

博士學位論文

内容の概要及び審査の結果の要旨

第 25 号

2021 年 9 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、2021 年 9 月に本学において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 46 号	博士(光産業創成)	星川雅春	ステルスダイシング事業の競争力強化に関する研究 －タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術の開発－	3
乙第 47 号	博士(光産業創成)	後藤謙太郎	実践知の生成・継承のための共創の場を創出する実践的方法の開発 －光医療機器開発の現場調査に基づく考察－	7
甲第 48 号	博士(光産業創成)	平尾健	超高速投影方式質量分析イメージングを実現する『イオンカメラ』の開発とその事業化	12

氏名	星川雅春
学位の種類	博士(光産業創成)
学位記番号	甲第46号
学位授与年月日	令和3年9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	ステルスダイシング事業の競争力強化に関する研究 ータイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術の 開発ー
論文審査委員	主査 教授 長谷川和男 准教授 姜理恵 教授 石井勝弘

論文の概要

本論文は、ステルスダイシング(Stealth dicing: SD)事業の競争力強化に関して行った顧客ニーズ探索のための現場観察、「SD 加工深さのリアルタイム測定」を行うためのタイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術(Time-stretch low-coherence interferometry: TS-LCI)の開発、そして、ダイナミック・ケイパビリティ(Dynamic capability: DC)理論に基づく技術開発の成功要因の分析を記述している。SD 技術は半導体デバイスの製造技術であり、レーザー照射により1枚のウェハから、数万個に及ぶデバイスチップへ分割して個片化する、新しいダイシング技術である。

第1章では、導入としてSD技術とSD事業の説明と競争力強化が必要な背景について述べた後、本論文の目的を述べている。

第2章では、SD事業強化のために必要な顧客ニーズ探索を目的に、SD装置が半導体デバイスの生産設備として実際に使われている製造現場に密着した参与観察を行った。その結果、製造現場に課された使命は、極少量多品種生産体制において、生産スケジュールを守ることであることを確認した。そして、分割工程後に行われている「断面観察」作業に多くの時間が掛けられており、潜在的な問題となっている事を明らかにした。そのことから、潜在的顧客ニーズは、SD層と呼ぶレーザー加工層の深さを分割工程の前に測定することであると結論した。そして、レーザー加工のリアルタイム測定のためには、200 kHz以上の高速な測定が必要なことを示した。

第3章では、レーザー加工層の高速なリアルタイム測定を行う技術として、低コヒーレンス干渉技術とタイムストレッチ技術について記述し、この2つを組み合わせたタイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測が適していると判断した。

第4章と5章では、「SD加工深さのリアルタイム測定」を行うために、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術の開発を行った。第4章では、既存技術であるフェムト秒レーザー光源技術とタイムストレッチ技術を深化させ、測定の繰り返し速度15 MHz、Si基板内の深さの分解能は6.97 μ m、光路長が0-18 mmの範囲で測定可能な測定システムを開発した。信号解析に必要な新しい波長分散補正手法を提案し、光路長特性の大幅な改善を行った。その内

容は査読付き論文として発表した。第5章では、SD層からの微弱な散乱光を検出するために、測定システムの感度を向上させた。Si基板内に形成された深さ440 μm のSD層の深さを誤差1%の精度で検出することに成功した。

第6章では、技術開発の成功要因から得られる示唆を今後の技術開発にも応用し、技術開発の競争力を高め続けるために、DC理論に基づき成功要因の抽出を行った。はじめに、技術開発活動の省察を行った。その結果として、活動に影響を与えた転換点に着目した。次に、転換点に至る背景や理由を知るために、活動に影響を与えた上司へのインタビュー調査を行い、定性・定量分析を行った。定性分析では、上司が当時、SD事業への行き詰まりを感じていたことや、レーザー応用の新しい何かへの期待感が、申請者を大学へ派遣させるに至った理由として浮き彫りにした。一方、テキストマイニングに基づく定量分析では、上司がこれまでの事業運営で重要と考えていた項目を、3つの単語群（「事業領域」、「顧客」、「知識」）として明確にした。最後に、技術開発に成功できた要因を、DC理論に基づき考察し、3つの成功要因を抽出した。3つの成功要因は、「製造部に浸透していた不明確なものへの挑戦を推奨する組織風土」、「上司によるDCの『感知』能力と『調整機能』の発揮」、「筆者によるDCの『感知』と『変容』能力の発揮」、である。

第7章では、結論として、研究の振り返りと目的に対する結論を述べた後、今後の事業戦略を述べた。開発したタイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術は、SD事業の強化だけでなく、医療分野や、レーザー加工が使われる自動車産業、航空機産業などの新規事業の進出にも有用な技術であること、および、既存のSD事業と新規事業の戦略を記述した。

審査結果の要旨

学位申請者は、ステルスダイシング(Stealth dicing: SD)事業の競争力強化という課題は明確であるが、その解決手段が定まっていない状態で本学に入学した。まず、ステルスダイシング装置が半導体デバイスの生産設備として実際に使われている製造現場に密着し、現場観察を行った。その結果として、現場の作業者が通常の工程の1つとして行う抜き取り検査での断面観察作業に多くの時間が掛けられていること、ステルスダイシングの利点の1つであるスループットの速さが生かされていないことに気づいた。さらに、レシピ検討の工程では、この断面観察を複数回行う必要があり、さらに多くの時間を要することが分かった。そこで、加工と同時にリアルタイムでレーザー加工層の深さを測定することができれば、抜き取り検査での断面観察が不要となり、実際の製造工程でスループットが向上できると考えた。さらに、その測定を実現する方法を検討した結果、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測(Time-stretch low-coherence interferometry: TS-LCI)が適していると判断し、その技術開発を進める決断をした。技術開発をニーズ探索から着手し、製造現場で必要とされる技術開発課題を見出したことは、事業実践として大いに評価できる。作業者にヒアリングを行うのではなく、学位申請者自らが参与観察で実際に現場に入ったことで、現場の作業者が気付いていなかった潜在ニーズに気付いたことは重要である。さらに、技術開発後に、再度、現場の作業者にヒアリングを行っていることも優れた点といえる。

技術開発については、最新の技術であるタイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉

計測システムを、自社での製品化を念頭に、光ファイバー超短パルスレーザー、光ファイバー干渉計、信号解析ソフトウェアまでを自ら設計・開発したことは、事業実践の大きな成果である。その中で提案した測定システムの波長分散補正手法は、これまでの手法より光路長特性の大幅な改善を可能とし、学術的にも評価できる。また、従来法で必要とされる光スペクトルアナライザーが不要となり、非常に簡便な測定で波長分散補正を可能としており、実用性も高い。さらに、レーザー加工層からの微弱な散乱光を検出するために測定システムの感度向上を行い、Si 基板内に形成されたレーザー加工層からの信号検出を可能とし、深さ 440 μm のレーザー加工層の深さを誤差 1 %の精度で検出することに成功した。これにより、レーザー加工層のリアルタイム測定の可能性を実証したことも学術的成果に加え、事業実践の成果として大いに評価できる。

第 6 章では、本研究における技術開発の成功要因を抽出するため、近年、世界的に注目される競争戦略論の一つである「ダイナミック・ケイパビリティ(Dynamic capability: DC) 理論」に基づき、一連の考察を行った。DC とは、不確実性が高い状況の中において、自己を変革し変化に適応する能力である。すなわち、変化を察知し(感知)、組織が保有する資源を必要に応じて組み換え動員し(捕捉)、環境変化に適応しながら刷新を続ける(変容)能力をいう。経済産業省が 2020 年に指摘するとおり、わが国のものづくり産業の競争力の維持において必要な能力である。学位申請者は、本理論を思考の軸に据えながら、自分自身の技術開発活動を省察し、関係者へのインタビュー調査を行い、その結果を定性的、かつ、定量的に分析して、今回の技術開発の成功要因を抽出した。経営学アプローチにおける本研究の学術的貢献は以下の二つである。

まず、学術的貢献の一つ目は、インタビュー調査という質的研究手法から得たデータを、テキストマイニング分析により定量的に検証することで、本技術開発の成功要因のキーワードが「事業領域」、「顧客」、「知識」であることを明らかにした研究手法の新規性の点である。

そして、二つ目は、この結果を踏まえながら、一連の技術開発の活動並びに学位申請者の派遣元企業の経営理念との関連性を示すことで、DC 理論の応用研究としての事例の積み上げに貢献した点である。

また、実践的な貢献として、学位申請者が抽出した三つの成功要因(①製造部に浸透していた不明確なものへの挑戦を推奨する組織風土、②上司による DC の「感知」能力と「調整機能」の発揮、③筆者による DC の「感知」と「変容」能力の発揮)を意識することで、技術開発を続ける派遣元企業のみならず、本学に関連する様々な技術開発のシーンにおいて、その成功の可能性を引き上げることが期待できる点を指摘したい。

さらに、第 7 章では、ステルスダイシング技術の競争力を高め、製造部の成長に繋げる緻密な事業戦略を提示している。具体的には、本博士研究で確立した「タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測」技術を、①如何にして段階を踏みながら SD 事業の強化につなげるかという成長戦略と、②如何にして新規事業創出につなげるかという複数の戦略オプションの提示である。これらの緻密で実現可能性の高い事業戦略を示した点は、事業実践の観点から大いに評価できる。本論文では、レーザー技術であるステルスダイシング事業の競争力強化を目指して、顧客ニーズ探索のための現場観察により「SD 加工深さのリアルタイム測定」という技術開発を設定し、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術の開発に成功している。開

発した技術は、医療分野や、レーザー加工が使われる自動車産業、航空機産業などの新規事業の進出にも有用な技術である。これらのことは光産業創成につながる成果であると言える。技術開発に関する査読付き論文が発表されており、学術的にも評価できる。上述したとおり、経営学アプローチによる研究においても、その学術的・実践的貢献は明らかである。

公聴会においては、博士論文の成果を明確に説明し、質問に対しても明瞭かつ的確に応答がなされた。

以上のことより、審査委員会は本論文が本学の学位規則および関連する内規等の基準を満たしていることを確認するとともに、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	後藤謙太郎
学位の種類	博士(光産業創成)
学位記番号	乙第47号
学位授与年月日	令3年9月17日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	実践知の生成・継承のための共創の場を創出する実践的方法の開発 －光医療機器開発の現場調査に基づく考察－
論文審査委員	主査 教授 藤田和久 教授 石井勝弘 准教授 姜理恵 教授 増田靖

論文の概要

本論文は、申請者の派遣元である光技術関連企業（以下「会社α」という）研究所内の医療機器開発部署における研究開発を促進するために、実践知の生成・継承のための共創の場を創出する実践的方法を構築した研究について論じている。

まず研究の背景として、健康長寿社会を支える医療機器開発を取り巻く複雑な環境と一般的な課題を概観したあと、光医療機器開発に取り組む申請者の派遣元部署の実務上の課題を述べている。その課題は、申請者の派遣元部署ではこれまで事業部へ移管して製品化された技術を開発してきているが、近年事業部移管へ進む技術開発が行われていないことである。本論文では、その課題をさらに3つに大別している。①研究開発段階から社会実装化する方法が分からないこと、②研究開発段階で必要な社内の他部署や社外のユーザーとの連携の仕方が分からないこと、③会社αで取り組まれている研究分野の幅は広く、特定の現場には一般的な方法論が必ずしも通用するかどうか分からないことである。申請者の派遣元部署の光医療機器開発を促進するためには、これらの実務上の課題が解決されなければならないとしている。

本論文は、以上の問題意識のもと「会社α企業内研究所の医療分野の研究開発を促進する実践的方法を構築すること」を研究目的として設定している。その目的を達成するために、2つの現場参加型研究と、それらの結果を基底に実践的方法を構築するための考察を行っている。

第一の現場参加型研究では、現場調査の方法に創発的ビジネスフィールド・リサーチを採用している。この方法は、調査対象に属する実務者が研究者として現場調査を行うもので、本論文では、申請者自身が実務者＝研究者として申請者の派遣元部署で現場調査を行っている。調査対象は、会社αの研究所で27年間に亘って研究開発され、製品化された生体計測用の光医療機器・製品Xの開発に関する実践である。この調査は、製品Xの開発プロセスにおける実践知の生成・変容・継承過程を明らかにすることを目的としている。「実践知」は本論文における2つの主要概念の1つである。そのため、まず製品系譜学に基づき、社内データベースに収められている情報（形式知化された実践知）を調査して、製品系譜図を作成している。次に製品系譜図を基に、製品Xの開発に関わった実務者にインタビューを実施して、データベースに収められていない製品Xの開

発プロセスにおける実践知を調査している。

調査結果の分析においては、製品 X の開発プロセスにおける実践知の生成・変容・継承過程を明らかにするために、さまざまな視点から分析・考察が行われている。まず状況的学習論における概念である実践共同体、バウンダリー・オブジェクト、ブローカーを用いて製品 X の開発プロセスにおける実践知の生成・変容・継承過程を分析している。分析の結果、複数のプロジェクトが推進されるなかで開発された試作機や計画書などがバウンダリー・オブジェクトとして機能し、各研究機関を繋げる役割を演じていることを明らかにしている。またそのプロセスのなかで、複数の実践共同体が生成・変容を繰り返していたことを見出している。さらに、実務者が実践共同体間をブローカーとして移動し、情報を持ち込むなどして、実践知を試作機などへ物象化・形式知化することに貢献していることを考察している。

つぎに、起業家の思考様式・行動原則に関するエフェクチュエーション論の概念枠組みにより分析を行い、企業内の実務者の行動のなかに、起業家の行動原則が見出せることを指摘している。そして、本論文における主要概念の 2 つ目である「共創」概念を用いて分析を行い、製品 X の開発プロセスにおいて実務者間で共創的コミュニケーションが実践され、共創現象が創出していたことを考察している。第一の現場参加型研究における成果が中核となって、本論文が提案する実践的方法を構築されたことを述べている。

第二の現場参加型研究は、2 つ目の主要概念である共創概念を手がかりに、ある地方都市のリハビリテーション病院における患者中心のチーム医療の実践を明らかにするとともに、医療現場に有効な医療機器の開発方法を探索することを目的としている。現場調査の方法として、発達のワーク・リサーチを採用している。この現場調査では、申請者は外部の研究者として、調査対象であるリハビリテーション病院におけるチーム医療の実践を参与観察し、インタビュー調査も行っている。調査結果の分析には、ネットワークングの概念と Bateson (1972) の学習レベル論の諸概念が用いられている。ネットワークングの観点からの分析の結果、参与観察された患者中心のチーム医療の実践のなかに、チームメンバー間におけるネットワークングを見出し、それがささやかながらも共創現象と捉えることができると考察している。また、Bateson (1972) の学習レベル論に基づく分析では、この共創現象が学習 II (選択肢群が修正される変化や経験の連続体の区切られ方の変化など) に該当すると指摘している。最後に、共創概念を用いて考察を行い、健康長寿社会を支える患者中心の医療現場に有効な医療機器の共創が期待されうる開発方法として、チーム医療の現場に外部の開発メンバーがチームの一員として参加することによる内部観測的な開発方法の可能性を提唱している。

続いて、これら 2 つの現場参加型研究の結果を基底に、実践的方法の構築を試みている。ここでは、ACDP サイクル (加藤、2016 ; 加藤・増田、2017) と共創概念を用いて、2 つの研究成果の比較分析を行っている。分析の結果、実務者が抽象的なアイデア (Abstract) から行動 (Action) を起こし、単なるコミュニケーション (Communication) ではなく、共創的コミュニケーション (Co-Creative Communication) を行い、そこから、単なる対話 (Dialogue) ではなく、何かが生み出される設計 (Design) が行われ、単なる実践 (Practice) ではなく、製品、試作品 (Product/Prototype) が創出される (Production) というプロセスを見出している。そして、こ

のプロセスは、「Action—Co-Creative Communication—Design—Production」と特徴づけられるACDPサイクルであると考察している。これは、これまでのACDPサイクルが新製品コンセプト策定のプロセスにおいて、コンセプト策定に向けての実践が生成されるプロセスをモデル化したものであるのに対して、製品開発プロセスにおいて、共創または共創の場が創出され、製品化に至るまでのACDPサイクルであることを含意している。そして前者をACDP 1と、後者をACDP 2と呼び、後者は拡張したACDPサイクルであり、その総称としてのACDPサイクルが本論文で構築した実践的方法であると論じている。

最後に、本論文で構築した実践的方法であるACDPサイクルを実務現場に適用することにより、研究の背景で述べた実務上の課題の解決に寄与すると述べている。そして、この共創の場を創出する実践的方法は、健康長寿社会を支える光医療機器関連分野以外への適用も可能であり、広く光産業創成に貢献できることを論じている。

審査結果の要旨

現在日本では少子高齢化が急速に進み、社会全体が健康長寿社会へ移行することが強く求められている。そのため、さまざまな施策が検討されているが、健康長寿社会を支える医療機器の開発もそのうちの1つである。しかし、医療機器開発には、さまざまなハードルが立ちはだかっていることは広く知られている。

医療機器開発のハードルを高いものにしてしているのは、外的な要因ばかりでなく、医療機器開発メーカーにおける内的な要因も大きい。本論文では、申請者の派遣元部署の実務上の課題として次の3つを挙げている。①研究開発段階から社会実装化する方法が分からない。②研究開発段階で必要な社内の他部署や社外のユーザーとの連携の仕方が分からない。③特定の現場には一般的な方法論が必ずしも通用するかどうか分からない。

本論文は、こうした課題を解決し、申請者の派遣元企業内研究所の光医療機器の研究開発を促進する実践的方法を構築することに果敢に挑んだ研究であり、まさに光産業創成に貢献するものである。本論文では、光医療機器開発の促進という難しい主題のもと、光医療機器開発メーカー内部への参加型現場調査と、医療機器のユーザーサイドである医療現場への参加型現場調査を実施し、光医療機器開発という複雑な研究対象を多角的・複眼的に観測・分析を行っている。さらに、「実践知」と「共創」という概念を手がかりに、具体的現象をメタ視点から分析することで、本学の先輩研究者が開発した、新製品開発のためのプロセスモデルであるACDPサイクルを、製品化・事業化に至るまでのプロセスモデルに拡張して、一般化が可能な実践的方法として構築している。

このように大変意欲的な本論文の功績は次の4つである。

第一に、民間企業の研究所における27年間に及ぶ社会実装化にまで至った研究開発事例を正当な手続のもと調査し、対象製品に関する実践知の生成・変容・継承の過程を明らかにしたことである。民間企業の研究所という調査対象、そして27年間という調査対象期間は、外部の研究者では調査することは不可能である。それだけで、調査結果そのものに、高い学術的価値があるといえる。加えて、本論文では、27年間の実践のなかで、実践知がどのように、何を契機として物

象化し、形式知化するのか、またそれらを生んだ実践共同体がどのように、何を契機として変容するのか、あるいは新しい実践共同体がどのように、何を契機として生成するのかを具体的に提示している。さらに、形式知化されデータベースで継承される実践知と、言語化されないまま実務者のみに内在化していた実践知の特質を明らかにしている。このように長期間の実践を対象とし、かつ対象に深く内在化した調査により実践知の総合的な理解に至った学術的含意は賞賛に値する。また、調査結果から、調査方法である製品系譜学の実務利用の提言を含め、実践知を継承するための具体的方法を提供していることは、実務的貢献として高く評価できる。

第二に、患者中心のチーム医療が実践されているリハビリテーション病院への現場調査を実施し、チーム医療の実践のなかに新しい医療機器開発への手がかりとなる共創現象を見出し、そこから、医療現場に有効な医療機器開発に繋がる共創の場の創出が期待されうる内部観測的な開発方法の可能性を提示したことである。それには、チーム医療の現場に外部の開発メンバーがチームの一員として参加できることが条件とされ、この開発方法は可能性でしかないとされているが、具体的な条件と手順を示している点が高く評価できる。医療機器開発で行き詰っている実務者に対して、明るい希望を与える大きな学術的かつ実務的含意である。

第三に、2つの現場参加型研究から得られた実践的知見を基底に、光医療機器の研究開発を促進するために、実践知の生成・継承のための共創の場を創出する実践的方法を構築したことである。現在あらゆるマネジメントの現場で用いられている、本来生産管理や品質管理のためのPDCAサイクルに代わる、新規事業・製品開発のためのマネジメント・ツールとしてのACDPサイクルは、これまで、その開発の経緯から、新製品コンセプトの開発のための実践(Practice)を創出するツールとして理論的に構築され、実践的に用いられてきた。しかし本来的には、製品化・事業化(Product/Production)まで導くマネジメント・ツールとしての役割が期待されていたが、これまで理論的にも実践的にもその機能は検証されてこなかった。それに対して、本論文は、27年間に及ぶ光医療機器開発の実践事例と医療現場の実践的参与観察事例を、理論的に分析することで、ACDPサイクルを製品化・事業化(Product/Production)にまで導くマネジメント・ツールとして拡張することができた。このことは、拡張されたACDPサイクルが理論的に検証されたということだけでなく、実践事例から導出された実践的ツールであることも含意している。この理論的分析による導出のプロセスは学術的貢献として評価できる。また本論文での実践は事業化の初期段階のものであるが、導出されたACDPサイクルは多くの事業化へ向けた実践に対して行動指針を与えるものであり、今後続く、光産業創成の可能性を上げた点で評価できる。

第四に、本論文では、さまざまな先行する理論・モデル・概念の有効性を検証していることである。その理論・モデル・概念は、社会科学の研究で既に定評のあるものだけでなく、本学の研究者がこれまで開発したものを含んでいる。前者としては、状況的学習論における実践共同体、バウンダリー・オブジェクト、ブローカー、拡張的学習論におけるネットワークング、エフェクチュエーション論の諸概念、共創概念である。このなかで、バウンダリー・オブジェクトについては、これまで日本での援用例が少なく、さらに長期に亘る研究開発過程において実践知がさまざまな形態に物象化し、実践共同体が生成・変容していくことを明らかにした研究は管見の限り行われていない。この点も、本論文の学術的貢献として評価できる。後者としては、創発的ビジ

ネスフィールド・リサーチ、製品系譜学、ACDP サイクルである。創発的ビジネスフィールド・リサーチは、本学の学生のように、実務者が研究者として、自身の現場を調査する方法論として開発されたものである。これまでも、いくつかの研究で採用されてきたが、本論文でもその有効性が検証された。製品系譜学は、開発された製品の系譜を辿ることでその開発過程に埋もれた暗黙的な実践知を発掘し、今後の開発に活かすことを目的とした調査方法であり、研究のみでなく、実務的にも有効な方法である。製品系譜学はこれまで、実践指導において用いられてきたが、本論文の研究によってはじめて学会誌にその価値が認められた。ACDP サイクルに関しては上記のとおりである。本論文は、これらの本学発の研究および実践に有効な理論・方法・モデルの有効性を理論的・実践的に検証している点で高く評価できる。

本論文の学術研究成果としては、経営情報学会誌における査読付き論文1編がある。また、本論文の公聴会において、すべての質疑に対して的確な応答がなされた。

以上のことより、審査委員会は本論文が本学の学位規則および関連する内規等の基準を満たしていることを確認するとともに、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	平尾 健
学位の種類	博士(光産業創成)
学位記番号	甲第 48 号
学位授与年月日	令和3年9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	超高速投影方式質量分析イメージングを実現する『イオンカメラ』の開発とその事業化
論文審査委員	主査 准教授 花山良平 教授 増田靖 准教授 森芳孝 准教授 内藤康秀

論文の概要

本論文は投影方式質量分析イメージングの測定時間の短縮と空間分解能の向上を同時に実現する二次元カメラ型検出器の開発と、それを用いた事業化に向けた事業計画の立案について述べられている。

質量分析イメージング (MSI) 技術は測定対象の表面の原子や分子の分布を、標識することなく可視化することが可能な技術である。研究用途に限らず多くの産業分野への応用が見込まれる技術であるが、潜在的なユーザーより、測定時間の短縮と空間分解能の向上が求められている。しかしながら、これらは相反する関係にあり、両立が困難であるため、市場の要求に応えることができていない。本研究ではこの課題の解決を試み、更に、それに基づく事業計画の立案を行っている。具体的には、本研究以前には、例えば 10×10 mm の領域を $5 \mu\text{m}$ の空間分解能で測定しようとした時、測定に要する時間は約 22 時間であったのに対し、それを 10 時間以下で実施可能とする検出器の開発を本研究の第一の目的としている。そして、開発した検出器の用途を明確にし、事業計画を立案することを第二の目的としている。第一の目的は現在の質量分析イメージングにおける技術改良の延長では達成し得ないので、見たい成分のみを対象にするターゲット分析に用途を限定する発想の転換を行うことで開発コンセプトを導出し、結果として、 10×10 mm の領域を空間分解能 $2 \mu\text{m}$ で、所要時間 68 分で測定可能とする技術の開発に成功している。そして、市場動向の分析とユーザーへのインタビューにより、開発した検出器を搭載した質量分析イメージング装置は、工業分野などのターゲット分析において一般的な分析装置になり得ると結論付けている。更に、この検出器を用いるビジネスで想定される、検出器メーカーである B1、MSI 装置メーカーである B2、及び、MSI 装置ユーザーである C からなる B1 to B2 to C ビジネスモデルにおいて、B1、B2、C 間のコミュニティ形成により、シナジーを高め、情報収集を行い、リスクを少なくした上で多角化を狙う事業化戦略が有力であることを明らかにしている。

本論文の第 1 章では質量分析イメージングの概説と共に既存技術の特徴と能力をまとめ、上述の技術的な課題設定について説明を行っている。

第 2 章では、測定時間の短縮と空間分解能の向上を同時に実現する、投影方式の飛行時間型質

質量分析イメージング (TOF-MSI) 用の検出器開発コンセプト導出を行い、マイクロチャンネルプレート (MCP)、蛍光面、ゲート機能付きイメージンシファイアー (I.I.)、CMOS カメラからなる検出器により所望の性能を実現可能であることを明らかにした。更に、開発する検出器を用いて質量分析イメージング装置を実現するためには強度分布が均一な照射スポットを得るトップハットレーザービーム光学系と、加速電場と I.I.ゲート動作のタイミング調整によるイオン像の質量分解能向上技術を組み合わせる必要があることを明らかにした。

第 3 章では前章で提案した検出器を開発するとともに、性能の実証試験を行っている。実証試験では質量が離れた 2 つのイオン種を観測するための質量窓を設定し、同一試料内に存在する 2 種類の色素の分布を、それぞれ分離して、質量イメージとして観測することに成功している。この時、 $700 \times 700 \mu\text{m}$ の測定範囲に対し、2 種の質量イメージを空間分解能 $2 \mu\text{m}$ 、所要時間 20 秒で取得することに成功している。この結果はこの測定を繰り返すことで $10 \times 10 \text{ mm}$ の領域を測定する場合の所要時間が 68 分であることに相当し、目標とした 10 時間を大幅に短縮することに成功している。

第 4 章では開発した検出器の事業戦略および事業計画の立案について述べている。まず、開発した検出器が搭載されることが想定されるマトリックス支援レーザー脱離イオン化飛行時間型質量分析計 (MALDI-TOF) の市場動向の分析とユーザーインタビューに基づき、投影方式 TOF-MSI 装置は、開発した検出器を搭載することにより、各種顕微鏡による観察結果との比較が可能となり、工業分野での試料分析において一般的な分析装置になり得ると主張している。事業戦略として、SWOT 分析およびクロス SWOT 分析により、投影方式 TOF-MSI 装置で想定される B1 to B2 to C ビジネスにおいて、B1、B2、C からなるコミュニティ形成が重要であることを述べている。また、ビジネスモデルキャンバスを用いた検出器ビジネスの現状分析から、B1、B2、C によるコミュニティをキーパートナーとして活用することが有効であり、キーパートナー候補に価値提案を行うことを起点とした戦略が有効であると主張している。更に、これらから得られた戦略はアンソフの成長マトリックスにより多角化とされ、シナジーを高めてリスクを低減する事業化ステップの基本方針を確認できたと述べている。このビジネスモデルでは、情報交換の機会が増えるコミュニティの活用により多角化におけるリスク低減が図れる。これらは B1 to B2 to C ビジネスに対して従来のビジネスモデルと異なる新しい戦略に基づいた事業計画案である。

第 5 章では結論が述べられており、各章の主要な結論が総括されているとともに、開発した検出器を用いた投影方式 TOF-MSI 市場の形成と発展に向けた展望が示されている。

この様に、この論文では測定時間の短縮と空間分解能の向上を特長とする、投影方式質量分析イメージング装置用二次元イオン検出器の開発について述べられており、従来技術より約 20 倍高速でかつ、2.5 倍高い空間分解能で、明瞭な質量イメージを取得可能な装置の実現に成功している。その事業戦略に関し、B1 to B2 to C ビジネスにおいて、B1、B2、C からなるコミュニティ形成が重要であることを報告している。

審査結果の要旨

質量分析イメージング (MSI) は、過去 10 年以上にわたって質量分析関係者の高い関心を集め

続けており、質量分析の技術的・学術的進歩を牽引する形で発展し、装置メーカーの商業的成功も支えてきた。現在、質量分析イメージングは、基礎研究分野だけでなく様々な産業分野でも本格的に利用され始めている。それとともに、質量分析イメージングのヘビーユーザーだけでなく、潜在的ユーザーからも、測定時間や空間分解能などについての要望や不満が明確に発信されるようになった。その一方で、市販装置の性能向上の限界も見えてきた。この様な状況下でこの論文では、従来の装置改良の延長では到達できないと思われるような測定時間や空間分解能を目標として開発研究を行い、微弱光検出技術を含む検出器関連技術を駆使し、目標性能を大幅に上回る二次元イオン検出器の開発に成功している。そして、この投影方式の飛行時間型質量分析イメージング (TOF-MSI) 専用検出器の新しい市場とビジネスを創出するための研究を行っている。

これまでに投影方式 TOF-MSI 専用検出器として先行研究されているディレイライン検出器、ピクセル検出器、および蛍光面方式の検出器は、実用的性能、堅牢性、ユーザビリティなどに大きな問題があった。そのため、投影方式 TOF-MSI は質量分析イメージングの現実的な装置技術として考慮されることがなかった。今回開発された二次元イオン検出器は、微弱光検出で豊富な実績を有する部品で構成されており、堅牢で、ユーザビリティに優れた検出器が実現されている。これにより、投影方式 TOF-MSI が実用的な性能を発揮できることが初めて明らかになった。

この論文で述べられている手法の巧みな点は、「ターゲット分析」を用途としたことにある。しかも、分析ターゲットが 1 成分だけでは魅力的な技術になり得ないところを、レーザー脱離イオン化現象の特性を踏まえてレーザー照射イベント毎に撮影対象成分を切り替えることで複数種類の質量イメージを取得する工夫を行っている。この手法の有効性を 2 成分からなるモデル試料の測定で実証している。この検出器の開発と検証についての報告は、その重要性を日本質量分析学会に認められ、査読付き論文として Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan 誌に掲載されている。

投影方式 TOF-MSI 専用検出器は、申請者が所属する企業の既存製品にはない種類の検出器であり、最善な事業計画の構築が極めて重要となる。また、「ターゲット分析」という言葉の存在が示すように、こうした分析用途は確かに存在するが、質量分析イメージングの既存市場における用途の主流は発見型基礎研究の「ノンターゲット分析」であり、開発した二次元イオン検出器の事業化には新しい市場の開拓が求められる。そこで、インタビュー調査や各種ビジネスフレームワーク分析から、工業分野での用途を特定するとともに、検出器メーカー (B1) と MSI 装置メーカー (B2) と MSI 装置ユーザー (C) によるコミュニティ形成を基調として、B1 to B2 to C ビジネスを創出する戦略を導き出している。質量分析イメージングに関する現環境下で、コミュニティ形成によりビジネスの成功確率を上げる取り組みは、考え得る最善のアプローチであると是認される。そして、申請者がインタビュー調査により B2 や C の対象者への接触を開始していることはコミュニティ形成に向けた布石にもなっており、事業計画の実行をすでに開始していると言える。今後の事業計画の推進には、B1 to B2 ビジネスモデルに適合した申請者の所属企業の中で、B1 to B2 to C ビジネスモデルのための部署間連携の構築が課題となるであろう。

この論文の光産業創成に対する貢献は、投影方式 TOF-MSI 技術のための、微弱光観測技術の発展による二次元イオン像観測技術や、レーザーを用いた均一なイオン像構築手法などを開発し、

光技術の新しい応用を示したことにある。これらの技術は光技術と質量分析の境界領域で開花した技術であり、質量分析イメージング技術の高度化に光技術が有用であることも同時に示している。また、逆ピラミッド型とも言われる光産業の構造において重要なビジネスモデルである B1 to B2 to C ビジネスにおいて、コミュニティ形成の有効性を示したことも重要な貢献である。この論文の内容における学術的独自性・新規性は、測定時間の短縮と空間分解能の向上が相反する質量分析イメージングにおいて、微弱光観測技術を応用した高感度・高解像度二次元イオン像観測技術を開発したことと、質量が既知の物質の検出に機能を限定することで従来の約 20 倍高速かつ、2.5 倍高い空間分解能で質量イメージングを取得する手法を開発したことにあり、その学術的意義はきわめて高いと言える。

本論文の公聴会においては、すべての質疑に対して的確な応答がなされた。また、申請者は探求心旺盛で、実務能力にも優れており、光産業創成を推進し得る資質を十分に備えていると認められる。

以上のことにより、審査委員会は本論文が本学の学位規則および関連する内規等の基準を満たしていることを確認するとともに、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。