

大分工業高等専門学校

紀 要

Memoirs of
National Institute of
Technology, Oita College

第 60 号

令和 5 年 11 月

NO. 60

November 2023

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 60 号
令和 5 年 1 1 月

[表紙](#)

[目次](#)

〔研究論文〕

[『大鏡』の学芸人 ―その描写方法― 〔三一②〕 藤原佐理](#)…………… 1

広瀬 裕美子

一般科文系

[自律を育む授業実践例](#)…………… 7

福村 浩亨

一般科理系

[子実トウモロコシ栽培において刈刈収量から全刈収穫量を簡易推定する方法の検討](#)…………… 11

森田 昌孝¹・重松 康祐²

¹一般科理系, ²情報工学科

[高専制度創設 60 周年記念キーホルダ製作](#)…………… 15

山本 通¹・小野 優翔¹・後藤 伶音¹・篠田 侑志¹・八丁 颯¹・丸山 哲生¹

¹機械工学科

[スキル修得とものづくりの楽しさを実感できるQRコード加工](#)…………… 19

篠田 侑志¹・後藤 伶音¹・佐藤 色波²・山本 通¹

¹機械工学科, ²株式会社椿本チエイン

[GRUS衛星画像を用いたトウモロコシの収穫日予測](#)…………… 23

重松 康祐¹・森田 昌孝²

¹情報工学科, ²一般科理系

弾性地盤上の矩形平板の面外自由振動のエネルギー解析

ー平板の周面が隔壁型単純支持された場合ー 25

名木野 晴暢¹・田川 達也²・稲田 真大³・清成 康平⁴・足立 忠晴⁵

¹都市・環境工学科, ²東京大学 工学部社会基盤学科, ³大阪大学 工学部地球総合工学科,

⁴株式会社 大林組, ⁵豊橋技術科学大学 機械工学系

材料判定の目安を満足しない土を農業用ため池堤体土として

活用するための地盤改良技術に関する文献調査および今後の展望 35

姫野 季之¹・佐野 博昭²・本田 欽也³・河野 正臣⁴

澄川 圭治⁵・河野 真也⁶・太田 宗一郎⁷

¹都市・環境工学科, ²防衛大学校, ³日鉄高炉セメント株式会社, ⁴株式会社九州建設マネジメントセンター

⁵日本製鉄株式会社, ⁶株式会社ソイルテック, ⁷タナベ環境工学株式会社

『大鏡』の学芸人 ―その描写方法― 「三―②」 藤原佐理

広瀬裕美子

一般科文系

『大鏡』における藤原行成は、強運の持ち主であり、和歌は不得意だが、発想が豊かで機知に富んだ人物として描かれている^{〔注1〕}。事実、行成は藤原道長の側近として、昼夜問わず日々煩瑣奮励している姿が、『権記』『御堂関白記』『小右記』等の古記録上で看取される。同時に行成は、内裏の額揮毫や数多くの書籍筆写等、その活躍は多岐に渡り、高名な能筆家でもあった。しかし、これについて、『大鏡』では「今の侍従大納言行成卿、世の手書きとののしりたまふは」(伊尹伝)とあるのみで、書に関して言及することはない。そこで、行成と同じく三蹟と称された藤原佐理は、『大鏡』においてどのように描写されているのか、以下検討してみたい。

キーワード… 中古文学、歴史物語、藤原佐理、藤原行成

一 藤原佐理

『公卿補任』によると、藤原佐理は摂政太政大臣藤原実頼の孫、藤原敦敏と藤原元名女との長男として誕生。天徳五(九六一)年正月七日に十八歳で従五位下となり、同年十月十三日侍従、康保三(九六六)年正月二十七日二十三歳で右少将、康保四(九六七)年正月二十日近江介、同年十月十七日従五位上、安和元(九六八)年十一月二十三日正五位下、安和二(九六九)年九月二日五位藏人、同十月十九日右中弁、天禄元(九七〇)年十一月二十日二十七歳で従四位下、天禄二(九七二)年十二月十五日左中弁、天禄三(九七三)年四月二十八日内蔵頭、天延三(九七五)年正月七日従四位上、同年十月五日紀伊守、内裏の額を書いたことによる功績を讃えて貞元二(九七七)年八月二日に正四位下となっている。

以上のように見てみると、確実に位階を高めており、順風満帆な人生のように見えるが、実情は違うようである。以降、天元二(九七九)年讃岐守、天元五(九八二)年伊予権守、天元六(九八三)年勘解由長官、永観二(九八四)年美作守、書殿門額賞により従三位となり、正暦二(九九一)年大宰

大貳、皇后宮権大夫、正暦四(九九三)年は正三位と昇進している。しかし、正暦五(九九四)年宇佐八幡の神人と乱闘騒ぎを起こし訴訟された後、この審議は越年し、長徳元(九九五)年十月十八日に大宰大貳を解任される。この時の佐理大貳解任については、『日本紀略』(正暦五年十月二十三日条)〈長徳元年十月十八日条〉、『本朝文粹』(六 奏上中申官爵)、『権記』(長徳元年九月二十八日条、同年十月十八日条)にも記されており、人々の関心事であったことが窺える。京に戻った佐理は、長徳三(九九七)年になり、やっと朝参が許されたが、翌年長徳四(九九八)年七月、五十五歳で薨じた。

天禄元(九七〇)年には摂政太政大臣であった祖父実頼が、永祚元(九八九)年には太政大臣であった叔父の頼忠が亡くなった。小野宮流の後ろ盾をなくした佐理は、以降、師輔の九条流が主流となっていく中、常に傍流に身を置くことになる。そして、晩年は宇佐八幡騒動により大宰大貳解職の憂目に遭い、後々朝参は認められたものの、その翌年に薨じるという、名門小野宮家に生まれ、世が世なら一の人ともなり得た佐理にとって、寂しい晩年であった。このことについて、春名好重氏^{〔注2〕}は、天禄元(九七〇)年祖父実

頼の没後は大きな後見を失ったためたちまち逆境になり、「佐理の前半生は、早く父を失ったことを別にすると、だいたい幸福であつたらしいが、後半生はだいたい不幸であつた」と指摘されている。

二 『大鏡』における藤原佐理

『大鏡』では、数多くの長短様々な逸話が収載されている。特に菅原道真左遷に関する逸話は『大鏡』の中でも纏述されており、作者の興味関心が窺える。『大鏡』(実頼伝)に注目すると、立伝されている藤原実頼や、小野宮流を代表し賢人右府と称された『小右記』の著者藤原実資を差し置いて、佐理の逸話が倍以上の長さで記されていることに気付く。このように作者の瞩目するところとなっている佐理の逸話について、『大鏡』では、どのように扱われているのか、以下確認してみたい。

①敦敏の少将の子なり、佐理の大式、世の手書きの上手。任果てて上られるに、伊予国の前なる泊にて、日いみじう荒れ、海の面悪しくて、風恐ろしく吹きなどするを、少し直りて出でむとしたまへば、また同じやうになりぬ。中略『いかなる事にか』と畏れたまひける夢に見えたまひけるやう、いみじう気高きさましたる男のおはして、『この、日の荒れて、日ごろここに経たまふは、己れがし侍る事なり。よろづの社に額の懸りたるに、己れが許にしも無きが悪しければ、懸けむと思ふに、なべての手して書かせむがわろく侍れば、汝に書かせ奉らむと思ふにより、『この折ならではいつかは』とて、止め奉りたるなり』とのたまふに、『誰とか申す』と問ひ申したまへば、『この浦の三島に侍る翁なり』とのたまふに、夢のうちにも、いみじう畏まり申すとおぼすに、おどろきたまひて、また更にも言はず。さて、伊予へ渡りたまふに、多くの日荒れつる日ともなく、うらうらとなりて、そなたさまに追風吹きて、飛ぶがごとくまうで着きたまひぬ。湯度々浴み、いみじう潔斎して清まはりて、日の装束して、やがて神の御前にて書きたまふ。神官ども召し出だして、打たせなど、よく法のごとくして帰たまふに、露恐るる事なくて、末末の船に至るまで、平らかに上りたまひにき。中略また、おほよそ、これにぞ、いとど日本第一の御手の覚えは取りたまへりし。六波羅蜜寺

の額も、この大式のかきたまへるなり。されば、かの三嶋の社の額と、この寺のとは同じ御手に侍り。

〈実頼伝〉

佐理は、大宰大貳の任期終了後、舟で京に戻る際に暴風雨に遭い窮していたが、三島明神の託宣により、額を書いたところすぐに天候回復、無事に上京でき、日本一の能書家と評判になった。六波羅蜜寺の額も佐理筆であるとし、『大鏡』では佐理の能筆ぶりを強調している。

佐理筆の「伊予三島明神の額」は『古今著聞集』(巻第七)、『十訓抄』(第十)に、「六波羅蜜寺の額」については『六波羅蜜寺縁起』に記されているのであるが、それ以外にも佐理は実際に、

造宮行事権左中弁菅原輔正朝臣奏覧内裏殿舎門等額。左中弁佐理書之。天皇感其筆跡。給勅禄。其後令懸舎。『日本紀略』貞元二年七月八日条と、内裏殿舎・門等の額を書いており、佐理の筆跡に感動した円融天皇は禄を与え、佐理筆の額を殿舎に懸けておくよう命じている。また、

貞元二八二正四下(書殿門額賞)

『公卿補任』貞元三年条

八月九從三位(書殿門額賞)

『公卿補任』永観二年条

と、内裏の額揮毫により昇進している記録も残っている。

これに対して、拙稿^{〔注3〕}で検討した藤原行成も数多くの額を書いている。十一日、甲寅、旦参内、仰云、可書清涼殿 即先書東廂色紙形、

『権記』長保二年十月条

と、清涼殿東廂の色紙形を書き、『公卿補任』によると同日、書額の賞により、正四位下を授けられている。又、同じ『権記』に

三日、辛卯、今日初書額、先紫宸殿、次承門、

〔長保五年七月条〕

□日、己未、此夕自行事所史生忠茂来示、額明日可覧、^{〔可〕}候宿者、

仍令獻紫宸殿・承明門・仙華門等額、

〔長保五年十月条〕

とあり、内裏の額も行成筆であったことが伺える。しかし、『大鏡』では、能書家である藤原行成の姿は「世の手書きとのしりたまふは」(伊尹伝)とあるのみで、逸話には全く触れていない。

続いて、『大鏡』には佐理の逸話がもう一つ挙げられている。

②御心ばへぞ、懈怠者、少しは如泥人ともきこえつべくおはせし。故中関

年次	西暦	年齢	佐理の内裏参入・隨身記録	主な官職
永祚二 (正暦元)	九九〇	四七	八月二十五日 定子供奉(道隆指示) 十月五日 定子立后の儀 十月二十五日 皇太后宮詮子遷御 十二月二十六日 済時娘の裳着儀式	從三位 兵部卿 大宰大式

『大鏡』で「懈怠者」「如泥人」と明記されている佐理ではあったが、このように古記録上での出仕状況を見ると、勤務実直という新たな姿が浮上してくる。

『親信卿記』によると、天禄三(九七二)年十一月二十五日では、藤原兼通と兼家の兄弟昇進騒動について、佐理が頼忠の使者として間に入り対応に苦慮している様子が分かる。続いて、その二日後の十一月二十七日には、頼忠から、兼通の内大臣昇進について「昌泰三年の内大臣召の宣命の案文」を提出するように指示されている。昌泰三年は藤原高藤が中納言から内大臣に昇進しており、前例となるこの事例を提示するために頼忠が依頼したのである。ところが、頼忠の佐理への信頼感が看取される。それ以降も、『小右記』によると、天元五(九八二)年正月十八日では、天皇の御召しに左右大臣が不参の中、佐理は出仕しており、寛和元(九八五)年十一月二十一日では、花山天皇行幸の際に参内したのは藤原義懐と佐理の参議二人のみだったとの記録も残っている。また、中島壤治氏^{〔注〕}は、『本朝世紀』(寛和二年)を見ると佐理の精勤ぶりがわかると指摘されている。

かくいう佐理も、『小右記』によると、

今日中宮御読経始、(中略)大夫参入、他公卿称障不集、藤宰相事了参入
(天元五年六月十三日条)

と、「中宮(遵子)の御読経始に際して、中宮大夫(藤原済時)以外の公卿は障りを称して来なかった中、佐理は行事が終わって参入した」という記録や、令奏云、依小忌人先可参上、勘解由長官不参、

と、「節会に佐理が参上していないとの奏上があった」など、遅刻や欠席をしている記述もある。ただ、『小右記』(天元五年六月十三日条)を見ても分かるように当時、会議に欠席する公卿は数多く、『親信卿記』では、

右大臣於左仗令奏云、去月廿日大原野祭、弁・史・外記・氏諸大夫已以不参、雖無仰事、氏上卿必所知也、仍令進散状、(天禄三年十二月九日条)と、大原野祭での欠席者が多かったことに対して、欠席理由を確認して上申するようにとの記載もある。

以上を踏まえて、古記録上での佐理の勤務状況を見るにつけても、『大鏡』で佐理が殊更に「懈怠者」「如泥人」と明記されている点について、やや違和感を覚える。確かに、他の逸話を見ると佐理の自由人な様子は否めないが、時代が九条流になっても腐心なく実直に出仕している一面もある。この点について、『大鏡』では一切触れることはない。

『大鏡』における佐理の逸話について、勝倉壽一氏^{〔注〕}は、前半…大山祇神(三島明神)と佐理。芸術的才能を発揮した名人芸説話。

後半…宫廷社会と佐理。政治的無能力を露呈した失敗談。

に、画面と分けられ、両者は量的にも近似し、かつ明確な対照性をなしているのである。それではなぜ、『大鏡』の作者は佐理像の矛盾、作品の分裂・破綻とも評すべき説話構成を行ったのであろうか。と、指摘されている。(この御指摘については、次項で触れる。)

三 三蹟と仰がれた二人『大鏡』における藤原行成との比較

小野道風・藤原佐理・藤原行成と言えば、平安時代を代表する能書家であり、三蹟と仰がれた。この三人については、

「むかしの手書には道風。佐理。行成。此三人を能書と宣り」『才葉抄』

「三賢トハ道風、行成、佐理ノ筆法是也」『筆法才葉集』

「佐理行成は道風が躰をうつしきたる。野跡。佐跡。権跡。此三賢を末代の今にいたるまで此道の規模としてこのむ事」『入木抄』

とある。また、『兼載雑談』では

「家の手跡といはんは。今は世尊寺殿。清水谷殿となり。彼両人行成卿の子孫なり。三跡の二はたえて。権跡ばかり今はのこりたるなり」と記されており、室町時代には行成の筆跡しか伝わっていないことが窺える。

そこで、佐理と行成の子孫に注目すると、『大鏡』では、佐理女について、「その大式の御むすめ、いとこの懐平の右衛門督の北の方にておはせし経任の君の母よ、大式に劣らず、女手書きにておはすめり」(実頼伝)とある。事実、佐理女は書家として高名だったようで、『栄花物語』にも、

宮の御贈物に何わざをしてまゐらせんと思しけるに、何ごともめづらしげなき世の御有様となりためれば、なかなかなりとて、村上の御時の日記を、大きな冊子四つに絵にかかせたまひて、ことばは佐理の兵部卿の女の君と、延幹君とに書かせたまひて、うるはしき宮一双に入れさせたまひて、さべき御手本など具して奉りたまひければ、宮はよろづの物に勝りてうれしく思しめされけり。

〈巻第十一「つばみ花」〉と、中宮妍子に佐理女と延幹が書いた村上天皇の日記を贈ったことが記されている。

また、同『栄花物語』に長元六（一〇三三）年倫子七十歳の賀での屏風歌を佐理女が書いたという話もある。

まことや、御賀の歌は、輔親、赤染、出羽、経任の頭弁の母にてもものしたまふ佐理の大式的女ぞ書きたまひける。

〈巻第三十二「調合」〉
対して行成女も、『更級日記』で

また聞けば、侍従の大納言の御むすめ亡くなりたまひぬなり。殿の中将のおぼし嘆くなるさま、わがものの悲しきをりなれば、いみじくあはれなりと聞く。上り着きたりし時、「これ手本にせよ」とて、この姫君の御手をとらせたりしを、「さよふけてねざめざりせば」など書きて、「鳥辺山たにに煙のもえ立たばはかなく見えしわれと知らなむ」と、いひ知らずをかしげに、めでたく書きたまへるを見て、いと涙を添へまざる。

とあり、孝標女が行成女の書を手本にしたという逸話が残されている。

行成一族は、行成亡き後、息子の行経以降、伊房、定実、定信…と代々書家として活躍し、後世、行成を祖とする世尊寺流という書の家として盤石な地位を確立することになる。『大鏡』での語りは万寿二（一〇二五）年現在とされており、行成の子孫について記されることがないのは当然であるが、『大鏡』の成立時代は下るため、作者は『大鏡』執筆時、行成の子孫の能筆ぶりを身近で見知っていたであろう。にも関わらず、『大鏡』ではそのような行成の逸話について触れることはない。

三蹟と称された行成と佐理であったが、『大鏡』では、行成を処世上の才覚が備わっているが、風流事は疎い人物としている。逆に佐理は、能筆の才能を重視し、処世上の才覚は劣っている様子が描かれており、『大鏡』における行成と佐理は、両極端な立場を取っている。確かに、行成については、自身の日記『権記』に昼夜を問わず献身的に道長に伺候している姿が多々見受け

られ、藤原道長の栄華を語る『大鏡』としては、行成の処世上の才覚を重視する描写は致し方ないのかもしれない。ただ、額や色紙、書物に至るまで、膨大な書を依頼され執筆してきた行成の能書ぶりについて、一切その逸話には触れていないのは、処世上の才覚に秀でている人物なのか、学芸・学才・和歌・漢詩・音楽・絵書に秀でている人物なのかを徹底して描き分けるという『大鏡』作者の表現手法によるものと言えよう。

『大鏡』では、道長に至る藤原北家嫡流の人物に対して共通して「たましひ」ある描写をしており、逆に、各学芸に精通している人物は、傍流に属する一族が該当している。『大鏡』において、神の導きにより額を揮毫し徳を得た逸話の直後に、「懈怠者」「如泥人」と評された佐理について、やや手厳しい感がするのは、当時、自由で無頓着な逸話が流布していたことに加え、処世上の才覚を絶対的なものと捉え、各学芸はそれには及ばないものとして位置付けている『大鏡』作者の価値基準によるものである。

従って、前項で勝倉氏が指摘された『大鏡』における「佐理像の矛盾、作品の分裂・破綻とも評すべき説話構成」について、佐理を能筆家Ⅱ芸術的才能の持ち主と強調し、政治的能力の欠如を露呈させているのは、一見、相反した逸話の挙げ方ではあるが、ある意味、『大鏡』作者のセオリー通り、つまり、価値基準に照合し、描き分けたが故の表現構成となったのではないだろうか。

そして、これは、『大鏡』作者が、道長に至る藤原北家嫡流の人物だけではなく傍流の人物についても、政治的能力（処世上の才覚）と芸術的才能（学芸）の截然たる描出をしていることの証左となっているのである。

〔注〕

1. 拙稿『大鏡』の学芸人―その描写方法―〔三―①〕藤原行成
『大分工業高等専門学校紀要』第五十九号 二〇二二年十一月
2. 春名好重 『藤原佐理』(吉川弘文館 一九六一年二月五日)
3. 〔注1〕に同じ。
4. 橘健二 『大鏡』(小学館日本古典文学全集 補注。
5. 春名好重 〔注2〕に同じ。
- 中島壤治 『藤原佐理研究』(桜楓社 一九九一年七月十四日)
- 勝倉壽一 『大鏡の史的空間』第三章 第一節 実頼伝―藤原佐理説話に
ついて―(風間書房 二〇〇五年九月三〇日)
6. 中島壤治 〔注5〕に同じ。
7. 勝倉壽一 〔注5〕に同じ。

※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)
- ・『枕草子』『栄花物語』『更級日記』：『新編日本古典文学全集』(小学館)
- ・『公卿補任』『日本紀略』：『新訂増補 国史大系』(吉川弘文館)
- ・『権記』：『史料纂集』(続群書類従完成会)
- ・『親信卿記』〔平記〕『小右記』：『大日本古記録』(岩波書店)
- ・『才葉抄』『入木抄』『兼載雑談』：『群書類従』(続群書類従完成会)
- ・『筆法才葉集』：『日本書画苑 第1』(国書刊行会)

※「東京大学史料編纂所データベース」及び

「国際日本文化研究センター撰関期古記録データベース」を参照。

(二〇二三年十月三日受付)

自律を育む授業実践例

福村 浩亨

一般科理系

概 要

本研究は、学生が主体的に学習に取り組むことができるような授業実践を研究したものである。一斉授業（講義形式）では学生が主体的に学びに参加することは難しい。また ICT を活用したグループワーク・ディスカッション・プレゼンテーションなど授業実践は多々あるが、どれも継続していく授業ではない。また教師によって授業に差があってはならないが実際はあるのが現状である。そのような問題点を今回の実践で学生の学習に対する取り組み方や考え方などの変化を報告するものである。

キーワード：自律、主体性、授業実践、ICT

1 はじめに

大分工業高等専門学校（以下、本校）は、九州の大分県に位置する工業系の高等専門学校です。同校は技術教育に重点を置き、学生たちに実践的な技術スキルと専門知識を提供している。豊富な実習機会と産学連携プログラムを通じて、学生たちは産業界での実務経験を積むことができる。大分高专では、機械工学科（以下、M 科）・電気電子工学科（以下、E 科）・情報工学科（以下、S 科）・都市環境工学科（以下、C 科）の 4 学科を有し、幅広い工学分野において専門的な教育を提供している。また国立高等専門学校（以下、国立高专）は中学卒業後の早い段階から 5 年間の専門教育を行うことにより、より実践的な技術者の育成を目的としている。

技術者にとって必要な力は、「専門知識」、「実践的なスキル」、「コミュニケーション能力」、「問題解決能力」、「持続的な学習意欲」など挙げられる。上記の 2 つは授業を通じて育成可能な力ではあるが、「コミュニケーション能力」・「問題解決能力」・「持続的な学習意欲」は授業とさらに学生自身の“自律”も必要になってくるだろう。そこで、本研究では学生の“自律”を育む授業実践を行った。

2 日本の授業形態の課題

学校での授業は、ここ数年でグループ活動や ICT を活用した授業が展開されているが、継続はせず講義形式（一斉授業）が未だ根強くある。講義形式では、一人の教

師が多くの学生を同時に指導するため、一人ひとりの進度や理解度に合わせた教育が難しく「個別の学習ニーズへの対応不足」になる場合がある。また、学生は情報を受け取る側になりがちであり、自発的な学習や積極的な参加が十分に促されないことがあり「受動的な学習」になってしまうなどの問題点が挙げられる。学生は個々に異なる学習スタイルや興味・関心を持っている。講義形式では、これらの多様性に対応することは難しく、一律の教育内容やアプローチになりがちである。これらの課題点に対処し、“自律”を育む授業実践を行った。

3 授業実践例

3.1 対象

学年学科：2 年生 M 科（以下、2M）

在籍：43 名

科目：微分積分 I（通年科目）

時期：前期（4 月～8 月）

本校では前期と後期のセメスター制を採用している。また、一人 1 台パソコンを所持しており、学生は自由に校内の wifi を利用することができる。

3.2 授業形態（4 月～6 月）

週 2 コマの授業を 1 セットとし、1 回目の授業時に小テスト範囲の演習問題を配布し 2 回目の授業開始時に小テストを実施。その後、次の小テストの範囲を学生に伝達し、それ以外は何も指示しない。

3.3 試験結果とアンケート実施

本校は前期に2回、後期に2回全学科共通で学習内容の定着をはかるために到達度試験(以下、到達度)を実施している。以下、1回目の到達度と前期中間試験の平均結果である。

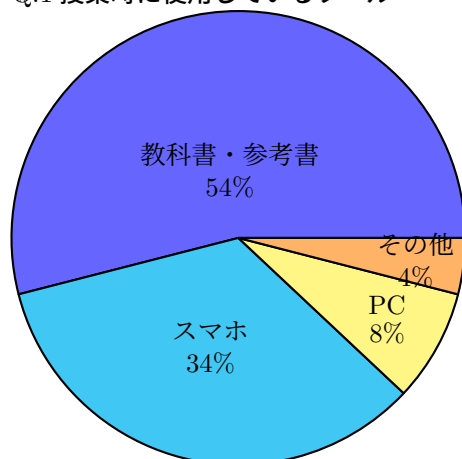
到達度試験	M科	E科	S科	C科
1回目	85.1	74.2	78.8	81.4

※昨年度(1年生)の到達度の状況は以下を参照。

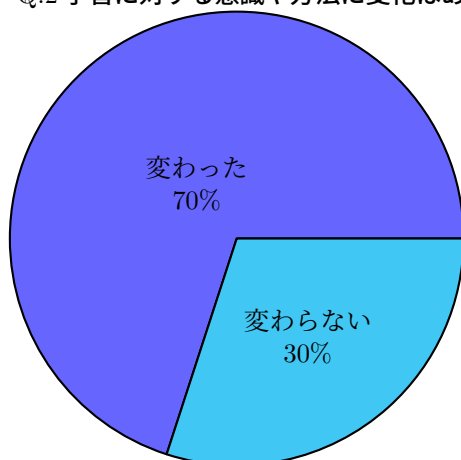
到達度試験	M科	E科	S科	C科
1回目	87.7	81.8	学級閉鎖	90.9
2回目	64.5	71.3	60.4	72.3
3回目	70.6	84.5	76.3	76.5
4回目	88.2	90.9	94.7	95.1

前期中間試験後に実施したアンケート内容と結果は以下のとおりである。

Q.1 授業時に使用しているツール



Q.2 学習に対する意識や方法に変化はありましたか。

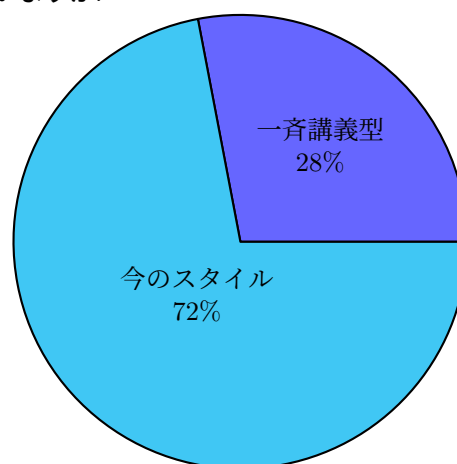


Q.3 Q.2の理由

- ・自主的にやるようになった
- ・分からないところを調べる習慣がついた

- ・質問を気軽にできるようになった
- ・自分からできるようになろうと意識をもつようになった
- ・自分で探す癖がついた
- ・やらされる勉強から、自分がしたいとやる勉強に変化した
- ・分からないをそのままにすることが少なくなった
- ・分かる、分からないが明らかになり、勉強しやすくなった
- ・自学意識が高まった
- ・学習意欲が高まった

Q.4 一斉講義型と今のスタイルどちらが自分に合っていますか。



Q.5 授業方法の要望

- ・このままでよい
- ・自分のペースで学習ができるのでこのままがいい
- ・解き方を教えるぐらいはしてほしい
- ・問題が難しくなったら授業がよい
- ・一人で学ぶにも限界があるから戻してほしい
- ・一斉授業の方が差がなくなる。難しいところは教えた方がいい
- ・授業をしてほしい
- ・今は自分で勉強するスタイルでもいいと思う
- ・早く終わったら他の足りないこともできるし、今が合っている。
- ・教科書が自分には難しく、授業を通して説明してほしい
- ・解説付きプリントが欲しい

3.4 分析と考察 I

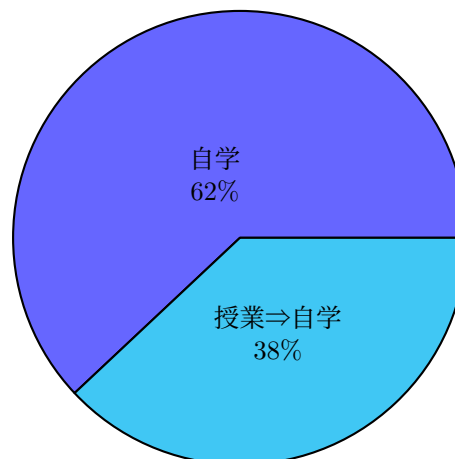
机間指導を行う中で感じたことは、与えられることだけでよかったことが自分で学習方法を考える必要がでたため、どうすればいいかわからない学生がいたことである。5割の学生が手持ちの教科書を使用し学習している。しかし、これまで与えられる学習から自ら考えて実践する学習によって学習に対する意識の変化を感じた学生は7割もいる。しかし3割の学生はこれまでどおり一斉授業を希望していた。脳科学的にも新しいことを始めるときに拒絶することは当たり前である。そのため全員が納得するような授業展開が必要である。

3.5 授業形態 (6 月～8 月)

上記のアンケート結果を受け、今後の授業形態をどのようにするか学生同士で合意形成をはかり以下のような授業形態をとった。

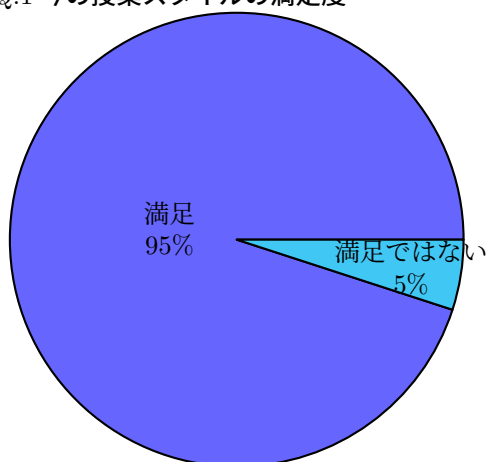
- ・授業を実施するが参加は自由
- ・単元ごとに小テストを実施 (4 月からの授業方法を継続)

到達度試験	M 科	E 科	S 科	C 科
2 回目	65	66.3	69.4	80.9



3.6 期末試験後の授業アンケートの結果 (2 回目)

Q.1 今の授業スタイルの満足度

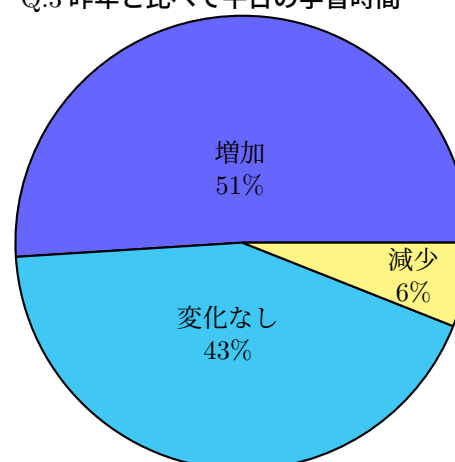


Q.1 の理由

- ・成績が高く維持できていると思うから
 - ・自身がいないところは授業を聞くことで、後の自習がやりやすくなるから
 - ・授業を受ける人、自学できる人で好きな勉強方法を選べるから
 - ・去年よりも成績が伸びたから
 - ・授業をしていただきたかったので満足です
 - ・自分のペースで勉強ができるようになったから
 - ・分からないところを先生や友達に自由に聞けて、自分のしたいことができるから
 - ・自分で考えて行動できるようになるから
 - ・自分に合った方法で学習できるから
 - ・自分の苦手なところを集中して学習することができるから
 - ・自律性が伸びていると感じているから
- △全員の授業スタイルに戻してほしい
△成績が落ち単位を落としそうだから

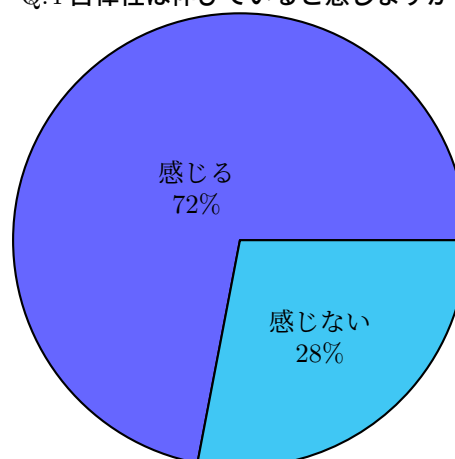
Q.2 今の自分の授業スタイル

Q.3 昨年と比べて平日の学習時間



- ※ 増加している平均時間は 15 分程度
- ※ 減少している平均時間は 10 分程度

Q.4 自律性は伸びていると感じますか



Q.4 の理由

- ・勉強を進んで出来る時が増えたと思う
- ・自分でしなければいけないことを判断して動いているから
- ・実際のところ点数が伸びているから
- ・何をしなければいけないのか考えてできるようになってい

と思う

- ・自分で色々行わなければテストの点が下がってしまうと感じたから

- ・明日のことを考えて自習できるようになった

- ・家に帰ってから復習をするようになったから

- ・進んで教科書を読んで難しい問題に挑戦しようとする癖がついた

△考えることはできたが、行動に移すことができなかった

△よくわからない

△考える前に内容が理解できないから

△自分から始めることができない

△変化がないから

3.7 分析と考察 II

6月以降の授業形態は授業と自学をテーマによって自分で“考えて選択”できるため9割を超えた満足の結果であった。6月までは一人ひとりが教科書やパソコンやスマートフォンを用いて学習に取り組んでいたが、時間が経つにつれ周りとは協同学習のスタイルに変わっていった。また、毎時間に小テストを実施するため学生は目標設定をしやすく安心して学習に取り組めることで、学習時間の増加に繋がったと思われる。毎回の小テストで自分の理解度も確認でき自主性も向上していく。その結果が自律性の向上を感じる学生が増えている結果である。

4 まとめ

本稿は“自律性”を育むための授業実践である。自律とは「自分で考え、判断し、行動する」と考える。自律や主体性を身につけさせることは大事とされながら、現在の授業方法の主流は教師が板書しそれを学生がノート等に写す。これでは自律性は伸びない。そのため授業実践の前に社会人に必要な力の話をし自律する力の育成の必要性の同意形成をはかった。最初は自分の学習スタイルを確立するために試行錯誤していた。がその試行錯誤こそが自律に繋がる。

従来からの受け身の授業の脱却し、自律心を育むことを目指した授業実践は半年の授業を通して学生の動機づけには成功したと思う。また授業を通して「自分で考えて判断し行動する」機会が増えることで自律性の向上が学生自身実感できている。今後も自律的学習者を育む授業を長いスパンで実践し模索していくことを今後の課題としたい。

参考文献

[1] 遠節夫ほか, 微分積分 I, 大日本図書

[2] 工藤勇一, 学校の「当たり前」をやめた。 , 時事通信社

(2023.9.11受付)

子実トウモロコシ栽培において 坪刈収量から全刈収穫量を簡易推定する方法の検討

森田 昌孝¹・重松 康祐²

¹一般科理系, ²情報工学科

トウモロコシは、近年の戦争や記録的な円安など海外から安価かつ安定的に輸入することが難しくなり、国産トウモロコシ生産が注目され、栽培面積が急拡大している。一方で、これまで栽培実績や収穫実績が少なかったため技術蓄積が進んでいなかった。

本研究では、坪刈収量からコンバイン全刈収量を予測する方法を検討した結果、坪刈により得られた雌穂重を用いてコンバイン全刈収量を推定する場合、雌穂重に 0.7×0.83 を乗じて10a収量に補正することにより簡易的に収量予測が可能である。

キーワード：子実トウモロコシ、坪刈収量、全刈収穫量、簡易推定方法

1. 緒言

我が国におけるトウモロコシの輸入量は、1500万トン程度¹⁾を毎年、輸入しており、主食用米生産量である670万tの2倍を超えている²⁾。その利用方法は、食用として直接食べる場合は少なく、家畜の飼料としての利用が65%、酒造原料や果糖ブドウ糖液、コーンスターチなどの加工原料、工業用利用での利用が35%³⁾であり、間接的に消費されている。主食米の2倍以上を利用していることから考えると我が国最大の消費農作物とも言える。

しかし、作付け面積から推定する国内自給率は、0.05%程度とわずかであり、7%の大豆⁴⁾や17%ある小麦⁴⁾と比較してもその自給率の低さがわかる。近年、主要輸出国での戦争や円安などの影響から穀物価格が高騰しており、食糧安全保障上からも国産子実トウモロコシ栽培（以下、子実トウモロコシ）が注目されおり、収穫機械の開発⁵⁾や汎用利用も重なり、大規模水田輪作地帯において国内生産が拡大している⁶⁾。

子実トウモロコシは、子実を収穫した以外の植物残差が大量の圃場に残ることから後作への土壌改良、連作障害回避、排水性改善効果などが注目されている^{7)・8)}。また、省力栽培が可能^{9)・10)}であり、単位面積当たりの穀物収量も多く、今後、担い手不足が深刻化する中、水田の利活用および農地の維持を目的とした栽培拡大も期待されている。

しかし、栽培拡大が進む中、安定生産技術の開発が求められているが¹¹⁾、都道府県における作付け実績が少なく、関連技術情報の蓄積が遅れている。特に生産現場において、

圃場での生育状況や子実の推定収量を簡易的に把握、推定する方法があれば、収穫機械や乾燥機の手配、運用などの効率的な収穫計画立案に貢献できる。特に収穫量を推定する場合、坪刈調査という圃場の代表的な地点から抽出調査を行い、全体を推定する方法が取られるが、調査後の前処理に時間がかかることや坪刈収量とコンバイン全刈収量との収量差が大きく、生産現場において課題を残していた。

そこで本調査では、坪刈収量調査からコンバイン収穫後の全刈収量を推定する方法を検討した。

2. 材料と方法

試験は、種類の異なるトウモロコシ（*Zea mays* L.）、2品種（食用品種；もちもち太郎パープル(以下、MP)、飼料用トウモロコシ；KD641(RM114) (以下、KD)) を供試した。試験地は、2022年は、大分県豊後大野市にある大分県農水研指導センター内の畑地（黒ボク土、標高167m）において実施した。

気象概況について、試験地の最寄りの気象庁気象観測地点である大分県豊後大野市犬飼のデータから降水量、気温を調査した。

坪刈収量は、試験地にて栽培したトウモロコシのうち、圃場内の3地点を設定し、各調査地点において中庸かつ連続した10株から得られた雌穂を調査対象として、収穫し、雌穂重(トウモロコシの可食部と芯(軸))、子実重(可食部の子実の重さ)、芯重(子実粒を軸から外した芯の重さ)を分解して測定した。脱穀は、手動コーンシェラーを用いて雌穂

1本ずつ行い、分解後の各重量は13.5%に補正して計算した。

全刈収量は、試験地において、栽培したトウモロコシをYH700M（ヤンマーアグリジャパン社製、70馬力）に専用コーンヘッダーを装着して収穫し、その後、汎用型穀物乾燥機にて乾燥させたものを13.5%収量として算出したものの比較した。併せて、水分と収量の早見表を作成した。

3. 結果

1)栽培概要

表1に栽培概要を示した。4月20日に真空播種機にて、播種し、株間21cm、条間75cmとした。表2に生育調査結果を示した。稈長、着雌穂高は、同等であったが、MPが高くなった。雄穂抽出日および絹糸抽出日は、KD641が2日程度、早くなったが概ね同等の日数であった。図1に気象観測地点における気温を示した。生育初期に平年値よりも低く推移したが、その後は、高く推移した。図2に気象観測地点における降水量の推移を示した。生育初期および後期は、降水量が少ない日が多かった。

表-1 栽培概要

品種	もちもち太郎 パープル	KD641
播種日	4月20日	4月20日
RM	-	114
株間 (cm)	21	21
条間 (cm)	75	75
基肥 (14-14-14) kg/10a (N)	5	5
追肥 (尿素) kg/10a (N)	5	5
土壌処理剤	アトラジン・S・メトラクロール	
茎葉処理剤	トルピラレート	
系統	ワキシー種	デント種

表-2 生育調査結果

品種	もちもち太郎 パープル	KD641
稈長(cm)	287.8	266.8
着雌穂高(cm)	155.5	131.5
稈径(cm)	24.1	27.8
雄穂抽出日	7月2日	6月30日
絹糸抽出日	7月3日	7月1日

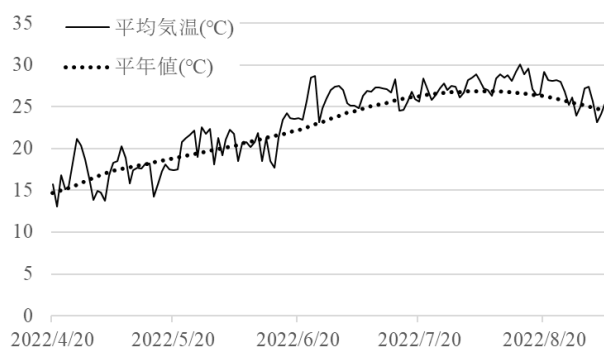


図-1 気象観測地点(犬飼)における気温の推移

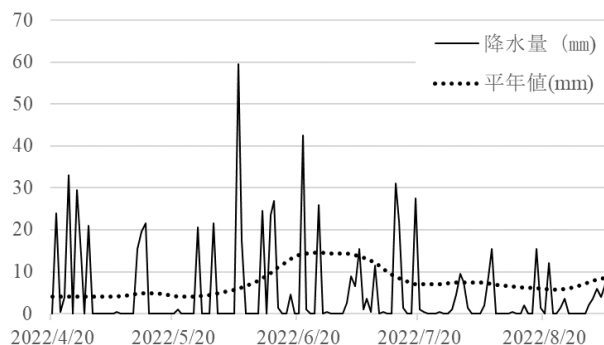


図-2 気象観測地点(犬飼)における降水量の推移

2)収量調査

収量調査の結果を表3に示した。10株あたりの雌穂本数は、1株に2本ある株あったため、両品種で10本よりも多くなった。雌穂重は、MPで、105.5g、KDで220gとなり約2倍の重量の違いがあった。雌穂から子実粒を外した子実重は、MPで85.5g、KDで189.3gとなった。子実重と雌穂重の比率を算出したところ、MPで0.81、KDで0.86となり、KDで雌穂当たりの子実重が多くなった。

表4に坪刈収量とコンバイン全刈収量および減少率（歩

留まり)を示した。各品種の減少率は、MPが0.81、KDで0.60であり、品種によって差が大きくなった。



図-3 コンバインによる全刈収量調査の様子

表-3 収量調査結果

	もちもち太郎 パープル	KD641
平均雌穂長 (cm)	15.9	17.7
雌穂本数 /10株	13.7	13.0
雌穂重/本 (g)	105.5	220.0
子実重/本 (g)	85.8	189.3
芯重/本 (g)	19.7	30.7
芯 /雌穂	0.19	0.14
子実 /雌穂	0.81	0.86

表-4 収量調査結果

	もちもち太郎 パープル	KD641
坪刈収量 kg/10a ^{※1}	544.5	1201.5
コンバイン 全刈収量 (kg/10a)	439	717
減少率	0.81	0.60

※1：子実重(本)×6346本/10aとして計算

4. 考察

子実トウモロコシは、世界情勢や国内事情により各県において栽培面積が拡大しており¹²⁾、公設試験場も含めて試験栽培が積極的に行われている¹³⁾。しかし、汎用型コンバインおよびコーンヘッダーによる大規模な作付けに伴い、坪刈収量と連動して実収量を簡易的に予測する方法が少なかった。

本試験では、圃場における子実重を求める坪刈調査とコンバイン全刈収量について、詳細な分解調査を行った2例を基に推定した結果、坪刈収量に0.7を乗じることにより、コンバイン全刈収量を推定することが可能であることが示唆された。

また、坪刈調査において、子実と芯を外すことなく、雌穂重から推定する場合は、分解前の雌穂重に0.83を乗じることによって、簡易的に全刈収量を推定することが可能である。

これらコンバイン全刈収量推定後にさらに正確な収量を予測するには、水分含量から収量を補正する必要がある。

表-5 乾燥前重量および水分含量が乾燥後重量(13.5%)との関係

乾燥前 重量	乾燥前水分含量			
	20%	25%	30%	35%
1000kg	920	870	810	750
900kg	830	780	730	680
800kg	740	690	650	600
700kg	650	610	570	530
600kg	550	520	490	450
500kg	460	430	400	380

そのため、刈取時水分含量測定後、穀物乾燥機にて乾燥し、13.5%になった収量を求めることが必要であり、表5に乾燥前重量および水分含量から乾燥後の収量を計算し、

把握する早見表を示した。乾燥前に800kgで水分30%であるものを13.5%まで乾燥した場合、水分が蒸発することによって650kgになることを示しており、生産現場において簡易的に予測することが可能である。

一方、坪刈収量地点の選定、品種やコンバイン収穫時の速度や脱穀調整、虫害や雑草、湿害の発生によってコンバイン全刈収量は、変化するため、今後は、圃場状況や刈取条件と連動した調査数を増やして精度を高める必要がある。

また、これまでの坪刈収量は、雌穂を収穫後、圃場外から持ち出し、分解調査を行う必要があり、結果が判明するまで時間と労力を要していた。今後は、更なる省力化のため、非破壊かつリモートでの収量予測方法について検討を進める。そのような収量予測方法として、高解像度の衛星画像を用いて収量を予測する方法が報告されている¹⁴⁾。また、近年進展が著しい機械学習技術も収量予測の精度を高めるための有用な手段となり得る。そこで、衛星から撮像された高解像度の画像データを入力として、機械学習モデルを構築することで、高精度かつ低労力な収量予測が可能となると考えている。

参考文献

- 1) 農林水産物輸出入情報・概況, 農林水産省, 2023年9月25日参照
<https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kokusai/attach/pdf/index-38.pdf/>
- 2) 米をめぐる状況について, 農林水産省, 2023年9月25日参照
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/komesangyou_ikenkoukan/attach/pdf/ikenkoukan-21.pdf
- 3) 穀物(とうもろこし)輸入を取り巻く環境について, 国土交通省港湾局, 平成24年7月5日交通政策審議会資料第49回港湾分科会参考資料4-3, 2023年9月25日参照,
<https://www.mlit.go.jp/common/000220291.pdf>
- 4) 知ってる? 日本の食料事情 2022, 農林水産省, 2023年9月25日参照
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/attach/pdf/panfu1-13.pdf
- 5) 篠遠善哉, 齋藤秀文, 大谷隆二: 国産汎用コンバインによる子実生産用トウモロコシの収穫技術の検討, 東北農業研究, 第68号, 61-62, 2015.
- 6) 篠遠善哉, 松波寿典, 大谷隆二, 冠秀昭, 丸山幸夫: 黒ボク土の水田転換畑におけるブラウ耕がトウモロコシの生育および子実収量に及ぼす影響, 日本作物学会紀事, 第86巻, 151-159, 2017.
- 7) 宮路 広武: 水田を活用した子実トウモロコシ生産の現状, 畜産技術, 2022年9月号, 7-11, 2022.
- 8) 富沢ゆい子: 北海道における子実用とうもろこしの栽培法と輪作体系への導入効果, 牧草と園芸, 第64巻第1号, 6-9, 2016.
- 9) 宮地広武, 篠遠善哉, 嶺野 英子: 国産子実用トウモロコシの生産に係る費用と定着に向けた課題, 農業経営研究, 第58号第3巻, 9-14, 2020.
- 10) 森田聡一郎: 東北地域におけるトウモロコシ子実(国産濃厚飼料)生産・利用拡大のための研究および技術開発, 日本草地学会誌, 第68巻第2号, 92, 2022.
- 11) 赤松佑紀: 飼料用トウモロコシの子実生産に関する研究の取り組み, 日本草地学会誌, 第67巻第2号, 100-103, 2021.
- 12) 飼料用トウモロコシ, 22年の国内作付けが最高, 日経新聞, 2023年4月29日参照
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUB276TB0X20C23A4000000/>
- 13) 新稲作研究会記念誌, 公益社団法人 農林水産・食品産業技術振興協会, 2023年9月25日参照,
<https://www.jataff.or.jp/project/inasaku/%E6%96%B0%E7%A8%B2%E7%A0%9450%E5%91%A8%E5%B9%B4%E8%A8%98%E5%BF%B5%E8%AA%8C.pdf>
- 14) Nahuel R. Peralta, Yared Assefa, Juan Du, Charles J. Barden and Ignacio A. Ciampitti: Mid-Season High-Resolution Satellite Imagery for Forecasting Site-Specific Corn Yield, Remote Sens, Vol. 8, Issue 10, 2016.

(2023.9.25受付)

高専制度創設60周年記念キーホルダー製作

山本 通¹・小野 優翔¹・後藤 伶音¹・篠田 侑志¹・八丁 颯¹・丸山 哲生¹

¹機械工学科

高等専門学校（以下、高専と言う）は昨年度、創設60周年を迎えた。この間、高専は優れた卒業生を輩出し、わが国の発展に大きく寄与してきたことから、社会的にも高い評価を得ている。一方、変化の激しい近年の社会情勢の中で活躍するには、基礎的能力や専門的能力以外に、構想力・問題解決力も重要になってくる。そのため、分野横断型PBL授業が注目され、本校・機械工学科でも7年ほど前からPBL科目を立ち上げ、実施している。例えば、本校・機械工学科5年次では、所属学生の研究室ごとに、主に指導教員がクライアントとなって様々な依頼をする。学生は、約4ヵ月をかけて、チームでその依頼に取組み、最終的な成果発表まで行うことで、問題解決力も含めた実践的な力の向上を図る。本年度、筆者らの所属する研究室では、高専や本校をPRできるような記念品製作を依頼し、3面潜像加工がほどこされた高専制度創設60周年記念キーホルダー製作を行うこととなった。本稿では、それらの一連の取組みについて紹介する。

キーワード： 高専創設60周年、マシニングセンタ、記念品、潜像加工、PBL科目

1. 緒言

高専は、産業界からの要請を受け、我が国の産業発展を支える中堅技術者育成を目的として、1962年に設立され、2022年度に創設60周年を迎えたり。その間、工業技術に関する実務教育を中心とした高い実践力を養成する教育機関としての役割を果たし、高専卒業生や高専教育は数多くの企業や大学等から高い評価を得ている²⁻⁴⁾。

一方、変化の激しいこれからの社会で活躍するためには、基礎的能力や専門的能力のほかに、汎用的技能や人間力などの分野横断的能力を備えておく必要がある⁵⁾。そのため、構想力・問題解決力を目指した分野横断型PBL(Problem Based LearningあるいはProject Based Learningの略称)科目が注目され、筆者が所属する機械工学科では、3年次にPBL、5年次にエンジニアリングデザインという必修科目を開講し、学生がこれまでに学修した知識や技術を活かしながら、問題解決やものづくりを行う能力の向上を図る機会を提供している。

筆者の所属する研究室でも、2017年度からエンジニアリングデザインという名称の授業の中で、筆者がクライアントとなって、オープンキャンパスで行っている鋳造イベントの改良⁶⁾、本校機械工学科の情報教育強化のための教材作成⁷⁾などを依頼し、研究室所属の5年生の問題解決力やスキル向上を図ってきた。

そのような中、本年度は、本校来場者等に高専や本校を

PRできるような記念品を製作し、企業等が開催しているコンテストに出品できるレベルに仕上げるように、担当学生に依頼した。その結果、3面潜像加工がほどこされた高専制度創設60周年記念キーホルダー製作を行うこととなった。本稿では、それらの一連の取組みについて紹介する。

2. キーホルダーの設計

(1) キーホルダー製作までの経緯

筆者らの研究室は、主にマシニングセンタの精度向上や利用方法に関する研究を行っている。研究室に配属されたばかりの5年生は、4年生までの実験実習で、汎用旋盤やフライス盤は自ら使用できるようになっている。しかし、マシニングセンタやNC旋盤は設置されている台数が少なく、実験実習の限られた時間ではNC等の操作指導に十分な時間がとれず、研究室に配属された直後は、NC工作機械を自由に扱える学生は、ロボット研究部所属の学生を除くと皆無である。そのため、例年、マシニングセンタを安全に学生が使用するために、約1ヵ月以上の時間をかけ操作指導を行っているのが現状である。

そこで、エンジニアリングデザインの授業で、マシニングセンタを使用させて何らかのものづくりをさせることで、卒業研究時に使用する可能性が高いマシニングセンタの実践的なスキルを修得させてきた。本年度も例年と同様の目的で、学生に依頼する課題を考え、本校来場者等に配



図-1 表面に使用するデザイン



図-2 裏面に使用するデザイン
(高専制度創設60周年記念ロゴ)

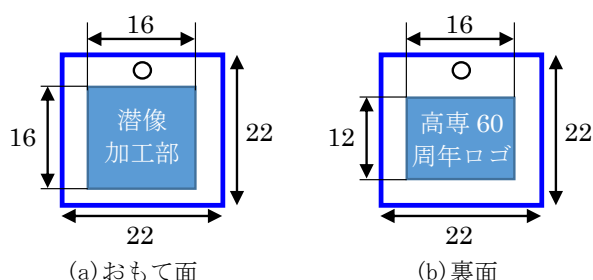


図-3 キーホルダーの概要

布できるキーホルダー製作を依頼するに至った。

(2) キーホルダーのデザイン

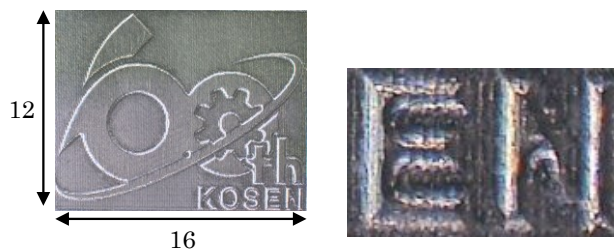
キーホルダーを製作するうえで、デザイン等を学生に最初から考えさせることも教育効果は高いと考えるが、そこから開始すると、スケジュール的に厳しいと考え、図-1と図-2に示すような案を学生に提案した。すなわち、おもて面では、大分高専校章、大分県地図とおんせん県おいたロゴ（以下、おんせん県ロゴと言う）を見る角度を変えることで見せるようにし、裏面では高専制度創設60周年記念ロゴ（以下、60周年ロゴ加工と言う）で高専60周年をPRするキーホルダーである。提案時、特に学生からの反対もなかったため、これらのデザインで進めることとした。

(3) キーホルダーの寸法

前述したように、今回製作するキーホルダーは、表面に3つのデザインを見せる潜像加工をほどこす。筆者らの知る限り、潜像加工を切削で行った事例は、本研究室以外では見られないため、キーホルダー製作の初期段階から、コンテスト出品を計画し、各種コンテストの調査を行った。その結果、締切期限等を考慮して微細加工工業会が主催するMICRO加工技術コンテストの1インチ部門にエントリーすることとした。ここで、上記コンテストの1インチ部門は、「最大1インチ（25.4mm）角内」に収まるサイズで作品を製作する条件があるため、キーホルダーのXY寸法は、図-3に示す寸法とした。また、厚さは、一般的に市販され

表-1 60周年ロゴの加工条件

Spindle speed	10000min ⁻¹
Feed rate	1000mm/min
Pick feed	0.1mm
Depth of cut	0.1mm(Max)
Tool	R0.5mm ball end mill



(a) 全面写真 (b) 右下文字部の拡大写真

図-4 当初の60周年ロゴ加工

ているキーホルダーを参考に3mmとした。

3. キーホルダー加工

(1) クランプ方法と被削材の決定

ワークの厚みが薄いことから一般的なバイスではクランプが難しい。このような場合、これまで、本研究室では瞬間接着剤を使用してきたが、瞬間接着剤ではフライス加工時等で切削力に耐えられずワークが外れたり、加工後に接着面に残る接着剤を取り除く作業が必要であった。

今回は、おもて面と裏面に加工を行うことから、瞬間接着剤の使用は極力避けたい旨を学生に伝え、クランプ方法と被削材について検討した。その結果、磁性があり錆びにくいSUS430を被削材として選択し、マグネットチャックでクランプすることとした。

しかし、本研究室では切削加工に適したマグネットチャックを所持していなかったため、測定用のマグネットチャックを使用して試切削を行ったが、加工中にワークがずれるような挙動が見られたため、再度検討を行った。

検討の結果、両面テープを使ってクランプすることにし、試切削を行ったところ、問題なく加工できることが分かった。一方、試切削時にSUS430加工時の切削抵抗が想定したより大きく、デザイン部を加工する工具が微細なことから、被削材はA7075を使用することにした。

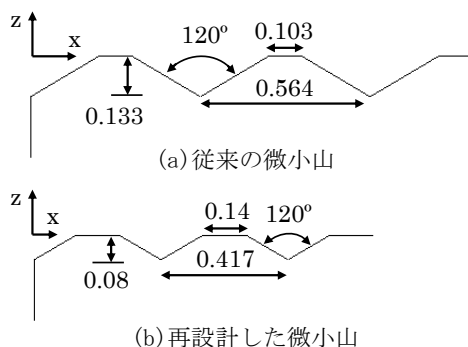
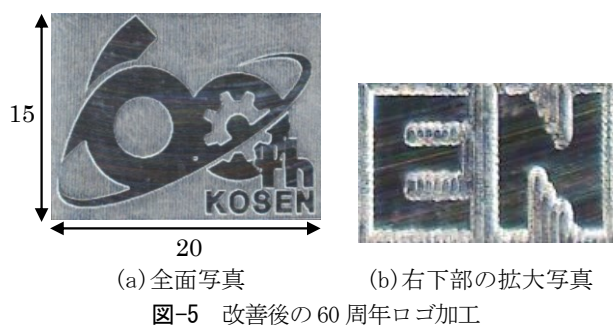
(2) 60周年ロゴ加工

自作CAMに画像を読みませ、その濃淡情報を高さに変換することで、60周年ロゴ加工用NCデータを作成し、表-1に示す条件で加工した結果を図-4(a)に示す。図からは少し読み取りにくいですが、例えば、図-4(b)に示すように、KOKENという文字の一部が分かりにくかったり、60という文字の一部に機械の誤差と思われるような不揃いの加

工面が見られ、「美しさ」という面で満足できない箇所が多数あった。そこで、使用するボールエンドミルをR0.5mmからR0.3mmに変え、加工領域も一回り大きく変更した。また偶然、工具長補正値を10 μ m程度上げて試切削を行った際に、最も高い部分に基準面加工時のフライス面が加工されずに残った。それが、ボールエンドミルでの加工面と比較すると金属光沢が際立っており、文字部が強調されることが分かった。そこで、加工用NCデータは最大0.1mmの切込みとしながら、工具長補正値に50 μ mを加算して加工を行った。加工結果を図-5(a)と(b)に示す。図から読み取れるように、ボールエンドミルのみで全体の加工を行うより、フライス加工面とボールエンドミル加工面を共存させるほうが、60周年ロゴを強調させることができた。

(3) 微小山

本研究室では、画像から潜像加工用NCデータを作成する潜像加工用CAMを独自開発し、図-6(a)に示すような微小山の右側面と左側面に異なるデザインの加工を行い、見る角度を変えることで2つのデザインを見せる潜像加工を実現してきた⁸⁾。今回は、前述したようにコンテストにおいて更なる技術PRを行うために、3つのデザインを見せる3面潜像を行うことを目標に、微小山の再設計を行った。具体的には、図-6(b)に示すように、上面からもデザインを加工できるように微小山頂点の平面部を広くした。一方、これまでの加工経験から、今回選択した画像は濃淡がはっきりしているため、最大切込みはこれまでの加工量より少なくてもデザインを見せることができると考え、微小山間のピッチは可能な限り小さくした。



(4) 3面潜像加工

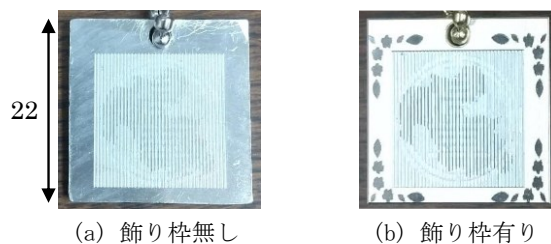
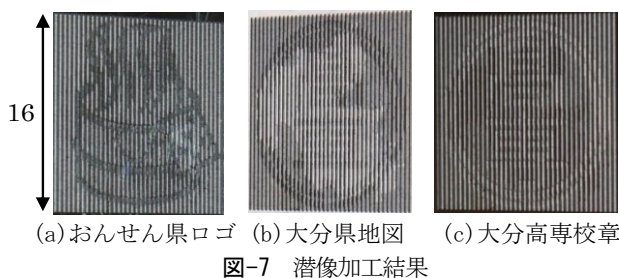
微小山の左側面におんせん県ロゴ、上面部に大分県地図、右側面に大分高専校章が加工できるように、本研究室で開発した潜像加工用CAMでNCデータを作成した。最初に、前節で設計した微小山を表-2左に示す条件で加工し、その後、潜像加工部を表-2右に示す条件で加工した。その加工結果を図-7に示す。図から読み取れるように、見る角度を変えることで3つのデザインを見せる3面潜像加工を、初めて実現させることができた。

(5) 飾り枠

これまで本研究室で積み重ねてきた加工経験を参考にしながら、3面潜像加工に挑戦し、それをやり遂げることができたが、全体的な外観だけを見ると、図-8(a)に示すように、コンテストに出品するには、物足りなさがあった。そこで、学生らと議論したところ、学生から潜像加工部の周りに、飾り枠をつけてはどうかとの意見が出た。そこで、大分県の県花である豊後梅を模した、飾り枠を追加し、60周年ロゴ加工と同じ工具、同じ加工条件で加工を行った。その加工結果が、図-8(b)である。飾り枠を追加したことで、高級感が大きく向上したことが分かる。

表-2 潜像加工部の加工条件

	Micro mountain	Latent-image
Spindle speed	8000min ⁻¹	8000min ⁻¹
Feed rate	400mm/min	400mm/min
Pick feed	0.417mm	0.417mm
Depth of cut	0.08mm	0.04mm(Max)
Tool	End mill of tip angle 120°	End mill of tip angle 90°



4. 結言

本取組みでは、3面潜像加工がほどこされた高専制度創設60周年記念キーホルダー製作に挑戦した。得られた成果や課題を以下に示す。

- 1) 本取組みによって、関わった学生のほとんどが、マシニングセンタを安全に扱えるようになり、精密加工の基礎を修得することができた。また、輪郭形状測定機、マイクロスコープやダイヤルゲージ等での計測スキルや、実践的なプログラミング能力も向上させることができた。
- 2) 本取組みの中で、切削による3面潜像加工を初めて実現することができた。出来上がったキーホルダーは、非常に高品位に仕上がりに、本校来場者等に配布するには十分な仕上がりと化した。今後、コンテストでの審査にて評価されることを期待したい。
- 3) 本取組みによって、大きく学生のものづくりに関するスキルを向上させることができたと考えているが、それが取組み開始前と比べて、どの程度向上したのか評価することは容易ではない。また、本取組みの中で、学生の構想力や問題解決力が向上したのか評価することも困難であった。
- 4) 安全面や高価な機器を扱うことから、教員のフォローがかなり手厚くなった感があった。行き過ぎたフォローが、学生自らが考えチームで活動する部分を阻害していた可

能性がある。どのような進め方が適切なのか、検討の余地がある。

参考文献

- 1) 谷口功: 高専教育制度の創設から60年, 化学と教育, 70, 4, p. 214-217, (2022)
- 2) 田村隆弘: 国立高専の変遷にみる高度化への取り組み, 工学教育, 69, 4, pp.64-73, (2021)
- 3) 矢野眞和: 工学教育の成果とキャリア, 工学教育, 65, 4, pp.16-21, (2021)
- 4) OECD, 森利枝(訳), 米澤彰純(解説): 日本の大学改革—OECD高等教育政策レビュー, 明石書店, (2009)
- 5) 濱田裕康, 矢島邦昭, 加藤岳仁, 多羅尾進, 田川晋也, 川辺真也, 岡野寛, 漆原史朗, 小林幸人, 高木夏樹, 野口健太郎, 森本真理: 高専が牽引するイノベーション人材教育: コンピテンシー教育コミュニティの形成, 工学教育, 69, 4, pp.86-93, (2021)
- 6) 立川正真, 江藤春輝, 国宗理恵, 山本通, 薬師寺輝敏: 本校オープンキャンパスにおける鑄造体験・実演イベント, 大分工業高等専門学校紀要, pp.12-15, (2020)
- 7) 山本通, 佐藤色波, 須藤優樹, 中谷賢希, 平山創大: 5軸マシニングセンタとVBAによる実践的な学習教材, 大分工業高等専門学校紀要, pp.18-23, (2022)
- 8) 山本通, 安藤開: 切削による潜像加工への挑戦, 精密工学会誌, 84, 9, pp.776-780, (2018)

(2023.9.6受付)

スキル修得とものづくりの楽しさを実感できるQRコード加工

篠田 侑志¹・後藤 伶音¹・佐藤 色波²・山本 通¹

¹機械工学科 ²株式会社椿本チエイン

日本発の技術で、世界中で広く使用されているものの1つとして、QRコードがある。筆者らは、マシニングセンタを使用した金属加工を得意にしており、QRコードを金属に加工し、それをデザインの1つとしながら、PRしたい情報も伝えられるようなものを作る実習を行うことで、学生の興味や関心を惹きながら、ものづくりのスキルアップを図れるのではと考えた。そこで、実際にアルミ材にQRコードを加工したが、当初は、製作したQRコードの情報を、スマートフォンのカメラで容易に読み取ることができなかった。そのため、本年度から試行錯誤をしながらカメラでの読取り率を向上させる取組みを行った。本稿では、それらの一連の取組みについて紹介し、切削加工で加工したQRコードの読取り率がどの程度まで向上させることができるかを明らかにする。

キーワード： QR code, Aspiring engineer, Reading accuracy, Machining, Smartphone

1. 緒言

資源の乏しい我が国は、人財こそが貴重な資源である。戦後、安価で性能のよい自動車や電化製品等を輸出することで目覚ましい復興を果たせたのは、様々な製品を開発、製造してきた優秀なエンジニアの存在があったからである。しかし、それらのエンジニアの多くが既に引退し、新興国の台頭で、製造業は苦戦し続けており、日本の国際的な影響力は年々低下している。さらに筆者らの調査では、我が国でエンジニアを志望する若者の割合が諸外国に比べ極めて低い状況も明らかになった¹⁾。また、国内では今後さらに、少子化が深刻になり、エンジニアを志望する若者の絶対数が減少し続けていくことが予想される。そこで、どのようにすれば、ものづくりの楽しさや、やりがい等を伝え、エンジニアを目指す若者を増やすことができるのか模索しているところである。

ここで、日本発の技術で世界中で広く使用されているものとして、QRコードがある。筆者らは、マシニングセンタを使用した金属加工を得意にしており、QRコードを金属に加工し、それをデザインの1つとしながら、PRしたい情報も伝えられるようなものを作ることを考えた。学生らに実際にQRコードが加工されたサンプルを自由に製作させるような実習を行うことができれば、学生の興味を惹きながら、ものづくりのスキルアップを図れると思惑からである。そこで、実際にアルミ材にQRコードを加工したが、当初、スマートフォンのカメラで情報を容易に読み取ることができなかった。そのため、本年度から試行錯誤をしながらカメラでの読取り率を向上させる取組みを行った。本

稿では、それらの一連の取組みについて紹介し、切削加工で加工したQRコードの読取り率がどの程度まで向上させることができるかを明らかにする。

2. QRコードの切削加工

QRコードは、1994年に愛知県の自動車部品メーカー・(株)デンソーで開発されたマトリックス型二次元コードである²⁾。本章では、QRコード付きのキーホルダー製作の経緯と、その取組み内容について紹介する。

(1) QRコード加工に至った経緯

15歳からの5年間一貫教育で技術者を育成する高専では、卒業年度の5年次に卒業研究を行う。本校・機械工学科でも、4年次の3月に、各学生が希望する分野の研究室に学生が配属され、約1年間の研究活動を行っている。筆者らが所属する研究室にも、毎年4名前後の5年生が配属され、5軸マシニングセンタの精度向上に関する研究³⁾、潜像加工に関する研究⁴⁾、振動解析に関する研究⁵⁾、実践的な学習教材開発等の研究⁶⁾等を行っている。

また、前述したように本研究室は、特にマシニングセンタに関しての経験が豊富であり、卒業研究の一貫で、マシニングセンタを通してエンジニアの基礎を学べる実践的な教材作成も行っている。これにより、卒研生自身の実験スキルアップ、プレゼンテーション能力アップや、低学年学生の実験スキルアップを目指している。

昨年度も同様の取組みを行った中で、学生から、実験実習で金属にQRコードを加工すれば、学生の興味を惹くこ

とができ、切削加工機に関する知識や技能等を得ることができるのではないかと提案があった。また、オープンキャンパス等で、本校ホームページをリンク先としたQRコード付きの加工サンプルを配布することで本校のPRにもつながることから、QRコード加工の取組みを開始した。

(2) QRコード加工

図-1に示すようなQRコード(リンク先は、本校のホームページ)を、web上の無料ページ⁷⁾を利用して作成し、本研究室で開発したCAMにQRコード画像を読み込ませた。なお、開発したCAMは画像の濃淡情報を、以下の式(1)を使って、濃淡情報を高さ情報に変換した。

$$ZT = (ZH - ZL) NC / St + ZL \quad (1)$$

ただし、ZHは画像部加工パスのZ座標最高設定値、ZLはZ座標最低設定値、Stはグレースケールの分解能、NCは各ピクセルから得た色情報である。本実験ではZH=0、ZL=-0.1としてNCデータを作成し、加工シミュレーションを行ったうえで、本校に設置されているマシニングセンタで、加工を行った。加工結果を図-2に、加工条件を表-1に示す。

(3) QRコードの読取り

製作した図-2のQRコードサンプルをスマートフォンのカメラで読取ろうとしたが、通常のカメラ機能では、うまく読み取れなかった。そこで、AIが搭載されているGoogle レンズ⁸⁾を使用して読取りを試みると、確率は非常に低いが、読取ることができる場合もあることが分かった。



図-1 大分高専ホームページへのQRコード

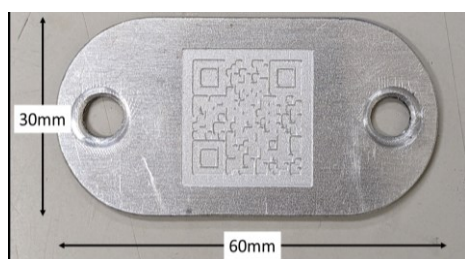


図-2 2022年度に製作したキーホルダー

表-1 QRコード部の加工条件

Spindle speed	8000min ⁻¹
Feed rate	800mm/min
Depth of cut	0.1mm
Pick feed	0.1mm
Work material	A5052
Tool	R0.5mm ball end mill

3. 条件変更等による試行錯誤

前章で製作したQRコードは、読取り精度に問題があることが分かった。そこで、読取り精度を向上させるために、様々な検討を行った。その結果について本章では紹介する。なお、いずれのQRコードも引き続き、リンク先は本校のホームページとした。

(1) 誤り訂正機能の変更

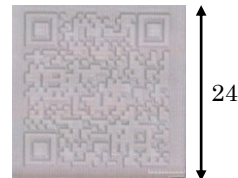
QRコードには、コードの一部が欠損しても、コード自身でデータを復元する「誤り訂正機能」がある。誤り訂正機能には4段階のレベルがあり、一般使用ではレベルLやM、汚れがつきやすい工場などの環境ではレベルQやHの使用が推奨されている⁹⁾。ここで、前章で作成したQRコードを調べてみたところ、最も誤り訂正機能の低いレベルLであったことが分かった。そこで、誤り訂正機能を選択できるwebページ¹⁰⁾から誤り訂正機能の最も高いレベルHのQRコード(図-3(a))を作成し、表-1と同じ条件で加工を行った結果が図-3(b)である。これを、前章と同様に、Google レンズを使ってQRコードの読取りを行おうとしたが、前章のサンプルとは異なり、全く読み取れない状況となった。これは、誤り訂正機能を入れたことで、複雑なQRコードとなったことが原因の可能性が高い。したがって、以降の実験は全てレベルLのQRコードを使用することとする。

(2) 加工シミュレーション結果の分析

図-4(a)は、レベルLのQRコードの加工シミュレーション結果である。この画像を実際のQRコードに近づけるために、一部を黒で塗りつぶした画像が図-4(b)である。この画像に対してGoogle レンズでの読取りを試みたところ、確実に情報が読み取れた。図-4(b)は、目視で確認できるほど、図-1と比べて形状に違いがあるため、切削を使ったQRコードを成功させるには、いかに濃淡差を表現できるかが最も重要であることが明らかとなった。

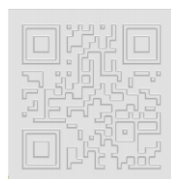


(a) レベルHのQRコード



(b) 加工結果

図-3 誤り訂正機能を最高レベルにしたQRコード



(a) シミュレーション結果



(b) 黒で塗りつぶし

図-4 シミュレーション結果の読取り精度比較

(3) 加工面と切り込み量の変更

使用したCAMは、画像の濃淡情報を高さに変換しNCプログラムを出力しており、実際のQRコードの形状まで考慮しているわけではない。そのため、加工深さが深くなると、意図しない側面部分も加工することになるため、前節で示したように加工後のQRコード形状が元画像と比べると少し変化する。そのため、切込みを0.02mmに変更し、その他は表-1と同じ条件で加工することにより、元画像に近い形状に近づける工夫を行うことにした。

一方、前節までの結果により、QRコードの白と黒の部分のコントラストをいかに表現するかが重要であることが分かった。そのため、金属光沢が出しやすいフライス加工面と、周速ゼロ部付近で加工したボールエンドミル加工面の2つの加工面を共存させることでコントラストを表現することを考えた。

具体的には、最初にフライスで基準面加工をした後、最大切込み0.1mmで作成したQRコード用NCデータをNCに読み込ませ、QRコード加工用工具の工具長補正值を0.08mm加算し、実質切込み0.02mmでQRコード加工を行った。その結果が図-5(a)で、図-5(b)に示すようにGoogleレンズでの読み取り精度が格段に上がった。

(4) 工具形状の変更による読み取り精度の比較

工具径を小さくすればするほど、より精密に加工が可能となるのは明らかであるが、前節までは工具形状等に関して調査をするまでには至っていなかった。そこで、工具形状を変更した場合に、読み取り精度の向上が図れるのか確認するために加工を行った。使用する工具は、図-6(a)に示すR0.3mmボールエンドミル、図-6(b)に示す先端角90°のエンドミル、図-6(c)に示す先端角120°のエンドミルである。加工条件は、工具形状の変更、切込みを0.02mmに変更した以外は、表-1の加工条件と同じとし、加工を行った。その時の加工結果を図-7(a)～(c)に示す。読み取り精度としては、工具形状の変更による差異は見られず、今回も加工面にあ

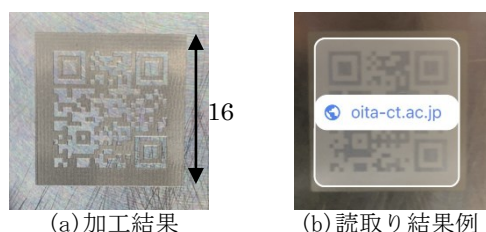
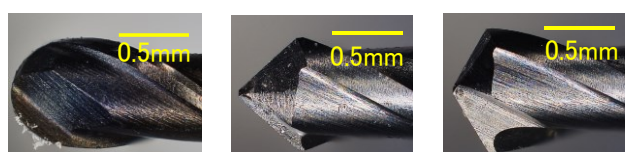


図-5 加工面と切込みを変更したQRコード



(a) R0.3mm ボール (b) 先端角 90° (c) 先端角 120°

図-6 QRコード加工用工具

たる光の具合でコントラストが変わり、読み取れる瞬間と読み取れない瞬間とが分かれた。

(5) 材質変更による読み取り精度の比較

光の反射や加工部と被削材のコントラストの関係で見え方が異なるため、色の異なる被削材にQRコードを加工し、その読み取り精度を比較する。具体的には、前節でアルミ材に加工した時と同じ条件で、真鍮に加工を行った。図-8(a)～(c)が、加工結果である。加工形状はA5052での加工結果と変わらないが、フライス面がA5052よりも、金属光沢で虹色に光る部分が少なかった。そのためQRコードの読み取り精度が良かったように感じたが、全く同じ環境で読み取れていないため正確に断定はできない。

(6) 考察

図-7と図-8で示したQRコードは、図-9に示すようなマシニングセンタ内部で撮影した。同じサンプルを、マシニングセンタから取り出して撮影した写真が、図-10と図-11である。ここで、図-11(b)の矢印で示す部分に注目すると、QRコード左上の四角形の中は白く見える。一方、図-8(b)の同じ部分は、黒く見える。つまり、周辺の光の位置や量、QRコードに向けるカメラの角度など、撮影環境によって、見え方が異なるわけである。

実際、図-9に示すマシニングセンタ内部の右上蛍光灯を切ると、QRコード加工面に反射する光が少なくなるためか、



(a) R0.3mm ボール (b) 先端角 90° (c) 先端角 120°

図-7 アルミ材・工具変更による比較



(a) R0.3mm ボール (b) 先端角 90° (c) 先端角 120°

図-8 真鍮材・工具変更による比較

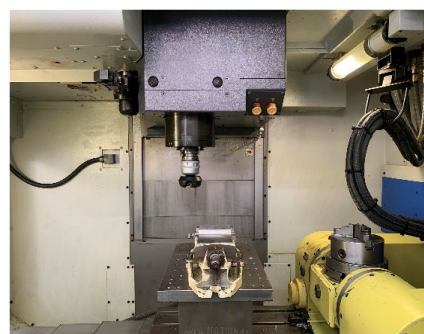


図-9 マシニングセンタの内部



(a)R0.3mm ボール (b)先端角 90° (c)先端角 120°

図-10 アルミ材・撮影環境による見え方の違い



(a)R0.3mm ボール (b)先端角 90° (c)先端角 120°

図-11 真鍮材・撮影環境による見え方の違い

QRコードの読取り率が劇的に向上した。明るさが暗ければコントラストが弱まり、読み取りにくくなると思われたが、フライス面にあたる光の向きの変化で読み取りやすくなっていると考えられる。以上のように、現状では、切削によるQRコード加工は、エンドミルで白い部分を切削し、フライス面を黒い部分として表現しコントラストを出すことで、読取り率を向上させることができた。

4. 結言

本取り組みでは、切削によるQRコード加工に挑戦した。得られた成果や今後の課題を以下に示す。

- 1) AIが搭載されたGoogle レンズ等を使用すれば、通常のスマートフォンに付属のカメラで、切削で加工されたQRコードの読取りができる場合があることを確認した。
- 2) 切削で加工したQRコードを認識させるには、QRコードの黒い部分と白い部分をいかに認識させることが重要であることが分かった。一方、元のQRコードから多少誤差が含まれた形状でも、情報の読み取りは可能であった。

3) 本研究ではQRコードの黒部をフライスで加工し、白部を各種エンドミルで加工することで、QRコードの読取り率を上げることができた。

3) A5052に加工したQRコードより真鍮に加工したもののほうが、読み取り精度が高い傾向にあった。しかし、読み取れるか否かは、現状では光の当たり方等、環境に大きく左右される。

4) QRコード加工は、比較的容易で、加工時間も短い。また、加工後、学生が自らのスマートフォンで、加工したQRコードが読み取れるか否かを、手軽に確認できる。そのため、QRコード加工を学生実験等に取り入れることができないか、今後検討していきたい。

参考文献

- 1) 高橋徹, 松本佳久, 樋口勇夫, 前稔文, 山本通: 高専志願者とエンジニア志望, 工学教育, 70, 6, pp.41-45, (2022)
- 2) (株)アंक: インターネット技術の絵本, 翔泳社, p.102, (2014)
- 3) 山本通, 西川創太: 5軸マシニングセンタの回転軸角度誤差測定に関する研究, 大分工業高等専門学校紀要, pp.14-18, (2019)
- 4) 山本通, 安藤 開: 切削による潜像加工への挑戦, 精密工学会誌, 84, 9, pp.776-780, (2018)
- 5) 山本通, 佐藤寿哉, 桐井彩斗: 振動解析に関する取組みの一例, 大分工業高等専門学校紀要, pp.26-29, (2021)
- 6) 山本通, 佐藤色波, 須藤優樹, 中谷賢希, 平山創大: 5軸マシニングセンタとVBAによる実践的な学習教材, 大分工業高等専門学校紀要, pp.18-23, (2022)
- 7) <https://qr.quel.jp/>
- 8) <https://k-tai.sharp.co.jp/appli/useful/google/09lens.html>
- 9) QRコードのおはなし, 日本規格協会, pp.38-39, (2002)
- 10) <https://www.cman.jp/QRcode/>

(2023.9.28受付)

GRUS衛星画像を用いたトウモロコシの収穫日予測

重松 康祐¹・森田 昌孝²

¹情報工学科, ²一般科理系

トウモロコシは多岐にわたる用途で利用され、生産・収穫の効率化が求められている。現在トウモロコシの生育監視は主に現地調査によって行われている。本研究では、生育監視を効率化するため、アクセルスペース社のGRUS衛星から得られた画像と機械学習を組み合わせ、トウモロコシの収穫日を予測する方法を検討した。その結果、線形回帰モデルを用いることで収穫日を平均絶対誤差17.4日で予測可能であることを確認した。この技術の導入により、現地調査を行うことなく収穫時の人員と機材の効率的な配置計画を策定することが可能となり、トウモロコシ栽培のコスト低減が期待される。

キーワード： GRUS衛星、リモートセンシング、機械学習、トウモロコシ

1. 緒言

トウモロコシは食品からバイオ燃料まで、多岐にわたる用途で重要な作物である。日本はトウモロコシの大部分を輸入しているが、生産コストが削減できれば、国内生産の拡大が期待できる。

一般に、トウモロコシ収穫に至るプロセスにおける生育状況の監視は、現地調査によって行われている。このような監視作業を遠隔地から自動化する技術が確立されれば、労力と費用の大幅な削減が可能である。近年、高解像度の衛星画像技術が進展することにより、作物の状態を遠隔地から高精度に監視する方法が開発されている。特に、植物や土壌の情報を効率的に収集する手段として、高解像度光学衛星センサの有用性が示されている¹⁾。加えて、収量予測においても高解像度衛星画像が用いられた例があるが²⁾、撮影頻度やデータ取得のコストの面で課題が残る。

このような状況を踏まえ、本研究ではアクセルスペース社が開発したGRUS衛星の画像データの利用を検討する。GRUS衛星画像の取得は比較的低コストであるため、小規模農業においても高い費用対効果が得られる。本研究はGRUS衛星の光学画像と機械学習を組み合わせたトウモロコシの収穫日予測を試みる。

本研究により、収穫時期を高精度に予測することができれば、現地調査を行うことなく収穫時における人員と機材の効率的な配置計画を事前に策定することが可能となり、トウモロコシ栽培のコスト低減につながることを期待される。

2. 実験圃場と栽培条件

本研究の実験圃場は、大分県豊後大野市に位置する大分県農林水産研指導センター内の畑地(黒ボク土)である(図-1)。播種は2022年4月20日に行い、収穫は同年9月4日に実施された。この期間中に、光学衛星画像の取得と並行して、トウモロコシの生育状態についても継続的な観察を行った。

栽培したトウモロコシには、食用品種「もちもち太郎パール」と飼料用品種「KD641(RM114)」の2種類が含まれている。播種に際しては、株間を21~24 cm、条間を75 cmと設定した。



図-1 実験圃場 (大分県豊後大野市) ³⁾

3. GRUS衛星画像^{4,5)}

GRUS衛星は、アクセルスペース社が開発した小型の光学衛星であり、農業をはじめとする多様な用途への利用

が期待されている。画像の分解能は、パンクロマティック（全色）で2.5 m、マルチスペクトルで5.0 mであり、ビット深度は12ビットである。また、5機体制（2021年8月時点）での運用が行われており、2日に1回の撮影頻度となっている。

GRUSは表-1に示す通り、バンド0からバンド5までの観測波長を有する。地上分解能は直下撮影時においてパンクロマティック（バンド0）で2.5 m以下、マルチスペクトル（バンド1～5）で5.0 m以下であり、撮影幅は55 km以上、最長撮影距離は1,000 kmである。本研究においては、トウモロコシの栽培期間中に4日分のGRUS衛星画像データを取得した。取得した4日分の画像データには、それぞれバンド0からバンド5までの画像が含まれる。

表-1 GRUSの観測波長

バンド名	観測波長
バンド0	450 - 900 nm (パンクロマティック)
バンド1	450 - 505 nm (青)
バンド2	515 - 585 nm (緑)
バンド3	620 - 685 nm (赤)
バンド4	705 - 745 nm (レッドエッジ)
バンド5	770 - 900 nm (近赤外)

4. 収穫時期の予測方法の検討

衛星画像中のトウモロコシが栽培されている領域の画素値の平均値をバンド毎に算出し、機械学習モデルの説明変数とする。算出した平均画素値を表-2に示す。目的変数は収穫日までの日数とする。

データ数が少ないため、複雑なモデルを使用すると過学習が生じる可能性が高いため、比較的シンプルなアルゴリズムである線形回帰、Ridge回帰、Lasso回帰、Elastic Net、決定木を用いた。一つ抜き交差検証（Leave-One-Out Cross-Validation）により、それぞれのアルゴリズムで学習・推論を行い、平均絶対誤差を算出した。評価結果を表-3に示す。結果より、線形回帰が最も優れており、平均絶対誤差は17.4日であった。

5. 結言

本研究では、GRUS衛星画像と機械学習技術を活用して、トウモロコシの収穫日を予測する基礎的な検討を行った。大分県豊後大野市のトウモロコシ圃場を撮影した衛星画像を用いて評価を行った結果、線形回帰モデルによる収穫日予測は、平均絶対誤差17.4日という結果を示し、高い精度での予測が可能であることを確認した。今後は、データ

量を増加させて、さらなる検証、精度向上を目指すとともに、他の作物や地域に対する適用可能性も検討していく予定である。

表-2 トウモロコシ栽培領域における各バンドの平均画素値

撮影日	2022年 5月4日 (収穫まで 125日)	2022年 6月30日 (収穫まで 68日)	2022年 8月6日 (収穫まで 31日)	2022年 8月30日 (収穫まで 12日)
バンド0	904.8	1342.8	1551.5	1536.4
バンド1	908.2	1084.4	1291.8	1115.1
バンド2	783.4	956.8	1122.8	1065.2
バンド3	662.0	672.0	772.3	818.9
バンド4	1030.6	1590.1	1549.2	1778.6
バンド5	1478.3	3357.9	3247.3	3353.2

表-3 各種アルゴリズムでの評価結果

アルゴリズム	平均絶対誤差（日）
線形回帰	17.4
Ridge回帰	20.4
Lasso回帰	36.5
Elastic Net	22.7
決定木	47.0

謝辞：本研究において使用した衛星画像は、令和5年度経済産業省の「衛星データ利用環境整備・ソリューション開発支援事業」より提供を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 井上 吉雄: 高解像度光学衛星センサによる植物・土壌情報計測とスマート農業への応用, 日本リモートセンシング学会誌, 37巻, 3号, pp. 213-223, 2017.
- 2) Nahuel R. Peralta, Yared Assefa, Juan Du, Charles J. Barden and Ignacio A. Ciampitti: Mid-Season High-Resolution Satellite Imagery for Forecasting Site-Specific Corn Yield, Remote Sens, Vol. 8, Issue 10, 2016.
- 3) Google MAPs , <https://www.google.com/maps> (参照日 2023年9月29日)
- 4) AxelGlobe画像仕様書, <https://docs.axelglobe.com/ja/image-specifications> (参照日 2023年9月29日)
- 5) 一般財団法人リモート・センシング技術センター, <https://www.restec.or.jp/solution/product/grus.html> (参照日 2023年9月29日)

(2023.9.29受付)

弾性地盤上の矩形平板の面外自由振動のエネルギー解析

—平板の周面が隔壁型単純支持された場合—

名木野 晴暢¹・田川 達也²・稲田 真大³・清成 康平⁴・足立 忠晴⁵¹都市・環境工学科, ²東京大学 工学部社会基盤学科, ³大阪大学 工学部地球総合工学科,
⁴株式会社 大林組, ⁵豊橋技術科学大学 機械工学系

本稿は、三次元弾性論に基づくエネルギー解析により弾性地盤上の矩形平板の自由振動性状を考察したものである。矩形平板は線形弾性論で理想化し、剛基盤上にある弾性地盤は線形のWinkler基礎でモデル化した。また、平板の周面は隔壁型単純支持されているとした。弾性地盤—平板系の自由振動の弾性ひずみエネルギーと運動エネルギーは文献7)で導出した厳密解を用いて解析的に求めた。設計変数に対する弾性地盤—平板系の面外自由振動の全弾性ひずみエネルギーと全運動エネルギーにおける個々のエネルギー成分の寄与率の変化を理論的に解析し、弾性地盤上の矩形平板の自由振動性状の理解を手助けする基礎資料を提示した。

キーワード: 矩形平板, 弾性地盤, 面外自由振動, エネルギー解析, 三次元弾性論

1. はじめに

構造物の動的設計の合理化および高精度化を実現するためには、その動的挙動を精度よく求めて理解することが重要になる。連続体の自由度は無限大であるため、無限個の正規モード（運動方程式に固有円振動数の調和振動を仮定したときに求められる固有円振動数に対応する固有振動モードのこと）を持つ。構造物の動的応答は、正規座標と正規モードの積の無限和、すなわち重ね合わせにより表される。したがって、構造物の自由振動特性である固有円振動数とこれに対応する固有振動モードは、共振周波数の推定のみならず、構造物の動的挙動を理解するための重要な基礎資料である。

弾性地盤上の平板の非減衰自由振動問題の三次元弾性解析は、これまでに理論的手法または数値解析的手法を用いて研究されている^{1)~8)}。弾性地盤—平板系の非減衰自由振動性状は、主に設計変数（板厚や地盤反力係数など）に対する固有円振動数の変化により評価される。その一例を図-1に示す。図-1の記号の定義は、文献8)を参照されたい。同図は、無次元地盤反力係数 k_1a/E に対する無次元振動数 Ω_{11} の数値的変動、および感度の高い領域に関する情報を提供してくれている。後者の範囲は板厚比 h/a に依存しているが、同図からこの原因を定量的に推定することは難しい。また、板厚比 h/a が大きくなると、無次元振動数 Ω_{11} は増加する。この原因の一つとして面外せん断変形の影響が考えられる。しかし、定性的な考察に留まることが多い。この

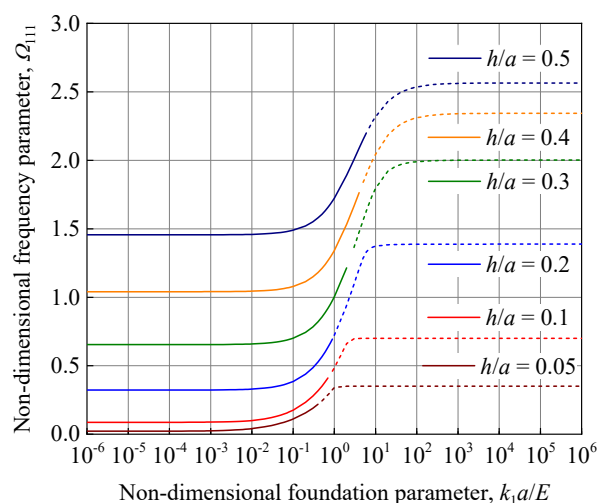


図-1 線形弾性地盤上にある正方形弾性平板の無次元振動数 Ω_{11} に与える無次元地盤反力係数 k_1a/E と板厚比 h/a の影響 (文献8)より転載)

ように、設計変数に対する固有円振動数の変動曲線は耐震設計における基礎資料を提供してくれているが、系の自由振動性状の一部を把握したに過ぎない。

de Souza・Croll⁹⁾は、等方性球殻の固有振動モードの全ひずみエネルギーに与える膜エネルギー成分と曲げひずみエネルギー成分の寄与を調べ、殻の自由振動性状を詳しく分析した。また、芳村ら¹⁰⁾は、逆対称アングル・プライ積層板の自由振動の全ひずみエネルギーにおけるカップリング剛性

に寄与するエネルギー成分の変化から、自由振動性状に与えるカップリング剛性の影響を定量的に明らかにしている。文献9)および文献10)は、対象としている連続体の自由振動の全ひずみエネルギーに対する個々のエネルギー成分の寄与率を分析することを“エネルギー解析”と呼んでいる。エネルギー解析の利点は、(1) 対象としている連続体の自由振動性状の理解に役立つこと¹⁰⁾、および (2) 構造物の動的設計における剛性変更の判断資料としても役立つこと⁹⁾であり、固有振動数とこれに対応する固有振動モードから求めることができるひずみエネルギーの情報は、実用上重要であると考えられる。名木野ら¹¹⁾は、三次元弾性論に基づくエネルギー解析により任意の支持条件を有する矩形平板の自由振動性状の定量的な評価を行っており、設計変数に対するエネルギー量の変化の情報は二次元近似理論(平板理論)の適用範囲の検討にも役立つ可能性を指摘している。

本稿では、文献8)で示された弾性地盤—平板系の自由振動性状の理解を手助けする基礎資料の提供を目的として、設計変数に対する弾性地盤—平板系の面外自由振動の全弾性ひずみエネルギーと全運動エネルギーにおける個々のエネルギー成分の寄与率の変化を三次元弾性論に基づいて理論的に解析した。なお、本稿は、第二著者、第三著者および第四著者が本校に在籍していたときの研究成果の一部を第一著者と第五著者が取りまとめたものである。

2. 数理モデル

本稿では、図-2に示すような弾性地盤の上にある周面隔壁型単純支持された矩形平板の非減衰自由振動問題を考える。ここで、 a, b, h は、それぞれ平板の長さ、幅、厚さであり、 k_1 は弾性地盤の地盤反力係数である。平板の中央面を通るように直交直線座標系O-xyzを設定し、 x, y, z 軸方向の時間依存性の変位成分を、それぞれ $u(x, y, z, t), v(x, y, z, t), w(x, y, z, t)$ とする。

平板は、内部領域 $V = (0, a) \times (0, b) \times (-h/2, h/2)$ と6つの境界面 $\partial V_i (i=1, 2, \dots, 6)$ からなる。ここで、 $(x=0)$ の境界面を ∂V_1 、 $(x=a)$ の境界面を ∂V_2 、 $(y=0)$ の境界面を ∂V_3 、 $(y=b)$ の境界面を ∂V_4 、 $(z=-h/2)$ の境界面を ∂V_5 、 $(z=h/2)$ の境界面を ∂V_6 と定義する。なお、時間領域は $t \in (0, \infty)$ であり、 $(t=0)$ は初期条件により与えられる。

(1) 仮定

平板は、線形の三次元弾性論に従って固有円振動数 ω で調和振動するものとする。また、材料の機械的性質である縦弾性係数とポアソン比をそれぞれ E と ν 、物理的性質である密度を ρ で表し、これらは均質であるとする。

弾性地盤は剛基盤上にあるとし、その振る舞いはWinkler型の線形弾性基礎でモデル化する。ただし、弾性地盤の質量の影響は考慮しない。

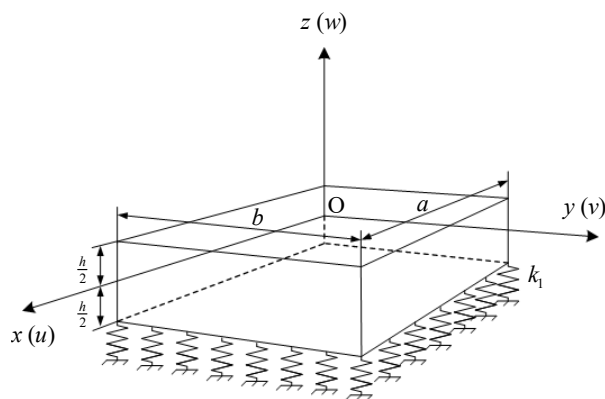


図-2 弾性地盤上の矩形平板と座標系

(2) 強形式

固有円振動数 ω で自由振動する弾性地盤上の弾性平板の変位成分 u, v, w は、それぞれ次式のように表される。

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= U(x, y, z)e^{j\omega t}, \quad v(x, y, z, t) = V(x, y, z)e^{j\omega t}, \\ w(x, y, z, t) &= W(x, y, z)e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $U(x, y, z), V(x, y, z), W(x, y, z)$ は、それぞれ x, y, z 軸方向の変位振幅であり、 j は虚数単位である。

内部領域 V の各点で満足する変位振幅 U, V, W に関する支配方程式は、次のように表される⁸⁾。

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 U + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e_v}{\partial x} + \left(\frac{\omega}{c_2} \right)^2 U &= 0 \\ \nabla^2 V + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e_v}{\partial y} + \left(\frac{\omega}{c_2} \right)^2 V &= 0 \\ \nabla^2 W + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e_v}{\partial z} + \left(\frac{\omega}{c_2} \right)^2 W &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ in } V \quad (2)$$

ただし、

$$e_v = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \quad (3)$$

であり、

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4)$$

は無限弾性体内を伝わる弾性波の横波の伝播速度、 μ は剛性率であり、 (ω/c_2) は波数である。式(2)は周波数領域のスカラ波動方程式(Helmholtz方程式)に相当する。ただし、左辺の第二項は変位振幅 U, V, W の連成を表す項である。

解析モデルに対応する境界条件式は、次のように表される⁸⁾。

$$V = W = 0, \quad \sigma_{xx} = 0 \quad \text{on } \partial V_1 \text{ and } \partial V_2 \quad (5)$$

$$U = W = 0, \sigma_{yy} = 0 \text{ on } \partial V_3 \text{ and } \partial V_4 \quad (6)$$

$$\sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0, \sigma_{zz} = k_1 W \text{ on } \partial V_5 \quad (7)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xy} = \sigma_{xz} = 0 \text{ on } \partial V_6 \quad (8)$$

ここで, $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ($i, j = x, y, z$) は時間依存性を排除した応力テンソルの成分であり, 第一添字は応力の作用する面, 第二添字は作用する方向を意味する.

以上が本稿の解くべき振動固有値問題の概要である. その詳細は, 文献7)および文献8)を参照されたい.

3. エネルギー解析

文献 8)の無次元量に従うとき, 弾性地盤-平板系の弾性ひずみエネルギー U と運動エネルギー T は, それぞれ式(9)および式(10)のように表される.

$$\begin{aligned} U &= (e^{j\omega t})^2 abhE \left\{ \int_0^1 \int_0^1 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2E} (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} \right. \\ &\quad + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + \sigma_{yz} \varepsilon_{yz} + \sigma_{zx} \varepsilon_{zx} + \sigma_{xy} \varepsilon_{xy}) d\zeta d\eta d\xi \\ &\quad \left. + \int_0^1 \int_0^1 \frac{1}{2} \left(\frac{k_1 h}{E} \right) (W|_{\zeta=-\frac{1}{2}})^2 d\eta d\xi \right\} \\ &= (e^{j\omega t})^2 abhEU_{\max} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} T &= (j\omega_{mnl} e^{j\omega t})^2 (abh^3) \int_0^1 \int_0^1 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{\rho}{2} (U^2 + V^2 \\ &\quad + W^2) d\zeta d\eta d\xi \\ &= (e^{j\omega t})^2 \{ \rho (j\omega_{mnl})^2 abh^3 \} T_{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで, $U_{\max}$ と $T_{\max}$ は, それぞれ, 弾性地盤-平板系が非減衰自由振動をするときの弾性ひずみエネルギーの最大値および運動エネルギーの最大値である. また, σ_{ii} と ε_{ii} ($i = x, y, z$) は, それぞれ i 軸方向の垂直応力と微小垂直ひずみであり, σ_{ij} と ε_{ij} ($i \neq j$) は, それぞれ ij 面のせん断応力と微小せん断ひずみである.

さて, 弾性地盤-平板系の弾性ひずみエネルギーの最大値 $U_{\max}$ を構成する各成分を

$$\left. \begin{aligned} U_{ii} &= \int_0^1 \int_0^1 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2E} (\sigma_{ii} \varepsilon_{ii}) d\zeta d\eta d\xi \quad (i = x, y, z) \\ U_{ij} &= \int_0^1 \int_0^1 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2E} (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij}) d\zeta d\eta d\xi \quad (i \neq j) \\ U_{\text{Winkler}} &= \int_0^1 \int_0^1 \frac{1}{2} \left(\frac{k_1 h}{E} \right) (W|_{\zeta=-\frac{1}{2}})^2 d\eta d\xi \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

と定義すると, $U_{\max}$ は, 次式のように表すことができる.

$$U_{\max} = U_{xx} + U_{yy} + U_{zz} + U_{yz} + U_{zx} + U_{xy} + U_{\text{Winkler}} \quad (12)$$

例えば, 矩形平板の最低次の面外曲げの自由振動を対象と

するとき, U_{xx}, U_{yy}, U_{xy} は面外曲げ変形により平板の内部に蓄積される弾性ひずみエネルギーを表している. U_{xx} は面外伸縮変形, すなわち板厚の伸縮変形により平板の内部に蓄積される弾性ひずみエネルギーを表し, U_{yz}, U_{zx} は面外せん断変形により平板の内部に蓄積される弾性ひずみエネルギーを意味している. また, U_{Winkler} は矩形平板が面外曲げ自由振動するときに, 弾性地盤 (Winkler 基礎) に蓄えられる弾性エネルギーである. U_{Winkler} を除くエネルギーの値は, 矩形平板の最低次の面外曲げ自由振動するときの変形成分の割合を表す定量的な指標の一つと考えることができる¹¹⁾.

同様に, 運動エネルギーの最大値 $T_{\max}$ を構成する各成分を

$$\left. \begin{aligned} T_{UU} &= \int_0^1 \int_0^1 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2} U^2 d\zeta d\eta d\xi \\ T_{VV} &= \int_0^1 \int_0^1 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2} V^2 d\zeta d\eta d\xi \\ T_{WW} &= \int_0^1 \int_0^1 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2} W^2 d\zeta d\eta d\xi \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

と定義すると, $T_{\max}$ は, 次式のようにも表される.

$$T_{\max} = T_{UU} + T_{VV} + T_{WW} \quad (14)$$

先と同じように矩形平板の最低次の面外曲げ自由振動を対象とするとき, T_{UU}, T_{VV} は面内変位による矩形平板の運動エネルギーを表しており, T_{WW} は面外変位によるそれを意味している. これらのエネルギーの値は, 矩形平板の最低次の面外曲げ自由振動するときの面内慣性と面外慣性の割合を表す定量的な指標の一つと考えてよからう¹¹⁾.

よって, 弾性地盤-平板系の固有円振動数 ω とこれに対応する固有振動モード U, V, W が既知であれば, 式(11)からは弾性地盤-平板系の弾性ひずみエネルギーの最大値 $U_{\max}$ を構成する各成分を, 式(13)からは運動エネルギーの最大値 $T_{\max}$ の各成分を求めることができる. また, 求めたエネルギー成分と設計変数の関係を解析することで, 弾性地盤-平板系の自由振動性状を調べることができる.

なお, 弾性地盤-平板系が非減衰自由振動するときの弾性ひずみエネルギーの最大値 $U_{\max}$ と運動エネルギーの最大値 $T_{\max}$ には, 次の関係が成り立つ.

$$abhEU_{\max} = \rho \omega_{mnl}^2 abh^3 T_{\max} \quad (15)$$

よって, $U_{\max}, T_{\max}$ と固有円振動数 ω の間には,

$$U_{\max} = \left(\omega_{mnl} h \sqrt{\frac{\rho}{E}} \right)^2 T_{\max} \quad (16)$$

が成立する. すなわち, 系の弾性ひずみエネルギーの最大値 $U_{\max}$ は, 板厚 h , 平板のヤング率 E と密度 ρ で無次元化した固有円振動数の二乗と運動エネルギーの最大値 $T_{\max}$ との積に等しい. 式(16)は, コード検証に活用することができる.

さて, 式(11)または式(13)に従って各エネルギーを求めるためには, 第2章で示した解くべき振動固有値問題を解いて,

固有円振動数 ω_{nnl} とこれに対応する固有振動モード U, V, W を求めておかなければならない。本稿では、著者らが文献7)で導出した厳密解を用いた。また、各エネルギーを求めるための積分は、全て解析的に行った。

4. 理論解析および考察

ここでは、地盤反力係数に対する弾性地盤—平板系の自由振動の弾性ひずみエネルギーと運動エネルギーの変化を理論解析により調べる。

(1) 理論解析に用いるパラメータ

本論文では、コンクリートからなる正形状の弾性平板($b/a=1$)を想定し、ポアソン比は $\nu=0.2$ に設定した¹²⁾。

弾性地盤上の平板の問題では、地盤反力係数 k_1 の設定が極めて重要になる。理論解析においては、 k_1 を任意に設定できるが、構造工学において意味を持つ範囲を念頭に置いて設定しなければならない。文献12)によれば、実在する弾性地盤を対象としたとき、次式のように無次元化された地盤反力係数(以下、無次元地盤反力係数と呼ぶ)は、

$$\frac{k_1 a}{E} \in [10^{-4}, 10^{-2}] \quad (17)$$

の範囲を取るようである。理論解析の際には、この範囲を含むように無次元地盤反力係数 $k_1 a/E$ を設定した。

理論解析の対象とする自由振動は、正方形平板の最低次の面外曲げの自由振動である $m=n=1$ とし、三次元弾性論に基づかなければ正確に調べることができない z 軸方向の振動次数 l は1, 2, 3とした。ただし、 m, n は、それぞれ x, y 軸方向の固有関数の半波数の数⁸⁾である。参考までに、 $m=n=l=1$ の自由振動は、耐震設計の際に必要な基本曲げの自由振動である。なお、無次元振動数は、

$$\Omega_{nnl} = \frac{\omega_{nnl} h}{c_2} \quad (18)$$

と定義している⁸⁾。

(2) 規格化された弾性ひずみエネルギーと運動エネルギー

エネルギー解析では、弾性地盤上にある正方形平板の面外自由振動の弾性ひずみエネルギーの最大値 $U_{\max}$ と運動エネルギーの最大値 $T_{\max}$ で規格化した次式のエネルギー量を指標とした。

$$T_i = (T_{UU} + T_{VV})T_{\max}^{-1}, \quad T_t = T_{WW}T_{\max}^{-1} \quad (19)$$

$$U_b = (U_{xx} + U_{yy})U_{\max}^{-1}, \quad U_t = U_{xy}U_{\max}^{-1},$$

$$U_s = (U_{yz} + U_{zx})U_{\max}^{-1}, \quad U_z = U_{zz}U_{\max}^{-1} \quad (20)$$

$$U_w = U_{\text{Winkler}} U_{\max}^{-1} \quad (21)$$

ここで、 T_i と T_t は、それぞれ全運動エネルギー $T_{\max}$ に対する面内慣性と面外慣性によるエネルギーの割合を表す指標である。同様に、 U_b, U_t, U_s, U_z, U_w は、それぞれ全弾性ひずみエネルギー $U_{\max}$ に対する曲げ変形または面内伸縮変形、面内せん断変形、面外せん断変形、面外伸縮変形によるエネルギーの割合、弾性地盤に蓄えられる弾性エネルギーの割合を意味する。無次元地盤反力係数 $k_1 a/E$ に対するこれらの規格化されたエネルギー量の変化を調べることで、弾性地盤—平板系の自由振動性状の変形成分の割合を知ることができる。

(3) Verification

本稿では、文献7)と文献8)の理論解析に用いた4倍精度計算のfortranコードを修正することで、各エネルギー量を求めた。その為、理論解析を実施する前にmodeling and simulationにおけるV & V (ASME V & V 10-2006)¹³⁾に倣って、“各エネルギー量を正しく計算できているか”を検証しておく必要がある¹⁴⁾。ここでは、本稿で示した各エネルギー量(Present)のコード検証について述べる。検証に用いる参照解の解析条件に合わせる目的でポアソン比は $\nu=0.3$ に設定した。また、固有円振動数 ω_{nnl} は、

$$n_{nnl}^* = \frac{\omega_{nnl} a}{c_0}, \quad c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (22)$$

のように無次元化した。ここで、 c_0 は一様な弾性棒の縦波の伝播速度である。

弾性地盤—平板系の無次元振動数 n_{nnl}^* とこれに対応する自由振動の運動エネルギー成分 $T_{UU}/T_{\max}$, $T_{VV}/T_{\max}$, $T_{WW}/T_{\max}$ の検証を表-1に示す。板厚比 h/a は0.001(極薄板), 0.01(薄板), 0.2(中等厚板)および0.5(厚板)とし、無次元地盤反力係数 $k_1 a/E$ は0(平板の下面は自由表面)と式(17)の上限値である 10^{-2} に設定した。検証のための参照解として、名木野ら¹¹⁾の三次元弾性論に基づくB-spline Ritz解析(BSRA)と有限要素解析(FEA)による数値解も併記した。ここで、FEAには汎用有限要素コードAbaqus 6.11を用いた。同表のSR4, C3D8およびC3D20は、それぞれ4節点一次低減積分シェル要素、8節点一次ソリッド要素、および20節点二次ソリッド要素を意味する¹⁵⁾。FEAの離散化は、要素が正方形または立方体を保つように分割した。よって、 M_x, M_y, M_z をそれぞれ x, y, z 軸方向の要素分割数とすると、 $h/a=0.01$ の要素分割数は $M_x \times M_y \times M_z = 200 \times 200$ (自由度数は121,203)、 $h/a=0.2$ のそれは $M_x \times M_y \times M_z = 40 \times 40 \times 8$ (C3D8の自由度数は45,387, C3D20の自由度数は174,291)であり、 $h/a=0.5$ のそれは $M_x \times M_y \times M_z = 32 \times 32 \times 16$ (C3D8の自由度数は55,539, C3D20の自由度数は215,523)である。他方、BSRAの離散化条件は、spline次数 $p_x \times p_y \times p_z = 4 \times 4 \times 2$, knotの数 $m_x \times m_y \times m_z = 13 \times 13 \times 5$ (自由度数は4,608)である。なお、本稿(Present)およびFEAの結果は、有効数字5桁で整理した。

表-1 弾性地盤－平板系の無次元振動数 n_{111}^* とこれに対応する自由振動の運動エネルギー成分の検証

h/a	k_1a/E	Methods	n_{111}^*	$T_{UU}/T_{\max}$	$T_{VV}/T_{\max}$	$T_{WW}/T_{\max}$
0.001	0	Present	5.9733×10^{-3}	8.2246×10^{-7}	8.2246×10^{-7}	1.0000
		BSRA ¹¹⁾	5.973×10^{-3}	-	-	1.000
0.01	0	Present	5.9713×10^{-2}	8.2143×10^{-5}	8.2143×10^{-5}	9.9984×10^{-1}
		BSRA ¹¹⁾	5.971×10^{-2}	-	-	1.000
		FEA (S4R)	5.9713×10^{-2}	-	-	-
	10^{-6}	Present	6.0544×10^{-2}	8.2143×10^{-5}	8.2143×10^{-5}	9.9984×10^{-1}
	10^{-4}	Present	1.1646×10^{-1}	8.2143×10^{-5}	8.2143×10^{-5}	9.9984×10^{-1}
	10^{-2}	Present	1.0016	8.2255×10^{-5}	8.2255×10^{-5}	9.9984×10^{-1}
		FEA (S4R)	1.0017	-	-	-
	0.2	Present	1.0607	2.1533×10^{-2}	2.1533×10^{-2}	9.5693×10^{-1}
		FEA (C3D8)	1.0577	-	-	-
		FEA (C3D20)	1.0607	-	-	-
	10^{-6}	Present	1.0607	2.1533×10^{-2}	2.1533×10^{-2}	9.5693×10^{-1}
	10^{-4}	Present	1.0609	2.1534×10^{-2}	2.1534×10^{-2}	9.5693×10^{-1}
	10^{-2}	Present	1.0820	2.1560×10^{-2}	2.1560×10^{-2}	9.5688×10^{-1}
		FEA (C3D8)	1.0790	-	-	-
		FEA (C3D20)	1.0820	-	-	-
	0.5	Present	1.8801	4.0189×10^{-2}	4.0189×10^{-2}	9.1962×10^{-1}
		FEA (C3D8)	1.8777	-	-	-
		FEA (C3D20)	1.8801	-	-	-
	10^{-6}	Present	1.8801	4.0189×10^{-2}	4.0189×10^{-2}	9.1962×10^{-1}
	10^{-4}	Present	1.8801	4.0190×10^{-2}	4.0190×10^{-2}	9.1962×10^{-1}
	10^{-2}	Present	1.8843	4.0267×10^{-2}	4.0267×10^{-2}	9.1947×10^{-1}
		FEA (C3D8)	1.8819	-	-	-
		FEA (C3D20)	1.8843	-	-	-

同表より、 h/a および k_1a/E に係わらず、BSRAおよびFEAによる近似解は、本稿で示した弾性地盤－平板系の n_{111}^* と $T_{WW}/T_{\max}$ によく一致している。また、三つの運動エネルギー成分は、

$$(T_{UU} + T_{VV} + T_{WW})T_{\max}^{-1} \cong 1$$

を少なくとも有効数字5桁で満足している。これらのことから、本稿で示した弾性地盤－平板系の n_{111}^* とこれに対応する自由振動の運動エネルギー成分 $T_{UU}/T_{\max}$ 、 $T_{VV}/T_{\max}$ 、 $T_{WW}/T_{\max}$ は妥当な結果を与えていることが確認できる。ここで、本稿の厳密解を正解としてFEAとBSRAの数値解の近似精度を確認してみると、C3D20によるFEAは有効数字5桁で厳密解に一致する高い精度を有していることがわかる。ただし、その自由度数は約21万とかなり大きい。他方、BSRAはFEAよりもかなり少ない自由度数で、精度の高い近似解を提供していることも確認できる。

表-2は、弾性地盤－平板系の無次元振動数 n_{111}^* とこれに

対応する自由振動の弾性ひずみエネルギー成分 $U_{xx}/U_{\max}$ 、 $U_{xy}/U_{\max}$ 、 $U_{yz}/U_{\max}$ 、 $U_{zz}/U_{\max}$ 、 $U_{Winkler}/U_{\max}$ を対象として、表-1と同様の検証を行ったものである。ただし、正方形平板($b/a = 1$)であるので、 $U_{xx}/U_{\max} = U_{yy}/U_{\max}$ および $U_{yz}/U_{\max} = U_{zx}/U_{\max}$ である。表-2より、 k_1a/E に対する各弾性ひずみエネルギー成分の変動、および

$$(U_{xx} + U_{yy} + U_{zz} + U_{yz} + U_{zx} + U_{xy} + U_{Winkler})U_{\max}^{-1} \cong 1$$

を満足していることから解くべき問題の弾性ひずみエネルギーを正しく求められていると考えてよからう。

以上より、著者が独自に作成したfortranコードは“各エネルギー量を正しく計算できている”と判断できる。

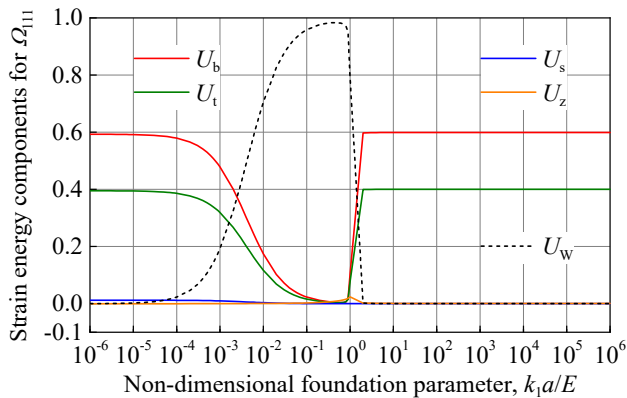
(4) 自由振動する平板の弾性ひずみエネルギーと運動エネルギーに与える地盤反力係数の影響

a) 薄板

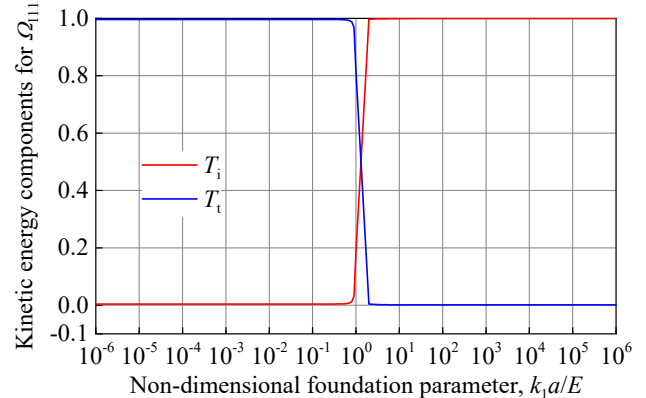
図-3は、無次元地盤反力係数 k_1a/E を 10^{-6} から 10^6 まで変化

表-2 弾性地盤—平板系の無次元振動数 n_{III}^* に対応する自由振動の弾性ひずみエネルギー成分の検証

h/a	k_1a/E	Methods	U_{xx}/U_{max}	U_{xy}/U_{max}	U_{yz}/U_{max}	U_{zz}/U_{max}	$U_{Winkler}/U_{max}$
0.001	0	Present	3.5000×10^{-1}	3.5000×10^{-1}	2.8199×10^{-6}	-1.4099×10^{-7}	0
		BSRA ¹¹⁾	3.250×10^{-1}	3.500×10^{-1}	-	-	-
0.01	0	Present	3.2482×10^{-1}	3.4980×10^{-1}	2.8174×10^{-4}	-1.4086×10^{-5}	0
		BSRA ¹¹⁾	3.248×10^{-1}	3.498×10^{-1}	-	-	-
	10^{-6}	Present	3.1596×10^{-1}	3.4026×10^{-1}	2.7406×10^{-4}	-1.1780×10^{-5}	2.7273×10^{-2}
	10^{-4}	Present	8.5370×10^{-2}	9.1963×10^{-2}	7.3973×10^{-5}	4.8445×10^{-5}	7.3710×10^{-1}
	10^{-2}	Present	1.1187×10^{-3}	1.2449×10^{-3}	8.7385×10^{-7}	9.9201×10^{-5}	9.9642×10^{-1}
0.2	0	Present	2.7197×10^{-1}	2.9060×10^{-1}	8.4788×10^{-2}	-4.1193×10^{-3}	0
	10^{-6}	Present	2.7197×10^{-1}	2.9048×10^{-1}	8.4788×10^{-2}	-4.1192×10^{-3}	4.0606×10^{-6}
	10^{-4}	Present	2.7186×10^{-1}	2.7961×10^{-1}	8.4749×10^{-2}	-4.1083×10^{-3}	4.0589×10^{-4}
	10^{-2}	Present	2.6121×10^{-1}	2.7961×10^{-1}	8.1019×10^{-2}	-3.0352×10^{-3}	3.8973×10^{-2}
0.5	0	Present	1.6644×10^{-1}	1.7264×10^{-1}	2.5227×10^{-1}	-1.0043×10^{-2}	0
	10^{-6}	Present	1.6644×10^{-1}	1.7264×10^{-1}	2.5227×10^{-1}	-1.0043×10^{-2}	4.4858×10^{-7}
	10^{-4}	Present	1.6643×10^{-1}	1.7264×10^{-1}	2.5225×10^{-1}	-1.0040×10^{-2}	4.4854×10^{-5}
	10^{-2}	Present	1.6580×10^{-1}	1.7220×10^{-1}	2.5072×10^{-1}	-9.6980×10^{-3}	4.4502×10^{-3}

Note: $U_{xx}/U_{max} = U_{yy}/U_{max}$ and $U_{yz}/U_{max} = U_{zx}/U_{max}$ 

(a) 弾性ひずみエネルギー成分

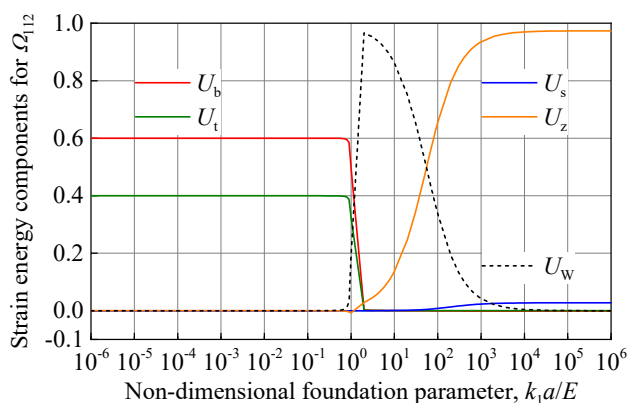


(b) 運動エネルギー成分

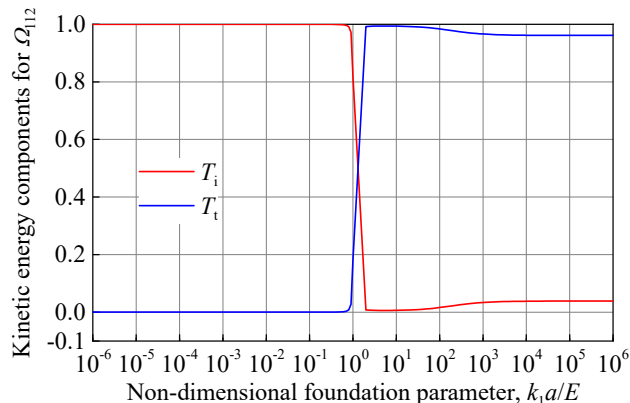
図-3 薄板の基本振動 Q_{III} の規格化されたエネルギーに与える無次元地盤反力係数 k_1a/E の影響: $h/a = 0.05$, $b/a = 1$

させたときの板厚比 $h/a = 0.05$ の正方形薄板の基本振動 Q_{III} の規格化された各エネルギー成分の変動を表したものである。ここで、(a)は弾性ひずみエネルギーであり、(b)は運動エネルギーである。まず、同図(b)より、運動エネルギー成分 T_i , T_t は $10^{-1} < k_1a/E < 10^1$ の範囲で急激に変化する。 $k_1a/E < 10^0$ の範囲では $T_i \approx 0$, $T_t \approx 1$ を取るが、 $k_1a/E > 10^0$ の範囲では $T_i \approx 1$, $T_t \approx 0$ にスイッチする。これは、運動エネルギー成分 T_i , T_t の変化率が大きい範囲で固有振動モードが変化したことを表している⁸⁾。また、文献⁷⁾から判断すると、スイッチ前は面外曲げの固有振動モード (flexural mode) ⁷⁾であるが、スイッチ後は厚さ方向に伸縮する固有振動モード (breathing mode) ⁷⁾になる。このとき、前者の振動状態は T_i が支配的で、後者のそれは T_t が支配的な傾向にある。更に、同図(b)は面

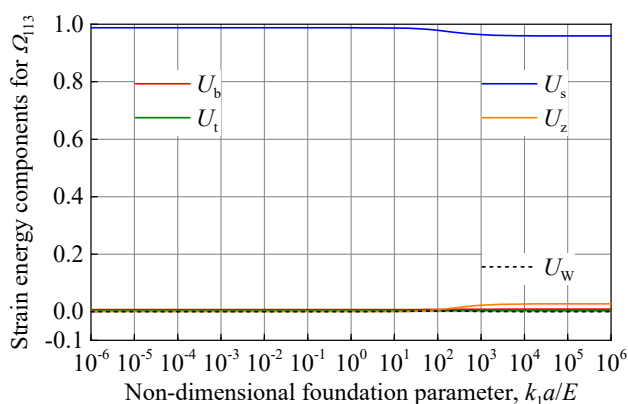
内変位と面外変位が非連成である情報も提供してくれている。次に同図(a)より、 k_1a/E が 10^{-6} から 10^0 まで変化するとき、 U_b , U_t , U_s は減少し、 U_w は増加する。ただし、 U_s の値は極めて小さく、 U_z はほぼ零である。これは、薄板が Q_{III} で自由振動するときの変形に面外せん断変形および面外伸縮変形がほとんど生じないことを表している。また、 $10^{-2} \leq k_1a/E < 10^1$ の範囲では、 $(U_b + U_t < U_w)$ となっており、固有振動モードが変化している k_1a/E の範囲では U_b , U_t もほぼ零となっている。更に、 k_1a/E に対する U_w の変動は、平板の自由振動に与える弾性地盤の影響を表しており、 $k_1a/E < 10^0$ の範囲は弾性地盤が存在しても $U_w \approx 0$ であれば平板の自由振動に与える弾性地盤の影響は殆どなく、構造動力学的には下面が自由表面 ($\sigma_{zz} = 0$, $\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ on ∂V_3) である



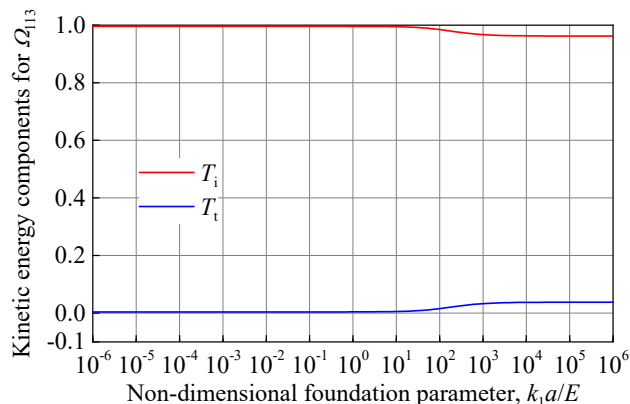
(a) 弾性ひずみエネルギー成分



(b) 運動エネルギー成分

図-4 薄板の二次振動 Ω_{12} の規格化されたエネルギーに与える無次元地盤反力係数 k_1a/E の影響: $h/a = 0.05$, $b/a = 1$ 

(a) 弾性ひずみエネルギー成分



(b) 運動エネルギー成分

図-5 薄板の三次振動 Ω_{13} の規格化されたエネルギーに与える無次元地盤反力係数 k_1a/E の影響: $h/a = 0.05$, $b/a = 1$

平板の自由振動と同じと考えてよからう。なお、 $k_1a/E > 10^0$ の範囲も $U_w \approx 0$ であるが、これは式(7)から明らかなように地盤反力係数 k_1 の増大にともなって境界 ∂V_3 の面外変位振幅 W は拘束され、 $W \rightarrow 0$ となるためである。一般に、固有振動数 Ω_{11} の数値情報のみではどのような振動状態であるかを判断することは難しいが、運動エネルギー成分と弾性ひずみエネルギー成分を計算して指標とすれば、固有振動数に対応する固有振動モードを描かなくても系の振動状態に関する情報を得ることができる。

図-4と図-5は、それぞれ板厚比 $h/a = 0.05$ の正方形薄板の二次振動 Ω_{12} と三次振動 Ω_{13} の規格化された各エネルギー成分を対象として図-3と同様の検討を行ったものである。図-4 (b)より、 $k_1a/E < 10^0$ の範囲の Ω_{12} は T_i が支配的な自由振動であるが、 $k_1a/E > 10^0$ の範囲は T_t が支配的になる。また、図-4 (a)からは、 $k_1a/E > 10^0$ の範囲では薄板理論では無視される U_z が卓越する自由振動状態であることがわかる。他方、図-5 (a), (b)は、 Ω_{13} は k_1a/E に関係なく T_t と U_s が支配的な自由振動であること示してくれている。

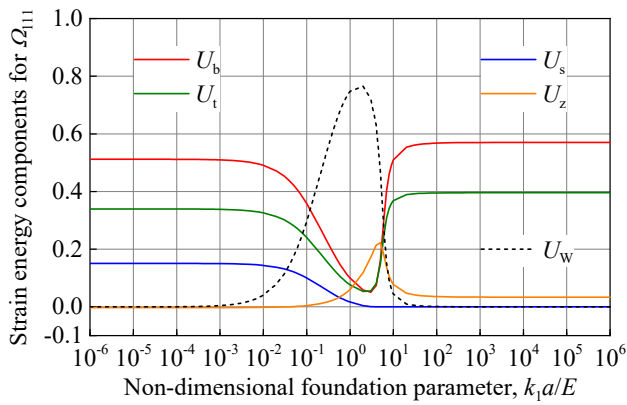
b) 中等厚板

図-6、図-7および図-8は、それぞれ板厚比 $h/a = 0.2$ の正方形中等厚板の基本振動 Ω_{11} 、二次振動 Ω_{12} および三次振動

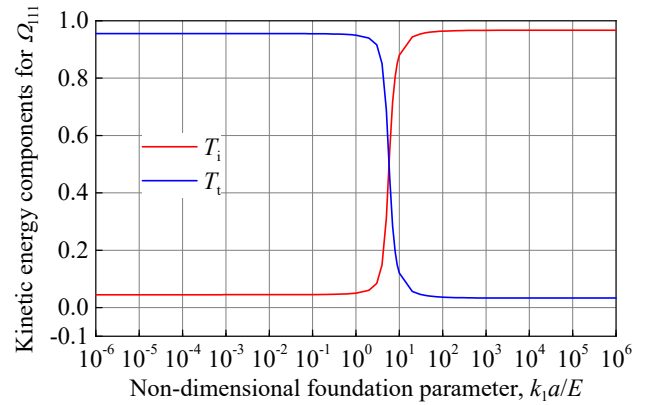
Ω_{13} の規格化された各エネルギー成分に与える無次元地盤反力係数 k_1a/E の影響である。ここで、(a)は弾性ひずみエネルギー成分、(b)は運動エネルギー成分であり、 k_1a/E は(a) 薄板と同様に 10^{-6} から 10^6 まで変化させた。図-6、図-7および図-8の(b)より、 k_1a/E に対する運動エネルギー成分 T_i , T_t の変動は、振動次数に係わらず概ね薄板のそれと同様である。ただし、 Ω_{11} と Ω_{13} は、板厚比 h/a が大きくなったことによる面内変位と面外変位の連成が確認できる。 k_1a/E に対する弾性ひずみエネルギー成分 U_b , U_t , U_s , U_z , U_w の変化についても概ね薄板のそれと同様であることが図-6、図-7および図-8の(a)からわかる。ただし、各エネルギー量の割合は異なっている。例えば、図-6 (a)より、 $k_1a/E < 10^{-1}$ の範囲の U_s は図-3 (a)よりも増加し、 U_b , U_t および U_w は減少している。これは板厚比 h/a が大きくなったことによる面外せん断変形の影響を定量的に表したものである。なお、 U_z はほぼ零であるので、中等厚板の Ω_{11} にも面外伸縮変形は殆ど生じない。

c) 厚板

最後に、板厚比 $h/a = 0.4$ の正方形厚板の基本振動 Ω_{11} 、二次振動 Ω_{12} および三次振動 Ω_{13} の規格化された各エネルギー成分を対象として、a) 薄板およびb) 中等厚板と同様の検討を行ったものをそれぞれ図-9、図-10および図-11に示し

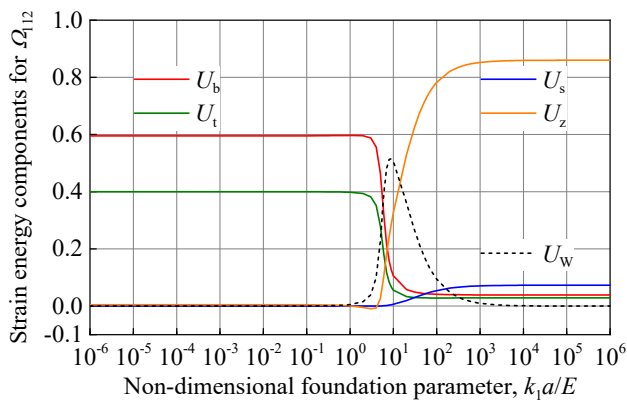


(a) 弾性ひずみエネルギー成分

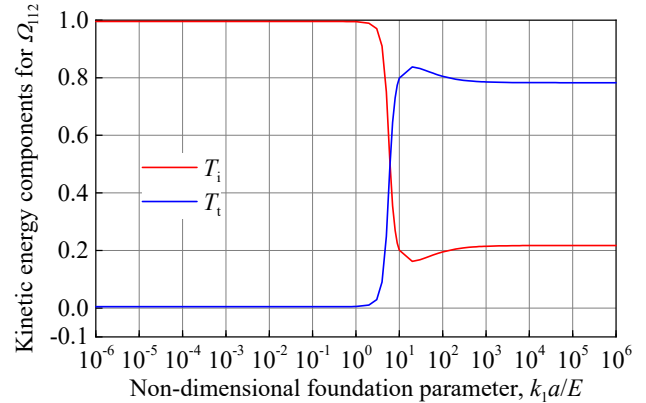


(b) 運動エネルギー成分

図-6 中等厚板の基本振動 Ω_{11} の規格化されたエネルギーに与える無次元地盤反力係数 k_1a/E の影響: $h/a = 0.2, b/a = 1$

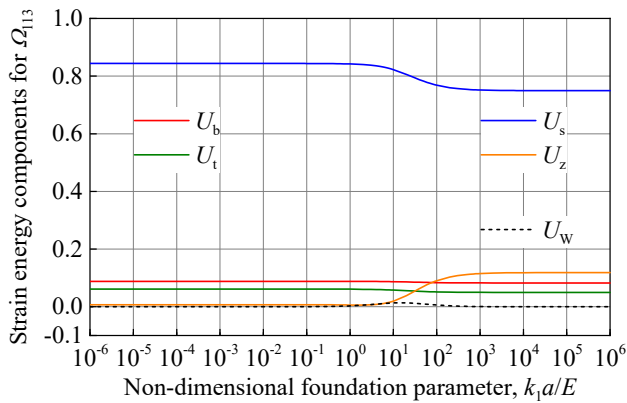


(a) 弾性ひずみエネルギー成分

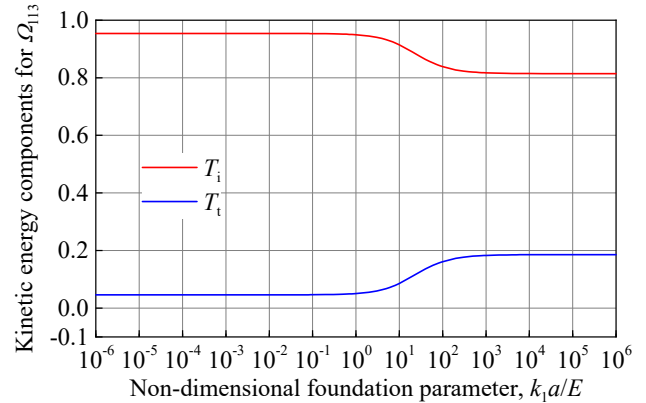


(b) 運動エネルギー成分

図-7 中等厚板の二次振動 Ω_{12} の規格化されたエネルギーに与える無次元地盤反力係数 k_1a/E の影響: $h/a = 0.2, b/a = 1$



(a) 弾性ひずみエネルギー成分

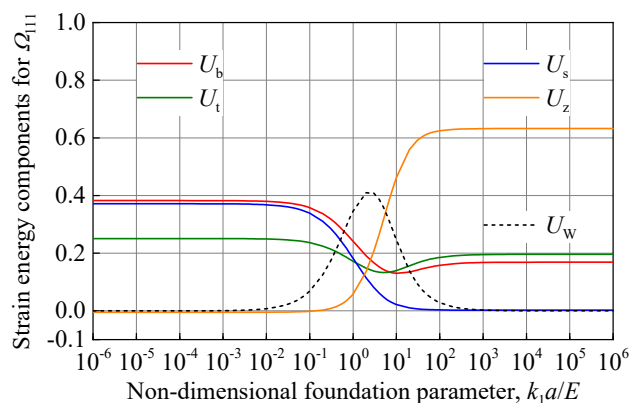


(b) 運動エネルギー成分

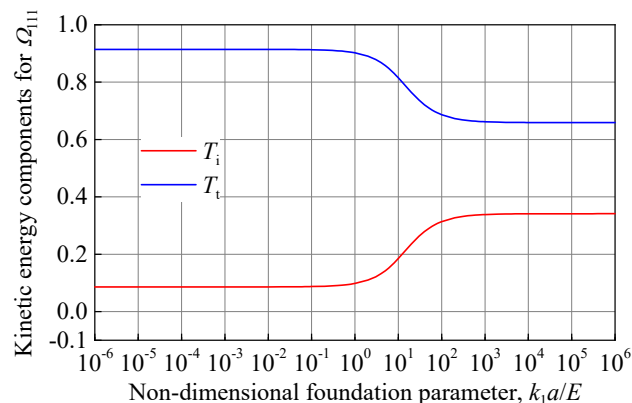
図-8 中等厚板の三次振動 Ω_{13} の規格化されたエネルギーに与える無次元地盤反力係数 k_1a/E の影響: $h/a = 0.2, b/a = 1$

た. 図-9, 図-10および図-11の(b)より, k_1a/E に対する運動エネルギー成分 T_i, T_t は, 振動次数にかかわらず図-8 (b)と同様の変動を示している. ただし, Ω_{11} の運動エネルギー成分 T_i, T_t の大小関係は $T_i < T_t$ であり, Ω_{12} と Ω_{13} のそれは $T_i > T_t$ である. $k_1a/E < 10^{-1}$ の Ω_{11} の T_i は中等厚板のそれよりも値が大きくなり, T_t は減少している. これは, 板厚が大きくなることにより, 面内変位に関する慣性の影響が現れることを意味していると考えられる. また, $h/a = 0.4$ になると Ω_{12}

の T_t が僅かに生じており, 若干ではあるが面内変位と面外変位が連成しているようである. 次に, 図-9 (a)の $k_1a/E < 10^0$ の範囲の k_1a/E に対する弾性ひずみエネルギー成分 U_b, U_t, U_s, U_z, U_w の変動は, 図-6 (a)の中等厚板とほぼ同様であるが, 板厚が大きくなったことにより $U_b \approx U_s$ となり, U_w は小さくなっている. また, 図-10 (a)と図-11 (a)より, $k_1a/E < 10^0$ の範囲で U_z が生じており, Ω_{12} と Ω_{13} の自由振動には面外伸縮変形の成分が混在していることもわかる. さらに,

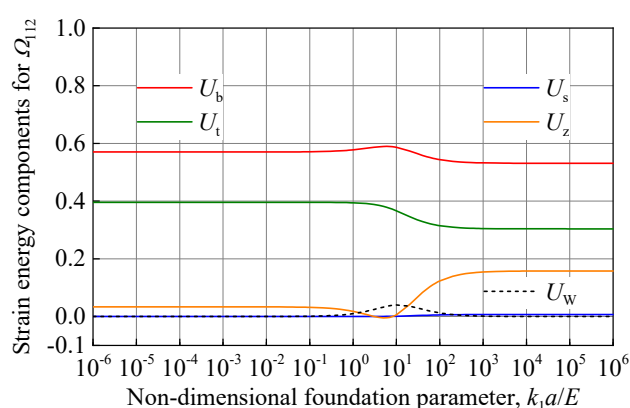


(a) 弾性ひずみエネルギー成分

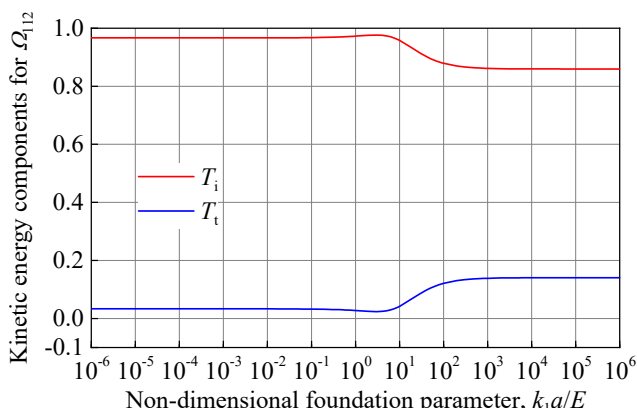


(b) 運動エネルギー成分

図-9 厚板の基本振動 Ω_{11} の規格化されたエネルギーに与える無次元地盤反力係数 k_1a/E の影響: $h/a = 0.4$, $b/a = 1$

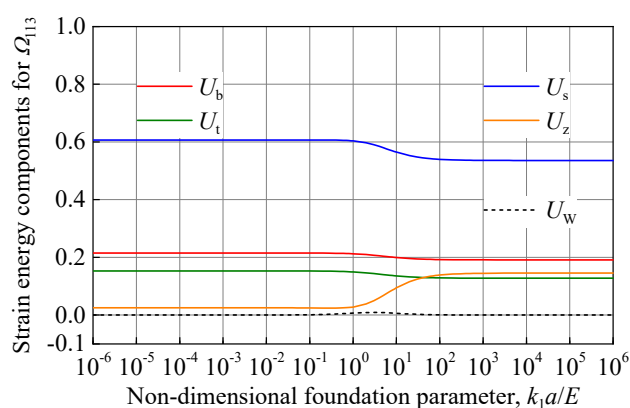


(a) 弾性ひずみエネルギー成分

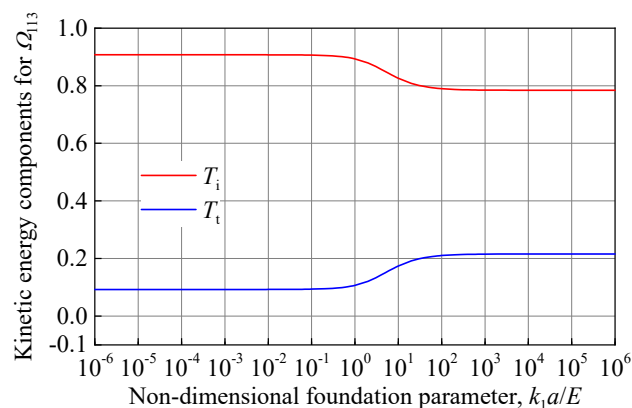


(b) 運動エネルギー成分

図-10 厚板の二次振動 Ω_{12} の規格化されたエネルギーに与える無次元地盤反力係数 k_1a/E の影響: $h/a = 0.4$, $b/a = 1$



(a) 弾性ひずみエネルギー成分



(b) 運動エネルギー成分

図-11 厚板の三次振動 Ω_{13} の規格化されたエネルギーに与える無次元地盤反力係数 k_1a/E の影響: $h/a = 0.4$, $b/a = 1$

図-3 (b)から図-11 (b)より、面内変位と面外変位の連成が大きいときに U_z が生じていることも確認できる。

以上より、地盤反力係数に対する弾性地盤—平板系の自由振動の全弾性ひずみエネルギーと全運動エネルギーにおける各エネルギー成分の寄与率の変動は、振動固有値問題の解（固有円振動数とこれに対応する固有振動モード）の理解

を手助けする有益な基礎資料の一つを提供していると言えよう。特に、地盤反力係数に対する弾性地盤に蓄えられる弾性エネルギー成分の変動は、弾性地盤—平板系の自由振動における弾性地盤と平板との幾何学的相互作用の影響を定量的に表す指標の一つである。また、図-3 (a)から図-11 (a)は、板厚が大きくなると、各自由振動の弾性地盤に

蓄えられる弾性エネルギー成分は減少し、弾性地盤と平板との幾何学的相互作用の影響が小さくなることを定量的に示している。

5. おわりに

本稿では、弾性地盤－平板系の自由振動性状の理解を手助けするための基礎資料の一つとして、弾性地盤の地盤反力係数に対する弾性地盤－平板系が自由振動するときの全弾性ひずみエネルギーと全運動エネルギーにおける個々のエネルギー成分の寄与率の変動に関する情報を三次元弾性論に基づく理論解析により提供した。また、矩形平板が面外曲げの自由振動するとき弾性地盤に蓄えられる弾性エネルギー成分は、弾性地盤－平板系の自由振動における弾性地盤と平板との幾何学的相互作用の影響を定量的に表す指標の一つであることを示した。なお、本稿の表-1と表-2で示した弾性地盤－平板系の無次元振動数とこれに対応する自由振動の運動エネルギー成分および弾性ひずみエネルギー成分の数値は、各種数値解析法のコード検証の参照解に使っていただければ幸いである。

今後は、平板の周面の支持条件を設計変数として、弾性地盤上にある平板の自由振動性状に関する基礎資料の蓄積を継続していく予定である。

謝 辞：本稿で用いた厳密解の導出にあたっては、明石工業高等専門学校 都市システム工学科 石丸和宏教授（当時）からご指導・ご助言を賜りました。また、名古屋大学情報基盤センターからはNUMPACKのNOLEQQのソースコードを提供していただきました。なお、本稿の有限要素解析は、平成24（2012）年度補正予算により導入された設備機器の一部を用いて実施しました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) Srinivas, S., Joga Rao, C.V. and Rao, A.K.: An exact analysis for vibration of simply-supported homogeneous and laminated thick rectangular plates, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.12 (2), pp.187-199, 1970.
- 2) Zhou, D., Cheung, Y.K., Lo, S.H. and Au, F.T.K.: Three-dimensional vibration analysis of rectangular thick plates on Pasternak foundation, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol.59 (10), pp.1313-1334, 2004.
- 3) Dehghan, M. and Baradaran, G.H.: Buckling and free vibration analysis of thick rectangular plates resting on elastic foundation using mixed finite element and differential quadrature method, *Applied Mathematics and Computation*, Vol.218 (6), pp.2772-2784, 2011.
- 4) Liu, H., Liu, F., Jing, X., Wang, Z. and Xia, L.: Three-dimensional vibration analysis of rectangular thick plates on Pasternak foundation with arbitrary boundary conditions, *Shock and Vibration*, Vol.2017, Article ID 3425298, 10 pages, 2017.
- 5) Lin, Z. and Shi, S.: Three-dimensional free vibration of thick plates with general end conditions and resting on elastic foundations, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol.38 (1), pp.110-121, 2018.
- 6) Dehghany, M. and Farajpour, A.: Free vibration of simply supported rectangular plates on Pasternak foundation: An exact and three-dimensional solution, *Engineering Solid Mechanics*, Vol.22, pp.29-42, 2014.
- 7) 稲田真大, 田川達也, 名木野晴暢, 足立忠晴: Winkler 基礎にある周面単純支持された弾性直方体の面外自由振動の閉じた形式の三次元弾性解, *土木構造・材料論文集*, 第39号. (投稿中)
- 8) 田川達也, 稲田真大, 名木野晴暢, 足立忠晴: 弾性基礎にある周面単純支持された矩形平板の面外自由振動に関する厳密な三次元弾性解析, *構造工学論文集*, Vol. 70A. (投稿中)
- 9) de Souza, V.C.M. and Croll, J.G.A.: An energy analysis of the free vibrations of isotropic spherical shells, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.73 (3), pp.379-404, 1980.
- 10) 芳村仁, 三上隆, 朴勝振: 逆対称アングル・ブライ積層板の自由振動, *構造工学論文集*, Vol.37A, pp.911-919, 1991.
- 11) 名木野晴暢, 清成康平, 水澤富作, 三上隆: B-spline Ritz法による任意の支持条件を有する矩形板の三次元自由振動問題のエネルギー解析, *構造工学論文集*, Vol.60A, pp.1-14, 2014.
- 12) 名木野晴暢, 大川栄友子, 樋口理宏, 足立忠晴, 水澤富作, 三上隆: 種々の面外荷重を受ける弾性基礎にある厚肉平板の三次元応力解析, *構造工学論文集*, Vol.58A, pp.26-39, 2012.
- 13) 白鳥正樹, 越塚誠一, 吉田有一郎, 中村均, 堀田亮年, 高野直樹 (共著): *工学シミュレーションの品質保証とV&V*, 丸善出版, pp.95-115, 2013.
- 14) 山田貴博 (監訳), 永井学志・松井和己 (訳): *有限要素法 (ABAQUS Student Edition付, 原書: A First Course in Finite Elements; Fish, J. and Belytschko, T.)*, 丸善出版, pp.239-245, 2008.
- 15) *Abaqus Analysis User's Manual: Vol.IV Elements Version 6.11*, Dassault Systemes Simulia, ABAQUS Inc., 2011.

(2023.9.14受付)

材料判定の目安を満足しない土を農業用ため池堤体土として 活用するための地盤改良技術に関する文献調査および今後の展望

姫野 季之¹・佐野 博昭²・本田 欽也³・河野 正臣⁴・

澄川 圭治⁵・河野 真也⁶・太田 宗一郎⁷

¹都市・環境工学科, ²防衛大学校, ³日鉄高炉セメント株式会社, ⁴株式会社九州建設マネジメントセンター
⁵日本製鉄株式会社, ⁶株式会社ソイルテック, ⁷タナベ環境工学株式会社

農業用ため池の改修工事にあたっては、良質な堤体土を必要量確保する必要があるが、量や性状を満足する土の確保が困難となっており、改修工事の実施の支障となる事態が生じている。そこで、筆者らは、農業用ため池の築堤材料としての目安を満足しない土を改良して活用する技術の開発を行っているところであり、このための手段として固化材を用いた化学的改良に着目している。ここで、化学的改良に用いられる代表的な固化材として、セメント系、石灰系およびスラグ系の固化材があり、それぞれ多くの実績を有している。本報では、これらの代表的な固化材に関する文献調査を行うとともに、既往の研究による固化原理や改良効果の違いについてまとめ、さらに、今後の展望について述べる。

キーワード：農業用ため池、材料判定の目安、化学的改良、改良土、固化材

1. はじめに

農業用ため池（以後、ため池と略記する）とは、降水量が少なく、流域の大きな河川に恵まれない地域などで、農業用水を確保するために水を貯え取水ができるよう、人工的に造成された池のことをいう¹⁾。全国に15万箇所存在し、特に西日本に多く分布しているが、その多くは江戸時代以前に築造され、各地域において試行錯誤を繰り返して得られた経験をもとに造られたものと推測されているとのことであり¹⁾、老朽化に伴う安全面に不安を抱えている。実際に、地震や台風、集中豪雨のたびに多くのため池が決壊して下流域に被害を及ぼしており²⁾、各自治体はハード対策およびソフト対策についての計画・推進を進めている。

ここで、大分県には2,118箇所のため池があり、そのほとんどが明治以前に築造されたものであるとされている。また、このうち決壊した場合の浸水想定区域に家屋や公共施設等が存在し、人的被害を与える恐れのあるため池1,029箇所を防災重点農業用ため池としている²⁾。このため、ため池の整備にあたっては、決壊の危険性の高い箇所や老朽化が進んだ箇所から順次改修を行うとともに、人家等に影響を及ぼす利用されていないため池は廃止工事を行っているところである²⁾。他方、必要な材料の確保をはじめ改修時に直面する課題は多く、技術者を悩ませている。

そこで、本報では、化学的改良を施した土をため池堤体

表-1 材料判定の目安の一例（文献3）より一部抜粋）

項 目	内 容
粒度分布	高い密度を与える粒度分布であり、適度に細粒分が含まれていること。
コンシステンシー	収縮性が小さく、適度の組成を有すること。
比重	2.6 以上
透水性	少なくとも現場にて締固めた状態の透水係数が $5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ を最大値として緩和することができる。
締固め度	土質材料の含水状態により、密度、せん断強度、透水係数が変化し、最適含水比付近でせん断強度が極大となり、最適含水比からやや湿潤側で透水係数が極小となること等から、材料の透水性、強度、施工性を判定する。
せん断強さ	見かけの粘着力と内部摩擦力で表されるが、安定解析を行う場合には三軸圧縮試験により求める必要がある。また、統一分類等によりある程度せん断強さが推定できる。

表-2 地盤改良工法ならびに補強に関する工法分類法(文献4)より一部抜粋)

原 理	大分類	中分類
物理的改良	置換工法	押出し置換工法 圧入置換工法 他
	圧密・排水工法	載荷重工法 バーチカルドレン工法 他
	締固め工法	表層締固め工法 振動締固め工法 他
化学的改良	化学的安定処理	表層混合処理 事前混合固化処理工法 他

土として活用するための検討に資するため、セメント系固化材、石灰系固化材およびスラグ系固化材を対象に文献調査を行うとともに固化原理や改良効果の違いについて整理した結果を報告するものである。

2. 材料判定の目安

ため池は、堤体、洪水吐、取水施設、土砂吐および緊急放流施設から構成されている。このうち、堤体の改修には、遮水性の高い土（以後、刃金土と称する）を用いた前刃金工法が一般的であり、これは、刃金土を遮水材料として上流側に用いる工法である。表-1は、刃金土として用いることができる土質材料の性質の目安を示しており³⁾、これらの目安を満足していない土質材料は用いることができない。そのため、前刃金工法を適用する際には、必要量の良質な刃金土を改修工事現場近く（10kmを目安）で確保することが求められるが、困難なことが多く、自治体担当者を悩ます要因となっている。

3. 文献調査の概要

筆者らは、材料判定の目安を満足する土質材料の確保のためのひとつの手段として、目安を満足していない土質材料に固化材を添加することで、前出表-1に示した目安³⁾を満足する土質材料へと改良する地盤改良工法の適用性を検討しているところである。通常、地盤を改良して良質な土質に改善する方法には、物理的に改良する方法と化学的に改良する方法があるが⁴⁾（表-2参照）、本研究では、セメント系固化材や石灰系固化材を用いて固化する化学的改良工法に着目するものである。また、セメント系固化材や石灰系固化材のほかにスラグ系固化材も物理化学的性質の改善や強度発現に寄与する⁵⁾ことが報告されていることからスラグ系固化材も検討項目に加えるものとする。

そこで、これらの固化材による固化原理および特性を調査・整理することによって前述の課題の解決に向けた検討への端緒とするため、文献調査を行うこととした。文献調

表-3 主なセメント系固化材の種類と特徴⁶⁾

種 類		特 徴
汎用固化材	特殊土用	軟弱地盤（砂質土・シルト・粘土・火山灰質土）に幅広く使用できるほか、改良土からの六価クロム溶出を抑制する効果がある固化材
	一般軟弱土用	軟弱地盤に幅広く使用できる固化材
高有機質土用固化材		腐食土・有機質土・泥土等有機物含有量の多い土に効果がある固化材
発塵抑制型固化材		粉体で使用した場合に発塵の少ない固化材

査は、1990年度以降に関係学協会を中心とした機関誌、各種学会等で発表された論文等を対象に行った。その結果、セメント系固化材は184編、石灰系固化材は44編、スラグ系固化材は48編、合計276編の文献を検索することができた。本報では紙面の都合上、主要論文のリスト（セメント系固化材に関しては2000年以降に限る）を参考資料として巻末に付すものとする。

4. 固化材の固化原理と改良土の特性^{5)~9)}

(1) セメント系固化材^{6)~8)}

表-3に主なセメント系固化材の種類と特徴を示す⁶⁾。セメントで土を固める技術が広く認知されたのは、ポルトランドセメントが世の中に登場して約100年以上が経過した1930年代にアメリカで「ソイルセメント」が開発されてからである。ポルトランドセメントを用いた改良土は、セメントの収縮に伴うひび割れの懸念や有機分を多く含んだ土に対して改良効果が低い等の課題が示された。そのため、1970年代に入るとポルトランドセメントをベースとした地盤改良に特化した「セメント系固化材」と呼ばれる特殊なセメントが登場するようになった。土を固めるセメント類を大別すると、ポルトランドセメント、混合セメント（主に高炉セメント）、セメント系固化材の3種類に大別される。

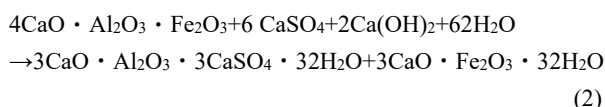
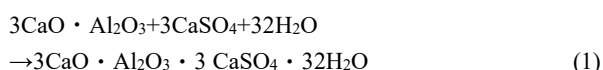
ポルトランドセメントおよび混合セメントの仕様は、日本工業規格（JIS）に定められている。一方、セメント系固化材は、JISで仕様が定められておらず、セメントメーカー各社が、特定成分や粒度を調整して各種の軟弱土を効果的に改良できる様に配合を行っている。

セメント系固化材の種類としては、母材のセメントの種類や有効成分の調整によって、汎用固化材（一般軟弱土用、特殊土用）、高有機質土用固化材および発塵抑制型固化材がある。

セメント系の固化材は、ポルトランドセメントによる水和反応が主なものであり、セメント系固化材を土に混ぜる

と、セメントが土中の水の一部と反応して主な水和物としてケイ酸カルシウム水和物(C-H-S)が生成される。ケイ酸カルシウム水和物の生成により土中の水分が水和反応物に取り込まれ、土粒子間の距離が近くなり、土粒子同士が密着する。さらに、水和反応が進むと水酸化カルシウム(Ca(OH)_2)が生成され、土中の粘土鉱物とポズラン反応を起こし、ケイ酸カルシウム等が生成して、改良土の長期強度向上に寄与する。

一般的なセメント系材料は、良質な砂質土等では強度発現性は高いが、含水比の高い軟弱土や有機物や粘土鉱物を多く含む土では、強度発現性が低い。これを補うために開発されたセメント系固化材は、セメントに比べて硫酸塩分が多く調整されている。硫酸塩分が多いセメント系固化材は、水和反応時にエトリンガイト($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)が生成され、土粒子間の空隙部分に骨格構造を形成して強度発現性が高まる。一般的に硫酸塩には石膏が用いられ、反応は式(1)、(2)のように示される。エトリンガイトは、土中の多量の水と結合した針状の結晶であり、水分が多くて空気の透過の少ない地盤中にある場合は炭酸化による分解が進みにくく、安定性の高い水和物である。



セメント系固化材による改良効果に及ぼす影響因子として、固化材の種類および対象とする土質などが挙げられる。改良前の土の含水比が高いほど、強度発現性が低くなるほか、土粒子の微粒分が多くなるほど強度発現性が小さくなること、有機物含有量や粘土鉱物の含有量が多くなるほど強度発現性が小さくなること、土のpHが低いと水和反応が阻害され、強度発現性が小さくなることなどが報告されている。そのため、使用する場合は事前に室内配合試験等を行って改良効果を確認する必要がある。

改良土の特性は、次のようなことが報告されている。まず、強度は、添加量の増加および材齢の経過に伴う水和反応の進行により増加し、雰囲気温度が高いほど水和反応が進みやすく強度が増加する。これに伴って透水係数は低下する。また、セメント系固化材は、一般のセメントよりエトリンガイトの生成量が多いことから、固化材の過剰添加や固化材と土の混合不良(固化材の過剰添加部分の偏在)がある場合、エトリンガイトの生成に伴う体積の膨張が生じる可能性に留意する必要がある。

(2) 石灰系固化材^{8), 9)}

表-4に石灰系固化材の種類と特徴を示す⁹⁾。ここで、石灰系固化材は、生石灰、軽焼ドロマイト、消石灰および水

表-4 石灰系固化材の種類と特徴⁹⁾

種 類	特徴・用途
一般軟弱土用	軟弱土(砂質土・シルト・粘土・火山灰質粘土)に幅広く使用できる汎用品
有機質土用	腐食土・有機質土・ヘドロなどの有機物含有量の多い土に効果がある固化材
発塵抑制型	施工上防塵性が要求される場合に使用される固化材

酸化ドロマイトを母材(主成分)とし、これに添加材として石膏、スラグ微粉末およびアルミナ含有物質またはフライアッシュなどのポズラン物質を添加したものでセメントを含有していない固化材を指している。石灰系固化材は、従来の石灰では固化しにくい含水比の高い粘性土や有機質土を固化するために開発されたものであり、石灰単体では強度発現の小さい土質に対して効果があり、高い強度が得られる。

生石灰(CaO)を土に添加すると土中の水分(H_2O)と反応を起こして、式(3)のように消石灰(Ca(OH)_2)が生成される。この反応により土中水は水和水(生石灰重量の0.32倍)として取り込まれ、かつ発熱反応により蒸発(生石灰重量の0.45倍)する。



生成直後の消石灰は絶乾状態であり、極めて高いサクシオンを有しており、この状態は周囲の土と平衡するまで持続され、さらに含水比を低下させる。土中で生成された消石灰は、比表面積が $12,000\text{cm}^2/\text{g}$ と微細粒子となり分散性に優れ、なおかつ反応性に富んでいる。土中で生成された消石灰は土中水に溶解し、カルシウムイオン(Ca^{2+})が土粒子表面に付着している水素イオン(H^+)、ナトリウムイオン(Na^+)、カリウムイオン(K^+)とイオン交換し、土粒子表面に吸着し、土粒子表面の帯電状態が変わり、団粒化する。これにより、土の塑性指数が低下する。

石膏系(CaSO_4)の添加材、あるいは石膏系とスラグなどのアルミナ系(Al_2O_3)の添加材によって生成したエトリンガイト結晶($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)が、空隙に針状に絡みあって土粒子を拘束する。また、土中の水分が結晶水に取り込まれ含水比を低下させる。イオン交換反応によって、 OH^- イオンが土中水をアルカリ雰囲気になると、土粒子の粘土鉱物や、コロイドを形成しているシリカ(SiO_2)やアルミナ(Al_2O_3)と消石灰(Ca(OH)_2)が化学的に結合し、不溶性の水和化合物を生成して土粒子を凝結し、この反応が長期間継続する。長期的に土中に含まれる炭酸または炭酸ガスによって炭酸カルシウムを生成し

て、不透水膜を形成し団結化を促進する。

石灰系固化材による改良効果に及ぼす影響因子として、細粒分が極端に少ない礫質土は、改良効果が小さいこと、地下水等で固化前に水位が高くなる箇所では強度発現性が小さくなること、含水比が低い土質の場合には改良土の密度が小さくなること、外気温が低い場合、強度発現性が小さくなることなどが挙げられる。

改良土の特性には、含水比や塑性指数を低下させ、施工性が早期に改善できることや、低強度から高強度まで所要の強度を長期にわたって発現させること、有機質土や泥土などに対する強度発現が可能であること、長期の仮置きを行っても強度の発現性は良いこと、改良土を破碎後に改良土を再度締め固めることによって再固化すること、盛土の変形や圧縮に追従できることなどが挙げられる。

(3) スラグ系固化材^{5), 10)}

鉄鋼の生産工程で副生する製鋼スラグを原料とするスラグ系固化材は、碎石状で締固めに適した粒度組成であるとともに、石灰分を多く含むことから軟弱土中の水分と反応して固化する性質があり、軟弱な建設残土や農地土などに混合して利用可能な土に改良できる。また、従来の粉体系改良材に比べて粉塵の発生が少なく、安価なため工事費の縮減が可能である。改良土は転圧性に優れ、過度に固化せず再掘削性を有しており、化学成分特性は、CaO含有量が30%以上、かつ、塩基度(CaO/SiO₂)が1.5以上である。

スラグ系固化材を適用すると、まず、粗粒分混合による粒度改善が図られる。次に、混合することによって土中の含水比が低減し、土粒子表面へのカルシウムイオンの吸着により団粒化して強度が高くなる。可溶性カルシウム分のボゾラン反応等による固化効果等による強度増加と再泥化抑制が図られる。

スラグ系固化材による改良効果に及ぼす影響として、軟弱土の含水比が高くなると効果が小さくなることなどが挙げられる。このほか、軟弱土中の細粒分含有率が多くなる場合や軟弱土中のSi、Al成分の溶出量が少ない場合、軟弱土中に含まれる有機物量が多い場合に改良効果が小さいことなどが報告されている。

改良土の特性としては、材齢の経過に伴う水和反応の進行により強度が増加すること、粒度改善により転圧性に優れていること、改良土は過度に固化しないため再掘削が容易であること、添加によって購入土量の抑制が図られ、安価な改良土を得ることができることなどが挙げられる。なお、スラグ系固化材は水と接すると高いアルカリ性を示すことから使用にあたっては事前に施工場所の確認を行うておく必要がある。

5. まとめと今後の展望

本報では、材料判定の目安を満足していない土質材料に

化学的改良を施してため池堤体土として活用するための検討に資するため、セメント系固化材、石灰系固化材およびスラグ系固化材を対象に文献調査を行うとともに固化原理や改良効果の違いについて整理した。ため池の改修に関する課題は、全国各地の自治体関係者が共通で抱える切実な課題であることから上述の検討内容に類似する研究事例も多い。しかしながら、使用する固化材や期待される土の物理・化学的および力学的性質の改善効果については土が堆積する場所や種類などによって大きく異なる。そのため、既往の手法をそのまま適用できるとは限らず、現場から採取した土試料と固化材を事前に混ぜ合わせることでその組み合わせの適合性を確認する必要がある。

筆者らは、本報で整理した各固化材の留意点などを踏まえ、大分県内で採取した材料判定の目安を満足していない土質材料を用いてセメント系固化材、石灰系固化材およびスラグ系固化材による改良効果に関する検討に既に着手しており、その結果については別報にて報告するものとする。また、今後は良質土を確保するための大分県内の土取場マップの作成や良質土確保のための迅速な土質材料判定のシステムを構築する予定である。

謝辞：本報は、大分ため池技術研究会研究助成の補助を受けて実施した。ここに深甚なる感意を表する。

参考文献

- 1) 農林水産省：ため池（参照日：2023年8月29日）
https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tam_eike/
- 2) 大分県：大分県のため池（参照日：2023年8月29日）
<https://www.pref.oita.jp/soshiki/15980/oitaken-tameike.html>
- 3) (公社) 農業農村工学会：土地改良事業設計指針「ため池整備」, pp. 9-19, 2015.
- 4) 社団法人地盤工学会：地盤工学用語辞典, p. 411, 2006.
- 5) 佐野博昭, 工藤俊昭, 山田幹雄, 田辺和康：鉄鋼スラグの混入が土の一軸圧縮試験結果に及ぼす影響, 建設用原材料, 17(1), pp. 23-30, 2009.
- 6) 一般社団法人 セメント協会編：セメント系固化材による地盤改良マニュアル (第5版), 技報堂, p. 4, 2021.
- 7) 一般社団法人 セメント協会編：セメント系固化材による地盤改良マニュアル (第5版), 技報堂, pp. 31-92, 2021.
- 8) 黒澤 功, 小嶋利司：講座 土を固める技術の動向 2. セメント・石灰で固める, 地盤工学会誌67(10), pp. 44-51, 2019.
- 9) 日本石灰協会編：石灰による地盤改良マニュアル (第4版), 日本石灰協会, pp. 7-11, 2014.
- 10) 田中裕一, 中川雅夫, 木曾英滋：土を固める技術の動向 8.スラグで固める, 地盤工学会誌68(3), pp. 34-41, 2019.

参考資料

論文題目	筆頭著者	発行年	出典
〈セメント系固化材43編〉			
固化処理したため池泥土の盛土材への適用性の研究	福島伸二	2000	土木学会論文集, 666, III-53, pp.99-116
固化処理したため池底泥土の堤体盛土材への適用性確認のための現場実証試験	福島伸二	2001	土木学会論文集, 680, III-55, pp.269-284
浚渫泥土を利用した貧配合セメント処理土の力学特性	渡部要一	2001	土木学会論文集, 694, III-57, pp.331-342
セメント混合浚渫土の固化強度と均一性評価	湯 怡新	2001	土と基礎, 49(5), pp.4-6
原位置における固化処理地盤の強度評価	笠間清信	2001	土と基礎, 49(5), pp.19-21
セメント改良された軟弱粘土地盤の剛性の評価	菅井正澄	2001	土と基礎, 49(5), pp.22-24
改良地盤の強度変形特性と支持力	前田良刀	2001	土と基礎, 49(5), pp.16-18
固化処理した底泥土を砕・転圧した築堤土の目標強度設定・配合試験法と施工管理法の提案	福島伸二	2002	土木学会論文集, 715, III-60, pp.165-178
固化した流動化処理土の力学的特性と品質基準に関する考察	久野悟郎	2003	土木学会論文集, 750, III-65, pp.99-113
固化処理底泥土で築造した傾斜遮水ゾーンによる老朽ため池の改修事例	福島伸二	2004	土木学会論文集, 764, III-67, pp.341-357
講座「土を固める原理と応用」1.講座を始めるにあたって	三木博史	2004	土と基礎, 52(10), pp.45-46
講座「土を固める原理と応用」2.セメントとセメント系固化材の化学	岡林茂生	2004	土と基礎, 52(11), pp.59-66
講座「土を固める原理と応用」3.改良土の特性	金城徳一	2004	土と基礎, 49-5(562), pp.4-6
講座「土を固める原理と応用」6.固化材と環境および固化改良土の有効利用	金城徳一	2005	土と基礎, 53(2), pp.43-50
固化処理底泥土からなる築堤土の非排水強度特性	鈴木素之	2005	土木学会論文集, 792, III-71, pp.211-216
固化処理底泥土による老朽ため池堤体改修の新設計法の提案	谷 茂	2006	農業土木学会論文集, 243, pp.301-308
フィルダムにおける固化処理底泥土を用いた堤体補強法とその設計法に関する事例研究	福島伸二	2007	土木学会論文集C, 63(2), pp.358-375
底泥土の固化処理強度に及ぼす粒度と含水比の影響	福島伸二	2007	土木学会論文集C, 63(2), pp.376-388
老朽化フィルダムに堆積した底泥土の固化処理強度に及ぼす粒度の影響に関する調査研究	北島 明	2007	土木学会論文集C, 63(2), pp.417-427
フィルダム堆積土のリサイクル利用による堤体改修について	谷 茂	2007	土と基礎, 55(10), pp.32-34
含水比と粒度が変化する底泥土における固化処理時における強度管理法の適用性	北島 明	2007	地盤工学ジャーナル, 2(3), pp.253-269
老朽化した堤体の固化処理底泥土を用いた改修法におけるゾーニング	福島伸二	2008	土と基礎, 56(3), pp.26-29
セメントおよび石灰改良土の発現強度に及ぼす養生温度の影響	佐藤厚子	2008	地盤工学ジャーナル, 3(4), pp.331-342
固化処理底泥土によるフィルダムの堤体改修における設計法	福島伸二	2008	農業農村工学会論文集, 256, pp.375-388
芦ノ町池堆積土の固化処理工法	岡村裕司	2008	水土の知, 76(5), pp.452-453
砕・転圧盛土工法による老朽ため池・フィルダムの堤体改修の特徴	谷 茂	2008	水土の知, 76(8), pp.729-733
固化処理底泥土を用いた老朽ため池堤体改修における堤体ゾーニングパターンの事例研究	福島伸二	2009	土木学会論文集C, 65(4), pp.789-805
固化改良した含水比と粒度が変化する混合泥土を用いた長原口池堤体改修工事	福島伸二	2011	地盤工学会誌, 59(9), pp.30-33
高含水比のセメント処理土の硬化過程	田中洋行	2012	地盤工学会誌, 60(6), pp.16-19
固化改良土の強度特性の長期的な経時変化	三上大道	2012	地盤工学会誌, 60(11), pp.8-11
フィルダムにおける貯水池内底泥土の固化改良土を用いた堤体耐震補強技術	福島伸二	2013	地盤工学会誌, 61(1), pp.18-21
浚渫土のセメント改良による他事業への利活用事例	中村伸二	2014	水土の知, 82(7), pp.543-546
特殊土における石灰・セメント固化反応ー有機質土ー	松山祐介	2018	セメント・コンクリート, 854, pp.26-31
土を固める技術の動向 1.講座をはじめるにあたって	北詰昌樹	2019	地盤工学会誌, 67(10), pp.42-43
土を固める技術の動向 2.セメント・石灰で固める	黒澤 巧	2019	地盤工学会誌, 67(10), pp.44-51
土を固める技術の動向 3.軽くして固める技術	渡部要一	2019	地盤工学会誌, 67(11/12), pp.46-53

土を固める技術の動向 4.補強材を入れて固める	峯岸邦夫	2019	地盤工学会誌, 67(11/12), pp.54-61
含水比の異なる周辺土との接触がセメント安定処理土の表層強度に与える影響	泉尾英文	2019	地盤工学ジャーナル, 14(4), pp.307-320
土を固める技術の動向 5.もうひと手間かける技術	笠間清信	2020	地盤工学会誌, 68(1), pp.38-41
土を固める技術の動向 6.海外の土を固める	野津光夫	2020	地盤工学会誌, 68(1), pp.42-45
土を固める技術の動向 7.混ぜずに固める技術	佐々木隆光	2020	地盤工学会誌, 68(2), pp.31-38
土を固める技術の動向 8.スラグで固める	田中裕一	2020	地盤工学会誌, 68(3), pp.34-41
土を固める技術の動向 9.講座を終えるにあたって	北詰昌樹	2020	地盤工学会誌, 68(3), pp.42-43
〈石灰系固化材13編〉			
火山灰風化粘性土の化学的・物理的性質	諸戸靖史	1991	土と基礎, 39(6), pp.9-14
生石灰を用いた建設残土の埋め戻し材としての再利用	吉田 保	1992	土と基礎, 40(6), pp.23-28
各種火山灰質粘性土の生石灰による土質安定処理と凍害防止	石田 宏	1993	土と基礎, 41(4), pp.33-38
生石灰安定処理土の反応機構と強度特性	石田 宏	1994	土と基礎, 42(4), pp.9-14
有機質火山灰質粘性土の安定処理と凍上防止	石田 宏	1997	土と基礎, 45(4), pp.9-12
石灰系固化材を用いた安定処理土の強度と凍上性	川端伸一郎	1997	農業土木学会論文集, 192(65-6), pp.829-835
石灰系土質安定材の現状と将来	山田洋夫	1990	石膏と石灰, 229, pp.92-95
関東ロームの石灰安定処理における反応性	宗 永焜	2001	土と基礎, 49(2), pp.13-16
消石灰と石膏による児島湖浚渫土の透水性改良	石黒宗秀	2002	農業土木学会論文集, 221(70-5), pp.575-580
石灰処理されたコアを有するため池の動的挙動 ―芸予地震による被害事例からの検討―	小林範之	2003	農業土木学会論文集, 225(71-3), pp.303-310
石膏系固化材と石こう混合物による改良土を利用したため池堤体の改修	下窪健一	2007	水土の知, 75(9), pp.846-848
ため池コア材への旧堤体土・底泥土再利用に関する一考察 ―兵庫県下における老朽ため池を事例として―	鈴木麻里子	2013	農業土木学会論文集, 284(81-2), pp.171-176
石灰系固化材で安定処理された砂質土の耐液状化性能	森井俊廣	2019	農業土木学会論文集, 308(87-1), pp.II_59-II_64
〈スラグ系固化材14編〉			
高炉水砕スラグ水和反応の液相分析による検討	大門正樹	1982	石膏と石灰, 176, pp.3-8
高炉水砕スラグの水和におよぼす刺激剤の作用	青木茂樹	1982	石膏と石灰, 181, pp.22-28
電気炉製鋼スラグの物理的, 化学的性質	桑山 忠	1999	土と基礎, 38(12), pp.23-28
事例報告 地盤工学において用いられる水砕スラグの特性	松田 博	2000	土と基礎, 48(6), pp.22-24
高炉水砕スラグの港湾構造物への裏込めへの利用	菊池嘉昭	2003	基礎工, 32(7), pp.58-61
高炉水砕スラグの地盤改良材としての適用性に関する基礎的研究	松田 博	2004	土木学会論文集, 764, III-67, pp.85-99
高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用	篠崎晴彦	2006	土木学会論文集C, 62(4), pp.858-869
高炉水砕スラグの硬化促進方法と効果強度評価方法の検討	菊池嘉昭	2011	土木学会論文集C, 67(1), pp.145-159
高炉水砕スラグの人工地盤への適用	岡本 隆	2012	地盤工学会誌, 60-11(658), pp.4-7
カルシア改質土で造成された地盤の特徴	赤司有三	2012	地盤工学会誌, 60-11(658), pp.12-15
製鋼スラグを用いた林道整備の開発	田辺和康	2012	地盤工学会誌, 60-11(658), pp.16-19
土工材料として用いられる高炉水砕スラグの地盤工学的諸特性	松田 博	2012	地盤工学会誌, 60-11(658), pp.20-23
浚渫土と鉄鋼スラグの混合土の工学的特性と混合の施工方法	湯 怡新	2013	地盤と建設, 31(1), pp.113-118
講座 土を固める技術 8.スラグで固める	田中裕一	2020	地盤工学会誌, 68(3), pp.34-41

(2023.9.29受付)

図書館運営委員

一宮 一夫（図書館長）	田中 美穂（図書館長補佐・一般科文系）
山本 通（教務主事補）	広瀬 裕美子（学生主事補・寮務主事補）
手島 規博（機械工学科）	常安 翔太（電気電子工学科）
十時 優介（情報工学科）	工藤 宗治（都市・環境工学科）
伊野 翔次（一般科理系）	

令和 5 年 11 月 10 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
