

八戸工業高等専門学校

紀 要

第 56 号

令 和 4 年

八戸工業高等専門学校

八戸工業高等専門学校紀要 第56号 目次

<教育論文>

女性エンジニアへのキャリア支援2
-コロナ禍における八戸高専「ろぼっと娘」の社会貢献活動- …… 齋 麻 子 …… 1

八戸高専における観光を通じた文化教育とリーディングの可能性 …… 菊 池 秋 夫 …… 9

組み込みロボット授業における地域企業と連携したものづくり技術交流の実践(4) …… 細 吉 川 靖
中 田 村 雅 昭
野 中 嘉 孝
遠 田 達 崇
也

<研究論文>

ダウンサンプリング処理を用いた自動運転のためのオブジェクト検出法 …… 工 藤 憲 昌
長 屋 博 輝
釜 谷 嘉 行
田 所 嘉 昭

量子力学の観測問題はなかった？
--量子力学の半分は情報理論である III-- …… 中 ノ 勇 人 …… 27

熱CVD法による二次元物質六方晶窒化ホウ素結晶の成長 …… 中 村 嘉 孝
小 子 内 行 羅
角 館 田 俊 行
鎌 田 貴 晴

熱CVD法によるグラフェンの結晶成長と転写技術の開発 …… 中 村 嘉 孝
小 角 橋 正 幹
鎌 館 田 俊 行
田 貴 晴

機械学習を用いた耐候性鋼材のさび外観評価モデルの開発 …… 杉 田 尚 男 …… 43

RESEARCH REPORTS

National Institute of Technology, Hachinohe College

No.56 2021

Contents

<Education Theses>

Developing Career Path for Female Engineers 2 -With Special Reference to the Continuous Activities of Social Contribution by NIT, Hachinohe College 'Robot Musume' in the Social Situation of COVID 19-	..... Asako SAI	..... 1
The Possibility of Cultural Education and Reading through Tourism at NIT, Hachinohe College	..... Akio KIKUCHI	..... 9
Craftsmanship Tchnology Exchange which Cooperated with the Local Company on Handicraft Class of Line-following Robots by Microcomputers (4)	Yasushi HOSOKAWA Masaaki YOSHIDA Yoshitaka NAKAMURA Takashi NONAKA Tatsuya TOHDA	..... 15

<Research Theses>

A study on detecting movement of objects using down-sampling processing	Norimasa KUDOH Hikaru NAGAYA Hiroyuki KAMAYA Yoshiaki TADOKORO	..... 21
There has not been the Measurement Problem in Quantum Mechanics? --A half of Quantum Mechanics is an information theory (III)--	..... Hayato NAKANO	..... 27
Growth of two-dimensional material hexagonal boron nitride crystal by thermal CVD method	Yoshitaka NAKAMURA Takara OKONAI Toshiyuki KAKUDATE Takaharu KAMADA	..... 35
Development of Crystal Growth and Transfer Technology of Graphene by Thermal CVD Method	Yoshitaka NAKAMURA Masaki KOBASHI Toshiyuki KAKUDATE Takaharu KAMADA	..... 39
Development of rust appearance evaluation model for weathering steel using deep learning	..... Hisao SUGITA	..... 43

女性エンジニアへのキャリア支援 2

-コロナ禍における八戸高専「ろぼっと娘」の社会貢献活動-

齋 麻子*

Developing Career Path for Female Engineers 2

With Special Reference to the Continuous Activities of Social Contribution by NIT, Hachinohe College 'Robot Musume' in the Social Situation of COVID-19

Asako SAI

* 総合科学教育科

Keywords :

Career paths, Female engineers, Social activities

1. はじめに

令和 3 年度に愛好会「ろぼっと娘」は結成から 4 年を迎えた。以前、拙稿「女性エンジニアへのキャリア支援—八戸高専『ろぼっと娘』の社会貢献活動を通して—」により、結成の経緯や結成初年度・平成 30 年度の活動内容を紹介した。(注 1)

本稿では、結成 4 年目の現在に至るまで活動内容、特にコロナ禍における地域貢献活動を中心に報告する。

2. 「ろぼっと娘」2 年目までの動き

拙稿では、結成前夜から結成初年度の活動を紹介したが、初年度の活動は、総じて言えば、活動開始の模索期であった。そのため、結成の契機となった鹿児島高専学生主事・塚崎香織教授率いる鹿児島高専「Robogals」と交流を重ね、活動方法を学んだ。(注 2)また、結成当時の背景として、本校は COC 事業の実施時期と重なり、学生による地域貢献活動を行っていた。この実績を活かし、八戸市民向けのイベント出展や小学校への出前授業を行った。小学校への出前授業については、本校の自主探究の枠組みの中で学生が主体的に出前授業の教材を作り、活動の中核にすることができた。

地域の市民向けイベントへの出展と小学校への出前授業という初年度の取り組みは、以降の「ろぼっと娘」の

中心的な活動となった。この 2 つの取り組みをベースに現在も活動を続けている。

2 年目の活動は、初年度からさらに継続性を持たせるための地ならしの活動となった。以下の項では、本校所在地・八戸市との地域の結びつき、および岩手大学による enpit 参加でのスキルアップについて紹介する。



写真 1 初年度の出前授業：八戸市立西白山台小学校

2.1 地域との結びつき—八戸市学生&高校生まちづくりコンペティション参加—

本校所在地である八戸市では、毎年、「学生まちづくり助成金」「高等学校地域活動促進事業助成金」を交付しており、採択され活動を行った学生団体に対し、その成果報告として「学生&高校生まちづくりコンペティション」

を実施している。「ろぼっと娘」は、結成2年目となる令和元年度より、市内大学生対象の「学生まちづくり助成金」を申請し、八戸市の助成を受けて活動を行っている。

初年度の活動の一つであった出前授業を充実させるために助成金を申請した。採択にあたり、審査会が設けられ、審査員から評価や助言を受けることができる。審査時の助言により、八戸市内小中学校でのプログラミング教育必修化をけん引する立場の八戸市教育センター・石井一二三氏を紹介いただいた。以後、「ろぼっと娘」の出前授業の教材開発は、八戸市のプログラミング教育必修化の取り組みの現状を踏まえ、石井氏をはじめとする地域小中学校の教育現場の方々から助言を賜りながら出前授業の教材づくりに取り組んでいる。

令和2年2月15日に実施された「令和元年度・第9回 学生&高校生まちづくりコンペティション」において、活動開始2年目の活動報告を発表し、取り組みが評価され、特別賞を受賞した。(注3)

この年実施した出前授業は、

- ・八戸市立明治中学校3年生
- ・八戸工業大学第二高等学校附属中学校2年生
- ・八戸市立三条小学校4年生
- ・八戸市立田面木小学校6年生
- ・八戸市立西白山台小学校5年生

上記5校で実施することができた。

出前授業の実施に当たっては、事前の教材づくりを自主探究として取り組む3年生2名を中心に行っている。実施校の教員の助言をもとに、対象となる生徒向けの教材を作成し、出前授業当日は約10名程度の学生で活動している。使用するロボット1台につき、子供たちに数名のグループを構成し、操作しながら考える活動時に、学生が2~3グループを見守り、助言をするというスタイルをとり、授業を実施している。



写真2 令和元年度・第9回
学生&高校生まちづくりコンペティション



写真3 西白山台小学校出前授業・講義編開始時



写真4 西白山台小学校出前授業・実習編

2.2 岩手大学による enPiT でのスキルアップ

結成初年度より、活動の中心に利用してきた Smart Small Turtle Robot に対する深い理解と、このロボットを小中学校でのプログラミング教育出前授業においてより活用できるかというスキルアップのため、「ろぼっと娘」の中核メンバーである4年生と3年生の有志が、岩手大学による enPiT プログラムに参加し、研鑽の場としている。enPiT とは、文部科学省の「国公立大学を通じた大学教育再生の戦略的推進」の支援事業のうち、大阪大学が中心となって全国で実施している「成長分野を支える情報技術人材の育成拠点の形成」事業を略したものである。enPiT は「ビッグデータ・AI 分野」「セキュリティ分野」「組込みシステム分野」「ビジネスシステムデザイン分野」の4分野からなる。ろぼっと娘が参加したのは、名古屋大学がリーダーとなる「組込みシステム分野」であり、岩手大学が連携校となって北東北の学生たちが参加したものである。(注4)

ろぼっと娘結成初年度より、本校情報系の4年生有志がこの事業に参加し、北東北の大学生・高専生と交流を持ちながら、研鑽を積んだ。2年目からはろぼっと娘の運営に携わる学生有志がこの事業に参加を継続している。

専門の技術を磨く自己研鑽の活動ではあるが、enPiT

参加学生の中でも、継続性をもったテーマで先輩から後輩へと受け継がれていく姿は、他に類がないことにより運営側からも大きな評価を得ることができた。集団としての活動の中で、個々のスキルを磨く機会をもつ活動もこの組織ならではのものと言える。



写真5 令和元年度 enPiT 成果報告会ポスター

3. コロナ禍における「ろぼっと娘」の活動

前節では結成 2 年目の主な活動を紹介した。結成当初は「Robogals」加盟が目標であり、その実現のための実績づくりが初年度からの取り組みであり、2年目はより地域に根差し、自らの研鑽を積む地固めの活動へと、堅実に活動の幅を伸ばして活動することができた。結成 3 年目となる昨年度、2年目からさらに継続的な活動を強め、「Robogals」の加盟へ向けて動き出そうとしていた。活動の場を広げ、八戸市まちづくりコンペティションで特別賞を受賞するなどの評価を糧に、さらなる活動を広げようとした結成 3 年目を迎えるのを目前に、世界を混乱に陥れたコロナ禍に突入することとなる。結成 3 年目は、コロナ禍での活動が強いられることとなった。

3.1 サイテックガールズでの活動

コロナ禍の混乱の只中にあった令和 2 年度は奇しくも本校が JST の次世代人材育成事業「女子中高生の理系進路選択支援プログラム」に採択された。本校は「はばたけ SciTech Girls(サイテック・ガールズ)―北東北産業都市八戸発！青森リケジョの人材交流型育成―」という企画名を掲げ、青森県における女子中高生への理系進路選択の啓もう活動を実施することとなった。「ろぼっと娘」は女子学生を中心に活動

する愛好会であるため、この企画の旗頭として地域の女子中高生のロールモデルとしての役割を期待されている。

コロナ禍で人が集まるイベントの開催が難しい中、感染対策を十分に行いながら、以下の催しが企画された。(注 5)

- ・八戸高専説明会およびサイテック・フェス(青森市)8月23日
- ・サイテック・フェス in 弘前(弘前市)9月26日

本校を会場として開催予定であったサイテック・フェス in 八戸(12月12日開催予定)は、残念ながら感染拡大により、開催中止となった。限られたイベント開催時にも参加し、女子中高生のロールモデルとして活動を紹介した。



写真6 8月23日の青森会場での様子

3.2 コロナ禍の出前授業

世の中の流れに違わず、本校の令和 2 年度の開始は学生を登校させない形で開始された。本校だけをとって見ても、人々が集まり活動を共にすることを制限されていたため、出前授業などという、他校を訪問する活動を行うことはかなり難しいものであった。

しかし、前年度に市内の学生団体に助成を行った八戸市は、コロナ禍にあっても市内の学生の社会貢献活動を停止しないよう、これまでに実績のある学生団体に呼びかけた。「ろぼっと娘」も例に漏れず呼びかけられ、「可能な限り」という前提での活動を約束し、再び八戸市からの助成を受けることとなった。

3.2.1 八戸工業大学第二高等学校附属中学校出前授業

出前授業を開催するには難しさがあったが、小規模であっても、サイテック・フェスが開催・実施できたことを受け、十分な感染防止対策を行えば実施可能ではないかと模索し、出前授業の計画を立てた。折しも、前年度に出前授業を実施した八戸工業大学第二高等学校附属中学校(以下、附属中学校)から出前授業の依頼が舞い込み、双方の感染予防対策を話し合いながら、出前授業を実施することとなった。

附属中学校が前年度に出前授業を依頼したのは、八戸市

立明治中学校への出前授業が新聞記事となって紹介されたことに由来する。中学校でのプログラミング教育必修化への模索として、附属中学校は、「ろぼっと娘」に出前授業を依頼したのであった。附属中学校では、この年、「ろぼっと娘」の出前授業のほかに、八戸工業大学のプログラミング教育出前授業を受けている。こうした実施経験より、附属中学校では、低学年の導入としてのプログラミング的思考を学ぶことを「ろぼっと娘」に、高学年ではより専門的なプログラミング教育を八戸工業大学に出前授業という形式で段階的にプログラミングに触れることを理想と考えたようである。前年度は中学 2 年生を対象に出前授業の依頼を受けて実施したが、この年は、継続的な実施を目指し、翌年度以降を中学 1 年生に実施するため、この年は中学 1・2 年生合同での実施となった。

附属中学校は土曜日にも授業が行われているが、10 月 17 日(土)に出前授業を実施した。3 名で 1 つのグループを構成し、ロボットを操作し、動きを見ながらロボットの動きをフローチャートにしていくという内容の授業を行った。中学生たちは熱心に授業を受け、先生方も中学生たちとともに授業に参加し、楽しんでくれた。この様子は、附属中学校の HP の「附中日誌」でも紹介されている。



写真7 八戸工業大学第二高等学校附属中学校
1・2 年生への出前授業

3.2.2 五戸町立上市川小学校出前授業

八戸市学生まちづくり助成金の制度は、学生の社会貢献活動を金銭的に支援することとどまらず、申請時に厳正なる審査会を開催し、終了時には、「学生&高校生まちづくりコンペティション」を開催している。参加する学生にとっては、申請時と成果発表時に、有識者などで構成される審査員の助言により、学生による独りよがりの活動ではなく、より広い視点をもった新たな活動となるように導き出してくれる。八戸市は「中核市」として青森県南地区を牽引する役割を担う自治体として、「ろぼっと娘」に対し、八戸市内にとどまらず、広域での活動を助言した。五戸町立上市川小学校への出前授業の実現は、八戸市からの「広域での活動推進」の助言より、八戸市近隣自治体での出前授業実施となった。



写真8 五戸町立上市川小学校への出前授業
フェイスシールドでの感染予防対策

1 月 28 日(木)五戸町立上市川小学校 6 年生を対象に出前授業を実施した。事前に小学校に赴いて打ち合わせを行い、感染防止対策を十分に講じ、体育館を会場に、個々にマスクの上からフェイスシールドを装着して実施した。対象学年は 6 年生であったが、距離をとりながら、他学年も見学を訪れ、出前授業課題となるロボットとは別に持参していたロボットも用いて、他学年にもロボットと遊ぶ体験を行うことができた。6 年生対象の出前授業では、Smart Small Turtle Robot の超音波センサを用いて超音波による障害物回避を体験する授業を実施したが、他の学年では、ライトトラッキングセンサでロボットを走らせてみるなどの簡単な体験会となった。はからずも対象学年だけでなく、複数の学年がロボットに触れる体験をしたことにより、学齢ごとの学齢に応じたロボットへのアプローチを垣間見る事ができた。



写真9 五戸町立上市川小学校への出前授業
6 年生対象の超音波センサを用いた授業

また、五戸町立上市川小学校での実施は、「ろぼっと娘」に所属する学生の母校であることから、学生自らが母校に呼び掛けて実現する形となった。学生自身が母校での出前授業を実施するという試みは、身近な存在をロールモデルとして子供たちに示すこととなり、「ろぼっと娘」の出前授業のあるべき理想形となった。(注 6)



写真 10 五戸町立上市川小学校へのお出前授業
卒業生が母校でロボットの動きを紹介

3.2.3 学生&高校生まちづくりコンペティション

前述のように「ろぼっと娘」は八戸市学生まちづくり助成金を活用して活動の幅を広げている。年度末に、これまでの成果として「学生&高校生まちづくりコンペティション」が開催され、活動報告を行っている。令和3年2月13日(土)八戸市総合福祉会館にて、八戸市内の大学生・高校生がこれまでの活動を報告した。「ろぼっと娘」も活動報告を行った。



写真 11 「ろぼっと娘」による報告



写真 12 出前授業で使用した教材の実演

3.3 コロナ禍での enPiT 参加

これまでの enPiT は、北東北の参加学生が参加期間中の幾度か一堂に会し、合宿をしてワークショップに参加したり、自らのグループの課題を発表したり、参加者が集まることで成果を積み上げてきた。しかし、コロナ禍において、これまでの実施形態のままの開催はされなかった。そのため、リモート形式により、自らの課題の解決に向けてディスカッションを行うなどして enPiT に参加した。コロナ禍においても上市川小学校で出前授業を実施したことが評価され、岩手大学から担当教員が出前授業の視察に訪れた。前節で紹介した八戸市の「学生&高校生まちづくりコンペティション」の開催日と enPiT の成果発表会の開催日が重なったため、学生たちは二手に分かれて同時刻に発表することとなった。

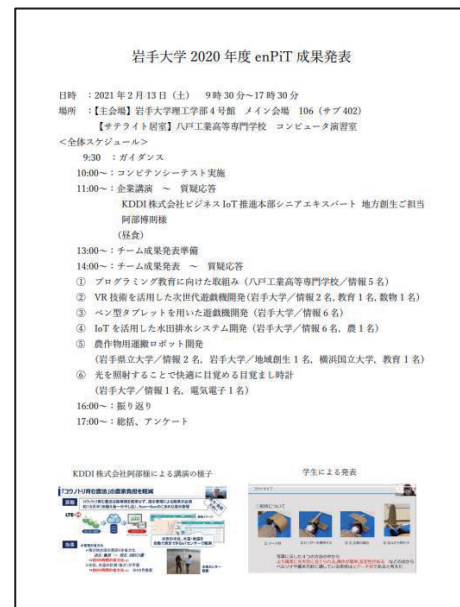


写真 12 岩手大学 2020 年度 enPiT 成果発表要項



写真 13 enPiT 成果発表 リモートによる発表



写真 14 enPiT 成果発表 リモートによる質疑応答

4. おわりに

「Robogals」という世界的な教育ボランティア団体への加盟を目指して結成された「ろぼっと娘」は、地元・八戸市を中心に活動を模索し、実績づくりをしてきた。「Robogals」に対する加盟のアプローチは、結成初年度に行ったが、返信がなかった。実績を積んだ後に再度アプローチをすることを検討し、結成 3 年目には「Robogals」への加盟を願い出る予定であった。しかし、世界を揺るがすコロナ禍の影響により、加盟申請できるような状況ではなくなった。だか、着実に実績を積み、少なくとも地元・八戸市から高く評価され、継続的な支援を受けることができるようになった今、コロナ禍であっても活動を止めない努力を行ってきた。

余談ではあるが、本校自主探究において低学年生の支援するファシリテーターを務める学生の中に、「ろぼっと娘」のメンバーが多くいる。このことは、学業にとどまらず、自らの専門性を活かした「ろぼっと娘」の活動により学生自らの自信につながっていると考えられる。

また、結成時にリーダーを務めた学生が、本校専攻科での特別研究に「ろぼっと娘」での経験を生かしたプログラミング教育コンテンツ開発を行っている。

「ろぼっと娘」の活動は、高専在学中に、学生として専門性を学びながら、教育ボランティアとして自らの知識や技術を実際に社会に還元し、貢献できる体験である。結成から 3 年が経過し、徐々にではあるが、活動に参加していた女子学生たちの自信をつけていく姿を筆者は目の当たりにしている。彼女たちの卒業後、女性技術者としてのキャリアに少なからず影響をもたらすのではないかと期待する。少なくともコロナ禍において、逆境の中、活動を継続できた学生たちの今後の将来に期待したい。

謝辞

本校「ろぼっと娘」の活動を理解し、助成・助言・支

援を継続してくださっている八戸市市民連携推進課・市民協同グループの皆様、八戸市教育センターの石井一二三様に深謝いたします。また、「ろぼっと娘」の活動の機会を与えてくださった八戸工業大学第二高等学校附属中学校、八戸市立明治中学校、八戸市立西白山台小学校、八戸市立三条小学校、八戸市立田面木小学校、五戸町立上市川小学校の教職員の皆様に感謝いたします。JST の次世代人材育成事業「女子中高生の理系進路選択支援プログラム」に「はばたけ SciTech Girls(サイテック・ガールズ)―北東北産業都市八戸発！青森リケジョの人材交流型育成―」を採択に向けての申請・けん引してくだっている本校総合科学教育科・戸田山みどり先生、副顧問的な立場として、enPiT の指導など、技術的にサポートしてくださった本校電気情報工学コース・細川先生をはじめ、活動を支援してくださった本校教職員の皆様にも感謝いたします。この場をお借りして御礼申し上げます。

注記

(1) 拙稿「女性エンジニアへのキャリア支援―八戸高専「ろぼっと娘」の社会貢献活動を通して―」は『八戸工業高等専門学校紀要』第 54 号(2020.02)に掲載されている。「ろぼっと娘」の結成の経緯と初年度の活動について紹介した。

https://www.jstage.jst.go.jp/browse/hnctech/54/0/_contents/char/ja

(2) 「Robogals」とは、オーストラリアのメルボルン大学の学生が結成し、運営している教育ボランティアの学生団体であり、世界中に 30 を超える支部を持つ。

「Robogals」の HP にて活動内容が確認できる。

<https://robogals.org/about/about-us/>

鹿児島高専の「Robogals Kagoshima」の活動紹介は内閣府男女共同参画局の HP 上で閲覧できる。

http://www.gender.go.jp/about_danjo/whitepaper/r01/zentai/html/column/clm_05.html

(3) 八戸市による「学生まちづくり助成金」は八戸市内の高等教育機関の学生を対象に、学生の地域貢献活動に対し助成する取り組みである。年度末には「八戸市学生 & 高校生まちづくりコンペティション」を開催し、活動の優劣を審査される八戸市の事業である。これまでの参加実績や審査結果などは八戸市の HP 上で確認できる。

<https://www.city.hachinohe.aomori.jp/soshikikarasagasu/shiminrenkeisuishinka/kyodonomachizukuri/2/4882.html>

(4) enPiT とは、文部科学省による「成長分野を支える

情報技術人材の育成拠点の形成」という事業であり、大阪大学を中心として、「ビッグデータ・AI分野」「セキュリティ分野」「組み込みシステム分野」「ビジネスシステムデザイン分野」の4分野からなる。本校学生は、名古屋大学がリーダーとする「組み込みシステム分野」の岩手大学が実践する事業に参加している。enPiTに関する詳細はenPiTのHP上で確認できる。

<http://www.enpit.jp/>

また、「ろぼっと娘」が成果発表したポスター等は、enPiT Emb(成長分野を支える情報技術人材の育成拠点の形成組み込みシステム分野)HPより閲覧できる。

<http://emb.enpit.jp/enpit2/news/>

(5)JST(国立研究開発法人 科学技術振興機構)の次世代人材育成事業「女子中高生の理系進路選択支援プログラム」に本校は「はばたけ SciTech Girls(サイテック・ガールズ)—北東北産業都市八戸発!青森リケジョの人材交流型育成—」という事業名で令和2年度に採択された。コロナ禍で全国的に各種イベント開催が困難な中、令和2年度、令和3年度と感染防止対策を講じながら活動している。地域の感染状況を踏まえて規模を縮小しての開催や、計画するも中止に迫

り込まれるなど、事業実施に困難な場面が多々あった。「女子中高生の理系進路選択プログラム」および本校「はばたけ SciTech Girls(サイテック・ガールズ)—北東北産業都市八戸発!青森リケジョの人材交流型育成—」に関する情報はJSTのHPと本校HPより「八戸高専はばたけ SciTech Girls」情報の詳細を確認できる。

<https://www.jst.go.jp/cpse/jyoshi/>

<https://www.hachinohe-ct.ac.jp/scitechgirls/>

(6)五戸町立上市川小学校での出前授業の様子は、2021年2月8日の「東奥日報」(東奥日報社)に掲載された。本校HP上で記事を確認できる。

<https://www.hachinohe-ct.ac.jp/info/2021/02/001312.php>

(原稿受付:2021年11月26日)

八戸高専における観光を通じた文化教育とリーディングの可能性⁽¹⁾

菊池 秋夫*

The Possibility of Cultural Education and Reading through Tourism at NIT, Hachinohe College

Akio Kikuchi

*総合科学教育科

Abstract : In NIT Hachinohe College, students, who are expected to be global engineers, are required to be familiar with various cultures. However, students are less willing to know cultures. It is necessary for us to develop their senses of cultures. In order to solve this problem, the attempt of using tourism as a catalyst to relate them to cultural knowledge was carried out in a selective class called ‘Tourism and Culture’ at NIT, Hachinohe College. In addition to the attempt, the development of reading skills was also tried with their skills of reading surveyed. According to the questionnaires after the classes, it was confirmed that tourism can stimulate students’ interest and that active reading was not fully carried out.

Keywords : English education, tourism, active learning, culture

1. 緒言

八戸高専の学生は、社会人ないし進学する前に多様な文化教養に対する受容の必要性がある。とりわけ、コミュニケーション力、基礎となる読解力/状況判断力の向上が必要とされる。一方で、そうした教養に関して、学生の受容の態度は決して積極的とはいいがたい。学生自身も関心や経験がある観光をプラットフォームにして文化教育とコミュニケーション教育のハイブリッドの可能性を試みた。その中で文章テキストの素材も活用し、リーディング力の向上も図った。従来型の内容理解のためにリーディングではなく、「伝える」などの目的のために主体的に読む実践トレーニングの可能性を探った。そのために、学生の読書・読解の実態を把握する必要性があった。こうした需要にこたえるため、八戸高専 5 年生選択科目「観光と文化」において、観光を通じた文化教育の可能性を探るアクティブラーニングの試みを行い、2018、2019 のアンケート比較から学生の読書や読解に対しての意識/実態を探った。

2. 実施の系譜

「観光と文化」は、八戸高専 5 年生選択科目として、2013 年に実施され、翌年から途絶えたが、2016 年から復活し、現在に至るまで継続している。2016 年度から 2019 年度にいたるまで、受講者数および特徴は以下のようにまとめられる。

表 1 「観光と文化」 2013;2016-2019 系譜

年度	受講者数	形式
2013	88	講義
2016	52	講義
2017	108	講義+プレゼンテーションの実施(グループワーク) 英語でのパンフレット制作
2018	82	講義+プレゼンテーションの実施
2019	97	講義+プレゼンテーションの実施(グループワーク) 英語でのポスター、レポート提出

表に示されるように、2013、2016 の講義のみの形式から、プレゼンテーションの導入、英語でのポスター・パンフレット制作など、グループワーク等のアクティブラーニングの要素を拡大していく傾向にある。

講義のテーマとしては、主に観光の歴史、鉄道・蒸気船・航空機などの交通インフラの発達と近代観光の成立、城・文化遺跡などの観光資源、世界遺産などである。こうしたテーマに関し講義形式で説明を行い、そのあとでそうしたテーマに関連したアクティビティを実施した。こう

した 2017 年度以降は、そうしたアクティビティの割合を多くし、成績評価にも反映した。

本稿では、こうした経緯を踏まえて、2019 年度はどのように実施したか、検証してみたい。

3. 実施

2019 年度では、講義のテーマとしては従来と共通であるが、とりわけグループワークの課題として地域貢献のテーマを扱った。

- ・レポート1 Build a new museum in Aomori
→プレゼン Build a new museum in Aomori
自分たちのアイデアをもとにグループで各自英語で発表
- ・レポート2 Make a School Trip Plan for a High School in Hachinohe

グループディスカッションの後で各自英語で作成

- ・レポート3 Write a Travel Writing as an Inbound Tourist
グループで外国からの旅行者（学校、家族等）の立場になり旅行記を（自由行動を含めて各自）作成

このような課題に関してグループワークを通じてコミュニケーションを図り、異なる視点を持つ意識を涵養する（具体的な出身国なども想定する）、博物館創設という観点から活かす意識で地域の特色・歴史・文化を見直す機会を設けた。また、自分たちでテーマを決めさせ、その参考資料を手配し、どのような情報をその資料から取得するかをディスカッションさせた。



図1 授業風景

4. アンケート実施報告

・受講者の意識に関するアンケートを実施。2018 年と 2019 年度での受講後での意識の変化を探った。2018 年度アンケートは、2018 年 7 月 25 日実施（82 人中 80 人回

答）、2019 年度は 2019 年 7 月 31 日実施（97 人 89 人回答）であった。

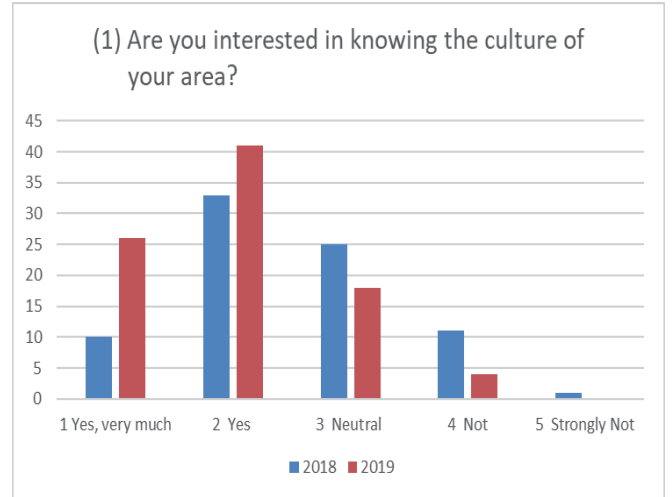


図2 アンケート項目 1

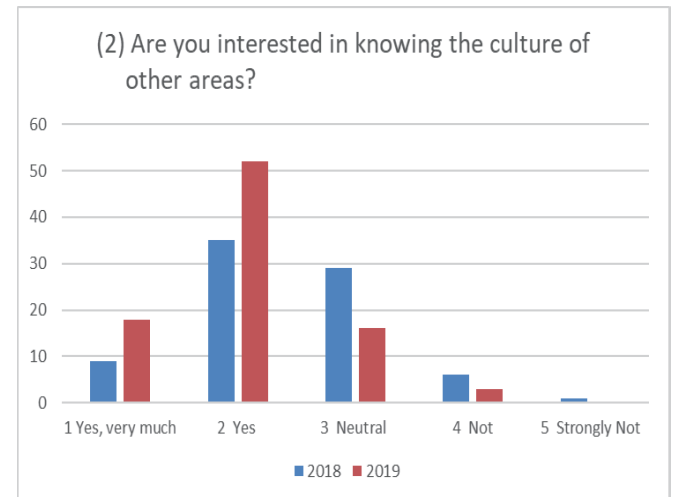


図3 アンケート項目 2

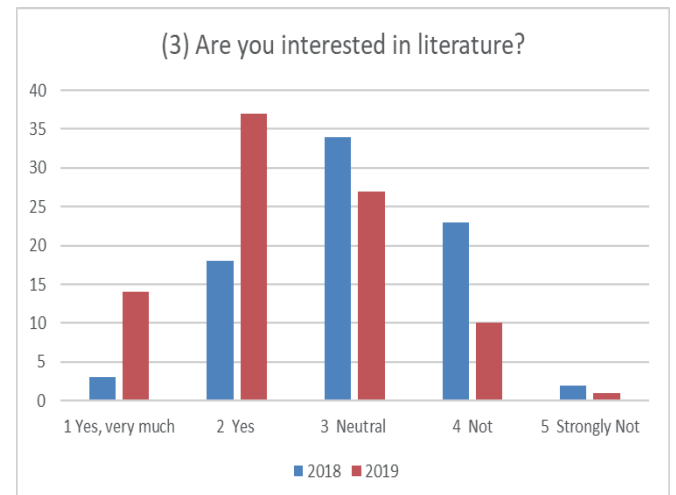


図 4 アンケート項目 3

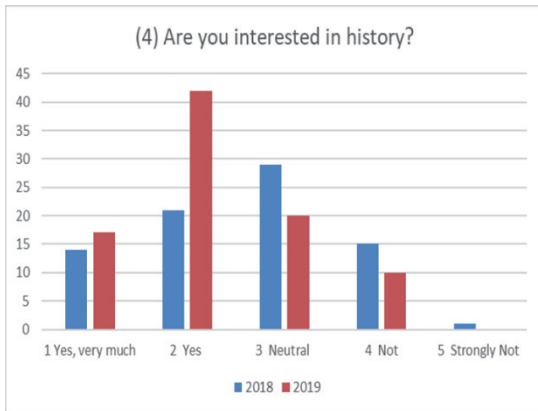


図 5 アンケート項目 4

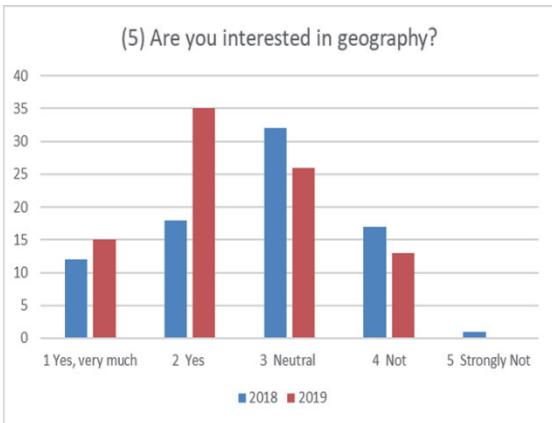


図 6 アンケート項目 5

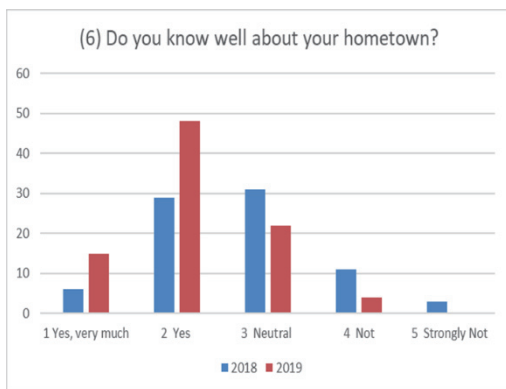


図 7 アンケート項目 6

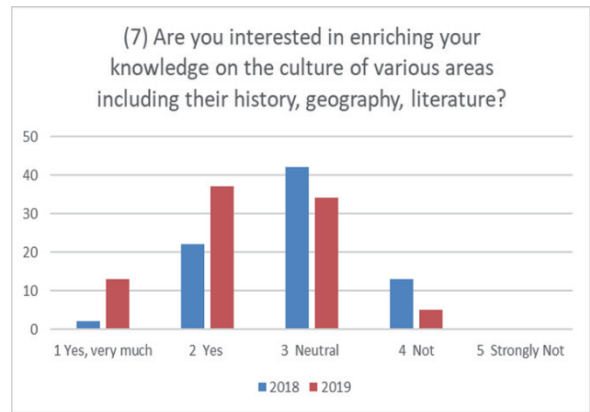


図 8 アンケート項目 7

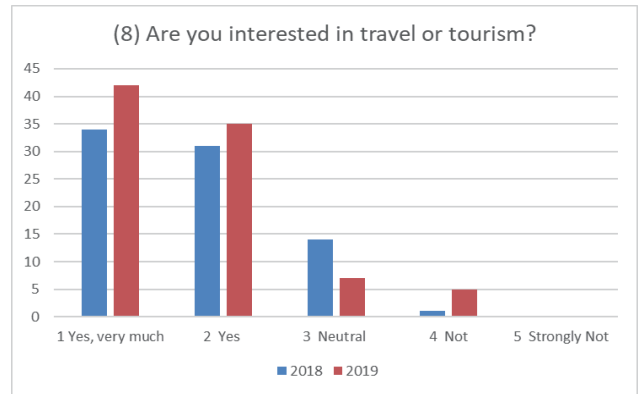


図 9 アンケート項目 8

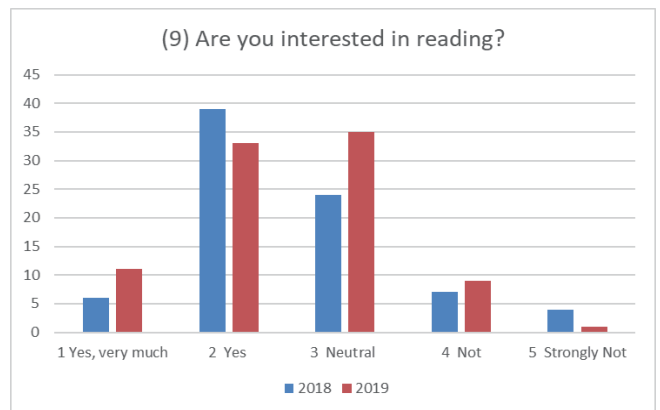


図 10 アンケート項目 9

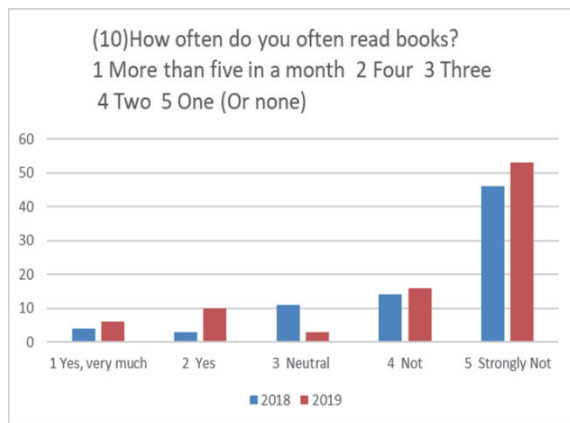


図 11 アンケート項目 10

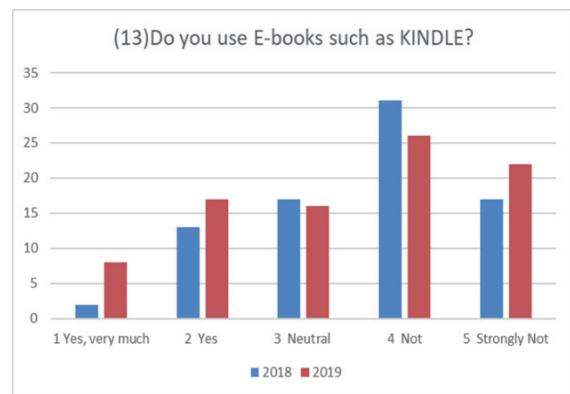


図 14 アンケート項目 13



図 12 アンケート項目 11

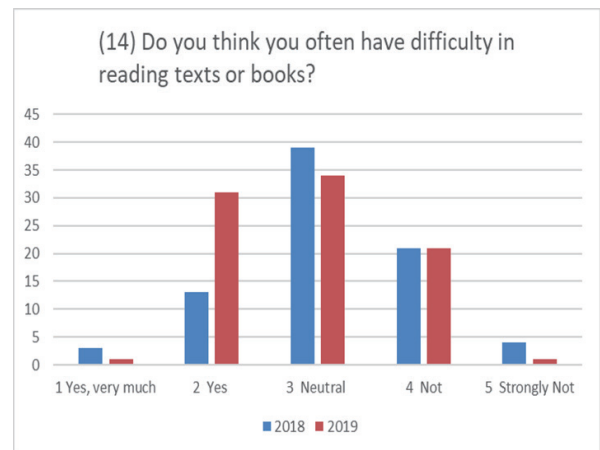


図 15 アンケート項目 14

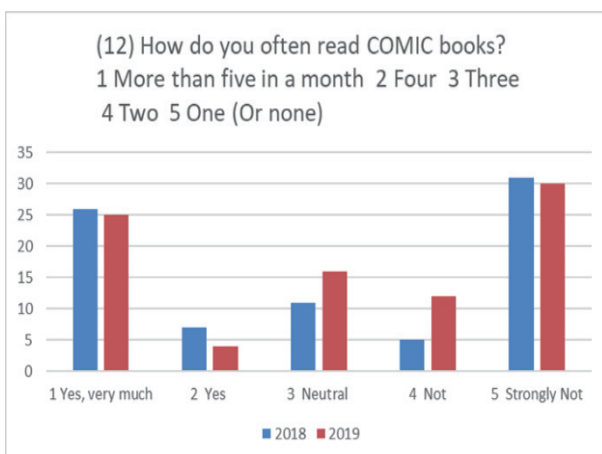


図 13 アンケート項目 12

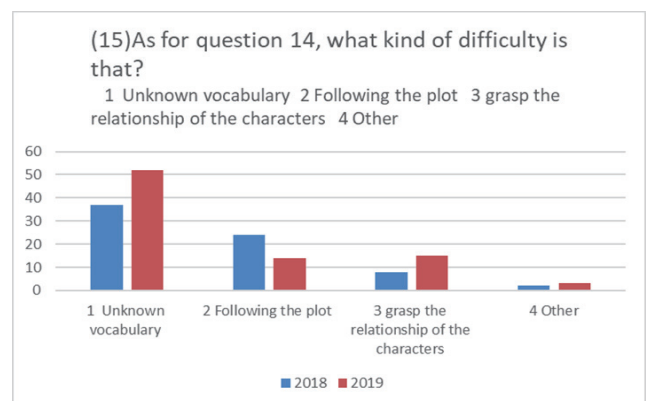


図 16 アンケート項目 15

全体的に 2018 年度の学生より 2019 年度の学生のほうが文化、観光などへの関心が高い傾向がある。質問 (10) に見られるように 一カ月における読書量は、2018 年度と 2019 年度でほとんど変わらず 1 冊以下が 70% 以上を占め

た。→読書不足の実態が浮き彫りになった。

質問(14)において、読書に対して苦手意識を持つ学生の割合は2019年度の学生のほうが高くなっている。またこの点に関し質問(15)で、2019年度の学生の方が語彙への自信がないことが示されている。

5. 結論

地域文化、歴史、地理などに関しては2018年度、2019年度とも興味・関心があることが窺われる観光・旅行に関しては2018年度、2019年度を通じて非常に関心が高く、文化・コミュニケーションの素材として有効であることが想定される。読書量に関して、2年の調査とも低い実態が浮き彫りになった。語彙量に関しての自信の低さは、上記の読書量の乏しさと連動すると思われる。

注

- (1) 本稿は令和元年8月21日に北九州国際会議場で行われた令和元年度高専フォーラムでの口頭発表に加筆修正をしたものである。

参考文献

- 1) Gruenwald, D. A., G. A. Smith, ed. (2008). *Place-Based Education in the Global Age*. Psychology Press.
- 2) Bird, Isabella L. *Unbeaten Tracks in Japan*. Traveler's Tales, 2000.
- 3) Youngs, Tim. *The Cambridge Introduction to Travel Writing*. Cambridge UP, 2013.

(原稿受付：2021年11月26日)

組み込みロボット授業における地域企業と連携したものづくり技術交流の実践(4)

細川 靖*・吉田 雅昭**・中村 嘉孝*・野中 崇*・遠田 達也***

Craftsmanship Tchnology Exchange which Cooperated with the Local Company on Handicraft Class of Line-following Robots
by Microcomputers (4)

Yasushi HOSOKAWA, Masaaki YOSHIDA, Yoshitaka NAKAMURA, Takashi NONAKA, Tatsuya TOHDA

*産業システム工学科 電気情報工学コース

**総合科学教育科

***教育支援センター

Keywords: 鉛フリーはんだ, Arduino, はんだ付け講習会, すずメッキ線, スイッチ基板工作, 工場見学

1. はじめに

八戸工業高等専門学校(以後、本校と略す)の産業システム工学科電気情報工学コース第3学年では、図1に示すライントレースを自作ロボットで行う授業「ロボットエレクトロニクス」を行っており、筆者らはこれまで鉛フリーはんだ付けによるマイコン基板の工作の実践¹⁾や、本校の鉛フリー化を推進するために各コースの協力を得て行った調査²⁾について述べた。前稿³⁾では、平成30年度電気情報工学コース第3学年生の鉛フリーはんだ付け技術の向上を目指し、地域企業と連携したものづくり技術の交流の実践として、すずメッキ線を用いたスイッチ基板工作と、地域のものづくり企業の工場見学を行った。その結果として、学生の工作技術の向上と学習意欲向上が確認できたことを報告した。

本稿では、いわゆるコロナ渦の中、前稿³⁾に引き続き令和2年度電気情報工学コース第3学年生の鉛フリーはんだ付け技術の向上を目指し、地域企業と連携したものづくり技術の交流の実践として、すずメッキ線を用いたスイッチ基板工作と、その評価を行った。さらに地域のものづくり企業の工場見学を行ったので報告する。



図1 ロボットエレクトロニクス授業風景

2. 鉛フリーはんだ付けマイコンボード工作と調査

2.1 令和2年度のマイコンボード工作の実施

電気情報工学コース第3学年では、「ロボットエレクトロニクス」の授業にて組み込み技術を学ぶため、Arduino⁴⁾の秋月電子通商製互換マイコンボード⁵⁾を用いる。このボードは未完成品なので、はんだ付け工作をする必要がある。本稿では前稿³⁾と同様に夏学期の実験実習時間を活用して、鉛フリーはんだのはんだ付けと鉛の環境への影響についてパワーポイントで説明を行った後、温度調節付のはんだごてと専用こて先などの工具や自作の工作マニュアルを用い、練習用基板で鉛フリーはんだ付けの練習を行い、その後にマイコンボードのはんだ付け工作を行った。

はんだ付け工作のサポート教員は細川と、第3学年実験実習担当の野中崇先生、遠田技術職員の計3名で行った。工作実施日は令和2年7月17日(木)と10月1日(木)の9:00~12:00の2回で合計5時間程度と、前回と同等の時間とした。

反省点は、学生側の工作ミスとして、ICソケットを逆にはんだ付けした者や、ジャンパピンの長い方と短い方を間違え逆にはんだ付けした者が複数名いたことである。これらのトラブルがあった学生達もサポート教員の対処により、最終的に工作した39名中38名がマイコンボードを動作させた。鉛フリーはんだ付けによるマイコンボード工作後の動作率は平成24年度が98%で、平成25年度から6年連続で100%であったが、令和2年度は97%になった。

2.2 マイコンボード工作のアンケート調査項目と結果

マイコンボード工作後に、筆者らが想定した作業時間、説明などが十分で学生達が工作できたか評価を行うため、

電気情報工学コース第3学年の39名を対象にアンケート調査を行った。十分が5、不十分が1の5段階評価とし、集計を遠田技術職員が担当した。以下にその調査項目を示す。また、表1に前稿³⁾の平成30年度アンケート調査結果と令和2年度のアンケート調査結果比較を、図2にアンケート調査結果のグラフを示す。青は前回とほぼ同様、橙は平均以下、緑は前回以上である。

- 1) 作業時間は十分か
- 2) 抵抗器・コンデンサ・水晶振動子の実装
- 3) ICソケットの実装
- 4) ピンソケット(メス1×8, 1×6)の実装
- 5) 電源ICとLEDの実装
- 6) スイッチとブリッジダイオードの実装
- 7) ピンヘッダ(オス2×3, 1×4)の実装
- 8) 電解コンデンサとDCジャックの実装
- 9) USBモジュールの実装
- 10) マイコンの装着とジャンパピンの接続
- 11) プレート加工と基板固定
- 12) ブートローダの書き込みと動作確認
- 13) 鉛フリーはんだ付け
- 14) 鉛入りはんだの環境への影響
- 15) マイコン工作は楽しかったか
- 16) マニュアルは理解しやすかったか
- 17) マニュアルははんだ付け工作に役立ったか

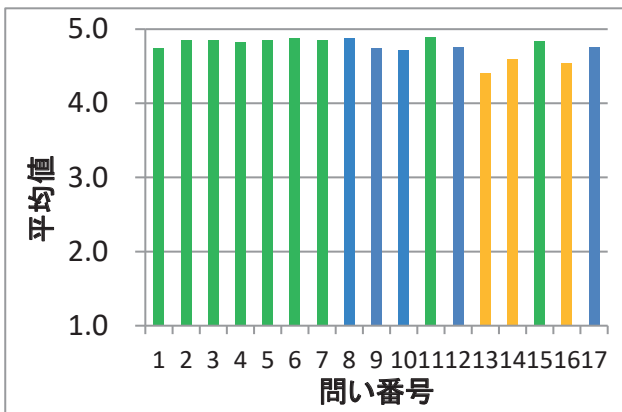


図2 令和2年度マイコンボード工作アンケート結果

これらの結果を見ると、令和2年度は平成30年度に比べ全体的に向上し、全ての調査項目で4以上であり、達成度は十分である。問い1の作業時間については4.74と前回より向上した。実験実習の時間に工作を進めたが作業時間は十分であることがわかった。問い13の鉛フリーはんだ付けに関しては4.41と前回よりは向上したが他の項目より低い。達成度としては十分と言えるが、マニュアルを読んで工作しており、講師による鉛フリーは

んだ付け実演の講習を行っていないので、少し難しく感じたようである。問い14の鉛の環境影響については、4.59と平成30年度に比べ約0.2低下した。パワーポイントでの説明が短かったためと考えられる。問い16は4.54と平成30年度に比べ約0.2低下した、問い17は4.76と平成30年度に比べ少し低下したが、これらのマニュアルに関する評価は平成30年度とほぼ同等で、カラーの写真付き工作マニュアルは有用で、十分であることが確認できた。

表1 平成30年度と令和2年度のアンケート調査平均値比較

	H29年度 平均値	R2年度 平均値
問1	4.51	4.74
問2	4.79	4.85
問3	4.69	4.85
問4	4.72	4.82
問5	4.72	4.85
問6	4.72	4.87
問7	4.77	4.85
問8	4.85	4.87
問9	4.77	4.74
問10	4.82	4.72
問11	4.79	4.90
問12	4.77	4.76
問13	4.15	4.41
問14	4.77	4.59
問15	4.67	4.84
問16	4.72	4.54
問17	4.84	4.76
平均値	4.71	4.76

3. 鉛フリーはんだ付け基礎技術習得のための基板工作練習の試行

3.1 基板工作練習の目的と経緯

鉛フリーはんだ付けは工作技術を必要とする。しかし、マイコンボード工作だけでは時間も短く、比較的容易な両面スルーホール基板のはんだ付けなので、学生の技術向上はあまり期待できない。本研究では、すずメッキ線を用いたスイッチ基板の工作を行う事ではんだ付け技術の向上を目標とするが、基本技術の習得が無い学生は、すずメッキ線を用いたスイッチ基板工作に多く作業時間を要する。特に外部講師を招聘して工作の講習会を実施した際、時間内に完成できない場合には自信喪失と満足度の低下も予想される。学生が自信喪失して鉛フリーはんだ付けへの苦手意識を持つことは、本研究の目的と反する。そこで、本研究では前回と同様に、スイッチ回路基板工作の前に、工作練習を実施した。

3.2 基板工作練習の計画

鉛フリーはんだ付け技術向上を目的として、令和3年2月12日(金)の14:30~16:00に電気情報工学コース第3学年の31名を対象に鉛フリーはんだ付けの練習会を実施した。はんだ付け技能保持者の総合科学教育科の吉田雅昭准教授からはんだ付けの技術講習を受け、新品のユニバーサル基板にすずメッキ線での配線練習を行った。書画カメラで手元のはんだ付けを撮影し、学生が講師の工作風景を見られるよう工夫した。新型コロナウイルス感染症対策を取りながら、吉田先生考案の直角配線を工作することとした。学生への連絡は担任の中村先生に依頼した。以下、作業予定と直角配線工作資料を図3に示す。

工作練習作業予定：

- ・ 準備 (5分)
- ・ 部品配布 (5分)
- ・ 講師工作実演 (20分)
- ・ 配線レイアウトの練習 (20分)
- ・ 休憩 (5分)
- ・ 抵抗の折り曲げとはんだ付け (15分)
- ・ 抵抗のはんだ付け (10分)
- ・ まとめと振り返り (5分)
- ・ 後片付け (10分)

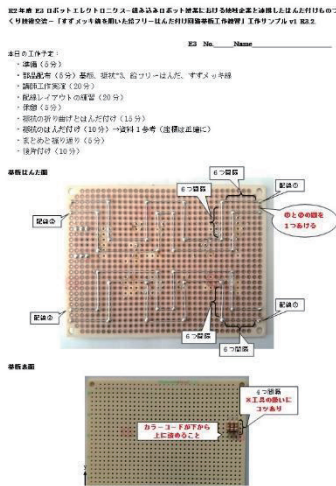


図3 工作練習用回路配線資料

3.3 基板工作練習の実際

工作時間は90分程度で、参加者は31名であった。補充試験に近いことや企業側の都合で日程が変更になったため8名が欠席となった。学生は工作時間がかかり、直角配線1つは全員できたが、時間内に2つ以上終えたのは31名のうち68%の21名であった。また、丁寧に工作できた学生と、殆ど工作できなかった学生があり、はんだ付け練習作品の完成度の差が大きかった。練

習工作の優良例と不良例を図4に、真摯に取り組んでいる工作練習の風景を図5に示す。

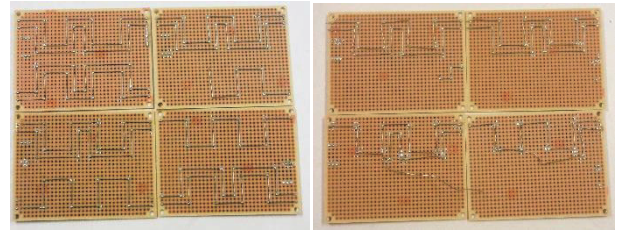


図4 工作練習用直角配線の優良例(左)と不良例(右)



図5 工作練習風景

4. 地域のスペシャリストによる鉛フリーはんだ付け技術向上のための電子回路工作講習会

4.1 鉛フリーはんだ付け技術向上のための電子回路工作講習会

地域のスペシャリストによる鉛フリーはんだ付け技術の向上を目的とし、冬学期到達度試験後の特別学習指導・研修期間の令和3年2月16日(火)にスイッチ回路基板のすずメッキ線を使った鉛フリーはんだ付けの講習会を実施した。鉛フリーはんだ付けにて製品を製造している企業の講師として、アンデス電気株式会社より、開発部長細川進氏、営業部海外営業課長中嶋博行氏、人事総務課係長櫻田憲司氏、管理部業務支援G青森生産管理課製品技術ユニット係長五日市悠氏に來校いただいた。講習会は新型コロナウイルス感染症対策を取りながら実施し、講師から環境を意識したRoHS対応と鉛フリーはんだ付けで生産している製品について、資料やパワーポイントを用いて概要説明があり、企業における鉛フリーはんだ付けのニーズを学んだ。また、鉛フリーはんだ付けの方法の説明を受け、工作技術を学んだ。以下に企業提案の工作講習会予定を示す。図6に講師による講習風景を示す。

鉛フリーはんだ付け回路工作講習会予定：

- 第1部 講義・研修 13:00～13:50(50分)
はんだとは、はんだの種類と極性、はんだ付けの方法と部品、はんだの国際規格、最新はんだ技術
- 第2部 はんだ実技・動作確認 14:00～15:40(100分)
振り返り・アンケート・片付け 15:40～16:00(20分)



図6 地域スペシャリストによる講習風景

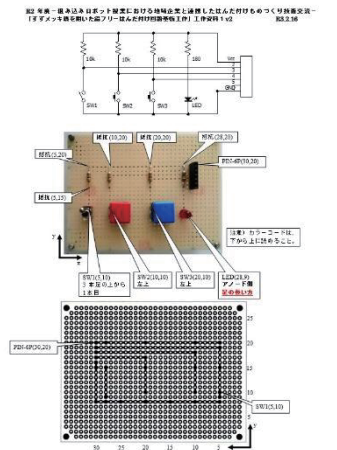


図8 スイッチ回路工作用資料

4.2 鉛フリーはんだ付け工作実習

すずメッキ線を用いた鉛フリーはんだ付け工作の実践として、吉田雅昭准教授作成の資料を参考に電気情報工学コース第3学年の授業「ロボットエレクトロニクス」で利用しているマイコンのための2ボタンスイッチ回路の工作を講師の指導の下に行った。回路完成後には筆者らが試作したサーボモータを用いた教材を使って回路基板の動作確認を行った。工作のみの時間は計100分程度であった。図7に学生が実際に作成した優秀回路基板例を示す。また、基板工作の資料を資料を図8に、講師の指導を受けながら工作した実習風景を図9に示す。

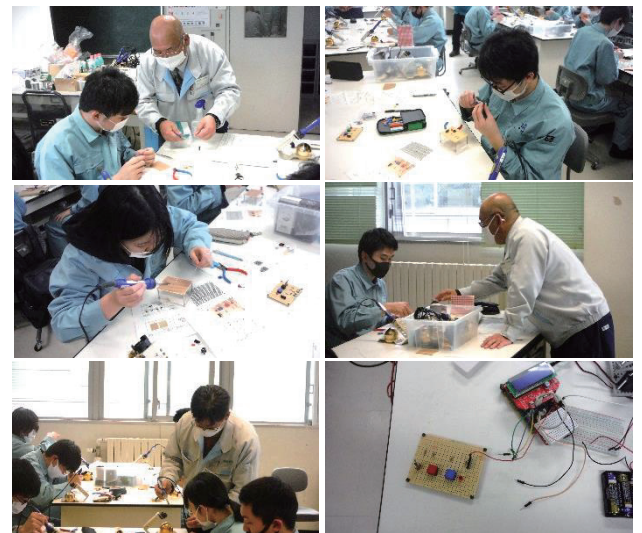


図9 スイッチ回路工作実習風景

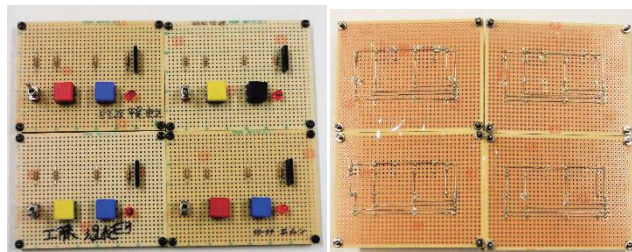


図7 学生が工作した回路の部品面(左)と配線面(右)

4.3 鉛フリーはんだ付け工作におけるアンケート調査実施と分析

地域のはんだ付けスペシャリストによる鉛フリーはんだ付け工作実習の実施後に、工作時間の過不足や自己評価のアンケート調査を行った。また、実践した地域企業と連携したものづくり技術交流によって、学生の鉛フリーはんだ付けの技術向上が行えたかについてもアンケート調査を行った。令和3年度の対象者は、工作に参加した電気情報工学コース第3学年33名で十分が5、不十分が1の5段階評価とし、集計を遠田技術職員が担当した。以下に鉛フリーはんだ付け工作実習に関する調査項目を示す。また、調査結果を図10に示す。

工作調査項目：

- 1) 工作時間は十分か
- 2) 抵抗器の実装
- 3) トグル SW1 (TSW) の実装
- 4) プッシュ SW2・3 (PSW) の実装
- 5) 発光ダイオード (LED) の実装
- 6) ピンソケット (メス 1×6) の実装
- 7) すずメッキ線による配線の実装
- 8) 基板足の実装
- 9) Arduino ボードと工作基板との接続
- 10) Arduino プログラムの実行
- 11) トグル SW 動作確認・理解
- 12) プッシュ SW 動作確認・理解
- 13) 鉛フリーはんだ付け
- 14) Arduino でのサーボモータの利用方法
- 15) アクチュエータのリンク機構の理解
- 16) 回路工作・演習は楽しかったか

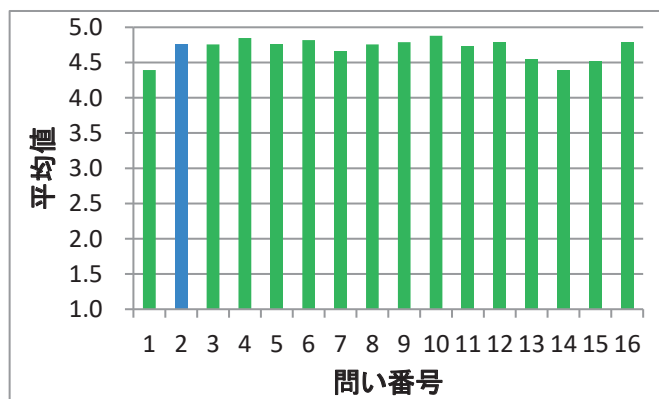


図 10 鉛フリーはんだ付け工作実習調査

図 10 の調査結果より、問い 1 では 100 分程度と工作時間を増やし、回路動作確認・振り返りの時間を含む改善をしたことで、平成 30 年度に比べ殆どの学生が工作時間が十分であったことが分かった。問い 16 も 4.79 で楽しく満足度も高かったことが分かる。問い 2 以外すべて平成 30 年度より 0.2 以上向上しており、全体的に高評価であったと言える。平成 30 年度は問い 13 が 3.83 と低かったが、今回は 4.55 と高い結果となった。工作練習よりも基板工作の方がよくできたためと考える。また、問い 15 も 4.52 とリンク機構の理解も高い結果となった。今後は少し評価が低かったサーボモータについての説明時間を増やすことが必要と考える。

次に、学生の鉛フリーはんだ付けの技術向上に関する調査項目を示す。

はんだ付け技術向上調査項目：

- 1) はんだ付けが好きになったか
- 2) 想像より楽しかったか
- 3) 地域企業のニーズを理解したか
- 4) 鉛の環境影響を意識するか
- 5) はんだ付け技術の向上
- 6) はんだ付け知識習得
- 7) 問題解決能力の向上
- 8) 達成感があったか
- 9) リンクとサーボの理解
- 10) 後輩も実施する方がいいか

図 11 の調査結果より、全体的に平成 30 年度より向上しており、殆どの学生が地域企業のニーズを理解し、鉛の環境影響を意識したことと、はんだ付け知識が習得でき、達成感があったことが分かった。また、本研究と同様の取り組みを後輩達も体験した方が良いかという問いは、はい・わからない・いいえの 3 段階評価で、平均は 2.67 と高く、後輩達も実施する方が良いと考えていることが分かった。平成 30 年度に比べはんだ付け好きにな

り、楽しく、はんだ付け技術が向上し、問題解決能力が向上し、達成感が得られたことが分かった。

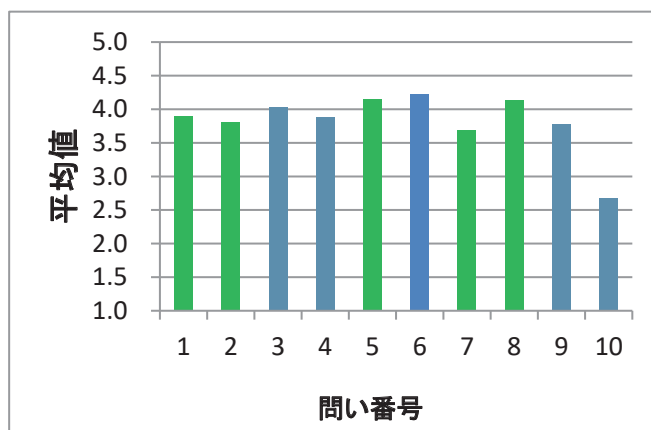


図 11 学生の鉛フリーはんだ付けの技術向上に関する調査

本研究では、技能保持者吉田先生による練習基板とスイッチ回路基板のはんだ付け技能の評価を行った。評価項目は、「はんだ付け 5 点」、「メッキ線配線 4 点」、「抵抗の折り曲げ 3 点」、「外観(見た目) 3 点」の 4 項目で合計 15 点満点とした。平成 30 年度の優良工作(11 点または 10 点以上)は練習が 26%で回路が 42%であった。これに対し令和 2 年度は、練習基板は 19%、スイッチ回路基板は 36%が優良工作となった。この内訳は、練習ありで評価低 2 名(向上無)、練習ありで評価低から高へ向上が 6 名(向上有)、練習ありで評価高が 5 名(向上有高品質)であった。全体では練習よりも回路工作での評価値が 17%向上した。これは平成 30 年度の 10%より高い結果となった。十分時間を確保したことで、はんだ付け練習・講習の効果が確認できた。

5. 地域のものづくり企業工場見学

令和 3 年 2 月 17 日(水)の 8:50 に集合してバスに乗り、地域のものづくり企業の理解のため、八戸市内の企業であるアンデス電気株式会社の工場見学を、電気情報工学コース第 3 学年希望者 9 名を対象に行った。企業側の新型コロナ感染対策のため、最小限の人数となった。対応者は前日に工作指導を行った、アンデス電気株式会社人事総務課係長櫻田憲司氏と製品技術ユニット係長五日市悠氏らであった。

始めに企業紹介があり、アンデス社の製品紹介としては、新幹線に採用された空気清浄機や、電器店の店舗に用いられている LED 照明など身近な製品であった。

見学は、アンデス社の開発した製品(空気清浄機、LED 照明等)と、製造ラインの試作工場であった。見学後に本校 OB によるグループディスカッションの質問

会を行った。これらの様子を図 12 に示す。



図 12 地域のものづくり企業工場見学の様子

学生達は企業見学が初めてで、見学後のアンケート調査の感想として、「高専生が必要とされている」、「事業の幅が広く日常生活に結び付いたものを数多く作っていて驚いた」、「ためになることがたくさんあった、仕事をしている風景が見れてよかった」、「OB の社員の方から話せるのはとても良い機会になりました」、等の意見から、地元企業への興味が喚起されたことが分かった。

また、「OB の方が英語を頑張れと言っていたのでやはり英語は大事だと思った」、「専門の勉強を頑張りたい」、「製図や CAD も勉強してみたい」等、学業への意識向上も確認できた。

さらに、「高専との繋がりがあり、就職に有利だと思った」、「アンデスさんに興味を持った」、「アンデス電気でアルバイトしてみたいと思った」、「仕事をしながらでも育児ができることに魅力を感じた」、「他の企業も見てみたい」等の意見があり、地域企業就職への意識向上も確認できた。

これらのアンケート結果から、社会に役立つ製品が八戸で開発生産されていることを知り、地域企業への興味喚起と高専出身の先輩の活躍などの刺激を受け、学生達の学業や、地域企業への就職の意識向上が確認できた。

6. まとめ

本研究では、電気情報工学コース学生の鉛フリーはんだ付け技術の向上を目指し、地域企業と連携したものづくり技術交流を実践し、すずメッキ線を用いたスイッチ基板工作と、地域のものづくり企業の工場見学を行った。

アンケート調査では、実際に自分ではんだ付けした難しさから多数の学生が「講師のはんだ付け技術に驚いた」と答え、講習後は「はんだ付けが好きになった」と答えており、本研究の成果が確認できた。

地域のものづくり企業見学では、コロナ過での対応に感謝したい。学生も「企業に初めて見学に行けてとても楽しかった」、「実際に仕事しているのを見て興味を持った」、「目標を持って勉強に励みたい」、等の肯定的な意見が多く、教育的成果と、学習意欲向上と地域理解向上が確認できた。

鉛フリーのはんだ付け工作は技術が必要だが、本研究では事前練習により全員が完成でき、工作品質も前年度より向上できた。工作が上手なのに学生自己評価が低い学生がいるので、声掛けや褒めること大事である。

「はんだ付け工作後のものづくり企業見学」が地域理解に有効なので、今後も本研究を継続して授業と地域のものづくり企業を連携させて、環境を意識したはんだ付け教育を継続・推進したいと考えている。

謝 辞

アンケート調査にご協力いただいた学生諸君と本研究にご協力いただいた教職員の皆様には感謝致します。また、本研究の一部は、公益財団法人 NSK メカトロニクス技術高度化財団 高等専門学校のカトロニクス技術高度化のための「教育 B 助成」の支援により行ったものであり、援助いただいた関係各位に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 細川 靖, 島脇良介:マイコンを用いた自走ロボット工作授業の展開(3), 八戸高専紀要, 第 48 号, pp.91-95(2013).
- 2) 細川靖, 野中崇, 鎌田貴晴, 吉田雅昭, 沢村利洋, 齊藤貴之, 丸岡晃, 遠田達也:校内鉛フリー化推進調査と鉛フリーはんだによる基板工作の実践, 八戸高専紀要, 第 49 号, pp.37-42(2014).
- 3) 細川 靖, 吉田雅昭, 松橋信明, 野中 崇, 遠田達也, 組み込みロボット授業における地域企業と連携したものづくり技術交流の実践(3), 八戸工業高等専門学校紀要, 第 54 号, pp.23-28(2020).
- 4) Arduino 公式ウェブサイト, <https://www.arduino.cc/> (2021).
- 5) 秋月電子通商公式ウェブサイト, <http://akizukidenshi.com/> (2021).

(原稿受付: 2021 年 11 月 26 日)

ダウンサンプリング処理を用いた自動運転のためのオブジェクト検出法

工藤 憲昌*・長屋 輝*・釜谷 博行*・田所 嘉昭**

A study on detecting movement of objects using down-sampling processing

Norimasa KUDOH, Hikaru NAGAYA, Hiroyuki KAMAYA, Yoshiaki TADOKORO

* 産業システム工学科 電気情報工学コース

** 豊橋技術科学大学 工学部

Abstract : In recent years, research on ADAS (Advanced Driver-Assistance System) has been actively conducted. Among the sensors, millimeter wave radar is cheap and wide utilization is expected. The purpose of this study is to detect the distance and velocity to objects with high accuracy using a millimeter-wave called a chirp signal. In this article, firstly, it is described that the configuration of the detection system and how to detect distance and velocity to objects using chirp signal. And then, we propose a method for estimating the frequency difference between the transmitted wave and the received wave using an adaptive filter. Finally, from extensive simulations, compared with the results of other frequency estimation methods such as FFT and MEM, the validity of the proposed method is verified. We also show that down-sampling improves the estimation accuracy.

Key words : Adaptive frequency estimation, Chirp signal, ADAS, FMCW, Down Sampling

1. はじめに

安心・安全で高効率の次世代モビリティとして、高度運転支援システム (ADAS: Advanced Driver Assistance System) や自動運転技術の研究開発がさかんに進められている。これらのシステムには、適材適所の意味で、色々なセンサが相補的に用いられると考えられる。この中でミリ波チャープ信号を用いる車間距離、速度、角度の検出法は、安価なこともあり最も多く使用されると想定される^{1),2)}。本検討では、チャープ率等を考慮して、レーダ間干渉を抑え距離と速度をより精度よく推定することを目標とする。本稿では、適応周波数推定法を用いた距離、速度、移動方向の検出法について検討したので報告する。本稿の構成を以下に示す。**2.**ではチャープ信号を用いた測距等の方法、**3.**では周波数推定のシステムについて、**4.**ではシミュレーションの結果を示している。**5.**は結論である。

2. 検出の概要

時間とともに周波数が増加もしくは減少するような信号をチャープ信号という。レーダにおいてこのチャープ信号を用いるのは、障害物 (ターゲット) との距離、速度差および到来方向を同時に測定することが可能であるためである³⁾。検出システムのブロック図を図 1 に示す。

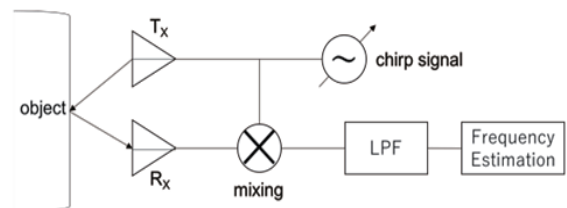


図 1 検出システム

Fig.1. Block diagram of detection system

まず、距離測定を概説する。送信アンテナ T_x からチャープ信号が送信され、ターゲットから反射して受信される信号と送信信号を乗算する。LPF (Low Pass Filter) で高周波成分を除去し、送信信号と受信信号の周波数差 f_d から得られるビート信号の周波数分析を行う。図 2 にその概要を示す。

$$k = (f_1 - f_0)/T \quad (1)$$

$$f_d = kt - k(t - t_d) \quad (2)$$

$$d = \frac{ct_d}{2} \quad (3)$$

ここで、 k はチャープ率、 t_d は遅延時間である。送信端とターゲットの距離 d は上述の周波数差 f_d から式(3)のように求められる。ここで、 f_1 、 f_0 はチャープ信号の最終周波数、初期周波数、 T はチャープ信号の 1 周期、 c は光速である。

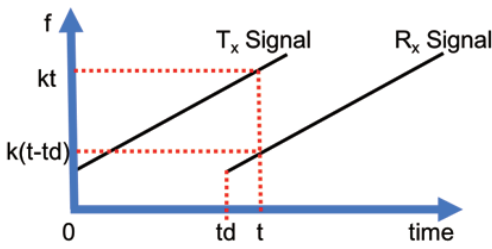


図2 送受信信号
Fig.2. TX and RX signal

次に、相対速度の測定について簡単に述べる。よく知られているように、ターゲットが高速に移動する場合、ドップラー効果により受信信号の周波数は送信信号のそれと異なる。これに対処するために、図3のように周波数が増加するアップチャープ信号と減少するダウンチャープ信号を併用する³⁾。図3の f_R はターゲットの距離により決まる周波数であり f_V は速度により決まる周波数である。 f_{BU} は $f_R - f_V$ 、 f_{BD} は $f_R + f_V$ から、相対速度は式(4)より求められる。

$$V_R = \frac{c(f_{BD} - f_{BU})}{f_c} \quad (4)$$

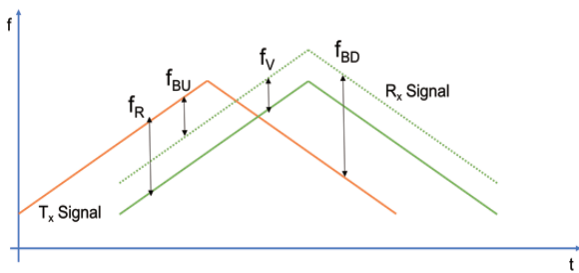


図3 ドップラーシフト
Fig.3. Frequency drift by Doppler effect

最後に対象物との角度の測定方法について記述する。図4に角度測定モデルを示す。角度を測定する場合、受信用のアンテナをもう2つ以上用意する。そして対象物からの距離の2つのアンテナの差とアンテナ同士の距離を用い角度を導出する。送受信波を平面波と考えると、そのとき対象物から受信アンテナ R_{x1} 、 R_{x2} までの距離の差を Δd とし、アンテナ間の距離を l (エル)とすると対象物との角度 θ は、以下のように求めることができる。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta d}{l} \right) \quad (5)$$

3. 周波数推定法

通常、周波数を求める際にはFFTが用いられている。サンプリング周波数を f_s 、変換規模を N とすると、FFT

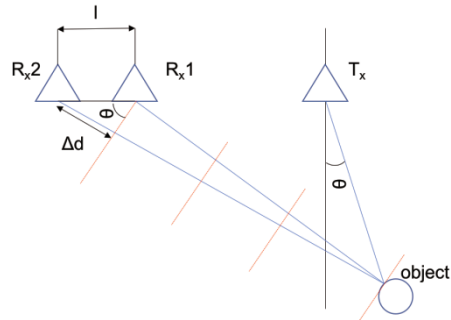


図4 角度の推定
Fig.4. Model of angle measurement

の周波数分解能は f_s/N である。精度よく周波数を求めるには、 N を大きくする必要があるが、 N を大きくすると計測までの時間がかかることになる。例として、 f_s を $400[\text{kHz}]$ 、 N を 1024 点とした場合、その周波数分解能は $390[\text{Hz}]$ 、データの蓄積時間は $2.56[\text{ms}]$ となる。また、変換規模を倍にするとそれに伴ってデータの蓄積時間も倍になってしまう。これらのことからわかるのは、FFTでは、推定精度を求めて周波数分解能を向上させるとデータの取得に時間を要するようになってしまうということである。これは、推定精度とリアルタイム性の両立が求められる車間距離等推定において、致命的な欠陥となる。そこで本検討では、周波数分解能が非常に小さい適応フィルタによる周波数推定を行う⁴⁾。

図5に周波数差 f_d を推定する適応フィルタの構成(単一周波数の推定)を示す。 $H_N(z)$ は適応ノッチフィルタ、 $H_S(z)$ は適応バンドパスフィルタであり、それぞれ式(6)、(7)で表される。ここで、 γ は極半径を制御するパラメータで、 $0 < \gamma < 1$ である。 $H_N(z)$ と $H_S(z)$ をトリー状に接続することで多周波推定も可能である⁵⁾。

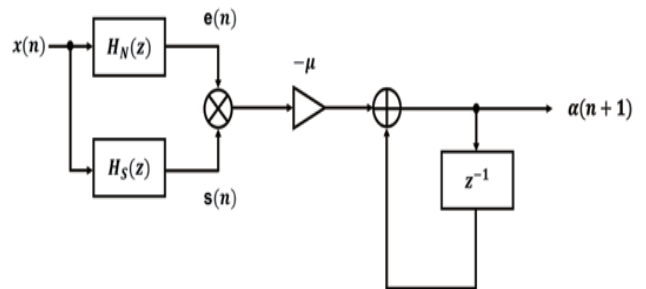


図5 周波数推定のための適応フィルタ
Fig.5. Adaptive filter for frequency estimation

$$H_N(z) = \frac{1 - \alpha z^{-1} + z^{-2}}{1 - \gamma \alpha z^{-1} + \gamma^2 z^{-2}} \quad (6)$$

$$H_S(z) = \frac{-(1-\gamma)z^{-1} + \gamma(1-\gamma)z^{-3}}{1 - \gamma \alpha z^{-1} + \gamma^2 z^{-2}} \quad (7)$$

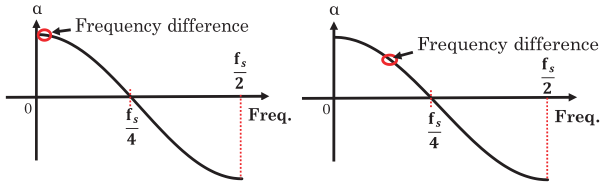
適応パラメータ α の真値は $2\cos \omega$ であり($\omega = 2\pi f_d$)、 α は次式に従って更新する。

$$\hat{\alpha}(n+1) = \hat{\alpha}(n) - \mu e(n)s(n) \quad (8)$$

ここで、 $e(n)$ は $H_N(z)$ の出力、 $s(n)$ は $H_S(z)$ の出力であり、 μ はステップサイズパラメータである。 α の推定値 $\hat{\alpha}$ を用いて、推定周波数は式(9)のように求められる。

$$f = \frac{f_s \cos^{-1}\left(\frac{\hat{\alpha}}{2}\right)}{2\pi} \quad (9)$$

本検討では、求める周波数 f_d がサンプリング周波数に比べ非常に小さいためダウンサンプリング処理も併用する。サンプリング周波数による α の値の概観を図 6 に示す。周波数が小さいと α の勾配が非常に小さいため、観測雑音により推定値 $\hat{\alpha}$ が影響を受けることが分かる。図示するように、ダウンサンプリングにより勾配が大きくなり、改善が図られることが分かる。



(a)without down sampling (b)with down sampling
 図 6 ダウンサンプリングの効果
 Fig.6. Effect of down-sampling

更に、通常のダウンサンプリングでは廃棄されるサンプルを推定速度向上のため、更新に用いることを提案する。ダウンサンプリング比を M とすると、 M 個のダウンサンプリングシステムがあることになる。 i 番目のダウンサンプリングシステムでは、 $\hat{\alpha}_i(n)$ は式(8)に従って、 $\hat{\alpha}_i(n+1)$ に更新したあと、次の $(i+1)$ 番目のシステム $\hat{\alpha}_{i+1}(n)$ としてコピーされる(図 7 参照)。このようにすることにより、単位時間当たりの更新回数はダウンサンプリング前と同一になり、収束速度が劣化しないことが分かる^{6),8)}。

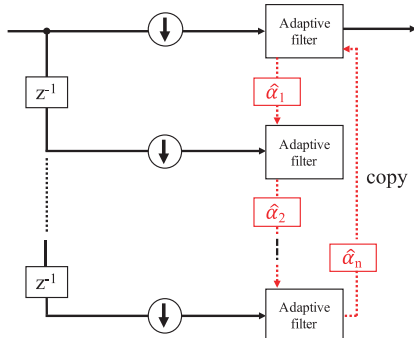


図 7 提案法の構成
 Fig.7. Block diagram of the proposed method

4. 数値例

本検討では使用する計算処理ソフトの最大配列サイズ

の制限のため、光速 c を 3×10^8 [m/s]、送信波を 0 [ms] から 10 [ms] の間に周波数が 76.5 [kHz] から 77.5 [kHz] へと変化するチャープ信号、受信波を送信から 5 [ms] 後に受信したものとした。なお、結果は 10 回の独立なシミュレーションの集合平均より求めている。

4.1 定常状態における推定特性

ターゲットとの距離が一定の定常状態において、FFT、MEM(Maximum Entropy Method)スペクトル⁷⁾ と提案方法の推定特性の比較を行った。送信信号 T_x とターゲットからの反射 R_x は、それぞれ、式(10)、(11)で与えられる。

$$T_x(t) = \sin \left\{ 2\pi \left(f_0 + \frac{f_1 - f_0}{T} \right) t \right\} \quad (10)$$

$$R_x(t) = \sin \left\{ 2\pi \left(f_0 + \frac{f_1 - f_0}{T} \right) (t - \tau) \right\} + \phi(t) \quad (\tau \leq t) \quad (11)$$

ここで、 $\Phi(t)$ は平均ゼロ、分散 σ_ϕ^2 の加法的ガウス雑音である。シミュレーション条件をいかに示す。

- (1) $f_s = 400$ [kHz], $f_0 = 76.5$ [kHz], $f_1 = 77.5$ [kHz];
- (2) $T = 10$ [msec], $\tau = 5$ [msec];
- (3) 受信波の SNR = 0 [dB];
- (4) $\mu = 0.015$, $\gamma = 0.95$;

上述の条件では、真値 $f_d = 500$ [Hz]、距離 $d = 7.5$ [m] である。推定結果を図 8 から図 10 に示す。

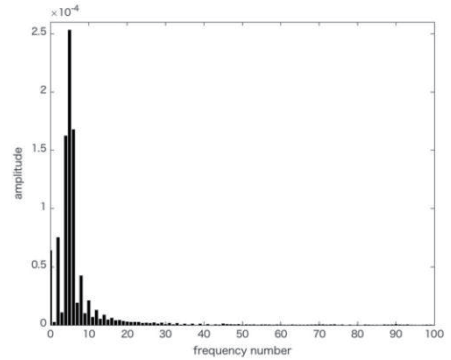


図 8 FFT による推定結果
 Fig.8. Frequency estimation result by FFT

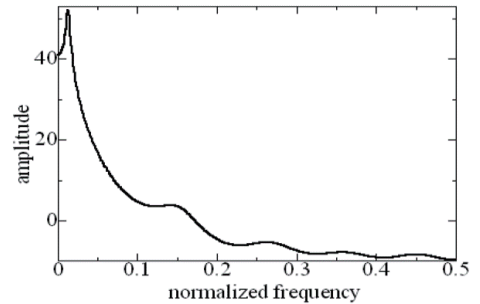
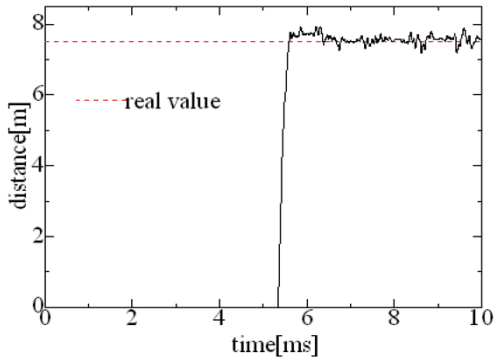
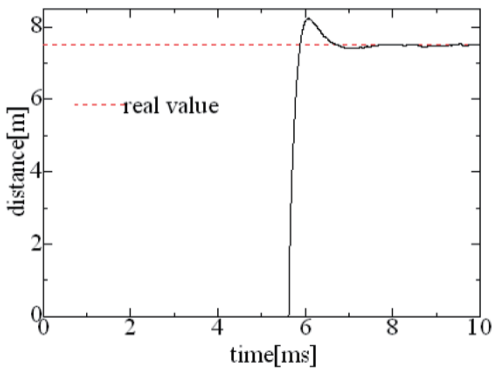


図 9 MEM スペクトルによる推定結果
 Fig.9. Frequency estimation result by MEM



(a) without down-sampling



(b) with down-sampling

図 10 提案法による距離推定結果

Fig.10. Distance estimation results of proposed method

図 8 に FFT による結果を示す。変換規模 $N=4096$ であるため、周波数分解能は $97.65[\text{Hz}]$ である。従って推定周波数は $488.25[\text{Hz}]$ 、推定距離は $7.32[\text{m}]$ である。よく知られているように、スペクトル漏れにより不要な成分が数多く検出されている。図 9 は MEM スペクトルによるものである。ピーク周波数から求めると、 $f_a=500[\text{Hz}]$ 、距離 $7.5[\text{m}]$ と定常状態では正確に求めることができる。

図 10 に提案法による結果を示す。推定距離の平均と分散は、ダウンサンプリングなしの(a)では、それぞれ $7.544, 0.0115$ 、ダウンサンプリングありの(b)では、それぞれ $7.491, 0.002$ であり、ダウンサンプリングによる距離推定の劣化はなく、むしろ分散が小さい推定が可能であることが示されている。

4.2 非定常状態における推定特性

送信側とターゲットの初期距離が $10[\text{m}]$ で両者とも $60[\text{km/h}]$ の速度で走行している状態から、ターゲットのみが 1 秒間に $50[\text{km/h}]$ に線形に減速していく場合についてシミュレーションを行った。ターゲットの速度を検出する図 3 の増減するチャープ信号を用い、送信信号 $T_x(t)$ は式(12)のようになる。

$$T_x(t) = \begin{cases} \sin\left\{2\pi\left(f_0 + \frac{f_1 - f_0}{T}\right)t\right\} & (0 < t \leq T), \\ \sin\left\{2\pi\left(f_1 - \frac{f_1 - f_0}{T}\right)t\right\} & (T < t \leq 2T) \end{cases} \quad (12)$$

- 4.1 の条件に加えたものは以下のとおりである。
- (1)距離は $10[\text{m}]$ から $4.4[\text{m}]$ に変化；
- (2)相対速度は $0[\text{km/h}]$ から $-10[\text{km/h}]$ に変化；

図 11 に MEM スペクトルによる結果を示す。データサイズは 256 サンプルで予測次数は 15 である。変化に対して追従できていないことが分かる。8

図 12 に提案法による距離と相対速度の推定結果 (拡大図) を示す。(a)は距離の推定 (丸で囲んだ部分が推定値)、(b)は相対速度の推定 (丸で囲んだ部分が推定値) を示しており、破線の真値とほぼ一致していることが分かる。

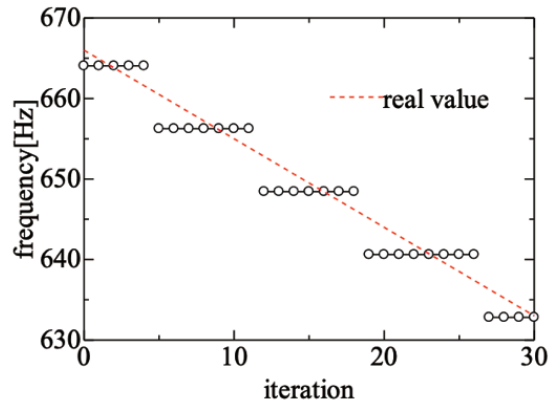
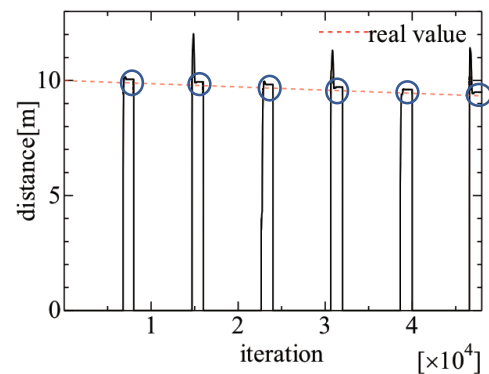


図 11 MEM による周波数推定

Fig.11. Frequency estimation result by MEM



(a) distance

図 12 移動の検出

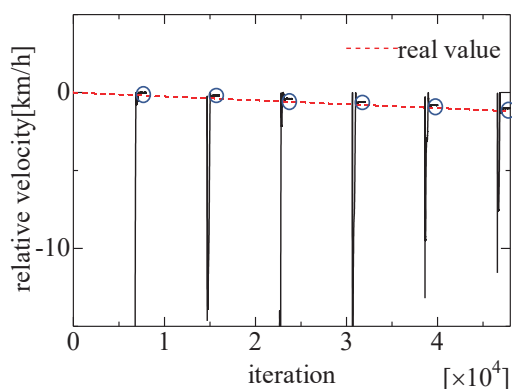
Fig.12. Movement detection results

5. 結論

適応周波数推定を用いたターゲットとの距離、相対速

度、到来方向を検出する方法について述べた。シミュレーションにより、提案方法は高精度でリアエウタイムの推定ができ、FFTやMEMスペクトルなどの車載レーダで用いる周波数推定法よりも有効であることを示した。また、ダウンサンプリング処理や通常廃棄するサンプルも適応処理の更新に用いることで、耐雑音性の向上や収束速度の維持をはかることができた。

今後は、複数のターゲットがある場合、複数の干渉信号がある場合について検討をすすめる予定である。



(b) relative velocity

図 12 移動の検出(続)

Fig.12. Movement detection results(continued)

howling canceller using quasi-whitened input signals”, Proceedings of IEEE TENCON, pp.1-4 (2016.11)

6) N.Kudoh, Y.Tadokoro, “Performance Analysis of a Fourier Coefficient Estimation Method Using IIR-BPFs and an LMS Algorithm and Improvement of its Performance”, Trans. of IEICE A, pp.1233-1242 (2001.10)

7) S.Haykin, “Adaptive filter theory”, 3rd Ed., Englewood, NJ, Prentice-Hall (1996)

8) 工藤憲昌, 長屋 輝, 釜谷博行, 田所嘉昭, “チャープ信号を用いたオブジェクトの移動検出に関する検討” 電気学会電子・情報・システム部門 全国大会予稿集 GS9-4, pp.1-5 (2021)

(原稿受付：2021年11月2日)

謝辞

本研究の一部分はJSPS 科研費 19K03043 の助成を受けたものです。

参考文献

1) M.Goppelt, H.L.Blocher, W.Menzel, “Automotive radar investigation of mutual interference mechanism”, Advances in Radio Science, Vol.8, pp.55-61 (2010.1)

2) T.Nozawa, Y.Makino, N.Takaya, M.Umehira, S.Takeda, X.Wang, H.Kuroda, “An anti-collision Automotive FMCW Radar using Time-domain Interference Detection and Suppression”, Proc. of RADAR 2017, pp.23-26 (2017.10)

3) M.Umehira, S.Takeda, X.Wang, H.Kuroda, ” Inter-radar Interference and Interference Mitigation Techniques in Millimeter-wave FMCW Radars for Automated Driving Applications ” , IEICE Tech.Rep.SRW2017-81, pp59-64 (2018.3)

4) K.Narita, N.Kudoh, H.Kamaya, Y.Tadokoro, ” A study on an ANC System using narrow-band signals” , proceedings of IEEE TENCON, pp1-4 (2016.11)

5) T.Fujimura, N.Kudoh, H.Kamaya, Y.Tadokoro, “A study on

量子力学の観測問題はなかった？ --量子力学の半分は情報理論である III--

中ノ 勇人

There has not been the Measurement Problem in Quantum Mechanics?
- A half of Quantum Mechanics is an information theory (III) -

Hayato NAKANO

* 電気情報工学コース

Abstract : Recently, there are often found opinions that the Measurement Problem in Quantum Mechanics has not existed since the origin of the field. Nevertheless, it is sure that the strangeness of QM (absence of the reality) has never been solved. In this article we try to explain the present situation and show how we should accept the relation between Quantum world and our Reality.

Keywords : quantum mechanics, measurement, projection, reality, absence of entity, nonlocality

1. 量子力学は不思議だ

量子力学は不思議だがパラドックスはない。この「不思議さ」を科学で解明するのがいわゆる「量子力学の観測問題」である^[1-6]。半世紀前の理・工学部では、そんなものにも興味をもつと時間を無駄にするだけだから「黙って計算しろ」というのが賢明な指導であった。前世紀の終わり近くから量子情報研究および量子測定の流行もあって、タブーの雰囲気はかなり緩み「不思議さ」はかなり整理されたのだが^[9-19]、量子力学を日常利用する専門家たちにも流布しているとはいいいがたい。そんな折、数年前から「量子力学の『観測問題』は始めからなかった」ともとれるような記事、発言などが目につくようになったので^[7,8]、それはどういう意味かここで少し整理してみたい。

結論を先に述べてしまおう。「量子力学の不思議さ」≈「観測問題」の本質は 50 年前とほとんど変わっていない。しかし、整理された結果、射影仮説に伴う不思議さはそういうものとして「公理」のように受け入れるべき絶対必要なもので、いくら科学的研究をしても、どうしてそうなのかは説明できない、とほぼ断言できるところまで来たように見える。この過程で最も貢献した研究は、いわゆる[Bell の不等式]である^[4,7,8,14,19]。

2. 量子力学の不思議さの本質

線形重ね合わせが可能な(純粋)状態、そして、この状態に対し物理量(observable)の測定をすると、特定の物理量をもつ状態に射影されてその物理量が得られる、というのが量子力学の構成である。後者は、いわゆる「コペンハーゲン解釈」あるいは「射影仮説」と呼ばれる^[18]。

射影仮説を認めてしまえば無矛盾であり実験結果と相違することがないこともかなり昔から知られていた。結局のところ、量子力学の不思議さの本質は、射影仮説にともなって生じる「实在(客観性)の不在」に集約される。かつては、この不思議さは量子力学が不完全であるために生じるもので、科学が進歩すればもっと納得のいく説明がされるものと期待された。すなわち「観測問題」は科学的問題であると認識されていた。しかし、現在に至り、この不思議さはこれ以上科学的アプローチで研究しても解答が与えられるものではなく、公理のように前提条件として必要であり導出不可能なものであると認識されるようになった^[14,19]。

2.1 实在(客観性)の不在

我々が自然を物理的対象として認識するとき当然のように「实在」を仮定している。科学的議論の文脈では、「客観的に存在する」と言い換えたほうがいいだろう。つまり、存在するモノは、誰が見てもそこに同じものが存在する。もっと敷衍して、誰も見ていないときにもそこに存在する、という前提のことである。日常感覚では当たり前であるし、古典物理学でも当たり前であった。相対性理論の登場で、同時刻・同地点の概念は揺らいだが、实在は揺らがなかった。

量子力学を素直に受忍することに抵抗した Einstein は言った。「誰も見ていないときに月は存在するのか？」まさにこの間が实在と関係する。古典物理学の世界では、誰も見ていなくても月はそこに存在し、誰にとっても同じ月が存在する、という仮定は絶対であって完全に無矛盾である。この客観性こそが「实在」である。現行の量子

力学はこのような実在の否定を含むようだから不完全である、との不満があったが、前節に出てきた「Bellの不等式」とその周辺の理論的および実験的研究はそれ(実在の不在)が量子力学に不可避に内在していることを明白にした¹²⁾。

2.2 「実在」の重要性

この世界の物理的存在が実在している、ことは我々の認識において極めて重要である。古典物理学においては、中の見えない箱の中に何が入っているかは、観測者が異なっても変わることはない。この当たり前のことが量子力学では成り立たない。A, Bの2人の観測者にとって箱の中身が同じかどうかはA, Bが共有している他の情報がどんなものであるかを規定しないと決まらないのである。情報の共有が、見ていない箱の中身が一致するかに関係してくる。つまり、箱の中身が独立した存在として決まらない＝実在しているとは言えない、という深刻な事態が量子力学では生じる。簡単に受け入れられるものではない。この気持ちが「観測問題は科学が進歩すれば解決できる」と信じられてきた歴史を支えている。

ただし、以下のことは強調しておかなければならない。否定しなければならない「実在」は「観測していない間の状態」についてであって、観測された物理量(そこに存在する、というも物理量に置きなおせる)については実在している、として無矛盾である¹³⁾。

2.3 Bellの不等式とその周辺

専門家に叱られないようにもう少し正確にいうと、Bellの不等式とその周辺の理論的および実験的研究が明らかにしたのは、量子力学に従う現象においては、

*実在 *局所性 *自由意志

のどれかが破れていなければならない、という絶対的な事実である¹⁴⁾。個々について詳細に説明する余裕はここではないが、前者2つは通常感覚ではまとめて「実在」と考えられている。厳密な議論では、「非局所的な実在」の存在を仮定することもできるが、それは既に日常感覚の「実在」とはとても思えない不自然なものなのであえて触れない。最後の「自由意志」というのは、別の言い方をすると、真のランダム、というものが有り得るか、という問題になる。もちろん日常感覚では有り得るし、古典物理学はそれ認めている。しかし、Bellの不等式がらみの理論・実験的研究の示すところは、もし、量子力学の世界において「実在および局所性が確かに成立しているならば、自由意志がありえない、すなわち、ランダムというものがあり得ない、としないと実験事実と矛盾する」という恐ろしい話である。この話は、量子力学で実在・局所性を保とうとすると陰謀論になる、などと説明されているものである。

3つのうちのどれが破れていてもとりあえず実験と矛盾しないのだが、(通常、陰謀論はとりあえず無視して)「局所実在」が破れていることが証明された、と考えるのが多数派である。こうして、量子力学では、実在=客観性、が存在しないことになった。これが、量子力学の不思議、すなわち、受け入れがたいところの本質である。実は、Schrodingerの猫や、Wignerの友人、などの感覚に矛盾する喩え話も、この「実在の不在」が顕著に表れた例であった。「猫」では、猫の生死、が客観的事実=実在として定まるのはいつなのかが不明になり、「友人」では、Wignerとその友人にとっての事実(実在)が一致しているかどうかの客観性が怪しくなっている。

3. 量子力学の「解釈」と観測問題の関係

「実在」が諦めきれない人たちは、何とか射影仮説なしに、射影仮説を導入した標準的な量子力学と同等なものを構築したいとしていろいろなことを考える。それが、いわゆる「量子力学の解釈」である。標準的な量子力学と同等なものを目指しているから「解釈」と呼ばれる。

3-1 コペンハーゲン解釈

詳細な異論はあると思うが、これを、ざっくり「標準的な量子力学」と呼ぶことにする。潔く、射影仮説は必要不可欠な公理であって、科学的には導出不可能、という立場が標準的な「コペンハーゲン解釈」である^{12,19)}。半世紀以上前から主流であるが、今はかつてよりずいぶん洗練されていることは忘れていただきたい^{11,15,16)}。50年前のまま大味ではなく痒い所に手が届く。この立場では、測定されて確定した[物理量]だけが実在であって、測定される前の状態や物理量は数学的にしか存在しない、とする。つまり「波動関数」は実在しない数学的概念に過ぎない。測定の結果、特定の状態が生き残り他の可能性が消えてなくなる(波束の収縮)、というのは、状態=波動関数を「実在」だと思ふと不自然だが、単に情報として、他の状態はない、ということを知っただけ、と考えれば変化がたとえ超光速でも納得がいく。観測問題は(科学的議論としては)存在しない、という立場と共存できる。強いて批判するなら、我々が世界として認識している何か、を無批判に自明なものとして考えているところが気になる。それゆえ、最終的に測定結果(およびそれを記録した世界)が決定する(した)のが、いったいどの時点なのかはっきりしない。理屈をこねると、いわゆる「観測の無限の連鎖」^{13,6)}が、認識の主体である「私の意識」まで決着しないという、「強い」コペンハーゲン解釈、まで行かなければならなくなる。そこ(意識)に本質がある、と考える物理学者はたぶん少ない。しかも意識とは何か、を物理学的に定義するのはおそらく絶望的に難しい。

3-3 多世界解釈

Everett の多世界解釈、とよく呼ばれるが彼自身は多世界(Many-world)とは言っておらず、曖昧な部分が多い。支持者が精密化して自分の主張を「多世界解釈」と呼ぶので、本当の多世界解釈がどれなのかよくわからない。測定によって確率的に実現する測定後状態を唯一の存在とはせず、他の可能性も同時に実現していて、量子重ね合わせのまま存在しているとする考え方である。実現した複数の測定後状態(世界：より正確には、測定結果の状態とエンタングルしている測定後の世界の状態)が直交していれば互いに全く無縁であり二度と交錯することはない、とする。こうすると、確率的に実現した個々の世界の中では測定結果は無矛盾であり、重ね合わせを考慮すればすべての測定前後の状態(世界)が保存されて「実在」しているから、実在を諦めることなく、無矛盾な量子力学が構成できる、という気持ちだろう^[3,5,20,21]。

どの流派の多世界にも共通の特徴は「説明不足」であって、モデル、特に「世界」がはっきり定義されていないので、詳細な議論ができない。筆者から見るとこれらの理論では、世界そのものの「実在」を認めていいのか困る。逆にいえば、我々が通常、自明として認識しているこの世界とは科学理論的に何なのかを(多世界解釈と整合するかたちで説明してくれれば、多世界解釈は、「実存」を諦めない量子力学になると思う。少なくとも現時点では「解釈」のひとつに過ぎない。

これを補強するために近年、「量子ダーウィン淘汰論(Quantum Darwinism)」というのが少し流行っている。個人的には、あとで紹介する「無矛盾歴史」の考え方と関係がありそうで気になる。

3-2 D. Bohm 流「パイロット波」解釈

(陰謀論以外では)「局所の実在」は既に否定されているので、「非局所の実在」があるものとして量子力学を構築しようという試みである^[22,23]。非局所の実在=非局所的隠れた変数、としてパイロット波、なるものを仮定する。これは非局所的ではあるが「実在する実体」であって、これの振る舞いによって標準的量子力学と同じ物理が実現すると考えている。ただし、この非局所的隠れた変数=パイロット波は、しばしば常識に反する超能力のような振る舞いをするので、これが認められる心理なら「実在なんて存在しない」というコペンハーゲン解釈の立場も受け入れられるのではないかと、思ってしまう。思考実験をするときも実験の構成が少し複雑になると、計算がとてつもなく複雑になるので実利もあまりない。

3-4 デコヒーレンス解釈

射影仮説は、量子系の状態(密度演算子)の干渉項の消失

現象と数式の上ではほぼ同等である。Zurek がこれを観測問題へ解決の手がかりとして強調し、デコヒーレンス(Decoherence=干渉の消失)という語を流行させた^[5,24,26]。開放系の量子力学(注目している量子系が多自由度の外界と相互作用をもっているために、外界に流失した情報が戻って来られない系)は、近似的にこの干渉項消失を示すので、観測問題への解答となる期待が高まったが、今では本質ではないことがわかっている。開放系の数理的記述においては、こっそり射影仮説を用いており、結果として得られるデコヒーレンスは、ある意味トートロジーである。理論的に独立していない。簡単に述べると、外界に出ていった情報は外界の中でいつか測定(射影)されその測定結果はわからない、もしくは、出て行った情報はなぜか外界の中で失われてしまう、という論理になっている。しかし、厳密にはトートロジーであっても、観測問題に伴う「観測の無限の連鎖」を途中で打ち切っても近似的には正当であることを示すとともに、いろいろな緩和現象が実は「(測定結果を捨ててしまう)連続測定」と同じ土俵で論じられること、すなわち、情報の散逸こそが緩和の本質であることを、かなり精密かつ定量的に示した功績は大きい。

注目している量子系を含むもっと大きな物理系に対して射影仮説を使うことにより、注目している量子系のもっと近くで射影仮説を使ったのと(近似的に)同じ結果が得られる、すなわち、究極的には仮に観測の連鎖は認識の主体の意識まで遡らなければいけないとしても、近似的には、注目している量子系やそれを測定する装置くらいまでを考えて射影仮説を使ってしまっても許される、ことが示されている。

「射影仮説を使って射影仮説を導く」ことで、量子力学(射影仮説を含む)は無矛盾である、ということも補強しており、ミクロな世界から我々の日常のマクロな世界まで連続的につながっていることを示唆してくれる。

また、繰り込み群を使うと射影仮説に似た干渉項の消失が導ける、という主張も散見するが、これもデコヒーレンス派の中に入れておく。繰り込みは、系自身を外界として取り込んでいくという過程を無限回繰り返す操作のようなもので、この繰り返しを通じて多自由度の粗視化を行っており、粗視化(ある種の平均近似)のたびにこっそり情報を捨てているのに相当している⁽⁴⁾。

3-5 無矛盾歴史(Consistent Histories)解釈

ものすごく雑に述べると、ファインマン経路積分の「経路」のうち、「無矛盾」な経路だけが「無矛盾歴史(Consistent Histories)」であり、実現可能であるとする、ボルンの確率解釈と同等のものが出てくる。これには波束の収縮=射影仮説を必要としない、という主張である^[27,28]。一部の哲

学者に受けがいいようだ。「無矛盾」の中には、古典的には存在しない状態も含む。勉強不足を棚に上げて敢て言うなら、途中、矛盾があつて消えてしまった可能性は後に実現することはない、と言っているだけに見える。確率だけを扱っているように見えて、「無矛盾な歴史」を選択するために挿入される途中の射影が結局射影仮説＝波束の収縮と同等の作用をしているので、表に見えないだけでこっそり射影仮説を使っているように読める。

ある支持者たちはこれを補強するために、先のデコヒーレンスを議論に持ち込む。しかし、デコヒーレンス自体がこっそり射影仮説を使っているからこれは問題の解決にはならない。

4. この世界とは何か？ — 普段、実在があるように暮らして困らないのはなぜか —

原理的には実在を諦めるにしても、我々が生きているこの世界が通常、素朴な実在論に従っているように見えるのはなぜか？量子力学がこれを説明してくれなければさすがに納得いかないだろう。

メゾスコピック物理、と呼ばれる 1980 年代に主として金属の電気伝導の分野から始まった考え方がある^[33-37]。日常レベルでは古典物理的な性質しか示さない電子の流れが、極低温や微細加工された試料では、量子の重ね合わせ、離散状態の性質を表す。環境、外界との相互作用で汚れてしまった量子系では、条件によって量子性が見えたり消えたりする。この分野での理解は、日常レベルでどうしてこの世界が古典力学的実在をもつように見えるのかに多くのヒントを与えてくれる。

ここでは、注目する量子系と弱い相互作用をする多自由度の外界、環境が大きな働きをする。日常のレベルでは注目する量子系を環境から隔離することができないので、量子系は環境との間でエネルギーや情報のやりとりをする。それゆえ、デコヒーレンスが起り我々の世界では古典物理的実在があるように見える、と考えることができる。

これまでの、誰も見ていない＝月はなにものにも観測されていない、という究極の状況を想定して議論していたが、現実には意図的な観測者がいなくても月は事実上観測されまくっている。月に反射された太陽光は地球に到達して地面、建物、窓辺で読書している人の頬にも当る。光の当たった物質は光と相互作用するだろう。あるいは、月の重力に伴う潮汐の変化、などいくらでも月は観測されている。デコヒーレンスの考え方では相互作用は観測になれるのだ。環境の情報はいつか消失・観測されて干渉項が消えるからである。観測者を仮に人間に限

ったとしても、これら月の影響を受けた物質や光と何らかの物理的関係をもってしまった人間はみな、月を部分的に観測していたことになってしまい、これまでの節で暗に仮定していたように、月を見ていない、などとは物理的には考えられない。また、観測者どうしも光や気体分子、音を介して互いに弱く相互作用している。

こうなるともはや、同じ月、すなわち月が「実在」していると考えて無矛盾な状況にある。これが、古典力学の実在である。

4.1 「世界」を古典化させ「実在」を復活させる思考実験

4.1.1 立場によって異なる状態 [主体]

Agatha, Brigit, Chiara の 3 人によるスピン測定を考える。Chiara を真ん中に、Agatha と Brigit がいる。それぞれ 1 光年、Agatha と Brigit は 2 光年離れている。彼女らは光速の古典通信、および光速の粒子転送が可能であるとす。3 人は別れる前に以下のような実験をすることを約束している。

Chiara は A, B 2 つの $1/2$ スピン粒子を用意し、エンタングルした状態 $|\psi_0\rangle = -(|\rightarrow_A\rangle|\leftarrow_B\rangle - |\leftarrow_A\rangle|\rightarrow_B\rangle)/\sqrt{2}$ を準備した。これは Spin-Singlet であり、スピンの基底を何にとっても 2 粒子のスピンはどこも向いていない。Agatha も Brigit もこの状態を知っている。Chiara は粒子 A を Agatha に向かって、粒子 B を Brigit に向かって投げる。Agatha, Brigit は Chiara から 1 光年離れたところにいるので、粒子が届くには 1 年かかり、Agatha-Brigit 間ではいかなる情報も 2 年以内には届かない。

粒子が Agatha と Brigit に届いた段階で 3 人にとっての測定前の粒子 A, B の密度演算子は $\rho_0 = |\psi_0\rangle\langle\psi_0|$ である。予め、約束しておいた時刻に Agatha が自分に届いた粒子のスピン測定を行なった。そのスピン測定の基底は 3 人で予め約束してあったとする。その測定結果を Chiara には教えていないときの Chiara にとっての密度演算子(注: Chiara は $|\psi_0\rangle$ および Agatha が測定したことを知っているが、測定結果は知らない)は $\rho_{Ch} = |\Psi\rangle\langle\Psi| \otimes \hat{I}_B \otimes \hat{I}_C$ となっている。ここで、 $|\Psi\rangle = (|\uparrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle|A_\uparrow\rangle - |\downarrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle|A_\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ である。Chiara は Agatha が測定したことを知っている、測定後の粒子 A と Agatha の状態がエンタングルしているが、測定結果を知らない(この古典情報は 1 年しないと届かない)ので $|\Psi\rangle$ は干渉項のある(射影のなされていない)純粋状態である。

測定直後の Agatha, Brigit にとっての密度演算子は⁽⁹⁾

$$\rho_{Ag}^{[1]} = \begin{cases} (|\uparrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle|A_\uparrow\rangle\langle A_\uparrow| \otimes |\downarrow_B\rangle\langle\downarrow_B| \otimes \hat{I}_C & \text{[Agatha の結果が } \uparrow \text{ だったとき]} \\ (|\downarrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle|A_\downarrow\rangle\langle A_\downarrow| \otimes |\uparrow_B\rangle\langle\uparrow_B| \otimes \hat{I}_C & \text{[Agatha の結果が } \downarrow \text{ だったとき]} \end{cases}$$

$\rho_{Br} = |\Psi\rangle\langle\Psi| \otimes \hat{I}_B \otimes \hat{I}_C$, $\rho_{Ch} = |\Psi\rangle\langle\Psi| \otimes \hat{I}_B \otimes \hat{I}_C$.
少し遅れて、約束しておいた時刻に、今度は Brigit が自分の粒子のスピンを測定する。すると Agatha にとって

$$\rho_{Ag}^{[2]} = \begin{cases} |\uparrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle|A_\uparrow\rangle|B_\downarrow\rangle\langle A_\uparrow|\langle\downarrow_B| \otimes \hat{I}_C \\ \text{[Agatha の結果が}\uparrow\text{だったとき]} \\ |\downarrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle|A_\downarrow\rangle|B_\uparrow\rangle\langle A_\downarrow|\langle\uparrow_B| \otimes \hat{I}_C \\ \text{[Agatha の結果が}\downarrow\text{だったとき]} \end{cases}$$

Agatha は Brigit が測定したことを知っているが結果を知らない。しかし、自分の測定するとき既に $\rho_{Ag}^{[1]}$ になっていたので、Brigit の測定時刻になった瞬間に ρ_{Ag} はこうなる。一方、Brigit は自分の測定結果を得た時、

$$\rho_{Br}^{[2]} = \begin{cases} |\uparrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle|A_\uparrow\rangle|B_\downarrow\rangle\langle A_\uparrow|\langle\downarrow_B| \otimes \hat{I}_C \\ \text{[Brigit の結果が}\downarrow\text{だったとき]} \\ |\downarrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle|A_\downarrow\rangle|B_\uparrow\rangle\langle A_\downarrow|\langle\uparrow_B| \otimes \hat{I}_C \\ \text{[Brigit の結果が}\uparrow\text{だったとき]} \end{cases} = \rho_{Ag}^{[2]}$$

これも同様で、Brigit は Agatha の結果を知らないが、自分の測定結果が決定した(射影が行われた)のでこうなる。このとき、Chiara にとっては

$$\rho_{Ch}^{[2]} = |\Psi'\rangle\langle\Psi'| \otimes \hat{I}_C, \quad \text{ここで、}$$

$$|\Psi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle|A_\uparrow\rangle|B_\downarrow\rangle - |\downarrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle|A_\downarrow\rangle|B_\uparrow\rangle)$$

Chiara は Agatha, Brigit の結果を知らないので $|\Psi'\rangle$ は純粋状態のままである(エンタングルしているが)。Agatha, Brigit の 2 人にとっては、両粒子のスピンはこの時点で確定している(=射影が行われている)。さらには、Agatha, Brigit の状態もこの時点で確定している(=射影が行われている)。測定結果を知らない Chiara にとってはまだ何も確定していない(=射影されていない)。 $\rho_{Ag}^{[2]} = \rho_{Br}^{[2]} \neq \rho_{Ch}^{[2]}$ に注目されたい。3 人にとっての量子状態=密度演算子は一致しない。ここには「Wigner の友人」と同じ構造が出現している。結果を知らない Chiara にとって状態は他の 2 人と異なる。客観性が消失している。

しかし、この状況は古典的にも何も矛盾はない。Chiara は 2 人から 1 光年離れているから、この時点で状態(密度演算子)が異なることを絶対を知ることができない。読者はすべてを見ているから矛盾に感じるかもしれないが、Agatha, Brigit, Chiara が矛盾を問の当りにすることはあり得ない。困るのはこの後である。

ここで Agatha, Brigit は測定済みの各々の粒子を Chiara に送る。(送るのは粒子だけ。測定結果は付随させない)これには 1 年かかる。届いたところで、Chiara は 2 粒子のスピンを測定する。すると、Chiara にとっての状態は

$$\rho_{Ch}^{[3]} = \begin{cases} |\uparrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle|A_\uparrow\rangle|B_\downarrow\rangle|C_{\uparrow\downarrow}\rangle\langle C_{\uparrow\downarrow}| \langle B_\downarrow|\langle A_\uparrow|\langle\downarrow_B| \\ \text{[Chiara の結果が}\uparrow,\downarrow\text{だったとき]} \\ |\downarrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle|A_\downarrow\rangle|B_\uparrow\rangle|C_{\uparrow\downarrow}\rangle\langle C_{\uparrow\downarrow}| \langle B_\uparrow|\langle A_\downarrow|\langle\uparrow_B| \\ \text{[Chiara の結果が}\downarrow,\uparrow\text{だったとき]} \end{cases}$$

この時点で、自動的に Agatha, Brigit の測定結果を Chiara

も知ることになるのだが、これで大丈夫だろうか。

さて、ここで 3 人にとっての状態=密度演算子が異なる ($\rho_{Ch}^{[3]} \neq \rho_{Ag}^{[2]} = \rho_{Br}^{[2]}$) のが気になる。3 人が今後出会ったり情報交換をしたりしなければ、異なっても比べることは絶対はないから矛盾もない。ここにもまだ「Wigner の友人」状況がある。

しかし、以降、3 人が情報をやりとりしても(出会って情報交換でも)矛盾は生じないだろうか？ Agatha と Brigit が自分の測定結果をもって Chiara のところへやって来た。それは 1 年前に行われた Chiara の測定結果と一致してほしい。だが、 $\rho_{Ch}^{[3]}$ にはそんな保証はない。 $\rho_{Ch}^{[3]}$ [Chiara の結果が...だったとき] が都合よく選ばれていけば無矛盾だがいつそれが選ばれたのか？ このモデルでは、この問いに量子力学は答えられない。3 人の測定が完了し、それぞれにとっての状態が単純な混合状態になってしまった、というこのモデルは、こののち、3 人が情報交換をしない(それぞれの[立場]が干渉しない)という仮定で使える近似である。

後で、モデルに変更を加えて、この一致がどうしてなされるかを論じるが、とりあえず一致したとしてもまだ問題がある。Chiara にとって Agatha, Brigit の測定結果が定まった(=射影された)のは、Agatha, Brigit が測定を行なった 1 年も後だということである。

3 人が集まって測定結果が定まったのはいつだったか議論したとしよう。「Agatha, Brigit の測定後の状態はいつ決まったか」と問えば、Agatha と Brigit は自分たちが測定したとき、すなわち、2 年前だと主張するだろう。証拠の記録もあれば提示できる。Chiara にとっては、Agatha, Brigit の測定結果は自分が 2 粒子を測定したとき(1 年前)に決まったのだが、Agatha, Brigit の主張に日和る。すなわち「2 粒子を測定するまで『知らなかった』だけ」と。そうすれば Chiara にとっても無矛盾である。

「Agatha という主体」、「Brigit という主体」、があるから、Agatha にとっての量子状態、Brigit にとっての量子状態、というものがある。2 人を主体と認めなければ、

「Chiara にとっての量子状態」しかない。注意するが、これは Agatha, Brigit が意識をもつかどうか、という話ではない。[Agatha の立場]、[Brigit の立場]、というものを考えるかどうかの話である。Agatha, Brigit が心を持たないロボットだろうと単なるメモリだろうと「その立場」を考えるなら「主体」である。

Agatha, Brigit がメモリで[立場]を考えなければ、上の話では「Chiara にとっての量子状態」しかない。Chiara にとっての量子状態では、まさに見たように、メモリの測定後の状態は干渉項をもつエンタングル状態であって、Chiara が測定するまで射影は行われない。「Agatha, Brigit

の測定後の状態いつ決まったか」と問えば、「Chiara が測定したとき」が答である。ここに何もおかしいことはない。メモリはただの物理系だから重ね合わせやエンタングル状態をとっても奇妙ではないだろう。Agatha, Brigit が人間であったとしても、Chiara にとっては物理系に過ぎないことが $\rho_{Ch}^{[2]}$ に表れている。

Agatha, Brigit の測定結果が定まった時点で 2 人の立場では互いの状態が古典的に定まった=射影された。これは 2 人がもとの 2 粒子の Spin-Singlet 状態を知っていたので排他的に相手の状態を知った、だけである。測定前の状態に関しては「実在」はないが、自分の測定だけで相

$$\rho_{Ag}^{[4]} = \begin{cases} (c_1|\uparrow_B\rangle|B_\uparrow\rangle + c_2|\downarrow_B\rangle|B_\uparrow\rangle)(c_1^*\langle\uparrow_B|B_\uparrow| + c_2^*\langle\downarrow_B|B_\uparrow|) \otimes |\uparrow_A\rangle\langle\uparrow_A| \otimes |A_\uparrow\rangle\langle A_\uparrow| \otimes \hat{I}_C & \text{Agatha の結果が}\uparrow\text{だったとき} \\ (c_3|\uparrow_B\rangle|B_\uparrow\rangle + c_4|\downarrow_B\rangle|B_\uparrow\rangle)(c_3^*\langle\uparrow_B|B_\uparrow| + c_4^*\langle\downarrow_B|B_\uparrow|) \otimes |\downarrow_A\rangle\langle\downarrow_A| \otimes |A_\downarrow\rangle\langle A_\downarrow| \otimes \hat{I}_C & \text{Agatha の結果が}\downarrow\text{だったとき} \end{cases}$$

$$\rho_{Br}^{[4]} = \begin{cases} (c_1|\uparrow_A\rangle|A_\uparrow\rangle + c_3|\downarrow_A\rangle|A_\downarrow\rangle)(c_1^*\langle\uparrow_A|A_\uparrow| + c_3^*\langle\downarrow_A|A_\downarrow|) \otimes |\uparrow_B\rangle\langle\uparrow_B| \otimes |B_\uparrow\rangle\langle B_\uparrow| \otimes \hat{I}_C & \text{Brigit の結果が}\uparrow\text{だったとき} \\ (c_2|\uparrow_A\rangle|A_\uparrow\rangle + c_4|\downarrow_A\rangle|A_\downarrow\rangle)(c_2^*\langle\uparrow_A|A_\uparrow| + c_4^*\langle\downarrow_A|A_\downarrow|) \otimes |\downarrow_B\rangle\langle\downarrow_B| \otimes |B_\downarrow\rangle\langle B_\downarrow| \otimes \hat{I}_C & \text{Brigit の結果が}\downarrow\text{だったとき} \end{cases}$$

このときは、Agatha にとって「Brigit の測定結果が確定せず(射影されていない)、Brigit の状態はスピンとエンタングル」しており、Brigit にとって「Agatha の測定結果が確定せず(射影されていない)、Agatha の状態はスピンとエンタングル」したままとなっている。つまり、Agatha にとって Brigit の測定(射影)は完了しておらず、Brigit にとって Agatha の測定も同様である。Chiara が用意した 2 粒子状態を Agatha, Brigit が知っていた前項の場合は、2 人のそれぞれは相手の結果を知らずとも排他的に相手の結果が決まったので相手の状態も射影され古典的に定まっていたのと対照的である。

この時点で Chiara にとっての密度演算子はどうなっているだろうか。Chiara は自分の用意した 2 粒子状態が

$$|\psi_0\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|\rightarrow_A\rangle|\leftarrow_B\rangle - |\leftarrow_A\rangle|\rightarrow_B\rangle) \\ = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle - |\downarrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle)$$

であることをしっているが、Agatha と Brigit の測定結果を知らない。すると、Agatha, Brigit が 2 粒子の初期状態を知っていた場合と同じで、

$$\rho_{Ch} = |\Psi'\rangle\langle\Psi'| \otimes \hat{I}_C \quad \text{ここで}$$

$$|\Psi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle|A_\uparrow\rangle|B_\downarrow\rangle - |\downarrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle|A_\downarrow\rangle|B_\uparrow\rangle)$$

である。

Chiara が 2 粒子のスピンを測定したら、

$$\rho_{Ch}^{[5]} = \begin{cases} |\uparrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle|A_\uparrow\rangle|B_\downarrow\rangle\langle C_{\uparrow\downarrow}|C_{\uparrow\downarrow}\langle B_\downarrow|A_\uparrow|\langle\uparrow_A|\langle\downarrow_B| \\ \text{[Chiara の結果が}\uparrow,\downarrow\text{だったとき]} \\ |\downarrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle|A_\downarrow\rangle|B_\uparrow\rangle\langle C_{\downarrow\uparrow}|C_{\downarrow\uparrow}\langle B_\uparrow|A_\downarrow|\langle\downarrow_A|\langle\uparrow_B| \\ \text{[Chiara の結果が}\downarrow,\uparrow\text{だったとき]} \end{cases}$$

となる。

この後、1 年かけて 3 人が集まったとき矛盾はないだろうか。Agatha と Brigit は Chiara から $c_1 = c_4 = 0$, $c_2 = -c_3 = 1/\sqrt{2}$ であると知らされる。すると、Agatha と Brigit

手の状態を知るのは、古典の情報の場合と何も変わらない。2 粒子のスピンに完全な負の相関があることを知っていただけで、情報伝達はなされていない。

4.1.2 古典情報のやりとりだけで変わる「状態」

Agatha, Brigit は測定の前段階で、準備された 2 粒子の状態を知らなかったとしよう。2 人にとって、測定前の 2 粒子の状態は、

$$|\psi_0(c)\rangle = c_1|\uparrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle + c_2|\uparrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle + c_3|\downarrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle + c_4|\downarrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle \quad (\sum_{i=1}^4 |c_i|^2 = 1) \quad \text{となる。}$$

2 人の測定直後の Agatha, Brigit にとっての密度演算子は

$$\rho_{Ag}^{[5]} = \rho_{Br}^{[5]} = \begin{cases} |\uparrow_A\rangle|\downarrow_B\rangle|A_\uparrow\rangle|B_\downarrow\rangle\langle A_\uparrow|\langle\downarrow_B| \otimes \hat{I}_C \\ \text{[Agatha, Brigit の結果が}\uparrow,\downarrow\text{だったとき]} \\ |\downarrow_A\rangle|\uparrow_B\rangle|A_\downarrow\rangle|B_\uparrow\rangle\langle A_\downarrow|\langle\uparrow_B| \otimes \hat{I}_C \\ \text{[Agatha, Brigit の結果が}\downarrow,\uparrow\text{だったとき]} \end{cases}$$

となって 3 人とも無矛盾である。ここで 3 人が無矛盾になったのは、Agatha と Brigit が Chiara から「 c_1, c_2, c_3, c_4 の値」という古典情報を与えられ、3 人がこの古典情報を共有したからであることに注意。古典情報の共有が観測者間に無矛盾(観測結果の実在)を与える例である^[8]。

上で見た 2 つの場合のどちらも、3 人が集合して情報を共有すれば無矛盾で不自然なことは何もない。ただし、集合する前の時点を見れば、いささか奇妙である。少なくとも密度演算子(すなわち全体の状態)は、誰の立場かによって異なっている。ここまでは、量子力学では素朴な実在論が成り立たない、という例を見ているに過ぎない。

4.1.3 3 人の情報交換が世界を古典化する

これを、Agatha と Brigit が測定をした時点で、すべてが決まっている、と考えようというのが先に紹介した無矛盾歴史の考え方に近い。過去を振り返って無矛盾な履歴しかあってはいけなく、とするのである。

Chiara だけが準備された 2 粒子状態を知っている場合で考える。3 人が 1 光年も離れているのでは無理なので、すぐ近くに集合して同じことをやる。そのかわり、3 人の間に当該の粒子以外の物質や情報のやりとりは絶対にできないような情報隔離だけは完全に行う。Agatha と Brigit の測定が終わった時点で、3 人にとっての密度演算子は、 $\rho_{Ag}^{[4]}$, $\rho_{Br}^{[4]}$, $\rho_{Ch}^{[4]}$ である。3 人のいる空間にアボガドロ数個の Bose 粒子をバラまいて運動させる。粒子たちは、3 人と微小な相互作用をして、 $|A\rangle, |B\rangle, |C\rangle$ などと弱いエ

ンタングルをする。ただしこのエンタングル状態の情報はすぐに全体系の外に捨てられて粒子たちと $|A\rangle, |B\rangle, |C\rangle$ の相関は失われてしまうとする。残るのは粒子たちを媒介として形成された $|A\rangle, |B\rangle, |C\rangle$ の間の相関である。粒子たちの情報の消失が干渉項を小さくする。

この状況はまさにデコヒーレンス解釈のモデルそのものである^[25,26,33-37]。Agatha, Brigit, Chiara は共通の多自由度の外界(環境・熱浴)と弱い相互作用をしていて外界のメモリー時間が極めて短い場合に相当する。計算の詳細は述べないが、粒子たちの導入により、Agatha, Brigit, Chiara と2粒子からなる系の密度演算子は、

$$\rho = \frac{1}{2} |\uparrow_A\rangle |\downarrow_B\rangle |\uparrow_A\rangle |\downarrow_B\rangle |C_{\uparrow\downarrow}\rangle |C_{\uparrow\downarrow}\rangle \langle B_{\downarrow} | \langle A_{\uparrow} | \langle \uparrow_A | \langle \downarrow_B | \\ + \frac{1}{2} |\downarrow_A\rangle |\uparrow_B\rangle |\downarrow_A\rangle |\uparrow_B\rangle |C_{\downarrow\uparrow}\rangle |C_{\downarrow\uparrow}\rangle \langle B_{\uparrow} | \langle A_{\downarrow} | \langle \downarrow_A | \langle \uparrow_B |$$

という混合状態に急速に近づき、Agatha, Brigit が測定を行った後わずかな時間で3人にとって密度演算子が同じ、すなわち実在を想定して良い状態になる。これは、導入したアボガドロ数個の粒子たちが3人の間に1回一回では弱いが何度も相互作用して多量の情報を運び合った結果である。別の言い方をするなら、アボガドロ数個の粒子たちが3人と2つのスピン粒子の状態を「測定してしまった」のである。ただしその測定結果は捨てられているので混合状態になっている。そして、本人たちは、上の2項のどちらが実現したかを知っている。

我々の巨視的(マクロ)な世界⁽⁶⁾にもアボガドロ個数の粒子に相当する自由度がいっぱいだ。これらを避けて情報の遮断など簡単にはできない。相対論でいうところの遠い関係、すなわち光円錐の外側に3人を互いに配置しないと予期せぬ自由度が情報を運んで量子実験を失敗させ、我々の通常世界にしてしまう。実際、「Bellの不等式の破れ」の証明実験など、光円錐の外側に2者(測定器)を配置して情報のやりとりが出来ないことを保証してやっと認められるものになった。情報の仲介者がごろごろしている環境ではあつという間に通常世界になってしまい、量子力学による「実在の不在」など見えない。

射影仮説を認めればデコヒーレンス派の膨大な計算例は近似計算として採用できる。その結果、デコヒーレンス派が主張してきたような外界、環境の存在するような状況では「無矛盾な歴史」しか残らない古典力学的な世界観が近似的に成立する。

5. 「観測問題」はなかったのか？

科学的なアプローチでは、量子力学の不思議さ(射影測定相当の公理が必要であること)を導出できないことがほぼ明らかになったので、もはや「観測問題」は科学的な

問題としては存在しなくなった。射影仮説～波束の収縮、は公理のように存在しているものだ。だから「観測問題」は始めからなかったのだ。多世界解釈のところで触れたように、我々が認識している「世界」を自明とせず、科学的、量子測定的に何なのかちゃんと説明できるならば、「観測問題」は科学的問題として生き残れるが、これは、俗にいう「この世界はすべての記録・記憶とともに5分前にできたのだ」を科学的に否定するのと同じくらい将来的にもおそらく不可能である。ただし再度強調するが、量子力学で諦めなければならない「実在」は「観測していない間の状態」を想像したときについてであって、観測された物理量については実在している、として無矛盾であるから心配はいらない。

まとめると、量子力学は原理的に「射影仮説」を公理のように導入することで、無矛盾で閉じた物理体系となる。射影仮説に相当するものを量子力学から導くのは不可能で、他の解釈も結局、射影仮説を認めていることになるだろう。Bellの不等式の破れが実験で証明されたように、情報が完全に遮断できるような状況を人為的に作りだせば、量子力学に従うこの世界では「実在の不在」が見えてしまう。しかし、日常世界の空間・時間スケールでは、観測の主体間で情報を伝達し合う「環境」「外界」の自由度の関与が排除できないので、主体たちにとっての「状態」が一致して通常の「実在」が存在する世界が近似的に成立するので、日常感覚と矛盾しない。

注

(1) 初期の「観測問題」には、雑多な疑問がごちゃごちゃに含まれ、現在では当時の理解不足に過ぎなかったことが明らかなものも多い。「観測問題」を思い出すために古い文献を読むのは害がある。下の参考文献[4][14]くらい読めばとりあえず足りる。

(2) 測定や状態変化についての理解はこの数十年で急速に整理された。大味な「射影測定」を部品として、現実的な測定がどう構成されどう振る舞うかが細かく示されている現在では、実在の不在以外、量子力学にもう奇妙なところはない、と思える。今でも多くの教科書に載っている、もとの「Heisenbergの不確定性原理」は、現代的な視点からすると何を言っているのか曖昧で、測定の反作用などをちゃんと考慮した「小澤の不等式^[4]」などまで洗練されてようやく何を示しているのかが物理的に理解できる。測り方を特定せずに誤差を云々されても困る。逆に、Bohrの「相補性原理」は残念ながら愚かな私には何を言っているのかいまだにわからない。

(3) この「観測していない」がとても重要である。あとで議論するように、日常レベルでは知らないうちに観測が行われているがゆえ、世界は古典的な実在をもっているように見えている。

(4) 場の量子論の連続無限自由度も情報をこっそり捨てるの

に便利だが、同じく本質ではないと思われる。無限小の誤差が誤差になる世界は情報に関して閉じていないだけである。

(5) 以下 $|A_i\rangle, |B_i\rangle, |C_i\rangle$ などは、Agatha, Brigit, Chiara の状態を表す。

(6) 巨視的実在(Macroscopic Reality)と呼ばれる研究分野があり、本稿で論じているのとは逆に、マイクロでないサイズでも量子力学的振る舞いが見えて「実在」が怪しい、といえるのはどういふときか、を考える。Leggett-Garg の不等式、などが提案され実験もある。超伝導の「巨視的トンネル現象」など Macroscopic Quantum Coherence の延長として、巨視的実在の不在を議論したいようなのだが、まだ巨視的実在の定義が曖昧なのであまり明確な議論になっていないように見える^[29-32]。

参考文献

- [1] 『量子力学における観測の理論』, 柳瀬睦男, 並木美喜雄, 町田茂 編, 新編物理学選集 69 (日本物理学会, 1978).
- [2] 『量子と実在—不確定性原理から Bell の定理へ』, ニック・ハーバート, はやし はじめ 訳 (白揚社, 1990).
- [3] 'Quantum Theory and Measurement' edited by J. A. Wheeler and W. H. Zurek (Princeton Univ. Press, 1983).
- [4] 『マーミン 量子のミステリー』, 町田茂 訳, (丸善, 1994).
- [5] W. H. Zurek, "DECOHERENCE AND THE TRANSITION FROM QUANTUM TO CLASSICAL", PHYSICS TODAY vol.44, pp. 36-44(AIP, 1991).
- [6] 『量子力学 —観測と解釈問題』, 高林 武彦, 保江 邦夫 (海鳴社, 2001).
- [7] 中ノ勇人, 「量子力学の「半分」は情報理論である」, 八戸工業高等専門学校紀要 50(0), pp. 2-14, (2016).
- [8] 中ノ勇人, 「古典情報の「共有」と量子「状態」の関係—続・量子力学の半分は情報理論である—」, 八戸工業高等専門学校紀要 52, pp. 57-64, (2018).
- [9] 清水明 「量子測定の原理とその問題点」, 数理科学 2002 年 7 月号 (サイエンス社).
- [10] 『量子論の基礎』, 清水明 (サイエンス社, 2004).
- [11] 『量子論の概念と手法』, A. ベレス, 大場一郎ほか訳 (丸善, 2001).
- [12] "FOUNDATIONS AND INTERPRETATION OF QUANTUM MECHANICS", G. Auletta (World Scientific, 2001).
- [13] "Testing quantum mechanics on new ground", P. Ghose (Cambridge Univ. Press, 1999).
- [14] 『量子力学の反常識と素粒子の自由意志』, 筒井泉, (岩波書店, 2011).
- [15] G. Kimura, 'Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information Theory' in "Introduction to Quantum Information Science", by M. Hayashi, et al. (Springer, 2014).
- [16] 『量子測定と量子制御』, 沙川貴大, 上田正仁 (サイエンス社, 2016).
- [17] S. Luo and Y. Sun 'Quantum coherence versus quantum uncertainty', Phys. Rev. A 96, 022130 (2017).
- [18] 森田紘平 「量子力学を解釈するとはどういうことだったのか」, 日本物理学会誌, 2021 年 76 巻 8 号 pp.532-534.
- [19] 『入門 現代の量子力学 量子情報・量子測定を中心として』, 堀田昌寛 (講談社, 2021).
- [20] "Many Worlds?: Everett, Quantum Theory, and Reality", edited by S. Saunders et al. (Oxford Univ. Press, 2012).
- [21] 『Schrodinger の子猫たち 実在の探究』, J. グリビン, 棲山義夫 訳 (シュプリンガー・フェアラーク東京, 1998).
- [22] "Bohmian mechanics and quantum theory", J.T. Cushing, A. Fine, et al. (Springer, 1996).
- [23] M. Genovese, 'Research on hidden variable theories: A review of recent progresses', Physics Reports, vol. 413 (2005) pp. 319-396.
- [24] "Quantum Measurements and Decoherence: Models and Phenomenology (Fundamental Theories of Physics Book 110)", M. Mensky (Springer, 2000)
- [25] "Decoherence: and the Quantum-To-Classical Transition", M. A. Schlosshauer (Springer, 2007).
- [26] "Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory", D. Giulini et al., (Springer, 1996).
- [27] "Consistent Quantum Theory", R. B. Griffiths (Cambridge Univ. Press, 2003).
- [28] E. Okon, D. Sudarsky, 'On the Consistency of the Consistent Histories Approach to Quantum Mechanics', Found Phys 44, 19-33 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10701-013-9760-2>
- [29] A. J. Leggett and A. Garg, 'Quantum mechanics versus macroscopic realism: Is the flux there when nobody looks?', Phys. Rev. Lett. 54, p.857 (1985).
- [30] F. Fröwis, P. Sekatski, W. Dür, N. Gisin, and N. Sangouard, 'Macroscopic quantum states: Measures, fragility, and implementations', Rev. Mod. Phys. 90, 025004 (2018).
- [31] J. Kofler and Č. Brukner, 'Classical World Arising out of Quantum Physics under the Restriction of Coarse-Grained Measurements', Phys. Rev. Lett. 99, 180403 (2007); J. Kofler and Č. Brukner, 'Condition for macroscopic realism beyond the Leggett-Garg inequalities', Phys. Rev. A 87, 052115 (2013).
- [32] C. Emary, N. Lambert and F. Nori, 'Leggett-Garg inequalities', Reports on Progress in Physics, 77, 016001 (2014).
- [33] "Introduction to Mesoscopic Physics (Mesoscopic Physics and Nanotechnology)", Y. Imry (Oxford Univ. Press, 2008).
- [34] "Fundamental Problems of Mesoscopic Physics: Interactions and Decoherence (NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, 154)", edited by I. V. Lerner, B.L. Altshuler, Y. Gefen (Springer, 2004).
- [35] "The Theory of Open Quantum Systems", H.-P. Breuer (Oxford Univ. Press, 2002).
- [36] "QUANTUM DISSIPATIVE SYSTEMS", U. Weiss (World Scientific Pub., 1993).
- [37] "Quantum Dynamical Systems", R. Alicki, M. Fannes (Oxford Univ. Press, 2001).

教科書(単行本)は多数あるが筆者の手許にあるもの限った。しばしば引用されている原論文は[1,3]に収録されているのでこのリストには挙げてない。

(原稿受付: 2021 年 10 月 30 日)

熱 CVD 法による二次元物質六方晶窒化ホウ素結晶の成長

中村嘉孝*, 小子内行羅**, 角館 俊行*, 鎌田 貴晴*

Growth of two-dimensional material hexagonal boron nitride crystal by thermal CVD method

Yoshitaka NAKAMURA*, Takara OKONAI**, Toshiyuki KAKUDATE*, Takaharu KAMADA*

* 産業システム工学科 電気情報工学コース

** 産業システム工学専攻

Abstract : A buffer layer of hexagonal boron nitride was grown on Cu foil, Ni foil, and (111)Si single crystal substrate in order to apply it as a base material for graphene. Raman peaks of the E2g vibration mode of h-BN were observed in each sample. Therefore, we were able to grow h-BN crystals directly on Cu foil, Ni foil, and (111)Si single crystal substrate without using any catalyst metal.

Keywords : Hexagonal boron nitride (h-BN)、CVD、Si substrate

1. 研究背景・目的

六方晶窒化ホウ素 (Hexagonal Boron Nitride : h-BN) は、窒素とホウ素が sp^2 結合し六角格子に並んでいる二次元物質である。この h-BN は c 軸方向にダンダリングボンドを持たないこと、その平坦性から、グラフェンとのヘテロ接合ではグラフェンのサスペンド状態に近い高特性を得られることが報告されている。そのため、グラフェンに関する研究、開発において欠かせない存在となっており、簡便かつ安価に大面積の h-BN 薄膜を得る方法の確立が望まれている。本研究では熱 CVD 法による高品質な h-BN の作成条件を確立することを目的とする。

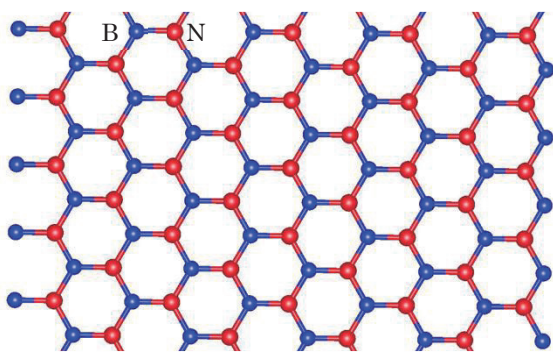


Fig. 1 h-BN の結晶構造 ¹⁾

2. 熱 CVD 法による h-BN 成長機構

熱 CVD 法による h-BN の合成は、原料としてアンモニアボラン (H_3NBH_3)、などのホウ素と窒素が含まれる化合物、成長基板として Cu や Ni などの遷移金属、もしくは Si ウエハが用いられる。Fig. 2 に熱 CVD

法による H_3NBH_3 を原料に用いた場合の h-BN の成長プロセスのモデル図を示す。

アンモニアボラン (H_3NBH_3) を加熱すると、 H_2 、アミノボラン (H_2BNH_2)、ボラジン ($B_3N_3H_6$) に熱分解される。その後、これらはキャリアガスによって基板まで移動し基板に吸着する。 H_2 は電気炉による熱エネルギーと遷移金属基板の触媒作用により水素原子にまで分解される。この水素原子がアミノボラントリア (H_2BNH_2)、ボラジン ($B_3N_3H_6$) から H を奪い、ホウ素 B と窒素 N の BN 二量体等の活性種を生成する。この活性種が結合することにより h-BN 結晶核が生成され、その結晶核に活性種が結合し成長すると言われている。²⁾

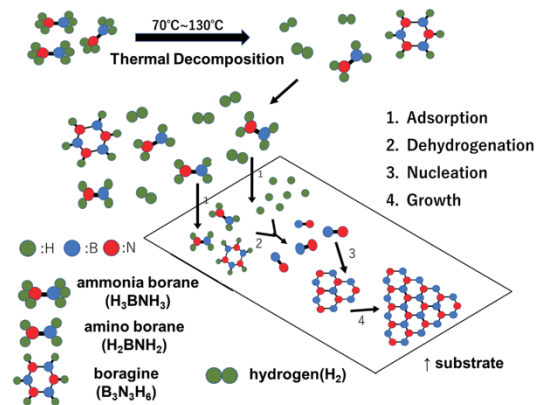


Fig. 2 熱 CVD 法による h-BN 成長機構

3. 結晶成長と評価

基板に Si(111), Cu((株)ニラコ Cu-113243), Ni((株)ニラコ Ni-313263) の三種類、原料

にはアンモニアボラン H_3NBH_3 を用いた。Fig. 3 に実験装置等の位置関係、Fig. 4 に成膜プロセスを示す。

加熱器は基板加熱用 (furnace 1) とアンモニアボラン H_3NBH_3 熱分解用 (furnace 2) の 2 つを用い、それぞれの中心間の距離を 35cm に設定した。

成膜プロセスは、まず基板を加熱し $1000^{\circ}C$ に達した後、Si 基板の場合は 30 分、Cu と Ni の基板の場合は 60 分間アニールし、基板表面の洗浄と表面加工傷を除去する。その後、furnace 2 を $100^{\circ}C$ で 30 分間保持し、150mg のアンモニアボラン H_3NBH_3 粉末を熱分解させ、基板上に原料ガスを供給した。その後、furnace 1 の電源を切り冷却した。キャリアガス流量は、加熱、アニールそして冷却時は Ar:498sccm、 H_2 :1.5sccm、h-BN 結晶成長時は Ar:118sccm、 H_2 :1.5sccm に設定した。

作成した試料はラマン分光法 (レニショー(株)、inVia™ confocal Raman microscope) により評価した。

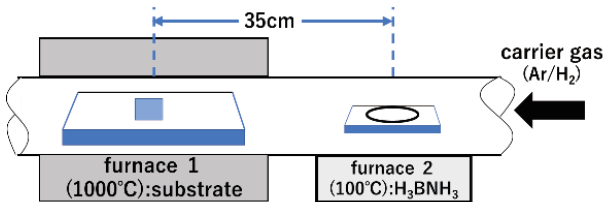


Fig. 3 実験装置の位置関係模式図

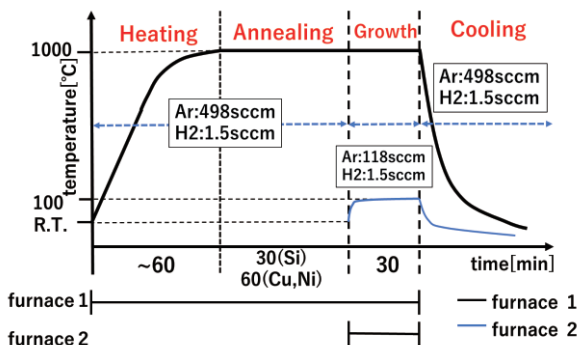


Fig. 4 成膜プロセス

4. 結果と考察

Fig. 5(a) (b) (c) に Cu 箔、Ni 箔そして (111)Si 単結晶基板上に成長させた h-BN 結晶の光学顕微鏡像を示す。Fig. 6 はこれらの試料のラマンスペクトラムである。このラマンスペクトラムのラベル番号は、Fig. 5 中に示した番号に一致する。また、各ラマンスペクトラムの半値全幅 (FWHM) を Table 1 示す。

Fig. 5(a) の Cu 箔基板を用いた場合、銅の結晶粒と結晶粒界が観察される。結晶粒表面は比較的滑らかであるが、若干波状の凹凸が観察された。結晶成長をさせる前の Cu 箔表面は銅箔の切り出しなどによる加工傷が観測されていたが、 $1000^{\circ}C$ で加熱し結晶成長後の表面に、加工傷は見られず滑らかになっていた。(b) の Ni 箔基板を用いた場合、Cu 箔と同様に、加工傷は消えて観測されなかった。また、結晶粒と

結晶粒界も観測されているが、Cu 箔に比べて、結晶粒の大きさは小さい事がわかった。また、Ni 箔の表面モフォロジーは、Cu 箔と場合と大きく異なり、気泡のような多数の粒状の結晶が観測され、非常に荒れた表面になっていた。(c) の (111)Si 単結晶基板を用いた場合、表面は比較的滑らかであるが、小さな結晶が多数観測された。また、h-BN 結晶の特徴である三角形の結晶粒も観測された。

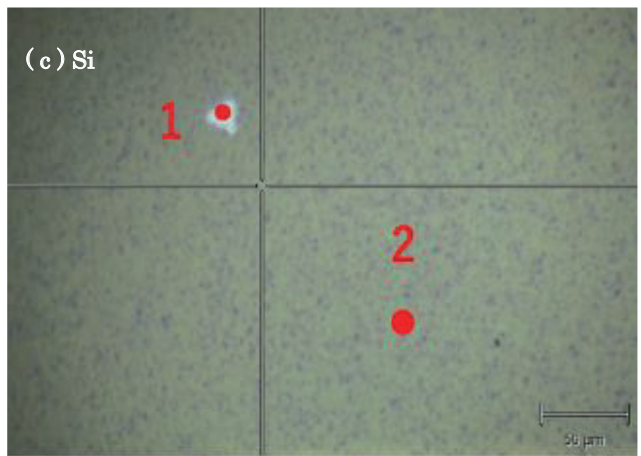
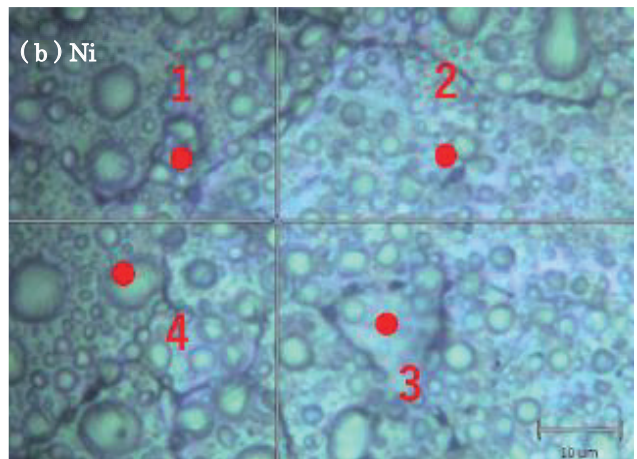
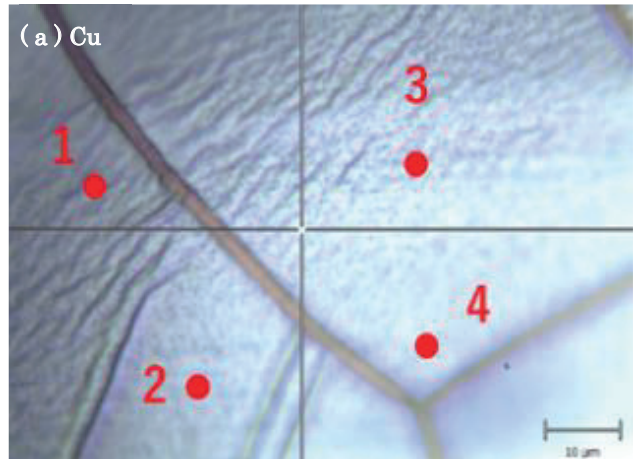


Fig. 5 Cu 箔、Ni 箔そして Si 単結晶基板上に成長させた h-BN 結晶の光学顕微鏡像

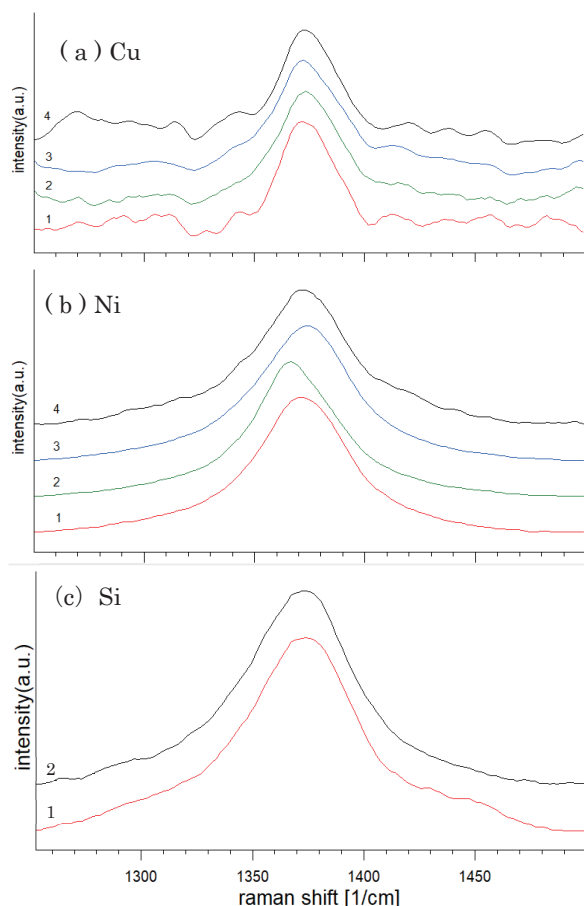


Fig. 6 Cu 箔、Ni 箔そして Si 単結晶基板上に成長させた h-BN 結晶のラマンスペクトラム

Table 1 ラマンスペクトラムの半値全幅

基板	測定点			
	1	2	3	4
Cu	31.23	34.95	33.79	27.93
Ni	49.08	52.23	45.80	49.89
Si	57.72	57.66		

Fig. 6(a)の Cu 箔表面のラマンスペクトラムを見ると、波数 1370cm^{-1} にピークが観測される。このラマンピークは h-BN 結晶の E_{2g} 振動モードのピークと等しいことから、Cu 箔表面に h-BN 結晶が成長している事がわかった。(b)の Ni 箔表面にも同じピークが観測される事から、Ni 箔表面にも h-BN 結晶は成長している事がわかった。(c)の (111)Si 基板上にも、h-BN のピークが観測された事から、触媒金属を用いなくても Si 基板上に h-BN 結晶を成長させることが出来た。しかし、Table1 のラマンピークの半値全幅から、(111)Si 表面に直接成長させた h-BN のラマンピークの幅は広い事から、Cu や Ni 上に成長した h-BN に比べて、結晶性は良くないことが分かる。しかしながら、金属触媒を使用せずに Si 基板上に直接成長させる事が出来たことは、商業化する上で有利で

ある。また、Si 基板上では、三角形の結晶が見られ、この結晶内外の両領域でラマンスペクトラムにピークが現れていることから、h-BN が多層に成長していると考えられる。

5. まとめ

Cu 箔、Ni 箔そして (111)Si 単結晶基板上へ h-BN を成長させる事が出来た。本研究の大きな目的は、h-BN 上にグラフェンを転写する事により、高性能なグラフェンデバイスを作成する事である。その為には、産業応用する上で有利となる Si 基板上へ直接 h-BN を成長させる事ができれば、h-BN/Si 基板上に直接グラフェンを転写すれば良いことになる為、Si 基板上に直接 h-BN 結晶を成長させる事ができた事の意義は大きい。そこで今後は、Si 上の h-BN の結晶の品質を向上させる為の成長技術の研究を進めていく。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K12854 の助成を受けたものです。

引用・参考文献

- 1) K. Momma and F. Izumi, Commission on Crystallogr. Comput., *IUCr Newslett.*, 7, 106-119, (2006)
- 2) Ren-Jie, C., Xiaochen, W., Shanshan, W., Yüewen, S., Ben, P., Harish, B., n, Jamie H. Warner, Growth of Large Single-Crystalline Monolayer Hexagonal Boron Nitride by Oxide-Assisted Chemical Vapor Deposition, *Chemistry of Materials*, 29, 6252-6260, (2017)

熱 CVD 法によるグラフェンの結晶成長と転写技術の開発

中村 嘉孝*, 小橋 正幹*, 角館 俊行*, 鎌田 貴晴*

Development of Crystal Growth and Transfer Technology of Graphene by Thermal CVD Method

Yoshitaka NAKAMURA*, Masaki KOBASHI**, Toshiyuki KAKUDATE*, Takaharu KAMADA*

* 産業システム工学科 電気情報工学コース

Abstract: In order to grow graphene, which is a two-dimensional material, by the thermal CVD method, the copper foil substrate was heat-treated. As a result, the annealed twins of the copper substrate could be reduced, and more copper (111) planes having high lattice consistency with graphene could appear on the surface of the substrate. We also report that graphene could be peeled off from a copper foil and transferred to a silicon substrate using the bubbles of hydrogen and oxygen gas in the electrolysis of water.

Keywords : Graphene, CVD, Cu foil

1. 研究背景・目的

マンチェスター大学の Geim 等は、2004 年に一つの原子の厚さしか持たないグラフェンの取り出しに成功し¹⁾、2010 年にノーベル物理学賞を受賞した。その後、Fig. 1 に示すようなグラフェン、六方晶窒化ホウ素 (h-BN) そして遷移金属ダイカルコゲナイド (MoS₂, WS₂ 等) などの 2 次元物質を積み重ねた、ファンデアワールスヘテロ接合を作る事で新しい性質を有する材料を作り出せると提案した。²⁾その後、MIT の Pablo 等は、2 枚のグラフェンの一方を回転させて積み重ねた、モアレ構造を持った二層グラフェンを作成する事で、超伝導現象が現れることを報告した。³⁾また、半導体の微細化が進むにつれて限界が近づき、インテルは 2019 年 12 月の国際会議 IEDM でトランジスタ技術のロードマップとして、積層させた 2 次元材料トランジスタの使用を発表した。こ

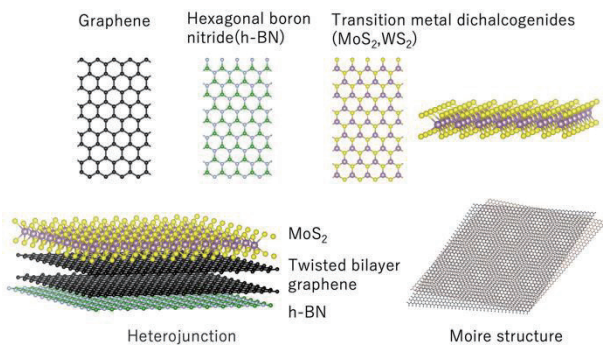


Fig. 1 2 次元材料の結晶構造とファンデアワールスヘテロ接合構造。2 次元材料の片方を回転させたモアレ構造を有するヘテロ接合構造。

の様に、2 次元材料の研究は大きな注目を集めている。熱 CVD 法によりグラフェンを結晶成長させる場合、銅箔を基板として使用する事が多いが、銅箔は多結晶であるため、綺麗な結晶グラフェンを成長させる事は難しい。そこで、本研究ではグラフェンを成長させる前に銅箔基板を加熱する事で、(111) 面が基板表面に多く現れた銅箔を合成する事を試みた。また、水の電気分解の際に電極に発生する水素ガスの泡を利用して、銅箔上に成長したグラフェンを剥がし酸化シリコン基板上に転写する事ができたので報告する。

2. 実験方法

2.1 多結晶銅箔の (111) 配向化とグラフェン成長

グラフェンは熱 CVD 法を用いて成長させた。Fig. 2 にグラフェンの成膜プロセスを示す。H₂ 気流下 1040°C で Cu 箔多結晶基板を 1 時間アニールし銅の (111) 面を形成した。その後、基板温度 1000°C で C₂H₂ を流入し 90 分保持した後、急冷却しグラフェンを成長させた。原料ガスとして C₂H₂ を 1.2sccm、キャ

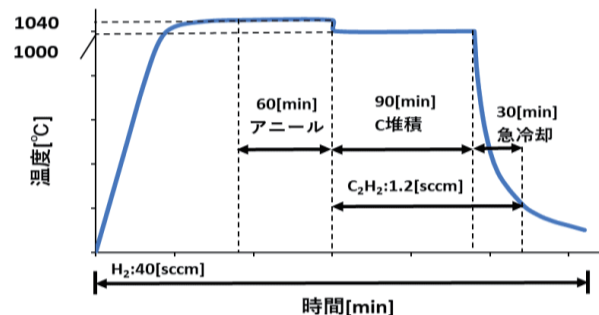


Fig. 2 グラフェンの成膜プロセス

リアガスはH₂として40sccmである。作製したグラフェン/Cuの試料を、40°Cのイオン交換水中に6時間含浸し銅表面を酸化させ、銅の焼きなまし双晶結晶を観察しやすくした。試料の評価にはX線回折法及びラマン分光法を用いた。

2.2 水の電気分解によるSiO₂/Si基板への転写

成膜したグラフェン/Cu基板を水の電気分解を用いて、Fig. 3に示すプロセスによりグラフェンを剥離し、SiO₂/Si基板に転写した。グラフェンを取り出すため、サポート材であるPMMA及びシアノアクリレートグラフェン/Cu基板表面に滴下し、スピンドーターで厚膜を作製した。次にグラフェンを銅箔から剥離するため、1規定の水酸化ナトリウム水溶液中で電源電圧5Vを印加し、グラフェン/Cuを陰極、炭素棒を陽極として水の電気分解を行い、発生する水素ガスの泡によりシアノアクリレート/グラフェンをはく離した。その後、その試料をSiO₂/Si基板表面に置いて、アセトンを用いてシアノアクリレートのみを溶解させ、基板上にグラフェンを転写した。試料評価にはラマン分光法を用いた。

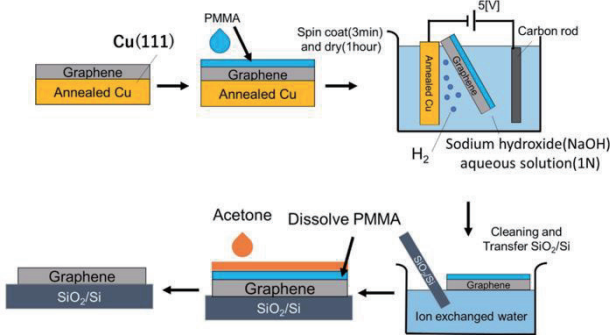


Fig. 3 水の電気分解を用いたグラフェンの転写プロセス図

3. 実験結果

Fig. 4にグラフェンの成膜前(a)と成膜後(b)のX線回折結果を示す。成膜前に優位であったCuの(220)、(200)、そして、(311)のピークは、成膜時の

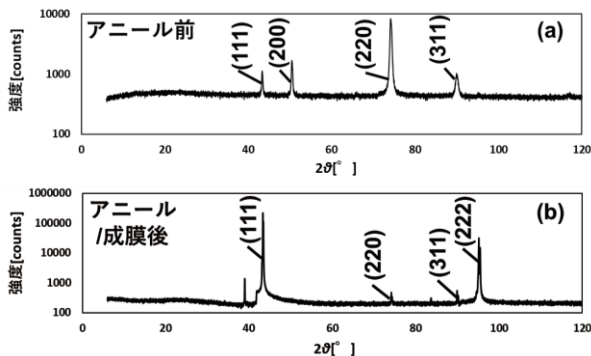


Fig. 4 銅箔のアニール前(a)とアニールした後にグラフェンを成長させた試料(b)のXRDパターン

アニールにより、成膜後は相対的に小さくなった。そして、Cu(111)面のピークは非常に強くなり、配向性が(111)面優位に変化した。

Fig. 5に、1040°Cでのアニール及びグラフェンを成長させた後の基板表面の光学顕微鏡画像を示す。焼きなまし双晶結晶を観察しやすくする為、40°Cのイオン交換水で銅箔表面を酸化させた。赤褐色の部分が特に強く酸化されている事から、板状の双晶部分は特に酸化がされ易い事が分かる。また、アニールにより板状結晶の密度が非常に小さくなる事を光学顕微鏡より確認した。板状結晶が減少した理由として、アニール温度を銅の融解温度に近づけたため、結晶粒が結合し基板表面全体が(111)面優位に変化したためと思われる。但し、Fig. 4(b)のXRDパターン中に非常に弱い(220)、(311)のピークが観測されていることから、顕微鏡で観察される板状結晶は(220)や(311)面配向した結晶粒と考えられる。Fig. 5の各部分のラマンスペクトルをFig. 6に示す。番号①~③はCu板状結晶内部、④⑤は外部の任意の部分である。板状結晶内外においてGバンド及び2Dバンドが観測され、また強度比から一層または二層のグラフェンが成長している事が分かる。グラフェンの結晶欠陥の存在を意味するDピークも、強度は弱い存在している事が分かる。また、板状結晶の内外で、層数や結晶性に大きな違いや規則性は見ら

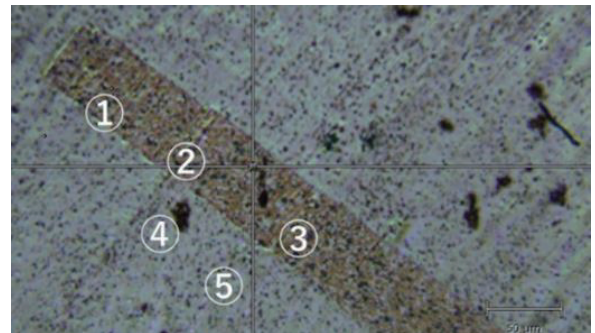


Fig. 5 酸化処理したグラフェンが成長している銅箔の光学顕微鏡画像。板状結晶(焼きなまし双晶)が観測される。

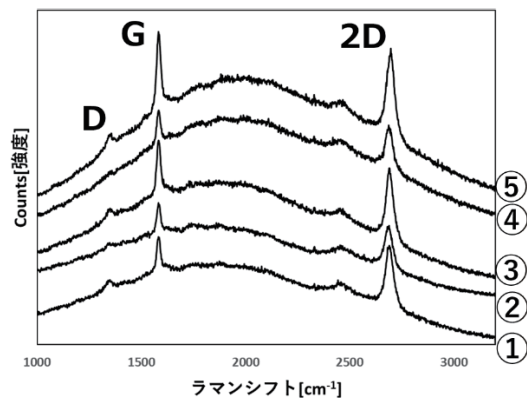


Fig. 6 アニールした銅箔上に成長させたグラフェンのラマンスペクトラム

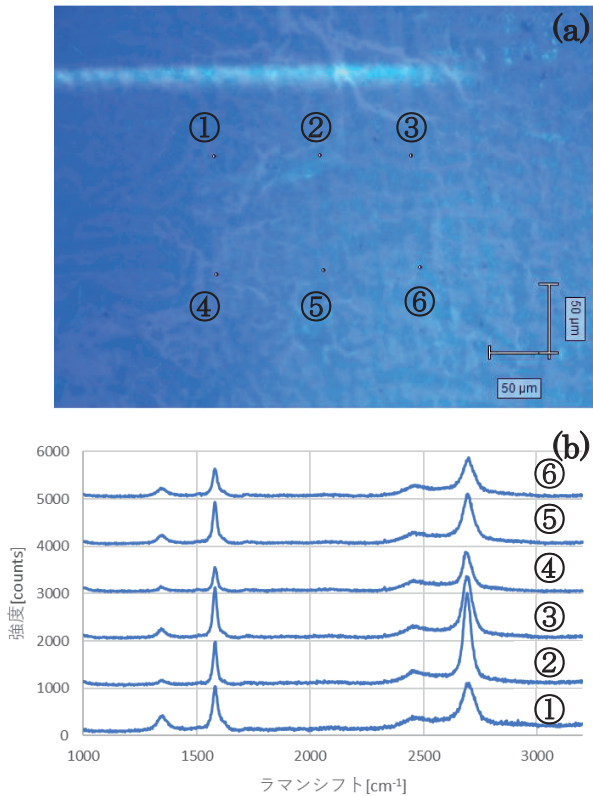


Fig. 7 SiO₂/Si 基板上に転写したグラフェンの光学顕微鏡画像 (a) とラマンスペクトル (b)

れなかった。

SiO₂/Si 基板への転写後のグラフェン/SiO₂/Si の光学顕微鏡画像を Fig. 7(a) に示す。グラフェンシートへの破れや穴なども無く、比較的大面積のグラフェンを転写することができた。Fig. 7(b) に各領域のラマンスペクトルを示す。G ピークと 2D ピークが観測され、また、これらの強度比から一層または二層のグラフェンが成長している事が分かる。グラフェンの欠陥の存在を意味する弱い D ピークも観測された。Fig. 6 の転写前の銅箔上に成長したままのグラフェンの D ピーク強度と大きな差異はない事から、水の電気分解による転写プロセスにおいて、グラフェンへのダメージは少ない事が分かる。

4. まとめ

本研究では銅箔基板のアニール、SiO₂/Si 基板への転写、そしてラマン分析を行い、銅基板の配向性の観点から均質なグラフェン成長の条件を検討した。その結果、1040°C で銅箔多結晶基板をアニールすることで、ほぼ(111)配向した単結晶ライクな銅基板を作製することができた。今後はこの基板へのグラフェンの成長プロセスの検討、転写技術の最適化、そして、モアレ構造を有するファンデアワールスヘテロ接合を作り出すための技術の開発を行う。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K12854 の助成を受けたものです。

引用・参考文献

- 1) Novoselov, k. S., Geim, A. k., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V. and Firsov, A. A. , *Science* 306(5696): 666-669, (2004)
- 2) A. Geim and I Grigorieva., *Nature*, Vol. 499, 25.07.2013, p. 419-425, (2013)
- 3) Yuan Cao, Valla Fatemi, Shiang Fang, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Efthimios Kaxiras & Pablo Jarillo-Herrero, *Nature* volume 556, pages 43-50, (2018)

機械学習を用いた耐候性鋼材のさび外観評価モデルの開発

杉田 尚男*

Development of rust appearance evaluation model for weathering steel using deep learning

Hisao SUGITA

*産業システムデザイン工学科 環境都市・建築デザインコース

Abstract : In the construction of steel bridges, maintenance for rust and corrosion prevention, such as painting, has been carried out as needed to prevent the deterioration of steel due to rusting, which is the fate of steel. However, most of the maintenance cost for rust and corrosion prevention is spent on painting, which is said to be 5-15% of the total cost of the superstructure construction. As the cost of public works is being reduced, it has become a mainstream trend to reduce the overall cost by working on the reduction of life cycle cost (LCC) in addition to the direct reduction of construction cost. Therefore, in this study, we will solve the problems of inspection and investigation of weathering steel bridges by applying image processing technology and neural networks, and investigate methods to improve the objectivity and accuracy of the rust appearance investigation method.

Keywords : atmospheric-corrosion resistant steel, neural network, convolutional neural network

1. はじめに

近年、公共工事コストの削減が進むなか、直接的な工事コスト低減に加え、LCC(ライフサイクルコスト)の低減に取り組み、建設から維持管理まで費用の総計を縮減することが重要となってきた。鋼橋建設において、これまで鋼材の宿命であるさびの発生による鋼材の劣化を抑制²⁾³⁾するため、塗装など防錆・防食のメンテナンスが適宜行われている。しかし、これら防錆・防食のための維持管理費の多くは塗装費用に当てられ、1回の塗装で上部工建設費用の約10%にもなるといわれている。

LCCの低減という観点にたったとき、鋼橋の維持管理における防錆・防食費用を低減させる必要がある。そのため鋼材自体を改質することにより防錆・防食性を高め、無塗装で使用可能な耐候性鋼材を採用した鋼橋建設が多くなっている。日本では1960年代後半から耐候性鋼材が橋梁に採用され始め、最近では年間10万tを超え、橋梁全体の重量に対しても15%を超えるようになってきている。

耐候性鋼材とは、表面に緻密な表面酸化膜を生成することで密着性のある安定化さび層を形成し、さびや腐食の進行を遅らせる鋼材である。しかし、安定化さび層の形成は飛来塩分などの環境の影響を受けやすく、架設後の点検・調査が必要不可欠である。一部では耐候性鋼橋はメンテナンスフリーであるという認識があるが、このような管理を必要とするミニマムメンテナンス橋である。特に海からの飛来塩分が多い地域では、

塩分付着による腐食が進行し続けるため、計画通りに安定さびが形成していない状態の橋梁も存在する。このように、耐候性鋼材の使用した橋が本来持った機能を損なわないようにするためにも、簡便かつ正確な点検・調査が求められる。

耐候性鋼橋の一般的な点検・調査方法は、実際に橋梁の下に足場を組んで目視によるさび外観評価⁴⁾を行っていくものである。これは評価者によりさびの粒径や色調の違いから、鋼材の状態をレベル1(状態の悪いもの)～レベル5(状態の良いもの)に評価する方法である。これは簡便に行える調査方法であるが、評価者の主観により評価が左右され、後のメンテナンスに影響を与えるという問題点がある。

そこで、それらの課題を改善するために、画像処理とAI手法を用いたさび外観評価の判別を提案する。これはカメラによる撮影によって得られた画像に画像処理を加え、AI手法を用いて客観的に評価するというものである。本研究では、さび粒子の粒径や色調の特徴を、画像処理を用いた事例写真や評価基準から得て、画像処理に畳み込みニューラルネットワークを適用する手法を検討し耐候性鋼材の腐食状況を予測し評価する方法を確立しようと試みた。

2. 耐候性鋼材の点検・調査方法

耐候性鋼橋において施工後の点検・調査は必要不可欠である。一般的な調査方法は目視による判別であるが、その

実施や方法にはいくつかの問題点がある。

第1点は、点検・調査の実施において当然ながら橋梁下部の鋼材の状態を判定することが重要となるが、点検・調査のために足場などをその都度設置するのは時間や費用の増大につながり、さらに、細部にわたる点検・調査をするためには足場を多く組まなければならない、非常に不経済になってしまう。

第2点は、実際に人が足場を通過して点検・調査し状態を判定することは、作業中の事故などの危険が伴うという点である。

最後に第3点は、目視によるさび外観評価法で客観的な判断をすることは、評価者の主観により左右され、また経験豊富な技術者でなければ容易ではなく、初心者には正確な判定ができない場合もあるという点である。

目視以外の確立されている調査方法として、さび層の電気抵抗による判別^①というものもあり、これは抵抗器やトランジスタをもって電氣的に評価するもので客観的な評価ができるものの、目視による判別方法よりも更なるコストがかかる他、作業の危険性や、長時間かかるという課題は改善できない。

3. さびの外観評価レベル

さびの外観調査は安定化さび形成の判定を行う点検・調査であり、その一般的な方法としてさび外観評価法がある。この方法は、図3.1に示すように評価者が目視でさびの外観を評価するものであり、その評価によって1~5のレベルに区分される。評価基準はさびの粒径の大きさやさびの色調であり、それらを調査して判定を行う。


4. 画像処理によるさび外観評価レベル判別法

4.1. ヒストグラム

ヒストグラムとは、一枚の画像全域、または部分領域について、濃淡値の出現頻度をカウントするものである。ヒストグラムの分布状態は、グラフとして表示するとわかりやすく、その場合一般に、水平軸に濃淡値、垂直軸に出現頻度を表す。ヒストグラムによって画像の濃淡値を知ること、明るさや色の補正、コントラスト調整などの画像処理を行ううえでの参考となる。0~255階調の256段階の画像濃度の頻度を、画像全体の頻度分布形状を確認できるようにした。


4.2. 平滑化処理

写真やスキャナによって取り込まれた画像には画像の劣化が生じ、これを雑音(ノイズ)という。この雑音を取り除かなければ、正確な処理が行えない。




- ・層状剥離さびが発生あり
- ・さび厚さは800 μ m 超え
- ・さびは層状の剥離がある。
- ・腐食の進行にともない板厚の減少が予測できる

(1) レベル 1




- ・さびの平均的外観粒子径は5~25mm 程度でうろこ状の剥離がある。腐食量は小さいが、層状の剥離さびに進展する可能性あり注意

(2) レベル 2



- ・さびの平均的外観粒子径は1~5mm 程度で粗く、均一性に欠ける。
- ・さび厚さは通常400 μ m 未満を目安とする。

(3) レベル 3



- ・さびの平均的外観粒子径は1mm 程度以下で細かく、均一である。緻密なさびが形成されており、非常に良好な状態である。

(4) レベル 4

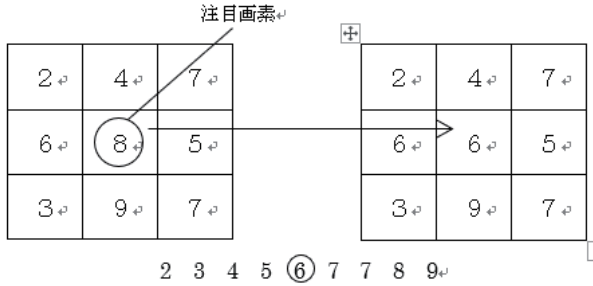


- ・さびは少なく比較的明るい黄褐色に近い色調を呈する。さびの厚さは通常約200 μ m 未満を目安とする。

(5) レベル 5

図 3.1 さび外観評価の評価基準²⁾

また、画像の中で隣り合った部分でも色の濃淡の差が大きいところができる場合がある。特に雑音が混じっている場合は、それが顕著に現れる。そこで、これらを取り除く方法として3×3メディアンフィルタを用いた。3×3メディアンフィルタは、対象処理画素のピクセルとその近傍8ピクセルの濃度のうち中央値を求め、それを目的の画素の濃度とする処理である。本研究では、次の図3.2に示すような処理を行う。



※小さい順に並び替え、その中間値をとる

図3.2 メディアンフィルタの概要

4.3. 2値化処理

2値化処理とは、濃淡を持つ画像の中から抽出したい部分を画像の中で分離させ、形として抽出する方法である。これは、得られた画像の濃淡情報がある閾値で区分し、その部分だけを白としほかの部分黒くすることで、画像を2階調に変換するという処理を行うものである。ここで本研究では、閾値を求める際に判別分析法を用いた。

4.4. 判別分析法

判別分析法とは、分離度が最大になる閾値Tを各画像ごとにプログラムで自動的に決定する手法である。実際にはプログラムを用いて自動的に導くのだが、閾値を求めるまでの処理手順を説明する。図4.1のように輝度についての画像のヒストグラムを求める。

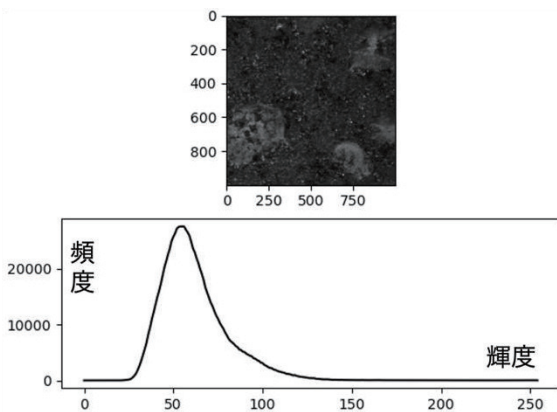


図4.1 輝度についてのヒストグラム

次にヒストグラムから、画素値の最大値lmax、最小値、平均値を求め、図4.2に示すようにlmin~lmax範囲内で、ある閾値Tを選ぶ。閾値Tでヒストグラムを2つのクラス(Class)に分ける。

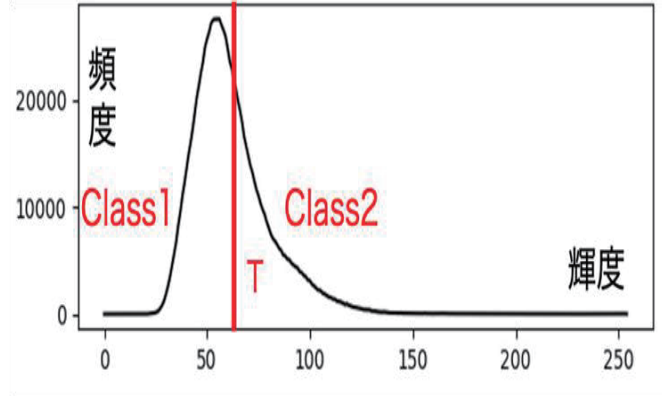


図4.2 閾値Tによるクラス分類

輝度クラス1の分散 σ_1^2 、平均値 μ_1 、画素数 n_1 を求め、クラス2の分散 σ_2^2 、平均値 μ_2 、画素数 n_2 を求める。式(4.1)、式(4.2)からクラス内分散 σ_w^2 とクラス間分散 σ_b^2 を求める。

$$\sigma_w^2 = \frac{n_1\sigma_1^2 + n_2\sigma_2^2}{n_1 + n_2} \quad (4.1)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{n_1(\mu_1 - \mu_0)^2 + n_2(\mu_2 - \mu_0)^2}{n_1 + n_2} \quad (4.2)$$

2つの分散から、分離度S(クラス内分散とクラス間分散の比)を求め、分離度Sをlmin~lmaxの範囲内にある全てのTの分だけ求める。最後に分離度Sが最大になるときのTを二値化処理に用いる閾値に決定する。例として、図4.3に閾値が68.0と判定され、2値化処理されたものを示す。

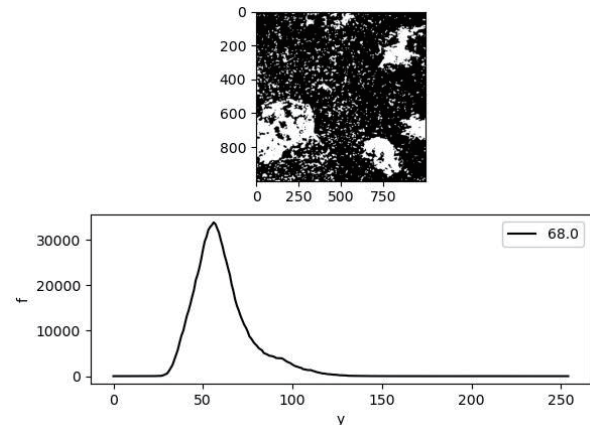


図4.3 判別分析法による閾値の決定

5. CNN (畳み込みニューラルネットワーク)

モデル構築から学習を行い推論モデルの作成を行った。ここでは活性化関数、損失関数、学習回数、訓練データについて説明し、モデルの学習および推論について述べる。

5.1. 深層学習

全結合ニューラルネットワークは、隣接する層のすべてのニューロン間で結合があった。これを全結合 (fully-connected) と呼び、全結合層 (Affine レイヤ) として構成していた。図 5.1 に示すとおり、全結合のニューラルネットワークは、Affine レイヤのあとに活性化関数の ReLU レイヤ (もしくは Sigmoid レイヤ) が続く。ここでは、「Affine - ReLU」の組み合わせを 4 層重ね、5 層目の Affine レイヤと続き、最後に Softmax レイヤで最終的な確率を出力する。

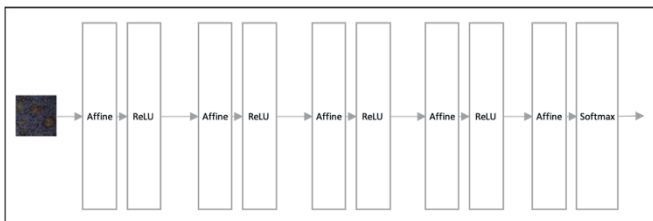


図 5.1 全結合ニューラルネットワーク

CNN⁷⁾⁸⁾⁹⁾でのネットワーク構成を図 5.2 に示す。CNN では新しく「Convolution レイヤ」と「Pooling レイヤ」が加わる。一般的な、CNN の層の繋がりは「Convolution - ReLU - Pooling」という流れとなっている。CNN でほかに注目する点は、出力層に近い層ではこれまでの「Affine - ReLU」という組み合わせが用いられることである。また最後の出力層では、「Affine - Softmax」の組み合わせが用いられている。これらも一般的な CNN の構成によく見られる組み合わせである。

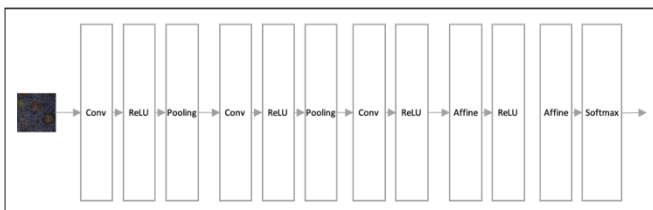


図 5.2 CNN

全結合層では、隣接するニューロンがすべて連結されており、出力の数は任意に決定できる。しかし、全結合層には問題点がある。それは「データの形状が無視されてしまうこと」である。例えば、入力データが画像の場合、画像は通常、縦・横・チャンネル方向の 3 次元の形状である。

しかし、全結合層に入力するときは 3 次元データをフラットな 1 次元に展開する必要がある。

画像は、3 次元の形状であり、この形状には大切な空間的特徴量情報が含まれている。

- 空間的に近いピクセル同士は類似値
- RGB の各チャンネルの間にはそれぞれ密接な関係
- 距離の離れたピクセル同士には深い関係

など、3 次元の形状には抽出すべき本質的な特徴量が存在している。全結合層では形状を無視して、全てのニューロンを同じ次元のニューロンとして入力するため、形状に関する特徴量を生かすことができない。

一方で、Convolution レイヤ (畳み込み層) は形状を維持するのである。つまり画像の場合、入力データを 3 次元のデータとして受け取り、形状を変えずに畳み込み演算を行い、3 次元のデータとして出力するのである。そのため、CNN は形状を有した画像などのデータを正しく理解できる可能性がある。

5.2. 畳み込み層

畳み込み層では「畳み込み演算」という画像処理の計算を行っている。畳み込み演算を、図 5.3 に示す。

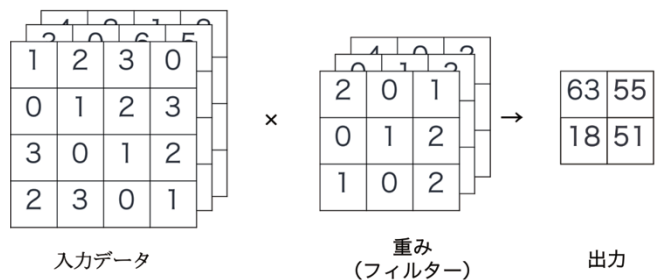


図 5.3 畳み込み演算

畳み込み演算は、入力データに対し重み (フィルター) を適用する。入力データは縦・横・チャンネルの 3 次元の形状を持ち、フィルターの形状も同じく縦・横・チャンネルの 3 次元の形状となっている。畳み込み演算は、入力データに対してフィルターのウィンドウを一定間隔でスライドさせ適用していく。それぞれの場所でフィルターの各要素と対応するウィンドウの各要素を乗算し、その和を求め出力の対応する場所へ格納していく。この一連のプロセスをすべてのウィンドウで行うことで畳み込み演算の出力を得ることができる。3 次元の畳み込み演算では、入力データとフィルターのチャンネル数は同じ値にしなければならない。一方、フィルターのサイズは任意の値に設定することができる。

5.3. プーリング層

Pooling レイヤ（プーリング層）には2つの特徴がある。第一に学習するパラメータがないことである。プーリング層は畳み込み層と異なり、学習するパラメータを持たない。プーリングは、対象領域の最大値を取る処理で、学習するパラメータは存在しないのである。第二に微小な変化に対してロバスト（頑健）であることだ。入力データの微小なズレに対してプーリングは同じような出力をする。そのため、入力データの微小変化に対してロバストであると言える。

5.4. 学習データ

レベル1~5の耐候性鋼材のさび画像約800枚を学習データとした。学習データを8:2に分割し、それぞれ訓練データ・テストデータとし、モデルの学習と推論用のデータに分けた。そして、訓練データをモデルの学習、テストデータ（未分類の画像）をモデルの推論に用いた。これによりモデルの汎化性能の検証を行うことができる。

本論では、耐候性鋼材のさび画像のサイズは、256px・横256pxとした。モデルの学習には実際に生の画像を入力することはできない。そこで画像を先のRGB値に変換する処理を行った。この処理には、pythonのライブラリであるOpenCVを用いた。RGB値に変換後、 $256 \times 256 \times 3$ の3次元行列として出力される。ここでいう「3」とは、RGBの3チャンネルのことを表している。各行列の値は0~255の数値であるため、各値を255で除すことで正規化を行った。こういった学習データに対する一連の処理を前処理という。本研究は、CNNの有用性を検証するものであるため、学習データの前処理はRGB変換と255で除すことによる正規化のみ行った。

5.5. 実装CNN

本研究で実装したCNNの構成について述べる。図5.4がその構成を示したものである。

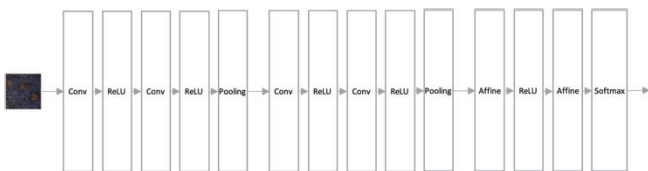


図5.4 本研究で実装したCNNの構成

畳み込み層が4層、プーリング層が2層、全結合層が2層の合計8層のCNNを構築した。それぞれ、中間層の活性化関数にはReLU関数、出力層にはソフトマックス関数を用いた。また、損失関数には交差エントロピー誤差を用

いて重みパラメータの更新を行った。学習回数については0~50回まで、1学習ごとにモデルの正解率（Accuracy）を算出し、学習過程を可視化した。

5.6. 最適化アルゴリズム

モデルの学習により、最適なパラメータを探索するとき最も重要なパラメータとされる「学習率」の決定について、SGD（確率的勾配降下法）、RMSProp、Adamの3つの最適化アルゴリズムの比較・検証を行った。

5.6.1. SGD

SGDは次の式(5.1)で表される。

$$W \leftarrow W - \eta \frac{\partial L}{\partial W} \quad (5.1)$$

ここで、更新する重みパラメータをW、Wに関する損失関数の勾配を $\partial L / \partial W$ とする。 ∂L は誤差関数、 η は学習率を表し、実際には0.001~0.01といった値を前もって設定するのが一般的である。式中の「←」は右辺の値で左辺の値を更新するというを表す。SGDは勾配方向へある一定の距離だけ進むという最も単純な手法である。SGDによる最適なパラメータの探索経路を図5.5に示す。

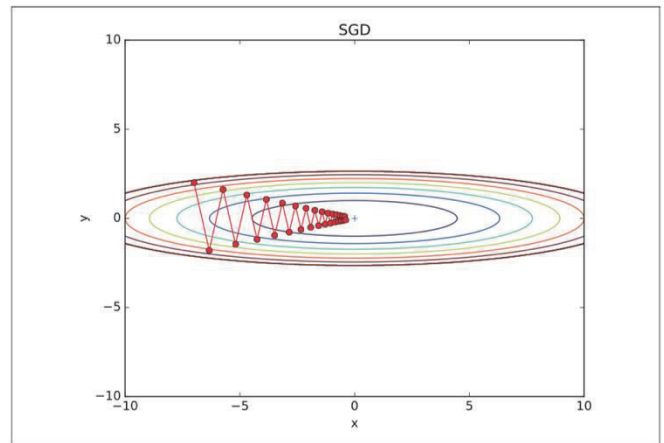


図5.5 SGDによる最適化の更新経路⁴⁾

5.6.2. RMSProp

RMSPropは学習率の減衰を行う手法である。学習率の減衰とは、学習が進むにつれ学習率を小さくしていくことである。学習のはじめのうちは学習率を大きく設定し、次第に小さくしていくのである。探索を式(5.2)、式(5.3)で表すと以下ようになる。

SGDと同様に、更新する重みパラメータをW、Wに関する損失関数の勾配を $\partial L / \partial W$ 、 η は学習率を表す

$$h \leftarrow h + \frac{\partial L}{\partial W} \times \frac{\partial L}{\partial W} \quad (5.2)$$

$$W \leftarrow W - \eta \frac{1}{\sqrt{h}} \frac{\partial L}{\partial W} \quad (5.3)$$

SGD と同様に、更新する重みパラメータを W 、 W に関する損失関数の勾配を $\partial L / \partial W$ 、 η は学習率を表す。 h はこれまで用いた勾配の値を 2 乗和として保持していることを表す。パラメータの更新時には勾配と学習率に $1 / \sqrt{h}$ を乗算することで学習のスケールを調整する。これにより、前回更新時に大きく更新されたパラメータの要素に対する学習率が小さく調整し、再度更新を行うことができる。

RMSProp による最適なパラメータの探索経路図を図 5.6 に示す。

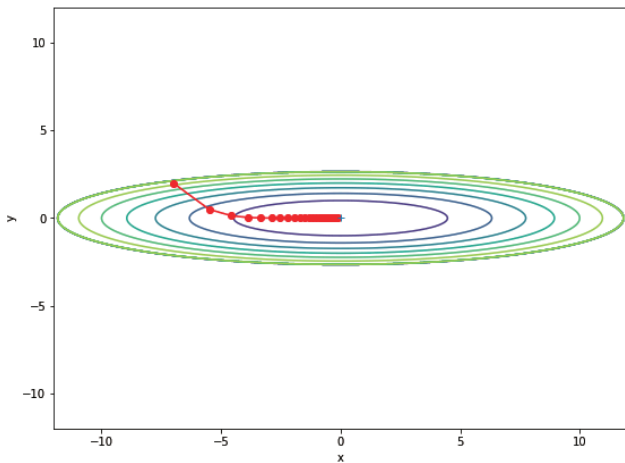


図 5.6 RMSProp による最適化の更新経路

5.6.3. Adam

RMSProp は、パラメータの要素ごとに適応的に学習率を調整した。一方、Momentum は物理法則に準じる動きをする。この 2 つの手法を組み合わせたものが Adam であり式 (5.4) で表される。これらの利点を組み合わせたことで、効率的にパラメータ空間を探索することが期待できる。

Adam による最適なパラメータの探索経路を図 5.7 に示す。

$$W_{t+1} \leftarrow W_t - \alpha \nabla_{\omega} L(\omega) \quad (5.4)$$

W_t 、 α 、 ∇_{ω} 、 $L(\omega)$ は、それぞれ、更新 t 回目のパラメータ、学習率、パラメータでの微分、損失関数を表す。

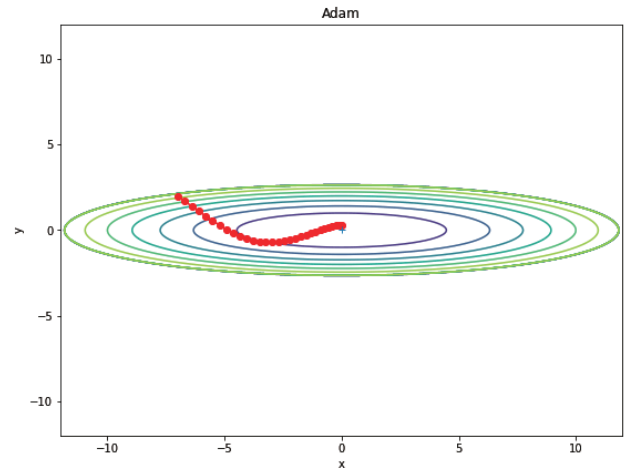


図 5.7 Adam による最適化の更新経路

6. モデルの学習過程における損失関数の推移

図 6.1 は各最適化アルゴリズム (optimizer) による、モデルの学習過程における正解率の推移を示したものである SGD について、先の正解率と同様に、損失関数の値が大きく、振動していることがわかる。この要因として、学習率が一定であるため、学習率が大きすぎると、勾配が大きい場合に重みパラメータを大幅に更新してしまい、損失関数が最も小さくなる時の重みパラメータの探索がスムーズに行えないと考える。

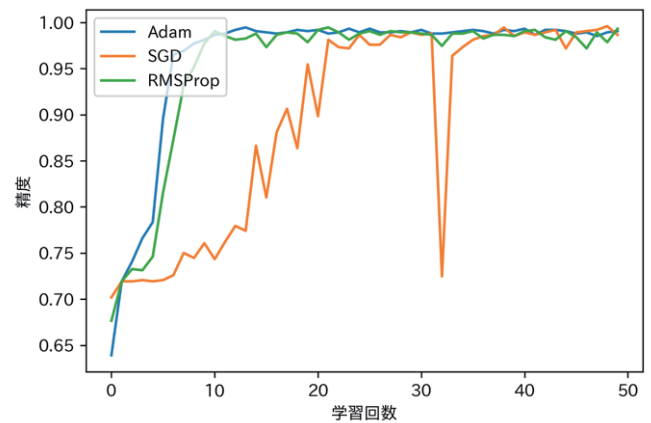


図 6.1 モデルの学習過程における正解率の推移

次に、RMSProp と Adam について考察する。この 2 つの最適化アルゴリズムは、重みパラメータの各要素において学習率を調整し、より損失関数が小さくなるパラメータを探索している。これにより、早い段階から最適なパラメータへの探索が進行し、学習が進むにつれて更新量も小さくなるため、損失関数の値が 0 に収束していると考えられる。

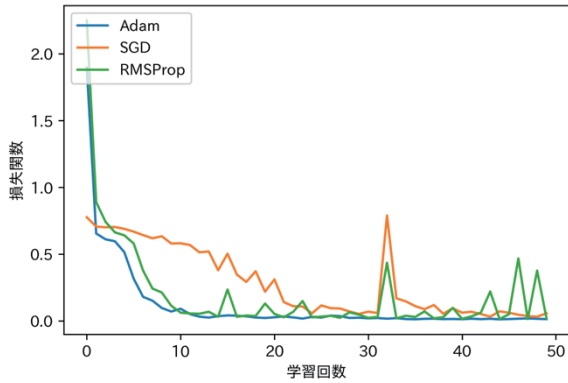


図 6.2 モデルの学習過程における損失関数の推移

6.1. モデルの推論による正解率・損失関数の比較

訓練データを用いてモデルの学習を行った後、テストデータ（未分類のデータ）を用いて推論を行った。表 7.1 はモデルの推論における、各最適化アルゴリズムの正解率と損失関数を示したものである。

それぞれの最適化アルゴリズムにおいても、正解率は高く、損失関数の値も一般的に良いモデルとされている 0.01 に近い値となった。このことから耐候性鋼材のさびレベル分類タスクにおける CNN の有用性は非常に高いと判断できる。また、最も正解率が高く、損失関数の値が小さかったのは Adam となり最適な重みパラメータの探索における有用性が高いのは Adam であると判断できる。

表 7.1 モデルの推論による正解率・損失関数の比較

	SGD	RMSProp	Adam
正解率 (%)	88.5	92.4	99.4
損失関数	0.028	0.020	0.0092

6.2. さび分類タスクにおける CNN の有用性の検討

耐候性鋼材のさび分類タスクにおける CNN の有用性は高いと判断した。ここで CNN の特性を踏まえて、その要因について考察する。

CNN はデータの形状を保持したまま学習できるという点が挙げられる。本研究で用いた学習データは「画像」という 3次元のデータである。従来のモデルは全結合層のみで構成されていたため、3次元のデータを次元に展開することでデータの形状が身視されていた。一方で CNN は畳み込み層による畳み込み演算で 3次元データの形状を変えことなく特徴量を抽出することができる。そのため、さび画像に含まれる RGB の各チャンネル間の密接な関係や隣り合うピクセルの関係など高度な特徴量まで抽出するこ

とで複雑性の高い耐候性鋼材のさびを分類することが可能になったと考える。

特徴の微小な位置変化に対してロバストであるためと考える。学習データには、さびが画像中の左よっているものや画像中央にあるもの画像下側にあるものもある。CNN はプーリング層によってさび（特徴量）が画像中のどこにあっても、同じような出力値を返す（完全に同じ値ではない）。これによりモデルの学習の際より最適な重みパラメータを探索しやすくなったと考える。

このように CNN は、耐候性鋼材のさび画像といった「形状に意味のあるデータ」に対して、非常に有用な手法であると判断できる。

さびレベルの分類タスクにおける CNN の有用性についての検討と、その基礎的研究を行い、さび外観評価モデルの実用性と今後の発展を目的とした。CNN を用いることで高精度なさび外観評価モデルの作成が可能であることがわかった。また、効率的なモデルの最適化には Adam が有用であると判断した。

7. 結論

本研究では、CNN を用いて学習したモデルの評価を「正解率」、「損失関数」の 2つの指標により行った。また、モデルの学習過程を可視化することで学習の効率性や安定性について、以下にそれぞれの各最適化アルゴリズム (optimizer) の有用性を比較・検討し、耐候性鋼材のさび外観評価における CNN の有用性、各最適化アルゴリズムについてそれぞれの考察を述べる。

7.1. SGD モデル

図 6.1 は各最適化アルゴリズム (optimizer) による、モデルの学習過程における正解率の推移を示したものである。optimizer を SGD として作成したモデルについて、図 6.1 に示すとおり正解率 (精度) が激しく振動していることがわかる。この原因として、SGD の欠点である「偏微分する関数の形状が等方的でない」と非効率な経路で最適なパラメータを探索してしまう」という点が考えられる。また、SGD は学習率が一定であるため、設定した学習率が大きすぎたことで偏微分の値が発散してしまい学習が安定せず、非効率に行われていると考えられる。

7.2. RMSProp モデル

optimizer を RMSProp として作成したモデルについて考察する。先の SGD と比較して、学習の初期段階で正解率が 90% を超えており、早い段階で最適なパラメータの探索が正常に行われていることがわかる。この要因として、各データの

要素（重みパラメータ行列の 1 要素）に対してひとつずつ学習率を調整しているという RMSProp の利点が作用したと考えられる。また、学習が進むにつれ、学習率を小さくしていることも要因として挙げられる。これにより、初期段階から最適パラメータの探索が正常に進行し、学習の中期・後期も正解率が安定したと考える。

7.3. Adam モデル

optimizer を Adam として作成したモデルについては、先の SGD、RMSProp と比較して、最も早い学習段階で正解率が安定しその後も振動することなく収束していることがわかる。これは、第一に Momentum の利点である速度減衰が作用してことが挙げられる。勾配の変化に応じて、その移動平均をとって振動のような急激な変化に動かないという Momentum の性質が効いていると考える。第二に RMSProp の特徴である各データの要素（重みパラメータ行列の 1 要素）に対してひとつずつ学習率を調整しているという点である。これにより、Adam が最も効率よく最適なパラメータを探索できている。

7.4. 今後の課題

本研究で用いた学習データは、1 つの耐候性鋼橋から取得したデータ 800 枚であるため異なる耐候性鋼橋に対する汎化性が低い可能性が懸念される。様々な耐候性鋼橋から取得したさび画像を用いて学習を行うことでモデルの汎化性の向上を期待できる。

参考文献

- 1) 鋼橋における鋼橋における劣化現象と損傷の評価, 土木学会出版物,1997
- 2) 無塗装橋梁用鋼材の耐候性合金指標および耐候性評価方法の提案, 三木千壽, 土木学会論文集 2003
- 3) 道路管理者のための実践的橋梁維持管理講座, 嘉門 雅史, 大成出版社,2011
- 4) 耐候性鋼橋梁の防食リスクマネジメント技術の開発, 藤井 泰盛, 新日鉄技報第 387 号, 2007
- 5) 耐候性鋼橋梁の手引き, 一般社団法人日本橋梁建設協会,2006
- 6) 腐食計測法による耐候性鋼さび安定度診断, 紀平 寛, 溶接学会誌, 第 63 巻第 6 号,1994
- 7) 機械学習のエッセンス, 加藤 公一, SB クリエイティブ, 2018
- 8) ゼロから作るディープラーニング, オライリージャパン, 斎藤 康毅, 2016
- 9) 深層学習 Deep Learning (監修:人工知能学会), 麻生英樹, 近代科学社,2015

(原稿受付 : 2021 年 11 月 4 日)

紀要編集委員会

委員長 工藤憲昌

委員 菊地康昭 村山和裕 熊谷雅美

齊藤貴之 藤原広和

幹事 馬渡龍

八戸工業高等専門学校 紀要 第56号

令和4年3月31日 発行

編集兼
発行者 八戸工業高等専門学校
〒039-1192 八戸市田面木字上野平16の1

印刷所 新光印刷株式会社
〒031-0813 八戸市新井田字鷹清水9-11
