

第45号

令和4年4月1日

博士學位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

(令和3年度 後学期授与分)

金沢工業大学

目 次

◇博士

(学位記番号)	(学位の種類)	(氏名)	(論文題目)
博甲 第 123 号	博士(工学)	林 俊斉	コンクリート工の生産性向上に資する骨材選定と締固め完了判定に関する研究 1
博甲 第 124 号	博士(工学)	Rattiya Panichkul Mebusaya	Integration of E-portfolio into General Education Classroom and Automate Classification Model for E-portfolio 5
博甲 第 125 号	博士(工学)	富永 貴亮	SiC MOSFET のスイッチング損失低減に関する研究..... 10
博甲 第 126 号	博士(工学)	榊原 満	極低周波微小磁界振動に対するパーマロイを用いた磁気シールド効果に関する研究..... 15
博甲 第 127 号	博士(工学)	小森 和範	シームレス閉ループ構造を用いた高温超伝導磁束トランスの構築と高感度磁気計測応用に関する研究..... 19
博乙 第 59 号	博士(工学)	保倉 篤	繊維系材料を用いたコンクリート部材における力学性能の評価と適用拡大に向けた提案..... 23
博乙 第 60 号	博士(工学)	白井 武広	不連続炭素繊維強化熱可塑性樹脂の革新的プレス成形最適化技術の研究..... 27
博乙 第 61 号	博士(工学)	布谷 勝彦	厚板の炭素繊維強化熱可塑性プラスチックにおける曲げ加工プロセスの研究 31

は し が き

本誌は、学位規則（昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号）第 8 条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

氏名	はやし としなり 林 俊斉		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲 第123号		
学位授与の日付	令和4年3月15日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当		
学位論文の題目	コンクリート工の生産性向上に資する骨材選定と締固め完了判定に関する研究		
論文審査委員	(主査) 教授	宮里 心一	教授 木村 定雄
	教授	田中 泰司	教授 長田 茂美
		ものづくり大学	
	教授	澤本 武博	

論文内容の要旨

国土交通省は生産性革命プロジェクトの一つとして「i-Construction」を導入し、政府は建設現場の生産性を2025年までに20%向上させることを宣言した。様々なICT技術の導入が進む一方、コンクリート工の生産性向上はまだまだ改善の余地がある。特に、コンクリートの製造および施工過程においては、技術者の経験やノウハウへの依存度が高く、近年の技術者の減少はコンクリートの品質低下に繋がると懸念している。そこで、コンクリートの品質を確保することを前提とし、生産性向上に資する技術の開発に取り組んだ。

【第1章】

コンクリート工において、材料選定、配合設計、練混ぜ、打込み、養生の各段階における既往の研究を調査した。その結果、生産性向上に貢献できる開発余地があると判断した。「骨材選定」および「締固め」に着眼点を置き、研究に着手した。

【第2章】

コンクリートに使用する骨材は、コンクリート容積の約7割を占めており、コンクリートの品質に大きな影響を及ぼす。また、骨材は原材料単価が安く輸送コストが大きいため、地産地消が原則とされているが、近年、良質な骨材の減少やコンクリートの収縮抑制を目的として石灰石骨材の使用が増え、遠方より輸送して使用するケースも散見されるようになった。コンクリートに使用する骨材はJISの品質規格に基づいて選定されるが、選定した骨材を使用したコンクリートの性能を骨材試験の結果のみで評価することは困難である。しかし、コンクリート供試体による試験の検証は数か月を要するため、コンクリートの性能に及ぼす骨材の品質を適切かつ短時間で評価できる技術の開発が求められている。そこで、コンクリートの性能で重要な乾燥収縮ひずみと、骨材の品質（吸水特性およびひずみ特性）との関係について追及し、ひずみ特性と強い相関があることを確認した。さらに、

骨材のひずみ特性の要因として、化合水含有率という新たな指標を見出し、粗骨材の化合水含有率は骨材のひずみ特性と強い相関があることを明らかにした。化合水含有率の測定は、少量のサンプルでよいこと、粗骨材に限らず細骨材あるいは粉体でも測定可能であり、測定における個人差が少ないことが利点である。本論文では、化合水含有率を用いた新たな骨材の評価手法を提案し、検証した結果、細骨材および粗骨材の化合水含有率からコンクリートの乾燥収縮ひずみを推定できる可能性を示した。

【第3章】

コンクリートの締固め程度の判断は、従来、作業従事者の経験に基づく目視判定と感覚に基づいて行われている。コンクリートの締固めは、振動や突きなどを与え、型枠の隅々までコンクリートを行き渡らせるとともに、空隙を減らして密実にする行為とされているが、それを定量的に評価できる指標がないのが現状である。締固めの定量化に対する取組みは様々行われており、コンクリート中の振動加速度、バイブレータの負荷電流などの測定事例が報告されている。しかし、コンクリートの締固め性状は様々な要因が影響しており、数点のデータでは評価できないことや、高価なセンサを埋設できないことなどが問題としてある。本論文においては、新たに安価かつ簡易な判定手法として、浮遊体を提案し、評価を行った。プラスチック製の浮遊体をコンクリートに埋設し、バイブレータによる締固めに伴うコンクリートの液状化とともに浮遊体が浮上する仕組みである。スランプ 10cm、13cm、16cm のコンクリートに対し、種々のサイズの浮遊体で試験を行ったところ、直径 40mm の浮遊体を用いた場合に締固めを判定できる可能性を示した。また、浮遊体の浮上条件と加速度の関係を検証し、新たな指標として累積加速度で判定できる可能性を示した。

【第4章】

実施工では、前述したように、締固めの程度は技術者の目視判定が基本として行われている。本論文では、熟練工の減少によるコンクリートの品質低下を防止するため、締固め判定に AI の導入を試みた。棒状バイブレータを用いて締固め中のコンクリート表面の映像を記録し、複数のコンクリート技術者の判定を正解ラベルとして AI に学習させると、AI が自動でコンクリート技術者と同様な判定が可能か否か、つまり、従来の目視判定の代替技術と成り得るか検証を行った。その結果、学習データを適切に処理することで、正解率 80% を超える判定を確認することができた。さらに、コンクリートの基本性状であるスランプや空気量などの数値データを画像データとともに学習することでさらなる精度向上を図り、リアルタイムに判定結果を可視化することに成功した。

【第5章】

本論文では、コンクリート工の生産性向上に資する技術の開発に取り組んだ結果、化合水含有率を用いた骨材選定手法、浮遊体の浮上による締固め完了判定手法、および、AI による自動締固め完了判定技術を新たに提案した。

論文審査の結果の要旨

第1章では、社会的背景と技術的背景を整理した。すなわち、国土交通省は生産性革命プロジェクトの一つとして「i-Construction」を導入し、政府は建設現場の生産性を2025年までに20%向上させることを宣言した。これにより、様々なICT技術の導入が進む一方、コンクリート工の生産性向上はまだ改善の余地がある。特に、コンクリートの製造および施工過程においては、技術者の経験やノウハウへの依存度が高く、近年の技術者の減少はコンクリートの品質低下に繋がることが懸念される。そこで本学位論文では、コンクリートの品質を確保することを前提とし、生産性向上に資する技術の開発に取り組んだ。はじめに、コンクリート工における各段階、すなわち材料選定、配合設計、練混ぜ、打込み、養生に関する既往の研究を調査した。その結果、生産性向上に貢献できる開発余地は、「骨材選定」および「締固め」において大きいと判断し、その二つに焦点を当て、前者は2章で、後者は3章と4章で検討すべく、研究の目的と構成を設定した。

第2章では、骨材の収縮特性の解明と新しい骨材選定方法の提案について論じた。コンクリートに使用する骨材は、コンクリート容積の約7割を占めており、コンクリートの品質に大きな影響を及ぼす。また、骨材は原材料単価が安く輸送コストが大きいいため、地産地消が原則とされているが、近年では良質な骨材の減少により、遠方から輸送するケースも散見されるようになった。ここで、コンクリートに使用する骨材はJIS規格に基づいて選定されるが、その骨材試験の結果のみからコンクリートの性能を評価することは困難であり、実際にコンクリート供試体を作製した試験を実施するがその検証には数か月を要する。そのため、コンクリートの性能に及ぼす骨材の品質を短時間で適切に評価できる技術の開発が求められている。そこで、コンクリートの性能で重要な乾燥収縮ひずみと、骨材の品質（吸水特性およびひずみ特性）との関係について追及し、ひずみ特性と強い相関があることを確認した。さらに、骨材のひずみ特性の要因として、化合水含有率という新たな指標を見出し、粗骨材の化合水含有率は骨材のひずみ特性と強い相関があることを明らかにした。したがって本章では、世界で初めて細骨材および粗骨材の化合水含有率からコンクリートの乾燥収縮ひずみを推定できる手法を提案した。特に化合水含有率の測定は、少量のサンプルでよいこと、粗骨材に限らず細骨材あるいは粉体でも測定可能であり、測定における個人差が少ないことが利点である。

第3章では、締固め完了判定の新たな方法の提案について論じた。コンクリートの締固め程度の判断は、作業従事者の経験に基づく目視判定と感覚に基づいて行われている。コンクリートの締固めは、振動や突きなどを与え、型枠の隅々までコンクリートを行き渡らせるとともに、空隙を減らして密実にする行為とされているが、それを定量的に評価できる指標が現状ではない。締固めの定量化に対する取組みは様々行われており、コンクリート中の振動加速度、バイブレータの負荷電流などの測定事例が報告されている。しかしながら、コンクリートの締固め性状は多様な要因が相互に影響しており、数点のデータでは評価できないことや、高価なセンサを埋設できないことなどが課題としてある。以上の背景を踏まえて、本章においては、新たに安価かつ簡易な判定手法として、浮遊体の活用を

提案した。この原理は、プラスチック製の浮遊体をコンクリートに埋設し、バイブレータによる締固めに伴うコンクリートの液状化とともに浮遊体が浮上する仕組みを応用したものである。具体的実験として、スランプ 10cm、13cm、16cm のコンクリートに対し、種々のサイズの浮遊体で試験を行ったところ、直径 40mm の浮遊体を用いた場合に締固めを判定できる可能性を示した。さらに、浮遊体の浮上条件と加速度の関係を検証した。

第 4 章では、AI による締固め完了判定システムの提案について論じた。実施工では、前述したように、締固めの程度は作業従事者の目視判定が基本として行われている。本章では、熟練工の減少によるコンクリートの品質低下を防止するため、締固め判定に AI の導入を試みた。棒状バイブレータを用いて締固め中のコンクリート表面の映像を記録し、複数のコンクリート技術者の判定を正解ラベルとして AI に学習させると、AI が自動でコンクリート技術者と同様な判定が可能か否か、つまり従来の目視判定の代替技術と成り得るかを検証した。その結果、学習データを適切に処理することで、正解率 80%を超える判定を確認できた。さらに、コンクリートの基本性状であるスランプや空気量などの数値データを画像データとともに学習することで、さらなる精度向上が図れ、リアルタイムに判定結果を可視化することに成功した。

以上のとおり本学位論文では、化合水含有率を用いた骨材選定手法、浮遊体の浮上による締固め完了判定手法、および AI による自動締固め完了判定技術を新たに提案した。これらの成果は、社会基盤の主要材料の一つであるコンクリート工の生産性向上に資すると期待される。すなわち、我が国が直面する少子高齢化に伴う技術者不足問題に対して、社会インフラの建設の観点から課題解決に取り組んだ、時宜を得た研究である。特に、その研究を推進するに際しては、土木工学に加えて情報工学の視点も含めて検討し、DX も考慮した先進的な成果を挙げている。

ここで、申請論文は、2 編の国内における査読付き論文（セメント・コンクリート論文集、精密工学会誌）、1 編の国際会議、および 5 編の国内における学会発表等に基づいている。そして、それらの学術的レベルは、国内外の研究者や技術者等からも極めて高く評価されている。

以上を総じて、申請論文は博士（工学）の学位として十分に値すると判断する。

氏名	Rattiya Panichkul Mebusaya		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲 第124号		
学位授与の日付	令和4年3月15日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当		
学位論文の題目	Integration of E-portfolio into General Education Classroom and Automate Classification Model for E-portfolio		
論文審査委員	(主査) 教授	中沢 実	教授 山本 知仁
	教授	神宮 英夫	金沢大学
			教授 秋田 純一

論文内容の要旨

This research aims to: 1) study e-portfolios and be able to effectively integrate the min to general education curriculum; 2) enhance students' learning and assessment and understand the value of learning through e-portfolio integration; 3) assess students' learning progress and outcomes through e-portfolio; and 4) build an automated model to reduce students' and instructors' workloads and allow them to analyze and make use of the information from the completed e-portfolio. The researcher divided this research into five phases:

Phase 1: E-portfolio and curriculum studies aim to understand, select, and suitably design learning theories, curricula, templates, lessons, and platforms for a general education context in Thailand. The researcher analyzed general education objectives and outcomes, created the goal sheet, and selected the experiential learning theory to design the curriculum based on e-portfolio integration.

Phase 2: Through trial and error, the Maharae-portfolio integration requirements were explored to identify the advantages, limitations, and students' perspectives regarding the models, templates, and lessons for e-portfolio integration.

Using a purposive selection method of e-portfolio-based learning and processes of 88 participants—first-year students who enrolled in SWU 141 and SWU 151 in 2015—the researcher found advantages and limitations of the learning model, integration methods, and Mahara

platform. The skills, ethics set, and goal sheet were clarified and revised, and a self-transformation learning cycle model was created.

Phase 3: Testing the self-transformation learning cycle model and evaluating the Google Sites tool was completed. The researcher aimed to determine the students' satisfaction level with e-portfolio integration using the self-transformation learning cycle model and to evaluate Google Sites as an e-portfolio tool.

Using a purposive selected method of e-portfolio-based learning and processes of 89 participants—first-year students who enrolled in SWU 141 and SWU 151 in 2017—the researcher identified best practices of e-portfolio integration utilizing self-transformation learning cycle models, key components of effective e-portfolio integration, students' satisfaction, students' self-transformation, and a peer review and triangulation assessment model. The statistics used in this phase included chi-square, one-sample t-test, normality, and t-score.

Phase 4: Rubric-based assessments were developed to examine and create appropriate rubrics for assessing students' e-portfolio learning progress and outcomes, and to measure these assessments' effectiveness.

The researcher created two types of e-portfolio rubrics for general education course assessment: a set of six analytics rubrics, assessing five core skills and the ethics learning process, and one annotated e-portfolio assessment rubric. The researcher employed index of item-objective congruence (IOC, ranging from 0.66–1.00) to examine rubrics for e-portfolio outcomes and applied item discrimination power, Cronbach's alpha reliability coefficients, and correlations as analytical tools to determine the efficiency, confidence, and relationship of each item in the annotated e-portfolio assessment rubric.

Phase 5: The classification model automated feedback on students' e-portfolios during self-reflection. This solved the remaining obstacle—workload—and reduced the time required for both students and instructors. The researcher chose to continue developing a classification model using logistic regression with PyThaiNLP (ROC at 0.91 for topic prediction and 0.81 for immediate feedback) for a future model.

論文審査の結果の要旨

近年、Society5.0に代表されるインターネットとデジタル技術は、我々の生活を急速に変化させる重要な鍵になっている事は周知の事実である。そのため、日常生活、ビジネス、仕事など、あらゆるものが変化しており、これからの時代に求められるスキルは、それ以前の全てのものとは異なってきている。人々の学習・修学方法についてもデジタル技術の影響を受け、情報や知識に簡単にアクセスできるようになり、インターネット上に溢れる状態になっている。このような状況において、企業の需要に合致した従業員を育成するためには、教育内容、教え方、学び方、評価法を改革することが必要とされてきている。伝統的な授業が効果的に機能する時代は終わったと言える。

本申請論文において申請者によると、一般教養とは基本的には、多様な学問分野を取り入れることで、学生の視野を広げ、ハード・ソフト両面で必要な能力を向上させることを目的としている。特に、大学卒業後の社会で活躍するために必要なスキルとマインドを身につけることが一般教養と定義づけている。申請者が教育のフィールドとするタイの大学でも、一般教養が同様に重視されており、特に倫理的な科目をすべての一般教養の必須科目とされている。しかしながら、一般教養科目は、抽象的な理論や指導方法が伝統的な講義の主流となっている。そのため、21世紀型スキルとして、宗教も加味した倫理的なトピックを盛り込んだ新しいスキルセットを採用し、それらを強調しているにもかかわらず、学生にとっては理解しにくいものになっている。学生から見ると、このような不明確な学習方法と評価のために、有益な学びが得られない感覚があり、一般教養科目に対する学習態度は消極的になりがちとなっていた事実があった。

さらに、これらの一般教養コースでは、必須であるため、各クラスには100人前後の学生がいて、学生の数に比べ講師の数が少ないのが現状となっている。各講師は学期ごとに少なくとも4つのクラスを担当しなければならない、学生が卒業後においても、スキルとマインドを身につけて目標を達成できるように能力を開発するため、講師にとっては大きな負担となっている。理想的なカリキュラム、期待される成果、そして時間がかかることから、大学にとっても困難で長期的な課題となっている。

本研究のモチベーションとして、従来の学習経験を変え、学生が自分自身の学習について理解し、自分の能力、スキル、倫理を有意義に向上させ、実践するための学習・評価ツールが必要という観点より由来する。電子ポートフォリオは、eポートフォリオと呼ばれ、学生と教員双方が学習の進捗状況や最終的な成果を振り返り、評価し、内省することができる証拠に基づいた学習である。ポートフォリオは新しいツールではなく、10年以上前から導入され、主に学生のショーケースとして利用されてきた。デジタル化が進み、eポートフォリオが導入されてからは、ポートフォリオはデジタルの利点を活かし、単なる学習成果の収集にとどまらず、その能力を高めている。ポートフォリオは、形成的評価（学習プロセスの評価）と総括的評価（学習成果の評価）の両方を行うことを可能としている。eポートフォリオは、学生の学習、成果、強み、弱み、アイデンティティを地域社会や他の聴衆に示すことを可能としている。

この研究は以下の達成を目的としている。

- 1) eポートフォリオを研究し、一般教養のカリキュラムに効果的に組み込むことができること、
- 2) eポートフォリオの統合により、学生の学習と評価を強化し、学習の価値を理解すること、
- 3) eポートフォリオにより、学生の学習進捗と成果を評価すること、
- 4) 学生と教員の作業負担を軽減し、完成したeポートフォリオからの情報を分析して活用できるようにするための自動化モデルを構築すること。

申請者はこの研究を5つのフェーズに分けて本論文にて解説している。

フェーズ1: eポートフォリオとカリキュラムの研究では、タイの一般教養における学習理論、カリキュラム、テンプレート、レッスン、プラットフォームを理解し、選択し、適切に設計することを目的としている。申請者は、一般教養の目的と成果を分析し、目標シートを作成し、経験的学習理論を選択し、eポートフォリオの統合に基づくカリキュラムを設計している。

フェーズ2: 試行錯誤を行いながら、Mahara を用いた eポートフォリオ統合の要件を探り、eポートフォリオ統合のモデル、テンプレート、レッスンに関する利点、限界、学生の視点を明らかにした。2015年にSWU141とSWU151の科目において1年生である88名の参加者を対象に、eポートフォリオを活用した学習とそのプロセスを用いて、学習モデル、統合方法、Maharaの利点と限界を明らかにしている。また、スキル、倫理セット、目標シートを明確にして、修正し、リフレクション学習サイクルモデルを作成した。

フェーズ3: リフレクション学習サイクルモデルのテストとGoogleサイトでの評価を実施している。申請者は、リフレクション学習サイクルモデルを用いたeポートフォリオの統合に対する学生の満足度を測定し、eポートフォリオツールとしての評価を実施した。2017年にSWU141とSWU151において1年生である89名の参加者を対象に、eポートフォリオ統合におけるベストプラクティス、効果的なeポートフォリオ統合の主要要素、学生の満足度、学生の自己変革、ピアレビューと3者レビューモデルを統計的検定(カイ二乗、一標本t検定、正規分布、tスコアなど)により、その効果を明らかにした。

フェーズ4: ルーブリックを用いた評価を目的として、学生のeポートフォリオの学習進捗と成果を評価するための適切なルーブリックを検討・作成し、これらの評価の有効性を測定するために開発している。申請者は、一般教養における評価用に2種類のeポートフォリオ評価基準を作成した。1つは、5つのコアスキルと倫理学習プロセスを評価する6つの分析基準で、もう1つはeポートフォリオ評価基準である。本研究では、eポートフォリオの評価基準を検討するために、項目-目的適合性指数(Item-Objective Congruence, 範囲0.66-1.00)を用い、項目識別力、クロンバックの α 信頼性係数、相関関係を分析ツールとして用い、eポートフォリオ利用の有効性を明示している。

フェーズ5: 分類モデルは、リフレクション中の学生のeポートフォリオに対するフィードバックの自動化を試みている。これにより、本研究における一課題であった教員側の「作業量」が解決され、学生と教員の双方が必要とする時間が短縮される可能性を示して

いる。しかしながら、精度として改善が必要な点もみられるため、今後継続的に、PyThaiNLP(タイ言語の自然言語処理システム)を用いたロジスティック回帰による分類モデル (ROC: トピック予測 0.91, 即時フィードバック 0.81) の研究開発を継続することとしている。

申請論文の内容に関して、申請者は博士後期課程在学中において、海外における査読付き論文 2 件、国際会議 1 件の筆頭著者として発表している。なお、技術者倫理における高度な倫理観についても、長年にわたりタイにおける大学講師として倫理教育を含めた指導を学生に対して実践しており、確認済みである。よって、本論文は博士 (工学) の学位に十分値すると判断する。

氏名	とみなが たかあき 富永 貴亮		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲 第125号		
学位授与の日付	令和4年3月15日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当		
学位論文の題目	SiC MOSFET のスイッチング損失低減に関する研究		
論文審査委員	(主査) 教授	中田 修平	教授 深見 正
		教授 井田 次郎	
		大阪大学大学院	東京大学大学院
		教授 舟木 剛	准教授 喜多 浩之

論文内容の要旨

脱炭素社会実現に向けて、パワーエレクトロニクス技術の進展により、電力変換効率を最大化し、エネルギーを有効活用することが求められる。そのため、パワーエレクトロニクスの根幹技術である、パワー半導体を更に進化させることが重要である。

現在、半導体チップの集積化技術を背景に、Si (Silicon) を用いて作製されたパワー半導体が広く普及している。一方で、デバイス構造や製造プロセスの最適化により、Si の理論限界特性に近づいている。そのため、パワー半導体の更なる進化に向けて、物性の観点から Si よりも優位な特性を実現可能な SiC (Silicon Carbide) が注目されている。

上述の理由から、SiC を用いたパワー半導体の研究開発が盛んであり、Si パワー半導体から SiC パワー半導体への置換による実用化が期待されている。特に、広く普及している Si パワー半導体の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を、SiC パワー半導体の MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) に置換する流れが加速している。これより、大幅なスイッチング損失低減が可能であり、よって電力変換効率向上が実現される。

一方、パワーエレクトロニクス機器の小型軽量化に向け、更なる高周波数駆動化が求められている。しかしながら、数 10 kHz を超える駆動周波数においては、SiC MOSFET を用いてもなお、全損失に対するスイッチング損失の寄与が大きくなる。そのため、SiC MOSFET のスイッチング損失低減が課題となる。

以上の背景の基づき、本論文では、SiC MOSFET のスイッチング損失低減に取り組んだ。スイッチング損失を低減する方法として、SiC MOSFET 外部からの駆動方法最適化による研究が一般的である。一方で、本論文では、SiC MOSFET 内部のスイッチング動作の物理メカニズムにまで踏み込んで、SiC MOSFET そのもののスイッチング損失低減を目指した。本アプローチを用いた先行研究は僅少であり、本論文の独創性を特徴づける。加えて、SiC

MOSFET のスイッチング損失低減に向けて、より根本的に貢献できるアプローチであると考えられる。

本論文では、SiC を用いることにより生じる、SiC パワー半導体に固有の課題に特に着目した。具体的には、Si パワー半導体に比べて、SiC パワー半導体では、①素子出力容量が大きい（第 2~4 章）、②p ボディ領域電位変動が大きい（第 5 章）、という課題に対して、これらが SiC MOSFET のスイッチング特性へおよぼす影響を明確化した。本論文の構成および概要は以下のとおりである。

第 1 章：序論

第 2 章：還流ダイオードの違いによるスイッチング損失変化

第 3 章：SiC MOSFET の全損失解析

第 4 章：還流ダイオード出力電荷、逆回復電荷のスイッチング特性への影響

第 5 章：p ボディ領域電位変動のスイッチング特性への影響

第 6 章：結論

第 1 章では、本研究実施に至る背景を述べ、SiC パワー半導体の概要を説明した。特に、本研究対象である SiC MOSFET について、これまでの研究開発動向を述べ、更に、その普及に向けた残課題を、信頼性の観点、損失の観点から詳述した。その後、本研究の目的と、論文概要を記した。

第 2 章では、還流ダイオードの違いがトランジスタのスイッチング損失へおよぼす影響を考察した。具体的には、MOSFET を単体で用いた場合、MOSFET と外付け SBD (Schottky Barrier Diode) とをセットで用いた場合、SBD 内蔵 MOSFET を用いた場合の違いを検証した。結果として、還流ダイオードの出力電荷 (Q_{oss}) と逆回復電荷 (Q_{rr}) とが、SiC においては同程度の値を有することを見出し、また、これらの増大がトランジスタのドレイン電流増減に寄与することを明らかにした。更に、 Q_{oss} 、 Q_{rr} 増大のスイッチング損失への影響の考察から、SBD 内蔵 MOSFET を用いた場合にスイッチング損失が最小化されることを明らかにした。

第 3 章では、第 2 章にて明らかにした、還流ダイオードの違いがスイッチング損失へおよぼす影響に基づき、SiC MOSFET をインバータ動作させた場合の全損失解析を行った。結果として、高周波数駆動条件において、SBD 内蔵 MOSFET を用いた場合に、全損失が最小化されることを明らかにした。

第 4 章では、還流ダイオードの Q_{oss} 、 Q_{rr} 増大によるトランジスタの I_d 増減（第 2 章）に加えて、 I_d 増減に起因して dV_{ds}/dt (V_{ds} : ドレイン電圧)、 dI_d/dt の変化が生じ、よってスイッチング損失に影響を与えることを、実験およびシミュレーションによる素子動作解析から明らかにした。また、スイッチング速度が速くなるほど、その影響は顕著化されることを明確化した。

第 5 章では、p ボディ領域電位変動の SiC MOSFET のスイッチング特性への影響を調べた。 V_{ds} 変化時の変位電流により生じる p ボディ領域電位変動が、スイッチング特性へおよぼす影響を、p ボディ領域へのコンタクト抵抗が異なる素子の比較検証を通じて、実験お

よびシミュレーションから考察した。結果として、p ボディ領域電位変動により、ターンオン時には dV_{ds}/dt 減少、ターンオフ時には dV_{ds}/dt 減少と dI_d/dt 増大が生じることを明らかにした。また、これらは、p ボディ領域電位変動に起因した、閾値電圧変化とゲート電流変化とにより説明されることを示した。

第6章では、本論文を総括し、今後の展望を示した。

以上、本論文で得られた結果より、SiC に固有の課題がスイッチング特性に及ぼす影響に着目し、SiC MOSFET 自体のスイッチング損失低減を図ることが、「2050年カーボンニュートラル」実現に向けて、極めて有効なアプローチであると結論される。

論文審査の結果の要旨

脱炭素社会実現に向けて、パワーエレクトロニクス技術の進展により、電力変換効率を最大化し、エネルギーを有効活用することが求められる。そのため、パワーエレクトロニクスの根幹技術である、パワー半導体を更に進化させることが重要である。

現在、半導体チップの集積化技術を背景に、Si (Silicon) を用いて作製されたパワー半導体が広く普及している。一方で、デバイス構造や製造プロセスの最適化により、Si の理論限界特性に近づいている。そのため、パワー半導体の更なる進化に向けて、物性の観点から Si よりも優位な特性を実現可能な SiC (Silicon Carbide) が注目されている。

上述の理由から、SiC を用いたパワー半導体の研究開発が盛んであり、Si パワー半導体から SiC パワー半導体への置換による実用化が期待されている。特に、広く普及している Si パワー半導体の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を、SiC パワー半導体の MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) に置換する流れが加速している。これより、大幅なスイッチング損失低減が可能であり、よって電力変換効率向上が実現される。

一方、パワーエレクトロニクス機器の小型軽量化に向け、高周波数駆動化が求められている。しかし、数 10 kHz を超える駆動周波数においては、SiC MOSFET を用いても、全損失に対するスイッチング損失の影響が大きくなる。そのため、SiC MOSFET のスイッチング損失低減が課題となる。

以上の背景の基づき、本論文では、SiC MOSFET のスイッチング損失低減に取り組んだ。スイッチング損失を低減する方法として、SiC MOSFET 外部からの駆動方法最適化による研究が一般的である。一方で、本論文では、SiC MOSFET 内部のスイッチング動作の物理メカニズムにまで踏み込んで、SiC MOSFET そのもののスイッチング損失低減を目指した。本アプローチを用いた先行研究は僅少であり、本論文の独創性を特徴づける。加えて、SiC MOSFET のスイッチング損失低減に向けて、より根本的に貢献できるアプローチであると考ええる。

本論文では、SiC を用いることにより生じる、SiC パワー半導体に固有の課題に特に着目した。具体的には、Si パワー半導体に比べて、SiC パワー半導体では、①素子出力容量が大きい (第 2~4 章)、②p ボディ領域電位変動が大きい (第 5 章)、という課題に対して、これらが SiC MOSFET のスイッチング特性へおよぼす影響を明確化した。本論文の構成および概要は以下のとおりである。

第 1 章：序論

第 2 章：還流ダイオードの違いによるスイッチング損失変化

第 3 章：SiC MOSFET の全損失解析

第 4 章：還流ダイオード出力電荷、逆回復電荷のスイッチング特性への影響

第 5 章：p ボディ領域電位変動のスイッチング特性への影響

第1章では、本研究実施に至る背景を述べ、SiCパワー半導体の概要を説明した。特に、本研究対象であるSiC MOSFETについて、これまでの研究開発動向を述べ、更に、その普及に向けた残課題を、信頼性や損失の観点から詳述した。その後、本研究の目的と論文概要を記した。

第2章では、還流ダイオードの違いがトランジスタのスイッチング損失へ及ぼす影響を考察した。具体的には、MOSFETを単体で用いた場合、MOSFETと外付けSBD(Schottky Barrier Diode)とをセットで用いた場合、SBD内蔵MOSFETを用いた場合の違いを検証した。結果として、還流ダイオードの出力電荷(Q_{oss})と逆回復電荷(Q_{rr})とが、SiCにおいては同程度の値を有することを見出し、また、これらの増大がトランジスタのドレイン電流増減に寄与することを明らかにした。更に、 Q_{oss} 、 Q_{rr} 増大のスイッチング損失への影響の考察から、SBD内蔵MOSFETを用いた場合にスイッチング損失が最小化されることを明らかにした。

第3章では、第2章にて明らかにした、還流ダイオードの違いがスイッチング損失へ及ぼす影響に基づき、SiC MOSFETをインバータに適用した場合の全損失解析を行った。結果として、高周波数駆動条件において、SBD内蔵MOSFETを用いると、全損失が最小化されることを明らかにした。

第4章では、還流ダイオードの Q_{oss} 、 Q_{rr} 増大によるトランジスタの I_d 増減(第2章)に加えて、 I_d 増減に起因して dV_{ds}/dt (V_{ds} :ドレイン電圧)、 dI_d/dt の変化が生じ、よってスイッチング損失に影響を与えることを、実験およびシミュレーションによる素子動作解析から明らかにした。また、スイッチング速度が速くなるほど、その影響は顕著化されることを明確化した。

第5章では、pボディ領域電位変動のSiC MOSFETのスイッチング特性への影響を調べた。 V_{ds} 変化時の変位電流により生じるpボディ領域電位変動が、スイッチング特性へ及ぼす影響を、pボディ領域へのコンタクト抵抗が異なる素子の比較検証を通じて、実験およびシミュレーションから考察した。結果として、pボディ領域電位変動により、ターンオン時には dV_{ds}/dt 減少、ターンオフ時には dV_{ds}/dt 減少と dI_d/dt 増大が生じることを明らかにした。また、これらは、pボディ領域電位変動に起因した、閾値電圧変化とゲート電流変化とにより説明されることを示した。

第6章では、本論文を総括し、今後の展望を示し、本論文で得られた結果より、SiCに固有の課題がスイッチング特性に及ぼす影響に着目し、SiC MOSFET自体のスイッチング損失低減を図ることが、「2050年カーボンニュートラル」実現に向けて、極めて有効なアプローチであると結論した。

この様に、従来まで着目されていなかったSiC固有の課題が引き起こす現象を実験的及び理論的に明らかとしている。この結果、工学的にも有用な研究成果が得られたと判断できる。

本研究の研究成果としては、本学大学院在学中に査読付き論文4編、査読付き国際学会発表4件(内3件が口頭発表)がある。これらの件数は、申請論文の成果が学会において高い評価を得ていることを客観的に示すものである。

よって、本論文は博士(工学)の学位に十分値すると判断する。

氏名	さかきばら みつる 榊原 満	
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博甲 第126号	
学位授与の日付	令和4年3月15日	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当	
学位論文の題目	極低周波微小磁界振動に対するパーマロイを用いた磁気シールド効果に関する研究	
論文審査委員	(主査) 教授 上原 弦	教授 中田 政之
	教授 足立 善昭	教授 平間 淳司
	九州大学	
	名誉教授 笹田 一郎	

論文内容の要旨

本研究の目的は、磁気シールドの性能にとって、重要な要素を明らかにし、それらをどのように制御すれば性能が向上し、磁気シールドの高度化に寄与できるのかを示すことである。

エレクトロニクス機器や基礎物理学の設備、医療機器の分野など、先端分野の機器・装置には僅かな磁界ノイズにも影響を受け本来の性能を発揮できないものがある一方で、近年の電気利用、科学技術利用によって我々を取り巻く環境は、様々な磁界ノイズに満たされている。こうした状況にあって磁気シールドは磁界ノイズに脆弱な機器・装置側と発生側との共存を図るうえで非常に重要な役割を担っている。

特に脳磁計測に代表される生体磁気計測の分野は、我々の環境を満たす磁界ノイズの1/1000000程度かそれ以下を計測する技術であり、ノイズを遮蔽する磁気シールドルームが必須である。しかし、この設備自体が非常に大きく重量があり、また高価なため脳磁計測装置の導入そのものにとって障害となることが多い。そこで、この磁気シールドを高性能化、軽量化することができれば生体磁気計測の技術普及を後押しできるはずである。

そのためには磁気シールド性能を決定する要因を捉え高度化する設計指針とすることが重要である。単純な形状をした磁気シールドの性能が、材料の透磁率と呼ばれる磁気特性、および径や材料板厚といった形状から決まることは、従来から知られているが、ここから磁気シールド性能を向上させるための指針として得られるのは、透磁率を高めること、形状を小さくすること、材料の板厚を厚くすることといった概要程度であり、実用的な指針とは言い難い。例えば、透磁率は計測方法や設定によってさまざまな値を取る指標であって、本来は具体的に条件を示さなければならない。また、現実的には球殻や無限長円筒、立方体といった単純な形状ではカバーしきれない様々な磁気シールド形状に対処しなければならいため、

より具体的な指針が必要となる。そこで本研究では、材料の透磁率を具体的な計測条件と方法で規定し、また形状因子がどのような働きをもって磁気シールド性能に寄与しているのかを明らかにしようと試みた。また、透磁率と形状の条件から磁気シールド効果が推定できるようにすることで磁気シールドの高度化を目指した。

具体的な透磁率の計測条件を定めるにあたっては、脳磁信号の周波数が数 Hz～数百 Hz であることと、環境磁界ノイズが低い周波数帯域ほど大きくなることを考慮し、磁気シールド材料は 3 Hz 程度までの極低周波に対する透磁率が重要であると定めた。また周期的に変動する磁界ノイズに対応する磁気特性として、従来用いられてきた直流磁気特性ではなく、振幅透磁率を計測対象とすべきであることを述べ、具体的な計測システムを示して、0.001 A/m 程度の非常に微小な磁界変動に対する振幅透磁率まで計測可能であることを示した。更にこの指標を用いて熱処理条件の異なる試験片を評価し、熱処理で振幅透磁率が調整可能であることを、つまり磁気シールド効果を向上させうる手法であることを示した。

磁気シールド形状が及ぼす磁気シールド効果については材料内部の反磁界に注目し、外部磁界によって磁化した磁気シールド材料内部で、いかにして反磁界が作用して磁気シールド効果に影響しているのかを理論的に示した。磁気シールド効果を推定する方法については、板、円筒、立方体形状で磁界解析と実験により検証した。磁界解析を用いて、外部磁界が加えられたときの磁気シールド板、円筒、立方体を解析した結果、反磁界の影響で材料内部の磁界が減衰するため、磁気シールド材料には非常に小さな磁界強度しか作用しないことが確認された。このことから初透磁率あるいは、これに近い微小領域の振幅透磁率が磁気シールド効果に作用することと、材料の評価では 0.001 A/m 程度の小さな磁界領域まで評価できる計測システムが有効であることを確認し、また、初透磁率に近い微小磁界領域の振幅透磁率を用いて板、円筒、立方体の磁気シールド効果を推定し、実際に作製した磁気シールドの実測結果と比較し、推定精度の高いことを示した。

本論文においては、磁気シールド対象を脳磁計と定め透磁率の具体的な設定条件を定めたが、例えば磁界強度や周波数といった要求仕様は磁気シールド対象によって異なることが前提であり、本論文にて議論した計測・評価方法の基本部分は設定変更により他の機器・装置への応用が可能である。

磁気シールドの高度化を目指す上での今後の課題としては、熱処理技術による透磁率の更なる調整方法の確立、多層構造を含め多様な形状について外部磁界が材料内部で生じさせる反磁界の検証、および実物の磁気シールドルームにおける磁気シールド効果の推定検証などが挙げられる。今後も、これらの議論を通じて磁気シールドの高度化、および生体磁気計測の分野に貢献出来る技術を探求する。

論文審査の結果の要旨

本研究の目的は、磁気シールドの性能にとって、重要な要素を明らかにし、それらをどのように制御すれば性能が向上し、磁気シールドの高度化に寄与できるのかを示すことである。

エレクトロニクス機器や基礎物理学の設備、医療機器の分野など、先端分野の機器・装置には僅かな磁界ノイズにも影響を受け本来の性能を発揮できないものがある一方で、近年の電気利用、科学技術利用によって我々を取り巻く環境は、様々な磁界ノイズに満たされている。こうした状況にあって磁気シールドは磁界ノイズに脆弱な機器・装置側と発生側との共存を図るうえで非常に重要な役割を担っている。

特に脳磁計測に代表される生体磁気計測の分野は、我々の環境を満たす磁界ノイズの $1/1,000,000$ 以下の信号を計測する技術であり、ノイズを遮蔽する磁気シールドルームが必須である。しかし、この設備自体が非常に大きく重量があり、また高価なため脳磁計測装置の導入そのものによって障害となることが多い。従って、この磁気シールドを高性能化、軽量化することができれば生体磁気計測の技術普及を後押しできるはずである。

そのためには磁気シールド性能を決定する要因を捉え高度化するための指針を得ることが重要である。単純形状の磁気シールドの性能については、材料の透磁率と呼ばれる磁気特性、および径や材料板厚といった形状から決まることは、従来から知られている。しかしながら、この知見から得られる指針は、透磁率を高めること、形状を小さくすること、材料の板厚を厚くすることといった概要程度であり、実用的な指針とは言い難かった。例えば、透磁率は計測方法や設定によってさまざまな値を取り得る指標であるが、具体的な計測条件を規定しなければ決まらない値である。また、現実的には球殻や無限長円筒、立方体といった単純な形状ではカバーしきれない様々な磁気シールド形状に対処しなければならぬため、より具体的な指針が必要となる。そこで本研究では、材料の透磁率の測定方法を具体的に規定し、また形状因子がどのような働きをもって磁気シールド性能に寄与しているのかを明らかにしようと試みた。また、透磁率と形状の条件から磁気シールド効果が推定できるようにすることで磁気シールドの高度化を目指した。

申請論文は全6章で構成されており、各章の内容はつぎに示すとおりである。

第1章は序論であり研究の目的と背景、本研究の位置付けについて述べている。

第2章は磁気シールド対象とその条件の設定について述べている。具体的な透磁率の計測条件を定めるにあたっては、脳磁信号の周波数が数 Hz～数百 Hz であることと、環境磁界ノイズが低い周波数帯域ほど大きくなることを考慮し、磁気シールド材料では3 Hz程度までの極低周波に対する透磁率が重要であることを示した。また周期的に変動する磁界ノイズに対応する磁気特性として、従来用いられてきた直流磁気特性ではなく、振幅透磁率を計測対象とすべきであることを示した。

第3章は磁気シールドの理論について述べている。磁束が高透磁率材料に吸い込まれることによって磁気シールドされるという従来の考え方ではなく、高透磁率材料が磁化され

てその磁場によって磁気シールドされるという考え方を示し、そこでは反磁場の効果が重要でありまた磁性体内部での磁界の強さに注目することが重要であることを示した。

第 4 章では透磁率の計測システムの開発について述べている。このシステムは、0.001 A/m 程度の微小な磁界変動に対する振幅透磁率でも計測可能であることを、実際の材料を用いて示した。また、この計測方法が磁性材料の特性を示す新たな指標になり得ることを示した。さらに、この指標を用いて熱処理条件の異なる試験片を評価し、熱処理で振幅透磁率が調整可能であること、すなわち磁気シールド効果を向上させうる手法であることを示した。

第 5 章では磁気シールド効果を推定する方法について、板、円筒、立方体形状で磁界解析と実験により検証した。磁界解析ソフトウェアを用いて、外部磁界が印加されたときの磁気シールド板、円筒、立方体についての分析を行った結果、反磁界によって材料内部の磁界が減衰するため、磁気シールド材料には非常に小さな磁界強度しか作用しないことが確認された。このことから初透磁率あるいは、これに近い微小領域の振幅透磁率が磁気シールド効果に作用することを確認した。また、材料の評価では 0.001 A/m 程度の小さな磁界領域まで評価できる計測システムが有効であることを確認した。この分析を踏まえて、初透磁率に近い微小磁界領域の振幅透磁率を用いて板、円筒、立方体の磁気シールド効果を推定し、実際に作製した磁気シールドの実測結果と比較する実験を行い、磁気シールド効果の推定精度が十分に高いことを示した。

第 6 章は本論文の総括であり、第 1 章から第 5 章までをまとめるとともに、今後の課題および展望を明確にした。

本研究の成果は精密な計測や制御を行う先端的なシステムを環境磁界ノイズの妨害から守るために必須のものであり、今後の社会貢献が大いに期待されるものである。

申請論文の内容は、博士後期課程在学中において、査読付き論文 4 件、国際会議 2 件、国内口頭発表 2 件として申請者が筆頭著者として発表している。これらは申請論文の成果が学会において高い評価を得ていることを客観的に示すものである。また、技術者倫理における高度な倫理観についても確認済みである。

よって、本論文は博士（工学）の学位に十分値すると判断する。

氏名	こもり かずのり 小森 和範	
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博甲 第127号	
学位授与の日付	令和4年3月15日	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当	
学位論文の題目	シームレス閉ループ構造を用いた高温超伝導磁束トランスの構築と高感度磁気計測応用に関する研究	
論文審査委員	(主査) 教授 上原 弦	教授 足立 善司
	教授 平間 淳司	
	国立研究開発法人	国立研究開発法人
	物質・材料研究機構	物質・材料研究機構
	有沢 俊一	北口 仁

論文内容の要旨

1986年の J. G. Bednorz と K. A. Müller による酸化物高温超伝導体の発見により、液体窒素温度を超える高温の臨界温度 T_c を示す様々な高温超伝導物質が発見され、2021年現在では T_c は超高压下条件にある CH_3S において 14.7°C に達している。これらの中には実用に耐える特性を有しない物質も多くあるが、RE-123系、ビスマス系の酸化物、 MgB_2 などの物質系においては長尺線材化などの技術が進展し、これらを用いた高温動作の超伝導マグネットの開発などが精力的に進められてきた。

一方で、こうした高温超伝導体、とくに液体窒素を超える T_c を示す RE-123系やビスマス系酸化物超伝導体においては、実用上の視点から問題点が顕在化してきた。すなわち線材の接合手法である。数十メートルを超える長尺の線材が市販され、臨界電流 I_c や T_c の分布において良好な特性が得られている一方で、線材を超伝導状態で接続する手法は研究の途上にある。この事実は、接合部における電力損失という問題とともに、超伝導現象の起因となる巨視的な量子状態の実現という視点からも、重要な課題となっている。

超伝導磁束トランスはこれまで超伝導量子干渉素子(SQUID)を用いた高感度マグネットメータシステムにおいて実用されている。ここで超伝導磁束トランスは、測定対象の磁束を磁気シールド内に置かれた磁気センサに伝達し、また磁束の濃縮を行うことで素子に伝達される磁束密度を増加させることで素子の磁場感度を向上させる機能を有している。このような超伝導磁束トランスでは金属系超伝導体の線材の両端を超伝導接続して閉回路を構築することで線長全体を超伝導状態に保ち、静磁場の印加による回路上への超伝導シールド電流の誘起を可能にすることで静磁場に対する伝達機能を発現させている。

このような外部磁束の濃縮と伝達機能は、SQUID のみならず多くの磁気センサにとって

有用である。高透磁率材料によるフラックスガイド（磁束伝達器）を用いた汎用センサの高感度化が研究され、SQUID などに匹敵する感度の実現が図られる中、フラックスガイドとしての超伝導磁束トランスの適用は非常に有望と考えられるが、金属系超伝導体では取り扱いが難しく高価な液体ヘリウムなどによる冷却システムが必要であり、高温超伝導材料では先述の通り線材接合の問題が存在する。

全体が量子的な接続状態にある高温超伝導の閉回路が任意の形状で実現できれば、超伝導磁束トランスを構築し、汎用センサとの組み合わせることで簡便な液体窒素冷却で運用できる高感度静磁場マグネトメータが可能になると考えられる。また均一磁場の影響を排除し局所的な磁場勾配を検知できる超伝導グラジオメータ構造は、冷却が簡便になることで地磁気探査などのフィールドユースへの適用が視野に入る。さらには大口径のループコイル作製技術によって、超長波通信のような極低周波磁気情報の伝達、高温で永久電流モード動作する超伝導磁石や磁気シールドやといった応用が拓けると考えられる。

本研究では、市販の高温超伝導線材を用いた、無接合での閉回路の構築手法を提案し、従来の報告に比べ非常に大型である 10cm サイズでのループコイルを試作した。このループコイルにおいて、静磁場印加によるマイスナー電流の誘起を液体窒素温度において確認した。この結果は、ループコイル全体が超伝導接続していることを示している。さらにはこの構造に基づくマグネトメータ、またグラジオメータ構造の高温超伝導磁束トランスを試作し、液体窒素温度での静磁場計測への応用を検討した。

本論文は、研究内容と結果に基づき 5 章から構成される。

第 1 章では、序論として、超伝導物質の磁気計測応用、閉じた超伝導回路の特徴的なふるまいと超伝導磁束トランスの概要、現状における応用上の問題点、

第 2 章では、高温超伝導線材を用いた無接続ループ体の構築と静磁場特性、

第 3 章では、磁束トランスを用いたマグネトメータの構築と磁場伝達特性の評価、

第 4 章では、グラジオメータの構築と磁性体片の検出試験、

第 5 章では、総括として本実験のまとめ、及び今後の課題について記述する。

本実験を通じた実験結果により、高温超伝導磁束トランスにおける磁場伝達機能の実現が確認された。一方、外部磁場に対する磁束トランスの伝達効率は 100% に達しておらず、外部磁場を磁気センサに伝達する際の磁束濃縮による高感度化については、十分な結果には至っていない。理由としては、平行線路上の磁束の漏れや磁束トランスのループ間インダクタンス整合の最適化などの問題が考えられる。今後は、こうした問題を検討し、金属超伝導線を用いた磁束トランスの性能を液体窒素温度で実現することが求められる。

論文審査の結果の要旨

1986年のBednorz と Müller による酸化物高温超伝導体の発見により、従来の金属系超伝導体の上限を超え、さらには液体窒素温度を超える高温の臨界温度を示す様々な高温超伝導物質が発見され、現在では、RE-123系、ビスマス系の酸化物、MgB₂などの物質系において長尺線材化などの技術が進展し、これらを用いた高温動作の超伝導マグネットの開発などが精力的に進められてきた。その一方で、こうした高温超伝導体においては、実用上重要である線材間の接合についての問題が顕在化してきた。これは、接合部における電力損失の発生という問題に加え、超伝導現象の特徴である巨視的な量子状態が阻害されるという視点からも、重要な課題となっている。

超伝導磁束トランスはこれまで超伝導量子干渉素子(SQUID)を用いた高感度マグネトメータシステムにおいて実用されている。ここで超伝導磁束トランスは、測定対象の磁束を磁気シールド内に置かれた磁気センサに伝達する、また磁束を濃縮し、素子に伝達される磁束密度を増加させることで SQUID の実効的な磁場感度を向上させる機能を有する。この超伝導磁束トランスでは、金属系超伝導体の線材の両端を超伝導接続して閉回路を構築することで線長全体を超伝導状態に保ち、静磁場の印加による回路上への超伝導シールド電流の誘起を可能にすることで静磁場に対する伝達機能を発現させている。

このような外部から印加された磁束の濃縮と伝達する機能は、SQUID のみならず多くの磁気センサにとって有用である。高透磁率材料によるフラックスガイド(磁束伝達器)を用いた汎用センサの高感度化が研究され、SQUID 等に匹敵する感度のマグネトメータの実現が図られる中、フラックスガイドとしての超伝導磁束トランスの適用は非常に有望と考えられるが、金属系超伝導体では取り扱いが難しく高価な液体ヘリウムなどによる大掛かりな冷却システムが必要であり、一方、高温超伝導材料では上述の通り線材接合の問題が存在する。

接続部分をもたない高温超伝導のシームレスな閉ループ構造が実現できれば、これによって超伝導磁束トランスを構築することが可能になり、これを汎用センサと組み合わせることにより、簡便な液体窒素冷却で運用できる高感度静磁場マグネトメータが実現可能になると考えられる。また均一磁場の影響を排除し局所的な磁場勾配を検知できる超伝導ラジオメータ構造は、冷却が簡便になることで地磁気探査などのフィールドユースへの適用が視野に入る。さらには大口径のループコイル作製技術によって、超長波通信のような極低周波磁気情報の伝達や、高温で永久電流モード動作する超伝導磁石や線材網による磁気シールドといった応用が拓けると考えられる。

本研究では、接合部分を介さずに高温超伝導テープ線材を閉回路化する方法を提案し、従来に比べて非常に大型である 10cm サイズでの高温超伝導ループコイルを試作した。また、このコイルにおいて、静磁場印加によるマイスナー電流の誘起を液体窒素温度において確認した。この結果は、ループコイル全体が超伝導接続していることを示している。さらにはこの構造に基づくマグネトメータ、またラジオメータ構造の高温超伝導磁束トランスを試作し、液体窒素温度での静磁場計測への応用を検討した。

本研究の実験により、高温超伝導磁束トランスにおける磁場伝達機能の実現が確認され、磁場濃縮機能の実現も検証された。さらに、高温超伝導グラジオメータが有する勾配磁場への感応性および定常磁場への不感性を用いて、静磁場中にある磁性体の近傍に生じる磁場勾配を利用した検知コイル近傍にある磁性体の検知に成功した。

本論文は、研究内容と結果に基づき5章から構成される。

第1章では、序論として、超伝導物質の磁気計測応用、閉じた超伝導回路の特徴的なふるまいと超伝導磁束トランスの概要、現状における応用上の問題点、

第2章では、高温超伝導線材を用いたシームレスループ体の構築と静磁場特性、

第3章では、高温超伝導磁束トランスを用いたマグネトメータの構築と磁場伝達特性の評価、

第4章では、高温超伝導グラジオメータの構築と磁性体片の検出試験、

第5章では、総括として本実験のまとめ、及び今後の課題について記述している。

本研究の成果は高温超伝導材料の応用分野をさらに広げるために必須のものであり、今後の社会貢献が大いに期待されるものである。

申請論文の内容については、博士後期課程在学中において、申請者が筆頭著者として査読付き論文2件、国際会議2件、国内口頭発表5件を発表している。これらは申請論文の成果が学会において高い評価を得ていることを客観的に示すものである。また、技術者倫理における高度な倫理観についても確認済みである。

よって、本論文は博士（工学）の学位に十分値すると判断する。

氏名	ほくら あつし 保倉 篤				
学位の種類	博士（工学）				
学位記番号	博乙 第59号				
学位授与の日付	令和4年3月15日				
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当				
学位論文の題目	繊維系材料を用いたコンクリート部材における力学性能の評価と適用拡大に向けた提案				
論文審査委員	(主査)	教授	宮里 心一	教授	木村 定雄
		教授	鵜澤 潔	教授	中田 政之
			富山県立大学		
		教授	伊藤 始		

論文内容の要旨

鉄筋コンクリートは、耐久性が高く、重要な社会基盤に利用されている。しかしながら、塩害などの劣化により、建設後 50 年まで性能を維持できない部材も一部で存在している。その対策のひとつとして、高耐食性の特長を有する繊維系材料が注目されている。そこで本研究では連続繊維補強材（FRP 補強筋）および短繊維補強コンクリートに着目した。

FRP 補強筋は、一般的に熱硬化性 FRP (FRTS) が用いられている。しかしながら、高いコストが一部で弊害になり、普及には至っていない。そこで FRTS と比較して、製造工程の少ない熱可塑性 FRP (FRTP) の大量製造が可能になれば、コストの低減が期待される。したがって、コンクリート用補強筋としての適用に向けて「FRTP 補強筋単体」および「コンクリートと FRTP 補強筋との複合体」に対する要素試験を行った。

一方、短繊維補強コンクリートには、様々な繊維および強度レベルのコンクリートが用いられている。しかしながら、普通強度レベルの短繊維補強コンクリート (FRC) では、年単位の経時変化を評価した研究はない。したがって、長期間に亘り供用された時の曲げ性能を評価するため、水中および気中暴露した後の曲げ載荷試験を行った。また、アレニウス則を用いて、20°C の水中で 100 年間に亘り暴露された後の曲げ強度および曲げタフネスを推定した。

第 2 章では、「補強筋単体の引張性能の評価」を行った。その結果、①高温下で吸水された場合、GFRTS および GFRTS の引張強度は低下することを確認できた。②高アルカリ溶液に浸漬前後の引張強度は、全ての補強筋において、同程度になることを確認できた。③紫外線に照射された場合、GFRTS の引張強度は低下することを確認できた。

第 3 章では、「コンクリートと補強筋の付着性能の評価」を行った。その結果、①異形鉄筋と CFRTS 補強筋のいずれも、コンクリートとの引抜き試験により測定された付着強度

のばらつきは、同程度になった。②CFRTP 補強筋において、W/C が低く、圧縮強度が高い程、付着強度は高くなった。③コンクリートと CFRTP の付着強度は、既往の研究と比較すると、鋼材の付着強度よりも高いことを確認できた。④暴露環境が水中および気中にかかわらず、付着強度は同等になった。⑤温度変動を受ける環境下では、コンクリートと FRP 補強筋の熱膨張係数が同程度の場合、暴露前後における付着強度は同等になった。しかしながら、コンクリートと熱膨張係数の異なる FRP 補強筋の場合、暴露後の付着強度は暴露前より低下した。

第 4 章では、「補強筋を埋設したコンクリート梁の曲げ性能の評価」を行った。その結果、①CFRTP を埋設したコンクリート梁供試体の曲げ破壊荷重は、CFRTP と同等で、FRP や鉄筋よりも高かった。②曲げ破壊荷重の実験値、解析値および理論値は同等になることを確認できた。したがって、FRTP を補強筋として用いる場合も、鉄筋を用いる場合と同様に FEM 解析等により設定できると判断した。③試作段階の FRTP の径を太くすることで、コンクリート梁に埋設した時の曲げ耐力を向上することが望まれた。

第 5 章では、「短繊維を混入したコンクリートの曲げ性能の評価」を行った。その結果、①水中暴露した場合の力学性能は、暴露温度が高い程、経時的に低下した。一方、気中暴露した場合の力学性能は、暴露温度にかかわらず、保持された。②アラミド短繊維補強コンクリートを、40℃、60℃および 80℃の水中で 1 ヶ月～3 年間に亘り暴露することで、20℃の水中で 100 年間に亘り暴露された後の曲げ強度および曲げタフネスを推定できた。

第 6 章では、「土木分野への適用拡大に向けた提案」を行った。その結果、①CFRTP は、コンクリート用補強筋や PC 緊張材への適用も期待できた。さらに、信頼性の高いものを生産できれば、補修・補強への活用も期待できた。一方、FRTP は、直射日光を受ける環境下での適用は避けなければならなかった。ただし、物性値の増加あるいは太径化することで、水分を受ける環境下において、コンクリート用補強筋として適用可能であると考えられた。また、塩害による PC 橋の早期劣化が社会問題になっている北陸地方を対象に、CFRTP を補強筋として用いることの LCC を試算し、経済性を評価した。さらに、補強筋以外の部材として、早期実用を期待できる付帯物・仮設物を対象に、使用の利点を整理した上で、検査路やマンホールの蓋ではイニシャルコストおよび CO2 排出量を、仮設橋ではランニングコストを試算した。⑤アラミド短繊維補強コンクリートは、壁高欄、ボックスカルバート、縁石、3D プリンティング、部材接合部・間詰めコンクリート、セグメント、覆工、主桁(RC)、床版(RC)、橋脚、砂防ダム、護岸ブロック、津波避難タワーおよび火山シェルターへの適用が期待できた。

以上を総じて、第 7 章では結論をまとめた。

論文審査の結果の要旨

圧縮力に強いが、引張力に弱いコンクリートを補強するため、内部に鉄筋が埋設された建設部材が多用されている。ただし、この鉄筋は腐食するため、社会基盤の老朽化を誘発し、現代の我が国の社会問題になっている。これを解決するため、耐食性の高い FRP ロッドが鉄筋の代替として注目され、石川県志賀町で 1988 年に世界初の CFRP ロッドを実用した PC 橋が建設され、冬の季節風が厳しい日本海沿岸に立地しているにも拘らず現在でも安全に供用されている。ただし、使用材料は熱硬化性 FRP (FRTS) であり、高いコストなどが弊害になり、その後の普及には至っていない。ここで FRTS と比較して、製造工程の少ない熱可塑性 FRP (FRTP) を大量製造できれば、コストが低減しかつ現場加工も可能なため、普及が図れると期待されている。

また、金沢市長町の武家屋敷跡等でも見られる土塀には、圧縮力に強い土と引張力に強い藁が混合され、様々な作用外力に耐え得る部材として供用されてきた。これに対する近代の建設材料が、コンクリートに短い繊維を混合した、短繊維補強コンクリート (FRC) である。これに対する建設直後の強度特性については、多くの実験によって明らかにされ、設計値も定まっている。ただし、長寿命な部材への実用を鑑み、長期間の供用に伴う力学性能の経年変化を評価した研究はない。

以上の背景を踏まえて申請論文では、FRTP ロッドと FRC の 2 つを対象に、繊維系材料を用いたコンクリート部材における力学性能を評価した。

第 1 章では、既往の文献等を整理した上で、論文の位置付けと目的を設定し、以降の章立てで研究を推進する流れを述べた。

第 2 章～第 4 章では、一つ目の FRTP ロッドを対象に検討した。先ず第 2 章では、建設用材料としての使用を目途して、ロッド単体の引張性能を評価した。その結果、①GFRTTP ロッドおよび GFRTS ロッドの引張強度は高温下で吸水された場合に低下する、②全て (CFRTTP、CFRTS、GFRTTP、GFRTS) の FRP ロッドにおいて高アルカリ溶液へ浸漬後も引張強度は低下しない、③GFRTTP ロッドの引張強度は紫外線に照射された場合に低下する、ことを明らかにした。

第 3 章では、引抜き試験によりコンクリートと FRTP ロッドの付着性能を評価した。その結果、①鉄筋と CFRTTP ロッドにおける付着強度の測定値のばらつきは同様になる、②水セメント比 (W/C) が低くてコンクリートの圧縮強度が高いほど CFRTTP ロッドの付着強度は高くなる、③FRTP ロッドの付着強度は水中暴露後と気中暴露後で同等になる、④コンクリートと FRTP ロッドの熱膨張係数が同程度の場合には温度変動環境下への暴露後の付着強度は低下しないが両者の熱膨張係数が異なる場合には暴露後の付着強度は暴露前より低下する、ことを明らかにした。

第 4 章では、FRTP ロッドを埋設したコンクリート梁の曲げ性能を評価した。その結果、①CFRTTP ロッドを埋設したコンクリート梁供試体の曲げ破壊荷重は CFRTS ロッドの場合と同等で GFRTS ロッドや鉄筋の場合よりも高い、②曲げ破壊荷重の実験値・解析値・理論値は同等になるため FRTP ロッドを補強筋として用いる場合も鉄筋を用いる場合と同様に FEM

解析により設計できる、③試作段階の GFRTP ロッドの径を太くして引張強度と静弾性係数を増加させればコンクリート梁の曲げ耐力を向上させられる、ことを明らかにした。

次に第5章では、2つ目の FRC を対象に、アラミド短繊維を混入したコンクリートの長期に亘る曲げ性能を評価した。その結果、①気中暴露した場合は暴露温度に拘わらず力学性能は保持される、②水中暴露した場合の力学性能は暴露温度が高いほど経時的に低下する、③新設部材を 40℃・60℃・80℃で1ヶ月～3年間に亘り暴露することで常温において100年間に亘り供用された後の曲げ強度および曲げタフネスを推定できる、ことを明らかにした。

以上の第2章から第5章までの実験的検討を踏まえて第6章では、繊維系材料を用いたコンクリート部材の、土木分野への適用拡大に向けた提案を行った。具体的には、次の通りであった。①CFRTP ロッドは、コンクリート用補強筋や PC 緊張材へ適用でき、信頼性の高い生産を実現できれば補修・補強へも活用できる。②GFRTP ロッドは、直射日光を受ける環境下での適用を避けなければならない。③GFRTP ロッドの物性値を改良および太径化することで、コンクリート用補強筋として適用できる。④塩害による PC 橋の早期劣化が社会問題になっている北陸地方において、CFRTP ロッドをコンクリート用補強筋として使う場合の LCC を試算した結果によれば、経済的なメリットが認められる。⑤CFRTP は早期実用の期待できる付帯物および仮設物へ適用でき、ランニングコストや脱炭素効果の試算結果によれば、経済的および環境的なメリットが認められる。⑥アラミド FRC は、壁高欄、ボックスカルバート、縁石、3D プリンティング、部材接合部・間詰めコンクリート、セグメント、覆工、主桁(RC)、床版(RC)、橋脚、砂防ダム、護岸ブロック、津波避難タワーおよび火山シェルターへ適用できる。

以上を総括して、第7章では結論をまとめ、繊維系材料を用いたコンクリート部材における力学性能の評価と適用拡大に向けた提案を論じた。

申請論文は、3編の国内におけるフル査読論文（土木学会論文集、材料、セメント・コンクリート論文集）、2編の簡易査読論文、5編の国際会議、および9編の国内における学会発表に基づいている。そして、それらの学術的レベルは、土木学会の FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウムで優秀講演賞を受賞するなどの実績が証すとおり、極めて高く評価されている。

以上を総じて、申請論文は博士（工学）の学位として十分に値すると判断する。

氏名	白井 武広 <small>しらい たけひろ</small>	
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博乙 第60号	
学位授与の日付	令和4年3月15日	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当	
学位論文の題目	不連続炭素繊維強化熱可塑性樹脂の革新的プレス成形最適化技術の研究	
論文審査委員	(主査) 教授 鵜澤 潔	教授 影山 和郎
	教授 斉藤 博嗣	
	東京大学大学院	東京農工大学大学院
	教授 高橋 淳	教授 小笠原 俊夫

論文内容の要旨

熱可塑性樹脂をマトリックスとする熱可塑性樹脂炭素繊維複合材料(熱可塑 CFRP)は、成形時の樹脂重合反応が伴わない溶融固化変化であるため、ハイサイクル成形が可能な特徴がある。熱可塑 CFRP は主にプレス成形で加工され、予め繊維基材に熱可塑性樹脂を含浸させたスタンパブルシートと呼ばれる中間基材材料が原材料に用いられる。最近では、成形性と機械特性に優れた熱可塑不連続炭素繊維テープをランダムに積層した CTT (Carbon Fiber Taped reinforced Thermoplastic) のスタンパブルシートが開発され市販されている。CTT 材は、不連続繊維構造であるため、プレス成形時の金型内材料流動が大きく複雑な立体形状の加工が1回の成形プロセスで可能である利点に加え、連続繊維には及ばないが構造部材として十分な機械特性を有しており、量産化に適した材料である。しかし、成形中の金型内材料流動についてその挙動のメカニズムが解明されておらず、成形条件の最適化が難しいという課題がある。さらに、成形品内部は、材料流動により繊維密度分布や配向に偏りが生じ、異方性領域で機械特性が劣化する事が問題となっている。そのため、CTT 成形品の繊維配向の解析は成形条件の最適化と製品品質を確認するために重要な技術であると言える。

本論文の目的は、今まで解明されていなかったプレス成形中の金型内材料流動を金型に搭載したセンサ計測で明らかにし、さらにセンサ計測からプレス成形プロセス中の材料流動の予測を行い、従来の経験的な方法ではなく定量的な判断にもとづいた成形条件最適化の方法を検討することである。また、成形品内部の繊維配向を解析し、成形品の特性を推定する技術を開発することである。そのため、革新的プレス成形条件最適化技術である「自律適応制御プレス成形技術の開発」と「仮想空間における設計試作評価」を実現させるための二つの要素技術の研究をおこなった。自律型能動制御プレス成形は、金型搭載センサ

計測データから、成形中の金型内材料流動異常を予測し、適正な材料流動に適応したプレス成形条件へ自律的に装置制御を行う不良品の発生 0 を目指した成形技術である。仮想空間における設計試作評価は、成形品構造を数値モデル化してシミュレーションによる設計、評価で最適化検討コストを大幅に低減する技術である。

本研究では、革新的プレス成形条件最適化技術の要素技術の研究を目的として、熱可塑性 CFRP プレス成形プロセスをセンサ計測データで定量的に測定するため、材料流動の計測手法を検討(第 2 章)し、CTT 材料流動を計測するための新しい手法を考案した(第 3 章)。そして CTT 成形品を数値モデル化するため、繊維配向と機械特性を把握(第 4 章)し、X 線透過観画像解析で得た繊維構造で計算モデルを構築し機械特性精度を検証(第 5 章)した。

本論文の第 1 章では、研究背景と研究目的について、熱可塑性 CFRP プレス成形プロセスの説明と、プレス成形中の金型内流動に伴う成形品内部の繊維配向変化が機械特性に影響する課題を説明し、従来のセンサ計測技術ではプレス成形中の複雑な材料流動の測定ができないことを説明し、従来技術の問題点と本研究で解決する課題について述べている。

第 2 章では、熱可塑性 CFRP スタンピング成形プロセス中の金型搭載センサの計測値変化とプレス成形条件と関係性について、連続繊維平織構造のスタンパブルシートを用いたプレス成形実験で金型変位センサ値の変化に着目して解析したところ、金型変位と材料流動の関係性が明らかになり、プレス成形プロセス中の材料流動測定は金型変位センサが有用であることについて述べている。

第 3 章では、材料流動の大きい CTT 材の流動特性をみかけ粘度で評価し、材料万能試験機でひずみ速度と温度依存性データの取得手法を確立した。そして、プレス成形中の金型内材料流動のみかけ粘度を測定するため、圧力センサと変位センサ計測値を複合化した測定方法を考案し、実験により実証性を確認したプレス成形中の材料流動を定量的に計測できる手法について述べている。

第 4 章では、X 線 CT 装置で CTT 成形品内部の繊維配向解析と機械特性の関係について 2 つの実験を行い、成形品面内からサンプルリングした繊維配向データから得られた成形品面内の機械特性の予測精度と、面外方向繊維配向が機械特性に及ぼす影響とをそれぞれ実験で明らかにした結果を述べている。

第 5 章では、撮影原理の異なる 2 つの X 線 CT 装置と X 線位相イメージング装置を用いて、撮影画像処理から得た繊維うねりや繊維配向のデータから成形品全面の材料物性を定義した。その計算モデルの機械特性は、引張試験の機械特性とよく一致した結果となり、高精度な成形品構造の数値モデル化手法が得られた内容について述べている。

第 6 章では、各章の緒言をまとめ本論文で得た知見をまとめている。

本研究を通して、従来の経験的な方法ではなく定量的な判断にもとづいた成形条件の最適化と、さらに成形品の特性を推定することが可能となったと言える。

論文審査の結果の要旨

本研究は、今後の利用拡大が期待されている熱可塑性炭素繊維複合材料(CFRTP)について、プレス成形条件最適化技術の確立を目標とした、定量的なプレス成形の挙動解明と成形品の材料特性推定技術に関する研究である。

CFRTP はプレス成形が多く用いられているが、ハイサイクル成形が可能なスタンピング成形は多くの試作トライを要するなど、まだその成形技術は確立していない。また、複雑な形状が再現できる不連続炭素繊維材料は、成形時に型内で材料が流動するため、成形品の材料特性が成形前の材料特性と大きく異なることが問題となっている。

そこで、カットされた熱可塑性炭素繊維一方向テープをランダムに積層した CTT 材について、プレス成形中の金型内材料流動を金型に搭載したセンサで定量的に計測・評価し、いままで明らかにされていなかった、プレス機による型締め動作と材料流動とが連成するスタンピング成形特有の挙動を明らかにした。また、成形品の X 線透過観画像解析で得た繊維構造から計算モデルを構築し成形品の機械特性を精度よく推定することができる事を明らかにした。

本論文の第 1 章では、研究背景と研究目的について、熱可塑性 CFRP プレス成形プロセスの説明と、プレス成形中の金型内流動に伴う成形品内部の繊維配向変化が機械特性に影響する課題を説明し、従来のセンサ計測技術ではプレス成形中の複雑な材料流動の測定ができないことを説明し、従来技術の問題点と本研究で解決する課題について述べている。

第 2 章では、熱可塑性 CFRP スタンピング成形プロセス中の金型搭載センサの計測値変化とプレス成形条件との関係性について、連続繊維平織構造のスタンパブルシートを用いたプレス成形実験で金型変位センサ値の変化に着目して解析したところ、金型変位と材料流動の関係性が明らかになり、プレス成形プロセス中の材料流動測定は金型変位センサが有用であることについて述べている。

第 3 章では、材料流動の大きい CTT 材の流動特性をみかけ粘度で評価するために、材料万能試験機でひずみ速度と温度依存性データを取得した。そして、プレス成形中の金型内の材料流動時のみかけ粘度を測定するため、圧カセンサと変位センサ計測値を複合化した測定方法を考案し、プレス成形中の材料流動を定量的に計測できる手法について述べている。

第 4 章では、X 線 CT 装置で CTT 成形品内部の繊維配向解析と機械特性の関係について、成形品面内からサンプルリングした繊維配向データから得られた面内方向の機械特性の予測精度と、面外方向繊維配向が機械特性に及ぼす影響とをそれぞれ実験で明らかにした結果を述べている。

第 5 章では、撮影原理の異なる 2 つの X 線 CT 装置と X 線位相イメージング装置を用いて、撮影画像処理から得た繊維うねりや繊維配向のデータから成形品全面の材料物性を定義した。その計算モデルの機械特性は、引張試験の機械特性とよく一致した結果となり、高精度な成形品構造の数値モデル化手法が得られた内容について述べている。

第 6 章では、各章の緒言をまとめ本論文で得た知見をまとめている。

本研究を通して、従来の経験的な方法ではなく定量的な判断にもとづいた成形条件の最適化と、さらに成形品の特性を推定することが可能となったと言える。

以上の様に、白井氏は、今後の利用拡大が期待されている熱可塑性樹脂複合材料のプレス加工技術について、将来の「自律適応制御プレス成形」と「仮想空間における設計試作評価」の確立につながる大きな成果を得た。これは研究成果のみならず産業界への貢献も含めて高く評価できる。

また、有審査論文3編と国際会議発表3件における発表、加えて研究者倫理教育(eAPRIN)の履修により、研究者としての能力と科学技術者倫理との総合的能力を持つことを確認している。

よって、本論文は博士(工学)に十分値すると判断する。

氏名	ぬのたに かつひこ 布谷 勝彦
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博乙 第61号
学位授与の日付	令和4年3月15日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当
学位論文の題目	厚板の炭素繊維強化熱可塑性プラスチックにおける曲げ加工プロセスの研究
論文審査委員（主査）	教授 鵜澤 潔 教授 影山 和郎 教授 中田 政之 教授 宮里 心一 岐阜大学大学院 教授 仲井 朝美

論文内容の要旨

CFRTP をインフラ構造などの大型構造物へ適用するためには、単純断面の CFRTP 剛性部材の簡便な製造技術が必要であると考え、簡便な製造技術の一つとして、部分加熱と部分曲げ加工が有用であると考え、本論文は、連続炭素繊維織物材を強化材とした厚板 CFRTP 積層材を用いた部分曲げ加工プロセスの提案および実証を目的とした。

部分曲げ加工プロセスの研究は、部分加熱による低容量加熱と部分曲げによる低加工力の実証を目指した。しかしながら、部分曲げ加工において、曲げ部にシワを発生させないことは、原理的に不可能である。そこで、曲げ部のシワ形成過程を制御することで、機械特性に影響が少ないシワ形態を意図的に形成させる手法を考案し、その機械特性を評価した。シワを有する厚板 CFRTP 積層材の曲げ加工部の機械特性においては、従来の CFRTS と同等の強度と剛性を有し、かつ FRP 特有の衝撃的な破壊を抑えることを目標とした。本研究で得られた結果は以下の通りである。

(1) シワを含まない曲がり部の特性の評価（2章）

厚板の CFRTS と CFRTP 積層材の曲がり部の機械特性を評価および考察するために、従来の成形法（CFRTS：VaRTM 法、CFRTP：プレス成形 ヒート アンド クール法）により製作した曲がり部にシワを含まない L 型試験片の 4 点曲げ試験（CBS 試験：Curved Beam Strength 試験）を実施した。

厚板 CFRTP のシワを含まない曲がり部は、モーメント負荷に対して、CFRTS よりも強度が優れていることがわかった。しかし、その破壊は、CFRTS と同様に層間はく離により衝撃的に発生することが明らかとなった。異なる積層構成で同寸法の厚板 CFRTP の曲がり部においては、単層が薄い（積層数が多い）方が、強度に対して優位であることを確認した。曲がり部寸法については、曲げ内半径が強度に影響するが、剛性には影響しないことを確

認した。

(2) 部分曲げ賦形によるシワの特性の評価 (3 章)

シワやはく離を含む曲げ部を評価および考察するために、厚板 CFRTP 積層材の部分加熱による単純な曲げ加工と型を用いた曲げ加工を実施し、CBS 試験をおこなった。

金型により押し潰されたシワを有する曲げ部は、シワを含まない曲げ部と比較して、強度が著しく低く、やや低い剛性であることがわかった。シワを含む曲げ部の初期損傷はシワの重なり面のはく離により生じ、最終破壊は最外層の繊維の圧縮座屈によることが明らかとなった。よって、曲げ部にシワの重なり面がなく、曲げ部の最外層にシワがないシワ形態を意図的に形成できれば、強度増加と剛性のバラツキ低減が図れる可能性が示唆された。以上により、厚板 CFRTP の剛性部材の加工方法として、部分曲げ加工プロセスの可能性が示された。

(3) 部分曲げ加工プロセスの考案 (4 章)

新たな部分加熱による厚板 CFRTP 積層材の部分曲げ加工プロセスを考案するために、構造シミュレーションによる部分曲げ部のシワ形態の評価、曲げ部断面形状の幾何学的な検討、フォーミングシミュレーションによるプロセスの検討および考察をおこなった。構造シミュレーションにより、曲げ部に分散したシワの形態は、モーメント負荷時の面外応力が小さく、曲げ部の強度増加が期待できることがわかった。次に、曲げ部断面形状の幾何学的な検討により、内曲げ半径と外曲げ半径を同寸法 (板厚 $t4\text{mm}$ に対して曲げ $R10\text{mm}$) にすることを決定した。続いて、フォーミングシミュレーションにより、圧縮工具部にゴム弾性体のメンブレンを用いる多段モーショ部分曲げプロセス (圧縮動作と曲げ動作を個別に動作制御) において、圧縮動作後に曲げ動作をおこなうモードが、曲げ部に分散したシワを形成できることがわかった。そして、分散したシワが形成されるメカニズムを明らかにした。また、フォーミングシミュレーションのモデル化においては、自由曲げによる層間分離応力値の推定手法を考案した。

(4) 部分曲げ加工の実証と評価 (5 章)

考案した多段モーションによる部分曲げ加工プロセスを実証するために、実験装置を設計製作し、加工実験をおこなった。その結果、考案した“多段モーションによる部分曲げ加工プロセス”の有効性を実証した。また、将来的な厚板 CFRTP 積層材の連続生産を視野に、熱可塑エポキシ樹脂をマトリクスとした CFRTP 積層材の適用性を評価した。しかし、熱可塑エポキシ樹脂をマトリクスとした CFRTP 積層材は、現状では部分加熱が困難であることがわかった。実証実験装置を用いた各種厚板 CFRTP 積層板の多段モーショ部分曲げ加工プロセスの加工実験より、以下の知見を得た。

- ・ 部分加熱の消費電力は、 0.04kWh 程度 (板厚 4mm , 加熱長 90mm) と非常に小さく、また、曲げ加工の負荷も圧縮動作の最大荷重が 1.1kN 程度、曲げ動作の荷重が 0.09kN 程度と極めて小さい。
- ・ 受圧ジグを用いて圧縮動作後に曲げ動作をおこなうモードは、全層からなるシワの重なり面を形成せず、曲げ部に分散したシワを形成できる。
- ・ 曲げ部の分散したシワ形態は、モーメント負荷に対して衝撃的な破壊挙動を示さず、

緩慢な破壊挙動を示す。

- ・ 厚板 CFRTP 積層板の曲げ部において、分散したシワ形態は、その他のシワ形態と比較して、曲げ部の強度と剛性が高く、そのバラツキも小さい。この結果は、CFRTP の積層構成（単層厚もしくは層数）に関係しない。

以上により、連続炭素繊維織物を強化材とした厚板 CFRTP 積層材において、考案した多段モーショ部分曲げ加工プロセスは、簡便な曲げ加工技術として有効であること示し、部分曲げ加工の基本プロセス を確立した。

論文審査の結果の要旨

本研究は、連続炭素繊維織物材を強化材とした熱可塑性炭素繊維複合材料(CERTP)を用いた部分曲げ加エプロセスの提案および実証を目的としたものである。部分曲げ加工は、部分加熱による低容量加熱と部分曲げによる低加工力が期待できる。しかしながら、曲げ部にシワを発生させないことは原理的に不可能である。そこで、曲げ部のシワ形成過程を制御することで、機械特性に影響が少ないシワ形態を意図的に形成させる手法を検討し、従来の炭素繊維複合材料(CFRP)と同等の強度と剛性を有し、かつ複合材料特有の衝撃的な破壊を抑えることを目標とした。

本研究で得られた結果は以下の通りである。

(1) シワを含まない曲がり部の特性の評価(2章)

厚板の CFRP の曲がり部の機械特性を評価および考察するために、従来の成形法(CFRP:VaRTM法, CFRTP:プレス成形 ヒート アンド クール法)により製作した曲がり部にシワを含まないL型試験片の4点曲げ試験(CBS試験)を実施した。

その結果、同寸法の厚板 CFRTP の曲がり部においては、単層が薄い(積層数が多い)方が、剛性と強度に対して優位であることを確認した。曲がり部寸法については、曲げ内半径が強度に影響するが、剛性には影響しないことを確認した。

(2) 部分曲げ賦形によるシワの特性の評価(3章)

シワやはく離を含む曲げ部を評価および考察するために厚板 CFRTP の部分加熱による単純な曲げ加工と型を用いた曲げ加工を実施し、CBS試験をおこなった。その結果、曲げ部にシワの重なり面がなく、曲げ部の最外層にシワがないシワ形態を意図的に形成できれば、強度増加と剛性のバラツキ低減が図れる可能性が示唆され、厚板 CFRTP の剛性部材の加工方法として、部分曲げ加エプロセスの可能性が明らかとなった。

(3) 部分曲げ加エプロセスの考案(4章)

新たな部分加熱による厚板 CFRTP の部分曲げ加エプロセスを考案するために構造シミュレーションによる部分曲げ部のシワ形態の評価、曲げ部断面形状の幾何学的な検討、フォーミングシュミレーションによる検討および考察をおこなった。

構造シミュレーションにより、曲げ部に分散したシワ形態は曲げ部の強度増加が期待できることがわかった。フォーミングシュミレーションにより、多段モーシオン部分曲げプロセス(圧縮動作と曲げ動作を個別に動作制御)において、分散したシワが形成されるメカニズムとそのプロセスが明らかになった。また、自由曲げによる層間分離応力値の推定手法を考案した。

(4) 部分曲げ加工の実証と評価(5章)

考案した多段モーシオンによる部分曲げ加エプロセスを実証するために実験装置を設計製作し加工実験を通して、考案した“多段モーシオンによる部分曲げ加エプロセス”の有効性を実証し、以下の知見を得た。

- ・ 部分加熱の消費電力は非常に小さく、また、曲げ加エの負荷も極めて小さい。
- ・ 曲げ部に分散したシワを形成できる加エプロセスを見出した。

- ・ 曲げ部の分散したシワ形態は, 衝撃的な破壊挙動を示さず, 緩慢な破壊挙動を示す.
- ・ 厚板CFRTP積層板の曲げ部において, 分散したシワ形態は, その他のシワ形態と比較して, 曲げ部の強度と剛性が高く, パラツキも小さい.

以上により, 連続炭素繊維織物を強化材とした厚板CFRTPにおいて, 考案した多段モーション部分曲げ加エプロセスは, 簡便な曲げ加工技術として有効であることを示し, 部分曲げ加工の基本プロセスを確立した.

以上の様に布谷氏は, 今後の利用拡大が期待されている熱可塑性樹脂複合材料の加工技術について, シワの発生を許容する独自の曲げ加エプロセスを考案し, 試作とシミュレーションを通してそのプロセスの有効性を実証した. これは研究成果のみならず産業界への貢献も含めて高く評価できる.

また, 有審査論文3編と国際会議発表3件における発表, 加えて研究者倫理教育(eAPRIN)の履修により, 研究者としての能力と科学技術者倫理との総合的能力を持つことを確認している.

よって, 本論文は博士(工学)に十分値すると判断する.