

平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「レーザ溶接数値化アルゴリズムでのインライン判定システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成 24 年 1 月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人千葉県産業振興センター

目次	
第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-1-1 研究開発の背景	3
1-1-2 研究目的および目標	4
1-1-3 本研究開発の達成目標	5
1-1-4 本報告における検出光の定義	6
1-1-5 研究実施内容	6
1-2 研究体制	6
1-2-1 研究組織（全体）	6
1-2-2 管理体制	7
1-2-3 管理員及び研究員	7
1-3 成果概要	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 本論	9
2-1 波形制御装置（本体）	9
2-2 適応制御実験	10
2-3-1 チタン材突き合わせ溶接の隙間発生時の検出波形	10
2-3-2 適応制御によるアンダーフィルの抑制	12
2-3-3 他社製品との適応制御機能比較	15
2-4 ステンレス薄板重ね溶接時の隙間検出	16
第3章 結論	18
3-1 本年度の研究開発結果	18
第4章 全体総括	19
4-1 プロジェクト通年の研究開発成果	19
4-1-10 研究開発成果まとめ	19
4-2 研究開発後の課題・事業化展開	20

第1章 研究開発の概要

現在、レーザ溶接が適応されている分野は エレクトロニクス産業（携帯電話等）、自動車産業（電気自動車向けリチウムイオン電池、ボディ、電装品）、航空機産業（大型構造物など加工）など、レーザ溶接を適用する対象が大型であったが、近年、医療機器産業の小型製品や、生活必需品（チタンなどの金属製眼鏡フレーム等）などにも広がりを見せている。各分野において、レーザ溶接を用いる上での共通の課題として、品質及び信頼性の向上が急務となっている。品質と信頼性を向上させるためには、溶接するワーク（製品）内部・外部のあらゆる溶接欠陥を検出することが有効であるが、そのためには、溶接条件のみならず、出射光、プラズマ光、熱、音、画像などあらゆる手段を用いて正確に溶接現象をモニタリングする技術を確立することと溶接結果との因果関係を解明して正確な判定結果を導くアルゴリズムを構築ことが必須である。

本研究開発では、全数をインラインで判定し、かつ自動的にあらゆる溶接不具合品を検出するため、溶接現象の加工プロセスを数値化し、アルゴリズムによる良否判定システムを開発する。更に、溶接不具合を未然に防ぐ、適応制御システムの構築も目指す。製品の品質と信頼性を高めながら、生産効率を向上させるこの技術は、レーザ溶接を行う産業の拡大と雇用確保に資するものである。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

近年、日本の産業界において、レーザ加工を応用した各種材料の溶接、穴あけ等は広く普及しており、板金・鋼管等の加工はもとより精密微細加工分野への適用も進展している。（図 1-1）

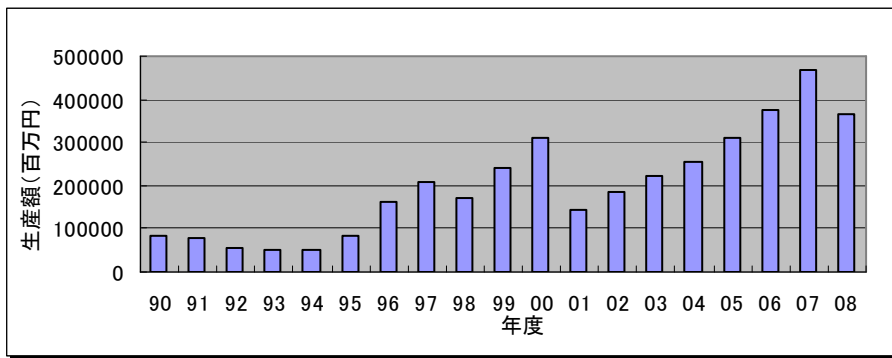


図 1-1 レーザ加工装置生産額の年度推移

電池産業ではリチウム電池の小型軽量化のため、アルミニウム合金が採用され、周辺部の部品への熱影響を最小にできるレーザ溶接が適用されている。電池ケースの外周部のレーザ溶接による完全密封構造が可能になることにより電池の高信頼性長寿命化が期待され、実現化されつつある。また、医療産業では医療機器用の工具チップの溶接、内視鏡のステンレスチューブの溶接など、低歪みで精密製の高い仕上げが要求されるため、レーザ溶接が適用されている。さらに、最近では眼鏡産業においても、メガネフレームの溶接部の見た目、品質の観点からレーザ溶接が適用されるなど、多種多様な業界でレーザ溶接は注目されている。

いずれの業界においても溶接部に安全性、耐久性が必要とされており、製造工程の品質管理は極めて重要である。しかしながら、現状での溶接部の品質管理は、後工程にて検査

工程が必要であり、外観検査、溶接強度検査等が行われる。特に溶接強度については、引っ張り試験や溶接断面の測定等の破壊検査が必要であり、全数検査が困難であることが多い。

このような状況から、レーザ溶接プロセスを数値化したアルゴリズムによる良否判定システムを開発することにより、全数をインラインで判定し、かつ自動的にあらゆる溶接不具合品を検出出来る装置を開発すれば、レーザ溶接は、より難易度の高い用途への拡大に貢献していくと思われる。更に、高速で、高品質・高機能な接合部を常時作製するために有効である適応制御機能を追加することで装置を実用化する上での大きな差別化が図れる。

西原電子では、本プロジェクトを行う以前にレーザ溶接向けのモニタリング装置の開発に着手し、出射光、反射光、プラズマ光、赤外光の強度を測定できるところまで研究が進んでいる。

一方大阪大学接合科学研究所の川人准教授は、最先端のレーザ技術を駆使して、研究論文などを多数発表しており、アルミニウム合金におけるインプロセスモニタリングと適応制御に関する研究など、レーザパワーのリアルタイム制御を目的とする研究も実施している。特に、薄板の重ねスポット溶接においてミリ秒単位の短いレーザ照射時間内に、マイクロサイズのレーザ照射部から熱放射光速度を基に熔融状態を推定し、レーザパワーをリアルタイム制御することで、穴あき欠陥を防止する技術を世界に先駆けて実証するところまで研究が進んでいる。（(社) 軽金属溶接構造協会 2006 年度軽金属溶接論文賞）

また、平成 22 年度からメガネフレーム製造国内大手であるシャルマンが研究実施機関として開発に参加している。開発したインライン判定システムを早期に実用化をするため、チタン材の実稼動加工ラインでのテストパイロットを行い、実際の生産現場で発生する溶接不良を判別できるアルゴリズムに改良する。また、溶接欠陥を未然に防ぐ適応制御システムを構築するため、シャルマン社内で実験、検証を行い実用化を目指す。

アドバイザーであるミヤチテクノスは、国内はもとより海外拠点も多く幅広い営業活動を行っており、レーザ装置は表 1-1 に示すシェアを占めている。長年培ったノウハウを基に生産現場で抱えるレーザ溶接の問題点や解決方法などのアドバイスを頂く。

平成 22 年度からアドバイザーとして参加するオリンパスは、医療機器の部材であるステンレスの溶接を行っている。インライン装置をユーザとしての目線で、ニーズや使い勝手などの観点からアドバイスを頂く。

表 1-1 固体レーザ加工機器 市場推移

年度	平成 17	平成 18	平成 19	平成 20	平成 21
年度別ミヤチテクノスシェア (パルス溶接のみ)	45%	44%	55%	61%	61%
年度別ミヤチテクノスシェア (固体レーザ加工機)	25%	26%	33%	36%	36%
(平成 20 年は見込み、平成 21 年は予測 平成 20 年 9 月)					

今回の研究開発は、西原電子及び大阪大学におけるこれまでの開発・研究成果を土台として、実稼動ラインでのテストパイロット及び現場からの装置に対する要望を聞くためにメガネフレーム製造国内大手であるシャルマン、レーザ溶接の問題点と解決方法を熟知しているミヤチテクノス社、オリンパス社のアドバイスを受けながら取り組んだものである。

1-1-2 研究目的および目標

本研究の目的は、川下企業の抱えるニーズに答えるため、リアルタイムでの溶接良否判定確立を目指す。平成 21 年度の研究で溶接材に用いたアルミニウム薄板は、熱伝導率、線膨張率が高いため溶接部およびその周辺部に変形が生じやすいという特徴を持っていた。

重ね合わせ溶接時には変形が生じ易く、変形により試料間に隙間が発生し、穴あき等の溶接不具合が見られた。平成 21 年度の研究開発したセンサを用いることで、アルミニウム合金の溶接不具合判別アルゴリズムを構築することができた。

平成 22 年度の研究で溶接材に用いたチタン材は、溶接を行う場合、大気中の酸素と反応し、酸化し易いなどの特徴を持ち、難溶接材のひとつである。マイクロ領域での高精度な接合に用いる場合には、個々の試料の表面状態や接合箇所毎の熱容量の僅かな差、固定治具の精度などにより、溶接品質の異なる状況が発生しやすく、プロセスを安定に維持するには非常に難しく重要な課題であった。平成 22 年度の研究では突き合わせ試料間の微小な隙間を検知することを目標にし、平成 21 年度に構築したアルゴリズムをチタン材突合わせ溶接時の隙間検出アルゴリズムに改良することが出来た。

本年度は、チタン材の突合わせパルス溶接に対する適応制御の検討と、レーザ溶接に適した材料といわれるステンレス材の重ね合わせ溶接時の微小な隙間を検知するモニタリング実験を行う。

レーザ溶接時のモニタリング方法として、図 1-2 に示すようにレーザ照射による溶融に伴い、溶融部から発生している光を各種センサで検出し、溶接の成否との関連性を探っていく。

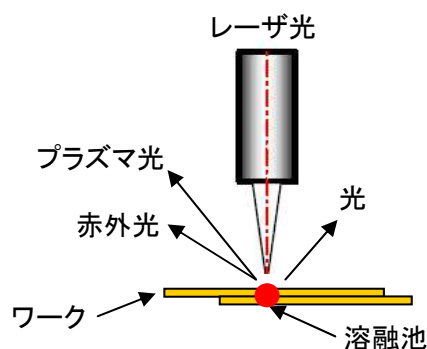


図 1-2 レーザ溶接と各種信号

1-1-3 本研究開発の達成目標

溶接不良の発生をレーザ照射中に感知し、適切な出力に制御することで溶接不良を未然に防ぐ適応制御システムの構築を達成目標とし、平成 22 年度に開発した溶接良否インライン判定システム装置に適応制御機能を追加した波形処理装置に改良する。また、適応制御の検証実験は、チタン材のレーザ溶接で実稼動加工ラインに近い環境でのテストパイロットにて実施する。

表 1-2 達成目標

項目	達成目標
適応制御機能の追加	溶接不良の発生をレーザ照射中に感知し、適切な出力に制御することで溶接不良を未然に防ぐ適応制御システムの構築

1-1-4 本報告における検出光の定義

本報告書内で使う各光の定義を表 1-3 に示す。

表 1-3 本報告における各光の定義

出射光	レーザー装置から照射されたレーザー光。
反射光	レーザー照射時に試料表面から反射したレーザー光。
可視光	レーザー照射時に試料から発生する光の内、目で認識できる波長のみを検出したもの。本研究においては主に試料のプラズマ光。
赤外光	レーザー照射時に試料から発生する光の内、熱放射光に分類される波長域を挟範囲で検出した光。

1-1-5 研究実施内容

本研究の研究実施内容と実施項目を表 1-4 に示す。

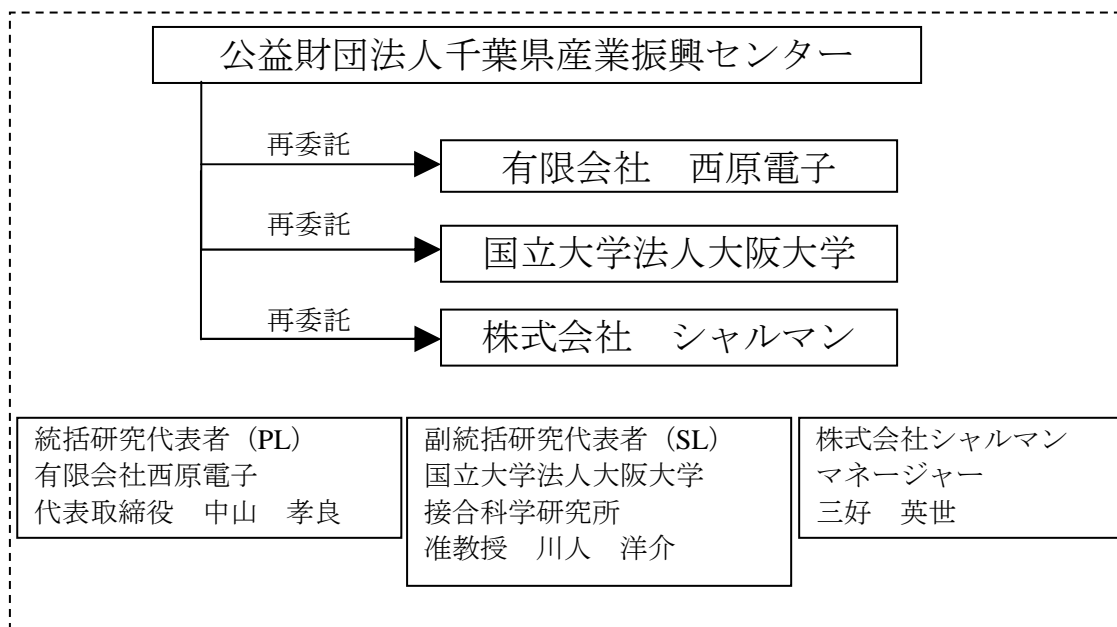
本年度は適応制御機能の追加と共に、前年度行っていた生産現場に対応したアルゴリズムの改良に対応する SUS 薄板の重ね溶接時の隙間欠陥の判別アルゴリズムについても実験を行う。

表 1-4 研究実施内容と実施項目

実施内容	実施項目
6 適応制御の追加	6.1 適応制御技術を用いた追加機能の検討

1-2 研究体制

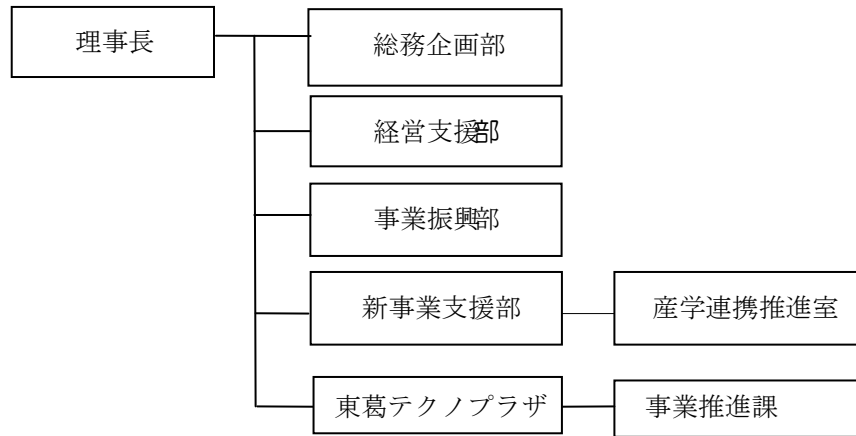
1-2-1 研究組織（全体）



1-2-2 管理体制

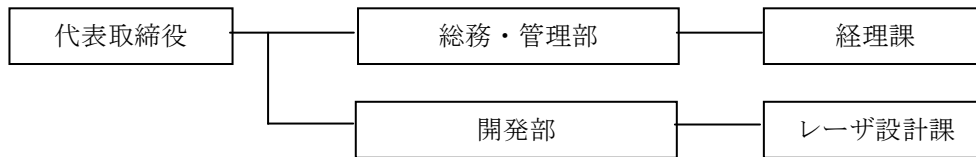
① 事業管理機関

[公益財団法人千葉県産業振興センター]（業務管理者：東葛テクノプラザ所長 山本 修一）
 経理担当者：谷口貞夫

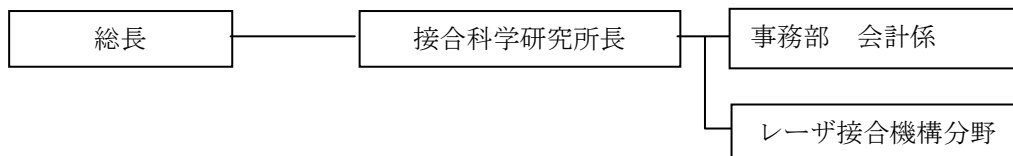


② 再委託先

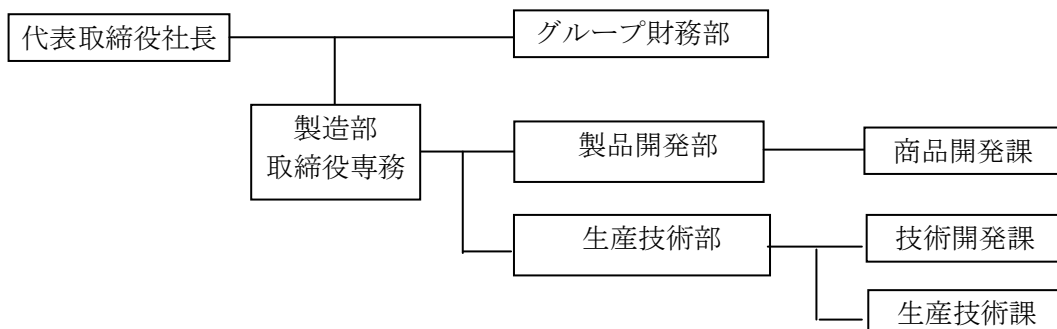
[有限会社西原電子]（業務管理者：代表取締役 中山 孝良、総務・管理部 取締役 中山 和子）
 経理担当者：中山和子



[国立大学法人大阪大学]（業務管理者：レーザ接合機構学分野 准教授 川人 洋介）
 経理担当者：岡本征子



[株式会社シャルマン]（業務管理者：取締役専務執行役員 岩堀 一夫）
 経理担当者：道野健



1-2-3 管理員及び研究員

[事業管理者] 公益財団法人 千葉県産業振興センター

氏名	所属・役職
古屋 敏昭	産学連携推進室 研究開発コーディネーター
加藤 重良	事業推進課 主査
島村 照美	事業推進課 嘱託員

[再委託先] 有限会社 西原電子

氏名	所属・役職
中山 孝良	代表 (代表取締役)
佐々木 春樹	主任研究員 (課長)
笹崎 浩	副主任研究員 (主任)
島崎 雄志	研究員
川上 佳剛	研究員
山内 悠	研究員
野杵 俊樹	研究員

[研究員] 国立大学法人大阪大学

氏名	所属・役職
川人 洋介	接合科学研究所 准教授

[研究員]株式会社シャルマン

氏名	所属・役職
三好 英世	生産技術部 技術開発課・マネージャー
藤木 孝行	製品開発部 商品開発課/品質保証課・マネージャー
勝木 史浩	生産技術部 生産技術課・サブマネージャー
中村 浩	生産技術部 技術開発課・エキスパート

1-3 成果概要

本研究の成果は以下である。

- (1) 波形検出～適応制御まで**0.05ms**で動作する波形処理装置を作製することができた。
- (2) 適応制御機能を用いた場合、チタン突合せ溶接時に発生するアンダーフィルの低減、溶け込み深さの安定化ができる適応制御ができた。
- (3) ステンレス材 (SUS304) 医療機器製造において、溶接部の引張強度を赤外光波形の特定時間積算値から推測するアルゴリズムへの改良をすることができた。
- (4) 作製した波形処理装置と類似した他社製品の適応制御機能比較を行った結果、レーザー溶接生産現場で使用する上では使い勝手の上で優位性があることがわかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

企業名	有限会社 西原電子
本社所在地	〒277-0885 千葉県柏市西原 6-8-30
代表者	代表取締役社長 中山孝良
連絡先	Tel : 04-7149-1239 Fax : 04-7149-1240 E-mail : nakayama-taka@msv.nishi-den.co.jp

第2章 本論

今年度の研究課題は、適応制御機能を使用した「チタンの突合せ溶接のアンダーフィルの抑制」と良否判定機能による「ステンレスの薄板重ね溶接時の隙間検出」である。

適応制御実験では、チタンの突合せ溶接のアンダーフィルの抑制を目的とした実験を行った。良否判定についての研究は、「ステンレスの薄板重ね溶接時の隙間検出」として、ステンレスの薄板重ね溶接時の隙間の検出においてどの程度までの隙間が検出することが可能かどうかを実験にて検証を行うこととした。

2-1 波形制御装置（本体）

表 2-1 に示す仕様は、溶接条件だけでなく、溶接現象を含めてアルゴリズムを構築しており、インラインで全数検査し、要求品質上問題となる重大溶接欠陥を検出することで、溶接品質の信頼性を確保する判定システム装置ともなるようにしている。

よって、溶接良否機能と適応制御機能を併せ持った波形処理装置となっている。

表 2-1 適応制御機能の主な仕様

応答速度	100us（モニタリングから波形表示まで）
適応制御電圧ステップ	0.25V
レーザ出力制御範囲	検出強度 300W 以下（モニタ値）
適応制御出力電圧	0.4V～10V
適応制御設定時間	レーザ照射終了までの任意（検出強度 300w 以上）

図 2-1 に開発したモニタと使用している iPad アプリケーションに適応制御機能を追加した画像を示す。

画面写真赤枠部の適応制御 ON 表示が、追加した機能を表している。平成 22 年度の開発した iPad アプリケーションに適応制御機能を追加し、実稼動加工ライン上でも視覚的にわかりやすくしている。図 2-2 に開発した iPad アプリケーション設定に適応制御機能を追加した画面を示す。適応制御 ON/OFF や接続チャンネル、適応制御開始電圧レベル等が視覚的に分かり易いようにした。また、レーザ照射 1 パルス内でも細かい制御が出来るように期間は最大 4 分割で可能である。平成 22 年度に開発した iPad アプリケーションに内蔵している良否判定設定同様に、適応制御設定画面も、実稼動加工ライン上で視覚的にわかりやすいようにした。

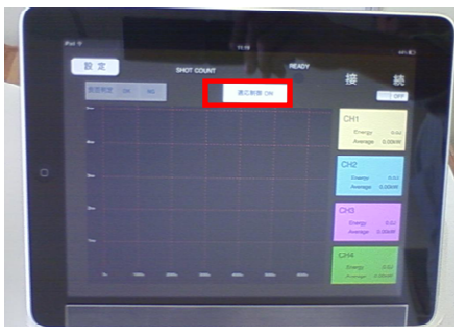


図 2-1 適応制御モニタ画面



図 2-2 適応制御機能設定画面

2-2 適応制御実験

2-3-1 チタン材突き合わせ溶接の隙間発生時の検出波形

まず、チタン突き合わせ溶接時の溶接現象をセンサで捉えることができるかを検証するため、平成 22 年度に開発した集光光学系を用いてチタン材突き合わせ部にレーザ溶接を行い、赤外光波形（波長 1300nm、1550nm）、反射光波形（波長 1064nm）を検出した。また、そのときの様子を高速カメラ（撮影速度：50000fps）で撮影し、赤外光、レーザ反射光の波形と溶融現象とを比較した。図 2-3 に本実験の概略図を示す。ファンクションジェネレータで設定したトリガ波形をレーザ装置、波形処理装置、高速カメラに入力し、レーザ出力開始、波形処理装置測定開始、高速カメラ撮影開始時間が同期するようにした。レーザ装置へのトリガ信号のパルス幅はレーザ出力時間に相当する。レーザ出力レベルは波形処理装置からレーザ装置に入力される。チタン突き合わせ継手部にレーザを照射し、水平方向から 50° 傾斜させて設置した外部集光ユニットにて光電変換素子に集光し、光電変換された赤外光、反射光信号は波形処理装置へと送られ、無線にて Ipad 上に波形が表示される。適応制御（フィードバック制御）を行う際には波形処理装置で検出した波形を基にして、設定値に従いレーザ出力を変動させる。また、溶接部の酸化を防ぐため、レーザ照射中はアルゴンガスを溶接部に吹き付けた。条件はレーザパワー1.2kW、照射時間 3ms とした。後に行う適応制御した場合の溶込み深さ、アンダーフィルの程度を比較する目的で溶け込み深さが適応制御有無によらず同等になるような条件を選定した。試料間に隙間 0.1mm を設けた場合の実験結果を図 2-4 に示す。

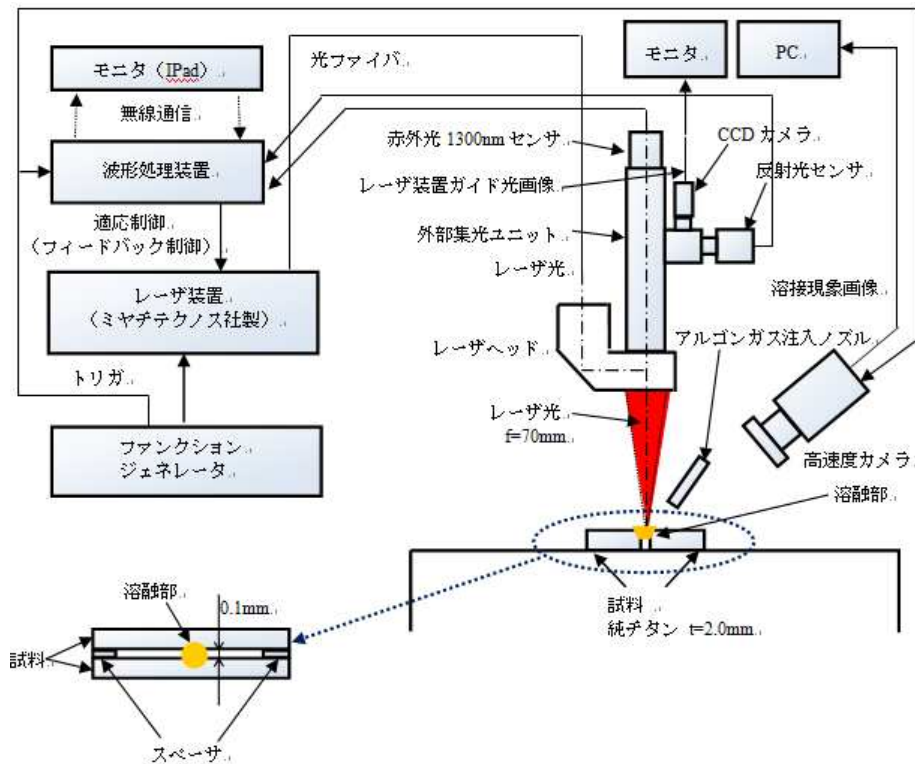


図 2-3 チタン突き合わせ実験概略図

・隙間 0.1mm、適応制御無しの場合の検出波形及び高速度カメラ画像

□ レーザパワー： 1.2kW □ 照射時間： 3ms

□ 材料：純チタン 突合せ継手 隙間 0.1mm

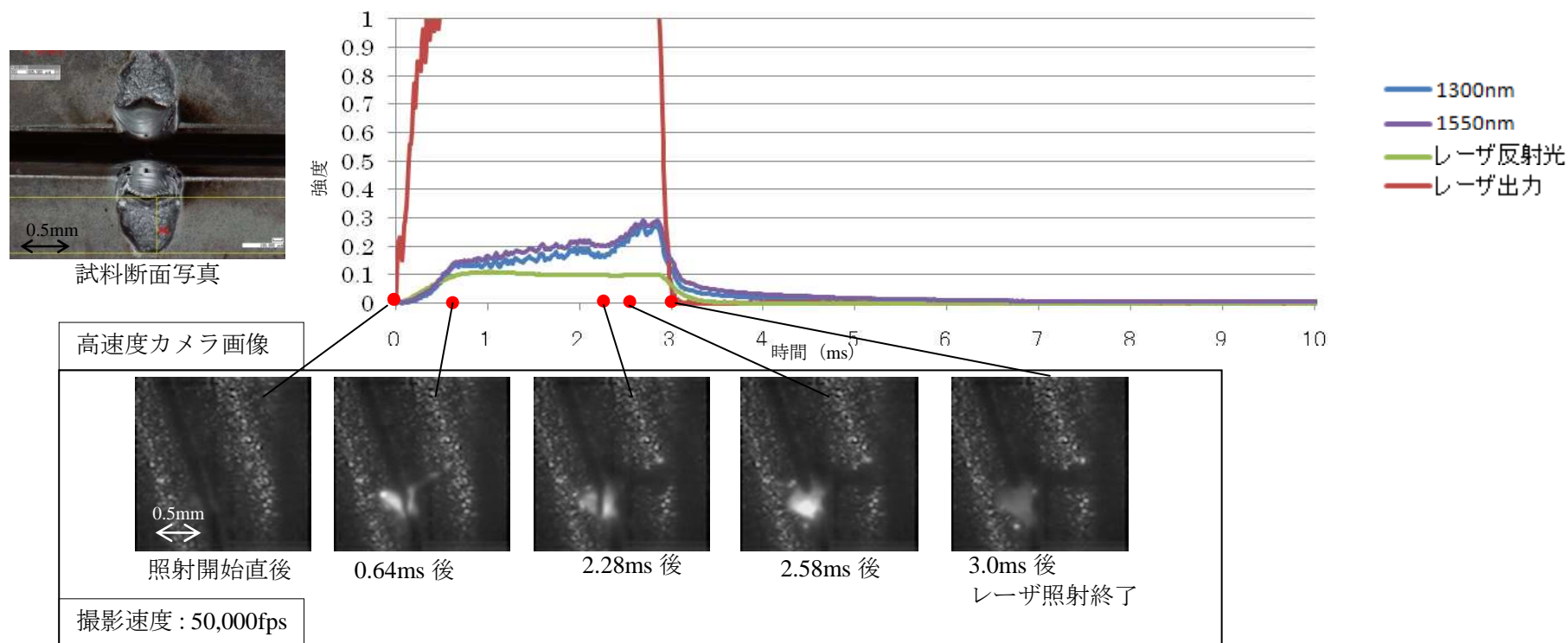


図 2-4 反射光、赤外光波形と高速度カメラ画像

《結果詳細》

- ・突合せ部に隙間 0.1mm を設けた状態でレーザーを照射した。
- ・照射開始から 2.58ms で試料両端が溶着した。同じタイミングで赤外光波形が急上昇する結果が得られた。
- ・200 μ m 程度の深さのアンダーフィルが発生した。

※本実験時の条件は、後に行う適応制御した場合の溶込み深さ、アンダーフィルの程度と比較するため、溶け込み深さが同等になる条件を選定した。

2-3-2 適応制御によるアンダーフィルの抑制

2-3-1 実験により、試料間に隙間が発生した場合、レーザー光が隙間から抜けてしまい、十分に溶接されず、アンダーフィルが発生してしまうことが分かった。このときの赤外光波形を見ると、隙間が埋め戻され、試料両端が一体化して溶着されると、照射面から見た熔融部の面積が一気に広がるため、波形が上昇する特性がある。この特性を利用し、試料両端が溶着された後に一定の条件で照射することで、安定した溶接品質が得られると考えられる。2-3-1 実験の波形から赤外光波長 1300nm の波形が強度 0.25 に達するあたりで波形が急上昇し、同タイミングで試料両端が溶着することが分かった。そこで、初期に 0.6kW の低レーザーパワーでレーザー照射し、赤外光波形が 0.25 に達した瞬間に 0.6kW、2ms の本パルスを照射する適応制御実験を行った。

隙間 0.1mm の場合の適応制御実験結果の一例を図 2-5 に示す。

0.1mm の隙間を与えた場合、試料両端が溶着する時間が 7ms 程度であった。照射から 5.6ms で試料両端が溶着し、6.92ms 後に赤外光が強度 0.25 に達し、レーザー出力を 1.0kW に上昇させた。試料断面を見ると 80 μ m 程度の深さのアンダーフィルが発生していた。これは、隙間 0.1mm での適応制御をしていない場合でのアンダーフィルに比べ半分以下である。

図 2-6 に適応制御の有無と溶け込み深さの関係、図 2-7 に適応制御の有無とアンダーフィル深さの関係をそれぞれ示す。図 2-6 より、適応制御有りの場合には溶け込み深さは同程度であるが、深さのばらつきが適応制御無しの場合よりも比較的少なく、また、アンダーフィル深さは、適応制御有りの場合には適応制御無しの半分以下に低減され、またばらつきも少なく、常に安定した溶接結果を得ることができた。

・隙間 0.1mm、適応制御した際の検出波形及び高速度カメラ画像

□ レーザパワー：適応制御前 0.6kW / 適応制御後 1.0kW □ 照射時間：適応制御前 1300nm 波形が 0.25 に達するまで / 適応制御後 2ms

□ 材料：純チタン 突合せ継手 隙間 0.1mm

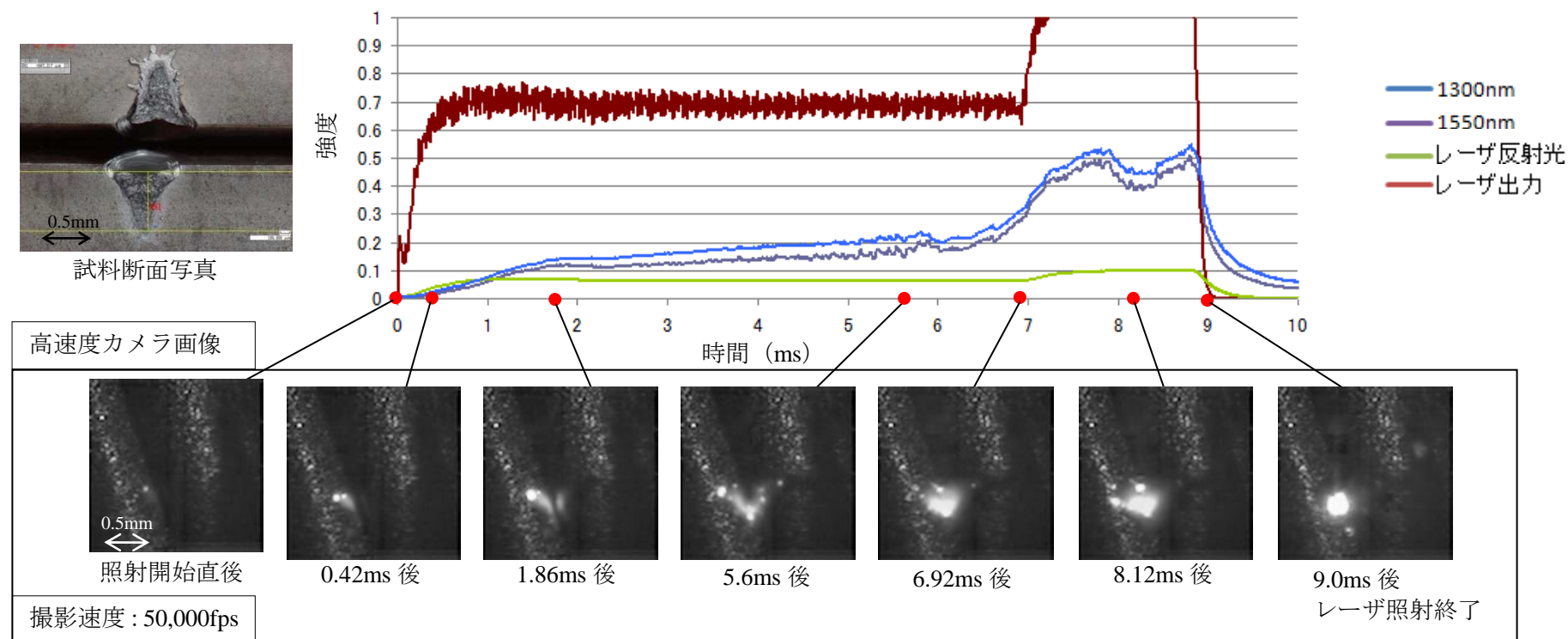


図 2-5 反射光、赤外光波形と高速度カメラ画像

《結果詳細》

- ・初期に 0.6kW の低パワーで照射し、試料両端の溶融部が溶着されるタイミングである赤外光 0.25 以上でレーザーパワー 1.0kW に上昇させた。
- ・5.6ms で試料両端が溶着され、その後、赤外光が 0.25 に達した 6.92ms でパワー上昇の制御を行うことができた。
- ・100 μ m 程度の深さのアンダーフィルが発生していた。同隙間条件でのサンプルに比べアンダーフィルが半分程度の深さに低減された。

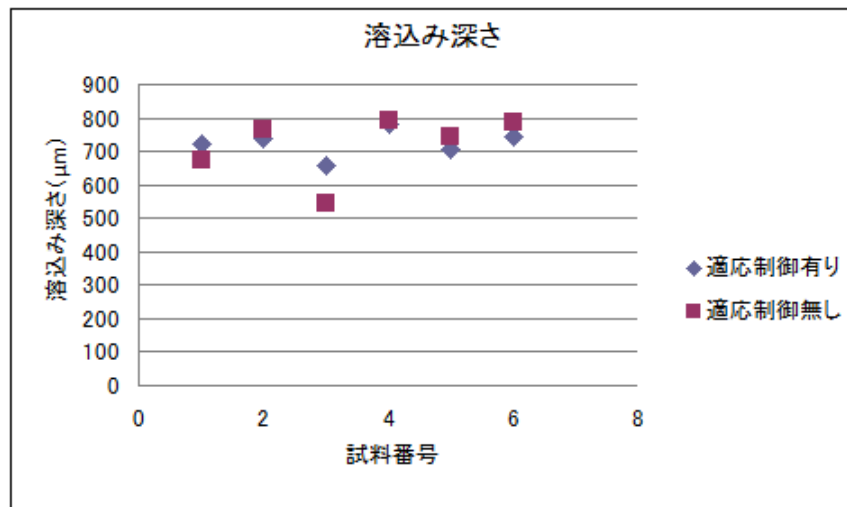


図 2-6 適応制御の有無と溶込み深さの関係

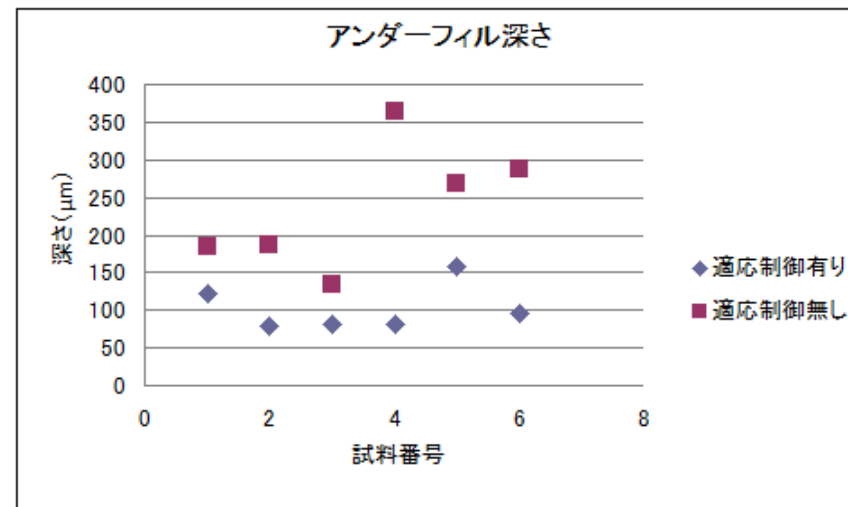


図 2-7 適応制御の有無とアンダーフィル深さの関係

《結果詳細》

- 初期に 0.6kW の低パワーで照射し、試料両端の溶融部が溶着されるタイミングである赤外光 0.25 以上でレーザーパワー1.0kW に上昇させた。
- 5.6ms で試料両端が溶着され、その後、赤外光が 0.25 に達した 6.92ms でパワー上昇の制御を行うことができた。
- 100 μ m 程度の深さのアンダーフィルが発生していた。同隙間条件でのサンプルに比べアンダーフィルが半分程度の深さに低減された。
- 隙間 100 μ m での突合せ溶接時の溶込み深さは、適応制御をした場合、制御後のレーザーパルスは隙間が埋まった後の溶融部に一定時間照射されるため、適応制御無しの場合に比べて安定した深さが得られることが分かった。
- 適応制御をした場合、アンダーフィル深さが適応制御無しの場合に比べて半分程度の深さに低減された

2-3-3 他社製品との適応制御機能比較

本研究により開発した波形処理装置の適応制御機能を検証するため、他社製品との比較実験を行った。実験機器及び接続を、図 2-8 に示す。



図 2-8 コーメックス電子(株)製 リアルタイム処理システム S-RTPstation

本研究で開発した波形処理装置の適応制御機能とコーメックス電子（株）製 リアルタイム処理システム S-RTPstation のシステム相違点を表 2-2 に示す。適応制御機能で最も重要である AD 変換から～DA 出力までの制御時間は共に $50\mu s$ で同等である。S-RTPstation は目的を限定しておらず、C 言語にて制御方法を書き換えられるため応用性は高いが、用途がレーザ溶接、生産現場で使用するのであるならば、本研究開発装置がシステム操作性や、サイズの面から優位性がある。

表 2-2 システムの相違点

	S-RTPstation	本研究開発装置
制御方法	C 言語	FPGA
制御時間	$50(\mu s)$	$50(\mu s)$
システム操作性	プログラミングの知識が必要	専門知識不要
重量	15kg	1kg
LAN	有線	無線/有線 切替え
OS	Windows、Linux	NiTRON

2-4 ステンレス薄板重ね溶接時の隙間検出

次に、医療用品の溶接を行っているオリンパス（株）社のニーズである SUS 薄板の重ね溶接時の隙間検出実験を行う。開発した波形処理装置、アンプ一体型集光ユニットを含めた実験システム図を図 2-9 に示す。本実験システムは、オリンパス社内で行われている溶接と同環境となるようなシステム構成にした。具体的には、デジタルジェネレータ信号出力にレーザ装置（IPG 社製）、波形処理装置、高速度カメラが同期して動作するシステムとした。また、レーザヘッドは、光ファイバ端焼け等がないように試料表面に対して 10° 傾けた状態でレーザ照射を行うこととした。溶接現象測定光は、反射光および赤外光 1300nm 測定用外部集光ユニットを使用し、水平方向から 50° 傾け、WD=150mm の位置で固定した。また、溶接時の試料の酸化を防ぐためにアルゴンガスを照射毎に試料表面に吹き付けて実験を行った。

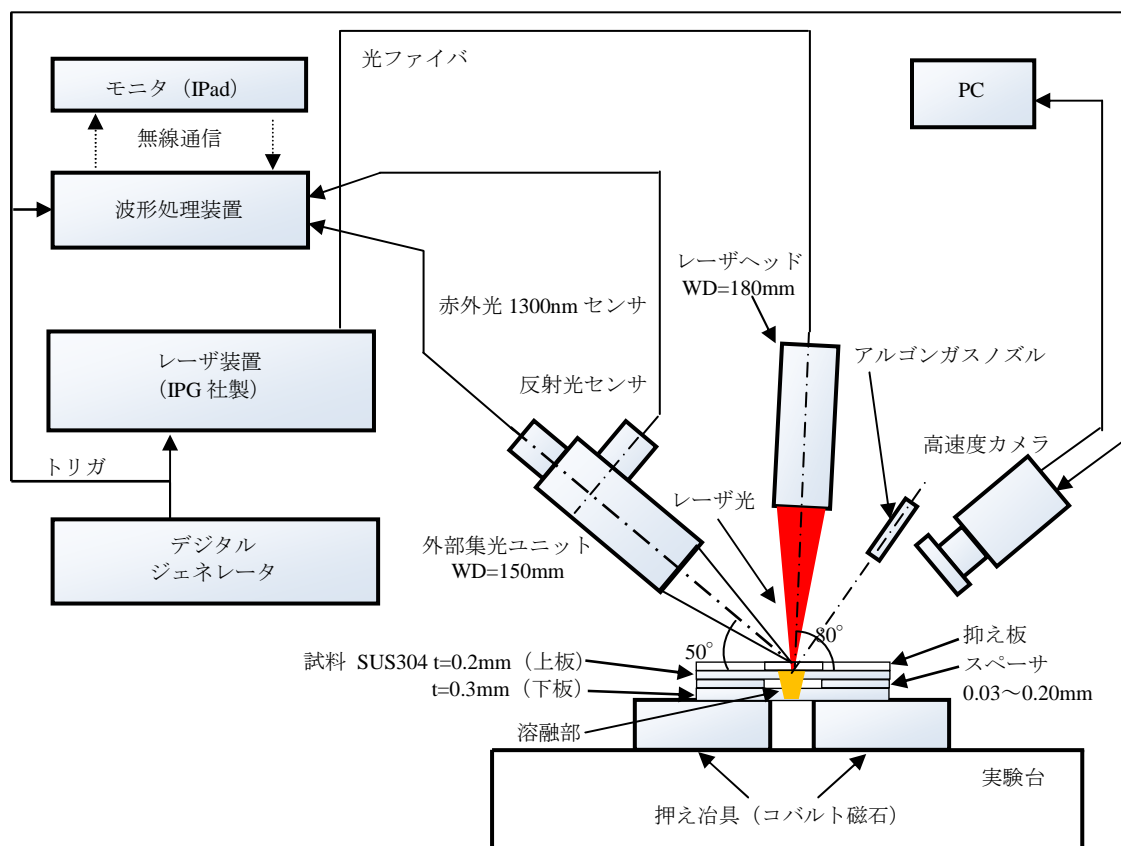


図 2-9 SUS304 レーザ溶接現象波形測定実験システム

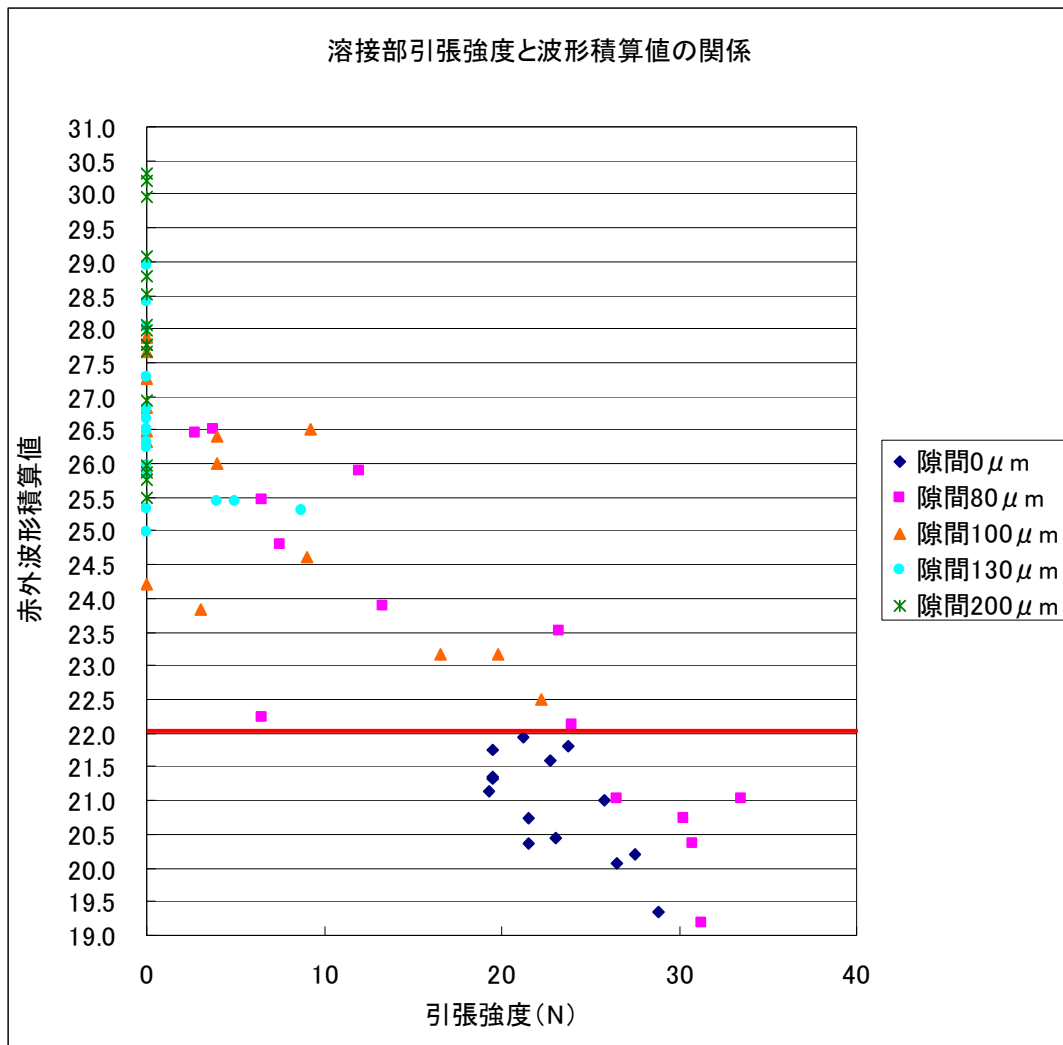


図 2-10 溶接部の引張強度と波形積算値の関係

図 2-10 に溶接部の引張強度と波形積算値の関係を示す。図 2-10 より隙間に関わらず 7～11ms までの波形積算値が小さいほど強い引張強度が得られることがわかった。これは実際の隙間はスペーサの厚みによらず微少な歪みなどにより上板と下板の隙間間隔が異なるためである。実際の隙間間隔が狭い場合は溶融部を介して下板側に熱が逃げるため積算値は小さくなるが、隙間が大きくなると、溶融部が下板に接しない（溶接できない）か、溶融部が下板に接したとしても微少であり、上板側に熱が蓄積し積算値が小さくなるものと思われる。グラフの詳細を見ると、積算値 22 以下で引張強度 19N 以上（隙間 0 は全て該当）が得られた。隙間 80 μm も積算値 22 以下に含まれるが引張強度 25N 以上であり、強度としては 0mm と同等の強度であった。隙間 100 μm 以上は一部、引張強度が 19 以上で隙間 0mm と同程度のサンプルも存在したが全て積算値 22 以上であった。以上の結果から、7～11ms の赤外光積算値に閾値 22 を設けることで、引張強度 19N 以上かつ、隙間が微少な溶接部を高精度で検出できることが分かった。

第3章 結論

3-1 本年度の研究開発結果

本年度の研究開発により、以下の成果が得られた。

○ 適応制御について

- (1) 適応制御機能を波形処理装置内に追加し、実稼動加工ラインに近い環境での動作確認が出来た。
- (2) メガネフレーム製造用チタン材突合せ溶接時に隙間 (100 μ m) があるとき、適応制御をした場合、適応制御をしない場合と比べて安定した溶込み深さが得られることがわかった。
- (3) メガネフレーム製造用チタン材突合せ溶接時に隙間 (100 μ m) がある場合、適応制御をした場合、適応制御しない場合に比べてアンダーフィル深さが半分程度の深さに低減されることがわかった。
- (4) 他社製品との適応制御機能比較実験も行い、レーザ溶接に限れば本プロジェクトで開発したインライン判定システムの方が優位であることがわかった。

○ 溶接良否判定について

- (1) 本プロジェクトで開発したインライン判定システムで、ステンレス薄板重ね溶接時の隙間検出が出来ることがわかった。
- (2) ステンレス薄板重ね溶接に隙間がある場合、赤外光は上板の厚みまでレーザが到達したときに 0.1mm 程度の隙間の有無で顕著に波形強度に差がでることが分かった。
- (3) ステンレス薄板重ね溶接時の隙間は、波形の時間的傾向を調べることで、隙間が大きくなるほど波形積算値が増加していく傾向であることがわかった。
- (4) ステンレス薄板重ね隙間検出実験において、せん断引張試験による引張強度と赤外光波形には相関性があり、赤外光波形 7~11ms の積算値を算出することで、引張強度を推測できる可能性があることがわかった。

第4章 全体総括

4-1 プロジェクト通年の研究開発成果

平成21年度～平成23年度の研究成果を総括する。

4-1-10 研究開発成果まとめ

平成21年度

- (1) アルミ薄板重ね合せパルス照射溶接時の主な欠陥として穴あき、スパッタが発生し、これら欠陥は赤外光、反射光の両者の波形により100%検出することができた。
- (2) パルス溶接時には試料の歪みに起因する溶融部が振動を起こす現象が見られた。この現象は反射光によって顕著に捉えることができる。
- (3) 連続溶接時の主な欠陥として穴あき、未溶融部などが発生し、これら欠陥発生時と良好な溶接時とでは赤外光、反射光において明らかにことなる波形が得られた。
- (4) 外部からの影響を受けにくい赤外光はモニタリングに適している。

平成22年度

- (1) 波形検出、判定、フィードバック出力ができ、ipad専用アプリにて操作可能である波形処理装置を作成することができた。
- (2) アンプ部と光学部を一体化した集光ユニットを作製することができた。
- (3) チタン製メガネフレーム製造において重大な欠陥となりうる0.1mm以上の隙間を検知することができるアルゴリズムに改良することができた。

平成23年度

- (1) 適応制御機能を波形処理装置内に追加し、実稼働加工ラインに近い環境での動作確認が出来た。
- (2) メガネフレーム製造用チタン材突合せ溶接時の隙間発生時に適応制御をした場合、適応制御をしない場合と比べて安定した溶込み深さが得られ、適応制御しない場合に比べてアンダーフィル深さが半分程度の深さに低減されることがわかった。
- (3) ステンレス薄板重ね溶接に隙間がある場合、赤外光は上板の厚みまでレーザーが到達したときに0.1mm程度の隙間の有無で顕著に波形強度に差がでることが分かった。
- (4) ステンレス薄板重ね隙間検出実験において、せん断引張試験による引張強度と赤外光波形には相関性があり、赤外光波形7～11msの積算値を算出することで、引張強度を推測できる可能性があることがわかった。

4-2 研究開発後の課題・事業化展開

本研究開発期間中に、シャルマン社、オリンパス社など、ユーザ側からの意見を踏まえながら開発を実施してきた。ユーザによって検出する溶接欠陥の種類、溶接材料、材料の形状、溶接継手、レーザの種類など数多くの条件が存在し、そのニーズは多種多様である。多様なニーズに応えるためには現状で得られた判別アルゴリズムではまだ十分とは言えず、研究開発後も他の川下企業と積極的に意見交換を行い、あらゆる条件に対応できるノウハウを蓄積することが重要である。

今後も開発した波形制御装置、集光光学系に改良を施しながらより完成度の高いモニタリングシステムを構築していく。

事業化展開について

2011年12月末を目標に、本研究実施機関である(株)シャルマンへ量産品として1台納入することが決まっており、当面は、メガネ業界市場をターゲットとして開発した装置の認知度を上げていくことを考えている。また、(有)西原電子も、レーザ加工プロセスリアルタイムモニタリング装置に興味を持っている産業(特に、医療機器)の企業に対して、本研究事業管理機関である東葛テクノプラザの支援を受けながら認知度向上のための顧客訪問を積極的に行っている最中である。

更に、事業研究実施機関であった大阪大学を通じた教育界、メガネ産業以外への産業への働きかけの協力も得ている。本研究のアドバイザーであったミヤチテクノス(株)の既存顧客である電池、電装、携帯電子部品、原子力発電業界への試験実施などで認知度向上への支援も取り付けている。

また、金属溶接に限らず、樹脂溶着、切断、穴開けなど他のレーザ加工にもモニタリングの可能性を見だし、潜在顧客を拡大する。