

大分工業高等専門学校

紀 要

Memoirs of
National Institute of
Technology, Oita College

第 59 号

令和 4 年 11 月

NO. 59

November 2022

大分工業高等専門学校
National Institute of Technology, Oita College

大分工業高等専門学校紀要

Memoirs of National Institute of Technology, Oita College

第 59 号
令和 4 年 1 1 月

[表紙](#)

[目次](#)

[令和 3 年（2021）10 月～令和 4 年（2022）9 月本校教員による著書、他誌等論文目録](#)

〔研究論文〕

[『大鏡』の学芸人 ―その描写方法― 〔三一①〕 藤原行成](#) 1

広瀬 裕美子

一般科文系

[13・14世紀アルスターのドヴナル・オニールの戦略](#) 7

田中 美穂

一般科文系

[留数定理を利用した実積分計算の有用性](#) 11

福村 浩亨

一般科理系

[高専における「探究」の在り方について](#)

[―「総合的な探究の時間」の視点から見た ALH とクラブ活動―](#) 13

二宮 純子

一般科理系

[5軸マシニングセンタとVBAによる実践的な学習教材](#) 18

山本 通¹・佐藤 色波¹・須藤 優樹¹・中谷 賢希¹・平山 創大¹

¹ 機械工学科

[パルス通電焼結による生体利用可能なチタン多孔質体の創製](#) 24

坂本 裕紀¹・小野 将輝²

¹ 機械工学科, ² 機械・環境システム工学専攻

[機械工学科におけるメカトロニクス一貫教育の構築](#) 30

中野 壽彦¹・山本 通¹・軽部 周¹

¹ 機械工学科

令和3年(2021)10月～令和4年(2022)9月本校教員による著書、他誌等論文目録

論 文 等 題 目	著 者	掲載誌名等 (年. 月)
憲法講義HANDBOOK：要約版講義案及び資料集〔補訂版-01〕 (図書)	小関 康平	佐伯コミュニケーションズ (単著／2022. 1)
宮沢俊義の《八月革命説》とその周辺——日本憲法思想の再論的断章——	小関 康平	憲法学会六十周年記念論文集『日本憲法学の理念と展望』 (図書／成文堂) (2022. 4) , pp. 21-40
《日本憲法体制》における連続性の検証——帝国憲法体制下の天皇・内閣を手掛りとして——	小関 康平	憲法研究54号 (2022. 6) , pp. 111-138

『大鏡』の学芸人 ―その描写方法―

〔三―①〕 藤原行成

広瀬裕美子 1.

1. 一般科文系

『大鏡』では、道長に至る藤原北家嫡流の人物に共通して「たましひ」ある豪胆な逸話が、対して藤原良房・仲平・実頼・伊尹・道隆の一族は、学芸色豊かな逸話が描かれている。旧稿^{〔註〕}では『古今』にもあまた侍めるは「良房伝」と記されている藤原良房について、そして、「和歌の道にも傑れおはしまして、後撰にもあまた入りたまへり」(実頼伝)と記されている藤原実頼について論じたが、本稿では「和歌のかたやすしをくれたまへりけん」(伊尹伝)と記されている藤原行成に注目し、同じ三蹟の一人として有名な藤原佐理と比較しながらその描写について検討してみたい。(ただし、今回は紙面の関係上、藤原行成について掲載し、藤原佐理については次稿で論じるものとする。)

キーワード… 中古文学、歴史物語、藤原行成

一 藤原行成

藤原行成は、天禄三(九七二)年、父右近衛少将義孝と母源保光女の子として誕生。父義孝は一条摂政伊尹と恵子女王(代明親王女、醍醐天皇の孫にあたる)との子である。義孝は、兄弟に挙賢・義懷、姉に懷子があり、懷子は冷泉天皇の女御で東宮師貞親王(後の花山天皇)の母であった為、今を時めく華やかな一族であった。行成の母である源保光女の父保光も恵子女王と同じ代明親王の子である。行成の外祖父にあたる保光は、紀伝道出身の学者にふさわしい式部大輔の経験があり、蔵人頭も経験している。この学識ある一族のものとて行成は教養を身に付けていったと推測される。

天延二(九七四)年行成が三歳の時、父義孝が二十一歳という若さで亡くなったため、祖父である伊尹の養子となり、天元五(九八二)年二月二十五日、十一歳で元服する。永祚元(九八九)年源泰清女と結婚。長徳元(九九五)年二十四歳で蔵人頭に任官し、長徳二(九九六)年権左中弁、長徳三(九九七)年右大弁を経て、長保三(一〇〇一)年に三十歳で参議となる。能書家としても名を馳せ、小野道風・藤原佐理とともに三蹟と称された。後、行成の書は「権

蹟」と言われ、代々世尊寺流として引き継がれることになる。寛仁二(一〇一八)年、行成は道長六男長家を婿に迎え、翌年大宰権帥を兼任。更に寛仁四(一〇二〇)年、権大納言に昇進する。行成の日記『権記』には、政務に追われて多忙な日々を過ごしている行成の姿が伺える。後、万寿四(一〇二七)年十二月四日、五十六歳で亡くなった。

二 『大鏡』における藤原行成

『大鏡』において行成は数多くの逸話が載せられている。それは、蔵人頭に任官する話・和歌が不得手な話・天皇に趣向を凝らした独楽や扇を贈る話・高陽院での秀句の話等であるが、以下、それぞれの逸話を他の史料・作品と比較しながら検討してみたい。

①この侍従大納言殿こそ、備後介とてまだ地下におはせし時、蔵人頭になりたまへる、例いと珍らしき事よな。そのころは、源民部卿殿は職事に

ておはしますに、上達部になりたまふべければ、一条院、『この次には、また誰かなるべき』と問はせたまひければ、『行成なむ、まかりなるべき人にさぶらふ』と奏せさせたまひけるを、『地下の者はいかがあるべからむ』とのたまはせければ、『いとやむ』となきものにさぶらふ。『中略』と申させたまひければ、道理の事とは言ひながら、なりたまひにしぞかし。
(伊尹伝)

『大鏡』には、行成は地下人だったが源俊賢の推挙によつて一躍蔵人頭となることのできたとある。しかし、行成は『公卿補任』によると備後権介となる以前に昇殿をしている。

寛和三年正月七日 従五位上。

永延元年九月 昇殿。

永祚二年正月二十九日 備後権介。

正暦二年正月七日 正五位下。

正暦四年正月九日 従四位下。――昇殿。

長徳元年八月二十九日 蔵人頭。

行成の日記『権記』にも、正暦四年正月十五日の条に

十五日、甲辰、自宇治到三条、自先頭辨許被示送被聴還昇之由と記されており、蔵人頭源扶義のもとから還昇が通達されている。従つて、『大鏡』の「備後介とてまだ地下におはせし時」は矛盾している。何故、『大鏡』の「備後介を許されていた行成を地下人としたのだろうか。作者は昇殿を許されていた行成を地下人としたのだろうか。

確かに、行成が蔵人頭に任官するに当たつて強力な後見人となるべき人物が存在しなかったのは事実である。蔵人頭に任官するまでの行成について見てみる。

年次	西暦	年齢	事項	位階
天祿三	九七二	一	十一月、祖父：伊尹没	
天延二	九七四	三	九月、父：義孝没	
三	九七五	四	四月、伯母：冷泉女御懷子 (花山母) 没	
永観二	九八四	一三		従五位下
寛和二	九八六	一五	六月、叔父：義懷出家	

寛和三 正暦二 四	九八七 九九一 九九三	一六 二〇 二二	正月、母：保光女没 五月、外祖父：保光没 八月二十九日、行成蔵人頭に補せらる	従五位上 正五位下 従四位下
長徳元	九九五	二四		

〔注 2〕

行成は蔵人頭に任官するまでに、両親・祖父・国母であつた伯母を亡くし、唯一生存している叔父も出家する。そのため一見不遇であるようだが、実は着実に位を上げることがわかる。

そこで、「二条殿の御族は、いかなる事にか、御命短くぞおはしますめる」(伊尹伝)とある部分に注目したい。これは伊尹一族が短命であることを述べているのであるが、『尊卑分脈』によると伊尹は四十九歳・孝賢は二十二歳・義孝は二十一歳・義懷は五十二歳・懷子は三十一歳・行成は五十六歳で亡くなっている。早世したのは孝賢・義孝・懷子であり、伊尹一族が短命であるとは言い難い。

「短命一族」というのは同時に繁栄しない一族を意味する。そのような中に地下人として行成をおき不遇であつたことを伺わせ、更に地下人から蔵人頭へと極端に昇進させることによって、行成が幸運の持ち主であることを強調しているのであろう。

②この大納言殿、よろづに整ひたまへるに、和歌の方や少し後れたまへりけむ。殿上に歌論議といふ事出で来て、その道の人々、『いかが問答すべき』など、歌の学問よりほかの事とも無きに、この大納言殿は、物ものたまはざりければ、『いかなる事ぞ』とて、なにがしの殿の、『難波津に咲くやこの花冬籠もり』いかに』ときこえさせたまひければ、とばかり物ものたまはで、いみじうおぼし案ずるさまにもてなして、『え知らず』と答へさせたまへりけるに、人人笑ひて、事醒め侍りにけり。(伊尹伝)

『大鏡』(伊尹伝)には、行成が和歌に関しては劣っており、『難波津に咲くやこの花、冬ごもり』はどうですか」と聞かれて、「わからない」と返答したという逸話がある。

「難波津に咲くやこの花、冬ごもり」は、『古今集』(仮名序)にある、
そへうた、おほささきのみかどをそへたてまつれるうた、

なにはづにさくやこの花ふゆごもりいまはるべとさくやこのはな
といへるなるべし。

を典拠としているのだが、同じく(仮名序)に

なにはづのうたはみかどのおほむはじめなり おほささきのみかどのなにはづ
にてみこときこえける時、東宮をたがひにゆつりてくらゐにつきたまはで三とせになり
ければ、王仁といふ人のいぶかり思ひてよみてたてまつりけるうたなり、(中略)

このふたうたはうたのちちははのやうにてぞ手ならふ人のはじめにも
しける

とあり、手習いの始めに用いられた和歌であったことがわかる。

また、能筆家であった行成は数多くの書写を依頼され、『御堂関白記』(寛仁二年十月二十二日条)には上東門第行幸に際して彰子より行成筆『古今集』二帙が送られた記事が見られる。

次太后御送物、箏御琴・侍從中納言書古今和哥二帙

『御堂関白記』寛仁二年十月二十二日条

以上のことから、貴族の常識とも言うべき『古今集』を、中でもごく初歩的な「難波津」の歌を行成が知らなかったということはあり得ず、『大鏡』のこの逸話は虚構であるといえよう。

ただ、行成は和歌等の風流事を好まなかった様で、『枕草子』(四七段)には、行成は「いみじう見え聞えて、をかしき筋など立てたる事はなう、ただありなるやうなるを」と格別風流を気どらない人物とされ、このような行成に対して若い女房達は「この君こそうたて見えにくけれ。こと人のやうに歌うたひ興じなどもせず、けすさまじなどそしる。」と非難している。同(一二七段)には、行成自身も「まろなどに、さる事言はむ(＝歌を詠む)人、かへりて無心ならむかし」と断言している。また、時代は下るが『撰集抄』(巻八第一八)には「さくらがり雨はふり来ぬおなじくは濡るとも花の陰にくらさん」と雨に濡れながら詠んだ藤原実方を、人々は興あることと思つたが、行成は「歌はおもしろし。実方は痴なり」と言つた逸話がある。

では、和歌を好まなかった行成は実際に歌才が劣っていたのだろうか。行

成の詠歌を見ると次のようになる。

大納言行成

おくれじとつねのみゆきはいそぎしをけぶりにそはぬたびのかなしさ

『後拾遺集』第十 哀傷 五四二

行成の和歌は、この『後拾遺集』(五四二)を始めとして、『新勅撰集』(五八二)・『続古今集』(二五六、一四〇四)・『玉葉集』(一〇三九、二六四五)・『風雅集』(二〇五一)・『新千載集』(二二〇五)・『新拾遺集』(七一四)に収められており、勅撰集に全九首入集している。

これ以外にも、

逢坂は人越えやすき閑なれば鳥鳴かぬにもあけて待つとか

『枕草子』一三〇段 一九

去年の今日今宵の月を見しをりにかからむものと思ひかけや

『栄花物語』巻第十 ひかげのかづら 八七

めづらしき今日のまゝは君がため千代に八千代にただかくしこそ

『栄花物語』巻第二十 御賀 二四六

壬戌、早朝差若雄丸、送書状於少将許、其詞□□云々、

世中^平如何為猿、思管起臥程^尔明昏^須假名^ム、(後略)

「世の中をいかにせましと思ひつつ起臥すほどにあけくらすかな」

『権記』長保二年十二月十九日条

等が挙げられる。

行成は、一条朝を代表する賢臣として源俊賢・藤原齐信・藤原公任らと共に四納言と称された。この四人其々の勅撰集入集歌数を見ると、当代随一の文化人である公任は『拾遺集』以下、百首もの和歌が入集されている。しかし、齐信の和歌は『栄花物語』に六首見られるものの、勅撰集入集歌数は『後拾遺集』以下全六首^{〔注3〕}であり行成の九首を下回っている。俊賢の和歌に至っては『栄花物語』に三首収められているが、勅撰集には一例も入集されていない。また、北村章氏^{〔注4〕}は、

行成の歌会出席は、『権記』『御堂関白記』『小右記』によると、長保年間(十二回、寛弘年間に十三回、長和年間に九回、寛仁・治安年間に各一回見られる。

と指摘されている。これによると数多くの歌会に出席している行成の姿を窺い知ることができる。

以上、行成詠歌は比較的多く見られ、格別に不得手であったとは言い難い。行成に関しては、前に挙げた『枕草子』『撰集抄』の他に『江談抄』や『古事談』等の作品に多くの逸話が載せられているが、この和歌の話は『大鏡』のみにしか見出せない。歌道に暗い行成を強調するために『大鏡』作者は『古今集』の「難波津に咲くやこの花」の話を作りあげたといえよう。

③少し到らぬ事にも、御魂の深くおはして、らうらうじうしなしたまひける御根性にて、帝幼くおはしまして、人々に、『遊び物ども参らせよ』と仰せられければ、さまざま黄金・銀など心を尽くして、『いかなる事をがな』と、風流をし出でて持て参り合ひたるに、この殿は、こまつぶりに村濃の緒付けて献りたまへりければ、く中略くいみじう興ぜさせたまひて、これをのみ常に御覧じ遊ばせたまへば、異物どもは籠められにけり。また、殿上人、扇どもして参らするに、こと人々は、骨に蒔絵をし、或るは金・銀・沈・紫檀の骨になむ、筋を入れ、彫物をし、えも言はぬ紙どもに、人のなべて知らぬ歌や詩や、また六十余国の歌枕に名挙がりたる所々などを書きつつ、人々参らするに、例の、この殿は、骨の漆ばかりをかしげに塗りて、黄なる唐紙の、下絵灰かにをかしきほどなるに、表の方には、楽府を、うるはしく真に書き、裏には、御筆とどめて草にめでたく書きて献りたまへりければ、打ち返し打ち返し御覧じて、御手箱に入れさせたまうて、いみじき御宝とおぼしめしたりければ、他扇どもは、ただ御覧じ興ずるばかりにて止みにけり。いづれもいづれも、帝王の御感侍るに増す事やはあるべきやな」

〈伊尹伝〉

後一条天皇の玩具に贅を尽くしたものを作る人々に対して、行成は独楽と斑濃の紐を、又、「楽府」の句を表は楷書で、裏は草書で書いた扇を献上する。それを天皇は大変面白く思い、宝物にするという逸話を『大鏡』は載せている。ここに行成の「少し到らぬ事にも、御魂の深くおはして、らうらうじうしなしたまひける御根性にて」(伊尹伝) という様子が伺える。

独楽の話は他の作品には見られないが、扇の話は『十訓抄』(巻十・六十八段)と『古今著聞集』(巻第七・能書第八)に載せられている。『十訓抄』(巻十・六十八段)には

行成道風が跡を継ぎて、めでたき能書なりけり。いまだ殿上人のころ、殿上にて扇合といふことありけるに、人々珠玉を飾り、金銀を磨きて、

「われ劣らじといとなみあへりけり。かの卿は、黒く塗りたる細骨のたけ高きに、黄なる紙貼りて、楽府の要文を、真草うちまぜて、ところどころ書きて出されたりけるを、召して御覧じて、「これこそ、いづれにもすぐれたれ」とて、御文机に置かれける。

とあり、『古今著聞集』(巻第七・能書第八)もほぼ同文である。『十訓抄』『古今著聞集』では扇合であり、「真草に打ちまぜて」記されているのに対し、『大鏡』では天皇への献上品となっており、行成が献上した扇に表は楷書で、裏は草書で書かれている点が異なっている。

『十訓抄』は「行成は道風が跡を継いで、めでたき能書なりけり」で話が始まり、行成の筆跡があまりにも素晴らしいので、彼の扇が天皇のお気に入りとなったという印象が強い。『古今著聞集』も同様に、能書の部に入れられているため、贅を尽くさなかった行成を描くというよりは、その筆跡の素晴らしさを言わんとしている。しかし、『大鏡』では能筆家である行成の姿は影をひそめ、扇を「表の方には、楽府を、うるはしく真に書き、裏には、御筆とどめて草にめでたく書きて」といった趣向を凝らしたため、天皇は「打ち返し打ち返し御覧じて御手箱に入れさせたまう」ことになったとある。これは、贅を尽くしたものを作る人々の中で行成は独楽に斑濃の紐をつけて献上したという話と同様、行成の着想が豊かであることを強調している。

④いみじき秀句のたまへる人なり。この高陽院殿にて競馬ある日、鼓は、讃岐前司明理ぞ打ちたまひし。く中略く勝つべき方の鼓を悪しう打ち下げて、負けになりにければ、その隨身の、やがて馬の上にて、ない腹を立ちて、見返るままに、『あな災ひや。かばかりの事をだに、し損ひたまふよ。斯かれば、「明理・行成」と一雙に言はれたまひしかども、一の大納言にて、いとやむごとくなくてさぶらはせたまふに、腐りたる讃岐前司古受領の、鼓打ちみ打ち損ひて、立ちたうびたるぞかし』と放言したいまつりけるを、大納言殿聞かせたまひて、『明理の濫行に、行成が醜名呼ぶべきにあらず。いと辛い事なり』とて、笑はせたまひければ、人々、『いみじうのたまはせたり』とて、興じ奉りて、そのころの言ひ事にこそし侍しか。

〈伊尹伝〉

高陽院殿で競馬の際に、讃岐前司明理が勝敗の合図の太鼓を間違って打ってしまったため、勝つべきはすだった方は負けになってしまった。その騎手

が「一時は『明理・行成』と並び称されていたが、そんなことから行成殿は大納言になつてゐるのに明理殿はしがない受領なのだ」と罵つたところ、行成は「明理の失策を言うのに、行成のつまらない名を呼ぶ必要はあるまい」と言い、人々は面白く思つたという逸話が『大鏡』(伊尹伝)にある。

高陽院殿での競馬は『日本紀略』『小右記』によると万寿元(一〇二四)年九月十九日に行なわれている。

十九日甲辰。天皇行幸関白左大臣高陽院。馬場殿有競馬事。

『日本紀略』後一條 万寿元年九月十九日条

高陽院行幸競馬事儀 十九日、甲辰

『小右記』万寿元年九月十九日条

『栄花物語』(巻第二十三 こまくらべの行幸)には、

同じ月の十九日、駒競せさせたまふ。日ごろだにありつるを、今日はとりわきめでたし。中略く競馬十八番なり。なまよるしきをりのだに、乗人も馬もいみじういどみてとみにやは出づる、馬の心地も、いといみじう世にめでたしと思ひて、ともすれば出でてはひき入りひき入りするほど、いといみじう心もとなく見えたり。さてのみあるほども久しければ、「やや」とたびたび仰せらるれば、出で初めて、たびたびになりて、左右かたみに勝負するほどの乱声の音もはしたげなるまでをかし。勝負の乗人の被け物のほどなど、方わきいどみたり。

と、この競馬の様子が詳細に記されている。

『大鏡』(伊尹伝)の「明理の濫行に、行成が醜名呼ぶべきにあらず。」という行成の秀句について、松村博司氏^[注]は

『江次第』(臨時競馬事の条)に、

故長経朝臣打競馬鼓、頗有偏頗。是国負畢。是国来鼓下、放言長経曰、君心操如此、仍不被昇進也、明理・行成者、当初殿上一双也、一人者、大納言在殿上、一人者、在地下打鼓。有人曰、何依罵長経、喚公卿名哉。とあるが、二、三同じことばを使っている所から見て、種は同じであろう。恐らく大鏡は行成の秀句をおもしろくするために、長経を明理に変更したものであろう。

と指摘されている。『大鏡』作者は行成の機知に富んだ様子を強調しているのである。

『大鏡』における藤原行成は、運が良く、和歌は不得意であるが、着想が

豊かで機知に富んでいる人物とされている。そこには、和歌を嗜み、書に秀でた行成の姿はなく、処世上の才覚ばかりが強調されている。ここでも意図的に描き分けている『大鏡』作者の姿を見て取ることができるのである。

[注]

1 拙稿『大鏡』の学芸人―その描写方法―(一) 藤原良房

(『有明工業高等専門学校紀要』第五十三号 二〇一八年一月)

拙稿『大鏡』の学芸人―その描写方法―(二) 藤原実頼

(『大分工業高等専門学校紀要』第五十五号 二〇二〇年十一月)

2 黒板伸夫『藤原行成』(吉川弘文館 一九九四年三月)をもとに作成。

3 斉信の和歌は、勅撰集には『後拾遺集』(一一三)・『千載集』(九一二、九六〇)・『新古今集』(一二二八)・『新拾遺集』(二〇、五四二)の全

六首入集。

4 北村章『藤原行成「和歌の方やすこし後れたま」ひし考』

(『日本文学論集』第一号 一九七七年二月)

5 松村博司『大鏡』(岩波日本古典文学大系 四六二頁・補注四九)。

※原文引用のテキストは以下の通り。

・『大鏡』：『日本古典集成』(新潮社)

・『栄花物語』『枕草子』『十訓抄』：『新編日本古典文学全集』(小学館)

・『古今和歌集』『後拾遺和歌集』：『新編国歌大観』(角川書店)

(本稿中に記している和歌番号は全て「新編国歌大観」番号とする。)

・『撰集抄』：『岩波文庫』(岩波書店)

・『御堂関白記』『小右記』：『大日本古記録』(岩波書店)

・『権記』：『史料纂集』(続群書類従完成会)

・『日本紀略』：『新訂増補 国史大系』(吉川弘文館)

※人物略歴については、「国史大辞典」(吉川弘文館)・「日本古典文学大辞典」
(岩波書店)・「平安時代史事典」(角川書店)・「史料綜覧」(東京大学出版会)
を参照。

(2022. 9. 30 受付)

13・14世紀アルスターのドヴナル・オニールの戦略

田中 美穂

一般科文系

13世紀後半から14世紀初めにかけて、ドヴナル・オニールは、アイルランド北部アルスター地方の中心部ティローン王国の王であった。当時、アルスター地方で最も有力な王であったドヴナルは、スコットランド王の弟エドワード・ブルースによるアイルランド侵攻（1315～18年）を支援したことで知られる。ドヴナルは、スコットランド王家のブルース兄弟と同盟関係を結び、自身の敵と戦った。

本稿では、13・14世紀に生きたドヴナルの生涯や彼の戦略を通じて、現地のアイルランド（＝ゲール）人がイングランド人勢力と戦ったのかについて、その一端を明らかにしたい。

キーワード：13・14世紀アイルランド史、ドヴナル・オニール、アルスター地方

はじめに

本稿で取り上げるドヴナル・オニールは、13世紀に唯一「アイルランド上王」（「何人もいる現地のアイルランド人の王の中で最有力の王」くらいの意味で王位は臨時）と称されたブリアン・オニールの息子で¹⁾、1325年まで生きた。

13世紀後半から14世紀初めにかけて、生涯で3度、ティローン王となり、エドワード・ブルース（1318年没）によるアイルランド侵攻という大きな出来事とも深く関わった。そればかりか、1317年にドヴナル自身が執筆した『抗議書（レモンストランス）』で、エドワード・ブルースを「アイルランド上王」として承認までしている。

13世紀後半以降、14世紀になっても、アイルランド各地では、現地のアイルランド人と、12世紀後半以降にアイルランドに侵入したイングランド人との争いが続いていた。現地のアイルランド人の中には、イングランド勢力と手を結んで、同胞のアイルランド人の王や王族と戦う者もいた。

この頃のアルスター地方では、イングランド人が、ノース海峽に面した現在のアントリム州、ダウン州の一部を占拠していたが、それ以外の地域は、オニールをはじめとする現地のアイルランド人が支配する地域となっていた。他地方と比べて、アルスター地方では、アイルランド人勢力が占める割合が圧倒的に大きかった。当時は、イングランド王のアイルランドに対する関心も低く、アイルランドは軍の兵士や食糧の供給地として利用されるくらいであった。ドヴナルら現地の王は、イングランド王が任命したアルスター伯ド・バーグの配下にあったものの、先祖から受け継いだ自分たちの領地を実質自分たちで治めていた²⁾。

そんな中、ドヴナル・オニールについては、海を隔てた

スコットランドとの関係が重要なものとして特徴づけられよう。本稿では、ティローン王ドヴナル・オニールの生涯、ドヴナルとエドワード・ブルースやギャロウグラス（スコットランド出身のゲール系兵士）との同盟、ドヴナル・オニールの戦略について論じ、13・14世紀におけるアルスター地方の勢力争いの一様相を明らかにしたい。

1. ティローン王ドヴナル・オニール

ドヴナル・オニールは、父であり、「アイルランド上王」の称号を年代記で与えられたブリアン・オニールが1260年に戦死したとき、まだ幼かったと推定される³⁾。1325年に領地内のクラノーグ（人工の島）で死去したとの年代記の記録から⁴⁾、父と異なり、ドヴナルは、寿命を全うしたものと考えられる。

父ブリアンの死後、ティローンの王位は、ブリアンを倒したエイド・ブデ・オニール（ブリアンのいとこの子）に渡った。エイド・ブデが1283年に戦死すると、ドヴナルがティローン王の地位を獲得する。しかし、3年後の1286年に、アルスター伯リチャード・ド・バーグ（1326年没）により退位させられた。父ブリアンも、イングランド王から派遣された時のアイルランド総督らと戦っていたが、息子のドヴナルも、アルスター伯のド・バーグと戦った。

ブリアンとドヴナル親子は、このようにアルスターにいたイングランド人勢力と戦ったが、現地のアイルランド人の王や王族の中には、イングランド側と手を結ぶ者もいた。エイド・ブデも、その兄弟のニアル・クーラーナハ（1291年没）も、エイド・ブデの子のブリアン（1296年没）も、リチャード・ド・バーグと同盟し、ド・バーグによってテ

イローン王位を認められている。

ドヴナルが、ティローン王であった期間は、1283～86年、1290～91年頃、1296年以降であったと推定される。

上述のように1286年にドヴナルがリチャード・ド・バーグにより退位させられた後、ティローン王となったのはニアル・クーラーナハであった。ドヴナルは、1290年にこのニアルを退位させてティローン王に返り咲いたと見られるが、翌1291年に、ド・バーグによって再びニアルに王位が戻された。これに対し、同年、ドヴナルがニアルを殺害すると、ド・バーグは、今度はエイド・ブデの子のブリアンにティローン王位を与えるのである。こうしてドヴナルが2回目にティローン王となった期間は1年ほどで終わってしまう。1296年に、ドヴナルは、ティローン王ブリアンをクリーヴ (Creeve) の戦いで殺害し、自身3度目のティローン王位を獲得した。その後は、ブルースの 아일랜드 侵攻が失敗に終わった翌年の1319年に、エイド・ブデの孫でブリアンの子のヘンリー・オニール (1347年没) らによって、一時的にティローンから追放されたものの、ティローンに戻り、王としての権力が回復し、1325年に死去するまでティローン王の地位にあった。

以上、ティローン王国の王位は、13世紀後半から14世紀初めにかけて、アイルランドで、少なくともアルスター地方では最も有力な現地勢力であるオニール家によって継承されてきた。しかし、その王位は、直系の血筋によってではなく、ドヴナルの父であるブリアンの家系と、その敵対者エイド・ブデの家系によって交互に継承されていた。そして後者のエイド・ブデ、ニアル・クーラーナハ、エイド・ブデの子ブリアンの家系は、ずっとイングランド勢力のド・バーグ家と結びついてきたのである。

エイド・ブデ、ニアル・クーラーナハとドヴナルは又従兄弟の関係であった。ティローン王位継承は、このような親族同士の争いに、アルスター伯ド・バーグ家や近隣の他のアイルランド人の王や王族など外部の力が加わって、左右されるものであった。

そして、イングランド人勢力の介入によって、ティローン王の地位を何度も奪われたドヴナル・オニールは、スコットランド王家と同盟関係を結ぶことになるのである。

2. エドワード・ブルースの侵攻と『抗議書』

ドヴナル・オニールの生涯の中で、中世アイルランド史上最も重要な出来事の一つと言えば、エドワード・ブルースのア일랜드侵攻である。ドヴナルはこのブルースと強い同盟関係を結び、『抗議書』の中でブルースこそが「ア일랜드上王」であると主張するのである。

エドワード・ブルースの兄は、スコットランド王ロバート・ブルース／ロバート1世 (在位1306～29年) である。ロバートは、1314年のバノックバーンの戦いでイングランド軍に勝利し、1297年からイングランド軍との間で戦

われた (第一次) スコットランド独立戦争で、スコットランドを最終的に勝利に導いた人物である。

ロバートは、1302年に2番目の妻として、アルスター伯リチャード・ド・バーグの娘を迎えた。彼女との間に1324年に生まれた息子が、父ロバートの死後にデイヴィッド2世 (在位1329～71年) となり、わずか5歳でスコットランド王位を継承することになる。

一方、ロバート・ブルースはドヴナル・オニールと同盟関係にあった。1314年のバノックバーンの戦い後、ドヴナルが、ロバートに対してアイルランドに軍を派遣するよう後押ししたと考える研究者もいる⁵⁾。いずれにせよ、ロバートが、翌年に、自身の弟のキャリック伯エドワード・ブルースをアルスターに派遣したことは事実である。

こうして1315年5月25日 (26日の説もある) に、エドワード・ブルース率いるスコットランドの軍がラーン (アントリム州の東海岸) に上陸し、約3年半にわたるアイルランド侵攻が始まることになった⁶⁾。

ドヴナルをはじめとするアルスター地方の有力な王や王族は、すぐさまエドワード・ブルースの軍に加わった。ブルースたちは、アントリム州のキャリックファーガスを占拠し、自分たちの拠点とした。また、レンスター地方にも侵入し、イングランド人入植者の艦隊を破り、ラウス州のダンドークを占拠した。これらに対して、アルスター伯リチャード・ド・バーグは軍を派遣し、敵対するエドワード・ブルースらの軍をレンスターからアルスターに退却させた。しかし、9月10日のアントリム州のコナー (Connor) での戦いで、逆にブルースらの軍に敗れる。ド・バーグはコナハト地方に敗走することとなった。

1315年12月初めまでに、ミーズにいたブルースは、トリム領主ロジャー・モーティマーに率いられたイングランド側の軍を破った。このロジャー・モーティマーは、翌1316年11月にイングランド王エドワード2世 (在位1307～27年) により、ア일랜드総督に任命され、エドワード・ブルース率いる軍の討伐を命じられることになる。

ドヴナル・オニールは、1316年初めのエドワード・ブルースのレンスター遠征にも同行した。一時は成功を収めたものの、イングランド軍の追撃もあり、南部を征服することは出来なかった。同年5月に、エドワード・ブルースは、ドヴナルから彼の父が持っていた「ア일랜드上王」の地位を与えられ、「ア일랜드上王」としてダンドーク近くのフォーガート (Faughart) で即位した。

翌1317年初めには、スコットランド王である兄ロバート・ブルースがギャロウグラスの援軍と共に合流した。ブルース兄弟率いる軍は、2月にミーズを荒らし、南部のレンスターとマンスターに遠征するが、またしても失敗に終わった。兄ロバートは、5月に弟を残してスコットランドに帰ってしまった。エドワード・ブルースは、アルスターに退却し、1年半ほどそこにとどまった後、1318年10月にまた南下しようとした。しかし、イングランド軍の攻撃を

受け、10月14日に、自身が「アイルランド上王」として即位したフォーガートで、エドワード・ブルースは戦死した。ドヴナル・オニールは敗者となった。

こうして、1315年から1318年まで毎年、計4回にわたって続いたエドワード・ブルースによるアイルランド侵攻は、失敗に終わった。結局、彼とその軍が、アルスター地方以外の地域を征服することはなかった。

ドヴナル・オニールが、教皇ヨハネス22世に宛てて、『抗議書（レモンストランス）』を書いたのは、1317年の夏であった⁷⁾。この文書では、アイルランドにおけるイングランド人による残忍な支配を非難し、父から譲り受けて自身が持つはずの「アイルランド上王」としての地位を、エドワード・ブルースに譲渡することが主張されている。

この頃は、南部への3回目の遠征が失敗し、スコットランド王ロバートも去り、ドヴナルが支持するエドワード・ブルース陣営にとって非常に厳しい時期であった。

ドヴナル・オニールは、なぜエドワード・ブルースによるアイルランド侵攻を支援し、自身もブルース軍に加わったのか、また彼はなぜ『抗議書』を執筆し、教皇に送ったのか、これらについて以下、考えてみたい。

3. ドヴナル・オニールの戦略

ロバート・ブルースは、スコットランド王に即位して間もない頃に苦境に立たされ、1306年秋から翌年2月まで、一時期スコットランド以外の地で過ごした。アルスター地方のラスリン島に避難していた可能性も指摘されている。いずれにせよ、1306年に避難場所から、ロバートはアイルランド全ての王・聖職者・住民に宛てた書簡を執筆し、アイルランド本土に使節を派遣して届けさせた。その書簡でロバート・ブルースは、スコットランド人とアイルランド人を、祖先・言語・慣習を同じくする「同胞（同じネイション）」としてとらえている⁸⁾。

この書簡はアイルランドからの援軍を求めて出されたものである。すでに多くの研究者によって指摘されているが、この頃、すなわち1306年にドヴナル・オニールとロバート・ブルースが同盟を結んだと考えられる。ドヴナルらアルスター地方の有力なアイルランド人領主は、ロバート・ブルースの援軍派遣要請に応えた可能性もある。ブルース兄弟は、母方からアイルランド（＝ゲール）系の血を引いており、ロバートの「ゲール同盟」を求める書簡は、自らの出自や、アイルランド人とスコットランド人のゲール系としての結びつきを意識したものであった⁹⁾。

一方、ドヴナル・オニールが1317年に執筆した『抗議書』でも、両者のゲール系としての結びつきが強調されている。ドヴナルは、最初の方で自身が、聖パトリックの時代（5世紀）から続く正統なイー・ネール（＝オニール）一族の子孫であることを述べる。そして、最後の方で、「ロバートの弟であるキャリック伯エドワード・ブルース」を

支援するためにアイルランドに招き、エドワードを自分たちの王国の王・領主とすることを宣言する。この『抗議書』では、スコットランド王の血統がアイルランドの高貴な祖先に由来することや、スコットランドではアイルランドの言語や慣習が保持されていることに言及されている¹⁰⁾。

つまり、1306年のロバート・ブルースがドヴナル・オニールらアイルランドの王たちに宛てて書いた書簡と、1317年にドヴナル・オニールがエドワード・ブルースをアイルランド上王にするために書いた『抗議書』、これら両方で、アイルランドとスコットランドが祖先・言語・慣習を同じくすることに言及されているのである。前者は、窮地に陥ったロバートがアイルランドに援軍を求める目的で書き、後者は、ドヴナルが、イングランド人による不当な圧政を終わらせるためにスコットランド王の弟をアイルランド上王にすることを意図して書いたものである。ドヴナルは、自身が『抗議書』を執筆する際、先のロバートの書簡を参考にしたのかもしれない。

13世紀以降、アルスターやコナハトの王たちは、スコットランドのヘブリディーズ諸島の王や王族と軍事や婚姻関係による同盟を結んできた。スコットランドのゲール系傭兵であるギャロウグラスも、最初にこれらの地域に派遣された。ドヴナルも、自身が1291年にティローン王に返り咲く際の戦いで、ギャロウグラスを利用している¹¹⁾。

『抗議書』の訴えを教皇が聞き入れることはなかった。また、エドワード・ブルースは1318年に戦死した。それ以降、スコットランド王家の者に「アイルランド上王」の位が与えられることはなかった。それどころか、「アイルランド上王」と見なされた王は、エドワード・ブルースが最後となった。

ドヴナル・オニールは、父である「アイルランド上王」ブリアン・オニールから自身が譲り受けるはずだった王位を、『抗議書』でエドワード・ブルースに譲ると主張する。しかし、「イー・ネール」と呼ばれていた時代の同王家出身の「アイルランド上王」や「アイルランド王」に比べて、また父ブリアン・オニールに比べても、エドワード・ブルースの「アイルランド上王」としての権威はおぼつかない。彼の即位は侵略戦争最中の出来事であり、結局、彼の支持者は、アルスターを中心とする一部の勢力に過ぎなかった。

ドヴナル自身も、父ブリアンには到底かなわなかった。ブリアンは、アイルランドで、アルスターのオニール以外の名門一族であるコナハトのオコナー、マンスターのオブライエンからも認められて「アイルランド上王」を名乗ることができた。一方、ドヴナルの場合、「アルスター王」の称号を与えた年代記もあるものの¹²⁾、「ティローン王（／領主）」と記しているものもあった¹³⁾。ティローンはアルスター地方の中心部を占めるが、その全てではない。

ドヴナルの生涯の数々の戦いにおいて、主な敵は、リチャード・ド・バークに代表されるイングランド人勢力と、オニール一族のエイド・ブデ直系の親族であった。そして、

ド・バークとエイド・ブデ・オニールの家系は同盟関係にあった。これらの敵に対抗するために、ドヴナルは、スコットランド王家と同盟することを選んだ。折しも、スコットランドでは、ゲール系の血を引くロバート・ブルースが 1306 年に王になった。スコットランド王家のロバートとエドワードのブルース兄弟は、ドヴナルにとって、イングランドを共通の敵とする重要な同盟相手であったのだ。

おわりに

エドワード・ブルースによるアイルランド侵攻は、アイルランドに大きな爪痕を残した。ブルース軍らが各地でくり広げた破戒と略奪に加え、ヨーロッパ中が飢饉に襲われた時期とも重なり、食人が行われたとの記録もある¹⁴⁾。

ドヴナルは、アルスター地方で自身の王としての地位を安定させることを第一に願ったのではないか。そのために彼が「アイルランド上王」に選んだのは、「ゲール同盟」の相手ブルースであった。敵対する親族がイングランド勢力のド・バーク家と同盟していたように、ドヴナルはスコットランド王家のブルースと同盟を結んだ。

ドヴナルの試みは失敗に終わったが、確かにアイルランドのイングランド勢力に大きな打撃を与えたのであった。

注

- 1) ブリアン・オニールについては、田中美穂「1258年のブリアン・オニールとオコナー、オブライエンとの同盟」『大分工業高等専門学校紀要』第58号、2021年、1-4頁を参照のこと。
- 2) Seán Duffy (General editor), *Atlas of Irish History* (Dublin: Gill & Macmillan, 1997) pp. 40-41; Duffy, *The Concise History of Ireland* (Dublin: Gill & Macmillan, 2000; pbk. ed., 2005), pp. 78-79.
- 3) ドヴナル・オニールの生涯については、主に以下の研究を参照した。Duffy, 'UA NÉILL, DOMNALL (ANTE 1260-1325)', in Duffy (ed.), *Medieval Ireland: An Encyclopedia* (New York and London: Routledge, 2005), pp. 480-481; Emmett O' Byrne, 'O' NEILL (Ó Néill), Domhnall (d. 1325)', in J. McGuire and J. Quinn (eds.), *Dictionary of Irish Biography: from the earliest times to the year 2002 (under the auspices of the Royal Irish Academy)* (Cambridge: Cambridge University Press, 2009) (以下 *DIB* と略す), vol. 7, pp. 752-753; Katharine Simms, *Gaelic Ulster in the Middle Ages: history, culture and society* (Dublin: Four Courts Press, 2020), pp. 98-118. 本稿で扱う年代記史料は、*Annals of Ulster*, W. M. Hennessy and B. MacCarthy (ed.), 4 vols. (Dublin, 1887-1901), 以下、*AU* と略す。 *The Annals of Loch Cé*, W. M. Hennessy (ed.), 2 vols. (London: Rolls Series, 1871), 以下、*ALC* と略す。

Annála Connacht: the Annals of Connacht, A. M. Freeman (ed.), (Dublin: Dublin Institute for Advanced Studies, 1983). 以下、*AC* と略す。 *Annála ríoghachta Éireann: Annals of the kingdom of Ireland by the Four Masters*, J. O'Donovan (ed.), 7 vols. (Dublin, 1851; rep. Dublin: De Burca rare books, 1990), 以下、*AFM* と略す。年代記史料も『抗議書』も下記のサイトで公開。CELT(=Corps of Electronic Texts): The Online Resource for Irish history, literature and politics. (<https://celt.ucc.ie/index.html>).

- 4) *AFM* 1325.1; Simms, *Gaelic Ulster*, p. 115.
- 5) O' Byrne, 'O' NEILL (Ó Néill), Domhnall (d. 1325)', p. 753.
- 6) エドワード・ブルースのアイルランド侵攻については、主に以下の研究を参照した。Robin Frame, *Colonial Ireland 1169-1369* (Dublin, 1981; Dublin: Four Courts Press, 2nd ed., 2012), pp. 126-136; S. Duffy, 'The Bruce brothers and the Irish Sea world, 1306-29', *Cambridge Medieval Celtic Studies*, 21(1991), pp. 55-86; rep. in Duffy (ed.), *Robert the Bruce's Irish Wars: the Invention of Ireland 1306-1329* (Stroud, 2002), pp. 45-70; David Beresford, 'BRUCE, Edward (p. 1274-1318)', in *DIB*, vol. 1, pp. 944-945; Simms, *Gaelic Ulster*, pp. 110-115; 常見信代「スコットランド独立戦争とアイルランド——その1 ブルースの侵略とプロパガンダ文書——」『エール (アイルランド研究)』第 19 号、1999 年、23-41 頁; 常見「ブルースのアイルランド侵略——その目的をめぐって——」『北海学園大学人文論集』第 23-24 号、2003 年、87-120 頁。
- 7) D. E. R. Watt (general ed.), *Scotichronicon* by Walter Bower (Aberdeen, 1991), vol.6 (Books XI & XII), 384-403 にテキストが収録。Diarmuid Scully, 'The Remonstrance of Irish Princes, 1317', *History Ireland* (Nov. / Dec., 2013), 16-19.
- 8) Duffy, 'The Bruce brothers', pp. 51-52; 田中美穂「中世アイルランドにおける『ネイション』意識」法政大学比較経済研究所／後藤浩子編『アイルランドの経験——植民・ナショナリズム・国際統合』(法政大学出版局, 2009年), 21-22頁。
- 9) ブルース兄弟の母方の祖父とドヴナルの祖父が同じ人物であった可能性も指摘されている。Duffy, 'UA NÉILL, DOMNALL (ANTE 1260-1325)', p. 481.
- 10) *Scotichronicon*, pp. 386-387, 400-403.
- 11) Simms, *Gaelic Ulster*, pp. 106, 419-420.
- 12) *ALC* 1325.1; *AC* 1325.2.
- 13) *AU* 1322.1; *AFM* 1325.1.
- 14) *AU* 1315.5; *ALC* 1318.7; *AC* 1318.8.

(2022.9.30受付)

留数定理を利用した実積分計算の有用性

福村 浩亨

一般科理系

概 要

実関数の積分では、置換積分や部分分数分解を利用、はさみこみなど様々な手法がある。
本稿では留数定理を用いた解法を紹介し、積分計算をする上でより高次の数学の学習に興味・関心をもってもらいたい。

キーワード：積分、留数定理

1 留数定理

α は $f(z)$ の孤立特異点とする。このとき $f(z)$ は、 α を中心とするローラン展開級数で表される。

$$f(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n(z-\alpha)^n \quad 0 < |z-\alpha| < R$$

次に点 α を内部に含む単純閉曲線 C を考える。 $f(z)$ は C および C の内部において、点 α を除いて正則とする。 $f(z)$ の両辺の C に沿う積分を求めると

$$\int_C f(z) dz = \cdots + a_{-1} \int_C \frac{dz}{z-\alpha} + \cdots$$

コーシーの積分定理を用いて、

$$a_{-1} = \frac{1}{2\pi i} \int_C f(z) dz$$

右辺の積分の値は C の選び方に無関係である。この a_{-1} の値を点 α における $f(z)$ の留数といい、 $\text{Res}[f : \alpha]$ とかく。また、定義から次の等式が導ける。

$$\int_C f(z) dz = 2\pi i \text{Res}[f : \alpha]$$

【留数定理】

単純閉曲線 C の内部にある特異点 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ を除き、 C の周および内部で $f(z)$ が正則ならば

$$\int_C f(z) dz = 2\pi i (\text{Res}[f : \alpha_1] + \cdots + \text{Res}[f : \alpha_n])$$

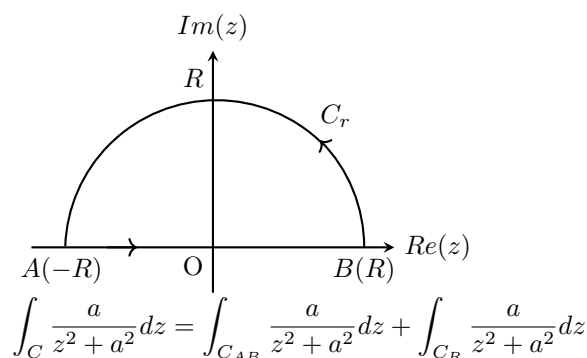
2 実積分の解法例

問題 1

$I = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{a}{x^2 + a^2} dx$ の値を求めよ。
ただし、 $a > 0$ とする。

実積分から複素積分に拡張させる。

以下のような経路 $C = C_r + C_{AB}$ を半径 R の以下の半円で反時計回りすると、



左辺について、2 次方程式 $z^2 + a^2 = 0$ の解はそれぞれ $\alpha = ia$, $\beta = -ia$. R は十分大きいものとする α のみ経路 C の内部にある。また、 α は 1 位の極であり留数は、

$$\begin{aligned} \text{Res}[f : \alpha] &= \lim_{z \rightarrow \alpha} (z - \alpha) \frac{a}{(z - \alpha)(z - \beta)} \\ &= \lim_{z \rightarrow \alpha} \frac{a}{(z - \beta)} = \frac{1}{2i} \end{aligned}$$

よって、留数定理より、

$$\int_C \frac{a}{z^2 + a^2} dz = 2\pi i \cdot \frac{1}{2i} = \pi.$$

右辺の C_{AB} と C_r について,

$$\int_{C_{AB}} \frac{a}{z^2 + a^2} dz = \int_{-R}^R \frac{a}{x^2 + a^2} dx \xrightarrow{R \rightarrow \infty} I$$

C_r 上の点 $z = Re^{i\theta}$ から, $dz = iRe^{i\theta} d\theta$

$$\begin{aligned} \int_{C_r} \frac{a}{z^2 + a^2} dz &= \int_0^\pi \frac{aRie^{i\theta}}{R^2e^{2i\theta} + a^2} d\theta \\ \left| \int_{C_r} \frac{a}{z^2 + a^2} dz \right| &\leq \int_{C_r} \left| \frac{a}{z^2 + a^2} \right| |dz| \\ &= \int_0^\pi \frac{aR}{|R^2e^{2i\theta} + a^2|} d\theta \\ &= \int_0^\pi \frac{aR}{|(R^2 \cos 2\theta + a^2) + iR^2 \sin 2\theta|} d\theta \\ &= \int_0^\pi \frac{aR}{\sqrt{(R^2 \cos 2\theta + a^2)^2 + R^4 \sin^2 2\theta}} d\theta \\ &= \int_0^\pi \frac{aR}{\sqrt{R^4 + a^4 + 2a^2R^2 \cos 2\theta}} d\theta \xrightarrow{R \rightarrow \infty} 0 \end{aligned}$$

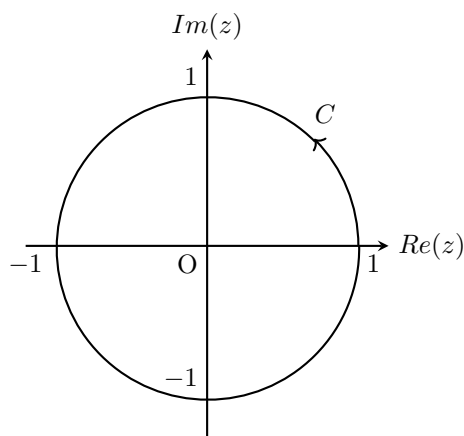
よって,

$$\begin{aligned} \int_{C_{AB}} \frac{a}{z^2 + a^2} dz + \int_{C_r} \frac{a}{z^2 + a^2} dz &= I \\ &= \int_C \frac{a}{z^2 + a^2} dz = \pi \end{aligned}$$

問題 2

$\int_0^{2\pi} \frac{1}{a + b \sin \theta} d\theta$ の値を求めよ.
ただし, $a > b > 0$ とする.

以下のような経路 C を中心原点, 半径 1 の円とする.



実積分から複素積分に拡張させる.

$$z = e^{i\theta} \text{ とおき, } \int_C \frac{1}{a + b \sin z} dz \text{ を求める.}$$

$$z = e^{i\theta} \text{ から } dz = ie^{i\theta} d\theta. \text{ よって, } d\theta = \frac{1}{iz} dz.$$

$$\text{また, } \sin \theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i} = \frac{z - z^{-1}}{2i}$$

$$\int_0^{2\pi} \frac{1}{a + b \sin \theta} d\theta = \oint_{|z|=1} \frac{2}{bz^2 + 2aiz - b} dz.$$

2 次方程式 $bz^2 + 2aiz - b = 0$ の解はそれぞれ,

$$\alpha = \frac{-ia + \sqrt{a^2 - b^2}i}{b}, \beta = \frac{-ia - \sqrt{a^2 - b^2}i}{b}$$

となる. $a > b > 0$ から $b^2 - a^2 < 0$ となることに注意.

$$-a + \sqrt{a^2 - b^2} < -a + a = 0, -1 < \frac{-a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b}.$$

$$\frac{-a - \sqrt{a^2 - b^2}}{b} < \frac{-b}{b} = -1.$$

以上から α のみ経路 C の内部にある. α は 1 位の極であり留数は,

$$\begin{aligned} \text{Res}[f : \alpha] &= \lim_{z \rightarrow \alpha} (z - \alpha) \frac{1}{b(z - \alpha)(z - \beta)} \\ &= \lim_{z \rightarrow \alpha} \frac{1}{b(z - \beta)} = \frac{1}{2\sqrt{a^2 - b^2}i} \end{aligned}$$

よって, 留数定理より,

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \frac{1}{a + b \sin \theta} d\theta &= \oint_{|z|=1} \frac{2}{bz^2 + 2aiz - b} dz \\ &= 2 \cdot 2\pi i \cdot \frac{1}{2\sqrt{a^2 - b^2}i} = \frac{2\pi}{\sqrt{a^2 - b^2}} \end{aligned}$$

3 留数定理を用いた積分計算

置換積分では新たな積分区間を求めたり, 特殊な置換方法を知らなければ積分の解に辿り着くことは難しい. 問題 1 では, $x = a \tan \theta$ と置換したり, 問題 2 では半角公式・加法定理など様々な性質を駆使して解くことができる. しかし, 複素関数論の留数定理を学ぶことによって, 実積分もあつという間に解けてしまう. 積分経路を上手くとる必要はあるが.

学習に対して意欲が低下している, または今勉強しているものは何のためになるのか. と考えている学生がいれば是非これを読んでもらいたい. 微力ながら学習意欲向上の助けになれば幸いである.

参考文献

- [1] 遠節夫ほか, 新応用数学, 大日本図書, pp.153 - 159

高専における「探究」の在り方について

ー「総合的な探究の時間」の視点から見たALHとクラブ活動ー

二宮 純子

一般科理系

2022年度から高等学校（以下、高校）の「総合的な学習の時間」が「総合的な探究の時間」に変更された。国立工業高等専門学校（以下、高専）ではモデルコアカリキュラム（MMC）をベースに柔軟なカリキュラムが組まれており、「総合学習」は実施されていない。しかし、高専教育で学ぶ学生が学科の専門性によらず共通で身に付けるべき能力として、学習領域に分類し、それらの学習内容の到達目標を明示し、高校学習指導要領との対応に配慮して到達水準が設定されている。本稿では、高校の「総合的な探究の時間」の教育目標を踏まえ、大分高専のカリキュラムに設置されているアクティブ・ラーニング・アワー（ALH）と、カリキュラムに設定されない科学部の活動に着目して省察した。高専から大学への接続を踏まえ、これから探究活動どのように活用していけばよいのか提言した。

キーワード：探究，アクティブ・ラーニング，科学部，理科教育

1. はじめに

2022年度、高校の「総合的な学習の時間」が「総合的な探究の時間」に変更され、その教育目標は学習指導要領に次のように示されている。

総合的な探究の時間 第1目標

探究の見方・考え方を働かせ、横断的・総合的な学習を行うことを通して、自己の在り方生き方を考えながら、よりよく課題を発見し解決していくための資質・能力を次のとおり育成することを目指す。

1. 探究の過程において、課題の発見と解決に必要な知識及び技能を身に付け、課題に関わる概念を形成し、探究の意義や価値を理解するようにする。
2. 実社会や実生活と自己との関わりから問いを見だし、自分で課題を立て、情報を集め、整理・分析して、まとめ・表現することができるようにする。
3. 探究に主体的・協働的に取り組むとともに、互いのよさを生かしながら、新たな価値を創造し、よりよい社会を実現しようとする態度を養う。¹⁾

「総合的な探究の時間」は、旧科目「総合的な学習の時間²⁾」と比較すると、課題発見から解決までの能力や主体的な学びを育むという点が継続されつつ、「自己の在り方生き方」を主軸とし、教科横断的探究学習で学ぶ思考プロセス

スや協同的な活動を通した授業となっている。

高専のカリキュラムは学習指導要領に縛られず、高校の「総合学習」は実施されていない。しかし、高専は、後期中等教育を包含した5年制の教育課程で、学生が卒業までに身につけるべき知識や能力の具体的な到達目標として、モデルコアカリキュラム（以下、MMC³⁾）が教育内容やカリキュラム編成のガイドラインとして示されている。本科生（5カ年）は、専門科目を通して職業に直結する専門知識を中心に習得しつつ、一般科目を通して社会に出るために必要となる基礎知識を学ぶ。高専生は、エンジニアとして将来の自分の生き方を主軸とし、課題解決に向けた知識や技能の習得とともに、技術者が備えるべき分野横断的能力の中に、「総合的な学習経験と創造的思考力」がある。本稿では、大分工業高等専門学校（以下、大分高専）のALHと科学部の活動から、「総合的な学習経験と創造的思考力」の獲得するための教育の機会について論じる。

2. アクティブ・ラーニングにおける「探究」

高専は、モデルコアカリキュラムを各学年での科目配置やその科目での目標水準を設定する際のガイドラインとしつつ、「アクティブ・ラーニング」や「地域の課題解決」といった独自の特色や地域性を反映させたカリキュラムの実施が推奨されている⁴⁾。

「アクティブ・ラーニング」とは、学習者が自ら能動的に学びに向かうよう設計された教授・学習法である。2012

年8月に取りまとめられた中央教育審議会答申では次のような記述で示されている。「生涯にわたって学び続ける力、主体的に考える力を持った人材は、学生からみて受動的な教育の場では育成することができない。従来のような知識の伝達・注入を中心とした授業から、教員と学生が意思疎通を図りつつ、一緒になって切磋琢磨し、相互に刺激を与えながら知的に成長する場を創り、学生が主体的に問題を発見し解を見いだしていく能動的学修（アクティブ・ラーニング）への転換が必要である。すなわち個々の学生の認知的、倫理的、社会的能力を引き出し、それを鍛えるディスカッションやディベートといった双方向の講義、演習、実験、実習や実技等を中心とした授業への転換によって、学生の主体的な学修を促す質の高い学士課程教育を進めることが求められる。学生は主体的な学修の体験を重ねてこそ、生涯学び続ける力を修得できるのである。⁶⁾」すなわち、アクティブ・ラーニングとは、教員が学生と互いに刺激を与えながら互いに知的好奇心を高め、学生の能動的学習を促す授業である。高専機構の「モデルコアカリキュラムに基づく高専教育」の国立高等専門学校の教育用語集には、「主体的・対話的で深い学びをもたらすための教育手法、問題発見・解決型学習、調査学習等が含まれるが、教室内のグループ・ディスカッション、ディベート、グループワーク等も有効なアクティブ・ラーニングの方法である⁴⁾」と明示している。

2017年以降、大分高専では、低学年（高校1～3年生に相当）のカリキュラムに、学生が主体性をもって自学自習を行うためのアクティブ・ラーニング・アワー（ALH）を水曜日の午後に導入している。学生は、ALHに学業や学校生活全般に関する質問や相談あるいは進路指導等を受けることができる。また、学科によっては、高学年の学生が低学年の学生の学習を指導するSA（ステューデントアシスタント）制度を導入し、自学自習の支援体制を整えている。ALHを担当していない教員は学生にいつでも対応可能な状態とするため教室内で待機する。授業のレポート作成や、卒業研究をしている学生から「試薬調製方法を教えてほしい」「文献に掲載されている蒸留装置の接続を知りたい」「（微生物に関する）実験データの処理方法がうまくいかない」といった質問や相談がALHに活発に行われる。学問や研究に対して意欲のある高専生は、自分の将来像である技術者の生き方を主軸として高専生活を過ごし、自分の興味関心のある内容について自ら調べ、最新の研究分野や課題について周囲と協働しながら問題解決に取り組むことができる。このような高専生は、ALHの時間に制限されることはなく、日常的に周囲と対話して、学業成績にも正の影響をもたらす。しかし、学生の自主性に任せたALHは、進路目標が持てずにいる学生や学業不振の学生にとって自由時間あるいは強制的に拘束される時間として認識されることがわかった。

文部科学省「産業界ニーズ事業」（平成24-26年）の中

部地域ブロック・東海A チーム7 大学（テーマ：アクティブ・ラーニングを活用した教育力の強化）の3年間の取組の成果として、アクティブ・ラーニングの失敗例がハンドブックに記されている⁶⁾。アクティブ・ラーニングの失敗例に共通する課題に、教員の指導と評価が指摘されている。

「アクティブラーニング実施の初期の段階では、リーダー格の学生が不在でもグループワークを進めやすい環境や課題を与えるなど、講座の設計が必要である。」また、学外の企業や地域との協働の場面では、「プロジェクト活動を進める中で、報告・相談・連絡を徹底させて一つ一つの作業状況を確認しながら、責任の在り方について適宜指導を行う必要がある。」教員の適切な助言や指導のもとで、学生の主体性は継続的かつ深い学びへと変化することがわかる。ALHにおいて、学習のプロセスを評価する「学習過程評価」と授業の達成目標に到達しているかを評価する「学習成果評価」の二つを、どのように基準を設け判断するかによって、学生のやる気・意欲に与える影響は大きい。

高専の一般科目でアクティブ・ラーニングを取り入れている鈴木氏の報告では、「基礎数学Ⅰ」の第1回目の授業で、どうして小中学校で慣れ親しんだ教員が主に指導する一斉授業をやらずに、『学び合い』といった授業を展開するのかを説明する。⁷⁾」ことが述べられている。また、『学び合い』の授業を展開していくことを学生たちに納得してもらおう。もちろん一度の説明だけで納得できるわけではないので、授業を通じてその必要性を学生たちに話題を変えながら幾度なく語ることになる。」学生がアクティブ・ラーニングという新しい授業形態を受け入れてくれるように何度も説明することが、その後の授業展開において重要であることを示している。また、一般科目「数学」でアクティブ・ラーニングを実践している森本氏は、学生主体の授業づくりのために休日返上でプリント作成していることを述べていた⁸⁾。鈴木氏と森本氏の報告から、教員が課題への導入や指導法を組み立て、ALHにおける「学習過程評価」「学習成果評価」を明確に示すことが重要であることがわかる。高知高専ではアクティブ・ラーニング教育センターを設置し、授業づくりに関するFD・SD研修を年に2回実施し、教員の意識改革に向けた継続的な取り組みを行っている。

高専において、一般科目と専門科目が横断的・総合的な学びとなるALHをカリキュラムに導入し、その実践報告した事例は少ない。今後、大分高専が、ALHを分野横断的な探究活動として展開することは、高専における総合的な探究学習の先駆けになると考えられる。

3. 学科を超えた学生の活動一科学部

文部科学省からSSH（スーパー・サイエンス・ハイスクール）やSGH（スーパー・グローバル・ハイスクール）の認定を受けた高校では、「総合的な学習の時間」を活用しながら課題研究を中心とする教科横断的な実践研究を実施

している。SSH事業とは、理科・数学教育に重点を置いた教育を行う高校を指定し、各校に年間1000万円以上の支援を行うプロジェクトである。この事業により、高大連携による共同研究や国際性を育む実践が推進されている。

高専は高等教育機関として、各専門学科に最新の精密機器や分析装置が設置されており、研究環境が整っている。大分高専の科学部は、これまで専門学科の教員の指導を直接受け、学生が所属する学科を超えた学びへ展開する活動の機会を多く得ることができた。科学部が取り組んできた活動を通して、高専における探究の在り方について考える。

(1) 学生の好奇心から生まれた探究活動

2012年、機械工学科（以下、M科）新入生が科学部に入学し、「鉛フリーはんだを自分でつくりたい。」と提案した。共晶はんだは、スズ 63 %、鉛 37 %で融点 184 °Cの低融点合金として、電子機器や基盤に用いられる。しかし、鉛の有毒性が注目されるようになり、RoHS指令施行の2006年以降、EUでは鉛入りのはんだの使用が禁止された。鉛フリーはんだとは、鉛の代わりに銀や金といった高価な金属を使用するためコストが高く、耐久性に乏しいといった課題がある。

M科の2年生が文献⁹⁾から二元合金の状態図から原子量比 Sn 85% : Zn 15 %の融点が200°C以下になることを見つけ、科学部で試作することになった。M科 松本佳久 教授に電気炉の使用だけでなく金属の特性や分析方法などの指導の機会を得た。Sn-Zn合金の研究は、現在（2022年）も継続している。その間、M科の学生による金属加工技術やSEM画像分析、電気電子工学科（以下、E科）の学生による酸化被膜の波長と反射強度の関係のシミュレーション製作、都市・環境工学科の学生によるコンクリートを用いた金属加熱装置の製作。学生の「やりたいこと」が、それぞれの専門分野を横断しながら課題の解決方法を思考し、知識と技能を互いに協働する過程を通して、自己実現する。科学部の活動における「学生の好奇心から生まれた研究」は、学内の専門的知識と実験機器をもつ教員の助言のもと、継続的かつ発展的な探究活動となる事例である。

(2) 国際性を鍛える

高校生や低学年の高専生を対象とした研究発表には、世界中から高校生が集まる「国際学生科学技術フェア（ISEF）」の出場権をかけて、国内では日本学生科学賞やJSEC（Japan Science & Engineering Challenge）などの大会が毎年開催されている。2016年以降、長岡技術科学大学主催による、高専生が国際会議での研究発表の雰囲気に触れる機会として、SDGs 達成に向けてグローバルな社会課題を解決する方法について議

論する国際会議「STI-Gigaku」（International Conference on “Science of Technology Innovation”）が実施されている。「STI-Gigaku」には、高専からは主に本科5年生や専攻科生が参加する。

2021年、「The 6th International Conference on “Science of Technology Innovation” 2021 (6th STI-Gigaku 2021)」に、大分高専科学部E科3年生が口頭発表に参加した¹⁰⁾。国際会議で自分たちの研究活動を海外の人へ発信するのは、一般科目「英語」の授業とは異なり、世界共通言語のツールとして英語の重要性を体験する機会であった。発表した学生は、次のように感想を述べている。「参加してよかったと思います。良い経験になりました。（英語の授業と異なり）国際会議は英語で専門用語や動作を簡潔で適切に表現する必要があり、自分の伝えたいことを正しい英文にできているか心配でした。（発表後、授業で）英語の発音、文の区切る場所、単語のつながりを意識するようになりました。また、国際学会で発表したことは今後の自信になったとおもいます。」3年生が国際会議で発表する姿は、科学部員の下級生だけでなく上級生にも刺激を与えた。研究発表を通してより広い世界とつながり、新たな課題を見つけるサイクルへと発展する。このような機会は、一部の優秀な高校生や低学年高専生だけのものではあってはならない。現在、小・中・高等学校のICT環境整備が急速に進められたことを好機と捉え、国内外の人たちとオンラインで容易につながるツールを生かした教育活動の在り方を検討することが必要であると考えられる。

(3) 地域社会貢献

高専のオープンキャンパスや公開講座などにおいて、科学部は小・中学生を対象にした科学実験を毎年行ってきた。しかし、2020年、コロナ禍で学内外のイベントが中止となり、科学部では自分たちのクラブ活動を安全に行うために3Dプリンターを用いてフェイスシールドの製作を手がけた。テレビなどでは、マスクが品切れになり医療機関が逼迫している状況が連日報道されるようになった。そこで、科学部員たちは、地域の医療機関へ提供することを目指して作製するようになった。試作品の段階で大分県庁に相談し、改良を行ね、2020年9月30日には大分県庁内で寄附物品の贈呈式が行われ100個を寄附することができた。11月、高専機構のまとめによると、学生や教員が自ら3Dプリンターを使用して、フェイスガード等を製作し、地方自治体や近隣の医療機関等に提供した事例は11（釧路高専、鶴岡高専、舞鶴高専、和歌山高専、津山高専、宇部高専、高知高専、有明高専、北九州高専、大分高専、都城高専）であることが報告された。そして、フェイスガード設計図等を全国立高専に情報共有し、全51高専で

製作が可能な状況である。高専では、各高専の学生と教員が各々で取り組んでいた地域や社会の課題を、「ものづくり」を通して対応する教育機関であることを示すものである。



図-1 フェイスシールド贈呈式

2020年7月6日からの記録的な豪雨により、大分県内では日田市、由布市、九重町、玖珠町を中心として、河川の氾濫や土砂崩れなどが発生し、甚大な被害を受けた。高専生の中には被災地に住む者がおり、学生や教員が自主的に災害復興に参加していた。科学部では、被災地復興のために今の自分たちに何ができるのか、ということ話をし合い、社会福祉法人 大分県社会福祉協議会へ連絡した。災害ボランティアをしているNPO法人 リエラからサイエンスショーの依頼がきた。10月31日、スクールバスに乗った科学部員は、移動途中で被災地に近づくに連れて河川の土砂災害やブルーシートがかけられただけの家屋の状況を目の当たりにした。イベント会場である道の駅 鯛生金山に到着すると、被災者とボランティアの方々に学生たちは笑顔で迎えられた。科学部のサイエンスショーの状況は、同伴した写真部が学内月間号としてまとめ、掲示した。科学部長は次のようなコメントをしている。「これまで、大分県の体験型こども科学館O-Laboや科学で遊ぼうの出前講座では、小中学生を対象にした実験をしてきましたが、今回は7月の大雨災害で被災された子どもから高齢者が対象ということもあり、部員一同やる気満々でした。現地に到着早々、炊き出しの日田やきそばや鶏めしなどをごちそうになり、ボランティアの方たちの優しさに触れながら美味しくいただきました。(略)」

科学部の活動を、写真部が報道するという学生の自主的な取り組みは、教員の予想を超えるものであった。学生たちが、地域社会との関わりを通して、課題克服のために情報を集め、協同活動からお互いの良さを認めあうことは、一人ひとりがより社会に貢献するための一員であるという自覚につながると考えられる。



図-2 写真部による被災地での活動報告

4. おわりに

高専は、モデルコアカリキュラムに則り独自のカリキュラムが設定されているため、「総合的な探究の時間」はカリキュラムに組み込まれていない。しかし、技術者が備えるべき分野横断的能力の「総合的な学習経験と創造的思考力」は、「総合的な探究の時間」の教育目標に一致する部分が多いことがわかった。高専がもつ専門分野の強みを活かし、一般科目・専門科目の分野横断型の授業づくりやクラブ活動において探究活動を活用することは、これからの時代が求める人材像の育成につながる。井ノ上氏らによる研究結果では、一般入試の入学者に比べ、A0・推薦入試の入学の方が研究思考の項目で研究者の素養(研究への主体性や学問意欲)が高いことが報告されている¹¹⁾。このことから、高専から大学への接続を考えると、専門との関連を強くもたせた上で、探究活動を進めることが、総合的な学習経験を獲得する教育機会として重要であることが示唆された。高専の教育活動において探究を活用するため、次の点を今後の課題とした。

- (1) ALHを一般科目と専門科目が横断的探究活動となる教授・学習法の構築
- (2) 高専から大学への接続を見通して、段階的に探究活動を組み立てるためのFD・SD研修

謝辞: 科学部の研究遂行にあたり,多大なご指導を賜った,機械工学科教授 松本佳久先生,電気電子工学科准教授 上野崇寿先生,田中大輔先生,都市・環境工学科教授 一宮一夫先生に深謝致します。また,2012年から現在の科学部員には,学内外のイベントに積極的にご協力頂きました。ありがとうございます。

参考文献

- 1) 高等学校 学習指導要領 (平成30年告示), 文部科学省
- 2) 高等学校 学習指導要領解説 総合的な学習の時間編, 平成21年7月, 文部科学省
- 3) モデルコアカリキュラムガイドライン- (経済・ビジネス系を除く), 独立行政法人 国立高等専門学校機構, 平成29年4月28日
- 4) モデルコアカリキュラムに基づく高専教育, 独立行政法人 国立高等専門学校機構 ([modelcoreleaflet2018.pdf](https://www.kosen-k.go.jp/modelcoreleaflet2018.pdf) ([kosen-k.go.jp](https://www.kosen-k.go.jp)))
- 5) 新たな未来を築くための 大学教育の質的転換に向けて ~生涯学び続け, 主体的に考える力を育成する大学へ~ (答申), P9, 平成24年8月28日 中央教育審議会
- 6) アクティブラーニング失敗事例 ハンドブック~ 産業

界ニーズ事業・成果報告 ~, 中部地域大学グループ・東海Aチーム, 一粒書房, 2014年

- 7) 高専におけるアクティブ・ラーニングの試み ~1年生の基礎数学 I, II の『学び合い』実践~, 鈴木道治, 木更津工業高等専門学校紀要 第 50 号, p70~73, 2017
- 8) 学生の自発的な学びと成長に貢献! 「教えない」授業で「教え合う」学生たち, 月刊高専, 公開日2021年9月8日 (<https://gekkan-kosen.com/3127/>)
- 9) 海老原熊雄, 『金属データブック』, p12~555, 平成2年
- 10) A Study on Teaching Materials for Light Interference Experiments Using Metal Oxide Films, Ryota Tomiyoshi, Kaname Hinago, Takahisa Ueno, Junko Ninomiya, 6th STI-gigaku 4-4 2021
- 11) 多面的・総合的入学者選抜の効果検証ー卒業年度の学生・教員双方の追跡調査の分析ー, 井ノ上憲司, 山下仁司, 大友弘子, 川嶋太津夫, 大学入試研究ジャーナル第32号, p. 56-61, 2022

(2022.9.30受付)

5軸マシニングセンタとVBAによる実践的な学習教材

山本 通¹・佐藤 色波¹・須藤 優樹¹・中谷 賢希¹・平山 創大¹

¹機械工学科

文部科学省では、「AI戦略2019」に基づいた数理・データサイエンス・AIに関する教育の強化に注力しているが、統計手法やAI手法の基礎には、数学や情報学があり、初等的な数学、表計算アプリの使い方やプログラミング能力も高めておく必要がある。一方、各専門分野や専門科目でも、Society5.0の実現に向けた対応が必要である。ここで、筆者の所属する機械工学科では、様々な製品や部品の製作時に、要求される形状、強度、精度、性能やコストなどを考慮する必要がある。そのためには、各種加工法や工作機械に関して知識や経験が必要となってくる。そこで、現代のものづくり産業における工作機械の中で、主役の一つであるマシニングセンタを題材にして、初等的な数学、表計算アプリの使い方、プログラミング能力を向上させるための実践的な教材作成に取り組んだ。本稿では、それらの詳細について紹介する。

キーワード：5軸マシニングセンタ，CAD，VBA，DXF変換，BYOD，微細溝加工試験

1. 緒言

Society5.0の実現に向け、自ら問題を発見し、目的に応じて解決策を発想し、人工知能・ビッグデータ・IoTなどを適切に活用して解決できる高度情報人材を多く輩出することが求められている。また、統合イノベーション戦略推進会議が策定した「AI戦略2019」では、文理を問わず全ての大学生・高専生に対して初級レベルの数理・データサイエンス・AIを習得することが掲げられた¹⁾。そのため、多くの高等教育機関で「AI戦略2019」に基づいた教育の強化に注力するために、様々な研究や教材作成等が行われている²⁻⁶⁾。本校も2021年に文部科学省から「数理・データサイエンス・AI教育プログラム(リテラシーレベル)」の認定をいただき、数理・データサイエンス・AIに関する基礎的な能力向上や、それらを自らの専門分野に応用できるように教育プログラムを実施している。

一方、各専門分野や専門科目でも、Society5.0の実現に向けた対応が必要である。ここで、筆者は工作機械メーカーに勤務していた経験があり、NC工作機械、特にマシニングセンタ(以下、MCと言う)に関して実務経験が豊富にある。MCは、現代のものづくりにおいて欠かせないツールであり、機械系の学生が、その特徴や操作方法を修得しておくことは重要で、これを利用した緻密で洗練されたものづくりは我が国の得意分野の一つである。また、通常、複雑な部品等の製作で、マシニングセンタを扱うにはCAD/CAMやシミュレーションソフトの知識やスキルも必要となる。さらに、

意図する精度、加工時間や加工品位を得るには、工具、加工条件、加工パス等の選択も重要で、総合的なものづくりに関する能力が必要とされる。

そのため、筆者は、マシニングセンタを題材とすれば、機械系分野でのSociety5.0の実現に向けた特徴的な教材が作成できるのではないかと考えた。そこで、マシニングセンタを動作させるためのNCプログラムを半自動で出力するための実践的な情報教育、マシニングセンタでの実加工、加工結果の測定や考察までを行える教材の検討を本年度から学生とともに開始した。本稿では、それらの具体的な内容や今後、授業を行っていくうえで予想される課題について検討した。

2. 5軸MCとVBA

(1) 5軸MC

5軸MCは、直進3軸と回転2軸を有することから工作物に対して任意の方向から工具を接近させることができる。そのため、リードタイムを短縮する手段として利用されたり、インペラなどの複雑形状部品の加工にも使われたりする。本校には、図-1に示すテーブル旋回形5軸マシニングセンタが設置されており、主に実験実習、卒業研究、特別研究等で利用されている。しかし、5軸MCを使いこなすには、かなりの知識や経験が必要なため、本校では、この工作機械を扱える学生は、ほとんどいない状況である。

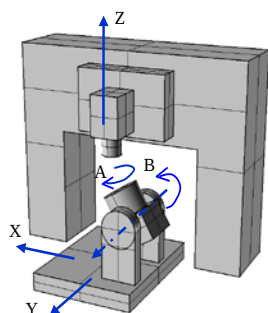


図-1 本校の5軸マシニングセンタ

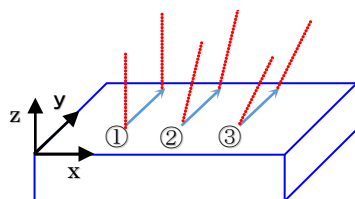


図-2 微細溝加工

(2) ExcelとVBA

Microsoft社のExcel(以下、Excelと言う)が、代表的な表計算ソフトであることは、周知の通りで、本校でも実験データを整理したり、科学計算等に利用したりしている。一方、Excel、WordなどのOfficeアプリケーションにおいて、特定の処理を自動化するために、ユーザーはVBAと呼ばれるプログラミング言語が利用できる⁷⁾。VBAは、比較的覚えやすくweb上の記事や入門書もとても多く、初心者向きのプログラミング言語とも言われる⁸⁾。

本教材では、初等的な数学、表計算アプリの使い方、プログラミング能力を基礎から学べることや、Microsoft社との包括協定により本校学生が自身のPCにMicrosoft 365のインストールが可能なことから、情報教育強化ツールの1つとしてExcelが適当ではないかと考え、教材開発を行った。

3. 先端点制御用NCプログラム出力

(1) 先端点制御機能と本校5軸MCの仕様

最新の5軸MCにはNCに先端点制御という機能が付加されているのが一般的である。例えば、先端点制御機能を有するテーブル旋回形5軸MCであれば、ワークをどこにセットしても同じプログラムで加工が可能となり、3軸MCを扱うのと似た操作手順で加工が行える。また、テーブル旋回形5軸MCの先端点制御用NCプログラムは、回転軸指令があっても、プログラム上はワークが回転せず工具軸が傾斜する形式(以下、ワーク座標系と言う)で出力されるため、プログラム軌跡を確認することで、どのような加工が行われるかイメージしやすい。しかし、本校に設置されている5軸MCは、導入から十数年経過しており、NCが先端点制御機能に対応していない。したがって、ワークをチャック等にセットした後、ワークや回転中心の位置を確認し、NCプログラムを作成しなければならない。

	A	B	C	D	E	F
1		ファイル出力				
2						
3		X	Y	Z	A	B
4	①	10.0	5.0	-0.1	0.0	0.0
5	②	15.0	5.0	-0.1	0.0	30.0
6	③	20.0	5.0	-0.1	90.0	30.0

(a) 配布用 Excel シート

(b) フォーム

```
1 |X10.0 Y10.0 Z-0.1 A0.0 B0.0<
2 |X15.0 Y10.0 Z-0.1 A0.0 B30.0<
3 |X20.0 Y10.0 Z-0.1 A90.0 B30.0<
```

(c) 出力結果

図-3 配布用 Excel シートと出力結果

```
Sub CommandButton1_Click()
    Dim row1 As Integer, col1 As Integer, _
        row2 As Integer
    row1 = Int(TextBox1.Text)
    col1 = Int(TextBox2.Text)
    row2 = Int(TextBox3.Text)

    Call F_OUTPUT(row1, col1, row2)
End Sub

Public Function F_OUTPUT(row1 As Integer, _
    col1 As Integer, row2 As Integer)
    '指定セルからのテキストデータ出力

    Dim FNAME As String, path As String
    Dim xx As Variant, yy As Variant, zz As Variant
    Dim aa As Variant, bb As Variant

    FNAME = ActiveWorkbook.path & "\data.txt"
    Open FNAME For Output As #1

    For I = 1 To row2 - row1 + 1
        xx = Format(Cells(row1 + I - 1, col1), "0.0")
        yy = Format(Cells(row1 + I - 1, col1 + 1), "0.0")
        zz = Format(Cells(row1 + I - 1, col1 + 2), "0.0")
        aa = Format(Cells(row1 + I - 1, col1 + 3), "0.0")
        bb = Format(Cells(row1 + I - 1, col1 + 4), "0.0")
        Print #1, "X" & xx & " Y" & yy & " Z" & zz & _
            " A" & aa & " B" & bb
    Next

    Close #1
    MsgBox ("ファイル出力しました")
End Function
```

図-4 配布用 Excel シートのソースコード(抜粋)

(2) VBAによる先端点制御用NCプログラム出力

前述したように、本校の5軸MCは、先端点制御に対応していないが、この機械で加工を行う場合、最初にワーク座標系で、先端点制御用NCプログラムを作成する必要がある。加工プログラムは、図-2に示すように、任意の工具姿勢でボールエンドミルにより、一定の深さで3本の溝加工を行う。なお、図の点線は工具姿勢で、数字と矢印で示す線が溝加工の軌跡である。この加工はプログラムが単純で分かりやすく、加工時間も短い。また、様々な面から考察

```

1 G0031.0
2 G90G54
3 G0G43Z20.0H32
4 G0X0Y0
5 G8P1
6 S8000M3
7 G0A0.0B0.0
8 G0X10.0Y5.0
9 G0Z10.0
10 G1Z4.9F500
11 Y10.0F1600
12 G0Z10.0
13 G0A0.0B30.0
14 G0X15.0Y5.0
15 G0Z10.0
16 G1Z4.9F500
17 Y10.0F1600
18 G0Z10.0
19 G0A90.0B30.0
20 G0X20.0Y5.0
21 G0Z10.0
22 G1Z4.9F500
23 Y10.0F1600
24 G0Z20.0
25 G0Z20.0
26 M2

```

図-5 微細溝加工のための先端点制御用 NC プログラム

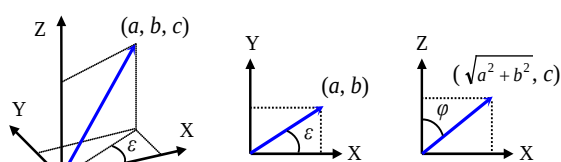


図-6 工具姿勢と AB 軸指令の関係

が可能のため、本教材では、この加工を採用した。

プログラム出力の具体的な手順は以下に示す通りで、最初に、図-3(a)に示すように、溝加工を開始する座標(x,yとz座標値)と工具姿勢(a,b指令)等が記述されたExcelシートを学生に配布する。学生は、シート内の「ファイル出力」ボタンを押し、表示される図-3(b)の「テキスト出力」ボタンを押すことで、図-3(c)に示すようにExcelのセル内の情報がテキストデータとして出力されることを体験する。その後、図-4に示すようなソースコードの説明を行い、学生にはこれをアレンジさせ、微細溝加工用NCプログラムが出力できる半自動CAMのプログラムを作成させる。例えば、R5mmボールエンドミルで、図-3(a)に示す加工開始位置と工具姿勢で、長さ5mmの微細溝を加工するNCプログラム(ボールエンドミルの工具中心位置出力)は、図-5のようになる。これにより、VBAの基礎を復習させるとともに5軸加工時のNCプログラム作成手順を理解させる。

4. NCプログラムのDXF変換

(1) DXFフォーマット

機械系学科に所属する学生にとって、CADの知識や操作スキルも必須の修得項目である。そこで、前章で作成したNCプログラム軌跡と工具姿勢をCADで表示できる形式のデータに変換させる教材も作成し、回転変換等の基本的な数学的知識を復習しながら、VBAによるプログラミングの更なる理解を深めさせようと考えた。

なお、NCプログラムをCADで表示するためのフォーマットとしては、DXFファイルを選択した。DXFファイルは、フォーマットが公開されており、テキスト形式で比較的容易に意図するデータを作成しやすく、多くのCADがDXF形式をサポートしていることが、選択理由である。

```

Public Function NMV_TOOL(AA, BB, IJK)
    Pi = 3.1415926535898
    AA1 = AA * Pi / 180
    BB1 = BB * Pi / 180

    Select Case IJK
    Case 1
        NMV_TOOL = Cos(AA1) * Sin(BB1)
    Case 2
        NMV_TOOL = Sin(AA1) * Sin(BB1)
    Case 3
        NMV_TOOL = Cos(BB1)
    End Select
End Function

```

図-7 AB 軸指令から工具姿勢を算出する自作関数

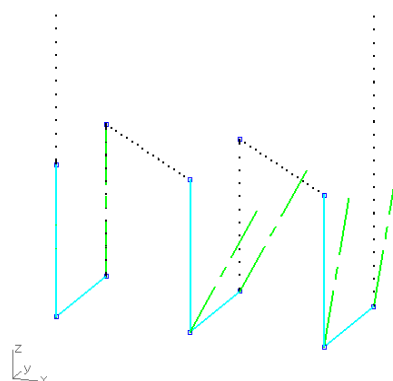


図-8 工具姿勢を付加した加工軌跡

(2) 回転軸指令から工具姿勢ベクトルの算出

工具姿勢をCAD上で、1本の線分で表現し、NCプログラムを視覚的に見せるには、図-6に示すような考え方が必要になる。つまり、本校の5軸MCで、A軸 ε 、B軸 φ の回転軸指令がNCプログラムで与えられたとすると、加工時の工具姿勢(a, b, c)は、以下の式(1)で算出できる。

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon) \times \sin(\varphi) \\ \sin(\varepsilon) \times \sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

これを図-7のように関数化し、点や線をDXF出力するサブルーチンも含めて学生に配布する。その後、学生には、配布されたプログラムを活用し、NCプログラムを読み取り、図-8に示すように、NCプログラムの軌跡をDXFデータ化するプログラムを作成させる。この作業には、早送り指令、切削送り指令や回転軸指令の認識をどのようにさせるかや、配布されたプログラムをどのように活用するか等、学生が自ら考えなければならない部分が多く、実践的な教材として有効ではないかと考える。

(3) DXFファイルと各種CADとの相性

本校機械工学科の授業では、主にSOLIDWORKSという名称のCADを使用している。しかし、前節で作成したDXFファイルを上記CADで開こうとすると、レイヤや線種の情報が引き継がれないことが分かった。一方、RhinoCerosというCADでは、図-8に示したように、意図した通りに加工軌跡や工具姿勢の線種やレイヤが表示される。なお、図の

点線はG0:位置決め(早送り)指令, 実線はG1:直線補間(切削送り)指令, 一点鎖線は工具姿勢を表す。

また, 最近, 条件を満たせば, 無料で使用できるCADとして注目されているFusion360でも, 作成したDXFファイルを読み込ませたが, 線種情報が引き継がれず, NCプログラムの軌跡を目視で学生に見せ, 教育効果を上げるには, 適当ではないという結果となった。したがって, 全てのCADで確認したわけではないが, 今回作成した教材は, Rhinocerosと相性が良いことが分かった。以上のように, CADにも様々な特徴がある点を理解させ, 1種類のCADだけではなく, 各種CADの操作性を体験させることもエンジニア育成において有効ではないかと考える。

5. 非先端点制御用NCプログラム出力

(1) 5軸MCの回転中心

先端点制御機能を使用する際は, 5軸MCの回転中心に関しての知識が十分でなくても加工が可能になるが, 本校の5軸MCのように, そのような機能を有しない5軸MCの場合, 回転中心について十分な理解が必要になる。

今回使用する5軸MCは前述したように, AB軸を有するテーブル旋回形であり, 基準原点 o は, 図-9に示すように定義する。なお, 図-1に示したように, 実験に使用した加工機の回転軸のうち, 360度以上回転可能な軸はC軸ではなくA軸と定義されているので, 加工機の軸名称について注意されたい。一方, これらの測定方法について, 本校・機械工学科所属の学生には, 3年次前期・機械工作法Ⅱの授業で紹介しており, それ以降の本校機械工学科・学生であれば, 比較的スムーズに内容の理解が進むと期待している。

(2) NCプログラム作成シート

図-9に示すように, ワークをセットしたとすると, 基準原点 o からワーク原点 o' までの相対距離を図-10に示すシートのC3, D3とE3セルに追記し, NCプログラム出力を行う必要がある。学生には, このようなシートのイメージを説明するのみにし, 作業自体は, 学生らに行わせ, 各自で非先端点制御用NCプログラムを出力させる。

6. 実加工

(1) 微細溝加工試験

筆者らは, 5軸MCの精度確認手法の1つとして, 微細溝加工試験を提案している⁹⁾。本教材で, 前章までに作成したNCプログラムは, まさに微細溝加工試験用のNCプログラムとなっている。これを使って, 相対工具長補正により, 直方体形状のワークに対し実加工を行う。加工手順は次の通りとなる。

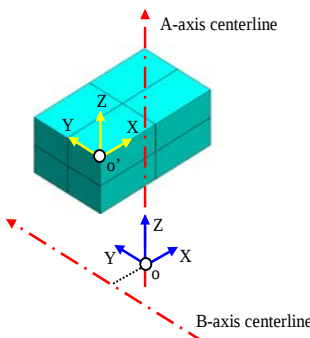


図-9 原点の定義

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		工具半径	ワーク原点			A軸中心方向ベクトル			B軸中心方向ベクトル						
2			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z		ファイル出力		
3		5	-50	-30	254.199	0	0	1	0	1	0				
4		溝長さ				A軸中心			B軸中心						
5		(Y方向)				X	Y	Z	X	Y	Z				
6		5				0	0	280	0.02	0	0				
7															
8						*基準原点(A中心X、A中心Y、B中心Z)									
9		ワーク原点基準の座標値			A	B	基準原点からの座標値(開始点)			A軸回転後の座標値(開始点)			B軸回転後の座標値(開始点)		
10		X	Y	Z			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
11		10.0	5.0	4.9	0.0	0.0	-40.0	-25.0	259.1	-40	-25	259.099	-40	-25	259.099
12		15.0	5.0	4.9	0.0	30.0	-35.0	-25.0	259.1	-35	-25	259.099	-159.858	-25	206.876
13		20.0	5.0	4.9	90.0	30.0	-30.0	-25.0	259.1	-25	30	259.099	-151.197	30	211.876
14															
15							基準原点からの座標値(終了点)			A軸回転後の座標値(終了点)			B軸回転後の座標値(終了点)		
16							X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
17							-40.0	-20.0	259.1	-40	-20	259.099	-40.000	-20	259.099
18							-35.0	-20.0	259.1	-35	-20	259.099	-159.858	-20	206.876
19							-30.0	-20.0	259.1	-20	30	259.099	-146.867	30	214.376
20															
21															
22															
23															

微細溝加工用NCデータ出力

データ読取りの開始位置

11

データ読取りの終了位置

13

溝長さ(Y方向)

5

主軸回転速度

8000

送り速度

1600

加工条件

NC出力

終了

図-10 学生に作成させるExcelシート例

表-1 加工条件

Spindle speed	8000 min ⁻¹
Feed rate	800 mm/min
Depth of cut	0.1mm
Tool	R5mm ball end mill (OSG 製 WXL-EBD R5×18)

1. 基準面作成のため、フライスでワーク上面を加工
2. 図-9に示す基準原点oからワーク原点o'までの相対距離を基準工具と基準ブロックにより測定
3. 前節までに作成したシートに、2で測定したパラメータを設定し、NCプログラムを作成
4. 1で製作した基準面を使って、加工に使用する工具と基準工具との相対長さを測定
5. 測定した相対長さに50を足した数値をNCの工具長補正値に設定
6. 準備したNCプログラムを起動し、シングルブロックをONにし、50mm上がった状態で意図した工具軌跡を描いているか確認
7. 6で問題がある場合は、前工程でミス等がないか確認。6が意図した通りに動作すれば、工具長補正値を元に戻し、実加工。

(2) 加工結果と考察

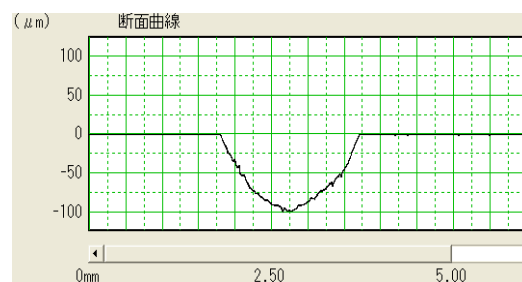
表-1に示す加工条件で、学生らとともに微細溝加工試験を行った。輪郭形状測定機による各溝の測定結果を図-11に示す。図から分かるように、100 μ mの加工深さで加工しているにもかかわらず、工具姿勢により、その加工深さが異なっている。これが熱変位によるものか、回転中心の設定誤差によるものか、工具の真球度によるものか等、何に起因するのか、学生に考えさせるのもこの教材の特徴の1つである。また、溝幅に関しては、機械工作法Ⅱの授業で教えている式(2)に示す理論粗さ R_{th} の導出式と一致するのかについても考察が可能である。

$$R_{th} = \frac{p^2}{(8R)} \quad (2)$$

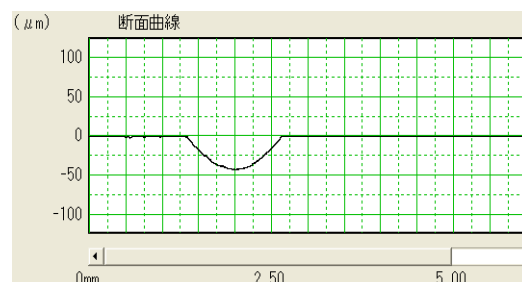
ただし、 p はピックフィード、 R はボールエンドミル半径である。以上のように、単純な溝加工であるが、輪郭形状測定機等で測定した深さ方向の誤差や溝幅について様々な考察が可能となる。

7. 今後の予定

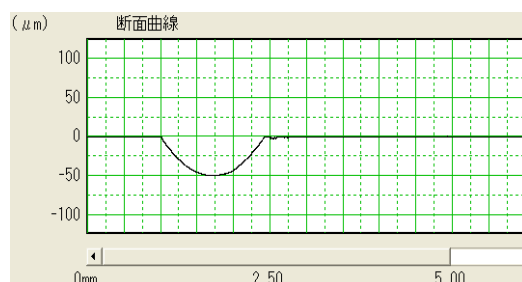
前述のように、教材のおおよその準備はでき、既に本研究所属の学生に一部の教材を試行的に実施し、実践的な教材として使えるような感触は得ている。しかし、これをどのように、授業に導入していくのか、この教材を実施するのにどの程度の時間が必要か、学生がどのような部分で理解に苦しむのか等、検討が十分でない部分も多々ある。ま



(a) A軸0度、B軸0度時の微細溝加工結果



(b) A軸0度、B軸30度時の微細溝加工結果



(c) A軸90度、B軸0度時の微細溝加工結果

図-11 実加工結果

ずは、全ての教材を使って、一部の学生に対し、模擬授業を行い、更なる改善等を行ってから、授業に取り入れるのが賢明かと考えている。

8. 結言

本稿では、機械工学科における実践的な専門教育と情報教育を行うための教材を作成し、その利用方法について検討を行った。以下に本研究で得られた成果や今後の課題等を示す。

1) 5軸MCで微細溝加工試験を行うための半自動CAMをVBAで作成する過程を学ぶ教材を作成した。

2) 微細溝加工試験用NCプログラムを視覚化するために、NCプログラムをDXF変換するための教材を作成した。また、本教材で作成したDXFデータを開くには、Rhinoと相性が良いことを確認した。

3) 本教材では、5軸MCによる実加工、加工領域の測定までをターゲットにしており、機械系学生に最適な教材になる

と期待できる。しかし、本稿をまとめる中で、実施や検討すべき課題も明らかになった。

4) 今回作成した教材は、社会人へのリカレント教育にも使用できると考えており、今後、その活用方法についても検討したい。

参考文献

- 1) 山本 章博, データサイエンス・プロセスから見るデータサイエンス・カリキュラム, 情報知識学会誌, 2021, 31, 4, pp.452-461, (2022)
- 2) 藤澤 修平, 吉田 秀典, 林 敏浩, 香川大学における数理・データサイエンス教育の検討, 日本科学教育学会研究会研究報告, 35, 6, pp.1-4, (2021)
- 3) 高谷 将宏, 佐藤 克美, 地域企業が学生に期待する AI リテラシーについての考察, AI時代の教育論文誌, 2021, 4巻, pp. 49-54, (2022)
- 4) 神部 順子, 玉田 和恵, 松田 稔樹, ICT問題解決に焦点

を当てた地域社会で活躍するためのAI・データサイエンス教育プログラム, 日本教育工学会研究報告集, 2022, 2, pp. 40-43, (2022)

- 5) 登本 洋子, 高橋 純, 表計算ソフトウェアの操作スキルの習得を目指した授業実践の成果と課題, 教育情報研究, 36, 3, pp. 37-48, (2020)
- 6) 平野 旭, 高専における全学的なAIスキル教育にむけた基礎分析, 工学教育, 69, 4, pp. 20-25, (2022)
- 7) 金城俊哉: はじめての最新 Excel VBA [決定版] Excel2019/Windows10 完全対応, 秀和システム, p.12, (2020)
- 8) リブワークス: スラスラ読めるExcel VBAふりがなプログラミング, インプレス, p.11, (2018)
- 9) 山本 通, 堤正臣: 微細溝切削による5軸制御マシニングセンタの幾何誤差推定方法の開発, 精密工学会誌, 77, 8, pp.776-780, (2011)

(2022.9.30受付)

パルス通電焼結による生体利用可能なチタン多孔質体の創製

坂本 裕紀¹・小野 将輝²

¹ 機械工学科, ²機械・環境システム工学専攻

純チタンおよびチタン合金は、機械的・化学的性質に優れていることから歯科用インプラントとして利用されているが、チタンと人骨との間で弾性率が異なるという問題がある。その解決策として、チタンを多孔質にすることが挙げられる。その解決策として、生体適合性の優れたリン酸カルシウムを被覆させる方法と、チタンを多孔質化する方法がある。本研究では、リン酸カルシウムを添加した多孔質チタン複合材料を製作し、アルカリ加熱処理による影響を調べた。その結果、リン酸カルシウムを添加した試料において骨の主成分であるハイドロキシアパタイトが確認され、リン酸カルシウムの添加は人骨とより早く結合することが示唆された。

キーワード：多孔質チタン，リン酸カルシウム，アルカリ加熱処理

1. 緒言

純チタン及びチタン合金は軽量で耐熱性・耐腐食性に優れた金属材料として、航空機・化学プラント・潜水艦と用途が多岐に渡る。また、人体に無害で組織適合性が良いため、歯科インプラントなどの歯科臨床に用いられている。しかし、チタンと骨の弾性係数が異なることから（チタン：105～110GPa，人骨：17～20GPa）¹⁾、ストレスシールドが発生し、骨と直接結合しにくいことが問題となっている。また、チタンインプラントの治療期間は、一般に約 6～12 ヶ月を要するといわれており、歯科インプラントは人体への強固な早期結合が求められている。その解決策として生体適合性の優れたリン酸カルシウムを被覆させる方法と、チタンを多孔質化する方法がある。リン酸カルシウムは骨の主成分であるため、添加させることで骨とより強固な結合が見込まれる。また、チタンの多孔質化により、骨の弾性係数に近似できるほか、気孔に骨の成分が侵入することによってより強固な結びつきが期待できる^{2,3)}。

さらに、アルカリ加熱処理と呼ばれる表面化学処理技術により、骨生成の基礎となる官能基層を被覆させることで、チタンインプラントの治療期間を約 3～6 か月に短縮できた報告例が出ている⁴⁾。従って、多孔質チタンにアルカリ加熱処理を施すことで従来よりも高い生体適合性が期待できる。しかし、多孔質チタンをインプラントに用いるには圧縮強度、弾性係数が不足している状態であり、それらの改善が課題となっている。

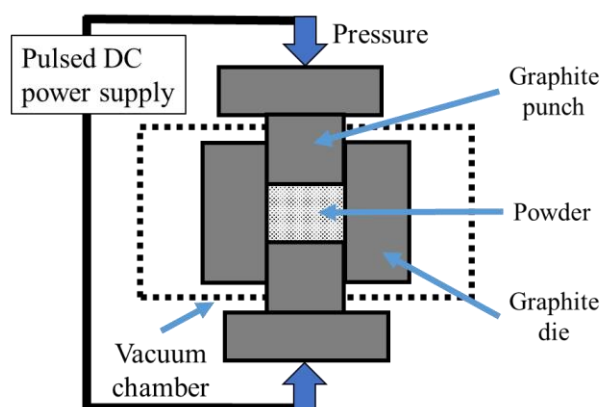
そこで本研究では、実際に歯科インプラントとして生体

利用可能な多孔質チタン複合材料の製作に着目した。複合材料を用いる理由として、以前の研究では、チタン粉末のみで試料製作を行ったが、骨との早期結合性という面で実用化に向けて改善の余地があった。従って、本研究はパルス通電焼結で試料を製作する際にリン酸カルシウム ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) を添加し、アルカリ加熱処理による影響を調べる。そして、骨埋入時に最適な強度、早期結合性と多孔性を有する多孔質チタン複合材料の製作を行い、圧縮試験、表面観察、XRD 回折による物性評価を行った。

2. 供試材

125 μm の球状純チタン粉末およびリン酸カルシウムをパルス通電焼結することで製作する。Fig.1 にパルス通電焼結の概略図とダイス、パンチの画像を示す。ダイスに粉末を投入し、カーボンシートとパンチで挟み、上下両側からパルス電流を印加し、加圧する。その際の加圧力とジュール熱によって粉末を焼結させる。チタン粉末とリン酸カルシウムの複合材料は、リン酸カルシウムとチタン粉末の重量比を変化させ、パルス通電焼結を行うことで製作した。

パルス通電焼結の焼結条件は圧縮力を 40MPa、焼結温度 570℃を一定とし、保持時間 15 分間で製作した。製作した複合材料は、直径 $d=5\text{mm}$ 、長さ $l=10\text{mm}$ の円柱状である。Table1 にチタン粉末とリン酸カルシウム複合材料の重量比の変化を示す。



(1) Schematic



(2) Die

(3) Punch

Fig.1 Schematic diagram of pulsed current sintering and image of the mold.

Table1 Weight ratio of calcium phosphate to titanium powder.

	Powder titanium : Calcium phosphate
No.1	Powder titanium only
No.2	97:3
No.3	90:10
No.4	80:20

3. 実験方法

(1) 圧縮試験

AG-X 材料試験機とは、各種材料あるいは製品に負荷を与え、その経過や結果として強度・剛性・弾性・硬さ・粘性・耐久性などの物理的特性を数値として検出、あるいは形状を観察するために用いる試験機であり、多くの分野で用いられている。試験治具の取り付けにより多様な使い方ができることから万能試験機と呼ばれているが、主に引張試験機として用いられ、圧縮・曲げ・硬さ試験などにも利用される。

本研究で使用した AUTOGRAPH (AG-100kNX, 島津製

作所) は、PC 上に試験機専用ソフト (TRAPEZIUMX) を起動した状態で接続することにより試験データをリアルタイムで PC 上に表示することができるため、データの取り扱いが容易である。

実際に人工骨や歯科イプラントとして使用することを想定すると、ヒトの日常的動作において骨や歯根には屈伸や咬合など主に圧縮方向の荷重が加わることがわかる。本研究では、万能試験機を用いて圧縮試験により強度評価を行った。試験ではクロスヘッド速度を 1.0mm/min で圧縮を行い、試料あるいはグラフから明らかに材料が破壊したと確認できるまで試験を行った。また、ひずみゲージを試験片の軸方向に 2 点貼り付け、測定を行った。その後、応力-ひずみ線図から、圧縮強度および弾性係数を算出した。

(2) 表面観察

走査型顕微鏡 (SEM) とは対象物に電子ビームを当て、反射した一次電子または二次電子を検出器で捉えて、拡大像として表示するものである。凹凸の激しい試料表面も立体的に観察でき、凹凸の激しい破面や表面の変形模様の観察から破壊の原因や無理の程度を予測することが出来る。また、材料の結晶粒度、結晶粒の形状、析出物の形状及び分布状態の観察による材料評価に利用される。

本研究では、パルス通電焼結によって制作したチタン粉末とリン酸カルシウム複合材料の気孔の有無、結合の状態を調べるために SEM による観察を行った。

(3) XRD 回折

結晶性物質に原子間距離と同程度の波長を持つ単色 X 線を入射すると、各原子は散乱体対となって X 線を散乱する。この各散乱角に対して散乱強度を記録すると、その物質特有の散乱スペクトルが得られる。回折角の位置・強度は結晶構造に特有で、回折図形から、主に無機化合物の同定ができる。

測定条件は Cu 管球を使用し、管電圧を 40kV、管電流は 30mA、角度を 20~80° の範囲で測定を行った。本研究では、パルス通電焼結によって製作したチタン粉末とリン酸カルシウム複合材料のアルカリ加熱処理前後での成分の変化を XRD 回折によって比較し、リン酸カルシウムの添加による成分変化の影響を評価した。また疑似体液浸漬前後の成分の評価も行った。

(4) 疑似体液浸漬とアルカリ加熱処理

歯科インプラント製作において必要な条件の 1 つとして、生体内に使用した場合に問題なく利用できるのかという点がある。また、ヒトの体内で試料の機械的試験を行うことは容易ではない。そこでヒトの体液を模した SBF に浸漬することで、評価を行った。Table2 にアルカリ加熱処理をした材料の重量比の変化を示す。

本研究では疑似体液浸漬による影響を評価するため、

No.1~ No.4 の 4 種類およびアルカリ加熱処理を行った No.1' ~ No.4' の計 8 種類について、浸漬を行った。pH 値が 7.40 となるように調製し、液温を 37℃に保持した。浸漬前、また浸漬後から 3, 7, 14, 21 日後に試料を取り出し、重量測定および表面観察、XRD 回折を行った。

アルカリ加熱処理をチタンに施すことでチタン表面から 1μm の厚さの層内で次第にチタン金属に変化する傾斜構造を形成するため、チタンの基盤に強固に結合されると報告されている⁵⁾。

本研究では、Table 2 に示した 4 種類についてそれぞれ 5mol の水酸化ナトリウム水溶液 (NaOH) に浸漬し、60℃のインキュベーター内に 24 時間保持した。その後、600℃の電気炉内で 1 時間保持し、炉冷を行った。

Table2 Conditions for alkali heat-treated samples.

	Powder titanium : Calcium phosphate
No.1'	Powder titanium only (Alkali heat treatment)
No.2'	97:3 (Alkali heat treatment)
No.3'	90:10 (Alkali heat treatment)
No.4'	80:20 (Alkali heat treatment)

4. 結果および考察

(1) 未処理材

チタン粉末およびリン酸カルシウム複合材料の条件別の応力-ひずみ線図を Fig.2, 圧縮強度と弾性係数の比較を Table3 に示す。No.3, No.4 に関しては試験中に破壊が起きたため、No.1 と No.2 のみを示す。これらから、リン酸カルシウムの添加量に応じて、圧縮強度、弾性係数が低下していることがわかった。No.3 および No.4 については圧縮試験中に破壊が起きてしまったため、本研究においては強度が不十分であることがわかった。続いて、Fig.3(1)に No.1, Fig.3(2)に No.3, Fig.3(3)に No.4 の SEM 画像を示す。大きな変化を調べるため No.1, No.3, No.4 の 3 種類で評価を行った。こちらもリン酸カルシウムによる影響はなく、アパタイト析出増加に期待は見られなかった。続いて、Fig.4(1)に浸漬前後の XRD 回折結果を示す。ここでは代表例として No.3 の測定結果を示す。こちらも、浸漬日数を増加させても、アパタイトのピークは得られなかったが、 β -Ca₂P₂O₇ のピークが見られた。また、Fig.4(2)にリン酸カルシウム粉末の XRD 測定結果を示す。焼結前には Brucite(CaHPO₄ · 2H₂O)のピークが多く見られている。このことから、パルス通電焼結による変化が示唆された。電気炉内で 600℃での焼結により CaHPO₄ · 2H₂O が β -Ca₂P₂O₇ に変化するという報告⁶⁾がある。すなわち、パルス通電焼結が低真空中で、電気炉内と同様の空気に触れる状態であったため β -Ca₂P₂O₇ に変化したのではないかと

考えられる。

また、アパタイトが析出しなかった要因としては、浸漬時間が短かったことが考えられる。しかし、1 か月近く浸漬したにもかかわらず、変化が見られないということは、アパタイト析出量増加に期待はできないと考えられる。つまり、リン酸カルシウムを添加させるのみでは、早期結合ができないということを示唆している。

(2) アルカリ加熱処理材

アルカリ加熱処理を施したチタン粉末およびリン酸カルシウム複合材料の条件別の応力-ひずみ線図を Fig.2, 圧縮強度と弾性係数の比較を Table3 に示す。結果から、チタン粉末のみの試料では弾性係数は人骨と同様の 20GPa となりストレスシールディングの発生が軽減されると考えられる。しかし、圧縮強度は 35MPa となっている。歯根直径を 5mm とすると約 690N となる。これは若年者の平均咬合力と同様の値となっており、安全率を考慮する必要があるため、まだまだ改善の余地があると考えられる。No.2' の試料では初期変化が起きた後、新たな傾きを経て、破断が起きていることがわかる。これはリン酸カルシウムとの焼結性が悪いという面と初期変化で気孔が潰れ、その後全体としての破断が起きたのではないかと考えられる。今後は、焼結条件の変更によって強度の向上が見込まれる。また、Fig.5(1)に No.1', Fig.5(2)に No.2', Fig.5(3)に No.3', Fig.5(4)に No.4' の SEM 画像を示す。3 日目においてリン酸カルシウムの部分が黒くなっており、新たに析出し、空孔が狭まっている様子が見て取れる。続いて、Fig.6(1)にアルカリ加熱処理を施した試料の浸漬前後の XRD 測定結果を示す。SBF 浸漬による影響で、 β -Ca₂P₂O₇ のピークがなくなり、ハイドロキシアパタイトのピークが新たに検出された。これらの要因から、析出物はハイドロキシアパタイトであると考えられる。長期間に及ぶ SBF 浸漬は行っていないため今後の析出は未知ではあるが、少なくとも 3 日目にしてハイドロキシアパタイトが析出した。これにより短期間での結合が可能であることが示唆された。

(3) 表面処理の有無による比較

通常のチタンおよびチタン合金はアルカリ加熱処理を行っても機械的強度、伸び等々は無視できる程度のものであったが⁷⁾、アルカリ加熱処理した多孔質試料は処理していないものに比べ、機械的性質が大きく低下していることがわかる。

Fig.6(2)に、No.4 および No.4' の XRD 回折による比較を示す。アルカリ加熱処理を施した No.4' において人骨の主成分であるハイドロキシアパタイトのピークが多く見られた。これは水溶液から生成する溶液法において、酸性条件では Brucite (CaHPO₄ · 2H₂O)や Monelite(CaHPO₄)が生成し、中性からアルカリ性条件下ではハイドロキシアパ

タイト($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH}_2)$)が得られる⁹⁾ことから、本研究で調製した疑似体液の pH は 7.40 と中性、アルカリ性条件下であるため、ハイドロキシアパタイトのピークが見られたと考える。

アルカリ加熱処理を施した試料においては、強度の面では改善の余地があるが、No.4' においてハイドロキシアパタイトが析出したため、リン酸カルシウムの添加は早期結合の期待ができる

5. 結言

リン酸カルシウムを添加した多孔体を製作するためにパルス通電焼結を用いて製作し、アルカリ加熱処理を施した場合の影響および SBF 浸漬による影響を圧縮試験、SEM 観察、XRD 回折による物性評価を行った。また、本研究での機械的性質、早期結合の点からの最適条件を模索した。

1) 圧縮試験の結果より、アルカリ加熱処理を施した場合、機械的性質が低下した。本研究においてはチタン粉末のみを用いた No.1 が最適な条件であるが、安全率を考慮してインプラントに利用しなければならないため、焼結温度や圧縮力等の焼結条件の改善が必要である。

2) SEM による観察では、アルカリ加熱処理を施し、リン酸カルシウムを添加した試料において骨の主成分であるハイドロキシアパタイトのような析出物が見られた。

3) XRD による測定を行ったところ、ハイドロキシアパタイトのピークが検出された。そのことから、リン酸カルシウムの添加は、人骨とより早く結合することが示唆された。

4) 本研究においては、リン酸カルシウムによってハイドロキシアパタイトが析出する点と機械的性質をある程度有する No.2' の条件が最適であり、より強い生体適合性が期待できる。

参考文献

- 1) 三浦維四, 井田一夫: チタンの歯科利用. 第 1 版, クインテッセンス出版(株), 東京, pp.28-32, 1988.
- 2) R. Van Noort : J. Mat. Sci, 22 , pp. 3801-3811, 1987.
- 3) S. J Simske, R.A. Ayers, T.A. Bateman : Mater. Sci. Forum, 250 , pp. 151-182, 1997.
- 4) H.-M. Kim, F. Miyaji, T. Kokubo and T. Nakamura: Journal of Biomedical Materials Research 32, pp.409-417, 1996.
- 5) Y. Sakamoto, K. Asaoka, Masayuki Kon, Toshio Mathubara, Kenichi Yoshida :Chemical surface modification of high-strength porous Ti compacts by spark plasma sintering.

Bio-Medical Materials and Engineering, Vol.16 No.2, pp.83-91, 2006.

- 6) 金澤孝文・永井正幸・星川潤: $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の加熱により得られた $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 粉体の性状と焼結. 窯業協会誌 91 [9] , p.415, 1983.
- 7) 中村太志, 守下昌輝, 臼井通彦, 中島啓介: 咬合力の測定方法とその大きさに影響を与える因子. 日歯周誌 60(4), pp.155-159, 2018.
- 8) 鈴木順, 佐々木佳男, 土居憲治, 他: アルカリ・加熱処理されたチタン合金の処理層の構造および機械的特性. 生体材料 19, pp.154-60, 2001.
- 9) 藤野治, 田村浩之, 合田四郎, 水溶液からのハイドロキシアパタイトの合成に関する基礎的研究, 理工学総合研究所研究報告, 15, pp.39-46, 2003.

(2022. 9. 30 受付)

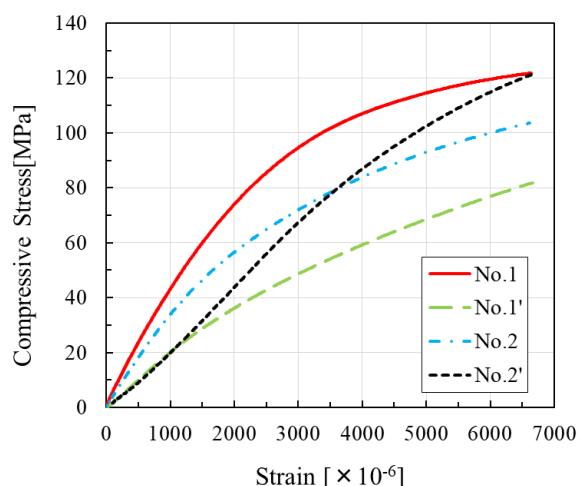
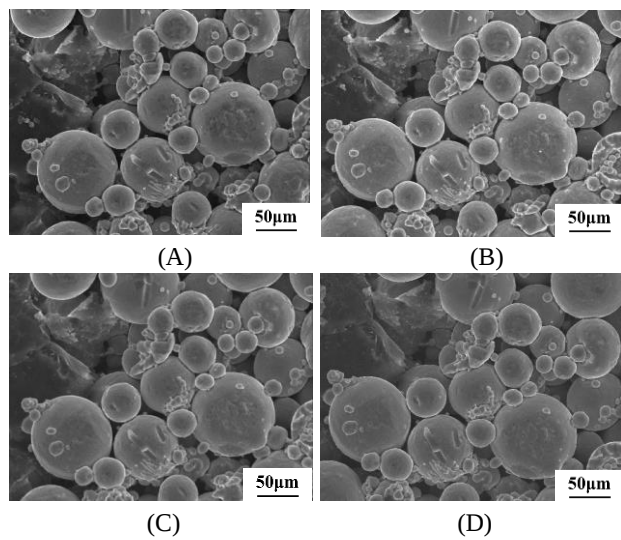


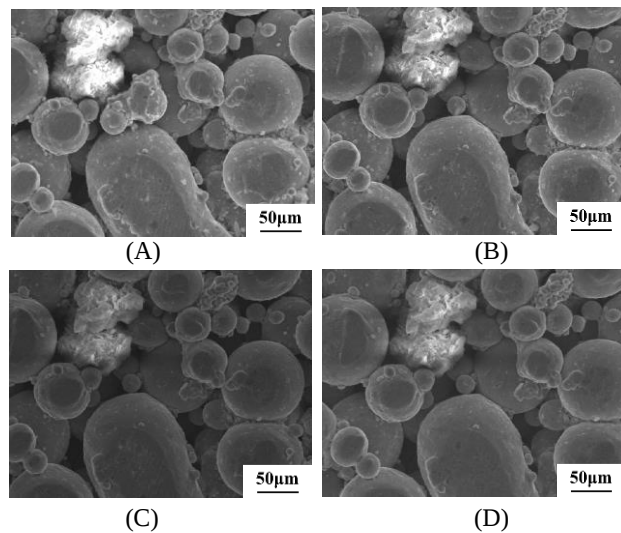
Fig.2 Stress-strain diagram for each condition.

Table3 Compressive stress and elastic modulus under each condition.

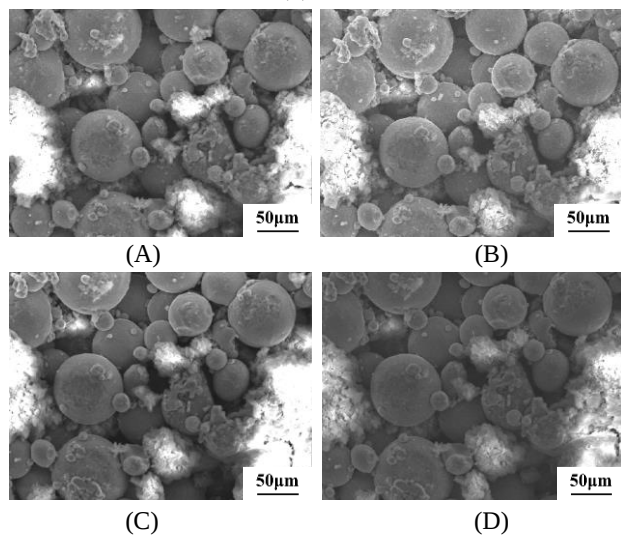
	Compressive strength	Elastic Modulus
No.1	60MPa	45GPa
No.1'	35MPa	20GPa
No.2	45MPa	34GPa
No.2'	—	18GPa



(1) No.1

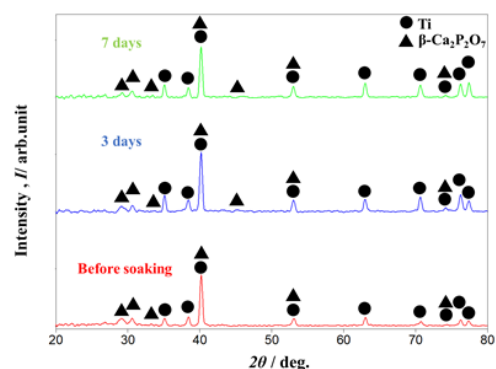


(2) No.3

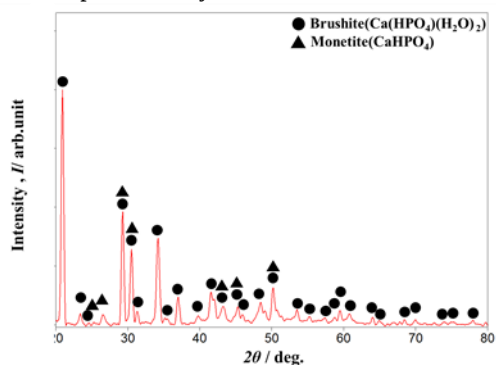


(3) No.4

Fig.3 Surface observation by SEM before and after soak in pseudo-body fluid under each condition.
(A) Before immersion in pseudo-body fluid.(B) Soak in pseudo-body fluid for 7 days.(C) Soak in pseudo-body fluid for 14 days.(D) Soak in pseudo-body fluid for 21 days.

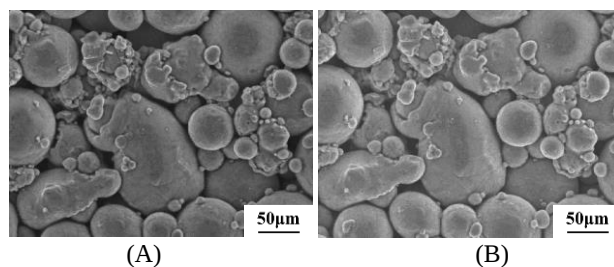


(1) XRD measurement results before and after soak in pseudo-body fluid for each condition.

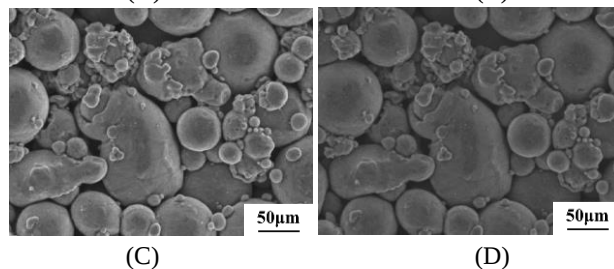


(2) XRD measurement results of calcium phosphate powder

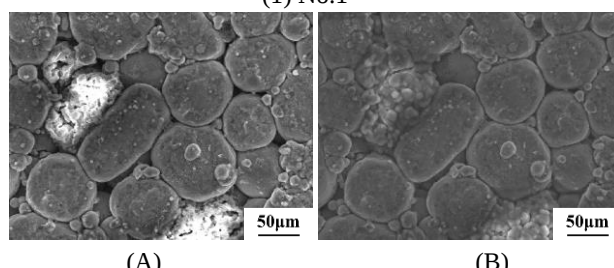
Fig.4 Component analysis results by XRD.



(1) No.1'



(2) No.2'



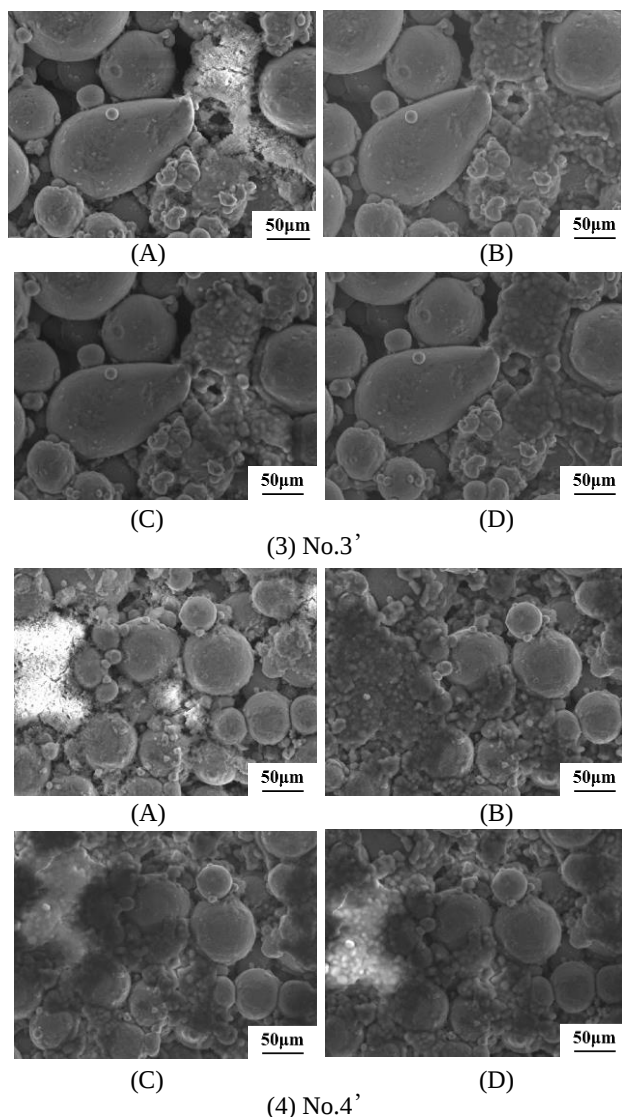
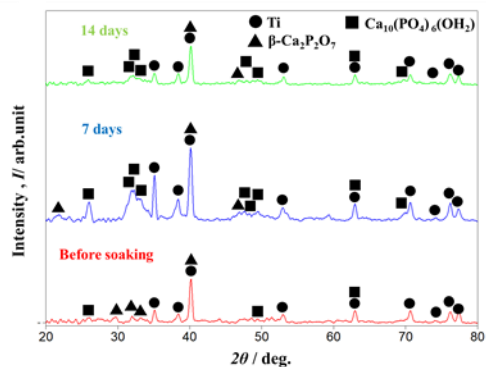
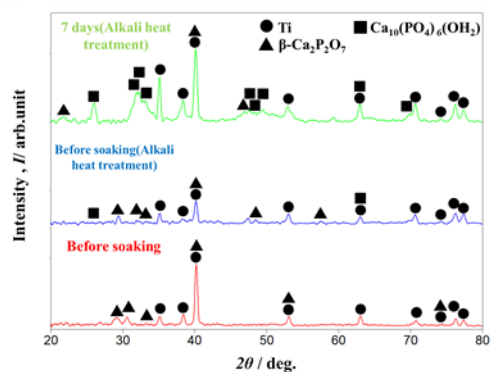


Fig.5 Surface observation by SEM of each sample with alkaline heat treatment before and after soak in pseudo-body fluid.

(A) Before immersion in pseudo-body fluid.(B) Soak in pseudo-body fluid for 3 days.(C) Soak in pseudo-body fluid for 7 days.(D) Soak in pseudo-body fluid for 14 days.



(1) XRD measurement results of each sample with alkaline heat treatment before and after soak in pseudo-body.



(2) XRD measurement results with and without alkaline heat treatment.

Fig.6 Component analysis results by XRD.

機械工学科におけるメカトロニクス一貫教育の構築

中野 壽彦¹・山本 通¹・軽部 周¹

¹機械工学科

産業界では従来の技術に高度IT技術を融合させて新たな価値を創出する「デジタルライゼーション」が必要とされており、経済政策や情報教育強化の取り組みが促進されている。そこで本プロジェクトでは、「産業のデジタルライゼーション」対応型人材育成のためのメカトロニクス一貫教育の構築を目標とし、現在の一部のメカトロニクス関連科目に、デジタルツイン環境の導入、情報・実験スキル向上に向けた教材開発、電気系スキル向上のカリキュラム構築、高度機械システム制御実験の計画と実施を行った。本稿では、本プロジェクトで構築を目指す一貫教育カリキュラムの目的と内容について説明し、構築した教育環境や教育実践について述べる。

キーワード：メカトロニクス教育、シーケンス制御、CAM、デジタルツイン、SLAM

1. 緒言

本校機械工学科では、2001年に、工場自動化やロボットなどメカトロニクス技術に精通し、機械工学と電子工学という異なった分野についてバランスの良い知識を持った技術者を養成するために、大々的な実習環境を導入しメカトロニクス実習を開始した。ラック&ピニオン、平カム、偏心クランク、レバースライダなどの機械モジュール、モーターおよびそれを制御するためのPLCとプログラム作成用ソフトウェア、オルゴールの生産ラインを模擬したミニメカトロ実習装置を導入し、機構・アクチュエータ・センサの基礎的な知識の取得、およびPLCによるシーケンス制御の理解を目的とした実習が計画され実践された¹⁾。以降、学生の創造性を育てることを目的として、試行錯誤で実習内容を変更しながらも、2年生機械実習Ⅱ、3年生工学実験Ⅰにおいて、これら実習装置は今も現役でメカトロニクス教育に活用されている。

一方、ここ数年の社会動向に着目すると、内閣府が定める「Society 5.0」、あるいは経済産業省が策定している「デジタルトランスフォーメーション推進ガイドライン」で述べられている通り、今後の産業界はデジタル技術との融合による新たな価値の創出が必要とされている。今後は高度IT技術の活用による「産業のデジタルライゼーション」が急速に進むことが予想される^{2,3)}。また文部科学省は情報教育の推進のため学習指導要領を改訂した。本校においても、「数理・データサイエンス・AI教育プログラム」が実施されており、令和4年度の入学生から低学年における情報教育強化のためのカリキュラムとして「情報Ⅰ」「情報Ⅱ」の科目が開始された。このような背景から、高等専門学校に

おける機械系技術者教育においても、情報技術を理解し、かつ既存技術と融合して応用できる素養を備えた技術者の育成が必要である。前述の通り、これまでの本校機械工学科の教育では、機械工学と電気・電子工学を融合したメカトロニクス教育を実践してきた。一方で、メカトロニクス技術の本質である、機械・電気・情報の融合による技術を実践する教育機会は、他科目との兼ね合いから時間数に制限がある。特に前述した情報技術応用力を持つ人材育成のためには、情報技術を扱う実践教育を強化する必要がある。

そこで、本校機械工学科のメカトロニクス教育について、「産業のデジタルライゼーション」対応型人材育成のための一貫教育カリキュラムの新規構築を目指し、令和3年度から実験実習環境の導入、実施計画を行い、一部科目は令和4年度前期から実践を開始した。本稿では、各科目・実験自習のカリキュラム構築の状況について報告する。第2章では一貫教育カリキュラム全体について説明し、第3章以降は各科目・実験自習での実践内容の詳細を述べる。

2. メカトロニクス一貫教育

本プロジェクトで構築を目指す「産業のデジタルライゼーション」対応型人材育成のための一貫教育カリキュラムのイメージを図-1に示す。令和4年度から開始した情報教育との連携も意識しながら、低学年から段階的に基礎を積み上げ、高度なメカトロニクス技術の知識と理解を深める一貫教育を目指している。

この一貫教育を構築するにあたり、既存の講義・実験・



図-1 提唱するメカトロニクス教育

実習科目を見直したうえで、具体的には以下の教育実践を新たに導入することとした。

- ① 仮想空間上に機構・アクチュエータを再現できるデジタルツイン教育環境を活用した応用力育成
- ② 機械システム制御を題材とするフィジカルコンピューティング実践教育によるプログラミング応用実践力の育成
- ③ 座学による電気電子工学の学び直し機会の充実による専門基礎力の強化
- ④ 高度デジタル技術の融合による機械システムの知能化・自動化の体験学習

科目間連携の全体イメージを図-2に示す。1～4年生までメカトロニクス基礎教育と情報技術基礎教育を段階的に進めていき、5年生では総まとめとして、座学と実験を同時並行で実施して総合的に理解を深めることを目指す。図中の太四角枠で示す実験実習・講義科目に対して、前述①～④の教育実践の導入を目指す。

3. 電気回路によるリレーシーケンス制御実習

2年生の機械実習Ⅱでは、「メカトロ基礎」というテーマを通年で実施しており、シーケンス制御による機械制御技術を理解することを目的とした実習を行っている。2001年に導入した小型機械モジュールとPLCを用いて、制御プログラムをPCで作成し、エスカレーター、天井クレーン、ベルトコンベヤーと空気圧シリンダを用いた部品輸送・ピックアップ作業などを題材としたシーケンス制御実践を行っている。実体配線と電磁リレーを用いた電気回路ベースでのシーケンス制御を学習する機会を提供できていない。本校機械工学科のカリキュラムでは、電気回路を自分の手で扱う実習機会が少ない。そこで電気回路技術に触れる機

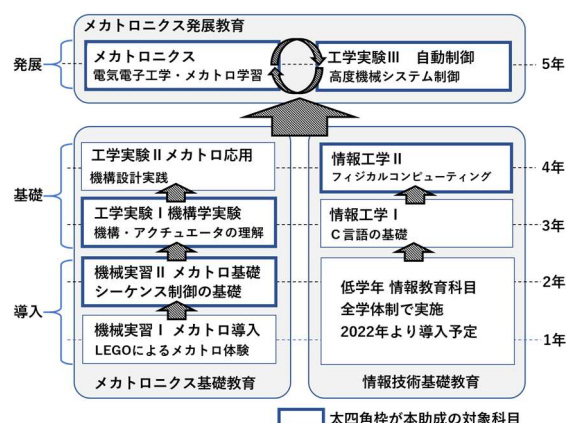


図-2 科目間連携のイメージ

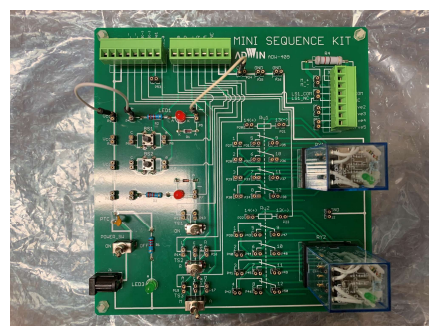


図-3 シーケンス実習キット

会を提供するため、新規に図-3に示す、(株)アドウィン製の実習教材を導入した。メーカーのHPで紹介されている導入実績を見ると、既に全国で何校かの高専でも本時実習キットを利用しているようである。本キットは卓上サイズの実習キットで、学生毎にキットを使用して実習を行うことが可能である。LEDのON回路から始まり、AND・OR回路、電磁リレーを用いた自己保持回路、小型DCモーターの駆動・自動停止・回転方向切り替え、インターロック回路といったシーケンス制御の基礎を、配線作業を行いながら体験することができる。これらを段階的に効率よく学ぶための実習テキストも準備されている。

機械実習Ⅱでは、令和4年度前期に本キットを用いて実習を行った。まずシーケンス制御とは何かを簡単に紹介したのち、一週目と二週目で本キットによる実習を行い、三週目でPLCによる制御を体験するというように構成した。従来の実習はPLCでのシーケンス制御のみであった。しかし本来、PLCにおけるリレー制御のプログラムの概念を理解するためには、まず電磁リレーによるリレーシーケンス制御を知っておく必要がある。そこでまず電気回路ベースのシーケンス制御を体験してから、PLC制御へのステップアップにつなげるようにした。

当初、電気回路配線は特に機械工学科の学生には敷居が高いのではないかという懸念があったが、実際に始めてみ

ると、やや苦戦する学生も一部見られたが、全体的には実習時間内に十分余裕をもって、指定の課題を終えることができた。次年度以降も継続できる実習内容を構築できたと考えている。

4. 情報スキルと実験スキルを向上させる新たな授業と教材の検討

産業界では、従来の技術に、高度IT技術を融合させて新たな価値を創出するデジタル化が必要とされており、高専でも更なる情報教育強化の取組みが必要となってきた。ここで、現在、本校・機械工学科の各学年で実施されている主な情報教育に関する内容を表-1に示す。表を一見すると、普通高校等と比べ、実験実習的な要素が多く、情報教育が充実されているように見えるかもしれない。しかし、実際には、本校の他学科に比べて情報関係の授業が苦手という学生の割合が多いのが現状である。例えば、筆者は、表内の情報工学ⅠとⅡを担当し、主にC言語でプログラミングを教えているが、プログラミングが苦手な授業の内容が全く分からないと言う学生も受講しており、そのような学生に、プログラミングの重要性の理解や授業に対するモチベーションアップをさせるのに苦労している。また、情報工学ⅠとⅡの授業で、現在使用しているCコンパイラでは、コマンドプロンプトに、コマンドを打ち込む作業が多く、実践的な授業を提供するという面では、物足りない部分があると感じていた。

(1) 自作CAMによるプログラミング教育

表-1 大分高専・機械工学科の情報教育(抜粋)

学年	内容	授業名
1	レゴを使ったプログラミング	機械実習Ⅰ
2	IoTゲームの製作競技会	機械実習Ⅱ
2	Microsoft Officeリテラシー	機械実習Ⅱ
2	3DCADリテラシー	機械実習Ⅱ
2	搬送ロボット組立・プログラミング	機械実習Ⅱ
3	C言語の基礎	情報工学Ⅰ
3	CAE	PBL
4	C言語の応用	情報工学Ⅱ



図-4 濃淡情報から深さ情報への変換例

NC 工作機械は、現代のものづくりにおいて欠かせないツールの1つであり、機械系の学生が、その特徴や操作方法を修得しておくことは重要である。そこで、代表的なNC工作機械であるマシニングセンタのNCプログラムを自動で生成できるCAMを自作させ、それにより作成したNCプログラムで実加工まで行うことで、実践的なプログラミング教育が可能になるとともに、実験スキル向上にも効果があるのではと考えた。

(2) 自作CAMの詳細

学生に自作させるCAMは、任意画像を読み込み、その濃淡情報を高さ情報に変換し、NCプログラムとして出力させる。その変換方法は、例えば、図-4に示すように、単純な方法で、その変換式は、以下の式(1)で表すことができる。

$$Z_t = (Z_H - Z_L)(S_t - N_c)/St + Z_L \quad (1)$$

ただし、 Z_H は画像部加工パスのZ座標最高設定値、 Z_L はZ座標最低設定値、 St はグレースケールの分解能、 N_c は各ピクセルから得た色情報である。

なお、無料で開発環境を容易に構築できることや、画像から濃淡情報等を容易に得られることから、開発用プログラミング言語は、Pythonを使用した。実際のコードの一部を図-5に示す。また、そのプログラムに、図-6(a)の画像を読み込ませ、出力されたNCプログラムの軌跡を図-6(b)に示す。残念ながら、図-5のようなコードを見せると、本校・機械工学科学生の多くは理解に苦しむ可能性が高い。しか

```

1 import cv2
2
3 def header(input_file): # NCプログラムのヘッダー部分
4     file.write('%n')
5     file.write('00031n')
6     file.write('G0G54G1F1000n')
7     file.write('G0G43Z200.0H32n')
8     file.write('G0X0Y0n')
9     file.write('G8P1n')
10    file.write('S7000M3n')
11
12 def footer(input_file): # NCプログラムのフッター部分
13    file.write('G0Z200.0M5n')
14    file.write('M30n')
15    file.close()
16
17 #最大Z高さ, 最小Z高さ, 1ピクセル間距離, アプローチ高さ
18 Zmax,Zmin,Pik,Ap_Z=0,-1,1.0,60.0
19 img=cv2.imread('onsen_100_140.bmp') # 画像の読み込み
20 gry=cv2.cvtColor(img,cv2.COLOR_RGB2GRAY) # グレースケールに変換
21 height1,width1= gry.shape # 画像の高さと幅を変数にセット
22 file=open('output.NC','w') # 書き込みファイルを設定
23 header(file) # NCプログラムのヘッダー部分をファイルに書き込み
24 for i in range(width1): # X方向のループ
25     C1=['X',str(round(i*Pik,3)),',Y0',',n']
26     file.writelines(C1)
27     C2=['G0Z',str(Ap_Z),',n']
28     file.writelines(C2)
29     file.write('G1')
30     for j in reversed(range(0,height1)): # Y方向のループ
31         color1=(gry[j,i]) #各ピクセルの濃淡情報を変数にセット
32         Z1=(Zmax-Zmin)*(255-color1)/255+Zmin
33         j1=height1-1-j
34         C3=['Y',str(round(j1*Pik,3)),',Z',str(round(Z1,3)),',n']
35         file.writelines(C3)
36     file.writelines(C2)
37
38 footer(file) # NCプログラムのフッター部分をファイルに書き込み
39

```

図-5 学生に配布するプログラム

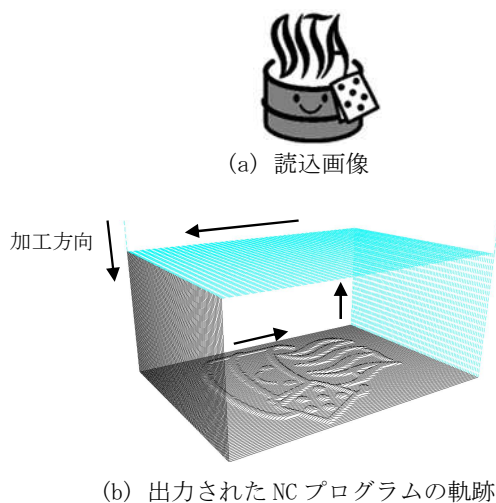


図-6 NCプログラム例

し、まずは、それぞれの学生にあらかじめ好きな画像を準備させ、このコードを配布し画像から容易にNCプログラムが作成できる経験をさせる。その後、各自が作成したNCプログラムを市販のシミュレーションソフトに取り込み、ボールエンドミルにより加工されていく過程を見せる。このような過程が、これまでの教育方法よりプログラミングに関する学生の興味を惹き、学習意欲の向上につながるのではないかと期待する。

(3) 加工機

現在、本校には、図-7に示すようなマシニングセンタが2台設置されているが、この2台だけでは、加工できる数に限りがある。そこで、図-8に示すような数万円で購入できるデスクトップCNCルータを手始めに1台購入し、問題ないようであれば、複数台購入し、なるべく多くの時間、学生に実加工させる機会を与えたいと考えた。しかし、実際に使用してみると、購入したデスクトップCNCルータでは、金属の加工は剛性的に難しく、値段相応の品質のようで、導入後、10回程度加工しただけで修理が必要になった。したがって、複数台導入するとなると、維持管理が難しいことが容易に想像できたため、デスクトップCNCルータを複数台導入することは断念した。そのため、本校に設置されているマシニングセンタ2台のみを使用することを想定し、どのように教材を導入するか検討を行った。ここで、本校・機械の各学年の実験実習は、40人のクラスを10人ずつ4グループに分けて行っている。学生は、それぞれの担当教員の実験実習を3週間、時間数にすると合計9時間の実験実習を行い、ローテーションしながら受講している。今回、作成する教材も実験実習に導入することを想定し、1回の実験実習で10人が受講すると想定して準備を進めた。

(4) 実加工

前述したように、1度の実習で10人に対し教材を展開する計画のため、学生を2班に分け、実加工は5人の学生でマ



図-7 本校のマシニングセンタ



図-8 デスクトップCNCルータ

シニングセンタ1台を使用することになる。ここで、ただ単に、それぞれが作成したNCプログラムで実加工を行い考察するだけでも、それなりの教育効果はあるかもしれないが、以下の制約を設けて実加工をさせる。つまり、実加工時は、時間の制約もあることから、加工範囲をあらかじめ決めて、学生にNCプログラムを作成させる。例えば、横20mm×縦25mmの領域に、各班でデザインを決めさせる。学生は、各自が選んだ画像を、画像処理ソフト等を使用して、決められた縦横比に入る画像に調整しなければならない。また、加工時間も評価の対象とすることとして、必要に応じてCAMをアレンジし、NCプログラムを作成させる。次に、加工シミュレーションを行い、問題が起らなかったNCプログラムを使って、実加工を行う。また、実加工は準備から片付けまでを、例えば90分以内にするという条件もつけ、終了後は、加工品位、デザイン、加工時間(準備時間も含む)等の項目別に得点を与え、2つの班で競わせる。このような方法であれば、実践的に情報科目や専門科目を学べるうえ、協調性やリーダーシップ等の分野横断的能力も育成できるのではないかと考えた。なお、最終的には実験実習のローテーションが全て終了した時点で、全班の結果を評価する機会を設ければ、学生も全ての班の状況が確認でき、授業の振り返りやモチベーションアップにもつながるのではと考えている。

(5) 予想される課題と今後の予定

以上のように、教材開発のおおよその目途はついたが、実際に実施するとなると、様々な課題が発生することが予想される。例えば、限られた時間内に、どれだけのチーム

が加工サンプル作成まで至ることができるのか、加工機を安全に使用できるか等の不安がある。また、マシニングセンタの違いによる加工時間差が、どの程度あるのかも事前に確認し、もし大きく異なるようだと、何かしらの工夫が必要になる。ただ、方向性としては、有益な手法であると考えているので、まずは有志学生に対し、試験的に授業を行い、課題の確認と、その解決方法を考え、実験実習で、本教材が行えるように準備を進めていきたい。

5. デジタルツイン環境を活用した教育

3年生は座学として「機構学」、また工学実験Ⅰのテーマの一つとして機構学実験を行っている。リンク機構、クラーク機構、カム、歯車などの機械要素について座学で学ぶとともに、小型機械モジュールを用いた実験を通して、体験的に理解を深める教育を行っている。今回、これら機械要素をバーチャル空間上で再現し、動作に加えて各部に作用するトルクなどもシミュレーションすることで、機構・アクチュエータを動力学の観点で理解を深められるのではないかと考え、数値計算ソフトウェアによるデジタルツイン環境を準備することにした。ソフトウェアとしてMathworks社のMATLABの教育用ライセンスを新規購入した。デジタルツイン環境の構築には、Toolboxの一つである「Simscape Multibody」を採用した。これは仮想空間上に3DCADと似たような感覚で様々な機械システムの物理モデルを構築して、動作をグラフィカルに表示することができるものである。座学の「機構学」および工学実験Ⅰへの活用については、本年度中に試行的に取り入れてみて、効果の検証を行う予定で準備を進めている。一方、5年生の工学実験Ⅲにおいて本ソフトウェアを用いたシミュレーションベースの実験を実施したので、簡単に紹介する。

工学実験Ⅲの自動制御のテーマでは、三週のうち一週分を、PID制御実験に充てている。機械工学科では4年生後期(令和5年度より5年生前期に変更)に「制御工学Ⅰ」として座学で講義を行っている。伝達関数、過渡応答、周波数応答、安定性など制御工学の基礎を扱っているが、時間の都合上、フィードバック制御の手法そのものを取り上げるまでには至っていない。一方で、産業界で広く利用されているPID制御を理解しておくことは、機械系エンジニアとして重要であると考えている。そこで工学実験の時間で、PID制御の座学+演習という形態で補完する形をとっている。これまで様々な実験装置やシミュレーション環境を用いてきたが、今回導入したデジタルツイン環境で新たにシミュレーションモデルを作成して実験を行った。図-9にシミュレーションモデルを示す。1自由度の垂直駆動アームを題材として、アームを任意の角度に駆動するためのモータトルクをPID制御則によって与えるものとした。PID制御ゲインを設定して実行すると、出力のグラフが生成される

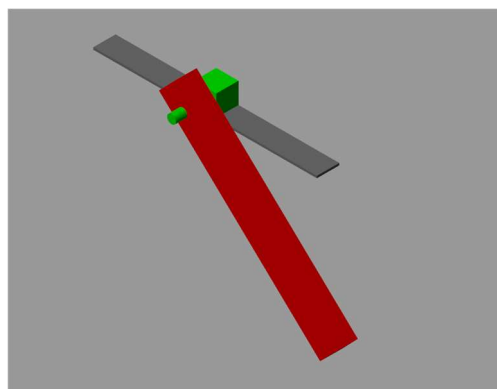


図-9 垂直駆動アームの仮想空間モデル

とともに仮想空間上のアームが動作する。各ゲインを変更したときの制御特性の変化が、グラフだけでなく物理モデルの実際の動作として再現されるため理解しやすくなっている。シミュレーションの実行プログラムは、ライブエディターという、ソースコードや入出力を対話型環境で統合したプログラムで作成した。これにより学生は、数回のマウスクリック操作のみでシミュレーション実験を進めることができるようにした。

視覚イメージを用いて動作を説明できるようになり、効率のよい実習ができるようになったと考えている。

6. メカトロニクス発展教育

図-2で示す通り、5年生では座学・実験を通じて発展的なメカトロニクス教育を行う。本章では講義、実験で構築した教育環境、および実施内容について説明する。

(1) 座学での電気工学学習機会の提供

機械工学科では従来から「メカトロニクスⅠ」という必修科目を5年生で実施して、センサやアクチュエータの基礎を学ぶこととしていた。一方、メカトロニクス技術の要素の一つである電気電子工学の学習機会は多く確保できていなかった。特に座学で電気工学を学ぶ機会は、物理系の科目以外ではなかった。学科内の議論で、電気系の学習機会が不足気味であることが課題として挙がっていた。そこで令和3年度から科目名を「メカトロニクス」に変更し、学修単位化した。そして自主学習時間を活用して、講義演習を主軸として電気電子工学の基礎力強化を図る講義を開始した。直流回路解析、交流回路解析、交流電力、さらに三相交流の基礎などを講義内容に盛り込んだ。

令和3年度および4年度と二年間実施したが、授業アンケートなどを見ると、半期科目で時間があまりない中で多くの内容を盛り込んだこともあり、学生にとってはやや負担が大きくなってしまったことが感じられた。また自主学習

を前提として課題の模範解答を与え学習環境を整えたが、「講義中に解説してほしい」という声も聞かれた。講義内容の取捨選択や、課題や定期試験のレベル設定など、今後とも試行錯誤が必要であると考えている。

(2) 高度機械制御技術の体験

5年生「工学実験Ⅲ」の自動制御のテーマでは、機構・アクチュエータ・センサ・プログラム技術を融合したメカトロニクス技術の学習機会として実験を行っている。従来は、マイコンと環境センサ（気温、湿度、気圧）によるIoT環境計測システム、カメラと赤外線センサによる監視システム、台車ロボット自動走行のデモ実験などを取り上げて実験を行ってきたが、情報処理技術との融合によるより高度な機械システム制御を体験できる実験として改変することにした。Raspberry Piを使用したマイクロマウスを教材とし、LiDARによるSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術を扱う実験を計画し、実施した。図-10に実験の様子を示す。複数毎のプラダンの仕切りを準備し、学生に自由に配置させてテストコースを作る。その後、マイクロマウス上でROSのサンプルプログラムを起動し、ゲームパッドからマウスをコース上で操作してもらう。LiDARで取得した情報はリモートPCに転送され、それを基に環境地図が生成される。実際に作成された地図を図-11に示す。

環境地図が逐次更新されていく様子を見せると学生からは感嘆の声が上がり、反応は悪くなかった。一方で、一週分2コマで実施しなければならない都合上、SLAMを実現するための具体的な理論や技術、ROSの扱い方などを説明する時間は確保が難しく、それらは概略の説明のみとして、デモ実験を試しに行ってみる、という程度の実験にとどまった。次年度に向けては、自動制御実験の内容を再構成し、実験機会を二週分確保するなどして、SLAMやROS自体の理解をより深められるような実験内容へ変更することなどを検討している。

7. 結言

本稿では「産業のデジタル化」対応型人材育成のための一貫教育カリキュラムの構築として、複数の講義科目・実験実習テーマに教材を導入、一部について実践した教育内容について報告した。現在機械工学科では、ここで紹介した取り組み以外でも、メカトロニクス教育の環境整備、改善を進めている。例えば4年生の工学実験Ⅱにおいて、教育用の卓上ロボットアームを新たに導入して、ハンド設計・制作・評価を題材としたPBL形式の実験を計画し準備している。今後も継続して教育改善に取り組み、社会ニーズに応える人材輩出を行う教育カリキュラム構築を目指したい。

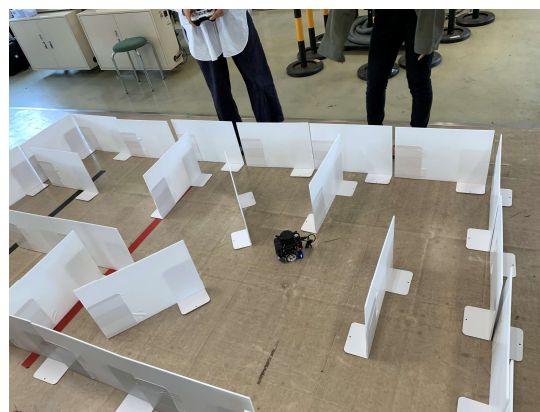


図-10 SLAM実験時の様子

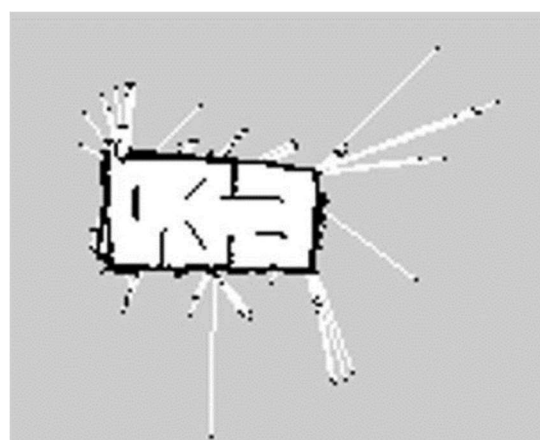


図-11 作成された環境地図

謝辞

本プロジェクトは、公益財団法人NSKメカトロニクス技術高度化財団の助成金交付（2019年度教育助成）により遂行されたものです。この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 高石伸一, 那賀修二, 小西忠司, 松本佳久, 菊川裕規 : 創造性を伸ばすためのメカトロニクス教育(技術教育(2)), 公開研究会・講演会技術と社会の関連を巡って : 技術史から経営戦略まで:講演論文集, 2001巻, (2001).
- 2) 林 和弘, 吉本 陽子, 佐藤 遼, 鈴木 羽留香, デジタル化とイノベーション政策, 研究 技術 計画, 34, 3, pp. 270-283, (2019).
- 3) 金井 啓一, 世界の製造業におけるデータ活用のベストプラクティス, システム／制御／情報, 62, 8, pp. 328-335, (2018).

(2022.9.30受付)

図書館運営委員

田中 美穂（図書館長）	薬師寺 輝敏（図書館長補佐）
山本 通（教務主事補）	川野 泰崇（学生主事補）
竹尾 恭平（寮務主事補・機械工学科）	常安 翔太（電気電子工学科）
重松 康祐（情報工学科）	山本 大介（都市・環境工学科）
広瀬 裕美子（一般科文系）	東木 雅彦（一般科理系）

令和 4 年 11 月 11 日 発行

発 行 〒870-0152 大分県大分市大字牧 1666 番地

独立行政法人 国立高等専門学校機構

大 分 工 業 高 等 専 門 学 校

National Institute of Technology, Oita College

TEL (097) 552-6084 (ダイヤルイン)

FAX (097) 552-6786

本誌に記載の論文は発行者の承諾なくして他に記載することを禁ずる
