

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「汎用多関節ロボットを用いたレーザ溶接による高精度、
高品質かつ低コストなテーラードブラנק製造装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成 22 年 3 月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人 富山県新世紀産業機構

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 レーザによるテーラードブランク溶接技術の確立

- 2-1 研究目的及び目標
- 2-2 実験方法
- 2-3 研究成果

第3章 高精度及び高速ロボット溶接のための位置決め技術の確立

- 3-1 研究目的及び目標
- 3-2 実験方法
- 3-3 研究成果

第4章 全体総括

- 4-1 成果の総括
- 4-2 今後の取組み

第 1 章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

世界の自動車産業において、CO₂削減や衝突安全性の向上のため、軽く、強い自動車のボディが求められており、その具体的な対策として、テーラードブランクなどの採用が増えていることから、コスト削減とテーラードブランク技術の普及の為、高品質かつ低価格なテーラードブランク製造装置の開発が望まれている。

そこで、本研究では、①レーザによるテーラードブランク溶接技術の確立、②高精度及び高速ロボット溶接のための位置決め技術の確立を軸とし、高精度、高品質かつ低コストなテーラードブランク製造装置の開発を目指す。

(2) 研究目的

自動車用テーラードブランク溶接構造部材を高寸法精度、低コストで製造できる自動溶接加工装置を開発するため、ファイバーレーザと産業用ロボットを一体化し、ビームスポットの最適化を図り、熔融池拡大による開先ギャップ裕度の改善およびレーザセンシングによる溶接軌跡補正技術を併用することで、高精度、高品質かつ低コストなテーラードブランク製造装置の開発を行う。

(3) 研究目標

【1】 レーザによるテーラードブランク溶接技術の確立

- ① 従来のランプ励起 YAG レーザでの貫通溶接に比べて溶接速度の 20%向上。
- ② 耐ギャップ裕度を 0.1 mmから 0.3 mmに拡大する。

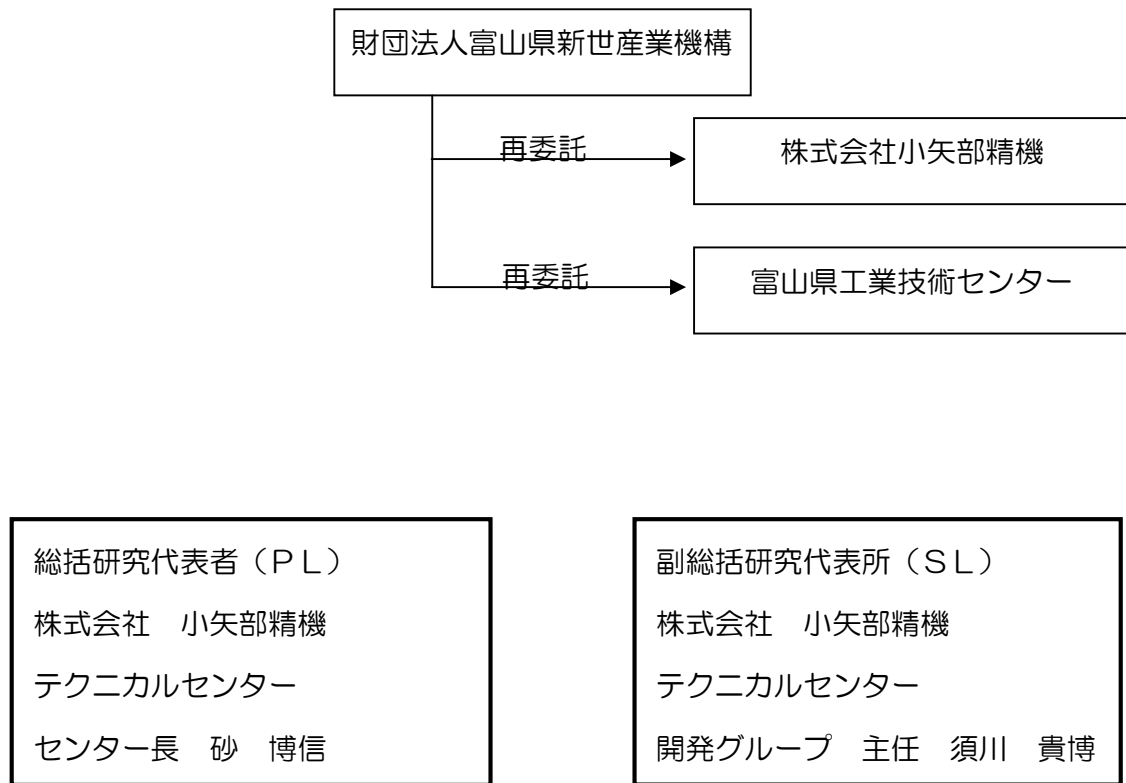
【2】 高精度及び高速ロボット溶接のための位置決め技術の確立

インラインシーム計測装置を用いたセンシング開発により、ロボット軌跡精度を 0.02 mm以内とする。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

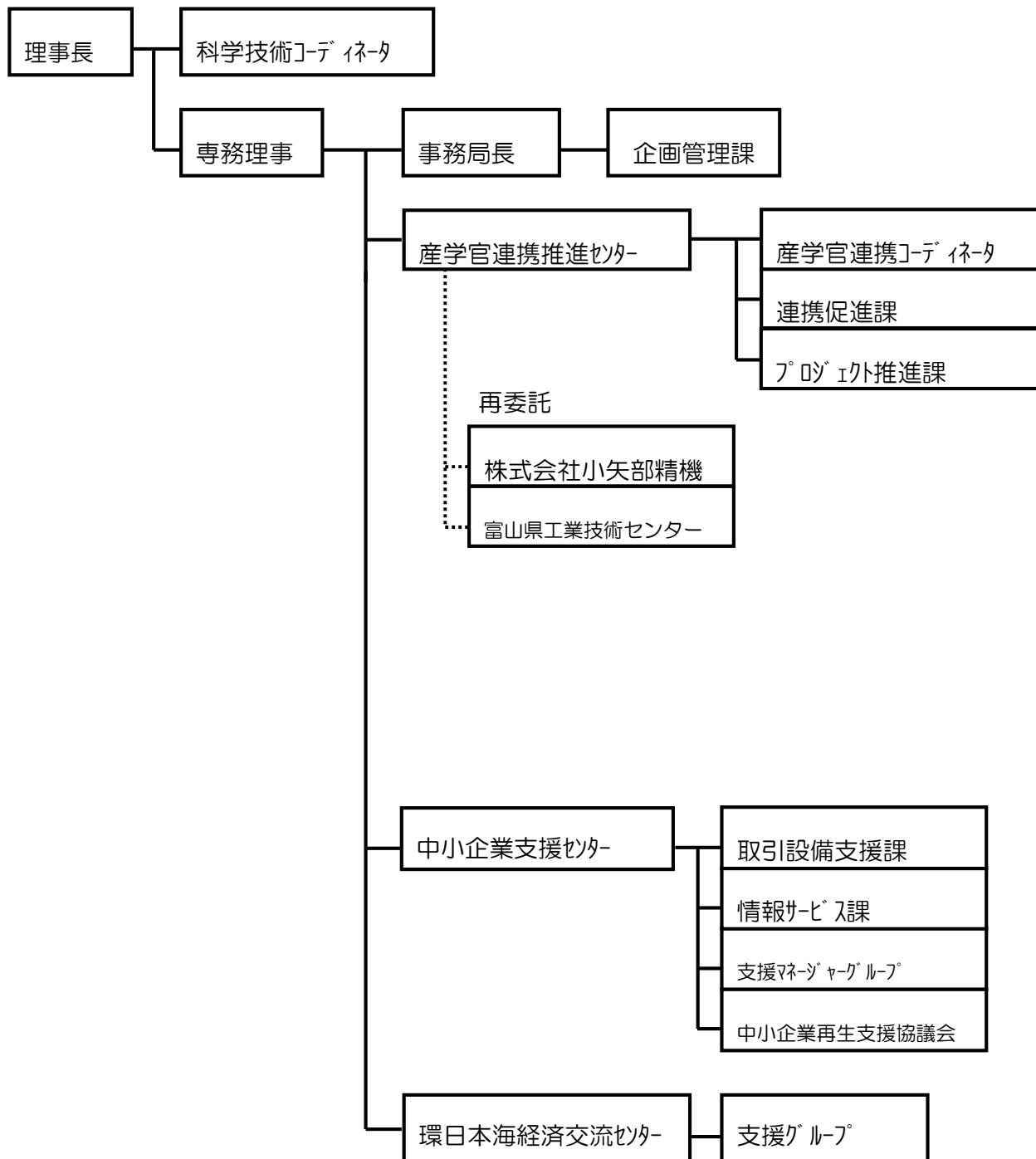
（1）研究組織・管理体制

研究組織

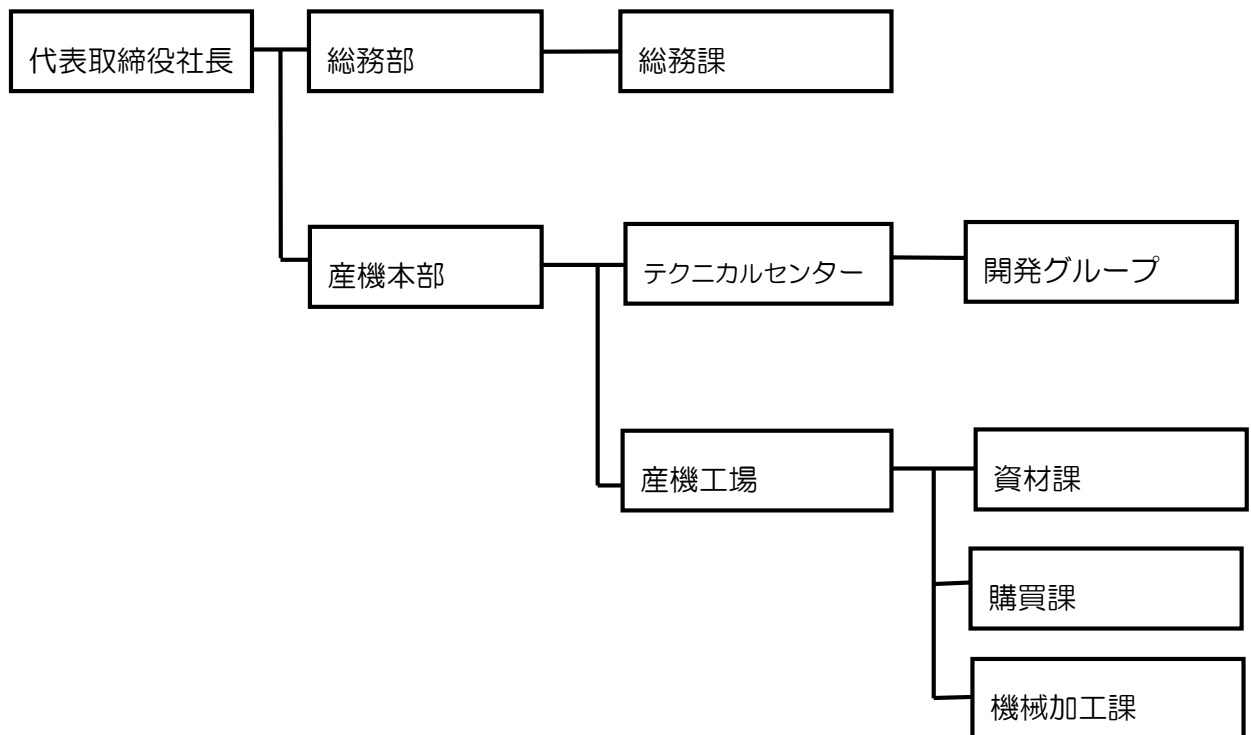


管理体制

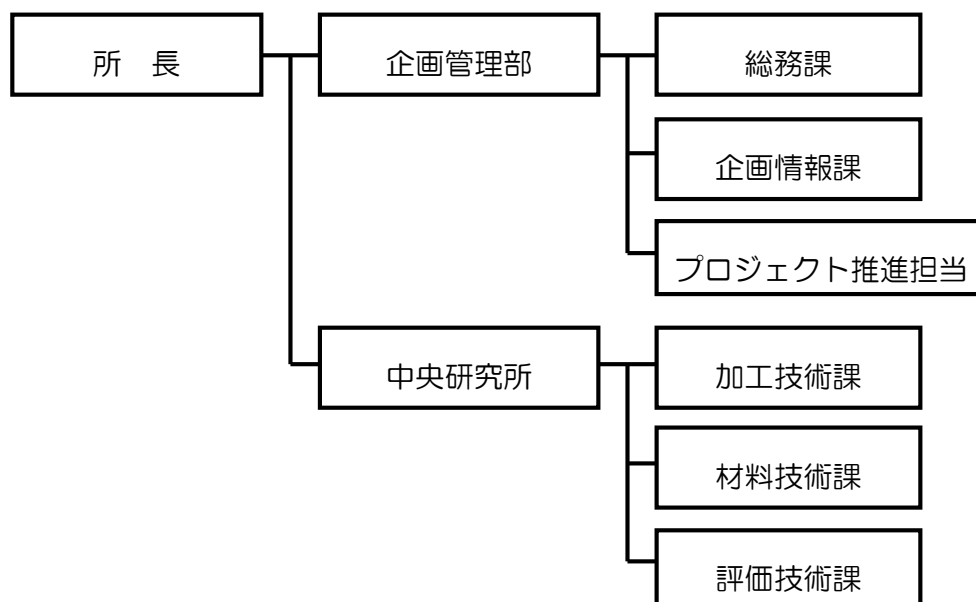
【財団法人富山県新世紀産業機構】



【株式会社小矢部精機】



【富山県工業技術センター】



(2) 研究者氏名

株式会社小矢部精機

氏 名	所属・役職
砂 博信	テクニカルセンター センター長
須川 貴博	テクニカルセンター 開発グループ 主任
早川 尚志	テクニカルセンター 開発グループ 主任
高長 昌志	テクニカルセンター 開発グループ

富山県工業技術センター

氏 名	所属・役職
富田 正吾	企画管理部 企画情報課 主幹研究員
山岸 英樹	企画管理部 企画情報課 主任研究員
森本 英樹	中央研究所 加工技術課 主任研究員
柿内 茂樹	中央研究所 材料技術課 研究員

(3) 協力者

住商スチール株式会社 自動車鋼板事業部 参事 長谷川 隆久

1-3 成果概要

(1) レーザによるテーラードブランク溶接技術の確立

本研究により、ギャップ裕度の増大を図るためには、レーザスポット径を拡大し、金属の溶融量のコントロールにより可能であることが判明した。また、レーザスポット径と溶融される金属量の相関関係が明確となり、ギャップに対する必要スポット径が机上にて算出できるようになった。

しかしながら、レーザスポット径をギャップに対して適切に設定した場合、従来技術では溶接速度が著しく低下する。この相反するテーマの解決方法として、今回の研究においては、シングルスポット法においては、小スポット径レーザを大きくデフォーカスさせて溶接を行う手法をもったの改善を確認し、耐ギャップ裕度を 0.3 mm に拡大 及び 従来のランプ励起 YAG レーザに比べて溶接速度の 20% 向上を達成した。また、ツインスポット法を用いることにより、ギャップ裕度と溶接速度をシングルスポット法と同等以上としつつ、溶接面のビート形状の改善と機械的強度の改善手法を得ることができた。

これらの成果より、溶接加工機の機械精度が劣る場合においても、容易にレーザ溶接が可能となり、また、高精度な溶接加工機との組み合わせにおいては、より高速、高品質な溶接の実現が可能となる。

(2) 高精度及び高速ロボット溶接のための位置決め技術の確立

本研究により、ロボット軌跡精度が最適となる配置は溶接線をロボット正面方向とすることが判明し、動作速度が変化しても軌跡精度には大きな影響が無いことが明らかとなった。また、この方向に動作させる場合、本来、ロボット単体での軌跡精度が良好であるため、インラインシーム計測装置の(※1)リアクティブ制御である、シームトラッキング機能だけを使用した場合は、制御応答性が低く、ロボット軌跡精度の向上率が低いことが判明した。そこで、(※2)プロアクティブ制御である、軌跡精度補償機能(「Compensation」)を併用することによりロボット軌跡精度が著しく改善され研究目標であるロボット軌跡精度 0.02 mm以内を達成した。

これより、直線溶接を対象とする産業用(汎用多関節タイプ)ロボットを使用したレーザ溶接加工装置はインラインシーム計測装置を併用することにより、従来の直行軸型溶接加工装置と同等の軌跡精度を得ることが可能となった。

□ (※1)リアクティブ制御・・・センサーなど外部情報によりアクチュエーターを制御

□(※2)プロアクティブ制御・・・予めマッピングされたプログラムに従い、センサーなど外部情報に頼らず必要とされる動作を予測してアクチュエーターを制御

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(1) 事業管理者

法人名：財団法人富山県新世紀産業機構（代表者 理事長 石井隆一）

住 所：〒930-0866 富山県富山市高田 529 番地

連絡担当者名、所属役職名：中川章 産学官連携推進センター部長

TEL：076-444-5636 FAX：076-444-5630

e-mail：nakagawa@tonio.or.jp

(2) 総括研究代表者

氏 名：砂博信

組織名：株式会社小矢部精機

所属役職名：テクニカルセンター センター長

TEL：0766-69-8131 FAX：0766-69-8955

e-mail：hironobu_suna@oyabe-seiki.co.jp

(3) 副総括研究代表者

氏 名：須川貴博

組織名：株式会社小矢部精機

所属役職名：テクニカルセンター 開発グループ 主任

TEL：0766-69-8131 FAX：0766-69-8955

e-mail：takahiro_sugawa@oyabe-seiki.co.jp

(4) 研究実施者

機関名	代表者役職氏名	連絡先
株式会社 小矢部精機	代表取締役社長 宮崎圭蔵	〒932-0137 富山県小矢部市渋江 2020 番地 TEL 0766-69-8131 FAX 0766-69-8955 e-mail :hironobu_suna@oyabe-seiki.co.jp
富山県 工業技術センター	所長 榎本祐嗣	〒933-0981 富山県高岡市二上町 150 番地 TEL 0766-21-2121 FAX 0766-21-2402 e-mail: tomida@itc.pref.toyama.jp

第2章 レーザによるテーラードブランク溶接技術の確立

2-1 研究目的及び目標

一般のレーザ溶接施工では、レーザビームはシングルスポットでの照射を行うが、テーラードブランク溶接では、板厚差があるため開先部の溶融が不十分となる危険性がある。本研究では、まず簡易治具装置を用い、溶接材料を固定した上で通常のシングルビームスポットによる溶接実験での溶接性、溶接継手形成に及ぼす溶接条件の影響を明らかにする。次に、ツインビームスポット法による溶接実験をおこない、溶接性、継手形成に及ぼす溶接条件や光学系パラメーターの影響ならびにシングルスポット法との比較検討をおこない、最適溶接条件の確立を目指す。本研究では、①従来のランプ励起 YAG レーザでの貫通溶接に比べて溶接速度の 20%向上、②耐ギャップ裕度を 0.1 mmから 0.3 mmに拡大することを具体的目標とする。

2-2 実験方法

実験計画段階では、アドバイザーより提案のあった品質工学を用いた実験計画手法である「タグチメソッド」を用い、効率的に各スポットの最適条件を模索したが、最適条件を確立するには至らなかった。

「タグチメソッド」を断念した理由として、

- ① L9 直交表では条件設定が粗く、溶接状態の傾向把握しか出来ず条件絞り込みができない。
- ② 傾向把握後、繰り返し溶接条件を細分化して実験を繰り返す必要があり、最適条件把握するためには膨大な時間が掛かりすぎ効率的ではない。

以上が挙げられる。

また、これまでの装置製作実績経験から、溶接状態の傾向を予測し、確認実験をおこない、より効率的に実験ポイントを絞り込むことにした。

2-2-① シングルスポットにおける最適溶接条件の評価

従来のレーザー溶接加工技術である、シングルスポットビームの溶接条件を変化させ溶接加工をおこない最適溶接条件を評価する。特に、ビームスポット径に着目し、①ビームスポット径の変化を軸に溶接実験を進めることにする。

ビームスポット径を変化させる手法としては、ファイバーケーブルのコア径を変化させることにより実現することとした。ファイバーケーブルのコア径としては 0.4 mm、0.3 mm、0.2 mmの三種類を選択した。

また、②フォーカス高さを変化させることにより、溶接対象部材に照射するレーザービームスポット径の微調整を実施する。

その他の溶接条件のパラメーターとしては、③ビーム狙い位置(オフセット)、④溶接速度、⑤レーザーパワーが上げられる。

各パラメーターを変化させながら、溶接加工をおこない、溶接ビードの外観形状を計測するとともに、表面欠陥の有無や溶接断面の溶け込み状況を評価する。また、溶接対象部材の入熱量をレーザーパワーメーターにて確認し、溶接時の状態を把握する。

ビームスポット径とギャップ裕度・溶接速度には一般的に下記 Fig.2-1 に示す相関がある。

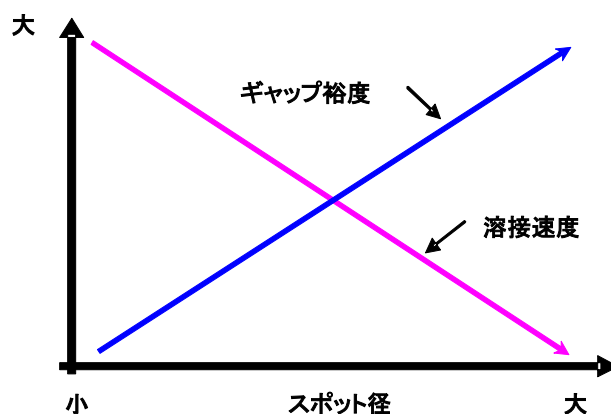


Fig.2-1 ビームスポット径とギャップ裕度・溶接速度の関係

Fig.2-1 の線図によると、ビームスポット径を大きくするとギャップ裕度は増大するが、溶接速度を低下させる必要があり、ビームスポット径を小さくすると逆の事象が発生する事を示している。

ギャップ裕度と溶接スピードは相反することを踏まえ、次にビームプロファイルの違いに着目し、ギャップ裕度を維持しつつ溶接速度を向上させる方策を検討することとした。具体的

には大きなスポット径を確保した状態で、深溶け込みが得られるパワー密度を有するビームプロファイルを創造することを検討する。

この「ビームスポット径が焦点位置より大きく、パワー密度の低い領域」に着目し、ギャップ裕度・溶接速度共に向上させる方策として、小スポット径レーザを大きくデフォーカスさせて溶接を行う手法を提案する。

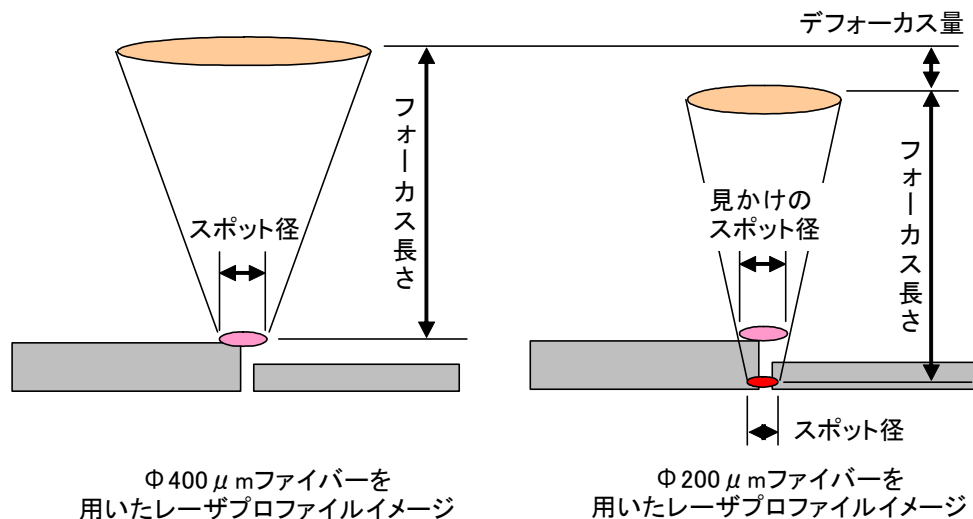


Fig.2-2 フォーカスモデル図

Fig.2-2 に示される左図はファイバーケーブル $\Phi 400 \mu\text{m}$ を用い、光学系を通過させた後、スポット径が 0.6 mm となる場合のレーザプロファイルと被溶接材の位置関係を示す。 CO_2 レーザ以外の場合は通常、厚板の上面にレーザの焦点が来るように位置を調整する。これに対し右図は、より細いファイバーケーブル $\Phi 200 \mu\text{m}$ を用い、スポット径が 0.3 mm となる場合の位置関係を示す。この場合、焦点位置を被溶接材下面付近まで下げる事により、材料表面付近の必要スポット径を確保しつつ、パワー密度の高い焦点位置を被溶接材の内部に調整することによりキーホール形成を促進し、結果的に溶接速度の向上が達成されると推定した。

また、このときの被溶接材表面付近のパワー分布は Fig.2-2 の左図の場合と同等であると推測し、ギャップ裕度に関しても同等の値が期待できる。

この理論を証明できれば、ギャップ裕度を維持し、溶接速度を向上させる事が可能であると考ええる。

2-2-② ツインスポットにおける最適溶接条件の確立

溶接開先部を確実に溶融し、なおかつ被溶接材料間の隙間（ギャップ）があった場合でも確実に溶接加工が行えるよう、ビーム光路にプリズムを配置し、見かけのスポット径を拡大するツインスポット法により溶接加工試験を行い、溶接状態等を評価する。具体的には、①レーザパワー、②溶接速度、③狙い位置、④フォーカス高さ、⑤ツインスポットのパワーバランス、⑥ツインスポットレーザビームのピッチを調整したうえで、インラインシーム計測装置の検査モジュールにより、溶接ビード幅や溶接部のアンダーフィル、ピンホールの有無など、溶接部の継手形状を測定する。また、レーザプロファイル計測装置によりレーザビームの形状を可視化することで、ビームのエネルギー密度分布の状態と溶接部の継手形状との相関関係の解析を行う。データ解析とともに、ツインスポットによるレーザパワーバランスとピッチ変化量について調査し、さらに、溶接部対象部材の入熱量をレーザパワーメーターにて確認することにより溶接時の状態を把握する。

まず、シングルスポットの場合と同様に、効率的にツインスポットにおける最適溶接条件を模索する手段として、下記のように実績経験に基づく推測を手がかりに、確認実験を行うこととする。

- a. パワーバランスは厚板・薄板の板厚比をベースとし決定する
- b. ビームピッチは測定されたギャップの大きさに応じて決定する
- c. レーザパワーと溶接スピードは厚板・薄板それぞれにビードオン・プレート溶接を実施し貫通具合を確認し決定する
- d. 狙い位置とフォーカス高さは必要金属と溶融金属との関係より決定する

2-2-③ 各種溶接条件での溶接部の機械的特性の評価

上記 2-2-①及び 2-2-②で溶接した各条件での試験材について、溶接部の機械的特性に影響する溶接組織状態を評価するため、溶接断面の組織観察を実施する。また、溶接継手の機械的特性を評価するため、引張強度試験やエリクセン試験（成形性試験）を行う。

また、溶融金属不足により溶接部の板厚が十分に確保されない場合の溶接部特性を把握するため、意図的にアンダーカット溶接状態に陥ったパネルを作成し、溶接線の断面形状の観察と、引張強度試験及びエリクセン試験をおこない溶接条件の相違と機械的特性の評価を実施する。

2-2-④ 溶接ビードの表面形状と溶接部の機械的特性との相関関係の調査

レーザ溶接条件と溶接断面の組織観察及びインラインシーム計測装置の検査モジュールにより得られた溶接継手形状と機械的特性との相関関係を調査し、最適溶接条件を確立する。
(本項目の研究成果については 2-3-① シングルスポットにおける最適溶接条件の評価及び、2-3-② ツインスポットにおける最適溶接条件の評価の項に含めて記述する。)

2-3 研究成果

2-3-① シングルスポットにおける最適溶接条件の評価、及び、溶接ビードの表面形状と溶接部の機械的特性との相関関係の調査

まずはシングルスポットでは標準的であるΦ606 μm のビームスポットを用い、1.6 mm と 0.65 mm の突合せ材料に対し、ギャップを 0~0.3 mm に変化させた場合の溶接品質について確認を行った。

その結果を Fig2-3 に示す。

厚板1.6mm 薄板0.65mm												
	スポット径	溶接速度	レーザパワー	ギャップ	狙い位置	フォーカス位置	計算による予測		外観検査	破壊検査		
実験番号	μm	m/min	kW	mm	mm	mm	熔融金属量	薄板溶込み		エリクセン	引張り	
S06-1	606	8.0	3.0	0	0	0	○	○	○			
S06-2				0.1	0		○	○	○			
S06-3				0.2	0		○	○	○			
S06-4				0.3	0		○	×	×	ブリッジせず		
S06-5				0.3	0.1(厚板)		○	×	×	裏掛けせず	○	○
S06-6		7.0		0.3	0.1(厚板)		○	×	○	○	○	
S06-7				0	0.1(厚板)		○	○	○	○	○	
S06-8				0.1	0.1(厚板)		○	○	○	○	○	
S06-9				0.2	0.1(厚板)		○	×	○	○	○	
厚板1.2mm 薄板0.65mm												
S06-10	606	7.0	3.0	0.3	0.1(厚板)	0	×	×	○			

Fig.2-3 シングルスポットによる溶接実験結果

また、このときのインラインシーム計測装置の検査結果や外観観察結果について代表的なものを抜粋し、溶接ビードの表面形状と溶接部の機械的特性と相関関係の調査も合わせて行う。

◇S06-1

Φ606 μm 8m/min 3kW ギャップ 0 mm

狙い 0 mm フォーカス 0 mm

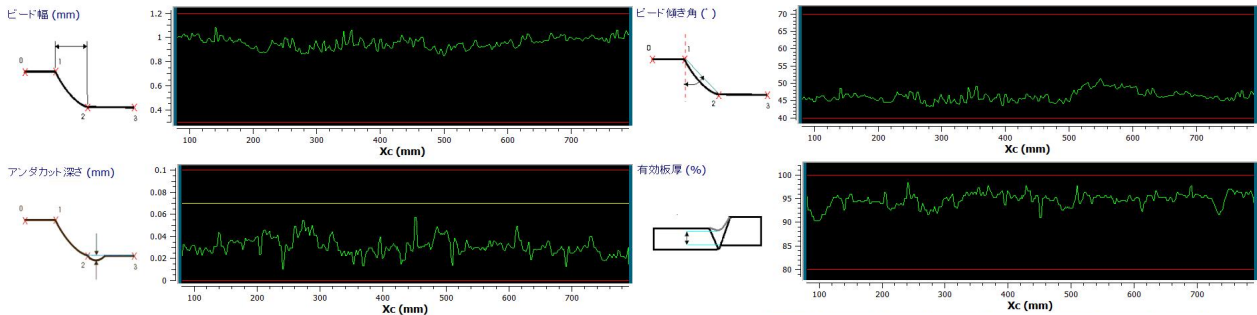


Fig.2-4 実験番号 S06-1 のビード検査結果（外観 OK）

◇S06-6

Φ606 μm 7m/min 3kW ギャップ 0.3 mm

狙い 0.1 mm（厚板） フォーカス 0 mm

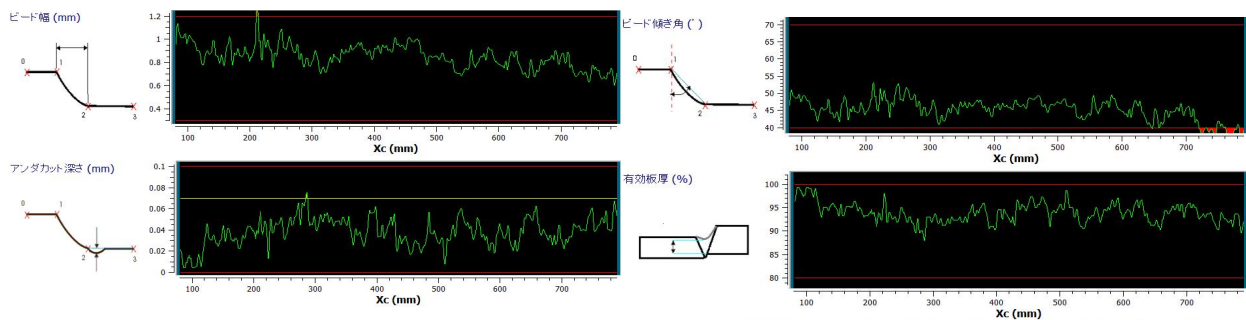


Fig.2-5-1 実験番号 S06-6 のビード検査結果（外観 OK）

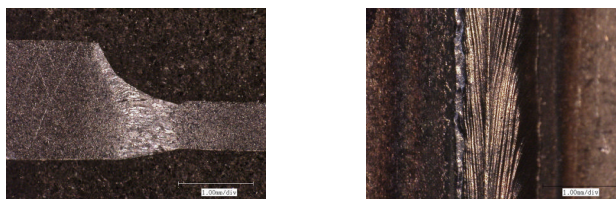


Fig.2-5-2 実験番号 S06-6 の外観観察結果

実験番号 S06-1～3 ではギャップが 0～0.2 mmと大きくなっても、外観的に溶接は良好であると判断し、引張強度試験についても良好な結果を得た。

実験結果により、シングルスロットで標準的なΦ606 μm のビームスポットを用いた溶接では、溶接速度 8.0m/min において、ギャップ裕度は 0.2 mm程度まで許容であるが、多少不安定な溶接領域があるため、事業化の際には十分な検討が必要である。

ギャップが 0.2 mm以上の場合は溶接速度を 7.0m/min へと低下させ、狙い位置を 0.1 mm厚板側にオフセットし対応する。但しこの場合においても材料端面処理など他の条件設定も影

響を考慮する必要があるため、事業化の際には十分な検討が必要である。

次に前項で述べたように、小スポット径レーザを大きくデフォーカスさせて溶接を行う手法についての実験結果を示す。

実験に用いたスポット径は $\Phi 606\mu\text{m}$ と $\Phi 455\mu\text{m}$ の二種類とし、ビームプロファイルと比較した。 $\Phi 455\mu\text{m}$ ビームスポットにおいて、 $\Phi 606\mu\text{m}$ のスポット径が得られるデフォーカス位置は、上下約5mm程度の位置であることから、加工ヘッドを5mm下げて溶接を行うこととする。Fig.2-6 に示すスポット径 $\Phi 606\mu\text{m}$ の場合と比較し、86%パワー分布エリアは同等であるがパワー分布は非常に鋭利になっている事が分かる。このパワー分布が溶接品質、溶接速度にどのように影響するかが重要なポイントであると考えた。

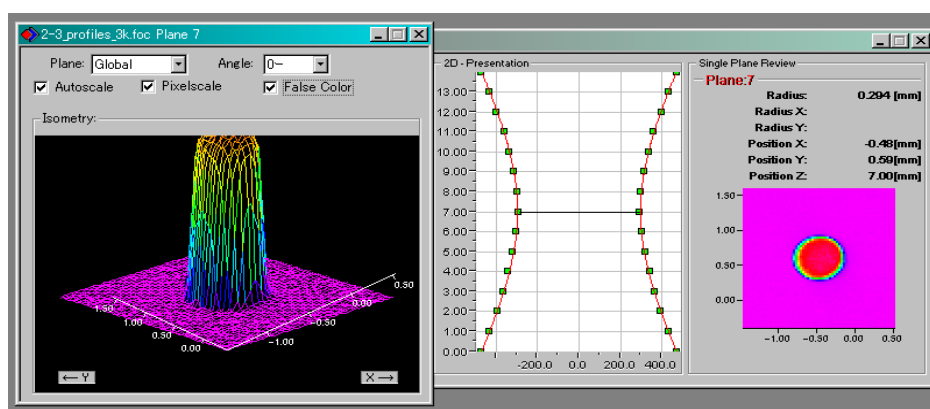


Fig.2-6 スポット径 $\Phi 606\mu\text{m}$ のビームプロファイルとパワー分布

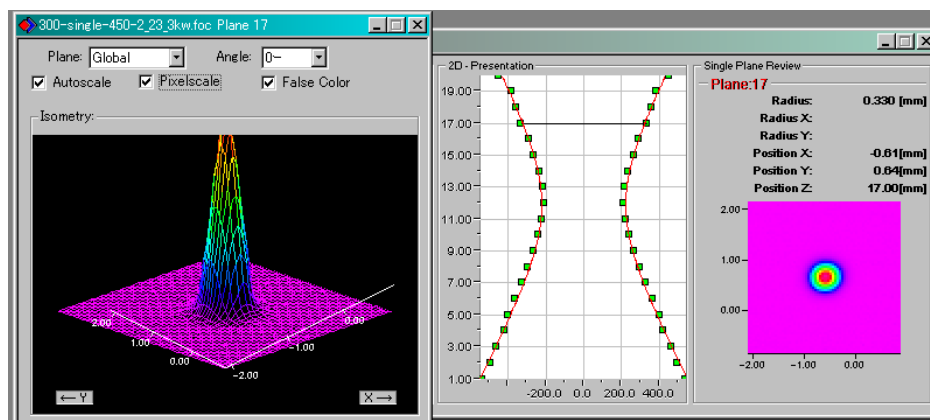


Fig.2-7 スポット径 $\Phi 455\mu\text{m}$ ビームの5ミリデフォーカス位置のパワー分布

Fig.2-7 に示すデフォーカス位置により溶接検証実験を行う。

また、このときのインラインシーム計測装置の検査結果や外観観察結果について代表的なものを抜粋して示し、溶接ビードの表面形状と溶接部の機械的特性と相関関係の調査も合わせて行う。

その結果について Fig.2-8 に示す。

厚板1.6mm 薄板0.65mm												
	スポット径	溶接速度	レーザパワー	ギャップ	狙い位置	フォーカス位置	計算による予測		外観検査	破壊検査		
実験番号	μm	m/min	kW	mm	mm	mm	溶融金属量	薄板溶込み		エリクセン	引張り	
S06-6	606	7.0	3.0	0.3	0.1(厚板)	0	○	×	○	○	○	
S045-1	455	8.0				-4.0	○	○	○	○	○	
S045-2		8.0				0	○	×	×裏抜けせず			
S045-3		9.0				-4.0	○	○	×裏抜けせず			
S045-4		7.0				-4.0	○	○	○			

Fig.2-8 シングルスロット・デフォーカスによる溶接実験結果

スポット径 $\Phi 455\mu\text{m}$ のビームプロファイルを用いた場合、実験番号 S045-2 で示すようにフォーカス位置が 0 mmでは良好な溶接ができない結果となり、薄板の溶け込みが不十分である。これに対し実験番号 S045-1 では 4 mmのデフォーカスを実施する事により、良好な溶接結果を得た。また、今回の実験において

溶接速度は 8.0m/min で、S06-6 と比較し 1.0m/min の速度向上を達成した。

同じデフォーカスの条件化において溶接速度 9.0m/min で実施し溶接限界を検証したが、残念ながら、溶け込み不足により良好な結果は得られなかった。

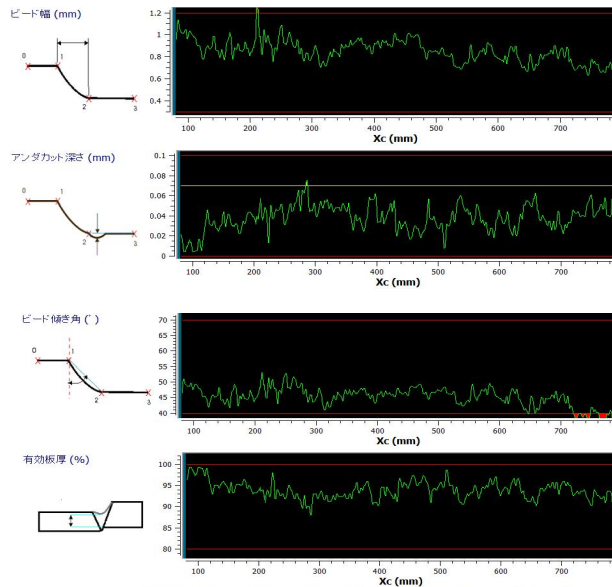
インラインシーム計測装置の測定結果、及び断面観察の結果を、共にギャップ 0.3 mm に対する溶接実験である、実験番号 S06-6 と S045-1 とで比較する。

◇S06-6

スポット径 $\Phi 606\mu\text{m}$

フォーカス位置 0 mm

溶接スピード 7m/min



◇S045-1

スポット径 $\Phi 455\mu\text{m}$

フォーカス位置 - 4 mm

溶接スピード 8m/min

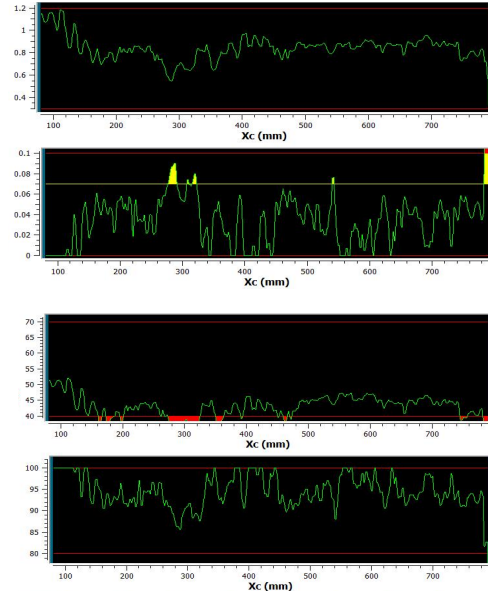
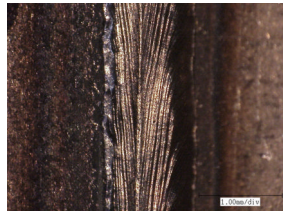
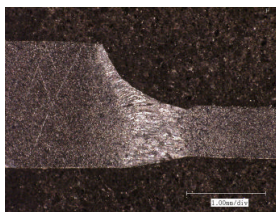


Fig.2-9-1 ジャストフォーカス・デフォーカス溶接のビード検査比較

◇S06-6



◇S045-1

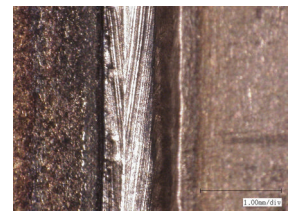
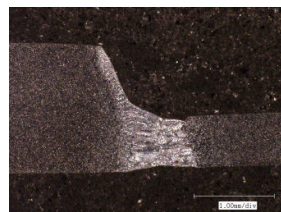


Fig.2-9-2 ジャストフォーカス・デフォーカス溶接の外観比較

S045-1 では溶接スピードが向上しているに関わらず、S06-6 と遜色の無い波形が得られたことが分かる。

また、S045-1 では S06-6 と比較し、ビード傾き角が小さくなり、アンダーカットの状態が不安定傾向を示すが、これも鋭利なビームプロファイルにより、レーザービーム中心部にエネルギーが集中し、突合せ付近に溶融が集中したと考えられる。

以上より、小スポット径レーザを大きくデフォーカスさせて溶接することにより、溶接品質を確保し、かつ、溶接速度を向上させることが可能であることを確認した。

2-3-② ツインスポットにおける最適溶接条件の評価、及び、溶接ビードの表面形状と溶接部の機械的特性との相関関係の調査

ツインスポットを用いた溶接実験では、2-2-②で示した推測を確認するため、多くの予備実験を行った。その結果、比較的大きいギャップの状態(0.2 mm~0.3 mm)の溶接において、見かけ上問題なく溶接できているように見受けられても、エリクセン試験の結果、溶接部における割れが発生する事象が多発した。この事象を改善するため、シングルスポットによる溶接実験成果に基づき、狙い位置や溶接スピードを変更したが、改善には至らなかった。そこで、ツインスポットのビームピッチを拡大してみたところ、溶接部における割れの発生がなくなった。そのときのビームプロファイルをそれぞれ下記に示す。

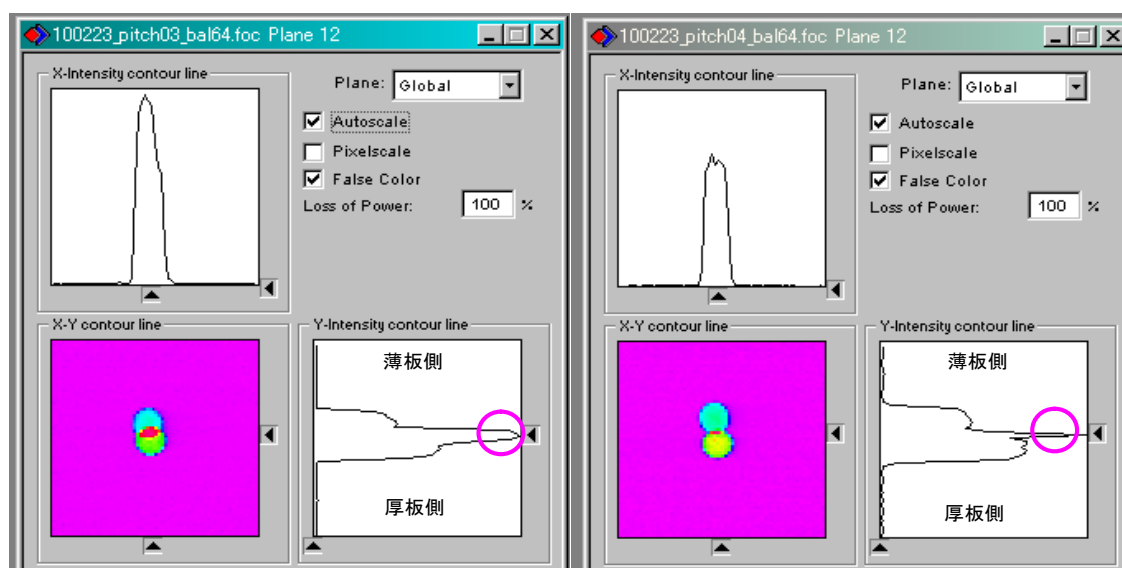


Fig.2-10 ビームプロファイルの違い

このビームプロファイルでは使用ファイバーケーブルが共に $\Phi 300\mu\text{m}$ 、パワーバランスは共に厚板側 60%薄板側 40%、ビームピッチは左図が 0.3 mm、右図は 0.4 mmとした。ビームプロファイルの大きな違いは、ビーム同士が近接する部分に現れる顕著なパワー突出 (Fig.2-10 丸印) の有無である。Fig.2-10 左図で示す、ビームプロファイルの場合、ガウスモードに近いビーム特性となり、溶接部近傍が入熱過多状態となり、熱影響部が拡大し、溶接部近傍の金属組織が脆くなる傾向になると推定される。

これに対し、Fig.2-10 右図のビームプロファイルは YAG レーザのようなトップハット形状と近似していることから、顕著なパワー突出が少ないため穏やかな入熱となり、熔融部の状態が安定し、また、パワーが二段階となっているため、板厚に応じた適切なレーザーパワーが各板材に作用していると推測する。

この予備実験により得られた結果から、前述の 2-2-②で述べた推測の軌道修正を行った。

b ビームピッチは測定されたギャップの大きさに応じて決定する

この推測を以下のように修正する。

軌道修正 b ビームピッチとパワーバランスはレーザプロファイルを検証し決定する

2-2-②で示した推測に上記内容修正を加えて溶接実験を行った。1.6 mmと 0.65 mmの突合せ材料に対しギャップを 0.3 mmとした場合の溶接品質について確認を行った。下記に実験結果を示す。

厚板1.6mm 薄板0.65mm														
	スポット径	溶接速度	レーザパワー	ギャップ	狙い位置	フォーカス位置	パワーバランス	ビームピッチ	計算による予測		外観検査	破壊検査		
実験番号	μm	m/min	kW	mm	mm	mm	厚板:薄板	mm	溶融金属量	薄板溶込み		エリクセン	引張り	
T045-1	455	8.0	3.0	0.3	0.12	0	70:30	0.4	○	○	○	○	○	
T045-2					0			0.4	×	○	×	○	○	
T045-3					0.12			0.2	○	×	○	○	○	
T045-4					0.12			0.6	×	×	○	○	○	

Fig.2-11 ツインスポットによる溶接実験結果

また、このときのインラインシーム計測装置の検査結果や外観観察結果について、溶接ビードの表面形状と溶接部の機械的特性と相関関係の調査も併せて行う。

◇T045-1

Φ455 μm (ツイン) 8m/min 3kW ギャップ 0.3 mm

狙い 0.12 mm (厚板) フォーカス 0 mm バランス 70 : 30 ピッチ 0.4 mm

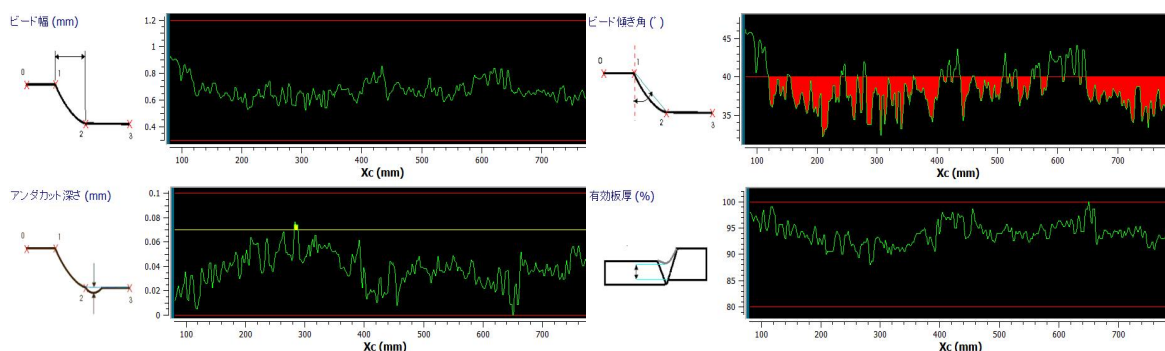


Fig.2-12-1 実験番号 T045-1 のビード検査結果 (外観 OK)

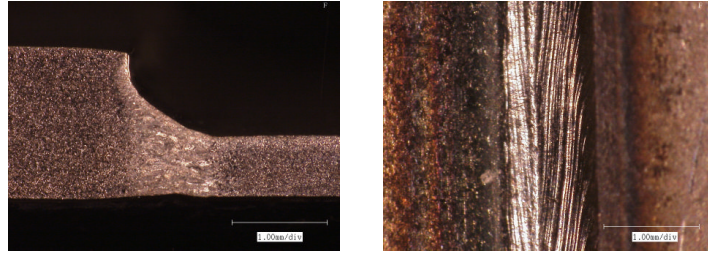


Fig.2-12-2 実験番号 T045-1 の外観観察結果

◇T045-4

Φ455 μ m (ツイン) 8 m/min 3kW ギャップ0.3 mm

狙い0.12 mm フォーカス0 mm バランス70:30 ピッチ0.6 mm

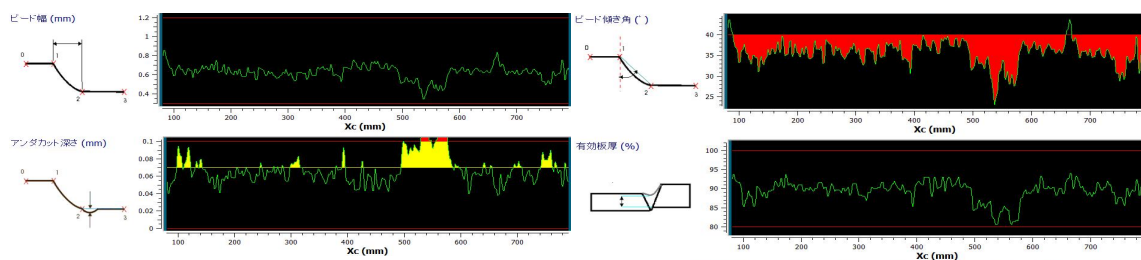


Fig.2-13-1 実験番号 T045-4 のビード検査結果（外観 OK）

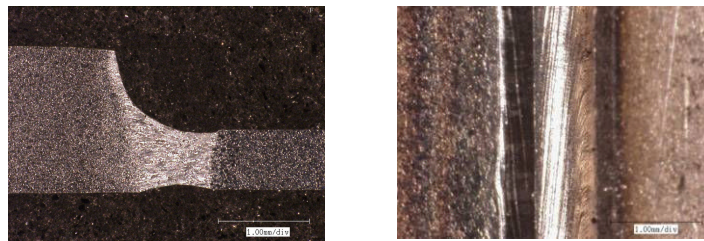


Fig.2-13-2 実験番号 T045-4 の外観観察結果

実験番号 T045-1 については良好な外観品質を得る事ができ、破壊検査においても所定の強度を持ち得る結果となった。ビード傾き角は閾値として設定した 40° を下回っているが、全域で有効板厚が 90%を上回っており、溶融金属が十分であるため、強度的な欠陥には結びつかないと推測される。

T045-4 については良好な外観品質を得たものの、ビード検査からは特にアンダーカットの傾向が見受けられ、有効板厚も減少傾向にあるが、これらも強度的な欠陥に結びつくものと推定する。

以上より、ツインスポットによる溶接実験の成果として下記結論を得た。

ツインスポット法を用いることにより、ギャップ裕度と溶接速度をシングルスポット法と同

等以上としつつ、溶接面のビード形状の改善と機械的強度の改善手法が得られることが可能である。また、ツインスポットの特性を有効に利用するためには、ビームプロファイルを逐次確認し、滑らかで且つそれぞれの板厚に適したパワー分布を得ることが重要である。

2-3-③ 各溶接条件を変化させた場合における溶接部の機械的特性の評価

溶融金属不足により溶接部の板厚が十分に確保されない場合の溶接部特性を把握するため、意図的にアンダーカット溶接状態に陥ったパネルを作成し、Fig.2-14 の手法で溶接線の断面形状の観察と、引張強度試験及びエリクセン試験を行った。

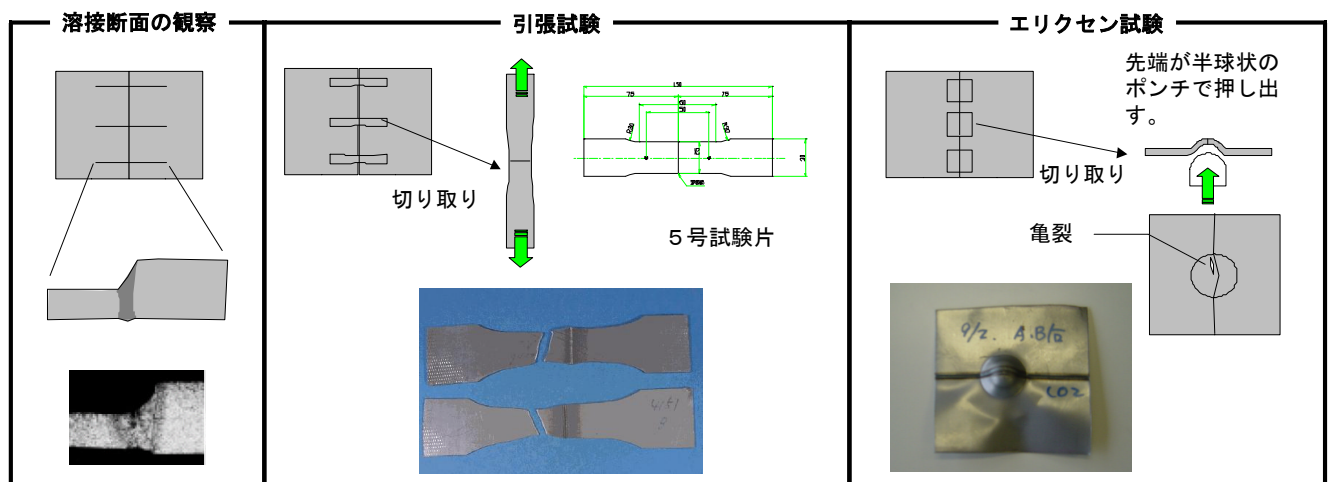


Fig.2-14 機械的特性の評価方法

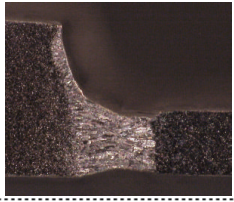
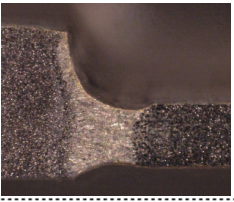
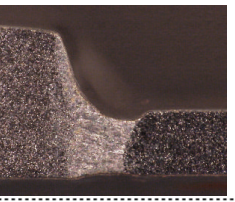
エリクセン試験結果	○母材破断	○母材破断	×溶接部破断	
引張り試験結果	○母材破断	○母材破断	×溶接部破断	
断面形状				溶け落ち発生しビード形成できない
板厚減少率	90	80	70	60 %
				

Fig.2-15 板厚減少率と溶接部特性の関係

Fig.2-15 の試験結果より有効板厚が 80%程度以上の溶接であれば、機械的強度を確保できると判断することとした。

また、溶接部板厚が80%以下に減少すると、以下の傾向があることを確認した。

- ◇ビード幅・・・細くなる(0.5 mm以下)
- ◇アンダーカット・・・大きくなる(0.1 mm以上)
- ◇ビード傾き角・・・小さくなる(40° 以下)
- ◇ビードの凸性・・・プラス方向になる(凹形状)
- ◇スキ・・・発生する(溶け落ち)

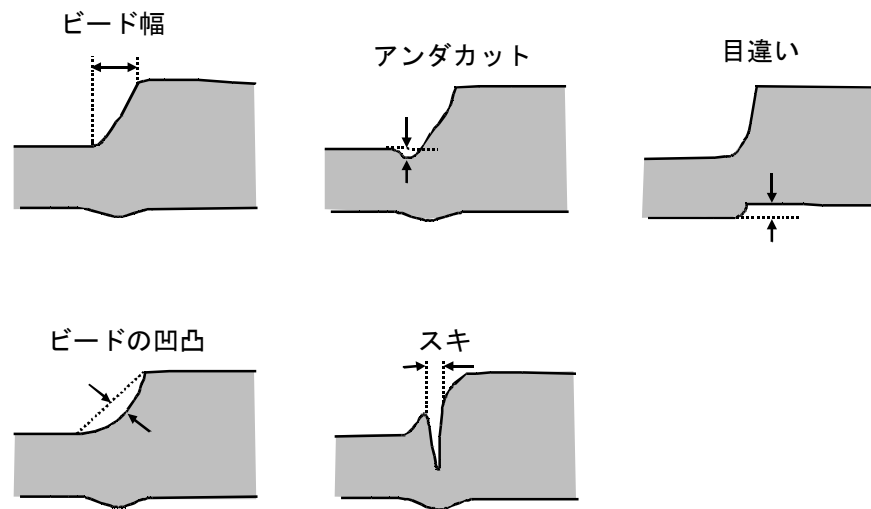


Fig.2-16 溶接部評価項目

「ビード幅」と「ビード傾き角」については、レーザ狙い位置に依存し数値が左右されるので、ビード幅が細く、ビード傾き角が小さい場合、狙い位置を厚板寄りに変更する事により、効果的に溶接状態を改善できる。

また、「アンダーカット」や「ビードの凸性」、「スキ」は各要素の総合的な作用により、溶融金属の過少な状態や、入熱量が不適切である等の結果を指し示す傾向にある。

これらの結果を基本として、実験での溶接品質の判断基準とする。

- ①基本的に有効板厚が80%程度以上の溶接で、必用最低限の機械的強度を満足する。
- ②溶接ビードに隙がないこと。
- ③レーザ狙い位置の確認のため、ビード幅およびビード傾き角は安定していること。
- ④レーザパワーは溶接中に変動がないこと。

2-3-補足 シングル&ツインスポットにおける最適溶接条件の確立のまとめ

今回の各種溶接実験において得られた結論を下記にまとめる。

従来のランプ励起 YAG レーザを用いた貫通溶接では、今回用いた板厚（1.6 mmと 0.65 mm）程度の接合の場合、溶接スピードは約 8.0m/min 以下、ギャップ裕度は 0.1 mmまでであった。これに対し今回ビームプロファイルをコントロールし、従来のテーラードブランクの溶接では不適とされた $\Phi 455\mu\text{m}$ 以下の小スポット径レーザを用い、大きくデフォーカスしての使用、ツインスポットを用いることで、従来の溶接スピードである 6.0m/min から、7.5m/min~8.0m/min へと向上させ、速度 20%を達成、さらに耐ギャップ裕度については 0.3 mmまで許容とさせ、研究目標を達成することができた。

このとき重要なファクターは「ビームプロファイルをコントロールすること」であり、レーザ光を単なる熱源として考えるのではなく、そのパワー分布を固体形状に見立て、視覚的に判断すること、であることを把握した。

以上より得られた結果から、溶接加工機の機械精度が劣る場合においても、容易にレーザ溶接が可能となり、また、高精度な溶接加工機との組み合わせにおいては、より高速、高品質な溶接が可能になることが見込まれる。

本研究成果を、量産機への展開も視野に入れ、ユーザの声に答えることのできる装置提供に繋がたいと考える。

3-1 研究目的及び目標

突合せレーザー溶接工法に産業用のロボットを適用するための一番重要なポイントは軌跡精度である。軌跡精度が劣ると、溶接条件を最適化出来ず、溶接品質や溶接速度の低下を招き、最悪、溶接不可となる場合がある。これらを解決するために、産業用ロボット本体の軌跡精度を調査し、性能評価を実施する。また、汎用多関節ロボットにインラインシーム計測装置を実装し、協調制御することで軌跡補正を実施し、軌跡精度向上について検討する。

本研究では、インラインシーム計測装置を用いたセンシング開発により、ロボット軌跡精度を 0.02 mm以内とすることを目標とした。

3-2 実験方法

3-2-① インラインシーム計測手法の最適化

インラインシーム計測装置のトラッキングカメラ位置検出精度を評価するため、ゲージブロックを用いて計測する。測定する基準ゲージブロックは、0.6 mm、0.62 mm、0.65 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm、1.0 mm、1.1 mm、1.2 mmの計 9 種類とする。計測はそれぞれ 5 回おこない、検出誤差、ばらつきを求め、インラインシーム計測装置の検出精度を評価する。計測方法の概要を Fig.3-1 に示す。

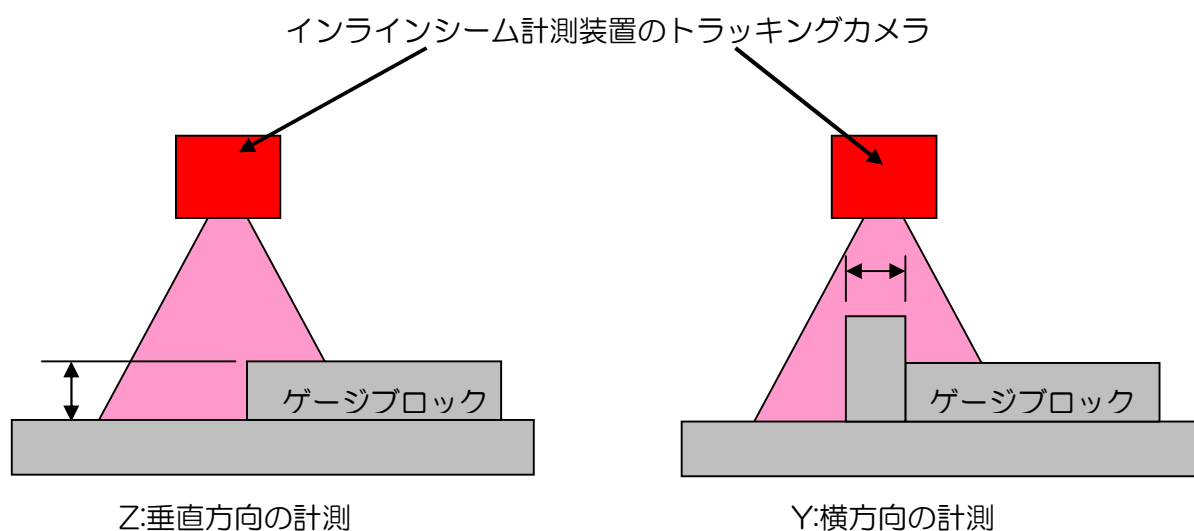


Fig.3-1 トラッキングカメラ位置検出精度の計測方法概要

3-2-② 産業用ロボットの軌跡精度の評価と軌跡精度向上の方策の検討

産業用ロボットの溶接方向を変え、インラインシーム計測装置とストレートエッジを用いてアーム先端の軌跡精度を計測し、軌跡精度が最も高まる姿勢について解析する。計測条件として、測定長さを 1,500 mm、速度を 6.0m/min と 10.0m/min、溶接方向となる姿勢を正面方向、横方向、斜め方向にそれぞれ 3 姿勢ずつ定義する。ロボットの正面方向に向かって左側から姿勢 X1,X2,X3,ロボット正面に対して横方向のロボット手前から姿勢 Y1,Y2,Y3,ロボットから正面左側へ向う斜め方向で、ロボットの正面方向に向かって左側から姿勢 XY1,XY2,XY3 と Fig.3-2、Fig.3-3 のとおり定義する。

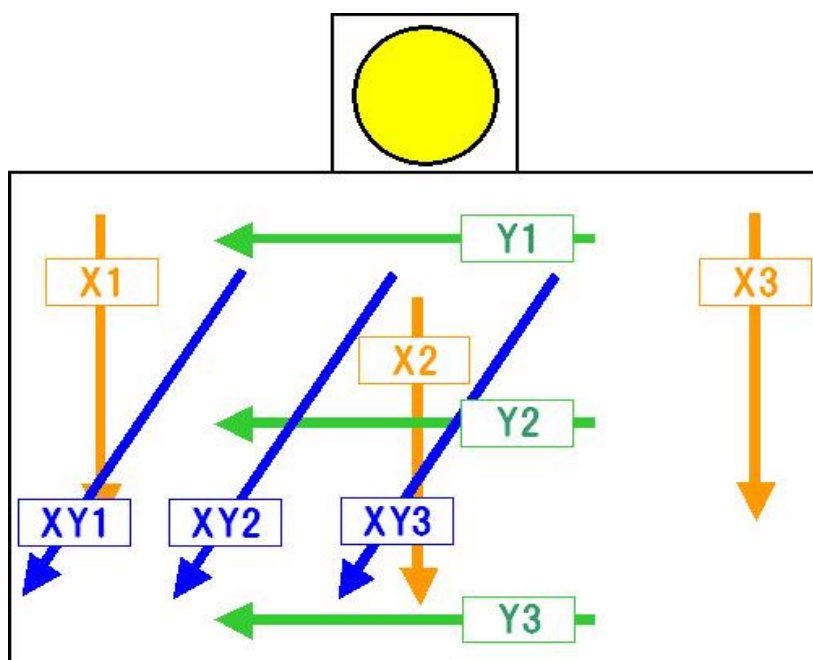


Fig.3-2 軌跡精度評価に用いた姿勢



正面方向（姿勢 X）



横方向（姿勢 Y）



斜め方向（姿勢 XY）

Fig.3-3 各姿勢における計測の様子

計測はそれぞれ5回実施し、Y方向（ロボットの溶接方向に垂直な方向）の軌跡精度を評価した。Z方向（高さ方向）に関しては、振れ幅が1 mm以下の範囲に収まっており、今回の実験でのレーザビームの焦点深度（レイリー長）が深い（0.6 mmスポットで約7 mm）ことから、溶接への影響が低いと判断し、軌跡精度評価の対象外とした。評価する際には出力データからインラインシーム計測装置の測定誤差を除いたものを振れ幅として検証し、出力データを回帰分析にてスムージングしたものを直進性として検証する。研究目標では「ロボット軌跡精度：0.02 mm以内」としたが、振れ幅と直進性、併せての検証が必要であるため、以下のとおり目標を追加することとした。

【研究目標】

1. ロボット軌跡精度 直進性 : 0.02 mm以内

（材料突合せ位置への追従性を表す。当初目標軌跡精度）

- 追加 2. ロボット軌跡精度 振れ幅 : ± 0.03 mm以内

（レーザビームスポット径 0.6 mmの 1/10 以内であれば溶接への影響は少ないと判断し定義する。）

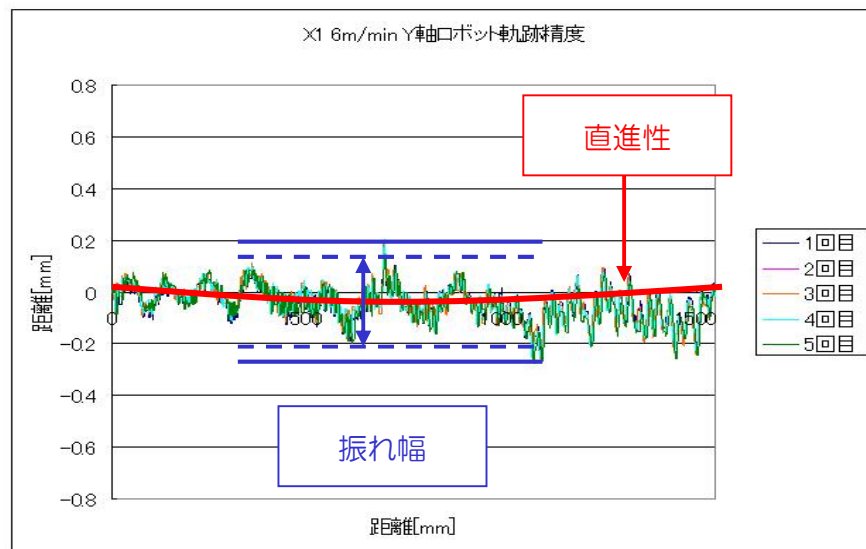


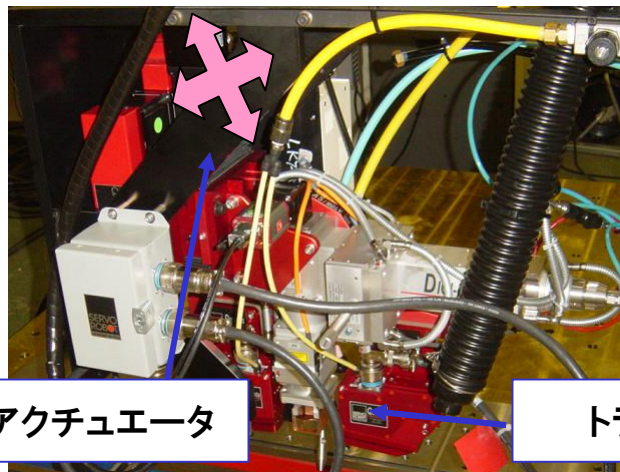
Fig.3-4 計測データの評価方法

3-2-③ インラインシーム計測装置で制御した産業用ロボットの軌跡精度の評価

産業用ロボットにインラインシーム計測装置を実装し、トラッキングモジュールと協調制御することで、ロボットの軌跡精度を補正し、補正前と補正後のデータ解析を実施し評価する。計測条件として、インラインシーム計測装置の溶接線追い機能である「シームトラッキング」（Fig.3-5 参照）を使用したものと、インラインシーム計測装置の溶接線補償機能である「シームトラッキング」「Compensation」（Fig.3-6 参照）を使用したものについて実

験をおこなった。また、これ以外の計測条件は 3-2-②同様とする。

■シームトラッキング機能・・・インラインシーム計測装置の溶接方向前部に取り付けられているカメラにより溶接線を検出し、検出されたズレ量をすぐ後ろに取り付けられているトラッキングアクチュエータにより、レーザ狙い位置を補正する機能。



トラッキングアクチュエータ

トラッキングカメラ

Fig.3-5 シームトラッキング

■Compensation・・・データティーチング時において、ロボットを予め動作させ、インラインシーム計測装置の溶接方向前部に取り付けられているカメラにより溶接線を検出し、検出されたズレ量の波形データを取得（①）し、ロボットの癖として認識。取得された波形データの逆位相の波形データを生成する（②）。ロボット動作の際にはこの逆位相データを用いてロボット動作軌跡を予想し、トラッキングアクチュエータが動作することにより、ズレが打ち消されて軌跡精度を向上を図る（③）。

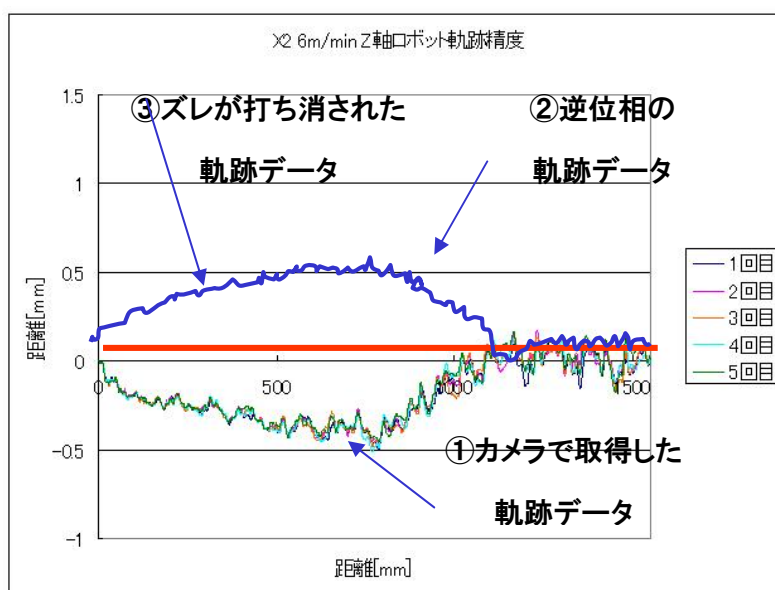


Fig.3-6 Compensation

3-3 研究成果

3-3-①インラインシーム計測手法の最適化

インラインシーム計測装置の溶接対象部材における突合せ面の位置検出精度測定結果の Y 方向（ロボットの溶接方向に垂直な方向）を Fig.3-7、Z 方向（高さ方向）を Fig.3-8 に示す。

実験回数	ブロックゲージ厚さ[mm]								
	0.6	0.62	0.65	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
1回目	0.608	0.616	0.632	0.696	0.804	0.892	0.999	1.107	1.177
2回目	0.6	0.616	0.633	0.696	0.794	0.892	1.01	1.107	1.196
3回目	0.589	0.607	0.627	0.697	0.803	0.884	1.027	1.094	1.204
4回目	0.599	0.617	0.635	0.69	0.803	0.902	1.018	1.092	1.187
5回目	0.589	0.617	0.626	0.699	0.777	0.894	0.999	1.097	1.196
測定誤差	0.019	0.01	0.009	0.009	0.027	0.018	0.028	0.016	0.027
平均値	0.597	0.6146	0.6306	0.6956	0.7962	0.8928	1.0106	1.0994	1.192

Fig.3-7 インラインシーム計測装置の Y 方向位置検出精度測定結果

実験回数	ブロックゲージ厚さ[mm]								
	0.6	0.62	0.65	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
1回目	0.652	0.674	0.712	0.742	0.857	0.951	1.065	1.17	1.26
2回目	0.658	0.677	0.724	0.751	0.857	0.955	1.083	1.164	1.283
3回目	0.589	0.607	0.627	0.697	0.803	0.884	1.027	1.094	1.204
4回目	0.599	0.617	0.635	0.69	0.803	0.902	1.018	1.092	1.187
5回目	0.653	0.661	0.701	0.729	0.847	0.969	1.068	1.165	1.28
測定誤差	0.069	0.07	0.097	0.061	0.054	0.085	0.065	0.078	0.096
平均値	0.6302	0.6472	0.6798	0.7218	0.8334	0.9322	1.0522	1.137	1.2428

Fig.3-8 インラインシーム計測装置の Z 方向位置検出精度測定結果

この結果より、測定誤差に着目すると Y 方向における最大誤差から最小誤差を引いた測定誤差は 0.028 mm、平均誤差は約-0.003 mmであった。また、Z 方向における測定誤差は 0.097 mm、平均誤差は約 0.034 mmであった。

このため、インラインシーム計測装置を用いて軌跡精度の評価を行うには、この測定誤差を除いたもので評価することにする。

測定誤差が計測器のノイズ成分として取り除くことが正しいかを検証するため、ダイヤルゲージをインラインシーム計測装置に取り付けて振れ幅を測定したところ、測定誤差を除いた値と一致することを確認した。また、機械式測定器にて測定が不能な領域は溶接への影響がほとんど無いと考えられる。

3-3-② 産業用ロボットの軌跡精度の評価と軌跡精度向上の方策の検討

産業用ロボット単体の軌跡精度実験のうち、動作速度 6.0m/min における Y 方向（ロボットの溶接方向に垂直な方向）と Z 方向（高さ方向）の軌跡精度測定結果を Fig.3-9 に、動作速度 10.0m/min における Y 方向（ロボットの溶接方向に垂直な方向）と Z 方向（高さ方向）の軌跡精度測定結果を Fig.3-10 に示す。

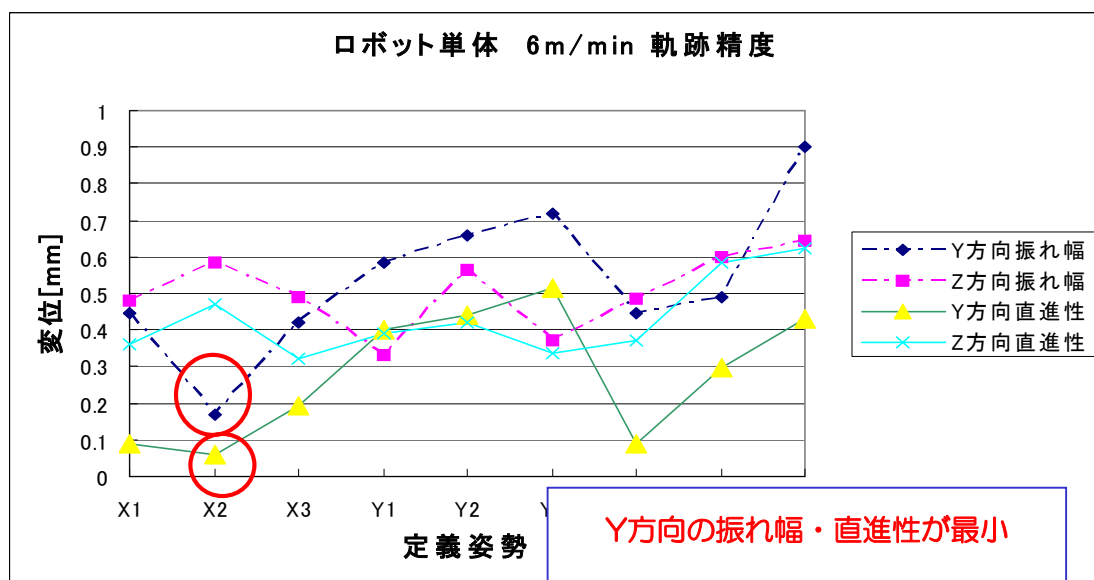


Fig.3-9 動作速度 6m/min における Y 方向（ロボットの溶接方向に垂直な方向）と Z 方向（高さ方向）の軌跡精度

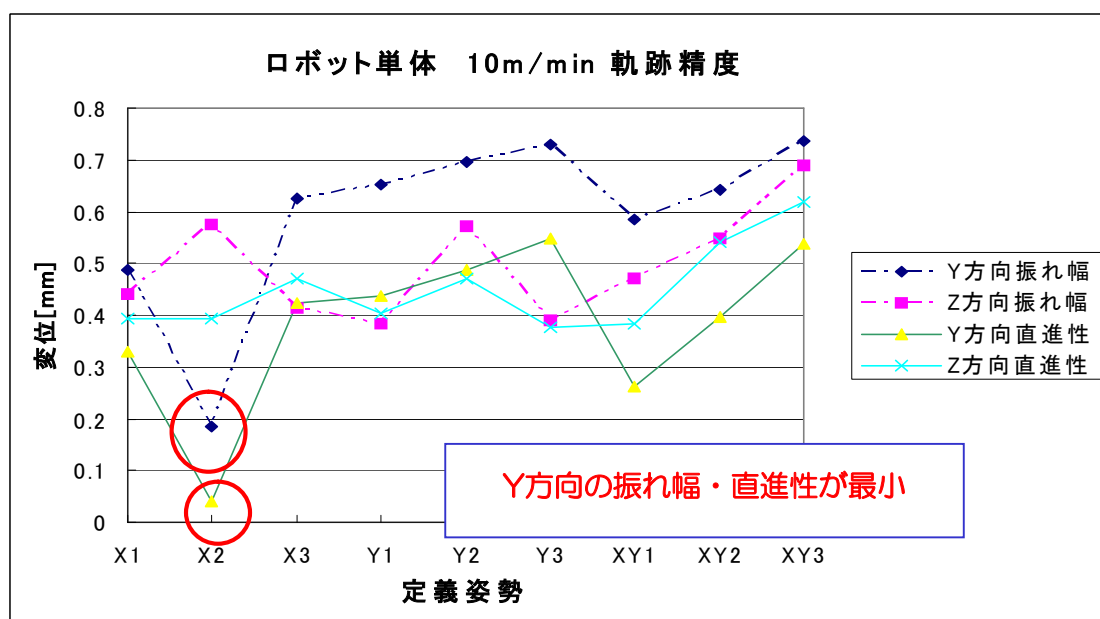


Fig.3-1 動作速度 10m/min における Y 方向（ロボットの溶接方向に垂直な方向）と Z 方向（高さ方向）の軌跡精度

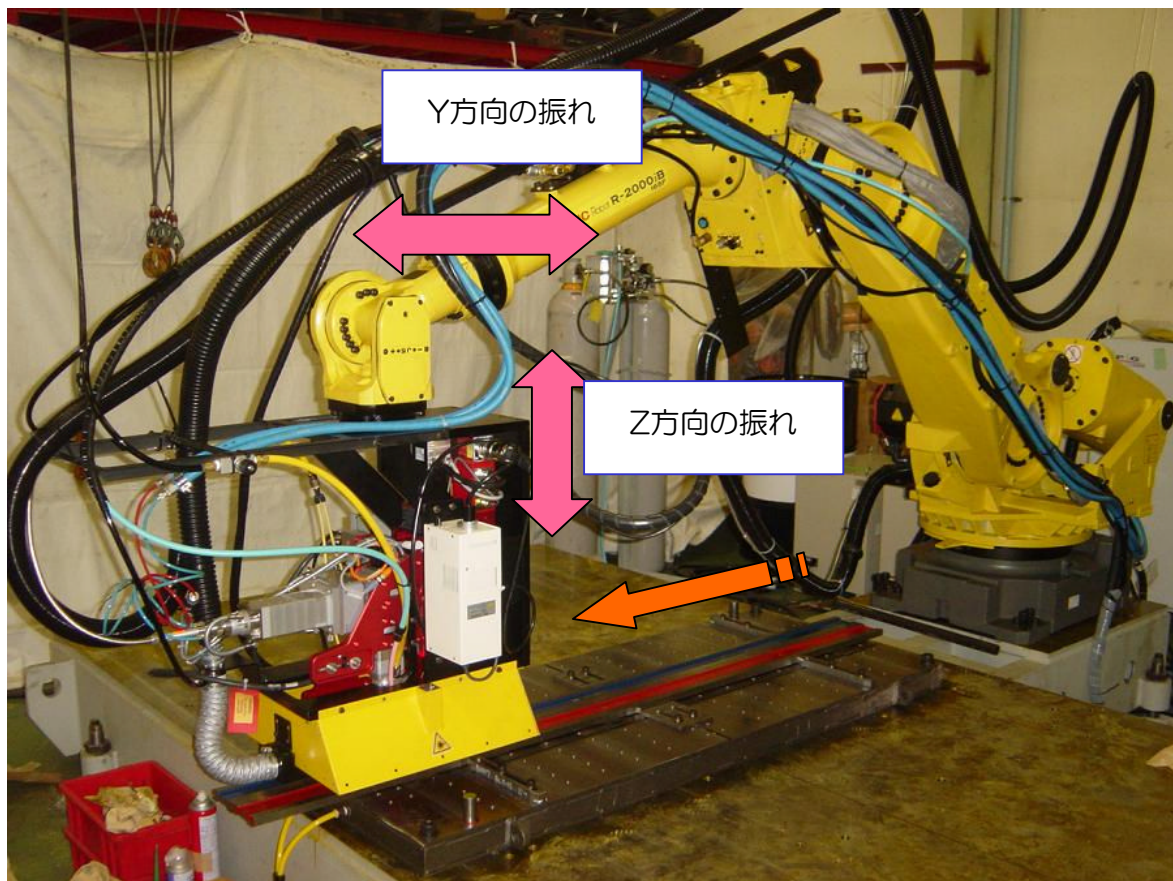


Fig. 3-11 姿勢 X2 における軌跡精度計測

この結果より、ロボット単体における Y 方向（ロボットの溶接方向に垂直な方向）の軌跡精度が最も良くなる姿勢は、ロボット正面の方向を動作する姿勢 X2 であることが明らかとなった。そこで、姿勢 X2 についての、軌跡精度の向上を目指し次項 3-3-③において評価を実施することとした。

3-3-③ インラインシーム計測装置で制御した産業用ロボットの軌跡精度の評価

軌跡精度向上の方策としてシームトラッキングの使用や Compensation の使用による軌跡精度の変化についての結果を示す。

姿勢 X2 における 6.0m/min で動作したロボット単体の Y 方向軌跡精度を Fig.3-12 に示す。また、シームトラッキングを使用した場合の結果を Fig.3-13 に、Compensation を使用した場合の結果を Fig.3-14 に示す。同様に、10.0m/min で動作したロボット単体の Y 方向軌跡精度を Fig.3-15、シームトラッキングを使用した場合の結果を Fig.3-16 に、Compensation を使用した場合の結果を Fig.3-17 に示す。

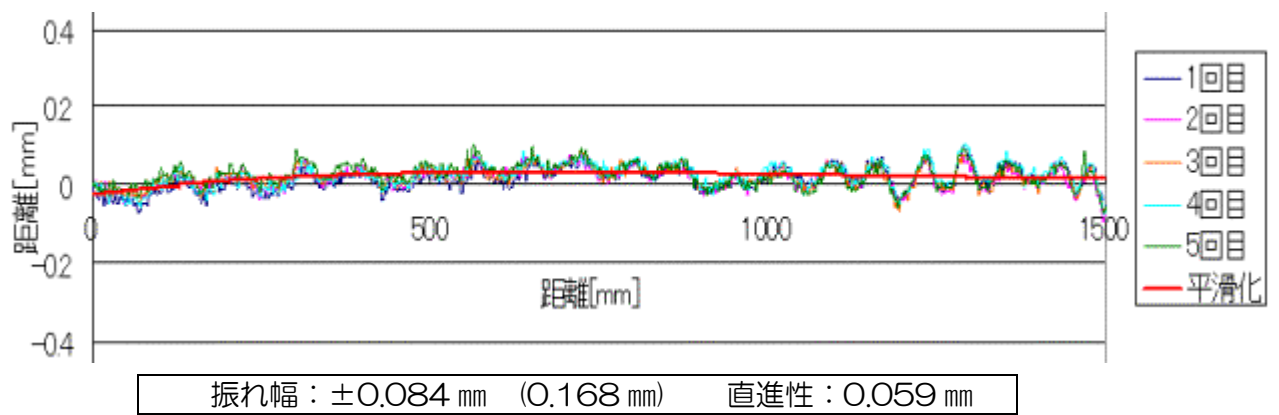


Fig. 3-12 姿勢 X2 における 6.0m/min でのロボット単体の軌跡精度

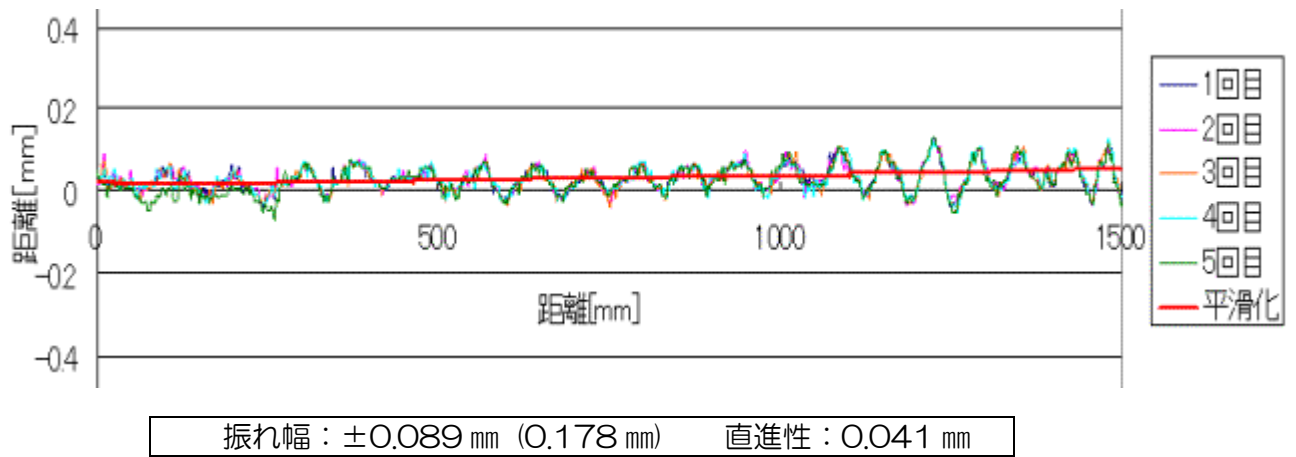


Fig. 3-13 姿勢 X2 における 6.0m/min でのシームトラッキングを使用した場合の軌跡精度

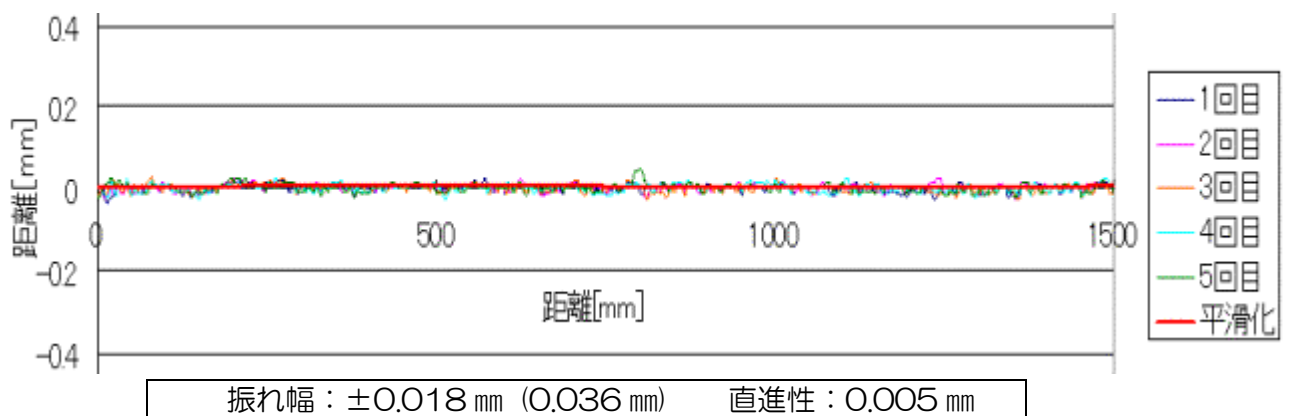
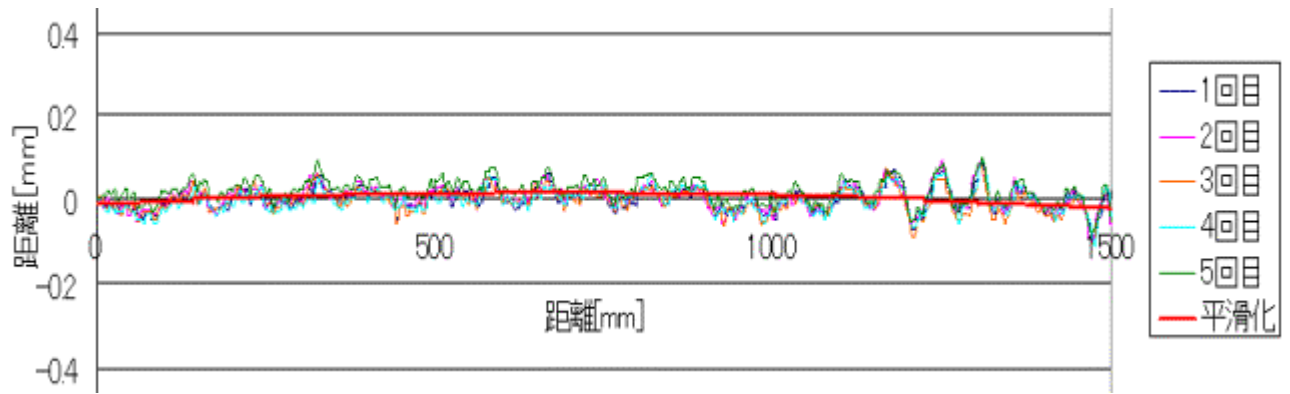
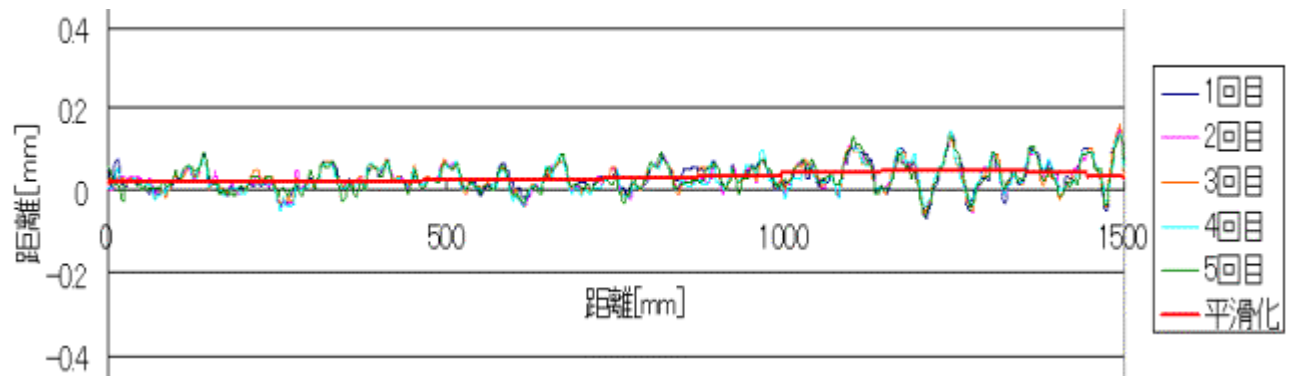


Fig. 3-14 姿勢 X2 における 6.0m/min での Compensation を使用した場合の軌跡精度



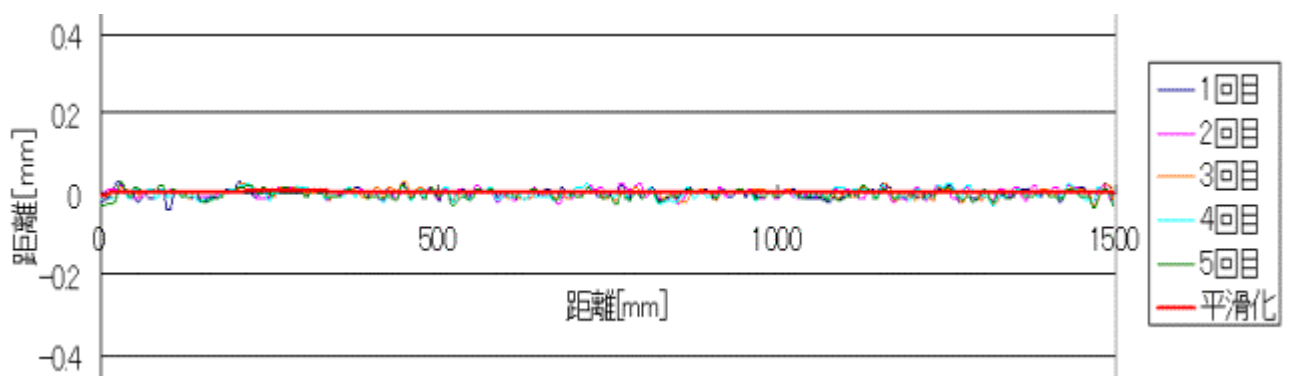
振れ幅：±0.093 mm (0.186 mm) 直進性：0.041 mm

Fig. 3-15 姿勢 X2 における 10.0m/min でのロボット単体の軌跡精度



振れ幅：±0.106 mm (0.212 mm) 直進性：0.058 mm

Fig. 3-16 姿勢 X2 における 10.0m/min でのシームトラッキングを使用した場合の軌跡精度



振れ幅：±0.0215 mm (0.043 mm) 直進性：0.0017 mm

Fig. 3-17 姿勢 X2 における 10.0m/min で Compensation を使用した場合の軌跡精度

この結果より、6.0m/min で動作した場合の軌跡精度は、ロボット単体の振れ幅 0.168 mm、直進性 0.059 mmであった。(Fig.3-12 参照)

シームトラッキングを使用した場合の振れ幅は 0.178 mm、直進性 0.041 mmであり、振れ幅は大きくなり、直進性も大きな変化は見られない。(Fig.3-13 参照)

Compensation を使用した場合の振れ幅は 0.393 mm、直進性 0.005 mmであった。(Fig.3-14 参照)

同様に、10.0m/min で動作した場合の軌跡精度は、ロボット単体の振れ幅 0.186 mm、直進性 0.041 mmであった。(Fig.3-15 参照)

シームトラッキングを使用した場合の振れ幅は 0.212 mm、直進性 0.058 mmであり、振れ幅は大きくなり、直進性も大きな変化は見られない。(Fig.3-16 参照)

Compensation を使用した場合の振れ幅は 0.043 mm、直進性 0.0017 mmであった (Fig.3-17 参照)

これより、ロボット単体・シームトラッキング使用時の軌跡精度と比較すると、Compensation を使用することにより、振れ幅・直進性共に大きく改善されることが明らかとなった。

以上のことから、本研究により、ロボット軌跡精度が最適となる配置は溶接線をロボット正面方向とすることが判明し、動作速度が変化しても軌跡精度には大きな影響が無いことが明らかとなった。また、この方向に動作させる場合、もともと、ロボット単体での軌跡精度が良好であるため、インラインシーム計測装置のリアクティブ制御である、シームトラッキング機能だけを使用した場合、制御応答性が低く、ロボット軌跡精度の向上率が少ないことを確認した。

そこで、プロアクティブ制御である、軌跡精度補償機能(「Compensation」)を併用することによりロボット軌跡精度が著しく改善されることが明らかとなり、目標としたロボット軌跡精度：直進性 0.02 mm以内を達成、及び、3-2-②で追加目標とし設定した、ロボット軌跡精度：振れ幅±0.03 mm以内を達成することができた。

また、ロボット単体での繰り返し精度は、全方向において最大 0.076 mmであり、ロボット正面方向では最大 0.03 mmであった。

これより、直線溶接を対象とする産業用(汎用多関節タイプ)ロボットを使用したレーザ溶接加工装置はインラインシーム計測装置を併用することにより、一般的な直行軸型溶接加工装置と同等な軌跡精度を得られることが可能となった。

第4章 全体総括

4-1 成果の総括

研究目標に掲げた内容について、下記に示す研究成果を上げることが出来た。

- (1) 従来のランプ励起 YAG レーザでの貫通溶接に比べて溶接速度の 20%向上を達成した。
- (2) 耐ギャップ裕度を 0.1 mmから 0.3 mmへと拡大することができた。
- (3) ロボットの正面方向を溶接線とすることで、ロボット軌跡精度の目標とした、直進性 0.02 mm以内及び、振れ幅 ± 0.03 mm以内を達成した。インラインシーム計測装置のシームトラッキング・Compensation を使用することで、一般的な溶接加工装置と遜色ない軌跡精度が得られた。
- (4) レーザ光線は単なる熱源ではなく、固体の要素である形状特性を持つことから、高品質な溶接の実現のためにはレーザプロファイルの検証が重要であることを確認した。
本研究目標をクリアする結果であり、更なる研究の深度を進め、溶接外観と機械的強度の因果関係をさらに突き詰め、次なる研究領域へのステップアップを目指すこととする。

4-2 今後の取組み

4-1 の成果の総括のとおり、本年度研究目標が達成でき、今回の研究の目的である、『汎用多関節ロボットを用いたレーザ溶接による高精度、高品質かつ低コストなテーラードブラ

ンク製造装置の開発』の第一段階である、直線溶接に対する技術の確立は達成した。
第二段階としては研究の最終目標でもある汎用多関節ロボットの特徴を生かした、非直線溶接(斜め線溶接や曲線溶接)を可能としたテーラードブラック製造装置であるため、さらに、今回得た技術を昇華、改良を実施し、製品開発を力強く推進する。

溶接技術の研究において、明らかとなった、レーザ光線は単なる熱源ではなく、固体の要素である形状特性を持ち合わせる点に着目し、レーザプロファイルの最適化を核に、更なる研究をおこない、製品化のための強力なサポートツールとして活用する。

本研究により、溶接技術理論は飛躍的に高まったといえる、従来製品にも早急にフィードバックを実施し、実生産フィールドでの検証も合わせて行っていく。

また、今回はテーラードブラックにおける板厚さの組み合わせを 1.6 mmと 0.65 mmとして実験を行ったが、今後の課題として、厚板、薄板の組み合わせを変化させたもの、同厚材、ハ

イテン材、メッキ材などについての実験をおこない、より広範囲な条件に適用できる理論である事を確認することとしたい。

本年度の研究成果からロボット制御技術およびレーザー溶接技術において、ライバルである欧米企業に対して対等に渡り合える自信を得たと考える。本研究を継続して推し進めることにはもちろんのこと、今回得られたシーズを基に次なる自社製品への展開も視野に入れながら、日本のものづくり技術の向上及び、更なる国際競争力の強化を目指したい。