

第34号

平成27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

(平成26年度授与分)

金沢工業大学

目 次

◇博士

(学位記番号)	(学位の種類)	(氏名)	(論文項目)
博甲 第 98 号	博士(工学)	柿島 浩徳	射出発泡成形における気泡生成メカニズムの解明と実用化に向けた機械特性予測に関する研究・・・1
博甲 第 99 号	博士(工学)	坂田 礼子	車載機器に関する感性の定量評価技術・・・6
博甲 第 100 号	博士(工学)	米田 涼	印象に基づく楽曲検索システムの設計に関する研究・・・11
博甲 第 101 号	博士(工学)	尾崎 弘晃	CF/PC 積層板を用いたスタンピング成形品の表面品質, 強度および寸法安定性に及ぼす成形条件の影響に関する研究・・・16
博甲 第 102 号	博士(工学)	藤平 潤一	先端的な精密計測のための超電導及び極低温機器の開発・・・21
博甲 第 103 号	博士(工学)	堀 正芳	RTM成形システムのハイサイクル化およびFRP製品の寸法安定性に関する研究・・・25

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	かきしま ひろのり 柿島 浩徳
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲 第98号
学位授与の日付	平成27年3月16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	射出発泡成形における気泡生成メカニズムの解明と 実用化に向けた機械特性予測に関する研究
論文審査委員（主査）	教授 山部 昌 教授 高野 則之 教授 中田 政之 教授 金原 勲 東北大学 准教授 佐藤 善之

論文内容の要旨

現在、我々の身の回りに、プラスチックとガラス繊維や炭素繊維等の異種材料を組み合わせた複合材料が多く存在する。今後、需要拡大が期待されている複合材料の1つに、発泡プラスチックがある。発泡プラスチックは、部品の軽量化が可能なることから、自動車部品を中心に応用が期待されている。発泡成形法は、発泡剤を使用し、プラスチックの中に気泡を分散・固定化させる成形法である。従来、発泡成形法として、バッチ式発泡成形法によるものが主流であったが、成形に時間を要するため生産性が低いといった課題があった。ここ数年、モノづくりの現場では、品質を向上させながら生産コストを削減し、生産性を向上させることが求められている。このような背景から、バッチ式発泡成形法に替わる新たな成形法として、射出発泡成形が注目を集めている。さらに、連続的に成形品を得ることを目標とし、様々な研究が行われている。

しかし、CO₂を発泡剤に使用した射出発泡成形では、同一の成形品で異なる発泡構造が生成し、外観不良や剛性・強度のバラつきに繋がるといった課題がある。本研究では、同一の成形品で異なる発泡構造が生成するのは、CO₂の供給圧力によって気泡生成メカニズム（気泡の生成が開始するタイミング、気泡の成長速度）が異なるためであるとの仮説を立てた。これを検証するため、金型内における充填過程の可視化観察を行い、気泡生成メカニズムを解明した。可視化観察により、CO₂が超臨界の条件では、樹脂が金型に充填された直後から、フローフロントに微細な気泡が多く生成する領域①の生成を確認した。これは、CO₂が超臨界の条件では、射出される際、急激な樹脂圧力の降下により気泡が多く生成し、樹脂温度の低下に伴って粘度が高くなることで、気泡の成長が抑制される。これにより、フローフロントに微細な気泡が多く生成し、領域①が生成することが分かった。さらに、射出ノズル及びシリンダ内における樹脂に対するCO₂の溶解に着目し、気泡生成との関係

を明らかにするため、樹脂に対する CO_2 の溶解度を評価した。 CO_2 が超臨界の条件では、亜臨界の条件に比べて溶解度が大きいことが分かった。溶解度の評価により、樹脂に対する CO_2 の溶解は、気泡生成メカニズムと密接な関係があることが明らかとなった。一方、径の大きい気泡が生成する領域②に関して、充填完了後の冷却過程における樹脂圧力の降下が、領域②の生成に与える影響を明らかにするため、金型内の樹脂圧力を計測した。金型内の樹脂圧力を計測した結果、 CO_2 は樹脂に溶解したまま金型へ射出され、充填完了後の冷却過程で樹脂温度の低下とともに樹脂圧力が降下することで、径の大きい気泡が生成し、領域②が生成することが明らかとなった。また、発泡構造の均一化制御を行ったところ、 CO_2 が亜臨界の条件では、通常の成形時に比べて、樹脂の計量を多くすることで、領域②で発泡構造を均一化できることが分かった。また、 CO_2 が超臨界の条件では、背圧を低く設定し、供給圧力との圧力差を小さくすることで、領域①で均一化できることが分かった。

射出発泡成形品の実製品への応用を考慮した場合、数値シミュレーションによって成形品の機械特性を事前に予測することが重要となる。従来、機械特性を予測する解析手法の代表として有限要素法があった。射出発泡成形品は、成形時にスキン層と発泡層が形成されるが、樹脂と気泡が混在する発泡層は一種の複合材料と考えられる。したがって、発泡層の機械特性を有限要素法により予測する場合、要素数や節点数が膨大となる。本研究では、不均質な機械特性を持つ介在物を、母材と同じ弾性特性を持ち、内部に固有ひずみを有する領域に置き換えて機械特性を導く手法である等価介在物法に着目した。成形品の発泡構造に基づいて気泡含有率を定量化し、等価介在物法により発泡層の弾性率を予測した。引張試験の実測結果と比較したところ、気泡含有率が少ない条件では、両者の結果が一致することを確認した。また、構造解析により、実製品を模したリブを有する成形品の曲げ荷重に対する変位を予測した。3点曲げ試験の実測結果と比較したところ、リブを有する成形品という一例ではあるが、解析結果と実測結果の一致を確認できた。さらに、気泡含有率が 30.9% の条件では、解析結果と実測結果の誤差が 10.0% 以下となった。したがって、射出発泡成形品の機械特性予測に対して、構築を試みた予測手法は、気泡含有率が 30.9% 以下の条件であれば、適用可能であることを確認した。また、 CO_2 を発泡剤に使用した射出発泡成形（物理発泡法）では、気泡含有率が 20.0%~30.0% となり、リブを有する成形品の曲げ荷重に対する変位を予測するにあたり、構築を試みた予測手法は適用可能であることを確認した。

本論文は 5 章で構成されている。

第 1 章では、射出発泡成形の現状について述べ、成形不良に関する研究動向、数値シミュレーションによる機械特性予測の課題を抽出し、本論文の目的と意義を明確にした。

第 2 章では、 CO_2 を発泡剤に使用した射出発泡成形において、同一の成形品で異なる発泡構造が生成する成形不良に対して、充填過程の可視化観察を行い、気泡生成メカニズムを

解明する。

第3章では、領域①或いは領域②のどちらかを優先的に生成させ、発泡構造の均一化制御を行う。

第4章では、成形品の実用化に向け、等価介在物法により、樹脂と気泡が混在する発泡層の弾性率を予測し、実測結果との比較を通して、発泡層の弾性率予測に対する等価介在物法の妥当性を検討する。また、構造解析により、実製品を模したリブを有する成形品の曲げ荷重に対する変位を予測し、実測結果との比較を通して、実製品に形状がより近いものへと拡張した射出発泡成形品の機械特性予測手法の構築を試みた。

第5章は本論文の総括であり、第2章から第4章までをまとめるとともに、今後の課題を明確化した。

論文審査の結果の要旨

地球環境保全のため、自動車等の輸送機器類の軽量化が進んでいる。その中でもプラスチック部品への応用は強度や剛性を自由に設計することができ、今後益々注目される技術分野であると言える。発泡プラスチックはその軽量のプラスチックをさらに軽量化させる可能性を秘めており、ここ 10 年来研究が進められてきた。しかし、いずれの研究も生産性の低い、コストの高い試作品として価値が低いものであった。柿島氏はこの点に着目し、生産性が高く、高品質な発泡成形技術の確立を目指し、研究に取り組んだ。まず、氏は従来技術であるバッチ成形法から、連続成形が可能な射出成形法に着目した。従来のバッチ成形でのサイクル時間は約 10 分に対して、射出成形法であれば、約 1 分で成形可能である。しかしながらサイクル時間が短いために、気泡の生成は過渡現象となり、その制御は複雑となる。このために製品品質の安定化が大きな課題となっている。氏はこの課題の解決に取り組むために、まずは射出成形金型内で生じている発泡挙動に関して、金型内の可視化に取り組み、その現象を把握しようとした。また同時に金型内の温度・圧力変化にも着目し、詳細な計測を行った。その結果、汎用的な熱可塑性樹脂であるポリプロピレンにおいて、超臨界ガス CO_2 を溶解させて成形した場合、比較的細かい気泡と、粗い気泡の 2 層が生成されることを明らかにし、その生成メカニズムに関して温度・圧力・粘度の観点より明らかにした。それは樹脂材料への超臨界ガスの溶解度との関連が深いものであり、熱力学的な観点も含め、独自の理論を展開した。また氏は、他の材料においても同様な挙動となることを明らかにし、それらをもとに統合的な理論づけを行った。氏は次にこの気泡層が 2 層となることが、製品の機械的特性に悪影響を与えるとの観点より、比較的細かい気泡だけの成形品と、比較的粗い気泡の成形品とを作り分ける方法について、前述の生成メカニズムをもとに提案した。これはそれぞれの気泡の生成経過時間が異なることに着目し、温度や圧力を適正に制御することにより、どちらか一方の発泡層だけを生成する成形方法である。

またその選択的な気泡発現については、熱可塑性樹脂の粘度変化から、発現のタイミングを理論的に証明した。次に氏は、このようにして生成された気泡を有する成形品を工業的に利用するために、発泡率と部品の強度・剛性の関係を有限要素法で予測するために、従来から用いられている複合則ではなく、等価介在物法を用いて数値解析を試みた。その等価介在物法とは複数の材料要素から構成されている材料に関して、別々の物理定数を代入するのではなく、あらかじめ単一材料として介在物に初期ひずみを与え、要素モデルを構築する方法であるが、氏はその手法を樹脂材料と気泡との複合材料というモデルで解析要素を定義した。また種々の気泡を含むテストピースに関して、実験的にその弾性率を求め、その結果と解析結果を比較して考察を行った。その結果、氏の提案する手法により、気泡含有率と物質の弾性率との関係を明らかにすることができた。このことは、気泡の含有率と樹脂材料の初期特性がわかれば、発泡樹脂の機械的特性が予測できることを示しており、本予測手法の実際の工業製品設計に応用できることが示された。氏はその結果をも

とに、実形状に対して本手法を適用し、実使用下での荷重—変位関係を明らかにした。

本論文は5章で構成されている。

第1章では、射出発泡成形の現状や問題点について述べ、成形不良や可視化観察に関する研究動向、近年急速に利用が進んでいるCAE、数値シミュレーションによる材料特性予測の現状や課題を抽出し、本論文の目的と意義を明確にした。

第2章では、CO₂を発泡剤として使用した射出発泡成形において、同一の成形品で異なる発泡構造が生成し、気泡径が二極化する成形不良に対して、金型内における充填過程の可視化観察を行い、各領域の気泡生成メカニズムを明らかにした。

第3章では、第2章の結果に基づき、同一の成形品で異なる発泡構造が生成する成形不良を低減しながら、細かい発泡、粗い発泡のどちらかを優先的に生成させ、発泡構造の均一化制御を行った。

第4章では、成形品の実用化に向け、等価介在物法により、樹脂と気泡が混在する発泡層の応力とひずみの関係から弾性率を予測した。さらに、成形品から試験用サンプルを製作し、発泡層の弾性率を予測した結果と引張試験の結果を比較し、成形品の材料特性予測に対する等価介在物法の妥当性を検討した。さらに、これにより、実用化に向けた射出発泡成形品の材料特性予測手法を構築した。

第5章は本論文の総括であり、第2章から第4章までをまとめるとともに、今後の課題を明確化した。これらの研究成果は査読あり論文3編（掲載予定1件含む）、国内発表6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）に十分に値すると判断する。

氏名	さかた れいこ 坂田 礼子	
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博甲 第99号	
学位授与の日付	平成27年3月16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	車載機器に関する感性の定量評価技術	
論文審査委員	(主査) 教授 神宮 英夫 教授 近江 政雄	
	教授 山田 真司	
	首都大学東京 教授 笠松 慶子	
	日本電気株式会社 技術主幹 福住 伸一	

論文内容の要旨

本論文の目的は、車載機器のような多重課題の状況で使用される製品において、人と機械のコミュニケーションシステムとしての特徴や特性に関する評価手法を明らかにすることである。製品デザインや製品開発では、人の感覚や感性による主観評価を実施し、製品の受容性や改善ポイントを探るなど、品質向上の取り組みがなされている。しかし、評価項目が不十分であると、製品の品質設計において重要なポイントに抜けが出る可能性がある。

本論文は、主観評価に加えて、定量指標である生理指標および行動指標を計測するユーザ試験を実施することで、適切な主観評価項目を設定する手法について検討した。

本論文は、第1章(はじめに)、第2章・第3章(本論)、第4章(総括)から構成されており、第2章は視覚的側面、第3章は聴覚的側面からのアプローチである。以下に本論文で目指した評価手法に関する主要な成果を示す。

■視覚的側面（第2章）

1) 表示の視認性：車載ヘッドアップディスプレイ（車載 HUD）に対して、HUD の位置を変えて、主観評価（表示の見やすさ）と、行動指標（表示の視認時間）を計測する試験を行い、それらの対応関係について言及した。結果として、両者の傾向が一致し、人の動作と密接に関係する主観評価項目は、それと対応する行動指標によって裏付けられることが分かった。

2) 危険性を伝える警告表示：車載 HUD に表示する前方障害物の警告表示に対して、表示

する位置および表示内容を変えて、主観評価（警告の危険感、目立ち感）と、生理指標（心電計測による交感神経活動指標）と行動指標（警告の認識時間）を計測する試験を行なった。結果として、異なる表示位置に同一の警告を表示する場合は、主観評価と行動指標が対応し、生理指標は対応しなかった。また同一位置に異なる警告を表示する場合は、生理指標が対応し、行動指標は対応しなかった。これにより、行動指標は人の動作と密接に関係する試験条件において有効であり、生理指標は内容自体が心的変化を引き起こす条件において有効であることが分かった。

3) 機器操作の快適性:カーナビゲーション(ナビ)の画面切替時間に複数の条件を設け、主観評価(操作のスピーディさ、反応の良さ、快適さ、目標の探し易さ、イライラ感の無さ、操作のし易さ)と、生理指標(NIRSによる前頭部の酸素化ヘモグロビン変化量、心電計測による副交感神経活動指標)と行動指標(ナビ操作時間)を計測する試験を行い、ナビ操作(副操作)と運転(主操作)の両立性の観点からナビ操作に関する主観評価項目について言及した。酸素化ヘモグロビン変化量は、主観評価(特に反応の良さ)と傾向が一致し、機器操作時にサクサク感がある場合には、操作に対して多くの注意を向ける必要がなくなり、脳活性の度合いが減少すると考えられた。一方で、副交感神経活動指標は主観評価と対応が見られなかった。これは、副交感神経活動指標がナビ操作と運転を含めた全体としてのストレスの総量を示す指標と考えられ、多重課題試験においては、製品以外の課題に関する主観評価項目(今回の場合は、運転のしやすさ、等)を設定する必要があると考えられた。

■聴覚的側面(第3章)

4) 音声案内の分かり難さ:道案内ナビの音声案内に対して、「右折です」を基本形とし、目標物(「信号を」など)、目標物修飾語(「100m先の」、「あの」など)、方向補足情報(「国際会議場へ」)を組み合わせて、主観評価(音声案内の分かり難さ)と、生理指標(NIRSによる酸素化ヘモグロビン変化量、心電計測による交感神経活動指標)を計測する試験を行なった。結果として、「あの」という指示語を用いた音声案内について、案内地点からの距離(100、125、150m手前)を変えて呈示しても、主観的な分かり難さには違いが無かったのに対して、交感神経活動指標は差が見られ、案内地点までの距離が近いほど心的緊張感が高まった。この結果から、音声案内の評価においては、主観的には明確に分かり難いと意識されず作業負担は決して高くはない場合でも、意識の潜在的側面では負担が生じる場合があると考えられ、評価指標に生理指標を用いるとともに、時間的な切迫感のような精神的な作業負担をもたらす要因に関する主観評価項目を設定する必要があると考えられた。

総括して、第4章では、多重課題の状況で使用される「人と機械のコミュニケーションシステム」に対する評価手法を提案した。評価手法は、二つのステップで構成される。ステップ1では、行動指標および生理指標という定量指標で裏付けされる主観評価の項目(評価軸)と試験条件を、少人数の試験によって見出し、次に、ステップ2で、ステップ1で

得られた主観評価項目を、多人数の試験に展開し、統計的処理によって対象システムを評価するものである。本論文では、車載機器を事例として、主にステップ1について論じた。主観評価と定量指標が一致しない場合に、人体の動作による負担、精神的な作業負担、多重課題における対象製品以外の課題、等の観点から考察して新たに追加すべき適切な主観評価項目を決めることで、ステップ2において、主観評価と製品の品質パラメータを関連付ける有効な統計データを得ることができる。

論文審査の結果の要旨

製品開発では、人の感覚や感性による主観評価を実施し、製品の受容性や改善ポイントを探るなど、品質向上の取り組みがなされている。しかし、評価項目が不十分であると、製品の品質設計において重要なポイントに抜けが出る可能性がある。

申請者は、主に、カーナビゲーションシステムなどの車載機器のインターフェイスデザイン開発に携わってきた。車載機器は、運転と機器操作という多重課題の状況で使用される製品であり、人と機械のコミュニケーションシステムとしての特徴や特性を知ることが重要であり、これに関する評価手法を明らかにすることに取り組んできた。本論文の目的は、主観評価に加えて、定量指標である生理指標および行動指標を計測することで、適切な主観評価項目を設定する手法の確立を図ることである。

本論文は、第1章(はじめに)、第2章・第3章(本論)、第4章(総括)から構成されており、第2章は視覚的側面、第3章は聴覚的側面からのアプローチである。以下に本研究で目指した評価手法に関する主要な成果を示す。

第2章では、初めに表示の視認性についての研究を行った。車載ヘッドアップディスプレイ(車載HUD)に対して、HUDの位置を変えて、主観評価(表示の見やすさ)と、行動指標(表示の視認時間)を計測する試験を行い、これらの対応関係について明らかにした。結果として、両者の傾向が一致し、人の動作と密接に関係する主観評価項目は、これと対応する行動指標によって裏付けられることが分かった。次に、危険性を伝える警告表示についての研究では、車載HUDに表示する前方障害物の警告表示に対して、表示する位置および表示内容を変えて、主観評価(警告の危険感、目立ち感)と、生理指標(心電計測による交感神経活動指標)と行動指標(警告の認識時間)を計測する試験を行なった。結果として、異なる表示位置に同一の警告を表示する場合は、主観評価と行動指標が対応し、生理指標は対応しなかった。また同一位置に異なる警告を表示する場合は、生理指標が対応し、行動指標は対応しなかった。これにより、行動指標は人の動作と密接に関係する試験条件において有効であり、生理指標は内容自体が心理的变化を引き起こす条件において有効であることが分かった。そして、機器操作の快適性の研究では、カーナビゲーション(ナビ)の画面切替時間に複数の条件を設け、主観評価(操作のスピーディーさ、反応の良さ、快適さ、目標の探し易さ、イライラ感の無さ、操作のし易さ)と、生理指標(NIRSによる前頭部の酸素化ヘモグロビン変化量、心電計測による副交感神経活動指標)と行動指標(ナビ操作時間)を計測する試験を行い、ナビ操作(副操作)と運転(主操作)の両立性の観点からナビ操作に関する主観評価項目を特定した。酸素化ヘモグロビン変化量は、主観評価(特に反応の良さ)と傾向が一致し、機器操作時にサクサク感がある場合には、操作に対して多くの注意を向ける必要がなくなり、脳機能の活性化の度合いが減少すると考えられた。一方で、副交感神経活動指標は主観評価と対応が見られなかった。これは、副

交感神経活動指標がナビ操作と運転を含めた全体としてのストレスの総量を示す指標と考えられ、多重課題試験においては、製品以外の課題に関する主観評価項目（今回の場合は、運転のしやすさ、等）を設定する必要が考えられた。

第3章では、音声案内の分かり難さについての研究を行なった。道案内ナビの音声案内に対して、「右折です」を基本形とし、目標物（「信号を」など）、目標物修飾語（「100m先の」、「あの」など）、方向補足情報（「国際会議場へ」など）を組み合わせ、主観評価（音声案内の分かり難さ）と、生理指標（NIRSによる酸素化ヘモグロビン変化量、心電計測による交感神経活動指標）を計測する試験を行なった。結果として、「あの」という指示語を用いた音声案内について、案内地点からの距離（100、125、150m手前）を変えて呈示しても、主観的な分かり難さには違いが無かったのに対して、交感神経活動指標には差が見られ、案内地点までの距離が近いほど心的緊張感が高まった。この結果から、音声案内の評価においては、主観的には明確に分かり難いとは意識されず作業負担が決して高くない場合でも、意識の潜在的側面では負担が生じている場合があると考えられ、評価指標に生理指標を用いるとともに、時間的な切迫感のような精神的な作業負担をもたらす要因に関する主観評価項目を設定する必要が考えられた。

総括して、第4章では、多重課題の状況で使用される車載機器のような「人と機械のコミュニケーションシステム」に対する評価手法を提案した。評価手法は、二つのステップで構成される。ステップ1では、行動指標および生理指標という定量指標で裏付けられる主観評価の項目（評価軸）と試験条件を、少人数の試験によって見出し、次に、ステップ2で、ステップ1で得られた主観評価項目を、多人数の試験に展開し、多変量解析によって対象システムを評価するものである。本論文では、車載機器を事例として、主にステップ1について論じた。主観評価と定量指標が一致しない場合に、人の動作による負担、精神的な作業負担、多重課題における対象製品以外の課題、等の観点から考察して新たに追加すべき適切な主観評価項目を決めることで、ステップ2において、主観評価と製品の品質パラメータを関連付ける有効なデータを得ることができる。

以上のように本研究は、車載機器のような多重課題の状況で使用される「人と機械のコミュニケーションシステム」に対する評価手法を提案するとともに、その有効性を実証しており、今後のインターフェイスデザインの開発に貢献できるものと期待できる。

よって、博士（工学）の学位論文として、十分価値のあるものと認められる。

氏名	よねだ りょう 米田 涼	
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博甲 第100号	
学位授与の日付	平成27年3月16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	印象に基づく楽曲検索システムの設計に関する研究	
論文審査委員	(主査) 教授 山田 真司 教授 神宮 英夫	
	教授 近江 政雄 教授 青木 茂明	
	九州大学大学院 教授 岩宮 眞一郎	

論文内容の要旨

近年、携帯端末上にて、過去に発売された楽曲の多くを月額定額で何曲でも聴ける「聴き放題」というサービスが登場した。このような音楽配信サービスでは少なくとも100万曲以上の楽曲が扱われ、我々は以前よりも簡単に膨大な数の楽曲に触れられるようになった。

現在、膨大な数の楽曲の中から聴きたい楽曲を検索する手法として、キーワード検索が主な手法として用いられている。しかし、キーワード検索では、自分の知っている楽曲名や音楽家、あるいは関連ドラマやCMの名前など、楽曲を検索するための何らかのキーワードの入力を必要とすることから、既知の楽曲以外にはアクセスし難いという問題が起きている。したがって、既知の楽曲以外からも聴きたい楽曲を適切に検索する技術が、音楽配信サービスを運営する上での重要な要素として注目されている。このようなとき例えば、さわやかで、やや静かな曲が聴きたいというように、楽曲の印象とその度合を手がかりとした楽曲検索が行えるならば、既知の楽曲以外にも容易にアクセスできると考えられる。このように印象で検索するシステムは「感性検索システム」と呼ばれ、楽曲の感性検索システムの構築を目的とした研究が過去に数多く行われている。

楽曲の感性検索システムを構築するためには、あらかじめ、データベースに膨大な数の楽曲の印象を登録しておく必要がある。そのため、感性検索システムの構築に関する研究では、楽曲印象の自動推定方法に焦点が当てられている。過去の研究では主に、音響特徴量を用いて楽曲印象の推定を行っている。しかし、音響特徴量を用いた楽曲印象の推定では、十分な推定精度が得られないためか、音楽配信サービスにおいて感性検索システムは未だ実用化されていない。一方、楽曲に付随するタグ情報（メタデータ）から、楽曲印象の推定を行った研究も少数ではあるが行われている。しかし、ここで用いられたメタデー

タは不特定多数のユーザによって登録されたものであり、妥当性や表記揺れなどの問題を含んでいるため、メタデータを用いることにより、楽曲印象をどの程度まで推定できるようになるかは不確かである。

そこで本研究では、音楽配信サービスを運営している会社から提供された 19099 曲分の統制されたメタデータを基にして、メタデータから楽曲印象を推定する方法について提案した。その後、音響特徴量を用いた推定との精度比較を行い、その有効性について検証した。

本論文の構成について述べる。第 1 章では、本研究の背景、目的などについて述べた。第 2 章では、楽曲の感性検索システムの構築において、どのような印象を検索対象とすべきかについて検討を行った。第 3 章では、第 2 章の結果から検索対象とした印象を、楽曲のメタデータから推定する方法を提案し、提案方法と、過去の研究で用いられている音響特徴量を用いた印象推定との精度比較を行うことで、提案方法の有効性について検討を行った。過去の音響特徴量から楽曲印象を推定する際、慣例的に、経時的に算出された音響特徴量を平均した値が用いられているが、第 4 章では、単に平均する以外の処理を行うことで、より精度高く印象を推定できるのかについて検討を行った。第 5 章では、第 2 章から第 4 章で得られた知見をまとめ、感性検索システムの構築に関する全体的な考察を行った。

本研究によって得られた結果について以下に述べる。

第 2 章では、どのような印象を検索対象とすべきかについて検討するために、ポピュラー音楽 219 曲を用いて聴取印象を調べた。その結果、「快さ」、「迫力」、「明るさ」の 3 因子でポピュラー音楽の印象を十分に説明できることを明らかにした。

第 3 章では、第 2 章で明らかにした印象を、楽曲の持つメタデータから自動推定する方法について提案し、その有効性を検証するために、音響特徴量を用いた自動推定との推定精度の比較を行った。その結果、楽曲メタデータを用いて楽曲印象を推定した場合、過去の研究の音響特徴量を用いた推定よりも、「快さ」と「明るさ」の因子においてより高い精度で楽曲印象を推定できることが示された。

第 4 章では、音響特徴量を用いた楽曲印象の推定精度を向上させるための方法について検討を行った。その結果、楽曲全体の「迫力」は、経時的に算出されたフレーム内エネルギーを単に平均した値よりも、値の小さい部分を除外してから平均した値と上手く対応することが分かった。この結果より、音響特徴量を用いた楽曲印象の推定において、過去の研究で慣例的に行われていたように、経時的に算出された音響特徴量の平均を用いるのではなく、平均する前に、値の小さい部分をある程度除外するという処理を行うことで、楽曲

印象をより精度高く推定できる可能性が示唆された。

第5章では、以上で得られた知見を統合的に用いることで、精度の高い感性検索システムを設計し、更に今後の展望について述べた。本研究で設計された音楽の感性検索システムは、未知の楽曲の検索を極めて容易にするものであり、今後、我々の日々の生活の中での音楽の聴き方を大きく変化させる可能性を持つものであると考える。

論文審査の結果の要旨

近年、携帯端末上にて、過去に発売された楽曲の多くを月額定額で何曲でも聴ける「聴き放題」というサービスが登場した。このような音楽配信サービスでは少なくとも 100 万曲以上の楽曲が扱われ、我々は以前よりも簡単に膨大な数の楽曲に触れられるようになった。

現在、膨大な数の楽曲の中から聴きたい楽曲を検索する手法として、キーワード検索が主な手法として用いられている。しかし、キーワード検索では、自分の知っている楽曲名や音楽家、あるいは関連ドラマや CM の名前など、楽曲を検索するための何らかのキーワードの入力を必要とすることから、既知の楽曲以外にはアクセスし難いという問題が起きている。したがって、既知の楽曲以外からも聴きたい楽曲を適切に検索する技術が、音楽配信サービスを運営する上での重要な要素として注目されている。このようなとき例えば、さわやかで、やや静かな曲が聴きたいというように、楽曲の印象とその度合を手がかりとした楽曲検索が行えるならば、既知の楽曲以外にも容易にアクセスできると考えられる。このように印象で検索するシステムは「感性検索システム」と呼ばれ、楽曲の感性検索システムの構築を目的とした研究が過去に数多く行われている。

楽曲の感性検索システムを構築するためには、あらかじめ、データベースに膨大な数の楽曲の印象を登録しておく必要がある。そのため、感性検索システムの構築に関する研究では、楽曲印象の自動推定方法に焦点があてられている。過去の研究では主に、音響特徴量を用いて楽曲印象の推定を行っている。しかし、音響特徴量を用いた楽曲印象の推定では、十分な推定精度が得られないためか、音楽配信サービスにおいて感性検索システムは未だ実用化されていない。一方、楽曲に付随するタグ情報（メタデータ）から、楽曲印象の推定を行った研究も少数ではあるが行われている。しかし、ここで用いられたメタデータは不特定多数のユーザによって登録されたものであり、妥当性や表記揺れなどの問題を含んでいるため、メタデータを用いることにより、楽曲印象をどの程度まで推定できるようになるかは不確かである。

そこで本研究では、音楽配信サービスを運営している会社から提供された 19099 曲分の統制されたメタデータを基にして、メタデータから楽曲印象を推定する方法について提案した。その後、音響特徴量を用いた推定との精度比較を行い、その有効性について検証した。

本論文の第 1 章では、本研究の背景、目的などについて述べた。第 2 章では、楽曲の感性検索システムの構築において、どのような印象の尺度を用いて検索を行えばよいかについて検討を行った。第 3 章では、第 2 章の結果で得られた印象尺度上の値を、楽曲のメタデータから推定する方法を提案し、提案方法と、過去の研究で用いられている音響特徴量

を用いた印象推定との精度比較を行うことで、提案方法の有効性について検討を行った。過去の音響特徴量から楽曲印象を推定する際、慣例的に、経時的に算出された音響特徴量を平均した値が用いられているが、第4章では、単に平均する以外の処理を行うことで、より精度高く印象を推定できるのかについて検討を行った。第5章では、第2章から第4章で得られた知見をまとめ、感性検索システムの構築に関する全体的な考察を行った。

本研究によって得られた結果は以下の通りである。

第2章では、どのような印象尺度を用いて検索を行えばよいかについて検討するために、ポピュラー音楽219曲を用いて聴取印象を調べた。その結果、「快さ」、「迫力」、「明るさ」の3因子でポピュラー音楽の印象を十分に説明できることを明らかにした。このことから、これら3因子の尺度を用いて検索を行えば良いことが明らかになった。

第3章では、第2章で明らかにした3因子尺度上の値を、楽曲の持つメタデータから自動推定する方法について提案し、その有効性を検証するために、音響特徴量を用いた自動推定との推定精度の比較を行った。その結果、楽曲メタデータを用いて楽曲印象を推定した場合、過去の研究の音響特徴量を用いた推定よりも、「快さ」と「明るさ」の因子においてより高い精度で楽曲印象を推定できることが示された。

第4章では、音響特徴量を用いた楽曲印象の推定精度を向上させるための方法について検討を行った。その結果、楽曲全体の「迫力」は、経時的に算出されたフレーム内エネルギーを単に平均した値よりも、値の小さい部分を除外してから平均した値と上手く対応することが分かった。この結果より、音響特徴量を用いた楽曲印象の推定において、過去の研究で慣例的に行われていたように、経時的に算出された音響特徴量の平均を用いるのではなく、平均する前に、値の小さい部分をある程度除外するという処理を行うことで、楽曲印象をより精度高く推定できる可能性が示唆された。

第5章では、以上で得られた知見を統合的に用いることで、精度の高い感性検索システムを設計し、更に今後の展望について述べた。

本研究で設計された音楽の感性検索システムは、未知の楽曲の検索を極めて容易にするものであり、今後、我々の日々の生活の中での音楽の聴き方を大きく変化させる可能性を持つものであると考えられる。

以上のように本研究は、博士（工学）の学位論文として十分価値のあるものと認められる。

氏名	おざき ひろあき 尾崎 弘晃	
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博甲 第101号	
学位授与の日付	平成27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	CF/PC 積層板を用いたスタンピング成形品の表面品質、強度および寸法安定性に及ぼす成形条件の影響に関する研究	
論文審査委員	(主査) 教授 宮野 靖	教授 鵜澤 潔
	教授 作道 訓之	教授 中田 政之
	東北大学大学院 教授 岡部 朋永	

論文内容の要旨

炭素繊維強化プラスチックは軽量かつ高強度、高剛性を有する優れた構造材であることから、これまで高性能化および省エネルギー化が要求される航空機の一次構造部材として、積極的な利用が図られて来た。最近、加熱と冷却によって液体と固体の間を可逆的に変化する熱可塑性樹脂をマトリックスとした炭素繊維強化熱可塑性樹脂（Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic: 以下CFRTPと略称）は、短い成形時間やリサイクル性の特徴を持つことから、自動車をはじめとする一般産業分野への利用の拡大が期待されるようになってきた。

CFRTPの成形法のひとつにスタンピング法がある。この方法は、先ず平板形状の比較的薄いCFRTP積層板を用意し、この積層板を成形型によって加熱・加圧して薄い一定厚さの三次元形状の成形品に賦形する成形法である。CFRTPの強化繊維として織物材を使えば、賦形時に生じる大きな形状変化による繊維の乱れは抑制され、連続繊維の持つ高強度、高剛性が成形品に期待できる。この成形法では、繊維の織形態、樹脂の種類、成形型の形状や成形温度、成形圧力など多くの因子が成形品の表面品質、強度および寸法安定性に影響を及ぼすことが考えられる。

本研究は、強化材である平織の炭素繊維織物(CF織物)とマトリックスであるポリカーボネート(PC)を組み合わせた平織炭素繊維強化ポリカーボネート(Carbon Fiber Reinforced Polycarbonate: 以下CF/PCと略称)を対象に、厚さ一定の三次元CF/PC積層構造のスタンピング成形システムを開発することを目的とする。具体的には、高品質のスタンピング成形品を実現するための成形指針を示すことを目的に、CF織物にPCを含浸して積層平板を成形する工程と、この平板をスタンピングによって賦形する工程からなるスタンピング成

形システムにおいて、スタンピング成形の諸条件と成形品の表面品質、強度および寸法安定性の関連について検討する。

最終製品に要求される表面品質、強度および寸法安定性は、CFRTP 積層板の成形工程とスタンピングによる賦形工程の両方の工程に跨るスタンピング成形システム全体に関する技術課題である。マトリックスとして熱可塑性樹脂を用いる最大の理由は成形サイクルの短縮化であるが、その達成には、成形システムの後工程である賦形工程はできる限り単純である必要があり、要求項目は可能な限り前工程の積層板の成形工程で解決しなければならない。この考えに基づき、表面品質や強度については積層板の成形工程で解決を図り、寸法安定性は賦形工程で解決すべきであるとした。

以下に各章で解決した技術課題を示す。

第2章では、表面品質を損なう問題の解決を目標に積層板成形の諸条件の影響を検討した。具体的には、CF 織物シートと PC フィルムの積層による樹脂含浸法に様々な工夫を凝らし、繊維の乱れや樹脂の白化および表面のボイドの無い高品質の CF/PC 積層板を成形できる方法と条件を見出した。

第3章では、第2章で確立した成形方法で成形した CF/PC 積層板の曲げ強度を求めると同時に破壊状況の詳細な観察を行い、曲げ強度に及ぼす成形温度およびその保持時間の影響を検討した。その結果、成形温度および保持時間を適切に選ぶことによって樹脂と繊維の界面接着強度を最大化することができ、繊維のマイクロバックリング圧縮破壊の理論強度から予測される曲げ強度を達成することができた。

第4章では、第2章および第3章で検討した成形方法および成形条件を用いて得られた CF/PC 積層板の耐衝撃性を評価した。衝撃後の曲げ強度を測定し、さらに超音波探傷装置による観察や断面観察により衝撃損傷のメカニズムを検討した。その結果、CF/PC 積層板はエポキシ樹脂をマトリックスとする従来の CFRP と比較して衝撃による損傷の進展を抑制することができ、高い耐衝撃性を持つことを確かめることができた。

第5章では、スタンピングによる CF/PC 積層板の賦形のモデルとしてハット型を採用し、種々のスタンピング温度のもとで CF/PC 積層板の平板を賦形し、スプリングバックと経時変形を計測した。経時変形については PC の粘弾性特性に成立する時間-温度換算則をもとに長期予測を行った。その結果、PC の粘弾性特性を根拠に、長期間にわたって寸法安定性を保証することが可能なスタンピング温度の決定指針を示すことができた。

第6章は結論であり、各章で得られた結果の総括を行った。すなわち、表面品質、強度および寸法安定性に優れた厚さ一定の三次元 CF/PC 積層構造のためのスタンピング成形シ

システムを開発することができた。ただし、本研究で開発されたスタンピング成形システムは極めて小規模である。積層板の成形工程においては、積層板のサイズが小さく、ホットプレスによるバッチ成形であるため、生産性は十分に考慮していない。また賦形工程では、二次元形状のハット型を検討しているが、実際の製品では複雑な三次元形状であるのが一般的である。したがって、本研究で開発したスタンピング成形システムは本格的なシステム完成のための開発基盤を作ったものと位置づけられる。

論文審査の結果の要旨

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は軽量でかつ高強度、高剛性の特徴を持つ優れた構造材であり、すでに航空機の一次構造部材として実用化されている材料である。最近、CFRPのマトリックスに従来の熱硬化性樹脂に替えて熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維強化熱可塑性樹脂（CFRTP）が注目されるようになり、短い成形時間やリサイクル性の特徴が加わることから、自動車をはじめとする一般産業分野への利用の拡大が期待されるようになってきている。

CFRTPの成形法のひとつにスタンピング法がある。この成形法は、平板形状のCFRTP積層板を先ず成形し、これを成形型によって加熱・加圧して一定厚さの三次元形状の成形品に賦形する成形法である。CFRTPの強化繊維として連続繊維の織物材を用いることによって、賦形時に生じる形状変化による繊維の乱れが抑制され、連続繊維の持つ高強度、高剛性が成形品に期待できる。このスタンピング法でも、繊維の織形態、樹脂の種類、成形型の形状や成形温度、成形圧力などの多くの成形因子が成形品の表面品質、強度および寸法安定性に影響を及ぼすことが考えられる。

本論文の目的は、強化材に平織の炭素繊維織物（CF織物）を用い、マトリックスに耐熱性と耐衝撃性に優れたポリカーボネート（PC）を用いた平織炭素繊維強化ポリカーボネート（Carbon Fiber Reinforced Polycarbonate:以下CF/PCと略称）を対象に、三次元形状のCF/PC積層構造物を成形するためのスタンピング成形システムを開発することにある。具体的には、CF織物にPCを含浸して積層平板を成形する前工程と、この平板をスタンピングによって三次元形状に賦形する後工程からなるスタンピング成形システムにおいて、成形品の表面品質、強度および寸法安定性に及ぼす成形因子について系統的に検討することにある。その成果は以下の通りである。

(1) 最終製品に要求される表面品質、強度および寸法安定性は、積層平板を成形する前工程とスタンピングにより賦形する後工程の両方に跨る成形システム全体の技術課題である。これらの技術課題は素材から構造物までの材料の流れをシステムとして考える材料システムの概念の下に解決しなければならないとし、表面品質や強度については積層平板の成形工程で解決を図り、寸法安定性は賦形工程で解決するという基本方針を立てている。

(2) 積層平板の成形工程においては、先ず表面品質を損なう問題の解決を目標に、成形の諸条件の影響を検討している。具体的には、CF織物シートとPCフィルムの積層による樹脂含浸法に様々な工夫を凝らし、繊維の乱れや樹脂の白化および表面のボイドの無い高品質のCF/PC積層平板を成形できる方法と条件を見出している。

(3) 前節で確立した方法で成形したCF/PC積層平板の曲げ強度を求めると同時に、破壊状

況の詳細な観察を行い、曲げ強度に及ぼす成形温度およびその保持時間の影響を検討している。その結果、成形温度および保持時間を適切に選ぶことによって樹脂と繊維の界面接着強度を最大化することができ、繊維のマイクロバックリング圧縮破壊の理論強度から予測される曲げ強度を達成している。

(4) CF/PC 積層板の耐衝撃性を評価している。すなわち、衝撃後の曲げ強度を測定し、超音波探傷装置による観察や断面観察により衝撃損傷のメカニズムを検討している。その結果、CF/PC 積層板はエポキシ樹脂をマトリックスとする従来の CFRP と比較して、衝撃による損傷の進展を抑制することができ、高い耐衝撃性を持つことを見出している。

(5) スタンピングによる CF/PC 積層板の賦形のモデルとしてハット型を採用し、種々のスタンピング温度条件の下で CF/PC 積層平板を賦形し、スプリングバックと経時変形を計測している。経時変形については PC の粘弾性特性に成立する時間-温度換算則を用いて長期予測を行っている。その結果から、長期間にわたって寸法安定性を保証することが可能なスタンピング温度の決定指針を示している。

以上の知見は、表面品質、強度および寸法安定性に優れた三次元形状の CF/PC 積層構造体を成形するためのスタンピング成形システムの基盤を構築したものであり、工学上および工業上貢献するところ大である。

よって、申請者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

氏名	ふじひら じゅんいち 藤平 潤一	
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博甲 第102号	
学位授与の日付	平成27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	先端的な精密計測のための超電導及び極低温機器の開発	
論文審査委員	(主査) 教授 上原 弦 教授 遠藤 和弘	
	教授 上田 修 教授 小原 健司	
	豊橋技術科学大学 教授 田中 三郎	

論文内容の要旨

現在の社会情勢において、エネルギーや資源の浪費などの問題が深刻化しているが、この状況は精密計測のための超電導・極低温機器についても同様である。

極低温とは、液体ヘリウム温度 4.2 K 以下の絶対零度に近い温度領域のことであり、極低温環境を作り出すための極低温技術とそれによって特性が得られる超電導技術で成り立っている。本研究では、この極低温を大きな柱として、エネルギーと極低温において重要な資源であるヘリウムの問題を解決すべく、酸化物超電導を用いた小型・省電力超電導機器の実用化と、酸化物超電導への置き換えが困難な超電導精密計測機器のためにノイズの少ない液体ヘリウムリサイクルの実現及び機器へのノイズを評価する方法の確立を目的とした。

超電導機器で最も実用化されているのはマグネット装置である。その中でも、装置全体を回転させて磁場方向とアクセス方向を自在に変えることが出来る回転式金属超電導マグネット装置が数多く市販化されており、磁場を必要とする幅広い研究・産業分野で気軽に利用されている。この数多く利用されている回転式マグネット装置を、脆弱性に対する懸念から今までに例の無かった酸化物超電導で実現できれば、超電導機器の小型化・省電力化が大きく進むことが期待できる。そこで、磁気分離用高速励磁・減磁を目的として開発された室温ボア径 200 mm の大口徑 Bi-2223 酸化物超電導コイルを用いて、冷凍機伝導冷却による回転式酸化物超電導マグネット装置の開発を行なった。これは、回転式のマグネット装置に酸化物超電導を適用した初めての例である。磁気分離とは、磁気力で磁性体や磁性体を吸着させた物質を分離する技術であり、下水や廃液の浄化、環境ホルモンの除去に役立つことで注目を受けている。この装置を用いることで、磁気分離用途の拡大、処理方法の確立と能力向上のために、垂直から水平までの様々な方向での磁気分離に対応可能と

なる。開発に際して、酸化物超電導の脆弱性を考慮して、回転動作による Bi-2223 コイルの特性劣化を防ぐために、コイル上下に設けたサポートと引張ジグでコイルを固定する、コイル口出し線に補強板を追加するといった補強対策を行なった。補強対策と熱設計を元に開発した装置を垂直方向と水平方向に回転させて励磁試験を行なった。いずれの方向でも 180 A まで Bi-2223 コイルと口出し線に急激な電圧上昇やクエンチなく通電可能であることが分かった。これにより、回転機構を有する酸化物超電導マグネット装置の実現性を確認できた。

次に、回転式酸化物超電導マグネット装置の発展型として、装置を回転させることなく、磁場方向だけを自在に変えることが出来る磁場方向可変酸化物超電導マグネット装置の開発を行なった。これも冷凍機による伝導冷却方式とした。方向可変磁場発生コイルは、試料空間中心での発生磁場を増加させるため、コイルユニット間距離を可能な限り狭めるようにテーパ形状とした 4 個のコイルユニットで構成された二軸スプリットコイル構造とした。この装置は、1 T 以上の方向可変磁場へのニーズが高まっている軟 X 線磁気円二色性 (X-ray Magnetic Circular Dichroism : XMCD) 計測装置として適用した。XMCD とは、省エネルギー化を推進していくためのエネルギー機器の高性能化に必要な磁性材料の磁気特性を評価するために適した手法である。コイルの設計と製作を行い、77 K、30 K での V-I 特性を評価した。熱設計を経て開発した装置の運転試験を行ない、1.2 T の方向可変磁場が発生可能できることを確認した。そして、その特性が良く知られている $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の XMCD スペクトルの磁場角度依存性を計測した結果、知られた特性のおよりの磁気異方性を有することが確認されて、本装置が新規 XMCD 計測に有用であることが分かった。

そして、ヘリウム資源の問題を解決するために、超電導精密計測機器のひとつである脳磁計 (MEG) を対象とした MEG 用分離供給型液体ヘリウム再凝縮装置の開発を行なった。液体ヘリウムの再凝縮は、MRI 等の強磁場機器において既に実用化されているが、超電導精密計測機器においてはノイズの観点から実用化の例が少ない。単体再凝縮能力設計値を 10 L/day とし、再凝縮サイクルと熱交換器の設計を行った。そして、開発した装置の単体再凝縮能力計測のためにカロリーメーター方式を提案して本装置の能力試験を行ない、9.6 L/day とほぼ設計通りの再凝縮性能を有することを確認した。また、100 L ヘリウムコンテナに接続した時の再凝縮率として 7.9 L/day を得た。本装置の MEG への影響を評価するために、従来の評価方法であるノイズスペクトラム計測の他に、新規評価方法として MEG ファントムによる位置ずれ計測と聴性誘発脳磁計測を行った結果、本装置による MEG 計測への影響は見られず、正常に計測が可能であることが分かった。

よって、本装置の分離供給方式が有用であることが分かった。

論文審査の結果の要旨

主査 1 名と副査 4 名からなる審査委員は、藤平潤一氏の「先端的な精密計測のための超電導及び極低温機器の開発」の論文について、その内容と公聴会での発表に対して下記のような審査を行ない、学位授与に値するものであるとの結論に至り、合格との判定を下した。

論文の内容について

提出された論文は、藤平氏が携わって来た極低温及び超電導の機器開発において、省エネルギー化と資源のリサイクル化を図ることにより、その極限環境や精密計測への応用を拡大しようとの意図でなされた研究をまとめたものである。すなわち 1 テスラを超える回転強磁場を発生する電磁石を高温超電導材料を用いて製作することによって省エネルギー化を実現し、10 フェムトテスラの微小磁場を測定する脳磁計のためのヘリウム冷凍機を製作することによりヘリウム資源のリサイクルを実現したものである。どちらも過去に例のないものであり、極低温及び超電導の利用される分野を確実に拡大するものである。

回転強磁場を発生する電磁石は、廃液の浄化や環境ホルモンの除去に利用できることで注目を受けているが、そのコイルを高温超電導材料で実現できれば、機器の小型化と省電力化が期待される。しかしながら高温超電導材料の脆弱性によって、今までその事例はなかった。この論文では、コイルのサポート方法と補強方法に工夫を加えることでその問題を解決し、詳細な熱設計を行なうことで低電力の冷凍機による駆動を可能にした。次に、この装置の発展型として複数のコイルを組み合わせることにより、装置自体は回転させることなく、磁場方向だけを自在に変えることが出来る電磁石の開発を行なった。このような電磁石は磁性材料の XMCD 計測に有用であるが、試料空間中心での発生磁場を増加させるために、4 個のテーパ形状のコイルで構成されたスプリットを新たに考案し、これを実現した。

ヘリウム冷凍機は現在多くの MRI 装置に組み込まれ、ヘリウム資源を節約することにより MRI の実用性が高められてきた。一方、脳磁計のような極微小磁場を測定する精密機器と組み合わせるためには、ヘリウム冷凍機が発生する磁気雑音を低減するなどの対策が必要であった。しかしながら、磁気雑音の程度を評価する方法が確立されておらず、ユーザが冷凍機導入の可否を判断できない状態であった。これを解決するために分離供給型再凝縮装置の開発を行ない、その磁気雑音の評価方法として MEG ファントムによる位置ずれ計測と聴性誘発脳磁計測の実行を提案した。開発とその評価の結果は良好であり、ユーザが安心して信頼できる脳磁計測ができることが示された。

またこれらの研究成果は、査読のある 4 編の論文に掲載されており、そのうち 2 編は藤

平氏が筆頭著者である。国際学会でも 8 件の発表がなされ、そのうち 2 件は藤平氏が筆頭発表者である。

公聴会での発表

発表においては研究の背景と目的を的確に示し、どのような課題があってそれに対してどのような解決を行なったかが示され、論文に記載されている研究の価値を十分に伝えることができる内容であった。また発表の後の質疑応答においては、質問に対して的確な回答を示すだけでなく、質問やコメントが将来の研究テーマの糧となることを理解して誠実な対応をしていた。

以上のような審査により、藤平潤一氏の論文と公聴会での発表は学位授与に値するものであるとの結論に至り、合格との判定を下した。

氏名	ほり 堀	まさよし 正芳
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博甲 第103号	
学位授与の日付	平成27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	RTM 成形システムのハイサイクル化 およびFRP製品の寸法安定性に関する研究	
論文審査委員	(主査) 教授 宮野 靖	教授 鵜澤 潔
	教授 遠藤 和弘	教授 中田 政之
	理化学研究所 副チームリーダー	田島 右副

論文内容の要旨

強化繊維としてのガラス繊維をオス型とメス型の間の空間に設置した後、この空間に熱硬化樹脂を注入して硬化する繊維強化プラスチック (FRP) 製品の成形法は RTM 法と呼ばれ、1980 年代初頭に実用化された。この成形法は、従来のオープン成形であるハンドレーアップ (HLU) 法やスプレーアップ (SU) 法に較べて樹脂を封じ込めたクローズド成形であるため臭気対策が容易であり、熟練を必要とするガラス繊維の積層作業が不要であるという利点を持つ成形法である。1985 年頃から浴槽や浄化槽などの住宅設備に FRP 製品が大量に使われようになった。これらの成形法として、ほとんどが手作りである従来からの HLU 法と SU 法による少量生産システムと、同じく当時実用化された大型プレス機と金型を使うシートモールディングコンパウンド (SMC) 法による大量生産システムとの間を埋める形で、樹脂型を使う RTM 法が中量生産システムとして着実に普及した。

ところが、1990 年代に始まった中国をはじめとするアジア諸国の工業上の発展の影響は日本の FRP 業界においても例外ではなく、2000 年頃には FRP の生産拠点はほとんど海外に移り、国内における RTM 成形はほとんど消滅した。しかし、2003 年頃から航空機内装材として軽量・高強度の FRP 製品が注目されるようになり、FRP 製品に求められる寸法精度と重量管理の厳しさと、多品種少量製品のため高価な金型が使えない等の事情から、樹脂型による RTM 法による生産が見直されるようになった。

RTM 法は熟練を要する積層作業が不要なため熟練工不要の成形法と言われているが、生産型からの転写により製品が生産されることでは他の成形法と同じである。生産型はマスター型から、マスター型は木型から、それぞれ積層作業の必要な HLU 法による転写の繰り返しで作られる。この熟練工の要不要に関する矛盾が RTM 成形法による FRP 製品の一般工

業部品への進出を妨げている要因でもある。航空機用内装材では、重量管理に加え、他の部材との組立のために寸法安定性すなわち寸法精度の確保と経時変形の抑制が厳しく要求されるが、従来の RTM 法ではこれらの要求は容易に達成できるものではない。

本論文は、航空機内装材に使われる RTM 成形による FRP 製品の成形時間の短縮化を図ることと、内装材に要求される製品の寸法精度と経時変形に影響を及ぼす要因を解明し、それらの対策を検討することを目的とする。

以下に各章で解決した技術課題を示す。

第 2 章では、樹脂型による RTM 法において、生産型と注入樹脂の温度管理を徹底することにより、成形サイクルを従来法に較べて大幅に短縮できた。また形状や寸法等の僅かな違いによる数種類の生産型の統一化を図り、型投資コストを低減した。その他の様々な工夫も加えて大幅な製造費のコストダウンが実現できたことを述べる。

第 3 章では、RTM 法により成形される最終 FRP 製品に要求される寸法精度に着目した。木型の製作から始まる複雑な工程ごとの寸法変化つまり収縮と反りは最終製品に至るまで積算されることになるが、これらの工程ごとの寸法変化を詳細に測定した。その結果、木型がオス型かメス型かにより各工程の反りと収縮は大きく異なることが判明し、その原因を究明し、これらを抑制する方策を見出したことを述べる。

第 4 章では、RTM 法で成形される最終 FRP 製品の寸法安定性に着目した。その結果、FRP 製品に使用するマトリックス樹脂の種類により寸法安定性つまり経時変形に大きな違いが生じることが分かった。FRP 製品はゲルコート層と FRP 層の 2 層構造であるが、FRP 層のマトリックスとしてフェノール樹脂を用いた場合には反りは経時的に増大し続けることが分かり、その抑制法を見出したことを述べる。

第 5 章は結論であり、各章で得られた結果の総括を行った。すなわち、航空機内装材に使われる RTM 成形による FRP 製品のコストダウンを目的とした成形時間の短縮化を図ることと、内装材に要求される製品の寸法精度と経時変形に影響を及ぼす要因を解明し、それらの対策を講じたことを述べる。

著者は、1980 年代の初頭において国内でいち早く RTM 法を導入することにより、浴室ユニット等の量産システムを完成させ、FRP 成形メーカーとして住宅設備などの企業に多くの FRP 製品の納入実績を築き上げてきた。コストの上で成形サイクルの短縮が厳しく要求される RTM 法では、製品に生じる反り・収縮は必然的に大きくなり、その対策に力を注がねばならなかった。しかし、参考となる文献はほとんど無く、「独自の経験と勘をたよりに、度胸で決定する」の頭文字を取った「KKD 方式」による対応を余儀なくされた。その

ため、製品が予測とは違う挙動を示すことがしばしばあり、脱型後の矯正処理を行うことも少なくなかった。今回の研究により、製品の寸法安定性つまり反りや収縮の発生機構の解明とその対策が見出されたことは、この RTM 成形法による FRP 製品の分野へ展開を可能とし、また製造現場の責任者の製品不良対策指針となるものと確信する。

論文審査の結果の要旨

ガラス繊維強化プラスチック (FRP) はバスタブなどに代表される一般産業用の構造材に広く使用されている。その製造法のひとつである Resin Transfer Molding (RTM) 法は、オス型とメス型の FRP 製型枠の隙間にガラス繊維を設置した後、隙間に熱硬化樹脂を注入して硬化し、一定厚さの三次元形状の製品に仕上げる成形法であり、1980 年代初頭に実用化された。この RTM 法は、オープン成形である Hand Lay Up (HLU) 法や Spray Up (SU) 法などの少量生産システムと、大型プレス機と型枠に金属型を使う Sheet Molding Compound (SMC) 法による大量生産システムとの間を埋める形で、中量生産システムとして着実に普及した。ところが、1990 年代に始まった中国をはじめとするアジア諸国の工業上の発展の影響は日本の FRP 業界においても例外ではなく、2000 年頃には FRP の生産拠点はほとんど海外に移り、国内における RTM 成形はほとんど見られなくなった。

2003 年頃から航空機内装材として軽量・高強度の FRP が着目されるようになり、内装材に求められる重量管理と寸法精度の厳しさに耐えられることと、多品種少量生産のため型枠に高価な金属型が使えない等の事情から、安価な FRP 型を使う RTM 法が見直されるようになってきた。このように内装材には、重量管理に加え、他の部材との組立のために寸法安定性すなわち寸法精度の確保と経時変形の抑制が厳しく要求される。しかし、従来の RTM 法ではこれらの要求は容易には達成できず、これまでは勘と経験を基に場当たりの要求に対処してきたのが実情である。

本論文は、航空機内装材に使われる RTM 成形による FRP 製品を対象に、成形時間の短縮化などの成形システムの合理化を図ると共に、内装材に要求される製品の寸法精度と経時変形に影響を及ぼす要因を解明し、対策を立てることを目的としている。その成果は以下の通りである。

(1) 成形型としての FRP 型と注入樹脂の温度管理を徹底することにより、成形サイクルを従来法に較べて大幅に短縮した。また形状や寸法等の僅かな違いをインサート型を使って FRP 型の標準化を図り、多品種のための型の種類の増加を抑えた。さらにプリフォーム成形として新たにドレイパブルプリフォーム製造法を考案し、このための設備投資を大幅に削減した。このような技術上の工夫によって大幅な製造費の低減を実現している。

(2) RTM 法により成形される最終 FRP 製品に要求される寸法精度に着目した。成形は木型から始まり、木型から FRP 製のマスター型、マスター型から FRP 製の生産型、生産型から FRP 製品が成形される複雑な工程を経て行われる。各工程で生ずる寸法変化つまり収縮と反りは最終製品に至るまで積算されるが、この寸法変化を詳細に測定した。その結果、木型がオス型かメス型かにより各工程の反りと収縮は大きく異なることが明らかになり、その原因を究明し、これらを抑制する方策を見出している。

(3) RTM 法で成形される最終 FRP 製品の寸法安定性に着目した。その結果、FRP 製品に使用するマトリックス樹脂の種類により寸法安定性つまり経時変形に大きな違いが生じることを見出した。FRP 製品は表面加飾のためのゲルコート層と構造を保持するための FRP 層の二層構造であるが、FRP 層のマトリックスとしてフェノール樹脂を用いた場合には反りは経時的に増大し続けることが分かり、その抑制法を提案している。

申請者は 1980 年代の初頭に国内で初めて FRP 製造法のひとつである RTM 法を実用化に導いた一人である。以来、この成形法が国内から消滅する危機を乗り越え、今日まで RTM 成形法の開発を継続してきた。学位論文はこの技術開発の一環と位置付けられる。得られた知見は、RTM 法による FRP 製品製造において成形時間の短縮化などの成形システムの合理化を計り、FRP 製品の寸法精度と経時変形に影響を及ぼす要因を解明し、それらの対策を立てたものであり、工学上および工業上貢献するところ大である。

よって、申請者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。