

第50号

令和8年6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7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)
博乙第 65 号	博士(工学)	小口 靖弘	放射線計測に用いる新規放射線誘起 蛍光体の開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
博乙第 66 号	博士(工学)	田中 薫子	感性工学による商品企画・製品開発・販売 に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・5

## 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	小口 靖弘		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博乙 第65号		
学位授与の日付	令和8年3月13日		
学位授与の要件	学位規則第4条第2項相当		
学位論文の題目	放射線計測に用いる新規放射線誘起蛍光体の開発		
論文審査委員	(主査) 教授 山口 敦史	教授 井田 次郎	
	教授 高野 則之	教授 南戸 秀仁	
	広島大学原爆放射線医科学研究所		
	教授 保田 浩志		

## 論文内容の要旨

放射線は、医療診断や治療、工業分野における非破壊検査、セキュリティ対策など、現代社会の多様な分野で利用されている。その一方で、放射線による人体や環境への影響を適切に管理することは不可欠であり、高い線量測定技術の確立が放射線防護の基盤を成している。特に個人被ばく管理では、受動形線量計が広く用いられており、その代表的方式には熱刺激ルミネッセンス (TSL)、光刺激ルミネッセンス (OSL)、およびラジオフォトルミネッセンス (RPL) が挙げられる。なかでも RPL は、放射線照射によって物質中に生成された発光中心が光励起により安定に発光する現象であり、信号を非破壊的にかつ繰り返し読み出すことができる点で他方式に優れる。実際に、銀活性リン酸塩ガラスを用いたガラスバッジは、わが国をはじめ世界各地で個人線量計として広く利用されている。しかし、このガラス材料は高湿度環境下での劣化（ウェザリング）や製造コストの高さなど課題を抱えており、新規材料の開発が強く求められている。

本研究の目的は、従来の銀活性リン酸塩ガラスや  $Al_2O_3:C$ ,  $Mg$  に代わる高性能 RPL 材料を探索・評価し、その発光機構を明らかにすることである。特に、安価かつ化学的に安定な硫酸カルシウム ( $CaSO_4$ ) を基盤材料とし、希土類元素や不純物の添加効果を系統的に調べることで、新しい RPL 材料の可能性を追究した。また、単なる材料評価にとどまらず、得られた知見を応用へと展開するため、独自に二次元線量イメージングが可能な RPL リーダシステムを構築し、実証実験を行った。

まず、サマリウム (Sm) 添加  $CaSO_4$  の RPL 特性を調査した。X 線照射により  $Sm^{3+}$  が  $Sm^{2+}$  へと価数変化し、630 nm 付近のブロードバンド発光および 680~820 nm の鋭い発光線が観測された。特に 0.1 mol% の添加濃度で高感度を示し、信号は室温で極めて安定で、フェーディングやビルドアップはほとんど認められなかった。さらに、500 °C での熱処理により信号のリセットが可能であり、繰り返し使用に適することを実証した。これらの結果は、Sm 添加  $CaSO_4$  が既存材料に匹敵する実用的特性を有することを示すものである。

次に、不純物を意図的に添加していない  $\text{CaSO}_4$  の RPL 特性を系統的に評価したところ、銀活性リン酸塩ガラスを凌駕する高感度と優れた信号安定性を示した。電子スピン共鳴 (ESR) 測定により、 $\text{SO}_3^-$  ラジカルアニオンや酸素空孔に起因する欠陥準位が RPL 発光に寄与することを明らかにし、RPL 現象の発光起源に新たな理解を加えた。これは、RPL 材料研究の理論的基盤を拡張する成果である。

さらに、Al、Mn、P、Si などの不純物を添加した  $\text{CaSO}_4$  の RPL 特性を比較検討した。その結果、特に P 添加により感度が顕著に向上し、最適濃度 0.5% で高い線量応答を示した。ESR 解析から E' センターとの相関が確認され、欠陥構造と RPL 発光の対応関係を明確にすることができた。また、高線量照射時における RPL 応答や欠陥生成挙動についても検討し、不純物を意図的に添加していない  $\text{CaSO}_4$  の RPL 現象の発光起源に新たな理解を加えた。

本論文ではさらに、国内外で実際に用いられている個人被ばく線量計材料 (RPL、OSL、TSL) について、感度、再現性、光耐性、線質依存性、環境安定性などの観点から総合的な比較評価を行った。その結果、P 添加  $\text{CaSO}_4$  は既存材料と比較して高い感度と安定性を兼ね備えており、次世代個人被ばく線量計材料として高い実用可能性を有することを示した。

本研究で見出した新しい検出器材料の応用性評価の一環として、RPL イメージングリーダを用いたイメージングを試みた。開発したイメージングシステムは多波長 LED 光源とペルチェ冷却 CMOS カメラを搭載し、銀活性リン酸塩ガラス、Sm 添加および P 添加  $\text{CaSO}_4$  粉末を用いた二次元 X 線投影像の取得に成功した。得られた画像は高い空間分解能と感度を有し、従来の線量計測に加えて線量分布の可視化や放射線場のリアルタイム監視に応用できる可能性を示した。さらに、本装置は既存の OSL イメージングプレートにも対応可能であり、RPL と OSL の双方を利用した汎用的な線量分布可視化技術として有望である。

以上の成果を総合すると、本研究は①Sm 添加  $\text{CaSO}_4$  における RPL 特性の系統的解明、②不純物非添加  $\text{CaSO}_4$  の高感度発光とその起源の同定、③不純物添加による感度制御と機構理解、④実用材料との比較評価、⑤開発した検出器材料のイメージング応用から成り立っており、RPL 材料研究の新たな展開を切り拓いた。これにより、従来限られた材料に依存していた RPL 線量計測の可能性が大幅に拡張され、次世代の高性能個人線量計や高感度放射線イメージング装置の基盤が確立されたといえる。

本論文の学術的意義は、RPL 発光の物理機構を  $\text{CaSO}_4$  系材料に基づいて多角的に明らかにした点にあり、これは材料科学および放射線計測学の双方に重要な貢献をもたらす。また、実用的観点からは、耐候性が高く、安価な材料を基盤とした新規線量計の実現可能性を示したことは、今後の個人被ばく管理や医療分野における放射線利用の高度化に直結するものである。さらに、イメージング技術の導入により、放射線分布の可視化という新たな応用領域を切り開いたことは、放射線防護や被ばく管理の実務に革新をもたらすと期待される。

## 論文審査の結果の要旨

放射線は、医療診断や治療、工業分野における非破壊検査、セキュリティ対策など、現代社会の多様な分野で利用されている。その一方で、放射線による人体や環境への影響を適切に管理することは不可欠であり、高い線量測定技術の確立が放射線防護の基盤を成している。特に個人被ばく管理では、受動形線量計が広く用いられており、その代表的方式には熱刺激ルミネッセンス (TSL)、光刺激ルミネッセンス (OSL)、およびラジオフォトルミネッセンス (RPL) が挙げられる。なかでも RPL は、放射線照射によって物質中に生成された発光中心が光励起により安定に発光する現象であり、信号を非破壊的にかつ繰り返し読み出すことができる点で他方式に優れる。実際に、銀活性リン酸塩ガラスを用いたガラスバッジは、個人線量計として広く利用されている。しかし、このガラス材料は、RPL のビルドアップ現象を呈したり、高湿度環境下での劣化 (ウェザリング) や製造コストの高さなど課題を抱えており、新規材料の開発が強く求められている。

本研究の目的は、従来の銀活性リン酸塩ガラスや  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 、 $\text{Mg}$  に代わる高性能 RPL 材料を探索・評価し、その発光機構を明らかにすることである。特に、安価で化学的に安定な硫酸カルシウム ( $\text{CaSO}_4$ ) を基盤材料とし、希土類元素や不純物の添加効果を系統的に調べ、新しい RPL 材料の可能性を追究した。また、単なる材料評価にとどまらず、得られた知見を応用へ展開するため、独自に二次元線量イメージングが可能な RPL リーダシステムを構築し、実証実験を行った。

まず、サマリウム (Sm) 添加  $\text{CaSO}_4$  の RPL 特性を調査した。その結果、0.1 mol% の添加濃度で高感度を示し、信号は室温で極めて安定で、フェーディングやビルドアップはほとんど認められなかった。さらに、500 °C での熱処理により信号のリセットが可能であり、繰り返し使用に適することを実証した。これらの結果は、Sm 添加  $\text{CaSO}_4$  の実用適用性を示すものである。

次に、不純物を意図的には添加していない  $\text{CaSO}_4$  の RPL 特性を系統的に評価したところ、高感度と優れた信号安定性を示した。電子スピン共鳴 (ESR) 測定により、 $\text{SO}_3^-$  ラジカルアニオンや酸素空孔に起因する欠陥準位が RPL 発光に寄与することを明らかにし、RPL 現象の発光起源に新たな理解を加えた。これは、RPL 材料研究の理論的基盤を拡張する成果である。

さらに、Al、Mn、P、Si などの不純物を添加した  $\text{CaSO}_4$  の RPL 特性を比較検討した。その結果、特に P 添加により感度が顕著に向上し、最適濃度 0.5 % で高い線量応答を示した。ESR 解析から E センターとの相関が確認され、欠陥構造と RPL 発光の対応関係を明確にすることができた。

本論文ではさらに、実際に用いられている個人被ばく線量計材料について、様々な観点から総合的な比較評価を行った。その結果、P 添加  $\text{CaSO}_4$  は既存材料と比較して高い感度と安定性を兼ね備えており、次世代個人被ばく線量計材料として高い実用可能性を有することを示した。

本研究で見出した新しい検出器材料の応用性評価の一環として、RPL イメージングリー

ダを試作し、二次元 X 線投影像の取得に成功した。得られた画像は高い空間分解能と感度を有し、従来の線量計測に加えて線量分布の可視化や放射線場のリアルタイム監視に応用できる可能性を示した。

これらの成果より、本研究では、RPL 材料研究の新たな展開を切り拓き、これまで限られた材料に依存していた RPL 線量計測の可能性を大幅に拡張し、次世代の高性能個人線量計や高感度放射線イメージング装置の基盤が確立したと言える。

以上の内容は、査読あり論文 3 編（内 2 編は筆頭著者）及び関連論文 3 編として学術誌（英文）に掲載されており、そのオリジナリティーは保証されている。また、そのほか、本研究に関して関連特許 2 件、国際会議発表 6 件などを行っており、博士（工学）に十分値するものと判断する。

氏名	田中 薫子		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博乙 第66号		
学位授与の日付	令和8年3月13日		
学位授与の要件	学位規則第4条第2項相当		
学位論文の題目	感性工学による商品企画・製品開発・販売に関する研究		
論文審査委員	(主査) 教授 山田 真司	教授 伊丸岡 俊秀	
	教授 渡邊 伸行	教授 土田 義郎	
	国立音楽大学大学院音楽研究科音楽研究領域		
	准教授 三浦 雅展		

## 論文内容の要旨

本研究は、商品企画・製品開発・販売の各段階において、感性工学の手法を用いることで、有効かつ効率的な作業が可能となることの検証を目的としたものである。実際に、モーターサイクルの商品企画・製品開発・販売を通して、感性工学的手法で感性価値を測定し、新たな価値創出のための具体的な方向性を示すことで、有効かつ効率的な作業を実現した。近年、モビリティ産業では環境規制や安全基準の強化により、騒音低減や燃費改善など機能面の性能向上が重視されてきた。しかしながら、モーターサイクルは単なる移動手段ではなく、ライダーにとって趣味性や情緒的価値を伴う製品であり、その魅力は感性に深く関わっている。従来企画・開発・販売のプロセスでは、こうした感性価値の定量化や設計指針への反映が十分に行われてこなかったため、製品の差別化やブランド価値の向上に課題が残されていた。本研究は、この課題に対し、心理学的評価手法と統計分析とを組み合わせ、感性価値を可視化し、商品企画から販売までの各段階に適用する体系的アプローチを構築することを目指した。

具体的には、商品企画・製品開発・販売に関する各段階において、Semantic Differential法（SD法、意味微分法）による印象評定実験と因子分析または主成分分析の組み合わせを複数回用いることで、目指すべき商品の方向性を定義し、実際のモーターサイクルの商品デザインを決定し、さらに、その製品のイメージを具現化した看板デザインの配色を決定した。

論文の第1章では、研究の背景、および、本研究で中心的に用いたSD法について述べた。

第2章では、新たなモーターサイクル製品の商品企画の段階で、目指すべき商品の大きな方向性を明らかにした様子を述べた。モーターサイクルに乗る人達にとって、特に加速時におけるエンジンの音が魅力であると言われている。しかしながらモーターサイクルの音に関しては、騒音の軽減に主眼を置いた研究がほとんどで、その魅力に関する研究はほ

とんど行われてこなかった。ここでは、6機種のスポートタイプのモーターサイクルを用意し、テストライダーにシャーシダイナモ上で、同一条件で加速させ、その際の各機種の加速音をライダーの耳元で録音した。これらの音を、普段モーターサイクルに乗っているライダー群と、乗っていない非ライダー群に提示し、聴取印象をSD法で評定させた。主成分分析の結果、「粗さ」と「活動性」の主成分が抽出された。「粗さ」の主成分については、ライダーと非ライダーの間でほとんど違いは無かったが、「活動性」については、ライダーは非ライダーに比べ、活動的な音はより活動的に、活動性が低い音はより非活動的に評定した。さらに、ライダー達の急加速音に対する「粗さ」の知覚量を、これらの音のRoughnessおよびDissonanceという2種の心理物理量と対比させた結果、ライダー達の急加速音の知覚は、交通騒音などを評価する際に用いられるRoughnessよりも、楽器音の評価によく使われるDissonanceと合致することが示された。このことから、ライダー達は、モーターサイクルの加速音を、騒音として否定的に捉えているのではなく、むしろ楽器音と同様に楽しんでいる様子が示唆された。以上の加速音に関する研究によって、スポートタイプのモーターサイクルの持つ、「音がうるさい」、「乗車できる人数が少ない」、「環境への負荷が大きい」などの否定的な側面の印象を低減させる方向だけではなく、モーターサイクルの魅力をより強調する方向で製品開発を行うべきとする設計指針の大きな方向性を得た。

第3章では、具体的に大型スポートタイプのモーターサイクルの製品をデザインする過程で、SD法による印象評定実験を3度遂行した様子を述べた。まず、1000mlクラスの既存スポートタイプの機種の名称を読み上げ、モーターサイクルに詳しい実験参加者達に、自由にイメージさせ、その印象をSD法で評定させた。その分析結果から、目指すべき新製品の印象を“Aggressive Yet Elegant”と定義した。次に、デザイナー達にこの目標をデザインに落とし込んだスケッチ試料を作成させ、既存機種のスケッチと併せて、欧米のディーラー達に提示して、その印象をSD法で評定させた。主成分分析の結果、躍動感と評価性の主成分が抽出され、目指すべき製品のイメージに最も近い2種のスケッチが選出された。これらのスケッチをもとに2台のモックアップが製作され、既存の実車4種とともに欧州のディーラー達に提示し、その印象をSD法で評定させた。主成分分析の結果、2種のモックアップは、“Aggressive Yet Elegant”の印象に沿ったものであることが明らかになったが、中でも1機種は、他社の既存機種との印象と区別化が容易であることが示されたため、このモックアップをもとに製品化することに決定した。以上のように、SD法による印象評定実験を製品化の各段階で行うことによって、開発者達が共通のイメージを持ち、効果的かつ手戻りのない効率的な開発を実現することができ、開発期間も約2ヶ月短縮された。このため、この研究プロセスが2輪開発規定のフロントローディングの解説欄に明記されるに至り、開発された商品は旗艦モデルとなった。

第4章では、製品の販売において非常に重要な位置を占める、路面店の看板デザインの配色を一新するため、3度のSD法による印象評定実験を行った様子を述べた。ここではまず、大きい正方形の中に小さい正方形を配置し、内側正方形と外周との色を様々に変化させ、SD法による印象評定実験を行った。次に、具体的に長方形の背景の中に文字を配

置した試料を用いて、同様の印象評定実験を行うことで、フラッグシップモデルのイメージである“Aggressive Yet Elegant”の印象に合致する配色を決定した。さらに新しい配色の看板が、背景の中で目立つことも、SD法によって確認した。

最後に第5章では研究全体をまとめ、今後、様々な商品企画、開発、販売に対して有効な、一般化された感性工学的手法の確立のための道筋について論じた。

以上のように、商品の企画から、製品開発、販売までの各過程で、SD法を用いて感性の可視化を行い、一貫したイメージを関係者と共有することで、効果的かつ効率的な作業が実現できることが実践的に示された。

## 論文審査の結果の要旨

本研究は、商品企画・製品開発・販売の各段階において感性工学の手法を用いることで、有効かつ効率的に作業を行うことができることを検証することを目的としたものであり、実際に、モーターサイクルの商品企画・製品開発・販売を通して、感性工学的手法で感性価値を測定し、新たな価値創出のための具体的な方向性を示すことで、有効かつ効率的な作業を実現した。近年、モビリティ産業では環境規制や安全基準の強化により、騒音低減や燃費改善など機能面の性能向上が重視されてきた。しかし、モーターサイクルは単なる移動手段ではなく、ライダーにとって趣味性や情緒的価値を伴う製品であり、その魅力は感性に深く関わっている。従来の企画・開発・販売のプロセスでは、このような感性価値の定量化や設計指針への反映が十分に行われてこなかったため、製品の差別化やブランド価値の向上に課題が残されていた。

本研究は、この課題に対し、心理学的評価手法と統計分析とを組み合わせ、感性価値を可視化し、商品企画から販売までの各段階に適用する体系的アプローチを構築したものである。具体的には、商品企画・製品開発・販売に関する各段階において、Semantic Differential 法 (SD 法、意味微分法) による印象評定実験と、因子分析または主成分分析を組み合わせを複数回用いることで、目指すべき商品の方向性を定義し、実際のモーターサイクルの商品デザインを決定し、さらに、その製品イメージを具現化した看板デザインの配色を決定している。

論文の第 1 章では、研究の背景、および、本研究で中心的に用いた SD 法について述べている。第 2 章では、新たなモーターサイクル製品の商品企画の段階で、目指すべき商品の大きな方向性を明らかにしている。モーターサイクルに乗る人達にとって、特に加速時におけるエンジン音が魅力であると言われている。しかしながらモーターサイクルの音に関しては、騒音の軽減に主眼を置いた研究がほとんどで、その魅力に関する研究はほとんど行われてこなかった。ここでは、6 機種のスポートタイプのモーターサイクルを用意し、テストライダーにツーリングダイナモ上で同一条件で加速させ、その際の各機種の加速音をライダーの耳元で録音した。これらの音を提示し、聴取印象をライダー達に SD 法で評定させた。主成分分析の結果、「粗さ」と「活動性」の主成分が抽出された。さらに、加速音に対する「粗さ」の知覚量を、音の心理物理量である Roughness および Dissonance の 2 種類と対比させた結果、加速音の知覚は、交通騒音などを評価する際に用いられる Roughness よりも、楽器音の評価によく使われる Dissonance と合致することが示された。このことから、ライダー達はモーターサイクルの加速音を、騒音として否定的に捉えているのではなく、むしろ楽器音と同様に楽しんでいる様子が示された。以上の加速音に関する研究によって、スポートタイプのモーターサイクルの持つ「音がうるさい」、「環境への負荷が大きい」などの否定的な印象を低減させる方向だけではなく、モーターサイクルの魅力をより強調する方向で製品開発を行うべきとする設計指針の大きな方向性を得た。

第 3 章では、具体的に大型スポートタイプのモーターサイクルの製品をデザインする過程にて、SD 法による印象評定実験を 3 度遂行した様子を述べている。まず、1000 mL クラ

スの既存スポーツタイプの機種の名称を読み上げ、モーターサイクルに詳しい実験参加者達、に自由にイメージさせ、その印象をSD法で評定させた。その分析結果から、目指すべき新製品の印象を“Aggressive Yet Elegant”と定義した。次に、デザイナー達にこの目標をデザインに落とし込んだスケッチ試料を作成させ、既存機種のスケッチと併せて、欧米のディーラー達に提示して、その印象をSD法で評定させた。主成分分析の結果、躍動感と評価性の主成分が抽出され、目指すべき製品のイメージに最も近い2種類のスケッチが選出された。これらのスケッチをもとに2台のモックアップが製作され、既存の実車4種とともに欧米のディーラー達に提示し、その印象をSD法で評定させた。主成分分析の結果、2種類のモックアップは、“Aggressive Yet Elegant”の印象に沿ったものであることが明らかになったが、そのうち1機種は、他社既存機種との印象差と区別化が容易であることが示されたため、このモックアップを基に製品化することを決定した。以上のように、SD法による印象評定実験を製品化の各段階で行うことによって、開発者達が共通のイメージを持ち、効果的かつ手戻りの少ない効率的な開発を実現することができ、開発期間は約2ヶ月短縮された。このため、この研究プロセスが二輪開発規定のフロントローディングの解釈に明記されるに至り、開発された商品は旗艦モデルとなった。

第4章では、製品の販売において非常に重要な位置を占める、看板デザインの配色を一新するため、3度のSD法による印象評定実験を行った様子を述べている。ここではまず、大きい正方形の中に小さい正方形を配置し、内側正方形と外周との色を様々に変化させ、SD法による印象評定実験を行った。次に、具体的に長方形の背景の中に文字を配置した試料を用いて、同様の印象評定実験を行うことで、フラッグシップモデルのイメージである“Aggressive Yet Elegant”の印象に合致する配色を決定し、さらに新しい配色の看板が、背景の中で目立つことも、SD法によって確認している。

最後に第5章では研究全体をまとめ、今後、様々な商品企画、開発、販売に対して有効な、一般化された感性工学的手法の確立のための道筋について論じている。

本研究の成果は、商品の企画から、製品開発、販売までの各過程で、SD法を用いて感性の可視化を行い、一貫したイメージを関係者と共有することによって、効果的かつ効率的な作業が実現できることを示すとともに、同様の方法を幅広い分野の商品へも適用可能であることを示しており、幅広い産業分野への貢献が期待される。また学位申請者は、学位申請論文の主たる内容について、査読付き学術論文3件（うち1件は英文）のほか、国際会議での発表1件、国内での発表7件を行っており、研究者として高い能力を有している。

よって、本論文は、博士（工学）に十分値するものと判断する。