

目 次

【第 68 巻 10 月分】

複数の将棋 AI からみた藤井聡太の将棋の特徴	高津和紀 高田宗樹 平田隆幸	1
ゼロから始める Android プログラミング ー1 週間で携帯アプリを作れるか？ー	万里川則亮 高津和紀 平田隆幸	13
原子炉ニュートリノモニター開発 ー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ー	池山佑太 中島恭平 玉川洋一	21
Annealing Effects on Thermal Diffusivity and Electrical Resistivity of a Surrogate for Metallic Fuel.....	Naoya ODAIRA and Yuji ARITA	29
酸化タービン油をろ過したメンブランパッチの色に及ぼす過油温の影響	本田知己	35

【第 68 巻 3 月分】

原理体験型「模擬 PET 装置」の開発	戸澤理詞 玉川洋一 小川泉 中島恭平	43
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	清水大貴 小高知宏 黒岩文介 諏訪いずみ 白井治彦	51
加速度データからの機械学習による行動認識	北村和也 小高知宏 黒岩文介 諏訪いずみ 白井治彦	59
VR 技術を用いた人とのインタラクションシミュレーションシステムについての基礎的研究	戸田皓 黒岩文介 小高知宏 諏訪いずみ 白井治彦	67
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	平田隆幸	75
エポキシ官能基を有するコアシェル粒子による エポキシ樹脂と炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の強靱化	川内崇弘 米田航 山口綾香 橋本保 漆崎美智遠 阪口壽一 川邊和正 近藤慶一 伊與寛史	87

**Memoir of Graduate School of Engineering, University of Fukui
Vol. 68, March 2020**

CONTENTS

[Vol.68 October]

Characterization of Sota Fujii's Shogi using Various Shogi AI Kazuki TAKATSU, Hiroki TAKADA and Takayuki HIRATA	1
Beginners Try to Learn Android Programming — Can They Master Android Programming in a Week?— Noriaki MARIKAWA, Kazuki TAKATSU and Takayuki HIRATA	13
The Development of Reactor Neutrino Monitor — Development of Liquid Scintillator Containing Gd with PSD Capability— Yuta IKEYAMA, Kyohei NAKAJIMA and Yoichi TAMAGAWA	21
Annealing Effects on Thermal Diffusivity and Electrical Resistivity of a Surrogate for Metallic Fuel Naoya ODAIRA and Yuji ARITA	29
Influence of Filtration Oil Temperature on the Membrane Patch Color of Oxidized Turbine Oil Tomomi HONDA	35

[Vol.68 March]

Development of Principle Experience Type "Simulated PET Device" Masashi TOZAWA, Yoichi TAMAGAWA, Izumi OGAWA and Kyohei NAKAJIMA	43
Proposal of Web application attack detection method using machine learning Daiki SHIMIZU, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA, Izumi SUWA and Haruhiko SHIRAI	51
A Method to Human Activity Recognition Using Acceleration Data by Machine Learning Kazuya KITAMURA, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA, Izumi SUWA and Haruhiko SHIRAI	59
Implementation of Human Interaction Simulation System with VR Technology Hikaru TODA, Jousuke KUROIWA, Tomohiro ODAKA, Izumi SUWA and Haruhiko SHIRAI	67

Why Should Engineering Students Study a Quantum Computer? – History of Computers from a Digital Calculator to a Quantum Computer –	Takayuki HIRATA	75
Toughening of Epoxy Resins and Carbon Fiber-Reinforced Plastics (CFRPs) with Core-Shell Particles Containing Epoxy Functional Groups	Takahiro KAWAUCHI, Ko YONEDA, Ayaka YAMAGUCHI Tamotsu HASHIMOTO, Michio URUSHISAKI, Toshikazu SAKAGUCHI, Kazumasa KAWABE, Keiichi KONDO and Hirohumi IYO	87

複数の将棋 AI からみた藤井聡太の将棋の特徴

高津和紀* 高田宗樹* 平田隆幸*

Characterization of Sota Fujii's Shogi using Various Shogi AI

Kazuki TAKATSU*, Hiroki TAKADA* and Takayuki HIRATA*

(Received September 27, 2019)

Sota Fujii is a professional shogi player who has achieved renewal of historical records. As Fujii is a young man, his brain is in the growing stage. Therefore his ability of shogi is improving with his brain growth. Analysis using shogi AI characterizes the future of the player's shogi quantitatively. There is a possibility that we can detect the rapid growth of the young player by analyzing only a few games. In this study, Fujii's ability was evaluated by analysis of records of shogi using multiple shogi AI.

Key Words : Shogi, Sota Fujii, Artificial Intelligence, Moving

1. 緒言

最年少プロ棋士の藤井聡太の活躍は、大きな注目を集めている。藤井は2016年10月1日に5人目の中学生プロ棋士としてデビューした。藤井の14歳2か月でのプロデビューは史上最年少記録である。藤井は、プロ棋士としての初の対局で加藤一二三に勝利したことを皮切りに29連勝した。藤井の登場は、将棋ブームを巻き起こすきっかけとなった。その後も、藤井は活躍を続け、全棋士参加の朝日杯将棋オープン戦を2017年、2018年度と制覇した。この朝日杯将棋オープン戦の2連覇は、藤井の活躍を再度世間に知らしめた。

世間一般には、藤井が注目を集めるようになったのは将棋の対局を通してであるが、最初に頭角を現したのは、詰将棋においてである。藤井は、詰将棋を解く速さを競う詰将棋解答選手権の最高難易度であるチャンピオン戦に8歳で参加し、13位となった。その後、2015年の詰将棋解答選手権において、12歳で初優勝し、現在まで5連覇を達成している。これらのことは、藤井の将棋に関する能力が幼いころから卓越していたことを示唆している。

プロデビューから現在までに様々な記録を残している若い藤井の成長は、現在も続いていると考えられる。藤井の棋力の向上は、将棋に真摯に向かいあう本人の努力のみならず、脳の成長に起因していると考えられる。

さて、人間の知能の発達という観点から藤井の将棋を考察してみよう。イギリスの心理学者であるRaymond Cattellは、知能を流動性知能と結晶性知能の2つに分類した^[1]。流動性知能とは、未知の状況に対応するために必要な知能であり、記憶力や計算力などが該当する。また、結晶性知能とは、過去の経験から培われる知能であり、言語力や速読力などが該当する。将棋に必要なとされる能力は、主に記憶力、集中力、思考力である。藤井の棋力の向上をレーティングという観点から明らかにしてきた^[2]。現在でも、藤井の棋力が向上し続けているのは、流動性知能が著しく発展しているためなのではないだろうか。

一般的に、流動性知能は、25歳でピークを迎えた後はゆっくりと低下していき、65歳以降は大きく低下する。14歳でプロ棋士となった藤井は、現在17歳である。藤井の流動性知能は発達途上であると考えられる。タイトルの獲得は、プロ棋士にとって強さの物差しである。プロ棋士は、棋士番号1番の金易二郎(なお、実力制初代名人の木村義雄は棋士番号2番である)から棋士番号318番の黒田堯之まで数えて318人いる。その中でタイトルを獲得したことがある棋

* 大学院工学研究科知能システム工学専攻

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

士は、43 人にすぎない。藤井と同じく中学生でプロ棋士となった加藤一二三、谷川浩司、羽生善治、渡辺明はタイトルを獲得している。脳の発達に伴い藤井の将棋は、今後さらに進化していくと考えられる。さて、少なくとも今後数年間は年齢とともに進化を続ける藤井の強さをどのように測ればよいのだろうか。

本研究では、複数の将棋 AI を使用して棋譜解析を行うことで藤井の将棋の変化を詳細に調べた。

2. さまざまな棋力の評価法

将棋の棋力を測る方法は複数存在し、それぞれに利点と欠点がある。以下でそれぞれの特徴をみていこう。

2.1 段位による評価

段位による評価は、囲碁・将棋や書道のみならず柔道や剣道などの武道においても用いられており、一般人に馴染み深いものである。しかし、注意しなければならないことがある。柔道・剣道の段位とは異なり、囲碁・将棋の場合、プロとアマチュアの段位は異なる評価基準によって与えられている。将棋の場合は、アマチュアの四段がプロの養成機関である奨励会の 6 級に相当する^[3]。そして、三段までは奨励会員として、四段からはプロ棋士として扱われる。なお、囲碁の場合は初段からプロ棋士として扱われる。囲碁・将棋の最高段位は九段であり、将棋のプロ棋士は、四段から九段までの 6 段階に分けられる。審判を行った場合の報酬の基本的な基準は、段位によって決められるなど、プロ棋士にとって昇段することは、大きな目標になっている。

現役のプロ棋士の段位別分布を図 1 に示す^[3]。図 1 から、プロ棋士は七段が最も人数が多いことが分かる。九段の人数が段位の中で 3 番目に多いのは、段位が一度上がったら下がることがないという特性を持っているためである。また、一定の成績を上げられない場合は、トーナメントに参加する資格を失いプロ

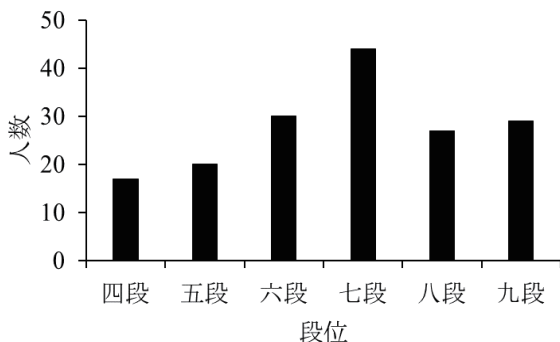


図 1 プロ棋士の段位別分布(2019年6月11日時点).

棋士としては引退になる。ただし、引退してもプロ棋士の資格を失うわけではなく、プロの公式戦の対局の場を失うことを意味し、以降はアマチュアの指導などが主な仕事になる。

2.2 レーティングによる評価

イロレーティングは、chess を含む多くのボードゲームで使用されている^[4]。例えば、GM(グランドマスター)、IM(インターナショナルマスター)の称号は、イロレーティングをもとに与えられる^[5]。Chess においては、イロレーティングは公的な団体も用いている強さを表す指標である。

将棋にもおいてもイロレーティングを使用しようとする試みがなされている。公的団体によるものは存在しないが、プロ棋士の棋力評価に利用しているウェブサイトが数多く存在する。ここで、将棋連盟棋士別成績一覧(レーティング)の藤井のイロレーティングの月毎の変化を図 2 に示す(以降、プロ棋士のイロレーティングは、Web 上で公開されている将棋連盟棋士別成績一覧(レーティング)を使用する)^[6]。

2019年6月29日時点のデータを用いた。図 2 から、2016年12月から2017年6月までのイロレーティングが大きく増加していることが分かる。なお、実力が変化しないとすると、100局以上の対局があるとイロレーティングは収束していると考えられている。

プロ棋士のイロレーティングの分布をみてみよう。2019年6月17日時点でのプロ棋士(167名)のレーティングのヒストグラムを図 3-a に示す。中央値は 1544、平均値は 1559、標準偏差は 151 である。図 3-a から、1500 から 1550 の人数が最も多いことが分かる。これは、プロ棋士のイロレーティングの初期値を 1500 としたためであると考えられる。また、プロ棋士のレーティングの累積度数分布を図 3-b に示す。

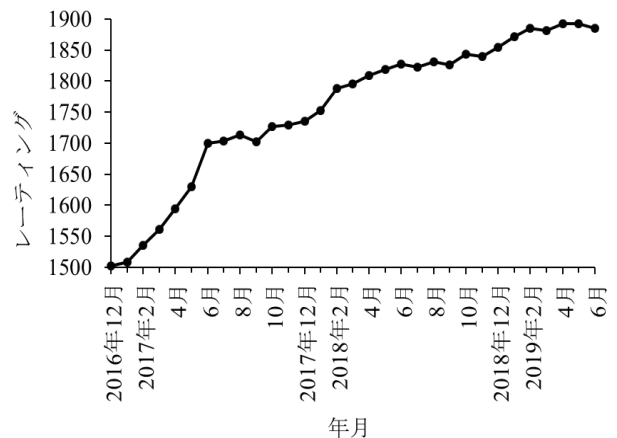


図 2 藤井のレーティングの推移(月別).

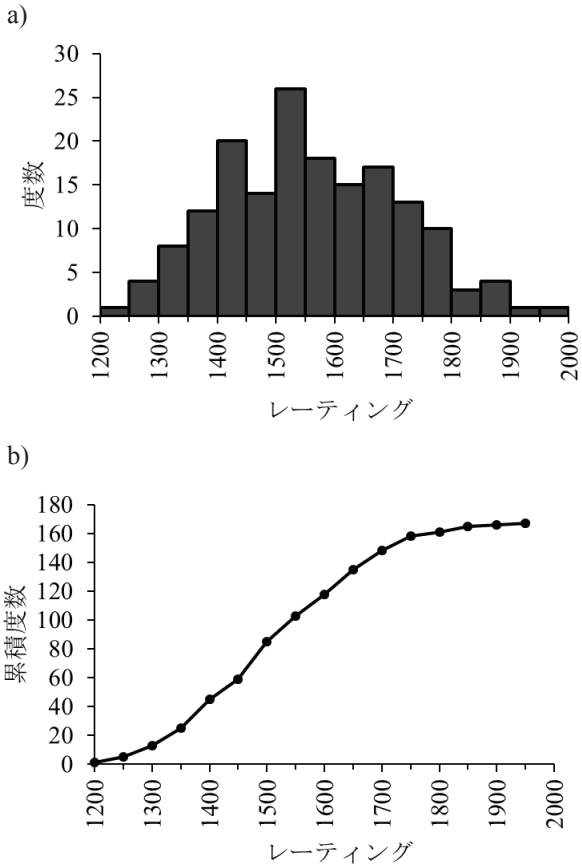


図 3 a) プロ棋士のレーティングのヒストグラム, b) プロ棋士のレーティングの累積度数分布.

3. AI を使った新たな評価法

3.1 段位とレーティングのメリット・デメリット

ここまで、段位とレーティングによる棋力評価をみてきた。段位とイロレーティングによる評価法のメリットとデメリットを表 1 にまとめる。表 1 から分かるように、段位とイロレーティングには成長過程の棋士の評価が困難であるという欠点がある。それゆえ、若く成長過程にある藤井の棋力を測ること

表 1 段位・レーティングのメリット・デメリット.

	段位	イロレーティング
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・世間一般に認知されているため、分かりやすい 	<ul style="list-style-type: none"> ・現在の実力を反映しやすい
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・現在の実力を反映していない 	<ul style="list-style-type: none"> ・成長が早すぎるプレイヤーの棋力に数値が追いつかない ・調子の揺らぎを大きく反映してしまう

は難しい。さらに、これらの棋力評価法はプレイヤーの将棋の特徴をみることができない。そこで、将棋 AI を使用してプレイヤーの将棋をみる新しい方法である棋譜解析を提案する。

将棋 AI を使用した棋譜解析とは、棋譜を将棋 AI によって 1 手毎の評価値を調べ、解析することである。現在の将棋 AI は人間よりはるかに強い。将棋 AI の示す指し手は近似的に最善手と仮定できる。そのため、将棋 AI を利用した悪手や一致率が定義され、使用されるようになっていった。インターネット上では、藤井を始めとしたプロ棋士の対局を、棋譜解析結果をもとに解説しているウェブサイトが複数存在する^{[7],[8]}。しかし、それらのウェブサイトの解析の多くは 1 つの将棋 AI のみで行われている。また、将棋 AI の示す悪手や一致率はプレイヤーの棋力を測る指標であると言われているが、実際の間人同士の対局においてどれほどの信頼性があるのかは深く研究されていない。

3.2 将棋 AI の歴史

AI とは Artificial Intelligence(人工知能)のことである。そして、将棋における AI は、局面を評価する評価関数に従って指し手を選択する。2019 年 7 月時点で、将棋 AI はプロ棋士をはるかに超える棋力を持っている。しかし、将棋 AI がプロ棋士の棋力に迫るまでには 35 年の月日を必要としていた。

ここで、将棋 AI 発展の歴史をみていこう。1960 年代からコンピュータに将棋を指させる試みがなされた。初めて作られた将棋 AI は、通常の将棋(指し将棋)ではなく、詰将棋を解くものであった^[9]。1970 年代になると、本格的な将棋 AI の制作が始まった。1975 年の大型コンピュータを使った将棋 AI の棋力はアマチュア級位者にも及ばなかった。1980 年代になるとパーソナルコンピュータ(PC)の普及に伴い、多くの将棋ソフトが市販されるようになった。例をあげると、森田和郎の将棋や本将棋内藤九段将棋秘伝などである^[10]。1990 年代になると、YSS や金沢将棋などの将棋 AI の棋力がアマチュア初段に達した。

2005 年に登場した保木邦仁の Bonanza は、将棋 AI 開発におけるエポックメイキングな出来事であった。Bonanza では、評価関数のパラメータを機械学習により自動調整させていた。Bonanza 以前は、開発者が評価関数のパラメータを手動で調整していた。しかし、パラメータが多すぎるため手動では最適なパラメータの調整は困難であり、アマチュアトップレベルの棋力に達することはできなかった。Bonanza は機械学習により、それまでの将棋 AI を超える棋力となったのである。Bonanza は、2007 年に大和証券杯

ネット将棋・最強戦の特別対局で当時竜王のタイトルを保持していた渡辺明と対局した^[11]。結果は渡辺の勝利となったが、タイトル保持者を相手に終盤まで互角以上の将棋を指したことで機械学習の優秀さを示した。Bonanzaの登場以降、他の将棋AIも機械学習を取り入れるようになった。

2010年、情報処理学会が日本将棋連盟にプロ棋士と将棋AIとの対局を望む書状を送り^[12]、女流棋士の清水市代とあから2010との対局が実現した。あから2010は、コンピュータ選手権上位ソフトYSS、激指し、Bonanza、GPS将棋の4つの将棋AIが多数決(合議制)で指し手を決定するものであった。なお、女流棋士は、女性のプロ棋士ではないことに注意しよう。現在、女流棋士の平均レーティングは、プロ棋士の平均レーティングと比べて約200点低い。清水は当時の女流棋士の中ではトップクラスの棋力であったがプロ棋士には及ばなかった。対局の結果はあから2010の勝利であり、将棋AIが女流棋士のトップレベル以上の棋力であることを示した。

2010年以降、将棋AIは様々な技術革新により成長を続けた。例えば、KPPからKPPTへの改良があげられる。3駒関係を評価項目にしたKPPは、Bonanzaで採用され主流となっていた^[13]。KPPTとは、玉とそれ以外の2つの駒の位置関係を評価項目にして評価関数を作成する3駒関係に、手番を加えたものである。KPPの欠点であった、角換わりなどで頻繁に起こる同型を評価できないという問題を改善したのである。同型の例を図4に示す。以降も、将棋AIの棋力の進化は続き、2017年には、Ponanzaがプロの名人である佐藤天彦に勝利した。

様々な手法を使用してプロ棋士を超えた将棋AIであるが、評価関数の学習法は、Bonanzaが登場した2005年以降、長く機械学習から変化することはなか

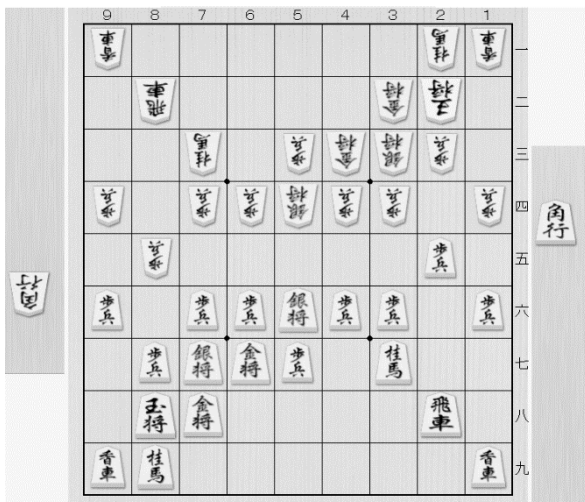


図4 角換わりの先後同型の例。

った。しかし、2015年にDeepMindがAlpha Goを発表したことで、将棋AIに新たな学習法がもたらされた^[14]。Alpha GoはNeural Network(以降はNNと略す)を用いて作成された囲碁AIである。囲碁AIが囲碁のプロ棋士に勝利するには、少なくとも10年はかかると言われていた。Alpha Goは2016年に囲碁のプロ棋士に勝利し、NNとボードゲームの組み合わせの優秀性を証明した。この影響は将棋にも及んだ。2017年に、Alpha Goの影響を受けて作成されたPonanza Chainerが第27回世界コンピュータ将棋選手権に参加し、準優勝した^[15]。2018年の第28回世界コンピュータ将棋選手権では、NNを利用したNNUE評価関数を使用したthe end of genesis T. N. K. evolution turbo type Dが参加し、優勝した。2019年7月現在、将棋AIの作成はNNUE評価関数をベースにして改善を加えていく方法が主流となっている。

3.3 将棋AIの評価値の意味

評価値とは、将棋AIが局面を判断し、優劣を数値化したものである。評価値は将棋AIの評価関数によって決まる。評価関数は、駒ごとの価値(例えば歩が10点、飛車が500点など)や複数の駒同士の位置関係(玉とそれ以外の2つの駒の位置など)を数値化している。また、NNによる将棋AIでは、評価関数はAI自身によって生み出される。それゆえ、歩が10点などという対応関係があるわけではない。このように、人間は将棋AIがどのように評価値を算出しているのかを理解することができなくなった。

一般には、将棋AIが500点差を付けた局面は優勢(相手にとっては劣勢)、1000点差を付けた局面は大優勢(相手にとっては大劣勢)と言われている。優勢は形勢が良いことを、大優勢は形勢がかなり良いというときに使用される用語である。実際は、評価値は評価関数によって異なるため、将棋AIごとに人間の評価基準も変更していかなければならない。

4. 棋譜解析について

棋譜解析で使用したハードウェア、GUIを示す。本研究では、Core i7-7700CPU、クロック周波数3.60GHz、4コア、8スレッドマシンを、GUIはShogiGUI^[16]を使用した。

4.1 使用した将棋AI

将棋AIを使用してプレイヤーの指し手を評価するには、複数の将棋AIで解析を行い、検討する必要がある。本研究では、フリーで入手できるdolphin1/Kristallweizen(以降はKristallweizenと略す)^{[17],[18]}、Giko

u2ver2. 0. 2(以降は技巧と略す)^[19], Bonanza6. 0(以降は Bonanza と略す)を使用した. これらの将棋 AI はそれぞれ棋力が異なる^[20]. 3 つの将棋 AI のレーティングを表 2 に示す(2019 年 6 月 24 日時点).

将棋 AI とプロ棋士のレーティングを比較する場合には, 注意が必要である. プロ棋士の最高レーティングは, 渡辺明の 1981(2019 年 7 月 16 日時点)である. プロ棋士と将棋 AI のレーティングは母集団が異なるため, 数値のみでは差を測れない. そのため, 2 つのレーティングをインターネット将棋対局場の将棋倶楽部 24 のレーティングに換算することが行われている^[21]. 将棋倶楽部 24 の対応表によると, プロ棋士の平均的な棋力は約 3000, Kristallweizen の棋力は約 4603 となる. イロレーティングでは, レーティング差が 727 以上ある場合はレーティング上位者の期待勝率が 99%となる. Kristallweizen はプロ棋士よりはるかに強いことが分かる.

4.2 将棋 AI のパラメータ

将棋 AI の強さは, ハードウェアや設定したパラメータに依存する^[22]. そのため, 本研究で使用した将棋 AI のレーティングは, 表 2 に示した数値とは必ずしも一致しない. それゆえ, 本研究で使用する AI の棋力を調べておく必要がある.

パラメータの違いによる将棋 AI の棋力の変化をみていこう. 3 つの将棋 AI の思考時間による棋力の違いを調べた. 具体的には, 思考時間 1 秒の同一将棋 AI を対戦相手として, 考慮時間を変え, 先後を入れ替えて 100(先手 50, 後手 50) 回自己対戦させた. なお, 考慮時間以外のパラメータは統一(深さは将棋 AI で設定できる最大値, Hash は 1024MB)した. 思考時間 1 秒の将棋 AI を基準として自己対戦させたときの勝率を表 3 に示す. 考慮時間 1 秒の勝率は, 最初に先手を指させた側の勝率を採用した. 同じ思考時間の将棋 AI の対戦(1 秒対 1 秒)においては, 理論的には勝率が 50%になるはずである. 表 3 でそのようなになっていないのは, 自己対戦数が 100 局であるために, 勝率にゆらぎが生じたためである. ここで, 将棋 AI の指し手について考える. かつての将棋 AI(本将棋内藤九段将棋秘伝など)は, プレーヤーの指し手に対する応手が決まっていた(7 六歩には必ず 3 四歩と指すなど). そのため, 同一将棋 AI で自己対戦を行う

表 2 将棋 AI のレーティング^[20].

AI	レーティング
Kristallweizen	4403
技巧	3796
Bonanza	2767

表 3 思考時間と対戦の勝率*.

思考時間 \ AI	Kristallweizen	技巧	Bonanza
1 秒	47 %	57%	43%
2 秒	83%	79%	66%
3 秒	92%	90%	74%
4 秒	94%	96%	80%
5 秒	98%	97%	78%

*思考時間 1 秒の同一将棋 AI を対戦相手として 100 回自己対戦させたときの勝率(%).

と全ての対局の指し手と同じになっていた(つまり, 自己対戦の勝率が 50%になる). 一方, 現在の将棋 AI は, 評価値がほとんど同一の候補手が複数ある場合は, 指し手を候補手からランダムで選択する. そのため, 同一将棋 AI 同士の自己対戦でも, 対局によって指し手が変化し, 同じ内容にはならない. これは, 自己対戦の勝率にゆらぎが生じる原因の一つである. 表 3 から, Kristallweizen, 技巧は, 思考時間が 3 秒の時点で勝率が 90%以上になるのに対して, Bonanza は思考時間が 3 秒の時点では 80%以下であることが分かる. これは, Bonanza は Kristallweizen, 技巧と違い, 短時間で有力な指し手を発見できないことを示している. ここから, Bonanza の棋力を上げるためには, 思考時間を長く設定しなければならないと考えられる.

3 つの将棋 AI の深さによる棋力の違いを調べた. 深さ 1 の同一将棋 AI を対戦相手として, 深さを変え, 先後を入れ替えて 100(先手 50, 後手 50) 回自己対戦させた. なお, 深さ以外のパラメータは統一(思考時間は設定しない, Hash は 1024MB)した. 深さ 1 の将棋 AI を基準として自己対戦させたときの勝率を表 4 に示す. 深さ 1 の勝率は, 最初に先手を指させた側の勝率を採用した. 表 4 から, 技巧, Bonanza は深さが 3 の時点で勝率が 90%以上になるのに対して, Kristallweizen は深さが 3 の時点では 70%以下であることが分かる. ボードゲームにおける AI の強さは評価関数と探索で決まる. 評価関数は局面の形勢を数値で

表 4 深さと対戦の勝率*.

深さ \ AI	Kristallweizen	技巧	Bonanza
1	47%	53%	52%
2	68%	89%	93%
3	69%	97%	96%
4	83%	100%	100%
5	99%	100%	100%

*深さ 1 の同一将棋 AI を対戦相手として 100 回自己対戦させたときの勝率(%).

表す役割を、探索は効率良く先の局面をみていく役割を担っている。探索が必要なのは、深く読まなければ精度の高い評価を下せないためである。仮に、将棋の完全解析ができたとすれば、将棋 AI は深い探索を必要としなくなる。なぜなら、評価関数が正確であるため、現局面より 1 手先の局面についての合法手(約 80 手)の評価値を算出するだけでよいからである。しかし、評価関数が弱い場合は 1 手先の探索だけでは精度の高い評価ができない。そのため、より深く探索することで評価の精度を上げようとするのである。これは、将棋 AI は強くなるほど探索を必要としなくなるということを示している。よって、Kristallweizen の評価関数は他の 2 つよりも優れていると考えられる。また、Bonanza は深さ 1 から深さ 2 で勝率が大きく上昇したことから、評価関数が特に弱いと考えられる。深さによる将棋 AI の棋力からは、現在のトップレベルの将棋 AI でさえ、深さに棋力が左右されていることが分かった。

3 つの将棋 AI の NPS(Node per second)を調べた。NPS は将棋 AI が 1 秒間に読む局面数である。NPS は同じ将棋 AI でも使用するハードウェアによって変化する。3 つの将棋 AI のスレッドごとの NPS を表 5 に示す。表 5 から、スレッドを 8 にした場合の NPS はスレッドが 4 の場合よりも約 1000k($k = 10^3$)多いことが分かる。これは、論理コアによる並列計算が棋力を上げる方法となることを示している。また、強い将棋 AI ほど NPS が大きくなっていることが分かる。ここから、NPS を制限することで、将棋 AI の棋力を大きく変化させられることが分かる。ここで、NPS と思考時間、深さとの関係を、Kristallweizen (スレッド 8) を例に考える。Kristallweizen の思考時間 1 秒での NPS は 4500k である。思考時間 1 秒で深さ 2 まで読めた場合、2 手先までの局面のうち、4500k の局面を読めることになる。しかし、探索が浅い場合は、総局面数が少ないため、NPS が大きくても棋力は変化しない。思考時間が 2 秒になると、より深く探索できるようになり、総局面数が増える。そのため、NPS が大きくなると棋力が指数関数的に高くなる。これが、思

表 5 将棋 AI のスレッドごとの NPS*。

AI	スレッド	NPS(k)
Kristallweizen	4	3200
	8	4500
技巧	4	2200
	8	3300
Bonanza	4	1300
	8	1800

*NPS の単位は $k(10^3)$ である。

考時間が 1 秒と 2 秒で勝率が大きく変化した原因であると考えられる。ただし、思考時間、深さの違いによる棋力の変化でみたように、評価関数が弱い場合は、思考時間を長くしても棋力の上昇は小さくなる。

4.3 解析に使用した 3 つの将棋 AI の評価値

評価値の値は、規格化されたものではなく、将棋 AI ごとに独自に定義されたものである。そのため、全ての将棋 AI が 1000 点を大優勢とみなしているわけではない。プレイヤーの将棋を詳細にみるために、将棋 AI ごとの評価値の数値の意味を調べる。

評価値の数値が示す意味を調べるために、一般的に互角、優勢(有利な局面)、大優勢(負けることがほとんどない局面)と言われる 300 点台、500 点台、1000 点台の局面から将棋 AI に自己対戦させたときの勝率をみた。また、パラメータは統一した。評価値が 300 点台、500 点台、1000 点台の局面から将棋 AI に 100 回自己対戦させたときの勝率を表 6 に示す。勝率は形勢がよい方のものである。表 6 から、Kristallweizen の勝率のみが、評価値が 500 点の時点で 90%以上となっていることが分かる。これは、Kristallweizen が大優勢を 500 点前後の小さな数値で表していることを示している。ここから、Kristallweizen の評価値で人間の指し手を評価する場合は、500 点前後に注目しなければならないと考えられる。また、Bonanza の勝率のみが評価値が 300 点台の時点で 70%台であることが分かる。ここから、Bonanza は形勢を大きな数値で表していると考えられる。これらのことから、Kristallweizen、技巧、Bonanza の評価値では、300 点台、500 点台の定義が異なることが分かった。

4.4 将棋 AI との一致率

ここで、棋譜解析における一致率を定義する。一致率 S_m とは、人間の指し手と将棋 AI の候補手と同じ

表 6 評価値の差と対戦の勝率*。

AI	評価値	勝率
Kristallweizen	300	81%
	500	95%
	1000	99%
技巧	300	80%
	500	85%
	1000	100%
Bonanza	300	71%
	500	83%
	1000	100%

*同一将棋 AI を評価値ごとに 100 回自己対戦させたときの勝率(%)。

であったときに一致とみなし、1 局の総一致数を手数で割ったものである。これは、1 局の手数を N 、一致した指手の合計を S_{total} とすると、 S_{total} / N で定義される。一致率が高いほどプレイヤーの棋力は高いとされている。これは、人間よりはるかに強い将棋 AI の指し手は将棋における正解手(真の最善手)とみなすことができるためである。また、将棋 AI の複数の候補手の中で、いくつめの候補手までを一致とみなすかを定義しなければならない。例えば、将棋 AI の示す第 5 候補手までの一致とみた場合、悪手も候補手に含まれてしまうので一致率が常に 90%以上になり、棋力差による違いが判断できない可能性がある。本研究では、最善手のみと、第 3 候補手までを一致と定義した。

5. 藤井聡太の棋譜解析

藤井聡太の棋譜を解析し、一致率から藤井の特徴をみた。なお、一致率を求めるために使用した将棋 AI のパラメータを表 7 に示す。探索の深さの制限はせず、思考時間を一定にした。ただし、定跡に該当する場合は思考時間に達する前に指し手を決めた。スレッドは各将棋 AI の棋力が最も高くなる数を選択した。Hash は一度探索した局面を保存し、後の探索に使用するために用いられる。Hash の大きさは 1024MB とした。

5.1 最善手を含む複数候補手との一致率と成長過程

藤井の Kristallweizen, 技巧, Bonanza での最善手の場合の一致率を図 5, 図 6, 図 7 に示す。エラーバーは標準偏差を表している。図 5, 図 6, 図 7 から、藤井の Kristallweizen, 技巧での一致率は 55%から 65% (Kristallweizen は 20/31, 技巧は 25/31) に収まる月が多いことが分かる。また、藤井の Bonanza での一致率は、Kristallweizen, 技巧と比べて、45%から 55%(14/31) に収まる月が多かった。いずれの将棋 AI でも、一致率が 70%以上となった月は 2017 年 1 月のみであった。2017 年 1 月の対局数は 1 局である。ここから、藤井の最善手のみとの一致率は 70%以下であることが分かる。月別一致率から藤井の月ごとの棋力の変化をみると、いずれの将棋 AI でも、2017 年の 8 月から 10 月にかけて、一致率が大きく上昇していることが分か

表 7 将棋 AI のパラメータ。

将棋 AI	思考時間	スレッド	Hash
Kristallweizen	60 秒	8	1024MB
技巧	60 秒	8	1024MB
Bonanza	60 秒	4	1024MB

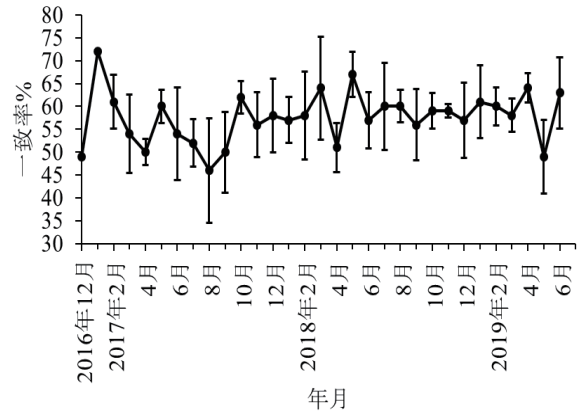


図 5 最善手のみ的一致率(Kristallweizen).

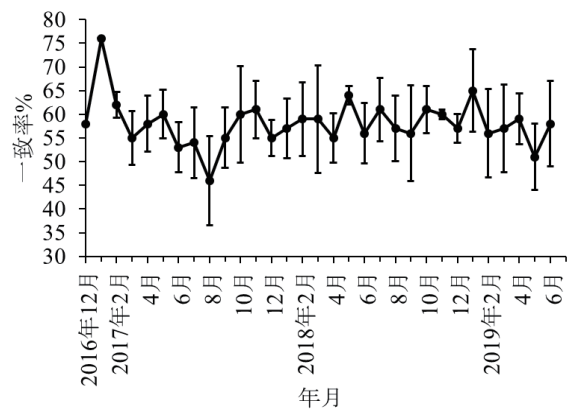


図 6 最善手のみ的一致率(技巧).

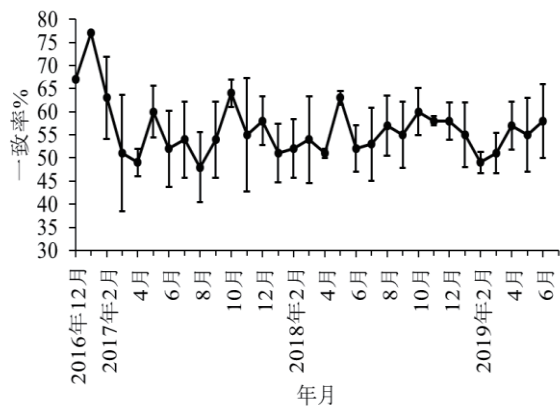


図 7 最善手のみ的一致率(Bonanza).

る。藤井は 2017 年の 8 月は 6 局中 2 局, 9 月は 8 局中 3 局負けている。しかし、藤井が負けた対局の一致率をみると、9 月の 3 局は、8 月の 2 局よりも一致率が高くなっていった。ここから、藤井が短期間で形勢が悪い局面で最善手を指す力を身に着けたと考えられ、成長の早さがうかがえる。

藤井の Kristallweizen, 技巧での第 3 候補手までを含めた場合の一致率を図 8, 図 9 に示す。エラーバーは標準偏差を表している。なお、Bonanza は ShogiGUI に標準対応しておらず、第 3 候補手までを含めた一致率を計算できなかった。図 8, 図 9 から、藤井の Kr

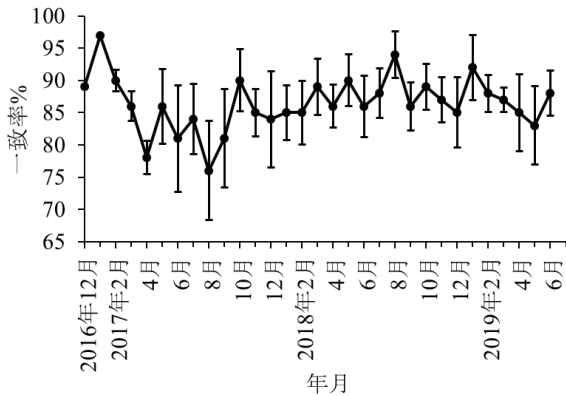


図8 第3候補手まで含めた一致率(Kristallweizen).

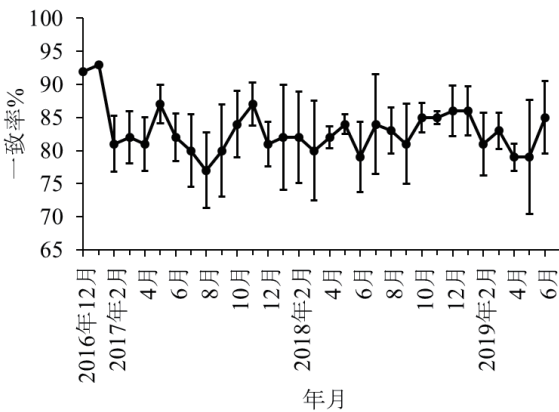


図9 第3候補手まで含めた一致率(技巧).

Kristallweizen での一致率は 85%以上(24/31)に、技巧での一致率は 75%から 85%(22/31)に多く収まることが分かる. ここから、第3候補手までの一致率をみた場合、藤井の指し手は Kristallweizen に近いと考えられる. 将棋の終盤は1手の価値が高いため、最善手以外の指し手では形勢を損ねることも多い. 藤井は候補手の評価値が大きく変わらず、選択の幅が広い中盤における指し手の精度が高いプレイヤーであると考えられる.

藤井が年齢を経るとともに棋力が向上しているのかをみるために、年齢ごとの最善手のみの一致率を調べた. 図10, 図11, 図12に Kristallweizen, 技巧, Bonanza での藤井の年齢ごとの一致率を示す. 一致率は藤井の年齢ごとの全対局, 勝った対局, 負けた対局の3つに分類した. エラーバーは標準偏差を表している. なお、藤井の年齢ごとの対局数は、14歳のときに32局(31勝1敗), 15歳のときに65局(51勝14敗), 16歳のときに53局(46勝7敗)であった. 藤井が14歳のときの負けた対局の棋譜は1局のみであることに注意しよう. 図10, 図11, 図12から、いずれの将棋AIでも藤井の全対局の年齢ごとの一致率は大きく変化しないことが分かる. しかし、年齢間の対局について、スチューデントの t 検定を行ったところ、藤井

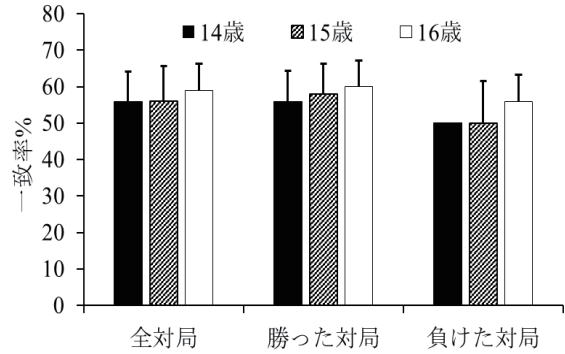


図10 年齢ごとの条件別一致率(Kristallweizen).

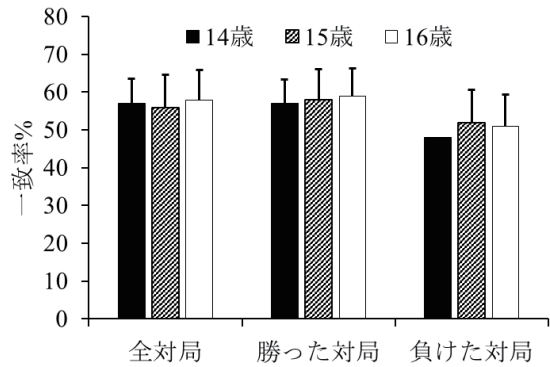


図11 年齢ごとの条件別一致率(技巧).

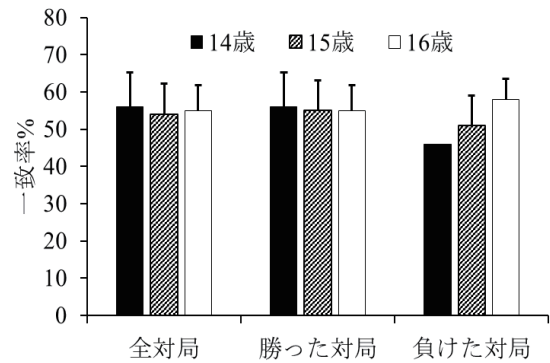


図12 年齢ごとの条件別一致率(Bonanza).

の Kristallweizen での全対局の一致率において、15歳、16歳間で $p < 0.05$ で有意差がみられた. ここから、藤井が1年間で1局全体の指し手の精度を上げていることが分かる. また、藤井の Bonanza での負けた対局の一致率において、15歳、16歳間で $p < 0.05$ で有意差がみられた. 藤井の Bonanza での負けた対局の一致率が年齢を重ねるごとに高くなっていることと、勝った対局では全ての将棋 AI で有意差がみられなかったことから、藤井が形勢の悪い局面において最善手を指す力をつけたと考えられる. これは、藤井の特徴と言える.

5.2 戦型別の一致率

藤井の将棋の特徴をみるために、戦型ごとの一致

率をみる。戦型は、お互いの囲いや戦法によって形成される陣形である。戦型に対する知識や経験はプレイヤーによって異なるため、プレイヤーの特徴を捉えやすい。

藤井の Kristallweizen, 技巧, Bonanza での戦型別の一致率を表 8 に示す。ここでは、対局数が 10 以上の戦法について議論した。一致率は最善手のみの場合である。表 8 から、全ての将棋 AI において、戦型別一致率は 60% 付近であることが分かる。ここで、表 8 の相居飛車での戦法に注目する。藤井の相居飛車の 2 大戦法は、相掛かりと角換わりである。

相掛かりは、定跡が整備されておらず、プレイヤーによって中盤の指し手が大きく変わる戦型である。また、序盤から定跡を外れやすい。相掛かりは将棋 AI の候補手と特に一致しにくい戦型である。そのような中で、藤井の相掛かりの一致率は他の戦法と同等である。これは、藤井は相掛かりのような常に指し手が広い局面において、短時間で候補を絞り込む能力に長けていることを表している。これは、藤井の特徴と言える。

角換わりは、中盤から終盤の入り口にかけて、ここ数年で定跡が整備されてきた。プロ棋士の対局では 50 手を超えても定跡通りに進むことも多い。特に中盤は有力な指し手が限られているため、将棋 AI の最善手とも一致しやすい。しかし、表 8 から、藤井の角換わりの一致率は、いずれの将棋 AI でも 50% 台となっており、低い。これは、角換わりでは、藤井は少ない選択肢の中でも第 2 候補手以降を指すことが多いことを示している。藤井は、角換わりでは中終盤に、将棋 AI が評価しない指し手(浅い探索では第 1 候補手とならないような分岐が多い手)を選ぶ傾向がある。これは、藤井の特徴と言える。ここで、将棋 AI の示す指し手と異なり、かつ評価値が大きく下がる指し手を悪手として、角換わりを見てみよう。藤井の角換わりの戦績は 33 勝 5 敗である。藤井の中盤の指し手は第 2 候補手以降が多いにも関わらず勝率が高いのは、藤井が最善手との評価値の差が小さい指し手を指し続けられるためである(悪手が小さい)。角換

わりの中盤は有力な指し手が少ないため、将棋 AI の候補手に入る指し手ならば、最善手との評価値の差が小さくなる。角換わりは、有力な指し手を続ければ悪手は小さく、それ以外の指し手が多いと途端に大きくなる戦型と言える。

6. 議論

藤井聡太の棋譜を Kristallweizen, 技巧, Bonanza の 3 つの将棋 AI で調べた。藤井の指し手は、最善手のみの一致率からみると Kristallweizen, 技巧に近かった。さらに、第 3 候補手までの一致率からみると、Kristallweizen に近くなった。将棋 AI によって異なる藤井の評価について議論する。

一致率は将棋 AI の示す候補手との一致をみるものであった。藤井は第 3 候補手までを含めた一致率をみると、Kristallweizen に最も近くなった。これは、一致率がプレイヤーの序盤、中盤の指し手の正確さを特にみているためである。一致率はプレイヤーの序盤、中盤力をみていると言える。将棋 AI が人間より強くなってからは、将棋 AI の序盤、中盤が新たな定跡として広まり、使用されていった。現在、プロ棋士が最も指す角換わりも、序盤から将棋 AI の定跡が使用されている。現在の将棋プレイヤーの棋力を測る上では、将棋 AI が生み出した定跡をどこまで利用し、発展させているのかをみる必要がある。Kristallweizen の一致率が最も高くなったのは、最新の将棋 AI であり、プロ棋士の指し手を評価できるためである。一方、技巧と Bonanza は現在の将棋 AI 定跡が生み出される前の将棋 AI であり、最新の指し手を評価できない。これらのことから、藤井は、一致率では、現代の将棋プレイヤーとしての棋力を測ると Kristallweizen に近いと考える。

さて、藤井の将棋を、現在の将棋界でトップレベルの棋力を持つ豊島将之と羽生善治の将棋と比較しよう。なお、豊島と羽生は棋士歴が長いので 10 年以上の棋譜がある。そのため、全ての棋譜を使用すると、長期間の棋力の変動や時代による進化(主力戦法の変化)の影響が大きくなる。これらの影響を除外するため、使用する 3 人の棋譜は 2019 年度のものに絞った。

豊島と羽生の棋譜を 3 つの将棋 AI で解析し、最善手のみの一致率を調べた。藤井、豊島、羽生の一致率を表 9 に示す。表 9 から、藤井の一致率が全ての将棋 AI において豊島、羽生と変わらないことが分かる。ここから、藤井の 1 局を通しての指し手の精度はトップレベルであると考えられる。また、レーティングランキングのトップ 5 に入る 3 人でさえも、最善手

表 8 藤井の戦型別の一致率(最善手のみ)。

条件	対局数	Kristallweizen	技巧	Bonanza
相居飛車	103	58%	58%	55%
対振り飛車	47	54%	55%	55%
角換わり	38	57%	57%	54%
相掛かり	18	58%	63%	57%
対中飛車	19	56%	55%	58%
対四間飛車	10	51%	53%	56%

表 9 藤井, 豊島, 羽生の一致率*

棋士 \ AI	Kristall Weizen	技巧	Bonanza
藤井	60%	57%	58%
豊島	58%	57%	52%
羽生	52%	56%	54%

*一致率は ShogiGUI 上の棋譜解析で得られたもの。

のみの一致率が 60%以下であることから、一致率で将棋の棋力をみることは難しいかもしれない。藤井, 豊島, 羽生の一致率からは藤井の指し手がトップレベルのプロ棋士と同等であることが推測できた。

将棋 AI の棋力の向上は、将棋界に 2 つの大きな変化をもたらした。それは、1) 将棋の勉強法、2) 将棋の楽しみ方の変化である。まず、将棋の勉強法の変化を見ていこう。将棋 AI が発展する以前の主な勉強法は、プロ棋士の棋譜を並べる、棋書を読む、実際に指す、詰将棋を解くの 4 つであった。プロ棋士の棋譜を並べる、棋書を読むといった勉強法は、記してある形勢評価に疑問があった場合に、自身で解消することが難しく、効率の良い上達法とは言えなかった。また、将棋人口が少ない県では、強いプレイヤーと対局する機会が乏しい。そのため、県によってプレイヤーに棋力差が生じていた(東京都、大阪府のプレイヤーの平均棋力は福井県のプレイヤーよりもはるかに高い)。さらに、地方ではプロ棋士の指導を受ける機会も限定されるため、棋力差の拡大に拍車をかけていた。将棋 AI はこれらの状況を一変させた。将棋 AI がフリーで入手できるようになり、プレイヤーはプロ棋士より強い対戦相手を得た。また、将棋 AI は強さを調整することができるため、プレイヤーの棋力を問わず活用できた。さらに、棋譜解析を行うことで、疑問を抱いた局面を客観的に検討できるようになった。このように、将棋 AI の普及は、地域格差の解消、検討の効率化という、勉強方法に 2 つの画期的な変化を起こした。関東、近畿地方に比べてプレイヤーの棋力が低い中部地方出身である藤井(愛知県出身)の急速な棋力の向上も、将棋 AI のおかげかもしれない。

次に、将棋の楽しみ方の変化をみていこう。2010 年以前のプロ棋士の対局の楽しみ方は、新聞や雑誌で棋譜および観戦記を見るのが主であった。しかし、2010 年代に入るとドワンゴが運営する配信サービスである niconico で将棋が生放送されるようになり、状況が大きく変わった^[23]。プロ棋士の対局をリアルタイムかつ、解説つきでみるできるようになった。また、対局の放送中に将棋 AI の評価値が表示されるようになった。視聴者は、プロ棋士の形勢評価と将棋 AI の評価値が異なることが多いことに驚い

た。そして、対局をみながら、プロ棋士と将棋 AI のどちらの評価が正しいのかを楽しむ人が増加していった。一方、弊害も指摘されている。将棋 AI の棋力がプロ棋士を大きく超えると、将棋ファンは将棋内容を見ずに、将棋 AI の評価値のみを重視するようになりになった。プロ棋士が将棋界の頂点であった時代では考えられない変化であった。将棋の楽しみ方が大きく変わったのである。さらに発展を続けている将棋 AI は、これからも将棋界に変化をもたらすだろうことが期待できる。

藤井はプロデビューして 3 年未満であるにもかかわらず、朝日杯将棋オープン戦の優勝などの様々な記録を残した。デビューして間もなく行われた非公式戦の炎の七番勝負では 6 勝し、棋力の高さを示した。この後も、藤井は急速に棋力を伸ばしていった。デビュー時は 1500 であったレーティングは、2019 年 7 月 16 日には 1909 となり約 400 の上昇をみせた。レーティングランキングでは 3 位である。豊島と羽生の将棋との比較からも、藤井の現在の棋力はプロ棋士のトップクラスであると考えられる。17 歳の藤井は脳の成長過程であり、流動性知能がピークを迎える 25 歳までは棋力が向上していくと考えられる。藤井の将棋の変化をみることは、脳の成長をみていく上で非常に有効な方法である。

藤井の将棋をみるためには、他のプロ棋士と比較することが非常に重要である。豊島や羽生などのトップレベルのプロ棋士だけでなく、レーティング下位のプロ棋士の棋譜を解析することも今後の課題である。また、本研究では、将棋 AI が示す最善手を含む候補手との一致率という観点から議論してきたが、逆に、悪手という観点から人間の指し手の特徴を解析することは興味深いテーマであり、将来的な研究課題と考えている。

謝辞

本研究を行う上で、福井大学大学院工学研究科知能システム工学専攻非線形科学研究室のメンバーに議論していただき感謝致します。

参考文献

- [1] Raymond B. Cattell, 斎藤耕二訳, 安塚俊行訳, 米田弘枝訳: パーソナリティの心理学, 金子書房, pp.318-327 (1975).
- [2] 高津和紀, 高田宗樹, 平田隆幸: 福井大工報, 67, pp.1-9 (2019).
- [3] 公益社団法人日本将棋連盟,
<<https://www.shogi.or.jp/>>(2019 年 6 月 24 日)
- [4] Arpad E.Elo: The Rating of Chessplayers Past &

- Present, Artwork by Zastrow Studios, Thiensville, Wisconsin (1978).
- [5] World Chess Federation,
<<http://www.fide.com/>>(2019年6月24日)
- [6] 将棋連盟棋士別成績一覧(レーティング),
<<http://kishibetsu.com/rating.html>>(2019年7月16日)
- [7] 右玉 NOW,
<<https://migigyoku.com/>>(2019年6月24日)
- [8] じゅげむの将棋ブログ,
<<http://shogijugem.com/category/professional>>(2019年6月24日)
- [9] 松本博文:棋士と AI はどう戦ってきたか, 洋泉社, pp.14-239 (2017).
- [10] 小谷善行, 吉川竹四郎, 柿木義一, 森田和郎:コンピュータ将棋—あなたも挑戦してみませんか—, サイエンス社, pp.101-116 (1990).
- [11] 大和証券杯ネット将棋,
<<http://www.daiwashogi.net/>> (2019年6月24日)
- [12] 一般社団法人情報処理学会,
<<https://www.ipsj.or.jp/>> (2019年6月24日)
- [13] 松原仁編:コンピュータ将棋の進歩 6—プロ棋士に並ぶ—, 共立出版, pp.1-45 (2012).
- [14] David Silver, Aja Huang, Chris J. Maddison, Arthur Guez, Laurent Sifre, George van den Driessche, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Veda Panneershelvam, Marc Lanctot, Sander Dieleman, Dominik Grewe, John Nham, Nal Kalchbrenner, Ilya Sutskever, Timothy Lillicrap, Madeleine Leach, Koray Kavukcuoglu, Thore Graepel & Demis Hassabis : Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search, Nature volume 529, pp.484-489 (2016).
- [15] CSA Computer Shogi Association コンピュータ将棋協会, <<http://www2.computer-shogi.org/>>(2019年6月24日)
- [16] ShogiGUI,
<<http://shogigui.siganus.com/>>(2019年6月24日)
- [17] dolphin+illqhal. 1. 7z,
<https://drive.google.com/file/d/1ST_XNioYuVqt9wOh7SCVIELY3OKRikGf/view>(2019年6月24日)
- [18] Kristallweizen,
<<https://github.com/Tama4649/Kristallweizen/tree/master/releases>>(2019年6月24日)
- [19] gikou-official,
<<https://github.com/gikou-official>>(2019年6月24日)
- [20] コンピュータ将棋 まとめサイト,
<<https://www.qhapaq.org/shogi/>>(2019年6月24日)
- [21] 将棋フリーソフト レーティング,
<www.uuunuuun.com>(2019年6月24日)
- [22] やねうら王,
<<http://yaneuraou.yaneu.com/>>(2019年6月24日)
- [23] niconico,
<<https://www.nicovideo.jp/>>(2019年6月24日)

ゼロから始める Android プログラミング -1 週間で携帯アプリを作れるか?-

万里川則亮* 高津和紀** 平田隆幸**

Beginners Try to Learn Android Programming -Can They Master Android Programming in a Week? -

Noriaki MARIKAWA*, Kazuki TAKATSU** and Takayuki HIRATA**

(Received September 27, 2019)

Can programming beginners create an application of mobile devices after 7 days lesson? To answer this question, we have done an experiment. One lesson was limited to an hour. Java on Android was used as a programming language. Five students who major in engineering took part in this attempt. They were beginners in Java programming and unfamiliar with making an application on mobile devices. Before and after 7 days lesson, the questionnaire surveys were carried out. The participants of the lesson succeeded in making a Java application on Android devices.

Key Words : Mobile Device, Android, Java, Programming beginners, Education

1. 緒言

携帯端末は、広く普及するとともに、その処理能力も飛躍的に向上してきている。これに伴い、携帯端末は通信手段としての利用のみならず、様々な利用がなされるようになってきた^[1]。携帯端末は、通信機能をはじめ、PC やゲーム機としても使用されている。また、携帯端末は PC と比較して、老若男女問わずより身近なものとなっている。現在、携帯端末上で動くアプリケーションには、多種多様なものが存在し、生活の一部になりつつある。また、携帯端末上で動くアプリケーションは、新しい可能性を秘めているとともに、技術やサービスを低コストで広く供給することが可能である。

携帯端末を使った多種多様なアプリケーションが存在するが、これらのアプリケーションには、一般

の人々が開発したものも多く含まれている。それ故、アプリケーションを製作してみたいと考えている人は多い^[2]。そこで、プログラミングの初心者が携帯端末のアプリケーションを開発できるかという点に注目する。また、それらの人々が短期間でアプリケーションをプログラミングできるかの可能性について議論する。

スマートフォンと呼ばれる携帯端末には、iOS(iPhone, iPad)で動作するものと、Android OS で動作するものがあり、この2つのプラットフォームが主流である。代表的な開発環境として、iOS では Xcode が挙げられ、Android OS では Android Studio を挙げるができる^[3]。ここでは開発環境に Android Studio を用いる。その理由として、世界的なシェアでは Android 端末が多くを占めているところにある。また、Android アプリを配信する google play では、開発者にかかるアプリ配信時のコストが App store に比べて低い。その為、だれでも簡単かつ気軽にアプリケーションを広く配布することが可能である^[4]。

ここではプログラミング初心者の学生に、7 日間の講習をおこない、Android OS 上のアプリケーションの製作が可能になるかを調べた。

* 機械・システム工学科

** 大学院工学研究科知能システム工学専攻

* Dept. of Mechanical and System Engineering

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

2. Andorid Programming 環境インストール

Android のアプリケーション開発は、Android アプリを用いて Android 端末上で行うことが可能である^[5]。しかし、Android の携帯端末上で、プログラム開発をおこなうより、PC をプログラム開発のプラットフォームにした方が便利である。ここでは、PC 上でのアプリケーション開発をおこなう。

2.1 PC プラットフォーム

開発環境について述べる。プラットフォームは、最低限のハードウェア(Windows10 が起動するもの : CPU Core-i5, RAM 2GB 以上, HDD 最低 4GB 以上)、モニター(24 インチ, 1280×800 以上)をもちいた。また、代表的な開発環境を表 1 にまとめた。対象の携帯端末のバージョンとして、Android4.4(KitKat)を想定した。アプリの実行は、Android Studio に搭載されている仮想デバイス上で行った。

次に、開発言語について述べる。Android アプリケーションの開発言語には、C, Kotlin, Ruby, Java などがある。図 1 に、上位 3 つのプログラミング言語の移り変わりを示す。データは、オランダの TIOBE Software 社が公開した「TIOBE Index」の、2018 年 12 月版を使った^[6]。なお、このランキングは複数の検索エンジンの検索結果から、各言語がどれだけ話題になっているのかを評価したものである。

次に、開発言語の特徴をみる。C 言語は Unix とともに発展してきた。開発言語としては最も歴史があり、制御など様々な分野で使用されている。また、プログラミング言語の教育の現場で最もよく使われている言語である。Kotlin は、Java 言語をより簡潔に書くことを目指して作られた言語である。Java 言語とは直接的な互換性がある。2017 年には Google が Kotlin を Android アプリケーション開発の推奨言語とした^[7]。Ruby は、日本人の松本行弘によって開発された言語である^[8]。きれいな構造的なプログラミングができ、人気がある。Java は、最も人気のあるプログラミング言語である。人気の要因として、Java は OS に依存することなく開発することができることにある。ここでは、Java を使用して携帯アプリケ

表 1 代表的な開発環境。

ハードウェア	Dell Inspiron 3470
CPU	i5-8400CPU
RAM	8GB
ソフトウェア	Android Studio
モニター	24 インチ, 1280×800

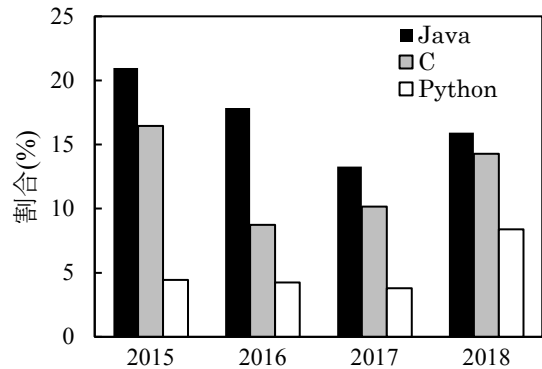


図 1 プログラミング言語の人気の変遷。

ーションを作成する。

2.2 Java Android 環境

Android Studio はエディタやコンパイラ、リンカ、デバッガまたはその他の支援ツールなどを統合した開発環境である^[9]。また、動作の確認には、実際の Android 端末ではなく、Android Studio に搭載された仮想デバイスを用いる。

3. 1 週間で Android アプリを作る

プログラミング初心者の大学生を対象に、短期間で Android アプリの製作が可能かを調べた。1 日 1 コマ(60 分)、7 日でアプリ製作を目指す。なお、開発言語として Java を使用した。

3.1 被験者

Java 言語のプログラミング初心者、5 名を被験者とした。年齢は、21~23 歳の男子 4 名、女子 1 名である。福井大学工学部の知能システム工学科の 4 年生である。なお、Android Studio はプログラミング言語 Java のほかに Kotlin を用いることができる。講習を始める前に Android Studio に触れたことがあるか、特に Java を使ったことがあるかなどについてアンケートをおこなった。プログラミング経験についてのアンケートの結果を表 2、表 3 に示す (アンケートの内容は付録を参照)。

被験者の携帯端末上のアプリケーションプログラ

表 2 被験者の開発環境に対する理解度*。

理解度レベル	1	2	3	4
Java	0 人	3 人	2 人	0 人
Android Studio	0 人	2 人	3 人	0 人

*1 は理解している, 2 は少し理解している, 3 は理解していない, 4 は分からない。

表3 被験者の経験.

	有	無	わからない
自作アプリ製作	0人	5人	0人
開発環境の導入	0人	4人	1人

ミングの経験についてまとめたものが表3である。経験の有無は、講習前のアンケートをおこなうことで調査した。表3から分かるように、被験者は開発環境を導入した経験がなかった。また、被験者5人は、アプリの製作経験もなかった。

3.2 講習内容と達成目標

教材の内容を要約する。講習は、7日間でおこなわれ、1日が1回分の講習に対応する。7回分の講習の内容を以下に箇条書きで示す。

- 1回目：準備
- 2回目：出力編 ～文字列～
- 3回目：出力編 ～図～
- 4回目：入力編 ～ボタン～
- 5回目：入力編 ～複数のボタン～
- 6回目：入力編 ～文字列～
- 7回目：センサの利用

なお、理解度調査のため、全7回のうち、偶数回目(2, 4, 6回目)の講習に課題1～3をおこなった。課題の出力例を図2に示す。

受講者の達成目標について述べる。大きな目標は、Android アプリケーションを1週間で製作することである。目標達成のため、3つの課題を設けた。課題1, 仮想デバイスに、複数の文字列を表示する。課題2, 仮想デバイスに、ボタン(インターフェース部)を配置する。課題3, 仮想デバイス上で計算機を作成する。

4. 実験と分析

プログラミング初心者5人に7日間の講習でJavaアプリ製作できるようになるかの実験をおこなった。そして、設定した課題を達成できたかを調べた。設定した課題は、3つである。以下に、課題の内容を述べる。

課題1は、複数の文字をAndroid端末の画面に出力する課題である(図2-a参照)。課題1には、任意の文字サイズと文字の色に変えるという課題が含まれており、文字の設定をできるかで理解度を測る。

課題2は、ボタンを押すと乱数が決まり、Android端末の画面にその結果を出力させる課題である(図2-b参照)。出力の結果には図や数式を用いる。インターフェース部が反応するか、乱数とその他のコンポーネントを組み合わせてあるかで理解度を測る。

課題3は、計算機をつくる課題である(図2-c)参

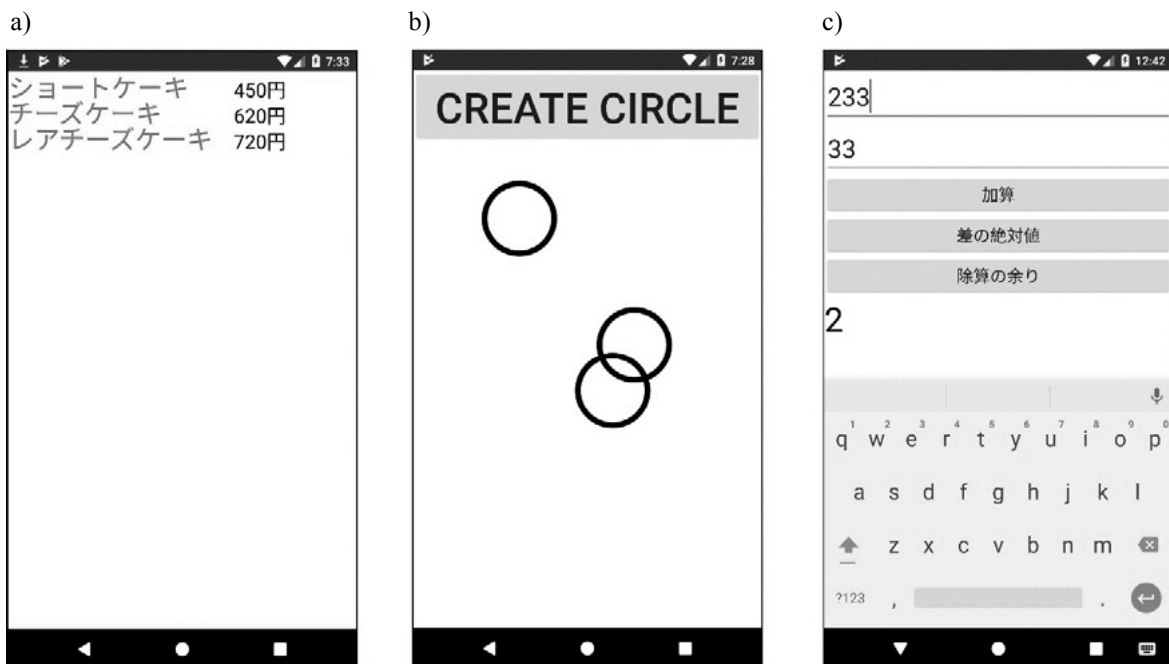


図2 課題の出力例. a)課題1(文字の大きさや色が異なる文字列の出力.), b)課題2(CREATE CIRCLE をクリックすると、ランダムな位置に円が描画されるボタン.), c)課題3(計算機: 上部には値の入力部分が2つ. 中部には加算, 差の絶対値, 除算の余りの計算ボタン. 下部には計算結果を出力させる.).

照). 計算機をつくるために, 入力部としてボタンとエディットテキストボックスをそれぞれ複数用いる. ボタンからは, 加算や減算などの演算の内容を受け取り, エディットテキストボックスからは数値を受け取る. これらの2種類の入力部から Android 端末の画面に結果を出力できるかで理解度を測る.

被験者の自己評価および教師による評価をみていく. 被験者5名の各課題に対して達成に要した時間を表4に示す. 各課題には制限時間の設定をしている. 課題1には15分, 課題2には20分, 課題3には40分である. いずれも1コマ(60分)の時間の中に含まれている.

表4から被験者の特徴について考察する. まず, 3つの課題を達成するのに要した合計時間という観点から被験者をみてみよう. 最も多くの時間を要した被験者Bと最も少ない時間で達成できた被験者Aを比べる. 達成時間に約30分の差が生じている. これは, 達成できなかった課題の達成時間を制限時間と換算してさえ, 1.6倍以上の時間を必要としたことが分かる. また, 被験者Cは, 課題2では時間内に達成できなかったにも関わらず, 課題3では特に優秀な時間で課題を達成している. このように, 課題によるばらつきも存在していることが分かる.

次に, 課題の達成割合という視点から考察する(表5を参照). 制限時間内に課題を達成できなかった課題を未達成とし, 課題別の達成割合を達成項目数から決めている. 表5から, 課題1は全ての被験者が

表4 課題の達成時間*

	課題1	課題2	課題3	合計
被験者A	3	5	36	44
被験者B	13	×(20)	×(40)	73
被験者C	6	×(20)	21	47
被験者D	5	7	×(40)	52
被験者E	5	9	35	49

*時間の単位は分である. ×は()内の制限時間内に達成できなかった場合である.

表5 課題別の達成割合(%)*.

	課題1	課題2	課題3	全体
被験者A	100	100	100	100
被験者B	100	50	33	61
被験者C	100	50	100	83.3
被験者D	100	100	66	88.7
被験者E	100	100	100	100

*各課題の達成項目は課題1が2つ, 課題2が2つ, 課題3が3つとなっている.

達成することができた. つまり, 課題2, 3に必要な基礎的な部分は理解できていると考えられる. 課題が達成できなかった者を注目すると, 被験者Bは課題2, 3で, 被験者Dは課題3で達成することが出来なかった. 被験者B, Dは難易度に連れて達成割合が下がったとみることができる. これに対して被験者Cは課題2を達成できなかったにも関わらず課題3を達成していることに注目する. このことからプログラミングの学習でも, 一部の内容に理解がなくなると, 回を重ねるごとに理解が深まる可能性があるといえる.

被験者の講習に対する理解度の自己評価という観点からみていく. 自己評価は, 講習終了後にアンケートによって調べた(表6を参照). ここでは, 課題を達成した場合は○, 達成できなかった場合は×と, 二者択一で回答してもらった. なお, 被験者の自己申告によるものであり, 客観的に課題を達成できたかを意味しないことに注意が必要である.

表6 被験者の自己評価.

	課題1	課題2	課題3
被験者A	○	○	○
被験者B	○	○	×
被験者C	○	○	○
被験者D	○	○	×
被験者E	○	○	○

表7 被験者の講義に対する評価.

	項目2	項目3	項目4	項目5
被験者A	3	3	3	3
被験者B	2	3	2	2
被験者C	3	2	2	3
被験者D	2	2	2	3
被験者E	2	2	3	3

表8 アンケートの内容.

項目1	被験者の自己評価(表6を参照)
項目2	講習の配布テキストは適切であったか
項目3	講習の難易度は適切であったか
項目4	講習の分量は適切であったか
項目5	講習に対して満足できたか

同時に、講義についても被験者に評価してもらった。調査は、講義後のアンケートを通しておこなった。評価は、0から3の4段階である。評価基準として、評価0は低評価、評価1はやや低評価、2はやや高評価、評価3は高評価としている。表7に評価被験者ごとの各項目に対する評価を示す。アンケートの内容をまとめたものを表8に示す。次に、各因子間の相関関係を調べた(相関関係を図3から図7に示す)。各因子は、達成時間、達成割合、満足度、自己評価の4つの因子である。

図3は、達成時間を横軸にとり、縦軸に達成割合をプロットしたものである。達成時間と達成割合には強い負の相関(相関係数 $r = -0.90$)があった。このことから達成度の高い被験者はより短い時間でプログラムを組むことが出来ていることがわかる。合計7時間という短い講習でも、相関関係にあらわれるような理解度の差がうまれている。

さて、特徴的な被験者をみることで、よりよい講習に改善できる可能性があるかもしれない。ここでは、被験者Cに注目する(表5を参照)。課題2が設定時間内に達成出来ていないことに対し、課題3では他の被験者と達成時間に差があることがわかる。

各課題では講座時間にして2時間の講習がなされている。このことに起因して、理解度に十分な変化をもたらしていることが考えられる。また、図3からわかるように時間を最大限使って課題をすべて達成した被験者は現れなかった。図4は、達成時間を横軸にとり、縦軸に満足度をプロットしたものである。達成時間と満足度には強い負の相関(相関係数 $r = -0.95$)があった。短い実習時間で課題を達成できた被

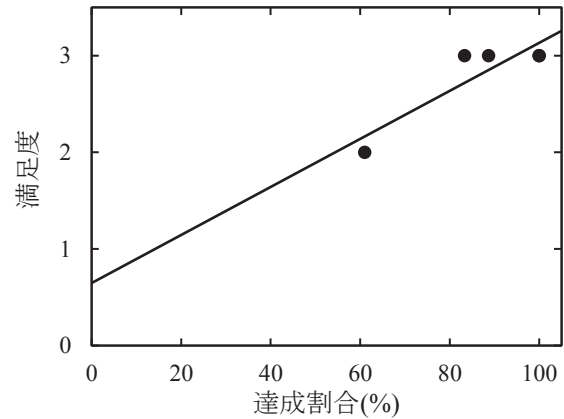


図5 達成割合と満足度.

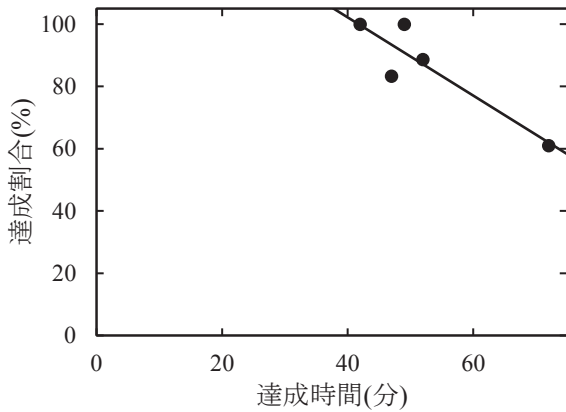


図3 達成時間と達成割合.

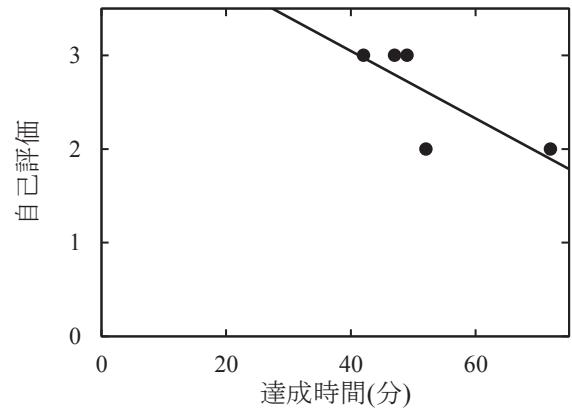


図6 達成時間と自己評価.

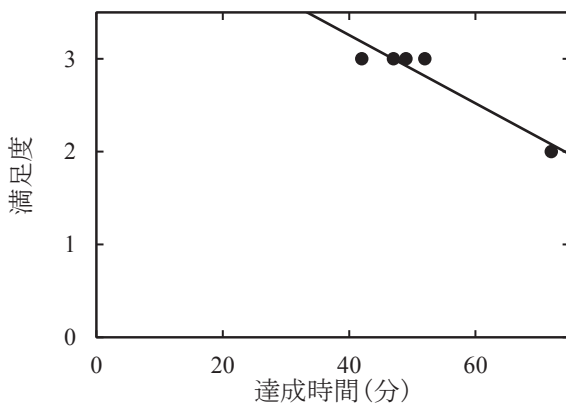


図4 達成時間と満足度.

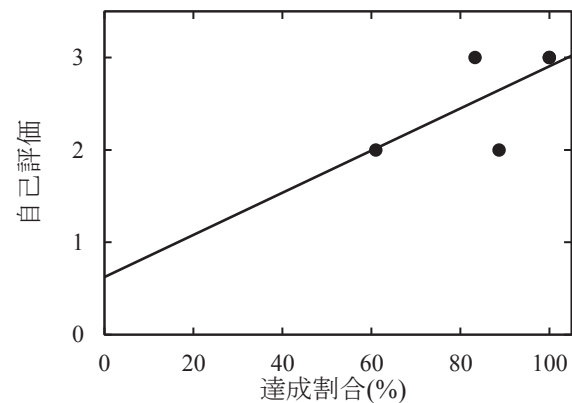


図7 達成割合と自己評価.

験者が満足度の高い傾向にある。図 4 から、満足度の低い被験者は他の被験者に比べて達成時間に大きな差がうまれている。

図 5 は、達成割合を横軸にとり、縦軸に満足度をプロットしたものである。達成割合と満足度には強い相関(相関係数 $r=0.89$)があった。ここで図 3, 4 の結果を考える。達成割合と満足度の両方に対し、達成時間は強い負の相関をもっていた。

次に、達成時間と達成割合に対して、被験者の自己評価はどのような関係があるかをみていく。図 6 は、達成時間を横軸にとり、縦軸に自己評価度をプロットしたものである。達成時間と自己評価には負の相関(相関係数 $r = -0.76$)があった。しかしデータ数が 5 と少ないため、相関係数 -0.76 は相関関係として十分ではないと考えられる。

図 7 は、達成割合を横軸にとり、縦軸に自己評価をプロットしたものである。達成割合と自己評価には強い相関関係(相関係数 $r=0.67$)がみられなかった。プログラミングにおける自己評価は曖昧なものであると考えられる。

達成時間と達成割合は客観的な理解度を示す重要な項目である。一方、自己評価もしくは満足度は主観的な項目である。それゆえ将来的には、自己評価もしくは満足度から講習の効果を定量的に調べる方法の確立が必要と考えられる。

図 3~7 までの結果から、理解度を測るには、達成時間と達成割合がともに高い相関関係を示したことから、達成時間と達成割合によって推定できることがわかった。なお、図 3~7 の回帰直線を表 9 に、相関係数を表 10 にまとめておく。

表 9 回帰直線.

x	y	回帰直線
達成時間	達成割合	$y = -1.3x + 150$
達成時間	満足度	$y = -0.037x + 4.7$
達成割合	満足度	$y = 0.025x + 0.65$
達成時間	自己評価	$y = -0.036x + 4.5$
達成割合	自己評価	$y = 0.023x + 0.62$

表 10 各種因子間の相関係数.

	相関係数	図
達成時間と達成割合	-0.90	図 3
達成時間と満足度	-0.95	図 4
達成割合と満足度	0.89	図 5
達成時間と自己評価	-0.76	図 6
達成割合と自己評価	0.67	図 7

5. まとめ

プログラミングの初心者を対象に、1日1コマ(60分)、7日間で Android アプリの作成ができるかという実験をおこなった。1週間で Android アプリを製作するという目標は、概ね達成できた。その結果、被験者 5 名の内 1 名は、少し満足であるとの回答があった。そして、講習前と講習後にアンケート調査をおこなった。さらに、相関関係を調べた。

被験者は、福井大学工学部の 4 年生であった。工学部の 4 年生がプログラミングの初心者であるかどうかは、議論の余地があるかもしれない。一般的に、プログラムの経験が工学部の学生より少ない文科系の学生を対象に、同様の調査をおこなうと異なった結果になる可能性はある。また、被験者数が 5 人というのは実験規模としては少ないかもしれない。今後、より大人数を対象とした実験をしたいと考えている。

アプリケーションの作成において、客観的評価と講習終了後のアンケートによる自己評価を比較した。自己評価と客観評価には、十分な相関が認められなかった。被験者は、自己の課題達成に関して、正しく認識できていなかったことが分かる。このことから、アンケートの質問が不適切であったかもしれない。

客観的評価と満足度には強い相関があった。また、達成割合と達成時間にも強い相関が得られたことから、達成割合、達成時間、満足度には相関関係があることが確認できる。ここで被験者の満足度を作為的に上げる方法について考えてみる。達成時間と満足度には負の相関があるので、プログラムの穴埋めのような時間のかからない課題に変更する方法が考えられる。達成割合と満足度には正の相関があるので、課題の難易度を下げることで、被験者の達成割合を意図的に伸ばす方法が考えられる。しかし、これらの方法はプログラミングの習得という点では好ましくないと考えられる。その理由として、実際にプログラミングをおこなう場合、前述した方法の課題よりも長いソースコードを書くことが必要となり、それに伴った複雑な構造を考えなければならないからである。

今後、Java だけでなく Android Studio に搭載されているもう 1 つのプログラミング言語である Kotlin を用いた講習をおこなうことで、言語の習得のしやすさが分かる可能性がある。さらに、Android OS と iOS の違いによる影響は、どれ程かを調べることも重要かもしれない。iOS のアプリケーションについても、本講習と同様の内容でアプリケーション製作

をおこなうことで開発のしやすさ、使い勝手の良さについて判断をおこなうことができると考えられる。

今回の実験は、受講者 5 人という小規模の被験者を対象におこなった。その結果、人数が少ない小規模授業ゆえに、きめこまやかな確認をすることが可能であった。これに対し、例えば、30 人ほどを対象とした場合を考えると、7 日間で受講者が Android アプリの作成ができるようになるのかは今後の問題である。

最後に、不特定多数の人間に講座の内容を紹介したいと考えている。INTERNET 上にテキストやサンプルプログラムを閲覧可能にした場合、閲覧者が教師なしで Android アプリの作成ができるようになるのかを調べることも今後の課題である。

謝 辞

研究をおこなうにあたり、被験者として協力してくださった研究室のメンバーに感謝いたします。また、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に感謝いたします。

参考文献

- [1] 濱谷英次：携帯電話を巡る技術社会史：技術的慣性から社会的慣性へ大阪大学大学院人間科学研究科博士論文(2012).
- [2] プログラミング初心者が始めるアプリ開発
<<https://www.creativevillage.ne.jp/20846>>
(2019 年 9 月 13 日)
- [3] iPhone(iOS)と Android のアプリ開発はどう違う？
開発言語や開発環境の違いまとめ
<<https://agency-star.com/freelance/articles/314/>>
(2019 年 9 月 13 日)
- [4] Android と iOS アプリ制作. どちらから勉強すべきか?
<<https://www.selva-i.co.jp/blog/archives/2531>>
(2019 年 9 月 13 日)
- [5] AIDE- IDE for Android Java C++
<<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.aide.ui&hl=ja>>(2019 年 9 月 10 日)
- [6] TIOBE Software TIOBE Index(2018 年 12 月版)
< <https://www.tiobe.com/tiobe-index/>>(2019 年 9 月 13 日)
- [7] Google I/O 基調講演 (Google I/O '17)
<<https://events.google.com/io2017/>>(2019 年 8 月 20 日)
- [8] 高橋征義, 後藤裕蔵, まつもとゆきひろ監修: た

のしい Ruby, ソフトバンクパブリッシング株式会社, pp.467(2002).

- [9] Android Developer
<<https://developer.android.com/studio?hl=JA>>(2019 年 9 月 13 日)
- [10] 布留川英一：Android プログラミングバイブル SDK 7/6/5/4 対応, ソシム, pp.18-164 (2017).
- [11] 高橋麻奈：やさしい Java, 風工舎 (2013).

0 から始める Android プログラミング 事前アンケート

年 月 日

年齢

- あなたはプログラミング言語である Java のオブジェクト指向を理解していますか？
 - ・理解している
 - ・少し理解している
 - ・理解していない
 - ・わからない
- あなたは Android アプリの構成(基本的な Activity クラス)を理解していますか？
 - ・理解している
 - ・少し理解している
 - ・理解していない
 - ・わからない
- Java のプログラミング経験がありますか？
 - ・ある
 - ・ない
 - ・わからない
- 自身でプログラムしたアプリを Android 端末で実行したことがありますか？
 - ・ある
 - ・ない
 - ・わからない
- あなたは一人で開発環境を整えることができますか？
 - ・できる
 - ・できない
 - ・一部行ったことがある
- あなたは開発環境を整えてある PC を持っていますか？
 - ・ある
 - ・ない
 - ・わからない

情報の取り扱いについて

本アンケートで得られた個人情報に関しては、研究活動の目的のみで使用し、ご本人の同意なく第三者に開示・提供することはいたしません。

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—

池山 佑太* 中島 恭平* 玉川 洋一*

The Development of Reactor Neutrino Monitor —Development of Liquid Scintillator Containing Gd with PSD Capability—

Yuta IKEYAMA*, Kyohei NAKAJIMA* and Yoichi TAMAGAWA*

(Received September 24, 2019)

Reactor neutrino monitor is a technology that utilizes an anti-electron neutrino generated from a nuclear reactor to monitor the operational status inside the reactor. Currently, we are developing a liquid scintillator (LS) for a prototype detector. The performance required for LS is not inferior to that of commercial products, and the transmittance is 90% or more with an optical path difference of 9 cm. In this paper, we report the result of light yield and transmittance measurement with respect to the various amount of LS constituents.

Key Words : Reactor Neutrino Monitor, Liquid Scintillator, Background

1. 緒言

原子炉ニュートリノモニターは反電子ニュートリノが原子炉から発生する事象を用いて、原子炉内部の稼働状況等の監視を試みる技術である。反電子ニュートリノは相互作用がほとんど起きず、発現事象の頻度が低いため関心領域内のバックグラウンド (BG) 事象の削減が重要になる。

反電子ニュートリノを検出するためにシンチレータに Gd を含有させ、BG を削減するための波形弁別能力を有する必要がある。現在、原子炉ニュートリノモニターの試作機を作成しているが、この検出器に必要な性能として、発光量は既存の物と比較して大きく劣らず、透過率は 90% 以上の物を目指している。

本論では、LS の構成物質である PP0、Bis-MSB、Gd、UltimaGold-F の量によるシンチレータの特性について発光量を後方散乱、透過率を分光光度計を用いて測定を行った。その結果について検討をする。

*大学院工学研究科原子力・エネルギー安全工学専攻

* Nuclear power and Energy Safety Engineering Course Graduate School of Engineering

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知ることができる。これは組成が判明するまでの時間がかかり放射能の観点からも危険を伴う。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、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。

2.1.1 反電子ニュートリノ

ニュートリノは、素粒子の軽粒子（レプトン）の一種である。ニュートリノは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けられ、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。

ニュートリノは波の性質をもつためニュートリノの合成によって種類が変わる。これをニュートリノ振動という。

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発生は原子炉燃料の²³⁵Uの核分裂後のβ崩壊で発生する。核燃料の1核分裂当たり約6個発生し、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、検出器に検出されるイベント数が少ないため、関心領域のバックグラウンド削減が重要である。

2.1.2 シンチレーション検出器

シンチレータとは、荷電粒子が通過するとき発生する物質の総称で、そこから出てくる光をシンチレーション光と言う。シンチレーション検出器には主に有機シンチレータと無機シンチレータがある。

無機シンチレータは炭素の含まない検出器であり、代表的にはNaI(Tl)シンチレータ等がある。無機シンチレータの特徴としては、γ線の全吸収ピークが検出されやすく、高い発光量を得られる。

有機シンチレータは、炭素を含む検出器で有機物で構成される。アントラセンやスチルベンなどの結晶やプラスチック、液体など多くの種類が存在する。主な構成元素が、炭素、水素等原子番号が小さいため、γ線に対してほとんどコンプトン散乱を起こすので、全吸収ピークを形成しない。無機シンチレータと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崩壊反応を用いるため、陽子（水素）が多く含まれる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。メリットとしては、液体なので添加物が付与しやすく必要な性能のものが作りやすいのと、PSに比べて安価である点である、しかし、使用する溶媒は油なので扱いに注意が必要なのがデメリット

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、主に溶媒、溶質、添加物で構成されている。

溶媒はπ電子を有しており、エネルギーの移行が溶媒間で起いやすく、溶質の溶解度大で、引火点が高い必要がある。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℃と高い値を持つLABを使用する。

溶質は、蛍光体とも呼ばれている。溶媒からエネルギーが移行し、励起され蛍光を放出する。蛍光効率や溶解度が重要で代表的なものにPPOやbutyl-PBD、Bis-MSBなどが存在する。本研究では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が出来る必要がある。反電子ニュートリノの検出に重要なのは、中性子捕獲断面積である。代表的なものにGdやLiがある。本研究では物質内で一番中性子捕獲断面積(48890barn)が高いGdを使用する。また、波形弁別を行うための代表的な添加物として、ナフタレンやUltima Gold-F(UG-F)がある。本研究ではUG-Fを使用する。

2.1.4 物質との相互作用

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

¹⁾ 図1にシンチレータで観測されるスペクトルの模式図を示す。

光電効果とは、光子が軌道電子のエネルギーを与え、軌道電子化が原子から飛び出す現象である。この時の運動エネルギーはシンチレータ内ですぐ止まるため、図1のようなピークが見られる。

コンプトン散乱とは、光子と電子の衝突で電子と散乱光子が生じる現象いう。衝突前後の光子のエネルギーを E_r 、 E_r' 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、

$$E_e = E_r - E_r' = \frac{E_r}{1 + \frac{mc^2}{E_r(1 - \cos\phi)}} \quad (1)$$

となる。シンチレータ内では散乱する ϕ に依存するため図1のようにコンプトンエッジを形成する。

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である。

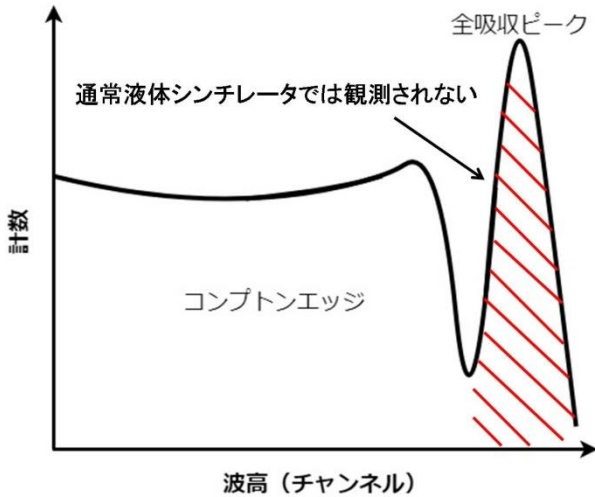


図1. シンチレータ内で観測される波高分布

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崩壊は反電子ニュートリノと陽子が反応し、陽電子と中性子を発生させる反応である。検出器には陽子を多く含む物質が必要で、主に有機シンチレータが用いられる。

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(先発信号)。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。したがって、シンチレータにGdを含ませることにより検出器内で熱化された熱中性子を捕獲して合計エネルギーが8MeVとなる複数のγ線を放出させる(後発事象)。(図2)

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してニュートリノ事象を同定する。この時間差を用いて本事象に対してBGを削減する方法を遅延同時計数という。この先発事象と後発事象の時間差は中に含まれるGdの含有量によって変化する。

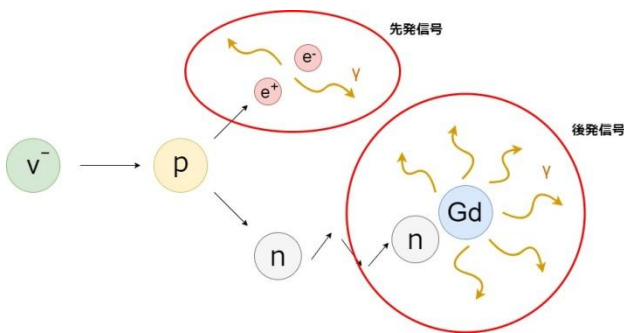


図2. 逆β崩壊を用いた反電子ニュートリノの検出原理

2.1.6 原子炉ニュートリノモニターの主なBG

原子炉ニュートリノモニターは、遅延同時計数を

用いることによりBGを2桁程度落とすことが出来る。しかし、時間相関があり落とすことのできないBGが存在する。それは、時間相関のある高速中性子によるイベントである。高速中性子が検出器内で陽子を反跳させて偽の先発信号を発生させて、先発信号のあと数十μs後に検出器内で熱化した中性子がGdに捕獲されγ線を出す場合である。これは、反電子ニュートリノによる逆β崩壊イベントの先発信号がγ線であるのに対して、この高速中性子によるイベントは先発信号が中性子によるものなので、波形弁別によるn/γ弁別を用いることで落とすことができる。これについてはまた後述する。

2.1.7 n/γ弁別

2.1.6で示したように、原子炉ニュートリノモニターのBGを削減するためには、入射粒子がγ線と中性子かを識別する必要がある。波形弁別は出力波形の後半部分がγ線と中性子で異なるのでn/γ弁別を行うことが出来る。これをPulse Shape Discrimination (PSD)と言う。

波形弁別は、粒子に対する光電子増倍管の出力の波形の形が異なることを利用して、波形の全積分Qと波形の後半部分の積分Qtailの比Qtail/Qを用いて弁別する。図3にγ線と中性子の波形の模式図と部分積分の波形の積分区間を示す。

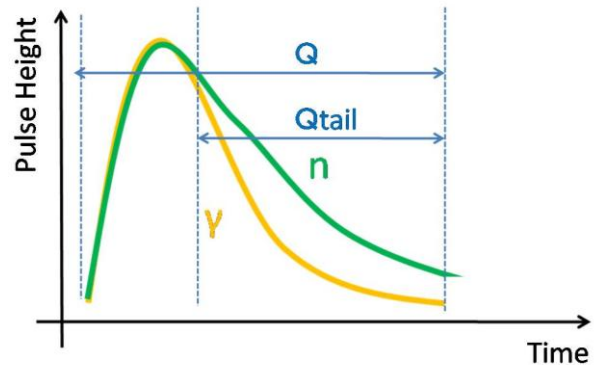


図3. γ線と中性子の波形の模式図と部分積分の波形の積分区間

2.2 先行研究

原子炉ニュートリノモニターの代表的な先行研究として、アメリカのSan Onofre Nuclear Generating Station(以後SONGS)実験²⁾、日本のPlastic Scintillator Anti-Neutrino Detector Array(以後PANDA)実験³⁾の例を示す。

2.2.1 SONGS実験

アメリカで2005年6月~2006年11月に行われていたSONGS実験は、Gdを含む0.64tの液

体シンチレータと、宇宙線遮蔽のプラスチックシンチレータ、中性子線を熱化させるためのポリエチレンと水の遮蔽が使用されている。Gd を含ませることにより、中性子捕獲の時間を $28 \mu\text{s}$ に短縮することができる。

この検出器は地下 10m、原子炉から 25m の位置に設置された。この研究により、ニュートリノの検出率は原子炉稼働時で 564 ± 13 [count/day]、停止時は 105 ± 9 [count/day] となり、原子炉の on/off が確認された。また、原子炉の燃料の交換前後で反電子ニュートリノの観測量が 10% 変化することがわかった。これは、原子炉の燃料の核分裂による反電子ニュートリノの放出量の時間推移のシミュレーション結果と傾向が一致しているため、燃料内部の組成変化によるものだと考えられる。

2.2.2 PANDA 実験

日本では、主に北里大学が行っているプラスチックシンチレータを用いた PANDA (Plastic Anti - Neutrino Detection Array) 実験がある。一本プラスチックシンチレータは $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 100\text{cm}$ であり、周りには Gd のフィルムが巻かれている。

両端は 2 インチの光電子増倍管があり、プラスチックシンチレータと光電子増倍管の間はアクリルのライトガイドがある。これらが 1 つのモジュールであり、全体として 10×10 の 100 個のモジュールから検出器が構築されている。プラスチックシンチレータを用いる利点として、難燃性であるため安全であること、加工がしやすく持ち運びに便利であることがあげられる。²⁾

現在、大飯原子力 4 号機傍約 45m 位置において PANDA100 の反電子ニュートリノイベントと BG イベントの比(S/N)は 1/100 となっている。

3. 本研究の目的

先行研究では、地下で実験が行われていた。地下で行うことにより、岩盤が宇宙線を遮蔽することが出来る。これにより、宇宙線起因の放射線と宇宙線イベントを軽減することができる。しかし、実際の原子炉ニュートリノモニターは地上での測定を想定しているため、地下に比べて地上では環境放射線である γ 線、中性子、宇宙線が増える。反電子ニュートリノは逆 β 崩壊を用いて検出する。原子炉ニュートリノモニターは先発信号と

後発信号の時間差を利用することで、時間相関のないイベントを排除することが出来る。しかし、時間相関のある高速中性子イベントは排除することが出来ない。2.1.6 で述べたように逆 β 崩壊と高速中性子イベントの違いは先発信号が γ 線か中性子かである。したがって、先発信号の入射粒子を γ 線か中性子か識別することにより更に BG 低減が可能である。しかし、既存の既製品の LS は PSD 能を持つものは存在するが Gd が含有しているものは存在しない。したがって、PSD 能を有する Gd 入り LS を自作する必要がある。本研究の当面の目的は原子炉ニュートリノモニター開発のための PSD 能を有する Gd 含有液体シンチレータを開発することである。本論文では、Gd 入り LS の作成方法と LS を構成する各物質に対しての量に依存する発光量と透過率に関する実験結果について述べる。

4. Gd 含有液体シンチレータ作成方法と濃度測定

4.1 作成方法

Gd は金属であり、 Gd^{3+} の状態で安定となる。したがって、LAB のような無極性である液体シンチレータに溶かしこむことは困難であるので錯体を形成して LAB に溶かしこむ。また、市販で売られているものは水和物である。なので、水と油のように分離する性質を持つ物に対して行う液液抽出法を用いて作成する。^{4) 5)}

4.2 Gd 濃度測定

作成した Gd 含有シンチレータ中の濃度測定には方法が 2 つある。キレート滴定と Gd の中性子捕獲時間測定である。中性子捕獲時間は 10L 程度のシンチレータを作成する必要があるが、キレート滴定は数 mL あれば十分である。なので、今回はキレート滴定を用いての Gd 濃度測定を行った。

キレート滴定は金属イオンの定量に用いる滴定法である。エネレンジアミン四酢酸二水素ナトリウム (EDTA) 標準液を用いることで金属と 1:1 で結合するという特徴がある。さらに、指示薬もある程度金属と結合するものを用いる。指示薬が発する色は金属と結合している時と遊離している時で色が異なる。この色の違いにより滴定の終点を判断する。図 4 に EDTA を入れて攪拌時の色の变化の様子を示す。



図 4. EDTA を入れて攪拌してる時の色の変化の様子

5. 発光量測定

5.1 測定方法

ここでは、PSD 能力を持つ Gd 含有液体シンチレータ作成に必要な構成物質決定のための、 γ 線源を用いた後方散乱ピークを使った発光量測定方法とその実験結果について示す。発光量はコンプトン散乱で得られるコンプトンエッジを用いることでも測定することは可能であるが、コンプトンエッジは明確な定義がないため測定精度が悪い。なので、後方散乱法を用いて測定を行う。LS は 2.1.4 に示したコンプトン散乱が起き、全エネルギーピークが見えないので逆方向に NaI シンチレータを置くことにより、ある一方向のみに散乱したイベントを取得することが出来る。これにより、単一ピークを形成する。また、NaI シンチレータに落ちるエネルギーも分かるため、そのエネルギー値の $\pm 1\sigma$ の範囲のイベントを選定することにより、偶発的に二つのシンチレータが同時に反応したイベントを排除することが出来る。

コンプトン散乱時の散乱された電子のエネルギーは式(1)である。 $\phi=180^\circ$ の時最大で、単一のエネルギーとなる。 ^{137}Cs 線源を用いた時の NaI に落ちるエネルギーは 185keV である。この時の LS の積分値で比較を行う。測定結果については後述する透過率測定と一緒に後述する。図 5 に γ 線源を用いた後方散乱ピークを用いた発光量測定の配置図を示す。

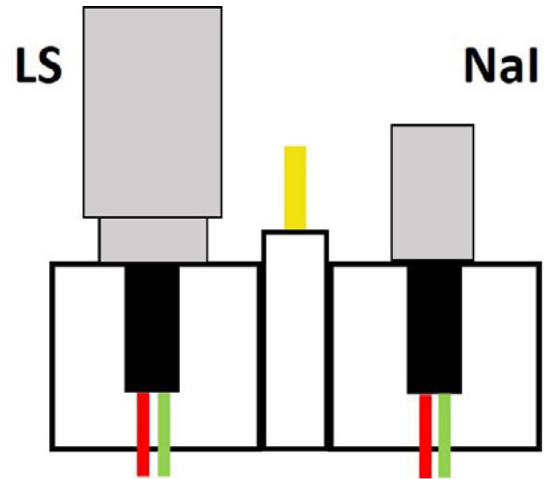


図 5. γ 線源を用いた後方散乱ピークを使った発光量測定配置図

5.2 使用サンプル

発光量測定に使用した LS の構成物質は、溶媒の LAB、溶質に PPO と Bis-MSB、添加物に Gd と UltimaGold-F (UG-F) を含有させた。

PPO が変化させた場合は、LAB と PPO と Bis-MSB で構成している。Bis-MSB を変化させた場合は、LAB と PPO と Bis-MSB で構成している。Gd が変化させた場合は、LAB と PPO と Bis-MSB と Gd で構成している。UG-F が変化させた場合は、LAB と PPO と Bis-MSB と UG-F で構成している。

6. 透過率測定

6.1 測定の原理と方法

透過率を測定する意義として、1t 級の LS を作成した時はシンチレータ全体の大きさが 1m 程度になることを想定している。そのためシンチレーション光の減衰長は 1m 以上必要である。減衰長 λ と透過率 T と光路差 x との関係式は以下ようになる。

$$\lambda = -\frac{x}{\ln T} \quad (2)$$

減衰長 1m は透過率 90%程度に値する。

一般的に LS に物質を混合すると透過率は減少する。したがって、LS の組成を決定する上で各物質の量の依存性を確認することは重要である。

今回の測定では本来はベースラインにはシクロヘキササンや光学用の純水を使用するが、本研究ではベースラインに LAB を使用する。また、測定ではリファレンス置き場に 1cm セルとサンプル置き場に 10cm セルを置いて測定をしている。これにより光路差 9cm の時の透過率を測定することが出来る。

6.2 使用機材と使用サンプル

図6に今回透過率測定で使用した機材（HITACHIのU-3900）を示す。透過率の簡単な原理として、まず任意の波長領域において基準となるベースラインの光の透過度を測定する。次に、測定したいサンプルを測定しベースラインとの割合で透過率を測定することが出来る。使用サンプルは発光量を同じ物を使用している。

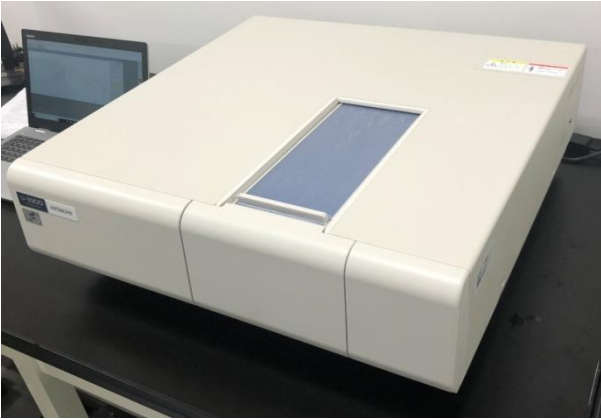


図6. 透過率測定で使用した分光光度計
(HITACHI U-3900)

7. 発光量と透過率測定の実験結果と考察

以下に発光量と透過率のLSの構成物資の量に依存する測定結果を示す。図の左縦軸は最大発光量に対する相対発光量で、右縦軸は透過率、横軸はLSの構成物質の各量である。

図7にPPOの量を変化させた時の発光量と透過率の測定結果を示す。発光量に関して3g/Lで平衡状態に達し、透過率はすべての量で90%以上を満たす。したがって、LSに含有させるPPOの量は3g/Lに決定した。

図8にBis-MSBの量を変化させた時の発光量と透過率の測定結果を示す。発光量に関して10mg/Lで平衡状態に達し、透過率はすべての量で90%以上を満たす。したがって、LSに含有させるBis-MSBの量は20mg/Lに決定した。

図9にGdの量を変化させた時の発光量と透過率の測定結果を示す。発光量に関しては量を増やしていくと30%程度減少していく。透過率に関しては量を増やしていくと25%程度悪くなる。他にも中性子捕獲時間の観点からも制限をかけていく必要がある。

図10にUG-Fの量を変化させた時の発光量と透過率の測定結果を示す。発光量に関しては量を増やしていくと10%程度増加していく。透過率はすべての量で90%以上を満たす。他にもn/γ弁別の観点からも制限をかけていく必要がある。

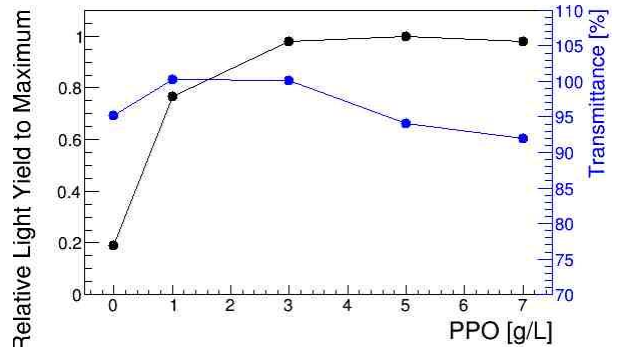


図7. PPOの量を変化させた時の発光量（左軸）と透過率（右軸）の実験結果

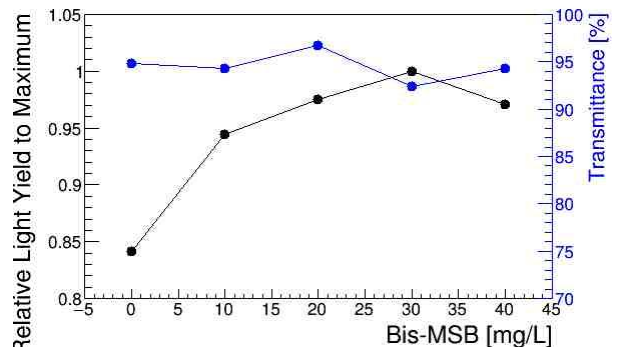


図8. Bis-MSBの量を変化させた時の発光量（左軸）と透過率（右軸）の実験結果

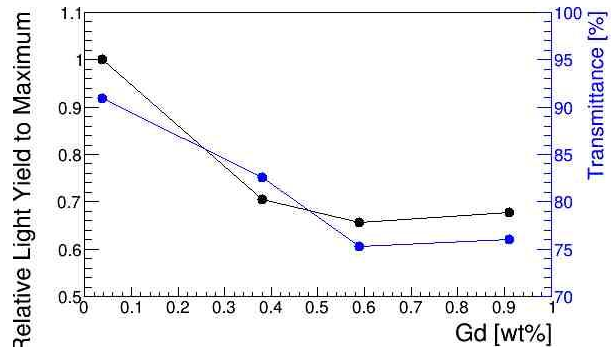


図9. Gdの量を変化させた時の発光量（左軸）と透過率（右軸）の実験結果

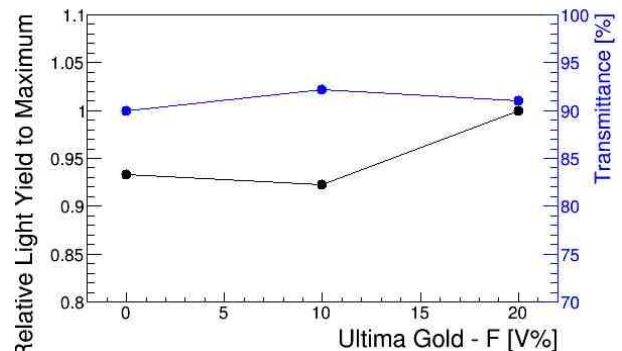


図10. UltimaGold-Fの量を変化させた時の発光量（左軸）と透過率（右軸）の実験結果

8. 結論

福井大学では、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、原子炉で燃料が核分裂し娘核が β 崩壊する時に発生する。この反電子ニュートリノを検出することにより、燃料内部の組成を監視するという技術である。

反電子ニュートリノモニターは逆 β 崩壊で検出される。この時、先発信号として検出器内では陽電子の運動量と対消滅時に発生する511keV2本分のエネルギーが検出される。数10 μ s後に後発事象として検出器内で熱化した中性子がGdに捕獲され、合計エネルギーが8MeVとなる複数の γ 線が検出される。この時間差を利用して、時間相関のないBGイベントを削減する。この方法を遅延同時計数という。

原子炉ニュートリノモニターのBGは遅延同時計数で落としきれないイベントがある。主に時間相関のある中性子イベントである。逆 β 崩壊と中性子イベントの違いは先発信号である。逆 β 崩壊は γ 線で中性子イベントは中性子なので、入射粒子を識別することで更なるBGを削減することが出来る。

現在、波形弁別能を持つGd含有LSベースの試作機を作成している。この試作機の目的は遅延同時計数と波形弁別を用いることでBG低減効果を確認することである。

一般的に、LSに混合物を混ぜると発光量と透過率が減少する。発光量を後方散乱、透過率を分光光度計を用いて測定を行った。

LSを構成する物質であるPPOは発光量が3g/Lで平衡に達し、透過率が90%達しているため3g/Lで決定した。Bis-MSBは発光量が10mg/Lで平衡に達し、透過率が90%達しているため20mg/Lで決定した。Gdは量を増やしていくと発光量が30%程度減少していき、透過率は25%程度悪くなる。他にも中性子捕獲時間の観点からも制限をかけていく必要がある。UG-Fは量を増やしていくと発光量が10%程度増加し、透過率はすべての量で90%以上を満たした。他にもn/ γ 弁別の観点からも制限をかけていく必要がある。

今回の測定でLSの構成物質であるPPOは3g/L、Bis-MSBは20mg/Lに決定した。今後はGdとUG-Fの量を決定するために、中性子捕獲時間とn/ γ 弁別測定を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 飯田博美「放射線概論」
- 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) S. Oguri, Reactor antineutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method : *Nucl. Phys. A757*, (2014) 33-39
- 4) 赤間健 「原子炉由来の反電子ニュートリノ観測のためのGd含有液体シンチレータの開発」
福井大学工学部 2018年卒業論文
- 5) 檜崎哲也 「反電子ニュートリノ検出に用いる波形弁別能力が高いガドリニウム入り液体シンチレータの開発」
東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻
平成27年 修士論文

Annealing Effects on Thermal Diffusivity and Electrical Resistivity of a Surrogate for Metallic Fuel

Naoya ODAIRA* and Yuji ARITA**

(Received September 20, 2019)

U-TRU-Zr metallic fuel is a candidate innovative fuel for the TRU burner. Americium (Am), one of the main targets of burning, will diffuse and form precipitates. The matrix and thermal properties of metallic fuels will change during high-temperature irradiation and annealing. In this study, the property changes of metallic fuels (including Am) were investigated by using surrogate elements. Niobium and rare earth (RE) elements were used as surrogates of U and Am. The thermal diffusivity and the electrical resistivity were measured for Nb-Zr+RE (5 wt.% of Ce or Nd) alloy specimens prepared by means of arc melting and then annealed at 400 °C.

Despite the similarity between the thermal diffusivity values, the electrical resistivity of the Nb-Zr+Ce alloy was significantly higher than that of the RE-free Nb-Zr alloy. Annealing had only a slight effect on the diffusivity, but yielded considerable improvement in the resistivity of the Ce-added specimens. The thermal diffusivity and electrical resistivity of the Nb-Zr+Nd alloy were quite similar to those of the Nb-Zr alloy, indicating that Nd had no effect on the conductivity and resistivity of Nb-Zr. Although Ce led to a decrease in the resistivity, the resistivity was rapidly improved via annealing.

Key Words : Nb-Zr Alloy, Electrical Resistivity, Thermal Diffusivity, Annealing Effects

1. Introduction

U-TRU-Zr metallic fuel is a candidate innovative fuel for the TRU burner [1, 2]. Americium (Am), one of the main targets of burning, will diffuse and form precipitates during operation. The matrix and thermal properties of metallic fuels will change, owing to neutron irradiation and annealing at high temperatures.

Thermal properties of this metallic fuel have been extensively studied, as simulations of the fuel temperature distribution require the precise thermal conductivity[2]. Post-irradiation examinations of various metallic fuel types, such as U-Zr or U-Pu-Zr alloys, have revealed that components of the fuel (especially Minor Actinides (MA) and Rare Earth (RE) elements) diffuse, thereby resulting in redistribution of the fuel matrix [3, 4].

Kim et al. have revealed the mechanism of this phenomenon[5]. The property changes caused by redistribution should be considered for precise performance simulation, but studies considering these changes are lacking.

Redistribution was mainly caused by neutron irradiation and chemical interaction between different elements. In metallic fuel, the main components, U and Zr, form a single phase at high temperatures (>700 °C), indicating that the van der Waals attraction between different elements is rather small. However, owing to a small attraction, sub-components of Am and RE will separate from U and Zr, and subsequently form an intermediate phase with plutonium, some other actinides, or another RE from fission products. Prior to loading U and Zr into a fast reactor, a U-TRU-Zr alloy forms a relatively homogeneous fuel matrix since the possible production procedure leads to quenching of the alloy [6]. The components of the metallic fuel will then diffuse slowly during the reactor operation.

Hence, chemical interactions play a key role in redistribution. In this study, Nb and RE (Ce and Nd)

* Advanced Interdisciplinary Science and Technology,
Graduate School of Engineering

** Research Institute of Nuclear Engineering

were chosen as surrogates of U and Am, owing to the similarity between U/Zr and Am/Zr interactions. The chemical interaction and thermal effect were investigated by annealing each specimen as a simulation of reactor operation.

2. Surrogate material

As in the case of the U-Zr system, a body - centered - cubic (BCC) mixture phase forms in Nb-Zr binary systems heated at high temperatures. Metallic fuel production can be performed by quenching and loading the fuel into a fast reactor. Although the U-Zr system undergoes many phase transitions, the mixture phase should be present in the U-Zr metallic fuel prior to loading.

3. Experiment

Nb-22.2Zr alloys (same atomic ratio as the U-10Zr alloy) were prepared (by means of arc melting or quenching) with 5 wt.% addition of Ce or Nd.

Two samples with the same composition were produced from each Ce- and Nd-added alloy. Each sample was polished with SiC paper into a disc ($\varnothing = 10$ mm, $h \leq 3$ mm) for measurements of the thermal diffusivity, electrical resistivity, and composition. After the first measurement of these properties, the discs were annealed at 400 °C for 36, 120, and 240 h and the measurements of thermal diffusivity and electrical resistivity were then repeated.

The thermal diffusivity was measured via the laser flash method and was calculated as follows:

$$\alpha = 0.1388 * \frac{d^2}{t_{1/2}} \quad (1)$$

Where, α is the thermal diffusivity, d is the thickness of each specimen, and $t_{1/2}$ is the time corresponding to half of the maximum temperature. The thermal diffusivity under vacuum conditions at 300, 400, and 500 °C was evaluated via laser flash measurements, which lasted for nearly 4 h, i.e., for relatively shorter than the annealing time. Black bodies were obtained by spraying each specimen with graphite [7, 8].

A four-terminal method was used to assess the extremely low electrical resistivity of the alloy. The measured electric potential difference was converted into electrical resistivity and conductivity as follows:

$$\rho = F_0 \times F_1 \times F_2 \times \frac{V}{I}$$

$$= 2\pi S * \frac{t/s}{2 \ln \left(\frac{\sinh(t/S)}{\sinh(t/2S)} \right)} * \left[1 + \frac{1}{\ln 2} * \ln \left(\frac{(d/s)^2 + 2}{(d/s)^2 - 2} \right) \right] * \frac{V}{I} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

Where, σ is the electrical conductivity, ρ is the electrical resistivity, S is the distance (0.26 cm) between terminals corresponding to the measured potential difference, t and d are the thickness and diameter of the sample, respectively, V is the potential difference, and I is the current (0.3 A) [9]. The potential difference was measured at both surfaces of each disc. The electrometer and current were corrected before starting the measurement of each disc.

4. Results

4.1 Thermal Diffusivity

Figs. 1 to 3 show the thermal diffusivity of Nb-22.2Zr+RE (5 wt.% of Ce or Nd) for each disc at 300, 400, and 500 °C. Uncertainties of 5% were employed. At 300 °C, similar diffusivities were obtained for all specimens, except for the relatively high diffusivity of the Ce-added Nb-Zr alloy. The diffusivity of another Ce-added specimen was almost the same as that of the RE-free and Nd-added alloys and the diffusivity of Ce was lower than that of the Nb-Zr alloy. These results indicated that the high diffusivity of the Ce-added alloys lies within the measurement uncertainty. At 400 °C, consistent diffusivity was obtained for all the discs, but the results at 500 °C indicate an effect of RE addition, as

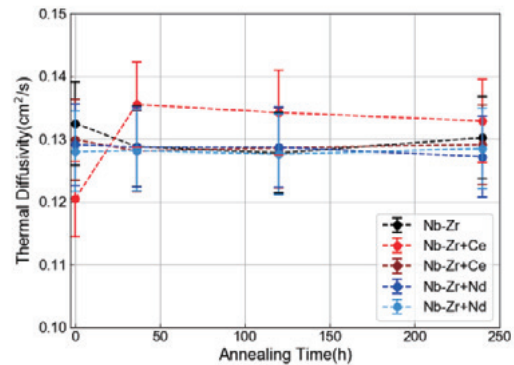


Fig. 1 Dependence of the thermal diffusivity at 300 °C on the annealing time. Error bar corresponds to $\pm 5\%$

evidenced by the relatively large discrepancy obtained. However, the diffusivity of each sample varied inconsistently with the annealing time, i.e., the diffusivity measurement revealed no dependence of diffusivity on annealing time and RE addition.

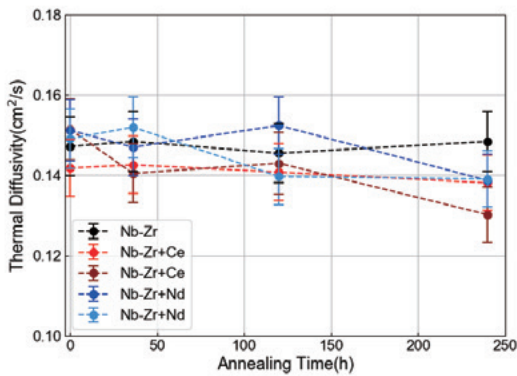


Fig.2 Dependence of the thermal diffusivity at 400 °C on the annealing time. Error bar corresponds to $\pm 5\%$ of the value

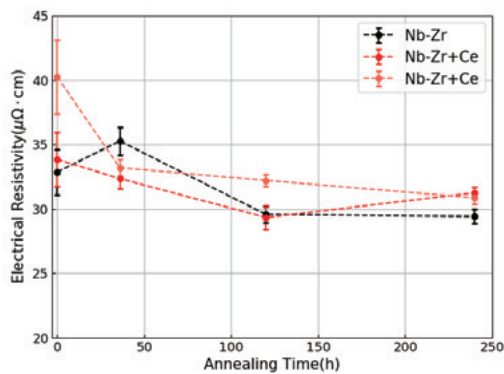


Fig.3 Dependence of the thermal diffusivity at 500 °C on the annealing time. Error bar corresponds to $\pm 5\%$ of the value.

4.2 Electrical Resistivity

Figs. 4 to 6 show the dependence of the electrical resistivity and conductivity at room temperature on the annealing time of each sample. The corresponding uncertainties were associated with the measurement points of each disc and contact situation. The resistivity of the RE-free and Nd-added alloys exhibited almost the same dependence on the annealing time, but the resistivity of the Ce-added alloy exhibited a different dependence. In one case, the conductivity was relatively lower than that of the RE-free alloy and was rapidly improved after 36 h of annealing. However, in the other case, the conductivity of the sample in the quenched

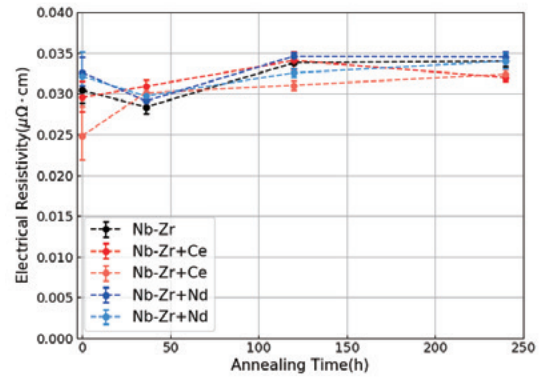


Fig.4 Dependence of the electrical resistivity on the annealing time of the Ce-added alloys. The error bars indicate the population variation statistically estimated from the measured value

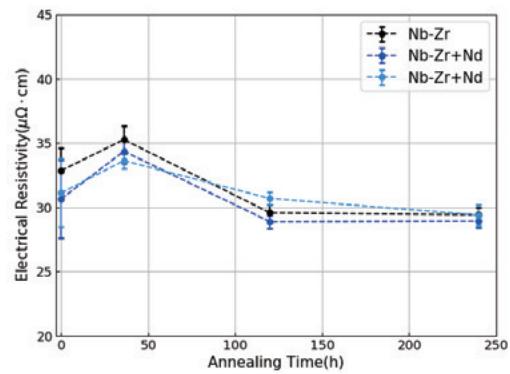


Fig.5 Dependence of the electrical resistivity on the annealing time of the Nd-added alloys. The error bars indicate the population variation statistically estimated from the measured value

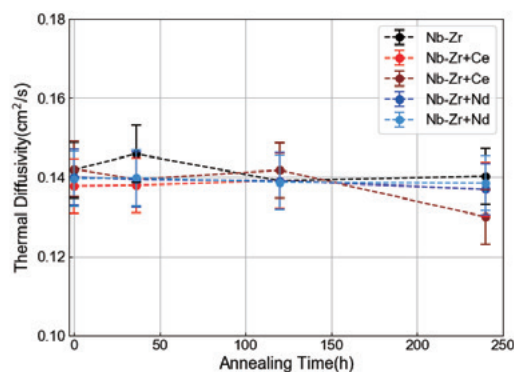


Fig.6 Dependence of the electrical resistivity on the annealing time of the Nb-Zr+RE alloys. The error bars indicate the population variation statistically estimated from the measured value

condition was almost the same as that of the other specimens.

4.3 Compositional Chages

Fig. 7 shows the content map obtained from SEM-EDS analyses of the Nb-Zr+Ce alloy (uncertainties were estimated from the measurement points and the SEM-EDS system). This map revealed a heterogeneous distribution of Ce (ranging from 1.5 wt.% to 4 wt.%) through the surface, indicating quite low solubility of Ce in the Nb-Zr alloy. Fig. 8 shows the compositional changes in each RE at the surface of each disc. As shown in the figure, the Ce content of the Ce-added alloys changed only slightly, whereas the Nd content of the Nb-Zr+Nd alloy increased significantly (from 2.5 wt.% to 4.2 wt.%). The difference between Ce addition and Nd addition may have resulted from the solubility difference of these metals. Massalski reported that, at 2640 K, the maximum solubility of Ce in Nb is 2.0 wt.%, whereas the solubility of Nd remains unknown [10]. However, similar trends observed for the RE solubility in other d-transition metals indicate that the maximum Nd solubility in Nb would be <1.5 wt.% at high temperatures. Mattern reported solubility values of ~12 wt.% at 1000 K and 7.7 wt.% at 1700 K for Ce and Nd, respectively, in solid Zr [10, 11]. From those published data and our SEM-EDS analyses, Ce and Nd solubility in Nb-Zr alloy was estimated as 2 wt.% to 3 wt.% and ≤ 2 wt.%, respectively. This suggested that, for RE amounts exceeding the solubility limit, the Nb-Zr alloy was unstable and excess RE diffused toward the grain boundary, thereby leading to equilibrium of the alloy.

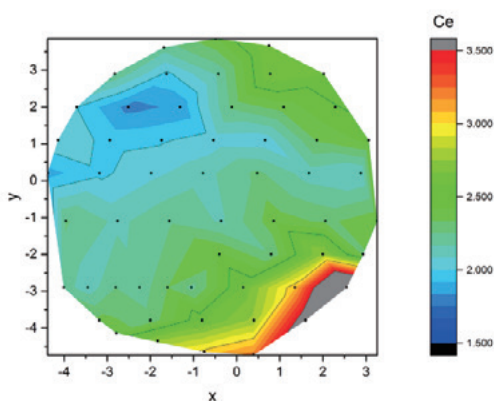


Fig. 7 Ce content map of the disc surface

5. Discussions

The electrical conductivity and compositional changes exhibited strong dependences on the annealing time, whereas the thermal diffusivity exhibited no dependence.

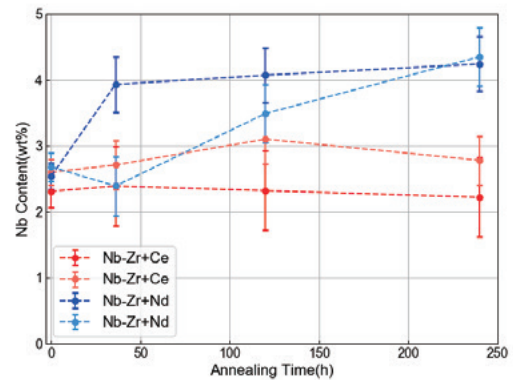


Fig.8 Dependence of RE on the annealing time at the surface. Error bar includes uncertainties associated with SEM-EDS and different areas of the sample.

The decrease in the electrical conductivity may have resulted from: (1) the shape of the sample, (2) the precipitation of oxide products, and (3) an increase in the amount of electron scattering induced by RE precipitation. The specimens were prepared via arc melting, where each specimen was polished from a button into a disc shape and, thus, different disc shapes were obtained. However, a correction was performed in order to obtain a finite disc shape of the specimens, based on the measured size. The conductivity varied with the shape of the samples. Furthermore, oxide products could be precipitated from RE, owing to the high reactivity of these elements. To verify this hypothesis, one of the Ce-added alloys was re-measured after polishing one side of the specimen with #2000 SiC paper. The re-measurement results were almost identical to the previous set of results. Therefore, the decrease in conductivity was attributed to an increase in the amount of electron scattering induced by RE precipitation (see point (3) from above).

We tried to determine the correlation between the compositional change and the electrical conductivity. Nb has the highest thermal conductivity of the elements considered in this experiment and, hence, we assumed that the Nb content at the surface is correlated with the conductivity. However, the results obtained for the compositional changes at the surface revealed that Nb is more distributed on the Ce-added alloy than on the Nd-added alloy. In addition, the maximum Nb concentration was realized after 120 h of annealing, although the electrical conductivity remained unchanged from the quenched state. This indicated that the Nb at the

surface had no correlation with the electrical conductivity. Similarly, the concentrations of Zr and RE were uncorrelated with the conductivity. That is, the Zr concentration differed significantly among the specimens, but the conductivity of the Nd-added alloy improved only modestly, whereas the Ce concentration changed only slightly, but the conductivity improved rapidly and significantly. We also considered the solubility difference. As previously mentioned in section 3.3., compared with Ce, Nd would have a relatively lower solubility in Nb and, hence, the main Nb-Zr phase contained a low amount of Nd.

6. Conclusion

The effect of annealing on the thermal diffusivity and electrical conductivity was determined for a Nb-Zr alloy with RE addition as a surrogate metallic fuel. The diffusivity of each RE-added specimen decreased at 500 °C. However, at 400 °C, similar diffusivity values were obtained, regardless of RE addition or annealing time.

The electrical conductivity of the quenched Ce-added alloy decreased at room temperature, but improved rapidly after a short annealing. However, as in the case of the RE-free Nb-Zr alloy, annealing-induced changes in the conductivities of the Nd-added alloys fell within the uncertainty limits.

For each disc, the dependence of the compositional changes on the annealing time was investigated via SEM-EDS. Compositional changes of Nd were detected, although the changes of Ce fell within the uncertainty limit. The difference between the behaviors of the Ce- and Nd-added alloys may have resulted from the difference between the solubility of these elements in the Nb-Zr alloy.

7. Acknowledgement

This research was conducted within the nuclear system research and development program under the auspices of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) in Japan during fiscal years 2014 to 2017. The project title was “Innovative metallic fuel design and development of the production technology for TRU burning”.

References

- [1] K. Arie, Y. Tsubota, T. Oomori *et al.*, in *Proceedings of GLOBAL*. (2015).
- [2] T. Nishi, K. Nakajima, M. Takano *et al.*, "Thermal conductivity of U-20 wt.%Pu-2 wt.%Am-10 wt.%Zr alloy". *Journal of Nuclear Materials* **464** (2015). 270-274,10.1016/j.jnucmat.2015.04.043.
- [3] M. K. Meyer, S. L. Hayes, W. J. Carmack *et al.*, "The EBR-II X501 minor actinide burning experiment". *Journal of Nuclear Materials* **392** (2009). 176-183,10.1016/j.jnucmat.2009.03.041.
- [4] C. Sari, C. T. Walker, M. Kurata *et al.*, "Interaction of U-Pu-Zr alloys containing minor actinides and rare earth with stainless steel". *Journal of Nuclear Materials* **208** (1994) 201-210.
- [5] Y. S. Kim, S. L. Hayes, G. L. Hofman *et al.*, "Modeling of constituent redistribution in U-Pu-Zr metallic fuel". *Journal of Nuclear Materials* **359** (2006) 17-28,10.1016/j.jnucmat.2006.07.013.
- [6] T. Ogata, "Metal Fuel" in "Comprehensive Nuclear Materials", chap. 3. 01, Elsevier (2012).
- [7] W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler *et al.*, "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity". *Journal of Applied Physics* **32** (1961). 1679-1684,10.1063/1.1728417.
- [8] L. Vozár, W. Hohenauer, "Uncertainty of Thermal Diffusivity Measurements Using the Laser Flash Method". *International Journal of Thermophysics* **26** (2005) 1899-1915,10.1007/s10765-005-8604-5.
- [9] S. Yilmaz, "The geometric resistivity correction factor for several geometrical samples". - *Journal of Semiconductors* **36** (2015) 082001, 10.1088/1674-4926/36/8/082001.
- [10] N. Mattern, Y. Yokoyama, A. Mizuno *et al.*, "Experimental and thermodynamic assessment of the Ce-Zr system". *Calphad-Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry* **46** (2014) 213-219,10.1016/j.calphad.2014.05.002.
- [11] N. Mattern, Y. Yokoyama, A. Mizuno *et al.*, "Experimental and thermodynamic assessment of the Nd-Zr system". *Calphad-Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry* **46** (2014) 103-107,10.1016/j.calphad.2014.02.008.

酸化タービン油をろ過したメンブランパッチの色に及ぼすろ過油温の影響

本田 知己*

Influence of Filtration Oil Temperature on the Membrane Patch Color of Oxidized Turbine Oil

Tomomi HONDA*

(Received September 1, 2019)

Oxidation of turbine oil used in combined cycle power plant has become a serious problem. Oxidation of turbine oil causes varnish generation finally and affects the operation of machine. To prevent this problem, the method that can diagnose the oxidation of turbine oil at early period of oxidation is required. Authors have been clarifying the relations between color of membrane patch and degradation of lubricating oil. In this study, we investigated the effect of filtration oil temperature on the membrane patch color of the oxidized turbine oil by using a colorimetric patch analyzer (CPA) and FT-IR (Fourier transform infrared spectrometer) with cooling and heating stage. As a result, we found that high oil temperature cause oxidation products by cutting hydrogen bond. So, it became difficult to trap with membrane filter and the membrane patch color became light. Moreover, we found not only oil temperature but incubation time affects the property of oxidation products and the color of membrane patch.

Key Words : Oxidative degradation, Colorimetric analysis, FT-IR, Membrane patch, Deterioration diagnosis, Hydrogen bond

1. 緒言

機械設備は運転時間の経過とともに劣化が進行するため、劣化の度合いに応じたメンテナンスが必要である。古くは、設備は故障してから修理するという考えが一般的であったが、設備の大型化や複雑化により故障による生産停止、動作精度低下などが大きな損失を伴うようになった。そこで、機械が壊れる前に機械部品の定期取替やオーバーホールを行い、故障を防ぐ予防保全が提案された^[1]。この場合、保全のタイミングは故障物理に基づく計算寿命や過去の事例からの経験則で決められているため、現実の寿命との間に大きなばらつきがあり、経済的・環境的観点から望ましいとは言えない。また、オーバーメンテナンスによるコストの増大や、作業者のミスや修理・復元時の忘れ事故などにより逆に故障を招く

恐れがあるといった問題も内在している。そこで、機械設備を安全に運転し続けるためには機械設備そのものを劣化させないことが重要であるとの考え方から、プロアクティブ保全 (PRM: Proactive Reliability Maintenance) が提唱されている。PRMは劣化の原因パラメータを監視・診断し、故障原因を事前に除去することを目指す保全方式であり、特に潤滑油劣化の監視が重要とされている^[2]。

タービン油などの潤滑油の劣化には、基油や添加剤の酸化と水や摩耗粉・塵埃等による汚損の2つの要因によるものが多い。2つの劣化要因のうち、近年では特に火力発電におけるガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電において内的要因である酸化が問題視されている。潤滑油の主成分である炭化水素は熱や放電などのエネルギーによりアルキルラジカルを生成し、これが酸素と反応して化学的に不安定なパーオキシラジカルや過酸化物となる。続いてアルデヒド、ケトン等を生成し、重縮合を繰り返してカルボン酸やエステルを主体とする高分子量の物質に変化していき^[3]、最終

* 大学院工学研究科機械工学専攻

* Mechanical Engineering Course, Graduate School of Engineering

的にはバーニッシュ (varnish) を生成すると言われていいる。コンバインドサイクル発電では発電効率向上のため、タービン入口のガス温度が年々上昇し、タービン油の使用温度も上昇している。それによりタービン油が酸化しやすい状態になり、バーニッシュを生成する問題がクローズアップされるようになった^[4]。そのためバーニッシュによるトラブルを未然に防ぐためにはバーニッシュを前駆体 (プレカーサ) の段階で検知する必要があり、そのため、潤滑油の劣化初期段階から酸化の兆候を検知し適切に対処できる状態監視法が必要不可欠となってきた。

そこで著者らは、酸化初期段階から迅速かつ簡便に潤滑油の状態監視ができる手法の開発を目指し、油をろ過した後のメンブランフィルタの色を反射光と透過光の両方を用いて測定することで、油の酸化度を診断する方法について研究を行ってきた。第一に、従来の反射光のみを用いた方法では検出不可能であったフィルタ内に捕捉した酸化生成物も検出できることを明らかにした^[5]、^[6]。また、無添加タービン油の基油の酸化過程がメンブランパッチの色に及ぼす影響を明らかにした^[6]。これまでの研究ではろ過はすべて常温で行っていたが、本診断方法は現場での診断を目指していることから、稼働している機械設備からサンプリングしたばかりの高温の試料油と、常温まで油温が低下した試料油との色の違いを定量的に調べる必要があると考えた。実機のガスタービンで使われている油の温度は 65 - 70°C と言われている。このような高温で使われている油の中の酸化生成物は、使用中の油温でも溶けない高分子化したものと、使用中の油温では油に溶けているが試料油を取り出して室温で冷却すると油に溶けなくなるものがある。後者の酸化生成物がバーニッシュ前駆体とよばれ、その分子量は 550 - 1900 程度であることが知られている^[7]。

そこで本研究では、メンブランパッチの色に及ぼす過油温の影響を明らかにするために、酸化したタービン油をろ過する際の油温とメンブランパッチの色との関係について詳細に調べた。また、各油温におけるメンブランパッチの色の違いを酸化生成物そのものの構造の違いから明らかにするために、顕微 FT-IR (FT-IR : Fourier transform infrared spectrometer) にオプションパーツとして加熱冷却プレートを用いることで油温に伴う IR スペクトルの変化をその場分析した。それら結果から、ろ過油温が酸化したタービン油のメンブランパッチ色に及ぼす影響について明らかにし、そのメカニズムについて考察した。さらに、ASTM D7843^[8]で規定されているろ過方法の妥当性についても併せて検証した。

2. 試験装置

2.1 ろ過装置

ろ過装置を Fig. 1 に、ろ過に用いたメンブランフィルタを Table 1 および Fig. 2 に示す。メンブランフィルタは直径 25 mm、厚さ 0.125 mm、孔径 0.8 μm のセルロースアセテート製であり、ろ過方向に複雑な網目構造を有している。ここで、ろ過後のメンブランフィルタをメンブランパッチと呼称する。メンブランパッチの作製手順を示す。まず、メンブランフィルタをファンネルと吸引容器の間に固定する。その後ファンネルに試料油 25 ml を注入し、真空ポンプにより減圧ろ過を行う。ろ過後のメンブランパッチから油分を取り除くため、石油エーテルでファンネルとパッチをリンスし、さらにファンネルを外しフィルタの縁から石油エーテルを滴下する。最後に、メンブランパッチを取り外して 50 °C に設定したホットプレートに乗せ、石油エーテルを再度滴下後 10 分間乾燥させる。

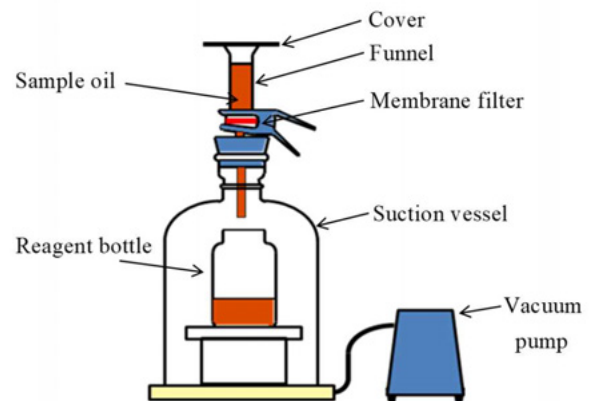


Fig.1 Filtering equipment.

Table 1 Details of membrane filter.

Material	Cellulose acetate
Pore size, μm	0.8
Diameter, mm	25
Thickness, mm	0.125

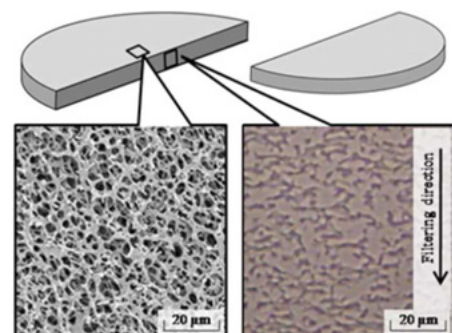


Fig.2 Magnified image of membrane filter.

2.2 色相判別装置 (CPA)

メンブランパッチの色を測定するために著者らが開発した色相判別装置 (CPA: Colorimetric Patch Analyzer) を用いた。CPA の測定原理を Fig. 3 に示す^[9]。CPA はメンブランパッチに白色光を投射し、その反射光からメンブランパッチ表面で捕捉された汚染物の RGB 値を、透過光からメンブランパッチ表面および内部で捕捉された汚染物の RGB 値をそれぞれ測定し、独自の色パラメータである最大色差 (MCD: Maximum color difference) と ΔE_{RGB} を算出する。RGB 値は 0-255 の 256 段階で表され、黒は (0, 0, 0) で白は (255, 255, 255) である。最大色差は RGB 値における 2 色間の最大差であり、試料油の劣化要因を大まかに分類できる^[10]。最大色差が大きい場合、劣化の主要因は酸化であり、メンブランパッチの色は茶系色となる。最大色差が小さい場合、メンブランパッチの色は黒系色、灰色系、白系色である。黒系色、灰色系の場合、劣化の主要因は固形粒子による汚損であり、白系色の場合は劣化の進んでいない正常な潤滑油である。 ΔE_{RGB} は白 (255, 255, 255) と測定されたメンブランパッチの色との距離であり、式 (1) で表される。メンブランパッチの色は試料油が汚染されているほど濃色化するため黒 (0, 0, 0) に近づき、 ΔE_{RGB} の値は大きくなる。よって ΔE_{RGB} の大小から試料油の汚染度を推定できる。

$$\Delta E_{\text{RGB}} = \{(255-R)^2 + (255-G)^2 + (255-B)^2\}^{0.5} \quad (1)$$

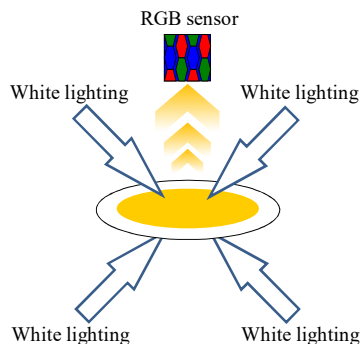


Fig.3 Measurement principle.

3. ろ過試験

3.1 試料油

試料油はグループ II の鉱油を基油とする添加剤入りタービン油の新油を実験室にて強制的に酸化させた酸化油である。タービン油の酸化には潤滑油酸化安定度試験法の一つである回転圧力容器酸化安定度試験法 (RPVOT: Rotating pressure vessel oxidation test)^[11]を用いた。本来 RPVOT は試料油の酸化の進行に

よって圧力容器内の圧力が最大値から 25.4 PSI (175.1 kPa) 低下するまでにかかる時間から酸化安定度を評価するものであるが、本研究では RPVOT 終了の基準となる圧力低下量を変更することで酸化の程度が異なる試料油を作製した。ASTM で規定されている試験条件では銅触媒を用いるが、それにより析出する酸化銅がメンブランパッチの色に影響を及ぼすため、本研究では銅触媒を除いた Table 2 の条件で試験を行った。Figure 4 に銅触媒を使用しない RPVOT の試験結果の一例を示す。試験時間 1200 min 付近 (圧力低下量 103 kPa 付近) から急激に圧力が低下しているが、これは試料油の酸化防止機能が失われたことによるものである。酸化による劣化の診断は劣化の初期段階での検知が望まれるため、急激に圧力が低下する以前の期間における 3 点 (圧力低下量 34.5, 68.9, 103 kPa) で RPVOT を終了した。それぞれの試料油を Sample oil I, Sample oil II, Sample oil III とする。

Table 2 Physical properties of non-additive oil.

Sample oil, g		50±0.5
Distilled water, ml	Sample beaker	5
	Pressure chamber	5
Temperature, °C		150
Rotational speed, rpm		100±5

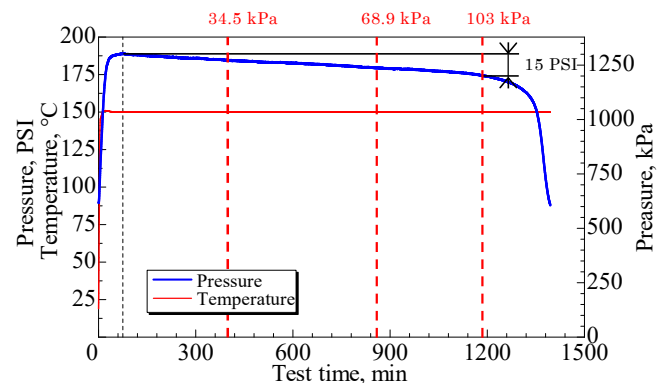


Fig.4 RPVOT test result without copper catalyst.

3.2 試験方法

本試験では RPVOT で一度に作製可能な酸化油の量とろ過に必要な試料油の総量の関係から、1 試料油につき 5 回の RPVOT が必要となる。そこで 5 回の RPVOT で作製した酸化油を混ぜ合わせ、試料油の性状を均一にするためにホットプレートスターラで大気中にて 100 °C まで加熱・攪拌し、そのまま 1 時間保持した。その後加熱をやめ、油温の低下とともに 80 °C から 20 °C まで 10 °C ごとにろ過を行い、メンブランパッチを作製した。本試験ではろ過時の油温低下を少なくするため、ファンネルに試料

油を 15 ml 入れ、10 ml ろ過し終えたところで一度真空ポンプを止め、そこに残りの 10 ml を加えてろ過した。

3.3 試験結果

それぞれの油温における試料油とメンブランパッチの画像を Table 3, 4 に示す。いずれも一定の撮影条件で撮影された。ただし、CPA の透過光を用いてメンブランパッチの色を測定する場合、直接的にその外観色を表示することはできないため、Table 4 に示した外観は我々が目視で物体色を判断する場合と同様に、反射光で撮影された色であることに注意する必要がある。油温による試料油自体の色変化を目視により確認することは難しい。また、酸化の度合いが低い Sample oil I のメンブランパッチの画像からはろ過油温による色の変化を視認することは難しいが、酸化の度合いが高い試料油で作製したメンブランパッチの画像からは油温により色が徐々に変化していることが見て取れる。特に Sample oil III は、ろ過油温による影響が大きく現れている。CPA での測定結果を Fig. 5, 6 に示す。目視では変化が確認し難い Sample oil I も含め、どの試料油においてもろ過油温が低いほど RGB 値は小さくなる傾向を示し、最大色差、 ΔE_{RGB} ともに大きくなった。つまり、

Table 3 Images of sample oil.

Temp. [°C]	Sample oil		
	I	II	III
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			

Table 4 Images of membrane patch.

Temp. [°C]	Sample oil		
	I	II	III
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			

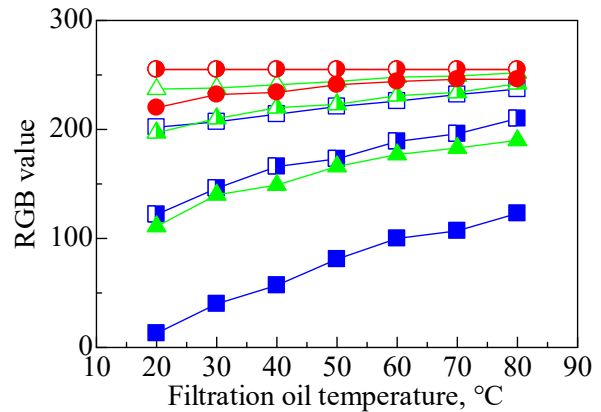


Fig.5 Relations between oil temperature and RGB values with transmitting light.

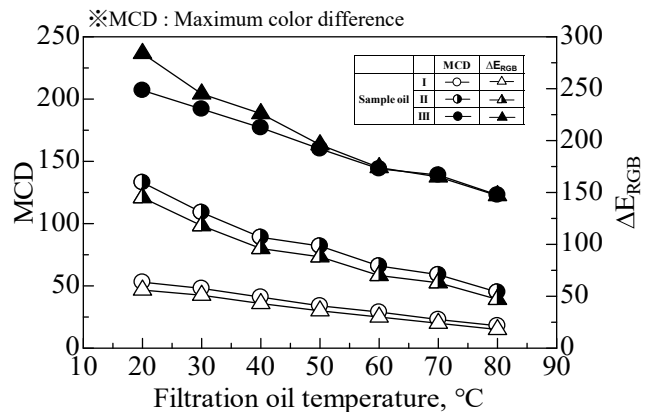


Fig.6 Relations between oil temperature and MCD, ΔE_{RGB} with transmitting light.

Sample oil Iについても油温によりメンブランパッチの色が変化していることがわかる。この結果は試料油の酸化によって生じる酸化生成物の油温による変化が影響していると考えられる。Sasaki^[7]らにより、比較的分子量の小さな酸化生成物は、油温が高い場合は油に溶けるが室温では溶けなくなることが報告されている。今回用いた試料油は酸化防止機能が失われる前の酸化初期段階のものであり、分子量が比較的小さい酸化生成物が含まれることが予想される。この現象がメンブランパッチの色に影響を及ぼしている可能性が考えられる。

3.4 メンブランパッチの表面観察

ろ過油温に伴う酸化生成物の変化を調べるために、電子顕微鏡を用いて Sample oil IIIのメンブランパッチの表面観察を行った。低温、高温で作製したメンブランパッチ表面の二次電子像を Fig. 7 に示す。すべてに共通して球状の物質がフィルタ上に捕捉されている様子が見られ、そのサイズは低温でろ過したものの方が大きい。20 °C でろ過したフィルタには球状の物質以外にフィルタ表面を覆うような物質も見られる。これは前節における室温の性状に近いものとなったためと考えられる。また、微細な物質がろ孔端部に付着しながら、徐々にその量が増加している様子が見て取れる。

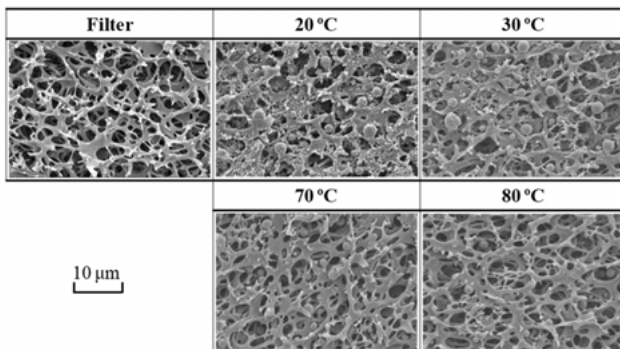


Fig.7 SE images of membrane patches (Sample oil III)

4. 試料油の性状分析

ろ過油温によるメンブランパッチの色変化の原因を調べるために、試料油の酸化によって生成された物質をガスクロマトグラフィー質量分析法 (GC-MS : Gas Chromatography Mass Spectrometry) を用いて調べた。分析に用いた試料油は Sample oil I と同様の手法で作製したものである。トータルイオンクロマトグラムを Fig. 8 に示す。比較のため、新油のクロマトグラムも併せて示す。また、同定された成分を Table 4 に示す。酸化油中から酸化防止剤である

③の成分に加え、複数の成分が検出された。ここで、④の未同定物質とは検出はされたものの装置内のデータベースに一致する成分がなく同定できなかった成分である。ここから酸化物の中でも①と⑤の生成が支配的であることがわかる。①、⑤の成分についてオンラインデータベースの Chemical Book で調べたところ、①は orange to brown, ⑤は light yellow to yellow-beige と記載されており、共に有色の酸化物であることがわかった。また、図 8 中に⑥の成分は見られないが、これは⑥の生成が極微量で鉱油由来のピークに隠れているためである。

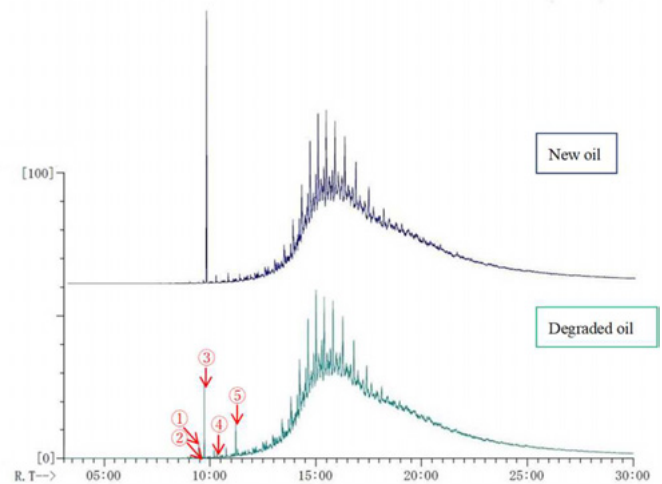


Fig.8 Total ion chromatogram.

Table 5 Detected ingredients by GC-MS.

Peak NO.	Estimated ingredient
①	2,6-Di-tert-butyl-1,4-benzoquinone
②	2,6-Di-tert-butyl-4-methylene-2,5-cyclohexadienone
③	2,6-Di-tert-butyl-p-cresol
④	Unidentified ingredient
⑤	3,5-Di-tert-butyl-4-hydroxybenzaldehyde
⑥	4,4'-ethylenbis (2,6-Di-tert-butylphenol)

5. 油温による酸化生成物の構造変化

油温の変化が酸化生成物にどのような構造変化をもたらすのかを明らかにするために、顕微 FT-IR に加熱冷却プレートを組み合わせて、油温による酸化物の構造変化をリアルタイムに分析した。赤外分光分析は分子振動をプローブとして用いるため、時間分解能が非常に高く、分子を構成している個々の官能基の配列や相互作用に高い感受性を併せ持つ。加熱冷却ステージ部の概略を Fig. 9 に示す。試料台はアルミニウム板に高さ 20 μm, 外径 9 mm, 内径 6 mm のリング状スペーサを取り付けたもので、スペーサの内径円内に試料油を 5 μL 滴下し、CaF₂ 製の蓋

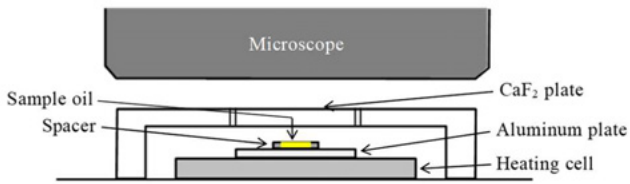


Fig.9 Schema of cooling and heating stage.

をかぶせて観察部が 80 °C になるまで加熱する。80 °C で 5 分間保持後、バックグラウンドを測定し、続いて試料の測定を行う。その後冷却加熱プレートを 70 °C に設定し、同様の手順で測定を行う。以後 20 °C まで 10 °C 毎に測定を行う。試料油は予備試験の段階では Sample oil I と同様の方法で作製した試料油を用いていたが、酸化の進行が初期段階ということもあり、明確な変化が見られなかった。そこで、油温によるメンブランパッチの色変化が大きかった Sample oil III と同様の方法で作製した試料油を調べた。分析結果を Fig. 10 に示す。酸化生成物である C=O の吸収帯 1800 - 1650 cm^{-1} において新油に存在しないピーク A, B が検出された。過去に行った基油を RPVOT で酸化させた試験や前述の GC-MS の結果から、ピーク A は基油の酸化生成物、ピーク B は Fig. 8 の⑤の成分であると考えられる。また、これらのピークの各油温における波数を表 6 に示す。ピーク A, B は共に 30 °C 以下から低波数側にシフ

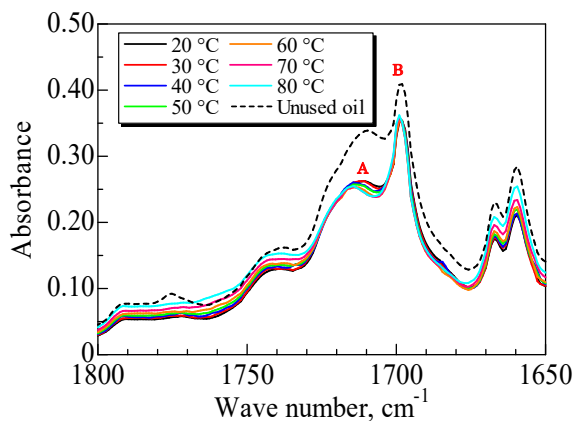


Fig.10 IR spectra of sample oils from 1800 to 1650 cm^{-1} .

Table 6 Wave number of peak A to D.

Peak	Wave number at each Oil temperature, cm^{-1}			
	20	30	40	50
A	1710.6	1711.5	1714.4	1714.4
B	1698.0	1698.0	1699.0	1699.0
Peak	Wave number at each Oil temperature, cm^{-1}			
	60	70	80	-
A	1714.4	1714.4	1714.4	-
B	1699.0	1699.0	1699.0	-

トした。低波数側へシフトした原因として水素結合の影響が考えられる。水素結合が形成されると程度は少ないが C=O の伸縮振動数は減少する^[12]。つまり、振動数と波数の関係から水素結合により低波数側へシフトすることになる。また、水素結合は温度に依存し、高温時に比べ低温時の結合強度が強くなる。今回の場合、加熱によって断たれていた水素結合が 30 - 40 °C の間で再形成されたため、30 °C 以下から低波数側にシフトしたと考えられる。水素結合の形成を確認するために 3600 - 3200 cm^{-1} におけるスペクトルを詳細に調べた。結果を Fig. 11 に示す。分子間水素結合により多量体が形成されると 3400 - 3200 cm^{-1} に幅広いピークが見られることが知られている^[13]。Figure 11 から 3400 cm^{-1} 前後に幅広いピークが存在し、温度が低くなるにつれてピーク強度が強くなっていることがわかる。特に 20-30 °C, 30-40 °C における上昇幅が大きい。このことから温度の低下による分子間水素結合の形成が示唆される。また、Fig. 10 中の破線のスペクトルは試料加熱前に室温 (20.1 °C) で測定したものであるが、一度 80 °C まで加熱し、その後油温が低下して 20 °C になった時の結果に比べてピーク A が極めて高いことがわかる。この結果から、酸化生成物の構造は室温での保持時間にも影響されることがわかる。試料油を 80 °C まで加熱することで水素結合が断たれ、油温が低下する過程で再び水素結合が形成されるが、この場合の 20 °C での測定は加熱からの経過時間が短く、加熱前の結合状態に戻るには至らなかったと考えられる。つまり、実際に機器の潤滑油の劣化診断を考えた場合、油温だけではなくサンプリングしてから分析するまでの時間も重要な因子となることが改めて明らかにされた。よってメンブランパッチの色による診断を行う際は、ろ過油温とサンプリングしてからの経過時間を一定にするか、分析前に一度加熱した後速やかに指定の温度まで冷却してからろ過することが必要であり、このような測定手順の

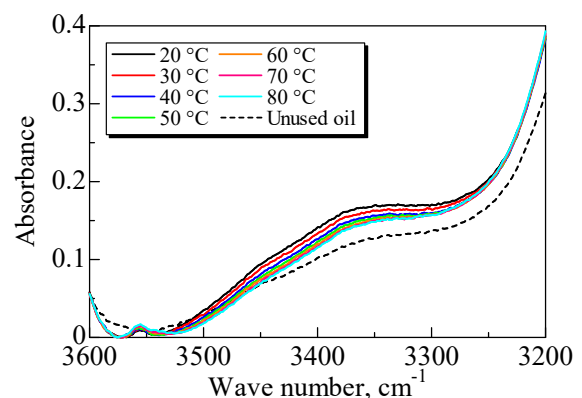


Fig.11 IR spectra of sample oils from 3600 to 3200 cm^{-1} .

統一によって信頼性の高い診断が行えると言える。
したがって、診断のための測定手順書にはこれらの情報を記録する項目が必須である。

6. 結 言

油をろ過することで得られるメンブランパッチの色に及ぼすろ過油温の影響について調べた結果、以下の結論を得た。

タービン油の酸化によって有色の酸化物が生成されるが、油温が高い場合は酸化生成物の分子間の水素結合が断たれ、メンブランフィルタで捕捉されにくくなるため色が薄くなる。一方、温度が低い場合は、断たれていた酸化生成物の分子間水素結合が形成されることによりメンブランフィルタで捕捉されやすくなるため色が濃くなることを明らかにした。同時に、油温だけでなく室温になってからの保持時間も酸化物の性状に影響を及ぼすことを見出した。したがって、メンブランパッチの色による診断を行う際は、ろ過油温とサンプリングしてからの経過時間を一定にするか、分析前に一度加熱した後速やかに指定の温度まで冷却してからろ過することが、潤滑油の劣化診断結果の定量性を保証するため必要不可欠である。

謝 辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C) (19560139) の助成を受けて行ったものである。本研究における測定の多くは福井大学大学院生の鴻埜和樹氏(現 株式会社小松製作所)により実施された。ここに謝意を表す。また、本研究の遂行にあたり、佐々木徹氏(メインテック・コンサルタント)に多大なるご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 日本機械工業連合会・日鉄技術情報センター編：設備管理技術の新展開に関する調査報告書，平成 20 年度報告書，1 (2009).
- [2] 豊田利夫：進化する設備診断技術の世界的潮流，*Plant Engineer* Mar 2003, 15 (2003).
- [3] 日本トライボロジー学会編：メンテナンストライボロジー，養賢堂，117 (2006).
- [4] A. Sasaki, S. Uchiyama, M. Kawasaki : *J. ASTM International*, 5, 2, Paper ID JAI101419 (2008).
- [5] T. Honda, K. Tanaka, K. Kono, Y. Iwai, A. Sasaki : Development of Deterioration Diagnosis Method for the Turbine Oil by the Colorimetric Analysis of

Membrane Patches, Presented at STLE Annual Meeting, May (2013).

- [6] 今智彦, 本田知己, 佐々木徹, 松本謙司: タービン用無添加鉱油の酸化過程とメンブランパッチの色との関係, *トライボロジスト*, 61-10, 709 (2016).
- [7] A. Sasaki, H. Aoyama, T. Honda, Y. Iwai and C. K. Yong : A study of the colors of Contamination in used oils, *Tribology Transactions*, 57-1, 1 (2014).
- [8] ASTM D7843-16 : Standard Test Method for Measurement of Lubricant Generated Insoluble Color Bodies in In-Service Turbine Oils using Membrane Patch Colorimetry, (2016).
- [9] 本田知己, 岩井善郎, 佐々木徹 : 特許 第 5190660 号, (2013).
- [10] T. Yamaguchi, S. Kawaura, T. Honda, M. Ueda, Y. Iwai : Investigation of Oil Contamination by Colorimetric Analysis, *Lubrication Engineering*, 58-1, 12 (2002).
- [11] ASTM D 2272 : Standard Test Method for Oxidation Stability of Steam Turbine Oils by Rotating Pressure Vessel, (2002).
- [12] Silverstein, Webster, Kiemle 著, 荒木峻, 益子洋一郎, 山本修, 鎌田利紘訳 : 有機化合物のスペクトルによる同定法—MS, IR, NMR の併用—, 化学同人社, 80 (2006).
- [13] 中西香爾, P. H. Solomon, 古館信生 : 赤外線吸収スペクトル—定性と演習—, 南江堂, 29 (1987).

原理体験型「模擬 PET 装置」の開発

戸澤 理詞* 玉川 洋一** 小川 泉*** 中島 恭平**

Development of Principle Experience Type “Simulated PET Device”

Masashi TOZAWA*, Yoichi TAMAGAWA**, Izumi OGAWA*** and Kyohei NAKAJIMA**

(Received February 3, 2020)

PET (Positron Emission Tomography) is one of the tests to find cancer cells in the body. When a radiopharmaceutical called FDG (Fluor Desoxy Glukose) is concentrated on cancer cells, positrons are emitted from FDG and cause pair annihilation with surrounding electrons. At this time, two gamma rays with the same energy (511 keV) are emitted in the opposite direction of 180 degrees at the same time, which is called annihilation radiation. PET examination uses the characteristics of annihilation radiation to find cancer cells.

In this study, we developed a simulated device that can understand the mechanism of PET by measuring simultaneous measurement events of two detectors placed at an angle of 180 degrees.

Key Words : PET, FDG, Positron, Gamma Rays, Annihilation Radiation, Cancer

1. はじめに

筆者が所属している素粒子・原子核実験グループでは、検出器や測定回路、データ収集システムを構築するための放射線計測技術が必要とされており、放射線が検出器へ入射する時間、線源の位置、放射線のエネルギーを正確に計測することが重要となる。

一方、大学では、地域貢献活動の一環として公開講座やオープンキャンパスなどのイベントを開催しており、一般の方が大学の研究内容に触れることができるようなテーマを提供している。このようなイベントでは、一般の方の興味を引くために、体験型であることや理解しやすい内容であることが求められる。

本研究では、放射線計測において重要な、時間、位置、エネルギーを正確に計測する技術を修得するとともに、一般向けに公開できるテーマを完成させ

ることを目的として、医療分野でがん細胞を見つけるために利用されている PET 装置を取り上げ、体験することでその仕組みがわかるような模擬的装置の開発に取り組んだ。

本稿では、2章で今回取り上げた PET の原理を説明し、3章で原理を再現するために行った実験、4章で開発した模擬 PET 装置を示す。5章では、模擬 PET 装置を実際のイベントで展示した際の様子を示し、体験者に依頼したアンケートの調査結果から考察を行う。

2. PET (Positron Emission Tomography)

2.1 PET 検査の概要

PET とは、体内のがん細胞を探し出す検査方法の一種であり、医療現場では図 1 に示すような装置で検査が行われる。

他のがん検査方法である CT 検査や MRI 検査と比べ、PET 検査は一度で体全身を調べることができ、「形」ではなく「機能」の異常を診るため、臓器の形だけで判断がつかないときに有効となる。また、がんの早期発見ができるということで特に注目されている。

* 工学部技術部

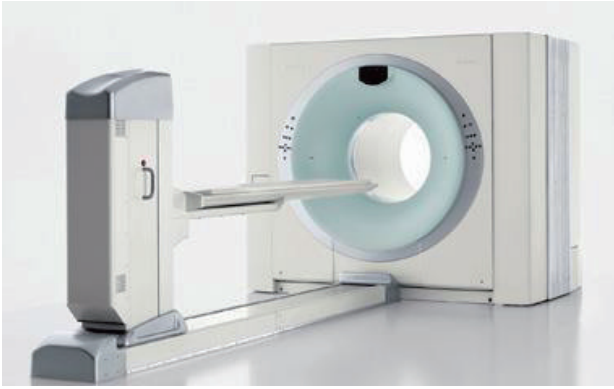
** 大学院工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻

*** 大学院工学研究科 物理工学専攻

* Technical Division

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

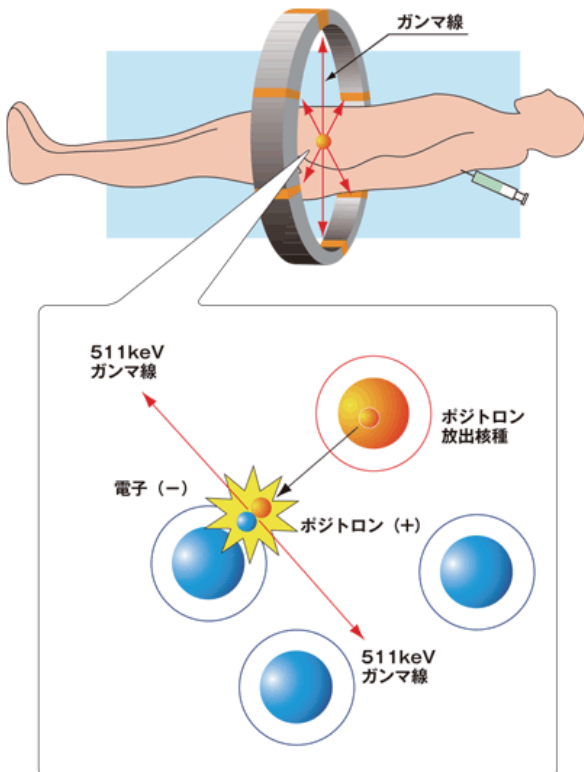
*** Applied Physics Course, Graduate School of Engineering

図1 PET装置^[1]

2.2 PET 検査の原理

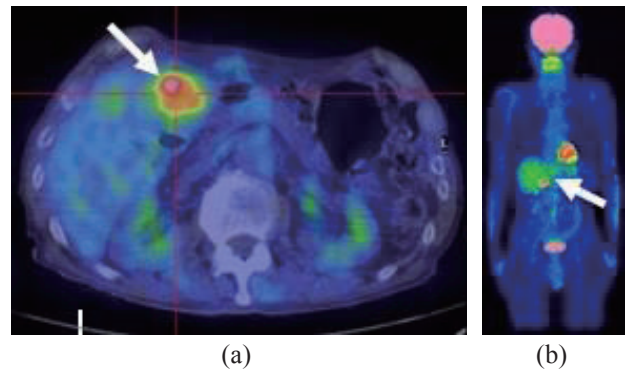
PET 検査では、陽電子放射断層撮影という方法で体内のがん細胞を探し出す。以下にその原理を示す。

がん細胞は正常な細胞より活発に活動するため、より多くのブドウ糖を取り込むという特徴がある。この特徴を利用して、ブドウ糖に陽電子放出核種を

図2 正常細胞とがん細胞の違い^[2]図3 ガンマ線の検出^[3]

結合させた放射性薬剤 (FDG) を体内に投与すると、それががん細胞に集中的に集まる (図 2)。陽電子放出核種は不安定な原子核であり、ベータプラス崩壊を起こして安定な原子核になるとともに、その過程で陽電子を放出する。放出された陽電子は、周囲の電子と対消滅を起こし、ガンマ線を放出する (図 3)。このガンマ線は、同時に 2 本、180 度反対の方向に、同じエネルギー (511 keV) を持って放出する、という特徴を持っており、消滅放射線と呼ばれている。

PET 装置には、ガンマ線を検出する多数のシンチレーション検出器がリング状に配置されており、体内で対消滅が起こると、消滅放射線が入射した向かい合う 2 つの検出器で、同時に信号が検出される。この同時計数事象を繰り返し観測することで、FDG の体内分布を画像化する。PET 検査で得られる画像を図 4 に示す。この画像から、FDG が集中している箇所がわかり、FDG を取り込んだがん細胞の位置を特定する。

図4 PET画像^[4] (a): 横断面, (b): 全身像

3. 原理の再現

前章で説明したように、PET 検査では、電子と陽電子の対消滅によって放出される消滅放射線の同時計数事象を原理として利用している。これを実験で再現するには、陽電子放出核種の放射線源に対して、検出器への入射時間、線源の位置、放射線のエネルギーを正確に計測し、消滅放射線の特徴である、同時に 2 本、180 度反対方向、同じエネルギー (511 keV) を持つガンマ線を観測する必要がある。

本研究の実験条件を 3.1 節に示し、時間、位置、エネルギーのそれぞれについて行った実験の内容を 3.2 節～3.4 節に示す。

3.1 実験条件

主な陽電子放出核種とその半減期を表 1 に示す。実際の検査では、受診者の被ばく線量を極力抑えるため、陽電子放出核種としては、半減期の短い ^{18}F ($T_{1/2}=110$ 分) などが使用されるが、実験で使用するには非常に短いため、より半減期が長く同様の特徴を持った ^{22}Na ($T_{1/2}=2.6$ 年) を使用した。

検出器には、シンチレータと光電子増倍管 (PMT) からなるシンチレーション検出器を使用し、シンチレータには、高密度、高原子番号であることからガンマ線検出効率が低いという特徴を持った NaI(Tl) 結晶を使用した。また、計数回路には、回路モジュールの機械的・電氣的仕様を規定した NIM 規格回路モジュールを使用した。

表 1 陽電子放出核種と半減期

核種	半減期
^{11}C	20 分
^{13}N	10 分
^{15}O	2 分
^{18}F	110 分
^{22}Na	2.6 年

3.2 同時計数回路の構築

放射線の時間に関する測定として、NIM 規格回路モジュールを用いて同時計数回路を構築し、オシロスコプの表示による確認を行った。

図 5 に、構築した同時計数回路を示す。シンチレーション検出器は、光電子増倍管に高電圧を印加す

ることで動作するため、 -1350V の高電圧を印加した。 ^{22}Na 線源を挟む形で両側に検出器を配置することで、 ^{22}Na から消滅放射線が放出された場合、両方の検出器にガンマ線が同時に入射し、それぞれでアナログ信号が得られる。検出器で得られる信号を、Divider で形を保ったまま 2 つに分ける。その内 1 つは、Discriminator で閾値を超えるアナログ信号をデジタル信号に変換し、Coincidence で 2 つのデジタル信号が同時に計測された際に信号を出力するようにする。これにより、2 つの検出器で同時にガンマ線を観測する、同時計数事象のみを取り出すことができる。Divider からのもう 1 つのアナログ信号は、Coincidence 出力とタイミングを合わせるために、Delay で 100ns 遅らせる。2 つの検出器のアナログ信号を、オシロスコプの 1ch, 2ch に、Coincidence 出力を 3ch に接続した。また、信号の数を数えるため、Coincidence 出力の 1 つを Scaler に接続した。

Coincidence は、複数の入力信号に対して OR または AND を取った結果を出力するモジュールであり、今回は 2 つの入力信号に対して、OR と AND を切り替えた際のオシロスコプの表示画面を観察することで、同時計数ができているかの確認を行った。図 6 に、オシロスコプの表示画面の結果を示す。Coincidence を OR にしたときは、図 6(a), (b) のように、2 つの検出器の内どちらか一方でも放射線を検出していれば信号を出力していたが、AND にしたときは、図 6(c) のように、必ず両方の検出器で検出したときに限り信号を出力していた。これにより、同時計数回路が構築できていることを確認した。

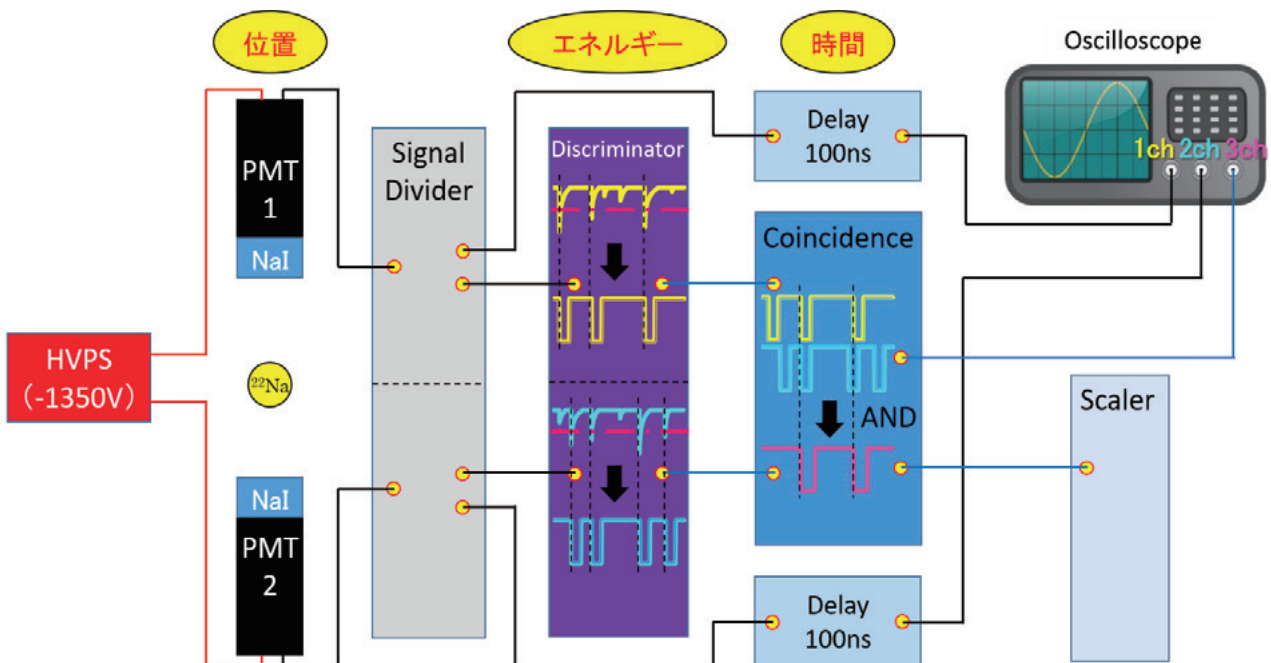


図 5 同時計数回路

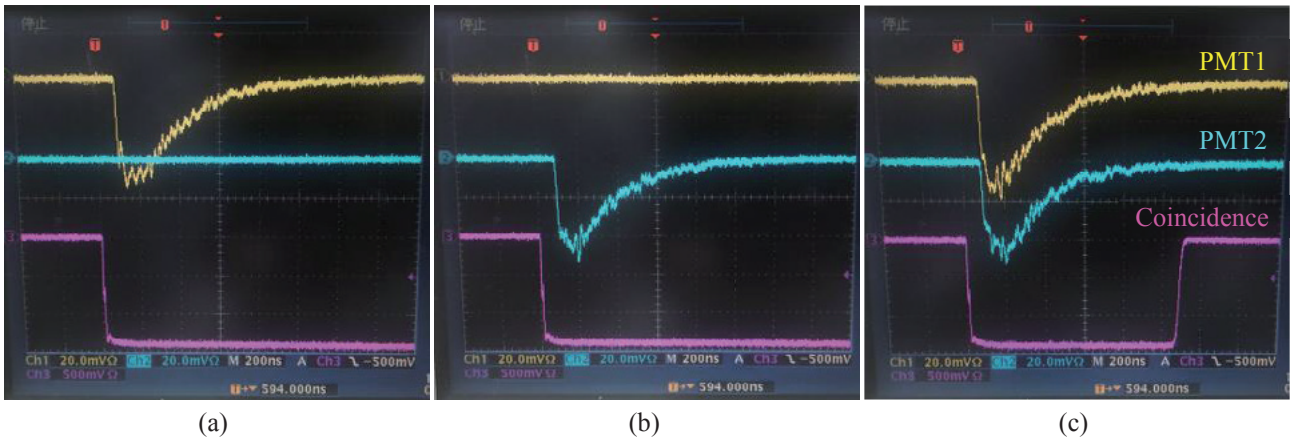


図6 Coincidence 出力に対する各検出器の出力波形 (a), (b) : OR のとき, (c) : AND のとき

3.3 角度・距離依存性の調査

放射線の位置に関する測定として、3.2 節で構築した同時計数回路を使用し、²²Na 線源に対して2つの検出器を配置する位置を変えることで、同時計数率の角度・距離依存性について調査した。

図7に、調査方法を示す。検出器1, 2のなす角度を θ 、線源と検出器の間の距離を r とする。まず、 r を 10cm に固定し、 θ を 90 度から 180 度まで変化させたときの角度依存性を調べた。その後、 θ を 180 度に固定し、 r を 7.5cm から 15cm まで変化させたときの距離依存性を調べた。各場合についてそれぞれ1分間測定を行い、Scaler で得た計数を60秒で割ることにより、計数率を求めた。

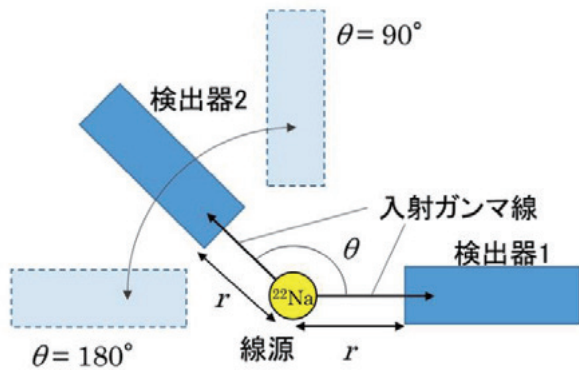


図7 角度・距離依存性の調査

r を 10cm に固定し、 θ を変化させたときの結果は、図8のようになった。プロット点に対して、

$$f(x) = N \exp \left\{ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (1)$$

でフィットを行ったところ、中心値 μ の値は 180 度となった。これは、検出器を 180 度向かい合わせの状態に置いたときに最も計数率が高くなるということであり、消滅放射線の特徴と一致する。

θ を 180 度に固定し、 r を変化させたときの結果は、図9のようになった。このとき、プロット点に対して、

$$f(x) = \frac{a}{x^2} + b \quad (2)$$

でフィットを行うことができ、線源を点線源とみなした場合、放射線強度は距離 r の 2 乗に反比例するという関係が成り立っていることがわかる。

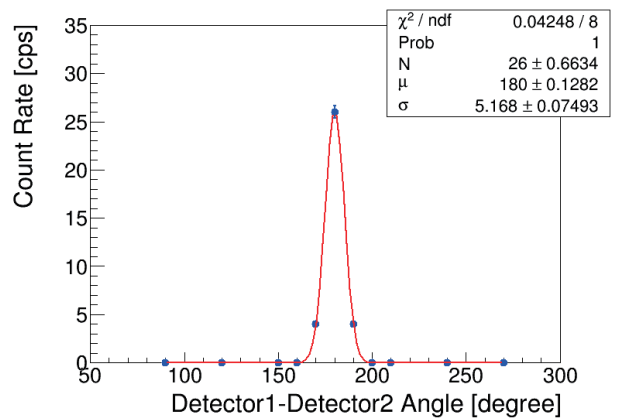


図8 同計数率の角度依存性

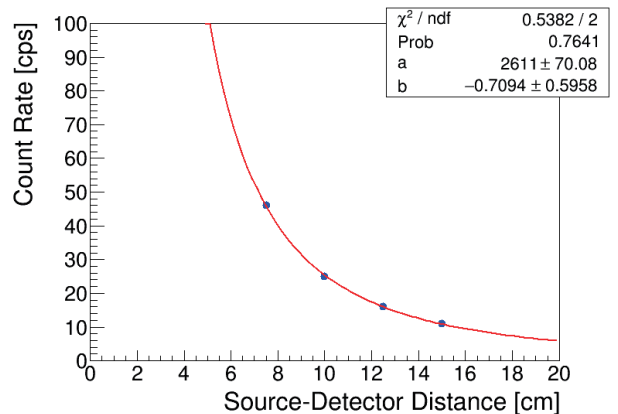


図9 同計数率の距離依存性

3.4 エネルギースペクトルの測定

放射線のエネルギーに関する測定として、エネルギーが既知である複数の線源に対してエネルギースペクトルを測定し、エネルギー較正を行った。その後、 ^{22}Na 線源に対してエネルギースペクトルを測定し、放出されるガンマ線のエネルギーが 511 keV にピークを持つことの確認を行った。

エネルギーが既知の線源としては、 ^{137}Cs (662 keV) と ^{60}Co (1173 keV, 1333 keV) の 2 種類を用い、エネルギースペクトル作成のためのデータ収集回路として、CAMAC 規格回路を用いた。また、ソフトウェアとしては、DAQ コンポーネントと呼ばれるソフトウェア・コンポーネントを組み合わせることで、柔軟な DAQ システムの構築が可能な、DAQ-Middleware^[5]を使用した。

^{137}Cs 線源から放出されるガンマ線のエネルギースペクトルを図 10 に示す。環境放射線などのバックグラウンドを、指数関数に近似できると考えると、エネルギーピーク領域はガウス関数+指数関数でフィットすることができる。

$$f(x) = N_{\text{gauss}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} + N_{\text{exp}} \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (3)$$

でフィットを行ったところ、662 keV に当たるピークの値 $\mu \pm \sigma$ は、 1873 ± 60.75 ch となった。

^{60}Co 線源から放出されるガンマ線のエネルギースペクトルを図 11 に示す。 ^{60}Co は、エネルギーピークを 2 つ持ったため、エネルギーピーク領域はガウス関数 1+ガウス関数 2+指数関数でフィットを行った。

$$f(x) = N_{\text{gauss1}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right\} + N_{\text{gauss2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right\} + N_{\text{exp}} \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (4)$$

でフィットを行ったところ、1173 keV と 1333 keV に当たるピークの値 $\mu_1 \pm \sigma_1$ 、 $\mu_2 \pm \sigma_2$ は、それぞれ 3160 ± 80.54 ch、 3568 ± 88.54 ch となった。

以上の結果から、エネルギーに対するチャンネルの値が 3 点求められ、図 12 に示すようにエネルギー較正を行った。図 12 より、3 点を通るように引いた直線の式は、

$$\text{Energy [keV]} = 0.3963 \times \text{ADC [ch]} - 80.1 \quad (5)$$

となる。

^{22}Na 線源から放出されるガンマ線のエネルギースペクトルを図 13 に示す。エネルギーピーク領域について(3)式でフィットを行ったところ、ピークの値 $\mu \pm \sigma$ は 1474 ± 53.74 ch となった。(5)式の ADC [ch] にこの値を代入すると、エネルギーの値は 504.0 ± 21.30 keV となる。よって、図 13 に見られるガンマ線のエネルギーピークは、511 keV の消滅放射線である。

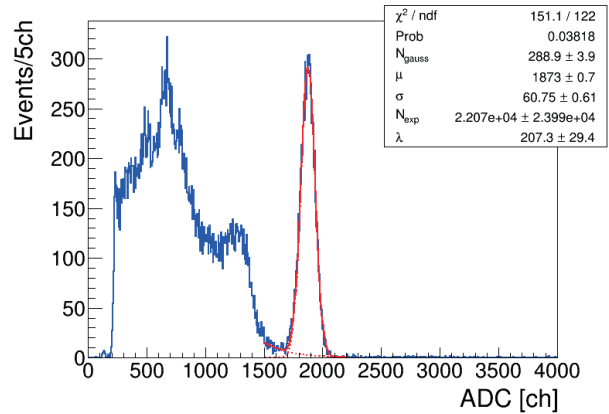


図 10 ^{137}Cs のエネルギースペクトル

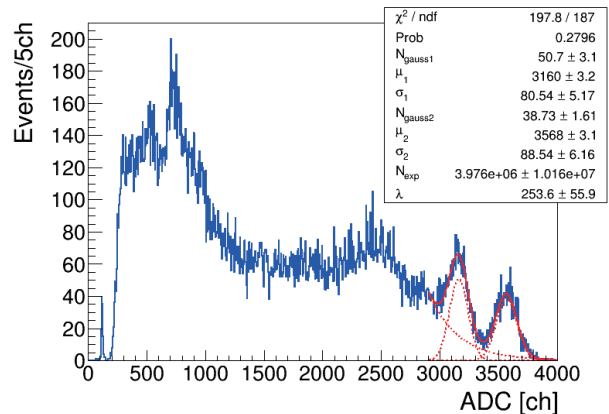


図 11 ^{60}Co のエネルギースペクトル

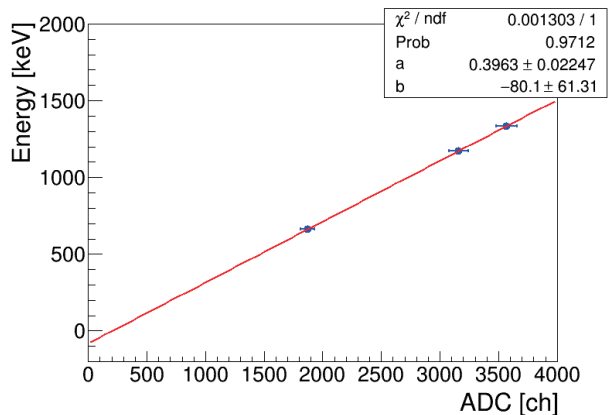


図 12 エネルギー較正

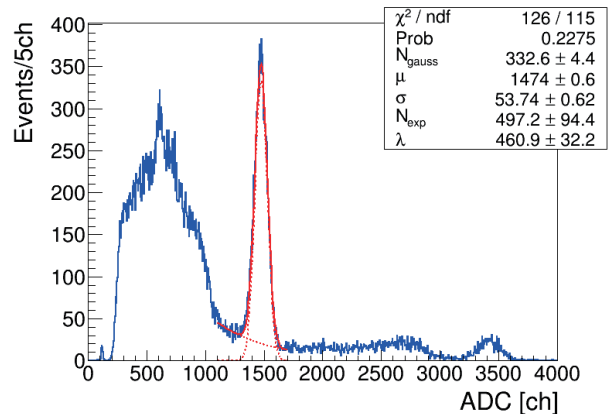


図 13 ^{22}Na のエネルギースペクトル

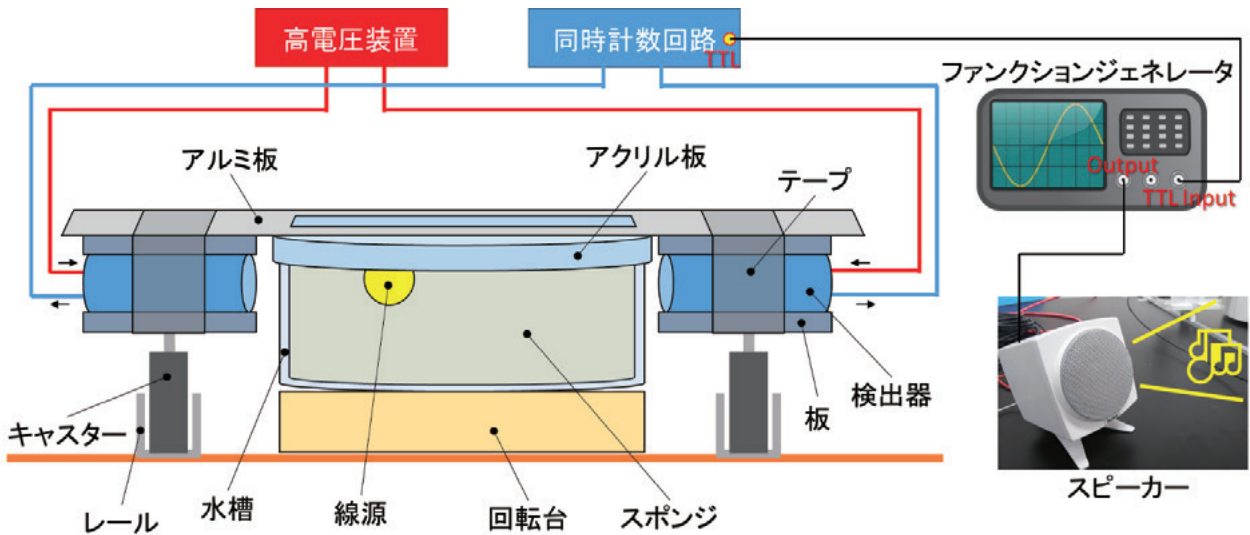


図 14 模擬 PET 装置の概略図

4. 模擬 PET 装置

模擬 PET 装置の概略図を図 14 に示す。実際の PET 装置では、図 3 に示すように、多数のガンマ線検出器が 360 度取り囲むように配置されているが、模擬 PET 装置では、回転台とレールを使用し、2 つの検出器を様々な方向から対象物へ向けることによって再現した。検出器からの信号は、3.2 節で構築した同時計数回路に接続し、消滅放射線の同時計数事象を取り出す。同時計数回路の Coincidence 出力を、ファンクションジェネレータを介してスピーカーにつなげることで、信号を音として表すようにした。

作製した装置を図 15 に示す。また、装置の操作手順を以下に示す (図 16)。

- ① がん細胞に見立てた ^{22}Na 線源をスポンジのすきまに入れ、上からふたをする。
- ② 検出器が付いた板を平行に移動する。
- ③ 信号の数が最も多くなる場所で移動を止め、板のすきまからふたの上に直線を引く。
- ④ 容器を回転して別の方向にした後、再度検出器を移動し、手順②、③を繰り返す。
- ⑤ 手順②～④を繰り返すと、直線が 1 点で交わる。
- ⑥ 直線の交点の位置に、 ^{22}Na 線源があることを確認する。

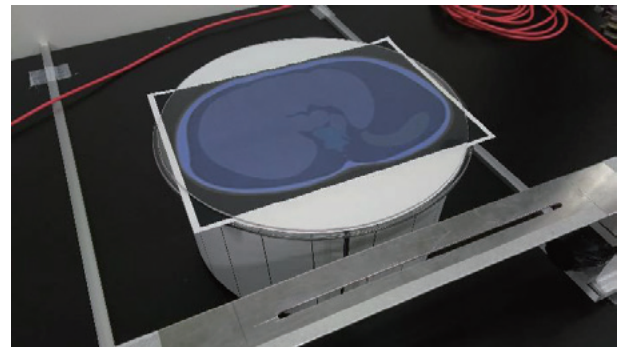


図 15 模擬 PET 装置

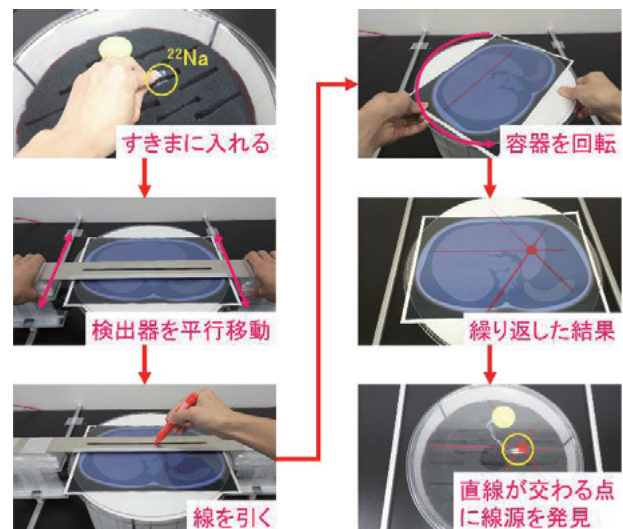


図 16 模擬 PET 装置の操作手順

5. 一般公開イベントでの展示

5.1 展示内容

作製した装置は、福井大学で開催される一般向け公開イベントにおいて、「放射線を使ったがん検診の原理を体験してみよう！～PET デモンストレータによるがん細胞の発見～」という企画名で展示を行った。イベントの様子を図 17 に示す。本イベントは、主に小中学生を対象としているため、がん細胞に見立てた ^{22}Na 線源の位置を当てるゲーム形式にすることで、子供たちの興味を引くような工夫をした。参加者は 62 名であった。



図 17 一般公開イベントでの展示

5.2 アンケート調査

参加者に向けて、今回の企画および模擬 PET 装置に関するアンケート調査を実施した。アンケートの集計結果を図 18 に示す。

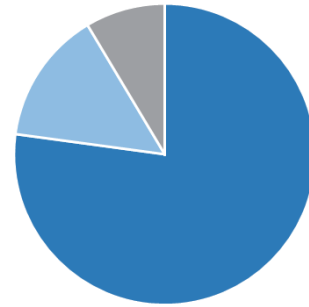
参加者の多くは小学生の親子連れであったが、図 18 の結果より、PET 検査の原理について「よくわかった」という回答が多かった。この結果より、今回作製した模擬 PET 装置は、PET 検査の原理を疑似的に体験して理解する道具として有効であると考えられる。

6. まとめ

地域貢献活動の一環として、また、研究室で必要となる放射線計測技術の修得を目的として、本研究では、放射線を使ったがん検査の一つである PET 検査を取り上げ、その原理を理解できるような体験型装置の開発を試みた。

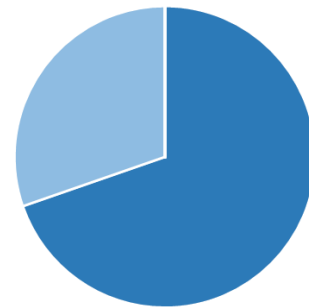
PET 検査では、陽電子と電子の対消滅によって生じる消滅放射線の同時計数を原理として利用している。本研究では、2 つの検出器を用いて、 ^{22}Na 線源から放出される放射線に対して、時間、位置、エネ

テーマ「放射線を使ったがん検診の原理」について、内容はどうでしたか？



- よくわかった
- わかった
- ふつう
- よくわからなかった
- まったくわからなかった

PET デモンストレータを動かした感想はどうでしたか？



- とてもよかった
- よかった
- ふつう
- よくなかった
- わからない

図 18 アンケート集計結果

ルギーを正確に計測し、消滅放射線の特徴をとらえることができた。

同時計数回路に接続した 2 つの検出器で、がん細胞に見立てた ^{22}Na 線源の位置を特定できるように装置を組むことで、PET 装置の原理を再現した。また、ファンクションジェネレータとスピーカーを用いることで、放射線の観測が音でわかるような工夫をした。

模擬 PET 装置は、一般公開イベントで展示を行った。参加者に対してアンケート調査を行ったところ、PET 検査の原理について「よくわかった」という回答が多く、開発した模擬 PET 装置は、PET 検査の原理を疑似的に体験して理解する道具として有効であると考えられる。

参考文献

- [1] シーメンス・ジャパン株式会社：PET/CTーより小さな腫瘍検出に PET・CT 装置 TruePoint Biograph 6/40/64, <https://www.innervision.co.jp/suite/siemens/technote/080860/index.html>, (2008).
- [2] 大分先端画像診断センター：PET の原理と仕組み, <https://www.odic.or.jp/medical/petct/>, (2019).
- [3] 浜松ホトニクス株式会社 編集委員会：光電子増倍管 その基礎と応用(第4版), 浜松ホトニクス株式会社, 285(2017).
- [4] 予防医学センター：PET 検査とは, https://aih-net.com/preventive/dock/pet_dock.html, (2019).
- [5] 仲吉一男：DAQ-Middleware 1.1.0 技術解説書, 4(2011).

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

清水 大貴* 小高 知宏* 黒岩 丈介* 諏訪いずみ* 白井 治彦**

Proposal of Web application attack detection method using machine learning

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

(Received January 27, 2020)

In this paper, we proposed two effective feature extraction methods for detecting intrusion in HTTP request sequences. We compared the classification accuracy of each proposed method using a machine learning.

Attacks on Web applications are difficult to distinguish between normal and abnormal, and mechanical detection is not easy. Therefore, we focused on the fact that attacks on various Web applications are closely related to special symbols that differ from ordinary characters.

As a result of classification using a method characterized by the number of occurrences of special symbols, the accuracy rate was about 95%. Also F-value and AUC are about 94% each.

Key words :Security, HTTP Request, Special Symbols, Machine Learning

1. 緒言

近年、インターネットの普及に伴い、web アプリケーションの利用者が増加している。Web アプリケーションのサービスは多岐に渡り、日々、様々な人々が利用している。例えば、YouTube や Gmail, Skype 等の様々なサービスが挙げられる。それらのサービスは、一般的な娯楽や利便性向上が目的の利用だけではなく、企業の業務に利用されることも多くなっている。

Web アプリケーションサービスは様々な利用者がある反面、サービスの管理者は高いセキュリティ性が要求される。サービスは常に稼働し、利用可能な状態となることが当たり前のもが多く、個人情報や社外秘となる情報も大量に扱う。しかし、Web サイトの改ざんや秘密情報の漏洩等の被害も度々報告されている。^[1] Web アプリケーションを狙った XSS(Cross-site

Scripting) 攻撃や SQL インジェクション攻撃も後を絶たず、管理者や企業全体にとって、深刻な問題となっている ^{[2],[3]}。そのため、データベースに格納されている個人情報や Web アプリケーション自体を脅威から守るために管理を徹底する必要がある。

サービスの管理者自身で施行するセキュリティ対策として、WAF(Web Application Firewall)がある。^[4] WAFとは、Web アプリケーションを含む Web サイトと利用者の間で交わされる HTTP 通信(HTTPS 通信)を検査、攻撃等の不正な通信を自動的に遮断するソフトウェアである。WAFは、現在のセキュリティツールの主流として、Web アプリケーションを対象とした外部からの攻撃の対策として、実際に運用されている。

しかし、現状運用されている WAFは、攻撃の検知方法としてシグネチャ検知を用いている場合が多い。シグネチャ検出は、攻撃を識別するルール(シグネチャ)を予め記述しておき、そのシグネチャに対してパターン照合を行うことによって、外部からの攻撃を検知している。シグネチャ検知では、ある程度の検知が可能であるが、XSS 攻撃や SQL インジェクション攻撃に用いられる入力は、正常な入力との区別が難しく、機械

* 大学院工学研究科 知能システム工学専攻

** 工学部技術部

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

** Technical Division

的な検知が容易ではない。また、シグネチャのパターン外の攻撃に対して検知は難しいことが現状である。

本研究では、様々な Web アプリケーション攻撃の検知に対応可能であり、それらに共通する特徴を用いて網羅的に検知できることを目標とする。そこで、機械学習アルゴリズムを用いるため、有効な特徴ベクトルの生成手法による検知を試みる。

本論文では、2章に Web アプリケーションの攻撃と対策を示し、3章に提案する特徴抽出手法について述べる。また、4章では、検知実験について述べ、5章で実験の結果について述べる。6章では結果について考察し、7章では本研究で提案した手法について、総括する。

2. Web アプリケーションにおける攻撃と対策

Web アプリケーションとは、ブラウザから利用可能なアプリケーションサービスのことである。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 アプリケーションに対する攻撃と、それに対する既存の対策方法について述べる。また、次章で、特徴抽出手法を提案するにあたって、本論文におけるアプローチ手法について述べる。

2.1 Web アプリケーションによる攻撃

本節では、Web アプリケーションに対する攻撃として、XSS(Cross-Site Scripting) 攻撃と SQL インジェクション攻撃を例として挙げて述べる^{[6],[7]}

XSS 攻撃 通常、Web アプリケーションにおいては、外部から入力した内容を処理し、その出力結果を Web サイトとして表示することが一般的である。しかし、外部から入力したデータが不適切であり、Web アプリケーションが適切に処理をせず、間違った HTML 生成を行う問題がある。この問題を Cross-site Scripting の脆弱性と呼び、この問題を悪用した攻撃を XSS 攻撃と呼ぶ。

XSS 脆弱性による引き起こされる影響として、利用者に偽物の Web サイトが表示されることや、ブラウザが保存してある Cookie を不正に取得される等が挙げられる。開発者が用意したサーバ側のプログラムが、ブラウザから入力された値を、そのまま出力に悪用するため、XSS 攻撃は、HTML コンテンツ内にスクリプトを埋め込むことによって、引き起こされる。

SQL インジェクション攻撃 データベースと連携した Web アプリケーションでは、外部から入力された情

報に基づいてデータベースへアクセスするための SQL 文が生成される。この生成された SQL 文に問題があると、データベースを不正利用される可能性がある。

SQL インジェクション攻撃により引き起こされる影響として、データベース内の秘密情報の閲覧、データベース内の情報改ざん、ID とパスワードを入力しない認証回避等が挙げられる。

SQL インジェクション攻撃は Owasp Top Ten Project^[5] では最も有害な脆弱性のひとつとしてリストのトップになっている。

2.2 現状の対策方法

攻撃全体に対する現状の対策手法として、ホワイトリストまたはブラックリストを用いたパターンマッチングによる入力値検査がある。入力値検査は、正規表現などの手法を用いて行うが、想定される入力値に対してホワイトリストを定義することは難しく、正常なリクエストを異常リクエストとして検出する可能性がある。また、異常文字列を定義するブラックリストを用いた場合でも、未知の攻撃に対して検知漏れを引き起こす可能性がある。

個別の対策方法として、XSS 攻撃の対策は、攻撃者によって、入力されたスクリプトの終端記号の解釈処理をされないようにすることである。つまり、HTML が生成される際、終端記号が HTML のタグとして解釈されないように、実態参照を用いて置換を行う必要がある。また、HTML データを扱わない場合は HTML 生成の出力時にタグを全て排除することなどが挙げられる。

SQL インジェクション攻撃の対策は、データベースにアクセスする SQL 文に外部から入力したデータを扱う場合、文字列データであれば SQL エスケープを行い、数値データであるなら適切であるか確認した後に、SQL 文の生成を行うことである。また、SQL 文を予めプリコンパイルを行い、テンプレートとして使用する方法も挙げられる。

しかし、現状、これら脆弱性の対策を行うことは困難とされている。理由として、Web アプリケーションプログラムが入力データをどのように扱うか様々であるからである。そのため、対策が多岐に渡るため、容易に対策漏れを引き起こす可能性がある。

2.3 各攻撃と特殊記号の関係性

本研究のアプローチ方法として、各 Web アプリケーションへの攻撃は特殊記号と深く関係している。攻撃手法のひとつである XSS 攻撃では外部からの入力値は下記である。

表 1 各攻撃手法に出現する特殊記号

攻撃名	特殊記号
XSS	< > = . ;
SQL injection	' = +
LDAP injection	() = *
XPATH injection	' = + /
OS command injection	; / . -
SSI injection	! # - "
Directory-Traversal	/ . \

```
<script>document.cookie=' sid=ROOT'
</script>
```

入力されている特殊記号として「<」、「>」、「.」、
「=」、「'」、「/」が6つ出現している。

SQL インジェクションも同様で特殊記号が多く出現する。

```
Select * from user where username= 'admin'
or 1=1 --and password = '123'
```

入力されている特殊記号として「*」、「'」、「=」、
「-」、「スペース」の4つが出現している。

他の Web アプリケーションへの攻撃における出現が多い特殊記号を表 1 に示す。表 1 では、XSS や SQL インジェクション以外の攻撃に出現する特殊記号が多岐に渡ることを示している。つまり、特殊記号に着目した侵入検知手法を用いることで、外部からの攻撃に対してある程度の検知が期待できると考えられる。

この着目方法ならば、既知の攻撃だけでなく未知の攻撃手法に対処も期待できる。外部からの入力でも内部のシステムを動かす場合、入力に特殊記号が必要不可欠であることがほとんどである。そのため、今後、発生する可能性のある未知の攻撃に対しある程度の対処は可能であると考えられる。

3. 提案する侵入検知手法

本章では、侵入検知の概要と、2.3 節で示した、攻撃と特殊記号の関係性から提案した本手法について述べる。

3.1 侵入検知の概要

侵入検知の流れを図 1 に示す。はじめに、正常リクエストと異常リクエストから学習モデルを構築する。本提案手法では、攻撃による異常 HTTP リクエストは特殊記号の出現にある特徴があると予想した。それらの特徴を特徴ベクトルとして定量的に表現を行い、機械学習アルゴリズムを用いて学習モデルを構築する。

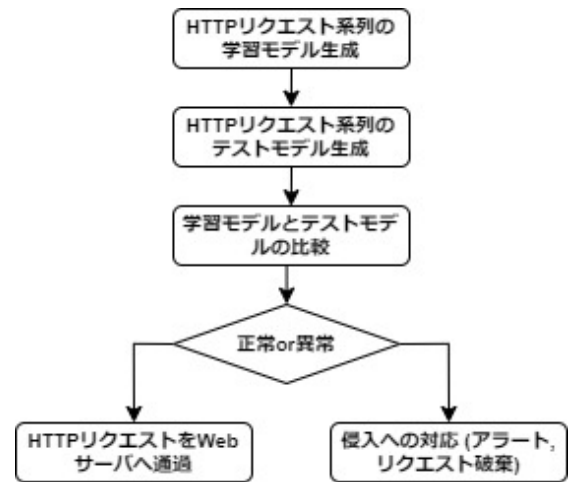


図 1 侵入検知の流れ

特徴ベクトルの作成手法は次節で、用いる機械学習アルゴリズムに関しては、4 章で述べる。

学習モデルによる十分な学習が終了すると、次に、テストモデルの構築であり、同様の手法で構築する。テストモデルは、学習モデルと異なる点として、ラベル情報を最後の正誤確認に使用されることである。

学習モデルとテストモデルの構築が終了し、次は、モデルの比較である。テストモデルのひとつが正常リクエストから生成された特徴ベクトルであった場合、学習モデルの正常リクエストから生成された特徴ベクトルと似た内容になるはずである。反対に、検査モデルのひとつが異常リクエストから生成された特徴ベクトルであった場合、学習モデルは同様に異常リクエストから生成された特徴ベクトルと似た内容になる。つまり、有効な学習が行われている場合、テストモデルの正常と異常リクエストの分類が可能である。

正常リクエストと異常リクエストを分類したあとの処理として、正常リクエストであった場合、当該リクエストを Web サーバへ通過させる。異常リクエストであった場合、異常検知として対応を行う。

3.2 モデルの構築

特殊記号は、表 2 に示している 33 種類であり、これら特殊記号の出現頻度などを特徴とした手法について述べる。

提案した手法は 2 つあり、特殊記号の出現頻度のみに着目した手法 1 と、特殊記号に加えて、英数字の出現頻度にも着目した手法 2 である。また、提案手法についての説明のため、特徴抽出対象のリクエストを以下とする。

```
http://local/page.jsp?modo=insertar&precio
=&B1=Pasar+por+caja
```

表 2 特殊記号

sp	!	“	#	\$	%	&	'	()	*
+	,	-	.	/	:	;	<	=	>	?
@	[\]	^	-	'	{		}	~

3.2.1 手法 1

表 3 に手法 1 で抽出する特徴を示す。

抽出する要素として、1 つ目は、入力項目がいくつあるかを特徴とする (x_1)。特徴抽出対象のリクエストでは、入力項目は”modo”, ”precio”, ”B1”が対応する。そのため、”3”が最初の特徴量として抽出される。

2 つ目は、表 2 の特殊記号の出現頻度である ($x_2 \sim x_{32}$)。ただし、抽出をする対象は、リクエストの URL 部を除いた部分と、各パラメタを区別するための記号である”=”, ”&”以外の特殊記号である。つまり、特徴抽出対象のリクエストでは、出現してる特殊記号は、”+”が 2 個である。他の特殊記号は、出現していないとして、”0”として抽出される。表 4 に生成された特徴ベクトルを示す。2 列目が対応している特殊記号を示し、3 行目は、対象のリクエストから抽出された特徴量を示している。

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 は、手法 1 に加えて、英数字の出現頻度も特徴とする ($x_{33} \sim x_{95}$)。英数字は、大文字の A~Z, 小文字の a~z, 数字 0~9 の計 62 である。特殊記号と同様の抽出を行う。例えば、”a”は、6 個出現、”b”は 0 個で、”B”は 1 個出現している。

表 3 抽出する特徴 (手法 1)

特徴	
入力項目数	
各特殊記号の出現頻度	

表 4 生成された特徴ベクトル (手法 1)

x_1	x_2	x_3	...	x_{12}	...	x_{32}
	sp	!	...	+	...	~
3	0	0	...	2	...	0

表 5 抽出する特徴 (手法 2)

特徴	
入力項目数	
各特殊記号の出現頻度	
英数字の出現頻度	

4. 検知実験

本節では、提案した手法の実験を行う。実験に伴って、用いるデータセットと機械学習アルゴリズム、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^[10]を用いる。データセットは XML で定義されており、HTTP リクエストは正常、攻撃手法とラベル付けで識別される。

データセットは、25000 の HTTP リクエストがあり、様々な Web アプリケーションのリクエストで構成される。リクエストは 8 つのクラスがあり、表 6 にクラスの種類を示す。また、リクエストはすべて GET メソッドとして統一して実験を行う。データセットから、GET メソッドのみを抽出しリクエストを 2 つに分割する。正常リクエスト 7436 と異常リクエスト 3752 を 1 つのセットとして、それぞれ dataset1 と dataset2 とする。

4.2 機械学習アルゴリズム

本実験で用いる機械学習アルゴリズムは、サポートベクタマシン (SVM) とランダムフォレストの 2 つである。

サポートベクタマシンは、線形可能なデータに対して、「マージン最大化」という概念のもと分類境界を決めることによって、一般的に高い精度をもつといわ

表 6 構成されているクラス

Class
Normal request
Cross-Site Scripting
SQL Injection
LDAP Injection
XPATH Injection
Directory-Traversal
OScommand Injection
SSI attacks

れている。¹⁸⁾ 線形分類が難しい場合、カーネル法といわれる高次元への写像を行うことによって分類を可能としている。

ランダムフォレストは、アンサンブル学習の一つであり、Leo Breiman によって 2001 年に提案された。¹⁹⁾ アンサンブル学習は複数の弱分類器によって強分類器のような識別を行う学習方法のことであり、ランダムフォレストは複数の決定木を用いて識別を行う機械学習手法である。

上記のアルゴリズムを用いて分類を行う。また、SVM は、線形 SVM とカーネル法を用いたカーネル SVM の 2 つを用いる。

4.3 評価

提案手法を機械学習アルゴリズムによって生成した分類器の性能は混同行列 (confusion matrix) によって表として要約することが可能である。混同行列を表 7 に示す。各行はテスト集合に記録された実際のクラスを示し、各列は、分類器によって予測されたクラスを示す。混同行列から様々な評価指標を導くことができる。提案した手法を評価するための評価指標を表 8 に示す。

5. 分類結果

本章では、4.1 節で述べたデータセットを用いて、検知実験を行い、その結果を示す。表 9 は、線形 SVM による分類結果、表 10 は、カーネル SVM による分類結

表 7 混同行列

	予測 ⊕	予測 ⊖
実際 ⊕	TP : True positive	FN : False negative
実際 ⊖	FP : False positive	TN : True negative

表 8 評価指標

尺度	定義・意味
正解率	$acc = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN}$
誤り率	$err = 1 - acc$
再現率	$recall = \frac{TP}{TP+FN}$
真陰性率	$tnr = \frac{TN}{FP+TN}$
偽陽性率	$fpr = \frac{FP}{FP+TN}$
偽陰性率	$fnr = \frac{FN}{TP+FN}$
適合率	$precision = \frac{TP}{TP+FP}$
F 値	$Fm = \frac{2recsl-precision}{recsl+precision}$
AUC	ROC 曲線の積分値

果、表 11 はランダムフォレストによる分類結果である。

設定したハイパパラメータは、線形 SVM では、手法 1 と手法 2 ともに $c = 0.5$ である。カーネル SVM では、手法 1 では、 $c = 5, \gamma = 0.1$ であり、手法 2 では、 $c = 50, \gamma = 0.01$ としている。ランダムフォレストでは、手法 1 と手法 2 ともに、決定木の数は 40、木の深さの最大値は 10 とした。

線形 SVM による分類結果の傾向として、手法 1 を用いた検知と手法 2 を用いた検知では、ほとんど同じ精度であった。それぞれの平均正解率も 93%程度と同程度であり、F 値や AUC も手法 1 と手法 2 では、ほとんど差異はなかった。

カーネル SVM による分類結果の傾向として、線形 SVM では精度はほとんど同じであるのに対し、異なる結果となった。手法 1 を用いた検知では、平均正解率は、94.8%程度であり、手法 2 を用いた検知では、93.3%程度と手法 1 を用いた検知のほうが精度が向上して

表 9 線形 SVM による分類結果

	手法 1		手法 2	
	dataset1	dataset2	dataset1	dataset2
正解率	0.931	0.935	0.933	0.934
誤り率	0.069	0.065	0.067	0.066
再現率	0.812	0.815	0.810	0.810
真陰性率	0.992	0.997	0.996	0.997
偽陽性率	0.008	0.003	0.004	0.003
偽陰性率	0.188	0.185	0.190	0.190
適合率	0.981	0.994	0.990	0.994
F 値	0.889	0.895	0.891	0.893
AUC	0.902	0.906	0.903	0.904

表 10 カーネル SVM による分類結果

	手法 1		手法 2	
	dataset1	dataset2	dataset1	dataset2
正解率	0.946	0.949	0.928	0.937
誤り率	0.054	0.051	0.072	0.063
再現率	0.861	0.870	0.853	0.853
真陰性率	0.991	0.990	0.972	0.980
偽陽性率	0.009	0.010	0.028	0.020
偽陰性率	0.139	0.130	0.157	0.147
適合率	0.979	0.977	0.938	0.956
F 値	0.916	0.921	0.888	0.901
AUC	0.926	0.930	0.907	0.916

表 11 ランダムフォレストによる分類結果

	手法 1		手法 2	
	dataset1	dataset2	dataset1	dataset2
正解率	0.934	0.936	0.944	0.945
誤り率	0.066	0.064	0.056	0.055
再現率	0.817	0.820	0.844	0.847
真陰性率	0.995	0.995	0.996	0.999
偽陽性率	0.005	0.005	0.004	0.001
偽陰性率	0.183	0.182	0.156	0.153
適合率	0.987	0.992	0.991	0.997
F 値	0.894	0.898	0.911	0.916
AUC	0.906	0.908	0.920	0.923

いる。また、F 値と AUC も手法 1 のほうが 2%程度向上している。

ランダムフォレストによる分類結果の傾向として、手法 1 を用いた検知より、手法 2 を用いた検知のほうが精度が向上している結果となった。手法 1 を用いた検知では、平均正解率は、93.5%程度であり、手法 2 を用いた検知では、94.5%程度となっている。F 値と AUC も、どちらも手法 1 より手法 2 を用いた検知のほうが、2%程度の差ができた。つまり、ランダムフォレストを用いた場合、カーネル SVM による分類結果とは、反対に手法 2 のほうが有効である結果となった。

6. 考察

本章では、特殊記号に着目した特徴抽出である、手法 1 と手法 2 を用いた実験の考察を示す。

手法 1 と手法 2 は、ほとんど同様であることが結果からわかる。少しの差であるが、手法 1 が手法 2 より、1%程度精度が高くなっている。全体として、90%以上であることから、手法 1、手法 2 とも有効であるといえる。実際に検出器として運用するという観点から、偽陰性率は、手法 1 では 13%程度であり、手法 2 では 15%程度である。そのため、異常リクエストを正常リクエストと誤検知を少なくする必要があるため、手法 1 を実際に検出器として選択が望ましいと考えられる。しかし、10%以上ある誤検知率を保持した状態で、運用することは難しいと考えられるため、偽陰性率を低くする改良が必要である。

本提案手法の結果において、正解率、F 値、AUC が 90%を超えており、正常リクエストと異常リクエストを分類するための特徴として、特殊記号に着目したことは、有用であるといえる。

異常リクエストを正常リクエストと誤検知してしまった攻撃は、主に XPATH インジェクション攻撃とディレクトリトラバーサルが多い傾向であった。XPATH インジェクション攻撃は、SQL インジェクション攻撃と同様に、終端記号を混入させて、その後の文字列構造を変化することが特徴的な攻撃である。そのため、SQL インジェクション攻撃の誤検知が少ないことや、終端記号などの特徴的な特殊記号が出現する攻撃であるにも関わらず誤検知が多い結果となった。

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文字列に含ませることで引き起こされる攻撃であり、パスの指定が特徴的である。この特徴は、XPATH インジェクション攻撃にも当てはまり、XPATH の指定を行うため、パス指定でよく利用される「\」が多く出現する。つまり、XPATH インジェクション攻撃とディレクトリトラバーサルの 2 つの共通点から、特殊記号「\」を含まれる攻撃においては、分類が完全にできていないといえる。また、誤検知したディレクトリトラバーサルが含まれているリクエストに関して、手法 1 よりも手法 2 のほうが多く含まれている傾向であった。理由として、誤検知したディレクトリトラバーサルが含まれているリクエストは、通常の特徴記号ではない文字列が多く出現しているものがいくつかあった。特殊記号以外の要素である英数字の出現頻度を加えた特徴抽出を行った手法 2 では、文字の並び順が考慮されていないことや、正常と異常に関係のない文字列を特徴と捉えてしまっている。そのため、ディレクトリトラバーサルが分類できなかったリクエストが増えて、手法 1 より手法 2 は少しであるが精度が低くなってしまったと考えられる。

7. 結言

本章では、Web アプリケーションに対する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、今後の課題点について述べる。

本研究では、様々な Web アプリケーション攻撃手法の検知に対応可能であり、それらに共通する特徴を用いて網羅的に検知できることを目的とした、手法の提案及び、その実装を行った。

本研究で提案した手法は、異常リクエストに多く出現する特殊記号に着目したアプローチに沿って、2 つの手法を提案した。提案手法の有用性を確認するために各手法に対して、公開されているデータセットである ECML/PKDD 2007 Discovery Challenge Dataset を用いて実験を行った。実験の結果、提案した手法 1 が侵入検知として実装できる可能性があることが実証

された。

今後の課題として、以下の点が挙げられる。

はじめに、提案した手法の改善が必要である。本提案手法は、正常リクエストと異常リクエストのある程度での分類が可能であったが、完全な分離ができたわけではない。仮に、実際の検出器として WAF に導入した場合、分類が 99% であったとしても、残り 1% の誤検知によって、深刻な被害に繋がる可能性もある。そのため、最終目標として、100% の分類を目指す必要がある。

本手法では、特殊記号に着目し、ある程度の結果であったことから、特殊記号への着目は有効であったといえる。各入力内の出現頻度について、特殊記号以外の着目する部分を加えることによって、より良い精度が期待できる。

加えて、特徴抽出後のデータに対して、加工を行うなどもある。本手法で得た特徴ベクトルに対して、そのまま加工を加えずに、機械学習アルゴリズムを用いて学習モデル生成を行っている。特徴ベクトルに加工を加えることによって、異なる結果となることがある。よい精度になるか不明であるが、本手法で得た特徴ベクトルは、"0" である要素が多くあり、冗長的となっている。この特徴ベクトルに対して、標準化や均一化といった処理を加えることによって、精度が上がる可能性がある。

次に、分類を行う際に用いている機械学習アルゴリズムに関してである。本実験では、機械学習アルゴリズムとして、SVM とランダムフォレストを用いたが、これら以外に様々なアルゴリズムが存在する。他の機械学習アルゴリズムを用いて実験を行うことによって、劇的な精度の改善とはならないが、多少の改善が期待される。

上記の課題となる事項を取り入れることにより、高い精度で正常リクエストと異常リクエストの分類が可能になると期待される。

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, <https://www.ipa.go.jp/files/000073462.pdf>
- [2] Anley C : Advanced SQL injection in SQL Server applications., <http://www.nextgenss.com/papers/advancedsqlinjection.pdf> (2002).
- [3] OWASP Cross-site Scripting (XSS). (2011).

- [4] 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版第3刷., <https://www.ipa.go.jp/files/000017316.pdf> (2016).
- [5] OWASP TOP Ten [EB/OL] (2017).
- [6] 伊波靖, and 高良富夫：サポートベクタマシンを用いた WAF への異常検知機能の実装と評価, 情報処理学会論文誌, 7-1, 1-13 (2014).
- [7] 園田道夫, and 松田健：攻撃特徴記号に基づく WAF 開発, 情報処理学会論文誌, 56-9, 1826-1833 (2015).
- [8] 栗田多喜夫：サポートベクターマシン入門, 産業技術総合研究所 脳神経情報研究部門 (2002).
- [9] Breiman, Leo : Statistics Department University of California Berkeley, Machine Learning, Springer, 45, 5-32 (2001).
- [10] Analyzing web traffic:Ecml/pkdd 2007 discovery challenge., <http://www.lirmm.fr/pkdd2007-challenge/>

加速度データからの機械学習による行動認識

北村 和也* 小高 知宏* 黒岩 丈介* 諏訪 いずみ* 白井 治彦**

A Method to Human Activity Recognition Using Acceleration Data by Machine Learning

Kazuya KITAMURA*, Tomohiro ODAKA*, Jousuke KUROIWA*,
Izumi SUWA* and Haruhiko SHIRAI**

(Received February 3, 2020)

In this paper, we proposed a method to identify human behavior using a 3-axis acceleration sensor of a smartphone. To realize context-aware services such as efficient energy-saving appliance control and elderly monitoring, high-accuracy in-home living activity recognition is essential. We tried to improve recognition accuracy by using deep learning for HAR(Human Activity Recognition).

The proposed methods are CNN(Convolution Neural Network) and lstm(Long short-term memory) methods. An experiment was performed using the HASC dataset to verify the effectiveness of the method. The HASC data set is data of three-axis acceleration. As a result of the experiment, the result using the CNN method was 95.4%, and the result using the LSTM method was 94.3%.

Key Words: Human Activity Recognition, Machine Learning

1. はじめに

スポーツの成績向上や日常生活の支援などを目的として人間の行動の分析が行われている。人間の行動を把握できることで、健康管理アプリケーション、スポーツ支援、高齢者の見守りシステムなど生活を支えるシステムに応用できる。これらのシステムに応用するためには、多種多様な行動の種類を識別し、高精度かつ高速に識別できることが求められる。また行動を理解し、行動内容や意図を把握したうえで適切な支援をする必要がある。

行動や立ち振舞を識別し理解する技術として、人間行動認識技術がある。人間の生活行動を観測し、理解できることで生活の質を向上させることが期待されている。近年、スマートフォンやスマートウォッチ

などの小型センサを搭載した機器が普及したことにより、センサで行動を計測することが容易になり、研究が盛んに行われている。

推定方法に用いるセンサは様々なものがあり、大きく分けてビデオカメラなどを用いて画像処理を使用する方法と加速度センサや角速度センサなどを使用する方法に分けられる。従来の行動認識では、SVM(Support vector machine)、ランダムフォレストなどの機械学習を利用した研究が多い^[1]。

そこで本研究では、スマートフォンの3軸加速度センサのデータから高齢者の見守りシステムや介護者の支援システムに応用できることを目的として、行動認識に深層学習を利用することで認識精度の向上を試みた。

データセットとして HASC(Human Activity Sensing Consortium) コーパスに収録されている停止、ジョギング、歩行、スキップ、階段上がり、階段下がり の6種類の行動データを用いて検証を行った^[2]。

本論文では、2章に行動認識における問題点と対策を示し、3章に提案する認識手法について述べる。ま

* 大学院工学研究科 知能システム工学専攻

** 工学部技術部

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

** Technical Division

た、4章では、提案手法の実験を行い、5章で実験の結果を述べる。6章では結果についての考察をし、7章では本研究で提案した手法について総括する。

2. 行動認識における問題点と対策

行動認識は機械による人間行動の自動認識である。近年、スマートフォンやタブレットなどのモバイル端末が多種多様なセンサを内蔵することでセンサで人の行動を計測し、行動に対するデータの取得が容易になっている。センサデータを解析することで医療やスポーツ、さらには日常生活などの幅広い分野で応用可能である。

本研究で扱う行動とは歩く、走る、止まるなどの基本的な行動である。行動情報とはセンサなどから対象とする人間の行動することによって取得できる情報であると定義する。本研究では、その行動情報としてスマートフォンの加速度信号情報に注目して、行動の種類を識別を実現することを目的とする。

2.1 行動認識技術の問題点と解決への取り組み

使用するセンサの種類や特徴量、識別するためのアルゴリズムを決定することで行動認識をすることができる。行動認識を行う場合に考える要素とそれに伴う問題点を以下にまとめる。

- 認識の精度
- マルチユーザー性
- 多様性
- リアルタイム性
- 装着感や拘束性
- 導入や運用のコスト

認識の精度とは行動認識の精度である。先行研究においても精度は90%以上の研究は多く存在するが、重要な操作に使用はしにくい。また、認識エラーとしては、そもそも認識しなかったり、他の動作と間違えて認識したりする誤識別や動作していないのに認識してしまうなどが考えられ、重要なシステムに組み込んでしまうと重大な問題を起こしてしまう可能性がある。

多様性やマルチユーザー性については、認識できる行動数をより多く対応することが好ましい。また、単一の行動だけを識別するのではなく、複数の行動を同時に識別できることが求められる。一般に識別で

きる行動の多さやユーザ数が多くなるほど識別精度は低下する。

リアルタイム性では、一般に認識は動作終了後に過去の一定時間間隔のセンサ情報を使用し特徴量抽出を行う。つまり、実際の動作からコンピュータが認識するまでにはラグが存在し、それが使用するユーザにとってはストレスになる場合がある。このタイムラグをどれだけ減らすことができ、リアルタイム性を確保できることが重要である。

装着感や拘束性は、行動認識では身体に複数のセンサデバイスを付けて計測することが一般的であり、拘束性が問題であった^[3]。しかしスマートフォンの登場でそれらの問題はかなり減少されている。

導入や運用コストは、設置型のセンサや装着型のセンサでは導入するまでの労力やコストがかかっていたが、スマートフォンなど既存のものにセンサが組み込まれたデバイスを用いることによって導入コストは格段に下がった。

2.1.1 機械学習を用いた行動認識手法

ウェアラブルセンサとIoTデバイスの増加に伴い、ユーザの行動データというものをリアルタイムで収集する傾向が高まっている。ロジスティック回帰、決定木、ランダムフォレスト、隠れマルコフモデルなどのアルゴリズムを使用して、行動認識の認識精度で大きな進歩を成し遂げてきた^{[4][5]}。このように、機械学習を用いた行動認識手法は多く存在し例えば、ランダムフォレストを利用した人間行動認識を行っており、複数の独立したランダムフォレストの分類器を統合しより安定し正確で高速な分類器を構築している^[6]。実験結果では、93.44%の精度で19個の行動を正しく認識している。

また、ウェアラブルデバイスでの行動認識に畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を多く用いている。CNNは、ローカル情報からグローバル情報への重みを共有することでシーケンス全体をモデル化し、一連の畳み込み演算を通じて階層層で抽象的な機能を抽出し、潜在的な機能をキャプチャするための生データの信号を処理することができる。CNNを用いた研究では行動認識の特徴量を自動的に抽出することで効率的に認識が行えるものを提案している^[7]。畳み込み処理により得られる局所的な特徴やプーリング処理により、積み重ねにより得られるさまざまなスケールの特徴が行動認識において重要であることを強調し、主に画像認識で利用されてきた畳み込みニューラ

ルネットを時系列データから成るセンサデータに対して適用する方法を提案しその有効性を検証した。

3. 提案する行動認識手法

3.1 行動認識における畳み込みニューラルネットワークの利用

一般に、CNN は画像データや動画データ等の多次元データを対象に利用することが多い。これは、画像の局所的な特徴量を学習できるため画像認識や物体認識に有効であることが知られている。先行研究では、行動認識においても親和性が高く、認識精度も高いことが示された^[7]。しかし、ニューラルネットへ信号を入力するたびに2次データに変換する計算コストが必要となり、計算能力の低い端末の場合、実際の運用には適さない可能性がある。

そこで、1次信号を2次信号に変換することなく入力する1D CNNに着目した。1D CNNの畳み込み層は入力と同じく1次元の畳み込みフィルタを用いて時間方向へスライドさせる演算を行う。基本的には通常のCNNと同様に実装することができる。

3.2 行動認識におけるリカレントニューラルネットワークの利用

上記のCNNは、局所的な周波数帯域での特徴量に適合している。本研究で扱う行動データは3軸の加速度信号データであり時系列データである。時系列データに対する深層学習では時間関係の特徴を抽出することができるRNN(リカレントニューラルネットワーク)よく用いられる。また、LSTM(Long Short Term Memory)は、過去のタイムステップを長期間保持することができる特性があり、このLSTMを用いることでより精度のよい行動認識モデルが期待できる。

4. 実験

本節では、提案した手法の実験を行う。実験にともない用いるデータセットと深層学習モデルについて述べる。

4.1 用いるデータセット

この節では、使用するデータセットの説明をする。データセットは、スマートフォンによって収集された3軸加速度センサを用いたデータであるHASCコーパスを用いる。

このデータセットの対象としている行動は、停止(stay)、歩行(walk)、ジョギング(jog)、スキップ(skip)、

階段を上がる(stUp)、階段を下る(stDown)の6種類であり、それぞれの3軸加速度信号データ(csv)、メタデータ(meta)、ラベルデータ(label)の3種類のデータ形式が記録されている。また、データセットは、大きく分けてセグメントデータとシーケンスデータに分けることができる。

セグメントデータは対象とする6種類の行動に対して一つ一つ記録しているデータである。各1回の計測時間は20秒でありサンプリング周波数は100Hzのものを用いる。1人あたりの計測回数を5セットとしている。データそれぞれ加速度データにメタデータが付与されており、メタデータには使用デバイス名、サンプリング周波数、性別、行動、身長、体重、スニーカー・サンダル・革靴などの履物、アスファルト・フローリングなどの路面状態、廊下などの場所、腰ポケット・ベルト・首・胸ポケットなどのセンサ取り付け位置、センサが固定なのか可動なのかのセンサデバイス取り付け状態の記載がされている。また、ラベルデータも付与されている。

シーケンスデータは、6種類の行動すべてが含まれた行動データである。各行動はそれぞれ5秒以上続けられておりそれが連続して行動されてひとつのデータとなっている。1回の計測時間は120秒であり、セグメントデータ同様に加速度データにメタデータ、ラベルデータが付与している。

本研究では、本データセットのセグメントデータを用いて実験を行う。セグメントデータの詳細を表1に示す。

4.2 実験に用いるモデルの構築

深層学習を用いて行動認識を行う。用いる深層学習モデルは、1次元の畳み込みニューラルネットワークである1D-CNNとRNNの拡張として登場した、LSTMを用いて深層学習モデルを構築した。

4.2.1 畳み込みニューラルネットワークによる行動認識の流れ

本研究では1次元のCNNである1D-CNNを用いて行動認識を行う。

1次元CNNは、2層の畳み込み層と1層の全結合層から構成されている。全ての畳み込み層において、1次元重みフィルタを横軸方向のみに移動して畳み込み処理を行う。それにより、各行動データごとの特徴からそれぞれの行動を識別する。1次元の畳み込みウィンドウの長さは3で元の入力と同じ長さを出力がもつように入力にパディングを行っている。

表 1 HASC セグメントデータの詳細

セグメントデータ	
一回の計測での信号	時刻 (sec)、 X 軸 (G)、 Y 軸 (G)、 軸 (G)
サンプリング周波数	20 ~ 100 Hz
対象とする行動	“ stay ”, “ walk ”, “ jog ” “ skip ” “ stair up ”, “ stair down ”
1 回の計測時間	20 s
被験者数	7 人
試行回数	540
Type	Single activity

表 2 RNN の設定

設定項目	設定値
出力層の活性化関数	ソフトマックス関数
誤差関数	クロスエントロピー関数
中間層ユニット	LSTM
最適化手法	Adam
入力次元数	3
出力次元数	6

入力データに対して 1 次元重みフィルタを畳み込みを行い特徴量を得る。次に、1 次元畳み込み層では、前の層目で取得した特徴量に対して 1 次元重みフィルタを畳み込み、新たな特徴量を得る。そして、MaxPooling を行う。最後に全結合層に与え出力層で softmax 関数を用いて算出する。

4.2.2 リカレントニューラルネットワークによる行動認識の流れ

3 軸加速度信号を入力として、各時刻の 3 軸加速度データを 3 次元の入力層と行動のクラス数に対応する出力層を構築した。中間層の各ユニットは LSTM を結合したネットワークモデルを用いる。出力層の活性化関数はソフトマックス関数を使用し、活性化関数にはクロスエントロピー関数を使用する。最適化手法は Adam を用いた。この RNN の設定の詳細を表 2 に示す。このネットワークは入力ベクトルが入力されたときに得られた出力ベクトルの要素の中で最大値を持つ要素に対応する行動を出力ベクトルとする。

5. 結果

本章では、4.1 節 で述べた HASC データセットを用いて実験を行い、CNN と LSTM を用いた手法の結

果を述べる。

5.1 畳み込みニューラルネットワークを用いた手法の結果

1 次畳み込みニューラルネットワークを用いて行動認識を行った結果を以下に示す。混合行列を表 5.1 に示す。全体の認識精度としては、95.4% となった。

最大の認識率は Stay であり、他の行動と間違えることがない。その次に認識精度が良かったのが、skip でありこれも他の行動状態と比べて行動が特徴的であるため他の行動より認識精度が高い。反対に精度が悪かった行動は、階段を下るである Stair down であり、Walk や Stair down などの他の行動と誤認識していることがわかる。

5.2 リカレントニューラルネットワークを用いた手法の結果

RNN を用いて行動認識を行った結果を以下に示す。RNN のモデルとして以下のパラメータとなった。設定したパラメータは、中間層である LSTM の数、遡るタイムステップ数、ドロップアウト率である。中間層の数は 3、遡るタイムステップ数は 30、ドロップアウト率は 50% に設定をした。表 4 に設定したパラメータをまとめる。

LSTM で行った分類結果の混合行列を表 5 に示す。全体での認識精度としては、94.3% となり、上記の CNN で行った識別とほぼ同値である。最大となった行動状態は Stay であり、その次に Skip の 94.2% である。最低の認識結果となった行動状態は、Stair up であり、CNN の場合は Stair down であったため違う結果となった。

表 3 CNN による分類結果

	Jog	Stair down	Skip	Stair up	Stay	Walk
Jog	0.950	0	0.004	0	0	0
Stair down	0.017	0.906	0.008	0.018	0	0.020
Skip	0.016	0.002	0.977	0.004	0	0
Stair up	0.017	0.045	0.006	0.944	0	0.028
Stay	0	0	0	0	1	0
Walk	0.001	0.044	0.006	0.023	0	0.950

表 4 RNN を用いた最良のモデル

パラメータ	値
中間層の数	3
遡るステップ数	30
ドロップアウトレート	0.5

6. 考察

CNN と LSTM の 2 つの手法を用いて行動認識を行ったがこの 2 つの手法は、ほとんど同様の認識結果になったことが結果からわかる。少しの差であるが、CNN を用いた手法のほうが 1% 程度高くなっている。どちらの手法も全体として 90% 以上の結果であるため有効であると言える。どちらの手法も stay の状態に対してはほとんど間違えることはない。

CNN を用いた手法は、全体として 95.4% となった。それぞれの行動について混合行列で見ると、Stair down が Walk がそれぞれ誤認識している。Jog は他の行動それぞれと少しずつ誤認識していることがわかる。

RNN を用いた手法は、全体として 94.3% になった。混合行列のそれぞれの行動についてみると、Walk が認識結果が良くない結果になっている。Walk は他の行動とそれぞれ誤認識しており、中でも Stair up や Skip に誤認識していることがわかる。また、Jog と Stair down と Skip と Stair up の間でも誤認識しあっている。歩くや走る行動状態の時、重力方向に動きが大きいとご認識しやすいと考える。

誤認識しているそれぞれの行動の元データを見ると、一般にあまり重力方向にブレない行動のとき大きなブレのある行動をしていると他の行動と誤認識していることがわかった。ここに注目して、モデルを作ればもう少し精度が高くなったと考えられる。

誤認識を少なくするには、3 軸の加速度データだけでなく、他の角速度データや音データなどを併用す

ることで誤認識は減り、認識精度が高くなったと考える。

健康管理や見守りシステムに利用することをすると、ユーザが正常な生活ができているかを判断するかが重要である。本研究で使用したデータセットである HASC コーパスは基本的な動作しか対象にしている。見守りシステムや健康管理アプリケーションに必要なのは日常生活の監視であるため他のデータセットやデータセットの拡張が必要である。

7. まとめ

本章では、加速度データからの機械学習による行動認識に提案した手法について総括し、今後の課題点について述べる。

本研究では、健康管理アプリケーションや高齢者の見守りシステムなどの生活を支えるシステムに応用される技術である行動認識技術についてスマートフォンから取得できる 3 軸加速度データを利用して分類を行いました。介護や高齢者の見守りシステムに応用できることを目的として加速度信号データから日常行動の識別を目的とした手法の提案および実装を行いました。

本研究で提案した手法は、深層学習である 1 次元の CNN である 1D-CNN を用いた手法と、LSTM を用いた手法の 2 つの手法を提案した。提案手法の有効性を検証するため人間行動理解のための装着型センサによる大規模データ構築を行っている HASC コーパスのスマートフォンから取得した 3 軸加速度データを用いて実験を行った。実験の結果、CNN を用いた手法では、95.4% であり、LSTM を用いた手法では 94.3% という結果となった。

今後の課題として以下の点が挙げられる。

はじめに、提案した手法の改善が必要である。本研究での最良の認識結果であるが 95.4% であるが、これは約 5% も誤認識をしているということである。介

表 5 LSTM による分類結果

	Jog	Stair down	Skip	Stair up	Stay	Walk
Jog	0.939	0	0.021	0	0	0
Stair down	0.017	0.936	0.011	0.027	0	0.023
Skip	0.016	0.012	0.942	0.021	0	0.019
Stair up	0.017	0.032	0.010	0.926	0	0.023
Stay	0	0.003	0	0.004	0.993	0.009
Walk	0.011	0.018	0.015	0.022	0.007	0.927

護者の支援や見守りシステムなどの基幹システムとして運用した時に、深刻な被害に繋がる可能性もある。そのため、最終的な目標としては、100%の分類精度を目指す必要がある。

本研究では、3軸加速度データを用いて行動分類を行い、行動認識に3軸加速度データを用いるのは有効だといえる。精度をよりよくすることとしては加速度データ以外のデータと併用して識別することでより良くなると考える。本研究はスマートフォンから取得した加速度データを用いたので、スマートフォンに搭載されているセンサから取得するのが妥当であろう。角速度データや音データを学習時に併用することができれば、更に用意するセンサデバイスも必要なくより良い精度が期待できる。

加えて、データセットについてである。今回用いたデータセットは6行動のデータであった。実環境における人間の行動分類としては非常に少ない。本研究の手法は、6行動の分類での分類結果でありさらに識別する行動数が増えれば精度は低下するだろう。介護や見守りシステムや健康管理アプリケーションへの応用を考えた時、重要であるのは健康に関わる行動をしているのかどうかである。それぞれの行動に対して高度の重要度を設定しアプリケーションに応用するなどの改善が必要である。

次に、分類を行ったアルゴリズムについてである。本実験ではCNNとRNNを用いたが、これら以外にも様々なアルゴリズムが存在する。他の機械学習アルゴリズムを用いて劇的な改善とはならないが多少の改善が期待される。また、今回用いたアルゴリズムを繋げてひとつの機械学習モデルにすることでよりよい結果になることも期待できる。

上記の課題となる事項を取り入れることにより、高い精度で行動認識が可能になると期待できる。

参考文献

- [1] Ling Bao and Stephen S Intille. Activity recognition from user-annotated acceleration data. In *International conference on pervasive computing*, pp. 1–17. Springer, 2004.
- [2] Nobuo Kawaguchi, Nobuhiro Ogawa, Yohei Iwasaki, Katsuhiko Kaji, Tsutomu Terada, Kazuya Murao, Sozo Inoue, Yoshihiro Kawahara, Yasuyuki Sumi, and Nobuhiko Nishio. Hasc challenge: gathering large scale human activity corpus for the real-world activity understandings. In *Proceedings of the 2nd augmented human international conference*, pp. 1–5, 2011.
- [3] 佐藤誠, 森田千絵, 土井美和子ほか. 生体データと加速度データを用いた行動認識. 第65回全国大会講演論文集, Vol. 2003, No. 1, pp. 105–106, 2003.
- [4] Jennifer R Kwapisz, Gary M Weiss, and Samuel A Moore. Activity recognition using cell phone accelerometers. *ACM SigKDD Explorations Newsletter*, Vol. 12, No. 2, pp. 74–82, 2011.
- [5] Francisco Javier Ordonez, Gwenn Englebienne, Paula De Toledo, Tim Van Kasteren, Araceli Sanchez, and Ben Kröse. In-home activity recognition: Bayesian inference for hidden markov models. *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 13, No. 3, pp. 67–75, 2014.
- [6] Zengtao Feng, Lingfei Mo, and Meng Li. A random forest-based ensemble method for activity recognition. In *2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 5074–5077. IEEE, 2015.
- [7] Jianbo Yang, Minh Nhut Nguyen, Phyo Phyo San, Xiao Li Li, and Shonali Krishnaswamy.

Deep convolutional neural networks on multichannel time series for human activity recognition. In Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2015.

VR技術を用いた人とのインタラクション シミュレーションシステムについての基礎的研究

戸田 皓* 黒岩 丈介* 小高 知宏* 諏訪 いずみ* 白井 治彦**

Implementation of Human Interaction Simulation System with VR Technology

Hikaru TODA*, Jousuke KUROIWA*, Tomohiro ODAKA*, Izumi SUWA*,
and Haruhiko SHIRAI**

(Received February 3, 2020)

In recent years, various types of robots become familiar in our living space, and they are expected to play important roles in various scenes in the future. Inspired by these situations, it is investigated that the robot's behaviors can actually affect our behavior. We consider that if a contrived experience system which can simulate the effect on us brought by the robot is implemented, it becomes easy to study appropriate robot's behaviors which are desirable for us. Therefore, the purpose of the present paper is to develop the contrived experience system based on several interaction games between an avatar and us. The system is developed on Unity, where two kinds of interaction games, (i) repetitive rock-paper-scissors game and (ii) prisoner dilemma game, are implemented. In the system, a user can freely decide the avatar's strategy of the game and the change laws of facial emotion and utterance contents. The interaction game is played in virtual reality space with fruitful presence by using Head Mount Display, providing making easier to interact between the avatar and us. In simulation experiments, we perform the repetitive rock-paper-scissors game and apply the strategy which deceives us in the decision of rock-paper-scissor. All the subjects are fooled by the avatar and are confused which is better, rock, paper or scissor. We have succeeded that the avatar's behaviors can really affect our behavior. Thus, our system is practical to simulate the effect on us brought by the robot.

Key Words : Interaction Game, VR, Human Interaction Simulation System

1. はじめに

近年、様々なロボットが登場し、ロボットが我々の生活空間中に存在することが当たり前になりつつある。例えば、言葉を発する際に人間のような口の動きや、瞬きを行うことが可能な受付案内を行うロボット「アクトロイド」、家庭用掃除ロボットの「ルンバ」な

ど他にも様々なロボットが様々な場面で人間の生活をサポートしている。また、それが次世代の産業の中心になる、と各国が研究を推し進めており、2030年には全世界で8億人がロボットに仕事を奪われる可能性さえ危惧されるほど、急速に普及している [1].

しかし、現在稼働中のロボットには人の感情を理解できるものがほとんど存在しないため、ロボット自身の振る舞いが人間に不快感を与える場合もある [2]. ロボットから人間が不快感を覚える可能性がある場面は様々な状況が想定され、例えば、ロボットの音声及要求に対する返答として適切でないことに対

* 大学院工学研究科 知能システム工学専攻

** 工学部技術部

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

** Technical Division

するストレス、自分から至近距離で大きなロボットが自律稼働することに対する恐怖、騒音に対する苛立ちなど、様々な要因から不快感を覚える可能性がある [3]。そしてこれから先、より多くのロボットが我々の生活空間中に普及することで、ロボットと我々が接する機会が増加し、我々がロボットの振る舞いからストレスを感じる機会が増加する可能性がある。

そのため、ロボットの振る舞いが人間に与える影響についても注目が集まり、研究が進められている。先行研究の一例を挙げると、シミュレーションゲーム内のエージェントの表情変化が、人間とエージェント間の協調行動に与える影響について研究したものがある [4]。この先行研究では、囚人のジレンマゲームを用いた研究を行い、エージェントの恥じらいを示す表情と悲しみを示す表情が人間に対して同じように感じ取られることや、エージェントの外見によって人間とエージェントの協力率が変化すること、それに加え、エージェントの表情によって人間の行動決定に変化が生じることが主張されている。

このようなロボットと人との間で起こるインタラクションを研究することによって、ロボットの振る舞いが人間の行動にどのように影響するかを明らかにすることが可能となる。そのため、現実世界でロボットを実際に用いて実験を行う場合に必要なスペースや費用を削減することができると考える。以上より、本研究ではシミュレーションシステムのひな型を作成するために必要な機能・実装方法を明らかにし、インタラクションゲームを用いたシミュレーションシステムを VR 技術を用いて実装することを目的とする。このようなシステムのひな型の実装が可能になれば、人とロボットのインタラクションについて様々な状況を想定し、実験条件などもユーザーが自由かつ容易に変更が可能となるため、研究の効率が上がると考えられる。これにより、ロボットの振る舞いが人間に与える影響についての理解が深まるため、ロボットの振る舞いが向上し、ロボットの振る舞いから人間がストレスを感じる機会を減らすことが可能になると考えられる。また、VR 技術を利用することによりシステムのインタラクション効果が向上し、より正確なシミュレーションが可能となる。

2. インタラクションゲームと VR 技術

2.1 インタラクションゲームとは

インタラクションとは、英語の「inter(相互に)」と「action (作用)」という 2 単語を合成したものであり、2 つ以上の存在が相互に影響を及ぼしあっていること

を意味する単語である。日常生活におけるインタラクションの一例として、人間とコンピュータのインタラクションの例を挙げると、人間がマウスやキーボードからコンピュータへ情報を入力すると、コンピュータがその入力を受けて情報を出力し、コンピュータからの出力を受けて人間も新たな入力をコンピュータへ送る、といったようなものがある。

つまり、インタラクションは身近な対人ゲームや人間同士の取引、交渉の現場、集団行動の場面で起こる協調行動等でも同様に起こる現象であり、インタラクション効果が発生する対人ゲームをインタラクションゲームと呼ぶ。具体的なゲームのルール及び、研究題材としたゲームについては以降の章で説明する。

2.2 インタラクションゲームの種類とルール

インタラクションゲームの代表的な例として、麻雀やチェス、ポーカー等のトランプゲームが挙げられる。これらのインタラクションゲームに共通している部分は以下である。

1. 相手の出し手や戦略について、盤面やルールから得られる情報が限られている
2. 必勝法が存在しない。
3. 複数人で行う。

以下に本研究で実装を行った「繰り返しじゃんけんゲーム」、「囚人のジレンマゲーム」のルールとインタラクションについて示す。囚人のジレンマゲームとは、2 人で行う対人ゲームであり、お互いのプレイヤーは信頼、裏切りの出し手を持ってゲームを開始する。そして、各プレイヤーはどちらかの出し手を選択し、相手と同じタイミングで提示する。この時の自分の出し手と相手の出し手の組み合わせで各プレイヤーに点数が加算され、この作業を複数回繰り返した後の総得点で勝敗を決めるゲームである。囚人のジレンマゲームでの得点表を表 1 に示す。繰り返しじゃんけんゲームも 2 人で行う対人ゲームであり、通常のじゃんけんを行い、勝ち、負け、あいこそれぞれで点数を付ける。そして、この作業を複数回繰り返した後の総得点で勝敗を決めるゲームである。繰り返しじゃんけんゲームの得点表を表 2 に示し、点数が 0 以下の場合もマイナスの値を更新し続けるものとする [5]。

表1 四人のジレンマゲーム点数表

		プレイヤー (P)	
		信頼	裏切り
プレイヤー (A)	信頼	P:5 点 A:5 点	P:7 点 A:3 点
	裏切り	P:3 点 A:7 点	P:4 点 A:4 点

表2 繰り返しじゃんけんゲーム得点表

勝利	敗北	あいこ
+1	-1	0

3. VR技術を用いたシミュレーションシステムの設計

3.1 要求分析

インタラクションシミュレーションシステムの実装にあたり、必要な機能とゲーム性についての要求分析を行った。

まず、必要な機能については、「VR技術を用いたグラフィカル表示に関わる機能」、「ユーザーインターフェースに関わる機能」、「アバターの振る舞いに関わる機能」、「ゲームの進行制御に関わる機能」の4つに分け、それぞれで要求分析を行った。また、ユーザーが使用する上でアバターとのインタラクションを発生させるために、アバター側の出し手戦略を工夫する必要があると考えた。これは、単調で相手に読まれやすい戦略ではインタラクションが発生しないと考えたためである。

3.2 シミュレーションシステムの設計

要求分析を元に実装で必要と思われる機能を抽出し、機能間の流れを一つのシステムダイアグラムにしたものを図2に示す。以下では、図2で示したそれぞれの機能の説明を述べる。

VRグラフィカル表示機能

VRグラフィカル表示機能の概要を図1に示す。グラフィカル表示機能はシステムがユーザーへ文字や、エージェントの状態等の視覚的情報を送信する機能であるとともに、ユーザーインターフェース機能としてボタンを表示し、ユーザーへ情報の送信を促す機能も兼ねている。ボタンはHTCViveに付属しているコントローラーを利用し、コントローラーのボタンに出し手を選択するための変数を割り当てた。尚、この設定は

Unityの設定画面上で行い、ボタンへの変数の割り当てではSteamVRを用いた。

また、VRインタラクショングラフィカル表示機能ではHMDを用いてVRインタラクション技術を利用するため、HMDを認識し、使用可能にする機能だけでなく、ゲームに必要なコントローラーの3Dオブジェクトの表示やVR視点を生成する機能も兼ねている。最終的に他の機能からデータを受け取り、その情報をディスプレイ上に表示することがこの機能の主な役割となる。本研究ではVR技術を用いるため、図内のグラフィカル表示機能にも通常とは異なる機能の実装を行った。

ユーザー出し手取得機能

コントローラーのボタンの押下が確認された後に受け取ったユーザーの出し手データをstring型の入力として受け取る機能である。

この機能で得たユーザーの出し手データは戦略決定機能、出し手決定機能、表情決定機能、得点計算機能、へ出力される。また、受け取った出し手データは、スクリプト内の配列に格納されるように実装した。

戦略決定機能

この機能は、ユーザー出し手取得機能から得たユーザーの出し手データを元に、エージェントが自分がどのような戦略で出し手を決定し、どのような出し手の組み合わせの場合にどの表情を表示するかを決定する機能である。この機能はユーザーがシステムを実行する際に自由に再

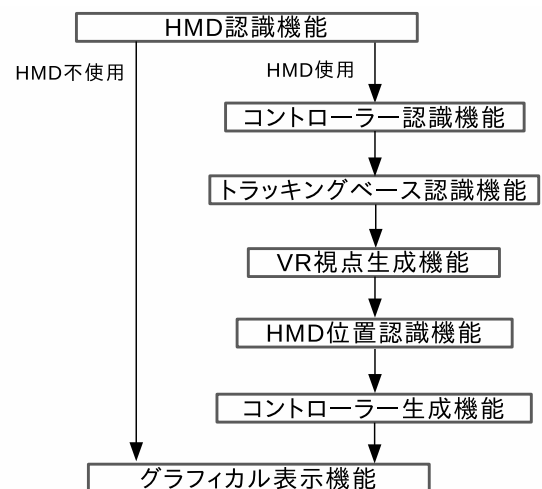


図1 VRグラフィカル表示機能のダイアグラム

定義可能な機能にするため、親クラス内で仮想関数として定義した。

戦略を決定した後、戦略データを読み込み、表情決定機能と出し手決定機能へ戦略の情報を送信する。

エージェント表情決定機能

ユーザー出し手取得機能で取得したユーザーの出し手データと、戦略決定機能で取得した戦略データを入力として受け取り、この2つのデータからエージェントの表情を決定し、データベースからその表情データを取り出す機能を持つ。

データベースから読み込んだ表情のデータは表情送信機能へと送られる。

出し手決定機能

表情決定機能と同様のデータを入力として受け取り、エージェントの出し手を決定する機能である。また、出し手の数や種類は使用するゲームによって異なるため、ユーザーが必要に応じて出し手の数や種類等を再定義できるように仮想関数として親クラス内で定義した。

ここで決定した出し手のデータは出し手送信機能へ出力される。

ゲーム進行制御機能

入力としてのデータはなく、エージェントが手を出すタイミングを指示する機能であり、出し手決定機能に情報を出力する。また、ユーザーがボタンを連打することでゲームが早々に終わってしまうのを防ぐために1回ボタンを押下すると3秒間のインターバルを発生させるように定義した。さらに、ゲームが指定した回数繰り返されると終了画面に遷移したり、ゲームを開始した際にコントローラーのボタンを押下するとゲーム画面に遷移する等のシーン遷移に関する指示を出す機能についても定義を行った。

エージェント表情・出し手表示機能

それぞれ、表情決定機能及び出し手決定機能で決定された表情・出し手データを入力として受け取り、表情決定機能では、グラフィカル表示機能にディスプレイ上に表示されているエージェントへ表情を変更した後に表示するよう指示を出す機能である。出し手決定機能では、出し手を画面に表示する際は、string型のデータとしてグラフィカル表示機能へデータを送信し、画面内の指定された場所にユーザーとエージェントの出し手が文字列として表示される。

得点計算機能

ユーザー出し手取得機能で得たユーザーの出し手データと、出し手送信機能から得たエージェントの出し手データを入力として受け取った後に2つの出し手を比較し、両者に追加される得点を計算した上で分配する機能である。比較する出し手は、string型データを用いるため、比較対象外の入力を受け取った場合はエラーを表示するように設定を行った。この機能で計算した得点のデータは、得点表示機能へと送られる。

得点表示機能

入力は得点計算機能によって計算された各プレイヤーに加点される点数データであり、出力先はグラフィカル表示機能である。この機能でユーザー及びエージェントの合計得点をグラフィカル表示機能に画面上へ表示するよう指示を出す。合計得点は画面上に文字列として表示され、指示を出す際にはstring型のデータをグラフィカル表示機能へ送信する。

4. システムの実装

システムの実装にあたり、使用したOSはwindows 10、実装環境はUnity、VRアプリケーション実装にあたってはSteamVR、言語はC#を用いた。また、システムの実装にあたって、囚人のジレンマゲームと繰り返しじゃんけんゲームをインタラクティブゲームの題材とし、それぞれのゲームに共通している機能を親クラス内に仮想関数として定義した。さらに、出し手戦略や感情表現に関する関数を親クラス内で仮想関数として定義することで、各ゲームを用いたシステムを実装する際に、必要に応じて様々な戦略を設定可

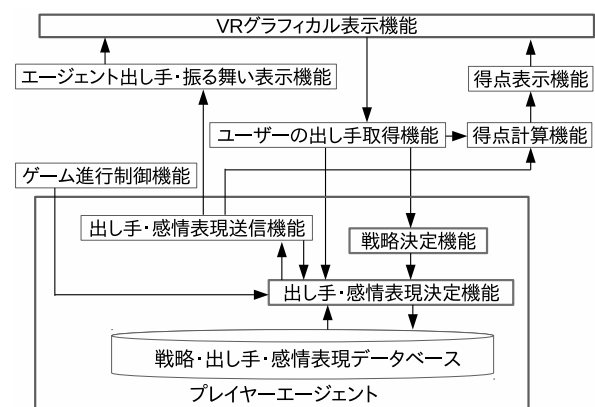


図2 システムの親クラスのダイアグラム

表3 一筋戦略

ゲーム数	1	2	3	4	5	6
ユーザー	P	G	P	C	G	C
エージェント	G	C	P	G	C	P

表4 しっぺ返し戦略

ゲーム数	1	2	3	4	5	6
ユーザー	P	G	P	C	G	C
エージェント	G	P	G	P	C	G

表5 逆しっぺ返し戦略

ゲーム数	1	2	3	4	5	6
ユーザー	P	G	P	C	G	C
エージェント	P	P	P	P	P	P

表6 固定戦略

ゲーム数	1	2	3	4	5	6
ユーザー	P	G	P	C	G	C
エージェント	G	G	C	G	P	C

能である。今回実装を行ったシステムは windows 上、もしくは HTC Vive を用いることで利用可能となっている。スクリプトの記述には VisualStudio2017 を使用した。ロボットに見立てたエージェントについては、Unity 上で無料ダウンロード可能なアバターである UnityChan(Unity Technologies Japan/UCL) を使用した。UnityChan を使用した理由として、本研究ではエージェントの表情変化が人間の行動決定に与える影響について調査可能なシミュレーションシステムの実装を目的の一部として持っているが、UnityChan には 17 種類の表情、31 種類のポーズが標準搭載されており、表情は Unity 上で編集可能である。つまり、この 17 種類の表情を元に Unity 上で調整を加えたものを使用できるという観点から、本研究に適していると考えたためである。本研究では「無表情」、「喜び」、「悲しみ」、「怒り」、「嘲笑」の 5 つの感情表現に該当するポーズを Unity 上で調整したり、Blender と呼ばれるアバターのポーズを製作可能なアプリケーションを用いて製作することで使用した。自作した表情を図 3 ~ 10 に示し、ポージングを図 11 ~ 14 に示す。

表情の怒り、悲しみ、嘲笑の表情については Unity 上で使用可能な BlendShape 機能で編集を行った。BlendShape 機能とは、Unity に搭載されている機能であり、アバターの骨格を移動させずに、表面上のメッシュの頂点を移動させることによって小さなアニメーション

として動作させることが可能である。これを使用することにより、このアバターの各表情について設定されている眉、目、口についてのウェイトバランスを調節し、口を編集するのであれば口角の上げ下げや口の開き方などを調節することが可能である。

ポーズについては、じゃんけんの出し手ポージングは全て自作し、その他の感情表現に使用したポージングは UnityChan に標準搭載されているポーズを用いた。また、エージェントの出し手戦略として、「一筋戦略」、「しっぺ返し戦略」、「逆しっぺ返し戦略」、「固定戦略」の 4 つを実装した。しっぺ返し戦略は一



図3 あいこの表情 (1)



図4 あいこの表示 (2)



図5 負けの表情 (1)



図6 負けの表情 (2)



図7 勝利の表情 (1)

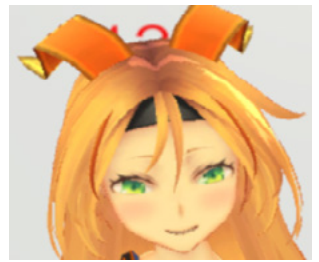


図8 勝利の表情 (2)



図9 勝利の表情 (3)

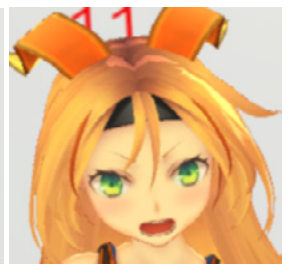


図10 負けの表情 (3)

手前に相手を使用した出し手を次の手で使用する出し手戦略であり、逆しっぺ返し戦略は一手前に出した相手の手に負けるような出し手戦略である。各戦略の繰り返しじゃんけんゲームにおける手の出し方の例をそれぞれ表3～6に示す。表内のG, C, Pはそれぞれ出し手の「グー」、「チョキ」、「パー」を表す。

また、お互いが手を出し、点数が加算される作業を1ゲームとすると、1セット20ゲームとして実装をおこなったが、このゲーム数はUnity上で変更を行うことが可能である。

5. インタラクション評価実験

5.1 実験内容

インタラクション効果についての評価実験では、実装を行ったシミュレーションシステムを用いて利用者とゲーム内のアバターとの間でインタラクション効果が表れることを確認することを目的とする。本研究では、ロボットと人間の間で発生するインタラクション効果についてのシミュレーションが可能なシステムの実装を主な目的としているため、画面内のアバターと利用者との間でインタラクション効果が発生しなかった場合、このシステムでシミュレーション



図 11 グーのポーズ

図 12 チョキのポーズ



図 13 パーのポーズ

図 14 待機状態のポーズ

を行うことが不可能となってしまう。そこで、実際に被験者にこのシステムを利用してもらうことでアバターと被験者の間でインタラクション効果がどの程度表れるかを確認する。

実験方法としては、実際に被験者にHMDを装着し、画面内のアバターと繰り返しじゃんけんゲームを20ゲームを1セットとして2セットをプレイしてもらう。1セット目と2セット目ではエージェントの出し手戦略のみ変更することで、アバターの感情表現が切り替わるタイミングが各セットで変化しないため、インタラクション効果が表出すると考えた。出し手戦略は、1セット目は、1～4ゲームは一筋戦略、5～10ゲームはしっぺ返し戦略、11, 12ゲームは固定戦略、13～17ゲームは逆しっぺ返し戦略、18～20ゲームはしっぺ返し戦略となっており、2セット目は、1～6ゲームは一筋戦略、7～12ゲームはしっぺ返し戦略、13, 14ゲームは固定戦略、14～20ゲームは逆しっぺ返し戦略、となっている。感情変化則については、アバター側が勝利、敗北、あいこだった場合の感情表現として、1～10ゲームでは図3, 図5, 図7を使用し、11ゲームのみ図4, 図9, 図10 12～17ゲームでは図3, 図6, 図8, 18～20ゲームは1～10ゲーム目と同様の表情変化則を使用するものとした。実験についてのゲームのルールやコントローラーの操作方法等の事前説明の段階では、被験者に対して「ゲームに勝利するように立ち回りを考えてもらいたい」という旨を伝えておく。このように伝えた理由としては、じゃんけんのゲームの共通認識として確率的要素が勝敗に大きく作用してしまうという一般認識から離れ、自身の勝敗を確率に委ねることを防止することでエージェントの出し手や感情表現に対して予測してもらうように促すためである。そして、ゲームが終了した後にアンケートとインタビューに答えてもらい、その結果からインタラクション効果について考察していく。アンケートの内容は以下のようなものとなっている。

1. ゲームのルールを理解出来ましたか？
(はい/いいえ/どちらともいえない)
2. 相手（アバター）の戦略を読むことが出来ましたか？
(できた/概ねできた/どちらともいえない/ほとんどできなかった/全くできなかった)
3. 実験中に3D酔いのような気分の悪さがありましたか？
(あった/少しあった/無かった)

4. アバターの感情表現を読み取れましたか？
(はい/いいえ/どちらともいえない)

5. 1セット目と2セット目を比較して、どちらが相手の戦略を読みやすかったですか？
(1/2/どちらともいえない)

6. アバターの感情表現や出し手戦略によって、自分がどのような出し手を選択すればよいかわからなくなること(混乱すること)がありましたか？
(あった/なかった/どちらともいえない)

7. 6で「あった」を選んだ方のみお答えください。それは1セット目と2セット目のどちらですか？
(1/2/両方)

8. アバターに勝利するために、ゲーム内のどの点に注目してゲームを進めていましたか？(記述)

また、被験者には2つのグループに分けてシステムを利用してもらう。1つ目のグループには実験の内容とゲームについての主なルール説明を行い、もう1つのグループには実験の内容とは別に、「アバターの出し手戦略、感情表現が複数用意されている可能性が有ること」を事前に説明する。

このように実験を行う理由としては、事前に知っていた場合と、そうでない場合でアバターの感情表現や出し手戦略に対してどのように注目するか確認するためである。被験者は20代の学生10人を対象として実験を行った。また、本文ではインタラクション効果に関わる部分のみ考察を行うものとする。

5.2 実験結果

実験結果を図15～18に示す。まず、アバターの出し手戦略については「どちらともいえない」の回答が半数を占める結果となり、この結果を被験者にインタビューしたところ、「読めている部分と読めていない部分が五分であった」との回答を得ることができた。特に後半の逆しつぺ返し戦略になったところで出し手を模索する様子が確認できたため、切り替わったタイミングは理解できても、どのような戦略かは理解できずにゲームを終了してしまった被験者もいたと思われる。

戦略の読みやすさについては、2回目の方が戦略を読みやすかったという意見が多く、これは1回目は出し手が3種類であることに対して、3の倍数で出し手

戦略が変化しなかったことで戦略が読みにくかったことと、ゲーム自体に慣れてきたことが起因していると

相手の戦略を読むことができましたか？

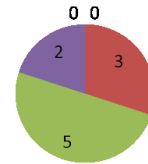
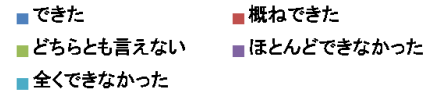


図15 アンケート2の結果

1回目と2回目のどちらの方が相手の戦略を読みやすかったですか？

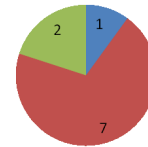


図16 アンケート5の結果

アバターの感情変化や出し手戦略によって、自分の出し手が分からなくなること(混乱すること)がありましたか？

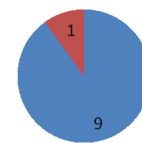


図17 アンケート6の結果

6で「あった」を選んだ方のみお答えください。それは1回目、2回目のどちらですか？



図18 アンケート7の結果

考える。そして、ほとんどの被験者がアバターの感情変化や出し手戦略によって混乱したと言う結果が得られた。これにより、アバターと被験者の間で読み合いによるインタラクション効果が確認できたと考える。また、1回目と2回目の両方で混乱した被験者が全体の過半数を占めていたが、2回目のみで混乱した被験者が比較的多かった理由として、1回目は出し手戦略が切り替わったタイミングと同時に感情変化則も切り替わったのに対し、2回目は出し手戦略の途中で感情変化則が切り替わったため混乱したと考える。

6. 考察

インタラクション効果については、まずアンケートの5の結果より、被験者ほとんどの被験者がどちらともいえない以外の回答を選択しているため、相手の出し手戦略を読み合おうとしている様子が伺える。また、アンケートの6、7の結果より、アバターの感情変化や出し手戦略が被験者の出し手決定について影響を与えているため、被験者が混乱した場面があったと考える。このため、アバターと被験者の間で十分なインタラクション効果が発生していると考え。さらに、アンケートの8の結果に注目すると、1つ目のゲームに関する詳細な内容を説明していないグループでは、アバターの身振り手振りや表情変化の感情変化に注目した被験者が多く、もう1つのグループでは、出し手戦略のみ、もしくは感情変化と出し手の両方に注目した被験者が多いという結果になっている。このことから、ルールの詳細を伝えなくともアバターへ注目する機会が多かった結果になっているため、アバターの感情表現が被験者の出し手決定に与える影響の割合が多いと考える。

7. まとめと今後の課題

7.1 まとめ

本研究で行った実験の結果、インタラクションゲームを用いたシミュレーションシステムをVR技術を用いて実装を行ったことにより、人と画面内のアバターとの間でインタラクション効果が起こることが確認できた。この結果から、本研究で実装を行ったシステムをHMDを用いて利用することで、ロボットの振る舞いが人間に与える影響を調査可能なシステムを実装できたと考える。また、Unityとオブジェクト指向言語を用いて実装を行ったことにより、クラスの継承を行うことで記述するスクリプトの削減を行うことができたため、プログラミングに対して知識のある

方ならば、容易に様々な状況でのシミュレーションが可能になったと考える。これから、ロボットと我々人間が接する機会が増えることが予想されるため、容易に様々なシミュレーションが行えることで、ロボットを施設やイベントに導入する際にロボットの振る舞いからストレスを感じる機会を削減するためのシミュレーションが可能になったと言える。

7.2 今後の課題

実験の結果から得られた意見として、出し手戦略を読みきった被験者も数名確認できたため、アバターとより深い読み合いをしてもらい、インタラクション効果を向上させるために複雑な出し手戦略を実装可能なインタラクションゲームを実装する必要があると考えた。

また、そのようなインタラクションゲームを実装した場合には長期戦になる確率も上がり、3D酔いになってしまう確率も上がってしまうため、対策として、途中で休憩を入れられるような機能の実装していきたい。

参考文献

- [1] Robots Are Coming for Jobs of as Many as 800 Million Worldwide”, Bloomberg Technology,2017,<https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-11-29/robots-are-coming-for-jobs-of-as-many-as-800-million-worldwide>
- [2] 人間とロボットとの円滑なコミュニケーションを目指して (<特集> HAI: ヒューマンエージェントインタラクション), 小松孝徳, 開一夫, 岡夏樹, others, 人工知能学会誌, 2002
- [3] 人間・ロボット協調作業時に被るストレス計測, 藤田真理奈 and 加藤龍 and 新井民夫, 精密工学会学術講演会講演論文集 2010 年度精密工学会秋季大会, 2010, 公益社団法人 精密工学会
- [4] Celso M. de Melo Peter Carnevale and Janathan Gratch, 2010, The Influence of Emotions in Embodied Agents on Human Decision-Making, <http://ci.nii.ac.jp/els/110009911850>
- [5] 木村将治 牧野泰裕 小倉和久 小高知宏 2002, 繰り返しじゃんけんゲームを対象とした固定的戦略による知識表現と遺伝的アルゴリズムによる知識獲得” pp479-483, 電気情報通信学会論文誌 D-1Vol.J85-D-INo.5

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 —量子コンピュータへ至る計算機の歩み—

平田 隆幸*

Why Should Engineering Students Study a Quantum Computer? —History of Computers from a Digital Calculator to a Quantum Computer—

Takayuki HIRATA*

(Received February 3, 2020)

Quantum supremacy is demonstrated by some groups. Quantum computer is a hot topic in both the scientific community and the general public. At first, let's summarize the history of a computer to understand a meaning of quantum computing. A Turing machine is an epoch making innovation in calculation by machine. Human being has gotten a powerful tool not only in numerical calculation but also in logical tools. However, Turing machine has a limitation on some problems such as NP complete and so on. Quantum computer may be one of the solutions that is a key of breakthrough of the limitation in modern computing. In this paper, I will discuss why engineering students should study a quantum computer.

Key Words: Quantum Computer, Quantum Supremacy, Computation, History of Computers, Quantum Mechanics, Engineering Student.

1. はじめに

量子コンピュータの超越性(Quantum Supremacy)が、科学者のコミュニティを越えた社会の話題になっている^{[1]-[4]}。一般の人に向けた、量子力学の基礎知識を必要とせず、数式を使わない、量子コンピュータについての分かりやすい解説本も多く出版されている：例えば、概略を知るためには長橋の本^[5]、ソフトウェアが分かりやすく（アルゴリズム）かつ少し理系のバックグラウンドを必要とする宇津木・徳永の本^[6]などを挙げる事ができる。さらに、理系の大学生に向けて、量子コンピュータの研究者である宮野健次郎・古澤明の入門書^[7]も出版されている。

ここで、量子状態を利用した新しい計算機の可能性が議論されるようになった歴史を簡単に振り返ってみよう。1980年、物理学者のP. Benioffが、物理系

としてのコンピュータ、つまり量子コンピュータの可能性を議論したことに端を発する^{[8][9]}。さらに、1982年ノーベル物理学賞受賞者 Feynman が、量子状態を使った計算は、古典計算と比較して、大きな可能性をもつことを示唆した。

また、量子コンピュータのアルゴリズムの面から、1992年にドイチェ・ジョサのアルゴリズム^[10]が、1994年にピータ・ショアによる因数分解に関するショアのアルゴリズム^[11]が提案された。ショアのアルゴリズムは、特定の問題を解くことに限定したものであるが、RAS暗号にも利用されている因数分解を高速で解くことができることを示したインパクトの大きなものであった。さらに、グローバーが、1996年のシンポジウムにおいて、実用的なデータベース内の探索アルゴリズムというテーマで量子コンピュータの有効性を示した^[12]。

さらに、量子コンピュータに注目をあつめることがおこった。量子コンピュータの可能性で、2012年 Serge Haroche と David J. Wineland がノーベル物理学賞（個別の量子系に対する計測および制御を可能に

* 大学院工学研究科知能システム工学専攻

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

する画期的な実験的手法の開発)を受賞した。同時に、量子テレポーテーションという魅力的なテーマにも発展がみられた。量子テレポーテーションは、最も単純な量子コンピュータと位置付けることができる^[13]。量子コンピュータは、2017年にはNHKなどでも取り上げられた^[14]。また、量子コンピュータという言葉は、アニメにも出てくるほど時代を反映したものとなりつつある。これら、量子コンピュータに対する期待が高まるとともに、工学部の学生がどのように量子コンピュータというテーマに取り組めば良いかという問題が生じた。

本論文では、量子力学の授業がない工学部の学生がどのように量子コンピュータを学べば良いのかについて考える。最初に、量子コンピュータに至る計算機発展の歴史について見ていく。同時に、他大学を含め工学部で量子力学の授業がどのようにおこなわれているのかをみる。さらに、量子コンピュータの状況について簡単に見ていく。そして、学生の量子力学さらには量子コンピュータについての知識について調べる。これらのことを通して、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を議論する。

2. コンピュータの歴史

現代社会では、PCをはじめとし、携帯電話、自動車、家電製品に至るまで、さまざまなところでコンピュータが使われている。ユーザーとしての私たちは、コンピュータと意識せずにコンピュータを使い、コンピュータに囲まれて生活しているといっても過言ではない。ここでは、アナログコンピュータからデジタルコンピュータ、そして量子コンピュータへと、コンピュータの歴史をできる限り日本人の生活に根ざした視点から振り返ってみよう。

2.1 アナログコンピュータ

アナログ計算機の歴史は古く紀元前にまでさかのぼれる。しかし、身近で実用的なアナログ計算機の例は、計算尺であろう。計算尺は、17世紀に対数の発見に伴い、イギリスの数学者ウィリアムオートレット(William Oughtred)によって発明された。日本では、中学校の授業にとり入れられていた時期もあった。計算尺のエッセンスは、対数の足し算は真数の掛け算に相当することを利用しているところにある。つまり、計算尺は、加減乗除という演算を計算尺に刻まれた目盛りを読むという作業で実行できるようにした道具である。アナログ的に手で計算尺を操作し目で目盛りを読む、というアナログ計算機である。

アナログ計算機は、大昔のものではなく、最近まで、科学の発展に大きく貢献してきた。日本人がカオスの研究に大きく貢献した上田アトラクター^[15]の発見は、OPアンプを使ったアナログ計算機によるものである。非線形常微分方程式をOPアンプを使った電子回路によって解かせ、オシロスコープで計測してストレンジアトラクタ(カオス)を見つけた仕事である。常微分方程式のパラメータも、数値を入力するデジタル計算機と異なり、ポテンシオメータを回すことによってアナログ的に変えていた。20世紀後半ごろまで、アナログ計算機は最先端研究においても使用されていたのである。しかし、時代は汎用性の高いデジタルコンピュータへ向かう。

2.2 デジタルコンピュータ

デジタル計算機の歴史も古く紀元前にまでさかのぼれる。しかし、日本人に馴染み深いデジタル計算機は、そろばんである。「読み、書き、そろばん」と言われるように、日本人の素養と考えられていた。そろばんは、16世紀に伝来し、現在も義務教育のカリキュラムに組み入れられている。デジタル計算機といえば、電卓を思い浮かべるかもしれないが、日本人はもっと古くからそろばんに代表されるデジタル計算機に接してきたのである。そういう意味で、デジタル計算機は、日本人の生活に根差したものであったことが分かる。

さて、近代的なデジタル計算機の歴史は、17世紀の機械式計算機(例えば、パスカルの計算機など)にまでさかのぼることができる。日本では、タイガー式計算機(手回し計算機)がよく使われた。タイガー式計算機は、1960年代頃まで大学の研究室においても数値計算に用いられていた(例えば、情報処理学会 HP^[16]参照)。プログラミングができる汎用計算機の登場は、人類の計算機による計算におけるパラダイムシフトであった。

電子素子を用いたデジタルコンピュータの登場は、衝撃的なできごとであるといえる。例えば、電子素子として真空管をもちいて作られ1946年に公開されたENIAC(Electronic Numerical Integrator and Computer)は、限定されているがプログラミングが可能な電子式コンピュータであった。当初、企画された弾道計算のみならず様々な計算がなされた。しかし、真空管をもちいたコンピュータは巨大なサイズと膨大な電力を必要とするものであった(30×50feet, 30tons^[17])。

チューリングマシンとしてのコンピュータは、ノイマン型コンピュータであった。初期のコンピュータは、ENIACのように非常に大型なものであった。

ENIAC を含む初期のコンピュータは、メモリも少なく限られた用途にしか使えなかった。汎用の商用コンピュータとしては、1960年代に登場したメインフレームを待たなければならない。メインフレームとして、実用的な大型計算機をリードしたのは、IBMであった。IBMは、1964年4月にSYSTEM/360を発表し、以降メインフレームは、汎用コンピュータとして、金融、製造、運輸などに使われるようになった^[18]。コンピュータの利用は、弾道の軌道計算などの科学計算の目的から始まったが、より広範なものへと移っていった。

日本の状況は、どうであったのだろうか？日本のメインフレームメーカーは、富士通、日立製作所、日本電気（NEC）の3社である。日本における大型計算機導入状況を、大学の大型計算機センターを中心に振り返ろう。日本もコンピュータ産業を育成するために、1965年に東京大学^[19]を皮切りに、旧帝国大学の7大学に大型計算機センター^{[20]-[25]}が設置された。産業界のバランスをとるため東京大学は日立のコンピュータ（HITACシリーズ）、東北大学、大阪大学はNECのコンピュータ（NEAC）、京都大学、北海道大学、名古屋大学、九州大学は富士通のコンピュータ（FACOM）、というように棲み分けがなされた。なお、大学以外に目を向けると、1944年に設立された統計数理研究所は、1950年代の富士通の継電器式自動計算機に始まり、1960年代の日立製作所のパラメロン計算機を経て、1970年代以降日立製作所のHITACシリーズを導入している^[26]。

日本の3つのメインフレームメーカーのコンピュータが、大学の大型計算機センターにバランス良く導入され、棲み分けが行われているのを見てきた。しかし、一般的な汎用大型計算機の利用が、金融などのシステムに使用されたのに対して、大学での計算機（コンピュータ）の利用は、数値計算、数値シミュレーションなど科学技術計算が主であった。そのため、科学技術計算に特化した計算機であるスーパーコンピュータの開発が渴望されるようになった。大学の大型計算機センターの主力コンピュータは、汎用コンピュータからスーパーコンピュータへと変遷していくのである。

Cray Research Inc.によって開発されたベクトル計算を含む数値計算に特化したスーパーコンピュータCray-1^[27]が米国ロスアラモス国立研究所に納入されたのは、1976年であった。Cray-1は、並列計算の能力が高いベクトル計算機であるという特徴もっていた。その後、スーパーコンピュータCrayシリーズは、政府機関や大学の大型計算機センターに次々と導入された。このスーパーコンピュータの系譜が、

地球シミュレータなど、神戸市の次世代スーパーコンピュータ「京」につながっているのである。スーパーコンピュータは、ベクトル計算や専用のCPUを使って並列計算に特化したコンピュータと言える。言い換えると、巨大な投資をおこない、高速な並列処理を達成しようというのがスーパーコンピュータの潮流と言える。

さて、大型計算機センターでは汎用大型コンピュータからスーパーコンピュータへと発展した一方、各研究室がコンピュータを所有できるようになってきた。1970年の小型コンピュータDEC PDP11の登場である。それまでは、パンチカードでプログラムを作り、大型計算機センターに制作したパンチカードを持っていき、コンピュータにカードリーダーを使ってプログラムを読み込ませ実行させていた。PDP11は、コンソール端末からプログラムができ、Fortranを走らせることができた。OSとして公式にUnixが使われたのもPDP11からである。ダウンサイジングの始まりである。

小型コンピュータは、数百万円から数千万円した。大型コンピュータが億円単位であったことから比較すると、非常に身近なものになったが、依然として、高価な設備であった。しかし、ダウンサイジングの波はこれに留まるものではなかった。ワークステーションの登場である。Sun Microsystemsのスパークステーション(1989年SPARC Station 1)が果たした役割は大きい。SPARC(Scalable Processor Architecture)は、RISCベースのCPUであり、OSにはUnixが使われていた。スパークステーションによって、予算の少ない大学の研究者にとっても、科学計算ができるコンピュータが身近な存在になった。

ワークステーションに留まらず、ダウンサイジングはさらに進んでいく。マイクロコンピュータの登場である。1971年に、Intelから4bitマイクロプロセッサIntel 4004(クロック周波数500kHz, 10 μ mプロセス・ルール。以降、クロック数が複数あるCPUの場合、CPUのクロック周波数およびプロセス・ルールに関しては、最初に発表されたものあるいは代表的なものを記している)が発表された。さらに、1972年に8bitマイクロプロセッサIntel 8008(クロック周波数500kHz, 10 μ mプロセス・ルール)が発表され、その後Intel 8080(クロック周波数2MHz, 6 μ mプロセス・ルール)、Intel 8085(1976年発表、クロック周波数3MHz, 3 μ mプロセス・ルール)と発展していく(図1に、Intel CPUのクロック数をプロットしたものを示す。). マイクロコンピュータの黎明期である。1978年には、現在まで続く最初のx86アーキテクチャである16ビットCPUのIntel 8086(クロック周波

数 5MHz, 3 μ m プロセス・ルール)が発表された. Intel 8086 は, NEC PC-9801 や IBM PC(Intel 8088 外部データバス 8bit にした低価格版)に使用され, パーソナルコンピュータの普及に大きく寄与した. 特に, IBM PC は, IBM PC/AT Compatibles (IBM PC 互換機あるいは DOS/V マシンとも呼ばれる)に引き継がれた.

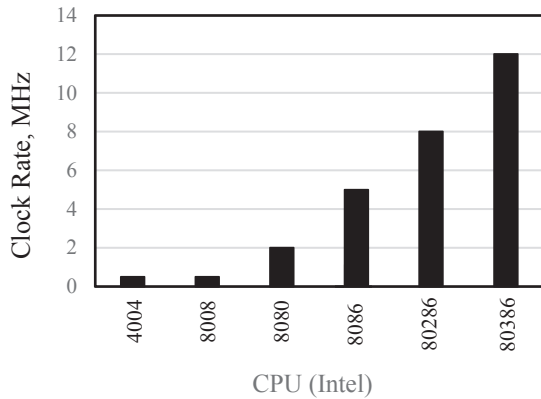


図 1 Intel CPU のクロック数

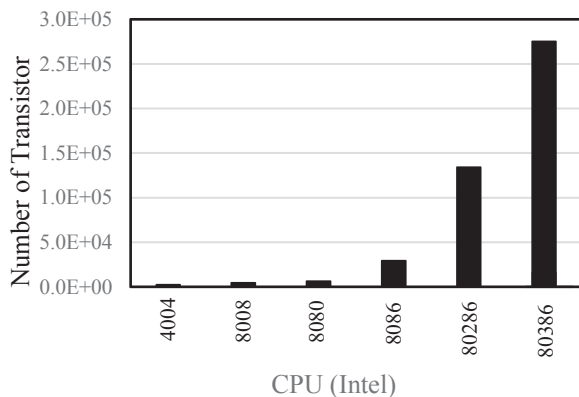


図 2 Intel CPU の集積度

マイクロプロセッサの黎明期には, Intel の 8080 だけでなく, モトローラの MC6800 やモステクノロジーの MOS 6502 などの CPU があつた. 1974 年に発表されたモトローラの MC6800 および 6800 シリーズ(6809 など)は発展を続け, 1980 年から生産された 32 ビットの MC68000 は, Apple 社の Lisa, Macintosh, シャープの X68000 に使用された. モステクノロジーが 1975 年に発表した MOS 6502 は, コモドル社が発売した PET 2001 やアップル社の Apple II に使われた, また, 1976 年にザイログから発表された Z80 の設計には, 日本人の技術者嶋正利が中心的役割を

果たしている. Z80 は, 1979 年に日本で発売された NEC PC-8001 に使用されていたり, 組み込み型マイコンとして使用されていたり, 日本ではなじみが深い CPU である.

Intel 8086 CPU は, Intel x86 系として, 16 ビットアーキテクチャ 8086, 80186, 80286 から 80386 で 32 ビットアーキテクチャに拡張され, さらに 64bit ビットアーキテクチャ AMD64 や Intel64 に引き継がれている. 80386 で実装された 32 ビットの命令 (IA-32 命令) は, 現在に引き継がれ, 使用されている.

さて, Intel x86 CPU に代表される CPU は, CISC(Complex Instruction Set Computer)である. CISC は複雑な命令を実行できる代わりに, クロック数を上げることが比較的困難であった. そこで, 命令を単純なものに厳選し, クロック数を上げる試みがなされるようになった. それが, RISC(Reduced Instruction Set Computer) CPU である. 前述の Sun Microsystems の SPARC(Scalable Processor Architecture)や MIPS アーキテクチャの R2000 (MIPS Computer Systems, Inc. (現 MIPS Technologies, Inc.))は, RISC ベースの CPU の代表例である.

現在の PC に使用されている CPU は, CISC の代表例である Intel x86 系 CPU である. それゆえ, マイクロプロセッサと言え, CISC を思い浮かべるかもしれないが, RISC 系の CPU も良く使われている. 携帯電話などに使われている CPU は, RISC の系譜につながるものである. 例えば, モバイル機器において多く使われている ARM Ltd の組み込みマイクロプロセッサ ARM も RISC に分類される. また, Intel も CISC である x86 系だけではなく, RISC に分類される Xscale (Intel が実装した第五世代の ARM アーキテクチャ)を使っている. なお, 現在の CPU, Intel atom などは, CISC・RISC の区別が意味をなさなくなっていることを付記しておく.

コンピュータの計算速度を速くする方法として, CPU が一度に処理できる bit 数を向上させる方法とクロック数を上げる方法とがある. Intel の CPU を例に見ていく. 4bit CPU: 4004 は, クロック周波数 0.5MHz, 8bit CPU: 8008 は, クロック周波数 0.5MHz, 8080 は, クロック周波数 2MHz, 16bit CPU: 8086 は, クロック周波数 5MHz, 80286 は, クロック周波数 8MHz, 32bit CPU: 80386 は, クロック周波数 12MHz と高速化された. 現在, x86 系 CPU のクロック数は 4GHz にまで高速化された, これは, 集積度を上げることによって達成された. 4bit CPU 4004 は, 2300 トランジスタ, 8bit CPU 8008 は 4500 トランジスタ, 8080 は 6000 トランジスタ, 16bit CPU 8086 は 29000 トランジスタ, 80286 は 134000 トランジスタ,

32bit CPU 80386 は 275000 トランジスタであった。図 2 に、CPU の集積度(トランジスタ数)の変遷を示す。「集積回路上のトランジスタは 18 か月で倍になる」というムーアの法則がうまく成り立っていた。

しかし、集積度を上げることの限界が見え始めた。同時に、クロック周波数を上げることによる高速化にも限界が現れた。そこで、複数のコアを走らせる、並列処理による能力向上がなされるようになってきた。例えば、AMD の最新の CPU Ryzen Threadripper 3990X(2020 年 2 月 7 日発売予定)は、ベースクロック 2.9GHz(ターボ時、最大 4.3GHz)、64core となっている(AMD の HP 参照：<http://www.amd.com/ja>)。ここでの高速化のポイントは、複数の Core を走らせる、並列処理がキーワードとなっている。

新しい潮流として、RISC の系譜につながる新しい種類の CPU である GPU(Graphics Processing Unit)も注目に値する。GPU は、画像を並列処理する。ここでは、並列処理、画像処理に特化した並列計算ができるようになっており、高い処理速度を誇っている。GPU の分野では、Intel や AMD 以外の新しいメーカーが台頭してきている。例えば、台湾の NVIDIA などである。トピックとして、NVIDIA は、GPU で培われた技術を使い Level 4 から Level 5 の自動運転の一翼を担うのでは、と期待されている。

3. 量子コンピュータに向けて

ノイマン型コンピュータは、非常に大きな成功を収めた。一方、ノイマン型コンピュータの限界も議論されるようになってきた。そこで、ノイマン型コンピュータの成功を越えた、新たな可能性が模索されるようになってきた。

3.1 デジタルコンピュータから量子コンピュータへ

量子コンピュータは、デジタルコンピュータの限界を打ち破る可能性があることから注目を浴びるようになってきた。デジタルコンピュータが、トランジスタによるスイッチ機能を利用して、古典状態(古典ビット bit)を扱うのに対し、量子コンピュータは量子状態(量子ビット qubit)を扱う。量子コンピュータでは、計算中の量子状態をアナログ値として取り扱い、入出力をデジタル値で与えるのである。つまり、量子状態を使うことによって量子コンピュータは、並列処理を実行でき、その結果として高速な演算が期待されるのである。

さて、量子コンピュータの新しい可能性と実現可能性について見ていく。最初に、量子コンピュータの基礎となる量子ビットについて考える。量子ビッ

トの実現方法は、光、スピン(電子スピン、核スピン(NMR)、シリコンのリン原子のスピン)、超電導量子ビットなどがある。初期のデジタルコンピュータにおいて、デジタルビット(古典ビット)が、真空管やトランジスタによるスイッチ機能を利用していたのと対応する(現在は、トランジスタに収束した)。それぞれの量子ビットには、メリットとデメリットがある。レーザーをつかった量子ビットは、任意の量子ビット間にエンタングルメント(entanglement)を構成しやすいが集積度を上げにくい。一方、半導体を使った量子ビットは、集積度は上げやすいが、近接した量子ビット間以外では、エンタングルメントを構成するのが難しい。将来、デメリットが克服され、どの量子ビットが有望になるか楽しみである。

次に、量子ビットを利用した量子コンピュータについて考える。量子テレポーテーションは、最もシンプルな量子コンピュータといえる^[13]。量子コンピュータは、通信にも大きな影響を与える可能性がある。ネットワークにおいて、セキュリティの問題は重要な問題である。量子暗号(例えば、BB84^[28])は、情報理論的安全性がある暗号技術として期待されている。量子コンピュータによって、計算量的安全性に基づく現在使用されている RAS 暗号が破られる可能性が指摘されている。一方、量子テレポーテーションを含めた新たな量子情報処理によって、量子暗号の有用性が議論されているのは興味深いことである。

量子コンピュータは、量子ビット数を増やすことが困難である。デジタルコンピュータと比較すると、非常に限られた量子ビット数しか実現できていない(使用できない)。では、現実にはまったく役に立たないのであろうか?しかし、限られた量子ビットでもデジタルコンピュータでは困難であった問題の解決に役に立つことが分かってきた。

現在、現実的な量子コンピュータのアルゴリズムは、量子アニーリングと NISQ(Noisy Intermediated-Scale Quantum (Computer))がある。NISQ でも RAS 暗号を短時間で解くことができる可能性が示された。量子アニーリングは、1998 年に日本人の物性理論の研究者の西森秀稔らが提案したアルゴリズムである^[29]。スピングラスの研究をおこなっていた西森が、量子アニーリングのアイデアに至ったのは、必然ともいえるし、非常に興味深い。量子アニーリングは、トンネル効果による local minimum からの脱出など、量子力学の現象を利用している。組合せ最適化問題(例えば、巡回セールスマン問題)を解くのに利用されている。すでに、D-Wave 社^[30]が有料で量子ビットを使用したシステム D-2000Q を提供している。D-

2000Q は, 128000 のジョセフソン接合を使って, 2048 qubits と 6016 結合(couplers), を実現している(D-Wave-2000Q-Tech-Collateral_1029.pdf 参照). 量子コンピュータは, 遠い将来に実現されるかもしれない理論的なものから現実的なものになりつつある.

量子コンピュータを利用するというエンドユーザーとしての立場に満足するのではなく, 工学系の大学生として, 量子コンピュータを開発し, 新しい世界を創造するための基礎を考えてみよう. そのためには, 何を学ぶべきかをみていく.

3.2 量子コンピュータで使う量子力学

量子コンピュータでは, 古典状態をつかう bit の代わりに量子状態 qubit を使う. そのため, 量子状態の理解が必要となる. つまり, 古典力学ではない, 量子力学の知識が必要となる. ここで, 量子コンピュータに必要な量子力学を考えていこう.

3.2.1 工学部での量子力学のカリキュラム

量子コンピュータに関する授業は, 大学の工学系の学部・大学院において, どのようにおこなわれているのだろうか? 日本を代表する 2 つの大学で調べてみた. 東京大学では, 学部学生を対象に長谷川秀一氏による量子コンピューティングが理工学部の授業としてリストされている. 京都大学では, 工学研究科融合工学コースの大学院生を対象に, 量子情報科学という授業が竹内繁樹・岡本亮氏によって開講されている. これらは, 東京大学・京都大学の HP から調べたものである(2019年12月1日時点). 授業を受けるにあたり, 事前知識として量子力学を勉強していることが推奨されている.

一般的に, 工学系のほとんどの学生は, 量子力学を学ばない. 一方, 量子コンピュータは, NHK でも取り上げられるように工学系の大学生のみならず, 世間一般の人の人口に膾炙するほどホットなテーマである. 量子力学の授業がカリキュラムにない工学系の学生にどのように, 量子コンピュータの授業をおこなえばよいのだろうか.

光子をもちいた量子アルゴリズムの実験をおこなない, 大学で量子コンピュータに関する授業も担当している竹内の本 BLUE BACKS^[31]を例に考えてみよう(竹内が担当している量子情報科学の参考書としても挙げられている). BLUE BACKS という本の性質上, 量子コンピュータについて, 数式を使わずに量子力学の確率波から量子コンピュータに必要な重ね合わせ状態までの説明を試みている. また, 「超並列計算」と称し, 量子アルゴリズムを紹介している. ここでは, 量子力学で使われる表記法(例えば, ブラ

ケットなど)を使用している. 一方, 従来の量子力学の授業でメインとなるシュレディンガー方程式, 応用としての井戸型ポテンシャルの水素原子, 散乱断面積, Born 近似などは, 取り上げられていない. 従来の量子力学の授業と量子コンピュータを学ぶことを主眼においた量子力学の授業では, 異なってくるのではないだろうか? このことについて考えていく.

3.2.2 量子コンピュータを理解するための量子力学

量子コンピュータの超越性という論文^[1]を基礎レベルから理解することを主目的とすると, 必要な勉強はなんだろうか? どのような授業が必要か? 従来の量子力学の授業は, シュレディンガー方程式, 応用としての井戸型ポテンシャルの水素原子, 散乱断面積, Born 近似, などが主となる. しかし, 量子コンピュータに現れる entanglement (絡まりあい)などは, あまり取り上げられていない.

最初に, 一般的な量子力学の授業を振り返ってみよう. 福井大学工学部では, 本格的な量子力学の授業は応用物理学科で開設されている. 量子力学 I・II (必修単位) であり, 標準的な受講スケジュールでは, 2年後期, 3年前期で履修することになる. シラバス上は, HP 参照), I・II と別れているが, 通年で共通の教科書^[32]を用いる. 教科書として用いられる小出の本は, 前期量子論から不確定性原理, シュレディンガーの波動方程式, そしてスピンや量子電磁力学までについて取り扱ったバランスの良いものである. 同時期に同じ出版社から出版された小出の量子力学 I・II^{[33][34]}からディラックの形式や行列による取扱を省くあるいは触れる程度にとどめた構成になっているといっても良い.

小出の本を教科書にした量子力学の授業では, シュレディンガー方程式がメインであり, 箱型ポテンシャルでエネルギー状態を求めるのがゴールになるものと考えられる. つまり, 工学部の授業では, シュレディンガーの波動関数を主に教え, ハイゼンベルグの行列力学(不確定性原理)は触れるのに留まり, またディラックの形式は, メインではない.

一方, 量子コンピュータの論文では, ディラックの形式, ブラケットが主役である. そう考えると, 量子コンピュータの理解を主目的とした量子力学の勉強のための量子力学の本としては, ディラックの本が良いだろう^[35]. 竹内や古澤の本の量子力学に関するもやもやした部分は, ディラックの本を読むとすっきりするかもしれない.

量子コンピュータの可能性に言及した Feynman とともにノーベル物理学賞を受賞した朝永振一郎の教科書についても触れておく. 名著として名高い朝永

の本^{[36][37]}は、量子力学の成立過程（前期量子論）の歴史を丁寧に扱っている。そういう意味で、現在の量子コンピュータの成立過程の状況は、量子力学の成立時期と類似しているかもしれない。朝永やディラックの本を読むことは、黎明期の分野を大切に育てようとする気持ちが伝わってくるようで興味深い。逆に、量子コンピュータを理解するための最小限の量子力学の知識を得ることを目的とした人には、冗長と感じられるかもしれない、勧められないかもしれない。

4. 現実的な量子コンピュータ

4.1 量子ビットの実現

量子コンピュータの基礎となるものは、量子ビット(qubit: quantum bit の略)である。古典的コンピュータの基礎となるのは binary bit(2 値: 0, 1)である: 0, 1 の離散値をとる。一方、量子ビット qubit は、

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

の複素数で表される。ここで、 α および β は複素数であり、 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ を満たす。古典ビット 0, 1 に対応するものは、 $|0\rangle$, $|1\rangle$ で表される状態ベクトルである。古典状態が 0, 1 という整数であるのに対し、量子状態は複素数で表されるという点で、ハードルが高いかもしれない。

さて、量子ビットの実現方法には、幾種類もの方法がある。原子核や電子のスピン、光子の偏光などである。原子核や電子のスピンを利用した量子ビットの実現には、0K から数 mK の超低温下でのシステムを必要とする。集積度を上げやすいというメリットがある。一方、光の偏光を利用した量子ビットは、超低温は必要としないが、集積度を上げにくいというデメリットがある。それぞれの特色を考慮すると、光の偏光を利用した量子ビットは、量子テレポーテーションには向いているのかもしれない。

量子ビットが実現できると、いよいよ量子コンピュータが現実のものとなってくる。竹内は、量子ビットから量子コンピュータへの発展性を議論しており^[31]、以下に条件として、

- 1) 量子ビットの初期化
- 2) 量子ビットの状態の読み出し
- 3) 基本ゲートの構成
- 4) スケーラブル
- 5) 重ね合わせの持続時間（緩和時間）

を分かりやすくリストアップしている。どのような量子ゲート(例えば、X ゲート、アダマールゲート、位相ゲート、Controlled-NOT ゲートなど)を用いて、どのような量子コンピュータを作るかは、楽しくかつ難しい問題である。

では、量子コンピュータが実現するとどのようなメリットがあるのだろうか。量子超越性という観点に立ち戻ってみる。NISQ(Noisy Intermediated-Scale Quantum (Computer)としての量子コンピュータが、スーパーコンピュータが約1万年かかる問題を200秒で解けたというのが、Quantum Supremacy の論文^[1]の骨子である。このように数十 qubits しかない量子コンピュータでさえ、古典的なスーパーコンピュータに優ることが示されたことがポイントである。

4.2 量子コンピュータをとりまく状況

量子コンピュータの状況を日本人による研究に重点を置いてみていこう。古澤らは、レーザーを使い1998年に決定論的量子テレポーテーションの実験に成功し、量子テレポーテーションをもっともシンプルな量子コンピュータと位置付けている。レーザーによる量子コンピュータは、真空管によるデジタルコンピュータに対応するかもしれない。ENIACがビル丸ごと使用したようにレーザー（光）によって量子ビットを実現する方法は、集積度を上げることが期待できない。日本人科学者がリーダー的役割を果たしたことにこだわって、量子コンピュータとして、レーザーを用いるのはあまり賢明と言えないかもしれない。同様に、西森らによる量子アニーリングも巡回セールスマン問題を解くことは得意かもしれない。NP complete を解くことができるのは、重要であるが、汎用性に劣るのは否めない。新しい可能性をもった分野であるがゆえに、現在の状況に拘泥することなく、若い学生の新しい挑戦が期待される。

次に、近い将来、量子コンピュータの活躍が期待される分野を考えてみよう。例えば、製薬に関連する分子シミュレーションなどが期待されている。さまざまな化学物質の可能性が短期間かつ安価に評価できるようになると、我々の生活は一変するかもしれない。

さらに、量子コンピュータをクラウドで利用することは、魅力的なアイデアである。量子コンピュータを現在のデジタルコンピュータのように小型化して、PCだけではなく家電製品から自動車などあらゆるところに組み込まれているような感じで利用できるようになるのは難しい。しかし、視点をかえると、量子コンピュータを誰も利用できるようになる可能性がある。今年からサービスが開始される5G（第5世代移動通信システム）や10年後に予定される6G（第6世代移動通信システム）がもたらす通信環境は、量子コンピュータの利用に大きな可能性を秘めている。基幹システムがクラウドに移行するのにもない量子コンピュータもクラ

ウドで利用されるようになると、冷却装置を含む巨大なシステムも大きな問題にならないだろう。このようにシステムは、すでに存在している。例えば、翻訳システムのポケットークである。ポケットークは、クラウド上にあるシステムで70言語以上の翻訳に対応している。量子コンピュータもよく似た利用方法が考えられる。

クラウド下で、量子コンピュータを使ってプログラムすることはすでに実現している。もっとも、より現実的な問題を量子コンピュータで解くのは、今後数年から数十年待たなければならないだろう。しかし、限られた少数の量子ビットしか取り扱えないことに我慢すれば、量子コンピュータの計算環境は提供されているのである。例えば、2020年1月現在、IBM (IBM Quantum Experiences <https://quantum-computing.ibm.com/>) や Amazon (Amazon Braket <https://aws.amazon.com/jp/braket/>) (AWS:アマゾンウェブ サービス)が量子コンピュータを使って計算する環境を提供している。さらに、IBMは、量子コンピュータ用のプログラミング言語 Q#を公開している。Amazonでは、notebook style のインターフェイスを通して、PythonでAmazon Braket SDKのコードを作成させる。こうしてみると、量子コンピュータは、すでに身近に存在していると言える。

5. 量子コンピュータに対する意識調査

急速な発展が期待される量子コンピュータの研究分野では、若い学生の挑戦が待たれている。そこで、工学部の学生に対して量子力学・量子コンピュータに関するアンケート調査(アンケート用紙は付録を参照)をおこなった。創造演習Ⅱ(必修単位)を受講している機械・システム工学科ロボティクスコースの3年生が対象であった。54名の学生からの回答が得られた。内訳は、男性47人、女性7人、平均年齢20.9歳(男子学生20歳12人、21歳28名、22歳7人、女子学生21歳7人)であった。アンケート結果をまとめたものを表1に示す。

アンケート結果を質問1から質問9まで順に見ていこう。質問1から、1人を除きほぼ全員が量子力学という言葉を知ったことがあることが分かる。さらに、質問2より、機械・システム工学科ロボティクスコースでは、必修科目として量子力学の授業が開講されていないにもかかわらず、76%の学生が量子力学の勉強をしたことがあると回答している(注:選択科目(半期のみ:2年~4年生対象。教科書は、小野寺嘉孝の演習で学ぶ量子力学^[38]、非常勤の方が担当)としての量子力学の授業はある)。アンケートか

ら、工学部の学生が量子力学に興味を持ち、かつ勉強したいと思っていることが分かった。しかし、質問3で、量子力学と古典力学の違いについて説明できると回答した学生は54名中3名にすぎなかった。このことは、質問4で、不確定性原理について説明できると回答した学生が6名であったこととほぼ合致している。しかし、小野寺嘉孝の教科書の3章が不確定性関係であることからすると不思議と言える(なお、教科書では、併記はしているが、不確定性原理を不確定性関係と記しているのが原因かもしれない)。

表1 量子力学・量子コンピュータについて*

質問内容	人数	人数	人数
1 量子力学という言葉を知ったことがありますか	ある 53	ない 1	——
2 量子力学の勉強をしたことがありますか	ある 41	ない 13	——
3 量子力学と古典力学の違いを説明できますか	できる 3	できない 42	わからない 9
4 不確定性原理を説明できますか	できる 6	できない 41	わからない 7
5 物理学は好きですか	はい 30	いいえ 24	——
6 力学は得意でしたか	はい 22	いいえ 25	わからない 7
7 量子コンピュータを知っていますか	知っている 33	知らない 21	——
8 量子コンピュータに興味がありますか	ある 23	ない 12	わからない 19
9 量子コンピュータについて勉強をしたいと思えますか	はい 23	いいえ 12	わからない 19

*2020年1月23日創成実験Ⅱの後にアンケートした結果(回答54人)。

次に、量子力学を離れて、より一般的な物理学に対する意識に関して、アンケート結果を見ていく。質問5の物理学が好きであると考えている学生が30/54(56%)、質問6の力学が得意であると思っている学生がわからないと回答した学生を除くと22/47(47%)であった。これらの結果は、工学部の学生だから物理が好きで、力学が得意だとは言えないことを意味する。約半分の学生は、物理学が好きではなく、力学も苦手であると思っている。

最後に、量子コンピュータに関する質問をおこなった。質問7より、量子コンピュータに関しては、33/54(61%)の学生が知っているという回答結果を得た。また、分からないと答えて判断を保留した回答19人を除くと、量子コンピュータに興味があると回答した学生が約6割(23/35(66%))にのぼることが分かった(質問8)。また、質問9において、量子コンピュータについて勉強したいと答えた学生は、興味を持つと回答した学生と同数であった(なお、興味を持

った学生全員が勉強したいと回答したわけではなかった。たまたま、結果として同数になった)。興味がある学生の多くが勉強したいと思っていることが分かった。

6. おわりに

量子コンピュータにいたる計算機の歴史を振り返ることで、量子コンピュータの超越性あるいは学ぶべき理由を考えてきた。しかし、工学部では、量子力学の授業をおこなっていない学科が多い。それゆえ、量子コンピュータを勉強する必要性を感じないことがと多いかもしれない。アンケートの結果でも、34%(12/35)の学生が量子コンピュータについて興味がないと回答している。逆に言うと、約3分の2の学生は、新しい量子コンピュータを学んでみたいと考えている。これは、単に量子力学の勉強をさせるのではなく、量子コンピュータなどのトピックを紹介することにより、基礎となる量子力学などの学習に対する動機づけとなるのではないだろうか。

本論文では、量子コンピュータに至る計算機発展の歴史を振り返り、量子コンピュータを学ぶ意義を考えた。同時に、他大学を含め工学部で量子力学の授業がどのようにおこなわれているのかを調べた。さらに、現在の量子コンピュータの状況について調べ、すでに量子コンピュータが身近な存在であることが分かった。工学部の学生が新しいテクノロジーである量子コンピュータにどう取り組むかは、本論文だけでは完結しない大きなテーマである。本論文は、量子コンピュータをどう学ぶかの概要に相当する。

今後、量子コンピュータを使ったプログラミング、量子コンピュータの実現および現実的な応用について議論を展開したいと考えている。具体的には、量子ビットの具体化を通じた様々な量子ビットのメリットとデメリット、量子超越性に関連したショアのアルゴリズムなどソフトウェア、さらに IBM の Q# を使った量子コンピュータのプログラミングなどを介して、工学部学生の教育と量子コンピュータの可能性を議論する予定である。

謝 辞

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、大学院生の高津和紀君をはじめとする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] 長橋賢吾: よくわかる最新量子コンピュータの基本と仕組み, 秀和システム, pp. 159 (2018).
- [6] 宇津木健著, 徳永裕己監修: 絵で見てわかる量子コンピュータの仕組み, 翔泳社, pp.173 (2019).
- [7] 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).
- [8] P. Benioff: The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines, *Journal of Statistical Physics*. **22** (5), 563–591 (1980).
- [9] P. Benioff: Quantum mechanical Hamiltonian models of Turing machines. *Journal of Statistical Physics*. **29** (3), 515–546 (1982).
- [10] David Deutsch & Richard Jozsa: Rapid Solution of Problems by Quantum Computation, *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 439, pp. 553-558 (1992).
- [11] Peter W. Shor: Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring, *Proceedings, 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, Santa Fe, November 20-22, IEEE Computer Society Press, PP. 124-134 (1994)
- [12] Lov K. Grover: A fast quantum mechanical algorithm for database search, *Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC)*, May, pp. 212-219 (1996).
- [13] 古澤明: Blue backs B1648 古澤明の量子テレポーテーションー瞬間移動は可能なのか?ー, 講談社, pp. 185 (2009).
- [14] 解説アーカイブ (2017年09月29日金曜) 量子コンピューターはくらしを変える? 土屋敏之解説委員
- [15] 上田皖亮: 非線形性に基づく確率統計現象ーDuffing 方程式で表わされる系の場合, *電気学会論文誌 A* 第98巻, pp. 167-173 (1978).
- [16] 情報処理学会 HP: IPSJ コンピュータ博物館 /www.ipsj.or.jp/ IPSJ

- [17] ENIAC at Penn Engineering:
/www.seas.upenn.edu/about/history-heritage/eniac/
- [18] IBM HP (ibm.com) 誕生から 55 年 IBM メインフレームはどこまで進化しているのか
- [19] [PDF] 全国共同利用大型計算機システム利用の手引き-東京大学-
<https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/public/VOL4/No2/tetsuzuki-gaiyou.pdf>
- [20] 学術情報メディアセンター 京都大学情報環境機構 –沿革–
www.media.kyoto-u.ac.jp/accms_web/wp-content/upload/2016/03/ACCMS-2016-history.pdf
- [21] 北海道大学情報基盤センターHP センター概要 沿革 <https://www.iic.hokudai.ac.jp/overview/history/>
- [22] 東北大学サイバーサイエンスセンター HP センター概要 沿革
<https://www.cc.tohoku.ac.jp/enkaku.html>
- [23] ちょっと名大史 大型計算機センターの設置
[Nua:nua.jimu.nagoya-u.ac.jp/upload/meidaishi/210/180737dc73934291f11496e8142b5444.pdf](http://nua.nua.jimu.nagoya-u.ac.jp/upload/meidaishi/210/180737dc73934291f11496e8142b5444.pdf)
- [24] 大坂大学 サイバーメディアセンター
https://www.cmc.osaka-u.ac.jp/?page_id=89
- [25] 九州大学情報基盤研究開発センター 研究用計算機システム <https://www.cc.kyushu-u.ac.jp/scp/>
- [26] 統計数理研究所 HP 統計数理研究所 計算機展示室 <https://www.ism.ac.jp/ism-tour/>
- [27] CRAY Homepage company history
<https://www.cray.com/company/history>
- [28] C. H. Bennett, G. Brassard: Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing, Proceedings of IEEE International Conference on Computers Systems and Signal Processing, Bangalore India, pp. 175-179 (1984).
- [29] T. Kadowaki & H. Nishimori: Quantum annealing in the transverse Ising model, Phys. Rev. E, 58, 5355 (1998).
- [30] D-Wave Systems Inc. HP
<https://www.dwavesys.com/>
- [31] 竹内繁樹: 量子コンピューター超並列計算のからくりー, 講談社 BLUE BACKS, pp. 272 (2005).
- [32] 小出昭一郎: 量子論(改訂版), 裳華房, pp.194 (1990)(注; 1968 年第 1 版).
- [33] 小出昭一郎: 量子力学 I (改訂版), 裳華房, pp. 265(1990) (注: 1969 年第 1 版).
- [34] 小出昭一郎: 量子力学 II (改訂版), 裳華房, pp. 213 (1990)(注: 1969 年第 1 版).
- [35] P. Dirac: The Principles of Quantum Mechanics fourth edition, Oxford University Press, London, pp.312 (1958)(量子力学 原書第 4 版, ディラック著, 朝永振一郎, 玉木英彦, 木庭二郎, 大塚益比古, 伊藤大介 共訳, 岩波書店, pp. 474(1968)).
- [36] 朝永振一郎: 量子力学 I, みすず書房, pp. 294 (1980).
- [37] 朝永振一郎: 量子力学 II, みすず書房, pp. 447 (1980).
- [38] 小野寺嘉孝: 演習で学ぶ量子力学, 裳華房, pp. 185 (2002).

付録 Appendix

量子コンピュータについてのアンケート

2020年1月23日

年齢 歳 性別 男 女

1. 量子力学という言葉聞いたことがありますか？
 ある ない
2. 量子力学の勉強をしたことがありますか？
 ある ない
3. 量子力学と古典力学の違いを説明できますか？
 できる できない わからない
4. 不確定性原理を説明できますか？
 できる できない わからない
5. 物理学は好きですか？
 はい いいえ
6. 力学は得意でしたか？
 はい いいえ わからない
7. 量子コンピュータを知っていますか？
 知っている 知らない
8. 量子コンピュータに興味がありますか？
 ある ない わからない
9. 量子コンピュータについて勉強をしたいと思いませんか？
 はい いいえ わからない

ご協力ありがとうございました。

情報の取り扱いについて
本アンケートで得られた結果は、研究のみに使用します。

エポキシ官能基を有するコアシェル粒子による エポキシ樹脂と炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の強靱化

川内 崇弘* 米田 航* 山口綾香* 橋本 保*
漆崎 美智遠* 阪口 壽一* 川邊 和正** 近藤 慶一** 伊與 寛史**

Toughening of Epoxy Resins and Carbon Fiber-Reinforced Plastics (CFRPs) with Core-Shell Particles Containing Epoxy Functional Groups

Takahiro KAWAUCHI*, Ko YONEDA*, Ayaka YAMAGUCHI*, Tamotsu HASHIMOTO*
Michio URUSHISAKI*, Toshikazu SAKAGUCHI*,
Kazumasa KAWABE**, Keiichi KONDO**, and Hirohumi IYO**

(Received October 23, 2019)

Three types of core-shell particles with different epoxy contents were used as a toughening agent for bisphenol A-derived epoxy resins and carbon fiber-reinforced plastics (CFRPs) prepared therefrom. Influences of the epoxy content of the core-shell particles on heat resistance, rigidity and toughness of the cured epoxy resins and the CFRPs were investigated. The addition of the epoxy-containing core-shell particles slightly increased glass transition temperature (T_g) of the cured epoxy resins. An increase in the epoxy content of the core-shell particles increased tensile modulus (E) of the cured epoxy resin among the samples in the presence of the core-shell particles. The addition of the core-shell particles decreased the interfacial shear strength (IFSS) between the cured epoxy droplet and a carbon fiber in the measurement by the micro-droplet method, but an increase in the epoxy content of the core-shell particles increased IFSS. In the single-edge-notch bending (SENB) test, the presence of the core-shell particles improved the stress intensity factor (K_{IC}) of the cured epoxy resins, but an increase in the epoxy content of the core-shell particles rather lowered K_{IC} of the cured epoxy resins. An increase in the epoxy content of the core-shell particles increased E of the prepared CFRPs among the samples containing the core-shell particles. The presence of the core-shell particles improved the Charpy impact strength (α_{CN}) of the cured epoxy resins and the CFRPs, but an increase in the epoxy content of the core-shell particles did not necessarily increase their α_{CN} . In the end notched fracture (ENF) test, interlaminar fracture toughness (G) of the CFRPs was improved by the presence of the epoxy-containing core-shell particles, but an increase in the epoxy content of the core-shell particles rather lowered G of the CFRPs. These results indicate that the use of optimum epoxy content of the core-shell particle is important to obtain highly-tough CFRPs.

Key Words : CFRP, Toughness, Core Shell, Epoxy Resin

1. 緒言

繊維強化プラスチック (FRP) は高強度、軽量であるため様々な分野で使用されている。その中でも、耐薬品性などの特徴から、鉄やアルミニウムなどの金属に代わる材料として注目されている。FRP に用いられている強化繊維としては、ガラス繊維、炭素繊維、アラミド繊維など様々であるが、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は特に高弾性率、高強度という優れた特性を持つため、航空機、宇宙機器、ス

* 大学院工学研究科材料開発工学専攻

** 福井県工業技術センター

* Materials Science and Engineering Course,
Graduate School of Engineering

** Industrial Technology Center of Fukui Prefecture

スポーツ用品などに利用されている^[1]。現在、CFRPのマトリックス樹脂としてエポキシ樹脂が使用されている^[2]。しかし、エポキシ樹脂は高度に架橋した三次元の網目構造を持つため、しばしば脆いことが欠点とされてきており、複合材料分野への応用を視野に入れた場合、その低靱性の改良が強く望まれる^[3]。強靱化を目指すにあたり、ブタジエンニトリルゴムなどのゴム粒子を樹脂系へ添加して硬化樹脂を強靱化させる手法が報告されている^{[4]-[6]}。ゴム粒子は強靱化の効果は大きいですが、ゴム分子がエポキシ樹脂に相溶してエポキシ樹脂が可塑化し、耐熱性や弾性を低下させることも報告されている^[7]。そのため、耐熱性や弾性低下を改善する添加剤としてコアシェル粒子が開発された^{[7]-[9]}。一般にコアシェル粒子は、中心のコア部分をゴム状高分子で、外殻のシェル部分を樹脂状高分子で構成するように設計されている。樹脂からなる硬いシェル部分でゴム相が被覆されるため、ゴム状高分子とエポキシ樹脂が相溶することなく、エポキシ樹脂の耐熱性の低下を防ぐことができる^[10]。

マトリックス樹脂に強靱化剤として添加されるコアシェル粒子には主に二つの効果があると考えられる (Figure 1)^[11]。一つ目は、樹脂に亀裂(クラック)が発生した場合、その進展とともに樹脂内にあるコアシェル粒子が変形することによりエネルギーを吸収することであり、二つ目は、発生した亀裂をコアシェル粒子が橋かけ(ブリッジング)して亀裂の進展を防ぐことである。

コアシェル粒子の配合量の最適化などの研究は報告されているが^[12]、コアシェル粒子が官能基を持つ場合、その官能基の含有量の最適化に関する報告はこれまでにない。そこで、本研究では、近年開発されたエポキシ官能基を有するコアシェル粒子を硬化エポキシ樹脂とCFRPの強靱化剤として利用し

(Scheme 1)、コアシェル粒子中のエポキシ含有量がCFRPの力学的特性に及ぼす影響を検討した。用いたコアシェル粒子は、コア部分がポリブタジエン、シェル部分がメタクリル酸エステルからなり、シェル部分にエポキシ基が種々の含量で導入されている (UF-1, UF-2, UF-3; Figure 2)。コアシェル粒子のエポキシ含有量が増加することにより、コアシェル粒子とエポキシ樹脂の接着性が向上し、ブリッジングによる強靱化の効果を向上させることができ、さらに、架橋点が増えるため、弾性率・耐熱性も向上することが期待できる。そこで、エポキシ含有量の異なるコアシェル粒子により強靱化された硬化エポキシ樹脂とCFRPの耐熱性・強度・靱性を測

定し、コアシェル粒子中のエポキシ含有量を最適化した。

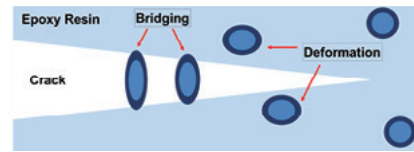


Figure 1. Image of toughening mechanism by core shell particles.

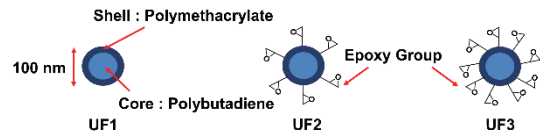
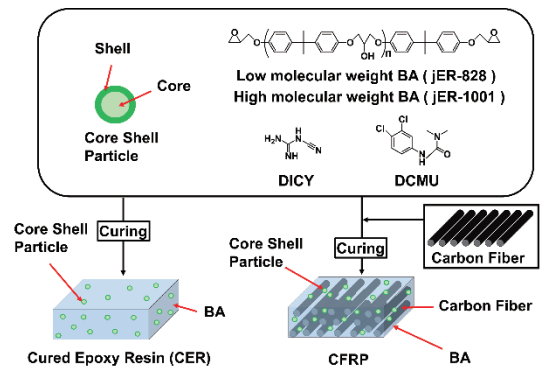


Figure 2. Image of core shell particles used.



Scheme 1. Schematic picture of preparation of core shell-containing cured epoxy resin (CER) and CFRP.

2. 実験

2.1 試薬・材料

35 wt%のコアシェル粒子 (UF1) と 65 wt%のビスフェノール A 型エポキシ樹脂 (BA) の混合物 [(MX-EXP (UF1)], 35 wt%のコアシェル粒子 (UF2) と 65 wt%の BA の混合物 [(MX-EXP (UF2)], 35 wt%のコアシェル粒子 (UF3) と 65 wt%の BA の混合物 [(MX-EXP (UF3)] は、カネカ (株) から提供されたものを使用した。ジシアンジアミド (jER キュア DIC15) は三菱化学 (株)、3-(3,4-ジクロロフェニル)-1,1-ジメチル尿素 (DCMU99) は保土谷化学工業 (株)、低分子量ビスフェノール A 型エポキシ樹脂 (jER828)、高分子量ビスフェノール A 型エポキシ樹脂 (jER1001) は三菱化学 (株) 製のものを使用した。

2.2 樹脂混練

井上製作所 (株) の熱硬化性樹脂調製装置 (PLM-

2-1) を用いて、コアシェル粒子と BA の樹脂混練を Table 1 に示す配合で行った。コアシェル粒子のエポキシ含有量は式(1)を用いて計算した。

$$EC_{\text{Core shell}} = \frac{EC_{\text{MX-EXP}} - 0.65EC_{\text{BA}}}{0.35} \quad (1)$$

$EC_{\text{Core shell}}$ (mol/g) はコアシェル粒子のエポキシ含有量, $EC_{\text{MX-EXP}}$ (mol/g) は MX-EXP のエポキシ含有量, EC_{BA} (mol/g) は MX-EXP に含まれる BA のエポキシ含有量である。EC はエポキシ当量 (g/eq) の逆数である。まず、従来の BA のみの樹脂混練を行った。jER828 (エポキシ当量, 187 g/eq) と jER1001 (エポキシ当量, 474 g/eq) とを 80 °C で 0.5 時間、脱泡しながら混練した。その後、硬化剤である DICY15 と硬化促進剤である DCMU99 を加えて再び脱泡を行いながら 1.5 時間混練した。次に、BA にコアシェル粒子を加えた樹脂混合物の混練を行った。jER828 と MX-EXP (UF1) (エポキシ当量, 286 g/eq) を 80 °C で 0.5 時間、脱泡を行いながら混練した。次に、jER1001 を加えて 80 °C で 0.5 時間、脱泡を行いながら混練した。その後、硬化剤である DICY15 と硬化促進剤である DCMU99 を加えて再び脱泡を行いながら 1.5 時間混練した。MX-EXP (UF2) (エポキシ当量, 277 g/eq), MX-EXP (UF3) (エポキシ当量, 269 g/eq) を用いた場合においても同様の手順で行った。

2.3 コアシェル粒子と BA の硬化エポキシ樹脂の作製

樹脂混練で作製した BA のみの樹脂および、BA にコアシェル粒子を加えた樹脂混合物の硬化エポキシ樹脂を作製した。2 枚のステンレス板の片面に離型剤を塗布し、樹脂が漏れないようにするために、1 枚のステンレス板上に、耐熱性の両面テープを用いて長方形で厚さ 2 mm のテフロンシートを取り付け、樹脂を流し込み、もう一枚のステンレス板で挟んだ。

ステンレス板で挟まれた樹脂を、60 °C で 3 時間脱泡させ、その後、130 °C で 2 時間加熱させることにより樹脂を硬化させ、2 mm 厚の硬化エポキシ樹脂を得た。また、厚さ 4 mm のテフロンシートを用いて 4 mm 厚の硬化エポキシ樹脂も得た。

2.4 コアシェル粒子と BA の CFRP の作製

樹脂混練で作製した BA のみの樹脂および、BA にコアシェル粒子を加えた樹脂混合物の CFRP を作製した。(株) ヒラノテクシード製の樹脂コーティング装置 (マルチコーター M-500) を用いて、離型紙に厚みが一樣になった樹脂を転写することによりプレポリマーシートを作製した。プリプレグシートの作製には、福井県工業技術センターが開発した空気開繊機構および縦振動付与機構を取り入れた薄層プリプレグ製造装置^[13]を用いた。炭素繊維は三菱ケミカル (株) 製 (TR50s 15L; 繊維径 6.8 μm) を使用した。作製したプリプレグシートを [0]₈₀ と [0]₅₀ のコンフィギュレーションで積層した。1 枚のプリプレグシートの厚みは約 40 μm であり、作製した積層板の厚みはそれぞれ約 3.2 mm, 2 mm であった。オートクレーブを用いてこの積層板中の樹脂を硬化させることにより CFRP を得た。硬化条件は、すべてのプリプレグシートに対して 0.5 MPa の圧力下で、130 °C, 2 時間の条件で行った^{[14]-[17]}。

2.5 測定

硬化エポキシ樹脂のガラス転移温度は、エスアイアイ・テクノロジー (株) 製 EXSTAR DSC6220 を用いて測定した。標準サンプルにはアルミパンを用いて、窒素雰囲気下で昇温速度 10 °C/min の温度条件で行い、ガラス転移温度 (T_g) を測定した。硬化エポキシ樹脂の引張試験は JIS K 7161 に基づいて行い、試験片のサイズは JIS K 7139 の短冊試験片 (タイプ B) を用いた^[18]。硬化エポキシ樹脂を、複合材料切

Table 1. Composition of cured epoxy resins (CERs)^{a)}

CER ^{b)}	Epoxy content of core shell, mmol/g	Core shell particle, phr ^{c)}	Low-molecular-weight BA ^{d)} , wt%	High-molecular-weight BA, wt%
Neat CER	-	0	40	60
UF1-CER	0	15	40	60
UF2-CER	0.383	15	40	60
UF3-CER	0.690	15	40	60

- (Low-molecular-weight BA) + (High-molecular-weight BA) = 100 wt%.
- [Epoxy group of epoxy resins]₀/[active hydrogen of amine groups of DICY]₀ = 0.72.
[DCMU (curing accelerator)]₀/[DICY (curing agent)]₀ = 0.14.
- Per hundred resin.
- (BA in MX-EXP) + (jER-828) = (Low-molecular-weight BA).

断機を用いて切断し、80 mm (長さ) × 10 mm (幅) の試験片を作製した (つかみ間距離; 50 mm). そして、島津製作所製 AUTOGRAPH AG IS (ロードセル; 5 kN セル) を用いて、標線間距離 20 mm, 引張速度 0.5 mm/min の条件で行った^[19]. 樹脂混合物のマイクロドロプレット試験は東栄産業 (株) 製複合材界面特性評価装置 MODEL HM410 を用いて行った. まず、未硬化のエポキシ樹脂玉 (ドロプレット) を単繊維につけ、オーブンで 130 °C, 2 時間の条件で硬化させた. 硬化したドロプレットをブレードにより固定し、繊維を引き抜くことで測定した. 試験の引き抜き速度は 0.12 mm/min, 荷重測定には 1 N ロードセルを使用し、繊維と樹脂が剥離するまで測定を行った^[20]. 硬化エポキシ樹脂のシャルピー衝撃試験は JIS K 7111-1 に基づいて行った. 複合材料切断機を用いて、80 mm (長さ) × 10 mm (幅) の試験片を作製した. 作製した試験片中心の片側に、ノッチを入れ (ノッチ半径; $r_N = 0.25 \pm 0.05$ mm), 安田精機製作所製の衝撃試験機を用いて、振り子 2J, エッジワイズ衝撃により行った^[21]. 硬化エポキシ樹脂の片側切欠き曲げ (SENB) 試験は ASTM D 5045 に基づいて行った. 複合材料切断機を用いて、44 mm (長さ) × 10 mm (幅) × 4 mm (厚さ) の試験片を作製した. 作製した試験片中心の片側に、ノッチを入れ (ノッチ半径; $r_N = 0.25 \pm 0.05$ mm), さらに初期亀裂として、5 mm の亀裂を入れた. 試験では、島津製作所製 AUTOGRAPH AG IS (ロードセル; 5 kN セル) を用いて、支点間距離 40 mm, 試験速度 10 mm/min の条件で三点曲げ試験を行った^[22]. CFRP の引張試験は JIS K 7165 に基づいて行い、B 型試験片 (繊維に直角方向) を用いた. 複合材料切断機を用いて、250 mm (長さ) × 25 mm (幅) の試験片を作製した (つかみ間距離; 100 mm). 引張試験では、島津製作所製 AUTOGRAPH AG IS (ロードセル; 5 kN セル) を用いて、標線間距離 50 mm, 引張速度 1.0 mm/min の条件で行った^[23]. CFRP のシャルピー衝撃試験は JIS K 7077 に基づいて行った. 複合材料切断機を用いて、80 mm (長さ) × 10 mm (幅) の試験片を作製した. 安田精機製作所 (株) 製の衝撃試験機を用いて、試験機の秤量 5 J, フラットワイズ衝撃により行った^[24]. CFRP の端面切欠き曲げ (ENF) 試験は JIS K 7086 に基づいて行い、試験片は成形板の積層時に初期亀裂導入のため、テフロンシートを積層中央面に縁が繊維配列方向と直角になるよう挿入 (25 mm) した成形板を用いた. また、複合材料切断機を用いて、140 mm (長さ) × 20 mm (幅) の試験片を作製した. 試験では、島津製作所製 AUTOGRAPH AG IS (ロードセル; 5 kN セル) を用いて、支点間距離 100 mm,

試験速度 0.5 mm/min の条件で行った^[25]. 走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察は、HITACHI S-3400N を用いて、加速電圧 1.0 kV にて行なった.

3. 結果と考察

3.1 硬化エポキシ樹脂の熱的特性

作製した硬化エポキシ樹脂の T_g を DSC により測定し、コアシェル粒子のエポキシ含有量による耐熱性の変化を検討した. 測定結果を Figure 3 に示す. まず、ゴム粒子をマトリックス内に配合した際に生じる T_g の低下は起こらなかった. シェルでゴム部位が覆われていることで、ゴム部位と周りのエポキシ樹脂の相溶を防いだためであると考えられる. さらに、コアシェル粒子のエポキシ含有量が増加することにより、わずかに、 T_g が上昇した. これはシェルに存在するエポキシ基がマトリックス樹脂であるエポキシ樹脂と反応してコアシェルが架橋鎖に組み込まれ、架橋点が増加したためであると考えられる.

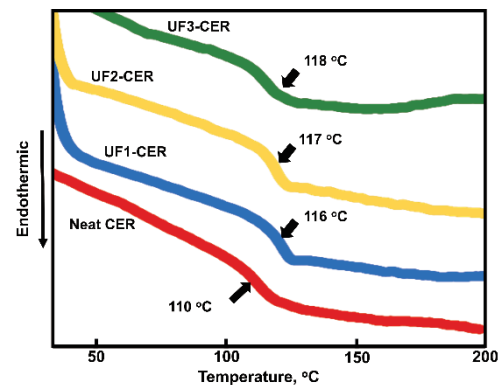


Figure 3. DSC thermograms of core shell containing-cured epoxy resins (CERs): Neat CER (no core shell particle), UF1-CER (epoxy content of core shell 0 mmol/g), UF2-CER (epoxy content of core shell 0.383 mmol/g), UF3-CER (epoxy content of core shell 0.690 mmol/g).

3.2 硬化エポキシ樹脂の力学的特性

作製した硬化エポキシ樹脂の力学的特性を、引張試験、マイクロドロプレット試験、シャルピー衝撃試験、片側切欠き曲げ試験により評価した (Table 2). 引張試験にて得られた応力-ひずみ曲線を Figure 4 に示す. コアシェル粒子を配合した硬化エポキシ樹脂の最大応力 (σ_{max}) と初期弾性率 (E , 0.1%–0.3%) は、コアシェル粒子を配合していない硬化エポキシ樹脂と比べ低下した. これは一般的に強靱化剤として用いられるゴム粒子を樹脂に配合した場合と同様

である^[10]。しかし、UF2-CERの σ_{\max} はUF1-CERと比較すると大きな値を示した。これはコアシェル粒子のエポキシ基が周りのエポキシ樹脂と反応して、架橋点が増加したためであると考えられる。しかし、エポキシ含有量の異なるUF2-CERとUF3-CERの σ_{\max} 、 E はほとんど同じであった。

次に、マイクロドロプレット法により、樹脂玉（ドロプレット）と炭素繊維の界面せん断強度（IFSS）を測定し、コアシェルを配合したエポキシ樹脂の炭素繊維に対する接着性を検討した。測定結果をFigure 5に示す。コアシェル粒子を配合した樹脂のIFSSはコアシェル粒子を配合していない樹脂と比べて低下した。しかし、コアシェルのエポキシ含量が増加すると、粒子を含めたことによるIFSSの低下をより抑えられた。コアシェル粒子が繊維と樹脂の界面に存在する場合を考えると、UF1のようなエポキシ基を有していない粒子では、単に異物として繊維と樹脂の密着性を阻害してしまうのに対し、UF2、UF3のようなエポキシ基を有する粒子では粒子表面のエポキシ基がマトリックスのエポキシ樹脂と反応してマトリックス樹脂と炭素繊維との接着を促していると考えられる。

シャルピー衝撃試験の結果をFigure 6に示す。シャルピー衝撃値（ α_{CN} ）とは単位面積当たりの試験片破壊に用いられたエネルギーである。樹脂にコアシェル粒子を配合した硬化エポキシ樹脂の α_{CN} は、樹脂にコアシェル粒子を配合していない硬化エポキシ樹脂と比べてより大きな値を示した。しかし、コアシェルに存在するエポキシ基の効果はほとんど見られなかった。

次に、硬化エポキシ樹脂の応力拡大係数（ K_{IC} ）を

測定するため、SENB試験を行なった。試験結果をFigure 7に示す。コアシェル粒子の配合は硬化エポキシ樹脂の K_{IC} を大きく増加させた。特に、エポキシ基を持たないUF1の配合は硬化エポキシ樹脂の K_{IC} を最も増加させた。しかし、コアシェルのエポキシ基が増加することにより、 K_{IC} が徐々に低下することがわかった。シェルに有しているエポキシ基が周りのマトリックスエポキシ樹脂と架橋することにより、界面接着性が向上し、ブリッジングの効果は向上したと推定される。しかし、靱性が低下した。これはコアシェル粒子のエポキシ基が周りのマトリックスエポキシ樹脂と架橋することにより、コアシェル粒子の変形が妨げられ、変形によるエネルギー吸収ができなかったためだと考えられる。

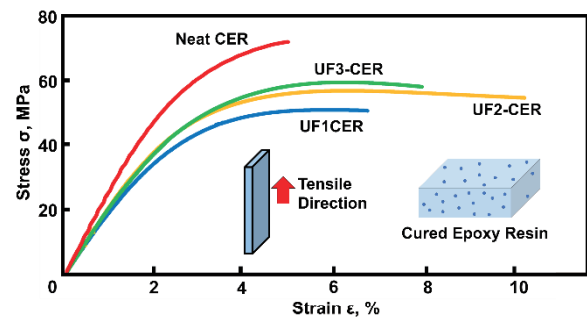


Figure 4. Stress-strain curve of core shell-containing cured epoxy resins (CERs): Neat CER (no core shell particle), UF1-CER (epoxy content of core shell 0 mmol/g), UF2-CER (epoxy content of core shell 0.383 mmol/g), UF3-CER (epoxy content of core shell 0.690 mmol/g).

Table 2. Thermal and mechanical properties of cured epoxy resins (CERs)

CER ^{a)}	Epoxy content of core shell, mmol/g	T_g^b , °C	σ_{\max}^c , MPa	E^d , GPa	IFSS ^{e)} , MPa	α_{CN}^f , kJ/m ²	K_{IC}^g , MPa·m ^{1/2}
Neat CER	-	110	72.08	2.68	22.07	1.42	1.38
UF1-CER	0	116	51.03	2.10	12.30	2.90	3.11
UF2-CER	0.383	117	56.58	2.20	13.01	2.91	2.68
UF3-CER	0.690	118	59.56	2.20	15.15	3.01	2.51

a) $[\text{Epoxy group of epoxy resins}]_0/[\text{active hydrogen of amine groups of DICY}]_0 = 0.72$.

$[\text{DCMU (curing accelerator)}]_0/[\text{DICY (curing agent)}]_0 = 0.14$.

b) Glass transition temperature measured by differential scanning calorimetry (DSC) on second heating scan.

c) Maximum stress measured by tensile test.

d) Initial elastic modulus (Strain 0.1 – 0.3 %) measured by tensile test.

e) Interfacial adhesive strength measured by micro-droplet method.

f) Charpy impact strength.

g) Stress intensity factor measured by single-edge-notch bending (SENB) test.

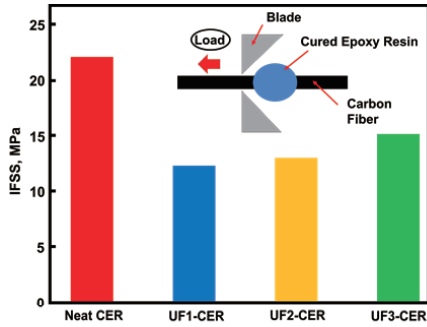


Figure 5. Interfacial adhesive strength of core shell-containing cured epoxy resins (CERs): Neat CER (no core shell particle), UF1-CER (epoxy content of core shell 0 mmol/g), UF2-CER (epoxy content of core shell 0.383 mmol/g), UF3-CER (epoxy content of core shell 0.690 mmol/g).

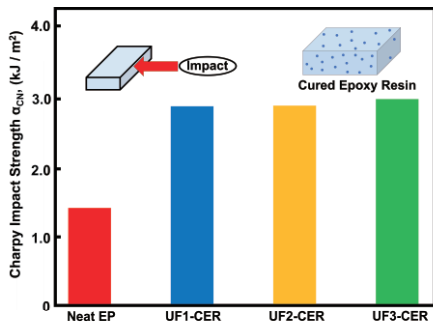


Figure 6. Charpy impact strength of core shell-containing cured epoxy resins (CERs): Neat CER (no core shell particle), UF1-CER (epoxy content of core shell 0 mmol/g), UF2-CER (epoxy content of core shell 0.383 mmol/g), UF3-CER (epoxy content of core shell 0.690 mmol/g).

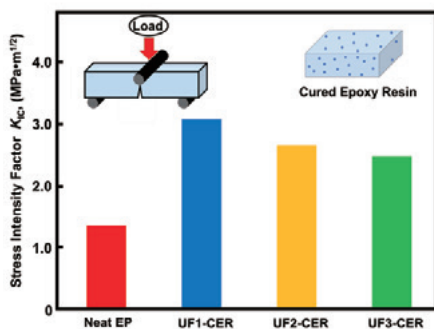


Figure 7. Stress intensity factor of core shell-containing cured epoxy resins (CERs): Neat CER (no core shell particle), UF1-CER (epoxy content of core shell 0 mmol/g), UF2-CER (epoxy content of core shell 0.383 mmol/g), UF3-CER (epoxy content of core shell 0.690 mmol/g).

3.3 CFRP の力学的特性

作製した CFRP の力学的特性を引張試験, シャルピー衝撃試験, ENF 試験により評価した (Table 3). 引張試験の結果を Figure 8 に示す. コアシェル粒子を樹脂に配合した場合には, σ_{\max} , E (0.1%–0.25%) が低下した. しかし, シェルのエポキシ基が増加することにより, 粒子を含めたことによる σ_{\max} の低下をより抑えることができるとわかった. CFRP の 90° 引張試験では, 繊維と樹脂の間の界面で破壊が生じる. そのため, E の低下はマイクロドロップレット試験と同様に, 繊維と樹脂の密着性を阻害したためであると考えられる. また, UF2, UF3 では粒子表面のエポキシ基がマトリックスのエポキシ樹脂と反応してマトリックス樹脂と炭素繊維との接着を促しているため, E の低下を抑制したと考えられる. CFRP の引張試験においても, 硬化エポキシ樹脂の場合と同様に, UF2-CEP と UF3-CEP の σ_{\max} , E はほとんど同じであった.

シャルピー衝撃試験の結果を Figure 9 に示す. 樹脂にコアシェル粒子を配合した CFRP は樹脂にコアシェル粒子を配合していない CFRP と比べ, α_{CN} が大きく上昇した. また, シェルのエポキシ基を多くすることで, α_{CN} は徐々に低下した. これは硬化エポキシ樹脂の SENB 試験と同様に, シェルに有しているエポキシ基が周りのエポキシ樹脂と架橋することにより, コアシェル粒子の変形が抑制されてしまい, 変形によるエネルギー吸収ができなかったためと考えられる.

ENF 試験の結果を Figure 10 に示す. 樹脂に UF1, UF2 を配合した CFRP は樹脂にコアシェル粒子を配合していない CFRP と比べ, 層間破壊靱性値 (G) が上昇した. また, エポキシ基を有するコアシェル粒子である UF2 はエポキシ基を有していない UF1 と比べ CFRP の G を大きく増加させた. これはシェルのエポキシ基が周りのエポキシ樹脂, 炭素繊維と架橋することにより, シェルにエポキシ基を持たない粒子と比べ繊維との接着性が高く,ブリッジングの効果が向上したためだと考えられる. しかし, UF3 を用いた CFRP では靱性が低下し, UF3 は層間破壊においては強靱化剤としての効果を全く示さなかった. これは, コアシェル粒子が周りのエポキシ樹脂や炭素繊維と架橋し過ぎることにより, コアシェル粒子の変形が起らず, 破壊エネルギーを吸収できなかったためであると考えられる.

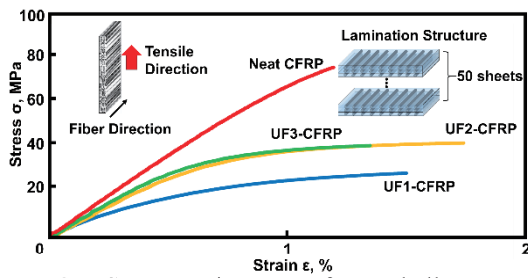


Figure 8. Stress-strain curve of core shell-containing CFRPs: Neat CFRP (no core shell particle), UF1-CFRP (epoxy content of core shell 0 mmol/g), UF2-CFRP (epoxy content of core shell 0.383 mmol/g), UF3-CFRP (epoxy content of core shell 0.690 mol/g).

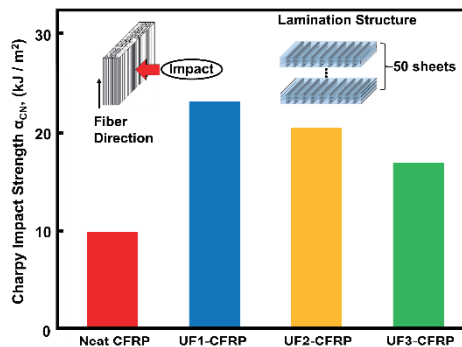


Figure 9. Charpy impact strength of core shell-containing CFRPs: Neat CFRP (no core shell particle), UF1-CFRP (epoxy content of core shell 0 mmol/g), UF2-CFRP (epoxy content of core shell 0.383 mmol/g), UF3-CFRP (epoxy content of core shell 0.690 mmol/g).

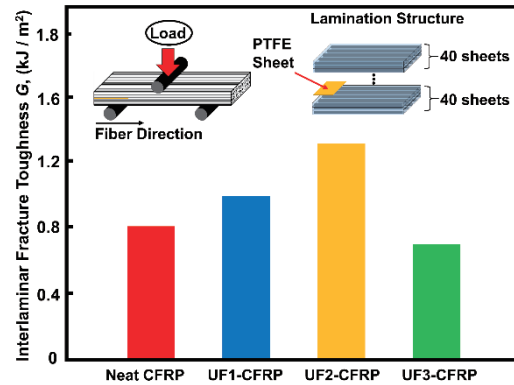


Figure 10. Interlaminar fracture toughness of core shell-containing CFRPs: Neat CFRP (no core shell particle), UF1-CFRP (epoxy content of core shell 0 mmol/g), UF2-CFRP (epoxy content of core shell 0.383 mmol/g), UF3-CFRP (epoxy content of core shell 0.690 mmol/g).

3.4 CFRPの断面観察

作製した CFRP を走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した. CFRP の断面を Figure 11 に示す. UF1-CFRP と UF2-CFRP では, 表面を研磨したことにより, エポキシ樹脂からコアシェル粒子が剥離した跡が見られた. しかし, UF3-CFRP ではコアシェル粒子が剥離した跡が見られなかった. これはコアシェル粒子のエポキシ基が周りのエポキシ樹脂と高度に架橋しているためであると考えられる. そのため, ENF 試験では UF3-CFRP はコアシェル粒子の変形が起こらず, 結果として靱性が向上しなかったと考えられる.

Table 3. Mechanical properties of carbon fiber-reinforced plastics (CFRPs)

CFRP ^{a)}	Epoxy content of core shell, mmol/g	$\sigma_{\max}^b)$, MPa	$E^c)$, GPa	$\alpha_{CN}^d)$, kJ/m ²	$G^e)$, kJ/m ²
Neat CFRP	-	75.59	7.87	9.93	0.80
UF1-CFRP	0	29.44	3.96	23.23	0.98
UF2-CFRP	0.383	43.27	5.98	20.54	1.30
UF3-CFRP	0.690	42.12	6.31	16.99	0.69

- [Epoxy group of epoxy resins]₀/[active hydrogen of amine groups of DICY]₀ = 0.72. [DCMU (curing accelerator)]₀/[DICY (curing agent)]₀ = 0.14.
- Maximum stress measured by tensile test.
- Initial elastic modulus (Strain 0.1 – 0.25 %) measured by tensile test.
- Charpy impact strength.
- Interlaminar fracture toughness measured by end notched flexure (ENF) test.

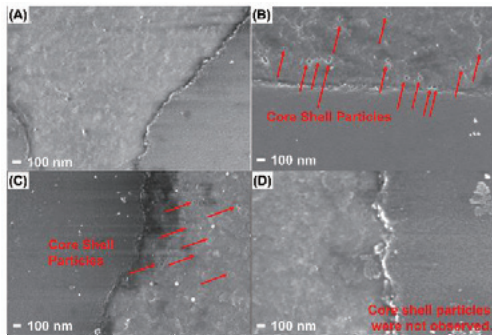


Figure 11. SEM image of core shell-containing CFRPs: (A) Neat CFRP (no core shell particle), (B) UF1-CFRP (epoxy content of core shell 0 mmol/g), (C) UF2-CFRP (epoxy content of core shell 0.383 mmol/g), (D) UF3-CFRP (epoxy content of core shell 0.690 mmol/g).

4. 結論

3種類のエポキシ含有量の異なるコアシェル粒子を用いて、4種類の硬化エポキシ樹脂と4種類のCFRPを作製し、耐熱性、剛性、靱性を検討した。コアシェル粒子のエポキシ含有量が増加するほど硬化エポキシ樹脂の T_g がわずかに向上することがわかった。コアシェル粒子のエポキシ基の存在は、コアシェル粒子の配合による硬化エポキシ樹脂、CFRPの E の低下を抑制した。硬化エポキシ樹脂の K_{IC} はコアシェル粒子のエポキシ含有量が増加するほど、低下した。CFRPの G はコアシェル粒子のエポキシ基の存在により改善されたが、コアシェル粒子のエポキシ含有量の増加はCFRPの G を低下させた。これらより、コアシェル粒子の配合による弾性の低下を抑制し、層間破壊時に最も高い靱性値を示したUF2が最も良い強靱化剤であった。つまり、本コアシェル粒子にエポキシ官能基を導入する場合、官能基含有量を0.383 mmol/g程度にすべきであると考えられる。

5. 文献

[1] 総説エポキシ樹脂第1巻基礎編I, 第2章エポキシ樹脂, p.19, エポキシ樹脂技術協会 (2003).
 [2] 垣内弘編: 新エポキシ樹脂, 第11章「積層品」, p.477, 昭晃堂 (1985).
 [3] 総説エポキシ樹脂第2巻基礎編II, 第2章変質・変性, p.57, エポキシ樹脂技術協会 (2003).

[4] R. A. Pearson, A. F. Yee : *J. Mater. Sci.*, **24**, 2571 (1989).
 [5] M. Ueda, N. Shishido, T. Ikeda, N. Miyazaki : *Trans JSCE*, 20090007 (2009).
 [6] D. B. Lee, T. Ikeda, M. Todo, N. Miyazaki, K. Takahashi : *Trans JSME*, **65**, 439 (1999).
 [7] A. Klingler, A. Bajpai, B. Wetzel : *Eng. Fract. Mech.*, **203**, 81 (2018).
 [8] J. Chen, A. J. Kinloch, S. Sprenger, A. C. Taylor : *Polymer*, **54**, 4276 (2013).
 [9] H. Park, H. Jung, J. Yu, M. Park, S. Y. Kim : *e-Polymers*, **15**, 369 (2015).
 [10] G. Giannakopoulos, K. Masania, A. C. Taylor : *J. Mater. Sci.*, **46**, 327 (2011).
 [11] H. Kishi : *J. Adhesion Soc. Jpn.*, **43**, 426 (2007).
 [12] D. Quan, A. Ivankovic : *Polymer*, **66**, 16 (2015).
 [13] K. Kawabe : *Sen'i Gakkaishi*, **64**, 262 (2008).
 [14] JIS K 7072, Japanese Standards Association.
 [15] A. Yamaguchi, T. Hashimoto, Y. Kakichi, M. Urushisaki, T. Sakaguchi, K. Kawabe, K. Kondo, H. Iyo : *J. Polym. Sci., Part A : Polym. Chem.*, **53**, 1052 (2015).
 [16] K. Kakichi, A. Yamaguchi, T. Hashimoto, M. Urushisaki, T. Sakaguchi, K. Kawabe, K. Kondo, H. Iyo : *Polym. J.*, **49**, 851 (2017).
 [17] R. Aoki, A. Yamaguchi, T. Hashimoto, M. Urushisaki, T. Sakaguchi, K. Kawabe, K. Kondo, H. Iyo, *Polym. J.*, **51**, 909 (2019).
 [18] JIS K 7139, Japanese Standards Association.
 [19] JIS K 7161, Japanese Standards Association.
 [20] A. Yamaguchi, T. Hashimoto, Y. Kakichi, M. Urushisaki, T. Sakaguchi, K. Kawabe, K. Kondo, H. Iyo : *Kobunshi Ronbunshu*, **73**, 244 (2016).
 [21] JIS K 7111-1, Japanese Standards Association.
 [22] ASTM D 5045, American Society for Testing and Materials.
 [23] JIS K 7165, Japanese Standards Association.
 [24] JIS K 7077, Japanese Standards Association.
 [25] JIS K 7086, Japanese Standards Association.

福井大学工学部及び大学院工学研究科紀要編集委員会

田嶋 直樹	物理工学専攻（紀要編集委員長）		
吉田 達哉	機械工学専攻	川戸 栄	電気・電子工学専攻
橘 拓至	情報・メディア工学専攻	原田 陽子	建築建設工学専攻
阪口 壽一	材料開発工学専攻	高橋 一朗	生物応用化学専攻
長宗 高樹	知能システム工学専攻	平田 豊章	繊維先端工学専攻
中島 恭平	原子力・エネルギー安全工学専攻		

福井大学大学院工学研究科研究報告

http://www.eng.u-fukui.ac.jp/ResearchActivities/memoirs_index.htm

福井大学大学院工学研究科研究報告 別冊 研究活動一覧

<http://www.eng.u-fukui.ac.jp/ResearchActivities/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>

福井大学工学研究科研究報告

2020年3月19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（総合戦略部門研究推進課）

印刷所 能登印刷株式会社