

目 次

【 第 70 巻 10 月分 】

原子炉ニュートリノモニター開発 ー試作機のバックグラウンド排除能力の評価ー 増井友哉 川端孝弥 玉川洋一 中島恭平	1
原子炉ニュートリノモニター開発に向けた PSD 能力を有した Li 含有液体シンチレータの発光特性評価川端孝弥 増井友哉 中島恭平 玉川洋一 鈴木耕拓	7
安定マッチングとそのいくつかの拡張問題の混合整数計画による定式化について鈴木欣秀 小原敦美	15
Analysis on the Distribution of COVID-19 Cases by Country - 2. Robust Power-Law Distribution Observed during the First Half of 2021 - 飛田英孝	23
電力使用量予測のための深層学習手法小松大起 黒岩丈介 小高知宏 諏訪いずみ 白井治彦	29
ひきこもり者支援のための 会話システムの実現に向けて池本武史 黒岩丈介 小高知宏 諏訪いずみ 白井治彦	37

【 第 70 巻 3 月分 】

タンデム加速器を用いた PSD 能力を有した Li 含有液体シンチレータの消光係数に関する研究川端孝弥 中島恭平 玉川洋一 鈴木耕拓 小栗廉太郎	45
原子炉ニュートリノモニター開発に向けた PSD 能力を有した Li 含有液体シンチレータの有効性の検討 川端孝弥 中島恭平 玉川洋一 鈴木耕拓	51
Branched Polymer Architecture Formed in Conventional and Living Emulsion Polymerization 飛田英孝	59

Q#によるショアのアルゴリズムの実装 ーIBM の量子コンピュータを使うー	万里川則亮 平田隆幸	69
階層型ニューラルネットワークによるクレジットカード不正利用履歴の検出	河合真知 小高知宏 黒岩丈介 諏訪いずみ 白井治彦	77
ディープニューラルネットワークによる Web 攻撃検知手法の提案	藤田良介 小高知宏 黒岩丈介 諏訪いずみ 白井治彦	85
サブドメイン名を用いた開放ポート推測可能性の検証	坂田拓美 小高知宏 黒岩丈介 諏訪いずみ 白井治彦	93
VR 技術を用いた異文化理解ゲームの実装	井上裕夢 黒岩丈介 小高知宏 諏訪いずみ 白井治彦	101

Memoir of Faculty of Engineering, University of Fukui
Vol. 70, March 2022

CONTENTS

【 Vol.70 October 】

Development of Reactor Neutrino Monitor

—Evaluation of the background reduction of the prototype detector—

.....Tomoya MASUI, Atsuya KAWABATA, Yoichi TAMAGAWA
and Kyohei NAKAJIMA 1

**The luminescence characteristics of Li loaded liquid scintillator for the development of
Reactor neutrino monitor**

..... Atsuya KAWABATA, Tomoya MASUI, Kyohei NAKAJIMA,
Yoichi TAMAGAWA and Kohtaku SUZUKI 7

On Formulation of Stable Matching Problems into Mixed Integer Program

.....Yoshihide SUZUKAWA and Atsumi OHARA 15

Analysis on the Distribution of COVID-19 Cases by Country

- 2. Robust Power-Law Distribution Observed during the First Half of 2021 -

..... Hidetaka TOBITA 23

A Deep Learning Method for Predicting Electricity Usage

.....Daiki KOMATSU, Jousuke KUROIWA, Tomohiro ODAKA,
Izumi SUWA, Haruhiko SHIRAI 29

Realization of Conversation Support System for Social Withdrawal

..... Takeshi IKEMOTO, Jousuke KUROIWA, Tomohiro ODAKA,
Izumi SUWA, and Haruhiko SHIRAI 37

【 Vol.70 March 】

**Study on quenching factors of Li loaded liquid scintillator with PSD using a tandem
accelerator**

.....Atsuya KAWABATA, Kyohei NAKAJIMA, Yoichi TAMAGAWA,
Kohtaku SUZUKI, Rentaro OGURI 45

The study on the effectiveness of Li loaded liquid scintillator with PSD for the development of reactor neutrino monitor	
..... Atsuya KAWABATA, Kyohei NAKAJIMA, Yoichi TAMAGAWA, Kohtaku SUZUKI	51
Branched Polymer Architecture Formed in Conventional and Living Emulsion Polymerization	
..... Hidetaka TOBITA	59
Implementation of Shor's Algorithm by Q# —Usage of IBM's Quantum Computer—	
..... Noriaki MARIKAWA, Takayuki HIRATA	69
Detection of Credit Card Fraud Records Using Hierarchical Neural Networks	
..... Masato KAWAI, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA, Izumi SUWA, Haruhiko SHIRAI	77
Proposal of Web attack detection method by deep neural network	
..... Ryosuke FUJITA, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA, Izumi SUWA, Haruhiko SHIRAI	85
The Possibility of Guessing Open Ports from the Subdomain Name	
..... Takumi SAKATA, Jousuke KUROIWA, Tomohiro ODAKA, Izumi SUWA, Haruhiko SHIRAI	93
Implementation of cross-cultural understanding game with VR	
..... Hiromu INOUE, Jousuke KUROIWA, Tomohiro ODAKA, Izumi SUWA, Haruhiko SHIRAI	101

原子炉ニュートリノモニター開発 —試作機のバックグラウンド排除能力の評価—

増井 友哉* 川端孝弥* 玉川 洋一** 中島 恭平**

Development of Reactor Neutrino Monitor — Evaluation of the background reduction of the prototype detector —

Tomoya MASUI*, Atsuya Kawabata*, Yoichi TAMAGAWA** and Kyohei NAKAJIMA**

(Received September 30, 2021)

Reactor neutrino monitor is a technology for remotely monitoring a reactor using anti-electron neutrinos generated from the reactor. Reduction of the background is important for detecting neutrinos, and previous studies have shown that the background for neutrinos is 100 times ($S/N = 1/100$). Currently, we have created a prototype for the development of a 1t size Gd-containing liquid scintillator for neutrino monitors with the goal of $S/N = 1/10$. In this paper, we evaluated the ability of the prototype to eliminate the background by pulse shape discrimination.

Key Words : Reactor Neutrino Monitor, Background, Liquid Scintillator

1. 緒言

原子炉から発生する反電子ニュートリノを用いて原子炉を遠隔から監視する技術である原子炉ニュートリノモニターの開発を進めている。反電子ニュートリノは相互作用がほとんど起こらず、検出頻度が低いため、地上での測定は、バックグラウンドの排除が重要な課題となっている。

先行研究では原子炉由来のニュートリノ事象に対してバックグラウンド事象が 100 倍($S/N = 1/100$)という結果が得られており、この結果を踏まえて、現在 $S/N = 1/10$ を目標とした 1t サイズの波形弁別能力を有する Gd 含有液体シンチレータ検出器の作成を行っている。

本論では、目標とする検出器の約 1/100 の大きさの試作機を作成し、作成した試作機の波形弁別を用いたバックグラウンドの排除能力を評価し、結果について検討する。

2. 研究背景

2.1 原子炉ニュートリノモニター

原子炉ニュートリノモニターとは、原子炉内での核分裂により発生する反電子ニュートリノを用いて、原子炉の運転状況や核燃料内部の ^{235}U と ^{239}Pu の組成比を遠隔でリアルタイムに監視する技術である。

またニュートリノは、弱い相互作用でしか反応しないため、遮蔽による隠ぺいが困難であり、この技術により IAEA(国際原子力機関)の核不拡散に貢献できると考える。IAEA では、 ^{239}Pu の兵器転用防止のため IAEA の保障措置の元、核査察を行っている。従来の方法では核燃料に対して、非破壊検査などによる確認を行っているがこの方法では査察側、被査察側の両方に負担がかかってしまう。そのため遠隔からリアルタイムで監視でき、プラントシステムから独立した原子炉ニュートリノモニターの開発が注目されている^[1]。

原子炉ニュートリノモニター実用化のため、性能として地上で測定可能、炉の運転に干渉しない、どこにでも設置可能、安価でコンパクトなどが求められる。そのため、これらの条件を満たすことのできる 1t サイズ程度のニュートリノ検出器の開発を現在行なっている。

* 大学院工学研究科安全社会基盤工学専攻

** 原子力安全工学講座

* System and Infrastructure Engineering for Safe and Sustainable Society, Graduate School of Engineering

** Department of Nuclear Safety Engineering

2.2 先行研究

2.2.1 SONGS 実験

SONGS(San Onofre Nuclear Generating Station)^[2]実験とはアメリカで2003年から2007年にかけて行われていた実験であり、原子炉から発生した反電子ニュートリノを用いた測定により、原子炉ニュートリノモニターの実現性を示した実験である。

この実験は、地下10m、原子炉から距離24.5mの位置に検出器を設置し、原子炉由来のニュートリノ測定を行なった。ニュートリノ検出器としてGd含有液体シンチレータを0.64t、宇宙線排除用にプラスチックシンチレータ、中性子に対する遮蔽材として50cm厚のポリエチレンが使用されている。

測定結果として、原子炉稼働時にニュートリノの検出効率が $544 \pm 13/\text{day}$ 、停止時に $105 \pm 9/\text{day}$ と原子炉稼働時と停止時でニュートリノの検出器に明確な差があることが確認できた。

2.2.2 PANDA 実験

PANDA(Plastic Anti-Neutrino Detection Array)実験^[3]とは、日本の北里大学が開発を行っている原子炉ニュートリノモニターの実験であり、特徴としてニュートリノ検出器としてGd含有シートを巻いたプラスチックシンチレータを検出器として用いている。プラスチックシンチレータは不燃性であるため、原子炉施設内で測定する際に安全であるという点で優れている。また特徴として1本 $10 \times 10 \times 100\text{cm}^3$ のプラスチックシンチレータを100本組み合わせて検出器として使用している。

2019年に関西電力の大飯原子力発電所の4号機の原子炉から45m離れた地上でテスト測定を行ない、結果としてニュートリノ事象に対するバックグラウンド事象の比(S/N)が1/100となり、原子炉由来の反電子ニュートリノの有意性を確認するには、約20日の測定を要することが確認された。

2.3 反電子ニュートリノ

ニュートリノとは、素粒子である中性レプトンの一種で電子ニュートリノ、タウニュートリノ、ミューニュートリノの3種類に分類できる。ニュートリノは電氣的に中性であり、質量が非常に小さいため弱い相互作用でしか反応せず、高い貫通力を有している。

また3種類のニュートリノには、それぞれ反粒子が存在する。電子ニュートリノの反粒子である反電子ニュートリノは、原子炉内で核燃料である ^{235}U と

^{239}Pu が核分裂し、 β 崩壊した際に発生する。1核分裂あたりに平均6個発生し、3GWの熱出力で1秒間に約 6×10^{20} 個発生する。

2.4 液体シンチレータ

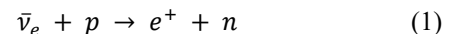
液体シンチレータとは、有機シンチレータの一種で特徴として波形の減衰時間が短く、約10ns以下である。本研究では、逆 β 崩壊反応を用いて反電子ニュートリノを検出するため、ニュートリノ検出器として陽子を多く含む液体シンチレータを使用した。液体シンチレータを用いる利点として安価で大量に作る点、容器の形状に拡張性がある点、溶質に添加材を加えることで容易に改良できる点などが挙げられる。

液体シンチレータは、主に溶媒、溶質2つで構成されており、溶媒には移動性に富み、励起されやすい π 電子構造を持つ有機物を使用することで溶媒間でのエネルギー移行が起こりやすくなることが出来る。主な溶媒の例としてリニアアルキルベンゼン(LAB)やプソイドクメン、トルエンなどが挙げられる。また原子力発電所で測定をする点から事故防止のため毒性が低く、引火点が高いものを用いる必要がある。溶質については、発光剤としての役割を持つ第一溶質と波長変化剤としての役割を持つ第二溶質の二つに分類できる。第一溶質は、溶媒から移行されたエネルギーにより励起され、蛍光を発するため蛍光効率や溶解度が重要である。第二溶質は、第一溶質で放出された光を吸収し、使用している光電子増倍管の感度に合わせた波長の光を放出するものを使用する必要がある。

これらの溶媒と溶質に加え、本実験では、添加物としてGdとUltima Gold-Fを加えた液体シンチレータを試作機として使用した。

2.5 原子炉由来の反電子ニュートリノの検出

原子炉由来の反電子ニュートリノは、検出器内で起こる逆 β 崩壊反応を利用して、遅延同時計測法を用いて検出する。逆 β 崩壊反応の式は、



と表される。式(1)より有機シンチレータ内の陽子と1.8MeV以上のエネルギーを持つ反電子ニュートリノが反応し、陽電子と中性子を発生させる。

遅延同時計測法とは、図1のように逆 β 崩壊反応により発生した陽電子が検出器内に落とすエネルギーと陽電子がエネルギーを落とし切った後、電子と反応し、対消滅した際に発生する2本の511keVの対消滅ガンマ線を先発信号、逆 β 崩壊反応により発生した中性子が熱化してGdに中性子捕獲された際

に発生する合計のエネルギーが約 8MeV となる複数のガンマ線を後発信号として、先発信号と後発信号の時間差によりニュートリノ事象を検出する方法である。このときの先発信号と後発信号の時間差は約数十 μs である。Gd を使う理由として中性子捕獲断面積が大きいという特徴があり、検出器内の Gd の濃度が高いほど先発信号と後発信号の時間差が短くなる。また遅延同時計測法を用いることで時間相関のないバックグラウンド事象を排除することができる。

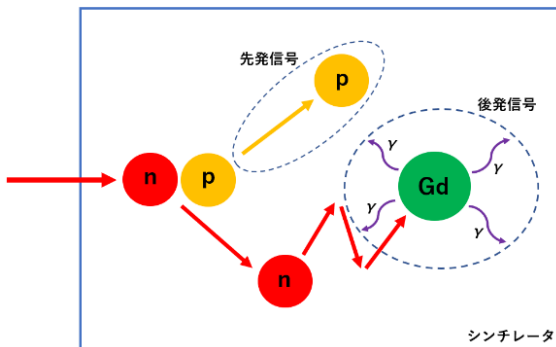


図 1 遅延同時計測法を用いた反電子ニュートリノの検出原理

2.6 バックグラウンド

遅延同時計測で排除できないバックグラウンド事象として、偶発背景事象と高速中性子事象がある。偶発背景事象は、先発信号として環境ガンマ線、後発信号として環境ガンマ線などが遅延同時計測の時間差内で偶然反応した事象である。高速中性子事象は図 2 のように先発信号として高速中性子と弾性散乱した反跳陽子が検出器内に落とすエネルギー、後発信号として高速中性子が熱化して Gd に中性子捕獲された際に発生する合計のエネルギーが約 8MeV となる複数のガンマ線が後発信号となり、ニュートリノ事象とよく似た時間差で発生するため遅延同時計測で排除することが非常に困難である。これらの事象を排除することが課題となっている。

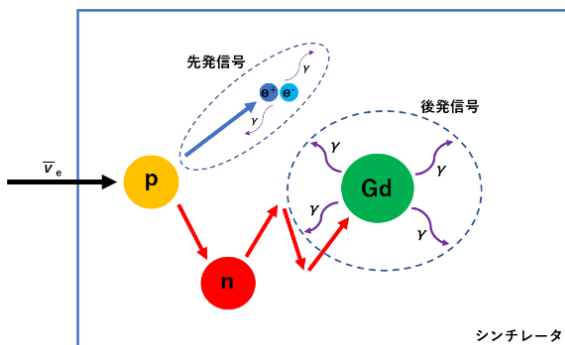


図 2 高速中性子事象の例

2.7 波形弁別

波形弁別とは、信号波形の違いからガンマ線と中性子を弁別する方法である。ニュートリノ事象の先発信号がガンマ線、高速中性子事象の先発信号が中性子による反跳陽子であることからガンマ線と反跳陽子の波形を弁別することでバックグラウンドである高速中性子事象を排除することができる。ガンマ線と中性子では図 3 のように波形の減衰部分に差があるため波形全体の積分値 Q と波形の減衰部分の積分値 Q_{tail} の比である Q_{tail}/Q により弁別できる。 Q については波形の波高値の最大になる位置から 20ns 前と 120ns 後の合計 140ns の範囲、 Q_{tail} については波形の波高値の最大になる位置から 36ns 後の波形が減衰し始める位置から 84ns 後までの範囲を積分範囲とした。

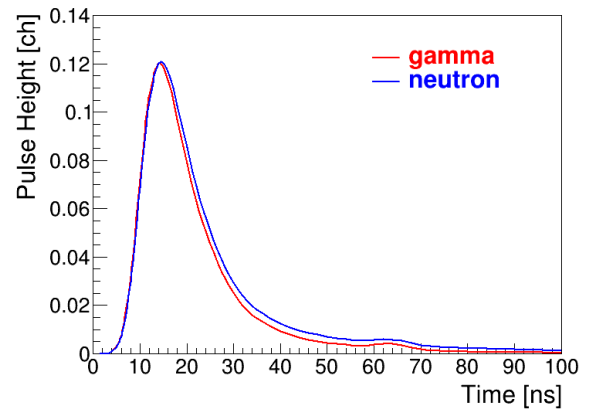


図 3 ガンマ線と中性子の平均波形

3. 本研究の目的

先行研究である PANDA 実験が原子炉近傍の地上でテスト測定をした際に、ニュートリノ事象に対してバックグラウンド事象が 100 倍 ($S/N = 1/100$) という結果が得られた。ニュートリノモニターの実用化のためには、より少ない日数で原子炉由来の反電子ニュートリノの有意性を確認する必要があるため、バックグラウンド事象のさらなる排除による S/N の改善が重要な課題となっている。バックグラウンド事象の内訳として偶発背景事象と高速中性子事象の 2 つが大部分を占めている。このうち高速中性子事象は先発信号が中性子のため波形弁別により排除することができる。

そのため本研究では、高速中性子事象を排除できる 1t サイズの波形弁別能を有する Gd 含有液体シンチレータの作成を行っている。PANDA 実験で使用した検出器は波形弁別能力を有していないため本研究で作成している検出器は、 S/N の更なる改善が望

めるため性能として $S/N = 1/10$ を目標としている。現在は、最終目標である 1t サイズの検出器の作成の前に約 1/100 サイズの試作機を作成し、性能評価を行っている。

本稿では、作成した試作機の波形弁別によるバックグラウンドの排除した際の S/N の改善についての実験結果を述べる。

4. バックグラウンド排除能力の評価

4.1 評価方法

先行研究の PANDA 実験のより $S/N = 1/100$ という結果が得られている。この結果をもとに試作機で測定したバックグラウンドについて波形弁別により高速中性子事象を排除した際の S/N の値で評価を行った。

4.2 実験に使用した試作機

実験には 8L の Gd 含有液体シンチレータを試作機として使用した。使用した液体シンチレータの構成は、溶媒として LAB, 第一溶質として PPO, 第二溶質として Bis-MSB, 添加物として、遅延同時計測を行えるようにするために中性子捕獲断面積の大きい Gd と液体シンチレータに波形弁別能力を与える Ultima Gold-F を使用した。液体シンチレータを入れる容器として図 4 のアクリル製の $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 20\text{cm}$ の立方体容器を使用した。また反射材としてデュポン社製のタイベックシートを容器全体に張り付け使用した。測定時には、アクリル容器の両側に浜松ホトニクス社製の光電子増倍管をつけ、アルミのケースに入れて遮光し、測定を行なった。

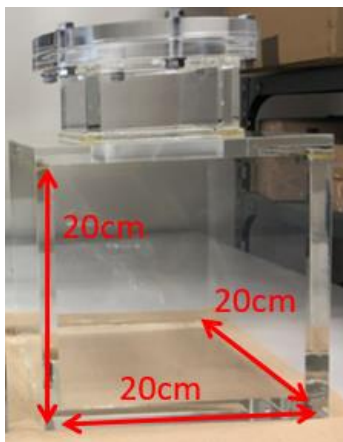


図 4 試作機に使用したアクリル容器

4.3 遅延同時計測による 2 事象間の時間差の確認

初めに試作機を用いて遅延同時計測ができるかの

確認を行った。測定には、中性子線源である ^{252}Cf を用いてニュートリノ事象と同様の時間相関をもつ事象である高速中性子事象で遅延同時計測を行った。2 事象間の時間分布は、図 5 のようになった。時間相関のある事象と時間相関のない事象が混ざった区間を ΔT_{on} 、時間相関のない事象のみの区間を ΔT_{off} として $\Delta T_{\text{on}} - \Delta T_{\text{off}}$ をすることで時間相関のある事象だけを取り出すことができる。今回は ΔT_{on} の区間を $2\mu\text{s}$ から $100\mu\text{s}$ 、 ΔT_{off} の区間を $202\mu\text{s}$ から $300\mu\text{s}$ とした。また先発信号と後発信号のエネルギースペクトルはそれぞれ図 6 と図 7 のようになった。先発信号と後発信号のエネルギースペクトルについて ΔT_{on} と ΔT_{off} の両方で 3000keV 以下に環境ガンマ線である ^{40}K と ^{208}Tl の事象が見られる。環境ガンマ線による事象は、2 つの事象が偶然遅延同時計測の時間差内で反応した偶発背景事象でない限り、時間相関がないため、 $\Delta T_{\text{on}} - \Delta T_{\text{off}}$ をした際のエネルギースペクトルでは排除されていることが確認できた。偶発背景事象を排除するため先発信号のエネルギーを 2000keV から 10000keV 、後発信号のエネルギーを 3000keV から 9000keV の領域の事象について遅延同時計測を行った。

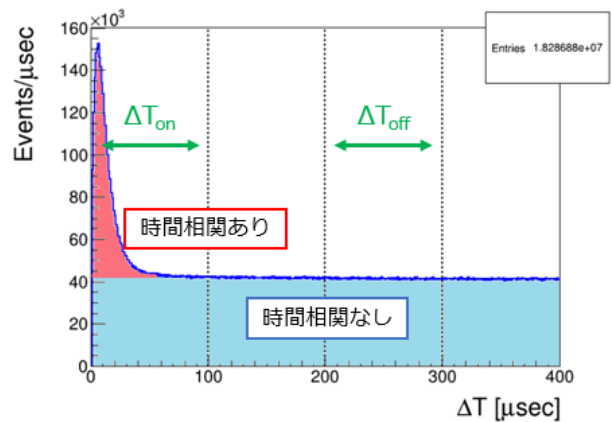


図 5 2 事象間の時間分布

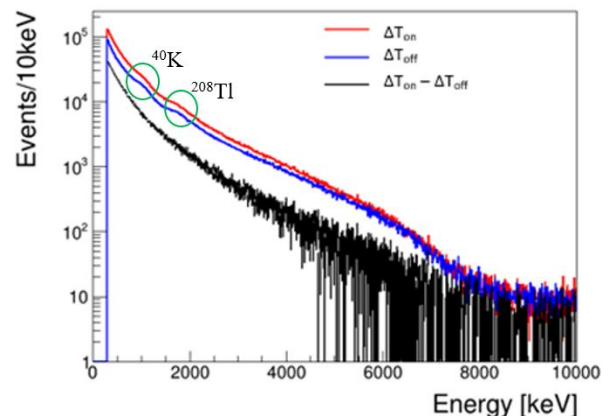


図 6 先発信号のエネルギースペクトル

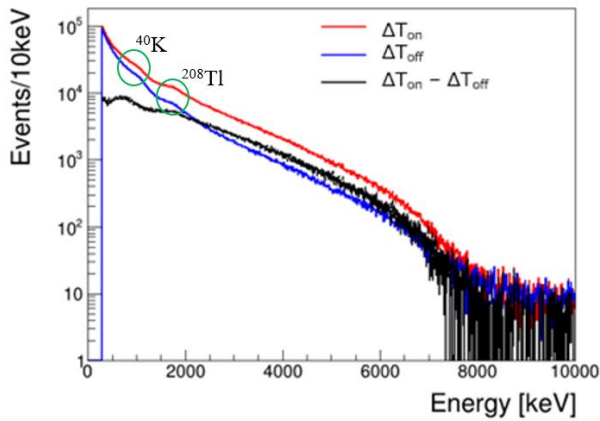


図7 後発信号のエネルギースペクトル

4.4 波形弁別能力の確認

次に波形弁別能の確認を行った。遅延同時計測により $\Delta T_{on} - \Delta T_{off}$ を行い、時間相関のある事象かつ対応する後発信号が 3000keV から 9000keV の領域にある先発信号の事象について縦軸を Q_{tail}/Q 、横軸をエネルギーとした 2次元ヒストグラムで表すと図8のようになった。 Q_{tail}/Q が 0.15 付近の事象が中性子による事象で 0.1 付近の事象がガンマ線による事象である。この先発信号の 2次元ヒストグラムについて 2000keV から 10000keV の領域で縦軸の Q_{tail}/Q を射影した際のヒストグラムが図9のようになった。ガンマ線による事象が実際にニュートリノを測定する際の先発信号の事象となるので、ガンマ線による事象をガウス分布で Fit を行った。この際に得られたガウス分布のパラメータである μ と σ を用いて、ガンマ線の事象が 95%以上残る $\mu + 2\sigma$ である $Q_{tail}/Q = 0.11$ を中性子による事象をカットする際のカット位置とした。

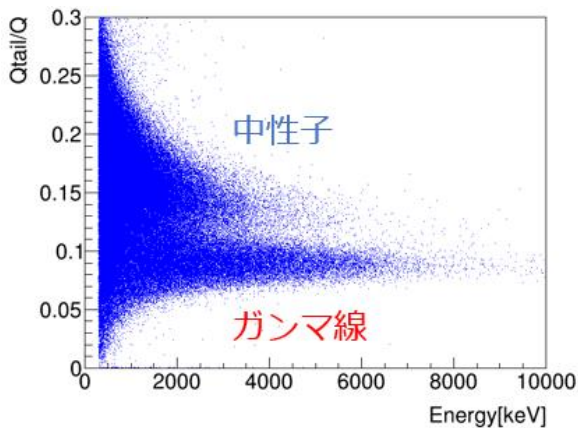


図8 ^{252}Cf 測定における先発信号の 2次元ヒストグラム

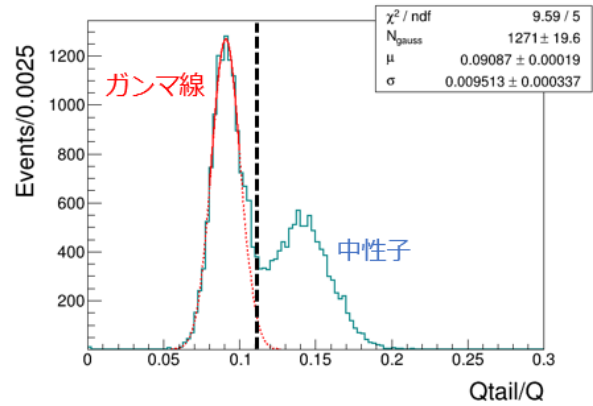


図9 図8の2次元ヒストグラムの縦軸 Q_{tail}/Q を 2000keV から 10000keV の領域で射影したヒストグラム

5. 結果

福井大学の敦賀キャンパスの実験室でバックグラウンド測定を行なった。近くに原子力発電所などがなかったため取得した事象は原子炉由来のニュートリノ事象でなく、全てバックグラウンドによる事象とした。測定したバックグラウンド事象について遅延同時計測を行い、先発信号の時間相関のある事象について縦軸 Q_{tail}/Q 、横軸をエネルギーとした 2次元ヒストグラムで表すと図10のようになった。縦軸の Q_{tail}/Q を射影した際のヒストグラムが図11のようになり、5.4で決めたカット位置である $Q_{tail}/Q = 0.11$ より右の事象を高速中性子による事象として排除することで高速中性子事象を含むバックグラウンドによる事象を 62%排除することができた。先行研究である PANDA 実験が遅延同時計測を行った後の S/N が $S/N = 1/100$ になるのに対して、今回作成した試作機は、 $S/N = 1/38$ という結果が得られた。

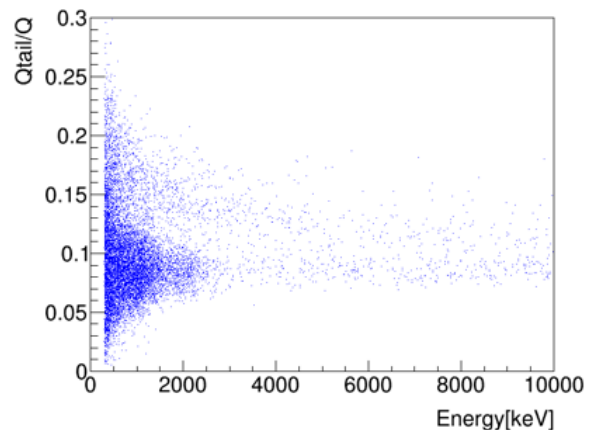


図10 バックグラウンド測定における先発信号の 2次元ヒストグラム

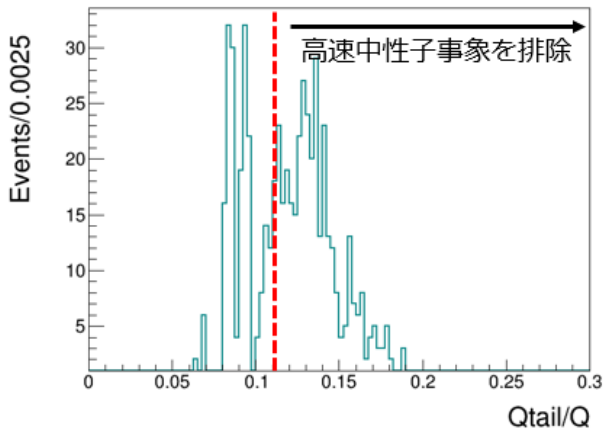


図 11 図 10 の 2 次元ヒストグラムの縦軸 Q_{tail}/Q を 2000keV から 10000keV の領域で射影したヒストグラム

6. 結論

現在福井大学では、原子炉から発生する反電子ニュートリノを利用して遠隔から原子炉の運転状態や核燃料の組成比を監視するニュートリノモニターの研究を進めている。実用化のためには、地上で測定可能、炉の運転に干渉しない、コンパクトで安価であるといった性能が求められる。

ニュートリノ事象の測定には、逆 β 崩壊反応を利用し、遅延同時計測を用いることでニュートリノ事象を検出しつつ、時間相関のない事象を排除することができる。先行研究より地上で測定する際は、遅延同時計測を用いてもニュートリノ事象に対してバックグラウンド事象が 100 倍 ($S/N = 1/100$) であることが分かっており、さらなるバックグラウンド事象の排除が重要な課題となっている。この遅延同時計測で排除できないバックグラウンド事象の内訳として偶発背景事象と高速中性子事象の 2 つ大きな割合を占める。高速中性子事象に対しては、先発信号が中性子による反跳陽子であるため波形弁別により排除することができる。

本研究では、 $SN = 1/10$ を目標とした 1t サイズの Gd 含有液体シンチレータの開発を行っており、前段階として 1/100 サイズの試作機を作成し、バックグラウンド排除能力の評価を行った。試作機には、20cm \times 20cm \times 20cm のアクリル容器と波形弁別能力を有する Gd 含有液体シンチレータを使用した。

試作機の遅延同時計測と波形弁別能力の確認のため中性子線源である ^{252}Cf を用いて測定を行った。今遅延同時計測のカット条件について、 ΔT_{on} を 2 μs から 100 μs 、 ΔT_{off} を 202 μs から 300 μs 、先発信号のエネルギーを 2000keV から 10000keV、後発信号

のエネルギーを 3000keV から 9000keV とし、高速中性子事象のカット条件として $Q_{tail} = 0.11$ 右の事象を中性子による事象とした。

試作機のバックグラウンド排除能力を評価するため実際にバックグラウンドを測定した。結果として波形弁別によりバックグラウンド事象が 62% 排除することができ、 $S/N = 1/38$ に改善された。

今後は、さらなる S/N 改善のため容器の形状を変えてバックグラウンド排除能力を評価することと今回行った波形弁別法より弁別能力の高い Shape Indicator 法^[4]による高速中性子事象の排除を行っていく予定である。

参考文献

- [1] Final Report: Focused Workshop on Antineutrino Detection for Safeguards Applications 28-30 October 2008 IAEA Headquarters, Vienna .
- [2] N. S. Bowden et al., “Observation of the isotopic evolution of pressurized water reactor fuel using an antineutrino detector”, Journal of Applied Physics 105, 064902 (2009).
- [3] Tomoyuki Konno, “Measurement of reactor neutrinos using plastic scintillator array on the ground”, Applied Antineutrino Physics 2019, Guangzhou city, China, Dec.7 2019 (presentation).
- [4] Yoichi Tamagawa et al., “Alpha–gamma pulse-shape discrimination in $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (GAGG): Ce^{3+} crystal scintillator using shape indicator”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 795 (2015) 192–195.

原子炉ニュートリノモニター開発に向けた PSD能力を有したLi含有液体シンチレータの発光特性評価

川端 孝弥* 増井 友哉* 中島 恭平** 玉川 洋一** 鈴木 耕拓***

The luminescence characteristics of Li loaded liquid scintillator for the development of Reactor neutrino monitor

Atsuya KAWABATA*, Tomoya MASUI*, Kyohei NAKAJIMA**, Yoichi TAMAGAWA**
and Kohtaku SUZUKI***

(Received September 30, 2021)

Reactor neutrino monitor is a technology that monitors the fuel composition inside the reactor by observing electron anti-neutrinos generated from the reactor. We developed a Li loaded liquid scintillator (LiLS) that has Pulse Shape Discrimination (PSD). In this paper, we reported the results of light yield, pulse shape discrimination and neutron capture measurement.

Key Words : reactor neutrino monitor, Li-loaded liquid scintillator, light yield, pulse shape discrimination

1. 緒言

原子炉ニュートリノモニターは原子炉稼働時に発生する反電子ニュートリノ事象を用いて、原子炉内部の稼働状況等のモニタリングを試みる技術である。反電子ニュートリノは物質との相互作用をほとんど起こさない。そのため、発現事象領域内のバックグラウンド (BG) 事象の削減が重要になる。

現在、原子炉ニュートリノモニター用反電子ニュートリノ検出器の候補として、液体シンチレータ (LS) とプラスチックシンチレータ (PS) の2種類が存在する。将来的に原子炉ニュートリノモニターはトラックの荷台に詰める可搬型を想定しているため、持ち運びがしやすく、形状の自由度が高い、液体シンチレータの開発に取り組んでいる。中でも、反電子ニュートリノ事象を効率よく検出するためにLiを含有させ、BGを削減するために波形弁別能力を有した液体シンチレータを開発する必要がある。

本論では、LSの構成物質である、LAB, PPO, Bis-MSB, UltimaGold-Fに天然のLiを界面活性剤によって添加し、波形弁別能力を有したLi含有液体シンチレータ (LiLS) の開発を行った。また、作製したLiLSの発光特性として γ 線源を用いた発光量、中性子線源を用いた波形弁別能力、中性子捕獲事象を評価した。

2. 背景

2.1 研究背景

原子炉ニュートリノモニターはニュートリノの特性を生かした技術の一つであり、反電子ニュートリノを用いた原子炉燃料内部の組成をモニタリングする技術である。従来の方法では原子炉を停止した後、燃料を取り出して、燃料を解体して調べることで内部がどのような組成になっているかを検証する。これは組成が判明するまでの時間がかかり、放射線による被ばくの観点からも危険が伴う。しかし、現在開発中の原子炉ニュートリノモニターで検出する反電子ニュートリノは、透過率が高いため原子炉建屋外から遠隔での監視が可能である。また、検出された反電子ニュートリノのイベント数とエネルギー分布から燃料内部の組成を割り出すことが出来る。これにより、リアルタイムで燃料内部の組成を知ることが出来る。

原子炉ニュートリノモニターという技術は、従来の時間と手間のかかる工程を省略するだけでなく、

* 大学院工学研究科安全社会基盤工学専攻

** 原子力安全工学講座

*** 若狭湾エネルギー研究センター

* System and Infrastructure Engineering for Safe and Sustainable Society, Graduate School of Engineering

** Department of Nuclear Safety Engineering, Faculty of Engineering

*** The Wakasa Wan Energy Research Center

本来の運転計画に対して運転状況が正しいかを判断することができ、これにより原子炉の兵器転用防止や、原子力発電所の事故防止に役立つことが期待されている^[1]。

2.1.1 反電子ニュートリノ

ニュートリノは、素粒子の一種である。素粒子とは、物質の構成要素の最小単位であり、大きく分けて三種類存在する。物質を作る物質粒子、力を伝えるゲージ粒子、質量を与えるヒッグス粒子である。ニュートリノは物質粒子に属するレプトンの一種である。

ニュートリノは表1のようにフレーバーと質量で分類される。フレーバーでは電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノに分類され、質量ではニュートリノ1、ニュートリノ2、ニュートリノ3に分類される。このフレーバーによる分類と質量による分類は一致せず、一つのフレーバーを選んだ際に、それは異なる質量のニュートリノの混ざり合いになっている。例えば、「電子ニュートリノ」と表記した際には、それはニュートリノ1、ニュートリノ2、ニュートリノ3が混合したものである。これを「ニュートリノ混合」という。

表1.ニュートリノのフレーバーと質量

フレーバー	質量
電子ニュートリノ	ニュートリノ1
ミューニュートリノ	ニュートリノ2
タウニュートリノ	ニュートリノ3

ニュートリノは、「粒子」であると同時に「波」としての性質を持つ。そのため、それぞれ異なる質量を持つニュートリノ1、ニュートリノ2、ニュートリノ3は、それぞれ異なる振動数を持つ「波」として空間を伝搬する。

ニュートリノのフレーバーは、質量の決まった波の重ね合わせとなり、ニュートリノが空間を飛ぶ間に波の位相が変化し、フレーバーの種類が移り変わる。この現象をニュートリノ振動と呼ぶ。

反電子ニュートリノは電子ニュートリノの反粒子である。反粒子とは、質量とスピンの等しく、電荷などが逆の性質の粒子のことをいう。反電子ニュートリノの主な発生源は原子炉燃料の²³⁵Uの核分裂後のβ崩壊である。核燃料の1核分裂当たり約6個の反電子ニュートリノが発生し、熱出力3GWの場合、毎秒約 6×10^{20} 個発生している。しかし、ニュートリノは電氣的に中性で弱い相互作用でしか反応しないので物質との相互作用をほとんど起こさない。したがって、検出器にて検出されるイベント数が少ない

ため、関心領域でのバックグラウンド削減が重要となる。

2.1.2 シンチレーション検出器

物質を構成する原子内の電子が放射線のエネルギーによって励起準位や伝導帯に励起された後、基底状態に戻るときにそのエネルギー差が光（電磁波）として放出される。この光をシンチレーションと呼ぶ。シンチレーションを出す蛍光体をシンチレータという。シンチレータは主に、無機シンチレータと有機シンチレータがある。

無機シンチレータは、原子番号の大きい元素を用いられることが多い。代表としてNaI(Tl)シンチレータがある。無機シンチレータの特徴としてはγ線の全エネルギー吸収ピークを検出しやすく、高い発光量を得られるため、エネルギー分解能が良い。

有機シンチレータは、炭素や水素を多く含む物質で構成される。アントラセン、トランススチルベンゼンなどの結晶や液体、プラスチックなど多くの種類が存在する。主な構成元素が、炭素や水素等の原子番号が小さいので、γ線に対してほとんど光電効果を起こさないため、全エネルギー吸収ピークを形成しない。γ線のほとんどが有機シンチレータ内でコンプトン散乱を起こす。無機シンチレータとは異なり、減衰時間が数nsであるため高い計数率で使用できるのが特徴である。

本研究では、反電子ニュートリノを検出するために逆β崩壊反応を利用することから、陽子（水素）を多く含んだ有機シンチレータを使用する。有機シンチレータには主に液体シンチレータ（LS）とプラスチックシンチレータ（PS）があるが、本研究ではLSを使用する。LSのメリットは、液体なので添加物を添加しやすく必要な性能のシンチレータの開発が容易であること、PSに対して安価な点がある。しかし、使用する溶媒は油なので取り扱いに注意が必要である。

2.1.3 液体シンチレータの構成物質

液体シンチレータは、溶媒、溶質、添加物で構成される。

溶媒には以下のような性質が求められる。

1. エネルギー移行の効率が、溶媒・溶質間のみでなく溶媒・溶媒間でも大きいことが望ましい。芳香族化合物のゆるく結合したπ電子は一般にこの性質を持つ。
2. 溶質の発光波長域に吸収が無い。
3. 溶質の溶解度が大きい。
4. 純度が良い。
5. 引火点が高い。

このような性質を持つ代表的なものに、リニアアル

キルベンゼン (LAB), プソイドクメン (PC), フェニルキシリルエタン (PXE) がある. 本研究ではこの中でも引火点が 150°C と特に高い値を持つ LAB を使用する.

溶質には, 以下のような性質が求められる.

1. 蛍光量子効率が良い.
2. 純度が良い.
3. 発光スペクトルが光電子増倍管等の光センサの感度スペクトルに合う.
4. 発光波長域に溶質の吸収がない.
5. 蛍光の減衰時定数が短い.
6. 溶媒への溶解度が大きい.

これらを踏まえて, PPO, butyl-PBD, Bis-MSB などがよく用いられる. 本研究では, このような条件にあった PPO と Bis-MSB を使用する.

添加物は, 反電子ニュートリノを検出可能で波形弁別能を付与する必要がある. 反電子ニュートリノの検出に重要なのは中性子捕獲核種の添加である. 中性子捕獲核種の代表的なものに, Gd や Li が存在する. 今回は中性子を捕獲した際にバックグラウンドには少ない α 線・トリチウムを放出する Li を添加することにした. また, 波形弁別能を行うための代表的な添加物として, ナフタレンや UltimaGold-F (UG-F) がある. 本研究では UG-F を使用する.

2.1.4 γ 線と物質との相互作用

光子とシンチレータの相互作用には, 光電効果, コンプトン散乱, 電子対生成の 3 種類が存在する.

光電効果とは, 光子が軌道電子にエネルギーを与え, 軌道電子が原子から飛び出す現象である.

コンプトン散乱は光子と電子の衝突で電子と散乱光子が生じる現象である. 衝突前後の光子のエネルギーを E_{γ} , E'_{γ} とし, 電子の質量を m , 光速を c とすると, 散乱された電子のエネルギー E_e は,

$$E_e = E_{\gamma} - E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{mc^2}(1 - \cos\varphi)} \quad (1)$$

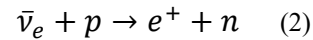
となる. シンチレータ内では散乱角 φ に依存するため, コンプトンエッジの形成をする.

電子対生成とは, 光子が原子核の強い電場に吸収され, 電子と陽電子を生み出す反応をいう. 電子と陽電子の質量を生成するために, 光子のエネルギーは電子の静止エネルギーの 2 倍の 1.022MeV 以上でないと起こらない.

2.1.5 反電子ニュートリノの検出方法

反電子ニュートリノは逆 β 崩壊を用いて検出する. 逆 β 崩壊は反応式 (2) のように反電子ニュートリノと陽子が反応し, 陽電子と中性子が発生する反応で

ある.



この反応で陽電子は電子と対消滅し, 511keV のエネルギーの γ 線を 2 本放出する (先発事象). 中性子は, 電氣的に中性であるため検出器で検出されにくい. そのため, シンチレータに Li を添加することにより検出器内で熱化した熱中性子を捕獲して合計エネルギーが 4.8MeV となる α 線・トリチウムを放出する (後発事象) (図 1).

先発事象と後発事象との時間差は約数十 μs あり, この時間相関を利用することでニュートリノ事象の同定を行う. この時間差を利用し, 時間相関のないバックグラウンド事象を削減する方法を遅延同時計測法という. この先発事象と後発事象の時間差は Li 濃度によって変化する.

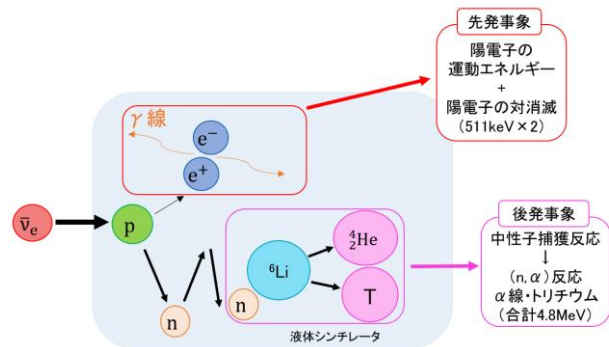


図 1. LiLS を用いた反電子ニュートリノの検出原理

2.1.6 中性子捕獲核種

2.1.5 で示したように反電子ニュートリノの検出には中性子捕獲反応を用いる. 中性子捕獲核種として主に表 2 のような Gd や Li などが用いられる.

本研究には中性子捕獲核種として中性子捕獲断面積がある程度大きい元素, またバックグラウンド事象に多い γ 線とは弁別ができるという観点より, ${}^6\text{Li}$ を用いることとした.

表 2 より Li には ${}^6\text{Li}$ と ${}^7\text{Li}$ の 2 種類の同位体が存在する. 中性子捕獲反応を起こすのは, ${}^6\text{Li}$ である. しかし, ${}^6\text{Li}$ は天然存在比が 7.6% と非常に少ない. そのため, ${}^6\text{Li}$ を 95% まで濃縮した Li 化合物が販売されているが, 非常に高価である. 液体シンチレータの大型化を目標としている本研究においてはコスト面からそれほど検出器にコストをかけることはできない. そのため, 本研究には濃縮した Li 化合物を使用するのではなく, 天然存在比の Li 化合物を使用することとした.

表 2. 主な中性子捕獲核種

物質名	天然存在比 [%]	中性子捕獲断面積 [barn]	反応
¹ H	99.985	0.33	(n, γ)
⁶ Li	7.6	940	(n, α)
⁷ Li	92.4	0.0454	-
¹⁰ B	19.9	3.835	(n, α)
¹⁵⁵ Gd	14.8	60900	(n, γ)
¹⁵⁷ Gd	15.65	254000	(n, γ)
Gd ave		48800	-

2.1.7. 時間相関のあるバックグラウンド事象

遅延同時計測法を用いることにより、遅延同時計測法を用いない場合に比べておおよそバックグラウンドを2桁程度除去することが可能である。しかしながら、この先発事象、後発事象の時間差数十 μ sという似た時間差で起こる背景事象が存在する。それが図2のような環境中の高速中性子事象である。

環境中の高速中性子が液体シンチレータ内の陽子と弾性散乱し、反跳陽子を生成する。これが先発事象である。弾性散乱後の中性子は液体シンチレータ内で熱化し、⁶Liに中性子捕獲され、 α 線・トリチウムを放出する。これが後発事象となる。この高速中性子事象による先発事象と後発事象も反電子ニュートリノ検出の際の先発事象・後発事象の時間差と非常によく似た時間差で発生するため、弁別が困難である。

そこで本研究においては反電子ニュートリノ事象と高速中性子事象を弁別するために液体シンチレータに後述する波形弁別能を付与した。波形弁別能を付与することで反電子ニュートリノ事象の先発事象である対消滅の γ 線と高速中性子事象の先発事象である高速中性子起因の反跳陽子を弁別が可能になる。

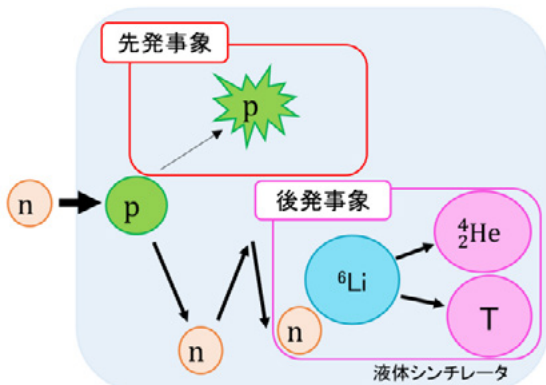


図 2. 環境中の高速中性子事象

2.1.8 波形弁別能

2.1.7 で示したように反電子ニュートリノ観測のためのバックグラウンド低減の観点から先発事象である γ 線と中性子（反跳陽子）を弁別する必要があ

る。波形弁別能とは図3のように波形の減衰時間を利用した弁別方法である。これを Pulse Shape Discrimination (PSD) という。

PSD の具体的な原理は観測した波形ごとに波形の全体積分の Q と波形の減衰部分の積分 Q_{tail} を計算し、積分値の比 Q_{tail}/Q を求める。この値をエネルギーに関しての分布を見ることで、図4のように γ 線の事象と中性子による反跳陽子事象の弁別を行うことが可能になる。

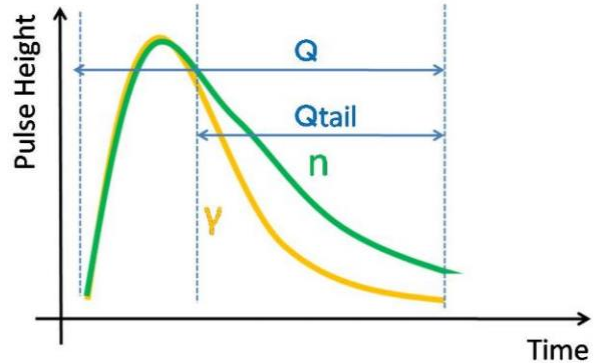


図 3. γ 線と中性子の波形

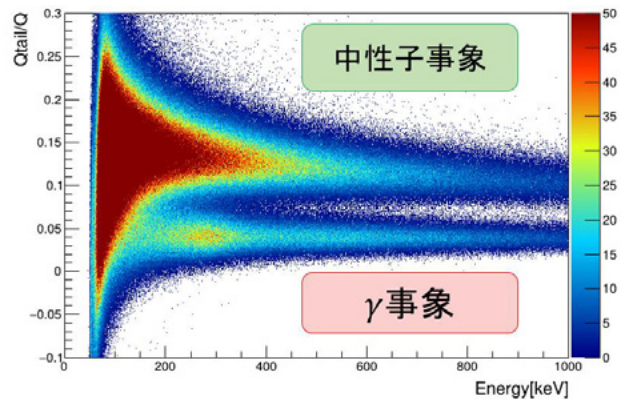


図 4. PSD 分布

2.2 先行研究

波形弁別能を有した Li 含有液体シンチレータの開発を行っているのが、アメリカの PROSPECT 実験である。[2][3][4]

PROSPECT 実験では⁶Liを濃縮した LiCl 水溶液を使用し、液体シンチレータを開発している。この液体シンチレータは、溶媒に DIN、溶質に PPO、Bis-MSB、添加物に濃縮 LiCl 水溶液、界面活性剤を用いている。

波形弁別能について調査しており、後述の FoM の値は本研究と同様の計算を行うと、4.11 となった。

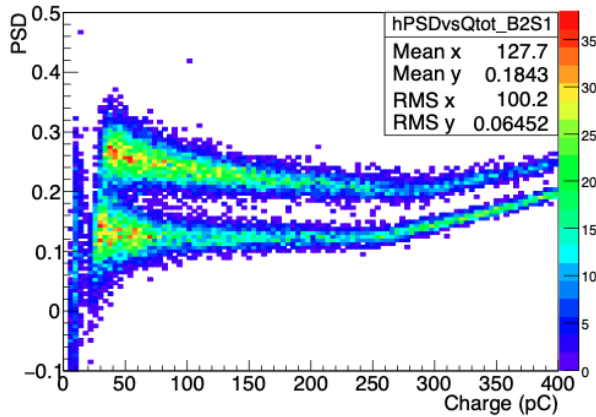


図 5. PROSPECT 実験において測定された PSD 分布

3. 本研究の目的

先行研究では、 ^6Li を濃縮した LiCl 水溶液を使用することで液体シンチレータの開発が行われていた。

しかしながら、濃縮した LiCl 水溶液は非常に高価である。そのため、今回は天然の Li が含有している LiCl 水溶液を使用し、波形弁別能を有した Li 含有液体シンチレータ (LiLS) の開発を行った。

本研究では、Li 0.1wt% を含有した LiLS と Li を含有していない LS の 2 種類を作製することにより LiLS の発光特性として発光量、波形弁別能、中性子捕獲事象数の評価を行った。

4. 波形弁別能を有した Li 含有液体シンチレータの作製

4.1 材料の選定

通常の液体シンチレータは溶媒、溶質の 2 種類もしくは 3 種類 (溶質が 2 種類) で構成される。しかし、今回は液体シンチレータに Li を添加し、かつ波形弁別能を付与する必要があるため、溶媒、溶質に添加物を加えた。

今回の液体シンチレータの材料と役割は表 3 に示した。

表 3. 液体シンチレータに用いた材料

名称	材料名	役割
溶媒	LAB	発光体
第 1 溶質	PPO	発光剤
第 2 溶質	Bis-MSB	波長変換剤
添加物	LiCl 水溶液	Li の添加
添加物	IGEPAL CO-630	界面活性剤
添加物	UltimaGold-F	波形弁別能の付与

4.2 液体シンチレータの作製方法

液体シンチレータの開発の前段階として LiCl 水溶液を作製する必要がある。LiCl 水溶液は工業用純水 50ml に対して 10g の LiCl を混合し、攪拌することで作製した。

LiLS は表 3 の材料を 150ml サイズのバイアルに入れ、攪拌を行い、作製した。

5. 測定環境

測定系には NIM モジュールを用いた。用いたモジュールは高圧電源(HV)、入力信号を複数の信号に分配する Linear Fan in-out、入力信号を増幅し出力する Amplifier、入力信号が閾値以上の信号の場合、矩形波を出力する discriminator、入力信号をある一定の時間遅らせて矩形波を出力する gate&delay generator を用いた。

信号の取得装置として CAEN 製 FADC V1730 を用いた。この FADC は、14bit、500MS/s のデジタイザーである。

5.1. 反射材の選定

測定の際に、LS からのエネルギー分解能を向上させるには LS からの光量を大きくする方が良い。一般的にはサンプルにアルミホイルなどの反射材を巻くなどして光量を増やせるよう工夫を行う。今回はどのような反射材を用いると光量が一番大きくなるか評価を行い、選定をした。反射材の候補にはタイベックシート (Tyvek(Soft))、アルミを表面に蒸着したタイベックシート (Tyvek(Silver))、アルミホイル (Aluminum foil)、テフロンテープ (Teflon) を候補とした。 ^{137}Cs を用いて測定を行い、コンプトンエッジの位置が一番高いところに来る反射材の組み合わせを用いた。結果は図 6 の通りになった。図 6 よりテフロンテープとアルミホイルを反射材として用いることとした。

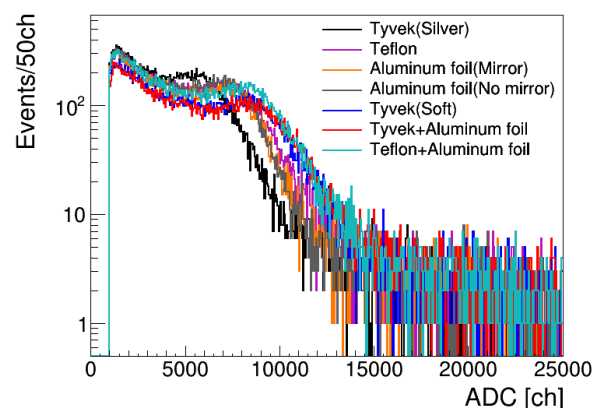


図 6. 反射材別による ^{137}Cs のコンプトンエッジ

6. γ 線源測定

γ 線源を用いて、発光量の評価を行った。 γ 線源として ^{137}Cs を使用した。液体シンチレータには全エネルギー吸収ピークのような明確なピークは存在しない。そのため、今回は ^{137}Cs のエネルギースペクトルよりコンプトンエッジを同定することによって、評価を行った。図7に各LSに対する測定で得られた ^{137}Cs のエネルギースペクトルを示した。Liが添加されることにより、発光量が減少していることが確認できる。

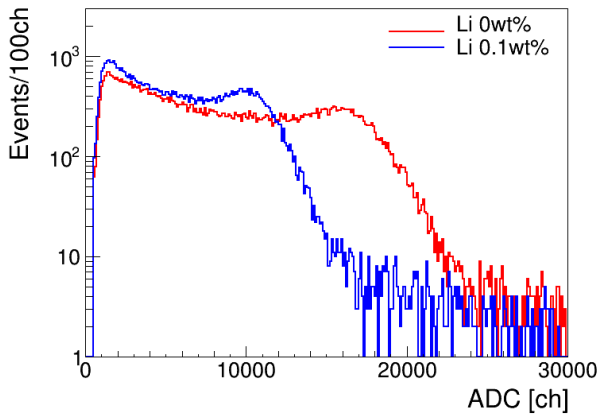


図7.各LSの ^{137}Cs のエネルギースペクトル

エネルギースペクトルにガウス関数(式(3))でFitを行った。そしてコンプトンエッジの位置を計算(式(4))し、評価を行った。結果は表4に示した。

$$\text{Gaussian function} = N \times \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

$$\text{C.E.} = \left(\mu + \frac{2.355}{2}\sigma\right) \pm \sqrt{\mu_{\text{err}}^2 + \left(\frac{2.355}{2}\sigma_{\text{err}}\right)^2} \quad (4)$$

表4.各LSにおけるコンプトンエッジの位置

サンプル	コンプトンエッジの位置 [ch]
LiなしLS	18449 ± 77
Li 0.1wt% LiLS	11865 ± 56

7. 中性子線源測定

7.1. 波形弁別能

中性子線源として、 ^{252}Cf を用いた。今回は図3で示したQの範囲を波形のピークより-20nsから+120ns, Q_{tail} の範囲を波形のピークより+36nsから+120nsとして Q_{tail}/Q を求めた。 Q_{tail}/Q をエネルギーに対してプロットしたLiなしLSのPSD分布を図8に示した。図8より、高速中性子事象と γ 事象が

明確に分離できていることが確認できる。

この範囲における300keV~700keVの区間をY軸射影した際に得られるPSDヒストグラムは図9である。式(3)で示したガウス関数でFitすることにより、ピークの位置と標準偏差を同定した。

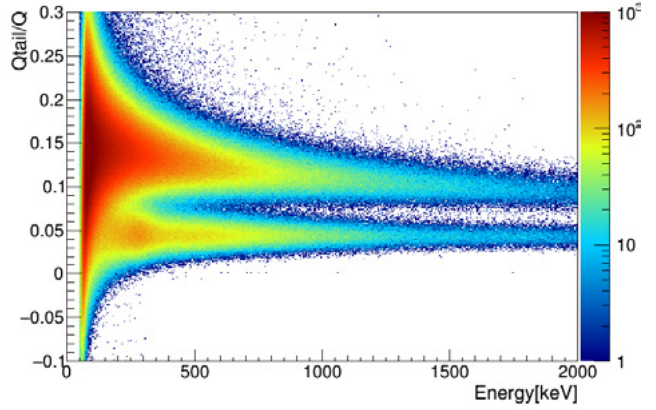


図8.LiなしLSの測定より得られたPSD分布

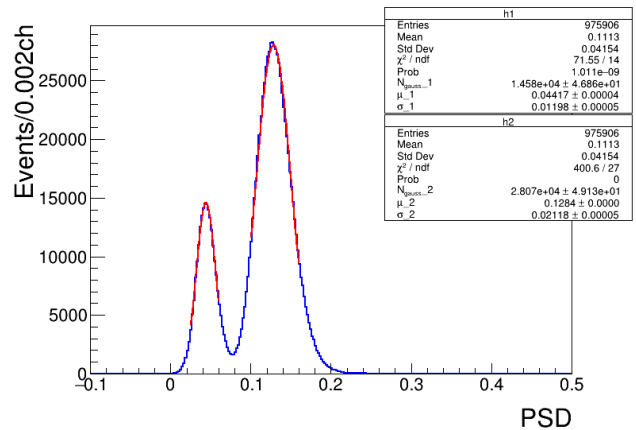


図9.LiなしLSの測定より得られたPSDヒストグラム

波形弁別能を評価するパラメータとしてFoM(式(5))を用いた。PSDヒストグラムをFitすることで得られたピークの位置と標準偏差より、FoMの値を求めた。得られたFoMの値は表5に示した。

$$\text{FoM} = \frac{|\mu_n - \mu_\gamma|}{\sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_\gamma^2}} \quad (5)$$

表5.各LSのFoM

サンプル	FoM
LiなしLS	3.46
Li 0.1wt% LiLS	2.74

7.2. 中性子捕獲事象

遅延同時計測法を用いて、中性子捕獲事象を評価した。図 10 に今回遅延同時計測法を用いて評価を行う ^{252}Cf 由来高速中性子による中性子捕獲事象の模式図を示した。

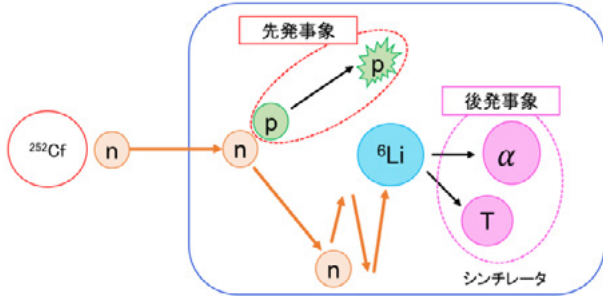


図 10. ^{252}Cf 由来高速中性子による中性子捕獲事象

図 11 に先発事象と後発事象の時間差 dT 分布を示した。今回は $5 \mu\text{sec} \sim 105 \mu\text{sec}$ を時間相関のある事象領域 ON time, $205 \mu\text{sec} \sim 305 \mu\text{sec}$ を時間相関のない事象領域 OFF time として選定した。

今回の関心領域は中性子捕獲が確認できる後発事象である。図 12 に ON Time, OFF time, ON-OFF time の後発事象のエネルギースペクトルを示した。ON-OFF time のエネルギースペクトルでは $400\text{keV} \sim 600\text{keV}$ 付近にピークが存在し、 ^6Li による中性子捕獲事象を確認することができた。

図 12 の中性子捕獲による事象数を確認するため、図 13 に示すようにピークに式 (3) で示したガウス関数で Fit した。ピークから前後 2σ の位置を積分し、事象数を計算した。また、Li なしの LS に関しては中性子捕獲による信号は確認できないので、 $400\text{keV} \sim 600\text{keV}$ の範囲を積分範囲として事象数を計算した。計算結果は表 6 に示した。

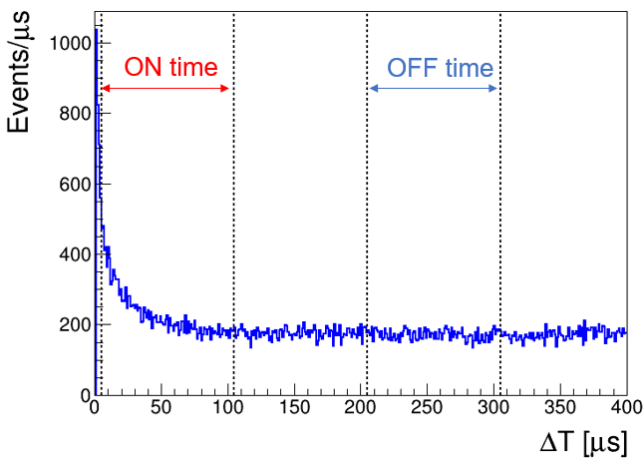


図 11. 先発事象と後発事象の時間差 dT 分布
 $5 \sim 105 \mu\text{sec}$ を ON time
 $205 \mu\text{sec} \sim 305 \mu\text{sec}$ を OFF time とした。

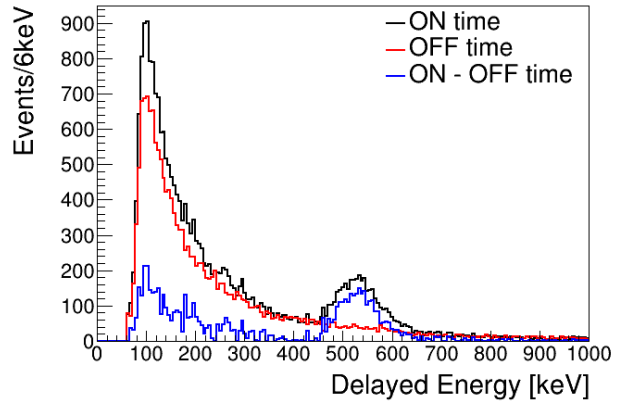


図 12. 後発事象のエネルギースペクトル

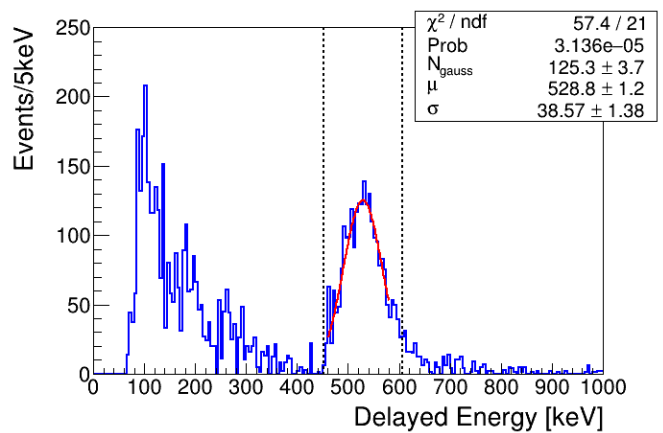


図 13. 中性子捕獲事象数計算のための積分範囲

表 6. 各 LS の中性子捕獲事象数

サンプル	中性子捕獲事象数
Li なし LS	105
Li 0.1wt% LiLS	2432

8. 結論

我々は、原子炉ニュートリノモニターの開発を進めている。原子炉ニュートリノモニターとは、原子炉稼働時に発生する反電子ニュートリノを観測することによって原子炉の稼働状況や U/Pu の燃料組成比をリアルタイムでモニタリングを試みる技術である。しかし、これまでに成功している例は、原子炉の稼働状況の確認までである。そのため、反電子ニュートリノのエネルギー分布を確認でき、燃料組成のモニタリングができる反電子ニュートリノ検出器の開発を行っている。

反電子ニュートリノの検出方法は、逆β崩壊を用いて観測を行う。この時、先発事象として陽電子の運動エネルギーと対消滅の際に発生する 2 本の γ 線が検出される。中性子は熱化し、液体シンチレータに添加した ^6Li によって吸収されることで、 α 線と

トリチウムを放出し、後発事象として検出される。この時間差を利用した遅延同時計測法を用いることで時間相関のないバックグラウンド事象を除去する。しかし、遅延同時計測法を用いても時間相関のあるバックグラウンド事象が存在する。それは環境中の高速中性子事象である。これは液体シンチレータには通常ない波形弁別能を付与することによって先発事象を弁別することが可能になり、ニュートリノ事象を同定しやすくなる。

本研究では、波形弁別能を有した Li 含有液体シンチレータを開発し、発光特性評価を行い、Li 添加による液体シンチレータへの影響を評価した。

^{137}Cs を用いた発光量評価では、Li を添加することにより、発光量が 36% 減少した。また、 ^{252}Cf を用いた波形弁別能評価では FoM が 21% 低下した。しかし、遅延同時計測法を用いた中性子捕獲事象の確認では、Li を添加することによって、中性子捕獲による明確なピークを確認することができた。関心領域内の事象数は 23 倍に増加した。

今後は、今回の結果を踏まえて、さらに液体シンチレータの Li 濃度依存性について調査を行い、反電子ニュートリノ検出に特化した検出器を開発していく予定である。

参考文献

1. Final Reports: Focused Workshop on Antineutrino Detection for Safeguards Applications, 28-30 October 2008 IAEA Headquarters, Vienna
2. J. Ashenfelter et al., (PROSPECT collaboration), "The PROSPECT Reactor Antineutrino Experiment", Nucl. Instrum. Meth. A, 922(2018) 287
3. J. Ashenfelter et al., (PROSPECT collaboration), "Lithium-loaded Liquid Scintillator Production for the PROSPECT experiment", 2019 JINST 14 P03026
4. J. Ashenfelter et al., (PROSPECT collaboration), "Performance of a segment ^6Li -loaded liquid scintillator detector for the PROSPECT experiment", Journal of Instrumentation, 2018 JINST 13 P06023

安定マッチングとそのいくつかの拡張問題の 混合整数計画による定式化について

鈴木 欣秀* 小原 敦美†

On Formulation of Stable Matching Problems into Mixed Integer Program

Yoshihide SUZUKAWA* Atsumi OHARA†

(Received September 20, 2021)

We show several techniques to formulate fundamental stable matching problems and their variants into mathematical program called mixed integer program (MIP). One-to-one or many-to-one stable matching problems have practically wide applications for mechanism designs in economics or in the real world. Recently MIP has emerged to be a powerful and cheap tool to solve many optimization problems including large-scale combinatorial ones. We demonstrate how to apply MIP to find satisfactory solutions, and results of numerical experiments to know current status of its computational ability.

Key words : Stable matching problems, Mixed integer program, Optimization of stability criterion, Blocking pairs, Stable marriage

1. 緒言

マッチング問題とは、結婚における男女、研究室配属における学生と研究室、就職活動における学生と企業のように、異なる集合に属し個々の選好をもつ主体同士を関係づける際、最も望ましい組み合わせを求め問題である。ここで「望ましい」とは、例えば研究室配属の場合、学生は志望研究室の順位・満足度などにそれぞれの選好があり、研究室側も GPA や専門科目の評価など学生に対する個々の選好がある中で、マッチングの結果が双方に不満を残さないことである。

この意味で望ましいマッチングの解が満たすべき最も基本的な条件として「安定性」という概念が提唱され、安定なマッチングを求めるアルゴリズムが考案された^[1]。以来、安定マッチングの理論は離散数学、計算機科学、数理経済学分野で様々な問題への拡張、安定解の存在性と構造、計算複雑度、離散凸解析との関係などが研究され、実社会・経済などではメカニズム

デザイン（制度設計）へ応用も広がっている^{[3]-[7]}。

一方、近年の計算機の性能/価格比の著しい向上に加えて、混合整数計画（Mixed Integer Program: MIP）[†]アルゴリズムのめざましい進歩と種々の汎用ソルバーへの実装・整備が整うにつれ、大規模な MIP の問題が手軽に試せるようになってきている^{[8],[9]}。また「安定性」については次節で紹介するが、安定なマッチングは所与の問題に対して、存在しても唯一とは限らない^{[1],[5],[7]}。

従って、標準的な安定マッチング問題を MIP へ定式化しておけば、様々な応用で解きたい個々の問題において考慮すべき固有な条件を、MIP の柔軟な記述力を活かして表現し書き加えることで、標準的な定式化をカスタマイズできる。これにより、個々の問題に合わせたアルゴリズムを一から新たに考案せずに、固有の安定マッチング解を探索することが可能となる。

さらに、安定性は最適化問題においては制約条件として表せる概念なので、解きたいマッチング問題に合わせた目的関数を設定できれば、その意味で最適な安定マッチングを見いだすことも可能となる。

* (株) アイシン

*AISIN Corporation

†電気・電子工学講座

†Department of Electrical and Electronics Engineering

*文献 [1] の著者 Shapley 氏は安定マッチング理論に関わる「安定配分理論と市場設計の実践に関する功績」で 2012 年度のノーベル経済学賞を受賞している（Gale 氏は当時すでに他界）。

†本報告では、純粋な整数計画（IP）も含んだ意味で用いる。

本稿の内容は、学術的な研究というより、上記の状況に促されて便利なツールを使うために取り組んで得た「ある種の工夫・ノウハウ」の説明の類いである。従って学術論文として公表される性格のものでないためか、同様な内容の先行報告は我々には見つけられなかった[‡]。また、もしマッチング問題に携わる機会・業務があったとき、自動化が容易で負担が軽減し、理論的な公平性の担保にも役立つため、知っておくと便利な「豆知識」という意味もあると考え[§]、ここに報告する。

第2節は、安定マッチングとMIPに関する準備である。第3節で、標準的な安定マッチング問題のMIPへの定式化を考察する。安定性を制約条件とするために、不安定性の定義の否定を考え、MIPで離接条件（ORの条件）が表現可能なことを用いる。第4節で、この定式化をもとにいくつかの拡張もしくは変形されたマッチング問題をMIPで表している。これらの問題は、新しく提案したもの、最適性を追求したもの、NP困難とされるものがある。NP困難な問題の結果は、現時点のごく普通の計算環境でどれほどのことが可能かの目安にもなると思われる。第5節は、パソコンでの計算機実験で、第6節でまとめている。

なお、本報告は主に文献^[12]に基づいている。

2. 準備：安定なマッチングと混合整数計画（MIP）

簡単な安定マッチング問題として、1対1で全員を誰かとマッチさせる結婚問題を例に、問題設定や導入される概念を説明する。 n 人ずつの男女の集合 $M = \{m_1, \dots, m_n\}$ と $W = \{w_1, \dots, w_n\}$ の各人が異性全員に対する選好の順位・満足度を持つとする（選好度は同順位・同点はなしとする）。男性 m_i が女性 w_j を女性 w_k より選好するとき、次のように書く：

$$w_j \succ_{m_i} w_k$$

M と W の1対1マッチング μ で m_i と w_j がマッチしていることを $\mu(m_i) = w_j$ や $\mu(w_j) = m_i$ と表す。

定義 1. マッチング μ において、以下の2条件を満たすペア (m_i, w_j) は μ のブロッキングペアであるという。ブロッキングペアが存在しないマッチングを安定マッチングと呼ぶ。

$$\text{i) } w_j \succ_{m_i} \mu(m_i), \quad \text{ii) } m_i \succ_{w_j} \mu(w_j)$$

すなわちブロッキングペアは、それぞれが μ でマッチしている相手に比べより選好しあうので、このマッ

[‡]MIPに定式化している興味深い文献はあった^{[10],[11]}が、本報告で考える意味の安定性は扱われていない。

[§]実は、筆者の一人が学科の卒研配属を担当したことが、本報告の内容を考えてみるきっかけであった。

チング μ に対する満足度は当然低くなる。したがって、不安定なマッチングは、ブロッキングペアがマッチング成立後にペアを組みなおした場合、マッチングが崩壊してしまう。

結婚問題には「安定マッチングは必ず存在するが、一般に唯一ではない」ことが知られ^{[1],[5],[7]}、文献[1]で提案されたアルゴリズムで安定マッチングが得られる。本報告では考案者の頭文字をとって **GS** アルゴリズム（詳細は省略。例えば文献^{[1],[5],[7]}参照）と呼ぶ。

しかし、「GSアルゴリズムで得られる解は、男性側、女性側どちらか一方の満足度が最適になるような特殊な安定マッチングである」ことも知られている^{[5],[7]}。

さて、MIPは下記のように線形な目的関数、(不)等式制約をもつ最適化問題のクラスである：

$$\text{minimize } \mathbf{c}^T \mathbf{x}, \quad \text{subject to } \begin{cases} \mathbf{A}_1 \mathbf{x} \leq \mathbf{b}_1, \\ \mathbf{A}_2 \mathbf{x} = \mathbf{b}_2. \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x} は成分の一部を整数に限定した実変数ベクトルで、 $\mathbf{A}_i, \mathbf{b}_i$ ($i = 1, 2$), \mathbf{c} は上の等式・不等式を満たす適当なサイズの与えられた実定数の行列またはベクトルである。ただし、ベクトルの不等号 $\mathbf{a} \leq \mathbf{b}$ は、第 i 成分同士が $a_i \leq b_i, \forall i$ を満たすことを表す。

以後、本報告では特に変数ベクトルのすべての成分が0か1の値に限定されたバイナリ変数のみを考える。

3. 標準的な安定マッチング問題のMIPへの定式化

3.1 1対1のマッチング：安定結婚問題

標準的な安定マッチング問題として、前節で説明した安定結婚を取り上げる。実定数 c_{ij}, g_{ij} をそれぞれ男性 m_i の女性 w_j への満足度、女性 w_j の男性 m_i への満足度とする（順位なら符号反転など前処理）。マッチング μ において m_i と w_j がマッチしている、いないとき、バイナリ変数 x_{ij} の値をそれぞれ1, 0とする。以下、 m_i, w_j の添え字の集合も M, W と表すと、 μ で全員が1人にマッチしている条件は次の通り：

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j \in W := \{1, \dots, n\}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \in M := \{1, \dots, n\} \quad (3)$$

これらの条件の下で、 $(m_i, w_j) \in M \times W$ がブロッキングペアであることは次と同値になる：

$$c_{IJ} > \sum_{j=1}^n c_{Ij} x_{Ij} \quad \text{and} \quad g_{IJ} > \sum_{i=1}^n g_{iJ} x_{iJ}$$

よって、この同値関係の否定を考えると以下のようになる。

補題 1. マッチング μ が安定であることは式 (2), (3) のもとで以下が成立することと同値である：

$$c_{IJ} \leq \sum_{j=1}^n c_{Ij}x_{Ij} \text{ or } g_{IJ} \leq \sum_{i=1}^n g_{iJ}x_{iJ}, \quad (4)$$

$$\forall (I, J) \in \mathcal{M} \times \mathcal{W}$$

MIP では十分大きな正定数 M (big-M) と一つのバイナリ変数 y_{IJ} で、式 (4) のような離接 (or) 条件を次のような合接 (and) 条件として表せる：

$$\exists y_{IJ} \in \{0, 1\}, \quad c_{IJ} \leq \sum_{j=1}^n c_{Ij}x_{Ij} + My_{IJ}$$

and

$$g_{IJ} \leq \sum_{i=1}^n g_{iJ}x_{iJ} + M(1 - y_{IJ})$$

M は、例えばこの問題では $\forall (I, J) \in \mathcal{M} \times \mathcal{W}$ に対して

$$M \geq \max \left\{ c_{IJ} - \sum_{j=1}^m c_{Ij}x_{Ij}, g_{IJ} - \sum_{i=1}^n g_{iJ}x_{iJ} \right\}$$

を満たせばよい[¶]。以下にまとめる。

定理 1. α, β を重みを表す正定数とする。男女の重み付き満足度の和を最大化する安定結婚問題は、バイナリ変数 x_{ij}, y_{ij} に関する次の MIP に定式化される：

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \alpha \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij} + \beta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g_{ij}x_{ij} \\ & \text{s.t. } \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j \in \mathcal{W}, \\ & \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{M}, \\ & \left. \begin{aligned} c_{IJ} &\leq \sum_{j=1}^n c_{Ij}x_{Ij} + My_{IJ}, \\ g_{IJ} &\leq \sum_{i=1}^n g_{iJ}x_{iJ} + M(1 - y_{IJ}), \end{aligned} \right\} \\ & \quad \forall (I, J) \in \mathcal{M} \times \mathcal{W}, \\ & x_{ij}, y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (i, j) \in \mathcal{M} \times \mathcal{W} \\ & M : \text{十分大きな正の定数} \end{aligned}$$

注：特に α と β のどちらかのみを 0 としたとき得られる解が女性最適、男性最適の安定マッチングであり、GS アルゴリズムの解と一致する。数値実験では、重みを調整することでその他の安定マッチングが（存在すれば）得られることが多かった。

[¶]あまり大きすぎると、数値実験では計算時間が長くなる傾向が見られた。

3.2 多対 1 のマッチング：卒研配属問題

次に多対 1 の安定マッチングの標準的な問題として、卒研配属問題（専門用語では研修医配属問題と呼ばれる）を考えよう。学生 n 人の集合 $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ と研究室 m 個の集合 $\mathcal{L} = \{L_1, L_2, \dots, L_m\}$ がある状況を考える。以下、 s_s, L_l の添え字 s, l だけ用いる。

バイナリ変数 x_{sl} を用いて、学生 s が研究室 l に配属される場合 $x_{sl} = 1$ 、そうでない時 $x_{sl} = 0$ とする。各研究室の定員上限 (Upper Bound) を UB_l とし、学生 s の研究室 l に配属した場合の満足度を c_{sl} 、研究室 l の学生 s を迎え入れた場合の満足度を g_{sl} とする。他の記号の使い方は結婚問題と同様である。

定義 2. 多対 1 マッチング μ において、以下の 2 条件を満たすペア $(s, l) \in \mathcal{S} \times \mathcal{L}$ は μ のブロッキングペアである。

- (i) s は μ でどこにも配属されていないか、または $l \succ_s \mu(s)$
- (ii) μ で l に配属された学生数は定員未満^{||}、または l に配属された学生の中に l にとっての満足度が s より低い学生がいる

すべての学生が研究室に配属され、定員も満たすことを表す条件

$$\sum_{l=1}^m x_{sl} = 1, \quad \forall s \in \mathcal{S},$$

$$\sum_{s=1}^n x_{sl} \leq UB_l, \quad \forall l \in \mathcal{L}$$

の下で、 (S, L) がブロッキングペアであることは次と同値：

$$c_{SL} > \sum_{l=1}^m c_{Sl}x_{Sl}$$

and

$$\sum_{s=1}^n x_{sL} < UB_L \text{ or } (g_{SL}x_{sL} > g_{sL}x_{sL}, \exists s \in \mathcal{S})$$

この同値関係の否定をとり、結婚問題と同様に離接条件を処理すると次の結果を得る：

定理 2. 学生と研究室の満足度の和を最大化する安定な卒研配属問題は、バイナリ変数 x_{sl}, y_{sl} に関する次の MIP に定式化される：

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \sum_{s=1}^n \sum_{l=1}^m c_{sl}x_{sl} + \sum_{s=1}^n \sum_{l=1}^m g_{sl}x_{sl} \\ & \text{s.t. } \sum_{s=1}^n x_{sl} \leq UB_l, \quad \forall l \in \mathcal{L}, \end{aligned}$$

^{||}この条件は不要な場合もあろう。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{l=1}^m x_{sl} &= 1, \forall s \in \mathcal{S}, \\ c_{sL} &\leq \sum_{l=1}^m c_{sL} x_{sL} + M(1 - y_{sL}), \\ g_{sL} x_{sL} &\leq g_{sL} x_{sL} + M y_{sL}, \forall s \in \mathcal{S}, \\ UB_L &\leq \sum_{s=1}^n x_{sL} + M y_{sL}, \end{aligned} \right\} \forall (S, L) \in \mathcal{S} \times \mathcal{L}$$

4. 拡張されたいくつかのマッチング問題と定式化

4.1 下限つき卒研配属問題でのブロッキングペア最小化

3.2節の卒研配属問題では、定員に上限がある場合は安定マッチングが必ず存在し、GSアルゴリズムで求解できる。しかし、下限がある場合は安定マッチングは存在するとは限らないことが知られている^[7]。その場合、ブロッキングペア(BP)の数が最小のマッチングを選ぶことは一つの妥当な策であろう。これには定理2で、満足度の最大化を捨て、ブロッキングペア数を検出するバイナリ変数 z_{sl} を追加し最小化すればよい。

系 1. 研究室配属数に下限 LB_l がある場合にブロッキングペア数を最小化する卒研配属問題は、バイナリ変数 x_{sl}, y_{sl}, z_{sl} に関する次のMIPに定式化される：

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \sum_{S=1}^n \sum_{L=1}^m z_{SL} \\ &\text{s.t. } LB_l \leq \sum_{s=1}^n x_{sl} \leq UB_l, \forall l \in \mathcal{L}, \\ &\quad \sum_{l=1}^m x_{sl} = 1, \forall s \in \mathcal{S}, \\ &\left. \begin{aligned} c_{sL} &\leq \sum_{l=1}^m c_{sL} x_{sL} + M(1 - y_{sL}) + M z_{sL}, \\ g_{sL} x_{sL} &\leq g_{sL} x_{sL} + M y_{sL} + M z_{sL}, \forall s \in \mathcal{S}, \\ UB_L &\leq \sum_{s=1}^n x_{sL} + M y_{sL} + M z_{sL}, \end{aligned} \right\} \forall (S, L) \in \mathcal{S} \times \mathcal{L} \end{aligned}$$

4.2 不完全リスト結婚問題と最大サイズ最小BP問題

安定結婚問題で、ペアになりたくない相手は満足度リストに書かなくて良いという不完全リストを考える。リストにない相手とペアになるより独身を好むことを意味する。これをSMI(Stable Marriage with Incomplete lists)と書く。独身も考慮するので男女の集合 \mathcal{M}, \mathcal{W} は同人数である必要はなく、それぞれの人数を n, m とする。

ある男性 m_i のリストに女性 w_j が書かれているとき、 m_i は w_j を受け入れ可能という。SMIのマッチングは、互いに受け入れ可能なペアを要素とする集合のうち誰も2人以上とマッチしていないものである。これに応じてSMIではブロッキングペアを次のように定義する。

定義 3. 互いに受け入れ可能な男女ペア (m_i, w_j) すべてを要素とする集合を \mathcal{A} と記す。SMI マッチング μ において以下の2条件を満たすペア $(m_i, w_j) \in \mathcal{A}$ が μ のブロッキングペアである**。

(i) m_i は μ で独身か、または $w_j \succ_{m_i} \mu(m_i)$

(ii) w_j は μ で独身か、または $m_i \succ_{w_j} \mu(w_j)$

前節と同様、添え字のみ記す。上の定義より、互いに受け入れ可能な男性 I と女性 J のペア $(I, J) \in \mathcal{A}$ がSMIのブロッキングペアであることは、1対1マッチングの条件(補題2の式(5),(6))の下で

$$\sum_{j=1}^m x_{Ij} = 0 \quad \text{or} \quad c_{IJ} > \sum_{j=1}^m c_{Ij} x_{Ij}$$

and

$$\sum_{i=1}^n x_{iJ} = 0 \quad \text{or} \quad g_{IJ} > \sum_{i=1}^n g_{iJ} x_{iJ}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (i, j) \in \mathcal{M} \times \mathcal{W}$$

である。この否定からSMIマッチングが安定であることは、式(5),(6)の下で $\forall (I, J) \in \mathcal{A}$ に対して

$$\sum_{j=1}^m x_{Ij} \neq 0 \quad \text{and} \quad c_{IJ} \leq \sum_{j=1}^m c_{Ij} x_{Ij}$$

or

$$\sum_{i=1}^n x_{iJ} \neq 0 \quad \text{and} \quad g_{IJ} \leq \sum_{i=1}^n g_{iJ} x_{iJ}$$

となる。従って、SMI問題は次のように書ける。

補題 2. マッチした男女の満足度を最大化するSMI問題は、バイナリ変数 s_i, t_j, x_{ij}, y_{ij} に関するMIPで以下のように定式化される：

$$\text{maximize } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij} x_{ij}$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n x_{ij} = s_j, \quad \forall j \in \mathcal{W}, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = t_i, \quad \forall i \in \mathcal{M}, \quad (6)$$

$$x_{I'J'} = 0, \quad \forall (I', J') \notin \mathcal{A},$$

** $\mu(m_i) \neq w_j$ かつ $(m_i, w_j) \in \mathcal{A}$ の条件^[7]は、仮定と i), ii) から従う。

$$\left. \begin{aligned} 0.5 &\leq \sum_{j=1}^m x_{Ij} + My_{IJ}, \\ c_{IJ} &\leq \sum_{j=1}^m c_{Ij}x_{Ij} + My_{IJ}, \\ 0.5 &\leq \sum_{i=1}^n x_{iJ} + M(1 - y_{IJ}), \\ g_{IJ} &\leq \sum_{i=1}^n g_{ij}x_{iJ} + M(1 - y_{IJ}), \end{aligned} \right\} \forall (I, J) \in \mathcal{A}$$

「SMIの安定マッチングは必ず存在し、GSアルゴリズムで求められる」や「すべての安定マッチングのサイズ（成立しているペアの数）は等しい」ことが知られている [5],[7].

安定とは限らないSMIマッチング（つまり、 \mathcal{A} の部分集合で1対1のマッチング）の中で最大サイズのマッチングを考える（これも一般に複数ある）。もしこの最大サイズが安定マッチングのサイズより十分に大きい場合、安定性を多少犠牲にして「最大サイズマッチングの中でブロッキングペア（BP）の数が最小な」マッチングを求めることは意味がある（かもしれない^{††}）。Biróらはこのような問題を最大サイズ最小BP問題として提案し、それがNP困難であることを示した [13].

この問題は、二段階に分けてMIPで定式化できる。まずSMIマッチングの最大サイズは s_i, t_j, x_{ij} をバイナリ変数として次のように求められる：

$$\begin{aligned} &\text{maximize } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \\ &\text{s.t. } \sum_{j=1}^m x_{ij} = s_i, \quad \forall i \in \mathcal{M}, \\ &\quad \sum_{i=1}^n x_{ij} = t_j, \quad \forall j \in \mathcal{W}, \\ &\quad x_{I'J'} = 0, \quad \forall (I', J') \notin \mathcal{A} \end{aligned}$$

求めた最大値を S_{\max} とすると、補題2を利用して次の結果を得られる。

定理3. SMI最大サイズ最小BP問題は、バイナリ変数 $s_i, t_j, x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}$ に関するMIPで以下のように定式化される：

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \sum_{I=1}^n \sum_{J=1}^m z_{IJ} \\ &\text{s.t. } \sum_{i=1}^n x_{ij} = s_j, \quad \forall j \in \mathcal{W}, \\ &\quad \sum_{j=1}^m x_{ij} = t_i, \quad \forall i \in \mathcal{M}, \end{aligned}$$

^{††}例えばマッチメーカーの商業的理由などで。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} &= S_{\max}, \\ x_{I'J'} &= 0, \quad \forall (I', J') \notin \mathcal{A}, \\ 0.5 &\leq \sum_{j=1}^m x_{Ij} + My_{IJ} + Mz_{IJ}, \\ c_{IJ} &\leq \sum_{j=1}^m c_{Ij}x_{Ij} + My_{IJ} + Mz_{IJ}, \\ 0.5 &\leq \sum_{i=1}^n x_{iJ} + M(1 - y_{IJ}) + Mz_{IJ}, \\ g_{IJ} &\leq \sum_{i=1}^n g_{ij}x_{iJ} + M(1 - y_{IJ}) + Mz_{IJ}, \end{aligned} \right\} \forall (I, J) \in \mathcal{A}$$

4.3 安定ルームメイト問題

$2n$ 人の寮生 $\mathcal{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_{2n}\}$ と n 室の2人部屋があり、各寮生 p_i は自分以外の学生 p_j に対する選好満足度 c_{ij} ($i \neq j$)を持っているとする。

安定ルームメイト問題は、この選好リストから次のように定義されるブロッキングペアが存在しない、完全な（すべての寮生が誰かとペアになっている）マッチング μ を求める問題である。

定義4. 異なる2者からなるペアすべてを要素とする集合を $\mathcal{E} = \{(p_i, p_j) | 1 \leq i < j \leq 2n, i, j : \text{自然数}\}$ と記す。完全なルームメイトマッチング μ において、以下の2条件を満たすペア $(p_i, p_j) \in \mathcal{E}$ は μ のブロッキングペアであるという。

$$\text{i) } p_j \succ_{p_i} \mu(p_i), \quad \text{ii) } p_i \succ_{p_j} \mu(p_j)$$

この定義は、定義1で男女の区別を略したものである。したがって、安定ルームメイト問題は3.1節の安定結婚問題を特別ケースとして含む、あるいは、安定結婚問題は無向2部グラフ上での安定マッチング問題ととらえられるが、安定ルームメイト問題は一般の無向グラフ上での安定マッチング問題と考えられる。

ルームメイト問題も「安定マッチングが存在するとは限らない」^[7]。そこで、4.1節、4.2節と同様にブロッキングペア（BP）の数を安定度の一つと見なして最小化することが次善策の一つとして浮かぶ。ただし、この問題もNP困難であることが知られている^{[7],[14]}ので、計算機実験してみる価値がある。

2部グラフにならない点のみに注意して、前節までの方法を踏襲すると次の結果は明らかであろう。

定理4. 最小BP安定ルームメイト問題は、バイナリ変数 x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} に関するMIPで以下のように定式化で

きる：

$$\begin{aligned}
& \text{minimize} && \sum_{(I,J) \in \mathcal{E}} z_{IJ} \\
& \text{s.t.} && x_{ij} = x_{ji}, \quad \forall (i,j) \in \mathcal{E}, \\
& && x_{ii} = 0, \quad \forall i \in \mathcal{P}, \\
& && \sum_{i=1}^{2n} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in \mathcal{P}, \\
& && \left. \begin{aligned} c_{IJ} &\leq \sum_{j=1}^{2n} c_{Ij} x_{Ij} + M y_{IJ} + M z_{IJ}, \\ c_{JI} &\leq \sum_{j=1}^{2n} c_{Jj} x_{Jj} + M(1 - y_{IJ}) + M z_{IJ}, \end{aligned} \right\} \\
& && \forall (I,J) \in \mathcal{E}, \\
& && x_{ij} \in \{0,1\}, \quad (i,j) \in \mathcal{P} \times \mathcal{P}, \\
& && y_{ij}, z_{ij} \in \{0,1\}, \quad (i,j) \in \mathcal{E}
\end{aligned}$$

4.4 学生の相互関係を考慮した卒研配属

この節では、3.2節で考えた定員上限つき卒研配属問題の拡張として、学生と研究室の間の満足度だけでなく、同一研究室に配属される学生の選好（友好度）も考慮した問題を提案しそのMIP定式化を示す。

例えば、研究チームやスポーツチームの構成員が協力し合いながら活動・プレーする場合、構成員間の友好度が高ければ、成績の向上も期待できるという点で構成員のみならずチーム側にとってもメリットがある。このマッチング問題は、そのような状況で考える意味があると思われる。

ブロッキングペアの定義など3.2節の設定はすべて同じとし、これらに加えて各学生 s_s の自分以外の全ての学生 s_t それぞれへの友好度 d_{st} , ($s \neq t$), $s, t \in \mathcal{S}$ を実定数データと考える。ただし、一般に $d_{st} \neq d_{ts}$ で、 $d_{ss} = 0$ とする。

すると最適化問題の定式化は、定理2と比べて、制約条件 (subject to の部分) は同じだが、目的関数には新しい項、すなわち一つの研究室 l 内での学生友好度を研究室毎にとった和

$$\sum_{l=1}^m \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n d_{st} x_{sl} x_{tl} \quad (7)$$

が加わることになる。

ところが、この項はバイナリ変数 x_{sl} に対し二次なので、このままではMIP（線形計画）でない。幸い、変数がバイナリであるので式(7)の各項は以下のように

記述できる。

$$d_{st} x_{sl} x_{tl} = \begin{cases} d_{st} & x_{sl} = x_{tl} = 1 \text{ のとき} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

これは論理積のandの関係に他ならない。論理積 $z = (x \text{ and } y)$ は線形等式・不等式で以下のように表せる：

$$\frac{x+y}{2} \geq z \geq x+y-1, \quad x, y, z \in \{0,1\}$$

これを用いて、式(7)の項を書き換えると次のようにMIPにできる。

定理5. 学生と研究室の満足度及び各研究室内での友好度の和を最大化する安定な卒研配属問題は、バイナリ変数 x_{sl}, y_{sl}, z_{stl} に関する次のMIPに定式化できる：

$$\begin{aligned}
& \text{maximize} && \sum_{s=1}^n \sum_{l=1}^m c_{sl} x_{sl} + \sum_{s=1}^n \sum_{l=1}^m g_{sl} x_{sl} \\
& && + \sum_{l=1}^m \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n d_{st} z_{stl} \\
& \text{s.t.} && \sum_{s=1}^n x_{sl} \leq UB_l, \quad \forall l \in \mathcal{L}, \\
& && \sum_{l=1}^m x_{sl} = 1, \quad \forall s \in \mathcal{S}, \\
& && \left. \begin{aligned} c_{SL} &\leq \sum_{l=1}^m c_{Sl} x_{Sl} + M(1 - y_{SL}), \\ g_{SL} x_{sL} &\leq g_{sL} x_{sL} + M y_{SL}, \quad \forall s \in \mathcal{S}, \\ UB_L &\leq \sum_{s=1}^n x_{sL} + M y_{SL}, \end{aligned} \right\} \\
& && \forall (S,L) \in \mathcal{S} \times \mathcal{L}, \\
& && \frac{x_{sl} + x_{tl}}{2} \geq z_{stl} \geq x_{sl} + x_{tl} - 1, \\
& && \forall (s,t,l) \in \mathcal{S} \times \mathcal{S} \times \mathcal{L}
\end{aligned}$$

5. 数値実験

数値実験では、MIPソルバーとして非商用のSCIP(Solving Constraint Integer Programs)^[15]を用いた。また、数値解析ソフトウェア(インターフェース)はmatlabR2014b^[16]、コンピューターはIntel(R)Core(TM) i5-4440(3.10GHz)8GBメモリを用いた。SCIPは非商用ソルバーの中では高速であり、いくつかの商用ソルバーよりも性能が良いことが知られている。

多くのMIPソルバーは分枝限定法が動作するので、仮に最適解が実行時間内に求まらなくても得られている解(暫定解)には精度保証があり、現実的な計算時間で十分な精度の解が得られることが多い。

数値実験は、入力データとしての満足度や友好度を乱数で生成した例題を100題解き、最適解を得るまでの平均実行時間などを調べた。

5.1 研究室配属問題

研究室配属問題について、3.2節の定員数上限のみの標準的な問題と4.1節の定員数上下限つき最小BPのそれぞれのMIPでの最適化実験結果を示す。

表1：標準的な定員上限のみ研究室配属問題

学生, 研究室 [人:室] \ 時間 [s]	平均実行時間	最大実行時間	最小実行時間
10:5	0.380	0.446	0.331
20:5	0.499	0.608	0.365
30:10	1.403	2.178	1.056
40:10	4.900	6.189	3.624

表2：定員上下限付き最小BP

学生, 研究室 [人:室] \ 時間 [s]	平均実行時間	最大実行時間	最小実行時間
10:5	1.04	1.846	0.902
20:5	2.188	7.049	1.006
30:10	122.745	3430.863	4.421
40:10	431.829	3300.819	7.509

定員上限のみはより大規模な問題でも扱えそうである。これに比較し定員数上下限付きのBP最小化は大幅に時間がかかっており、下の5.4節の結果も勘案すると変数が増えていること以上に難しい問題であることがわかる。例題により実行時間のばらつきが大きい。

5.2 SMI問題と最大サイズ最小BP問題

4.2節で述べた不完全リスト安定結婚(SMI)問題と最大サイズ最小BP問題それぞれのMIPでの最適化実験結果を示す。

表3：不完全リストを許す安定結婚(SMI)問題

平均値 \ 男性, 女性 [人:人]	10:10	20:20	30:30
平均実行時間 [s]	0.546	0.655	0.790
一人あたりの平均満足度	27.062	56.080	86.354
安定マッチングの平均サイズ	7.72	17.89	28.05
平均ブロッキングペア数	0	0	0

表4：最大サイズ最小BP問題

平均値 \ 男性, 女性 [人:人]	10:10	20:20	30:30
平均実行時間 [s]	1.023	2.961	280.870
一人あたりの平均満足度	24.673	51.743	82.638
最大サイズマッチングの平均サイズ	8.85	19.86	30.00
平均ブロッキングペア数	1.36	2.74	1.85

SMI問題の方はより大規模な問題も扱えそうである。最大サイズ最小BP問題はNP困難ではあるが、二段階

解法にも関わらず平均時間のみに着目するともう少し規模の大きい問題でも、現実的時間の範囲でなんとかなりそうである。

ただしその他の評価項目を比較すると、最大サイズ最小BP問題を考える意義のある状況が発生するには、入力データに何らかの偏りが必要ではないかと推測される。

また参考のため、3.1節で述べた標準的な安定結婚問題の計算実行時間を以下に示す。

表5：標準的な安定結婚問題

男性, 女性 [人:人]	10:10	20:20	50:50	80:80
平均実行時間 [s]	0.76	1.62	9.92	23.65

興味深いことは、表3と比較できる10:10と20:20の2ケースでしかないが、SMI問題の方が標準的な安定結婚問題より平均時間が短いことである。両問題では、SMIの方が変数の数はやや多いが、それ以上に制約条件が増えるので、ソルバーの分枝限定法がより効果的に働くからではないかという仮説が立つ。

5.3 最小BP安定ルームメイト問題

4.3節で述べた最小BP安定ルームメイト問題のMIPでの最適化実験結果を示す。

表6：最小BP安定ルームメイト問題

人数 [人]	10	20	30
平均実行時間 [s]	0.594	11.327	1750.006

最小BP安定ルームメイト問題では標準的な安定結婚問題(表5)に比べ、変数の数が増えることに加えて男女の区別が無いことから組み合わせの数も増大する。計算機実験では、NP困難問題らしく、問題スケールの増加につれて求解時間が急激に大きくなった。40人の問題については、30000[s]~62000[s]程度かかった。

5.4 学生の相互関係を考慮した卒研配属問題

4.4節で述べたこの問題の数値実験結果を示す。

表7：相互関係を考慮した研究室配属問題

学生, 研究室 [人:室] \ 時間 [s]	平均実行時間	最大実行時間	最小実行時間
10,5	0.477	0.968	0.347
20,5	0.799	1.188	0.612
30,10	1.769	2.917	1.312
50,10	6.181	12.520	3.649

相互関係（友好度）を考えない標準的な多対1の結果である表1と比べやや時間が長くなった程度で、論理積を表すために新しく導入した変数による負荷はさほどではないようである。

6. 結言

本稿では、いくつかの安定マッチング問題のMIPへの定式化例と計算機実験結果を示した。これらは、変数の数を削減したり、big-Mの値の調整などで改善の余地は多分にある。安定マッチングが存在するとは限らない発展問題に対しては、ブロッキングペアの数が安定度の指標の一つと見なせることから、この指標最小化も考察した。また、配属者の相互関係も考慮したマッチングにも取り組んだ。

本報告では省略したが、定員下限つき研究室配属問題に対処するため安定性を緩和した「無駄のないマッチング」、「フェアなマッチング」という概念も提案されており、無駄がなくフェアなマッチングが安定マッチングと対応する^[17]。これらの概念も、MIPに定式化できる。

一方、マッチングアルゴリズムで重要な「耐戦略性」の定式化については、本報告では考察していない。マッチングアルゴリズムが耐戦略性を持つとは、他の主体がどうするかに関わらず、各主体は選好順位・満足度リストで嘘をついても利のないことを指す。

GSアルゴリズムは、それが適用可能な問題に対しては二つの集合のどちらか、すなわち結婚問題なら男性側あるいは女性側のみに対戦略性を持たせることができる^[7]。また、定員下限つき多対1マッチング問題でやや緩和した意味の安定性と耐戦略性をもつアルゴリズムが提案されている^[18]。

MIPは様々な最適化問題のプラットフォームなので、計算機の方式が変化してもその汎用ソルバーとしての性能は今後しばらく上昇すると予想され、より規模の大きい問題の解決が期待できる。耐戦略性がMIPに定式化できるかは今後の課題としたい。

参考文献

- [1] D. Gale and L.S. Shapley: American Mathematical Monthly, 69, 9-15 (1962).
- [2] D. Gusfield and R.W. Irving: The Stable Marriage Problem: Structure and Algorithms, MIT Press (1989).

- [3] 田村 明久: 離散凸解析とゲーム理論, 朝倉書店 (2009).
- [4] 田村 明久: オペレーションズ・リサーチ, 58-6, 325-331 (2013).
- [5] 安田 洋祐: 数学セミナー, 52-4, 40-45 (2013).
- [6] 岩崎 敦: オペレーションズ・リサーチ, 60-6, 323-329 (2015).
- [7] 宮崎 修一: 安定マッチングの数理とアルゴリズム～トラブルのない配属を求めて～, 現代数学社 (2018).
- [8] 宮代 隆平: <http://web.tuat.ac.jp/miya/ipmemo.html> (2021/9).
- [9] 梅谷 俊治: 自然言語処理, 21-5, 1059-1090 (2014).
- [10] 今野 浩: 数理決定法入門 キャンパスのOR, 朝倉書店 (1992).
- [11] 堀田 敬介: 文教大学経営論集, 2-1, 1-18 (2016).
- [12] 鈴川 欣秀: 整数計画を用いた不安定マッチングの安定度最大化とその評価, 福井大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻 修士論文 (2021).
- [13] P. Biró, D. F. Manlove and S. Mittal: Proc. WAOA, LNCS 5426, 15-28 (2008). (Full version: Technical Report TR-2008-283, University of Glasgow, Department of Computing Science (2008).)
- [14] D. J. Abraham, P. Biró and D. F. Manlove: Proc. WAOA, LNCS 3879, 1-14 (2005).
- [15] <https://www.scipopt.org/> (2021/9).
- [16] <https://jp.mathworks.com/> (2021/9).
- [17] 横尾 真: 日本ソフトウェア科学会第30回大会講演論文集, 493-500 (2013).
- [18] 鎌田, 小島, 和光: 医療経済研究, 23-1, 5-20 (2011).

Analysis on the Distribution of COVID-19 Cases by Country — 2. Robust Power-Law Distribution Observed during the First Half of 2021 —

Hidetaka TOBITA*

(Received August 20, 2021)

Part 1 of this series^[1] analyzed the global cases of COVID-19 during April through November, 2020. In this second report, the data from November 14, 2020 to August 7, 2021 are used for the analysis. Four important findings on the rank-size relationship reported in Part 1 are reconfirmed. (1) The top countries approximately follow the power-law distribution, with $rank \propto size^{-\alpha}$. (2) The overall distribution can be represented by the lognormal distribution. (3) These two characteristics are reproduced reasonably well by the discrete-time stochastic model that employs the weekly reproduction rate μ . (4) The distribution of μ can be approximated by the gamma distribution. The μ -distribution determined for the time period of November 14, 2020 through May 22, 2021 predicts that the stationary distribution after a long time leads to form the power-law tail with $\alpha = 1.24$, while the actual data show $\alpha = 0.9$ during the whole period. This persistent characteristic is supported by the Monte Carlo simulation, showing the robustness of the power-law distribution once established. In order to keep the number average size finite, the magnitude of α must be larger than 1, which corresponds the condition with the average of μ smaller than 1. In addition to the cases by country, the distribution of the number of deaths by country is investigated to find that the characteristics described in item (1) and (2) apply.

Key Words : COVID-19, Ranking Plot, Power Law, Lognormal Distribution, Pandemic, Reproduction Rate, Gamma Distribution

1. Introduction

In Part 1 of this series,^[1] the global cases of COVID-19 reported on the website of Center for Systems Science and Engineering at Johns Hopkins University^[2] were used to analyze the distribution of the cases by country, i.e., the rank-size relationship. Because the rank is proportional to the number fraction of the countries whose number of cases is larger than a given size, the rank corresponds to the upper probability distribution $CN(x)$ as follows.

$$rank \propto CN(x) = \int_x^{\infty} N(x) dx . \quad (1)$$

In Eq. (1), $N(x)$ shows the number-based probability density function (pdf), and x is the number of cases in a country. The rank-size relationship directly shows the cumulative distribution function graphically.

It was found^[1] that the power-law relationship, $rank \propto x^{-\alpha}$ applies for the top countries, and α is approximately in the range of 0.7 – 0.9 during the time period of April through November, 2020. The power law for the COVID-19 distribution was also reported by the other researcher.^[3] When the power-law distribution $rank \propto x^{-\alpha}$ applies, Equation (1) leads to give $N(x)$ as follows.

$$N(x) \propto x^{-\alpha-1} \quad \text{for large } x\text{'s}. \quad (2)$$

The power-law distribution is sometimes referred to as scale free, because the average can go infinity. The scale-free power-law distribution is a pathway capable of connecting finite and infinite sizes smoothly, and appears frequently in the theory of phase transition.^[4,5] Because the pandemic is a phenomena that the infection prevails endlessly, it may be related with the scale-free power law distribution.

Although the upper tail probability distribution conforms to the power law, it was found^[1] that the whole distribution, including the lower-ranked countries, can be

* Department of Materials Science and Engineering

represented by the lognormal distribution rather well.

The following simple discrete-time model^[6] was used to examine the data. The increase of cases during a certain week is represented by Δx_t , and the increase in the next week is by Δx_{t+1} . The newly infected would be infectious, and let μ_t be the weekly reproduction rate, defined by:

$$\mu_t = \Delta x_{t+1} / \Delta x_t. \quad (3)$$

The weekly reproduction rate μ corresponds to an approximate representation of the effective reproduction number in epidemiology,^[7] sometimes referred to by using a symbol, R_t .

With this simple model, the number of cases x_t is represented by the following equations.

$$x_{t+1} = x_t + \Delta x_t. \quad (4)$$

$$\Delta x_t = \mu_{t-1} \Delta x_{t-1}. \quad (5)$$

During the time period of April 20 through November 11, 2020, the distribution of μ for the top 120 countries showed that the average of μ is 1.14, which is larger than 1, and the distribution cannot reach the stationary state.^[6] On the other hand, however, the Monte Carlo (MC) simulation showed^[1] that the distribution that conforms to the above-mentioned two different types distribution simultaneously can be formed during the transient period, i.e., the power-law for the upper tail distribution and the lognormal for the whole region.

In this subsequent report, the data were collected every week for the period of Nov. 14, 2020 (0th week, $t = 0$) through Aug. 7, 2021 (38th week, $t = 38$). From May 15, 2021 ($t = 26$), the numbers of deaths by country are also collected.

2. Results and Discussion

2.1 Cases by Country

Fig. 1 and 2 show the rank-size relationship on the designated dates, from $t = 0$ (Nov. 14, 2020) to 27 (May 22, 2021). Fig. 1 shows that the upper tail distribution conforms to the power law, while the whole distribution is represented by the lognormal distribution, as shown in Fig. 2. The power exponent, α was determined by the least square fit of the double logarithmic plot for the top 30 countries. Two characteristics found in Part 1^[1] are reconfirmed.

Fig. 3 shows the distribution of weekly reproduction

rate, μ obtained from the data between $t = 0$ and 27. The distribution can be approximated by the gamma distribution, represented by the following equation.

$$f(\mu) = \frac{\mu^{m-1}}{\Gamma(m)\eta^m} \exp\left(-\frac{\mu}{\eta}\right). \quad (6)$$

Two parameters, m and η are determined to be $m = 16.3$ and $\eta = 0.0609$.

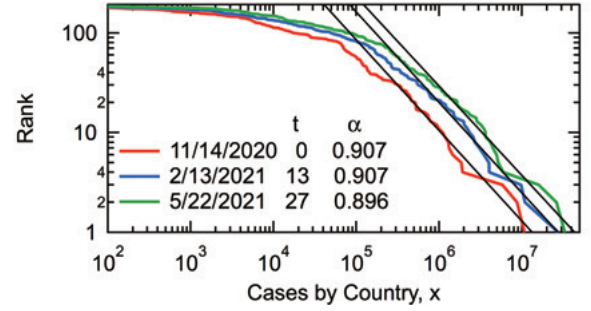


Fig. 1 Relationship between the rank of the country and the number of cases for the country. During this time period, the USA is ranked the first, and $rank = 1$ for the USA.

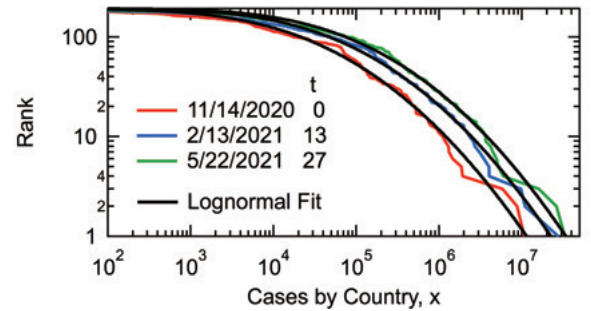


Fig. 2 Fitted curves by the lognormal distribution.

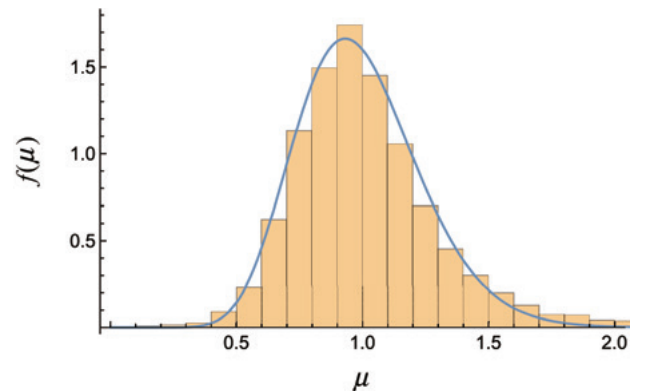


Fig. 3 Distribution of the weekly reproduction rate μ for the time period from $t = 0$ to 27. The solid curve is the fitted gamma distribution.

The average of the gamma distribution is given by

$$\bar{\mu} = m\eta, \quad (7)$$

which leads to $\bar{\mu} = 0.993$ and the distribution converges to the stationary state.

Yamamoto^[6] reported that the present discrete-time model leads to a stationary power-law tail with $rank \propto x^{-\alpha}$, if the following equation has a unique positive solution, α .

$$\int_0^{\infty} \mu^{\alpha} f(\mu) d\mu = 1. \quad (8)$$

Note that the left-hand side represents the expected value of μ^{α} .

For the gamma distribution, Equation (8) can be calculated to give

$$\int_0^{\infty} \mu^{\alpha} f(\mu) d\mu = \frac{\eta^{\alpha} \Gamma(m + \alpha)}{\Gamma(m)} = 1. \quad (9)$$

For the case with $m = 16.3$ and $\eta = 0.0609$, one obtains $\alpha = 1.24$.

To confirm if the stationary state α is equal to 1.24, the MC simulation was conducted. To determine the stationary state α accurately, the number of clusters (i.e., the total number of countries for the present problem) was set to be $N = 10^5$. The initial values used were $x_0 = 0$ and $\Delta x_1 = 1$ for all clusters. The random number that follows the gamma distribution with $m = 16.3$ and $\eta = 0.0609$ were used.

Fig. 4 shows the MC simulation results at $t = 10^3$ (blue) and $t = 10^4$ (red, broken). Note that the y-axis shows the upper probability distribution $CN(x)$, defined by Equation (1). Both curves overlap each other, and the distribution has already reached the stationary state at $t = 10^3$. It is confirmed that the upper tail follows the power-law distribution with $\alpha = 1.24$.

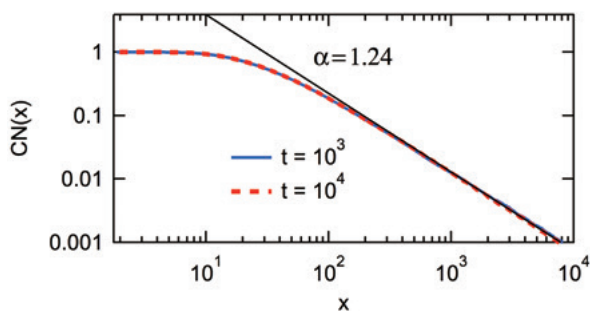


Fig. 4 MC simulation results to confirm the validity of $\alpha = 1.24$ at the stationary state.

In spite of the fact that the stationary distribution has a tail with $\alpha = 1.24$, the α -values shown in Fig. 1 are about 0.9 for all cases. Fig. 5 shows the determined values for each week up to the 27th week. The α -value is quite

stable and is about 0.9 throughout the time period. Does this discrepancy from the stationary state distribution mean that the present discrete-time stochastic model cannot be applied? To examine this, another MC simulation was conducted.

The value of x_1 was set to be equal to the actual data at $t = 1$, and Δx_0 was determined from the difference of x_1 and x_0 for each country. The simulation was done for $N = 179$ countries where Δx_0 is larger than 0. The distribution at $t = 27$ was simulated.

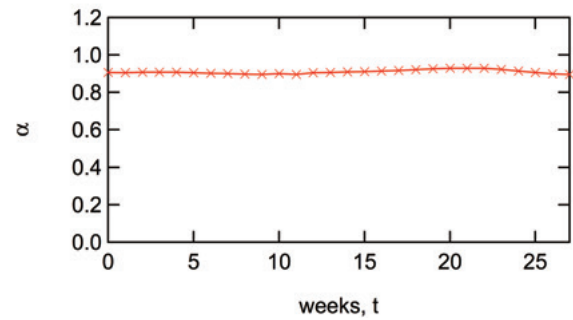


Fig. 5 Obtained α -values from $t = 0$ to 27.

The MC simulation was repeated for 100 times, and Fig. 6 shows all the simulated results, together with the actual data shown by the red line. The data (red) is within the range of 100 simulated results (colored dots).

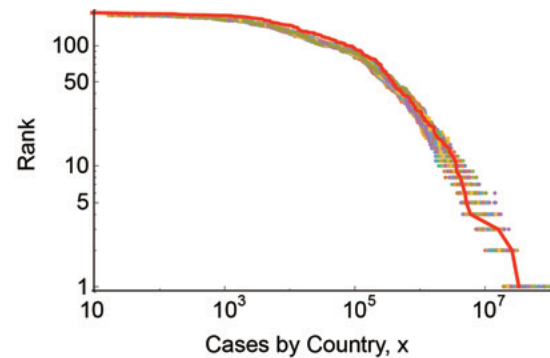


Fig. 6 Data at $t = 27$ (red) and the simulated results (colored dots).

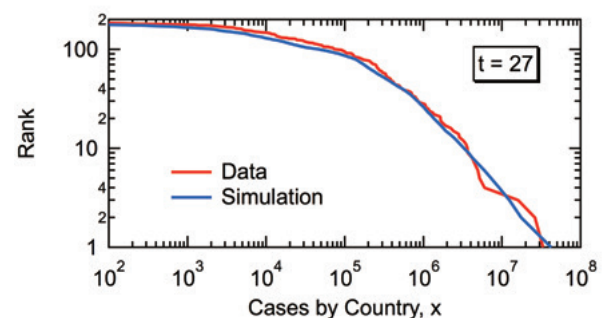


Fig. 7 Comparison between the data at $t = 27$ (red) and the average of simulated results (blue).

The blue line in Fig. 7 shows the average of the simulated results repeated 100 times, which agrees reasonably well with the actual data (red). The simulated results (blue) show two important characteristics: (1) the upper tail follows the power-law distribution with $\alpha = 0.9$, as shown in Fig. 8a, and (2) the whole distribution agrees well with the lognormal distribution, as shown in Fig. 8b.

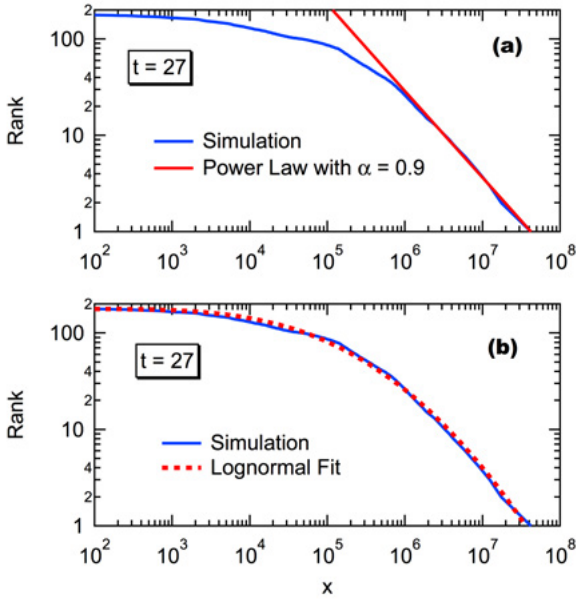


Fig. 8 MC simulation results (blue) at $t = 27$. Red line shows (a) the power law with $\alpha = 0.9$ and (b) the lognormal fit.

Although the convergent stationary distribution is the power-law distribution with $\alpha = 1.24$, as shown in Fig. 4, the MC simulation shows that a stable power-law distribution with $\alpha = 0.9$ holds throughout 27 weeks, which agrees with the actual data.

In order to further examine the robustness of the power law tail with $\alpha = 0.9$, the simulation for $t = 100$ was conducted. As shown in the green line in Fig. 9, the power law tail with $\alpha = 0.9$ is preserved even after 100 weeks. The power law tail is remarkably robust. As shown in Fig. 10, the overall lognormal distribution is also kept after 100 weeks.

Fig. 11 shows the actual data of α 's for the period from $t = 28$ to 38, and it is shown that $\alpha = 0.9$ persists. The power law distribution once formed seems to be rather robust and the power exponent α cannot be changed easily.

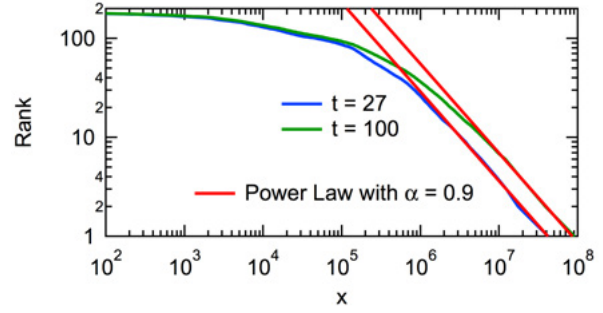


Fig. 9 Simulation results at $t = 27$ and 100. Both distributions possess the power law tail with $\alpha = 0.9$.

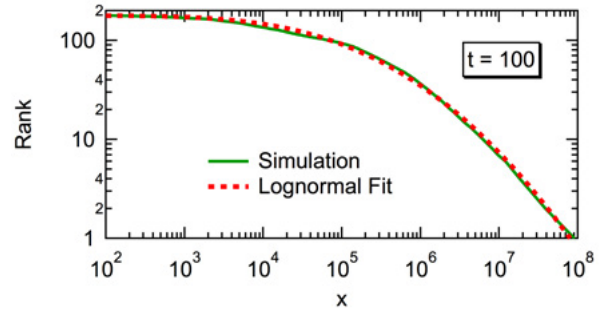


Fig. 10 Lognormal fit for the simulation results at $t = 100$.

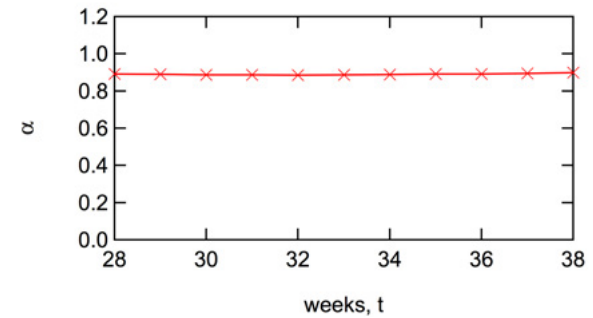


Fig. 11 Obtained α -value for the cases by country during the time period from $t = 28$ to 38.

2.2 Deaths by Country

Starting from May 15, 2021 ($t = 26$), the numbers of deaths by country were also collected. Fig. 12 shows the distribution of the number of deaths at $t = 38$. The distribution shows (1) the power-law tail and (2) good fit to the lognormal distribution. The fundamental characteristics are the same as for the cases by country. The power exponent determined from the top 30 countries is $\alpha = 0.85$ at $t = 38$.

Assuming that the fatality rate is almost the same for all countries, the number of deaths is expected to have the same power-law tail with $\alpha = 0.9$. Fig. 13 shows the power exponent for the deaths by country. The values are compared with those for the cases by country. The

α -values for the deaths ($\cong 0.85$) and the cases ($\cong 0.9$) are almost the same, but the deaths show slightly smaller α 's consistently. In general, smaller α indicates a wider disparity. This may imply the disparity of medical systems among countries.

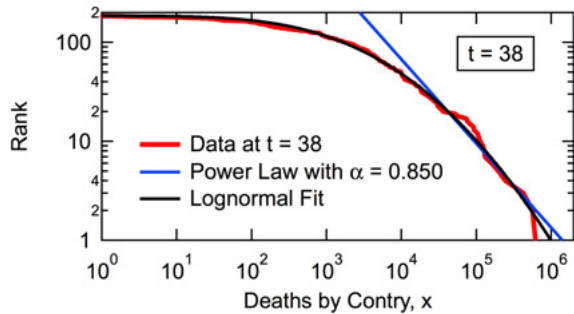


Fig. 12 Relationship between the rank of the country and the number of deaths for the country.

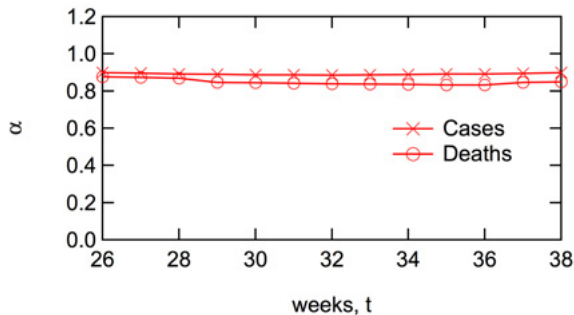


Fig. 13 Obtained α -value for the deaths by country, in comparison with cases by country, during the time period from $t = 26$ to 38.

Fig. 14 shows the fatality rate by country. Fatality rates of several countries are much higher than the average.

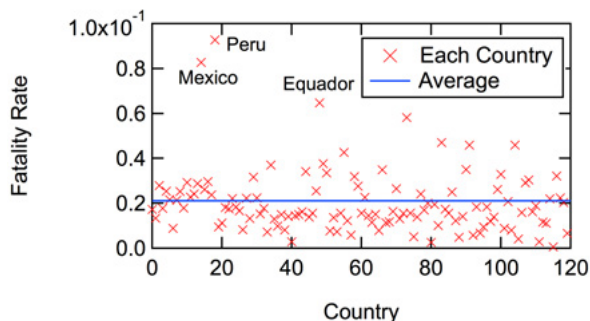


Fig. 14 Fatality rate by country as of August 7, 2021 ($t = 38$). The country order in the x-axis is the rank of the cases by country.

2.3 Power Exponent at the Critical Point

In the standard theory of gelation in polymer

science,^[8] the gel (critical) point is reached when the weight-average molecular weight goes to infinity. Various power-law relationships hold at the vicinity of gel point,^[4,5] which is known as the universality of the critical phenomena.

In order to cause polymeric gelation, the formation of cross-linkage that connects two different clusters is required.^[9] The molecular weight distribution at the gel point follows the power law, with $\alpha \leq 2$ at which the weight average goes to infinity.

On the other hand, in the branched structure of infection tree, no cross-linkage is formed. The elements are connected in one direction, and there exists only one start point in each tree. The expected size of the tree when one picks up such a start point randomly is the number-average size.^[10] For the infection tree, it is reasonable to consider that the critical point is reached when the number average goes to infinity. The number of cases in a country is the sum of a finite number of infection trees, and therefore, the critical point will be the same as for the tree. In the distribution having a power-law tail, the number average goes to infinity when the magnitude of power exponent is $\alpha \leq 1$.

Assuming that the μ -distribution follows the gamma distribution, Equation (8) reduces to Equation (9). The condition that yields $\alpha = 1$ is given by the following equation.

$$\eta m = \bar{\mu} = 1. \quad (10)$$

The number average goes to infinity when the average of μ reaches 1. In fact, Yamamoto^[6] showed that $\alpha = 1$, which is known as the Zipf's law, is obtained when the average of μ is 1, irrespective of the type of μ -distribution. In epidemiology, usual measure to suppress epidemic is to make the effective reproduction number, which corresponds to μ , smaller than 1.^[7] The condition to make $\alpha > 1$ conforms to this usual criterion.

In Part 1 of this series,^[1] the conditions to make the power exponent $\alpha > 2$ was considered, in order to suppress the pandemic. It is now shown that $\alpha > 1$ would be a better criterion for the suppression.

The μ data for $0 < t < 27$ give $m = 16.3$ and $\eta = 0.0609$, as shown in Fig. 3. In this case, $\bar{\mu} = 0.993$ and $\alpha = 1.24$. Because $\bar{\mu} < 1$, the pandemic is expected to be terminated if the present μ -distribution continues. The $\bar{\mu}$ -value ($= 0.993$) is very close to 1, but the α -value ($= 1.24$) of the stationary distribution is significantly larger than 1.

As could be recognized from Fig. 3 the values of $m =$

16.3 and $\eta = 0.0609$ are approximate. Assuming $m = 16.3$, it is straightforward to show that $\eta = 0.05955$ gives $\alpha = 2$ from Equation (9). The values of $m = 16.3$ and $\eta = 0.05955$ leads to $\eta m = \bar{\mu} = 0.971$.

Fig. 15 shows these two types of gamma distribution graphically. The difference is surprisingly small. It would be difficult to distinguish these two curves from the actual data. Considering small differences in the gamma distribution, the prevention criterion proposed in Part 1, based on $\alpha = 2$, might be still acceptable: (1) the average μ must be made smaller than 1 and (2) the time period for $\mu > 2$ must be made negligibly small. Safer condition of item (2) might be “the time period for $\mu > 1.5$ should be controlled to make as small as possible”.

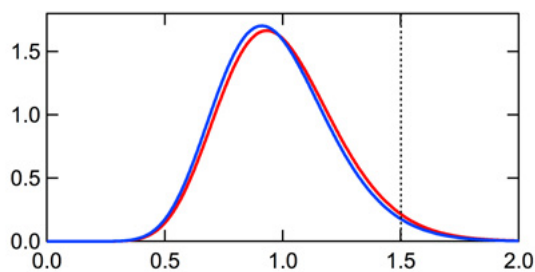


Fig. 15 Two types of gamma distribution. The red curve shows the case with $m = 16.3$ and $\eta = 0.0609$, and the blue curve is the case with $m = 16.3$ and $\eta = 0.05955$.

3. Conclusions

Following the analysis of the global cases of COVID-19 reported in Part 1 of this series,^[1] the data during November 14, 2020 (elapsed weeks, $t = 0$) through August 7, 2021 ($t = 38$) were used for the analysis in this report. Four important findings on the relationship between the rank and the number of cases by country reported in Part 1 are reconfirmed for the present time period. (1) The top countries approximately follow the power-law distribution, with $rank \propto size^{-\alpha}$. (2) The overall distribution is represented well by the lognormal distribution. (3) These two characteristics can be reproduced reasonably well by the discrete-time stochastic model that employs the weekly reproduction rate μ . (4) The distribution of μ can be approximated by the gamma distribution.

The μ -distribution determined for the time period from $t = 0$ to 27 predicts that the stationary distribution after a long time leads to have the power-law tail with $\alpha = 1.24$,

while the actual data show $\alpha = 0.9$ persistently throughout the investigated time period. This persistent α -value agrees with the MC simulation results. The power-law distribution once formed is quite stable, and the power exponent cannot be changed easily.

The number of deaths by country was investigated for the time period of $t = 26$ through 38. The relationship between the rank and the number of deaths shows the similar characteristics with the number of cases. (1) The distribution possesses the power-law tail and (2) the distribution is well fit to the lognormal distribution. The power exponent of the tail distribution was $\alpha = 0.85$, which is slightly smaller than that for the cases by country.

In order to keep the number average size finite, the magnitude of α must be larger than 1, which corresponds the condition with the average of μ smaller than 1. In order to suppress the pandemic, (1) the average μ must be made smaller than 1 and (2) the time period for $\mu > 1.5$ should be controlled to make as small as possible.

References

- [1] H. Tobita and M. Fujii: Mem. Fac. Eng. Univ. Fukui, **69**, 37-42 (2021).
- [2] COVID-19 Dashboard by the Center for Systems Science and Engineering at Johns Hopkins University, <<https://coronavirus.jhu.edu/map.html>>, (2020/04/11-2021/08/07).
- [3] B. Blasius: *Chaos*, **30**, 093123 (2020).
- [4] W. Gebhardt and U. Krey: *Phasenübergänge und kritische Phänomene*, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, Germany (1982). (Japanese translation, ISBN: 4-8427-0242-7)
- [5] D. Stauffer: *Introduction to Percolation Theory*, Taylor & Francis, London, UK (1985).
- [6] K. Yamamoto: *Phys. Rev. E*, **89**, 042115 (2014).
- [7] R.M. Anderson and R.M. May: *Infectious Diseases of Humans*, Oxford University Press, UK (1991).
- [8] P.J. Flory: *Principles of Polymer Chemistry*, Cornell University Press, Ithaca, USA (1953).
- [9] H. Tobita: *J. Polym. Sci., Part B, Polym. Phys.*, **36**, 2015-2018 (1998).
- [10] H. Tobita: *Macromol. Theory Simul.*, **5**, 1167-1194 (1996).

電力使用量予測のための深層学習手法

小松 大起* 黒岩 丈介** 小高 知宏** 諏訪 いずみ*** 白井 治彦****

A Deep Learning Method for Predicting Electricity Usage

Daiki KOMATSU*, Jousuke KUROIWA**, Tomohiro ODAKA**
Izumi SUWA*** and Haruhiko SHIRAI****

(Received September 30, 2021)

In this paper, we investigate how to apply deep learnings for multimodal inputs. The target problem is the prediction of power consumption, which enable us to control the operating time of each power plant in the short term and adapt the necessary amount of fossil fuels and other resources in the long term. In this paper, therefore, we perform the prediction of power consumption by using LSTM, which is a model that can handle time-series data. We employ the combination of temperature, precipitation and/or weather as multimodal inputs, which should be meteorological factors for the power consumption. The prediction is depend on the model structure and the combination of data.

Key words :Deep Learning, Machine Learning, Electricity Usage, LSTM

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災以降、低コストかつ効率的な発電方法であり全体の2割から4割を占めていた原子力発電は安全性に問題があるとされ2021年5月現在では停止中の2基も合わせて合計9基の原子力発電所が稼働するのみとなっている。^[1] それにより、原子力発電よりコストの高い火力発電での発電量が増え発電コストの増加による電気料金の値上げが生じ、我々消費者の負担増加に繋がっている。^[2]

電力使用量の予測を行うことができた場合、長期的

には季節ごとの電力使用量に基づいた最適な時期での化石燃料の調達、短期的には電力使用量が増える時間帯において各発電所の稼働状態を適切に決めることが可能であると考えられる。大まかな電力使用量の推移は経験から判別が可能であると思われるが、深層学習を用いて時系列データ予測を行うことによってより詳細な予測が可能となり、今後の計画を立てることができるようにと考えられる。^[3] 適切な予測を行い適切な量の電力供給や燃料調達を行うことができれば電力会社は過剰な発電や、供給不足による突発的に高コストな発電方法、効率の悪い発電方法を行う必要がなくなる。

近年、人工知能に関する多くの分野で情報処理技術として知的処理技術の一つである深層学習が用いられている。深層学習とは、ニューロンの層が多段に組み上げられたニューラルネットワークのことを指す。^[4] 深層学習が用いられる分野としては、人物の行動認識や表情認識に挙げられるような画像処理に関わるものや、話し言葉や書き言葉などの我々が普段使うような自然言語を対象として、それらの言葉が持つ意味を解析する自然言語処理や、株価や電気使用量など

* 大学院工学研究科 知識社会基礎工学専攻 知能システム科学コース

** Fundamental Engineering for Knowledge-Based Society Intelligent Systems Science Course,
Graduate School of Engineering

** 大学院工学研究科 知能システム工学講座

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

*** 仁愛女子短期大学

*** Jin-ai Women's College

**** 福井大学

**** University of Fukui

の予測にも用いられる。

そこで本研究の目的は、電力使用量のみを入力とした電力使用量予測では気象要因による変化を捉えきれないと考えられるため、気象要因を入力とした際に最適な入力の組み合わせを選択し、最適なモデル構造を見つけてより詳細な深層学習を用いた予測を実現することである。

2. 深層学習モデルについて

ニューラルネットワークとは、人間の脳の仕組みから着想を得たものであり、神経回路網をコンピュータ上で表現しようと作られた数理的モデルである。人間の脳はニューロンと呼ばれる神経細胞の結びつきで情報伝達や記憶の定着が行われており、その人間の脳神経系の持つ強力な学習能力を数学的に応用することにより、画像認識や音声認識などへの利用が期待され研究が行われている。通常ニューラルネットワークは、入力層、中間層、出力層から構成されており、これらの層と層の間にニューロン同士のつながりを示すシナプス結合荷重 W があり、これを重みと呼んでいる。ニューラルネットワークの中間層は多層にすることができ、中間層が多数存在する多層構造のニューラルネットワークを用いた手法を深層学習（ディープラーニング）と呼ぶ。

本節では、用いるニューラルネットワークモデルを中心として深層学習モデルについて概要の説明を行う。

2.1 RNN (Recurrent Neural Network)

ある時刻での中間層の出力を次の時刻の層の入力として利用できるような再帰的構造を持ったニューラルネットワークモデルのことを RNN (Recurrent Neural Network) と呼ぶ。RNN は 1986 年の David E. Rumelhart による研究に基づき開発されたモデルである。^[6] 前の時刻での中間層の出力を扱うことにより、ある時点での中間層の出力がそれ以降の出力にも影響を及ぼしていくことになる。そうすることにより過去の情報を扱うことになり、時系列データを扱うことができるようになっていく。時間を追って得られたデータを時系列データと呼び、画像などのデータが一つのベクトル \mathbf{x}_n で表されるのに対し、 $(\mathbf{x}(1), \dots, \mathbf{x}(t), \dots, \mathbf{x}(T))$ という T 個のデータが 1 つの入力データ群として扱われる。時系列データには、本実験でも扱っている気温の推移や降水量の変化などの気象データ、株価や売上の推移などが挙げられ、これらのデータは一般的なデータの集まりではなく、データの並び

自体に意味を持つ。RNN において、時刻 t での入力を $\mathbf{x}(t)$ 、入力層と中間層の間の重みを U 、また中間層と出力層の間の重みを W 、 f, g を活性化関数とすると中間層の出力値 $\mathbf{s}(t)$ とネットワークの出力 $\mathbf{y}(t)$ は、以下のように表すことができる。

$$\mathbf{s}(t) = f(U\mathbf{x}(t) + W\mathbf{s}(t-1)) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = g(W\mathbf{s}(t)) \quad (2)$$

2.2 LSTM (Long Short-Term Memory)

LSTM (Long Short-Term Memory) は RNN の拡張として 1997 年に Sepp Hochreiter 及び Jürgen Schmidhuber によって発表された時系列データを扱うモデルである。^[5] Long Term Memory (長期記憶) と Short Term Memory (短期記憶) という神経科学における用語から取られており、RNN はその構造上、時刻が離れているデータ間の依存関係を学習することが難しく、その弱点を克服するために開発されたモデルが LSTM である。LSTM は近い過去を扱うことのできる短期記憶と遠い過去を扱うことのできる長期記憶が可能である。LSTM は RNN の中間層を LSTM block と呼ばれるメモリと入力ゲート、忘却ゲート、出力ゲートの 3 つのゲートを持つブロックに置き換えることで実現されている。メモリは入力の依存性を記憶し、入力ゲートはメモリへ与える入力の調節を行い、忘却ゲートはメモリ中の値をどれだけ忘れるかを調節、出力ゲートはメモリ中の値のどれだけを活性化関数に与えるかの調節を行う。また、中間層の内部状態を以下のように表す。

$$\mathbf{f}(t) = \sigma_g(U_f\mathbf{x}(t) + W_f\mathbf{h}(t-1)) \quad (3)$$

$$\mathbf{i}(t) = \sigma_g(U_i\mathbf{x}(t) + W_i\mathbf{h}(t-1)) \quad (4)$$

$$\mathbf{o}(t) = \sigma_g(U_o\mathbf{x}(t) + W_o\mathbf{h}(t-1)) \quad (5)$$

$$\mathbf{c}(t) = \mathbf{f}(t) \odot \mathbf{c}(t-1) + \mathbf{i}(t) \odot \sigma_c(U_c\mathbf{x}(t) + W_c\mathbf{h}(t-1)) \quad (6)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{o}(t) \odot \sigma_h(\mathbf{c}(t)) \quad (7)$$

RNN と同じく入力層と中間層の間の重みを U 、中間層と出力層の間の重みを W 、 σ を活性化関数とすると、 $\mathbf{f}(t)$ は忘却ゲート、 $\mathbf{i}(t)$ は入力ゲート、 $\mathbf{o}(t)$ は出力ゲートでの活性化ベクトル、 $\mathbf{c}(t)$ はメモリの活性化ベクトル、中間層の出力値 $\mathbf{h}(t)$ とネットワークの出力値 $\mathbf{y}(t)$ は、以上のように示される。 \odot はアダマール積を示し、ベクトルの要素ごとの積を行う演算子である。また、本研究では LSTM を用いる。

3. 実験方法

本節では、入力に用いるデータについての詳細及び実際に用いるネットワークについての説明を示す。また本実験で用いるデータは、予測を行いたい電力使用量に加えて気温、降水量、天気などのデータを用いる。用いるネットワークはLSTMを用いる。

3.1 用いるデータについて

3.1.1 電力使用量

本実験では東京電力パワーグリッド社が提供している電力使用量のデータ2016年4月から2020年12月のデータを用いる。電力使用量の推移を図1から図5に示す。

図1、図2では、2019年と2020年の年間での電力使用量の推移を示している。それぞれ縦軸が電力使用量の 10^4 kW、横軸が日にちを示している。春と秋に使用量が減り夏と冬に使用量が増加するという、ともに同じような傾向が見て取れる。

図3から図5は2020年4月の第2週から第4週の電力使用量の推移を示している。こちらも同様に縦軸が電力使用量の万kW、横軸が時間を示している。図3より、赤系統の色は休日である土日を示し、青系統は平日を示している。通常は、平日の方が休日よりも活動が多いため電力使用量が増えていることを読み取ることができる。しかし、図4と図5を見ると外れ値的な動きをしている日があることが読み取れる。図4だと13日と18日、図5だと20日である。1日に100mm降ると大雨と呼ばれるがそれぞれ13日は132mmで18日は90mmと大雨に準ずる降水量であり、そのために電力使用量が増えたのだと考えられる。20日の場合は19日が平均気温 14.7°C 、21日が 14.2°C なのに対して 9.7°C と約 5°C 低下し、気温の低下により電力使用量の増加に繋がったのだと考えられる。このように電力使用量の推移は気温や降水量等の気象条件に左右されるため、電力使用量の予測には気象要因を考慮する必要があると考えられる。

3.1.2 気温

気温のデータは気象庁が提供している、2016年4月から2020年12月のデータを用いる。図6に各年の気温の推移を示す。縦軸が温度($^{\circ}\text{C}$)を示しており、横軸が日にちを示している。基本的には、他の年の気温の推移も同じく夏場を頂点とする負の2次関数の形をとっている傾向を読み取ることができる。

3.1.3 降水量

降水量のデータは気象庁が提供している、2016年4月から2020年12月のデータを用いる。例として2020年の降水量の推移を図7に示す。縦軸が降水量(mm)を示しており、横軸が日にちを示している。最大降水量だけを見ると8月から10月ごろ、4月ごろ、梅雨である6月ごろに多く降っていることを読み取

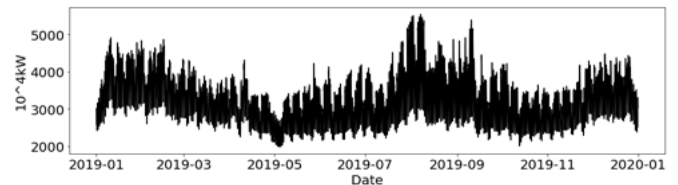


図1：2019年の電力使用の推移

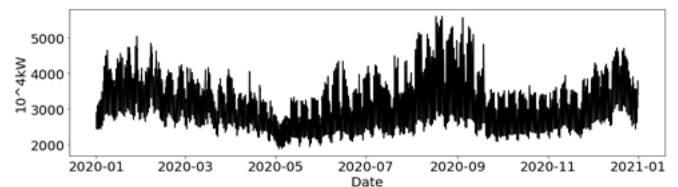


図2：2020年の電力使用の推移

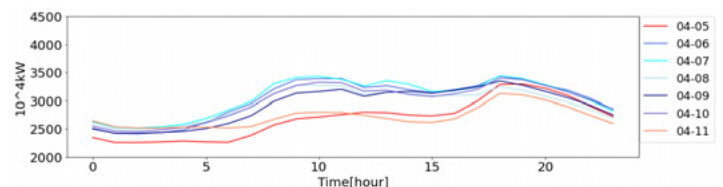


図3：2020年4月2週目の電力使用の推移

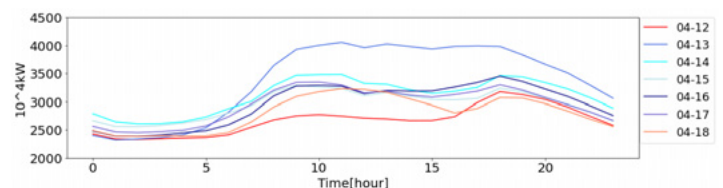


図4：2020年4月3週目の電力使用の推移

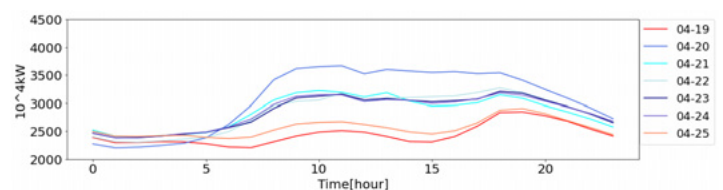


図5：2020年4月4週目の電力使用の推移

表 1: 天気概況による数値付け

天気概況	対応する数値
「快晴」	0.0
「晴」	0.0
「曇」	0.5
「薄雲」	0.5
「大風」	0.3
「霧」	0.6
「霧雨」	0.7
「雨」	1.0
「大雨」	1.0
「暴風雨」	1.0
「みぞれ」	1.0
「雪」	1.0
「大雪」	1.0
「暴風雪」	1.0
「地ふぶき」	1.0
「ふぶき」	1.0
「ひょう」	1.0
「あられ」	1.0
「雷」	1.0

ることができる。また、他の年の降水量の中には 200 mm を超えるような外れ値的な降水量を記録することもある。

3.1.4 天気

天気のデータは気象庁が提供している、2016 年 4 月から 2020 年 12 月のデータを用いる。本研究では、天気を入力として扱う際に雨を 1.0、曇りを 0.5、晴れを 0 として各天候に数値付を行なった。各天気概況における数値付けを表 1 に示す。例として 2020 年の天気の推移を図 8 に示す。また、縦軸は天気を与えた数値、横軸は日にちを示す。雨を示す数値が 1.0 の点を見ると大まかに降水量が多かった期間において雨の数が増えている傾向を読み取ることができる。

3.2 データ間の相関関係

データ間の特性が離れすぎていると入力として適切ではないと考えられるため、これらのデータ間の相関関係について調べる。相関関係は相関係数を用いて計算を行なった。本計算は python の拡張モジュールである数値計算を行うためのライブラリ numpy を用

表 2: 電力使用量と各項目の期間ごとの相関係数

	気温	降水量	天気
時間	0.085	-0.024	-0.014
日にち	-0.069	-0.069	-0.13
週	-0.075	-0.20	-0.050

いた。また、相関係数 r は以下の数式で示される。

$$r = \frac{S_{XY}}{S_X \times S_Y} \quad (8)$$

S_X は X の標準偏差、 S_Y は Y の標準偏差、 S_{XY} は X と Y の共分散を示す。また、電力使用量は時間ごとのデータが与えられているため、それらを足し合わせたものを日にちごとのデータと週ごとのデータとして用いている。それ以外のデータについては公開されている時間ごとのデータから平均を算出することで日にちごとと週ごとのデータとして扱っている。

それぞれの期間ごとの相関係数を見ると、時間ごとでは気温との間に全体で唯一の正の相関を持っていることがわかる。また、日にちごとでは天気との間に強い負の相関を持ち、週ごとでは降水量との間に強い負の相関を持っていることがわかった。

3.3 用いるモデル構造について

本実験では、電力使用量の予測に LSTM を用いる。プログラミング言語には python を用いて、主に python のライブラリである tensorflow-1.15, pandas-1.2.4, numpy-1.18.5, scikit-learn-0.24.2 を用いて実装を行なった。

tensorflow は Google が開発したディープラーニングのフレームワークとして知られるオープンソースの機械学習ライブラリである。また、tensorflow はオープンソースのニューラルネットワークライブラリとして知られている keras と統合されたため tensorflow からインポートすることにより keras の機能を用いることが可能となっている。tensorflow は機械学習において直感的な構造の構築が可能となっている。

pandas 及び numpy はデータを扱うためのライブラリとして知られており様々な計算処理を行うことができる。相互に変換が可能であるためデータの用途によって使い分けることが可能である。

scikit-learn は主に機械学習のアルゴリズムを実装する際に用いられるライブラリであり、本実験では RMSE (Root Mean Square Error) を用いたモデルの

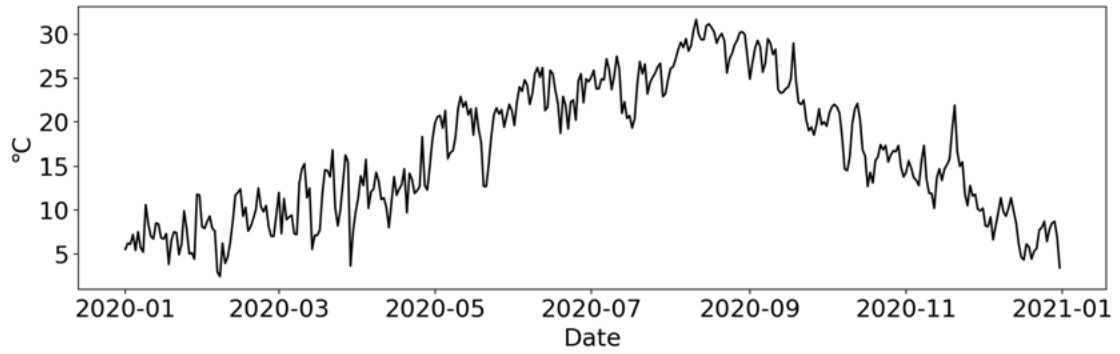


図 6 : 気温の推移

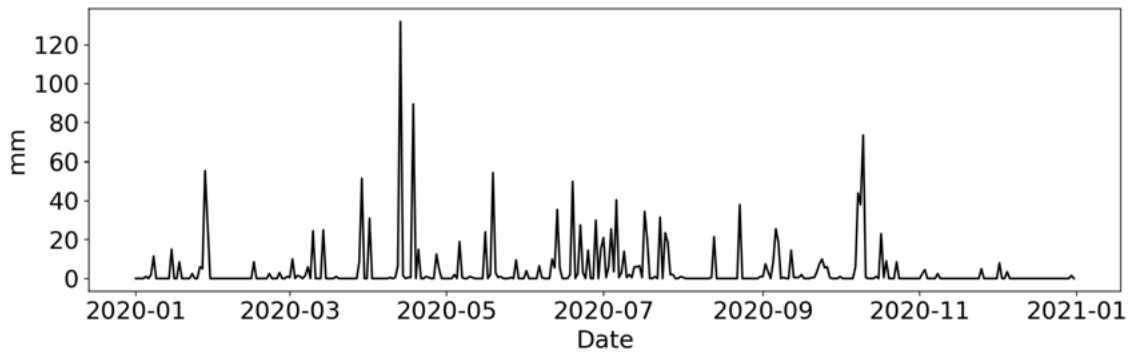


図 7 : 降水量の推移

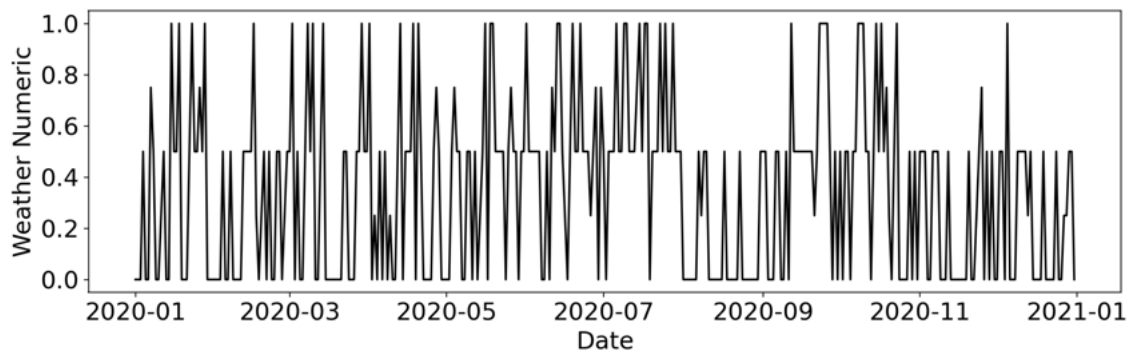


図 8 : 天気推移

評価に使用した。また、numpy 及び本実験では用いていないが scipy とのやりとりのみに対応しているため pandas で扱ったデータを numpy 形式に変換する必要がある。

本実験で用いる入力には時間ごと、日にちごと、週ごとそれぞれにおいて電力使用量に加えて気温、降水量、天気それぞれの組み合わせを入力として扱う。具体的な入力には電力使用量に加えて気温、降水量、天気、気温と降水量、気温と天気、降水量と天気、気温と降水量と天気、各々電力使用量とともに入力として与えた場合、及び電力使用量のみを入力とした場合で実験を行った。また Train data と Test data は入力を 8 対 2 として分割を行い、予測結果は時間ごとなら 1 時間後、日にちごとなら 1 日後、週ごとなら 1 週後の結果の予測を行った。最適化アルゴリズムには Adam を用い、学習率の初期値は 0.001 とし、バッチサイズは時間ごと 64、日にちごと 3、週ごと 1 として、epoch 数は validation loss が 10 回以上改善しなくなるまでとした。また層数は 1 層、2 層、3 層と変化させ、中間層の素子数は 100 個、200 個、300 個と変化させて電力使用量の予測を行った。予測結果の評価には RMSE を用いた。

3.3.1 RMSE (Root Mean Square Error)

本実験で用いる指標である RMSE は、平均平方根二乗誤差と呼ばれ、入力と予測結果の誤差が大きいほど大きい値になる特徴を持つ評価指標である。そのため、値が大きく変動する点での予測の評価を主に行いたい本実験では適した指標であると考えられる。また、RMSE は以下の式で表される。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

上記の n はデータ数を、 y と \hat{y} は入力と予測値を示す。

4. 実験結果

時間ごと、日にちごと、週ごとの予測結果の推移を図 9 から図 11 に示す。それぞれの結果において、気温、降水量、天気、気温と降水量、気温と天気、降水量と天気、気温と降水量と天気、各々電力使用量とともに入力として与えた場合、及び電力使用量のみにおいて層数を 1 層、2 層、3 層と変化させ、素子数をそれぞれ 100 個、200 個、300 個としたときの結果を示している。

一番精度の良い予測結果はそれぞれ、時間ごとでは電力使用量のみを入力として、層数 2 層、素子数 300 個の時に RMSE が 0.0130、日にちごとでは気温と降水量を入力として、層数 3 層、素子数 100 個の時に RMSE が 0.0744、週ごとでは気温と降水量と天気を入力として、層数 2 層、素子数 200 個の時に RMSE が 0.0972 という結果を示した。時間ごとの予測結果の下位 4 つでは必ず気温の情報が入力として与えられていた。日にちごとの予測結果では、時間ごとの予測結果と比較して層数が少ない時に比べて、層数を増やした際の予測結果のばらつきが見られた。週ごとの予測結果では、下位 3 つが入力として気温を含んでいることがわかった。

5. 考察

予測精度は週ごと、日にちごと、時間ごとの順で高くなっていることがわかる。時間ごとではデータ数が多く、単純に日にちごとは時間ごとの 24 分の 1 そして週ごとはさらに 7 分の 1 のデータ数になっていることから、データ数が減ってしまうため予測精度の低下が見られたのだと考えられる。

時間ごとの予測結果では、一番精度が良い入力には電力使用量のみを入力とした場合であった。時間ごとの予測の際には予測を行うにあたり十分な量のデータがあったと考えられるため、入力として複雑になりすぎない電力使用量のみを入力とした時に精度の上昇が見られたのだと考えられる。また、精度の下位 4 項目では全て気温を入力として含んでいることがわかった。時間ごとの気温は電力使用量と唯一正の相関をもっていることから正の相関を持つことが精度の低下につながる可能性があると考えられる。

日にちごとの予測結果では、気温と降水量を入力した際に精度が一番良いことがわかった。しかし、他の項目でも時間ごと、週ごとの結果と比べて差が小さいことがわかった。気温、降水量、天気それぞれを入力した際には、相関係数の値の順で精度が高いことがわかった。時間ごとの予測は日にちごと、週ごとと比較して安定しているためデータ数が適していると考えられる。

週ごとの予測結果では、気温と降水量と天気を入力した際に精度が一番高かった。精度の下位 3 つが気温を入力に含んでいることがわかった。下位の予測結果の全てが気温を含んでいるわけではないが、時間ごとのデータにおいて電力使用量と正の相関をもっている気温が入力として含まれることで精度が下がってしまっているため週ごとのデータにおいても相関係

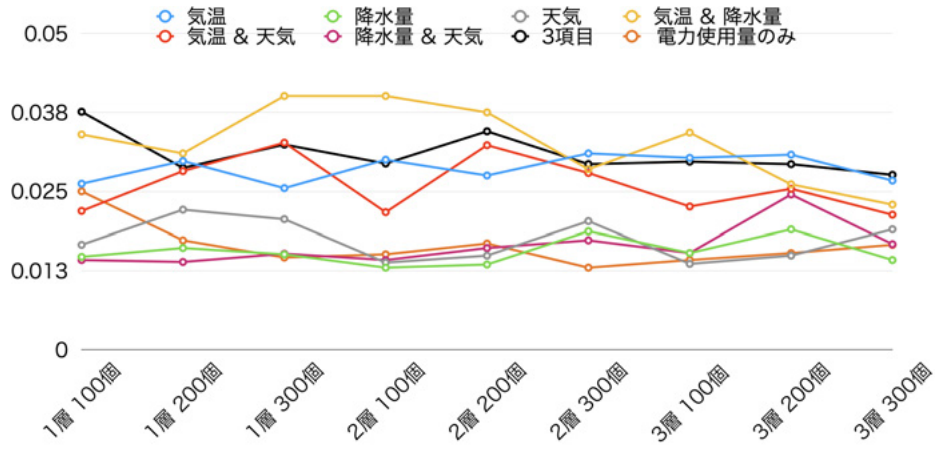


図 9：時間ごとの予測結果

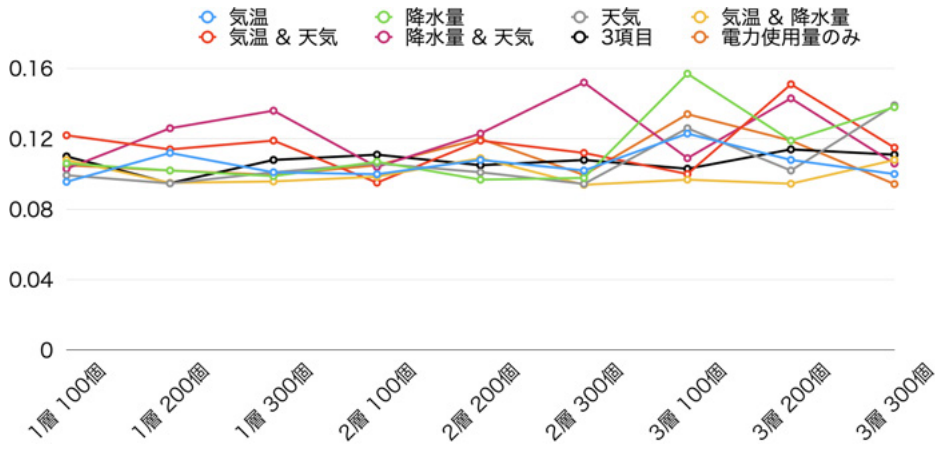


図 10：日にちごとの予測結果

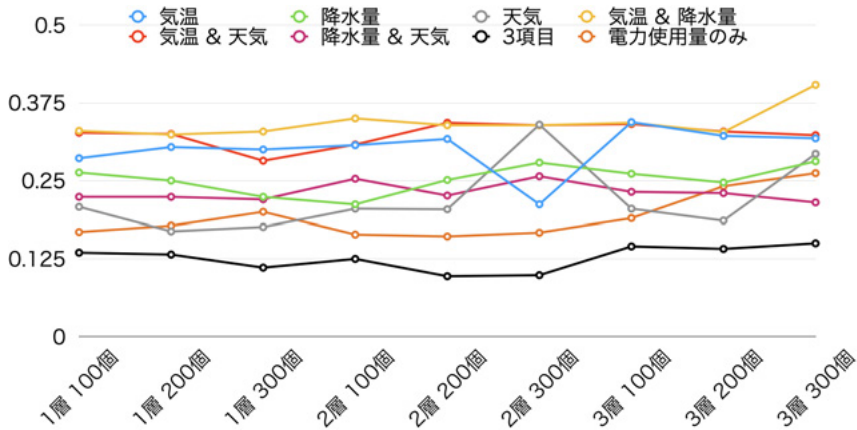


図 11：週ごとの予測結果

数以外の関係が存在していると考えられる。

また、層数は時間ごと、日にちごと、週ごとそれぞれにおいて2層及び3層の場合に良い精度を示していることから1層だと単純であるためこのデータ数を扱うためには、2層以上のモデルが適しているのだと考えられる。素子数については、数によって大きな差が見られないことから層数よりは重要視する必要のない項目であると考えられる。

以上のことから、精度の上昇には層数が少なすぎないモデルを用いること、データ数を増やすことが適していると考えられる。

6. まとめ

本研究では、気温、降水量、天気を組み合わせてマルチモーダルな入力として電力使用量の予測を行なった。その際には総数や素子数のモデル構造の変更を行い、RMSEの値による精度の違いを調べた。期間ごとの最良な予測結果はそれぞれ、時間ごとでは電力使用量のみを入力として、層数2層、素子数300個の時にRMSEが0.0130、日にちごとでは気温と降水量を入力として、層数3層、素子数100個の時にRMSEが0.0744、週ごとでは気温と降水量と天気を入力として、層数2層、素子数200個の時にRMSEが0.0972という結果を示した。相関係数による精度の違いも確認することができたが、精度向上に最適なのはデータ数が多いことだとわかった。

6.1 今後の展望

本実験では全ての入力を始めから等しく入力として扱うことで電力使用量の予測を行なったが今後作成したいモデルとして考えているモデルが電力使用量のみを主な入力として、他の項目を最終的な調節に用いることのできるモデルの作成を考慮する。時間ごとの予測では相関係数による精度の違いを見ることができたが、週ごとの予測では規則性は見つかったものの、相関係数でそれを示すものはなかったため他の関係性の評価を行うことを考える。また、RMSEを評価指標として用いたが、他の評価指標も用いることで結果を多角的に見られるようにしたいと考える。

参考文献

- [1] 日本の原子力発電所の状況, <
<https://www.enecho.meti.go.jp>> (2021/09).
- [2] 松尾 雄司, 永富 悠, 村上 朋子: 有価証券報告書を用いた火力・原子力発電コスト構造の分析, Journal

of Japan Society of Energy and Resources, Vol.33, No.5, 1-2(2012).

- [3] 鎌田 真, 市村 匠: リカレント構造適応型 Deep Belief Network による時系列データの学習, 計測自動制御学会論文集, Vol.54, No.8, 628-639(2018).
- [4] 浅川伸一: python で体験する深層学習, コロナ社, 302-303(2016).
- [5] Sepp Hochreiter, Jurgen Schmidhuber: Long short-term memory, Neural Computation, 9(8), 1735-1780(1997).
- [6] David E. Rumelhart, Geoffrey E. Hinton, Ronald J. Williams: Learning representations by back-propagating errors, Nature, 323, 533-536(1986).

ひきこもり者支援のための 会話システムの実現に向けて

池本 武史* 黒岩 丈介** 小高 知宏** 諏訪 いずみ*** 白井 治彦****

Realization of Conversation Support System for Social Withdrawal

Takeshi IKEMOTO*, Jousuke KUROIWA**, Tomohiro ODAKA**
Izumi SUWA*** and Haruhiko SHIRAI****

(Received September 30, 2021)

In this paper, we develop a conversation support system with virtual agents for socially withdrawn persons. In order to solve a problem of withdrawn persons it would be important to provide an opportunity for conversation. In this study, we develop a conversation system on Unity, which has functions to converse using chatting or listening while empathizing with the user, and to record the contents of the conversation and provide them to counselors and other supporters.

Key words : Virtual Agent , Support System , Socially Withdrawn Persons

1. はじめに

本論文では、仮想エージェントを用いた、ひきこもり者支援のための会話システムについて研究を行なった。

ひきこもりとは、厚生労働省によると、「社会参加(修学・就労・交遊など)を回避し、原則的には6ヶ月以上にわたっておおむね家庭にとどまり続ける状態」のことである。^[1] ひきこもり問題は1970年ごろに認知され始め、1990年代の終わりまで若者の問題として日本社会で広く扱われていた。だが、時が経ち、当時の若者が中高年になっていき、現在は中高年のひきこもりが多く期間が長期化している。こうしたひきこもりの長期高齢化は、「8050問題」と呼ばれる社会問題に繋がる。8050問題とは、50代のひきこもりの中高年の子供と80年代の高齢の親が孤立するという問題であ

る。2018年12月の内閣府調査によると、40歳から64歳のひきこもりの人は、全国推計で61万人になる。^[2]

ひきこもりの長期化の問題として、まず、社会的な時間感覚が失われて生活リズムがみだれる。次第に人とのコミュニケーションが不足する。そして、気力がなくなりさらに生活リズムがみだれる、という悪循環に陥ることが問題として挙げられる。この問題を解決するためのアプローチとして、我々は、ひきこもり者の会話のきっかけ作りが必要であると考えた。

先行研究で、自己表現が苦手な児童を対象とした、仮想エージェントを用いたバーチャル会話トレーニングの研究が行われている。^[4] これは、音声認識を用いて男子生徒・女子生徒・校長先生の3人を想定した仮想エージェントと会話トレーニングするシステムである。仮想エージェントとは、ユーザーの問いかけに、人工知能、機械学習、自然言語処理などを介して対応する、CGやアニメーションにより作成した仮想のキャラクターのことである。よって、我々は、ひきこもり者と対象として仮想エージェントを用いた会話システムが開発可能ではないかと考えた。また、ひきこもり者支援システムの先行事例として、「Warokuパブリックヘルス」というクラウド型相談業務システムがある。^[5] これは、支援団体がそれぞれ作成・保管し

* 大学院工学研究科 知能社会基礎工学専攻

** 知能システム工学講座

*** 仁愛女子短期大学

**** 福井大学

* Fundamental Engineering for Knowledge-Based Society,
Graduate School of Engineering,
Graduate School of Engineering

** Department of Human and Artificial Intelligent Systems

*** Jin-ai Women's College

**** University of Fukui

ていた相談記録や成育環境情報をクラウド上で保存し、支援窓口間で共有するシステムである。この事例から、ひきこもり者と会話システムのやり取りの記録を保持できる機能が重要だと考えた。将来、このような情報共有システムに会話記録を保持できれば、その情報をカウンセラーがひきこもり者との会話に生かすことができると考えるからである。

以上により、本研究の課題であるひきこもり者の会話のきっかけ作りのために、仮想エージェントを用いた、会話ログ保存が可能な会話システムの開発を行うことにした。具体的には、まずひきこもり者が、テキスト入力や音声認識を通じて仮想エージェントと会話を行い、会話のきっかけ作りをする。そして、この時の会話をログ保存して、その情報をカウンセラーがひきこもり者との会話に生かすことができるシステムを開発する。

2. システムの機能分析

本研究では、ひきこもり者の会話のきっかけ作りを行う会話システムを開発する。この章では、会話システムに必要な機能について述べる。

ひきこもり者支援のための会話システムとして求められる機能を考えるにあたって、カウンセリングの手法に注目した。カウンセリングの初期段階では、対象者の抱える問題の明確化し、問題の設定を行うことが重要である。^[3] これを行うには、ひきこもり者と信頼を築き、情報を集めることが重要であると言われている。よって、ひきこもり者の情報収集を行う機能が重要だと考える。

ひきこもり者の情報収集の方法として、カウンセリングの手法である、雑談と傾聴に注目した。雑談は、自己に関することや会話者の興味・関心など広範な話を扱うことができる。^[6] よって、雑談はひきこもり者の特徴を知るための情報収集に必要な機能だと考えた。

また傾聴とは、相手の話を否定せず、立場や気持ちに共感しながら会話することである。よって、傾聴を用いて話のペースや気持ちに合わせながら話すことで、ひきこもり者との信頼関係の構築に繋がるのではないかと考えた。

これらを踏まえて、本研究で目指す会話システムは以下のように考えた。エージェントが相手に「共感」しつつ、「雑談」と「傾聴」を用いて会話をして「情報収集」する。そして、ひきこもり者の「会話のきっかけ作り」を行う、システムである。目指すシステムのイメージ図を図1で示す。ひきこもり者と会話システムとの会話のやり取りを通じ、情報収集を行う。そして、システムから提供された情報をカウンセラーは

ひきこもり者との会話内容に利用するというシステムの流れである。以上により、本システムに必要な機能は大きく分けて以下の4つである。

1. **雑談会話機能**：ユーザーが入力した会話文に対して、雑談文を生成しエージェントが応答する機能である。
2. **傾聴会話機能**：ユーザーが入力した会話文に対して、傾聴文を生成しエージェントが応答する機能である。
3. **感情応答機能**：ユーザーが会話入力した際の感情値を抽出し、エージェントが感情値に応じた応答をする機能である。この機能によって、ユーザーに共感をしながら応答することが可能になると考える。
4. **会話ログ保存機能**：ユーザーの会話文とエージェントの応答文をログとして保存する機能である。これにより、ユーザーの興味・関心のある話題について情報収集することが可能になると考える。また、カウンセラー等に支援者に情報を提供することも可能であると考えられる。

3. ひきこもり者支援のための会話システムの設計

システムの構成とデータの流れについて述べる。2章で述べた4つの必要な機能をふまえてシステム開発するために、以下のより詳細な11の機能に分けて考えた。また、今回実装したシステムの構成図を図2で示す。

3.1 発話文入力機能

テキスト文入力でユーザーの発話文を受け取る機能である。受け取った発話文は、応答文生成機能と会話ログ保存機能に送られる。またテキスト文入力時、感情分析機能を実行させる。データの流れとしては、GUI上のテキスト入力フォーム上で入力された文字

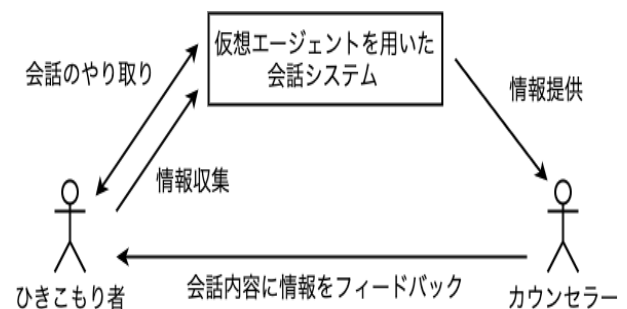


図1 会話システムのイメージ図

列データを、応答文生成機能と会話ログ保存機能に送る流れである。

3.2 音声認識機能

マイクからの音声入力によってユーザーの発話音声を文字起こしして、発話文として受け取る機能である。受け取った発話文は、応答文生成機能と会話ログ保存機能に送られる。また音声入力時、感情分析機能を実行させる。データの流れとしては、マイク入力した発話文の音声データを API に送り、API で変換された発話文の文字列データを受け取って、応答文生成機能と会話ログ保存機能に送る流れである。

3.3 感情分析機能

テキスト文入力か音声入力をした時のユーザーの表情画像を端末のカメラから取得し、感情値を分析する機能である。表情画像から抽出した感情値は、エージェント応答機能に送られる。データの流れとしては、GUI 上で取得した表情画像を API に送り、API で抽出された最も可能性の高い感情の種類をエージェント応答機能に送る流れである。

3.4 応答文生成機能 (雑談文生成)

発話文入力機能や音声認識機能から送られてきたユーザーの発話文に対して、エージェントの雑談応答文を生成する機能である。生成した雑談応答文は、音声合成機能と会話ログ保存機能と応答文表示機能に送られる。データの流れとしては、発話文入力機能や音声認識機能から送られてきた、発話文の文字列のデータを API に送り、API で生成した雑談応答文の文字列データを、音声合成機能と会話ログ保存機能と応答文表示機能に送る流れである。

3.5 応答文生成機能 (傾聴文生成)

発話文入力機能や音声認識機能から送られてきたユーザーの発話文に対して、エージェントの傾聴応答文を生成する機能である。生成した傾聴応答文は、音声合成機能と会話ログ保存機能と応答文表示機能に送られる。データの流れとしては、発話文入力機能や音声認識機能から送られてきた、発話文の文字列のデータを API に送り、API で生成した傾聴応答文の文字列データを、音声合成機能と会話ログ保存機能と応答文表示機能に送る流れである。

3.6 音声合成機能

応答文生成機能から受け取ったエージェントの応答文を合成音声に変換する機能である。生成した合成音声は、エージェント応答機能に送られる。データの流れとしては、応答文生成機能から受け取ったエージェントの応答文の文字列データを API に送り、API で音

声データに変換されエージェント応答機能に送る流れである。

3.7 エージェント応答機能

感情分析機能から受け取った感情値や音声合成機能から受け取った応答文の音声に応じ、エージェントに表情や身体の動作と発話を指示する機能である。データの流れとしては、感情分析機能から受け取った最も可能性の高い感情の種類をアニメーション制御機能に送り、それに合う表情や身体の動作のアニメーションファイルを受け取ってエージェントを制御する。また、音声合成機能から受け取った応答文の音声データをリップシンク機能に送り、エージェントの口を動かすパラメータを受け取って、エージェントに発話の指示を出すという流れである。

3.8 アニメーション制御機能

エージェント応答機能からのリクエストに応じ、エージェントの表情と体の動きを制御する機能である。データの流れとしては、エージェント応答機能から受け取った感情の種類に合った、表情や身体の動作のアニメーションファイルをエージェント応答機能に送信する流れである。

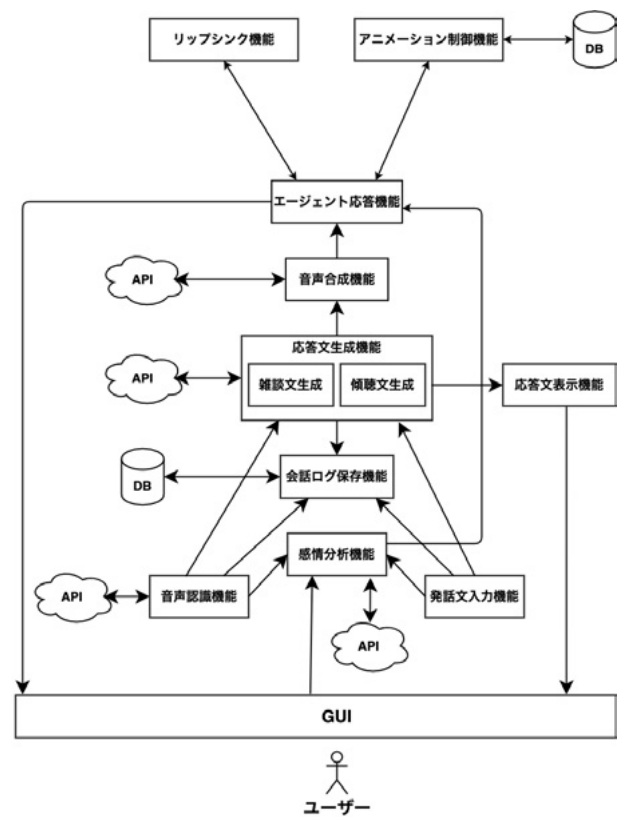


図 2 システムの構成図

3.9 リップシンク機能

エージェント応答機能から受け取った音声データに応じアバターの口の動きを制御する機能である。データの流れとしては、エージェント応答機能から受け取った音声データを再生して音域を測定し、エージェントの口を動かすパラメーターを決めてエージェント応答機能に送るという流れである。

3.10 応答文表示機能

応答文生成機能から受け取ったエージェントの応答文を画面表示する機能である。データの流れとしては、応答文生成機能から受け取ったエージェントの応答文の文字列データを、GUIのテキスト文表示パネルに送るという流れである。

3.11 会話ログ保存機能

発話文入力機能や音声認識機能から送られたユーザーの発話文と、応答文生成機能から送られたエージェントの応答文を外部に保存する機能である。データの流れとしては、ユーザーの発話文とエージェントの応答文の文字列データと送信した時間を外部ファイルに保存するという流れである。

4. ひきこもり者のための会話システムの実装

4.1 システムの開発環境

本システムの開発に用いたツールやライブラリについて述べる。開発 PC は MacBook Pro 2019 を使用する。総合開発環境者 Unity を利用し、開発エディタには、Visual Studio Code を使用する。プログラミング言語には C# と Python を用いる。

4.1.1 Unity について

Unity とは、Unity Technologies が開発・販売している、Web ブラウザ、デスクトップ PC、ゲーム機、モバイル向けのゲームやアプリケーションなど、複数の機種に対応したゲームエンジンである。ゲームエンジンとは、ゲームを簡単に作るための支援をするツールで、ゲームに必要な映像や音などの処理を行い、開発を効率化してくれる。

4.1.2 Visual Studio Code について

VSCode (Visual Studio Code) とは Microsoft が開発している、Windows・Linux・macOS 用のソースコードエディタである。このエディタは誰でも無償で利用できる。また、カスタマイズ性が高く、テーマやキーボードショートカット、環境設定を変更することができる。他にも、拡張機能をインストールして機能追加をすることができる。今回は、拡張機能によって Unity と連携し C# と Python のプログラム作成を行う。

4.1.3 使用する公開 API (Application Programming Interface) について

本システムで利用する API について述べる。API とは、ソフトウェアやプログラム、Web サービスの間をつなぐインターフェースのことである。つまり API を用いることで例えば、異なるソフトウェアやサービス間でチャット機能を共有したり、片方から数値データを取り込んで別のプログラムでそれを解析したりできるようになる。API を公開するとは、ソフトウェアに API という窓口を作り、外部のアプリと連携できる状態にするということである。本システムの開発では以下の、4 つの 公開 API を使用する。

- **Google Cloud Speech-to-Text** : Google 社が提供する、音声文字変換 API である。音声データをこの API に送信すると、テキスト文に変換されて受け取ることができる。この API を用いることで音声認識による発話文生成・入力が可能になる。
- **A3RT(読みは「アート」)** : 機械学習や深層学習といった技術を、リクルートテクノロジーズ社が外部提供している API 群である。現在、11 種類の API が提供されている。その中でも本研究では、Talk API という API を使用する。この API は、チャットボットを作成するための API である。テキスト文をこの API に送信すると、RNN (Recurrent Neural Network) を用いて応答文を生成して受け取ることができる。RNN とは、数値の時系列データなどを認識するように設計された、ニューラルネットワークモデルである。つまり RNN は、過去の情報を記憶しその情報に従い新しい事象を処理することが可能である。この API を用いることで雑談文生成が可能になる。
- **Amazon Polly** : Amazon Web Services 社が提供する、深層学習を用いて文章をリアルな音声に変換するサービスである。この API では、数十におよぶ言語と自然な男女の音声を利用することができる。テキスト文をこの API に送信すると音声データに変換され、受け取ることができる。
- **Amazon Rekognition** : Amazon Web Services 社が提供する、機械学習を使用して画像と動画の分析を自動化するサービスである。画像の検索・検証・整理を実施し、画像内の物体・場面・顔の検出、有名人の認識、画像の比較などを行うことができる。例えば、表情画像をこの API に送信すると、画像から感情分析されて感情値を受け取ることができる。また感情値は次の 8 種類に分類さ

れる。Happy (幸せ)・Angry (怒り)・Surprised (驚き)・Confused (困惑)・Disgusted (呆れる)・Calm (穏やか)・Fear (恐れ)・Sad (悲しい)の8種類である。

4.1.4 Flask について

他にも、Unity のプロジェクトフォルダ外の Python ファイルを Unity で実行するために、Flask を用いた。Flask とは、Python で利用できる Web アプリケーションフレームワークである。これによって Python で簡単な Web API を作成することができる。そして、Unity で実行する C# のプログラムから API 通信を行うことで作成した Web API を利用することが可能になる。API の中でも、HTTP 通信によりやりとりを行うものを Web API という。

4.1.5 MeCab について

また、形態素解析エンジンである MeCab も利用する。MeCab とは、京都大学情報学研究所と日本電信電話株式会社コミュニケーション科学基礎研究所の共同研究で開発されたツールである。形態素解析とは、言語の文法や品詞の情報を利用し、文章を形態素(意味を持つ最小単位の単語)に分解する解析である。例えば、「趣味の話をしたと思います。」という文章を、MacBook のターミナル上で MeCab を実行し解析した結果は、「趣味 | の | 話 | を | し | たい | と | 思 | います | 。」と、品詞ごとに 10 個の形態素に分けられる。

4.2 Unity の導入方法

以下で、Unity の導入手順について述べる。

1. ダウンロードページから、Unity Hub をダウンロードする。Unity Hub とは、Unity のバージョン管理ツールであり、Unity をアップデートしたら動かなくなるという事態を回避するために必要である。
2. Unity Hub をダウンロードできたら、それを起動し、メニューのインストールから、Unity をインストールする。今回は、Unity 2020.3.6.f1 バージョンをインストールする。
3. インストールが終わった後、メニューの [プロジェクト] → [新規作成] の手順で、プロジェクト新規作成画面に移動する。プロジェクトとは、Unity で一つのゲームを製作するのに、使ったもの全てを収納したフォルダのことである。
4. プロジェクト新規作成画面で、プロジェクトの名前とプロジェクトの保存先を指定する。プロジェクトのテンプレートは、本研究では 3D を選択する。
5. 作成を選ぶことで、新規のプロジェクトが作成され、Unity を使用できるようになる。

4.3 Visual Studio Code の環境構築

VSCoDe の環境構築手順について述べる。

1. **VSCoDe をインストールする**：VSCoDe の公式ホームページから、ソフトウェアをインストールする。Windows・Linux・macOS の三つの OS がダウンロード可能なので、開発に利用する端末に合わせてダウンロードする。
2. **スクリプトを開くエディタを VSCoDe に変更**：Unity のプロジェクトを開きメニュー欄で「Unity」→「preferences」→「External Tools」→「External Script Editor」を選択しメニューを開く。メニューの中から VSCoDe に変更する。これによって、Unity の右クリックメニュー「Open C# Project」を押したときや、Unity 上で C# ファイルをダブルクリックしたとき、VSCoDe が開くようになる。
3. **C# の拡張機能を導入**：VSCoDe を起動し、画面左のメニューから「拡張機能」を選択して検索候補に「C#」と入力し、C# の拡張機能をインストールする。これによって、VSCoDe 上で C のスクリプトのデバッグと、コード補完が可能になる。
4. **Debugger for Unity の拡張機能を導入**：C# の拡張機能を導入した時と同じ手順で、Debugger for Unity の拡張機能をインストールする。これによって、Visual Studio Code で Unity をデバッグできるようになる。
5. **Python の拡張機能を導入**：C# の拡張機能を導入した時と同じ手順で、Python の拡張機能をインストールする。これによって、VSCoDe 上で Python のスクリプトのデバックと、コード補完が可能になる。
6. **Flask でローカルサーバー立ち上げ**：使用 PC のターミナルを開き、Flask をインストールする。これによって PC にローカルサーバーを立ち上げ、Unity から Python のスクリプトに API 通信できるようになる。

7. **MeCab を導入**：まず、使用 PC のターミナルを開き、MeCab をインストールする。その後、MeCab で利用する中で最もメジャーな辞書の一つである IPA 辞書を使用可能にするため、mecab-ipadic をインストールする。そして、MeCab を Python から利用できるようにするため、mecab-python3 をインストールする。最後に、MeCab の性能を実用レベルまで引き上げるために、neologd 辞書をインストールする。これによって、VSCode 上で MeCab を利用することができるようになる。

4.4 Unity ちゃんの利用

本システムでは、仮想エージェントに Unity Technologies Japan 社が提供するオリジナルキャラクター、「Unity ちゃん」を使用する。このキャラクターは身体パーツの 3D モデルデータが詳細に作成されており、ゲーム上で柔軟な操作がしやすいモデルである。ダウンロード後、Unity の Project ウィンドウにドラッグアンドドロップし Unity にインポートすることで、Unity ちゃんを使用することができるようになる。

4.5 各機能の実装

3 章で述べた 11 の機能を Unity で実装する方法について以下で述べる。

4.5.1 発話入力機能の実装

まず Unity の Project ウィンドウ上に、発話文の入力フォームと発話文送信用ボタンを配置する。次に、以下のことを行う C# のスクリプトを作成する。まず、発話文送信ボタンを押した際にフォームに入力した文字列データを、応答文生成機能と会話ログ保存機能を実行する関数に渡し実行させる。また、発話文送信ボタンを押した際に感情分析機能を実行する関数を実行させる。

4.5.2 音声認識機能の実装

まず Unity の Project ウィンドウ上に、音声入力用ボタンを配置する。次に、以下のことを行う C# のスクリプトを作成する。まず、音声入力用ボタンを押している間はマイク入力を起動させる。次にボタンを離れた時、それまで入力した音声データを音声文字変換 API の Google Cloud Speech-to-Text に送信する。またボタンを離れた時、感情分析機能を実行する関数を実行させる。そして、API から変換した文字列データを受け取る。最後にそのデータを、応答文生成機能と会話ログ保存機能を実行する関数に渡し実行させる。

4.5.3 感情分析機能の実装

まず、Unity の Project ウィンドウ上に、PC の内部カメラで撮影した表情画像を表示するパネルを配置する。次に、以下のことを行う C# のスクリプトを作成する。まず、発話文送信用ボタンや音声入力用ボタンを押した時にパネルに表示される表情画像を取得する。次に、取得した表情画像を感情分析 API である Amazon Rekognition に送信する。最後に API から受け取った 8 種類の感情値の中で、最も値の大きい感情の種類情報をエージェント応答機能に送信する。

4.5.4 応答文生成機能(雑談文生成)の実装

まず、Unity の Project ウィンドウ上に、以下の二つのトグルボタンを配置する。1 つ目は、テキスト文入力での雑談文生成を行う機能を実行可能にするボタン。2 つ目は、音声入力での雑談文生成を行う機能を実行可能にするボタンである。次に以下のことを行う C# のスクリプトを作成する。まず、発話文入力機能や音声認識機能から送られてきた、発話文の文字列データを、雑談文生成 API である A3RT に送信する。そして、API から応答文の文字列データを受け取る。最後に、そのデータを音声合成機能と応答文表示機能と会話ログ保存機能を実行するそれぞれの関数に送信する。

4.5.5 応答文生成機能(傾聴文生成)の実装

まず、Unity の Project ウィンドウ上に、以下のトグルボタンを配置する。テキスト文入力での傾聴文生成を行う機能を実行可能にするボタンである。上記で述べた 2 つのトグルボタンを合わせて、3 つのトグルボタンを切り替えることで、実行する機能を切り替え可能にする。

次に以下のことを行う C# のスクリプトを作成する。まず、発話文入力機能から送られてきた、発話文の文字列データを、Flask を介して Python のスクリプトに送信する。次に、Python のスクリプトによって生成された傾聴応答文の文字列データを Flask を介して受け取る。最後に、そのデータを音声合成機能と応答文表示機能と会話ログ保存機能を実行するそれぞれの関数に送信する。

また、以下のことを行う Python のスクリプトを作成する。まず、Flask を介して受け取った発話文の文字列データを、MeCab によって形態素に分解する。次に、事前に作成した変換辞書に当てはまる、特定の形態素を変換する。例えば、「趣味 | の | 話 | を | し | たい | と | 思い | ます |。」と 10 個に分割された形態素を、「趣味 | の | 話 | を | し | たい | と | 思う | の | ですね |。」と変換する。このように、相手の話の語尾を書き換え

て繰り返すような傾聴応答文を生成する。そして最後に、生成した傾聴応答文を文字列データとして、Flask を介して C# のスクリプトに送信する。

4.5.6 音声合成機能の実装

以下のことを行う C# のスクリプトを作成する。まず、応答文生成機能から受け取ったエージェントの応答文を、文字列データとして音声合成 API の Amazon Polly に送信する。次に、API から音声データを受け取る。最後に、その音声データをエージェント応答機能を実行する関数に送信する。

4.5.7 エージェント応答機能の実装

以下のことを行う C# のスクリプトを作成する。まず、音声合成機能から受け取った応答文の音声データをリップシンク機能を実行する関数に送信する。次に、感情分析機能から送られてきた、最も感情値が高い感情の種類の情報、アニメーション制御機能を実行する関数に送信する。

4.5.8 アニメーション制御機能の実装

Unity のアニメーション管理機能である Animator Controller を利用する。まず、Animator Controller を開き、エージェントの胴体を動かすアニメーション管理をする、「Base Layer」と、表情のアニメーションを管理する、「Face Layer」を追加する。次に、それぞれの Layer に 8 種類のアニメーションファイルを設置する。そして、以下のことを行う C# のスクリプトを作成する。エージェント応答機能から受け取った感情の情報に応じたアニメーションファイルを実行し、エージェントの動作を変化させる。

4.5.9 リップシンク機能の実装

以下のことを行う C# のスクリプトを作成する。エージェント応答機能から受け取った応答文の音声データを再生し、音域に応じて、エージェントの口を開くパラメーターを変化させる。

4.5.10 応答文表示機能の実装

まず、Unity の Project ウィンドウ上に、応答文を表示させるパネルを配置する。次に以下のことを行う C# のスクリプトを作成する。発話文入力機能や音声認識機能から送られてきたユーザーの発話文の文字列データをパネルに表示させる。

4.5.11 会話ログ保存機能の実装

以下のことを行う C# のスクリプトを作成する。発話文入力機能や音声認識機能から送られたエージェントの発話文と、応答文生成機能から送られたエージェントの応答文を、CSV ファイルに文字列データとして送信し保存する。

5. ひきこもり者支援のためのシステムの動作実験

5.1 動作実験の概要

今回、Unity にて開発した会話システムが正常に起動するかどうかノート PC にて確認する。動作実験に使用する PC は MacBook Pro 2019 である。前章で実装した機能群が実際に意図通り動作するのかが確認するのが本実験の目的である。

5.2 動作実験の結果

動作実験の結果、三つの結果を得ることができた。まず一つ目は、エージェントによる雑談と傾聴応答機能によりユーザーと簡単な会話が可能になったことである。続いて二つ目は、ユーザーの表情画像から感情分析し、それに合わせたエージェントの応答が可能になったことである。最後に三つ目は、会話ログを CSV 保存することにより、ユーザーの情報収集が可能になったことである。



図 3 雑談会話機能の実行情例 1



図 4 雑談会話機能の実行情例 2

エージェントの雑談会話機能の実行情例を図 3 と図 4 で、会話ログ保存機能の実行情例を図 5 で示す。図 3 で

134	クライアント	アバター	2021/7/13
135	こんにちは		10:20:14 AM
136		こんにちは	10:20:15 AM
137	今日は何をしますか		10:20:46 AM
138		まだ決めていません	10:20:47 AM
139	疲れました		10:21:47 AM
140		お疲れ様です	10:21:47 AM

図5 会話ログ保存機能の実行例

は、「テキストで雑談」という項目にチェックを入れ、「今日は何をしますか?」とテキスト入力し、「会話する」ボタンを押して送信を行なっている。またこの時、PCの内部カメラから取得した表情画像を感情分析APIに送信を行なっている。

その後、図4では、「今日は何をしますか?」という発話文に対して「掃除します」という応答文がAPIで生成され、画面に表示されている。またこの時、エージェントが応答文の発話を行っている。それに加えて、表情画像からAPIによって感情の情報を抽出し、それに応じてエージェントが表情と身体の動きを変化させている。図5では、CSVファイルにて、ユーザーの入力文とエージェントの応答文と送信された時間が記録されている。項目はクライアント・アバター・今日の日付の3つに分けられている。

6. 考察

動作実験結果を踏まえて今後の課題として、一つ目の結果に関して、今回のシステム開発では、会話の中で雑談と傾聴を用いるタイミングについて分からなかったため、各機能の確認で雑談文生成と傾聴文生成の機能を分けた。よって、そのタイミングについて今後考える必要があることが分かった。また、今回は辞書マッチによる変換法のみで傾聴文生成を行なった。よって、品詞変換による生成法も用いることで、傾聴文生成パターンをより増やすことができると考える。続いて二つ目の結果に関して、感情分類結果に応じて、応答文の語尾を変える機能の実装が今後必要だと考える。これによって、現時点ではエージェントの表情と動作の変化のみであるが、発話内容も感情に応じて変えることができるからである。最後に三つ目の結果に関して、会話ログを見てエージェントの応答をコントロール可能にするような機能が必要だと考える。これによって、ひきこもり者の状態に合わせて、カウンセラー等に支援者に情報を提供しやすくなるのと考えられるからである。

7. まとめと今後の課題

今回、仮想エージェントを用いたひきこもり者支援のための会話システムをUnityで開発した。現在、

1. テキスト打ち込みや音声認識によって入力した会話文から、雑談文や傾聴文を生成し、エージェントと短文で会話すること。
2. 表情画像から抽出した感情に合わせてエージェントの表情や動作の変化をすること。
3. 会話ログを外部ファイルに保存すること。

が可能となっている。今後は、会話の中で雑談と傾聴を用いるタイミングについて考えることや、感情分類結果に応じ、応答文の語尾を変える機能が必要だと分かった。他にも、会話ログを見てエージェントの応答をコントロール可能にするような機能が必要だと考える。

参考文献

- [1] ひきこもりの評価・支援に関するガイドライン, <https://www.mhlw.go.jp/content/12000000/000807675.pdf> (2021/09/08)
- [2] Dinh Quynh Trang, Nguyen Phuong Thuy: 現代日本における8050問題 - 中高年ひきこもりへの支援活動に着目して-, ベトナム国家大学ハノイ校日越大学地域研究プログラム日本研究専攻修士論文, (2020)
- [3] 江刺利彦, 久保村千明, 服部峻, 亀田弘之: 擬人化エージェントによるマルチモーダルなカウンセリングシステムの構築, 情報処理学会創立50周年記念(第72回)全国大会, pp.623-624, (2010)
- [4] 伊藤基晴, 伊藤大河, 山本利一: 小学校通級指導教室に通う児童の会話力を育てる教育実践—音声認識と3Dキャラクターを用いたバーチャル会話トレーニング—, 埼玉大学教育学部附属教育実践総合センター紀要16, pp.9-15, (2017)
- [5] Waroku パブリックヘルス | 株式会社レスコ, https://rescho.co.jp/product/waroku/public_health.html (2021/09/08)
- [6] 星野春香, 松本知香: 心理臨床面接における雑談の可能性についての一考察, 京都大学大学院教育学研究科附属臨床教育実践研究センター紀要24, pp.110-117, (2021)

タンデム加速器を用いた PSD能力を有したLi含有液体シンチレータの消光係数に関する研究

川端 孝弥* 中島 恭平** 玉川 洋一** 鈴木 耕拓*** 小栗 廉太郎*

Study on quenching factors of Li loaded liquid scintillator with PSD using a tandem accelerator

Atsuya KAWABATA*, Kyohei NAKAJIMA**, Yoichi TAMAGAWA**,
Kohtaku SUZUKI*** and Rentaro OGURI*

(Received January 13, 2022)

We developed a Li loaded liquid scintillator (LiLS) with Pulse Shape Discrimination (PSD). In order to observe the α -ray and tritium from the neutron capture reaction of ${}^6\text{Li}$, the quenching factor of α -ray and proton beam were measured using the tandem accelerator at The Wakasa Wan Energy Research Center. In this paper, we report on the measurement method and results of quenching factors of liquid scintillator.

Key Words : Li loaded liquid scintillator, quenching factor, accelerator, reactor neutrino monitor

1. 緒言

我々の研究グループは、原子炉ニュートリノモニター開発に向けた基礎研究に取り組んでいる。原子炉運転時に発生する核分裂生成物は β 崩壊の際に透過率の高い反電子型ニュートリノを放出する。原子炉ニュートリノモニターとは、この反電子型ニュートリノのエネルギー分布や数を観測することで、原子炉稼働状況や燃料組成を遠隔よりモニタリングする装置である。

我々は原子炉ニュートリノモニターで最も重要な反電子型ニュートリノ検出に用いられる液体シンチレータの開発に向けた研究を行っている。反電子型ニュートリノ検出には逆 β 崩壊反応を利用する。逆 β 崩壊反応の際に放出する中性子を効率よく観測するために液体シンチレータ内にLiを添加し、さらに波形弁別能を付与したLi含有液体シンチレータ

(LiLS)の開発に成功した。

現在は開発したLiLSの特性評価を行っている。特性評価の中には、発光量、透過率、波形弁別能の他に消光係数を評価する必要がある。 ${}^6\text{Li}$ が中性子を捕獲した際に放出する α 線・トリチウムは電離消光の効果により、観測エネルギーが小さくなる。そのため、中性子捕獲反応を観測するにはLiLSの消光係数を調査する必要がある。今回は若狭湾エネルギー研究センターのタンデム加速器を用いて消光係数測定を行ったが、使用したタンデム加速器の仕様上、粒子の照射口は横向きであった。そのため、LiLSを測定する際には横から打ち出される α 線および陽子線を測定する必要があった。通常、LiLSの横側に粒子の照射口のための穴を開けると液体がこぼれ出てしまう。そのため、今回は専用の検出容器を作製した。

本論文では、加速器において粒子の照射口が横向きであっても液体シンチレータといった液体の検出器の測定を可能にする検出容器の作製から測定方法について示し、測定で得られた α 線および陽子線の消光係数のエネルギー依存性について報告する。

2. 背景

2.1 研究背景

原子炉ニュートリノモニターはニュートリノの特性を活かした技術の一つであり、原子炉運転時に発

* 大学院工学研究科安全社会基盤工学専攻

** 原子力安全工学講座

*** 若狭湾エネルギー研究センター

* System and Infrastructure Engineering for Safe and Sustainable Society, Graduate School of Engineering

** Department of Nuclear Safety Engineering, Faculty of Engineering

*** The Wakasa Wan Energy Research Center

生ずる透過率の高い反電子型ニュートリノを観測することによって原子炉内部の稼働状況や燃料組成をモニタリングする技術である。従来の方法は原子炉を停止した後、燃料を取り出し、解体し、調べることで内部の組成を検証する。これは組成が判明するまでに時間がかかり、放射線による被ばくの観点からも危険が伴う。原子炉運転時に発生する核分裂生成物の β 崩壊の際に放出される反電子型ニュートリノは透過率が高いという特徴を持つ。そのため透過率が高いという特徴を活かして、原子炉建屋外から遠隔で反電子型ニュートリノを観測することが可能になる。反電子型ニュートリノの数やエネルギー分布を詳細に取得することができれば、原子炉建屋外からでも原子炉の稼働状況や燃料組成をリアルタイムで特定することができる。

原子炉ニュートリノモニターという技術は、従来の時間と手間のかかる工程を省略するだけでなく、本来の運転計画に対して運転状況が正しいかを瞬時に判断することができる。これにより原子炉の兵器転用防止や、原子力発電所の事故防止に役立つことが期待されている^[4]。

2.2 Li含有液体シンチレータ

2.2.1 シンチレーション検出器

物質を構成する原子内の電子が放射線のエネルギーによって励起準位や伝導帯に励起された後、基底状態に戻るときにそのエネルギー差が光（電磁波）として放出される。この光をシンチレーションと呼ぶ。シンチレーションを出す蛍光体をシンチレータという。シンチレータは主に、無機シンチレータと有機シンチレータがある。

無機シンチレータは、原子番号の大きい元素を用いられることが多い。代表としてNaI(Tl)シンチレータがある。無機シンチレータの特徴としては γ 線の全エネルギー吸収ピークを検出しやすく、高い発光量を得られるため、エネルギー分解能が良い。

有機シンチレータは、炭素や水素を多く含む物質で構成される。アントラセン、トランススチルベンなどの結晶や液体、プラスチックなど多くの種類が存在する。主な構成元素が、炭素や水素等の原子番号が小さいので、 γ 線に対してほとんど光電効果を起こさないため、全エネルギー吸収ピークを形成しない。 γ 線のほとんどが有機シンチレータ内でコンプトン散乱を起こす。無機シンチレータとは異なり、減衰時間が数 ns であるため高い計数率で使用できるのが特徴である。

本研究では、逆 β 崩壊反応を利用して反電子型ニュートリノを検出するため、水素を多く含んだ有機

シンチレータを使用する。有機シンチレータには主に液体シンチレータとプラスチックシンチレータがあるが、本研究では液体シンチレータを使用する。液体シンチレータのメリットは、液体に添加物を添加しやすく必要な性能のシンチレータの開発が容易であること、プラスチックシンチレータに対して安価な点がある。しかし、使用する溶媒は油なので取り扱いに注意が必要である。

2.2.2 反電子型ニュートリノの検出

逆 β 崩壊反応を利用して、反電子型ニュートリノを検出する。反応式(1)に逆 β 崩壊反応を示す。反電子型ニュートリノと液体シンチレータ内の陽子が逆 β 崩壊反応を起こすことによって、陽電子と中性子が発生する。

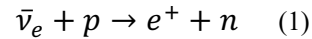


図1にLiLS内における反電子型ニュートリノ検出の模式図を示した。逆 β 崩壊反応後、放出された陽電子はLiLS内でエネルギーを落としていきながら、最終的に電子と対消滅し、511 keVのエネルギーを持つ γ 線を2本放出する。これを先発事象とする。中性子は検出器内で熱化し、最終的にLiLSに添加した ${}^6\text{Li}$ に捕獲され、中性子捕獲反応である α 線・トリチウム（合計4.78 MeV）を放出する。これを後発事象とする。

先発事象と後発事象の時間差は約数十 μs であり、この時間相関を利用することで反電子型ニュートリノを観測する。先発事象と後発事象の時間差を利用し、時間相関のないバックグラウンド事象を排除する方法を遅延同時計測法という。この先発事象と後発事象の時間差はLi濃度によって変化する。

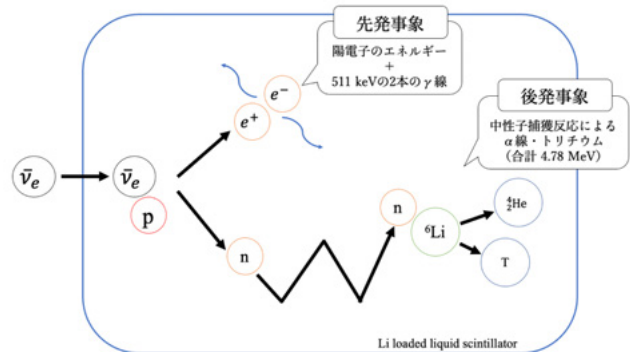


図1. LiLS内での反電子型ニュートリノ検出の模式図

2.2.3 消光

シンチレータでは、何らかの原因により蛍光強度が減少もしくは消失する現象が起こる。これを消光、あるいはクエンチング(Quenching)という。消光は、原因により区別される。代表的なものには電離消光、

温度消光，不純物消光，濃度消光がある．本研究で扱う消光は主に電離消光と呼ばれるものである．

2.2.4 消光係数

入射エネルギー（Incident Energy）と観測エネルギー（Observed Energy）との間の係数は消光係数（Quenching Factor）と呼ばれる．式（2）に消光係数の計算式を示す．消光係数は入射エネルギーに依存する．消光係数が分かれば，様々な観測エネルギーから入射エネルギーが計算可能になる．

本研究では，入射エネルギーを後述するモンテカルロシミュレーションソフトである TRIM の結果より得られたエネルギー，観測エネルギーを LiLS で観測したエネルギーとした．

$$\text{Quenching Factor} = \frac{\text{Observed Energy}}{\text{Incident Energy}} \quad (2)$$

2.3 加速器

2.3.1 加速器とは^[2]

加速器とは，電子や陽子などの粒子を光の速度近くまで加速して高いエネルギーの状態を作り出す装置である．

高いエネルギーの粒子を使った研究は大きく分けて二つある．一つ目は高エネルギーの粒子を衝突させ，宇宙誕生時に多数存在した粒子を発生させて反応を調査したり，ニュートリノを発生させ，振る舞いを調べたりする研究などである．これらはいずれも物質を細かく分けていくと何から出来ているのかなど，物質の根源や宇宙誕生時の物質の起源にせまる謎を解明してくれる基礎科学研究である．二つ目は高エネルギー粒子が曲がるときに放つ強力な光や，粒子の衝突反応から生まれるミューオンや中性子といった粒子を用いることで，物質の極微の世界の構造を調べる研究である．このような研究は，タンパク質の立体構造や薬品の新素材の開発研究につながる基礎科学研究である．

2.3.2 若狭湾エネルギー研究センターの加速器^[3]

本研究では，福井県敦賀市に所在する実験施設若狭湾エネルギー研究センターを使用した．若狭湾エネルギー研究センターには多目的シンクロトロン・タンデム加速器（W-MAST）が設置してあり，タンデム加速器とシンクロトロンでの測定が可能である．タンデム加速器では，最大 500 万ボルトの高電圧により最高で光の速度の約 14%，およそ秒速 4 万 km まで加速することが可能である．シンクロトロンでは，陽子を最高で 2 億ボルト（200 MeV），光の速度の約 60%，およそ秒速 18 万 km まで加速することができる．本測定ではタンデム加速器を使用

して， α 線及び陽子線の消光係数測定を行った．図 2 に W-MAST の外観図を示す．また，図 3 に測定を行った加速器の照射口が設置されているチェンバーの様子を示す．図 3 のように加速器からの照射口が横向きなので今回の測定のように液体シンチレータのような液体の検出器での測定には工夫が必要である．



図 2. 多目的シンクロトロン・タンデム加速器
本測定においてはタンデム加速器から発生する
 α 線および陽子線を測定した．
また，測定は照射室 1 にて行った．

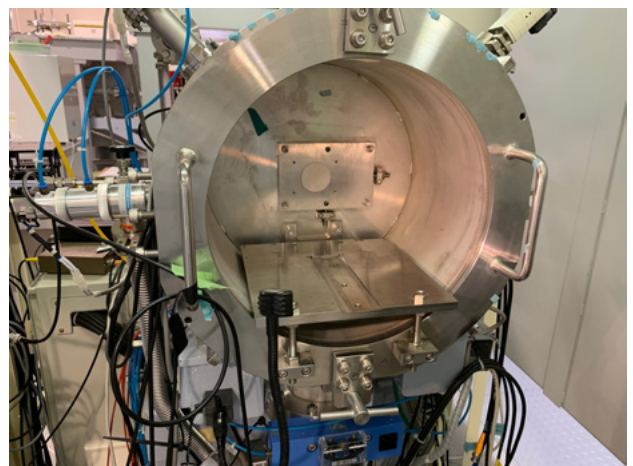


図 3. 使用した加速器のチェンバーの様子
チェンバー奥に見える小さい円が加速器より発生
した粒子の照射口となる．

3. 研究目的

若狭湾エネルギー研究センターのタンデム加速器を用いて液体シンチレータといった液体の検出器を用いた際の α 線および陽子線の測定を行う方法を検討する。また我々の研究グループで開発したLiLSの消光係数測定を行うことで ${}^6\text{Li}$ の中性子捕獲により放出される α 線・トリチウムの観測エネルギーを予測する。

4. 検出器

4.1 波形弁別能を有したLi含有液体シンチレータ

今回使用したLiLSはLi 0.1wt%の濃度で溶けている液体シンチレータになる⁴⁾。表1に詳細な材料の混合比を示した。

表1. 測定に使用したLiLSの材料組成
サンプル全体が100gの場合の組成である。

材量	分量
LAB	66.0 g
界面活性剤	20.1 g
LiCl 水溶液	3.7 g
PPO	0.35 g
Bis-MSB	35.0 mg
Ultima Gold F	10.0 g

4.2 検出器の作製

図4に加速器の照射部分に光電子増倍管(PMT)を設置し、測定する際の配置を示す。図3、図4のとおり照射口は横を向いており、検出器を横に置く必要があることが分かる。照射する粒子は α 線と陽子線であり、これらの粒子は飛程が短いため、LiLSに直接粒子を入射させる必要がある。そのため、測定を行う際の検出器には工夫を施す必要がある。今回はシャーレを用いて、検出器を横にしても液体の表面張力によって液体が漏れない検出器の作製に取り組んだ。

図5に検出器の材料を示す。検出器の本体になるのはシャーレであり、深さ1.5 cm、直径6 cmである。シャーレのふたには厚さ0.5 mmのアルミ板を使用した。シャーレとアルミ板を接着するために二液式接着剤を使用した。また、反射材にはテフロンテープとアルミホイルを使用した。

図6に検出器の設計図を示す。図6の通り、アルミ板には直径3 mmの穴を2種類開けた。その後、直径3.5 mmのドリルで穴をならすことにより、穴が滑らかになるように工夫し、発光した際に光が反

射しないようにした。2種類穴を開けた理由は、アルミ板中央の穴は粒子の入射口になるが、もう1種類の穴はLiLSを注入した際に検出器内にたまる空気を逃がすためである。この穴を作製することにより、検出器内をLiLSで満たすことができる。

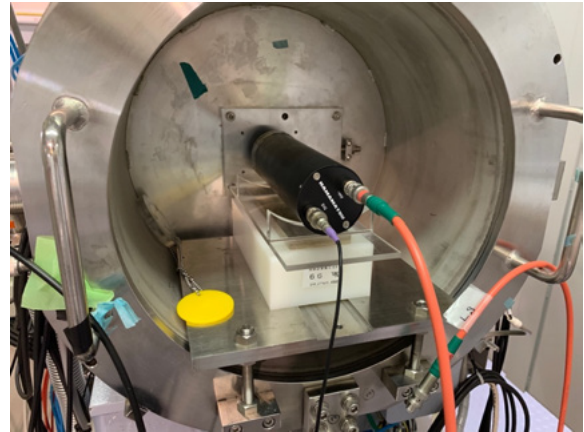


図4. 測定を行う際の配置図

PMTを横に配置するため、検出器も横にする必要がある。

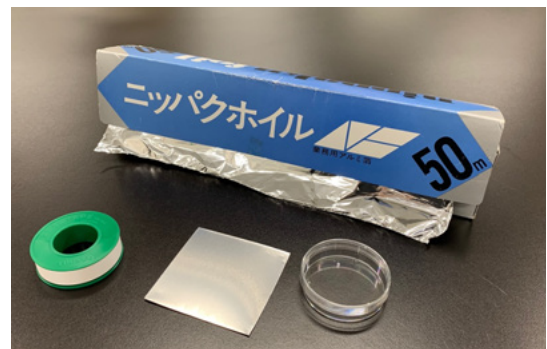
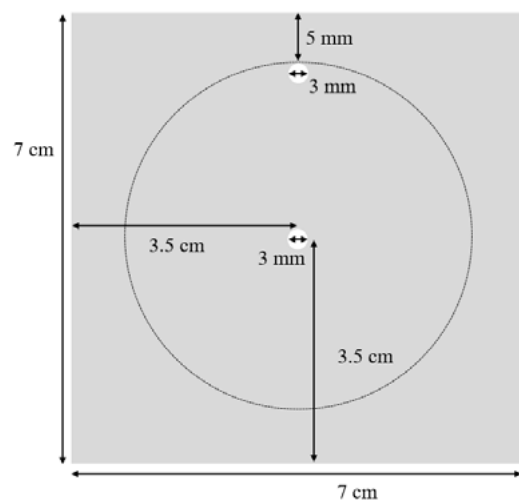


図5. 検出器の材料

奥に見えるのがアルミホイルであり、手前は左からテフロンテープ、アルミ板、シャーレである。



—: シャーレを設置する位置

図6. 検出器の設計図

7 cm × 7 cmのアルミ板に直径3 mmの穴を2箇所開けた。

こうして作製できた検出容器は LiLS を入れた状態で横にしても、粒子の入射口から LiLS があふれることもなく、測定を行うことができた。

5. 測定と結果

入射した α 線は 2 MeV~5 MeV, 陽子線は 1.4 MeV~3.4 MeV の範囲で測定を行った。

消光係数を求めるには、粒子が LiLS に到達した際のエネルギー（入射エネルギー）と LiLS で観測したエネルギー（観測エネルギー）を知る必要がある。今回の測定では観測エネルギーは、LiLS で観測したエネルギースペクトルからガウス関数でフィッティングすることにより求めた。入射エネルギーは TRIM というシミュレーションソフトを使用することによって、入射エネルギーを見積もり、計算した。

5.1 TRIM

加速器からの荷電粒子は真空状態の輸送ラインを進行し、厚さ 200 nm のシリコンを通過し、大気中に取り出される。粒子は LiLS に入射するまでにシリコンと大気でエネルギー損失を受ける。この影響を考慮するため、阻止能 dE/dx のデータベース SRIM-2013^[5] に付随する TRIM というモンテカルロシミュレーションを用いた。

TRIM において、測定条件を指定し、モンテカルロシミュレーションを実行するとエネルギースペクトルを得ることができる。この結果にガウス関数でフィッティングを行うことによって、平均値を入射エネルギーとした。表 2 に今回測定を行った加速器で発生させた粒子の種類およびエネルギー、TRIM で求めた入射エネルギーを示す。加速器で発生させた粒子のエネルギーはビーム調整の結果を使用している。

表 2. 加速器で発生させた粒子の種類とエネルギーおよび TRIM で求めた入射エネルギー

粒子の種類	発生エネルギー [MeV]	入射エネルギー [MeV]
alpha	5.00	4.87
alpha	4.00	3.84
alpha	3.50	3.33
alpha	3.00	2.81
alpha	2.50	2.29
alpha	2.00	1.76
proton	3.40	3.38
proton	2.40	2.38
proton	1.90	1.87
proton	1.40	1.37

5.2 消光係数測定

加速器で発生した粒子は LiLS にて検出を行った。PMT より得られた光信号は CAEN 社製 FADC V1730 (14bit,500MS/s) にて保存した。LiLS は γ 線源である ^{137}Cs , ^{60}Co のコンプトンエッジを用いてエネルギー較正を行った。図 7 に 5 MeV の α 線を測定した際に得られたエネルギースペクトルを示す。図 7 に示すように得られたエネルギースペクトルにはガウス関数でフィッティングを行い、平均値を今回の LiLS で得られた観測エネルギーとして評価を行った。

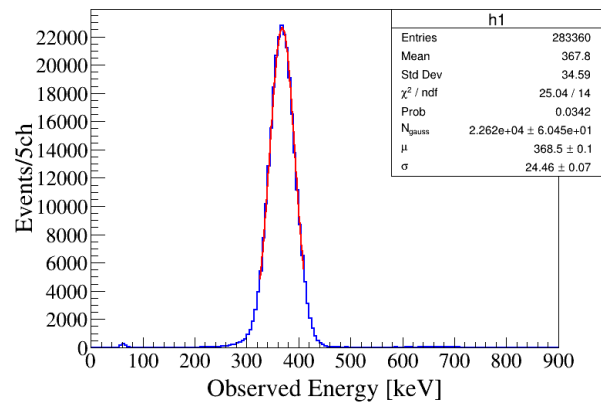


図 7. 5 MeV の α 線で得られたエネルギースペクトル

(青：エネルギースペクトル，赤：観測エネルギーを求めるためにフィッティングしたガウス関数)

6. 結果と考察

図 8, 図 9 に 5.1 節, 5.2 節で求めた入射エネルギー、観測エネルギーを用いて式 (2) より求めた α 線および陽子線の消光係数を示す。今回作製した検出容器を用いることにより、図 8, 図 9 に示すように α 線および陽子線の消光係数のエネルギー依存性が確認することができた。これらの結果より、 ^6Li の中性子捕獲反応による α 線・トリチウムはおよそ 1/10 である 500 keV 相当に確認できる。

今後は、入射エネルギーを表面障壁型 Si 半導体検出器 (SSD) にて測定した値を用いた消光係数の見積もり、また実験データに沿うような半経験的手法が Birks によって提案されており^[6,7]、この理論を用いて異なる粒子においても消光係数を見積もることができるようにすることが必要である。また、今回は加速器を用いた外部照射による消光係数のエネルギー依存性を確認したが、内部崩壊による消光係数の見積もりも必要である。

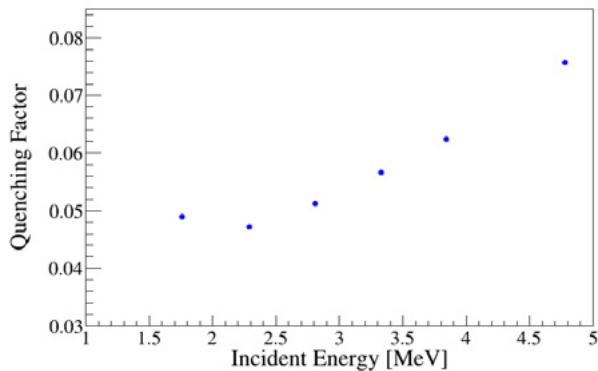


図 8. α 線の消光係数のエネルギー依存性

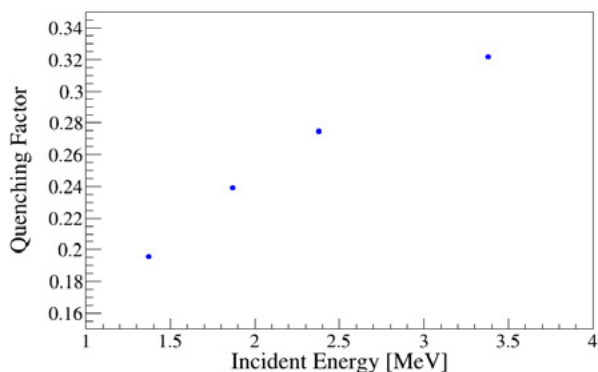


図 9. 陽子線の消光係数のエネルギー依存性

7. まとめ

我々の研究グループでは原子炉ニュートリノモニターの開発に取り組んでいる。原子炉ニュートリノモニターは原子炉運転時に発生する核分裂生成物の β 崩壊の際に放出される反電子型ニュートリノを観測することにより、原子炉内部を遠隔よりモニタリングする技術である。反電子型ニュートリノは逆 β 崩壊反応を利用することによって検出を行う。そのため、有機シンチレータは水素を含み、特に液体シンチレータは水素量が多いことから検出器として適している。我々は中性子捕獲反応によって α 線・トリチウムを放出し、反電子型ニュートリノ検出に貢献が期待できる ${}^6\text{Li}$ を添加した液体シンチレータ(LiLS)の開発に成功した。

そこでLiLSの特性として、加速器を用いた消光係数の測定を行った。福井県敦賀市に所在する実験施設 若狭湾エネルギー研究センターのタンデム加速器を用いて、 α 線および陽子線の消光係数のエネルギー依存性を調査した。今回使用した加速器はビームの照射口が横向きになっているため、そのまま検出容器を横にしてしまうとLiLSがこぼれてしまう。そのため、専用の検出容器の作製をした。その結果、ビームの照射口が横向きでも液体シンチレータとい

った液体の検出器でも測定ができることを証明した。また、得られた結果より、LiLSの α 線および陽子線の消光係数のエネルギー依存性について確認することができた。

今後は入射エネルギーを測定することができるSSDの結果を用いた消光係数のエネルギー依存性を評価し、Birksが提案した半経験的手法を用いて異なる粒子でも消光係数を見積もることができるようにすることが必要である。また、今回は加速器を用いた外部照射による消光係数の測定を行ったため、内部崩壊による消光係数の測定を行うことが重要になる。

参考文献

1. Final Reports: Focused Workshop on Antineutrino Detection for Safeguards Applications, 28-30 October 2008 IAEA Headquarters, Vienna.
2. 総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科加速器科学専攻ホームページ
<https://www2.kek.jp/accl/sokendai/kasokuki.html>, 2022.01.03 閲覧
3. 公益財団法人 若狭湾エネルギー研究センターホームページ
<http://www.werc.or.jp/outline/shisetsu/kasokuki/>, 2022.01.03 閲覧
4. 川端孝弥, 増井友哉, 中島恭平, 玉川洋一, 鈴木耕拓, 「原子炉ニュートリノモニター開発に向けた PSD 能力を有した Li 含有液体シンチレータの発光特性評価」, 福井大学学術研究院工学系部門研究報告, 2021.10, vol.70.2
5. J.F. Ziegler, J.P. Biersack, M.D. Ziegler, <http://www.srim.org>, 2022.01.03 閲覧
6. J.B. Birks, Phys. Rev. 84 (1951) 364.
7. J.B. Birks, Phys. Rev. 86 (1952) 569.

原子炉ニュートリノモニター開発に向けた PSD能力を有したLi含有液体シンチレータの有効性の検討

川端 孝弥* 中島 恭平** 玉川 洋一** 鈴木 耕拓***

The study on the effectiveness of Li loaded liquid scintillator with PSD for the development of reactor neutrino monitor

Atsuya KAWABATA*, Kyohei NAKAJIMA**, Yoichi TAMAGAWA** and Kohtaku SUZUKI***

(Received January 13, 2022)

Reactor neutrino monitor is a technology that monitors the fuel composition inside the reactor by observing electron anti-neutrinos generated from the reactor. We developed a Li loaded liquid scintillator (LiLS) with Pulse Shape Discrimination (PSD). In this paper, the effectiveness of LiLS is verified by estimating the S/N in electron anti-neutrinos observations.

Key Words : reactor neutrino monitor, Li-loaded liquid scintillator, neutrino, S/N

1. 緒言

我々の研究グループは、原子炉ニュートリノモニター開発に向けた基礎研究に取り組んでいる。原子炉ニュートリノモニターとは、原子炉運転時に発生する反電子型ニュートリノを観測することで、原子炉内のリアルタイムモニタリングを行う技術である。原子炉運転時に発生する核分裂生成物は β 崩壊時に反電子型ニュートリノを放出する。この反電子型ニュートリノの数やエネルギー分布を詳細に得ることができれば、原子炉内の稼働状況や燃料組成をリアルタイムで遠隔から知ることが可能になるため、核不拡散、核の平和利用の観点において、IAEAから開発要請もあり、研究が進められている。

この反電子型ニュートリノ検出には逆 β 崩壊反応(図1)を利用する。我々は原子炉ニュートリノモニターにおけるニュートリノ検出器として水素を多く含む有機シンチレータの中でも特に液体シンチレー

タの開発に取り組んでいる。逆 β 崩壊反応によって放出される中性子を効率よく検出することで検出効率向上に貢献できる。我々は、中性子捕獲反応として α 線・トリチウムを放出する ${}^6\text{Li}$ を添加し、さらに波形弁別能を有したLi含有液体シンチレータ(LiLS)の開発に成功した。これまで、LiLSの発光量、波形弁別能、透過率、中性子捕獲反応、消光係数といった基礎特性を評価してきた。

本論文では、これまで評価してきた基礎特性の結果より最も原子炉ニュートリノモニターに最適だと結論付けたLiLSに対して、中性子線源である ${}^{252}\text{Cf}$ 、環境放射線(バックグラウンド)を測定することで、検出器としてどの程度のバックグラウンド排除能力を有しているのか検討した結果について報告する。

2. 背景

2.1 原子炉ニュートリノモニター

原子炉ニュートリノモニターは、ニュートリノの特性を活かした技術の一つである。ニュートリノには透過率が高いという特徴がある。原子炉運転時に発生する核分裂生成物の β 崩壊の際に発生する反電子型ニュートリノの数やエネルギー分布を明らかにすることで原子炉の稼働状況や燃料組成をリアルタイムでモニタリングできる装置である。現在、燃料組成を確認する方法は、原子炉を停止し、一定時間経過後に、燃料を取り出し、内部を調査する方法が

* 大学院工学研究科安全社会基盤工学専攻

** 原子力安全工学講座

*** 若狭湾エネルギー研究センター

* System and Infrastructure Engineering for Safe and Sustainable Society, Graduate School of Engineering

** Department of Nuclear Safety Engineering, Faculty of Engineering

*** The Wakasa Wan Energy Research Center

とられている。これは組成が判明するまでに時間がかかり、放射線による被ばくの観点からも危険が伴う。この方法に対し、原子炉ニュートリノモニターは透過率の高い反電子型ニュートリノを観測することで燃料組成を確認することができる。この方法は、原子炉建屋外から原子炉内に直接アクセスすることなく、リアルタイムで情報を得ることができるため、安全である。そのため、IAEAからも開発要請がある^[1]。

また、このようにニュートリノ観測の技術が向上すると物理学分野におけるステライルニュートリノといった未解決問題解決に貢献できると考えられている。このように原子炉ニュートリノモニターという技術は工業的利用、物理学的観点といった幅広い分野に応用できることから、研究が進んでいる。

原子炉ニュートリノモニター実用化のため、地上で測定可能、原子炉の運転に干渉しない、移動が容易、どこにでも設置可能、トラックの荷台に積めるコンパクトな検出器といった条件が求められる。我々は、このような条件を満たすことのできる1tサイズ程度の反電子型ニュートリノ検出器の開発を行っている。

2.2 先行研究

原子炉ニュートリノモニターの研究開発は世界的に進められている。代表的な実験として SONGS 実験、PANDA 実験、PROSPECT 実験が挙げられる。

2.2.1 SONGS 実験^[2]

SONGS (San Onofre Nuclear Generating Station) 実験である。アメリカで2003年から2007年にかけて行われていた実験である。原子炉から発生した反電子型ニュートリノを測定し、原子炉ニュートリノモニターの実現性を示した実験である。

この実験では、地下10m、原子炉から距離24.5mの位置に検出器を設置し、原子炉由来の反電子型ニュートリノ測定を行った。反電子型ニュートリノ検出器としてGd含有液体シンチレータを0.64t、宇宙線排除用にプラスチックシンチレータ、中性子に対する遮蔽材として厚さ50cmのポリエチレンが使用されている。

測定結果は、原子炉稼働時にニュートリノの検出効率が、 544 ± 13 /day、停止時に 105 ± 9 /dayと原子炉稼働時と停止時でニュートリノ検出効率に明確な差があることが確認できた。

2.2.2 PANDA 実験^[3]

PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detection Array) 実験である。日本の北里大学が開発を行っている原子炉ニュートリノモニターの実験である。特徴は、反電

子型ニュートリノ検出器としてGd含有シートを巻いたプラスチックシンチレータを検出器として用いている。プラスチックシンチレータは不燃性であるため、原子炉施設内で測定する際に安全であるという点で優れている。また特徴として、プラスチックシンチレータ1本10cm×10cm×100cmを100本組み合わせた検出器を使用している。

2019年に関西電力の大飯原子力発電所4号機にて、原子炉から45m離れた地上でテスト測定を行った。反電子型ニュートリノ事象に対するバックグラウンド事象の比(S/N)が1/100となり、原子炉由来の反電子型ニュートリノの有意性を確認するには、約20日の測定を要することが確認された。

2.2.3 PROSPECT 実験^[4]

アメリカで行われているPROSPECT実験である。天然存在比7.5%の⁶Liを95%まで濃縮したLiClを用いて⁶LiLS開発を進めている。

プロトタイプとして、117.6cm×14.5cm×14.5cmの検出器を2つ用意し、検出器の両側に光電子増倍管(PMT)を設置することで検出器の両側から信号を読み出している。検出器は、1MeVにおいてエネルギー分解能は $4.0 \pm 0.2\%$ であった。また、波形弁別能によって、 γ 線による事象と中性子による反跳陽子事象を明確に分離することができており、⁶Liによる中性子捕獲反応を十分に確認できている。この試作機では、減衰長、位置分解能、中性子捕獲反応、長期安定性を測定した。PROSPECT実験における反電子型ニュートリノ観測とバックグラウンド事象排除に対する条件を満たしており、ニュートリノ検出のほかにも中性子検出といった他の用途でも価値のある検出器の開発に成功している。

2.3 反電子型ニュートリノの検出

逆 β 崩壊反応を利用して、反電子型ニュートリノを検出する。反応式(1)に逆 β 崩壊反応を示す。反電子型ニュートリノと液体シンチレータ内の陽子が逆 β 崩壊反応を起こすことによって、陽電子と中性子が発生する。

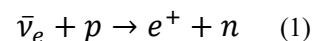


図1にLiLS内における反電子型ニュートリノの検出原理を示す。逆 β 崩壊反応後、放出された陽電子はLiLS内でエネルギーを落としていきながら、最終的に電子と対消滅し、511keVのエネルギーを持つ γ 線を2本放出する。これを先発事象とする。中性子は検出器内で熱化し、最終的にLiLSに添加した⁶Liに捕獲され、中性子捕獲反応である α 線・トリチウム(合計4.78MeV)を放出する。これを後発事象とする。これまでLiではなくGdを添加した液体シ

ンチレータの開発を行ってきた^[5,6]. Gd の場合, 中性子捕獲反応として複数の γ 線 (合計 8 MeV) を放出するのに対し, ${}^6\text{Li}$ では, 中性子捕獲反応として α 線・トリチウムを放出するため, 先発事象, 後発事象の弁別, またバックグラウンドとの弁別が容易であることが優れている.

先発事象と後発事象の時間差は約数十 μs であり, この時間相関を利用することで反電子型ニュートリノ事象の観測を行う. 先発事象と後発事象の時間差を利用し, 時間相関のないバックグラウンド事象を削減する方法を遅延同時計測法という. この先発事象と後発事象の時間差は Li 濃度によって変化する.

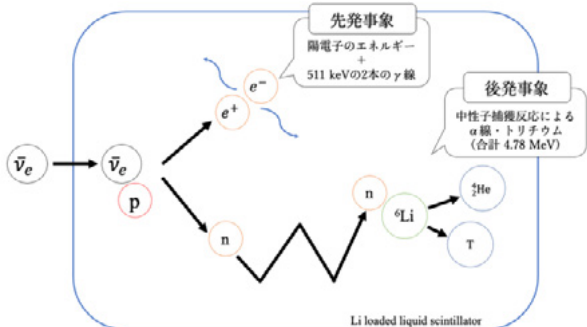


図 1. 反電子型ニュートリノ検出原理

2.4 遅延同時計測法では排除できない背景事象

図 2 に宇宙線による核破砕反応で発生する環境中の高速中性子が LiLS 内で検出される際の模式図を示す. 高速中性子が LiLS 内の陽子と弾性散乱し, 反跳陽子が生成される. これが先発事象となる. 弾性散乱後の中性子は LiLS 内で熱化し, ${}^6\text{Li}$ による中性子捕獲反応によって α 線・トリチウムを放出する. これが後発事象となる.

遅延同時計測法は図 1 に示すような 2 つの事象の時間差を利用して反電子型ニュートリノ事象を同定する手法であるが, 環境中の高速中性子事象による先発事象, 後発事象の時間差も反電子型ニュートリノ事象における先発事象, 後発事象とよく似た時間差で検出されるため, 遅延同時計測法を用いて弁別するのが困難である. そのため, 後述する波形弁別能を利用することで弁別をする.

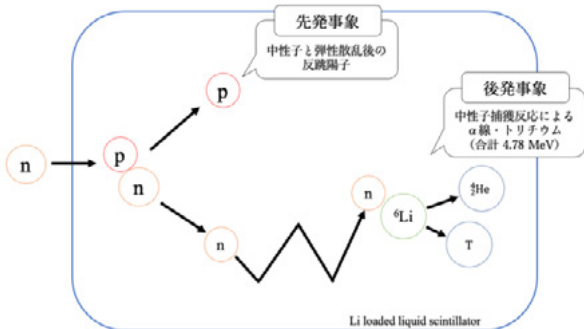


図 2. 環境中の高速中性子事象

2.5 波形弁別能

近年, エレクトロニクス発展により, 放射線検出器の出力波形を高速にデジタル化して 1 つ 1 つの波形を保存することが可能となり, 1 波形ずつを用いた解析を行うことができるようになった.

波形弁別は, 得られた放射線の波形の減衰時間の違いから γ 線と中性子を弁別する方法である. 図 3 に γ 線と高速中性子によって発生する反跳陽子の本測定において得られた平均波形を示す. γ 線と反跳陽子において波形の減衰時間に明らかな差が出ていることが確認できる.

反電子型ニュートリノ測定では先発事象が γ 線であるのに対し, 環境中の高速中性子事象の先発事象が高速中性子由来反跳陽子であることから, γ 線と反跳陽子の波形の減衰時間を利用した波形弁別によって 2.4 節で示した環境中の高速中性子事象を排除することが可能になる.

具体的な方法は, 波形の全体積分 Q_{total} , 減衰部分の積分 Q_{tail} を求める. これらの比 $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ を求め, 分布を見ることで弁別を行う.

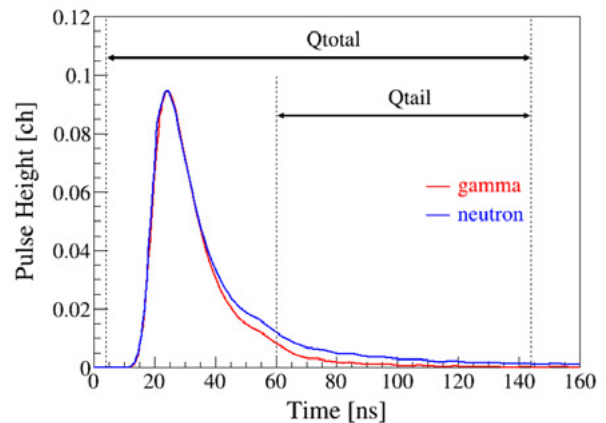


図 3. γ 線と高速中性子由来反跳陽子の本測定において得られた平均波形

3. 本研究の目的

先行研究である PANDA 実験が 2019 年に関西電力の大飯原子力発電所 4 号機より 45 m 離れた位置でテスト測定を行った際に, $S/N = 1/100$ という結果が得られた. この実験において, 原子炉由来の反電子型ニュートリノの有意性を確認するには, 約 20 日の測定が必要であることが確認された. しかし, 原子炉ニュートリノモニターの実用化には, より少ない日数で反電子型ニュートリノの検出を行う必要がある. そのため, バックグラウンドをもっと効果的に排除する必要がある.

そのため, 我々は波形弁別能を有した Li 含有液体シンチレータ (LiLS) の開発に取り組んでいる. LiLS

は波形弁別能を有しているため、遅延同時計測法を用いた後に、波形弁別によってさらに関心事象を選別することが可能になり、2.4節で示した環境中の高速中性子事象も排除することが可能になる。

本研究では、我々が原子炉ニュートリノモニターにおいて最適だと結論付けた LiLS に対して、中性子線源である ^{252}Cf 、バックグラウンド測定を行うことにより、PANDA 実験で得られた $S/N = 1/100$ がどれだけ改善できるか検討を行う。

4. Li 含有液体シンチレータ

表 1 に、本実験において使用した LiLS の材料組成を示した。Li 濃度が 0.1wt%、波形弁別能を付与する Ultima Gold F が発光母体である LAB, Ultima Gold F に対して、10wt%となるようにした。

表 1. 本実験に使用した LiLS の材料組成

材量	重量
LAB	68.4 g
界面活性剤	20.0 g
LiCl 水溶液	3.7 g (Li 0.1wt%)
PPO	0.27 g
Bis-MSB	27 mg
Ultima Gold F	7.6 g

5. 測定と評価

今回は、100 g サイズの LiLS を用意し、測定を行った。このサイズは原子炉ニュートリノモニターとして想定している 1 t 級サイズの LiLS に対して、1/10000 である。

我々の研究グループは過去に環境放射線の測定を行っている。その際に 2.4 節で示した高速中性子事象は 3L (およそ 3kg) サイズの液体シンチレータにおいて、およそ 20 events/hour という結果を得た。今回の測定では 100 g の LiLS での測定であることから、さらに高速中性子事象は検出レートが下がることが考えられる。そのため、今回の測定においては、中性子線源である ^{252}Cf の高速中性子を測定することで、LiLS 内で発生する高速中性子事象を予測し、その結果をもとにバックグラウンド測定より S/N 改善の検討を行うこととした。

5.1 中性子線源測定

5.1.1 遅延同時計測法による中性子捕獲反応の確認

中性子線源である ^{252}Cf を用いて測定を行い、遅延同時計測法を用いることで時間相関のある事象領域

(On-timing) と時間相関のない事象領域 (Off-timing) の選定を行った。

図 4 に中性子線源測定における測定系の模式図を示す。 ^{252}Cf 測定の際は、バックグラウンドの γ 線や ^{252}Cf から発生する γ 線を排除するため、厚さ 5 cm の鉛ブロックで覆い、線源側には厚さ 10 cm の鉛ブロックを設置した。これにより、大幅に γ 線による事象を排除することが可能になる。

図 5 に遅延同時計測法によって得られる先発事象と後発事象の時間差 ΔT 分布を示す。この結果から On-timing を 5~100 μs , Off-timing を 205~300 μs とした。また、先発事象のエネルギー範囲は、測定機器の性能上、5000 keV 以上はサチュレーションを起こしていたため、200~4500 keV とした。後発事象のエネルギー範囲は ^6Li による中性子捕獲反応である α 線・トリチウムの観測エネルギーがおおよそ 500 keV 付近に見られることから 300~700 keV とした。

図 6 に後発事象のエネルギースペクトルを示す。点線で囲っている範囲が今回の後発事象のエネルギー範囲である 300~700 keV である。500 keV 付近に中性子捕獲反応による α 線・トリチウムによって形成されたピークが確認できる。これにガウス関数でフィッティングをし、ピーク値より $\pm 2\sigma$ の位置である 461~634 keV の事象を中性子捕獲反応による事象として計算すると 709 ± 41 events であった。

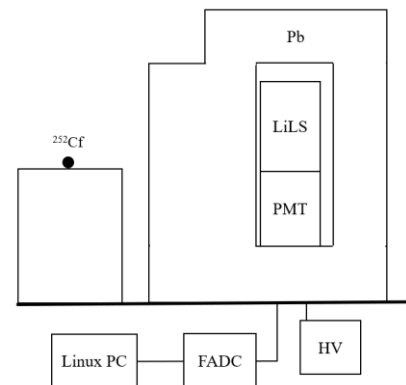


図 4. 中性子線源測定における測定系の模式図

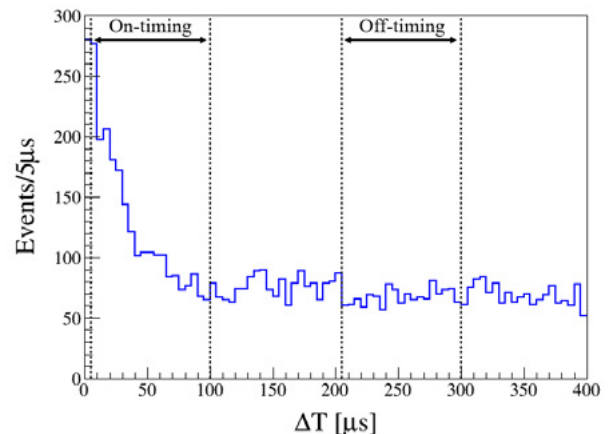


図 5. 遅延同時計測法より得られた時間差 ΔT 分布

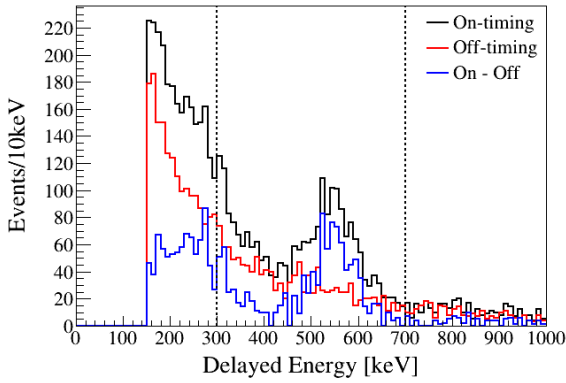


図 6. 後発事象のエネルギースペクトル

5.1.2 波形弁別を用いた n/γ の選別

遅延同時計測法を用いた ²⁵²Cf の測定データに対して γ 線による事象と高速中性子事象の弁別を行うためのカットラインを選定した．波形弁別能を行う際に 2.5 節で示した Q_{total} を波形のピークから、-20 ns ~ +120 ns の範囲、Q_{tail} を波形のピークから、+36 ns ~ +120 ns とした．

図 7 に縦軸 Q_{tail}/Q_{total}、横軸 エネルギーとして、On-timing から Off-timing を差し引いた後発事象における Q_{tail}/Q_{total} のエネルギー依存性の二次元ヒストグラムを示す．図 8 に図 7 で示した 300 keV~700 keV に対する縦軸 Q_{tail}/Q_{total} を射影した際のヒストグラムを示す．図 8 の Q_{tail}/Q_{total} ヒストグラムに対して、ガウス関数でフィッティングを行った．反電子型ニュートリノ事象を検出するには、先発事象が陽電子の電子対消滅による γ 線の事象、後発事象は ⁶Li の中性子捕獲反応による α 線・トリチウムとなる．そのため、図 8 において、⁶Li の中性子捕獲反応による α 線・トリチウム事象を 95% 以上残せるようガウス関数でフィッティングした際に得られる μ - 2σ の位置を後発事象における n/γ のカットラインとした．こうして後発事象のカットラインを選定すると後発事象では Q_{tail}/Q_{total} = 0.094 となった．

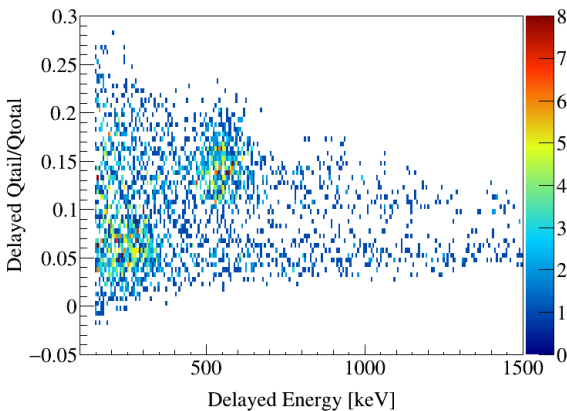


図 7. ²⁵²Cf 測定における後発事象の Q_{tail}/Q_{total} のエネルギー依存性

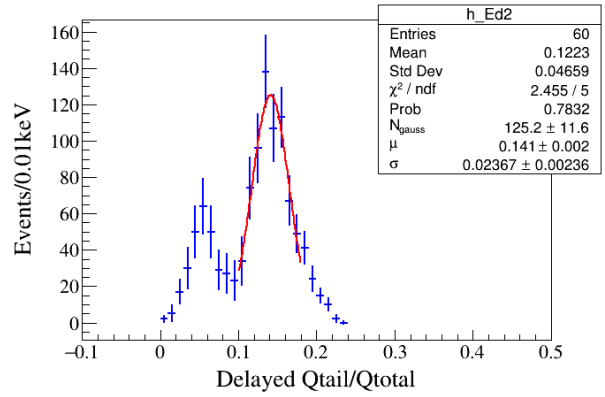


図 8. 図 7 において Q_{tail}/Q_{total} を 300~700keV の範囲で射影した際のヒストグラム (青：ヒストグラム，赤：中性子事象にフィッティングしたガウス関数)

5.2 バックグラウンド測定

5.2.1 遅延同時計測法

図 9 にバックグラウンド測定における測定系の模式図を示す．図 4 に示す中性子線源測定とは違い、周囲の鉛ブロックを排除した．

5.1 節において、On-timing を 5~100 μs、Off-timing を 205~300 μs としたところ、中性子捕獲反応を十分に確認することができた．バックグラウンド測定では、反電子型ニュートリノ事象がなく、環境中の高速中性子事象も非常に少ないことが想定されるため、遅延同時計測法を用いた際に On-timing 領域と Off-timing 領域の選定が困難である．そのため、5.1 節で示した On-timing 5~100 μs、Off-timing 205~300 μs を採用することとした．

バックグラウンドの測定データに対して遅延同時計測法を用いた．遅延同時計測法における選別条件は、次の通りとした．先発事象のエネルギー範囲は 200~4500 keV、後発事象のエネルギー範囲は 300~700 keV、On-timing 領域は 5~100 μs、Off-timing 領域は 205~300 μs である．この条件で遅延同時計測法を行い、得られた先発事象、後発事象のエネルギースペクトルをそれぞれ図 10、図 11 に示す．

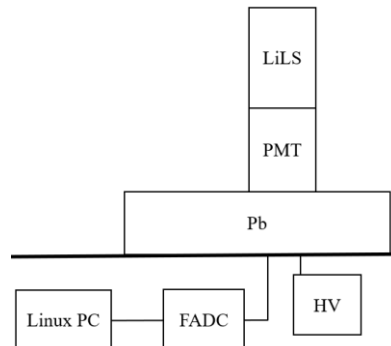


図 9. バックグラウンド測定における測定系の模式図

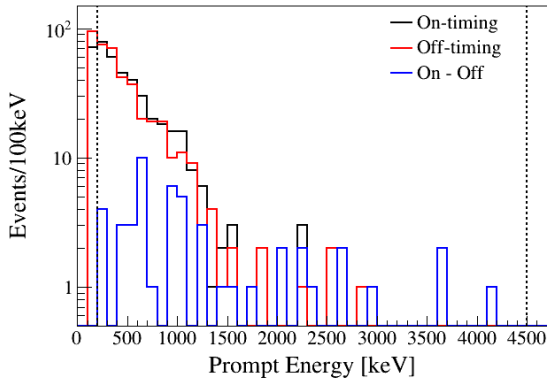


図 10. 先発事象のエネルギースペクトル

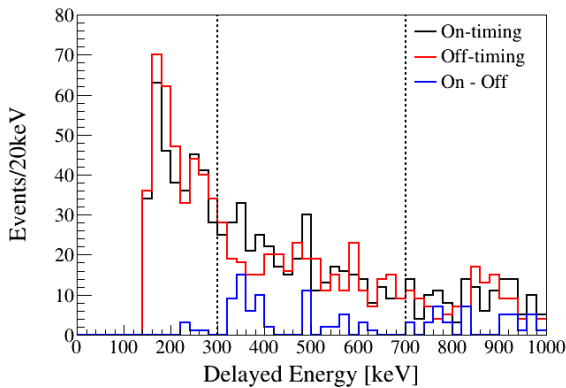


図 11. 後発事象のエネルギースペクトル

5.2.2 波形弁別による S/N 改善に関する検討

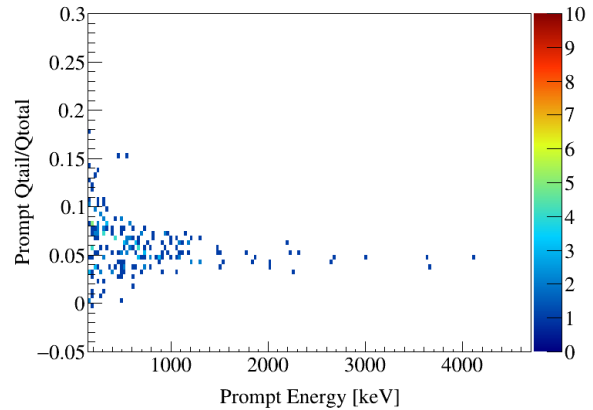
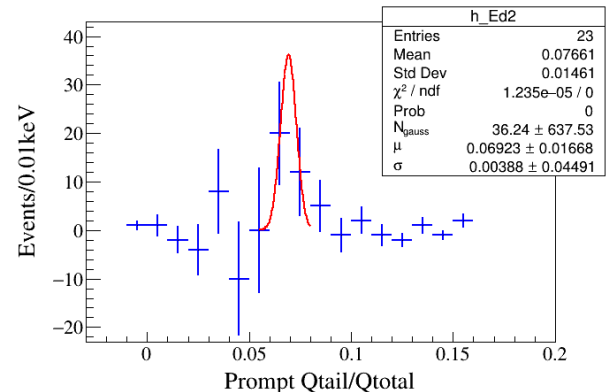
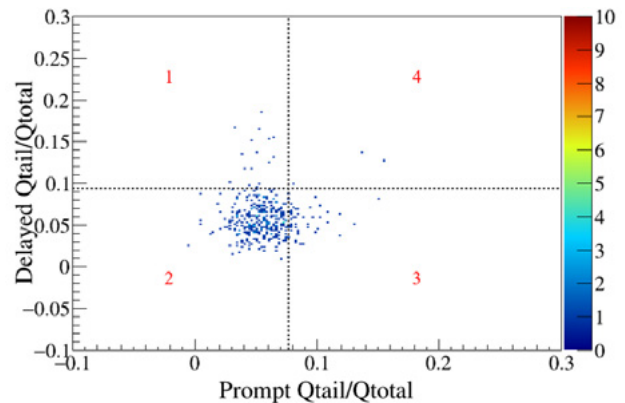
図 12 に縦軸 $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$, 横軸 エネルギーとして, On-timing から Off-timing を差し引いた遅延同時計測法後の先発事象における $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ のエネルギー依存性の二次元ヒストグラムを示す. 図 13 に図 12 で示した先発事象の 200~4500 keV に対する縦軸 $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ を射影した際のヒストグラムを示す. 5.1.2 節に示したように反電子型ニュートリノ事象の検出には, 先発事象は陽電子の電子対消滅による γ 線の事象である. そこで図 13 の $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ ヒストグラムに対してガウス関数でフィッティングを行い, γ 線の事象を 95%以上残せるようガウス関数でフィッティングをした際に得られる $\mu + 2\sigma$ の位置を先発事象における n/γ のカットラインとした. こうして先発事象のカットラインを選定すると, 先発事象では $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}} = 0.077$ となった.

図 14, 図 15 に, On-timing, Off-timing における縦軸 後発事象における $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$, 横軸 先発事象における $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ とした二次元ヒストグラムを示す. 図 14, 図 15 には, 先発事象, 後発事象のカットラインを引いており, 反電子型ニュートリノ事象が観測される領域および遅延同時計測法を用いても排除できない領域を示した.

表 2 に遅延同時計測法を用いても排除できない事

象, 図 14, 図 15 のどの領域がこの事象にあたるか, および今回観測された On-timing から Off-timing を差し引いた各領域における事象数を示す.

表 2 の結果より, 全体の事象数 (1+2+3+4) を 100% とした場合に対して反電子型ニュートリノを観測される事象領域 1 以外の事象数 (2+3+4) は 68% である. この結果より, PANDA 実験の示した $S/N = 1/100$ に対して, 今回の測定では $S/N = 1/32$ まで改善できることが確認できた.

図 12. バックグラウンド測定における先発事象の $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ のエネルギー依存性図 13. 図 12 において $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ を 200~4500 keV の範囲で射影した際のヒストグラム図 14. On-timing における縦軸 後発事象の $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$, 横軸 先発事象の $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ とした二次元ヒストグラム

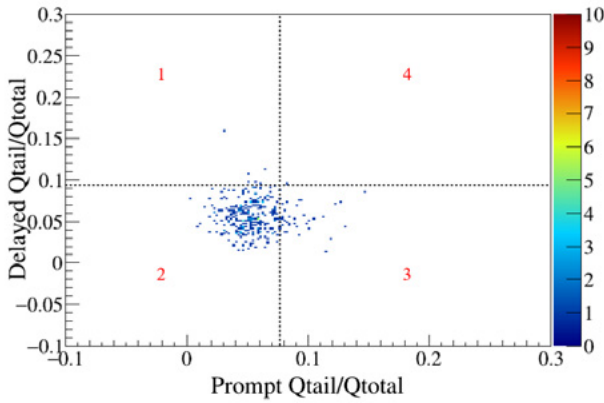


図 15. Off-timing における縦軸 後発事象の $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$, 横軸 先発事象の $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ とした二次元ヒストグラム

表 2. 遅延同時計測法後に観測される事象と今回の測定において観測された各領域における事象数

領域	事象	On [events]	Off [events]	On-Off [events]
1	$\gamma - n$	16 ± 4	6 ± 2	10 ± 5
2	$\gamma - \gamma$	297 ± 17	286 ± 17	11 ± 24
3	$n - \gamma$	43 ± 7	35 ± 6	8 ± 9
4	$n - n$	3 ± 2	1 ± 1	2 ± 2

6. 結果と考察

福井大学敦賀キャンパス 3 階の実験室でバックグラウンド測定を行った。敦賀キャンパスの近くには稼働中の原子力発電所がないため測定において得られるデータはすべて環境中のバックグラウンドに起因するものとした。

5.1 中性子線源測定では ^{252}Cf を用いて遅延同時計測法を用いることによって、中性子捕獲反応数は $461 \sim 634 \text{ keV}$ の範囲に観測でき、中性子フラックス $4 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ に対しておよそ 35 events/hour であった。また、この測定において反電子型ニュートリノを観測する際の後発事象カットラインを $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}} = 0.094$ とした。

5.2 バックグラウンド測定においては先発事象カットラインを $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}} = 0.077$ とした。中性子線源測定で得られた後発事象カットラインを用いることで、現状 $S/N = 1/100$ をどこまで改善できるのかを確認した。結果はバックグラウンドをさらに 68% 排除可能であることが確認され、 $S/N = 1/32$ となった。

今回の測定は 100 g サイズの LiLS を使用し、測定を行い、 S/N を見積もった。しかし、実際に想定している原子炉ニュートリノモニターの検出器サイズは 1 t 級である。波形弁別能は検出器サイズが大きくなると悪くなることが分かっている。今後は 1 kg とい

った LiLS の容量を大きくした検出器で検討を行う必要があると考えられる。

7. まとめ

我々の研究グループでは原子炉ニュートリノモニターの開発に取り組んでいる。原子炉ニュートリノモニターとは、原子炉運転時に発生する核分裂生成物の β 崩壊の際に放出される反電子型ニュートリノを観測することで原子炉内部をリアルタイムモニタリングする技術である。その中でも、我々は特に重要な反電子型ニュートリノ検出器の開発に取り組んでいる。反電子型ニュートリノ検出の際に逆 β 崩壊反応を利用する。逆 β 崩壊反応の際に放出される中性子を効率よく検出できると反電子型ニュートリノの検出効率向上に貢献する。そこで我々は中性子捕獲反応として α 線・トリチウムを放出する ^6Li を添加し、波形弁別能を有した Li 含有液体シンチレータ (LiLS) の開発に成功した。これまでは LiLS の発光量、波形弁別能、中性子捕獲反応といった発光特性を中心に基礎特性の評価を行ってきた。そこで原子炉ニュートリノモニターに使用するために最適な LiLS を結論づけた。

先行研究である PANDA 実験では反電子型ニュートリノ事象とバックグラウンド事象の比 (S/N) が $1/100$ であることが示されている。PANDA 実験では波形弁別能を有していないプラスチックシンチレータを使用しており、本実験では波形弁別能を有した LiLS を使用するため、遅延同時計測法では排除できない環境中の高速中性子事象等の排除が可能になり、 S/N の改善が期待できる。

本研究では、最適と結論づけた LiLS 100 g を用いて中性子線源である ^{252}Cf 測定、バックグラウンド測定を行った。これらの測定データを用いることで、 S/N がどれだけ改善できるか見積もった。今回の測定では、近くに稼働中の原子力発電所といった反電子型ニュートリノの発生源となる施設がなかったため、バックグラウンド測定の結果を用いて S/N の N にあたるバックグラウンド事象がどれだけ排除できるか検討を行った。バックグラウンド測定において、 100 g の LiLS では環境中の高速中性子事象は非常に少ないことが想定されるため、中性子線源として ^{252}Cf を用いて中性子捕獲反応の確認ができるエネルギー条件の選定や後発事象における $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ のカット条件の選定を行った。遅延同時計測法後に波形弁別能を用いることで $S/N = 1/32$ になることが確認できた。

今後は、原子炉ニュートリノモニターの開発に向

けて検出器の大型化を行う必要がある。将来的には、1 t 級の LiLS を用意する必要がある。また波形弁別能は LiLS が大きくなれば、悪くなることが分かっているため、まずは 1 kg とした 1/1000 サイズの試作機を作製し、大型化に向けて検討を行っていく必要がある。

参考文献

1. Final Reports: Focused Workshop on Antineutrino Detection for Safeguards Applications, 28-30 October 2008 IAEA Headquarters, Vienna.
2. N. S. Bowden et al., "Observation of the isotopic evolution of pressurized water reactor fuel using an antineutrino detector", Journal of Applied Physics 105, 064902 (2009).
3. Tomoyuki Konno, "Measurement of reactor neutrinos using plastic scintillator array on the ground", Applied Antineutrino Physics 2019, Guangzhou city, China, Dec.7 2019(presentation).
4. J. Ashenfelter et al. (The PROSPECT collaboration), "Performance of a segmented ^6Li -loaded liquid scintillator detector for the PROSPECT experiment", JINST 13(2018) P06023.
5. 池山佑太, 中島恭平, 玉川洋一
「原子炉ニュートリノモニター開発 -PSD 能力を有する Gd 入り液体シンチレータの発光量と透過率測定-」
福井大学学術研究院工学系部門研究報告, 2020.03, vol.68, 3.
6. 増井友哉, 川端孝弥, 玉川洋一, 中島恭平
「原子炉ニュートリノモニター開発 -試作機のバックグラウンド排除能力の評価-」
福井大学学術研究院工学系部門研究報告, 2021.10, vol.70, 2.

Branched Polymer Architecture Formed in Conventional and Living Emulsion Polymerization

Hidetaka TOBITA*

(Received January 14, 2022)

Emulsion polymerization proceeds in a unique locus of polymerization, having confined submicron space with a higher polymer concentration from the beginning of polymerization. Assuming the ideal polymerization kinetics during Interval II in emulsion polymerization, the branched architecture formed by the chain transfer reaction to the polymer is investigated by using a Monte Carlo simulation method, both for the conventional and the living free-radical polymerization (FRP). The conventional FRP leads to form a broad molecular weight distribution (MWD), while the living FRP gives a rather narrow MWD. The expected contraction ratio g of the mean-square radius of gyration Rg^2 of the branched polymer to that of a linear polymer for a given number of branch points k is essentially the same, at least approximately, both for the conventional and the living FRP, irrespective of the reaction condition, and a universal equation is proposed for the g - k relationship. The magnitude of Rg^2 can be represented by using the maximum span length L_{MS} , $Rg^2 = 0.172 L_{MS}$, both for the conventional and the living FRP. Similar relationships, $Rg^2 = a L_{MS}$ with $a = 0.17$ – 0.18 apply to various types of branched polymers, and could be considered as a universal relationship.

Key Words : Branched Polymers, Chain Transfer to Polymer, Emulsion Polymerization, Living Radical Polymerization, Molecular Weight Distribution, Radius of Gyration

1. Introduction

Polymerization is a reaction process in which monomers are converted to polymers, and therefore, the weight fraction of polymer increases just linearly with the monomer conversion x , as shown by the dotted line in Fig. 1 for usual bulk polymerization. On the other hand, the locus of polymerization in emulsion polymerization is the polymer particle, which is schematically shown in Fig. 2. After a short nucleation period, called Interval I, the weight fraction of polymer in the polymer particle is approximately kept constant until the depletion of monomer droplets, due to the monomer transfer from the monomer droplets to the polymer particles. The constant polymer weight fraction period, which leads to a constant polymerization rate period in a typical emulsion polymerization, is called

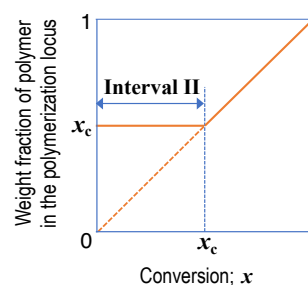


Fig.1 Polymer weight fraction development in the polymerization locus during emulsion (solid line) and bulk polymerization.

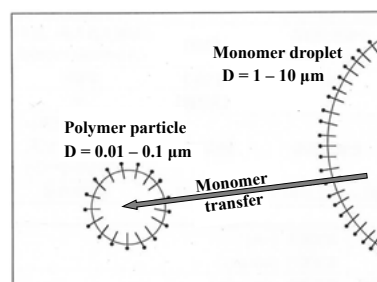


Fig. 2 Illustration of the emulsion polymerization during Interval II.

* Department of Materials Science and Engineering

Interval II. Assuming the nucleation period is small enough, the weight fraction of polymer in the polymer particle changes as shown by the solid line in Fig. 1. In this article, the branched polymer formation due to the chain transfer to polymer is investigated theoretically during Interval II.

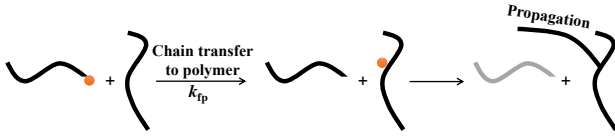


Fig. 3 Schematic representation of the process of chain transfer to polymer in free-radical polymerization (FRP).

Fig. 3 shows the process of chain transfer to polymer, leading to the long-chain branching. The rate R_{fp} of chain transfer to polymer is represented by:

$$R_{fp} = k_{fp}[R^*][M]_0 x_c \quad (1)$$

where k_{fp} is the rate constant for the chain transfer to polymer, $[R^*]$ is the radical concentration, $[M]_0$ is the initial monomer concentration, and x_c is the weight fraction of polymer in the polymer particle, which is equal to the monomer conversion at which the monomer droplets are depleted, as shown in Fig. 1. In usual polymerization in a homogeneous medium, R_{fp} is zero at conversion $x = 0$, because polymer is not present. On the other hand, R_{fp} is large from the beginning in emulsion polymerization. Emulsion polymerization promotes the branching reaction.

The rate R_p of polymerization is given by:

$$R_p = k_p[R^*][M]_0(1-x_c) \quad (2)$$

where k_p is the propagation rate constant.

The branching density ρ is defined as the fraction of units that bear a tri-branch point. The instantaneous branching density is given by the rate ratio of R_{fp} and R_p , which is given by:

$$\rho = \frac{R_{fp}}{R_p} = C_{fp} \frac{x_c}{1-x_c} \quad (3)$$

where C_{fp} ($= k_{fp}/k_p$) is the chain transfer constant to polymer. Equation (3) shows that the branching density is kept constant throughout Interval II, investigated in this article.

Although the branching density of the whole polymer is kept constant, the branching density or the probability of possessing a branch point in a unit in chain is different,

depending on when the unit is incorporated into the polymer chain. The units that are incorporated in the earlier stage of polymerization are subjected to the polymer transfer reaction for a longer period of time, compared with those bound in the later stage of polymerization. The branching density of a unit in chain is a function of the time when the monomer turns into polymer.

The total number n of monomeric units incorporated into polymer in a polymer particle increases with time. Suppose $n = n_p$ at the present time. The expected branching density ρ_{unit} of a unit bound into polymer at $n = n_b$ is given by the following equation.^[1]

$$\rho_{unit}(n_b, n_p) = C_{fp} \frac{x_c}{1-x_c} \ln\left(\frac{n_p}{n_b}\right) \quad \text{for Interval II.} \quad (4)$$

Fig. 4 shows the calculated result of the branching density distribution represented by Eq. (4) at $n_p = 1 \times 10^6$. A large variation in the branching density distribution is an important characteristic of emulsion polymerization, although the average branching density ($= \rho$) is kept constant throughout Interval II.

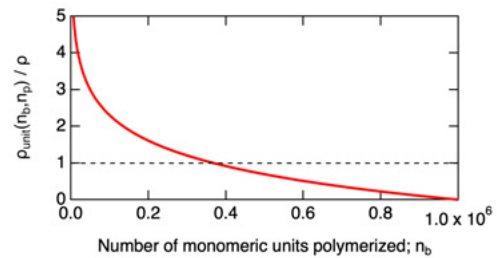


Fig. 4 Branching density distribution ρ_{unit} during Interval II at $n_p = 1 \times 10^6$, calculated from Eq. (4).

When discussing the branched polymer architecture, the primary polymer chain^[2] is a useful concept. The primary polymer chain is a linear chain when all branch points are severed. In the conventional FRP, each primary chain is formed instantaneously, therefore, Fig. 4 shows that the primary chains that are formed in the earlier stage of polymerization possess a larger branching density than those formed in the later stage of polymerization. The variation in the branching density is among the primary chains in the conventional FRP.

On the other hand, in the living FRP, or the reversible-deactivation radical polymerization in the IUPAC terminology,^[3] the variation in the branching density is observed along the sequence of a primary polymer chain. Note that when the growing primary

chain causes the polymer transfer reaction, this primary chain becomes a dead primary chain, while a new growing primary polymer chain is formed from a radical on a backbone chain.

In this article, the statistical properties, such as the molecular weight distribution and the radius of gyration, of the branched polymer molecules formed in the conventional and the living emulsion polymerization are investigated, seeking for newer methods to design and control the branched polymer architecture.

2. Method

The Monte Carlo simulation method to generate the branched polymer architecture of each polymer molecule is described in detail in ref.^[4] As described therein, the number fraction distribution $N_p(r)$ of the primary polymer chains in emulsion polymerization during interval II is typically given by the following most probable distribution.

$$N_p(r) = \frac{1}{\bar{P}_{np}} \exp\left(-\frac{r}{\bar{P}_{np}}\right) \quad (5)$$

where r is the chain length, and \bar{P}_{np} is the number-average chain length of the primary polymer molecules.

For the living FRP, the termination reaction is neglected, and the average number of monomeric units added during a single growth period is set to be 2, as was done earlier.^[4,5]

The statistical analysis is conducted when the number of monomeric units polymerized in a polymer particle reaches $n = 1 \times 10^6$. Assuming that the molecular weight of the monomer is 100, and the density of polymer is 1 g/cm^3 , the diameter of a dried polymer particle at $n = 1 \times 10^6$ is 68 nm, which conforms to a normal emulsion polymerization experiment during Interval II. A large number of polymer particles are simulated to determine statistically valid properties.

3. Results and Discussion

3.1 Calculation Conditions

The systematic analyses are conducted by using the conditions shown in Table 1. C1–C4 are the conventional FRP, and L1–L4 are the living FRP.

The branching probability P_b , which is the probability for a primary polymer chain end to be connected to the

backbone polymer chain is increased from 0.2857 (top: C1, L1) to 0.8333 (bottom: C4, L4).

Table 1. Calculation conditions

Run	\bar{P}_n ¹⁾	ρ ²⁾	\bar{P}_{np} ³⁾	P_b ⁴⁾
C1, L1	200	0.002	142.9	0.2857
C2, L2	500	0.002	250	0.5
C3, L3	1000	0.002	333.3	0.6667
C4, L4	1000	0.005	166.7	0.8333

¹⁾ The number-average chain length of the product polymers.

²⁾ The average branching density of the product polymer. ³⁾ The number-average chain length of the primary polymer chains.

⁴⁾ The probability that the chain end of a primary chain is connected to the backbone chain, named branching probability.

Fig. 5 shows the weight fraction distribution of the primary chains. In the figure, PDI means the polydispersity index, which is the ratio between the weight- and number-average, representing the degree of breadth of the chain length distribution. For the conventional FRP, PDI = 2 for all C1–C4, because the PDI of the most probable distribution is 2.

For the living FRP, the smooth low molecular weight curve represents the primary chains that have experienced chain stoppage through the polymer transfer reaction. In L1, most primary chains do not experience the polymer transfer reaction, which is represented by the sharp high molecular weight peak. On the other hand, most of the primary chains in L4 are subjected to the polymer transfer reaction to form a distribution close to the most probable distribution whose PDI is nearly 2.

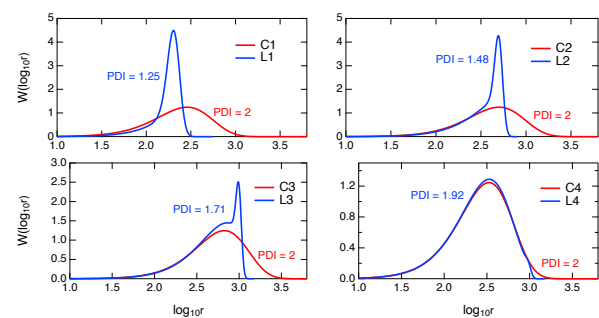


Fig. 5 Primary chain length distribution.

3.2 Molecular Weight Distribution (MWD)

3.2.1 Conventional FRP

Fig. 6 shows the weight fraction distribution of the product branched polymers for the conventional FRP at $n = 1 \times 10^6$. As the branching probability P_b increases, the

distribution becomes broader, and PDI is as large as 109 for C4. The distribution is broader than the random branching of the same primary polymer chains,^[4] and it is shown that the present type of nonrandom distribution of branch points, represented by Eq. (4) and Fig. 4, leads to a broader molecular weight distribution in the conventional FRP.

When P_b is large, as in the cases of C3 and C4, another high molecular weight (MW) peak appears. This high MW peak is formed because of the limitation of the small particle size. In the present simulation, the total number of monomeric units incorporated into polymer molecules in a particle is $n = 1 \times 10^6$, and therefore, it is impossible to form a polymer molecule whose chain length (degree of polymerization) is larger than 1×10^6 . In fact, the polymer molecules in the high MW peak in C4 are the largest polymer molecule in each polymer particle. These polymer molecules want to grow further, but they cannot because of the limitation of the particle size. This type of confined space effect may become important in nonlinear emulsion polymerization.

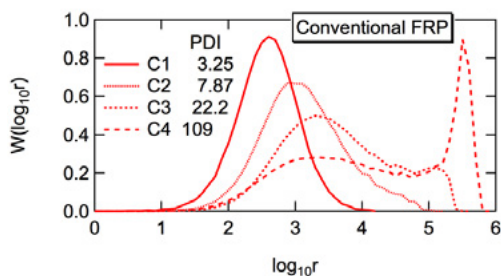


Fig. 6 Weight fraction distribution of the product polymers at $n = 1 \times 10^6$, for the conventional FRP, C1–C4.

Another interesting characteristic of the conventional FRP conducted in a constant polymer/monomer condition is that the MWD of the high MW tail follows the power law, represented by the following weight-based distribution function.^[6,7]

$$W(r) \propto r^{-1/P_b}, \quad (6a)$$

or equivalently, in the number-based functional form:

$$N(r) \propto r^{-(1/P_b+1)}. \quad (6b)$$

Fig. 7 shows the double logarithmic plot of the number fraction distribution $N(r)$ of C1–C4. The power-law distribution represented by Eq. (6b) is confirmed, including the bimodal distributions observed for C3 and C4 shown in Fig. 6. Because the slope is related with P_b , the power-law distribution can be used to determine the

chain transfer constant experimentally.^[7]

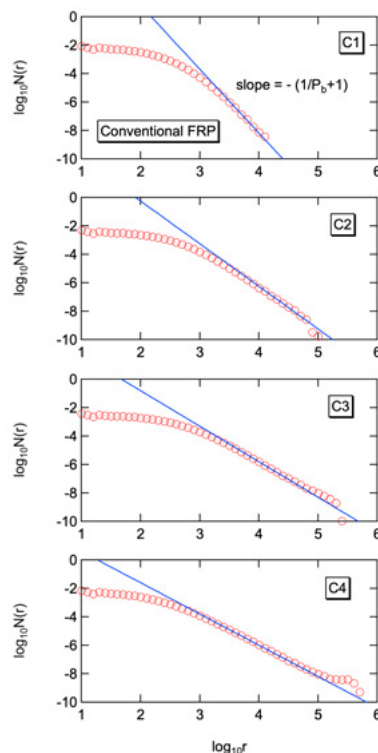


Fig. 7 Double logarithmic plot of the number fraction distribution $N(r)$ of the polymers formed in the conventional FRP, C1–C4.

The red bimodal MWD shown in Fig. 8 is the experimental result reported for the emulsion polymerization of ethylene,^[8] which is known to have a large frequency of branching through chain transfer to polymer. A bimodal MW distribution, as in the case of C4, is observed. When the MWD, $W(\log_{10}M)$ is converted to $W(M)$ and plotted in the double logarithmic form, one obtains the dotted curve, showing a power-law relationship for the important MW region. $P_b = 1/1.23 = 0.813$ leads to give the chain transfer constant C_{fp} that agrees reasonably well with the reported value.^[7]

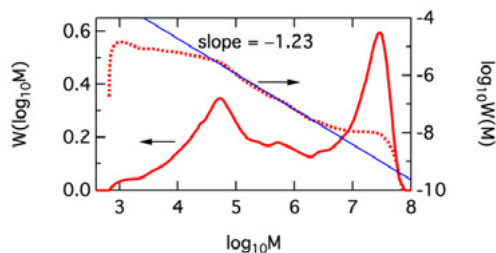


Fig. 8 MWD of the emulsion-polymerized polyethylene, reported in ref.^[8] In the figure, M is the molecular weight, and is related with chain length (degree of polymerization) r by $M = 28 r$.

3.2.2 Living FRP

Fig. 9 shows the simulated weight fraction distribution for L1–L4. Although the branching density ρ is the same as for the corresponding conventional FRP, for example L1 and C1, significant broadening of the MWD, as was observed for the conventional FRP, is not found. In fact, the distribution is narrower than the random branching of the same primary chains.^[4] The polymers with extremely large MW are not formed in the living FRP.

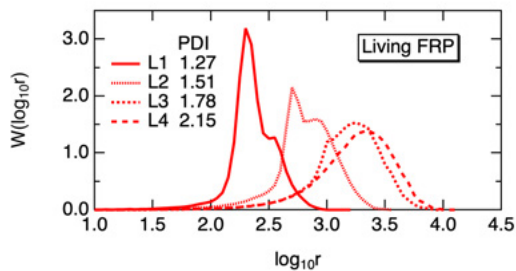


Fig. 9 Weight fraction distribution of the product polymers at $n = 1 \times 10^6$, for the living FRP, L1–L4.

Table 2 shows how the PDI changes with branching. Interestingly, the PDI does not change significantly in the living FRP, which is a notable difference in contrast to the conventional FRP. Note that the primary chain length distribution cannot be determined in a straightforward manner in a usual emulsion polymerization experiment, and all one can obtain is the MWD of the product polymers. It may be difficult to find the existence of branches, judging solely from the product polymer distribution because the PDI values are so small.

Table 2 Polydispersity index (PDI) of the primary chains and the product branched polymers, for L1–L4.

	Primary chains	Product polymers
L1	1.25	1.27
L2	1.48	1.51
L3	1.71	1.78
L4	1.92	2.15

3.3 Radius of Gyration

The mean-square radius of gyration Rg^2 describes the spatial dimension of the polymer. To highlight the effect of branching in polymer, the g -ratio of Rg^2 of the branched polymer to that of a linear polymer is a useful measure.

$$g = \frac{Rg_{\text{Branched}}^2}{Rg_{\text{Linear}}^2}. \quad (7)$$

As a standard branched polymer structure, the Zimm-Stockmayer equation^[9] that describes the random branching of the primary chains with the most probable distribution has been used widely. The expected g -value for the polymer molecules having k branch points is given by:

[Zimm-Stockmayer]

$$g = \left[\left(1 + \frac{k}{7} \right)^{0.5} + \frac{4k}{9\pi} \right]^{-0.5} \quad (8)$$

Note that the branched architecture formed in the present emulsion polymerization system is not random, as shown by the branching density distribution in Fig. 4. For the primary chain length distribution, the most probable distribution applies for the conventional FRP, but not for the living FRP, as shown in Fig. 5.

Fig. 10 shows the g - k relationship for C4. Each red dot represents a pair of values for each polymer molecule, g and k . The blue open circles show the average within the intervals of Δk , representing the expected g -value for a given k .

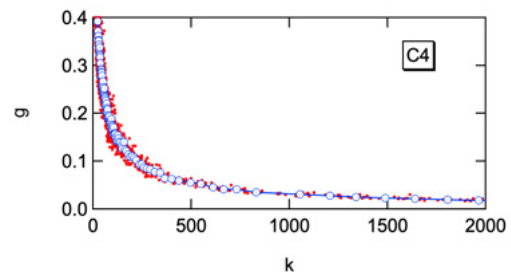


Fig. 10 Relationship between g and k for C4.

Fig. 11 shows the expected g - k relationships for the conventional FRPs. It is interesting to note that the relationships stay nicely on a single universal curve, irrespective of the calculation condition.

The black solid line shows the Zimm-Stockmayer theory, represented by Eq. (8), and the conventional FRP shows smaller g -values, i.e., smaller radius of gyration. Because the primary chains in C1–C4 follow the most probable distribution, which is the same as the assumption used in the Zimm-Stockmayer theory, the difference must come from the nonrandom connection of the primary chains. The compact architecture formed in the conventional FRP, compared with the random branching, could be rationalized, based on the branching

density distribution shown in Fig. 4. In the conventional FRP, each primary chain is formed instantaneously, and the primary chains formed in the earlier stage of polymerization are expected to possess larger values of branching density. These primary chains are likely to bear a large number of branch chains, leading to form a core region, resulting in an overall star-like architecture. This would be the reason for showing smaller g -values.

Incidentally, Eq. (8) represents $g \propto k^{-0.5}$ for the large k region, while the simulation results show $g \propto k^{-0.8}$, as represented by the dotted line in Fig. 11b. This finding will be used to find the universal g - k relationship.

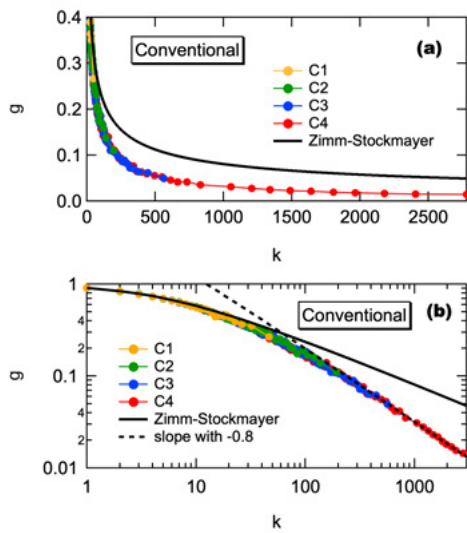


Fig. 11 Relationship between g and k for the conventional FRP, C1–C4. (a) Normal plot. (b) Double logarithmic plot.

Fig. 12 shows the g - k relationships for the living FRPs, L1–L4. A slight increase by the branching probability P_b is observed, however, the difference is rather small, and it could be considered essentially the same g - k relationship for all conditions.

The solid black curve shows the Zimm-Stockmayer theory, and the g - k relationship appears to be close. On the other hand, this seemingly close relationship is just coincidental, because the primary chain length distribution is much different from the most probable distribution, as shown in Fig. 5.

It is already known that the narrower primary chain length distribution leads to a smaller g -value in the random branched polymers.^[10] For the primary chains that follow the Schulz-Zimm distribution, the following equation was proposed.

[Random branch of the Schulz-Zimm chains]

$$g = \left[\left(1 + \frac{k}{5 + \text{PDI}} \right)^{0.5} + \frac{4k}{(1 + 4\text{PDI})\pi} \right]^{-0.5} \quad (9)$$

Note that the Schulz-Zimm distribution, or the Gamma distribution in the mathematical term, is a generalized form of the most probable distribution, and Eq. (9) reduces to Eq. (8) when $\text{PDI} = 2$.

The primary chain length distribution becomes broader in the order from L1 to L4, and therefore, it could be expected that the g -value increases from L1 to L4. However, the obtained g - k relationship is essentially the same, as shown in Fig. 12.

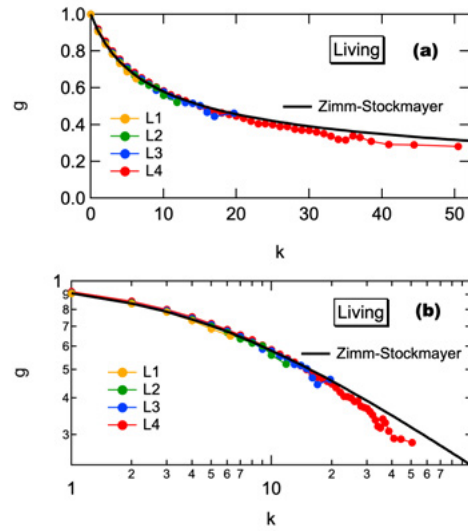


Fig. 12 Relationship between g and k for the living FRP, L1–L4. (a) Normal plot. (b) Double logarithmic plot.

To remove the difference of primary chain length distribution, the g - k relationships for the random branched polymers of L1–L4 conditions shown in Fig. 5 are determined by using the MC simulation. Fig. 13 shows the comparison. When the branching probability P_b is small (L1), the g -value is larger than the corresponding random branch case, but the difference becomes smaller as P_b increases, and the g -value is smaller than the random branch in L4.

Incidentally, the black solid curves for the random branched polymers in Fig. 13 are calculated from Eq. (9), and they agree with the MC simulation results well, even though the primary chain length distribution assumed is different from the Schulz-Zimm distribution. Equation (9) could be used to estimate the g -values of the random branched polymers in general.

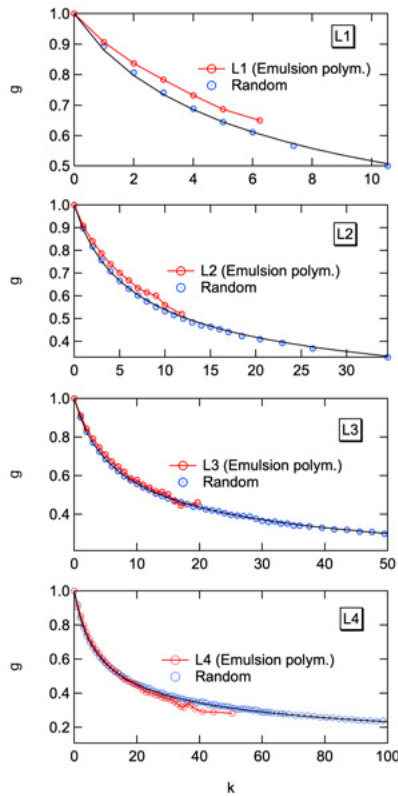


Fig. 13 Comparison of the g - k relationship. The primary chain length distribution is set to be the same for the corresponding cases.

For L4, most primary chains experience the chain stoppage due to the chain transfer reaction, as can be guessed from the primary chain length distribution shown in Fig. 5. In this case, the situation is similar to the conventional FRP. The primary chains formed earlier are expected to possess a larger number of branch chains, and a core region could be formed. It is reasonable to consider that more compact architecture is formed, compared with random branching.

On the other hand, in L1, most primary chains do not experience chain stoppage, and the branching density distribution shown in Fig. 4 is expected to be observed along the sequence of a primary chain. The probability of possessing a branch point is higher for the units located closer to the starting point. If these earlier incorporated units are subjected to the chain transfer reaction at the earlier stage of polymerization, the length of the connected branch chains could be long, because they have enough time for growth. This type of event would introduce a long linear polymer part in the formed branch polymer molecule, which makes the radius of gyration larger. This would be the reason for obtaining a larger g -value, compared with the random branching.

As the branching probability P_b increases, the primary chain length distribution becomes broader, which would make the g -value larger. On the other hand, a larger P_b tends to reduce the above enlarging effect caused by the branching density distribution along the chain. In the case of L4 in which most of the primary chains experience chain transfer reaction, the branching density distribution is found among the primary chains, not along the chain. The g -value is reduced by the branching density distribution in the case, L4.

3.4 Universal g - k Relationship

As shown in Fig. 11 and Fig. 12, it appears that while the g -value for the conventional FRP is significantly smaller than the Zimm-Stockmayer equation, the g -value for the living FRP is rather close to the Zimm-Stockmayer relationship. On the other hand, it is worth noting that the range of the k -values is much different. Even though the average branching density is the same for the corresponding conventional and living FRP, huge polymer molecules are not formed in the living FRP, as shown in the weight fraction distribution, Fig. 9. The branch points are distributed among polymer molecules much more evenly in the living FRP.

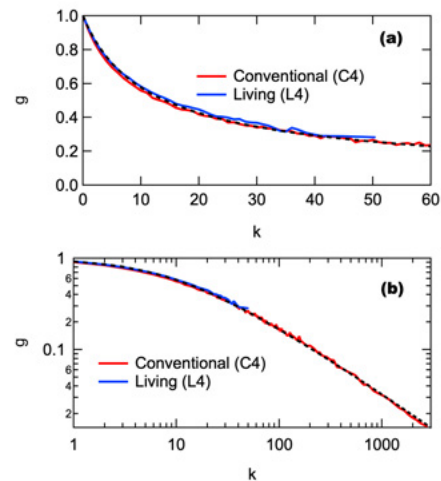


Fig. 14 Universal g - k relationship found for both the conventional and living FRP. (a) Normal plot. (b) Double logarithmic plot.

Fig.14 shows the g - k relationship for C4 and L4, plotted on the same sheet. Both relationships agree well. Note that the g - k relationships of C1–C4 lie on a single curve (Fig. 11), and in addition, L1–L4 agree well (Fig. 12). Therefore, the g - k relationships for all cases can be described by a single universal curve, i.e., the black

dotted curve, which is given by the following empirical equation.

[Emulsion polymerization during Interval II]

$$g = \left[\left(1 + \frac{k}{12} \right)^{0.5} + \frac{k}{5\pi} \right]^{-0.8} \quad (10)$$

The above universal relationship for the emulsion polymerization during Interval II, which is applicable both for the conventional and living FRP, is proposed here.

3.5 Relationship between Rg^2 and the Maximum Span Length, L_{MS}

In a branched polymer molecule, there are many chain ends, as shown in Fig. 15. Within various combination of two chain ends, the longest one is named the maximum span chain, whose length is described as L_{MS} . It is reasonable to consider that L_{MS} has a dominant effect on the mean-square radius of gyration, Rg^2 .

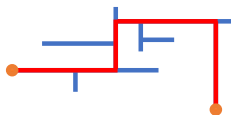


Fig. 15 Schematic representation of the maximum span chain (red), whose length is represented by L_{MS} .

In this article, L_{MS} is represented by the number of monomeric units, and therefore, Rg^2 used here is the one when each monomeric unit is considered as a freely rotating segment. Obviously, a segment consisting of any number of monomeric units can be used, as long as the number of segments is large enough. The above definition (one monomeric unit forms a segment) is needed only for the absolute values of Rg^2 and L_{MS} plotted on the figures.

Fig. 16 shows the Rg^2 - L_{MS} relationship. Each red dot represents a pair of values for each polymer molecule, Rg^2 and L_{MS} . The blue open circles show the average within the intervals of ΔL_{MS} , representing the expected Rg^2 -value for a given L_{MS} . Nice linear relationship is observed.

Fig. 17 shows the expected Rg^2 for the conventional FRPs. All C1–C4 fall nicely on a single line, $Rg^2 = 0.172 L_{MS}$.

Fig. 18 shows the Rg^2 - L_{MS} relationships for the living FRPs. Again, all the relationships for L1–L4 fall on the same line, $Rg^2 = 0.172 L_{MS}$. The relationship, $Rg^2 =$

$0.172 L_{MS}$ applies both for the conventional and living FRP.

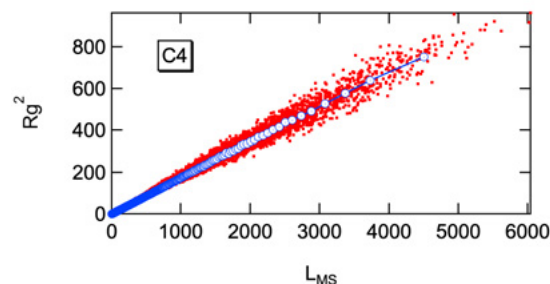


Fig. 16 Relationship between Rg^2 and L_{MS} for the case with C4.

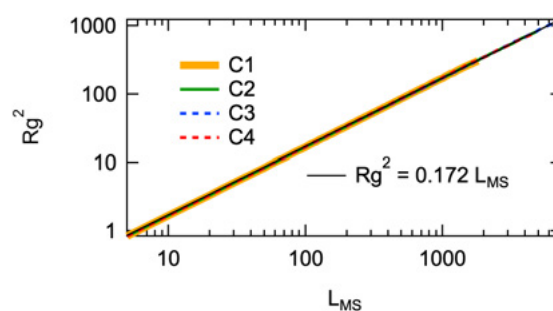


Fig. 17 Relationship between Rg^2 and L_{MS} for the conventional FRP, C1–C4.

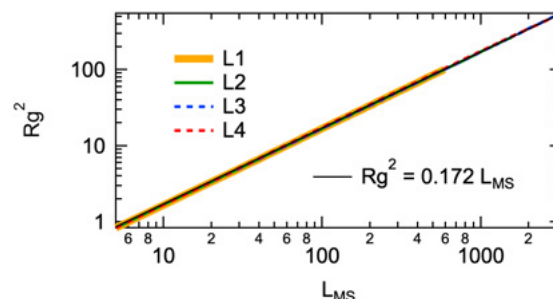


Fig. 18 Rg^2 - L_{MS} relationship for the living FRP, L1–L4.

Essentially the same linear relationship is valid for various types of branched polymers, as summarized in Table 3. The relationship,

$$Rg^2/L_{MS} = 0.17 - 0.18 \quad (11)$$

applies universally for various types of branched polymers that include randomness in their architecture. The value of a is a little larger than $1/6 = 0.167$ for linear polymers, which implies that the polymer chains other than the maximum span chain contribute slightly to increase the a -value.

In order to synthesize branched polymers with large radius of gyration, one should design a branched

architecture whose maximum span length is large. Because L_{MS} is a one-dimensional property, it is much easier than directly imagining complex 3D architectures for the molecular design.

Table 3 Linear relationship $Rg^2 = a L_{MS}$, found for various types of polymers.

Polymer type	a
Emulsion polymerization during Interval II: Conventional FRP with chain transfer to polymer	0.172
Emulsion polymerization during Interval II: Living FRP with chain transfer to polymer	0.172
Random branching of polymer chains ^[10]	0.178
Hyperbranched polymers formed in step polymerization of AB ₂ -type monomer conducted in a batch reactor or in a CSTR ^[11]	0.18
Hyperbranched polymers formed in self-condensing vinyl polymerization (SCVP) conducted in a batch reactor or in a CSTR ^[12]	0.18
Linear polymers ^[9]	0.167
Dendrimer ^[11,12]	0.5

4. Conclusions

The branched architecture formed in the conventional and living emulsion polymerization that involves chain transfer to polymer was investigated theoretically. The simulations were conducted for Interval II, where the polymer/monomer ratio is kept constant.

The MWD formed in the conventional FRP can be very broad, and a bimodal MWD could be formed when the branching probability P_b is large enough. The high MW tail follows the power law, $W(r) \propto r^{-\alpha}$ with $\alpha = 1/P_b$. Controllable power-law distribution can be obtained by using the conventional FRP.

The living FRP leads to form rather narrow MWD. One may overlook the formation of branches, judging solely from the formed MWD.

Both for the conventional and living FRP, the g - k relationship is represented by the following universal relationship [Eq. (10)], which gives smaller g -value compared with the Zimm-Stockmayer formula.

$$g = \left[\left(1 + \frac{k}{12} \right)^{0.5} + \frac{k}{5\pi} \right]^{-0.8}$$

Both for the conventional and living FRP, the

relationship between the mean-square radius of gyration Rg^2 and the maximum span length L_{MS} is represented by $Rg^2 = 0.172 L_{MS}$. For various types of branched polymers, from the polymers with long-chain branches to the hyperbranched polymers synthesized through various types of reaction/reactor, the following simple relationship applies. [Eq. (11)]

$$Rg^2/L_{MS} = 0.17 - 0.18$$

For example, to produce branched polymers having a large radius of gyration, one should think of a production process that leads to give larger values of maximum span length, L_{MS} .

The present work would shed new light on the production technologies for various types of branched polymers with controlled architecture.

References

- [1] H. Tobita: Polym. React. Eng., 1, 357-378 (1993).
- [2] P.J. Flory: Principles of Polymer Chemistry, Cornell University Press, Ithaca, NY, Chap. 9 (1953).
- [3] A.D. Jenkins, R.G. Jones and G. Moad: Pure Appl. Chem., 82, 483-491 (2010).
- [4] H. Tobita: Processes, 6, 14 (2018) [22 pages].
- [5] H. Tobita: Macromol. Theory Simul. 28, 1900018 (2019) [11 pages].
- [6] H. Tobita: e-Polymers, 4, 878-887 (2004).
- [7] H. Tobita: Macromol. Mater. Eng., 290, 363-371 (2005).
- [8] W.H. Starkweather, Jr. and M.C. Han: J. Polym. Sci.: Part A, Polym. Chem., 30, 2709-2713 (1992).
- [9] B.H. Zimm and W.H. Stockmayer: J. Chem. Phys., 17, 1301-1314 (1949).
- [10] H. Tobita: Macromol. Theory Simul., 29, 1900057 (2020) [7 pages].
- [11] H. Tobita: Processes, 7, 220 (2019) [18 pages].
- [12] H. Tobita: Macromol. Theory Simul., 28, 1800061 (2019) [10 pages].

Q#によるショアのアルゴリズムの実装 — IBM の量子コンピュータを使う —

万里川則亮* 平田隆幸**

Implementation of Shor's Algorithm by Q# — Usage of IBM's Quantum Computer —

Noriaki MARIKAWA* and Takayuki HIRATA**

(Received January 21, 2022)

Quantum computing is a scientific topic of people beyond computer researchers' community. Some companies offer service of usage of quantum computer to the people who want to use quantum computer. Various quantum computers are now working, which are open use for public users via online. Now we stand at the dawn of the utilization of quantum computers. There are some computer languages for quantum computing. We report the usage of Q# that was developed by IBM, and the implementation of Shor's algorithm on IBM's cloud computing.

Key Words : Quantum Computer, Q#, Shor's Algorithm, IBM's Cloud Computing.

1. はじめに

量子コンピュータは、計算機科学において新しいブレイクスルーとなるものとして期待されている。また、科学者だけでなく多くの一般の人々の注目をも集めている^{[1]-[4]}。量子コンピュータは、量子力学が基礎となっているため、工学部の学生には敷居が高そうに思われているにもかかわらず、アンケート調査を実施したところ、工学部の学生は量子コンピュータに強い興味をもっているが分かった^[5]。現在、量子コンピュータの研究は、ハードウェア研究開発^[6]のみならず、ソフトウェアの開発さらにアプリケーション開発がおこなわれるようになってきている^[7]。

さて、量子コンピュータの特徴を生かして発展が期待される分野を考えてみよう。量子コンピュータの計算は、超並列処理に特徴がある。この特徴を生かすことによって、現在利用されている機械学習や

深層学習などにかかる処理時間を大幅に短縮できる可能性がある。というのは、量子コンピュータは複数の可能性を同時並行で探索できるため、超並列処理が可能となるからである。具体的な問題として、古典的なコンピュータでは、巡回セールスマン問題などの問題を解くのに莫大な計算時間を必要とした。それに対し、量子コンピュータは、超並列処理が可能であるため、巡回セールスマン問題などの NP 完全問題を短時間で解くことが期待されている。

現在、量子コンピュータの実用的な利用が現実的になってきたことにともない、どのように効率的なソフトウェアを開発するか問題に移ってきた。同時に、量子コンピュータを利用し問題を効率良く計算を行うためには、量子計算のためのアルゴリズムを新しく作らなければならない。そこでは、どのようなアルゴリズムが信頼できて実用性があるのかを、実際の量子コンピュータを用いて評価しなければならない。これらのことが解決していかなければならない問題である。

ここで、量子コンピュータをもちいた量子計算の短所を振り返っておこう。量子コンピュータは処理の回数が多くなるほど解の信頼性が下がる。これは計算を行う際のノイズによって、計算結果を誤って

* 大学院工学研究科知識社会基礎工学専攻

* Fundamental Engineering for Knowledge-Based Society, Graduate School of Engineering

** 知能システム工学講座

** Department of Human and Artificial Intelligent Systems

しまう可能性があるからである。そのため、量子コンピュータの研究では、誤り訂正の研究も進められている。同時に、計算効率が良く、信頼性の高いアルゴリズムを作ることが求められている。本研究では、これらのことをふまえて、実際の量子コンピュータでショアのアルゴリズムを実行するために必要な乗算回路を Q# で製作した。また、C# をもちいて古典的アルゴリズムによる素因数分解をおこなったので報告する。

2. 量子コンピュータをつかう

2.1 量子コンピュータをつかう環境

量子コンピュータを使える環境が整備されつつある。Amazon による AWS^[8]、IBM による IBM Q^[9] などである。ハードウェアだけでなく、同時にソフトウェアの開発が進んでいる。さらに、量子コンピュータを用いたプログラム環境も提供されている。

量子コンピュータのプログラミング実行環境には、現在、2 種類の環境がある。実際の量子コンピュータと用いるものと、エミュレータを用いる方法である。2 つの環境には、メリットとデメリットが存在する。

まず、実際の量子コンピュータを使うものとして、IBM や AWS が提供しているサービスからみていこう。第一の特徴は、IBM や AWS (Amazon Web Services) では、借りることが可能な qubit が非常に少ないであるがである。2016 年に IBM がオンラインサービスを開始したときは、5 量子ビットであった。現在、2020 年 9 月時点で、65 量子ビットまで拡張されている量子プロセッサ「Hummingbird」を公開している。さらに、IBM は 2023 年には 1000 量子ビット超えの量子コンピュータを計画している^[10]。Amazon も、AWS で、超伝導量子ビットやイオントラップを用いて構築された量子アニーレーザやゲートベースのシステムなど、数種類のハードウェアをオンラインで利用することができるサービスを開始している。

現在は、IBM や AWS などによる量子コンピュータ（ハードウェア）のオンライン利用サービスだけでなく、量子コンピュータのエミュレータを提供するサービスも始まっており、オフラインによる量子計算のプログラミングも可能となっている。例えば、Microsoft が提供する Visual Studio 2019 では、ライブラリとして Q# の拡張ができ、Q# による量子コンピュータをつかったプログラミングが可能となっている。ここで注意すべき点は、量子計算をエミュレーションで実行しても速くはないということである。なぜなら、Q# のコードが C# のコードに翻訳され、実行されるためにステップ数が増えるためである。それゆえ、量子プログラムだから速くなるとい

うことにはならないことに留意しよう。

では、どのような意味があるのかを考える。エミュレーションによる方法は、量子コンピュータが一般的に利用可能になった時のために、プログラミングの練習を行うことができるという意味合いが大きい。実際の量子コンピュータとエミュレータを使用した場合の比較を以下でおこなう。

1) 実際の量子コンピュータを使ったとき

一般的に、実際の量子コンピュータを使うのは、オンライン上で提供されているサービスを利用することになる。また、多くの量子ビットを扱えるわけではないため複雑な回路を組むことは難しい。

2) 量子コンピュータのエミュレータを使ったとき

量子コンピュータのエミュレータを使って実行するには visual studio を拡張したものやその他のソフトを用いて、仮想の量子ビットを扱うことになる。この方法で得られる計算結果は理論的に実行されるもので、後で触れるように実際の量子コンピュータを実行した結果とは異なる可能性がある。

将来的には、一般の人々でも 1) の実際の量子コンピュータの利用が可能になることが期待されるが、現在は 2) が主流である。実際の量子コンピュータを利用できる時代に備え、仮想的な量子コンピュータでプログラムや経験を積み重ねている段階といえる。そのため、量子コンピュータのエミュレータが開発されている。例えば、QCEngine などの量子コンピュータのエミュレータである^[7]。QCEngine は JavaScript で書かれたサンプルプログラムをブラウザ上で動かすことができる。なお、QCEngine の特徴は、量子コンピュータでのプログラミングに必要な知識を学ぶ環境が提供されていることである。

量子コンピュータには、他に量子アニーリング方式がある。量子アニーリング方式では、D-Wave 社^[11] のシステムのように大規模な量子ビットをあつかえるという利点を持っている。なお、D-Wave 社の advantage という名前のシステムは 5000qubit を扱うことができるが、ゲート式の量子コンピュータとは異なり汎用的な使い方はできない。しかし、組み合わせ最適化問題を解くための量子アルゴリズムを扱うことに特化して、商用として利用されている。このように、日本人研究者が先駆的な役割を果たした量子アニーリングもすでに実用化されている。なお、本論文では、量子アニーリングについてこれ以上詳しくは触れないことにする。

2.2 量子コンピュータで扱われている問題

現時点で、量子コンピュータの強みを生かして、量子コンピュータで扱うことが期待されている問題

をみていこう。ネットを介しての通信および取引の発展にともない、公開鍵暗号が重要性を増してきた。例として、Shorの素因数分解は、量子コンピュータで計算時間が大幅に短縮できるものとして挙げることでできる。Shorのアルゴリズムは、古典アルゴリズムでは困難なRSA暗号解読への応用が期待されている。

さらに、量子コンピュータは、分子・物質の性質解析への期待も高まっている。自然界でも、宇宙空間のような極低温・超真空の極限状態では、分子の一部では重ね合わせの状態が実現している場合がある。対象とする分子が増えると、考慮しなければならない分子のとり得る分子状態数が爆発的に増える。このことに伴い、重ね合わせの状態の計算に必要な計算時間が増大する。それゆえ、量子コンピュータを用いた高速化が研究されている。他にもHHLの行列積計算を量子コンピュータで行うことで物理現象、機械学習、金融といった分野で活躍することが期待されている。

さて、現時点の暗号技術と量子コンピュータとの関係をふりかえてみよう。現在、ビットコインなどのインターネット上にある資産はRSA暗号等で保護されている。しかし、RSA暗号は、前述したように量子コンピュータによって暗号が解かれる可能性がでてきた。逆に、量子コンピュータによって資産を守る方法が考えられている。量子暗号は、情報のやりとりを盗み見られたかを判断できるアルゴリズムである。それゆえ、もし見られていても、通信を途中からやり直すという方法で盗み見を回避できる。以上のように、量子コンピュータは現在の暗号技術を根底から覆す可能性を持っている。

2.3. 量子コンピュータのプラットフォーム

一部の研究者を除き、計算機研究者にとっても現実の量子コンピュータを直接触ることができる機会は多くない。しかし、ネットワークを介して、量子コンピュータをつかえる様々なプラットフォームが公開されている。また、量子プログラミング（量子アルゴリズムによる表現をプログラムする）には、ネットワークを通して比較的少ない量子ビット(qubit)を借りる方法と仮想量子ビット(qubit)を用いてプログラミングする方法がある。

現実の量子コンピュータのqubitを借りて利用する方法について説明する。IBMやAWSで、量子コンピュータを使うときは、アカウントを持つ必要がある。アカウントを作成するためには、いくつかの必要事項（メールアドレス等）を入力する過程がある。しかし、簡単かつ無料で利用可能であるため、

利用しやすい。多くのqubitを借りることはできないが、現実の量子コンピュータで、量子ゲートを用いた回路の計算ができるようになる。一方、仮想量子ビット(qubit)を用いたプログラミングでは、現実の量子コンピュータを利用するよりも多くのqubitを仮想的に使うことができる。Visual studioやPythonをつかうことで、無料で環境を整えることができる。なお、仮想量子ビット(qubit)を借りることは多くのqubitを扱うことが出来るメリットがあるが、実際に量子コンピュータで同じプログラムを動かすとうまくいかない可能性がある。今回の実験では、素因数分解を行うプログラムを行うため、利用するqubitの数が多くなる。

今回の実験ではVisual studioによる仮想量子ビット(qubit)を利用する。また、今回利用したローカルな計算環境はAMD Ryzen 7 3700X 8-Core Processor 3.60 GHzである。

2.4 Quantum 開発キット

Quantum 開発キット(以降QDK)には、Microsoftのオープンソースプログラミング言語であるQ#や量子シミュレータ、他のプログラミング環境用の拡張機能、APIドキュメントが用意されている^[12]。QDKでは、Python、C#、F#の要素を取り入れたQ#を用いている。Q#の特徴として、量子固有の構造と演算が可能なデータ構造が導入されている。なお、Q#では量子演算を確認するために、量子アルゴリズムを記述する必要がある。QDK内のライブラリを使用することで、簡単な演算シーケンスを設計する必要がなく、複雑な量子演算が可能となる。

3. ショアのアルゴリズム

ショアのアルゴリズムは、整数の素因数分解をおこなうアルゴリズムである。Nの因数について調べるとき、次の手順で因数を探すことができる。はじめに、ユークリッド互除法でaとNの最大公約数を探す。aとNが互いに素であるならば、 $f(x)=a^x \bmod N$ の周期rを求める。最後に周期rから因数を求めることができる。

3.1. 量子コンピュータを用いた計算

量子コンピュータはショアのアルゴリズムのうち、周期rを求めることに用いられる。重ね合わせの状態と量子コンピュータで行われるフーリエ変換によって従来では計算しきれないものを理論上では可能にしている。

3.2 量子フーリエ変換

量子フーリエ変換(QFT)は, qubit の相対位相と大きさの中にあるパターンや情報を得るための変換である^[2]. QFT は, 量子ビットの相対位相を利用してパターンの情報を得ている. なお, 離散フーリエ変換は, デジタルビットの値で周波数の情報を得るための変換である. 4qubit の QFT を図 1 に示す. 左のゲートから順に 4qubit に作用させることで周期の情報を得る. また, 逆量子フーリエ変換は図 1 のゲートを右から順に作用させることで利用できる. これはユニタリ変換の特徴によるものである.

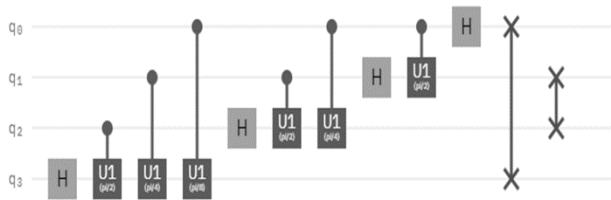


図 1 4qubit の QFT.

3.3 C#による因数分解プログラミング

量子コンピュータによるショアのアルゴリズムの計算と C#を使った古典的なアルゴリズムによるものとを比較する. ここでは, C#で総当たりによる因数分解を行うプログラムを作成した. このプログラムのアルゴリズムは, 入力した値に対して小さい値から順番に因数の候補として除算を行う. 余りが 0 の時, 因数として記録する. その後, 入力した値から因数を割った商に対して同様に小さい値から除算を行う. このプログラムでは入力を素数としたときに計算量が最大となる. 最大 $N^{1/2}$ の除算を繰り返すプログラムである. 実際に素数を入力することで計算にかかる時間を調べた. このプログラムによる結果を表 1 に示す.

表 1 C#を使った因数分解にかかった時間

入力した素数	処理時間(s)
10000000000000037	0.848
46116646144580591	4.240
10000000000000003	5.573
4611664614458057389	39.131

このように, 従来のコンピュータによる計算方法では計算時間が指数関数的に伸びていくことが分かる. これに対して量子コンピュータでの計算時間は qubit が増えるにつれて線形的に増えていくと考えられている.

3.4 $a^x \bmod N$ の実装

ショアのアルゴリズムを量子コンピュータで実行するには, 重ね合わせの状態を保ったまま $a^x \bmod N$ の計算を行う必要がある. 参考にした教科書^[7]では $a=2$ の場合について紹介をしていた. $a=2$ の場合は swap ゲートを上の位から順に作用させることで簡単に実装できる. また, $a^x \bmod N$ の量子回路は既に考えられている. しかし, 今回の実験では作成した乗算の回路がオンライン上で借りた量子コンピュータで実際に動くかを確認する. 多くの qubit を借りることは出来ないため, 2 以外の比較的簡単な乗算を考えた.

3.4.1 フェルマー数

本研究では, 回路を作るに際して, フェルマー数に注目した. フェルマー数とは $2^{2^n} + 1$ である数を指す. また, 素数であるフェルマー数はフェルマー素数と呼ばれる. フェルマー素数の乗算回路がステップ数として少なくなるかは問題となる

3.4.2 (2^n+1) の乗算回路

図 2 は入力 2qubit に対して 3 を乗算する回路である. 2^n+1 の乗算を行う際, 4 つのステップに分けられる. ①繰り上がりする位の記録, ② 2^n 回のシフト, ③元の状態との同期, ④繰り上がりによるインクリメントである. また, 繰り上がりを記録する qubit を演算が終わるたびに $|0\rangle$ の状態へリセットすることで乗算を繰り返すことができる.



図 2 (2^n+1) の乗算回路(n は自然数). n=1 の例.

4. 実験と分析

4.1 IBM での乗算回路の実行

IBM のオンラインサービスで提供されている量子コンピュータを使用して, 3 の乗算を行う回路を製作した. 表 2 は, 実行した際に得られた実行までの過程と所要時間をまとめたものである. 次に, 個々に詳細に見ていこう. Created は自身が作成した量子回路を IBM へ送った時である. 今回は図 3 の内容を

送信した。2qubit にアダマール変換を行った後に 3 の乗算を行う回路である(つまり入力は $|0\rangle\sim|3\rangle$)。IBM へ量子回路を送ると Transpiling が行われる。すると、図 4 のように変換された量子回路が得られる。その後、Validating が行われ、キューに加えられる。IBM では複数のユーザーが量子コンピュータを使うために順番を待たなければいけない。この待ち時間が In queue の時間である。

今回の実行では、比較的キューの待ち時間が短かった。なお、長いときは 2 時間ほどかかることもある。そして、この回路を量子コンピュータで実行すると約 11 秒かかったことがわかった。

表 2 実行までの過程*と所要時間

動作	所要時間
Created	—
Transpiling	1.4 s
Validating	0.992 s
In queue	557.4 s
Running	11.1 s
Completed	—

*(IBM Quantum Experience)



図 3 3 の乗算回路。IBM の量子コンピュータへ送信した回路(Transpiling 前)。

この回路で整数 0~3 の重ね合わせの状態に乗算の計算が可能であるかを試した。図 3 の回路においても表 3 に示された結果が得られることを期待した。量子コンピュータは誤差があるため、表 3 のように正確に確率に則った結果を出すことはない。しかし、今回実行した結果である図 5 と比較してみると、予



図 4 量子コンピュータで実行された量子回路 (0-3 の整数の重ね合わせの状態に 3 の乗算を行う)。

想と結果に違いがでていることがわかる。例えば 00000 と 00011 は、予想では高い数値にならないはずの 00001 の半分ほどの確率となった。問題点を探すため、繰り返りがない回路を実行した。その結果、出力が 000 となったのが 49.9%、110 となったのが 38.1%という値が得られた。また、その他の割合は 0.6~2.9%と結果が得られた。このことから今回考案した繰り返りがない演算に、回路もしくは量子コンピュータ自身に何かしら問題があると考えられる。

表 3 重ね合わせの入力に対して期待される結果

入力	結果	確率
00000	00000	25%
00001	00011	25%
00010	00110	25%
00011	11001	25%
	その他	0%

4.2. Q#での乗算回路の実行

図 3 の 3 の乗算回路をエミュレータ用プログラミング言語 Q#を使ってプログラムして演算させた。考案した演算が予想通りに動くのかをエミュレータを用いて検証した。その結果、すべての状態が出力され、表 3 と同じ結果が得られた。

次に (2^n+1) の乗算の他の例として $9(n=3)$ と $17(n=4)$ の乗算を行う。9 の乗算を行う理由として、3 の乗算回路を 2 回繰り返す演算と 9 の乗算回路を 1 度だけ行う回路ではどちらが信頼でき、計算が早い回路であるかを試すべきだと考えたからである。また、17 を試す理由は 3 の次に小さいフェルマー素数であることがあげられる。 2^n+1 の乗算回路が演算として安定した結果を残せるのであれば、ショアのアルゴリズムにおける a の値として (2^n+1) は回路が組みやすく、効率的であると考えられる。

17 といった大きな値は実際の量子コンピュータではできないため、Q#を用いる。そのため信頼性についての評価はしていない。Q#では用意する仮想 qubit の数が計算時間に影響がある可能性があるため、17 の乗算に必要な qubit をそれぞれの計算に用意した。3 の乗算回路を 2 回繰り返す演算、9 の乗算

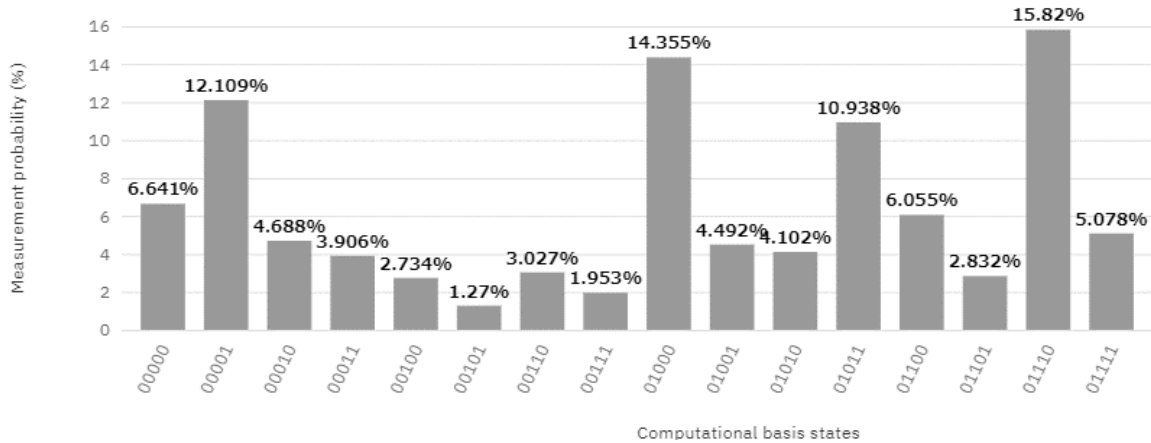


図5 2048回実行した際に得た計算結果の分布.

表4 エミュレータを使った Q#での実行時間^{a)}

	実行時間(s)
3 の乗算	49
3 の乗算 2 回	62
9 の乗算	53
17 の乗算	68

a) AMD Ryzen 7 3700X 8-Core Processor 3.60 GHz の PC 使用

を行う演算, 17 の乗算を行う演算を Q#で実行した結果を表 4 に示す. 3 と 9 の乗算には計算時間に大きな差は見られないように見える. それに比べて 3 の乗算を 2 回行った場合には 9 の乗算を行った時間よりも時間を要した. このことから, 乗算を行う際は, 素数の乗算を複数回組み合わせる乗算して行うよりも, 一般化された乗算回路のほうが時間の効率が良い可能性がある. しかし, エミュレータ上での計算であるため, 量子コンピュータで行う計算にかかる時間とは強く関係するとは言えないことに注意しなければならない. また, エミュレータ上で実行に時間がかかる場合は回路が複雑である可能性があげられる. 17 の乗算に注目する. 3 の乗算を 2 回行った場合よりも多くの時間を費やしている. 3,9,17 の乗算の結果から, 乗算する値に対して時間が指数関数的に増えていく可能性がある. これは乗算する値によって回路を変えるために起こる現象だと考えられる. 一般化した乗算回路であれば, 乗算する値が変わることによって計算時間に変化は生まれないと考えられる.

4.3. 奇数の乗算回路

(2^n+1)の乗算回路を発展させることで, 奇数の乗算回路を作ること考えた. 奇数と偶数の掛け算の組み合わせですべての乗算が可能になる. 偶数の乗算は値をシフトするだけで良いので, 奇数の乗算回路が完成するとすべての乗算回路を作ることができる. また, 完成した乗算回路を逆から作用させることで除算の計算が可能であるかを考察した.

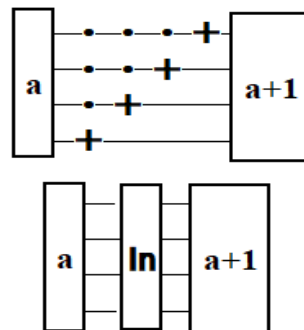


図6 加算回路.

奇数の乗算は, ($2^a+2^b+...2^{2^a+1}$)の乗算として考えられる. 図 3 の回路を発展させることで, 加算回路(図 6 参照)の組み合わせによる奇数の乗算回路を実現させることができた. 奇数の乗算回路の例として 4qubit 同士の回路を図 7 に示す. これは入力を任意の値 a に対して, 奇数 b を乗算する回路である. 実行した結果, 重ね合わせの状態同士の乗算に成功したことを確認できた. また, 利用 qubit の数を増やすほど計算時間が指数関数的に増える結果となった. 図 7 に示されたように加算回路が階段状に並んでいることがわかる. このアルゴリズムはオペランドや筆算による計算手順と異なる. 計算内容は筆算やデジタル計算と量子回路による計算内容は同じである

が、量子回路は計算の順序が変わるだけで結果が変わってしまうので、古典的なアルゴリズムを量子回路に転用することはできない。その理由は、量子回路に用いられる各ゲートがユニタリ行列であることからわかる。

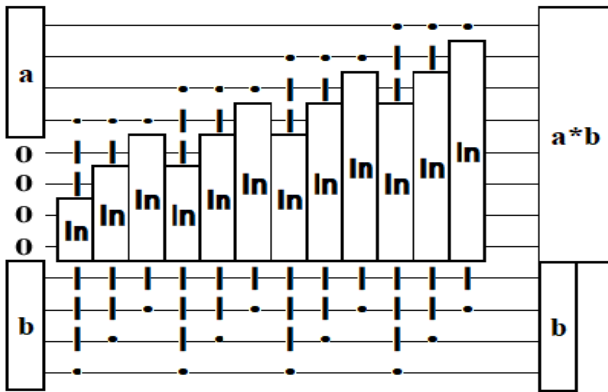


図7 奇数の乗算回路。

4.4. 奇数の除算回路

奇数の除算回路が可能であるかについて考える。量子フーリエ変換と逆量子フーリエ変換との関係のように、今回の奇数の乗算回路は逆から作用させることで奇数の除算回路として成り立たない。乗算回路とは異なり、除算には解が整数とならない場合を考えなければならない。この除算回路では割り切れない場合、予測できないような値が出力されてしまう。割り切れない場合を含めた除算回路の完成が今後の課題として残った。

5. おわりに

古典的なアルゴリズムによって素因数分解をおこなう場合と、実際の量子コンピュータを使った量子アルゴリズム（ショアのアルゴリズム）によって素因数分解をおこなった場合との比較を目指した。しかし、量子コンピュータを使った計算は、途中の乗算回路の設計までしか実行できなかった。エミュレーションでは、Q#を用いてショアのアルゴリズムの素因数分解に用いるための汎用的な奇数の乗算回路を製作できた。

量子演算によって解を求めると、確率によって解が得られることを確かめた。Q#などのエミュレータによって、プログラミングすると、確率的な揺らぎは生じず、実際に量子コンピュータを使った場合とは、異なることに注意しなければならない。

ショアのアルゴリズムにおける累乗の計算を、乗

算回路を複数回利用することで計算できることをエミュレータ上で確かめた。偶数の乗算(奇数の乗算と 2^n の乗算を組み合わせた演算)が可能であることを少数 qubit の場合(3qubit までの乗算)に確かめた。なお、Quantum supremacy(量子超越性)を議論するためには、揺らぎを考慮しなければならないので、エミュレータを使う場合は留意しなければならないだろう。累乗の計算を複数回の乗算で行うことは、ノイズの影響を多く受けてしまう可能性があり、結果の信頼性が低くなる恐れがある。

ハードウェアとしての量子コンピュータの現実性について述べよう。IBMは、「スーパー冷凍機」の開発をおこなうことにより、「フォールトトレラントな（ノイズがあっても正確な量子計算ができる）量子コンピュータは今後10年以内に達成できる目標だと感じている」と考えており^[10]、揺らぎの問題も解決されるかもしれないと予想している。

次にソフトウェアとしての量子コンピュータの課題について述べよう。ハードウェアとしての量子コンピュータが完成しても、実際にプログラミングする場合、習得の難度が高い可能性がある。例えば、古典的な乗算回路のアルゴリズムは量子アルゴリズムには転用できなかったのをみてきた。量子アルゴリズムには、量子コンピュータにおける知識が必要不可欠である。いくつかの回路を実際の量子コンピュータで実行することにより、量子コンピュータに関する理解を深めることができるかもしれない。しかし、実際の量子コンピュータで複雑な回路を実行するのに多くの qubit を利用することはまだ難しい。そのため現時点では、量子プログラミング言語の習得やアルゴリズムの開発に、エミュレータを利用することは有効であると考えられる。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、議論および有益なコメントをしてくださった高田宗樹教授、および研究室のメンバーに感謝いたします。

参考文献

- [1] F. Arute et al.: Quantum supremacy using a programmable superconducting processor, *Nature*, 574, 505-511 (2019).
- [2] M. Brooks: Before the quantum revolution with decades still to go until the first general-purpose quantum computers, the race is on to make today's systems useful, *Nature*, 574, 19-21 (2019).
- [3] E. Gibney: Google publishes landmark quantum supremacy claim, *Nature*, 574, 461-462 (2019).

- [4] William D. Oliver: Quantum computing takes flight, Nature, 574, 487-488 (2019).
- [5] 平田隆幸:なぜ工学部の学生は量子コンピュータを学ぶべきなのかー量子コンピュータへ至る計算機の歩みー, 福井大学大学院工学研究科報告(2020).
- [6] 宮野健次郎, 古澤明: 量子コンピュータ入門第2版, 日本評論社, pp.165 (2016).
- [7] Eric R.Johnston,Nic Harrigan,Mercedes Gimeno-Segovia : 動かして学ぶ量子コンピュータプログラミング, 北野明章訳, 丸山耕司技術監修, オライリー・ジャパン, pp. 309, (2020).
- [8] Amazon AWS<<https://aws.amazon.com/jp/braket/>> (2021年11月).
- [9]IBMQ<<https://www.ibm.com/services/jpja/strategy/quantum/>>(2021年11月).
- [10] ITmedia NEWS >科学・テクノロジー>2023年に1000量子ビット超えのIBM製量子コンピュータ <<https://www.itmedia.co.jp/news/articles/2009/17/news095.html>>(2021年11月).
- [11] DWave<<https://dwavejapan.com/>>(2021年11月).
- [12] Azure Quantum documentation <<https://docs.microsoft.com/en-us/azure/quantum/>>(2021年11月).

階層型ニューラルネットワークによる クレジットカード不正利用履歴の検出

河合真知* 小高知宏** 黒岩丈介** 諏訪いずみ*** 白井治彦****

Detection of Credit Card Fraud Records Using Hierarchical Neural Networks

Masato KAWAI* Tomohiro ODAKA** Jousuke KUROIWA**

Izumi SUWA*** Haruhiko SHIRAI****

(Received January 24, 2022)

In this paper, the effectiveness of the multilayer perceptron model for detecting credit card fraud records was examined by using real data. Since the original data set had an imbalance between normal and abnormal data, a shaping process was applied. Next, we conducted a preliminary experiment to determine the model structure to be used for the detection of credit card fraud records.

The model was trained by inputting well-formed data to the model structure determined by preliminary experiments. Each model trained with differently processed data sets were validated if the models can discriminate between abnormal and normal transactions with a validation data set. Four evaluation indices were used to evaluate each model that discriminated between abnormal and normal.

For the purpose of this study, the maximum value of recall, which indicates the percentage of fraudulent transactions that were actually judged to be fraudulent, was approximately 98 %.

For practical use, the value of recall should be close to 100 %, so further improvement is needed.

Key words : Credit Card Fraud Detection, multilayer perceptron

1. 緒言

近年、現金を使わずに支払いを済ませる方法であるキャッシュレス決済が普及しており、日本国民の3割ほどの国民が何らかのキャッシュレス決済を利用している。キャッシュレス決済の種類には、クレジットカードやデビットカード、プリペイドカードのほか、電子マネーやQR・バーコード決済など多種多様にわたっている。

*大学院工学研究科 知識社会基礎工学専攻

*Fundamental Engineering for Knowledge-Based Society, Graduate School of Engineering

**知能システム工学講座

**Department of Human and Artificial Intelligent Systems

***仁愛女子短期大学 生活科学学科

***Jin-ai Women's College

****工学部 技術部

****Technical Division

その中でも、クレジットカード払いが最も多く利用されており、全体の9割以上を占めている。

クレジットカードは、現金の持ち合わせがなくても、与信限度額の範囲内で商品やサービスを購入し、請求に対する時間的余裕を提供する。^[1] また、カード一枚で決済ができるため、財布の中から小銭や紙幣を探すといった手間が省け精算がスピーディーでスマートに行えたり、支払い履歴が残るため無駄遣い防止にもつながる。そういった利便性からクレジットカードの利用はますます浸透している。

しかし、それと同時に、クレジットカードの不正利用被害も年々増加傾向にある。ここ数年、フィッシング詐欺やなりすまし、ネットショッピング詐欺、スキミングなど、クレジットカードに関する様々な不正利用がニュースで取り上げられており、世界中のほとんどの人々が不正行為を念頭に置いている。不正利用に対する認知は高まっているが、クレジットカードの不正利用は簡単なターゲットであり、何のリスクもなく、所有者の知らな

うちに、短期間で多額の金額が引き出されたり、見知らぬ取引が行われてしまう。不正利用者は不正な取引を正当なものにしようとするため、不正利用の検知は非常に難しく、困難な作業である。

不正利用に対する対策として、例えば銀行では、EMVカードという磁気ストライプではなく集積回路にデータを保存するスマートカードへの移行が進んでいる。これにより、カードによる支払いの一部は安全になったが、カードを使用しない不正行為は依然として高い確率で発生している。

本研究では、クレジットカードの利用履歴から不正の取引を検出することを目標とする。不正の取引を検出する手法として、異常検知分野で応用されているニューラルネットワーク、その中でも単純な多層パーセプトロンモデルを用いる。クレジットカード不正利用検出に対する多層パーセプトロンモデルの有効性の検証には、第3章で説明する kaggle で提供されている Credit Card Fraud Detection^[3] を用いる。また、モデルの評価には第3章で説明する4つの評価指標を用いる。

本論文では、2章にクレジットカード不正利用の原因と手口、不正利用対策に関する過去の研究を述べる。3章で異常検知実験について述べ、4章にその異常検知実験に対する結果を示す。5章で実験結果に対する考察を述べ、6章で本論文に対するまとめを述べる。

2. クレジットカード不正利用の手口と対策

最近では、オンラインネットショッピングの普及に伴い、店頭以外でもクレジットカードを利用する機会は増えている。企業間で行われる仕入れや売り上げといった取引では、現金での取引はほとんど発生していない。クレジットカードを使用することで、事業者側にも顧客側にも多くのメリットがあるが、カード決済が持ち合わせているリスクを把握していないと思われぬ被害に巻き込まれる可能性がある。以下にクレジットカード不正利用の原因や手口の例を挙げる。^[2] また、クレジットカード不正利用の対策に関する過去の研究について述べる。

2.1 クレジットカード不正利用の手口

1. フィッシング詐欺

フィッシング詐欺とは銀行等の金融機関やクレジットカード会社を装って、偽の web サイトに誘導するメールを送りつけ、誘導したサイトでクレジットカード番号や暗証番号等の情報を入力させて情報を盗み取る手口のことである。

2. ネットショッピング詐欺

ネットショッピング詐欺とは架空のネットショッピングサイトで商品購入手続きをさせた上で商品を送らず、クレジットカード情報を盗む手口のことである。

3. スキミング

スキミングとは、スキマーと呼ばれるカード情報読み取り装置を用いてカードの磁気ストライプ情報を盗み取り、偽造カードにコピーする手口のことである。

4. 盗難や紛失

スリや置き引き、車上荒らしなどによってクレジットカードが盗難されるケースのほか、飲食店や電車、トイレ等での財布の置き忘れによる紛失によって、クレジットカードが不正利用されるケースである。

5. なりすまし

なりすましは、第3者が不正に入手したクレジットカード情報やカード本体をカード所有者本人になりすまして利用する手口のことである。

6. 出会い系サイト詐欺

出会い系サイト詐欺は、出会い系サイト内で使えるポイントをクレジットカード決済によって購入させ、サクラを使ってポイントを消費させ、カード情報を盗み取る手口のことである。

7. ネットショップからの情報漏洩

ネットショップからの情報漏洩は、ネットショップに不正アクセスすることで、クレジットカード情報を盗み出す手口のことである。

2.2 クレジットカード不正利用に対する対策と関連研究

クレジットカードが不正利用される原因や手口は様々なものがあり、カード所有者本人が原因や手口を理解して気を配っていたとしても、悪人は巧妙な手口で不正利用を試みる。また、実際に不正利用が行われたことをカード所有者本人が気づくのは、カードの利用明細を確認してからであるため、発見が遅れることが多い。

そこで、本研究では、クレジットカードを使用した取引履歴において、各取引が持つ個々の特徴を学習し、不正利用を検出することを目的とする。クレジットカード不正利用の検出には、近年、異常検知分野に応用されているニューラルネットワークモデルを使用し、その中でも本研究では多層パーセプトロンモデルを用いる。クレジットカードの不正利用検出に対する多層パーセプトロンモデルの有効性の検証には、kaggle で提供されて

いる Credit Card Fraud Detection を使用する。このデータセットを用いた従来の研究では、2019 年に Vaishnavi Nath Dornadula や Geetha S によって、^[1] サポートベクタマシン、ロジスティック回帰、決定木、ランダムフォレストなどの様々な機械学習手法を用いて、不正行為を予測するための最良の手法を開発する研究が行われた。この論文でのクレジットカード不正利用検出精度の最大値は accuracy で 99.98, precision で 99.96 であった。このほかにも、電子商取引をはじめとする多くのオンラインサイトで、オンラインでの決済手段が増え、オンライン詐欺のリスクが高まっているという現状を踏まえ、研究者たちはオンライン取引における詐欺を検出・分析するために様々な機械学習手法を開発している。

3. 異常検知実験

本章では、多層パーセプトロンモデルを用いたクレジットカード不正利用履歴の検出実験について述べる。まず、本実験に使用するデータセットと整形処理について述べる。次に、本実験に使用するモデル構造について説明する。

3.1 データセットと整形処理

本実験では、kaggle からダウンロードした 2013 年 9 月の 48 時間に行われたヨーロッパのクレジットカードトランザクションデータセット^[3]を使用する。このデータセットは非常にアンバランスで、284807 件の取引のうち、492 件が不正の取引である。特徴としては、取引の金額、最初の取引からの経過時間（単位：秒）、主成分分析によって匿名化された 28 の共変量が挙げられ、図 1 に一部を示す。各データポイントには、不正な取引かそうでないかのラベル (0:真正, 1:不正) が付けられている。図 1 中の数値特徴量は、前処理の段階でデータの平均を 0、標準偏差を 1 に正規化した。^[4]

	Time	V1	V2	V3	V4	V5
0	0.0	-1.359807	-0.072781	2.536347	1.378155	-0.338321
1	0.0	1.191857	0.266151	0.166480	0.448154	0.060018
2	1.0	-1.358354	-1.340163	1.773209	0.379780	-0.503198
3	1.0	-0.966272	-0.185226	1.792993	-0.863291	-0.010309
4	2.0	-1.158233	0.877737	1.548718	0.403034	-0.407193

図 1: データプレビュー

このデータセットには、全 284807 件のトランザクション履歴が入っているが、そのうち不正のトランザクシ

ョンは 492 件と正常のトランザクションに対して非常に少ないアンバランスなものとなっている。このままのデータでモデルを学習すると、正常のトランザクションの特徴をより学習し、階層型ニューラルネットワークでクレジットカードの不正利用を検出するという本研究の目的に沿わない。そこで、元のデータに対して整形処理を行い、以下の [1]~[7] の新たなデータセットを用意した。比較のために、元のデータセットもモデルの学習に使用する。データ整形の方法としては、まず len 関数を用いて不正のトランザクションの件数 (492 件) を取得し、iloc というスライス機能を用いて、不正のトランザクションの k 倍分の正常のトランザクションを切り出す。

表 1: 整形処理後のデータセット

	件数	真正	不正	真正:不正
[1]k=2	1476 件	984	492	2:1
[2]k=3	1968 件	1476	492	3:1
[3]k=4	2460 件	1968	492	4:1
[4]k=6	3444 件	2952	492	6:1
[5]k=12	6396 件	5904	492	12:1
[6]k=24	12300 件	11808	492	24:1
[7]k=48	24108 件	23616	492	48:1
[8] 元データ	284807 件	284315	492	

[1]~[8] のそれぞれのデータに対して、訓練用、検証用、テスト用の割合を

- ・訓練用データ：80 % (検証用データ：20 %)
- ・テスト用データ：20 %

として分割した。

3.2 モデルの構築

本研究では、クレジットカードの不正利用を検出するモデルとして多層パーセプトロン (MLP) を用いた。多層パーセプトロンとは、単純パーセプトロンを層状に重ね合わせ多層構造にしたニューラルネットワークである。ここで、単純パーセプトロンは、入力信号とそれに対応する重みを掛け合わせた値を全て足し合わせた値がある閾値を超えた場合に 1 を、そうでない場合に 0 を出力する。^[5] 多層パーセプトロンは、単純パーセプトロンでは扱うことができなかった線形分離不可能な問題についても扱うことができるため、様々な場面で応用されている。本研究で使用する多層パーセプトロンの構造としては、図 2 に示すように、入力層、中間層 1 層、出力

層の3層からなるモデルである。入力層のユニット数は入力データの次元数と同じ28、出力層のユニット数を2(正常と異常を判別する2値分類より)としてモデルの構築を行った。中間層のユニット数については、後述する事前実験で決定する。中間層と出力層の活性化関数は、ほかのモデルを参考に、中間層を ReLU 関数、出力層をソフトマックス関数と設定した。重みの更新には、確率的勾配降下法 (SGD) を採用した。

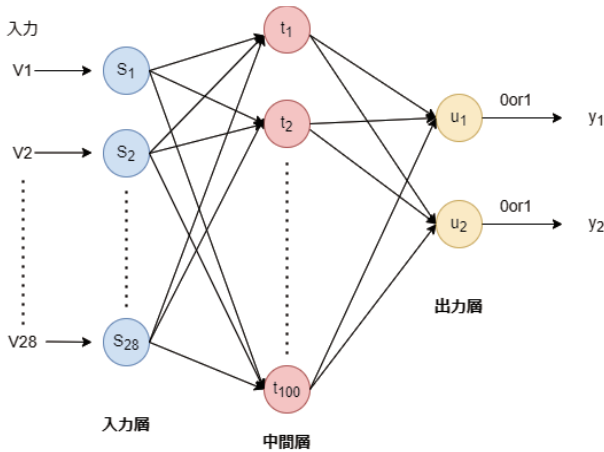


図2: 階層型ニューラルネットワーク (多層パーセプトロン)

ここで、中間層のユニット数を決定するための事前実験を行う。[4]k=6, 3444 件, 真正:2952, 不正:492, 真正:不正 = 6:1 のデータセットに対して、入力層のユニット数28と出力層のユニット数2は固定し、中間層のユニット数 $t_{1 \sim n}$ 数のみを変化させ、最適な結果を示した時のモデル構造を採用する。そのモデルに対して、[1]~[8]それぞれのデータセットで学習し、結果を比較する。中間層のユニット数のみを変化させて学習させ、異常検知を行った結果を比較する指標を次の3.3節で述べる。

3.3 評価指標

[1]~[8]それぞれのデータセットで学習したモデルでクレジットカードの不正利用を検出した結果を比較するための評価指標として、accuracy(正解率), precision(適合率), recall(再現率), F-measure(F値)の4つを用いた。accuracy(正解率)は、全てのサンプルのうち正解したサンプルの割合、precision(適合率)は、不正と予測されたサンプルのうち正解したサンプルの割合、再現率(recall)は、実際に不正のサンプルのうち正解したサンプルの割合、F-measure(F値)は、precision(適合率)とrecall(再現率)の調和平均である。真陽性、真陰性、偽陽性、偽陰性をそれぞれ TP : True Positive, TN : True Negative, FP : False Positive, FN : False Negative とすると、4つの評価指標は以下の式で表される。^[5]

$$accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$F - measure = \frac{2 * recall * precision}{recall + precision}$$

ここで、真陽性 (TP : True Positive) は実際のクラスが不正:1 で予測も不正:1, 真陰性 (TN : True Negative) は実際のクラスが正常:0 で予測も正常:0, 偽陽性 (FP : False Positive) は実際のクラスは正常:0 で予測が不正:1, 偽陰性 (FN : False Negative) は実際のクラスは不正:1 で予測が正常:0 を表す。

3.4 モデル構造の決定

中間層のユニット数を決定するために $n=1, 10, 20, 30, \dots, 170, 180, 190, 200$ と変化させたときの4つの評価指標の値を表2に示す。

表2: 中間層のユニット数の変化による評価指標の比較

	accuracy	precision	recall	F-measure
[1]n=1	0.9753	0.9506	0.8556	0.9006
[2]n=10	0.9826	0.9425	0.9213	0.9318
[3]n=20	0.9840	0.9651	0.9121	0.9379
[4]n=30	0.9797	0.9348	0.9149	0.9247
[5]n=40	0.9724	0.9263	0.88	0.9026
[6]n=50	0.9768	0.9524	0.8696	0.9091
[7]n=60	0.9768	0.9462	0.8889	0.9167
[8]n=70	0.9826	0.9529	0.9101	0.9310
[9]n=80	0.9840	0.9697	0.9231	0.9458
[10]n=90	0.9782	0.9101	0.9205	0.9153
[11]n=100	0.9840	0.9787	0.9109	0.9436
[12]n=110	0.9898	0.9667	0.9560	0.9613
[13]n=120	0.9797	0.9314	0.9314	0.9314
[14]n=130	0.9826	0.9451	0.9247	0.9348
[15]n=140	0.9797	0.9080	0.9294	0.9186
[16]n=150	0.9884	0.9429	0.9802	0.9612
[17]n=160	0.9811	0.96	0.9143	0.9366
[18]n=170	0.9826	0.9639	0.8989	0.9302
[19]n=180	0.9840	0.9576	0.9496	0.9536
[20]n=190	0.9797	0.9271	0.9271	0.9271
[21]n=200	0.9797	0.9792	0.8868	0.9307

表2より、中間層のユニット数が150のときのrecall値が最大をとるため、最適であることがわかる。また、ユニット数の増減によるrecall値の推移に目立った傾向は見られないため、ユニット数 $n=200$ までで比較を終

了した. 次に recall 値が最適であったユニット数 $n=150$ 付近で比較を行った結果を表 3 に示す.

表 3: 中間層のユニット数の変化による評価指標の比較 ($n=150$ 付近)

	accuracy	precision	recall	F-measure
[1] $n=147$	0.9840	0.9792	0.9126	0.9447
[2] $n=148$	0.9884	0.9659	0.9444	0.9551
[3] $n=149$	0.9855	0.9556	0.9348	0.9451
[4] $n=150$	0.9884	0.9429	0.9802	0.9612
[5] $n=151$	0.9811	0.9565	0.9072	0.9312
[6] $n=152$	0.9913	0.9806	0.9619	0.9712
[7] $n=153$	0.9826	0.9419	0.9205	0.9310

表 3 より, ユニット数 150 付近で比較を行ったところ, F-measure の値が最大を取ったのは, ユニット数 $n=152$ のときであったが, 本研究の目的である recall(再現率: 実際に不正のサンプルのうち正解したサンプルの割合) の値が最大をとったのは, ユニット数 $n=150$ のときであった. 以上より, 中間層のユニット数を 150 に決定した.

4. 分類結果

3.4 節により決定した入力層のユニット数 28, 中間層のユニット数 150, 出力層のユニット数 2 の 3 層構造の多層パーセプトロンをそれぞれ [1]~[8] のデータセットで学習させ, 学習した各モデルでクレジットカードの不正利用を検出した時の結果を表 4 に示す.

表 4 実験結果

	accuracy	precision	recall	F-measure
[1] $k=2, 1476$ 件	0.9696	0.977	0.9239	0.9497
[2] $k=3, 1968$ 件	0.9746	0.9775	0.9158	0.9457
[3] $k=4, 2460$ 件	0.9695	0.9712	0.8938	0.9309
[4] $k=6, 3444$ 件	0.9884	0.9429	0.9802	0.9612
[5] $k=12, 6396$ 件	0.9923	0.9681	0.9381	0.9529
[6] $k=24, 12300$ 件	0.9939	0.9512	0.8764	0.9123
[7] $k=48, 24108$ 件	0.9956	0.8889	0.8791	0.884
[8]284807 件	0.9995	0.8837	0.8261	0.8539

本研究の目的である不正利用検出の観点から recall(再現率: 実際に不正のサンプルのうち正解したサンプルの割合) の値が一番良い [4] $k=6$ の時が最適であるという結論に至る. 表 5 に $k=6$ の時の混同行列を可視化する.

表 5 混同行列の可視化

	予測が正常	予測が不正
実際に正常	582	6
実際に不正	2	99

表 5 を見ると, 実際のクラスは不正で予測が正常を表す偽陰性 (FN: False Negative) の件数が 2 件存在する. この 2 件の中に深刻な被害をもたらす取引が存在している可能性があるため, ニューラルネットワークの構造やモデルの学習方法の見直しを行い, 偽陰性の件数を 0 にすることが今後の課題である. また, 実際のクラスは正常で予測が不正を表す偽陽性 (FP: False Positive) の件数も 6 件あり, 正常なクレジットカード利用者の取引が停止されてしまうことも問題であるため, 偽陽性の件数を減らす工夫も考える必要がある.

5. 考察

本章では, 多層パーセプトロンによるクレジットカード不正利用履歴の検出実験の考察を述べる.

本実験では, クレジットカード不正利用履歴の検出実験に多層パーセプトロンモデルを使用した. モデル構造として, 入力層 1 層, 中間層 1 層, 出力層 1 層の 3 層構造で, 各層のユニット数として, 入力層がデータの特徴量数の 28, 出力層が真正と不正の 2 値分類より 2 と設定した. 次に, クレジットカード不正利用履歴の検出に最適な中間層のユニット数を決定するために事前実験を行った. 真正と不正の割合が 6:1 のデータに対して中間層のユニット数のみを変化させ, 不正利用履歴の検出を行い, 3.3 節の評価指標を用いて, 各モデルの評価を行った. 表 2 と表 3 より, 本研究の目的である recall(再現率: 実際に不正のサンプルのうち正解したサンプルの割合) の値が最適であったユニット数 $n=150$ を本研究で使用するモデル構造として採用した. 事前実験により決定した入力層のユニット数 28, 中間層のユニット数 150, 出力層のユニット数 2 の 3 層構造の多層パーセプトロンに対して, [1]~[8] それぞれのデータセットで学習させ, 学習したモデルでクレジットカードの不正利用履歴を検出した結果を表 4 に示した.

表 4 より, 全体のデータ件数のうち正解した割合を示す accuracy(正解率) の値は, データ件数が多くなるほど大きくなる傾向がある. [1]~[8] のデータセットに含まれる不正のデータ件数は元のデータセットの 492 件のままで, 正常のデータ件数のみを変えることによって全

体のデータ件数を増やしている。データ件数を増やすと、accuracy の値は大きくなるが、これは、モデルが正常のトランザクションの特徴を学習し、真陰性の件数が大きくなっていることが関係する。accuracy はデータ件数を増やすことで大きくなるが、この場合、真陽性の件数が低くても全体としての accuracy が高くなるケースも存在する。本研究の目的は不正を不正と判断できるようになることであるため、accuracy のみで判断することはできない。

一方、不正と予測されたデータのうち正解した割合を示す precision(適合率) の値は、表 4 よりデータ件数が多くなるほど小さくなる傾向がある。これは、データ件数が増加するにつれて正常のトランザクションを不正であると判断する割合が増えることに起因するが、実際の現場に応用しようとした際に、正規のユーザーの利用を妨害することは望ましくないため、不正の件数に対して正常の件数が多いアンバランスなデータでモデルを学習させるのはよくない。

本研究では、不正利用を不正であると判断できることを目的としているため、実際に不正のデータのうち正解した割合を示す recall(再現率) の値が 4 つの評価指標の中で最も重要であると考え。今回の実験で用意した [1]~[8] のデータセットのうち、最も recall の値が高かったのは、[4](k=6, 3444 件) のデータで学習させたときであった。また、precision(適合率) と recall(再現率) の調和平均である F-measure(F 値) の値についても [4] のデータで学習させた時が最適であったことから、本実験では入力層のユニット数 28、中間層のユニット数 150、出力層のユニット数 2 の 3 層構造の多層パーセプトロンモデル構造に対して [4] のデータセットで学習させることが最適であると結論づける。一方で、偽陰性の観点から問題点も存在する。表 5 の混同行列に示すように、偽陰性の件数が 2 件存在する。この 2 件の中に深刻な被害をもたらす取引が存在している可能性があるため、ニューラルネットワークの構造やモデルの学習方法の見直しを行い、偽陰性の件数を 0 にすることが今後の課題である。また、偽陽性の件数も 6 件あり、正常なクレジットカード利用者の取引が停止されてしまうことも問題であるため、偽陽性の件数を減らす工夫を考え、正常なクレジットカード利用者が快適に利用できるモデルを構築していきたい。

6. 結言

本研究では、クレジットカード不正利用検出における多層パーセプトロンモデルの有効性を実際のデータを用いて検証した。データには、kaggle からダウンロード

した 2013 年 9 月の 48 時間に行われたヨーロッパのクレジットカードトランザクションデータセットを用いた。このデータセットには、全 284807 件のトランザクション履歴が入っているが、そのうち不正のトランザクションは 492 件と正常のトランザクションに対して非常に少ないアンバランスなものとなっている。このままのデータでモデルを学習すると、正常のトランザクションの特徴をより学習し、階層型ニューラルネットワークでクレジットカードの不正利用を検出するという本研究の目的に沿わない。そこで、元のデータに対して整形処理を行い、いくつかのデータパターンを用意した。様々なデータパターンによる実験の結果から以下のことが結論付けられる。

まず、全体のデータ件数のうち正解した割合を示す accuracy(正解率) の値は、データ件数が多くなるほど大きくなる傾向がある。本研究では、データセットに含まれる不正のデータ件数は元のデータセットの 492 件のままで、正常のデータ件数のみを変えることによって全体のデータ件数を増やしている。データ件数を増やすと、accuracy の値は大きくなるが、これは、モデルが正常のトランザクションの特徴を学習し、真陰性の件数が大きくなっていることが関係する。単純な正解率はデータ件数を増やすことで大きくなるが、本研究の目的は不正を不正と判断できるようになることであるため、accuracy のみで判断することはできないと考えた。

一方、不正と予測されたデータのうち正解した割合を示す precision(適合率) の値は、データ件数が多くなるほど小さくなる傾向がある。これは、データ件数が増加するにつれて正常のトランザクションを不正であると判断する割合が増えることに起因するが、実際の現場に応用しようとした際に、正規のユーザーの利用を妨害することはよくないため、不正の件数に対して正常の件数が多いアンバランスなデータでモデルを学習させるのはよくないと考える。

本研究の目的である不正利用検出の観点から、実際に不正のデータのうち正解した割合を示す recall(再現率) の値が 4 つの評価指標の中で最も重要であると考え。今回の実験で用意した [1]~[8] のデータセットのうち、最も recall の値が高かったのは、[4](k=6, 3444 件) のデータで学習させたときであったが、実際の現場で導入すると考えたときに、この値は 100% に近い値であることが望ましいため、さらなる改善が求められる。また、予測に失敗したトランザクションデータに特徴の傾向はないのかという検討も必要であろう。

最後に、不正利用検出に対する多層パーセプトロン(MLP) の有効性を判断するためにも、さらにデータ件数の多いデータセットでの検証や CNN をはじめとする、

他の手法との比較実験が必要である.

参考文献

- [1] Vaishnavi Nath Dornadula, Geetha S : Credit Card Fraud Detection using Machine Learning Algorithms, *Procedia Computer Science*,165, 631-641(2019).
- [2] クレジットカード不正利用のパターンとは?予防と対策方法とは?, [https://www.orico.co.jp/service/knowledge/abuse/\(2021/12/11\)](https://www.orico.co.jp/service/knowledge/abuse/(2021/12/11))
- [3] Credit Card Fraud Detection, [https://kaggle.com/mlgulb/creditcardfraud\(2021/11/28\)](https://kaggle.com/mlgulb/creditcardfraud(2021/11/28))
- [4] Ankur A. Patel 著, 中田 秀基 訳: Python ではじめる教師なし学習, 株式会社オライリー・ジャパン, 30-34(2020)
- [5] 平野 誠, 八槇 博史: 機械学習を用いた攻撃検知に関する学習手法の精度評価, 情報処理学会, 第 81 回全国大会, 461-462(2019)

ディープニューラルネットワークによる Web 攻撃検知手法の提案

藤田 良介* 小高 知宏** 黒岩 丈介** 諏訪 いずみ*** 白井 治彦****

Proposal of Web attack detection method by deep neural network

Ryosuke FUJITA* , Tomohiro ODAKA** , Jyosuke KUROIWA**
Izumi SUWA*** and Haruhiko SHIRAI****

(Received January 27, 2022)

In this paper, we proposed two feature extraction methods to detect attacks on the Web. We confirmed whether each method was effective by using deep learning.

Attacks on the Web are difficult to classify as normal communications and difficult to detect by machines. Therefore, We focused on the fact that many special symbols appear in HTTP requests for attacks on the Web.

As a result of classification using a method characterized by the number of occurrences of special symbols, the accuracy rate was about 94%.

Key words : Security, HTTP Request, Special Symbols, Deep Learning

1. 緒言

近年, インターネットは急速に発展, 普及し, 今では個人がインターネットに繋がる端末を所持するようになった。それに伴って, Web もまた発展してきている。現在では情報収集を行うための Web サイトだけでなく, 動画を閲覧する, サービスに入会, 退会する登録を行う, 物を購入する, レビューを書くといった事が行える Web アプリケーションを利用する人も増えている。また, Web アプリケーションサービスは娯楽や利便性向上を目的とするものだけでなく, 企業が業務システムに利用す

ることも多くなっている。

Web サービスは便利であり, 多くの利用者がいる反面, Web サービスの管理には高いセキュリティが必要となっている。サービスは常に稼働し続ける必要があるものも多く, サービス利用者の名前や連絡先などの個人情報や, 企業の業務システムであれば, 社外秘となる重要情報など, 漏洩してはならない重大な情報を大量に扱う。しかし, セキュリティホールとなる脆弱性は日々, 発見され, それを狙った攻撃も度々報告されている。^[1] 最近でも, Web サーバ上の任意のファイルを不正に閲覧するディレクトリ・トラバーサル攻撃にまつわる脆弱性が報告されている。^[2] 他にも SQL インジェクション攻撃を始めとした情報を盗み出す攻撃や, XSS(クロスサイトスクリプティング) 攻撃といった利用者に害を与える攻撃が存在する。これらの攻撃は現在深刻な問題となっている。そのため, Web サーバ上のデータベースに格納されている重大な情報や, Web そのものを守るためにセキュリティを徹底する必要がある。

Web サービスの管理者は脆弱性を作り込まないこと, 脆弱性が発見された場合には早期に修正するといった実装面での対策の他にも攻撃から Web アプリケーション

*大学院工学研究科知識社会基礎工学専攻

**知能システム工学講

*** 仁愛女子短期大学

**** 工学部技術

*Fundamental Engineering for Knowledge-Based Society, Graduate School of Engine

**Department of Human and Artificial Intelligent Systems

***Jin-ai Women's College

****Technical Division

を保護する運用面での対策として WAF(Web Application Firewall) が存在する。WAF は Web アプリケーションを含む Web サイトと利用者間で交わされる HTTP(あるいは HTTPS) 通信を検査し、攻撃などの不正通信を自動で遮断することができる。^[3]

しかし、現在の WAF はシグネチャ検知という手法を用いている場合が多い。シグネチャ検知はあらかじめ攻撃を識別するためのルールを記述しておき、そのルールとパターン照合を行うことによって攻撃を検知している。ただし、現状シグネチャ検知では攻撃に用いられる入力と正常な入力を判別することが難しいという欠点がある。特に SQL インジェクション攻撃や OS コマンドインジェクション攻撃はシグネチャ検知では回避されやすいという問題がある。

本研究では、様々な Web への攻撃を網羅的に検知する事を目標とする。そこで、本研究では深層学習を利用する。Web に対する攻撃には HTTP リクエスト系列に特殊記号が多く現れると考えられる。よって、特殊記号に着目した特徴ベクトルの生成手法による検知を目指す。

本論文では 2 章で Web における攻撃の対策、および、攻撃と特殊記号の関係を示し、3 章では提案する特徴抽出方法を示す。4 章では実験方法について述べ、5 章では実験結果を示す。6 章では得られた実験結果についての考察を述べ、7 章では本実験についてまとめる。

2. Web における攻撃と特殊記号の関係

本研究における Web は Web アプリケーションを含む Web サイトを指す。Web アプリケーションとはブラウザから様々な機能を利用可能なアプリケーションサービスの事である。クライアントとサーバ間で HTTP 通信を利用してデータの送受信を行っている。本章では Web に対する攻撃と現在の対策方法について述べ、攻撃と HTTP リクエスト系列に含まれる特殊記号の関係を示す。

2.1 Web における攻撃と対策

本節では、主な Web への攻撃種類と現在における攻撃への対策を述べる。

以下に主な Web への攻撃種類を示す。

- XPath インジェクション
- OS コマンドインジェクション
- Ldap インジェクション
- SSI インジェクション
- SQL インジェクション

- ディレクトリ・トラバーサル
- クロスサイト・スクリプティング

インジェクション攻撃は脆弱性を利用して情報を搾取、マルウェアの感染、データベースの改ざんや消去などを行う攻撃である。例えば、OS コマンドインジェクションでは脆弱性のある Web アプリケーションに対して OS コマンドを送信する事で不正にアクセスする攻撃である。攻撃を受けると、情報を搾取される、他の標的に攻撃する際の踏み台とされる。SQL インジェクションでは外部から不正な SQL 文を送信することで、不正にデータベースの情報を搾取する。クロスサイト・スクリプティングでは脆弱性のある Web サイトに罠を仕掛け、サイトを訪れる利用者を悪質なサイトに誘導する事で、利用者の情報を搾取、あるいはマルウェアの感染などを行う。

これらのインジェクション攻撃は OWASP Top 10 2021^[4] では第 3 位のリスクとされている。2017 年以前の OWASP Top 10 ではインジェクション攻撃は第 1 位のリスクであった。このことからインジェクション攻撃は昔から脅威であったことが分かる。

これらの攻撃に対処するためにはまず、脆弱性を作り込まない事が大切である。例えば、OS コマンドインジェクションを防ぐためには、シェルを起動可能な言語機能を避ける、そもそも外部から入力された命令文をそのままコマンドラインに注入しないといった事が大切である。SQL インジェクションを防ぐためには不正な SQL 文を直接反映しないようにする必要がある。クロスサイト・スクリプティングを防ぐためには「<」や「」といった区切りやタグの意味を持つ文字を意味の無い文字列に変換するサニタイジングが有効である。

また、セキュリティに関する情報を収集し続ける必要もある。脆弱性は日々発見されるために、いち早く修正する必要があるからだ。

ただし、どんな人間でも、どれほど時間をかけたとしても脆弱性を全く持たない Web アプリケーションを作ることはできない。なので、攻撃を防ぐために WAF の導入も推奨されている。

WAF はクライアントと Web サーバの間で通信を監視し、不正アクセスを防止する。WAF の多くは検知方式にシグネチャ検知を用いている。シグネチャとはパターンを定義したものであり、WAF は Web アプリケーションへのアクセスパターンを照合し、正常か異常かを判別している。シグネチャのパターンには主にブラックリスト型とホワイトリスト型が存在する。ブラックリスト型では既知の攻撃パターンをシグネチャに定義し、それと一致した通信パターンを拒否する。ホワイトリスト型で

表 1 各攻撃手法に出現する特殊記号^[5]

攻撃名	特殊記号
XPath インジェクション	' = + /
OS コマンドインジェクション	; / . -
Ldap インジェクション	() = *
SSI インジェクション	! # - "
SQL インジェクション	' = +
ディレクトリ・トラバーサル	/ . \
クロスサイト・スクリプティング	< > = . ;

は正常な通信のパターンをシグネチャに定義し、それと一致しない通信のパターンを拒否する。

しかし、ブラックリスト方式ではシグネチャに定義されていない攻撃を防ぐことはできない。つまり、未知の攻撃やまだアップデートが完了していない最新の攻撃に対応することはできない。ホワイトリスト方式ではそもそも正常な通信を定義することが難しく、正常な通信であっても拒否する誤検知が起こってしまう可能性がある。

上記の対策は行うべきことではあるが、現状では全て行えたとしても完璧な対策にはならず、また、Web が入力値をどう扱うのかはそれぞれのシステムによって異なるので対策も多岐に渡る。そのため、対策漏れはどうしても起こってしまう。

2.2 Web における攻撃と特殊記号

本研究では Web における攻撃と特殊記号には強い関係があると予想し、HTTP リクエスト系列に含まれる特殊記号に着目したアプローチを行う。このアプローチ方法が有効であることは清水らの研究から証明されている。^[5]

Web における各攻撃と出現頻度の多い特殊記号の関係を表 1 に示す。例えば、OS コマンドインジェクション攻撃であれば、入力値にシェルや命令文を入力する必要がある。これは他の攻撃も同様である。SQL インジェクション攻撃であれば、SQL 文を入力する必要がある、クロスサイト・スクリプティングであれば、JavaScript や HTML タグによる不正なスクリプトの挿入が必要とされる。故に、通常の入力に比べ、特殊記号の出現頻度が大きくなると考えられる。

特殊記号に着目したアプローチ方法であれば、ある程度網羅的に攻撃を検知する事が可能であると考えられる。また、未知の攻撃や WAF を回避する攻撃などにも対応可能であると期待できる。

表 2 特殊記号

sp	!	"	#	\$	%	&	'	()	*
+	,	-	.	/	:	;	<	=	>	?
@	[\]	^	-	'	{	—	}	~

3. 提案する検知手法

本章では侵入検知の概要と、2.2 節で示した攻撃と特殊記号の関係性から提案する侵入検知手法について述べる。

3.1 侵入検知の概要

初めに、通常利用の通信である正常な HTTP リクエストと攻撃用の通信である異常な HTTP リクエストを用意し、学習モデルを構築する。本研究では 2.2 節で示した通り、Web における各種攻撃には特殊記号と関係があると予測している。それらの特殊記号に着目した特徴ベクトルを正常な HTTP リクエストと異常な HTTP リクエストから抽出する。抽出した特徴ベクトルを用いて深層学習を行う。特徴ベクトルの作成手法は次節で述べ、深層学習に用いるディープニューラルネットワークは 4 章で述べる。

学習モデルによってディープニューラルネットワークを十分に学習し終えた後は、実際にネットワークの精度を確認する。学習モデルを作成したときと同じように検証モデルを作成する。学習を終えたネットワークに検証モデルを入力し、その結果と検証モデルのラベルを比較することで精度を検証する。学習モデルによって、十分に正常なリクエストと異常なリクエストの特徴を学習することができていれば、ネットワークは正常なリクエストを正常と、異常なリクエストを異常と分類できるはずである。

3.2 提案する特徴抽出方法

表 2 に特殊記号を示す。これらの出現頻度に着目した特徴ベクトルの抽出方法について述べる。

提案する特徴抽出方法は 2 つあり、1 つは特殊記号の出現頻度のみに着目した手法 1、もう 1 つは特殊記号だけでなく英数字の出現頻度にも着目した手法 2 である。また、図 1 のリクエストを例として提案方法を説明する。

3.2.1 手法 1

表 3 に手法 1 で抽出する特徴を示す。

抽出する特徴の要素の 1 つ目は入力項目数がいくつ

表 3 特徴抽出方法 (手法 1)

特徴
入力項目数
各特殊記号の出現頻度
%エンコーディング
以外の特殊記号 (+ - .)

表 5 特徴抽出方法 (手法 2)

特徴
入力項目数
各特殊記号の出現頻度
%エンコーディング
以外の特殊記号 (+ - .)
英数字の出現頻度

表 4 手法 1 による特徴ベクトルの例

x1	...	x9	x10	x11	...	x20	...	x35	...
		'	()		=		+	
2		4	1	1		1		24	

あるかである (x_1). 図 1 の例では"2"が特徴量として抽出される.

2つ目は表 2 に示されている各特殊記号の出現頻度である ($x_2 \sim x_{34}$). 例の URL 部を除いた部分では各特殊記号は%エンコーディングが施されている. つまり, 特殊記号は"% xx"と表現されている. 例を見ると,"%27"と表現される "'", "%28"と表現される "(", "%29"と表現される ")", "%3D"と表現される "="が出現している. これらの出現頻度を特徴量として抽出し, 他の出現していない特殊記号は"0"として抽出する.

3つ目は入力項目を表す"="や"&"以外の%エンコーディングされていない特殊記号である ($x_{35} \sim x_{37}$). 厳密には"+"などは空白を意味するなど特殊記号ではないが, 攻撃には特に"+"が多く含まれているように感じるため, これらも特徴量として含める. 例では"+"は"24"個出現しており,"."が 1 個出現している. 他の出現していない記号は"0"として抽出する.

表 4 に手法 1 にて生成される特徴ベクトルの例を示す. 2 行目は対応する記号を示し, 3 行目は出現頻度を表している. また, 1 列目は入力項目数である.

3.2.2 手法 2

表 5 に手法 2 で抽出する特徴を示す. 手法 2 では手法 1 の特徴抽出法に加え, 英文字である a~z, A~Z と数字

```
/cdss9uiNbh9putoDu/cBjtxYsdsiNsg3Yetat/eYYEzPiVc/q_.iNv.php3?eogp0Lf14f1=bulk++insert+++od+++from++++%27pwdump.exe%27++++with+++%28codepage%3D%27RAW%27+++%29&esonRwtqndqi=hEPPQ
```

図 1 HTTP リクエストの例

表 6 構成されているクラス

Class
Normal query(Valid)
XPATH Injection (XPathInjection)
OScommand Injection (OsCommanding)
LDAP Injection (LdapInjection)
SSI attacks (SSI)
SQL Injection (SqlInjection)
Directory-Traversal (PathTransversal)
Cross-Site Scripting (XSS)

である 0~9 の計 62 個を特徴として加える ($x_{38} \sim x_{99}$). これらの英数字を特殊記号と同様に出現頻度を特徴量として抽出する.

4. 検知実験

本節では 3 章で説明した手法によってどれほどの精度になるのかを確認する検知実験について述べる. まず, 検知実験で使用するデータセットについて説明し, 次に, 深層学習に使用するネットワークの構造について述べる. 次に, 検知実験の流れを説明し, ネットワークの精度評価について述べる.

4.1 使用するデータセット

本実験では ECML/PKDD 2007 Discovery Challenge Dataset^[6] を使用する. データセットは XML で定義されており, 各 HTTP リクエストはラベル付けで識別される.

このデータセットは特定の Web アプリケーションだけでなく, 様々な Web アプリケーションの HTTP リクエストで構成されている. データセットは 8 つのクラスがある. データセットを構成するクラスの種類は表 6 に示す. データセットには"GET", "POST", "PUT"の 3 つのメソッドがあるが, そのほとんどは"GET"メソッドである. 本実験では"GET"メソッドのみを用いる. また, 正常

表7 手法1におけるネットワークの構造

層の形状	ユニット数	活性化関数
全結合	296	LeakyReLU
全結合	222	LeakyReLU
全結合	148	LeakyReLU
全結合	111	LeakyReLU
全結合	37	LeakyReLU
全結合	18	LeakyReLU
全結合	6	LeakyReLU
全結合	2	LeakyReLU
全結合	1	Sigmoid

表8 手法2におけるネットワークの構造

層の形状	ユニット数	活性化関数
全結合	792	LeakyReLU
全結合	594	LeakyReLU
全結合	396	LeakyReLU
全結合	297	LeakyReLU
全結合	99	LeakyReLU
全結合	18	LeakyReLU
全結合	6	LeakyReLU
全結合	2	LeakyReLU
全結合	1	Sigmoid

なりクエスト 7436, 攻撃である異常なリクエスト 3752 を1つのセットとして取り出し, 学習用のデータと検証用のデータとする。

4.2 ディープニューラルネットワーク

ニューラルネットワークは, 人間の脳神経を模して作られた情報処理モデルである。^[7] 入力層, 中間層, 出力層の3層からなるネットワークは多層マルチパーセプトロンと呼ばれる。このネットワークで中間層が複数になるものをディープニューラルネットワークと呼び, それを用いて行う機械学習を深層学習と呼ぶ。

手法1で用いたネットワークの構造を表7に, 手法2で用いたネットワークの構造を表8に示す。

層を重ねることで精度はわずかながら向上したが, 10層以上に重ねると精度の向上は見られなかったため, 入力層1, 中間層7, 出力層1からなる9層の構造とした。また, 活性化関数に関してはReLUよりも精度が高かったため, 入力層と中間層にはLeakyReLU関数を使用している。出力は0~1の間にする必要があるため出力層にはSigmoid関数を用いている。

表9 混合行列

	予測は正常	予測は異常
実際は正常	TN	FP
実際は異常	FN	TP

4.3 実験方法

具体的な実験方法を図2に示す。第3.2節で述べた各手法によって, 学習用データセットと検証用データセットから特徴ベクトルを抽出する。抽出した特徴ベクトルの内, 学習用のものをネットワークに入力し, 学習させる。その後, 学習を終えたネットワークに検証用のデータを入力し, その出力から得られた分類結果と検証用データのラベルを比較することで, 精度を確認する。

本実験の評価方法は次節で述べる。

4.4 評価指標

ネットワークの精度は混合行列によって表として要約することが可能である。表9に混合行列を示す。各列はネットワークが予想したクラスを表し, 各行は実際のクラスを表している。この混合行列からは様々な評価指標を導くことができる。

本実験で使用する評価指標を表10に示す。左の列には精度指標の名称を示しており, 右の列にはそれらの指標の計算式を示している。

5. 実験結果

本章では4.1節で述べたデータセットから, 3.2節で述べた手法1と手法2に従って作成した特徴ベクトルを用いて行った検知実験の結果を示す。

本実験では, 最適化関数をAdam, 損失関数をBinary

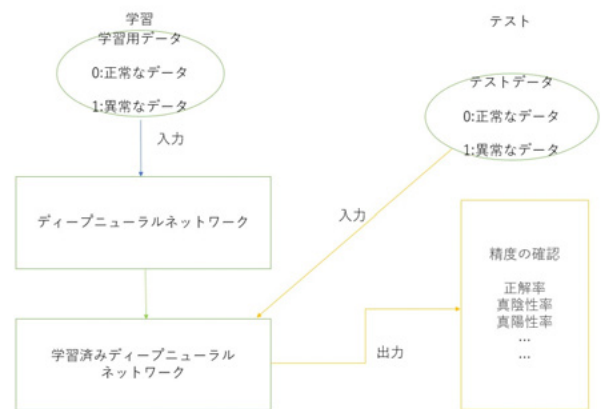


図2 実験方法

表 10 評価指標

尺度	定義
真陰性数	TN
偽陽性数	FP
真陽性数	TP
偽陰性数	FN
正解率	$acc = \frac{TP+TN}{TN+FP+TP+FN}$
誤り率	$err = 1 - acc$
再現率	$recall = \frac{TP}{TP+FN}$
特異度	$specificity = \frac{TN}{FP+TN}$
陰性適中率	$NPV = \frac{TN}{TN+FN}$
適合率	$precision = \frac{TP}{TP+FP}$
F 値	$F - measure = \frac{2 \cdot recall \cdot precision}{recall+precision}$

表 11 手法 1 による実験結果

手法 1	
真陰性数	7406
偽陽性数	30
真陽性数	3114
偽陰性数	638
正解率	0.94
誤り率	0.05
再現率	0.82
特異度	0.99
陰性適中率	0.92
適合率	0.99
F 値	0.90

Cross Entropy にロジスティクス関数をかけたものを使用して学習を行った。また、ミニバッチ数を 50 とし、500 エポック学習させた。500 回以降でも損失値は減少したが、精度の向上は見られなかったため、本実験での学習回数は 500 エポックとした。

図 3 と図 4 にそれぞれの手法で抽出した特徴ベクトルを用いて深層学習を行った際の損失値を示す。どちらも十分に学習が収束していることが分かる。

表 11 に手法 1 による実験結果を、表 12 に手法 2 に示す。

手法 1 による正解率は 0.94 であり、手法 2 による正解率は 0.93 とわずかながら手法 1 の方が精度は高い結果となった。

偽陽性数は手法 1 の方が手法 2 に比べて少なく、特異度、陰性的中率、適合率は手法 1 の方が優れている結果となった。偽陰性数は手法 2 の方が少なく、再現率は手法 2 の方が優れている結果となった。全体的な精度を見ると、手法 1 の方が精度が高い結果となった。

6. 考察

本章では特殊記号に着目した特徴ベクトル抽出方法である、手法 1 と手法 2 を用いた実験結果の考察を示す。

手法 1 と手法 2 のそれぞれで抽出した特徴ベクトルをディープニューラルネットワークで学習させた結果、損失値は減少している。つまり、特殊記号に着目して抽出した特徴ベクトルで正常なリクエストと異常なリクエストの違いを学習できていると考えられる。

手法 1 での全体的な正解率は 94%、手法 2 での全体的な正解率は 93% となっており、特殊記号に着目して特徴を抽出する手法は有効であると考ええる。

また、手法 1 の結果と手法 2 の結果を比較すると、手法 1 の方が正常なリクエストを異常と誤検知する数が少なく、評価指標の特異度、陰性的中率、適合率が高い。ただ、手法 1 に比べて手法 2 の方がわずかながら異常なリクエストを正常なリクエストと分類してしまう数が少ない。しかし、それ以上に手法 2 では誤検知してし

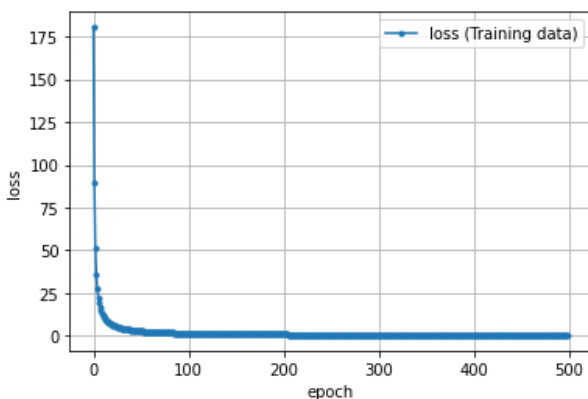


図 3 手法 1 における損失値の変化

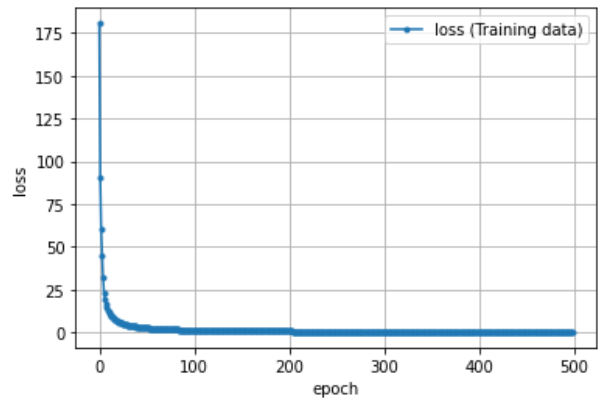


図 4 手法 2 における損失値の変化

表 12 手法 2 による実験結果

手法 2	
真陰性数	7275
偽陽性数	161
真陽性数	3133
偽陰性数	619
正解率	0.93
誤り率	0.06
再現率	0.83
特異度	0.97
陰性適中率	0.91
適合率	0.95
F 値	0.88

まっている.F 値を見ると, 手法 1 の方が高く, 全体的には手法 1 の方が有効であることが分かる. つまり, 特殊記号の出現頻度は特徴として有効であるが, 英数字の出現頻度は特徴としてそれほど有効ではない考える.

手法 1, 手法 2 のどちらの手法においても偽陽性は少なくなっており, 特異度や適合率は 95% を越えている. そのことから, 本研究で提案した手法は正常なリクエストを異常なリクエストであると誤検知することは十分に少ないことが分かる. しかし, 再現率を見ると, どちらも 80% ほどと検知器としてしようするにはまだまだ低い結果となっている. 再現率は全ての異常なリクエストの内, 異常なリクエストであると分類できた割合である. つまり, 本研究で提案した手法では, 正常なリクエストを正常であると分類することは十分にできるが, 異常なリクエストを正常であると判断してしまう可能性がそれなりにあると言える. 陰性的中率が 90% ほどなので, 正常であると分類されたリクエストの内, 1 割ほどは異常なリクエストとなってしまっている. 再現率が低い状態のままでは検出器として運用するのは難しいため, 偽陰性数を抑え, 再現率を向上させるための改善が必要である.

異常リクエストを正常リクエストと分類してしまった攻撃は OS コマンドインジェクションが特に多く, 次いでディレクトリ・トラバーサルであった.

OS コマンドインジェクションは 2.1 節でも述べたが, 不正な OS コマンドを注入することで, 対象の PC やサーバにアクセスする攻撃である. また, ディレクトリ・トラバーサルはディレクトリの相対パスを注入することで, 本来は閲覧できないはずのデータを不正に入手する攻撃である. この 2 つの攻撃に共通する特殊記号は「/」と「.」である. これらの特殊記号を多く含む攻撃は正常なリクエストとの見分けがあまりついていないために,

この 2 つの攻撃を正常なリクエストと分類してしまっていると考える. また, この 2 つの攻撃には他の攻撃と重なる特殊記号が少ないのも, あまり分類できない一因ではないかと考える.

ネットワークの学習は十分に行われており, 正常なリクエストと異常なリクエストを分類する閾値を 0 という厳しい数字を使用しているにも関わらず, OS コマンドインジェクションをおよそ半分ほどしか異常と分類できていない. また, 英数字の出現頻度を特徴ベクトルに加えた手法 2 であっても, SQL インジェクションやディレクトリ・トラバーサルを正常なリクエストであると分類してしまう数は減ったものの, OS コマンドインジェクションにはあまり影響は無かった. 本研究の提案手法では OS コマンドインジェクションを満足に分類できないと考える.

再現率を向上させるためには, ネットワークの構造を変更する, 特殊記号に加えて新たな特徴を抽出するなど, 特に OS コマンドインジェクションを見分けられる方法を考える必要がある.

7. 結 言

本章では Web への攻撃を検知するために提案した特徴抽出手法について総括し, 今後の課題について述べる.

本研究では様々な Web 攻撃手法に共通する特徴を用いて, それらの攻撃を網羅的に検知する事を目的とした.

本研究では攻撃用の異常リクエストには特殊記号が多く出現することに着目したアプローチに沿って, 2 つの特徴抽出手法を提案した.

提案した特徴抽出手法の有用性を確認するために ECML/PKDD 2007 Discovery Challenge Dataset を用いて実験を行った. 実験の結果, ある程度分類は可能であると実証された.

次に, 今後の課題について述べる.

まず, 本研究で深層学習に用いたディープニューラルネットワークの改善が必要である. 現状では, ある程度分類は可能である. しかし, 検知器として使用するには再現率が低い. 本研究で用いたディープニューラルネットワークは全て全結合層からなるものであったが, ネットワークには畳み込みなどの種類がある. それらを使用することで精度改善が期待できる.

また, 特徴抽出手法の改善も必要であると考えられる.

上記のように深層学習に使うネットワークを変えることで, より特徴を掴める可能性は存在するが, 現状, OS コマンドインジェクションのリクエストと正常リクエストを見分けられていない. つまり, 本研究で提案した特徴抽出手法により作成した特徴ベクトルでは完全に

分類できていない。また、英数字の出現頻度を特徴ベクトルに加えても、精度は向上しないことが分かっている。

本研究による提案手法では全ての特殊記号を特徴量としたが、正常リクエストと異常リクエストの分類にあまり役立っていない特殊記号を省いて抽出する。あるいは、出現頻度だけではなく、出現する順番も特徴ベクトルで表現できるようにするといった改善点が考えられる。

上記の課題を取り入れることで、より高い精度での分類が可能になると期待できる。

参考文献

- [1] 情報処理推進機構:ソフトウェア等の脆弱性関連情報に関する届出状況 [2021 年第 2 四半期 (4 月～6 月)], <<https://www.ipa.go.jp/files/000092739.pdf>>(2021/10)
- [2] JVN iPedia 脆弱性対策情報データベース:Apache HTTP Server におけるディレクトリトラバースの脆弱性,<<https://jvndb.jvn.jp/ja/contents/2021/JVNDB-2021-000090.html>>(2021/10)
- [3] 情報処理推進機構:安全なウェブサイトの作り方改訂第 7 版,<<https://www.ipa.go.jp/files/000017316.pdf>>(2021/10)
- [4] OWASP Top 10 2021,<<https://owasp.org/Top10/ja/>>(2021/10)
- [5] 清水大貴, 小高知宏, 黒岩丈介, 諏訪いずみ, and 白井治彦:機械学習を用いた Web アプリケーション攻撃検知手法の提案, 福井大工報, 68, 51-58 (2020).
- [6] Analyzing web traffic:Ecml/pkdd 2007 discovery challenge, <<http://www.lirmm.fr/pkdd2007-challenge/>>(2021/4)
- [7] 麻生英樹: 多層ニューラルネットワークによる深層表現の学習. 人工知能学会誌, 28-4,649–659(2013).

サブドメイン名を用いた開放ポート推測可能性の検証

坂田 拓美* 小高 知宏** 黒岩 丈介**
諏訪 いずみ*** 白井 治彦****

The Possibility of Guessing Open Ports from the Subdomain Name

Takumi SAKATA*, Tomohiro ODAKA**, Jousuke KUROIWA**,
Izumi SUWA*** and Haruhiko SHIRAI****

(Received January 31, 2022)

Today, any information which is available on the internet is often used to attack servers by attackers. DNS is one of the information sources which are used by them.

We propose a new possibility of guessing open ports from only the subdomain name. Subdomain name is a name for hosts, often named after the service running on them. It potentially means the name contains the information about running services which can help attackers to know how to intrude into the target server before sending out any packets to it.

In this paper, we examined the possibility with statistical data and machine learning. We used fastText as machine learning model to learn linguistic relations between subdomain name and open ports.

As a result, we find it possible to guess open ports from subdomain name by using machine learning.

Key words : DNS, Subdomain, Cybersecurity, Internet, Machine Learning

1. 緒言

昨今では、インターネット上の様々な情報が収集され、多種多様な目的に利用されている。インターネットを介して誰もが情報の発信者となることが可能となった情報化社会においては、これらの情報を元に生成さ

れる新たな情報は高い精度で現実世界を反映したものとなりえる。

インターネットを利用した情報収集の中でも、一般に公開された情報をもとにして目的とする情報を収集・分析する手法を OSINT (Open Source Intelligence) と呼ぶ。^[1] 今日、OSINT はサイバーセキュリティにおいて重要視されており^[2]、悪意のある攻撃者とシステム管理者のどちらも積極的に活用している。

ドメイン名に関する情報も OSINT として利用できる場合がある。現在 DNS (Domain Name System) における OSINT としては、サブドメインをリストアップすることによる稼働マシンのリストアップや、whois 情報が一般的となっている。^[3] しかし、これら以外にも利用方法がある可能性が考えられる。

そこで新たな情報として、サブドメインから対象サーバで稼働中のサービスを推定し、攻撃手法の選別に用

*大学院工学研究科 知識社会基礎工学専攻

*Fundamental Engineering for Knowledge-Based Society, Graduate School of Engineering

**知能システム工学講座

**Department of Human and Artificial Intelligent Systems

***仁愛女子短期大学 生活科学学科

***Jin-ai Women's College

****工学部 技術部

****Technical Division, School of Engineering

いられてしまう可能性を考える。本研究の目的は、サブドメインとサービスに関連の深い開放ポートの間に、推定可能な関係性が存在するか検証することである。本論文ではいくつかの手法で検証した結果について検討を行う。

2. 研究背景

DNS とはインターネットを利用する上で欠くことのできない仕組みのひとつである。しかし、DNS リフレクション攻撃など、DNS を悪用した攻撃手法が度々使用されていることが確認されている^[4]。本章では、DNS や OSINT について述べた後に、本論文で警鐘する新たな DNS 悪用手法について述べる。

2.1 DNS の現状

本節では、DNS の利用状況と DNS がどのような攻撃に利用されているのかについて述べる。

2つの DNS ルートサーバを管理している Verisign によると、すべての TLD に登録されているドメイン名の総数は 2021 年の 6 月末時点で 3.67 億個を超えている^[5]。Web サイトを代表として、多種多様な利用がされている現代のインターネットは、数多くのサーバによって成り立っている。それらのサーバに対してドメイン名が割り当てられ管理されることで、DNS が扱うドメイン名は膨大な数へと成長した。

また、DNS が考案された当初の目的であったサーバへアクセスする際のアドレス管理の簡便化だけでなく、電子メールの送信元認証技術である DMARC^[6] や、HTTPS 通信などで用いられる公開鍵証明書の発行を担う認証局の指定を行う CAA^[7] などの仕組みが DNS に実装されている。これらの新たな仕組みによって、DNS が扱うデータの種類や影響範囲は拡大している。

より安全なインターネットを実現するための仕組みが、DNS の機能を利用または拡張することにより実装されている。しかし、これによって DNS がインターネットのセキュリティにおける脆弱部となることも考えられる。

2.2 サブドメインからのサービス推測可能性

はじめに、サブドメインについて簡単に述べる。最終的にアクセスを行うホストを表す FQDN は、複数のドメインからなっている。ドメインは階層構造になっており、それらの各ドメイン間は“.”(ピリオド)で区切られている。サブドメインは、これら複数あるドメインの中であるドメインの配下につくドメインのことを言う^[8]。

例として、“www.example.com”を考える。ドメイン名は右から左へと記述するため、右にあるものがより上位のドメインとなる。最上位となる“com”に注目して見ると、その左にある“example”または“www.example”がサブドメインということになる。つまり、一般にサブドメインは視点によって異なる。しかし、本論文では簡単のため最も左にあるドメインのみをサブドメインとする。

最も左にあるドメインは、特定のホストにつけられたものである。名付けの際には、そのホストが提供する機能や情報に基づいて、管理者または利用者にとって都合の良いものがつけられることが多いと考えられる。これが事実であれば、サブドメインから対応するホストで稼働しているサービスに関する情報を入手できてしまう可能性がある。

あるホストで稼働しているサービスに関する情報を、第三者が取得することそのものについては大きな問題ではない。攻撃者にとって、ターゲットの稼働サービスを調べることは、攻撃前に必ず行わなければならないことである。これは複雑な作業ではなく、ポートスキャンなどを実行することでできる。

サブドメインから稼働しているサービスに関する情報が分かることが問題となる理由は、ターゲットとなるホストに一切のログを残すことなく実行可能という点である。一般的な手法の一つであるポートスキャンでは、ターゲットの各ポートに対して各種パケットを送信することで開放ポートを調べる。ターゲットとなるホストにおけるファイアウォールの設定にもよるが、パケットをターゲットに送信するということは、そういった通信があったというログが残ることになる。管理者は攻撃への対策として、このログをもとにアラートを通知させることや、通信元アドレスのブロックを行うように設定できる。

それに対して、サブドメインからサービスに関する情報を入手する場合には、悪意のある攻撃者は攻撃対象となるホストのサブドメインを入手するだけで、ターゲットとの通信を行う必要がなくなる。サブドメインを入手する際には、攻撃対象である組織が管理する DNS サーバに総当りになどによる列挙が必要になる場合があるが、この通信ログが残るのは DNS サーバであり攻撃対象ではない。また、Passive DNS などのデータベースを用いることで^[9]、外部への通信を最小限に抑えることも可能と言える。これらにより、攻撃対象となったホストの管理者は、攻撃を事前に察知しブロックするなどの対策をすることが不可能となる。

以上から、サブドメインからサービスを推測することが可能であった場合、セキュリティ上無視できない

脅威となると言える。本論文では、サブドメインからサービスを推測することが実際に可能であるかどうかを検証し、考察を行なった。

3. 検証方法

本章では、サブドメインからサービスを推測することが可能か検証を行う方法について述べる。

3.1 検証に用いるデータ

まず、検証に用いるためのデータの準備を行なう。必要なデータは、サブドメインとそれと対応するホストで稼働しているサービスのペアを記録したものである。しかし、これに該当する公開されたデータセットが見つけれなかったため、サービスではなく開放ポートとのペアのデータセットを作成した。

データセットの作成の際に用いたデータは、Rapid7 が Project Sonar の一環として公開している Open Data^[10] の一つである、FDNS (Forward DNS) 2021-04-23-1619136719-fdns_a.json をデータとして用いた。

この FDNS データは、Rapid7 の DNS サーバに対してフォワードされたすべての DNS クエリへの応答が記録されたものである。その中でもクエリタイプが A、つまりドメイン名から IPv4 アドレスの名前解決を行なっているもののみを対象とした。また、利用したデータの対象期間は日本時間で 2021 年 4 月 23 日 09:16:21 から 2021 年 4 月 24 日 06:57:46 である。

このデータから IP アドレスが割り当てられていた FQDN (Fully Qualified Domain Name) のみを抽出し、重複していた FQDN も削除を行なった。こうして作成した FQDN のデータベースを元に、ポートスキャンを行い、各 FQDN とペアとなる開放ポートのデータセットを作成した。

3.2 検証の流れ

本研究では、大きく分けて 2 種の手法を用いて検証を行なう。1 つはサブドメインと開放ポートの統計的なデータを用いた検証である。もう一つは機械学習を用いた検証である。本節では、それぞれの手法について検証を行う際の流れについて述べる。

3.2.1 統計的なデータを用いた検証

この手法では、サブドメインの命名に固有のパターンが存在するのを確認するため、各サブドメインの出現割合、同一サブドメインの出現頻度分布、重複の

有るサブドメインにおけるポート出現率、重複の無いサブドメインにおけるポート出現率を算出する。

各指標の算出方法は表 1 に有るとおりである。各サブドメインの出現割合の算出方法は、各サブドメインの出現総数を対象となる FQDN の総数で割った値となる。また、重複の有るサブドメインにおけるポート出現率と重複の無いサブドメインにおけるポート出現率は、対象となるホストが異なるもので計算式はどちらも条件 (重複の有るサブドメインまたは無いもの) に合うサブドメインにおける全てのポートの総出現回数を条件に合うサブドメインの総数で割った値となる。

表 1 各指標の算出方法

指標	算出方法
各サブドメインの出現割合	$\frac{\text{各サブドメインの出現総数}}{\text{FQDN の総数}}$
各ポート出現率	$\frac{\text{各ポートの総出現回数}}{\text{対象サブドメイン総数}}$

また、同一サブドメインの出現頻度分布は、異なる FQDN の中で同一のサブドメインが何回重複して現れるかを数え、各頻度ごとに度数を出したものである。

3.2.2 機械学習を用いた検証

統計データによる検証では、サブドメインを一つのブロックとして捉え、サブドメインの文字列の並びを全く利用していない。そのため、機械学習を用いた手法では、文字列に開放ポートの推測に用いることができる隠れた特徴が存在しないかを確認することを目的としている。

今回、学習ライブラリとして 2016 年に Facebook が公開した fastText を用いた。fastText は、Word2Vec を基に開発された自然言語処理ライブラリであり、入力された単語をベクトル空間にマッピングすることでテキストの分類を行う^[11]。

学習には、用意したデータセットを学習データ:検証データ=4:1 に分割して利用する。また、単一ホストであっても複数の開放ポートが存在するため、マルチラベル予測を行うためのロス関数である one-vs-all を用いた。fastText には学習時に設定可能なハイパーパラメータは、学習率とエポック数の 2 つがある。今回、これらのパラメータは学習率=0.05、エポック数=25 とした。

学習後のモデルを用いて評価するための指標には、Precision, Recall, F-measure を用いた。それぞれの計算式は表 2 に記す。ここで、*gold*s は、検証データに含まれるラベルの総数である。

表2 学習後のモデル評価指標の算出方法

指標	算出方法
Precision	$\frac{truePositives}{truePositives+falsePositives}$
Recall	$\frac{truePositives}{golds}$
F-measure	$\frac{2*precision*recall}{precision+recall}$

サブドメインから開放ポートを推測することが可能となる特徴に、どういったものがあるのかヒントを得るため、用いるデータセットにいくつかのパターンを用意する。用意するパターンは表3のとおりである。なお、各パターンの()内に書かれた数字は、そのデータセットに含まれるサブドメインの数を意味している。

表3 データセットのパターン

パターン	11 空きポート除外	80 除外
パターン 1 (1,196,076)		
パターン 2 (1,107,946)	o	
パターン 3 (1,109,117)	o	o

データセットに行う操作は2種類用意した。パターン1では、用意したデータセットをそのまま利用し、パターン2とパターン3で各操作による予測精度への影響を見る。

11個以上のポート除外は、多数のポートが開放されているホストを除外するためのものである。単一のホストに多数のポートが開放されている場合、そのホストでは多数のサービスが稼働されていると考えられる。このようなホストにつけられるサブドメインは、稼働サービスを基に付けられているとは考えにくいので、予測に用いることは難しいのではないかと考えられる。そのためこれを除外した際に、予測精度に対する影響を確かめる。これは、単一のホストで11個以上の開放ポートがあるホストそのものを、データセットから除外する。

80番ポート除外は、多くのホストで開放されている80番ポートのラベルを削除することで、80番ポートの数による影響を減らすためのものである。これは、各ホストで80番ポートのラベルが存在していた場合、そのラベルのみを削除する。

また、11個以上の開放ポート除外および80番ポート除外のどちらもあるパターン3では、80番ポート除外を行なった後に11個以上の開放ポート除外の操作を行う。この順番により、開放ポートが10個以下となり除外の対象外となったサブドメインによって、パターン2よりもサブドメイン数が1,171個増えている。

4. サブドメインと開放ポートの統計データによる検証

はじめに、代表的なサービスと開放ポートの例を表4に示す。この表にはサブドメインとそのサブドメインで開放されていたポートの一つ、およびそのポートを使用している関連サービスを示している。サブドメインにおける出現数では、表4で示した開放ポートが、そのサブドメインが付けられたホストの内、いくつかのホストで開放されていたかを表している。

日常生活で最も頻繁に見かける“www”は、Webサイトで用いられる一般的なサブドメインであり、このサブドメインかつhttpが使用できるように80番ポートが開放されているホストは、357,089という数となっていた。反対に、“dns”や“rdp”などのプロトコル名をそのままサブドメインとして用いたものはあまり多くないことも分かる。

次に、3.2.1節で述べた手法による結果を示す。図1は各サブドメインの出現割合を円グラフとして表したものであり、割合が0.5%を超えるサブドメインが個別に示されている。図2は同一サブドメインの出現頻度分布を示したものである。図3は重複の有るサブドメインにおけるポート出現率を算出した結果のうち、上位5つとなったポート番号を示している。図4は重複の無いサブドメインにおいて、図3と同様に算出されたポート出現率上位5つが示されている。

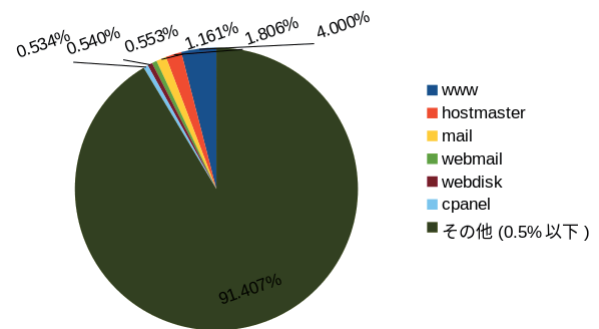


図1 サブドメインの出現割合

図1を見ると、最も多く使われているサブドメインは“www”であるが、その割合はたった4%しかないので分かる。全体の90%超が出現割合0.5%以下となっており、一般的に広く設定されるサブドメインというものは無いということが言える。

図1から多種多様なサブドメインが利用されていることが推測できるが、実際にどれだけ重複したサブドメインが付けられることが有るのかは図2を見ることで分かる。図2は横軸が各サブドメインで重複した数、縦軸がその重複回数におけるサブドメインの種類数を

表 4 サービスと開放ポートの対応関係の例

サブドメイン	開放ポート例	関連サービス	出現数
www	80	http	357,089
dns	53	DNS	242
rdp	3389	Windows Remote Desktop	27
pop	995	POP3 over TLS	98

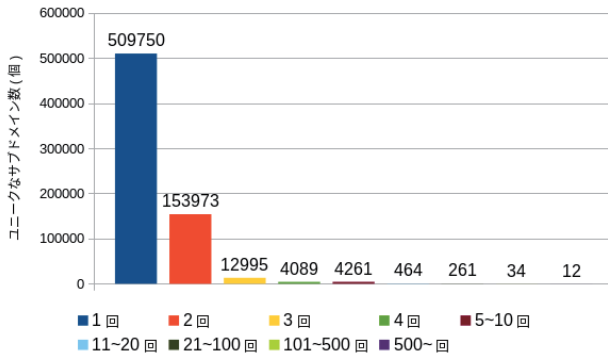


図 2 同一サブドメインの出現頻度分布

意味している。見て明らかなように、重複がない1回のみしか出現しなかったサブドメインの種類数が他と比較して圧倒的に多いことが分かる。重複回数が増えていくごとに、対応するサブドメインの種類数は減少していき、500回以上重複したサブドメインはたった12種類しか存在しなかった。図1における出現割合0.5%以上のサブドメインは、この500回以上重複したサブドメインの中でも上位6位となる。

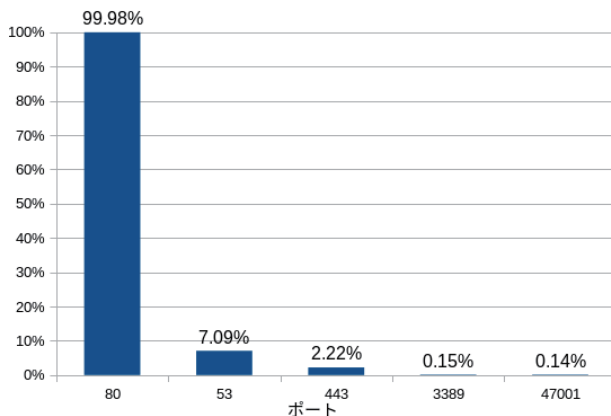


図 3 重複の有るサブドメインにおけるポート出現率の上位5つ

重複が有るものと、重複が無いものとのサブドメインの種類数の隔たりが大きいことが分かった。そこで、それぞれにおける開放ポートの特徴に違いがあるのかを見ることができるポート出現率についての図が図3

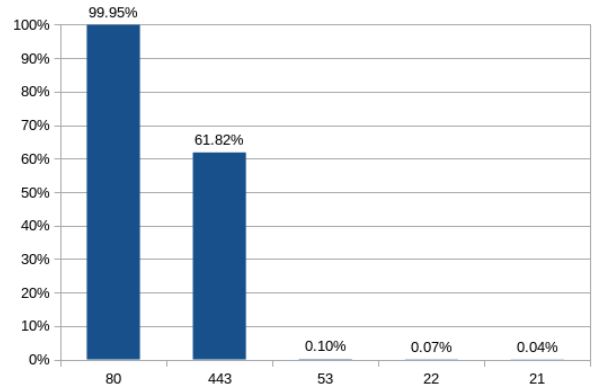


図 4 重複の無いサブドメインにおけるポート出現率の上位5つ

と図4である。

図3と図4の両方を見ると、重複の有る・無し関係なくほとんどのサブドメインが割り当てられたホストにおいて、80番ポートが開放されていることが分かる。重複の有る・無しにおける大きな違いは、重複の無いサブドメインにおいて80番ポートと同じweb系のhttpsで用いられる443番ポートが次点で多く存在することである。重複の無いサブドメインにおいては61.82%もの出現率だが、重複の有るサブドメインにおいてはたったの2.22%と大きな差が存在する。

重複の有る・無しによるポート出現率の違いでもうひとつの興味深い点は、DNSで用いられる53番ポートである。443番ポートほどではないものの、重複の有るサブドメインにおいては7.09%となっているのに対して、重複の無いサブドメインにおいては0.10%と小さな値となっている。これは、DNSサーバに対してよく使われるサブドメインが存在する可能性を示唆していると言える。

5. サブドメインと開放ポートの機械学習を用いた検証

本章では、3.2.2節で述べた手法による結果を示す。表5には各データセットのパターンによって学習したモデルによる予測性能を示している。

マルチラベル予測の際の予測するラベル数および基

準は、予測ラベル可能性のしきい値を設定することで調整を行う。あるサブドメインにおいて予測するラベル数に制限は加えずに、予測されるラベルの確率がしきい値を超えていた場合に出力される。

今回のバリデーション時には、予測ラベル可能性のしきい値を、0.6, 0.5, 0.4, 0.3 の4種類で行なった。

表5 機械学習による開放ポート予測性能

予測しきい値		パターン 1	2	3
0.6	Precision	0.953	0.855	0.882
	Recall	0.994	0.849	0.806
	F-measure	0.9730	0.8520	0.8423
0.5	Precision	0.952	0.849	0.875
	Recall	0.997	0.859	0.815
	F-measure	0.9740	0.8540	0.8439
0.4	Precision	0.952	0.843	0.869
	Recall	0.998	0.866	0.822
	F-measure	0.9745**	0.8543*	0.8448*
0.3	Precision	0.950	0.824	0.862
	Recall	0.998	0.879	0.827
	F-measure	0.9734	0.8506	0.8441

表5内のF-measure欄で“*”が付けられた項目は、各パターン内で最も良い値となっていることを示している。また、全3パターンの中で最もよい値には“**”が付けられている。予測しきい値は4種類で行なったが、全てのパターンにおいて最も良い結果となったのは0.4となった。

データセットに対して操作を行っていないパターン1がF-measureにおいて最も良い0.9745という結果となり、操作が増えるにつれて結果が悪くなっていることから、できる限り多くのデータを入力することが重要であると言える。

もっとも結果の良かったパターン1における0.9745という数値は、攻撃時の下調べとして行われる作業を考えると、実際に利用可能となってしまうほど高い値と言える。つまり、この手法を用いることでサブドメインから開放ポートを推測することは可能である。

6. 考察

統計的データを用いた手法と機械学習を用いた手法の2つで検証を行なった。今回の結果からは、統計的データをもとに開放ポートを推測することは難しいが、文字列の特徴から開放ポートとの関係性を見出す機械学習を用いる手法では、開放ポートの推測は可能であることが分かった。

統計的データを用いた検証においては、重複したサブドメインが付けられることは少ないということが分かった。このことから、悪意を持った攻撃者があるホストに関する下調べをする際に、そのホストのサブドメインと同一のホストにおいてどのようなポートが開放されていたかという情報をもとに推測することは困難であると言える。

しかし、推測するサービスを一部に絞った場合、適応可能な条件も存在する可能性が考えられる。一例としては、図3にあったDNSに用いられている53番ポートである。重複の有るサブドメインと重複の無いサブドメインで有為なポート出現率が異なる53番ポートは、このデータを基に考えることも可能となる。

サービスの推測ではないが、サブドメインから推測できる情報の攻撃への悪用として考えた場合、53番ポートよりも明確な差が重複の有るサブドメインと重複の無いサブドメインの間で存在する443番ポートも利用できてしまう可能性が考えられる。重複の有るサブドメインでは443番ポートの出現率が低いことから、通信内容が暗号化されるHTTPSによる通信がほとんどされていないことを意味する。つまり、中間者攻撃の実行を考えている攻撃者が、どのサーバへのトラフィックをターゲットにするか選定を行う際に、サブドメインの重複があるものから優先的に確認していくことで、選定を効率化できてしまう可能性が有る。

機械学習を用いた検証においては、表5よりパターン1においてF-measureが0.9745という非常に予測精度の高いモデルが学習可能であることが分かった。このことから、サブドメインに使われる文字列には、明確に開放ポートとの関係性が存在していると言える。

パターン1に対して、パターン2、パターン3とデータセットに対する操作が増えるたびに予測精度は悪化した。これは、パターン2では11個以上のポートが開放されているホストを除外し、パターン3では更に80番ポートのラベルを除外したため、学習に利用されるデータ数が減少したことによる影響だと考えられる。

特に、80番ポートは図3および図4から、他と比較して圧倒的な割合で存在していることが分かっている。この数の差から、モデルが80番ポートを出力するだけでモデル性能を向上させることができしまい、80番ポートの過学習を起こしてしまっている可能性が考えられる。

パターン3で80番ポートを除外したが、これによる精度に対する影響は予測しきい値0.4においてF-measureが、パターン2と比較して0.0095しか減少していないことは注意すべきである。全てのサブドメインで80番ポートを出力するだけで向上していたと仮定すると、

それによって良い値となっていた Recall が減少したものの、80 番ポートによる過学習がなくなったことで Precision が改善したものと考えられる。

パターン 2 とパターン 3 は、F-measure で比較した場合にはパターン 2 が性能の良いモデルとなるが、圧倒的多数となっている 80 番ポートを除外してこの性能を維持しているパターン 3 の方が、広範囲で適用可能であると言える可能性が有る。

また、パターン 1 とパターン 2 およびパターン 3 間の予測精度の差が大きい。この差から、11 個以上のポートが開放されているホストの除外を行う際に稼働サービスを基に付けられているとは考えにくいと予想していたが、これは間違っていたことになる。つまり、サブドメインと 11 個以上の各開放ポートの間には、予測可能となるような特徴量が存在していると言える。

7. 結言

本研究では、サブドメインのみを用いることで、攻撃時に行われる事前作業の簡易化およびステルス化ができてしまう可能性について検証を行なった。

本研究で警鐘しているサブドメインの新たな悪用方法は、あるホストに対する侵入経路を提供するようなものではないが、確実に攻撃へのハードルを下げるものである。これが実際に可能であるかどうかを検証し、対策を考えることは、インターネットへの依存が高まる現代においては重要なことであると言える。

今回、統計的データによる検証と機械学習による検証を行なった結果、統計的データによってサブドメインから開放ポートを推測することは困難であるが、機械学習を用いることで可能であることが実証された。これが意味することは、サブドメインと開放ポート間にはそれらを結びつける特徴量が存在するというのである。

サブドメインのみで開放ポートが分かるということは、稼働サービスの推測も可能であるということである。こういった状況は、セキュリティ上の問題である。今後の課題として、サブドメインの命名規則に関して、新しく開放ポートの推測が困難なものに変えていく必要がある。

推測困難なサブドメインと言っても、ただランダムな文字列にするというだけでは課題が残る。ドメインは人間にとって分かりやすい文字列を、IP アドレスの変わりにニックネームのように用いることが目的の一つである。それに対して、利用者にとっても、管理者にとっても難解な名前をつけることは、ドメインの目的に反してしまうことになる。

そのため、外部に公開されるサブドメインはランダムな文字列にしながらも、管理する際のインターフェイスには外部には公開されない管理用の名前をもとに作業するなどの手法を採用する必要があると考えている。この手法の場合、利用者にとっては難解な名前のままではあるが、管理者にとっては管理用の名前を用いることで緩和することができる。しかし、外部に公開される名前と管理用の名前を関連付けするというレイヤが増加するため、システムとしての複雑さが増すことは問題として残る。

サブドメインから開放ポートが推測できるという問題は、致命的な脆弱性とはならないが、攻撃面を可能な限り小さく抑えるためにこの問題の解決を行うのは重要であると考ええる。

参考文献

- [1] M. Glassman and Min Ju Kang: Computers in Human Behavior, 28-2, 673-682 (2012).
- [2] J. Pastor-Galindo and P. Nespoli and F.G. Mármol and G. M. Pérez: IEEE Access, 8, 10282-10304 (2020).
- [3] OSINT Techniques for Domain POIs, <https://mediasonar.com/2020/09/17/osint-techniques-for-security-poi-domains/> (2021/7).
- [4] C. Fachkha and E. Bou-Harb and M. Debbabi: 2014 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), IEEE, 1-5 (2014).
- [5] The Domain Name Industry Brief Q2 2021, <https://www.verisign.com/assets/domain-name-report-Q22021.pdf> (2021/10).
- [6] RFC7489 Domain-based Message Authentication, Reporting, and Conformance (DMARC), <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7489> (2021/5).
- [7] RFC8659 DNS Certification Authority Authorization (CAA) Resource Record, <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8659> (2021/5).
- [8] RFC1034 DOMAIN NAMES - CONCEPTS AND FACILITIES, <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1034> (2021/5).

- [9] F. Weimer: In FIRST conference on computer security incident, FIRST, 98 (2005).
- [10] Rapid7 Labs - Open Data, <https://opendata.rapid7.com/> (2021/5).
- [11] A. Joulin and E. Grave and P. Bojanowski and T. Mikolov: Proc. of the 15th Conf. of the EACL, 2, 1-5 (2014).

VR 技術を用いた異文化理解ゲームの実装

井上裕夢* 黒岩 丈介** 小高 知宏** 諏訪 いずみ*** 白井 治彦****

Implementation of cross-cultural understanding game with VR

Hiromu INOUE*, Jousuke KUROIWA**, Tomohiro ODAKA**
Izumi SUWA*** and Haruhiko SHIRAI****

(Received January, 31, 2022)

In recent years, globalization is expanding and communication problems may occur because of differences in cultural backgrounds. In order to avoid the problems, it is important for us to know about cross-cultural education that provides a methodology for recognizing different cultures and understanding each other. As a part of cross-cultural education, there are games about cross-cultural understanding. However, it is not widespread. In this study, we applied VR technology to cross-cultural understanding games. The purpose of this study is to clarify a method to practice cross-cultural education easily. In fact, by using Unity and various open source libraries, VR technology can be applied to cross-cultural understanding games. We found that it is easy for a fourth-year student of an information science university to create a cross-cultural game using VR technology.

Key words : VR, Support System, cross-cultural education, cross-cultural understanding

1. はじめに

近年、グローバル化が促進する社会において文化的背景が異なる人々とコミュニケーションを取る機会が増加している傾向にある。しかし、それで日本社会が国際的に多様性を受け入れられる社会になったとは言いがたく、日本人が文化的背景の異なる人々と良好な関係を築ける知識や態度を習得しているとは断言できない。多様性を無視し、排除しようとする人はいないと思われるが、多様性を受け入れることを試行錯誤し、当惑してしまう人は存在すると思われる。また、場合によっては異なる考え方や価値観を目的

当たりなし、ストレスを感じてしまう人もいると思われる。そして、その様な状況に陥ることを改善しないままに良いと思う人は少ないはずである。したがって、文化の異なる人々と友好的な関係を築くためにどのような知識や態度が必要なのかを学ぶことは、国際的企業に勤めている人や国際交流に関わっている人だけの課題ではなく、日本人全員の課題である。また、この文化的背景が異なる人々というのは、国籍の異なるの人々だけを指すものではない。同じ国籍の人々においても、住んでいる地域、性別、年代、社会的立場によって文化的背景が異なるということが大いに有り得る。

そして、これらを学ぶために異文化トレーニングというものが存在している。異文化トレーニングは、異文化環境を擬似的に体験できるゲームを通して、実際に異文化の人々と対面した際に起こる気持ちを体験してもらい、それについて議論することで対応力の向上を図るものである。しかし、異文化トレーニングは基本的に集団で行うものであり、トレーニングの趣旨を理解し、ゲームの進行およびフィードバックができる進行役が必要となるが、それができる人が少な

*大学院工学研究科 知識社会基礎工学専攻

*Fundamental Engineering for Knowledge-Based Society, Graduate School of Engineering

**知能システム工学講座

**Department of Human and Artificial Intelligent Systems

***仁愛女子短期大学 生活科学学科

***Jin-ai Women's College

****工学部 技術部

****Technical Division

い。したがって、トレーニングを行う機会が少なく、認知度も低い。先行研究では異文化トレーニングにインターネット技術を導入し、異文化理解ゲームと呼ばれるトレーニングの1つをスマートフォンアプリとして実装することで手軽に異文化トレーニングを行えるようにした^[1]。

そこで、本研究ではVRを用いた教育支援についての研究が世界中で進められているということに注目し^[2]、異文化理解ゲームをVR技術を用いて画面に出てくるキャラクターとできるようにした。これにより臨場感のある異文化トレーニングの実装手法の確立を目的とした。

2. 異文化トレーニングについて

2.1 異文化コミュニケーションの問題

「文化」という言葉からは衣服や食べ物などの目に見えるもの、歌や踊りなどの伝統がよく連想される。しかし、文化というものは生まれつき持っているものではなく、意識的または無意識的に学んでいくものであるため、時間の感覚・コミュニケーションスタイル・価値観なども文化に含まれる^[3]。そして、同じ文化を持つ人々にとっては常識となってしまうため、普段それを意識することは少ない。したがって、異文化コミュニケーションにおいては目に見えない文化の部分で問題が発生すること多い。

2.2 異文化トレーニングの目的

異文化コミュニケーションにおいては、「相手の常識は、自分の非常識。自分の常識は相手の非常識」という考えを常に持つことが大切である。したがって、相手の考えが自分と違うからといって「良くない」と判断するのではなく、文化が違えば考え方が異なるのは当然であるということを理解しなくてはならない^[4]。自文化を基準にした物の見方から抜け出し、他の文化からの物の見方をしてみるということが大切となる。何もこれは自分の見方を無くすということではなく、他の観点でも見てみようとする態度を持つということである。このように、相手の考え方を理解し、尊重しようとする姿勢を養うことが異文化トレーニングの最大の目的となる。

2.3 異文化トレーニングの現状

異文化トレーニングはグローバル化が進む社会において重要視されていることであるが、積極的に取り組んでいる人は少なく、まだまだ認知度は低いという状況にある。この原因は2つ考えられる。1つ目

は、異文化トレーニングは集団で行うものが多いため、物理的に行う機会が限られてくるということ。2つ目は、異文化トレーニングを行う際の進行役にはそのトレーニングへの経験と熟知が求められることである。進行役は、トレーニングの効果が十分に得られるように様々なことに気を配らなければいけない。しかし、しっかりと異文化トレーニングを進行できる人が少ない。これらの要因が異文化トレーニングの認知度に大きく関わっていると考える。

2.4 異文化理解ゲームについて

異文化トレーニングの一環としていくつかの異文化理解ゲームというものが存在している。例えば、「Barnga」、「Bafa Bafa」、「背中合わせゲーム」というものが挙げられる^[5]。これらのゲームはそれぞれ、異文化を理解することにつながる目的が設定されている。以下は、本研究で題材することになった「背中合わせゲーム」の目的とその方法について記述する。

目的

言葉のみを使って伝達してもなななか意図が伝わらないという体験してもらうこと。意思伝達手段が言葉だけの場合は、明確で詳細に行うような語り手の意識と、聞き手の努力およびテクニックが大切であることを認識すること。

方法

1. 参加者には2人1組みになってもらい、紙とペンを配布する。
2. それぞれに5分から10分で簡単な絵を描いてもらう。このとき、自分の描いた絵は周りの人に見えないようにする。
3. どちらか一方の絵を他方に言葉だけで説明してもらい、聞き手は言われた通りに紙に絵を描いてもらう。聞き手は話し手の絵を正確に再現しようと努める。
4. 話し手にできるだけ正確に自分の絵を言葉で説明してもらうようにする。ただし、背中合わせで話し合い、話し手も聞き手の絵を見てはいけない。また、聞き手は質問することはできない。このとき分かりにくかった説明に関しては、後のディスカッションの時に話題にしてもらう。
5. 役割を交代して同じ作業を行なってもらう。その後お互いの絵を見せ合い、ディスカッションを行なってもらう。

6. ディスカッションでは言葉だけの伝達で伝わりやすかった情報とうまく伝わらなかった情報をそれぞれリストアップしてもらい、その原因を考えてもらう。
7. この時、日常生活の場でもこれと似たように自分の意図がうまく伝わらなかった体験がないかを考えてもらう。
8. 7の内容を踏まえ、どのような工夫をすれば正確に情報が伝達できるか、必要なスキルや心構えについても話し合ってもらおう。

2.5 異文化トレーニングのVR化

先行研究では、異文化トレーニングをスマートフォンゲームとして実装することで時や場所を選ぶことなく行えるようにした。この研究では、スマートフォン上に次の動作の指示が文字で表示され、その指示に従って異文化トレーニングを行うことができた。また、マルチプレイを実装することで複数人でも行えるようにしていた。これを踏まえ、さらに異文化トレーニングの異文化環境を擬似的に体験できるゲームを通して、実際に異文化の人々と対面した際に起こる気持ちを体験してもらおうという狙いを実現するためには、一人で行うときでも相手を意識できるようにすると良いのではないかと考えた。そこで、近年注目を集めているVR技術を用いる。画面に表示されるキャラクターが話してゲームの進行をしてくれることによってより臨場感のある異分野トレーニングを提供できることを期待している。

3. 異文化トレーニング支援システムの開発

3.1 要求分析

背中合わせゲームをVRゲーム化するにあたり、特に重要な部分についての要求分析を行った。以下に「背中合わせゲーム」、「キャラクター」、「ゲーム性」についての要求分析を記述する。

3.1.1 背中合わせゲームについての要求分析

背中合わせゲームをVRゲーム化するために必要とされることを挙げる。まず最初に、キャラクターや文字を画面上に表示する機能が必要となる。そして、VRで表示するためのVR化機能、キャラクターを動かすためにキャラクター制御機能、表示される文字の切り替えや全体の進捗を制御する進捗コントロール機能が必要。また、難易度別に問題文と正解の絵を選

択する画像および問題文選択機能が必要であると考ええる。

3.1.2 キャラクターについての要求分析

本研究では、画面にキャラクターが出てきて背中合わせゲームの進行を行ってくれるものにする。そこで、キャラクターのモデルに関しても気を配る必要がある。例えば、小さい子にも遊んでもらうことを考えるとリアリティのある人間や暗い雰囲気キャラクターモデルは避けた方がよいと考える。しかし、あまり子供を意識しすぎると今度は大人の趣向に合わなくなってしまう。また、ロボットやかっこいいキャラは男性受けは狙えるかもしれないが、女性受けは狙えないかもしれない。したがって、丁度良い塩梅のキャラクターモデルを用いることが必要とされる。

3.1.3 ゲーム性についての要求分析

背中合わせゲームをVRゲームとして実装することが目的であるが、ただキャラクターが背中合わせゲームを進行してくれるものにするだけでなく、ユーザーに楽しんでもらえるような工夫が必要である。1回背中合わせゲームを行っただけでは、ゲームの目的を十分に達成できるとは言い難いので、ずっと楽しんでもらえるようなゲーム性は必要ないが、少なくとも数回はやってみようと思ってもらえるゲーム性が必要だと考える。

3.2 ゲームの全体設計

要求分析を行ったことで、得られた必要となる機能について以下にまとめる。また、図1にシステムの全体像を示し、図2に各機能の関係図を示す。



図1 システムの全体像

3.2.1 画面表示機能

画面表示機能は、PCの画面上で実装する背中合わせゲームを出力するものである。キャラクターや解答の絵を出力させる他、キャラクターが話す内容を文字起こししたものも出力する。基本的にキャラクター制御機能と進捗コントロール機能によって得られたデータを画面出力するものとなるので、ユーザーに最も近い機能となる。

3.2.2 VR化機能

VR化機能について記述する前に、まず、VRというものの説明をしていきたいと思う。日本バーチャルリアリティ学会によるとVRとは「みかけや形は原物そのものではないが、本質的あるいは効果としては現実であり原物であること」という説明がされている。これによると、VRというものは一般的にゴーグルを用いて目前に映像が広がるものと捉えられているが、画面に3D表示されるキャラクターもVRということができる。したがって、このVR化機能はキャラクターを3Dとして画面に出力する機能となる。

3.2.3 キャラクター制御機能

キャラクターの動きを司る機能になる。基本的にこの機能は後述する進捗コントロール機能の支配下にあり、進捗コントロールによってキャラクターの話すタイミングを計りこの機能によって動かす。この時、キャラクターのセリフは事前にmp3のファイルを作成しておき、それを再生するものとする。

3.2.4 進捗コントロール機能

ユーザーに合わせてゲームの進行度合いを調節する機能である。複雑な操作にならない様に、画面をクリックすると次に進むようにすることでプレイヤー自身が自分のペースで進行できるようにする。進捗コントロール機能は、プレイヤーが最初に難易度を選択した際にその難易度の問題文と解答の絵のデータを読み込んでくる画像および問題文選択機能からデータを受け取り、プレイヤーに合わせて次の説明を開始したり解答の絵を表示するというのがこの機能である。また、キャラクターの動くタイミングについてもこの機能にて管理する。

3.2.5 画像および問題文選択機能

画像・文章データから適切なデータを選択する機能となる。適切なデータというのは、プレイヤーが最初に選択した難易度の問題文と解答の絵のデータということになる。データの選択に偏りがあるといけなないので、各難易度の問題文および解答の絵の中からランダムで選んでくる様にした。

4. 背中合わせゲームの実装

4.1 各機能の実装

第3章で記述したシステムの設計を踏まえた実装方法について説明する。本システムで実装した機能の実装方法をそれぞれ示す。また、本機能の実装において開発言語としてC#、ゲームエンジンUnityを利用した。

4.1.1 画面表示機能の実装

ゲームシーンを画面に表示させるためにUnity上のGame Viewという機能を用いた。Game Viewを用いることで、ゲームアプリの実行、画面切り替え・サイズ変更・ミュートなどの制御、実行状態の表示が可能となる。このGame Viewの最初の設定として、メニューから「Warn if No Cameras Rendering」にチェックを入れた。この機能は、画面にプレイヤー視点のカメラが存在しない場合に警告を表示してくれるものである。意図せずにカメラを削除したり無効にしまったときにその原因を突き止めるのに役立つ。また、「Clear Every Frame in Edit Mode」にもチェックを入れた。この機能は、ゲームが再生中でないときはフレームごとにゲームビューが消去する機能である。これによって、ゲームを設定している際の画面の崩れを避けることができる。

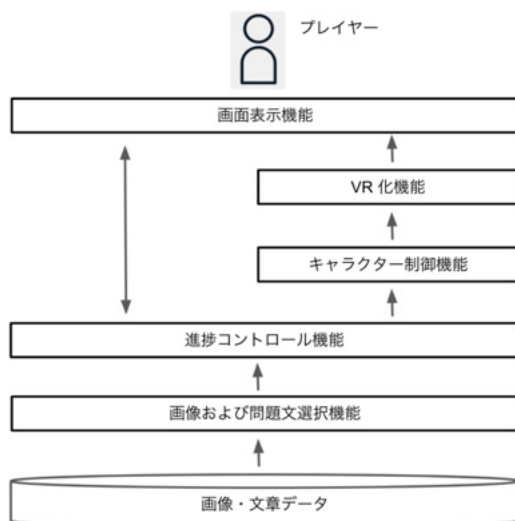


図2 システムの全体像

4.1.2 VR化機能の実装

キャラクターを3Dで表示するためにUnityの3Dエディターというものを用いてゲームの制作を行った。3Dエディターを用いることでゲーム画面に表示できるオブジェクトを3Dで表示できるようになる。キャラクターのモデルはUnity Asset Storeから無料で公開されているものを用いた。Unity Asset Storeでは3Dモデルやテクスチャ、アニメーション、オーディオなどゲーム制作やアニメーション制作に必要な素材をダウンロードできる公式の販売サイトである。また、用いたキャラクターのモデルは図3に示す。

4.1.3 キャラクター制御機能の実装

キャラクター制御機能では基本的に進捗コントロールによって下された命令を実行する。進捗コントロール機能からの命令は、キャラクターの音声を再生するというものである。

キャラクターの音声は音声合成ライブラリ「ゆくも」というものを用いてmp3のファイルを作成した。しかし、Unity上で再生するとノイズや音割れが発生し、キャラクターの音声が聞き取りづらいという問題が発生した。このファイルはPC上では正常に聞き取れた。また複数の音声が同時に再生されていて、音が重なっていることが原因で聞き取りづらくなっていたわけではない。したがって、Unityに音声ファイルを取り込む際に問題が生じたと考えた。そこで、調べてみるとUnity上では再生すらできないが各OS標準のプレイヤーでは普通に再生できるというmp3ファイルが存在するということがわかったので、音声読み上げソフト「音読さん」というフリーソフトを用いてmp3のファイルを作成したところUnity上でも正常に再生することができた。



図3 キャラクターのモデル

4.1.4 進捗コントロール機能の実装

進捗コントロール機能はプレイヤーの進度に合わせて、次の説明文を表示したり答えの絵を表示したりする。基本的に、画面をクリックすると次の説明文が表示されるようになっている。進捗コントロール機能では、画面をクリックした回数をカウントしておりカウント数に応じて音声ファイルを再生するようにキャラクター制御機能に命令を下す。例えば、カウント1で音声ファイル1を再生するというように実装した。

また、正解の絵を表示する前には必ずキャラクターに「それでは答えを表示しますね」と言ってもらう。そのセリフが、カウント10で再生されるとすると、カウント11で答えの絵を表示するようにした。そして、カウント12から再びキャラクターの音声再生されるようにする。

4.1.5 画像及び問題文選択機能の実装

最初に、Unity上でSceneというものにセットとなる問題文と答えの絵をまとめておく。今回用いた問題文および答えの絵は先行研究にて用いられていた2種類と、自分で作成した2種類である。その計4種類の絵と問題文にそれぞれ難易度が3つずつ存在するので、Scene1からScene12までの計12つのSceneを用意した。Scene1からScene4を難易度「簡単」の絵と問題文とし、Scene3からScene4を難易度「普通」、Scene5からScene6を難易度「難しい」のものとした。画像および問題文選択機能では、難易度「簡単」を指定すると1から4までの数字を乱数にて獲得し、その番号に応じたSceneを出力する。同様に、難易度「普通」を選択すると5から8まで、「難しい」を選択すると9から12までの数字を獲得し、その番号に応じたSceneを出力する。

4.2 画像および問題文の作成

背中合わせゲームを進める上で必要になってくる問題文およびその解答の絵に関して、先行研究で用いられたもの以外には存在しない。そこで、先行研究で用いられたものも取り入れつつ種類を増やすために自作した。問題文および解答の絵の作成に関して、説明文を考えることが容易で尚且つ聞き手が理解しやすいものにする必要がある。そこで、絵描き歌を参考に問題文と解答の絵を作成することにした。

今回は、ハリネズミとゾウを題材とした問題文と解答の絵を作成した。また、各絵に対して、難易度「簡単」、「普通」、「難しい」の3種類を容易した。この難易度に関しては、説明文の情報量に差をつけるこ

表1 ハリネズミの問題文

難易度 出力順	簡単	普通	難しい
1	ギザギザのボールがあります	ギザギザのボールがあります	ギザギザのものがあります
2	そのボールには横向きに何本も線が入っています	そのボールには何本も線が入っています	そこには針が刺さっています
3	ボールの左側には、左を上として、三角のテントが立っています	ボールの左側には三角のテントが立っています	ボール付近にはテントが立っています
4	テントの先には黒い球がついています	テントの先には黒い球がついています	テントには黒い球がついています
5	ボールに足を2本描いて、テントに目をつけます	ボールに足を2本描いて、目をつけます	足と目をつけます

とで実装している。作成した問題文を表1、表2に、解答の絵を図4に示す。

5. 評価実験

背中合わせゲームを画面上のキャラクターと一緒にできる様にしたことについて、背中合わせゲームの目的を果たすことができているかどうかの評価実験を行った。今回、評価項目としたものは「難易度設定」、「答えの絵」、「キャラクター」の項目とした。被験者は、自分の研究について何も知らない私の家族3名、友達4人の計8人とし、実際に背中合わせゲームを行ってもらい、その後アンケートに回答してもらった。

5.1 難易度設定についての評価

難易度設定について、説明文の情報量を変えることで難易度を設けた。被験者にはハリネズミと象の絵を用いて全難易度のゲームを行ってもらった。その後、難易度の上昇を感じることができたか否かについて5段階で評価してもらった。アンケートの結果を表3にまとめる。また、評価段階は以下のように表すものとする。「全くできなかった(1)」、「できなかった(2)」、「普通(3)」、「できた(4)」、「大いにできた(5)」。この時、よくわからなかったという場合も普通としてカウントしている。

このアンケート結果から、できなかった(x)と答えた人にどういった理由でそう答えたのかを質問した。結果、ハリネズミの問題の「簡単」のレベルから

表2 象の問題文

難易度 出力順	簡単	普通	難しい
1	丸い池があります	丸い池があります	池があります
2	池の下の方からホースが1本伸びています	池の下の方からホースが伸びています	その池からはホースが伸びています
3	池の中には2つの石が横並びに落ちていきます	池の中には2つの石が落ちていきます	池の中には石が落ちていきます
4	池の左右両側に大きな耳があります	池には大きな耳がついています	池には耳がついています

表3 難易度についてのアンケート結果

評価段階	1	2	3	4	5
人数	0人	3人	3人	2人	0人

既に難しく、そこからさらに情報量が減っていくと難しさしか感じるできないという意見が得られた。したがって、ハリネズミの問題に関しては改善の余地がある。改善点に関しては、考察にて詳しく記載する。逆に、象の問題に関しては「簡単」と「普通」ではあまり差を感じられなかったが、「簡単」と「難しい」を比較すると難しくなっていることが感じられるという意見があった。

5.2 問題文と答えの絵に対する評価

背中合わせゲームに用いるハリネズミと象の絵に関して、問題文の説明が絵に対して妥当かどうかについてのアンケートを行った。初見で描けるかどうかではなく、一旦やってもらった後に説明文と答えの絵を見てもらい、説明文を聞いてその絵が描けるかど

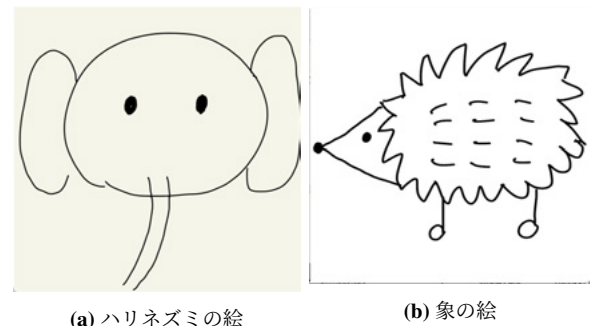


図4 答えとなる2つの絵

表4 問題文と答えの絵についてのアンケート結果

評価段階	1	2	3	4	5
人数	2人	2人	2人	2人	0人

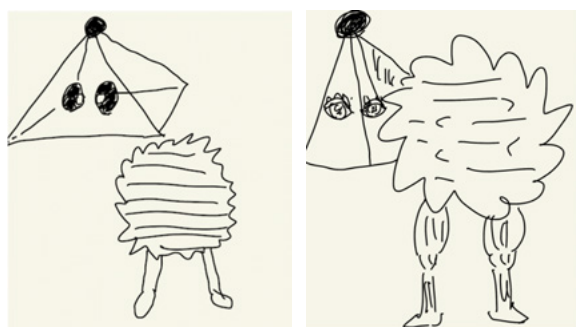
表5 キャラクターについてのアンケート結果

評価段階	1	2	3	4	5
人数	0人	0人	4人	2人	0人

うかの妥当性について調査した。評価段階は以下のように表すものとする。「全く描けない(1)」、「不適切(2)」、「普通(3)」、「適切(4)」、「大いに適切(5)」。この結果を表4に示す。

5.3 キャラクターに対する評価

最後にキャラクターについての評価実験を行った。キャラクターを用いることの目的は、1人で背中合わせゲームするときにも相手を意識できるようになることで、より臨場感のあるゲームを体験してもらうことである。そこで、この評価実験では被験者6名に文字だけの説明とキャラクターありの説明を聞いてもらい、相手を意識することができたかどうかについてアンケートに答えてもらった。結果を表5に示す。評価段階は以下のように表すものとする。「全くできなかった(1)」、「できなかった(2)」、「普通(3)」、「できた(4)」、「大いにできた(5)」。文字だけの説明のゲームは、同ゲームのキャラクターの部分画面で隠し、音声も切って行った。この結果から、文字だけの説明よりキャラクターを用いる方が相手を意識できたと答えた人が多かったことがわかる。また、要求分析にて求められていたキャラクターモデルに近いものを使っているかについても、質問したところ、幅広い年代の人に受け入れてもらえるのではないかという意見が多かった。



(a) 一人目の絵

(b) 二人目の絵

図5 描いてもらった絵

6. 考察

6.1 難易度についての考察

ハリネズミの絵の難易度に関しては、「簡単」から絵を描くのが困難という結果が得られたので、問題文や答えの絵から改善する必要があると考える。しかし、象の絵に関しては難易度の差を作ることができたと考える。したがって、問題文の情報量を減らしたり、使う表現を変えて難易度を生み出すということに関しては成功したものと思う。

6.2 問題文と答えの絵に対する考察

図の実際に書いてもらった絵から共通してわかることは、3番目の「ボールの左側には三角のテントが立っています」という説明が特に伝わっていないことがわかった。これに関して、「テント」という表現が個人による捉え方の差が大きく出てきて、答えの絵から遠ざかってしまっているのではないかと考えた。

また、象の絵について「ホース」というワードから象になるのではないかとという予想が付き、描きやすかったという意見が得られた。このことから、お題となる動物の特徴を捉えたワードが入っていることによって描きやすくなっていたことがわかる。ハリネズミの説明文にも、「ギザギザのボール」という動物の特徴を捉えたワードは入っているが、象と比べるとハリネズミは動物的にマイナーなので、「ギザギザのボール」というワードだけでハリネズミを想像することは難しいのだと思う。したがって、ハリネズミの問題文の修正点としては、もっとハリネズミの特徴を捉えた問題文にすること、ハリネズミという題材の動物自体を変更することの2つが考えられる。

6.3 キャラクターに対する考察

アンケート結果より、今回キャラクターを用いるということの目的はある程度達成できたものとする。「普通」と答えた人の中には「ないよりもあった方がマシ」という考えで答えた人もいた。これは、キャラクターの動きを実装できなかったことが大きいと考える。実際に人とやるときは、対面する相手は少なからず動いているものであるため、動きがないとどうしても不自然に感じてしまうのだと思う。また、動きに関しては身体が動くだけでなく瞬き、話しているときの口の動き、視線などを実装することによってより自然に人と対面している感じを演出することができるのではないかと考える。

6.4 ゲーム性に対する考察

今回は、異文化理解ゲームを電子デバイス上で実装するというを行ったが、実際に実用化するためにはゲーム性を付与する必要がある。世の中にあるゲームには、大きな目標が設定されており長い期間続けていられるものもあるが、背中合わせゲームは一つのゲームをずっと行うよりも、短く何回も行うものである。そこでいくつかゲーム性を持たせるための案を記載する。

案1 脱出ゲーム風

アプリ版の脱出ゲームは、画面に部屋の画像が映し出され、怪しい部分をタップすることでその場所を調べることができ、脱出に必要なアイテムを揃えてそれを使いながら、部屋からの脱出を図るゲームである。この脱出に必要なアイテムを集める時に、背中合わせゲームをクイズとして出題し、正解するとアイテムが入手できるという感じにできないかと考えた。

案2 パックマン風

パックマンのように、敵の追跡から逃れながら迷路の中に配置されているアイテムを集めていくゲームにできないかと考えた。逃げる過程で、速度アップなどのアイテムを取るときや近道をするときに背中合わせゲームを行い、その正解度合いによって得られる効果が変わるようにする。

7. まとめと今後の課題

7.1 まとめ

今回、背中合わせゲームを画面上に表示できるキャラクターと行えるようにした。実装に用いたオープンソースライブラリは、Unity、音声読み上げソフト「音読さん」という容易に使えるもののみであった。これにより、VR技術を用いた異文化理解ゲームが、通常の情報系の大学4年生程度の能力があれば実装可能ということがわかった。

7.2 今後の課題

今後の課題としては様々な点が挙げられるが、特筆すべきはキャラクターの動作の作成、ゲーム性の追求の2点だと思われる。キャラクターの動作は、体全体の身振り手振り、瞬き、口の動きの実装が必要と考える。ゲーム性については、考察でも述べたように1回背中合わせゲームを行っただけではゲームの目的を十分に達成できるとは言い難いので、ずっと楽しんでもらえるようなゲーム性は必要ないが、少なくとも

も数回はやってみようと思ってもらえるゲーム性が必要だと考える。

参考文献

- [1] 今井佑輔, 黒岩丈介, 小高知宏, 諏訪いずみ, 白井治彦, 加藤優: 異文化教育支援のためのスマートフォンゲームの実装, 福井大工報, 67, 01-29 (2019)
- [2] Anton Tokareva, Ivan Skobelina, Mikhail Tolstova, Aleksandr Tsyganova, Margarita Pa: Development of VR educational instruments for school pre-professional education in a research university, Procedia Computer Science pp, 750-754(2021)
- [3] 加藤優: やさしい異文化理解, pp. 61-63, 三恵社, 2021.04.08
- [4] 八代京子, 荒木晶子, 樋口容視子, 山本志都, コミサロフ善美: 異文化コミュニケーションワークブック, 三修社, pp. 17-19 (2001)
- [5] 八代京子, 町恵理子, 小池浩子, 磯貝友子: 異文化トレーニング-ボーダーレス社会を生きる-, 三修社, pp. 290-291 (1998)

福井大学学術研究院工学系部門研究紀要編集委員会

菊池 彦光	物理工学講座（紀要編集委員長）		
福島 啓悟	機械工学講座	重信 颯人	電気・電子工学講座
岩田 賢一	情報・メディア工学講座	山田 岳晴	建築建設工学講座
鈴木 清	材料開発工学講座	吉見 泰治	生物応用化学講座
平田 隆幸	知能システム工学講座	高村映一郎	繊維先端工学講座
中島 恭平	原子力安全工学講座		

福井大学学術研究院工学系部門研究報告

<http://www.eng.u-fukui.ac.jp/research/memoirs-2/index.html>

福井大学学術研究院工学系部門研究報告 別冊 研究活動一覧

<http://www.eng.u-fukui.ac.jp/research/researchactivities-2/index.html>

国立情報学研究所 論文情報ナビゲータ（福井大学関連）のURL（書誌情報のみ）

<https://ci.nii.ac.jp/ncid/AA12208150>

福井大学学術研究院工学系部門研究報告

2022年3月18日 発行

福井大学大学院工学研究科

〒910-8507 福井市文京3丁目9-1

電話（0776）27-8016（研究・地域連携推進部研究推進課）

印刷所 能登印刷株式会社