

博士論文

ファイバー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

令和元年9月

光産業創成大学院大学

前田 利光

博士論文の要旨

前田 利光

ファイバーレーザーによる大型建造物のレーザー溶接に関する研究

本論文は、産業界への更なるレーザー溶接の適用拡大を目的に、大型建造物への大出力レーザー溶接のための周辺機器の開発や溶接施工法の確立を取りまとめたものである。特に、大型建造物への大出力ファイバーレーザー装置による長時間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った。

第1章では「序論」としてレーザー加工の市場動向、優位性および課題について述べた。今日、レーザー加工の適用は、電機産業、自動車産業、機械産業、エネルギー産業などで、その優れた加工特性が認知され、従来には無かった高い付加価値を生み出し、確実に進化している。一方、レーザー発振器においても大出力化、高機能化、小型化、高効率化、低価格化が進んでおり、レーザー加工の応用は益々拡大すると予想される。しかし、大型建造物の溶接に適用する場合には、①溶接線の狙い外れによる溶接欠陥の発生 ②溶接継手の許容ギャップが小さい ③熱レンズ効果で焦点シフトが発生する ④長時間運転に対するレーザー機器の信頼性の確保 ⑤溶接線と仮付の識別が可能なシームトラッキングなどの課題がある。そこで、本研究ではこれらの課題を解決することを目的に研究を行った。また、一倉理論を用いた経営計画を活用した研究開発の進め方を検討し、その手法の有効性の立証も目的とする。

第2章の「高出力ファイバーレーザー用の加工ヘッドの研究」では、長時間運転を行う場合に、レーザー加工ヘッドおよび加工光学系の冷却強化を行うと共に、水冷された集光ミラーを採用してレーザー伝送やレーザー集光を行う溶接用レーザー加工ヘッドを開発した。

第3章の「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」では、溶接線を確実に追い、溶接欠陥を発生しないための、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だ。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事によりシームトラッキングが可能となった。2次元同軸シームトラッキングシステムの追従精度は、平均0.072mmであった。3次元シームトラッキングシステムの追従精度は、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軸の追従精度は±0.4mmであった。これらは、実用上問題ないレベルにあることが実証された。

第4章の「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」では、ハイブリッド溶接用のシームトラッキングシステムの開発について述べている。突合せ継手での溶接線の追従精度は、最大+0.12mm、最小-0.09mmであった。また、すみ肉継手の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変形が生じても溶接線の追従が可能であった。これらの追従精度は実用上問題のないレベル(±0.15mm

以下)にあることが実証された。

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、継手ギャップ幅が変化する突合せ継手において、開発したシームトラッキング技術に加えて、適応制御センサーを用いてリアルタイムに継手ギャップ幅も同時に測定し、継手ギャップ幅に応じた最適なレーザ出力、溶接速度およびワイヤー送給速度を高速に適応制御できるシステムを開発した。確認実験では板厚6mmのSPHC鋼材を用いて継手ギャップ幅を0～2mmに変動させた突合せ溶接継手に対して、レーザとアークを出力して、同時に継手ギャップ適応制御機能を使用することでアンダーフィルおよび溶落ちなどの欠陥のない健全な溶接ができることを確認した。

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、大型構造物をレーザ溶接する場合、一般に部材を固定するために仮付がなされる。その結果、溶接線には未溶接線と複数の仮付ビードが混在する。そのため、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。ここでは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)のデータを設定して、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開発した。

第7章の「4m長尺溶接構造物へのレーザ・アークハイブリッド溶接の適用事例」では、長時間の連続加工となるため、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。本章では輻射熱とフェームといった外乱が、シームトラッキングセンサーへ悪影響を及ぼすので、センサーが故障しないように①水冷銅板(保護板)、②ヒューム吸引ノズル及び③水冷ジャケットを取り付けるという対策について研究を行った。これらの対策により、4m長さのすみ肉継手のハイブリッド溶接を行ったが、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ている中小企業である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、「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」を策定する「一倉理論」を用いた経営計画を運用した。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・継続する事ができた。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」を推進することで、A社の経営に大きな相乗効果をもたらした結果と言える。

第9章の「結論」では、第1章から第8章までの研究成果をまとめた。

以上

Abstract of doctor thesis
Toshimitsu Maeda
Study on laser welding of large structures by fiber laser

In the present thesis, it is described that the developments of welding facilities and the welding procedures have been studied in order to apply the high power laser welding to large welded structures. Especially, the long seam welding by a high power fiber laser was investigated for the application of large welded structures.

The result of the investigation with regard to the market of laser material processing and its advantages are described in chapter 1. Recently, the applications of laser material processing make the additive value and make progress surely in many industries such as electric/electronics, automobile, machinery, energy. On the other hand, laser facilities have been developed as high power laser, high quality, small, high efficiency and low cost machine. It is expected that the application of laser material processing will increase in the future. However, the followings should be considered in the application of laser welding to large welded structures;

- Weld defects are caused by misalignment of laser beam to weld seam.
- Allowable weld joint gap is too small.
- Focal point shift is occurred by thermal lens effect.
- Reliability of laser facility is required for long term operation.
- Seam tracking that can distinguish weld lines and tack welds

The objective of the present study is to make the solutions of the above issues.

In addition, the purpose is to prove that a business plan using the ICHIKURA theory is effective for safely carrying out risky research and development.

In chapter 2, study on laser head for high power fiber laser is described, High performance laser head and laser optics for long seam welding are developed by enhanced water cooling of head and water cooled focusing mirrors.

In chapter 3, study on seam tracking system of laser welding is described. 2D and 3D seam tracking systems without weld defect have been developed using a weld seam tracking sensor. In order to control the laser beam position, a sensing area at 5mm ahead of laser beam is observed by a CCD camera. Then, the laser beam position is adjusted to the weld seam as a real time monitoring system. The average tracking accuracy of X direction in 2D coaxial seam tracking system was 0.072mm. The average tracking accuracy of X direction in 3D coaxial seam tracking system was from -0.065 mm to $+0.016$ mm. The tracking accuracy of Z direction was ± 0.4 mm. It is proved from present

study that developed 2D and 3D tracking systems have enough accuracy to apply to the industries.

In chapter 4, development of seam tracking for laser – arc hybrid welding is described. The seam tracking accuracy of X direction for hybrid welding of butt joint was from -0.09 mm to $+0.12$ mm. In the hybrid welding of fillet joints, even if thermal deformation occurred during welding, seam tracking of the weld line was possible. The accuracy of seam tracking system for laser – arc hybrid welding was applicable level , which is less than ± 0.15 mm.

In chapter 5, it is described that development of adaptive control system for weld bead when joint gap changes. In addition to the developments of seam tracking systems, the adaptive control system for laser – arc hybrid welding of butt joint with a variable joint gap has been developed. In the development, the weld seam and joint gap is monitored continuously by an adaptive control sensor in real time. At the same time, the joint gap is detected for adaptive controls of laser output power, welding speed and wire feeding rate in order to get sound weld bead. In the development, three welding parameters are controlled to be optimum for the variable joint gap by adaptive control system. A butt joint of SPHC steel (thickness : 6 mm) was welded by the hybrid process using an adaptive control system to make sure that adaptive control system is available to get sound weld bead without weld defects such as under fill and burn through . It was proved that sound weld bead without weld defect could be obtained by the adaptive control system of laser output power, weld speed, and wire feeding rate at the same time.

In chapter 6, the investigation of seam tracking system for laser welding of weld seam with tack weld is described. In case of laser welding of large structure at stage of temporary assembly, tack welding is necessary to fix the long joint. In general, weld seam and tack weld are coexist in a weld line. Therefore, the seam tracking system is required to distinguish tack weld from weld seam during welding at real time. Image processing in the seam tracking system includes the following 4 parameters ;

- Change of density value
- Defect detection by trend edge
- Standard deviation of detected segment
- Edge angle by approximate line of detected segment

As a result, a new seam tracking system for weld seam with tack weld was developed.

In chapter 7, a trial of laser – arc hybrid welding to large welded structure of 4 m in length has been implemented. Considering an application of laser welding to large welded structures, the welding atmosphere becomes usually severe environment by reflected light, spatter, radiant heat and fume at welding point. A trial on the application

of laser welding to large welded structures has been investigated. Seam tracking sensor was protected by three measures such as ①a water cooled copper plate, ②a fume suction nozzle and ③two water jackets in order to avoid the disturbances by the radiant heat and the fume. As a result, in the trial of laser – arc hybrid welding of a long fillet joint of 4m in length, sound weld bead was obtained without large deviation of weld bead from weld seam through the full length of welded joint.

In chapter 8, the study on the method of research & development using a management planning has been described. A management method using an ICHIKURA theory has been investigated simultaneously to avoid the financial risk and to keep the soundness of financial condition of the small and medium size enterprise A. In the case, enterprise A was pushing the research and development with a financial risk. The ICHIKURA theory consists of Management plan, Profit plan, Cash flow plan and Balance sheet. As a result, the necessary measures of management are found and the best balances between the management and the research & development can be kept in the enterprise A. In the present work, management of enterprise A has been studied as an example. As a result, sound management by management planning using ICHIKURA theory and intensity of R & D made a great synergy effect on the management of enterprise A.

In chapter 9, Conclusion summarizes the research results from Chapter 1 to Chapter 8.

ファイバー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

目 次

第1章 序論	5
1.1 研究の背景	5
1.2 ファイバーレーザーによる大型構造物の溶接におけるプロセスの問題点と 研究課題	10
1.3 ファイバーレーザーによる大型構造物の溶接における溶接欠陥と 品質確保	11
1.4 研究目的	13
1.5 本論文の構成	13
第2章 高出力（10 kW～30 kW）ファイバーレーザー用の加工ヘッドの研究	17
2.1 緒言	17
2.2 高出力ファイバーレーザー用加工ヘッドの耐光性と耐熱性の実験方法	17
2.2.1 用いたレーザー加工装置	17
2.2.2 測定項目と測定方法	19
2.3 実験結果および考察	23
2.3.1 1 kWから30 kWまでのレーザー出力の測定結果	23
2.3.2 30 kWまでの焦点位置および焦点シフト量の測定結果	24
2.3.3 冷却水量の測定結果	25
2.3.4 加工ヘッド各部位の温度測定結果	25
2.3.5 冷却水路の増設における影響	28
2.4 考察	32
2.5 まとめ	32
第3章 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	35
3.1 緒言	35
3.2 実験方法	37
3.2.1 実験装置と追従原理	37
3.2.2 実験項目	40
3.3 実験結果および考察	47
3.3.1 溶接線の識別	47
3.3.2 2次元同軸シームトラッキングシステムの追従精度	50

3. 3. 3	3次元シームトラッキングシステムの追従精度	5 1
3. 4	考察	5 2
3. 5	まとめ	5 2
第4章	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システム	5 4
4. 1	緒言	5 4
4. 2	実験方法	5 4
4. 2. 1	供試材	5 4
4. 2. 2	溶接設備	5 5
4. 2. 3	溶接施工	5 6
4. 2. 4	シームトラッキングセンサーの追従精度の測定方法	5 6
4. 3	実験結果および考察	5 8
4. 3. 1	レーザ・アークハイブリッド溶接でのシームトラッキングの追従精度 基礎実験の結果および考察	5 8
4. 3. 2	3次元シームトラッキング技術のレーザ・アークハイブリッド溶接への 適用実験	5 9
4. 4	まとめ	6 0
第5章	継手ギャップの変動に対する適応制御技術の開発	6 1
5. 1	緒言	6 1
5. 2	継手ギャップの適応制御技術の原理	6 1
5. 3	実験方法	6 2
5. 3. 1	基礎実験	6 3
5. 3. 2	応用実験	6 6
5. 4	実験結果と考察	6 7
5. 4. 1	基礎実験結果	6 7
5. 4. 2	応用実験結果	6 8
5. 5	まとめ	7 1
第6章	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	7 2
6. 1	緒言	7 2
6. 2	仮付ビードの追従処理方法	7 2
6. 2. 1	濃度値の変化	7 2

6. 2. 2	トレンドエッジ欠陥検出	7 2
6. 2. 3	検出セグメントの標準偏差	7 5
6. 2. 4	検出セグメント近似直線によるエッジ角度	7 5
6. 2. 5	仮付ビードの検出のためのAND/OR制御	7 5
6. 2. 6	仮付ビードの追従処理の実験	7 9
6. 3	仮付ビードありの場合の2次元同軸シームトラッキング溶接の追従精度の確認	8 1
6. 3. 1	実験方法	8 1
6. 3. 2	溶接速度を変えての2次元同軸シームトラッキングの平均追従精度	8 5
6. 4	実験結果および考察	8 5
6. 4. 1	仮付ビードの追従処理	8 5
6. 4. 2	仮付ビードありの場合の2次元同軸シームトラッキング溶接の追従精度	8 6
6. 4. 3	溶接速度を変化させての2次元同軸シームトラッキングの平均追従精度	8 7
6. 5	まとめ	8 7
第7章	4m長尺溶接構造物へのレーザ・アークハイブリッド溶接の適用事例	9 0
7. 1	緒言	9 0
7. 2.	実験方法	9 0
7. 2. 1	溶接設備	9 0
7. 2. 2	供試材および評価方法	9 1
7. 3	実験結果	9 7
7. 3. 1	温度測定結果	9 7
7. 4	まとめ	1 0 0
第8章	経営計画を用いた研究開発の進め方の研究	1 0 1
8. 1	緒言	1 0 1
8. 2	企業経営における研究開発の位置づけ	1 0 3
8. 3	経営計画の策定	1 0 4
8. 3. 1	一倉定の略歴	1 0 4
8. 3. 2	なぜ一倉理論なのか	1 0 4
8. 3. 3	なぜ経営計画が必要か	1 0 4

8. 3. 4	全社員が前向きになる魔法の書	106
8. 3. 5	企業の未来像を描く	106
8. 3. 6	経営計画手法「経営計画書」の作成	108
8. 3. 7	経営計画手法「利益計画書」の作成	109
8. 3. 8	経営計画手法「資金運用計画書」の作成	109
8. 3. 9	経営計画手法「比較バランスシート」の作成	110
8. 3. 10	各計画書とバランスシートの妥当性の確認	111
8. 4	中小企業における研究開発のための設備投資	112
8. 4. 1	中小企業における研究開発の変遷	113
8. 4. 2	中小企業における研究開発費と営業利益率	114
8. 4. 3	A社の事例	115
8. 4. 4	より安全な経営状態で研究開発を進める	116
8. 4. 5	未知未踏分野への挑戦	117
8. 5	まとめ	119
第9章	結論	123
	謝辞	127

第1章 序 論

1. 1 研究の背景

1960年7月7日、ゼオドア・H・メイマンによる、ルビーレーザーの発振の成功以来、レーザーの応用が既に半世紀を超えた。このレーザーを熱源として溶接加工に用いることにより、次のような利点が生じる。

① 加工速度が速い

レーザー溶接はアーク溶接に比べて10倍以上の溶接速度で加工が可能である。高密度エネルギーであるレーザーは10m/minを超える溶接速度であっても、加工点での溶融プールを維持し続けることが可能である。薄板ステンレス鋼板の溶接速度は40m/min～80m/minでも可能となっている。レーザー切断では200m/min～300m/minのレーザー切断が可能である。

② 溶接変形が少ない

板厚1mmのSUS304突合せ溶接における、TIG溶接(上)とレーザー溶接(下)の溶接サンプルの比較を図1-1に示す。溶接速度はTIG溶接が0.2m/min、レーザー溶接は7m/minである。その溶接変形は、溶接長さ300mmに対して、TIG溶接が10mm以上あるのに対して、レーザー溶接は0.5mm以下であった。



図1-1 : TIG溶接(上)とレーザー溶接(下)溶接変形の比較

- ③ アーク溶接に比べてアスペクト比が高く深溶け込みの溶接が可能
レーザによるSUS304材へのビード・オン・プレートを行ったものを図1-2に示す。レーザ出力2kW 溶接速度4m/min 溶込み深さは6mmであった。

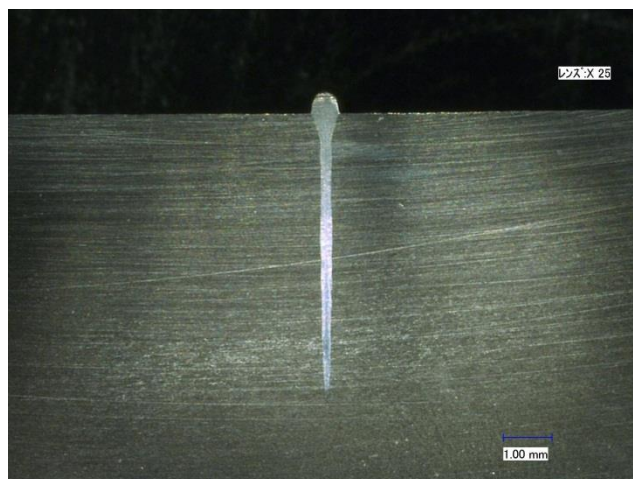


図1-2：レーザによるSUS304鋼材のビード・オン・プレート溶接における溶込み

また、100kWのファイバーレーザを用いると、図1-3に示すように100mm以上の溶込み深さを得ることができる¹⁾。

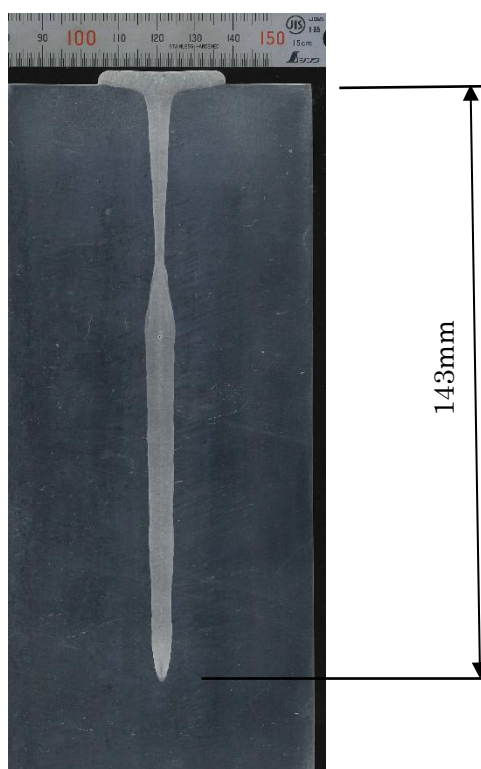


図1-3：100kWファイバーレーザによる炭素鋼の低真空溶接における溶込み¹⁾

- ④ レーザビームの分岐により、複数の加工ステーションで異なる加工が可能である
発振器から発振されたレーザをビームスイッチングすることによりレーザビーム分岐を行い、予め配置されている複数のプロセスファイバーヘタイムシェアリングでレーザを伝送し、複数の加工ステーションで異なるレーザ加工をすることが可能である。また、ビームを複数に分岐して、多点同時溶接をすることができる。
- ⑤ 高速移動が可能な熱源である
ガルバノミラーなどを用いて、 10000 mm/s 以上の高速でビームを移動し、加工ができる。
- ⑥ 磁気や磁場に影響されない
電子ビーム溶接では、磁気によるビームの偏向が生じるとかX線の発生がある²⁾。またアーク溶接ではアークが磁場により曲がり溶接施工に影響されるが、レーザ溶接では磁場の影響を受けない。
- ⑦ 微細なビームスポットで溶接できる（微細加工ができる）
レーザを集光レンズで数 $10\ \mu\text{m}$ のスポットに絞り溶接できる。最小 $5\ \mu\text{m}$ のスポット径も可能である。
- ⑧ 非接触加工である
レーザ加工は、光熱源を用いた非接触加工であるため、スポット溶接などで生じる打痕などの変形が無い。また、脆いセラミックスのマーキングなどにおいて、破損を生じないでマーキングが可能である。機械切削では工具の磨耗があるが、レーザ加工ではレーザ加工光学系の磨耗がない。

このような利点があることより、今日では自動車、航空機、造船などの輸送機器産業、重工業、電機産業、精密機器、機械産業、鉄鋼業、医療機器分野、情報産業、エネルギー産業など、各種産業界でのレーザの適用が急速に進んでいる³⁾⁴⁾⁵⁾。各産業界のレーザの応用は、そのアウトプットとして従来には無かった高い付加価値を生み出し、多くの機能を進化させた。しかし、その貢献は全体のまだ一部に過ぎず、レーザの応用は今後も更に拡大すると考えられる。また、レーザ発振器においても現在進化し続けており、大出力化、高性能化、小型化、高効率化、低価格化は更に進むものと考えられる。特に、ファイバーレーザ発振器の発展は顕著である。今後、 20 kW を超える信頼性のあるレーザ加工機が開発されれば航空宇宙、造船、橋梁および建築などの大型構造物への適用が進むと思われる。そこで、なぜファイバーレーザが著しく成長して来たかを考えて、そのファイバーレーザの特徴を次に述べる。

① ビーム品質が非常に良い⁶⁾

どの程度までビームを絞ることができるかは、 M^2 値または **Beam Parameter Product** (以下 **BPP** と記す) というビーム特性を示す指標が用いられる。BPP はビームウェスト (W_0) の半径 (w) とビームの発散角 (Θ) の半角 (θ) の積として定義され、単位は $[\text{mm}\cdot\text{mrad}]$

で表される。BPPは図1-4に示すように定義され、次式で求められる。

$$BPP = W_0 \times \Theta / 4 \quad \dots \dots \dots (1-1)$$

ここで W_0 : 焦点でのビーム径 Θ : ビームの拡がり角

実際のレーザービームが理想的なガウスビームに、どれほど近いかを表す因子が M^2 であり、BPPとの関係は次式で示される。

$$M^2 = BPP \cdot \pi / \lambda \quad \dots \dots \dots (1-2)$$

ここで λ はレーザーの波長である。

BPPで示せば次式となる。

$$BPP = w \theta = M^2 \times \lambda / \pi$$

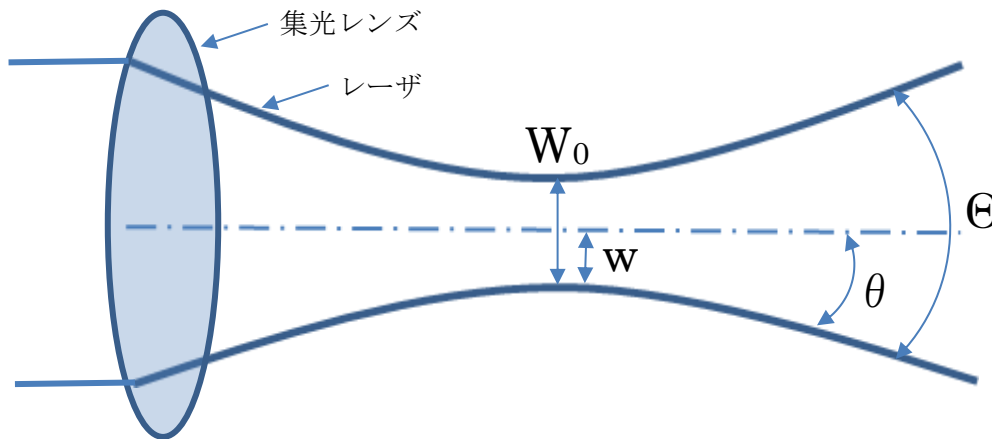


図1-4：集光レンズによるレーザービームの集光と発散

1 kWの代表的な各種レーザー装置のBPPについて比較をすると次のとおりである。

CO₂レーザーが3～4 mm・mrad、ランプ励起YAGレーザーが2.5 mm・mrad、LD励起YAGレーザーが1.2 mm・mrad、ディスクレーザーが2 mm・mrad、マルチモードのファイバーレーザーが1 mm・mrad、シングルモードのファイバーレーザーが0.34 mm・mradである。このことよりファイバーレーザーのビーム品質は他のレーザーに比較して格段にビーム品質が良いと言える³⁾。

② 高出力・高輝度⁶⁾である

YAGレーザーなどの従来の高出力固体レーザーでは数100Wを超える高出力になると熱レンズ効果によりビーム品質が低下する。一方、ファイバーレーザーは直径数100μmという細い光ファイバーを増幅媒体としているため、比表面積が大きく放熱が容易である。このため、ファイバーレーザーでは高ビーム品質を維持したままでの高出力化が容易である

6). 高出力ファイバーレーザーの輝度は励起用半導体レーザーの輝度の5000倍以上にもなる⁷⁾。

③ エネルギー変換効率が高い

ファイバーレーザーでは、励起光およびレーザー光が低損失な光ファイバーのコアに閉じ込められ導波されるため、励起光およびレーザー光の損失が非常に低い。また、励起LDは電気から光への変換効率が60～75%と非常に高い。さらに、Ybファイバーレーザーでは、Ybの活性元素としての量子効率が非常に高いこともあり、YAGレーザーに比べて励起光からレーザー光へのエネルギー変換効率は40～50%と非常に高い。これらの理由でファイバーレーザーは高ビーム品質を維持しながら、高い変換効率で高出力レーザーを発振できる⁷⁾。

④ 小型・軽量である

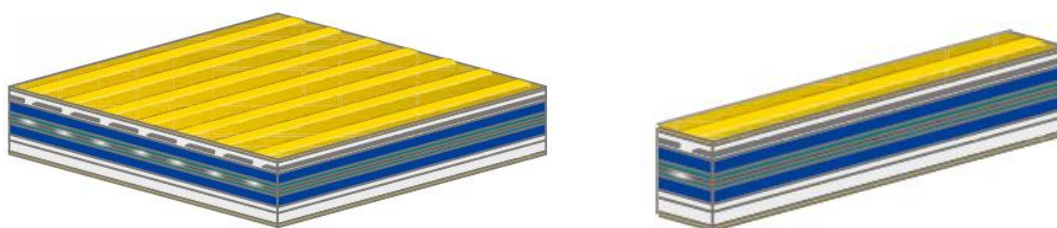
高出力ファイバーレーザー発振器は、励起用半導体および細いファイバーと小型の光学部品等で構成されている。前述の通り、励起用LDのエネルギー変換効率が非常に高いため、放熱機構や電源を大幅に小型化できる。そのため高出力ファイバーレーザーは従来の高出力CO₂レーザーに比べて非常に小型・軽量である⁷⁾。例えば、4kWの出力で比較すると、CO₂レーザーの発振器の体積は2.5m³、質量1500kgに対して、ファイバーレーザーの発振器の体積は1.2m³、質量650kgと大幅に小型・軽量化されている⁷⁾。

⑤ 発振器の安定性および信頼性が高い⁷⁾

従来のレーザーでは、共振器、レンズやミラーなどの光学部品は機械的に筐体や定盤に固定して構成されており、それらが振動や衝撃、温度変化などにより位置がずれるなど安定性に欠ける点があるため、設置後および定期的にこれらの調整が必要となる。また、これらの光学部品は長期の使用で汚れたり損傷したりするため、定期的な清掃や交換も必要である。一方、ファイバーレーザーは光ファイバーに励起用LDを融着接続して構成されており、ビームの伝搬にも融着接続された光ファイバーを用いる。融着接続箇所は振動や衝撃、温度変化などで動くことがないため、ファイバーレーザーではビーム品質および出力が安定である。また、空間にビーム通過部分が露出していないため、空気による汚れがなく光学部品の清掃や交換の必要がない。いわばメンテナンスフリーということもファイバーレーザーの大きな特徴である⁷⁾。

高出力ファイバーレーザーが従来の固体レーザーに比べて高信頼性である大きな要因は、使用する高出力励起LDの種類および励起LDのシステムとしての使い方にもある。従来のYAGレーザーにおいても励起光源としてLDを用いることが可能であり、高出力のLD励起YAGレーザーは高出力ファイバーレーザー出現以前には材料加工の主流となると目されていた。図1-5(a)および(b)にLDバーチップとシングルエミッターLDチップを示す。このLD励起YAGレーザーの場合、ほとんどが、1つのチップに発光部が複数あるマルチエミッターのLDバーを用いている。複数のエミッターは、チップ内部にあるため並列接続しかできず、1つのエミッターが故障するとエミッター全部が光らなくなってしまう⁷⁾。

一方、高出力ファイバーレーザでは、使用する高出力励起LDの内部において1チップに発光部が1か所というシングルエミッタタイプが使用される。このため、1チップ毎にスクリーニング(欠陥の疑いのあるものを発見することを目的に行う検査)が可能であり、欠陥の少ないLDチップを選定できる。また、チップ間の熱影響がなくチップ設計と熱設計を分離できる。これらは、高出力励起LD自体に高い信頼性を担保している。また、複数の励起LDあるいはチップを用いる場合、各チップは電氣的に直列接続される。このため、1つのチップが故障(短絡)しても他のチップは故障の影響を受けない。このように、高出力ファイバーレーザは使用するLDおよびLDのシステムの観点からも高い信頼性を有する⁶⁾。



(a) LD bar chip

(b) Single-emitter LD chip

図1-5 7)

以上のようにレーザ発振器が発達し、今や30kW、50kW、100kWのファイバーレーザが出現し、これらのファイバーレーザを用いた加工技術の確立が望まれている。しかし、これらの大出力レーザの適用には次のような多くの問題点があり、厚板20mmを超える溶接構造物への適用³⁾⁸⁾⁹⁾はあまり進んでいないのが現状である。これらの課題を早く解決することが望まれている。

1. 2 ファイバーレーザによる大型構造物の溶接におけるプロセスの問題点と研究課題

大型構造物のレーザ溶接はプロセス上の問題点として、次のようなものがある。

① 溶接線の狙い外れによる溶接欠陥

レーザビームのスポット径が小さいため、溶接線に対して0.15mmを超える狙い外れが発生した場合、溶接欠陥が発生し易い。

ワーク精度やセッティングのバラツキ、溶接中における熱変形により、予めされていたティーチングラインから溶接線が外れてしまうことにより、溶接欠陥が生じる。特に長尺形状のワークにおいては狙い外れの問題が大きい。

② 溶接継手の許容継手ギャップが小さい

溶接継手の継手ギャップが大きい場合、アンダーフィルになるとか、溶け落ちなど溶接そのものが出来なくなる場合がある。レーザ溶接の場合、許容継手ギャップはビームスポット径に近いので、非常に小さい。よって、実際には継手ギャップが一定の幅でなく不均一である場合が多く、小さい継手ギャップを保持することは困難である。継手ギャップを埋めるために、溶接ワイヤーを供給しても健全な溶接品質が得られない場合がある¹⁰⁾。

③ 熱レンズ効果で焦点シフトが発生する

特に高出力のレーザになればなるほど、加工ヘッド内の光学系は熱を吸収して、膨張し、熱歪みが生じ、大きな焦点シフトが発生する。溶接の場合、焦点シフトは溶込み深さに直接多大な影響を及ぼすため、焦点シフト量はレイリー長の範囲内で収めなければならない。

④ 伝送用ファイバーの長さに問題がある

大出力になると長距離伝送が困難であり、小さいコア径のファイバーが使えない。10 kWのレーザ出力では、ファイバーコア径200 μm のとき、50 mの長さのファイバーが使用できるが、30 kWのレーザ出力では、ファイバーコア径300 μm のとき、ファイバー長さは30 mが限界である。

⑤ 長時間運転に対するレーザ機器の信頼性が必須である

例えば、直径5 mの圧力容器の周溶接を実施するときなど、長時間（30分以上）溶接となり、その間の装置の信頼性や安定性などが問題となる。

⑥ これらの問題点以外に実際には大型部材を固定するために複数の仮付がなされるので、溶接線と仮付を識別してシームトラッキングする必要がある。

1. 3 ファイバーレーザによる大型構造物の溶接における溶接欠陥と品質確保

レーザによって大型構造物を溶接する場合、継手の品質を確保するためには図1-6に示す特性要因図の各要因を検討する必要がある。例えば、溶接欠陥に対しては次のものがある。

① 溶込み不足¹¹⁾¹²⁾

溶込み不足を誘発させる原因を調査する。原因とされる外乱を取り除き、最適な溶接施工法を確立するため課題として取り上げる。

② 表ビードのアンダーカットと裏ビードの垂れ落ち¹¹⁾¹²⁾¹³⁾

熔融金属の表面張力のバランスが崩れることにより、熔融金属の溶け落ちが発生する。また、同時にそのことが原因で表面の溶接ビードに大きなアンダーカットが生じる。溶接継手の裏から熔融金属が垂れ落ちにくい溶接施工方法を確立するため課題として取り上げる。

③ 表溶接ビードのアンダーフィル¹¹⁾¹²⁾¹³⁾

継手ギャップが大きすぎる時とか、蒸発しやすい元素を含む金属のレーザ溶接をする時

には、ビード中央が凹形となるアンダーフィルを生じやすい。継手強度が低下するという問題が起こる。

④ 溶接金属の高温割れ 11)12)

材料によっては熔融金属の凝固過程で低融点組成のものが最後まで残留し、最終的には高温割れを誘発する。S, P, Siなどを偏析させない溶接施工法を確立するため課題として取り上げる。

⑤ 溶接金属のポロシティ 11)12)13)15)16)17)

溶接欠陥であるポロシティが多くあると健全な継手とは言えない。

溶接内部のポロシティを抑制する溶接施工法を確立するため課題として取り上げる。

⑥ スパッタの問題 18)

エネルギー密度の高いファイバーレーザー溶接ではスパッタが生じやすい。製品本体へのスパッタ付着そして加工ヘッドの保護ガラスの汚染など大きな問題となっている。

これら以外に下記に示すような要因についても検討する必要がある。

変形、介在物の巻込み、合金元素の蒸発損失、マクロ偏析、ミクロ偏析、機械的性質（強度、硬度、衝撃、疲労特性、靱性）の問題、化学的性質（腐食等）の問題 11)。

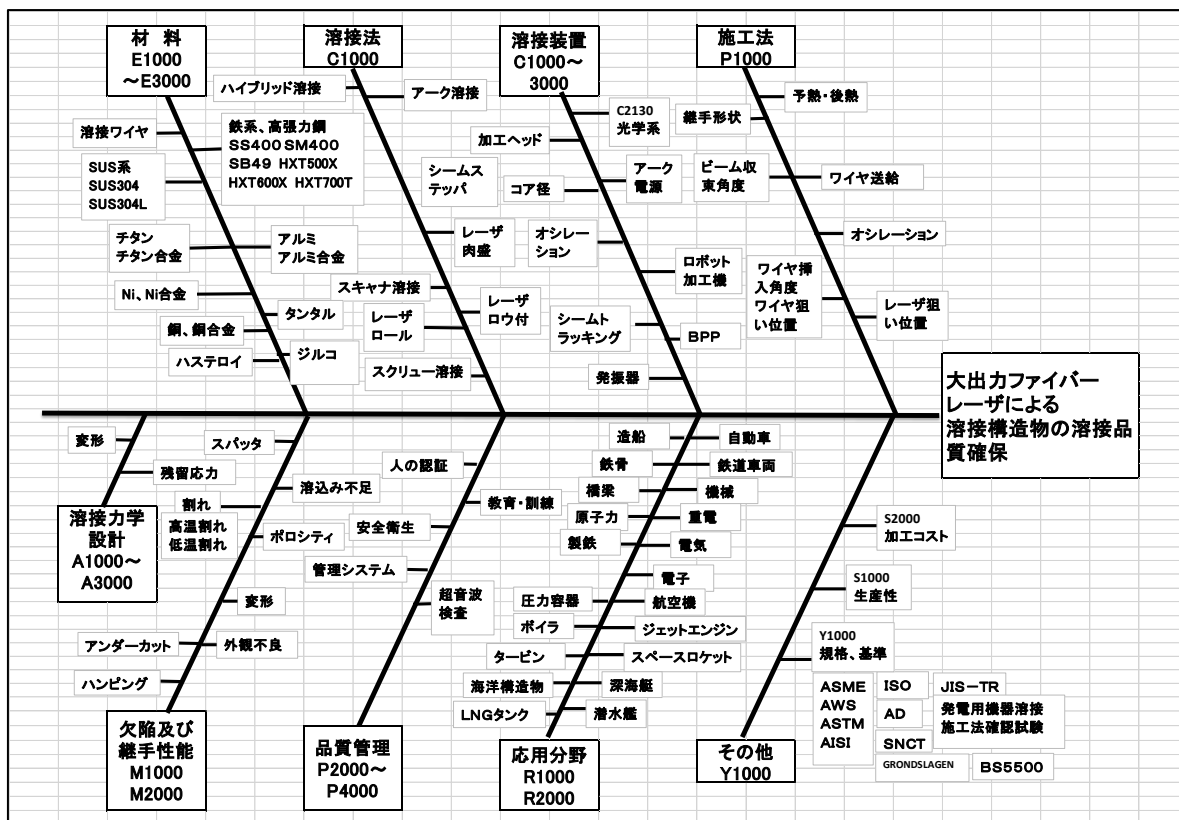


図 1 - 6 : 大型構造物のレーザー溶接の品質確保のための特性要因図

1. 4 研究目的

レーザー溶接は熱歪み変形が少なく、1パスでの溶込みが深く、高速での溶接が可能であるため、従来の工法と比較すると生産性や品質が格段に向上する。しかしながら、現在の適用範囲は限られており、比較的低出力のレーザー装置で高精度な小型ワークの適用が多く、大型構造物への適用は造船分野³⁾およびパイプ分野¹⁹⁾に限られている。

レーザー溶接はレーザーを集光レンズによって数100 μ mに集光させ、深溶込みが可能であり、厚板大型構造物も入熱が少なく低歪で溶接できる。

しかしながら、レーザー溶接を適用するためには、先に述べた問題点を解決しなければならない。例えば、ワークの継手精度を従来の溶接工法よりも格段に上げなければならない。また、図1-6に示した要因について十分検討する必要がある。

本研究の目的は長尺の大型構造物にファイバーレーザー溶接を適用するために、1-2節および1-3節で示した問題点のうち、

- 1) 1-2-①項の溶接線の狙い外れによる溶接欠陥
- 2) 1-2-⑤項の長時間運転に対するレーザー機器の信頼性
- 3) 1-2-②項の溶接継手の許容継手ギャップが小さい
- 4) 1-2-⑥項の溶接線と仮付を識別できるシームトラッキング

について検討を行うもので、ファイバーレーザー溶接を大型溶接構造物に適用するために、そのレーザー溶接施工方法を確立することを目的とする。また、これらの開発は、大きな投資を伴うため、中小企業にとって経営上のリスクを抱えることになる。そこで、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できるよう、一倉理論を用いた経営計画を活用した研究開発の進め方を検討し、その手法の有効性の確認も目的とする。

1. 5 本論文の構成

本論文の構成は次の通りである。

第1章では、本研究の序論を述べている。

第2章では、高出力(10kW~30kW)用のファイバーレーザーの加工ヘッドの検討を行った。高品質の溶接加工を安定的に行うためには、耐光性、耐熱性、熱レンズ効果に対して有効なレーザー溶接加工ヘッドの開発結果を述べている。

第3章では、レーザー溶接でのシームトラッキングシステムについての検討を行った。大型構造物や長尺の溶接構造物へレーザー溶接を適用するためには、溶接中リアルタイムに溶接線をシームトラッキングする必要がある。ここではシームトラッキングの制御システムの開発について述べる。

第4章では、第3章のシームトラッキングシステムを応用し、レーザー・アークハイブリッド溶接でのシームトラッキングシステムの検討を行った。大型の溶接構造物は、小型部品に比べて単品精度が得られにくいことから、継手ギャップが大きく発生しやすい。熱源

がレーザーのみを用いるレーザー溶接と比べて、溶接フィラワイヤーを併用するレーザー・アークハイブリッド溶接は、継手ギャップに対して裕度が大きい。本章ではレーザー・アークハイブリッド溶接でのシームトラッキングシステムの開発について述べている。

第5章では、第3章と第4章の両技術を融合して、継手ギャップの適応制御技術の検討を行った。適応制御センサーを用いて溶接線をトラッキングする際に溶接継手間の継手ギャップの計測も同時に行い、その継手ギャップに応じて「溶接フィラワイヤーの供給速度」「レーザー出力」「溶接速度」の3つのパラメータを同時可変適応制御させるものである。この技術によって加工中に生じる熱変形による継手ギャップを溶接中にリアルタイムに計測をして、溶接の最適化を図る適応制御の可能性について検討した。

第6章では、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についての検討について述べる。大型構造物をレーザー溶接する場合、単品部品同士の溶接線に対して、溶接線が長く、溶接中に熱変形が生じやすいので本溶接を行う前に必要な位置に仮付を行い、予め仮組みをして継手を組む必要がある。よって、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に判断しながらレーザー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、画像処理の際にビード形状と関連性の大きい4つの監視パラメータのデータを設定して、未溶接線か仮付ビードかを正確に判断できるように検討した。

第7章では、シームトラッキングシステムおよび継手ギャップ適応制御技術を用いて、造船用構造物を模擬した4 m長さの溶接継手のレーザー溶接を行ない、長時間運転に耐えることができる適応制御システムの検討を行った。

第8章では、中小企業が研究・開発を行う場合、大きな投資のため、経営が困難となる場合がある。このような経営困難に陥らないようにするため、一倉理論に基づく経営計画を用いた研究開発の進め方の研究を行なった。ここでは、経営計画の4つの手法を密接に関連させて、企業の財務体質の健全性を維持しながら、多額な費用を必要とする研究開発をどのように進めて行くべきかについて、経営指標を交えながら検討を行なった。

以上の様に本論文は、産業界への更なるレーザー溶接の適用拡大を目的に、大型構造物への大出力レーザー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取りまとめたものである。

参考文献

- 1) 住森大地：“大出力レーザー溶接技術とキーホール深さ測定技術の研究開発”、溶接学会誌、86 巻 (2017) 第 7 号、505-509
- 2) 竹本朝紀：“大出力電子ビーム溶接装置” 昭和 57 年 1 月 26 日溶接構造物への大出力電子ビーム溶接の適用に関する講演会、73-87
- 3) F.Roland：“ヨーロッパ造船業におけるレーザー溶接の最近の動向”、溶接技術、2003 年 11 月号、92-97
- 4) 北側彰一：“中厚板レーザー重ね溶接継手の強度特性とパネル製造” 平成 14 年レーザーシンポジウム 中厚板構造へのレーザー技術の適用、33-46
- 5) Uwe Reisgen, Simon Olschok, Christoh Tumer, HYBRID LASER WELDING IN SHIPBUILDING - EXTENSION OF THE APPLICATION RANGE TO VERTICAL DOWN WELDING、ICALEO'2014、672-678
- 6) Yosuke Yamazaki, Akikazu Kitagawa, DEVELOPMENT AND APPLICATION OF 10kW FIBER LASER WELDING SYSTEM、ICALEO'2012、458-463
- 7) 姫野邦治：“高出力レーザーの基礎と特徴” フジクラ技法 第 126 号、2014 Vol.1、1-6
- 8) Thomas Seefeld Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH, "CHANCE AND CHALLENGES IN PROCESSING WITH HIGHBRIGHTNESS LASERS" ICALEO'2010、530-539
- 9) Takeshi Tsukamoto, Hirotsugu Kawanaka, Yoshihisa Maeda、LASER NARROW GAP WELDING OF THICK CARBON STEELS USING HIGH BRIGHTNESS LASER WITH BEAM OSCILLATION、ICALEO'2011、141-146
- 10) Christopher Dawes, CEng, "LASER Welding"、ABINGTON PUBLISHING、Woodhead Publishing Ltd in association with The Welding Institute Cambridge England
- 11) 片山聖二：“高出力レーザー溶接における欠陥の発生機構と防止策”、平成 14 年レーザーシンポジウム 中厚板構造へのレーザー技術の適用、11-21
- 12) 小野数彦：“中厚板の CO2 レーザ溶接におけるプロセス制御” 平成 14 年レーザーシンポジウム 中厚板構造へのレーザー技術の適用、23-31
- 13) 山上智之：“アルミニウムのレーザー・アークハイブリッド溶接” 平成 14 年レーザーシンポジウム 中厚板構造へのレーザー技術の適用、135-145
- 14) Jan-Philipp Weberpals, Philipp Krueger, Peter Berger, Thomas Graf、Institut fuser Strahlwerkzeuge(IFSW)、UNDERSTANDING THE INFLUENCE OF THE FOCAL POSITION IN LASER WELDING ON SPATTER REDUCTION、ICALEO'2011、159-168

- 15) 下楠善明：“原子力機器へのレーザー溶接の適用”平成14年レーザーシンポジウム 中厚板構造へのレーザー技術の適用、47-57
- 16) 児嶋一浩：“レーザー溶接用材料の開発”平成14年レーザーシンポジウム 中厚板構造へのレーザー技術の適用、107-116
- 17) 安田耕三：“厚板の高速溶接（フォトンプロジェクトの成果）”平成14年レーザーシンポジウム 中厚板構造へのレーザー技術の適用、117-128
- 18) Andreas Heider、Peter Stritt、Rudolf Weber、Thomas Graf、COMPARING THE AMOUNT OF LASER WELDING SPATTERS RESULTING FROM DIFFERENT ANALYZING METHODS、ICALEO'2015、461-464
- 19) Sergeji Gook、Andrey Gumenyuk、Msichael Rethmeier、WELD SEAM FORMATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF GIRTH WELDS PERFORMED WITH LASER-GMA -HYBRID PROCESS ON PIPES of GRADE X65、ICALEO'2010、62-69

第2章 高出力（10 kW～30 kW）用のファイバーレーザーの加工ヘッドの研究

2. 1 緒言

レーザー溶接加工ヘッドは溶接品質を決める重要なファクターの一つである。特に高出力（10 kW～30 kW）レーザーとなると、レーザー光が光学系を透過する時に発生する熱による光学系への影響がたいへん大きいため、耐光性、耐熱性に優れたレーザー溶接加工光学系が必要である¹⁾。また、出力が高いとレンズおよび反射ミラーが加熱され、焦点がずれる熱レンズ効果が大きくなる。これを低減するための工夫も必要である。よって、レーザー溶接を大型構造物などにも広く適用するためには、これらの課題を克服しなければならない²⁾³⁾。

過去に30 kWのレーザー出力で各種の溶接実験を試みたところ、従来のレーザー溶接加工ヘッドの光学系を焼損させてしまう事態が生じた。そのため30 kWのレーザー出力と光学系に発生する熱に十分に耐えうることができるレーザー溶接加工ヘッドを新たに独自開発する必要があった。また、30 kWのレーザー出力を使用する場合、レーザー溶接加工ヘッドは、熱による焼損が無く、焦点シフト量が少ないものが求められ、すでにいろいろな研究例も報告されている³⁾⁴⁾。

本章においては、30 kWファイバーレーザーを用いて大型構造物を溶接する場合に利用できる信頼性のあるレーザー溶接加工ヘッドを利用する上で、上記の課題を解決することを目的とする。特に、30 kWのレーザー出力を連続的に長時間使用する場合においても、問題なく利用できる加工ヘッドの開発をするため、高出力レーザー用加工ヘッドを構成している加工光学系（レンズ、ミラー）の耐光性、耐熱性および熱レンズ効果による焦点シフト量などについて検討を行った。

2. 2 高出力レーザー用加工ヘッドの耐光性と耐熱性の実験方法

2. 2. 1 用いたレーザー加工装置

評価実験に用いたレーザー加工装置全体を図2-1に示す。レーザー発振器は30 kWファイバーレーザーである。発振されたレーザーはプロセスファイバーにより加工光学系に伝送して用いる。本装置は100 kg可搬の6軸多関節型ロボットが、6 m長のストロークを持つリニアテーブルの上に搭載され、回転・傾斜用の2軸ポジショナーとともにレーザー発振器を含めた9軸制御できる装置である。図2-2に示す30 kWファイバーレーザー発振器はレーザー波長が1070 nm、ビーム品質BPPは10 mm・mradである。また、コア径200 μmで、長さ50 mのプロセスファイバーとコア径300 μmで、長さ30 mのプロセスファイバーの2本が装備されており、ビームスイッチで任意にそれぞれ切り替えることができる。

本実験ではコア径300 μmのプロセスファイバーを用い、コリメートミラーの焦点

距離を200mmとし、集光加工ミラーの焦点距離を400mmとした。焦点での集光スポット径は約 $\phi 600\mu\text{m}$ である。

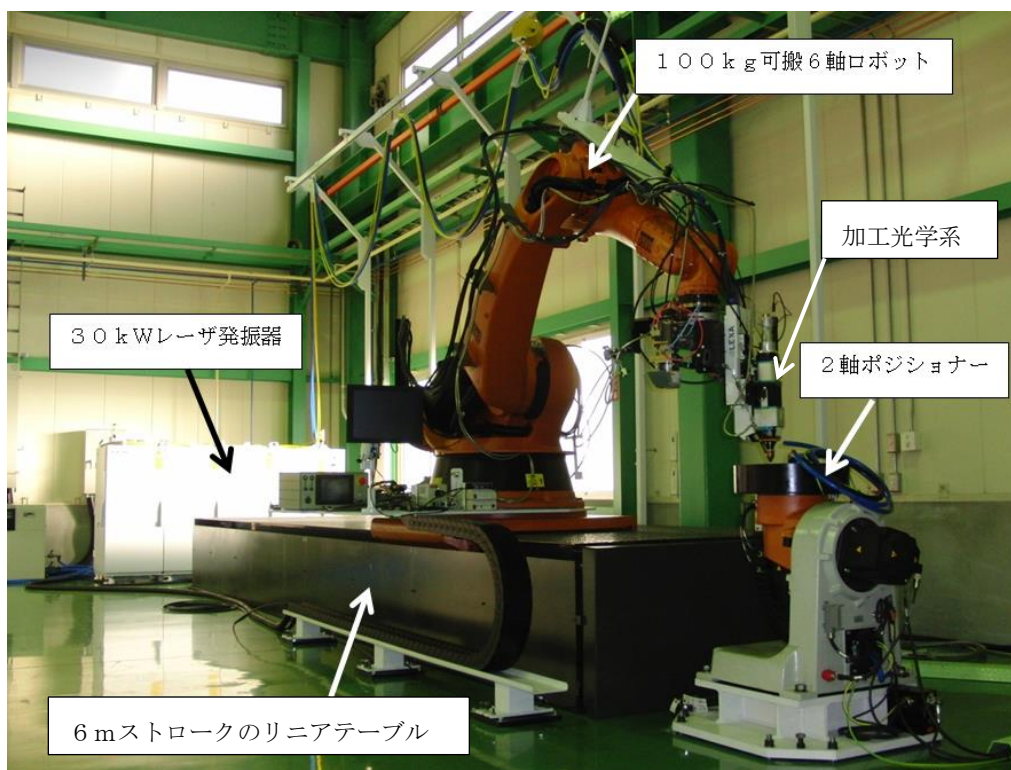


図2-1：実験に用いたレーザー加工装置



図2-2：30kWファイバーレーザーの発振器

2. 2. 2 測定項目と測定方法

レーザ加工ヘッドの耐光性および耐熱性を評価するために、ここでは5項目の測定を行った。これらの実験の概要を図2-3に示す。次にこれらの測定方法について説明する。

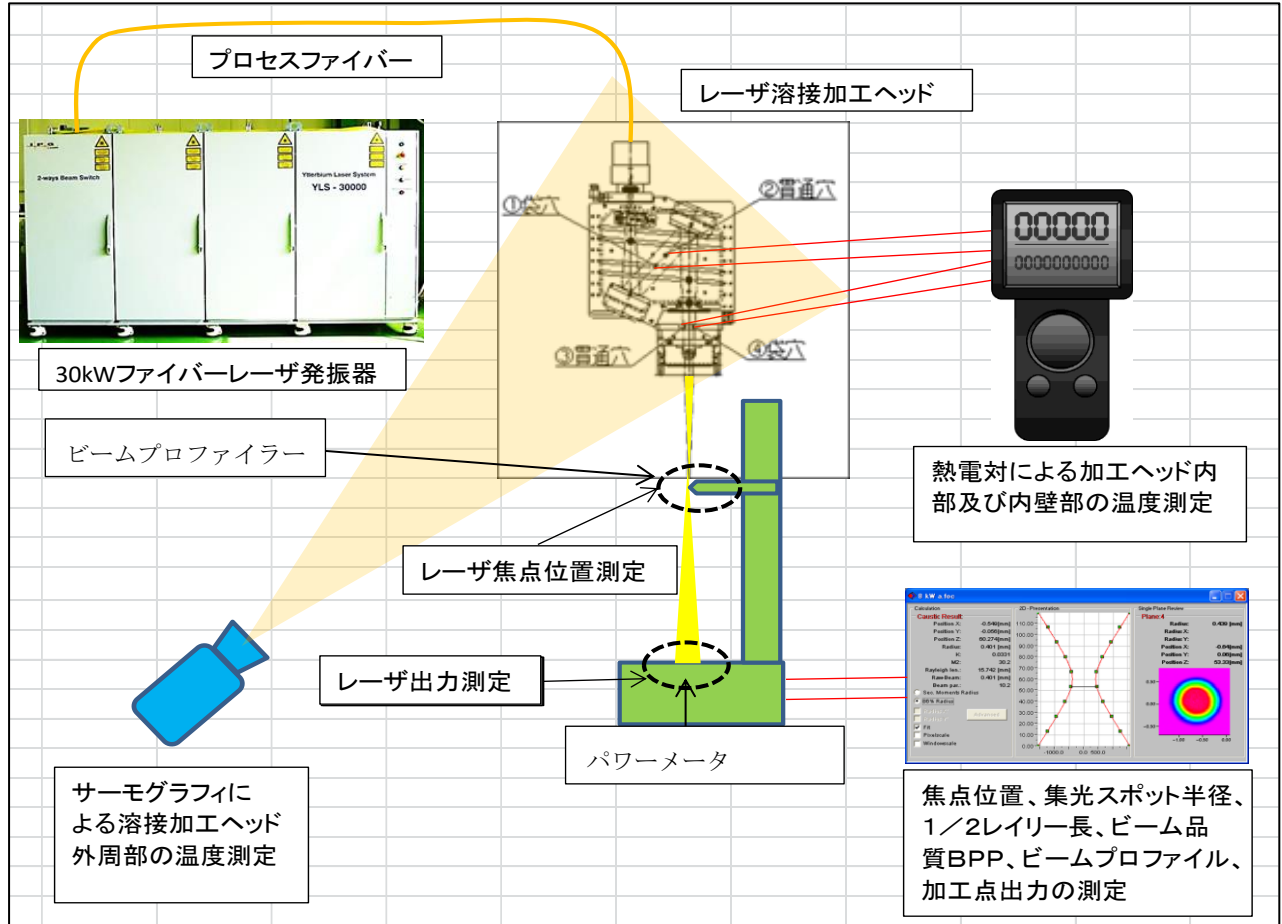


図2-3：高出力レーザ用加工ヘッドの耐光性・耐熱性・焦点シフト量の評価実験

(1) 1 kW～30 kWのレーザ出力測定

5分間の連続照射で1 kW～30 kWまでのレーザ出力を図2-4に示すようにパワーメータで測定をした。

(2) 焦点位置および焦点シフト量の測定

5分間の連続照射で1 kW～30 kWまでの焦点位置付近のビーム径とビームプロファイルをビームプロファイラで測定をした。その状況を図2-4に示す。これらの測定結果より、焦点位置と焦点シフト量を求めた。ビームプロファイラ（Primes社製：フォーカスマニタFM-120/パワーメータPM100）の外観写真を図2-4に示す。ビームプロファイラは、加工ヘッドから出射されたレーザビームの焦点近傍のプロファイルをフォーカスマニタでリアルタイムに測定することが可能である。パワーメータの測定位置は出力密度を低下させて、パワーメータが焼損しない位置として焦点位置より約500 mm下方とした。全ビームの出力をパワーメータに投入してレーザ出力を

測定した。パワーメータの最大測定出力は30 kWとした。測定結果の一例を図2-5に示す。ビーム径、集光スポット半径、1/2レイリー長、ビーム品質BPP、ビームプロファイルおよびレーザ出力が測定できた。

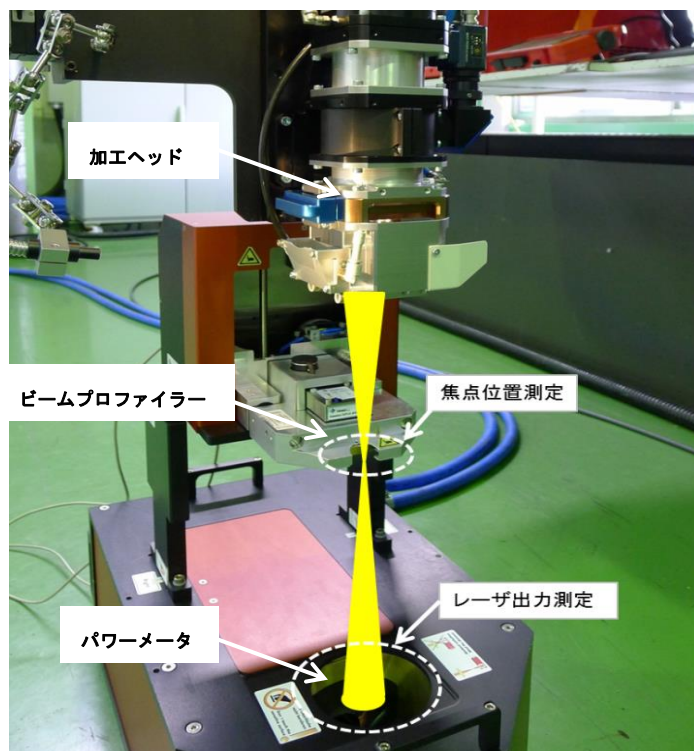


図2-4：ビームプロファイラーの外観及び焦点位置とレーザ出力の測定位置

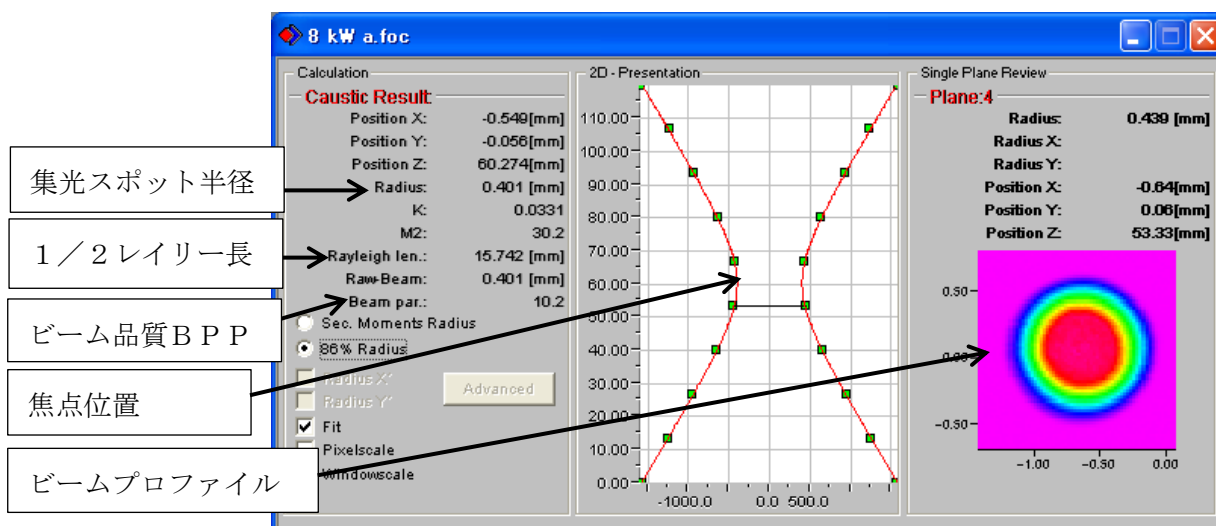


図2-5：ビームプロファイル測定結果の一例

(3) 冷却水量の測定

レーザ加工ヘッドの透視図を図2-6に示す。加工ヘッド外壁がウォータージャケット構造となっており、集光放物面鏡、コリメートミラー、保護ガラスおよびプロセスファイバーコネクター部も一筆書き水路で冷却できる構造になっている。加工ヘッド内の冷却水入口から3 L/minの冷却水を循環させ、出口から排出される冷却水量を60秒間で測定した。

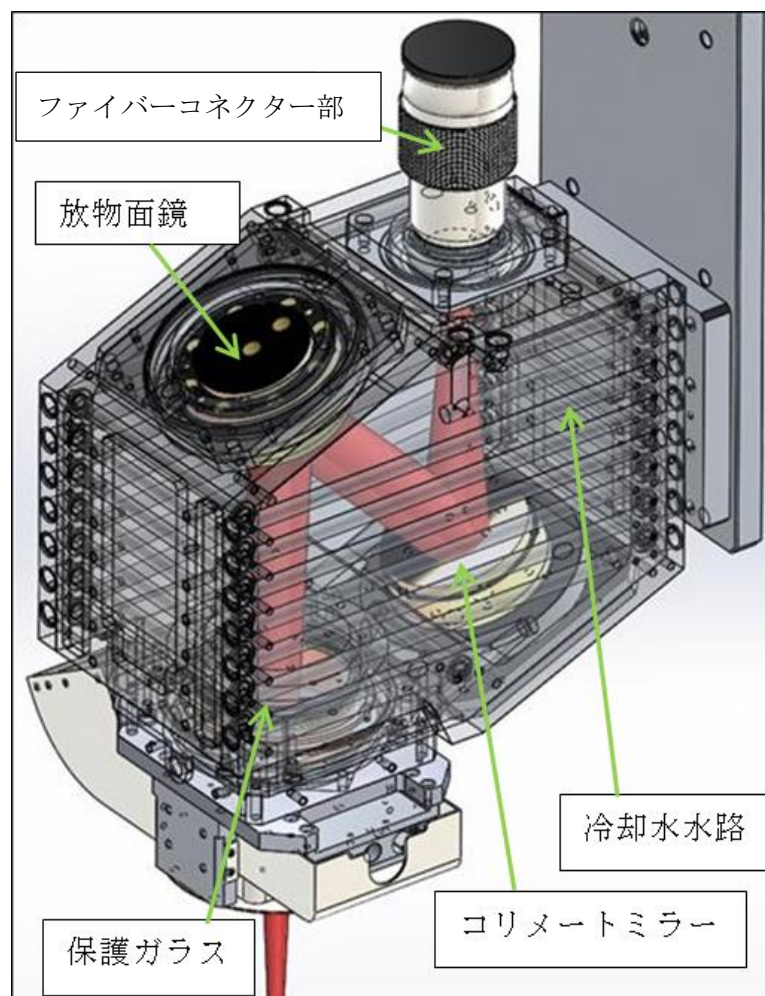


図2-6 : 30 kW用レーザ加工ヘッドの透視図

(4) 加工ヘッドの内部と外周の温度測定

レーザ加工ヘッドの耐熱性を評価するため、レーザ出力を1 kWから30 kWまで変化させた時の、レーザ光路の各ポイントに直径3.8 mmのアルメルクロメル熱電対を配置して温度測定を行った。温度測定をした位置6か所を図2-7 (a) および (b) に示す。同図の (c) および (d) は熱電対の取り付け穴である袋穴および貫通穴の詳細をそれぞれ示す。

使用時これらの温度は刻々と変化するので、昇温状態が飽和した所で読み取った。測定時

間は、上限を5分間とし、限界温度は外周部を60℃とし、内側・壁内突き当てセンサー部を100℃とした。もし、限界温度を超えた場合には、安全確保のため実験を中断することとした。なお、同時にサーモグラフィで、加工ヘッド全体の外周温度も測定し、異常に昇温するホットスポットが無いかの監視をした。

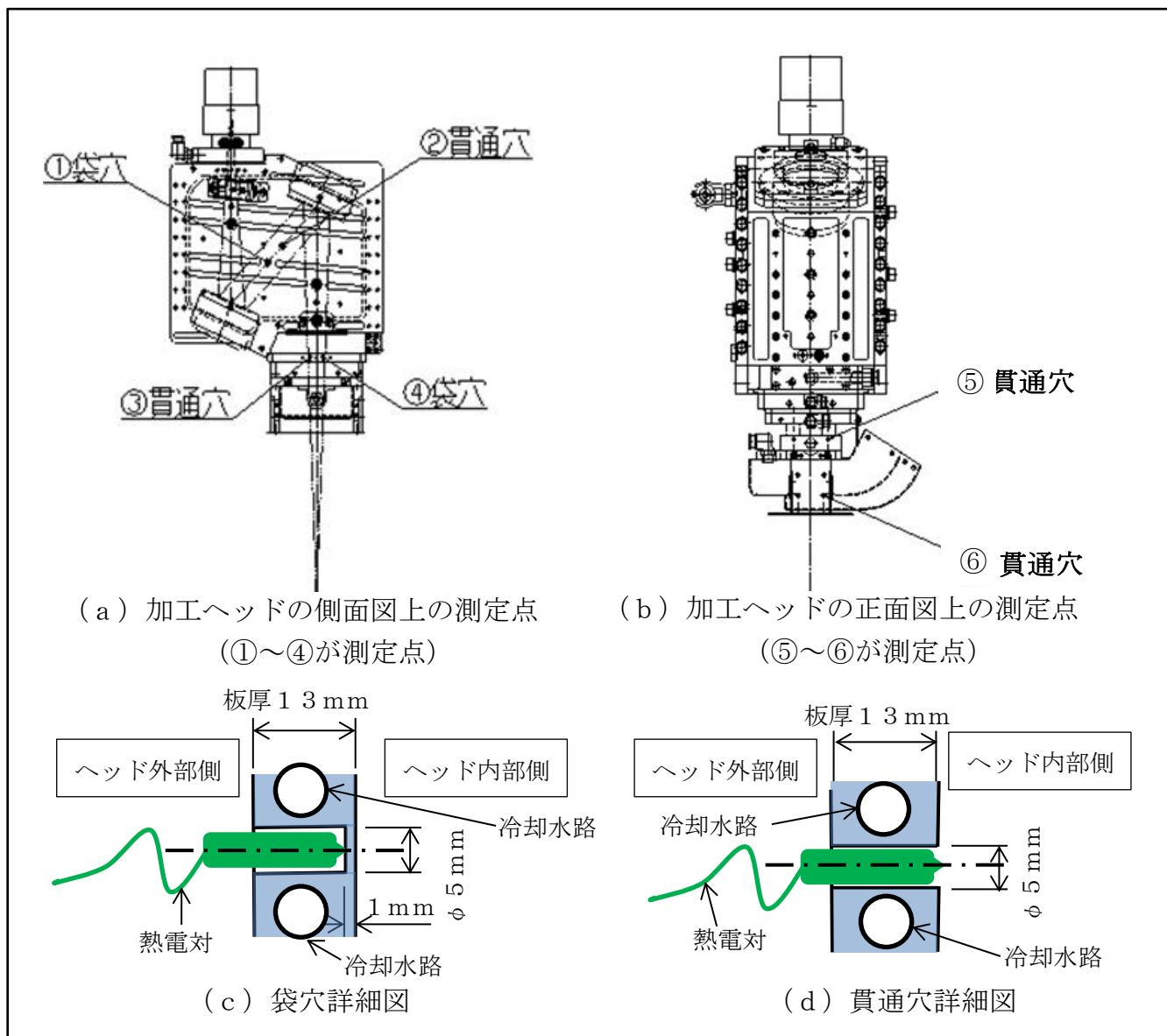


図 2-7 : 温度測定位置と穴形状の詳細

(5) 冷却水路の増設にともなう加工ヘッドの温度測定

冷却水路を一筆書きの1系統の水路ではなく、ミラー部のみ別系統の水路とし、2系統の水路に変更した。加工ヘッドの本体部の水路は、従来通り冷却水量を3L/minとしたが、ミラー部の水路は冷却水量を3L/minから6L/minに増やし、従来のもの

と比較して加工ヘッドの温度変化を測定した。

2. 3 実験結果および考察

レーザ溶接加工ヘッドを安全に使用するためには、外周部は樹脂部品が一部装着されているため使用限界温度を60℃以下とする必要がある。またレーザ溶接加工ヘッド本体の素材はアルミ合金で製作されており、その内側と内壁部の温度はアルミ合金A6061の高温引張特性（約120℃で高温引張強さが低下するという特性）⁵⁾より使用限界温度は100℃以下になることが必要である。また、レーザ溶接加工ヘッドで使用されている加工光学系ではレイリー長が18mmのため、熱レンズ効果による焦点シフト量は9mm以下に抑える必要がある。

2. 3. 1 1kWから30kWまでのレーザ出力の測定結果

1kWから30kWの設定レーザ出力に対して、加工点での実測レーザ出力を測定した結果を図2-8に示す。加工点では、設定レーザ出力に対して98%～99%の実測レーザ出力が得られている。

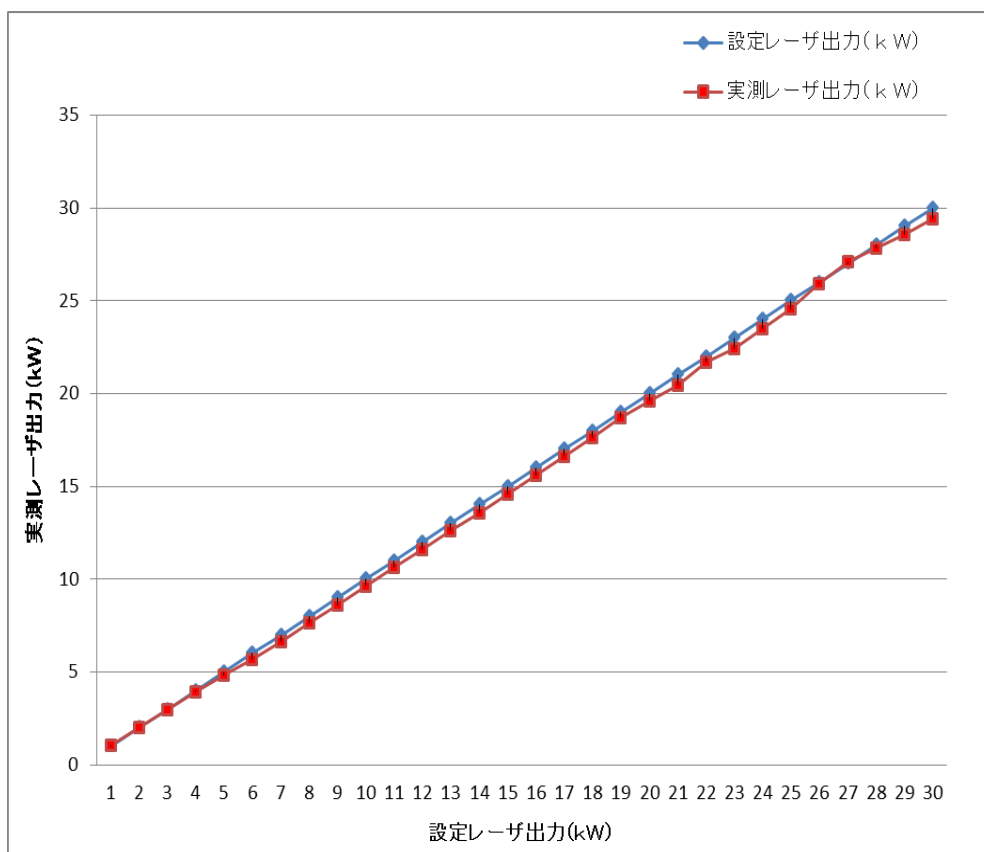


図2-8：設定レーザ出力と実測レーザ出力の関係

2. 3. 2 30 kWまでの焦点位置および焦点シフト量の測定結果

レーザ出力を5 kWから30 kWまで変化させたときの焦点シフト量を測定した結果を図2-9に示す。レーザ出力の増加とともに焦点シフト量は15 kWを境にして、低出力側と高出力側で曲線の勾配角度が異なった。30 kWでの焦点シフト量は+6.9 mmであった。また、一般に、レイリー長は図2-10に示すように定義され、次式で求められる。

$$b=2w^2/BPP=W_0^2/(2 \times BPP) = \frac{\pi W_0^2}{2 \lambda M^2} \dots (2-1)$$

ここで、 b : レイリー長、 w : 焦点半径、 BPP : ビーム品質、 W_0 : 焦点でのビーム径
このようにレーザ溶接加工ヘッドの集光ミラーとその BPP の関係より、本実験で用いた加工光学系では、そのレイリー長 (b) は計算上18 mmになる。よって、レーザ出力30 kWで仮に25 mm~30 mm厚の鋼材を溶接する場合、焦点シフト量が6.9 mmであれば、焦点の移動によるスポット径の変化は最小ビーム径の $\sqrt{2}$ 倍以下になるのでビード形状の変化も少なくレーザ加工の支障がないと考える。

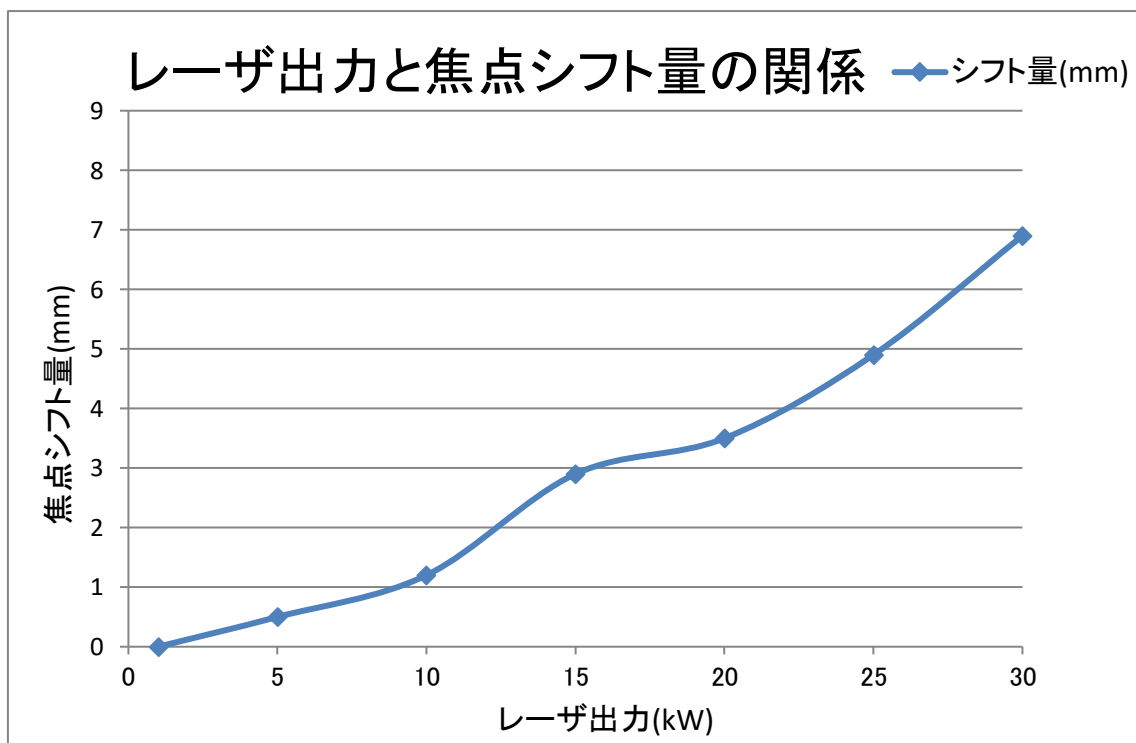
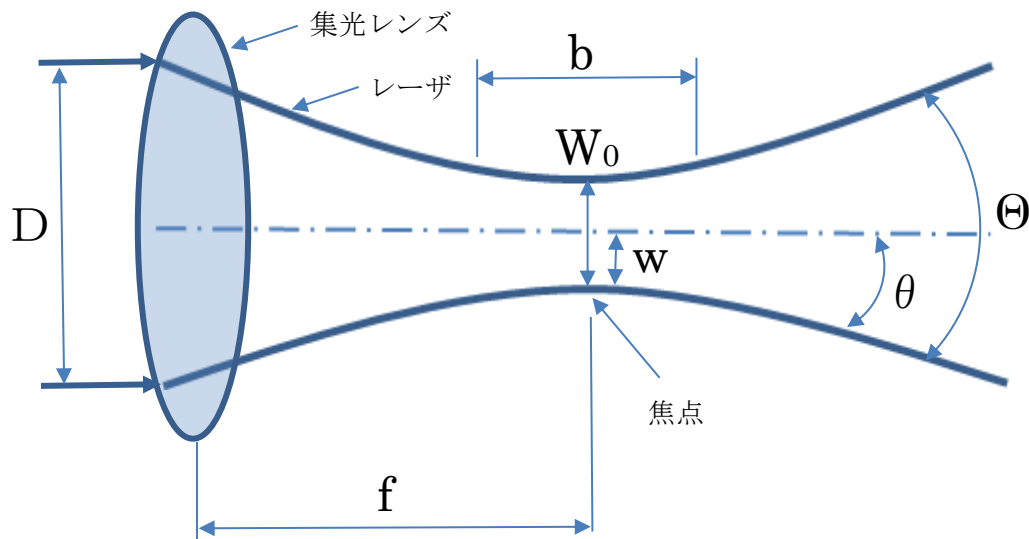


図2-9 : レーザ出力と焦点シフト量の関係



D = レンズへの入射ビーム径、 W_0 = 焦点でのビーム径、 w = 焦点でのビーム半径
 b = レイリー長、 f = 焦点距離、 θ = ビームの拡がり角の半角、 Θ = ビームの拡がり角

図 2 - 1 0 : レーザを透過した後のビーム伝播特性

2. 3. 3 冷却水量の測定結果

レーザー発振をしないで、加工ヘッド内部および光学系の冷却水路に水を 60 秒間流し、その水量を計測した。その結果、3 L/min で流したものが、出口では 2.9 L/min であった。0.1 L/min の測定誤差があったが、問題のない範囲であった。

2. 3. 4 加工ヘッド各部位の温度測定結果

1 kW および 5 kW から 30 kW まで、5 kW ごとに各出力でレーザー連続照射を行い、レーザー溶接加工ヘッドの外周部をサーモグラフィで測定した温度分布を図 2 - 1 1 に示す。a 図はレーザー出力が 1 kW のとき、b 図はレーザー出力が 5 kW のときの温度分布である。レーザー出力が低出力の領域では、レーザー溶接加工ヘッドの外周部の温度は 30°C ~ 35°C であり異常はない。c 図、d 図および e 図はそれぞれレーザー出力が 10 kW、15 kW および 20 kW のときの温度分布である。レーザー出力が中出力の領域ではレーザー溶接加工ヘッドの外周部の温度は 30°C ~ 40°C と上昇した。全体の温度分布もほぼ均一になっており、局所的な昇温は見受けられない。f 図は 25 kW のときの温度分布である。レーザー溶接加工ヘッドの外周部の温度は 40°C ~ 50°C とかなり上昇し、レーザー照射出口部付近に 50°C 近くの高温領域が局所的に見られる。g 図はレーザー出力が 30 kW のときの温度分布である。レーザー溶接加工ヘッドの外周部の温度は 45°C ~ 50°C になった。レーザー照射出口部付近の高温領域は、f 図と比較してその範囲が拡大をしているが、実用上は問題のないレベルである。

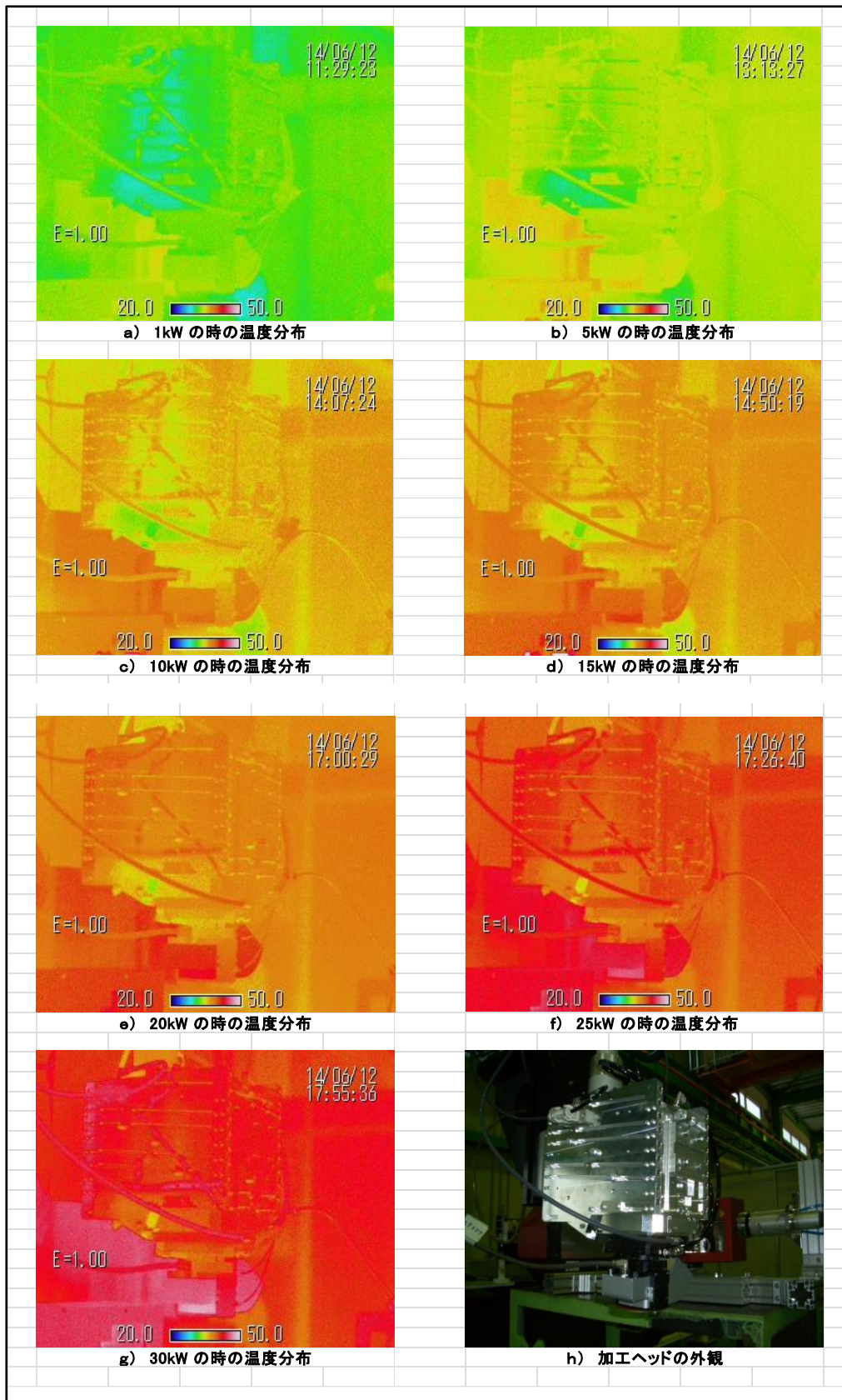


図 2 - 1 1 : 3 0 k W 用 レーザ 溶接 加工 ヘッド の 外 周 部 の 温 度 分 布

また、サーモグラフィと同時に、レーザ溶接加工ヘッドの内部と内壁にアルメルークロメル熱電対をつけて温度測定をした結果を図2-12および図2-13に示す。いずれの測定結果も、特定の場所に異常高温を示すホットスポットはなく、レーザ溶接加工ヘッドの外周の樹脂部品の設計上の限界使用温度（60℃）および内側・内壁部のアルミ材（A6061）の限界使用温度（A6061アルミ材の高温引張特性より100℃）を下回っていた。そして、各レーザ出力での温度測定に対して、ウォータージャケットの各点（図2-7の側面図①②③④の位置）の温度測定結果とレーザ出射部近傍（図2-7の正面図⑤⑥の位置）の温度測定結果より、温度測定位置によるバラツキはあるが、ほぼ同様な傾向を示した。

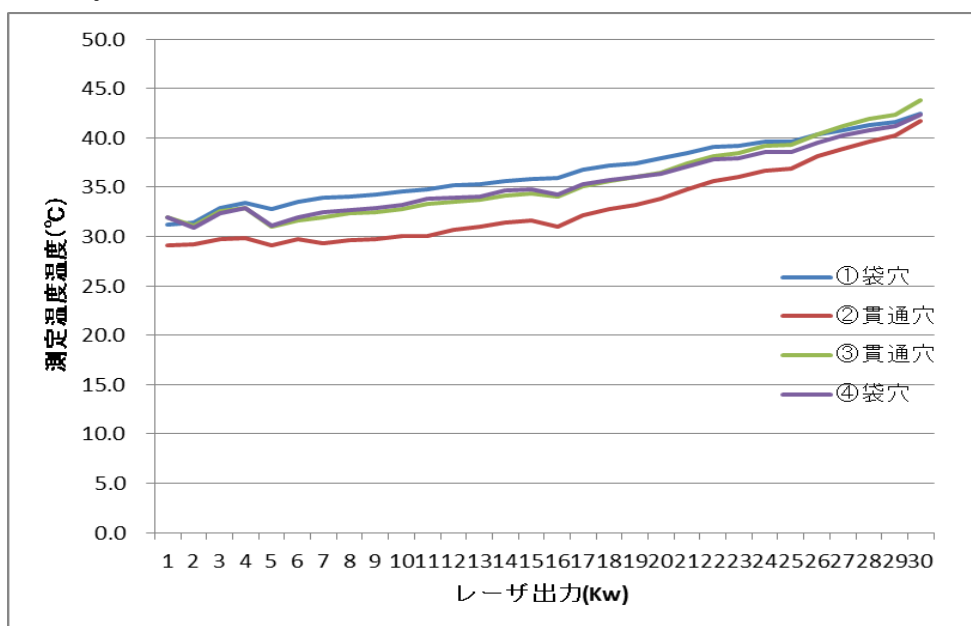


図2-12：光路上の各点（図2-7の側面図①②③④の位置）の温度測定結果

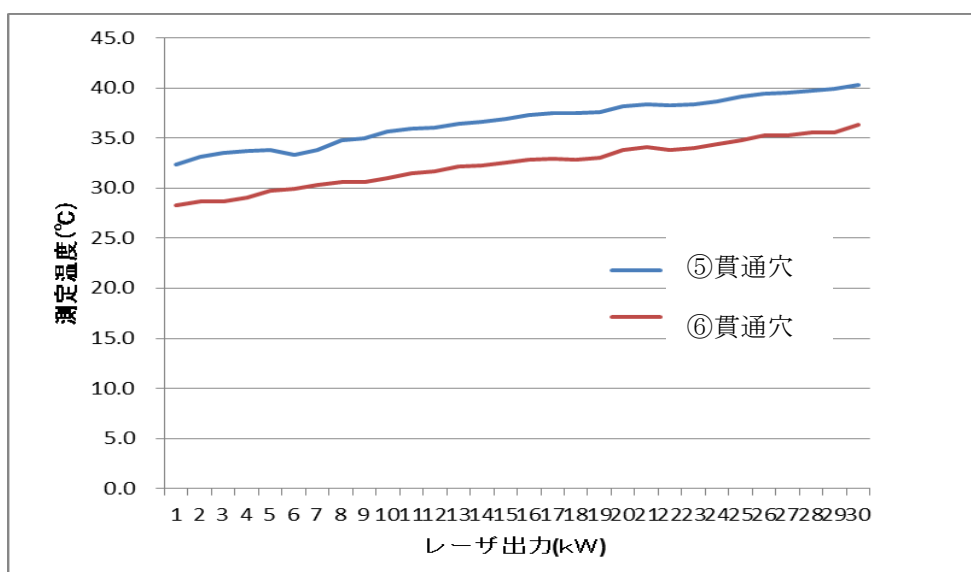


図2-13：レーザ出口部（図2-7の正面図⑤⑥の位置）の温度測定結果

2. 3. 5 冷却水路の増設における影響

図2-14にレーザ出力と焦点シフト量に及ぼす冷却水路の影響について示す。レーザ出力の上昇と共に焦点シフト量は増加しており、ヘッド本体全体に3 L/minで冷却したときは、30 kWでは+6.8 mmとなったが、ミラーに水量を増設し6 L/min流したときは+7.8 mmとなった。

他方、15 kW付近の焦点シフト量におけるグラフ線の勾配角度は緩やかになるが、これは一時的に保護ガラスの熱レンズ効果とコリメートミラーおよび集光ミラー（放物面鏡）の熱レンズ効果の釣り合いがとれた区間と思われる。冷却水量の違いによる焦点シフト量を比較すると、1 kWから25 kWまでは、6 L/minの方が焦点シフト量は少ないが、26 kWを超えると3 L/minの方が、焦点シフト量は少ない。これは、集光ミラー（金属製）の表面側と裏面側の冷却効果の差による集光ミラー表面の曲率の違いにより生じたと思われる。

レーザ出力と焦点シフト量の関係

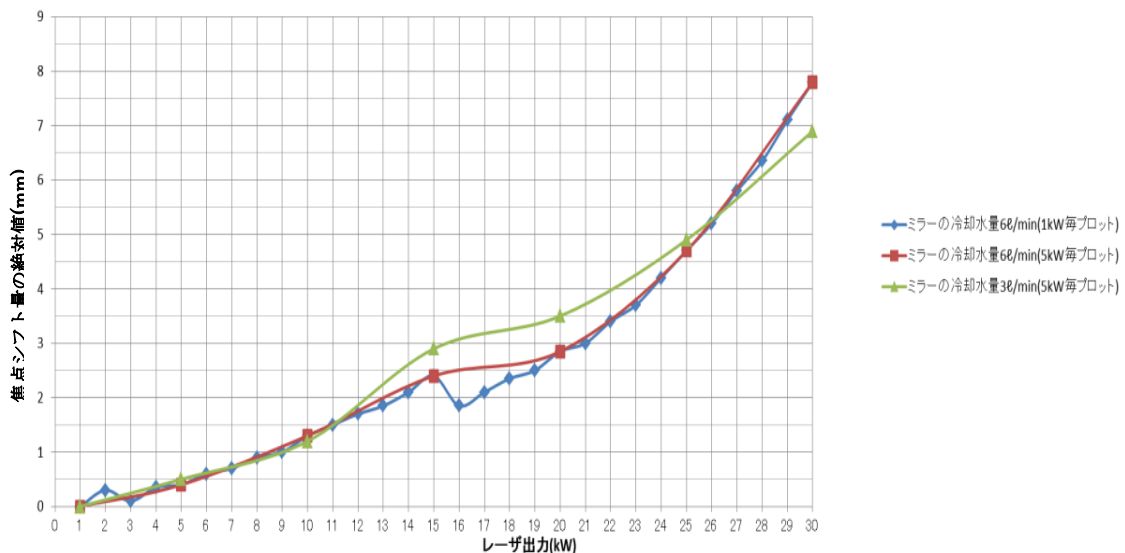


図2-14：レーザ出力と焦点シフト量

図2-15および図2-16は熱電対によるレーザ加工ヘッド6か所の温度測定結果を示す。全ての部位で、出力の上昇と共に温度が上昇したが、100℃を超えることは無かった。また、冷却水量による温度を比較すると、3 L/minの場合に比べて、6 L/minの方が、温度が低い傾向にある。また、出力の上昇と共にその差は広がっていくが、26 kWを超えるとその差が少なくなっている。使用限界温度60℃以下という目標は達成しているものの、30 kWに対しては冷却効率が低く、今後さらに焦点シフト量の改善が必要である。また、図2-17はサーモグラフによる外周部の温度測定結果を示す。外周部は最高約35℃で、異常に発熱する部位は見受けられなかった。

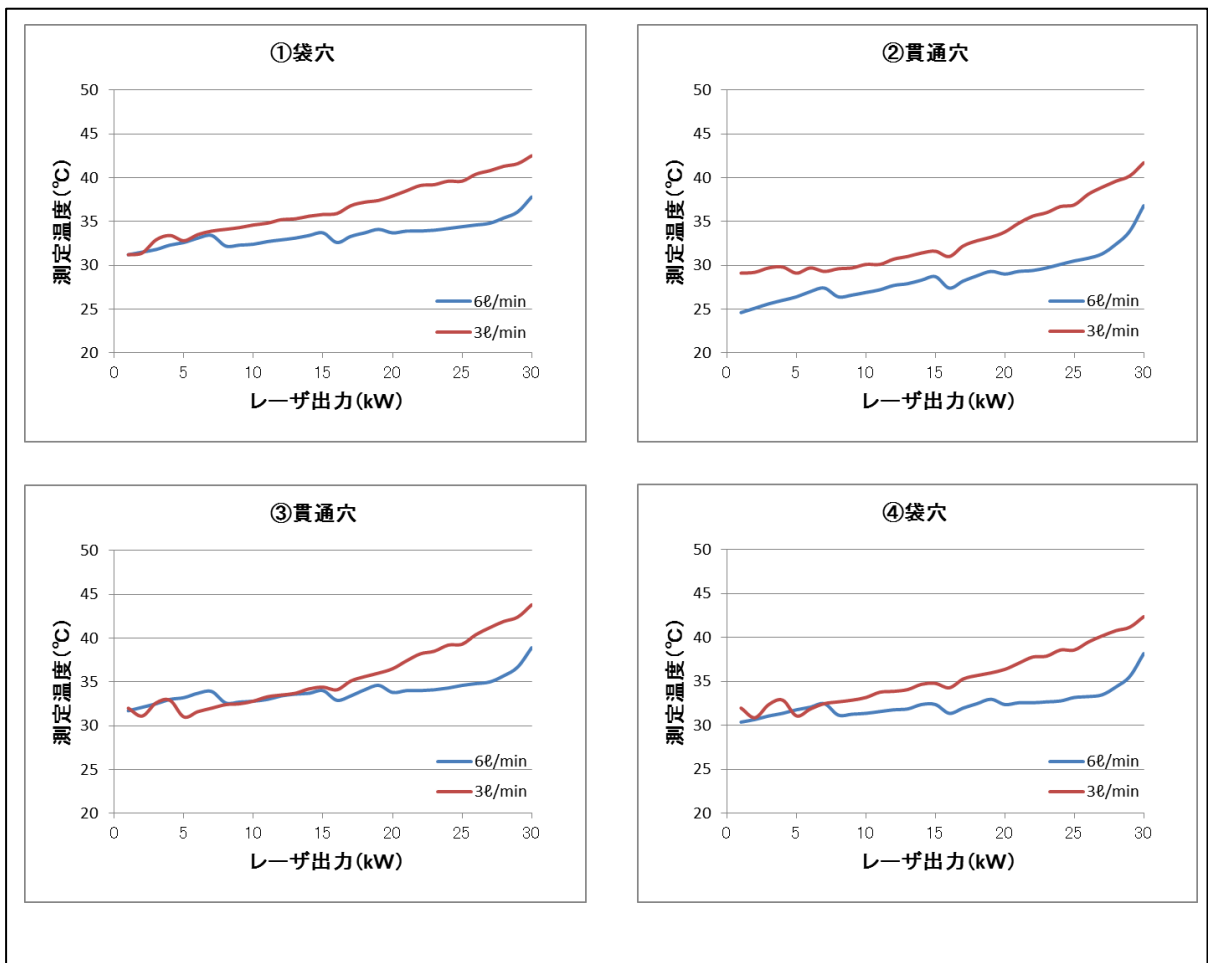


図 2 - 1 5 : 光路の温度測定結果

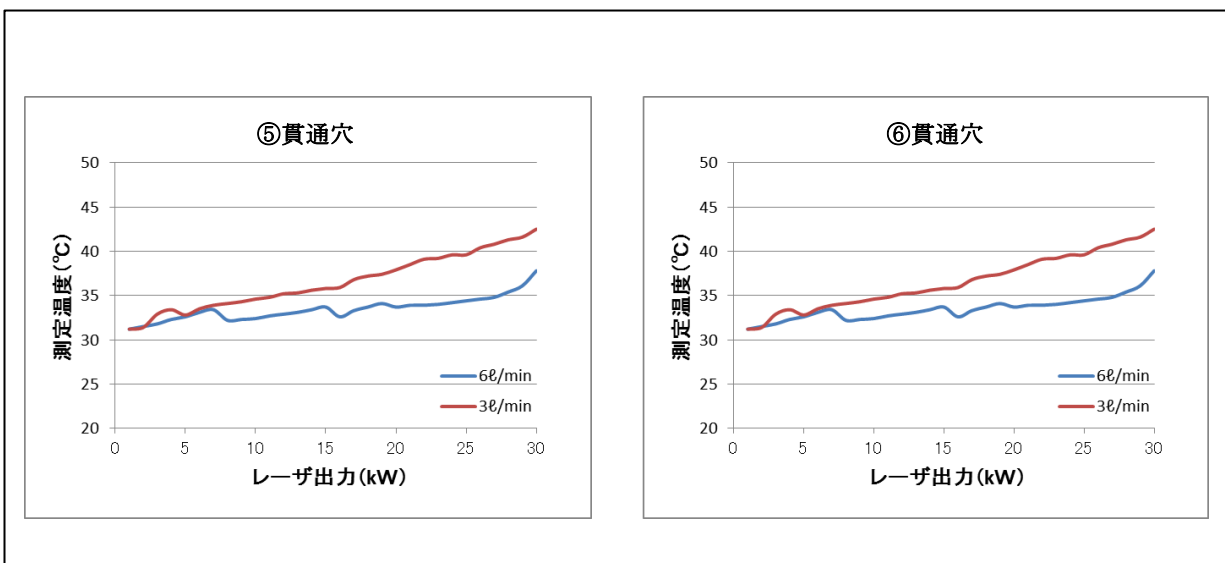


図 2 - 1 6 : 出口部の温度測定結果

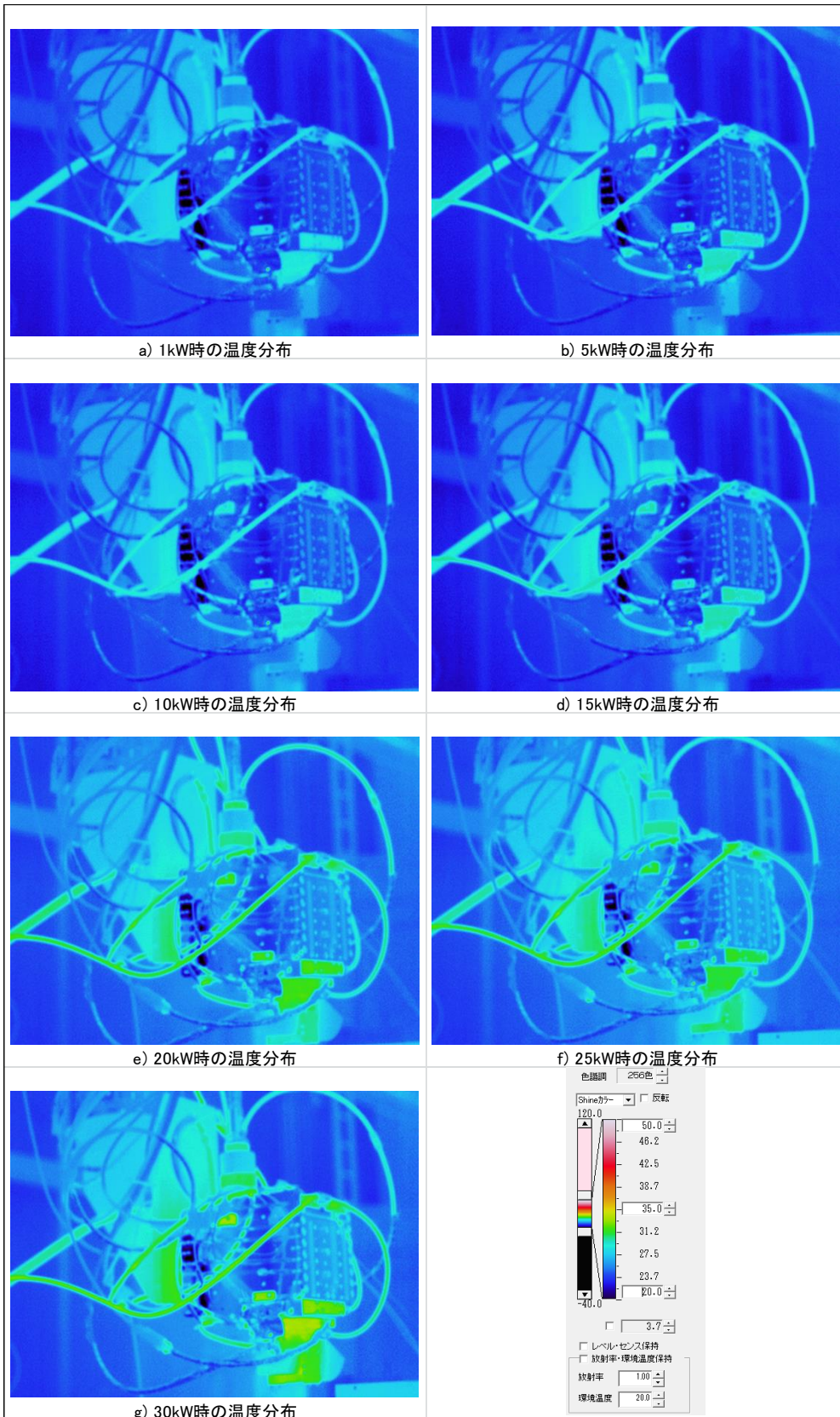


図2-17：加工ヘッド外周部温度（本体3 L/m i n、ミラー部の流量6 L/m i n）

レーザ出力30kWでの2時間連続照射の結果を図2-18および2-19に示す。加工ヘッドの内面①～⑥の温度を熱電対により長時間測定した結果、全ての部位で時間と共に温度上昇がみられた。照射後30分程で約5℃の温度上昇があり、その後は緩やかに上昇を続けた。2時間後には約8℃～9℃上昇し、最高温度46℃となった。その結果、アルミA6061の限界使用温度100℃を超えることはなかった。

図2-20に2時間連続照射前後の-30mmデフォーカスした位置でのビームプロファイル測定結果を示す。ビーム径の変化は無く、同一ビーム径を維持した。レーザ出力30kWで2時間連続照射という酷使試験においても、加工ヘッドに異常を来たしてなく、実験後の点検においても問題なかった。また15kWのレーザ出力で、焦点位置においてビームプロファイルを測定したが、BPPの変化はみられなかった。更にレーザ加工ヘッドを点検したところ、内部の汚れ、光学系の焼損も無く、健全な状態を保っていた。

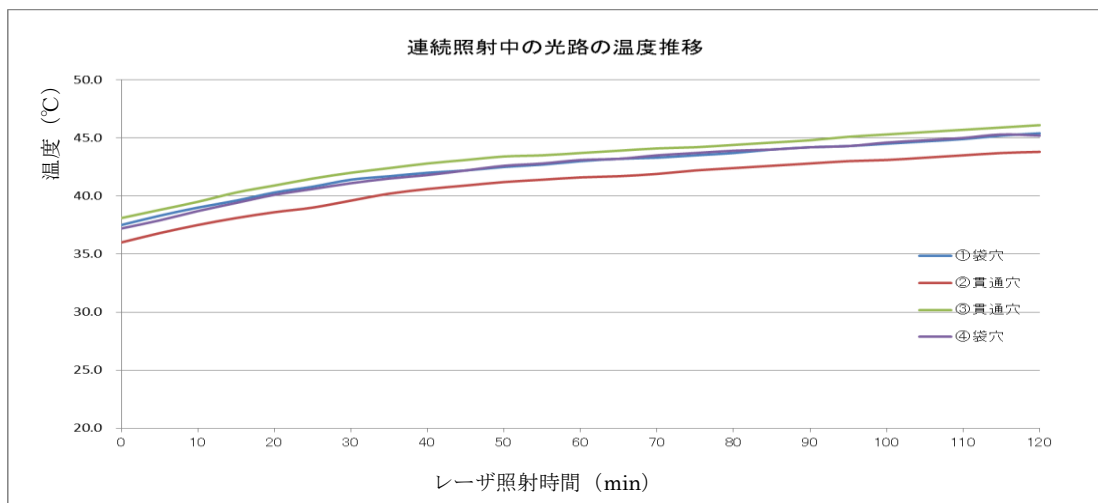


図2-18：連続照射中の光路の温度推移の測定結果

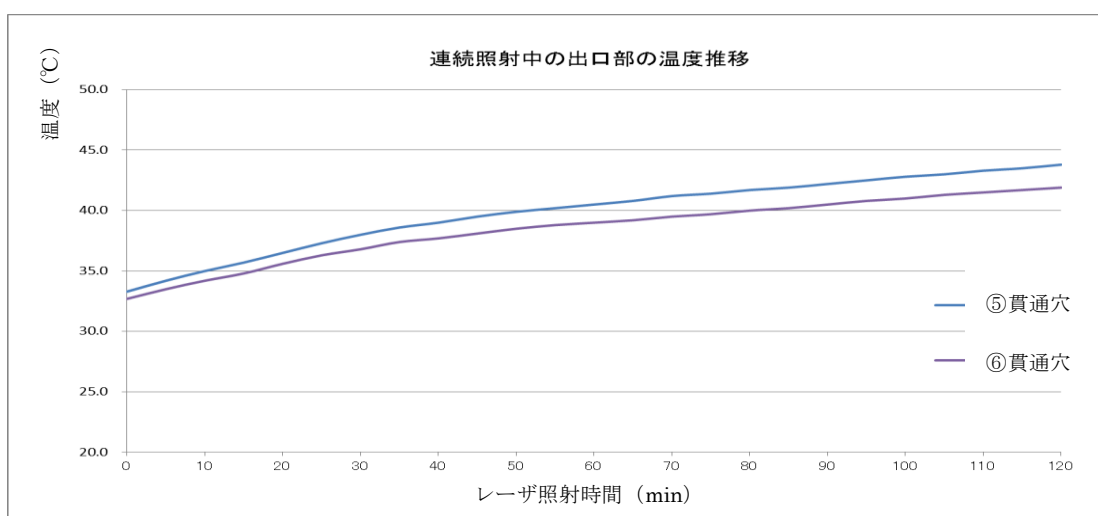


図2-19：連続照射中の出口部の温度推移測定結果

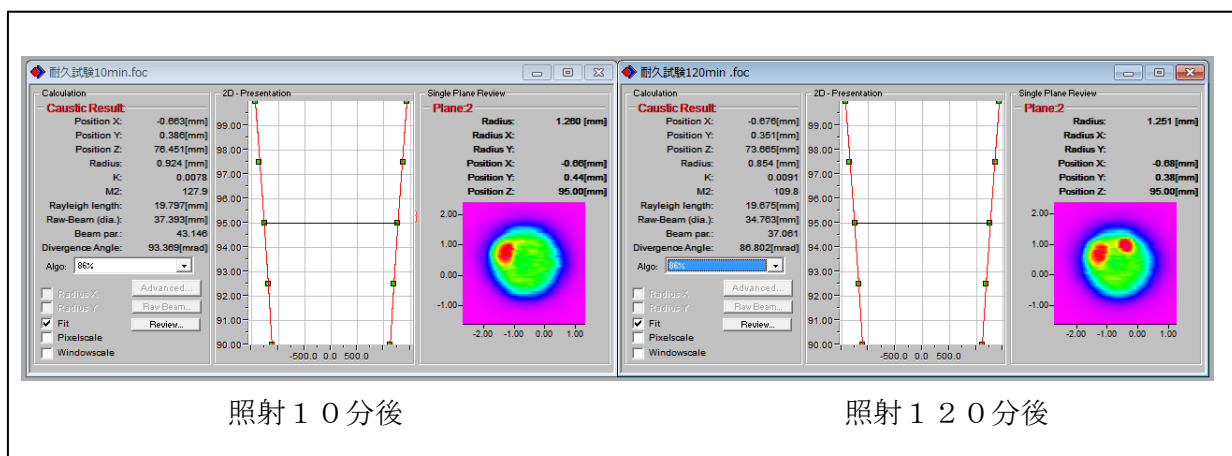


図 2-20 : 2 時間連続照射後の -30 mm デフォーカスでのビーム径の変化

2. 4 考察

冷却水量の違いによる焦点シフト量を比較すると、1 kW から 2.5 kW までは、3 L/min に比べて、6 L/min の方が焦点シフト量は少ないが、2.6 kW を超えると 6 L/min の方が、焦点シフト量は大きくなった。この原因を考察すると、集光ミラーを裏面側より水冷しているため、流量が増加すると裏面側の温度が保持され表面がより加熱された状態となるため、ミラーの表面の曲率が大きくなるためと思われる。

2. 5 まとめ

レーザ出力を 1 kW から 30 kW まで変えて、次の実験を行った。

- (1) 1 kW ~ 30 kW のレーザ出力測定
- (2) 焦点位置及び焦点シフト量の測定
- (3) 冷却水量の測定
- (4) 加工ヘッド内部と外周部の温度測定
- (5) 冷却水路の増設にともなう加工ヘッドの温度測定

その結果、次のことが明らかとなった。

- 1) 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。
- 2) 冷却水路が一筆書きで 3 L/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 1.5 kW の時に +2.9 mm、30 kW の時は +6.9 mm であった。
また、冷却水路が 2 系統で加工ヘッド本体の冷却を 3 L/min、ミラーの冷却を 6 L/min にした場合は、焦点位置および焦点シフト量はレーザ出力 1.5 kW の時に +2.4 mm、30 kW の時は +7.8 mm であった。
- 3) レーザ溶接加工ヘッドの外周部の温度をサーモグラフィで測定した結果、冷却水路が一筆書きで 3 L/min である場合でも、冷却水路が 2 系統で加工ヘッド本体の冷却

を 3 L / m i n、ミラーの冷却を 6 L / m i n にした場合であっても、その温度は限界使用温度 6 0 °C 以下の 4 0 °C であった。

- 4) レーザ溶接加工ヘッド内部の光路の各点とレーザ出口部をアルメルークロメル熱電対で測定した結果、冷却水路が一筆書きで 3 L / m i n である場合は 4 5 °C 以下であり、冷却水路が 2 系統で加工ヘッド本体の冷却を 3 L / m i n、ミラーの冷却を 6 L / m i n にした場合は 4 0 °C 以下であった。
- 5) 開発したレーザ溶接加工ヘッドについて、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った。その結果 3 0 k W 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ことを確認した。

参考文献

- 1) 下楠善明：“原子力機器へのレーザ溶接の適用”平成14年レーザシンポジウム 中厚板構造へのレーザ技術の適用、47-57
- 2) Klaus Behler , Peter Schafer " MELT POOL DYNAMICS IN HIGH SPEED WELDING WITH MODERN HIGH POWER SOLID STATE LASERS" ICALEO'2005、1026-1030
- 3) Reinhard Kramer , Harald Schwede , Volker Brandl , Stefan Wolf , Otto Marten "OPTICS EVALUTATION FOR MULTIKILOWATT SOLID STATE AND FIBER LASERS" ICALEO'2006、403-406
- 4) Daniel Reitemeyer , Thomas Seefeld , Frank Vollertsen , Jean Pierre Bergmann "COVER GLASS INFLUENCE ON HIGH POWER FIBER LASER INDUCED FOCUS SHIFT" ICALEO'2009、751-758
- 5) UACJ アルミポケットブック第2版 2015、47
<https://www.alumi-world.jp/files/pdf/pdf01poketbook.pdf>

第3章 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

3.1 緒言

ファイバーレーザを用いたレーザ溶接では、レーザビームを加工光学系により、直径数 $10\mu\text{m}$ ～数 $100\mu\text{m}$ の微小スポット径に集光して溶接を行う。他の溶接熱源と比べて、エネルギー密度が極めて高いため、図1-2および1-3のようなアスペクト比の高い溶込み形状のビードが得られ、溶接変形も少ない¹⁾²⁾³⁾。そのため、中厚板の鋼材の溶接ではアーク溶接のような開先加工や多層溶接が不要となり、歪み取りの作業工数も大幅に低減できる。よって、板厚 10mm 以上の鋼材に対してレーザ溶接が適用できれば、従来のアーク溶接に比べて大幅に工数低減が可能となり、格段の生産性向上が期待できる⁴⁾。しかし現実には、部材が大きく複雑形状の鋼構造物にとって、溶接継手に対する厳しい寸法精度、開先ギャップなどの要求がレーザ溶接適用の最大の障害となっている⁵⁾。レーザ溶接ではビーム径が微細であるため、溶接線の狙い外れに対する裕度が極めて狭く、通常、板厚が 6mm 以下では溶接線に対してその許容範囲は $\pm 0.15\text{mm}$ 程度である。軌跡精度が $\pm 0.3\text{mm}$ の6軸多関節ロボットを用いた大型構造物へのレーザ溶接の適用を考える場合、狙い精度は $\pm 0.15\text{mm}$ 以内というのは極めて困難である。また溶接中の部材の変形などにより溶接線が変化するため、予め設定されていたティーチングポイントから溶接線が外れてしまうこともある。

以上の問題点を解決するため、6軸多関節ロボットを使つてのレーザ溶接を大型構造物へ適用する場合には、溶接線をリアルタイムで追従するシームトラッキング機能が開発されている⁶⁾⁷⁾。シームトラッキングに主に使われるセンサーは、図3-1に示すように接触式シームトラッキングと非接触式シームトラッキングがある⁸⁾。接触式シームトラッキングは、スプリングによるテンション機能を有した機械的な溶接線の倣いである。溶接継手の開先内に接触子を直接接触させて、溶接線の検出とともにシームトラッキングを行う。接触式シームトラッキングは装置コストが安いですが、機械的な接触式センサーを倣わせるため、ある一定以上の開先深さが必要である。ワイヤタッチセンサーは通電しないワイヤをタッチさせると電圧が0になるので、ワイヤタッチセンサーでX・Yの距離が測定できる。予めワイヤタッチセンサーで複数の位置座標のポイントを教示した後に本溶接を行う。

一方、非接触式センサーには①アークセンサー、②磁気センサー、③光センサー、④超音波センサー、⑤音響センサーがありレーザ溶接におけるシームトラッキングには主として光切断法で溶接線を検出する方法が用いられる。すなわち、図3-2⁸⁾に示すように外部から溶接線検出用の光を溶接線へ照射し、その光の反射形態や反射した光の強度分布をカメラで取得し、独自のアルゴリズムや画像処理を実施して溶接線を検出しシームトラッキングを行う方法である⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。レーザ溶接のような開先を必要としない溶接法の場合、非接触式シームトラッキング方法として光切断法が有効と考える。

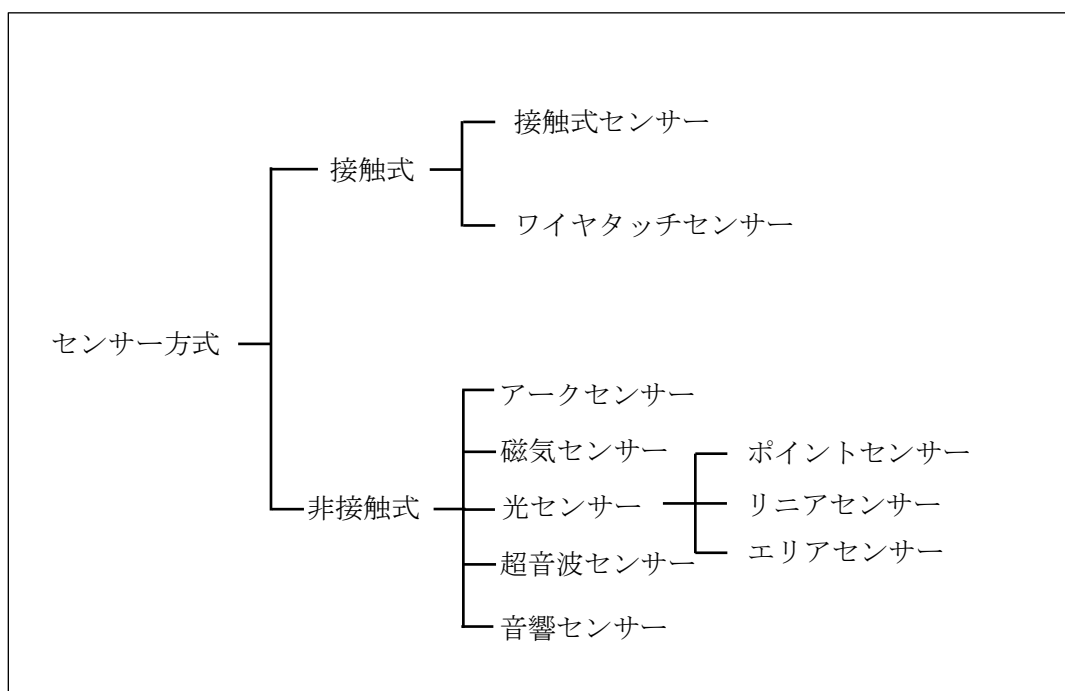


図 3 - 1 : シームトラッキングに使われるセンサーの分類⁸⁾

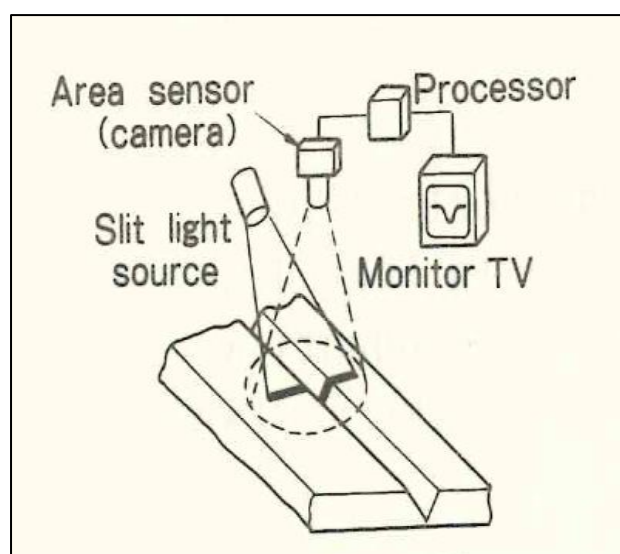


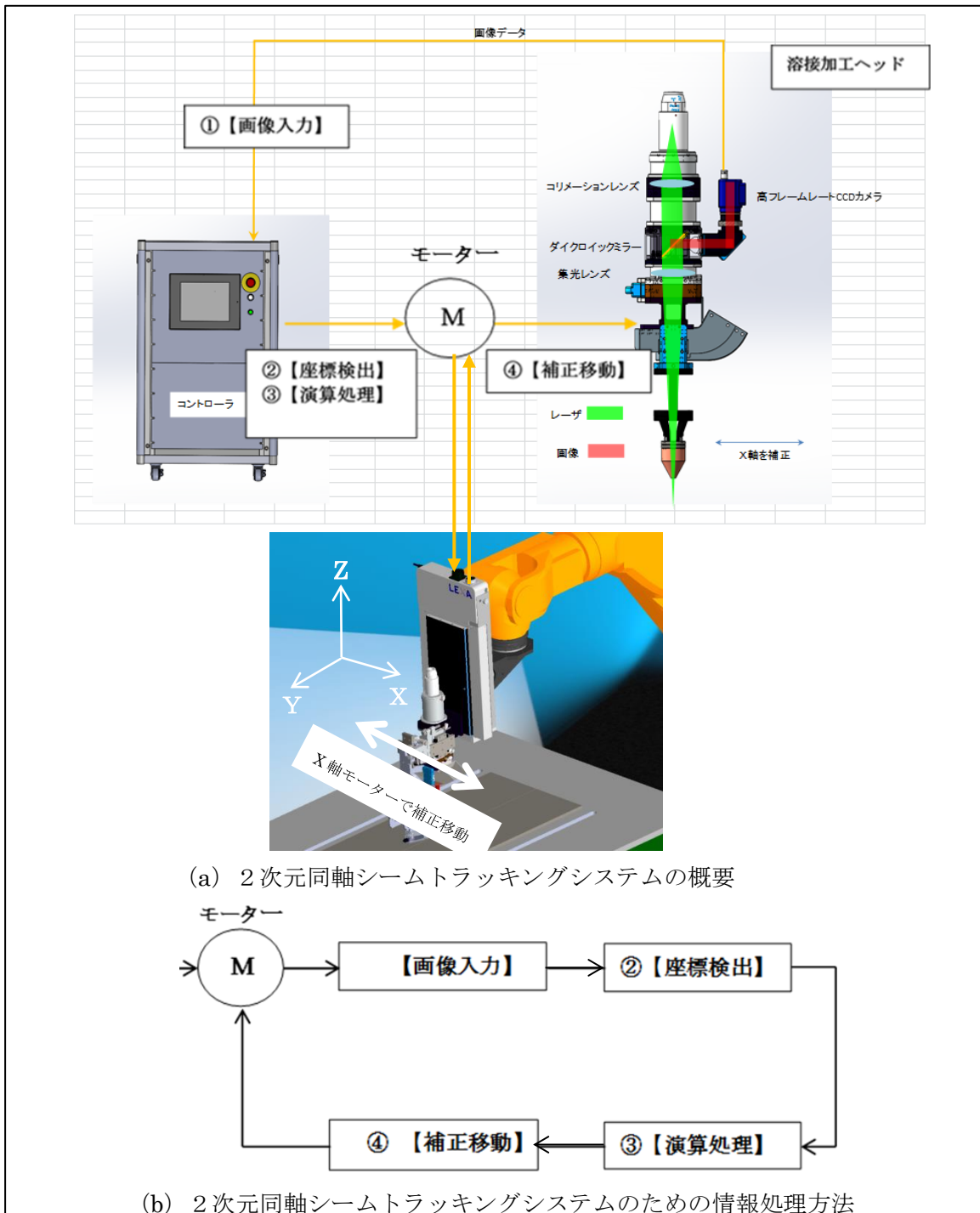
図 3 - 2 : シームトラッキングに使われる光エリアセンサー⁸⁾

第 3 章では 6 kW のファイバーレーザーを用いて、出力 1 ~ 4 kW のレーザー出力で溶接したときの光切断法を用いた 2 次元および 3 次元の非接触式シームトラッキングシステムを試作し、この基本的な追従精度について検討をすることを目的とした。

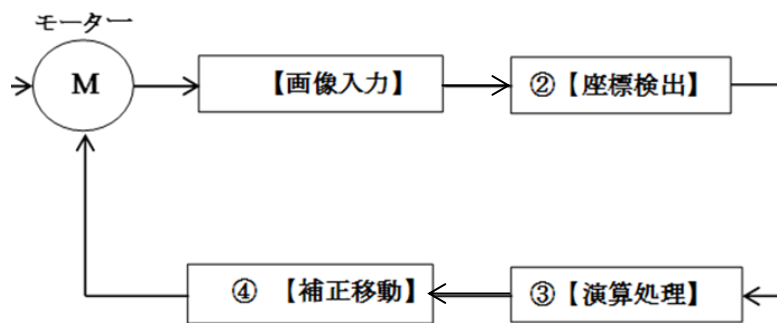
3. 2 実験方法

3. 2. 1 実験装置と追従原理

2次元同軸シームトラッキングシステムを開発するために、図3-3に示すようなシームトラッキングシステムの追従原理を用いた。また、図3-4に示すような2次元同軸シームトラッキング溶接ヘッドを開発した。



(a) 2次元同軸シームトラッキングシステムの概要



(b) 2次元同軸シームトラッキングシステムのための情報処理方法

図3-3：2次元同軸シームトラッキングシステム

まず、【画像入力】をCCDカメラにより加工点の撮像から行う。次に【座標検出】で入力した画像の画像処理により開先線の座標検出を行う。そして【演算処理】では原点座標と検出した開先線左右のエッジ座標を比較演算し、溶接線（原点座標）との位置ズレをリアルタイムに演算処理する。同時に外乱（例えばスパッタ、仮付部）を取り除くロバスト処理も併用して行い、シームトラッキングの安定化を図った。最後に【補正移動】を行い、演算処理で求めた位置ズレ量を補正量としてパルスモーターのパルス値に変換後、X軸駆動モーターへ出力させ、X軸（溶接線と垂直な方向）を補正移動させる。この工程を繰り返しながら、シームトラッキングを行う。このサイクル時間は約33msである。

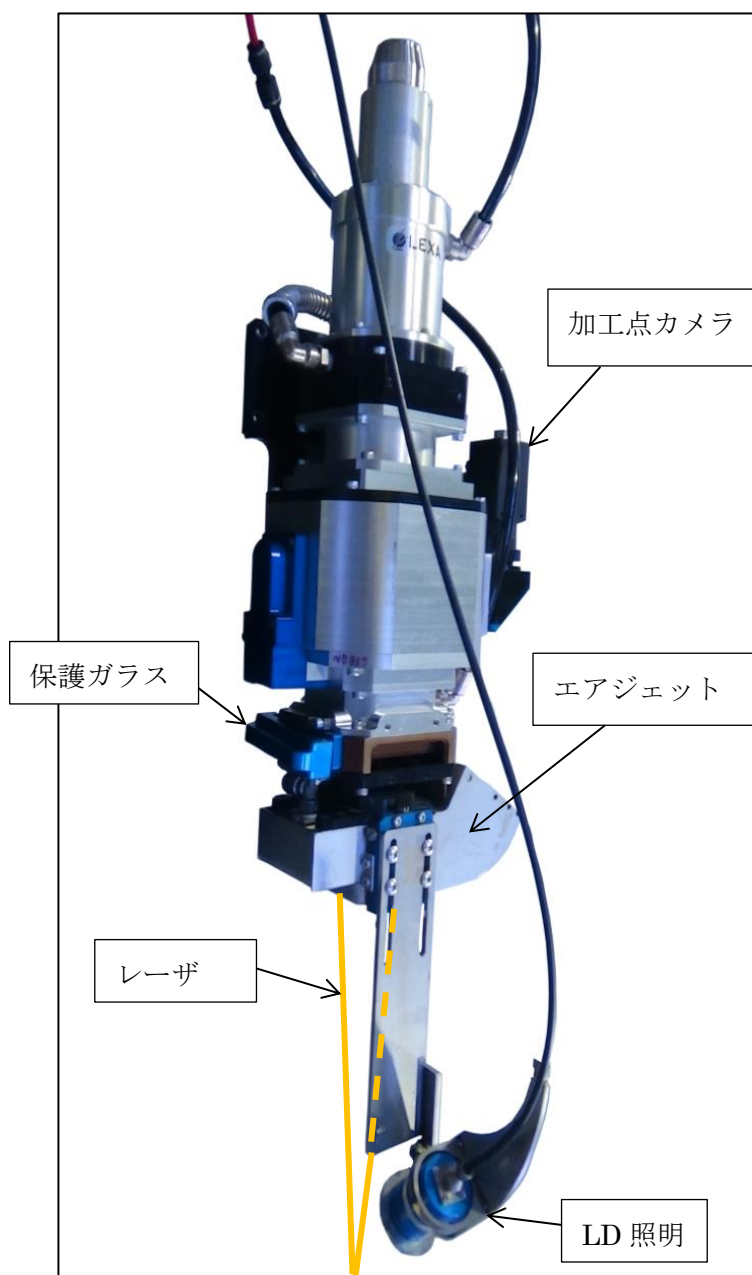


図3-4：2次元同軸シームトラッキング溶接ヘッド

カメラの同軸視野内で溶接線を認識している状態を図3-5に示す。認識された溶接線をA線で示す。この線はセンシングエリア（Bエリア）内でも延長した線として表示される。

このように、センシングエリア（Bエリア）内で、溶接線を自動検出し、溶接線を確実に認識して、傾斜している溶接線であっても確実に扱うことができる。溶接線（A線）は図3-6に示すように溶接中であっても、溶接中に発光する外乱光に影響されることがなく溶接線の連続追従が可能である。このように、溶接時に発光する強烈なプラズマ光を選択的にフィルターで遮光することにより、溶接線を可視化してリアルタイムでシームトラッキングをすることが可能である。



図3-5：溶接ラインの自動認識（溶接線A＝緑色の縦の仮想線）

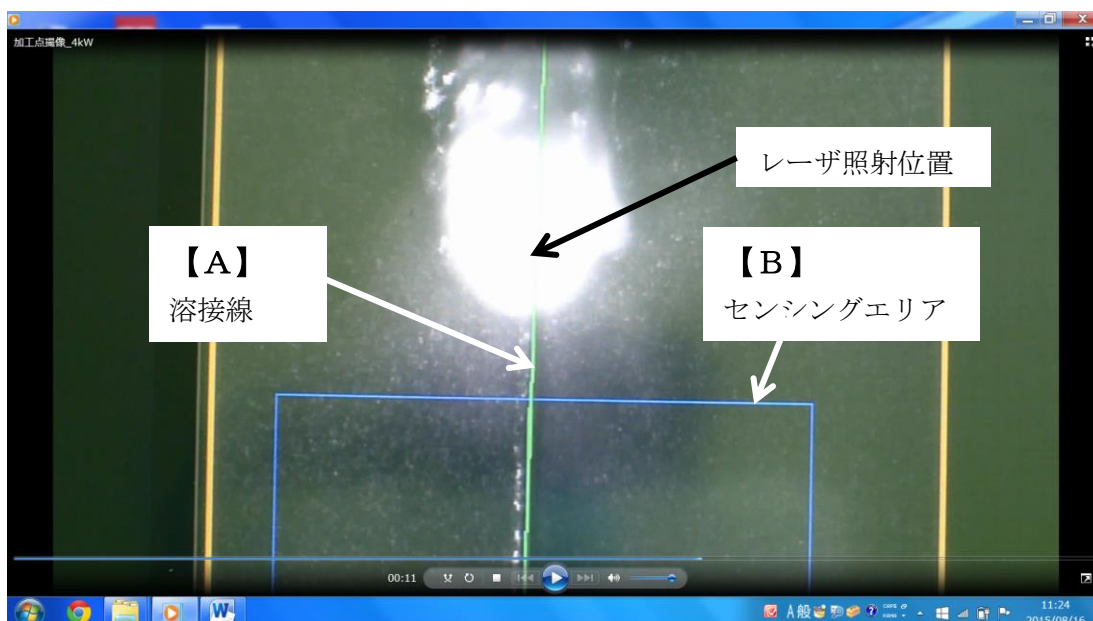


図3-6：溶接中でもセンシングエリア内で検出される溶接線A（緑の縦の仮想線）

3. 2. 2 実験項目

第3章での実験項目は①溶接線の識別、②2次元同軸シームトラッキングシステムの追従精度の確認、および③3次元シームトラッキングシステムの追従精度の確認である。以下に各々の詳細について記す。

3. 2. 2 (1) 溶接線の識別

同軸シームトラッキングにおいて重要なことは、同軸視野内に加工点とセンシングエリアがあるため、加工点からの発光ノイズに影響されることなく、溶接線を正しく識別させることである。本研究では溶接線の識別が可能であるかを検証するため、溶接中にPLC (Programmable Logic Controller) のリアルチャートで溶接線の位置情報を取得し、シャッター速度と照明出力を変化させることで、PLCのリアルチャートの波形に入るノイズ量が、どのように変化をするかの調査を行った。また同時にレーザ溶接中にセンサーが溶接線を正しく識別し続けることができるか試験片で実験を行なった。溶接線識別テストのための試験片の形状を図3-7に示す。SPHC鋼板 板厚6mm×長さ200mm×幅30mmの試験片2枚を突合せ継手にして、試験片の点P0から点P1までレーザ溶接を行い検証した。実験条件を表3-1に示す。実験条件はコリメートレンズを $f = 150\text{ mm}$ とし、フォーカスレンズを $f = 300\text{ mm}$ とし、その時の集光スポット径を $400\text{ }\mu\text{ m}$ とした。加工点とセンサーの距離は5mmとして、4kWのレーザ出力で溶接速度を 2 m/min 、焦点外し距離を0mmで実際にレーザ溶接を行い検証した。なお、突合せ継手部に継手ギャップや開先がある場合は、溶接線の識別が容易であるが、本実験では突合せ継手部の継手ギャップを約 $30\text{ }\mu\text{ m}$ 以下の状態で評価を行った。また、ここでは、溶接線の識別のみのテストとし、シームトラッキング機能は併用しなかった。

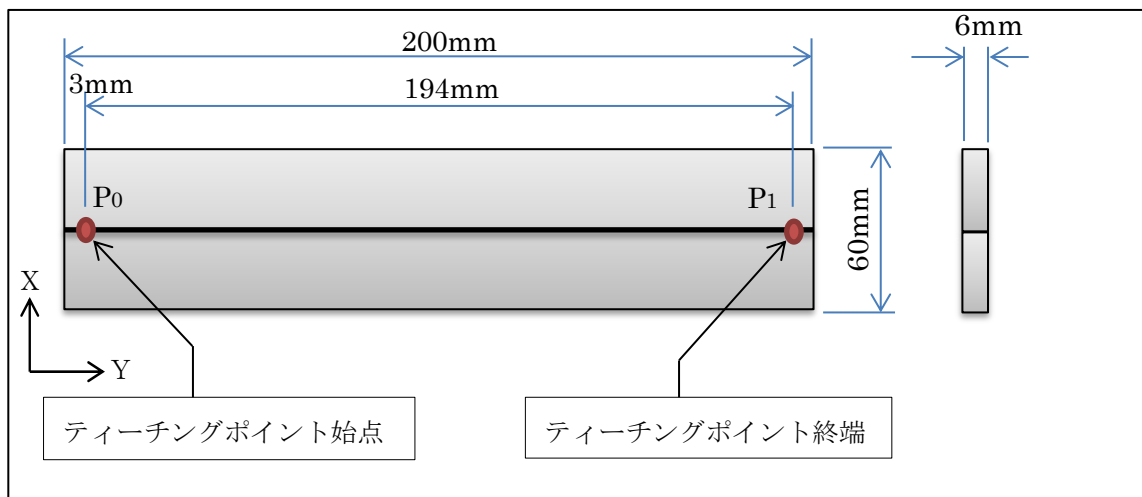


図3-7：溶接線識別テストのための試験片形状

表 3-1 : 実験条件

条件項目	設定条件
供試材	S P H C 鋼 (板厚 : 6 m m)
6 軸多関節型ロボット	K R 6 0 H A (繰り返し位置決め精度 $\pm 5 0 \mu m$)
ファイバーレーザ発振器	Y L S - 6 0 0 0 (最大出力 6 k W)
プロセスファイバーのコア径	2 0 0 μm
コリメートレンズの焦点距離	1 5 0 m m
集光レンズの焦点距離	3 0 0 m m
集光スポット径	4 0 0 μm
レーザ出力	4 k W
溶接速度	2 m / m i n
焦点外し距離	0 m m

3. 2. 2 (2) 2次元同軸シームトラッキングシステムの追従精度の確認

板厚 2.3 mm の S P H C 材の突合せ継手を使用して、2次元同軸シームトラッキングシステムの追従精度の確認実験を図 3-8 に示すように行った。ロボットのティーチングプログラムは、溶接始端部では 0 mm、終端部では 2 mm 溶接線に対して意図的にずらして作成した。溶接後はマイクロスコープを使用して、本来の溶接線の位置と溶接後のビード中心の位置を比較測定することでトラッキング精度の確認をした。測定箇所は全溶接長 600 mm に対して、40 mm ピッチで 15 か所 溶接長さ 30 mm の溶接を行った後、精度の比較測定を行った。実験条件を表 3-2 に示す。実験条件はコリメートレンズを $f = 150 \text{ mm}$ 、フォーカスレンズを $f = 300 \text{ mm}$ とし、その時の集光スポット径を $\phi 600 \mu m$ とした。加工点とセンサーの距離は 5 mm とし、3 kW のレーザ出力で溶接速度を 3 m / m i n、焦点外し距離を 0 mm で実際にレーザ溶接を行い検証した。なお、突合せ継手に継手ギャップや開先がある場合は、溶接線の識別が容易であるが、本実験では突合せ継手部の継手ギャップを約 30 μm 以下の状態で評価を行った。

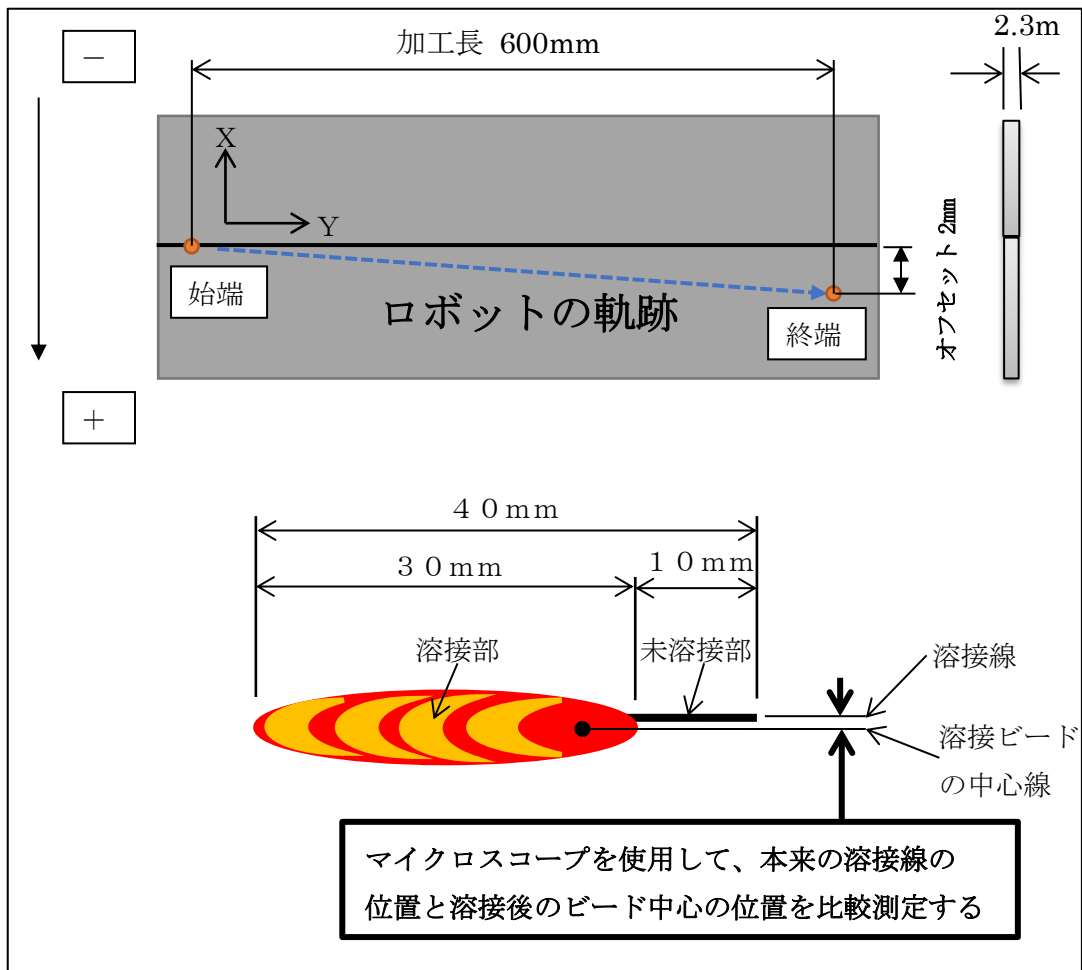


図 3-8 : 2次元同軸シームトラッキングの追従精度の確認実験

表 3-2 : 実験条件

条件項目	設定条件
供試材	S P H C 鋼 (板厚 : 2.3 mm)
6 軸多関節型ロボット	K R 6 0 H A (繰り返し位置決め精度 $\pm 50 \mu m$)
ファイバーレーザー発振器	Y L S - 6 0 0 0 (6 kW)
プロセスファイバーのコア径	$300 \mu m$
コリメートレンズの焦点距離	150 mm
集光レンズの焦点距離	300 mm
集光スポット径	$600 \mu m$
レーザー出力	3 kW
溶接速度	3 m / m i n
焦点外し距離	0 mm

3. 2. 2 (3) 3次元シームトラッキングシステムの追従精度の確認

3次元シームトラッキングシステムについて、その追従精度を求めるために行った、3次元シームトラッキングシステムの概略図とその実験状況をそれぞれ図3-9および図3-10に示す。加工点・センサー間距離は、50mmとした。センサーは、加工点よりも50mm先行して溶接線を読み取っており、その3次元座標位置情報を制御システムにリアルタイムに送信して、溶接線のトラッキングをすると共に、ワークディスタンスの距離を常に一定に保つように3次元の制御を行った。

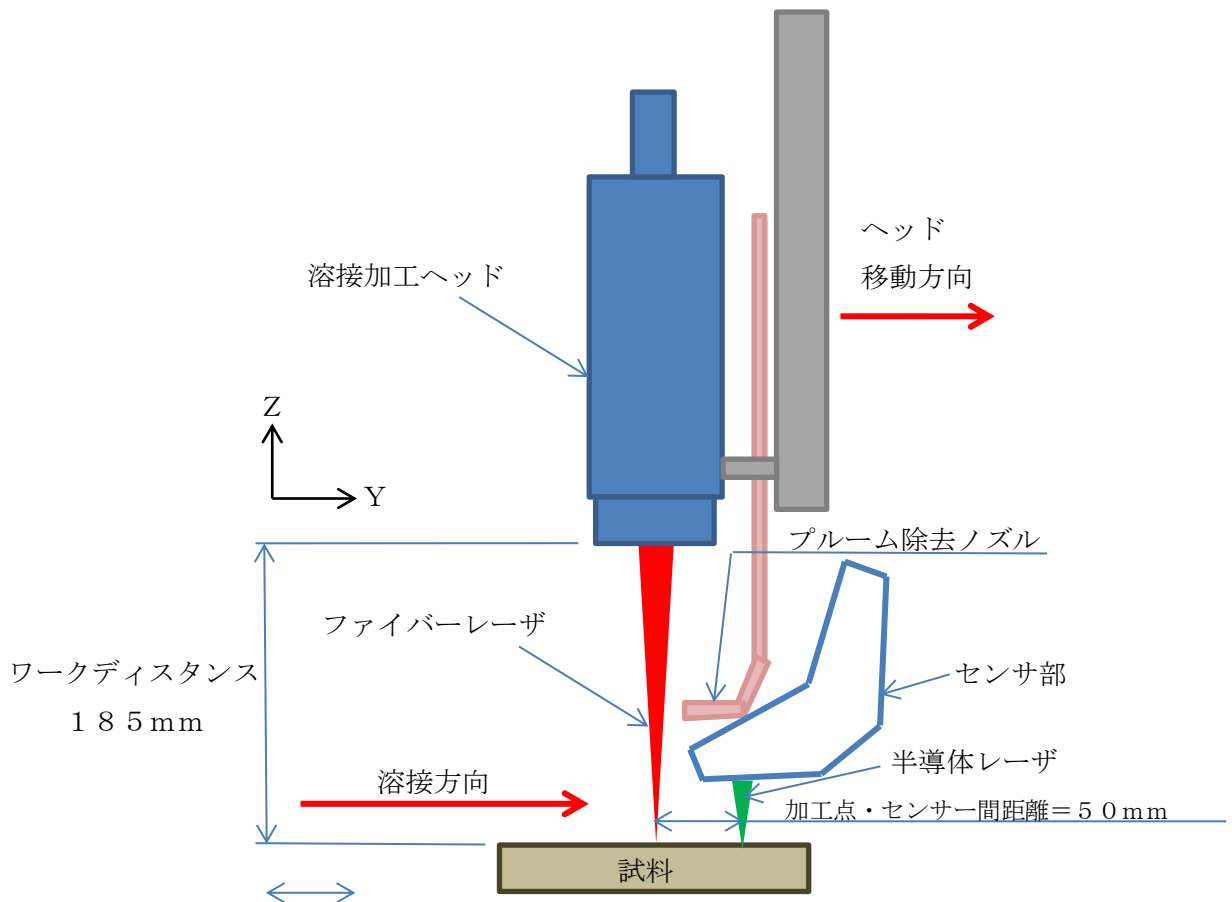


図3-9：3次元シームトラッキングの概略図

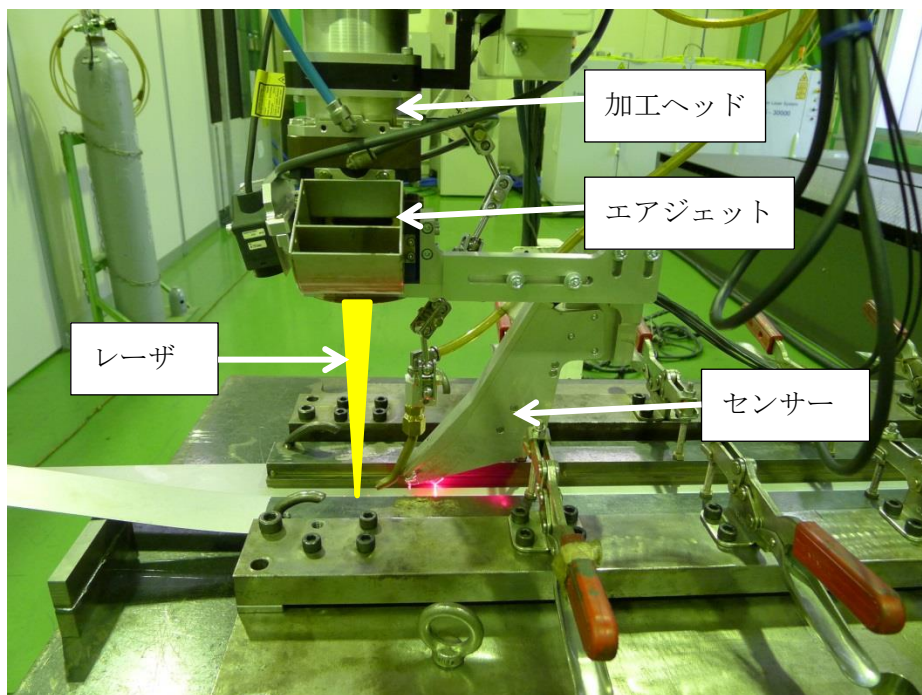


図 3-10 : 3次元シームトラッキングの実験状況

3次元シームトラッキングシステムの追従精度確認実験に用いた試験片の形状を図3-11に示す。S PHC鋼板、板厚0.6mm×長さ900mm×幅50mmの試験片2枚を突合せ継手にして実験を実施した。

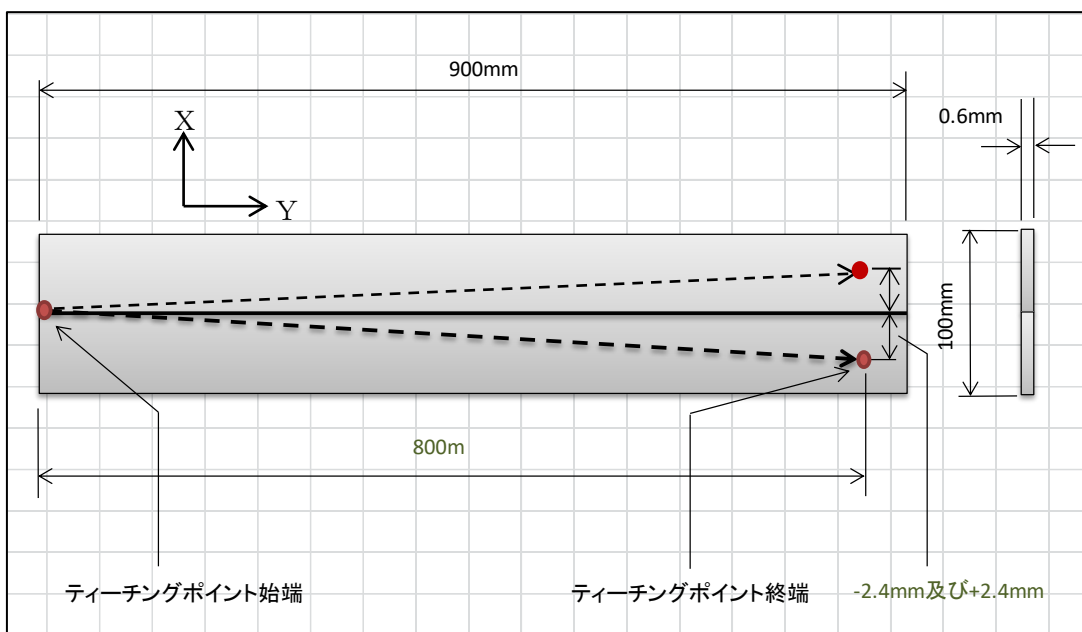


図 3-11 : 3次元シームトラッキングの追従精度確認実験に用いた試験片の形状

3次元シームトラッキングシステムの追従精度の確認方法を図3-12に示す。板厚0.6mmのSPCC材の突合せ継手を使用して、3次元シームトラッキングシステムの追従精度の確認実験をした。ティーチングポイント始点から終端までロボットのティーチングプログラムは、溶接線に対して意図的にX方向に±2.4mm（=±3mm/1000mm相当）ずらして作成した。溶接後はマイクロスコープを使用して、本来の溶接線の位置と溶接後のビード中心の位置を比較測定することでトラッキング精度の確認をした。測定箇所は全溶接長900mmに対して、200mmピッチで4か所 溶接長さ190mmの溶接を行った後、追従精度の比較測定を行った。

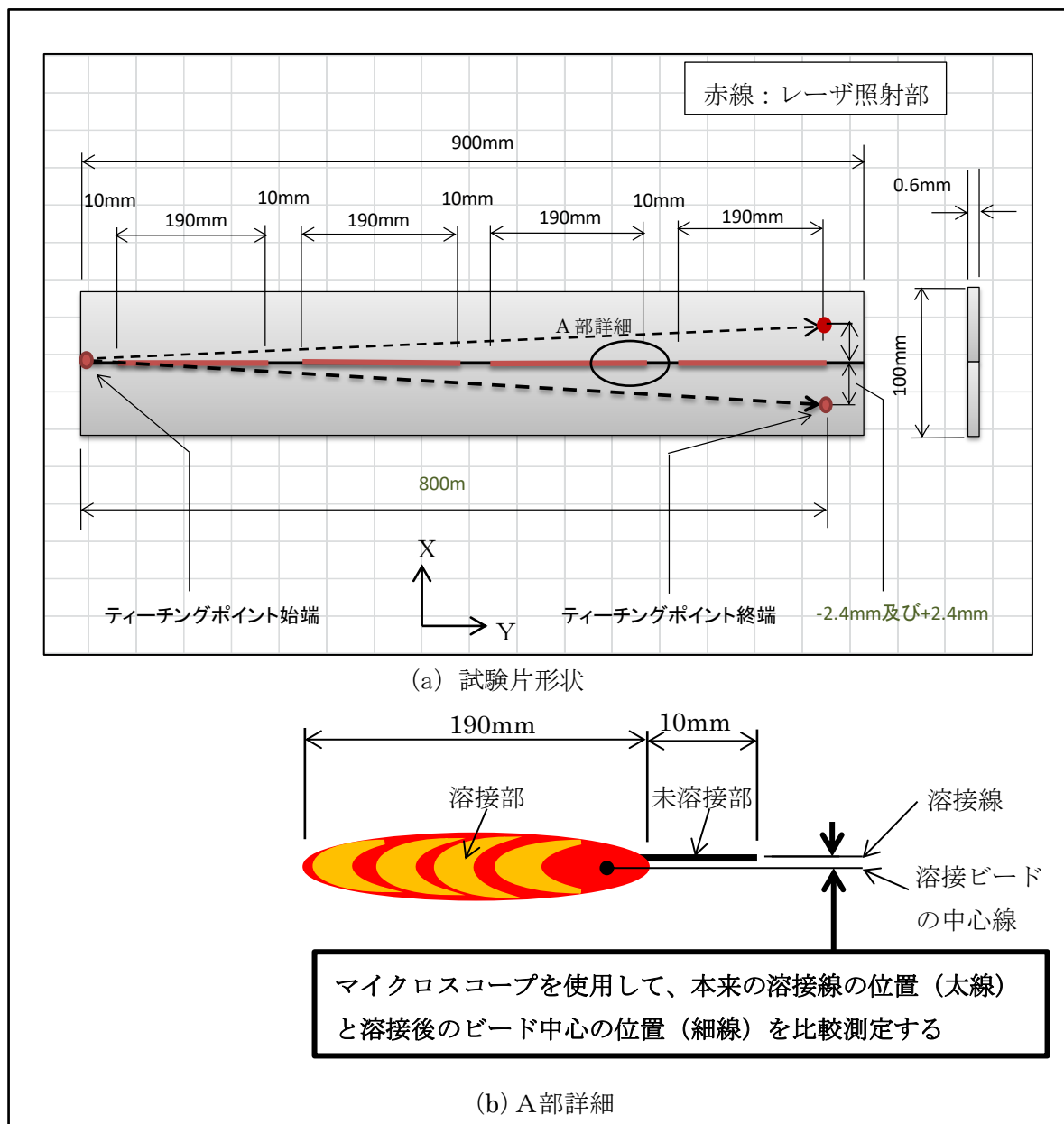


図3-12：3次元シームトラッキングの追従精度の確認方法

実験におけるレーザビームのONとOFFのチャートを図3-13に示す。全溶接長800mmに対して溶接加工ヘッドを停止させること無く、3m/minの溶接速度でレーザビームONとOFFを繰り返し、溶接長さ190mmの溶接を行い、意図的に10mm長さの未溶接部を作った。測定箇所は溶接長800mmに対して、200mmピッチ4か所で行った。

溶接速度 3m/min一定

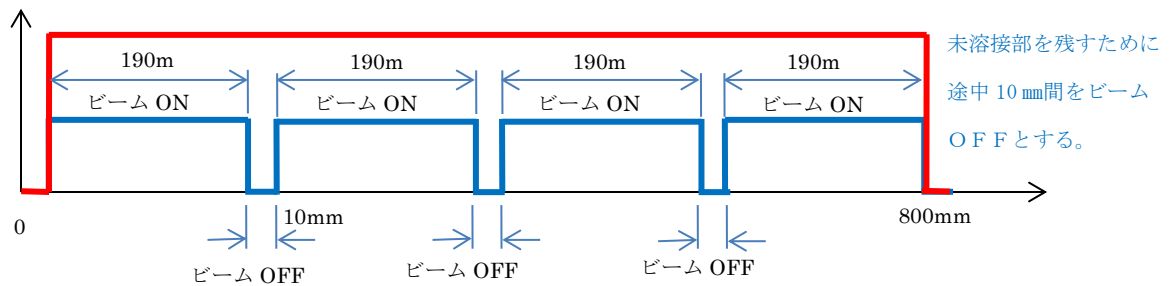


図3-13：レーザビームのONとOFF

ここでは、シヤの切り口のカエリ面とダレ面とを、それぞれ組み合わせて実験を行なった。その組み合わせを図3-14に示す。

実験条件を表3-3に示す。実験条件はコリメートレンズを $f = 150\text{mm}$ 、フォーカスレンズを $f = 300\text{mm}$ とし、その時の集光スポット径を $400\mu\text{m}$ とした。加工点・センサー間距離は50mmとして、1kWのレーザ出力で溶接速度を3m/min、焦点外し距離を0mmで実際にレーザ溶接を行い検証した。なお、突合せ継手部に開先ギャップや開先がある場合は、溶接線の識別が容易であるが、本実験では突合せ継手部の開先ギャップを約 $30\mu\text{m}$ の状態の評価を行った。

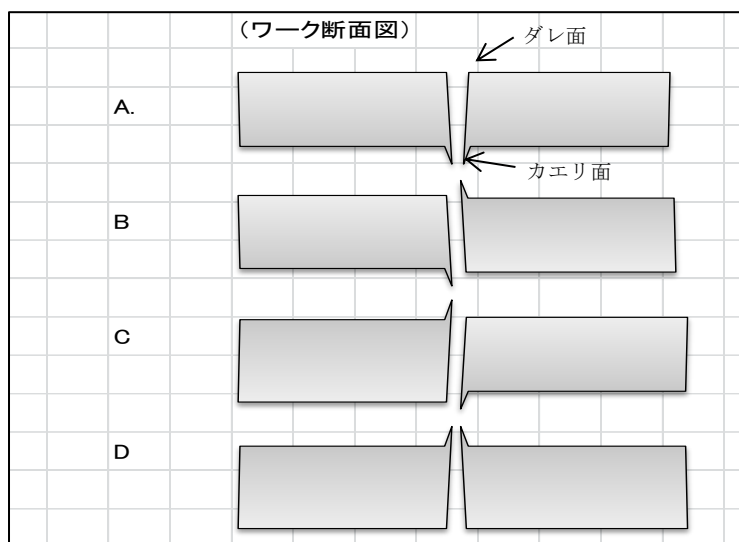


図3-14：シヤの切り口の組み合わせ

表 3-3 : 3次元シームトラッキングシステムの追従精度の確認実験の実験条件

条件項目	設定条件
供試材	S P C C 鋼 (板厚 : 0.6 mm)
6 軸多関節型ロボット	K R 6 0 H A (繰り返し位置決め精度 $\pm 50 \mu\text{m}$)
ファイバーレーザー発振器	Y L S - 6 0 0 0 (最大出力 6 kW)
プロセスファイバーのコア径	200 μm
コリメートレンズの焦点距離	150 mm
集光レンズの焦点距離	300 mm
集光スポット径	400 μm
レーザー出力	1 kW
溶接速度	3 m/min
焦点外し距離	0 mm
ティーチング終端ずらし量	+ 2.4 mm および - 2.4 mm

3.3 実験結果および考察

3.3.1 溶接線の識別

表 3-4 はシャッター速度を変化させ、照明出力を 18W に固定したときのリアルタイムチャート上のノイズの状況から判断した識別結果を示す。

以下にこのときの測定結果を示す。

表 3-4 : シャッター速度を変化させたときの識別結果

条件No	シャッター速度	照明出力	レーザー出力	溶接線の識別結果 ^(注)
1	1/120 sec	18W	0kW	○
2	1/120 sec	18W	4kW	×
3	1/1000 sec	18W	4kW	△
4	1/2000 sec	18W	4kW	△
5	1/5000 sec	18W	4kW	△
6	1/10000 sec	18W	4kW	×

(注) ○ : 溶接線識別可 △ : 溶接線識別一部可 × : 溶接線識別不可

条件No. 1 のテスト結果を図 3-15 (条件No. 1 シャッター速度 1/120 sec / 照明出力 18W / レーザ出力 0kW) に示す。赤色の線が溶接線の認識値である。レーザー照射がされていないので外乱 (ノイズ) が少なく、連続的な波形線になっており、溶接線の識別が良好である。条件No. 2 のテスト結果を図 3-16 (条件No. 2 シャッター速度 1/120 sec / 照明出力 18W / レーザ出力 4kW) に示す。赤色の線が上下に振り切っており、ノイズを

拾い溶接線を全く認識出来ていない。

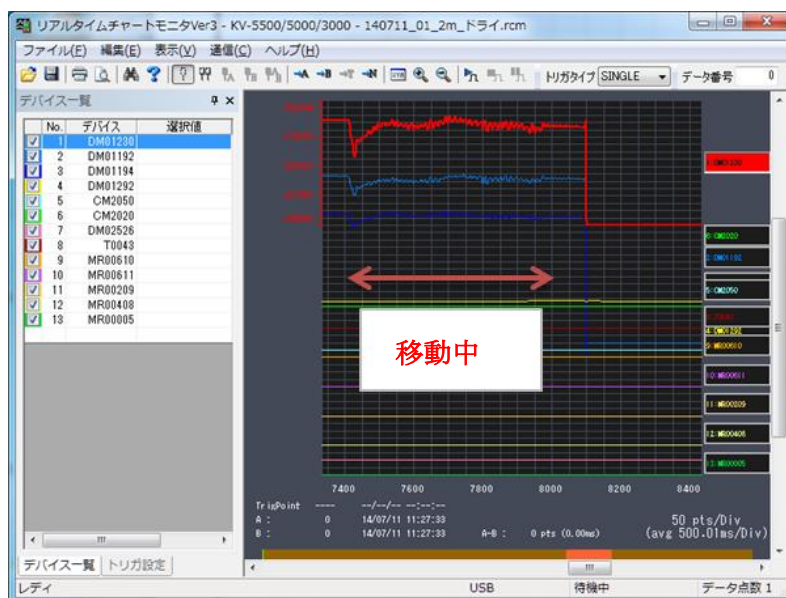


図 3-15 : レーザを照射しない状態での溶接線識別テスト

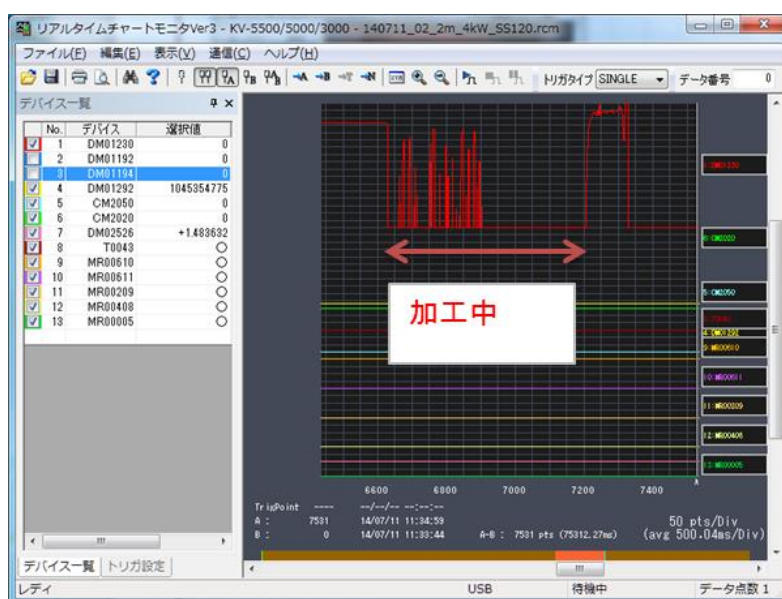


図 3-16 : 4 kWでレーザを照射した状態での溶接線識別テスト

条件No. 3～No. 6のテストについても溶接線を一部認識しているが、ノイズが多いへん多くシームトラッキングには使用ができないレベルであると考える。

表 3-5 はシャッター速度を固定し、照明出力を変化させたとき識別結果である。

表 3 - 5 : 照明出力を変化させたときの識別結果

条件No	シャッター速度	照明出力	レーザ出力	溶接線の識別結果 (注)
4	1/2000 sec	18W	4kW	△
7	1/2000 sec	25W	4kW	△～○
8	1/2000 sec	30W	4kW	△～○
9	1/2000 sec	36W	4kW	○
10	1/2000 sec	45W	4kW	△～○

(注) ○ : 溶接線識別可 △ : 溶接線識別一部可 × : 溶接線識別不可

条件No. 4のテスト結果を図3-17 (条件NO. 4 シャッター速度 1/2000sec / 照明出力 18W / レーザ出力 4kW) に示す。赤色の線が上下に振り切っており、ノイズを拾い、溶接線を全く認識出来ていない。条件No. 9のテストについては図3-18 (条件NO. 9 シャッター速度 1/2000 sec / 照明出力 36W / レーザ出力 4kW) に示すようにノイズが軽減され溶接線を認識できており、シームトラッキングの使用ができるレベルであると考えられる。すなわちノイズが立っているものの、10回以下と少なく、ほぼ連続的な波形線になっており溶接線の認識については問題のないレベルである。

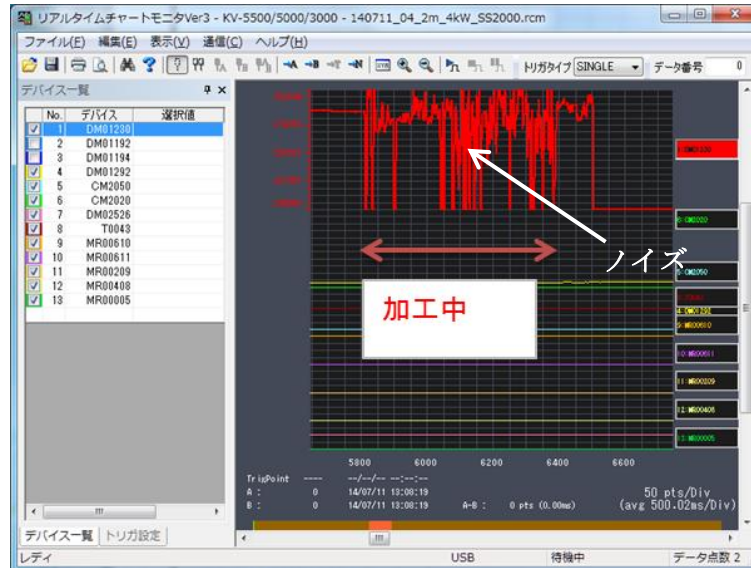


図 3 - 1 7 : 4 kWでレーザを照射した状態での溶接線識別テスト

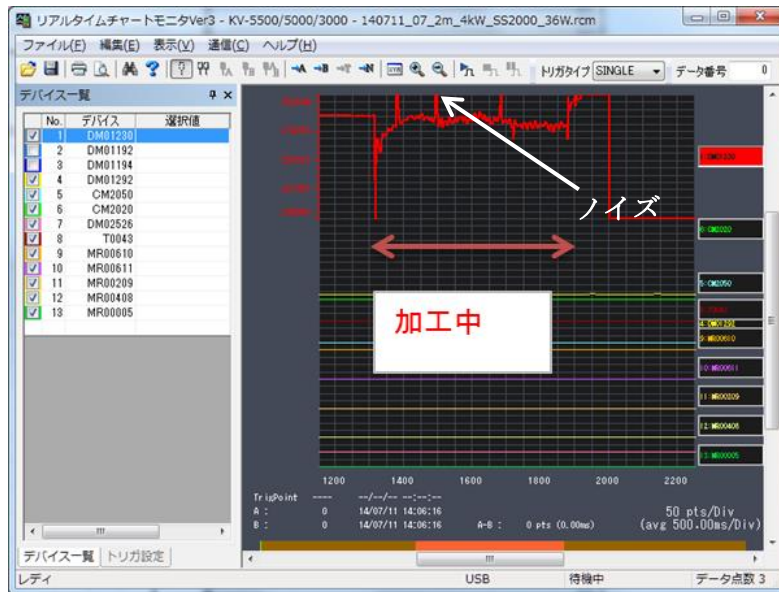


図 3-18 : 4 kWでレーザを照射した状態での溶接線識別テスト

3. 3. 2 2次元同軸シームトラッキングシステムの追従精度

測定された狙いに対するX方向のズレ量を図 3-19 に示し、平均追従精度を表 3. 6 に示す。同表から明らかのように、ズレ量は溶接線の座標位置 0 に対して、最大+0. 145 mm、最小-0. 005 mmであり、レーザ溶接の狙い許容値±0. 15 mm以下を満たしている。

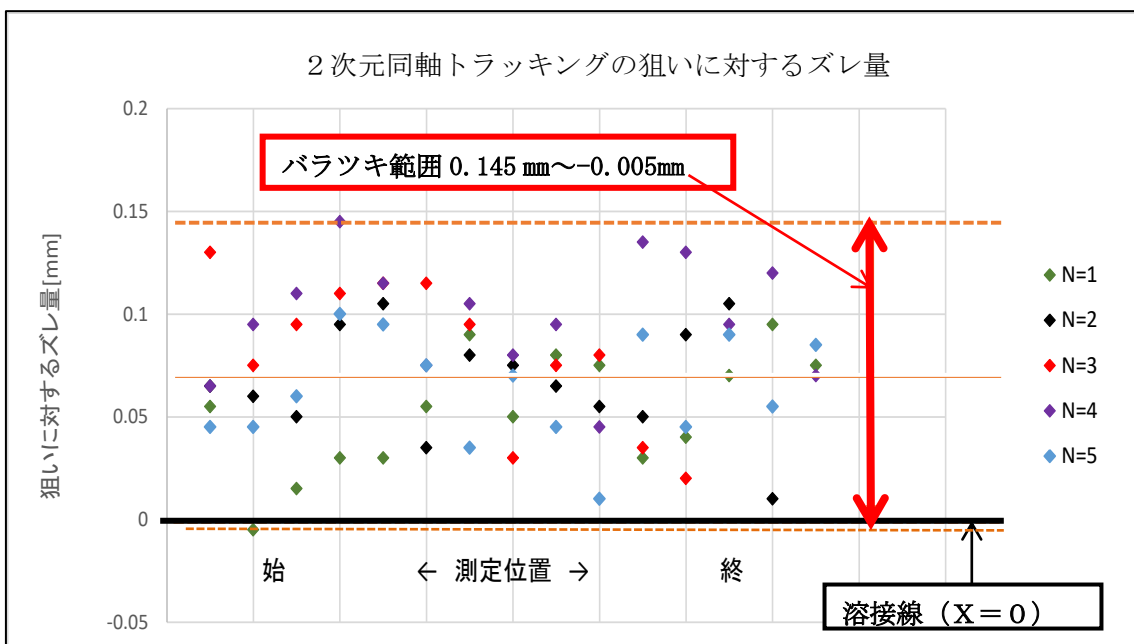


図 3-19 : 同軸トラッキング狙いに対するズレ量

表3. 6 : 2次元同軸シームトラッキングシステムの追従精度の実験結果 単位 mm

実験番号	最大狙いズレ量	最小狙いズレ量	狙いズレ量平均値
1	0.095	-0.005	0.052
2	0.105	0.01	0.067
3	0.13	0.02	0.081
4	0.145	0.045	0.099
5	0.1	0.01	0.063
評価値	0.145	-0.005	0.072

3. 3. 3 3次元シームトラッキングシステムの追従精度

図3-20より考察をすると、溶接線(X=0)に対してプラス側は最大+0.11mm、最小-0.06mmの狙い外れが生じている。マイナス側は最大+0.05mm、最小-0.15mmの狙い外れが生じている。図3-11に示すワークでは800mmの直線の溶接線に対し、±2.4mm(=±3mm/1000mm相当)の狙い外れがある場合であっても、溶接速度3m/minの時、溶接線からの狙い外れ量は、プラス側は平均0.016mm、マイナス側は平均-0.065mmを確保した。レーザ溶接の狙い許容値±0.15mm以下を満たしている。

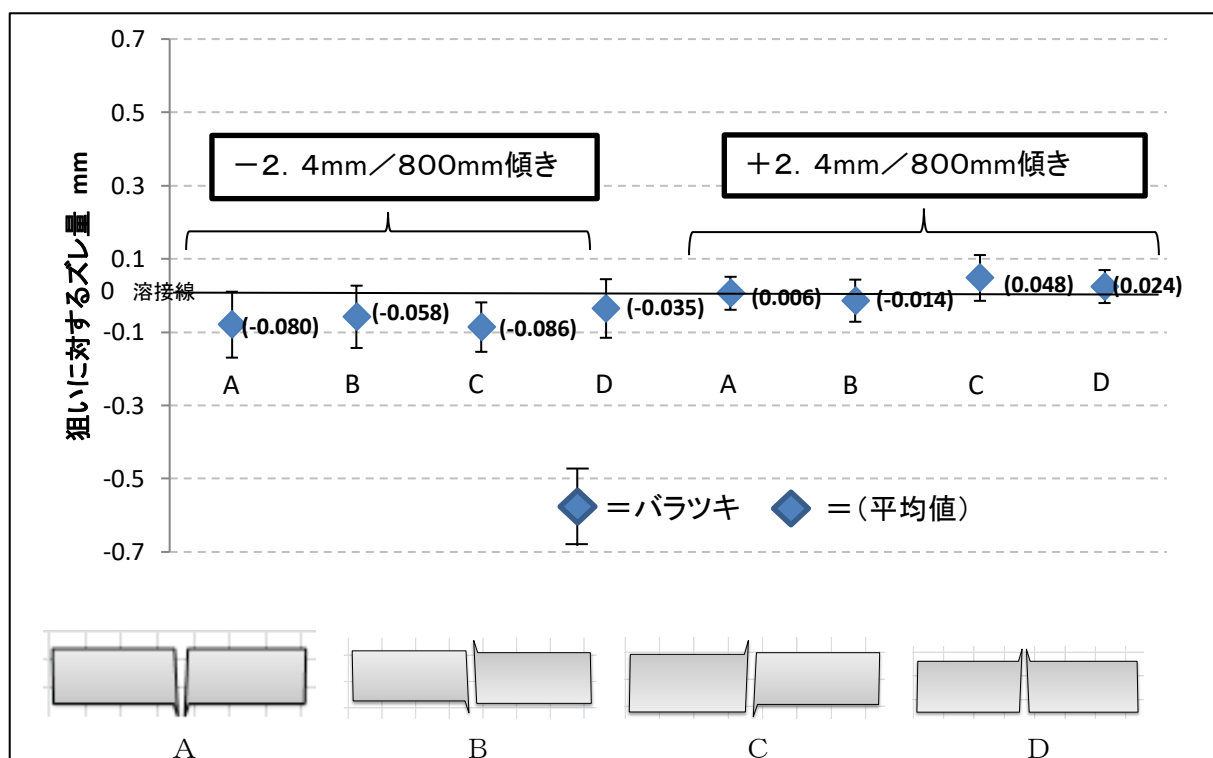


図3-20 : シヤ切り口の組合せにおけるトラッキングのズレ量

図3-21はZ軸で追従精度の軌跡を測定したものである。Z軸の追従精度は±0.4mmの精度が確認できた。厚板のレーザ溶接においては、実用上は問題が無いと判断される。

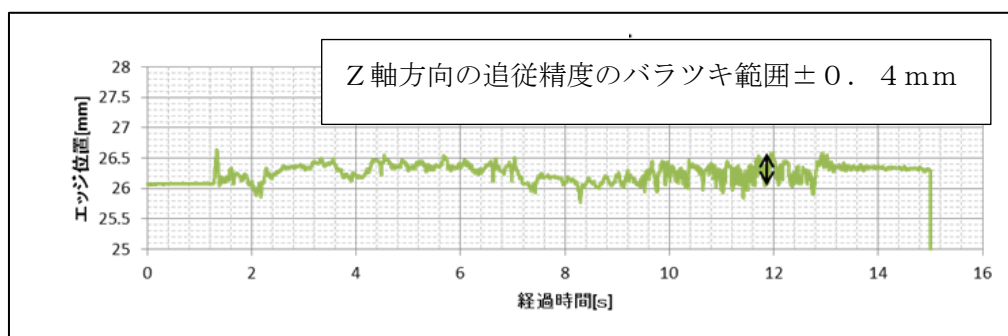


図3-21：開先エッジのZ軸方向のエッジの軌跡データ

3.4 考察

図3-19での狙いズレがプラス側によりバラついている原因を考察する。ティーチングラインが溶接線終端部で意図して-2mmズラしてある事により、溶接線は常にプラス側にある。常にプラス側にある溶接線に対するシームトラッキングセンサーの溶接線検出は、常に加工点より溶接進行方向の5mm前方位置を先読みしてデータを取っているため、ズレ量もプラス側にバラついていると考える。

3.5 まとめ

溶接線の識別、2次元同軸シームトラッキングシステムの追従精度、および3次元シームトラッキングシステムの追従精度の各々の実験の結果、次のことが明らかとなった。

- 1) 照明出力を36Wに高めることにより、溶接加工点からの発光ノイズに影響されることなく、溶接線を正しく識別することができた。
- 2) 2次元同軸シームトラッキングシステムの追従精度の平均値は、溶接線(X=0)に対して、+0.072mmであった。そのバラツキの範囲は-0.005mmから+0.145mmであった。
- 3) 3次元シームトラッキングシステムの追従精度の平均値は、溶接線(X=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軸の追従精度のバラツキ範囲は±0.4mmであった。
- 4) これらの結果より、開発した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にあることが判明した。

今後、センサーで検知した溶接線の情報に対して、位置補正のコンピュータの処理速度を上げることで、更なる高速高精度のシームトラッキングが可能と思われる。

参考文献

- 1) Claus Thomy , Michael Grupp , Matthias Schilf , Thomas Seefeld , Frank Vollertsen : WELDING OF ALUMINUM AND STEEL WITH HIGH-POWER FIBER LASERS ,ICALEO 2004 Congress Proceedings , (2004) , 8-14
- 2) Holger Braun , Friedhelm Dorsch , Steffen Kebler , Dieter Pfitzner , Volker Rominger : CAMERA-BASED LASER BEAM WELDING SENSOR IN THE NEAR INFRAED SPECTRAL RANGE , ICALEO 2011 Congress Proceedings , (2011) , 80-84
- 3) Thomas Engelhardt , Andreas Heider , Rudolf Weber , Thomas Graf : TIME-RESOLVED X-RAY ANALYSIS OF THE KEYHOLE BEHAVIOR DURING LASER WELDING OF STEEL AND ALUMINUM AT REDUCED AMBIENT PRESSURE , ICALEO 2016 Congress Proceedings , (2016) , 80-84
- 4) Thomas Seefeld : CHANCES AND CHALLENGES IN PROCESSING WITH HIGH BRIGHTNESS LASERS , ICALEO 2010 Congress Proceedings , (2010) , 530-539
- 5) 小野数彦 : 中厚板の CO₂ レーザ溶接におけるプロセス制御 , 平成 14 年レーザーシンポジウム中厚板構造へのレーザー技術の適用 , (2002) , 23-31
- 6) Xianfeng Shen , Wenhua Teng : A RAPID IMAGE PROCESSING ALGORITHM FOR STRUCTURED LIGHT STRIPE WELDING SEAM TRACKING IN LASER WELDING , ICALEO 2011 Congress Proceedings , (2011) , 118-124
- 7) Dimitrios Iakovou , Ronald Aarts , Johan Meijer , Ben Jonker : PERIMETRIC SENSOR FOR THE DETECTION AND FOLLOWING OF COMPLEX SEAM TRAJECTORIES IN ROBOTIC LASER WELDING , ICALEO 2007 Congress Proceedings , (2007) , 1049-1057
- 8) Akira Matsunawa , Masao Ushio , Yuji Sugitani , Takeshi Araya , Takayoshi Ohji ,Kenji Ohshima , Muneharu Kutsuna , Hideyuki Yamamoto , Toshihiko Watanabe : SENSORS AND CONTROL SYSTEM IN ARC WELDING , Technical Commission on Welding Processes Japan Welding Society ,(1991) , I -1- I -30
- 9) Markus Kogel-Hollacher ,Christoph Dietz , Thomas Nicolay , Joann Schmid , Matthias Schmidt , Jochen Bahnmuller , Berthold Kessler , Bert Schurmann , Matthias G. Muller :PROCESS MONITORING OR PROCESS CONTROL IN LASER MATERIALS PROCESSING , ICALEO 2001 Congress Proceedings , (2001) , #207

第4章 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システム

4. 1 緒言

大型構造物へレーザ溶接の適用を考える場合、大出力レーザ装置を用いてレーザビームのみで溶接する方法では、継手ギャップが0.15mmを超えるので適用が困難である。このような場合、レーザとアークを併用したレーザ・アークハイブリッド溶接法で溶接することが望ましい。この方法を用いると許容継手ギャップなどの適用範囲をさらに広げることが可能である。しかし、アーク溶接を併用するのでアーク光などのセンサーへの影響によりレーザ溶接用のシームトラッキング技術が適用できるか疑問である。本章では、第3章で開発したレーザ溶接用の3次元シームトラッキング技術を、レーザ・アークハイブリッド溶接に用いた場合の追従精度の調査をすることを目的とした。

4. 2 実験方法

4. 2. 1 供試材

供試材として材質SPHC鋼、サイズ620mm×100mm×4.5厚を用いた。その化学組成および機械的性能を表4-1に示す。この供試材を突合せて図4-1に示すような継手形状とした。継手ギャップを0.0mmとしたI型突合継手とした。アーク溶接用の溶接ワイヤーはYGW11を用いた。その化学組成および機械的性能を表4-1に示す。

表4-1: 供試材および溶接ワイヤーの化学組成および機械的性能

	規格	化学組成 (wt%)							機械的性能				
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ti+Zr	引張試験			衝撃試験	
									引張強さ (MPa)	降伏点 (MPa)	伸び (%)	温度 (°C)	シャルピー吸収エネルギー (J)
母材	SPHC (JIS G 3131)	0.12以下	—	0.06以下	0.045以下	0.035以下	—	—	270以上	—	31以上	—	—
溶接ワイヤー	YGW11	0.02~0.15	0.55~1.10	1.40~1.90	0.030以下	0.030以下	0.50以下	0.02~0.30	490~670	400以上	18以上	0	47以上

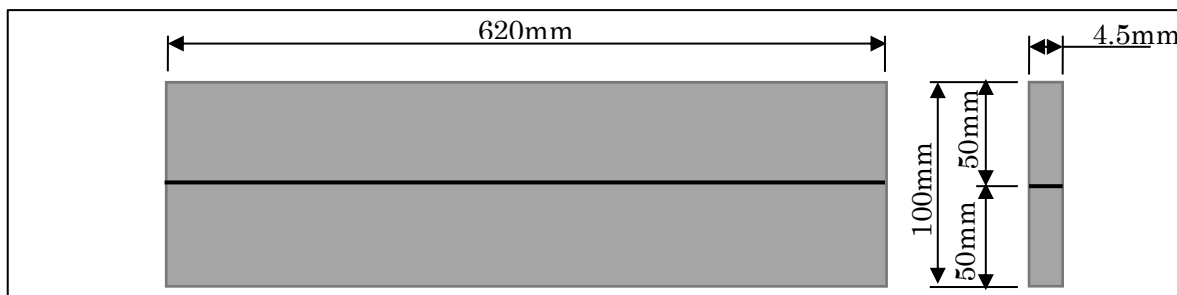


図4-1: レーザ・アークハイブリッド溶接のシームトラッキングの追従精度の確認実験に用いた供試材

4. 2. 2 溶接設備

溶接設備は図4-2に示すように、Fronious社製TPS5000MAG/MIG溶接機、60kg可搬のKUKA社製の6軸多関節型ロボット、IPGフォトニクス社製の6kWマルチモードファイバーレーザ、コア径が $\phi 200\ \mu\text{m}$ のプロセスファイバー、自社製の10kWレーザ出力対応型溶接加工ヘッドおよび開発したシームトラッキングセンサーで構成した。

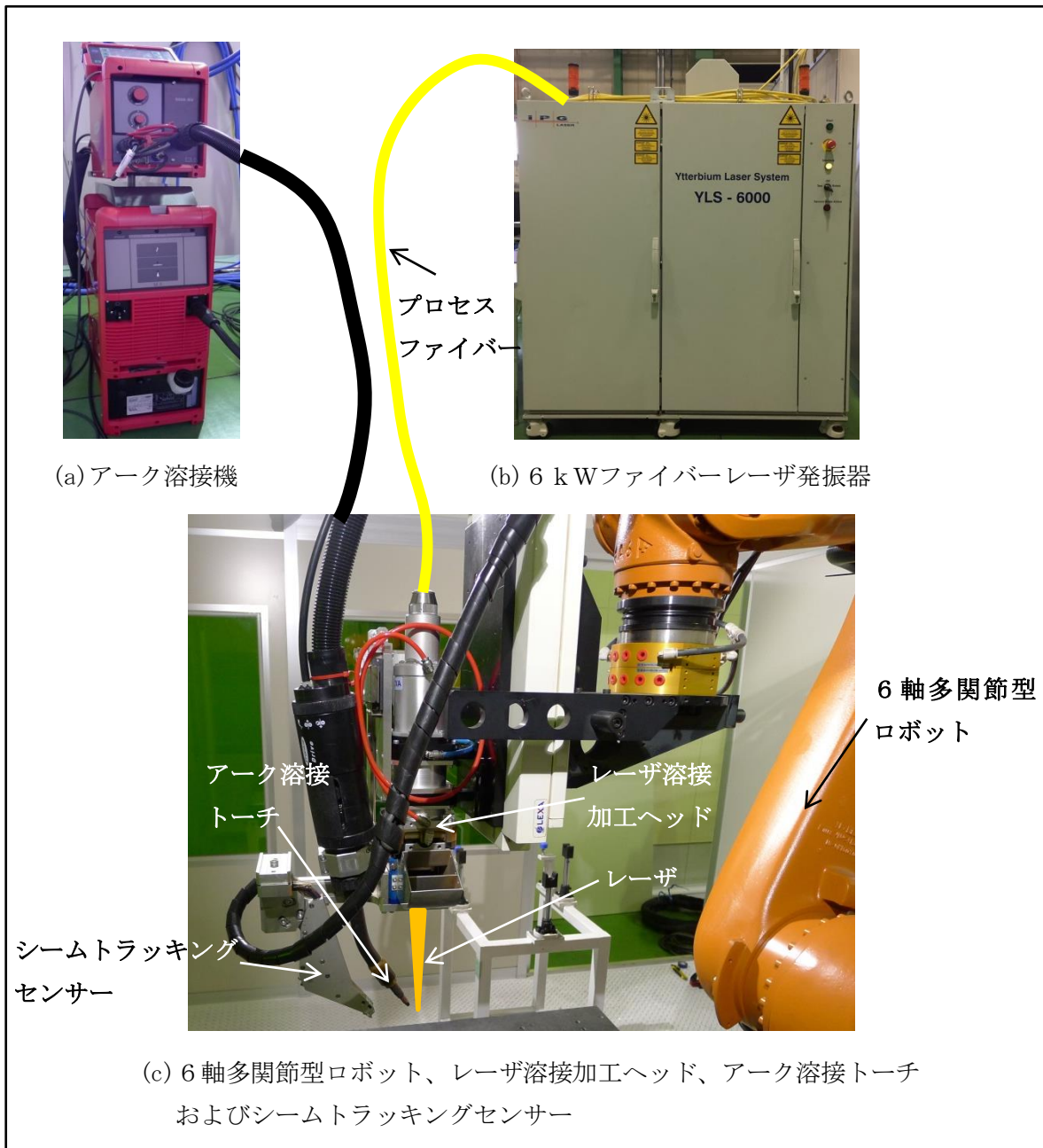


図4-2：レーザ・アークハイブリッド溶接のシームトラッキングの追従精度の確認実験に用いた溶接設備

4. 2. 3 溶接施工

板厚4. 5 mmのSPHC鋼板の突合継手を表4-2に示す溶接施工条件でレーザー・アークハイブリッド溶接を実施した。開先形状はI型開先、プロセスファイバーのコア径は200 μm、コリメートレンズの焦点距離 (f_c) を150 mmとし、フォーカスレンズの焦点距離 (f_f) を300 mmとし、その時の集光スポット径を400 μmとした。レーザー出力は2 kW、溶接速度を1. 2 m/min、焦点外し距離を0 mmとした。溶接電流は164 A、溶接ワイヤーはYGW11の線径1. 2 mmを用い、溶接ワイヤー送給速度を5. 2 m/minとした。

表4-2：溶接施工条件

条件項目	設定条件
供試材	SPHC鋼 (板厚：4. 5 mm)
開先形状	I型開先 (継手ギャップ=0. 0 mm)
プロセスファイバーのコア径	200 μm
コリメートレンズの焦点距離	150 mm
集光レンズの焦点距離	300 mm
集光スポット径	400 μm
レーザー出力	2 kW
溶接速度	1. 2 m/min
焦点外し距離	0 mm
溶接電流×アーク電圧	164 A×21. 5 V
溶接ワイヤーおよび径	JIS Z3312 YGW11、1. 2 mm径
溶接ワイヤー送給速度	5. 2 m/min

4. 2. 4 シームトラッキングセンサーの追従精度の測定方法

次に、シームトラッキングセンサーの追従精度を測定するために、図4-3に示す実験方法でレーザー・アークハイブリッド溶接を表4-2の条件で行った。すなわちロボットのティーチングプログラムでは、600 mm長さの溶接線に対して意図的に溶接ヘッドの軌跡を2 mmずらして作成した。測定箇所は溶接線の長さ600 mmに対して、図4-4 (a) に示すように溶接長さ20 mmのビードを40 mmピッチで15か所溶接を行った。溶接後、図4-4 (b) に示すようにマイクロスコープを使用して、本来の溶接線の位置と溶接後のビード中心の位置とのズレ量を測定することでトラッキング追従精度の確認をした。実験状況の写真を図4-5に示す。

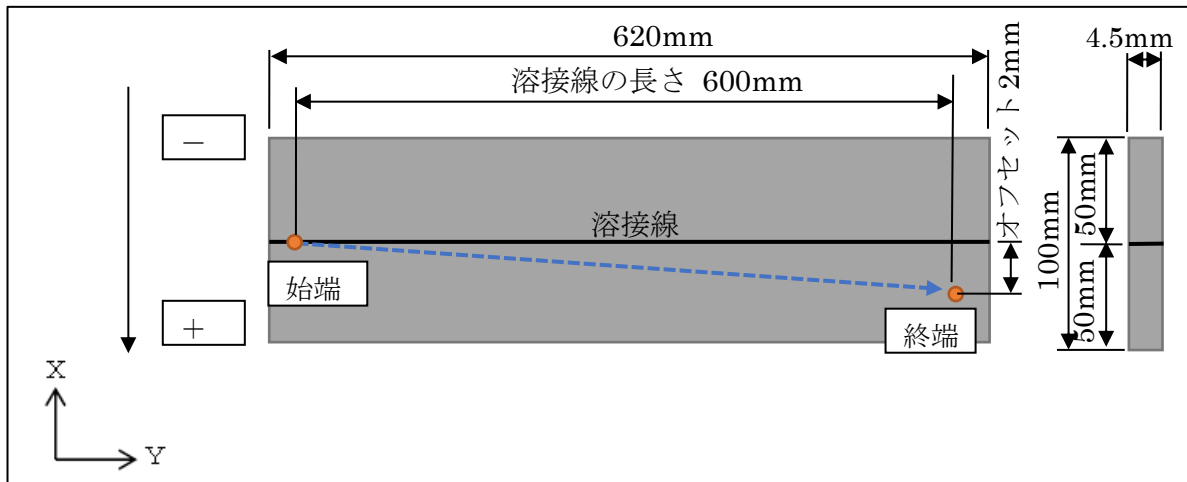


図4-3：レーザー・アークハイブリッド溶接のシームトラッキングの実験方法

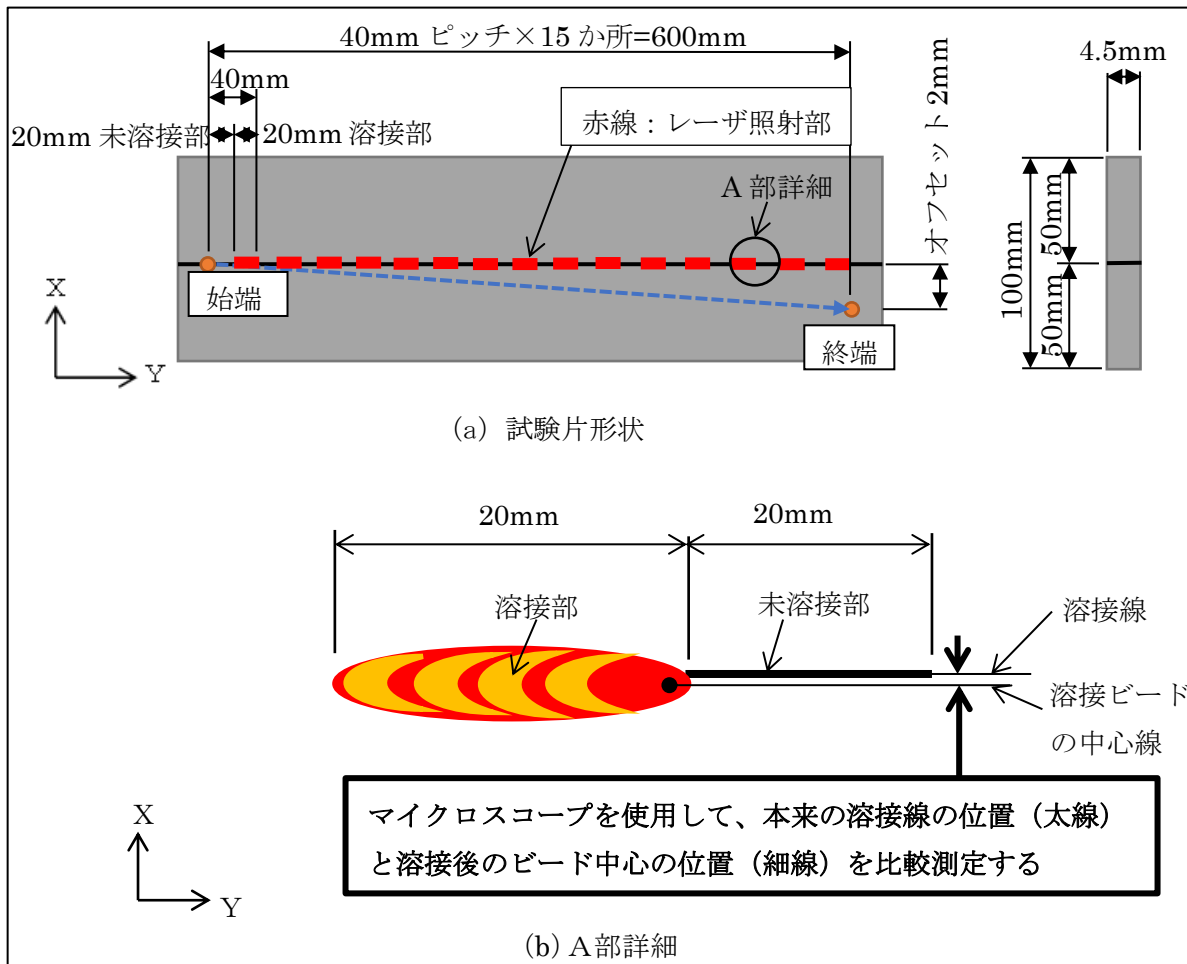


図4-4：3次元シームトラッキングの追従精度の確認方法

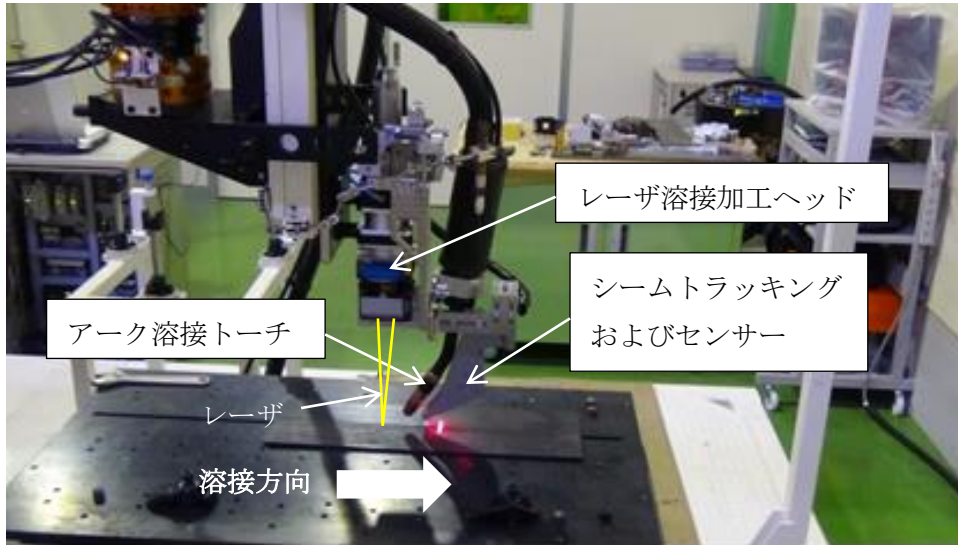


図4-5：シームトラッキングの追従精度確認の実験状況

4. 3 実験結果および考察

4. 3. 1 レーザ・アークハイブリッド溶接でのシームトラッキングの追従精度の基礎実験の結果および考察

全溶接長600mmに対して、40mmピッチで15か所 溶接長20mmの溶接を行った後、顕微鏡を使用して、本来の溶接線の位置と溶接後のビード中心線の位置を測定した結果を図4-6に示す。この図より溶接線のX座標位置0に対して最大+0.12mm、最小-0.09mmの狙いズレが生じていることが分かる。第3章と同様の理由で狙いズレはプラス側へバラついたが、板厚6mm以下の鋼材に対してのレーザー溶接における狙いズレの許容値±0.15mmを十分に満たしている。

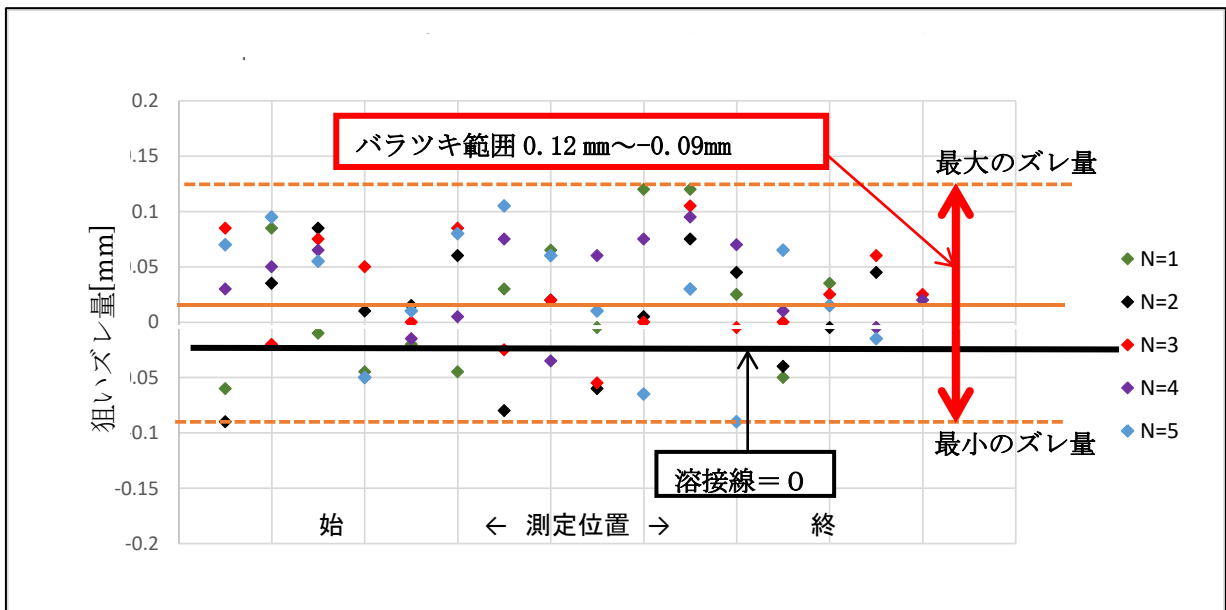


図4-6：トラッキング狙いに対するズレ量の測定結果

4. 3. 2 3次元シームトラッキング技術のレーザ・アークハイブリッド溶接への適用実験

大型溶接構造物へのレーザ・アークハイブリッド溶接の適用を考えた場合、当然溶接継手は数mと長く、溶接時間も30分とか1時間とか長時間となる。このような条件下で3次元シームトラッキング技術が実用上適用できるか検討する必要がある。そこで本節では長尺部材の試験片を用いてレーザ・アークハイブリッド溶接を行い、3次元シームトラッキングシステムの追従精度を測定した。溶接長さ1.5mの長尺形状のワークをすみ肉溶接した結果を図4-7に示す。溶接終了点を意図的に溶接線から水平方向に3mmずらしてティーチングをしている。同図にある上側のワークはシームトラッキング機能を使用して溶接を実施したもので、溶接線とビードのズレがほぼゼロである。下側のワークはシームトラッキング機能を使用しないで溶接をしたもので、溶接線とビードがズレている。これらの溶接終端部の写真を図4-8に示す。シームトラッキング機能があるものは溶接終端部を意図的に3mmずらしているにもかかわらず約0.1mmのズレしか生じなかった。シームトラッキングがないものの結果は約6mmと大きなズレが生じた。以上より溶接中に発生する熱歪み変形に対しても、このシームトラッキングシステムは溶接線の追従が可能であった。

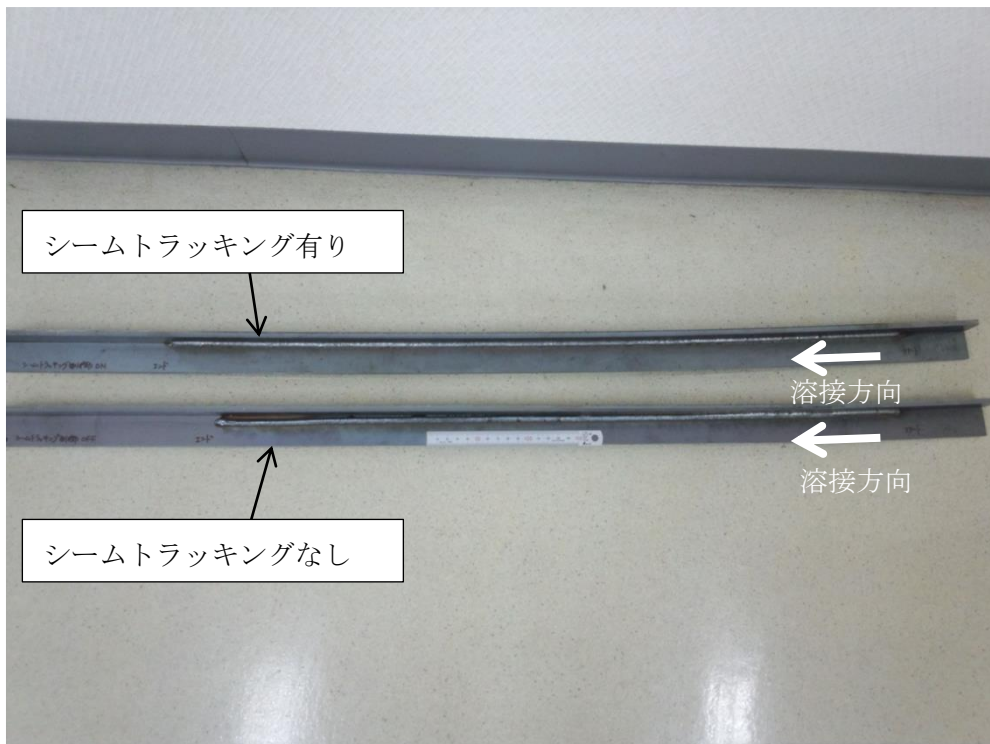


図4-7：長尺形状のすみ肉溶接

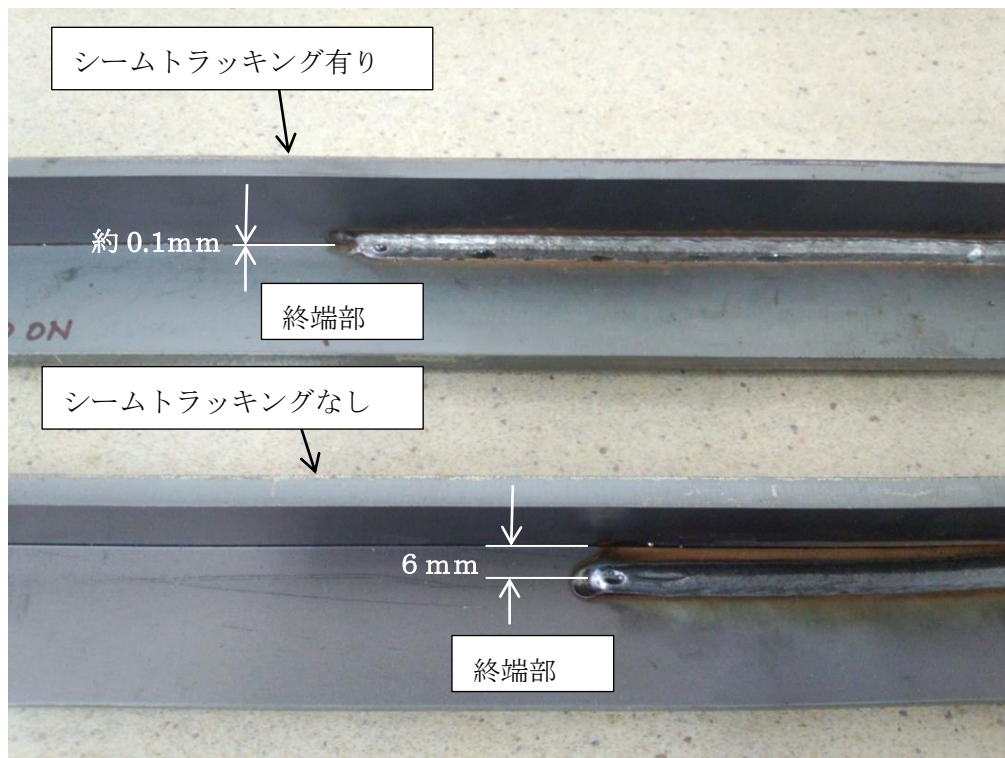


図4-8：レーザー・アークハイブリッド溶接部（終端部）の外観写真

4. 4 まとめ

3次元シームトラッキング技術をレーザー・アークハイブリッド溶接に用いた場合の追従精度について検討した結果、次のことが明らかとなった。

- 1) 突合せ継手のレーザー・アークハイブリッド溶接では、溶接線のX座標位置0に対して最大+0.12mm、最小-0.09mmの狙いズレが生じた。
- 2) すみ肉継手のレーザー・アークハイブリッド溶接では、溶接中に発生する熱歪みにより変形が生じて溶接線の追従が可能であった。

第5章 継手ギャップの変動に対する適応制御技術の開発

5. 1 緒言

大型構造物へのレーザ溶接の適用は、小型部品に比較してワークの単品精度の確保が困難であるため、継手ギャップが生じアンダーフィル、アンダーカット、融合不良といった溶接欠陥を生じ易い。また、特に長尺形状のワークは溶接中に生じる熱変形により、継手間にギャップが発生し同様の溶接欠陥が発生する。

これらの課題に対して本章では、第3～4章に述べたシームトラッキング技術と併用して、継手ギャップの変動に対する適応制御技術の開発を行った。センサーで溶接線をシームトラッキングする際に溶接継手間の継手ギャップの計測も同時に行い、その継手ギャップに応じて「溶接フィラワイヤーの送給量」、「レーザ出力」および「溶接速度」の3つのパラメータを同時可変適応制御させるものである。

本章ではこの制御技術によってワークの精度、組立精度が不十分なために生じる継手ギャップや加工中の熱変形によって生じる継手ギャップを溶接中にリアルタイムに計測をして、健全な溶接部をつくることを目的としている。

5. 2 継手ギャップ適応制御技術の原理

継手ギャップ適応制御技術の原理について図5-1に概要を示す。まず、【画像入力】においては、CCDカメラにより加工点前方40mmの未溶接線の撮像を行う。次に【座標検出】では、入力した画像の画像処理により左右の開先線とその中心位置の座標検出を行う。そして【演算処理】では原点座標と検出した開先線左右のエッジ座標およびその中心座標を比較演算し、継手ギャップ幅と原点座標との位置ズレ量をリアルタイムに演算処理する。同時に外乱（例えばスパッタ、仮付部）を取り除くロバスト処理も併用して行い、継手ギャップ適応制御およびシームトラッキングの安定化を図る。最後に【補正移動】においては、演算処理で求めた継手ギャップ幅に対応する溶接速度、ワイヤー送給量およびレーザ出力の3つのパラメータが常に最適値になるように同時可変制御をさせる。同時に溶接線開先の中心の位置との位置ズレ量を補正量としてパルスモーターのパルス値に変換後、X軸駆動モーターへ出力させ、X軸（溶接線と垂直な方向）を補正移動させる。この工程を繰り返しながら、継手ギャップの適応制御とともにシームトラッキングを行う。この演算処理のサイクル時間は約33msである。

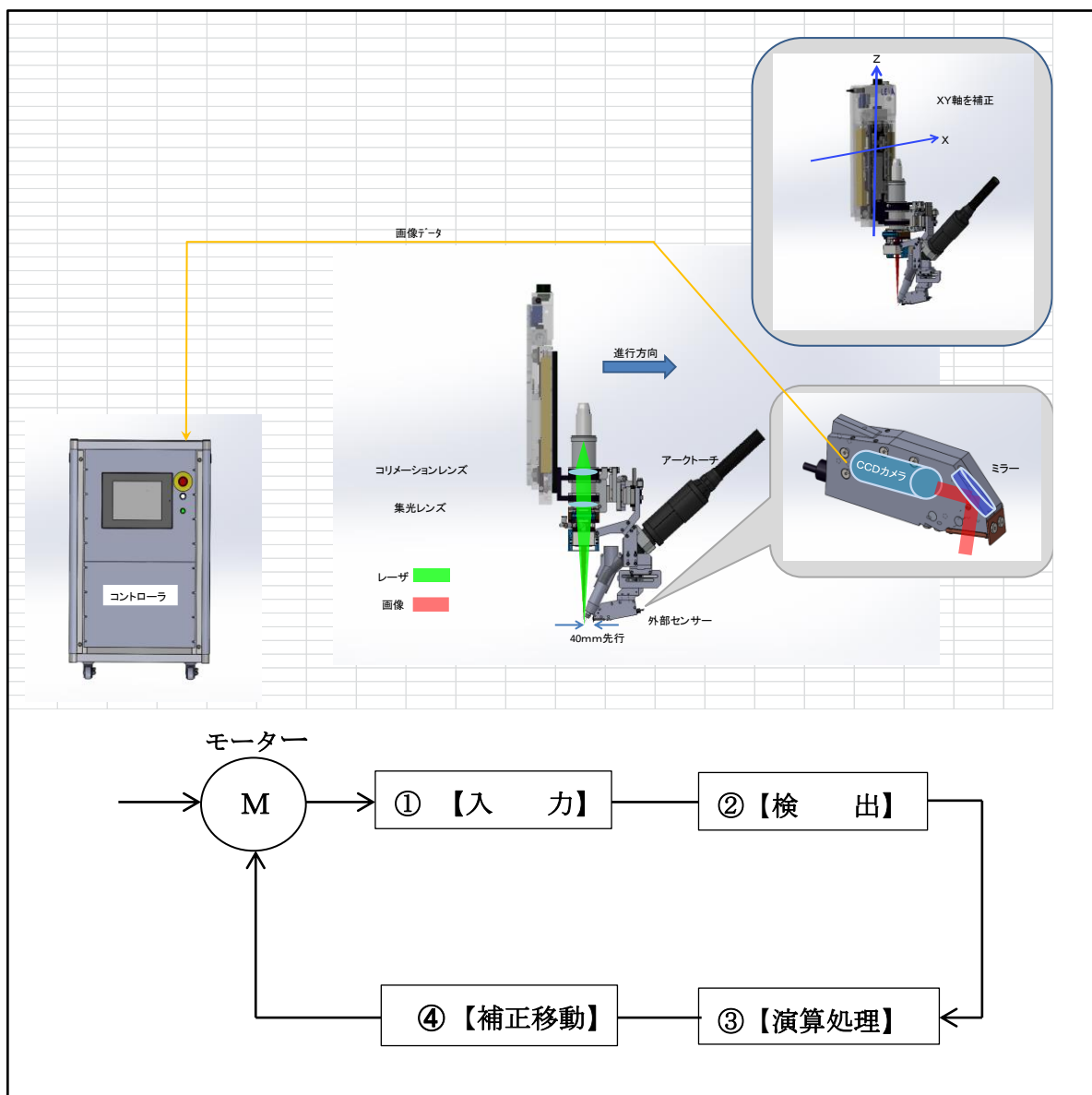


図 5 - 1 : 継手ギャップ適応制御システム

5. 3 実験方法

ここではレーザー・アークハイブリッド溶接における適応制御技術の実用性について実験した。継手ギャップの適応制御技術を確立するために、3次元シームトラッキングセンサーが溶接線を捉えると同時に、継手ギャップを計測し、リアルタイムに下記の3つのパラメータを同時適応制御させる必要がある。

- ①継手ギャップにより溶接速度を最適速度に調整する。
- ②継手ギャップ体積（継手ギャップ×板厚×溶接速度）を求め、溶接ワイヤー送給量を最適調整する。
- ③継手ギャップにより溶接ビード形状を最適化するようにレーザー出力を最適調整する。

5. 3. 1 基礎実験

まず基礎実験としては、1つの適応制御センサー（光センサー）が、溶接線をシームトラッキングして、かつ同時にギャップ幅を計測できるか検討した。供試材としては前述のSPHC鋼（板厚：4.5mm）を用いた。2枚のSPHC鋼板は突合せ継手で両端の裏面を仮付溶接しており、継手ギャップがない図5-2 a)に示すサンプルAと溶接線途中に0.75mmと1.0mmの継手ギャップを設けた図5-2 b)に示すサンプルBを用いて実験した。まず、レーザを出さずに適応制御センサーの検出機能を確認するため、表5-1に示すように3軸直行型ステージ、焦点距離(f_o)150mmコリメートレンズ、焦点距離(f_f)300mmフォーカスレンズのおよび光切断方式の光センサーを用いて継手ギャップと溶接線の検出能力を調べた。図5-3に示すように、ステージ上に供試材を配置し、走行軸へレーザ加工ヘッドとセンサーを装着した。レーザの加工点と光センサー間距離は40mmあり、レーザ加工ヘッドより先行したセンサーが溶接線と継手ギャップを測定する。このときの測定条件は表5-2に示すように走行速度3m/minおよび焦点外し距離を0mmとした。

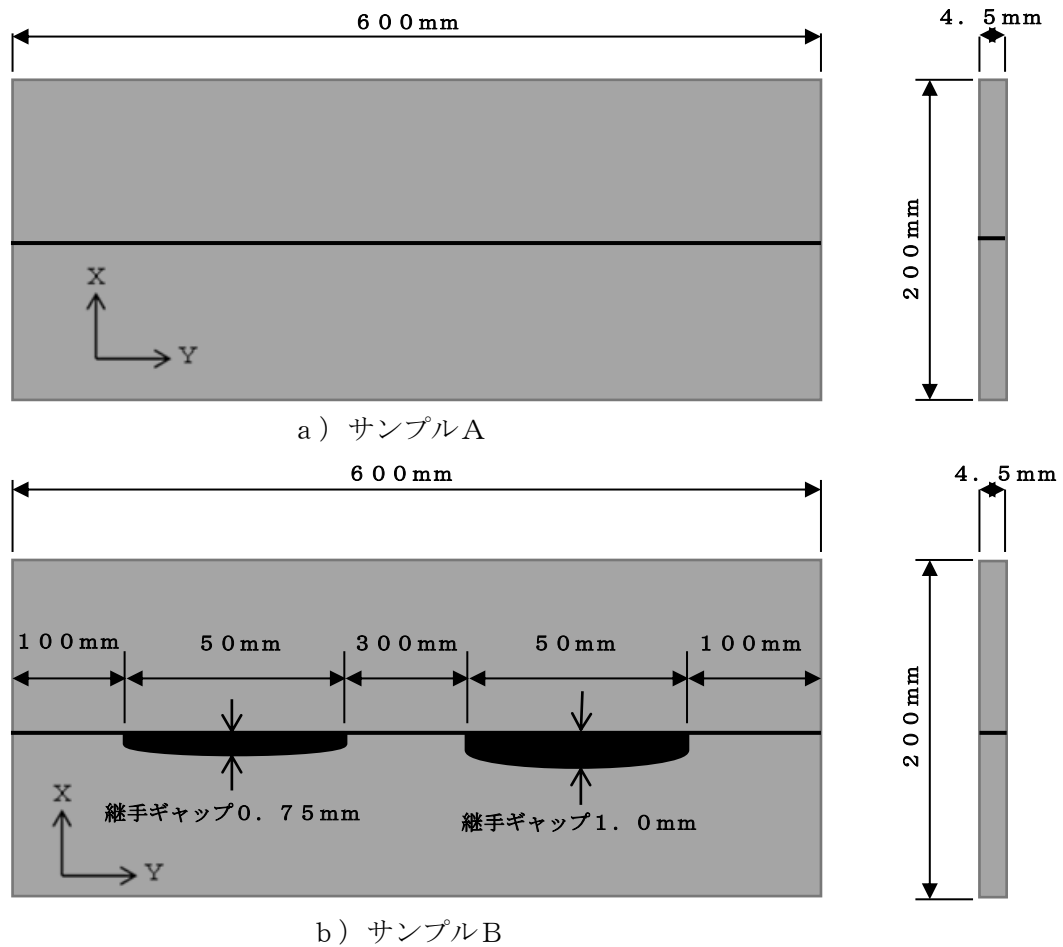


図5-2：レーザなしで継手ギャップと溶接線を測定する時のサンプル

表 5 - 1 : 継手ギャップと溶接線を測定するための実験設備

用いた実験設備	仕 様
ステージ	3 軸直行型ステージ
コリメートレンズ	1 5 0 mm
集光レンズ	3 0 0 mm
適応制御センサー (光センサー)	光切断法方式

表 5 - 2 : レーザなしで継手ギャップと溶接線を測定する時の実験条件

条件項目	設定条件
走行速度	3 m / m i n
焦点外し距離	0 mm

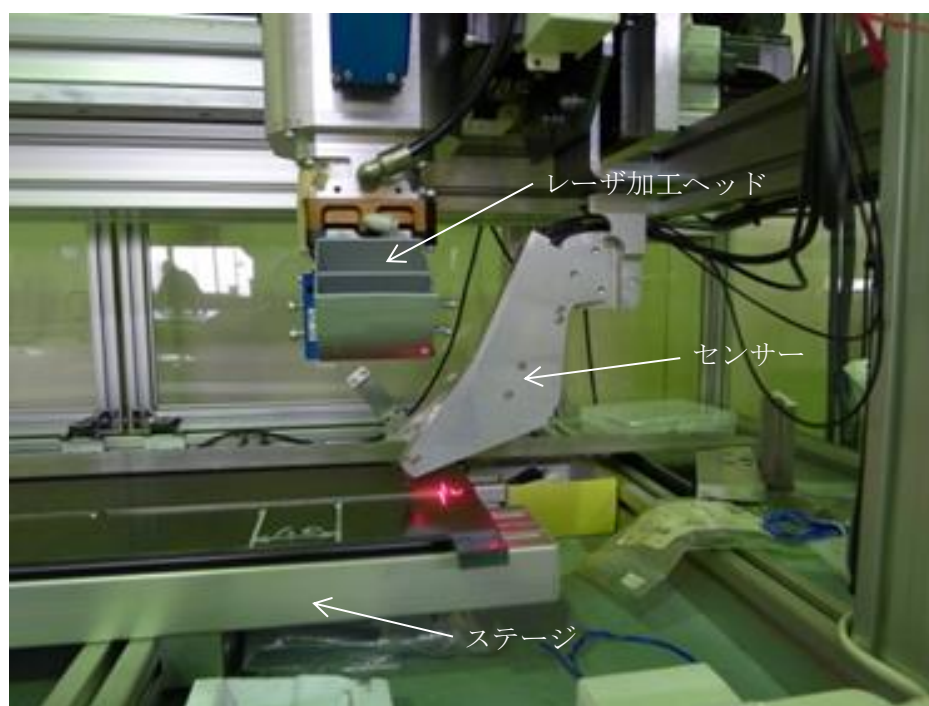


図 5 - 3 : 実験状況

また、次にレーザー・アークハイブリッド溶接装置に装着し、この適応制御技術の性能について検討した。レーザー・アークハイブリッド溶接加工ヘッドに継手ギャップの適応制御センサーを図 5 - 4 に示すように装着して溶接線と継手ギャップを正確に測定できるか表 5 - 2 の条件で検討した。すなわち、走行速度は 3 m / m i n で、焦点外し距離は 0 mm で行った。なお、この実験では継手ギャップのある場所ではギャップの中央部をシームトラッキングするようにプログラミングしており、レーザーおよびアークを出力しないで確認

実験を行った。実験は図5-4に示すように、適応制御センサーを配置しレーザー照射点は前方40mmに検出ラインを設けて継手ギャップと溶接線を検出した。図5-5は図5-4の拡大図である。

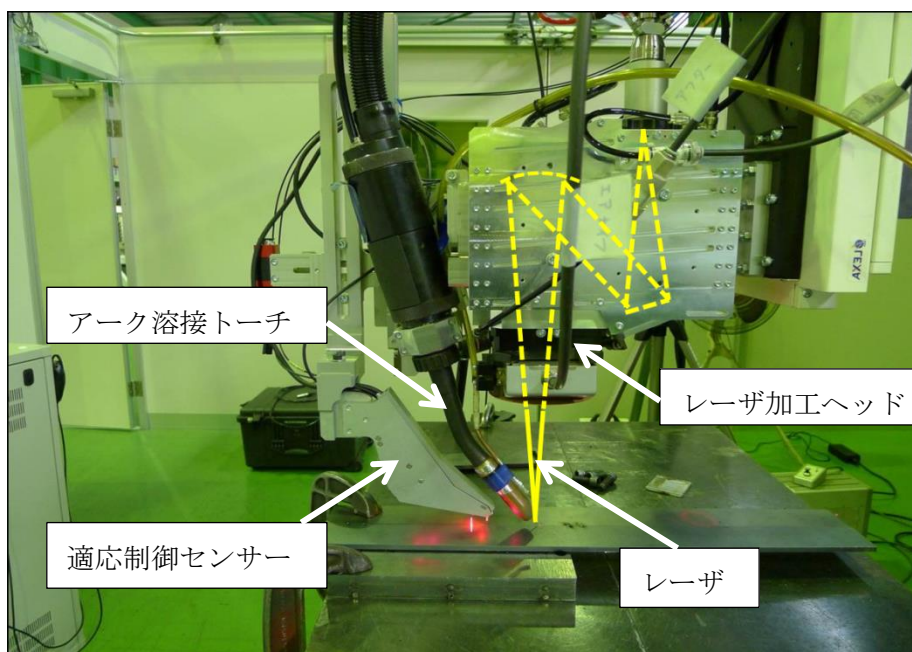


図5-4：溶接加工ヘッドと周辺機器の構成

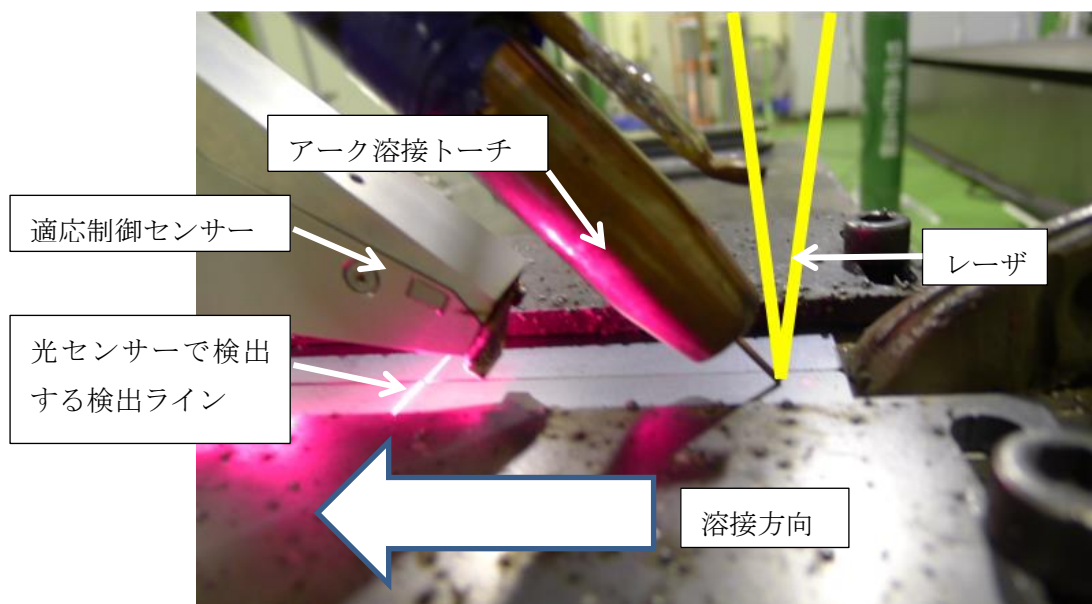


図5-5：継手ギャップの適応制御の実験システム

5. 3. 2 応用実験

継手ギャップが変動する場合の適応制御技術の実用性について更に検討した。供試材としてSPHC鋼（板厚：6 mm）を用いてI形突合せ継手とし、図5-6に示すように片方を継手ギャップ0 mmとし、他方を2.0 mmとして用いた。用いた溶接実験設備としては表5-3に示すように60 kg可搬のKUKA社製の6軸多関節型ロボット、IPGフォトリクス社製の6 kWマルチモードファイバーレーザ、Fronios社製TPS 4000 MAG/MIG溶接機および光切断方式の光センサーを用いた。その装置の一部を図5-4に示す。実験条件は表5-4に示す条件で実施した。継手ギャップを0 mmから2 mmまで変動させた不均一な継手ギャップがある場合は、ある一つの溶接条件のみでは全ての溶接長にわたって良好なビードを得ることが困難である。今回はこのような不均一な継手ギャップに対して、前述の3つのパラメータを制御した適応制御技術が有効であるかどうかレーザ・アークハイブリッド溶接を行い確認した。



図5-6：溶接前の継手形状

表5-3：実験設備

条件項目	設定条件
6軸多関節型ロボット	KR 60 HA（繰り返し位置決め精度 $\pm 50 \mu\text{m}$ ）
ファイバーレーザ発振器	YLS-6000（6 kW）
アーク溶接機	TPS 4000（400 A）
適応制御センサー	光切断方式

表5-4：実験条件

条件項目	設定条件
供試材	S P H C 鋼 (板厚 : 6 mm)
継手ギャップ	0. 0 mm ~ 2 mm
プロセスファイバーのコア径	ϕ 2 0 0 μ m
コリメートレンズの焦点距離	1 5 0 mm
集光レンズの焦点距離	3 0 0 mm
集光スポット径	ϕ 4 0 0 μ m
レーザ出力	3 kW
溶接速度	1. 2 m / m i n
焦点外し距離	0 mm
溶接電流	2 5 0 A
溶接ワイヤー	J I S Z 3 3 1 2 Y G W 1 1 ϕ 0. 9 mm
ワイヤー送給量	可変制御

5. 4 実験結果と考察

5. 4. 1 基礎実験結果

レーザおよびアークを出さないで行った基礎実験の結果は次に示す通りである。

継手ギャップのないサンプルAの測定結果を図5-7に示す。サンプルAは溶接線5. 0 mmに対して+0. 06 mmから-0. 03 mmのズレ範囲でシームトラッキングができたことを確認した。次に継手ギャップを0. 75 mmおよび1. 0 mm設けたサンプルBの測定結果を図5-8に示す。サンプルBは、継手ギャップ0. 75 mmの部分を通じた時、最大移動量が4. 65 mmであり、溶接線5. 0 mmとの差は0. 35 mmである。すなわち、0. 75 mmのおおよそ半分であることより、ギャップの中央付近をレーザ加工点が通過したと思われる。1. 0 mmギャップも同様にギャップの中央付近をレーザ加工点が通過した時、最大移動量が4. 56 mmであり、溶接線5. 0 mmとの差は0. 44 mmである。おおよそ1. 0 mmの半分であることより、ギャップの中央付近をレーザ加工点が通過したものと思われる。ギャップのない継手部は、溶接線5. 0 mmに対して+0. 01 mmから-0. 04 mmのズレ範囲でシームトラッキングができた。

このことより、開発した適応制御技術は許容差の $\pm 0. 15$ mmの範囲内にあるので、十分な実用性があると判断できる。



図5-7：サンプルAの測定結果

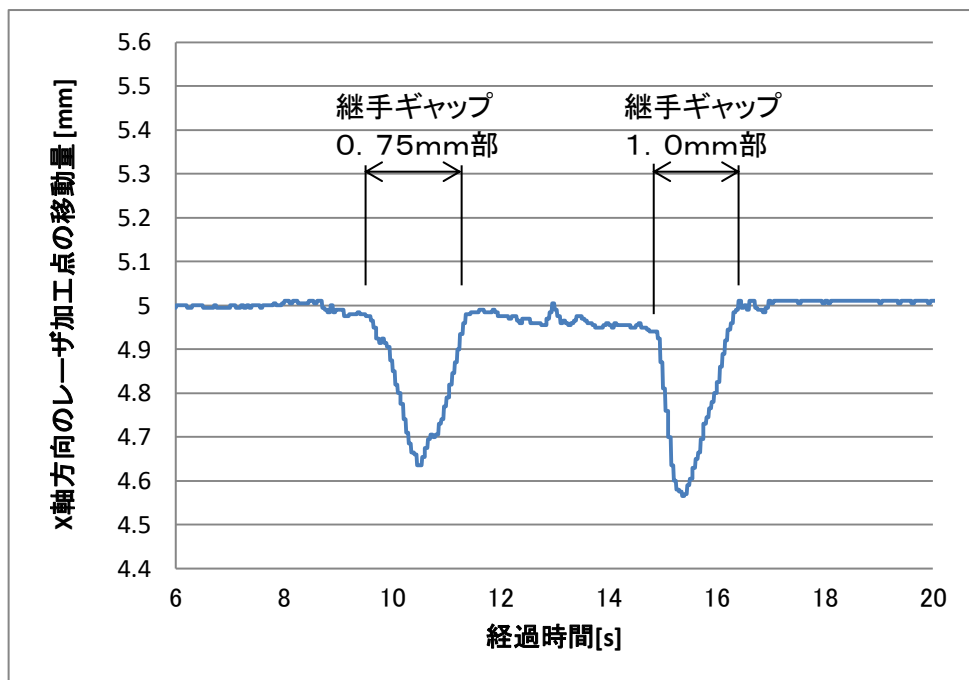


図5-8：サンプルBの測定結果

5. 4. 2 応用実験結果

次にレーザおよびアークを出力してハイブリッド溶接した応用実験の結果を示す。不均一な継手ギャップを設けた試験片に対して適応制御をしていない場合の継手は図5-9に示すように、溶接条件が適正でない場所（A-A）では、スパッタが多発したり、図5-10に示すように、大きく深いノッチ状のアンダーフィルが発生した。一方、継手ギ

ギャップ適応制御をした場合の継手は、図5-11および図5-12に示すように溶接ビードの外観はスパッタが少なく、表裏ともアンダーカットやアンダーフィルがなく良好なビードであった。継手ギャップが狭い場所では、ビード幅が狭く、継手ギャップが広い場所ではビード幅が広がっており、継手ギャップの幅に応じて溶接ワイヤー送給量を調整する適応制御がされていることが分かる。

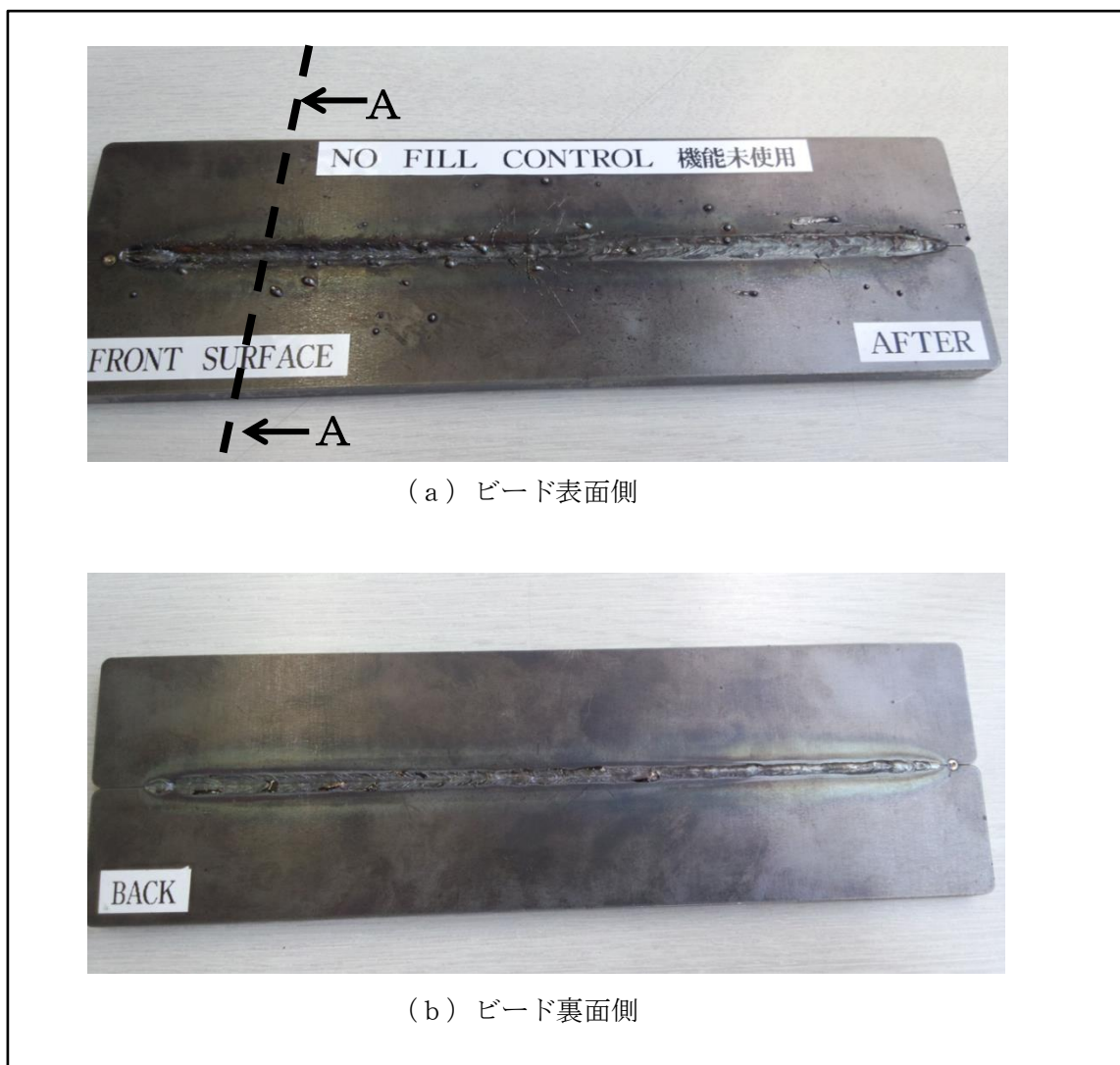


図5-9：継手ギャップ適応制御をしないでハイブリッド溶接した継手の外観写真

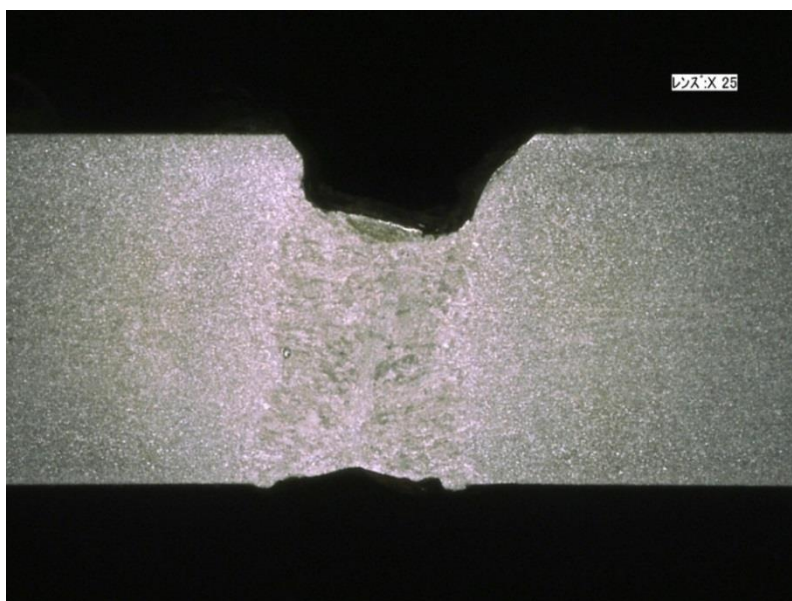
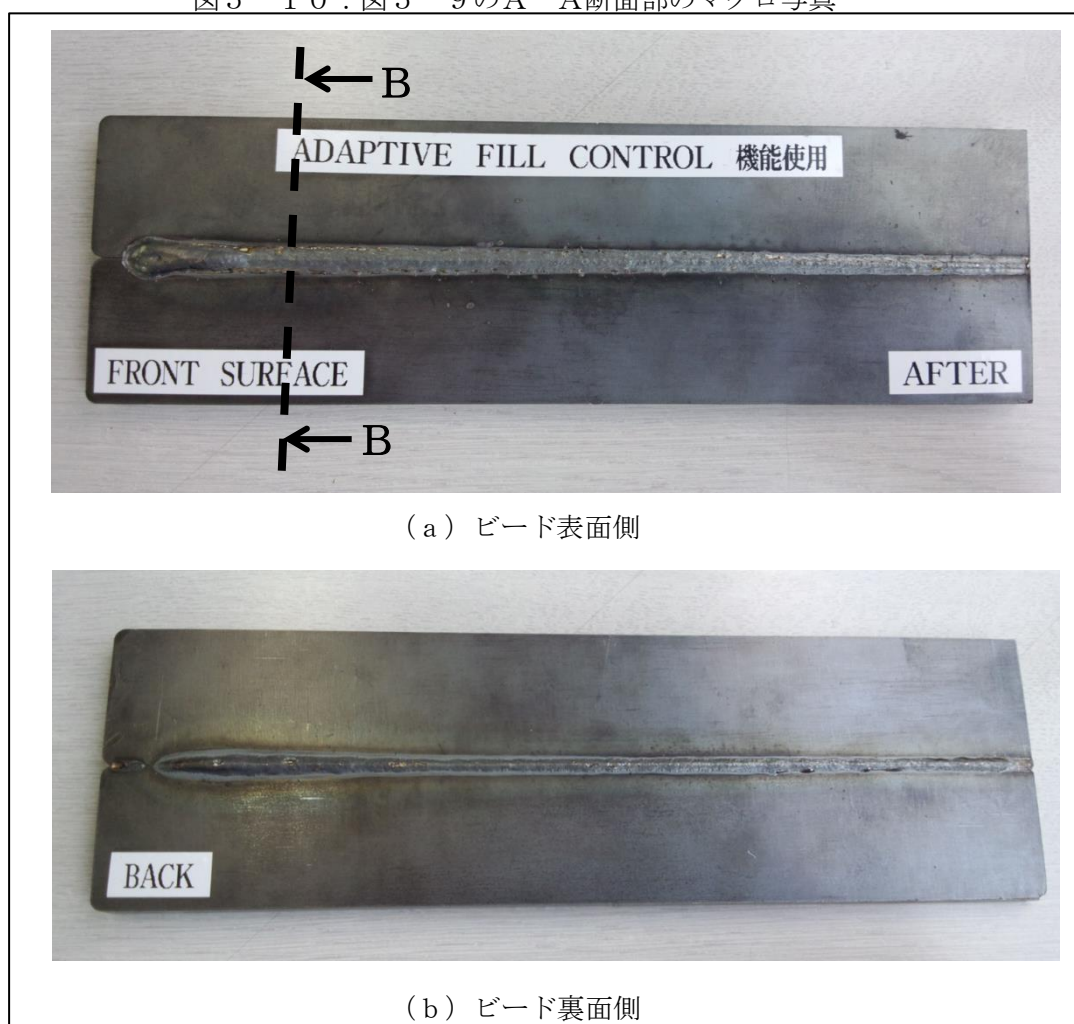


図5-10：図5-9のA-A断面部のマクロ写真



(a) ビード表面側

(b) ビード裏面側

図5-11：継手ギャップ適応制御した継手の外観写真

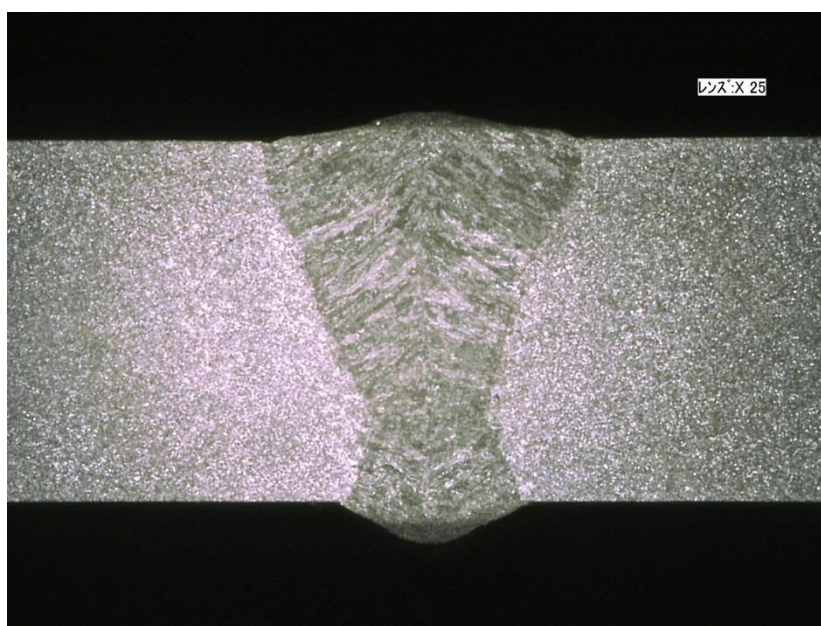


図5-12：溶接継手を適応制御して得られた溶接ビードのB・B断面マクロ

5-5 まとめ

基礎実験ではレーザとアークを出力しない状態で、継手ギャップに対して適応制御が可能であるか検討し、適応制御センサーが、溶接線をシームトラッキングしながら、同時にギャップ幅を計測できることが分かった。応用実験ではSPHC材（板厚：6 mm）の突合せ継手において、継手ギャップを0～2 mmに変動させた継手ギャップに対して、レーザとアークを出力して、同時に継手ギャップ適応制御機能を使用することでアンダーフィルなどのない健全な溶接ができることを確認した。

3次元シームトラッキング技術と継手ギャップ適応制御技術を併用させることにより、大型構造物へのレーザ溶接の適用の拡大は可能と考える。また、大型構造物以外にも、プレス加工品のようなワーク精度の確保が難しく、レーザ溶接の適用ができなかった構造物又は部材に対しても有効ではないかと考える。センサーで検知した溶接線や継手ギャップの情報に対して、位置補正やパラメータ補正のコンピュータの処理速度を上げることが、今後の更なる高速高精度の適応制御につながると思われる。

第6章 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

6. 1 緒言

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、本溶接を行う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に判断しながらレーザ溶接をしなければならぬ。仮付ビードの輪郭形状を溶接線と誤認しないように、著者らは独自の画像処理技術を開発し、その技術を用いて画像処理の際に関連性の大きい4つの監視パラメータのデータを抽出して、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開発することを目的とした¹⁾²⁾。

6. 2 仮付ビードの追従処理方法

6. 2. 1 濃度値の変化

仮付ビードのある部材のレーザ溶接においては、シームトラッキングできるように追従処理を行う必要がある。そこで本研究では4つの監視パラメータ ①濃度値の変化、②トレンドエッジの欠陥検出、③検出セグメントの標準偏差および④検出セグメント近似直線によるエッジ角度を抽出して処理する方法を検討した。仮付ビードがある場合とない場合の画像処理におけるセンシングエリア (B) の平均濃度値を図6-1および図6-2に示す。

このデータから、画像処理における測定エリア (B) の濃度値の変化を読み取り、溶接線であるか仮付ビードであるかを判断させた。Aエリアが仮付ビードである。B部のセンシングエリア内において、画像処理により求めた平均濃度値はCエリアに表示され、仮付ビードがある状態で109.480と低く、仮付ビードがない状態で120.116と高い値になっており、仮付ビードがある場合とない場合で平均濃度値にあきらかに差があることが分かる。よってある限界値を設けると仮付ビードであるか否かが判別できる。

6. 2. 2 トрендエッジ欠陥検出

仮付ビードがある場合とない場合の画像処理における欠陥量の比較写真を図6-3および図6-4に示す。この画像処理におけるトレンドエッジ欠陥とは図中の黄点 (検出セグメント) が直線から離れていたもので、トレンドエッジ欠陥量とはその時の直線からの距離を表すような値である。この時の総欠陥量を読み取り、溶接線であるか仮付ビードであるかを判断させた。Aエリアが仮付ビードであり、Bエリアに仮付ビードを判定するパラメータとして総欠陥量が表示されている。仮付ビードがある状態では16.613となっており、仮付ビードがない状態では0.000となっている。仮付ビードがある場合とない場合で差があることがわかる。このことより、仮付ビードと溶接線の区別が可能である。

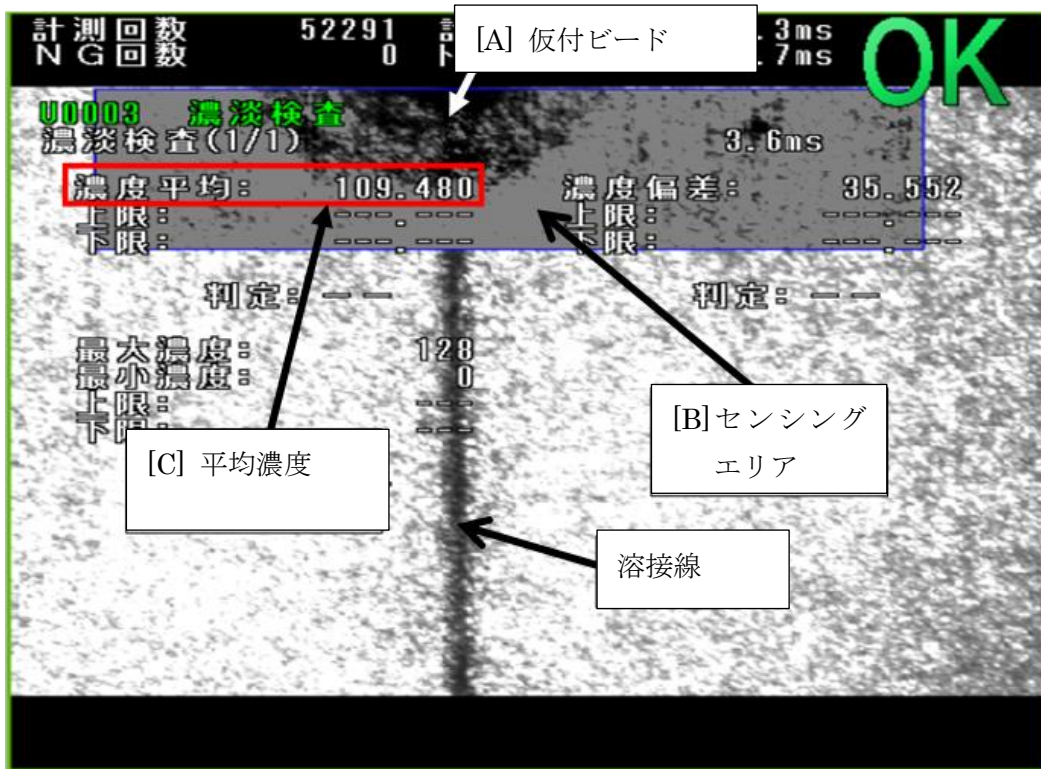


図 6 - 1 : 仮付ビードがある場合の画像処理における濃度値

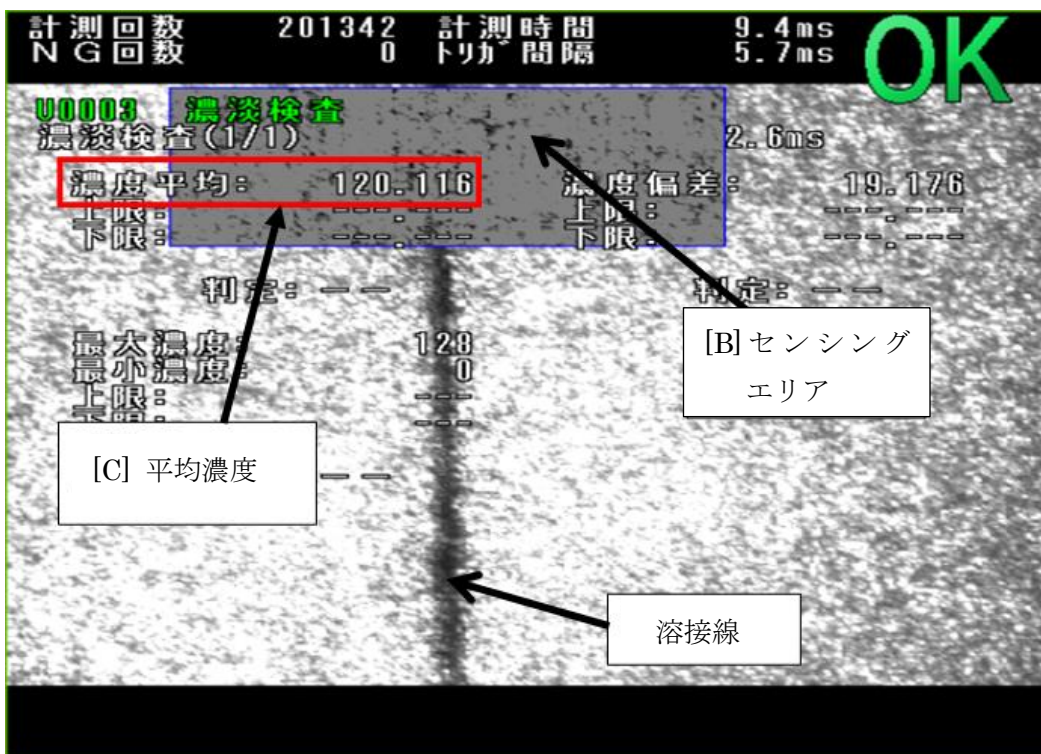


図 6 - 2 : 仮付ビードがない場合の画像処理における濃度



図6-3：仮付ビードがある場合の画像処理データに示されたトレンドエッジの欠陥量

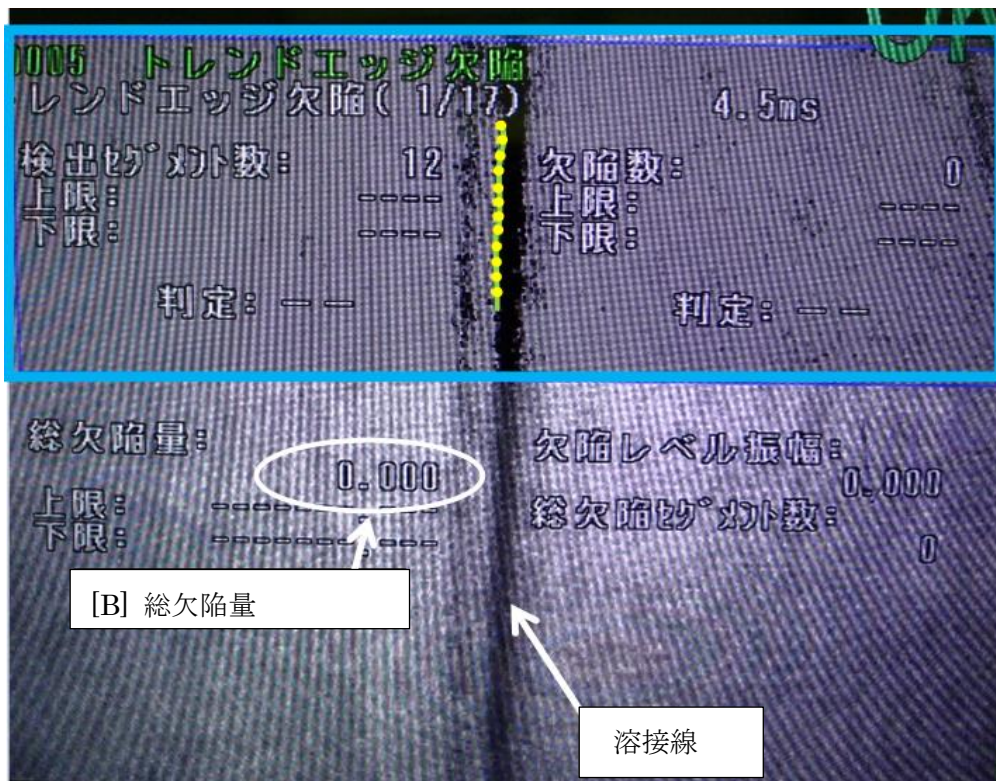


図6-4：仮付ビードがない場合の画像処理データに示されたトレンドエッジの欠陥量

6. 2. 3 検出セグメントの標準偏差

次に、仮付ビードがある場合とない場合の画像処理における検出セグメントの状態の比較写真を図6-5および図6-6に示す。画像処理によりエッジを検出する際に最大数が16の点群である検出セグメントでエッジライン位置を検知し、その位置の平均値を出力する。仮付ビードがある場合は、各検出セグメントにバラつきが生じる。図6-5では検出セグメントがX方向にバラつきが発生している。このX方向のバラつきをラインからの距離として標準偏差で求めることにより仮付ビードの判定を行うことができる。一方、図6-6では複数の検出セグメントが溶接線のエッジラインに沿って平行に並んでいるので、この標準偏差は0に近く、仮付けのある場合と区別できる。このことから未溶接線があることが判る。

6. 2. 4 検出セグメント近似直線によるエッジ角度

仮付ビードがある場合とない場合の画像処理における検出セグメント角度の比較写真を図6-7および図6-8に示す。図6-5によって表示されている検出セグメントの近似直線(D線)とセンシングエリア内の基準軸であるX軸との角度(θ)によって、仮付ビードであるかどうかの判定を行う。D線がセグメント近似直線、角度 θ がセグメント近似直線との角度となっており、仮付ビードがある場合は、その角度 θ は126.255度である。角度 θ は仮付ビードがない場合は、90.623度となっている。よって、仮付ビードがある場合とない場合で角度に変化があり、仮付ビードと溶接線とを区別できる。

6. 2. 5 仮付ビードの検出のためのAND/OR制御

上述の4つのパラメータを、単独あるいは複数のどれかを任意に選択し、選択したパラメータを「AND/OR」で組み合わせることで、仮付ビードの検出をより正確に行うことができるようにシームトラッキングシステムの安定化を図った。具体的には、実験で求めた値を、ユーザ側で標準偏差、濃度値、角度エッジ、エッジ欠陥検出の各パラメータのそれぞれの閾値を入力することにより、仮付ビードの持つ情報を正確に捉えることが可能となり、より正確に仮付ビードを検出することが可能である。それぞれ、パラメータの閾値を目的に合わせて入力設定をする画面を図6-9に示す。また、各パラメータの組合せの選択画面を図6-10に示す。それぞれのパラメータのスイッチを左から選択をしていく。例えば、図6-10のA部の標準偏差のスイッチのみを選択にした場合、標準偏差の制御で仮付ビードと判定がされた場合のみに、仮付制御を伴ったシームトラッキングを行う。B部の濃度値、「AND」、標準偏差の3つのスイッチを選択した場合、濃度値を用いた制御と標準偏差を用いた制御の両方で仮付判定がされた場合のみに、仮付制御を伴ったシームトラッキングを行う。また、C部の7つのスイッチを選択した場合、エッジ欠陥検出または、エッジ角度または、濃度値または、標準偏差のどれか一つでも仮付判定がされた場合に、仮付制御を伴ったシームトラッキングを行う。これら4つのパラメータを「A

ND」あるいは、「OR」で自由に組み合わせることによって、さまざまな状況での仮付制御が可能となり、シームトラッキング機能を用いたレーザー溶接施工の安定化につながる。

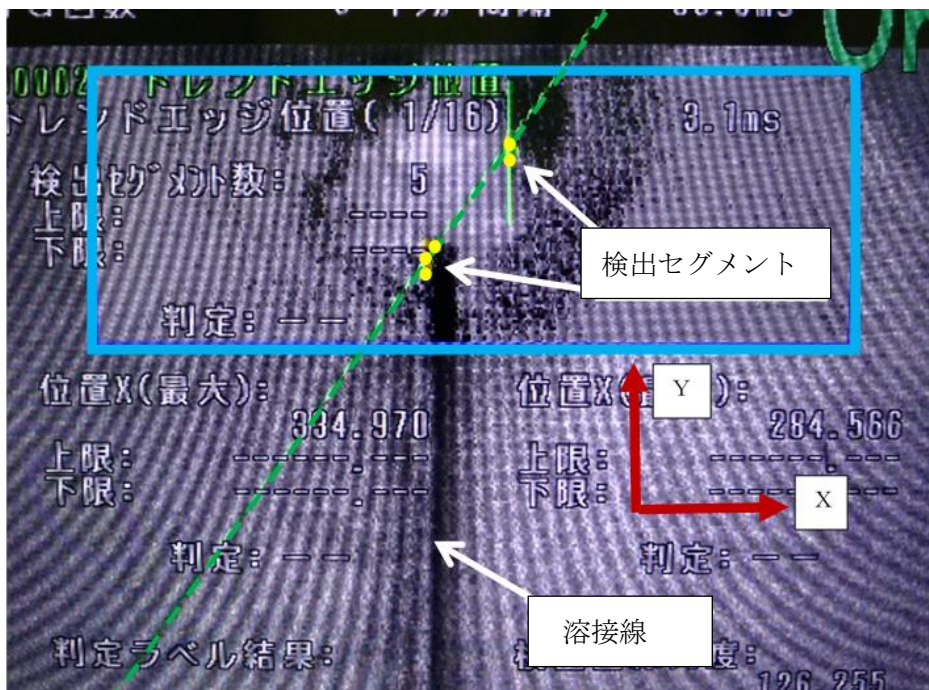


図6-5：仮付ビードがある場合の画像処理データに示された検出セグメントの状態

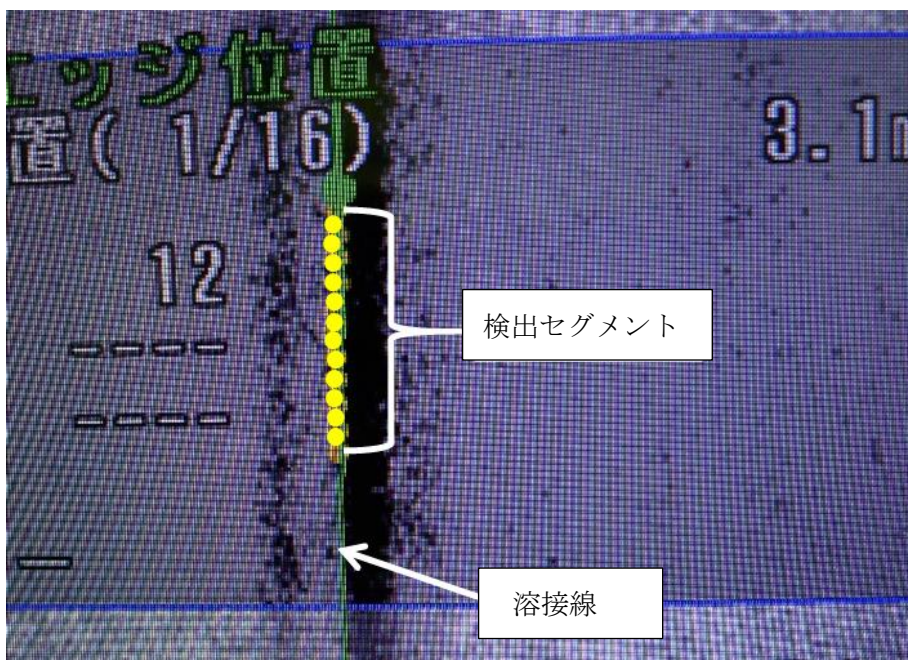


図6-6：仮付ビードがない場合の画像処理データに示された検出セグメントの状態

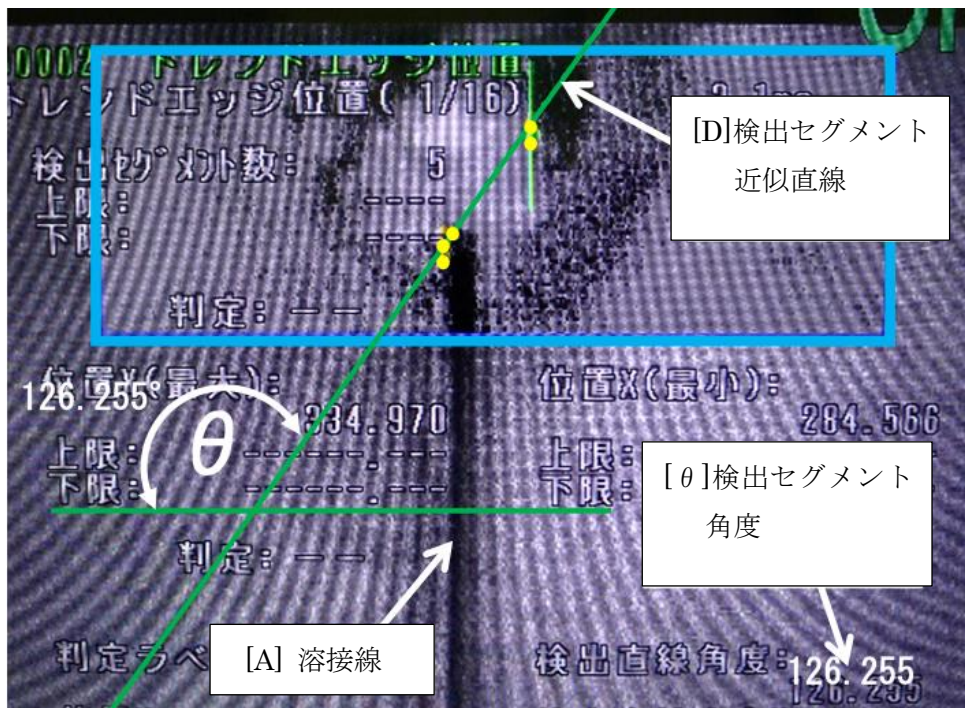


図6-7: 仮付ビードがある場合の画像処理データに示された検出セグメント角度

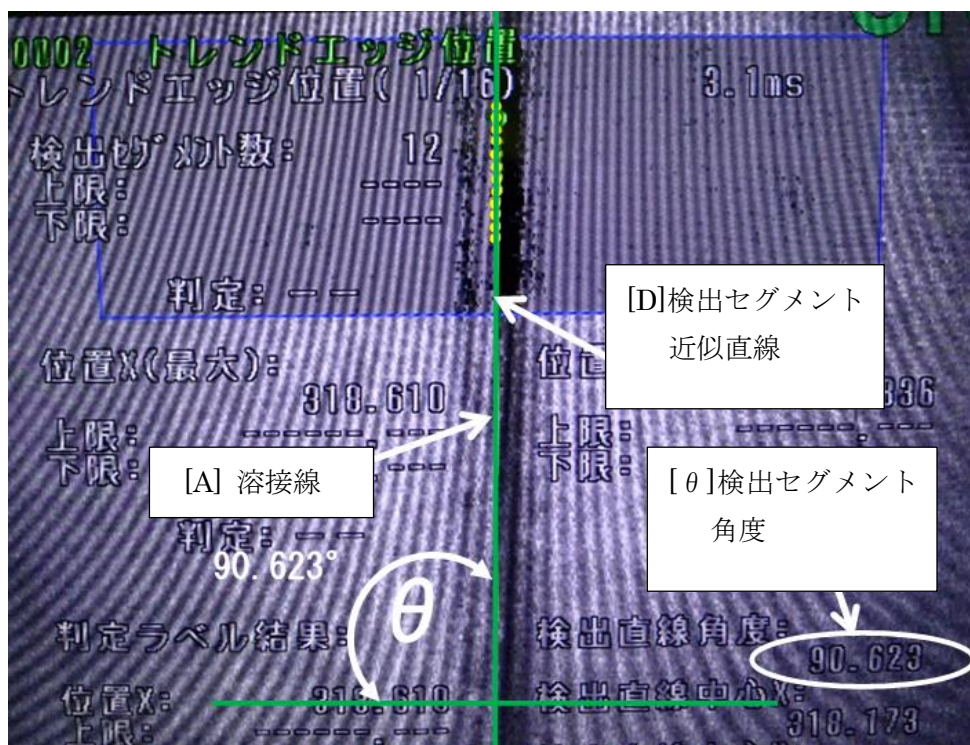


図6-8: 仮付ビードがない場合の画像処理データに示された検出セグメント角度

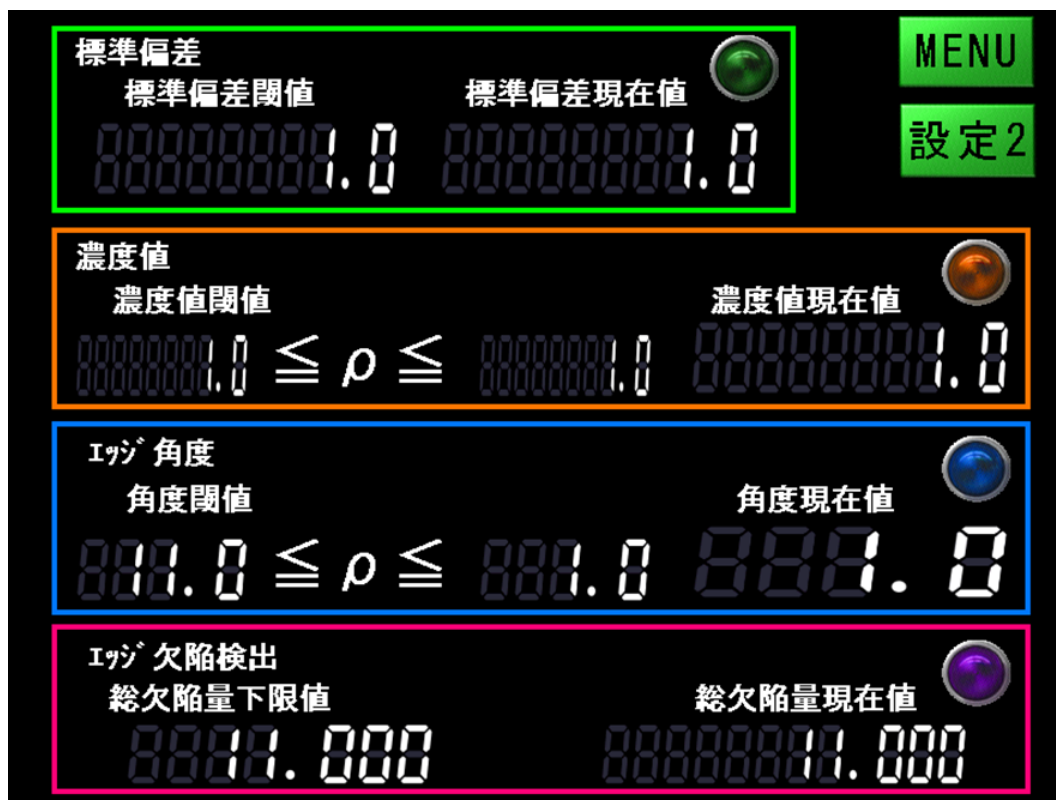


図 6 - 9 : 仮付ビード制御用 4 種パラメータの閾値入力設定画面

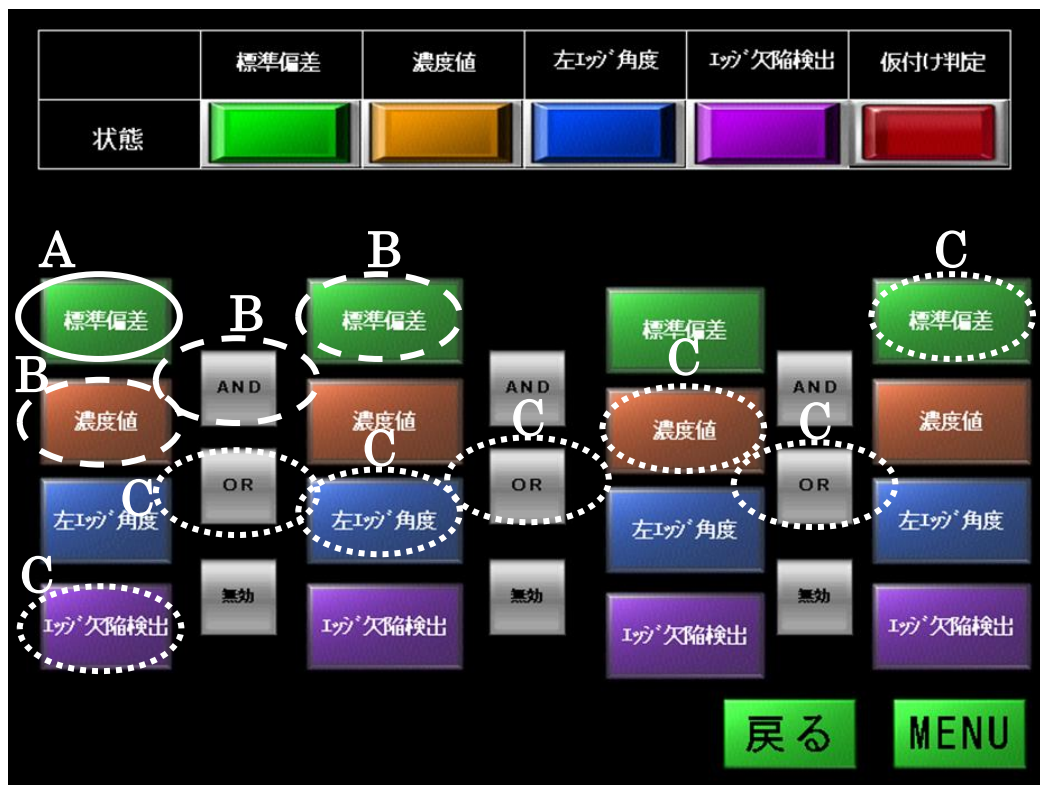


図 6 - 10 : 各パラメータの組合せの選択画面

6. 2. 6 仮付ビードの追従処理の実験

板厚2.6mmのSPCC鋼材の突合せ継手材を用いて、2次元同軸シームトラッキングシステムに仮付制御の機能がある場合と、ない場合での溶接線の追従精度の比較実験を行った。仮付制御の4つのパラメータは、どれか一つでも判定された場合、仮付制御を機能してシームトラッキングを行うようにした。機器は1軸走行型テーブル、レーザ溶接加工ヘッドは自社製の10kWのレーザ出力対応型溶接加工ヘッドを用いた。その時の実験条件を表6-1に示す。実験ではレーザを出力せずに同軸カメラの映像から溶接線および仮付ビードの追従精度の検証をした。実験で用いた1軸走行型テーブルを図6-11に示す。1軸走行型テーブルは500mmのストロークがあり、走行速度は0.1m/min(1.7mm/s)刻みで、0.1m/min(1.7mm/s)から10m/min(166.7mm/s)までの速度の設定が可能である。試験片を図6-12に示す。SPCC鋼板 板厚2.6mm×長さ410mm×幅30mmの試験片2枚を突合せ継手にして、試験片のスタートポイントからエンドポイントまで走行させて検証をした。仮付ビードの拡大写真を図6-13に示す。ここでは、直径φ3.2mmのレーザスポット溶接で仮付ビードを作製した。なお、本実験では開先がない突合せ継手で開先ギャップを0mmとして実験をした。

表6-1：ファイバーレーザの溶接中における仮付ビード識別のための実験条件

条件項目	設定条件
供試材	SPCC鋼(板厚:2.6mm)
6軸多関節型ロボット	KR60HA(繰返し位置決め精度±50μm)
ファイバーレーザ発振器	YLS-6000(最大出力6kW)
プロセスファイバーのコア径	200μm
コリメーションレンズの焦点距離	150mm
集光レンズの焦点距離	300mm
集光スポット径	400μm
加工点・センサー間距離	5mm
レーザ出力	0kW
溶接速度	2m/min
焦点外し距離	0mm



図6-11：実験で用いた1軸走行型テーブルの外観

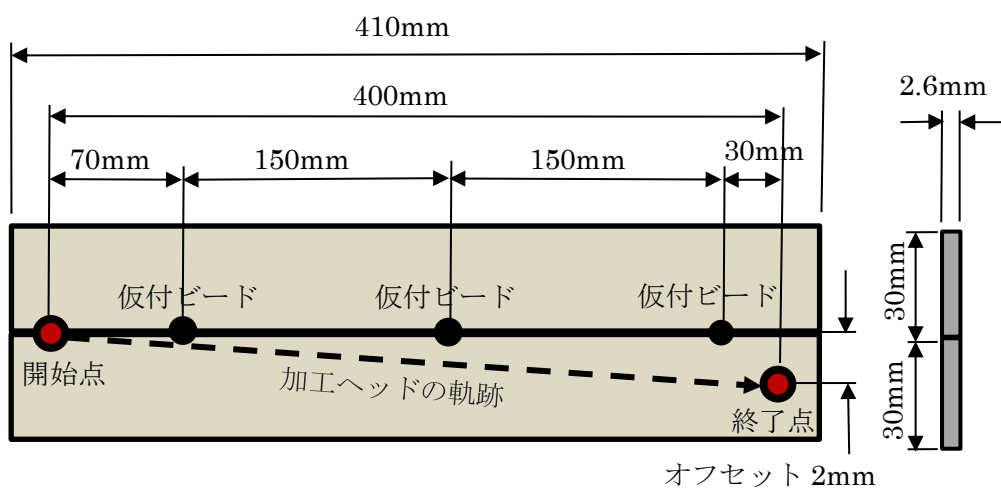


図6-12：シームトラッキングの実験のための仮付された供試材

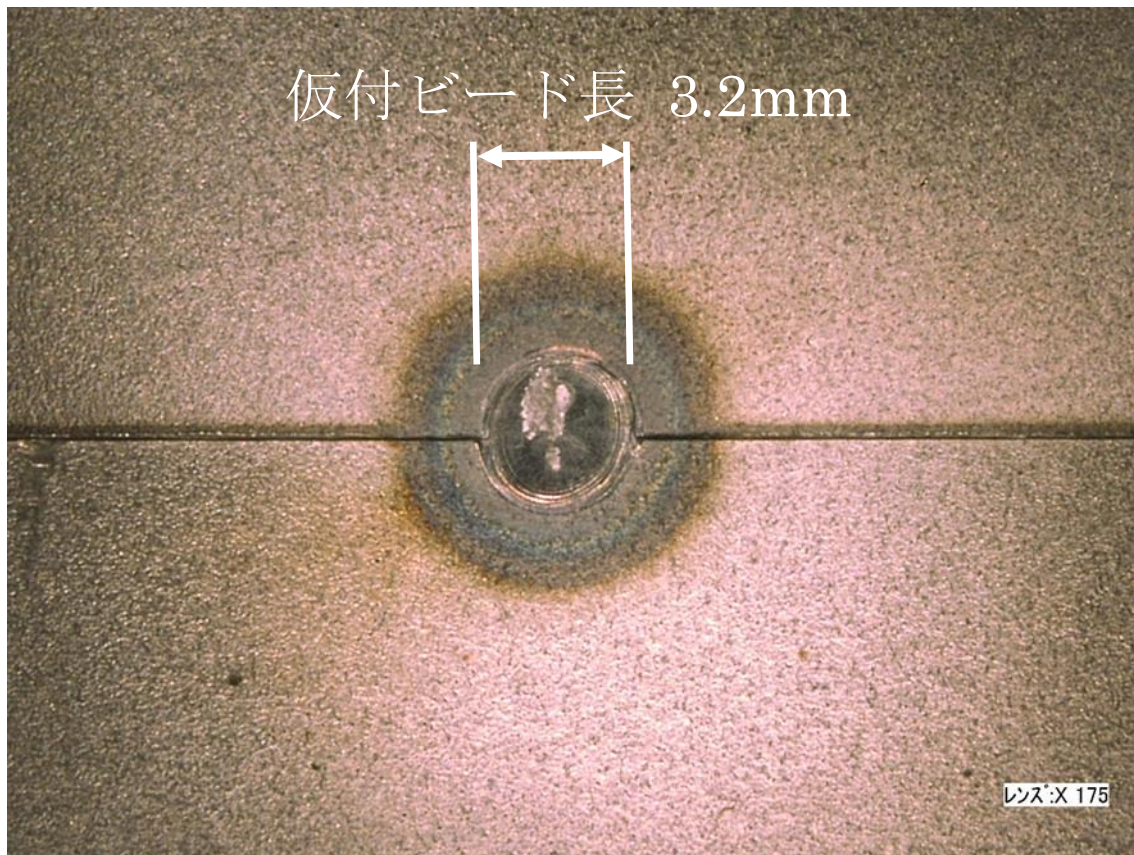


図6-13：ファイバーレーザーによる仮付ビードの外観

6. 3 仮付ビードありの場合の2次元同軸シームトラッキング溶接の追従精度の確認

6. 3. 1 実験方法

ここでは溶接線の狙い外れに対して、溶接不良の感受性をより敏感にし、より厳密な評価をすることを目的に板厚1.2mmのSPCC材の突合せ継手材を用いて、仮付ビードありの場合の2次元同軸シームトラッキングシステムの追従精度の確認実験をした。実験条件を表6-2に示す。プロセスファイバーのコア径を $300\mu\text{m}$ 、加工点・センサー距離を5mm、2kWのレーザー出力で溶接速度を $3\text{m}/\text{min}$ ($50\text{mm}/\text{s}$)、焦点外し距離を0mmで実際にレーザー溶接を行い検証した。試験片を図6-14に示す。SPCC鋼板 板厚1.2mm×長さ610mm×幅30mmの試験片2枚を突合せ継手にして、150mmピッチで4ヶ所の仮付溶接をした。なお、本実験では開先がない突合せ継手で開先ギャップを0mmとして実験をした。

表 6-2 : 2次元同軸シームトラッキングの追従精度を確認するための実験条件

条件項目	設定条件
供試材	S P C C 鋼 (板厚 : 1.2 mm)
6 軸多関節型ロボット	KR 6 0 H A (繰返し位置決め精度 $\pm 50 \mu\text{m}$)
ファイバーレーザー発振器	Y L S - 6 0 0 0 (最大出力 6 kW)
プロセスファイバーのコア径	300 μm
コリメーションレンズの焦点距離	150 mm
集光レンズの焦点距離	300 mm
集光スポット径	600 μm
加工点・センサー間距離	5 mm
レーザー出力	2 kW
溶接速度	3 m / m i n
焦点外し距離	0 mm

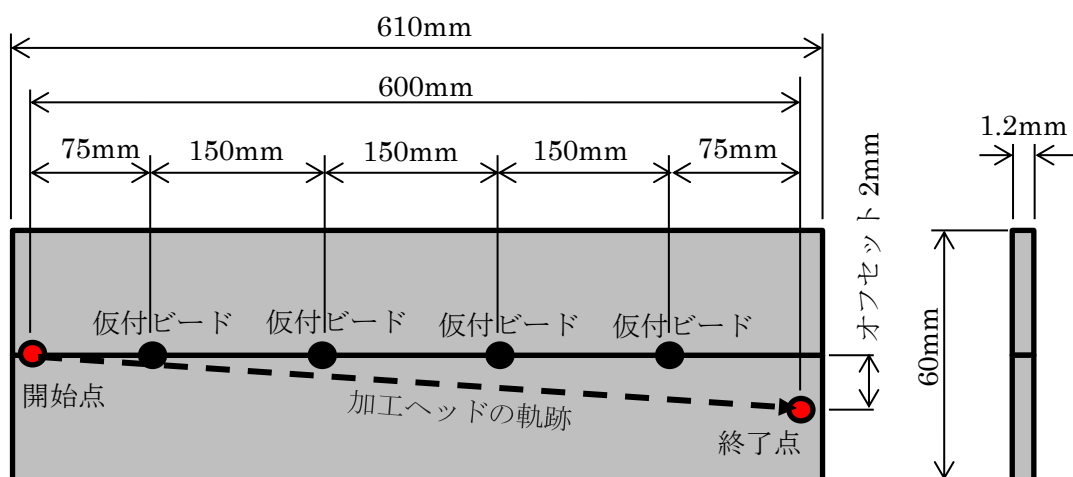


図 6-14 : 4か所の仮付ビードがあるレーザー溶接シームトラッキング用の実験試験片

実験方法を図 6-15 に示す。ロボットのティーチングプログラムは、溶接始端部ではネライはずし量を 0 mm、終端部ではネライはずし量を 2 mm とし溶接線に対して意図的にずらして作成した。溶接後はマイクروسコープを使用して、本来の溶接線の位置と溶接後のビード中心の位置を比較測定することでトラッキング精度の確認をした。測定箇所は全溶接長 600 mm に対して、40 mm のピッチで 15 か所 溶接長 30 mm の溶接を行った後、精度の比較測定を行った。

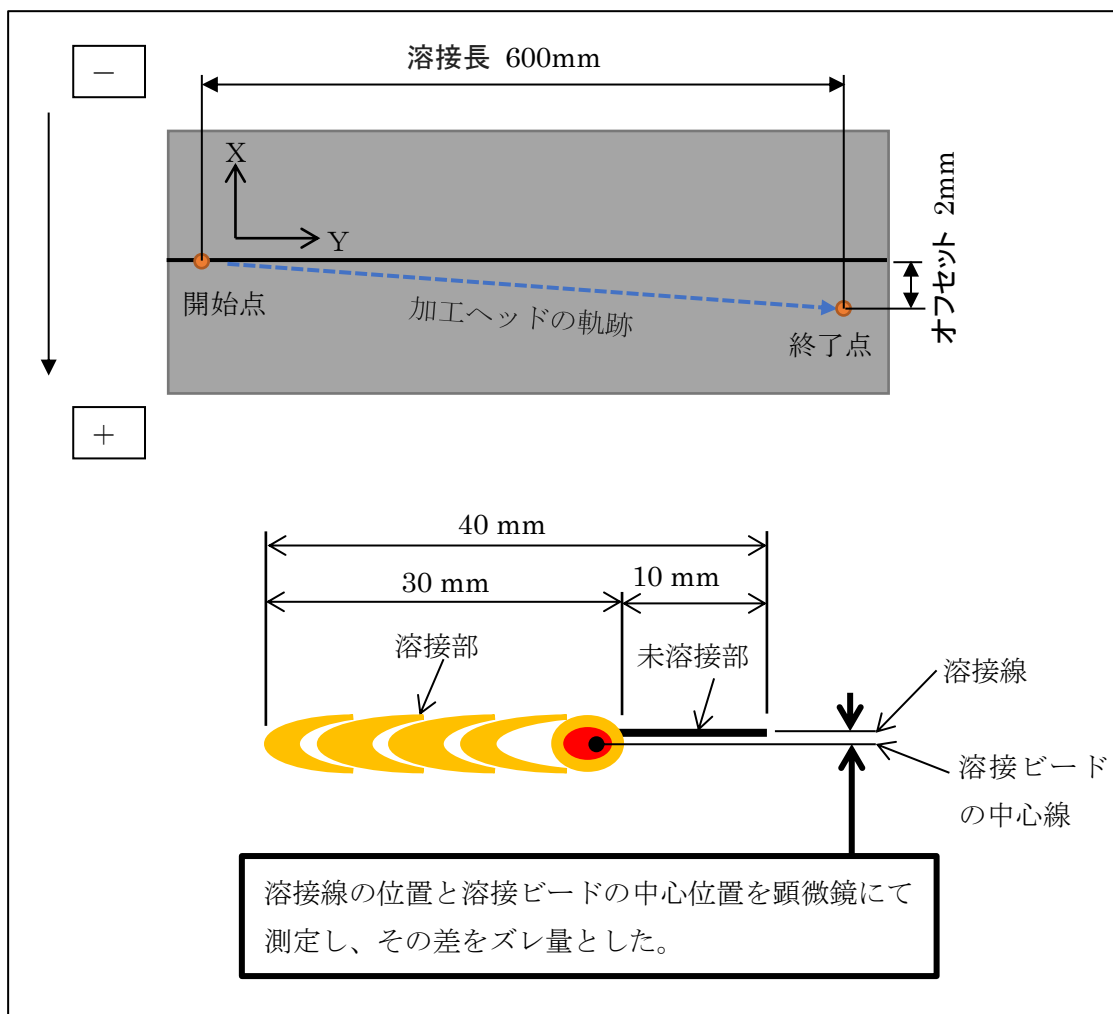


図6-15：2次元同軸シームトラッキングの追従精度確認の実験方法

また、仮付ビードの追従処理のために、標準偏差、濃度値、角度エッジ、エッジ欠陥検出の各パラメータへ閾値をそれぞれに入力をした。その入力画面を図6-16に示す。標準偏差値は50で設定した。この場合、50を超えると仮付部と判定する。標準偏差現在値は12.4であるため仮付部ではないと判断している。次に濃度値の閾値を $20 \leq \rho \leq 115$ で設定をした。この場合、 ρ が閾値の範囲に入ると仮付部と判定する。濃度値現在値は124.5であるため仮付部ではないと判断している。次にエッジ角度の閾値を $75 \leq \alpha \leq 105$ で設定をした。この場合、 α が閾値の範囲に入ると仮付部ではないと判定する。角度現在値は94.3であるため仮付部ではないと判断している。エッジ欠陥検出では総欠陥量下限値を40で設定した。この場合40を超えると仮付部と判定する。総欠陥量現在値は0であるため仮付部ではないと判断している。

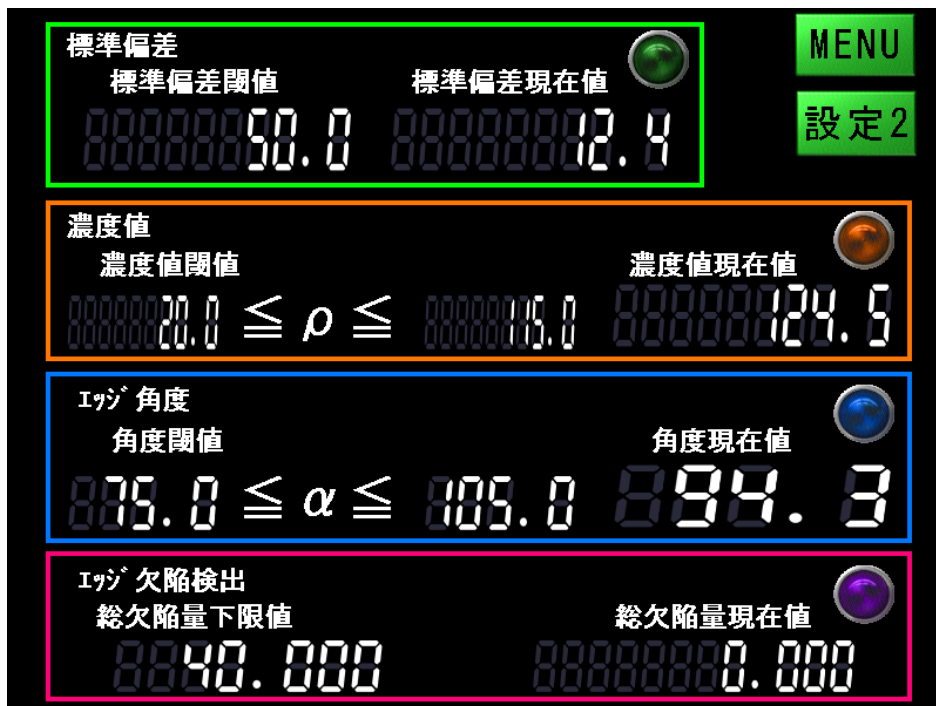


図6-16：仮付ビード制御用4種パラメータの閾値入力設定画面

今回は標準偏差、濃度値、角度エッジおよびエッジ欠陥検出の4種類のパラメータを全て「OR」でリンクさせる設定をした。この4種類のパラメータのうち1種類でも仮付部と判定した場合は仮付ビードの追従処理が起動する。その選択画面を図6-17に示す。同図中、○で示すパラメータは選択したパラメータである。

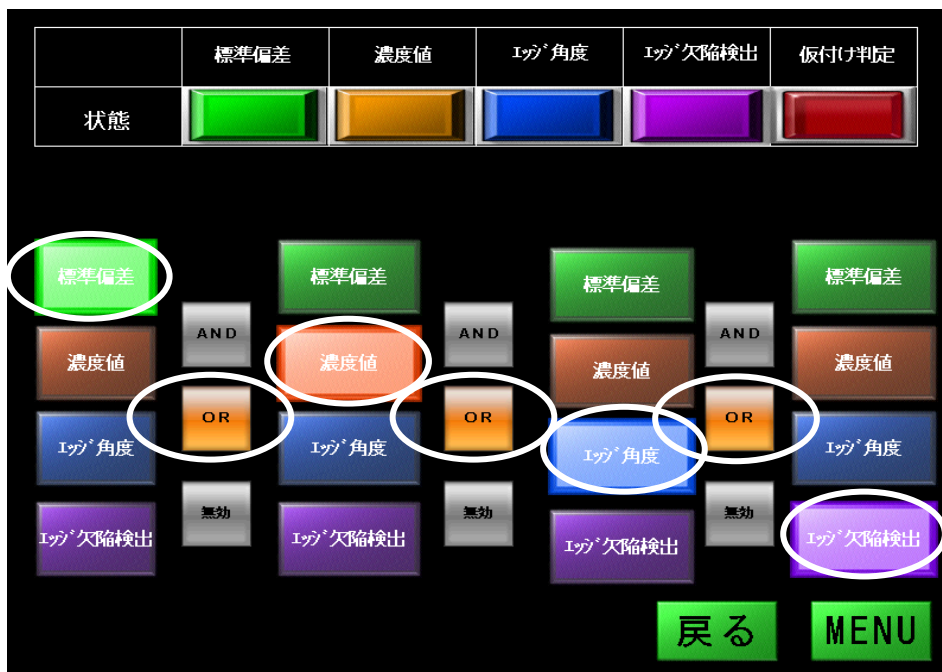


図6-17：各パラメータの組合せの選択画面

6. 3. 2 溶接速度を変えての2次元同軸シームトラッキングの平均追従精度

溶接速度を 1 m/min (16.7 mm/s)、 5 m/min (83.3 mm/s)、 7 m/min (116.7 mm/s) にて、変化をさせて6. 3. 1と同様の実験を行った。レーザ出力は 1 m/min (16.7 mm/s) の時は 1.2 kW 、 5 m/min (83.3 mm/s) の時は 3 kW 、 7 m/min (116.7 mm/s) の時は 3.5 kW として、それぞれの溶接速度における平均追従精度を、同条件で5回繰り返した時の平均値として評価した。

6. 4 実験結果および考察

6. 4. 1 仮付ビードの追従処理

1軸型走行テーブルを用いて、レーザを出力しないで実施をした仮付ビードの追従処理の実験結果について報告をする。図6-18は仮付けビードへ仮付制御を機能させない場合のシームトラッキングの溶接線の狙いズレ量を縦軸に示す。ズレ量が最大 $+0.7\text{ mm}$ 発生しており、溶接線を誤認している箇所が見られる。一方、図6-19は仮付制御を機能させた場合の溶接線の狙いズレ量を示す。最大 $+0.04\text{ mm}$ の狙いズレ量が発生しているが、これは、レーザ溶接する上では良好な溶接品質を確保することが可能で、実用上は問題とならない狙いズレ量である。

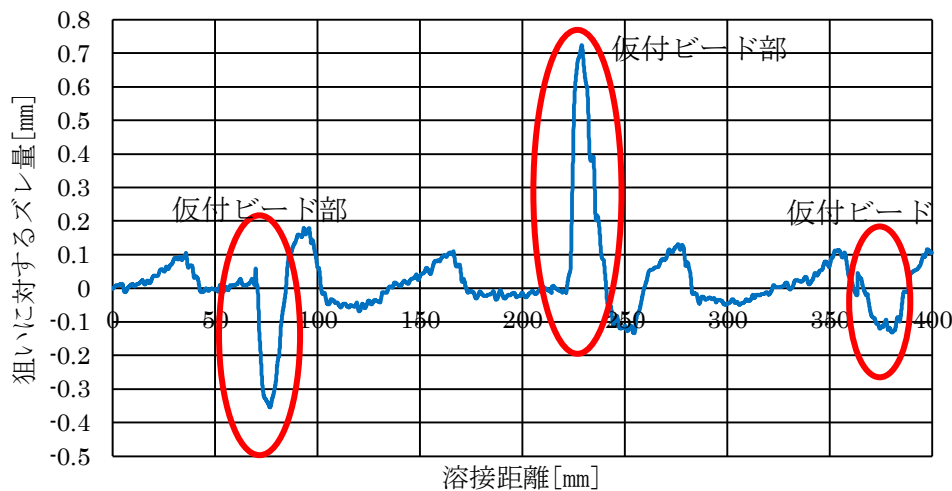


図6-18：仮付制御を機能させない場合のシームトラッキングの溶接線の狙いズレ量

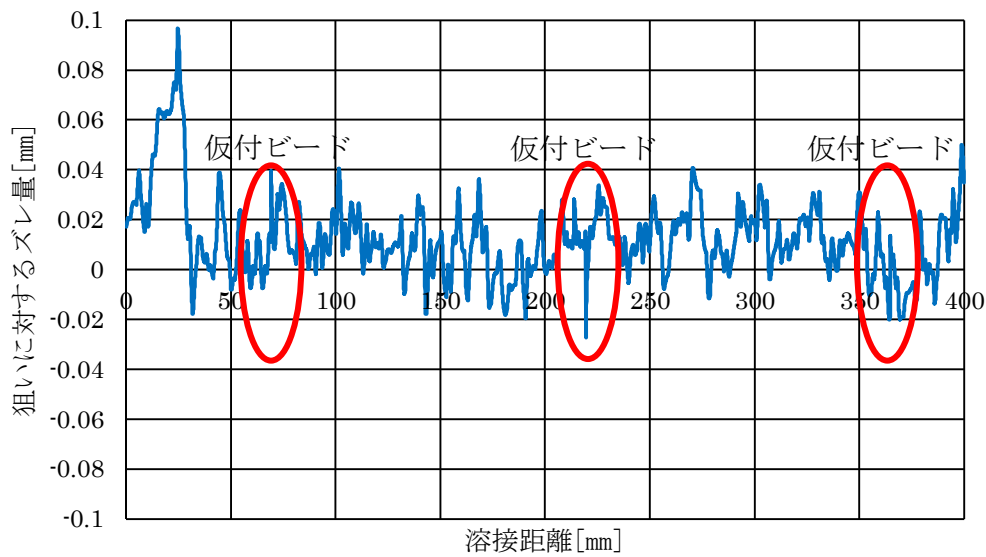


図 6 - 1 9 : 仮付制御を機能させた場合のシームトラッキングの溶接線の狙いズレ量

6. 4. 2 仮付ビードありの場合の 2 次元同軸シームトラッキング溶接の追従精度

仮付ビードの追従処理を併用して、2次元同軸シームトラッキングシステムで溶接をおこなった時の追従精度の測定結果を表 6 - 3 および図 6 - 2 0 に示す。追従精度は溶接線の座標位置 0 mm に対して、最大 +0. 1 4 0 mm、最小 -0. 0 3 5 mm の狙いズレが生じている。ここでの実験番号 1 から 5 の全ての実験における追従精度を平均すると +0. 0 5 mm であった。仮付ビードの追従処理を併用した場合であっても、レーザ溶接で良好な溶接が可能な狙い精度の許容値 $\pm 0. 1 5$ mm を満足している。

表 6 - 3 : 仮付制御を機能させた場合のシームトラッキング精度のテスト結果
単位 mm

実験番号	最大狙いズレ量	最小狙いズレ量	狙いズレ量平均値
1	0.07	0.002	0.046
2	0.09	0.015	0.059
3	0.09	0.02	0.063
4	0.09	-0.04	0.03
5	0.14	-0.035	0.054
評価値	0.145	-0.04	0.050

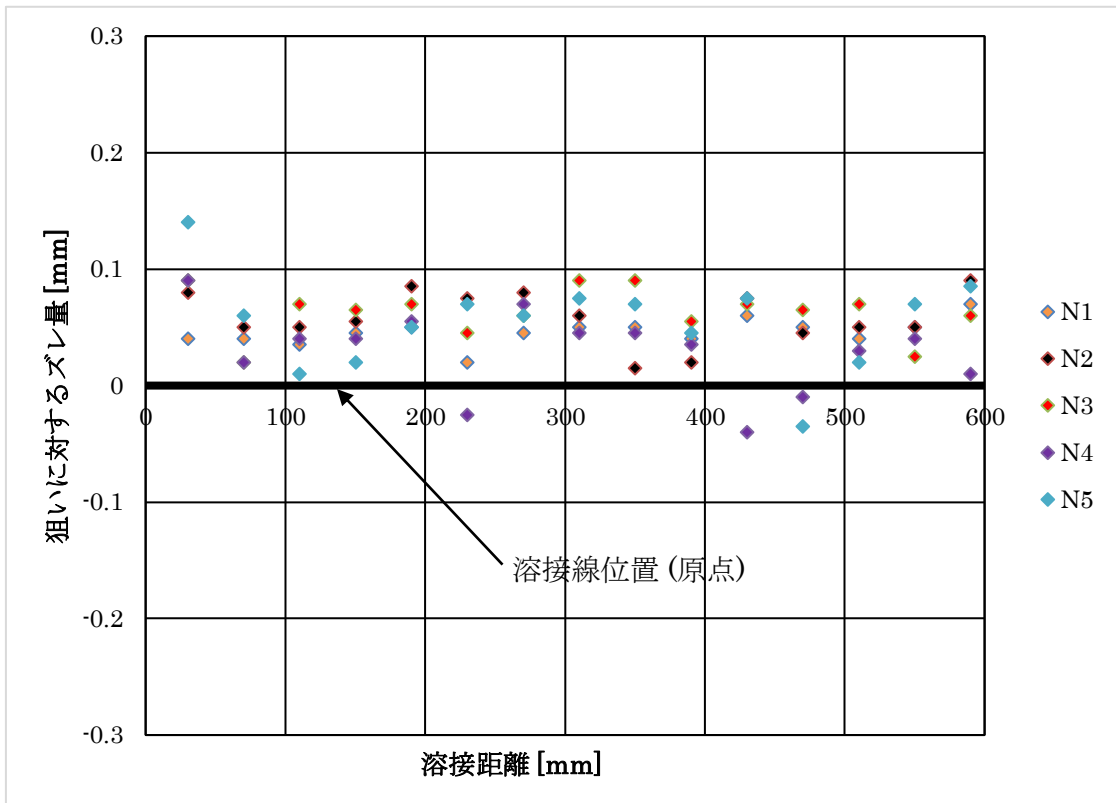


図 6-20 : 仮付制御を機能させた場合のシームトラッキングの追従精度

6. 4. 3 溶接速度を変化させての2次元同軸シームトラッキングの平均追従精度

溶接速度を 1 m/min (16.7 mm/s)、 5 m/min (83.3 mm/s)、 7 m/min (116.7 mm/s) にて、変化をさせて同様の実験を行った。その時のそれぞれの平均追従精度は溶接線に対して、溶接速度 1 m/min (16.7 mm/s) では $+0.041 \text{ mm}$ 、溶接速度 5 m/min (83.3 mm/s) では $+0.062 \text{ mm}$ 、溶接速度 7 m/min (116.7 mm/s) では $+0.082 \text{ mm}$ であった。溶接速度を 7 m/min (116.7 mm/s) まで増すと追従精度が $+0.082 \text{ mm}$ と増して悪くなった。

6. 5 まとめ

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検討した結果、次のことが明らかになった。

- 1) 4つのパラメータを制御することにより仮付ビードを検出し、シームトラッキングのプログラムを制御することで、仮付ビードにおけるシームトラッキングの溶接線の狙いズレ量は、最大 $+0.04 \text{ mm}$ であった。この結果はレーザー溶接をする場合において良好な溶接品質を十分に確保できる、問題とされない狙いズレ量であった。
- 2) 仮付ビードありの場合での、シームトラッキングの溶接線の追従精度は溶接線の座

標位置 0 mm に対して、最大 +0.14 mm、最小 -0.035 mm の狙いズレが生じた。ここでの実験番号 1 から 5 の全ての実験における追従精度を平均すると +0.05 mm であった。仮付ビードの追従処理を併用した場合であっても、レーザー溶接で良好な溶接が可能な狙い精度の許容値 ± 0.15 mm を満足している。

- 3) 溶接速度を変えた平均追従精度は溶接線に対して、溶接速度 1 m/min (16.7 mm/s) では +0.041 mm、溶接速度 5 m/min (83.3 mm/s) では +0.062 mm、溶接速度 7 m/min (116.7 mm/s) では +0.082 mm であった。溶接速度を 7 m/min (116.7 mm/s) まで増すと追従精度が +0.082 mm と増して悪くなった。
- 4) 独自開発の画像処理技術および 4 つの監視パラメータを用いて、仮付と溶接線を識別機できる 2 次元および 3 次元シームトラッキングシステムが開発できた。

参考文献

- 1) 前田利光、鳥越功、春日翔貴、沓名宗春：6軸多関節ロボットを使った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、溶接学会論文集、第36巻、第1号、111-121 (2018)
- 2) 前田利光、鳥越功、春日翔貴、沓名宗春：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研究、溶接学会全国大会講演概要、第101集 (2017-9)、385-395
- 3) 特願 2017-194217 自動溶接機及び自動溶接方法
- 4) 特願 2018-174274 レーザ溶接状態判定装置

第7章 4 m長尺溶接構造物へのレーザ・アークハイブリッド溶接の適用事例

7. 1 緒言

長尺部材など大型構造物へのレーザ溶接の適用を考えた場合、長時間の連続加工となるため、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ーの内部には、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清浄さが要求される。また設計上のセンサー外装部の許容温度は85℃以下となっている。レーザ・アークハイブリッド溶接を長尺溶接構造物へ適用する場合、シームトラッキングセンサーが溶接中に発生する輻射熱により、熱損傷を受けて故障する、あるいは、ヒュームにより光学部品が汚染され故障するといった事態が想定される。本章では長時間溶接における輻射熱とフェームといった外乱に対応できる、本研究で開発したシームトラッキングセンサーを用いて4 m長尺溶接構造物のレーザ・アークハイブリッド溶接の実用化を研究目的とした。

7. 2. 実験方法

7. 2. 1 溶接設備

実験ではIPG社製30 kWファイバーレーザ発振器、KUKA社製100 kg可搬の6軸多関節型ロボット、Fronius社製ROB 5000ワイヤー送給装置（アーク溶接機）、自社製レーザ出力30 kW用の溶接加工ヘッドおよび3Dシームトラッキングシステムを用いた。レーザ発振器から溶接ヘッドまでは、コア径300 μmのプロセスファイバーでレーザを伝送し、レーザ照射点と3Dシームトラッキングセンサーの距離は50 mmとした。照明にはオプトサプライ社製出力3 W LD照明を2個用いた。実験に用いたレーザ溶接システムの外観を図7-1に示す。レーザ溶接ヘッドと周辺機器の構成を図7-2に示す。

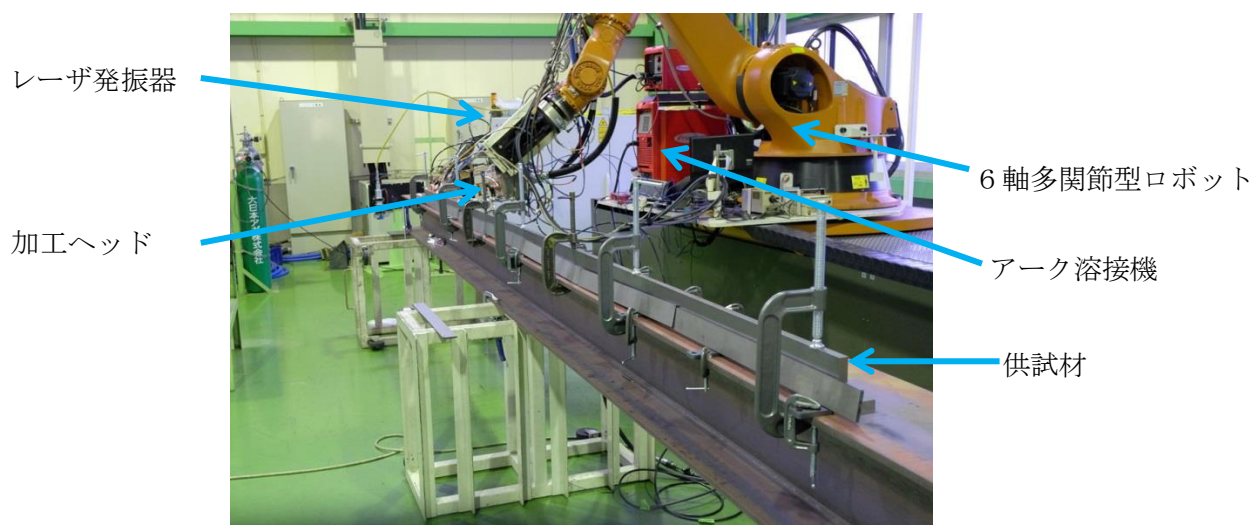


図7-1：レーザ溶接システム

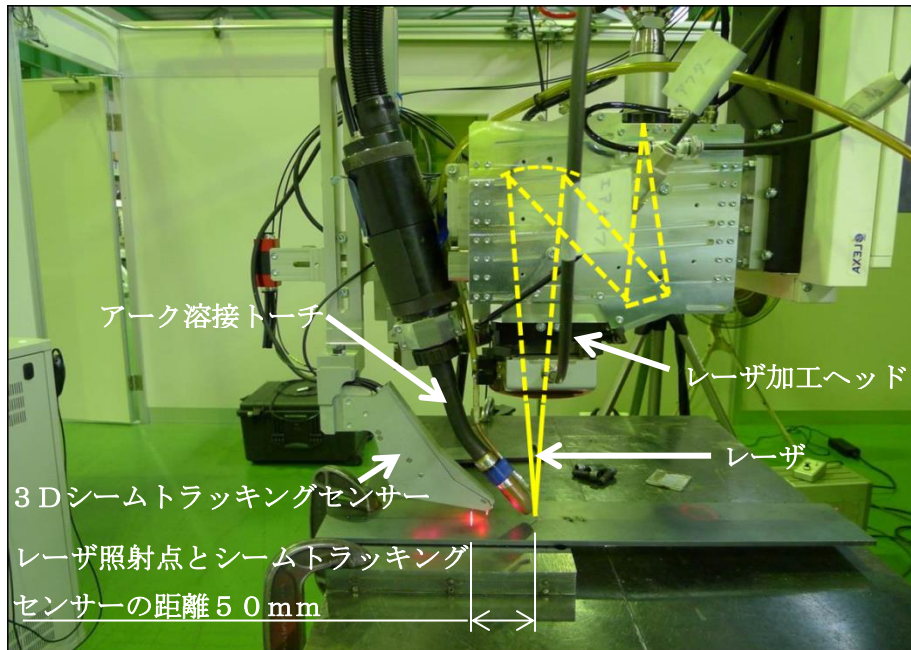


図 7-2 : 溶接加工ヘッドと周辺機器の構成

7. 2. 2 供試材および評価方法

1) 供試材

4000mm×70mm×14mm厚のSS400鋼フラットバーを2枚使いL字形のすみ肉継手で実験をした。供試材の形状を図7-3に示す。

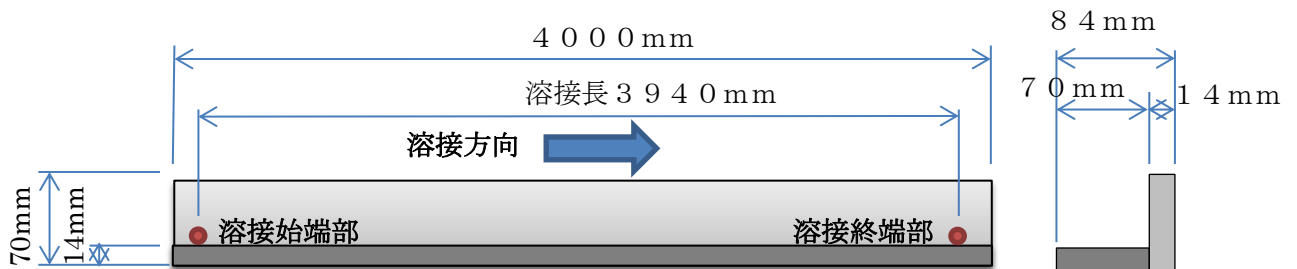
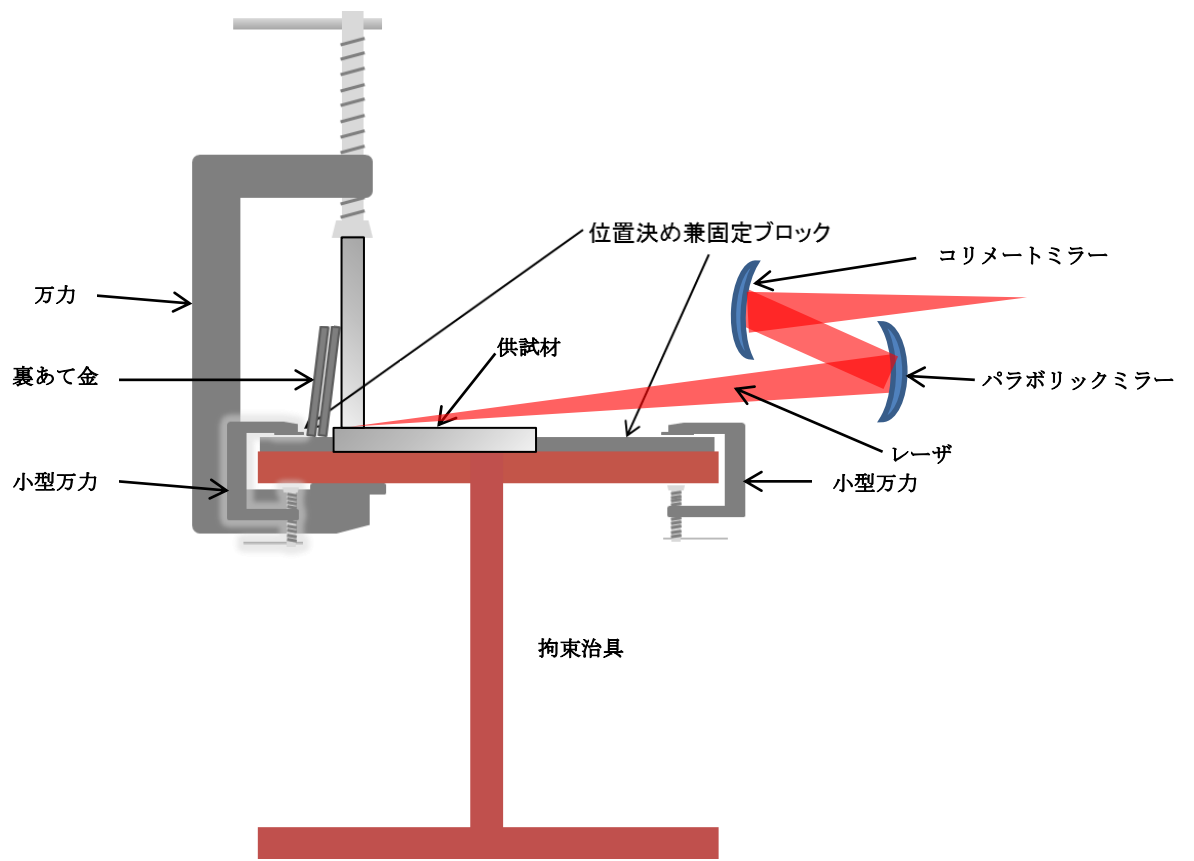
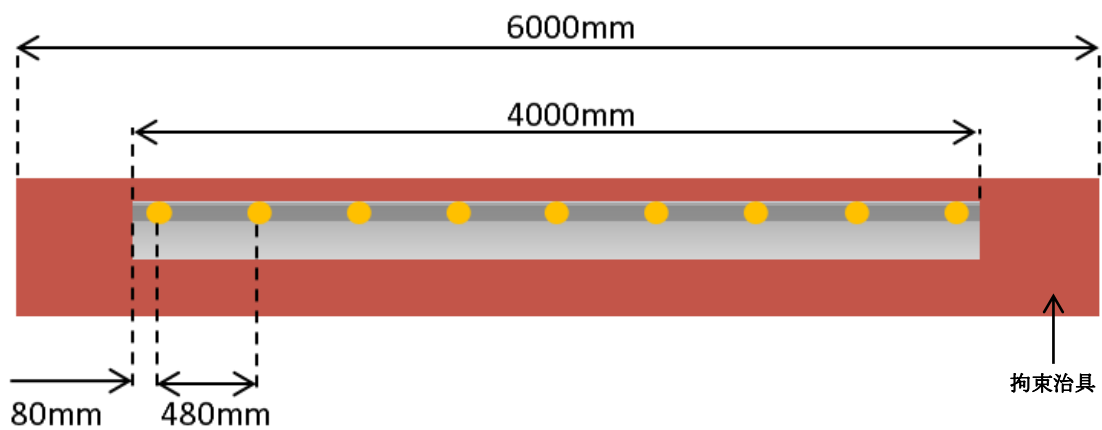


図 7-3 L字形のすみ肉継手の形状

供試材の固定方法を図7-4に示す。長さ6000mmのH形鋼(350mm×350mm×7mm×11mm)を拘束治具として、4000mm×70mm×14mm厚の2枚のフラットバーのL字型すみ肉継手を供試材とし、480mmピッチで9か所を万力でクランプした。なお、貫通したレーザービームで事故にならないよう裏あて金(板厚9mm)を図7-4(a)に示すように溶接継手全長に渡って設置した。



(a) 固定治具断面図



● クランプ位置(480mmピッチ)

(b) クランプ位置を示す平面図

図7-4：供試材の固定方法

2) 評価方法

a) センサーの冷却効果

全長4000mm（溶接長3940mm）のすみ肉継手をレーザー・アークハイブリッド溶接し、輻射熱対策として装着した「水冷銅板（保護板）」による溶損防止効果および「アルミニウム製ジャケット」による冷却効果の確認をした。これらの冷却効果の確認方法は、吸引ノズルおよびセンサー外装部に熱電対を貼付け、溶接中の温度変化をデータロガーで記録し確認した。ヒューム対策の有効性を確認する方法としては、図7-5に示すセンサー映像にて、溶接開始から画像認識用素子（セグメント）が減少し始めるまでの時間を“画像安定時間”として評価した。なお、画像認識用素子（セグメント）が16個認識されるのが、センサーが汚染されない状態で、7個以下になるとセンサーの認識が不可能となる。レーザー出力20kW、溶接速度0.9m/min、溶接長3940mm、溶接時間262秒とした。アーク溶接の条件は溶接電流301A、アーク電圧27.5V、ワイヤー送給速度9.6m/minで実施した。

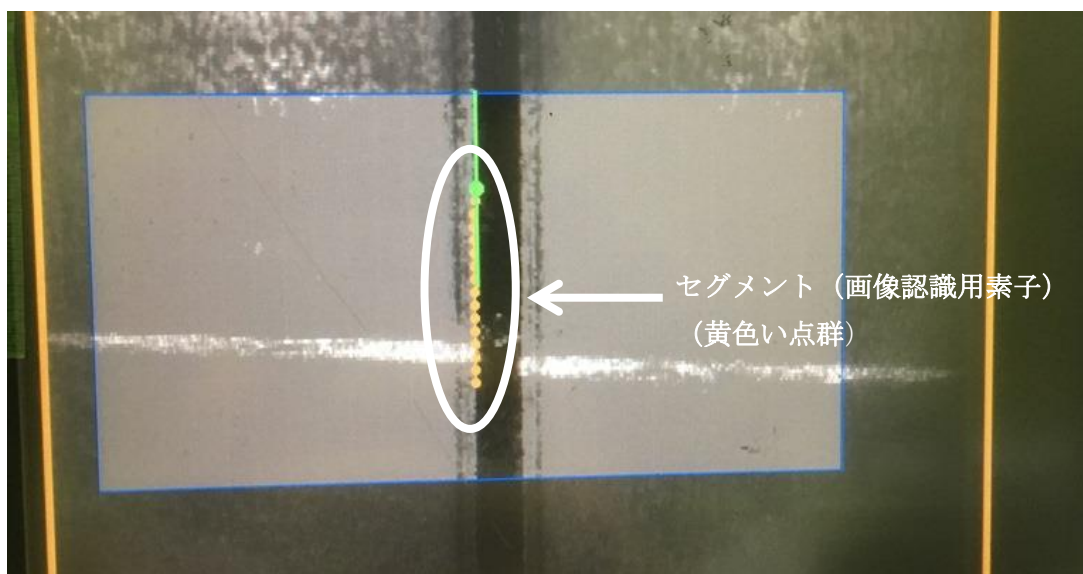


図7-5：画像処理画面

図7-6にアルミニウム合金製水冷ジャケットを示す。アルミ合金製水冷ジャケットはセンサー外装部の上部側面側とその対面側の2か所に取り付け、冷却することによりセンサー内部にあるCCDカメラとLEDの温度上昇を抑制した。

b) ノズルの冷却効果

図7-6に水冷銅板（保護板）も示す。水冷銅板（保護板）は、図に示すように吸引ノズルの前方に取り付け、レーザーやアークの反射および輻射熱により吸引ノズルが溶損する

のを防止した。なお、冷却水の流量および入口温度は、アルミニウム製水冷ジャケット、水冷銅板（保護板）はともに1 L/m i n 、3 0 °Cとした。

また、同図に熱電対測定位置と各冷却位置を示す。熱電対の測定位置はセンサー外装部のLEDの付け根部と吸引ノズル前面の中心の2か所とした。

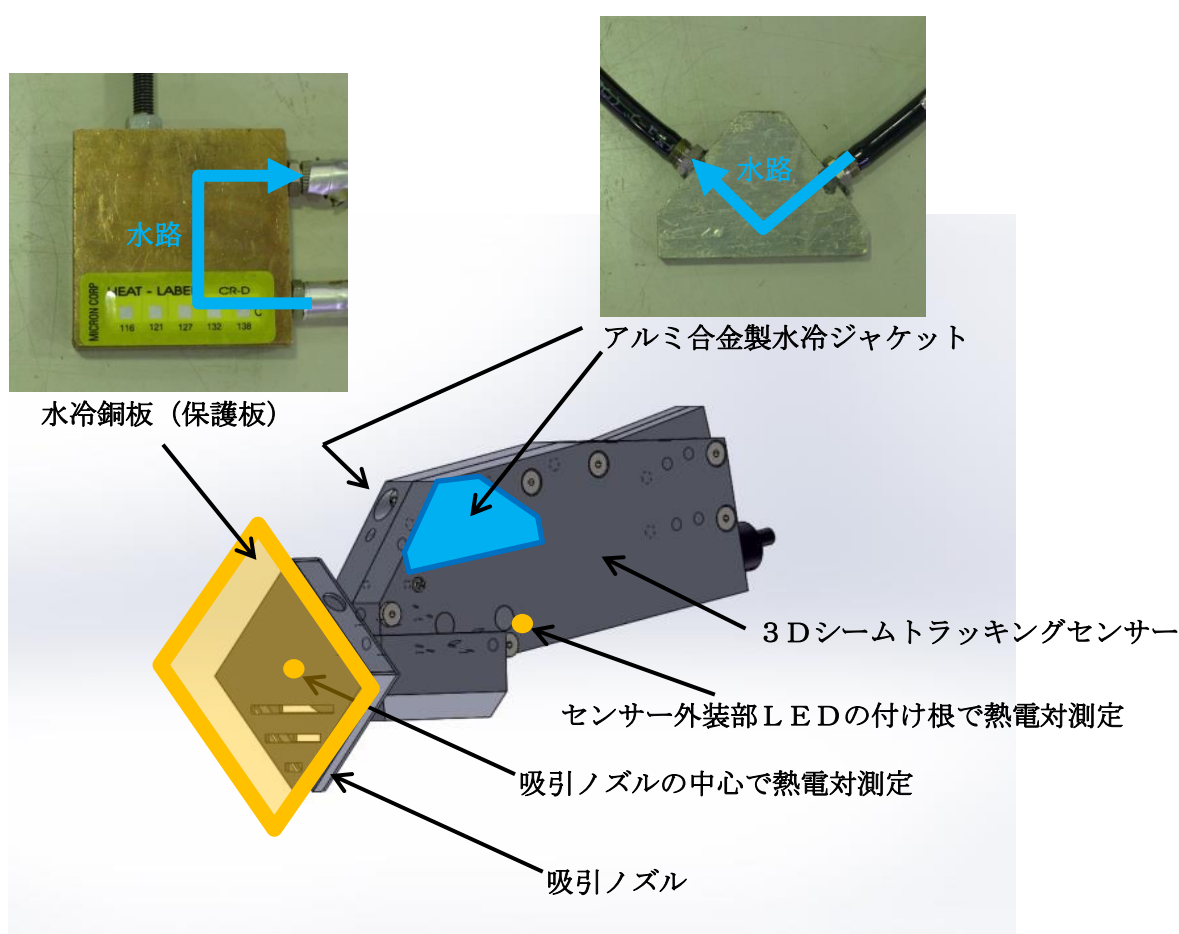


図7-6：熱電対測定位置と各冷却位置

溶接部の各機器の配置を図7-7に示す。継手形状は4000mm×70mm×14mm厚のフラットバーを2枚使用したL字型のすみ肉継手とした。レーザ先行型のレーザ・アークハイブリッド溶接方法を採用し、図7-7(a)に示すレーザヘッドの前進角は0°とし、アーク溶接の前進角は30°とした。

図7-7 (b) でのレーザヘッド角度はフランジ（横板）に対して 10° とし、アーク溶接トーチの角度は 45° とした。

なお、3Dシームトラッキングセンサーは溶接点より 50mm 前方に配置し、図7-7 (a)、図7-7 (d) ではフランジに対して 45° で取り付けた。

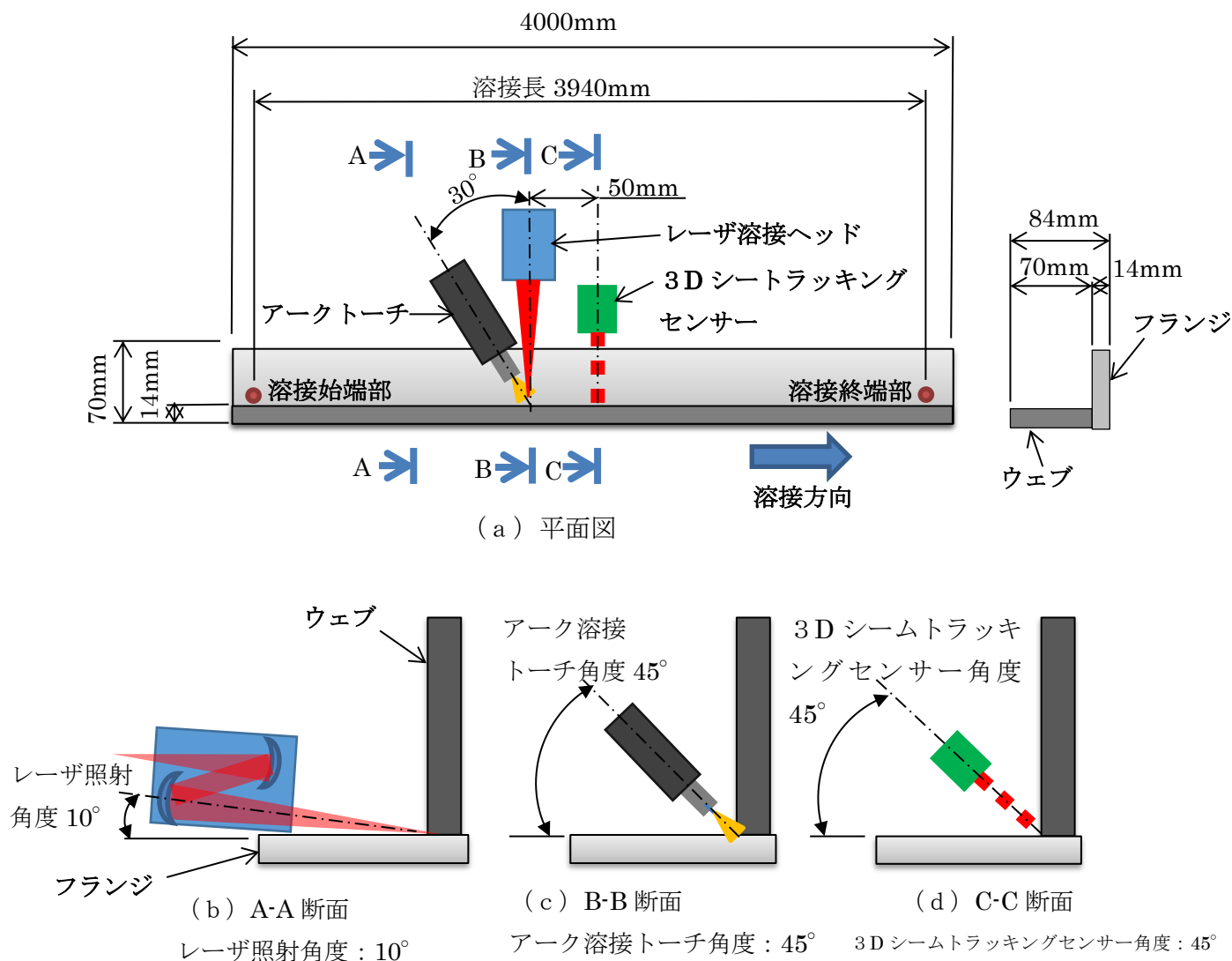


図7-7：継手形状と溶接部の各機器の配置

次にヒューム対策の有効性を判断するためのセンサー映像を図7-8に示す。溶接開始からセグメント（画像認識用素子）が1個でも減少し始めるまでの時間を“画像安定時間”として評価した。すなわち、16個のセグメントが15個になるまでの時間を画像安定時間とした。

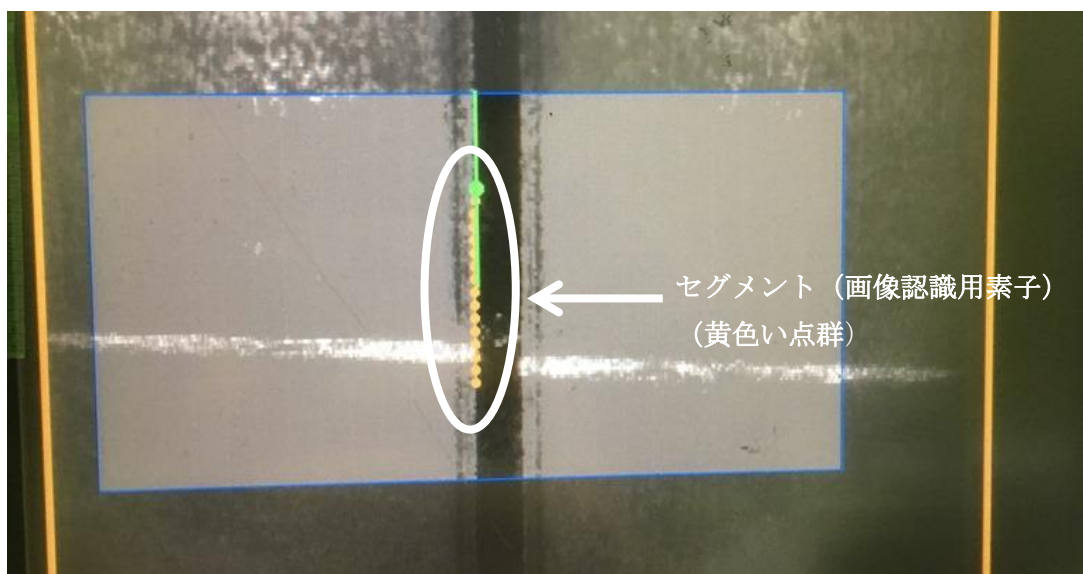


図 7-8 : 画像処理画面上のセグメント

図 7-9 に溶接部における各機器の配置を示す。溶接点から 50 mm 離れた場所に 3D シームトラッキングセンサーと精密機器類が配置してあり、溶接時に発生する輻射熱やレーザーの反射光に耐えるようにアルミ保護フィルムでセンサーを養生した。

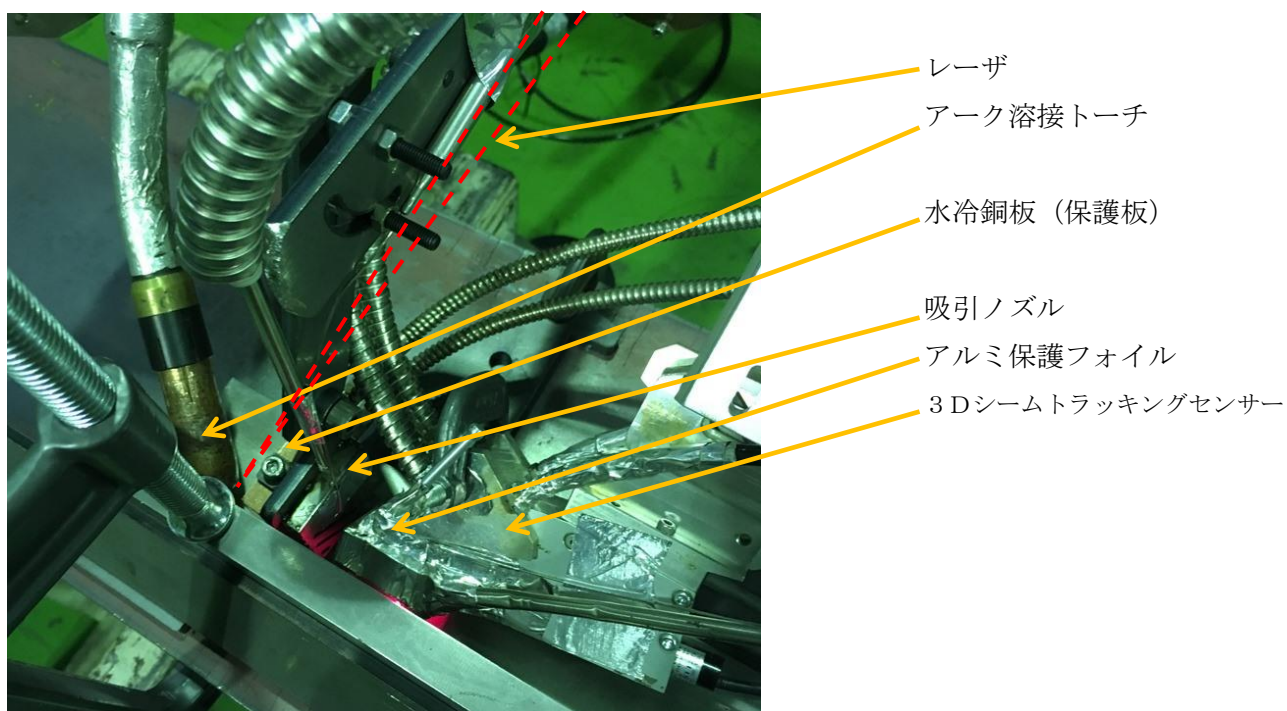


図 7-9 : 溶接部における各機器の設置状況

水冷銅板 (保護板)、吸引ノズルおよび 3D シームトラッキングセンサーの配置の詳細を図 7-10 に示す。水冷銅板 (保護板) は吸引ノズルよりも溶接点に近い場所に配

置してあり、40 mm角サイズの吸引ノズルを50 mm角サイズの水冷銅(保護板)が、溶接の輻射熱やレーザーの反射光から吸引ノズルを守る役割をしている。また、吸引ノズルは、溶接中に発生する溶接ヒュームを吸引し、吸引ノズルの後方にある3Dシームトラッキングセンサーの継手検出のためのCCDカメラの汚染防止を目的としている。

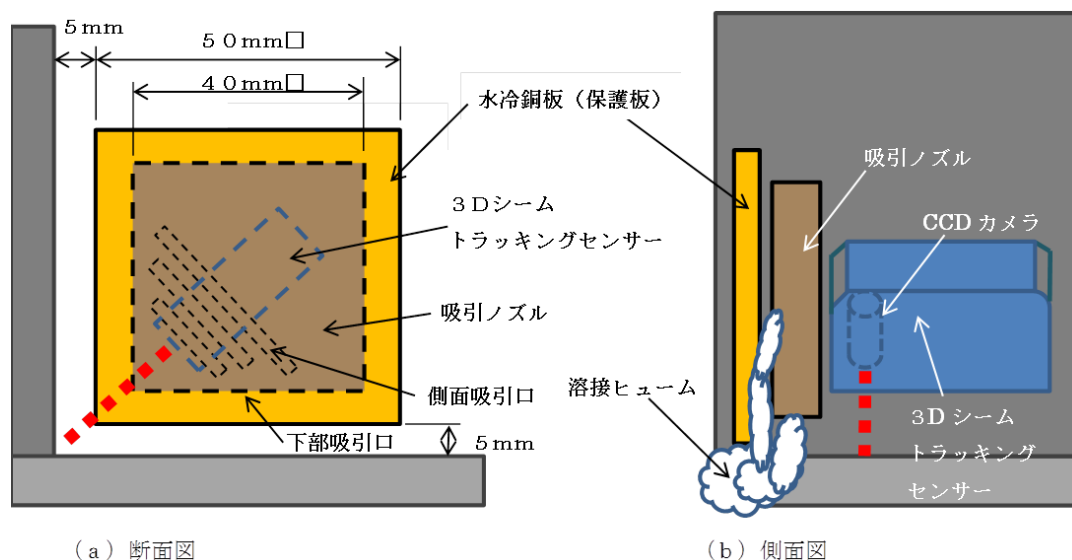


図7-10：水冷銅板(保護板)、吸引ノズルおよび3Dシームトラッキングセンサーの配置

7. 3 実験結果

7. 3. 1 温度測定結果

レーザー出力20 kW、溶接速度0.9 m/min、溶接電流301 A、アーク電圧27.5 V、ワイヤー送給速度9.6 m/minで実験を行った時のセンサー外装部および吸引ノズルの温度の測定結果を図7-11および図7-12に示す。図7-11に示すように、センサー外装部のLED付け根の温度は最高到達温度が58℃であった。平均温度は、約170秒で飽和し50℃近くとなった。センサー内部のCCDカメラとLEDの動作保障温度範囲85℃以下であり、問題ないことが確認された。

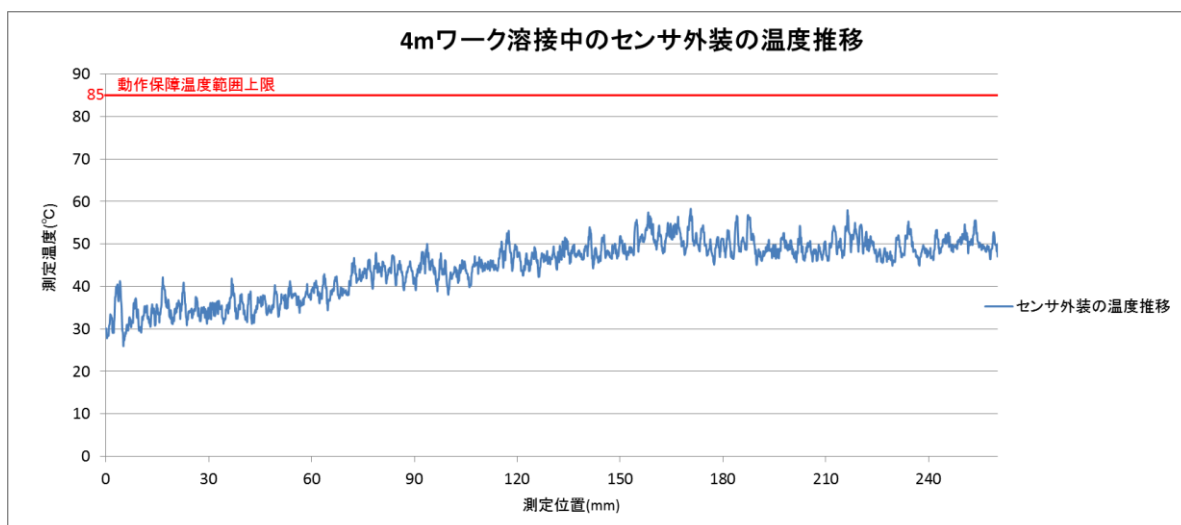


図 7 - 1 1 : 4 m のすみ肉継手溶接におけるセンサー外装部の温度変化

吸引ノズルは溶損することはない。図 7 - 1 2 に示すように、最高到達温度は 3 0 0 ° C であった。平均温度は、約 2 3 0 秒で 2 8 0 ° C 近くに達し、飽和した。吸引ノズルの材質は軟鋼で融点は約 1 5 0 0 ° C であり、問題ないことが確認された。

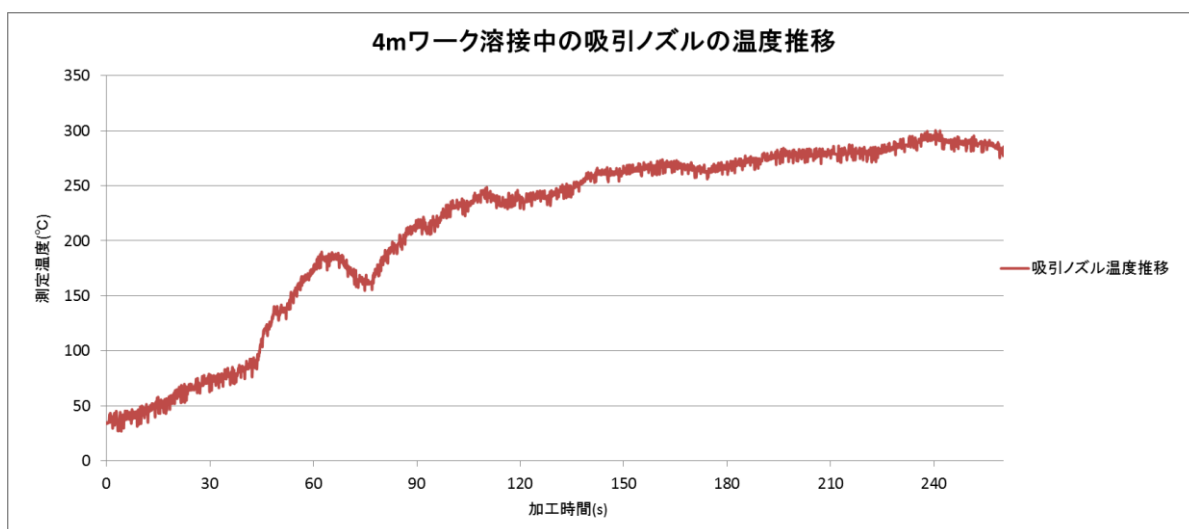


図 7 - 1 2 : 4 m のすみ肉継手溶接における吸引ノズルの温度変化

溶接開始直後および溶接終了直前のセンサー映像を比較して図7-13にそれぞれ示す。同図に示すように、センサー映像もヒュームにより曇ることなく、16個のセグメントの検出は終始安定していたことを確認できた。3Dシームトトラッキングを併用してのレーザ・アークハイブリッド溶接で、4m長さのすみ肉溶接を行った溶接ビード外観を図7-14に示す。全溶接長において狙いズレはなく、健全な溶接ができた。

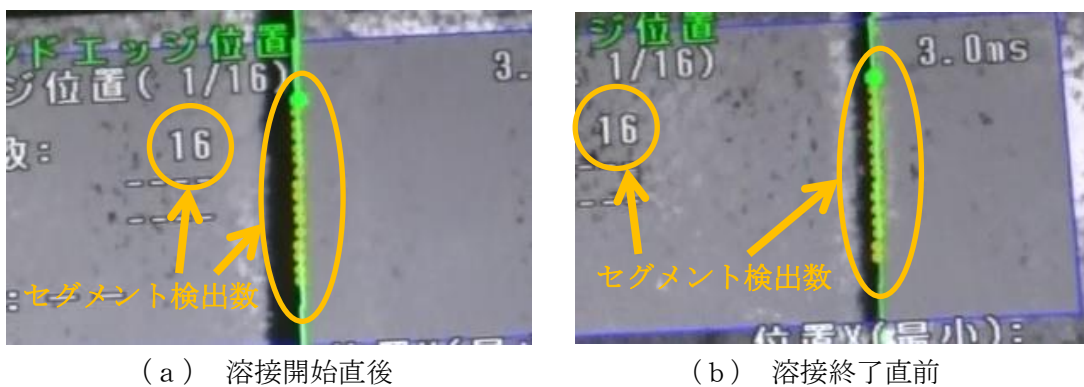


図7-13：溶接前後におけるセンサー映像比較

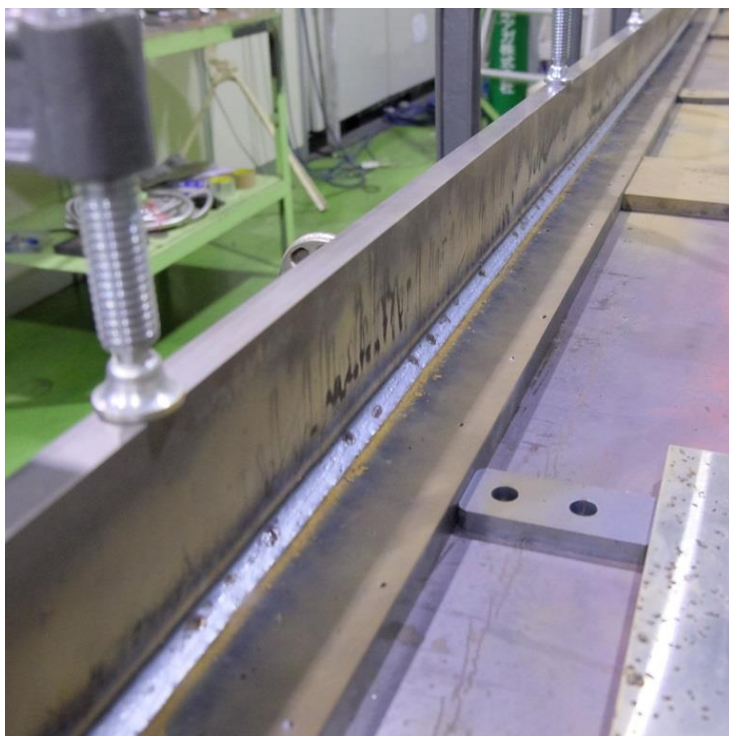


図7-14：溶接継手およびビードの外観

7. 4 まとめ

4 m長尺溶接構造物へのレーザ・アークハイブリッド溶接の適用上問題となる輻射熱とフェームなどの外乱について検討した結果、次のことが明らかになった。

- 1) センサー外装部のLED付け根の最高到達温度は58℃であった。平均温度は、約170秒で飽和し50℃付近を推移した。センサー内部のCCDカメラとLEDの動作保障温度範囲85℃以下であり、問題ないことが確認された。
- 2) 吸引ノズルは溶損することはなかった。最高到達温度は300℃であった。平均温度は、約230秒で280℃付近に達し、飽和した。吸引ノズルの材質は軟鋼で融点は約1500℃であり、問題ないことが確認された。
- 3) 溶接中のセンサー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終始安定していたことを確認できた。
- 4) 3Dシームトラッキングを併用してのレーザ・アークハイブリッド溶接で、4 m長さのすみ肉溶接を行ったが、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た。

第8章 経営計画を用いた研究開発の進め方の研究

8.1 緒言

前章までは、レーザ溶接に関する研究開発の内容について論じてきた。本章では、研究開発を遂行するために大きな投資が必要となる中小企業が、リスクを回避しながら、より安全な経営状態でそれら研究開発を進めるためには、事前に経営計画を策定することが重要である点について論述する。経営計画の重要性を論じる際、本論文では理論の支柱として「一倉理論」を用いる。一倉理論と経営計画の詳細の説明に入る前に、近年における中小企業の現状と企業経営における研究開発の位置づけについて俯瞰しておく。

平成24年度の国税庁の調査によれば、決算上赤字である欠損法人は、全体の70.3%を占めており、中小企業の多くは厳しい経営環境下にあると言える¹⁾。表8-1には中小企業庁編『中小企業白書』の副題等一覧を示した²⁾。この表から、平成に入り、わが国産業の競争力構造が問われるようになったことが分かる。「円高」、「新たな発展」、「構造転換」という白書の副題は、当時のわが国の政策課題を忠実に反映している。

平成2年以後、バブル経済の発生とその崩壊がわが国を襲う²⁾。「挑戦」、「新中小企業像」、「変革と創造」、「新たな可能性」、「日本経済の再建の担い手」、「企業家精神」、「新規創業」および「自立した中小企業」などの白書の副題は、中小企業庁の問題意識を反映しているといえよう²⁾。「ピンチ」（平成22年）「震災」（平成23年）は、リーマンショックや東日本大地震時の副題である。この時、日本全体が危機に陥り、多くの国民が疲弊したことは未だ記憶に新しい。

近年では、「応援歌」、「未来を拓く稼ぐ力」および「次世代への承継」といった中小企業自体の存続問題における切実な実態が反映されている。中小企業の現役経営者の高齢化と継承者の減少が重なることで、中小企業の大廃業時代がこれから始まり、その経済損失や技術損失は、今後の日本経済に大きな影響を与えることが予想されている。このような経済環境のもと、自社における将来の理想図や発展像が描けない後継者は非常に多い。時代や世代を越えて目まぐるしく変化する経営環境に柔軟に適応できない企業は、自然浄化作用で消滅の運命をたどることが常である。

一方、大企業や中堅企業に目を転じると、それら企業も初期の段階においては零細・中小企業であった²⁾。数多くある零細・中小企業の内、大企業にまで成長する企業にはどのような特徴があるのだろうか。それは、単に大企業に従属する存在ではなく、自立的に行動する零細・中小企業ではないだろうか³⁾。言い換えるならば、新しい商品やサービス、事業システムを創造する「独創企業」といえよう³⁾。

「独創は反省であり差別化である」³⁾。自らの居場所を問い直し、居場所を変更していくことは独創につながる³⁾。山倉氏（2009）によれば、独創的中小企業の条件は次の5つである。①主体となる中小企業自身が危機感を強く持ち自らを変えていく努力を積み重ねてい

くこと。②経済環境の変化をリアルに見つめ、自社がどういった形で対峙していくのかを冷静に判断していること。③自立的な事業展開を強く意識していること。④中小企業としての社会性を強く意識し、それをアピールしていくこと。⑤自社に不足している点を自覚し、外部の資源を有効に活用していることである³⁾。

表 8 - 1 中小企業庁『中小企業白書』副題またはキーワードの変遷

発行年	中小企業白書の副題一覧
平成 元 [1989] 年	円高定着下で進展する構造転換と新たな課題
平成 2 [1990] 年	景気拡大下で進行する中小企業構造の変化と新たな発展への課題
平成 3 [1991] 年	21世紀に向けて挑戦を続ける中小企業
平成 4 [1992] 年	新中小企業像―多様化し増大する中小企業の役割―
平成 5 [1993] 年	中小企業の課題と進路―新しい経済社会への構造変化の中で―
平成 6 [1994] 年	構造変化の中での「変革」と「創造」
平成 7 [1995] 年	新たな可能性へのチャレンジ
平成 8 [1996] 年	中小企業の時代―日本経済再建の担い手として―
平成 9 [1997] 年	‘中小企業’その本領の発揚
平成 10 [1998] 年	変革を迫られる中小企業と企業家精神の発揮
平成 11 [1999] 年	経営革新と新規創業の時代へ
平成 12 [2000] 年	IT革命・資金戦略・創業環境
平成 13 [2001] 年	目覚めよ！自立した企業へ
平成 14 [2002] 年	「まちの企業家」の時代へ～誕生、成長発展と国民経済の活性化～
平成 15 [2003] 年	再生と「企業化社会」への道
平成 16 [2004] 年	多様性が織りなす中小企業の無限の可能性
平成 17 [2005] 年	日本社会の構造変化と中小企業者の活力
平成 18 [2006] 年	「時代の節目」に立つ中小企業～海外経済と関係深化・国内における人口減少～
平成 19 [2007] 年	地域の強みを活かし変化に挑戦する中小企業
平成 20 [2008] 年	生産性向上と地域活性化への挑戦
平成 21 [2009] 年	イノベーションと人材で活路を開く
平成 22 [2010] 年	ピンチを乗り越えて
平成 23 [2011] 年	震災から復興と成長制約の克服
平成 24 [2012] 年	試練を乗り越えて前進する中小企業
平成 25 [2013] 年	自己変革を遂げて躍進する中小企業・小規模事業者
平成 26 [2014] 年	小規模事業者への応援歌
平成 27 [2015] 年	地域発、中小企業イノベーション宣言
平成 28 [2016] 年	未来を拓く稼ぐ力
平成 29 [2017] 年	中小企業のライフサイクル―次世代への承継―

(出所) 中小企業白書 (2017) を参考に前田作成

同様に、山倉氏（2009）によれば、優れた経営を行なっている中小企業の共通点は次の五つである。①規模は小さくても大きな夢を描いている。②他社の気づかない領域に目をつけている。③独自のプロセスを構築する。④実践を通じて組織の学習能力を高めている。⑤小さなことを徹底する風土をつくっている³⁾。

また、高橋ら（2014）も指摘するように、中小企業がいたずらに企業規模を拡大することは望ましくない。中小企業は、「従業員数や資本金、売上高でみた量的な成長よりも、自社や顧客が抱える問題の解決（＝イノベーション創出）能力でみた質的な成長を目指すべきである」⁴⁾。量を求める余り、質が低下しては元も子もない⁴⁾。ここでいうイノベーションとは、「潜在的なニーズを掘り起こして開発機会を自ら創造し、新製品・新サービスや新技術によって新たな顧客を獲得し利益拡大をはかることである」⁴⁾。

これを実現させるためには、将来の自社のあるべき姿を明確にし、明確なる目標の設定を行い、それらの内容を経営計画にまとめることが有効な手段であると筆者は考える。経営計画は、「何をしたいかではない。何をすべきかを考えるべきであり、見たくない現実を見る道具として考える」⁵⁾。そのためにも、しっかり現実を見切ること、見たくない現実を見ること、その見たくない現実から想像力を鍛えることが重要である⁵⁾。

8. 2 企業経営における研究開発の位置づけ

企業にとっての研究開発を一言で述べるならば、次世代の新たな収益源を確保し、次の新たな成長へ飛躍するための重要な経常業務の一つである。研究開発で産み出された企業の新しい商品や革新的な技術は、その企業の将来を有望かつ優位に展開することを可能とし、その結果、企業を大きく発展させることができる。また、中には企業のビジネスコアが大きく変換し、創業時からの業態そのものが全く変わってしまうことも珍しくない。

目まぐるしく変転する市場競争と環境の変化の中で、企業が生き残り発展していくためには、急激に大きく変化する市場環境に柔軟に対応していく必要がある⁶⁾⁷⁾⁸⁾。上述したとおり、市場環境に柔軟に対応できない企業は規模の大小や競争力の強弱に関わらず、自然浄化作用に遭遇し加速的に陳腐化して、衰退の道をたどることであろう。

一方、企業は研究開発の成果を通じて、自ら新しい市場を創造し、自らが最適になる環境を自ら意図的に創り出し、市場におけるスタンダードの地位を確保することにより、競合他社の優位性を戦略的に完全に無力化させる。このように、市場ニーズの後追いではなく、現在は市場そのものがないが、未来に向けた新市場の創造と構築を目的とした、シーズ先行型の研究開発を武器に、新市場の創造と制覇をほぼ同時に達成してしまう優良な企業もある。

お掃除ロボットのルンバを開発したアイロボット、ハイブリッド車や燃料電池車を市場投入したトヨタ自動車、iPod、iPhone、iPad といった情報デジタル家電を送り出したアップル、電気自動車を市場投入したテスラモータ、アマゾン、グーグル、マイクロソフトなど、研究開発の成果を自社の強みとして新しく取り入れることができ、且つ従来からあつ

た自社の強みとのシナジー効果を得ることで、さらに競争力のある企業へ進化している⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

それらの研究開発には多額の費用がかかる。また、研究成果が出るまでには数年どころか数十年かかることも珍しくない。実用化にいたってはさらにそこから相当な時間が必要である。企業の収益の柱に育つまでには途方のない時間と費用がかかるのが現実である。それゆえ、明確な方針や基準を持たずに無理な研究開発を行なうことは、企業の体力を大きく奪い、経営上致命的なダメージを与えることになる。

これらの経営上のリスクを回避し、安全な経営状態で研究開発を進めるためにも、経営計画の策定が重要なのである。本章では、このようなリスクを伴う研究開発を進める状況下にある中小企業において、一倉理論を用いて経営計画の策定し、健全な企業経営をする方法について検討することを目的とした。

8. 3 経営計画の策定

8. 3. 1 一倉定の略歴

中小企業の経営者である筆者が、経営計画策定にあたり理論の支柱としているのが「一倉理論」である。その理論を構築した一倉定氏の略歴は次のとおりである。

一倉定氏は、1918年4月生まれ。1999年3月に逝去するまで、「事業経営の成否は、99%社長次第で決まる」という信念から、社長だけを対象に情熱的に経営指導する異色のコンサルタントとして活躍した。多くの赤字企業を黒字転換した実績を持ち、その厳しく情熱溢れる指導に多くの社長が師と仰ぎ、今なお“社長の教祖”と呼ばれている。これまで指導してきた会社は、大中小5,000余社を超え、あらゆる業種・業態に精通し、文字通り、我が国に於ける『社長専門の経営コンサルタント』の第一人者である¹¹⁾。

8. 3. 2 なぜ一倉理論なのか

「一倉理論」が、なぜ経営計画の理論的支柱になるかという点、一言でいえば、その理論に貫かれている「実践性」である。一倉氏自身が、空理空論を嫌い、徹底して「お客様第一主義と現場実践主義」を標榜してきた。多くの事例の積み上げから構築された一倉理論は、実務の現場への適合性と応用の可能性が高いのである。一倉氏は、数多くの社長を小学生のように叱りつける反面、社長の悩みを共有し、この理論をベースに親身になって業績向上策を練り、幾多の高収益会社を育てたのである¹¹⁾。

8. 3. 3 なぜ経営計画が必要か

なぜ、経営計画が必要かという点、それは企業と経営環境の関わり方を将来思考的に示す構想であり、企業内の人々の意思決定の指針となるものだからである¹²⁾。

本研究における経営計画は次の4つで構成されている。「経営計画書」、「利益計画書」、「資金運用計画書」、「比較バランスシート」である。

「経営計画書」は、企業の方針が記され、企業の理念、未来像、経営目的、経営方針、行動方針などが示される⁶⁾⁷⁾⁸⁾¹⁰⁾。

「利益計画書」は、企業および各部門の月次決算書である。毎月次決算を実施し、計画に対する実績の進捗状況の把握および確認をする²⁾。

「資金運用計画書」では、「経営計画書」と「利益計画書」を計画通りに実行した場合の、年間ベースに流動する資金の流れを読み取ることができる。期首の現金流動預金の残高が、年間予定の行事を実施することで、期末では現金流動預金の残高がどのように変化をするかを把握および確認ができる⁷⁾。

「比較バランスシート」では「利益計画書」と「資金運用計画書」を関連付け、月次決算時に、期首（計画時）、期中（現状）、期末（目標）の3断面を時系列で比較をして、財務における個々の科目についての進捗状況を把握および確認をする⁷⁾。

経営計画の4つの手法を密接に関連付けることにより、現時点における将来の予測が精度良くできる。過去の数字を分析することは反省という面で有効であるが、過去の数字は絶対に変えることができない。しかし未来の数字は別である。「経営計画書」「利益計画書」「資金運用計画書」「比較バランスシート」の各項目へ自ら意図する文言と数字を置き、自社としてあるべき姿を設定すること⁷⁾ができる。

経営計画を策定することを通じて、戦略が明確となり、そのために必要となる経営資源の特定や業績目標の設定が可能になる。とりわけ計画を策定するというプロセスにこそ経営計画の有効性がある。なぜなら、多くの者は目前にある喫緊の課題ばかりにとらわれがちだが、そのような日々の課題から一歩引いて戦略的かつ長期的な視点で意思決定を行なう機会を経営計画の策定プロセスがあたえてくれるからである¹³⁾。

このプロセスを通して表明された戦略は、トップ経営者の頭のなかにある構想を従業員達と共有することを可能にし、それをもとに人々の認知、思考、選択過程（認識過程）を深く理解させるための有効な手段となる¹⁴⁾。いかに動くべきか（know-how）を伝えるだけでなく、なぜそのように動かなければならないか（know-why）の解釈の整合化は組織にとって重要事項といえる¹⁴⁾。

来年のことは雲をつかむようなことで分からないわけではない。むしろ、上述のプロセスを行えば、かなり正確に予測可能である⁷⁾。例えば、人件費は昇給額が決まっていれば予測ができる。償却費は法律で償却できる率が決まっている。新規設備投資があるのであれば、購入金額と導入時期を決めれば、当期の新規の償却負担額も決定できる。金利も決まっているため正確にわかる。外注費や経費などの変動費は今年の売上げと今年目標売上げに対して回転率で求めて予想ができる。今期の売上げ目標を今年の105%として設定したならば、変動費も1.05回転（1.05倍）で考えればよい。但し、特殊事情がある変動費は、その事情を考慮に入れて予想される変動費から加算・減算をして外乱を取り除き、精度を高める。

このように、外注費、購入品費、経費などのような変動費、人件費、償却費などの固定

費は精度良く予測が可能である。但し、将来あげられる収益だけは分らない。しかし、将来あげなければならない収益は分る。従って経営計画策定以降においては、将来必要とする収益を、どのように手に入れるかを考え、手を打たなければならないし、収益のみについて考えればよい。企業経営は複雑極まりないが、経営計画の立案時に予測可能な数字は全て織り込み済みであるため、後は必要とする収益の確保を実現するために、経営資源をどのようにコントロールするかが大切になってくる。この割り切り方は少々乱暴に思えるが、かえって企業経営がシンプルになり、本当の意味で経営計画は使える強力な武器となる。

経営計画の策定は生やさしいことではない。目標を達成するためには、沢山の制約や障害を1つ1つ取り除き、あるいは乗り越えていくための具体策を決めていかなければならないのである。そこには、文字通りの「あちらを立てばこちらが立たず」の矛盾と不可能にぶつかる。その矛盾と不可能をつぶさなければならないのである。この突破口は、外に出て、市場状況をよく観察し、顧客の要求を聞き出すことによって可能である。従って、経営計画をたてる期間は少なくとも2～3ヶ月はかかる。この期間は多大な時間のように思えるが、経営計画の策定にしっかり時間をかけることこそ、時間の最も有効な使用法といえよう。なぜならば、経営計画策定に要した時間の数千倍、数万倍の時間が、それ以降節約できるからである。この意味は、経営計画を策定する過程において、戦略と戦術も同時に生み出されるため、「利益増大」に繋がる可能性があるということである。仮に1年で利益が2倍になれば、1年間節約したことになる。

1年の短期の経営計画ができれば、それを同じ要領で9年先まで計画をたてる。そうすれば、10年の長期計画ができる。10年後の計画となればさすがに精度は悪くなるが、そうであっても将来の課題が顕在化できるので、時間に余裕を持って対処することができる。場当たりの経営から、計画的な経営へ変わることで、腰をすえてじっくり取り組むことができる。

8. 3. 4 全社員が前向きになる「魔法の書¹⁵⁾」

経営計画の策定は、企業そのものの姿勢の表れである。企業の存在意義を明確にして、企業がどのようにして社会へ貢献していくのかを、明確に示すことにより、社員が会社の重要な存在意義を快く受け止め、深く理解をしてくれる。これが動機となって、社員が業務に対して前向きに取り組むようになる。当然、業務における結果や成果がやりがいや達成感に変換され、これが次のヤル気に繋がり新しい意欲とエネルギーが湧いてくるといった好循環をもたらす。そのため、数年という時間軸で観察していると、日々の経常業務における前向きな取り組みが、結果的には個々の社員の大きな成長に繋がる。経営計画の策定は社員が前向きになる。それゆえ、一倉氏は、経営計画を「魔法の書¹⁵⁾」と呼んでいる。

8. 3. 5 企業の未来像を描く

経営計画は将来の企業のあるべき姿を織り込み計画を立てる必要がある。将来のあるべき姿は企業によってその内容は当然異なるが、共通して言えることは「企業の生き残る条件⁶⁷⁾」および「企業が競合他社と比較して、必ず優位な展開ができる」ための条件を定量的に設定するところから始まる。つまり将来にわたって繁栄を継続できる条件設定をここではしなければならない。それは意欲的な計画となり、現時点での企業の力量では到底に達成できない内容が数字となって現れてくる。潜在的な課題がここで初めて顕在化することとなり、この矛盾をどのように解決して行けばよいのかという、今までに考えてもみなかった高い難度の課題が現実となって現れてくる。企業が将来にわたって生き残り、繁栄するための条件を顕在化させるため、一倉氏は「たとえ目標より実績が下回ったとしても、期中に目標の下方修正を絶対してはならない^{71*)}」と述べている。

もし実績が計画した目標に及ばない場合、その目標と実績の差こそが企業の大切な課題として明確に顕在化される。もし期中に実績が目標に及ばないということで、目標の下方修正を行なえば、市場の要求から外れてしまっているその企業の実態そのものが分からなくなってしまう⁷⁾。その事実を関係者で共有し深く認識して、各課題を解決するための方策や戦略を企画し確実に実行をして行く。

組織の成功は、行動によってではなく、行動によってもたらされる「実績」によって判断されるべきと考えられる。売り手側でいくら良い製品を造ったと思っても、買い手に評価されなければ意味はない。従って、行動ではなく実績こそが最終的な判断基準となるべきである¹⁶⁾。そして、必ず毎月の目標と実績の差をチェックして、現状把握をして、計画にフィードバックをかけることが大切である⁷⁹⁾。

また、逆に中・長期経営計画は市場環境の変化に対して、単年度の経営計画からのフィードバックされた内容を織り込み変化させなければならない⁷⁹⁾。常に市場動向は激しく変化しており、今の主力商品が陳腐化してしまい競争力を急激に失うことが考えられる。関係者に市場環境の変化の情報を展開して、目標達成のための企業努力を繰り返し、繰り返し実行して行くことが大切である。特に遂行された時期の中期経営計画の内容が、後年度の経営成果に深く意味を持ち、次の中期経営計画が始まると前の中期経営計画の効果は消えるのではなく、中期経営計画の内容によっては、再度効果を表すこともあることが確認されている¹⁷⁾。

経営計画の4つの手法を駆使することにより、前向きな経営ができるばかりか、現時点より将来を予測して、経営課題とそのリスクを早期に発見することができる。過去の決算書を穴が空くほど眺めても、過去の数字は変わらない⁷⁾。しかし、経営計画の4つの手法を駆使することで、未来の数字を自らコントロールをして築き上げることができる。「企業の未来像を描く⁶⁾」ことで、たいへん質の高い予測が可能である。

次頁では、経営計画の4つの手法を具体的にどのように作成するか、その要点について説明をする。

¹ 但し、上場企業においてはその限りではない。

8. 3. 6 経営計画手法「経営計画書」の作成

経営計画書には企業のあるべき姿や方針を記述する。それは、まず初めに、「経営理念」や「社是」の記述から始まる。ここでは、企業の生業と社会貢献において、その企業はどのような存在意義と存在価値を担っているか、その「社会的責任」⁷²⁰⁾を正確に記述する。それは時代を超えても変わらない原理原則であり正義である。創業者の人格、人生観、哲学がそのまま凝縮投影され、短い言葉で表現される強いメッセージでもある。

経営理念の捉え方は、大きく分けて3つに分けられる。1つ目は組織に働き掛け、従業員のモチベーションを刺激する「価値観」としての捉え方。2つ目は戦略に働き掛け、その策定のベースとなる「事業範囲・方向性」としての捉え方。3つ目はその中間的な位置付けである「目的・存在意義」としての捉え方である。これらの3つの捉え方より、はっきりと業績に影響を与える経営理念は「事業範囲・方向性」であると指摘されている²¹⁾。

社員が自社の「経営理念」や「社是」に共鳴をしてくれることにより、企業文化の統一が図られる。それは、多様な価値観とそれぞれ異なる理解や解釈をする個々の社員のベクトルを意図した方向に向けることができ、大きな協力が得られる。トップの考え方は浸透しやすくなり、考え方がぶれないため組織の結束力も強くなる。但し、社員の多様な価値観を尊重することは非常に大切なことであるので、決して忘れてはならない。経営理念を共有するための経営施策には、企業業績を向上させる効果の可能性が指摘されている²¹⁾。逆に経営不振状態の中小企業の多くは、明確な経営理念が存在しない²²⁾。

次に、「中・長期事業構想」「経営の目的」「経営基本方針」について記述する。「中・長期事業構想」では、企業が5年～10年後の将来に実現したい事柄を、定性的に記述する。市場環境に変化がある場合は、環境の変化に柔軟に対応するために、記述内容は毎年更新されなければならない。

「経営の目的」では会社経営を通して、最終的に成し遂げようとする事柄を記述する。例えば「社会貢献」「お客様満足」「社員幸福」「取引先の発展」「自社の発展」「利益の確保」「利害関係者への分配」などに関わることがある。

「経営基本方針」では、会社経営において特に重要な基本方針を記述する。例えば「お客様の満足に繋がるための考え方や行動」「環境の変化に対応するための考え方や行動」「優先順位の明確化」などの絶対に外してならない重点方針である。

ここまで述べた目的や方針が確定したところで、更に詳細の企業目標や方針を設定していく。例えば、「営業部の方針」「製造部の方針」「経理部の方針」「品質保証部の方針」「安全衛生部の方針」「内部体制に関する方針」「人材育成の方針」「クレームに関する方針」「環境方針」「組織図」「設備計画」「要員計画」などである。企業として目標を達成させるためには全社員のベクトルを合わせる必要があり、目標達成のために、どのように取組むのか、今後はどこへ向かうのかといった方向性を明確に示さなければならない。また同時に企業の存在意義を織り込み、世の中にとって必要不可欠な存在であることを分かりやすく記述する必要がある。経営計画書に明確な方針を示すことで、次元の低い管理、監視および利

己的な議論は不要になる。方針が理解されていることで、目標達成のための個々の社員の行動パターンが極めて合理的になり、仮に判断に迷った場合においても経営計画書が正しい方向へ導いてくれる。

8. 3. 7 経営計画手法「利益計画書」の作成

「利益計画書」について、その留意点について説明する。ここで取り上げる「利益計画書」は単年度の利益計画であり、短期の計画である。「利益計画書」では、毎月月次決算を行う。期首に計画をした、各項目の当月目標と累計目標に対して、期中の各項目の実績を比較検討することで、当期の期中における「利益計画」の進捗状況を把握、管理およびコントロールをして行くことができる。

「利益計画書」は会社全体の計画書として策定することを基本とするが、必要であればこれを企業の各商品群や各部門に分けて「利益計画書」を運用することも可能である。そうすることにより、企業のそれぞれの各商品群や各部門における個別の現時点での市場ニーズの実態を推測および把握することができるため、事前に企業の将来に対する有効な手を打つことができる。

また、この「利益計画表」の過去数年間の実績の推移状況を読み取ることで、企業に対する市場の要求動向の強さや弱さなどの変化が顕在化される。そのため、将来において継続して行くことができるアイテムであるか、あるいは撤退をしなければならないアイテムであるか、または育てるべきアイテムであるかの見極めをすることが可能であるため、企業の将来のために有効な決定ができる。

8. 3. 8 経営計画手法「資金運用計画書」の作成

「資金運用計画書」について、その留意点について説明をする。この「資金運用計画書」は単年度の資金運用計画であり、短期の計画である。「資金運用計画書」では「経営計画書」と「利益計画書」で決定した事柄を記入して行く。計画された「経営計画書」と「利益計画書」を実際に実行した場合、「期首現金流動預金」が、期中の運用を通して「期末現金流動預金」ではどのように変化するかが予測できるのである。

この「資金運用計画書」で、資金がショートをしないように、必要な場合は事前に銀行から資金の調達をしたり、会社の体力以上の投資であることが分かれば投資を控えたり、「受取手形」「売掛金」の増加をしないように、支払方法を現金や前払いに変えていくなどの努力を行なう。資金移動に関わる様々な想定を、この「資金運用計画書」でシュミレーションすることで、立てた計画が妥当であるかどうかを、入念に練るのである。

もし、ここでの「資金運用計画書」で力量に見合わない実力以上の計画であることが分かれば、「経営計画書」と「利益計画書」の再検討をする必要がある。逆に、ここでの「資金運用計画書」で自社の力量で十分に計画を実行できるのであれば、自信を持って迷わずに計画を進めることが決定できる。想定される最悪のケースに陥った場合であっても「会

社を絶対に潰さないこと」と同時に、「会社の将来のための前向きな行動をすること」を、この「資金運用計画書」で両立させるのである。この「資金運用計画書」で根拠と裏付けを取り、企業にとってベストな選択肢を決定することができるのである。

ここでは1年の短期の「資金運用計画書」の作成について記述しているが、これを同じ要領で1年ごとに更に9年先までの「経営計画書」「利益計画書」「資金運用計画書」を、長期計画として作成することで、10年の長期計画ができる。10年後の計画となればさすがに精度は悪くなるが、そうであっても将来の課題が顕在化できるので、時間に余裕を持って対処することができる。場当たりの経営から、計画的な経営へ変わることで、腰をすえてじっくり取り組むことができる。また、これらの計画書により企業の経営の基準ができるため、不測の事態に陥っても、何をどうすればよいかの発見と判断が容易になり、経営の安全性と安定性が図れる。これらの計画書を銀行に開示することによって、企業の信用度が格段に上がる。

銀行の立場から言えば、無計画な盲目的経営を行なっている会社と、10年先までの計画があり、いつ、どのタイミングでどうなるのかを明確につかんでいる会社と比較した場合、当然計画を持っている会社の信用は高くなる。これは社員や取引先などの全ての利害関係者に共通して言えることであり、企業と債権者（銀行）の間にある「情報の非対称性」を緩和することで利害関係者からの信用度が高まり、前向きな支援や協力を得られる可能性が高くなると考える。

経営計画を立てることにより、正しい道へ導かれることで、企業経営において迷走することがなくなり、限られた貴重な時間を高密度に有効に使うことができる。企業経営者は忙しいからこそ、経営計画を作成して有効な手を打つ必要があると考える。

8. 3. 9 経営計画手法「比較バランスシート」の作成

「比較バランスシート」について、その留意点について説明をする。ここでの「比較バランスシート」は単年度の比較バランスシートであり、短期の計画である。「比較バランスシート」では「経営計画書」、「利益計画書」、および「資金運用計画書」で決定および設定した金額を順番に記入して行く。計画された「経営計画書」、「利益計画書」および「資金運用計画書」を実際に実行した場合に、「期首」の「資産科目」と「負債科目」が「期中増減」を経て、そこには目標とする「期末」断面の「資産科目」と「負債科目」の財務状態が表れる。

この活用方法は、計画した「経営計画書」、「利益計画書」および「資金運用計画書」を実際に期中で進めて行く中で、毎月月次決算を行い、当月の各々の勘定科目の金額が、「期首」と「期末」の金額の範囲内であれば、正常であると判断ができるのであるが、範囲外になり異常値を示せば、「なぜ基準となる範囲を超えたのか」の原因をチェックする必要がある。

このようにして、「期首」と「期末」のバランスシートの金額を基準範囲として設定し、

期中の毎月のバランスシートと比較を行なうことで、計画に対する進捗状況の管理ができるのである。

8. 3. 10 各計画書とバランスシートの妥当性の確認

上述した要領で「利益計画書」「資金運用計画書」「比較バランスシート」を作成したら、その内容の妥当性について確認していく必要がある。

①「利益計画書」について

本計画書では、「経常利益」の金額の妥当性の確認を行なう。例えば、銀行借入があり、決められた金額を返済しなければならない場合の返済の原資は、「経常利益」から税金を差し引いた「純利益」と「減価償却費」の合計がそれに当たる。これにより、最低限必要とされる「経常利益」が必然的に決定される。ここで、もし「経常利益」の目標が達成できないような事態に陥れば、その不足分の「現金流動預金」がマイナスとなる。時代背景や景気の動向により、「経常利益」の必達が困難と想定される場合は、予め資金調達の準備をする必要がある。

②「資金運用計画書」について

本計画書では、「当期設備投資」の金額についての妥当性の確認を行なう。ここでは「資金運用計画書」の「固定資金余裕」が、例えば月商の3ヶ月以上確保できれば「当期設備投資」の金額について妥当」と判断するなど、企業の安全を確保するための基準を決める必要がある。

「資金運用計画書」の「当期経常利益」が、もし不足するような事態が起これば、「固定資金余裕」はその不足分マイナスになり、「期末現金流動預金」も同額のマイナス影響を受けることになりリスクが高まる。そのため、設備投資を行なう場合は、全額「長期借入金」で賄い経営状態の負の変動に対して意図した安全性と弾力性を担保する必要がある。

次に「資金運用計画書」の「期末現金流動預金」についての妥当性の確認を行なう。

「期末現金流動預金」の金額が、来期の運転資金の運用において耐え得るものかどうかの査定をする。もし不足するのであれば、運転資金の調達の準備をしなければならない。設備投資の予定があれば縮小するか、中止をするなどをして、経営計画の見直しを図る。また、受取手形のサイトの短縮、現金取引への変更、あるいは、支払いを前払いにもらうなどの方法は有効である。そして、棚卸資産は、最小限まで圧縮することで、現金が在庫に化けないための企業努力をすることで、「期末現金流動預金」の確保をして行くことが大切である。

③「比較バランスシート」について

本バランスシートでは、資産科目の「受取手形」「売掛金」「棚卸資産」を確認する。負債科目の「支払手形」「買掛金」も同時に確認をする。ここで必要とされる運転資金を算出するためである。その算出式は次のとおりである。

運転資金 = (売上債権残高 + 棚卸資産残高) - 仕入債務残高

売上債権残高 = 受取手形 + 売掛金、仕入債務残高 = 支払手形 + 買掛金

この計算結果において、その解の符号がプラスの場合、運転資金は入金より支払いが先行するため、恒常的な資金不足になる。それゆえ、経営上で必要な運転資金を確実に確保しておく必要がある。更に、「比較バランスシート」を用いて、特に重要とされる財務分析を行う。経営計画で計画された事柄を実際に実施した場合、当期期末断面でどのような財務状態になっているか、企業の財務体質の健全性のチェックをすることができる。以下表 8-2 にその項目、計算式および目標値²³⁾を記す。

表 8-2 代表的な財務指標とその計算式およびその目標

財務指標項目	計算式	目標
総資本経常利益率	= 経常利益 ÷ 総資本 × 100%	5%以上
売上高経常利益率	= 経常利益 ÷ 売上高 × 100%	5%以上
総資本回転率	= 売上高 ÷ 総資本	2回転以上
流動比率	= 流動資産 ÷ 流動負債	150%以上
固定比率	= 固定資産 ÷ 自己資本	100%以下
長期適合率	= 固定資産 ÷ (自己資本 + 長期借入金)	80%以下
自己資本比率	= 自己資本 ÷ 総資本 × 100%	50%以上

(出所) 島津良知: 上司学²³⁾を基に前田作成

上記の項目が目標値に達しない場合は再計画をする。儲けることよりも、まず、絶対に会社を潰さない硬い計画を立てることが肝要である。

8. 4 中小企業における研究開発のための設備投資

未来の収益の柱を育成するための研究開発には、設備投資が不可欠である。その研究開発のための設備とは、例えば、試験機、分析器、評価機、加工機、付帯設備などがあり、価格は何百万円～何千万円(何億円)と非常に高価である。年々加速的に高度化する顧客要求を実現するためには最新鋭の設備機器が不可欠であり、研究開発能力はその設備能力に完全に依存するかたちになる。

これらの設備の法定耐用年数は現在4～10年である。10年という長期間にわたる設備の減価償却期間は、急速に進む技術革新による技術の陳腐化の概念がない。そのため、陳腐化して使い物にならなくなった設備であっても減価償却費の負担がかかってくる現実がある。レーザ加工機のような高価な最先端技術の設備であればあるほど、その陳腐化は

著しく早く、中小企業にとって大きな負担となっている。一方で、企業は現在の商品、技術、サービスに依存し続けて、永遠に将来の売上や収益を確保できるわけではない。その時代のニーズを満たすことができる新商品および新技術を開発し、刻々と変わる市場環境に対応をしていかなければならない。

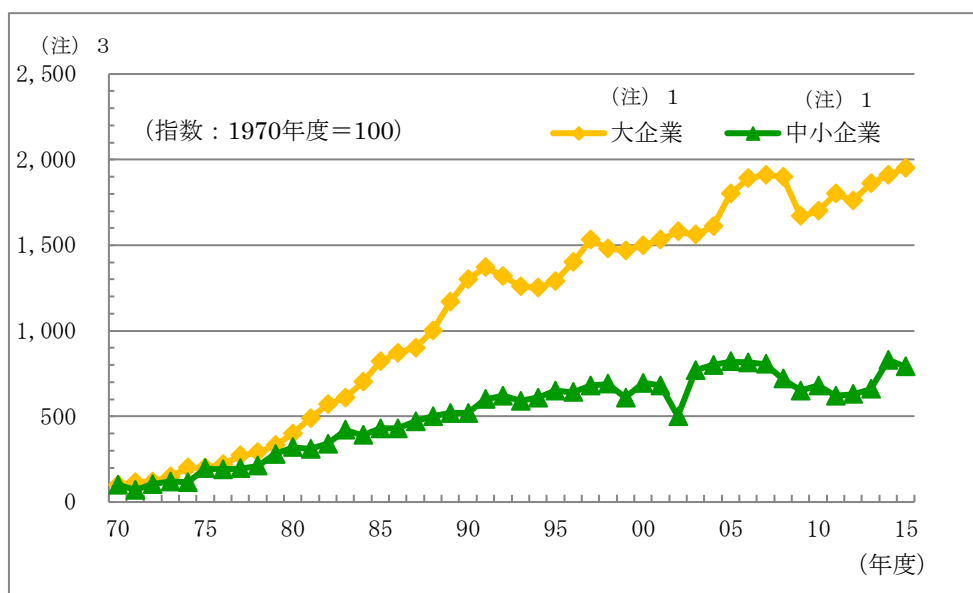
そのため、企業としては研究開発を継続的に行い、高度な最新鋭技術を持った設備機器を導入して、企業の売り物を進化させる必要がある。

8. 4. 1 中小企業における研究開発の変遷

表8-3には、日本の製造業における研究開発費の推移（大企業及び中小企業）を示した。この表から、大企業と中小企業が投じる研究開発費の差は歴然である。企業規模と企業体力に研究開発費は比例すると言えよう。

縦軸の数値は、1970年度を100とした時の指数値である。2015年度においては、大企業の指数が約1900で、中小企業の指数が約700である。1970年度時点と比較をすると2015年度では、大企業と中小企業はともに研究開発費の推移は大きく上昇しているが、中小企業の伸びは大企業と比較して、実に37%にとどまっている。大企業は、大きな市場を広くカバーするのと、難度の高い高付加価値を持った商品の取り扱いが多いため、必然的に投資額がかさむと考えられる。それゆえ、中小企業の研究開発費と比して、その金額は相対的に見て非常に大きい。

表8-3：製造業における研究開発費の推移（大企業及び中小企業）²⁴⁾



(出所) 総務省「科学技術研究調査」を基に前田作成

(注) 1. 従業員数1～299人の企業を中小企業、300人以上を大企業としている。

2. 研究開発費は、社内使用研究費と社外支出研究費の合計。

3. 数値は、1970年度を100とする指数値。

研究開発は、その研究開発によって産み出された新商品の販売によって、その開発投資資金を回収し、更に回収した資金を再投資して、次の研究開発をするといったサイクルが必須となる。そのため、企業組織内において「研究開発～新商品開発～販売～利益創出～再投資～」といった健全性を担保した好循環の仕組みが必要であり、途切れなく企業組織の中を縦横断する継続活動が必要である。特に新しく市場に出された新商品における、モニタリングと市場調査は必須であり、新商品を使用するユーザからの不満、クレーム、不具合などの意見はたいへん貴重なため、必ず企業組織内にフィードバックを行い、更に新商品のブラッシュアップを行なうことで商品の完成度を高める「リバーズエンジニアリング」の思想がたいへん重要である。

その点を考慮すると、中小企業は大企業と違い企業規模が小さいため、顧客からの意見や助言を、素早く受け止め、組織内ですぐに行動に移すことができるため、新商品の完成度を高めることが早くできると言えよう。これは、大企業よりも中小企業の方が優位な点である。

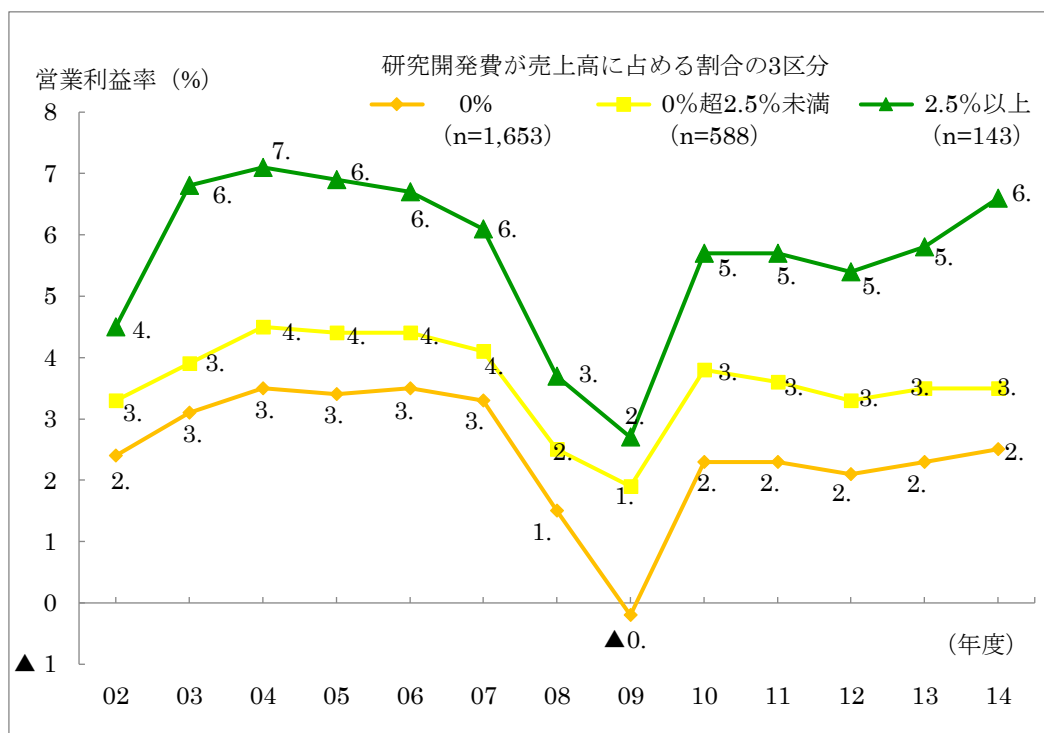
8. 4. 2 中小企業における研究開発費と営業利益率

表8-4には、中小製造業における研究開発費が売上高に占める割合別に見た、営業利益率の推移を示した。売上高における研究開発費の割合が多いほど、営業利益率が高い傾向にある。2009年度はリーマンショックの影響を受けた年度で、世界的にも記録的な大不況になった年度である。それにも関わらず、売上高における研究開発費の割合が多い中小製造業は赤字にはならず営業利益を確保している。

2010年度からはV字回復をしているが、2012年度までは大不況の余波のあおりを受けて営業利益は停滞気味である。しかし2013年度以降の景気回復とともに、売上高における研究開発費の割合（2.5%以上）が多い中小製造業は、加速的に営業利益率の上昇が見られる。

表8-4が示すとおり、研究開発を実施することは、確かにリスクが高いように思えるが、そのリスクを上回る利益も同時に企業にもたらすのである。

表8-4：中小製造業における研究開発費が売上高に占める割合別に見た、
営業利益率の推移²⁴⁾



(出所) 経済産業省「企業活動基本調査」を基に前田改編

(注) 2002年度と2014年度の2時点で中小企業基本法の中小企業の定義を満たし、かつ2002年度から2014年度までの全ての年度において、同じ凡例の区分に該当する企業について集計している。

8.4.3 A社の事例

創業69年の中小企業であるA社と中小企業（製造業）の2015年度の平均の代表的な財務分析の実績値の比較を、表8-5に示した。中小企業（製造業）の実績値は中小企業白書より引用した。評価については日本リーダーズ学会の嶋津(2011)より引用している。

A社の財務は、総資本経常利益率、売上高経常利益率、流動比率、自己資本比率において、中小企業（製造業）の平均を大きく上回り、評価も健全である。しかしながら総資本回転率のみが0.6回転ということで中小企業（製造業）の平均値よりも悪く、評価においても健全性が維持されていない。これはA社の研究開発の強化に伴い、2012年より研究開発用の高額な設備投資（先行投資）を実施し、2015年度時点ではまだ設備投資額に見合う回収ができていないことを意味する。この総資本回転率は、非効率な経営状態に陥っていることを示しているが、A社では、事前に一倉理論を用いてこのリスクを予想し回避する手立てをうっている。更に、上述したとおり、研究開発を実施することは、リ

スクの発生とともに、そのリスクを上回る利益も同時に企業にもたらすことが期待される。それゆえ、ここで行った投資金額の回収には後少し時間を要してみていく必要がある。

このようにしてA社では一倉理論を用いて、経営計画を策定し財務の健全性を保ちながら、リスクの高い研究開発に取り組んでいる。一倉理論を駆使することで、リスク回避が可能なことは、A社の過去の事例、および、他社事例から既の実証済みであるため、A社の研究開発活動は極めて安全に前向きに実施できている。実践的な一倉理論は、実務の現場への適合性と応用の可能性が高く、企業経営を前向きにコントロールすることが可能であることが分る。

表 8-5：2015年度のA社と中小企業（製造業）の代表的な財務分析の比較

項目	A社*	中小企業(製造業)**	評価***
総資本経常利益率	7.9%	3.9%	5%以上であれば健全
売上高経常利益率	12.4%	3.6%	5%以上であれば健全
総資本回転率	0.6回転 ****	1.1回転	2回転以上であれば健全
流動比率	321%	187%	150%以上あれば健全
固定比率	93%	98%	100%以下であれば健全
自己資本比率	63%	44%	50%以上であれば健全

(出所) A社実績と中小企業白書等を基に前田作成

(注) *2015年度A社実績、**平成28年度中小企業動向、2015年度版中小企業白書

*** 嶋津・上司(2011)、****A社の研究開発の強化により、2012年より研究開発用の高額設備の先行投資を実施したため、総資本回転率は低い値を示している。

8.4.4 より安全な経営状態で研究開発を進める方法

研究開発費の確保についてその源泉は、例えば設備投資の場合であれば、自己資金で行なう場合は「純利益」と「減価償却費」の合計の範囲以内になる。もしこの範囲で賄うことができない場合は、外部資金である「補助金」や「助成金」を活用することは有効である。

また、現在のように金利が低い状況下では、手元資金は極力温存しておいて、銀行での長期借入金で全額を賄うことが安全であろう。銀行で借入交渉をする時は、経営計画を構成する3つの計画書と1つのバランスシートを丁寧に説明し、その合理性を理解、認識してもらうことで、金融機関を自社の理解者として強い味方についてももらうことができる。

これは社員についても同様である。経営計画は企業のトップが創り決定をするが、具体

的な戦略の実施は社員が深く関わるので、社員に丁寧に説明をして協力を求める必要がある。

中小企業における研究開発費の確保と会社全体としてのバランスは、ここまで述べてきた経営計画の4つの手法を駆使することで可能である。この手法の魅力は、企業の財務体質の健全性を保ちながら、同時に会社の将来のための前向きな行動（すなわち研究開発）をとることが可能であるということである。

研究開発用の設備はたいへん高額であり、また先行投資の意味合いが強いために、即座に、売上や利益の増加に結び付くものではない。そのため「研究開発用の高額設備を導入した直後は、全く売上と利益に貢献しない」という前提の元で、経営計画におけるその進め方について事前に熟慮しなければならない。

繰り返し述べているとおり、経営計画の策定は生やさしいことではない。目標を達成するためには、沢山の制約や障害を1つ1つ取り除き、あるいは乗り越えていくための、具体策を決めていかなければならないのである。そこには、文字通りの「あちらを立てばこちらが立たず」の矛盾と不可能にぶつかる。その矛盾と不可能をつぶさなければならないのである⁷⁾。

経営計画策定には苦勞がつきものであるが、メリットもある。それは、策定プロセスにおいて、多くの仮想体験をすることができることである。頭の中で描いていることを、紙面に記述することで、計画に対する根拠と裏付けを同時に整理することができる。この根拠と裏付けは、当然リスクに対する事柄も含まれており、期中発生するかもしれない研究開発に関わる経営リスクも既に織り込み済みである。この様に経営計画の策定のプロセスを通して、現状から見たリスクの許容範囲が明らかになるのである。その範囲内での研究開発活動であれば許容範囲と考えて良い。

8. 4. 5 未知未踏分野への挑戦

企業の研究開発は、市場や顧客の課題解決を目的とした大変重要な取り組みである。企業は、いつか自社へ新しい収益をもたらしてくれることを期待し、多額な費用と時間を使って研究開発へ取り組むが、市場や顧客が抱える課題は非常に困難なものも多く、結果的に失敗に終わってしまうケースも多々ある。企業の新しい収益源どころか、逆に企業の業績へ大きな悪影響を及ぼすこともある。

しかし、企業が新しく成長するためには、時代と顧客および市場の環境変化に柔軟に対応する必要がある。将来的に陳腐化する可能性がある自社の現商品にいつまでもしがみつき、依存し続けることは、企業にとってかえってリスクとなる。これからの新しい時代に見合った新商品を追加して行く必要がある。これは企業として健全な成長をして行くための、永遠に継続しなければならない課題であり宿命でもある。

この企業の永遠の課題と宿命を考慮すると、上場企業を頂点としたピラミッド構造に所属する中小企業（製造業）のビジネスモデルには、アンソフの「成長ベクトルの構成要素」

25)にあるような、表8-6に示す4種類のタイプがあると考えられる。①下請け型ビジネスモデル②応用型ビジネスモデル③研究開発型ビジネスモデル④市場開拓型ビジネスモデルである。

①下請け型ビジネスモデルは、特に受注型であり、価格や仕様などの決定権が殆どないため極めて自主性はなく、企業の命運はすべて顧客に握られているビジネスモデルである。これは研究開発強化前のA社のビジネスモデルでもある。②応用型ビジネスモデルは、既存技術や既存商品で新規市場に攻勢をかける手法である。既に知り尽くした技術や商品に若干の工夫や改善を加え、販売先、販売層、販売地域などを変えることで、比較的少ないリスクで新しい成長と機会を見出すことが可能である。

表8-6：企業におけるビジネスモデル

	既存技術／既存商品	新規技術／新規商品
既存市場	①下請け型ビジネスモデル 特徴：受注型、成熟型、定型 改善型、価格競争、公知	③研究開発型ビジネスモデル 特徴：シーズ先行、未完の大型、 市場拒否、超ニッチ
新規市場	②応用型ビジネスモデル 特徴：提案型、成熟型、不定型 改造型、価格競争、市場歓迎	④市場開拓型ビジネスモデル 特徴：化学反応型、市場歓迎、 コアビジネスの大変革、 イノベーション、想定外

(出所) 前田作成

③研究開発型ビジネスモデルは、シーズ先行型のものが多く、市場や顧客が抱えている課題解決にむけて誰もが気が付かない方法で具現化していく。前例が無く、失敗に至るケースがたいへん多い。また、仮に開発に成功したとしても、今まで世の中になかったものを販売するのは非常に難しい。一般的に人は前例のないものには、よほどの理由がない限り受け入れようとしない心理が働くと考えられる。そのため、この③研究開発型ビジネスモデルでは多くの失敗が生まれることがある。しかし、市場や顧客の課題に正しく向き合い続けることで、最初は市場や顧客に受け入れられなかったその研究開発の成果も、次第に市場に浸透し④市場開拓型ビジネスモデルへと進化して行く。

この④のビジネスモデルでは、いくつかの複数の研究成果がまるで化学反応を起こすように相乗効果を引き起こし、当事者さえも予測ができない革新的なアウトプットをもたらすことがある。これはだれもが経験したことのない「未知未踏」分野への第一歩であり、大きく成長できる大変貴重な機会がこのビジネスモデルのある段階で与えられる。これはまさに理想とするビジネスモデルである。

さらに、過去に失敗し、埋没したかのように思われた研究開発の成果は、時代の遷移とともに新市場の新規要求により、突然新たな可能性をもたらすこともある。研究開発の成

果と事前に練られた経営計画は個々の最適なタイミングで、お互い補完し合うことができる。経営計画により課題が明らかになっているため、通常であれば見落としてしまう研究成果を、ここでは敏感に感じ取り、その成果をいち早く活かすことに気付くからである。

このような微差が大差を生み、研究開発を進める大きな原動力となり、好循環を生み出す。研究開発からもたらされた成功は「偶然」ではなく、経営計画からもたらされる「必然」であることに気付く。

A社では、研究開発の強化を機に行った設備投資以外にも、2015年度以降から2018年7月までに年商の約60%に相当する新規の研究開発用の追加の設備投資を実施している。その結果、従来に比較してより難度の高い高付加価値型の案件の受注ができるようになった。

A社の2018年度(2017年12月～2018年7月)の最新の経常利益の実績は、2015年度(2014年12月～2015年7月)と比較すると約1.5倍となり増益を実現した。また、有名な優良企業との取引も急増加しており、受注業務の質や内容そのものが大きく高付加価値化している。本論文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始められている。

A社は、一連の研究開発をとおり、従来、経験のない未体験ゾーンに踏み込んだ瞬間、そこには競合や比較される概念が無く、自らの意志で市場を創り上げる自由度があることに気付いた。もし、A社の研究開発が「一人よがり」ではなく、真に顧客要求や顧客課題に貢献できるものであれば、新しい市場が創造でき、A社の成長のみならず、国力強化に繋がるような大きな貢献ができる可能性があると考えているのである。

8.5 まとめ

本章では、A社を含む中小企業が、リスクを回避し安全な経営状態で研究開発を進めるために、事前に経営計画策定することの重要性について論じてきた。実際に、A社では、経営計画の「経営計画書」「利益計画書」「資金運用計画書」「比較バランスシート」の4つの手法を駆使することにより、先手を打った前向きな経営が可能となっている。現時点より将来を予測して、経営課題とそのリスクを早期に発見し、早期に手を打つことで、意図的に健全性を保った財務をコントロールしているのである。

新たなゾーンへ成長・飛躍するためには、企業にとって重要な経常業務であり、同時にリスクもある研究開発を継続的に行い、その成果を事業化する必要がある。研究開発の成果から、新事業創造の実現を考えた場合、その実現のためには、短期的ではなく長期的な視野に立ち、熟慮された計画策定を何度も繰り返し、成功するまでやり抜く企業の強い姿勢とその準備が必要とされる。

通常、初期の開発商品を市場投入する前に、モニタリングを目的に市場や顧客に試用してもらい、その中で揉まれることで改善され、売れるための条件づくりを築いていく手法が一般的によく取られる。その初期商品は市場や顧客の中でブラッシュアップされ、原型

を留めないくらい形が変わることもある。そのブラッシュアップの期間は意外と長く、この間をどのように凌ぐかも重要となる。先走って利益の確保をしたいところであるが、ブラッシュアップの期間でも多くの改良や変更が必要となるため、相変わらず資金の不足の悩みが尽きない時期が続くため、注意深く計画策定を繰り返す必要があると考える。このブラッシュアップが成功すれば、いよいよ新事業と新市場の創造のスタート地点に立てると考える。開発期間と販売準備期間は何れにしても長期間にわたるため、儲けるよりも、まずは会社を絶対潰さない大前提のもと、計画を策定すると良いと考える。

今回のA社の研究開発においては「財務の安全の確保」を重点事項として進めてきた。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」を用いた経営計画を策定してきたのである。計画策定時には、「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・継続することができた。今回のA社のケースを通じて、「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が改めて証明されたといえよう。

さらに、研究開発の強化により、研究成果を学会等で論文として発表する機会を得たことで、多くの関係者との新たな交流が生まれた。更に、その交流を通じて多くのご意見やご助言を頂いたことで、A社では決して気付くことができない、顧客目線の市場要求がはっきりと顕在化してきた。その後の研究では、学会の交流を通して気づいた実際の顧客要求に対して、案件を絞り込み「技術開発と市場開発」を同時に取り組むことができた。

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ている。顧客の構成も優良顧客が増加した。それに伴い自社業界では知名度が上がり、利益率の高い受注が増加し、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」が加わることで、A社の経営に大きな相乗効果をもたらした結果と言えよう。

以上の結果より、一倉理論はリスクを伴う研究開発を進めるうえで、必然的に健全経営を両立させることができる有効な理論であることが確認できた。

参考文献

- 1) 安西克巳, 井ノ上寛人, 春日正男 : 中小企業の経営状況を可視化する財務評価手法の提案, P441, 日本感性工学会, 2014
- 2) 寺岡寛 : 日本における中小企業の研究動向, 大原社会問題研究所雑誌 No.541, P32-P36, 2003
- 3) 山倉健嗣 : 中小企業の成長戦略と組織・組織間関係, 横浜国際社会科学研究所 第 13 巻第 6 号, P409, 2009
- 4) 高橋美樹 : 中小企業の量的成長と質的成長, P133-P134, 三田商学研究第 56 巻第 6 号, 2014
- 5) 加藤雄士 : 中小企業の経営計画立案に関する一考察 (2) , P168 , 2015
- 6) 一倉定 : 一倉定の社長学第1巻 経営戦略, 日本経営合理化協会, 1980
- 7) 一倉定 : 一倉定の社長学第2巻 経営計画・資金運用, 日本経営合理化協会, 1980
- 8) 河野豊弘 : 戦略経営計画のたて方, ダイヤモンド社, 1980
- 9) 占部都美 : 経営戦略と経営計画, 白桃書房, 1971
- 10) 真船洋之助 : 戦略的経営のための経営計画, 税務経理協会, 1992
- 11) 日本経営合理化協会サイト 講師・著者紹介
<http://www.jmca.jp/prod/teacher/1375>
- 12) 加藤雄士 : 中小企業の経営計画立案に関する一考察 (1) , P93, 2015
- 13) 福島誠宣, 米満洋己, 新井康平, 梶原武久 : 経営計画が企業業績へ与える影響についての経験的な検証, 2011
- 14) 加護野忠男 : 経営戦略の意味, P26, 国民経済雑誌 第 175 巻第 4 号, 1997
- 15) 一倉定 : 一倉定の社長学第6巻 内部体制の確立, 日本経営合理化協会, 1982
- 16) 澤邊紀生, 飛田努 : 中小企業における組織文化とマネジメントコントロールの関係についての実証研究, P75, 日本政策金融公庫論集 第 3 号, 2009
- 17) 高見茂雄 : 中期経営計画が経営成果に及ぼす影響, P46, Melco Journal of Management Accounting Research vol.6.issue1/2, 2013
- 18) 川上義明 : 中小企業経営・管理研究に関する基礎的考察, P381, 2007
- 19) 一倉定 : 一倉定の経営心得, P34, 日本経営合理化協会, 2003
- 20) 櫻井克彦 : 現代の経営環境と企業の社会的責任, P23, 中京経営研究 第 15 巻第 1 号, 2005
- 21) 檜崎賢吾 : 経営理念の内容と業績との関係についての考察, P103, 大阪府立大学経済研究 第 56 巻 4 (234) , 2011
- 22) 佐竹恒彦 : 中小企業の再生と経営者のリーダーシップ, P105, 2016
- 23) 嶋津良智 : 上司学 , 日本リーダーズ学会 , 2011
<https://ameblo.jp/shimazuyoshinori/entry-10845777577.html>

24) 平成 28 年度中小企業動向, 2017 年度版中小企業白書

http://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/H29/PDF/chusho/00Hakusyo_zentai.pdf

25) Ansoff, H. I., Corporate Strategy : An Analytic Approach to Business Policy for Growth and Expansion, McGraw Hill, 1965 (広田寿亮訳『企業戦略論』産業能率短期大学出版部, 1969)

第9章 結 論

本論文は、産業界への更なるレーザー溶接の適用拡大を目的に、大型構造物への大出力レーザー溶接のための周辺機器の開発や溶接施工法の確立を取りまとめた。特に、大型構造物への大出力ファイバーレーザー装置による長時間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った。

第1章では「序論」としてレーザー加工の市場動向とその優位性および課題について述べた。今日の各種産業界でのレーザー加工の適用は急速に進んでおり、各産業界のレーザー加工の応用は、そのアウトプットとして従来には無かった高い付加価値を生み出し確実に進化している。一方、レーザー発振器においても大出力化、高性能化、小型化、高効率化、低価格化が進んでおり、レーザー加工の応用は今後も更に拡大すると予想される。

第2章の「高出力（10 kW～30 kW）ファイバーレーザー用の加工ヘッドの研究」では、高出力で長時間運転に耐える加工ヘッドの開発を目的に、レーザー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ー伝送やレーザー集光を行う溶接用レーザー加工ヘッドを開発した。レーザー出力1 kW～30 kWのレーザー出力測定において、設定レーザー出力に対して、実測レーザー出力は98%～99%のレーザー出力が得られた。また、冷却水路が一筆書きで3 L/minである場合は、焦点位置および焦点シフト量はレーザー出力15 kWの時に+2.9 mm、30 kWの時は+6.9 mmであった。次に、冷却水路が2系統で加工ヘッド本体の冷却を3 L/min、ミラーの冷却を6 L/minにした場合は、焦点位置および焦点シフト量はレーザー出力15 kWの時に+2.4 mm、30 kWの時は+7.8 mmであった。冷却水量の違いによる焦点シフト量を比較すると、1 kWから25 kWまでは、6 L/minの方が焦点シフト量は少ないが、26 kWを超えると6 L/minの方が、焦点シフト量は大きくなった。この原因は集光ミラーを裏面側より冷却しているためその表面の曲率が大きくなるためと思われる。次にレーザー溶接加工ヘッドの外周部の温度をサーモグラフィで測定した結果、冷却水路が一筆書きで3 L/minである場合でも、冷却水路が2系統で加工ヘッド本体の冷却を3 L/min、ミラーの冷却を6 L/minにした場合であっても、その温度は限界使用温度60℃以下の40℃であった。レーザー出力30 kW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ー加工ヘッドであることを確認した。

第3章の「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」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だ。溶接加工点より前方5 mm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、加工用のレーザーとほぼ同軸でのシームトラッキングが可能であった。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0.072 mmであった。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0.016 mm、マイナス側は平均-0.065 mmであった。高さ方向であるZ

軸の追従精度の範囲は ± 0.4 mmであった。このことより、開発した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にあることが判明した。

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、レーザ・アークハイブリッド溶接用のシームトラッキングシステムを開発した。突合せ継手での溶接線の追従の狙いズレは、溶接線に垂直のX座標位置0に対して最大 $+0.12$ mm、最小 -0.09 mm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の追従が可能であった。開発したレーザ・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は実用上問題のないレベル（ ± 0.15 mm以下）にあることが判明した。

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、第3章と第4章で開発した技術に加えて、すなわち、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、適応制御センサー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ー送給速度、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た。すなわち、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にした。適用実験ではSPHC材（板厚：6 mm）の突合せ継手において、継手ギャップを0～2 mmに変動させた溶接継手に対して、レーザとアークを出力して、同時に継手ギャップ適応制御機能を使用することでアンダーフィルなどの欠陥のない健全な溶接ができることを確認した。すなわち、開発した適応制御技術ではレーザ出力、ワイヤー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、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、本溶接を行う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して、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開発した。仮付ビードありの場合での、シームトラッキングの溶接線の追従精度は溶接線の垂直方向のX軸の座標位置0 mmに対して、最大 $+0.14$ mm、最小 -0.035 mmの狙いズレが生じた。実験における追従精度は、平均 $+0.05$ mmであった。すなわち、仮

付ビードの追従処理を併用した場合であっても、レーザ溶接で健全な溶接が可能な狙い精度の許容値 ± 0.15 mm以下 を満足した。また、溶接速度を変えた平均追従精度は溶接線に対して、溶接速度 1 m/min では $+0.041$ mm、溶接速度 5 m/min では $+0.062$ mm、溶接速度 7 m/min では $+0.082$ mmであった。溶接速度を 7 m/min まで増すと追従精度が $+0.082$ mmと増して悪くなった。

第7章の「4 m長尺溶接構造物へのレーザ・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溶接の適用を考えた場合、長時間の連続加工となるため、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ーの内部には、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、シームトラッキングセンサーが溶接中に発生する輻射熱により、センサーが熱損傷を受けて故障する、あるいは、ヒュームにより光学部品が汚染され故障するといった事態が想定される。本章では輻射熱とフェームといった外乱が、シームトラッキングセンサー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水冷ジャケットのような対策を取り、レーザ溶接の大型構造物への実用化の実現に向けて本章では研究に取り組んだ。その結果、センサー外装部の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。センサー内部のCCDカメラとLEDの動作保障温度範囲 85°C 以下であり、問題ないことが確認された。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、飽和した。吸引ノズルの材質は軟鋼で融点は約 1500°C であり、問題ないことが確認された。さらに、溶接中のセンサー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終始安定していたことを確認できた。3Dシームトラッキングシステムを併用してのレーザ・アークハイブリッド溶接で、4 m長さのすみ肉溶接を行ったが、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た。これより外乱に対する3つの対策は有効であったことがわかった。

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た。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・継続することができた。今回のA社のケースを通じて、「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が改めて証明された。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ている。顧客の構成も優良顧客が増加した。それに伴いA社の業界では知名度が上がり、利益率の高い受注が増加し、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と言える。

謝 辞

本研究を遂行するに当たって、終始御懇切なるご指導ご鞭撻を賜った光産業創成大学院大学の沓名宗春特任教授、姜理恵准教授に対し厚く御礼申し上げます。また、本研究の実験にご協力いただいた鳥越功、春日翔貴の両氏にも厚く御礼申し上げます。また、本論文をまとめるに際して、終始ご指導いただいた光産業創成大学院大学の坪井昭彦教授および沖原伸一郎准教授に対して、特に記して深甚の謝意を表します。