

平成 21 年度戦略的基盤技術高度支援事業

「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 22 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 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	4
1-2	研究体制	9
1-3	当該研究開発の連絡窓口	10
1-4	成果概要	11
第 2 章	実験方法.....	12
2-1	実験装置、実験試料	12
2-2	使用機器	12
第 3 章	本論.....	14
3-1	レーザ溶接モニタ用センサ開発	14
3-2	モニタデータと溶接現象の因果関係の解明.....	15
3-3	加工現象に基づく検査アルゴリズムの構築.....	24
第 4 章	結論.....	31
4-1	実験結果まとめ	31
4-2	溶接部良否の検出アルゴリズムのまとめ.....	31
4-3	今後の展開	31

第1章

研究開発の概要

現状、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）とレーザ溶接を適用する対象が大型であったが、近年、小型製品である医療機器産業や、生活必需品（チタンなどの金属製眼鏡フレーム等）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。

そのためには、溶接するワーク（製品）内部・外部のあらゆる欠陥を検出することが有効であるが、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、溶接条件や溶接現象の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の開発によって、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100%検出する。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。

西原電子がこれまで開発してきたモニタリング技術と、大阪大学での研究成果をベースに、モニタリング要素（センサ）を追加し、あらゆる不具合・条件に対応したデータ収集を進め、良否判定のアルゴリズムを構築するとともに、インライン判定システムとして装置化を目指すものである。

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)

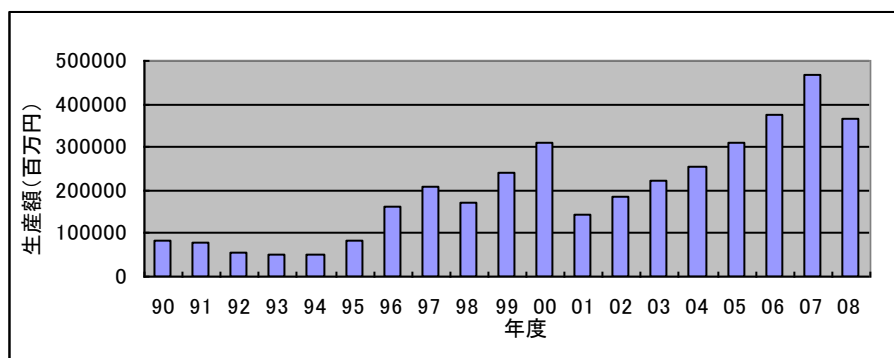


図 1-1 レーザ加工装置生産額の年度推移

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がりが要求されるため、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。

西原電子では、平成 18 年 12 月に東葛テクノプラザへ入居した後、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、プラズマ光の強さ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洋介准教授は、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、穴あき欠陥の防止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）

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しており、長年培ったノウハウを基盤に現場で抱えるレーザ溶接の問題点と解決方法を熟知している。

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、ミヤチテクノス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 研究目的及び目標

本研究の目的は、川下製造業者の抱えるニーズに答えるため、レーザ溶接プロセスを知能化させる上で重要なインラインプロセスモニタリングに基づく検査システムを確立するための基礎知見を得ることで、リアルタイムでの溶接良否判定の確立を目指す。具体的な検査良否内容としては、軽量化用途のため溶接材として用いられることの多いアルミニウム合金の溶接プロセスを追究する。

アルミニウム合金は熱伝導率、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。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微妙な差などにより穴あき不良など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る。

課題の解決方法として、レーザ溶接プロセスをリアルタイムでモニタリングし、その信号に基づいて溶接状態を判断し、いち早くプロセス上の不具合や溶接品質の不具合を周辺にアラーム警告するインラインモニタリングシステムを開発することが目標である。また、将来的には、今回の研究開発で得られた基礎データを基にアルミニウム以外の金属素材や金属素材以外の溶接にも応用出来ることも目標としている。

現在、アルミニウム合金をレーザ溶接する際のモニタリング方法として、図 1-2 が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音、光、熱を信号源として検出を行い、溶接の成否との関連性を探っていく。

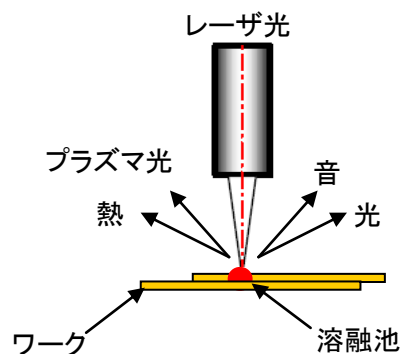


図 1-2 レーザ溶接と各種信号

1-1-3 溶接不良判別の達成目標

溶接不良判別の達成目標として、アルミニウム合金のレーザ溶接における溶接不良をなくするため表 1-1 に記載したような溶接欠陥の判別アルゴリズム作成を本研究に技術目標とする。

表 1-1 委託期間中の達成目標項目

項目
(1) 外部欠陥
・溶接にて発生した段差（目違い）
・アンダーフィル（ビードの垂れ落ち）
・ビード表面不安定及び異常（ハンピングビード、プラズマビードなど）
・穴あき
・スパッタ
・表面のクラック
(2) 内部欠損
・溶け込み深さ不良
・内部ブローホール
・内部のクラック

1-1-4 本報告における各光の定義

本報告書内で使う各光の定義を表 1-2 本報告における各光の定義に示す。

表 1-2 本報告における各光の定義

出射光	レーザ装置から照射されたレーザ光。
反射光	レーザ照射時に試料表面から反射したレーザ光。
可視光	レーザ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

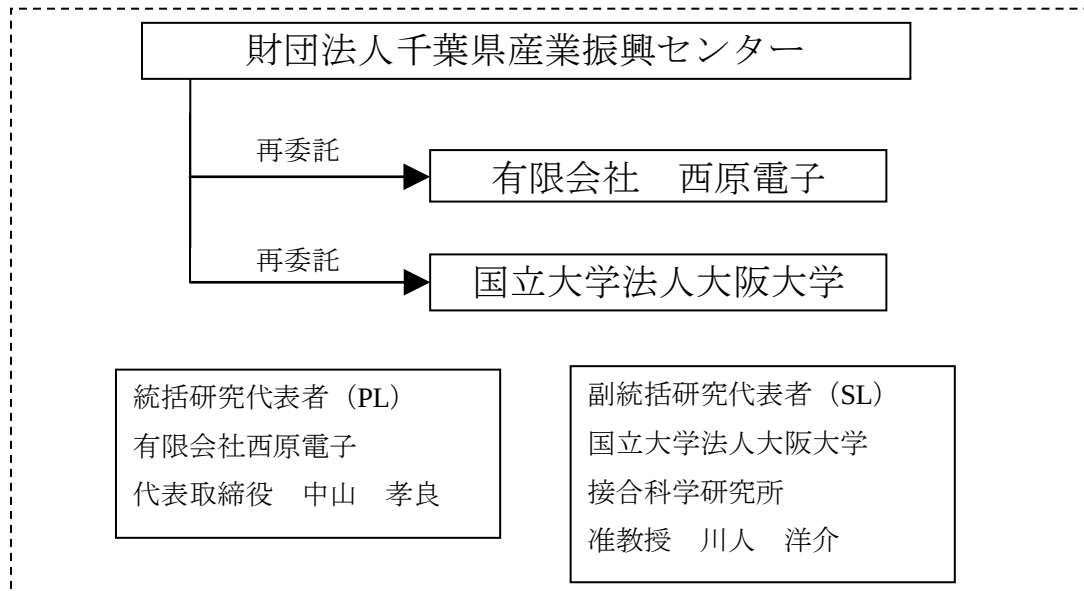
本研究の研究実施内容と実施項目を表 1-3 研究実施内容と実施項目に示す。

表 1-3 研究実施内容と実施項目

実施内容	実施項目
1 レーザ溶接モニタ用センサの開発	1.1 レーザ波長の出射光・反射光・プラズマ光のモニタ用センサ開発 1.2 赤外光の測定モニタ用センサ開発 1.3 溶接時の音センサ開発 1.4 イメージセンサーによる画像センサ開発
2 モニタデータと溶接現象の因果関係の解明	2.1 熔融地やキーホールと反射光、プラズマ光、赤外光、音データ収集と波形観測 2.2 材料表面の状態や位置ずれと反射光、プラズマ光、赤外光、音データ収集と波形観測 2.3 スパッタと反射光、プラズマ光、赤外光、音、画像データ収集と波形、画像観測 2.4 レーザパワー低下と出射光のデータ収集
3 加工現象に基づく検査アルゴリズムの構築	3.1 出射光とプラズマ光の加工現象の検査アルゴリズムの構築 3.2 反射光と加工現象の検査アルゴリズムの構築 3.3 赤外光と加工現象の検査アルゴリズムの構築 3.4 音と加工現象の検査アルゴリズムの構築 3.5 画像データと加工現象の検査アルゴリズムの構築 3.6 溶接良否判定のための検査アルゴリズムの構築

1-2 研究体制

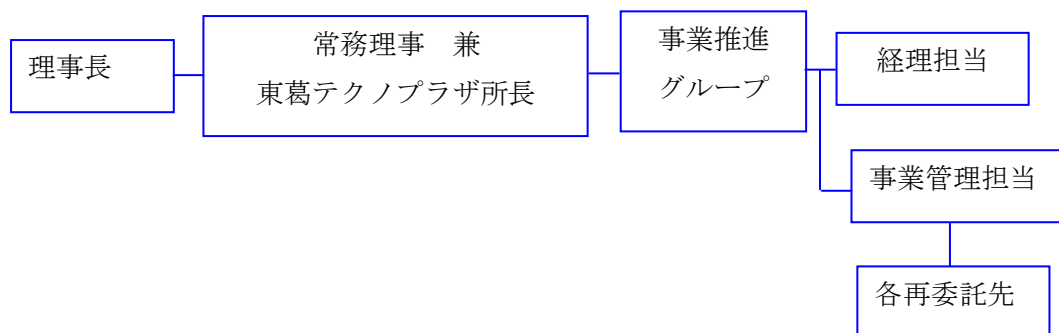
1-2-1 研究組織（全体）



1-2-2 管理体制

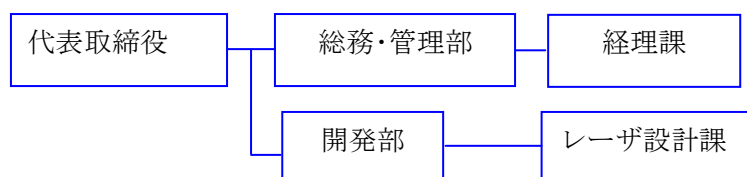
①事業管理者

〔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：粕谷 修

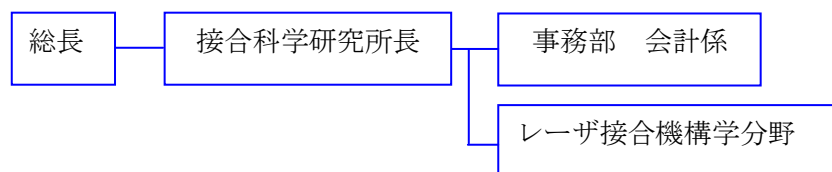


②再委託先

〔有限会社西原電子〕（業務管理者：代表取締役 中山孝良）
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



1-2-3 管理員及び研究員

〔事業管理者〕 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	プロジェクトコーディネーター
谷田貝 敦志	事業推進グループ 主査
粕谷 修	事業推進グループ 主査
大井 麻里絵	事業推進グループ 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
蓮見 忠之	研究員
川上 佳剛	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

1-3 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	〒277-0882 千葉県柏市柏の葉 5-4-6
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

1-4 成果概要

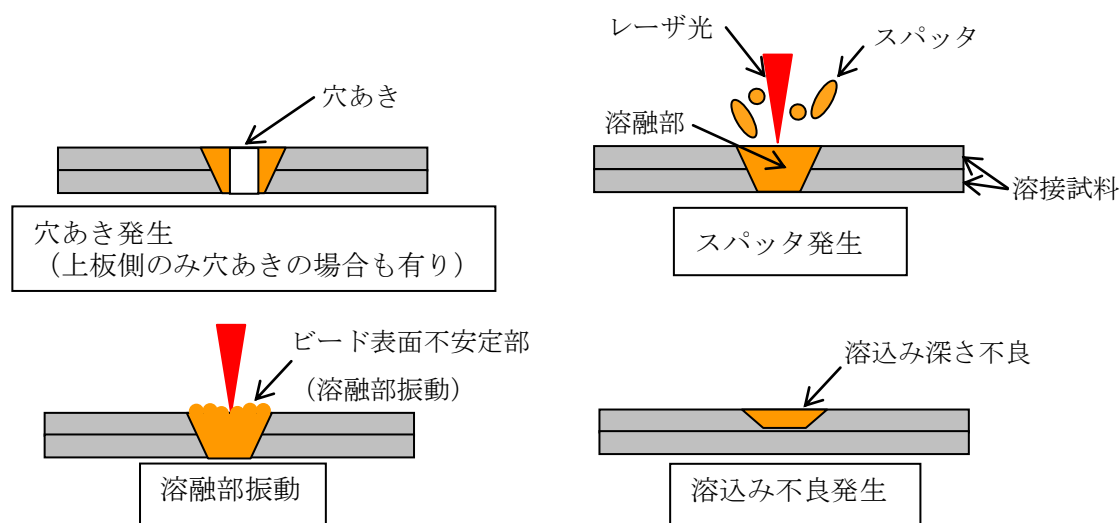
本研究の成果は以下である。表 1-4 に、モニタリング方式毎の欠陥検知結果を示す。

- (1) パルス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) 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。

表 1-4 モニタリング方式毎の欠陥検知結果

溶接欠陥の種類	モニタリング方式			
	赤外光	反射光	可視光	音
穴あき	◎	○	○	○
スパッタ	◎	○	○	○
ビード表面不安定 (溶融部振動)	△	○	△	×

◎:検出有効、○:検出可能性あり、△:有効と推定、×:現状では困難



今回の成果として、反射光、もしくは赤外光センサによるモニタ方式を駆使することで、レーザ溶接結果の良否を判断しうる新しいモニタ技術を創出することができ、マイクロレーザ溶接をはじめとする各種産業分野への貢献が期待されるものである。

第 2 章

実験方法

2-1 実験装置、実験試料

本実験には LD 励起ディスク YAG レーザ (TruDisk 10002 トルンプ (株) 製) (以下ディスクレーザ) とファイバレーザ溶接機 (ML-6810A ミヤチテクノス (株) 製) (以下ファイバレーザ) を使用した。前者は大阪大学接合研究所、後者は (有) 西原電子社内にて使用したレーザ装置である。ただし、両レーザ装置とも、同じような実験結果、傾向を示したため、本報告では両者の実験データの混同を避けるため、前者ディスクレーザのみの実験結果を示す。得られた各波形データを元に、欠陥判別が可能であるか検討する。

2-2 使用機器

図 2-1 にモニタリング信号検出・測定系の概略図を示す。発振機から出力されたレーザ光は、光ファイバを介して出射部に伝送され、試料台上の試料に照射される。光ファイバは一般的に高出力 YAG レーザ溶接に用いられている SI ファイバ (ステップ・インデックス) 型を使用した。光信号の検出には、それぞれの特定波長を抽出する集光系ユニットである赤外光集光ユニット、反射光集光ユニット、可視光集光ユニットを使用した。各センサともレーザ照射部に対して一定角度で固定し、集光点をレーザ照射部に合わせた。音響信号の検出には一般的なマイクロフォンを用いた。

赤外光集光ユニットから検出した光は干渉フィルタにより 2 波長の赤外光が抽出され、赤外光用フォトダイオード (浜松ホトニクス製) にて光—電気変換される。

反射光集光ユニットから検出した光は光ファイバによってチェッカーのセンサユニット部に送られ、ダイクロイックフィルタ (シグマ光機製) によって本実験で用いられるレーザの波長帯域を抽出し、可視～赤外用フォトダイード (浜松ホトニクス製) にて光—電気変換される。

可視光集光ユニットから検出した光も反射光集光ユニットと同様に光ファイバによってチェッカーのセンサユニット部に送られ、熱線吸収フィルタ (シグマ光機製) によって可視光のみ抽出し、可視光用フォトダイード (浜松ホトニクス製) にて光—電気変換される。なお、レーザ照射部に発生する可視光波形は、高速度カメラの映像のプルーム噴出のタイミングと合致していたため、本報告では可視光集光ユニットにより検出された光はプルーム光として扱う。

また、レーザ照射部斜め方向から高速度ビデオカメラ (株式会社 nac 製) を設置した。レンズ前方にレーザ発振波長帯域を含まない近赤外波長帯域を透過する干渉フィルタを介し、同波長帯域の照明を用いることで、レーザ反射光、プルーム光によるハレーションを抑え、レーザ照射部を観察できるようにした。

赤外光集光ユニット

高速度カメラ

反射光線センサ

可視光センサ

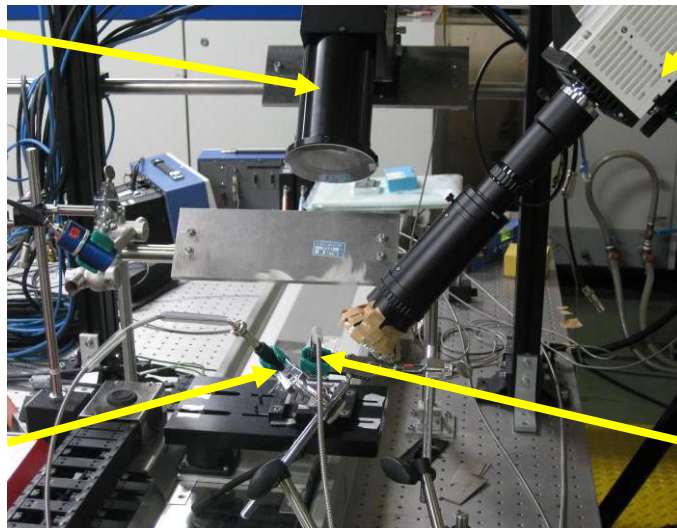


図 2-1 実験装置外観図

第3章

本論

3-1 レーザ溶接モニタ用センサ開発

溶接時の加工現象解明に必要と思われるセンサの開発を行った。(表 3-1)

表 3-1 開発するレーザ溶接モニタ用センサ

出射光センサ	P I Nフォトダイオードによる分岐ミラーを通してレーザ出力光強度を測定する。
反射光センサ	P I Nフォトダイオードにより材料から反射されるレーザ光の強度を測定する。
可視光センサ	P I Nフォトダイオードにより材料から発生する可視光波長領域の強度を測定する。
赤外光センサ	赤外光用フォトダイオードによりレーザ照射時の材料表面の温度変化を測定する。
音センサ	超指向性マイクロフォンによるレーザ照射時の音の変化を測定する。
画像センサ	C C D又はC M O Sイメージセンサー(カメラ)を使用して画像を取り込む。

※本報告書内での光センサの呼称は出射光、反射光、可視光、赤外光としている。

表 3-1 に示された各センサ開発結果を表 3-2 に示す。

表 3-2 センサ開発結果

センサ	開発状況
出射光	未開発
反射光	開発済み
可視光	開発済み
赤外光	開発済み
マイクロフォン	開発済み
画像	開発済み

出射光センサが未開発である理由は、出射光の用途がレーザ光出力をセンシングするだけであり、本来、大概のレーザ装置にはレーザ出力をモニタする機能が搭載されているため、今回の研究目的であるインラインプロセスモニタリングに基づくアルゴリズムを構築する上で大きなウェイトを占めないため未開発とした。

センサ回路開発の基本方針として、光や音をセンシングする入力回路部、センシングした信号を増幅する回路部、増幅した信号を各光の波長、可聴帯域にするためのフィルタ部、

フィルタした信号をモニタ装置へ出力させる回路部からなる回路構成とした。

開発したセンサの音センサの回路を図 3-1 に示す。

このセンサ基板を用い、アンプ部に各波長の光センサ、音センサを接続し、アルミニウム合金薄板の重ね溶接のモニタリング信号を検出する。



図 3-1 マイクロフォンセンサ回路

3-2 モニタデータと溶接現象の因果関係の解明

実際に開発したセンサを用い、アルミニウム合金 A3004 薄板の重ね溶接時の溶融現象をモニタリングできるかを検討した。各センサの検出強度は絶対値では無いため、無単位で検出強度と表す。

3-1 項で述べたように、出射光のセンサは開発していないため、表 1-4 に記載した 2-4 項の「レーザパワー低下と出射光のデータ収集」は行わず、追加項目として、「穴あきと測定波形の関係」を 3-2-4 項に記した。

3-2-1 溶融池と測定波形との関係

アルミニウム合金薄板を治具（図 3-2）で挟んで固定した後、レーザ照射した結果、全 20 サンプル中全てで貫通溶接となっていた。また、溶接結果は目視では正常と判断できるが、高速度カメラ画像では、溶接中に溶融部が激しく振動するなど、欠陥の発生要因となるような溶融現象が観察された。

表 3-3 に実験条件を示す。

次ページ以降に溶接が正常に行われたサンプルの実験結果（図 3-3）、溶接結果は正常であるものの、溶接中に溶融部が激しく振動したサンプルの実験結果（図 3-4）を示す。



図 3-2 試料治具

表 3-3 パルスレーザー照射実験条件組み合わせ

レーザー装置	発振波形	試料	溶接継手	レーザーパワー	照射時間	実験回数
ディスクレーザー	パルス (矩形波)	A3004	2 枚重ね	p1	t1	20

- ・良好に溶接された場合の波形と高速度カメラ画像

レーザパワー p1／レーザパルス幅 t1／波形形状 矩形波／焦点位置 試料表面／薄板 2枚重ね／実験回数 N=20

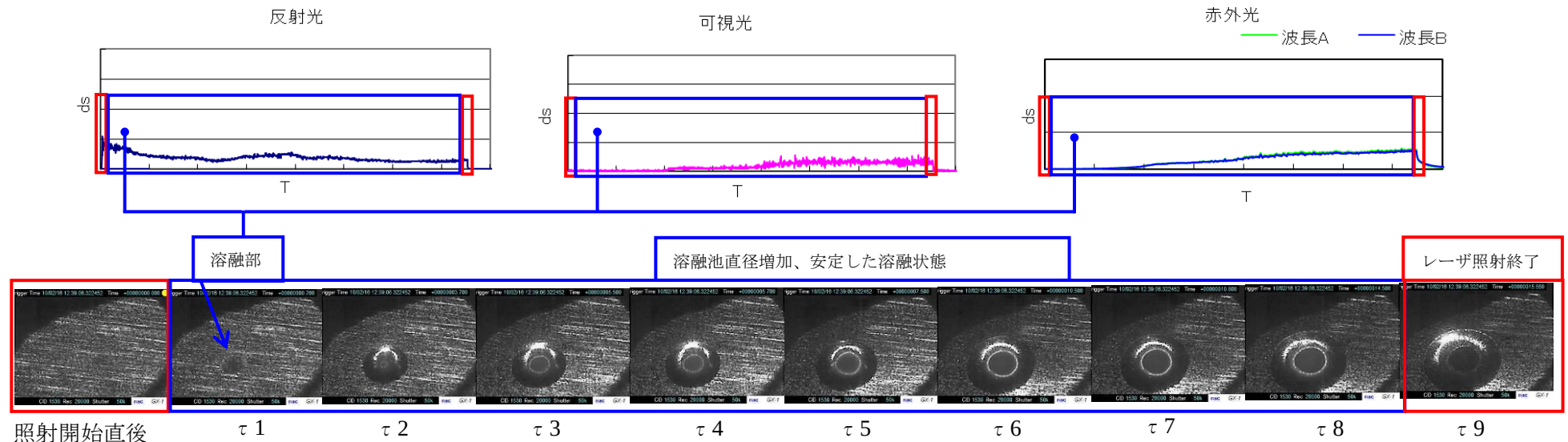


図 3-3 反射光、可視光、赤外光波形と高速度カメラ画像

《結果詳細》

- ・ 高速度カメラ画像から、照射開始直後から溶融部が徐々に形成され、時間経過と共に溶融池の直径が拡大していく様子が確認された。
- ・ このとき得られた反射光を確認すると、照射開始直後の検出強度が最も大きく、それ以降の照射時間はほぼ一定の検出強度で推移していった。これは、照射開始直後は試料表面の反射率が高いため強いレーザ反射光が得られるが、その後はレーザが試料内部に吸収され、反射するレーザ光が減少する為である。
- ・ 可視光は反射光とは異なり、照射開始直後は検出強度が低く、照射時間 $\tau 1 \sim \tau 8$ にかけて波形が増加した。これは、可視光がレーザ吸収によって試料から発生するプルーム（金属蒸気等を伴った火柱のようなもの）を捉えている為で、試料にレーザが吸収されるほど強度は増加する傾向にある。
- ・ 赤外光は、可視光と同じ様な波形の挙動を示した。これは、赤外光が試料表面の入熱を捉えているためで、レーザ吸収により、表面の温度、溶融部の面積が大きくなるほど強度は高くなる。
- ・ 良好に溶接される場合は上記とほぼ同じ画像、波形特性であった。

- ・ 溶融部が激しく変動した場合の波形と高速度カメラ画像

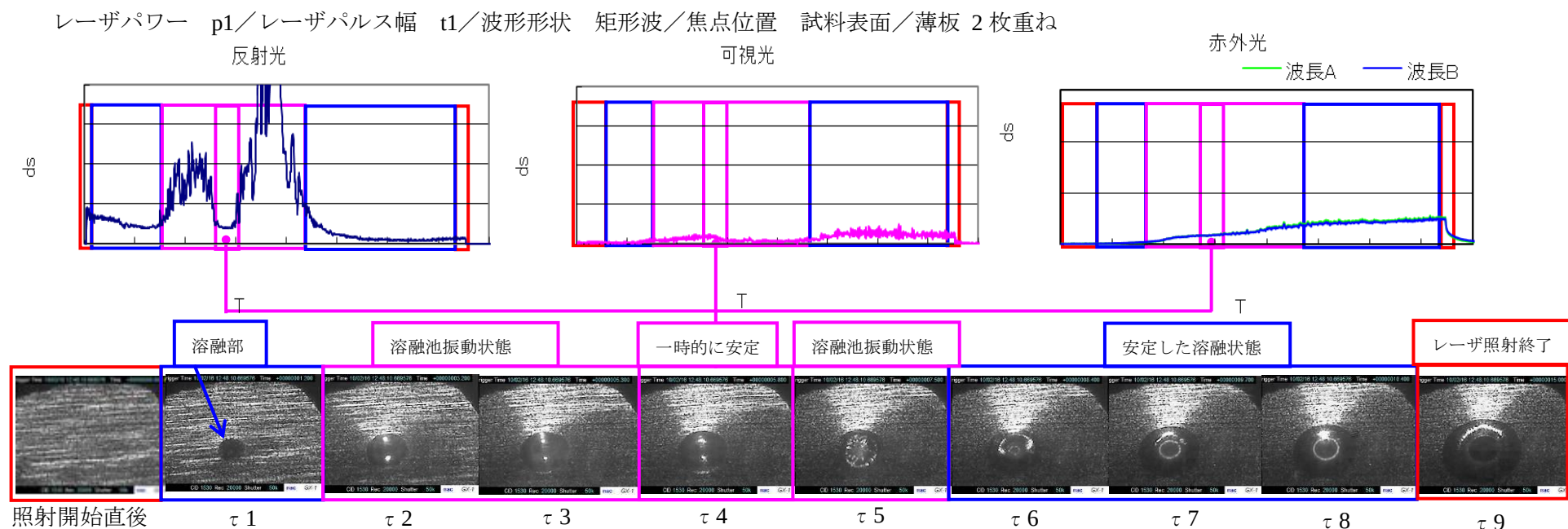


図 3-4 反射光、可視光、赤外光波形と高速度カメラ画像

《結果詳細》

- ・ 高速度カメラ画像より、レーザ照射開始から照射時間 $\tau 2$ までは良好な溶接時とほぼ同じ挙動であったが、照射時間 $\tau 2$ から溶融部が振動し始めた。
- ・ この振動は照射時間 $\tau 4$ ほどで一端収束し、照射時間 $\tau 5$ で再び振動を始めた。その後はレーザ照射終了まで信号は発生しなかった。
- ・ このときの反射光波形は、照射開始直後～ $\tau 1$ までは良好な溶接時とほぼ同じ波形であるが、照射時間 $\tau 2 \sim \tau 3$ で一定以上の検出強度 (ds) が検出され、照射時間 $\tau 4$ で減衰し、照射時間 $\tau 5$ で再び一定以上の検出強度が得られた。その後はレーザ照射終了まで減衰していった。この波形挙動は高速度カメラの溶融部の振動発生タイミングと対応しており、振動現象を波形が明確に捉えているといえる。
- ・ 可視光波形は、反射光の溶融部振動を捉えたタイミングとほぼ同期した波形形状の増減が確認できるが、信号が小さく、良好な溶接時との区別は付き難い。
- ・ 赤外光波形は良好な溶接時とほぼ同形状であり、波形変動はほぼ見られなかった。
- ・ 反射光はレーザ拡散光を捉えているため、溶融部の振動による溶融池表面の揺らぎで散乱光が増加するため波形変化を明確に確認できたが、可視光はブルームの増減を捉えるため、溶融部の微細な振動にはほぼ影響されず、また、赤外光強度は溶融部の温度と面積変化による為、検出されなかった。
- ・ 実験試料が薄板の為、同条件であっても容易に試料に歪みが発生し、隙間、レーザ焦点の微妙なずれなどで振動を起こしたと考えられる。

3-2-2 材料の位置ずれと測定波形との関係

前項レーザ照射時に発生した溶融部の振動は、試料間の隙間に起因すると考え、試料間に板厚 sp1～sp4 のスペーサを挟み隙間を与えることで、欠陥が発生する頻度を増やし、溶接不具合が各センサにより検出できるか実験を行った。実験条件を表 3-4 に示す。前実験から薄板溶接の場合、同条件であっても溶接結果が異なることから、一定の板厚のスペーサを用いても厳密にスペーサ相当の隙間が空いているとは限らない。その為、本実験では 10 サンプルの波形、画像データを収集し、総合的な傾向を考察することとした。

表 3-4 条件にて実験を行った結果、表 3-5 のように、与えた隙間の大きさによってスパッタ等、穴あき等の発生頻度は増大した。特に穴あきは顕著に発生頻度が増しており、隙間の度合いが起因していることが伺える。

良好な溶接となった場合の実験結果の例を図 3-5、図 3-6 に示す。

隙間の度合いによって反射光の初期ピーク値が若干上昇していく傾向にある。レーザ照射面がレーザ出射口側にずれることにより、照射面のパワー密度が下がり、試料に吸収されない散乱光が増すため、初期のピーク値が強くなるためと考えられる。しかし、この反射光は同様の隙間間隔であってもサンプルごとのばらつきが大きい。そのため、隙間の傾向はつかめるものの、サンプルごとに隙間間隔を明確に特定することはできない。

3-2-3 項に本項で発生したスパッタ発生時の実験データ例を、3-2-4 項に穴あき発生時の実験データ例を掲載した。これらの結果と波形から閾値を設け、検査アルゴリズム判定を検討するが、前記したように隙間の度合いのよる検出値の微妙な違いも留意し、閾値を設ける必要がある。

表 3-4 隙間による材料の位置ずれ実験条件

レーザ装置	波形形状	試料	溶接継手	隙間	レーザ パワー	照射時間	実験回数
ディスク レーザ	パルス	A3004	2 枚重ね	sp1/sp2 sp3/sp4	p2	t2	10

表 3-5 隙間による欠陥発生頻度

溶接状態	隙間 sp1	隙間 sp2	隙間 sp3	隙間 sp4
良好な溶接	6	5	7	4
スパッタ飛散	2	2	0	1
穴あき	2	3	3	5

サンプル数（個）

・隙間 sp1 正常溶接時の実験結果

レーザーパワー p2／レーザーパルス幅 t2／波形形状 矩形波／焦点位置 試料表面／薄板 2 枚重ね／試料間隙間 sp1

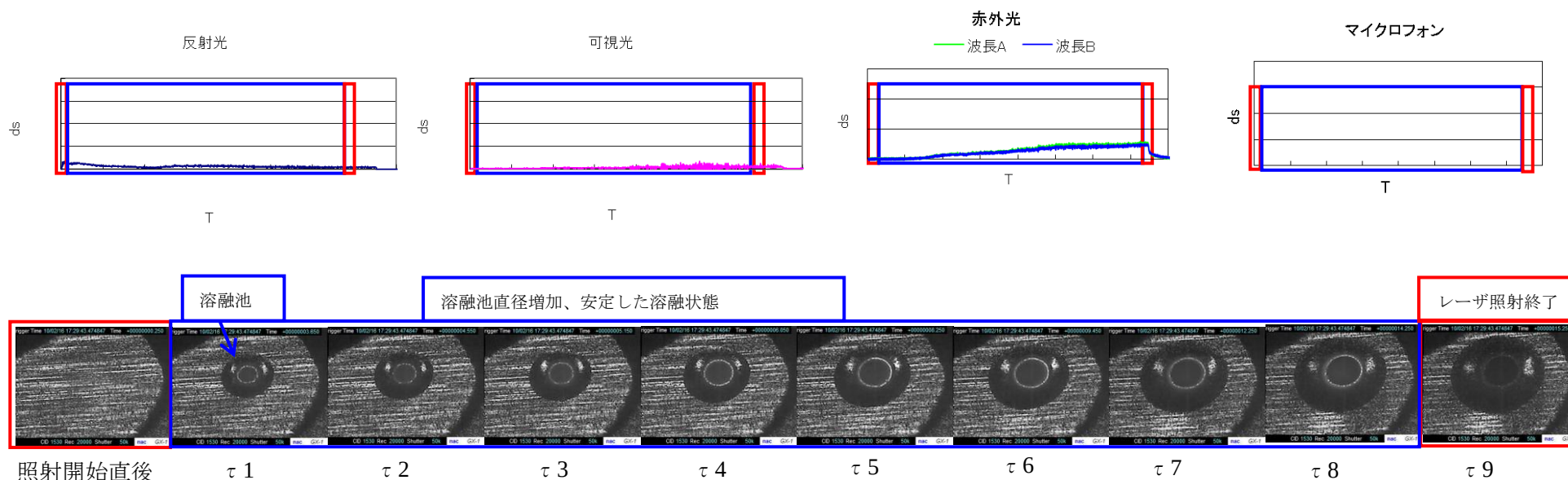


図 3-5 反射光、可視光、赤外光、音響信号波形と高速度カメラ画像

《結果詳細》

- ・ 高速度カメラ画像から、照射開始直後から溶融部が徐々に形成され、時間経過と共に溶融池の直径が拡大していく様子が確認された。
- ・ このとき得られた反射光を確認すると、照射開始直後の検出強度が最も大きく、それ以降は減衰していった。
- ・ 可視光は反射光とは異なり、照射開始直後は検出強度が低く、照射時間 $\tau 1 \sim$ 照射終了 $\tau 9$ までほぼノイズに埋もれている状態である。
- ・ 赤外光は、照射開始直後は検出強度が小さく、徐々に増加を始め、照射終了時 $\tau 9$ で最大検出強度が得られた。3-2-1 項で述べたように溶融部面積の増加に伴い、検出強度が増加していく傾向にある。
- ・ マイクロフォンが照射開始から照射終了時 $\tau 9$ まで波形はノイズに埋もれており、波形変化は見られなかった。
- ・ 良好に溶接される場合は隙間の程度によらず上記とほぼ同じ画像、波形特性であった。

3-2-3 スパッタと測定波形の関係

・隙間 sp1 スパッタ発生時の実験結果

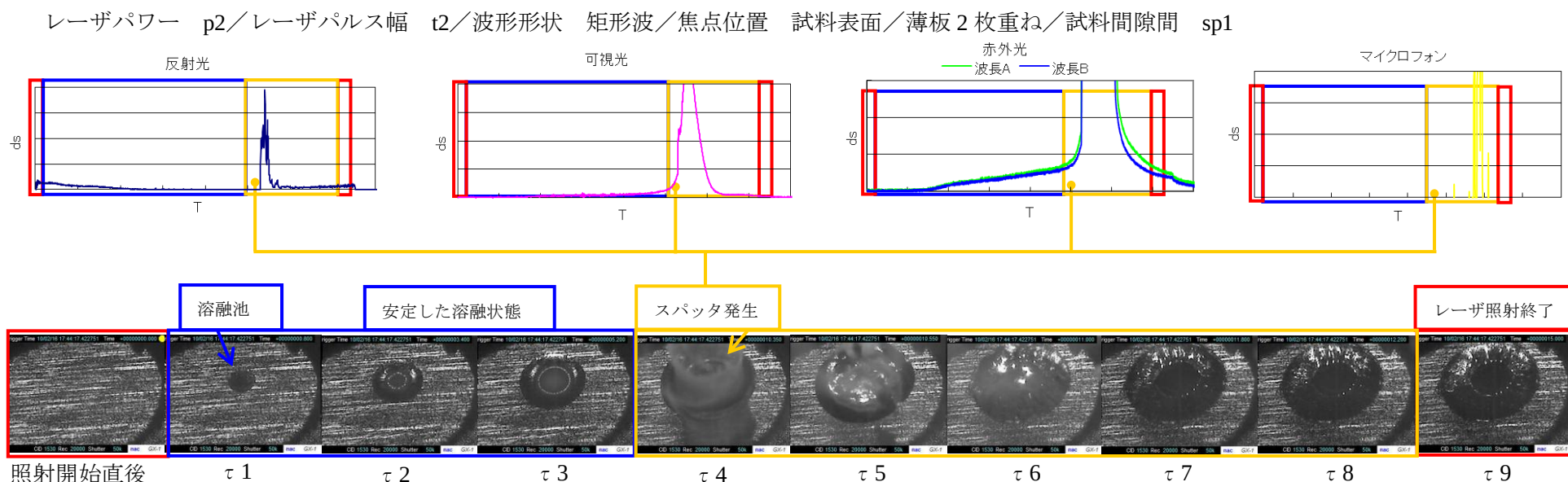


図 3-6 反射光、可視光、赤外光、音響信号波形と高速度カメラ画像

《結果詳細》

- ・ 高速度カメラ画像から、レーザ照射開始から $\tau 3$ までは良好な溶接時とほぼ同じ挙動であったが、 $\tau 4$ で溶融部からスパッタが飛散した。このとき、スパッタが飛散する直前まで溶融部に異変はほとんど無かった。
- ・ スパッタが飛散した後、溶融部の変動は収束し、 $\tau 7$ には完全に変動が収まった。
- ・ 反射光波形は、照射開始～ $\tau 3$ までは良好な溶接時とほぼ同じ波形であるが、 $\tau 4$ 付近で一定値以上の検出強度が検出され、 $\tau 7$ には減衰した。スパッタ発生時には急激に溶融部の挙動が変化するためその散乱光を検出したものと思われる。
- ・ 可視光波形は、照射開始～ $\tau 3$ までは良好な溶接時とほぼ同じ波形であるが、 $\tau 4$ 付近で一定値以上の検出強度が検出され $\tau 8$ 付近で減衰した。可視光は本来ブルーム発光を捉えているが、可視光全域に感度を持つため、スパッタ発生の際には、噴出する瞬間の溶融金属の発光を捉えていると思われる。
- ・ 赤外光波形は、照射開始～ $\tau 3$ までは良好な溶接時とほぼ同じ波形であるが、 $\tau 4$ 付近で一定値以上の検出強度が検出され、 $\tau 8$ 付近で減衰した。溶融金属が噴出する瞬間には非常に高温になることが予想され、また、噴出することで瞬間的に観察面積が広がることから波形が大きく検出されたと考えられる。反射光、可視光、赤外光の波形挙動は高速度カメラのスパッタ発生タイミングと対応しており、3 センサともスパッタ発生を捉えている。
- ・ マイクロフォンは、 $\tau 7$ で大きな検出強度が発生しており、スパッタ発生に近いタイミングで波形を捉えているが、他のセンサに比べ検出する時間が遅い。

3-2-4 穴あきと測定波形の関係

- ・ 隙間 sp1 1 枚目穴あき時の実験結果

レーザパワー p2/レーザパルス幅 t2/波形形状 矩形波/焦点位置 試料表面/薄板 2 枚重ね/試料間隙間 sp1

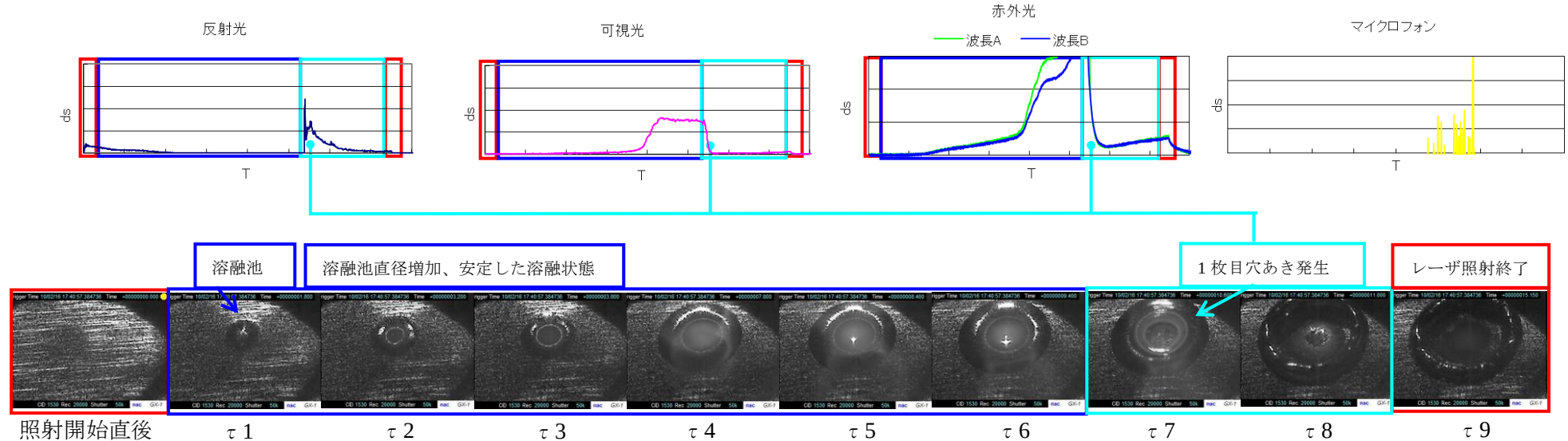


図 3-7 反射光、可視光、赤外光、音響信号波形と高速度カメラ画像

《結果詳細》

- ・ 高速度カメラ画像から、 $\tau 6$ までは良好な溶接時と同様であるが、 $\tau 7$ で試料 1 枚目に穴が発生する様子が見られた。
- ・ このとき得られた反射光を見ると、 $\tau 7$ 付近で一定以上の検出強度が得られた。これは、穴あきが発生することで下板側の表面からレーザが反射し、散乱したものを検出したと考えられる。
- ・ 可視光は $\tau 4$ 付近から一定以上の検出強度が得られ、1 枚目の穴が発生する $\tau 7$ 付近で大きく減衰する。穴あきが発生すると、プルームも消滅する為 $\tau 8$ で波形が減衰したと考えられる。また、良好な溶接時に比べ検出強度が大きい、これは、試料間に隙間が発生していたために、上板のみが加熱され、熱が溜まりやすくなり、プルームの発光強度が大きくなったものと考えられる。
- ・ 赤外光は $\tau 2$ 付近から波形が増加し、 $\tau 4$ でさらに急激に増加を始め一定以上の検出強度となった。その後 1 枚目の穴あきが発生する $\tau 7$ 付近で一定以上の検出強度に減衰する。穴が発生すると熱を観察している溶融部自体が無くなってしまうため、 $\tau 7$ で波形が減衰したと考えられる。その後、検出強度はレーザ照射終了時 $\tau 9$ までの間微増していく。これは、2 枚目試料表面のレーザ吸収による温度上昇を捉えているものと思われる。
- ・ マイクロフォンは $\tau 6 \sim \tau 8$ に掛けて大きく波形が検出されている。これは 1 枚目に穴が開いた時間と近いが、検出強度が不安定であり、穴あきのタイミングを特定することが困難である。

・隙間 sp4 2 枚目穴あき時の実験結果

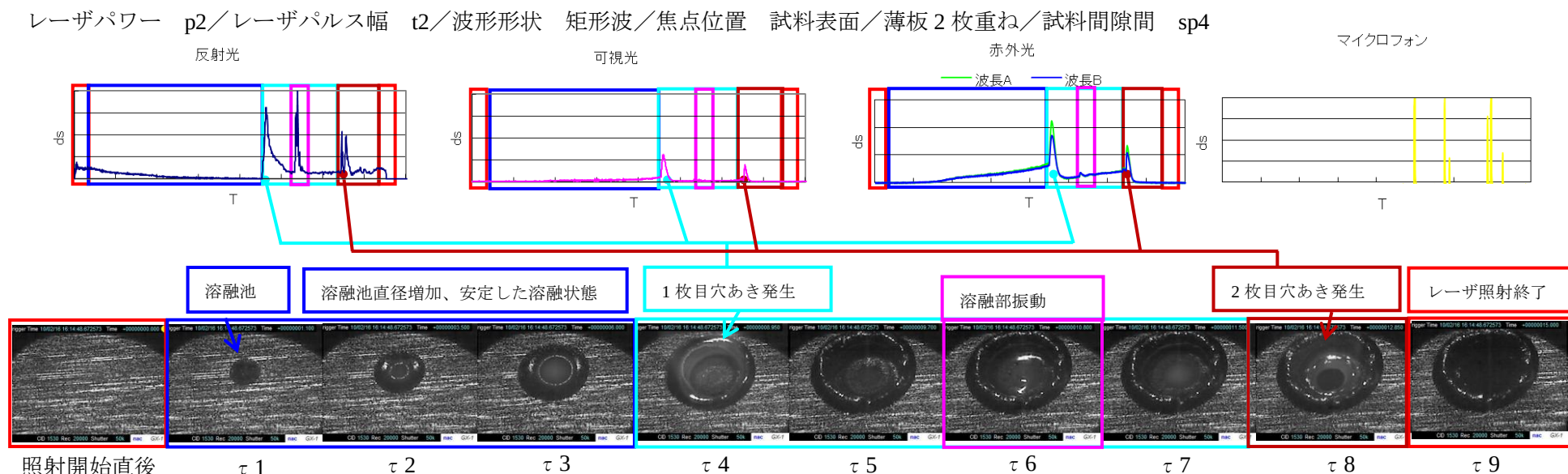


図 3-8 反射光、可視光、赤外光、音響信号波形と高速度カメラ画像

《結果詳細》

- ・ 高速度カメラ画像から、 $\tau 3$ までは良好な溶接時と同様であるが、 $\tau 4$ で試料 1 枚目に穴が発生する様子が見られた。さらに、 $\tau 6$ では瞬間的に熔融部が振動し、 $\tau 8$ では試料 2 枚目にも穴が発生する様子が見られた。
- ・ このとき得られた反射光を確認すると、 $\tau 4$ 付近で一定以上の検出強度が得られた。その後、穴あきが発生することで反射光は減衰するが、 $\tau 6$ 、 $\tau 8$ でも瞬間的に一定以上の検出強度のピークが発生する。
- ・ 可視光は $\tau 4$ 程度から一定以上の検出強度が得られ、直後に減衰しており、2 枚目に穴が発生する $\tau 8$ で再び同じような波形が見られる。
- ・ 赤外光は $\tau 2$ 付近から波形が増加し、1 枚目の穴あきが発生する $\tau 4$ で一定以上の検出強度が得られる。その直後に減衰し、2 枚目の穴が発生する $\tau 8$ 付近で再び一定以上の検出強度が得られる。

以上までの結果から、スパッタ発生時には反射光、可視光、赤外光ともスパッタ発生とほぼ同時に波形が立ち上がることが分かった。また、穴あき発生時には反射光は穴あき発生時付近で波形が立ち上がり、可視光、赤外光は穴あき発生時に波形が立ち下がる傾向にあることが分かった。ただし、本項の 2 枚穴あきの例のように、可視光、赤外光のピークが小さく、一定値以上のピークが発生する時間も短い例があるため、判別閾値を設ける上で留意する必要がある。

3-3 加工現象に基づく検査アルゴリズムの構築

ここまでのパルス溶接時のサンプルデータから、各信号に閾値を設け、実験中に主に発生した穴あき、スパッタ等を定量的に判別可能であるか調べる。

(1) 欠陥分類

まず、溶接欠陥、溶接現象を分類する。良好に溶接されており高速度カメラ画像からも特に異常らしき変動が見られなかったサンプルを「良好な溶接」、良好に溶接されていたものの、高速度カメラ画像から熔融部に振動が見られたサンプルを「熔融部振動」、溶接中に明らかに溶液の一部が熔融池の外に飛散したサンプルを「スパッタ」、溶接試料の上板のみに穴あきが発生したものを「1枚目穴あき」、上板、下板ともに穴あきが発生したものを「2枚目穴あき」と定義した（表 3-6、図 3-9）。

表 3-6 溶接欠陥分類

分類	詳細
良好な溶接	溶接欠陥は発生せず、高速度カメラ画像からも以上が見られなかった場合
熔融部振動	溶接欠陥は発生しないが、高速度カメラ画像から熔融部に振動が見られた場合
スパッタ	溶接中に溶液の一部が熔融部の外に飛散した場合
1枚目穴あき	上板のみに穴あきが発生した場合
2枚目穴あき	上板、下板ともに穴あきが発生した場合

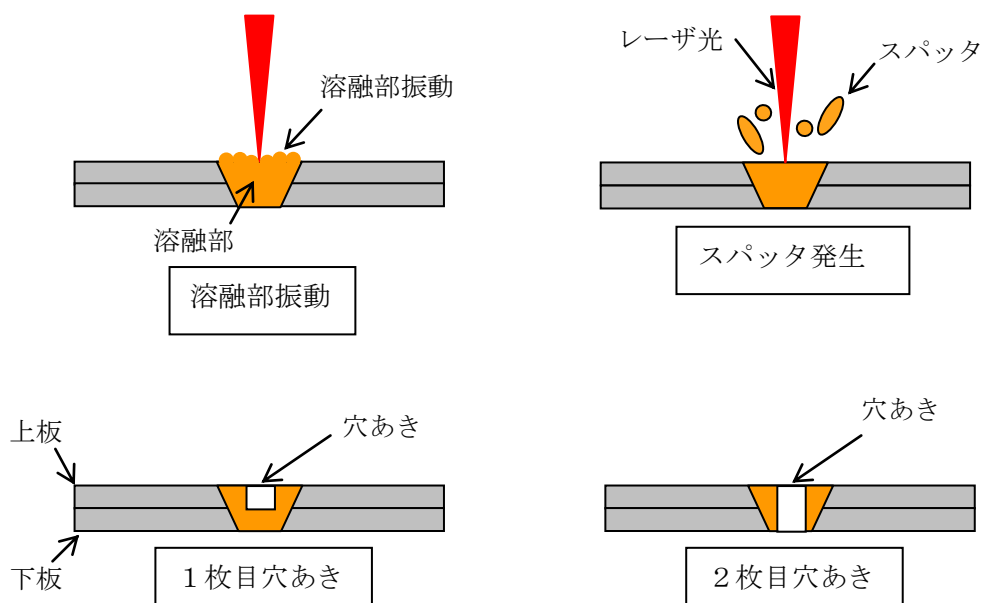


図 3-9 分類欠陥概略図

(2) 検査アルゴリズムの構築方法

まず、各サンプルの検出波形のピーク値を取り、これまでに発生した溶接現象、溶接欠陥を区分けし、検査アルゴリズムを構築できるかを検討する。図 3-10 は検出波形の一例であるが、図中の青線のように、各波形で得られた最高検出強度をピーク値とし、3-3 (1) 項で述べた欠陥分類とピーク値との相関性を各センサ信号から考察する。(3-3-1 項～3-3-4 項)、その結果を踏まえ、各センサの波形から総合的に溶接良否、欠陥分類を判定する検査アルゴリズムを 3-3-5 項にて検討する。

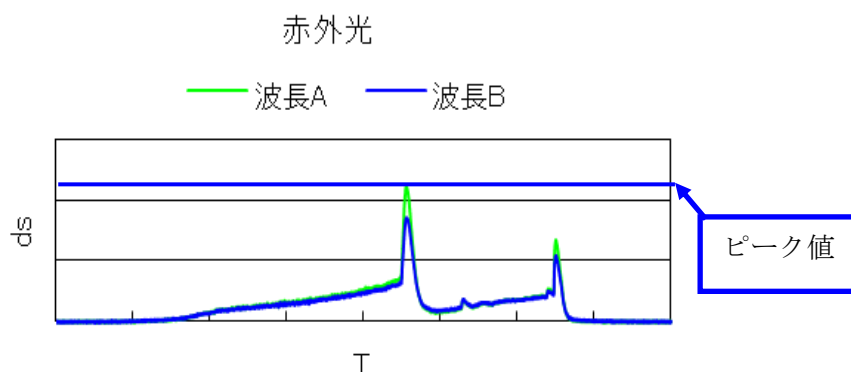


図 3-10 波形ピーク値 (赤外光センサ波形)

なお、3-1 項で述べたように、出射光のセンサは開発していないため、表 1-4 に記載した 3-1 項「出射光と加工現象の検査アルゴリズム」は行わず、追加項目として、「可視光と加工現象のアルゴリズム」を 3-3-1 項に記載した。また、ここまでの実験結果で示したように、溶接欠陥の有無は光センサにて比較的明確に捉えられており、画像によるアルゴリズム作成に優位性が見られなかったため、3.5 項「画像データと加工現象の検査アルゴリズム」は記載せず、3-3-5 項に「溶接良否判定の為の判定アルゴリズム」を記載した。

3-3-1 可視光と加工現象のアルゴリズム

まず、可視光について分類を区分できるか検討する。図 3-11 はこれまでに実験を行った全 60 サンプルを 3-3 (1) 項にて分類した欠陥ごとに色分けしプロットした可視光のピーク値である。良好な溶接、熔融部振動の群と、スパッタ、1 枚目穴あき、2 枚目穴あきの群に分かれる傾向にあるが、一部混在しているデータがあるため、今回のデータからは可視光のみで明確に分類を区分けすることは難しいが、欠陥発生と波形との相関性は見られるため、今後の研究においても引き続き有用性を検討していく。

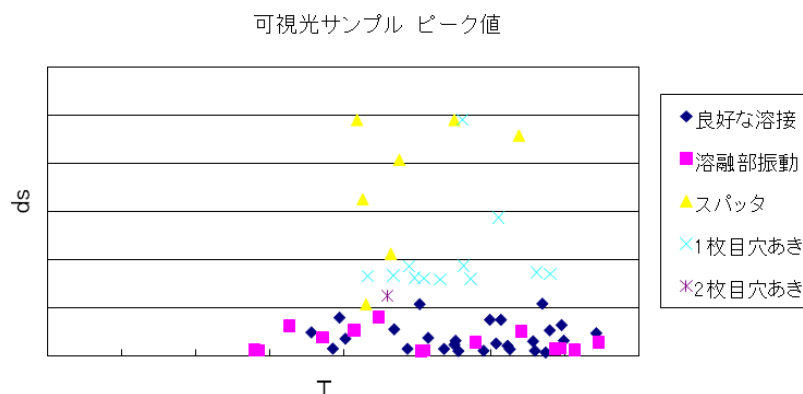


図 3-11 可視光ピーク値と溶接結果の関係

3-3-2 反射光と加工現象のアルゴリズム

反射光について分類を区分できるか検討する。図 3-12 は反射光のピーク値を分類ごとに色分けしプロットしたものである。良好な溶接の場合、ピーク値は検出強度 $ds1$ 未満で検出される。また、溶融部振動、スパッタ、穴あきのピークは全て検出強度 $ds1$ 以上で分布している。反射光の検出強度 $ds1$ を閾値に設けることで良好な溶接時とそれ以外の分類に完全に大別することができるため、判定アルゴリズムに用いることが可能である。

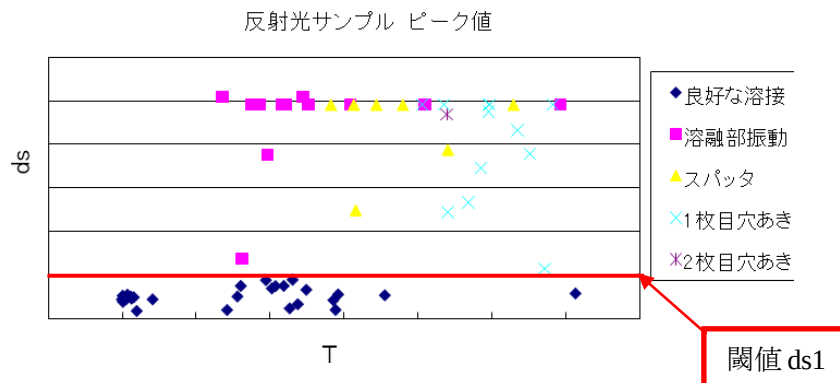


図 3-12 反射光ピーク値と溶接結果の関係

3-3-3 赤外光と加工現象のアルゴリズム

赤外光について分類を区分できるか検討する。良好な溶接、溶融部振動の場合は検出強度 $ds2$ 未満で密集している。スパッタ、1 枚目穴あき、2 枚目穴あきの場合は検出強度 $ds2$ 以上で散在している。

赤外光の検出強度 $ds2$ に閾値を設けると良好な溶接、溶融部振動と、スパッタ、1 枚目穴あき、2 枚目穴あきとに大別できる。ここまでの結果、反射光、赤外光の閾値から良好な溶接、溶融部振動、それ以外の欠陥の 3 種に大別できる。詳細を 3-3-5 項にて記述する。

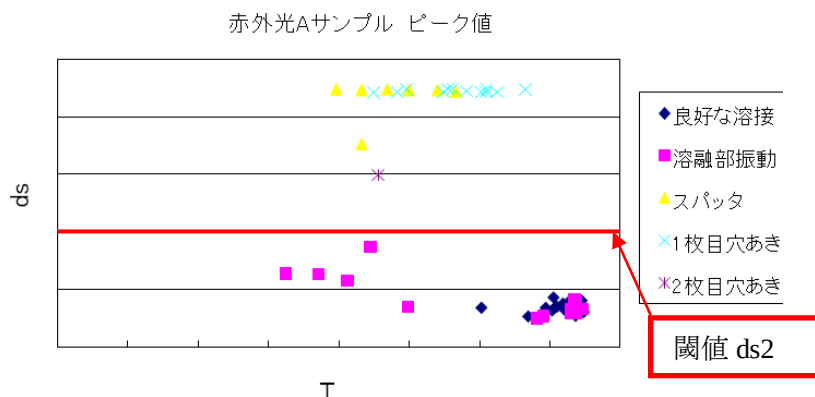


図 3-13 赤外光ピーク値と溶接結果の関係

3-3-4 音響信号と加工現象のアルゴリズム

マイクロフォンについて分類を区分できるか検討する。良好な溶接とそれ以外に分類することはできるが、音響信号の場合、外部からのノイズに影響されやすく、単純に検出強度で比較するには不安定な信号である。良好な溶接以外では極端に高い検出強度で検出されるため、現時点では他のセンサの異常の検知や溶接良否判定の補助的な役割の信号として使用することを検討しており、本報告内での判定アルゴリズムでは用いない。

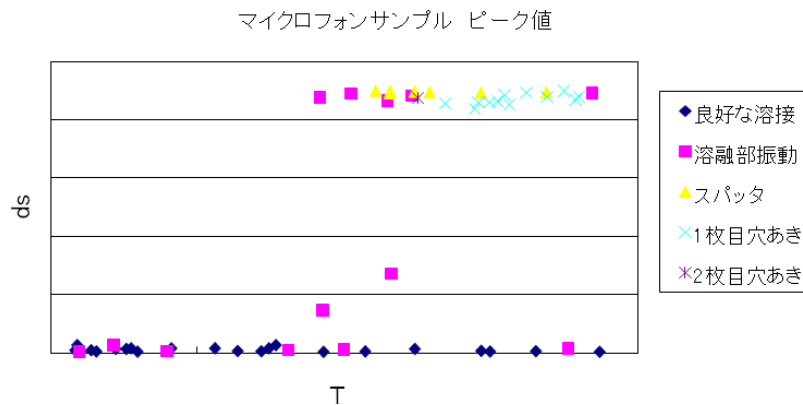


図 3-14 マイクロフォンピーク値と溶接結果の関係

3-3-5 溶接良否判定の為の判定アルゴリズム

以上の結果から、反射光、赤外光センサのピーク値に閾値を設けることで、良好な溶接、溶融部振動、溶融部にスパッタもしくは穴あきが発生した場合の3種に大別できる。

ここで、穴あきには1枚目穴あきと2枚目穴あきの2種類存在するが、どちらも穴あき時にも接合面積の減少による強度不良もしくは未溶接が問題となると思われるため、この項では両者を統一して扱う。表3-7に反射光、赤外光ピーク値と欠陥分類の関係をまとめたものを示す。

表 3-7 センサ閾値と欠陥分類

	反射光センサ	赤外光センサ
良好な溶接	ピーク値 ds1 未満	—
溶融部振動	ピーク値 ds1 以上	ピーク値 ds2 未満
スパッタ、穴あき	ピーク値 ds1 以上	ピーク値 ds2 以上

ここまでで、良好な溶接時と、欠陥が発生する可能性がある溶融部振動時、重大な欠陥であるスパッタ飛散及び穴あきの3通りに分けられたため、良否判定として十分成り立つものと思われるが、発生した欠陥がスパッタであるか穴あきであるか認識する必要がある場合も想定し、これらが分けられるかを検討した。

(1) スパッタ、穴あきの区分け方法

スパッタ発生時には 3-2-3 項の様に、反射光波形と赤外光波形の挙動は類似しており、両者ともほぼ同時に波形が立ち上がる。これに対し、穴あきが発生する場合には 3-2-4 項の様に、赤外光波形が立ち下がるタイミングで反射光波形が立ち上がる傾向にある。

前項までで定めた閾値である、反射光検出強度 $ds1$ と赤外光強度 $ds2$ を用い、反射光検出強度 $ds1$ を超えたときの時間を「反射光立ち上がり時間」とし、赤外光検出強度 $ds2$ を超えたときの時間を「赤外光立ち上がり時間」、立ち上がった後 $ds2$ を下回ったときの時間を「赤外光立ち下がり時間」とし (図 3-15)、反射光立ち上がりと赤外光立ち上がり、立ち下がりの差分を求めることで、欠陥分類が区分けできるか検証する。

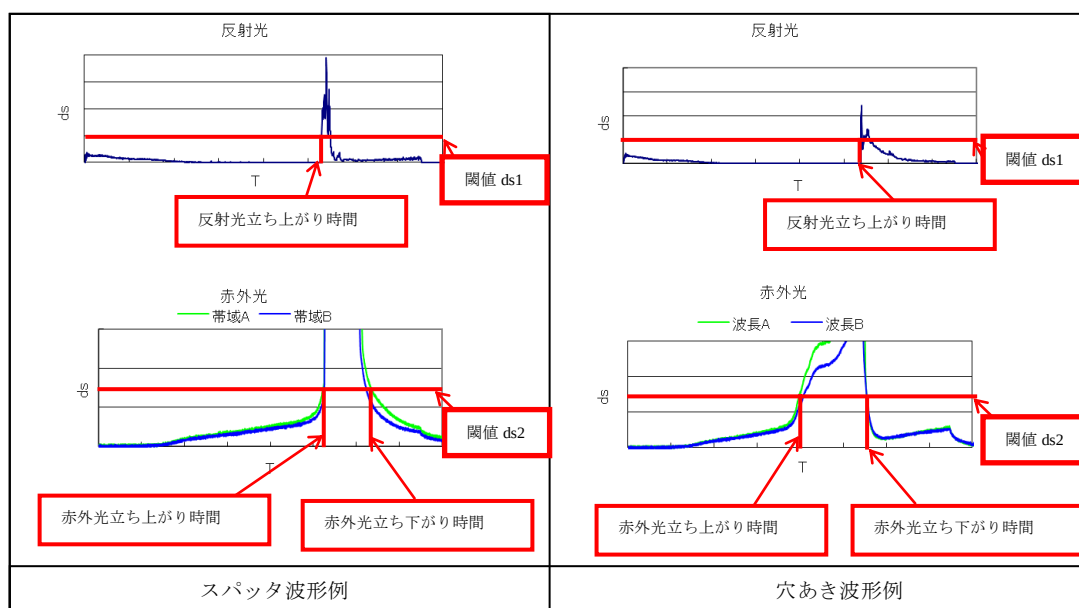


図 3-15 各波形の立ち上がり、立ち下がり時間説明図

(2) スパッタ、穴あきの区分け結果

赤外光立ち上がり時間と反射光立ち上がり時間の差分の絶対値を取ったグラフを図 3-16 に、赤外光立ち下がり時間と反射光立ち上がり時間との差分の絶対値を取ったグラフを図 3-17 に示す（これ以降、差分は絶対値）。共に横軸にサンプル番号、縦軸を差分した時間で表したものである。サンプル番号はスパッタ、穴あきを同時に表記するため形式的に割り振った番号であり、番号自体には特に意味は無い。

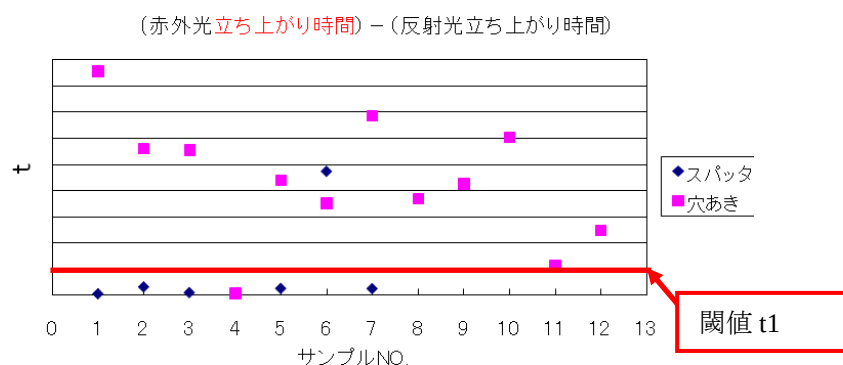


図 3-16 赤外光立ち上がり時間と反射光立ち上がり時間との差分

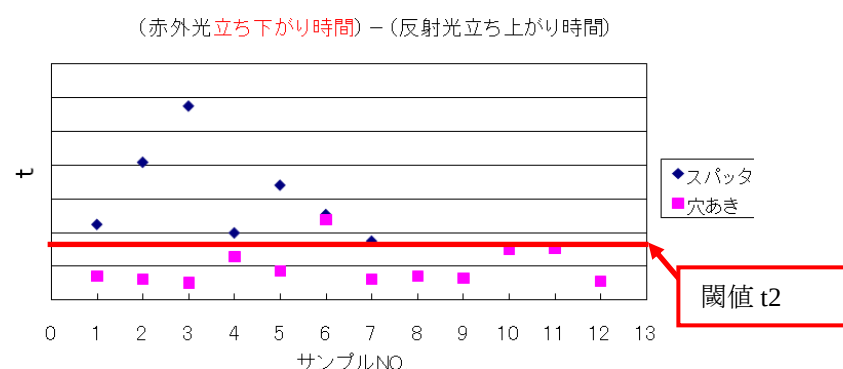


図 3-17 赤外光立ち下がり時間と反射光立ち上がり時間との差分

図 3-16 から、t1 に閾値を設けると、スパッタ発生の場合、サンプル 7 個中 6 個が t1 未満となり、穴あきの場合、サンプル 12 個中 11 個が t1 以上となった。これは前述したように、スパッタ発生時には赤外光と反射光の波形立ち上がり時間が類似しているためである。次に、図 3-17 から、t2 に閾値を設けると、スパッタ発生の場合、サンプル 7 個中全てで t2 以上となり、穴あきの場合、サンプル 12 個中 11 個が t2 未満となった。これは、穴あき発生時には赤外光が立ち下がるタイミングで反射光が立ち上がるためである。これらの結果を表 3-8 にまとめる。

表 3-8 スパッタ、穴あきの区分け結果

	(赤外光立ち上がり) - (反射光立ち上がり)	(赤外光立ち下がり) - (反射光立ち上がり)
スパッタ	t1 未満	t2 以上
穴あき	t1 以上	t2 未満

前項のように、スパッタ、穴あき発生時にある程度の区分けは行えることが分かった。
表 3-8 の内、区分け不可と判定されたサンプルはスパッタ、穴あき発生時のサンプル
全 20 個中 3 個であり、85%は、スパッタ、穴あきのいずれかに区分けすることができた。

(3) 検査アルゴリズム

前述した表 3-7 と表 3-8 を踏まえ、構築した欠陥検査アルゴリズムを図 3-18 に示す。
この検査アルゴリズムにより、今回の実験では、良好な溶接を 100%、溶融部振動を 100%、
スパッタ及び穴あき欠陥を 100%判別でき、さらにスパッタ及び穴あき欠陥の内 85%はス
パッタもしくは穴あきのいずれかに特定することができた。

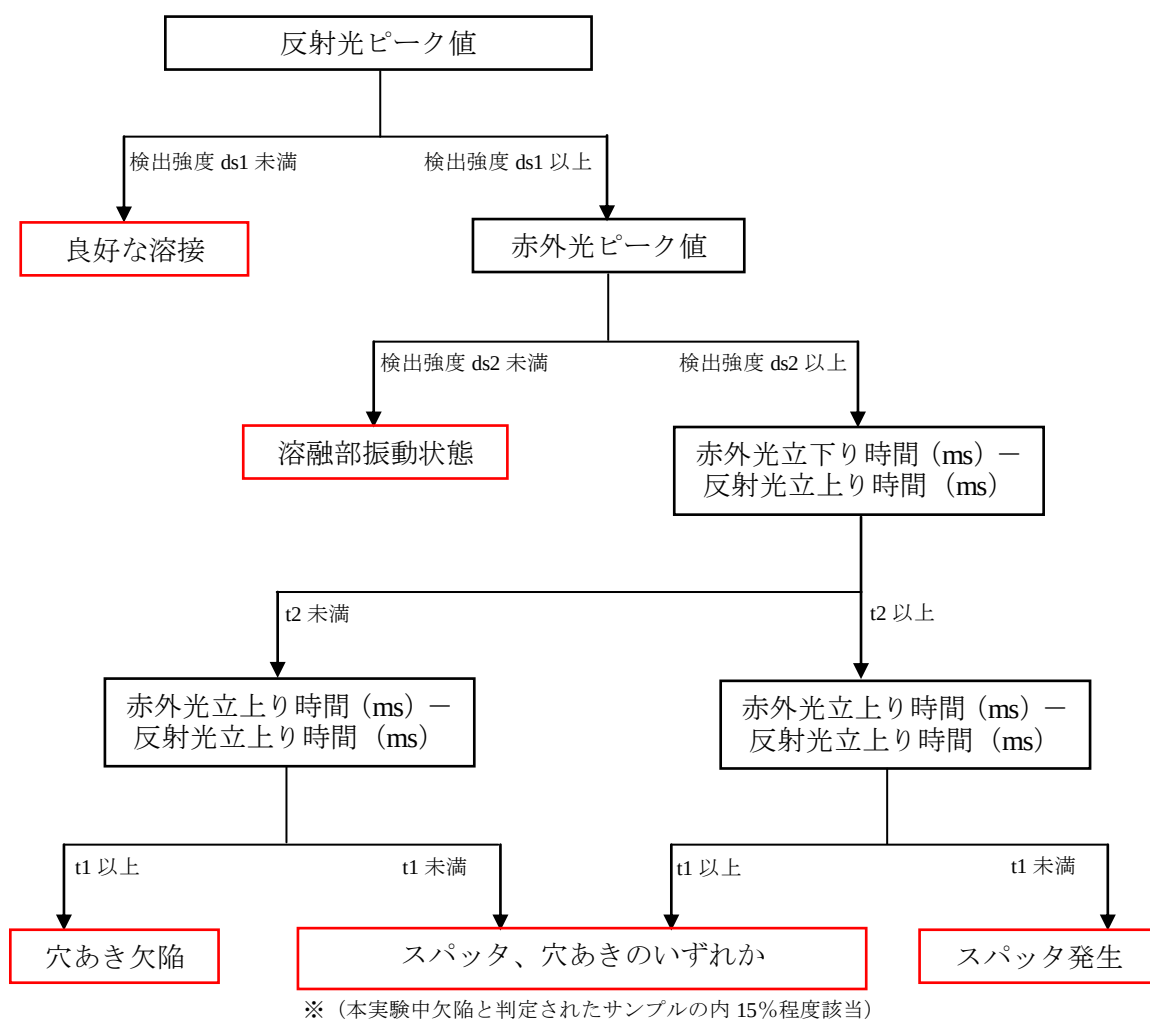


図 3-18 欠陥分類アルゴリズム

第4章

結論

4-1 実験結果まとめ

- (1) パルス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) 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。

表 4-1 モニタリング方式毎の欠陥検知結果

溶接欠陥の種類	モニタリング方式			
	赤外光	反射光	可視光	音
穴あき	◎	○	○	○
スパッタ	◎	○	○	○
ビード表面不安定 (溶融部振動)	△	○	△	×

◎:検出有効、○:検出可能性あり、△:有効と推定、×:現状では困難

本研究において赤外光、反射光がモニタリングに有効であることがわかった。

4-2 溶接部良否の検出アルゴリズムのまとめ

- (1) 反射光の検出強度のピーク値が $ds1$ 未満で良好な溶接と判定可能。
- (2) 反射光の検出強度のピーク値が $ds1$ 以上、赤外光の検出強度のピーク値が $ds2$ 未満であれば溶融部の激しい振動などの発生を判定可能。
- (3) 反射光の検出強度のピーク値が $ds1$ 以上、赤外光の検出強度のピーク値が $ds2$ 以上であればスパッタ、穴あき発生を判定可能。
- (4) 上記のようにスパッタ、穴あきと判別されたサンプルのうち 85%は、反射光、赤外光の立ち上がり、立ち下がりタイミングから、スパッタ、穴あきのいずれかに特定することができる。

4-3 今後の展開

本研究では、センサの開発、基礎的な良否判定アルゴリズムの構築のため、一般的にエレクトロニクス産業において軽量化を主目的とした溶接材として用いられることの多いアルミニウム合金のモニタリングを行った。このモニタリング方式は、溶接材の材質、厚み、レーザの種類(波長など)、レーザ条件などにより溶融現象は異なることが予想されるため、判定アルゴリズムはその都度構築、改良を加える必要がある。

そのため今後、このシステムを実用化していくためには、川下ユーザが現状問題としている溶接不具合、溶接条件、溶接材等を十分に把握し、判定アルゴリズムによる欠陥判別が実用可能か検証していく必要がある。

大阪大学川人准教授は川下企業(O社)に出向き、現状での本研究の進捗、今後の研究の動向、O社が抱える溶接製品が抱える課題、問題点について話し合いを行った。また、川人准教授は1月21日に開催された光学総合技術展フォトニクスジャパンに足を運び、今後のレーザ溶接業界の展開、レーザ加工品質モニタリング技術の動向を探った。

こうした川下企業との意見交換や最近のレーザ業界の動向を見ると、本システムの実用化のためには、ここまでに得られた研究結果に基づき装置化したうえで、良否判定の精度を高めるべく生産現場に即したアルゴリズムへ改良していくことが課題である。

加えて、良否判定だけでなく、不良が生じた場合に、良品へと修正させる適応制御機能の追加も検討していく必要がある。

今後の展開を表 4-2 に示す。

表 4-2 今後の目標

今後の技術目標	内容
1.構築したアルゴリズムに基づいたインライン判定システムの装置化	今回構築したアルミニウム薄板での溶接良否判定アルゴリズムを基に、アルゴリズム内蔵のモニタリング装置を開発する。
2.生産現場に対応したアルゴリズムの改良	川下企業の生産現場に対応した検査アルゴリズムに改良し、品質上問題となる溶接不具合が検出できるようにする。
3.適応制御の導入検討	レーザインラインモニタシステムに適応制御を導入し、リアルタイムでモニタリングした値をフィードバックし、アルゴリズムを元にレーザ制御を行い、溶接不良を防ぐ。