

第44号

令和3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2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 121 号	博士(工学)	久島 康嘉	下肢の筋出力の方向を考慮した機能的電気刺激による運動制御に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
博甲 第 122 号	博士(工学)	上羽 文人	射出成形における高繊維含有率ポリアミド樹脂の流動挙動に関する研究・・・・・・5
博乙 第 57 号	博士(工学)	田中 宏明	金属-樹脂接合射出成形品の X 線 CT 画像解析による接合状態評価と接合強さ発現に関する研究・・・・・・・・・・11
博乙 第 58 号	博士(工学)	石田 応輔	炭素繊維強化熱可塑性樹脂スタンパブルシートの連続製造技術の研究・・・・・・15

## 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	くしま よしひろ 久島 康嘉
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲 第121号
学位授与の日付	令和3年3月13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	下肢の筋出力の方向を考慮した機能的電気刺激による運動制御に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 河合 宏之                      教授 鈴木 亮一 教授 竹井 義法                      教授 森本 喜隆 富山大学大学院 教授 平田 研二

## 論文内容の要旨

現在、日本では脳卒中や脊髄損傷などにより、肢体に不自由を抱える患者が数多くおり、これらの患者は機能的な運動をおこなうことが困難な場合がある。多くの患者が自発的なリハビリテーション(以下、リハビリ)によって運動機能の回復を図っているが、日本では脊髄損傷を対象とした再生医療製品が厚生労働省から「条件及び期限付承認」を取得し、上位運動ニューロンの損傷に対する治療方法として大きな注目を集めている。しかし、この再生医療の分野においても、運動機能回復のためのリハビリが必要であり、ロボティクスなどの応用によるリハビリ手法の技術的な発展にも関心が寄せられている。このような工学の応用によるリハビリにおいて、電気刺激によって運動機能の再建を図る機能的電気刺激(FES)の研究がおこなわれている。

FESによる運動制御をおこなうような従来研究としてFESとモータの融合によるペダリング運動をおこなうものや速度制御を位置制御によるFESペダリング運動をおこなうものなどがあるが、これらを含むFESの運動制御に関する従来研究の課題として片麻痺患者を対象にFESによるペダリング運動をおこなうと、電気刺激がされなくなる場合があること、一部の対麻痺患者はペダリング運動ができないということがあげられる。また、自転車上にシステムを構築して実際に電気刺激をおこないながら移動可能なものもあるが移動体として考えた際の安定性が保証されている研究がないという点、そして、制御の枠組みからシステムの有用性を確認するために非健常者を対象に単発的な実験をおこなう研究はあるが、非健常者を対象とした継続的な実験がおこなわれている研究はない。

そこで本研究では、従来のFESによる運動制御では十分な運動が実現できなかった片麻痺患者や対麻痺患者に対して、実現可能なFESを用いた運動制御を提案することを目的として、人の身体の特徴である二関節筋を含めた筋群への筋刺激による筋出力の方向を考慮した運動制御を提案、適用をおこない、安定性解析について議論する。

1 章では研究の背景と動機、目的について述べる。

2 章では、FES によるペダリング運動の速度制御について議論する。従来研究において片麻痺患者を対象に FES によるペダリング運動の目標値追従の実験をおこなうと、健足側での運動によって目標値を超えてしまい十分な電気刺激がされない場合があるため、FES ペダリングシステムに対して、速度制御則の提案をおこなう。まず、人の下肢とリカンベントトライクを一つのシステムとして考え、ペダリング運動のモデル化をおこなう。また、二関節筋を含む 4 つの筋群による筋出力の方向を考慮した筋刺激の方法について示す。つぎに、制御目的を実現するための速度制御則の提案とリアプノフの安定論に基づく安定性解析をおこなう。そして、提案する手法の有用性を確認するために健常者を対象に実験をおこなう。また同様に、片麻痺患者を想定してペダリング運動の際の電気刺激の有無による力の左右差に関する検証実験をおこなう。

3 章では、FES による交互屈伸運動の追従制御について議論する。従来研究において筋力が十分でない対麻痺患者対象に実験をおこなった際、ペダリング運動の途中で脚が止まってしまう場合があるため、筋力が十分でなくても実現可能な新しいリハビリ手法の実現を目指し、ペダリング運動とローイング運動の特徴を併せ持つ交互屈伸運動を提案する。まず、人の下肢とリカンベントトライクを一つのシステムとして考え、交互屈伸運動のモデル化をおこなう。また、筋出力の方向を考慮した交互屈伸運動を実現するための筋刺激の方法について示す。つぎに、提案するシステムに対して RISE 制御則の適用とリアプノフの安定論に基づく安定性解析をおこなう。そして、構築した FES 下肢交互屈伸トライクシステムの概要と機構の特徴について説明する。最後に提案する手法の有用性を確認するために健常者を対象に実験をおこなう。また同様に、構築したシステムの移動体としての活用についての検証をおこなう。

4 章では、車速を考慮した FES によるペダリング運動について議論する。FES によるペダリング運動の研究として移動体としての活用を考慮したものがあるが、実際に走行することを考慮したうえで制御の枠組みと組み合わせ、制御則の提案や安定性の議論をおこなうような研究は存在しない。そこで、リカンベントトライクでの移動を伴う新しいリハビリのための車速を考慮した FES ペダリングシステムを考える。まず、車速を考慮したペダリング運動のモデル化をおこなう。つぎに、目標走行速度でペダリング運動をおこなうための速度制御則の適用と安定性解析をおこなう。そして、提案する手法の有用性を確認するために健常者を対象に実験をおこなう。

5 章では、非健常者を対象とした検証実験について議論する。FES を用いた運動制御の安定性について議論し、非健常者を対象とした実験をおこなっている研究はあるが、リハビリの効果を確認するような長期にわたる実験はおこなわれていない。まず、従来研究に関して、非健常者を対象としたと実験を 1 か月間おこない、結果を確認する。つぎに、2 章の FES ペダリングシステムを用いて非健常者を対象とした実験を 1 か月間おこない、結果を確認する。そして、モーションキャプチャカメラシステム VICON と床反力系を用いて、椅子からの立ち上がりの際の運動解析をおこなう。

最後に 6 章では、本研究の成果についてまとめ、今後の課題について述べる。

## 論文審査の結果の要旨

現在、日本では肢体不自由者が 190 万人以上おり、その起因となる脳卒中患者や脊髄損傷者などが 110 万人以上いると報告されている。脳卒中や脊髄損傷などにより上位運動ニューロンに損傷を抱えると、立ち上がり、歩行、物の把持などの機能的な運動動作が困難となるため、患者の多くはリハビリテーションによって運動機能の回復をはかっている。このリハビリにロボティクスを応用することでリハビリ手法を技術的に発展させることに関心が寄せられており、そのひとつに失われた脊髄運動ニューロンの働きを補うために人工的に筋に刺激を与えて運動機能の再建を目指す機能的電気刺激(FES)がある。これまで FES は主として医療分野で用いられ、その使用方法は決められた刺激量を決められたタイミングで刺激するものがほとんどであったのに対し、近年になって工学的な視点から状況に併せて刺激量を変更する制御システムとして捉える研究がはじめられるようになった。この FES を用いた運動制御では、ヒトの身体を制御システムの一部と捉えるものの、身体的特徴を十分に反映した研究がおこなわれておらず、患者によっては運動が実現できない問題があった。

このような背景のもと、本研究は従来の FES による運動制御では十分な運動が実現できなかった片麻痺患者や対麻痺患者に対して、FES を用いて実現可能な運動制御の手法を構築することを目的とし、身体の特徴である二関節筋力学体系をモデル化に組み込み、工学的な視点から筋における非線形な活性化ダイナミクスや疲労などの動的変化の影響を受けにくい制御則を提案し、理論的な安定性解析とともに製作した実システムを用いて健常者ならびに非健常者を被験者とした実験を通して有用性の検証をおこなったものである。

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 章では、本研究の着手に至る社会的背景と国内外の研究動向やそれを受けての研究目的および方法について述べている。

第 2 章では、FES ペダリング運動に対する速度制御法を提案している。これは片麻痺患者の FES ペダリング運動に従来研究の位置制御法を適用した際、健側脚での運動の影響によって患側脚に十分な筋刺激が施されないという問題を解決するためのものである。具体的には、ヒトの下肢とリカンベントトライク(3 輪の自転車)をひとつのシステムとして考え、ペダリング運動のモデル化をおこない、ヒトの身体の特徴である二関節筋を含む 4 つの筋群による筋出力の方向を考慮することで効率的な筋刺激の方法について示した。望ましい速度でのペダリング運動を実現するための速度制御則の提案と工学的な視点からリアプノフの安定論に基づく安定性解析をおこなっている。そして構築した実システムにおいて健常者を対象に実験をおこない、滑らかなペダリング運動が実現されることと、電気刺激の有無による片麻痺患者のペダリング運動を想定した脚力の左右差に与える影響を示すことで、提案手法の有用性を検証している。

第 3 章では、筋力の弱い対麻痺患者がペダリング運動を実施しようとしても、トライクの構造上の特性からデッドポイントと呼ばれる下肢を動かせなくなる姿勢が存在することで滑らかなペダリング運動が実現出来ないという問題に対して、FES ペダリング運動に代

わる新しい FES 下肢交互屈伸運動を提案している。この FES 下肢交互屈伸運動は、デッドポイントの存在しない両脚を同時に屈伸させるローイング運動と左右の脚を別々に動かすペダリング運動の利点を兼ね備えた運動である。この新しい運動に対して、筋出力の方向を考慮した安定化制御則を提案している。実システムにおいては、フリーホイールを 2 つ用いた直線運動変換機構とチェーン・プーリギア機構を設計したことで、脚の屈伸運動によって前進するトライクを構築した。また、健常者を対象に実験をおこない、提案手法によって滑らかな周期運動が実現されることを示した。

第 4 章では、FES ペダリング運動によってトライクを望ましい速度で移動させるために、トライクの車速を考慮した FES による運動制御について議論している。従来研究では、実システムの構築による実験的な検証のみがおこなわれ、理論的な枠組みでの議論がなされてこなかったのに対し、本研究ではトライクのダイナミクスを含めたモデル化をし、2 章の筋刺激方法を適用したうえで制御則の提案と安定性解析をおこなっている。そして、健常者を被験者とした実験を通して、移動速度を考慮していない 2 章の制御手法と 4 章での提案手法での実験結果を比較および検討することで有用性を検証した。

第 5 章では、本研究で提案している FES を用いた運動制御の手法を麻痺を有する患者に適用した際の実験結果について議論している。週 2 回の実験を 4 週間実施し、筋刺激の有無によってペダリング運動の滑らかさに変化がみられることを確認した。また、初回と最終回の自発的な運動の比較によって、ペダリングの滑らかさが改善されたことを確認した。さらに、FES ペダリング運動の実施による副次的な結果として立ち上がり動作が改善された被験者の例が報告され、リハビリとしての効果に期待出来る可能性を示した。

第 6 章では、各章の結果をまとめるとともに、研究を発展させるうえでの課題や今後の展望について述べている。

本研究の研究成果については、本学大学院在学中に査読付き論文 2 編、査読付き国際学会発表 4 件、国内学会発表 6 件をおこなっており、国内口頭発表での優秀論文発表賞を含めた 3 件の受賞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。

なお、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	上羽 文人
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲 第122号
学位授与の日付	令和3年3月13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	射出成形における高繊維含有率ポリアミド樹脂の流動挙動に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 山部 昌 教授 廣瀬 康夫
	教授 瀬川 明夫 教授 中田 政之
	金沢大学 特任教授 米山 猛

## 論文内容の要旨

近年、多くの産業分野で、軽量化、形状自由度および意匠性等の観点から、金属部品の樹脂化の要望が高まってきている。しかし、金属部品の樹脂化は、該当部品の要件を考慮すると、高強度および高剛性が求められる観点から様々な複合材料が使用されている。また、生産性を考慮すると、複合材料の成形は射出成形で行われる事が多いが、射出成形用の熱可塑性繊維強化樹脂の場合、一般的に、その内部微視構造は複雑な繊維配向を示すと考えられ、製品の力学特性に関与するため、繊維配向およびその繊維配向に影響を与える樹脂流動挙動を把握する事は重要である。

これまで、ガラス繊維強化樹脂の流動挙動および繊維配向に関する研究については多くの報告がなされているが、その多くの報告は、繊維の含有率 50wt%未満についての射出成形における流動挙動および繊維配向の確認であり、繊維の含有率 50wt%以上の場合は、力学特性やキャピラリーレオメーターによる確認である。よって、繊維の含有率 50wt%以上の樹脂による射出成形の流動挙動についての報告は少ない。

そこで、本研究では、ガラス繊維強化ポリアミド樹脂（以下、GF-PA と示す）について、ガラス繊維の含有率が 50wt%以上を含む GF-PA が引き起こす流動上の変化を、ガラス繊維の含有率および射出条件毎に、成形中の樹脂流動挙動の直接観察を行い、その流動挙動をあきらかにする事を目的とした。また、その結果の汎用性の観点から板厚依存性についてもあきらかにするとともに、工業的な貢献が出来るように材料の設計指針を提案する事とした。

本研究の結果としては、GF-PA において限界壁面せん断応力 0.21MPa をしきい値にファウンテンフローからメルトフラクチャーに変化する事、および板厚依存性がない事をあきらかにした。その対策の方向性としては、ガラス繊維の含有率を低下させるだけではなく、粘度を低下させる事で対応が可能である事が確認出来た。これは、製品の要件から力学特

性が必要な成形品においては、重要な結論であり、今後は、ベースポリマー、平均残存繊維長および残存繊維長分布等の観点で粘度を低下させる等の対策案が考えられる。その結果、高繊維含有率 GF-PA であるが、成形性および力学特性が両立した材料開発の可能性があり、工業的に大きな意義を有すると考えられる。

本論文は 7 章で構成されている。

第 1 章では、射出成形、樹脂の特性および繊維強化樹脂の動向を説明した上で、高濃度 GF-PA を工業的部品に適用する問題点としては、力学特性が高く出来ない事および成形不良を形成する事について述べた。そして、高濃度 GF-PA の流動挙動把握の研究成果が、工業的な貢献が出来るような提案に繋がる事を研究目的とした。そして、その目的を達成するために、5 つの観点で、具体的なアプローチを整理した。

第 2 章では、1 章のアプローチ方法を用いて、PA-GF のフローフロントの流動変化定量化手法を構築した。流動挙動の定量把握のために、金型内部に設置した圧力センサーおよび温度センサーから取得したデータを用いて、粘度およびせん断速度を算出する事とした。また、フローフロントの可視化による直接観察については、ガラスブロックを設置した可視化金型および高速度カメラを用いて、成形品の板厚方向を直接観察した。そして、その撮像した画像を流動挙動の定量化のために、可視化画像を板厚方向で 5 層に分け、コア層、中間層、スキン層の流速を、専用ソフトを用いて解析した。

第 3 章では、第 2 章で構築した方法を用いて、GF-PA の流動挙動を板厚 2mm の短冊試験片により、粘度、せん断速度および壁面せん断応力の観点で定量化した。金型内部の樹脂流速については、メルトフラクチャーを形成する時は、流動方向の流速が、コア層、中間層およびスキン層の速度勾配がなくなる事が確認された。そして、壁面せん断応力値が 0.21MPa 以上になると、メルトフラクチャーを形成する事が確認された。壁面せん断応力値が、0.20MPa から 0.21MPa までの領域は、ファウンテンフローからメルトフラクチャーの遷移領域と推察された。

第 4 章では、第 3 章であきらかになった壁面せん断応力のしきい値の考え方に汎用性がある事を板厚依存性の観点であきらかにした。成形品の板厚に依存せず限界壁面せん断応力 0.21MPa 以上において、メルトフラクチャーの形成が確認された。そして、板厚に依っては、メルトフラクチャーにより形成する壁面せん断応力の影響で残存繊維長が短くなる事が確認された。

第 5 章では、本論文の限界壁面せん断応力をしきい値にファウンテンフローからメルトフラクチャーになるという考え方が工業的な製品に活用出来る様に、板厚方向の段差部の流動変化について、流動距離および領域という観点であきらかにした。

第 6 章では、本研究結果が、工業的な提案を出来る様にする為に、材料設計指針を提案した。力学特性を維持する観点から、ガラス繊維の含有率を高くしなければならない場合に、メルトフラクチャーを形成していたガラス繊維の含有率が高い GF-PA においても、材料の粘度を低下させる事でファウンテンフローを形成する事をあきらかにした。よって、LV-GF60wt%の様に、ガラス繊維の含有率が 60wt%の場合でも、粘度が低くなる事で壁面せん断応力が 0.21MPa 以下であれば、流動挙動はファウンテンフローを形成する事が確認された。

第 7 章では、本論文の総括であり、第 1 章から第 6 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。

本研究で得られた結論が、射出成形の現象解明、特に繊維強化樹脂の流動挙動解明に広く活用され、射出成形技術の発展に貢献出来る事を期待する。

## 論文審査の結果の要旨

近年、各産業分野において、軽量化・高付加価値の観点で金属材料部品の樹脂化が進んでいる。しかしながら樹脂材料単体では、金属材料と比較して、機械的特性が劣る。このために、樹脂材料を補強する目的で、ガラス繊維や炭素繊維を含有させて機械的特性を向上させ、金属材料と同等、あるいはそれ以上の特性が求められている。このために、樹脂単体にいかに多くの補強繊維を含有させるかが大きな課題である。一方樹脂部品の多くは生産性やコストを考慮すると、射出成形法によって成形されることが多く、この場合、金型には熔融された樹脂材料と、固体である補強繊維の混合体が、高温高压で射出されるために、複雑な流動挙動となる。特に補強繊維の繊維配向は、製品の特性を支配する大きな因子であり、その制御に関しては、従来までは試行錯誤によるものであり、このためにその成否が製品品質を大きく左右するものであった。上羽氏はこの成形プロセスにおいて、金型内の可視化により、樹脂材料ならびに強化繊維の流動挙動を明らかにするとともに、独自で考案した限界壁面せん断応力の理論を提案し、実験的、理論的にその有用性を確認した。

具体的には上羽氏は、ガラス繊維強化ポリアミド樹脂（以下、GF-PA と示す）について、ガラス繊維の含有率が 50wt%以上を含む GF-PA が引き起こす流動上の変化を、ガラス繊維の含有率および射出条件毎に、成形中の樹脂流動挙動の直接観察を行い、その流動挙動を明らかにする事を目的とした。また、その結果を汎用性の観点から板厚依存性についても明らかにするとともに、工業的な貢献が出来るように材料の設計指針を提案する事を目指した。

本研究の結果としては、GF-PA において限界壁面せん断応力 0.21MPa をしきい値にファウンテンフローからメルトフラクチャーに変化する事、および板厚依存性がない事を明らかにした。その対策の方向性としては、ガラス繊維の含有率を低下させることなく、粘度を低下させる事で対応が可能である事を確認した。これは、製品の要件から力学特性が必要な成形品においては、重要な結論であり、今後は、ベースポリマー、平均残存繊維長および残存繊維長分布等の観点で粘度を低下させる等の対策案が考えられる。その結果、高繊維含有率 GF-PA であっても、成形性および力学特性が両立した材料開発の可能性があり、工業的に大きな意義を有すると考えられる。

本論文は 7 章で構成されている。

第 1 章では、射出成形、樹脂の特性および繊維強化樹脂の動向を説明した上で、高濃度 GF-PA を工業的部品に適用する問題点としては、力学特性が高く出来ない事および成形不良を形成する事について述べた。そして、高濃度 GF-PA の流動挙動把握の研究成果が、工業的な貢献が出来るような提案に繋がる事を研究目的とした。そして、その目的を達成するために、5 つの観点で、具体的なアプローチを整理した。

第2章では、1章のアプローチ方法を用いて、PA-GFのフローフロントの流動変化定量化手法を構築した。流動挙動の定量把握のために、金型内部に設置した圧力センサーおよび温度センサーから取得したデータを用いて、粘度およびせん断速度を算出する事とした。また、フローフロントの可視化による直接観察については、ガラスブロックを設置した可視化金型および高速度カメラを用いて、成形品の板厚方向を直接観察した。そして、その撮影した画像を流動挙動の定量化のために、可視化画像を板厚方向で5層に分け、コア層、中間層、スキン層の流速を、専用ソフトを用いて解析した。

第3章では、第2章で構築した方法を用いて、GF-PAの流動挙動を板厚2mmの短冊試験片により、粘度、せん断速度および壁面せん断応力の観点で定量化した。金型内部の樹脂流速については、メルトフラクチャーを形成する時は、流動方向の流速が、コア層、中間層およびスキン層の速度勾配がなくなる事が確認された。そして、壁面せん断応力値が0.21MPa以上になると、メルトフラクチャーを形成する事が確認された。壁面せん断応力値が、0.20MPaから0.21MPaまでの領域は、ファウンテンフローからメルトフラクチャーの遷移領域と推察された（この研究内容で論文投稿済）。

第4章では、第3章で明らかになった壁面せん断応力のしきい値の考え方に汎用性がある事を板厚依存性の観点で示した。成形品の板厚に依存せず限界壁面せん断応力0.21MPa以上において、メルトフラクチャーの形成が確認された。そして、板厚に依っては、メルトフラクチャーにより形成する壁面せん断応力の影響で残存繊維長が短くなる事が確認された（この研究内容で論文投稿済）。

第5章では、本論文の限界壁面せん断応力をしきい値にファウンテンフローからメルトフラクチャーになるという考え方が工業的な製品に活用出来る様に、板厚方向の段差部の流動変化について、流動距離および領域という観点で明らかにした。

第6章では、本研究結果が、工業的な提案を出来る様にする為に、材料設計指針を提案した。力学特性を維持する観点から、ガラス繊維の含有率を高くしなければならない場合に、メルトフラクチャーを形成していたガラス繊維の含有率が高いGF-PAにおいても、材料の粘度を低下させる事でファウンテンフローを形成する事を明らかにした。よって、LV-GF60wt%の様に、ガラス繊維の含有率が60wt%の場合でも、粘度が低くなる事で壁面せん断応力が0.21MPa以下であれば、流動挙動はファウンテンフローを形成する事が確認された。

第7章では、本論文の総括であり、第1章から第6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。

以上述べたように、従来までは試行錯誤による射出成形条件の決定から、理論に基づく流動挙動の定量的なしきい値の定義により、工学的にも工業的にも汎用的で有用な研究成

果であると判断する。また本研究成果は本学大学院博士課程在学中において、査読あり論文2編、国内発表3件が示すように、学協会でも高く評価されている。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	たなか ひろあき 田中 宏明
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博乙 第57号
学位授与の日付	令和3年3月13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	金属-樹脂接合射出成形品の X 線 CT 画像解析による接合状態評価と接合強さ発現に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 山部 昌 教授 高野 則之 教授 吉田 啓史郎 教授 斉藤 博嗣 日本大学 教授 高橋 進

## 論文内容の要旨

自動車分野では温室効果ガスの排出量削減に向けた車体の軽量化が必要不可欠であり、マルチマテリアル化の推進と、その為の加工技術開発や材料開発が盛んに行われている。特に金属部品の樹脂化は軽量化効果が大きいですが、エンジン周辺や車体構造部等、耐熱性や耐久性、力学特性を要求する箇所には適応が困難である。このため、樹脂と金属の接合技術の重要となり、多様な接合手法が開発・提案されている。この一つとして、金属の接合面に微細な凹凸処理を行い、インサート射出成形により樹脂部品の成形と金属材料との接合を同時に行う手法が提案され、生産性、材料選択性および接合部の形状自由度の高さなどの利点から注目を集めている。

しかし、これらの接合手法は本格的な産業導入が進んでいない。この理由として、1) 詳細な接合メカニズムが明らかとなっていない2) 金属表面処理・成形条件と接合強度の関係が十分解明されていないことが挙げられる。これまで、金属表面の凹凸構造への樹脂流入によるアンカー効果、または接合界面での分子間力と化学的結合が接合の原理と考えられ、この解明のため、諸条件を変更した接合成形品の接合強度評価や接合部の断面観察などが行われてきた。しかしながら、これらの発現や寄与度に関して明らかにした報告はまだない。このように、接合メカニズムの解明が困難となっている理由は、金型内での成形プロセスおよび成形品接合部における有効な評価手法が確立されていないためと考えられる。

そこで本研究では、これまで金属-樹脂接合射出成形における接合強度発現メカニズムの解明に向けて、これまでに研究の報告がなされていない以下の項目を目的に検討を行った。

1. 射出成形プロセスにおける接合成形現象の解明
2. X線 CT 画像解析による接合部の 3次元非破壊定量化手法の構築
3. 接合部の 3次元非破壊定量化手法を活用した接合強度発現メカニズムの解明

まず、射出成形プロセスにおける接合現象の解明を目的に、金型壁面にガラスブロックを設置した樹脂流動可視化金型を使用し、インサートした金属プレートの凹凸構造近傍の樹脂流動をハイスピードカメラにより直接観察した。この結果、接合部での樹脂圧力挙動と凹凸構造への樹脂流挙動の関係を明らかにした。また、金属の接合強度に与える代表的な射出成形条件とせん断接合強度の関係を明らかにし、接合強度を向上させるための成形条件を提案した。しかしながら、接合強度発現メカニズムの解明に向けて支配的な寄与因子を特定するためには、成形品における凹凸構造に対する樹脂充填状態の詳細な評価が必要と再認識した。

そこで次に成形品接合部を X 線 CT 顕微鏡により観察し、取得した CT データの三次元画像解析から接合部の三次元非破壊定量化手法の構築を目指し検討を行った。これを実現するためには、CT データの輝度コントラストから、接合部を構成する金属、樹脂、強化繊維および空気の各物質相が占める領域を正確に分割して、それぞれの座標データを抽出する必要がある。強化繊維には独自開発した繊維抽出ツールを使用して抽出を行った。このツールは CT データに円柱モデルをフィッティングして、輝度値をもとにモデル軸座標の乱数変動と適合度の最適化を行うことで、個々の繊維座標を抽出するものである。また、その他の不鮮明な境界の分割には、物質層境界にある急激な輝度値勾配に着目した領域分割手法である Watershed Segmentation の適用により処理が可能となった。本画像解析手法の確立によって成形品接合部を構成する金属、樹脂、空気、および強化繊維の分布状況を確認できる。さらに、金属加工、樹脂材料および成形プロセスにおける諸条件の変更に伴い変化する接合状態の詳細な定量評価が可能となった。

次に、接合強度に影響すると考えられる代表的な因子として①凹凸構造に対する樹脂充填率（成形プロセス条件）②凹凸構造深さ（金属加工条件）③強化繊維長（樹脂材料条件）を変更した。またこれらの成形品接合部を三次元非破壊により定量化した。更にこれらの結果と諸条件における接合強度との比較を行い、各因子が接合強度に及ぼす影響および接合強度発現メカニズムの解明に向けて検討を行った。凹凸構造深さが異なる条件においてアンダーカット領域とこの領域に充填した樹脂体積を定量評価した結果、せん断接合強度と正の相関を確認した。また、金属の表面処理の無い部分では殆ど接合がなされない点から、アンダーカット領域への樹脂材料充填によるアンカー効果の発現が支配的な接合機序であることを確認した。

以上に述べた、金属-樹脂接合射出成形におけるせん断接合強度の発現に関する研究により、1. 射出成形プロセスにおける接合成形接合現象の解明、2. X 線 CT 画像解析による接合部の 3 次元非破壊定量化手法の構築、3. 接合部の 3 次元非破壊定量化手法を活用した接合強度発現メカニズムの解明において研究成果を得た。また、本研究において構築した、接合部の X 線 CT 画像解析による三次元非破壊定量化手法の適用範囲は金属と樹脂の接合だけに留まらず、画像データの十分な解像度と輝度コントラストが確保されれば、様々な材質の接合部評価に応用が可能であり、接合分野における現象解明の新たな手法として貢献するものと考えられる。

## 論文審査の結果の要旨

近年多くの産業では、軽量化、形状自由度の観点から、金属材料部品の樹脂化が進んでいる。しかしながら、樹脂材料のみの工業製品は、機械的特性が十分ではなく、通常は樹脂材料部品と金属材料部品とを組み合わせ、マルチマテリアル化の構造体設計が不可欠である。このため、樹脂と金属の接合技術が重要となり、多様な接合手法が開発・提案されている。この一つとして、金属の接合面に微細な凹凸処理を行い、インサート射出成形により樹脂部品の成形と金属材料との接合を同時に行う手法が提案され、生産性、材料選択性および接合部の形状自由度の高さなどの利点から注目を集めている。しかし、これらの接合手法は本格的な産業導入が進んでいない。この理由として、1) 詳細な接合メカニズムが明らかとなっていない2) 金属表面処理・成形条件と接合強度の関係が十分解明されていないことが挙げられる。さらに金属-樹脂間の機械的接合強度に関しては、そのメカニズムが明らかとなっていないために、ばらつきが大きく、工業的に信頼度は低い。この現状に対して、田中氏は金属-樹脂接合面における接合状態を定量化する独自の手法を開発し、その手法を応用して、金属-樹脂接合面における接合メカニズムを明らかにして、その機械的特性向上方法を提案した。

田中氏は金属-樹脂接合射出成形における接合強度発現メカニズムの解明に向けて、これまでに研究の報告がなされていない以下の項目を目的に研究を行った。

1. 射出成形プロセスにおける接合成形現象の解明
2. X線CT画像解析による接合部の3次元非破壊定量化手法の構築
3. 接合部の3次元非破壊定量化手法を活用した接合強度発現メカニズムの解明

本論文は7章により構成されている。

第1章では研究の背景、本実験で用いた供試材料と、その前加工（レーザー加工方法）、金属-樹脂接合における技術的課題が述べられている。

第2章では射出成形プロセスにおける接合現象の解明を目的に、金型壁面にガラスブロックを設置した樹脂流動可視化金型を使用し、インサートした金属プレートの凹凸構造近傍の樹脂流動をハイスピードカメラにより直接観察した。この結果、接合部での樹脂圧力挙動と凹凸構造への樹脂流挙動の関係を明らかにした。また、金属の接合強度に与える代表的な射出成形条件とせん断接合強度の関係を明らかにし、接合強度を向上させるための成形条件を提案した。

第3章では成形品接合部をX線CT顕微鏡により観察し、取得したCTデータの三次元画像解析から接合部の三次元非破壊定量化手法の構築を目指し検討を行った。これを実現するためには、独自に考案したCTデータに円柱モデルをフィッティングして、輝度値をもとにモデル軸座標の乱数変動と適合度の最適化を行うことで、個々の繊維座標

を抽出できることを述べている。

第4章では接合強度に影響すると考えられる代表的な因子として①凹凸構造に対する樹脂充填率（成形プロセス条件）②凹凸構造深さ（金属加工条件）③強化繊維長（樹脂材料条件）を変更し前章の評価技術を適用した。またこれらの成形品接合部を三次元非破壊により定量化した。

第5章では前章の結果と諸条件における接合強度との比較を行い、各因子が接合強度に及ぼす影響および接合強度発現メカニズムの解明に向けて検討を行った。凹凸構造深さが異なる条件においてアンダーカット領域とこの領域に充填した樹脂体積を定量評価した結果、せん断接合強度と正の相関を確認した。また、金属の表面処理の無い部分では殆ど接合がなされない点から、アンダーカット領域への樹脂材料充填によるアンカー効果の発現が支配的な接合形態であることを確認している。

第6章では強化繊維を含む樹脂材料について、同様の評価技術を応用して、CT撮影と強化繊維の画像抽出を行い、強化繊維が接合強度に及ぼす影響について、定量的に述べた。

第7章ではまとめとして、金属-樹脂接合射出成形におけるせん断接合強度の発現に関する研究を総括するとともに、本研究において構築した、接合部のX線CT画像解析による三次元非破壊定量化手法の適用範囲は金属と樹脂の接合だけに留まらず、画像データの十分な解像度と輝度コントラストが確保されれば、様々な材質の接合部評価に応用が可能であり、接合分野における現象解明の新たな手法として貢献できると提案している。

以上の研究成果より、従来までは定量化されていなかった、金属-樹脂接合面の機械的特性評価が可能となり、金属と樹脂とのマルチマテリアル化による工業製品の設計が可能となり、工学的にも工業的にも有用で汎用的な技術と位置付けられる。また本研究成果は本学高信頼理工学研究センター研究員として在籍中に、査読あり論文5編（内3件は主たる著者）、国内発表10件が示すように、学協会でも高く評価されている。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	いしだ おうすけ 石田 応輔
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博乙 第58号
学位授与の日付	令和3年3月13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	炭素繊維強化熱可塑性樹脂スタンパブルシートの連続製造技術の研究
論文審査委員（主査）	教授 鵜澤 潔      教授 影山 和郎 教授 中田 政之      教授 斉藤 博嗣 東京大学大学院 教授 高橋 淳

## 論文内容の要旨

本研究は、熱可塑性 CFRP の中間基材である熱可塑性スタンパブルシートの連続製造技術を研究したものである。スタンパブルシート製造における課題は熱可塑性樹脂の含浸の難しさによる高い製造コストと低い量産性にある。そこで含浸を効率的に行うためのメカニズムの検討とその成形技術を研究した。基材には汎用的な炭素繊維（CF）織物と PA6 樹脂を適用した。まずは基礎的含浸手法の検討から始めて、最終的に連続的な含浸プロセスを可能とする固定ローラー式 DBP 装置を用いた製造技術の確立を図った。本研究で得られた結果は以下の通りである。

### （1）基礎的含浸手法の検討

樹脂粘度を下げた高い含浸品質を得ることができる溶剤法と幅広い基材へ適用可能で簡易に均一な積層を得ることができるフィルムスタッキング法に注目して検討を行った。溶剤法については、PA6 を低コストで毒性の低いメタノール/塩化カルシウム溶媒に溶解させて炭素繊維織物へ含浸する手法を検討した。樹脂含浸量は単独で複合材を作製するには不十分であったが、溶液含浸処理した織物に PA6 フィルムを追加積層して成形した結果、含浸処理しない場合よりも含浸性が向上することが分かった。また、フィルムスタッキング成形において繊維束への含浸挙動を調査した結果、圧力、樹脂粘度、保持時間、繊維基材の浸透係数をパラメータとする Darcy 則による理論式で挙動を説明できることを示した。

### （2）ダブルベルトプレス（DBP）によるスタンパブルシート製造手法の検討

スタンパブルシートの連続的な含浸プロセスを可能とする DBP 装置に着目した。特に基材積層した嵩高い状態から含浸後の板厚までの厚み変化に対応できる固定ローラー式 DBP 装置を用いて成形技術を検討した。プロセス条件（ベルト速度、加熱温度、ローラー荷重、

冷却液圧、ベルト間 Gap) の違いが成形中の温度や圧力のプロファイルを変化させることで、成形板の含浸性へ影響を及ぼすことを明らかにした。

### (3) DBP 含浸プロセスモデルの開発とその検証

上記の(1)で得た含浸挙動を表す式を各ローラー直下に適用して、それを統合することで DBP 含浸プロセスモデルを構築した。CF 織物/PA6 のフィルムスタッキング基材を用いた DBP 成形実験から得られた繊維束における含浸距離は、モデルの予測値によってある程度の精度で表すことができた。さらに、スチールベルトを介して材料が加熱される時の熱伝達モデルと上記含浸プロセスモデルを組み合わせて、基材仕様とプロセス条件から成形中の含浸進行を予測するツールを DBP 装置メーカーの IPCO 社と提案した。

### (4) ローラー直下の含浸流動メカニズムの検討

DBP 成形中のローラー直下では、固定されたベルト間 Gap を中心に生じるスチールベルトのたわみによって含浸と同時に樹脂の面内流動が生じて、その流動抵抗により樹脂圧が決定されると考えられる。そこで、万能試験機に平板金型を取り付けて、圧縮プロセスを制御した条件で樹脂の含浸流動を生じさせるモデル実験を実施した。Darcy 則と薄層流体理論の組み合わせにより含浸流動モデルを構築した結果、モデルから予測される荷重変化、含浸度、及び面内流動は実験結果をおよそ妥当なレベルで表現できた。

さらに上記理論モデルに基づいて、ローラー直下の含浸流動挙動を簡易的に模したシミュレーションモデルを含浸解析ソフト PAM-RTM を用いて作成して、プロセス条件が樹脂圧力と含浸流動の挙動へ与える影響を調査した。シミュレーションと DBP 成形実験との比較結果から、ベルト間 Gap が樹脂含浸量と面内流動量を決定する主因子であり、また、含浸進行に伴って減少する理論的な基材厚さをローラー直下で設定することが含浸プロセスの最適化に有効であることが示唆された。その時のローラー直下の圧力はローラーに負荷した荷重とバランスすると考えて推定できることが示唆された。さらに、樹脂含浸量を増加させて面内流動量を減少させるには繊維基材の浸透係数を高めることが有効であると示された。

### (5) DBP 成形実験による検証

上記の(1)～(4)まで得られた知見をもとに導かれたプロセス条件によって、CF 織物/PA6 フィルムと GF 織物/PA66 フィルムの異なる 2 種類の基材について DBP 成形実験を行い、成形板の含浸性と曲げ特性を評価した。その結果、目標とする含浸性(ボイド率 1%程度)と曲げ特性(通常ホットプレス成形とおよそ同等)を達成できた。

### (6) まとめ

固定ローラー式 DBP を用いた連続的な樹脂含浸プロセスを検討して樹脂の含浸流動メカニズムを解明すると共にそのプロセスを最適化できたことで、高い含浸品質と力学特性を有する熱可塑性 CFRP スタンパブルシートを連続製造する技術の基礎を確立できた。

## 論文審査の結果の要旨

本研究は、熱可塑性 CFRP の中間基材である熱可塑性スタンパブルシートの連続製造技術を研究したものである。スタンパブルシート製造における課題は熱可塑性樹脂の含浸の難しさによる高い製造コストと低い量産性にあり、含浸を効率的に行うためのメカニズムの検討とその成形技術を研究した。

### (1) 基礎的含浸手法の検討

高い含浸品質を得ることができる溶剤法と幅広い基材へ適用可能なフィルムスタッキング法に注目して検討した。溶液含浸処理した織物に PA6 フィルムを追加積層して成形した結果、含浸処理しない場合よりも含浸性が向上することが分かった。また、フィルムスタッキング成形において繊維束への含浸挙動を調査した結果、圧力、樹脂粘度、保持時間、繊維基材の浸透係数をパラメータとする Darcy 則による理論式で挙動を説明できることを示した。

### (2) ダブルベルトプレス (DBP) によるスタンパブルシート製造手法の検討

基材積層した嵩高い状態から含浸後の板厚までの厚み変化に対応できる固定ローラー式 DBP 装置を用いて成形技術を検討した。プロセス条件 (ベルト速度, 加熱温度, ローラー荷重, 冷却液圧, ベルト間 Gap) の違いが成形中の温度や圧力のプロファイルを変化させることで、成形板の含浸性へ影響を及ぼすことを明らかにした。

### (3) DBP 含浸プロセスモデルの開発とその検証

上記の (1) で得た含浸挙動を表す式を各ローラー直下に適用して DBP 含浸プロセスモデルを構築した。CF 織物/PA6 のフィルムスタッキング基材を用いた DBP 含浸プロセスモデルを構築した。DBP 成形実験から得られた繊維束における含浸距離は、モデルの予測値によってある程度の精度で表すことができた。さらに、基材仕様とプロセス条件から成形中の含浸進行を予測するツールを DBP 装置メーカーの IPCO 社と提案した。

### (4) ローラー直下の含浸流動メカニズムの検討

DBP 成形中のローラー直下では、固定されたベルト間 Gap を中心に生じるスチールベルトのたわみによって含浸と同時に樹脂の面内流動が生じて、その流動抵抗により樹脂圧が決定されると考えられる。そこで、万能試験機に平板金型を取り付けて、圧縮プロセスを制御した条件で樹脂の含浸流動を生じさせるモデル実験を実施した。Darcy 則と薄層流体理論の組み合わせにより含浸流動モデルを構築した結果、モデルから予測される荷重変化、含浸度、及び面内流動は実験結果をおよそ妥当なレベルで表現できた。

さらに上記理論モデルに基づいて、ローラー直下の含浸流動挙動を簡易的に模したシミュレーションモデルを含浸解析ソフト PAM-RTM を用いて作成して、プロセス条件が樹脂圧力と含浸流動の挙動へ与える影響を調査した。シミュレーションと DBP 成形実験との比較結果から、ベルト間 Gap が樹脂含浸量と面内流動量を決定する主因子であり、また、含浸進行に伴って減少する理論的な基材厚さをローラー直下で設定することが含浸プロセスの最適化に有効であることが示唆された。その時のローラー直下の圧力はローラーに負荷した荷重とバランスすると考えて推定できることが示唆された。さらに、樹脂含浸量を増加さ

せて面内流動量を減少させるには繊維基材の浸透係数を高めることが有効であると示された。

#### (5) DBP 成形実験による検証

上記の(1)～(4)まで得られた知見をもとに導かれたプロセス条件によって、CF 織物/PA6 フィルムと GF 織物/PA66 フィルムの異なる 2 種類の基材について DBP 成形実験を行い、成形板の含浸性と曲げ特性を評価した。その結果、目標とする含浸性（ボイド率 1%程度）と曲げ特性（通常のホットプレス成形とおよそ同等）を達成できた。

よって、本論文は博士（工学）に十分値すると判断する。