



Title	自動車製造プロセスにおけるレーザ溶接のインプロセスマニタリング技術の研究
Author(s)	森, 清和
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3129094
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

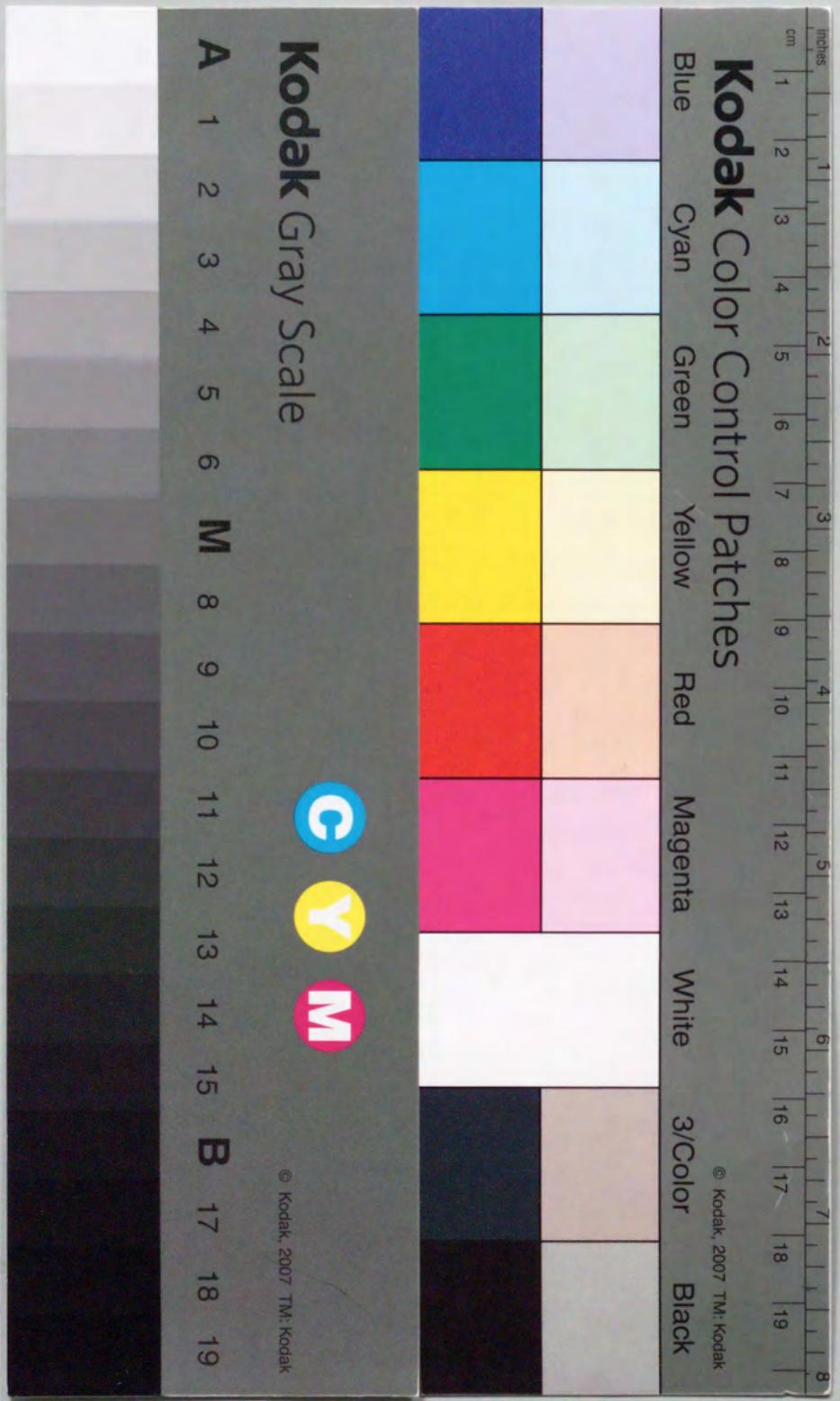
<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

自動車製造プロセスにおける
レーザ溶接のインプロセスマニタリング技術の研究

1996年12月

森 清 和



自動車製造プロセスにおける
レーザ溶接のインプロセスマニタリング技術の研究

1996年 12月

森 清和

- 目次 -

第1章 緒論	1
1.1 本論文の背景	1
1.2 本論文の構成	2
第2章 レーザ溶接の問題点とモニタリング技術の必要性	5
2.1 はじめに	5
2.2 レーザ加工機と供試材料	5
2.2.1 レーザ発振器と光学系	5
2.2.2 集光特性	6
2.2.3 供試材料	9
2.3 溶接特性と継ぎ手の機械的性質	10
2.3.1 溶接速度の影響	10
2.3.2 溶接パラメータと溶け込み形状	12
2.3.3 継ぎ手の機械的性質	17
2.4 レーザ溶接品質の信頼性における問題点	19
2.4.1 光学部品の経時変化	19
2.4.2 溶接パラメータの変動	19
2.4.3 ワークの加工精度及び汚染	20
2.5 レーザ溶接の品質保証の現状	21
2.5.1 レーザ加工機の信頼性	21
2.5.2 溶接品質のインプロセスマニタリングの可能性	21
2.5.3 レーザ溶接のインプロセスマニタリング技術の研究動向	22
2.6 本研究の着眼点	24
2.7 結言	25
第3章 深溶け込みレーザ溶接の発光特性	26
3.1 はじめに	26
3.2 レーザによる深溶け込み溶接の観察	26
3.2.1 キーホール内の力のバランス	26

3.2.2 深溶け込み溶接の観察	28
3.3 プラズマプルームの性質	29
3.3.1 分光分析の実験方法	29
3.3.2 スペクトル強度の時間変化	30
3.3.3 プラズマの温度	31
3.3.4 電子密度	33
3.3.5 温度と電子密度の半径分布	33
3.3.6 プラズマとレーザビームの相互作用	35
3.4 フォトセンサーシステム	37
3.4.1 センサーの特性	37
3.4.2 回路構成	39
3.5 検出波形と信号処理	39
3.5.1 センサーの配置	39
3.5.2 信号処理	40
3.6 プルームとキーホール発光の分離	41
3.6.1 受光強度の角度特性	41
3.6.2 溶融池からの輻射の影響	44
3.6.3 キーホール内でのプラズマ発光強度分布の検討	45
3.7 結言	50

第4章 レーザ溶接におけるプラズマ発光強度の時間変動	51
4.1 はじめに	51
4.2 周波数特性	51
4.2.1 プラズマ発光強度の周波数解析	51
4.2.2 信号の処理	53
4.2.3 AC成分でのキーホールプラズマの分離	54
4.3 周波数分布と溶け込み形状の関係	55
4.3.1 板厚の影響	56
4.3.2 スポット径の影響	58
4.3.3 貫通溶接と非貫通溶接との比較	61
4.4 プラズマ発光の時間変動要因の考察	63

4.4.1 高速度撮影によるキーホール開口の観察	63
4.4.2 発光強度の変動要因	65
4.4.3 共鳴振動による考察	66
4.4.4 貫通・非貫通溶接におけるプラズマ発光	68
4.5 センサーシステム	69
4.5 結言	71
第5章 プラズマ発光強度による溶接パラメータ変動の検出	72
5.1 はじめに	72
5.2 検出対象となるパラメータ	72
5.3 パラメータ変動の影響と発光強度の関係	74
5.3.1 ガス流量の影響	74
5.3.2 焦点位置の影響	78
5.3.3 レーザパワーの影響	79
5.4 変動パラメータの識別	81
5.4.1 DC成分による推定	81
5.4.2 AC成分による推定	86
5.5 品質推移の検出	89
5.6 結言	90

第6章 テーラードブランク溶接へのインプロセスマニタリング技術の応用	91
6.1 はじめに	91
6.2 システム構成	91
6.2.1 テーラードブランク溶接システムの構成	91
6.2.2 モニタリングシステムの構成	93
6.3 テーラードブランク溶接溶接における欠陥検出	96
6.3.1 検出対象となる溶接不良	96
6.3.2 ビード貫通の検出	96
6.3.3 穴あき欠陥の検出	98
6.3.4 アンダーフィル欠陥の検出	101
(a) 空間分布による検知	101

(b)周波数分布による検知	104
6.4.5 モニタリングシステムの稼働実績	107
6.4 レーザ溶接インプロセスモニタリング技術の世代分け	108
6.4.1 モニタリング技術の世代分け	108
6.4.2 今後の課題	109
6.5 結言	111
第7章 総括	112
謝辞	115
引用文献	116
本研究に関連した発表論文	120

第1章 緒 論

1.1 本論文の背景

レーザ溶接は高パワー密度・低入熱の高能率の溶接工法であり、熱変形が少なく、高速溶接が可能であることから、自動車ボディのような薄鋼板の溶接に適している。自動車業界でのレーザ溶接は当初は、変速機のギア等の電子ビーム溶接工法の代替として検討が始まった¹⁾。自動車ボディへの適用の検討は1970年代後半に、従来は抵抗スポット溶接が用いられていたアンダーフロアパネルの接合部へのレーザ溶接の適用が検討された。重ね溶接の隙間の管理が不充分であったため、加工信頼性が確保できず、失敗した例が報告されている²⁾。1980年代後半からは、ボディパネルのプレス用素材を突合させ溶接し、一体でプレス成形する、いわゆるテーラードブランク溶接工法の概念が提唱された^{3,4,5)}。1990年代からは特に欧州の自動車メーカーで、自動車ボディのレーザ溶接の適用検討がルーフとピラーの接合部を中心に進められ^{6,7,8)}、従来の接合技術では不可能な車体構造の合理化や高生産性によるコスト低減の可能性が指摘された。

このようにレーザ溶接は生産性が極めて高いため、当初は自動車製造へのレーザ溶接の応用拡大の速度は、1995年ごろに切断の応用数を溶接の応用数が上回るものと予想されていた。しかしながら、レーザ熱加工研究会の調査⁹⁾によると、Fig.1.1に示されるようにレーザ溶接の応用数はレーザ切断の数分の一に留まっており、現時点でもその状況に変わりがない。その理由として様々な要因が考えられるが、最も重要な要因は、自動車製造のような大量生産ラインでは、高生産性と共に要求される加工信頼性が十分でないためである。すなわち、このような量産ラインでは、次工程への溶接不良の流出が

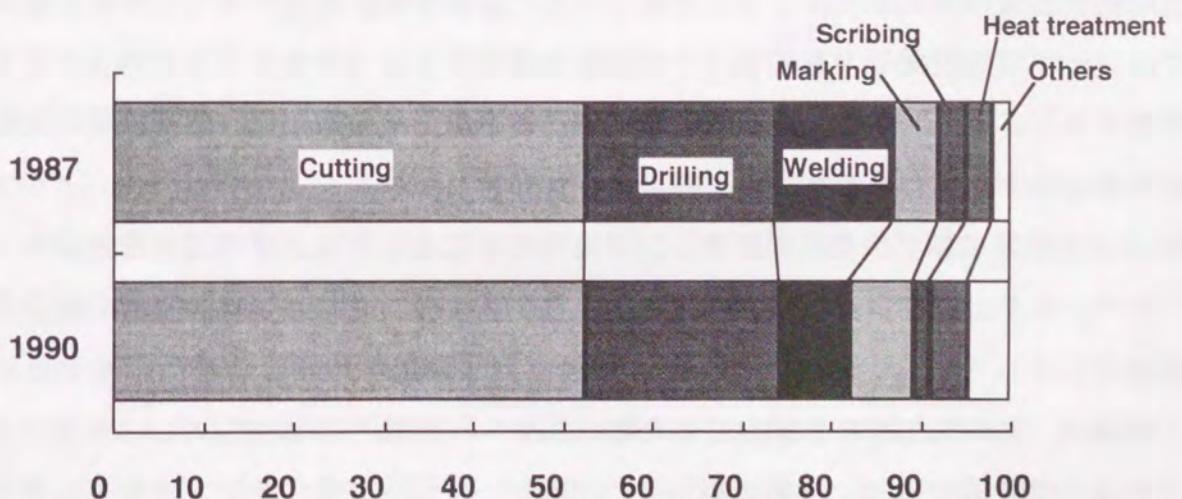


Fig.1.1 Comparison of application share at 1987 and 1990⁹⁾.

無いことが不可欠であるのに対し、現時点でのレーザ溶接工法の信頼性が未だ不十分なためである。レーザ加工の信頼性の向上には、以下の二つの点が重要と考えられる。まず第一に溶接パラメータを許容値内に管理し、ワークへのレーザ照射状況を一定に保つ源流管理が不可欠である。発振器から出力されたレーザビームは、伝送および集光用の多くの光学部品を経由するため、ワーク上の加工点での出力や集光スポット径はこれらの光学部品の影響を強く受ける。しかしながら、これら光学部品はその性能評価に特殊な測定機器が必要なため、ワークへのレーザ照射状況を生産現場で容易に計測・評価することができず、管理を困難にしている。さらに、レーザ発振器や伝送および集光に用いられる光学部品は、光学的精度と共に大出力レーザへの耐久性が必要であるが、発振器、オプティクスメーカーによる改良が継続的に行われているのにもかかわらず、現状においては経時劣化が避けられず、寿命予測が困難であるなどの点で解決すべき課題が残っている。

第二にレーザ溶接は100~500 μm 程度の微少なスポット径にレーザビームを集光して行うので、溶接品質は継ぎ手の精度や清浄度に大きく影響を受ける。これは、溶接パラメータの源流管理だけでは、レーザ加工の信頼性が十分でないことを示している。特に、自動車ボディのような薄板の溶接では、継ぎ手に隙間や傷、さらに油分等による汚染があると、容易に溶接欠陥が発生する。自動車部品は数百mm以上の比較的大型の部品が多く、スポット径に相当する数百 μm 以下の精度に継ぎ手を管理するためには、通常の生産工程の管理水準に比べ数倍以上の加工精度が要求される。

レーザ加工の信頼性の向上に対して、既存の溶接法で広く適用されている非破壊検査法を、レーザ溶接においても適用することが考えられるが、レーザ加工速度に見合う速度での精度の高い検査は現状では不可能である。自動車部品製造のような大量生産ラインではレーザ溶接現象そのものを、その理解に基づきインプロセスでモニタリングする必要がある。さらに、溶接品質が許容範囲内にあるか否かを検知し、溶接欠陥の発生を検出するシステムが必須であり、その開発の要請が大きい。

レーザ溶接のインプロセスモニタリング技術の手法としては、プラズマ発光強度、アコースティックエミッション、プラズマ電界強度等を検出対象とした研究例が報告されている。しかしながら、加工現象に対する検出信号の物理的意味の解明が不十分であり、現状は、実験的な試みを含めても実際の部品への実用例は極めて少ない。

このような背景の下で、自動車製造におけるレーザ溶接品質のインプロセスモニタリング技術を新規に開発し、テーラードブランク溶接などの量産ラインへ実用化した。本

論文では、レーザ溶接時に誘起されるプラズマの発光強度に注目し、レーザ溶接現象とプラズマ発光現象を関連づける一連の研究に基づいて、自動車部品製造ラインで実用可能な性能のモニタリングシステムを研究・開発した内容を纏めたものである。

1.2 本論文の構成

研究の流れをFig.1.2に示すが、全7章で構成されている。まず、第2章において高パワー密度のレーザにおける深溶け込み溶接の基本特性を整理し、薄板の溶接には継ぎ手性能、生産効率の点でレーザ溶接が優れていることを示す。また、レーザ溶接を自動車製造プロセスのような生産ラインに導入した場合に遭遇する問題点を例示し、特にインプロセスモニタリングによる品質保証技術の開発が重要な課題であることを示した。レーザ溶接における既存のモニタリング手法を整理し、光センシングが最適であるが、より高度な光モニタリング技術の開発が必須であることを示した。

ついで、第3章においてはレーザ加工による深溶け込みビード形成現象を整理し、発光源の一つであるプラズマプルームの性質を分光により調査した。光センサーとしてシリコンフォトダイオードを選定しプラズマ発光強度のセンサーとしての感度及び応答性を評価している。複数の検出角度の光センサーを用いて時間平均した発光強度特性を調査し、これに基づいてキーホール内のプラズマとプラズマプルームの発光強度を分離するインプロセスモニタリング手法を提案している。さらに検出角度特性からキーホール内の発光強度分布を推定した。

また、第4章においてはプラズマ発光強度のAC成分に注目し、その周波数分布とキーホールの形状との相関を明らかにした。このプラズマ発光の周波数分布がレーザ溶接品質のモニタリング手法に利用できることを示した。また、プラズマ発光強度の時間変動の原因を考察し、キーホールの共鳴振動と相関のあることを示した。

次に、第5章では第3、4章で提案したキーホールプラズマとプラズマプルームの発光強度をDC成分とAC成分に分離して解析することによって、溶接パラメータの変動の検出ができる事を示した。さらに、光学部品の劣化等に起因する長期間の変動推移の検出手法を提示した。

さらに第6章では、本研究で開発された新しいモニタリングシステムを、自動車部品製造の量産ラインに応用した例をテーラードブランク溶接を中心に示した。全体のシステム構成を示し、実際の生産ラインで発生する可能性のある溶接欠陥の検出方法として、溶接ビードの貫通検知およびワーク精度の不良や汚染に起因する穴あき欠陥および

アンダーフィル欠陥を発光強度信号から検出する手法を提示した。さらに、レーザ溶接品質のインプロセスモニタリング技術をその知能レベルから分類し、今後の課題について述べている。

第7章では、本論文の総括として、各章で得られた諸事項をまとめている。

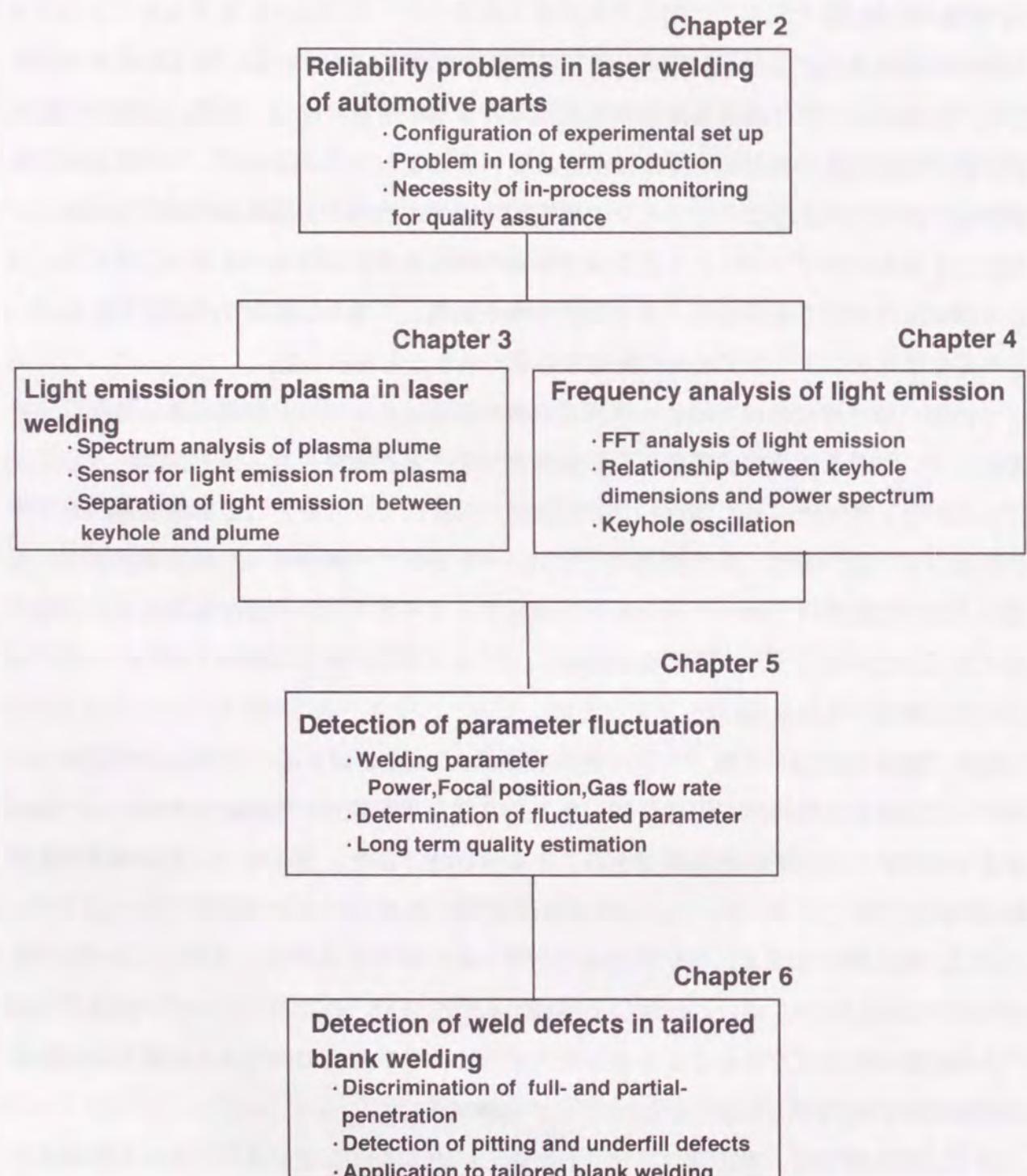


Fig.1.2 Flow chart of the present study.

第2章レーザ溶接の問題点とモニタリング技術の必要性

2.1 はじめに

レーザ溶接は集光点での高いパワー密度によって得られる深溶け込み溶接を特徴しており、高能率の接合が可能で継ぎ手性能が優れているため、自動車部品製造などへの応用において高いポテンシャルを持っている。

本章では、本研究で用いたレーザ発振器と光学系の構成を示し、その集光性能を評価する。次に基本的な溶接パラメータである溶接速度、レーザパワー、焦点位置およびアシストガス流量等のパラメータとビード幅、溶け込み深さとの関係を明らかにする。さらに、レーザ溶接継ぎ手の機械的性質を調査し、自動車部品への応用の可能性を評価する。

レーザ溶接は高い溶接性能を有する反面、量産ラインに導入する際には、発振器ならびに光学部品の経時劣化、溶接パラメータの変動による溶接品質の変動およびワーク加工精度や汚染などに起因する突発的な不具合などのレーザ溶接に固有の問題がある。これらの諸問題を整理し、その問題の解決策としてレーザ溶接中に継ぎ手品質の良否を判定するインラインでのモニタリング技術の必要性を述べる。さらにレーザ溶接に関する既存インプロセスモニタリング技術の現状を整理した上で、本研究での着眼点を述べる。

2.2 レーザ加工機と供試材料

2.2.1 レーザ発振器と光学系

本研究では2種類のCO₂レーザ発振器を主に用いた。いずれもRFグロー放電励起する高速軸流タイプの連続発振レーザで、一つは、東芝製のCO₂レーザ発振器を用いる加工機であり、第3章で述べるプラズマプルームの分光分析及び第4章で述べるキーホールの直接観察に用いた。もう一つは、トルンプ社製のCO₂レーザ発振器を搭載する加工機であり、前者による実験以外の光センサーによるプラズマ発光のモニタリング実験及び、実際の自動車部品への応用を含む全般的な実験に用いた。以降では簡単のため、トルンプ社製のレーザ発振器をTLF5000t、東芝製のレーザ発振器をCO30PMSと略称することにする。

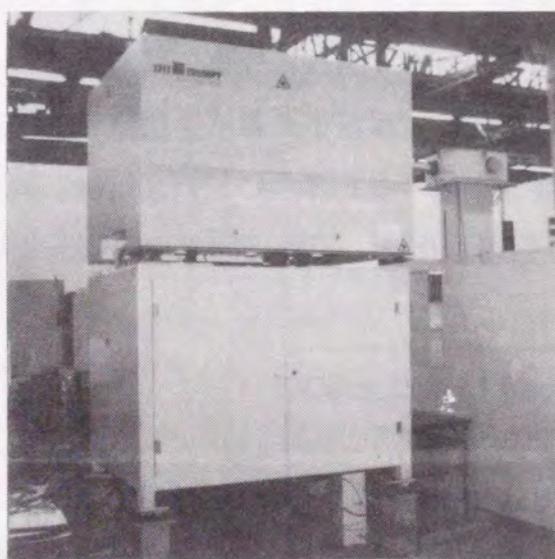
2つの発振器の基本仕様をTable2.1に示した。TLF5000tは、RF放電励起により連続発振する高速軸流型で定格出力5000Wであり、その外観写真をFig.2.1に示す。レーザ

ガスはターボプロアで高速に循環され、約10MHzの高周波放電により励起される。発振器出口でのビーム径は約 ϕ 25mmであり、ビーム広がり角(全角)は約1.5mradである。

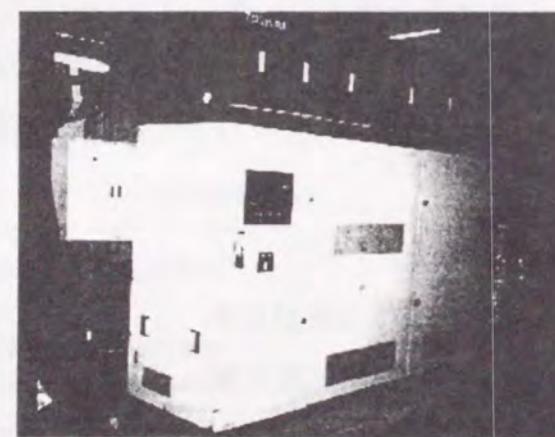
CO30PMSは、同じくRF放電励起で連続発振する高速軸流型であり、その外観写真をFig.2.2に示す。定格出力は低次モードで1.5kW、高次モードで3kWである。発振器出口でのビーム径およびビーム広がり角は、低次モードで ϕ 16mm、約1mrad、高次モードで ϕ 30mm、約3mradである。

Table.2.1 Specification of laser oscillators, TLF5000t and CO30PMS.

Laser	Nominal mode	Pumping	Beam dia. (mm)	Divergent angle (full) (mrad)	Power (kW)
TLF5000t	TEM _{01*}	RF-discharge	25	1.5	5.0
CO30PMS	low order	RF-discharge	16	1.0	1.5
	multi	RF-discharge	30	3.0	3.0



**Fig.2.1 Photograph of CO₂ laser.
(TLF5000t)**



**Fig.2.2 Photograph of CO₂ laser.
(CO30PMS)**

2.2.2 集光特性

平面波をなすレーザビームの集光性能は、次に示す3つの因子によって支配されている¹⁰⁾。

- (1) 回折限界
- (2) レーザビームの横モード
- (3) 集光系の収差

(3)については、本研究の加工実験には45度軸外し放物面鏡を用いており、精度よく光

軸調整することにより集光系の球面収差は無視できるので、ここでは(1)の回折限界と(2)のビームの集光性を検討する。TEM₀₀モードのレーザビームを集光しうる最小スポットサイズは回折限界d_cによって制限され、次式によって表される。

$$d_c = \frac{4}{\pi} \lambda \frac{f_l}{D_0} \quad (2.1)$$

ここで、λ=波長、f_l=集光系の焦点距離、D₀=集光ミラーへの入射ビーム径(強度が中心の1/e²となる直径)である。

(2)のビームモードに関しては、現実のレーザビームはいくつかの発振モードが混在しているので、回折計算により理論的に求めることは困難である。そこで、実測したスポット径と(1)の回折限界との比をビーム評価指数M²と定義し用いられることが多い¹¹⁾。すなわち、集光ビーム径d₀は次式によって表される。

$$d_0 = M^2 d_c \quad (2.2)$$

また、焦点から距離F離れた位置でのビーム径D(F)は、集光ビーム径d₀とM²により次のように表される¹²⁾。

$$D(F) = d_0 \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda F}{\pi (d_0/2)^2} \right)^2} \quad (2.3)$$

レーザビームの強度分布は、Fig.2.3に示すような、中空ニードルが回転する方式の市販のビームアナライザ(Prometec社製UFF100¹³⁾)を用いて計測した。ニードル先端にはピンホールがあり、ピンホールに入射したレーザビームはニードル内で多重反射し焦電素子で検知される。ピンホール径は非集光ビームの場合は300 μm、集光ビームの場合は10 μmを用いた。ニードルが回転面内で一方向に移動することにより、ピンホールがビーム領域内を2次元的にスキャンし、任意分布をなすビームの強度分布が測定される。ビーム直径Dはビームの強度分布をガウス分布としたときのピーク強度の1/e²となる直径として定義されるが、実際の発振ビームはガウス分布から外

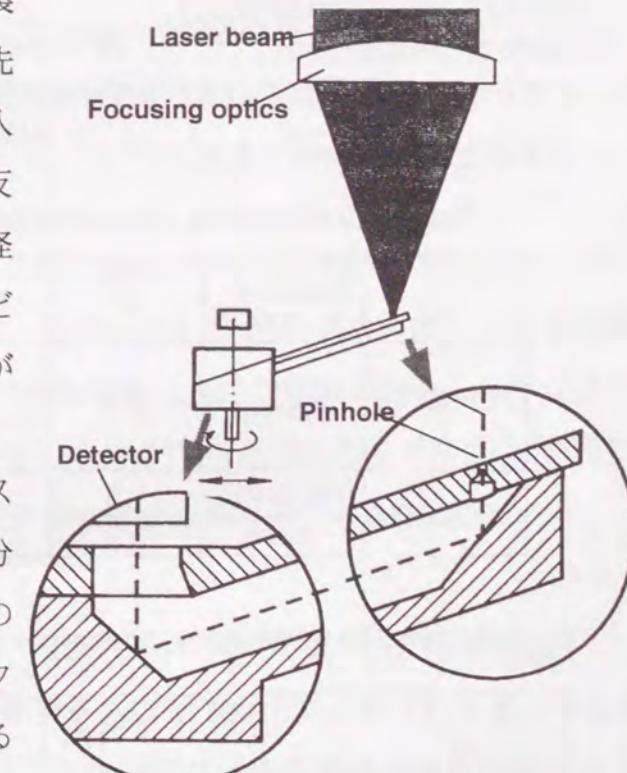


Fig.2.3 Working principle of beam analyzer UFF100¹³⁾.

れるので、ビーム強度の86%が含まれる領域の面積に等しい円の直径とした。

TLF5000tのレーザビームの集光にはFig.2.4に示す加工ヘッドを新たに設計した。加工ヘッドは平面鏡と45度軸外し放物面鏡¹⁴⁾(回転放物面)より構成され、いずれもCu基板にAuコートをしたもので水冷構造となっている。45度軸外し放物面鏡は光軸調整の許容度の大きいことが特長である。放物面鏡の焦点距離f_lは150mmおよび250mmを用いた。CO30PMSのレーザビームは焦点距離127mmのZnSe製平凸レンズ(周辺水冷構造)を用いて集光した。

Table2.2にTLF5000tならびにCO30PMSの各発振器の集光特性を示す。TLF5000tでは発振器出口からワークステーションまでの伝播距離を約2mおよび約10mすることにより集光ミラーへの入射ビーム径をφ27mmおよびφ35mmに変化させた。Table2.2でのd₀はそれぞれのFナンバーでビームアナライザを用いて実測した集光スポット径の最小値を示している。また、M²はそれぞれのFナンバーでのd₀を式(2.2)に代入して求めた値の平均値である。

Table 2.2 Focusing characteristics of lasers used in this study.

	Nominal mode	M ²	f/No	D ₀ (mm)	f _l (mm)	d ₀ (μm)		
TLF5000t	Tem _{01*}	3.6	5.6	27	150	270		
			7.1	35	250	360		
			9.3	27	250	440		
			low order	1.5	7.9	16		
CO30PMS			multi	5.9	4.2	30		
					127	160		

Fig.2.5はTLF5000tでのそれぞれのFナンバーf/Noでの集光特性を示しており、プロットした点はビームアナライザによる実測値を、実線はTable2.1のM²とd₀を用いて式(2.3)により求めた計算値を示している。ここでFは焦点に対する被測定面の相対位置とし、焦点よりビーム伝播の前側をF<0、後側をF>0と定義した。図よりf/Noが

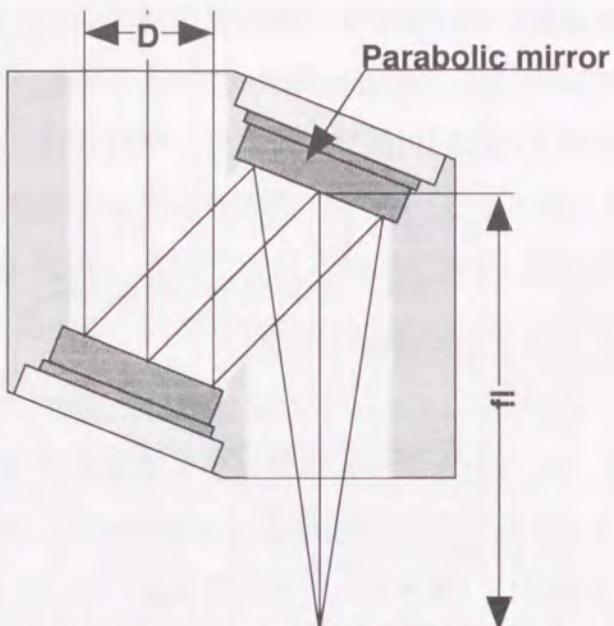


Fig.2.4 Schematic illustration of focusing unit.

小さいほど最小スポット径は小さくなっているが、焦点付近でのスポット径の変化が大きく、焦点深度が浅いことがわかる。Fig.2.6はTLF5000tにおいてビームアナライザを用いて計測した焦点付近での強度分布の例を示す。ビームモードはTEM_{01*}と公称されているが、それに対応するM²の値(1.7)よりもTable2.2の値はかなり大きい。これはFig.2.6からもわかるように、より高次モードが含まれていることならびに、波面歪みが存在するためと考えられる。

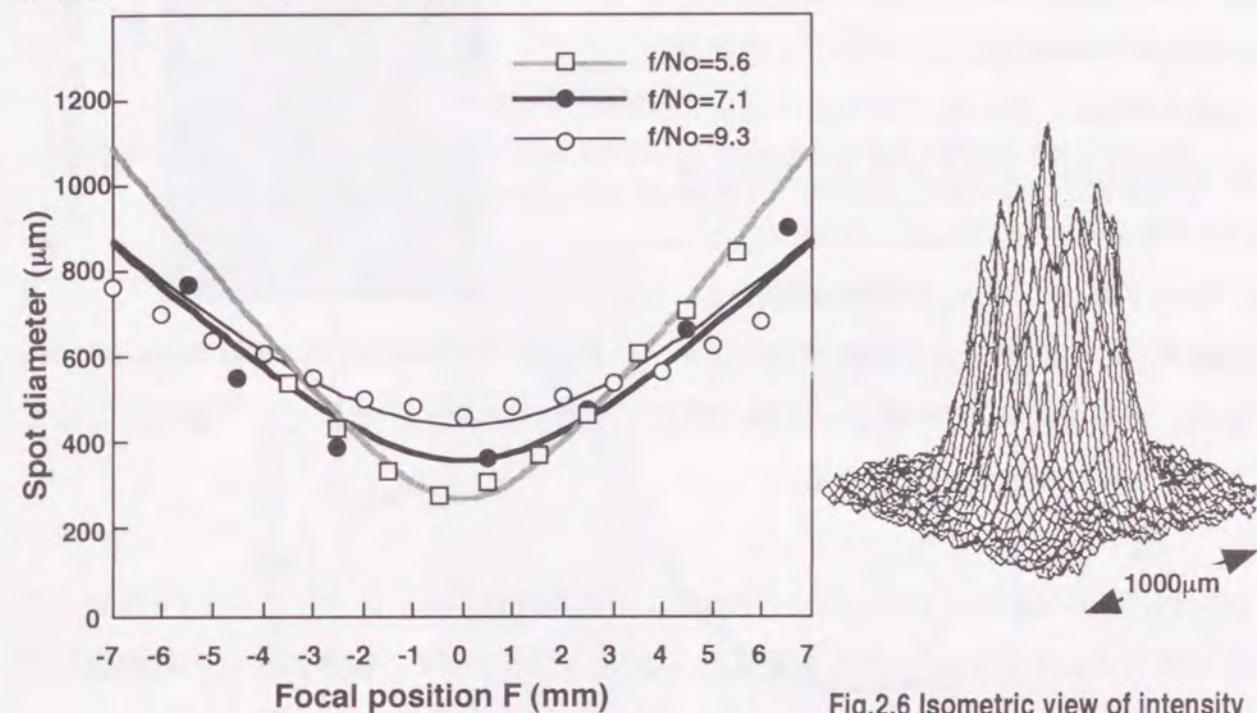


Fig.2.5 Focusing characteristics at different F-numbers. (TLF5000t) Lines are calculated and plot marks are experimental.

Fig.2.6 Isometric view of intensity distribution of focused CO₂ laser beam. (TLF5000t)

2.2.3 供試材料

本研究には板厚0.8~12mmの自動車用の低炭素鋼板を用いた。板厚0.8~1.6mmの供試材は、自動車用冷間圧延鋼板(JIS:SPC)を、板厚2.9~12mmの供試材は、自動車用熱間圧延鋼板(JIS:SPH)を用いた。Table.2.3に供試材の代表的な機械的特性と化学組成を示す。材料の表面はプレス成形時の型への耐焼き付き性向上のためのダル仕上げ(表面粗さはRa=0.5~2.0 μm程度)されており、突き合わせ面は剪断加工とした。

Table 2.3 Mechanical properties and chemical compositions of specimen used in this study.

	Thickness (mm)	TS (MPa)	YS (MPa)	EI (%)	C	Mn	P	S (mass%)
A	0.8~1.6	270	195	46	0.006	0.13	0.006	0.014
B	1.6~12	330	205	26	0.13	0.6	0.04	0.03

2.3 溶接特性と継ぎ手の機械的性質

2.3.1 溶接速度の影響

本研究に用いたレーザ加工機の基本的な特性を調べるために十分清浄な軟鋼板 (SPC)にビードオンプレート溶接し、溶接速度と溶け込み特性の関係を調査した。ビード横断面を研磨後にエッチングしたマクロ写真をFig.2.7に示す。このようにビード幅は深さ方向に変化するが、溶け込み深さ h の半分の位置でのビード幅(w_h)とした。ビード幅として w_h を採用したのは、重ね継ぎ手の剪断強度との相関が高いからである。以下では w_h を半値ビード幅と呼ぶ。溶け込み深さと半値ビード幅の比としてアスペクト比 R_a を次式で定義する。

$$R_a = \frac{h}{w_h} \quad (2.4)$$

$M^2=3.6$ (TLF5000t)、Fナンバー $f/No=7.1$ 、焦点位置 $F=0$ 、レーザパワー $P=3kW$ 、アシストガスとしてアルゴンガスを流量 $Q_{Ar}=30\text{ l/min}$ として、板厚12mmの軟鋼板にビードオンプレート溶接した際の、溶け込み深さ h と半値ビード幅 w_h の関係をFig.2.8に示す。

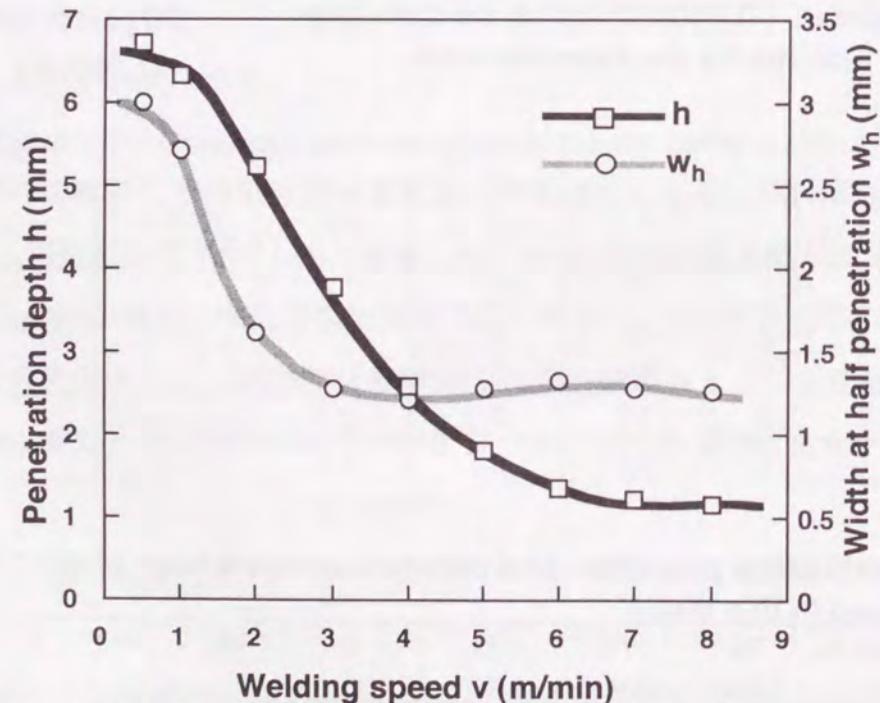


Fig.2.8 Effect of welding speed v on penetration depth h and bead width w_h . ($P=3kW$, $F=0mm$, $Q_{Ar}=30\text{ l/min}$)

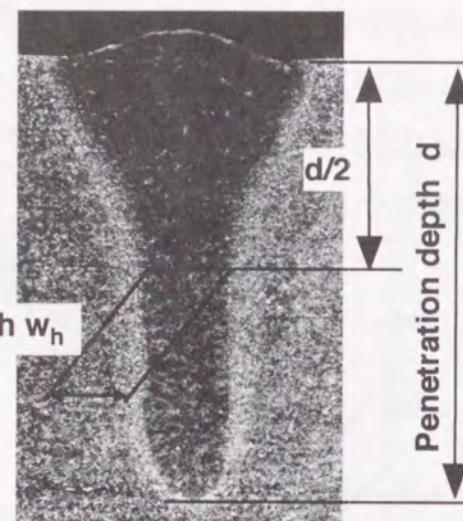


Fig.2.7 Definition of bead dimensions.

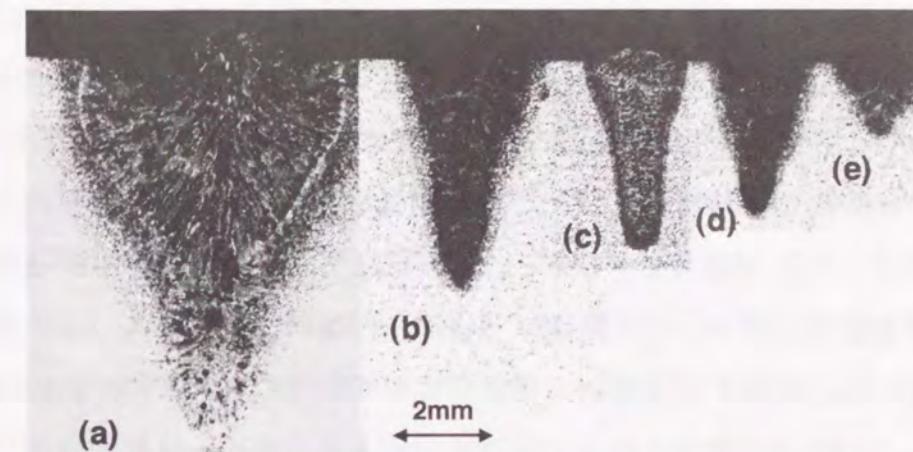


Fig.2.9 Cross sections at various welding speed; (a) 0.5 m/min, (b) 2m/min, (c) 3m/min, (d) 4m/min and(e) 5 m/min. ($P=3kW$, $F=0mm$, $Q_{Ar}=30\text{ l/min}$)

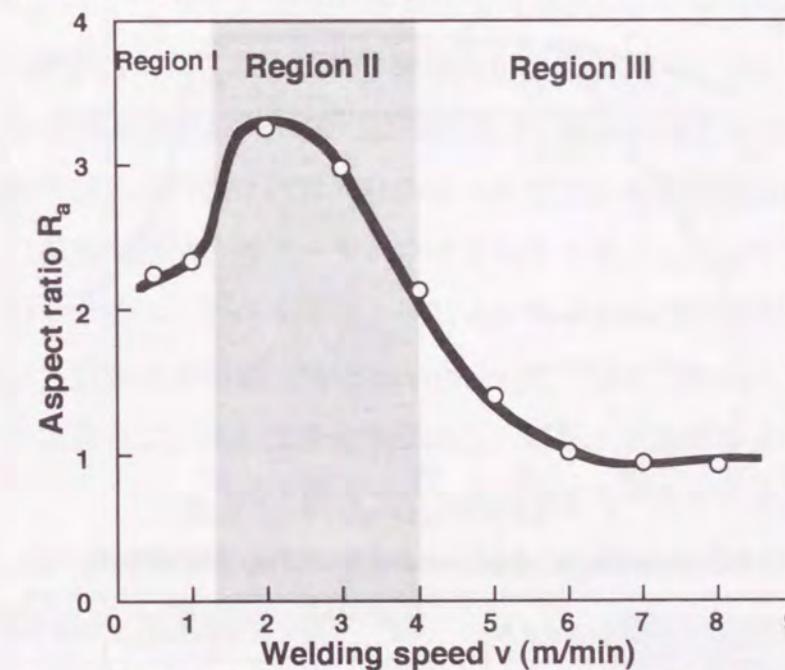


Fig.2.10 Relationship between welding speed v and aspect ratio R_a . ($P=3kW$, $F=0mm$, $Q_{Ar}=30\text{ l/min}$)

断面形状の写真をFig.2.9に示すように、溶け込み深さは溶接速度を $v=5\text{ m/min}$ 以下にするとほぼ v に逆比例して急速に増加し、 0.5 m/min 以下では $h=6.5\text{ mm}$ となったのちは、ほぼ一定値に飽和する。半値ビード幅は $v=2\text{ m/min}$ 以上では約 1.3 mm となるが、 2 m/min 以下ではワークへの熱伝導の影響ならびにプラズマブルームとの相互作用によって、ビード幅は急激に増加する。このように溶け込み深さとビード幅が変化する溶接速度がそれぞれ異なることから、ビード断面のアスペクト比はFig.2.10に示すように3つの領域に分けられる。

第1の領域は 1.5 m/min 以下の領域で、溶け込み深さおよびビード幅は大きいが、溶接速度の減少に伴ってアスペクト比は減少傾向にある。このような低速溶接領域では、

熱影響幅が広いが、特に輝度の高いプラズマプルームが観察される。プラズマプルームによるレーザビームの吸収が大きいため、プルーム中で消費されるレーザビームが無視できず、キーホールに入射するレーザビームの割合が低下すると考えられている^{15,16)}。

第2の領域は $1.5\text{m/min} < v < 4\text{m/min}$ の領域である。単位溶接長当たりの入熱の増大に伴ってアスペクト比 R_a が増大し、 R_a が2以上を維持する典型的な深溶け込み溶接が得られる領域で熱影響幅も狭い。この速度域では第1領域に比べてプルームの輝度は低下しており、プルームによるビーム吸収の影響が比較的少なく、入射ビームのほとんど大部分がキーホールの形成に費やされると推察される。そのため、比較的高速で溶け込み深さが大きくとれ、産業応用としてはこの領域が経済的に最も効率が良い。また、溶接ビードの熱歪みやアンダーフィルなどの不具合も少ない。

第3の領域は $v > 4\text{m/min}$ の高速溶接の領域である。第2領域と同様にプラズマの影響が少ないため半値ビード幅はほぼ一定となるが、溶け込み深さは2mm以下と浅い。

以上のように、溶接速度によってプルームの発光状況や溶け込み特性が変化する傾向から、キーホールとプルームに費やされるエネルギーの割合が溶接速度によって異なるものと推察される。本研究ではキーホールに多くのエネルギーが費やされ、かつ溶け込み深さの大きい第2の領域のほぼ中央($v=3\text{m/min}$)を、標準溶接速度とした。以下ではTable2.4に示す条件を標準条件と呼び、これらの条件のうち一つを変化させるととき、標準条件の中で特定のパラメータを変化させたと表現する。

Table 2.4 Parameters of standard welding condition.

Power:P	Speed:v	Focal position:F	M^2	F-number:f/No	Gas flow rate:QAr
3kW	3m/min	0mm	3.6	7.1	30 l/min

2.3.2 溶接パラメータと溶け込み形状

レーザ溶接において発振器と光学系が与えられたとき、管理すべき基本的なパラメータとしては、2.3.1項で述べた溶接速度 v を除くと、アシストガス流量 Q 、焦点位置 F 、レーザパワー P が挙げられる。本項では、これらの溶接パラメータの溶け込み形状への影響を調査する。

(a)ガス流量の影響

レーザ溶接で誘起されるプラズマプルームが高温になり電子密度が高くなると、逆制動輻射によるレーザ吸収のため、キーホールに入射するレーザパワーが減少することが

知られている¹⁵⁾。このため、プラズマプルームの制御のためにアシストガスを吹き付けてプラズマを冷却し、ビーム吸収を低減する技術がレーザ加工の固有の技術として重要なである。大出力・低速領域では、プラズマ冷却能力の高いHeをアシストガスとして用いるとプラズマ吸収の影響を低減させることも可能であるが、産業用としては高価なHeよりArが用いられる。

Fig.2.11にアシストガスとしてArを用い、標準条件(レーザパワー $P=3\text{kW}$ 、溶接速度 $v=3\text{m/min}$ 、焦点位置 $F=0$, Fナンバー $f/\text{No}=7.1$)の中でガス流量 Q_{Ar} のみを変化させた

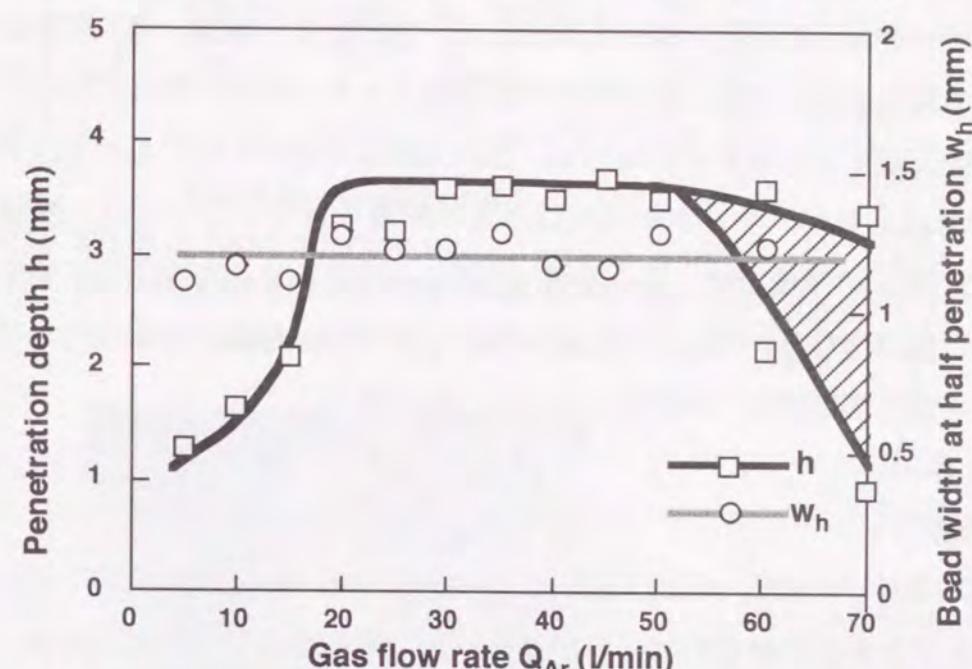


Fig.2.11 Relationship between gas flow rate Q_{Ar} and penetration depth h .

($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $F=0\text{mm}$)

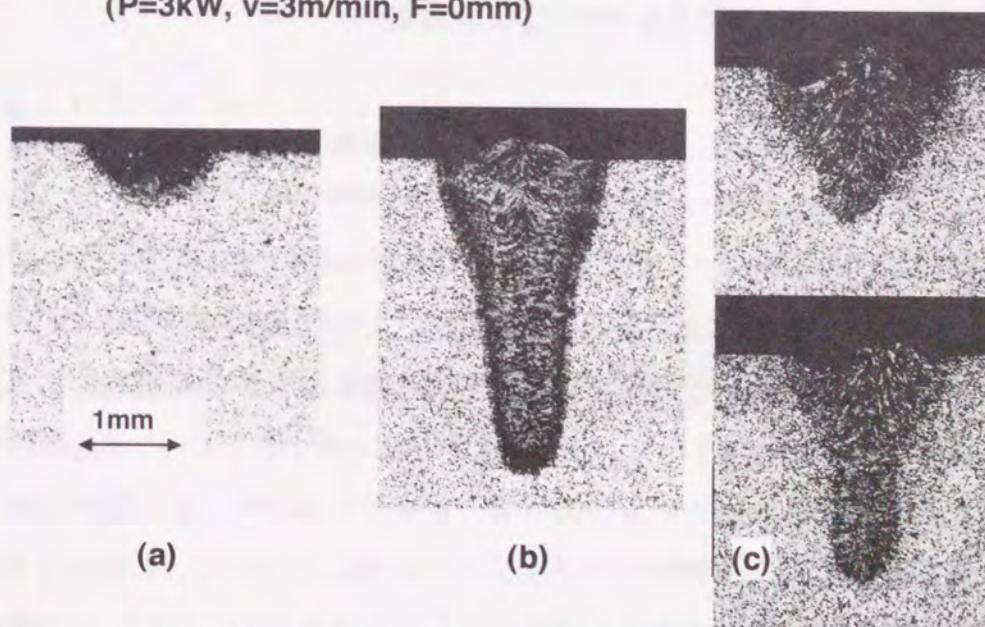


Fig.2.12 Cross sections at various gas flow rate Q_{Ar} (a) 5 l/min, (b) 30 l/min and (c) 60 l/min. ($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $F=0\text{mm}$)

場合の溶け込み特性との関係を示す。それぞれの代表的なビード断面写真をFig.2.12の(a)~(c)に示す。半値ビード幅は Q_{Ar} によらずほぼ一定であるが、 $Q_{Ar} < 20 \text{ l/min}$ のときは、ガス流量が低下すると溶け込み深さが急激に低減して、ビード断面積が著しく小さいことがわかる。このことは、プラズマブルームによりビームが吸収され、キーホールに達するレーザエネルギーが著しく低減することを示している。このことは $Q_{Ar} < 20 \text{ l/min}$ でガス流量の減少と共に、肉眼観察でブルームの発光量が急激に増大することからも推察される。 $20 < Q_{Ar} < 50 \text{ l/min}$ の領域ではガス流量によらず安定した深い溶け込みが得られ、ビード幅・溶け込み深さともにほぼ一定となる。但し、ガス流量低減に伴って、溶接部の発光強度は次第に低下するのが観察された。肉眼観察は主としてブルームの発光状況を反映すると考えられるので、この流量域では、アシストガスはブルームを冷却する働きはあるが、キーホールへはあまり影響を及ぼさないものと推察される。 $Q_{Ar} > 50 \text{ l/min}$ の領域では、ビード幅・溶け込み深さとともに不安定に変動するハンピングビードの領域となり、Fig.2.12(c)に示すように同じ溶接条件で得られたビード内で溶け込み深さが2倍程度以上も変動していることが解る。

(b) 焦点位置の影響

Fig.2.13は標準条件($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $Q_{Ar}=30 \text{ l/min}$, $M^2=3.6$, $f/\text{No}=7.1$)の中で焦点位置Fのみを変化させた場合のビード断面形状との関係を示している。図中に示すように焦点位置Fは焦点に対するワーク表面の相対位置であり、ワーク内に焦点がある場合を $F<0$ 、ワーク上方に焦点がある場合を $F>0$ と定義した。

$-2 < F < 2\text{mm}$ の範囲ではほぼ一定の溶け込み特性を示すが、レーザビームの焦点深度が浅いので、 $|F|$ がある程度以上に大きくなると、僅かな $|F|$ の変化で溶け込み深さが大きく変化する。Fig.2.14は(a) $F=0$ および(b) $F=+3\text{mm}$ でのビードのマクロ断面写真を示している。 $F=0$ ではアスペクト比が大きく、ビードの断面積も大きいのに対して、 $F=+3\text{mm}$ ではアスペクト比の小さい熱伝導型となり、ビード断面積も極めて小さい。

ここで注目されるのは、レーザ溶接中に観測されるブルームの発光強度である。ブルームの発光強度は溶け込み深さ h の大きい $F=0$ よりも、 h の小さい $F=+3\text{mm}$ のほうが、遥かに強かった。このことは焦点位置によって、レーザエネルギーがブルームおよびキーホール中で消費される割合が異なることを示している。すなわち、 $F=0$ ではレーザエネルギーの多くはキーホール中で消費されるのに対し、 $F=3$ 付近ではブルームで吸収されると共に、表面からの反射によって失われることが明らかである。

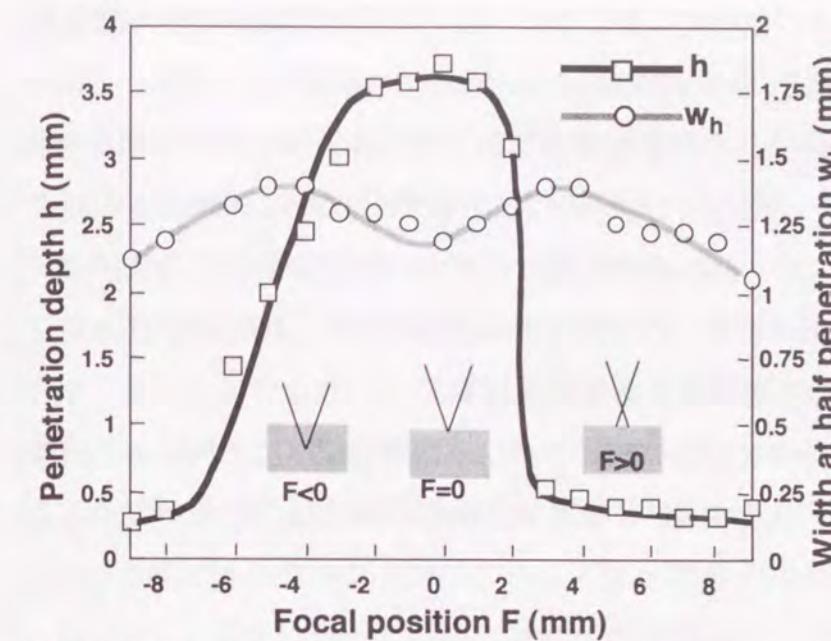


Fig.2.13 Effect of focal position on penetration depth h and bead width w_h .
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$)

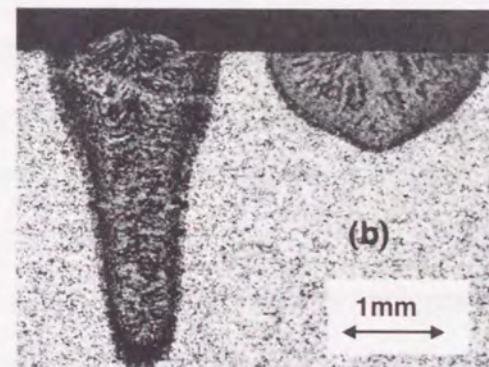


Fig.2.14 Cross sections at various focal position (a) $F=0$ and (b) $F=+3\text{mm}$.
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$)

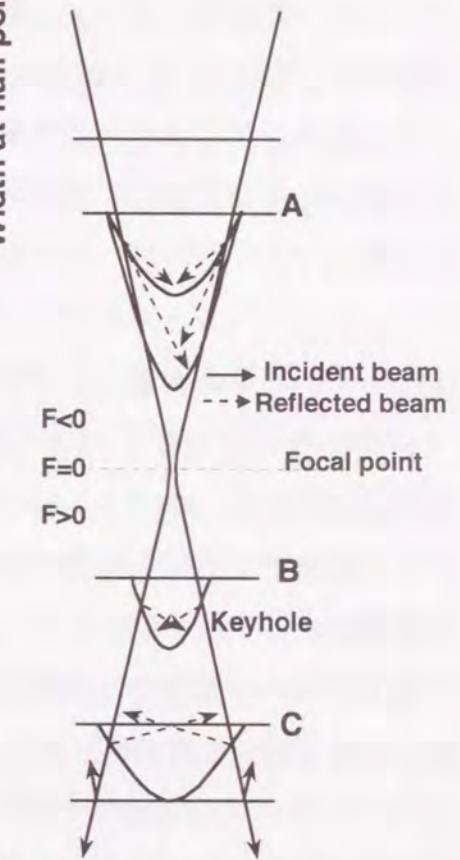


Fig.2.15 Schematic diagram showing interaction between beam and keyhole¹⁷⁾.

このような深溶け込み溶接となる限界パワー密度は、Fig.2.13では $-6\text{mm} < F < 3\text{mm}$ の範囲であり、Fig.2.5から $F=+3\text{mm}$ でのスポット径が約 $\phi 540 \mu\text{m}$ 、 $F=-6\text{mm}$ でのスポット径が約 $\phi 800 \mu\text{m}$ であるので、レーザパワー 3kW の86%との比により限界パワー密度は $0.5 \sim 1.1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ と計算される。この値は従来報告¹⁵⁾されている深溶け込み溶接の限界パワー密度 $0.4 \sim 0.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ とほぼ一致している。

また、Fig.2.13よりFの正負によって限界パワー密度付近の溶け込み深さが異なることがわかる。このようなFの正負による差異は、Fig.2.15を用いて次のように説明される¹⁷⁾。F<0の場合にはワーク表面がビームの収束側にあり、図中のA点に示すような浅い

キーホールが形成されたとき、その側壁に入射したビームの反射光はキーホール底部に向かい再度キーホールに照射される、いわゆるWall-focusing効果¹⁷⁾が生じる。これに対し、 $F>0$ の場合はワーク表面がビームの発散側となり、キーホールが浅いと図中のB点に示すようにキーホール側壁へ照射されたビームはキーホール外に反射するため、Wall-focusing効果は生じない。ビームの照射角度とキーホールの側壁との角度の違いによって、Wall-focusing効果が生じ易い $F<0$ の方が、 $F>0$ に比べて比較的小さなパワー密度により深溶け込み溶接へ遷移するものと考えられる。

このようにレーザビームの焦点深度が浅いため、パワー密度の僅かな差異により溶け込み深さは大きく変化するので、焦点位置Fの管理は極めて厳密に行う必要があることが解る。

(c) レーザパワーの影響

標準条件の中でレーザパワーPのみを変化させた場合の溶け込み深さとの関係をFig.2.16に示す。約 $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ であるP=1kWで深溶け込み溶接となり、実験したパワー範囲では溶け込み深さはP>1kWではレーザパワーの増大によって、ほぼ直線的に増大する。

以上のレーザ溶接では実験室的にはv, Q_{Ar} , F, P等のパラメータが与えられたとき、溶接特性は極めて再現性が良いことがわかった。

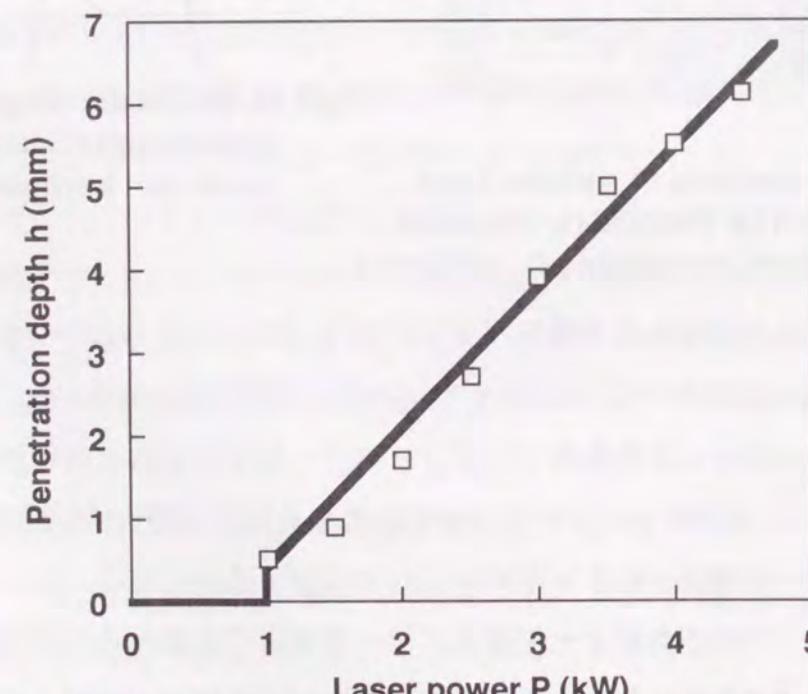


Fig.2.16 Relationship between laser power P and penetration depth h($v=3\text{m/min}$, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$, $F=0\text{mm}$).

2.3.3 継ぎ手の機械的性質

レーザ溶接の速度は数m/min程度と比較的高速で低入熱であるため、抵抗スポット溶接やアーク溶接などに比べて優れた継ぎ手の性質が期待される。本項ではテーラードプランクに用いられる板厚0.8mmの軟鋼板(JIS:SPC)の突き合わせ溶接部の継ぎ手の性質を示す。溶接条件はP=4kW, v=4m/min, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$, F=0mmである。

Fig.2.17は溶接ピードの横断面のヴィッカース硬度を示している。溶接部は高速溶接に伴う高冷却速度のため、母材の2倍程度まで硬度上昇しているが、その幅は1mm程度と狭く、また、入熱量が少ないため溶融部の近傍の熱影響部の硬度変化はほとんど認められない。このように溶接部、熱影響部の硬度上昇範囲が1mm程度と狭いため、プレス成型時に十分な伸びを維持することが、他の溶接方法に比べた特長であり、テーラードプランク工法にレーザ溶接が用いられる理由の一つになっている³⁾。

軟鋼板では溶接部の硬度が母材に比べ上昇するため、静的な引っ張り強度は母材より高く、ほとんどの場合レーザ溶接部ではなく母材から破断した。Fig.2.18は突き合わせ継ぎ手の合わせ部の隙間量を変化させ、溶接部のアンダーフィル量と、引っ張り剪断強度との関係を示したものである。母材に対する溶接部の残存板厚比T/T₀が0.7以上では母材破断となった。溶接部での破断を防止する限界(T/T₀~0.7)となる突き合わせ隙間の限界値は、板厚0.8mmの場合に0.15mm程度であり、素材加工には高い寸法精度が要求される。

Fig.2.19は残存板厚比T/T₀=0.8におけるレーザ溶接部の平面曲げ疲労強度を、母材と比較したものである。疲労限が母材に比べて10%程度低下するが、ほぼ母材と同等の疲労強度を有している。破断部を観察すると溶接部近傍の母材(熱影響部)から板厚方向に破断し、溶接部内に亀裂が進展することは無かった。

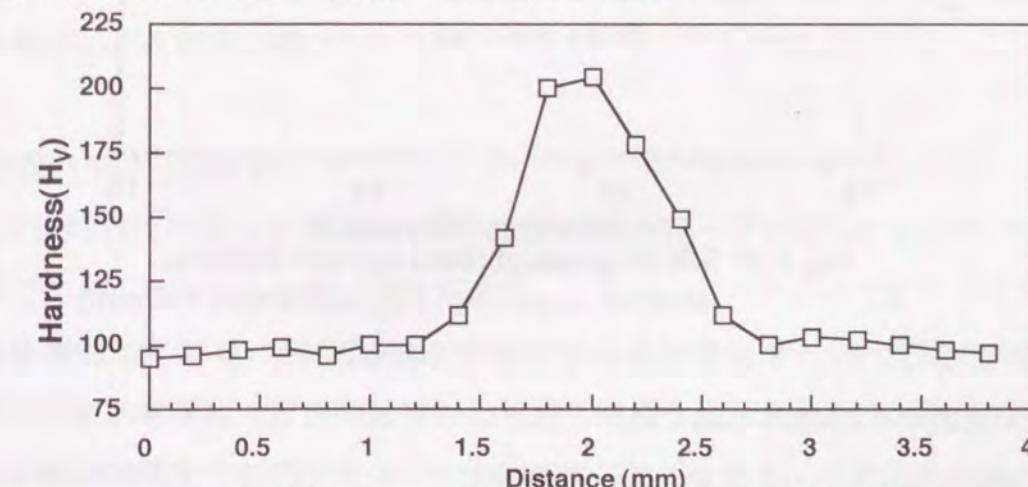


Fig.2.17 Hardness distribution of welding bead.
(JIS:SPC, P=4kW, v=4m/min, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$, F=0mm)

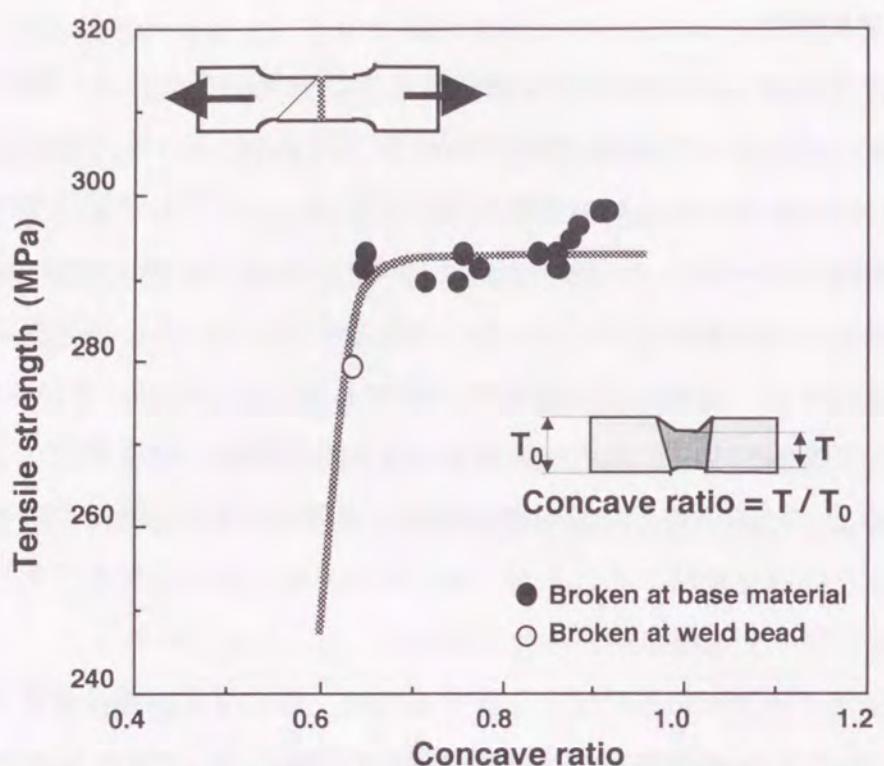


Fig.2.18 Relationship between concave ratio and tensile strength.
($P=4\text{kW}$, $v=4\text{m/min}$, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$, $F=0\text{mm}$)

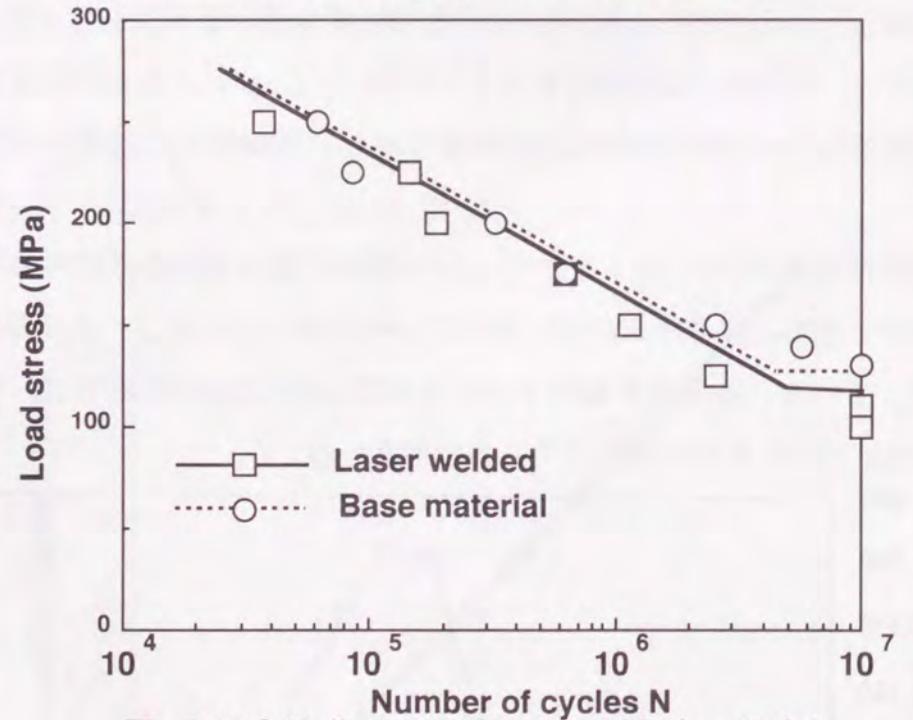


Fig.2.19 S-N diagram of laser welded material.
($P=4\text{kW}$, $v=4\text{m/min}$, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$, $F=0\text{mm}$)

以上のように、レーザ溶接においては自動車部品に用いられるような薄板では数 m/min の高能率の溶接が可能であり、継ぎ手の機械的性質も自動車用部品として十分に高い性能を持っている。また、レーザ溶接パラメータが所定の範囲に管理されていると、溶接品質の再現性は高く、自動車部品の溶接に適していることが解った。

2.4 レーザ溶接品質の信頼性における問題点

2.4.1 光学部品の経時変化

Fig.2.20は伝送および集光用の5枚の金属ミラーを通過した後の加工点でのレーザパワーであり、数ヶ月程度の長期間にわたって記録したものである。図では発振器の出力に対する、加工点でのレーザパワーの比をスループットとして定義している。横軸はレーザ発振器が稼働した積算時間を表しており、約600時間程度使用するとスループットが12~15%も減少するのが認められる。

その場合、反射鏡表面にはオイルミストおよび微少な金属粉が付着しているのが見られた。このような汚染は生産現場での雰囲気に含まれるオイルや粉塵、溶接部から発生する金属蒸気の存在を考えるとほとんど避けられない。ミラーを有機溶剤でクリーニングすると不連続にスループットが回復するのが解る。現時点では作業開始前にオペレータがスループットを測定し、これを勘案して発振器出力を設定することにより加工点でのレーザパワーが所定の値になるように制御しているが、レーザパワーが同一でも劣化した光学部品では熱誘起光学歪み¹⁸⁾により集光性能が異なり、加工品質への光学部品の経時劣化の影響は避けられない。

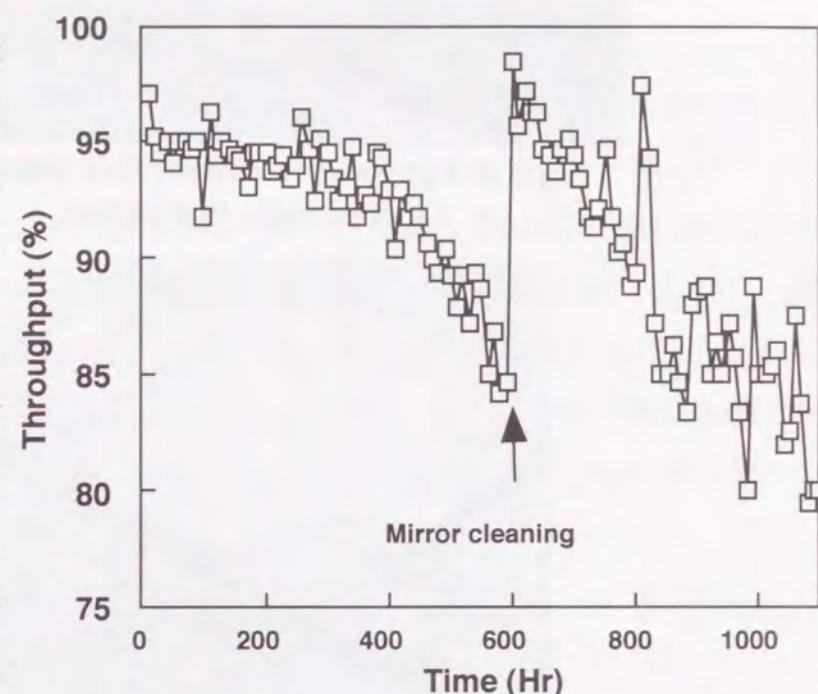


Fig.2.20 Long term record of throughput for five-mirror optics.

2.4.2 溶接パラメータ変動

Fig.2.21は3次元形状の板厚0.8mmの軟鋼板2枚をレーザで重ね溶接したビードの裏面の写真であり、加工途中に焦点位置が変動したため、ビードの途中からパワー密度不足により非貫通状態となった例である。このような溶接パラメータの変動の原因は、アシストガスノズルへのスパッタの付着によるガス流量や流れ方向の変化や、透過光学系の汚染による熱誘起光学歪み、さらに部品の精度不良による焦点位置変化や目違いなど数多い。光学部品の劣化により数週間程度の長い時間軸で発生する場合もある。

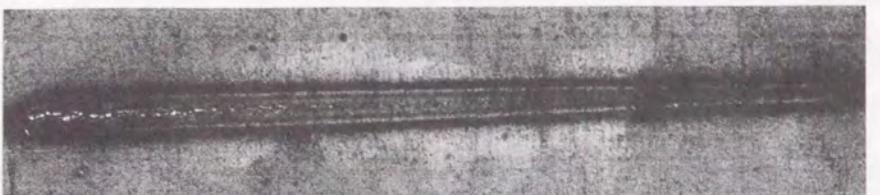


Fig.2.21 Appearance of back side bead in case of focal position fluctuation.

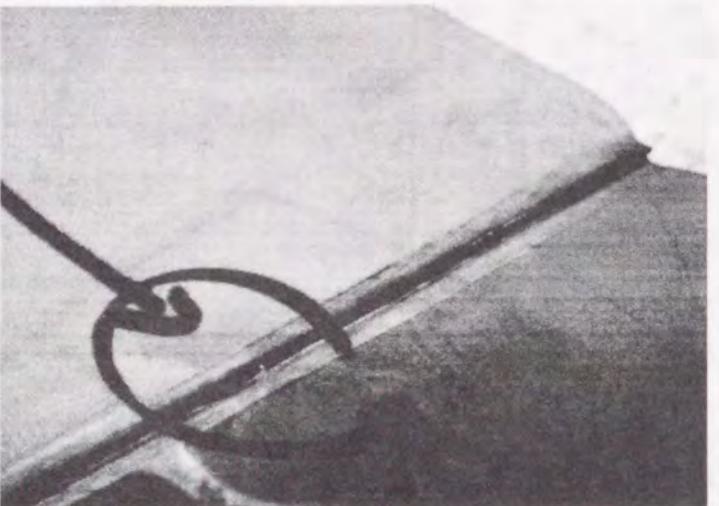


Fig.2.22 Photograph of typical pitting defect in tailored blank.

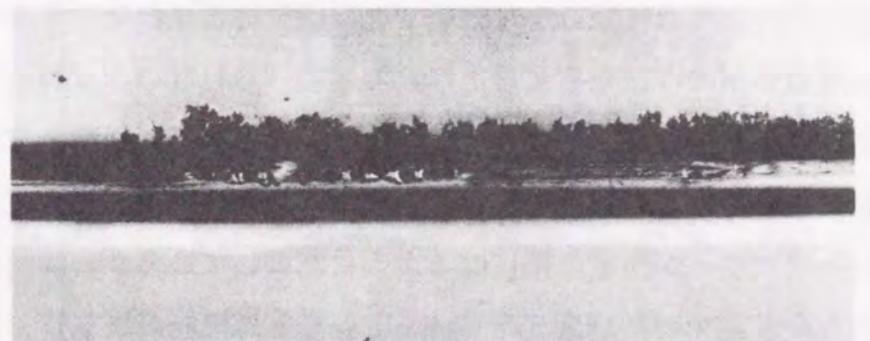


Fig.2.23 Photograph of heavy underfill of lap joint due to excess gap.

2.4.3 ワークの加工精度および汚染

レーザビームは小さなスポットに集光されるので、従来溶接法では問題にならないような突き合わせ面の小さな傷や合わせ面精度でも非常に敏感に影響され、新たな問題を提起している。Fig.2.22は板厚0.8mmを突き合わせるテーラードブランク溶接の例である。ビードには直径約0.5mmの穴あき欠陥が発生しているのが見られる。この種の欠陥は搬送途中に付いた微少な傷の部分に発生したものである。しかし、切断加工の精度や搬送途中の突き合わせ面の管理は製造コストとのトレードオフとなり、現状ではこの

ような突発的な不具合の発生は皆無にはできない。また、車体ボディの溶接などの重ね溶接においては、合わせ部の傷に加えて前工程で付着した油分などの汚染物質が残存していても、同様の突発的な欠陥が発生する。

Fig.2.23は自動車ボディの3次元溶接の例で板厚0.8mmと0.7mmの重ね溶接でのビード表面写真である。ワークの板間の隙間が過大となった部位において、アンダーフィル欠陥が生じ不規則なビードとなった例である。レーザによる重ね溶接ではフィラーワイヤ等を用いない場合は許容される隙間は板厚の30%程度とされている¹⁹⁾。しかし、現実には合わせ面の精度不良や歪みによって、通常の抵抗スポット溶接を前提とした治具では、その数倍もの隙間が存在する場合がある。このため、圧力をかけて隙間を矯正しながら溶接する技術が用いられるが、局所的なワークの歪みの発生部位などにおいては、予測できない欠陥発生の可能性がある。

2.5 レーザ溶接の品質保証の現状

2.5.1 レーザ加工機の信頼性向上

2.3節ではレーザ溶接は十分に清浄なワークに対して、溶接パラメータ(v, P, Q)を把握・管理した状態では再現性は高く、自動車部品製造に適した加工法であることを示した。これに対し、2.4節ではレーザ発振器ならびに伝送・集光に用いる光学部品が実生産においては、オイルミストや粉塵の浮遊する雰囲気に設置されるため光学部品の寿命は限られていること、各種溶接パラメータが短期・長期に渡って変動すること等により溶接品質に問題が生じることを示した。

このような問題点を解決するために、発振器ならびに、光学部品メーカーでは性能改善の努力が継続的に行われている。しかし、現状のレベルでは高いパワーレベルにおいては、発振器用の光学部品の劣化が避けられないため、レーザビームのパワーやパワー密度を長期間に渡って一定に維持することはほとんど不可能である。また、それらを生産現場でモニターする技術も開発されていない。ワークに照射する集光点のパワー密度や加工点での実効的なアシストガス流量が生産ラインでは測定できない。

2.5.2 溶接品質のインプロセスモニタリングの可能性

発振器や光学系が十分管理されていても、ワークの継ぎ手の精度、汚染に起因する突発的な不良が生産現場では発生する可能性があることも例を挙げて示した。生産ラインにおけるこれらの現状を考えると、溶接プロセスを監視し、溶接不良の発生の有無をイ

ンプロセスでチェックするモニタリング技術を開発し、品質保証することが必須である。

レーザ溶接を注意深く観察すると、プラズマ発光強度や音響信号が、良好な溶接時と異なって感じられた際に、ワークに溶接不良が発生することは、しばしば経験することである。経験の豊かなレーザ加工オペレータはプラズマ発光強度の色味(色温度)によってアシストガスの流量や焦点位置の良否を判断し、また、プラズマ発光や音響信号の不連続性により、穴あき欠陥などの突発的な現象をある程度知覚することができると言われている。このように、レーザ溶接中に観察される様々な物理量の観察から溶接品質をモニタリングする可能性があることを示唆している。

2.5.3 レーザ溶接のインプロセスモニタリング技術の研究動向

現状ではほとんどが研究室レベルであるが、レーザ溶接時に発生する様々な現象に関する物理量を対象とする、モニタリング法がいくつか報告されている。以下にそれぞれの検出方法とその実生産への適用の可能性を述べる。

(a) プラズマ発光強度

プラズマ発光強度と溶接パラメータの相関についてはMiyamotoらによって最初にモニタリングへの適用が検討された¹⁵⁾。その後、Beyerらの複数のグループにより研究²⁰⁾されている。溶接条件が変化すると、プラズマ発光強度が高速かつ大きな変化幅で変化するが、市販の光検知センサーは極めて高速に応答・検知することができる。発光信号は回折の影響が小さく直進性が大きいため、空間分解能が高く、プラズマプルームやキーホールのいずれの部位から発生したかを識別することも可能である。また、生産現場の環境光に対して溶接部からの発光強度が大きくノイズの影響を受けにくいため、溶接品質の判定に適していると考えられる。また、これまでプラズマプルームの性質は分光器等を用いて比較的詳しく研究^{21~23)}されているので、検出信号の物理的な意味も理解しやすい。しかし、溶接現象とプラズマ発光強度の系統的な関係は明確にされておらず、溶接不良の判定性能も現時点では実生産ラインでの実用域には達していない。

(b) アコースティックエミッション

キーホールから噴出するガス圧の変化に起因する音響信号も溶接現象と関係があることはしばしば経験する所があり、モニタリングの対象としても研究されている²⁴⁾。ただ

し、音響信号は、波長が数十cm程度であり回折効果が大きいため空間的な分解能は上記の発光検出に比べて遙かに劣る。また、音響信号と溶接品質との関連に関する研究は少なく、音響発生プロセスについては未だ不明な点が多い。さらに、生産現場では各種機械設備が音響信号を生じるため、これら環境音の影響を受け易い。そのため、これまでにテラードブランクへの採用の試みが報告されているが²⁵⁾、長期間の使用での信頼性の問題で実用化されるに至っていない。

(c) レーザの反射光

Ishideらによって、YAGレーザによる溶接時の溶融池からの反射光を、プラズマ発光強度と共にモニタリングする方法が報告されている²⁶⁾。しかし、レーザビームの反射特性は極めて複雑であり、溶接現象と直接に関係づけることは困難である。また、信号強度と溶接特性との関係の直線性が原理的に低く、ビード形状が熱伝導型か深溶け込み型かの判別ののようなオン・オフの判定に限定される。

(d) プラズマ電界強度

Steenらによってプラズマ電界強度のモニタリングが検討されている^{27,28)}。プラズマ電界強度はプラズマプルームの電子とイオンの拡散速度の差を検出対象としており、レーザノズルと一体化されたセンサーに特徴がある。しかし、溶接パラメータの変化との相関は解明されておらず、また空間分解能が不充分であり、実用化の域には達していない。

(e) 治具の温度上昇

Maruyamaらによって自動車のブーツバンドの溶接用の治具内に熱電対を埋め込み、治具の温度上昇の程度によって、溶接ビードの有無を検出する手法が実用化されている²⁹⁾。しかし、(a)~(d)に述べた検出信号と比較して、レーザ溶接現象に対して間接的であり、治具への熱伝導時間により応答性は(a)~(d)までの物理量に比べ一桁以上低い。

(f) ビードの表面状態の検査

Natsumiらによって自動車のテラードブランク材のビード表面を光切断法で画像処理することにより、表面ビードの形状の検査が開発されている³⁰⁾。ビード表面に現れた欠陥の検査方法として他のモニタリング手法と相補的に用いることは有効であるが、こ

の方法では装置の物理的制約からビード表面形状の観察は100mm程度、溶融池から距離が必要であるため、フィードバックには使用できず、また画像処理に時間を要するため突發的な変動検出には適さない。

2.6 本研究の着眼点

これまで述べたようにレーザ溶接のモニタリング手法は研究室レベルでは数多く提案されているが、現時点では実際の生産ラインで実用化された例は極めて少ない。それは、検出信号の物理的意味を十分に理解しおらず、また、検出性能および長期の使用に耐えうるセンサー自体の信頼性も不十分なためである。

Table2.5にこれまで述べた検出信号を比較している。表には検出信号と物理的現象の理解度、応答性、S/N比を等級分けして表している。これらを検討した結果、本研究では検出信号としてプラズマ発光強度を選択することにした。この理由として、先ず、溶接条件の変化に対する信号の変化が大きく応答性が高いため、ダイナミックレンジと時間分解能に優れていることが挙げられる。また、回折現象が小さく直進性に優れているため、プラズマプルームやキーホールからの発光を分離できる空間分解能を持っている。さらに生産ラインでの耐環境性に優れS/N比が高く取れることも有利な条件である。

2.3節では、溶接パラメータによってプルームとキーホールに与える影響がそれぞれ異なることを示した。このことは、キーホールとプルームからの信号を区別して識別できるモニタリング手法が推奨されることを示している。これまでに報告されている研究例では、プラズマ発光強度の検出には全て単一のセンサーを用いている。溶接パラメータによってはキーホールとプルームに与える影響がそれぞれに異なることを考えると、両発光強度を区別せずに検出する単一のセンサーでは、両信号の寄与を区別することはできない。このため、単一センサーから得られる情報量は極めて少なく、生産ラインで実用化されるに至らなかったものと考えられる。

これらのことから勘案して、本研究では複数のフォトセンサーを用いて、プラズマとキーホールの発光強度を分離し、単一のセンサーを用いる既存の方法に比べて、質・量ともに優れた情報を採取することができる高度なセンシングシステムの開発を狙いとした。発光の検出対象となるのは、レーザ誘起プラズマであり、その広い波長領域における発光を検出できる応答性の良いセンサーの選択、検出信号の物理的意味の把握が重要な課題である。これらの発光強度の解析結果を基に、自動車製造プロセスで使用できる

検出能力と信頼性の高いモニタリングシステムの開発を目指した。

Table 2.5 Comparison of sensing signal in weld quality.

Sensing signal	Understanding of phenomena	Response speed	Signal-Noize ratio
a) Light emission from plasma	A	A	A
b) Acoustic emission	B	A	C
c) Laser reflection from molten pool	C	A	A
d) Plasma charge	C	A	A
e) Temperature of jig	C	C	B
f) Bead surface figure	C	C	A

(Relativity evaluation: A:Excellent , B:Good , C:Poor)

2.7 結言

レーザ溶接で得られる継ぎ手の機械的性質を調査し、自動車部品への適用の可能性を検討した。また、自動車製造プロセスのような大量生産ラインへのレーザ溶接の適用時の問題点を整理した。本章で得られた結果は以下のように要約される。

- (1) レーザ溶接では高速度で、アスペクト比の高い溶接ビードが得られ、その継ぎ手の機械的性能も優れており、自動車部品製造での薄板の溶接に優れたポテンシャルを持っている。
- (2) レーザ溶接では光学部品の経時劣化等により、予測不可能な溶接不良の発生の可能性があり、また継ぎ手の加工精度不良や汚染に敏感であり、レーザ発振器や光学系、アシストガスノズルなどは長期運転で変動が避けられない。自動車用薄鋼板のレーザ溶接では、溶接品質のモニタリング技術が必須である。
- (3) 既存のモニタリング方法では、信号の物理的意味合いが把握されておらず、検出速度や欠陥検出性能が不十分であり、自動車製造のような大量生産ラインへの適用は困難であり、新しいモニタリング技術の開発が必要である。インプロセスモニタリングの検出対象としては、物理現象の相関、応答性、S/N比に優れたプラズマ発光強度が最も適している。
- (4) ガス流量や焦点位置などの溶接パラメータによって、キーホールおよびプルームの発光状態に与える影響が異なり、これらを区別して検出するモニタリングシステムの開発が望まれる。

第3章 深溶け込みレーザ溶接の発光特性

3.1 はじめに

高パワー密度のレーザ溶接においては高温に加熱された金属の蒸発反跳力によってキーホールが形成・維持され深溶け込みビードとなる。このときキーホール内部はプラズマ化した金属蒸気で充たされ、その一部はプルームとなって外部に噴出する。条件によってはプルームと入射レーザビームは相互作用し、入射ビームを吸収して溶け込み深さに影響を与える。キーホール内部の金属蒸気プラズマおよび噴出したプルームの温度または発光状態はキーホール現象の反映と考えられるので、レーザ溶接品質をモニタリングする上で重要な情報を提供するものと期待される。

本章では、レーザ溶接における深溶け込み溶接の観察手法として先ず、プラズマプルームの性質を分光分析によって計測し、プルームの基本的性質である温度・電子密度を求め、レーザビームとプルームの相互作用を評価した。さらに、モニタリング用のセンサーとして広い波長感度、高速応答性を有し、生産ラインでの長期・連続使用に耐えるフォトダイオードを選択し、これを用いるセンサーシステムを開発した。このシステムでは複数の光センサーを用いるが、光センサーの受光強度の検出角度特性に基づき、キーホールプラズマとプラズマプルームの発光強度を分離検出する手法を提案した。また、キーホール形状を円筒とする単純化したモデルを用いて、検出角度特性の計算と実験結果の比較を行い、キーホール内部のプラズマ発光強度の密度分布を解析した。

3.2 レーザによる深溶け込み溶接の観察

3.2.1 キーホール内の力のバランス^{31,32)}

集光したレーザビームが 10^6 W/cm^2 オーダーの高いパワー密度に達すると、キーホールが形成され効率的にレーザが吸収されることにより、Fig.3.1に示すようなレーザ溶接の典型的な深溶け込みビードが得られる^{33~35)}。

深溶け込み溶接で形成されるキーホールは、Fig.3.2に示すようにキーホール壁面

から蒸発する金属粒子のアブレーション圧 **Fig.3.1 Typical cross section of deep penetration bead in laser welding.**



力 P_{abl} と溶融金属の表面張力 P_γ との圧力の均衡によって維持されると考えられる。 P_{abl} はキーホールを押し広げる力として働き、次式で与えられる。

$$P_{abl} = m n_g u_g \quad (3.1)$$

ここで m =蒸発粒子の質量、 n_g =密度、 u_g =速度である。

P_γ はキーホールを閉じる力として働き、次式で与えられる。

$$P_\gamma = \gamma / a \quad (3.2)$$

ここで、 γ =表面張力係数、 a =キーホール半径である。

Kroosらはキーホール半径の関数として

P_{abl} と P_γ を与える式を導き、Fig.3.3に示すように、S、Nの2つの交点において $P_{abl} = P_\gamma$ の平衡となることを示した³¹⁾。ここで、平衡点のキーホール半径が変位した際に発生する($P_{abl} - P_\gamma$)なる力が、変位を押し戻す方向の復元力となるのはS点のみで、安定な平衡点である。このようなS点における P_{abl} と P_γ の圧力平衡は、金属蒸気の噴出や溶融金属の対流などの外乱によって変動を受けるが復元力が駆動力となってキーホールの形状は平衡点Sを中心に振動的に変化すると考えられる。このようなキーホールの時間変動はキーホール形態に依存すると考えられるが、それについては第4章で扱うものとする。

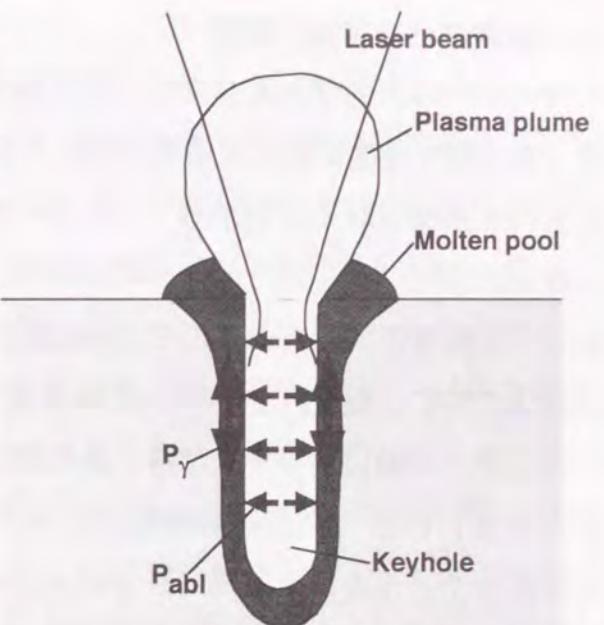


Fig.3.2 Schematic of pressure balance in keyhole.

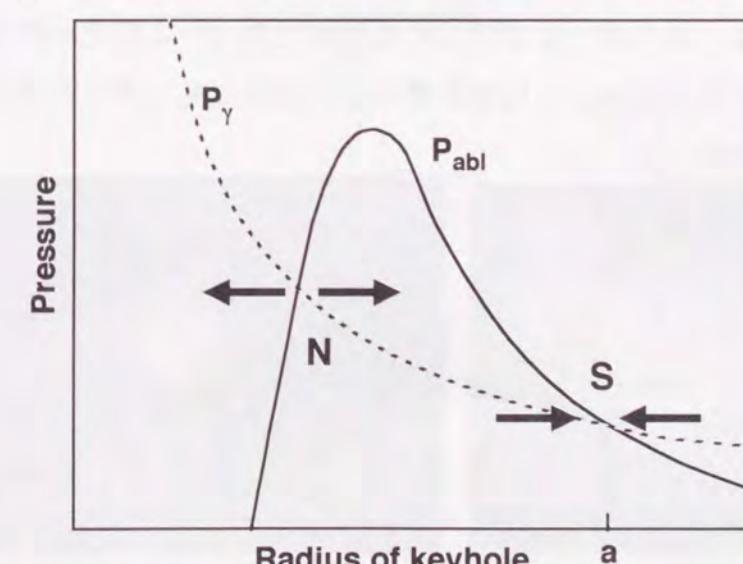


Fig.3.3 Relationship between radius of keyhole and ablation pressure P_{abl} , surface tension P_γ .³¹⁾

3.2.2 深溶け込み溶接の観察

キーホールの内部およびプルームを構成する金属蒸気プラズマは溶接現象の反映であり、その発光強度を検出することによりレーザ溶接品質に関する重要な情報が提供されるものと推察される。しかし、キーホール内のプラズマ(以下ではキーホールプラズマと呼ぶ)に関しては、キーホール壁面で取り囲まれていることおよび、キーホールに隣接して高輝度のプラズマプルームが遮蔽するために観測または計測は容易では無く、その特性に関する報告例もほとんどない。

キーホール開口部の形状は露光量を調整することによりプルーム越しに撮影することができる。Fig.3.4(a)は溶融池にほぼ垂直方向から撮影した結果である。撮影には35mmスチールカメラを用い、シャッター速度は1/1000秒とした。露光が過大なときには溶融池表面を高輝度のプラズマプルームが覆っており、内部を観察することはできない。NDフィルターを用いて露光量を減少させると、Fig.3.4(b)に示すようにレーザビーム軸中心付近に円形の強い発光域が見られ、キーホールの輪郭が観察される。ただし、その輪郭は鮮明ではなく、キーホール開口は一定形状を維持するのではなく、シャッター速度(1/1000秒)より高速に形状が変化することを示唆している。

キーホールプラズマの性質はキーホール内の状況を反映すると考えられ、ビード形態に関する直接の情報が含まれると期待される。プラズマプルームはキーホールプラズマの影響に加えて、ワーク上でレーザビームと相互作用することから、キーホールプラズマとは異なる情報が得られることが予想される。

前章で考察したように溶接パラメータによってプルームとキーホールの各プラズマに与える影響が異なるため、キーホールプラズマの発光をプルーム発光と分離して検出できれば、従来報告されている方法よりも情報量の多い高度なモニタリング手法が実現するものと期待される。

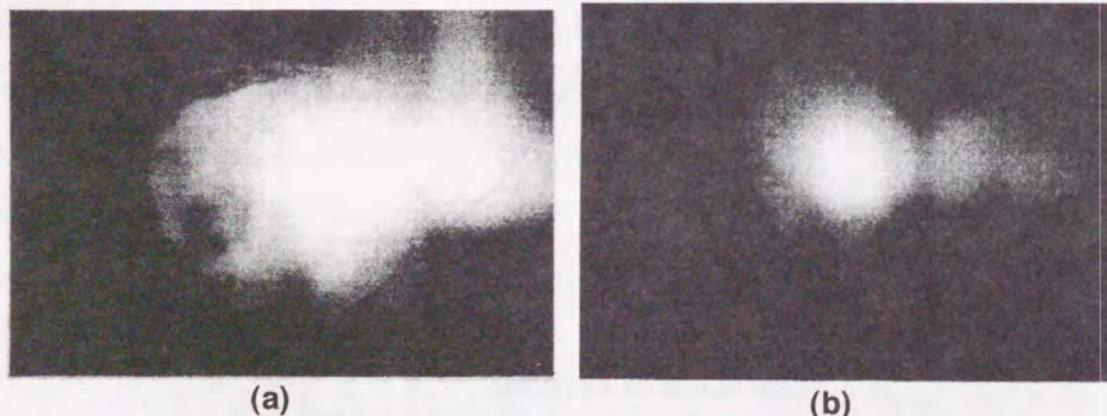


Fig.3.4 Photograph of surface of molten pool taken with ND filters (a) 1/8, (b) (1/8)x3.

3.3 プラズマプルームの性質

3.3.1 分光分析の実験方法

プラズマプルームの分光実験に用いたCO₂レーザ発振器は、CO30PMSである。アシストガスは同軸のガスノズル(Φ5mm)を用いてArガス($Q_{Ar}=30\text{ l/min}$)によりシールドを行った。レーザパワーは低次モードでP=1.5kW、高次モードでP=2.5kWとした。

本研究での分光実験にはニコンP250(分解能0.06nm)モノクロメータを用いた。Fig.3.5にプラズマの発光分析に用いた実験配置を示す。プラズマプルームは溶接の進行方向に垂直な面内で検出角度15度で設置したレンズを用い、溶融石英の光ファイバー端面に5倍に結像した。この検出角度ではキーホール内部の開口部付近の深さ約0.2mmの領域の発光もモノクロメータに取り込まれることになる。光ファイバー端面には矩形開口を設け、プルームの縦0.5mm×横0.25mmの矩形領域からの発光を受光した。モノクロメータのスキャン速度は5nm/sでサンプリング速度850HzでA/D変換し、コンピュータに取り込んだ。これよりサンプリング波長間隔は約0.006nmとなる。

レーザ誘起プラズマは時間変動が激しく、波長をスキャンしながら採取するスペクトルデータへ影響を与えるため、同一条件で与えられた波長域を多数回スキャンを行い時間的に平均化する手法を取った。1本のビードから同一条件下で一連のスペクトルデータを取得するため、直径620mmの円盤状のテストピース(軟鋼、板厚0.8mm)を2枚重ね、その外周付近を重ね溶接した。実験条件は溶接速度v=1.4m/min、アシストガス流量 $Q_{Ar}=30\text{ l/min}$ と一定とし、焦点位置Fを主なパラメータとした。

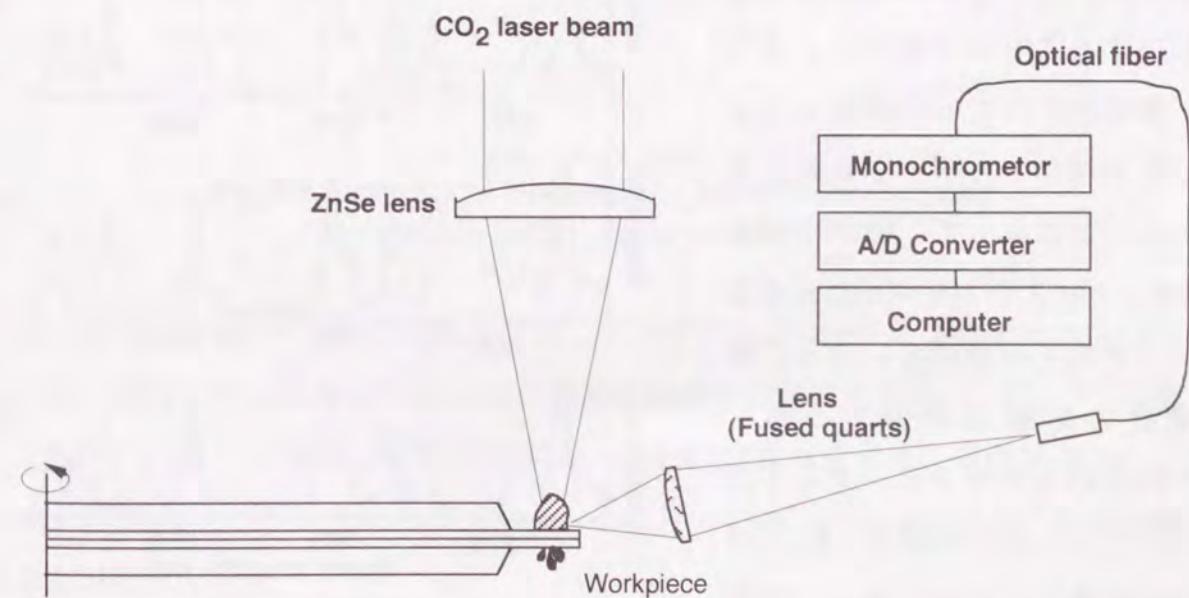


Fig.3.5 Schematic diagram of experimental setup for spectral analysis.

3.3.2 スペクトル強度の時間平均

後述するように、プラズマプルームの上部の輝度は比較的小さく、キーホール直上の高さ0.5mm以下の領域に約90%の発光領域が集中している。そこで、ワーク表面に接するビーム軸上の縦0.5mm×横0.25mmの領域での375.824nm(FeI)の時間変化を測定し、Fig.3.6に示した。溶接熱源としてCW発振のレーザビームを用いているにも拘わらず、発光強度は激しく時間変動を示しており、強度がほぼ0となる瞬間も存在することが解る。

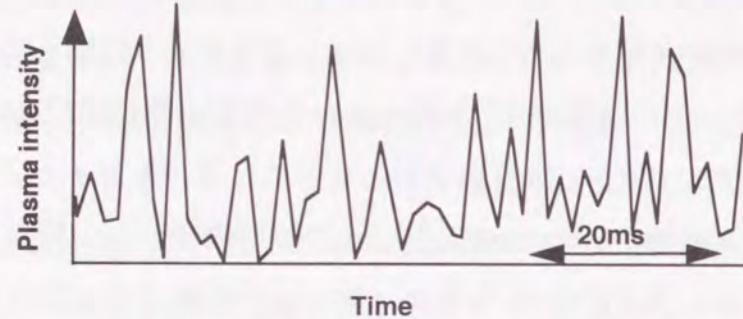


Fig.3.6 Time change in spectral intensity at 375.824nm(Fe I) during welding.

Fig.3.7 (a)は1回の波長スキャンデータにより得られたスペクトルデータを示す。スペクトル線には時間変動に起因する細かいランダムなノイズが重畳しているため、正確なスペクトル線の同定や強度を検出することはできない。そこで、複数回にわたって波長スキャンしたスペクトルデータを順次加算することによって、時間平均を求めた。Fig.3.7 (b)~(d)に示すように、平均化回数が多いほど、時間変化の影響は減少するが、10~15回のスキャンデータの平均化によって、良く分離したFeスペクトルを得ることができた。本研究では平均化回数は10回とした。

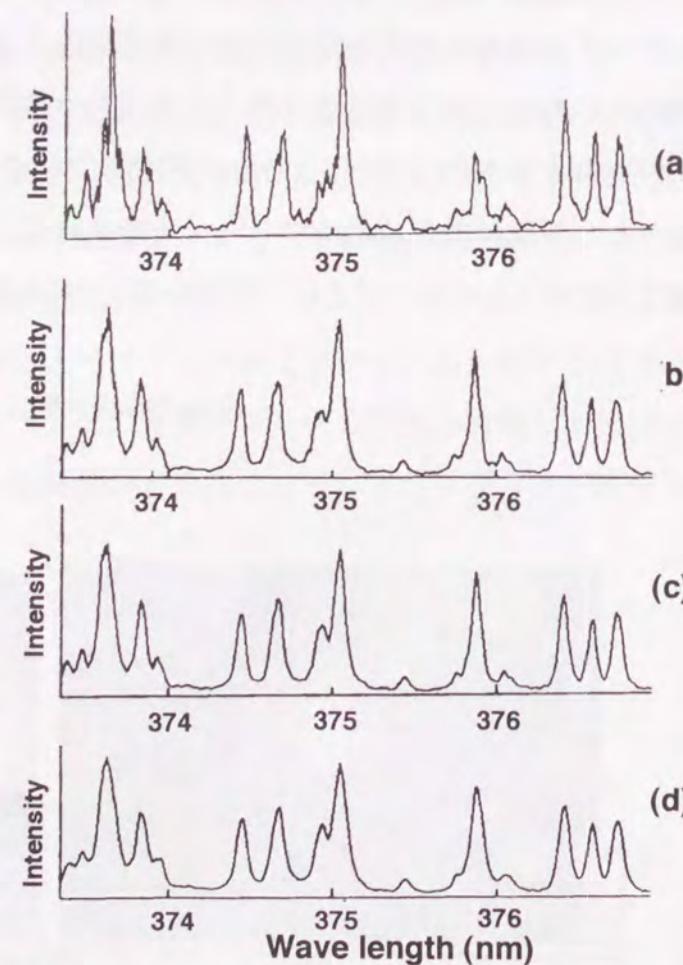


Fig.3.7 Spectrum of plasma plume averaged at scanning times:(a) 1, (b) 10, (c) 15, (d) 20

同定できたスペクトルはほとんどがFeIおよびFeIIであり、本研究の条件ではシールドガスのArのスペクトル線は弱く、強いイオン線は検出されなかった。

3.3.3 プラズマの温度

光学的に希薄なプラズマが局所熱平衡にあるとき、次式が成立する³⁶⁾。

$$\ln \left(\frac{I_{\text{nm}} \lambda}{g_n A_{\text{nm}}} \right) = -\frac{E_n}{kT} + \text{const.} \quad (3.3)$$

ただし、 λ =波長、 k =ボルツマン定数、 E_n =エネルギー準位、 g_n =統計重率、 A_{nm} =遷移確率、 I_{nm} =スペクトル強度である。

集光レーザビームの中心軸上のワーク面に隣接する縦0.5mm×横0.25mmの矩形領域から検出角度15度で採取したスペクトルデータから、波長領域 $\lambda=364.874\text{nm} \sim 382.782\text{nm}$ の間のFeIスペクトルを同定した。その上で遷移確率が解っているFeI線を用いてボルツマンプロットした例をFig.3.8に示す。直線関係は良好であり、この傾きから $T=8200\text{K}$ が得られた。

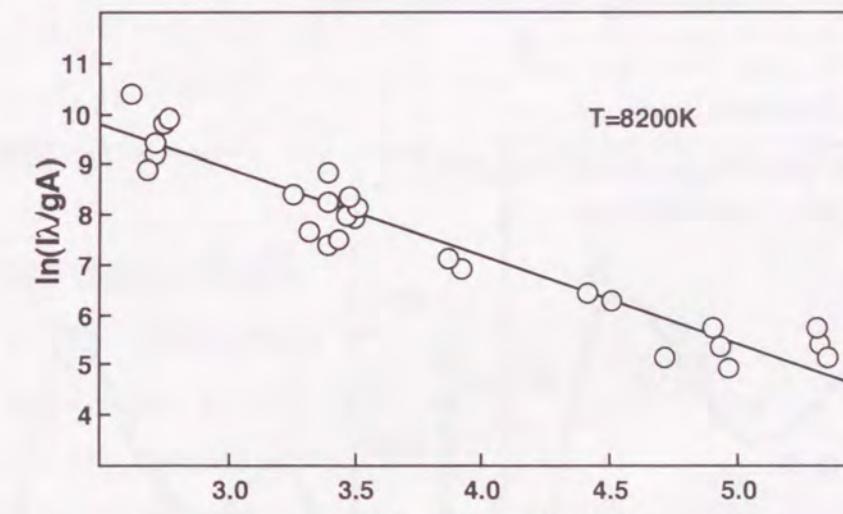


Fig.3.8 Example of Boltzmann plot of laser-induced Fe plasma in CO₂ laser welding.

種々の焦点位置Fで同様の実験を行い、ボルツマンプロットによりビーム中心軸上のワークに隣接する1.5mm×0.25mmの領域の時間平均温度を求めた。Fig.3.9は低次モード($M^2=1.5$, $P=1.4\text{kW}$)における焦点位置Fと温度Tの関係を示す。焦点が $-4\text{mm} < F < 4\text{mm}$ の深溶け込み溶接となる領域では、その外側の領域に比べてプルームの温度が高いことが解る。

また、深溶け込み溶接となる領域内では $F=0$ 付近で温度は低下し極小値となることが

解った。この現象は、Fig.3.2に示したように、キーホールの壁面による冷却効果により説明される。すなわち、キーホール壁の表面温度は最高でも材料の沸点(約3000K)であり、上記のプラズマの温度約8000Kに比べ遥かに低いため、キーホール内の金属蒸気プラズマはキーホールの壁面により冷却されることになる。キーホール直径とレーザビーム径とが比例関係にあると仮定すると、 $F=0$ 付近ではキーホール径が極小となるため、キーホール壁面によるキーホール内プラズマの冷却効果が最も大きくなり、キーホールプラズマの温度が極小となると考えられる。キーホール内の金属蒸気プラズマが開口から噴出した後も、その開口にごく近い領域においてはプルームがキーホール内の温度を維持すると考えると、プラズマプルームの温度が $F=0$ 付近で極小となるのは理解できる。

高次モード($M^2=5.9$, $P=2.5\text{kW}$)においても同様の分光実験により、プラズマプルームの温度を求めた。Fig.3.10に高次モードでの焦点位置 F とプラズマプルームの温度 T の関係を示す。低次モードとほぼ同様に $F=0$ 付近で極小をとる傾向を示しているが、レーザパワーの密度が低いため温度が若干低いことがわかる。

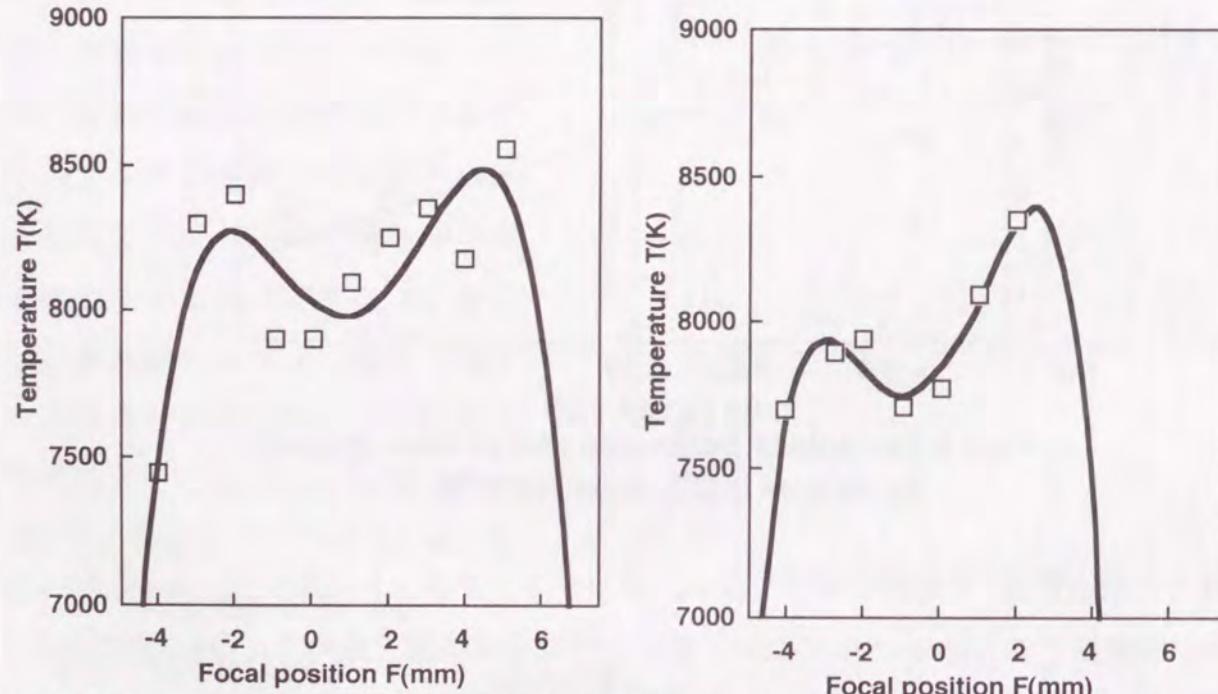


Fig.3.9 Average temperature T of plasma plume plotted against focal position F (low-order mode).

Fig.3.10 Average temperature T of plasma plume plotted against focal position F (multimode).

3.3.4 電子密度

局所熱平衡にあるプラズマにおいて、原子線FeIとイオン線FeIIの強度比が既知であると、電子密度は次式により求められる³⁶⁾。

$$N_e = 4.83 \times 10^{15} \frac{I g^+ A^+ \lambda}{I^+ g A \lambda^+} T^{3/2} \exp\left(\frac{E-E^+-V}{kT}\right) \quad (3.4)$$

ここで、 V =イオン化エネルギー、 E =励起準位、 T =温度、 I =スペクトル強度であり、Feのみの平衡を考慮した。ただし、添字+はイオン種、添字のないものは原子種を示す。ここでは、FeI(285.18nm)とFeII(292.659nm)の時間平均した強度から平均電子密度を求めた。

焦点位置 F とプラズマプルームの平均電子密度 N_e の関係をFig.3.11に示す。温度と同じように $F=0$ 付近で極小となる変化を示した。その値は $N_e=(1\sim 4)\times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の範囲にある。

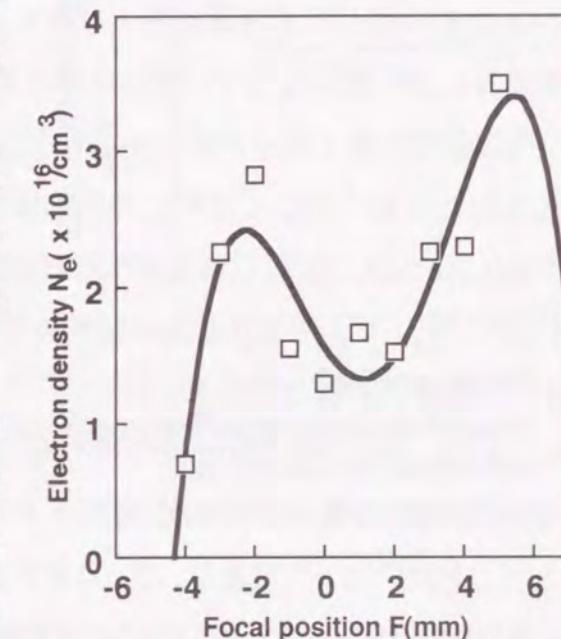


Fig.3.11 Electron density of plasma plotted against focal position F .

3.3.5 温度と電子密度の半径分布

温度ならびに電子密度の測定においては結像光学系の光軸に沿って、プラズマプルームの中心から周辺に至る全領域のスペクトル強度が加算されるため、求められる温度、電子密度も、共に半径方向の平均値である。そこで、アーベル変換²²⁾により、半径方向のスペクトル強度の分布を求め、各位置でボルツマンプロットすることにより温度の半径分布を求めた。

Fig.3.12のようにプラズマプルームが軸対称であると仮定し、溶接進行方

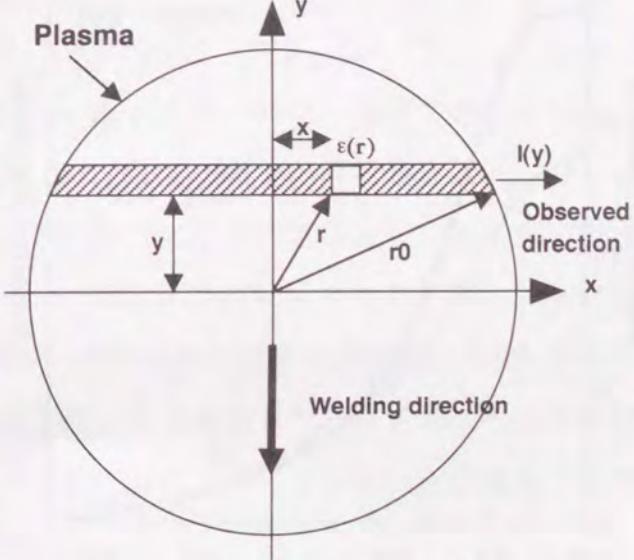


Fig.3.12 Illustration of geometrical relationships between variables in Abel transformation.

向にy座標を定義した。y方向に0.25mm間隔にスペクトル強度 $I(y)$ を測定し、アーベル変換により半径方向のスペクトル強度 $\epsilon(r)$ を求めた。

溶接条件は高次モード($M^2=5.9$, $P=2.5\text{kW}$)、 $v=1.4\text{m/min}$ 、 $F=1\text{mm}$ とし、367.736 ~ 381.584nmの波長域の6波長について測定を行った。Fig.3.13に376.554nm、Fig.3.14に381.584nmでの半径位置yと平均強度 $I(y)$ および $\epsilon(r)$ を示す。 E_n の高い376.554nmでは中心付近が周辺部分より高いのに対して、 E_n の低い381.584では中心軸付近が周辺部分より低くなっている。そのため、ボルツマンプロットの傾きは中心部で小さく、周辺部で大きくなるため、中心軸付近で高温に、周辺部で低温となる。

Fig.3.15はこのようにして求めた局所的な温度Tの半径分布を示している。図より、温度は半径0.5mm以上の周辺部分が8000~8500K程度とFig.3.9で求めた平均温度とはほぼ等しいのに対して、半径0.5mm以内の中心部分では9500K程度と周辺部よりも1000~1500K程度高い値となった。

同様の手法で、FeI(285.18nm)とFeII(292.659nm)のスペクトル強度分布を求め、式(3.2)より半径距離rと電子密度 N_e の関係を求めFig.3.16に示した。周辺部の電子密度は $N_e=(2 \sim 5) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ であり、3.3.4項で求めた平均電子密度とほぼ等しいのに対して、中心部分は $N_e=(1 \sim 2) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ と一桁近く高い値を示した。

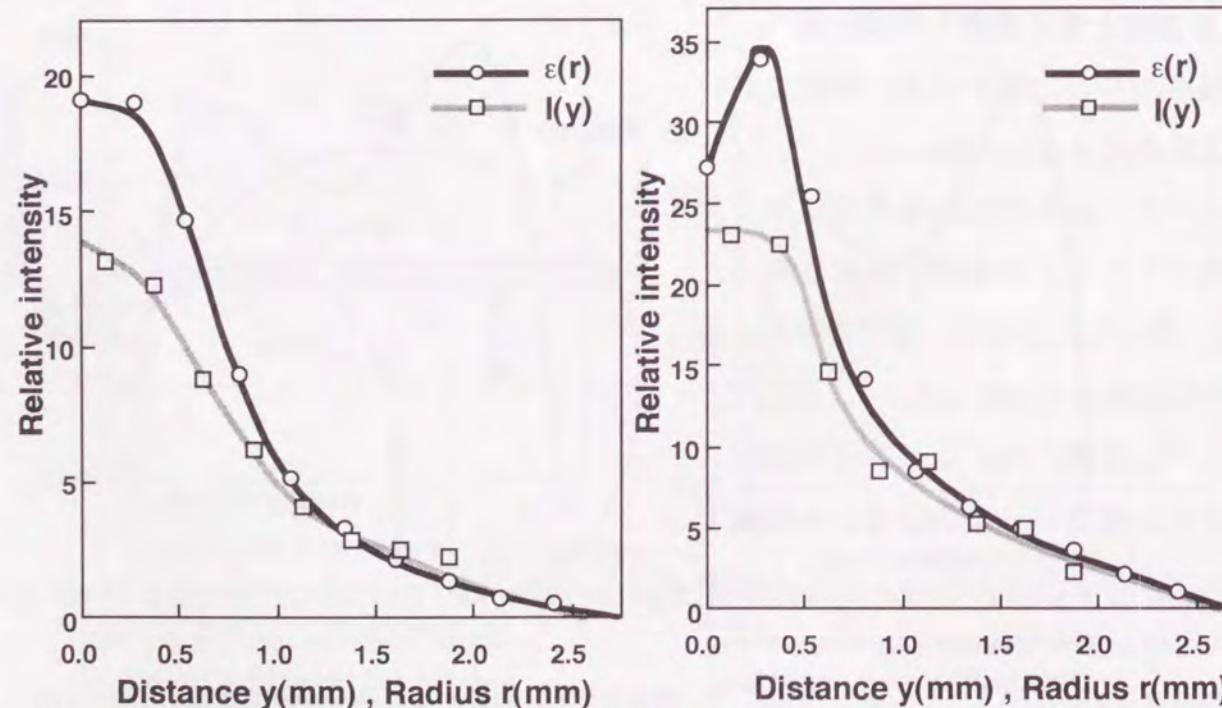


Fig.3.13 Lateral and Radial distribution of spectral intensity at 376.554nm
Fig.3.14 Lateral and Radial distribution of spectral intensity at 381.584nm

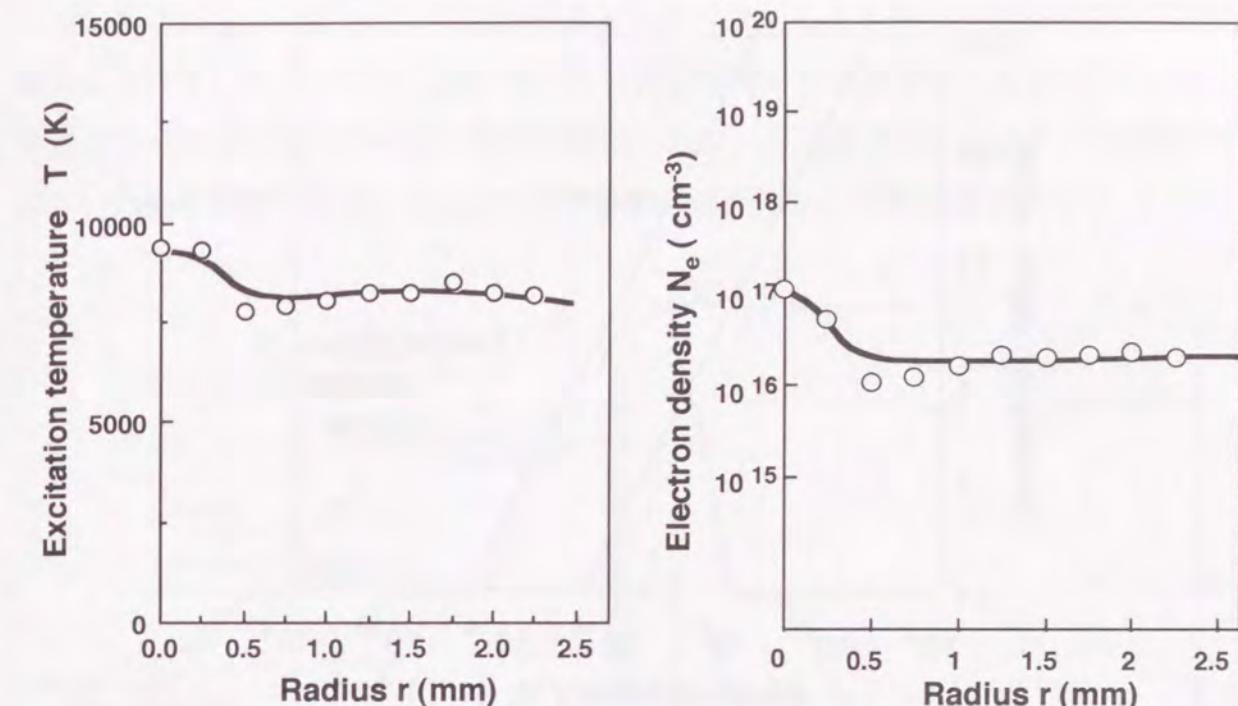


Fig.3.15 Radial temperature distribution in Fe plasma.
(multi mode, $P=2.5\text{kW}$, $v=1.4\text{m/min}$)

Fig.3.16 Radial electric density distribution in Fe plasma.
(multi mode, $P=2.5\text{kW}$, $v=1.4\text{m/min}$)

3.3.6 プラズマとレーザビームの相互作用

レーザビームの周波数がプラズマ振動の周波数より十分に高いときに、レーザビームのプラズマでの吸収係数 $\beta(\text{cm}^{-1})$ は次式の逆制動輻射によって与えられる³⁶⁾。

$$\beta = \frac{4}{3} \left(\frac{2\pi}{3kT} \right)^{1/2} \frac{N_e N_i Z^2 e^6}{h c m^{3/2} v^3} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{hv}{kT} \right) \right\} \quad (3.5)$$

ただし、 Z =平均電荷、 v =レーザの周波数、 k =ボルツマン定数、 h =プランクの定数、 c =光速、 T =温度、 $N_{e,i}$ =電子、イオンの密度、 m =電子質量、 e =電子電荷である。 CO_2 レーザ及びYAGレーザにおいて、温度 $T=5000\text{K}$ および 10000K での吸収長さ $\alpha (=1/\beta)$ ：レーザ強度が $1/e$ となる長さ)を計算した結果をFig.3.17に示す。これより、本研究で得られた電子密度 $N_e=(1 \sim 2) \times 10^{17}/\text{cm}^3$ では CO_2 レーザの α は約4cmとなる。Fig.3.16に示したようにプラズマブルームの密度の高い部分がワークに接する半径約0.5mmの半球をなすと仮定すると、この部分での吸収損失は約1.2%と推定される。このように溶接速度が 1.4m/min と比較的速いときには、レーザビームがプラズマブルームを通過するときの吸収損失はほとんど無視できることが解った。

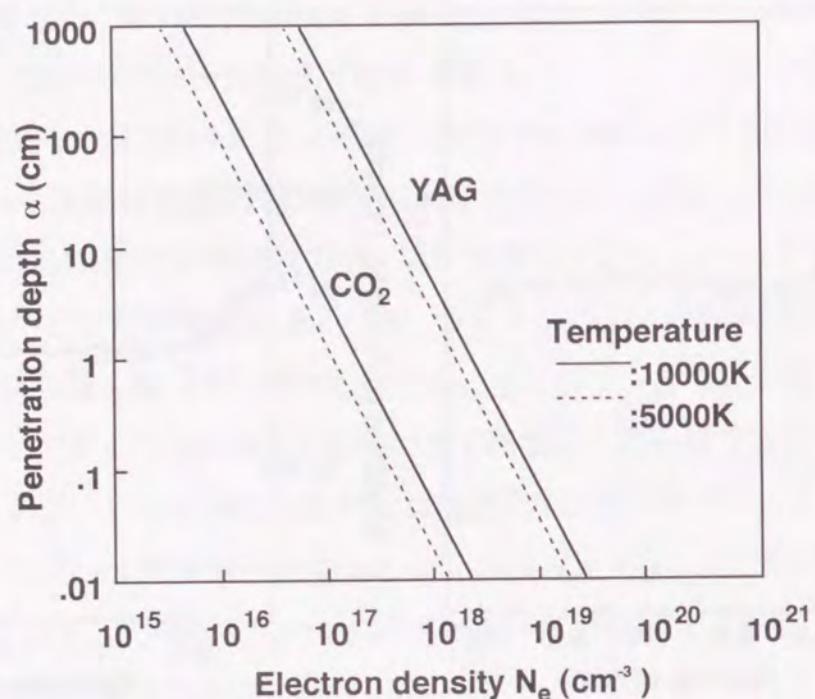


Fig.3.17 Effect of electron density on penetration depth of CO_2 and YAG lasers in plasma

このようなプラズマプルームによるレーザビームの吸収は、比較的低溶接速度でガス流量が少ない場合に顕著となる。Fig.3.18に示すように、メインレーザと垂直にワーク平面からの高さ $z=0.5\text{mm}$ において、プローブ用の CO_2 レーザ(10W)をZnSeのレンズで集光(スポット径 $\phi 200\mu\text{m}$)して透過させ、透過したプローブレーザのパワー I をパワーメータで計測し、メインビームが照射されないときのプローブレーザパワー I_0 との比率より吸収率 $(I_0 - I)/I_0$ を求めた。実験条件は、 $v=0.5\text{m/min}$ と低速とし、 $Q_{\text{Ar}}=10\text{l/min}$ と 30l/min の2種類について測定した。種々の y 位置で透過プローブパワー $I(y)$ が測定されたとき、吸収係数 $\beta(r)$ は次式によって求められる。

$$\ln \left[\frac{I_0 - I(y)}{I_0} \right] = -2 \int_0^r \beta(r) dx \quad (3.6)$$

ただし、 $r^2=x^2+y^2$ である。

Fig.3.19は溶接速度 $v=0.5\text{m/min}$ において、吸収係数 $\beta(r)$ と電子密度 N_e の半径分布を求めたものである。 $\beta(r)$ は式(3.6)をアーベル変換することにより求めた。プルームの吸収係数 β は、 $Q_{\text{Ar}}=30\text{l/min}$ では $\beta=0.8\text{cm}^{-1}$ と比較的小さいが、 $Q_{\text{Ar}}=10\text{l/min}$ では $\beta=1.8\text{cm}^{-1}$ と大きな値となった。このときの吸収損失は、この吸収係数のプラズマプルームが、半径 0.5mm の半球にのみ存在するとすると、 $Q_{\text{Ar}}=30\text{l/min}$ では約3.9%、 $Q_{\text{Ar}}=10\text{l/min}$ では約8.6%となり、無視できない大きさとなる。実際にはプラズマプル

ームの高さは Q_{Ar} の低下により前記の値よりも大きくなると考えられるので、この吸収損失の差は更に大きくなる。第2章では目視観察で、ガス流量が小さいときにプルーム発光が強い場合には、溶け込み深さが低減したが、その理由として、ビームの吸収が大きいためと推察したが、Fig.3.19の実験結果はそのことを裏付けている。

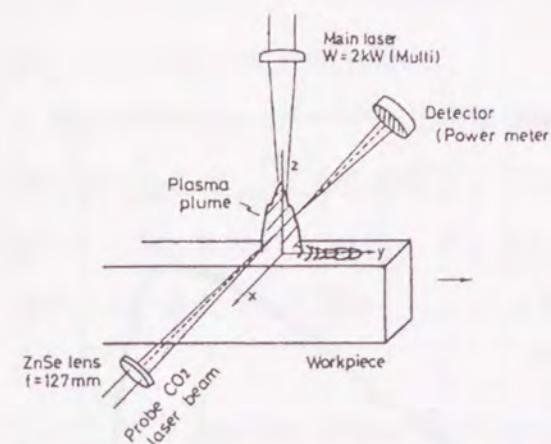


Fig.3.18 Experimental setup used for measurement of the absorptivity of plasma plume.

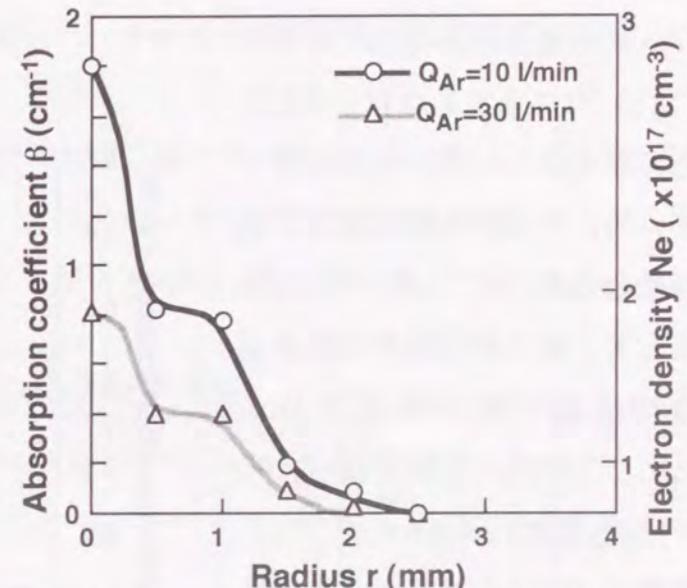


Fig.3.19 Radial distribution of absorption coefficient and electron density at $z=0.5\text{mm}$.

3.4 フォトセンサーシステム

3.4.1 センサーの特性

プラズマ発光を検出するセンサーとしては紫外～赤外精密測光用のシリコンフォトダイオード(浜松ホトニクス製S1336-18BQ³⁷⁾)を用いた。Fig.3.20に入射光に対する出力電流の比として定義されているセンサーの分光感度特性を示す。このセンサーは紫外から近赤外までの190nm～1100nmに感度波長範囲があり、最大感度波長は960nmである。この分光感度特性は、反射 CO_2 レーザの波長(10600nm)や後述する溶融金属からの輻射のピーク波長(約1500nm)から大きく外れており、 CO_2 レーザや溶融池からの輻射の影響をほとんど受けることなく、プラズマ発光強度の大部分の波長を検出することができる。センサーは約10度の広い範囲で均一な特性を持っており、以下に述べるように、レーザ照射点から十分に離れた点で検出するため、発光源は±1度以内にあり、指向性の影響は無視できる。

フォトダイオードの周波数応答性は素子の浮遊容量と負荷抵抗によって決まる。

Fig.3.21は負荷抵抗 R_L とステップ応答に対する90%到達時間で定義した上昇時間 τ_r の関

係を示しており、ほぼ直線関係にある。負荷抵抗 R_L を小さくすることにより τ_r はサブマイクロ秒に短くでき、 $R_L=100\Omega$ では $\tau_r=10^{-8}$ s(=100MHz)程度、 $R_L=1k\Omega$ では $\tau_r=10^{-7}$ s(=10MHz)程度である。プラズマ発光強度の時間変動は、4章で詳細を述べるよう100kHz程度の周波数応答性があれば十分であるので、出力電圧を大きく、S/N比を大きくするために負荷抵抗 R_L は本研究では1 kΩを主に用いた。

入射光量と出力電流の関係は

Fig.3.22に示すように、8桁以上のダイナミックレンジを持っている。その低入射光量側の限界は暗電流($10^{-11}A$ オーダー)によって、高入射光量側の限界は負荷抵抗により決定され、 $R_L=1k\Omega$ では、入射光量が $10^{-11}W$ (出力電流 $10^{-11}A$)～ $10^{-4}W$ (出力電流 $10^{-4}A$)の範囲まで直線性が保たれていることが解る。本研究での実験条件及び発光部とセンサーの距離では出力電流を $10^{-4}A$ オーダー以下となるように設定した。

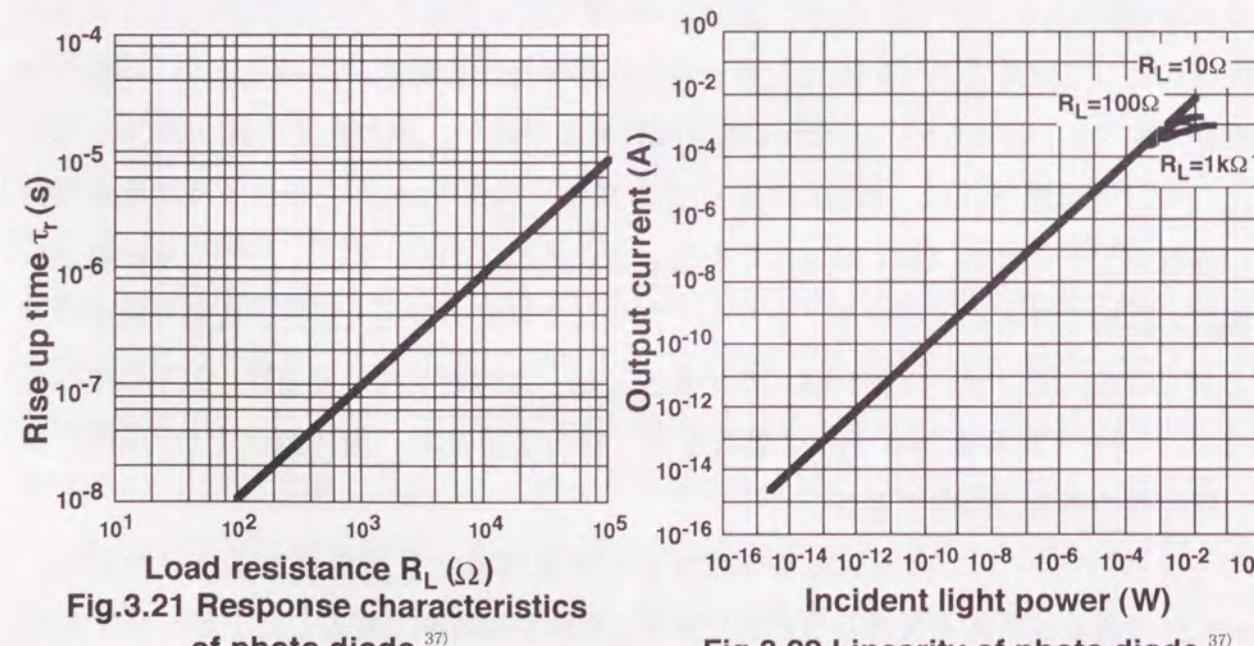


Fig.3.22 Linearity of photo diode.³⁷⁾

3.4.2 回路構成

Fig.3.23に検出回路の構成を示す。センサーの出力は負荷抵抗により電流電圧変換を行い、ローパスフィルタおよび計装アンプで前処理後、AD変換してパソコンに取り込んだ。ローパスフィルタはAD変換時のアンチエイリアス用で、バタワース特性を持ったアナログのアクティブフィルタで構成し、カットオフ周波数はサンプリング周波数の1/2とし、計装アンプの増幅率は10倍とした。本研究でのプラズマ発光強度は全て、計装アンプの出力電圧値を用いた。

測定装置には、レーザ励起用高周波放電や加工機のサーボモーター等のノイズ源が隣接しているので、ノイズ対策としてセンサーを含む全てのアナログ回路をシールドし同軸ケーブルを用いて結線した。AD変換器の精度は12bitで、サンプリング速度は100kHzで最大8chを同時に取り込んだ。

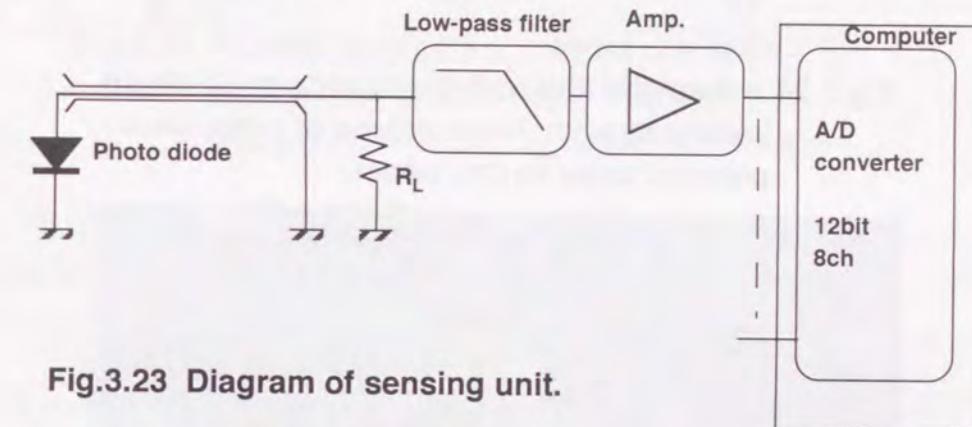


Fig.3.23 Diagram of sensing unit.

3.5 検出波形と信号処理

3.5.1 センサーの配置

センサーはFig.3.24に略図をFig.3.25に写真を示すように、ワーク面上のレーザビーム光軸を中心とした半径120mmの円周上に、溶接の進行方向に垂直な面内に、複数個配置した。各センサーの受光面は $1.1 \times 1.1\text{mm}$ の正方形であり、その立体角は $8.4 \times 10^{-5}\text{ Sr}$ である。センサーの前には40mm長さで $\phi 5\text{mm}$ の円筒状のアダプターを付けて、プラズマ発光以外の外乱光の影響を防止した。このアダプターはさらに、スペッタの付着防止と、外乱光の防止、および溶接ヒュームの付着防止の役割も持っている。

アシストガスの供給には内径 $\phi 4\text{mm}$ のサイドガスノズルを用い、ワーク表面となす角度(検出角度)45度で溶接部前面より吹き付けた。

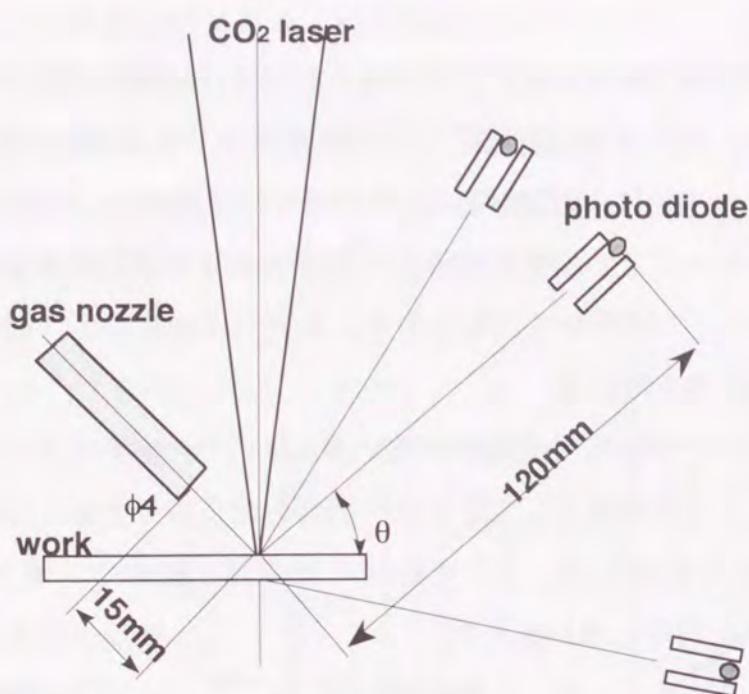


Fig.3.24 Schematic illustration showing multi-photo sensor system. Work moves in a direction perpendicular to this paper.

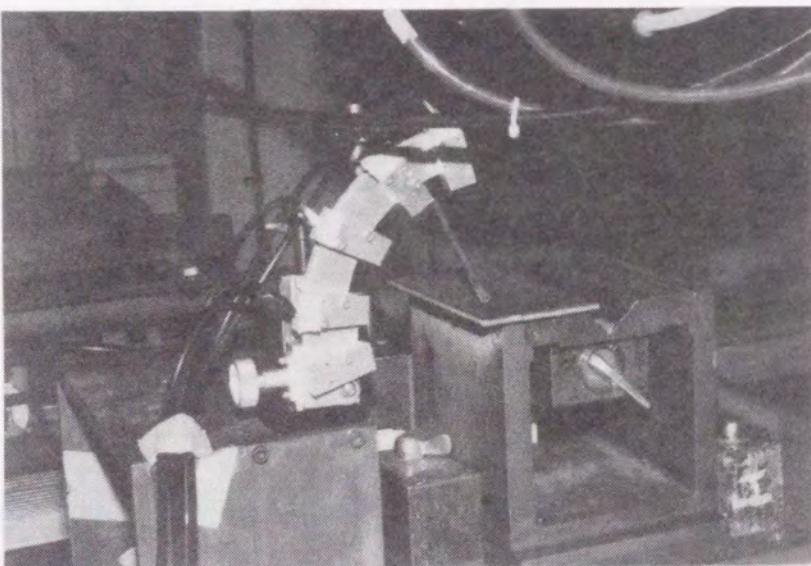


Fig.3.25 Experimental set up used in multi-photo sensor system.

3.5.2 信号処理

Fig.3.26は本研究で用いた光センサーにより、軟鋼にビードオンプレート溶接した際のプラズマ発光を検出角度75度で採取した波形を示している。CO₂レーザ発振器としてTLF5000tを用いて、溶接条件は本研究の標準条件($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $F=0\text{mm}$, $M^2=3.6$, $f/No=7.1$, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$)とした。このように、フォトダイオードを用いるとプラズマ発光の激しい時間変化を検出することができる。本研究ではこの信号を時間平

均値を表すDC成分と、時間変動を表すAC成分に分けて扱った。DC成分は1秒間の時間平均値とした。本章ではDC成分を取り扱うが、AC成分については第4章で詳細に検討する。

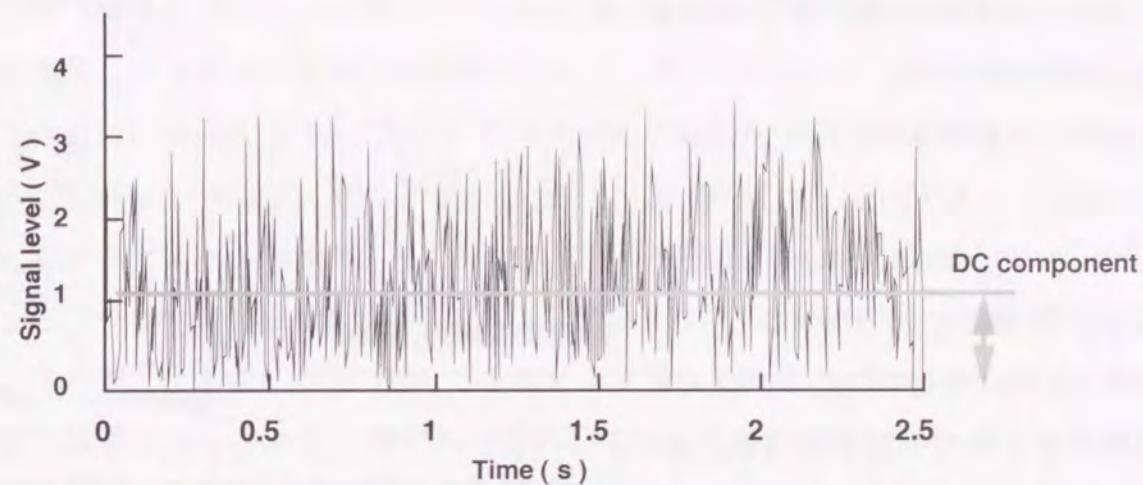


Fig.3.26 Typical waveform of plasma emission detected by photo-diode. ($\theta=5\text{deg}$)
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$, $F=0\text{mm}$)

3.6 プルームとキーホール発光の分離

3.6.1 受光強度の角度特性

高パワー密度のレーザ溶接ではキーホール内部に金属蒸気が電離したキーホールプラズマが存在し、また、キーホール開口から噴出してプラズマプルームを形成する。これらプラズマは高輝度の発光を伴うが、その発光強度によってビード形態が異なることも経験的に知られている。これまで報告されている発光強度の検出手法はいずれも単一のセンサーを用いるもので、キーホール内の発光とプラズマプルームの発光を区別することはできなかった。第2章では主要な溶接パラメータが溶け込み形態に与える影響を示したが、発光強度に対して与える影響は溶接パラメータによってキーホールプラズマとプラズマプルームとでは大きく異なることが推察された。このためキーホール内外の発光強度を区別して検出できれば、溶接品質を評価する上で新たな情報が得られ、レーザ溶接品質のモニタリング技術が高度化されるものと期待される。本項では、プラズマ発光の検出角度による受光強度の変化特性を利用して、キーホール内外のプラズマの発光強度を区別する手法を提案する。

第2章で示した溶融ビード断面のアスペクト比から推定して、キーホール内部からの全発光を検出するには、高い角度から受光する必要がある。本研究では、Fig. 3.27に示

すように集光ヘッド及びワークと接触しない空間にワーク表面となす角度(検出角度と呼ぶ)が5度から75度までの範囲に10度おきに8個のセンサーを設置し同時計測した。

本研究での標準条件($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m}/\text{min}$, $M^2=3.6$, $f/\text{No}=7.1$, $F=0\text{mm}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l}/\text{min}$)で板厚4.0mmの軟鋼板にビードオンプレート溶接した際に検出された、プラズマ発光強度の1秒間の時間平均値 $P(\theta)$ をFig.3.28に示す。検出角度 θ の増加に対して $P(\theta)$ は単調に増大し、約75度でほぼ飽和している。

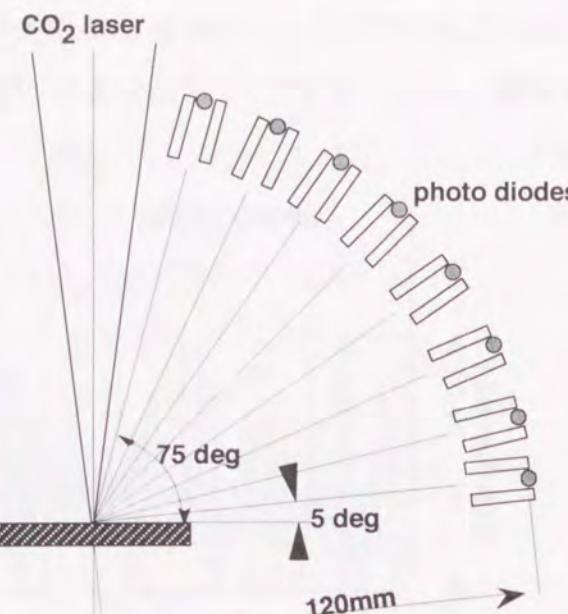


Fig.3.27 Experimental setup of multi photo sensors.

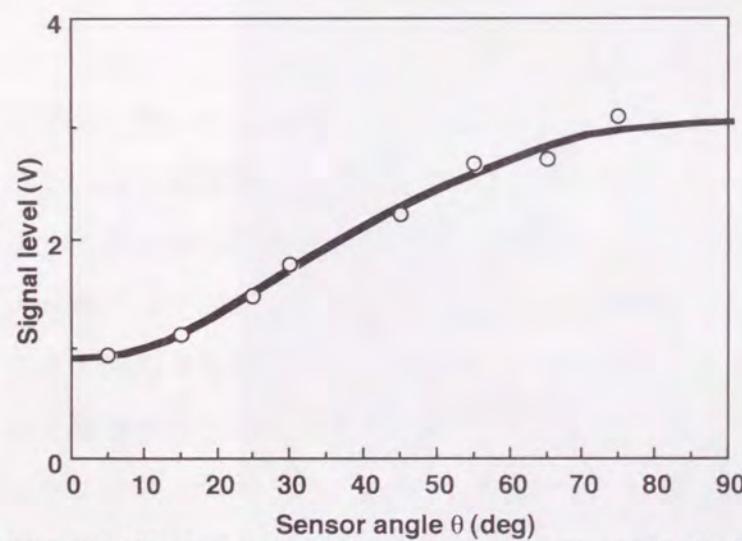


Fig.3.28 Relationship between sensor angle θ and signal level.
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m}/\text{min}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l}/\text{min}$, $F=0$)

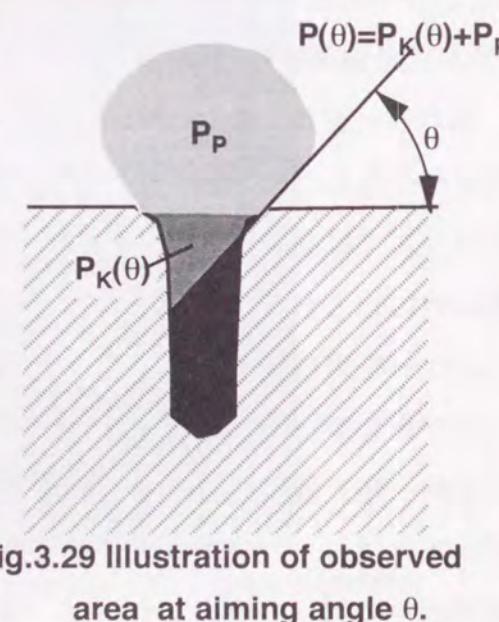


Fig.3.29 Illustration of observed area at aiming angle θ .

プラズマからの発光のみに注目すると与えられた角度のセンサーはその角度で観察可能なキーホール内の領域のプラズマからの発光を受光するものと考えられる。すなわち、Fig.3.29に示す検出角度 θ のセンサーの受光強度は次式で表される。

$$P(\theta) = P_K(\theta) + P_P \quad (3.7)$$

ここで、 $P_K(\theta)$ は検出角度 θ で観察可能なキーホールプラズマの領域からの発光の寄与を、 P_P はプラズマブルームの発光の寄与を表している。ここで、 $P_P=P(0)$, $P_K(0)=0$, $P_K(90)=P_K$ である。

$P_K(\theta)$ は検出角度 θ によりキーホール内の見える領域からの発光であるので、キーホールの形状、特にアスペクト比の影響が大きいと考えられる。ここでは、検出角度の影響を受けない P_P を除外して $P_K(\theta)$ のみを考え、 $P_K(90)=1$ で正規化して考える。ただし、 $P_K(90)$ は $P_K(\theta)$ の $\theta=90$ 度への外挿値とした。

Fig.3.30はアスペクト比が大きく異なる2つの溶接速度 $v=3\text{m}/\text{min}$ と $8\text{m}/\text{min}$ での正規化したプラズマ発光強度 $P_K(\theta)$ を表している。これら2つの発光の角度特性を比較すると、 θ の増大による $P_K(\theta)$ の変化する傾きが異なっており、 $v=8\text{m}/\text{min}$ のほうが小さい角度で急速に立ち上がり、約55度で飽和している。これに対して、 $v=3\text{m}/\text{min}$ では小さい角度での $P_K(\theta)$ の傾きは小さく、75度程度と $v=8\text{m}/\text{min}$ よりも大きい角度まで飽和しない。

この2つの条件ではFig.3.31の溶接ビードのマクロ断面でわかるように、アスペクト比が大きく異なっており、 $v=3\text{m}/\text{min}$ でのアスペクト比は約3で、 $v=8\text{m}/\text{min}$ でのアスペクト比は約0.8である。キーホール径はビード幅より幾分小さく、第4章で述べるように $\phi 500\mu\text{m}$ 程度と考えられるので、キーホールのアスペクト比は $v=3\text{m}/\text{min}$ では約6、 $v=8\text{m}/\text{min}$ では約1.5で約4倍異なる。検出角度特性の違いはこの両者のアスペクト

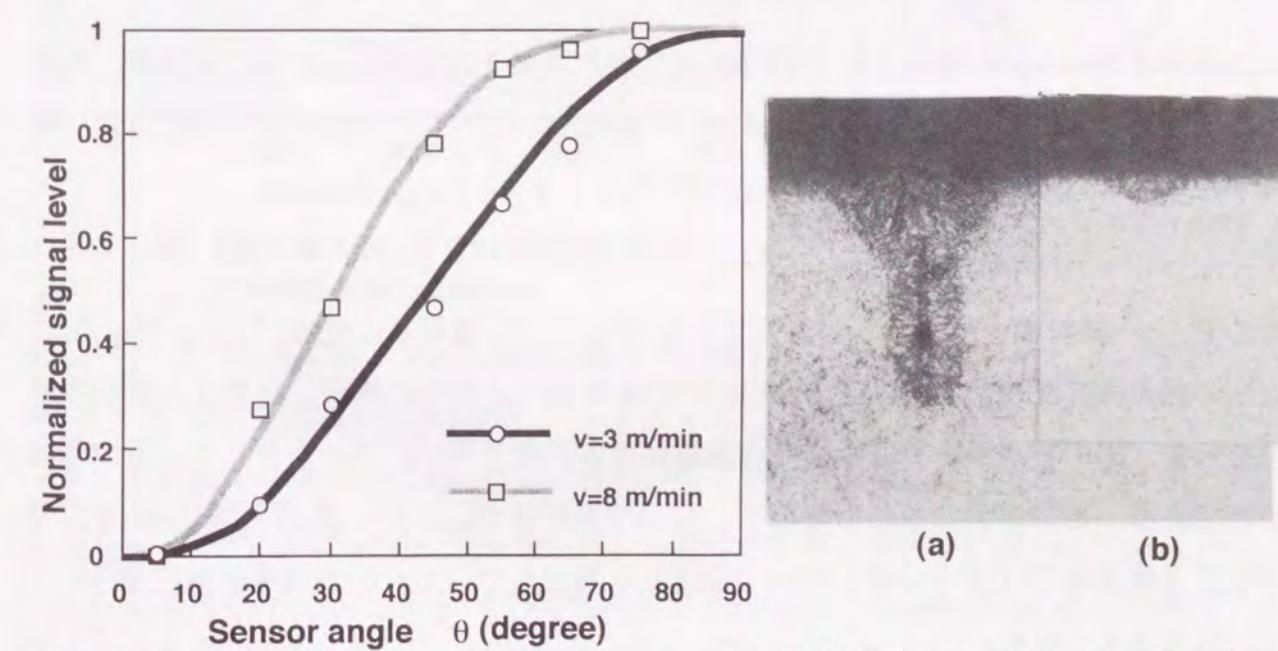


Fig.3.30 Relationship between sensor angle and normalized signal level.
Fig.3.31 Cross section at welding speed; (a) 3m/min, (b) 8 m/min.

比の違いを反映していると考えられる。溶接速度以外にレーザパワー、ガス流量、ガス種類、焦点位置などを変化させて発光強度の角度特性を調査したが、本実験の条件範囲ではFig.3.30の2つの曲線の間に全てが入ることが解った。

このように、本研究の実験条件の範囲内においては $\theta=75$ 度でほぼ飽和するので、 $P_K(75) \approx P_K$ と見なして差しつかえない。また、 $\theta=5$ 度で観察されるキーホール内の深さはキーホール径を $\phi 500 \mu\text{m}$ と仮定すると最大 0.04mm と小さく、キーホール内の発光の影響は無視できる。このように 5 度と 75 度の2つのセンサーを用いて、次式によりプラズマプルームの発光強度 P_p とキーホールプラズマの発光強度 P_K の近似値を求めることができる。

$$P_p \approx P(5) \quad (3.8)$$

$$P_K \approx P(75) - P(5)$$

3.6.2 溶融池からの輻射の影響

前項で提案したキーホールプラズマとプラズマプルームの分離手法においては、センサーの受光量はプラズマからの発光強度のみに依存すると仮定した。プラズマ以外の発光としては、溶融池からの輻射の影響も考えられる。本項では溶融池からの輻射の影響ならびに、センサーの方位角の影響についても述べる。プルーム中での光の逆制動輻射については高速溶接では無視できることを3.3.6項で示した。

フォトダイオードで検出される信号に対して、溶融金属表面からの輻射の影響を検討する。単位面積の溶融池表面からの輻射の、波数 $d\nu$ でのパワー密度 $U_T(\nu)d\nu$ は次式で示すプランクの放射式によって与えられる^{38,39)}。

$$U_T(\nu)d\nu = \epsilon \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT}-1} d\nu \quad (3.9)$$

ここで、 ϵ =輻射率、 h =プランクの定数、 k =ボルツマン定数、 c =光速である。Fig.3.32に鉄の融点(約1800K)と沸点(約3000K)での各温度での波長と輻射エネルギー密度の関係を示す。図中で網掛けで表示した波長範囲は本研究で用いたフォトダイオードの感度範囲である。この溶融池からの輻射を、波長感度特性が $L_{eff}(\lambda)$ 、検出角度 $\theta=90$ 度、受光面の立体角 $8.4 \times 10^{-5}\text{Sr}$ のセンサーで受光した場合のセンサーの出力電圧への寄与 V_{pool} は次式で与えられる。

$$V_{pool} = \frac{8.4 \times 10^{-5}}{2\pi} \alpha R_L \times a_{pool} \int_{190}^{1100} U_T(\lambda) \times L_{eff}(\lambda) d\lambda \quad (3.10)$$

ここで、 R_L =負荷抵抗、 α =アンプの増幅率、 a_{pool} は溶融池の面積を表しており、Fig.3.33に示すように、表面ビード幅とその2倍である $1.5\text{mm} \times 3.0\text{mm}$ の長円で、表面温度が鉄の沸点(約3000K)と融点(約1800K)の中間である2400Kとし、キーホールが $\phi 0.5\text{mm}$ の円形で、その表面温度を沸点に相当する3000Kと仮定する。輻射率は多めに見積もり $\epsilon=1$ とした。これより、 $V_{pool}=8.5\text{mV}$ である。

本研究での標準条件において、プラズマプルームのみの寄与(検出角度 $\theta=5$ 度の値)を考えたセンサーの出力電圧値は約1Vである。この値と V_{pool} を比較すると、溶融池からの寄与は1%以下でありほぼ無視できることが解った。

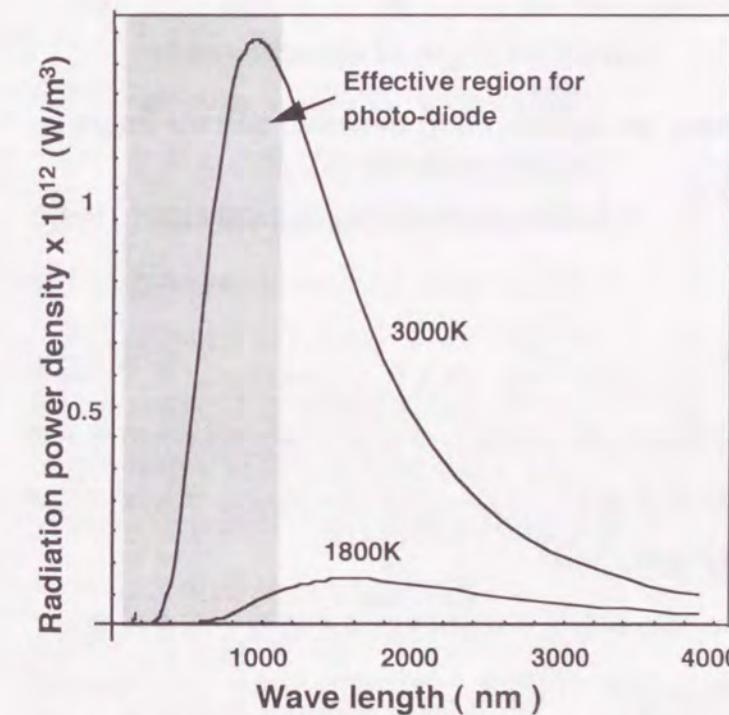


Fig.3.32 Distribution of wavelength in black body radiation.

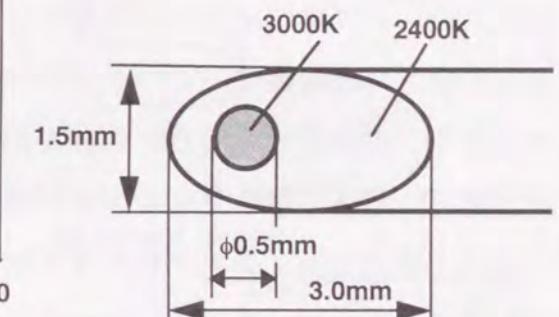


Fig.3.33 Model of molten pool surface.

3.6.3 キーホール内でのプラズマ発光強度分布の検討

(a) キーホール内での発光の対称性

レーザ溶接時のキーホールの移動に伴い、キーホール前壁にレーザビームが強く照射されるので、発光強度分布が中心軸に対して非対称となる可能性がある。そこで、センサーの方位角 ψ (センサーとレーザ照射点を結ぶ線のワーク表面への投影と溶接進行方向のなす角度)をパラメータとして受光強度を計測した。Fig.3.34は本研究での標準条件において、検出角度を $\theta=55$ 度と一定としたときの、方位角 ψ と受光強度との関係を

示している。図より方位角 φ に対して $P(\theta)$ はほとんど影響を受けず、プラズマ発光強度は軸対称としてよいことがわかった。このことは、キーホール内では高温のプラズマは、半径方向には均一に広がっていることを示している。また前述のようにキーホール壁面からの輻射が無視できることからもこのことが理解できる。

このように、光センサーで検出した発光強度は溶融池からの輻射の寄与は無視でき、キーホール内の発光強度は軸対称であることが解った。また、Fig.3.16の電子密度を考えると、190~1100nmの波長域でのプラズマによる光吸収を無視することができ、以上のことから、プラズマ発光強度の検出角度特性は、キーホール内の観察可能な領域のプラズマ発光強度の寄与と考えて良く、式(3.8)に示した近似式を用いて plasma plume とキーホールプラズマの発光強度を分離して差し支えないことが解った。

上記の受光強度の角度特性はキーホールの形状とその内部の発光強度分布を反映していると考えられる。以下では軸対称の単純形状（円筒または円錐）のキーホールを仮定し、受光の角度特性よりキーホール内の発光強度分布を推定する。

(b) 円筒キーホール中の均一プラズマ分布

まず最初に、キーホール形状をFig.3.35に示すような半径 r 、深さ l の円筒とし、その内部に均一発光強度のプラズマが分布していると仮定した。ワーク表面のキーホール中心に原点を、また図のように(x,y)座標をとりキーホールの深さ方向をz軸とした。(x,z)平面でのx軸とセンサーとのなす角(検出角度)を θ とすると、検出角度 θ での受光強度は観察可能な領域(Fig.3.35の網掛け部)の容積に比例し、次式で与えられる。

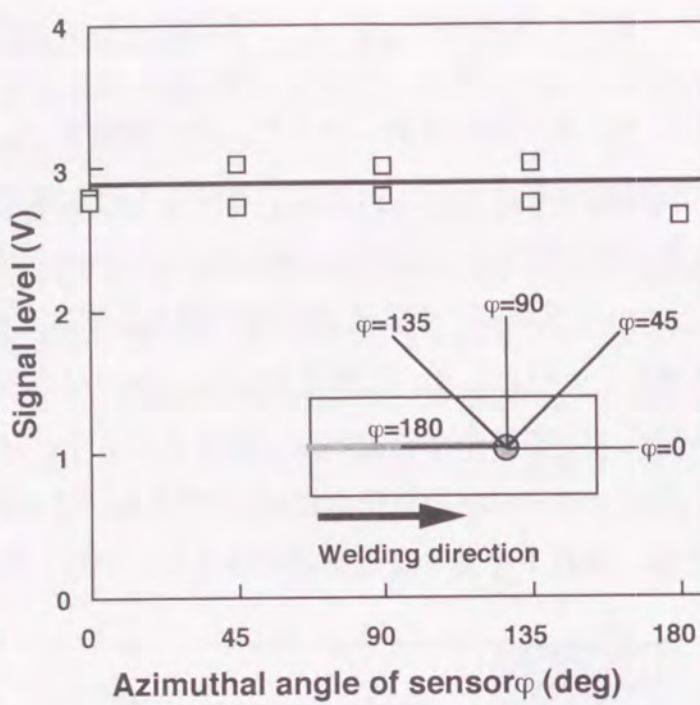


Fig.3.34 Relationship between sensor angle φ and signal level.
($\theta=55\text{deg}$, $P=3\text{kW}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l/min}$, $F=0$)

$$q(\theta) = k \int_0^c a_c(z) dz \quad [c \leq l] \quad (3.11)$$

$$q(\theta) = k \int_0^l a_c(z) dz \quad [c > l]$$

ここで、 c は角度 θ で観測されるキーホール壁に沿った最大深さ、 k は単位体積当たりの発光強度、 $a_c(z)$ は深さ z での(x,y)平面内における可視領域の面積であり、それぞれ次式で表される。

$$c = 2r \tan(\theta) \quad (3.12)$$

$$a_c(z) = \int_{-r}^b 2\sqrt{r^2 - x^2} dx \quad (3.13)$$

ここで、 b は深さ z での可視平面領域 $a_c(z)$ の直線部とy軸との距離で次式で与えられる。

$$b = \frac{2r(c-z)}{c} - r \quad (3.14)$$

これらの式によりアスペクト比 $R_a=r/l$ が0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0の6種類について計算した受光強度の検出角度特性をFig.3.36に示す。縦軸は実験結果と比較できるように $q(0)=0$, $q(90)=1$ に正規化した。図より、 $q(\theta)$ はアスペクト比が小さいと θ の小さな領域で急激に増大し、小さい角度で飽和する傾向が見られる。

アスペクト比に対するこの $q(\theta)$ の増加傾向はFig.3.30で示した実験結果の傾向と定性的に一致する。しかし、計算結果と実験結果を同一のアスペクト比で比較すると、 $v=8\text{m/min}$ に対応する $R_a=1.5$ 程度の小さい領域では、両者は良く一致するのに対し、 $v=3\text{m/min}$ に対応する $R_a=6$ となると、計算値に比べて実験値のほうがかなり小さな角度で飽和するのが解る。

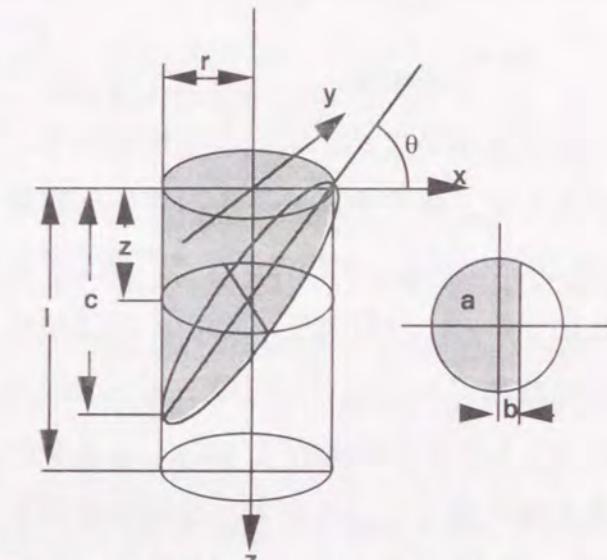


Fig.3.35 Definition of coordinate in cylindrical keyhole.

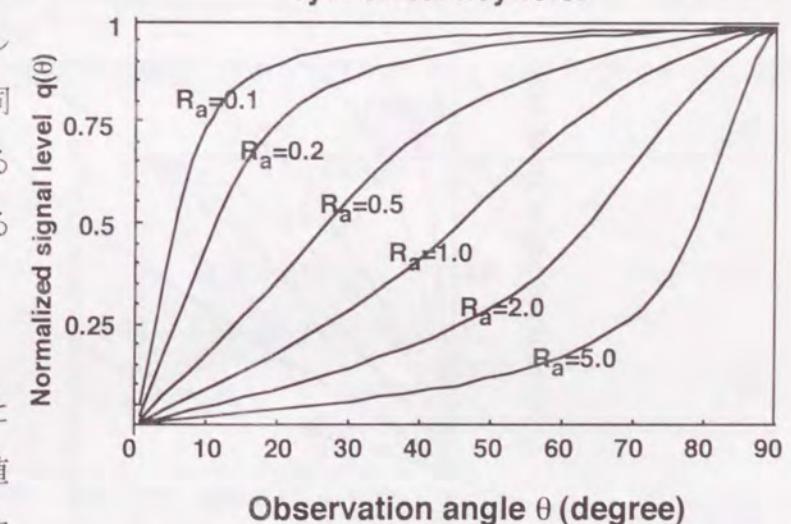


Fig.3.36 Relationship between aiming angle θ and calculated signal level $q(\theta)$ in cylindrical keyhole.

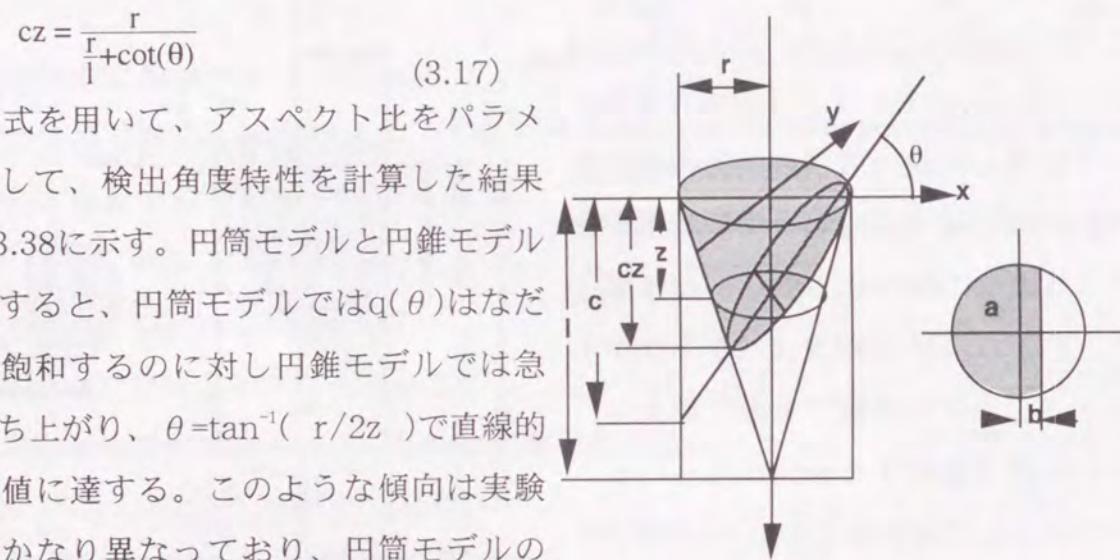
(c) 円錐キーホール中の均一プラズマ分布

キーホールの直径は深くなるほど小さくなる傾向があるので、キーホールが円錐形状であり、その中に均一強度のプラズマが存在すると仮定して、同様の解析を行った。Fig.3.37に定義して検出角度 θ での受光強度 $q(\theta)$ は次式で与えられる。

$$q(\theta) = k \int_0^1 a_e(z) dz \quad (3.15)$$

ここで、 cz は角度 θ で観測される最大深さ、 $a_e(z)$ は深さ z での(x,y)平面内における可視領域の面積であり、それぞれ次式で表される。

$$a_e(z) = \int_{-r}^b 2\sqrt{(\frac{-rz}{l})^2 - x^2} dx \quad (3.16)$$



この式を用いて、アスペクト比をパラメータとして、検出角度特性を計算した結果をFig.3.38に示す。円筒モデルと円錐モデルを比較すると、円筒モデルでは $q(\theta)$ はながらに飽和するのに対し円錐モデルでは急激に立ち上がり、 $\theta = \tan^{-1}(r/2z)$ で直線的に最大値に達する。このような傾向は実験結果とかなり異なっており、円筒モデルのほうが現実に近いことが解る。

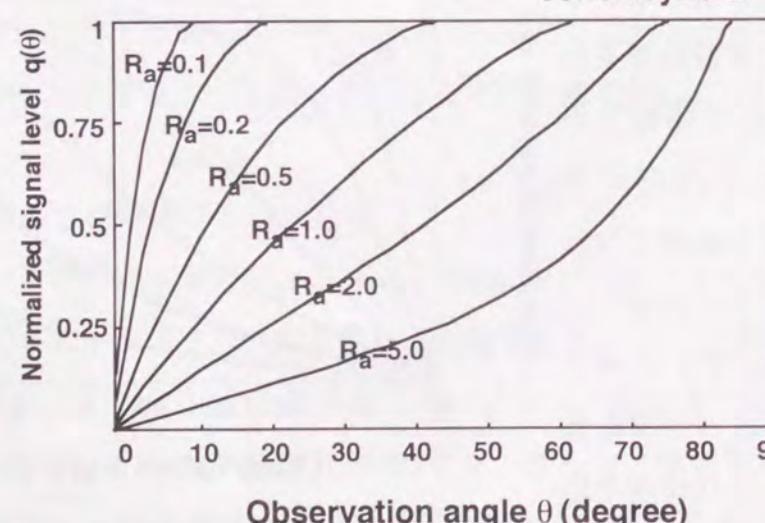


Fig.3.38 Relationship between aiming angle θ and calculated signal level $q(\theta)$ in cone keyhole.

(d) 円筒キーホール中の不均一プラズマ分布

次に、キーホール形状は円筒形状とし、内部のプラズマの発光強度分布が深さ方向に均一でないと考えて解析した。計算結果に比べて実験結果のほうが、 θ が小さい領域での立ち上がりが早いことから、キーホール入り口付近に強い発光領域が存在することが示唆される。そこで、円筒キーホールについてキーホールの深さ z 方向の密度分布 $W_p(z)$ を下記のように仮定した。

$$W_p(z) = w_0 + w_1 \exp(-k_w z^2) \quad (3.18)$$

ここで、 w_0 、 w_1 、 $k_w (\text{mm}^{-1})$ は係数である。ここで、 $W_0=0.1$ 、 $w_1=0.9$ とし、 $k_w = 0, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$ での $W_p(z)$ をFig.3.39に示した。 $k_w=0$ は式(3.11)で示す均一な密度分布に対応する。円筒モデルの式(3.11)に対して、 $W_p(z)$ で与えられる密度分布を仮定すると受光強度は次式で与えられる。

$$q(\theta) = k \int_0^c a_c(z) W_p(z) dz \quad [c \leq l] \quad (3.19)$$

$$q(\theta) = k \int_0^l a_c(z) W_p(z) dz \quad [c > l]$$

Fig.3.40はアスペクト比 $R_a=6$ の場合で、 k_w をパラメータとして、検出角度 θ と $q(\theta)$ の関係を示している。均一分布である $k_w=0$ では実験値と計算結果の食い違いが大きいのに対し、 k_w の増加によりキーホールの入り口付近により強い発光の集中を与えると、小さい θ での立ち上がりが大きくなり、実験値に次第に近づき、 $k_w=2$ で両者はほぼ一致した。さらに大きな k_w では、逆に θ の立ち上がりが余りに急峻となって実験値と計算結果は食い違いが大きくなる。このように、キーホール入り口に局所的に強い発光域があると考えると、実験値と良く一致することがわかった。

本研究で用いたセンサーの波長感度特性がフラットでないが、本解析ではその影響を考慮に入れていないため、定量化にはより詳細な検討が必要であるが、本解析の結果は、キーホールの開口部に隣接する狭い領域にプラズマ発光強度の高い部分があることを示唆している。この強い発光部がキーホール開口から外部に噴出していると考えられる。

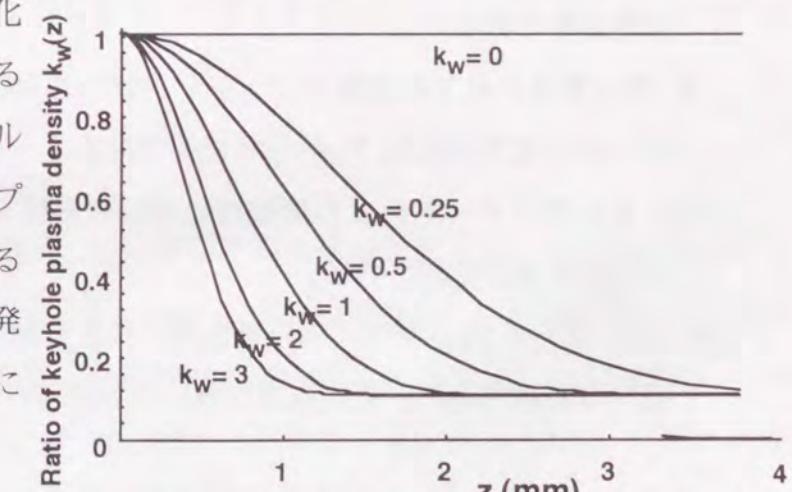


Fig.3.39 Ratio of keyhole plasma density $k_w(z)$.

4.1 はじめに

レーザ溶接時に誘起されるプラズマの発光は溶接現象の反映であり、モニタリングの検出信号として溶接品質に関する多くの情報をもつものと期待される。第2章で述べた溶接状況の肉眼観察ならびに、溶接パラメータがビード形態に与える影響は、キーホールプラズマとプラズマプルームに与える影響が、溶接パラメータによって異なることを示している。このことより、キーホールとプルームの各プラズマ発光強度を P_K と P_p に区別して検知することにより、溶接状況が的確に把握できるものと期待される。

激しく時間変動するプラズマ発光の信号強度をDC成分とAC成分に分け、第3章ではDC成分と溶接パラメータの関係を調べ、検出角度特性によってキーホールプラズマとプラズマプルームの発光強度を分離する手法を示した。本章では発光強度のAC成分である時間変動に注目したが、これによりDC成分とは異なった溶接情報が得られるものと期待される。本章では、第3章と同様の手法でAC成分においてもプラズマからの発光強度をキーホール $P_{K,AC}$ とプルーム $P_{p,AC}$ に分離し、 $P_{K,AC}$ 、 $P_{p,AC}$ と溶接特性との相関を調べた。板厚およびビームスポット径(または焦点位置)の変化に対するプラズマ発光の時間変動の周波数分布の関係と、貫通溶接と非貫通溶接でのキーホールプラズマとプラズマプルームの位相関係への影響を調査した。

また、キーホール開口およびプルームの高速度撮影に基づく観察により、キーホールの開口形状が時間的に激しく変動していることを示す。プラズマ発光強度の時間変動の要因について、これまでに報告されている変動のメカニズムを整理し考察した。それらに基づいてキーホールの圧力バランス点を中心とした共鳴的な振動に着目し、その固有振動が本研究の結果を最も良く説明できることを示す。

4.2 周波数特性

4.2.1 プラズマ発光強度の周波数解析

発光強度の周波数解析を行う前に、レーザ溶接時に採取されるプラズマ発光強度にどのような周波数成分が含まれるかをTLF5000t CO₂レーザを用いて予備調査した。負荷抵抗を $R_L=50\Omega$ とし、センサーの周波数応答性を100MHz以上となるように設定し、本研究で設定した標準条件($P=3kW$ 、 $v=3m/min$ 、 $F=0mm$ 、 $Q_{Ar}=30\ell/min$ 、 $f/No=7.1$)で板厚2.9mmの軟鋼板にビードオンプレートにて貫通溶接した。プルームとキーホール

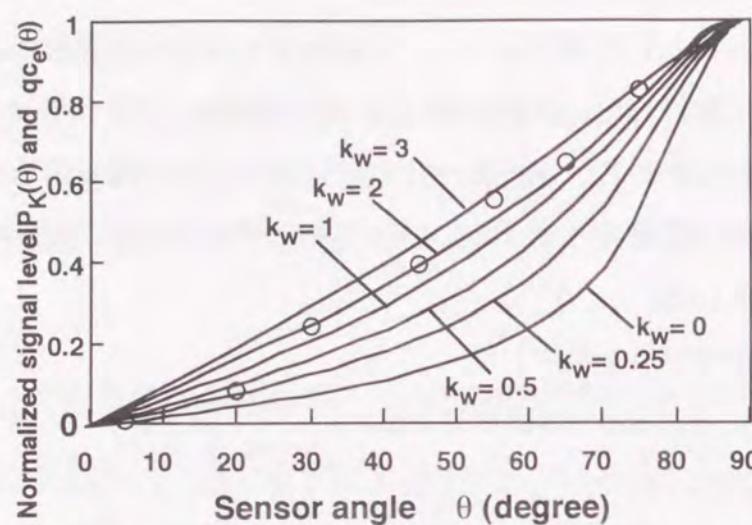


Fig.3.40 Relationship between sensor angle θ and normalized signal level $P_K(\theta)$. Lines are calculated with various weight ratio k_w , plot marks are experimental.

3.7 結言

レーザ溶接の深溶け込み時に生じる、プラズマプルームの分光分析を行うと共に、光センサーとして紫外～赤外精密測光用のシリコンフォトダイオードを用いて、発光強度の時間平均値の角度特性を調べた。本章で得られた結果は下記に要約される。

- (1) プラズマプルームの温度と電子密度は、プルーム中央部の半径約0.5mmの領域で約9500K、 $10^{17}/cm^3$ と高い値となり、周辺部は平坦な分布となる。中心軸付近では周辺部に比べ、温度では1000~1500K、電子密度では一桁近く高い。また、プラズマプルーム中で逆制動輻射によるレーザビームの吸収損失は本研究の標準条件の溶接速度ではほとんど無視できる。
- (2) 光センサーで検出した信号強度は、方位角の依存性が無く、プラズマ発光強度は軸対称である。
- (3) 検出角度の異なる複数のフォトセンサーを用いることにより、プルームとキーホールの発光強度 P_p 、 P_K が分離可能である。
- (4) フォトダイオードにより溶融池の輻射の影響を受けることなく、プラズマからの発光強度が検出される。
- (5) キーホール内のプラズマ発光強度は深さ方向で均一ではなく、キーホールに隣接する表面付近に、発光強度の強い領域が存在する。

ルの両発光を検出できるよう検出角度 θ =75度にてP(75)を計測した。サンプリング周波数 $f_s=200\text{Hz}, 10\text{kHz}, 100\text{kHz}, 1\text{MHz}, 10\text{MHz}$ に変化させて計測したが、その検出波形P(75,t)をFig.4.1(a)~(e)に示した。

サンプリング周波数 f_s が低い(a),(b)から、 f_s を大きくすると、(c)($f_s=100\text{kHz}$)に示すように数kHzの発光変動が観察される。さらに高サンプリング周波数の(d)では、振幅の小さなノイズを除くと(b)の波形を単純に引き延ばした波形となる。さらに f_s を大きくして細かいノイズを拡大すると約10MHzの断続的な振動が観察される(e)。この約10MHzの周波数は本実験で用いたCO₂レーザのRF励起電源の周波数に一致する。RF放電型の発振器では定格出力以下で運転する際に、発振のインピーダンスのマッチングの為、高速でスイッチングすることによりデューティ比を変化させて出力調整する方式をとっている。Fig.4.1(e)の10MHzのRF励起成分が断続しているのは、定格5kWの発振器を平均出力3kWに90kHzでスイッチングしているためである。

以上のことから、レーザ溶接現象と関係して検出対象となるプラズマ発光波形はFig.4.1(d)からRF励起に起因する細かなノイズを取り除いたもので、数kHzのオーダーであると考えられる。RF放

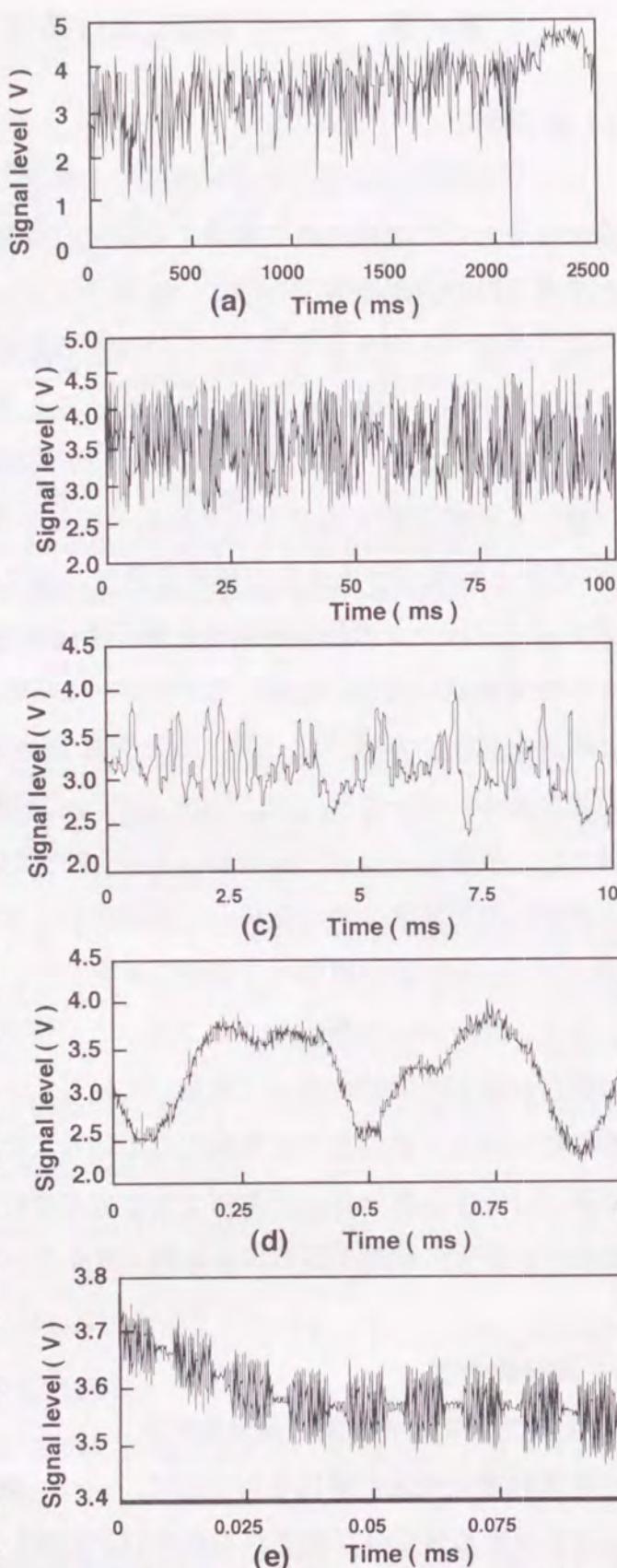


Fig.4.1 Frequency characteristics of light emission from plasma at various sampling rates. (a) 200Hz, (b) 10kHz, (c) 100kHz, (d) 1MHz and (e) 10MHz. ($P=3\text{kW}, v=3\text{m/min}, F=0\text{mm}, Q_{Ar}=30\text{l/min}$)

電周波数やスイッチング周波数、またプラズマ振動の周波数帯⁴¹⁾(数十THz)に比べこの検出対象となる発光信号の周波数は十分に低いので、これらが発光信号に与える影響はほとんど無視できると考えられる。

サンプリング速度 $f_s=100\text{kHz}$ での信号成分を、FFTアルゴリズムによりパワースペクトラムを求め⁴²⁾、周波数解析した結果をFig.4.2に示す。このように、パワースペクトラムは周波数が増大するにつれ急激に減少し、10kHz以上の周波数成分は無視できるほど小さいことが解った。これ以降では、サンプリング周波数を100kHzとし、約10kHz以下の周波数成分を解析することとした。

4.2.2 信号の処理^{42~45)}

収集された信号はコンピュータ上でデジタル信号処理を行い、DC成分とAC成分を評価した。センサーの受光強度P(t)を、時間 $\Delta t=h$ 每の等間隔にサンプリングしN個のデータ列、{u(n)}, $n=0,1,\dots,N-1$ を構成した。サンプリング周波数 f_s および、ナイキスト折り返し周波数 f_c は、それぞれ次式で表される。

$$f_s = \frac{1}{h} \quad (4.1)$$

$$f_c = \frac{1}{2h} \quad (4.2)$$

本報告では $h=10\mu\text{s}, N=1024$ としたので、 $f_s=100\text{kHz}, f_c=50\text{kHz}$ である。この{u(n)}に対して前処理として、時間平均値を差し引き、次式で示す{x(n)}とした。これにより $\bar{x}=0$ である。

$$x(n) = u(n) - \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} u(j) \quad (4.3)$$

周波数fでの信号強度を表すスペクトラム{S_p(n)}は{x(n)}の離散フーリエ変換{X(n)}の2乗として次式で求めた。ここで、n番目の項は周波数(n/N)f_sに対応するが、f_c以上の周波数は評価されない。

$$S_p(n) = X(n)^2 \quad (4.4)$$

ただし、{X(n)}は{x(n)}の離散フーリエ変換であり、次式で与えられる。

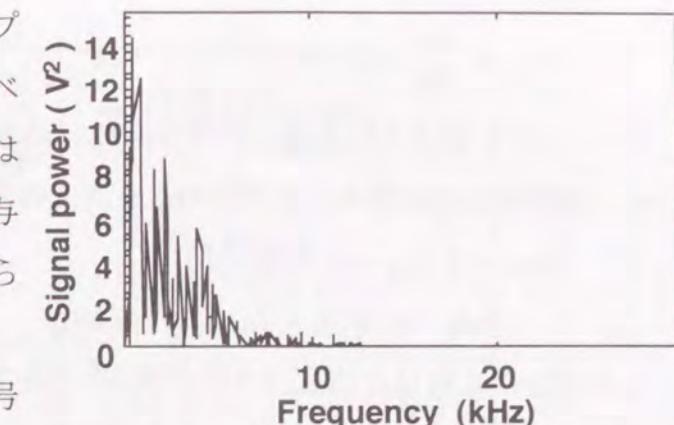


Fig. 4.2 Power spectrum of typical signal of laser induced plasma. ($P=3\text{kW}, v=3\text{m/min}, F=0\text{mm}, Q_{Ar}=30\text{l/min}$)

$$X(n) = \sum_{j=0}^{N-1} x(j) e^{-2\pi ij/N} \quad (4.5)$$

次に $\{x(n)\}$ に含まれる f_c 以下の周波数成分のうち、周波数帯 f_1 から f_2 までを透過させるため、理想的な周波数応答関数 $\{H(n)\}$ を次式の定義で与えた。

$$\begin{aligned} H(n) &= 1 \quad f_1 < (n/N)f_s < f_2 \\ &= 0 \quad (n/N)f_s < f_1, f_2 < (n/N)f_s \end{aligned} \quad (4.6)$$

この $\{H(n)\}$ に対して $\{X(n)\}$ の合成積 $\{Y(n)\}$ をもとめ、これを離散フーリエ逆変換することにより、濾波されたデータ列 $\{y(n)\}$ をそれぞれ次式により求めた。

$$Y(n) = X(n) H(n) \quad (4.7)$$

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} Y(j) e^{+2\pi ij/N} \quad (4.8)$$

この $\{y(n)\}$ に対し 2 乗平均値 S_{AC} を次式により求めた。

$$S_{AC} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} y(j)^2 \quad (4.9)$$

4.2.3 AC成分でのキーホールとプルーム発光の分離

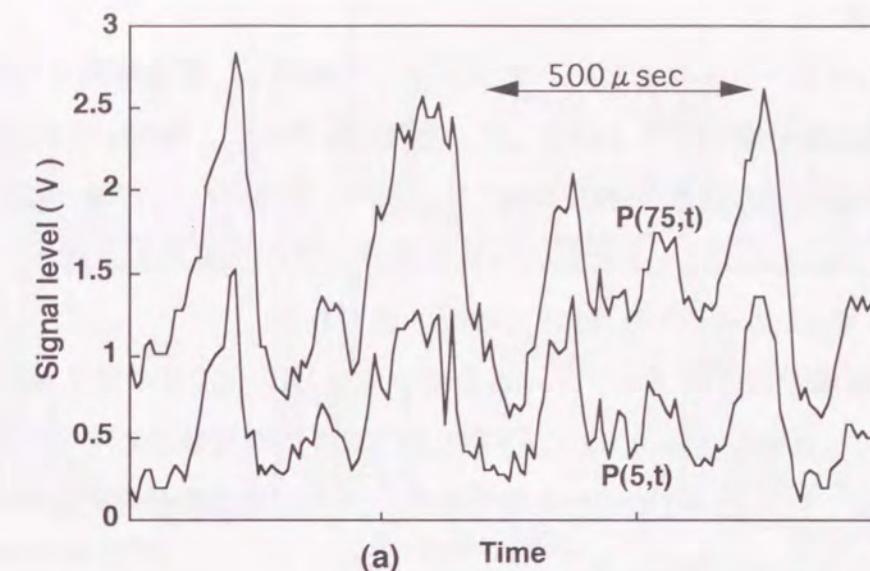
検出角度の異なるセンサーで受光した信号からキーホールプラズマとプルームプラズマの発光強度の時間平均値(DC成分)を分離する手法について3章で述べたが、同じ考え方を、発光強度の時間変動成分(AC成分)にも当てはめることが出来る。

検出角度 θ 、時間 t での受光強度を $P(\theta, t)$ とし、検出角度 $\theta = 5$ 度と75度でのプラズマ発光強度 $P(5, t)$ および $P(75, t)$ の受光波形(DC成分も含んだ波形)をFig.4.3 (a) に示している。これらの値から、時間 t でのプラズマプルームおよびキーホールプラズマの寄与 $P_p(t)$, $P_k(t)$ は次式によって近似できる。

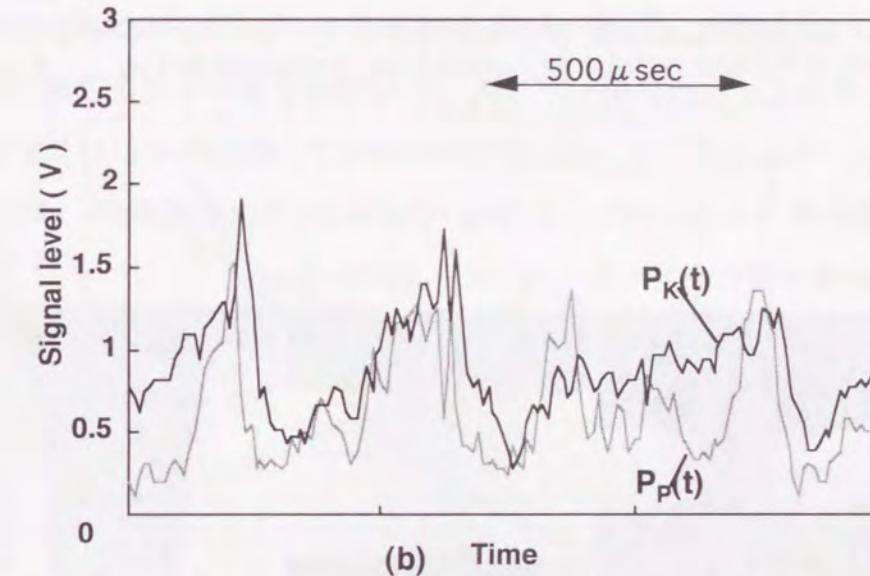
$$P_p(t) \approx P(5, t) \quad (4.10)$$

$$P_k(t) \approx P(75, t) - P(5, t)$$

$P_p(t)$ と $P_k(t)$ に分離した結果をFig.4.3(b)に示す。 $P_p(t)$ と $P_k(t)$ には発光強度の信号変化に相関が見られ、信号の時間変化の強弱がほぼ一致することが解る。さらに詳細に両者を比較すると、位相差も見られ、 $P_p(t)$ に比べて $P_k(t)$ は数十 μs の遅れがあることが解る。以下では、キーホールプラズマとプラズマプルームのAC成分の大きさに加え、その位相差も調査対象とする。



(a) Time



(b) Time

Fig.4.3 Separation of keyhole plasma emission P_k from plasma plume emission P_p at high frequency. (a) $P(75, t)$ and $P(5, t)$, (b) $P_p(t)$ and $P_k(t)$.
($P=3kW$, $v=3m/min$, $F=0mm$, $Q_{Ar}=30l/min$)

4.3 周波数分布とキーホール形状の関係

プラズマ発光の周波数分布と溶け込み形状の関係を調べるために、板厚と集光スポット径を変化させ、FFTによりパワースペクトラムを求めた。また、裏面までの貫通溶接と非貫通溶接でのキーホールプラズマ $P_{K,AC}(t)$ とプラズマプルーム $P_{P,AC}(t)$ の位相関係についても調査した。プラズマ発光のAC成分と、実際の溶接パラメータの影響については第5章で、AC成分による溶接欠陥の検出方法については第6章で述べる。

4.3.1 板厚の影響

種々の板厚のテストピースをビードオンプレート溶接し、貫通溶接での板厚とプラズマ発光強度の周波数分布の関係を調査した。板厚は0.8mm, 1.6mm, 2.9mmとし、溶接条件はすべて本研究での標準条件($f/N_{\text{No}}=7.1$, $F=0$, $P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l}/\text{min}$)とした。Fig.4.4にビード断面の写真を示す。どの板厚でも半値ビード幅(板厚中央部でのビード幅)は $w_h=0.85\sim0.9\text{mm}$ とほぼ一定である。

Fig.4.5に各板厚でのプラズマプルームとキーホールプラズマの発光強度のAC成分の波形 $P_{\text{P.AC}}(t)$ 、 $P_{\text{K.AC}}(t)$ を、Fig.4.6にはFFTにより求めた周波数分布を示す。FFTの前処理として、 $P_{\text{P}}(t)$ 、 $P_{\text{K}}(t)$ からDC成分を取り除き、さらに周波数分布の比較のため、2乗平均値=1 V²となるよう正規化した。

$P_{\text{P.AC}}(t)$ については板厚による波形の差異は小さく、いずれも10kHz付近までほぼ同じように分布している。これに対して、 $P_{\text{K.AC}}(t)$ は板厚が薄いほどより周波数の高い波形に変化している。すなわち、 $P_{\text{K.AC}}(t)$ は板厚0.8mmでは最高6~8kHzまでの比較的高い周波数成分を含んでいるのに対し、1.6mmでは4kHz以上の成分が、また2.9mmでは3kHz以上の成分が非常に小さくなっているのがわかる。

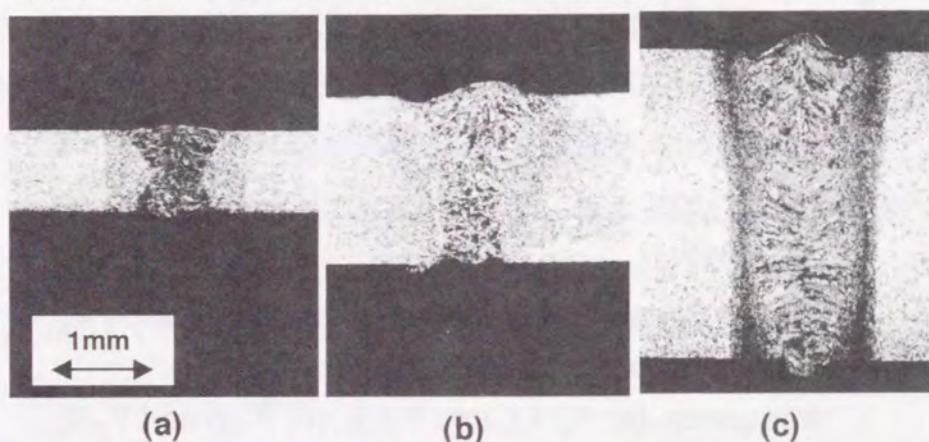


Fig.4.4 Cross section at each thickness (a) 0.8mm, (b) 1.6mm, (c) 2.9mm.

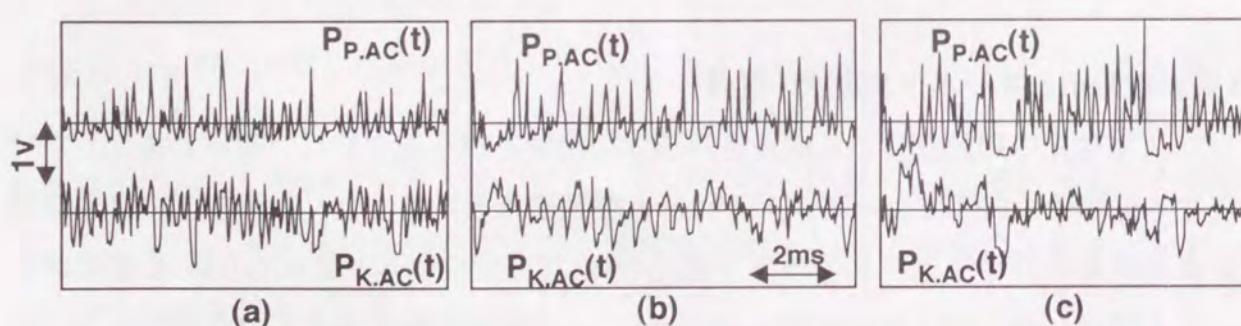


Fig.4.5 Waveform of light emission from plume $P_{\text{P.AC}}(t)$ and light emission from keyhole $P_{\text{K.AC}}(t)$ at thicknesses; (a) 0.8mm, (b) 1.6mm and (c) 2.9mm.
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l}/\text{min}$, $F=0$)

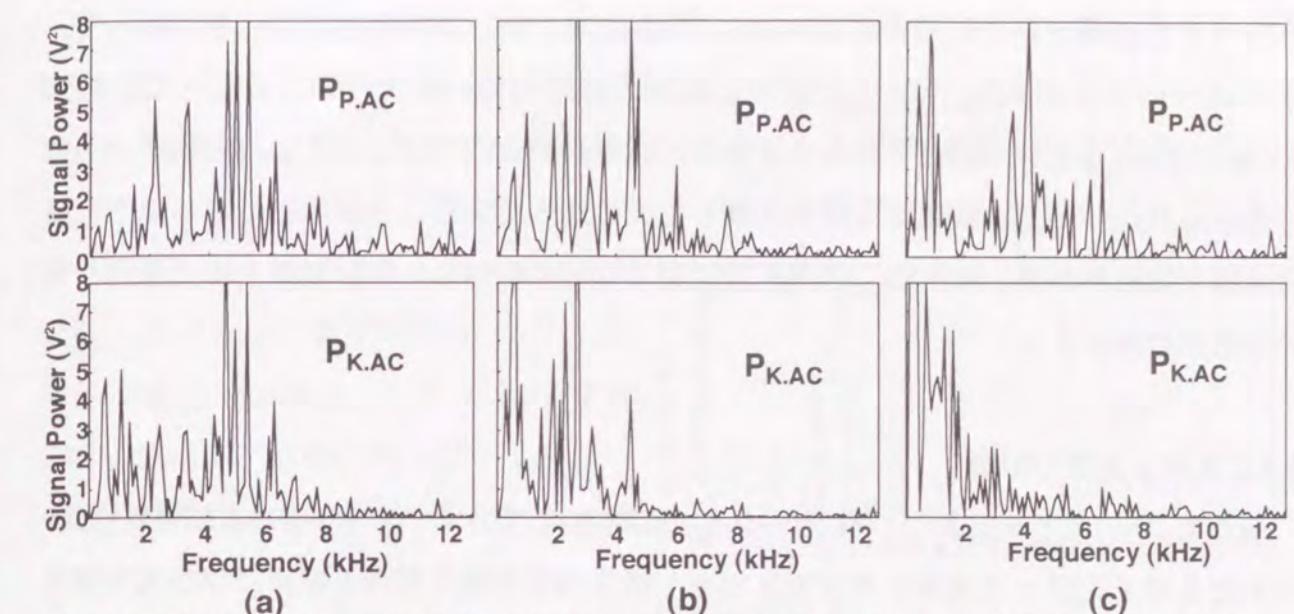


Fig.4.6 Power spectrum of light emission from plume $P_{\text{P.AC}}$ and light emission from keyhole $P_{\text{K.AC}}$ at thicknesses; (a) 0.8mm, (b) 1.6mm and (c) 2.9mm.

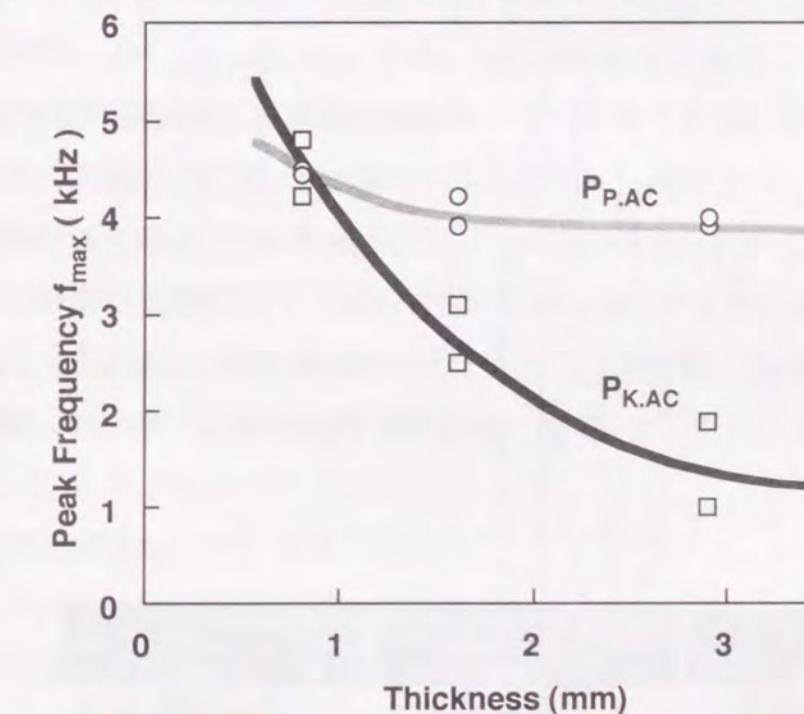


Fig.4.7 Relationship between sheet thickness and peak frequency f_{max} of plasma emission from keyhole (Bead on plate welding).
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $F=0\text{mm}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l}/\text{min}$)

このような周波数分布の変化を定量化するために、パワースペクトラムのピークが限界値以上となるものの中で、最も高い周波数 f_{max} を比較した。限界値を変えても基本的な f_{max} の特性に変化は無いが、以下では便宜上限界値を5V²と設定して f_{max} を求めた。板厚と f_{max} の関係をFig.4.7に示す。実験データが幾分ばらつくため、同一条件で行った2回の実験結果をプロットしている。プラズマプルーム $P_{\text{P.AC}}$ の f_{max} は板厚の増大につれや

や減少する傾向が見られるものの4~4.5kHzとほぼ一定とみなせる。 $P_{P,AC}$ と比較して、キーホールプラズマ $P_{K,AC}$ の f_{max} に対する板厚の影響は極めて大きい。すなわち、板厚0.8mmでは f_{max} は4~5kHzであるのに対し、板厚1.6mmでは約2.5kHz、板厚2.9mmでは約1.5kHzと、 f_{max} は板厚にほぼ反比例して低くなっていることが解る。このように貫通溶接では板厚が厚いほど $P_{K,AC}$ の周波数は低くなるのに対し、 $P_{P,AC}$ はほとんど変化しないことがわかった。

4.3.2 スポット径の影響

板厚を1.6mmと一定とし、貫通溶接となる範囲内でFナンバー f/No および焦点位置Fを変化させて、ワーク表面におけるスポット径を変化させ、前項と同様にプラズマ発光強度の周波数分布を調べた。但し、他の条件は $P=3kW$, $v=3m/min$, $Q_{Ar}=30\ell/min$ と一定とした。Fig.4.8は、 $f/No=7.1$ で $F=-3$, 0, 3mmでのビードオンプレート溶接した断面形状を示している。半値ビード幅は $F=0$ mmで $w_h=0.6mm$ に対し、 $F=-3mm$, $F=+3mm$ 共に $w_h=0.75mm$ 程度であり、ビード表面での集光ビーム径が $F=0$ で $\phi 360\mu m$ 、 $|F|=3mm$ で $\phi 500\mu m$ と半値ビード幅はビーム径にほぼ比例して増大している。

Fig.4.9にはFFT法により求めた $F=-5$, -3, 0, 3, 5mmでの $P_{K,AC}$ の周波数分布を示す。 $F=0$ において最も高い周波数まで分布が広がっているが、 $|F|$ の増大に伴って、周波数分布は次第に低い周波数側へ移動する。ただし、Fの正負で傾向が異なり、 $|F|$ が同一でも $F>0$ （焦点が材料面の上部）では $F<0$ （焦点が材料面内部）にくらべ高い周波数成分の減少が著しい。

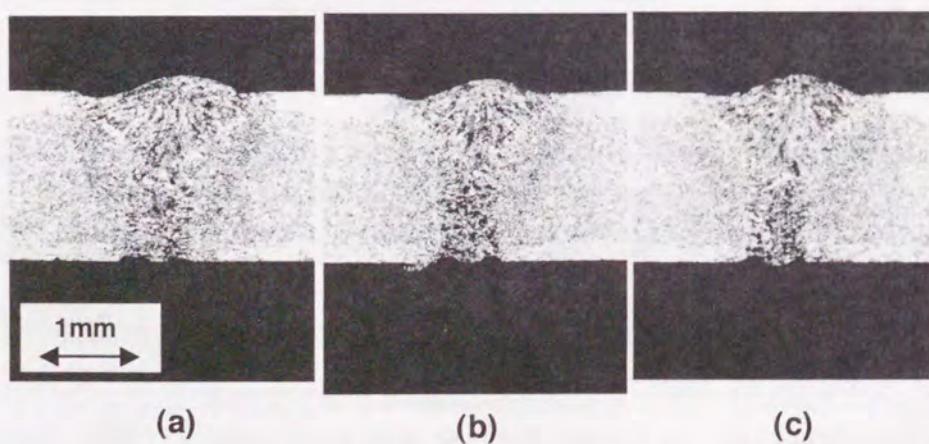


Fig.4.8 Cross section at focal position F (a) $F=-3mm$, (b) 0mm , (c) +3mm.
($P=3kW$, $v=3m/min$, $F=0mm$, $Q_{Ar}=30l/min$)

さらに $f/No=5.6$ および9.3においても板厚1.6mmで貫通溶接となる範囲内で焦点位置Fを変化させたデータを加え、材料表面でのスポット径と f_{max} の関係をFig.4.10にプロットした。 $P_{P,AC}$, $P_{K,AC}$ 共にスポット径が大きくなると f_{max} が小さくなる傾向が見られる。このことはキーホール径が大きいほど、キーホール発光の f_{max} が減少することを示している。減少速度はキーホールプラズマ $P_{K,AC}$ のほうが plasma plume $P_{P,AC}$ に比べて大きい。また、 $|F|$ が同一でも $F<0$ に比べて $F>0$ の方が、ビームスポット径の変化に対する f_{max} の変化が大きいことがわかる。これは板表面で同一スポット径であっても、板裏面のスポット径が $F>0$ に比べて $F<0$ の方が小さいため理解される。

このような焦点位置FによるAC成分の周波数分布の変化をモニタリングに応用するために、2乗平均値を求めた。Fig.4.9を詳細に観察すると、Fによる f_{max} の変化に加えて、2~4kHz帯の周波数の変動も大きいことがわかる。そこで、バンドパスフィルターを用いて2~4kHz帯を濾波し、その2乗平均値を求めた。Fig.4.11にこのようにして求めた2乗平均値と焦点位置Fの関係を示した。この図では信号強度の評価のため、2乗平均= $1V^2$ とする正規化は行っていない。AC成分の2~4kHz帯の2乗平均値は、 $F=0$ 付近で極小となる傾向を示す。但し、デフォーカス部の極大値は $F<0$ の場合の方が $F>0$ に比べて遥かに大きいことが注目される。

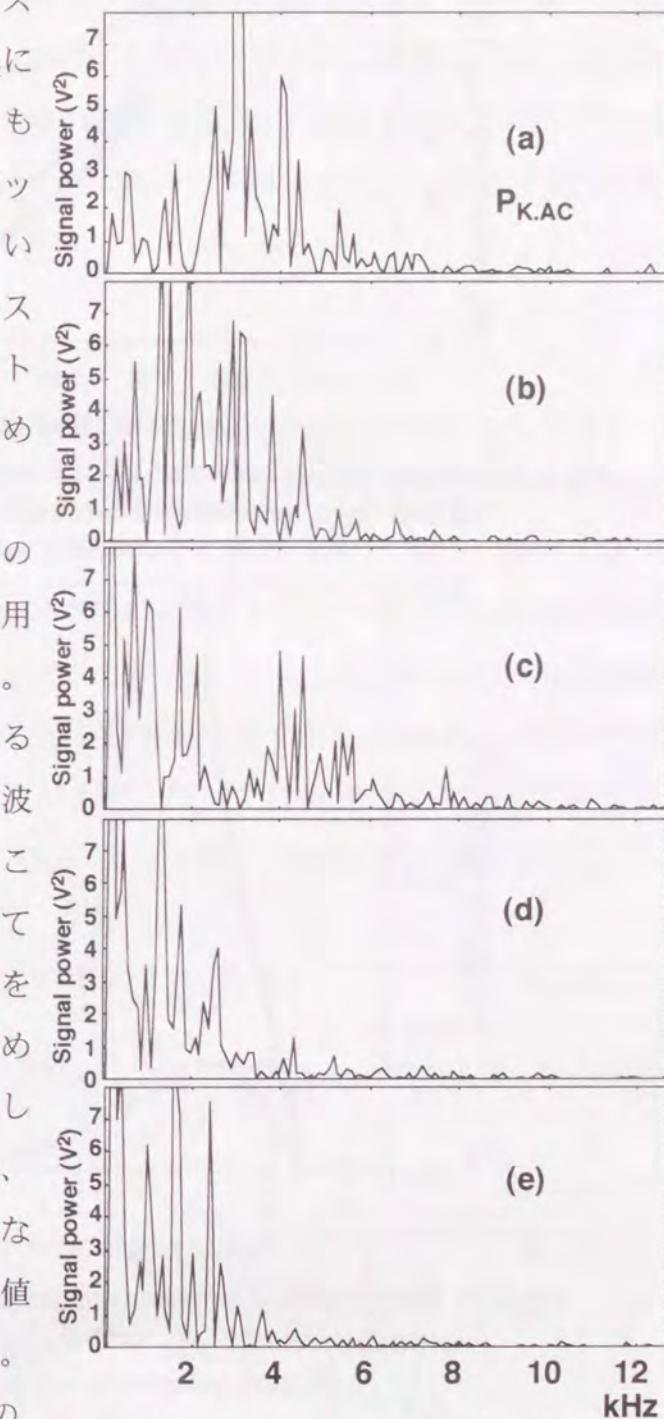


Fig.4.9 Power spectrum of light emission from keyhole $P_{K,AC}$ at focal position F at
(a) -5mm, (b) -3mm , (c) 0mm ,
(d) +3mm , (e) +5mm.

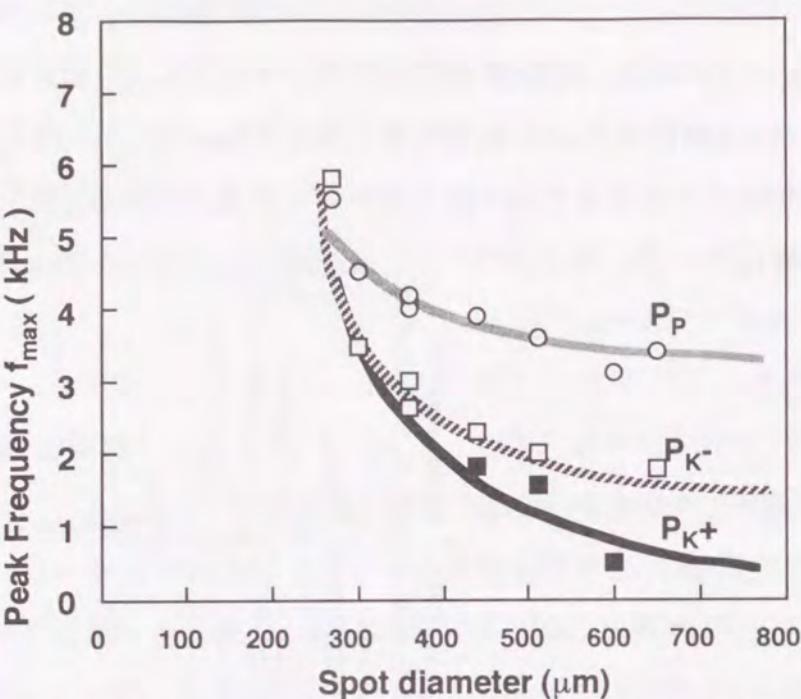


Fig.4.10 Relationship between spot diameter and peak frequency f_{\max} of the light emission from keyhole (Bead on plate welding).
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $F=0\text{mm}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l/min}$)

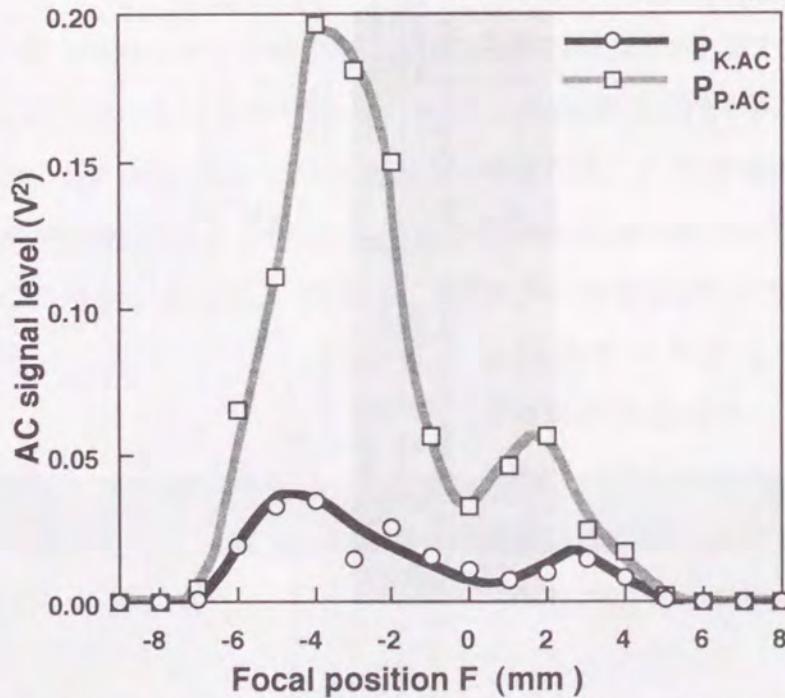


Fig.4.11 Relationship between focal position and AC signal level of $P_{P.AC}$ and $P_{K.AC}$ in frequency band 2~4kHz.
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $F=0\text{mm}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l/min}$)

焦点位置Fが変化したときの、 P_p と P_K のAC成分の示す変化傾向を解明するには更に詳細な解析が必要であるが、現状では次のように推察している。F=0付近でAC成分の2乗平均値が極小となるのは、AC成分の周波数分布がより高い周波数まで広がるため、

Fig.4.11で求めた2~4kHz帯の周波数帯の強度が相対的に減少したためと考えられる。

また、デフォーカス部の極大値がF<0の場合の方がF>0に比べ大きく、焦点位置Fの影響が非対称であるのは、レーザ光の入射する角度が異なるためと推察している。すなわちF<0の場合にはキーホール内部にレーザ光が収束する角度で入射されるため、キーホール深さ方向のレーザパワー密度の分布がF>0の場合に比べ大きく、キーホール壁面がより不安定となるものと考えられる。このようなキーホールの周波数に関わる現象は十分に解明されておらず、その解析は今後の課題である。Fの正負によって2乗平均値が非対称性を示す事実は、焦点位置の正または負のいずれの方向への変化であるかを明確に識別できるため、実用的な意味は大きい。

4.3.3 貫通溶接と非貫通溶接の比較

薄板のレーザ溶接では裏面までビードが貫通する溶接を必須とすることが多い、貫通・非貫通の判定が重要である。与えられた板厚に対して溶接速度を変化させて実験を行った。Fig.4.12, Fig.4.13は板厚4.0mmで本研究での標準条件($P=3\text{kW}$, $F=0$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l/min}$, $f/\text{No}=7.1$)での検出角度 $\theta=5^\circ$ および $\theta=75^\circ$ でのプラズマ受光強度のAC成分の波形 $P_{\text{AC}}(5,t)$ 、 $P_{\text{AC}}(75,t)$ を示している。Fig.2.8に示したように、(a)の2m/minは貫通溶接で、(b)の4m/minおよび(c)の6m/minは非貫通溶接である。 $P_{\text{AC}}(5,t)$ に関しては、(a)~(c)で波形に大きな差異は見られないが、 $P_{\text{AC}}(75,t)$ では貫通の(a)に比べて非貫通の(b)、(c)では振幅が遥かに小さく、貫通状態によって著しく波形が異なることが解る。

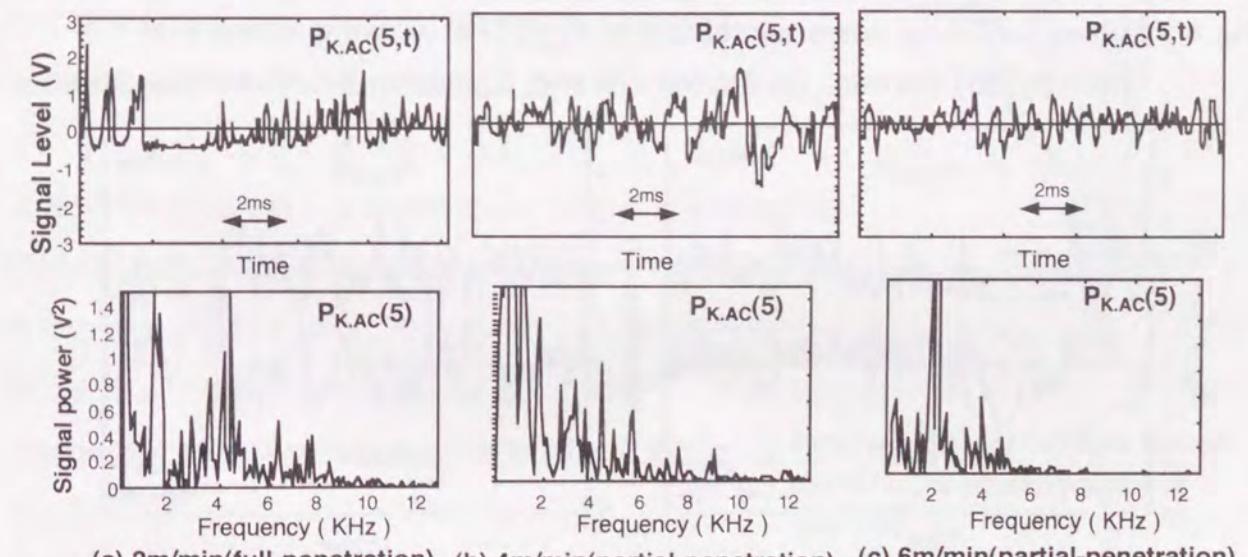


Fig.4.12 Wave form and power spectrum of $P_{\text{AC}}(5)$ at welding speed v (a)
2m/min, (b) 4m/min, (c) 6m/min. ($P=3\text{kW}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l/min}$, $F=0$, Thickness=4.0mm)

貫通溶接(2m/min)と非貫通溶接(4m/min)の $P_{AC}(5,t)$ と $P_{AC}(75,t)$ の値より $P_{P,AC}(t)$, $P_{K,AC}(t)$ に分離したものが、Fig.4.14である。波形そのものに関しては、 $P_{P,AC}(t)$ と $P_{K,AC}(t)$ ともに貫通溶接(a)と非貫通溶接(b)で差は見られない。しかし、 $P_{P,AC}(t)$ と $P_{K,AC}(t)$ の位相関係を比較すると貫通溶接と非貫通溶接とでは大きく異なっている。すなわち、貫通溶接(a)では $P_{P,AC}(t)$ に対し $P_{K,AC}(t)$ はほぼ類似の波形である。ただし、詳細に見ると $P_{P,AC}(t)$ に対して、 $P_{K,AC}(t)$ が40~50μs遅れて増減している。これに対して、非貫通溶接(b)においては、 $P_{P,AC}(t)$ と $P_{K,AC}(t)$ の絶対値はほぼ同じであるが符号が互いに反転しており、 $P_{P,AC}(t)$ が増大すると $P_{K,AC}(t)$ はほぼ同時に減少している。このように、キーホールから金属蒸気プラズマを噴出するプロセスが、キーホール底部が開口しているか否かによって異なることがわかった。

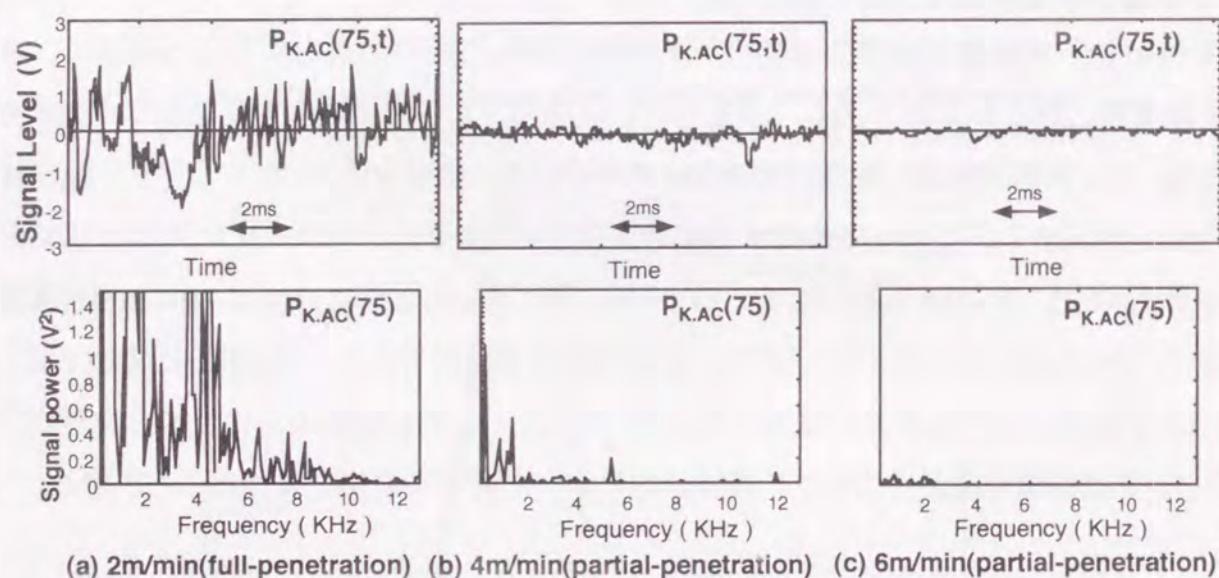


Fig.4.13 Wave form and power spectrum of $P_{AC}(75)$ at welding speed v (a)

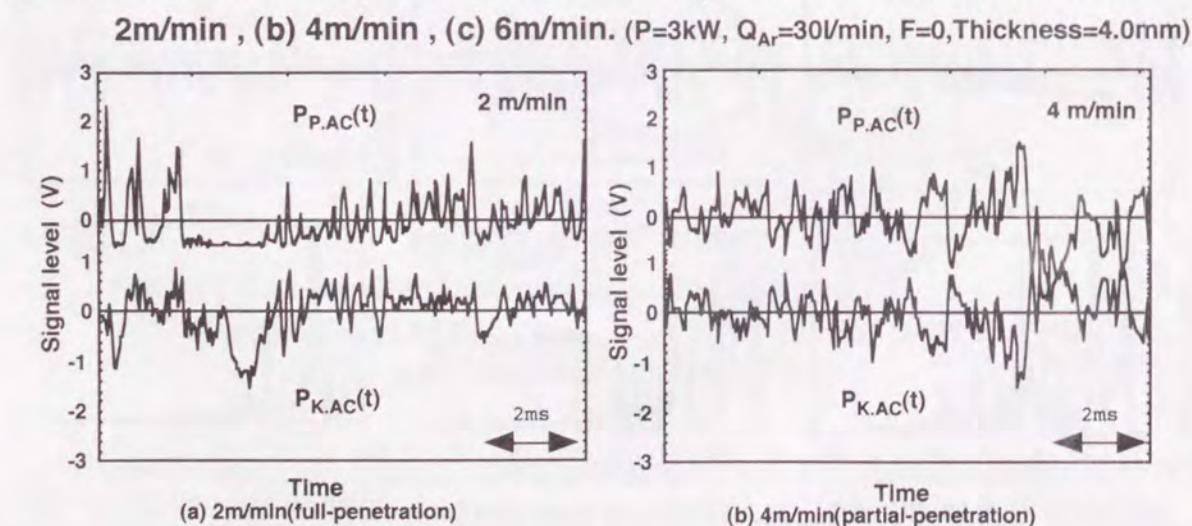


Fig.4.14 Waveform of $P_{P,AC}(t)$ and $P_{K,AC}(t)$ at welding speed (a) 2m/min (b) 4m/min.

以上のように、プラズマ発光強度の時間変動成分(AC成分)の周波数分布が板厚やスロット径により変化することが明らかになった。このことは、プラズマ発光強度のモニタリングによりキーホールの形状に関する情報が得られることを意味する。さらに貫通溶接と非貫通溶接ではブルームおよびキーホールプラズマの位相が変化することが解った。これらのこととは3章で取り扱ったようなプラズマ発光強度の時間平均値(DC成分)と異なる溶接現象に基づくものと考えられ、溶接品質のモニタリングのための情報として、DC成分に加えてAC成分を解析することにより、より多くの溶接品質に関する情報が得られることが期待できる。時間変動成分の解析による実際の溶接品質のモニタリングへの適用手法については第5章で述べる。

また、プラズマ発光のAC成分はアスペクト比の大きいキーホール溶接においても、表面側に設置したセンサーのみで、キーホールの内部あるいは裏面までの貫通状態を検出できる可能性を示唆している。

4.4 プラズマ発光の時間変動要因の考察

4.4.1 高速度撮影によるキーホール開口の観察

プラズマの時間変動の要因を調査するため、キーホール開口部の形状を毎秒約40万コマの高速度カメラを用いて撮影した。高速度カメラはFig.4.15に示すように試料面に対して約60度に設定して撮影した。この実験にはCO30PMSを用い、溶接条件は $P=3\text{kW}$, $v=2.4\text{m/min}$, $Q_{Ar}=20\text{l/min}$, $F=0$ とした。Fig.4.16はこのようにして撮影したキーホールの開口部の画像を画像解析により輝度勾配の大きい部分を輪郭として強調したもので、3~4コマおきに表示している。キーホール開口は幾分円形から逸脱して変形するが、その平均直径は周期的に拡大・縮小するのがわかる。Fig.4.17はキーホール領域の面積を求め、それから求めた平均直径の時間変化をプロットしている。図より、キーホール開口は半径方向に400~600Hzで周期的に振動している。

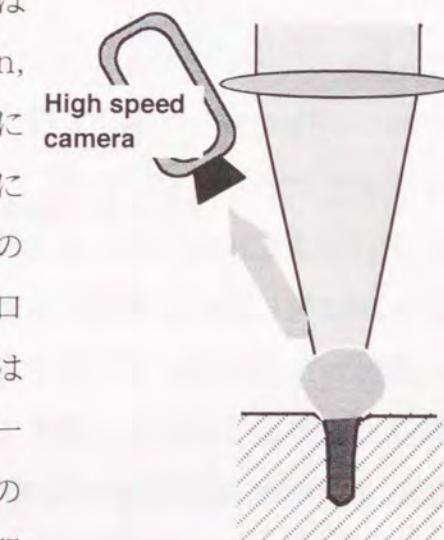


Fig.4.15 Set up of high speed camera for photographing keyhole.

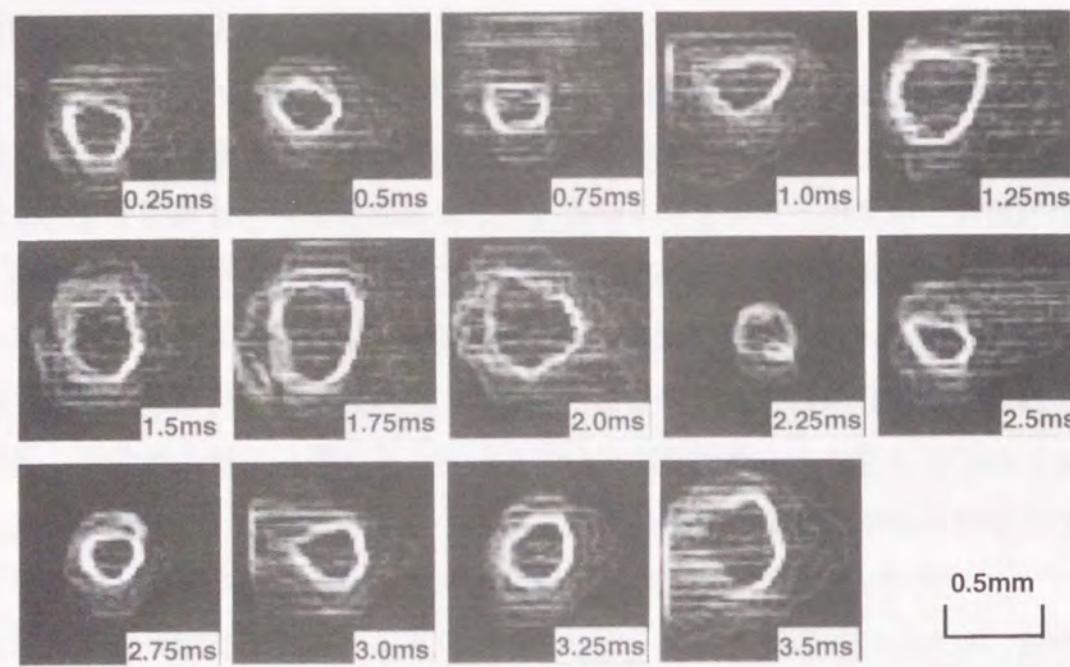


Fig.4.16 Dynamic behavior of keyhole opening taken by high speed camera.
($v=2.4\text{m/min}$, $P=3\text{kW}$, $Q_{\text{Ar}}=20\text{ l/min}$)

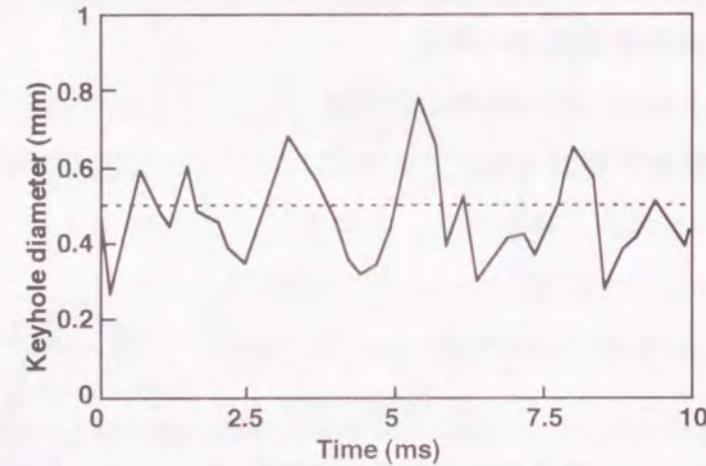


Fig.4.17 Time change of the keyhole radius.

Fig.4.18は同じ溶接条件で、高速度カメラを試料面に平行に設定し、溶接進行方向に垂直に撮影したものであり、プラズマプルームの時間変化を示している。プラズマプルームは高さが激しく変動し、完全に消滅する瞬間も認められる。また、試料表面に接する約0.5mmの高さに高輝度の領域が見られ、1~1.5kHzで周期的に振動していることがわかる。このプルームの高速度撮影で直接観察される変動周波数は、キーホール開口で観察された変動周波数400~600Hzより2~3倍高く、前節で示したプラズマ発光強度のAC成分の周波数である数kHz程度と、比較的良く一致する。このことから、プラズマ発光強度の時間変動は、開口径の変動以外にキーホール内部の変動の寄与もあることが示唆される。

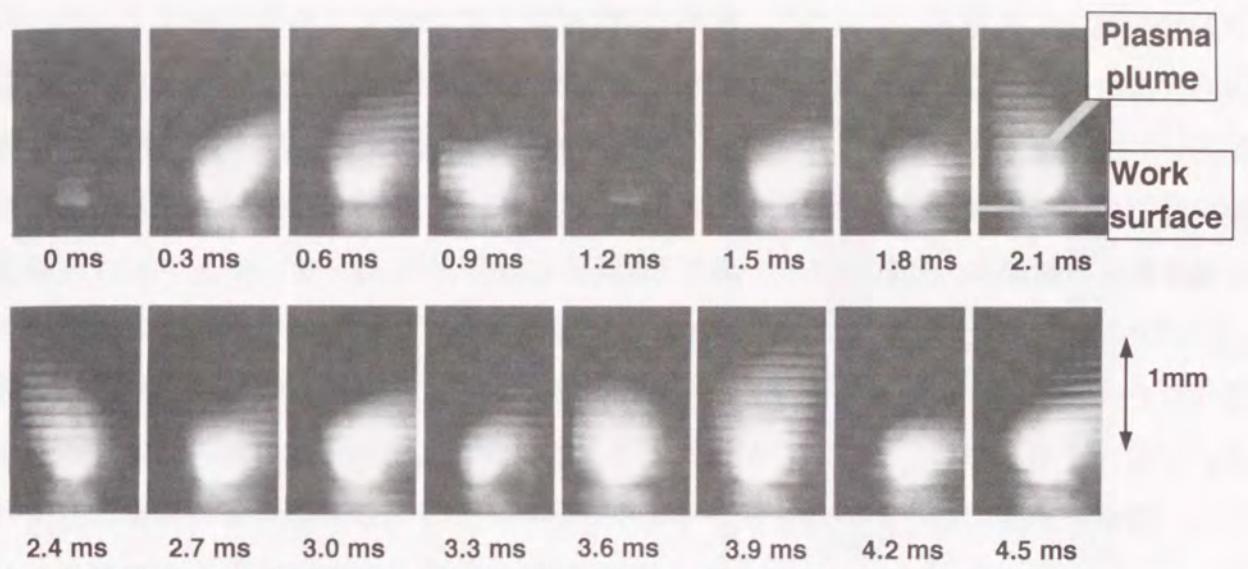


Fig.4.18 Dynamic behavior of plasma plume taken by high speed camera.
($v=2.4\text{m/min}$, $P=3\text{kW}$, $Q_{\text{Ar}}=20\text{ l/min}$)

4.4.2 発光強度の変動要因

前節までで、プラズマ発光は数kHz程度のAC成分を含んでおり、その周波数成分が板厚、スポット径、および貫通溶接か非貫通溶接化によって変化するため、溶接品質のモニタリングに有効な情報を有することを示した。また、キーホール開口およびプラズマプルームの高速撮影による観察により、キーホールならびにプルームが時間的に激しく時間変動していることを示した。本項では、このプラズマ発光の時間変動の要因を考察する。

Beyerらは、キーホール中のプラズマが逆制動輻射によるレーザビームの吸収で急速に温度上昇し、さらに金属蒸気の密度が上昇することにより、プラズマがキーホール開口から噴出し、雰囲気中に拡散するサイクルにより、プラズマ発光強度が変動すると説明している⁴¹⁾。しかし、キーホールの深さや径と時間変動の周波数の関連を説明できない。

レーザと溶接現象が類似していると考えられる真空中電子ビーム溶接では、キーホールの前面の壁に電子ビームを集中的な照射を受ける不連続な段差が生じ、この段差がキーホールの深さ方向に移動する現象が知られている³⁴⁾。これは、キーホール壁の集中的な電子ビーム照射部が他の領域より高温となるために、アブレーション圧力の勾配により移動するものと、説明されている。しかし、高速度撮影で観測されたキーホールの開口径が変動するような現象は説明できない。

Kroosらは第3章で示したように、溶融金属の表面張力 P_y と壁面からの金属粒子の蒸発によるアブレーション圧力 P_{abl} の平衡により維持されるキーホールが平衡点を中心

振動するモデルを提示している³¹⁾。振動の駆動力としては多くの外乱が存在するが、最終的にはキーホールの固有振動が支配的になると考えられる。その際のキーホールの振動モードは半径方向の振動以外に方位角振動、軸振動が考えられ、深溶け込みレーザ溶接ではその固有振動数は数kHzであると計算している。この値は本研究の発光強度の変動周波数の実験結果と比較的良好く一致する。

Dulleyらは、レーザ溶接時に誘起される音響信号を大気伝播のマイクロフォンで検出し、その周波数分析を行った²⁴⁾。レーザ出力を時間的に変調し、その変調周波数の通倍波に相当する音響信号のピークが現れることを見いだしている。これは、キーホールの持つ固有振動数に近い変調周波数を与えると、キーホールが共振することを示している。

これらのキーホール内部の物理的なバランスは、蒸発粒子の反跳力がキーホール壁面付近が熱平衡状態では扱えず、クヌーセン層⁴⁷⁾を考慮する必要があり、沸点に近い金属壁面の性質が十分に解明されていないことや、Semakらが提示⁴⁸⁾しているような蒸発金属の反跳力によって溶融金属が押し出され、体積変化を伴う大きい振幅の振動の記述が困難であることなどの課題も内包している。しかし、本研究で得られたプラズマ発光強度の時間変動現象の実験結果は、十分に解明されていないが、キーホール振動の共鳴振動による説明が最も妥当と考えている。

4.4.3 共鳴振動による考察

深溶け込み溶接で形成されたキーホールは、第3章で示したように静的にはキーホール壁面から蒸発する金属粒子のアブレーション圧力 P_{abl} と溶融金属の表面張力 P_γ との圧力の均衡によって維持されていると考えられる³²⁾。ここでは、Fig.4.19に示すような貫通溶接での溶融池内に円筒形のキーホールを仮定し、Fig.4.20に示すように溶融池径 a_m 、キーホール径を a 、キーホール深さを d とする。Fig.3.3に P_{abl} と P_γ のキーホール半径の関係を示したように、 $P_{abl}(a) = P_\gamma(a)$

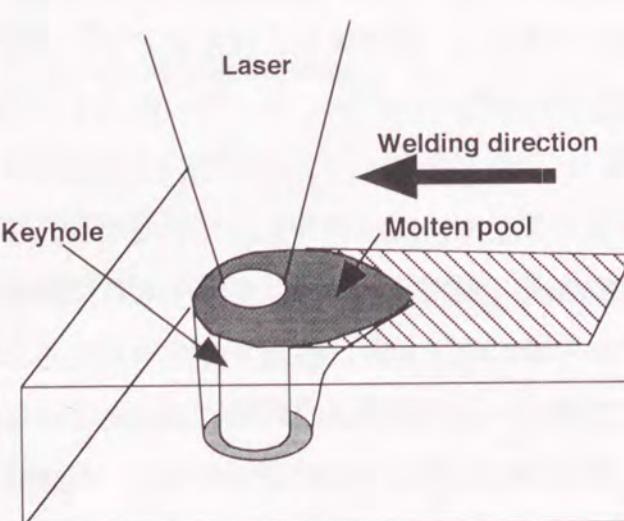


Fig.4.19 Illustration of keyhole in full penetration welding.

となる2つの点のうち、安定な圧力平衡点は図中のS点のみである。この平衡点に対して、金属プラズマの噴出や溶融金属の対流等の外乱によって、S点を中心に $B(P_{abl}(a) - P_\gamma(a))$ を復元力とするキーホールの共鳴的な振動が発生することが考えられる^{31,49)}。

キーホール振動は、半径、深さ及び方位角に3つの基本モード(Fig.4.21)が存在する。それぞれの振動の次数を n, l とし、(a)が基本モード $(0,0)$ である半径振動モード、(b)が断面方向の方位角振動モード、(c)が深さ方向の軸振動モードを表している。この (n,l) モードでの固有振動数はKroosらによって、次式によって与えられている³¹⁾。

$$\omega_{nl}^2 = \frac{ka}{K_n(ka)} \left[\frac{\gamma}{a^3 \rho} (n^2 + k^2 a^2) + \frac{B}{a \rho} \right] \quad (4.11)$$

ここで、ここで、 B =復元圧力、 ρ =溶融金属の平均密度、 a =キーホール半径、 C =溶融池半径とキーホール半径の比、 k =軸振動の波数、 K_n =変形ベッセル関数、 γ =表面張力を表している。

Fig.4.22は、式(4.11)を用いてKroosらが計算した固有振動数を示している。材料をFeとし、ビーム径が $\phi 300\mu m$ のCO₂レーザを照射した場合において、振動の次数 (n,l) をパラメータとし板厚の関数として示されている。復元圧力 B は吸収エネルギーに依存するので、与えられた板厚に対して最大の周波数を表している。

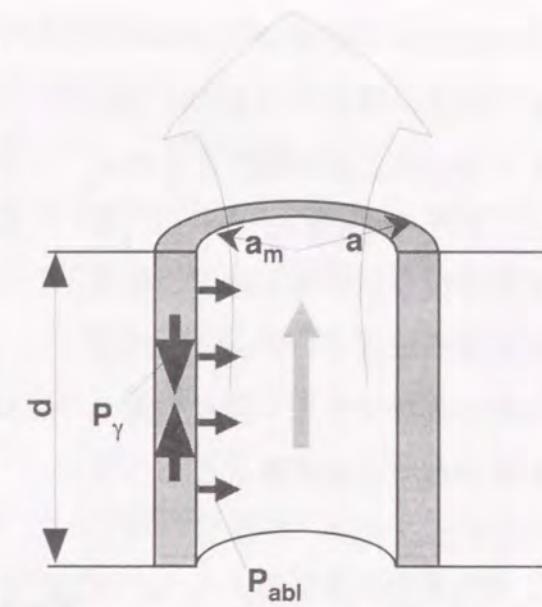


Fig.4.20 Pressure balance in keyhole.

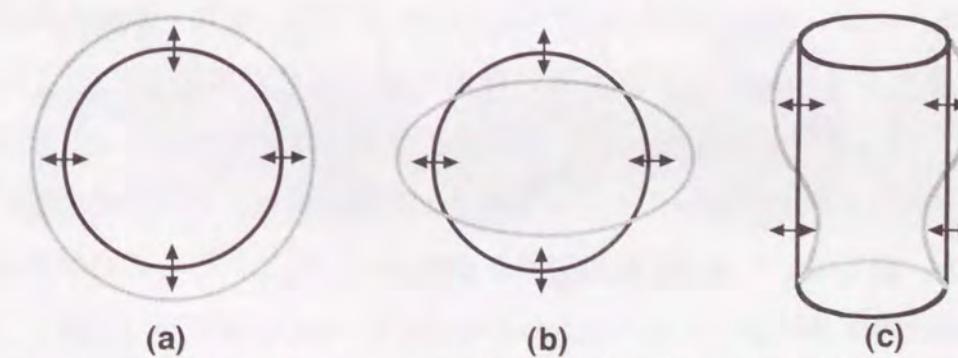


Fig.4.21 The three basic oscillation modes of a cylindrical keyhole at mode ;(a) radial $(0,0)$, (b) azimuthal $(n,0)$, (c) axial $(0,l)$ ³¹⁾.

固有振動数の計算結果は数kHz程度であり、振動モードのn, lが大きくなるほど高い固有振動数となっており、軸振動モードlが大きい場合は板厚が小さいほど固有振動数は高くなっている。これは実験で得られたプラズマ発光強度の周波数分布域とほぼ重なるものと考えられる。

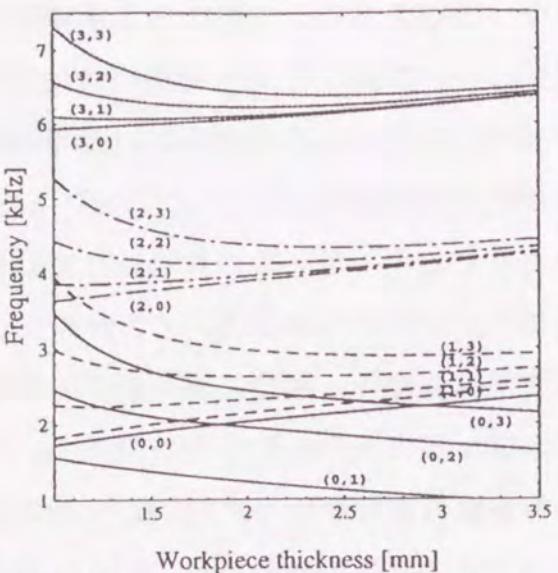


Fig.4.22 Relationship between workpiece thickness and maximum eigenfrequencies of radial, axial and azimuthal oscillations³¹⁾.

4.4.4 貫通・非貫通に溶接におけるプラズマ発光

キーホールとプルームのプラズマ発光強度のAC成分 $P_{K.AC}$, $P_{P.AC}$ の実験結果は、キーホール開口の高速撮影による観察結果および、キーホールの共鳴振動の固有振動数の計算結果を考慮すると、次のように考えることができる。

Fig.4.23はキーホール内の半径振動および軸方向振動によるプラズマの密度の変化及び開口よりの吐出を模式的に描いたものである。図中の濃淡はプラズマの密度の大小と対応させている。図に示すように軸方向振動によってキーホール内のくびれた部分が移動することにより、キーホールプラズマの一部はキーホールから押し出されプルームとなって拡散し、一部はキーホール下部へ移動する。

このようなキーホールプラズマの吐出現象はキーホールの開口部付近の局部的にプラズマの温度、電子密度の高い領域(ホットコア)に大きな影響を与えるものと考えられる。このようなキーホール開口部付近のホットコアの存在は、プルームの直接観察でワーク表面に隣接するキーホールの直上部に輝度の高い領域が認められること及び、3.6.3項で述べたキーホールの表面付近の発光強度が強い領域の存在からも示唆されている。このホットコアのキーホールの共鳴振動による挙動がキーホールの裏面が開いている貫通溶接と、閉じている非貫通溶接で異なるために、 $P_{K.AC}$, $P_{P.AC}$ の時間変動の位相が変化するものと考えられる。

Fig.4.23(a)に示した貫通溶接においては、ホットコアはキーホール開口及び、キーホール下部へと分かれて噴出する。プルームは拡散し膨張することによる温度低下の速

度が大きく、次第に消失する。このプルームの拡散速度はキーホール内部の温度低下の速度より早いため、プルームのプラズマ発光強度はキーホールのプラズマ発光強度に比べ位相がやや進んで観測されるものと考えられる。

非貫通溶接の場合は、キーホール裏面が開口していないことから、ホットコアのキーホール内部への移動が抑制され、Fig.4.23に示すようにキーホールの開口部付近で上下に移動するため、プルームとキーホールのプラズマ発光の位相が逆になるとと考えられる。

本研究ではプラズマ発光の変動の周波数がキーホール直径や板厚によって異なり、また、貫通・非貫通によって差異があることを実験的に示した。その結果は次章以降で示す溶接品質のモニタリングに応用できる。そのメカニズムは以上のように推論しているが、その解明には今後の詳細な検討が必要である。

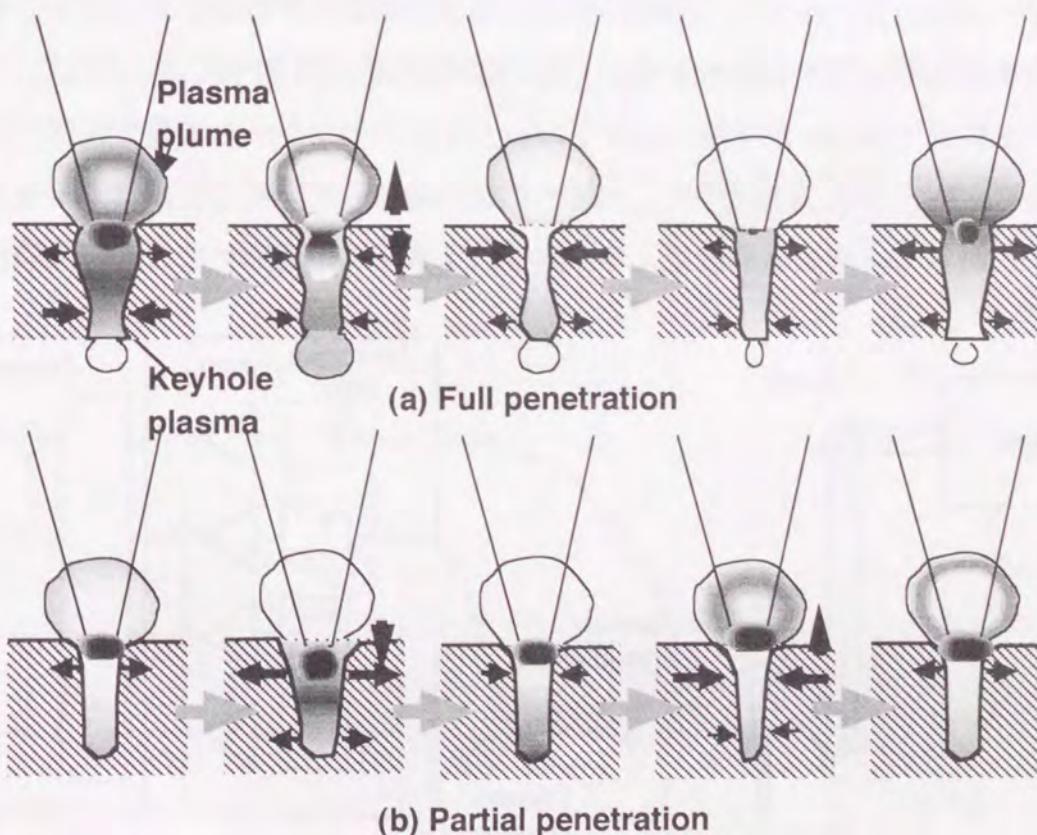


Fig.4.23 Illustration of plasma ripple due to keyhole oscillation.

4.5 レーザ溶接品質のインプロセスモニタリングのためのセンサーシステム

以上の成果に基づいてレーザ溶接品質をインプロセスでモニタリングできるセンサーシステムを構築した。本システムの特徴は、検出角度の異なる2種類の光センサーを用いて、キーホールとプルームのプラズマ発光強度を分離し、さらに両者の時間平均値であるDC成分と、時間変動値であるAC成分の4つの信号($P_{K,DC}$, $P_{P,DC}$, $P_{K,AC}$, $P_{P,AC}$)を同時に検出することにある。Fig.4.23にセンサーシステム構成を示すように、検出角度 θ_1 および θ_2 の2つのセンサーをレーザ照射点を中心とする円周上に設置し、同時計測した。

インプロセスモニタリングの検出対象となる溶接不良は、キーホール径が $\phi 0.5\text{mm}$ 程度で溶接速度が 50mm/s 程度であるので、 100Hz 程度の時間分解能が必要である。このため、DC成分のサンプリング周波数は2倍の 200Hz を主に用いた。また、本章で述べたプラズマ発光強度のAC成分とキーホール形状との相関を解析するためには 10kHz 以上の周波数成分を検出することが必要であるので、AC成分のサンプリング周波数は 100kHz とした。

センサーの出力は、DC成分の測定用とAC成分の測定用に分割し、4チャンネルの独立したローパスフィルタおよび計装アンプで前処理後、AD変換してコンピュータに取り込み、本研究で提示した手法によりプルームとキーホールからの発光強度に分離することにより、 $P_{K,DC}$, $P_{P,DC}$, $P_{K,AC}$, $P_{P,AC}$ の4つの信号値として記録した。第5章および第6章では、これらの信号値の解析により、溶接パラメータの変動検出と溶接欠陥の検出を行った。

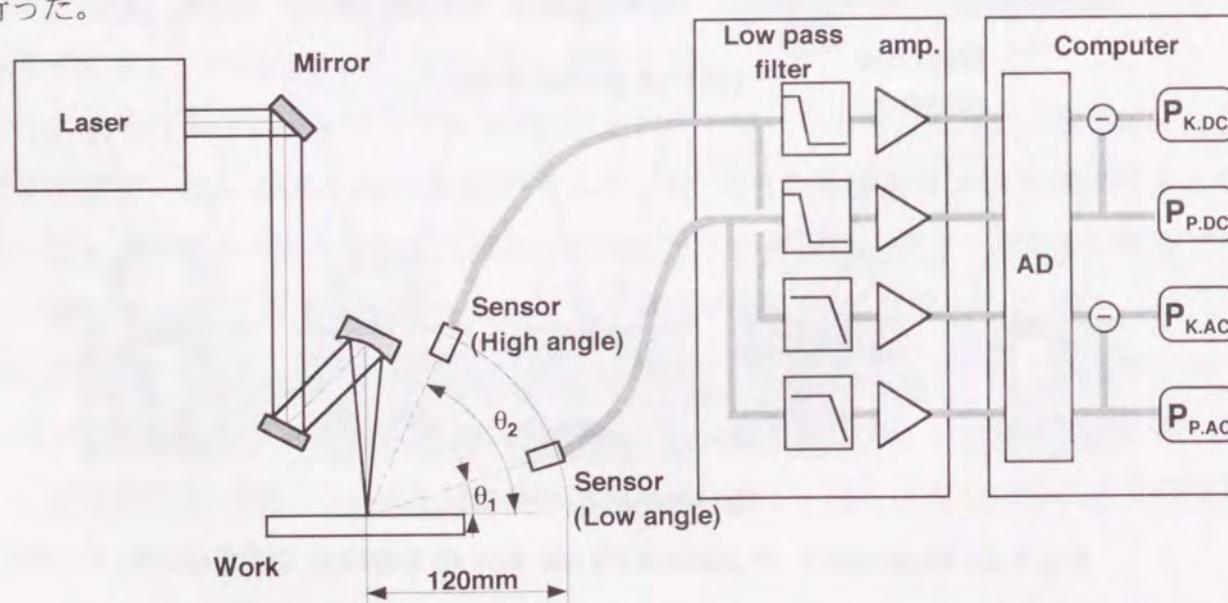


Fig.4.24 Multi photo sensor system developed for in-process monitoring of laser weld quality.

4.6 結言

プラズマ発光強度は数kHz程度の周波数で時間変動しており、その時間変動の周波数分布および位相と溶接ビードの溶け込み形状には相関があることが解った。これにより、第3章のプラズマ発光強度の時間平均値に加えて、時間変動成分を解析することにより、レーザ溶接品質のモニタリングの精度を高める情報が得られることがわかった。本章で得られた結果は以下に要約される。

- (1) キーホールとプルームのプラズマ発光強度は 10kHz 程度までの時間変動を含んでいる。
- (2) 貫通溶接においては、板厚が厚いほどキーホールプラズマのピーク周波数は低くなる。
- (3) 貫通溶接においては、スポット径が小さいほどキーホールプラズマのピーク周波数は高くなる。また、同一集光系では同じ焦点外し量でも、焦点位置が正側の方が負側よりも、周波数成分の低下速度が大きい。
- (4) 裏面までの貫通溶接ではキーホールプラズマとプラズマプルームは同位相であるが、非貫通溶接では符号が逆の位相となる。
- (5) このようなプラズマ発光の時間変動は、キーホールの共鳴振動現象を考えると説明できる。

第5章 プラズマ発光強度による溶接パラメータ変動の検出

5.1 はじめに

レーザ溶接の品質は溶接パラメータの変動に敏感に影響を受け、予期しない溶接不良や、突発的な溶接欠陥が発生する可能性があることを第2章で示した。これに対して、第3章および第4章では複数センサーを用いてキーホールとプルームのDC成分ならびにAC成分の発光強度を分離できる新しいプラズマ発光強度の解析手法を提案した。これによって、単一センサーを用いる既存の検知手法では知ることのできなかった溶接現象の変動を把握できるようになった。 P_p と P_k に分離した発光信号から溶接欠陥を検出することができるが、その手法の自動車部品のテールードブランク溶接への適用を第6章に述べる。

また一方では、溶接不良が発見されたときにその原因を推定し、迅速に対策することが、生産ラインでは重要である。レーザ溶接の品質に影響を与えるパラメータは数多くあり、経験を積んだオペレータであっても、溶接不良を発見した際にどの溶接条件が変動したかを識別することは容易ではない。また、光学部品の経時劣化は、加工機の使用環境や稼働状況によって大きく影響されるため、メンテナンス時期を予測することは困難である。このようなトラブルシューティングや光学部品のメンテナンス時期決定の補助を行い、欠陥発生を未然に防ぐことも、モニタリングシステムに期待されている。本章では第3章、第4章で述べたプラズマ発光強度の検出手法に基づいて、生産ラインで想定される溶接パラメータの変動が受光信号に与える影響を調査し、受光信号の変化挙動より、変動した溶接パラメータを識別する手法を提案する。また、レーザ溶接中の発光強度の長期的なデータ解析から光学部品の経時劣化を検出する方法についても述べる。

5.2 検出対象となるパラメータ

レーザ溶接プロセスにおいては、Fig.5.1に示すような品質の安定性を阻害する要因が存在し、溶接不良の発生の可能性があることは第2章で述べた。継ぎ手部の精度不良や傷および油分等による汚染などがあると、キーホールが突発的に変動することにより穴あき欠陥等が発生する。このような溶接欠陥の検出については第6章で取り扱う。

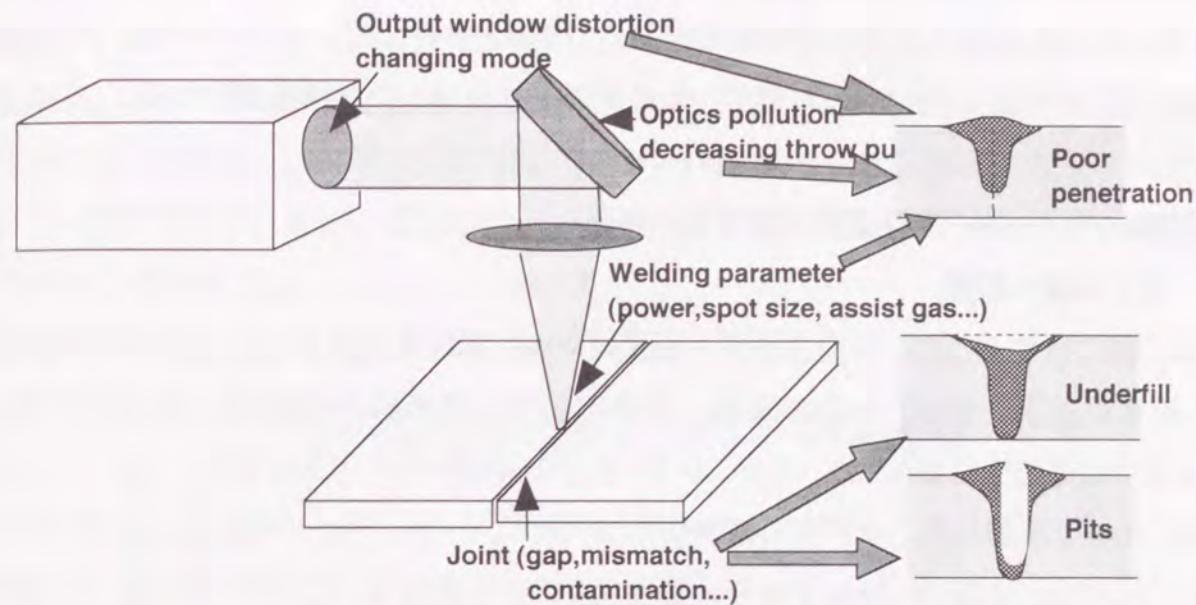


Fig.5.1 Welding factor vs defects.

溶接品質に影響を与える溶接パラメータとしては、溶接速度v、ガス流量Q、焦点位置F、発振器の集光性能 M^2 や加工点のレーザパワーPが挙げられる。溶接速度vに関しては、通常のレーザ加工機はNC制御されており、変動する可能性は事実上無視できる。ガス流量Qは、加工ガスノズルがレーザ照射部の10mm程度の近傍に設置されるため、スパッタの付着やノズルアライメントの変化により、加工点での実効的な流量が変動する可能性がある。

焦点位置は実際の生産では、光学部品の劣化およびワークの加工機内でのセット位置精度不良の2つの要因により変動する可能性がある。発振器の出力鏡のような透過光学部品が劣化すると熱誘起光学歪み¹⁸⁾により焦点位置は数mm程度の変動をする。これは、焦点位置の許容範囲を容易に逸脱させうる大きさである。また、特に3次元形状のワークの溶接では、ワークの形状不良や治具との固定精度の誤差により数mm程度の焦点位置の変化が、予期せず発生することがあり、焦点位置の検出が必要である。

発振器の出力は現在のCO₂レーザ発振器では設定値に一定に保つ機能を持っているものが多いが、伝送及び集光光学系の劣化により加工点でのレーザパワーの変動が生じる。光学部品の経時劣化は比較的長時間にわたって発生するので、レーザパワーは比較的長期間の変動を検出する必要がある。レーザ発振器の集光性能 M^2 は発振器光学系の経時劣化に伴う変動が考えられるが、集光スポットへ影響を与えることから、焦点位置の変動に包含されると考える。

これらのことから、本章ではレーザ溶接の基本パラメータの中で、実際の生産ラインで長期・短期を含めて変動する可能性があるパラメータとして、レーザパワーP、焦点位置F、ガス流量Qに注目し、パラメータ変動と受光信号との関係を調査する。

5.3 溶接パラメータの変動と発光強度との関係

5.3.1 ガス流量の影響

Fig.5.2に示すように、アシストガス流量によって溶け込み深さは3つの領域(領域Iのガス流量が過小、領域IIの適正流量、領域IIIのガス流量過大の領域)に分けられる。Fig.5.2では適正な領域II($20 < Q_{Ar} < 50 \text{ l/min}$)を網がけて示している。

適正領域の流量範囲は本研究の標準条件($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $F=0\text{mm}$, $f/\text{No}=7.1$)では、 $20 < Q_{Ar} < 50 \text{ l/min}$ であり、管理するのに十分範囲が広い感がある。しかし実際には、ガス消費量を削減するため、できるだけ少ないガス流量に設定したい要請を考えると管理範囲はそれほど広くない。さらに、ノズルアライメントの変化やノズルへのスパッタの付着などによりレーザ照射部へ実際に供給されるガス流量が予期せず減少する可能性がある。そこで溶接品質を一定に保つためには、加工点における実効的なガス流量をモニタリングすることが望まれるが、現実に不可能である。

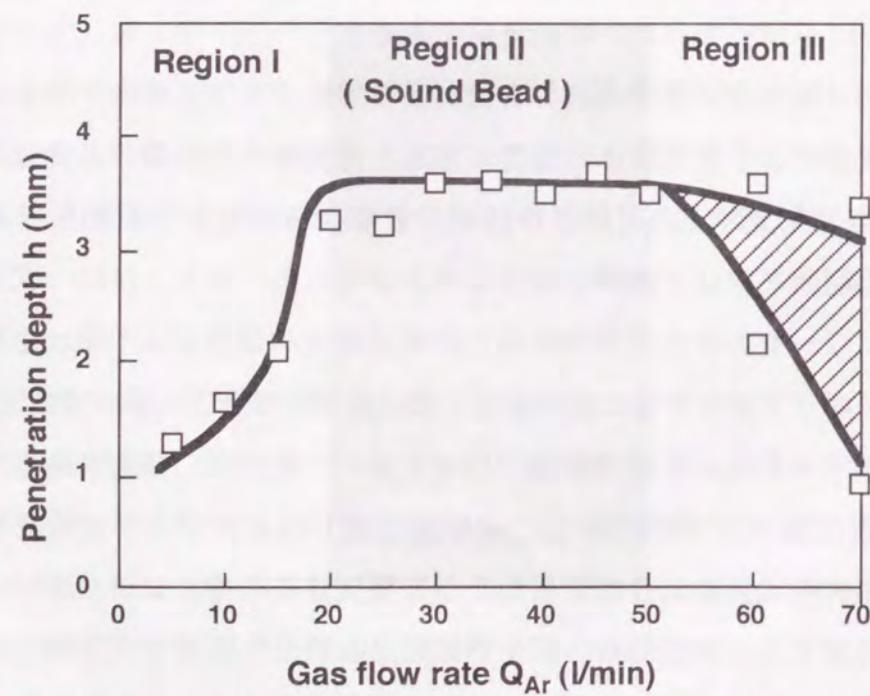


Fig.5.2 Relationship between gas flow rate Q_{Ar} and penetration depth h .
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $F=0\text{mm}$)

上記3領域において、レーザ溶接時に発生したプラズマ発光強度を検出角度75度と5度のフォトダイオードによる受光強度 $P(75,t)$ 、 $P(5,t)$ の波形をFig.5.3の(a)～(c)に示す。領域I($Q_{Ar}=5 \text{ l/min}$)では、 $P(75,t)$ 、 $P(5,t)$ とともに、平均強度は大きいが、時間変動成分は小さい。領域II($Q_{Ar}=30 \text{ l/min}$)では、領域Iとは逆に $P(75,t)$ 、 $P(5,t)$ 共に平均強度は小さく、時間変動が大きい。領域III($Q_{Ar}=60 \text{ l/min}$)では、 $P(5,t)$ が非常に小さい値となっていることがわかる。

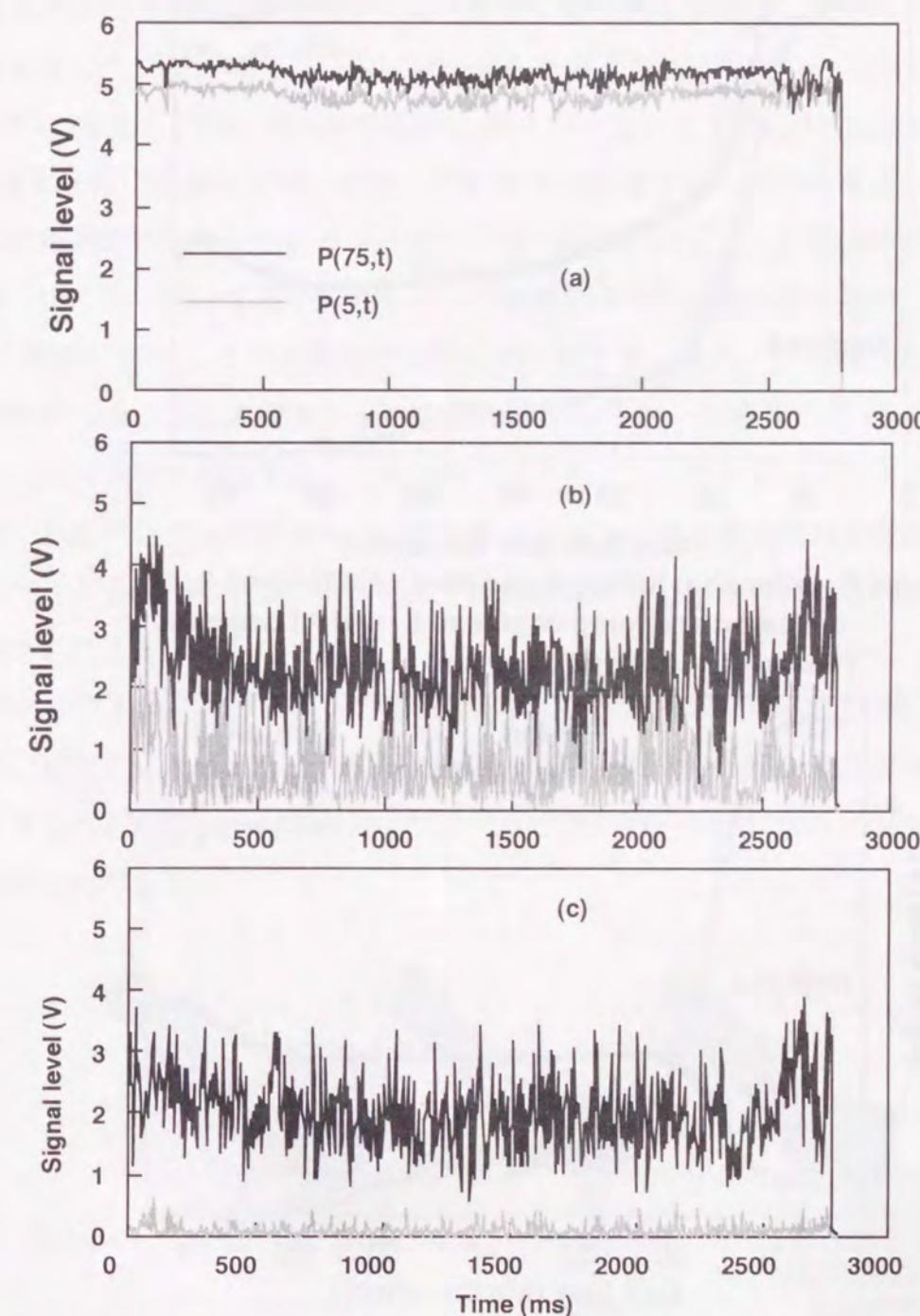


Fig.5.3 Wave form of each gas flow rate Q_{Ar} (a) 5 l/min, (b) 30 l/min, (c) 60 l/min.
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $F=0\text{mm}$)

Fig.5.4は時間平均値(DC成分)である $P_{DC}(5), P_{DC}(75)$ の Q_{Ar} との関係を示している。ガス流量 Q_{Ar} の増加に伴って、 $P_{DC}(5)$ は単調に減少し、領域IIIではほぼ0にまで低下する。 $P_{DC}(75)$ も単調に減少するが、領域IIでかなり高い値を維持し、領域IIIでは若干上昇している。このように各センサーの受光強度の変化はなだらかであり、個々のセンサーの検出量からは直接各領域を明確に識別することは出来ない。

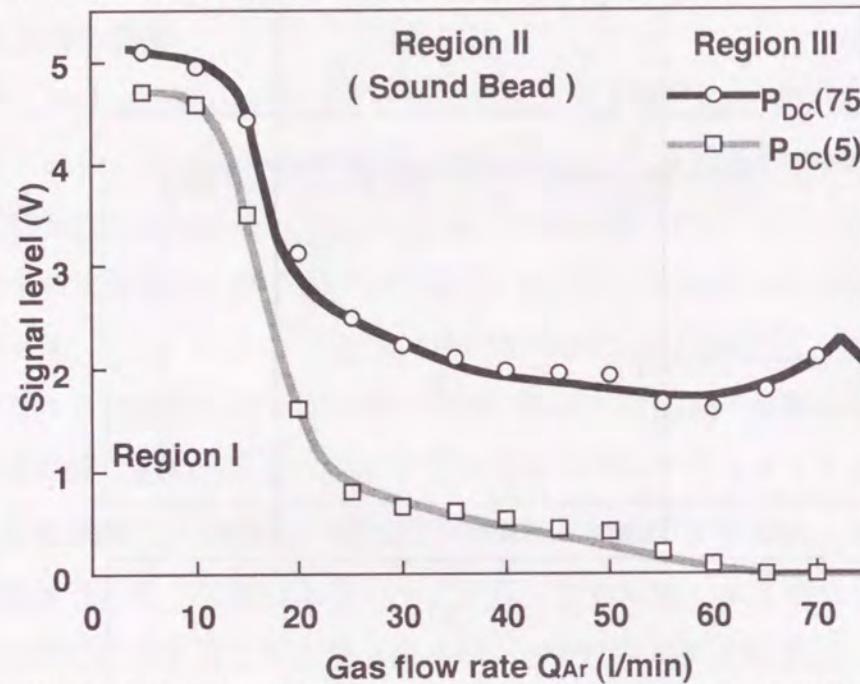


Fig.5.4 Relationship between gas flow rate Q_{Ar} and light emission at aiming angles of 5 and 75 degrees.
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $F=0\text{mm}$)

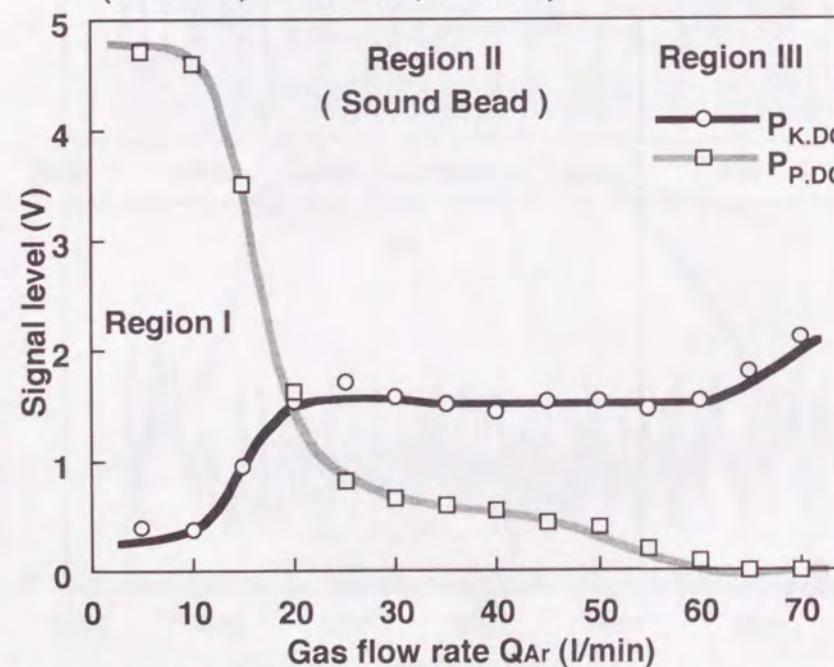


Fig.5.5 Relationship between gas flow rate and light emission from keyhole $P_{K,DC}$ and plume $P_{P,DC}$. ($P=3\text{kW}, v=3\text{m/min}, F=0\text{mm}$)

これに対して、第3章で述べた手法で、プルームプラズマとキーホールプラズマの発光強度の時間平均値 $P_{P,DC}, P_{K,DC}$ に分離して、その時間平均値を求めたものをFig.5.5に示す。 $P_{P,DC}$ と $P_{K,DC}$ を区別して検出することにより、 $P_{DC}(75), P_{DC}(5)$ に比べ3つの領域がはっきりと識別できるようになり、検出信号の物理的意味もより明確になる。

アシストガスの及ぼす効果をFig.5.6に模式的に示している。領域Iでは、 Q_{Ar} の低下に伴うアシストガスの冷却効果の低減により、プラズマプルーム $P_{P,DC}$ が急激に増大し、溶け込み深さの減少を反映してキーホールプラズマ $P_{K,DC}$ が減少している。これは、逆制動輻射によってプラズマプルームにレーザ光が吸収されてキーホールへの到達量が減少したためと考えられる。領域IIでは $P_{K,DC}$ がほぼ一定となるのに対し、 $P_{P,DC}$ はガス流量 Q_{Ar} の増大と共に直線的に減少する。この領域では溶け込み深さはほぼ一定である。このことは領域IIで発生しているプラズマプルームはレーザビームに対してほぼ透明であり、キーホールに到達するレーザビームに影響を与えていないことを示している。これは、3.3節のプルームの分光解析の結果とも一致する。また、アシストガス圧がキーホールの力のバランスに影響を与えないものと思われる。領域IIIでは、 $P_{P,DC}$ はほぼ0となり、 $P_{K,DC}$ は不安定に増大する。この領域ではさらにアシストガス圧が大きくなるため、キーホールに大きな圧力が加わり、これをキーホール壁の表面張力が安定に維持できなくなることを示している。その結果、溶融金属が押し出され、安定にキーホールが維持できなくなると考えられる。

このようにアシストガスの圧力領域に応じて、プルームとキーホールに及ぼす影響が段階的に変化するため、 $P_{P,DC}$ と $P_{K,DC}$ を分離することにより、アシストガス圧の変動の把握ができることが解った。これは、プルームとキーホールに対するアシストガスの影響が異なるためである。

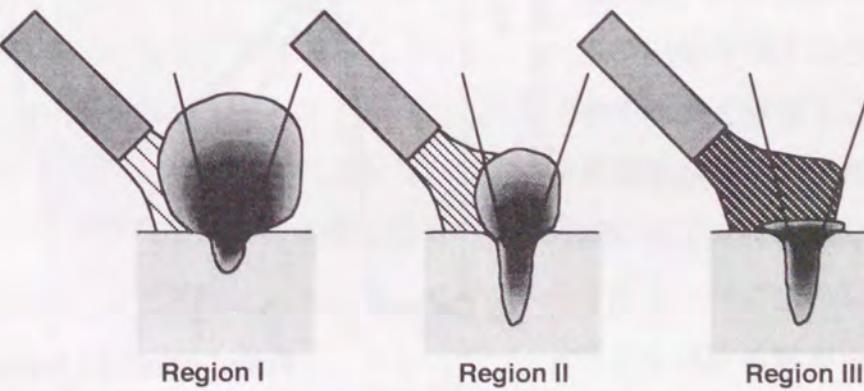


Fig.5.6 Illustration of effect of gas flow rate.

5.3.2 焦点位置の影響

Fig.5.7は本研究での標準条件($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m}/\text{min}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l}/\text{min}$, $f/\text{No}=7.1$)の中で焦点位置Fのみを変化させた場合の溶け込み深さ h との関係を示している。溶け込み深さは $-2 < F < 2\text{mm}$ ではほぼ一定であるが、 $|F|$ の増大により急激に減少する。図中では仮に溶け込み深さが3mm以上の範囲である $-3 < F < 2\text{mm}$ を良好範囲とし、この範囲を図中で網掛けして示した。

Fig.5.8は、プラズマプルーム $P_{\text{P,DC}}$ とキーホールプラズマ $P_{\text{K,DC}}$ の時間平均値と焦点位置Fの関係である。 $P_{\text{P,DC}}, P_{\text{K,DC}}$ 共に $|F|<5\text{mm}$ 程度で大きな値を示すが、 $F=0$ を中心として、極小値を示している。 $|F|=4\sim 5\text{mm}$ 程度での極大値はFが正側の方が幾分大きな値を示している。

このようなプラズマ発光強度のDC成分における、焦点位置が正負に変動した影響の非対称性は、Fig.4.11で示したAC成分における非対称性と正負での傾向が異なっている。このことは、焦点位置の変動量とその方向を検出できることを示唆しており、モニタリング技術の実用化に重要な意義を持つ。レーザ切断用の加工機では静電容量タイプのセンサーを用いた焦点位置補正機構が実用化されているのに対し、レーザ溶接時にはプラズマプルームの影響により

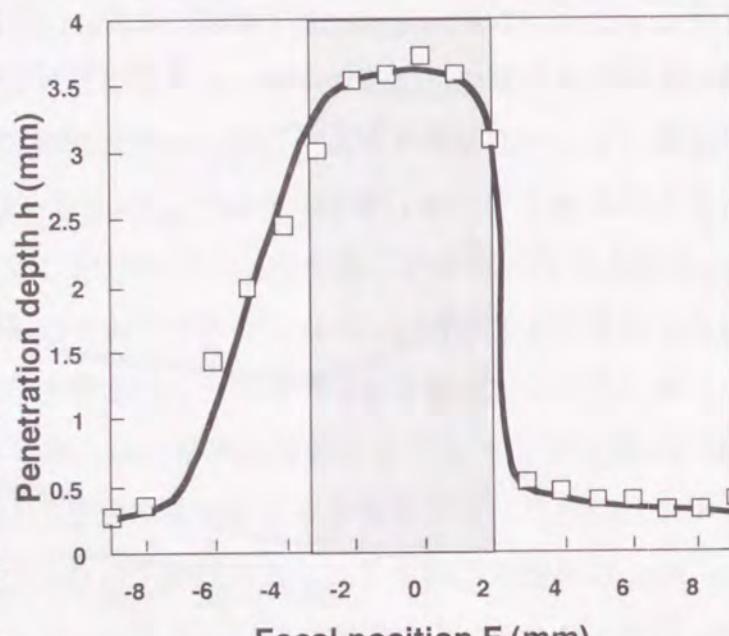


Fig.5.7 Relationship between focal position F and penetration depth h.
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m}/\text{min}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l}/\text{min}$)

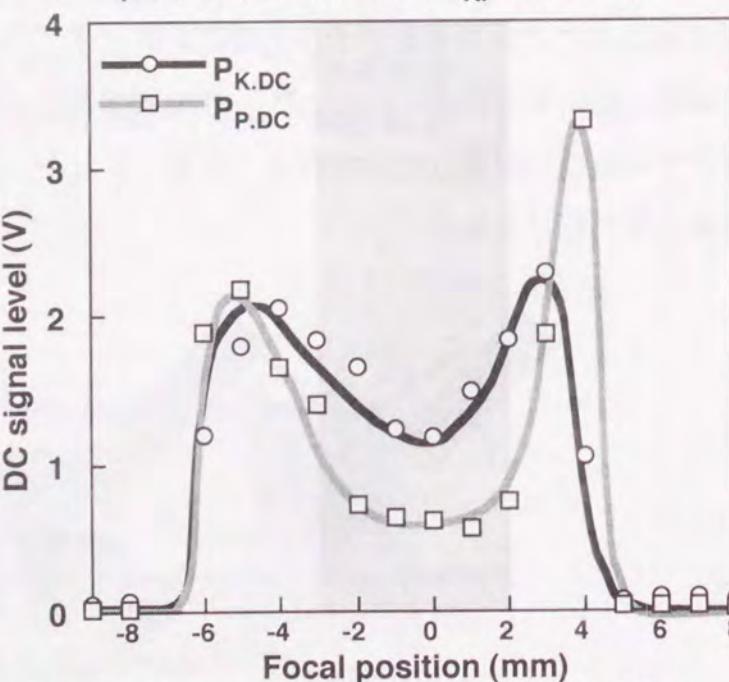


Fig.5.8 Relationship between focal position and DC signal level of $P_{\text{P,DC}}$ and $P_{\text{K,DC}}$.
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m}/\text{min}$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l}/\text{min}$)

センサーが誤動作し使用できなかった。これに対し、プラズマ発光強度のDC成分とAC成分により焦点位置の変動量とその変動方向を解析する手法は、レーザ溶接加工機の自動焦点技術の可能性を示唆している。

焦点位置Fが変化したとき、DC成分である $P_{\text{P,DC}}$ 、 $P_{\text{K,DC}}$ の変化傾向を解明するには更に詳細な解析が必要であるが、現状では次のように推察している。 $F=0$ 付近で発光強度が極小となるのは、第2章で述べた分光分析によって得られたキーホールに隣接するブルームの温度・電子密度と同じ傾向であり、ワーク表面でのスポット径が小さいため、キーホール径が小さくなり、プラズマがキーホール壁面の溶融金属によって冷却されるためであると考えられる。このため、 $F=0$ 付近でプラズマ発光強度は極小となる。 $F<0$ の場合は、最もパワー密度の大きい焦点がワーク内部にあるため、ブルームの加熱は比較的小さく、DC成分の極大値は $F<0$ の場合よりも $F>0$ の場合の方が大きい。

これに対してAC成分の焦点位置に対する影響は、4.3.2項で考察したように、キーホールの蒸発反跳力 P_{abl} と表面張力 P_y の平衡状態に、レーザ光の入射する角度が異なることが影響を与えるためと推察される。

5.3.3 レーザパワーの影響

本研究での標準条件において、レーザパワー P を変化させた場合の溶け込み深さ h との関係をFig.5.10に示す。溶け込み深さは $P>1\text{kW}$ ではレーザパワーの増大によって、ほぼ直線的に増大する。Fig.5.11は時間平均値(DC成分)である $P_{\text{P,DC}}$ および $P_{\text{K,DC}}$ のとレーザパワー P との関係であり、溶け込み深さと同様に $P_{\text{P,DC}}, P_{\text{K,DC}}$ も直線的に変化し、その傾きは $P_{\text{K,DC}}$ の方が大きい。5.3.1項で述べたように標準条件でのアシストガス流量では、プラズマブルームはキーホールに到達するレーザビームにほとんど影響を与えることなくキーホールに到達すると考えられるので、レーザパワーの変動の影響は $P_{\text{P,DC}}$ に比べ $P_{\text{K,DC}}$ の方が大きくなるものと考えられる。

レーザパワーの変動に対しては、 $P_{\text{P,DC}}, P_{\text{K,DC}}$ 共に直線的な変化をするの伝送及び集光光学系の劣化によるレーザパワーの変動は、比較的長期間の解析によって、変動の検出は可能であると考えられる。このような信号強度の推移については5.5節で述べる。

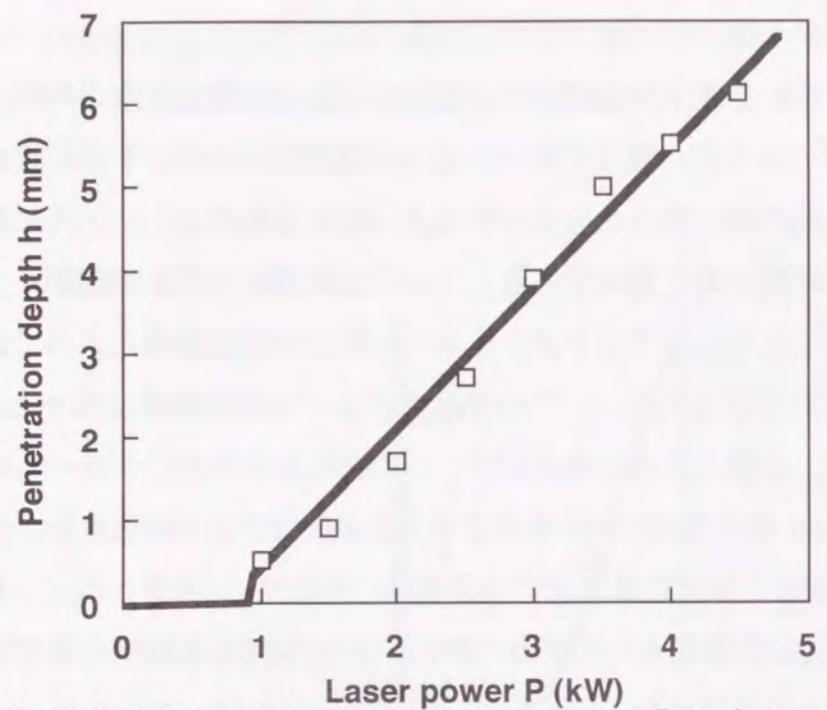


Fig.5.10 Relationship between laser power P and penetration depth h . ($v=3\text{m}/\text{min}$, $Q_{\text{Ar}}=30\ell/\text{min}$, $F=0\text{mm}$)

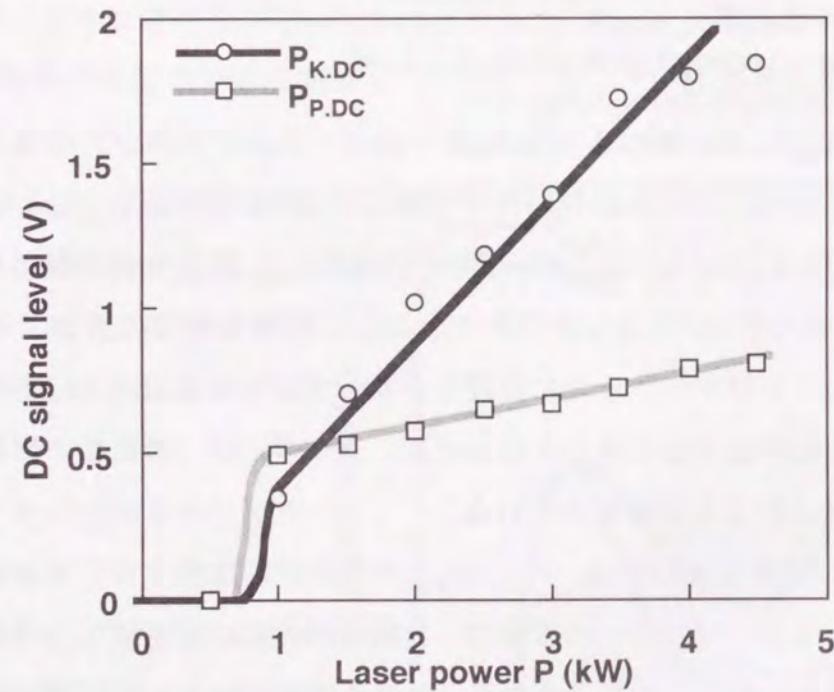


Fig.5.11 Relationship between laser power P and light emission from keyhole $P_{\text{K},\text{DC}}$ and plume $P_{\text{P},\text{DC}}$. ($v=3\text{m}/\text{min}$, $Q_{\text{Ar}}=30\ell/\text{min}$, $F=0\text{mm}$)

5.4 変動パラメータの識別

前節では Q_{Ar} , F , P の3つのレーザ溶接パラメータについて、それぞれのパラメータの変動により、キーホールプラズマ P_{K} とプラズマプルーム P_{P} のそれぞれのDC成分とAC成分への影響を調査し、溶接パラメータによって、4つの発光強度($P_{\text{K},\text{DC}}$, $P_{\text{P},\text{DC}}$, $P_{\text{K},\text{AC}}$, $P_{\text{P},\text{AC}}$)に与える影響が異なることを示した。本節では、本研究での標準条件($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m}/\text{min}$, $f/\text{No}=7.1$, $F=0$, $Q_{\text{Ar}}=30\ell/\text{min}$)を基準点とし、 P , F , Q_{Ar} のいずれのパラメータが変動したかの識別の可能性を調査した。二つ以上のパラメータが同時に変動する場合については、通常の生産ラインの管理状態では起きる可能性は少ないので、本研究ではいずれか一つのパラメータが変動した場合を想定した。

5.3.1 DC成分による識別

本項では標準条件から検出信号が変化した場合に、その原因となった変動パラメータの識別を目的として、プラズマ発光強度のDC成分(時間平均値)に注目して検討する。まず、単一のセンサーによる変動パラメータの識別には限界があることを示し、次に $P_{\text{P},\text{DC}}$ と $P_{\text{K},\text{DC}}$ に分離することにより変動パラメータの識別が明確になることを示す。

(a) 単一のセンサーによる変動パラメータの識別

本研究での標準条件での検出出力 P_{DC} (75)が、約2Vから2.75Vに変化した場合を例として考える。Fig.5.12~5.14に前節で求めた P , F , Q_{Ar} と P_{DC} (75)および P_{DC} (5)のダイアグラム上に標準条件をA点で示す。 P , F , Q_{Ar} のうちいずれか一つが変動したと仮定すると、Fig.5.12~5.14より次の3つの場合が考えられる。

- 1) $Q_{\text{Ar}}=22\ell/\text{min}$ への減少。(Fig.5.12のB点)
- 2) $P=4.5\text{kW}$ への増加。(Fig.5.13のC点)
- 3) $F=+2\text{mm}$ または $F=-3\text{mm}$ へ移動。(Fig.5.14のD点またはD'点)

の3つの可能性が考えられる。このように、75度の単一センサーのみによる検知では、どのパラメータが変動したのかを識別することは出来ない。また、5度あるいは他の中间的な角度でも同様で、単一のセンサーでは信号が変化した原因となった変動パラメータを識別することは出来ない。これまでに報告されたモニタリング手法^{20,24~30)}は全て、このような単一のセンサーによるもので、変動パラメータを識別することは不可能である。

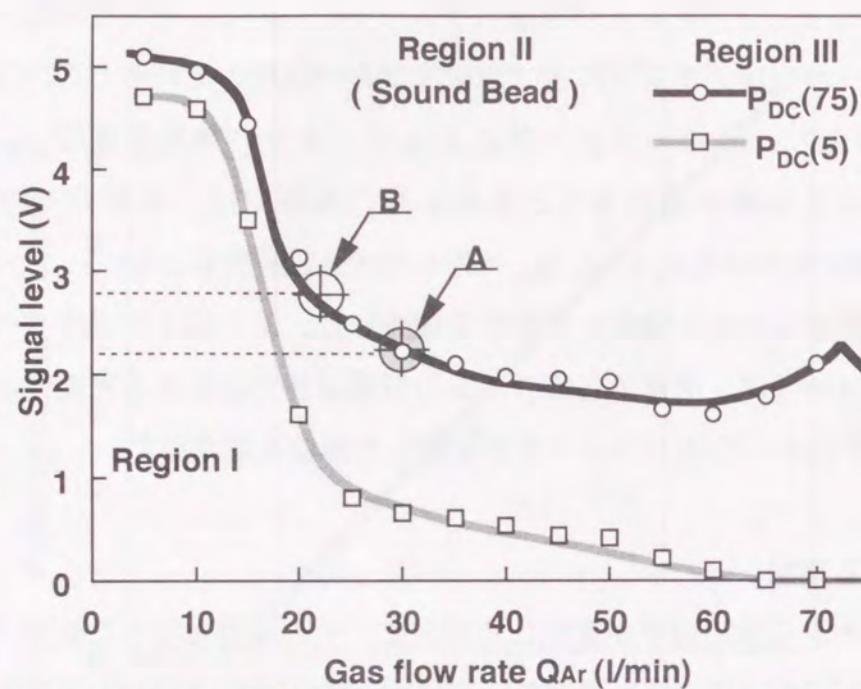


Fig.5.12 Relationship between gas flow rate Q_{Ar} and light emission from plasma at aiming angles of 5 and 75 degrees.
($P=3kW$, $v=3m/min$, $F=0mm$)

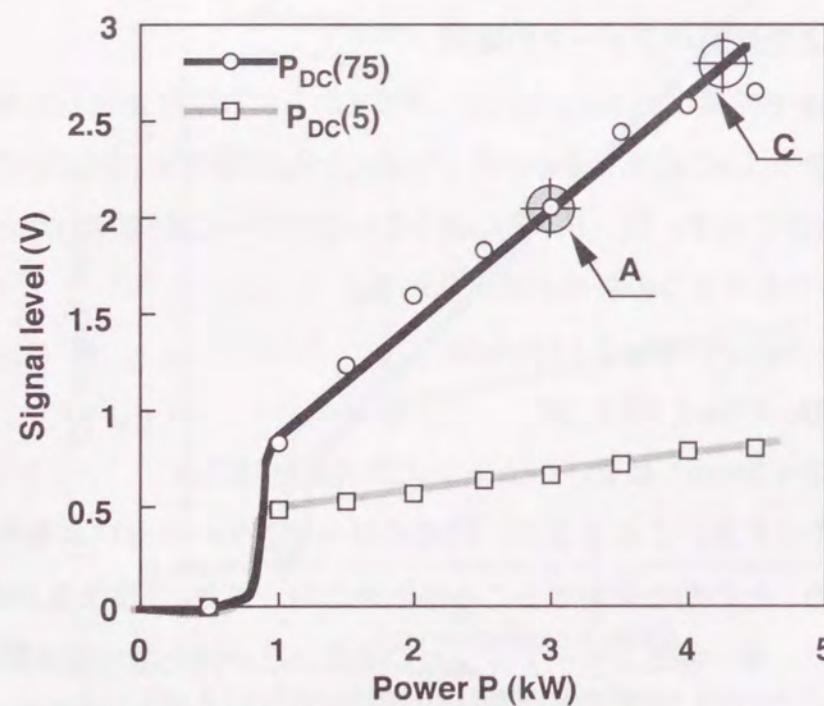


Fig.5.13 Relationship between laser power and light emission from plasma at aiming angles of 5 and 75 degrees.
($v=3m/min$, $Q_{Ar}=30$ l/min, $F=0mm$)

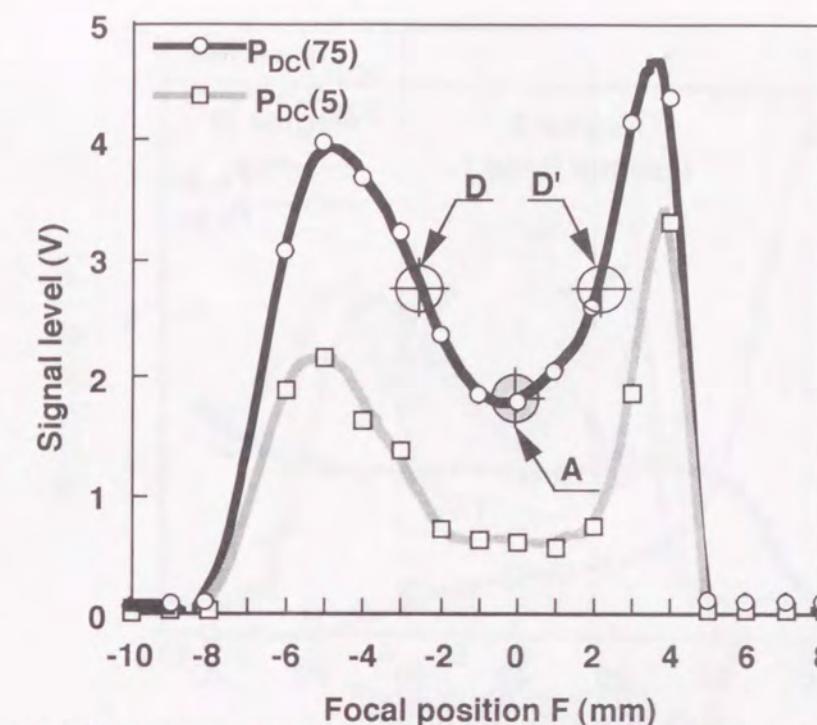


Fig.5.14 Relationship between focal position and light emission from plasma detected at aiming angles of 5 and 75 degrees.
($P=3kW$, $v=3m/min$, $Q_{Ar}=30$ l/min)

(b) P_p, P_k による変動パラメータの識別

第3章で述べた手法により、発光強度をプラズマプルーム $P_{p,DC}$ とキーホールプラズマ $P_{k,DC}$ に分離し、両値が検出できた場合は次に示すようになる。Fig.5.15~5.17は P, F, Q_{Ar} に対する $P_{p,DC}$ および $P_{k,DC}$ の関係であり、図中でE点として表示した標準条件の $P_{k,DC} \approx 1.4V$, $P_{p,DC} \approx 0.7V$ が $P_{k,DC}=1.8V$ に上昇した場合を考える。

その原因が Q_{Ar} , P , F のいずれか一つのパラメータの変動によるものと仮定すると、Fig.5.15~17のE点は F , G , H または H' へ変化する3つの可能性が考えられる。そのいずれであるかは、 $P_{p,DC}$ の値が解れば、

- 1) $P_{p,DC}=0$ の場合 : $Q_{Ar}=67$ l/minへの増大 (Fig.5.15のF点),
- 2) $P_{p,DC}=0.8V$ の場合 : $P=4kW$ に増加 (Fig.5.16のG点),
- 3) $P_{p,DC}=1.0V$ の場合 : $F=+2mm$ あるいは $F=-3mm$ に変化 (Fig.5.17のHまたはH'点)

と変動パラメータを識別できる。 $P_{k,DC}$ が減少した場合でも $P_{p,DC}$ の値を知ることにより同様の推定が可能となる。

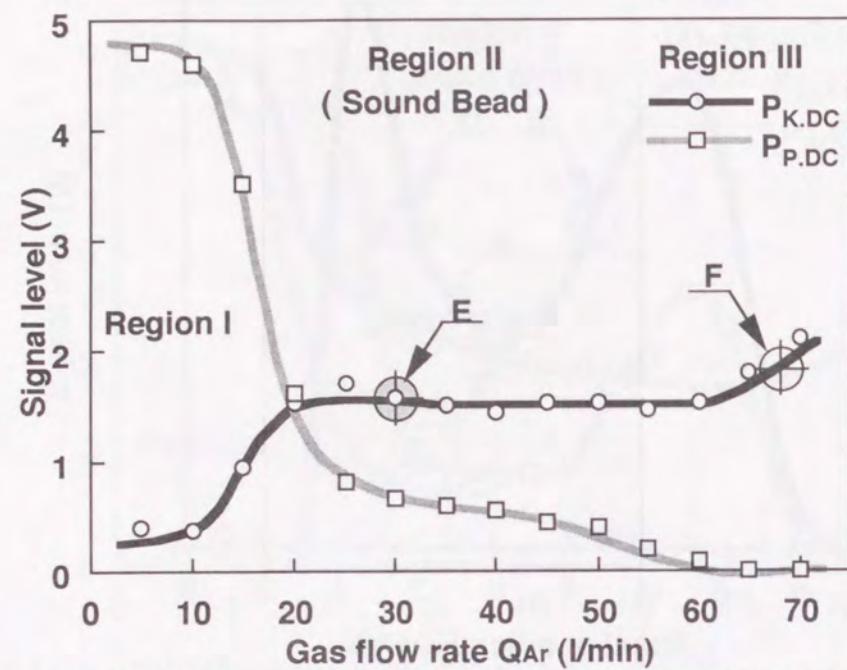


Fig.5.15 Relationship between gas flow rate and light emission from keyhole $P_{K,DC}$ and plume $P_{P,DC}$.
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $F=0\text{mm}$)

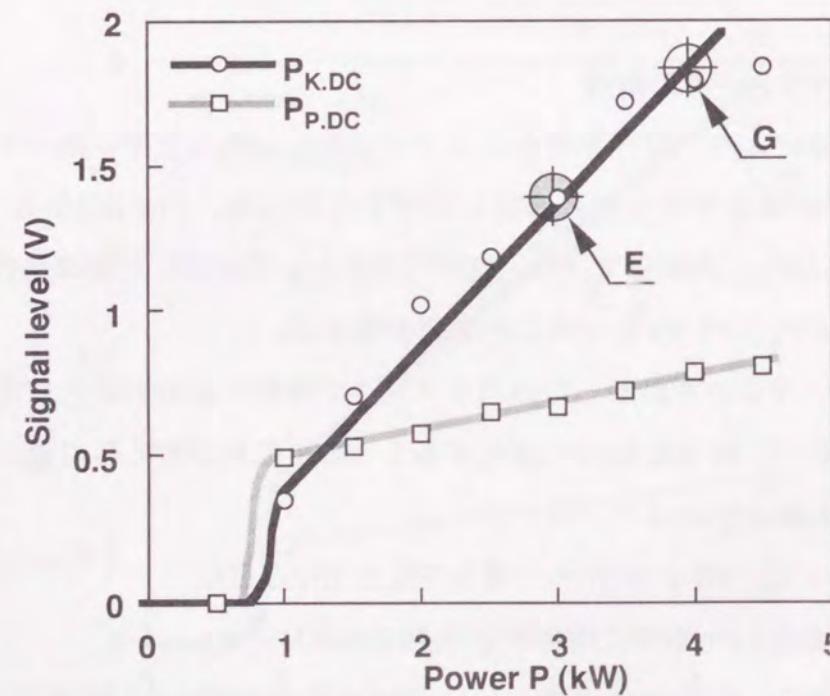


Fig.5.16 Relationship between laser power and light emission from keyhole $P_{K,DC}$ and plume $P_{P,DC}$.
($v=3\text{m/min}$, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$, $F=0\text{mm}$)

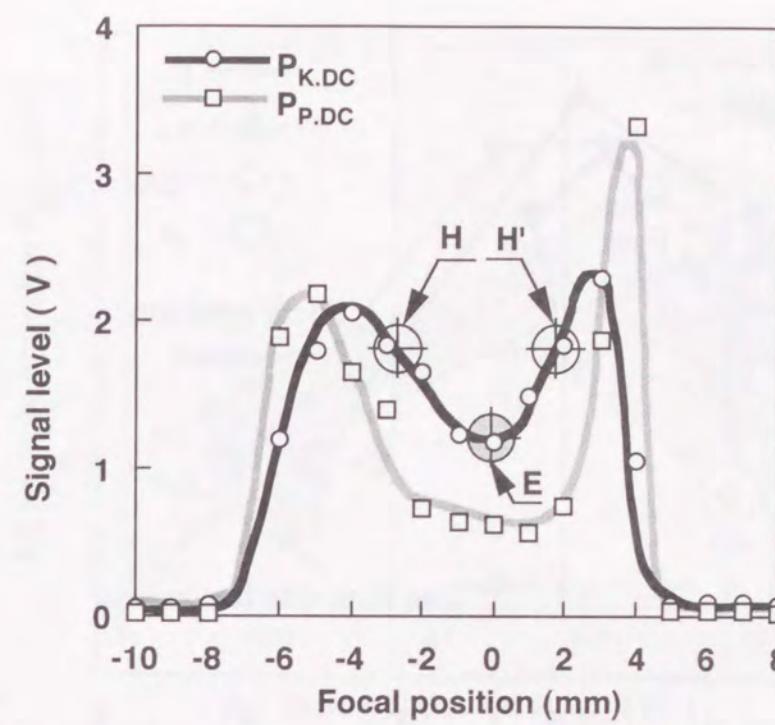


Fig.5.17 Relationship between focal position and light emission from keyhole $P_{K,DC}$, and plume $P_{P,DC}$.
($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$)

Fig.5.18はFig.5.15~5.17から求めた $P_{K,DC}$ と $P_{P,DC}$ の関係である。図には \oplus で表示した初期設定値からの各パラメータの変動に伴う検出信号の変化経路を矢印で示す。網掛け部は5.3節で示した Q_{Ar} およびF的良好領域である。 $P_{P,DC}-P_{K,DC}$ 座標における Q_{Ar} の変動による検出信号の変化経路はPまたはFの変動による変化経路と明瞭に異なるために、変動パラメータを容易に識別できる。しかし、Fは変動量が小さい領域では、F+、F-で図示した変動の正負での信号の変化経路が重なり、正負のどちら側に変動したかは識別できない。また、Pの変動とも変化経路が重なるため、両者を識別することはできない。ただし、実在のレーザ加工システムにおいては、経時変化によってPが増加することは考えられず、比較的長いオーダーの時間で減少する。これに対して、Fは比較的短期に変動する可能性があり、両者の発生モードが異なっており、容易に区別できるので実際上の問題はない。

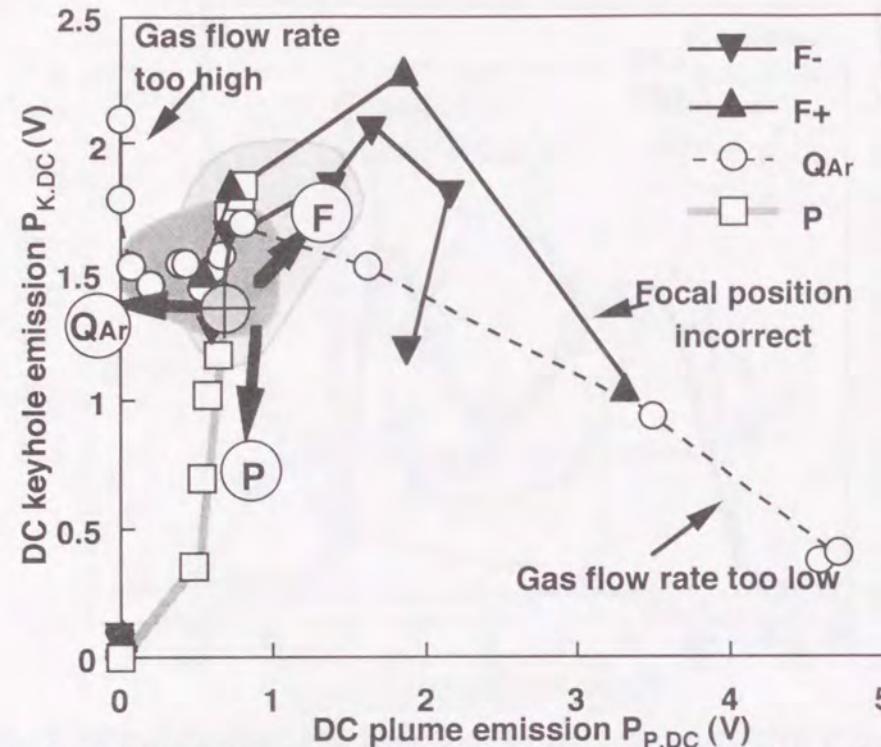


Fig.5.18 Relationship between DC light emission from plume $P_{P,DC}$ and DC light emission from keyhole $P_{K,DC}$. \oplus indicates an initial condition ($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$, $F=0\text{mm}$).

5.4.2 AC成分による識別

本項では、標準条件からの信号変動の原因となった変動パラメータの識別を、前項のDC成分での識別に加えて、AC成分に注目して検討を行った。

(a) 焦点位置の変動方向の識別

Fig.5.19はAC成分における P_K と P_p の2乗平均値 $P_{K,AC}$, $P_{p,AC}$ の関係である。 \oplus は初期設定値であり、網掛け部はFの良好領域を示している。Fig.5.18に示したDC成分での $P_{K,DC}$ と $P_{p,DC}$ の関係と比較して、焦点位置Fの変動による検出信号の変化経路が大きく異なることが解る。AC成分の $P_{K,AC}$ - $P_{p,AC}$ 座標ではFが正側に変動した場合は、検出信号の変化量が小さいのに対して、Fが負側へ変動した場合は大きな変化を示し、正負での検出信号の変化経路が顕著に異なっている。これは、5.3.2項において示した、焦点位置Fの正負の変動に対するAC成分の非対称性が、DC成分に比べて大きいためである。

しかし、AC成分の $P_{K,AC}$ - $P_{p,AC}$ 座標系での信号の変化経路の解析のみではガス流量 Q_{Ar} およびレーザパワーPの変動の影響は不明確であり識別できない。このため、DC成分の $P_{p,DC}$ - $P_{K,DC}$ 座標系での変化経路の解析とAC成分の解析を相補的に用いることにより、変動パラメータの識別をより明確に行うことが可能であると思われる。

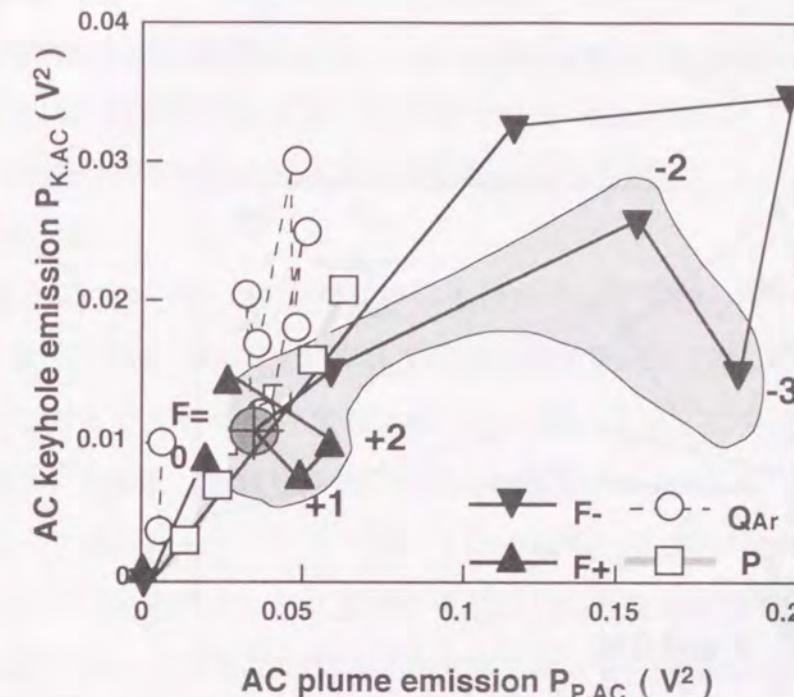


Fig.5.19 Relationship between AC light emission from plume $P_{p,AC}$ and AC light emission from $P_{K,AC}$. \oplus indicates an initial condition ($P=3\text{kW}$, $v=3\text{m/min}$, $Q_{Ar}=30\text{l/min}$, $F=0\text{mm}$).

(b) ギャップと出力低下の分離

重ね継ぎ手や突き合わせ継ぎ手では、これまで示したレーザパワーP, 焦点位置F, 加工ガス流量 Q_{Ar} に加えて、合わせ部の隙間Gの変動も合わせて検出する必要がある。Fig.5.20は板厚0.8mm+0.8mmの軟鋼板の重ね溶接において、P, F, Q_{Ar} , Gのそれぞれの変動に対してDC成分の $P_{p,DC}$ - $P_{K,DC}$ 座標系での変化経路を示したものである。P, Q_{Ar} , Pに関しては、ビードオンプレート溶接で示したFig.5.18とほぼ同様の傾向を示しているが、隙間Gの変動による信号の変化範囲はレーザパワーPの変動によるものとほぼ同じであり、この図のみでは識別は不可能である。

これに対し、Fig.5.21はDC成分の P_K とAC成分の P_p による、 $P_{K,DC}$ - $P_{K,AC}$ 座標系での関係を示したものであり、Fや Q_{Ar} の変動による変化経路は不明確になるが、PとGの変動による変化経路が明確に異なり、両パラメータの変動を識別できることが解る。

このように、プラズマプルーム P_p とキーホールプラズマ P_K それぞれの、DC成分およびAC成分の信号変化を解析することにより、生産ラインで変動が生じうる溶接パラメータのいずれが変動したかを識別することが可能である。これは、前述したようにパラメータによって、プルームとキーホールのプラズマに与える影響が異なるためである。実用的な推定手法としては、プラズマ発光の受光信号をDC成分の $P_{p,DC}$, $P_{K,DC}$ およびAC

成分の $P_{P,AC}$, $P_{K,AC}$ の4次元座標で表し、初期設定値からの変化ベクトルの方向と長さにより、変動パラメータの種類と変動量を推定するシステムを実際のラインで採用準備中である。

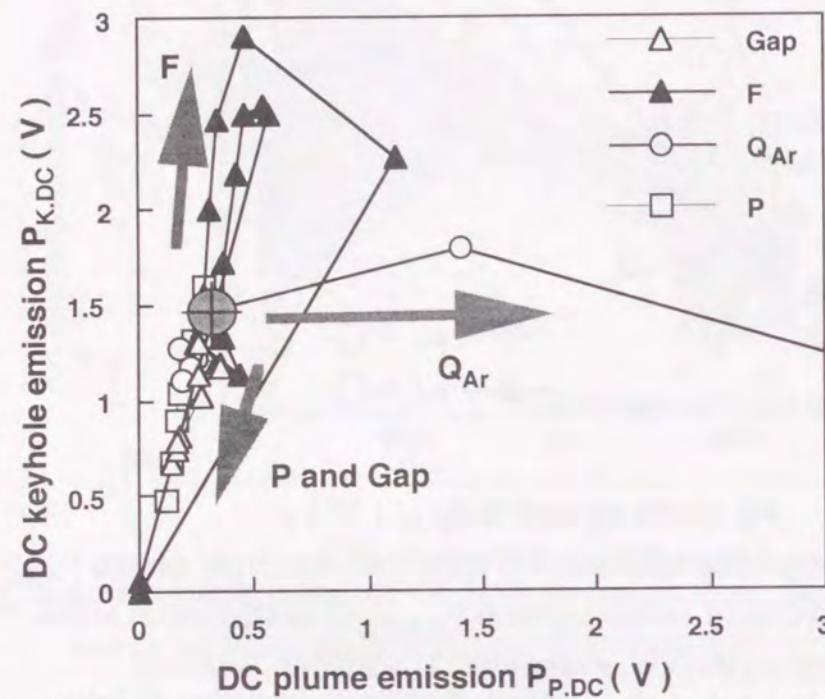


Fig.5.20 Relationship between DC light emission from plume $P_{P,DC}$ and DC light emission from keyhole $P_{K,DC}$ in the case of lap joint.

⊕ indicates an initial condition($P=3kW$, $v=3m/min$, $Q_{Ar}=30l/min$, $F=0mm$).

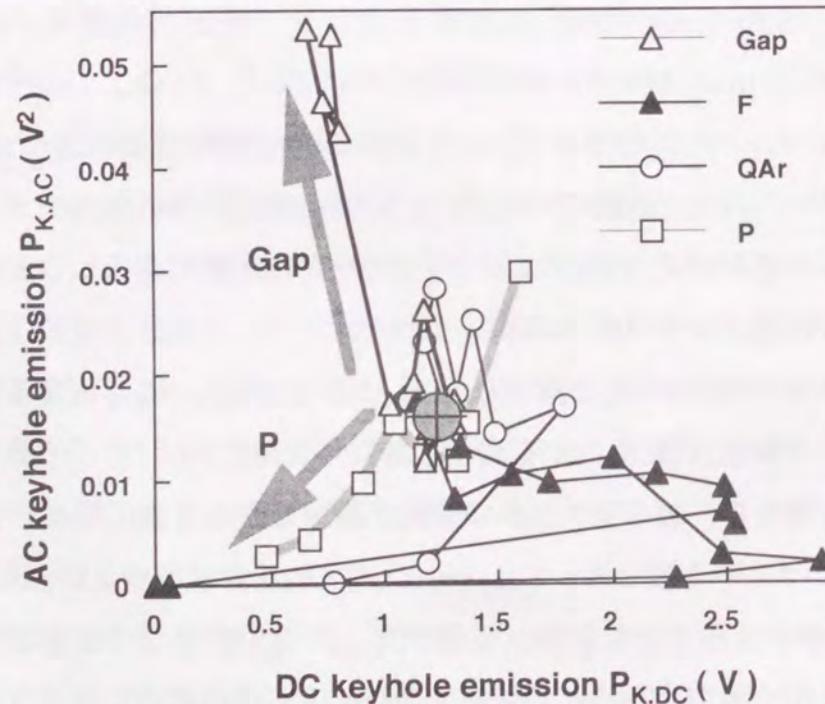


Fig.5.21 Relationship between DC light emission from keyhole $P_{K,DC}$ and AC light emission from keyhole $P_{K,AC}$ in the case of lap joint. ⊕ indicates an initial condition($P=3kW$, $v=3m/min$, $Q_{Ar}=30l/min$, $F=0mm$).

5.5 品質推移の検出

短時間に発生する溶接不良に対し、レーザ発振器や伝送・集光光学系のミラーやウインドーの劣化は、数週間以上の長い時間軸で溶接不良を引き起こす。このような溶接不良は、ワーク毎のプラズマ発光強度の平均値の推移を解析することにより検出が可能である。

Fig.5.22はテーラードプランク溶接の生産ラインで連続して1000個のワークを溶接した際の、ワーク毎のプラズマ発光強度の平均値の推移である。(a)のフルスケールで解るように、この例では数時間程度の連続生産では、プラズマ発光強度の平均値は3%程度の変動幅の中に収まっており、加工性能には影響を与えない。

Fig.5.22 (b)は縦軸のスケールを拡大したもので、昼休み等の休憩時間の前後で不連続な点があることを示している。設備が再起動した直後は比較的高い値を示し、数十分程度で一定値となることから、共振器のアライメントの熱的な変動によるものと推定している。このような傾向はレーザ発振器によって異なり、原因の特定は困難であるが、

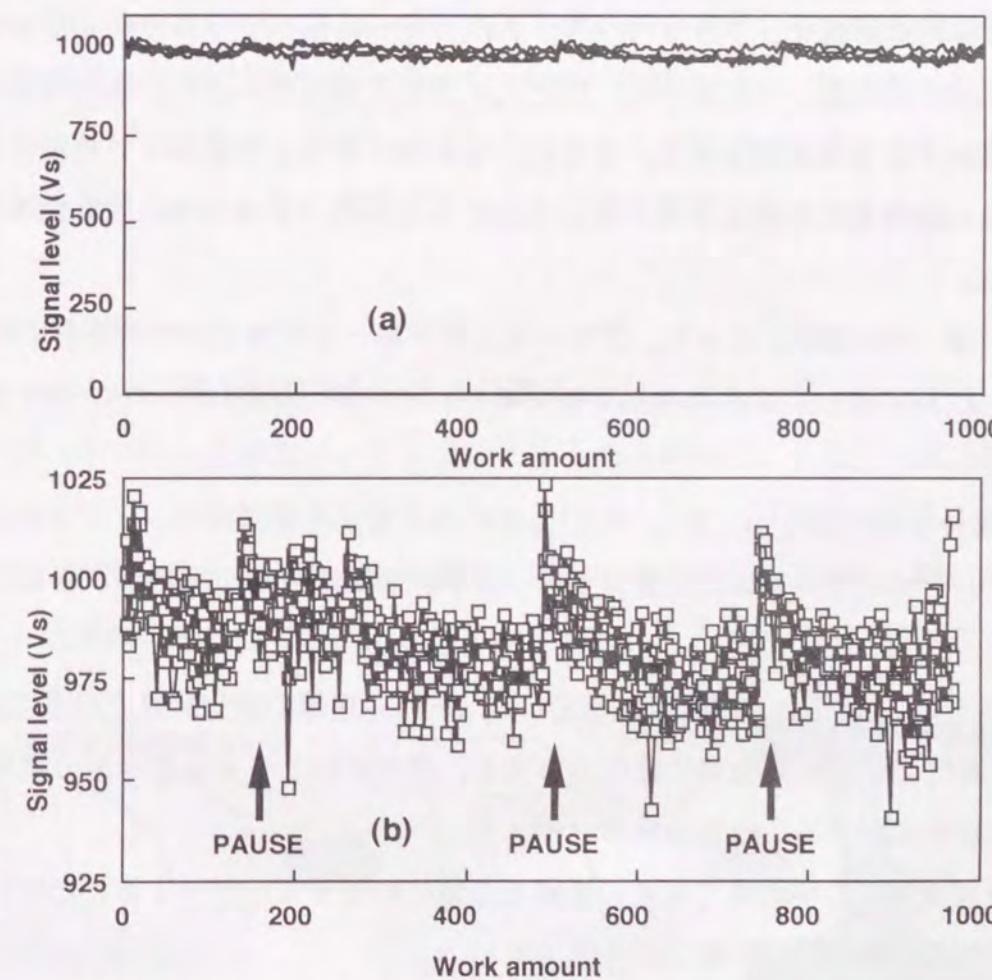


Fig.5.22 Record of averaged signal level in long term production. (a) full scale , (b) magnified scale.

変動幅が3%程度と小さいためこの例では実用上の問題は無い。

このように、数千から数万個単位での連続生産時のプラズマ発光強度の推移を解析することにより、光学部品の劣化などに起因する長期にわたる経時劣化を検出することが可能である。レーザ発振器および伝送・集光光学系の経時劣化は、加工機の構成や稼働状況によって大きく異なるため、本研究で示したような長期間の信号強度の推移により光学系のメンテナンス時期を推定することが可能となる。しかし、実際の生産ラインでは、加工ガスノズルのメンテナンスや、焦点位置の変動など変動因子が数多くあるので、経時変化を自動的に検出するには、さらに知能的なモニタリングシステムの開発が必要である。

5.6 結言

通常の生産ラインで長期または短期間で変動が想定される溶接パラメータとして、ガス流量 Q_{Ar} 、焦点位置 F、レーザパワーPに注目し、これらのパラメータの変動がプラズマ発光強度に与える影響を、プラズマプルーム P_p とキーホールプラズマ P_k のそれぞれをDC成分とAC成分に分離して調査した。 P_p と P_k の変化を解析することにより変動したパラメータを識別する手法を提示する。さらに、長期間にわたって記録された検出信号から、光学部品の経時劣化を検出する方法についても述べた。本章で得られた結果は下記に要約される。

- (1) Q_{Ar} 、F、Pの変動によって、プルームとキーホールの発光のそれぞれのDC成分およびAC成分の変化は検知可能であり、その変化傾向はパラメータによって異なる。
- (2)DC成分の受光強度の、 $P_{p,DC}$ - $P_{k,DC}$ 座標における変化経路から、アシストガス条件、レーザパワー、焦点位置のうち、いずれが変動したかを識別することができる。
- (3)AC成分の $P_{p,AC}$ - $P_{k,AC}$ 座標とDC成分の $P_{p,DC}$ - $P_{k,DC}$ 座標の変化経路を併せて追跡することにより、焦点位置の変化の方向と、突き合わせギャップなどの開先精度の不良を識別することが出来る。
- (4)プラズマ発光の平均発光強度の推移を長期にわたってモニタすることにより、光学部品の経時劣化の検出が可能である。

第6章テーラードブランク溶接へのインプロセスモニタリング技術の応用

6.1 はじめに

第3章と第4章では、プラズマ発光強度をキーホールとプルームのDC成分とAC成分に分離する新しいモニタリング手法を提案した。この手法により従来のモニタリング手法に比べて遥かに多くのレーザ溶接品質に関する情報を得ることが可能となり、溶接パラメータの変動の検出精度を生産ラインでの実用レベルまで向上させうることを第5章で述べた。

本章では、実際の自動車部品の生産ラインへ本研究のモニタリング技術を応用するための具体的な手法について述べる。これまでに、数種類のワークへの応用を実現しているが、ここでは主にテーラードブランク溶接工法について、実際の生産ラインへ応用したシステム構成と、溶接欠陥の検出手法、およびその適用効果について述べる。

さらに、本研究での知見を基にレーザ溶接のインプロセスモニタリング技術を、その機能により3つの世代に分類し、各世代でのモニタリングシステムの持つ機能と、実現に必要な技術について述べる。ついで、今後の課題として、テーラードブランクに比べ、さらに高い検出精度と知能レベルのモニタリング技術が必要となる自動車ボディの3次元溶接を例として、次に実現されるべき技術を整理する。

6.2 システム構成

6.2.1 テーラードブランク溶接システムの構成

テーラードブランク溶接は、プレス加工する前の素材を、平板の状態で突き合わせ溶接し、一体でプレス成形する工法である。これにより、大型パネル部品の必要な部位にのみ板厚、強度、表面処理の異なる鋼種を用いることが可能となり、部品設計の合理化とコスト低減が可能となる。Fig.6.1はボディサイドアウターと呼ばれる自動車ボディ

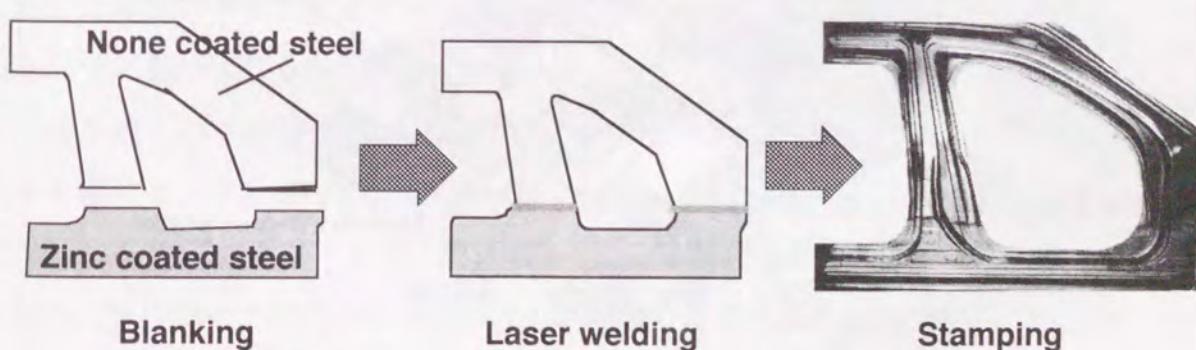


Fig.6.1 Laser welded tailored blanks.

の側方部の大型パネル部品でのテーラードブランク溶接の例であり、防錆性能が必要な下部を表面処理鋼板とし、上部の普通鋼板とレーザ溶接している。従来の単一鋼種のブランク材では防錆性能の不要な上部まで高価な表面処理鋼板を使用していたのに比べて、材料費のコスト低減を図っている。

Fig.6.2は日産自動車の追浜工場のテーラードブランク溶接ラインの鳥瞰図である。中央部に設置されたCO₂レーザ発振器(TLF5000t)から放出されたビームは、可動ミラーによる光路切り替え装置で、2台の溶接加工機に時分割で伝送される。このシステムでは、一方の溶接加工機がレーザ溶接を行っている間に、他方の加工機がワークの搬入および搬出を行うことにより、効率良くレーザ発振器を稼働させることができる。それぞれの溶接加工機は、3つのステージから構成されている。最初のプリセットステージ上にローディングロボットが溶接前のワークを搬入すると、次の溶接ステージに運ばれ、高精度に突き合わせられる。ついで、加工ヘッドがワーク上を移動することによってレーザ溶接が行われ、同時にプラズマ発光強度がモニタリングされる。溶接終了後、直ちに発光強度の解析による判定結果が、次の搬出ステージのロボットに送られて、溶接品質が良好と判定されたワークのみが次工程のプレス工程に搬出され、溶接不良が検出されたワークはラインから跳ね出され、スクラップとして廃棄される。

テーラードブランク溶接工法での溶接速度は、第2章で述べたように母材板厚に対する溶接ビードの残存板厚比T/T₀によって制限される。T/T₀の許容値は溶接継ぎ手の強度及びプレス成形性によって決定され、自動車用鋼板ではT/T₀>0.8であることが要求

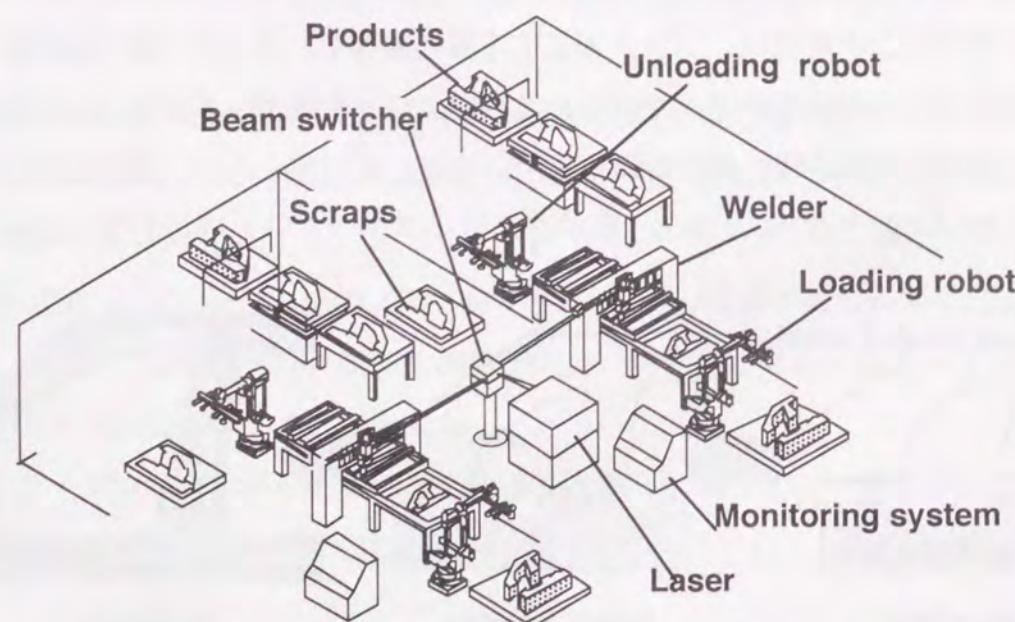


Fig.6.2 Illustration of tailored blank welding facility in NISSAN.

される³⁾。T/T₀を支配するレーザ溶接の因子はビードの溶融面積と突き合わせ隙間であり、溶融面積は、溶接速度の影響を最も強く受ける。Fig.6.3はT/T₀と突き合わせ隙間Gの関係を、板厚0.8mm、レーザパワーP=4kW、ガス流量Q_{Ar}=30 l/minにおいて、溶接速度をパラメータとして示したものであり、T/T₀は隙間の増大によって減少し、溶接速度が大きいほどT/T₀は小さい値となった。これより、T/T₀>0.8とするためには、溶接速度を遅くすること、及び隙間の管理を厳密に行うことが必要であるが、生産コストを考慮したうえで、隙間の管理値を0.1mm以下とし、溶接速度は5m/minとしている。

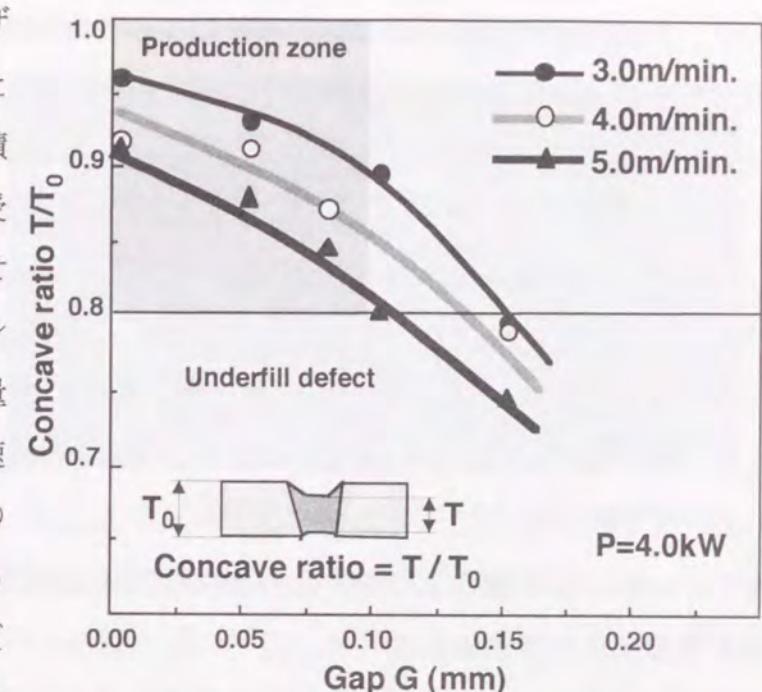


Fig.6.3 Relationship between gap G and concave ratio T/T₀.

6.2.2 モニタリングシステムの構成

Fig.6.4はテーラードブランク溶接に用いたレーザ集光ヘッドの写真であり、45度軸はずし放物面ミラーによる集光光学系にアシストガスノズルおよび、2つのセンサーが設置されている。センサーはこれまでの実験に用いたものと同型のフォトダイオード(浜松ホトニクス製:S1336-18BQ)を用いた。高角度センサーはガスノズルとの干渉を避けるため、検出角度をθ=55度とし、低角度センサーはθ=約10度とした。テーラードブランク溶接は1mm程度の薄板に主に用いられるので、キーホールのアスペクト比はR_a=1程度と小さく、3.6.1項で述べたようにθ=55度においても、キ

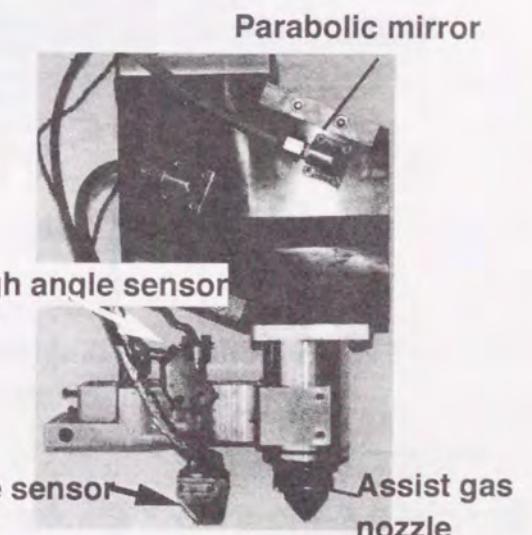


Fig.6.4 Photograph of laser head with two photo sensors.

一ホール内の全発光量を検出できると考えられる。各センサーは生産ラインでの使用環境を考慮し、清浄なエアーによりバージされ、溶接ヒューム等からの汚染を防止すると共に、冷却水で一定温度に管理し、長期間の連続使用での安定性の向上を図った。

Fig.6.5はモニタリングシステム装置の信号の流れを示したダイアグラムである。センサーで受光された信号は同軸ケーブルで処理装置に送られ、アナログフィルターおよび計装アンプで前処理した後に、A/D変換しコンピュータに取り込んだ。検出角度の違う2つのセンサーの信号は、それぞれ2系統のフィルターに並列に接続し、DC成分用とAC成分用にカットオフ周波数の異なるフィルタ処理をおこない、4chを同時に最大100kHzで取り込んだ。モニタリングシステムとレーザ加工機とはデジタルI/Oにより結び、レーザ加工機からワークの種類および加工開始のトリガ信号を入力し、判定結果信号を出力している。

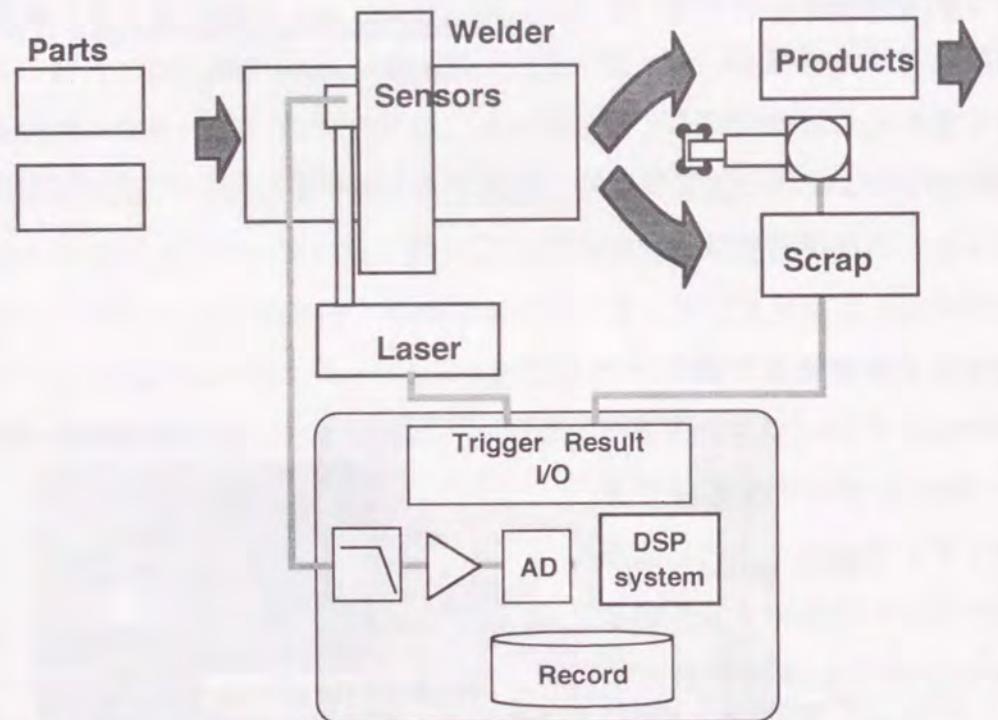


Fig.6.5 Schematic diagram of laser welding system developed for production line of automotive parts.

プラズマモニタリングシステム全体の制御用ソフトウェアとしてLMONITと呼ぶ制御プログラムを開発した。Fig.6.6にLMONITの基本メニュー画面のコピーを示す。LMONITには5つの基本的な機能があり、それぞれメニュー画面の上部の5つのコマンド（自動運転、データ表示、感度調整、パラメータ変更、オプション）に対応している。「自動運転」機能は、本ソフトウェアの主要な機能であり、レーザ加工機からのトリガ信号を監視し、レーザ溶接の開始と同時に発光強度のサンプリングを行い、判定

結果を搬出口ポートに出力する。さらに発光強度の時間積分値と時間変動の最大ピーク値等をワーク毎に記憶装置に記録する。

「データ表示」では、記録された発光強度の波形を表示し、判定結果を確認する機能である。Fig.6.7は本モニタリング装

置を用いて実際にテーラードブランク溶接で採取した発光強度の波形表示画面の例である。この例では4カ所の溶接部位の1番目の中央付近に発光強度の急激な落ち込みが見られ、その近くに「B」が表示されている。これは次節で述べる穴あき欠陥の検出部位である。また、溶接パラメータの変動の検出は、良好な溶接での検出信号を統計処理し、その平均値と分散から、判定の閾値を設定している。プラズマ発光強度の検出信号はトリガ信号を起点に全溶接長さに応じて3~10箇所のセクターに分割し、それぞれのセクター内で信号の時間積分値を求め、予め設定した閾値の範囲内であるか否かを判定している。

H:自動運転 I:データ表示 T:感度調整 P:印刷 O:終了 LMONIT ver5.0.3 追浜工場 ブランク材溶接用					
hardtifukの残り容量: 20,596 H-byte					
●トリガーレベル : 200 (1.20)					
●保存門限 : 率:240byte ●T/T0 レベル : 200 (19.52v)					
●ファイル名:Data0001 ●T0-T1 レベル : 200 (0.49v)					
●ファイルディレクトリ:R:\#3FLD\#4# ●T0-T1 レベル : 25					
●HD 1:0'5 2:0'5 3:0'5 4:0'5					
速度 2ch 計測 平均1 上1 下2 Part name					
0:0 0 4.00	0	0	0 9.99	0.00	---
1:0 2 5.00	15	400	2700	9.99	0.00
2:0 2 5.00	15	400	2700	9.99	0.00
3:0 0 4.00	0	0	0 9.99	0.00	---
4:0 2 4.00	15	300	1100	9.99	0.00
5:0 2 4.00	15	470	2300	9.99	0.00
6:0 2 5.00	15	470	2300	9.99	0.00
7:0 2 4.00	15	470	2300	9.99	0.00
8:0 2 4.00	15	470	2300	9.99	0.00
9:0 1 4.00	0	0	0 9.99	0.00	---

Fig.6.6 CRT screen of main menu

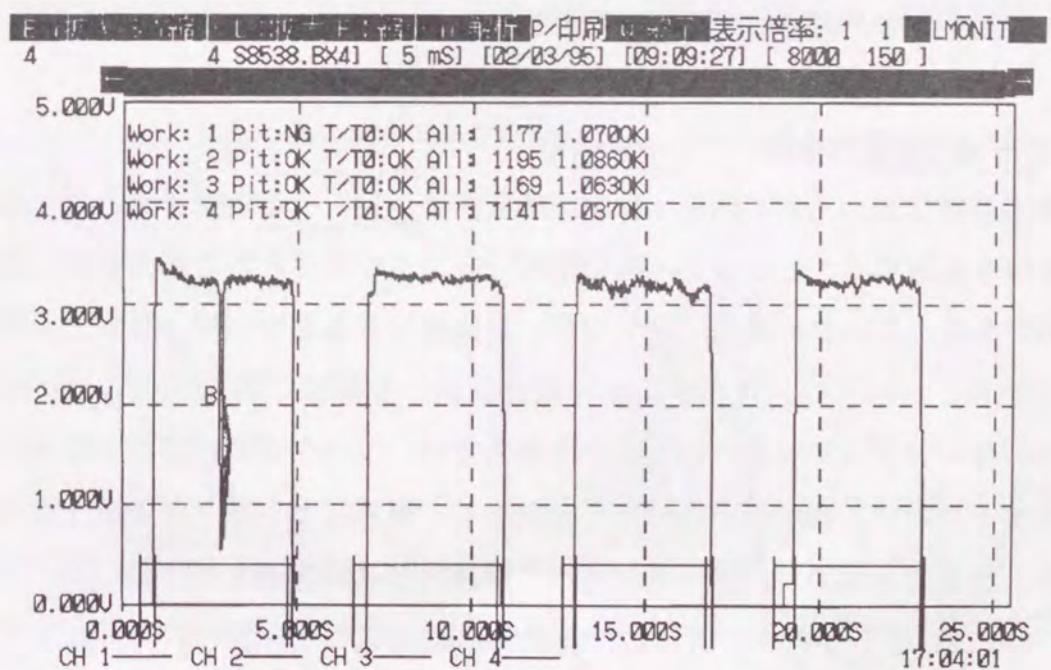


Fig.6.7 Example of signal wave from tailored blank welding.

6.3 テーラードブランク溶接における欠陥検出

6.3.1 検出対象となる溶接不良

テーラードブランク工法をはじめとした自動車製造の生産ラインでのレーザ溶接の適用においては、第5章で述べたような溶接パラメータの変動を検出し、溶接不良の発生を未然に防ぐ源流管理に加えて、発生した溶接欠陥を検出して跳ね出す流出防止の機能が必須である。本節ではこのような溶接欠陥の検出手法について述べる。

生産ラインでは、溶接パラメータの変動に加えて、ワークの精度や清浄度に起因する溶接欠陥が発生する可能性がある。本研究で対象とした薄板の溶接において発生が想定される溶接欠陥としては、貫通溶接から非貫通溶接への移行、素材の傷や油分などによる汚染に起因する穴あき欠陥および、継ぎ手の合わせ隙間に起因するアンダーフィルが主なものである。これらの溶接欠陥は、キーホールが0.1mmオーダーであり、溶接速度が10mm/sのオーダーであることから、数十msのオーダーで突発的に発生すると考えられ、その検出においては、プラズマ発光強度の数十から数百Hz程度の時間変化を解析する必要がある。

これらの溶接欠陥の発生状況は、ワークの継ぎ手形状や精度によって異なり、適用部品毎に最適な検出方法を選択する必要がある。本節では薄板の突き合わせ溶接であるテーラードブランク溶接で発生する溶接欠陥の検出を中心とするが、重ね継ぎ手である車体の3次元溶接などの応用例において発生する溶接欠陥の検出についても取り扱う。

6.3.2 ビードの貫通の検出

自動車製造で用いられる数mm程度の薄板では、レーザ溶接継ぎ手として裏面までの貫通溶接を要求することが多く、溶接品質のモニタリングとして裏面までの貫通の検出は必須である。ワークの裏面に光センサーを設置できる場合では、裏面での発光の有無を検出することにより、貫通溶接か非貫通溶接かを確実に検出することが可能であるが、テーラードブランクのような大きな部品では、ワークが固定されて集光ヘッドが移動するタイプの加工機が用いられることが多く、裏面にセンサーを設置することは困難である。そこで、本節では第4章で述べた貫通溶接と非貫通溶接においてプラズマ発光のAC成分が変化する現象に注目し、表面側に設置したセンサーのみでビードの貫通を検出する方法を開発した。

Fig.6.8は本研究の標準条件($P=3\text{kW}$, $F=0\text{mm}$, $f/\text{No}=7.1$, $M^2=3.6$, $Q_{\text{Ar}}=30\text{l/min}$)の中で溶接速度を変化させ、板厚4.0mmの軟鋼板にビードオンプレート溶接した際の

溶け込み深さ h を示している。板厚4.0mmでは3.0m/min以下でほぼ貫通溶接となっていることが解る。同様に、板厚1.6mmでは5m/min以下で貫通溶接となる。

Fig.6.9およびFig.6.10は板厚1.6mmおよび4.0mmでの溶接速度 v と $P_{\text{AC}}(75), P_{\text{AC}}(5)$ のAC成分から0.1kHz~10kHzまで周波数帯をバンドパスフィルタで濾波した後に求めた2乗平均値を示している。図中の網掛け部はそれぞれの板厚での裏面までの貫通溶接となる領域である。 $P_{\text{AC}}(75)$

の2乗平均値は、板厚1.6mmにおいては溶接速度の低下に伴って、約5m/minで急激に増加しており、貫通領域では、非貫通領域よりも遥かに大きいことが解る。板厚4.0mmにおいても $P_{\text{AC}}(75)$ の2乗平均値は約3m/minで急激に増大し、貫通領域は非貫

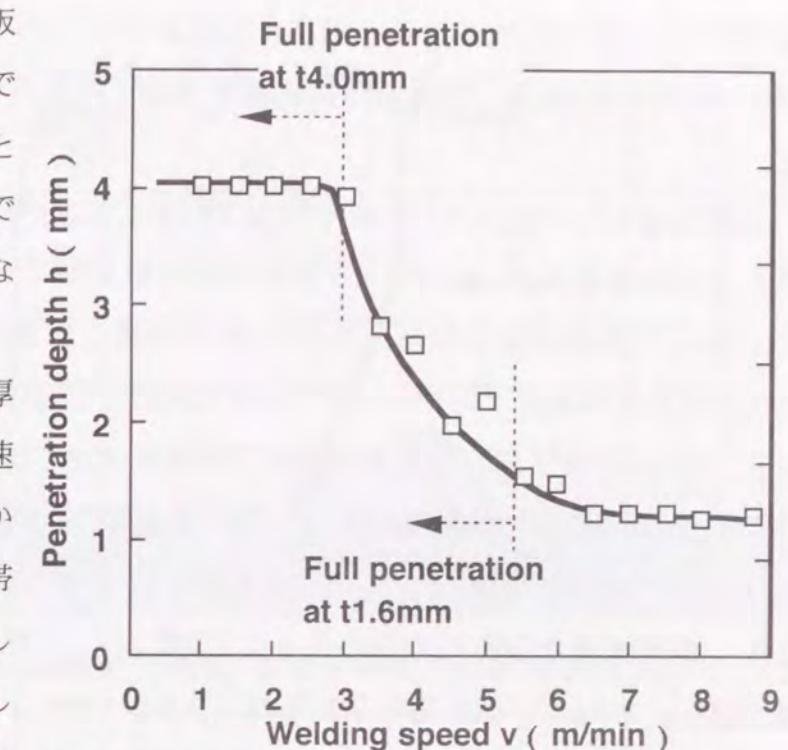


Fig.6.8 Relationship between welding speed v and penetration depth h at standard welding condition.

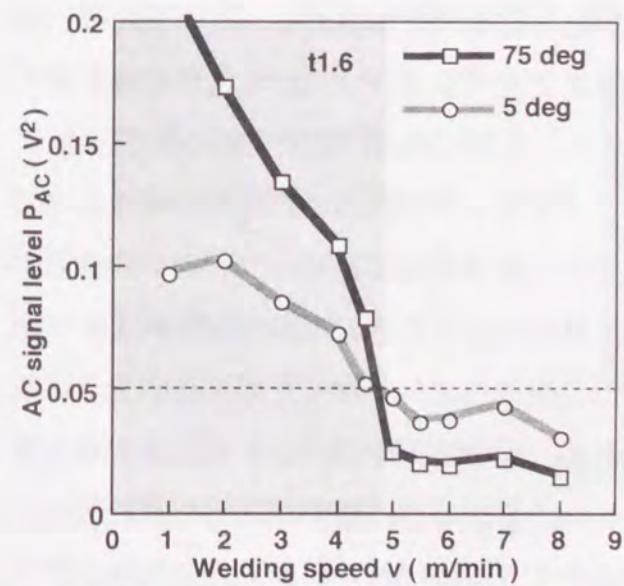


Fig.6.9 Relationship between welding speed v and AC signal level P_{AC} at a thickness 1.6mm.

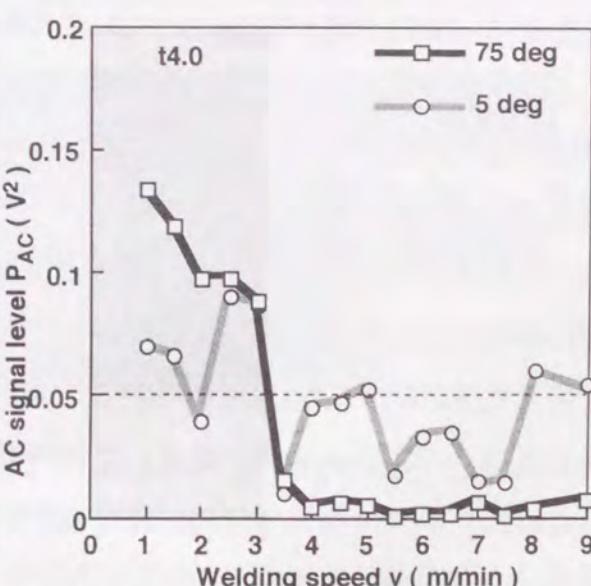


Fig.6.10 Relationship between welding speed v and AC signal level P_{AC} at a thickness 4.0mm.

通領域よりも遙かに大きな値を示す。このように、 $P_{AC}(75)$ のAC成分の2乗平均値は溶接速度の低下に伴って、貫通・非貫通境界で急上昇する単調増加曲線を描くことが解った。

これに対して、 $P_{AC}(5)$ の2乗平均値は板厚4.0mmでは貫通・非貫通の両領域でランダムに近い変動を示し、ビード貫通の判定が困難であることが解った。また、板厚1.6mmでは溶接速度の低下に伴って2乗平均値の漸増が認められるが、 $P_{AC}(75)$ のように貫通溶接限界速度でのシャープな増大は認められない。

$P_{AC}(75)$ の2乗平均が非貫通溶接時に急激に減少するのは、第4章で述べたように、プルームとキーホールのプラズマ発光のAC成分である $P_{P,AC}, P_{K,AC}$ が、貫通溶接のほぼ同位相から、非貫通溶接での逆位相に変化するためである。このため、貫通領域では $P_{P,AC}$ と $P_{K,AC}$ が同位相となるため強め合うことで $P_{AC}(75)$ の信号出力は大きくなり、非貫通領域では $P_{P,AC}$ と $P_{K,AC}$ が逆位相となるため打ち消し合い、 $P_{AC}(75)$ は小さくなる。

このように、 $P_{AC}(75)$ の高周波成分を予め設定した閾値(本研究の条件ではFig.6.2, Fig.6.3の破線で示した $0.05V^2$)と単純に比較することにより、裏面までの貫通・非貫通を表面側に設置したセンサーのみにより検出することが可能である。

6.3.3 穴あき欠陥の検出

本研究で対象としている薄板のレーザ溶接では、フィラーワイヤなどの補助材料を用いないで溶接を行うことがほとんどであるため、開先部の傷や油分などの汚染に敏感に影響を受け、溶融金属が飛散した穴あき欠陥が発生する可能性がある。ビード内部に残留する微小なポロシティに比べて、ビード表面まで達するような穴あき欠陥は継ぎ手の機械的性能に影響を与える重大な溶接欠陥であり、全数の検出が必須である。

開先部の傷が特に問題となるのは、テーラードブランク溶接などの薄板の突き合わせ溶接の場合である。Fig.6.11は板厚0.8mmの突き合わせ溶接であり、ワークの突き合わせ部に搬送途中に微少な傷が付いたことにより発生した穴あき欠陥の表面写真と、プラズマ発光強度 $P(55,t)$ の波形である。この波形は、高周波成分を除くために100Hz以下を透過するローパスフィルターを通したものである。図中の矢印で示した穴あき欠陥の発生部には、プラズマ発光強度の急激な減少が見られる。これは傷が存在した部位では、キーホール径が急に大きくなつてレーザビームにより直接加熱されなくなるために、キーホール壁面の温度が低下しプラズマの発光強度が低下したものと考えられる。

重ね溶接においては、ワークの重ね合わせ面に、油分などの分解温度の低い有機汚染

物質が存在する場合にも類似の欠陥が発生する。

Fig.6.12は板厚2.9mmと3.2mmの炭素鋼を重ね溶接した際に、境界部に存在した機械油によって発生した穴あき欠陥の表面写真と検出波形の例である。突き合わせ溶接においてワークの傷に起因して発生した穴あき欠陥とともに、重ね溶接の穴あき欠陥においても欠陥発生部で急激なプラズマ発光強度の低下が見られる。これは、分解温度の低い油分が加熱されて発生した高い蒸気圧がキーホール内加わり、キーホールの表面張力によって維持できなくなつて溶融金属が飛散したためと考えられる。同様の現象は亜鉛メッキ鋼板などの蒸気圧の高い表面処理材の重ね溶接でも発生することが知られている⁵⁰⁾。

このような、穴あき欠陥発生時のプラズマ発光強度の突発的な時間変化は、キーホールの径が $500\sim1000\mu m$ で溶接速度は $50mm/s$ 程度であるので、10~20msオーダーの短時間の現象である。そこで、穴あき欠陥の検出においては、数十Hz帯のみを透過するバンドパスフィルターにより検出を行った。Fig.6.13にフィルタ

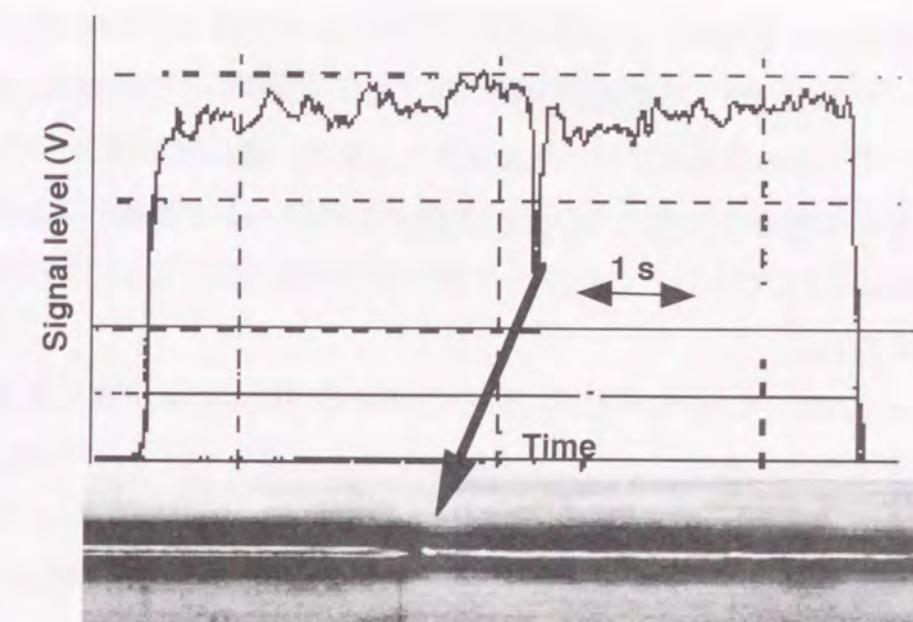


Fig.6.11 Example of pitting defect and signal in butt joint.

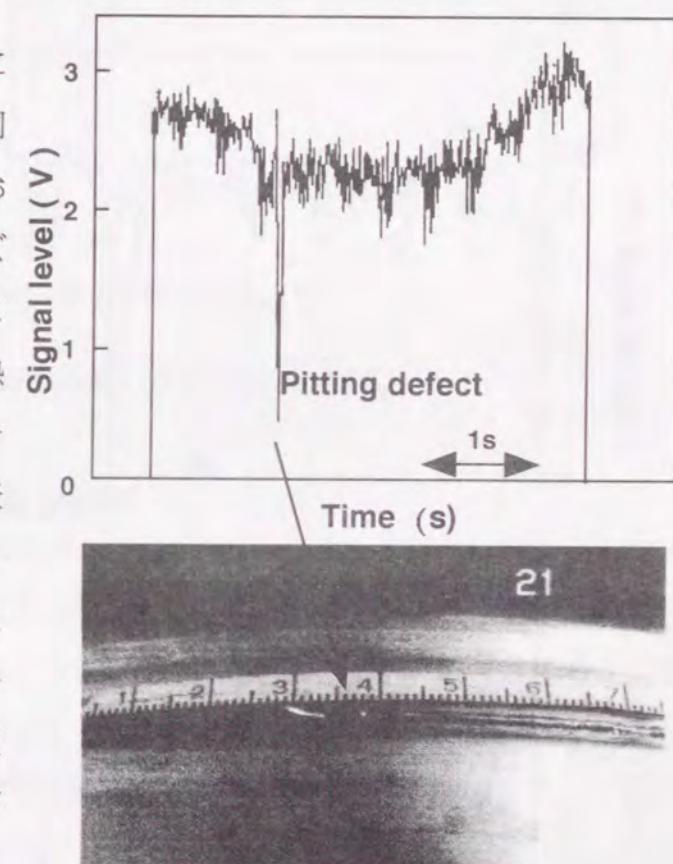


Fig.6.12 Example of pitting defect and signal in lap joint.

処理前(a)と処理後(b)の波形を示す。フィルタ処理後の波形では、実際の穴あき欠陥となった矢印で示した部位以外に、小さなピークがいくつか見られる。これらのピークはキーホールのサイズがいったんは拡大したが、凝固時に埋まってしまい穴あき欠陥と成らなかったものと考えられる。実際の生産ラインで確認している穴あき欠陥は直径が0.3mm以上であり、これ以下の微少な穴は凝固時に埋められて残存しなかったものと考えられる。

そこで、一つのワーク内でのフィルタ処理後の最大のピーク値をFig.6.13(b)の d_p に示すように定義し、テーラードブランクの生産ラインでの700個の連続生産での変動ピーク d_p のヒストグラムをFig.6.14に示す。図中の白抜きの部分が目視検査で0.3mm以上の穴あき欠陥が認められなかったワークを、黒塗りの部分が認められたワークを示している。この例では変動ピーク $d_p > 0.71$ となったワークを不良品と判定することで、穴あ

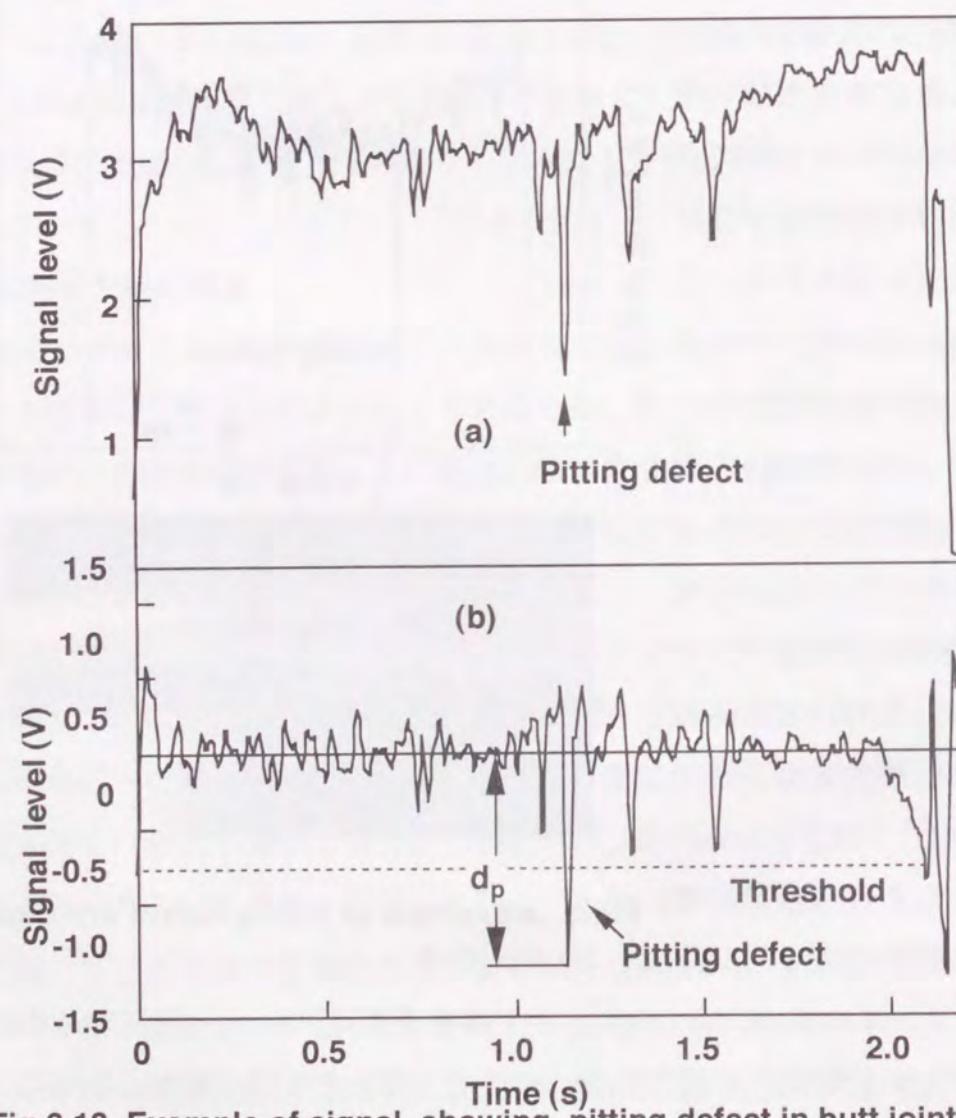


Fig.6.13 Example of signal showing pitting defect in butt joint of 0.8mm thickness (a) without and (b) with filtering (4kW, 4m/min)

き欠陥の見逃しが0となる。ただし、このとき穴あき欠陥の認められないワークも数%程度、過剰に検出することになるが、実用的には十分な検出精度を持っていると判断できる。

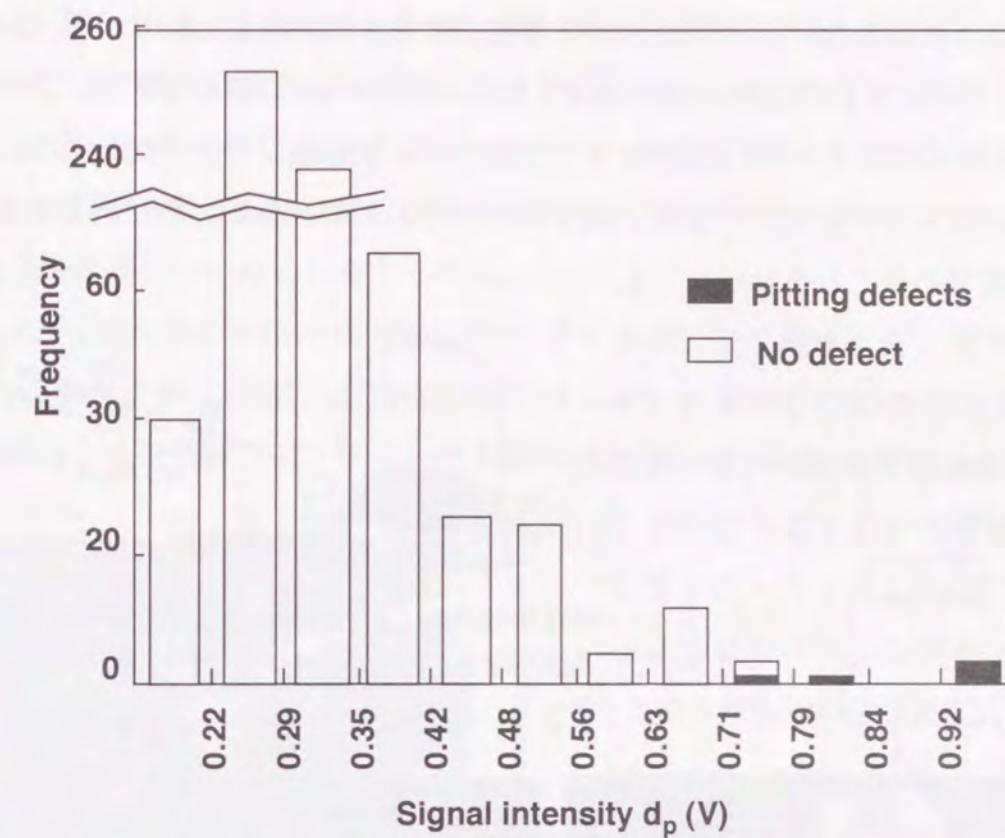


Fig.6.14 Distribution of signal level d_p

6.3.4 アンダーフィル欠陥の検出

前述したように薄板のレーザ溶接では、フィラーワイヤ等の補助材料を用いないことが多いので、突き合わせや重ね溶接の合わせ部に隙間が生じると溶融部が全体に引けてアンダーフィル欠陥となる。この検出方法として、板厚や継ぎ手形状に応じた2種類の手法を開発した。一つはアンダーフィル発生時の溶融池の落ち込みに注目した手法で、テーラードブランク溶接のような突き合わせ溶接の場合に適している。もう一つはアンダーフィル発生時の高周波成分の変化に注目した手法であり、車体ボディのような比較的薄板の重ね溶接の場合に適している。

(a)空間分布による検出

アンダーフィル欠陥は溶融金属不足によるキーホール全体の落ち込みが原因であるので、プラズマの発光部位の空間分布が変化することが考えられる。Fig.6.15はプラズマ

発光部位の空間分布を観察する実験装置の構成で、CCDカメラの前にNDフィルターを設置し、プルームの輪郭を撮像した。CCDカメラのダイナミックレンジは小さいので、NDフィルターを用いて露光量を変化させ、画像処理にて一定輝度の領域の輪郭を求めた。Fig.6.16は標準条件で板厚0.8mmの軟鋼板2枚を重ね溶接した際のプルームの撮像結果であり、(a)は板間の隙間Gが0の場合、(b)はG=0.3mmの場合である。これを1/8のNDフィルターを2, 3, 4枚と変化させて撮像し、画像処理して得られたプルームの輪郭を合成した結果をFig.6.17に示す。図中のそれぞれの輪郭線の内側は外側に比べて8倍の発光強度であることを示している。

(a)のアンダーフィルが生じていない場合に比べて、(b)のアンダーフィル状態では、最も発光強度が大きい領域Iの部分の面積が小さくなっていることが解る。領域Iはキーホールに隣接した0.5mm程度の小さい領域であるが、プルーム発光の約90%の寄与があ

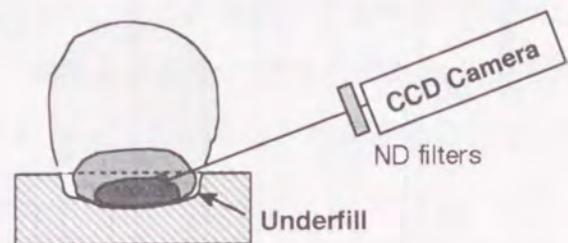


Fig.6.15 Set up to observe the distribution of light emission from plume by CCD camera.

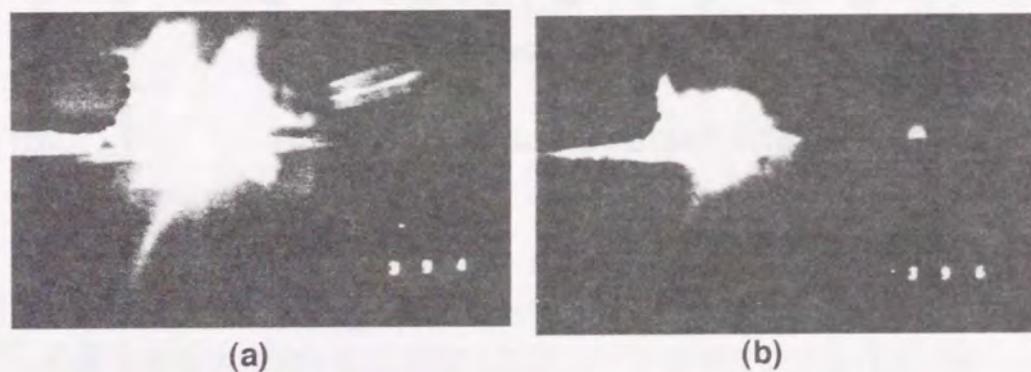


Fig.6.16 Photograph of plasma plume with gap G (a) 0.0mm , (b) 0.3mm.

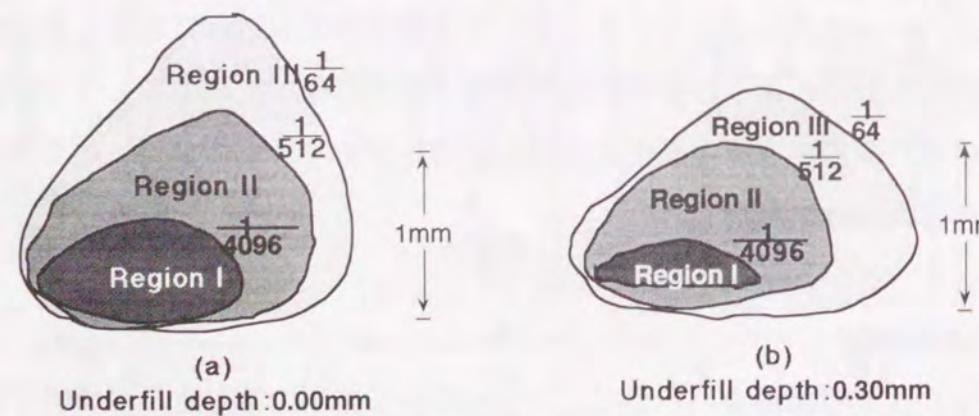


Fig.6.17 Contours of plasma plume taken by CCD camera and ND filters.

る。そのため0.3mm程度のアンダーフィルでも、低い検出角度では領域Iがキーホール壁面で遮蔽され敏感に受光量が低減する。

Fig.6.18はレーザビーム照射側の板厚2.3mm、反対側の板厚1.6mmの2枚の軟鋼板の重ね溶接時に0.4mmの隙間が生じた部分の断面写真(a)と検出角度 $\theta = 10$ 度および55度でのプラズマ発光強度 $P(10,t), P(55,t)$ を示している。アンダーフィルが生じた部分では、 $P(10,t)$ は大きく落ち込んでいるのに対して、 $P(55,t)$ では大きな変化は無い。これは、 $\theta = 55$ 度ではアンダーフィルが生じていても、観察角度が高い為、キーホール壁面での遮蔽効果が少ないためと考えられる。

Fig.6.19は板厚0.8mmの軟鋼板のテーラードプランク溶接時に、突き合わせ面に0.1mmの隙間があった部位での断面写真(a)と、 $P(55,t)$ および $P(10,t)$ である。Fig.6.11の重ね溶接とほぼ同様にアンダーフィル部において $P(10,t)$ の減少が認められる。他の溶

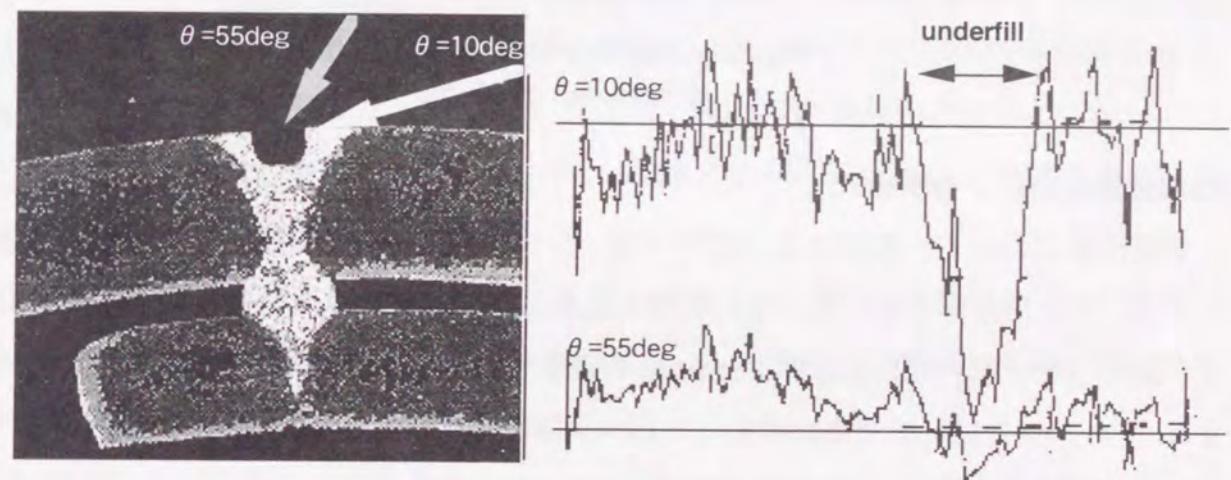


Fig.6.18 Example of under-fill defect in lap joint.

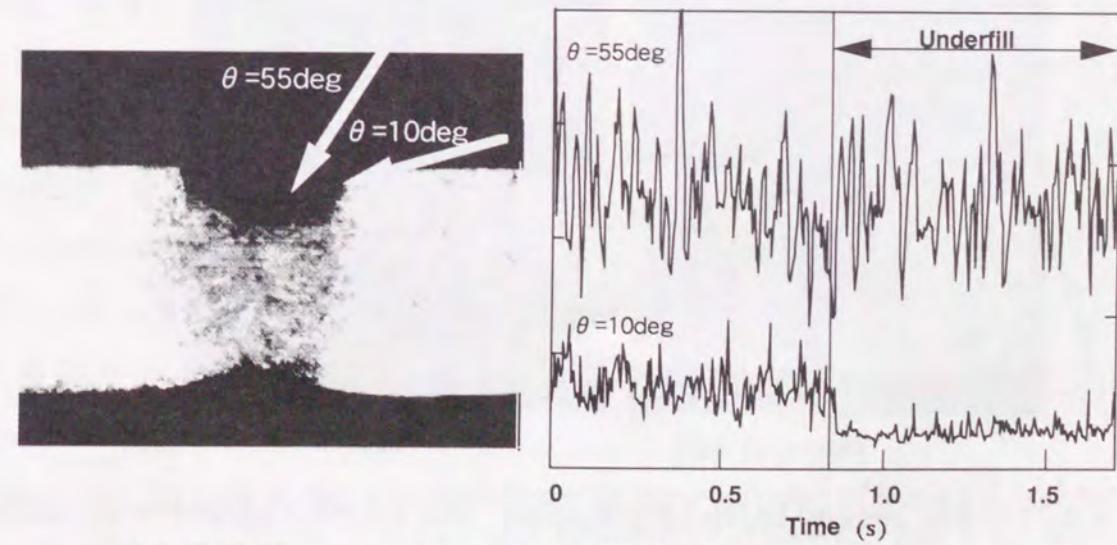


Fig.6.19 Example of under-fill defect in butt joint.

接パラメータのが、 $P(10,t)$ に与える影響を取り除くため、 $P(55,t)$ から $P(10,t)$ を差し引いた値と、実際の溶接断面から求めたアンダーフィルの関係をFig.6.20に示す。相関係数は $R^2=0.75$ 程度で相関度合いはそれほど高くないが、アンダーフィルの発生の有無を検出する用途としては十分な実用性がある。

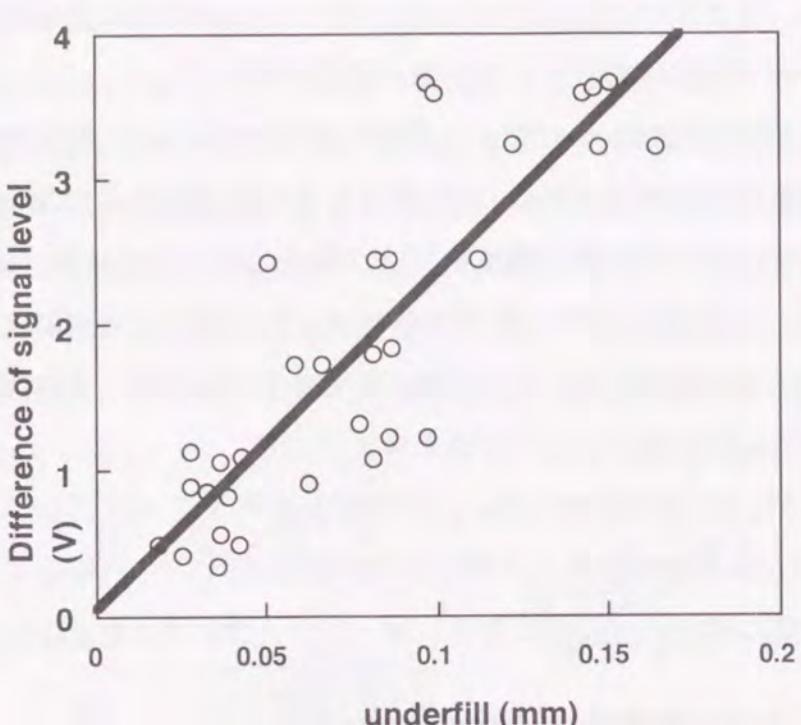


Fig.6.20 Relationship between underfill depth and difference of signal level.

(b)周波数分布による検出

貫通溶接において、板厚によってキーホールプラズマの高周波成分の周波数分布が変化することを第4章で述べた。この事実を応用して、薄板の重ね溶接での隙間の検出手法を開発した。Fig.6.21は板厚0.8mmの軟鋼板を標準条件($P=3kW, v=3m/min, Q_{Ar}=30l/min, f/No=7.1, F=0$)で重ね溶接したビード断面形状を示し、(a)は板間の隙間

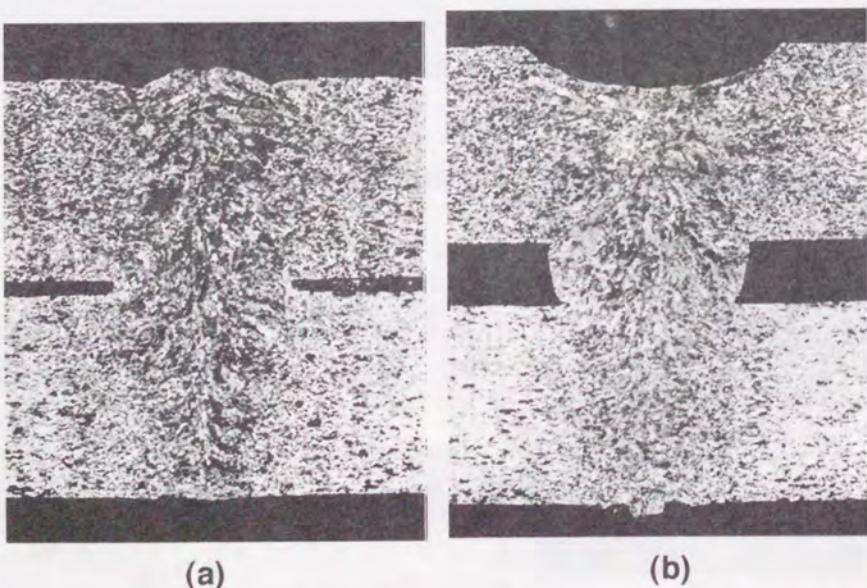


Fig.6.21 Cross section of lap joint welding with gap G (a):0.05mm, (b):0.35mm.
($P=3kW, v=3m/min, Q_{Ar}=30l/min, F=0$, Thickness=0.8mm)

$G=0.05mm$ 、(b)は $G=0.35mm$ である。(a)は健全なビード形状であるが、(b)は隙間によりアンダーフィルが生じているのが解る。

Fig.6.22は幅40mmの試験片を40mmラップさせ、その中央部に幅20mmレーザ溶接を行った引っ張り試験片の、剪断強度と板間の隙間の関係を示す。引っ張り強度は $G=0.3mm$ 程度まではほぼ一定となるが、 $G>0.4mm$ では急激に低下する。これより継ぎ手強度から要求される隙間許容値は $G<0.3mm$ と設定できる。

Fig.6.23は $G=0.05$ および $G=0.35$ でのキーホールプラズマ $P_{K,AC}$ の波形および周波数分布を示したものである。(a)の $G=0.05$ に比べて(b)の $G=0.35mm$ では明らかにピーク周波数が高周波側に移動していることが解る。Fig.6.24は板間の隙間 G と閾値以上のピークを示す最大ピーク周波数 f_{max} の関係を示す。 f_{max} は $G<0.3mm$ では板厚1.6mmのビードオノ溶接で得られた約2.5kHzとほぼ一致するのに対し、 G が増大すると f_{max} は急激に大きくなり、 $G=0.2\sim0.3mm$ で板厚0.8mmの約5kHzに移行している。これは、 G が限界を超えると2枚の板が別々の振動挙動を示すために、キーホールの共鳴振動が板厚0.8mmの高い値に移行するためである。ただし、後方では溶融池が合体して単一のビードを形成している。このように、 f_{max} が G の増大によってほとんど不連続に変化することが理解できる。

この周波数分布の変化は板厚によって影響を受けるが、板厚0.8mmにおいて変化が最も大きい4~6kHzの周波数帯域をバンドパスフィルターにより濾波し2乗平均値を求めた。Fig.6.25にその結果を示すように、 $G>0.3mm$ となると2乗平均値は急激に増大している。この2乗平均値が急激に増大する隙間 G の値は、接合強度が低下し始める G の限界値とほぼ一致している。いま閾値を適当な値($0.035V^2$)に設定し、これと $P_{K,AC}$ の2乗平均値との大小関係を単純に

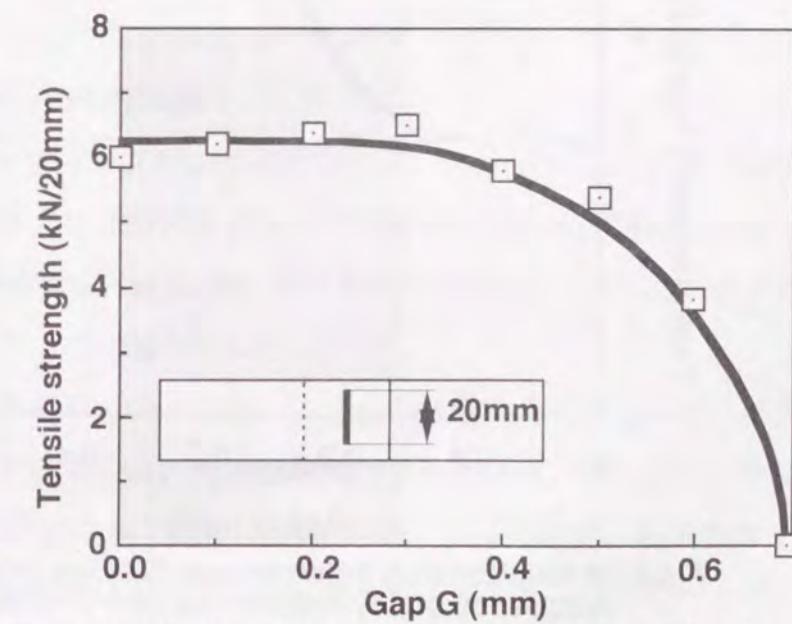


Fig.6.22 Relationship between gap of lap joint and tensile strength. ($v=3m/min, P=3kW, F=0, Q_{Ar}=30l/min$, lap joint thickness 0.8mm + 0.8mm)

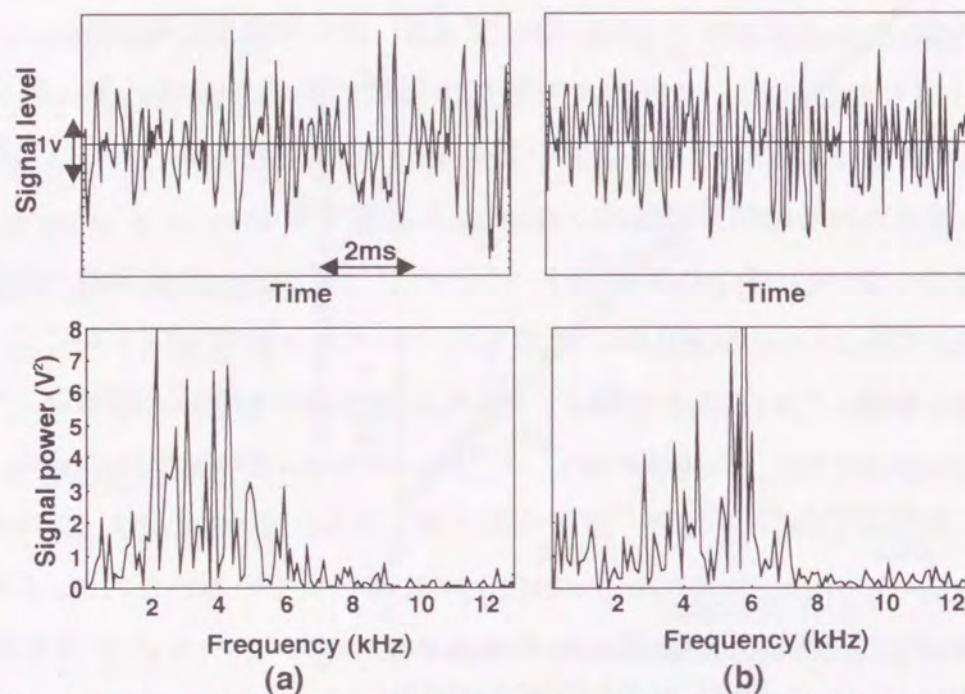


Fig.6.23 Wave form and power spectrum of P_K in lap joint welding with gap G (a):0.05mm , (b):0.35mm.

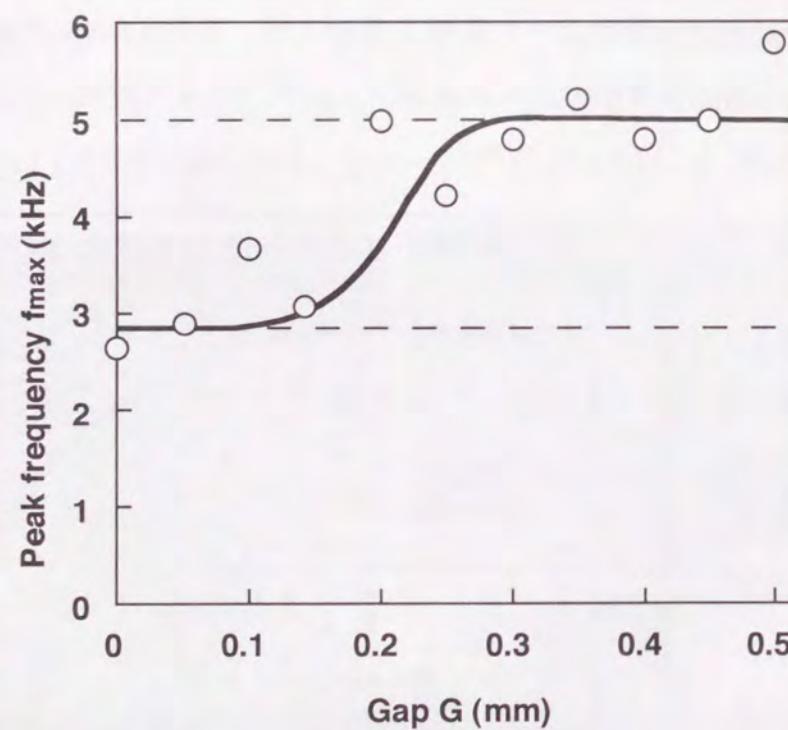


Fig.6.24 Relationship between gap G of lap joint and peak frequency of key-hole emission. ($v=3\text{m}/\text{min}$, $P=3\text{kW}$, $F=0$, $Q_{Ar}=30\text{l}/\text{min}$, lap joint thickness $0.8\text{mm}+0.8\text{mm}$)

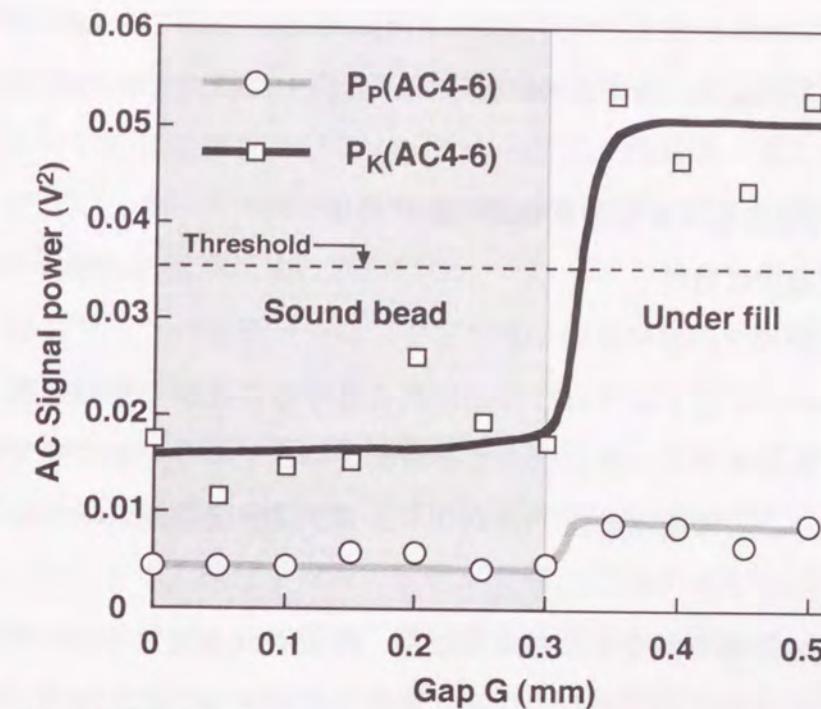


Fig.6.25 Relationship between gap G of lap joint and mean square of AC signal. ($v=3\text{m}/\text{min}$, $P=3\text{kW}$, $F=0$, $Q_{Ar}=30\text{l}/\text{min}$ lap joint thickness $0.8\text{mm}+0.8\text{mm}$)

比較することにより、重ね継ぎ手の隙間Gが限界値0.3mmより大きいか小さいかをモニタリングすることが可能である。

これに対し、Fig.6.24,25で解るように、AC成分の周波数分布による隙間の検出0.2~0.3mmで移行しており、Fig.6.22の条件を満たすことができるので、隙間検出のモニタリング手法として、十分な実用性がある。

6.4.5 モニタリングシステムの稼働実績

1993年末に最初のテラードプランク用のプラズマモニタリング装置が稼働してから、現時点までに数システムで200万部品以上の生産実績がある。現在の溶接条件はレーザパワー $P=4\text{kW}$ 、溶接速度 $v=5\text{m}/\text{min}$ 、アシストガス流量 $Q_{Ar}=20\text{l}/\text{min}$ を標準としており、約20秒の生産タクトで稼働している。

これまでの稼働では、モニタリング装置による自動検査のみで次工程への不良品の流出は無く、本モニタリングシステムの有効性が実証されている。また、ワーク毎の検出信号の平均値の推移の解析結果を、光学系のメンテナンスの時期の判断指標としている。センサーを含めた計測装置は非常に安定しており、センサーの汚染による劣化等も見られず、ほとんどメンテナンスフリーで稼働している。

現在、第5章で述べた溶接不良の発生原因の推定システムを組み込んだ次世代のモニ

タリングシステムのフィールドテスト中であり、所定の性能が確認でき次第採用する計画である。今後、本システムは、数年内に10システム以上に拡大する予定である。

6.4 レーザ溶接インプロセスモニタリング技術の世代分け

6.4.1 モニタリング技術の世代分け

これまで述べた本研究での開発結果を基にして、レーザ溶接のインプロセスモニタリングシステムはTable 6.1に示すような3つの世代に分けることができる。第1世代は溶接品質を判定し、不良品をラインから排除する機能を持っている。本研究で開発したモニタリング技術では、この機能は既にテーラードブランク溶接の実際の生産ラインで実用化していることは前節で述べた。

第2世代は溶接不良の原因を推定するだけでなく、溶接不良の発生を予知する機能も持った、より知能化したシステムである。レーザ溶接技術がさらに拡大採用されるためには、必ずしもレーザ溶接の専門家でないオペレータであっても、溶接品質のトラブルに対して処理が可能な生産システムとする必要がある。この為に、インプロセスモニタリング装置の機能として、溶接不良の検出機能に加えて、品質トラブルが発生した場合の迅速な復旧のためのトラブルシューティングの補助をする機能が求められる。第5章では、第2世代機の実現のための基礎となる手法として、キーホールとプルームのプラズマ発光強度 P_K 、 P_P のDC成分とAC成分に分離することにより、変動した溶接パラメータの識別が可能であること及び、長期間の発光強度の推移により、光学部品の経時変化を検出できることを示した。現在、この手法に基づいたモニタリングシステムはプロトタイプ機によるフィールドテストを行っているところである。

第3世代ではフィードバック制御によって、溶接欠陥の発生を防止することの出来る究極のシステムである。第3世代のモニタリングシステムの実用化のためには、レーザ溶接の速度に見合う、高速な処理が必要である。レーザ溶接では溶接速度は数十mm/s

Table 6.1 Three generations of monitoring system

1st generation: detection of weld defects

2nd generation: Prevention of weld defects by determination of parameter shift

3rd generation: adaptive feedback control system

程度であるため、溶接長1mm当たり1回のフィードバックを行うだけでも1秒間に数十回の溶接現象のモニタリングとその解析が必要である。これには、ハードウェアとしてのセンサー、処理装置およびフィードバックする発振器、加工機の高速処理が必要であるだけでなく、激しく時間変動する溶接現象のダイナミックな解析が必要であり、さらなる溶接現象の研究が必要と思われる。

6.4.2 今後の課題

プラズマモニタリング技術の今後の課題について、車体ボディの3次元溶接を例にして述べる。従来、スポット抵抗溶接が用いられていた車体ボディの組立工程にレーザ溶接を応用することで、継ぎ手形状の制限が大幅に緩和されることや、連続溶接による接合強度の向上などが見込めるため、車体構造の合理化を目的とした応用検討が進められている。Fig.6.26は自動車ボディのルーフとサイドパネルの接合部へのレーザ溶接の検討例である。Fig.6.27は実験に用いたレーザ溶接専用に設計された3次元溶接口ロットシステムの写真であり、走行軸が付いた極座標系の6軸ロボットの各関節にCO₂レーザを伝送するためのミラーが設置されている。Fig.6.28は加工ヘッドの模式図であり、その先端に車体ボディの隙間を矯正するための圧力ローラーと共に、プラズマ光センサーが検出角度θ=55度およびθ=10度に2つが設置されている。

前節で述べたテーラードブランク溶接と比較して、車体ボディの3次元溶接には、以下のようないくつかの要因のため、さらに高いレベルのモニタリング技術の実用化が要求される。その要因の一つは、車体ボディは数mの大きさの大型構造物であるため、溶接部の位置精度は数mm程度の誤差が生じる可能性があり、特に焦点位置の変動は避けられないことである。このため、焦点位置を含めた溶接パラメータの変動を絶えずモニタリングし、フィードバックする必要がある。

また、車体ボディの溶接部は閉断面構造となる部位が多く、溶接部の裏面へのセンサーの設置は困難な場合がほとんどであり、表面側センサーのみで裏面への貫通や隙間の検知を行う必要がある。この要求に対しては、前節で述べたように、プラズマ発光強度のAC成分を $P_{P,AC}$ 、 $P_{K,AC}$ へ分離することにより対応することができる。すなわち、 $P_{P,AC}$ および $P_{K,AC}$ のAC成分の位相の解析により、貫通溶接か非貫通溶接かの検出が可能であり、 $P_{K,AC}$ のAC成分の周波数分布の変化を検知することにより合わせ隙間に起因するアンダーフィル欠陥が検出することが可能である。このように、表面側のセンサーからの信号のみで、その溶け込み形状の検出が行えることは、車体ボディのような3次元溶接

では、従来のモニタリング手法に比べ飛躍的に有効な手法である。

テールードプランクがパネル部品の素材の溶接であったのに対し、車体ボディは最終に近い工程での溶接であること、高いレベルのインプロセスモニタリングが要求される要因である。溶接不良が発生した場合に車体ボディを廃棄すると損害は大きく、発生した溶接不良の検出機能よりも、溶接不良の発生を未然に防止する機能の要望が高い。このためには、第5章で述べたような変動した溶接パラメータの識別や品質推移の解析手法が必須であり、第2世代以降のインプロセスモニタリング技術の実用化が必要である。

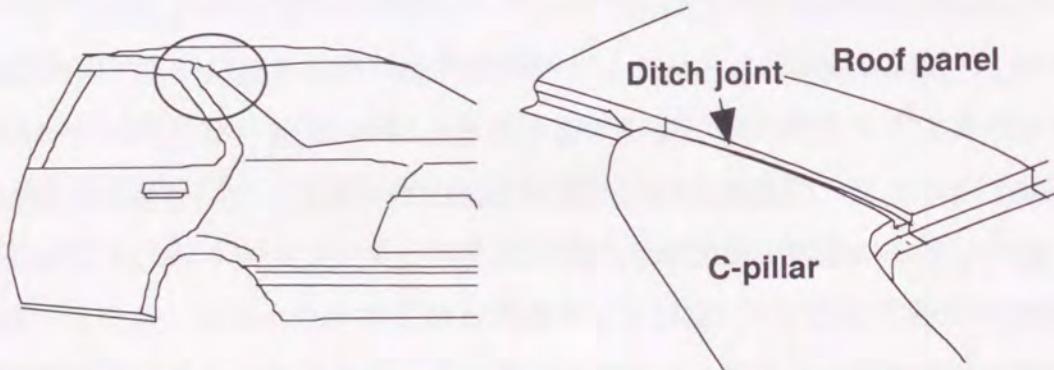


Fig.6.26 Roof to side panel joint of three dimensional lap welding.

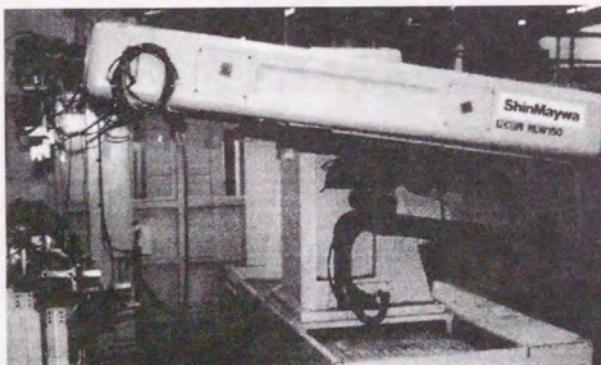


Fig.6.27 Photograph of three dimensional laser welding robot.

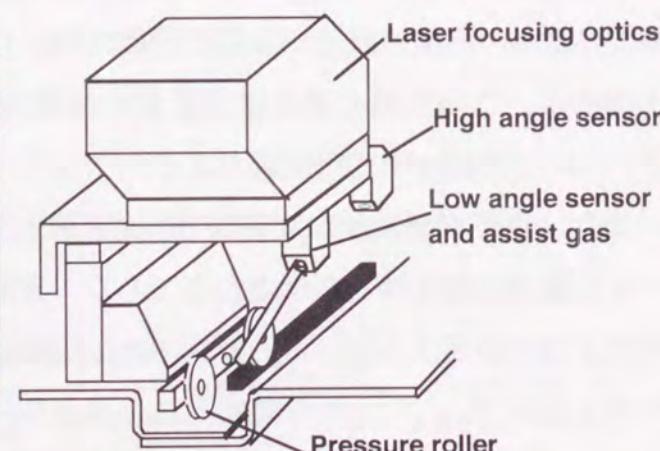


Fig.6.28 Illustration of multi photo sensors for 3-D lap laser welding.

6.5 結言

本研究で開発したプラズマ発光強度のインプロセスモニタリング技術をテールードプランク溶接の生産ラインへ適用した手法について述べた。また、レーザモニタリング技術をその知能化レベルで分類し、現在の達成レベルと今後の課題について述べた。本章で得られた結論は以下のように整理できる。

- (1) 75度センサーによる受光強度の数kHz帯のAC成分は非貫通溶接に比べて貫通溶接時に大きくなる。75度センサーのAC成分の2乗平均値を閾値と単純に比較することにより、貫通・非貫通のモニタリングに適用することができる。
- (2) 高い角度のセンサーにより、プラズマブルームの急激な受光量低下を検出することによって穴あき欠陥の検出が可能である。
- (3) プラズマブルームの最も明るい部分がワーク内に沈み込むと、低い角度のセンサーの受光強度が敏感に低下するため、アンダーフィル欠陥が検出可能である。
- (4) 重ね溶接の合わせ隙間が増大すると、 P_K のピーク周波数が2枚の合計板厚相当から2枚の各板厚の周波数に遷移する現象を応用することにより、モニタリング可能である。
- (5) 本研究のインプロセスモニタリング技術は、テールードプランク溶接のような生産ラインにおいて、十分な検出精度と信頼性を持っていることが実証された。

第7章 総括

レーザ溶接は生産性が高く高品質の継ぎ手が得られるが、信頼性が不十分なことが量産ラインに導入する際の障害となっている。本研究は自動車部品製造における、レーザ溶接品質の信頼性向上を目的として、プラズマ発光強度を検出する新しいインプロセスのモニタリング手法を研究・開発した内容をまとめたものである。本研究のモニタリングシステムの特徴はプラズマ発光強度に注目し、マルチフォトセンサーによりキーホールとブルームのプラズマ発光強度を分離・検出できることである。分光分析によりプラズマ発光の基本的性質を調べるとともに、溶接現象の解析に基づきセンサーによる検出量の物理的意味を調査した。このモニタリング手法により溶接欠陥の検出機能と溶接パラメータの変動の検出が従来の手法に比べて遙かに精度良く行うことが可能となり、自動車部品のテーラードブランク溶接の生産ラインに実用化することができた。

本論文で得られた成果を総括すると以下の通りである。

第2章では、自動車部品の接合にレーザ溶接を適用したとき、パラメータが適切な範囲に管理されると、生産性が高く、優れた機械的性質を持った溶接継ぎ手が得られることを示した。しかしながら、発振器や伝送・集光系の光学部品の経時劣化や、ワークの加工精度不良や汚染による溶接不良の発生が避けられず、また、加工点でのパワー密度等の重要なパラメータが生産現場で計測・管理が困難であるため、溶接品質の信頼性が不十分であり、生産ラインにレーザ溶接を導入するには、インプロセスモニタリングによる品質評価技術の開発が必須であることを示した。モニタリングの検出対象としては、物理現象との相関、応答性、耐環境性を考慮してプラズマ発光強度が最適であることを示した。

第3章では、プラズマブルームを分光分析によって、温度・電子密度などの基本的な性質を調査し、ブルームのキーホール直上での半径約0.5mmの狭い領域では、周辺部にくらべて温度・電子密度が高いこと、実生産で対象となる数m/minの高速溶接ではプラズマによるレーザビームの吸収はほとんど無視できることを示した。光センサーとして高感度、応答速度の紫外～赤外精密測光用シリコンフォトダイオードを選定・採用し、これにより溶融池の輻射の影響を受けることなく、プラズマ発光強度を検出できることを示した。また、検出角度の異なる複数の光センサーを用いることにより、キー

ホール plasma と plasmaブルーム の発光強度を、分離して検出することのできるモニタリング手法を提案した。このシステムを用いて、キーホール内の深さ方向に plasma 発光強度が均一でなく、キーホールに隣接する表面付近に発光強度の強い領域があることを示した。

第4章では、プラズマ発光強度の時間変動挙動を解析し、発光強度の時間変動成分(AC成分)もキーホール plasma と plasmaブルーム の値を分離・評価できることを示した。この解析手法により、貫通溶接においては板厚が薄いほど、またスポット径が小さいほどキーホール発光のAC成分のピーク周波数が高くなることを示した。更に、貫通溶接ではキーホール plasma と plasmaブルーム の発光波形はほぼ同位相であるのに対し、非貫通溶接では位相が反転することから、75度センサーの信号の2乗平均値からピードの貫通・非貫通を識別できることを示した。また、プラズマ発光強度の時間変動の要因を考察し、キーホールの共鳴振動現象が最も妥当であることを示した。

第5章においては、実際の生産ラインで長期・短期にわたって変動が想定される加工点出力、焦点位置、ガス流量を取りあげ、変動したパラメータを検出する手法を提示した。この手法においては plasmaブルーム とキーホールの plasma の発光強度の関係から、各溶接パラメータの変動を知ることができる。これによると、溶接欠陥が発生したとき、その原因の特定、変動パラメータの識別による欠陥発生の防止などが可能となる。さらに、プラズマ発光の平均発光強度を長期間にわたって記録し、その推移を解析することにより光学部品の経時劣化の検出が可能であることを示した。

第6章では、本研究で開発した新しいインプロセスモニタリング手法を実際の自動車製造プロセスにおけるテーラードブランク溶接に適用し、各種溶接欠陥を検出する例をまとめた。裏面までの貫通溶接においては、検出角度が75度のセンサーのAC成分の2乗平均値は、非貫通溶接に比べて大きくなることから、貫通・非貫通の識別が可能であることを示した。また、テーラードブランク溶接における穴あき欠陥、突き合わせ溶接および重ね溶接におけるアンダーフィル欠陥の検出について実際例を示した。また、重ね継ぎ手の隙間に起因するアンダーフィル欠陥が発生すると、キーホール plasma のピーク周波数が2枚の合計板厚に相当する周波数から、上側の板厚に相当する周波数に遷移するため、検出可能である。本モニタリングシステムでは、プラズマモニタリングの判定結果を搬出口ボットに指令を送り、自動的に欠陥品を跳ね出すものであり、1993年より既に数百万以上の部品への応用実績がある。

本研究で開発したモニタリングシステムは、欠陥の検出のみを行う(第1世代機)が

1993年より稼働しており、欠陥の原因の識別や、不良の発生予測の機能(第2世代機)を現在、生産ラインでフィールドテスト中である。今後の課題としては、変動した溶接パラメータを識別し、加工機へフィードバックする機能(第3世代機)であるが、その実現にはさらに高速なフィードバックシステムの開発とさらなる溶接現象の研究が必要である。

謝辞

本研究の遂行にあたって、始終ご指導とご教示を賜りました、大阪大学生産加工工学科教授 宮本勇博士に心から厚く御礼申し上げます。

本論文の作成に当たって、ご指導・ご助言を賜りました。大阪大学生産加工工学科教授 仲田周次博士ならびに黄地尚義博士、大阪大学レーザー核融合研究センター教授 中井貞雄博士に深く御礼申しあげます。

本論文作成の機会を与えていただき、激励を賜りました、日産自動車技術開発センター前部長 西岡勝昭氏、同社技術開発センター前主管 加藤規康氏ならびに同レーザ加工グループの皆様に深甚の謝意を表します。

また、本論文の作成においてご助言やご支援を頂いた大阪大学生産加工工学科助教授 大村悦二博士を初め、宮本研究室の皆様に御礼申し上げます。

引用文献

- 1)森：レーザ加工の自動化とその課題、溶接学会論文集、Vol.10, No1, (1992), pp.176-181
- 2)M.Yessick and D.J.Schmats:SAE Tech Paper, MR75-996 (1974)
- 3)森 他：ブランク材のレーザ溶接工法の開発、日産技報、35号(1994), pp.121-126
- 4)仁志、小松、高砂:レーザ溶接における結合素材のプレス加工、レーザ熱加工研究会誌, Vol.2, No.1 (1995), pp.123-129
- 5)F.Zimmer:Technical Trends of Tailored Blanking Technology in Europe and North America, レーザ熱加工研究会誌、Vol.2, No.1(1995), pp.79-84
- 6)L.Haniche and O.Strandburg:Roof Laser Welding in Series Production, SAE 930028
- 7)J.Flohr and H.Bayerlein:Optimization of laser welding in car body manufacturing,ECLAT'96(1996),pp.41-48
- 8)P.Breuer:Nd:YAG laser welding used in car body manufacturing,Industrial Laser Review, Vol.9(1994), No.8, pp.13-15
- 9)宮本:アンケート調査による日本のレーザ加工の現状；レーザ熱加工研究会論文集、第24回(1990), pp.31-50
- 10)宮本：レーザ溶接の基礎、第26回レーザ熱加工研究会論文集、(1991), pp.1-17
- 11)A.Siegman:New development in laser resonators, SPIE Vol.2246, pp.25-36
- 12)J.Luxon:Applied Optics Vol.27, 10, 15 May 1988.
- 13)Prometec GmbH:Technical manual of LASERSCOPE UFF 100
- 14) 江畑 他：45度軸はずし放物面鏡の集光特性、第31回レーザ熱加工研究会論文集 (1994), pp.63-78
- 15).Miyamoto et al; The Role of Assist Gas in CO₂ Laser Weldings, ICALEO'84, LIA Vol.44(1984) 68-75
- 16)丸尾、宮本ら；金属材料のレーザ溶接(第2報)-ビード形状にたいする移動速度の影響-,溶接学会誌、Vol.50, No.4 (1981), pp. 403-410
- 17)丸尾、宮本ら；金属材料のレーザ溶接(第1報)-集光系によるビード形態の変化-,溶接学会誌、Vol.49, No.10 (1980), pp. 687-692
- 18)I.Miyamoto et al;Analysis of Thermally Induced Optical Distortion in Lens during Focusing High Power CO₂ Laser Beam, Proc. European Congress on Optics, SPIE Vol. 1276 (1990) pp112-121
- 19)小野 他：薄鋼板レーザ重ね溶接継ぎ手の強度特性、溶接学会論文集、Vol.14, No.3(1996), pp.586-591
- 20)E.Beyer,P.Abel:Process Monitoring in Laser Materials Processing, Proc. of LAMP'92(1992), pp.433-438
- 21)宮本、森、丸尾：薄板のレーザ溶接におけるプラズマの挙動-レーザ溶接の知能化に関する研究(1),溶接学会論文集, Vol.13, No.2(1995), pp.211-217
- 22)I.Miyamoto and H.Maruo;Spatial and Temporal Characteristics of Laser Induced Plasma in CO₂ Laser Welding, Proc.LAMP'92 (1995) pp311-306
- 23)宮本 他；レーザ溶接のプラズマブルームの解析、第28回レーザ熱加工研究会論文集 (1992), pp.59-66
- 24)W.Duley et al; Acoustic Emission from Modulated Laser Beam Welding of Materials, ICALEO'95, LIA
- 25)Thyssen Stahlag:Using a Laser Beam for Welding Thin Sheet Metal, Thyssen Technical Information (1990)
- 26)T.Ishide et al.: High Power YAG Laser Welded Sleaving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants, Proc. LAMP'92, (1992), pp.957-962
- 27)L.Li,W.M.Steen,D.J.Brookfield:Sensor Development for In-Process Quality Inspection and Optimization of High Speed Laser Can Welding Diagnosis, Proc. LAMP'92(June,1992), pp.451-456
- 28)W.Steen: Adaptive Control of Material Processing, Proc. LAMP'92(June,1992), pp.439-444
- 29)丸山 他：ブーツバンドのレーザ溶接におけるレーザ溶接品質管理、レーザ熱加工研究会誌、Vol.1, No.2(1994), pp.77-84
- 30)夏見 他：結合素材によるボディーパネルの一体化、自動車技術、Vol.48, No.11(1994), pp.27-32

- 31)J.Kroos et al:Dynamic behavior of the keyhole in laser welding, J.Phys. D., Appl. Phys., Vol.26(1993), pp.481-486
- 32) J.Kroos and G.Simon:Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding,J.Phys. D., Appl. Phys., Vol.26(1993), pp.474-480
- 33) Y.Arata et al:Beam Hole Behavior during Laser Beam Welding,LIA,Vol.38, ICALEO(1983), pp.59-66
- 34) 荒田：超高エネルギー密度熱源に関する最近の研究、高温学会誌(1986), Vol.12, No.1, pp.3-15
- 35)Y.Arata et al :fundamental Phenomena in high power CO₂ laser(report II)-Vacuum laser welding-, Transaction of JWRI Vol.14 No.2(1988), pp.84-94
- 36)H.R.Greim:Plasma Spectroscopy, McGraw-Hill, New York (1964)
- 37)浜松ホトニクス：フォトダイオード技術資料
- 38)和田：放射の物理、共立出版
- 39)櫛田：量子光学、朝倉書店
- 40)黄地 他：赤外線照射プラズマ診断法によるレーザプルーム計測の試み、第32回 レーザ熱加工研究会論文集(1994)
- 41)A.Matsunawa: Physical phenomena and their interpretation in laser materials processing, ICALEO (1990), pp.313-324
- 42)J. Bendat et al;ランダムデータの統計的処理,培風館
- 43)三谷：ディジタルフィルタデザイン-ディジタル信号処理シリーズ第3巻-,昭晃堂
- 44)S.Wolfram:Mathematica A System for Doing Mathematics by Computer, Wolfram Research Inc.
- 45) E. Crandall:Mathematica for the Sciences,Addison-Wesley Publishing Company
- 46) E.Beyer et al:Model of dynamic behavior in laser beam welding, High Power Lasers and Laser Machining technology, SPIE Vol.1132 (1989), pp.17-23
- 47) B.Finke and G.Simon:On the gas kinetics of laser-induced evaporation of metals,J.Phys. D. , Appl. Phys., Vol.23(1990), pp.67-74
- 48)V.Semak et al:Weld Pool Oscillations in Laser Welding, Proc. ICALEO (1995) , pp.739-748
- 49)J.Kroos,T.Kein et al; Oscillation of the keyhole in penetration laser from welding, J. Physic ;Appl. Physics,Vol. 27 (1994)pp2023-2030
- 50)C.Bagger et al :Process Behavior during High Power CO₂ Laser Welding of Zinc Coated Steel, Proc. of LAMP'92 (1992), pp.553-558

本研究に関連した発表論文

- 1 宮本、森、丸尾：薄板のレーザ溶接におけるプラズマの挙動-レーザ溶接の知能化に関する研究(1),溶接学会論文集, Vol.13, No.2 (1995), pp.211-217
- 2 森、坂元、宮本：テーラードブランク溶接における溶接欠陥の検出-レーザ溶接のインプロセスマニタリングシステムの開発(第1報)-;溶接学会論文集, Vol.14, No.4(1996), pp.689-693
- 3 宮本、森：レーザー重ね溶接における隙間検知法の開発；レーザー研究, Vol.24, No.9(1996), pp.1013-1018
- 4 宮本、森：プラズマ発光の脈動成分解析による貫通検知、レーザー研究, Vol.24, No.10(1996), pp.1107-1113
- 5 宮本、森：レーザー溶接における変動パラメータの特定;レーザー研究, Vol.24, No.11(1996), pp.1211-1217
- 6 I.Miyamoto, H.Maruo, K.Mori and H.Sakamoto:In Process Monitoring in Laser Welding of automotive Parts, Proc. Laser Materials Processing Conference, ICALEO'93,LIA Vol.77(1993), pp.413-424
- 7 I.Miyamoto and K.Mori:Development of In-Process Monitoring System for Laser Welding, Proc. ICALEO'95, LIA Vol.80 (1995), pp.759-767
- 8 I.Miyamoto, T.Maiwa and K.Mori:Properties of Keyhole Plasma in CO₂, Laser Welding, Proc. Laser Materials Processing Conference, ICALEO'95, LIA Vol.80 (1995), pp.708-717
- 9 K.Mori and I.Miyamoto:In-Process Monitoring in Laser Welding by Analyzing Ripple of Plasma Emission, Journal of Laser Applications, LIA 揭載予定
- 10 K.Mori and I.Miyamoto:Study on In-process monitoring for Laser Welding, Proc. ECLAT'96 (1996), pp.79-87

