

博士學位論文

内容の概要及び審査の結果の要旨

第 23 号

2019 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、2019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 41 号	博士(光産業創成)	内山文宏	超短パルスレーザーを用いたダイヤモンド工具成形技術に関する研究 ～下請け企業から研究開発型企業への成長戦略～	3
甲第 42 号	博士(光産業創成)	前田利光	ファイバレーザーによる大型構造物のレーザー溶接に関する研究	7

氏名	内山文宏
学位の種類	博士(光産業創成)
学位記番号	甲第 41 号
学位授与年月日	令和元年9月20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	超短パルスレーザーを用いたダイヤモンド工具成形技術に関する研究 ～下請け企業から研究開発型企业への成長戦略～
論文審査委員	主査 教授 江田英雄 東京電機大学 教授 松村隆 助教 楠本利行 教授 坪井昭彦

論文の概要

本論文は、超短パルスレーザーを用いた新たなダイヤモンド工具成形技術を開発することにより切削技術の向上を図ることについて論じている。また、小規模事業者が新規事業を起こし、下請け企業から研究開発型企业へ成長するための戦略について論じている。

最初に、超短パルスレーザーを用いてダイヤモンド焼結体 (Polycrystalline Diamond : 以下 PCD と記す) 工具を成形する技術の研究開発について以下のように論じている。

切削加工は、産業を支える加工技術として重要な役割を担っている。切削加工とは、工作機械に切削工具を取り付け、材料の不要な部分を切りくずとして除去することで、所望の形状や寸法に加工する方法である。切削加工の性能は切削工具の性能に大きく依存する。切削される材料は、市場ニーズに対応して、難削化・複合化といった高度化が進んでいる。これに対応できる切削工具には、小径化、形状の微細化・複雑化、多数枚刃化等などの高度な工具成形技術が要求される。切削工具のうち PCD 工具は、アルミニウム等の自動車部品やアクリル等の情報端末部品等の切削加工において、需要が増加している。PCD の材料であるダイヤモンドは、地球上でもっとも硬い物質であり、究極の工業材料として知られている。しかしながら、その硬さ故、PCD 工具を成形する従来技術である放電加工や砥石研削では、精度や形状に限界がある。よって、PCD 工具が高度化するためには、新たな工具成形技術の開発がカギとなる。

そこでレーザー加工技術を用いた新たな工具成形技術を開発した。超短パルスレーザーによる微細加工技術に注目し、工具成形機の開発と最適な照射条件を導出することで、微細な工具形状の成形と、鋭利な刃先の創製を実現した。刃先の鋭利性を示す刃先丸みは、従来技術では 1.3 μm である。切削性を考慮して目標は 1 μm 以下と設定した。その結果、UV ピコ秒レーザーを用いることにより 0.72 μm の刃先丸みを実現した。超短パルスレーザーを用いたダイヤモンド工具成形技術を応用し、全体厚 0.55 mm のガラス樹脂積層材を切削できる PCD 工具と、軟質樹脂を切削できるチップブレイカ付 PCD 工具が製作され、それらによる切削加工試験を行った。結果として、本論文にて開発した工具成形技術による PCD 工具による切削面は、他の技術で製作した

PCD 工具による切削面と比較して、ガラス部分に関しては欠けが少なく、樹脂部分に関しては溶けがなく透明性が高いなど、産業的に良好な切削結果を得た。また、ストラクチャ付工具による加工面粗さ制御技術を実際の切削試験結果を基にした切削シミュレーションによって確立した。この技術により、切削条件の変更のみで数 μm から数十 μm の範囲で加工面粗さの制御が可能となった。

次に、小規模事業者が新規事業を起こし、下請け企業から研究開発型企业へ成長するための戦略について以下のように論じている。

中小企業が新規事業を起こし高度化を図ることが、我が国の経済にとって重要である。第 5 期科学技術基本計画によれば、技術シーズを短期間で新規事業につなげるようなイノベーションの創出は、市場規模の制約があり意思決定に時間を要する大企業よりも、迅速かつ小回りの利く中小・ベンチャー企業との親和性が高い。中小企業白書によれば、中小企業は自ら需要を獲得する必要に迫られている。従来、受託加工を事業としてきた中小企業・小規模事業者は、大企業が市場から獲得してきた需要の恩恵を享受してきた。しかし、グローバル化の進展等を背景に、相互依存関係は希薄化し、中小企業・小規模事業者は自ら市場と向き合い、需要を獲得する必要に迫られている。また、同白書は中小企業が高度化を図ることが我が国製造業の国際競争力向上に資すると指摘している。しかしながら、中小企業は、新規事業を起こすにはどうしたら良いかわからないことが多い。よって、中小企業が新規事業を立ち上げるために、何が重要で、どのような方向性を必要とするか、が求められている。中規模企業に比べ経営リソースの乏しい小規模事業者では、さらにその傾向は顕著である。そこで 6 年間の事業実践を通じ、小規模事業者が新規事業を起こすには何が重要で、何が重要であったかを観察することで、小規模事業者が新規事業を起こす際に、ヒントになる方向性を示すことを目的とした。

小規模事業者による 6 年間の新規事業実践を観察した結果、産学連携として①連携体制の構築、②補助金による開発資金の調達、③レーザ工具成形装置の開発・導入、④レーザによる工具成形技術の開発、⑤工具開発、⑥事業化という 6 つのステップに分かれていた。また、各ステップでの学会・展示会での発表や論文・記事による発表などの実績と、その後の事業展開との相関を観察および考察した。その結果、小規模事業者が新規事業を起こし、下請け企業から研究開発型企业へ成長するためには、次の 3 点が重要であることがわかった。それらは、産と学が互いの成果を意識した産学連携、川下企業との連携を意識した補助金による資金調達、国の施策との整合性を意識することの 3 点である。

以上のように本論文は、超短パルスレーザを用いた新たなダイヤモンド工具成形技術を開発することにより切削技術の向上を図ることについて論じたものである。また、小規模事業者が新規事業を起こし、下請け企業から研究開発型企业へ成長するための戦略について論じている。結論として、本研究の成果が、小規模事業者の成長と切削技術の発展を促し、日本のものづくりの発展と国際競争力の向上に寄与するものであることを論じている。

審査結果の要旨

本論文は、超短パルスレーザー加工を切削加工用工具成形に応用することにより、従来技術では実現できなかった微細構造成形を可能とする工具成形技術の研究およびその応用例について論じている。また、6年間の自らの事業実践したことを観察することで、小規模事業者が下請け企業から研究開発型企業へ成長するための戦略について論じている。

本論文の新規性および成果は、以下の2点である。

第1に、レーザー加工技術を導入することにより、従来技術では実現が困難であった切削工具成形技術を開発し、その技術の有用性を実際の切削加工によって明らかにしたことである。従来技術である放電加工や砥石研削では、刃先丸みを $1\ \mu\text{m}$ 以下、刃先ピッチ $200\ \mu\text{m}$ 以下の精度で自由形状を持つ工具を製作することが困難であった。そこで、レーザー加工技術に注目し、波長や時間幅の異なる各種レーザー光源によるレーザー加工実験を通じての光源の最適化、また光学顕微鏡などを搭載した切削工具成形用システムの開発を行うことにより、刃先丸み $0.72\ \mu\text{m}$ 、刃先ピッチ $50\ \mu\text{m}$ 以下の精度で成形加工できる技術の開発に成功した。また、開発した技術を駆使しないと製作できない、ガラス樹脂積層材を1本で同時に切削可能なエンドミルや溶けやすい軟質樹脂切削用に微細なチップブレードを設けたエンドミルやピッチ $50\ \mu\text{m}$ のニック付き工具を開発した。それらの切削工具としての有用性を、光学顕微鏡を使った切削面の観察、高速度カメラを使ったインプロセスモニタリング、切削動力計などによるインプロセスでの力測定、切削シミュレーションなどの科学的アプローチにより様々な視点から評価した。その結果、本論文で開発された技術で製作された工具は、従来技術で製作された工具と比較して優位性を持つことを明らかにした。これは、産業にとってエビデンスとして活用できる状況であることを意味しており、光産業創成の観点から評価できる。特に、ニック付き工具を傾斜させて切削を行い、その傾斜角度と送り速度によって切削面の表面粗さを制御する切削技術は、International Journal of Automation Technology に査読付き論文として出版されており、この技術の科学的な新規性も明らかであり評価できる。

第2に、小規模事業者の成長戦略として下請け企業から脱却する際、自らの事業実践を通じて具体的に重要な3点を提示したことである。中小企業・小規模事業者は、市場ニーズを獲得しやすい大企業の需要の恩恵を受けた下請け企業となっている場合が多い。現在、大企業はグローバル化を促進しており、生産拠点を海外に移す傾向を持つ。それに従い、大企業と中小企業・小規模事業者の関係が希薄化している。中小企業・小規模事業者は自ら社会ニーズを獲得し、そのニーズに合わせた技術開発等を行える研究開発型企業へ成長する必要に迫られている。しかしながら、どのようにすれば成長できるのかという成長戦略を立てることは容易ではない。そこで、本論文では、論文執筆者の所属企業が下請け企業から研究開発型企業へ成長できた事業実践経緯を詳細に分析した。その結果、成長戦略として産学連携、資金調達、国の施策との整合性という点が重要であることを明らかにした。産学連携の部分において、今まで学との共同研究などを行ったことがないために生じやすい、産学間での成果の相違に言及している。産および学にとっての成果は、それぞれ「できるだけ早く結果(生産現場で使える技術)を上げたい」、および「学術

的なアウトプットを出したい」である。これらのお互いの成果を理解し、それぞれが出やすいように前向きに連携する必要性があることに言及していることは、産学連携を行う上での重要な視点である。また、資金調達においては、サポイン事業への申請などを行うことのメリットとして、産学連携体制の構築ができること、マーケットインが可能となること、実現性の高い事業計画書を作成できるなどの自社の成長ビジョンの明確化などを挙げている。また、不採択となった補助金の申請書は、他の補助金申請に活用することで、結果的に資金調達に成功している。これは、補助金申請はハードルもコストも高いと考えている中小企業・小規模事業者にとって、補助金申請に対するメリットを示したものであり、光応用産業を含む産業創成に大きく貢献していると評価できる。国の施策との整合性については、提案するテーマが国の将来への方向と合致したテーマであるかどうかを意識することにより、共同研究者や協力者の理解を得られやすいだけでなく、補助金の採択率にも大きく影響する可能性について論じた。これは、中小企業・小規模事業者が光技術の導入による成長戦略を作成する際にも非常に重要な視点であり、光産業創成に大きく貢献していると評価できる。

公聴会において申請者は、本学位論文に関する技術面及び経営面に関する多様な質問に対し、明瞭且つ的確に応答がなされていた。

審査委員会では、本研究で開発された新工具成形技術が高く評価されるとともに、成長戦略に関する考察が、中小企業などが新規に光技術応用を導入する際に必要かつ重要な考察であると評価され、光産業創成に十分寄与すると評価された。

以上により、本論文は光産業創成に貢献する高度な研究であると評価し、本学の学位規則及び関連する内規等の基準を満たしていることを確認し、審査委員全員一致をもって博士（光産業創成）の学位を授与するに値すると判定した。

氏名	前田利光
学位の種類	博士(光産業創成)
学位記番号	甲第42号
学位授与年月日	令和元年9月20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	ファイバレーザによる大型構造物のレーザ溶接に関する研究
論文審査委員	主査 教授 坪井昭彦 准教授 姜理恵 准教授 沖原伸一郎 特任教授 沓名宗春

論文の概要

本論文はファイバレーザによる大型構造物のレーザ溶接に関する研究について論述している。産業界への更なるレーザ溶接の適用拡大を目的に、大型構造物への大出力レーザによる溶接のための周辺機器の開発や、溶接施工法の確立についてまとめたものである。特に、大型構造物への大出力ファイバレーザ装置による長時間連続溶接に関する問題点を解決する方法について研究開発を行い、これについて論じている。

本論文は9章で構成されている。

第1章では「序論」として、研究の背景、ファイバレーザによる大型構造物のレーザ溶接における問題点と研究課題、および溶接欠陥と品質確保に関する概況を述べ、これに基づいて設定した本研究の目的、即ち、①ファイバレーザ溶接を大型溶接構造物に適用するための溶接施工方法の確立（主たる目的）、②過大な投資を必要とする技術開発に伴う経営リスク回避と、より安全な経営状態での研究開発推進への一倉理論を用いた経営計画推進の有効性確認（従たる目的）と、本論文の構成について述べている。

第2章の「高出力（10kW～30kW）ファイバレーザ用の加工ヘッドの研究」では、高出力で長時間連続運転に耐える加工ヘッドの開発を目的に、レーザ加工ヘッドおよび加工光学系の冷却強化を十分に行うと共に、水冷された集光ミラーを採用してレーザ伝送やレーザ集光を行う溶接用レーザ加工ヘッドを開発したことがまとめられている。特に、レーザ出力1kW～30kWのレーザ出力測定において、設定レーザ出力に対して、実測レーザ出力は98%～99%のレーザ出力が得られたこと、冷却水路が一筆書きで3L/minである場合は、焦点位置および焦点シフト量はレーザ出力15kWの時に+2.9mm、30kWの時は+6.9mmに抑制されたことが示された。また、レーザ溶接加工ヘッド外周部の温度をサーモグラフィで測定することにより、温度が限界使用温度60℃よりも低い40℃となることを確認し、レーザ出力30kWでの2時間連続発振であっても、安全に連続運転に耐え得るレーザ加工ヘッドであることを確認している。

第3章の「レーザ溶接におけるシームトラッキングシステムの研究」では、2次元および3次元のシームトラッキングシステムの開発に取り組んでいる。溶接加工点より前方5mmの未溶接線

をリアルタイムでモニタリングすることにより、加工用のレーザとほぼ同軸でのシームトラッキングを可能としている。2次元同軸シームトラッキングシステムの追従精度は、溶接線に垂直のX座標位置0に対して、平均0.072mmであった。これに対して、3次元シームトラッキングシステムの追従精度は、溶接線に垂直のX座標位置0に対して、プラス側は平均0.016mm、マイナス側は平均 -0.065mmであった。高さ方向であるZ軸の追従精度の範囲は±0.4mmであった。このことより、開発された2次元および3次元シームトラッキングシステムの追従精度は実用上問題のないレベル（±0.15mm以内）にあることを示している。

第4章の「レーザ・アークハイブリッド溶接におけるシームトラッキング」では、第3章で開発したシームトラッキングシステムを応用し、大型構造物に適用されるレーザ・アークハイブリッド溶接用シームトラッキングシステムを開発し、その性能を確認している。突合せ継手での溶接線追従の狙いズレは、溶接線に垂直のX座標位置0に対して最大+0.12mm、最小-0.09mmであった。また、すみ肉継手のレーザ・アークハイブリッド溶接では、溶接中に発生する溶接継手の熱歪みにより変形が生じて、溶接線追従が可能としている。開発されたレーザ・アークハイブリッド溶接用シームトラッキングシステムの追従精度も、第3章で開発されたシステム同様に実用上問題のないレベル（±0.15mm以下）にあることを示している。

第5章の「継手ギャップの変動に対する適応制御技術の開発」では、継手ギャップの変動に対する適応制御技術の開発について論じている。大型構造物のレーザ溶接は、小型部品と比較してワークの単品精度確保が困難であるため、継手ギャップの発生に起因した溶接欠陥を生じ易いだけでなく、長尺の溶接中に生じる熱変形により、継手間にギャップが発生する。レーザ溶接中に継手ギャップ幅が変化する突合せ継手において、適応制御センサを用いてリアルタイムに溶接線および継手ギャップ幅を連続モニタリングすることにより、シームトラッキングを行うのと同時に継手ギャップ幅も同時測定し、その継手ギャップ幅に最適なワイヤ送給速度、レーザ出力および溶接速度を同時可変制御できるシステムを開発し、その性能を確認した。変化する不均一な継手ギャップに対して、常に最適な3つの溶接パラメータになるように適応制御させることを可能とした。適用実験による品質確認により、開発した適応制御技術では「レーザ出力」、「ワイヤ送給速度」および「溶接速度」の3つのパラメータを同時可変制御させることにより、ビード欠陥のない溶接継手が可能であることを立証した。

第6章の「仮付ビード識別機能を持ったレーザ溶接用シームトラッキングシステムの研究」では、溶接線上の仮付ビード輪郭を溶接線と誤認しない高信頼性リアルタイムシームトラッキングシステムの開発について論じている。大型構造物をレーザ溶接する場合、単品部品同士の溶接線に対して、必要な位置に仮付を行い、本溶接施工前に予め仮組みをして部材を固定する必要がある。そのため、溶接線には未溶接線と複数の仮付ビードが混在するため、シームトラッキングシステムが溶接中に溶接線か仮付ビードかをリアルタイムで判別しながらレーザ溶接をしなければならない。仮付ビードの輪郭形状を溶接線と誤認しないように、画像処理の際に関連性の大きい4つの監視パラメータ（①濃度値の変化、②トレンドエッジ欠陥検出、③検出セグメントの標準偏差、④検出セグメント近似直線によるエッジ角度）を適切な範囲に設定することで、溶接線

か仮付ビードかを正確に判断できるシームトラッキングシステムを研究・開発している。実験における追従精度は平均+0.05mmであり、仮付ビードの追従処理を併用した場合であっても、レーザー溶接で健全な溶接が可能な狙い精度の許容値（±0.15mm以下）を満足した。

第7章の「4m長尺溶接構造物へのレーザー・アークハイブリッド溶接の適用事例」では、長尺部材など大型構造物へのレーザー溶接適用を想定した長時間連続加工に耐えうるシームトラッキングセンサの実用化研究について論じている。溶接加工点周辺は多量の輻射熱、反射光、スパッタおよびヒュームにさらされ、劣悪な環境となる。特にシームトラッキングセンサの内部には、光学部品や精密機器が装着されており、常にこれらの光学系の信頼性が要求される。そのため、溶接中に発生する輻射熱により、シームトラッキングセンサが熱損傷を受けて故障する、あるいは、ヒュームによる光学部品の汚染で故障するといった事態が想定される。本章では輻射熱とヒュームといった外乱が、シームトラッキングセンサへ悪影響をおよぼし、故障に至らないように、①水冷銅板（保護板）、②ヒューム吸引ノズル、③水冷ジャケットの採用のような対策を取り、レーザー溶接の大型構造物への実用化の実現に向けて研究に取り組んだ。その結果、センサ外装部のLED付け根の最高到達温度は58°Cであった。平均温度は、約170秒で飽和し50°C付近で推移した。センサ内部のCCDカメラとLEDの動作保障温度範囲85°C以下であり、問題ないレベルであることを確認した。また、吸引ノズルの温度は、溶接スタート後、約230秒で280°Cに達し、飽和している。吸引ノズルの材質は軟鋼で融点は約1,500°Cであり、問題ないことを確認した。さらに、溶接中のセンサ映像はヒュームにより曇ることがなく、16個のセグメントの検出は溶接中始終安定していたことを確認した。3次元シームトラッキングシステムを併用してのレーザー・アークハイブリッド溶接で、4m長さのすみ肉溶接を確認実験として行い、全溶接長において溶接線の狙いズレはなく、健全な溶接ビードが得られている。これにより外乱に対する3つの対策の有効性を示した。

第8章の「経営計画を用いた研究開発の進め方の研究」では、リスクを伴う研究開発を進める上で、A社の財務体質の健全性の維持と事前のリスク回避を同時遂行するための手法として「一倉理論」を用いた経営計画の策定が重要である点について論じられている。経営計画は「経営計画書」、「利益計画書」、「資金運用計画書」、および「比較バランスシート」の4つの手法で構成されており、これらの計画を策定する過程で「一倉理論」により、多くの的確な啓示がなされた。その結果、A社において、経営上必要な先手を打つことが可能となり、事業経営と研究開発の最適バランスを維持・継続されている。これにより、「一倉理論」が、経営実務面における大変有効な理論であることを改めて証明した。研究開発の強化を始めた2012年以来、A社のコアビジネスは確実に変化し進化を遂げ、A社のビジネスモデルが変容した。研究開発強化前のA社のビジネスモデルは、受注型であり、価格や仕様の決定権が殆どないため自主性はなく、企業の命運はすべて顧客に握られる「下請け型ビジネスモデル」であった。しかし、研究開発強化後のA社は、市場や顧客の課題に正しく向き合い、研究開発を続けることで、幾つかの複数の研究成果がまるで化学反応を起こすような相乗効果を引き起こし、当事者さえも予測できない革新的なアウトプットをもたらす「市場開拓型ビジネスモデル」へと進化しつつある。顧客構成も優良企

業が増加し、それに伴いA社の業界での知名度向上、高利益率の受注増となり、自社業態が大きく改善し進化している。これは「一倉理論」を用いた「経営計画」による健全経営に「研究開発の強化」をすることで、A社の経営に大きな相乗効果をもたらした結果である。

第9章の「結論」では、第1章から第8章までの研究成果がまとめられている。

審査結果の要旨

本論文は、自動車、航空、造船などの輸送機器産業他への更なるレーザー溶接技術の適用拡大を目的として、長時間溶接が要求される大型構造物に大出力ファイバレーザを適用するため、これに必要な加工ヘッド、モニタリングによるトラッキングシステム、適応制御システムなどの周辺機器の開発について論じている。また、大規模な設備投資リスクを伴う研究開発を進める中小企業A社を事例に取り上げ、財務体質の健全性の維持と事前のリスク回避を同時に遂行できる「一倉理論」を用いた経営計画の運用とその有効性について論じている。

本論文の新規性は、独自にファイバレーザを用いた溶接におけるシームトラッキングシステムを開発し、これを大型構造物に模した4m長尺溶接構造物へのレーザー・アークハイブリッド溶接に適用し、システム機能が実用レベルにあることを実証したことである。開発したシームトラッキングシステムについては、溶接学会論文集に査読付き論文として掲載されており、学術的な新規性も評価できる。実用化レベルに至るには、幾つかの解決すべき課題があり、この解決のために6つの段階を踏んで、計画的に研究が行われたことも評価できる。

第1段階は、長尺の大型構造物にファイバレーザ溶接を適用するため、高出力(30kW)ファイバレーザ用加工ヘッドの開発である。冷却水路の工夫により2時間連続発振であっても、安全に連続運転に耐えうる性能を確保した。加工ヘッド自体は既製品として販売されているが30kWまでの高出力連続使用に耐えうる製品が世界的にも無いことから申請者自らが開発を行った。これによりヘッド製作に関する暗黙知を得ることができ、顧客からのオーダーにカスタマイズした製品提供を可能とした。

第2段階は、レーザー溶接におけるシームトラッキングシステムの研究開発である。開発したシステムは、溶接加工点より前方5mmの位置における未溶接状態のギャップをリアルタイムでモニタリングすることにより、その線にレーザを2次元および3次元で追従させてレーザー溶接を行うことができる。光切断法によるモニタリングと照明出力・検証光の減衰制御等の研究によりこの2次元および3次元シームトラッキングシステムの追従精度を実用上問題のないレベル($\pm 0.15\text{mm}$ 以内)にすることに成功した。レーザー溶接におけるレーザービーム径が0.5mm~1.0mmであることから非常に高い追従精度であること、および3次元でのシステムを構築し機能を実証したことは優れた成果である。

第3段階は、レーザー・アークハイブリッド溶接におけるシームトラッキングシステムの開発である。大型構造物においては大きな継手ギャップが存在するため、レーザー溶接に対してより幅広い溶接が可能なアークハイブリッド溶接と組み合わせた工法で同様に開発を行った。これについても追従精度も実用上問題のないレベル($\pm 0.15\text{mm}$ 以下)にすることに成功した。

第 4 段階は、安定した溶接品質を確保するための継手ギャップの変動に対する適応制御技術の開発である。適応制御センサを用いてリアルタイムに溶接線および継手ギャップ幅を連続モニタリングすることにより、シームトラッキングを行うことと同時に継手ギャップ幅も同時測定し、その継手ギャップ幅に最適なワイヤ送給速度、レーザー出力および溶接速度を同時可変制御できるシステムを開発した。これによって、トラッキングシステムのみでは実現できなかったビード欠陥のない溶接継手を可能とした。

第 5 段階は、仮付ビード識別機能を持ったレーザー溶接用シームトラッキングシステムの開発である。大型構造物の溶接においては、ほぼ仮付が行われている。この仮付のビードは既存のトラッキングシステムにおいては障害となるため、これを回避するための機能が必要である。これに対して、複数の監視パラメータを独自に設定することでこれを実用レベルで回避できることに成功した。

第 6 段階では、先の 5 段階の研究によって開発された溶接システムを用い、4m 長尺溶接構造物へのレーザー・アークハイブリッド溶接を行い、大型構造物の溶接に適用できることを実証した。

これら一連の実証にむけた研究開発により、長時間溶接、厚板溶接が要求される大型溶接構造物（船舶、建築・橋梁、圧力容器、ペンストック、発電プラントなど）をレーザー溶接する場合の問題点に対して、個々の問題点を学術的だけでなく技術的にも解決した。加えて一貫した制御システムを生み出し、総合的に健全な溶接継手を得る溶接施工法を確立した。近年、レーザー装置の大出力化、低コスト化が進み、今後も造船のような大型溶接構造物などへのレーザー溶接が拡大されようとしている。本論文における研究成果はこのような分野に大きく貢献していく点を踏まえて高く評価できる。

続いて、本論文の事業化や事業実践に関わる審査事項について述べる。申請者が経営する中小企業 A 社は 1 億円を超える 30kW ファイバレーザを国内では早い段階で導入し、大型構造物への適用を目指し、その溶接施工法を確立するまで至った。これは大いに評価されることである。また、すでにこの技術に対して顧客から問い合わせがいくつも来ていることから、販売実績を上げることが見込まれる状況まで事業を展開した。一方で、本論文における各種開発は申請者が所属する中小企業等にとっては大きな投資であり、経営上のリスクを抱えることになるため、リスクを回避しながら、より安全な経営状態で研究開発を進めることが重要である。このため、本論文ではこれまで多くの実績事例のある一倉理論に基づく経営計画を活用した研究開発の進め方を検討し、実際に本手法の有効性を示した。この一倉理論は、「社長専門の経営コンサルタント」と呼ばれた一倉定が、大中小の 5,000 余社のあらゆる業種・業態において業績向上策を練り、幾多の高収益会社を育ててきた実績と、その実践性から構築した理論である。ここでの有効性については次の 3 つの効果で説明できる。

1 つ目は、新たな設備投資による経常利益の増加である。A 社ではものづくり補助金 105 百万円 (7 件獲得) 等を活用して研究開発の強化を行った設備投資以外にも、2015 年度以降から 2018 年までに年商の約 60% に相当する新規の研究開発用の追加設備投資を実施している。その結果、従来に比較してより高難度高付加価値型の案件の受注ができるようになり、A 社の 2018 年度の

最新の経常利益は、2015年度と比較すると約1.5倍となり増益を実現している。

2つ目は、有名な優良企業との取引の急増加と、受注業務の質や内容そのものの高付加価値化である。本研究における一連の研究開発の成果とその副産物も、次第に市場に受け入れられ始めている。

3つ目は、申請者の所属するA社のビジネスモデルの変容である。すなわち、「下請け型ビジネスモデル」から脱却し、「市場開拓型ビジネスモデル」への進化である。これらの効果は一倉理論を用いた経営計画に基づく健全経営に、研究開発事業の強化が加わることにより生まれた経営上の大きな相乗効果といえる。今後新しい市場が創造でき、A社の成長のみならず、わが国の国力強化に繋がるような大きな貢献が期待されることから、この点についても評価できる。

公聴会において申請者は、本論文に関する技術的内容や事業展開、一倉理論の他の企業への適用の有効性などの様々な質問に対し、総じて的確な応答がなされた。

審査委員会では、本研究で行われたファイバレーザによる大型構造物のレーザ溶接に関する研究開発とその施工法の高度な実証および事業展開実績について高く評価した。また、一倉理論を用いた研究開発手法の有効性を示したことについて、中小企業が大型の設備投資というリスクを踏まえた研究開発を行う際の指針となる成果として評価した。これらの実践は技術と経営の融合を謳う本学の理念に添っており、光産業創成への貢献が非常に高いと評価した。

以上により、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、審査委員全員の一致にて、博士（光産業創成）を授与するに値すると判定した。