

博士學位論文

内容の概要及び審査の結果の要旨

第17号

2016年6月

光産業創成大学院大学

はしがき

本編は学位規則(昭和 28 年 4 月 1 日 文部省令第 9 号)第 8 条による公表を目的として、2016 年 6 月に本学において博士の学位を授与した者の論文内容の概要及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

学位記番号に付した甲は学位規則第 4 条第 1 項(いわゆる課程博士)によるものであり、乙は学位規則第 4 条第 2 項(いわゆる論文博士)によるものであることを示す。

目 次

学位番号	学位の種類	氏 名	論文題目	頁
甲第 33 号	博士（光産業創成）	深澤宏仁	バイオ蛍光顕微鏡用ハイブリッドフォトディテクタ（HPD）の開発とプロモーション	3
甲第 34 号	博士（光産業創成）	八木慎太郎	光技術を利用した表面加工による新規クラッチ用摩擦材の開発と開発効率化手法の構築	7

氏名	深澤宏仁
学位の種類	博士(光産業創成)
学位記番号	甲第33号
学位授与年月日	平成28年6月17日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	バイオ蛍光顕微鏡用ハイブリッドフォトディテクタ (HPD) の開発とプロモーション
論文審査委員	主査 教授 藤田和久 教授 瀧口義浩 教授 増田靖 准教授 横田浩章 講師 平野美奈子

論文の概要

本論文は高感度・高時間分解能・低アフターパルス（ノイズ）の特長をもつ微弱光検出器であるハイブリッドフォトディテクタ（HPD）について論じている。申請者はHPDが近年バイオ蛍光顕微鏡用途で急激に売上を伸ばしていることに着目し、バイオ蛍光顕微鏡用HPDの開発とプロモーションを本論文の目的に設定している。

第1章では、研究の背景、研究目的、研究内容が述べられている。研究の背景として、まず申請者の所属企業が主力微弱光検出器製品である光電子増倍管（PMT）によって光検出器市場の中のニッチな微弱光検出器市場を安定して独占しているものの、近年半導体微弱光検出器の登場など市場が様変わりしていることが述べられている。そして、他社からの破壊的技術の登場に備えて新技術を導入した自社新製品とその用途の開発の必要性と、所属企業における新製品開発とその情報発信の問題点への言及があり、独占ニッチ市場における新製品のビジネス戦略の構築が非常に重要であると結論づけている。研究内容については以下のように述べられている。

- ①バイオ用途に有用な新製品の開発と持続的な改良発展
- ②開発した新製品のバイオ用途開発
- ③新製品とその用途に関するスムーズな情報発信
- ④新製品の有用性の明示

第2章では、現行HPD製品の特性が詳述されている。

第3章では、バイオ用途で使用される微弱光検出器の説明が、HPDとPMTの特性比較、HPDの長所・短所とともに述べられている。

第4章では、現行HPD製品が使用されているバイオ蛍光顕微鏡についての説明がされている。

第5章では、本研究で開発した3種類の新規バイオ用HPDとその開発目的が説明され

ている。その要約を以下に示す。

- ①光電面冷却型：ダークノイズを現行型の 1/10 に低減して微弱光の検出精度を向上
- ②マルチチャンネル型：多波長同時計測や分光分析用装置におけるコストダウン
- ③マルチピクセルフォトンカウンター（MPPC）内蔵型：HPD の低電圧駆動を可能にして蛍光顕微鏡への組み込みを簡素化

第 6 章では、HPD の新規バイオ用途開発について述べられている。本研究では新規開発品（光電面冷却型）あるいは現行製品を用いて、従来の微弱光検出器や高感度カメラでは困難だった、動いている生体一分子の高時間分解能蛍光検出を応用したバイオ新規用途を開発した。その内容を以下に示す。

- ・新規開発品（光電面冷却型）：二次元自由拡散を行う脂質分子に標識した蛍光分子の 0.1ms 時間分解能蛍光強度検出
- ・現行製品：流路を利用した 2 色蛍光強度同時計測によるタンパク質一分子の構造変化の 10 μ s 時間分解能検出

第 7 章では、製品の市場へのスムーズな情報発信と有用性の明示という課題解決のため行った現行 HPD 製品の売上拡大過程の分析について述べられている。まず一般的なマーケティング戦略の立案プロセスについて言及があり、次に今回分析手法として採用したプロダクトジェネアロジーについての説明が述べられている。続いて、プロダクトジェネアロジーによる現行 HPD 製品の売上増大に関するターニングポイントの抽出により協力的関係にあった大学からの積極的な情報発信が HPD の社会的認知の向上に役立った事実を見出したことが述べられている。そして、第 6 章で述べた HPD の新規バイオ用途に関する光産業創成大学院大学や共同研究先を通じた情報発信の実施についての説明がありそれが有効であったと結論づけている。また、抽出されたターニングポイントのワイドレンズの手法による分析により、所属企業とエンドユーザの視点からの分析だけでは可視化できなかった事実が見出されたことが述べられている。この事実とは、蛍光顕微鏡メーカーが採用した優れたビジネス戦略によって、販売代理店やエンドユーザにおいて HPD を組み込んだ顕微鏡の価値が高まり、ビジネスの成功に結び付いた事実のことを指す。

第 8 章では本論文のまとめが記述されている。

審査結果の要旨

緑色蛍光タンパク質（GFP）の登場による細胞内のタンパク質の動態観察の劇的な簡素化によって、蛍光顕微鏡は生命科学の研究現場になくてはならないツールとなっている。とりわけレーザー励起蛍光顕微鏡（LSM）は、細胞内の生体分子の局在を三次元的に高解像度でイメージングできるため多用されている。

LSM 組み込み用の微弱光検出器のほとんどは光電子増倍管（PMT）であるが、近年 PMT より高い性能をもつ申請者の所属企業のハイブリッドフォトデテクタ（HPD）製品がこの分野で急激に売上を伸ばしている。申請者の所属企業は様々な PMT によって光検出器市場

の中のニッチな微弱光検出器市場を長年にわたって独占しているなか、申請者は HPD の新製品開発とプロモーションが停滞していると感じ危機感を抱いていた。

そこで申請者はバイオ蛍光顕微鏡用の HPD の開発とプロモーションを本研究の目的に設定した。この研究目的達成のため、新規バイオ用 HPD の開発、HPD の新規バイオ用途の開発、現行 HPD 製品の売上拡大過程の分析とそれに基づいた製品のプロモーションの実践、新製品の有用性の数値化を行った。

新規バイオ用 HPD については、低ノイズの光電面冷却型、分光イメージングが可能なマルチチャンネル型、低電圧駆動が可能なマルチピクセルフォトンカウンター（MPPC）内蔵型の 3 種類の新規 HPD を申請者は開発した。いずれも本研究にて初めて開発されたものであり高い独自性と新規性を有している。このうちマルチチャンネル型については、欧文誌に査読付き論文として出版している。HPD は PMT より高い時間分解能・低いアフターパルス（ノイズ）・高い受光面感度均一性・広いダイナミックレンジの特長をもつ。新規開発したバイオ用 HPD によって、定常蛍光検出はもちろん、高い時間分解能が要求される時間分解蛍光検出（定常励起光を用いる蛍光相関分光法（FCS）やパルス励起光を用いる蛍光寿命イメージング法（FLIM）など）のさらなる高度化が期待できる。

HPD の新規バイオ用途については、申請者は、動いている蛍光一分子から発せられる定常蛍光の高時間分解能検出の用途を 2 種類開発した。従来の蛍光一分子イメージングのほとんどは、高感度 CCD カメラ（最高時間分解能：数ミリ秒）を用いてガラス基板に固定した生体分子をイメージングしている。一方、単一光子アバランシェダイオード（SPAD）を用いれば、高時間分解能検出は可能であるが、広視野観察はできない。これに対し、申請者は HPD によって基板に固定していない生体分子一分子の高時間分解蛍光検出が可能であることを示した。生体内では生体分子は通常動き回って機能しており、動いている生体分子の高時間分解蛍光検出は高い新規性が認められ、広い適用範囲が想定できる。

現行 HPD 製品の売上拡大過程の分析については、プロダクトジェネアロジーの手法を用いて、これまで埋もれていた、売上拡大過程におけるターニングポイントを明らかにした。まず、協力的関係にあった大学からの情報発信が社会的認知過程において重要な役割を果たしたことを見出した。その知見に基づき、本学及び共同研究先の大学を通じた学会などでの情報発信を実際に行い、その結果として HPD の引き合いが増えた。このことは、学術的な調査による知見がビジネスの拡大を目指した実務に活かされている点で高く評価できる。

次に見出されたターニングポイントであるユーザ企業による技術的補完（モジュール化）について、自社だけでなく他社や販売代理店、エンドユーザをも含めたエコシステム全体を洞察するワイドレンズの手法により分析を行った。その結果、LSM メーカーが採用した優れたビジネス戦略が明らかとなった。ここで得られた知見は、社内関係部署への新製品の有用性の明示という課題に対して強力な解決策となるものである。この点においても所属企業のビジネスの拡大という目標に貢献することが期待できる。

以上、本論文のHPDは学術的に価値があるばかりでなく、バイオ蛍光顕微鏡市場での更なるビジネス拡大に貢献するものと考えられる。また、本論文はニッチ市場を独占している企業の新製品ビジネス戦略に関する前例のない研究である点においても学術的に価値を有する。微弱光検出器市場以外にも幅広い応用が可能であろう。

本論文に関する公聴会においては、いずれの質疑に対しても的確な応答がなされた。本研究成果の今後の利用や発展についての質問には、最近の本学における複数の学位論文の成果も組み合わせた利用と発展についての構想が示され、申請者自身の研究領域のみならず、広い視野と高い関心を持って今後の研究と事業の実践に取り組もうとする姿勢がみられ、大いに期待できるところである。

本研究の成果としては、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment誌の査読付論文1件がある。

以上により、本論文は本学の学位規則及び関連する内規等の基準を満たしており、審査委員会は全員一致で博士（光産業創成）の学位授与に値すると判定した。

氏名	八木慎太郎
学位の種類	博士(光産業創成)
学位記番号	甲第34号
学位授与年月日	平成26年6月17日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	光技術を利用した表面加工による新規クラッチ用摩擦材の開発と開発効率化手法の構築
論文審査委員	主査 教授 藤田和久 教授 増田靖 講師 沖原伸一郎

論文の概要

本論文は、光技術を利用した表面加工による新規クラッチ用摩擦材の開発と開発効率化手法の構築に関し、二つの研究を論述している。一つは、自動車クラッチの新規摩擦材開発に対して新たに光技術の導入を試み、その有用性に関する研究である。もう一つは、部品開発メーカーにおいて研究開発をより効率的に発展させるため、埋もれがちで言語化の難しい知識・技術に着目し、プロダクトジェネアロジーの手法を用い、これらを発掘・整理を行う本手法の構築に関する研究である。これら二つの研究は、新規クラッチ用摩擦材自社製品の市場におけるシェア拡大、および将来に対する競争力の獲得を目標とした取り組みであり、本論文ではそれらの実践について論じられている。

本論文は、8章で構成されている。

1章では、序論として自動車産業におけるクラッチ部品メーカーのクラッチ用摩擦材開発の背景が述べられ、その開発において新技術となるレーザー加工技術の導入についての検証、及び開発を効率化するしくみの構築を目的と設定しており、本論文の構成が示されている。

2章では、自動車およびトランスミッションの市場調査により明らかになった、クラッチの市場動向および業界における課題について記述されている。完成車メーカーの生産、調達、販売戦略の変化が、サプライヤーである部品メーカーに及ぼす影響とその課題について議論され、本研究の二つの目的を自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技術の開発、及び技術開発の効率向上のための手法の構築、と設定している。

続く3章から5章においては、本研究の目的の一つである新技術開発が論じられている。

3章では、研究対象である自動車の自動変速機用湿式クラッチおよびペーパー摩擦材について、自動車と変速機の成り立ちから、湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の技術的な背景について解説している。これらを受けて、今後のクラッチシステムの変化に追随し、メーカーとして競争力を維持していくためには、クラッチの性能を左右する最も重要な要素であるペーパー摩擦材を進化させる必要があることを示し、それに求められる高容量（軽量・

コンパクト)、長寿命、低ドラグ(短い時間での制動)、変速フィーリング(スムーズな変速)といった要求に対して、各性能間のバランスをとる技術の重要性と難易性を指摘している。

4章では、ペーパー摩擦材の新規加工技術として、レーザーを用いた摩擦材表面への微細テクスチャの形成手法について記述されている。トライボロジー特性に対する表面処理技術の位置づけやペーパー摩擦材に対する既存の表面処理などの背景の下、レーザー技術の導入について提案している。各種レーザー装置の利用により、レーザーの波長、出力、走査速度、繰り返し周波数等の広いパラメータ領域においてペーパー摩擦材の加工試験を実施し、加工前後の変化を把握した。特に、加工条件を適切に選択することでペーパー摩擦材の表面に溝巾100 μm 以下、深さ100 μm 以上の、従来の手法では形成できなかった微細かつアスペクト比の高い溝をペーパー摩擦材にダメージを与えることなく形成可能であることを初めて示している。

5章では、レーザーによりペーパー表面に微細なテクスチャを形成した、湿式クラッチ用のフリクションディスクを用いて、摩擦特性に与える効果について論じている。湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の表面にピコ秒レーザーを用いてマイクロメートルオーダーのテクスチャを形成し、摩擦材の各種機能性を評価する専用評価機(SAE#2)を用いた試験により摩擦特性への影響を検証している。静的摩擦係数を低下させることなく動的摩擦係数を制御できることを初めて明らかにし、クラッチの軽量コンパクト化と良好な変速フィーリングの実現の可能性を示している。この章の内容が査読付き投稿論文の内容となっている。

6章では、本研究の二つ目の目的である開発の効率化手法の構築について論じている。プロダクトジェネアロジー(製品系譜学)の手法を用いて、ペーパー摩擦材の過去の開発に埋もれた暗黙知の発掘と、技術的なポイントの抽出を行うことで、開発の効率化手法としての有用性を検討している。ここでは経験に基づく知識である暗黙知の発掘手法として、ナラティブインタビューの有効性や、暗黙知となっていた過去の知識を発掘し整理することで、ノウハウを伝承するとともに開発の効率化を図る可能性が示されている。

7章では、これまでに述べたレーザーによる摩擦材表面へのテクスチャの形成およびプロダクトジェネアロジーを用いた暗黙知発掘の発展性について述べ、それらを基にした、継続的に競争力を獲得するための技術開発に向けた考察とその結果について論じている。特に将来的な競争力獲得のための考え方として、技術面では、広く他分野の技術を取り入れ、自社の技術とのコラボレーションを推進すること、また開発の効率化手法の面では、本研究で開発された手法を習慣化し、そこから新たな知識創造につなげるためのシステムを構築し、さらに新たな知識創造を促進する独自の組織文化を育むことが述べられている。

8章では、本研究を総括し結論を述べるとともに、今後の課題と展開について述べている。自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技術の開発においては、レーザー加工技術を用いた表面加工方法の開発とその有用性を示している。技術開発の効率向上のための手

法の構築においては、まずは過去の開発の中に暗黙知として埋没した知識を発掘・蓄積するシステムを構築するのが重要と考え、プロダクトジェネアロジーにより摩擦材の開発系譜図を作成し、系譜図を基にしたナラティブインタビューを行っている。その結果、開発者の過去の経験（記憶）を整理しやすくし、効率的に精度の高い情報の収集が行えることを実証することで、技術開発の効率向上のための有用性を示している。

今後については、情勢の変化に対応し、継続的に競争力をもちうる技術開発を行っていくための本研究における結果を発展させた考え方を提示し、これをもとに技術開発、知識創造システムの構築を実践することで、競争力を持った新事業を開発し、今後の自動車産業の発展に寄与していくことで光産業創成に貢献するとし、本論文を締めくくっている。

審査結果の要旨

本論文は、自動車用クラッチメーカーに所属する申請者が、クラッチ市場におけるシェア拡大と競争力の獲得を目標とした、光技術を応用した新しいクラッチ用ペーパー摩擦材の開発と、技術開発を効率化する手法の構築への取り組みについて論じたものである。

自動車部品サプライヤーであるクラッチメーカーが直面する課題を抽出し、大きな世界シェアを有する自動車用クラッチにおける市場シェア拡大、および将来に対する競争力を獲得するための、今後の戦略および対応手法として、次の2つの目的を設定している。

- (1)自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技術の開発
- (2)技術開発の効率向上のための手法の構築

これら2つの目的に対する研究から、以下の知見が示されている。

目的(1)に対する研究においては、特に大きな市場を有する自動変速機(AT)用クラッチとして使用されている、湿式クラッチの摺動部材であるペーパー摩擦材について、光技術を用いた摩擦材へのテクスチャ形成による摩擦特性の向上が試みられている。研究では、レーザー加工技術によって湿式ペーパー摩擦材の表面を加工することで、これまでにないペーパー摩擦材の表面性状を実現した。加工条件の適切な選択により、従来の手法では作成不可能であった溝巾100 μm 以下、深さ100 μm 以上の溝を、ペーパー摩擦材の表面に形成できることを初めて実証した。このような微細かつアスペクト比の高い溝を、ペーパー摩擦材にダメージを与えることなく形成させた例はない。これは、種々の配合のペーパー摩擦材表面に対して最適なレーザー種類の選択および加工条件の設定により、任意の形状の表面テクスチャを形成することが可能となったことを示しており、ペーパー摩擦材へのレーザー加工技術の適用可能性を実証した優れた結果である。

この知見を活かし、フリクションディスク上のペーパー摩擦材表面にレーザー加工によってマイクロメートルオーダーの微細な溝形状のテクスチャを形成し、その摩擦特性への影響を評価している。溝巾約20 μm 、溝深さ最大150 μm の周期的な溝形状テクスチャの形成により、摩擦材の動摩擦係数が変化した。また、摩擦材の単位体積あたりに存在する溝形状のテクスチャの体積によりペーパー摩擦材表面のオイル浸透時間(OPT)を制

御でき、それによって摩擦材の動摩擦係数を制御できるという新たな知見についても示されている。こういった動摩擦係数の制御に関する詳細データの提示自体も当該分野においてはほぼ皆無であり、学術的に貴重なデータを取得、提示している。加えて、今回開発したレーザー加工技術を応用することで、これまで使用できなかった低気孔率の材料の新たな活用や、高摩擦係数かつ良好な μ - V （摩擦係数-摺動速度）特性（摩擦材同士の適切な短い引き摺り時間での摩擦力による制御特性）を有した新たなペーパー摩擦材の実現、及び複雑かつ微細な3次元構造の形成・利用についても、それらの可能性を新たに拓いている。こういった新たな特性を持ったペーパー摩擦材によってクラッチ性能の向上が図られ、市場における競争力の獲得、シェア拡大に寄与する可能性が高まったといえる。

目的(2)においては、プロダクトジェネアロジー（製品系譜学）を用いて湿式クラッチ用摺動部材（摩擦材）の開発の中の暗黙知の発掘を試みている。グループインタビューにより摩擦材の開発系譜図を作成し、系譜図を基にしたナラティブインタビューにより、開発者の過去の経験（記憶）が整理されやすくなり、効率的に精度の高い情報の収集が可能になることを明らかにしている。さらに、「周辺技術との連携」が過去の摩擦材の発展に大きく寄与し、技術的なブレイクスルーの起点となったことが明らかになり、環境の変化に対して、先を見据えた「コンセプト提案」とともに今後の開発にとって重要になることが示された。摩擦材の技術面での形式化されていない知識、例えば配合の狙いや変遷、製造技術に関するノウハウなどが多く抽出され、系譜図を用いることで系統的に整理している。

このように、技術開発系の組織が抱える技術の継承に関する課題に対し、プロダクトジェネアロジーの手法を利用した暗黙知の発掘手法を構築し、過去の開発の中に埋没した知識の発掘におけるこれらの手法の有効性を示している。本手法により過去の知識を発掘し、活用することで、今後の開発の効率化につなげられるという発展性についても示している。この手法における発掘作業においては、技術を理解する申請者自らがインタビュアーとなり、ナラティブインタビューを行ってその有効性を示し、所属コミュニティにおいてそれを発展させるべく環境構築をしていることは評価に値する。

以上のように、本研究は、自動車産業の潮流において自動車部品サプライヤーであるクラッチメーカーが直面する課題分析の下、その解決策の一つとなる新技術（レーザー加工）の開発とその検証を行い、且つその潮流に対応する効率的な技術開発のために、保有する強みを活かす手法を構築、提案している。これらの実践は技術と経営の融合を謳う本学の理念に沿っており、光産業創成への貢献として評価を与えることができる。

学術業績としては、レーザーを用いた摩擦材の微細なテクスチャリング加工による機能性の付与に関する研究について査読付き論文一報（Tribology 誌）が出版されている。

公聴会においては、いずれの質問に対しても適切な回答がなされた。プロダクトジェネアロジーによる暗黙知発掘とその利用に関する今後の展開についての質問には、継続調査に関する周囲からのフォローや理解が広がりつつあり、変化が実際に生じている現状について説明がなされた。実効性のある展開までには時間がかかると予想されるが、本研究に

より現場で実際の変化を生じさせている意義は大きく、自社の競争力向上はもとより、広く産業界でも利用できるような実践的な研究に発展していくことにも大きく期待したい。

以上、本論文は学位授与に関する細則と内規の基準を満たしており、審査員全員の一致にて、博士（光産業創成）を授与するに値すると判定された。