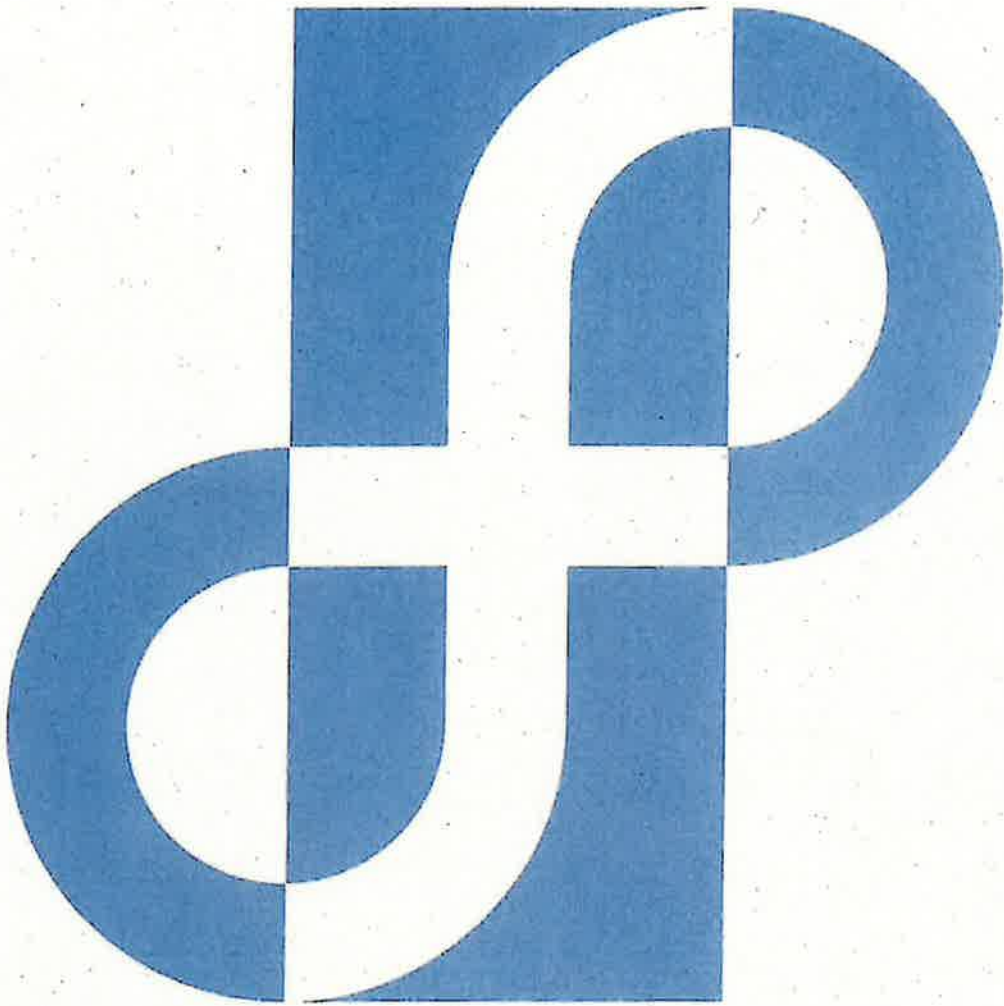


ISSN 1882-1871 COD EN: FDDKAL

MEMBERS OF THE GRADUATE SCHOOL OF ENGINEERING, UNIVERSITY OF FUKUI



**福井大学大学院
工学研究科
研究報告**

Vol.55 2007 MARCH

目 次

オキシエチレン鎖とウレタン結合を置換基に含むビニルエーテルのカチオン重合挙動	市村 健太 橋本 保	1
水に極めて難溶なモノマーを含むシード乳化共重合反応に及ぼす攪拌の影響	金 哲山 鈴木 清 渡邊 裕祐 藤田 和美 埜村 守 徳永 雄次	9
タバコのポイ捨てゴミにおけるフラクタル分布の発現—観測事実とモデル解析—	飛田 英孝 稲垣 成識	15
Theory of Random Degradation and Its Applications to Polymer Modification, Chain Transfer Reactions, and Particle Size Distribution	Hidetaka TOBITA and Kiyoshi SUZUKI	23
4次元初期値空間での Hodgkin-Huxley neuron のリミットサイクル振動の basin の形	諸屋 博 田中 ダン 平田 隆幸	35
サッカーシミュレーションにおける声を使った協調行動	吉田 真士 白井 治彦 高橋 勇 黒岩 丈介 小高 知宏 小倉 久和	45
リアルタイム適応のための LEO エージェントモデルの提案	河原林 友美 久保 長徳 高橋 勇 黒岩 丈介 小高 知宏 小倉 久和	53
群ロボットにおける接触コミュニケーションシステムの設計	平田 隆幸 川地 秀幸	61
人的資源論と労務コスト—M&Aに見る人間関係論—	野村 康則	67
ベルベット織物を用いた炭素電極研磨	今村 朋洋 西海 豊彦 青木 幸一	73
ユーザのセキュリティ意識向上を目的としたパケットヘッダ情報可視化システム	中野 翔太 白井 治彦 高橋 勇 黒岩 丈介 小高 知宏 小倉 久和	77
応力制御下における 1070 アルミニウムの非比例多軸低サイクル疲労寿命	伊藤 隆基 平井 孝典 山本 隆栄	85
ヘリカルコイル内強制流動沸騰の熱伝達特性と流動様相 ...	大河瀬 睦人 永井 二郎 吉川 信治	91
遷音速フラッタ制御時のリミットサイクル振動—数値解析予測と風洞試験実証—	松下 洗 八田 淳 齊藤 健一	99
MOSFET における極薄酸化膜のトンネル電流と酸化膜遷移層の考察	今井 康人 山本 弘明	107
非対称二重障壁構造を連結した四重障壁構造の共鳴トンネル現象の解析	根津 浩倫 大橋 祐介 篠 競 山本 弘明	115
Education for Multicultural Society in the Global Age – Promoting Active Communication with Different Communities in Japan –	Yuko KATO	121

CONTENTS

Cationic Polymerization of Vinyl Ethers Containing an Oxyethylene Chain and a Urethane Linkage in Their Substituents	Kenta ICHIMURA and Tamotsu HASHIMOTO	1
Effect of Agitation on Seeded Emulsion Copolymerization of Two Monomers Including Sparingly Water-Soluble Monomer .....	... Zheshan JIN, Kiyoshi SUZUKI, Yusuke WATANABE, Kazumi FUJITA, Mamoru NOMURA, Yuji TOKUNAGA	9
Fractal Distribution Found in Littering of Cigarette Butts – Observation and Model Analysis – .....	..... Hidetaka TOBITA and Shigenori INAGAKI	15
Theory of Random Degradation and Its Applications to Polymer Modification, Chain Transfer Reactions, and Particle Size Distribution	Hidetaka TOBITA and Kiyoshi SUZUKI	23
Shape of the Basin of Limit Cycle of Hodgkin-Huxley Model in 4 Dimensional Initial Value Space	Hiroshi MOROYA, Dan TANAKA, Takayuki HIRATA	35
Cooperation Action Using the Voice in a Soccer Simulation .....	..... Masashi YOSHIDA, Haruhiko SHIRAI, Isamu TAKAHASHI, Jousuke KUROIWA, Tomohiro ODAKA, Hisakazu OGURA	45
LEO Agent Model for Real-time Adaptation .....	... Tomomi KAWARABAYASHI, Takenori KUBO, Isamu TAKAHASHI, Jousuke KUROIWA, Tomohiro ODAKA, Hisakazu OGURA	53
Design of Communication System of Swarm Robots during a Real Contact .....	..... Takayuki HIRATA and Hideyuki KAWACHI	61
Human Resources Theory and the Personnel Cost – Human Relations through the M&A Cases – .....	..... Yasunori NOMURA	67
The Polishing Function of Velvet Textiles for Glassy Carbon Electrode .....	..... Tomohiro IMAMURA, Toyohiko NISHIUMI, Koichi AOKI	73
A Proposal on End-User Network Security System to Visualize Packet Header Information .....	..... Shouta NAKANO, Haruhiko SHIRAI, Isamu TAKAHASHI, Jousuke KUROIWA, Tomohiro ODAKA, Hisakazu OGURA	77
Multiaxial Low Cycle Fatigue of 1070Aluminum under Stress Controlled Non-proportional Loading	Takamoto ITOH, Takanori HIRAI, Takaei YAMAMOTO	85
Heat Transfer Characteristics and Flow Situations of Forced Convective Boiling inside Helically Coiled Tube	Mutsuhito DAIGASE, Niro NAGAI, Shinji YOSHIKAWA	91
Limit Cycle Oscillation in Controlled Transonic Flutter – Numerical Analysis Prediction and Wind Tunnel Test Verification –	Hiroshi MATSUSHITA, Jun HATTA, Kenichi SAITOH	99
Tunneling Current through Ultra-Thin SiO₂ Layer and Study of Transition Layer in MOSFET .....	..... Yasuto IMAI and Hiroaki YAMAMOTO	107
Theoretical Study of Resonant Tunneling in Novel Quadruple-Barrier Structure Constructed by Two Asymmetrical Double-Barrier Units .....	..... Hiromichi NEZU, Yusuke OHSHI, isou SHINO, Hiroaki YAMAMOTO	115
Education for Multicultural Society in the Global Age – Promoting Active Communication with Different Communities in Japan – .....	..... Yuko KATO	121

オキシエチレン鎖とウレタン結合を置換基を含む ビニルエーテルのカチオン重合挙動

市村 健太* 橋本 保*

Cationic Polymerization of Vinyl Ethers Containing an Oxyethylene Chain and a Urethane Linkage in Their Substituents

Kenta ICHIMURA* and Tamotsu HASHIMOTO*

(Received January 31, 2007)

2-(2-vinyloxyethoxy)ethyl phenylcarbamate (VEEPC) and 2-[2-(2-vinyloxyethoxy)ethoxy]ethyl phenylcarbamate (VEEPC) were synthesized by the reactions of phenyl isocyanate with di(ethylene glycol) mono vinyl ether and tri(ethylene glycol) mono vinyl ether, respectively, and were purified by molecular distillation. These new vinyl ethers with both an oxyethylene chain and a urethane group were polymerized under the various reaction conditions to investigate the possibility of their living polymerization. The HCl/ZnCl₂-initiated polymerization of VEEPC proceeded in CH₂Cl₂ at -30°C, where the number-average molecular weights (M_n 's) of the product polymers were in direct proportion to monomer conversion. However, the polymer molecular weight distributions (MWDs) were somewhat broad ($M_w/M_n = \sim 1.25$). The polymerization of VEEPC may involve more side reactions to produce rather low-molecular-weight products under the same reaction conditions, although the M_n 's of the polymers increased with increasing monomer conversion. The thermal and other properties of the obtained polymers were also studied.

Key Words : Cationic polymerization, Living polymerization, Vinyl ether, Oxyethylene, Urethane, Phenylcarbamate

1. 緒言

カチオン重合は、ルイス酸やプロトン酸などの酸性の開始剤を用いるイオン重合の一種であり、多くのビニル化合物がカチオン重合を起こしポリマーを生成する。^{[1][2]} カチオン重合は成長種である炭素カチオンがビニルモノマーに求電子的に付加して重合が進行する。そのため、置換基が電子供与性であるとモノマーは大きな反応性を示し、また生成する成長炭素カチオンもより安定化し副

反応を起こしにくくするため、電子供与性の置換基を有するビニルモノマーがカチオン重合に有利である。ビニルエーテルは電子供与性のアルコキシ基を持つ代表的なカチオン重合性のモノマーである。近年、プロトン酸/ルイス酸の組み合わせによる2成分開始剤系などの開始剤を用い、連鎖移動反応や停止反応などの副反応がないリビング重合がビニルエーテルのカチオン重合でも達成され、^[3]ポリマーの分子量の精密な制御や末端基の規制が可能になり、新しいポリマーの合成が行われるようになった。^[4]

一方、ポリマー材料においてウレタン結合は窒素を含む重要な官能基である。ウレタン結合を有する高分子は、水素結合を介して強い相互作用を持つので、ポリウレタン系熱可塑性エラストマー

*工学研究科材料開発工学専攻

*Materials Science and Engineering Course, Graduate School of Engineering

に見られるように優秀な高分子材料になる。また、水素結合可能な物質はウレタン結合と相互作用するので、ウレタン結合を有する高分子は特定の低分子物質を捕捉する機能を有する可能性もある。当研究室ではすでに、ウレタン結合を有するビニルエーテルのリビングカチオン重合の可能性を検討するため、フェニルカルバミン酸 4-ビニロキシブチル(VBPC)や、フェニルカルバミン酸 2-ビニロキシエチル(VEPC)が合成された。これらのビニルエーテルは、塩化水素と塩化亜鉛を組み合わせた開始剤を用い、塩化メチレン中、 -30°C で重合することによりリビング重合が進行することがわかった。^{[5], [6]}

また、オキシエチレン鎖を側鎖に有するポリビニルエーテルはその水溶液が感熱応答性を有していることが知られている。^[7]そこで、本研究では、ポリビニルエーテルを基本骨格とし、物質捕捉能とともに感熱応答機能を有するポリマーを合成し、生成ポリマーの性質と機能を検討することを目的とした。ここではまず、ウレタン結合とオキシエチレン鎖ともに有するビニルエーテルとしてフェニルカルバミン酸 2-(2-ビニロキシエトキシ)エチル(VEEPC)と、フェニルカルバミン酸 2-[2-(2-ビニロキシエトキシ)エトキシ]エチル(VEEEPC)を新規に合成し、それらのカチオン重合挙動を検討した。また、生成ポリマーの熱的性質などの基本的性質についても検討を行った。

2. 実験

2.1 試薬

2.1.1 フェニルカルバミン酸 2-(2-ビニロキシエトキシ)エチル(VEEPC)の合成

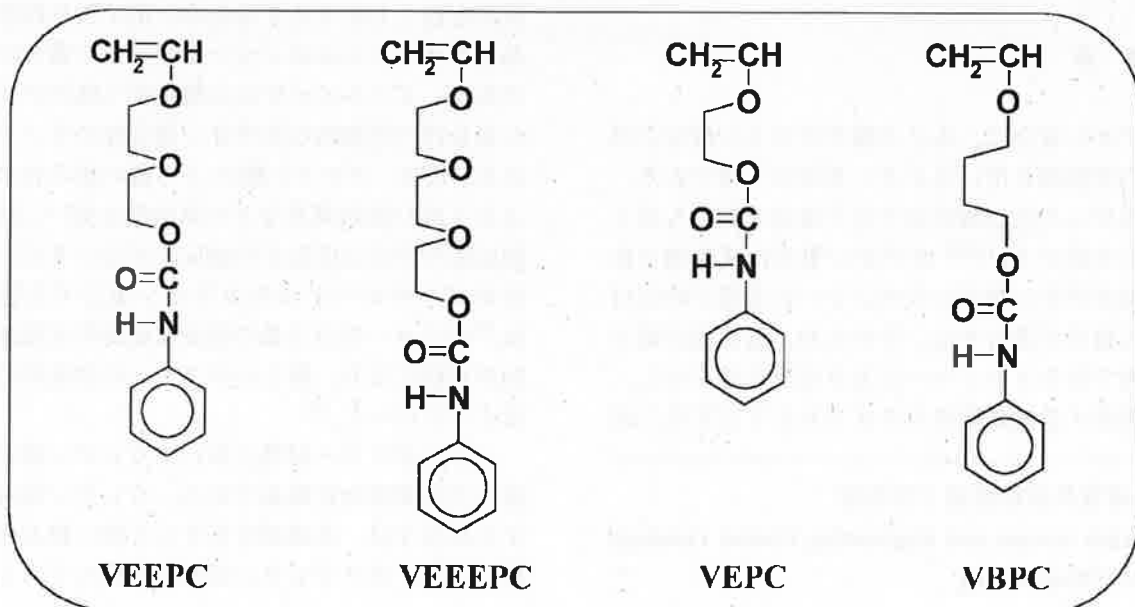
ジエチレングリコールモノビニルエーテルとイソシアン酸フェニルとの反応により合成した。還流冷却器をつけ N_2 置換した三口フラスコに、イソシアン酸フェニル(25mL, 0.23mol)、ピリジン1滴を加え、水浴で冷やして攪拌しながら滴下ロートを用いてジエチレングリコールモノビニルエーテル(40mL, 0.31mol)を滴下した。滴下後、 60°C のオイルバスで3時間加熱後、室温まで冷却し、生成物を分子蒸留(bp $110^{\circ}\text{C}/<10^{-4}$ mmHg)により精製した。収率33%；密度1.147g/mL； ^1H NMRはFigure 1(A)参照， ^{13}C NMRはFigure 1(B)参照。

2.1.2 フェニルカルバミン酸 2-[2-(2-ビニロキシエトキシ)エトキシ]エチル(VEEEPC)の合成

トリエチレングリコールモノビニルエーテルとイソシアン酸フェニルとの反応により VEEPC と同様の方法で合成し、生成物を分子蒸留(bp $120^{\circ}\text{C}/<10^{-4}$ mmHg)により精製した。収率16%；密度1.139g/mL； ^1H NMRはFigure 2(A)参照， ^{13}C NMRはFigure 2(B)参照。

2.1.3 その他の試薬

VEPC, VBPC は、以前に報告された方法で合成した。^{[5], [6]}塩化メチレン(和光, 一級)は、10wt%炭酸ナトリウム水溶液、イオン交換水の順で洗浄後、塩化カルシウムにより一晩乾燥した後、水素化カ



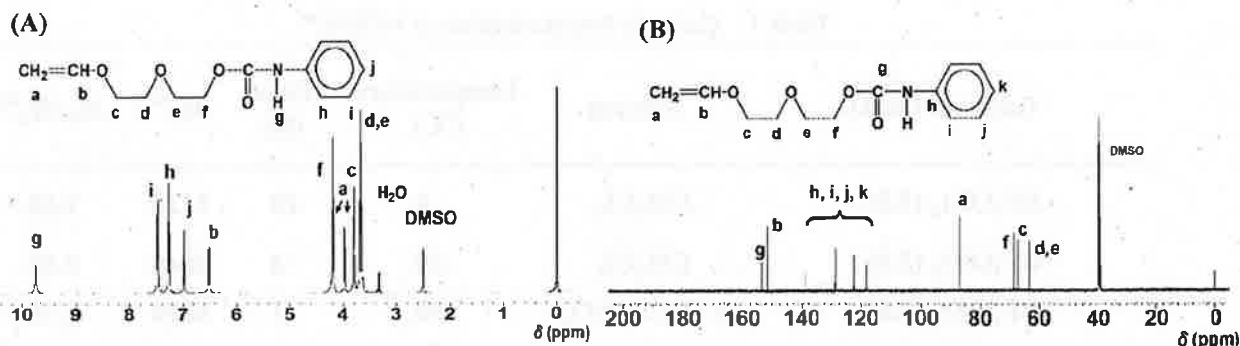


Fig. 1 NMR spectra of VEEPC in DMSO- d_6 : (A) ^1H NMR; (B) ^{13}C NMR.

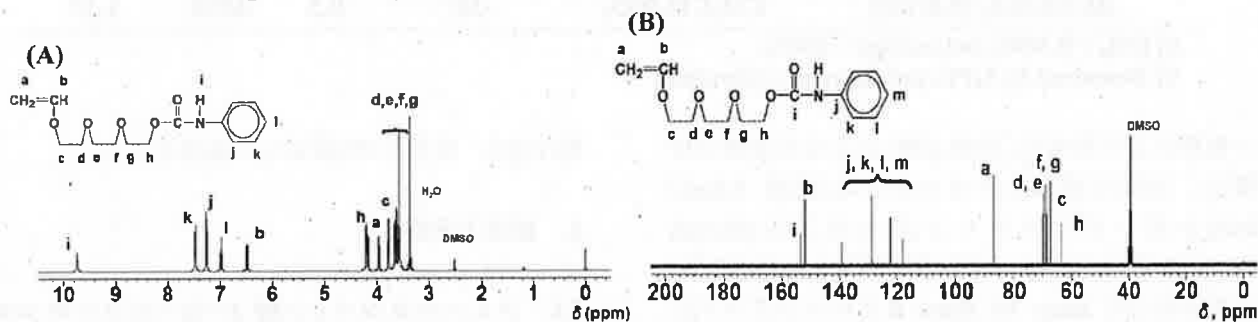


Fig. 2 NMR spectra of VEEPC in DMSO- d_6 : (A) ^1H NMR; (B) ^{13}C NMR.

ルシウム上で2回蒸留した。ジエチルエーテル(和光, 一級)は, 塩化カルシウム中で一晩乾燥した後, 水素化カルシウム上で2回蒸留し, 褐色アンブルに小分けした。ニトロエタン(和光, 一級)は, 塩化カルシウムにより一晩乾燥した後, 水素化カルシウム上で2回蒸留し, 褐色アンブルに小分けした。四臭化スズ(Aldrich)は, 1.0Mの塩化メチレン溶液を調製し, 褐色アンブルに小分けし, 冷蔵庫に保存した。塩化水素 4.0M 1,4-ジオキサン溶液(Aldrich)は, 褐色アンブルに小分けし, 冷蔵庫に保存した。塩化亜鉛 1.0M ジエチルエーテル溶液(Aldrich)は, 褐色アンブルに小分けし, 冷蔵庫に保存した。三フッ化ホウ素エーテル錯体(Aldrich)は, 1.0M 塩化メチレン溶液を調製し, 褐色アンブルに小分けして冷凍庫に保存した。その他の試薬は市販品をそのまま使用した。

2.2 重合操作

重合はヒートガンにより約 400°Cでベーキングした三方コックを付けたナス型フラスコまたはシュレンク管中, 窒素雰囲気で行った。三フッ化ホウ素エーテル錯体を開始剤に用いた場合は, あらかじめ重合温度に冷やした三フッ化ホウ素エーテル錯体溶液(0.5mL 塩化メチレンまたはニトロエタン溶液)を, メタノール恒温槽中のモノマー溶液(4.5mL 塩化メチレンまたはニトロエタン溶液)に加えることにより重合を開始した。塩化水素/

塩化亜鉛開始剤を用いた場合は, あらかじめ重合温度に冷やした塩化水素溶液(0.5mL 塩化メチレンまたはニトロエタン溶液)と塩化亜鉛溶液(0.5mL エーテル溶液)を, この順番でモノマー溶液(4.0mL 塩化メチレン, またはニトロエタン溶液)に加えることにより重合を開始した。重合の停止は, アンモニア水を含むメタノールを 2.0mL 加えることにより行った。反応溶液は, 塩化メチレンを加えて希釈し, イオン交換水で洗浄し, エバポレーターで溶媒を除去し, さらに減圧乾燥して生成物と未反応のモノマーの混合物を回収した。モノマーの重合率は, 回収物の ^1H NMR スペクトルにおいて, 残存モノマーのビニルエーテルメチン基のピークと全回収物のフェニル基のピーク強度比により求めた。生成ポリマーを精製するため, 生成ポリマーのテトラヒドロフラン溶液をメタノール中に注いでポリマーを沈殿させた。

2.3 測定

ポリマーの分子量分布は, 4つのポリスチレンカラム(Shodex K-805L 1本と K-804 3本)と, 示差屈折計(島津 RID-6A)および UV 検出器(日立 L-7400)を取り付けた島津 LC-10AD を用いたゲルパーミエーションクロマトグラフィー(GPC)により 40°Cで溶媒にクロロホルム(流速 1.0mL/min)を用い測定した。数平均分子量(M_n)と多分散度[重量平均分子量/数平均分子量(M_w/M_n)]はポリスチレ

Table 1 Cationic Polymerization of VEEPC^{a)}

Initiator (mM)	Solvent	Temperature (°C)	Time (h)	M_n^b	M_w/M_n^b
BF ₃ OEt ₂ (5.0)	CH ₂ Cl ₂	0	20	5120	2.60
BF ₃ OEt ₂ (5.0)	CH ₂ Cl ₂	-30	2	4640	2.52
BF ₃ OEt ₂ (5.0)	CH ₃ CH ₂ NO ₂	-30	1	8350	2.78
HCl/ZnCl ₂ (5.0/2.0)	CH ₂ Cl ₂	-30	6	5490	1.25
HCl/ZnCl ₂ (5.0/2.0)	CH ₃ CH ₂ NO ₂	-30	0.5	4390	1.57

a) $[M]_0 = 0.30M$; conversion: ~100%.

b) Measured by GPC, polystyrene calibration.

ン換算により求めた。分取 GPC による生成物の分離は、室温で溶媒にクロロホルム(流速 3.0mL/min)を用いポリスチレンゲルカラム(Shodex Megapak GEL 201)と示差屈折計(Shodex RI SE-31)を取り付けた Jasco Tri Rotar-II クロマトグラフにより行った。¹H(500MHz),および¹³C(125MHz)NMR スペクトルは、内部標準にテトラメチルシラン、溶媒に DMSO-d₆を用い Jeol LA-500 により測定した。示差走査熱量測定(DSC)は、理学 Thermo Plus 示差走査熱量計 DSC8230L を用いて、窒素雰囲気下、5°C/min で 200°Cまで昇温した後、-100~200°Cの温度範囲で降温、昇温を3回繰り返して行った。ガラス転移温度(T_g)は、第二昇温過程の熱容量の変化の中心点の温度とした。熱重量分析(TG-DTA)は、理学 TG-DTA8078G1 により、窒素雰囲気下、昇温速度 10°C/min で行った。熱分解温

度(T_d)は、重量が5%減少した温度とした。

3. 結果と考察

3.1 フェニルカルバミン酸 2-(2-ビニロキシエトキシ)エチル(VEEPC)のカチオン重合

このモノマーのカチオン重合性を調べるため、種々の開始剤系を用い、異なる溶媒中で、重合を行った。その結果を Table 1 に示す。一般的なルイス酸開始剤である三フッ化ホウ素エーテル錯体を用い、塩化メチレンやニトロエタンのような極性溶媒中で重合すると、 M_n が数千のポリマーを生成したが、 M_w/M_n の値が 2.5 以上であり分子量分布は広いものであった。一方、リビング重合開始剤として知られる、塩化水素/塩化亜鉛開始剤を用いて重合を行うと、生成ポリマーは分子量分布が比

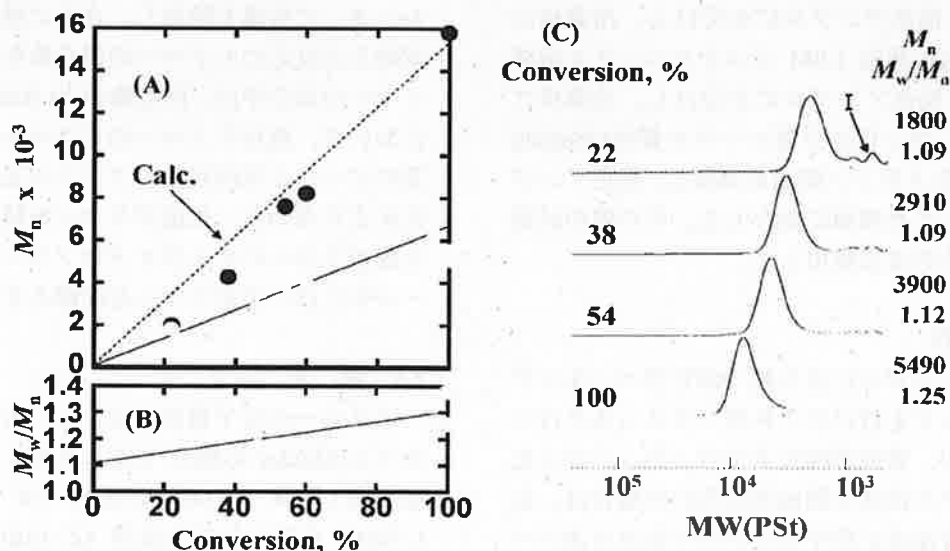


Fig. 3 Polymerization of VEEPC with HCl/ZnCl₂ in CH₂Cl₂ at -30°C: [VEEPC]₀ = 0.30M; [HCl]₀ = 5.0mM; [ZnCl₂]₀ = 2.0mM. (A) M_n vs. conversion: M_n by GPC(○); M_n by NMR(●); (B) M_w/M_n vs. conversion; (C) GPC traces of polymerization products.

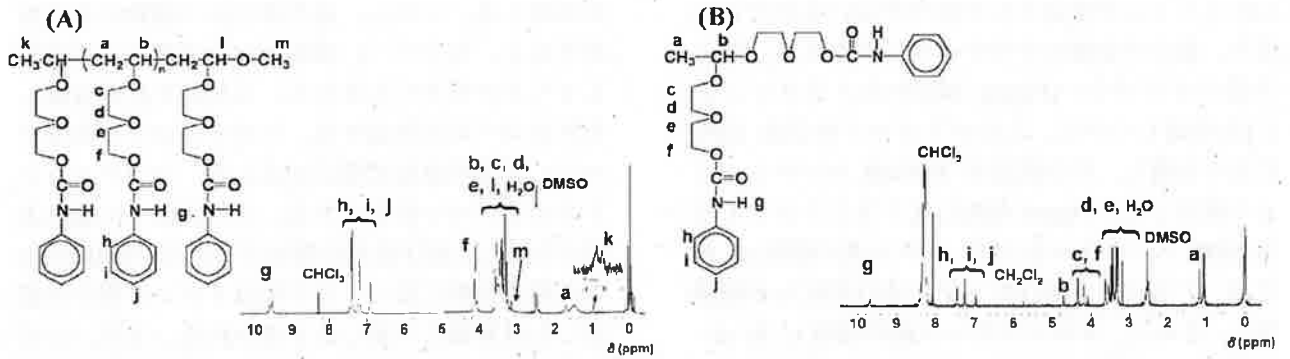


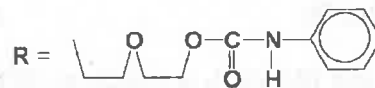
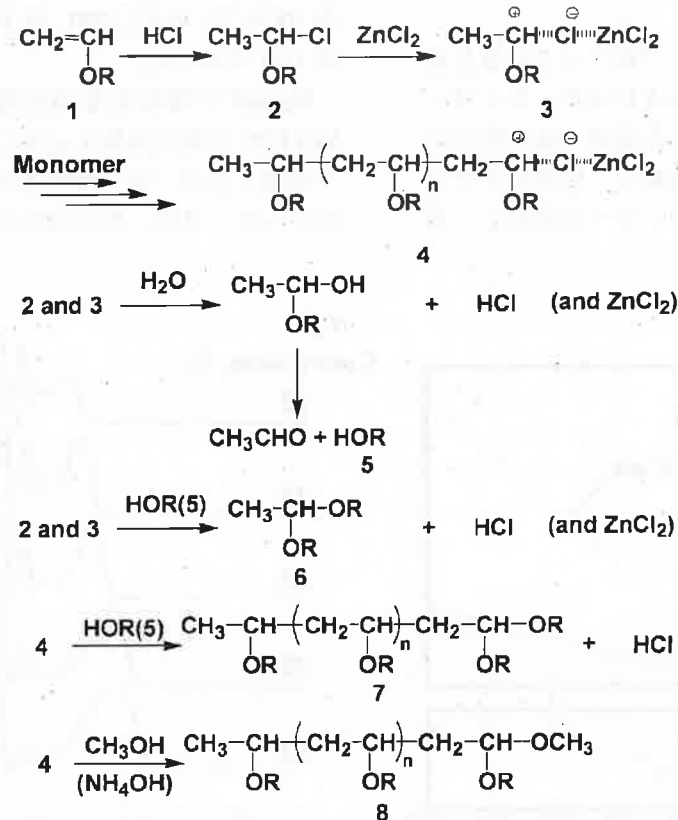
Fig. 4 (A) ^1H NMR spectrum of PolyVEEPC. (B) ^1H NMR spectrum of the lowest-molecular-weight fraction I of the product [shown in Fig.3(C)] by the polymerization of VEEPC with HCl/ZnCl_2 in CH_2Cl_2 at -30°C : $[\text{VEEPC}]_0 = 0.30\text{M}$; $[\text{HCl}]_0 = 5.0\text{M}$; $[\text{ZnCl}_2]_0 = 2.0\text{M}$.

較的狭く、特に塩化メチレン中では M_w/M_n の値が 1.25 のポリマーが得られた。

そこで、塩化水素/塩化亜鉛開始剤を用い、塩化メチレン中、 -30°C での重合を詳しく検討した。Figure 3(A)に示すように、GPCにより求めた M_n (図中の○)は重合率に比例して増加したが、リビング重合を仮定した計算値より低くなった。これはここで求めた M_n が GPC によるポリスチレン換算による相対的な M_n であるためと思われる。そこで、

^1H NMR スペクトルによる末端基分析に基づく分子量を求めた。Figure 4(A)に示すスペクトルの中で、ポリマーの開始末端の吸収強度 k とポリマー側鎖中のフェニル基の吸収強度 h, i, j の強度比をもとに数平均重合度を求め、 M_n に換算した。こうして求めた M_n を Figure 3(A)中の●で表した。 ^1H NMR スペクトルによる末端基分析に基づく M_n はリビング重合を仮定した計算値によく一致した。

しかし、ポリマーの分子量分布は M_w/M_n の値が



Scheme 1 Reaction mechanism of the polymerization of VEEPC and the formation of low-molecular-weight side products with the HCl/ZnCl_2 initiating system.

1.25 とリビング重合としてはやや広いものであり、また、低分子量側にややテーリングがあり、低分子量のオリゴマー[Figure 3(C)中のフラクション I]も生成していた。このオリゴマーを分取 GPC により分離し、その構造を $^1\text{H NMR}$ スペクトルにより検討した。Figure 4(B)にはフラクション I の $^1\text{H NMR}$ スペクトルを示す。メチル基の吸収 a, および、アセタール結合のメチン基の吸収 b が観測され、さらに、オキシエチレン鎖の吸収 c, d, e, f, ウレタン結合の吸収 g, フェニル基の吸収 h, i, j が観測された。この $^1\text{H NMR}$ スペクトルから、フラクション I の構造は、Figure 4(B)に示すような、1つのモノマー単位と、もう1つのモノマーの側鎖からなるアセタールであると考えられる。 $^1\text{H NMR}$ スペクトル中の各ピークの積分強度比とこの構造に基づくプロトンの数を比較した。その値を以下に示す。括弧の値はプロトンの数であり、ピーク a: 3.01(3); b: 1.02(1); c, f: 8.16(8); g: 2.09(2); h, i, j: 10(10)となった。このように各々の観測されたピークの積分強度比は、考えられる構造のプロトンの数とよく一致した。したがって、フラクション I は Figure 4(B)中に示される構造であると考えられる。

以上の検討に基づき、ここで起こっていると考えられる重合機構を、Scheme 1 に示す。モノマーに塩化水素が付加し、生成した炭素-塩素結合にルイス酸である塩化亜鉛が作用し、炭素カチオンが生成する。そこに次々とモノマーが反応し、重

合が起こる。しかし、重合系中に不純物の水が存在すると、モノマー1 量体の成長末端に水が反応してヘミアセタールを生じ、さらにそれが分解してアルコールが生成する。このアルコールがモノマー1 量体の成長末端に反応して、フラクション I のオリゴマーを生成する。この反応中に塩化水素が生成し、再び重合を開始するので、NMR による末端基分析に基づく分子量はリビング重合を仮定した計算値に一致したと思われる。また、この反応は成長ポリマー鎖に対しても起こる連鎖移動反応でもあるので、ポリマーの分子量分布は重合の進行とともに広がったと思われる。

3.2 フェニルカルバミン酸 2-[2-(2-ビニロキシエトキシ)エチル(VEEPC)のカチオン重合

VEEPC のカチオン重合を、三フッ化ホウ素エーテル錯体を用い、塩化メチレン中、 -30°C で重合を行った。その場合重合率 100%で、 M_n は 4200、分子量分布は M_w/M_n の値が 1.72 のポリマーを生成した。次に、塩化水素/塩化亜鉛開始剤を用い、塩化メチレン中、 -30°C での重合を検討した。重合率 100%で、 M_n は 3200、分子量分布は M_w/M_n の値が 1.69 であった。

Figure 5 に塩化水素/塩化亜鉛開始剤系を用いた VEEPC の重合結果を示す。 M_n は重合率に比例して増加したが、分子量分布は重合の進行とともに広がった。また、得られたポリマーの M_n は、リ

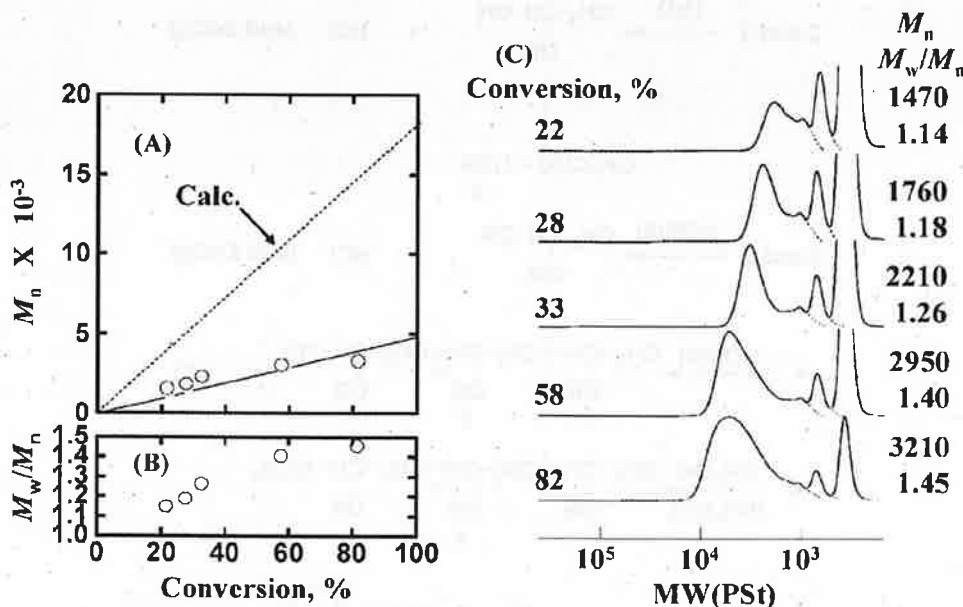
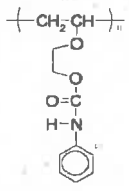
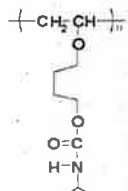
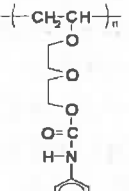
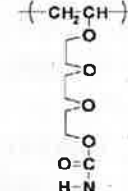


Fig. 5 Polymerization of VEEPC with HCl/ZnCl_2 in CH_2Cl_2 at -30°C : $[\text{VEEPC}]_0 = 0.30\text{M}$; $[\text{HCl}]_0 = 5.0\text{mM}$; $[\text{ZnCl}_2]_0 = 2.0\text{mM}$. (A) M_n vs. conversion; (B) M_w/M_n vs. conversion and (C) GPC traces of polymerization products.

Table 2 Glass Transition Temperature of Polymers

				
	VEPC	VBPC	VEEPC	VEEPC
M_n	19,500	21,900	16,000	6700
M_w/M_n	1.23	1.22	1.42	1.39
$T_g(^{\circ}\text{C})^{\text{a)}}$	57	30	34	14
$T_d(^{\circ}\text{C})^{\text{b)}}$	246	261	252	—

a) By DSC; 2nd heating scan.

b) By TGDTA; 5% weight loss.

ピング重合を仮定した計算値よりも低くなった。生成ポリマーのGPC曲線より判断すると、VEEPCのポリマーよりテーリングが大きく分子量分布がより広いことがわかる。これは、例えば、先ほど示した VEEPC の重合において起こる連鎖移動反応がより活発に起こっているためと考えられ、その原因としては、成長末端に隣接するより多くの極性なオキシエチレン鎖が、この一連の副反応を誘発しやすいためと考えられる。

3.3 熱的性質

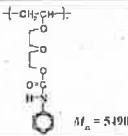
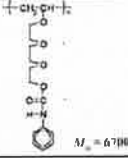
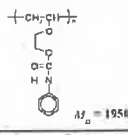
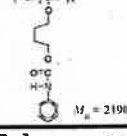
以前に報告された、ウレタン結合とブチレン鎖を有するビニルエーテル(VBPC)やエチレン鎖を

有するビニルエーテル(VEPC)のポリマーと、今回合成した VEEPC と VEEPC のポリマーの熱的性質を比較した。その結果を Table 2 に示す。主鎖とウレタン結合の間のスペーサー長が最も短い Poly(VEPC)のガラス転移温度(T_g)が 57°C と最も高く、Poly(VBPC)が 30°C、そして、今回の Poly(VEEPC)が 34°C と同程度で室温よりも少し高く、もっともスペーサー長が長い Poly(VEEPC)が 14°C であった。一方、熱分解温度(T_d)は一般に 250°C 前後であった。

3.4 種々の溶媒への溶解性

生成したポリマーの溶媒への溶解性を検討した。

Table 3 Solubility of Polymers^{a)}

	Hexane	Toluene	Diethyl ether	Chloroform	Tetrahydrofuran	Dichloromethane	1-Propanol	Acetone	Nitroethane	Dimethyl sulfoxide
	x	x	x	o	o	o	x	o	o	o
	x	x	x	o	o	o	x → o 90°C	o	o	o
	x	x	x	o	o	o	x	o	o	o
	x	x	x	o	o	o	x	o	o	o

a) Polymer concentration, 1wt/vol%.

Table 3 に示すように、Poly(VEEPC)およびPoly(VEEEPC)はクロロホルム、テトラヒドロフラン、ジクロロメタン、アセトン、ニトロエタン、ジメチルスルホキシドに溶解し、ヘキサン、トルエン、ジエチルエーテル、1-プロパノールに溶解しなかった。しかしPoly(VEEPC)は90°Cという高温で1-プロパノールに溶解した。一方、これらの溶解性は、スパーサーがエチレン鎖およびブチレン鎖のポリマーであるPoly(VEPC)とPoly(VBPC)とほぼ同じであり、全てのポリマーはその他の低級アルコールや水に不溶であった。

4. 結論

VEEPCは、分子量分布の比較的狭いリビング的なポリマーを与えたが、VEEEPCでは、寿命の長い成長種は生成しているものの分子量分布がかなり広いポリマーしか得られなかった。しかし、これまでに検討したVBPCとVEPCでは理想的なリビング重合が起こることから、¹⁵¹Hoオキシエチレン鎖の存在は、少なくとも本重合条件下ではより副反応を誘発することがわかった。

参考文献

- [1] T. Higashimura, In Cationic Polymerization (in Japanese); Kagaku Dojin: Kyoto, Chapter 6 (1971).
- [2] J. P. Kennedy, and E. Marechal, In Carbocationic Polymerization; John Wiley & Sons: New York, Chapter 3 (1982).
- [3] M. Sawamoto, Prog. Polym. Sci. 16, 111 (1991).
- [4] T. Higashimura, S. Aoshima, and M. Sawamoto, Makromol. Chem. Macromol. Symp. 3, 99 (1986).
- [5] T. Namikoshi, T. Hashimoto, and T. Kodaira, J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem. 42, 2960 (2004).
- [6] T. Namikoshi, and T. Hashimoto, Mem. Grad. Eng. Univ. Fukui 54, 33 (2006).
- [7] S. Sugihara, K. Hashimoto, S. Okabe, M. Shibayama, S. Kanaoka, and S. Aoshima, Macromolecules 37, 336 (2004).

水に極めて難溶なモノマーを含むシード乳化共重合反応に及ぼす攪拌の影響

金 哲山* 鈴木 清* 渡邊 裕祐** 藤田 和美*** 埜村 守* 徳永 雄次*

Effect of Agitation on Seeded Emulsion Copolymerization of Two Monomers Including Sparingly Water-Soluble Monomer

Zheshan JIN*, Kiyoshi SUZUKI*, Yusuke WATANABE**, Kazumi FUJITA***,
Mamoru NOMURA* and Yuji TOKUNAGA*

(Received January 31, 2007)

Effect of agitation on the rate of batch seeded emulsion copolymerization of styrene and dodecyl methacrylate is studied. In the conditions studied, increase in agitation rate did not affect the rate of polymerization of styrene, but increased the rate of polymerization of dodecyl methacrylate. This suggests that diffusion of sparingly water-soluble monomer, whose water-solubility is less than that of dodecyl methacrylate, from monomer droplets to the aqueous phase is rate-determining step in emulsion copolymerization system including sparingly water-soluble monomer.

Key Words : Seeded Emulsion Polymerization, Copolymerization, Agitation, Diffusion, Water-Solubility of Monomer

1. 緒言

工業的な高分子の製造において、乳化重合などの不均一系での重合操作がよく行われる。製造される高分子の物性を制御し、又、重合速度を増加し、制御するために、シード乳化共重合が行われるが、水に極めて難溶なモノマーを用いると、重合速度が低く、また、凝集しやすいという問題がある。この原因としては、次のようなことが提唱されている。すなわち、乳化（共）重合によって重合が進むためには、溶媒である水の中に分散しているモノマーの滴から、水中へとモノマーが溶解し、水中からポリマー微粒子へとモノマーが拡散する必要があるが、モノマーの水への溶解度が著しく低い場合には、その

モノマーは微粒子に拡散する速度が極めて低くなる。そのため、シード乳化重合で主な重合の場所である微粒子内でのモノマー濃度が低くなり、重合速度が低下する。さらに、モノマー滴内でも極めて低速度ながら重合が進行して、モノマーを多く含む不安定で巨大な粒子が長期間にわたって存在する状況が現出し、凝集が起こりやすくなる。このことが真実ならば、シード乳化（共）重合において、攪拌速度が水への溶解度が低いモノマーの重合速度に影響するはずである。しかし、モノマーの水溶性と、そのモノマーのシード乳化重合速度への攪拌の影響の関係は、定量的には理解されてはいない。そこで、本研究ではその影響を定量的に検討することを目的に、実際に水への溶解度の低いモノマーを含むシード乳化重合を行い、その結果から考察を行った。

* 工学研究科材料開発工学専攻

** 材料開発工学科

*** 技術部

* Materials Science and Engineering Course,
Graduate School of Engineering

** Dept. of Materials Science and Engineering

*** Dept. of Technology

2. 実験

2.1 試薬

水への溶解度の低いモノマーとして、重合挙動が良く検討されているスチレン(以後、Stと記す)と、メタクリル酸ドデシル(以後、DMAと記す)を用いた。

Stの水への溶解度は0.025wt%であり^[1], DMAの水への溶解度はStの値より遥かに低く 10^{-6} wt%であるとの報告^[2]があるが、極めて低いために正確な測定は困難である。スチレンは、和光純薬工業製特級のを以下の方法で精製したものをを用いた。スチレン1000gあたり約15wt%水酸化ナトリウム水溶液330gを加えて洗浄することを3回繰り返す、重合禁止剤を除去した。続いて純水でアルカリが検出されなくなるまで洗浄した。その後、モノマー中の水分を除去するために -20°C の冷蔵庫内に1日以上放置し、水分を凍結させ、生成した氷をろ別した。その後、窒素ガス雰囲気化で減圧蒸留(圧力27mmHg, 沸点約 50°C)を2回行った。生成モノマーは使用直前まで -20°C の冷蔵庫に保管した。メタクリル酸ドデシルは和光純薬工業製、特級のもの200gあたり約5wt%水酸化ナトリウム水溶液100gを加えて洗浄することを2回繰り返して、重合禁止剤を除去した。続いて純水でアルカリが検出されなくなるまで洗浄した。洗浄されたモノマーは使用直前まで -20°C の冷蔵庫に保管した。実験において使用した水は、milli-Q Labo実験用小型超純水装置によって精留したものである。

水溶性開始剤として過硫酸カリウム(和光純薬工業製、特級、以後KPSと表記)、乳化剤としてラウリル硫酸ナトリウム(ナカライテスク(株)製、特級、以後SDSと表記)、pH調整剤として炭酸水素カリウム(KHCO_3 , ナカライテスク(株)、特級)をそのまま使用した。油溶性開始剤として、2,2'-アゾビス2-メチルブチロニトリル(和光純薬(株)製、一級、以後V-59と表記)を、メタノール中で再結晶を2回行って精製したものを使用した。メタノール(関東化学(株)製、1級)とテトラヒドロフラン(和光純薬工業製、特級)をそのまま用いた。

2.2 ポリスチレンシードラテックスの調製

前報^[3]で記した回分反応器に純水を270g, Stを60g, SDSを1.875g仕込んだ。開始剤であるKPSを0.375g, 純水30gに溶解させ、開始剤投入器に仕込んだ。反応器中に存在する酸素及び反応溶液中の溶存酸素を除去するため、窒素ガスを反応器内と開始剤投入器内の液中に流通した。その後、攪拌速度を300rpmに保ち、反応器内の温度を 50°C まで上昇させ、開始剤を投入し12時間重合させた。得られたポリスチレンシードラテックス中に含まれる残存KPSを分解させるため、酸素を混入させた後、 80°C で保った。得られたポリスチレン粒子の平均径を動的散乱光度計(DLS, 大塚電子製 DLS-

7000)により測定したところ、約100nmであった。また、重合率をメタノールを沈殿剤とする重量法で測定したところ、98%であった。

2.2 シード乳化共重合

作成したポリスチレンシードラテックス75gに炭酸水素カリウム水溶液を加え中和し、Stを17.6g加え、ポリスチレン粒子にスチレンが十分膨潤するよう、冷蔵庫内に一日放置した。一日後にStを10g, DMAを30g加え、反応器に仕込み、100rpmで攪拌した。水30gに開始剤としてKPSを0.297g溶解させ、開始剤投入器に仕込んだ。反応器中に存在する酸素及び反応溶液中の溶存酸素を除去するため、窒素ガスを反応器内と開始剤投入器内の液中に流通した。その後、攪拌速度を300rpmに増加させ、反応器内の温度を 60°C まで上昇させ、開始剤を投入し重合を開始させた。このとき、スチレン10gとDMA30gを加えてから開始剤を加えるまでの時間が約50分程度になるようにした。また重合時に水の総量が225g, ポリスチレン粒子の数が 2×10^{14} 個/cc-waterで一定になるように調整した。開始剤投入後所定の時間に、反応液をメタノール中に採取し、少量の塩酸を加えてから 40°C に30分ほど保って生成したポリマーを凝集させた。ろ過して凝集したポリマーを得た。得られたポリマーの重量を測定した。また、得られたポリマー中のポリスチレンとポリメタクリル酸ドデシルの重量分率を後述するNMR法によって測定した。

また、開始剤水溶液を投入した直後に攪拌速度を500rpmにした場合についても上記と同様にして実験を行い、結果を比較検討した。さらに、上記と同様にスチレンを加えたシードラテックスを冷蔵庫に一日放置した後に、St10gとDMA30gの代わりにStのみ40g加えて、スチレンの単独シード乳化重合を上記と同様にして行い、結果を比較検討した。

2.3 得られたポリマーの分析

得られたポリマー試料を重クロロホルム(Cambridge Isotope Laboratories, Inc.製、0.05%テトラメチルシラン含有)に、濃度が3g/lになるように溶解し、NMR(日本電子データム(株)製、LA500)による $^1\text{H-NMR}$ 測定に供した。

3. 結果と考察

3.1 スチレンの単独シード乳化重合への攪拌の影響

スチレンのみをモノマーとして加えてシード乳化重合を行った場合の重合率を時間に対して記したのが図1である。記号は攪拌速度の異なる場合の結果を示しているが、重合速度は 300rpm の場合でも 500rpm の場合と同じになっている。このことから、スチレン程度の水溶性のモノマーでは、本実験条件では、攪拌速度が 300rpm 以上であれば、モノマーはモノマー滴から水相を通してシード粒子に十分速やかに供給され、モノマーの分配平衡が成り立ったことが示唆される。

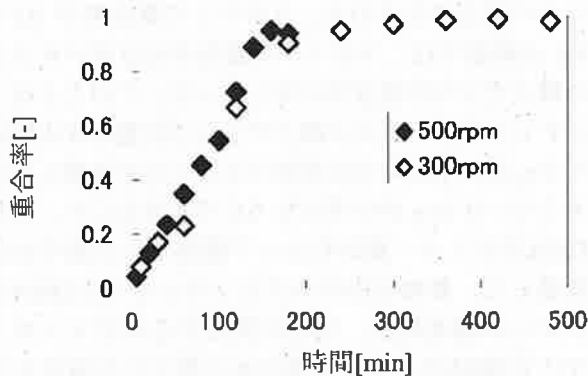


図1 スチレンの単独シード乳化重合での重合率-時間曲線への攪拌速度の影響

3.2 スチレンとメタクリル酸ドデシルのシード乳化共重合への攪拌の影響

スチレンとメタクリル酸ドデシル DMA のシード乳化共重合を図1と同じ条件で行った。サンプル中の生成したポリマーの重量分率を重量法によって求め、加えたスチレンと DMA モノマーの重量分率の

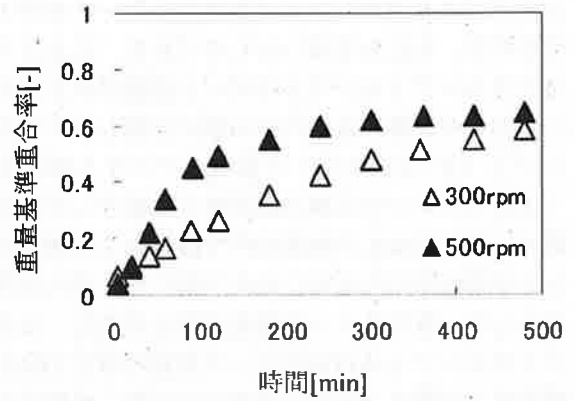


図2 スチレンとメタクリル酸ドデシルのシード乳化共重合における攪拌速度の影響

和で割った値（これを重量基準の重合率と記す）を時間に対して記したのが図2である。初期の重量基準重合率の増加速度は、攪拌速度が高いほど大きくなっている。この結果は、スチレン単独のシード乳化重合では 300rpm 以上に攪拌速度を増加しても重合速度は増加しなかったことも考慮すれば、メタクリル酸ドデシルがモノマー滴から水相を通してシード粒子に移動する速度が不十分であり、微粒子内のメタクリル酸ドデシルの濃度が平衡時の濃度よりも低くなって、メタクリル酸ドデシルの重合速度が低下していることを示唆する。そこで、このことを確かめるために、メタクリル酸ドデシルの重合速度を、NMR 法によって求め、攪拌速度 300rpm と 500rpm の場合で比較検討した。

得られたポリマーのNMRスペクトルの一例を図3に記す。ケミカルシフト7近傍の2つのピークはポリスチレンのフェニル基の水素に帰属できる。ケミカルシフト2以下のピークは、アルキル基の水素、つまり、ポリスチレンの主鎖の炭素原子に結合している水素と、ポリ DMA の水素と考えられる。ただし、ポリ DMA の水素の中で酸素原子の横のメチレ

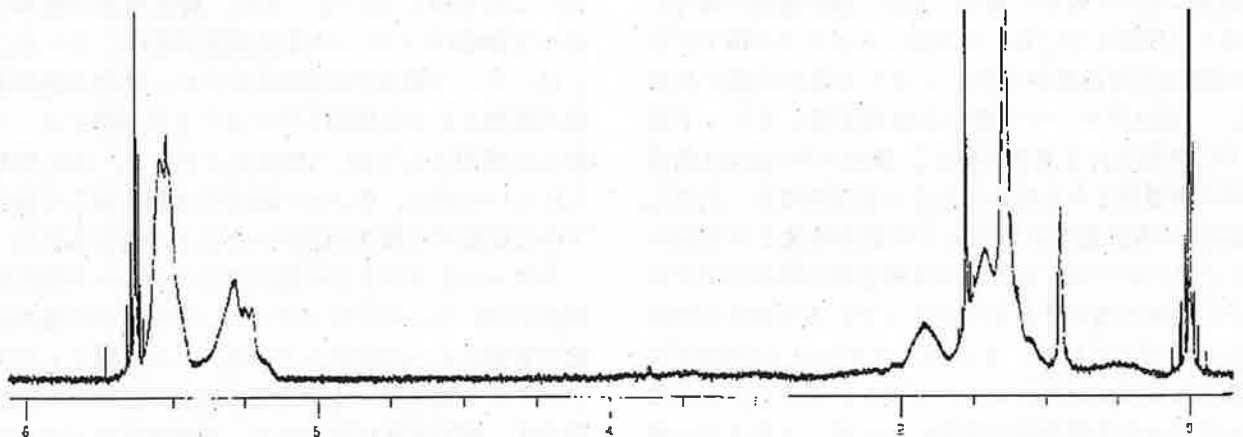


図3 スチレンとドデシルメタクリレートとのシード乳化共重合で得られたポリマーの $^1\text{H-NMR}$ スペクトル。攪拌速度 500rpm. 開始剤投入後 8 時間

ン水素はケミカルシフト4あたりのピークを示すはずなので、それらを除いたものである。以上より、ケミカルシフト6.3~7.5のピーク面積がポリスチレンのベンゼン環の水素のモル数に比例し、ケミカルシフト1.0~2.5のピーク面積がアルキル鎖の水素（ポリスチレンの主鎖の炭素原子に結合している水素と、ポリDMAの水素の中で酸素原子の横のメチレン水素を除いたもの）のモル数にそれぞれ比例するとして、各ポリマーの重量分率を求めた。なお、ケミカルシフト4付近のピーク面積はポリDMAの酸素原子の横のメチレン水素のモル数に比例するはずであるが、面積が小さくて誤差が大きいため、今回は解析に用いなかった。

以上のようにして決定したポリスチレン、ポリDMAの採取ポリマー中の重量分率と、反応液中の採取ポリマーの重量分率から、スチレンとDMAの重合率を求め、時間に対してプロットしたのが、図4である。

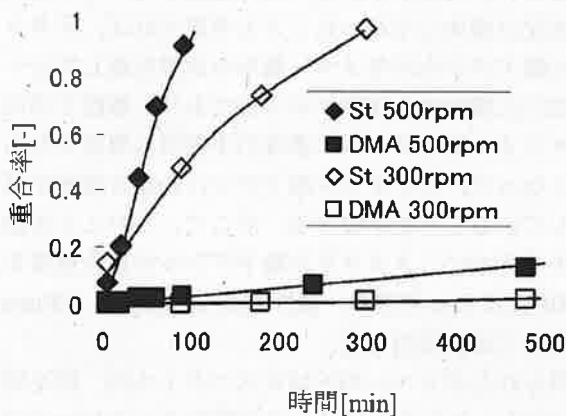


図4 スチレン (St) とメタクリル酸ドデシル (DMA) のシード乳化共重合における攪拌の影響

メタクリル酸ドデシルの重合速度はスチレンの重合速度に比べて著しく遅く、また、攪拌速度の増加によって増加している。これは、メタクリル酸ドデシルDMAの水溶性がスチレンよりも遥かに低いために、DMAがモノマー滴から水相を通してシード粒子に供給される速度が低く、微粒子内のDMA濃度が平衡濃度よりも低かったことを支持する。ただし、DMAの重合速度がスチレンの重合速度よりも低いことについては、それらの共重合反応性比がスチレンが高速で重合するようになっている可能性も原因として考えられる。そこで、スチレンとDMAの共重合反応性比を検討した。スチレンとメタクリル酸エステル共重合反応性比 r_1 と r_2 は、メタクリル酸エステルのアルキル基の炭素数にあまり依存せず、

いずれも0.6近傍であることが知られている。^[4]そこで、確認のために、スチレンとメタクリル酸ドデシルの塊状共重合を以下の方法で行って、 r_1 と r_2 の値を確認した。すなわち、回分反応器にStとDMAを当モルとなるようにそれぞれ15gと36.64g仕込み、開始剤として油溶性開始剤であるV-59（和光純薬工業製）を1.19g仕込み、攪拌速度100rpmで攪拌しながら窒素置換を流量300cc/minで約30分間行なった。その後、温度を上昇させ、60℃にして重合を開始させた。反応液を所定時間ごとに採取し、メタノール中で生成ポリマーを沈殿させ、溶媒を除去し、テトラヒドロフランに溶解してから、再度メタノール中で沈殿させて、溶媒を除去し、乾燥した。得られたポリマーを上述のNMR法での測定に供し、結果から、各時間でのスチレンとメタクリル酸ドデシルの重合率を求めた。スチレンの重合率が0.1~0.5の範囲では、スチレンの重合率はほぼメタクリル酸ドデシルの重合率に等しかった。このことは、スチレンとメタクリル酸ドデシルの共重合反応性比 r_1 と r_2 がいずれも0.6近傍であることと矛盾しない。そこで、 r_1 と r_2 がいずれも0.6であるとして、また、DMAがモノマー滴からシード微粒子へと速やかに拡散して、微粒子内のスチレンモノマーとDMAモノマーの濃度比が、系内に残存するスチレンモノマーとDMAモノマーの量の比に等しいと仮定して、スチレンの重合率から、DMAモノマーの重合率を推算した。推算にはNomuraら^[5]のシード乳化共重合速度の式を用いた。推算されたDMAモノマーの重合率は、図4に示されるスチレンの重合率よりも高く、DMAモノマーの実測された重合率よりも遥かに高かった。このことは、シード粒子内におけるDMAモノマー濃度のスチレンモノマー濃度に対する比が、反応器全体に存在しているDMAモノマー量のスチレンモノマー量に対する比よりも著しく小さいことを示している。また、攪拌速度の増加によってDMAモノマーの重合速度が増加していることは、シード粒子内のDMAモノマー濃度が攪拌速度の増加によって増加していることを示唆する。これらの原因としては、DMAモノマーが、水に溶解しにくいために、モノマー滴から水相を通して微粒子内に拡散する速度が遅かったことが考えられる。

スチレンとメタクリル酸ドデシルのシード乳化共重合において、スチレンモノマーの重合率が攪拌速度の増加によって増加している。この原因としては、メタクリル酸ドデシルが十分にはシード粒子には拡散せず、攪拌速度が低いほど、水相中のモノマー滴に多くのメタクリル酸ドデシルが残り、スチレンが

モノマー滴に多く存在したことも考えられるが、原因は定かではない。今後の検討が必要である。

4. まとめ

本研究で得られた実験結果から次のことが示唆された。本実験条件では、攪拌速度が 300rpm 以上なら、スチレンモノマーはポリスチレンのシード粒子へ十分に拡散し、スチレンモノマーはモノマー滴、水相、シード粒子の間で平衡状態になる。一方、メタクリル酸ドデシルモノマーのシード粒子への拡散速度は小さく、シード粒子中のメタクリル酸ドデシルの濃度は平衡濃度には至らない。したがって、攪拌速度を増加させることにより、メタクリル酸ドデシルの重合速度は増加する。

参考文献

- [1] N. Sütterlin: *Polymer Colloids II* (R.M Fitch Ed.), Plenum (New York), p.583 (1980).
- [2] C.S. Chern and T.J. Chen: *Colloids Surface A*, 138, 65 (1998).
- [3] M. Nomura, S. Sasaki, M. Harada and W. Eguchi: *J. Appl. Polym. Sci.*, 22, 1043 (1978).
- [4] J. Brandrup and E.H. Immergut: *Polymer Handbook* 2nd Ed., Wiley (New York), II-59 (1975).
- [5] M. Nomura, M. Kubo and K. Fujita: *Mem. Fac. Eng. Fukui Univ.*, 29, 167 (1981).

タバコのポイ捨てゴミにおけるフラクタル分布の発現 — 観測事実とモデル解析 —

飛田 英孝* 稲垣 成識**

Fractal Distribution Found in Littering of Cigarette Butts — Observation and Model Analysis —

Hidetaka TOBITA* and Shigenori INAGAKI**

(Received January 30, 2007)

The statistical characteristics of the littering of cigarette butts are investigated, in the campus of University of Fukui and several other public places. It was found that the distribution of the number of butts littered at one spot follows a power law, $cn(x) \sim x^{-\alpha}$ where $cn(x)$ is the number of spots in which more than or equal to x butts are found. We developed a simple model for the littering behavior on the basis of a well-known principle, "littering attracts littering". According to our model, the power exponent of $cn(x)$ is equal to, $\alpha = 1/p_f$, where p_f is defined as the *followers rate*, the probability that a person litters to a spot that already has butts rather than creating a new littering spot. The followers rate determined from the power law found in the littering data, $p_f = 1/\alpha$ agrees reasonably well with the attitude survey results of a questionnaire conducted for the students.

Key Words : Littering, Cigarette Butts, Power Law, Scale Free Distribution, Model Analysis
Simulation, Mathematical Sociology

1. 緒言

タバコのポイ捨ては、公共空間の美観を損ねるとともに、ポイ捨てゴミの終着地である海洋において野生動物への影響も危惧されている。タバコの煙は多数の病因物質を含み、タバコによる健康被害^[1]は大きな社会的・経済的損失^{[2], [3]}も引き起こしている。2002年、東京都千代田区が路上禁止地区での喫煙及びポイ捨てを禁止して以来、自治体単位でもポイ捨て防止活動が進められている。

本研究では、福井大学文京キャンパスをはじめ、いくつかの観測地点においてタバコのポイ捨てゴミについての調査・検討を実施した。本研究を通じて

以下のような結果が得られた。

(1) タバコのポイ捨てゴミ分布はベキ分布に従う。

学内・学外の観測地点でのポイ捨て数の分布について、大まかにはベキ乗則が成立することを見いだした。この関係は、1箇所に落ちているタバコのポイ捨て数を x とした場合、ポイ捨て数が x 以上である箇所数 $cn(x)$ が、 $cn(x) \sim x^{-\alpha}$ により定式化できる。

(2) ベキ分布は、簡単なポイ捨てシミュレーションモデルにより再現できる。

ポイ捨てゴミについては、「ゴミがゴミを呼ぶ」という経験則が知られている。そこで我々は、この経験則に従う簡単なモデルを構築してポイ捨て挙動のシミュレーション解析を行った。その結果、観測事実と同様にタバコのポイ捨て数の分布はベキ分布となった。さらに、その指数 α と「追従率」と名付けたパラメータ p_f の間には、 $\alpha = 1/p_f$ というきわめて簡単な関係があることを見いだした。

(3) 意識調査により得られた追従率は、ポイ捨て数分布の実測データと良好に一致した。

* 材料開発工学専攻

** 材料開発工学科

* Materials Science and Engineering Course, Graduate School of Engineering

** Dept. of Materials Science and Engineering

福井大学文京キャンパスにおいては、ポイ捨てを行っているのは主に福井大学の学生であると推定される。そこで、ポイ捨てゴミの調査と並行して福井大学工学部学生を対象としたアンケート調査を行い（回答者数 447）、タバコのポイ捨てについての意識調査を実施した。本調査により推定された追従率は、ポイ捨てゴミ調査により得られたベキ指数と、 $\alpha = 1/p_j$ なる関係を通じて良好に一致することが示された。

以下、具体的な検討結果について報告する。

2. 方法

2.1 ポイ捨てデータの収集

工学部1号館周辺の観察区域においては、定期的にタバコゴミの清掃を行い、その後のポイ捨て挙動について観察した。前期（4月～7月）の観察では、目視によるポイ捨て挙動の観察の他、7分割した区域内のポイ捨てゴミ数の変化を測定した。しかしながら、ポイ捨てタバコの総本数は日ごとの変化が大きく、また、自主的な清掃活動等の影響も無視できず、法則性を十分に確立することはできなかった。そこで、後期（10月～12月）の観測では、直径1m範囲内に落ちているポイ捨てタバコ数に着目し、ポイ捨て数分布データの収集を行った。本稿で報告するのは後期のデータであり、前期のデータについては、別途^[4]報告する。

ポイ捨てタバコ数分布の計測においては、タバコゴミが落ちている場所において約1mの円を描き、円内のタバコ数を計測した。なお、タバコゴミは側溝内も含め、肉眼で観察できるものはすべて計測した。

上記、観察区域外の福井大学キャンパス、および学外の公園等における調査では、ゴミ清掃は行わず、直径1m範囲内に落ちているタバコ数分布のみを計測した。

2.2 アンケート調査

福井大学工学部学生を対象とし、授業担当教員に依頼してアンケート調査を実施した。実施期間は、平成18年6月～7月であり、回答者数は447名であった。具体的なアンケート内容、およびその結果を付録1に示す。

2.3 モデル解析

ポイ捨てゴミが1個存在している状態からシミュレーションをスタートし、(1)ゴミを捨てる際に、確率 p_j ですでにゴミが落ちているクラスターにゴ

ミを落とす。(2)すでにゴミが落ちているクラスターに捨てる場合 $(1-p_j)$ 、ゴミを特定のクラスターに落とす確率は、すでにクラスター内に存在するゴミの数 x に比例するとした。

以降、確率 p_j を依存率と呼ぶ。

上記のモデルをモンテ・カルロ法によりシミュレーションした。

3. 結果と考察

3.1 ポイ捨て数分布

図1に観察区域内を清掃後、1日目および2日目におけるタバコのポイ捨てゴミのクラスター分布を示す。独立変数の x は、直径約1mの円内のポイ捨てタバコ数であり、 $n(x)$ は x 本タバコが落ちているスポット数である。1日目、2日目のいずれにおいても、(1) x の小さいポイ捨て数の少ないスポット数が圧倒的に多いが、(2)集中度の極めて高いスポットも数の上では少ないものの存在することがわかる。

x 本以上タバコが落ちている箇所数を $cn(x)$ で表す。

$$cn(x) = \sum_{n=x}^{\infty} c(n) \quad (1)$$

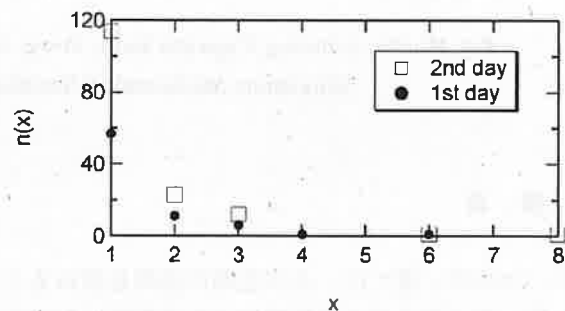


図1 清掃後、1日目および2日目のポイ捨てタバコ数の分布。 x はスポット内のポイ捨てタバコ数、 $n(x)$ は x 本タバコが落ちているスポット数を表す。

測定日：2006年10月12-13日

タバコ総本数：1日目107本、2日目210本

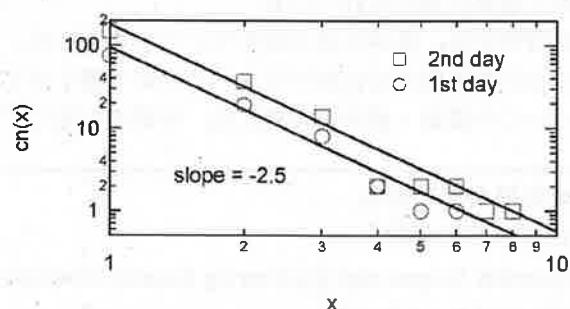


図2 積算分布 $cn(x)$ の両対数プロット。図1と同じデータを積算分布に変換した。

図1で示した同じデータを(1)式で定義される積算箇所数を用いて両対数プロットした結果を図2に示す。ばらつきは大きいものの、おおよそ直線関係を示すことがわかる。また、タバコゴミが時間と共に増大しても、ほぼ同じ傾きの直線関係が成立することがわかる。

図3-5に、別の日に実施した同様の測定結果の両対数プロットを示す。測定日により、捨てられるタバコ数には大きな違いが見られるが、分布はいずれも(2)式で示すようなベキ分布となり、ベキ指数 α

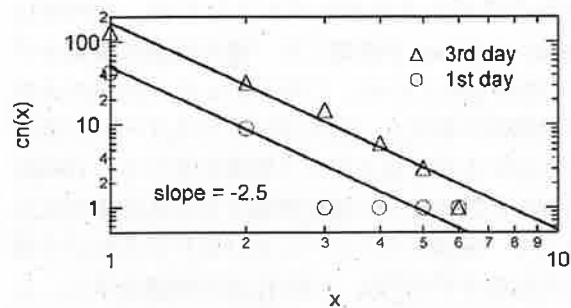


図3 積算分布 $cn(x)$ の両対数プロット。
測定日：2006年10月16-18日
タバコ総本数：1日目56本，3日目189本

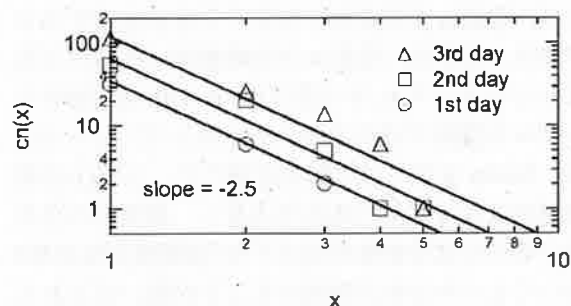


図4 積算分布 $cn(x)$ の両対数プロット。
測定日：2006年10月23-25日
タバコ総本数：1日目40本，2日目81本，3日目161本

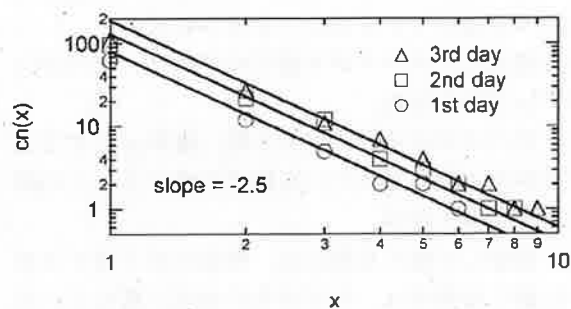


図5 積算分布 $cn(x)$ の両対数プロット。
測定日：2006年10月30日-11月1日
タバコ総本数：1日目85本，2日目142本，3日目167本

にも大きな変化がみられないことがわかる。

$$cn(x) \sim x^{-\alpha} \quad (2)$$

図中には $\alpha=2.5$ とした直線を目安として書き入れた。個々に細かく観察すれば $\alpha=2.5$ からはずれる場合もあるが、大まかには傾き-2.5なる直線に乗ると考えられる。

以上の結果は、(1)福井大学工学部1号館周辺の観察区域内において、(2)清掃によりタバコゴミを皆無にした後でのポイ捨て挙動である。ベキ乗則がこのような限られた条件でのみ成立するのか、あるいはより一般的に成立するのかを検討するために、観察区域外で清掃を行わずにポイ捨て数の観測を行った。

図6に工学部と同じ文京キャンパス内の教育地域科学部、松岡キャンパスにある医学部、さらに、福井県立大学の福井キャンパス内におけるポイ捨て分布の測定結果を示す。教育地域科学部では、ポイ捨てが目立つ汚れた箇所も見られたが、医学部、福井県立大学は比較的きれいな状況であった。いずれの場所においてもタバコのポイ捨てゴミ数の分布は、ほぼベキ乗則が成立していることがわかる。汚れが目立った教育地域科学部の場合の傾きがやや小さい傾向があるものの、傾き-2.5なる直線からの顕著なずれは見られなかった。

大学という場所は、ほぼ同じ構成員が繰り返しポイ捨てを行う場所だと考えられる。ベキ分布の汎用性をさらに検討するために、不特定多数の人たちが利用する公園において、同様の測定を行ってみた。対象とした公園は、福井市内の運動公園内こどもの国(11月29日実施、ポイ捨て観測総数：74本)、足羽山公園(11月30日実施、10本)、幾久公園(11月30日実施、8本)、愛知県安城市にある今村公園(11月28日実施、26本)、篠目公園(11月28日実施、117本)、安城公園(11月28日実施、9本)である。いずれの公園も美観を損ねるほどのタバコのポイ捨てゴミは見られなかった。実際のところ運動

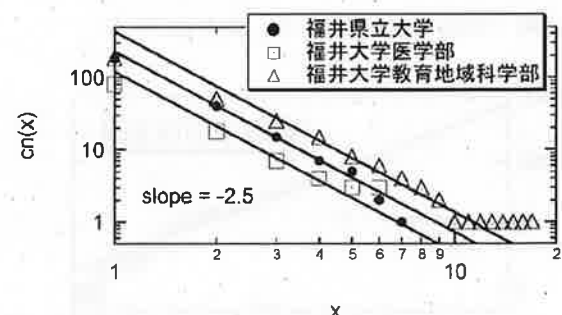


図6 積算分布 $cn(x)$ の両対数プロット。
県立大：2006年11月30日，総本数252本
医学部：2006年12月1日，総本数115本
教育地域科学部：2006年12月6日，総本数306本

公園と篠目公園以外では、ポイ捨て本数が少なすぎ、分布の解析はできなかった。

図7に運動公園（福井市）と篠目公園（安城市）におけるポイ捨て分布を示す。どちらの公園でも、おおよそベキ乗則が成立し、しかも傾き-2.5なる直線ともほぼ一致した。

図2-7の結果より、ポイ捨てゴミがそれほど多くない場所においては、大学、公園を問わず、ほぼ指数 $\alpha=2.5$ なるベキ分布に従うことが見いだされた。

一方、文京キャンパス全体について調査したところ、極めてタバコゴミの多い汚い場所が多数観察された。そこで、文京キャンパス全体についても調査を実施した。

図8に文京キャンパス全体でのポイ捨て分布を示す。観測したポイ捨てタバコの総本数は、1476本のほり、タバコのポイ捨てがかなり目立つ状況であった。この場合のポイ捨て数分布にも、両対数プロットした場合、良好な直線関係が見られ、ベキ分布が成立することがわかる。しかしながら、直線の傾きは、他の観測結果に比べ小さくなった（ $\alpha=1.5$ ）。傾きが、他の測定結果と一致しない原因は現在のところ明確ではないが、以下のような理由が推測される。(1)ポイ捨てゴミが非常に目立つ状況では、ポイ捨て挙動が変化する。(2)ポイ捨てがあまりに激しく、直径1mの円でポイ捨てスポットを区分することが

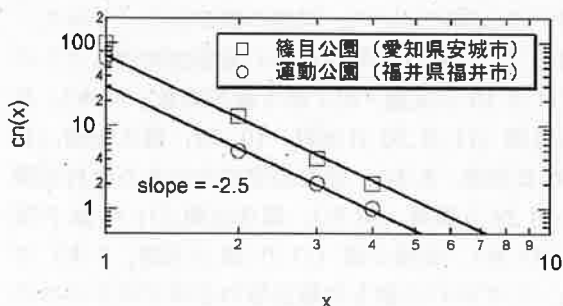


図7 積算分布 $cn(x)$ の両対数プロット。
篠目公園：2006年11月28日、総本数117本
運動公園：2006年11月29日、総本数74本

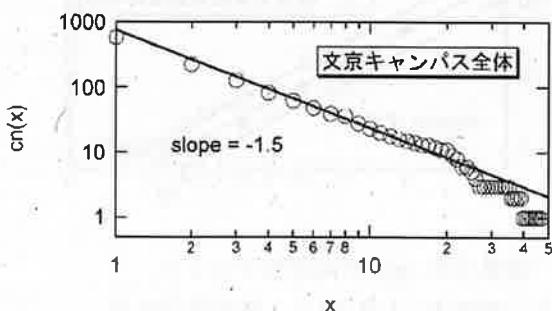


図8 積算分布 $cn(x)$ の両対数プロット。
2006年12月6日、総本数1476本

困難な場所も見られた。(3)ポイ捨てされてから日数の経った吸い殻も多く、雨や風等の自然現象による移動による集積効果もあったのではないかと考えられる。

図8に示すように、ベキ指数 $\alpha=2.5$ という値は、どのような場所に対しても適用できるわけではない。しかしながら、多数のポイ捨てゴミクラスターから構成される集合がベキ分布には従うという観測結果は大変興味深い。

3.2 モデルによるシミュレーション

ベキ分布を生み出すモデルとしては、1999年に Barabasi と Albert が提案した「優先的選択成長モデル」^[5]が知られている。このモデルは、(1)系の大きさが時間的に拡大し、(2)大きいクラスターほど優先的にさらに大きくなるという特徴を有する。1994年に Tobita が高分子への連鎖移動を含む乳化重合反応に対して「直接シミュレーション法」と名付けて発表した反応モデル^[6]も、上記(1),(2)の特徴を有し、このモデルは分子量分布がベキ乗則に従う高分子をつくり出すことが示されている^[7]。Barabasi と Albert により提案されたモデルでは、ベキ指数を自由にコントロールすることはできない。一方、Tobita モデルでは、指数 α を反応条件により自由に制御することができ、しかも、指数 α と分岐確率と名付けられた反応パラメータ P_b との間には、 $\alpha=1/P_b$ なる極めてシンプルな関係が成立することも見いだしている^[8]。なお、Tobita モデルでの解析を通じて、上記(1)の系の継続的拡大は必須の条件ではなく、物質の出入りを伴いながら定常状態が成立する「連続槽型反応器」においてもベキ分布が発現することが見いだされている^[9]。連続槽型反応器は、細胞内での代謝反応モデルにも適用できるので、生物系でのフラクタル分布形成モデルとしても展開できると考えられる。

ここでは、高分子への連鎖移動を含む重合反応に対して提案された Tobita モデルに軽微な変更を加えたモデルを用いてシミュレーションを行う。

今回使用したタバコポイ捨てモデルは、次の2つのステップからなる。

(1) タバコのポイ捨てをする際、確率 p_f ですでにタバコがポイ捨てされている場所に捨てる。この確率 p_f を追従率と呼ぶ。

(2) 追従して捨てる際には、特定のポイ捨てスポットに捨てる確率は、すでにその地点に落ちているタバコゴミの本数に比例する。これは、「ゴミはゴミを呼ぶ」という経験則をモデル化したものである。

上記のモデルは、系（タバコゴミの総本数）の継続的増大、多数のタバコゴミを有するクラスターの

優先的拡大という特性を有した「優先的選択成長モデル」である。

図9に p_f 値を0.1から0.9まで変化させて行ったシミュレーション結果を示す。グラフの縦軸は、次式で定義される数基準の累積分布関数である。

$$CN(x) = \sum_{n=x}^{\infty} N(n) \quad (3)$$

ここで $N(n)$ は、次式で表される確率密度関数である。

$$N(x) = \frac{n(x)}{\sum_{x=1}^{\infty} n(x)} = \frac{n(x)}{n_{spot}} \quad (4)$$

ここで、 n_{spot} はポイ捨てのあるスポットの総数である。

$cn(x) \sim x^{-\alpha}$ なる関係が成立するとき、 $n(x)$, $N(x)$, $CN(x)$ はそれぞれ、以下のようなべき乗則に従う。

$$n(x) \sim x^{-(\alpha+1)} \quad (5)$$

$$N(x) \sim x^{-(\alpha+1)} \quad (6)$$

$$CN(x) \sim x^{-\alpha} \quad (7)$$

シミュレーションは、タバコのポイ捨てが1本だけあった状態からスタートし、1本ずつタバコゴミを上記(1),(2)のプロセスにより増大させ、ポイ捨てスポット数が10万箇所以上になるまで計算を続けた。

追従率 p_f が小さい場合には、べき乗則が成立する領域が小さいものの、いずれも $\alpha=1/p_f$ なるべき分布に従うことがわかる。なお、べき分布と呼ばれる分布は一般に、 x がある程度大きい領域においてべき乗則が成立するような分布である。

理論分布は、サンプル数が無限大である場合の分

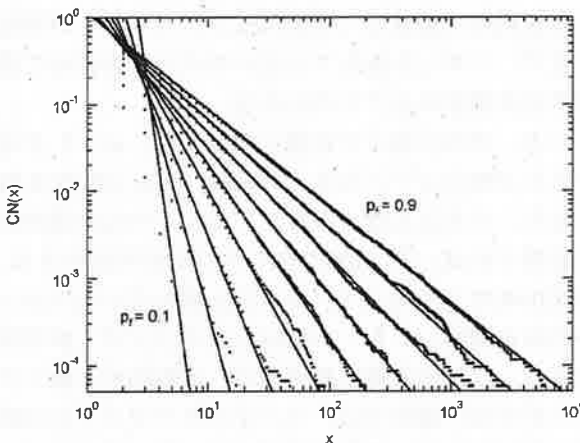


図9 ポイ捨てモデルによるシミュレーション結果。左側から順に追従率 p_f を0.1から0.9まで0.1刻みで変化させた場合の結果を示す。縦軸は、(3)式で与えられる累積分布関数であり、ポイ捨てタバコ数が x 本以上である箇所数の分率を表す。図中の直線は、傾き $-1/p_f$ なる直線。

布であるが、一般に現地調査ではサンプル数があまり大きく取れない場合が多い。そこで、今回の観測結果とほぼ同じポイ捨てタバコ総本数 n_t においてもシミュレーションを行ってみた。

図10に $n_t=210$ である場合のシミュレーション結果と観測結果の比較を示す。シミュレーションでは、 $p_f=1/\alpha=1/2.5=0.4$ として計算を行った。サンプル数が210程度と小さい場合には、シミュレーションにおいても x の大きい領域での両対数グラフ上のばらつきは大きく、そもそも誤差の大きな観測実験であることを考慮すれば極めて良好に一致していると言える。

図11に最もサンプル数の少ない図4中の1日目のデータに対するシミュレーション結果を示す。ここでも、 $p_f=0.4$ としてシミュレーションを行った。この場合にも、実測データ、シミュレーション結果、そして、図中に引いた直線の3者は良好に一致することがわかる。

分布データでは、いくつかのクラスターをランダムに排除しても全体の分布は変化しない。したがって、前期に実施したポイ捨てタバコの総本数の測定よりも自主的な清掃活動の影響を受けにくい。そういった意味で、ポイ捨てタバコ数分布の計測はポイ捨て挙動を簡便に調査する優れた方法だと考えられる。

一方、図8に示したように、極めてタバコゴミの目立つ環境下では、 α の値が小さくなっている。こ

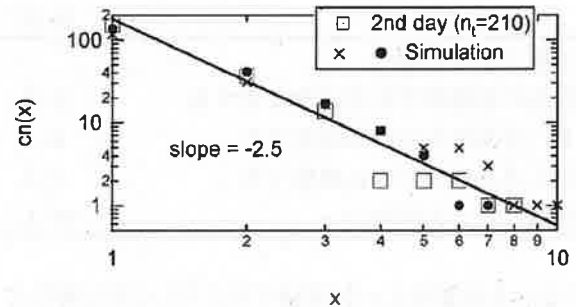


図10 図2で示した学内観測区域内での計測データ(2日目)とシミュレーション結果の比較。

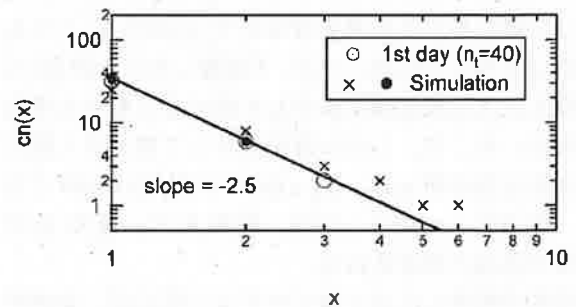


図11 図1で示した学内観測区域内での計測データ(1日目)とシミュレーション結果の比較。

ここで提案したポイ捨てモデルからは、これは、依存率 p_f が増大したと解釈できる。つまり、タバコゴミが増えてくると、それまで新たなポイ捨てスポットを開拓していた独立心の強い人も汚れた場所に捨てやすくなるという挙動の変化があることを示唆する。あるいは、タバコゴミの散乱が激しい場所では、たとえ独立に捨ててもスポット内に入ってしまうという結果になり、見かけ上、依存率が高くなるということも考えられる。

本節で行ったモデル解析からは、 $\alpha=2.5$ の場合には依存率 $p_f=0.4$ となり、また、図9で示した $\alpha=1.5$ の場合には依存率 $p_f=0.67$ と解釈できる。

3.3 意識調査結果との関係

2006年6-7月、工学部学生を対象として、付録に示すようなアンケートを実施し、タバコのポイ捨てについての意識調査を行い、447名から回答を得た。アンケートから得られた喫煙率は $62/447=13.8\%$ であり、2005年度、工学部学生を対象として1253名より回答を得た調査結果 16.9% よりもやや低くなった。

問6、7のポイ捨て挙動についての集計結果を表1に示す。

表1 ポイ捨て挙動のアンケート結果

学内でタバコのポイ捨てをしたことが	
ある	42人
ない	20人
ポイ捨てをする際	
きれいな場所でもポイ捨てをする	14人
2-3本落ちていれば捨てる	6人
たくさん落ちていれば捨てる	7人
意識したことがない	15人

「2-3本落ちていれば捨てる」「たくさん落ちていれば捨てる」と答えた人数から依存率 p_f を推定すると $p_f=(6+7)/42=0.31$ となる。もちろん、「きれいな場所でもポイ捨てをする」と答えた人たちが従属して捨てることも考え得るので、 p_f は 0.31 よりも大きいと考えられる。一方、「意識したことがない」と答えた人は無意識に依存して捨てているとも考えられる。そこで、この人数を依存して捨てる人数に加えると依存率 p_f は、 $p_f=(6+7+15)/42=0.67$ となる。従って、 p_f 値としては、最低 0.31 、最大 0.67 程度であると推定される。

前節で提案したポイ捨てモデルに従えば、実測データの $\alpha=2.5$ は、 $p_f=0.4$ となる。この値は、上記のアンケート結果、 $p_f=0.31-0.67$ とともにまずまずの精

度で一致する。

一方、ポイ捨てゴミが増大してくると、無意識に捨ててもスポット内に入る確率は増大するであろう。そのように考えると、図8で示された直線の傾きより得られた $p_f=0.67$ というのも、アンケート結果と大きく矛盾する結果とは言えない。

意識調査により得られた追従率は、ポイ捨て数分布の実測データとまずまずの精度で一致するといえるであろう。

$N(x) \sim x^{-(\alpha+1)}$ なる分布に従う場合、タバコのポイ捨て数が x 本であるスポットにあるポイ捨てゴミの合計のポイ捨て総本数に占める割合 $W(x)$ は、次式で表される。

$$W(x) = \frac{xN(x)}{\sum_{x=1}^{\infty} xN(x)} \sim x^{-\alpha} \quad (8)$$

従って、タバコのポイ捨て数が x 本以上のスポットに捨てられているタバコの総数のポイ捨て総本数に対する分率 $CW(x)$ は、

$$CW(x) = \sum_{n=x}^{\infty} W(n) \sim x^{1-\alpha} \quad (9)$$

(9)式において、 $\alpha=2.5$ とすると、 $CW(x) \sim x^{-1.5}$ となる。ベキ分布では、 $x=1$ までベキ分布が適用できるとは限らないが、今、両対数プロットにおける直線が $(1,1)$ に近い点を通ると仮定してタバコゴミの回収について試算を行う。図9に示すように、一般に $(1,1)$ より上を通る直線となるので、ここでの試算結果は最も低く見積もった値である。 $x \geq 2$ なるスポットに捨てられているタバコの総本数の割合は、 $CW(2)=0.35$ 程度と見積もられ、2本以上のスポットのみ選択的に清掃しても 35% しかタバコゴミが回収できず、1本しか落ちていないスポットを含めて清掃する必要があることがわかる。

一方、汚れが進んだ状態における値、 $\alpha=1.5$ を用いると $CW(x) \sim x^{-0.5}$ となる。この場合には、 $CW(2)=0.71$ となり、2本以上捨てられたスポットのみを選択的に清掃すれば、約 70% のタバコゴミが回収できる。 $CW(3)=0.57$ であるので、3本以上落ちているスポットのみを清掃しても、半数以上のタバコゴミが回収できる。今回の考察に基づけば、比較的ポイ捨てタバコが少ない場所では、すべてのタバコゴミを回収すべきであるが、汚れた場所では、特にポイ捨ての目立つ場所のみ清掃しても、十分な割合のタバコゴミが回収できることが示唆される。

現在のポイ捨てモデルは極めて簡素化されたモデルであり、まだまだ改善の余地はあると考えられるが、タバコのポイ捨てのたまかな挙動は記述できて

いると考えている。

4. 結論

学内での観測区域内において、清掃後のポイ捨てタバコ数分布を調査したところ、清掃後1日後、2日後、3日後のいずれのデータも $\alpha=2.5$ なるベキ分布 $cn(x) \sim x^{-\alpha}$ なるベキ分布に従うことを見いだした。

学内の他の区域や他大学、さらには、一般の公園において、あらかじめ清掃を行うことなく、タバコゴミ分布の状況調査を行ったところ、あまり汚れの目立たない場所では、先の知見と同じく、ほぼ $\alpha=2.5$ なるベキ分布に従うことが示された。

学内の非常に汚れた地区を含む観測においてもポイ捨てタバコ数は、ベキ分布に従うことを見いだされたが、この場合には指数 α の値は 1.5 程度と上記の観測より小さくなった。

タバコのポイ捨て挙動について、ゴミがゴミを呼ぶという経験則に基づいて「優先的選択成長モデル」を構築し、シミュレーションを行ったところ、観測事実と同様にベキ乗則に従うポイ捨て数分布が得られた。このモデルに従えば、タバコを捨てる際に、すでに捨ててあるスポットにポイ捨てる確率 p_f と、ベキ指数 α の間には、 $\alpha=1/p_f$ という極めて簡単な関係がある。

学内で主にポイ捨てるを行っているのは、本学の学生であると推測される。そこで、工学部学生を対象としてアンケートによる意識調査を行ったところ、追従率は、 $p_f=0.31-0.67$ 程度となることが推定された。今回実測された指数 α の値は、清浄な環境下では 2.5、汚れが進んだ環境では 1.5 であったので、 $\alpha=1/p_f$ なる関係からは、それぞれ、0.4 および 0.67 となる。これらの値は、意識調査に基づく追従率とも良好に一致していると言える。

今後、このようなポイ捨て挙動解析を、ポイ捨てゴミを減らす方法作りに生かしていきたいと考えている。

付録

タバコのポイ捨てに関するアンケート調査

2006年6-7月、工学部学生対して実施。回答者数は447であった。

(1) あなたの所属学科(専攻)は?

生物応用化学科	58人
電気・電子工学科	56人
知能システム工学科	66人
材料開発工学科	76人
機械工学科	74人
情報・メディア工学科	66人

建築建設工学科	48人
原子力安全工学専攻	3人

(2) あなたの学年は?

2年生	54人
3年生	341人
4年生	31人
大学院生	21人

(3) あなたは大学でタバコを吸いますか?

1. ほぼ毎日吸う	39人 (8.7%)
2. 時々吸う	23人 (5.1%)
3. 吸わない	385人

1および2と答えた人は、問(4)以降、順に3と答えた人は問(8)へ

(4) あなたは、携帯灰皿を持っていますか?

1. 持っている	23人
2. 持っていない	37人

(5) あなたが、大学内でタバコを吸うとき:

1. 一人で吸うことが多い	24人
2. 友達と吸うことが多い	21人
3. どちらとも言えない	15人

(6) あなたは、大学内でポイ捨てるをしたことがありますか?

1. したことがある	42人
2. したことがない	20人

1と答えた人は、問(7)へ

2と答えた人は、問(8)へ

(7) 大学内でポイ捨てるをしたことがある人に伺います。

(a) あなたはまったくタバコがポイ捨てされていないきれいな場所でもポイ捨てるをしますか?

1. する	14人
2. 2-3本落ちていれば捨てる	6人
3. たくさん落ちていれば捨てる	5人
4. 意識したことがない	15人

(b) あなたは、大学内のどのような場所でポイ捨てるをしますか? (該当するものすべてに○)

1. 汚い場所	11人
2. 人目につきにくい場所	8人
3. 他人が捨てているのを見て	3人
4. ベンチのある場所	7人
5. 排水溝の中	18人
6. その他()	4人

(8) タバコのポイ捨てるは悪いことだと思いますか?

1. はい	411人 (92%)
2. いいえ	33人
無回答	3人

(9) あなたは、大学内のポイ捨てるをなくしたいですか?

1.はい	378人 (85%)
2.いいえ	65人
無回答	4人

(10) あなたは、タバコのポイ捨てをなくすために週1回10分程度のボランティア活動に参加する意志はありますか？

1.はい	68人 (15%)
2.いいえ	378人
無回答	3人

(11) あなただったらタバコのポイ捨てを減らすのにどのような方法をとりますか？

謝辞

福井大学工学部生物応用化学科3年の伊東護一君、材料開発工学科2年の徳永理子さん・吉川千裕さんには、工学部共通科目「学際実験・実習」のエコロジー&アメニティ部門での活動を通じ、実験データの収集、アンケートの作成・整理等に協力して頂きました。多数の福井大学工学部の教員の方々には、貴重な授業時間を割いてアンケート調査にご協力頂きました。福井大学医学部看護学科長谷川智子助教授、上原佳子助手には、喫煙に関する意識について貴重なご助言を頂きました。末尾ながら心から感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 加濃正人編：タバコ病辞典，実践社（2004）。
- [2] 後藤公彦：日本医師会雑誌，116，370（1996）。
- [3] (財)医療経済研究機構：喫煙政策のコスト・ベネフィット分析に係わる調査研究報告書，平成6-8年度厚生科学研究費補助事業（1997）。
- [4] 稲垣成識：卒業論文，福井大学工学部（2007）。
- [5] A.-L. Barabasi and R. Albert: Science, 286, 509 (1999).
- [6] H. Tobita: Polymer, 35, 3023 (1994).
- [7] H. Tobita: Macromolecules, 37, 585 (2004).
- [8] H. Tobita: Macromol. Mater. Eng., 290, 363 (2005).
- [9] H. Tobita: e-Polymers, no. 076 (2004).

Theory of Random Degradation and Its Applications to Polymer Modification, Chain Transfer Reactions, and Particle Size Distribution

Hidetaka TOBITA* and Kiyoshi SUZUKI*

(Received January 30, 2007)

A simple computational method to predict the molecular weight distribution (MWD) formed through random chain scission of linear chains is proposed. This method can be applied to any initial MWD including experimentally obtained ones with small computational time. The random degradation theory can be applied to such problems as the effect of chain transfer reactions and the particle size distribution (PSD) formed in microemulsion polymerization, as well as the random degradation of polymer chains.

Key Words : Polymer Degradation, Molecular Weight Distribution, Modeling, Calculations, Chain Transfer, Particle Size Distribution

1. Introduction

Modification of the molecular weight distribution (MWD) through random scission degradation of polymers provides an attractive research field, combining at the same time fundamental and applied topics of great interest. Theoretical description of the random chain scission has been studied for many years by application of the analytical solutions for several representative polymer MWDs^{[1]-[7]} and by using numerical simulation technique, notably through the Monte Carlo (MC) method, for more general cases.^{[8]-[14]}

Compared with the MC technique, the analytical approach is usually easier to use with superior precision. On the other hand, the analytical solution can be obtained only for several limited distribution functions and may not be applied to the experimentally obtained distributions. The MC method is a versatile technique and could be applied to various polymer systems. However, the MC simulation results always involve some amount of error, as long as the sample size is finite, and a long calculation time may be needed for obtaining statistically valid distribution.

As an example, suppose the initial polymer distribution is given by the Schulz-Zimm distribution

whose weight-based function $W_0(r)$ is given by:

$$W_0(r) = \frac{\sigma^\sigma}{u\Gamma(\sigma)} \left(\frac{r}{u}\right)^\sigma \exp\left(-\frac{\sigma r}{u}\right) \quad (1)$$

where u is the number-average chain length, and σ represents the narrowness of the distribution.

When the linear polymer chains having the Schulz-Zimm distribution is severed randomly with scission probability ϕ , the resulting distribution is given by:^[5]

$$W(\xi, \eta) = \frac{1}{u} \left\{ 2\xi\eta + (1-\xi)\xi\eta^2 + \frac{1}{\Gamma(\sigma)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} (\sigma\xi)^{\sigma+k} C_k \right\} \exp(-\eta\xi) \quad (2)$$

where $\xi = r/u$, $\eta = u\phi$, and C_k is defined by:

$$C_k = \frac{(\sigma+k)(\sigma+k+1) - 2(\sigma+k+1)\xi\eta + (\xi\eta)^2}{(\sigma+k)(\sigma+k+1)} \quad (3)$$

Figs. 1-3 show the MWD change during random scission process with $\sigma = 1$ (the most probable distribution), 0.1 (a broad initial MWD) and 10 (a narrow initial MWD), respectively. The curves are calculated from Eq. (2), and the symbols are from the MC simulation method proposed earlier.^{[12]-[14]} A total of 2×10^4 polymer molecules were simulated in the MC method. In the figure, the magnitude of ϕu represents the average number of scission points in a chain.

As the scission reaction proceeds, the distribution approaches to the most probable distribution whose polydispersity index (\bar{P}_w/\bar{P}_n) is 2. Both Eq. (1) and the MC simulation results agree reasonably well. However,

* Materials Science and Engineering Course, Graduate School of Engineering

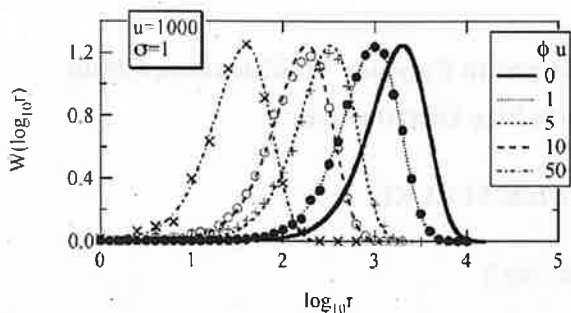


Fig. 1 MWD change during random degradation for $u=1000$ and $\sigma=1$.

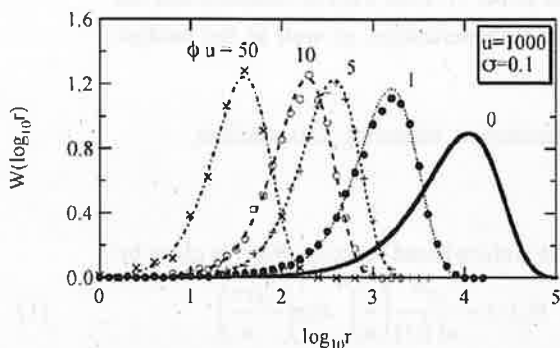


Fig. 2 MWD change during random degradation for $u=1000$ and $\sigma=0.1$.

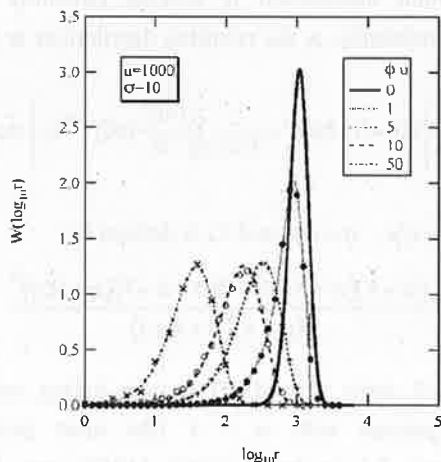


Fig. 3 MWD change during random degradation for $u=1000$ and $\sigma=10$.

with a closer look at these figures, one would notice that (1) the MC simulation results involve small but finite amounts of errors, and (2) the high MW tail of the analytical solution in Fig. 3 with $\phi u = 1$ shows an oscillatory behavior, as more clearly shown in Fig. 4. This is because the summation in Eq. (2) involves positive and negative terms that appear alternatively with k . When the magnitude of each term in the summation is

extremely large, it is difficult to obtain the numerical calculation results with high accuracy. Even the analytical solution may not be free from errors when the actual numerical calculation is conducted.

In this article, first, a simple calculation method for the MWD formed through random chain scission is proposed. It is aimed to develop a method that works (1) fast enough (2) with higher precision, and that (3) can be applied to any type of initial MWDs. The equations to calculate the number- and weight-average chain lengths are also proposed. Then, it will be shown that the random degradation theory can be applied to various problems, including seemingly unrelated phenomena. The theory is applied to: (1) the peroxide promoted degradation of polypropylene, (2) the MWD formed through the conventional free-radical polymerization that involves chain transfer reactions, (3) the effect of monomer transfer reactions in a living/controlled free-radical polymerization, and (4) the prediction of the particle size distribution in microemulsion polymerization.

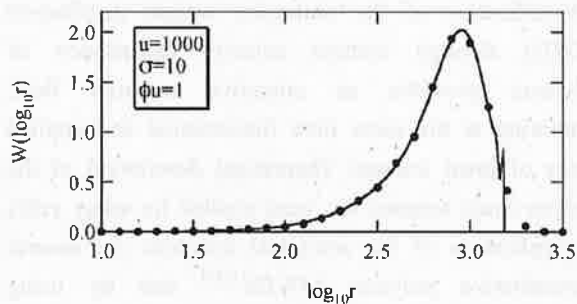


Fig. 4 Closer look at the MWD for $u=1000$, $\sigma=10$ and $\phi u = 1$.

2. Theoretical

2.1 Basic Strategy

The fundamental idea proposed in this article is very simple. The MWD formed through random degradation of polydisperse polymers is calculated by superimposing the MWDs formed by random degradation of monodisperse polymers. The solid curve in Fig. 5 shows the initial polymer distribution. Within this initial polymer mixture, the shaded area represents the fraction having a certain chain length. This fraction of polymer would form the polymer represented by the lightly shaded area through random degradation. The whole MWD formed by random chain scission of the initial polymer (represented by the dashed curve) can be

obtained by summing up all of the degraded fractions.

When the initial polymers, whose weight fraction distribution is $W_0(r)$, are degraded by cutting the bonding with probability ϕ , the resulting polymer distribution is represented by:

$$W(r, \phi) = \sum_{s=r}^{\infty} W_0(s) W_{uni}(r, s, \phi) \quad (4)$$

where $W_{uni}(r, s, \phi)$ is the weight fraction distribution formed by random degradation of uniform polymers having chain length s .

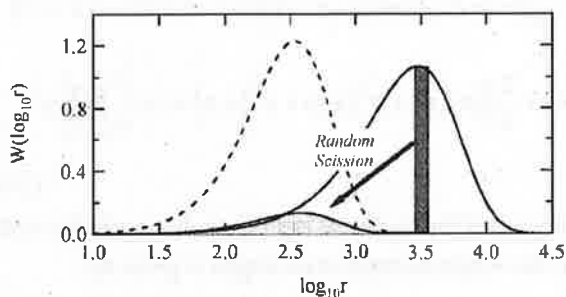


Fig. 5 Fundamental concept of the calculation method for the random degradation of polydisperse polymers.

2.2 Random Degradation of Uniform Polymer Chains

The functional form of the MWD formed by random degradation of uniform polymer chains is already known. However, in this section the full MWD function as well as the weight-average chain length is derived by using the random sampling technique^[15] in which only a simple arithmetic calculation is needed. The weight fraction distribution can be obtained by selecting polymer chains on a weight basis. The selection on a weight basis can be conducted by selecting one unit randomly from all units in polymer chains.

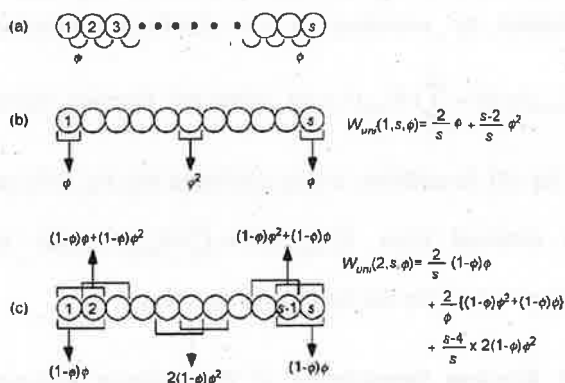


Fig. 6 Derivation of the MWD function formed through random degradation of uniform polymer chains.

Consider a polymer chain having length s as shown in Fig. 6(a). The probability of cutting each bond is ϕ . First, consider the probability of having a chain with length $r = 1$ by selecting one unit randomly, namely, $W_{uni}(1, s, \phi)$. As shown in Fig. 6(b), if one chooses the end units (first or the last unit) whose probability is $2/s$, the chain with $r = 1$ can be obtained by cutting one bond whose probability is ϕ . On the other hand, if one chooses other than the end units whose probability is $(s-2)/s$, two bonds connected to the randomly selected unit must be cut to obtain a chain with $r = 1$ whose probability is ϕ^2 . Therefore, $W_{uni}(1, s, \phi)$ is given by:

$$W_{uni}(1, s, \phi) = \frac{2}{s} \phi + \frac{s-2}{s} \phi^2 \quad (5)$$

Similarly, $W_{uni}(2, s, \phi)$ can be determined as follows. (i) If one chooses the end units, the chain with $r = 2$ can be obtained by connecting the neighboring unit while cutting the second bond. The probability of causing such type of events is $(2/s)(1-\phi)\phi$. (ii) If one chooses the second to the end units, the chain with $r = 2$ can be obtained as follows. If the end unit is connected, the other side bonding must be cut. On the other hand, if the counter side from the end is connected, two bonds must be cut, as shown in Fig. 6(c). The probability of causing such type of events is $(2/s)[(1-\phi)\phi + (1-\phi)\phi^2]$. (iii) If one chooses other than the above units whose probability is $(s-4)/s$, two bonds must be cut while connecting one of the neighboring units. Therefore, the probability of causing such events is $[(s-4)/s] \times 2(1-\phi)\phi^2$. $W_{uni}(2, s, \phi)$ can be obtained by summing up the probability for these three types of possible events:

$$W_{uni}(2, s, \phi) = \frac{2}{s} (1-\phi) \phi + \frac{2}{s} \{ (1-\phi) \phi + (1-\phi) \phi^2 \} + \frac{2(s-4)}{s} (1-\phi) \phi^2$$

$$= \frac{4}{s} (1-\phi) \phi + \left\{ \frac{2}{s} + \frac{2(s-4)}{s} \right\} (1-\phi) \phi^2 \quad (6)$$

The same discussion leads to:

$$W_{uni}(3, s, \phi) = \frac{6}{s} (1-\phi)^2 \phi + \left\{ \frac{6}{s} + \frac{3(s-6)}{s} \right\} (1-\phi)^2 \phi^2 \quad (7)$$

In general, $W_{uni}(r, s, \phi)$ is given by:

$$W_{uni}(r, s, \phi) = \frac{2r}{s} (1-\phi)^{r-1} \phi + \left\{ \frac{2}{s} \sum_{i=1}^{r-1} i + \frac{r(s-2r)}{s} \right\} (1-\phi)^{r-1} \phi^2$$

$$= \frac{r\phi}{s} (1-\phi)^{r-1} \{ 2 + (s-r-1)\phi \} \quad (8)$$

On the other hand, the chains with $r = s$ is obtained only when no bonds are cut, and $W_{uni}(r, s, \phi) = (1-\phi)^{s-1}$. The obtained results are summarized as follows:

$$W_{uni}(r, s, \phi) = \begin{cases} \frac{r\phi}{s}(1-\phi)^{r-1}\{2+(s-r-1)\phi\} & (r < s) \\ (1-\phi)^{r-1} & (r = s) \\ 0 & (r > s) \end{cases} \quad (9)$$

For the cases with $\phi \ll 1$ and $r \gg 1$, Eq. (9) can be approximated to:

$$W_{uni}(r, s, \phi) \approx \begin{cases} \frac{r\phi}{s}\{2+(s-r)\phi\}\exp(-\phi r) & (r < s) \\ \exp(-\phi r) & (r = s) \\ 0 & (r > s) \end{cases} \quad (10)$$

Equation (10) agrees with the solution obtained by Saito^[5] in which the integro-differential equation was used.

The number-average chain length can be obtained simply from the stoichiometric argument. The number-average chain length can always be obtained by taking the ratio between the total number of monomeric units and the total number of polymer molecules. The number of polymer chains increases by one by cutting one bond, and therefore:

$$\bar{P}_n = \frac{1}{\frac{1}{\bar{P}_{n,0}} + \left(1 - \frac{1}{\bar{P}_{n,0}}\right)\phi} = \frac{\bar{P}_{n,0}}{1 + (\bar{P}_{n,0} - 1)\phi} \quad (11)$$

where $\bar{P}_{n,0}$ is the number-average chain length of the original (initial) polymer chains.

The weight-average chain length can be obtained from the distribution function, Eq. (9) or (10). However, in order to show the versatility of the random sampling technique, it is derived by using this technique. Look at Fig. 6(a) again. One chooses one unit randomly, and the expected chain length so selected is the weight-average chain length. To simplify the discussion, let us assume $s = 4$. Suppose one has chosen the first unit. In this case, one unit has already been ensured. The probability that the second unit is connected is $p = 1 - \phi$ and if the second unit is connected, the number of units on this chain increases by one. Therefore, the expected number of units up to the second unit is $1 + p \times 1$. The probability that the third unit exists in the selected chain is p^2 , and the expected number of units up to the third unit is $1 + p \times 1 + p^2 \times 1$. As a consequence the total expected number of units when the first unit is selected randomly, $\bar{P}_w^{(1)}$ is given by:

$$\bar{P}_w^{(1)} = 1 + p + p^2 + p^3 \quad (12)$$

Please remember that we are now considering the case

with $s = 4$.

Next, consider the expected weight when the second unit is chosen randomly. Toward the right direction, the expected weight including the selected unit is $1 + p + p^2$. Looking toward the left-hand side, the expected weight is $p \times 1$. Therefore, $\bar{P}_w^{(2)}$ is given by:

$$\bar{P}_w^{(2)} = 1 + p + p^2 + p \quad (13)$$

Any unit on the chain can be selected with equal probability, $1/4$, and therefore, the total expected weight, which is equal to the weight-average chain length of the whole reaction mixture, \bar{P}_w is given by:

$$\begin{aligned} \bar{P}_w &= \frac{1}{4}(\bar{P}_w^{(1)} + \bar{P}_w^{(2)} + \bar{P}_w^{(3)} + \bar{P}_w^{(4)}) \\ &= \frac{1}{4}\{(1+p+p^2+p^3) + (1+p+p^2+p) + (1+p+p+p^2) + (1+p+p^2+p^1)\} \\ &= 1 + \frac{2}{4}\{(p+p^2+p^3) + (p+p^2) + p\} = 1 + \frac{2}{4}\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^j p^i \end{aligned} \quad (14)$$

In general for the initial uniform polymer chains with $r = s$, the weight-average chain length is given by:

$$\bar{P}_{w,uni}(s, p) = 1 + \frac{2}{s} \sum_{j=1}^{s-1} \sum_{i=1}^j p^i = 1 + \frac{2p}{s} \cdot \frac{s(1-p) + (1-p^s)}{(1-p)^2} \quad (15)$$

By substituting the relationship, $p = 1 - \phi$, one obtains:

$$\bar{P}_{w,uni}(s, \phi) = 1 + \frac{2(1-\phi)}{\phi^2 s} \{ \phi s - 1 + (1-\phi)^s \} \quad (16)$$

Equation (16) agrees with the equation developed in ref.^[7] in which the cascade theory was used for the derivation.

When $\phi \ll 1$ and $s \gg 1$, Eq. (16) reduces to:

$$\bar{P}_{w,uni}(s, \phi) \approx \frac{2}{\phi^2 s} \{ \phi s - 1 + \exp(-\phi s) \} \quad (17)$$

Equation (17) agrees with the one derived in ref.^[5] in which the integro-differential equation was used to solve. Further, it is straightforward to show that Eq. (16) is obtained by summing up the distribution function,

$$\bar{P}_{w,uni}(s, \phi) = \sum_{r=1}^s r W_{uni}(r, s, \phi) \text{ using the function shown}$$

in Eq. (9). In addition, it was confirmed that Eq. (17) can be obtained from $\bar{P}_{w,uni}(s, \phi) = \int_0^s r W_{uni}(r, s, \phi) dr$ by using Eq. (10) for the distribution function.

2.2 Random Degradation of Polydisperse Polymer Chains

The MWD formed through the random degradation of

polydisperse polymer chains can be obtained from Eq. (4):

$$W(r, \phi) = \sum_{s=r}^{\infty} W_0(s) W_{uni}(r, s, \phi) \\ = r\phi(1-\phi)^{r-1} \sum_{s=r+1}^{\infty} W_0(s) \frac{2+(s-r)\phi}{s} + W_0(r)(1-\phi)^{r-1} \quad (18)$$

When $\phi \ll 1$ and $s \gg 1$, Eq. (18) reduces to:

$$W(r, \phi) \approx r\phi \exp(-\phi r) \int_r^{\infty} W_0(s) \frac{2+(s-r)\phi}{s} ds + W_0(r) \exp(-\phi r) \\ \approx r\phi \exp(-\phi r) \int_r^{r_{max}} W_0(s) \frac{2+(s-r)\phi}{s} ds + W_0(r) \exp(-\phi r) \quad (19)$$

where r_{max} represents the chain length above which $W_0(r)$ practically drops to zero.

Fig. 7 shows the calculated results when the initial polymer distribution follows the Schulz-Zimm distribution with $u=1000$ and $\sigma=10$. As discussed in the introduction part, Eq. (2) has troubles in conducting the numerical calculation, and shows an oscillatory behavior. On the other hand, Eq. (19) shows a nice smooth curve up to the high molecular weight tail that agrees with the MC simulation results. The present method works pretty fast and is free from statistical errors. In addition this method can be applied to any initial polymer distribution including the experimentally obtained ones.

For the number average chain length, Eq. (11) is valid also for the polydisperse systems.

The weight-average chain length can be obtained from:

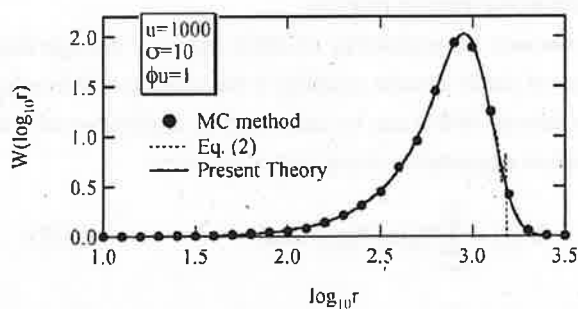


Fig. 7 Calculated MWD formed through random degradation of polymer chains having the Schulz-Zimm distribution with $u=1000$ and $\sigma=10$ when the degree of chain scission is $\phi u = 1$.

$$\bar{P}_w = \sum_{s=1}^{\infty} W_0(s) \bar{P}_{w,uni}(s, \phi) \\ = 1 + \frac{2(1-\phi)}{\phi^2} \sum_{s=1}^{\infty} W_0(s) \frac{\phi s - 1 + (1-\phi)^s}{s} \quad (20)$$

For $\phi \ll 1$ and $s \gg 1$, Eq. (20) can be approximated by:

$$\bar{P}_w \approx \int_0^{\infty} W_0(s) \bar{P}_{w,uni}(s, \phi) ds \\ \approx \frac{2}{\phi^2} \int_0^{\infty} W_0(s) \frac{\phi s - 1 + \exp(-\phi s)}{s} ds \quad (21)$$

When the initial polymer distribution $W_0(r)$ follows the Schulz-Zimm distribution represented by Eq. (1), Eq. (20) leads to obtain:

$$\bar{P}_w = 1 + \frac{2(1-\phi)}{u\phi^2} \left\{ u\phi - 1 + \left(\frac{\sigma}{\sigma - u \ln(1-\phi)} \right) \right\} \quad (22)$$

Equation (22) agrees with the equation derived in ref.^[7]

On the other hand, when Eq. (21) is used, the random degradation of polymers having the Schulz-Zimm distribution leads to:

$$\bar{P}_w = \frac{2}{u\phi^2} \left\{ u\phi - 1 + \left(\frac{\sigma}{\sigma + u\phi} \right)^{\sigma} \right\} \quad (23)$$

Equation (23) agrees with the one developed in ref.^[5]

3. Applications

3.1 Polymer Modification by Degradation

The most straightforward application of the present theory is to investigate the modification of polymer distribution by the random chain scission reactions. As an illustration, the experimental data for the peroxide promoted degradation of polypropylene reported in ref.^[16] are used. In the present investigation, the main purpose is to show the versatility of the present method; i.e., the present method does not require the MWD represented by some distribution function, but the experimental data that may involve errors could be employed directly. Therefore, we are not going into detailed discussion on the chemistry of this particular reaction system.

The actual reaction mechanism of peroxide promoted degradation of polypropylene could involve complicated reactions; however, it was reported that the random degradation model agrees reasonably well, at least for

the prediction of average molecular weight development during degradation.^{[16], [17]}

The bold curve in Fig. 8 shows the initial polymer distribution. We have taken a set of discrete data from ref.^[16] reported graphically. It is expected our numerical data involve some amount of errors because of the graphical read-out method, in addition to the experimental errors. Equation (19) was used to calculate the MWD formed through random chain scission. A spline function was used to interpolate the discrete data for the numerical integration.

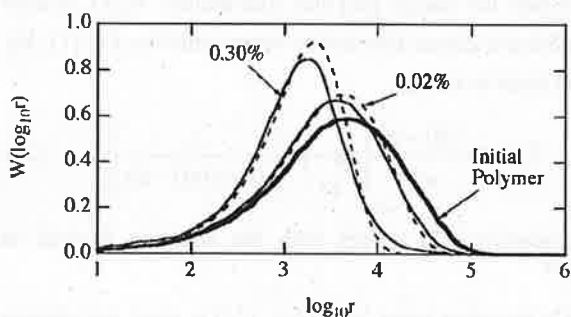


Fig. 8 Peroxide promoted degradation of polypropylene. The solid curves are the experimental data reported in ref.^[16], and the dashed curves are the calculated.

In the reported experiment,^{[16], [17]} the initiator, 2,5-dimethyl-2,5-bis(t-butylperoxy)hexane was used as a radical generator. The weight percentage of the initiator used is shown in Fig. 8. The ϕ values used are 8×10^{-5} and 5×10^{-4} , respectively for 0.02% and 0.30%. Note that these values were not optimized, and should be regarded as a rough measure of the degree of chain scission. The calculated results agree reasonably well with the experimental data, except for the larger chain length regions.

Up to the present, the average molecular weight data have been mainly used to investigate the polymer degradation. The use of present method promises a more detailed investigation using the full MWD data.

3.2 Chain Transfer Reactions in Conventional Free-Radical Polymerization

In this section, it will be shown that the random degradation theory can be used to investigate the effects of chain transfer reactions, by confirming that the present theory leads to a well-established theoretical MWD function for the conventional free-radical polymerization.

The most probable distribution is the most representative MWD function of synthetic polymers, and the instantaneous MWD (formed within a very small time interval) of free-radical polymerization follows this function when the combination termination reactions can be neglected, which is given by:^[18]

$$W_0(r) = r \left(\frac{1}{1+\tau} \right)^{r-1} \left(\frac{\tau}{1+\tau} \right)^2 \quad (24)$$

$$\tau = \left(R_{td} + \sum_{i=1}^N R_{f,i} \right) / R_p \quad (25)$$

where R_{td} is the rate of disproportionation termination, R_p is the rate of polymerization, and $R_{f,i}$ represents the rate of chain transfer reaction of type i . It is assumed that there are N types of chain transfer reactions. Therefore, when another type of chain transfer reaction is introduced, τ should be changed to $\tau' = \tau + \xi$ where $\xi = R_{f,N+1} / R_p$. Note that the lifetime of a growing polymer radical is very small, and therefore, the concentration change during such a small time interval can be neglected. The values of τ and τ' are considered constant in the instantaneous MWD.

In the present reaction system, a dead polymer chain is formed either by disproportionation termination or by chain transfer. When an additional chain transfer reaction is introduced, the probability of chain stoppage by this additional transfer reaction is:

$$\phi = \frac{\xi}{1+\tau+\xi} \quad (26)$$

When chain transfer reaction occurs, a new growing polymer chain is formed at the same time. Therefore, the MWD formed by chain transfer reaction is equivalent to considering chain scission of the polymer molecules without the transfer reaction.

Because the probability of chain stoppage through this type of chain transfer reaction is the same for all bonds, the formed MWD can be calculated by application of the random degradation theory and is given by:

$$W(r) = \sum_{s=r}^{\infty} W_0(s) W_{uni}(r, s, \phi) \quad (27)$$

By using $W_{uni}(r, s, \phi)$ given by Eq. (9), Eq. (27) leads to:

$$\begin{aligned} W(r) &= \left(\frac{\tau}{1+\tau} \right)^2 r \phi (1-\phi)^{r-1} \sum_{s=r+1}^{\infty} \left(\frac{1}{1+\tau} \right)^{s-1} \{ 2 + (r-s-1)\phi \} + r \left(\frac{1-\phi}{1+\tau} \right)^{r-1} \left(\frac{\tau}{1+\tau} \right)^2 \\ &= r \left(\frac{1-\phi}{1+\tau} \right)^{r-1} \left(\frac{\phi+\tau}{1+\tau} \right)^2 \end{aligned} \quad (28)$$

Substituting ϕ represented by Eq. (26) into Eq. (28),

one obtains:

$$W(r) = r \left(\frac{1}{1 + \tau + \xi} \right)^{r-1} \left(\frac{\tau + \xi}{1 + \tau + \xi} \right)^2 = r \left(\frac{1}{1 + \tau'} \right)^{r-1} \left(\frac{\tau'}{1 + \tau'} \right)^2 \quad (29)$$

where $\tau' = \tau + \xi$.

Equation (29) agrees with Eq. (24), which shows that the effect of chain transfer reaction can be investigated by using the present random degradation theory.

When the combination termination is involved, a special consideration is needed for the bonding formed by the combination termination. If this bonding is cut, the fate of the coupled polymer radical by the combination must be considered. To be exact, therefore, the present theory cannot be applied in a straightforward manner. On the other hand, however, the polymer chains normally formed in free-radical polymerization is large, and it is reasonable to neglect the effect of this single bonding on the whole MWD.

When the polymer chain length is large enough, the MWD formed in free-radical polymerization, including the combination termination, is given by the following continuous function:^[18]

$$W_0(r) = (\tau + \beta) \left\{ \tau + \frac{\beta}{2} (\tau + \beta) r \right\} r \exp\{-(\tau + \beta)r\} \quad (30)$$

where $\beta = R_{ic}/R_p$ and R_{ic} is the rate of termination by combination.

The probability of chain scission for this case is represented by:

$$\phi = \frac{\xi}{1 + \tau + \beta + \xi} \equiv \xi \quad (31)$$

Note that we are considering the cases where the formed polymer chains are long enough, and therefore, τ , β , $\xi \ll 1$.

By application of the present theory, the MWD formed with the addition of another transfer reaction would be given by:

$$W(r) = \int_r^\infty W_0(s) W_{uni}(r, s, \phi) ds \quad (32)$$

By using $W_{uni}(r, s, \phi)$ given by the exponential function Eq. (10), one obtains:

$$\begin{aligned} W(r) &= (\tau + \beta) \phi r \exp(-\phi r) \int_r^\infty \left\{ \tau + \frac{\beta}{2} (\tau + \beta) s \right\} \left\{ 2 + (s - r) \phi \right\} \exp\{-(\tau + \beta)s\} ds \\ &\quad + (\tau + \beta) \left\{ \tau + \frac{\beta}{2} (\tau + \beta) r \right\} r \exp\{-(\tau + \beta + \phi)r\} \\ &= (\tau + \beta + \xi) \left\{ \tau + \xi + \frac{\beta}{2} (\tau + \beta + \xi) r \right\} r \exp\{-(\tau + \beta + \xi)r\} \\ &= (\tau' + \beta) \left\{ \tau' + \frac{\beta}{2} (\tau' + \beta) r \right\} r \exp\{-(\tau' + \beta)r\} \quad (33) \end{aligned}$$

It is shown here that the present random degradation theory can be applied to investigate the effect of chain transfer reactions on the MWD. The necessary condition is that the rate ratio, $\xi = R_{f,N} / R_p$ is kept constant during the formation of a polymer chain, which is valid for the instantaneous MWD in the conventional free-radical polymerization.

If the $(N+1)$ th transfer reaction is the monomer transfer, the ξ -value is kept constant during the whole course of polymerization. Therefore, the accumulated MWD can be obtained directly by application of the present theory to the accumulated MWD estimated without monomer transfer reactions as the initial polymer distribution $W_0(s)$.

3.3 Effect of Monomer Transfer Reactions in Living Radical Polymerization

Recently, the controlled/living free-radical polymerization has been significant academic and industrial interest. An important motivation to employ a living free-radical polymerization is to produce polymers having narrow distribution. The frequency of bimolecular termination can be reduced by lowering the active radical concentration, preserving potentially active radicals as dormant. If chain transfer reaction is involved, in general, the ratio R_f/R_p changes along the chain. On the other hand, however, every effort is usually made to reduce the chain transfer reactions by carefully removing potential chain transfer agents from the reaction system. In such cases, the only chain transfer reaction that cannot be prevented is the monomer transfer reaction. For the monomer transfer reaction, $\xi = C_m$, where C_m is the monomer transfer constant, is kept constant during the whole course of chain formation. Therefore, the present random degradation theory can be applied to consider how the monomer transfer reaction broadens the MWD.

As already pointed out,^[19] the living radical polymers having very long chain lengths cannot be synthesized because of the monomer transfer reactions. The maximum number-average chain length attainable in any free-radical polymerization is:

$$\bar{P}_{n,max} = 1/C_m \quad (34)$$

The MWD formed in this case is the most probable, and the polydispersity index ($= \bar{P}_w / \bar{P}_n$) is 2. In order to obtain narrow distribution polymers, the chain length designed to synthesize $\bar{P}_{n,design}$ must be much smaller than $\bar{P}_{n,max}$.

Normally, $C_m \ll 1$, and it is reasonable to set $\phi = C_m$.

The full MWD would be obtained from Eq. (9) or (10) by using the $W_0(r)$ function that does not account the monomer transfer reactions. The number-average chain length can be obtained from Eq. (11), and the weight-average from Eq. (16) or (17).

It was recently shown that the MWD of the ideal living radical polymerization is given by:^[20]

$$W_0(r) = (1-p)^2 p^{r-1} r e^{-z} F[1+r, 2; (1-p)z] \quad (35)$$

where z is the average number of active periods during polymerization, and p is the probability of connecting the next unit during the active period that is equal to the rate ratio, $R_p / (R_p + R_D)$ where R_D is the dormant formation rate. In the above equation, it is assumed p is constant during polymerization, and the active periods are distributed randomly. In Eq. (34), $F(a, b; x)$ is the confluent hypergeometric function (Kummer's function of the first kind), represented by:

$$F(a, b; x) = 1 + \frac{ax}{b} + \frac{a(a+1)}{b(b+1)} \cdot \frac{x^2}{2!} + \dots \quad (36)$$

The MWD formed with the existence of monomer transfer reaction can be calculated from:

$$W(r) = C_m r \exp(-C_m r) \int_0^{\infty} W_0(s) \frac{\{2 + C_m(s-r)\}}{s} ds + W_0(r) \exp(-C_m r) \quad (37)$$

A problem for applying Eq. (37) with the initial MWD given by Eq. (35) is that it may take rather long computational time depending on the calculation conditions because of the complicated hypergeometric function. In such cases, one can resort to a faster calculation method. First, obtain the discrete data points for the initial MWD $W_0(r)$. Then, the continuous approximate function is determined by using, for example, a spline function. Finally, the spline function is used to conduct the integration in Eq. (37).

Some of the examples of the calculated results are shown in ref.^[20] It was found that in terms of the weight fraction distribution, the designed number-average chain length $\bar{P}_{n,design}$ should be made smaller than about 10% of $\bar{P}_{n,max}$. On the other hand, however, a significant number of shorter chains are already formed even when $\bar{P}_{n,design}$ is as small as 10% of $\bar{P}_{n,max}$ ($\bar{P}_{n,design} = 0.1 \times \bar{P}_{n,max}$). In terms of the number fraction distribution, it may be better to keep $\bar{P}_{n,design}$ smaller than about 5% of $\bar{P}_{n,max}$. If the purpose of using living radical polymerization is to synthesize well-defined block copolymer, it is recommended to keep $\bar{P}_{n,design}$ smaller than about 5% of $\bar{P}_{n,max}$.

Application of the present theory to the initial MWD predicted by the Monte Carlo simulation method can be found in ref.^[21]

3.4 Particle Size Distribution (PSD) Formed in Microemulsion Polymerization

In usual microemulsion polymerization, the amounts of monomer and emulsifier initially charged are comparable, and the number of micelles left in the system is much larger than the total number of polymer particles throughout the polymerization.^[22] Therefore, the probability of radical entry into the preformed polymer particles is negligibly small. As a simplest model, the microemulsion polymerization can be considered as a polymerization without bimolecular termination.^{[23], [24]} For such a living system, the polymer chain stoppage is dominated by the monomer transfer reactions, without the existence of other chain transfer agents. The polymer particle stops growing when an oligomeric radical formed by the monomer transfer reaction exits from the particle.^{[24]-[26]}

The probability that a growing polymer radical causes the monomer transfer reaction is $C_m / (1 + C_m) \cong C_m$. The oligomeric radical (mainly monomeric in most cases) formed by the monomer transfer reaction may then diffuse out of the particle with probability P_{exit} . Therefore, the probability of the radical exit from a growing polymer particle before adding next monomeric unit, ϕ_e is given by:

$$\phi_e = C_m P_{exit} \quad (38)$$

It is expected that P_{exit} is larger for smaller particles, and P_{exit} should be particle-size dependent.^{[27], [28]} On the other hand, it was reported that the model that neglects the size dependency of P_{exit} agrees with experimental data reasonably well,^[25] especially when one considers relatively large experimental errors involved in measuring the PSD.

The major objective of the present theoretical investigation is to explore the possibility to synthesize polymer particles with narrow distribution qualitatively, and we use a constant ϕ_e -value in the present investigation. For more detailed investigation, one can resort to the other simulation techniques that account for the nonrandom chain scission, such as the MC simulation method.

Fig. 9 shows the basic concept of the present model microemulsion polymerization system. At $t = t_1$, a radical enters into a micelle, and the particle starts to grow. The

second radical will not enter this particle. The growing polymer chain may be stopped by the monomer transfer reaction, and a new chain may be formed in the particle. The particle continues to grow until the monomeric radical formed by the monomer transfer reaction exits from the particle. Neglecting the bimolecular termination in the water phase for simplicity, the radical that exists from the particle enters into another micelle to generate a new polymer particle. These processes continue until the polymerization is finally stopped at $t = t_R$.

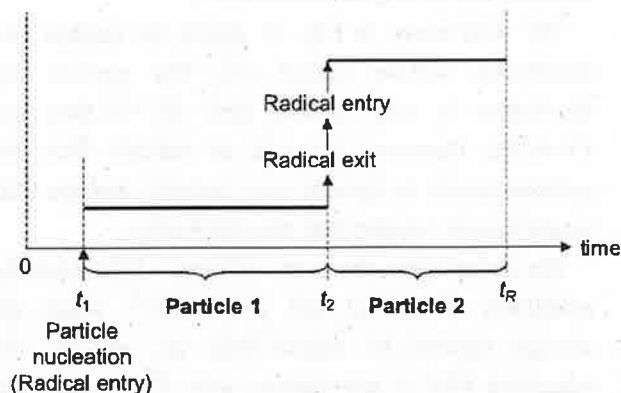


Fig. 9 Schematic representation of the particle formation in a model microemulsion polymerization system.

During the time interval between t_1 and t_R , the total number of monomeric units added to a single radical, i.e., the sum of polymerized monomeric units both in the particle 1 and 2 in Fig. 9, r is given by:

$$r = \int_{t_1}^{t_R} k_p [M]_p dt \quad (39)$$

where $[M]_p$ is the monomer concentration in the polymer particle.

Suppose the weight fraction distribution of polymer particles without the exit of radicals is represented by $W_0(s)$, the weight fraction distribution with the existence of radical exit is given by:

$$\begin{aligned} W(r) &= \int_r^\infty W_0(s) W_{uni}(r, s, \phi) ds \\ &= \exp(-\phi r) \left\{ \phi \int_r^\infty \frac{W_0(s)}{s} [2 + (s-r)] \phi ds + W_0(r) \right\} \end{aligned} \quad (40)$$

where $\phi = \phi_c$ given by Eq. (38).

The number fraction distribution, $N(r)$ is therefore given by:

$$N(r) = \frac{\exp(-\phi r) \left\{ \phi \int_r^\infty N_0(s) [2 + (s-r)] \phi ds + N_0(r) \right\}}{\int_0^\infty \exp(-\phi r) \left\{ \phi \int_r^\infty N_0(s) [2 + (s-r)] \phi ds + N_0(r) \right\} dr} \quad (41)$$

First, we are to determine the functional form of $N_0(r)$. Suppose an initiator, whose decomposition rate constant is k_d , is used, the functional form of N_0 when the independent variable is time, t is given by:

$$N_0(t) = \frac{k_d \exp(-k_d t)}{1 - \exp(-k_d t_R)} \quad (42)$$

Note that $N_0(t)dt$ shows the number fraction of particles generated during the time interval between t and $t+dt$, without the existence of radical exit. From Eq. (39), $N_0(s)$ is given by:

$$N_0(s) = \frac{N_0(t)}{k_p [M]_p} = \frac{N_0(t)}{k_p [M_0]_p (1-x)} \quad (43)$$

where $[M_0]_p$ is the initial monomer concentration in the monomer-swollen micelles, and x is the monomer conversion to polymer.

For a microemulsion polymerization, it was reported^{[23], [24]} that the following equation describing the conversion of monomer to polymer, x agrees reasonably well with the experimental data, except for a high conversion region:

$$x = 1 - \exp(-\alpha k_d t^2) \quad (44)$$

where α is a constant defined by:

$$\alpha = \frac{k_p f [M_0]_p [I_0]_w m}{M_0} \quad (45)$$

In Eq. (45), f is the initiator efficiency, $[I_0]_w$ is the initial initiator concentration in the water phase, m is the molecular weight of monomer, and M_0 is the weight of monomer initially charged per unit volume of water.

Note that any conversion-time relationship, including the experimentally determined equation, can be used in conducting the present theoretical investigation.

The relationship between the particle diameter D_p and the number of monomeric units r is given by:

$$r = \frac{\pi N_{Av} D_p^3 \rho}{6m} \quad (46)$$

where N_{Av} is Avogadro's number, and ρ is the polymer density.

Illustrative calculations of the PSD: We used the following constants for the illustrative calculations; $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$, $m = 100$, and $\alpha k_d = 2 \times 10^{-6}$. The solid curve in Fig. 10 shows the conversion development during microemulsion polymerization, calculated from Eq. (44) with $\alpha k_d = 2 \times 10^{-6}$. We set the reaction time, $t_R = 20 \text{ min}$, and the conversion at that time is $x = 0.944$.

The fraction of initiator radicals generated F_{ini} is represented by:

$$F_{ini} = \frac{N_{I,0} - N_I}{N_{I,0} - N_{I,t_R}} \quad (47)$$

where N_I is the number of initiator molecules, $N_{I,0}$ is that of the initial value, and N_{I,t_R} is that at $t=t_R$.

The dashed curve in Fig. 10 shows F_{ini} when $k_d=1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. In the present example, because k_d is small, new initiator radicals are generated continuously, resulting in a continuous production of new polymer particles.

The solid curve in Fig. 11 shows the particle size distribution without radical exit when $k_p[M_0]_p=1000 \text{ s}^{-1}$. The particle size distribution is broad, with the number average diameter $\bar{D}_p=34.5 \text{ nm}$ and the coefficient of variation $CV=42.4\%$. The dashed curve shows the calculated PSD when the probability of radical exit, $\phi=5 \times 10^{-6}$. In this case, the average number of radical exit, $\phi r_R=3.08$, where r_R is defined by:

$$r_R = \int_0^{t_R} k_p [M]_p dt \quad (48)$$

Next example is the case with $k_d=1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $N_0(r)$ is broad in the present example, and the PSD with the

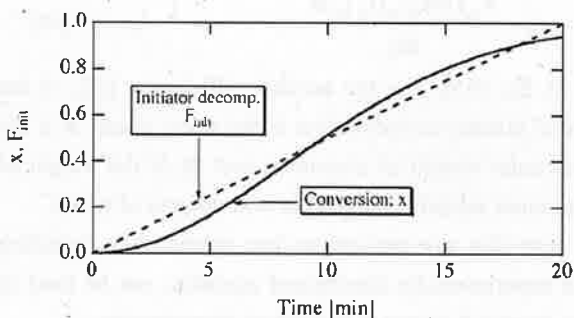


Fig. 10 Conversion (x) and the fraction of initiator radicals generated (F_{ini} , defined by Eq. (47)) as a function of time, with $\alpha k_d=2 \times 10^{-6}$ and $k_d=1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

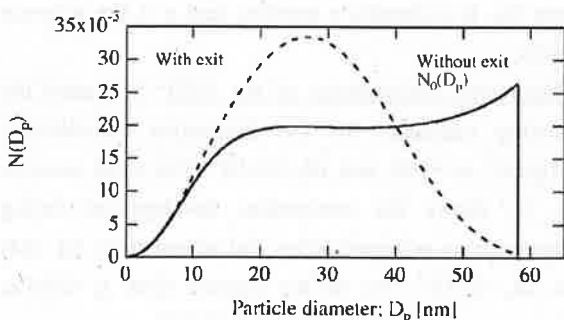


Fig. 11 Calculated particle size distribution with and without radical exit for a slow initiator decomposition with $k_d=1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

existence of radical exit makes the distribution narrower, with $\bar{D}_p=27.8 \text{ nm}$ and $CV=39.1\%$. Similar theoretical PSD profiles as Fig. 11 were reported earlier in ref.^[29]

$k_p[M_0]_p=200 \text{ s}^{-1}$, while the other constants (except for the ϕ -value that will be discussed later) are the same as the previous example. The time development of x and F_{ini} for the present case is shown in Fig. 12. The aim of the present example is to examine if small polymer particles with a narrow distribution can be synthesized in microemulsion polymerization. It is obvious that a faster initiation results in a narrower PSD.

The solid curve in Fig. 13 shows the particle size distribution without radical exit. The particle size distribution is very narrow, with $\bar{D}_p=32.0 \text{ nm}$ and $CV=6.7\%$. However, the exit of radicals from the particles results in forming new particles, and the PSD would become broader than this distribution.

The dotted curve shows the calculated PSD when the probability of radical exit is $\phi=1 \times 10^{-6}$, where the average number of radical exit, $\phi r_R=0.123$. The calculated PSD is still narrow, with $\bar{D}_p=30.5 \text{ nm}$ and $CV=15.1\%$.

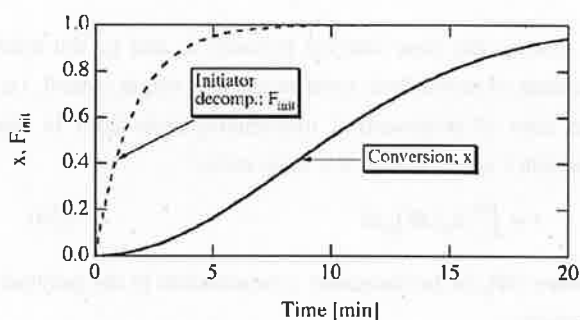


Fig. 12 Conversion (x) and the fraction of initiator radicals generated (F_{ini}) as a function of time, with $k_d=1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

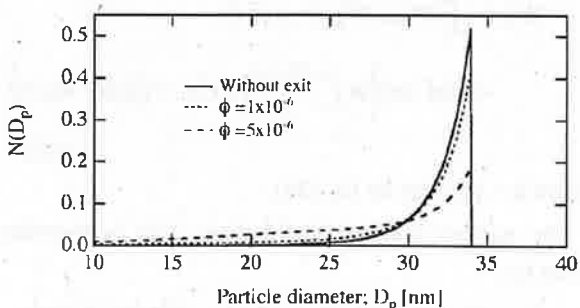


Fig. 13 Calculated particle size distribution with and without radical exit for a fast initiator decomposition with $k_d=1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Obviously, the PSD becomes broader as the ϕ -value increases, and when $\phi = 5 \times 10^{-6}$, the PSD is shown by the dashed line in Fig. 13, with $\bar{D}_p = 26.4 \text{ nm}$ and $CV = 26.2\%$.

From the theoretical point of view, the polymer particles with small \bar{D}_p and CV could be produced if (1) the initiation period is short enough compared with the whole reaction time and (2) the polymerization is stopped before the radical exit, namely, by keeping the ϕ_{rk} value small.

4 Conclusions

A simple computational method for the random degradation of linear polymer chains is proposed. This method works fast enough in a usual PC with high precision and can be applied to any type of initial MWD.

In addition to the polymer degradation reactions, the random degradation theory can be applied to various interesting phenomena seemingly no resemblance to the polymer degradation. The theory was applied to the investigation of the effects of chain transfer reactions in both conventional and living free-radical polymerization. For the monomer transfer reactions, the accumulated MWD can directly be predicted by application of the random degradation theory. For living radical polymers, the present theory can be used to determine the designed number-average chain length $\bar{P}_{n,design}$ that are not broadened significantly by the monomer transfer reactions. The $\bar{P}_{n,design}$ value must be significantly smaller than $1/C_m$, where C_m is the monomer transfer constant.

The random degradation theory can also be used to estimate the PSD formed in microemulsion polymerization. It was found that the polymer particles with small \bar{D}_p and CV could be produced under the reaction condition where (1) the initiation period is short enough compared with the polymerization time, and at the same time, (2) the polymerization must be stopped before the particle size grows too large. The number of polymerized monomeric units in a particle must be significantly smaller than $1/\phi_e$, where ϕ_e is the probability of radical exit.

Acknowledgment

HT acknowledges his students who have cooperated on this study - Mr. H. Tanaka and Mr. F. Yanase.

References

- [1] O. Saito: J. Phys. Soc. Jpn., 13, 198 (1958).
- [2] A. Charlesby: Atomic Radiation of Polymers, Pergamon Press, Oxford, UK (1960).
- [3] T. Kimura: J. Phys. Soc. Jpn., 17, 1884 (1962).
- [4] M. Inokuti and M. Dole: J. Chem. Phys., 38, 3006 (1963).
- [5] O. Saito: The Radiation Chemistry of Macromolecules, vol.1, M. Dole, Ed., Academic Press, New York, Chapter 11 (1972).
- [6] C. David and D. Baeyens-Volant: Eur. Polym. J., 14, 29 (1978).
- [7] M. Demjanenko and K. Dusek: Macromolecules, 13, 571 (1980).
- [8] A.M. Kotliar and S. Podgor, S: J. Polym. Sci., 55, 423 (1961).
- [9] J. Malec: J. Polym. Sci., Part C, 33, 223 (1971).
- [10] J.B. McDermott, C. Libanati, C. LaMarca and M.T. Klein, : Ind. Eng. Chem. Res., 29, 22 (1990).
- [11] M. Guaita, O. Chiantore and M.P. Luda: Macromolecules, 23, 2087 (1990).
- [12] H. Tobita: Polymer, 36, 2585 (1995).
- [13] H. Tobita: Macromolecules, 29, 3000 (1996).
- [14] H. Tobita: Macromolecules, 29, 3010 (1996).
- [15] H. Tobita: Macromol. Theory Simul., 5, 1167 (1996).
- [16] C. Tzoganakis: Peroxide Degradation of Polypropylene during Reaction Extrusion, Ph.D. Thesis, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada (1988).
- [17] C. Tzoganakis and J. Vlachopoulos and A.E. Hamielec: Polym. Eng. Sci., 28, 170 (1988).
- [18] A.E. Hamielec and H. Tobita: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, vol. A21, VCH, Weinheim, Germany, p.305 (1992).
- [19] K. Matyjaszewski: Curr. Opin. Sol. St. Mater. Sci., 1, 769 (1996).
- [20] H. Tobita: Macromol. Theory Simul., 15, 12 (2006).
- [21] H. Tobita: Macromol. Theory Simul., 15, 23 (2006).
- [22] A.P. Full, E.W. Kaler, J. Arellano and J.E. Puig: Macromolecules, 29, 2764 (1996).
- [23] J.D. Morgan, K.M. Lusvardi and E.W. Kaler, E.W.: Macromolecules, 30, 1897 (1997).
- [24] M. Nomura and K. Suzuki: Macromol. Chem. Phys., 198, 3025 (1997).
- [25] K. Suzuki, M. Nomura and M. Harada: Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp., 153, 23 (1999).

[26] K. Suzuki and M. Nomura: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **36**, 1242 (2003).
[27] J. Ugelstad, P.C. Mork, P. Dahl and P. Rangness: *J. Polym. Sci.*, **27**, 49 (1967).
[28] M. Harada, M. Nomura, W. Eguchi and S. Nagata, : *J. Chem. Eng. Jpn.*, **4**, 54 (1971).
[29] J.D. Morgan and E.W. Kaler: *Macromolecules*, **31**, 3197 (1998).

4次元初期値空間での Hodgkin-Huxley neuron のリミットサイクル振動の basin の形

諸屋 博* 田中 ダン* 平田 隆幸*

Shape of the basin of limit cycle of Hodgkin-Huxley model in 4 dimensional initial value space

Hiroshi MOROYA*, Dan TANAKA*, Takayuki HIRATA*

(Received, January 30, 2007)

The structure of the basin of limit cycle of Hodgkin-Huxley model was investigated by carrying out the numerical simulations. As the Hodgkin-Huxley model has four variables, the basin of limit cycle of Hodgkin-Huxley model has 4-D structure. The external input current to the Hodgkin-Huxley neuron was important factor for repeated firing, i.e., the limit cycle solution. When the external input current is low, there is no stable limit cycle solution. In general, the area of basin of limit cycle increases with external input current. We determined the detailed shape of the basin in 4 dimensional space by changing the external input to Hodgkin-Huxley neuron.

Key Words : Hodgkin-Huxley neuron, Initial value, Basin, Phase diagram, Limit cycle

1. はじめに

知能とは、何であろうか？知能の解明は、人類の夢のひとつあり、さまざまなアプローチがなされている。例えば、人工知能やコンピュータサイエンスからのアプローチである。また、商業ベースとしての興味もたれているチェスのアルゴリズム、将棋のアルゴリズムなども知能のひとつと考えられる^{[1],[2]}。さらには、ヒューマノイド型のロボットの研究には、人間に似た知能が必要であると考えられる。

このような人工的な知能に対して、自然界に存在する知能をまねることによって、知能を解明しようとするアプローチが存在する。自然界に存在する知能の典型例は、人間の脳である。脳の機能を解明するために、行動心理学、解剖学、神経生理学などのアプローチがなされている^[3]。さらに人間の脳に限らず、さまざまな動物が知的な行動をすることに注目し、知能の解明に迫ろうという研究がある。

さて、さまざまな脳を考えてみよう。人間の脳は、 10^{10} 個あまりのニューロンがシナプスを介して相互に結合し、相互作用しながら高次の情報処理をおこなっている。また、人間の脳(巨大脳)に比べて、小規模なニューラルネットワークである昆虫などの微

小脳が驚くべき複雑な作業をこなす^[4]。昆虫の微小脳が、 10^6 個程度のニューロンから構成されていることを考えると非常によく設計された「知能」システムと言える。

近年のコンピュータの発展は、大規模なニューラルネットワークのシミュレーションを可能にした^[5]。大規模なニューラルネットワークの研究は、脳科学の基礎的な研究としてだけでなく、工学的な応用が考えられる^[6]。ニューロンのモデルには、FitzHugh-Nagumo モデル、Morris-Lecar モデルなどがある^{[7],[8]}。本研究で用いる Hodgkin-Huxley モデルは、ヤリイカの軸索を用いた実験により導出された、標準的なニューロンのモデルである^[9]。

Hodgkin-Huxley ニューロンは、6つの関係式をもった4変数の非線形方程式である。解の挙動はパラメーター（例えば、微小電流による外部入力）に依存するのみならず、初期値にも依存する。

この Hodgkin-Huxley モデルに関する研究は数多くなされている。例えば、外部から入る刺激電流 I_{ext} に周期関数やランダムノイズなどの様々な形で入力を加え、それに対する挙動を調べるなどである^{[10]-[12]}。他にも、解析的な方面から解の挙動を調べるために、分岐解析ソフトである AUTO を用いて解構造の探索などを行ったものなどがある^{[13]-[15]}。しかし、初期値によるリミットサイクル振動解の basin の形を詳しく調べたものはない。

* 知能システム工学科

* Dept. of Human and Artificial Intelligent Systems

そこで、本研究では外部入力を変えながら、周期的連続発火になる初期値の分布を求め、リミットサイクル振動解の basin の形を詳細に調べたので報告する。

2. Hodgkin-Huxley モデル

Hodgkin と Huxley は、1952 年に、ヤリイカの巨大軸索の活動電位の計測実験によってえた知見を元に神経細胞(neuron)の発火現象を記述する数理モデル (Hodgkin-Huxley モデル) の提案を行った。Hodgkin-Huxley モデルは、6 つの関係式を含む 4 変数の非線形常微分方程式である^[9]。膜電位を表す変数を V 、 Na^- コンダクタンスの増加、 Na^+ コンダクタンスの減少、 K^+ コンダクタンスの増加の各プロセスに対応するイオンチャネルのゲートの状態を表す変数をそれぞれ m , h , n とすると (m , h , n は 0 と 1 の間の値をとる)、Hodgkin-Huxley モデルは、

$$\begin{aligned} C_m \frac{dV}{dt} &= -g_K n^4 (V - V_K) - g_{\text{Na}} m^3 h (V - V_{\text{Na}}) \\ &\quad - g_l (v - v_l) + I_{\text{ext}} \\ \frac{dm}{dt} &= \alpha_m (1 - m) - \beta_m m \\ \frac{dh}{dt} &= \alpha_h (1 - h) - \beta_h h \\ \frac{dn}{dt} &= \alpha_n (1 - n) - \beta_n n \end{aligned} \quad (1)$$

で与えられる。

ここで、 n^4 は開いている K^+ チャネルの割合、 $m^3 h$ は開いている Na^+ チャネルの割合を意味する。 I_{ext} は、外部からニューロンに流入する電流とする。また、膜の電気容量を $C_m = 1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 、 K^+ の平衡電位を $V_K = -12.0 \text{mV}$ 、 Na^+ の平衡電位を $V_{\text{Na}} = 115.0 \text{mV}$ 、リーク電流に対する膜のコンダクタンスを $g_l = 0.3 \text{mS}/\text{cm}^2$ 、その平衡電位を $V_l = 10.6 \text{mV}$ 、 K^+ チャネルが完全に開いたときのコンダクタンスを $g_K = 36.0 \text{mS}/\text{cm}^2$ 、 Na^+ チャネルが完全に開いたときのコンダクタンスを $g_{\text{Na}} = 120 \text{mS}/\text{cm}^2$ とする。なお、これらの定数の値は、Hodgkin と Huxley の論文で用いられているものである。それぞれのゲートの開閉レートに関係する α , β は V の関数であり、

$$\begin{aligned} \alpha_m &= 0.1 \frac{25 - V}{\exp\left(\frac{25 - V}{10}\right) - 1} \\ \beta_m &= 4 \exp\left(\frac{-V}{18}\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_h &= 0.07 \exp\left(\frac{-V}{20}\right) \\ \beta_h &= \frac{1}{\exp\left(\frac{30 - V}{10}\right) + 1} \\ \alpha_n &= 0.01 \frac{10 - V}{\exp\left(\frac{10 - V}{10}\right) - 1} \\ \beta_n &= 0.125 \exp\left(\frac{-V}{80}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

である^{[10][12]}。なお、 V の単位は、 mV である。

Hodgkin-Huxley モデルは、静止膜電位のとりかたによって、見かけ上異なる形で表記されることがあるが、静止膜電位を 0mV としている Hodgkin と Huxley の論文にしたがって、式(2)を用いる。

Hodgkin-Huxley モデルは、ヤリイカのニューロンの活動電位の挙動を再現できるように導出されている。Hodgkin-Huxley モデルの挙動を実際のニューロンの挙動と関連させて簡単にまとめておく。

1) 外部から入る刺激電流 I_{ext} により膜電位がある閾値を越えると、ニューロンは発火 (活動電位が生じる) する。2) ニューロンの発火後は、大きな刺激電流が入っても、活動電位が生じない不応期 (絶対不応期 (absolute refractory period) および相対不応期 (relative refractory period)) が存在する。

3. 数値計算シミュレーション

3.1 Runge-Kutta 法を用いたシミュレーション

数値シミュレーションは、4 次の Runge-Kutta 法を用いて行った。ここでは、標準的な数値計算ライブラリーである Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing (数値計算の処方: 科学計算の技芸)を用いた^[16]。Numerical Recipes のライブラリーの関数は、float 型で定義されているので、ここでの計算も float 型を用いて行った。Runge-Kutta 法を用いたシミュレーションにおいては、固定刻み幅法と適応刻み幅制御法があるが、計算ステップ $\Delta t = 0.01$ とした固定刻み幅法を用いた^[15]。

3.2 Hodgkin-Huxley ニューロンの典型的挙動

Hodgkin-Huxley ニューロンの典型的な挙動を見ておく。Hodgkin-Huxley ニューロンは、外部から入力される電流 I_{ext} によって発火 (fire) 挙動が変化する。およそ $I_{\text{ext}} = 10 \mu\text{A}$ 以上で、ニューロンは連続発火を起こす。一方、 $I_{\text{ext}} = 10 \mu\text{A}$ 以下では、Hodgkin-Huxley ニューロンは連続発火しない。2 つの典型的

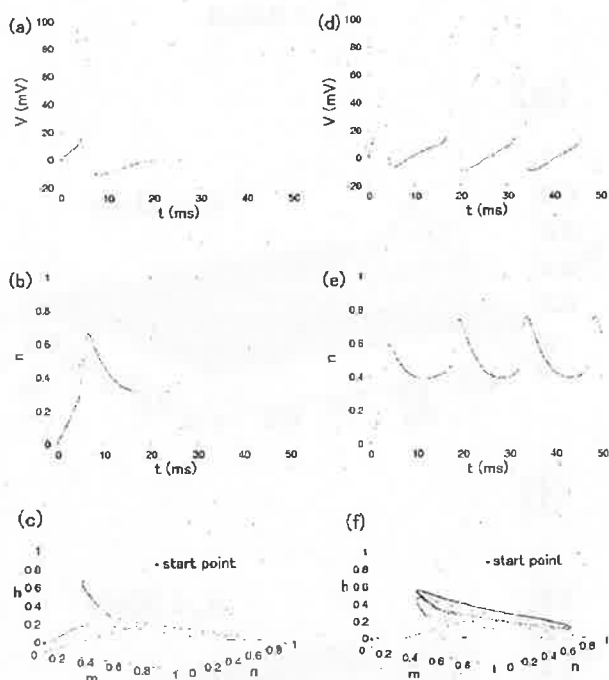


図1 Hodgkin-Huxley ニューロンの 2 つの典型的な挙動. (a)~(c)は $I_{ext} = 0\mu\text{A}$ で, 固定点($V = 0.001$, $m = 0.052$, $n = 0.317$, $h = 0.596$)に収束する様子, (d)~(f)は $I_{ext} = 10.0\mu\text{A}$ で, 連続発火により周期振動する様子. (a), (d)は V の時系列. (b), (e)は n の時系列. (c), (f)は m, n, h の位相空間での解軌道である. 初期値は $(V_0, m_0, n_0, h_0) = (0, 0, 0, 0)$ を用いた.

な挙動を図1に示す.

$I_{ext} = 10\mu\text{A}$ では, 初期値によって, 一度発火した後0付近に収束する場合と, 連続発火を起し膜電位 V が周期振動をする場合がある. これは, 安定な固定点アトラクターと周期アトラクターが共存しているためである. 多数の Hodgkin-Huxley ニューロンを結合させたニューラルネットワークの挙動を調べるためにも, 独立した Hodgkin-Huxley ニューロンが初期値によってどのような挙動をするかを調べておくことは, 重要である. そこで, 初期値によって Hodgkin-Huxley モデルの挙動がどのように変化するのかを理解するために V, m, n, h の4次元の初期値空間で連続発火, つまりリミットサイクル振動解になる basin 領域を求めた.

3.3 リミットサイクル振動解の basin

外部入力 I_{ext} の値を $7\mu\text{A}$ から $10\mu\text{A}$ に変化させながら, V, m, n, h の初期値 V_0, m_0, n_0, h_0 を変化させて連続発火する領域を調べた. m, n, h は, 開閉率を表す変数であるので, 0 から 1.0 の値をとる. また,

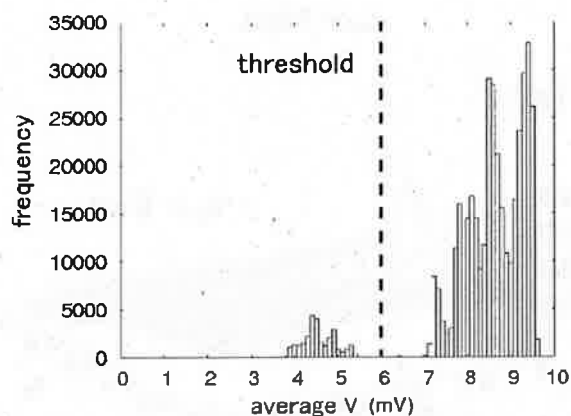


図2 200ms 間の v の平均値の分布. $7.0 \leq I_{ext} \leq 10.0\mu\text{A}$, $0 \leq m_0, n_0, h_0 \leq 1.0$, $-10 \leq V_0 \leq 100\text{mV}$, $\Delta I_{ext} = 1.0\mu\text{A}$, $\Delta m_0 = \Delta n_0 = \Delta h_0 = 0.05$, $\Delta V_0 = 10\text{mV}$, 合計 444528 パターンの分布である.

膜電位 V は, 基準電位を 0mV とした Hodgkin-Huxley ニューロンを用いたので, V は -10mV から 100mV をとる. それゆえ, 各初期値の範囲を $-10 \leq V_0 \leq 100\text{mV}$, $0.0 \leq m_0, n_0, h_0 \leq 1.0$ として, $\Delta m_0 = \Delta n_0 = \Delta h_0 = 0.05$, $\Delta V_0 = 10\text{mV}$ の刻みで, 挙動を系統的に調べ, リミットサイクル振動解の basin 領域を詳細に調べた.

連続発火しているかどうかを自動判別することにした. 初期値の探索範囲は $m_0(21) \times n_0(21) \times h_0(21) \times V_0(12) \times I_{ext}(4) = 444528$ パターンの初期値の組み合わせになる. これら全ての組み合わせに対して, 連続発火であるかどうかを個々に判断することは, 膨大な時間を必要としてしまう. 各初期値についてのシミュレーションを 200ms 行い, その間の膜電位 V の平均値をによって連続発火しているかどうかの判断を行う.

444528 パターンの各初期値の組について 200ms 間の V の平均の頻度分布を示す. 図2は2つの山の分布に完全に分かれている. 一回のみの発火のときの V の平均値は, 3.5mV から 5.5mV の範囲に分布にあるのに対し, 連続発火しているときは, V の平均値が 7mV から 10mV の範囲に分布する. このことから, V の平均値が 6mV 以上の場合を連続発火と判別する基準値として用いることができることが分かる. これより, basin 領域の境界面を求めた.

4次元の境界面を図3, 図4に示す. 4次元の境界面を3次元のグラフとして示すことは不可能なので, 図3, 図4では, $V_0 = 0, 30, 60, 90(\text{mV})$ のときの (m_0, n_0, h_0) 空間の境界面を縦に並べることによって示してある. さらに, 外部入力 I_{ext} を $7\mu\text{A}$, $8\mu\text{A}$, $9\mu\text{A}$, $10\mu\text{A}$ と変えたときに, どのように変化するかを示されている.

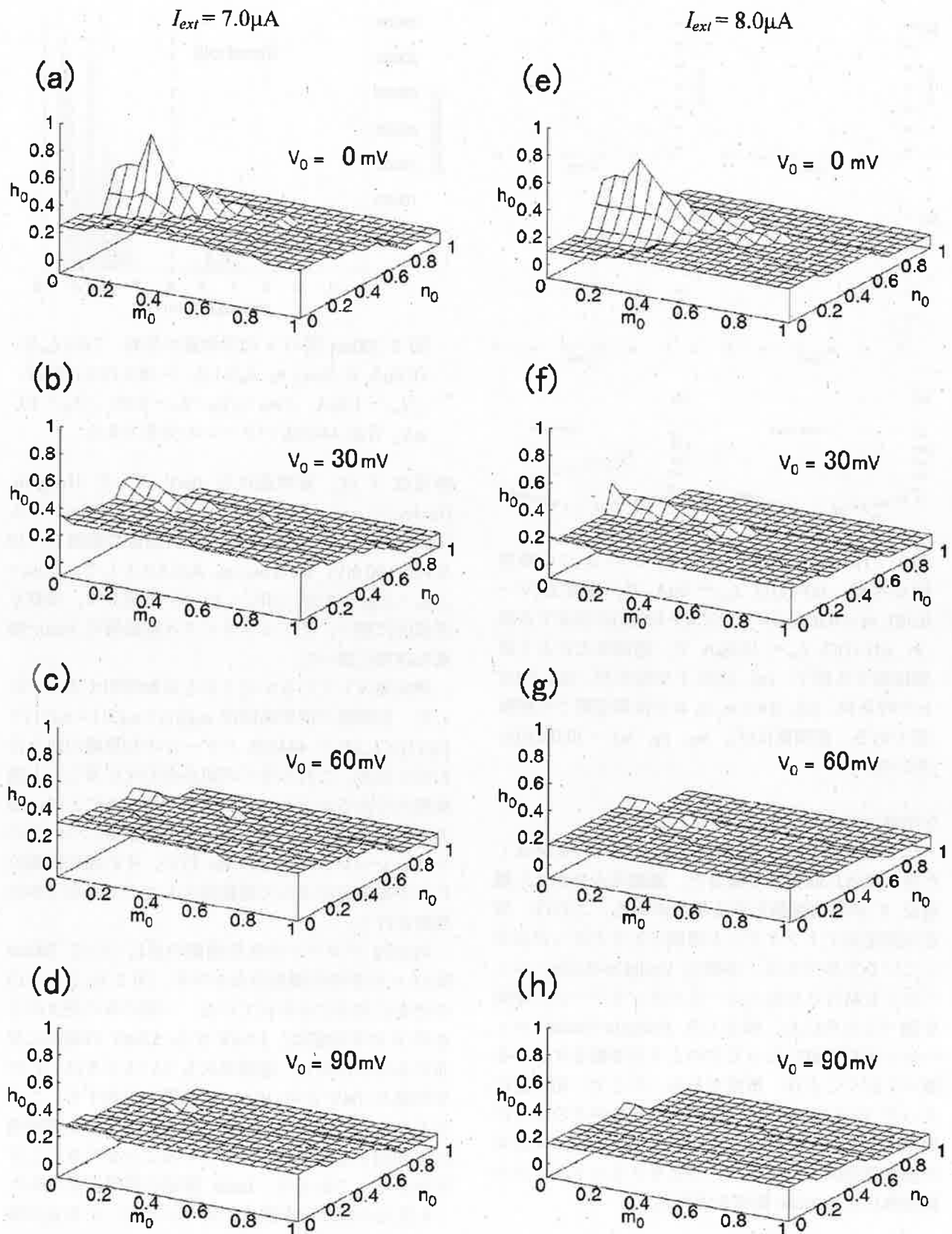


図 3 周期振動と固定点を分ける曲面. 曲面よりも上の初期値では周期解となり, 連続発火を起こす. 曲面より下の初期値では固定点に収束し, 連続発火を起こさない. (a)-(d)は $I_{ext} = 7.0\mu\text{A}$, (e)-(h)は $I_{ext} = 8.0\mu\text{A}$, (a), (e)は $V_0 = 0\text{mV}$, (b), (f)は $V_0 = 30\text{mV}$, (c), (g)は $V_0 = 60\text{mV}$, (d), (h)は $V_0 = 90\text{mV}$ である.

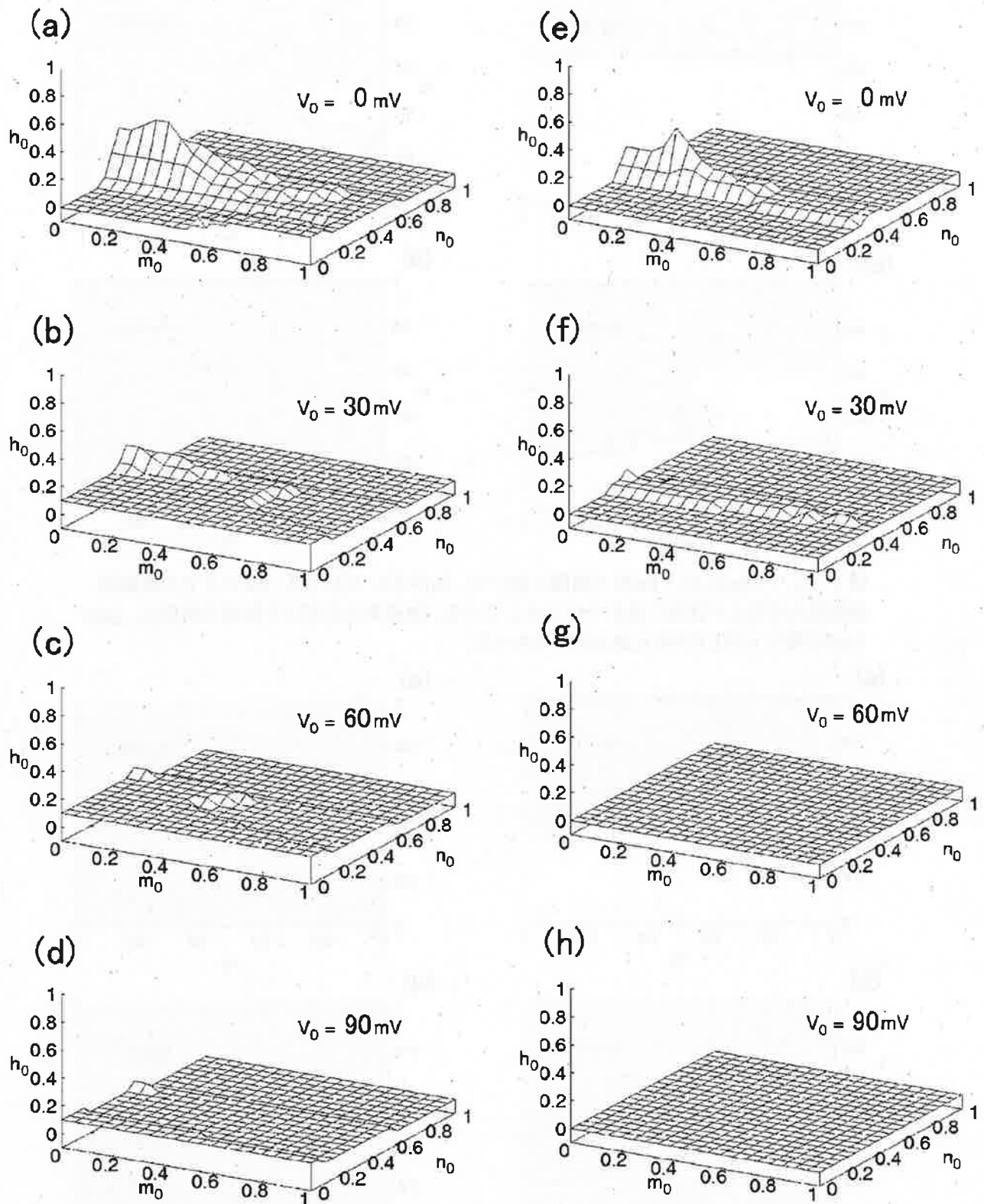
$I_{ext} = 9.0 \mu\text{A}$ $I_{ext} = 10.0 \mu\text{A}$ 

図 4 周期振動と固定点を分ける曲面. 曲面よりも上の初期値では周期解となり, 連続発火を起こす. 曲面より下の初期値では固定点に収束し, 連続発火を起こさない. (a)-(d)は $I_{ext} = 9.0 \mu\text{A}$, (e)-(h)は $I_{ext} = 10.0 \mu\text{A}$, (a), (e)は $V_0 = 0\text{mV}$, (b), (f)は $V_0 = 30\text{mV}$, (c), (g)は $V_0 = 60\text{mV}$, (d), (h)は $V_0 = 90\text{mV}$ である.

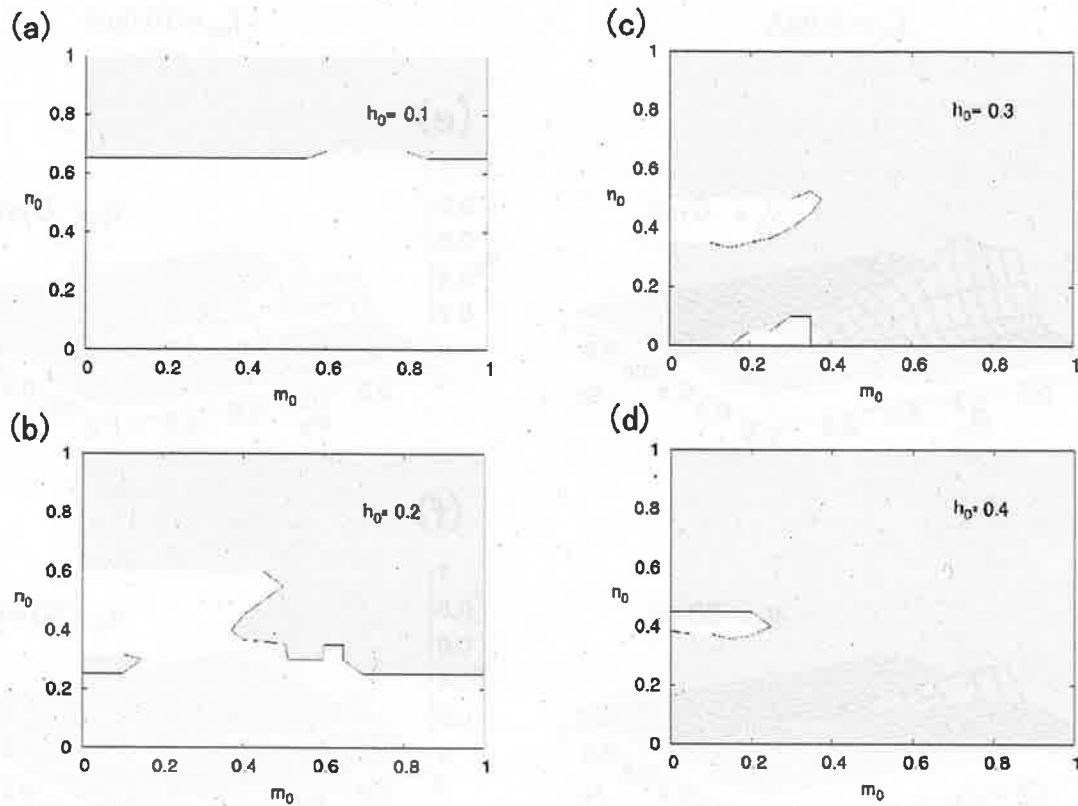


図5 $I_{ext} = 7.0\mu\text{A}$, $V_0 = 0\text{mV}$ の曲面において, h_0 が 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 のときの断面図. 連続発火を起こす部分に色をつけて示している. 連続発火を起こす領域の割合は, (a) から(d)の順に 0.333, 0.546, 0.88, 0.971 であった.

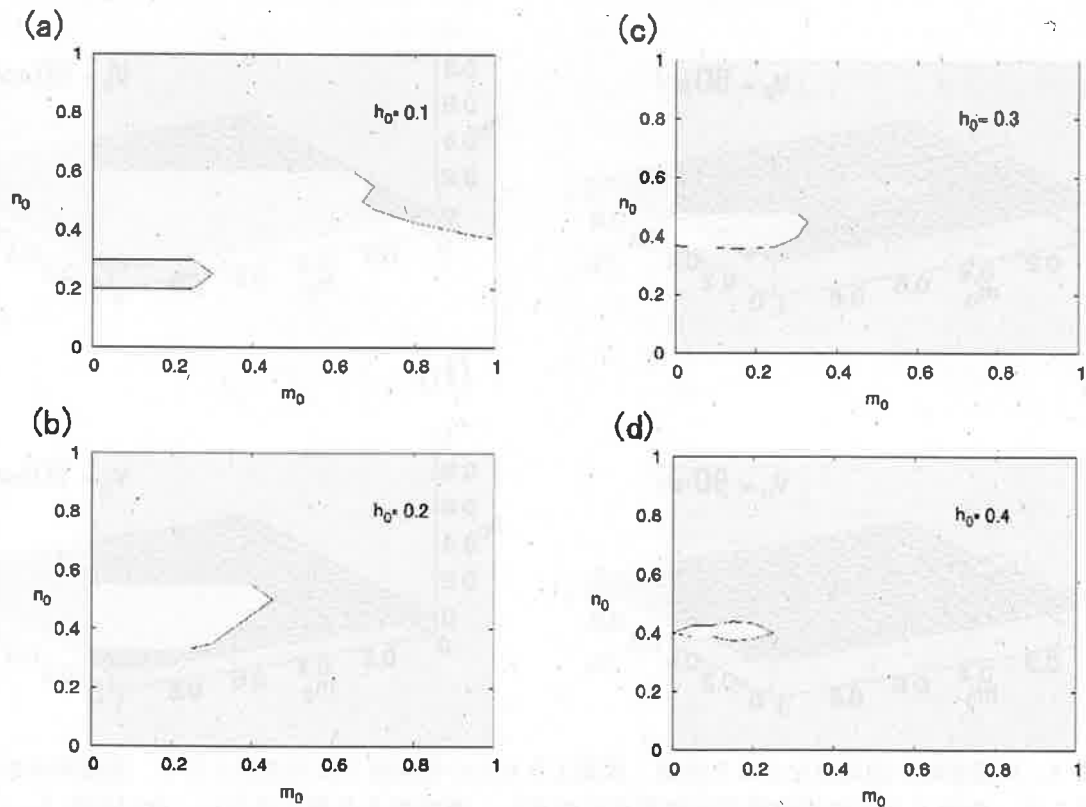


図6 $I_{ext} = 8.0\mu\text{A}$, $V_0 = 0\text{mV}$ の曲面において, h_0 が 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 のときの断面図. 連続発火を起こす部分に色をつけて示している. 連続発火を起こす領域の割合は, (a) から(d)の順に 0.395, 0.898, 0.97, 0.987 であった.

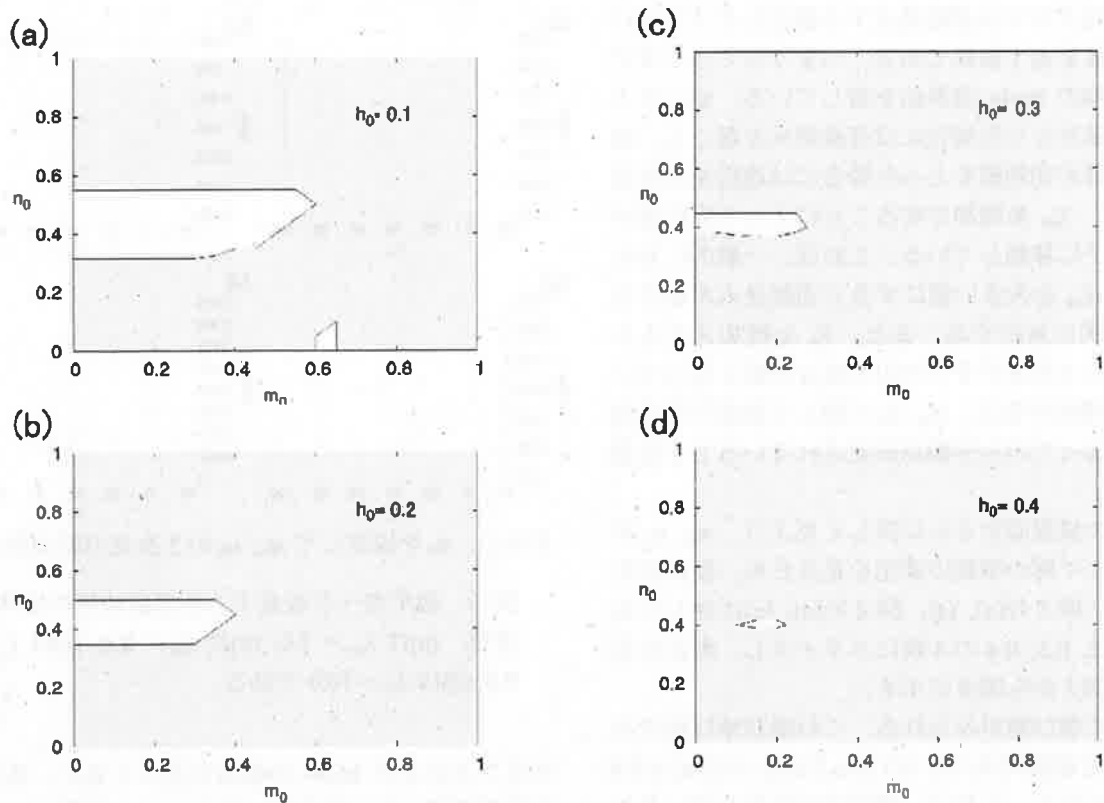


図7 $I_{ext} = 9.0\mu\text{A}$, $V_0 = 0\text{mV}$ の曲面において, h_0 が 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 のときの断面図. 連続発火を起こす部分を色をつけて示している. 連続発火を起こす領域の割合は, (a) から (d) の順に 0.758, 0.923, 0.98, 0.993 であった.

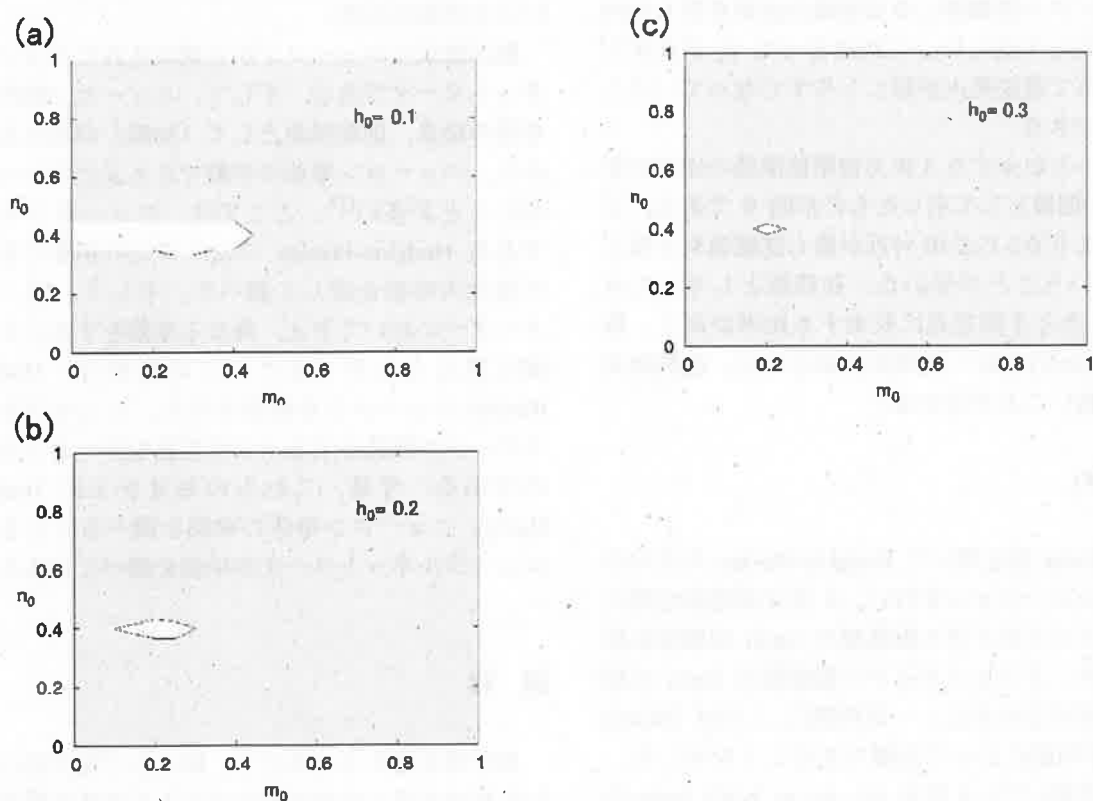


図8 $I_{ext} = 10.0\mu\text{A}$, $V_0 = 0\text{mV}$ の曲面において, h_0 が 0.1, 0.2, 0.3 のときの断面図. 連続発火を起こす部分を色をつけて示している. 連続発火を起こす領域の割合は, (a) から (c) の順に 0.93, 0.985, 0.995 であった.

各3次元グラフは連続発火する場合とそうでない場合の境界を表す曲面である。つまりリミットサイクル振動解の basin 境界面を表している。面より上部の初期値をとった場合には連続発火を起こし、面より下部の初期値をとった場合には連続発火を起こさない。 I_{ext} を増加させることによって変化面が全体的に下に移動している。これは、一般的に知られている I_{ext} を大きい値にすると連続発火が起きるという事実に対応する。また、 V_0 を増加させることによって3次元グラフの山の高さが低くなっている。 V_0 が増加すると、 m_0, n_0 に関して敏感でなくなり、 h_0 によってのみ挙動が決定されていることを意味する。

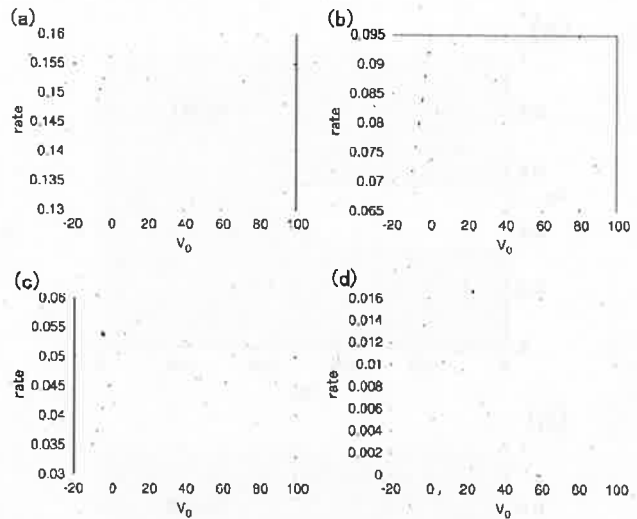
3次元の境界面をさらに詳しく見よう。 m_0, n_0 平面に注目して解の挙動の変化を見るため、断面図を作成した。図3の(a), (e), 図4の(a), (e)に対して $h_0 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ の4枚にスライスし、断面を見たものを図5から図8に示す。

図の中に飛び地がみられる。この飛び地は固定点に収束する範囲であり、 $0.3 \leq n_0 \leq 0.5, 0 \leq m_0 \leq 0.4$ で多くみられる。これは、固定点に収束しているときの m, n がとる値の近辺である。このことから、固定点に近い初期値から始めた場合に連続発火が起こり難いことが分かる。なお、各グラフの図注にリミットサイクル振動解になる領域の比率を記したので、参考にしてほしい。これによって h_0 が大きくなるにつれて連続発火が起こりやすくなっていくことが確認できる。

固定点へと収束する3次元初期値領域の比率の変化を V_0 の関数として示したものが図9である。このグラフより $0 \leq V_0 \leq 10$ 付近が最も連続発火を起こし難いということが分かる。初期値として、 $V_0 = 0\text{mV}$ としたとき固定点に収束する比率が高く、静止膜電位(0mV)と近い初期値の場合には、連続発火が起こり難いことが分かる。

5. まとめ

Runge-Kutta法を用いて Hodgkin-Huxley モデルの数値シミュレーションを行い、4次元初期値空間におけるリミットサイクル振動解の basin の構造を詳細に調べた。リミットサイクル振動解の basin の境界面を決定するために、一定時間(ここでは 200ms)の V の平均値によって分離できることを示した。この手法を用いて、4次元 (V_0, m_0, n_0, h_0)の basin の詳細な形を求めることができた。4次元構造を示すために V_0 を固定した3次元の図を並べて示した。



さらに、 h_0 を固定して m_0, n_0 の2次元の断面図を求

図9 固定点へと収束する初期値領域の比率の変化。(a)は $I_{ext} = 7.0$, (b)は $I_{ext} = 8.0$, (c)は $I_{ext} = 9.0$, (d)は $I_{ext} = 10.0$ である。

めることにより basin の構造を詳しく見た。また、初期値空間におけるリミットサイクル振動解になる領域の比率を V_0 の関数として得た。得られた比率の変化から、4次元初期値空間において、固定点に近い初期値からはじめた場合には連続発火になり難いことが分かった。

脳は膨大なニューロンから構成されたニューラルネットワークである。そして、ニューロン間の相互作用の結果、創発現象として「知能」が現れる。しかし、ニューロン単体の挙動でさえまだ分かっていないことが多い^[17]。ここでは、ニューロンモデルである Hodgkin-Huxley ニューロンの初期値を変えた場合の挙動を詳しく調べた。そして、同一パラメータにおいてさえ、異なる挙動をすることを詳細に見ることができた。この結果は、Hodgkin-Huxley ニューロンを結合させた、ニューラルネットワークの研究をする上で有意義なデータとなるものである。今後、これらの知見を元に Hodgkin-Huxley ニューロン単体の挙動を調べるとともに、ニューラルネットワークの挙動を調べていきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、様々なご協力をいただいた福井大学工学部知能システム工学科非線形科学研究室の皆様には、深く感謝いたします。

参考文献

- [1] D. リービ, M. ニューボーン, 飯田弘之(訳), 吉村信弘(訳), 乾伸雄(訳), 小谷善行(訳): コンピューターチェス, サイエンス社, 1-289 (1994).
- [2] 小谷善行, 柿木義一, 吉川竹四郎, 森田和郎: コンピューター将棋, サイエンス社, 1-133 (1990).
- [3] 宮川博義, 井上雅司: ニューロンの生物物理, 丸善, 1-218 (2003).
- [4] 水波誠: 昆虫-脅威の微小脳, 中公新書, 1-291 (2006).
- [5] 平田隆幸, 黒岩文介, 浅井竜哉: 福井大工報, 52-2, 161 (2004).
- [6] J. J. Hopfield: Reviews of Modern Physics, 71-2, 5431 (1999).
- [7] R. Fitzhugh: Biophys J., 1, 445 (1961).
- [8] C. Morris and H. Lecar: Biophys. J., 35, 193 (1981).
- [9] A.L.Hodgkin and A.F.Huxley: J.Physiol., 117, 500 (1952).
- [10] H. Sakaguchi: Phys. Rev. E, 73-3, 031907 (2006).
- [11] K. Pakdaman and S. Tariabe: Phys. Rev. E, 64-5, 050902 (2005).
- [12] 林初男: 脳とカオス, 裳華房, 1-403 (2001).
- [13] M. E. Rush and J. Rinzel: Bulletin of Math. Biology, 57-6, 899 (1995).
- [14] P. R. Shorten and D. J. N. Wall: Bulletin of Math. Biology, 62, 695 (2000).
- [15] H. Fukai, S. Doi, T. Nomura and S.Sato: Biol. Cybern, 82, 215 (2000).
- [16] W.H.Press, B.P.Flannery, S.A.Teukolsky and W.T.Vetterling: Numerical Recipes in C, Cambridge University Press (1988).
- [17] C. Koch: Nature, 385, 207 (1997).

サッカーシミュレーションにおける声を使った協調行動

吉田 真士* 白井 治彦** 高橋 勇**
黒岩 丈介** 小高 知宏** 小倉 久和**

Cooperation action using the voice in a soccer simulation

Masashi YOSHIDA*, Haruhiko SHIRAI**, Isamu TAKAHASHI**,
Jousuke KUROIWA**, Tomohiro ODAKA** and Hisakazu OGURA**

(Received January 31, 2007)

In multi-agent system, a cooperation behavior is an attractive problem. In the RoboCupSoccer simulation the environment of each agent dynamically and suddenly changes. Therefore, it is difficult to solve the problem in the cooperation behavior. The difficulty would come from the uncertainty of the position of the other agents and the ball, getting from the visual information, and from the fact that each agent can not know the internal state of the other agents. In order to overcome the problem, we focus on the voice as one of communication tools and design the strategy of the soccer team.

Key Words: RoboCup, Soccer Simulation, Multi Agent, University of Fukui

1. はじめに

ロボカップは、複数のサッカーエージェントを用いて対戦させるものでマルチエージェントの問題を提供するためやロボット工学と人工知能の融合・発展のために発足された。今では全国で多数の研究者や学生が参加する一大国際プロジェクトになっている。1) ロボカップは5つの部門から構成されており、小型ロボットリーグ・中型ロボットリーグ・四足ロボットリーグ・シミュレーションリーグ・ヒューマノイドリーグに分けられる。ロボカップ最終目標を「2050年までに、自律型ヒューマノイドロボットで人間している。そして、その過程で生み出された技術が社のサッカーの世界チャンピオンに勝つこと」と設定会基盤や次世代産業など、いろいろな分野に波及

及することを目指している。今回の研究ではロボカップの部門の一つであるシミュレーションリーグを用いている。シミュレーションリーグとは、それぞれの参加者がサッカーエージェントの選手のプログラムを用意しそれを架空2次元フィールド上で対戦させるリーグであり、その制御はサッカーサーバが行っている。サッカーサーバとクライアント間の通信方法はUDP/IPを用いて通信している。サッカーサーバはクライアントから送られてくる命令コマンドを実行させ、それを2次元フィールドに反映させてクライアント側にデータを送るというシステムで構成されている。また現実の世界のサッカーに近づけるためにサッカーサーバではノイズや量子化誤差を取り入れている。ノイズは物体が必ずしも思ったところに飛んでくれないということを実現している。量子化誤差は視覚情報に用いられ、遠くにいるプレイヤーやボールに関する情報が不確実なものとなってきている。また、エージェントの視野範囲は限られている。そのような状況のなかでマルチエージェントの環境を生かしエージェント同士が協力しあい、より大きな効果を得ることはロボカップにとってとても重要な課題の一つである。そこで本研究では、重要

* 工学研究科知能システム工学専攻

** 知能システム工学科

* Human and Artificial Intelligence Systems Course,
Graduate School of Engineering

** Dept. of Human and Artificial Intelligence Systems

な課題だと考えられる効果的な協調行動の方法として、聴覚情報を利用する手法を提案している。ロボカップでは実際のサッカーと同じように、他のエージェントにメッセージを伝えることができる。このメッセージをうまく使うことにより視覚情報だけでは難しかった有効な協調行動を行い、マルチエージェントの環境を有効に生かした行動選択を行うエージェントの作成を行った。

2. 声を使った協調行動

2.1 ロボカップにおける協調行動

ロボカップはマルチエージェントの環境を提供するために考案されたものであるが、協調行動をどのように実現させるかがロボカップにおいて重要なテーマの一つとなっている。ロボカップにおける協調行動とは、複数のエージェントが協力して優位な状況を作りだしたり自チームの危機を回避したりすることである。例えば単純な協調行動の例としてパスが上げられる。パスをすることによってボールを持っているエージェントに迫っている危機を回避することができたり、少ない時間とスタミナの消費で前線にボールを運べたりすることができる。

またロボカップの協調行動の実現手法は今までさまざまな手法^{2),3),4)}が提案されてきた。今回この論文で提案する手法はエージェントによる声を使った手法である。エージェントの聴覚の情報を使うことによって、有効な協調行動を行う手法を実現している。

2.2 協調行動における声の役割

ロボカップにて声はさまざまな使い方ができると考えられる。まず一つに、声を協調行動の発動のトリガーとして使うという使用方法がある。サッカーの作戦において、複数のエージェントがあらかじめ決められた動きをしてパターン攻撃や連携準備をする作戦が一般的にある。この協調行動の作戦に参加する各エージェントらが、パターン行動を発動するタイミングを他のエージェントとうまく合わせなければならない。もし一人のエージェントでもパターン行動を発動しなかったり大幅に遅れてしまったりすると作戦は失敗となってしまう。エージェントには視野範囲が限られているので、視覚情報だけでは作戦発動のタイミングを逃してしまうことも十分に考えられる。そこで、そのパターン行動を発動する合図を音声によって行うことによってより確実に作戦を成功させることができる。

次に考えられる使用方法として、他のエージェントに自分もっている情報を送っての協調行動が挙げられる。ロボカップのサッカーシミュレーションリーグでは

実現モデルに近づけるために各エージェントは視野角度が制限されている。そのためエージェントは自分より後方の情報は取得することができない。そこでそれぞれのエージェントが持っている情報を他のエージェントが声を使って教えることによって広い範囲の情報をエージェントは取得できるようになる。多くの情報を取得できるようになるので、より適切な判断をできると考えられる。

3つ目に考えられる使用方法として、他のエージェントに自分の意思を伝えることができることである。視覚情報だけだと自分の考えていることを他のエージェントに伝えることが困難であるが声を使うことによって自分の意思をほぼ確実に伝えることができる。自分が何をしたいか、他のエージェントに何をしてほしいかを伝えることによって複数のエージェントによる協調的な行動を行うことができる。

上記に挙げたとおり協調行動における声の役割はいろいろあることが分かる。視覚情報だけでは精度の高い協調行動や作戦はなかなか難しいが上記のような聴覚情報も取り入れることによって協調行動がより容易に、完成度がより高くなるのではないかと考えられる。今回の論文では先ほど述べた一つ目と二つ目の声の使用法を用いて協調行動を実装している。一つ目に述べた声を利用して協調行動の具体的な実現例としてオフサイドトラップを取り上げ実装し、二つ目は効果的なパス相手を選択する方法として声を取り入れ実装している。

2.3 Robocupにおける音声について

サッカーサーバーコマンドの say コマンドを使用することでほかのエージェントにメッセージを送ることができる。say コマンドで送ることができるメッセージは、そのプレイヤーから 50 メートル以内までという制限があるので、遠く離れたエージェント間では声を使わなかった協調行動ができないことになる。また、say コマンドで伝達されるメッセージの長さは 10 バイト以内の文字列という決まりがあり、送る情報量はある程度限られている。また、発声されたメッセージは敵のプレイヤーも聞くことができる。

3. エージェントの設計

3.1 エージェントの設計について

エージェントの行動ルールは優先順位付きルールベース形式によって実装されている。優先順位付きルールベース形式とは、各行動ごとに優先順位と行動が発生するための条件を設けておき、与えられた情報を基に優先度の高いものから行動決定の判定を順に行っていき、条

件と一致したものについて実行するという方法である。

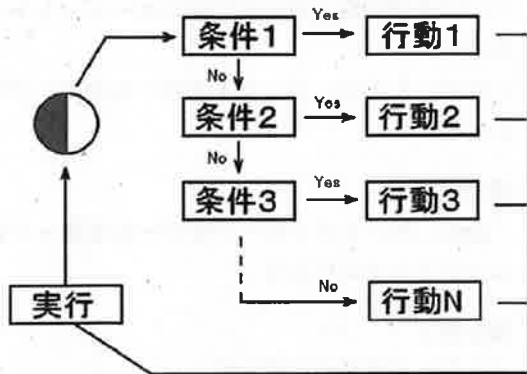


図1: 優先順位付きルールベース形式

3.2 声を使ったオフサイドトラップについて

ディフェンダーは敵に攻められている時に、オフサイドトラップの仕掛ける状況になっているかなっていないのかを調べるように設計してある。オフサイドトラップを仕掛ける状況は、簡単に述べるとディフェンスライン近くにいる敵に縦のロングパスができる状況になったときに設計した。ロングパスに限定した理由はオフサイドトラップに失敗した場合でもリスクが少ないからである。(パスが通るまでの時間が長いためオフサイドがとれなくてもパスカットができるため。)

オフサイドトラップの仕掛ける状況に気づくとディフェンダーは、他のディフェンダーはオフサイドトラップを仕掛ける状況になったことを知らせつつ前方へ移動する。メッセージを受け取ったディフェンダーもディフェンスラインを引き上げる動作をする。

3.2.1 オフサイドトラッププログラムの構成

声を使用したオフサイドトラップは、今回作成したライブラリの「say-offside.act」と「offside.act」をプログラム本体から呼び出すことでディフェンスラインを押し上げる行動を行うことができる。これらのプログラム詳細は下記の通りである。

「say-offside.act」について

- 発動条件
 - 敵が中央付近でボールを持っている。
 - 敵チームのフォワードの最前線にいるエージェントのx座標の値が味方チームのオフサイドラインの付近にある。

- ボールと最前線の敵のパスコースが開いている。

以上の3つの条件をすべて満たしたとき、

- 実行内容
 - ”アガレ”と発声しつつ、敵チームの一番前の選手(フォワードライン)のx座標の値を求めてそのx座標の値に5を引いた位置まで移動する。この移動するときのyの値は変化しないように移動するようにする。
- 終了条件
 - 目標地点までの移動が終わる

「offside.act」について

- 発動条件
 - ”アガレ”というメッセージが聞こえたら発動
- 実行内容
 - 敵チームの一番前の選手(フォワードライン)のx座標の値を求めてそのx座標の値に5を引いた位置まで移動する。この移動するときのyの値は変化しないように移動するようにする。
- 条件終了
 - 目標地点までの移動が終わる

3.3 声を使ったパス相手選択について

次に声を用いてのパス相手の選択方法の方法について説明する。通常、パスは見えている範囲内にいる味方選手の中で最もパスに相応しい選手を選びその選手にパスをする。最もパスに相応しい選手を選ぶ方法は、味方選手の一人一人に評価値を与え最も高い点数の選手がパスに相応しい選手としている。しかしパスの候補は見えている範囲の選手に限られてくるのでマルチエージェントの環境を効率よく生かしているとはいえない。ボールを持っているエージェントが後方を確認することでパスの候補の選手は増えるが、もし後方にパスに相応しい選手がいなかった場合は完全に無駄な行動となりボールを取られるリスクが増すだけなので積極的にやるべきではない。

そこで今回は声を使用してボールを持っていない選手が、ボールを持っている選手に情報をあたえることでより有効なパスの選択を行う。ボールをもっていない選手は、自分が最もパスに相応しい選手だと考えたときはボールを持っている選手に「pass」というメッセージを送る。こうすることによりボールをもっている選手は、

どの方向に最もパスに相応しい選手がいるのかを理解しながらプレーすることができ、試合をより有利な展開で行うことができると考えた。

声を出す側のエージェントは、下記の手順を行いパスの要求を行う行動条件を満たしているのかを判定している。

- (1) 自分の評価値を求める
- (2) 5ステップ以内に見えたボールを持っていないエージェントについて、それぞれの評価値を求める
- (3) 「自分の評価値が最も高い」と「自分の評価値が閾値以上」の2つの行動条件を満たすとパスの要求を行う

また、(3)で明記の条件判定に用いている閾値の値は常に一定にはしていない。これは連続的な時間帯に声が出るのを防ぐためである。ボールを持ったエージェントは敵のプレッシャーがない時、声を聞いた方向を確認してパスを出すようにしてあるがパスを出す前にまた新しい情報が声によるメッセージにて来た場合は再び確認作業に入ってしまう。このように連続した時間帯にメッセージが続くと行動ができず、ボールを持ったエージェントはもたもたしてしまうことが考えられる。このことについての解決するために、情報を提供する側のエージェントは、声を出す際に過去の数ステップ間に誰か声を使っていた場合は、デフォルトの閾値をあげてよほどのことがない限り声を出さないようにした。閾値を上げることによりどうしてもパスがほしい時（パス評価関数の返す値がとてつ大きい時）に限り、連続した時間帯でも声を出すように設計している。

3.3.1 パス相手の評価方法

声を使用したパス相手の選択は、今回作成したライブラリの「say-free.act」、「keep-ball-find-player」、「pass.act」をプログラム本体から呼び出すことで実現している。これらのプログラム詳細は下記の通りである。なお下記のパスの評価関数とは5つの項目を引数としてフィールドから受け取り評価値を返す自作した関数である。「パス受け手のシュート角度」「パス受け手のポジション」「パスを出す側と受ける側の距離」「パスの角度」「パス受け手の周辺の敵の数」の5つの引数により評価値を求めている。

「say-free.act」について

- 発動条件
 - パス評価関数の返す値が閾値以上
 - パス評価関数の返す値が他のエージェントよりも高い
 - 自チームのエージェントがボールをキープしている
- 実行内容
 - 「pass」というメッセージをボールを持っているエージェントに伝える
- 条件終了
 - メッセージを発声し終わる

「keep-ball-find-player」について

- 発動条件
 - 自分がボールを持っている
 - 「pass」というメッセージを受け取る
- 実行内容
 - フィールドの状況次第で実行内容が異なる。(下図)
- 条件終了
 - 各行動が終わる

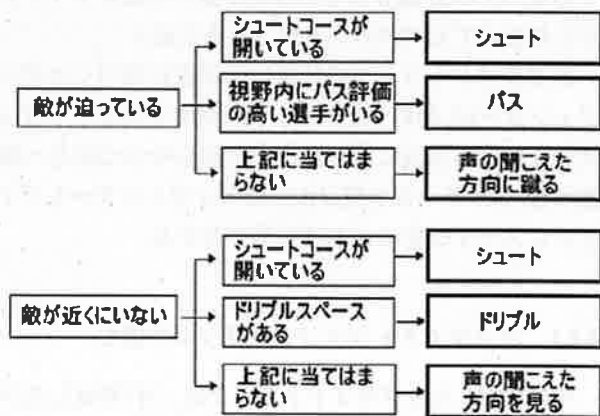


図 2: パスの要求をされた時の行動

「pass.act」について

- 発動条件
 - (ボールを持っている) & (シュートチャンスではない) & (ドリブルスペースがない)
- 実行内容
 - 5ステップ以内に見えた味方エージェントに対しパス評価関数を使い評価値を与え、評価値の一番高かったエージェントに向かってボールを蹴る。

- 条件終了
パスを出し終わる

4. 実験

4.1 オフサイドトラップの実験

ここでは、第3章での述べたオフサイドトラップが正しく機能しているかを確認した。また、声を掛けるエージェントの人数によって効果がどのように違ってくるのか、声を使わないで視覚情報のみでオフサイドトラップを仕掛けた場合とでは成功率がどのくらい違ってくるのかを調べた。

4.1.1 ローカル環境による動作確認の実験

Case1:声をかけるエージェントが一人の場合

Case 1では、オフサイドトラップが本当に機能しているのか、確かめるためにオフサイドトラップがかけやすい環境を作成した。環境は以下のようなローカル環境を用意し実験を50回行った。オフサイドトラップの掛け声を掛けるのは特定の一人のみとしている。

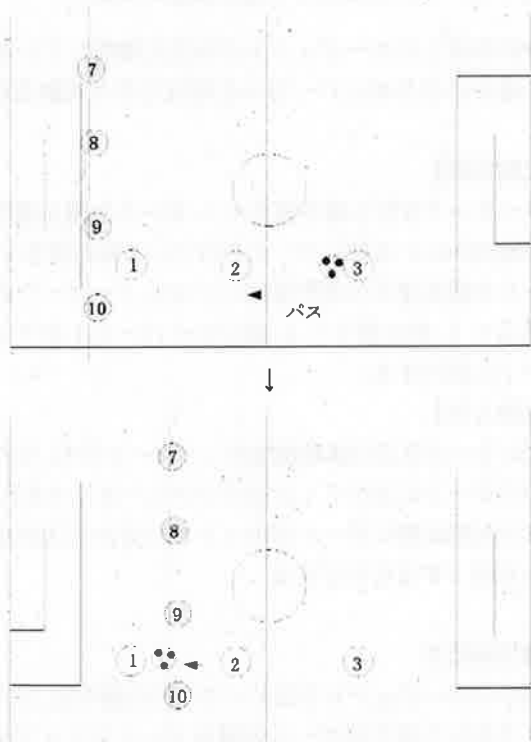


図3: ローカル環境による実験

【味方側】

キーパー一人を配置し、味方ディフェンダーをy座標

の-35の線上に4人並べた。ディフェンダーの行動はオフサイドトラップの行動以外は行動しない(ボールを追ったりはしない)ものとする。オフサイドの声を発声させるのは図3上の背番号9の選手で、それを聞いた選手及び9番の選手は前方へ移動し、オフサイドラインを押し上げ敵の背番号1をオフサイドポジションに陥れる。

【敵側】

敵のエージェントの背番号1, 2, 3を座標(33,-13), (8,-13), (-5,-13)上にならべて3の選手は2にパスをして、パスをもらった2の選手はボールをいったん止めて1番にパスをするように作成している。

■ Case1: 結果

実験1を50回行った結果、オフサイドトラップの成功数は10回となり成功率は20%だった。どのディフェンダーも前へ移動するのが、遅れることなくフラットなラインを保っていたがトラップを仕掛けるタイミングがほんの少し(1~2ステップ)遅れてオフサイドトラップが失敗することが多かった。

Case 2: 声をかける人数が4人の場合

Case 2では、ディフェンダー全員(4人)の内誰でも命令してもよいとした場合での実験してみた。敵側の環境はさきほどのローカル環境と同じである。

予想される結果としてはCase 1の結果よりも、Case 2の声を出すエージェントの数が4人の方がよい結果が得られると考えられる。声を出すエージェントを特定の一人に限定してしまうと、その一人が判断が遅れてしまったりしてしまった場合はオフサイドトラップが失敗してしまうからである。

一方ディフェンダー1人が状況判断して声を出してオフサイドトラップをした場合は4人の内、誰かがオフサイドトラップの命令を出せば良いということになるので条件を満たしていた場合に特定の一人が声を出していた時の場合より、より早く命令を出せる確率が高いことになる。

■ Case2: 結果

実験2を50回行った結果、オフサイドトラップの成功数は27回で成功率は54%となった。特定の一人の選手のみが発声するときより高くなっていた

Case 3: 声を出さない場合でのオフサイドトラップ

Case 3では声を使わないで視覚情報のみでオフサイド

トラップを実装し実験することにする。ディフェンダー4人が条件判定をして条件が真の場合に前方へ移動する。敵の環境は Case 1, 2と同じローカル環境とする。予想される結果としては声を出していた時よりもオフサイドトラップの成功率は低いと思われる。4人全員がオフサイドトラップの条件が真と満たさなければ成功しないからである。それに最終ディフェンスラインも一番遅く判断をしたエージェントのx軸になってしまうことも、オフサイドトラップを成功させるには不都合なこととなってしまふことになる。

■ Case3：結果

Case3を50回行った結果は下記のようになった。失敗する時のパターンとして多かったのはエージェントの内、一人だけが大きく出遅れてディフェンスラインの引き上げが遅くなってしまふ、というパターンだった。その例を図4を用いて説明すると、ディフェンダー(赤)の背番号7番が背番号8,9,10番に比べて大きく出遅れオフサイドトラップに失敗している。

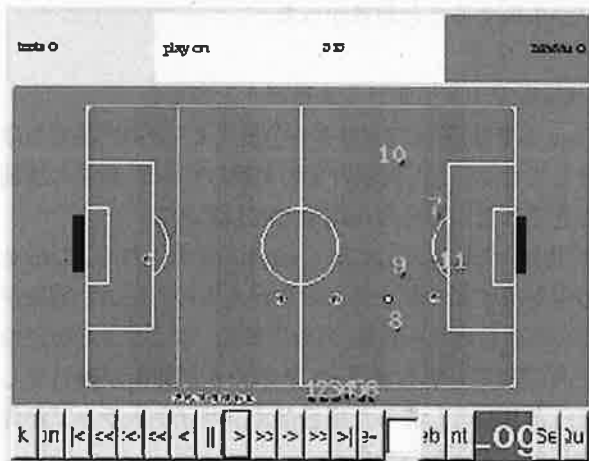


図4: 大きく遅れるディフェンダー

表1: 各 Case での結果

方法	成功回数	成功率
Case1:1人のみ声を使う	10回	20%
Case2:4人が声を使う	27回	54%
Case3:声なし	16回	32%

4.1.2 実践による実験

このセッションでは実践の試合において、今回作成した声を用いたオフサイドトラップが本当に有効なの

かを確かめる実験を行っている。声を使わない場合と声を使う場合の試合で結果を比べることによって声の有効性を確かめた。実験では Case2 と Case3 においてシミュレーションの試合を10試合ずつ行う実験を行った。対戦相手は Case1~3のようなオフサイドトラップを実装していないチームと行った。

実験結果

実験結果は下記のようになった。声を使った時の方がオフサイドトラップの成功数が多く平均失点も少なく抑えることができた。このことにより、声がオフサイドトラップ発動のトリガーとしての役割が有効に作用し、試合結果にも好影響を与えているということが出来る。

表2: 実践による実験での結果

方法	平均成功回数	平均失点
Case2:4人が声を使う	7.1回	1.8失点
Case3:声なし	2.6回	2.4失点

4.2 声を使ったパス選択の実験

4.2.1 ローカル環境による動作確認の実験

今回作成したエージェントが本当に機能しているのかを確かめるためにローカルな環境を作り実験を行った。

【実験環境】

フリーキックを行う味方選手×1, ボールを蹴る選手の視野範囲内にいる敵にマークされている味方選手×1, ボールを蹴る選手の視野範囲にいないノーマークの味方選手×1, 敵の選手×4, 敵のキーパー×1をフィールド上に配置する。

【実験方法】

上記にそった任意の実験環境を5パターン作り、それぞれのパターンにおいて10回ずつフリーキックを行う。1回の実験は敵にボールがカットされるかパスが成功したら終了するものとする。

■実験結果

声ありのエージェントではノーマークの選手は、フリーキックを行う選手がボールを蹴る4~5ステップ前に「pass」というメッセージを送っていることがプレイヤーログを見ることにより確認することができた。この声によるメッセージによってフリーキックを蹴る選手は、ノーマークの選手の存在を知ることができより有効なパスを出すことができた。ただし、稀に声を使った場合でもマークされた選手にパスをすることがあった。これはパ

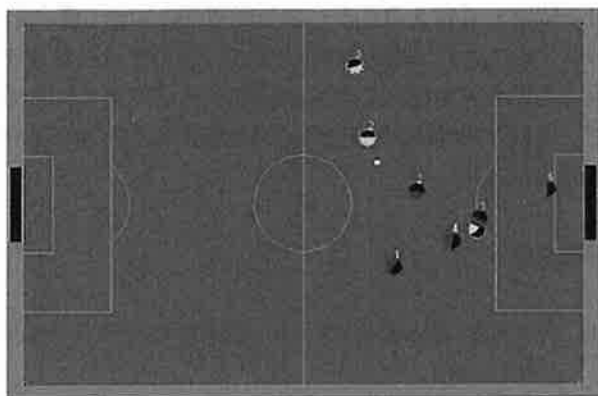


図 5: ローカル環境での実験例

スを要求するタイミングが遅れてしまいボールを蹴る瞬間やボールを蹴った直後にパスの要求を行ってしまったからである。タイミングの遅れは声を出すエージェントの視覚情報の誤差によるものである。

表 3: ローカル環境での動作実験結果

フリーキックでのパス相手		
方法	ノーマークの選手	マークされた選手
声あり	43 回	7 回
声なし	0 回	50 回

4.2.2 実践による閾値を変えた実験

選手がパスを要求する条件は自チームがボールをキープしている時に、(1) パス評価関数の返す評価値が閾値以上である、(2) パス評価関数の返す評価値が他のエージェントよりも高い、この2つの条件を満たした時であるが(1)の判定時の閾値の値の設定によって、1試合におけるパスを要求する回数が大きくことなることが考えられる。ここでの実験は閾値の設定における試合内容(ボール支配率)と1試合における味方選手のパスを要求した回数を調べる実験を行った。

パスの評価関数は自作した関数であり、パスの相応しさによって0~200(評価値が高い方が高得点)の評価値を返している。今回の実験ではデフォルトの閾値を100~200で20刻みの設定したエージェントと声を使わないエージェントそれぞれのボール支配率を調べた。対戦相手には研究室内のチームであるFU-Iと対戦させそれぞれの閾値で10試合ずつ行った。

■実験結果

実験結果は下記の表のようになった。閾値が低いと、さ

ほどパスに相応しくなくてもパスを要求するため1試合におけるパスの要求回数も増えてしまい、また連続な時間帯にパスを要求するケースも多かった。連続した時間帯にパスを要求されるとボールを持った選手がもたもたしてしまいこのことが試合内容に悪影響を及ぼしていた。閾値が200の場合だと値が高すぎるためなかなか声を出す条件にならずパスの要求をほとんどしなかった。ボール支配率も声なしのエージェントとほとんど変わらなかった。

表 4: 閾値を変えた実験での結果(10試合の平均)

閾値	ボール支配率	パスを要求した回数
100	54.2 %	483 回
120	54.9 %	392 回
140	56.8 %	183 回
160	58.9 %	97 回
180	62.2 %	34 回
200	58.6 %	5 回
声なし	58.4 %	0 回

4.3 実験の考察

4.4 オフサイドトラップの考察

ローカル環境における実験においてCase1とCase2の比較(声を出すエージェントの数がディフェンダーが特定の一人の場合とディフェンダー全員の内誰でも命令してもよいことにした場合の比較)を見てみると明らかにディフェンダー全員の内誰でも命令してもよいことにした場合の方が良い結果が確認できた。これはディフェンダー4人の内一番速く判断したエージェントのx軸がほぼオフサイドトラップのラインとなるため、オフサイドトラップの条件を満たしてから、より早くラインを上げることができるためだと考えられる。Case1とCase3を比較すると声なしの方が結果がよかった。この原因として考えられるのが声を聞いてから行動を起こすまでの僅かな時間である。この時間がオフサイドトラップを失敗させる原因となっていると考えられる。Case2とCase3の比較で声ありの方が成功率が高い原因として考えられるのは、Case2がディフェンダーの4人が判断をしているのでオフサイドトラップの条件が発生してから声をだすまでの時間がCase1と比べて短かいからだと考えられる。

図は各Caseの時間の流れを表している。図の説明をみると、Case3は声なしの場合なので条件に一番気づくのが遅い選手の時間帯がライン押し上げの時間帯となっている。yCase1は特定の一人の選手が声を出すオフサイドトラップであるが、その特定の一人の選手がオフサイド

トラップの条件に気づく時間は、図の一番早く気づく時間帯のときもあれば、一番遅く気づく時間帯のこともあるので図ではその平均の時間ということで、赤線と青線の中央の時間帯で声をだすと表わしている。声を出してからライン押し上げまでに若干時間がかかるので、Case1のライン押し上げの時間帯がCase3よりも遅れることとなった。Case2は、4人で条件判定をしているので一番条件に早く気づいた選手が声をだすことができるので、一番早くライン押し上げができています。

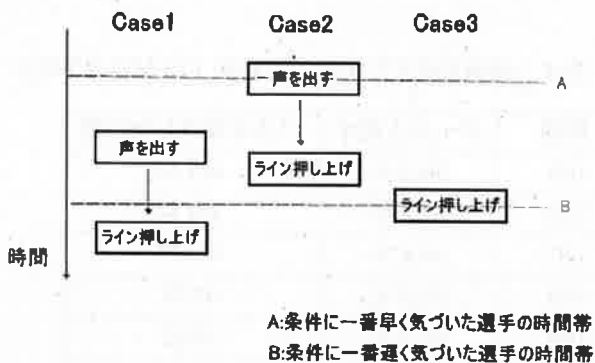


図 6: 各実験の行動時間帯

4.5 声を使ったパス選択の考察

閾値を変えた実験において、閾値を適当な値に設定することによって声の使用が試合に好影響を及ぼすが、閾値が小さすぎると悪影響を及ぼしていることが分かった。たいしたパスチャンスでもない時にパス要求をしてもボールを持っているエージェントにとっては悪影響の時がある。情報を送る側のエージェントは、よい情報を厳選して情報を送るべきであると考えられる。これは実際のサッカーでもいえることである。

5. おわりに

今回ロボカップサッカーのシミュレーションにおいて、声を「協調行動の発動タイミングのトリガーとしての使用」と「自分もっている情報を他のエージェントに伝える」という2通りの活用方法による協調行動を提案をした。声をトリガーとして使用した場合は、複数のエージェントがほぼ同時期に作戦の発動が行われていることが実験の結果とエージェントのログから確認できた。このことにより協調行動の発動のトリガーとして、声によるメッセージが有効に活用できると言える。二つの声によって自分の持っている情報と伝える、という協調行動の手法はエージェントのパスの選択においては情報を送る側のエージェントが、良い情報だ

けに限定して伝えることにより効果的な協調行動を行うことができた。今後の課題として、2.2章で述べたように他にも声を使っての協調行動手法が考えられるので、これらの具体的な方法を行い実装することが今後の課題である。

参考文献

- [1] 大島真樹: RoboCup サッカー選手プログラム, 森北出版 (2005).
- [2] 高橋友一: RoboCup ではじめるエージェントプログラミング, 共立出版 (2001).
- [3] Peter Stone, Manuela Veloso: Layered Learning and Flexible Teamwork in RoboCup Simulation Agents, Lecture Notes in Computer Science (2000).
- [4] Ali Ajdari Rad, Navid Qaragozlou, Maryam Zaheri: Scenario-Based Teamworking, How to Learn, Create, and Teach Complex Plans, Springer-verlag Berlin Heidelberg (2004).

リアルタイム適応のためのLEOエージェントモデルの提案

河原林 友美* 久保 長徳** 高橋 勇*** 黒岩 丈介*** 小高 知宏**** 小倉 久和***

LEO Agent Model for Real-time Adaptation

Tomomi KAWARABAYASHI*, Takenori KUBO**, Isamu TAKAHASHI***,
Jousuke KUROIWA***, Tomohiro ODAKA**** and Hisakazu OGURA***

(Received January 31, 2007)

We propose a learning agent model for real-time adaptation based on LEO (Learning from Experience and Observation), in which "Learning from Observation (LO)" is incorporated with "Learning from Experience (LE)". In the present paper, the LEO agent model is applied for a soccer agent to adapt its shooting decision to its opponent in the RoboCup simulated soccer games. Through ninety experiments by using the RoboCup Soccer Simulator, the proposed model can improve a success rate of "shot" action to 0.12 from 0.04 (non-learning) and 0.06 (LE model only), suggesting that the LEO agent model works effectively for a real-time adaptation problem.

Key Words : Autonomous Agent, Observation Learning, Real-time Adaptation, Soccer Agent and RoboCup

1. はじめに

本論文では、ある行動を環境に応じてリアルタイムに適応させるために学習するエージェントのモデルを提案する。我々は、RoboCup^{[1][3]}のサッカーシミュレーションリーグにおいて、サッカープレーヤーエージェント^{[4][5]}の作成を行っている。サッカーゲームは、そのようなエージェントが11体ずつ2チーム、計22体からなるマルチエージェントシステムである。個々のサッカープレーヤーはそれぞれの特徴をもったエージェントで、走ったり、ボールをドリブルしたり蹴ったりする。パスしたり、シュートして

ゴールしたりしてゲームをする時は、当然ながら相手チームのエージェントの行動から影響を受ける。このような状況下で、リアルタイムで、エージェントが学習する、あるいは相手チームの特徴に適応する、ということは重要なエージェント機能である。

しかし、これまでのエージェントの学習システムについては、リアルタイム性について余り考慮されていない。たとえば、エージェントが経験に基づいてある行動を学習する場合、マルチエージェント環境では他のエージェントと行動が競合し、結果、自分の学習機会が失われる場合がある。これは、学習のための十分な機会が保証されているわけではなく、リアルタイムでは適応のための学習が意図したレベルまで行われぬ可能性が高い。このような学習機会の問題は、マルチエージェント環境におけるエージェントの学習機能上の課題である。

この課題に対して我々は、学習機会を増やし、リアルタイム適応の効果を上げる方法として、他者の行動を観察し学習する仕組みを検討してきた^[6]。これは、人間が自分の経験から学ぶだけでなく、他人の行動を観察して、その結果を評価し学習する行動に基づいた仕組みである。

* 工学研究科システム設計工学専攻

** 仁愛大学

*** 知能システム工学科

**** 工学研究科原子力・エネルギー安全工学専攻

* System Design Engineering Course, Graduate School of Engineering

** Jinai University

*** Dept. of Human and Artificial Intelligent System

**** Nuclear Power and Energy Safety Engineering Course, Graduate School of Engineering

本論文では、「経験からの学習 (LE)」と「観察からの学習 (LO)」を併用した「経験と観察からの学習 (LEO)」を導入した LEO エージェントのモデルを提案する。そして、RoboCup サッカーエージェントのシュート行動にこのモデルを用い、RoboCup Soccer Server^{[7],[8]}を用いてシミュレーションで試合を行いモデルの有用性を示した。

以下、2章では、LEOを導入した LEO エージェントモデルを記号を用いて定義する。3章では、上記の LEO エージェントモデルを RoboCup サッカーエージェントに実装した例を示す。4章では、提案モデルの有用性を検証するためのサッカーエージェントによるシミュレーション実験と結果を示す。実験では、エージェントのシュート判断をリアルタイム適応の対象とした。5章でまとめを行う。

2. LEO エージェントモデル

LEO エージェントモデルは、センサ情報処理部、意志決定部、動作部、学習部からなるエージェントのシステムの学習部に、自分の行動結果から学習を行う LE と他人の行動を観察し自分に置き換えて学習をする LO と併用した LEO を組み込んだモデルである。本論文では、このモデルを記号を用いて定義する。

例えばサッカーエージェントの場合、このシステムのセンサ情報処理、意志決定部、動作部は、以下のように動作している。センサ情報処理部では、「ボール、味方、敵の位置や速度」、「ゴールの位置」などのセンサ情報入力を得る。意志決定部では、センサ情報入力と「体の正面と頭の正面の角度差」や「ボールをキックできる範囲」など自分の身体の状態や能力を表す情報である内部状態、「自身が推定した味方や敵のエージェントモデル」である他エージェントモデルを用いて、「ボールが蹴れる」、「ゴールが近い」、「シュートコースが空いている」などの環境状況を認識する。更に、前件が状況で後件が「シュート」などの行動の if-then ルールで構成される行動ルールを複数持っており、この中からルールをひとつ選択することで、「パス」、「ドリブル」、「シュート」などの行動を表す行動ラベルを選択する。動作部では、その行動ラベルを「kick」、「dash」、「turn」などの動作コマンドに変換し、出力する。

2.1 LEO エージェントモデルの定義

このエージェントが存在する環境には、複数のエージェントと、これらのエージェントが行動できる物理的なフィールドから構成される。また、これらのエージェントは、少なくとも、環境を知覚し行動できる。

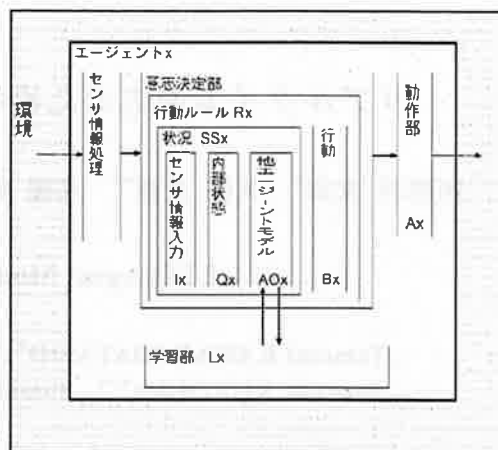


図 1: LEO エージェントの枠組

エージェントは、環境を感知するセンサ情報を入力として、環境を認識し環境状況を得る。この環境状況より行動ルールを選択して行動ラベルを決定し、それを動作に変換して環境に対して出力する。また、学習を行なうための学習ルールを持っている。

全てのエージェントの集合を *Agents* とする。エージェント $x \in Agents$ を、次の 8 つ組で定義する。

$$x = \langle I_x, Q_x, AO_x, SS_x, B_x, A_x, R_x, L_x \rangle \quad (1)$$

ここで、 I_x はエージェント x のセンサ情報入力の集合、 Q_x はエージェント x の内部状態集合、 AO_x はエージェント x が推定する他エージェントモデルの集合、 SS_x はエージェント x の環境状況集合、 B_x はエージェント x の行動ラベル集合、 A_x はエージェント x の動作集合、 R_x は行動ルール集合、 L_x は学習ルール集合である。学習ルール集合は行動ルールを書き替えるルールである。

図 1 は、この 8 つ組の関係をエージェントのシステムに対応付けたものである。エージェントのシステムは、センサ処理部、意志決定部、動作部、学習部からなる。意志決定部には行動ルール集合 R_x が、動作部には動作集合 A_x が、学習部には学習ルール集合 L_x が対応する。行動ルールは、状況と行動の組合せからなるが、これには、環境状況集合 SS_x と行動ラベル集合 B_x が対応している。また、状況は、センサ入力、内部状態、他エージェントモデルによって判断されるが、これには、センサ入力集合 I_x 、内部状態集合 Q_x 、推定された他エージェントモデル集合 AO_x が対応する。一般には、学習によって、行動ルール内の状況と行動の組合せを変更することが可能であるが、ここでは行動ルー

ル内における推定された他エージェントモデル (AO_x) を変更する場合を対象とする。

2.2 LEO エージェントのセンサ情報処理と環境状況の認識

エージェント x は、自分の内部状態集合 Q_x 及びエージェント x が想定する他エージェントモデル集合 AO_x を用いて、センサ情報入力集合 I_x を解釈し、環境状況集合 SS_x として認識する。また、エージェント x は内部状態を複数個持っており、 i 番目の内部状態を $q_x^i \in Q_x$ と表現する。さらに、エージェント x は自身が想定する他エージェントモデルを複数個持っており、 j 番日の他エージェントモデルを $Asm(x, j) \in AO_x$ ($j \in Agents, j \neq x$) と表現する。これらの認識の結果、得られる環境状況の集合を SS_x とする。また、引数を明示して、 $SS_x(I_x, Q_x, AO_x)$ とも表す。

エージェント x が想定する j 番日の他エージェント $Asm(x, j)$ は次のような7項組である。

$$\begin{aligned} Asm(x, j) = & \\ < asm(x, I_j), asm(x, Q_j), asm(x, SS_j), \\ & asm(x, B_j), asm(x, A_j), asm(x, R_j), \\ & asm(x, L_j) > \quad (2) \end{aligned}$$

これら、 $asm(x, I_j)$, $asm(x, Q_j)$, $asm(x, SS_j)$, $asm(x, B_j)$, $asm(x, A_j)$, $asm(x, R_j)$, $asm(x, L_j)$ は、それぞれ「エージェント x が想定したエージェント j 」の環境状況集合、センサ情報入力集合、内部状態集合、行動ラベル集合、動作集合、行動ルール集合、学習ルール集合である。これらはエージェント j の実際の構成と関係はない。

2.3 LEO エージェントのルール

行動ルール

エージェントの行動ルールは、if-then ルールからなり、後件は行動を表す行動ラベル、前件はその行動が実行されるための状況集合である。エージェント x は、行動ルール集合 R_x から行動ルールを1つ選ぶことで行動を選択する。行動ルールが複数選択された場合は競合解消を行なって1つを選択する。

エージェント x の認識結果が k 番日の行動ルール $r_x^k \in R_x$ の前件 $S_x^k \in SS_x$ に合致し、選択されたとする。その結果、エージェント x の k 番目の行動ラベル $b_x^k \in B_x$ が選択される。エージェント x の k 番日の行動ルール r_x^k を

$$r_x^k = \text{if}(S_x^k(I_x, Q_x, AO_x)) \text{then}(b_x^k) \quad (3)$$

と表す。ここで、 $S_x^k \in SS_x$ は、エージェント x の k 番目の行動ラベル b_x^k が選択される条件を表す状況集合である。この S_x^k を

$$S_x^k = \{s_x^{km}\} \quad (4)$$

と表現する。ここで、 s_x^{km} は、エージェント x の k 番目の行動の条件を表す状況集合の m 番目の状況である。引数を明示して次のようにも表す。

$$s_x^{km} = s_x^{km}(I_x, Q_x, AO_x) \quad (5)$$

動作出力

エージェント x は、 k 番日の行動ラベル $b_x^k \in B_x$ を選択した結果、動作 $a_x^{kn} \in A_x^k$ を環境に対して出力する。 A_x はエージェント x のすべての動作集合、 A_x^k はその部分集合である。 a_x^{kn} はエージェント x の k 番日の動作集合 A_x^k 中の n 番目の動作である。たとえば、エージェント x をサッカーエージェント、 a_x^{kn} をボールを蹴る動作、行動ラベル b_x^k をシュート行動ラベルとすると、この時、シュート行動を実現するための蹴る動作に関する角度と強さの組み合わせの集合は $A_x^k \in A_x$ のように表せる。 a_x^{kn} は、シュートを実現するための蹴る動作集合 A_x^k のうちの1つを表している。

学習ルール

学習ルールを用いて行動ルールを操作する場合、一般には行動ルールの取り換え、行動ルールの前件と後件の組み合わせの変更、行動ルールの組み合わせはそのままで前件や後件に修正変更を加えるような学習方法が考えられる。ここでは、学習ルール $l_x^1, l_x^2, l_x^3, l_x^4 \in L_x$ を用いて、行動ルールの前件部分を修正変更する。LE では、自らの行動と結果から、対応する行動ルールの前件部を評価修正する。LO では、自分が学習対象としている行動を第三者が行っている場合、その状況と行動と結果を観察し、対応する自分の行動ルールの前件部を評価修正する。また、学習のタイミングであるが、LE は自ら行動したとき、LO は他者の行動を観察したときにそれぞれの学習ルールが発動するため、これらの2つの学習は同時には行われない。

学習対象

エージェント x の行動ルール r_x^k の前件部のある状況 s_x^{km} に用いられている x が想定しているエージェント $y \in Agents (y \neq x)$ の t 番日の内部状態 $asm(x, q_y^t)$ を学習対象とする。これらの関係を次のように記述する。

$$r_x^k = \text{if}(S_x^k(I_x, Q_x, AO_x)) \text{then}(b_x^k) \quad (6)$$

$$s_x^{km} = s_x^{km}(I_x, Q_x, asm(x, q_y^t)) \quad (7)$$

LE のルール

LE では、エージェント x が自分の行動の成否によって学習を行う。成功時は学習ルール l_x^1 、失敗時は学習ルール l_x^2 に従う。

$$\begin{aligned} l_x^1 = & \text{if}(s_x^{km}(I_x, Q_x, asm(x, q_y^t)) = T \\ & \text{and } Res(b_x^k) = S) \\ & \text{then}(asm(x, q_y^t) \\ & \leftarrow Adj(asm(x, q_y^t)) = F(asm(x, q_y^t))) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} l_x^2 = & \text{if}(s_x^{km}(I_x, Q_x, asm(x, q_y^t)) = T \\ & \text{and } Res(b_x^k) = F) \\ & \text{then}(asm(x, q_y^t) \\ & \leftarrow Adj(asm(x, q_y^t)) = F'(asm(x, q_y^t))) \end{aligned} \quad (9)$$

$Res(b_x^k)$ は行動 b_x^k の結果を, S, F は成功, 失敗を表す。 $F(asm(x, q_y^t))$ と $F'(asm(x, q_y^t))$ はそれぞれ学習の具体的操作を表す式である。 $Adj(asm(x, q_y^t))$ は, $asm(x, q_y^t)$ の操作結果を表す。 \leftarrow は, 値を代入し更新することを表す記号である。学習ルール l_x^1, l_x^2 の後件部では, 行動ルール r_x^k の前件部 s_x^{km} の $asm(x, q_y^t)$ の値を基に, $Adj(asm(x, q_y^t))$ を求め, それを再び行動ルール r_x^k の前件部 s_x^{km} の $asm(x, q_y^t)$ に代入している。

LO のルール

LO では, エージェント x が学習したい行動を, 第3者であるエージェント $z \in Agents (z \neq x, y)$ が行った場合, その状況と行動を観察し, 自分に置き換え, その行動に対応する自分の行動ルールの前件部を評価する。この評価結果とエージェント z の行動結果が異なった場合, 学習ルール l_x^3 , または l_x^4 に従って学習を行う。

$$l_x^3 =$$

$$\begin{aligned} & \text{if}(Perc(x, a_z^{cd}) = T \\ & \text{and } a_z^{cd} = a_x^{ke} \\ & \text{and } b_z^c = b_x^k \\ & \text{and } s_x^{km}(asm(x, I_z), Q_x, asm(x, q_y^t)) = F \\ & \text{and } Res(b_z^c) = S) \\ & \text{then}(asm(x, q_y^t) \\ & \leftarrow Adj_{obs}(asm(x, q_y^t)) = F_{obs}(asm(x, q_y^t)) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} l_x^4 = & \\ & \text{if}(Perc(x, a_z^{cd}) = T \\ & \text{and } a_z^{cd} = a_x^{ke} \\ & \text{and } b_z^c = b_x^k \\ & \text{and } s_x^{km}(asm(x, I_z), Q_x, asm(x, q_y^t)) = T \\ & \text{and } Res(b_z^c) = F) \\ & \text{then}(asm(x, q_y^t) \\ & \leftarrow Adj_{obs}(asm(x, q_y^t)) = F'_{obs}(asm(x, q_y^t)) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで, a_z^{cd} は, エージェント z の行動ラベル b_z^c に関する動作集合の d 番日の動作 A_z^c の要素を表す。 $Perc(x, a_z^{cd})$ はエージェント x が, a_z^{cd} を知覚したかどうかを表す。 $asm(x, I_z)$ は, エージェント x が推定するエージェント z のセンサ入力情報集合である。 $Res(b_z^c)$ は行動 b_z^c の結果を, S, F は成功, 失敗を表す。 $F_{obs}(asm(x, q_y^t))$ と $F'_{obs}(asm(x, q_y^t))$ はそれぞれ学習の具体的操作を表す式である。 $Adj_{obs}(asm(x, q_y^t))$ は, $asm(x, q_y^t)$ の操作結果である。 \leftarrow は値を代入し更新することを表す。

学習ルール l_x^3, l_x^4 の後件部では, 行動ルール r_x^k の前件部 s_x^{km} の $asm(x, q_y^t)$ の値を基に $Adj_{obj}(asm(x, q_y^t))$ を求め, それを再び条件部の $asm(x, q_y^t)$ に代入している。この $Adj_{obs}(asm(x, q_y^t))$ は, 他者の行動を観察することにより間接的に求めた値であって, 自分で行った行動から求めた値 $Adj(asm(x, q_y^t))$ とは一般には異なる。したがって, それを再び条件部の $asm(x, q_y^t)$ に代入する際には, 何らかの変換操作を行う必要がある。しかし, ここでは簡単のためそのまま代入する。

3. サッカーエージェントのシュート判断への適用

LEO エージェントモデルをサッカーエージェントに適用し, シュート判断を適応的に行うエージェントを構築した。

サッカーの試合においては、対戦相手のインターセプトの能力によって、シュート時における対戦相手の配置などが全く同じであっても、シュートの成功、失敗が異なる。対戦相手の能力は事前に情報が収集できない場合や試合中に変化する可能性がある。したがって、入りそうなのにシュートしない、取られるのにシュートしてしまうという状況避けるために、シュートが成功するかどうかの状況判断をリアルタイムに適応的にする必要がある。また、シュート行動は、他の行動に比べて多くは行われず、他のエージェントが実行してしまうと、自分で学習するチャンスが減る。したがって、リアルタイムに適応するためには学習機会が少いことを補う必要がある。

3.1 シュート行動ルールと状況のモデル化

エージェント p のシュート行動ルール r_p^{shoot} を次のように表現する。

$$r_p^{\text{shoot}} = \text{if}(S_p^{\text{shoot}}(I_p, Q_p, AO_p)) \text{then}(b_p^{\text{shoot}}) \quad (12)$$

$$= \text{if}(s_p^{\text{shoot}1} \text{ and } s_p^{\text{shoot}2} \text{ and } s_p^{\text{shoot}3}) \text{then}(b_p^{\text{shoot}}) \quad (13)$$

また、シュート行動ルールの前件部、後件部は具体的には次のような状況や行動として表現する。

$$s_p^{\text{shoot}1} = (\text{I can kick the ball}) \quad (14)$$

$$s_p^{\text{shoot}2} = (\text{I am in the shooting distance}) \quad (15)$$

$$s_p^{\text{shoot}3} = (\text{A shooting space is open}) \quad (16)$$

$$b_p^{\text{shoot}} = (\text{Shoot}) \quad (17)$$

このうち $s_p^{\text{shoot}3} = (\text{A shooting space is open})$ という状況の評価は、次のような認識の過程を経て行なう。ゴール周辺にいる対戦相手の位置などから、シューターがゴールを臨む領域から（図2 領域T）、インターセプトされそうな領域（図2 領域U）と重なる部分を（図2 領域V）を差し引いて、開いている領域（図2 領域W）があればシュート可能と判断する。

インターセプト領域の広さは対戦相手によって異なる。この領域の広さを表現するためにインターセプト能力推定値指数 $\alpha = b/a$ を設定する（図2）。 a はインターセプターがボールを捉える事のできる最短地点までのボールの移動距離、 b はインターセプターがボールを捉える事のできる最短距離である。行動能力はエー

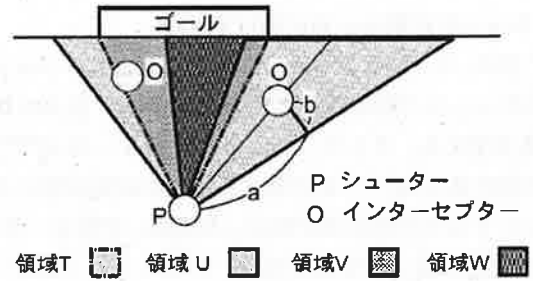


図2: シュートスペース認識のモデル化

ジェントごとに異なるが α は、初期値が α_0 で、最小値 α_{min} から最大値 α_{max} までの実数とする。 α の値が低いと対戦相手のインターセプト領域は小さく、高いとインターセプト領域は大きいと判断する。

ここでは、簡単のため各インターセプターを区別せず同一の α を用いる。この α は、エージェント p が推定するインターセプター o の内部状態集合の一つであるので、これを h 番目の内部状態とし、 $\alpha = \text{asm}(p, q_o^h)$ とする。よって、 $s_p^{\text{shoot}3}$ を次のように記述する。

$$s_p^{\text{shoot}3} = s_p^{\text{shoot}3}(I_p, Q_p, \alpha) \quad (18)$$

3.2 シュート行動ルールにおける LE と LO

(1) シュート行動ルールにおける LE

LE では、エージェント p が自分のシュートの結果によって学習を行う。成功時は学習ルール l_p^1 、失敗時は l_p^2 に従う。

$$l_p^1 = \text{if}(s_p^{\text{shoot}3}(I_p, Q_p, \alpha) = \text{T} \text{ and } \text{Res}(b_p^{\text{shoot}}) = \text{S}) \text{ then}(\alpha \leftarrow \text{Adj}(\alpha) = F(\alpha) = \alpha - \delta) \quad (19)$$

$$l_p^2 = \text{if}(s_p^{\text{shoot}3}(I_p, Q_p, \alpha) = \text{T} \text{ and } \text{Res}(b_p^{\text{shoot}}) = \text{F}) \text{ then}(\alpha \leftarrow \text{Adj}(\alpha) = F'(\alpha) = \alpha + \delta) \quad (20)$$

ここで、 $\text{Res}(b_p^{\text{shoot}})$ は行動ラベル b_p^{shoot} が示す行動の結果で、S、Fはその成功、失敗を表す。 $F(\alpha)$ と $F'(\alpha)$ はそれぞれ学習の具体的な操作を表す式である。 $\text{Adj}(\alpha)$ は、 α を操作した値である。 δ は、 $\text{Adj}(\alpha)$ を求めるために α を調節する実数定数である。 \leftarrow は値を代入し更新することを表す。

(2) シュート行動ルールにおける LO

LOでは、エージェント p が第3者であるエージェント u のシュート行動と状況と結果を観察し、自分の状況に置き換える。そして、シュート行動ルール r_p^{shoot} の前件部である $s_p^{\text{shoot}3}$ を評価する。この評価結果とエージェント u の行動結果が異なった場合、学習ルール l_p^3 、または l_p^4 に従って学習を行う。

$$\begin{aligned}
 l_p^3 = & \\
 & \text{if} (\text{Perc}(p, a_u^{\text{shoot}f}) = T \\
 & \quad \text{and } a_u^{\text{shoot}f} = a_p^{\text{shoot}g} \\
 & \quad \text{and } b_u^{\text{shoot}} = b_p^{\text{shoot}} \\
 & \quad \text{and } s_p^{\text{shoot}3}(asm(p, I_u), Q_p, \alpha) = F \\
 & \quad \text{and } Res(b_u^{\text{shoot}}) = S) \\
 & \text{then}(\alpha \leftarrow Adj_{obs}(\alpha) = F_{obs}(\alpha) = \alpha - \delta')
 \end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
 l_p^4 = & \\
 & \text{if} (\text{Perc}(p, a_u^{\text{shoot}f}) = T \\
 & \quad \text{and } a_u^{\text{shoot}f} = a_p^{\text{shoot}g} \\
 & \quad \text{and } b_u^{\text{shoot}} = b_p^{\text{shoot}} \\
 & \quad \text{and } s_p^{\text{shoot}3}(asm(p, I_u), Q_p, \alpha) = T \\
 & \quad \text{and } Res(a_u^e) = F) \\
 & \text{then}(\alpha \leftarrow Adj_{obs}(\alpha) = F'_{obs}(\alpha) = \alpha + \delta')
 \end{aligned} \tag{22}$$

ここで、 $a_u^{\text{shoot}f}$ は、エージェント u のシュート行動に関連する動作集合 A_u^{shoot} の f 番目の動作を表す。 $\text{Perc}(p, a_u^{\text{shoot}f})$ は、エージェント p が $a_u^{\text{shoot}f}$ を知覚したかどうかを表す。 $a_p^{\text{shoot}g}$ は、エージェント p のシュート行動のための動作集合 A_p^{shoot} の g 番目の動作を表す。 $asm(p, I_u)$ は、エージェント p が推定するエージェント u のセンサ情報入力を表す。 $Adj_{obs}(\alpha)$ は、 α を操作した値である。 $F_{obs}(\alpha)$ と $F'_{obs}(\alpha)$ はそれぞれ学習の具体的な操作を表す式である。 δ' は、 $Adj_{obs}(\alpha)$ を求めるために α を調節する実数定数である。 \leftarrow は値を代入し更新することを表す。

この $Adj_{obs}(\alpha)$ は、他者の行動を観察することにより間接的に求めた値であって、自分で行った行動から求めた値 $Adj(\alpha)$ とは異なる。したがって、それを再び条件部の α に代入する際には、何らかの操作を行う必要がある。しかし、ここでは簡単のためそのまま代入する。また、 δ' も簡単のため、 δ と同じ値とする。

表1: チーム Neko に対するチーム 1, 2, 3 の試合結果 (30 試合平均)

チーム	得点	シュート 試行回数	得点率	センタリング	観察回数
1	0.8	18.3	0.04	0.7	—
2	1.3	20.0	0.06	3.7	—
3	3.0	25.0	0.12	11.5	11.87

得点率 = 得点 / シュート試行回数

4. サッカーシミュレータを用いた試合形式の実験

サッカーシミュレーションの試合を行い、提案手法である LEO エージェントモデルを適用したサッカーエージェントのシュート判断のリアルタイム適応効果を示す。

検証項目は以下の通りである。リアルタイム適応効果として、LEO エージェントの得点率が、「学習なし」、LE だけを用いた LE エージェントより高いかを見る。また、リアルタイム適応の結果どのような事が起こったかを「得点」、「シュート試行回数」、「ラストパス回数」から検証する。

4.1 実験概要

実験は、学習のタイプを変えた3つのチーム1, チーム2, チーム3と実験用の対戦チーム neko をそれぞれ30回ずつ対戦させることで行なう。

サッカーエージェントチーム

チーム1, 2, 3は我々が開発したチーム RaiC を基に作成した。チーム1は学習を用いないエージェントからなるチーム、チーム2はFW (フォワード) 2体と攻撃的MF (ミッドフィルダー) 1体にもみ LE エージェントモデルを用いたチームである。チーム3はFW2体と攻撃的MF1体にもみ LEO エージェントモデルを用いたチームである。IOを併用したエージェントの観察の回数やタイミングは一切制御していない。

パラメータ

α は初期値0, $0 \leq \alpha \leq 1$ とした。 α の値を変更する δ の値は、0.125 とした。学習を行わないエージェントの α 値は0で固定とした。neko は学習を一切しないチームである。

4.2 実験結果

チーム1, 2, 3のFW2体と攻撃的MF1体がnekoから獲得した1試合平均の得点、シュート試行回数、得点率、ラストパス回数を1に示す。1試合の試合平均の得点はチーム3がチーム1の3.75倍、チーム2の

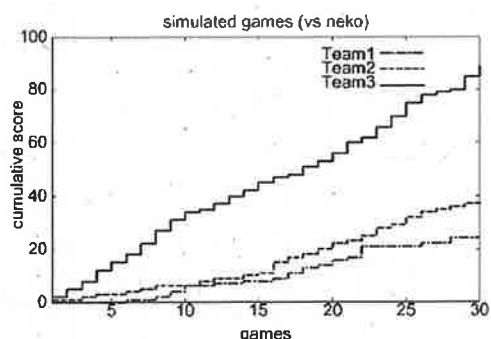


図 3: 30 試合累計得点 (対チーム Neko)

2.31 倍得ている。また、図 3 に、チーム 1, 2, 3 の累積得点結果を示す。チーム 1 がチーム 2, 3 と比べて試合毎に得点を取っていることが分かる。得点率もチーム 3 がチーム 1 の 3 倍、チーム 2 の 2 倍高い。得点率はそのときの状況に応じた適切なシュート判断を行っているか評価するための重要な指標である。学習なしよりも LE エージェントの方が、LE エージェントよりも LEO エージェントの方が、より対戦相手に適応した判断を行い、得点を取るといった目的をより達成しているといえる。1 のセンタリングの回数もチーム 3 がチーム 1 の 16.1 倍、チーム 2 の 3.11 倍多い。インターセプト能力推定指数をリアルタイムで得ることによって、「シュートコースが開いている」という状況認識が適応的に変化し、行動ルール選択においてシュートが選択されず、センタリング行動が選択されたということである。得点、得点率、センタリング回数ともにチーム 3 がチーム 1, 2 よりも高い。1 試合中 11.87 回の I.O の回数が LE を補ったと考える。これは LEO によって、より適応的なシュート行動選択、目的の達成ができていているということである。実践的環境において LEO エージェントモデルが有用であるといえる。

5. まとめ

マルチエージェント環境におけるエージェントのリアルタイム適応を目的として、「観察からの学習 (LO)」を「経験からの学習 (LE)」と併用する「経験と観察からの学習 (LEO)」を用いた LEO エージェントモデルを提案した。

RoboCup サッカーシミュレータを用い、サッカーエージェントのシュート判断に提案手法を実装し、コンピュータシミュレーション実験を行った。結果、LEO エージェントモデルを用いたエージェントは、LO が LE を補ってシュート状況判断適応の効果が上がったことを示した。

参考文献

- [1] H. Kitano, M. Asada, Y. Kuniyoshi, I. Noda, and E. Ozawa.: RoboCup: The Robot World Cup Initiative, Proc. of IJCAI-95 Workshop on Entertainment and AI/Alife (1995)
- [2] D.Nardi, M.Riedmiller, C.Sammut, J.Santos-Victor(Eds.): RoboCup 2004: Robot Soccer World Cup VIII, Springer-Verlang (2005)
- [3] <http://www.robocup.org/>
- [4] 伊藤暢浩, 高橋友一: RoboCup ではじめるエージェントプログラミング, 共立出版 (2001)
- [5] 秋山英久: ロボカップサッカーシミュレーション 2D リーグ必勝ガイド, 秀和システム (2006s)
- [6] T. Kawarabayashi, T. Kubo, T. Morisita, J. Nishino, T. Odaka, and H. Ogura: Real-time Adaptive Learning from Observation for RoboCup Soccer Agents, Proc. of the 6th International Conference on Distributed Autonomous Robotic Systems, Vol.5, pp.207-214, Springer-Verlag (2002).
- [7] I. Noda, H. Matsubara, K. Hiraki, and I. Frank. Soccer server: A tool for research on multi-agent systems, Journal of Applied Artificial Intelligence, Vol.12, pp.233-250 (1998)
- [8] <http://sserver.sourceforge.net/>

群ロボットにおける接触コミュニケーションシステムの設計

平田 隆幸* 川地 秀幸*

Design of Communication System of Swarm Robots during a Real Contact

Takayuki HIRATA* and Hideyuki KAWACHI*

(Received January 31, 2007)

We designed the communication system during a real contact for swarm robots. The simple electric circuit and micro-computer enable the robots to communicate, when the robots contact with each other. We don't aim to make the perfect communication system free from a miss in data transmission, because the system is designed for the bio-inspired swarm robots, e.g., ant robots. We tested the performance of our communication system and discussed the application of it to the research of swarm robots.

Key Words : Communication system, real contact, swarm robots, bio-inspired robot

1. はじめに

群知能(Swarm Intelligence)の研究が注目をあつめている^[1]. 群知能の研究は, 要素間の相互作用によって創発(emergence)現象が発生し, より高度な知的システムが現われることに注目したものである. コンピュータ・シミュレーションによる研究が多い群知能の研究の中で, 実機をもちいた群ロボットの研究がなされるようになってきた^[2].

群ロボットの研究では, 相互作用する多数の小型ロボットがもちいられる. 群ロボットの研究にもちいられる個々の小型ロボットの性能は一般的に高くないが, 相互作用し協調行動をとることにより, 単独のロボットではできないような仕事を達成させるというのが特徴である. 個々の小型ロボットに高度な能力を要求しない群ロボットには, 次のような特徴がある. 1) 個々のロボットを安価に製作できる. 2) 安価ゆえに, 多数のロボットを製作できる. 3) 多数のロボットが協調行動をおこない仕事を達成することから, たとえ数台のロボットが故障しても群ロボット全体の仕事は影響を受けない(robustness). 4)

用途を限定し特殊化したロボットをもちいていないので, プログラムを変えるだけで, さまざまな作業(task)をこなせるという柔軟性がある(flexibility).

さて, 大きな可能性をもった群ロボットであるが, どのように設計すればよいのだろうか? 例えば, 小型のロボットにどれだけの機能を持たせればよいのだろうか? 個々のロボットを高機能化すればするほどさまざまなことができるようになるが, 同時に前述の群ロボットとしての長所が失われていく. 一般的に, 群ロボットの設計には大きな自由度がある. そこで, 蟻や蜂などの社会性昆虫(social insect)の行動をヒントにして, 群ロボットの設計をおこなうという研究がなされている^[3].

生物現象は, 創発現象の宝庫である. 特に社会性昆虫の群れとしての行動は, 創発現象の典型例であり, 最適化問題にも応用されている. さて, 群ロボットにおける創発のキーポイントは, 個体間の相互作用による協調行動である. 個体間の相互作用のためには, 個々のロボット間でどのように情報交換をするかが重要になってくる. 例えば, 社会性昆虫である蟻コロニーによる餌場探索では, フェロモンを介しての情報伝達がおこなわれている. 蟻のフェロモンを介してのコミュニケーションによる巣と餌場間の運搬路形成は, AOL(Ant Colony Optimization)と

* 知能システム工学専攻

* Dept. of Human and Artificial Intelligent Systems

して、最適化問題へと応用されている^{[4],[5]}。

さて、蟻コロニーにおける情報伝達を考えると、フェロモンによる情報伝達だけではなく、各個体が直接に出会ったときに、触覚などによって情報を伝達していることが知られている^[6]。ここでは、群ロボットにおける情報伝達手段の一つとして、ロボットが実際に接触したときにデータの交換をおこなえる通信システム的设计・製作をおこなう。

2. 接触通信システム的设计

2.1 複数ロボット間での通信

通信ラインが実際に接触したときのみに通信をおこなう接触通信システムを设计する。群ロボットに接触通信システムを搭載し、接触したときにロボット間で情報交換をおこなえるようにするのが目的である。通信ラインが接触したときに、通信が成立するシステムを设计する場合にどのような問題点が生じるかを考える。ロボットが2台の場合は、接触通信システム的设计は、容易である。一つの通信ラインをもった2台のロボットをロボットA、ロボットBとすると、一方のロボットの通信ラインを送信、もう一方のロボットの通信ラインを受信に設定しておくことができる(図1を参照)。なお、双方向の通信は、一方からのデータ送信が終了した後に、送信・受信を切り替えることによって実現できる。

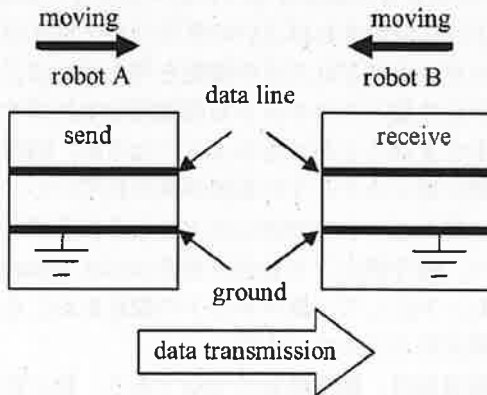


図1 2台のロボットが接触したときにデータ通信するシステムの模式図。

しかし、3台のロボット間でのデータ通信を考えた場合、2台のロボットのときのように、送信するロボット(type Sとする)、受信するロボット(type Rとする)という設定では問題が生じる。例えば、type Sのロボットが2台、type Rのロボットが1台、計3台のロボット間の通信を考える。Type Sとtype Rの

ロボットが出くわした場合には、うまく通信が成立するが、2台のtype Sのロボット同士が出くわした場合は、通信は成立しないという問題が生じる(図2を参照)。3台以上のロボット間での接触通信システムを考えた場合、最初から通信ラインを送信あるいは受信と決めておくことはできない。

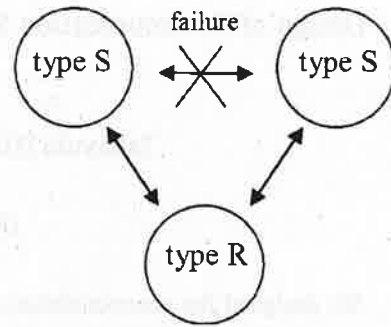


図2 3台のロボット間での通信。

3台以上のロボットで構成された群ロボットにおいて、任意のロボット間で通信が成立するようにするためには、通信ラインを送信あるいは受信というように決めておくことができない。つまり、type S(最初にデータを送信するロボット)あるいはtype R(最初にデータを受信するロボット)というような2種類のロボットではなく、2台のロボットが接触したときに、データを送信するロボットと受信するロボットを動的に決める必要がある。

2.2 マイコンをもちいた通信回路

接触したときに動的に送信側と受信側が決まる通信システムを簡単な電気回路とマイコンをもちいて実現することにする。ここでは、マイコンの2つのI/Oポート(input portとoutput port)に保護回路の役割を果たす電気回路を接続した通信システムを考える。図3に、接触通信システムを示す。

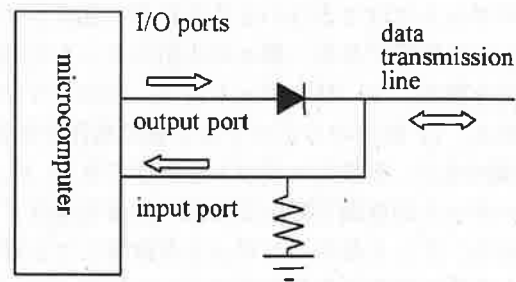


図3 マイコンと保護回路をもちいた通信システム。

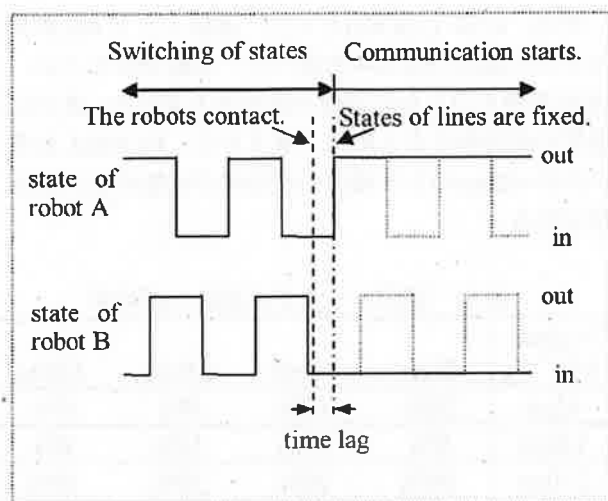


図4 通信ラインの状態の変化のタイムチャート。

1つの通信ラインがマイコンの output ポートと input ポートに接続されている(図3参照)。通信ラインは、マイコンにより一定の周期で送信・受信に切り替えられる。さて、2台のロボットが接触した場合を考えよう。通信ラインは、送信・受信が切り替わっているため、2台のロボットの送受信の切り替えタイミングが完全に一致している場合を除き、一方が送信、もう一方が受信となる。このときに、データを送信するロボット、受信するロボットが決まる。図4に、2台のロボットの通信ラインの送受信の状態が切り替わる様子をタイムチャートとして示す。

通信ラインが出力の状態(送信の状態)とは、マイコンの output ポートの出力を high(+5V)にしている状態を言う。この状態で、ロボットが他のロボットと接触していない場合は、output ポートの出力は保護回路の抵抗を通してグラウンドに流れる。なお、出力状態の2台のロボットが接触したとしても、保護回路のダイオードにより、output ポートに電流が流れ込むことはない。また、通信ラインが入力の状態(受信の状態)とは、output ポートを low(0V)にし、input ポートの入力値が high か low かをマイコンが監視している状態を言う。ロボットが他のロボットと接触していない場合、input ポートの入力値は low になる。

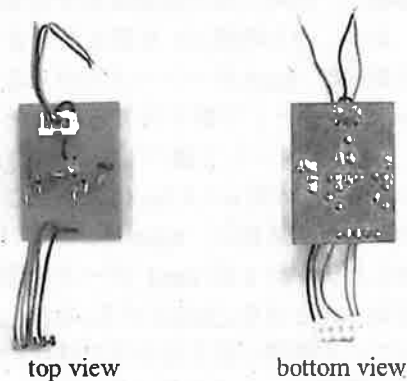
2台のロボットが接触したとき、2台のロボットの通信ラインの状態は、3つのパターンに分類される。1)一方のロボットの通信ラインが入力、もう一方のロボットの通信ラインが出力の場合。2)2台のロボットの通信ラインが両方とも出力の場合。3)2台のロボットの通信ラインが両方とも入力の場合である。1)の場合は、接触するとすぐに通信をはじめ

ることができる。2)あるいは3)の場合は、通信をはじめめるまでに、図4に示されているように time lag が生じる。

3. 接触通信システムの製作

3.1 製作した通信回路と通信アルゴリズム

図3に示した接触通信システムを製作し、ロボットに搭載して、通信が成功するかどうかを調べる実験をおこなった。マイコンには、Renesas Technology社のマイクロコンピュータ H8ファミリの 16bit CPUである H8/3052 をもちいた。なお、保護回路の抵抗には、10kΩのものをもちいた。実際に製作した接触通信システムの保護回路の部分を図5に示す。保護回路は、H8/3052の I/O ポートに接続されている。また、2台のロボットが接触したときに、同時に双方向のデータ通信がおこなえるように、図5に示した回路には2つの通信ラインが実装されている。なお、図5の回路には、通信システムの動作確認のた



めの LED が付け加えられている。

図5 接触通信システムの保護回路。

設計した接触通信システムは、通信ラインが物理的に接触しているときのみ、データ通信がおこなえる。移動するロボット同士が出くわしたとき、物理的に接触している時間は長くない。物理的に接触している間のみ情報交換をおこなうシステムであるため、データ通信中に物理的に離れてしまうと、通信に失敗するという問題点がある。しかし、数バイトの情報量のデータ通信を想定した場合、物理的に接触している間に、通信をおこなうことは可能である。また、社会性昆虫などの情報通信を模した群ロボットに搭載するという事を考えると、接触した場合 100%の確率でデータ通信が成功するという完全な通信システムである必要はない。

データ通信は、シリアル通信である。ここでは、もっとも通信の成功率の高い通信レート f を調べた。

また、物理的接触を考えたとき、接触した瞬間は、接触状態が不安定である確率が高い。それゆえ、接触感知から Δt 時間後に通信を開始することにし、最適な待ち時間 Δt を求めた。図6は、 Δt および通信レート f を分かりやすく示すための模式図である。

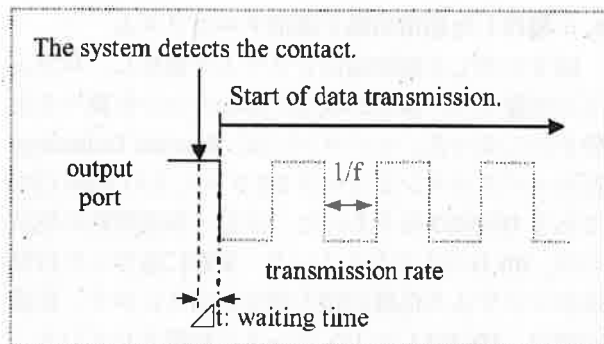


図6 待ち時間 Δt と通信レート f の説明図。

3.2 通信実験

図5に示す2つの通信ラインをもった回路をロボットに搭載し、同時に双方向通信をする実験をおこなった。まず、待ち時間 Δt を変えたときの通信の成功率を調べた。Inputポートへ入力があるかどうかは、inputポートとして割り当てられたマイコンのI/Oポートをモニターして調べている。I/Oポートの値の読み取りは、時間 $\omega=4.2\mu\text{s}$ 毎におこなうようにプログラムした。最初に、inputポートがhighの入力を感知した後、計 n 回inputポートの読み取り値がhighであったときを $\Delta t(n)$ とする。なお、 $\Delta t(n)$ は、 n によって一定時間に決まるわけではないことに注意しよう。通信レート $f \approx 2.4\text{kHz}$ ($1/f=420\mu\text{s}$ に設定)として、各条件で10回実験をおこない、通信の成功率を決めた。なお、通信するデータ量は、8~32bitsとした。表1は、 $\Delta t(n)$ を変えたときの通信の成功率をまとめたものである。待ち時間 $\Delta t=0$ ($n=1$ に対応する)つまり待ち時間が無いときより、 $n=30$ ($\Delta t(30) \geq 29 \times 4.2 \approx 122\mu\text{s}$)のときの方が通信の成功率が高いことが分かる。

表1 $\Delta t(n)$ と通信の成功率

n \ data	8bits	16bits	24bits	32bits
1	30%	30%	20%	30%
10	50%	40%	40%	30%
30	60%	40%	40%	40%
50	50%	30%	20%	30%
80	40%	30%	20%	30%
100	50%	40%	20%	20%

なお、通信レートは $1/f=420\mu\text{s}$ である。

次に、 $n=30$ ($\Delta t(30)$)として、通信レート f を変えたときの通信の成功率を調べた。実験条件ごとに、10回実験をおこない通信の成功率を求めた。表2に、通信の成功率をまとめた。表2から、 $f=336\mu\text{s}$ あるいは $f=420\mu\text{s}$ のとき通信の成功率が比較的良好いことが分かる。

表2 通信レート f と通信の成功率

data \ 1/f	8bits	16bits	24bits	32bits
42 μs	20%	10%	0%	0%
126 μs	0%	20%	10%	0%
210 μs	50%	20%	30%	10%
336 μs	30%	50%	30%	10%
420 μs	40%	25%	25%	30%

待ち時間は $\Delta t(30)$ としている。*420 μs のデータについては、20回実験をおこなったときの成功率。

双方向通信は、2つの通信ラインを使って同時におこなう方法以外に、1つの通信ラインの送受信を切り替えることによっておこなう方法がある。1つの通信ラインを使って送受信をおこなう場合は、通信時間が2倍かかるというデメリットがある。一方、2つの通信ラインを使って同時に双方向通信をおこなう場合、グランド・ラインを含め3つのラインが同時に接触していなければならない。3つのラインの1つでも接触不良になると、通信は成功しない。1つの通信ラインを使う方法は、同時に接触していなければならないラインは、グランド・ラインを含め2つのラインであるので、単位時間あたりの接触不良率は小さくなるというメリットがある。そこで、1つの通信ラインを使い、 $n=30$ 、 $1/f=336\mu\text{s}$ として、通信の成功率を調べた。表3に、実験結果をまとめたものを示す。

表3 1本の通信ラインをつかった場合の成功率

data	8bits	16bits	24bits	32bits
success	50%	60%	40%	60%

ここでは、待ち時間 $\Delta t(30)$ 、通信レート $1/f=336\mu\text{s}$ 。

4. まとめ

群ロボットに搭載する接触通信システムを設計・製作した。2つの通信ラインを使った同時双方向通信の実験をおこなった。接触通信システムでは、データ送信中に通信ラインの接触不良が生じると、通信が不完全になり、通信失敗となってしまう。そこで、通信レート f および待ち時間 Δt を系統的に変えながら、通信の成功率がもっともよくなる f および

$\angle l$ の値を求めた。また、1つの通信ラインを使い送受信を切り替えることにより、双方向通信をおこなう実験をおこない、もっとも通信の成功率が高くなる通信レート r を求めた。2つの通信ラインをもちい同時に双方向通信をおこなう方法と1つの通信ラインをもちい送受信を途中で切り替え双方向通信をおこなう方法を比較した場合、両方法にメリット・デメリットがあり、現段階では、どちらがよいかの結論は出せなかった。

接触通信システムでは、通信ラインの接触部分が通信の成功率の大きなファクターとなっている。接触部分を改良することによって、大きく通信の成功率が高くなる可能性がある。また、通信システムにもちいたプログラミングにも改良の余地がある。それゆえ、今回の実験は予備実験といえるかもしれない。しかし、簡単な保護回路とマイコンによって、接触通信システムの製作に成功したことは、今後の群ロボットへの搭載を含め、群ロボットの研究において新たな通信システムの可能性を増やしたと言える。例えば、電磁波ノイズが多く、電波を使った通信などが困難な極限状況で作業する群ロボットへの応用などが期待できる。

今後、接触通信システムの改良およびこのシステムを我々が開発している小型ロボット^[7]に搭載し、群ロボットの可能性を追求する研究をおこないたいと考えている。

謝 辞

田中ダン講師をはじめとする知能システム工学科非線形科学研究室のメンバーとの議論は研究をおこなう上で、非常に有益でした。また、本研究は、部分的に2006年度福井大学大学院生創成・企業化育成教育プロジェクトの補助をいただいております。ありがとうございます。

参考文献

- [1] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz: *Swarm Intelligence*, Oxford Univ. Press, New York (1999).
- [2] F. Mondada, L. M. Gambardella, D. Floreano, S. Nolfi, J-L Dencubourg, M. Dorigo: *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 12-2, 21 (2005).
- [3] 川村：生命複雑系からの計算パラダイム，森北出版，pp.1-81(2003).
- [4] M. Dorigo and T. Stützle: *Ant Colony Optimization*, MIT Press, Cambridge (2004).
- [5] M. Dorigo: *Ant Colony Optimization*, <http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/ACO/>

[6] 例えば, MSN エンカルタ総合大百科.

[7] T. Hirata, M. Yamazaki, N. Shuto : *Proceedings of SCIS&ISIS*, pp. 262-266 (2006).

人的資源論と労務コスト —M&Aに見る人間関係論—

野村 康則*

Human Resources Theory and the Personnel Cost — Human Relations through the M&A Cases —

Yasunori NOMURA*

(Received December 19, 2006)

This paper aims to suggest to reconsider about the Human Relations theory to the current management system of the Japanese companies which are mainly following the way of U.S.A. Human Relations theory says that the most important key factor for the productivity-growth is the human relations at the work place, which shall be taken into the account for the further growth of Japanese economy. I also took the actual example of the M&A which I was directly involved when I was working for the pharmaceutical company and I have stated the actual voices from employees who had to follow the decision of the company. Current corporate governance theory says that the company shall be owned by the share-holders and not by the employees. Finally, I would like to remind that the employees are the asset of the companies and human relations is most important in any cases.

Key Words : Human relations, Personnel cost, Corporate governance, M&A

1. はじめに

今日本では M&A が盛んに行われている。2006 年度で既に 2500 件の M&A が行われ買収総額は 11 兆円にのぼる、と言われている。企業で働く社員は突然のこの M&A の渦に巻き込まれ、本当に幸せであるのだろうか、企業の資本の合理性で行われる M&A は人間性を疎外していないか、1930 年代にアメリカで提案された「人間関係論」と合わせて考察してみたい。

2. 人的資源論

古くから経営資源の 3 大要素を 3M (Man, Material, Money)と呼んできたが、最近ではこれに知的財産な

どの無形資産も含める傾向にある。更に会社の優劣度の尺度を単に、売上高・利益だけではなく、知的財産・特許の保有高で測定することも行われている。これと同時に企業の経営方針も 1960 年以降の高度経済成長期と合わせ、変化をとげてきた。これまでの年功序列・学歴社会制度から能力主義による生産性の向上と賃金の成果配分、QC 活動、ZD (Zero Defect) 活動などによる品質向上運動などにより、日本の製品が海外でその品質の高さから、爆発的に売れ始め、日本企業の海外進出も目立つようになってきた。それと同時に労働者の賃金も 1970 年の大卒初任給は約 4 万円から現在は 20 万円と実に 5 倍に膨れあがっている。軽自動車の価格は 1970 年で約 50 万円であったが、現在でも倍の 100 万円程度である。このように、経済の成長と共に、人件費も比例的に膨張してきたが、経済成長も安定期に入り、生産性も大幅に向上してきた現時点では、労働力の余剰現象がみられ、企業として最も真剣に取り組まなくてはならないと感じているのは「人」の問題であろう。

* 工学研究科ファイバーアメニティ工学専攻

* Fiber Amenity Engineering Course, Graduate School of Engineering

しかも社会人口の高齢化と相まって、企業で働く中高年者は賃金のカットや早期優遇退職制度などという企業の施策で士気をそがれ、セカンドキャリアへの転換を迫られている。一方企業が将来の成長と企業内労働者の年齢構成適切化のために欲している若年層は昨今の社会的現象として、正社員として働く意欲に欠け、ニートと呼ばれる世間離れ現象が起こっており、労働力の流動化が起こっている。西洋社会のように、「新卒の定期採用」という概念の無い社会と違い、日本では新卒の就職率が大きな問題とされている。こうした中、企業では人事部をかつては Personnel Dept.と英文表示していたが最近では Human Resources Dept.と表示する企業が大半である。前者の英文は正に「人事(ひとごと)」である。後者は「人的資源」を意味し、欧米では後者を使っている。また「人材」という言葉の代わりに「人財」という言葉を使う企業も多くなってきた。「人材」は英語では Human materials となり、一方の「人財」は Human assets である。Materials は材料であり、人が材料という表記は好ましくなく、人は財産である、という表記を使い始めている。企業組織では人事部の代わりに人財開発部という言葉も使われている。人事部は勤怠や給与の支払い、人事評価を主とした業務になるが、人財開発部という名のもとには採用や教育研修も含む範疇の広い組織が考えられるからである。

2.1 科学的管理法

Taylor, F. W. は「科学的管理法の父」(The Farther of Scientific management) と呼ばれている。テイラーは 1880 年代当時アメリカで組織的怠業が蔓延しておりこの解決には「作業の標準化」による生産性効率を向上させることが最大の解決策である、という信念のもとにストップウォッチを用いた「動作研究」を徹底的に行い、差別出来高賃金制度を導入し、高い能率をあげた者には高い賃金を払う、という現在日本で流行の「成果反映型賃金制度」の先行版を提案した。トヨタ式生産方式もこれに近く、標準原価を使い、実際原価との差額を徹底的に分析して無駄の排除を行って最大限の効率化を目指すものである。一方で当時からこれは労働組合から「非人間的」として強く反発を受けていた。またチャップリンの「モダンタイムズ」は機械化と人間性の疎外を風刺した映画であるがこれも当時のこうした世情を反映したものであろう。

テイラー自身も当時組合からの反発が強く、議会から喚問を受けている。

更にアメリカでは後に発表される McGregor, D. M. (マクレガー) の X 理論(性悪説)、Y 理論(性善

説)へと議論が発展してゆく。この科学的管理法はマクレガー理論からすれば性悪説ということになる。つまり人間は生来、放置しておくとう安易な方に流れて効率化が阻害される、という考えである。一方この科学的管理法(テイラリズム)は、日本では労働組合などによる組織的な抵抗を受けてはいないが、広島県の呉海軍工廠で戦時中にこのテイラリズムを導入しようとして、労働者から大きな組織的抵抗を受けた事実がある^[1]。

2.2 人間関係論

1924 年から 1932 年にかけて Mayor, E. (メイヨー) と Roethlisberger, F (レスリスバーガー) はこの科学的管理法の証明のため、ATT (アメリカ電信電話会社) の子会社である WE (Western Electric Co.) のホーソン工場でさまざまな実験を行った。とりわけ、工場の照明が作業の安全や能率を決定する要因になるという仮説を証明するためであった^[2]。

この実験を通じて最初は工場の生産ラインにて照明を明るくすれば一時的に生産性が向上するものの、しばらくするとまた生産性が低下してゆく、という結果が見られた。これは照明だけでなく他の要素でも同じ結果であった。ここでメイヨーとレスリスバーガーは実験結果が当初の命題とは違う方向に向かい、結論としては「職場の人間関係」が生産性向上の一番大きな要因である、と結論つけたのである^[3]。

つまり、従業員の作業能率に重要な影響を与えるのは、照明などの物的環境、賃金などの非人間的な条件ではなく、同僚や上司との間に作られる人間関係であると言い、人間関係論 (Human Relations Theory) がここに生まれたのである。

タイムズ誌はこの人間関係論を大きく紙面に取り上げ、真の生産性向上理論の登場をアピールした。「目的を上司から知らされ、十分なコミュニケーションを持って仕事をするチームは目的を知らされずに作業させられるチームよりも生産性が高い。」という例を示してこの人間関係論を高く論評した。

70 年も前にアメリカでは、既に特有の合理的精神の中にも人間性の大切さを理解しているが、日本ではそのことが未だに余り取り上げられることが無いのは残念である。

3. 人件費(労務コスト)について

通常人件費と言うと、給与賃金、賞与の合計たる年俸収入を想定されるのが大半の見方であろう。

ところが人件費にはまだこれらにカバーされないものがある。それは健康保険・厚生（共済）年金・国民年金・雇用（失業）保険・労災保険などの法定の社会保険費用、更には企業が独自で社員のために負担している企業年金・退職金・福利厚生費などがある。これらは給与・賞与の合計年俸額の40%近くになる。これら全てを総称して「労務費」という言い方もある。とりわけ人件費というと範疇が限定されてしまうように思えるため、ここでは労務費として扱う。

3.1 労務費は変動費か固定費か

「労務費は固定費である」と最近では言われているが果たしてそうであろうか。通常コスト計算では製造現場で働く人達の労務費は生産高に比例して発生するコストであり、変動費と言われる。一方事務部門や管理監督者の労務費は生産高に関係なく期間内では一定額発生するため固定費として原価計算するし、これが通常原価計算論の基本である。ところが近年景気が横這いで大幅な売り上げの伸びが期待できない状況では、すでに雇用した社員の解雇は不可能に近く、どの企業でも余剰人員が発生しているのが実態である。そうなれば労務費はもはや固定費ではないか、という論理となってくるのも事実である。本論ではこの議論に結論は出さず、通常原価計算論に沿って考察したい。

変動費で扱われる労務費は製品1個当たり、あるいはもっと厳密な原価計算を行っている企業ではラインの工程別稼働時間1分当たり何円としてコストに組み込まれている。製造現場で働く社員の給与は基本給はむしろ低く、残業など変動部分の割合が高く、作業した時間数でその月の給与が決まることが多い。つまり時間給に近いので、そのままあたり計算が出来る。賞与や社会保険、福利厚生費はいくら製造現場とはいえ、時間当たりでなく固定的であり、これは下記の計算式で求めた必要総稼働時間で当該部門の総費用を除いて工程別（ライン別）1分あたりコストに換算する。

$$(1) \text{必要総稼働時間} = \Sigma (\text{製品1個当たり工程別必要生産工数(時間)} \times \text{生産数量})$$

ここでいう生産数量は販売数量では無いのは自明の理であろう。つまり下記(2)の関係を想定して生産量を決定するからである。

$$(2) \text{当期販売数量} = \text{期首在庫数} + \text{当期生産数量} - \text{期末在庫数}$$

ここでは在庫の適正化が当期生産数量決定の大きな要因となってくる。

以上から変動費及び固定費としての労務費は時間当たり換算され、原価計算が可能となってくる。経験則上、製造会社においては、売上高に占める労務費の割合は、外注委託比率ゼロという前提では、おおむね30%未満が理想であろう。

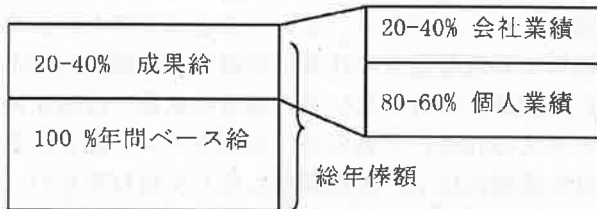
3.2 余剰工数の取り扱い

上記(1)で求めた必要総稼働時間は果たして何人の社員を必要とするか、が会社の経営計画のポイントである。当然、何人社員が在籍するから生産量をいくらにする、ということとはできない。事務員や管理監督者の仕事は生産量と無関係（完全に無関係とは言えないが、通常の状態では固定的と考えられる）であるが、生産ラインで働く社員は生産量に応じ、人員調整しなくてはならない。そこで左記(1)の総時間を人間の頭換算してみた結果、必要総稼働時間の定時時間総数 < 実在籍者の定時時間総工数（工数：時間）という場合、余剰が発生していることとなる。この場合、残業をゼロとしても人が余る計算となり、企業としてこうした余剰人員の取り扱いに頭を悩ますこととなる。工数計算上で人が余った場合、そういう社員をどう扱うかが問題となる。大企業で下請けや、関連先など裾野の広いグループ企業では出向などで余剰を解消することは出来るが、多くの企業はそうではない。いつ生産が向上し、工数不足を来たすか分からない事態への対応として余剰人員を抱えたまま生産を続けることになってしまう。後で述べるが、簡単に社員の解雇も日本では出来ない。そこで**労務費は固定費**、という考え方にもなってくる。社員の解雇は労働基準法上は、「原則解雇は出来ない」が「30日以上事前の通告、又は30日分相当以上の平均賃金の支払いで解雇予告可能」（労働基準法第20条、21条）とあるが、労働者側に瑕疵が無い限り、合理性を欠く解雇は出来なく、労働訴訟の実態としてほぼ大半のケースで企業の敗訴となっている。

4. 成果主義

日本的経営の代名詞とも言われた終身雇用、年功序列が崩れ、今や成果主義に基づき報酬が決定される時代となっている。かつてのような春闘での大幅な賃上げ、特にベースアップはせいぜい一人当たり千円から2千円という小幅なところで決まっている。大半の企業の成果主義の測定の仕方は、会計年度の初めに管理職と社員が各自の業務目標を話し合い、お互いに合意に達した所でサイ

ンを交わし、6ヶ月後あるいは1年後の事業年度終了時に実際のパフォーマンス評価結果の話合いをし、合意に達した数字が賞与に反映される仕組みである。企業によっては年俸の20—40%がこの成果給となっているところが多い。更にはこの成果給部分は会社業績部分（例えば30%）と個人業績部分（例えば70%）に分かれ、それぞれ職位が上位になるほど会社業績の比率が高くなっているケースが多い。



成果主義を先行して導入した富士通では、経済の低迷と共に自社の業績が低迷し始めた原因の一つがその成果主義の導入にあった、として反省し、日本の経営の良い部分を取り入れようと成果主義100%から脱皮を図っている。また「成果主義の崩壊」という告発図書も出ており、一時期話題を呼んだ⁴⁾。

このように、人の評価まで「100% 欧米式」というのも個性がなくなってしまうように思える。日本型経営の良い点も見直さなくてはならない。年功序列は弊害のように言われるが、年を重ねることの意義もあるわけで、「和洋折衷」も大事であろう。日本が再度世界経済の檜舞台に登壇して行くためには、かつてのソニー、松下、ホンダというような著名な経営者の輩出と独自の経営理論を持たないと日本はいつまでも二流に終わってしまうであろう。そのキーポイントは「人間関係論」であり、人を大切にしながら、業績を伸ばしてゆく、というのが企業のあるべき姿ではないか、と思う。

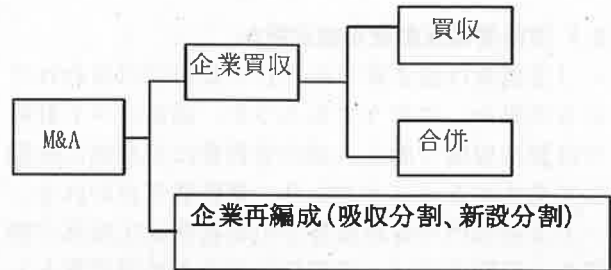
現在日本の上場「大会社」（資本の額が5億円以上または貸借対照表上の負債の合計額が200億円以上の会社）では日本版SOX法と呼ばれる「内部統制」の強化とそのため社内業務整理（社内全業務の業務プロセスとフローチャートなどの作成義務）に膨大な資金と労力を投資して、てんでこ舞いしている。全て欧米の右習え式でやはりここでも日本の独自性が見られない。かつてアメリカで日本的経営がもてはやされ、社員のやる気を起こさせるのは日本的経営が最善である、と言われた時期もあった筈である。その日本的経営の原点であった「年功序列」や「終身雇用」をむしろ、もう一度考え直してみよう、という雰囲気も日本社

会の中に出来つつあるのは大いに歓迎したい。

5. M&A

さて本論最後のテーマであるM&Aについて一部筆者の経験に基づき、論述してみたい。

M&AはMerger & Acquisitionの略で「経営権の移転を伴う提携」である。それは下図のように「企業買収」と「企業再編成」（会社分割）とに分類される。



最近村上ファンドが証券取引法違反で告訴されているが、上場企業で、今後業績が伸びる可能性のある会社は買収の格好の狙い目となっている。特に狙われやすいのは上場企業で(1)内部留保が豊富にある、(2)無借金経営、(3)配当性向が高い、(4)不特定株主が多い会社、ではないかと思われる。その理由は持てる豊富な自己資金の再投資により、拡大再生産理論による経営の更なる発展、引いては株主への配当での還元が大となってくる、という期待感からである。投資側からすれば、買収による投資額と年間で得られるリターン、それが配当であれ、役員派遣などによる労務費のリターンであれ、総リターンの収益還元価値が投資コストを上回れば成功となるわけである。

村上ファンドのように海外投資家から数千億円という膨大な資金の提供を受け、国内企業に再投資し、リターンを得る、といういわゆる「秃げ鷹ファンド」が無防備な日本の企業に狙い目をつけており、企業防衛策（ポイズンピル）を企業は必死でリスクヘッジしなくてはならない⁵⁾。

となれば、体力の無い会社は最早上場する意味がどこにあるのか、ということで上場廃止を決めた会社もある。これは本末転倒の議論であり、上場することにより、コーポレートガバナンスを充実させ、公開企業としての社会的責任（CSR）を果たしてゆくことが企業の本来の目的であり、乗っ取り防止のために上場廃止などは、どこか社会の仕組みがおかしいと言える。

日本は急激な経済成長の中であらゆるインフラ整備が後手後手となってしまった。こうした企業防衛

のリスクマネジメントすら緒についたばかりである。

5.1 会社分割

本論では M&A 手法の中の会社分割について触れてみたい。企業は「資源の選択と集中」という資本の理論から企業の持つ各種の営業分野を分離し、得意の分野に特化しようという企業の思いと、分離される分野が欲しいと願う企業との思いが合致して事業を譲渡する手法である。ここから筆者が実際に経験した例で述べてみたい。エスエス製薬（株、本社東京日本橋）は年商 500 億円でその内 20% の 100 億円が医療用薬品（Ethical drug）の開発・製造・販売、残りの 80% が大衆薬品（OTC）の開発・製造・販売を行って来た創業 240 年という国内では田辺製薬に次いで老舗であり、特に大衆薬では大正、武田に次いで業界第 3 位のシェアを持っている無借金経営の会社である。そのエスエス製薬（以降エスエス）が全体売上の 20% 部分の医療用薬品を久光製薬（以降久光、本社佐賀県鳥栖市）に対する分割譲渡を 2005 年 4 月に実施した。この買収で久光が支払った金額は 146 億円であった（薬局新聞 平成 17 年 4 月 13 日）。通常買収額は収益還元法など各種経済計算で行われるが、単純には売上の 1-2 年分、利益額の 3-5 年分相当でやりとりされているのが現状ではないだろうか。エスエスの場合は売上の 1.4 年分となる。久光側は「貼り薬」と言われるサロンパスのような製品で国内のトップシェアを誇る独占企業で年商 800 億円を超える高収益企業である。この久光とエスエスは会社分割という手法でその事業の一部を譲渡することとなった。

5.2 M&A と社員

当然ながら M&A の作業は超秘密裏に進められ、その間社員の参画はあり得ない。対象者は報道されたように、総勢 266 名（薬局新聞平成 17 年 4 月 13 日）。発表後、久光としてはエスエス社員を暖かく向かえるべく最大限の努力をしてくれたが、勤務地変更により、単身赴任を余儀なくされる者など、これまでの人生設計の変更を余儀なくされる者も多かったことと思われる。エスエス側としては社員に納得を求めるため、実行日までの約 1 年間、組合と労使交渉に大変な労力と時間を費やすこととなった。そして筆者がその責任者として矢面に立つこととなった。しかし、有り難かったのはそういう苦難の中でも一人としてサボタージュしたり、製造過程で混乱を来すことも無く、また売上を落とすことなく、通常通

りに営業を継続してくれたのには経営陣として大変感謝の念に耐えなかった。これも日本人だからこそも知れない。医療用薬品は「患者」という顧客が医薬品を必要としており、どんな会社都合であろうと、その製品の供給をストップすることは社会責任上出来ないのである。

かつて欧州勤務時代にフランスの自動車会社のストライキを目の当たりにした経験がある。欧州では組合組織が産業別となっているため、社内組合だけではなく、同じ産業別の外部団体が応援に来て、大変激しい闘争を、しかも長期間にわたって行うため、ストライキが行われると会社経営は麻痺してしまう。しかも欧州ではかなり頻繁にストライキが行われており、近辺の道路は封鎖され、通行にも支障を来すが、余り部外者への迷惑は顧みないようである。

日本の場合には、労使共に、現在争っている目的を明らかにし、できるだけ早期に解決を求めようとする意識があるため、欧州のように長期化することは少ない。

5.3 分割に伴う労働契約承継法

M&A 案件や薬事法では「承継」という言葉を使う、これは「継承」と同意語である。

会社分割は事業の一部を他社に譲渡する訳で、組織をそのままそっくり移転させることとなる。従い、そこで働く社員も当然ながら分割された会社に引き続き勤務することが前提である。引き受ける側からすると、製品を開発・製造・販売する社員が必須であり、コアとなる社員が欠けると事業が成り立たなくなるからである。勿論新会社として引き受ける社員が少ないほど労務費負担が少なく済むため、M&A においては社員の異動数が相互の駆け引きとなってくる。引き受ける社員数が多いと買収価値は下がり、少ないと価値は上がるものである。当然ながら間接部門（人事・総務・経理部門など）の社員の移籍は敬遠されることが多いと思われる。

また昨年度の薬事法の改正により、製造工場は持たなくても良くなったことが製薬会社間の頻繁な M&A に拍車をかけることとなった。エスエスの場合も久光に事業譲渡後も当面はエスエスで製造を受託することで契約を行っている。

さて、会社分割では「労働契約承継法」が適用され、対象となる社員で「当該事業分野の業務が個人の主たる業務である場合は拒否権がない」、逆に「主たる業務でない社員は会社に不服の申し立てが出来る」とされている。その代わり、「現状

の労働条件・報酬はそのまま一定期間同一水準で維持しなくてはならない」というのが「労働契約承継法」である。ここで「主たる」とは何かが問題となる。解釈として、その業務に大半の（50%以上）ウエイトがある場合、というのがその理解となる。

労働契約承継法を採用しない場合は、M&A 実行に当たり対象社員全員の同意が必要となる。しかしながら、当然全員の同意をとることはほぼ不可能であるため、会社としては労働契約承継法を選択することとなる。しかも、それによって社員の労働条件は一定期間、同等レベルに保つ事ができるため、社員にとっても、一定期間内は労働条件の不利益変更が無く、好都合な筈である。しかし、会社側からの説明はなかなか社員を納得させるのは困難である。

M&A における最大の成功策は「当該事業の商品」のみ譲渡され、「人」は出来るだけ移動してこないこと、と言われている。それは M&A 後の会社経営の効率化を考えると、最大の固定費たる労務費負担を出来るだけ避けるためであるのは、至極当然であろう。では「人は要らない、営業（製品）だけが欲しい」というのが M&A の実態だとしたら、そこに誠心誠意尽くしてきた社員は一体何のために企業で働き、素晴らしい研究成果としての製品を生み出し、会社発展のために貢献してきたのか、と自問自答せざるを得ない。

6. 結 び

1960年代の経営学では「企業は人なり」と言われていた。現在では「企業は誰のものか」という議論からはその答えは、先ず「社員のもの」とは言えない時代である。コーポレートガバナンスの観点からは「株主」が最優先とされている。それは投資家が企業を実質的に「所有」し、その得た剰余金の分配は株主が「株主総会」で決定するからである。一方でその利益を生み出す知恵と労力を提供したのは主として社員であり、果たして社員は給与と賞与で十分に報われていると言えるのであろうか。

M&A は新聞紙上ではすんなり行われたように結果しか表面化していないが、その舞台裏では会社も社員も痛みを味わっている。大手金融会社の統合がひと段落したようであるが、依然「異なる会社間の社員の処遇」は未解決のまま、という企業が多いのも事実である。「社員を大事にする優しい会社」、「お客様第一主義」とかいう経営理念を掲げる会社が多いが、会社の経営者は再度

その中長期的にとるべき施策と社員の処遇について社員参画のもとで考え直す必要があると思われる。どんな場合でも人は財産であり、人間社会においては、人間関係が最も大事であることを忘れてはならない。この論文が一石を投じることが出来れば幸いである。

参考文献

- [1] 高橋衛：科学的管理法と日本企業（導入過程の軌跡），御茶の水書房，（1994）。
- [2] 梶原豊：人的資源間理論，同友館，（2002）。
- [3] トーマス・C・コ克蘭：アメリカのビジネスシステム，筑摩書房，（1969）。
- [4] 城繁行：内側から見た富士通「成果主義の崩壊」，光文社，（2004）。
- [5] 芥川基：図解会社分割，中央出版，（2001）。

ベルベット織物を用いた炭素電極研磨

今村 朋洋*, 西海 豊彦**, 青木 幸一**

The Polishing Function of Velvet Textiles for Glassy Carbon Electrode

Tomohiro IMAMURA*, Toyohiko NISHIUMI** and Koichi AOKI**

(Received January 31, 2007)

The polishing method is one of the most important interests for the researchers who investigate electrochemistry, interface phenomena, electric circuits and optics. However the properties of polishing cloths such as the materials, durability and manufacturing processes have never been considered yet by the researches. Fukui is well-known as a prosperous area in fiber industry. Because the rubbing and polishing processes are very important for electronics and nano-technologies, high technology has stimulated fiber industry, currently. In this paper we evaluate six kinds of velvet textiles and we found the advantage of using velvet textiles for polishing glassy carbon electrode over the commodity one. Then we adopt velvet textiles as polishing cloth for glassy carbon because we need the smooth surface on the glassy carbon electrode as mirror like.

Key Words : Velvet Textile, Polishing Cloth, Glassy Carbon Electrode, Cyclic Voltammetry

1. 緒言

福井県では古くから繊維産業が盛んであり、機能性繊維の生産だけでなく、染色整理、織物産業も活発であり、様々な布が作られている。これらは、衣料、家庭用、インテリア用のみならず、産業用に利用されている。繊維加工技術に於いて、例えば、3次元織物に分類されるベルベット織物は、手触りの良さや見た目の美しさだけでなく、液晶のラビングやハードディスクのポリシング材として、工業生産のラインとして先端製品の製造に使われてきた実績がある。^{1)~14)} 我々の電気化学分野の研究では、白金や炭素素材の電極表面を磨くことは実験を行ううえで避けて通れない必要な技術であり、H頃から適当

な研磨布を検討してきたが、専ら電気化学測定キットを販売する会社の市販の研磨布を用いてきた。これは、一見ベルベットに良く似た構造の布で、パイルに相等する研磨用繊維が電着植毛によって接着剤でランダムに高密度にベース布に固定されたものだが、製品寿命が短いという欠点があった。また、剥れた部分とパイルが残っている部分では電極との接触状態が異なり、電極表面を正常に磨くことができなくなる可能性が高かった。一方、ベルベット織物は、パイル糸がベース布に織物として織り込まれ、非常に規則正しく高密度に並んでいるという特徴があり、構造上パイル糸が抜けにくいいため、長寿命で高い研磨性能が期待される。そこで、不安定な市販の研磨布を使うよりベルベット織物を使用できることが分かれば、我々の実験結果の信頼性が増すことが期待出来る。電気化学電極を磨くために、ベルベット布を用いるということは、学会関係者の間でも聞いたことはない。ベルベット織物が市販品以上の性能と耐久性を発揮するならば、今後電極を使う最先端の研究、分野でますます使用されるようになる

* 物理工学科

** 工学研究科ファイバーアメニティ工学専攻

* Dept. of Applied Physics

** Fiber Amenity Engineering Course, Graduate School of Engineering

表1 用いたベルベット織物の特性

ベルベット	#3180-090	#8037-090	#6600-090	#3160 マルチ	#6040	#1030-090
タテ糸	PET56T	Co 40/2	BB 135T	PET56T	PET84T	RY133T
ヨコ糸	PET56T	Co 40/2	BB 110T	PET56T	PET84T	RY133T
パイル糸	PET/NY84T24F	Co 40/2	RY133T40F	PET56T144F×2	PET167T96F	NY110T48F
タテ密度 (本/インチ)	136	46	61	126	175	178
ヨコ密度 (本/インチ)	101	81	95	100	119	97
パイル密度 (株/インチ ²)	4800	1800	3800	4200	5200	4300
フィラメント密度 (k本/インチ ²)	1210	天然繊維の 為不明	150	1210	499	206
総厚 (mm)	1.2 ± 0.15	2.5 ± 0.1	1.8 ± 0.1	1.2 ± 0.15	1.2 ± 0.15	1.6 ± 0.1

PET: ポリエステル, Co: 綿, BB RY: レーヨン, NY: ナイロン

だろう。こうした積み重ねによって、ベルベット織物が新しい分野で使用されるようになれば、更なる織物業の発展、ひいては福井県の繊維産業の発展に繋がると考えて、この課題に取り組んだ。

2. 実験

揚原織物工業株式会社により提供された表1に示すベルベット織物と市販の電気化学電極用研磨布を用いて、実際にグラッシーカーボン電極を研磨して顕微鏡観察により比較した。与えられたベルベット織物の中からグラッシーカーボン電極を磨くのに最も適したものを見つけ、市販品に対しての性能評価を行った。また、最も基本的な電気化学測定法である、サイクリックボルタモグラム測定を行った。

2.1 ベルベット織物

ベルベット織物は、図1に示すような基本構造をしており、下地のタテ糸、ヨコ糸、および、垂直に立ったパイル糸からなる。ベルベット織物は、平織り又は綾織りなどの2枚の織物の間にタテ糸の一部を用いてパイル糸を織り込みそれを2枚に切り分けて製造される。製造後パイル抜けが少なく、パイル密度が高く、パイル繊維の直立性に優れる。繊維の軸

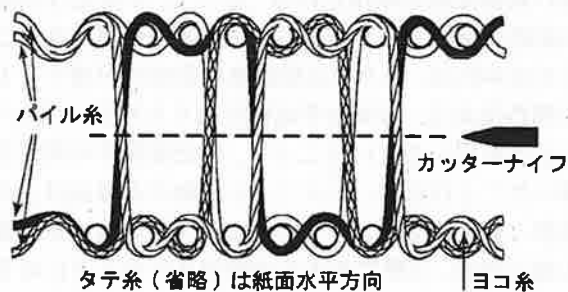


図1 Velvet (タテ糸・ヨコ糸・パイル糸)の基本構造

方向が高密度にそろっているため、柔らかく、光を吸い込むような深い色艶を示し、繊維の末端周辺の特徴を直接伝える肌触りを実現できる織物である。

2.2 実験器具

直径3.0 mm グラッシーカーボン電極(東海カーボン)、サンドペーパー#600、顕微鏡倍率450倍(KEYENCE)、両面テープ(ニチバン)、シャーレ、アルミナ(0.3 μm)、表1のベルベット織物(揚原織物工業株式会社)、市販電極用研磨用パット(BAS)、蒸留水、白金コイル、銀|塩化銀電極、ポテンシオスタット(扶桑)。

2.3 実験方法

実際に電極を磨くときは電極表面の傷の状態を考慮し、#の小さいサンドペーパーからサンドペーパー#2000まで磨いた後、市販の研磨布の上にアルミナを使って磨いた。そうした場合、一般に、電極表面は鏡のようになり、瞳を写すことができるくらい滑らかな電極表面に磨き上げることができるが、今回の実験では布の特性を比較することを目的としているので、通常と異なる方法で検証することにした。

まず市販サンドペーパー#600で電極表面を磨き、表面に粗い傷を付けた。この電極表面の状態をグラッシーカーボン電極表面が傷ついた実験前の状態として統一した。次にビデオ顕微鏡で電極表面を観察した。ベルベット織物を固定するために、シャーレの裏に両面テープで張り合わせ、研磨作業中、布が動かないようにした。アルミナを布の上に少量散布し、蒸留水を適宜加えてから電極表面を磨いた。磨き方は電極に垂直方向に一定の力を加えて8の字を描くように磨いた。0, 100, 200, 300, 500回とそれぞれ磨き終わった後、表面を顕微鏡で観察して写真を

撮った。その後、最も電極表面が滑らかになった電極を用いて一般的な電気化学測定であるサイクリックボルタンメトリー法でフェロセンの測定を行った。

3. 結果と考察

3.1 ベルベット織物による研磨

図 2-4 について、(a)はサンドペーパー#600 で磨くことで古い炭素表面を剥ぎ取り新しい表面が出るまで磨いたものである。図 2(b)はその後、それぞれの布で 500 回磨いたものである。研磨前後で同じ箇所を顕微鏡観察し 450 倍の倍率で撮影し、傷の消失過程が判別しやすいようにした。

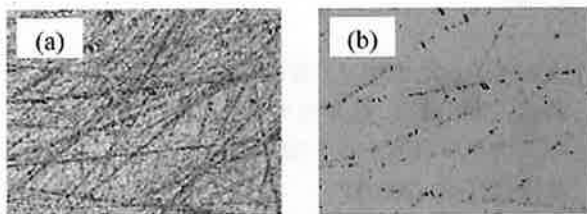


図 2 市販研磨布の結果 (a)研磨前 (b)500 回研磨後

図 2(b) は市販の研磨布を使用し、(a)を開始状態としてグラッシーカーボン電極を 500 回磨いたものである。図 2(a) と(b)を比較すると、浅い傷、深い傷に関わらず、平均的に全体から傷が消えている。市販の研磨布ということで完全に傷が消失することを期待していたが、小さい傷は残ってしまった。この結果から、市販の研磨布は粗い傷を磨くときに適さないとも考えられる。または、磨いている際に毛が抜け落ちていき、徐々に磨く能力が落ちたため、完全な平滑面を得られなかった可能性も考えられる。

次に、ベルベット織物が電極の研磨布として使えるかどうかを評価するために、この傷が消える過程を基準として用いた。顕微鏡写真については、研磨の評価結果を全て掲載することは出来ないため、最も良い結果を示したものと、効果的には傷が消えなかったものについて、2 種類の典型例についてのみ掲載する。

図 3 は、電極表面の傷が最も消えた場合であり、

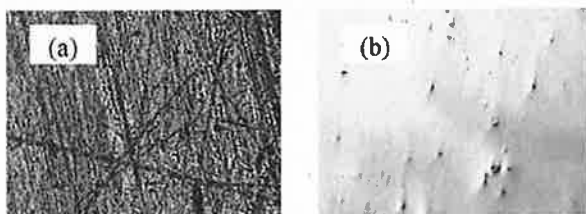


図 3 #6040 の結果 (a)研磨前 (b)500 回研磨後

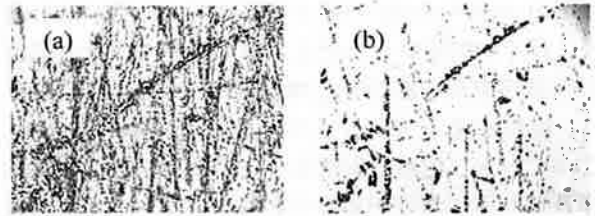


図 4 #8037-090 の結果 (a)研磨前 (b)500 回研磨後

図 3(b)は、#6040 を使用して電極を 500 回磨いたものである。サンドペーパーにより付けた初期の浅い傷、深い傷に関わらずほとんど全ての傷が消えたことが分かる。市販の研磨布より電極表面が滑らかになっており予想以上に良好な結果であるといえる。図 4 は、最も傷が消えにくかった場合であり、図 4 (b)は #8037-090 を使用して電極を 500 回磨いたものである。初期状態のサンドペーパーで付けた傷に比べて磨いた効果は表れているが、深い傷はほとんど消えておらず、浅い傷でさえも十分には消えていない。今回の実験では最も電極を磨くのに適さない布であった。パイル糸がポリエステル素材のものが、レーヨンやコットン素材よりもグラッシーカーボンの研磨に適していることを示唆している。

研磨操作後の図を省略したベルベット織物について結果は次の通りである。

#3180-090：平均的に傷は消えた。深い傷、浅い傷共に良く消えた。磨けば磨くほどそれに比例して傷が消える効果が表れた。市販の研磨布の効果に最も近い結果であるが、研磨効率の面で劣っていた。

#6600-090：浅い傷はある程度消えたが、深い傷は消えなかった。

#3160 マルチ：浅い傷はほとんど消えたが、深い傷が少し残った。磨く回数さえ増やせば、問題なく実用出来ると考えられる。

#1030-090：浅い傷はある程度消えたが、深い傷がほとんど消えなかった。#6600-090 と類似の結果が得られた。

布の表面が硬くしっかりしているとアルミナと電極がよくこすれた。また毛深く柔らかいとアルミナが毛と毛の間に入りこんでしまい、磨く際にアルミナで磨いているという感覚が感じられなかった。電極を磨くときに毛が長いと、先端が動いてしまい、うまく磨けないと考えられる。#8037-090 ではパイル糸が長く柔らかいため、効果的に磨けている感覚が無かった。傷は布表面の手触りに対して固いものと比べて柔らかい方が消えにくく、磨きにくかった。

今回の実験では炭素電極を使ったが、6 種類のベルベット織物のうち電極を磨く際にもっとも好ましい布は#6040 であることが分かった。この布は材質

がポリエステルで、パイル糸が短く、総厚が最も薄く、パイル密度がもっとも大きい。逆に今回の実験では結果が最も悪かった#8037-090はパイル糸が長く、総厚が最も大きく、パイル密度が最も小さい。このことから電極の研磨布として使用する布には総厚及びパイル密度が重要であると考えられる。次点は#3160マルチである。しかし#6040や市販の研磨布と比べると少々傷が残る傾向があった。今回の実験で使った#6040以外の布を使用するならば磨く回数を増やす必要がある。

3.2 サイクリックボルタンメトリー測定

#6040で磨いて最も滑らかになった炭素電極を用いてサイクリックボルタンメトリー測定を行った。^[1] KCl 0.1 M, FcTMA 1 mMの水溶液を用意し、作用電極に#6040で磨いた直径3 mmの炭素電極、対極に白金コイル、参照電極に銀|塩化銀を使用した。掃引速度を0.01 V/sで電位測定範囲を0.0—0.8Vで2周測定した。(図5)水溶性フェロセンであるFcTMAが酸化還元反応を示し、ピークが表れており、問題なく電気化学測定が行えることが分かった。このことから、ベルベット布を電極の研磨に使用して炭素電極は正常に機能し特別な影響はない。

4. 結論

今回6種類のベルベット織物を用いたが、織物の特性が分かっている範囲で電極を磨くのに最適な条件を把握すれば、炭素電極を効率よく綺麗に磨けることを実証出来た。構造的にパイル糸が抜けにくいベルベット織物は、市販の電極用研磨布に対して明らかな利点を有しており、丈夫で長持ちする。よってベルベット織物を使えば安定した研磨をすることができるようになるといえる。ベルベット織物は、他にも特性の異なる種類があるので最も適した研磨布

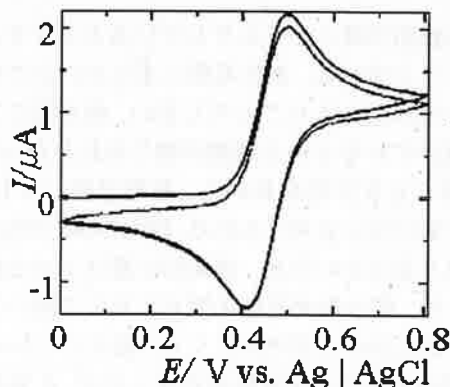


図5 水溶性フェロセンのサイクリックボルタモグラム

を設計、開発するべきであろう。そうすることによって電極を磨く精度の向上にも繋がるし、電極を使う分野への貢献にも繋がるだろう。

また、ベルベット織物で磨いた電極を用いて実際にサイクリックボルタンメトリー測定した結果から、ベルベット織物を炭素電極の研磨に使用しても問題ないことが実証出来た。

謝辞

この場をかりてベルベット織物を提供して下さった揚原工業株式会社に感謝の意を表させていただきたい。

参考文献

- [1] 上山博之, 尾畑納子, 喜成年泰, 桑原宣彰, 新宅救徳, 高田輝彦, 松平光男, 山本孝: 21世紀のテキスタイル科学—人と環境の関わり, (社)日本繊維機械学会 (2003).
- [2] 繊維学会編: おもしろい繊維のはなし, 日刊工業 (1989).
- [3] 篠原昭, 白井汗芳, 近山淳雄: ニューファイバーサイエンス, 培風館 (1990).
- [4] 宮本武明, 本宮達也: 新繊維材料入門, H刊工業新聞社 (1992).
- [5] 電気化学学会: 電気化学測定マニュアル基礎編, 丸善株式会社 (2002).

ユーザのセキュリティ意識向上を目的としたパケットヘッダ情報 可視化システム

中野 翔太* 白井 治彦*** 高橋 勇** 黒岩 文介** 小高 知宏* 小倉 久和**

A Proposal on End-User Network Security System To Visualize Packet Header Information

Shouta NAKANO *, Haruhiko SHIRAI ***, Isamu TAKAHASHI **, Jousuke KUROIWA **
Tomohiro ODAKA ** and Hisakazu OGURA **

(Received January 31, 2007)

To Improve security awareness of end-user, we designed and implemented the visualization system of packet header that represents the condition of network communication. We implemented our system using Microsoft Visual Studio 2005 with Winpcap library and the development language of system was Visual C++. This system captured a packet and visualized flow of network traffic, protocol and the time it captured a packet.

Key Words : Network, Security, Visualization, Packet Header

1. はじめに

近年、情報通信技術の発展に伴い、ネットワーク通信(以下、通信)の高速化・大容量化が進んでいる。しかし、技術の進歩における弊害が表面化しているのもまた事実である。それは、通信というものが目に見えず抽象的な存在であるため、一般的なユーザにとっては実際に通信がどのような仕組みで、どのようなことが行われているかわからないという問題である。この問題の一例としてファイル共有ソフトの利用が引き起こした企業や官公庁による一連の内部情報流出事件が挙げられる。これは通信に対する意識の低さが引き起こした事件と言える。このような問題を解決するためには、ユーザがセキュリテ

ィ意識を高くもつ必要がある。そのためには、通信についての知識や構造を知る必要がある。そのためのツールも数多く存在するが、例えばプロトコルの名称やパケットの構造などネットワークの専門的な知識がないとわからないことも数多く存在し、一般的なユーザには敷居が高いものとする。また、ユーザに通信に対して興味を持ってもらわなければユーザは通信に関する知識を身につけようとはしないと考える。

そこで本研究では、ネットワークに対する知識が乏しいエンドユーザを対象とし、ユーザが使用しているコンピュータにおけるネットワークの情報をわかりやすく提示するシステムを提案する。このシステムを利用することで、ユーザは抽象的な存在であるネットワークの世界に興味をいだききっかけをつくり、その興味をユーザのセキュリティ意識向上へとつなげることが本研究の目的である。システムにおけるわかりやすさという視点に着目し、通信の状況をできるだけシンプルに表示することが重要だと考えた。そこで、利用中のコンピュータがやりとりするパケットにおけるヘッダ情報の一部のみを表示することで情報を簡素化することとした。ヘッダ情報はネットワークの流れをわかりやすく理解できる

* 工学研究科原子力・エネルギー安全工学専攻

** 工学研究科知能システム工学専攻

*** 技術部

* Nuclear Power and Energy Safety Engineering Course, Graduate School of Engineering

** Human and Artificial Intelligent Systems Course, Graduate School of Engineering

*** Dept. of applied Physics

ものだけを選択してユーザに提示するものとした。具体的には、通信におけるデータ量を表すパケットのサイズ、通信が行われているサービスを表す宛先ポート番号というヘッダ情報をシステムで利用する。システムはネットワークから取得したパケットからヘッダ情報のみを利用し、そこから前述の2つのヘッダ情報に加えて、不必要なパケットをフィルタリングするためのヘッダ情報の抽出・保存・処理を行う。そして、単位時間ごとの宛先ポート別通信量上位3位をグラフ化して表示することでわかりやすいインターフェースを実現した。システムは、一般的に利用者が多いOSであること、そして対象とするユーザを考慮に入れた結果、Windows系OSで動作するものとした。

本論文は2章でセキュリティの現状とそれをふまえてのシステムの設計について、3章ではパケット可視化システムの実装について、4章では動作実験について実際のインターフェース画面を交えて述べ、5章では考察、そして6章で今後の課題について述べる。

2. セキュリティの現状とシステムの設計方針

2.1 セキュリティの現状

常時接続形態のネットワークの普及でコンピュータがネットワークに接続する時間が長くなったことにより通信量が増大し、コンピュータウイルスやワームなどの悪意あるプログラムによる不正アクセスの危険性が高くなっている。同時にクラッカーによる人為的な不正アクセスの危険性も高くなっている。このような悪意あるプログラムやユーザはコンピュータ内のデータを破壊したり、コンピュータそのものを停止させたりといったユーザにとって不利益な活動を行う。

しかし、このような危険な状況にも関わらずウイルス対策ソフトやファイアウォール等の導入といった防御策を全く行わずに通信を利用するユーザが後を絶たないという現状がある¹⁾。これがひとつめの常時接続環境における弊害である。この状況は、ネットワーク環境の改善によりインターネット利用者の間口が広がり、誰でも通信が利用できるようになったことが一因であると考えられる。

ふたつめの弊害は、ファイル共有ソフトの利用による企業や官公庁などの一連の内部情報漏洩事件である。これらの事件はファイル共有ソフト利用者を標的としたワーム型ウイルスに感染することが原因である。感染するとウイルスがコンピュータ内の個人情報や企業の情報をネットワークに流出させてし

表1 近年のネットワーク環境、常時接続環境の弊害とその原因

事象	概要
近年のネットワーク環境	大容量常時接続形態
常時接続環境における弊害	不正アクセスの危険性の増大とそれに対するユーザの無関心
	ファイル共有ソフト利用によるウイルス感染
常時接続環境における弊害の原因	エンドユーザがネットワークに興味を持たない
	ネットワーク・通信の構造を知らない

まう。

ファイル共有ソフトの使用自体に根本的な問題があるようにも思われるが、不正アクセスに対して無防備なユーザの問題も含めて、これらの弊害にはある共通した問題があるように思われる。それはインターネットを利用する一般的なユーザが、ネットワークがどのような構造であるか、そして通信がどのようにして行われているかを知らないこと、またネットワークそのものに対して興味を持たないことである(表1参照)。

その理由のひとつとしてはネットワークが目に見えず、抽象的な存在のためであると考えられる。これは通信が不透明であり、かつネットワークにおけるデータのやりとりが複雑な構造をしていることに起因していると考えられる。もうひとつの理由は通信が常時接続形態になったことで通信を利用したアプリケーションが増えていることであると考えられる。

そのため、ブラウザやメーラーのようにユーザによる操作によって通信を行うアプリケーションだけでなく、ユーザが意図しないところで通信を行うアプリケーションが非常に増えている。例えば、ウイルス対策ソフトに代表される定期的なアップデートが必要なソフトウェアはユーザが意図しないところで通信が行われてしまうアプリケーションである。

このような理由から、ネットワーク環境の改善によりユーザと通信との距離は縮まったが、ユーザ全体のネットワークに対する興味や理解度は平均して下がっているものと考えられる。

2.2 システムの設計方針

図1に2.1章で述べた問題に対応したシステムの設計方針を示した。本システムはネットワークにおけるエンドユーザにセキュリティ意識を高く持ってリテリ意識の低いユーザが本システムの対象となるわけであるが、そのようなユーザとはすなわちイン

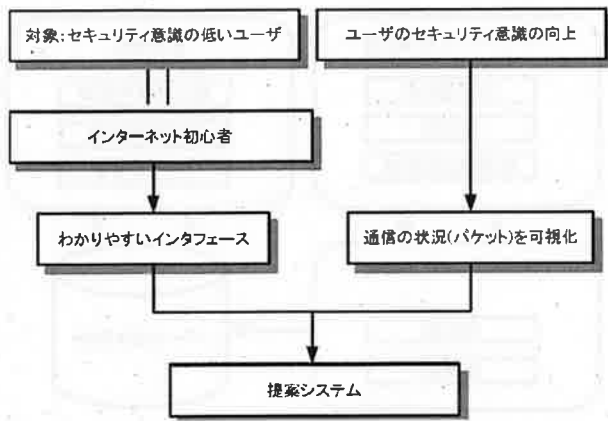


図1 システムの設計方針

インターネット利用歴の浅いユーザである[1]。インターネットの利用歴の浅いユーザはネットワークに関する事象の認知度も低いものと考えられる。そのため、このようなユーザにセキュリティ意識を高く持ってもらうためにはなるべくわかりやすいインターフェースを持ったシステムが必要であると考えられる。それと同時に、このようなユーザの多くは UNIX 系 OS の利用をすることはほぼ皆無と考えられる。そこで、本システムは Windows 上でのみ動作するものとする。

また、何らかの形で通常は見ることができないネットワークにおけるデータの流が見えるようにすることがセキュリティ意識の向上には必要であると考えられる[2]~[6]。つまり、通信の状況をユーザに提示するという意図をもったパケットの可視化である。

以上より、本システムは対象とするインターネットの利用歴の浅いユーザに対してシンプルでわかりやすいインターフェースでパケットを可視化するシステムとする。そのため、ユーザに提示する情報をヘッダ情報の一部だけに簡素化し、そのうえで通信の状況がわかるように設計した。システムでは以下のような情報をユーザに提示するものとする。

- 宛先ポート番号とそのサービス名
- 単位時間あたりの宛先ポート番号別通信量

まず、宛先ポート番号をユーザに提示する理由は一般的なクライアントーサーバ間の通信において、その通信を特定するのがサーバにおけるサービスだからである。クライアント側ではネットワーク上でデータがやり取りされる際に 1025 番以降の短命ポートが使われるケースがあり、その状況をユーザに把握させたいという理由から表示するものとした。例えば、クライアントが Web 閲覧を行う場合、通信を特定するのはサーバにおけるサービスであるので、クライアントが Web サーバに対して通信をするこ

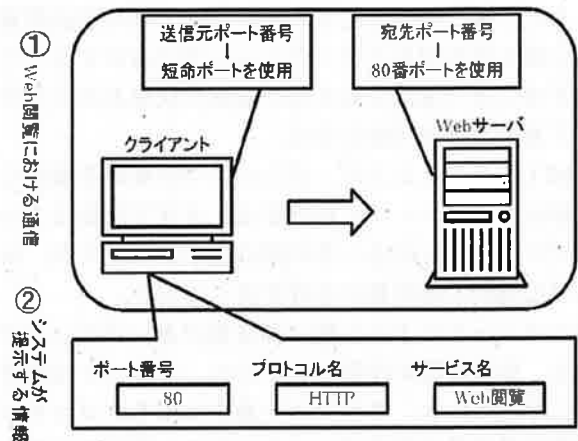


図2 システムが提示する情報。(Web 閲覧を行う場合)

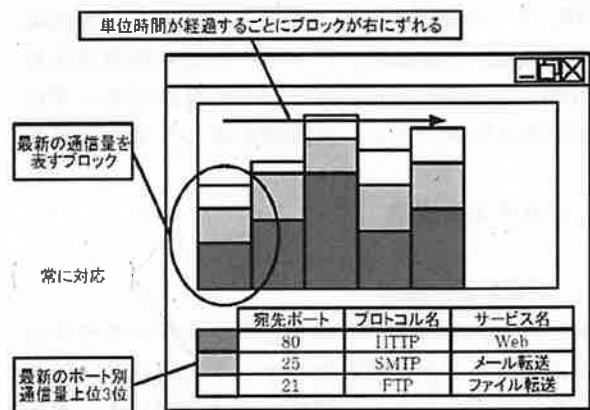


図3 システムのインターフェース両面例

とになる。よって通信の方向としてはクライアントからサーバという方向となる(実際の通信では、クライアントーサーバ間では双方向の通信が行われる)。そのとき、クライアント側には送信元ポート番号、サーバ側には宛先ポート番号が割り当てられる。クライアント側では任意の短命ポート番号が使用され、サーバ側は HTTP(HyperText Transfer Protocol) によって使用される 80 番ポートがこの場合には当てはまる(図 2①参照)。

サービス名はヘッダ情報には含まれないが、宛先ポート番号のみの表示では対象とするユーザがどのプロトコルを使用し、どのようなサービスが行われているのかがわかりづらいと考えたため、ポート番号と対応付けて表示するものとした。前述と同様に HTTP を例にあげると、「80-HTTP-Web 閲覧」といった表示がシステムからクライアント側、すなわちユーザになされる(図 2②参照)。

また、単位時間あたりの宛先ポート番号別通信量の上位3位までをグラフ化しユーザに表示する。こうすることで通常は見えない通信の状況をわかりやすく見ることが可能となる。

図3に示したように、以上の2つの要素を融合した形をもってユーザに提示する。グラフ画像は3つのブロックからなる1本の縦に長いブロックがある。単位時間の通信量の合計を表しており、そのブロックの下から順に通信量が多いブロックである。単位時間が経過するごとに、ブロックは右方向にずれていき、グラフの一番左にあるブロックが最新の通信量を表すブロックとなる。画面下の宛先ポート番号・プロトコル名・サービス名の情報は単位時間が経過するごとに更新されていく。つまり、情報の表示はグラフ画像の一番左のブロックの情報をユーザに提示している。図3は最新の単位時間あたりにおいて宛先ポート別通信量の上位3位がHTTP、メール配送・転送に利用されるSMTP(Simple Mail Transfer Protocol)、ファイル転送に利用されるFTP(File Transfer Protocol)であった場合にユーザに提示するインターフェース画面を表したものである。

3. システムの構築

3.1 システムの概要

本システムはユーザに対するネットワークセキュリティ意識向上を目指したパケット可視化システムである。このシステムの構成を図4に示した。本システムはパケットヘッダ取得機構、パケットヘッダ処理機構、データ保存機構、表示機構という4つの機構から構成される。

3.2 システムの実装

2.2章で述べたシステムの設計方針に基づき、開発環境としてMicrosoft Visual Studio 2005を用いてシステムを実装した。開発言語はVisual C++を使用した。以下に、システムにおける各々の機構の詳細について示す。

3.2.1 パケットヘッダ取得機構

パケットヘッダ取得機構によってパケットにおけるヘッダ部分のみを取得する。パケットヘッダの取得には、WinPcapライブラリ^[7]を使用する。WinPcapライブラリとは、Windows環境においてネットワークアダプタでやりとりされるパケットの取得に関する様々な操作を行うことができるライブラリである。パケットを取得すると、格納部においてWinPcapライブラリで用意されている構造体に全ヘッダ情報が格納される。システムが動作しているときはパケッ

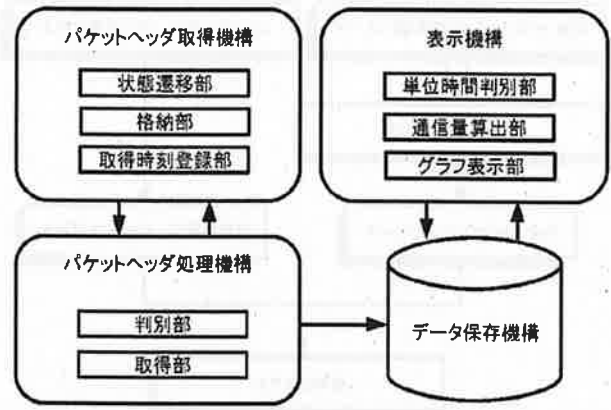


図4 システムの構成

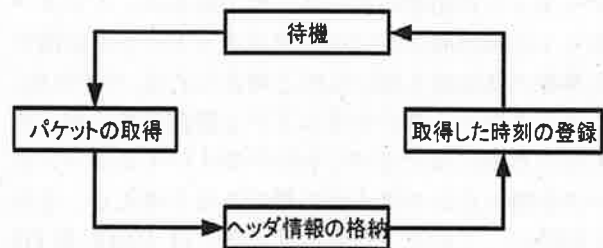


図5 パケットヘッダ取得機構での内部構造

トの取得と取得待機が繰り返されるので、パケットを取得する度に、状態遷移部にて取得状態・待機状態の状態遷移が絶えず行われる。つまり、パケットが全くこない場合は待機状態が続くことになる。また、時刻登録部にてパケットヘッダを取得した時刻を登録しておく。まとめると、この機構では、図5のようなループがシステムを終了するまで繰り返されることになる。

3.2.2 パケットヘッダ処理機構

パケットヘッダ処理機構の構造を図6に示した。点線で囲まれた部分がパケットヘッダ処理機構である。また、点線の内部にある図はパケットの構造を示したものである^[8]。実際にはパケットの情報はパケットヘッダ取得機構にて構造体に格納されている。

まず、パケットヘッダ取得機構から渡されたヘッダ情報を判別部においてヘッダ情報を用いた選別を行う。Type FieldはEthernetにおける上位プロトコルが何かを示しているものであり、この違いによりプロトコルが指定されている。本システムではIPパケットのみを扱うため、Type Fieldの判別を行う。

Type FieldはEthernetフレームのヘッダに含まれるため、ここからデータを取得し判別する。Type FieldがIPパケット以外のものであった場合は、処理はパケットヘッダ取得機構に戻り、待機状態とな

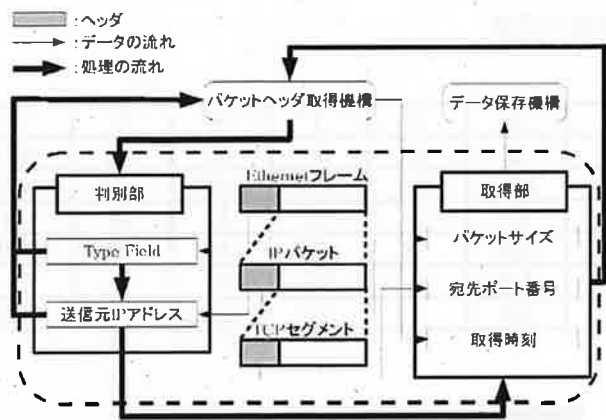


図6 バケットヘッダ処理機構の構成

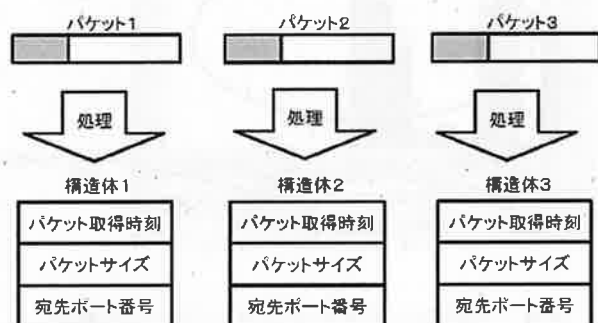


図7 バケットヘッダ処理後に構造体に格納する情報

る。IPパケットのものであった場合は、送信元IPアドレスの判別に処理が移る。送信元IPアドレスの判別はWinPcapライブラリの性質上、ネットワークアダプタにおいてやり取りされる全パケットを取得してしまうため、自分のコンピュータとは関係のないパケットが含まれてしまう。そこで、自分のコンピュータにおいて割り振られている送信元IPアドレスによるフィルタリングを行うことで、パケットの選別を行う。送信元IPアドレスはIPパケットのヘッダに含まれるため、ここからデータを取得し判別する。先程と同様に、送信元IPアドレスが自分のコンピュータ以外のものであった場合、処理がバケットヘッダ取得機構に戻り、待機状態となる。ここまでの判別が終了すると、処理は判別部から取得部に移る。

取得部では、先にバケットヘッダ取得機構で格納された構造体から、本システムで必要となる情報を取得する。バケットサイズはIPパケットのヘッダから、宛先ポート番号はTCPセグメントのヘッダから、そして取得時刻はバケットヘッダ取得機構の取得時刻登録部からそれぞれの情報を取得する。取得時刻、

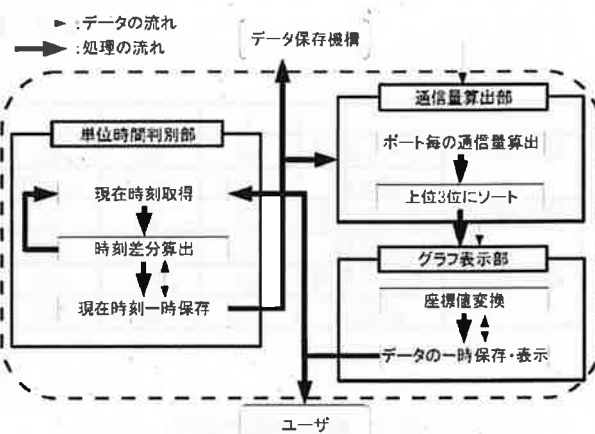


図8 表示機構の構成

宛先ポート番号、パケットサイズの3つの情報がデータ保存機構に渡される。取得部における一連の情報の取得が終了すると、処理はバケットヘッダ取得機構に戻り、待機状態となる。

3.2.3 データ保存機構

データ保存機構では、バケットヘッダ処理機構から受けたデータを本システム実装のために用意した構造体に格納する。実際に構造体に格納する情報は図7に示したように、バケット取得時刻・パケットサイズ・宛先ポート番号の3つである。システムで利用するひとつの構造体が持つ情報はひとつのパケットの情報だけである。このようにすることで、情報が整理されていることから通信量算出部での処理が容易になるという利点がある。

3.2.4 表示機構

表示機構の構造を図8に示した。まず、表示機構の単位時間判別部において現在時刻を取得する。時刻差分算出にて初めて処理が渡されたときは、現在時刻からシステムを起動した時間の差を求める。求めた差が単位時間であった場合は、そのときの現在時刻を一時的に保存し、データ保存機構に単位時間分のデータを渡すよう要求を出し、処理が通信量算出部に渡る。%修士論文では時刻の取り方を図にする。求めた差が単位時間ではなかった場合、処理が現在時刻取得に戻る。2回目からの時刻差分算出は、現在の時刻と一時的に保存した時刻との差を求める。

通信量算出部では、データ保存機構から渡されたデータから通信が存在した宛先ポート番号の通信量の総和を算出する。算出した通信量をソートにかけて、通信量の大きいものの上位3位までを決定する。ここまでの処理が終了したら、グラフ表示部に処理が移る。

グラフ表示部では、以上の一連の処理がなされた

表 2 動作実験の結果

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
通信量1位	ポート番号	80	80	80	22	22	22	80	80	80	80
	通信量	27316	14769	10201	1504	1824	932	14338	26665	416	48601
通信量2位	ポート番号	22	22	22	0	53	0	22	22	22	443
	通信量	1212	1116	1932	0	343	0	1612	1108	92	38858
通信量3位	ポート番号	53	53	161	0	138	0	53	53	0	22
	通信量	610	249	105	0	229	0	336	115	0	9932

表 3 動作実験の結果

ネットワーク環境	無線 LAN (BUFFALO 製 WLI-CB-G54)
実験時間	10 分間
起動していたアプリケーション	ブラウザ(FireFox) ターミナルエミュレータ (TeraTerm Pro)

データの座標値変換を行う。座標値変換はデータをそのままの値で表示すると、ある単位時間の通信量が極端に多い場合は画面上における座標を超えた値になってしまう。それを防ぐために、ある一定の値を超えた場合は単位時間当たりの通信量の総和から 3 つの通信量の割合を算出し、変換後のデータをグラフ表示部において図 3 に示したようにグラフ化してユーザに表示する。同時に算出したデータを一時的に保存する。これは、過去のデータもグラフ化して一緒に表示するためである。さらに、ポート番号・プロトコル名・サービス名もグラフと共に表示する。プロトコル名・サービス名はあらかじめそれら一覧を示したテキストデータを用意しておき、ヘッダ情報の構造体データにおける宛先ポート番号から対応するものを抜き出し表示する。ユーザへの表示と同時に処理は再び単位時間判別部の現在時刻取得に戻る。

4. 動作実験

実装したシステムを実際に動作させる実験を行った。その動作実験の概要を表 3 に示した。2 種類のアプリケーションを使用しているが、これは 10 分間のあいだはずっと起動させておいた状態で断続的に使用した。このような状況で、動作させた結果が表 2 の動作実験の結果と図 9 のシステムのインターフェース画面である。表 2 は 1 分間ごとの通信量上位 3 位のポート番号とその通信量を表したものである。

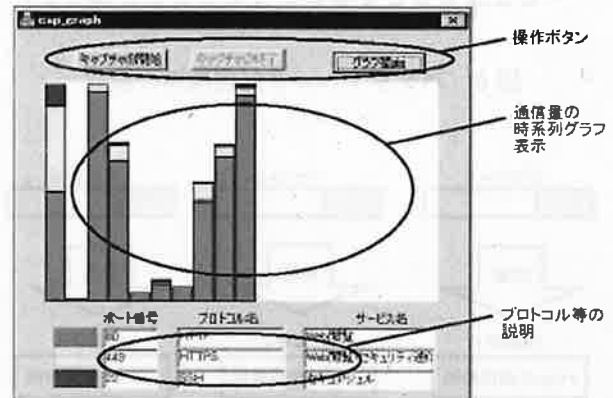


図 9 実際のシステムインターフェース画面

80 番ポートを使用するブラウザと 22 番ポートを使用するターミナルエミュレータを使用していたことから、このポートにおける通信がそのほとんどを占めていることがわかる。

図 9 からわかるように「キャプチャの開始」ボタンを押すことでパケットのキャプチャを開始し、「キャプチャの終了」ボタンを押すことでキャプチャを終了する。終了条件は、ボタンを押すことと設定した時間が終了することの 2 つである。また、現在の段階では、リアルタイムに動作することができないので、設定した時間である 10 分経過後「グラフ描画」ボタンを押すことでグラフが表示されるという仕組みになっている。2.2 章でも述べたように、インターフェース画面の下側に表示されている情報は一番左側のブロックの情報、すなわち最も新しい通信量の情報を表している。よって図 9 では、最後の 1 分間の通信量上位 3 位のポート番号(80, 443, 22)、プロトコル名(HTTP, HTTPS, SSH)、サービス名(Web 閲覧, Web 閲覧(セキュリティ通信), セキュアシェル)を表している。

5. 考察

動作実験の結果を表により表示した場合とグラフ

化して表示した場合とを比較すると、2.2 章で述べた、わかりやすさという観点からは明らかにグラフ化したほうが優れていることが見てとれる。例えば、図 9 からは実験開始時と終了時に通信が集中していることが一目で理解できる。よって、提案システムにより、ユーザに通信状況の概観を理解してもらうことはできるのではないかと考える。このことから、システムの設計方針で述べたパケットの可視化を実現できることを確認できた。

その他に動作実験からわかったこととして、システムにおける上位 3 位までの宛先ポート別通信量の表示が機能しない場合が 10 回中 3 回存在した。これは単位時間が短かったため、通信量自体が少なかったことが原因であると考えられる。この結果は今後のシステム改良に有益だと考える。

6. 今後の課題

本システムでは、わかりやすいインターフェースとパケットの可視化という 2 点をシステム設計の重要なポイントであると位置づけた。その中で、パケットの可視化は動作実験の結果からも達成できたと考えるが、インターフェースについて主観的に判断しても実装したシステムでは通信の概観は理解できても視覚的に興味をひくものとは言い難く、現状ではユーザに通信に興味を抱かせることは困難であると考え。よって、今後の課題としては、まずインターフェースの有効性を確認することが挙げられる。

また、今回実装したシステムでは宛先ポート番号・プロトコル名・サービス名の 3 つの表示であったが、システムの対象ユーザであるインターネット利用歴の低いユーザにとってわかりやすいものとは言い難い。加えて、宛先ポート番号が短命ポート番号の場合はプロトコル名が存在しない場合があるため、本システムではプロトコル名が表示されない可能性がある。以上 2 点を補うため、通信を行っているアプリケーションを宛先ポート番号などと同時に表示する機能を付加することも今後の課題である。

参考文献

- [1] 独立行政法人情報処理推進機構: 情報セキュリティに関する新たな脅威に対する意識調査報告書 (2006).
- [2] 小池英樹, 高田哲司: 視覚表現による不正侵入検知システムの提案と実装, *Cyber Security Magazine*, 1-1, pp.32-35 (2000).
- [3] 斉藤匡人, 金田裕剛, 山下勝司, 青柳禎矩, 鶴飼

文敏, 徳田英幸: 3D-tcpdump: 通信トラフィックとネットワーク情報の視覚化ソフトウェア, 日本ソフトウェア科学会 SPA 2005 ポスター (2005).

- [4] Lloyd Treinich: Flow Visualization of Network Traffic, *IEEE Computer Graphics and Applications* September/October, pp.6-8 (1998).
- [5] 荒井正之, 田村尚也, 渡辺博芳, 小木曾千秋, 武井恵雄: TCP/IP プロトコル学習ツールの開発と評価, *情報処理学会論文誌*, 44-12, pp.3242-3251 (2003).
- [6] 大橋正興, 塚田浩二, 安村通晃, 小池英樹: Secure Sense:生活空間でセキュリティを「感じる」ための情報提示環境, *情報処理学会シンポジウム論文集*, 2003-7, pp.93-94 (2003).
- [7] WinPcap:The Packet capture and network monitoring library for windows, <http://www.winpcap.org/>.
- [8] 小高知宏: 基礎からわかる TCP/IP アナライザ作成とパケット解析 Linux/FreeBSD 対応, オーム社, 273 (2001).

応力制御下における1070アルミニウムの非比例多軸低サイクル疲労寿命

伊藤 隆基* 平井 孝典* 山本 隆栄**

Multiaxial Low Cycle Fatigue of 1070 Aluminum under Stress Controlled Non-proportional Loading

Takamoto ITOH*, Takanori HIRAI* Takaei YAMAMOTO**

(Received January 28, 2007)

This paper describes the low cycle fatigue life of 1070 aluminum under stress controlled multiaxial loading. Proportional loading tests were carried out under combined push-pull and reversed torsion. Non-proportional loading tests were also carried out using three stress paths of cruciform, box, and circle. Mises stress range, Mises strain range and maximum principal stress range were applied to the experimental data and the applicability of the life prediction methods was discussed. No life prediction methods accurately predicted the multiaxial low cycle fatigue life under non-proportional loading within a small scatter band.

Key Words : Low Cycle Fatigue, 1070 Aluminum, Non-proportional Loading, Life Prediction, Stress Controlled Loading

1. 緒言

機械構造物の強度設計をする上で材料の多軸疲労強度を考慮することは重要である。これまでも様々な多軸疲労試験が行われてきたが、これらの多軸疲労試験の多くは応力およびひずみの主軸方向が固定されたいわゆる比例負荷の下で行われてきた^{[1]~[5]}。ところが実構造物では応力およびひずみの主軸方向が時間的に変化する非比例負荷を受けることがある。ひずみ制御においては比例負荷に比べて、非比例負荷の破損寿命が著しく低下し、また寿命低下の程度は負荷経路および材料に依存することが報告されている^{[6]~[14]}。したがって多軸低サイクル疲労での構造物の健全性・安全保証には、非比例負荷を考慮した適切な寿命評価法を確立することが必要不可欠であるといえる。しかし、ひずみ制御と応力制御では多軸低サイクル疲労寿命に及ぼす非比例負荷の影響が

異なる可能性がある。

本研究では、これまで実施例のほとんどない応力制御による比例負荷および同非比例負荷の低サイクル疲労試験を1070Alの薄肉円筒試験片を用いて実施した。また、得られた結果より寿命に及ぼす負荷経路の影響について調べ、非比例多軸低サイクル疲労寿命特性について考察した。

2. 試験方法

本研究で用いた供試材はTable 1に化学成分を示す1070Alである。試験片は、Fig. 1に示す標点部の外径12mm、内径9mmおよび平行部長さ5.27mmの薄肉円筒形状を用いた。試験は室温大気中の応力制御で実施した。Fig. 2(a)および(b)にそれぞれ比例負荷および非比例負荷の試験で用いた応力経路を示す。Fig. 2(a)の比例負荷では引張・圧縮(Push-pull)、繰返しねじり(Reversed torsion)および引張・圧縮と繰返しね

* 工学研究科機械工学専攻

** 大分大学工学部機械・エネルギーシステム工学科

* Mechanical Engineering Course, Graduate School of Engineering

** Department of Mechanical and Energy Systems Engineering, Oita University

Table 1 Chemical composition of 1070Al (wt.%).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	V	Else	Al
0.06	0.10	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	≤0.03	99.80

じりの組合せ負荷(Combined)の3種類の負荷経路とした。また、Fig. 2(b)の非比例負荷では引張・圧縮と繰返しねじりを交互に負荷する十字型負荷(Cruciform)、引張・圧縮と繰返しねじりに保持を有する四角形負荷(Box)および引張・圧縮と繰返しねじりが90度の位相差を有する円形負荷(Circle)の3種類の負荷経路とした。なお、応力速度は、ミーゼス型の相当基準で10MPa/s一定とした。

繰返し数の計数は、Fig. 2に示した負荷経路を一巡すると1サイクルとした。また、破損寿命(N_f)は、繰返しねじり負荷ではねじり方向のひずみ範囲が、その他の負荷経路では軸方向のひずみ範囲が $1/2N_f$ におけるその2倍となる繰返し数とした。

3. 試験結果および考察

3.1 低サイクル疲労寿命の整理結果

破損寿命をミーゼス型の相当応力範囲($\Delta\sigma_{eq}$)で整理した結果をFig. 3に示す。なお、 $\Delta\sigma_{eq}$ は比例および非比例多軸負荷経路の1サイクル中でのミーゼス基準の応力範囲の最大値である。図中に示した実線は引張・圧縮負荷のデータを基準に引いたものであり、その両側の破線は係数2、また同一点鎖線は係数6の範囲を示している。円形負荷の破損寿命は係数6の範囲内に整理されるが、引張・圧縮負荷のそれと比べて低寿命となる傾向があった。一方、その他のすべての比例および非比例負荷の破損寿命は、長寿命側で整理された。また、最も長寿命となった繰返しねじり負荷の破損寿命は、係数6の範囲をやや外れている。また、組合せ負荷、十字型負荷および四角形負荷は、長寿命側の係数6の範囲内で整理された。

破損寿命を $1/2N_f$ におけるミーゼス型の相当全ひずみ範囲($\Delta\varepsilon_{eq}$)で整理した結果をFig. 4に示す。なお、 $\Delta\varepsilon_{eq}$ は比例および非比例多軸負荷経路の1サイクル中でのミーゼス基準の全ひずみ範囲の大きさの最大値である。図中に示した実線は引張・圧縮負荷のデータを基準に引いたものであり、破線および一点鎖線はFig. 3と同様にそれぞれ係数2および係数6の範囲を示している。繰返しねじり負荷と十字型負荷の一部の破損寿命が係数6の範囲から大きく外れて長寿命側に整理されているが、その他の破損寿命は係数6の範囲の内側で整理されている。また、円形負荷の破損寿命は低寿命側の係数6から長寿命側の係数2のばらつき範囲、四角形負荷の破損寿命は低寿命側の係数6の範囲の内側、十字型負荷は長寿命側の係数6の範囲の外側で整理されている。

Itohらが実施したSUS304^[10]および6061Al^[12]のひ

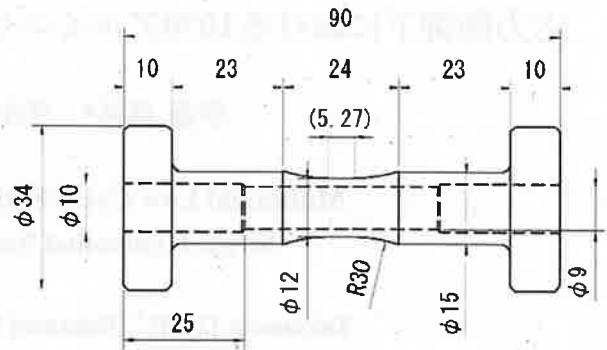


Fig. 1 Shape and dimensions of hollow cylinder specimen tested (mm).

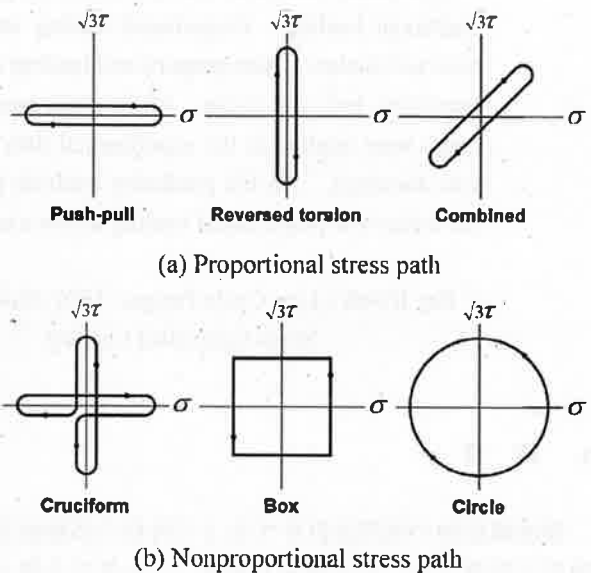


Fig. 2 Stress path employed.

ずみ制御下の非比例・多軸低サイクル疲労寿命をミーゼス型の相当全ひずみ範囲で整理した結果では、非比例負荷の破損寿命は比例負荷に比べて低下することが報告されている。しかし、本研究の応力制御下の非比例・多軸低サイクル疲労寿命をミーゼス型の相当応力範囲で整理した結果では、比例負荷に比べて円形負荷のみ寿命の低下が見られたが、他の非比例負荷では逆に寿命は増加していた。

一方、非比例負荷の寿命をミーゼス型の相当ひずみ範囲で整理した結果では、四角形負荷では破損寿命の低下、十字型負荷では破損寿命の増加が見られた。これらのことは、非比例多軸低サイクル疲労寿命特性は、応力制御とひずみ制御の違いによる制御方法に大きく依存する可能性を示している。

最大主応力範囲($\Delta\sigma_1$)で破損寿命を整理した結果をFig. 5に示す。なお、 $\Delta\sigma_1$ は比例および非比例負荷経路の1サイクル中での主応力範囲の最大値であ

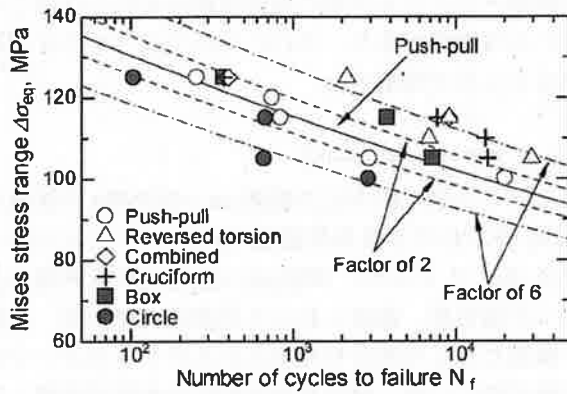


Fig. 3 Correlation of LCF lives with Mises stress range.

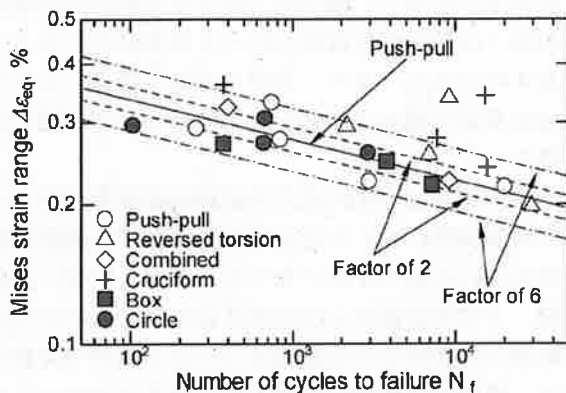


Fig. 4 Correlation of LCF lives with Mises strain range.

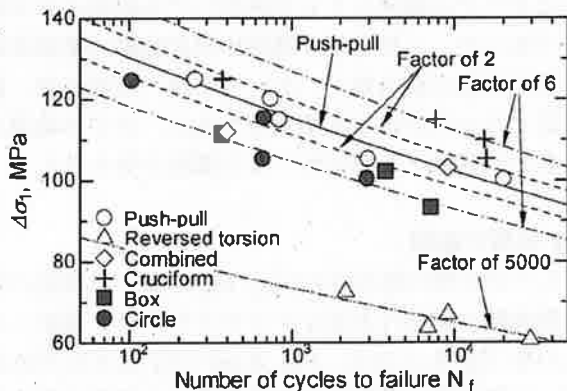


Fig. 5 Correlation of LCF lives with maximum principal stress range.

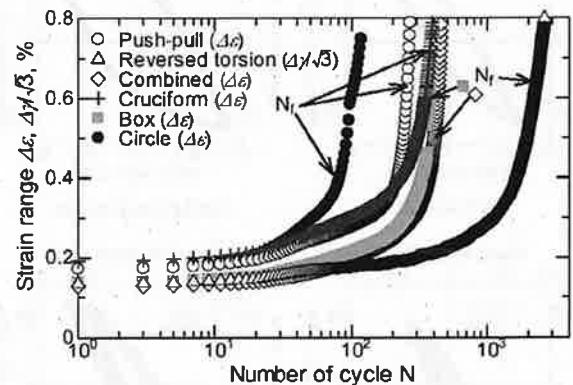
る。図中に示した実線は引張・圧縮のデータを基準に引いたものであり、その両側の破線は係数 2、同一点鎖線は係数 6、さらに同二点鎖線は係数 5000 の範囲を示している。十字型負荷の破損寿命は長寿命側の係数 6 の範囲内で整理されたが、その他のすべての比例および非比例負荷の破損寿命は低寿命側で整理され、組合せ負荷、円形負荷および四角形負荷の破損寿命はともに低寿命側の係数 6 の範囲内となっ

た。また、繰返しねじり負荷の破損寿命は低寿命側に大きく外れ、係数 5000 の低寿命側の整理結果となった。繰返しねじりの破損寿命が低寿命側に大きく外れる傾向は Hamada¹¹¹¹らの論文でも報告されている。

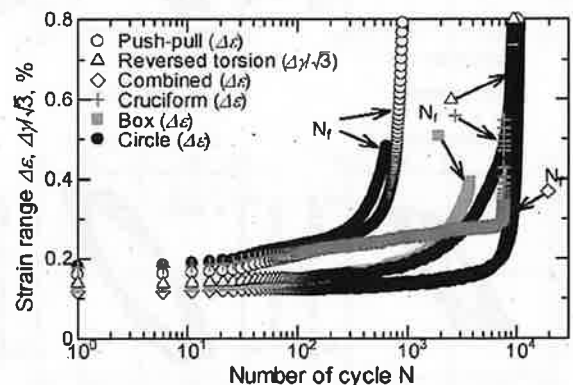
本研究で適用を試みた 3 種類の寿命評価パラメータ、すなわち、従来から提案されているミーゼス型の相当応力範囲、ミーゼス型の相当ひずみ範囲および最大主応力範囲では、応力制御下での 1070Al の非比例・多軸低サイクル疲労寿命を係数 2 の範囲で整理できなかった。したがって今後、有効な寿命評価パラメータを開発することが必要であり、それには各負荷制御下での各種試験を実施し繰返し変形挙動やき裂の発生・伝ば挙動を解明する必要があると考えられる。

3.2 繰返しに伴うひずみ範囲の変化

ミーゼス型の相当応力範囲 $\Delta\sigma_{eq}=125\text{MPa}$ および 115MPa での各負荷経路の試験における繰返しに伴うひずみ範囲の変化をそれぞれ Fig. 6(a)および(b)に示す。ここで、繰返しねじり負荷はせん断ひずみ範



(a) $\Delta\sigma_{eq}=125\text{MPa}$



(b) $\Delta\sigma_{eq}=115\text{MPa}$

Fig. 6 Variation of strain range with number of cycle.

围を、その他の負荷経路は軸ひずみ範囲を示した、Fig. 6 (a)の $\Delta\sigma_{eq}=125\text{MPa}$ の結果では、ひずみ範囲はいずれの負荷経路においても繰返しの初期から繰返しに伴い緩やかに増加した後、繰返しの初期におけるひずみ範囲の1.5倍程度まで増加したあたりで急激に増加した。

Fig. 6 (b)の $\Delta\sigma_{eq}=115\text{MPa}$ の結果でも十字型負荷を除くすべての負荷経路でFig. 6 (a)の結果と同様の繰返しに伴うひずみ範囲の変化が見られた。このように繰返しの初期からの緩やかなひずみ範囲の増加は材料の転位組織の変化等の内部組織の変化に伴う繰返し軟化や微小き裂の発生等によるものであると考えられるが、これらの点については今後中断試験等を通じて検討する予定である。

一方、Fig. 6 (b)の十字型負荷では繰返し数が約 $0.25N_f$ からひずみ範囲の増加が緩やかになり、破損寿命の近くで急激なひずみ範囲の増加を示している。このことから、 $\Delta\sigma_{eq}=115\text{MPa}$ の十字型負荷の試験で

の損傷メカニズムが他の負荷経路のそれとは異なっている可能性があり、それについては3.4のき裂観察のところで考察する。

3.3 ヒステリシスループ

ミーゼス型の相当応力範囲 $\Delta\sigma_{eq}=105\text{MPa}$ の試験の $1/2N_f$ 時における各負荷経路でのヒステリシスループをFig. 7に示す。同図(a)~(c)比例負荷試験の引張・圧縮負荷、繰返しねじり負荷および引張・圧縮-繰返しねじり組合せ負荷はヒステリシスループの形状が似ている。組合せ負荷の応力範囲が引張・圧縮負荷および繰返しねじり負荷のそれに比べて小さくなっているが、これはミーゼス型の相当応力基準一定の条件なので、軸方向とねじり方向の応力範囲が引張・圧縮負荷や繰返しねじり負荷に比べ小さくなるためである。また、引張・圧縮-繰返しねじり組合せ負荷の軸およびせん断方向のひずみ範囲はほぼ等しい。

一方、同図(d)~(f)に示す非比例負荷試験ではすべての負荷経路においてせん断方向のひずみ範囲が軸方向のそれに比べ小さくなった。また、引張・圧縮負荷、十字型負荷および円形負荷の軸方向の全ひずみ範囲と非弾性ひずみ範囲をミーゼス基準で比較すると、両ひずみ範囲の幅がともに最も大きかったのは円形負荷であり、次いで引張・圧縮負荷、最も小さかったのは十字型負荷であった。また、それらの差は全ひずみ範囲よりも非弾性ひずみ範囲の方が顕著であった。これらの3種類の負荷経路の破損寿命は円形負荷が最も短く、次いで引張・圧縮負荷、最も長くなったのは十字型負荷であり、ひずみ範囲が大きい試験ほど寿命が短くなる傾向が見られた。

3.4 き裂の観察

ミーゼス型の相当応力 $\Delta\sigma_{eq}=105\text{MPa}$ の試験後の各負荷経路の試験片表面をデジタルカメラで撮影したものをFig. 8に示す。Fig. 8 (a)~(e)はそれぞれ引張・圧縮負荷、繰返しねじり負荷、十字型負荷、四角形負荷および円形負荷である。Fig. 8 (b)の繰返しねじり負荷では大きなき裂が観察されたが、他の負荷経路では同様のき裂は観察されなかった。また、比例負荷であるFig. 8 (a)および(b)の試験片表面は平滑であるのに対し、非比例負荷のFig. 8 (c)~(e)の試験片表面には顕著な起伏がみられる。

ミーゼス型の相当応力 $\Delta\sigma_{eq}=105\text{MPa}$ の試験後の各負荷経路の試験片表面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察したものをFig. 9に示す。Fig. 9 (a)~(e)はそれぞれ引張・圧縮負荷、繰返しねじり負荷、十字型負荷、四角形負荷および円形負荷である。

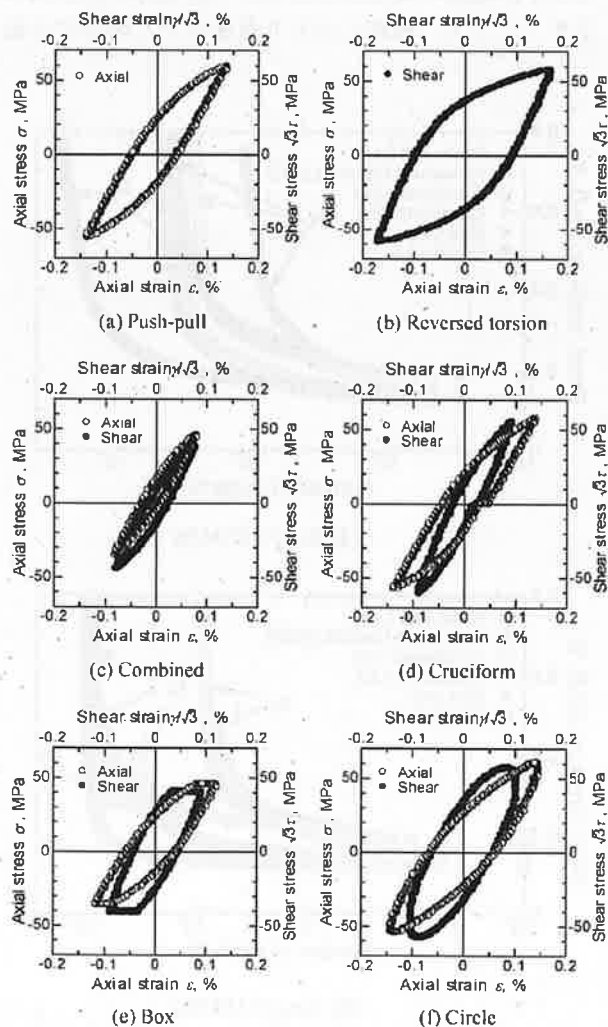


Fig. 7 Hysteresis loop for $\Delta\sigma_{eq}=115\text{MPa}$ at $N=1/2N_f$.

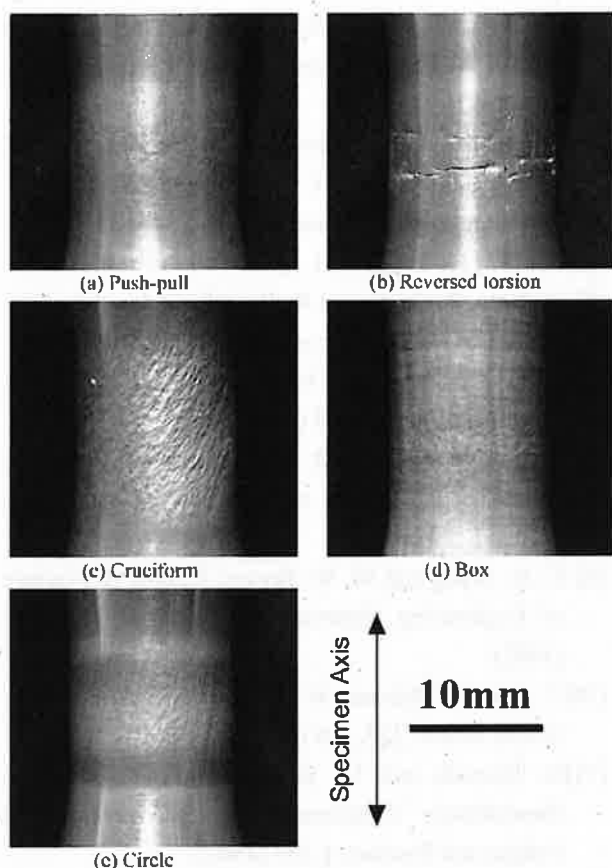


Fig. 8 Observations of specimen surface at $\Delta\sigma_{eq}=105\text{MPa}$.

Fig. 9 (a)に示す引張・圧縮負荷では試験片軸方向からおおよそ 45° 傾いた方向に、Fig. 9 (b)に示す繰返しねじり負荷では軸方向とそれに直交した円周方向にき裂が伝ばしているのが観察された。これらのことから、比例負荷試験における試験片表面のき裂の伝ば方向は最大せん断応力方向であることがわかる。

Fig. 9 (c)に示す十字型負荷では円周方向に沿って伝ばしている長いき裂が観察された。しかし、そのき裂の数は非常に少なく、他の負荷経路で観察される $100\mu\text{m}$ 前後のき裂は観察されなかった。このことから、Fig. 6 (b)で十字型負荷が破損寿命の近くで急激なひずみ範囲の増加を示したのは、寿命後期で大きなき裂が急速に伝ばしたためであると考えられる。また、十字型負荷のみに試験片表面に細かい筋状の模様がみられた。

Fig. 9 (d)に示す四角形負荷では軸方向からおおよそ 30° 傾いた方向にき裂が伝ばしているのが観察された。四角形負荷では軸方向から 22.5° 傾いた方向と 67.5° 傾いた方向で主応力と最大せん断応力が最も大きな値となる。したがって、両応力が最も大きくなる而にき裂が伝ばしていると考えられる。Fig. 9

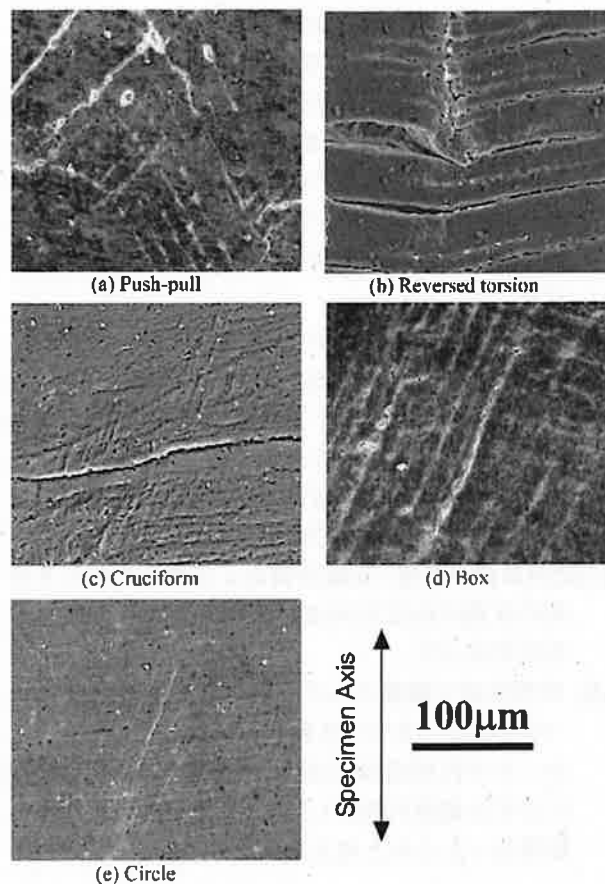


Fig. 9 Observations of specimen surface by SEM at $\Delta\sigma_{eq}=105\text{MPa}$.

(e)に示す円形負荷の試験片表面では大部分のき裂は円周方向と軸方向からおおよそ 30° 傾いた方向に伝ばしており、その数は円周方向に伝ばしたき裂の方が多かった。また、観察されたき裂は他の負荷経路に比べて小さかったが、き裂の数は最も多かった。このことが円形負荷では他の負荷経路よりも早期にひずみ範囲が増加し、疲労寿命が最も短くなる結果になったものと考えられる。

4. 結 言

- (1) ミーゼス型の相当応力範囲による破損寿命の整理では、円形負荷は低寿命側の係数 6 の範囲内で整理され、その他のすべての比例および非比例負荷は長寿命側のほぼ係数 6 の範囲内で整理された。
- (2) ミーゼス型の相当ひずみ範囲による破損寿命の整理では、円形負荷の破損寿命は低寿命側の係数 6 から長寿命側の係数 2 のばらつき範囲で、四角形負荷の破損寿命は低寿命側の係数 6 の範囲内、十字型負荷と繰返しねじり負荷の破損寿命は長

寿命側の係数 6 の範囲を超えて整理された。

- (3) 最大主応力範囲による破損寿命の整理では、十字型負荷の破損寿命は長寿命側の係数 6 の範囲内で、組合せ負荷、円形負荷および四角形負荷の破損寿命は低寿命側の係数 6 の範囲で整理された。また、繰返しねじり負荷の破損寿命は低寿命側に大きく外れ、係数 5000 程度のばらつきが生じた。
- (4) ひずみ範囲は、初期から繰返しに伴い緩やかに増加した後、初期におけるひずみ範囲の 1.5 倍程度まで増加したあたりで急激に増加した。しかし、十字型負荷の低応力の試験では $0.25N_f$ 付近からひずみ範囲の増加が緩やかになり、破損寿命の近くで急激なひずみ範囲の増加を示した。
- (5) 比例負荷の引張・圧縮負荷および繰返しねじり負荷のき裂の伝ば方向はいずれも最大せん断応力方向であった。
- (6) 円形負荷で観察されたき裂は他の負荷経路に比べて小さかったが、き裂の数は最も多かった。このことが円形負荷では他の負荷経路よりも早期にひずみ範囲が増加し、疲労寿命が最も短くなる結果なったものと考えられる。

参考文献

- [1] R. D. Lohr and E. G. Ellison: *Fatigue Eng Mater Struct*, **3**, 1, 1 (1980).
- [2] M. W. Brown and K. J. Miller: *ASTM STP*, **770**, 299 (1982).
- [3] F. A. Kandil, M. W. Brown and K. J. Miller: *Mech Behav Nucl Appl Stainless Steel Elevated Temp*, **203** (1982).
- [4] M. Sakane, M. Ohnami and M. Sawada: *ASME JEMT*, **109**, 236 (1987).
- [5] M. Sakane, M. Ohnami and M. Sawada: *ASME JEMT*, **113**, 244 (1991).
- [6] A. Nitta, T. Ogata and K. Kuwabara: *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **36**, 376 (1989).
- [7] S. H. Doong, D. F. Socie and I. M. Robertson: *ASME JEMT*, **112**, 456 (1990).
- [8] T. Itoh, M. Sakane, M. Ohnami and K. Ameyama: *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **41**, 1361 (1992).
- [9] C. H. Wang and M. W. Brown: *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **16**, 1285 (1993).
- [10] T. Itoh, M. Sakane, M. Ohnami and D. F. Socie: *ASME JEMT*, **117**, 285 (1995).
- [11] N. Hamada and M. Sakane: *Proceedings of 5th International Conference on Biaxial/Multi-axial Fatigue and Fracture*, **1**, 251 (1997).
- [12] T. Itoh, T. Nakata, M. Sakane and M. Ohnami: *European Structural Integrity Society*, **25**, 41 (1999).
- [13] D. F. Socie and G. B. Marquis: *Society of Automotive Engineers International*, 129 (2000).
- [14] T. Itoh: *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **50**, 1317 (2001).

ヘリカルコイル内強制流動沸騰の熱伝達特性と流動様相

大河瀬 睦人* 永井 二郎* 吉川 信治**

Heat Transfer Characteristics and Flow Situations of Forced Convective Boiling inside Helically Coiled Tube

Mutsuhito DAIGASE*, Niro NAGAI* and Shinji YOSHIKAWA**

(Received January 31, 2007)

The helically coiled tube of heat exchanger is used for the evaporator of prototype fast breeder reactor "Monju". This report aims at the grasp of relation between two-phase flow phenomena and heat transfer characteristics of forced convective boiling of water inside helically coiled tube, especially focusing on oscillation of transition point. A transparent double tube made of glass is used as a heat exchanger. Water flows up inside helical tube and the high temperature oil flows down in the outside tube. The oscillation of the transition point was observed, that is mainly caused by intensive nucleate boiling near the dryout point and evaporation of thin liquid film flowing along the surface. Fluctuations of local heat flux, local temperature, pressure and flow velocity can be explained with relation to visualized flow situations.

Key Words : Forced Convective Boiling, Helically Coiled Tube, Oscillation, Heat Transfer, Visualization

1. 緒言

1.1 研究背景

エネルギー自給率の低い我が国においては、核分裂しないウラン 238 に高速中性子を吸収させることにより、核分裂性のプルトニウム 239 を燃焼量以上に生産できる高速増殖炉は大変有望な発電方法である。福井県敦賀市にはこの技術の実現のための高速増殖原型炉「もんじゅ」が建設されている。「もんじゅ」では核分裂で発生した中性子の減速効果が小さい金属ナトリウムを冷却材に用いており、ナトリウム加熱による蒸発器ではヘリカルコイル型伝熱管が用いられている。

この蒸発器で不安定流動が生じる条件の範囲はモックアップ試験で確認されている^[1]。この振動は局

所的な熱応力変動を伴うため、その発生条件、発生機構、熱伝達特性を定量的に把握することは、蒸発器の安全性をより合理的に把握することに貢献する。ヘリカル蒸発管についてマクロ的熱伝達・流動特性は解明されてきてはいるが、ヘリカル蒸発管内の沸騰二相流の可視化など、内部での沸騰二相流現象については十分な精度の機構論的モデルは把握されていない。

1.2 目的

著者らは、ヘリカル蒸発管内の沸騰二相流を可視化することを目的として、ガラス製ヘリカルコイル二重管を用いた水の強制流動沸騰の高速観察を行い、不安定流動現象（特にドライアウト点の振動現象）の特性を調べた^{[2], [3]}。その結果、ドライアウト点振動は、ドライアウト点の上流側に位置する遷移点（環状流に移行する点）付近の発泡と管壁に沿って上昇する液膜の蒸発が発生要因であると考えられ、また、加熱条件、液流量・温度、ヘリカルコイル管寸法等のパラメーターが振動の発生条件・振幅・周期に及ぼす影響を実験的に明らかにした。しかし、

* 機械工学専攻

* 日本原子力研究開発機構

* Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering

** Japan Atomic Energy Agency

ヘリカル蒸発管の局所熱伝達特性と流動様相の関係については把握できていない。

そこで本研究は、ヘリカル蒸発管の局所の熱流束・温度を計測し、同時に流動様相を観察することで、局所熱伝達の変動と流動様相（特に遷移点の振動現象）の関係を調べることを目的とする。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置

本実験装置は熱交換を行うヘリカルコイル型の熱交換器、加熱装置、試験液体供給容器、高温油循環装置の4つの部分から構成されている。Fig. 1に概略図を示す。

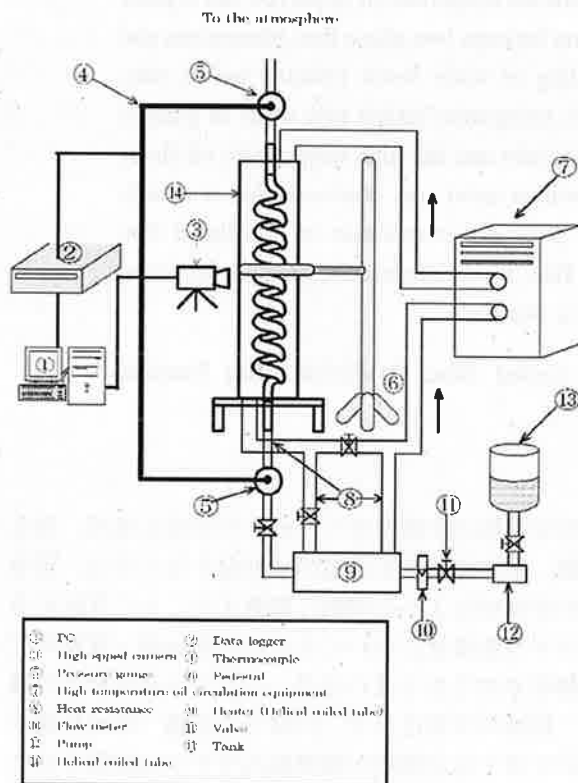


Fig. 1 Outline of experimental setup

熱交換器はガラス製のヘリカル蒸発管を真鍮板で開いたものを自作し使用した。真鍮板には穴を空け、そこにガラス板を貼り付ける事で内部を観察できるようにした。ヘリカル蒸発管表面には熱流束センサーを貼り付け、熱流束と温度を計測できるようにした。熱流束センサーは、水の入口部分のヘリカル管巻き始め部分から出口方向に5cm間隔で4枚貼り付けた。熱流束センサーについて、詳細をTable 1に示す。熱流束センサーは、管壁に沿って曲げた際に感度が変わるので、検定実験により感度を検定した。また、熱流束センサーを管壁に貼り付けた際の熱流束の誤差を計算により求めると、約5%となった。

Table 1 Characteristics of heat flux sensor

Maker		Captec	
Sensor size[mm]		10×10	
Sensitivity [$\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$]		Before	After
	Sensor1	0.885	0.531
	Sensor2	0.900	0.318
	Sensor3	0.935	0.623
Sensor4	0.994	0.680	
Type		Flexible	

Table 2 Dimensions of the helically coiled tube

Radius of curvature:R	14 mm
Outside diameter of helically coiled tube: $2r_o$	7.4 mm
Inside diameter of helically coiled tube: $2r_i$	5.0 mm
Thickness of helically coiled tube	1.2 mm
Length of outer tube:L	380 mm
Number of rolling	38
Pitch:p	10 mm

熱交換器外側に高温油を下向きに、内側のヘリカル管に水を上向きに流すことにより熱交換を行い、ヘリカル蒸発管内で沸騰現象を発生させる。本実験にて使用したヘリカル蒸発管の詳細図をFig. 2に、各種寸法をTable 2に示す。

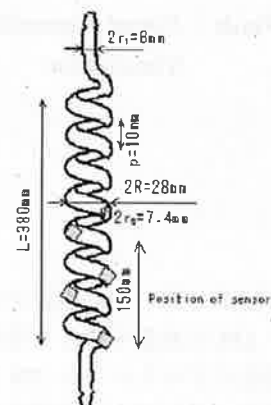


Fig. 2 Detail view of the helically coiled tube

循環させる油は高温用油（沸点 391℃・透明）を、試験液体は蒸留水を使用した。Fig. 1⑦の高温油循環装置は温度・流量を制御でき、連続使用最高温度は250℃である。水の出入口温度・圧力は、測定ボックス入口から流入した水を一度隔壁に当て、温度・圧力を均一にさせたものを測定した。④の熱電対はK型であり、⑧の耐熱ホースは連続使用最高温度が260℃のフッ素樹脂製である。⑨の加熱部はガラス製二重管のヘリカル蒸発管用い、管に流入する高温油の量を制御することで水の入口温度を調節した。水の流量は、バルブ⑩を調節することで変化させた。蒸発管で発生した蒸気は大気に開放される。

2.2 実験方法

実験条件は、油の流量は一定、油の温度は 195°C ~ 170°C の間で変化させ、水の流量は $0.05 \sim 0.2 \text{ L/min}$ 、水の入口温度は 60°C 、 70°C で実験を行った。実験方法は、水の流量を設定して流した後に油の温度を設定し一定の流量で循環させる。その後、高温油・水の入口温度・入口流量が設定条件に達したら測定・観察を行う。ヘリカル蒸発管内における水の沸騰の様子を観察・記録する時はデジタルビデオカメラで撮影した。測定する値は高温油の出入口温度、蒸留水の出入口温度・圧力、入口の流量、ヘリカル蒸発管表面の熱流束・温度、遷移点の振動発生時は振動の周期、振幅である。管壁での熱流束、温度は水の入口から出口に向かって①~④と区別する。遷移点の位置は熱交換器の隣に設置した定規の日盛りから測定した。熱交換器の下部に設置してある水の入口温度・圧力測定ボックスを 0m 地点として計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 測定値の振動と流動様相について

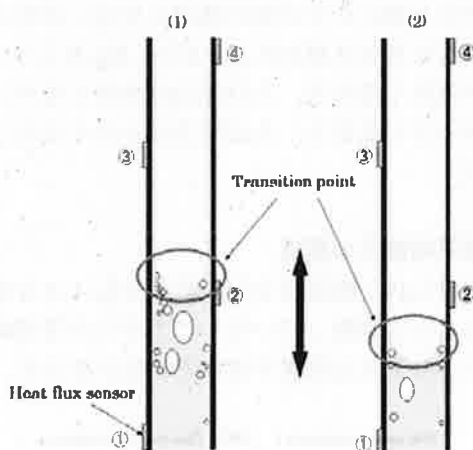


Fig. 3 Flow situation (inlet velocity 0.0425m/s)

Fig. 3 は、流速が 0.0425m/s の水の流動様相とセンサー位置の関係を表した模式図である。センサー①の部分は主に液単相流となっており、①~②の間で遷移点の振動が起こっている。遷移点は①付近が谷の位置となり、②付近が山の位置となる。③、④の位置では液膜が流れている状態となっている。

Fig. 4 は、熱流束②と管壁温度②を同期させたグラフである。Fig. 5 は、入口流速と入口圧力を同期させたグラフである。Fig. 6 は、遷移点振動の様子を表している。Fig. 4、Fig. 5、Fig. 6 はすべて同条件、同時

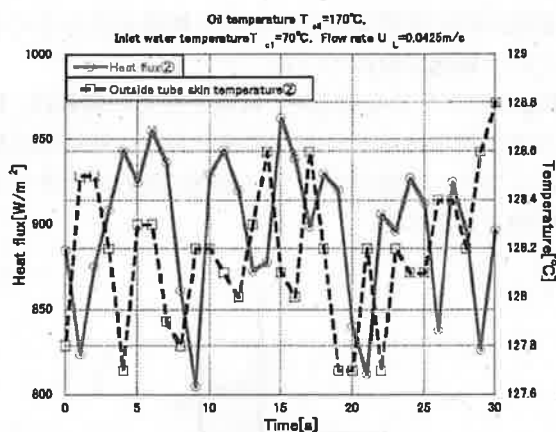


Fig. 4 Fluctuation of heat flux ② and outside surface temperature ② (inlet velocity 0.0425m/s)

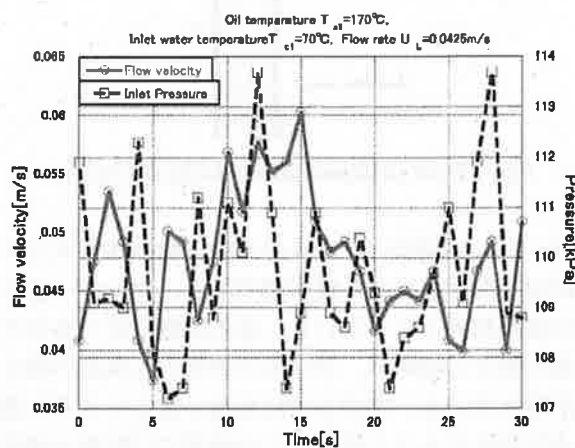


Fig. 5 Fluctuation of flow velocity and inlet pressure (inlet velocity 0.0425m/s)

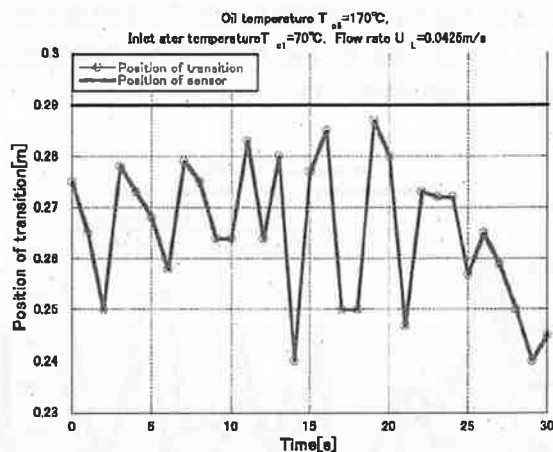


Fig. 6 Fluctuation of transition point (inlet velocity 0.0425m/s)

間の値を使用し、流動様相は Fig. 3 の状態である。

Fig. 4 と Fig. 6 のグラフを比較すると、遷移点の位置がセンサー②付近にある時は管壁温度が低くなり、熱流束は大きくなる。また、遷移点の位置が下がっ

た状態の時に管壁温度は高くなり熱流束は小さくなるという傾向が現れている。

Fig. 5のグラフを見ると、流速と圧力の関係は、ばらつきが見られるものの、流速が大きい時に圧力が小さくなり、流速が小さくなる時に圧力が大きくなる傾向が見られる。

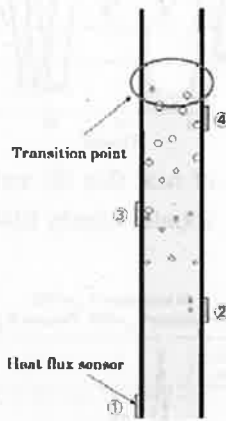


Fig. 7 Flow situation (inlet velocity 0.17m/s)

Fig. 7は、流速が0.17m/sの水の流動様相とセンサー位置の関係を表した模式図である。センサー①の所は液単相流となっている。②の位置付近で小さな気泡が発生し始める。③と④の間から気泡の発生量が増えていき、④の上では発泡が激しくなり、遷移点が存在するようだが、この流速では振動は確認できなかった。流速が速いほど振動が発生しにくくなる結果は、既報¹²⁾と同様の結果である。

Fig. 8は、熱流束②と管壁温度②を同期させたグラフである。Fig. 9は入口流速と入口圧力を同期させたグラフである。Fig. 8, Fig. 9は同条件、同時間の値を使用し、流動様相はFig. 7の状態である。

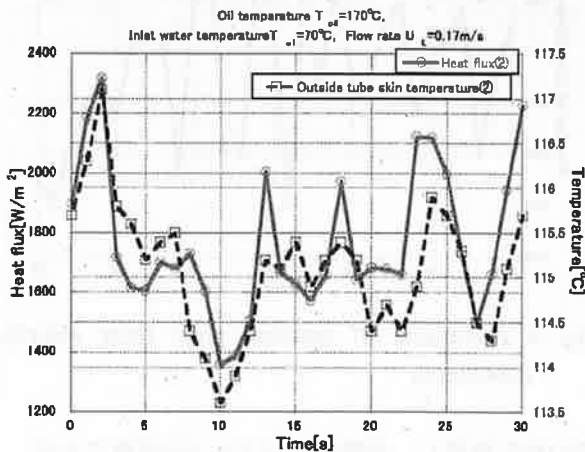


Fig. 8 Fluctuation of heat flux ② and outside tube skin temperature ② (inlet velocity 0.17m/s)

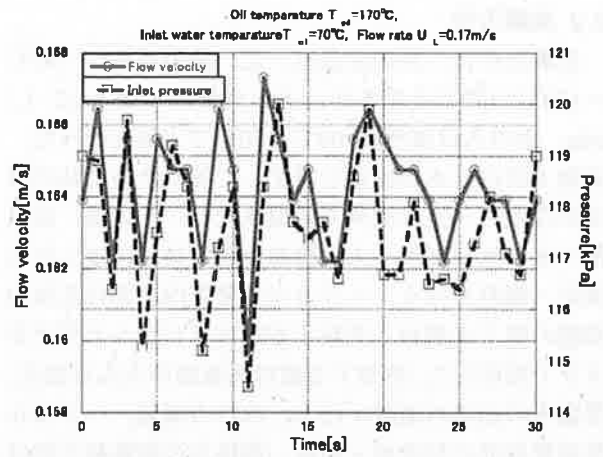


Fig. 9 Fluctuation of flow velocity and pressure (flow rate 0.17m/s)

Fig. 8より、管壁温度が高い時に熱流束は大きくなっていることがわかる。また、管壁温度が小さい時に熱流束は小さくなる。Fig. 3の低流速の場合と異なる理由として、Fig. 3では遷移点がセンサー②付近で振動するため、遷移点付近の高熱流束による壁温の低下と低熱流束の液膜蒸発による壁温上昇が交互に起こるのに対し、Fig. 7の高流速の場合は遷移点の振動現象が近くでは無いため、加熱用油の温度分布（上流から下流にいくに従い高温になる）がそのまま反映されたものと思われる。また、Fig. 9より、入口流速が大きくなると、入口圧力は大きくなり、入口流速が小さくなると、入口圧力は小さくなることがわかる。

3.2 時間平均値との関係

実験で得られた熱流束などの値は、Fig. 4, 5, 6を見てわかるように振動している。ここでその平均値がそれぞれどのような関係を持っているかを示す。

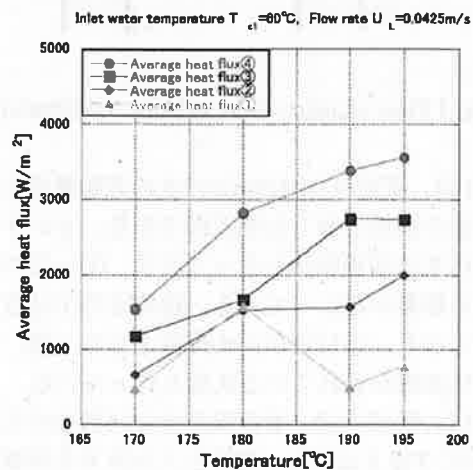


Fig. 10 Average heat flux and inlet oil temperature

Fig. 10 は、油の入口温度を横軸に、①～④の平均熱流束を縦軸にとったグラフである。流動様相は Fig. 3 の状態である。②～④の平均熱流束は入口油温が高くなると平均熱流束も大きくなる。しかし、①についてはそうではない。

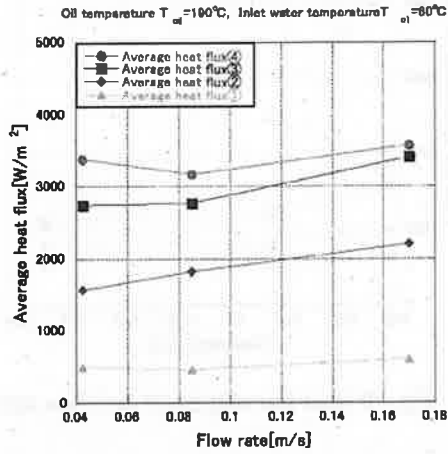


Fig. 11 Average heat flux and inlet velocity

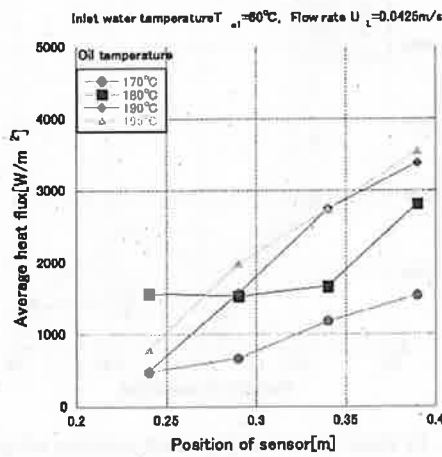


Fig. 12 Average heat flux and position of sensor (inlet velocity 0.0425m/s)

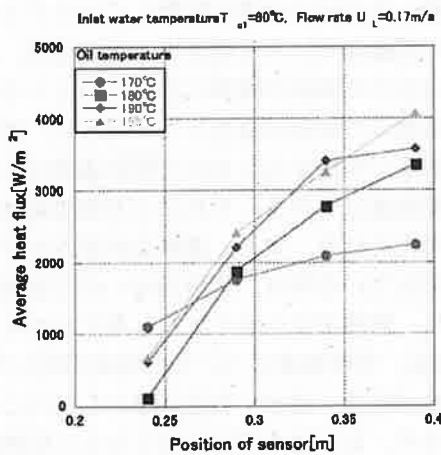


Fig. 13 Average heat flux and position of sensor (inlet velocity 0.17m/s)

Fig. 11 は、水の入口流速を横軸に、①～④の平均熱流束を縦軸にとったグラフである。流速が大きくなると、平均熱流束は少し大きくなる傾向がある。

Fig. 12, Fig. 13 は、センサーの位置を横軸に、平均熱流束を縦軸にとったグラフである。Fig. 12 は流速が小さい時、Fig. 13 は流速が大きい時の様子を表している。どちらの場合も、センサーの位置が高くなると熱流束の値が大きくなるということを示している。ただ、流速が小さい状態で油の温度が低い時は、位置による熱流束の値の差が小さくなる場合がある。

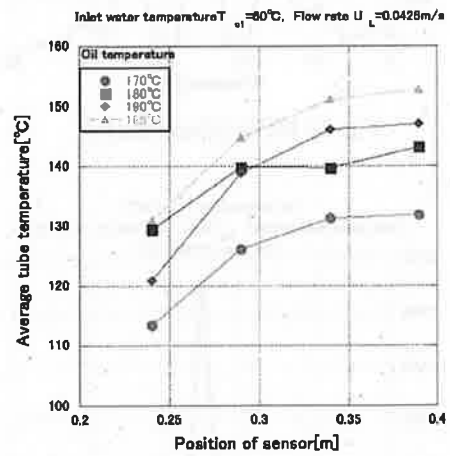


Fig. 14 Average surface temperature and position of sensor (inlet velocity 0.0425m/s)

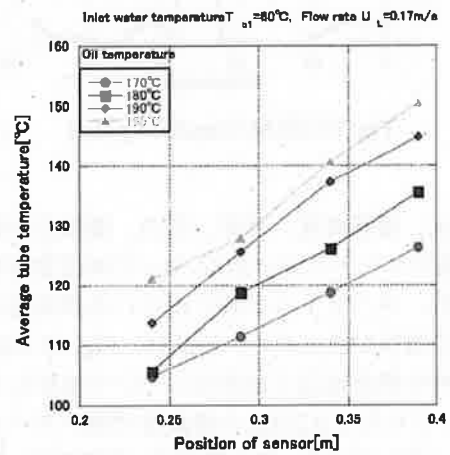


Fig. 15 Average surface temperature and position of sensor (inlet velocity 0.17m/s)

Fig. 14, Fig. 15 は横軸にセンサーの位置、縦軸に平均管壁温度をとったグラフである。センサーの位置が高くなると温度も高くなるということがわかる。Fig. 14 は流速が小さい時で、その時はセンサーの位置が高い所では温度変化が小さくなっている。Fig. 15 のグラフの方が傾きは大きくなっている。

3.3 測定値の周期, 振幅

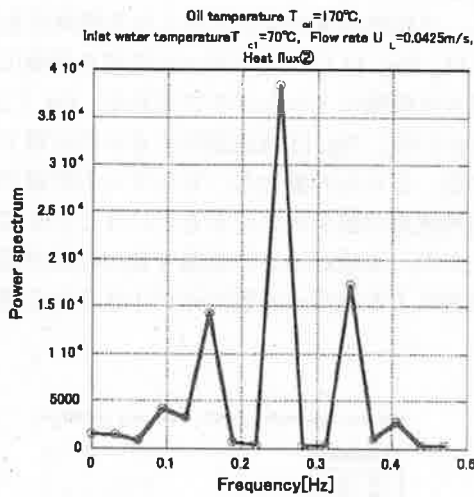


Fig. 16 MEM (Heat flux②)

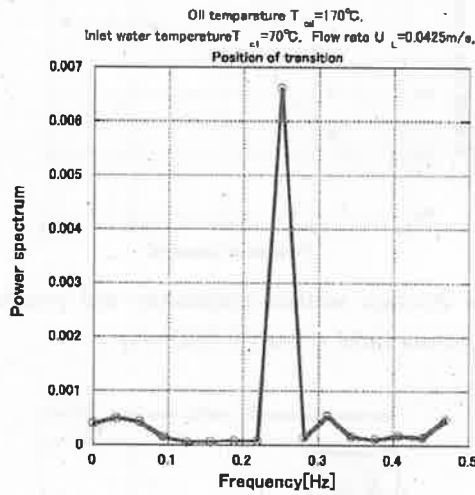


Fig. 17 MEM (transition point)

熱流束, 管壁温度, 流速, 圧力, 遷移点の振動をMEM(最大エントロピー法)によって周波数解析した。それぞれ, スペクトルが強く出ている周波数が多数存在する場所が見られた。Fig. 16, Fig. 17は同じ実験条件時の熱流束②と遷移点について解析した結果である。どちらも0.25Hzの周波数で強いスペクトルが出て一致している。他の熱流束, 管壁温度, 流速, 圧力, 遷移点についても, それぞれ同じ周波数で強いスペクトルが出ている場合が多く見られた。

Fig. 18は, 横軸に流速, 縦軸に熱流束の振幅をとったグラフである。振幅は振動している値の最大値と最小値の差から求めた。流速が大きくなると, 熱流束の振幅は小さくなる傾向がある。

Fig. 19は, 横軸にセンサーの位置, 縦軸に熱流束の振幅をとったグラフである。振幅が一番大きくな

るのは, センサー①の所である。その他の場所では, それぞれの振幅の大きさに変化があまり見られない。

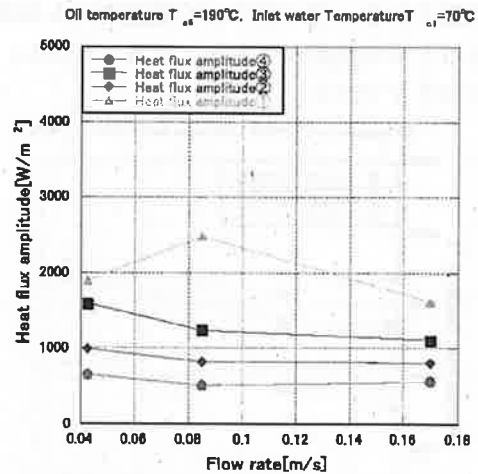


Fig. 18 Heat flux amplitude and flow rate

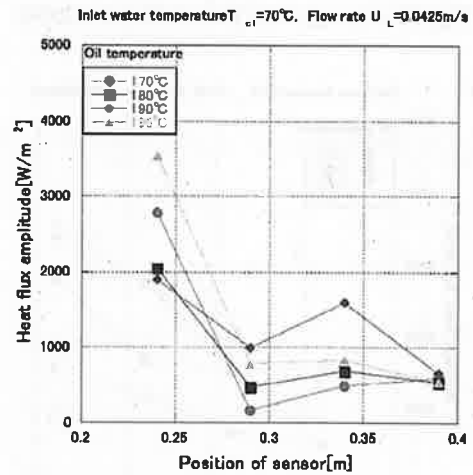


Fig. 19 Heat flux amplitude and position of sensor

4. 結 言

- (1) 実験結果から熱流束, 管壁温度, 遷移点の位置, 入口流速, 入口圧力は値が振動していることがわかる。水の流動様相により熱流束と管壁温度, 入口流速と入口圧力の振動の関係に違いが出てくる場合がある。遷移点の振動が発生している時に, 遷移点付近では激しい発泡を生じるので熱伝達率は大きくなり, 管壁温度は下がる。それにより熱流束は大きくなると考えられる。また, 遷移点が遠ざかり壁面を液膜が流れている時は, 発泡がないので管壁温度が高くなり, 熱流束は小さくなると考えられる。
- (2) 熱流束, 管壁温度については時間平均した値と, 入り口油の温度・流速・測定位置から次のことが言える。まず, 入り口油の温度が高くなると伝熱面温度が高くなり, 熱流束は大きくなると考えられる。流速が大きくなった場合に熱流束が大きくなる場合が

見られたが、層流から乱流に遷移する間で熱伝達率が高くなるので、その遷移域の流れになっているのではないかと思われる。

熱流束と測定位置の関係から、水の出口部分に向かって熱流束が大きくなることがわかった。流速が小さい時、①の場所は水の状態で熱伝達率が小さいので熱流束が小さくなる。②の位置からは液膜が流れる状態となるが、下流に行くほど液膜の厚さが薄くなるために熱流束が大きくなると考えられる。流速が大きい時、①の場所は先ほどと同じ理由で熱流束は小さい。観察から②の付近で沸騰が始まる。その時上の位置ほど伝熱面温度が高くなるから熱流束も大きくなっていくと考えられる。

(3) 熱流束などの値の振動について、周波数解析を行いそれぞれの周期を求め、関連性を調べた。熱流束、管壁面温度、遷移点、流速、入口圧力の周期は一致する場合が多く見られたので、それらの振動は互いに強く関連している。

また、振幅について、熱流束は流速の変化を受け若干小さくなる傾向が見られた。ヘリカル蒸発管の最下部で熱流束の振動が一番大きくなる。

参考文献

- [1] 竹内・久保田・土屋, “ナトリウム加熱蒸気発生器における不安定流動現象”, 機論(B編), **47**-413, 166 (1981).
- [2] N.Nagai et al., “Forced Convective Boiling of Water inside Helical Coiled Tube (Characteristics of Oscillation of Dryout Point)”, Japanese J. of Multiphase Flow, Progress in Multiphase Flow Research I, 111 (2006).
- [3] 永井ら, “ヘリカルコイル内強制流動沸騰のドライアウト点振動に関する研究”, 混相流学会年会講論集, 118 (2006).

遷音速フラッタ制御時のリミットサイクル振動 — 数値解析予測と風洞試験実証 —

松下 洸* 八田 淳** 齊藤 健一***

Limit Cycle Oscillation in Controlled Transonic Flutter — Numerical Analysis Prediction and Wind Tunnel Test Verification —

Hiroshi MATSUSHITA*, Jun HATTA** and Kenichi SAITOH***

(Received January 31, 2007)

The wind tunnel test was carried out with great care obtaining successfully limited numbers of LCO data at dynamic pressures above the open loop flutter point. After confirming a flutter dynamic pressure of the controlled wing, we tried to excite the wing by a leading edge control surface oscillation at three different dynamic pressures in between the open and the closed loop flutter dynamic pressure. Even though the control might have lost the effectiveness due to large amplitude of LCO and resulting amplitude might have broken the wing seriously, we have succeeded in getting smaller amplitude of LCO. Adjusting the mathematical model to new wind tunnel test data, the model could predict the closed loop bifurcation that shows good correspondence to the test data.

Key Words : Transonic Flutter, Active Flutter Control, Limit Cycle Oscillation, Bifurcation

1. 緒言

遷音速の飛行速度域ではフラッタは、衝撃波が剥離を伴って翼而上を移動することによる遷音速空気の非線形性のためにリミットサイクル振動(LCO)となることが知られている^{[1]~[3]}。著者らは高アスペクト比翼模型に対して旧航空宇宙技術研究所(NAL, 現宇宙航空研究開発機構, JAXA)の遷音速風洞で実施した一連の遷音速風洞試験で観測された LCO の分岐現象のほとんどを説明できる非線形数学モデルを開発した^{[4]~[6]}。遷音速フラッタの分岐線図は、風洞試験で観測されるものも数学モデルで予測されるものも、亜臨界ホップ分岐に分類される。それは LCO 型のフラッタが基準フラッタ動

圧よりも 10%も低い動圧でも生じうることを意味する^[7]。

遷音速領域でフラッタ速度を効率的に高める方法が確立されれば航空機の性能を格段に高めることになる。この領域では飛行マッハ数に対してフラッタ動圧が急激に減少する遷音速ディップとして知られる現象があるからである^[8]。フラッタに適用するアクティブ制御技術は性能劣化を伴わずにフラッタ速度を上昇させることができる点で、大変有望な技術である。著者らはモデルの不確かさに対してロバストな制御則を生ずる実用的な制御則設計法を提案した^[9]。

制御則の評価のために著者らは連続法を用いた閉ループ分岐特性に対する評価手法をも開発した^{[6], [10]}。しかしながらこの分岐線図の解析予測を実証する実験データはなかった。そこで 2005 年 4 月に JAXA の遷音速風洞で再度試験を実施する計画を立てた。

2. 風洞試験で観測された遷音速フラッタの LCO と分岐

図 1 は高アスペクト比翼の風洞試験模型を示している。翼は図のハッチした部分に前縁舵面と後縁舵

* 機械工学専攻

** ブラザー工業(株)

*** 宇宙航空研究開発機構

* Mech. Engg. Course, Grad. Schl. of Engg.

** Brother Industries, Ltd

*** Japan Aerospace Exploration Agency

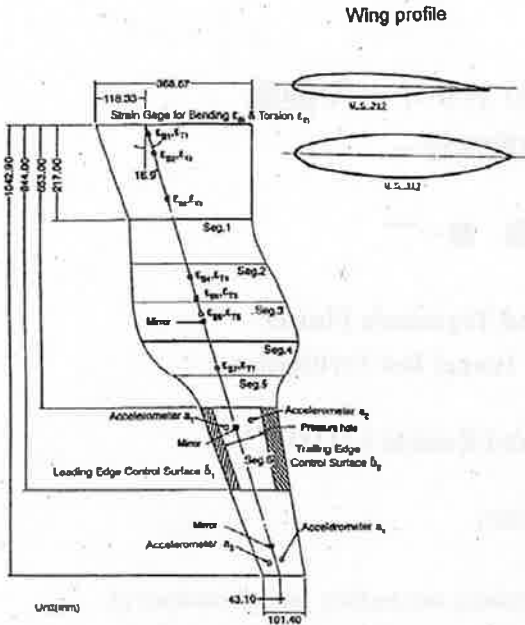


Fig. 1 High aspect ratio wing model

面を持つ。それらはアクティブフラッタ制御の研究に使われた¹⁹⁾。翼は拡大中央部を持ちそこに制御のための2組の舵面駆動用電動モータが装着されている。風洞試験による LCO の研究では前縁舵面を加振源として使用してその応答を翼のアルミ桁に取り付けた4個の加速度計と7組の曲げ・振り歪ゲージで測定する。

NAL の遷音速風洞で実施した一連の風洞試験においてこの翼が典型的な遷音速フラッタを生ずることが判明した。翼は遷音速域でフラッタを生ずる最小の動圧を有し(遷音速ディップ現象)、フラッタは LCO となる。フラッタにおいて、マッハ数 0.8 で図 2 の最下段の時間履歴に示すように風洞内圧(すなわち動圧)を上げてゆくと、翼は同図最上段の時歴のようにある特定の動圧(基準動圧)において LCO 状態に飛び移る。(同図はアクティブ制御の結果⁶⁾を示して

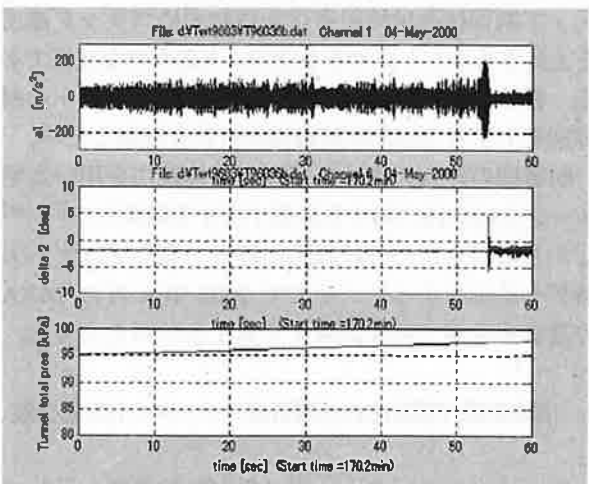


Fig. 2 Time history of nominal flutter occurrence during the increase of the wind tunnel pressure.

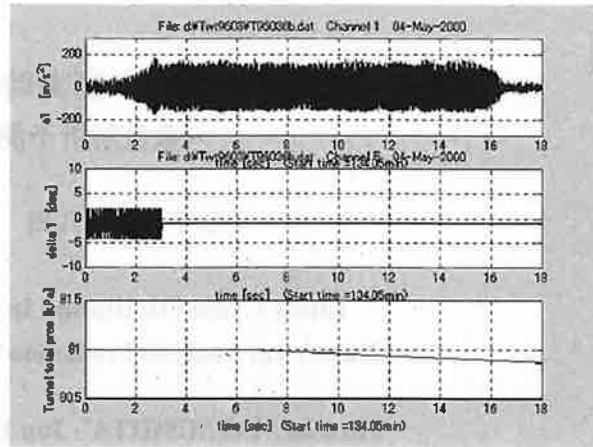


Fig. 3 Quasi-steady decrease of the dynamic pressure at the saddle-node bifurcation

いるので LCO は同図中段の時歴のように後縁舵面を操舵すると直ちに停止している。)

引き続き研究で明らかになったことは、基準フラッタ動圧より低い動圧であっても翼があるレベル以上に外乱によって励振されれば LCO 状態に入りうることである^[11]。一旦 LCO 状態に入ると加振を止めても LCO が持続する。一旦入った LCO も風洞内圧をさらに低下させると停止安定状態に戻る。これらの現象は図 3 に示すように LCO が同図中段に示す前縁舵面の励振によって発生し、励振を止めても持続している。LCO は風洞内圧を準静的に減少しても持続し、ある動圧に達して初めて停止する。この停止点は亜臨界ホップ分岐の鞍・接点に対応する。

図 4 は風洞試験で見出されたこれらの現象を分岐線図としてまとめたもので、LCO 振幅を横軸に、動圧を縦軸に取って図示している。この図で安定境界、あるいは不安定リミットサイクルは多少ばらついていて境界の下の安定域が幾分狭い。翼面で発生する流れの剥離やそれによる風洞気流の乱れなどは実験的に得られる安定域を狭める。

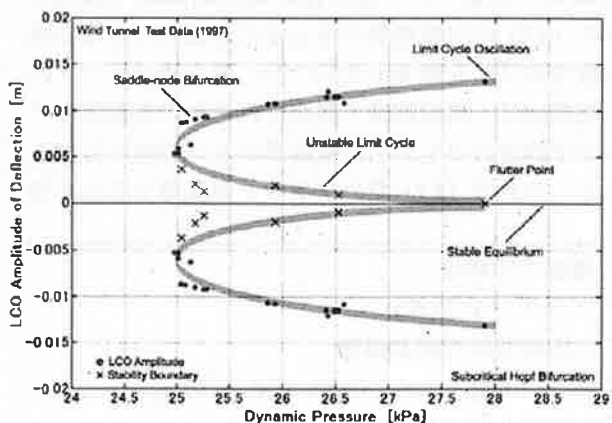


Fig. 4 Bifurcation diagram obtained from 1997 wind tunnel test

3. 遷音速フラッタの非線形数学モデルと開ループ分岐

著者らは遷音速フラッタの非線形数学モデルを一般空気力の減衰項に4次の非線形性を導入することで2モードの有限次数非線形微分方程式の形で導いた^[4]。これを4モードに拡張することでシステムノイズ $w(t)$ を含む次のような14次の非線形微分方程式が得られた^[5]、^[6]、^[12]。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + \Delta A_{NL}x + Bu + Gw(t); \\ x &= [q^T \quad \delta_2 \quad \dot{q}^T \quad \dot{\delta}_2 \quad r^T]^T \in R^{14 \times 1} \\ u &= \delta_2 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで q は一般座標、 r は非定常空気力の遅れを表す付加状態変数である。 A, B, C は線形の通常のフラッタ解析で用いる行列で次の通りである。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_1 & 0 \\ A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 \\ 0 & -K_\delta & 0 & -C_\delta & 0 \\ B_{0q} & B_{0\delta} & 0 & 0 & \Lambda \end{bmatrix} \in R^{14 \times 14} \quad (2a)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_q S_\delta K_\delta \\ K_\delta \\ 0 \end{bmatrix} \in R^{14 \times 1} \quad (2b)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ I_5 \\ 0 \end{bmatrix} \in R^{14 \times 5} \quad (2c)$$

ただし、

$$\begin{aligned} A_1 &= -M_q(K - A_{2q}), & A_2 &= M_q\{S_\delta K_\delta + A_{2\delta}\} \\ A_3 &= -M_q(B_c - A_{1q}), & A_4 &= M_q\{S_\delta C_\delta + A_{1\delta}\} \\ A_5 &= M_q \end{aligned} \quad (3)$$

および

$$\begin{aligned} M_q &= (M - A_{0q})^{-1} \\ S_\delta &= (S - A_{0\delta}) \end{aligned} \quad (4)$$

上記の方程式で、 M, C, K はそれぞれ一般質量行列、一般構造減衰行列、一般剛性行列であり、 A_2, A_1, A_0, B_0 および Λ は有限次元空気力学モデルを構成する^[5]。

(1)式中の行列 ΔA_{NL} は非線形項を表し、次の形を持つ。

$$\Delta A_{NL} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_q A_{1q} \Delta A_{NL} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \in R^{14 \times 14} \quad (5)$$

$$\Delta A_{NL} = \begin{bmatrix} (\beta_1 \dot{q}_1^2 + \gamma_1 \dot{q}_1^4) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\beta_2 q_2^2 + \gamma_2 q_2^4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで(1,1)、(2,2)要素はそれぞれ曲げ変位および振り変位における空気減衰係数である^[12]。

数学モデルを実験結果と比較するためには(1)式の状態変数を風洞試験で計測する出力変数に関係付ける出力方程式が必要である。翼の加速度 a_1, a_2 、速度 v_1, v_2 および変位 d_1, d_2 という二組の測定変数と誘導変数が比較のためには十分であるから、出力方程式は測定ノイズを $v(t)$ として次の形をとる。

$$\begin{aligned} y &= Cx + Du + v(t) \\ y &= [a_1, a_2, v_1, v_2, d_1, d_2]^T \in R^6 \end{aligned} \quad (7)$$

上記 C, D の係数行列については文献^[12]を参照されたい。(1)式と(7)式が遷音速フラッタに対する非線形数学モデルを構成する。

Christiansen と Lehn-Schiøler は松下等の非線形数学モデル^[4]に連続法(continuation method)を、プログラムパッケージを改訂することで適用した^[14]、^[15]。連続法は4次精度のルンゲ・クッタ積分(固定時間間隔)を組み込んでいて、リミットサイクルの解をポアンカレ断面において制御パラメタ(本論文では動圧)の変化に対して連続的に求めることが出来る。連続法は従って一旦LCO振幅の1点が求まれば、不安定リミットサイクルも含めて連続的にポアンカレ断面をたどることが出来る。これによって滑らかな分岐線図が得られる。

非線形数学モデルの非線形項に含まれる2つのパラメタ β, γ の値を、数学モデルが風洞試験結果とよい対応をする値になるように、連続法を用いて探索し、

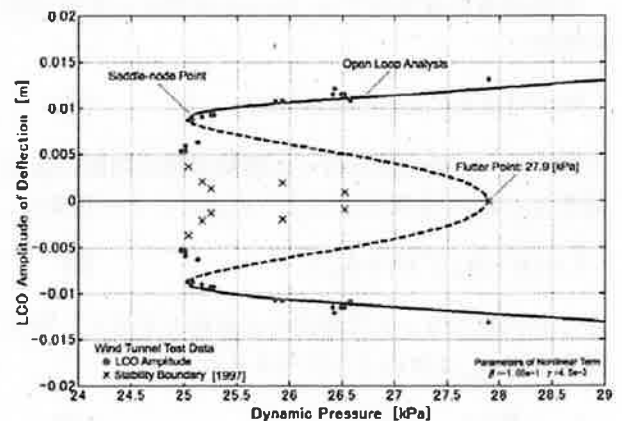


Fig. 5 Analytical bifurcation diagram based on 1997 wind tunnel test

$\beta = -1.05e^{-1}, \gamma = 4.5e^{-3}$ と求められた^[5]. この結果得られた分岐線図を図5の実線(安定 LCO)および破線(不安定リミットサイクル)で示す. 図には風洞試験結果も示してある. 数学モデルと風洞試験結果の LCO の対応はきわめて良好で, LCO の振幅はほとんど一致していて鞍・接点の位置は正確に等しい. 不安定リミットサイクルに対してはまだ相違が残っていて, 数学モデルは不安定リミットサイクルの間に広い安定域があるのに対して風洞試験データは安定域が限られている. 前述のように, この相違の主たる理由はノイズの影響にあると思われる. 実際状況では本来安定な領域でも擾乱があると翼の振動を励起してしまい, 不安定な領域に飛び移らせて翼を LCO の状態に押し上げてしまうことはありうる.

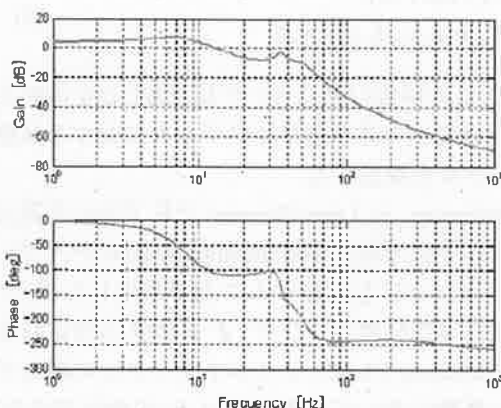


Fig. 6 Bode diagram of controller CT03-161

4. ロバストフラッタ制御器と閉ループ分岐線図

4.1 ロバスト制御器の設計

左規約分解手法に基づくロバスト安定制御設計^[16]を対象翼模型に適用し, 残差法によって低次数化制御器を設計し, ロバスト性を持った制御器を得た^{[9], [17], [18]}. 概要は以下の通りである.

制御対象の基準モデル $P(s)$ を基準化左規約分解の形で

$$P(s) = (A, B, C, D) = M(s)^{-1} N(s) \quad (8)$$

と表すと, 不確定性を持った制御対象は加法的安定擾乱 Δ_M, Δ_N の表現で次のように表すことが出来る.

$$\tilde{P} = (M + \Delta_M)^{-1} (N + \Delta_N) \quad (9)$$

X, Y を代数リカッチ方程式の正定解とすると, 最大安定余裕 ε_{\max} は次のように与えられる.

$$\varepsilon_{\max} = (1 + \lambda_{\max}(XY))^{-1/2} \quad (10)$$

ここで $\lambda(XY)$ はハンケルノルムで $\lambda_{\max}(XY)$ はその最大値である. 安定余裕 ε を $0 < \varepsilon < \varepsilon_{\max}$ のように選べば, 中心制御器 $K_1(s)$ はドイルの表現を用いて次のような形で与えられる.

$$K_1 = \begin{bmatrix} A_2 - B_2 B_1^T X + \varepsilon^{-2} W_r^T Y C_1^T C_1 & \varepsilon^{-2} W_r^T Y C_1^T \\ B_1^T X & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ただし,

$$W_r = (1 - \varepsilon^{-2}) I + XY \quad (12)$$

(11)式で与えられる制御器は制御対象であるフラッタの数学モデルと同次数となるので次数の低減が必要である. 次数低減に残差法を用いることによって低次数制御器が得られ, 一般的に次のように表すことが出来る.

$$\dot{z} = Fz + Gy \quad (13)$$

$$u = Hz + Jy$$

こうして得られた制御器(記号で CT03-161)は NAI で風洞試験に使用されフラッタ速度を 10.9%上昇させた^[9]. 制御器のボード線図を図6に示した.

風洞試験では制御器に併せてアンチ・エリアシングフィルターを用いるとともに, 制御器を組み込んだ PC の前後に A/D, D/A 変換器を用いた. これらの数学モデルはそれぞれ次のように表現できる.

$$\dot{y}_1 = \omega_f y_1 - \omega_f y \quad (14)$$

$$\dot{y}_2 = -f_a y_2 - \dot{y}_1 + f_a y \quad (15)$$

これらの方程式で加速度出力 y がフィルター出力 y_1 となり, さらに変換器出力 y_2 となる.

4.2 閉ループ分岐線図

閉ループ系の分岐線図を解析する手順は連続法を用いることで開発することが出来る. 制御則(13)式を状態方程式(1)式に代入し, 出力方程式(7), アンチ・エリアシングフィルターと A/D 変換の数学モデル(14), (15)式を用いると閉ループ系に対する次の齊次方程式が得られる.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\hat{x}}(t) \end{bmatrix} = \tilde{A}_0 \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

ここでシステム行列は,

$$\tilde{A}_0 = \begin{bmatrix} A + \Delta A_{NI} & -BK_1 \\ K_2 C(\bar{q}) & A_r(\bar{q}) \end{bmatrix} \in R^{28 \times 28} \quad (15)$$

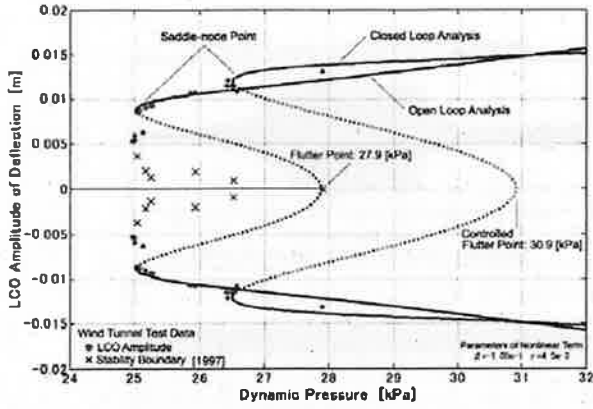


Fig. 7 Closed loop bifurcation diagram compared with

で、

$$A_c(\bar{q}) = A(\bar{q}) - B(\bar{q})K_1 - K_2C(\bar{q})$$

である。係数 $A(\bar{q})$, $B(\bar{q})$, $C(\bar{q})$ は設計動圧 \bar{q} での値を取る。今や連続法が開ループ系と同様に適用することが出来る。図7は(14)式で得られる閉ループ分岐線図に対する連続法による解析結果を示している。同図では開ループの線図も載せている。解析結果はロバスト制御器が開ループ分岐線図をより高い動圧に移動することを示している。しかし、鞍・接点の動圧の上昇はフラッタ点の上昇より幾分少なめである。

5. 閉ループ分岐の風洞試験による検証

5.1 基準フラッタ試験

風洞試験を計画し2005年4月にJAXAの遷音速風洞において実施した。図8および9は風洞測定部に設置した翼模型とフラッタ制御の風洞試験機器の配



Fig. 8 Model installed in the wind tunnel test

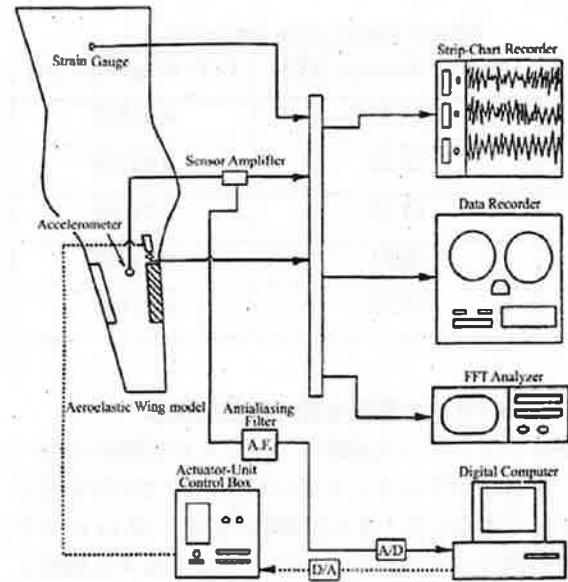


Fig. 9 Wind tunnel instrumentation for flutter control.

置を示す。2000年12月に実施した前回の風洞試験からH数が増えているので模型特性の有無を確認するために基準開ループ試験をまず実施した。代表的な風洞試験時系列記録を図10に示す。上図に示した#1の加速度計出力が下図に示した風洞内圧の上昇によって2.5秒を過ぎる時点で突然LCOに入っている。表1には、試験中数回実施した基準フラッタ試験の結果の一覧を示した。表には風洞内圧とマッハ数から求めた動圧を表示している。

1997年の風洞試験での動圧27.9kPaと比較すると表はすべて低い動圧でフラッタが発生していることを示している。前回の試験以来欲の表面を補修したためにフラッタ特性がわずかに変化している。今回の2005年試験では26.0kPaを基準フラッタ動圧とする。

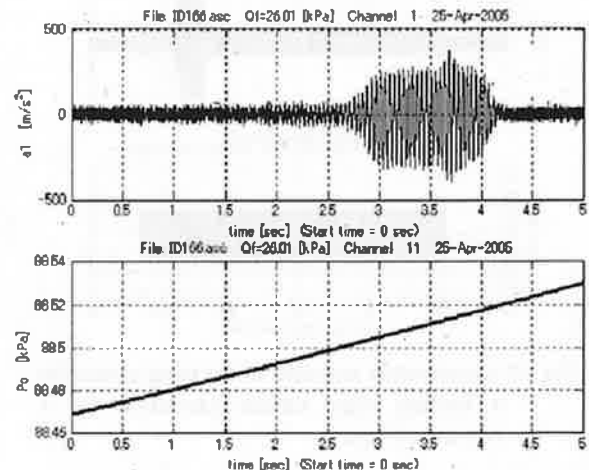


Fig. 10 Time history of accelerometer output and total pressure in wind tunnel

Table 1 Flutter point test results

No.	Dynamic Pressure [kPa]	LCO Amplitude [m]
1	25.85	0.01169
2	25.55	0.01128
3	25.13	0.01092
4	26.01	0.01234
5	25.83	0.01165

5.2 基準フラッタ動圧を超える加振試験

閉ループフラッタ試験を、ロバスト制御則 CT03-161 を基準フラッタより低い風洞内圧で印加するようにして実施した。その後風洞内圧を、図 11 に示すように閉ループフラッタが生ずるまで徐々に増加していった。確認した閉ループフラッタの動圧は 28.3kPa であった。

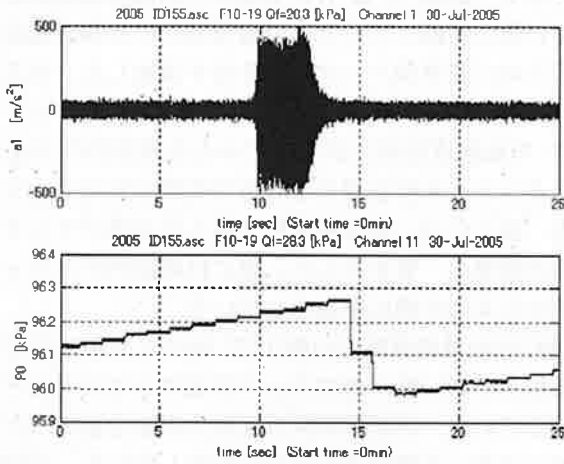


Fig. 11 Time history of flutter point test

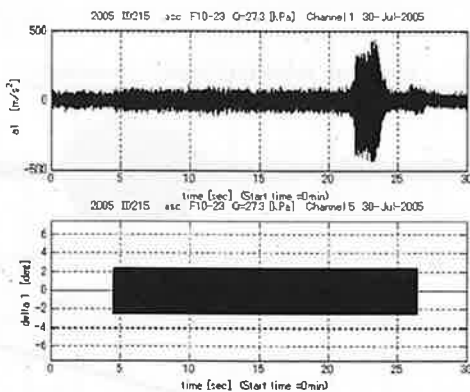


Fig. 12 Acceleration response of the wing caused by a leading edge surface excitation for a controlled flutter.

我々は次に基準フラッタ動圧を上回る動圧で加振試験を実施した。上記の閉ループフラッタ確認試験と同様、亜臨界動圧で制御を加え、準静的に風洞内

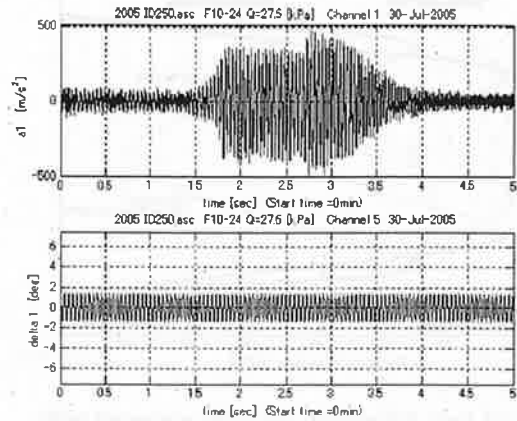


Fig. 13 Time history of LCO test (case: c)

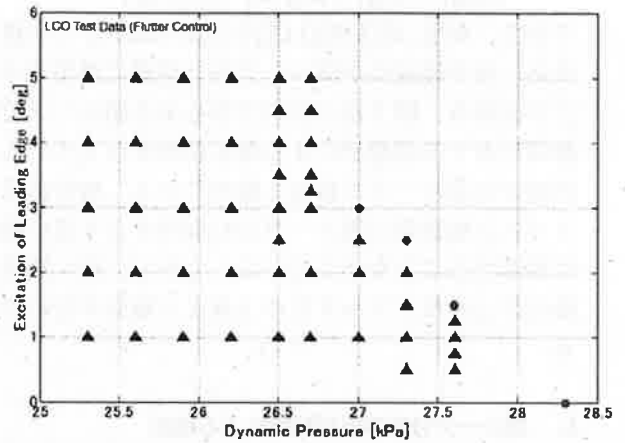


Fig. 14 LCO (flutter control) test result

圧を上昇させていく。その間、異なった風洞内圧でフラッタ周波数 22.4Hz の正弦波で前縁舵面を加振する。舵面加振の振幅は LCO が発生するまでステップ状に上げてゆく。一旦 LCO が発生したら、加振を停止して LCO が停止するか継続するかを観察する。試験で得られた典型的な結果を全体図として図 12 に、詳細図として図 13 に示す。それぞれの図で上図が前縁舵面を 2.5 度の振幅で加振したことによる加速度応答とした LCO を示している。LCO を確認した直後に、模型破損を防ぐために風洞測定部のフラッタ停止板を操作してフラッタを停止させている。図 14 にこうした試験の結果をまとめた。

LCO の加速度データを積分することで分岐線図の LCO 振幅を描くことが出来る。図 15 は閉ループ系に対する分岐線図を開ループ系のもとともに示している。制御されたシステムでは LCO は動圧 26.7kPa 以下では完全に抑制されている。図中の 3 組の三角印は分離線(separatrix), すなわち不安定リミットサイクルのわずかに外側の状態を示している。

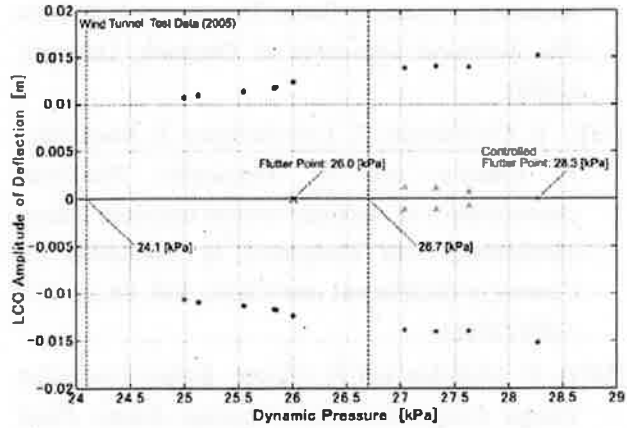


Fig. 15 Bifurcation diagram of 2005 wind tunnel

5.3 予知分岐の風洞試験による検証

数学モデルの自由パラメタを調整して、今回の風洞試験データに合致するように数学モデルを更新した。最終的に得られた分岐線図を図16に描いた。今回の閉ループフラッタ試験で得られた3点の試験データは数学モデルから解析的に得られた分岐線図の上に乗っている。

数学モデルに基づけば閉ループの分岐線図は図17のように描くことが出来る。図は解析結果が試験結果を見事に良く予測していることを示している。このことはフラッタ制御による閉ループ系に対する分岐線図解析方法が風洞実験で基本的に検証されたことを意味する。

5. 結言

開ループフラッタを上回る動圧において十分な注意を持って風洞試験を実施し、供試模型を破損することなく複数の貴重な試験データを取得することに

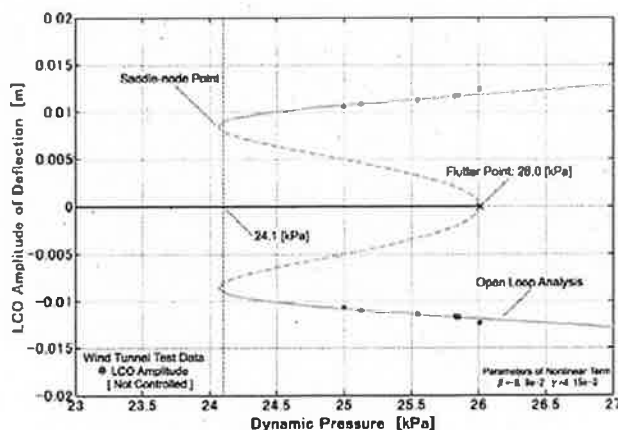


Fig. 16 Parameter adjusting on the bifurcation diagram,
 $\beta=8.9e-2$, $\gamma=4.15e-3$

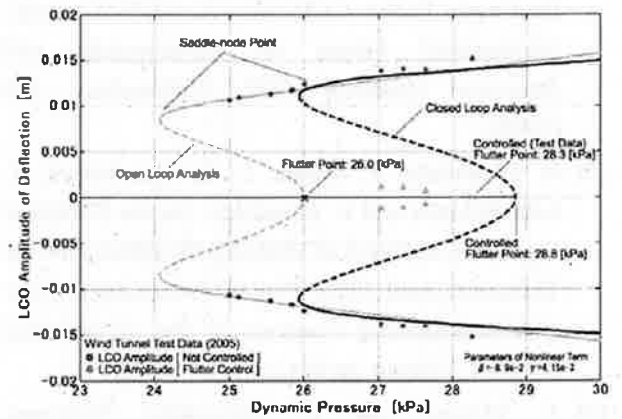


Fig. 17 Open loop and closed loop bifurcation diagram compared with 2005 test data

成功した。制御状態の翼のフラッタ動圧を実験的に確認した後、開ループと閉ループのフラッタ動圧の間の異なる3点の動圧において、前縁舵面過信によって翼を励振することを試みた。大振幅のLCOによって制御性能が失われる可能性があり、その結果、翼に重大な破壊をもたらす可能性があったが、制御中のLCOフラッタの振幅は適度な振幅に留まった。

今回の風洞試験結果に適合するように調整した数学モデルに基づいて、風洞試験に使用したロバスト制御則を組み込んだシステムに対する閉ループ分岐を提案した手法で予測した。風洞試験で得られた3点のLCOは予測した分岐線図のLCOと良く一致した。さらに、制御されたフラッタの動圧についても、予測値は風洞試験結果と大変良い一致を示した。

参考文献

- [1] A. M. Cunningham, Jr.: Practical problem: airplanes. Chapter 3, *Unsteady transonic aerodynamics*, Nixon, D., ed., Progress in Astronautics and Aeronautics, 120, AIAA, pp 75-132 (1989).
- [2] E. H. Dowell: *Nonlinear Aeroelasticity. Flight-Vehicle Materials, Structures and Dynamics*, 5, Part II, Chapter 4, ASME, pp 213 - 239 (1993).
- [3] G. Schewe and H. Deyhle: Experiments on transonic flutter of a two-dimensional supercritical wing with emphasis on the non-linear effects. *Proceedings of the Royal Aeronautical Society Conference on "UNSTEADY AERODYNAMICS"* (1996).
- [4] H. Matsushita, K. Saitoh, and P. Gránásy: Two degrees-of-freedom nonlinear math model with

- fourth order nonlinear aerodynamics for transonic limit cycle flutter. *CEAS/AIAA/ICASE/NASA LaRC International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics 1999*, Williamsburg, US (1999).
- [5] H. Matsushita, T. Miyata, L. E. Christiansen, T. Lehn-Schiøler and E. Mosekilde: On the Nonlinear Dynamics Approach of Modeling the Bifurcation for Transonic Limit Cycle Flutter, *Proceedings of the 24th International Congress of the Aeronautical Sciences*, Toronto, pp 414.1 - 414.8 (2002).
- [6] T. Miyata, and H. Matsushita: Nonlinear Mathematical Modeling of a Transonic Flutter Phenomena Observed in the wind Tunnel Tests, *4th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science*, Chongquig, China (2002)
- [7] H. Matsushita, T. Miyata, M. Kawai, and E. Mosekilde: Nonlinear Mathematical Modeling of Aircraft Wing Flutter in Transonic Range, *International Conference on Physics and Control*, St. Petersburg, Russia (2003).
- [8] K. Isogai: On the Transonic-Dip Mechanism of Flutter of a Sweptback Wing, *AIAA Journal*, Vol. 17, No. 7, pp 793-795 (1979).
- [9] K. Saitoh, D. H. Baldelli, H. Matsushita, and M. Hashidate: Robust controller design and its experimental validation for active transonic flutter suppression. *Proceedings of CEAS International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics 1997*, Vol. II, Rome, pp 393-399 (1997).
- [10] H. Matsushita, T. Miyata and A. Fujimori: Possible Decrease in LCO Flutter Dynamic Pressure due to Robust Controller. *Proceedings of the 25th International Congress of the Aeronautical Sciences*, Yokohama, pp 5.10.3.1 - 8 (2004).
- [11] H. Matsushita, K. Saitoh, and P. Gránásy: Nonlinear characteristics of transonic flutter of a high aspect ratio wing. *Proceedings of 21st International Congress of the Aeronautical Sciences*, Melbourne, pp 1-7 (1998).
- [12] J. Hatta, K. Imamura and H. Matsushita: Four-Mode Modeling of Non-linear Characteristic of Transonic Flutter, *2004 KSAS-JSASS Joint Symposium on Aerospace Engineering*, Seoul (2004).
- [13] 八田淳：遷音速フラッタ制御に対する閉ループ分岐特性と風洞試験実証，福井大院機械工学専攻修士論文，(2006)
- [14] L. E. Christiansen and T. Lehn-Schiøler: Stochastic modeling of transonic flutter. Department of Physics, The Technical University of Denmark, Denmark (2000).
- [15] L. E. Christiansen, T. Lehn-Schiøler, E. Mosekilde, P. Gránásy and H. Matsushita: Nonlinear characteristics of randomly excited transonic flutter. *Mathematics and Computers in Simulation on Control of Oscillations and Chaos*, Vol. 58, pp 385 - 405 (2002).
- [16] D. C. Mcfarlen and K. Glover: *Robust Controller Design Using Normalized Coprime Factor Plant Descriptions*. Springer-Verlag (1990).
- [17] D. H. Baldelli, H. Matsushita, M. Hashidate, K. Saitoh, and H. Ohta: Flutter Margin Augmentation Synthesis Using Normalized Coprime Factors Approach. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 18, No. 4, pp 803 - 811 (1995).
- [18] A. Fujimori, H. Matsushita, and K. Saitoh: Model Modification of Transonic Aerodynamic Force on a High Aspect Ratio Aeroelastic Wing and Its Active Flutter Suppression. *Proceedings of the 23rd International Congress of the Aeronautical Sciences*, Harrogate, UK (2000).

MOSFETにおける極薄酸化膜のトンネル電流と酸化膜遷移層の考察

今井 康人* 山本 弘明**

Tunneling Current through Ultra-Thin SiO₂ Layer and Study of Transition Layer in MOSFET

Yasuto IMAI* and Hiroaki YAMAMOTO**

(Received January 31, 2007)

Recently the thin SiO₂ (silicon dioxide) layer whose thickness is nanometer order is used generally in MOSFET. The reason is that the excellent technique can construct the thin layers through which tunneling current may be produced. This work describes how much effect the tunneling current gives on the drain current with decreasing SiO₂ thickness. It is confirmed that the thin oxide layer much thicker than 1.2nm is not destroyed by simple electric field. On the other hand, it is known that the thermal oxide method provides the high-quality oxide layer: this shows high-quality structure (regularly hexagone-like atom arrangement on silicon wafers). In this view point a promising transition layer thickness between Si substrate and SiO₂ layer is investigated and estimated in ideally minimum size (0.324nm on (100) and 0.529nm on (110) Si substrate).

Key words : Tunneling current density, Ultra-thin SiO₂ layer, Transition layer between SiO₂ and Si

1. 序論

最初のトランジスタの発明は60年前の1947年にゲルマニウムを基板とした点接触型にその起源を発する[1]. 2年後の1949年には現在の基礎とも言うべき接合型が発表された[2]. シリコンはその融点温度が高いことから精製技術が遅れたために1960年代に入ってからその有用性が認められてゲルマニウムに代わって今日の主役の座を得ることになった. 室温においてそのバンドギャップが1.12[eV]であることと酸化膜(SiO₂)が非常に安定で優れた絶縁性を有するためである. トランジスタに対しては, 歴史的にはベル研では当初, 電界効果型を日指したが表面準位の影響を受けて成功せず, 実際には上記の点接触型になったいきさつがある.

実際の電界効果型トランジスタは, 1952年 Shockley の接合型 FET の理論解析 [3] を経た後に 1960 年に Kahng と Atalla が MOSFET を発表している [4]. 当時のチャネル長さは 20[μm], 酸化膜厚 100[nm] で 40 数年経過した現在では, サブミクロン時代に入り, 0.14[μm], 酸化膜厚 1.6[nm] の MOSFET が量産されるようになっていいる. 一時期はトンネル効果の悪影響でそのリーク電流のために, 酸化膜厚の薄さの限界は 2.0[nm] と言われていた. 現在では, 酸化膜作製技術の進歩とあいまって, 2.0[nm] の壁を越えて生産されている. リーク電流は MOSFET のドレイン電流に悪影響を与えるほどではなく, 実質上の結果オーライの量産大勢である. 酸化膜(SiO₂)は本来アモルファス構造を取ることが知られていて, ある程度以上の膜厚が必要とされてきた. 一方で, 学問的にはアモルファスである酸化膜(SiO₂)は, 構造的に完全に不規則配列された原子から構成されているという長年の解釈から, 結合手の特性に関する研究が進展するにつれて, 長距離秩序はないものの数十原子層程度では規則的な配列をしているという解釈に

*情報・メディア工学科

**大学院工学研究科情報・メディア専攻

* Dept. of Information Science

** Information science course, Graduate school of Engineering

変わってきている。最近の酸化膜厚の 2[nm] 以下の薄膜化傾向は、作製技術の向上に伴って薄い酸化膜は安定な性質をもつ、すなわち、結晶の特性に近いアモルファス構造になっていることを物語っていると考えられる。

本研究では、トンネル電流の酸化膜厚依存性を計算し、1.2[nm] 以上の酸化膜厚ではドレイン電流に及ぼす影響はほとんど無いことを確認した。これは、現状の MOSFET においてはこのトンネルによるリーク電流を無視した状態で作製・動作していることを確かめたことになる。一方、酸化膜が薄くなるほど高品質で安定な特性を示すことが知られていることに対して、その構造のモデル化に取り組んだ。その結果、シリコン基板と酸化膜との間に存在する遷移層を結合手の特性を考慮して構築することによって、その最小膜厚と考えられるモデルを示すことができた。

2. 酸化膜厚の極薄化とゆらぎ

ここでは、ダングリングボンドを考慮に入れて、シリコン基板と酸化膜間に生ずる遷移層に対するモデルを構築する。

2.1 酸化膜厚の極薄化とゆらぎの概要

Si 及び SiO₂ の基本構造を図 1 に示す [5, 6]。

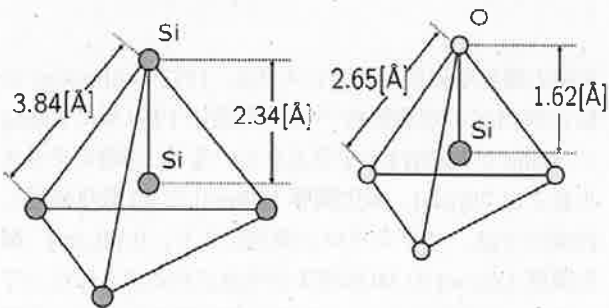


図 1: Si と SiO₂ の基本構造

熱的に成長した SiO₂ の基本構造は、図 1 に示されているように Si 原子の周りを四つの酸素原子が取り囲んだ正四面体構造になっている。Si-O 原子間の距離は 1.62[nm]、O-O 原子間の距離は 2.65[nm]、O-Si-O の結合角は 109.5° である。このような正四面体は酸素を介してお互いにいろいろな形に結び付き SiO₂ を形成している。SiO₂ の構造には結晶的構造とアモルファス構造がある。一般に Si が熱的に酸化されると SiO₂ はアモルファス構造をとることが知られているが、酸化膜厚が 2.0[nm] よりも薄くなると結晶性 (結合の近距離秩序が保持されたアモルファス構造) が強くなる。また、図

2 に示される Si から SiO₂ へ変化する遷移領域はシリコン酸化膜とは異なる構造をとるといわれている。本研究では、この遷移領域で「酸化膜厚のゆらぎ」を考察することにする。

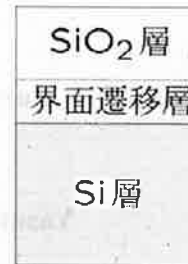


図 2: Si/SiO₂ 界面の概略図

(100) 面を基板とするシリコン上と (110) 面の 2 種類のシリコン酸化膜を考える。Si, SiO₂ 界面のダングリングボンド密度はそれぞれ次の原子密度で計算できる。

$$\frac{2}{a^2} : (100) \text{ 面} \tag{1}$$

$$\frac{4}{\sqrt{2}a^2} : (110) \text{ 面} \tag{2}$$

ここで a は室温における格子定数である: 5.43Å (Si), 3.75Å (SiO₂) とする。

式 (1) より求めたシリコン及び酸化膜の界面のダングリングボンド密度を表 1, 表 2 に示す。

表 1: Si 界面のダングリングボンド密度

面	Si 界面のダングリングボンド密度
(100)	$6.78 \times 10^{18} [1/m^2]$
(110)	$9.59 \times 10^{18} [1/m^2]$

表 2: SiO₂ 界面のダングリングボンド密度

面	SiO ₂ 界面のダングリングボンド密度
(100)	$1.42 \times 10^{19} [1/m^2]$
(110)	$2.01 \times 10^{19} [1/m^2]$

表 1, 2 から SiO₂ 界面のダングリングボンドは Si のダングリングボンド密度に比して数が非常に多いことが分かる。また、SiO₂ 界面のダングリングボンドは Si 原子よりも O 原子と結合しやすいため、SiO₂ 界面では O 同士が結び付いた構造が多くなると考えられる。このため、Si 界面にダングリングボンドが発生しやすくなる。この遷移層にできる Si のダングリングボンドを含んだ層を、本研究では「酸化膜厚ゆらぎ」と称することにする。この、酸化膜ゆらぎを図 3, 4 に示す。図 3 は [100] 方向に成長させたシリコン酸化膜を [110] 方向から見た図である。図 4 は [110] 方向に成長させたシリコン酸化膜を [100] 方向から見た図である。

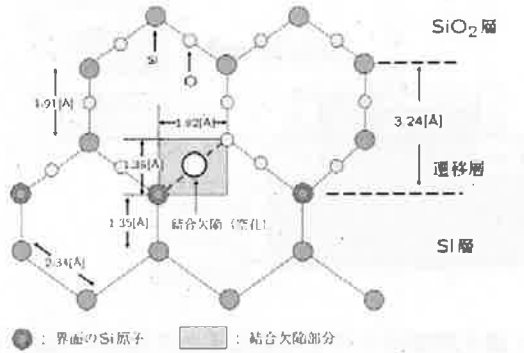


図 3: (100) 面上に成長した遷移層の 2 次元的原子配置

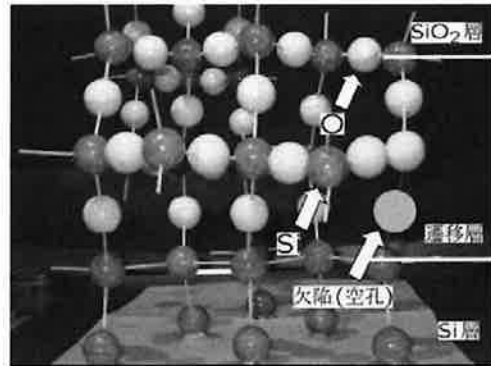


図 6: 酸化膜厚の遷移層モデル [100]

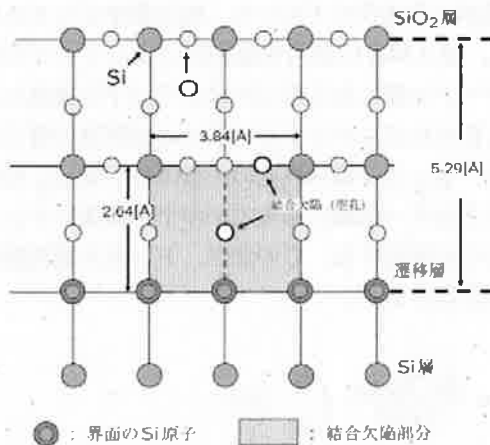


図 4: (110) 面上に成長した遷移層の 2 次元的原子配置

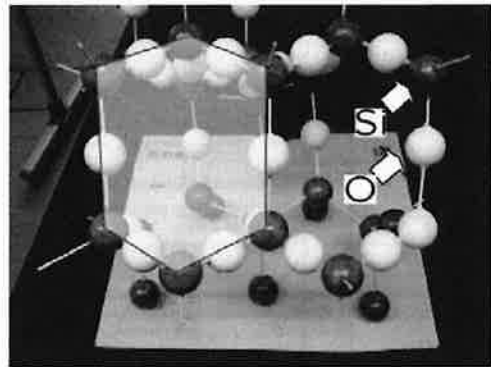


図 7: 酸化膜厚の遷移層モデル [111]

2.2 酸化膜厚のゆらぎモデル

ここでは、シリコンと酸化膜を [110] 方向に成長させた場合に対して、シリコン酸化膜の遷移層を 3 次元的にモデル化した。このモデルを [010], [100], [111] 方向から見た図をそれぞれ図 5, 6, 7 に示す。

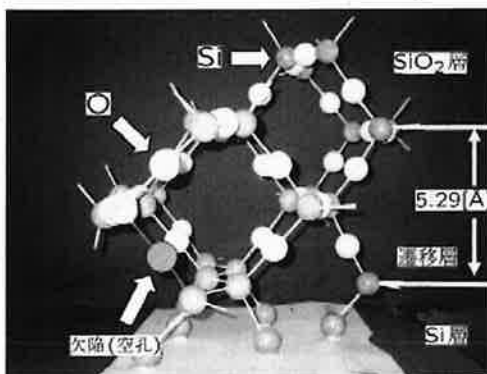


図 5: 酸化膜厚の遷移層モデル [010]

図 5 から遷移層の厚さを計算すると 5.29[Å] となる。図 6 から遷移層では SiO₂ のダングリングボンドに O 原子が結合し O 原子を主体とした構造となることで Si/SiO₂ 界面に結合欠陥 (空孔) が生じていることが分かる。図 7 からは網目部分の 6 角形の面積がシリコン結晶のそれよりも広く、Si 結晶よりも SiO₂ はその密度が疎であることが分かる。

3. 酸化膜厚ゆらぎが MOSFET に及ぼす影響

3.1 ゲートリーク電流に及ぼす影響

図 8 の構造を持つ理想的な p-MOS にゲート電圧 V_G を加え強反転状態のもとでのリーク電流を計算する。

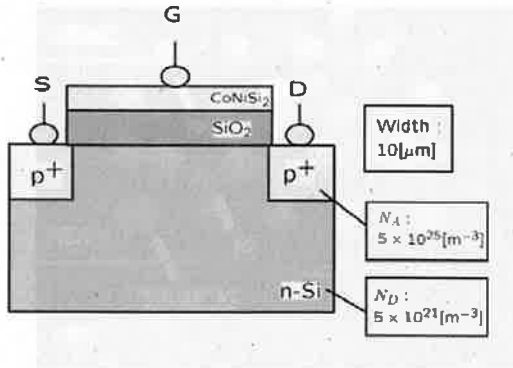


図 8: MOS 構造の概略図

酸化膜が非常に薄いと絶縁体である酸化膜を電子が通り抜けるトンネル現象が起こる。その結果、ゲートリーク電流が流れる。このときのエネルギーバンド図を図 9 に示す。

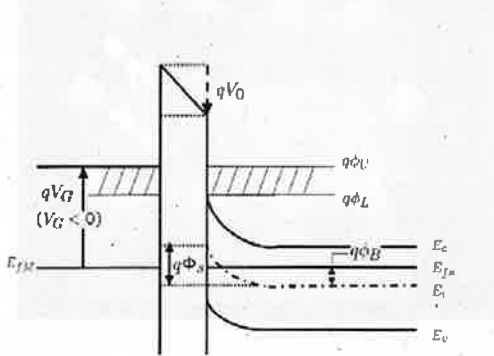


図 9: 反転状態のエネルギーバンド図

ゲート電極には、MOSFETにおいて今後ますます重要になってくる低消費電力化を念頭におき、 $V_G = -1.0[V]$ の電圧印加を仮定した。このときのシリコン内部の価電子帯の上端をエネルギーの基準にとったとき図 9 の各パラメータ値は以下ようになる。

- E_{fM} : 0.889[eV]
- qV_G : 1.0[cV]
- qV_0 : 0.342[eV]
- $q\Phi_S$: 0.658[cV]
- $q\phi_U$: 1.899[eV]
- $q\phi_L$: 1.788[eV]
- $q\phi_B$: 0.329[cV]

また、前節で構築した酸化膜厚のゆらぎモデルを考慮に入れた解析モデルを導入する (図 10 参照)。

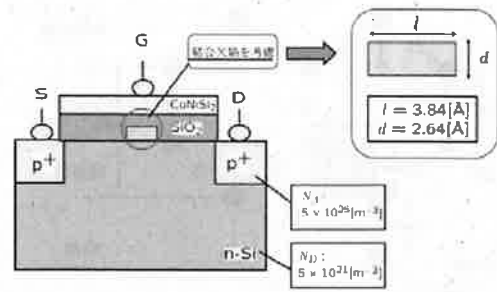


図 10: 酸化膜厚ゆらぎを考慮に入れた場合の MOS 構造の概略図

図 1 の Si 及び SiO₂ の基本構造と図 5, 6, 7 で示した酸化膜厚の遷移層モデルから、酸化膜厚ゆらぎを高さ 2.64Å、幅 3.84Å の結合欠陥 (空孔) としてモデル化する。ゲート電極に加えた電圧は全て電子の運動エネルギーに使われるものとする。図 9 の金属側の電子のエネルギー $q\phi_U$ と半導体界面の伝導体の下端 $q\phi_L$ の間にあるエネルギー領域にある電子が半導体側にトンネルするものと仮定する。このとき、トンネル電流密度は次式で計算する [7]。

$$|J| = \frac{qm^*k_B T_K}{2\pi^2 h^3} \int_{q\phi_L}^{q\phi_U} |T|^2 \times \ln \left(\frac{1 + \exp[(E_F - E)/k_B T_K]}{1 + \exp[(E_F - E - qV_G)/k_B T_K]} \right) dE \quad (3)$$

ここで、 h はプランク定数、 E_F はフェルミ準位、 V_G はゲート電圧、 k_B はボルツマン定数、温度は室温で $T_K = 300[K]$ 、 T は電子の透過確率である。式 (2) を用いて結合欠陥なしと結合欠陥ありの 2 種類のゲートリーク電流を酸化膜厚 $t_{ox} = 1.6[nm]$ と $t_{ox} = 1.4[nm]$ に対して求めた結果を図 11, 図 12 に示す。

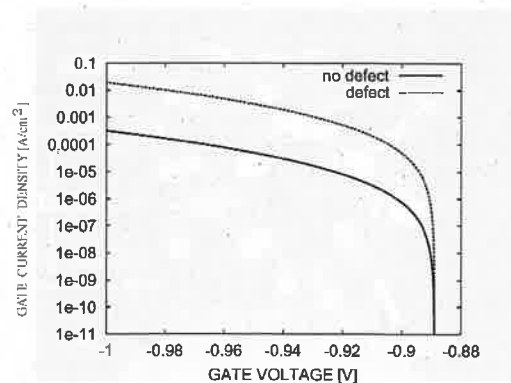


図 11: ゲートリーク電流密度 ($t_{ox} = 1.6[nm]$)

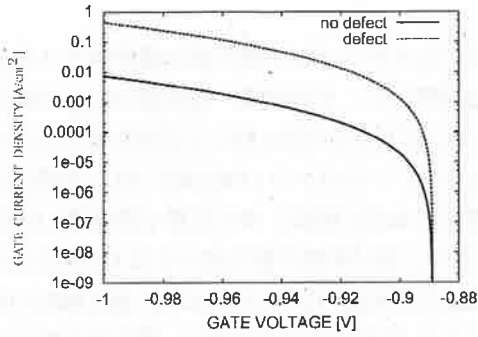


図 12: ゲートリーク電流密度 ($t_{ox} = 1.4[\text{nm}]$)

酸化膜の薄膜化に伴ってリーク電流は増加している。また、結合欠陥部を流れるリーク電流は結合欠陥なしの状態と比較して $V_G = -1.0[\text{V}]$ 印加時にはおよそ 60 倍に増加している。このことからゲートリーク電流に対して酸化膜厚ゆらぎの影響は大きいと考えられる。

3.2 ドレイン電流に及ぼす影響

チャージシェアモデル [8, 9] を用いて図 8 の遷移層構造をもつ MOSFET の電流電圧特性の解析を行なった結果を図 13, 14 に示す。

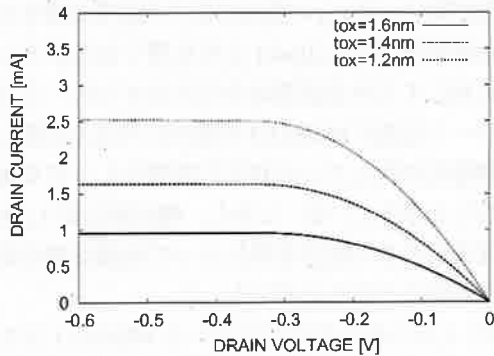


図 13: MOSFET の電流電圧特性
($L = 1.0[\mu\text{m}]$, $W = 10[\mu\text{m}]$, $V_G = -1.0[\text{V}]$)

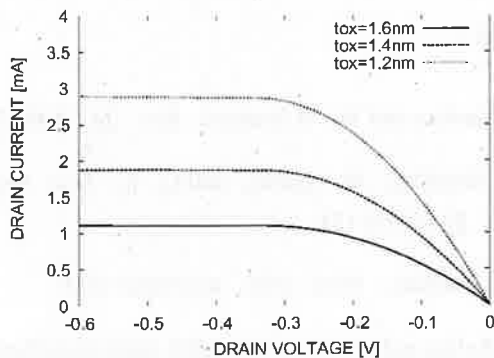


図 14: MOSFET の電流電圧特性
($L = 0.4[\mu\text{m}]$, $W = 10[\mu\text{m}]$, $V_G = -1.0[\text{V}]$)

前節で行なったゲートリーク電流の解析結果と比較すると、ゲートリーク電流の値が最も大きい場合である、 $V_G = -1.0[\text{V}]$ 、酸化膜厚 $1.4[\text{nm}]$ (結合欠陥あり) の場合でもドレイン電流はゲートリーク電流に比して約 5 桁ほど大きく、ゲートリーク電流が及ぼす影響は無視できる。このことからドレイン電流に対して酸化膜厚ゆらぎの影響はほとんどないと考えられる。

3.3 絶縁破壊に及ぼす影響

結合欠陥がない状態の MOSFET の界面の電界分布を図 15, 16 に示す。

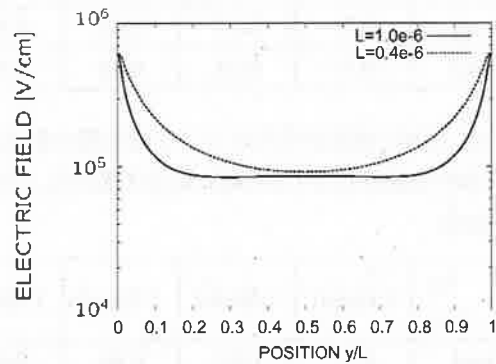


図 15: 界面電界分布 ($t_{ox} = 1.6[\text{nm}]$, $V_G = -1.0[\text{V}]$)

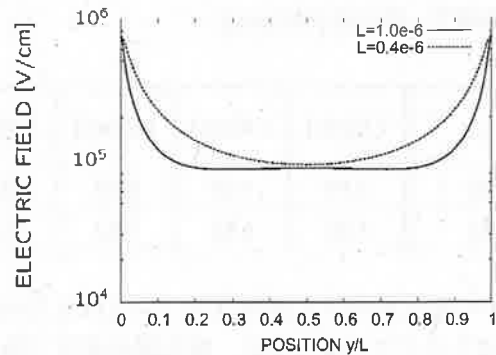


図 16: 界面電界分布 ($t_{ox} = 1.2[\text{nm}]$, $V_G = -1.0[\text{V}]$)

図 16 から酸化膜厚が $1.2[\text{nm}]$ の場合でも結合欠陥がない状態ならば絶縁破壊を起こす大きさの電界がかかっていないことが分かる。しかし、図 17 のように酸化膜厚のゆらぎを考慮し、結合欠陥部にかかる電界を局所電界 (ローレンツの方法) を用いて調べると表 3, 4, 5 のようになる。

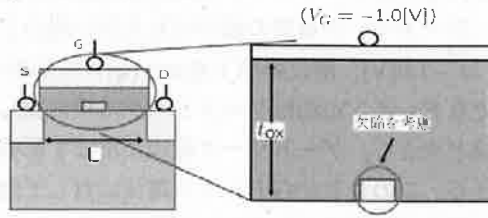


図 17: 酸化膜厚のゆらぎを考慮にいた解析モデル

表 3: [100] 方向に成長させたシリコン酸化膜の結合欠陥部分に加わる局所電界 (中央部に結合欠陥発生: 単位は [MV/cm])

$L \backslash t_{ox}$	1.6[nm]	1.4[nm]	1.2[nm]	1.0[nm]
1.0[μm]	0.70	0.73	0.76	0.83
0.6[μm]	0.71	0.73	0.75	0.82
0.4[μm]	0.77	0.78	0.80	0.97

表 4: [110] 方向に成長させたシリコン酸化膜の結合欠陥部分に加わる局所電界 (中央部に結合欠陥発生: 単位は [MV/cm])

$L \backslash t_{ox}$	1.6[nm]	1.4[nm]	1.2[nm]	1.0[nm]
1.0[μm]	0.77	0.82	0.86	0.97
0.6[μm]	0.78	0.81	0.85	0.97
0.4[μm]	0.84	0.87	0.91	1.14

表 5: 結合欠陥部分に加わる局所電界 (ソース-基板間に結合欠陥発生: 単位は [MV/cm])

面 $\backslash t_{ox}$	1.6[nm]	1.4[nm]	1.2[nm]	1.0[nm]
(110)	5.99	7.05	8.55	10.87
(100)	5.46	6.33	7.52	9.26

表 5 から酸化膜厚が 1.2[nm] のときに [110] 方向に成長させたシリコン酸化膜に、酸化膜の耐圧である 8[MV/cm] を越える電界がかかる可能性があることが分かった。また、酸化膜厚が 1.0[nm] のときに [100] 方向に成長させたシリコン酸化膜に、酸化膜の耐圧である 8[MV/cm] を越える電界がかかる可能性があることも分かった。さらに、シリコン酸化膜の厚さが 1.125[nm] となるときの、どの方向にシリコン酸化膜を成長させても結合欠陥による絶縁破壊が起こる可能性があることが分かった。このことから酸化膜の薄膜化が進むにつれて、酸化膜厚ゆらぎの影響が酸化膜の絶縁破壊に大きく影響を与えることになると考えられる。

4. まとめ

本研究ではまずシリコン酸化膜の遷移層の 3 次元的モデルを構築した。その結果、遷移層の厚さの最小値を [100] および [110] 方向に対して見積もることができた。すなわち、シリコンの (100) 面に SiO_2 を成長させている通常の MOS 構造における最小遷移層の厚さは 3.24Å となり、原子密度が最も疎となる (110) 面上では 5.29Å の最小遷移層が得られた。また、酸化膜厚のゆらぎモデルから Si 結晶に比べて SiO_2 構造は密度が疎であることが分かった。このため、酸化膜が厚いと、酸素原子とシリコン原子が置換して界面を生成するより酸素原子が酸化膜を早く通り抜けてシリコン基板界面に到達してしまうことが起こりやすくなる。これが SiO_2 の特性が好ましくないアモルファス構造をとる原因の一つであると考えられる。このことから酸化膜厚が薄いほど結晶性 (結合手の近距離秩序が保たれた状態) が強くなり結合欠陥ができにくいと推測した。

次に酸化膜厚の結合欠陥を考慮にいた MOSFET の静特性の解析をおこなった。結合欠陥ができることによりゲートリーク電流は増加するがドレイン電流に影響を及ぼすほどの大きさではないことが分かった。とくに、酸化膜厚 1.4[nm] の場合に結合欠陥を考慮すると実質的な酸化膜厚は 1.2[nm] よりも薄くなるがドレイン電流に対して大きな影響はみられなかった。このことからリーク電流が MOSFET の動作に与える影響に関しては薄膜化が進んでいる現状に問題なしとする裏付けが取れたと考えている。しかし、酸化膜厚が 1.2[nm] に到達するあたりで結合欠陥によって絶縁破壊が起こる可能性が強くなることが分かった。

以上のことから現在使用されている MOSFET が正常に動作することを裏付けるとともに、将来、酸化膜は 1.1[nm]~1.2[nm] 程度の薄さで MOSFET 動作に限界を与えるものと予測する。

参考文献

[1] J. Bardeen and W. H Brattain, Rev. 74 (1948) 230
 [2] W. Shockley, M. Sparks, and G. K. Teal, Phys. Rev. 83 (1951) 151
 [3] W. Shockley, Proc. IRE, 40 (1952) 1365
 [4] D. Kahng and M. M. Atalla, IRE Solid State Device Res. Conf., Pittsburgh, PA (1960)
 [5] S. M. Sze, Semiconductor Devices -Physics and Tchnology- 2nd ed. (Wiley & Sons, 2002) p. 372

- [6] S. M. ジー, 半導体デバイス -基礎理論とプロセス技術- 1st ed. (産業図書, 1987) p. 359
- [7] R. Tsu and L. Esaki, *qAppl. Phys. Lett.*, 22, (1973) 562
- [8] 岸野正剛・小柳光正 共著, VLSI デバイスの物理 (丸善, 1986) 97
- [9] 平本俊郎, *応用物理*, 67 (1998) 571

非対称二重障壁構造を連結した四重障壁構造の 共鳴トンネル現象の解析

根津 浩倫* 大橋 祐介* 篠 競* 山本 弘明*

Theoretical Study of Resonant Tunneling in Novel Quadruple-Barrier Structure Constructed by Two Asymmetrical Double-Barrier Units

Hirofumi NEZU* Yusuke OHASHI* Kisou SHINO* and Hiroaki YAMAMOTO*

(Received January 31, 2007)

Resonant tunneling is studied theoretically for novel quadruple-barrier structures with asymmetrical double-barrier unit. Analytical expressions for the transmission coefficient and the resonance condition are derived. It is obtained that the resonance condition leads to two independent resonance levels. The procedure of constructing a resonant tunneling quadruple-barrier structure is shown.

Key words : Resonant tunneling, Probability density, Transmission coefficient, Resonance condition, Quadruple-Barrier structure

1. まえがき

近年、情報産業の発展にともない大量の情報を高速に処理する必要性が高まってきた。その社会的要請に応えるためにハードウェアの視点からは集積回路の高速化、高密度化が進められてきた。これは半導体デバイスの微細化によって実現されてきたが、デバイスの設計サイズがナノメートルサイズに及ぶと、電子の波動性による量子効果がデバイスの動作に影響するようになった。また、従来の半導体デバイスの微細化にも限界が見えはじめ、ムーアの法則と呼ばれる半導体デバイスの微細化・高速化の実現も困難になってきている。今後、社会の高度情報化はさらに加速し、それにもともなって伝送される情報量は増大し、高速でより高性能、高機能な半導体デバイスはますますその重要性を増していく。このような社会的背景のもとに、量子効果を用いた量子効果デバイスは室温でも動作可能であり、高速なテラヘルツ領域における動作など、従来の半導体デバイスでは得られない特性を得ることが可能であると考えられ、積極的にその研究が遂行されて

きた。この量子効果デバイスの例として共鳴トンネルダイオードや共鳴トンネルトランジスタがある。

量子効果の一つにトンネル現象がある。これは、電子のエネルギーが障壁のポテンシャルよりも低いときに障壁を透過する確率が1未満の有限値を示すというものであり、古典力学では説明できない現象である。この現象が起きる理由は電子が粒子性と波動性を持つからである。特に、障壁構造が単一障壁を複数並べた多重障壁構造において、障壁構造に入射する電子のエネルギーが障壁によってできた量子井戸の電子のエネルギー固有値と一致するとき、電子が障壁構造を透過する確率が1になる共鳴トンネル現象が注目されてきた。

ここ20年に渡って超格子構造を利用する量子効果デバイスの研究が盛んに行われてきた。これは、情報化社会の発展を支え得る超高速・多機能デバイスの一分野として注目されてきたためである。その中で、ナノメートルサイズの多層膜で生ずる共鳴トンネル現象に関する研究の出発点は1969年のKaneの理論解析と見なされている^[1]。実験に関しては、1973年のTsuとEsakiによるGaAs/AlGaAs系に対するパイオニア的報告がある^[2]。その後も二重障壁構造に対しては活発に研究が進められてきている。

続いて、井戸間の相互作用が現れる対称矩形三重障

*大学院工学研究科情報・メディア工学専攻

*Information Science Course, Graduate School of Engineering

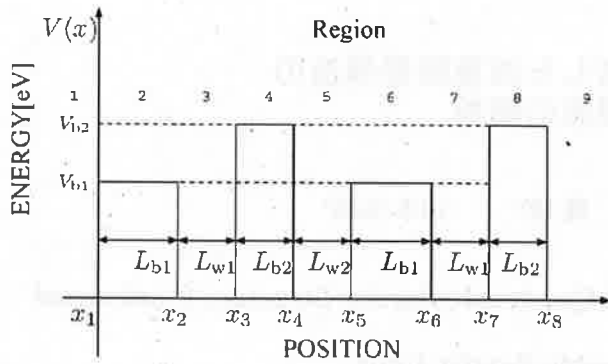


図 1: 非対称二重障壁構造を連結した四重障壁構造

壁構造が報告され^[3-6], 1990年には, 二つの独立した共鳴条件が得られるという画期的な対称矩形四重障壁構造の提案とその理論解析が報告された^[7]. 一つは外部井戸に依存する共鳴条件であり, 他方は中央井戸と外部井戸との相互作用によって生ずることが電子の波動関数を調べることによって1993年に解明された^[8]. 一方, 四重障壁構造に対するトンネル時間の実験的研究がその翌年に報告され^[9], また, 設定した共鳴準位に対する障壁構造を決定する方法も報告された^[10]. その後は, 解析の労力と9層からなる多層膜作製上の問題からか研究はほとんど行われていないようである^[11].

今回, 新しい非対称矩形四重障壁構造(非対称矩形二重障壁構造を縦属接続した構造)を提案し, その共鳴トンネル特性の理論解析を遂行する. 理論結果から, GaAs/AlGaAs系で数値計算を行って特性の概要を把握して, 共鳴構造の設計法・電子の確率密度から実際の応用面に対する知見を得ることとする.

2. 透過係数の理論解析式

2.1 透過係数の理論解析式

図1に示すような非対称二重障壁構造を連結した四重障壁構造において, x 軸の負方向から正方向に向かって, エネルギー E の電子が飛来する場合のトンネル現象を考察する. 電子の有効質量 m^* は全領域において一定とする. この構造においてシュレーディンガー方程式は次式で与えられる.

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\psi_j(x)}{dx^2} + (V_j - E)\psi_j(x) = 0 \quad (1)$$

各物理量及び物性定数は以下のとおりである.

- $\psi_j(x)$: 領域 j における波動関数
- m^* : 電子の有効質量
- V_j : 領域 j のポテンシャル
- L_j : 領域 j の幅

E : 電子のエネルギー

\hbar : プランク定数 ($\hbar \equiv h/2\pi$)

式(1)より, 各領域でのシュレーディンガー方程式の一般解は次式で表される.

$$\psi_j(x) = A_j e^{ik_j x} + B_j e^{-ik_j x} \quad (j = 1, \dots, 9) \quad (2)$$

ここで, 各領域における k_j は,

$$k_j = \frac{\sqrt{2m^*(E - V_j)}}{\hbar} \quad (E > V_j)$$

$$k_j = i \frac{\sqrt{2m^*(V_j - E)}}{\hbar} \equiv ik_j \quad (E < V_j)$$

と表される. 式(2)において A_j, B_j は波の振幅で, x に依存しない定数である. 波動関数とその導関数が境界で連続であることを考えて,

$$\psi_j(x_j) = \psi_{j-1}(x_j) \quad (3)$$

$$\frac{1}{m_j^*} \frac{d\psi_j(x)}{dx} \Big|_{x=x_j} = \frac{1}{m_{j+1}^*} \frac{d\psi_{j+1}(x)}{dx} \Big|_{x=x_j} \quad (4)$$

という境界条件を課す. この境界条件から得られる隣合う領域における振幅の関係式をトランスフォーマートルクス法を用いて表現する.

$$\begin{bmatrix} A_j \\ B_j \end{bmatrix} = R_j \begin{bmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで, R_j は2行2列の行列であり次式で与えられる.

$$R_j = \frac{1}{2k_j m_{j+1}^*} \begin{bmatrix} (k_j m_{j+1} + k_{j+1} m_j) e^{i(-k_j + k_{j+1})x_j} & (k_j m_{j+1} - k_{j+1} m_j) e^{i(k_j + k_{j+1})x_j} \\ (k_j m_{j+1} - k_{j+1} m_j) e^{i(-k_j - k_{j+1})x_j} & (k_j m_{j+1} + k_{j+1} m_j) e^{i(k_j - k_{j+1})x_j} \end{bmatrix}$$

式(5)より, 第1領域と第9領域における波動関数の振幅に対して,

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = R_1 R_2 \cdots R_8 \begin{bmatrix} A_9 \\ B_9 \end{bmatrix} \quad (6)$$

が成立する. 式(6)において $B_9 = 0$ とし, $\frac{A_9}{A_1}$ を求め, $\frac{A_9}{A_1} \frac{2\hbar k_9}{2\hbar k_1}$ より電子の透過係数 T を求めると次式が得られる.

$$T = [1 + 2 \{ A_{b1}(A_{b1} + 1) + A_{b2}(A_{b2} + 1) + 4A_{b1}A_{b2}(A_{b1} + 1)(A_{b2} + 1) + 2\sqrt{A_{b1}(A_{b1} + 1)A_{b2}(A_{b2} + 1)} \times (2A_{b1} + 1)(2A_{b2} + 1) \cos \theta_1 + 4A_{b1}(A_{b1} + 1)A_{b2}(A_{b2} + 1) \cos^2 \theta_1 \} (\cos \theta_2 + 1)]^{-1}$$

$$A_j = \frac{k_1^2 - \kappa_j^2}{4k_1 \kappa_j} \sinh^2(\kappa_j L_{bj}) \quad (E < V_{bj})$$

$$A_j = \frac{k_1^2 - k_{2j}^2}{4k_1 k_{2j}} \sinh^2(k_{2j} L_{bj}) \quad (E > V_{bj})$$

$$j = 1, 2$$

ここで θ_j は各井戸における特徴位相差であり、

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \phi_1 + \phi_2 + 2k_1L_{w1} \\ \theta_2 &= 2k_1L_{w2} + 2\phi_3 \\ \phi_j &= \arctan\left(\frac{k_1^2 - \kappa_j^2}{2k_1\kappa_j} \tanh(\kappa_j L_j)\right) \quad (E < V_{bj}) \\ \phi_j &= \arctan\left(\frac{k_1^2 + k_{2j}^2}{2k_1k_{2j}} \tan(k_{2j}L_j)\right) \quad (E > V_{bj}) \\ j &= 1, 2 \\ \phi_3 &= \arctan\left(\frac{\sin(\phi_1 + \phi_2 + L_{w1}) - r_1r_2 \sin(L_{w1})}{\cos(\phi_1 + \phi_2 + L_{w1}) + r_1r_2 \cos(L_{w1})}\right) \\ T_L &= \sqrt{1 - T_L} \\ T_R &= \sqrt{1 - T_R}\end{aligned}$$

また、 $(1 + A_{bj})^{-1}$ は各障壁をそれぞれ単一障壁としてみた場合の透過係数である、

$$\begin{aligned}T_L &= \frac{1}{1 + A_{b1}} \\ T_R &= \frac{1}{1 + A_{b2}}\end{aligned}$$

ここで、非対称二重障壁構造における透過係数 T_a の理論解析式

$$\begin{aligned}T_a &= \left[T_L^{-1} T_R^{-1} + (T_L^{-1} - 1)(T_R^{-1} - 1) \right. \\ &\quad \left. + 2\sqrt{T_L^{-1}(T_L^{-1} - 1)T_R^{-1}(T_R^{-1} - 1)} \cos \theta_1 \right]^{-1} \quad (7)\end{aligned}$$

を用いると、四重障壁構造の透過係数の理論解析式は

$$T = [1 + 2T_a^{-1}(T_a^{-1} - 1)(\cos \theta_2 + 1)]^{-1} \quad (8)$$

とかける。

2.2 共鳴条件

四重障壁構造において透過係数が 1 となる条件を求める。全節で求めた透過係数の理論解析式より

$$T_a = 1 \quad (9)$$

または

$$\cos \theta_2 = -1 \quad (10)$$

のとき、式(8)の右辺の値は 1 となる。式(9)は非対称二重障壁の共鳴条件であり、この条件の中には中央井戸 L_{w2} の項が含まれていない。そのためこの条件による共鳴は外側井戸によって共鳴がおき、中央井戸 L_{w2} は共鳴に関係せず、非対称二重障壁構造が二つ並んだ構造として電子が透過するものと考えられる。式(10)は四重障壁構造にすることで新しく得られた共鳴条件であり、外側井戸、中央井戸の項が含まれている。したがって、中央井戸と外側井戸のカップリングによっ

て共鳴が起きる。四重障壁構造としての共鳴条件である。式(10)より複数の完全共鳴が得られると考えられる。これは従来の対称四重障壁構造の特徴であり、非対称二重障壁構造を連結した四重障壁構造は全体として非対称形になるが、その性質が維持されることが分かる。また、この二つの共鳴条件は独立した共鳴条件であり、任意に指定可能な共鳴エネルギーが二つ存在すると考えられる。

2.3 共鳴構造決定

本節では、共鳴時における四重障壁構造の構造決定法について述べる。以下に、四重障壁構造の完全共鳴構造決定の手順を示す。

1. 構造を構成する半導体を設定すると、各領域のポテンシャルの値が決まる。
2. 共鳴エネルギー値 E_{res1} と第一障壁幅 L_{b1} を指定する。
3. 式(7)、(9)から第二障壁幅 L_{b2} と外側井戸幅 L_{w1} が求まる。
4. E_{res2} を指定すると式(10)から中央井戸幅 L_{w2} が求まる。

この手順を用いて決定した四重障壁構造のパラメータ値を表 1 に示す。四重障壁構造は $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ 構造を想定した場合、各領域のポテンシャルは、GaAs については $V_j=0.0[\text{eV}]$ 、第一障壁の $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ については $V_{b1}=0.3[\text{eV}]$ 、第二障壁の $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ については $V_{b2}=0.4[\text{eV}]$ と決まる(手順 1)。続いて、完全共鳴エネルギー値 E_{res1} を $0.1[\text{eV}]$ 、第一障壁幅 $L_{b1}=4.0[\text{nm}]$ を指定すると(手順 2)、式(7)、(9)から第二障壁幅 $L_{b2}=3.148[\text{nm}]$ 、外側井戸幅 $L_{w1}=4.904[\text{nm}]$ が求まる(手順 3)。さらに $E_{res2}=0.2[\text{eV}]$ と指定すると式(10)から中央井戸幅 $L_{w2}=7.937[\text{nm}]$ が求まる(手順 4)。以上で求めた値を表 1 にまとめて示す。この値に対する構造におけるトンネル透過係数のエネルギー依存性は図 2 のようになる。図より、指定したエネルギー値 $E_{res1} = 0.1[\text{eV}]$ 、 $E_{res2} = 0.2[\text{eV}]$ において完全共鳴が起こっていることがわかる。また $E_{res1} = 0.1[\text{eV}]$ に非常に近いエネルギー値においても透過係数が 1 になるスペクトルが存在する。これはダブルレットと呼ばれ、多重障壁構造に見られる現象である。

以上、電子の透過係数のエネルギー変化の考察には、両方の障壁のポテンシャルよりも共鳴エネルギーが低い場合を扱った。次に、片方の障壁よりも高い ($V_{b1} < E < V_{b2}$) 共鳴エネルギー E_{res3} を指定する方

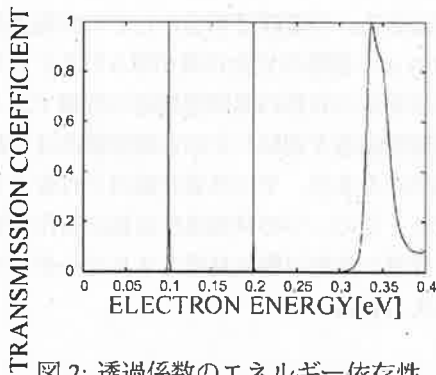


図 2: 透過係数のエネルギー依存性

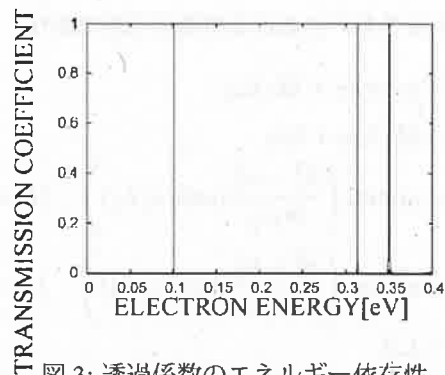


図 3: 透過係数のエネルギー依存性

法について述べる。先ほどと同様に任意の共鳴エネルギーを指定した場合の障壁構造の設計法は以下のようになる。

1. 構造を構成する半導体を設定すると、各領域のポテンシャルの値が決まる。
2. 共鳴エネルギー値 $E_{res3}(V_{b1} < E_{res3} < V_{b2})$ を指定することにより、第一障壁の幅 L_{b1} が決定される。
3. 共鳴エネルギー値 E_{res1} を指定することにより、第二障壁幅 L_{b2} と外側井戸幅 L_{w1} 、中央井戸幅 L_{w2} が求まる。

この手順を用いて決定した四重障壁構造のパラメータ値を表 2 に示す (障壁の高さ、共鳴エネルギー値は先例と同様とする)。この値に対する構造におけるトンネル透過係数のエネルギー依存性は図 3 のようになる。図より、指定したエネルギー値 $E_{res1} = 0.1[eV]$ 、 $E_{res2} = 0.35[eV]$ において完全共鳴が起こっていることがわかる。

表 1: 四重障壁構造における完全共鳴構造の各パラメータ値 ($E_{res} < V_{b1} < V_{b2}$)

$L_{b2}[nm]$	$L_{w1}[nm]$	$L_{w2}[nm]$
3.148	4.904	7.937

表 2: 共鳴エネルギーの値が片方の障壁よりも高いときの完全共鳴構造の各パラメータ値 ($V_{b1} < E_{res} < V_{b2}$)

$L_{b1}[nm]$	$L_{b2}[nm]$	$L_{w1}[nm]$	$L_{w2}[nm]$
10.952	8.800	4.925	4.293

3. 確率密度

電子の確率密度分布を考える。第一領域における入射波の振幅を基準としたときの電子の存在確率は

$$P_j(x) = \frac{|\psi_j(x)|^2}{|A_1|^2}$$

となる。ここでは先ほどのモデルを用いて、完全共鳴時の電子の確率密度分布を求め、電子の閉じ込め現象を解析する。

まず、表 1 のパラメータに対する確率密度分布を調べる (図 4-8)。図 4 は完全共鳴時における確率密度分布である。透過係数 $T = 1$ であり、入射領域において反射波が存在しない。電子のエネルギーが低いため、中央井戸において極めて強い電子の閉じ込めがおきていることが確認できる。図 5 は指定した E_{res1} における電子の確率密度である。このときの透過係数 T は 1 であるため、入射領域において反射波は存在せず電子が外側井戸に強く閉じ込められていることが確認できる。また、中央井戸 L_{w2} において電子の確率密度が 1 になっている。これは、電子が四重障壁構造を透過する際に二重障壁構造が二つ連結したものと透過しており、中央井戸において左側の二重障壁構造の透過波だけが存在しているからである。図 6 は図 5 と非常によく似た確率密度分布になっている。これは、二重障壁構造の共鳴エネルギーに近い値であり、その共鳴の仕方も似ている。外部井戸において大きな電子の閉じ込めがおきているが、中央井戸においても電子の閉じ込めがおきている。この共鳴スペクトルはダブルレットとよばれ、四重障壁構造の中央井戸と外部井戸がカップリングした結果で電子の閉じ込めが起き、共鳴状態になったと考えられる。図 7 は指定した E_{res2} における電子の確率密度である。この透過係数 T は 1 であり、入射領域に反射波は存在せず、電子が中央井戸において強く閉じ込められていることがわかる。また、中央井戸における確率密度のピークの数 2 つあり、これは中

央井戸のエネルギー固有値の第二準位であることがわかる。図8は透過係数 $T = 1$ の完全共鳴であり、電子の閉じ込めが障壁全体にわたって起きている。四重障壁構造であるため得られた共鳴であり、左右で電子の閉じ込めの強さが異なっている。

次に、表2のパラメータに対する確率密度分布を調べる(図9-図12)。図9は、外側井戸 (E_{res1}) における共鳴である。障壁の幅が広いために図5と比較すると強い電子の閉じ込めがおきている。図10、図11は共鳴レベルが障壁の高さよりも高い ($V_{b1} < E_{res} < V_{b2}$) 場合の電子の確率密度分布である。図11の場合は第一障壁において干渉条件を満たしているため障壁を透過し、他の三つの障壁を三重障壁構造として透過している。図12は図11の拡大図であり、左側の第一障壁と右側三つの障壁構造が独立した構造になっていることがわかる。

4. むすび

非対称の二重障壁構造を連結した四重障壁構造における共鳴トンネル現象を解析した。透過係数の理論解析式を導出し、共鳴条件を示した。その結果、独立な共鳴条件が二つあり、非対称二重障壁構造の共鳴条件と四重障壁構造としての共鳴条件の二つが得られた。これは、障壁を透過するときに非対称二重障壁構造が二つ並んだ構造として電子が透過する場合と、四重障壁構造として透過する場合があることを示している。また、複数の完全共鳴が得られ、従来の四重障壁構造としての性質を維持していることがわかった。ポテンシャルの高さが異なる障壁を用いることにより、障壁の高さよりも低いエネルギーと高いエネルギーにおける共鳴エネルギー値を指定できることがわかった。

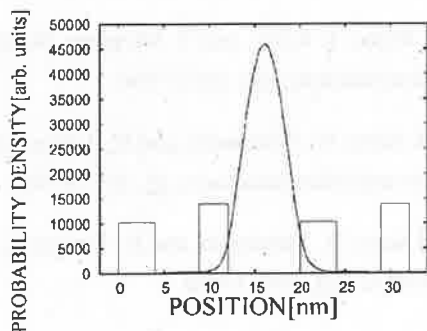


図4: 確率密度 ($E = 0.052[eV]$)

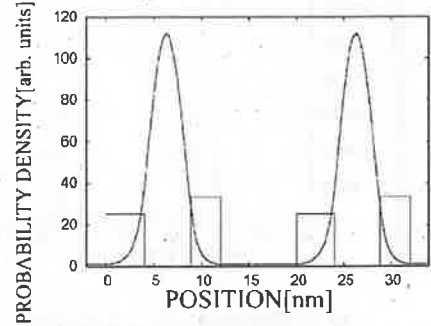


図5: 確率密度 ($E = 0.1[eV]$)

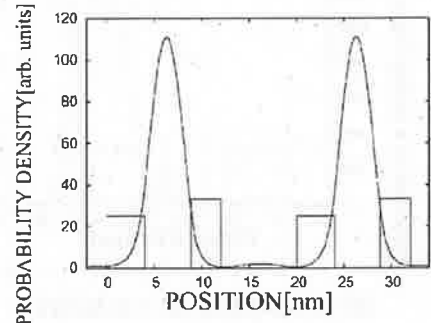


図6: 確率密度 ($E = 0.1003[eV]$)

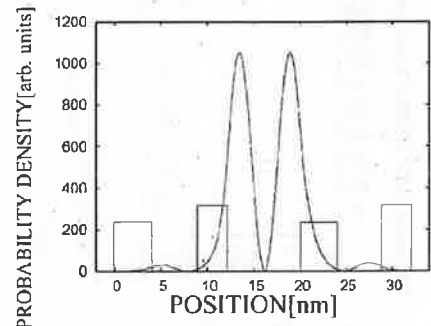


図7: 確率密度 ($E = 0.2[eV]$)

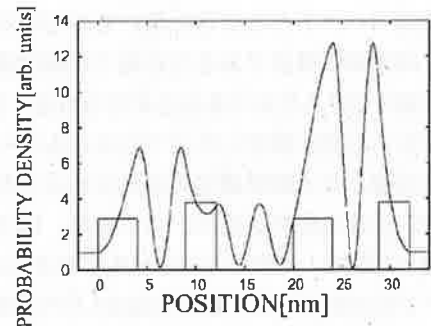


図8: 確率密度 ($E = 0.34[eV]$)

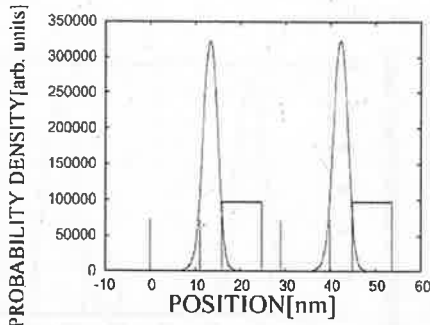


図 9: 確率密度 ($E = 0.1$ [eV])

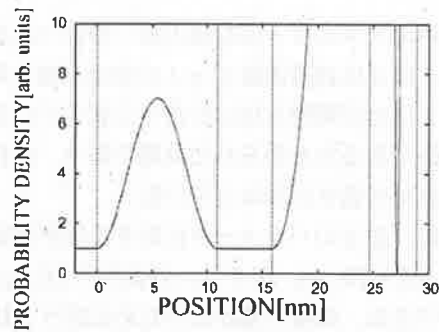


図 12: 図 11 の確率密度の拡大図

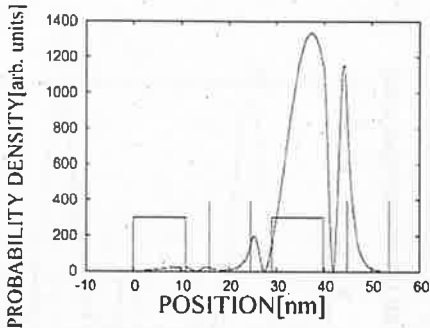


図 10: 確率密度 ($E = 0.313$ [eV])

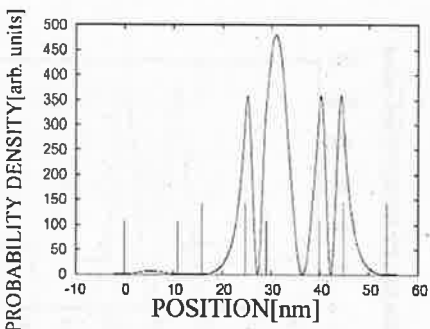


図 11: 確率密度 ($E = 0.35$ [eV])

電子のエネルギーがどの障壁の高さよりも低い場合には、透過スペクトルは非常に鋭いものが得られた。これは、四重障壁構造であるため電子が障壁構造の影響をより強く受けるためであると考えられる。さらに、共鳴条件から任意に指定した二つのエネルギー値において完全共鳴となる障壁構造の設計法を示した。これは本研究の重要な研究成果の一つである。電子の確率密度を調べた結果、外側の井戸で共鳴が起きる場合(外側の井戸のみ閉じ込めが起きる場合)と四重障壁構造全体で電子の閉じ込めが起きる場合があることがわかった。

以上の結果より、本研究の対象構造である非対称二

重障壁構造を連結した四重障壁構造は、全体的に鋭い透過スペクトルと共鳴エネルギーを独立に二つ指定できるという特性を持つことから、電子の透過スペクトルを利用する透過エネルギー選択に対するフィルタなどに有用であると考えられる。

参考文献

- [1] E.O. Kane, Tunneling Phenomena in Solids, p. 1 (Plenum, 1969)
- [2] R. Tsu and L. Esaki, Appl. Phys. Lett. 22, 588 (1973)
- [3] M. C. Payne, J. Phys. C, 18, L879 (1985)
- [4] T. Nakagawa, H. Imamoto, T. Kojima, and K. Ohta, Appl. Phys. Lett. 49, 73 (1986)
- [5] H. Yamamoto, Y. Kanic, and K. Taniguchi, Phys. Stat. Solidi b, 167, 571 (1991)
- [6] 荒川正和, 山本弘明, 田中寛, 山田徳史, 電子情報通信学会論文誌, J85-C, 374 (2002)
- [7] H. Yamamoto, Y. Kanic, and K. Taniguchi, Phys. Stat. Solidi b, 162, K25 (1990)
- [8] H. Yamamoto, H. sano, Y. Kanic, and K. Taniguchi, Superlattices and Microstructures, 13, 29 (1993)
- [9] T. Waho, T. Koch, and T. Mizutani, Superlattices and Microstructures, 16, 205 (1994)
- [10] H. Sano, H. Yamamoto, and K. Taniguchi, Superlattices and Microstructures, 15, 433 (1994)
- [11] H. Sano, H. Yamamoto, and K. Taniguchi, Phys. Stat. Solidi b, 195, 407 (1996)

Education for Multicultural Society in the Global Age - Promoting Active Communication with Different Communities in Japan-

Yuko KATO*

(Received January 30, 2007)

This study bases on the idea that promoting active communication and mutual understanding with different communities should meet the aims of education preparing the young people for multicultural society in the global age. In this paper, an experimental lesson for students at the University of Fukui implemented in the spring term of 2006 will be described. In the lesson Japanese students were encouraged to communicate with overseas students. Some key findings from the questionnaires distributed to explore issues and effectiveness of the lesson indicate that there is a lack of understanding of different communities and preparing the young people to live in multicultural society is one of the significant issues for countries like Japan where consisted of mono-cultural society for a long time.

Key Words : Multicultural Education, English Language, Global Age, Overseas Students

1. Background Information: the Global Age and Multicultural Society

1.1 The Global Age

There are many arguments suggesting that we are now living in "the global age". The global age refers to the present time when there are many emerging events and situations which people have to face globally: Nowadays people of different countries come into contact with each other much more than in the past; many issues such as the environment, human rights, conflicts between and within countries, are discussed at an international level; the Internet has sped up access to information produced in other countries; the ethnic mix of people living in many countries has increased; more people than ever before travel, study and work abroad.

The more human development grows, the wider its scale becomes. Moreover, its speed is incredibly fast, thanks to technology. As Eggleston^[1] defines, the technological society enables us to act in a global scale. Such phenomenon, as many call it 'globalization', which refers to the compression of the world and the

intensification of consciousness of the world^[2], now influences not only economic but also technological and cultural aspects of our daily life. In other words, as Brown^[3] states it is "an irresistible and irreversible process beyond the scope of human agency to resist (p. 3)". Accordingly, these discourses lead us to find ourselves living in the global age.

Many issues featuring the global age should include world-wide ones which should be considered beyond the nation states, such as war and peace, poverty and development, population growth, and environmental issues. Although there are also some issues which rather belong to local states, such as politics and social issues, it is almost impossible to tackle emerging issues without considering our relationships with different countries and acting on a global scale.

1.2 Multicultural Society

According to the migration of people on a global scale, multicultural society which is rapidly developed emerges as one of the features of the global age.

The more global the economy becomes and the more technology is developed, the more people move throughout the world. Accordingly, the number of people

* Dept. of Architecture and Civil Engineering
Copyright © University of Fukui

who visit, work and study abroad is increasing. In the case of Japan, the number of people who go abroad only for sightseeing has increased 10 million for ten years since 1985. In 2005, 1.7 billion Japanese people went abroad^[4]. As a result, people throughout the world seem no longer to be able to avoid coming into contact with other cultures.

The number of foreign people living in Japan was more than 2 million in 2005, and it accounts for 1.57% of the whole population in Japan^[5]. It is the highest number on record, growing at an estimated rate of 47.7% since 1995. The number of foreign people who live in Fukui prefecture, where this research is conducted, is about 13,600, 1.66% of the whole population of Fukui in 2004^[6].

Although Japanese people, except the small group of Ainu living in Hokkaido in the northern part of Japan, are basically homogeneous in terms of ethnicity, it is rapidly changing. Facing the aging society and the decrease in skilled workforce in many areas, it is clear that Japan needs to secure workforce of foreign people to maintain its economic status and stability. It is unavoidable and inevitable to accept many foreign people willing to work in Japan, and it results in creating multicultural or multinational society.

2. Emerging Issues in Developing Multicultural Society

2.1 Issues in Developing Multicultural Society in Japan

Moving and living abroad have been rather common for countries comprised of immigrants, and for countries in the Continent where many people have moved around since old times. Although Japan had also accepted immigrants from the Continent since early times, the impact of closing the door to overseas people for 200 years during the Edo Era strongly influenced Japanese society afterwards. During this period Japanese people developed their own culture under their own social orders, and it strengthened their tendency to focus on domestic issues rather than to form better relationships with other countries. Although Japan resumed trade with overseas in the Meiji Era, she lost World War Two, experienced mass destruction and again had to concentrate on domestic matters first. After reconstructing the modern society with high technology,

and gaining its economic power, Japan gradually attracted foreign people to move in. Nevertheless, Japanese still seem to stick to their insular tendency and do not pay much attention to other people living within their society.

Some research findings show that there are many Japanese young people who are interested in 'internationalism' but few of them are keen on 'multiculturalism'. According to the research conducted with 400 Japanese and British students in 2000^[7], some outcomes from the two countries are in striking contrast. In this research, seven aims and eleven curriculum contents of education for the global age are listed in a questionnaire and the respondents were asked the degree of emphasis of each aim that should be given in the global age. The degrees are categorised in five ranges from 'much more emphasis than now' to 'much less emphasis than now'.

The curriculum content mentioned to be emphasized most by both Japanese and English students is 'world wide issues'. In total, 69.4% of the students from the two countries feel it should be emphasized more (see table 1 and figure 1).

Table 1

World issues (e.g. environment, human rights, war and peace)

Scores*	1	2	3	4	5	M	SD
UK(%)	35.6	44.6	16.8	2.5	0.5	1.88	0.81
JP (%)	24.5	34.0	18.6	13.8	9.1	2.47	1.25

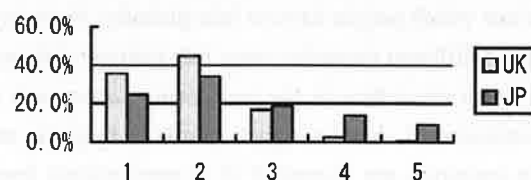


Figure 1

*In the questionnaire, 5 degrees of satisfaction are divided into 5 scores as follows: Score 1 = Much more emphasis than now; Score 2 = A bit more emphasis than now; Score 3 = Same as now; Score 4 = A bit less emphasis than now; Score 5 = Much less emphasis than now. M = Mean Score. SD = Standard deviation.

The findings also show that the aim which most English students (83.7%) feel should be emphasized is

'to help pupils to develop an understanding of different communities in their own country'. On the contrary, the smallest group of Japanese students (49.0%) are interested in emphasising this aim (see table 2 and figure 2). The largest mean difference is also found in ANOVA test in this case ($F = 85.57, P < 0.05$).

Table 2

To help pupils to develop an understanding of different communities in their own country. (learning to live together)

Scores*	1	2	3	4	5	M	SD
UK(%)	46.3	37.4	14.3	2.0	0	1.72	0.78
JP (%)	16.6	32.4	30.2	15.1	5.7	2.60	1.10

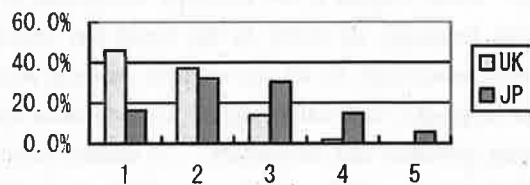


figure 2

In the research, interviews of 40 Japanese and British teachers were also implemented and the findings revealed Japanese teachers' views about multiculturalism are very narrow. The following statements come from Japanese teachers, describing their attitude towards Japanese and non-Japanese people:

"We Japanese have a uni-racial society, so we are reluctant to think and act on a global scale. So our view is very narrow, we only concentrate on domestic issues. And I don't know if I can be kind enough to people coming from other countries [because I don't know how]. Even now, when I meet foreign people in Japan, I have a strange feeling with them."

"It is difficult to understand 'difference'. We Japanese people often understand each other without actual communication, like '*ishin denshin*' [meaning tacit understanding], and we tend to see ourselves as the 'same'."

Those views can unconsciously cause rather apathetic

attitudes towards different communities in Japan. There is also some research which finds that the young pupils have negative attitudes toward people living in Asian countries. According to a survey exploring high school students' views about Asian countries^[8], the respondents show their images about people in Asian countries as 'poor, starved, developing / undeveloped, refugees, dark, overpopulated, dirty'. Although international understanding education is introduced in 62.6% of the primary, and 25.3% of the secondary schools in Japan^[9], the above finding shows it will take a lot of time to change some stereotyped attitudes. It is not too far from the truth to say that those negative attitudes also influence their indifference towards multicultural society.

2.2 Issues and Tasks in Multicultural Society

Issues of multicultural society are also concerned with national and individual identities, social and cultural values each nation developed over many years. Even though people move around globally, it is quite difficult to assimilate into a different culture; 'culture' is strongly connected with individual identity.

Holding national identities and values, people need to respect and accept different customs and cultures which often make things more difficult and complicated. It seems much easier then for the host community to keep its system as it is and neglect different ones. For immigrants' part, on the other hand, it is inevitable to learn customs and languages of the host community to survive. However, if they are 'neglected or even discriminated, as it can be seen in some countries, it should be easier for them to stick to their own customs and cultures in order to defend their identities despite living in different countries. We may also say that those negative attitudes stem from some fear that multiculturalism may ultimately risk values and social order each country has developed, making every state borderless.

However, we are already living in the global age, developing our society more multinational, and multicultural. It is the most significant and difficult issue to realise that we no longer belong to one state or one culture, and we can appreciate cultural diversity within our own community.

Therefore, it is inevitable for the host communities to prepare themselves to avoid any predicaments in the course of developing multicultural society, and there are

various tasks in political, legal, economic and social aspects. Education is also no exception.

On the whole, it is quite important to change people's stereotyped attitudes towards different communities, in order to avoid indifference and a lack of trust between different communities in one state. In order to change people's stereotyped attitudes, education which promotes mutual understanding and communication is important.

It will also be important to note here, however, that changing views and attitudes towards different people and developing respect and mutual understanding are still difficult issues even for Britain, which has developed a multicultural society for many years. The following remark was made by one British teacher in the research previously described:

"I have been predominantly in mono-cultural schools where it's been all white, middle class kind of environment and although people can maybe intellectually appreciate there is a need to have this broader outlook, the fact that they are not consequently in a multicultural environment, tend to make it seem not really an important issue which is difficult because obviously it is more important in those areas because otherwise you preserve stereotypes."

This opinion indicates that, as another teacher says, "The main problem as always is changing people's attitude". In fact it is quite challenging and easier said than done. Yet it is the key task for education in the global age, since it will lead us to build a truly multicultural society with some system and order which are flexible enough to be widely accepted as well as to preserve cultural diversity.

3. The Experimental English Class Aiming at Education for Multicultural Society

3.1 Learning English as Education for Multicultural Society

In order to promote mutual understanding and communication with different communities, foreign language education is also important as education prepares students to live in a multicultural society. Language has been one of the vital tools of human beings from its origin to communicate, trade and develop. There

are approximately 6,000 languages in the world, including a dozen which are spoken by over 100 million people^[10]. The more globalization leads to multilingual societies, the more learning of languages of countries other than one's own native land becomes important in many respects.

Learning foreign languages can further social and cultural understanding of foreign countries. In fact, some educators have already noted that learning foreign languages increases awareness of how the knowledge of other languages helps understanding of other cultures^{[11]-[13]}.

In addition, for those who are not native English-speakers, a method of communicating with people from other countries is made possible by using English. While English is not officially recognised as a universal language, its utility in the world has already been well recognised. As we can see here, learning about foreign languages, especially English, is much more than acquiring grammar and vocabulary^[14]. It enables people to communicate with others, to help economic developments in a global scale, and most importantly, to learn different social trends and cultures. In addition to one's own native language, English will be great help to communicate with different communities within one country.

This study focuses on implementation of English education as education for a multicultural society, and in the following sub-sections an experimental English Class in higher education is shown.

3.2 Pre-Test: The Survey in 2005

Education preparing students to live in a multicultural society, including foreign language education is important, however, there are some problems of implementation. As already mentioned, young people are not interested in the understanding of different communities in their own country. In fact, after teaching English at University of Fukui, the national university of Fukui prefecture, for one and a half years, the researcher began to notice that the majority of the students, except for those who learn Cultural Studies, hardly had a communication with foreign people within their community, including overseas students.

According to a survey conducted in 2005 to 56 Japanese students reading Engineering Studies in the University, only 3.6% of them knew that there are a few

outdoor activities with overseas students, 8.9% knew there is an international friendship meeting held once a week, and 17.9% knew they can request a language exchange lesson with overseas students.

This situation is regrettable, since they are losing their opportunities to know different cultures and to make friends from different places without visiting other countries. It is also great loss for overseas students, who would like to know about Japanese culture and to make a lot of Japanese friends.

In addition, the survey revealed that there were many students (25.0%) who had little self-confidence in their English speaking skills even though they had interest in communication with overseas students. The following quotations are some typical opinions of those students:

“I want to talk with overseas students, but I don't think I can speak English well.”

“I want to talk with them but I am very scared to speak English.”

“I am quite worried about my English skills.”

Also, some students mentioned that they want to talk with overseas students but they don't have enough time, mainly because of the tight timetable, and working part-time jobs. Allowing for those opinions, it should be effective if we can provide some opportunities to talk with overseas students within English class.

It is also true that many overseas students of the University of Fukui hope to stay and work in Japan after their graduation, and they would be members of our community, or would consist of different communities in terms of culture and nationality. Allowing for this, it is significant to provide a good opportunity for Japanese students to communicate with overseas students more, if we are going to promote education for a multicultural society. Accordingly, in the spring term of 2006, the researcher arranged an experimental lesson of education for a multicultural society in her English class at University of Fukui. This purpose was to promote active communication with overseas students, aiming at education for a multicultural society, and its contents will be described more in the following sub-sections.

3.3 The Aim of the Experimental English Class: Promoting Active Communication with Overseas Students

The main aim of this experimental class is to promote active communication with overseas students in order to implement education for a multicultural society. Needless to say, developing communication skills in English is one of the most significant aims of this class. In addition to this, here I would like to look at the definitions of the education for multicultural society used in this study.

In this study, the definition of education for a multicultural society is based on the following aims:

1. To increase the students' knowledge and understanding of the different cultures.
2. To raise their awareness of different communities within the local community.
3. To enable students to adopt a global perspectives on contemporary concern and to gain an understanding of multicultural Japan in its world context.

The third aim is an ultimate goal and is based on one of the general curricular aims of multicultural education in England^[15].

In order to implement the above aims, this study stands on the idea that one of the significant teaching methods is to promote active communication and mutual understanding with different communities. It is because of the nature of this class; developing communication skills is one of the significant purposes of foreign language education. In addition, it is actually the simplest way as the first step to know difference, promote mutual understanding, appreciate cultural diversity, and ultimately, change people's attitude towards different communities.

In the following sub-sections, detailed information on the experimental class is described.

3.4 Methodology

The experimental Class was organized during the Spring Term of 2006, at the University of Fukui. In this class, 30 Japanese students reading Engineering Studies were encouraged to develop their knowledge about different cultures, to communicate with overseas students, and to do an oral presentation about their findings at the end of the term.

In this experimental class, the textbooks, classroom

activities, and the syllabus planning were set in accordance with the aims described in the above sub-section. Moreover, in order to explore the effectiveness and issues of this lesson, questionnaires were distributed at the end of this class.

In consideration of the aim of this experimental class, the textbooks should provide some knowledge of cultural background of other countries and promote oral communication skills. Since textbooks which include both aspects with a certain standard appropriate for undergraduate students are few, and oral communication should be learned through actual communication with overseas students, the researcher decided to utilize a knowledge-based textbook, named *Kiss, Bow and Shake Hands*^[16]. This textbook provides readings of interesting cultural differences in other countries which are found in daily life. There are 12 chapters, and the students were encouraged to read and translate each chapter in a classroom.

In addition to this main textbook, some sub textbooks were used in preparation of the assessment. In this class, assessment method is based on the students' reading, presentation and writing skills in English.

Apart from the above classroom learning, the outside learning activity needed to be arranged. The main aim of this class was to communicate with overseas students, so the researcher needed contact with someone at the International Student Centre of the university.

Before the Spring Term, the researcher met the professor who is in charge of the Centre, and he kindly agreed to arrange some meetings for my students with overseas students. Fortunately, he organizes an international friendship meeting which provides free talking time both in English and Japanese after school every other week, associating with Sosen-bu, University of Fukui Co-op., and University of Fukui International Student Association (UFISA), and suggested our students to attend this meeting. Accordingly, a syllabus of the experimental class for 38 undergraduate students was prepared as follows:

Table 3

The Syllabus of the Experimental English Class: Promoting Active Communication with Overseas Students in the Spring Term 2006

Prepared for: 38 undergraduate students

General Contents of the Course		
The aims	Learning Contents	Assessment based on
1. to develop Communication Skills in English	<ul style="list-style-type: none"> • Simple expressions • Words and Phrases for interviews • Words and Phrases for presentations * Students are encouraged to develop skills to use appropriate words and phrases in various situations and skills to express their opinions properly to overseas students. 	Presentation Skills *Observation of Interviewing
2. To increase the students' knowledge and understanding of the different cultures	<ul style="list-style-type: none"> • knowledge-based understanding of different cultures in other countries • Learning about cultural differences in daily life: Greeting; dressing; eating and drinking; using gestures, and so on. • Compare them with Japanese culture and custom 	* Reading skills (Attitudes towards different cultures)
3. To raise their awareness of different communities within the local community	<ul style="list-style-type: none"> • Actual communication with overseas students • In the interview, students are encouraged to check what they've learnt in the textbook. • Students are encouraged to explain some Japanese culture in English 	(Attitudes towards overseas students)
4. Others: Concerning Social Research Skills	<ul style="list-style-type: none"> • How to make good questions • How to be successful in the interview • How to make a good presentation 	Contents of the questions
Textbooks		
1. <i>Kiss, Bow, or Shake Hands</i> ^[16] 2. <i>Doing Your Research Project</i> ^[17] 3. <i>Scientific Writing and Presentations in English</i> ^[18] 4. Other useful materials		
Assessment Methods		
1. Reading Skills 2. Presentation Skills 3. A Short Writing (essay) about the Interview		

The Plan for the Spring Term 2006 (15 lessons)

① Preparation (lessons 1~9)

Studying the topics of *Kiss, Bow, or Shake Hands* ^[16]. Knowledge-based learning

- Students will learn about general cultures and customs such as greeting, clothing, body languages, foods. They will choose some of these topics for their following interviews, as well as some original questions which they want to ask.
- Some additional materials with more detailed information on the countries of the overseas students in the University of Fukui are distributed.

Concerning the Interviews: Oral communication Skills

- They learn some key ideas of Social Research, which are extracted from *Doing Your Research Project* ^[17].
- Students learn some words and phrases for interviews.
 - They are divided into 3 groups, and each group should attend the international friendship meeting on the day it has chosen. Before they go to the meeting, they have to submit the contents of their questions.
 - Students have to prepare around 10 questions with the topics chosen from the textbook, and a few questions which they want to ask.
 - In addition to learning about words and phrases for interviewing, they also should learn how to make effective questions. For instance, they are encouraged to ask some questions about cultures and customs which are rather general issues. But they can start with more personal levels' questions which should be easier to answer for overseas students by using simple phrase.

② Interviewing (7th • 21st June, 5th July)

- Students go to the lounge at the International Student Center for the Interview with overseas students.

③ Preparation for Presentations (lessons 10~13)

- During this stage, students learn about some short writings and skills of good presentations by using *Scientific Writing and Presentations in English* ^[18].

④ Presentations (lessons 14, 15)

- Students give a presentation (speech) for 3 minutes.
- They also submit a short writing about their interviews on 24th July.
- Questionnaires are distributed.

At the end of the course, students were filled in the questionnaire. In the questionnaire, students are asked the following five questions concerned with communications with overseas students:

1. Have you ever had a chance to communicate with overseas students before this class?
2. In which occasion did you meet overseas students? (This question is for the respondents who answered "yes" in question 1.)
3. Do you think you want to communicate with overseas students after finishing this class? State your opinion.
4. What do you want to know about overseas students, and what kind of activities do you want to do with them? (Some key issues are listed and students can choose more than one item)
5. Write freely your opinions about this class.

4. Findings and Analysis

4.1 Presentation of Findings

First of all, answers for question 1 indicate that most students (80.0%) had not communicated with overseas students before this class.

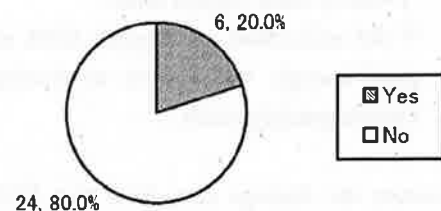


Figure 3

Question 1: Have you ever had a chance to communicate with overseas students before this class? (Numbers and Percentages)

In question 2, the students, who had communicated with overseas students before, answered they met overseas students as classmates. This means there were no students who intentionally got in touch with overseas

students.

For question 3 asking about their attitude towards communicating with overseas students, 58.0% of the respondents remarked positive attitudes, while 32.0% of them answered "neither yes nor no", and 10% said "no".

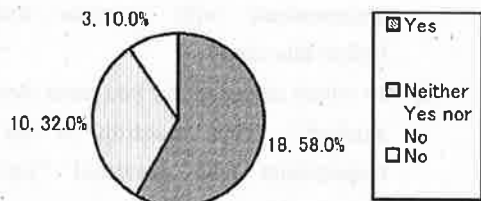


Figure 4
Question 3: Do you think you want to communicate with overseas students after finishing this class?
(Numbers and Percentages)

This figure seems not so different from the findings in the survey conducted in 2005, mentioned in section 3.1, but the reasons for this question stated by the students seem a little bit difference. In the survey of 2005, many respondents mentioned that they had no self-confidence in using foreign languages to communicate with overseas students. In this survey, there were 30.7% of the respondents who showed their positive attitudes towards developing their English skills. The following quotations are some typical opinions:

"I want to learn English more."

"I did understand my English skills are not good enough, but I want to develop my English speaking skills."

However, the findings also show that 19.0% of the respondents are still worried about their communication skills. This suggests that more development of speaking skills will be needed, if this type of English class should be implemented.

In addition, there are also some students who want to have friends from overseas more and are interested in other cultures as follows:

"After having a conversation with overseas students, I have noticed that there are many things that I don't know, and I find those

things are interesting."

"I want to know about other cultures more."

For question 4, 55.6% of the respondents answered that they want to know about general issue of the overseas students' home countries. There were also many students (33.3%) who mentioned that they want to ask the reason why the overseas students chose the University of Fukui.

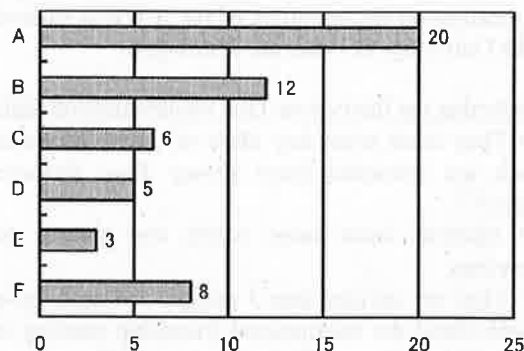


Figure 5
Question 4: What do you want to know about overseas students, and what kind of activities do you want to do with them?
A = Ask about general issues of their countries
B = Ask the reason why they chose University of Fukui
C = Talk about academic subjects
D = Talk about good and bad issues of Japanese culture
E = Teach Japanese
F = Others

As shown in the above, many students are interested in asking about general issues, such as traditional customs, foods, languages of overseas students' countries. If talking about Japanese culture is included, cultural issues seem to be the main interest.

Some positive attitudes towards learning about other cultures are also found in answers for question 5. Answers for question 5 are mainly concerned with two issues: one is about cultural studies (28.6%); the other is about English skills (71.4%). First, opinions about cultural studies are as follows:

<Positive attitudes towards learning about other cultures>

"After communicating with overseas students, I

felt foreign countries are so near, so real. Speaking with many students coming from different countries over one table was so new to me, and very exciting. I thought we should have this kind of opportunity more."

"Although I was compelled to do this, I was happy to have this opportunity in the end....Everyone was so friendly, and if I have a chance, I want to talk with other overseas students."

"I went to this meeting for the first time, and was so irritated with myself since I couldn't speak English well. But I found that so many overseas students visit [not only Japan but also] many countries, and thought it's great. I wasn't interested in visiting abroad, but I think I will visit somewhere before my graduation. I want to attend this meeting again in the future."

"I think I really enjoyed this meeting, and would like to talk with overseas students more in the future."

As awareness for cultural issues, there is a student, who noticed that he needs to learn about his own culture more.

As for English skills, their opinions are basically the same as answers for question 3:

<Attitudes towards learning about English skills>

"My English was so poor, and I hardly understood what overseas students said to me. I think this meeting was so meaningful."

"If we can have this type of opportunity more often, I think my English skills will be developed more."

"I was so shocked to know that my English is so poor, and hardly understood what they were talking about. I want to develop my English skills more."

It will also be important to mention that some negative attitudes towards this class described in question 5 are basically about their English skills, and not about cultural issues at all. Many students realised that their English skills are so "poor", and they said they tried hard to understand what the overseas students were talking about. However, many of them mentioned that the meeting with

overseas students were meaningful, especially for developing their English skills. They understood that they need to learn English more, and this was quite an effective result in terms of English teaching, since a lack of motivation is quite a serious issue in learning foreign languages. In the following sub-section, analysis and further discussion are described.

4.2 Analysis and Further Discussion

First of all, I would like to look at activities within the classroom. In the classroom lessons, the knowledge-based textbooks which are mainly to develop students' reading skills were used. Although the main textbook provides plentiful information and develops understanding of different cultures, the findings which mentioned a lot about their "poor" speaking skills may suggest that there needs more emphasise on speaking skills.

In addition, students were asked to present the content of their interviews in the end of the term. Although students were provided some important information on presentation skills, they seemed to be very much concerned with interviews and didn't pay much attention to this. More time might be needed for developing presentation skills, however, this would be covered with some lessons for developing speaking skills, hopefully.

Judging from the above, more emphasis on speaking rather than reading skills should have been used for this class, although getting some basic knowledge about other cultures is quite important. It can be said that more careful consideration for selecting textbooks is needed. When selecting knowledge-based textbooks, we need some additional materials or, need to be more careful to develop students' speaking skills.

As for the interview with overseas students, it seemed quite successful in many ways. It encouraged Japanese students to learn about both cultural issues and communication skills in English. The findings in question 3 and 4 indicate that the meeting with overseas students became a good opportunity to raise motivation to learn English more, while the finding for question 4 suggests that interest in different culture is found in many students.

In addition, as the finding for question 1 suggests, 80% of the respondents had never communicated with overseas students before this class. As already mentioned, overseas students are some of the representatives of the

different communities within one country, having different cultural and national backgrounds. In terms of learning about different cultures within one country, we can say that the experimental class was successful as the first step. In fact, the professor who is in charge of the International Students Centre reported that some students who said they want to continue activities with overseas students in question 3 positively attended some activities after finishing this class. It shows this experimental class was quite successful.

Accordingly, we can say that this experimental class was useful to change indifferent attitudes towards different communities in the students' own country as the first step. Nevertheless, it should be noted that learning about racism and human rights which are the main concerns of a multicultural society was not mentioned in the contents of this experimental class. For one reason, there is not enough time for including those profound issues in the class which is mainly prepared for learning English. In this study, the contents concentrate on our indifferent attitudes towards different communities, leaving the details of racism and human rights to another discussion.

If we are going to emphasize this aspect more, another experimental class should be prepared with careful consideration. For instance, selecting of the English textbooks focused on social issues might be useful, and the discussion in English about those profound issues should be interesting if the students have a certain level of communication skills. However, in those cases actual communication with overseas students might not be combined easily, since having a discussion on issues such as racism with overseas students could be quite difficult and sensitive. This type of class should be either more careful with the topic to talk about with overseas students or more focused on knowledge-based studies.

In any case, careful consideration on selecting textbooks and teaching methods according to students' ability in English should be required. In addition, in order to prepare students to live in a multicultural society, this type of teaching and learning method should be continued and developed more. If this type of class activity is to be continued, it will lead the students to change people's stereotyped attitudes towards different communities, to avoid indifference and a lack of trust between different communities in one country.

5. Conclusion

In this experimental class, students learned about different cultures and had an actual communication with overseas students. The findings of the questionnaire indicate that their awareness of different cultures and motivation to develop English skills were increased. Having an actual communication with overseas students in this class became their first time to have contact with different communities within their local community, and this class was quite effective to provide such an opportunity. In order to raise their awareness of different communities within one country, and to live in a multicultural society in the global age, this type of class activities should be continued. The more young people communicate with overseas students and different people within the community, the more they adapt themselves to an emerging multicultural society developing global perspective.

References

- [1] Eggleston, J: Learning to Be A Citizen in the Global Age. *Multicultural teaching*, 18-1, 8-11 (1999).
- [2] Robertson, R: *Globalization: Social Theory and Global Culture*, Sage (1994).
- [3] Brown, T: Challenging globalization as discourse and phenomenon. *International Journal of Lifelong Education*, 18-1, 3-17 (1999).
- [4] Immigration Bureau of Japan: Statistics of the number of Japanese people leaves Japan in 2005, <http://www.moj.go.jp/PRESS/060406-1/table01.html>, (2006).
- [5] Immigration Bureau of Japan: Statistics of the number of Alienation Registration in 2005, <http://www.moj.go.jp/PRESS/060530-1/060530-1.html>, (2006).
- [6] Fukui International Association: *Welcome to Fukui*. Fukui International Association, Fukui, (2005).
- [7] Kato, Y: *Education for the Global Age*. Ph.D. thesis, University of York, (2002).
- [8] Hirota, Y (ed.): *Tabunka Shugi to Tabunka Kyoiku (Multiculturalism and Multicultural Education)*, Akashi Shoten, (2001).
- [9] Monkasho (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology): A survey on International Education in Primary and Secondary Education, http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shotou/026/shiryou/05060301/002.htm, (2006).

- [10] Delors, J: *Learning: The Treasure Within*, UNESCO, (1996).
- [11] Buttjes, D: Teaching Foreign Language and Culture. *Language Learning Journal*, 2, 53-57, (1990).
- [12] Morgan, C: Teaching Culture at A-Level, *Language Learning Journal*, 7, 42-44, (1993).
- [13] Wallner, M: The Value of A-Level Textbooks for Teaching German Culture. *German Teaching*, 12, 8-12, (1995).
- [14] Kramersch, C: Foreign Languages for a Global Age. *ADFL Bulletin*, 25-1, 5-12, (1993).
- [15] Nixon, J: *A Teacher's Guide to Multicultural Education*, Blackwell, (1985).
- [16] Powell, R: *Kiss, Bow, or Shake Hands*, 5th ed. Macmilan Languagehouse, (2004).
- [17] Bell, J: *Doing your Research Project*, 2nd ed., Open university Press, (1996).
- [18] Ishida, Y (ed.): *Scientific Writing and Presentations in English*. Corona, (2004).

