



Title	視覚センサによる溶接自動化システムの高機能化と実用化に関する研究
Author(s)	浅井, 知
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/34407
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

博士学位論文

視覚センサによる溶接自動化システム
の高機能化と実用化に関する研究

浅井 知

2013年12月

大阪大学大学院工学研究科

目 次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本研究に関する従来の研究	3
1.3 本論文の構成	6
第 2 章 近赤外線 CCD カメラを用いた溶融池センシングシステム	9
2.1 緒言	9
2.2 溶融池センシングシステムの構成	10
2.2.1 光学システムとその特性	10
2.2.2 画像処理方法	12
2.3 実験方法	16
2.4 実験結果および考察	16
2.4.1 トーチねらい位置ずれと溶融池の傾きの相関	16
2.4.2 溶接条件の変化と溶融池形状の相関	20
2.4.3 ギャップ変動と溶融池形状の相関	23
2.4.4 溶融池温度分布パターン	25
2.4.5 異常検知への応用	26
2.4.6 溶融池センシングの溶接条件制御への適用検討	27
2.5 結言	29
第 3 章 ステレオビジョンによる溶接ビード表面外観検査システム	31
3.1 緒言	31
3.2 溶接ビード表面外観検査システムの製作	31
3.2.1 3次元形状計測の原理	31
3.2.2 システムの構成	32
3.2.3 処理手法	34
3.3 ビード表面形状計測結果	37
3.4 欠陥の自動識別	39
3.5 結言	40
第 4 章 全自動溶接システム	42
4.1 緒言	42
4.2 全自動溶接システムのコンセプト	42
4.3 全自動溶接システムの構成	43
4.4 全自動溶接システムの機能	45

4.4.1	センサとセンシング項目	45
4.4.2	溶接条件制御機能	46
4.4.3	品質確認機能	49
4.4.4	全自動溶接システムの動作シーケンス	49
4.5	機能検証試験	50
4.5.1	検証試験方法	50
4.5.2	溶接条件制御検証試験結果	53
4.5.3	品質確認機能検証試験結果	59
4.5.4	異常事象確認検証試験結果	61
4.6	結言	67
第5章	固定配管高能率狭開先自動GTAWシステム	69
5.1	緒言	69
5.2	自動溶接システムの構成	69
5.3	レーザスリット光センサによる開先形状計測システム	70
5.3.1	計測項目	70
5.3.2	システムの機能	71
5.4	IR-CCDカメラによる溶融池センシングシステム	74
5.4.1	画像抽出方法	74
5.4.2	画像処理による特徴量の抽出	77
5.4.3	溶接制御項目	78
5.5	溶接条件の適応制御	78
5.5.1	溶接欠陥と溶融池形状の相関	78
5.5.2	溶融池形状パラメータの抽出	81
5.5.3	溶接条件制御方法	82
5.6	自動溶接システムの動作シーケンス	85
5.7	火力プラント配管溶接への適用	86
5.8	結言	88
第6章	原子力炉内構造物現地遠隔ロボット溶接システム	90
6.1	緒言	90
6.2	適用対象と開発課題	90
6.3	ロボットシステムの構成と機能	92
6.3.1	溶接ロボット	93
6.3.2	小型TIGトーチ	93
6.3.3	遠隔操作用カメラ	93
6.3.4	オフラインティーチングシステム	94

6.3.5	視覚センシングシステム	95
(1)	3次元形状計測システム	95
(2)	裏波センシングシステム	97
6.4	機能検証試験	99
6.5	実工事への適用	105
6.6	結言	107
第7章	溶接インプロセス品質管理システム	108
7.1	緒言	108
7.2	供試材料および実験方法	108
7.2.1	供試材料	108
7.2.2	溶接方法	108
7.3	溶接インプロセス品質管理システムの構成	109
7.4	システム機能検証試験結果	113
7.5	タービンロータ溶接への実機適用	119
7.6	結言	122
第8章	溶接技能デジタル化システム	123
8.1	緒言	123
8.2	溶接技能デジタル化システムの構成と機能	123
8.2.1	システムの基本コンセプト	123
8.2.2	TIG 溶接技能デジタル化システムの構成と機能	124
8.2.2	MAG 溶接技能デジタル化システムの構成と機能	127
8.3	溶接技能訓練への適用結果	129
8.3.1	初心者訓練	129
8.3.2	溶接技量資格取得訓練	131
8.4	技能継承への活用結果	134
8.4.1	配管全姿勢溶接	135
8.4.2	管と管板の溶接	136
8.4.3	気密容器の溶接	139
8.4.4	被覆アーク溶接による配管溶接	141
8.5	結言	143
第9章	結論	145
	謝辞	148

参考文献 149

発表論文 154

第1章 緒論

1.1 本研究の背景と目的

昭和40年台末までの高度成長期における日本のアーク溶接法は、被覆アーク溶接を主流とした手動溶接に支えられてきた。そして、二度のオイルショックを受けるまでは、重厚長大産業の華やかな時代であり、造船、重電等が大型化していくなか、高能率化が追求されるようになってきていた。そして、自動溶接技術として、厚板の高能率溶接としてサブマージアーク溶接が先端技術として、いち早く実用化され、広く適用されるにいたっていた。一方、ガスシールドアーク（GMAW）溶接は、半自動による高能率化溶接として適用がすすめられ、オイルショック以降は、比較的薄板の溶接をはじめ、溶接姿勢を問わない自動溶接法として注目され、高能率化、省人化を目的として導入が急速にすすめられた。そして、我が国のロボット普及元年である1980年を経て、ガスシールドアーク溶接による多関節ロボットを用いた自動溶接法が、自動車産業を中心に主流となってきた。しかしながら、重電産業のような大型部品で多品種少量生産の現場では、リピート部品が少ない分、ティーチング作業に多大な時間を要することからロボットの活用は限定的なものにとどまっており、製品形状に合わせた専用機としての自動溶接が主体であった¹⁾。そして、1991年のバブル崩壊後、重厚長大から軽薄短小への産業構造の変化にともない、重電産業をはじめとした重厚長大産業分野では、3K職場が敬遠され、若年層の溶接離れがすすみ、溶接士の高齢化にともない、溶接士不足が深刻化するようになった。このため、高能率化、省人化を第一としてすすめられてきた溶接作業の自動化についても、職場環境の革新のみならず、若手溶接士の早期育成や高齢者の有効活用の観点から脱技能化をポイントとした高品質化へとその狙いの変化した²⁾。その結果、あらかじめティーチングあるいはプログラムされた動作のみで、溶接中の変動、外乱に対応できないロボットや自動溶接システムは、その機能向上が課題となってきた。

とくに、重電分野では、発電設備にかかわる溶接構造物において、その溶接部の信頼性が社会問題にまで発展することから、その品質向上は極めて重要な問題である。過去、原子力発電プラントを代表とする発電プラントにおいて、手溶接で行われた溶接部の溶接欠陥が起因となって生じたトラブル事例が多く見られる。このためには、溶接士の教育訓練の徹底が大切であるが、熟練溶接士が不足している現状を考慮すれば、熟練溶接士に頼らず一般の作業者が操作して信頼性の高い溶接部が得られる自動溶接システムの導入が必要となる。

一般に、自動溶接においては、実験等で適正溶接条件範囲をあらかじめ選定して実施するのが通常で実験時と状況が同じ（前提条件）であれば何の修正もなく、健全な溶接が行えるはずである。ところが、実際は、溶接対象物並びに溶接プロセス側の外乱発生により、前記の前提条件が維持できなくなり、条件等の修正作業が必要となる。この溶接対象物の外乱としては、ワーク形状誤差や設置誤差、開先形状の変動、溶接熱変形、治具の誤差やワークの熱容量の相違などが考えられる。一方、溶接プロセス側の外乱要因としては、ア

ーク熱、電磁気、ワイヤの曲がりや送給変動、給電チップの磨耗、電源電圧変動、環境の影響等が考えられる³⁾。

これらの外乱を検知し、自動的に溶接条件等を適正に修正、制御するためにはセンサを備えた制御システムが必要となる。この為、どのようなセンサでどの対象範囲まで制御するかは、前提条件の変動の程度あるいは溶接オペレータの関与程度により決定されることになる。

センサの情報抽出対象としては、外的状況として環境条件の変化に関するものと内的状況として溶接固有の現象の変化に関するものに分けられ、これらの情報を基に、溶接線倣い等の位置補正、溶接条件の適応制御、さらにはモニタリング等による異常検知を行う。

センサの種類を構成要素別に分類すると基本的には、接触式と非接触式に大別される⁴⁾。一般的に同じ情報抽出対象に対して各種センサが適用できるが、測定範囲、応答性、測定精度、経済性などを考慮した上で最も適したセンサを選定することが重要である。また、アーク溶接の環境は極めて厳しく、高温、光、ヒューム、電磁場、スパッタなどが生じることに加え、センサの設置スペースの制約もあり、実用化できるセンサはこれらに耐えうるものでなければならない。

現在、最も適用されているセンサは、電流や電圧変化を検出するアークセンサと電極接触式センサであり、センサの利用目的としては、開先倣い制御（溶接線倣い）と部材端の検出が最も多い。電極接触式センサは、多関節ロボットへの適用が多く、最近では標準装備されているのに対し、アークセンサは、ロボット及び自動化機器両方への適用が多い。アークセンサは、溶接トーチまわりに検出器を取り付ける必要がなく狭隘部での溶接が可能であることやスパッタ、光、ヒュームの影響をうけないなど、利点が多いもののトーチを揺動する必要があり、溶接条件に応じてセンサパラメータを調整する必要があることから、溶接条件を連続的に変化させる姿勢溶接等への適用は困難である。また、適用材料によって制約をうける。さらに、応用例としては、溶接線倣いが主であるが、溶着量や裏ビード形状の制御など溶接条件の適応制御へも進展しつつあるが⁵⁾、限定された応用であり、とりわけ、多層盛溶接への適用には、電流あるいは電圧変化の検出精度の問題から制約が多く、今後の無人化、無監視化をふまえた知能化、高機能化への展開には限界があると考えられる。

これに対し、開先形状や溶融池現象を直接検知できる視覚センサを代表とする光学式センサの応用が期待されるが、その検出手法や処理手法に課題も多く、実用化例も少ないのが現状である。

以上の背景をもとに、本研究の目的は、視覚センサを用いてビード形状や溶融池現象を直接検知することで抽出する情報と溶接品質との相関を明らかにし、溶接条件の適応制御や施工中の品質確認手法を提示するとともに、それらを活用した実用的な溶接自動システムを構築することで、溶接自動化システムの知能化、高機能化の手法を提供しようとするものである。

1.2 本研究に関する従来の研究

アーク溶接用センサとしての光学式センサに関する研究は1970年台頃からはじまり^{6~11)}、1980年はじめには、実用化例が報告されている¹²⁾。また、1990年には、溶接学会溶接法研究委員会にて、溶接法ガイドブック2として「アーク溶接におけるセンシングと制御」と題してセンシング技術の基礎と日本における応用事例について取り纏められ、光学式センサに関する報告もなされている⁴⁾。可視光やレーザ光を検出する光学式センサとしては、その受光面の形状によってポイントセンサ、リニアセンサ、エリアセンサに大別されているが、実用的には、レーザ光を照射し、その反射光を撮像するレーザセンサとCCDカメラなどで直視する視覚（ビジュアル）センサに区別される¹³⁾。

また、レーザセンサの代表的なものとして、リニアセンサであるスポット光を走査するレーザスポット光センサとエリアセンサであるレーザスリット光センサがある。レーザスリット光センサは、光切断法と呼ばれ、レーザスリット光を部材の開先に横切るように照射し、これをCCDカメラなどで斜め前方より撮像することで開先やビード形状を計測するものである。一方、レーザスポット光センサは、スポット光を走査させ部材表面との距離変化を得ることで対象物の断面形状を計測するものである。

藤山¹⁴⁾は、He-Neレーザを用いて溶接線前方にスリット光を照射し、開先断面像をえることにより開先倣いを行う方法を報告している。また、同様に大嶋ら¹⁵⁾は、薄板のギャップ検出に同様の手法を適用している。レーザセンサは、アーク点近傍はアーク光が強く認識できないため、アーク光の影響をうけないようにアーク前方にレーザ光を照射する必要があり、溶接トーチがセンシング位置に達したときにそのずれをフィードバックする遅延処理が必要である。

高宮ら¹⁶⁾は、レーザスリット光とTVカメラを用いて多層溶接の各パスの狙い位置補正を行うシステムの開発を報告しているが、アーク光の影響に対する対応策を講じているものの、あくまで溶接線倣いへの適用のみである。

また、同様に和田ら¹⁷⁾は、レーザ距離センサを開先方向に走査する手法で厚板多層溶接時のトーチ狙い位置を補正するシステムを開発し、円筒周継手のサブマージアーク溶接へ実用化している。とくに、トーチ位置の検出から積層アルゴリズムに従い溶接条件を適正化することを可能としている。しかしながら、この方法もすでに積層したビード形状の計測を基準としており、リアルタイムでアークの状況を検出、制御しているわけではないため、突発的な異常への対応は不可能であり、システムの高機能化には限界がある。

柴田ら¹⁸⁾は、レーザスリット光センサを搭載したパルスMIG全自動溶接システムを開発し、アルミ車両長手溶接へ適用している。これは、3.5~4.0mm板厚のV型突合せと重ね継手が対象であり、これも全自動といいながら、センサ情報は、溶接線倣いに活用しているのみであり、単純な直線溶接であるために品質確保と作業能率の向上には有効であるが、無監視化、無人化への展開まで考慮されていない。

多関節ロボットへのレーザセンサの搭載としては、清原ら¹⁹⁾により、リニアセンサを用いミラースキャナによるレーザの走査する手法にて、薄板曲線形状の溶接線倣いとトー

チ角度制御を実現している。しかしながら、これも薄板を対象としたものであるとともにトーチ位置のみの制御で、入熱にかかわる溶接条件をリアルタイムで制御するものではなかった。

また、レーザセンサの形状認識機能を活用して、J.E.Agrapakis ら²⁰⁾は、すみ肉溶接の脚長、ビード幅の検出などに活用している。同様に、高野ら²¹⁾は、レーザスポット光センサをMAG溶接ロボットに搭載し、ワイヤタッチセンサの代替に活用するとともに、溶接後のすみ肉ビードの脚長計測に適用し、溶接品質評価の自動化をはかっている。これは、寸法計測に有効であることを示しているが、品質確認機能として、溶接欠陥の認知への展開ははかられていない。

このように、レーザセンサは、開先形状もしくは溶接ビード形状などの2次元形状情報を得るのみであり、形状計測には有効であるもののアーク近傍の情報や溶融池に関する情報をえることが出来ない。さらに、レーザ光の照射部と受光部が必要なことからセンサヘッドが大きくならざるえない点や材料の表面状態、たとえば光沢や粗さなどが検出に影響を与えるなどの欠点も有している。このようにレーザセンサでは、得られる情報量が限定されることから、自動溶接システムの高機能化への適用には限界があることは明らかである。

一方、レーザセンサと異なり人間の目に近い状態で対象物を直視できる視覚センサは、情報量も多く、自動溶接システムの知能化、高機能化への適用が期待できる。

視覚センサにおける溶融池情報の抽出に関する基礎的研究として、井上^{22~23)}は、アーク光と溶融池のスペクトル測定を行い、鮮明な映像を得る上での光学フィルタ選定の考え方を示すとともに得られた映像から溶融池形状（ビード幅）を抽出のための二値化処理について述べ、ビード幅のリアルタイム測定が可能であることを示した。

また、大嶋らは、MAG溶接においてサンプリング周期ごとに電流を1msの期間だけ低電流に下げ、アーク光の影響をさけることでCCDカメラにて溶融池やギャップを撮影する方法を提案し²⁴⁾、得られた映像から溶融池幅を計測している。さらに、溶融池幅の計測結果をもとにファジィ制御を用い、溶接電流を変化させることにより溶け込みを一定に制御する手法を示している²⁵⁾。

さらに、菅は、薄板TIG溶接においてCCDカメラにて溶融池形状を測定する手法を提案し、溶接速度変化に対して溶け込みを一定に制御できたこと²⁶⁾や溶接線倣いの可能性²⁷⁾を報告している。

しかしながら、以上の研究結果は、視覚センサによる溶融池形状とくに溶融池幅の抽出手法とそれを用いた溶込み制御手法を提案しているものであるが、ビードオンプレートによる単純な溶接継手を対象としており、実作業への適用には課題も多い。すなわち、これらは、溶融池幅と溶込みの関係のみに着目したものであり、実溶接作業において生ずる外乱要因と溶融池形状変動の相関が検討されていない。自動溶接システムの知能化、高機能化を行う上では、溶融池形状の変化と溶接施工パラメータおよび環境要因の変動の相関を系統的に整理する必要があり、その結果、溶融池形状のなかで何を指標にすれば、適応制

御に有効であるかを明確にする必要があると考えられる。

視覚センサを用いた自動溶接システムとしては、以下のような報告が行われている。

和田ら²⁸⁾は、厚肉円筒容器の狭開先MIG溶接を対象として、赤外ビジコン+赤外フィルタを用いて溶接部を撮影し、画像処理を行うことで、ワイヤ突き出し長さ、熔融池幅(開先幅)、ワイヤ位置を算出し、トーチ位置制御を行うシステムを実用化している。このシステムでは、トーチ位置制御を行っているのみで、溶接開始から溶接中、溶接終了後を通じた品質確認機能はなく、溶接中の外乱等の異常事態に対応できる機能までは有していない。

また、井口ら²⁹⁾は、LNG地下タンクメンブレン溶接を対象に、自動TIG溶接装置にCCDカメラを搭載し、熔融池前方の映像を画像処理することで重ね継手の溶接線倣いを実現しているが、これも溶接線倣いに限定した活用であり、視覚センサのもつ機能を十分発揮しているとは言いがたい。

前田ら³⁰⁾は、ガスパイプラインの狭開先MAG溶接への適用を目的としてCCDカメラにより熔融池幅及び熔融池ワイヤ位置の画像計測を行い、溶接線倣い制御に利用する方法を開発している。この場合では、MAG熔融池の映像を抽出するため、955nmの干渉フィルタを採用したことを特徴としている。これも、現状溶接線倣いへの適用であり、溶接中の品質確認に着目した活用は行われていない。

一方、熟練溶接士の技能に近づけ、無人化、脱技能化を目指した全自動溶接システムの開発の取り組みが行われている。森沢ら³¹⁾は、光学式センサを用いてオーステナイト鋼ステンレス鋼配管を対象としたGTAW全自動溶接システムを開発した。ここでは、光学式センサとして、検出項目ごとにレーザスポット光センサ、レーザスリット光センサ、2種類のCCDカメラが用いられており、機能的には無人化を可能とするものとなっているが、搭載しているセンサの種類が多いため、溶接ヘッドが複雑かつ大型化しており、明らかに実用的ではない。実用的な溶接システムを構築するためには、溶接ヘッドをコンパクトにする必要があり、センサの数を最小限にすることが重要である。このためには、単一機能ごとにセンサをと取り付けるのではなく、一つの視覚センサから多くの情報を獲得し、その情報を多岐にわたって活用する必要がある。

また、鴨ら³²⁾は、配管狭開先GTAWを対象に同様の全自動溶接システムを開発している。ここでは、CCDカメラとレーザスリット光センサが用いられ、適応制御機能により、無人化、無監視化が実現できることが示されている。しかしながら、配管溶接で最も重要である初層裏波溶接を、対象外としていること、さらに、センサ抽出情報として熔融池の温度に着目したアプローチはなされていない。

このように、視覚センサの抽出情報として熔融池形状以外に温度情報が期待される。溶接部の温度計測としては、赤外線センサ(サーモビジョン)に関する研究が多くなされている^{33~35)}。これらは、赤外線センサから得られたTIG溶接部の熔融池の熱画像を画像処理し、トーチ位置やワイヤ挿入位置検出、ビード幅の変化の検出に適用されているが、赤外線センサは、サイズが大きく実用に供しない上に、熔融池などの可視情報が得られな

いため、情報に制約をうける問題がある。このためには、可視情報と温度情報の両方を獲得できる視覚センサの適用が必要である。

一方、CCDカメラを代表とする視覚センサは、人間の目と同じ情報を獲得できる利点を有している。たとえば、中島は、視覚センサを用いて人間の目と同様の3次元画像を得ることが可能であることを示しているが³⁶⁾、溶接の分野において3次元映像をもとにしたインプロセス中での形状計測や品質評価に視覚センサが適用された例はほとんどない。また、配管溶接を含め初層裏波溶接の信頼性確保は重要な課題であると述べたが。従来、配管溶接において裏波溶接を制御するには、表面の熔融池側からの観察あるいは温度測定³⁷⁾によるものがほとんどであり、表面情報と裏ビードの相関を膨大なデータベースを作成することで行われてきた。これは、配管裏面側から裏波を直視する手法が検討されていなかったためであり、視覚センサを有効に活用するための光学システムに課題があると言える。

溶接学会溶接法研究委員会において、溶接プロセスの高効率化における現状と課題と題してアンケート調査が行われており、その中で、センサの利用動向が調査されている³⁸⁾。光学式センサの利用については、2011年においても1993年調査時³⁹⁾に比べ活用が飛躍的にはのびていない。しかし、今後充実させたいセンサとして視覚センサへの期待は大きいことから、未だ実用上の問題が多くあることを示している。

1.3 本論文の構成

本論文は、視覚センサを用いてビード形状や熔融池現象を直接検知することで抽出する情報と溶接品質との相関を明らかにし、視覚センサから得られる多岐にわたる情報を溶接条件の適応制御や施工中の品質確認評価に活用する手法を提示するとともに、それらを適用した実用的な溶接自動システムを構築することで、溶接自動化システムの知能化、高機能化の基本的技術を明らかにし、その有効性を示そうとするものである。

本論文の構成と流れを Fig.1.1 に示す。

第1章では、本論文の緒論であり、本研究を行うに至った背景と本研究の目的を記すとともに、視覚センサを用いた自動溶接システムに関する従来の研究の概要について述べる。

第2章では、視覚センサとして近赤外線CCDカメラを用いた熔融池センシングシステムの検討を行っており、画像抽出のための光学システムならびに画像処理手法を確立するとともに熔融池形状と溶接品質にかかわる溶接パラメータの相関を調査し、溶接条件適応制御への適用に関して考察する。

第3章では、CCDカメラを用いた溶接ビード表面外観検査システムについて検討する。ステレオビジョンを用いた3次元形状計測手法の検討ならびに試作装置による溶接ビード形状および欠陥検出性能の調査を行うとともに、表面欠陥の自動識別手法の検討を加え、自動溶接システムの品質確認機能への適用に関して考察する。

第4章では、第2章の熔融池センシングシステムと第3章の溶接ビード外観検査システムの検討結果をもとに、それらの機能をあわせ、熟練溶接士が不要であり、溶接前、溶接

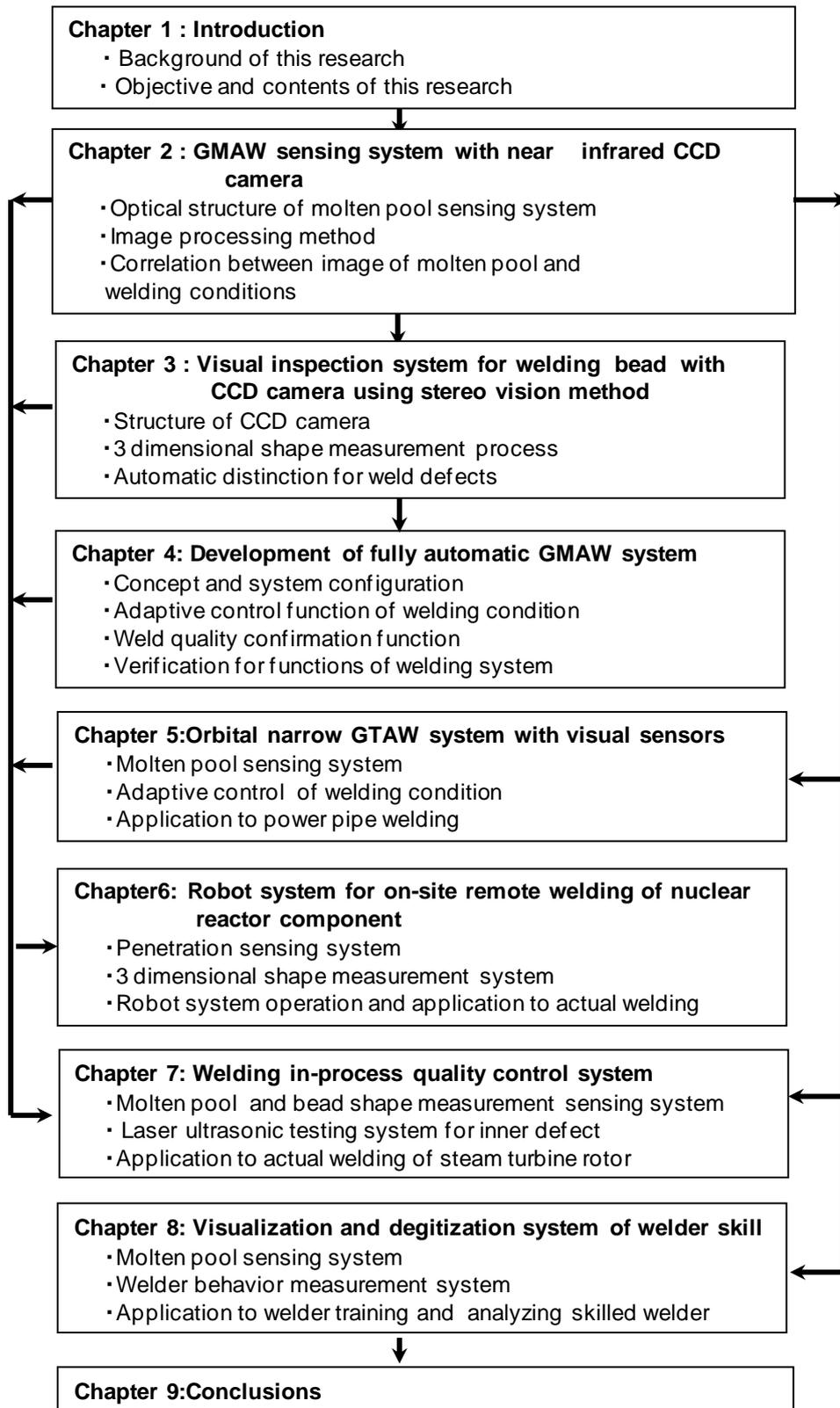


Fig.1.1 Outline of the thesis.

中、溶接後の作業を通じて無監視が可能な全自動溶接システムについて検討する。そして、パルス MAG 溶接の開先突合せ溶接およびすみ肉溶接を対象とし、実用的な全自動溶接システムを製作し、溶接条件適応制御機能および品質確認機能に関する機能検証に加え、環境等の異常事象対応機能を検証し、全自動溶接システムの有効性を示す。

第5章では、第2章の溶融池センシングシステムの実用化として、固定配管狭開先GTAWシステムへ適用検討を行う。近赤外線CCDカメラを用いて、高電流条件においても画像抽出が可能な光学システムの検討を行い、抽出画像と溶接欠陥との相関を調査することで溶接条件適応制御手法およびインプロセスでの品質確認手法を提示する。そして、レーザセンサを加えた実用的な高機能自動溶接システムを製作し、火力プラント機器の配管溶接実作業へ適用することでシステムの有効性を示す。

第6章では、第2章の溶融池センシングシステム、第3章の溶接ビード外観検査システムを総括した自動溶接システムの実用化として原子炉内構造物現地遠隔ロボット溶接システムについて検討する。視覚センサを用いた3次元計測手法による開先検査およびビード余盛形状検査方法の開発ならびに裏波ビードの溶接条件適応制御機能の開発を行い、作業者のアクセス性に制約のある原子炉内被曝環境下の遠隔溶接作業への適用性を検討する。そして、実際に原子炉保全工事に適用し、溶接システムの有効性を示す。

第7章では、第2章の溶融池センシングシステム、第3章の溶接ビード外観検査システム、第6章の配管裏波直視技術の実用化として溶接インプロセス品質管理システムについて検討する。第5章で示したインプロセス品質管理手法を活用し、レーザ超音波法による内部欠陥検出手法を加えた統括的なインプロセス品質管理システムの開発を行い、自動溶接の監視レス化を検討する。そして、実際に、火力プラントの蒸気タービンロータの溶接作業への適用し、システムの有効性を示す。

第8章では、第2章の溶融池センシングシステムの実用化として、複数の視覚センサを活用した溶接技能デジタル化システムへの適用検討を行う。画像計測による溶接状況ならびに溶接士の挙動を数値化、定量化する手法を開発することにより、溶接技能のデジタル化、ビジュアル化を検討する。そして、実際に、溶接技能デジタル化システムを適用し、溶接訓練ならびに技能継承への有効性を示す。

第9章は、結論であり、本研究によって得られた主な結果を総括する。

第2章 近赤外線CCDカメラを用いた溶融池センシングシステム

2.1 緒言

製造現場において、溶接士の高齢化や熟練溶接士不足が深刻な問題となってきた。この対応として溶接作業の脱技能化に向けた自動溶接システムの導入や無監視化、無人化を目指した溶接システムの知能化・高度化が必要と考えられる。これらを実現するキーテクノロジーの一つとしてセンシング技術があげられる。過去、各種センサが溶接自動化に用いられてきたが⁴⁰⁾、溶接線倣いが主体であり、外乱に対する溶接条件適応制御への適用には制約があり、限定された応用に限られてきた。しかしながら、近年、コンピュータ技術の進歩に伴い、光学センサが比較的安価に入手可能となってきたため活用が増えつつある。

光学センサは、主としてレーザ光を照射し、その反射光を撮像するレーザセンサとCCDカメラなどで直視する視覚センサにわけられる⁴¹⁾。CCDカメラを代表とする視覚センサは、レーザセンサと異なり、人間の目に近い状態でアーク部並びに溶接後のビード形状を直視出来る為、その情報量も多く、溶接状況を監視し、溶接条件をリアルタイムに適応制御することや溶接中の異常判断、溶接後のビード表面の外観検査など自動溶接システムを構築する上で、応用範囲が広い特徴を有している。さらに、近年のコンピュータ技術の発展に伴う画像処理技術の進歩により、視覚センサにて抽出した情報を加工し、多岐に利用できるとともに、処理速度やコスト面からも自動溶接システムに実用化できるようになってきた。そして、視覚センサを用いることにより、シンプルかつコンパクトで多機能なセンシングシステムの実現が可能になるものと期待されている。

そこで、視覚センサを目として有し、熟練溶接士に代わる高度な自動溶接システムの開発を狙いとして、視覚センサからの採取情報を加工し多種に応用する画像センシング技術の開発を行うことにより、溶接中の溶融池からの抽出情報からアークの形態や溶け込み状態、トーチねらい位置などを適正化する溶接条件適応制御を実現することができる。

Fig.2.1 は、視覚センサに要求される代表的な溶接部のセンシング対象とその情報に基づく制御項目を示したものである。一つの視覚センサからいかに多くの情報を抽出し、制御に活用できるかが溶接センシングシステム構築のポイントとなる。とくに、溶接品質状況を直接あらかず溶融池をセンシングし、その特徴量の抽出と制御量との相関が適応制御システムを構築する上で重要である。

本章では、高機能自動MAG溶接システムの構築を目的として、近赤外線CCDカメラを用いた溶融池センシングシステムを構築し、溶接条件適応制御機能に関する検討を行った。

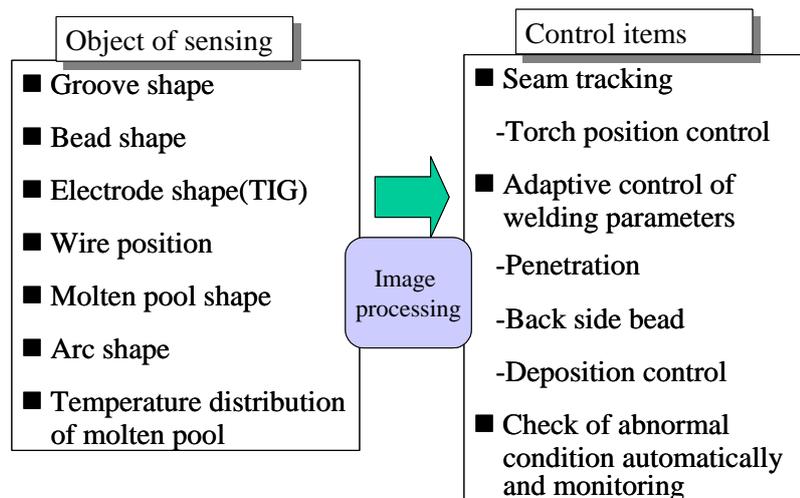


Fig.2.1 Object of sensing and control items.

2.2 溶融池センシングシステムの構成

2.2.1 光学システムとその特性

視覚センサとして近赤外線 CCD カメラ（以降 I R - C C D カメラと称す）を用いた。通常、視覚センサとして用いられている C C D カメラは、赤外線領域をフィルタにてカットされ、波長が約 400 ~ 700 n m に感度を有している。一方、I R - C C D カメラは、検知素子をシリコン C C D として、C C D カメラの赤外線カットフィルタをとりはずし、近赤外線領域を透過させ、感度を 1200 n m まで広げたものである⁴²⁾。一般に、溶融池の形状等を視覚センサにて撮影するには、強烈なアーク光のもと、アークおよび溶融池の分光特性を考慮した光学系ならびにフィルタの選択が重要である。

M A G 溶接（シールドガス：Ar + CO₂）におけるアーク光の分光特性は、可視光短波長域の成分が可視光長波長から近赤外線域よりも相対強度が大である計測結果が井上により報告されている⁴³⁾。Fig.2.2 は、M A G 溶接のアークと溶融池の分光特性を計測した結果を示したものであるが、井上と同様の結果をあらわしている。

また、黒体放射に関するウィーンの様式

$$\lambda_{\max} \cdot T = 0.002898$$

λ_{\max} : ピーク波長 (m)

T: 絶対温度 (K)

からは、約 1500°C の溶融池のピーク波長は、約 1600 n m で赤外線域にあることが知られている。

以上から、M A G 溶接の溶融池を可視化するには、溶融池の放射ピークを持つ赤外域を透過する光学フィルタを用いて溶融池の相対輝度を上げる方法が有効である。一方、温度計測を行う上では、プランクの法則により示された黒体における分光放射輝度⁴⁴⁾からは、短波長になるほど高温の放射が強くなり、短波長に感度の強い測定系を用いれば、高温の

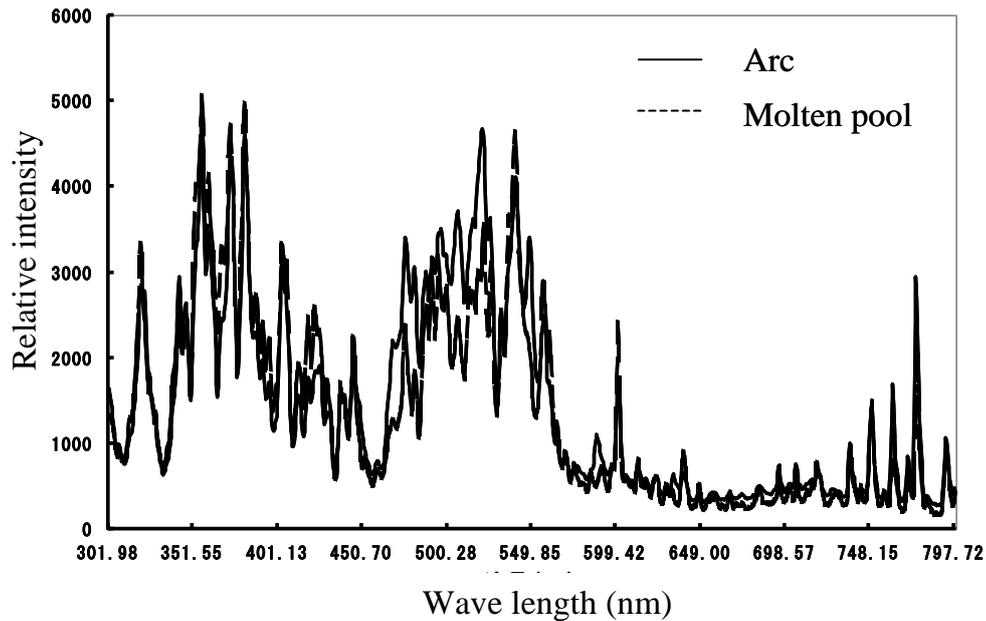


Fig. 2.2 Spectral distribution of radiative intensity in MAG arc and molten pool.

温度を測定することができることが知られている。通常の CCDカメラは、短波長の光を受光できるが可視光領域の光が外乱としてはいるため温度計測には使用できない。それに対し、IR-CCDカメラは、近赤外線領域まで感度を有しており、可視領域をカットするように適正な波長選択を行う光学フィルタを取り付ければ、800~1200nm の近赤外線領域の光を受光可能となり、500℃以上の比較的低温領域からの温度検出に活用できる。そこで、IR-CCDカメラに赤外透過の各種市販のバンドパスフィルタを取り付け、溶融池を試験的に計測した結果、1064nm の狭帯域バンドパスフィルタが有効であった。この結果、MAG溶接の溶融池センサとして、温度情報への拡張まで可能であるように IR-CCDカメラに1064nm の狭帯域バンドパスフィルタを取り付けた光学系を採用することにした。Fig.2.3 に IR-CCDカメラの外観を示す。寸法は、直径 17mm、長さ 38.9 mmとコンパクトである。また、Fig.2.4 に CCDカメラの感度特性、Fig.2.5 に選定した狭帯域バンドパスフィルタの透過特性を示す。



Fig.2.3 View of IR-CCD camera.

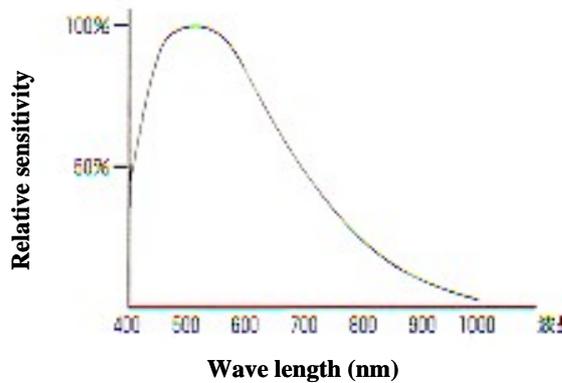


Fig.2.4 Spectral sensitivity of CCD camera.

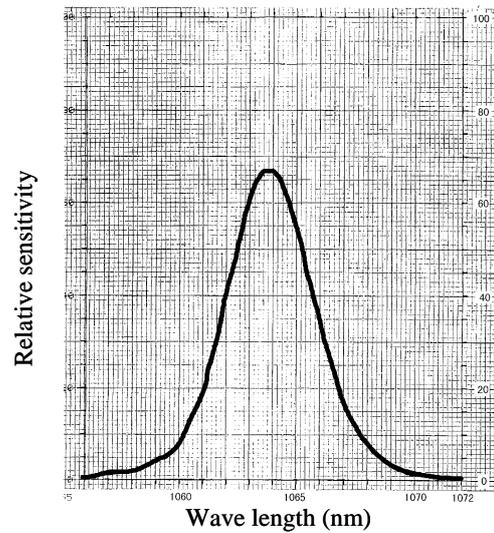


Fig.2.5 Spectral sensitivity of band pass filter.

2.2.2 画像処理方法

IR-CCD カメラにて得た溶融池映像は、画像処理することで溶融池やアーク状態の抽出情報として利用することができる。Fig.2.6 は、IR-CCD カメラを溶接トーチに取り付け、溶融池後方からの映像を画像処理することにて得られる溶融池形状の代表的な計測項目を示したものである。代表的な計測項目は、アーク領域の中心（アーク位置を代表）、溶融池の面積、溶融池幅、溶融池後端までの距離（溶融池長さの代表）、溶融池の傾き（アーク領域の中心から後端位置までの角度）、アーク領域の中心からみた溶融池幅の比である。

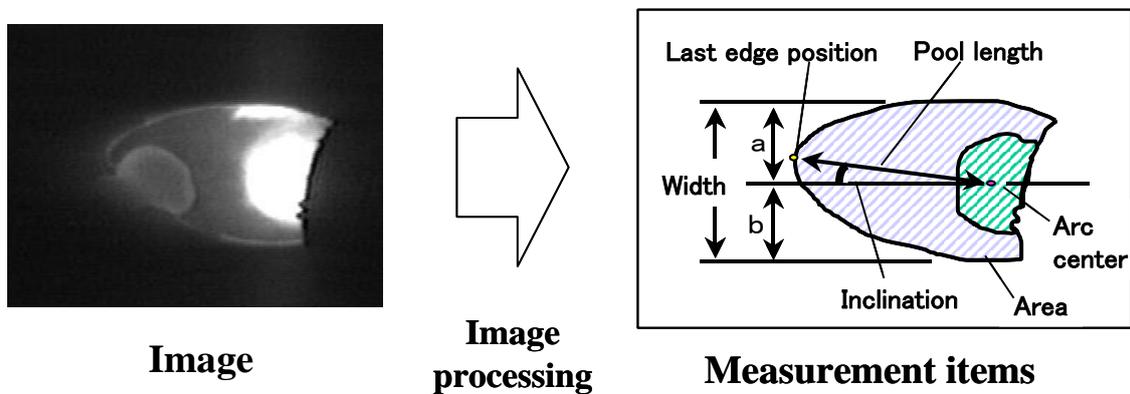


Fig.2.6 Measurement items of molten pool image by image processing.

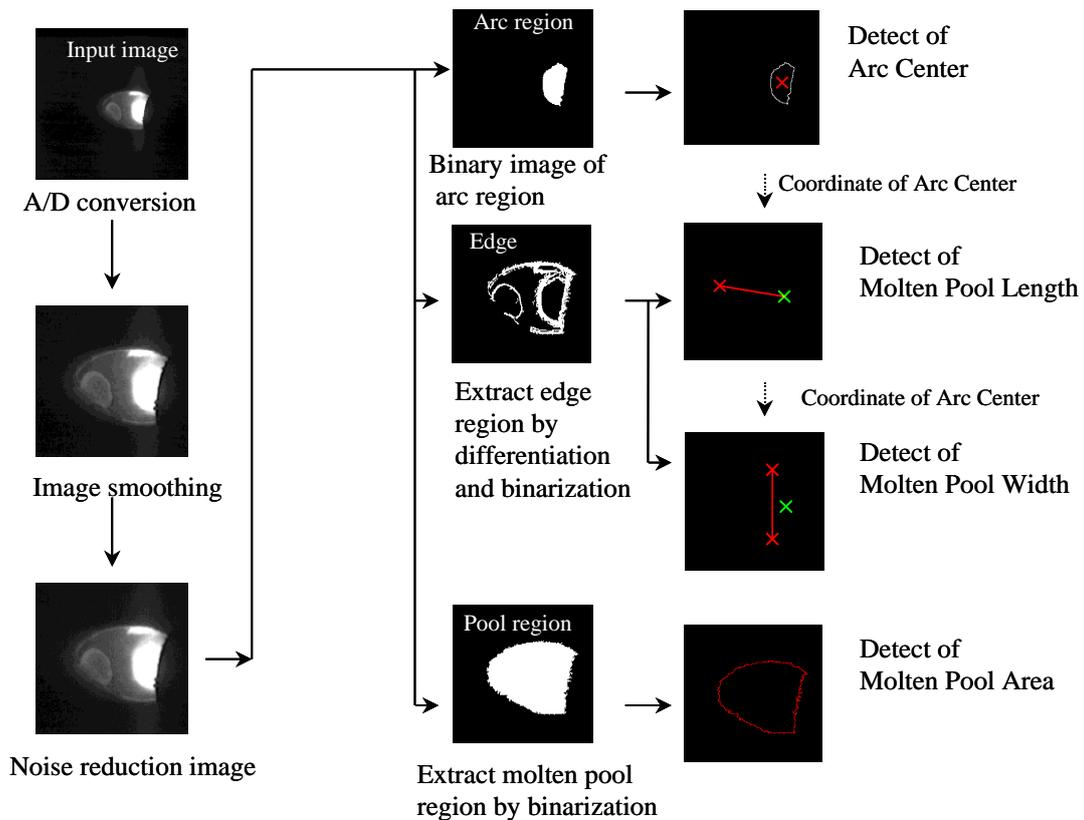


Fig.2.7 Image processing algorithm.

Fig.2.7 に、これらの溶融池形状抽出のための画像処理の流れを示す。溶融池後方からの溶融池映像をデジタル変換後、二値化処理にて溶融池領域を抽出する。さらに二値化処理にて溶融池領域内でアークによる高輝度領域を抽出し、その領域での幾何学的重心位置を求め、それをアーク領域の中心とする。また、同様に、二値化処理ならびに微分処理により、溶融池エッジの抽出、溶融池領域の抽出を行ない、溶融池後端距離（先に求めたアーク領域の中心から溶融池端までの距離の最大長さ）、溶融池幅（溶融池の最大幅）、溶融池面積を計測する。また、溶接進行方向を0度としてアーク領域の中心から溶融池後端までの角度を溶融池の傾きとして定義し、溶融池形状の特徴の一つとした。

また、**Fig.2.8** に示すように溶融池領域の輝度分布（放射率補正を行なうことで温度分布として扱える。）より等温線分布を求め、それらを先に求めたアーク領域の中心位置を中心として方向距離変換（極座標変換）を行なうことで各等温線分布を角度とアーク中心からの距離で表現でき、溶融池の等温線分布をパターン化、特徴化することも可能となる。これは、溶融池形状以外に溶融池の状況の特徴化指標として活用できる。また、本手法により、溶融池の傾きを算出することも可能である。すなわち、極座標にて示された最大距離を示す角度を溶融池の傾きと定義できる。

計測精度については、下記のように評価した。まず、計測の基準となるアーク領域の中心位置に関しては、高輝度領域の二値化処理にてアーク領域を決定し、その重心位置が出されるが、二値化処理する閾値がポイントとなる。**Fig.2.9**は、その閾値を変化させた場合のアーク中心の座標の移動量を示したもので、高輝度領域を256階調で示した場合、140以上のレベルに閾値を設定すれば、求められる重心位置（アーク中心）がほとんど変化しないことがわかる。このように最も安定してアーク領域を設定できる閾値を選定した。そして、**Fig.2.10**に示すようにビードオンプレートでの試験において、抽出した溶接中の溶融池幅と溶接終了後の実際のビード幅を比較することにより計測精度を求めた結果、 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内であった。

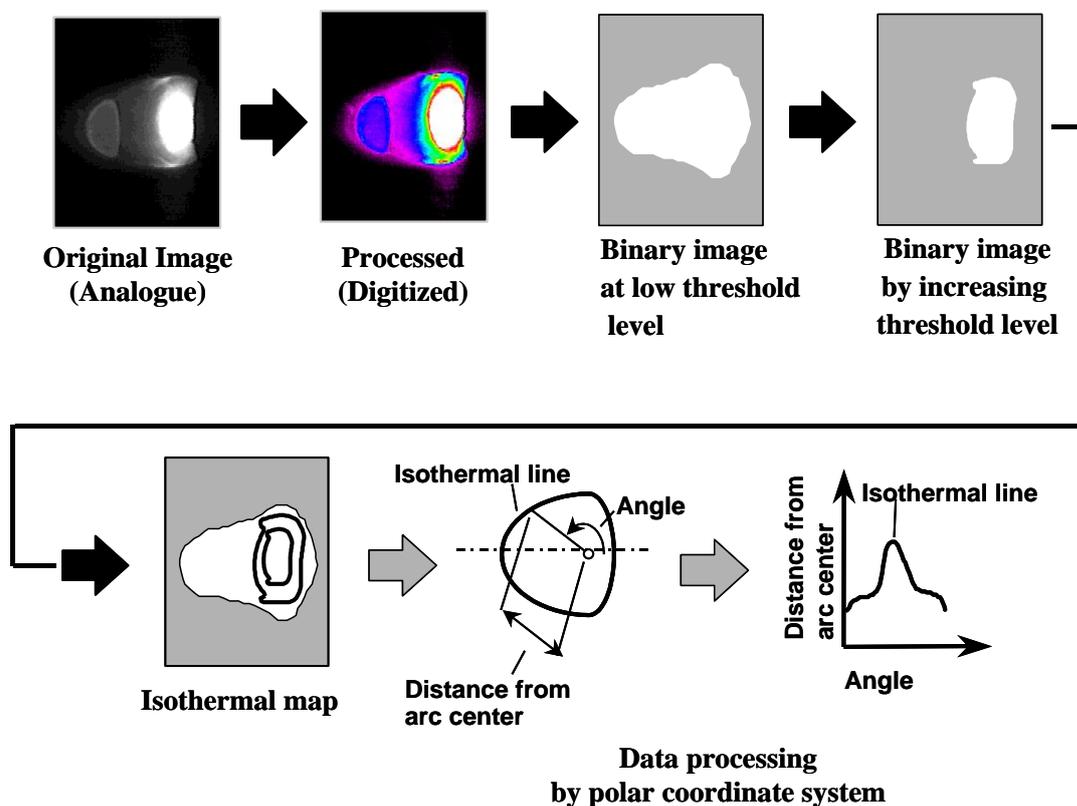


Fig.2.8 Image processing algorithm for brightness distribution pattern on molten pool.

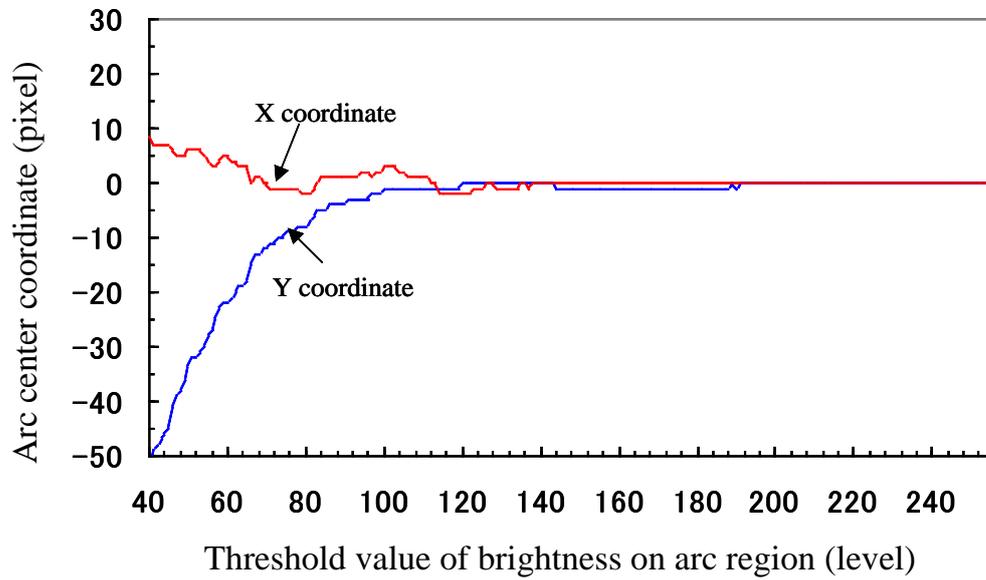


Fig.2.9 Relationship between threshold value of brightness on arc region and arc center coordinate.

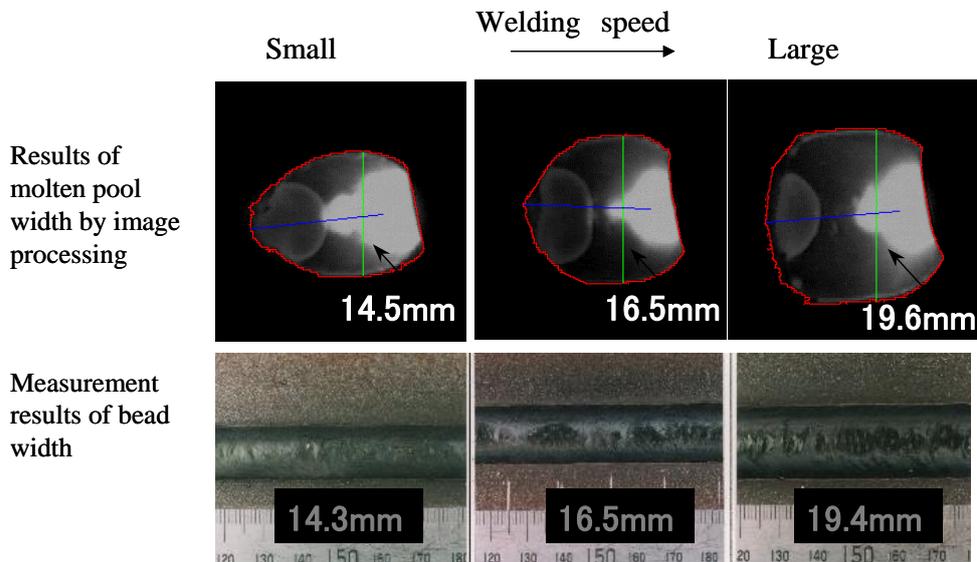


Fig.2.10 Measurement accuracy of molten pool width.

2.3 実験方法

Fig.2.11 に今回実験に使用した自動溶接システムならびに試験片形状を示す。自動溶接システムは、IC カードにて溶接条件をオフライン入力可能なプログラム制御のパルスMAG 溶接装置 (TACS システム) と溶接ヘッドに取り付けた IR-CCD カメラから構成される。継手形状は、突合せ溶接とすみ肉溶接を対象とした。供試材は、母材を炭素鋼 SM 400A、溶接ワイヤを YGW-16 (1.2φ)、シールドガスは、At+20%CO₂を用いた。また、突合せ溶接の裏当材には、セラミック製のバックリングテープを用いた。

実験では、IR-CCD カメラを用いた溶融池センシングシステムにより、各種溶接条件のもと溶融池を計測し、アークの状況や溶け込み状況との相関を調べた。

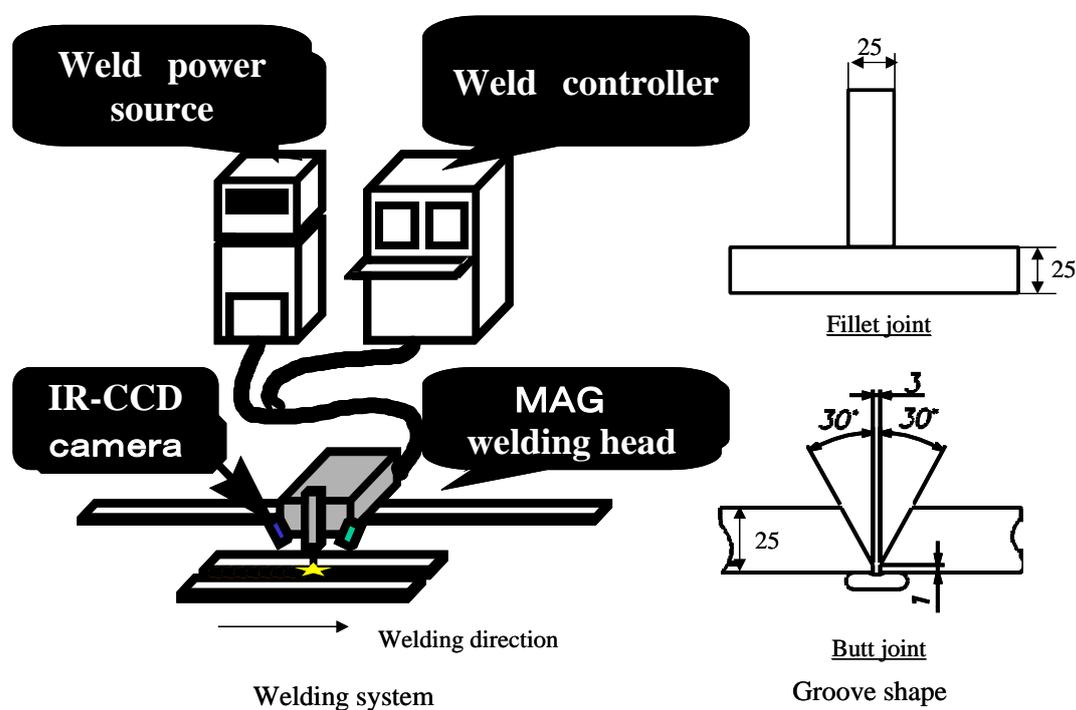


Fig.2.11 Welding system and groove shape used.

2.4 実験結果および考察

2.4.1 トーチねらい位置ずれと溶融池の傾きの相関

溶け込みを確保する上で溶接トーチのねらい位置を一定に保つことが重要である。ところが溶接線の変化や熱変形による変動などで、溶接前に設定した位置を適正に変化させることが必要となる。また、MAG 溶接では、ワイヤの曲がりにより、アーク位置がトーチねらい位置からずれる状況が生じることがあり、トーチのノズル位置を適正化するだけでは不十分であり、アーク状況に応じたワイヤ先端位置の適正化が要求される。そこで、トーチねらい位置のずれを溶融池形状の変化より情報抽出することができれば、ワイヤ先端位

置よりも直接アークの状況、溶込み状況を反映することになるため、溶接中の適応制御への有効な制御量となりうる。

Fig.2.12 は、すみ肉初層溶接において、トーチ角度を 45° とし、トーチねらい位置をルート部から立板側垂直方向に 4 mm までずらした場合の溶融池画像の変化ならびに溶接後の断面マクロを示したものである。本実験の溶接条件のもとでは、垂直方向へのずれ量が 2 mm をこえるとルート部の溶け込み不良、さらに、3 mm をこえるとオーバーラップが認められている。一方、溶融池画像から、トーチのねらい位置がずれた場合、溶融池形状には変化が認められる。そこで、溶融池センシングシステムにより溶融池形状を計測した結果、溶融池の傾きの変化が顕著であることが明らかとなった。**Fig.2.13** は、トーチねらい位置のずれ量と溶融池の傾きとの関係をグラフ化したもので、ずれ量の増加とともに溶融池の傾きが小さくなる傾向が認められ、両者には明瞭な相関関係があることがわかる。

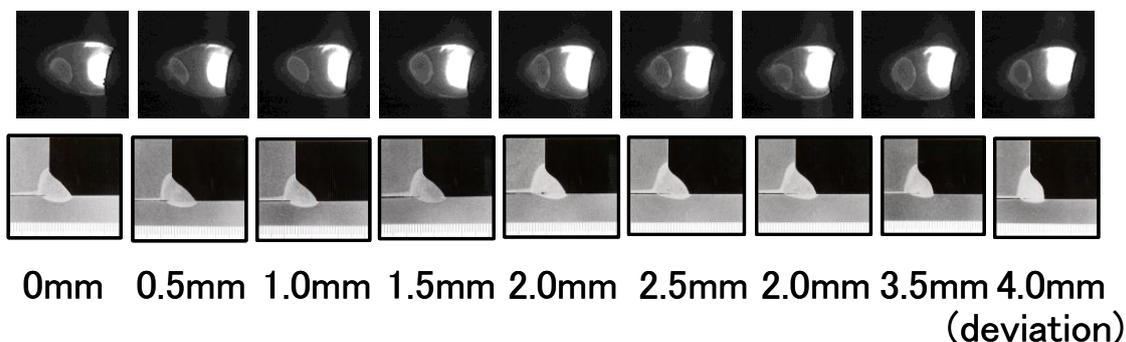


Fig.2.12 Relationship between molten pool images and cross sections of fillet welds.

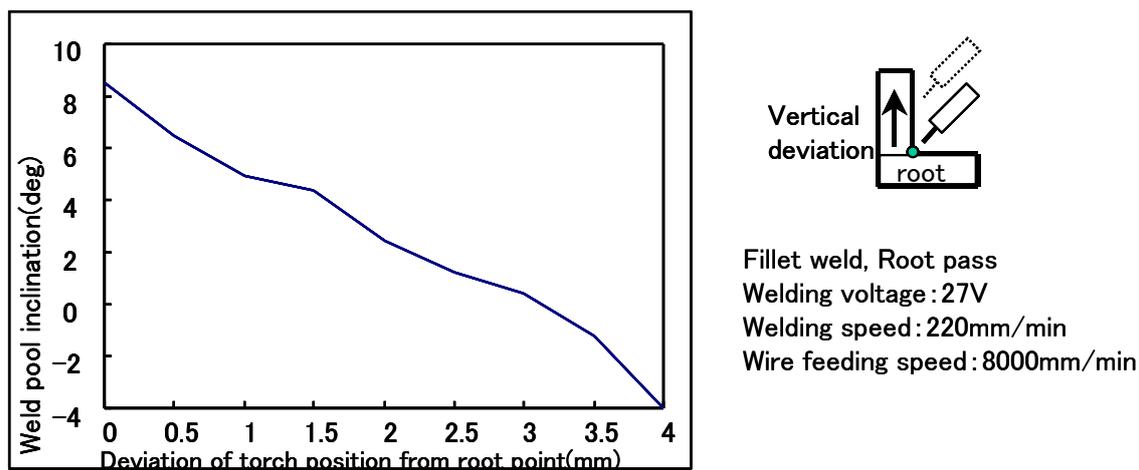


Fig.2.13 Correlation between vertical deviation of torch position and weld pool inclination.

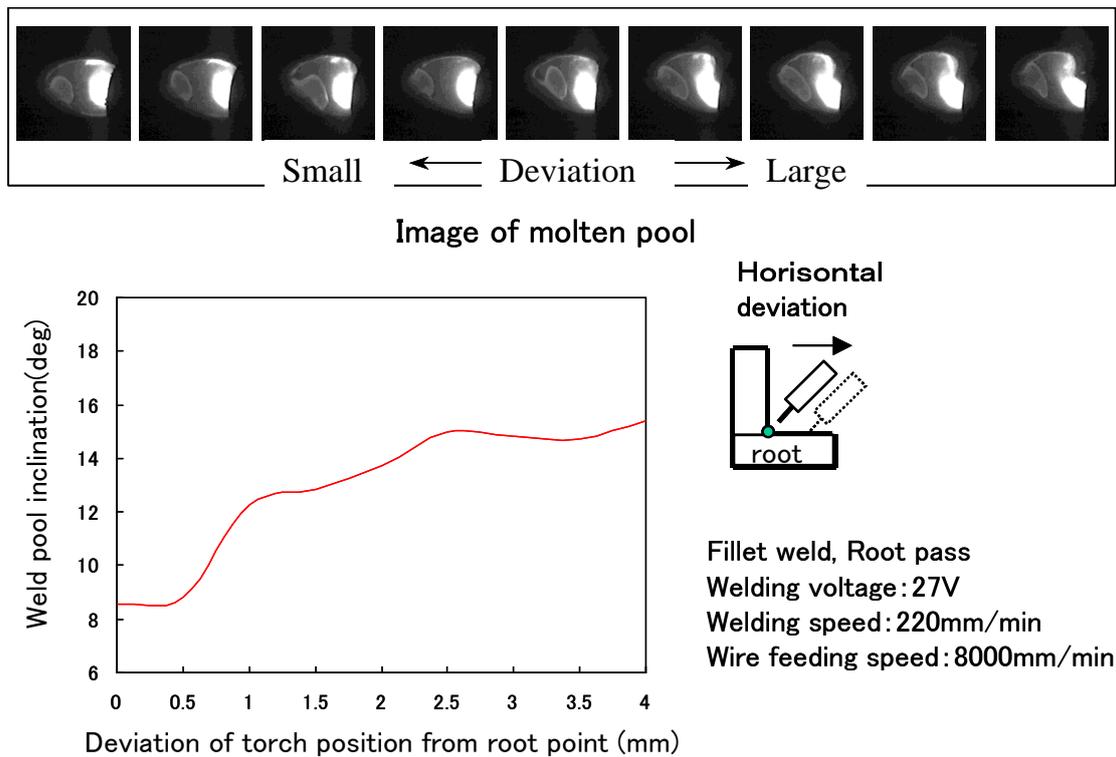


Fig.2.14 Correlation between horizontal deviation of torch position and weld pool inclination.

同様に、**Fig.2.14**には、水平方向にずらした場合のトーチねらい位置ずれ量と溶融池の傾きの関係を示したもので、垂直方向へのずれと同様に相関関係があることがわかる。この場合、ずれ量の増加とともに溶融池の傾きは増加する傾向にある。このように、溶融池の傾きを検出すれば、トーチねらい位置の基準位置からの変化が定量的に把握できることになり、適応制御への指標とすることができる。

Fig.2.15は、突合せ開先溶接の場合のトーチねらい位置ずれと溶融池の傾きの相関を示したものである。すみ肉溶接の場合と同様に、開先傾斜面側へのずれが大きくなるとともに溶融池の傾きが小さくなる傾向にあることがわかる。このような突合せ開先溶接の場合、反対側の開先面側へずれた場合、溶融池の傾きは大きくなるためトーチの左右方向へのずれを検出できることになる。**Fig.2.16**に、突合せ溶接の場合にトーチ位置を2.5mmずらした場合の溶融池画像と溶接後の断面マクロの例を示す。溶融池画像より計測した溶融池の傾きは、ずれのない場合0.1°、ずれが2.5mmの場合、-8°であった。

また、突合せ溶接におけるウィービングパスの場合には、ウィービング端の停止時の映像を取り込むことで同様の検出が可能であり、トーチねらい位置ずれに対しウィービング端での溶融池の傾きを計測することでストレートパスと同じよう扱うことができる。

Fig.2.17にウィービングパスでのトーチ位置ずれ有無の溶融池画像の比較を示す。

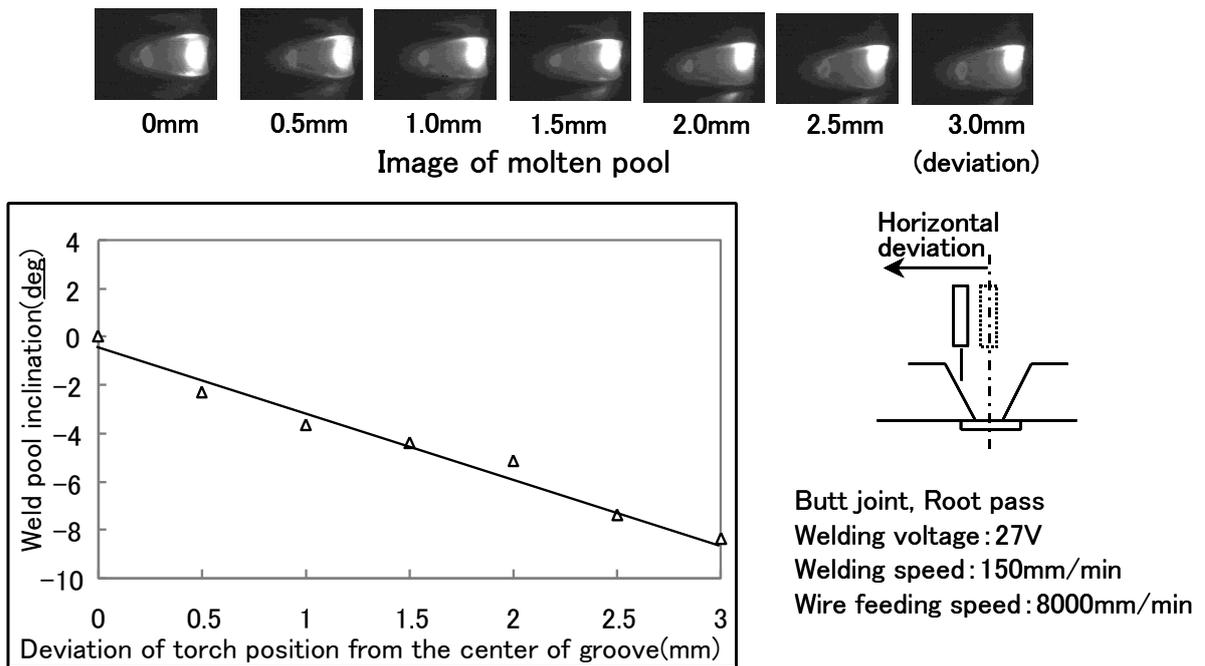


Fig.2.15 Correlation between deviation of torch position and weld pool inclination in butt weld.

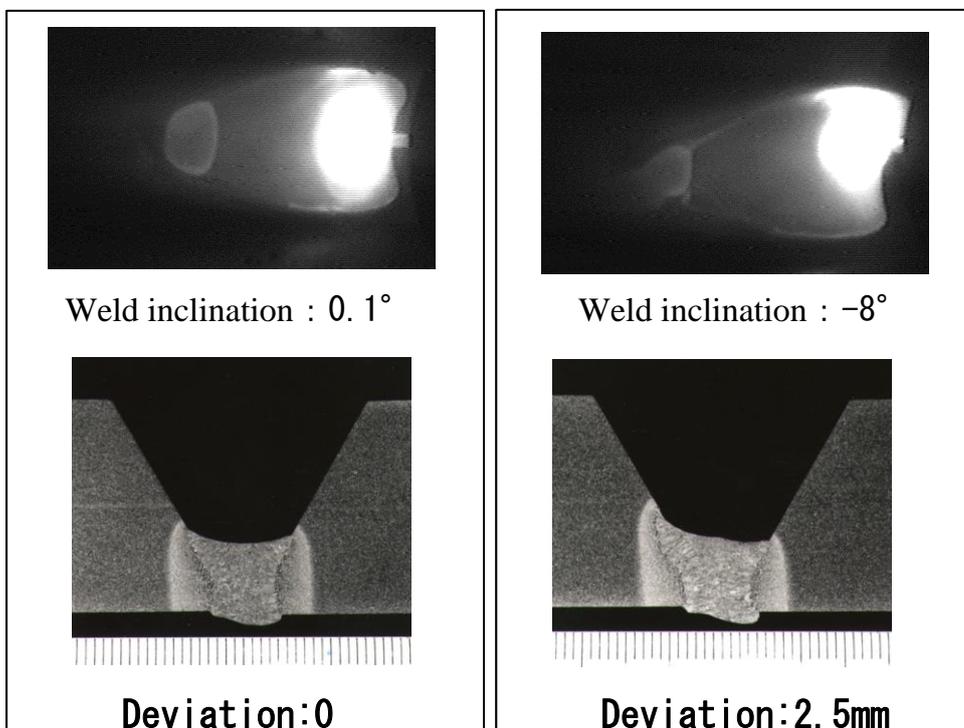


Fig.2.16 Comparison between molten pool inclination and cross section of root weld with and without deviation of torch position.

以上のように溶融池の傾きを指標にすれば、すみ肉溶接のみならず開先突合せ溶接、さらにはウィービング溶接についてもトーチ位置ずれを検出可能であることがわかる。一般に、MAG溶接においては、アーク光の影響からアーク先端位置の検出が困難であるため、溶融池情報からトーチ位置を検出できることは適応制御システム構築に対し非常に有効であるといえる。

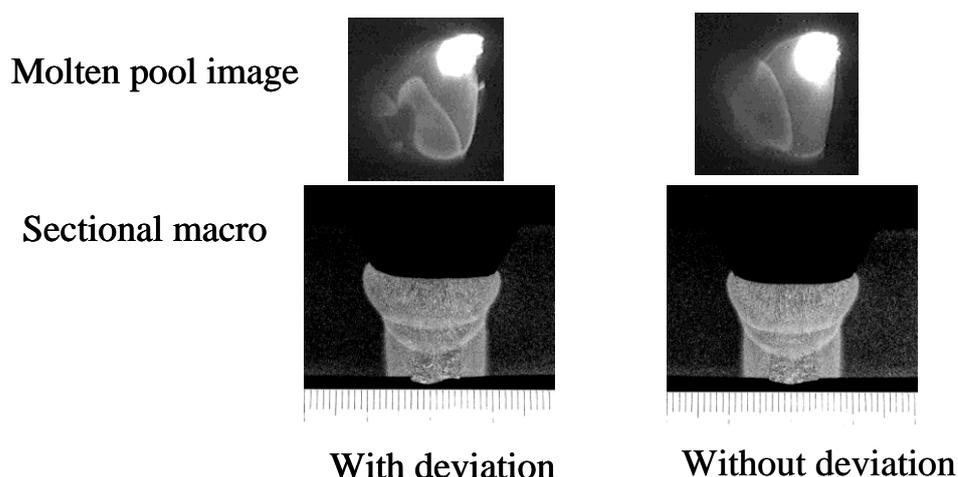


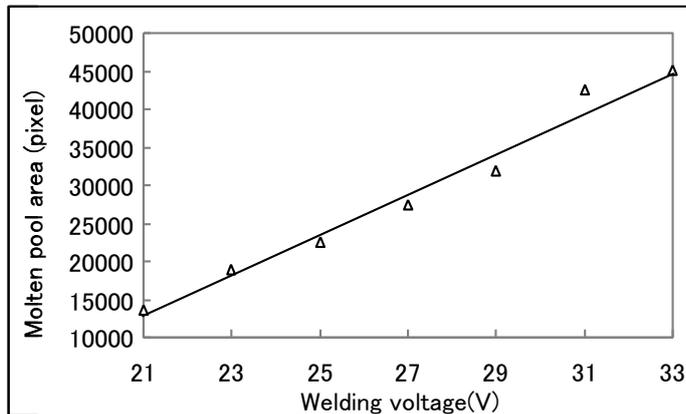
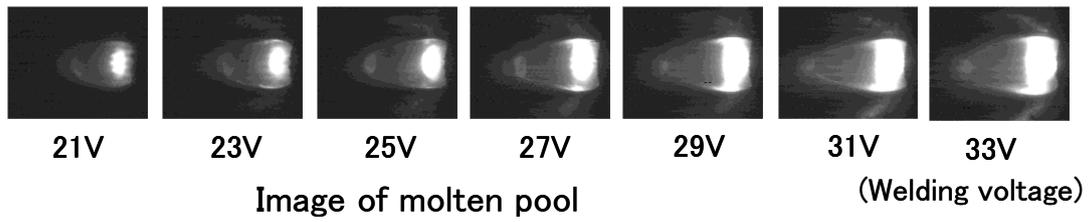
Fig.2.17 Comparison between molten pool image and cross section of groove weld with and without deviation of torch position in weaving pass.

2.4.2 溶接条件と溶融池形状の相関

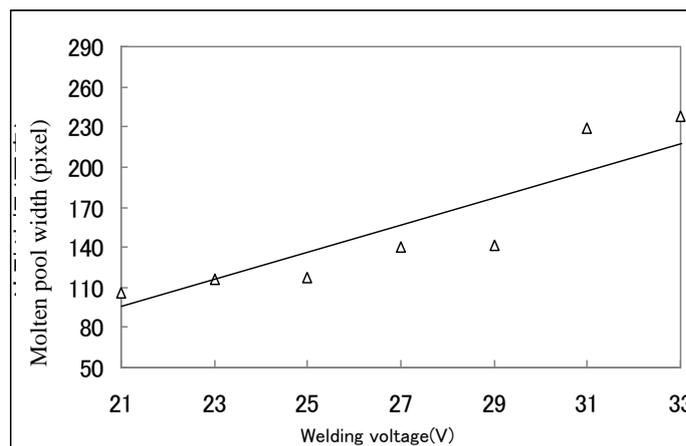
溶接条件の変化にともない溶融池形状は変化する。安定した溶け込みを確保するためには、溶接入熱を適正に制御する必要がある。すなわち、設定した適正な溶接条件における溶融池形状を外乱等の変動が生じても一定に保つことが溶け込み確保に有効である。たとえば、母材の板厚や熱容量が変化する部材の溶接では、溶接条件を一定に保持しても溶融池寸法が変化し、結果として溶け込みが変動することになる。このことから自動溶接システムにおいて溶接入熱制御を行うためには、溶融池形状の計測が必要となる。2.2.2項で述べたように、溶融池の寸法としては、溶融池の幅、長さ（後端距離）、面積が指標としてあげられ、溶融池センシングシステムにてすべて検出可能である。

Fig.2.18 は、突合せ溶接初層ルートパス溶接における溶接電圧の変化に対する溶融池寸法（面積、幅、長さ）の変化を示したものである。溶融池面積、幅、長さともに溶接電圧の増加とともに直線的に増加する傾向が認められる。しかしながら、溶融池面積と溶融池長さ比べ溶融池幅の変化は小さくかつばらつきが多く、開先溶接の特徴量とするには不適である。さらに、溶融池長さ比べ溶融池面積は、画素数からみた変化量が大きく、かつ直線性が高いことから溶接入熱にかかわる制御量とするには適しているといえる。

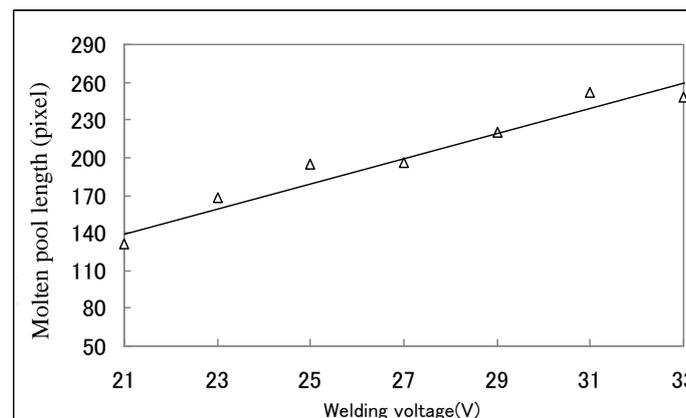
Fig.2.19 に突合せ溶接のウィービングパスにおける溶接電圧の変化と溶融池形状の関係を示したものである。ストレートビードの場合と同様に溶融池面積、幅、長さともに、



(a) Molten pool area



(b) Molten pool width



(c) Molten pool length

Fig.2.18 Correlation between welding voltage and molten pool shape in butt welding. (Welding speed: 150mm/min, Wire feed speed: 8000mm/min)

溶接電圧の増加とともに直線的に増加する傾向が認められる。さらに、溶融池面積が最も溶接電圧の変化に対して大きい変化を示すことがわかる。

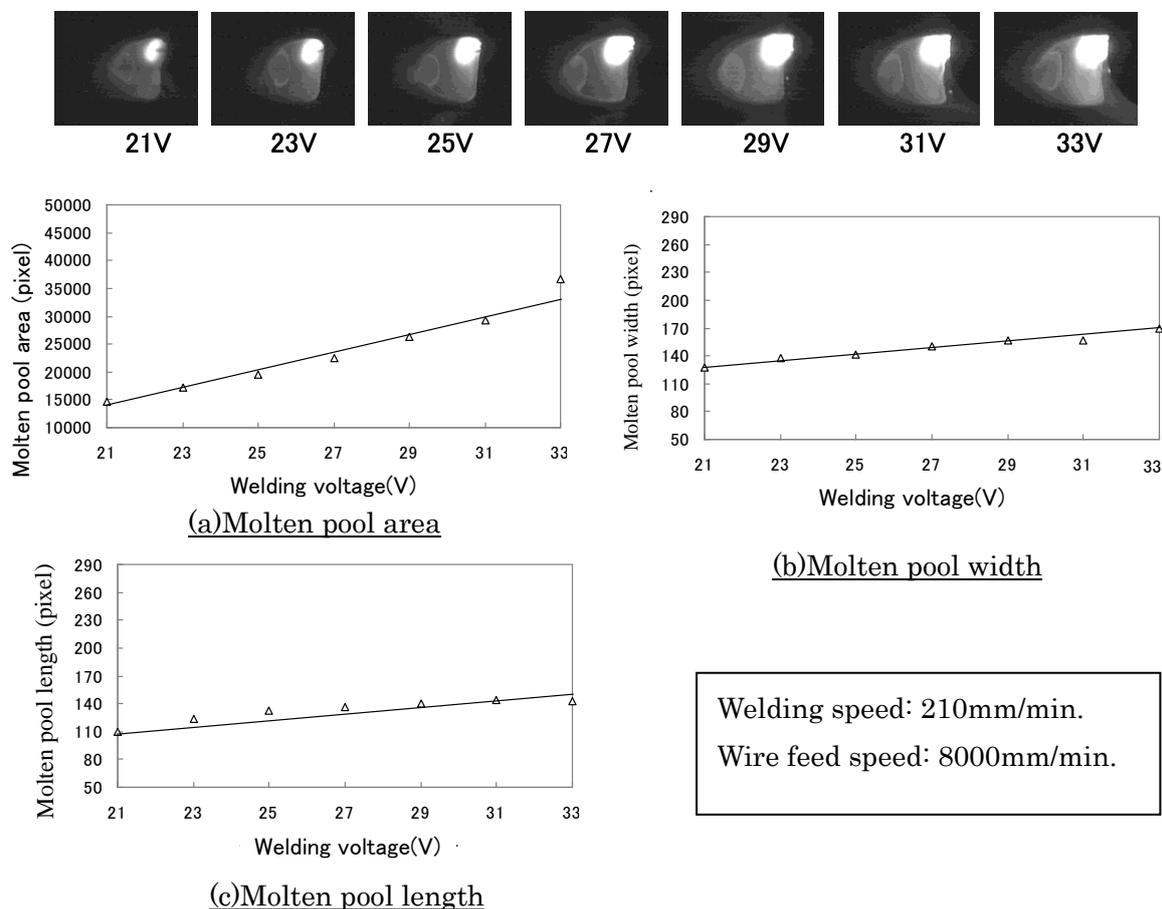


Fig.2.19 Correlation between welding voltage and molten pool shape in weaving welding.

また、**Fig.2.20** は、すみ肉溶接において溶接電圧を23～31Vの範囲で変化させた場合の溶融池画像の変化ならびに画像処理にて求めた溶融池面積と溶接電圧の関係をグラフ化したものである。突合せ溶接の場合と同様に溶接電圧と溶融池面積とは、直線関係に近い相関が認められる。

以上のことから、溶接の溶け込みを確保する目的で入熱制御により溶融池形状（寸法）を適正に維持するには、溶融池面積を指標に溶接電圧を制御パラメータにすることが可能であることがわかる。今回用いたパルス溶接電源はユニットパルス方式であり、溶接電圧の変化に伴い平均溶接電流値も変化するタイプのものであるため、入熱制御として溶接電圧が有効となる。一般的には、制御パラメータとしては、溶接電流や溶接速度を選定することも考えられるが、MAG溶接では、溶接電流を変えるにはワイヤ送給速度を変える必

要があり、また、溶接速度の変化では同時に溶着量も変化するなど複雑な相関関係が生じるが、溶着量に影響をおよぼさない溶接電圧は、溶接入熱のみを制御できる点で制御パラメータとして有効あると考えられる。

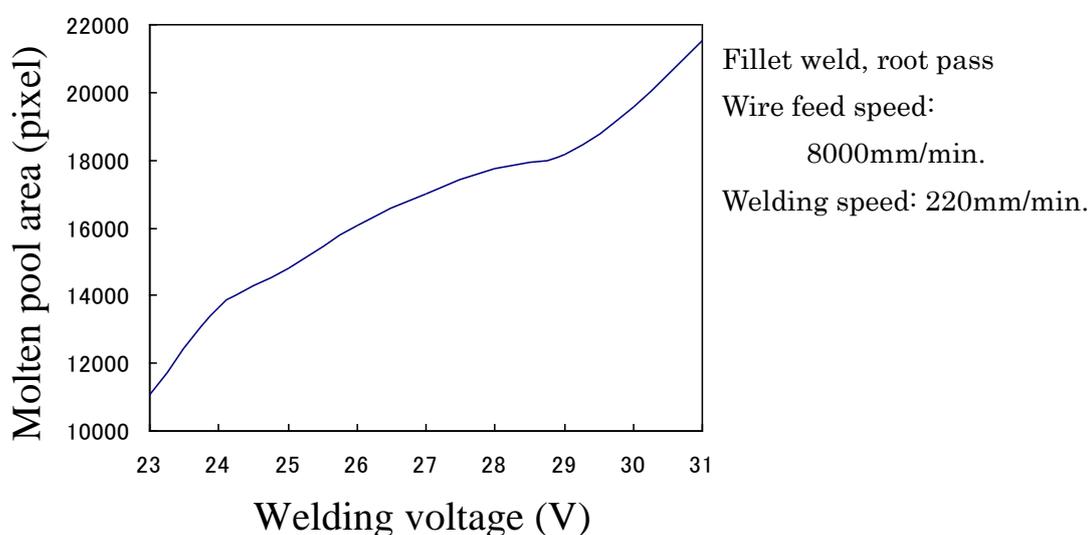
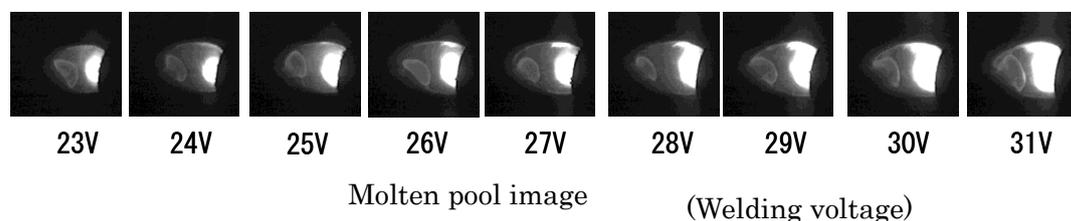


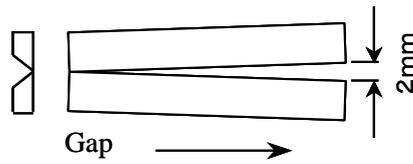
Fig.2.20 Correlation between welding voltage and molten pool area in fillet welding.

2.4.3 ギャップ変動と溶融池形状の相関

Fig.2.21 は、ギャップ変化に対する溶融池形状の変化を確認するため、突合せ溶接ルートパスにおいて開先ギャップを溶接進行方向に変化させた状態で一定溶接条件のもと溶接を行った場合の溶融池画像の変化および溶融池形状の変化を示したものである。ギャップが大きくなるにつれ、溶融池幅の変化は明確に認められないものの、溶融池面積および溶融池長さ（後端距離）は、大きくなり溶融池形状は変化することがわかる。とくに、ギャップが1mmをこえると溶融池形状の変化が大きくなり、その変化は溶融池長さ（後端距離）で顕著に認められる。

上記の結果は、裏当てを取り付けた場合であるが、**Fig.2.22** は、開先形状をU開先とした場合の同様の試験結果を示したもので、ギャップの増加とともに、溶融池長さ（後端距離）が大きくなることわかる。この場合、ギャップが1mmをこえると溶け落ちを生じ

Wire feed speed: 5000mm/min.
 Welding voltage: 17.5V
 Welding speed: 200mm/min.



Molten pool image

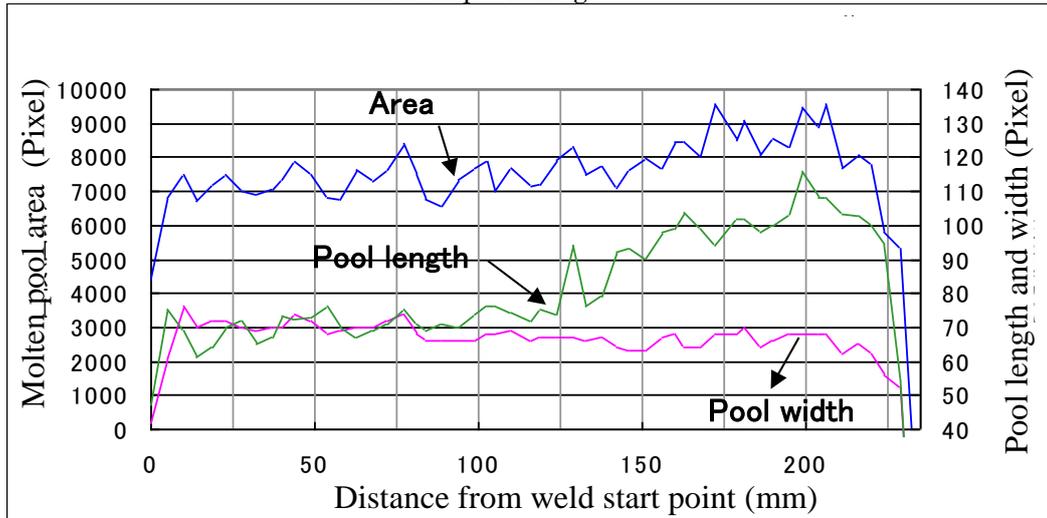


Fig.2.21 Correlation between root gap and molten pool shape.

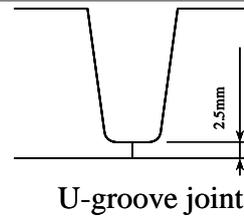
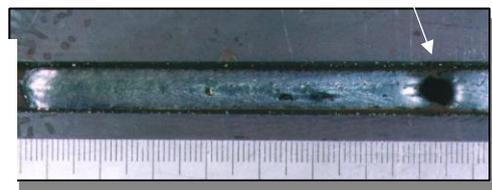
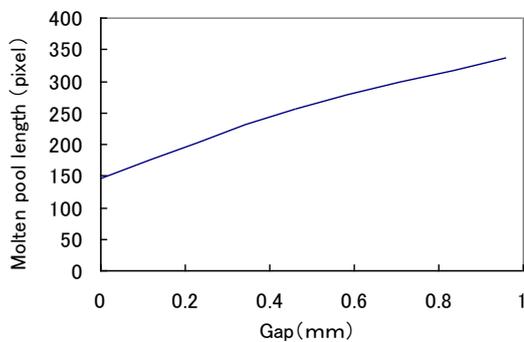
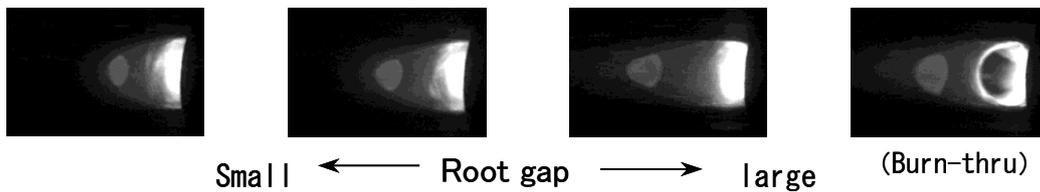


Fig.2.22 Correlation between root gap and molten pool length in U groove joint.

ており、溶融池画像からその状況が確認できる。

このようにルートギャップの変化を溶融池形状の変化から検出することが可能であり、溶融池面積や溶融池長さ（後端距離）をその指標にすることができる。

2.4.4 溶融池温度分布パターン

溶融池の温度分布は、溶接の溶け込み状態と相関性があると考えられる。

Fig.2.23 は、U開先（ルートギャップ0 mm）において、ルートフェイスを2.5 mmと4.0 mmとし、一定の溶接条件のもとで溶接を行った場合の溶融池温度分布パターン（放射率補正をしていないため輝度分布）の比較を示したものである。溶融池温度分布パターンは、等温線（等輝度線）をアーク中心からの角度と距離として極座標表示したもので、裏波が良好なルートフェイス2.5 mmと裏波が形成されず溶け込み不良を生じているルートフェイス4 mmでは、そのパターンが異なっていることがわかる。とくに、低輝度レベルのパターンの相違が顕著である。このように、溶融池温度分布パターンは、溶融池の特徴化に有効な指標であることがわかる。溶融池温度分布パターンを実際に活用する上では、この極座標表示による輝度分布パターンをコンピュータにて自動認識することが必要である。この手法については、第3章にて詳しく述べる。

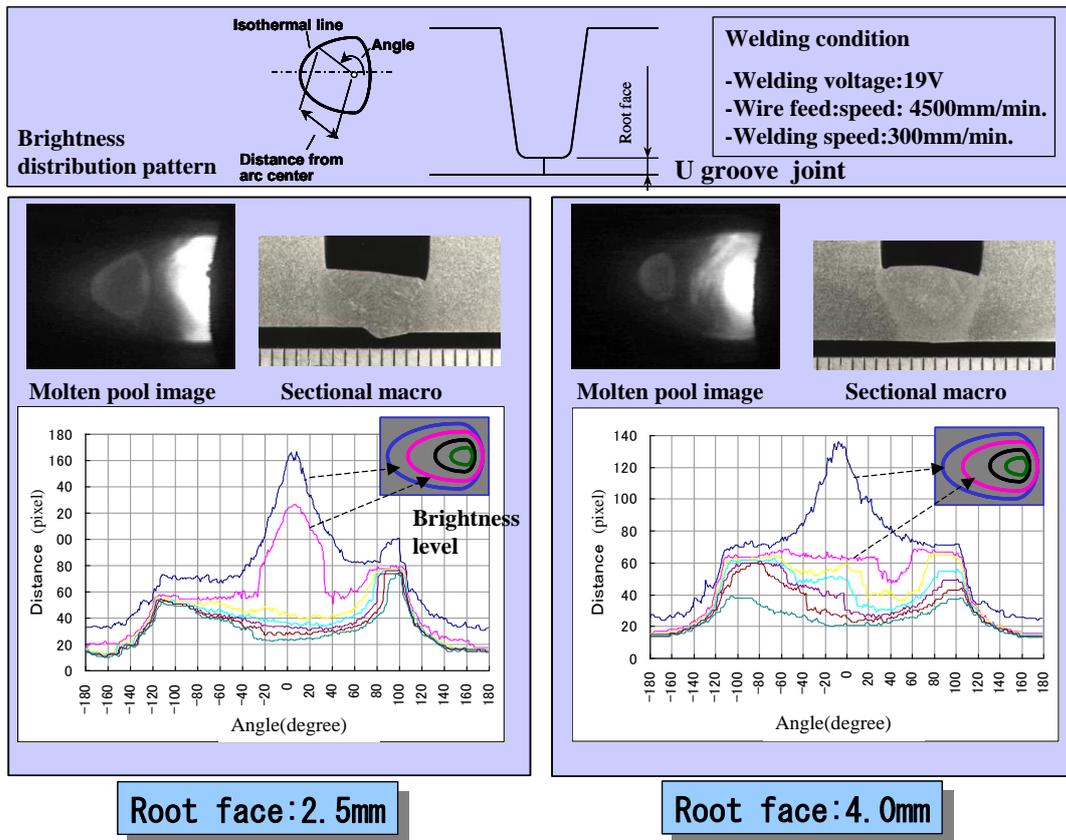


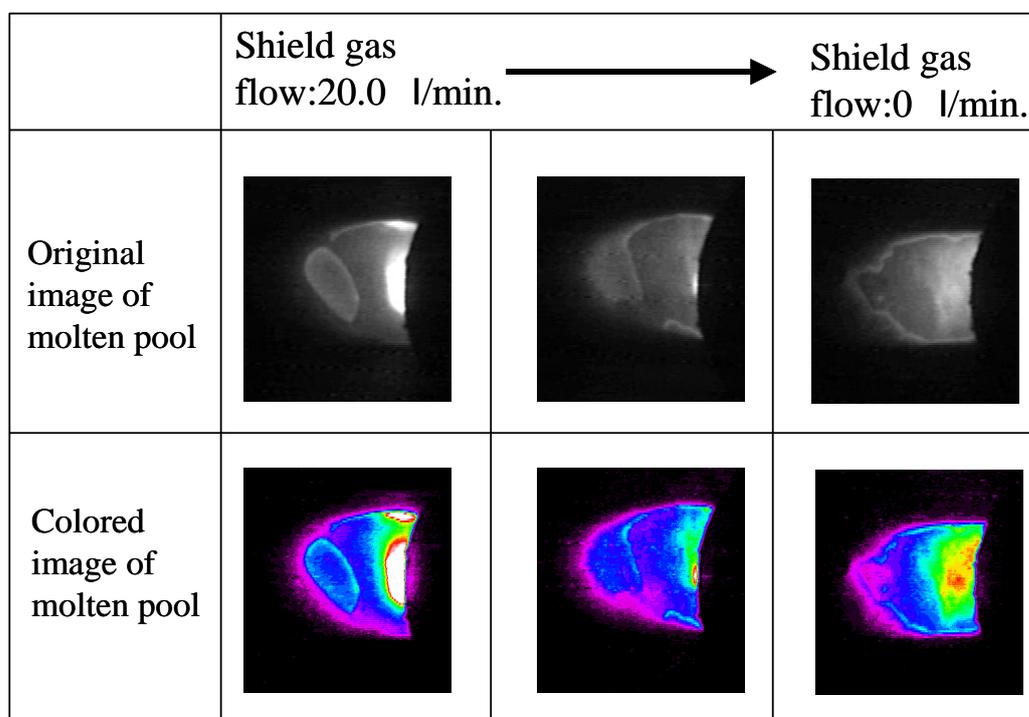
Fig.2.23 Comparison of molten pool temperature distribution pattern.

今後、溶融池の抽出のタイミングやパターンの変化度合い、さらには、センサ分解能の向上が必要であるが、溶融池形状の変化にあらわれにくい溶接状況の変化には、溶融池温度分布パターンの抽出が有効であり、溶接条件制御や異常判断への応用が考えられる。また、本手法は、母材部まで含めた温度分布の抽出により、HAZの冷却速度計測などへの展開も期待できる。

2.4.5 異常検知への応用

溶接状況の異常が溶融池にあらわれれば、溶融池をセンシングすることでその異常判断が可能となる。溶融池センシングの異常検知への可能性について検討した結果を以下に述べる。

Fig.2.24 は、シールドガス不良の検知を目的として、シールドガスを適正状態から0 l/min. に変化させた場合の溶融池の状況変化を溶融池画像と輝度レベルで擬似カラー表示した熱画像で示したものである。限界流量は明確ではないが、シールド不良になり、溶接が不安定になりはじめると、溶融池の輪郭が不明瞭になり、さらにスラグの挙動が正常時と異なってくるのが溶融池画像および熱画像上で認められる。すなわち、溶接パラメータ異常が、溶融池形状変化や溶融池温度分布（熱画像）変化との相関が得られれば、溶融池センシングにより異常検知が可能であることを示唆している。実作業への応用としては、従来検知が困難であったノズルへのスパッタ付着によるシールド不良や磁気吹き、さらにチップ溶融等の溶融池への異物混入などの異常検知が考えられる。



Welding voltage:27V, Wire feed speed:8000mm/min., Welding speed:220mm/min.

Fig.2.24 Correlation between molten pool image and shield gas flow.

また、**Fig.2.25** にウィービング溶接時の4 / 3 0 sec. 毎の溶融池画像と輝度レベルで擬似カラー表示した熱画像を示したものである。スラグは、溶融池画像あるいは、熱画像における輝度レベルの相違から形状を明瞭に検出することができ、その挙動を溶融池センシングにて確認できることがわかる。このように、スラグ挙動を抽出することで溶接の安定性評価や品質評価などへの応用が可能であるといえる。

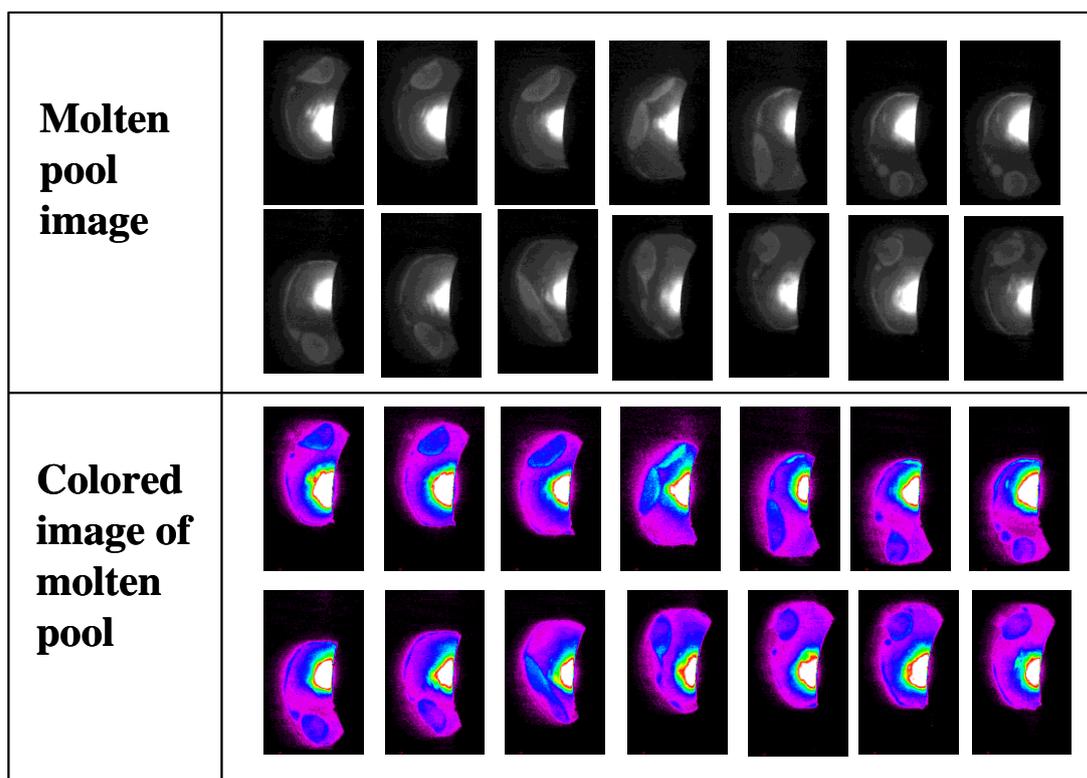


Fig.2.25 Behavior of slag on molten pool with image processing and thermal image.

2.4.6 溶融池センシングの溶接条件制御への適用検討

IR-CCDカメラを用いた溶融池センシングにて得られた情報をもとに溶接条件の適応制御システムを構築する上で、画像処理などの計測処理時間や溶融池形状変化の過渡応答時間は重要である。**Fig.2.26** は、溶接電圧を25Vから27Vに変化させた場合の溶融池幅、溶融池長さ（後端距離）、溶融池面積の過渡応答を示したものである。溶融池幅、溶融池長さ、溶融池面積には顕著な差はなく、ともにほぼ定常になるまで3~4secであることがわかる。また、**Fig.2.27** は、トーチねらい位置を垂直方向に2.5mmずらした場合の溶融池の傾きの過渡応答を示したものである。溶融池の傾きは、溶融池幅等と比べ安定しており、定常に達するまでには約1secであった。これらの過渡応答は、大嶋らの計測⁴⁵⁾と同様の傾向を示しており、過渡応答特性が一次遅れで近似できることから溶融池形状のフィードバック制御が十分可能であるといえる。

一方、画像処理に要する時間は、本計測システムでは、映像を取り込み計測処理までを

行い出力するのに 150msec である。1 回の計測では、誤差、異常を出力することも考え、5 回の計測の平均値を出力するとすると、画像計測処理に 750msec かかることになるが、上記の溶融池の過渡応答特性を考慮すれば、処理時間として余裕があり、画像処理計測による制御システムの構築は十分可能である。

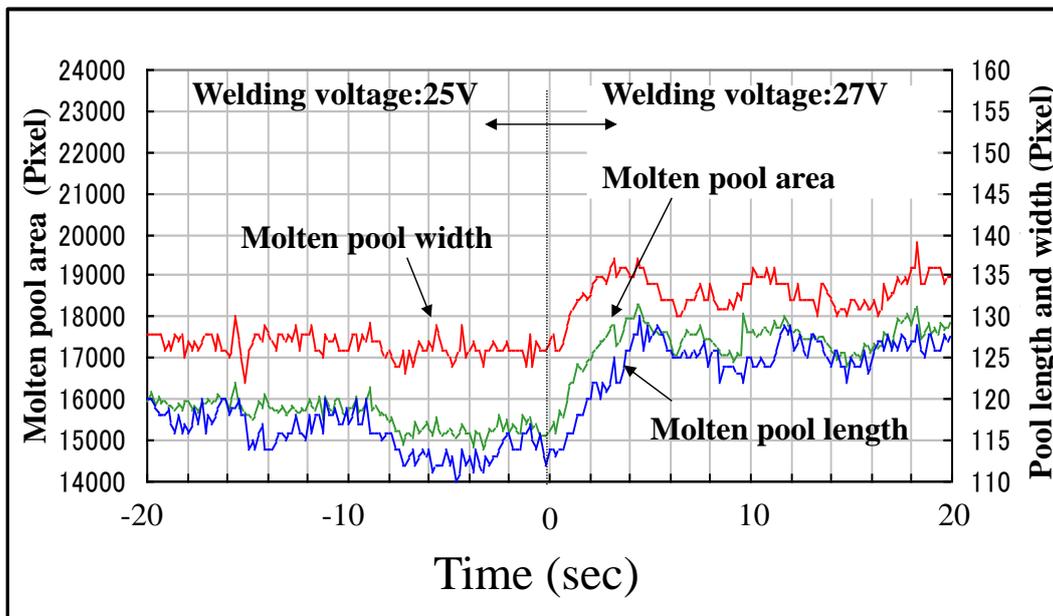


Fig.2.26 Response of molten pool shape by changing welding voltage.

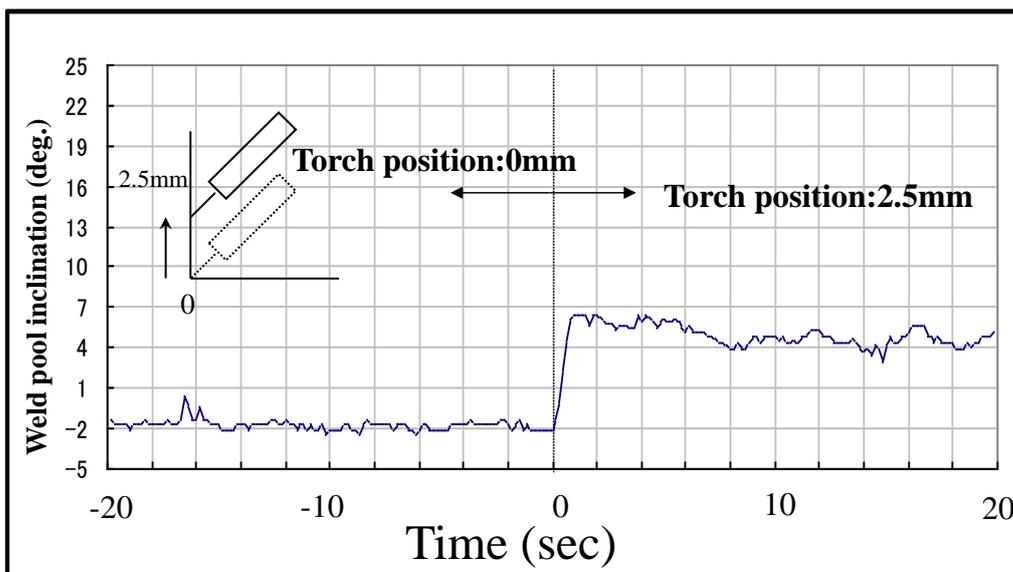


Fig.2.27 Response of weld pool inclination by changing torch position.

以上から、溶融池センシングによる溶接条件制御システムとしては、十分な溶け込みが得られる適正溶接条件時の溶融池形状とくに溶融池面積や溶融池幅の計測を行い、その適正值になるように溶接パラメータ、ここでは溶接電圧をフィードバック制御することが考えられる。また、同様に、適正なトーチねらい位置の場合の溶融池の傾きの計測データをもとに、溶融池の傾きが適正值になるようにトーチ制御軸を制御することでトーチねらい位置制御を実現できる。

また、溶融池熱画像からの溶接異常監視は、異常時の特徴量をデータベース化しておき、特徴量が異常パターンになった場合に溶接をストップさせるシステムが考えられる。

このように構築する自動溶接システムに応じて指標となる溶融池形状の特徴量を決定し、その適正值をあらかじめデータベース化しておくことで、溶融池センシングシステムを有効に活用することができる。

2.5 結言

本章では、高機能自動MAG溶接システムの構築を目的として、近赤外線CCDカメラを用いた溶融池センシングシステムを構築し、溶接条件適応制御機能に関する検討を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) MAG溶接の溶融池をセンシングするために、MAG溶融池とアークの分光特性ならびに温度情報の抽出を考慮し、近赤外線領域まで感度を有しているIR-CCDカメラに1064nmの狭帯域バンドパスフィルタを取り付けた光学系を選定した。
- (2) IR-CCDカメラにて抽出した溶融池映像は、二値化処理および微分処理などの画像処理を行うことで、アーク領域の中心、溶融池面積、溶融池幅、溶融池長さ（溶融池後端距離）、溶融池の傾き、アーク領域の中心からみた溶融池幅の比などの溶融池形状を代表する項目を計測することができる。
- (3) IR-CCDカメラにて抽出した溶融池映像を画像処理することで、溶融池領域の輝度分布（温度分布）から等温線分布を求め、さらに方向距離変換を行うことで各等温線分布を角度と距離で表現することにより、溶融池の温度分布パターンを求めることが可能となり、溶融池状況の特徴化する指標として活用できる。
- (4) 画像処理にて求めた溶融池幅と溶接終了後のビード幅を比較することで画像処理計測の計測精度を求めた結果、 $\pm 0.2\text{mm}$ であった。
- (5) トーチねらい位置ずれと溶融池画像より計測した溶融池の傾きには相関が認められ、溶融池の傾きを指標にすれば、すみ肉溶接のみならず開先突合せ溶接、さらにはウィービング溶接についてもトーチ位置ずれを検出可能である。
- (6) パルスMAG溶接において溶接電圧の変化と溶融池画像より求めた溶融池面積、幅、長さには相関が認められ、溶接電圧の増加とともに直線的に増加する。とくに溶融池面積は、画像処理上、画素数からみた変化量が大きく、かつ直線性が高いことから溶接入熱変化にかかわる溶融池形状の指標には適している。これらは、突合せルートパスおよびウィービングパスさらにはすみ肉溶接においても同様の傾向を示す。

- (7) 開先ギャップが変化した場合の溶融池形状の変化は、溶融池長さと同融池面積により検出できる。
- (8) ルートフェイスが異なる裏波が形成される場合と同融されない場合では、溶融池の表面温度分布パターンが異なることが明らかとなり、溶融池温度分布パターンが溶け込み状況をあらわす指標として活用可能である。
- (9) シールドガスが適正である場合と同融の場合では、溶融池形状やスラグの挙動に違いが認められることから溶融池センシングを異常検知に活用することが可能である。
- (10) 溶接電圧のステップ変化による溶融池形状（面積、長さ、幅）の過渡応答変化ならびに溶接トーチ位置のステップ変化による溶融池の傾きの過渡応答変化を計測した結果、画像処理などの計測処理時間を考慮しても溶融池センシングによる溶接条件の適応制御システムの構築は十分可能であることを示した。

第3章 ステレオビジョンによる溶接ビード表面外観検査システム

3.1 緒言

溶接ビード表面の外観検査は、溶接品質の確認の上で極めて重要であり、熟練の検査員により実施されてきた。しかしながら、人間が行う目視検査は、欠陥などを定性的に評価できる反面、定量的に得なければならない形状寸法はゲージなどの機械を用いて計測し、過去の経験に基づいて合否判定が行われていた。溶接表面に関する目視検査の基準は、各種の基準・規格で規定されているが、それらの大半は定量的な判定基準ではない。

品質に影響を与える溶接表面の欠陥は、割れ、ポロシティ、スパッタ、アンダカット、オーバラップである。また、初層、中間層におけるビード形状寸法（不揃い）や融合不良および最終層の余盛形状も重要な判断要素である。

自動溶接システム構築には、品質確認機能は不可欠であり、従来、検査員以外にインプロセス中に溶接士が行っていた各パス、各層溶接終了後のビード表面外観確認を含めた自動外観検査システムの構築が必要である。自動外観検査システムとして必要な要素技術は、形状計測技術と欠陥認識技術である。

従来、表面形状を計測する方法としては、レーザを用いたパターンの投影法、スペックル干渉法、モアレ干渉法などのアクティブ法がほとんどであった^{4)6)~50)}。しかし、溶接外観検査では、形状寸法を求めるだけでなく、人間の目により近い質感や色相によるものも検査として必要である。そこで、ここでは、複視差の可視画像を用いて3角測量の原理に基づき3次元を再構成することで形状を求め、2次元画像から画像を理解するパッシブ法を用いた外観自動検査システムを検討した。

また、本溶接ビード表面外観検査システムは、ビード表面の形状計測情報から品質良否を自動判断する品質確認システムとして自動溶接システムに搭載できることもふまえ、開発を行った。

3.2 溶接ビード表面外観検査システムの製作

ステレオビジョンを用いた溶接ビード表面外観検査システムを製作した。以下にそのシステム構成ならびに処理手法について説明する。

3.2.1 3次元形状計測の原理

本システムでは、ステレオビジョンを用いた3次元形状計測を行う。その計測原理を以下に述べる。

ある対象の3次元位置は、2ヶ所の位置関係が異なった視点から観測することにより得ることができる。これは視点情報から2ヶ

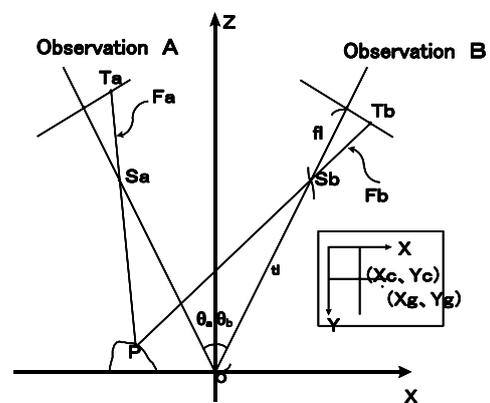


Fig.3.1 Theory of three dimensional measurement.

所の視点と対象上の1点を頂点とする幾何学的性質から導かれる3角測量の原理に基づいているからである。

Fig.3.1において、3次元座標で表される任意の点P (X_p, Y_p, Z_p) は、撮影系Aの撮像素子面に投影される点Ta (X_{ta}, Y_{ta}, Z_{ta})とレンズ中心点Sa (X_{sa}, Y_{sa}, Z_{sa})とを通る直線Faと撮影系Bの点Tb (X_{tb}, Y_{tb}, Z_{tb})と点Sb (X_{sb}, Y_{sb}, Z_{sb})とを通る直線Fbの交点である。点Ta, Tbは、撮影系A, Bで得られる画像上の2次元座標Ga (X_{ga}, Y_{ga})、Gb (X_{gb}, Y_{gb})となる。また、撮影系A, Bは点O (0, 0, 0)で光軸中心が交わる配置にあり、それぞれの光軸は点OからXZ平面状で θ_a , θ_b の角度をもつ。このとき各点の座標は以下に示す値となる。

Ta (X_{ta}, Y_{ta}, Z_{ta})

$$X_{ta} = (t_l + f_l) \sin \theta_a + \{-(X_{ga} - X_c) \times p_l (\cos \theta_a)\}$$

$$Y_{ta} = (Y_c - Y_{ga}) \times p_l$$

$$Z_{ta} = (t_l + f_l) \cos \theta_a - \{-(X_{ga} - X_c) \times p_l (\sin \theta_a)\}$$

Tb (X_{tb}, y_{tb}, Z_{tb})

$$X_{tb} = (t_l + f_l) \sin \theta_b + \{-(X_{gb} - X_c) \times p_l (\cos \theta_b)\}$$

$$Y_{tb} = (Y_c - Y_{gb}) \times p_l$$

$$Z_{tb} = (t_l + f_l) \cos \theta_b - \{-(X_{gb} - X_c) \times p_l (\sin \theta_b)\}$$

Sa (X_{sa}, Y_{sa}, Z_{sa})

$$X_{sa} = t_l \sin \theta_a$$

$$Y_{sa} = 0$$

$$Z_{sa} = t_l \cos \theta_a$$

Sb (X_{sb}, Y_{sb}, Z_{sb})

$$X_{sb} = t_l \sin \theta_b$$

$$Y_{sb} = 0$$

$$Z_{sb} = t_l \cos \theta_b$$

f_l: 焦点距離

t_l: 原点Oカラレンズ中心までの距離

p_l: 画像中の画素の幅

直線Fa, Fbは、以下に示す式であらわされる。

$$\begin{aligned} \text{Faの直線式: } (X_p - t_l \sin \theta_a) / (X_{ta} - t_l \sin \theta_a) &= Y_p / Y_{ta} \\ &= (Z_p - t_l \cos \theta_a) / (Z_{ta} - t_l \cos \theta_a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fbの直線式: } (X_p - t_l \sin \theta_b) / (X_{tb} - t_l \sin \theta_b) &= Y_p / Y_{tb} \\ &= (Z_p - t_l \cos \theta_b) / (Z_{tb} - t_l \cos \theta_b) \end{aligned}$$

3.2.2 システムの構成

溶接ビード表面外観検査システムは、**Fig.3.2**に示すように画像処理部、3次元再構成部および欠陥同定・統括制御部で構成される。また、ビードを撮影する視覚センサとしては、

ステレオビジョンが可能な複視差カメラを開発した。ステレオビジョンでは、複視点の可視画像間の視差量から前項で述べた三角測量の原理に基づき3次元形状を再構成する立体視法を用いている。Fig.3.3は、開発した複視差カメラの構造を示したもので、1つの CCD 素子を用いて光学ミラーと液晶シャッターおよびプリズムで構成される。複視差カメラは、左右2視点からの映像が一つの撮像素子面に結像するように光学系が配置されており、撮影時には、液晶シャッターの開閉を交互に1/60secで切り替えることによりフレーム構成とした映像を出力する。

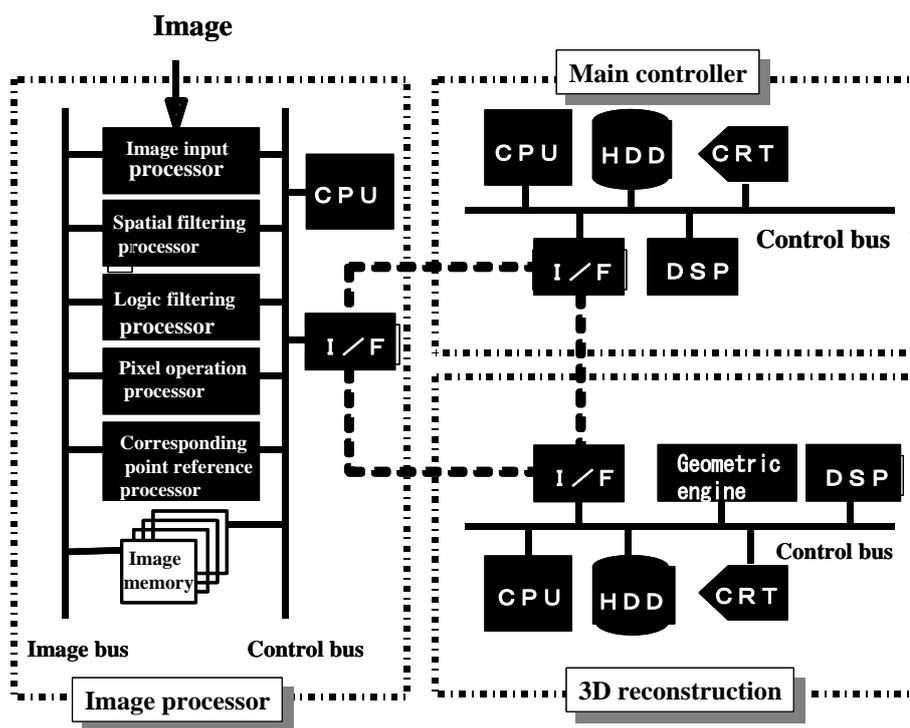


Fig.3.2 Configuration of system.

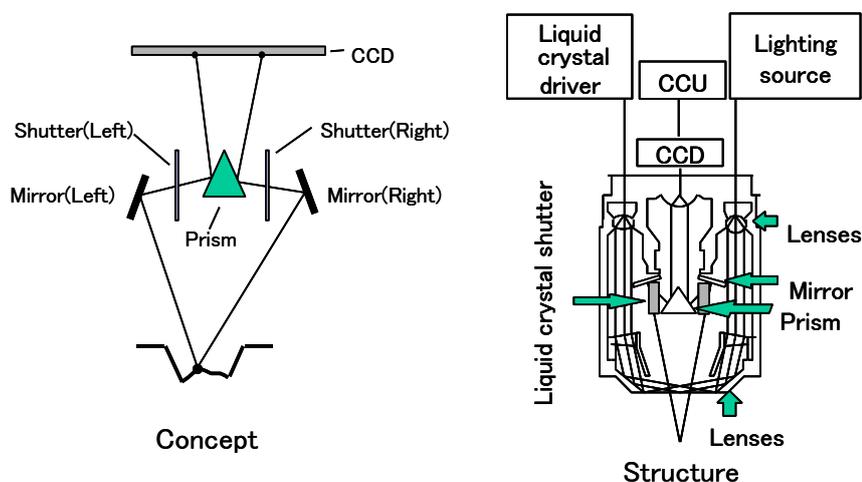


Fig.3.3 Structure of twin lenses parallax camera.

複視差カメラからの映像信号は、画像入力プロセッサで 512×512 画素にデジタル化され、各画像プロセッサで平滑処理、雑音除去処理等の前処理を行う。前処理画像は、対応点検索プロセッサに入力される。対応点検索プロセッサでは、各画素における視差量を相関演算により求める。対応点検索は、 25×25 画素のプレートで 10^8 回程度相関演算をするため、**Fig.3.4**に示す専用の対応点検索プロセッサを試作した。

求めた各画素の視差値は、3次元再構成部で座標変換し、3次元座標値にする。3次元座標値は、インターフェイスを介して3次元再構成部に入力する。3次元再構成部では、3次元座標値と入力画像からジオメトリックエンジンを用いてモニタ上に対象表面の外観を表示する。ここで表示される表示モードは、ワイヤフレームモード、サーフェイスモード、テクスチャマッピングモードの3種類である。また、得られた3次元画像は、グローバルマップ上に記録し、保存される。

欠陥同定・統括制御部では、各処理部の情報制御を行い、欠陥同定部では、3次元再構成部で得た3次元座標から距離変換画像を生成し、認識アルゴリズムにより各種欠陥の識別を行う。

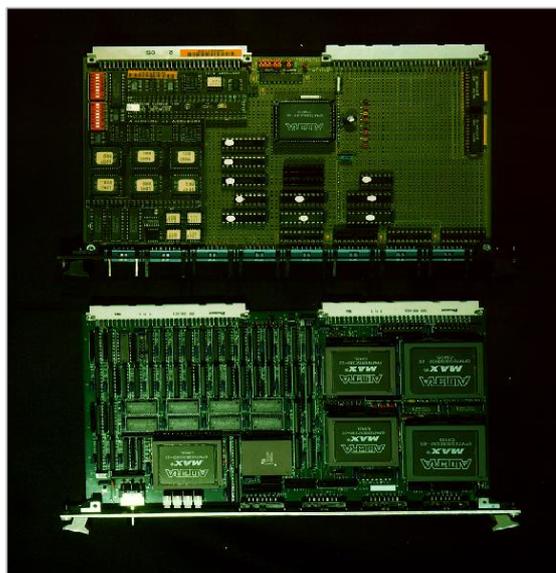


Fig.3.4 Corresponding point reference processor.

3.2.3 処理手法

本システムの処理の流れを **Fig.3.5** に示す。視差の異なる2枚の画像 ($\pm 7.5^\circ$) を入力し、処理領域を設定する。処理領域は、光学レンズのひずみを考慮して光軸中心から上下左右125画素とした。設定領域画像に対してエッジを保った平滑化処理を行い、空間的雑音の除去を行う。

2枚の画像間の相関は、 25×25 画素のプレートに対してサーチ領域を $x: \pm 15$ 画素、 $y: \pm 4$ 画素について行い、視差量を求める。この視差量から2つの撮像系による直線式の連立方程式より対象の3次元座標値を計算する。隠れ点などで相関のとれない点などは、補

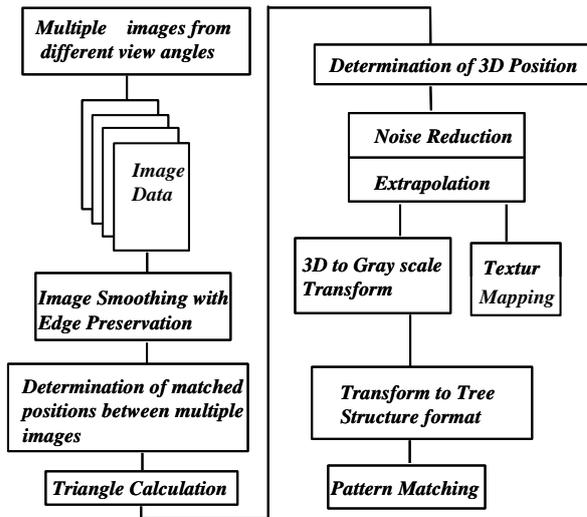


Fig.3.5 Diagram of 3-D Reconstruction

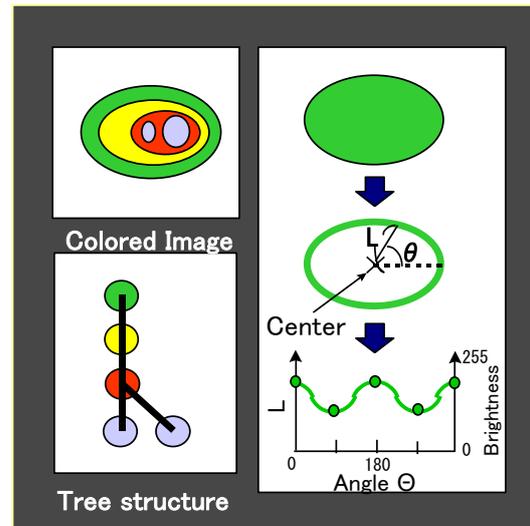


Fig.3.6 Mapping method.

間処理を行い雑音の少ない画像を生成する。この画像に対してテクスチャ・マッピング等の処理を行いモニタへ出力する。

一方、欠陥認識処理は、3次元座標データからZ軸（深さ方向）を輝度で正規化した距離画像を用いて行う。欠陥識別は、距離画像の特徴を写像化したツリー構造の画像に変換したものを欠陥定義データと照合して判定を行う。

Fig.3.6 は、写像化手法を示したものである。左上図の擬似カラー表示は、距離画像から距離を色で表現したものであり、この画像のある距離以上の画像は、右上図の図形で示すことができ、この図形の重心から各角度毎の距離を計測することができる。そして、距離

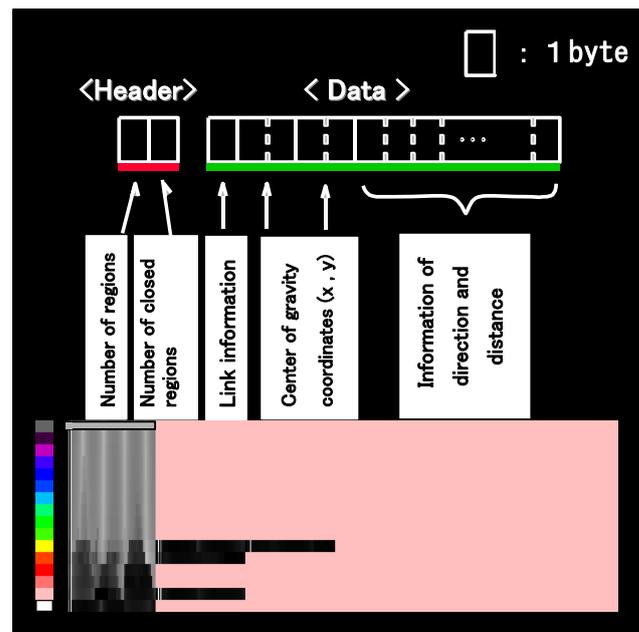


Fig.3.7 Data format and mapping image.

をパラメータとして繰り返し計測することでツリー構造のデータが生成できる。ツリー構造の各データは、**Fig.3.7** のデータフォーマットに示すようにヘッダ部に距離領域数と閉領域数の2バイト、特徴情報部に親子情報と重心XY座標の5バイト、および方向距離値の36バイト(10° 毎)の合計43バイトで構成されている。距離領域数を32とすれば、約1.38キロバイトで1枚の画像を表現できるものである。これらのツリー構造データと写像画像を用いて溶接ビード表面形状の欠陥を識別できる。各識別事象において各々判定式を用意することで自動識別が可能となる。

以下に判定式の例を示す。

①ポロシテイ

If $a < \text{検出領域の方向距離総数}$ and
 $t > \text{検出領域と親領域の方向距離差分}$ and
 $h > \text{検出領域の分割輝度値}$
 Then [POROSITY]

②スパッタ

If $a < \text{検出領域の方向距離総数}$ and
 $t > \text{検出領域と親領域の方向距離差分}$ and
 $h < \text{検出領域の分割輝度値}$
 Then [SPATTER]

③割れ

If $l < \text{検出領域の逆方向の加算値}$ and
 $t > \text{検出領域と親領域の方向距離差分}$ and
 $d > \text{検出領域の分割輝度値}$
 Then [CRACK]

④アンダカット

If $w > \text{検出領域の0度180度方向加算値}$ and
 $d > \text{検出領域の分割輝度値}$
 Then [UNDERCUT]

⑤オーバーラップ

If $t > \text{検出領域と親領域の方向距離差分}$
 Then [OVERLAP]

但し、 a:面積
 t:勾配
 h:高さ
 l:最大長
 d:深さ
 w:幅 (ビード境界)

3.3 ビード表面形状計測結果

Fig.3.8 に本システムを用いてGMAWにおいて各種溶接条件にて溶接後のビード表面形状を計測した結果を示す。ワイヤフレームモードでの出力結果と任意断面のビードプロフィール計測結果を示している。深さ等の分解能は、画角により異なるが、ここで示した画角での分解能、幅 $30\mu\text{m}$ 、深さ $50\mu\text{m}$ である。各種溶接条件におけるビード形状が忠実に再現されており、その違いが明確に計測できている。また、断面マクロとの比較により、ビード形状の計測精度は、 $\pm 0.1\text{mm}$ を満足しており、ビード形状の計測に実用上十分な精度であるといえる。

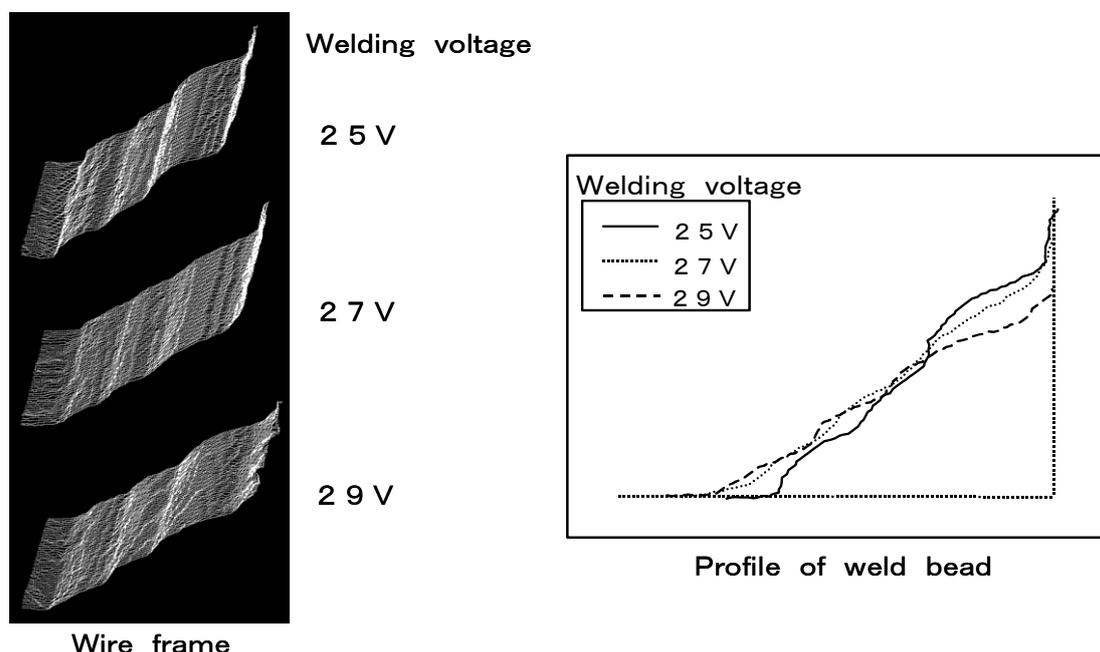


Fig.3.8 Results of measuring weld bead shape by twin lenses parallax CCD camera.

Fig.3.9 は、ビード表面に生じたポロシティの計測結果を示したものである。(a)は、密集したポロシティ、(b)は単独ポロシティの例である。(b)のポロシティのサイズは、直径 2.1mm 、深さ 1.5mm と計測された。また、**Fig.3.10** は、余盛形状を計測した結果を示したものである。

このように、本手法を用いることでビード形状の計測や表面欠陥の寸法の計測が可能であることがわかる。このビード表面形状計測により、アンダカットやオーバーラップ状のビード不連続やポロシティを検出することで、多層溶接時の次パスの溶接可否判断に用いることが出来る。また、トーチ位置設定の補正や溶着量を計算し次パスの溶接条件制御にも利用できる。さらに、開先形状の計測も可能であることから溶接線に対するトーチねらい位置の設定や溶接開始前の開先面の汚れ等の健全性確認にも応用は可能である。すなわち、従来の視覚センサでは適用が困難でレーザスリットセンサが用いられていた計測対象につ

いても適用が可能であることから、多くのセンサを取り付けることなく本システムのみで広範囲な応用へ活用できることを示している。

現在、本システムの計測処理速度が 10mm ピッチで 2~3sec.であることから溶接中の適応制御への適用には制約があるが、専用ボードの開発により今後適用が十分可能である見通しを得ている。

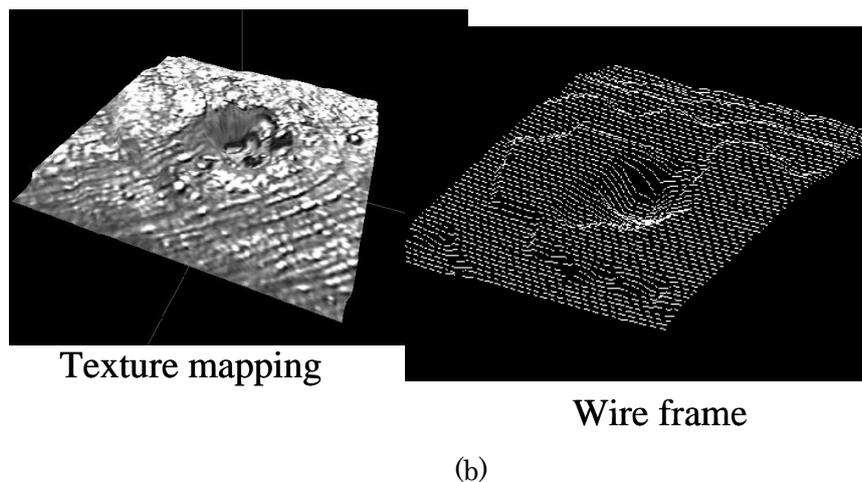
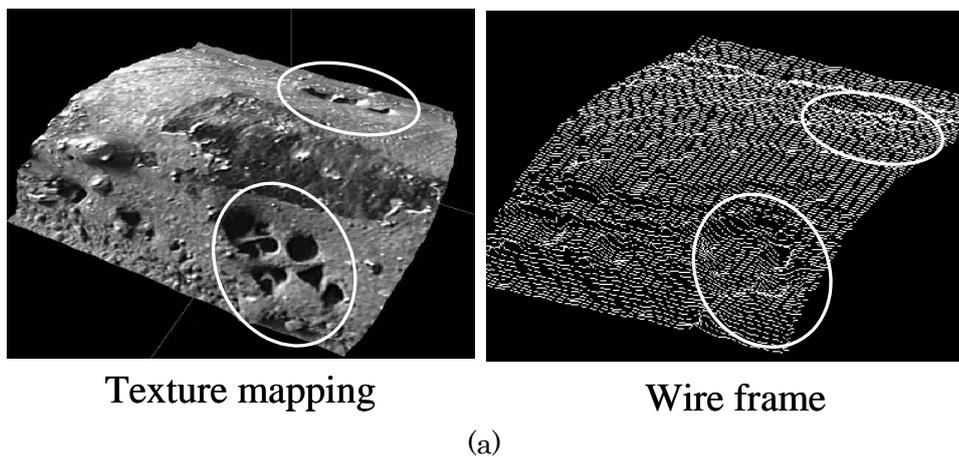


Fig.3.9 Results of measuring porosity on weld bead.

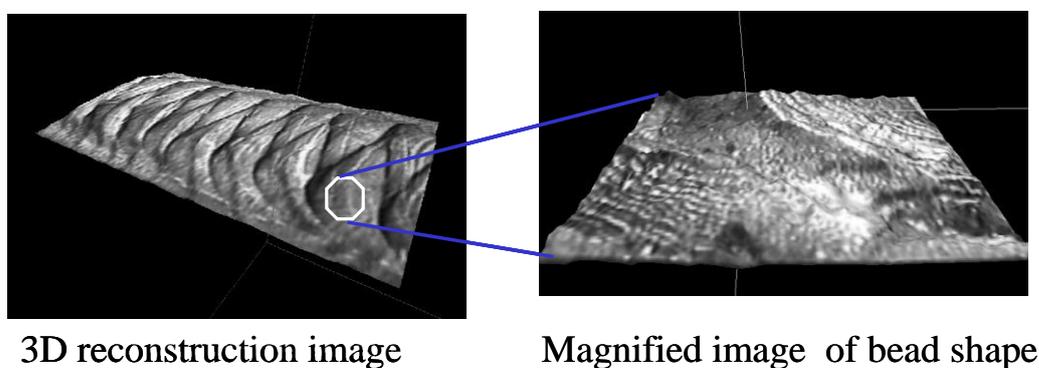


Fig.3.10 Result of measuring reinforcement shape.

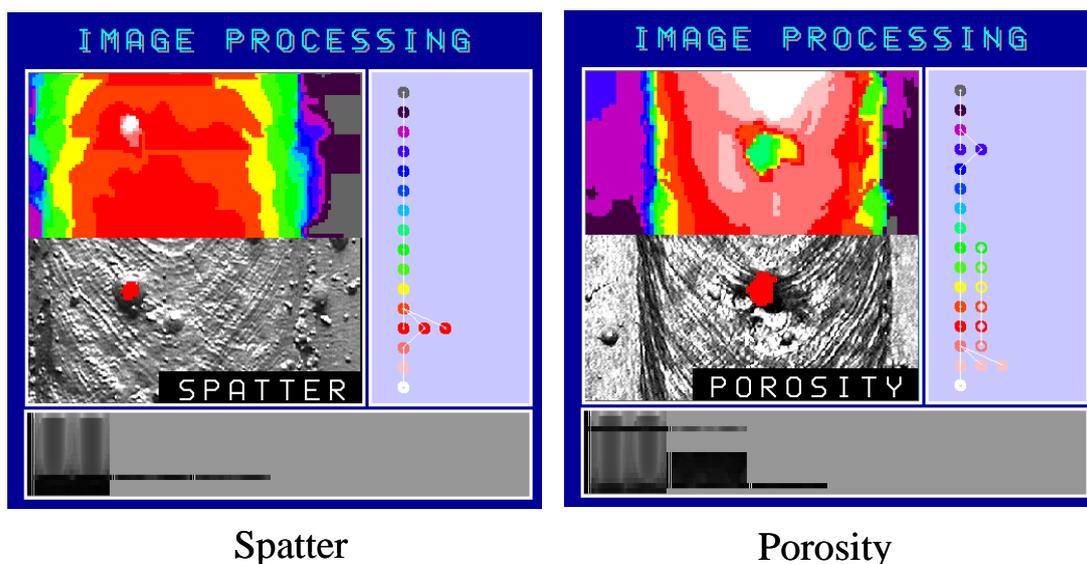


Fig.3.12 Test results of automatic defect distinction for spatter and porosity.

3.5 結言

本章では、ステレオビジョンを用いた3次元溶接ビード表面外観検査システムの製作およびその試験、評価を行い、外観検査の自動化ならびに自動溶接システムにおける品質確認システムへの応用を検討した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 3角測量の原理を用い、3次元計測が可能である溶接ビード表面外観検査システムの製作を行った。システムは、画像処理部、3次元再構成部、欠陥同定・統括処理部で構成される。
- (2) ステレオビジョンが可能な視覚センサとして複視差CCDカメラの開発を行った。複視差CCDカメラは、1つのCCD素子を用いて光学ミラーと液晶シャッターおよびプリズムで構成され、左右2視点からの映像を1つの撮像素子面に結像できる。
- (3) 複視差カメラからの映像信号から3次元座標値の算出を行うため、対応点検索プロセッサを開発した。そして、出力としては、ワイヤフレーム、サーフェイスモード、テクスチャマッピングの3種類の表示を可能とした。
- (4) 製作した3次元溶接ビード表面外観検査システムを用いてGMAWすみ肉溶接ビードの表面形状を計測した結果、 $\pm 0.1\text{mm}$ の精度で計測可能であり、ビードプロフィールならびに凹凸の計測が実用上問題のないことを確認した。
- (5) スパッタならびにポロシティのワイヤフレーム表示を行うとともに寸法が、分解能幅 $30\mu\text{m}$ 、深さ $50\mu\text{m}$ で計測可能であった。
- (6) 欠陥の自動識別として、3次元座標データから方向距離変換、写像化手法を用いた処理方法を開発した。そして、本手法をスパッタおよびポロシティを有した試験片に適用した結果、自動識別が可能であることが確認できた。
- (7) 開発した溶接ビード表面外観検査システムは、ビード形状の計測や表面欠陥の寸法

計測が可能であるとともに品質確認機能として自動溶接システムに応用できることが明らかになった。

第4章 全自動溶接システムの開発

4.1 緒言

発電設備の信頼性を確保する上で、溶接部の信頼性の確保は極めて重要である。従来、その溶接は熟練した溶接士によって施工されてきたが、近年、溶接士の高齢化や熟練溶接士の不足が深刻な問題となってきた。一般に、熟練溶接士は、溶融池の視覚情報を基に経験的な判断を行い、微妙な変化に対応した運棒操作により品質を確保しながら作業を実施すると言われている。そこで、熟練溶接士の視覚判断にかわるものとして視覚センサに着目し、その視覚センサにて得られた情報をもとに自動溶接システムの構築を図ることが考えられる。近年、視覚センサを用いた自動溶接システムの開発がすすめられているが、多くは溶接線の追従が主であり、熟練溶接士のような品質を確保しうる機能を有するシステムの実用化例は、ほとんど見受けられないのが現状である。

そこで、視覚センサから得られる採取情報を加工し、多種に利用する高機能な画像センシング技術の開発を行うことにより、熟練溶接士に頼らず一般の作業者が操作することで信頼性の高い溶接継手が得られる高度に自動化された全自動溶接システムの導入が考えられる。ここでいう全自動溶接システムとは、従来の自動溶接機が有する自動溶接機能に加え、適正溶接条件を自動的に選定、補正する適応制御機能を備え、かつ、この溶接過程で、溶接条件、ビード外観等の品質確認と記録をリアルタイムに行うとともに、品質異常時には溶接作業を自動停止する機能を備えたものとした⁵¹⁾。

本章では、視覚センサとして2章で述べた近赤外線 CCDカメラと3章で述べた3次元複視差 CCDカメラを用いて実用化レベルの全自動溶接システムの製作を行ない、その機能検証を行なった結果について述べるとともに、その全自動溶接システムの有効性について評価した。

4.2 全自動溶接システムのコンセプト

本開発における全自動溶接システムのコンセプトを **Fig.4.1** に示す。一般に、熟練溶接士が行っている視覚判断として溶接前の開先状況の確認、溶接中の溶融池の状況確認そして溶接後のビード外観確認があげられる。本全自動溶接システムのコンセプトとしては、これらの視覚判断を2つの視覚センサに置き換え、視覚情報に基づく画像センシング技術にて溶接状況の適応制御並びに品質確認を行う機能を有することと、さらに実用性を考慮して2つのセンサからの採取情報を多種に利用することによりシンプルかつコンパクトなシステム構成を実現することである。そして、本システムでは、オペレータは、熟練度が不要であり、基本的に無監視で溶接作業が行われる。

2つの視覚センサとしては、第2章で述べた溶融池から情報抽出する IR-CCDカメラ（近赤外線カメラ）と第3章で述べたビード表面形状を計測する複視差 CCDカメラを用いることとした。溶融池からの情報としては、近赤外線カメラを適用することにより、形状に加え、人間の目では得られない温度分布情報を得ることが可能となり、高度な制御に

活用できる。さらに、CCDカメラも複視差カメラの適用により、人間の目と同じ3次元情報を得ることが可能となり、品質判断に活用できる。

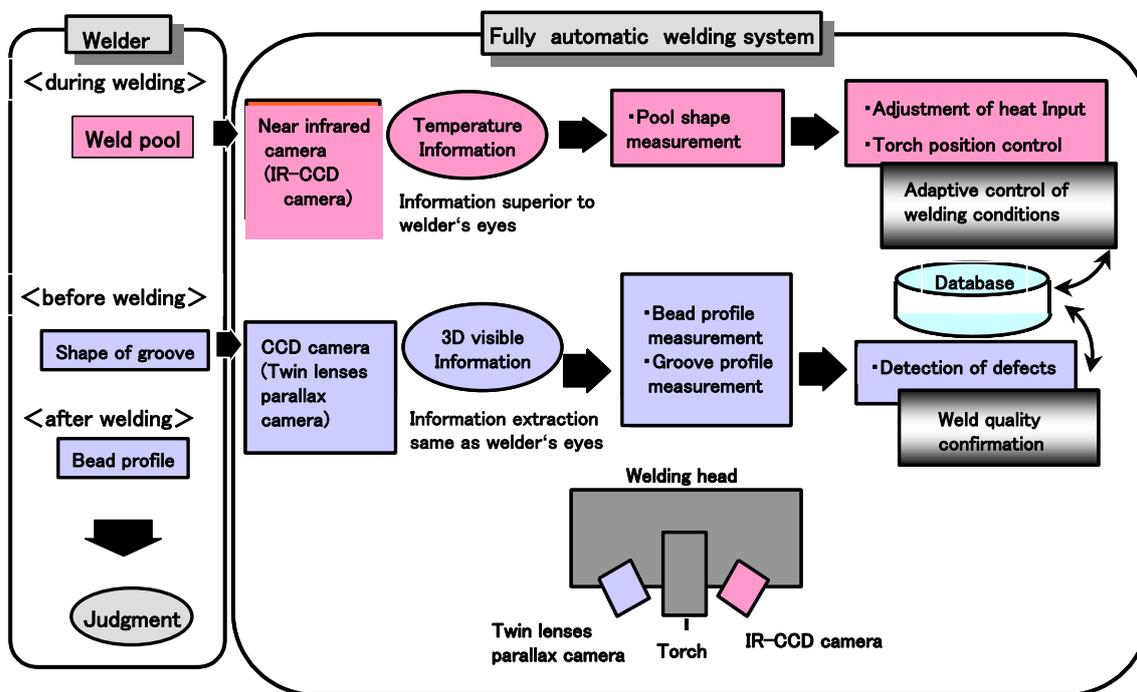


Fig.4.1 Concept of fully automatic welding system.

4.3 全自動溶接システムの構成

Fig.4.2 に今回開発したGMAW全自動溶接システムのシステム構成を示す。システムは、溶接電源、溶接ヘッドとそれに取付けたIR-CCDカメラ（近赤外線カメラ）と複視差

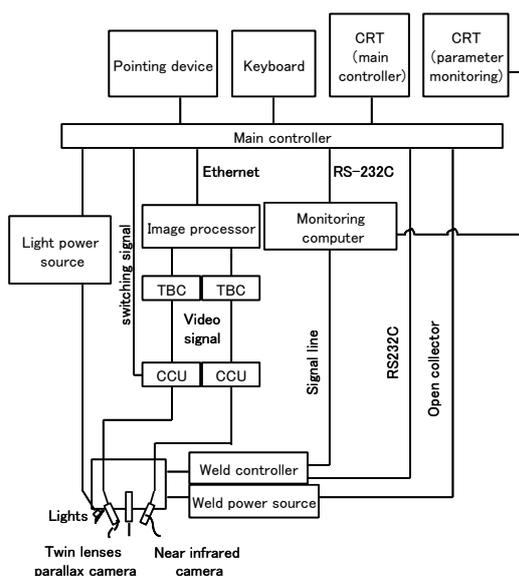


Fig.4.2 System configuration.

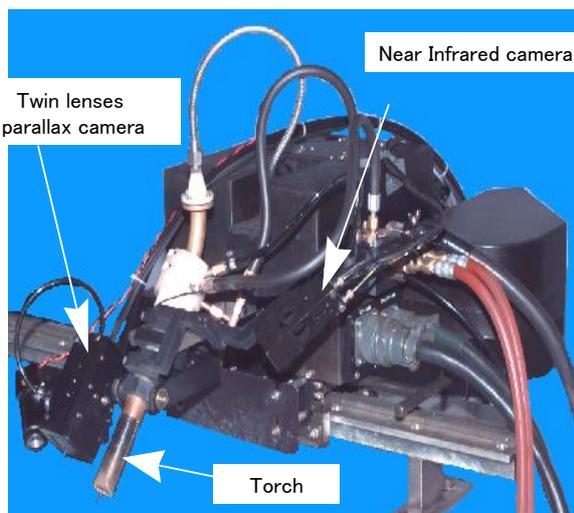


Fig.4.3 Appearance of welding head.

CCDカメラからなる2つの視覚センサ及びそれらを統括する制御装置から構成される。また、基本的な溶接条件のプログラム設定ならびに溶接線をティーチングする機能を有しており、一般的なプログラム制御の自動溶接装置を基本としている。とくにここでは、ICカードにて溶接条件を入出力できるTACSシステム⁵⁾²⁾を使用している

さらに、溶接中の溶接条件の監視とその記録を行なうモニタ装置も有している。**Fig.4.3**に溶接ヘッドの外観、**Fig.4.4**に統括制御装置の外観、**Fig.4.5**にCRT画面の例を示す。

マンマシンインターフェイスは、従来の押しボタン式のスイッチをすべて排除したグラフィカルインターフェイスを採用した。作業者はCRT上のマウス操作だけで全ての操作が行なえる。

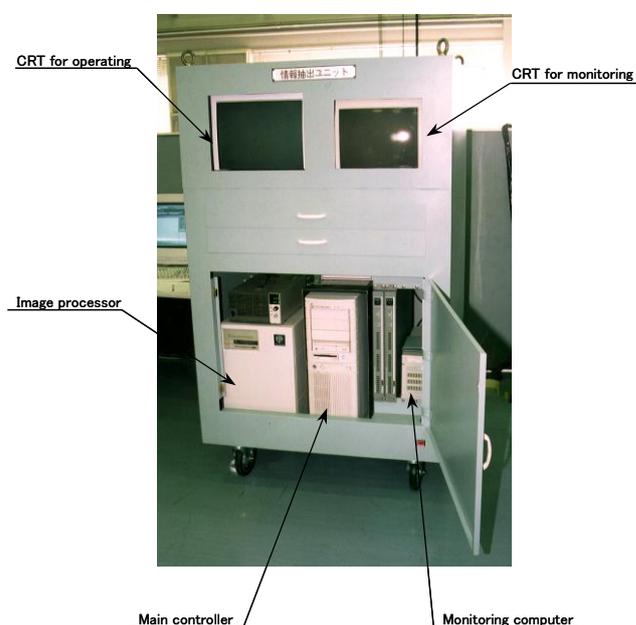
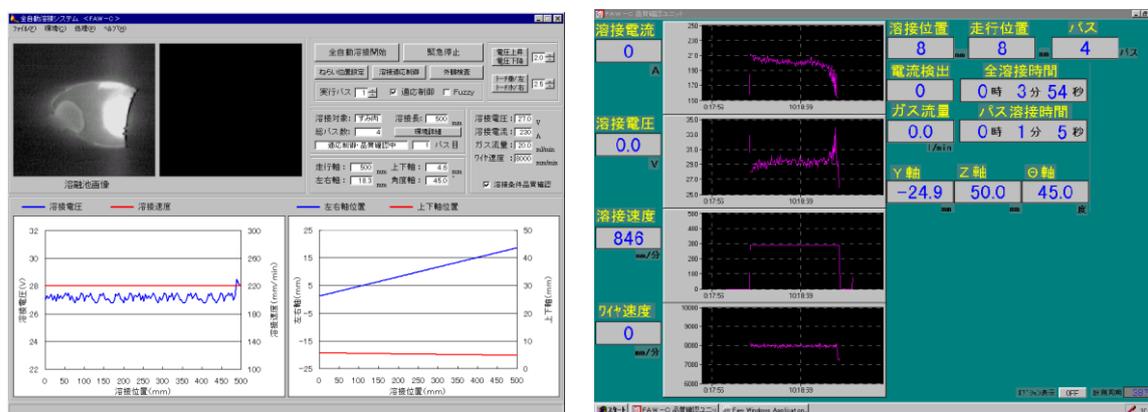


Fig.4.4 Appearance of main controller.



(a) CRT for operating

(b) CRT for monitoring

Fig.4.5 CRT display.

なお、溶接電源には、ユニットパルス方式の市販パルスMAG溶接電源を用いた。

4.4 全自動溶接システムの機能

4.4.1 センサとセンシング項目

全自動溶接システムに用いられるセンサの種類とそのセンシング項目を **Table4.1** に示す。用いた視覚センサは、IR-CCD カメラと複視差 CCD カメラで、その仕様は、それぞれ第2章と第3章で示した通りである。それ以外には、溶接条件の確認のため、電気信号の計測機器として電圧計、電流計、エンコーダや流量センサを使用した。センサの基本機能としては、溶接条件制御と品質確認機能である。

Table 4.1 Sensor and sensing items.

	Purpose	Sensing item	Sensor
Adaptive control of welding conditions	Torch position control	Weld pool shape (Weld pool inclination)	IR-CCD camera
	Welding parameters control	Weld pool shape (Weld pool area size)	
	Setting of torch position adjustment	Width & depth of groove, Width & height of bead	Twin lenses parallax camera
	Weld deposition control	Width & depth of groove, Width & height of bead	
Weld quality confirmation	Groove shape check	Width, depth, root gap & root discrepancy of groove	Twin lenses parallax camera
	Weld bead shape check	Unevenness of weld bead shape (concavity, undercut & overlap), porosity	
	Welding parameters check	Current, voltage, speed, wire feeding rate, shielding gas flow rate & torch driving axes	Current meter, voltage meter, encoder & flow meter

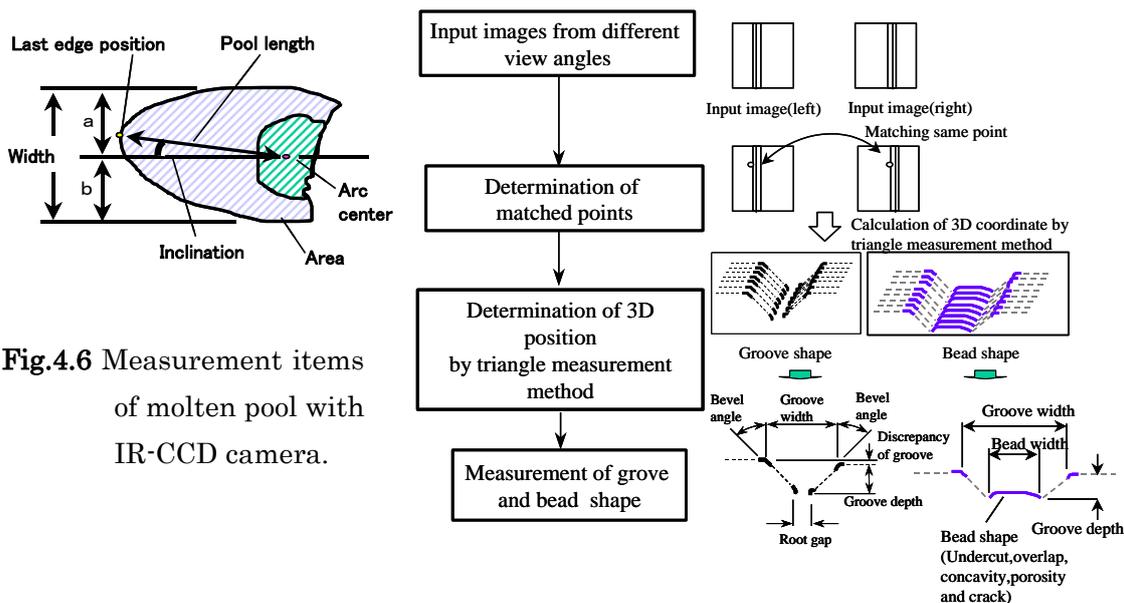


Fig.4.6 Measurement items of molten pool with IR-CCD camera.

Fig.4.7 Processing flow for measurement of bead shape.

IR-CCD カメラでは、**Fig.4.6** に示すように溶融池形状を計測し、溶融池の傾きと溶融池面積、溶融池後端距離を抽出する。用いた画像処理手法は、第2章に示した通りである。また、複視差 CCD カメラは、**Fig.4.7** に示すように開先形状および溶接ビード形状の計測に用いられ、開先角度（ベベル角）、ルートギャップ、開先幅、開先深さ、溶接ビード幅、ビードプロフィール（ビード凹凸、アンダカット、オーバラップ、ポロシティ、割れ）を抽出する。同様に用いた画像処理、計測アルゴリズムは、第5章に示したとおりである。

4.4.2 溶接条件制御機能

全自動溶接システムにおける溶接条件制御機能を以下に説明する。

(1) トーチねらい位置設定

複視差 CCD カメラにより溶接線各位置の開先形状、ビード形状を計測することにより、溶接開始時並びに次パス溶接時のトーチねらい位置の設定を行なう。溶接開始時では、開先表面端部およびルート端部の座標から開先ルート中心を求め、溶接線各断面位置で同様に求めた開先ルート中心位置を直線補間することで溶接線全長のトーチねらい位置を設定する。すみ肉溶接では、ルート位置座標の計測により、トーチねらい位置を設定する。また、溶接後の次パス以降では、各層でビードエッジ（開先端部とビード端部の交叉位置）座標を計測し、データベースで設定したオフセット値に従い、あらかじめプログラムされた各パスのトーチねらい位置を補正する。

(2) 溶接条件設定

溶接条件設定機能は、複視差 CCD カメラにより前層のビード形状を計測し、あらかじめデータベースに基づき設定された目標溶着量になるように次層の溶接条件（溶接速度）を補正するものである。これにより、各層毎の溶着量（ビード高さ）のばらつきを平準化し、総溶着量を一定にすることができる。**Fig.4.8** に溶接条件設定の処理手法を示す。ここでは、各層の溶着量補正のために溶接条件として溶接速度を補正することになっている。これは、ワイヤ送給速度を補正した場合、溶接電流が変化し、溶接電圧の補正も必要となり、多くの溶接パラメータが変化するのを避けるため、溶接速度の補正の場合、他の溶接パラメータの補正が不要であることによる。

(3) トーチねらい位置制御

第2章で示したように、溶融池の傾きとトーチねらい位置のずれには相関関係が認められる。ここでは、その相関関係を利用して、溶接中の溶融池の傾きを計測することでトーチねらい位置を制御する方法を適用した。IR-CCD カメラからの溶融池画像をもとに溶融池の傾きを計測することで、データベースにて設定された標準溶接条件である溶融池の傾きの値になるようにトーチ駆動軸をリアルタイムに制御する。制御方法としては、溶融池の傾きとその時間的変化量を入力としトーチ移動量（モータ駆動軸）を出力とするファジィ制御³⁾を用いた。**Fig.4.9** にトーチねらい位置制御の処理手法を示す。制御ルールとしては、たとえば、 θ （溶融池の傾き）が標準値よりもかなり小さく（DB）、その時間的変化量（ $\Delta \theta$ ）が変化しない（ZR）場合、出力のトーチ移動量をかなり大きく（UB）+側へ変化

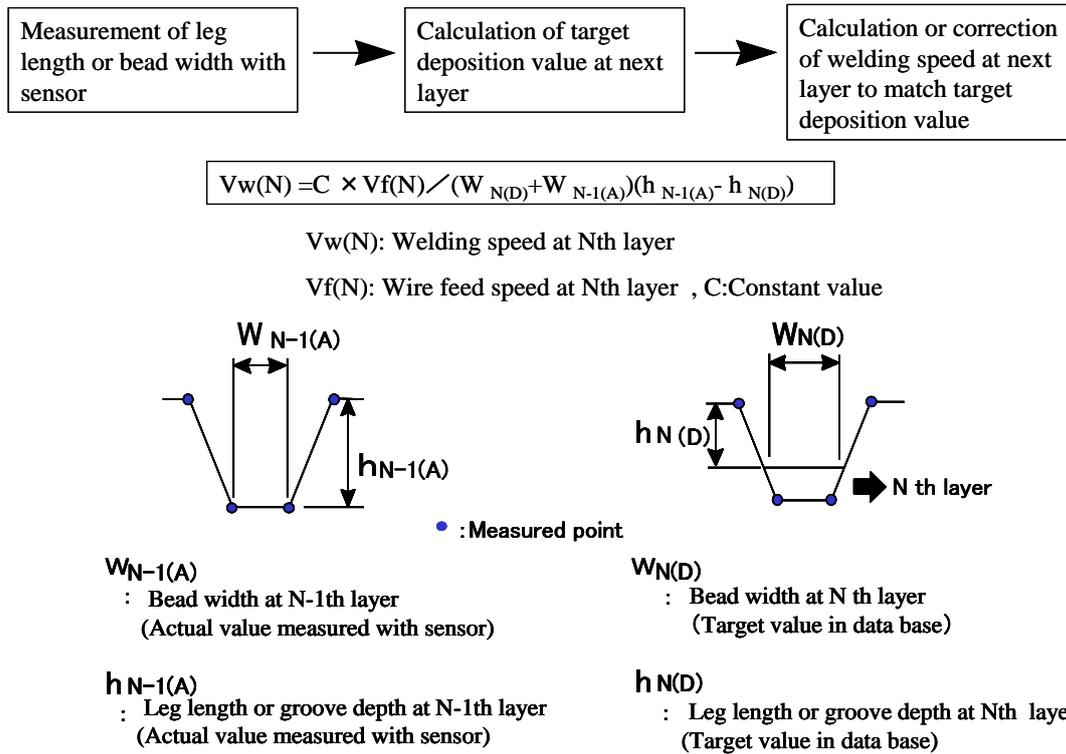


Fig.4.8 Processing flow of welding condition setting for weld deposition control.

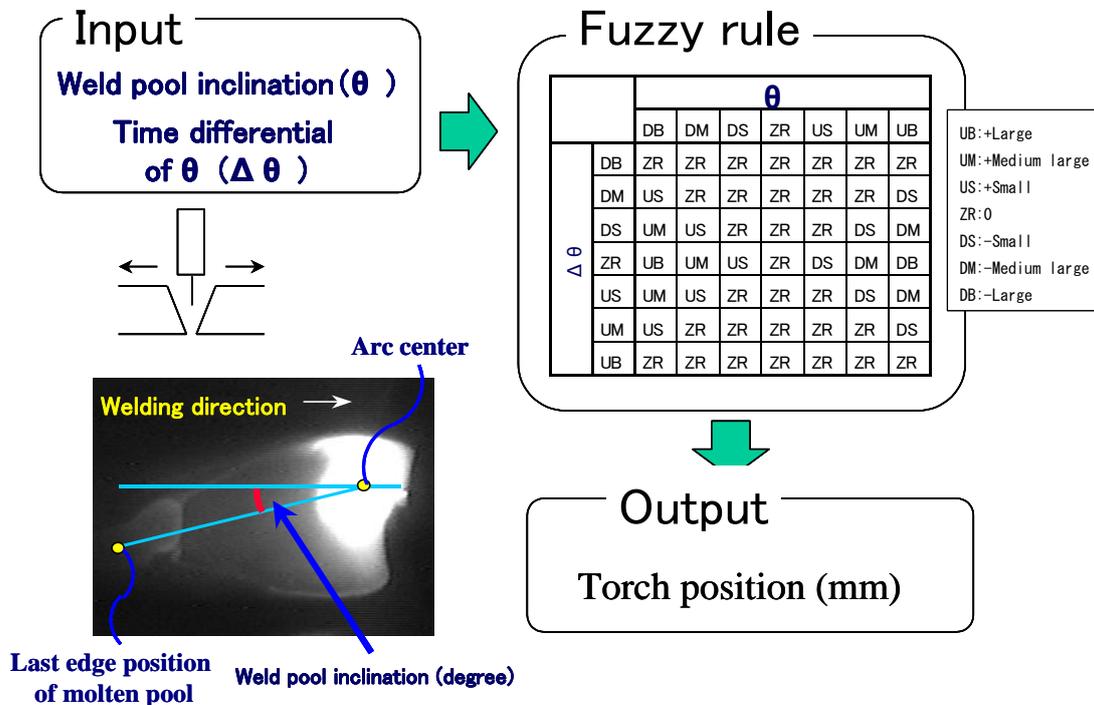


Fig.4.9 Fuzzy rule for torch position control.

させるものである。開先溶接の場合は、中心位置を標準として右側を+、左側を一方向として規定する。すみ肉溶接では、トーチねらい位置とトーチ角度を制御できる。トーチねらい位置を優先に制御し、その場合、垂直方向を優先として、その後水平方向を制御する手順とした。

(4) 溶接条件制御

溶接の溶け込みを適正に維持、確保するため、溶融池の形状を適正溶接条件時と同様に制御することが有効である。これは、出力値である溶接電流や電圧を一定に制御しても、母材の状態変化、たとえば、板厚や熱容量の変動があれば、溶け込み状態が変化してしまうからで、直接溶融池の大きさをモニタすることが有効である。第2章に述べたように、定電流タイプのパルス MAG 溶接では、溶融池面積および溶融池後端距離と溶接電圧には相関関係が認められる。そこで、溶融池形状の指標となる溶融池面積や後端距離を一定になるように溶接電圧を制御することが可能である。ここでは、溶融池面積を指標に選択し、溶け込みを一定に制御するために、I R—C C Dカメラからの溶融池画像から溶融池面積を計測することで、常時データベースにて設定された標準溶接条件の溶融池面積になるように溶接電圧をリアルタイムに制御することにした。制御方法としては、溶融池面積とその時間的変化量の2入力とし、溶接電圧を出力とするファジィ制御を用いた。Fig.4.10 に溶接条件制御の処理手法を示す。ファジィ制御の基本的なルールは、トーチねらい位置制御と同様である。溶接電圧を制御量としたのは、溶接電流や溶接速度と異なり溶着量が影響をうけないことによる。

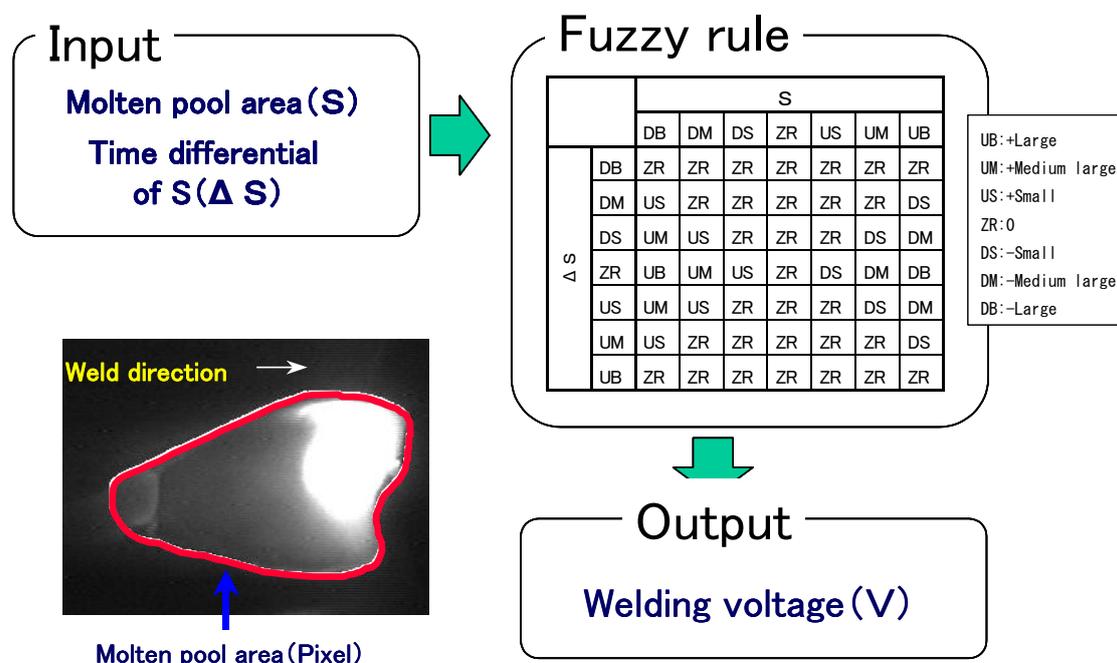


Fig.4.10 Fuzzy rule for welding condition control.

4.4.3 品質確認機能

全自動溶接システムが有する品質確認機能を以下に示す。

(1) 開先形状確認

溶接開始前に複視差CCDカメラにてルートギャップ、目違い、開先角度、開先の幅および深さを計測し、許容値範囲外である場合は溶接を開始せず異常の警告を出す。

(2) 溶接ビード形状確認

各溶接パス終了後、溶接開始位置に戻る際に複視差CCDカメラにより溶接ビード表面形状を計測し、ビードの凹凸、アンダカット、オーバラップ、ポロシティ（表面に開口したもの）などの寸法や個数が許容値をこえていないか判定を行なう。許容値範囲外であると判断した場合、次パスの溶接を停止させ、異常の警告を出す。尚、オーバラップやアンダカットはビードの凹凸の一つとして判断されるのに対しポロシティは識別され個数で異常判断を行なうものとした。

尚、欠陥識別方法については、第3章の考え方の通りである。

(3) 溶接条件確認

溶接中に電流計、電圧計やエンコーダからの信号をリアルタイムに監視し、溶接電流、溶接電圧、溶接速度、短絡回数、ワイヤ送給速度、シールドガス流量があらかじめ設定された適正条件範囲内であることを確認する。適正範囲を逸脱した場合、溶接を自動停止させ、異常の警告を出す。

4.4.4 全自動溶接システムの動作シーケンス

以上の溶接制御機能と品質確認機能を含め、溶接開始から終了までのシステムの基本的な動作シーケンスを **Fig.4.11** に示す。

視覚センサの動作としては、IR-CCD カメラは溶接中に作動し処理を行なうのに対し複視差カメラは各パス溶接終了後、溶接開始点へ戻る際に作動し処理を行なう。

まず、はじめに、オペレータは、開先形状ならびに継手形式に応じて支持された各パスの標準溶接条件をデータベースに基づいてあらかじめプログラム設定し、溶接装置のセッティング後、溶接線のティーチングを実施する。そして、マウスをクリックし溶接を開始する。溶接開始後は、視覚センサが稼働し、**Fig.4.11** のシーケンスに従い、溶接制御機能ならびに品質確認機能が作動することにより、オペレータの監視なく溶接が終了まで自動的に実行される。ただし、何か異常が生じ、溶接が自動的に中断した場合、アラームにて認識したオペレータが、異常原因の確認、処置を行った後、溶接を再開させることになる。

基本的に溶接中は、あらかじめ設定した適正条件範囲内で溶接条件制御機能が働き、それを逸脱した場合、品質確認機能にて異常停止するしくみである。

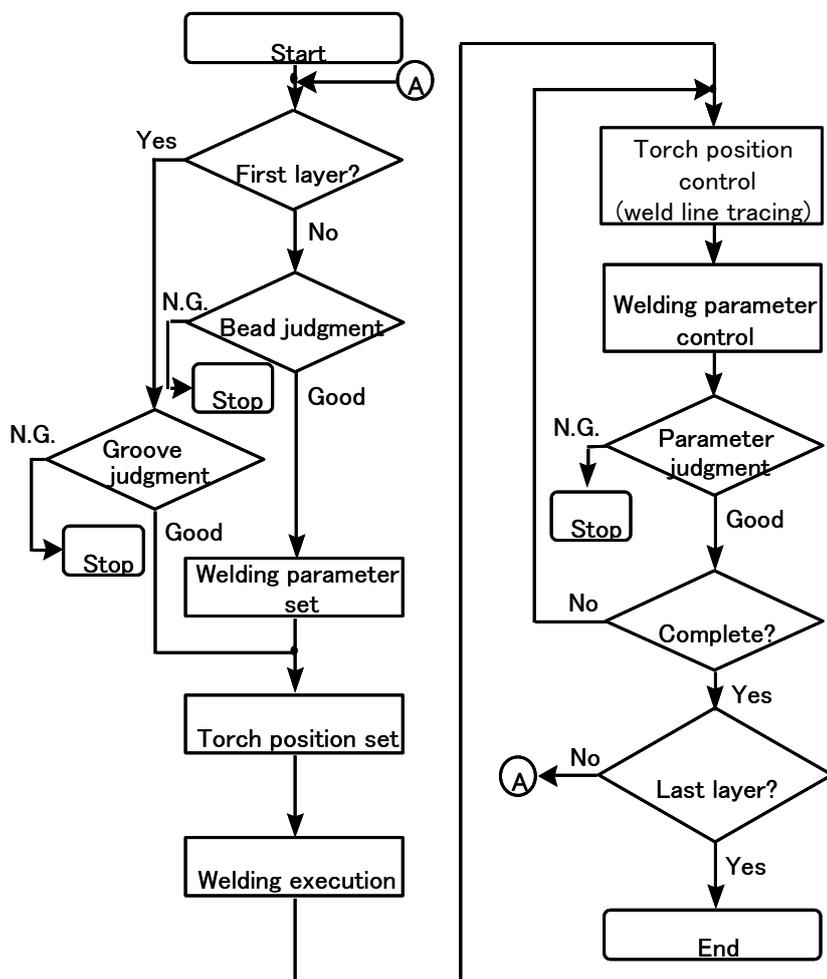


Fig.4.11 Basic process sequence of fully automatic welding system from start to finish of welding.

4.5 機能検証試験

全自動溶接システムの機能を確認するために溶接条件制御機能および品質確認機能に対する機能検証試験を行った。さらに、全自動溶接システムの信頼性を確認するため総合検証として異常事象影響確認試験を行った。その結果を以下に述べる。

4.5.1 検証試験方法

本全自動本システムは、突合せ及びすみ肉溶接を対象としている。検証試験に用いた試験片形状ならびに開先形状を Fig.4.12 に示す。供試材として、母材は SM400、溶接ワイヤは YGW-16 (1.2φ)、シールドガスは 80%Ar+20%CO₂、裏当て材にはセラミックス製のバックグテープを用いた。突合せ溶接時には、変形を防止するため、裏面に SM400 の拘束板を取り付けた。Table4.2 に母材および溶接ワイヤの化学成分を示す。また標準溶接条件として、チップ母材間距離 20mm とし、パルス溶接条件は、パルススピー

ク電流 450A、パルスベース電流 50A、パルスピーク時間 2ms 一定とした。

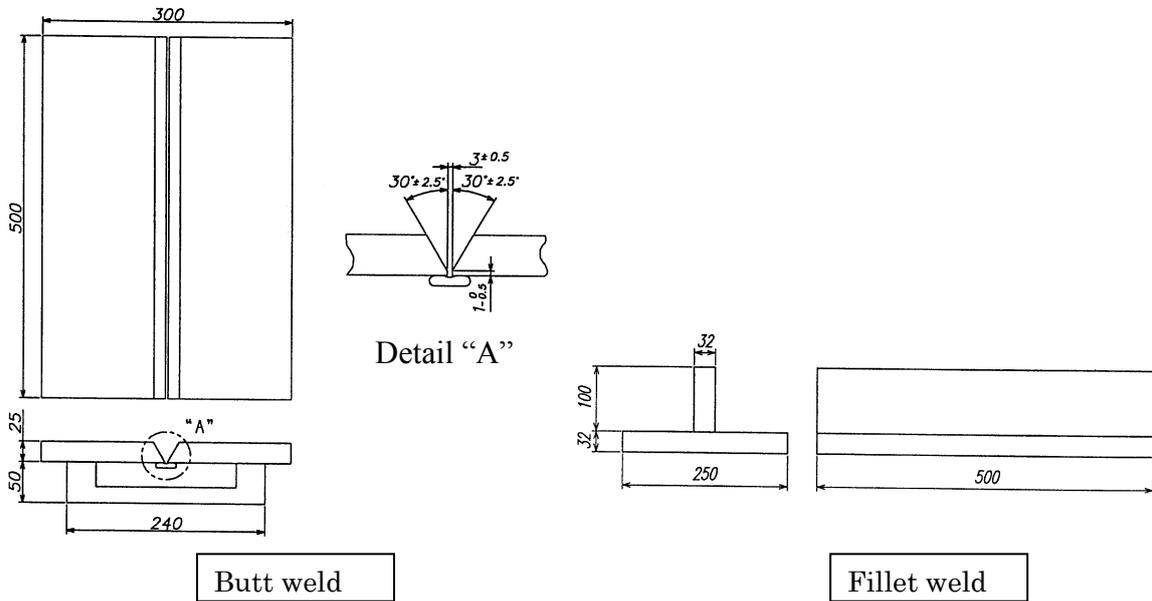


Fig.4.12 Groove shape and dimension of test piece used.

Table 4.2 Chemical composition of base metal and welding wire used.

	(wt%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
SM400	0.16	0.16	0.73	0.012	0.011	—
YGW-16	0.09	0.75	1.38	0.012	0.015	0.24

溶接条件制御機能検証試験は、トーチねらい位置制御機能と溶接条件制御機能を行うもので、それぞれ標準条件を逸脱した状態で溶接を開始し、途中で制御機能を作動させ、溶接終了後、外観および断面マクロ調査により機能評価を行った。溶接条件制御では、溶接電圧変動、ルートギャップ変動、チップー母材間距離変動に対する検証を行った。

品質確認機能検証試験では、あらかじめアンダカット、アーバラップ、ビードの凹凸、ポロシティを有した試験片を準備し、その検出機能の評価した。

また、異常事象確認検証試験としては、システムの総合検証試験の位置付けで、溶接条件制御機能および品質確認機能すべての動作確認を評価するため、実施工において溶接変形により生ずる可能性のあるチップー母材間距離変動と開先寸法変動をとりあげた。さらに、作業環境により生ずる可能性のある風の影響確認試験を実施した。Fig.4.13 は、チップー母材間距離変動試験の試験方法を示したもので、溶接進行方向にチップと母材間の距離が 20mm から 30mm まで変化するように試験板を傾け、距離変動を発生させた。また、Fig.4.14 は、開先幅変動試験方法を示したもので、試験板の拘束板をとりはずすことで、溶接変形にて溶接途中の開先寸法変動（開先幅の減少）を発生させた。一方、Fig.4.15 は、

風の影響確認試験の試験方法を示したものであり、溶接進行方向と風の方向をあわせた軸方向試験の装置配置を示している。また、溶接進行方向と直角方向から風を与える直角方向試験も実施しており、気流発生装置（最大風速 2.5m/s, 吹き出し寸法 ϕ 0.8m）から、風速 1.5m/s および 2.0m/s を与えた状態で溶接を開始させ、システムが正常に機能し、溶接を継続するか、または風の影響を検知し、自動停止するかの検証をおこなった。

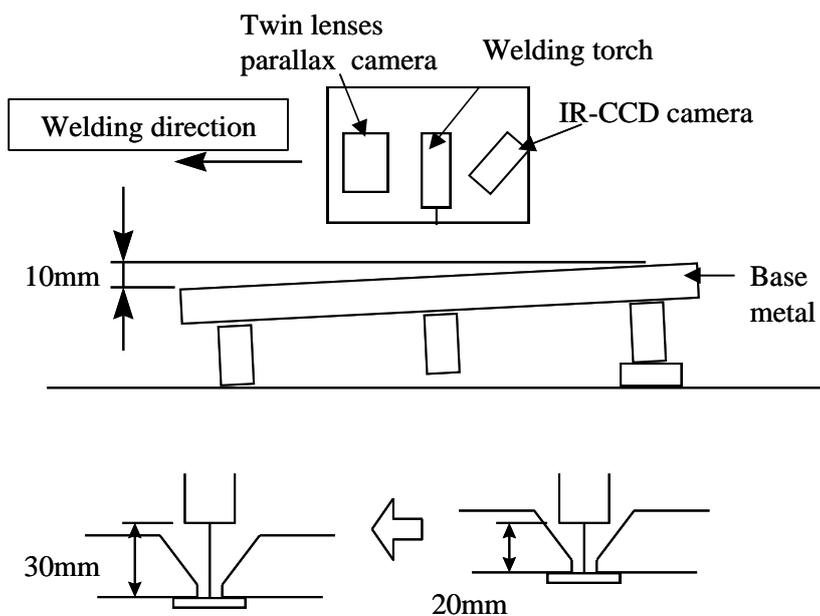


Fig.4.13 Test procedure for influence of changing distance from tip to base metal.

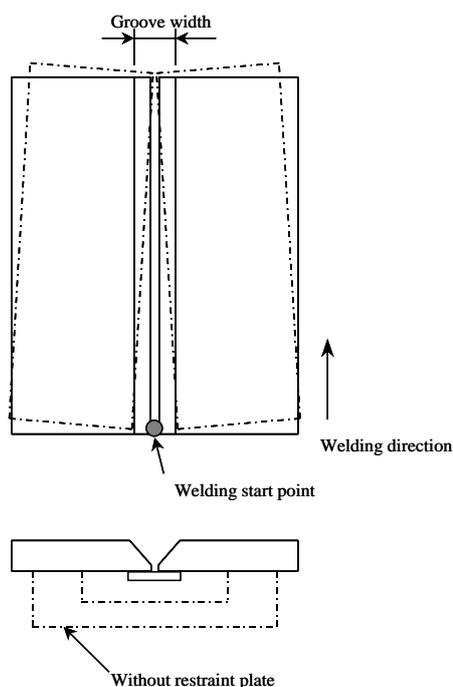


Fig.4.14 Test procedure for influence of changing groove dimension.

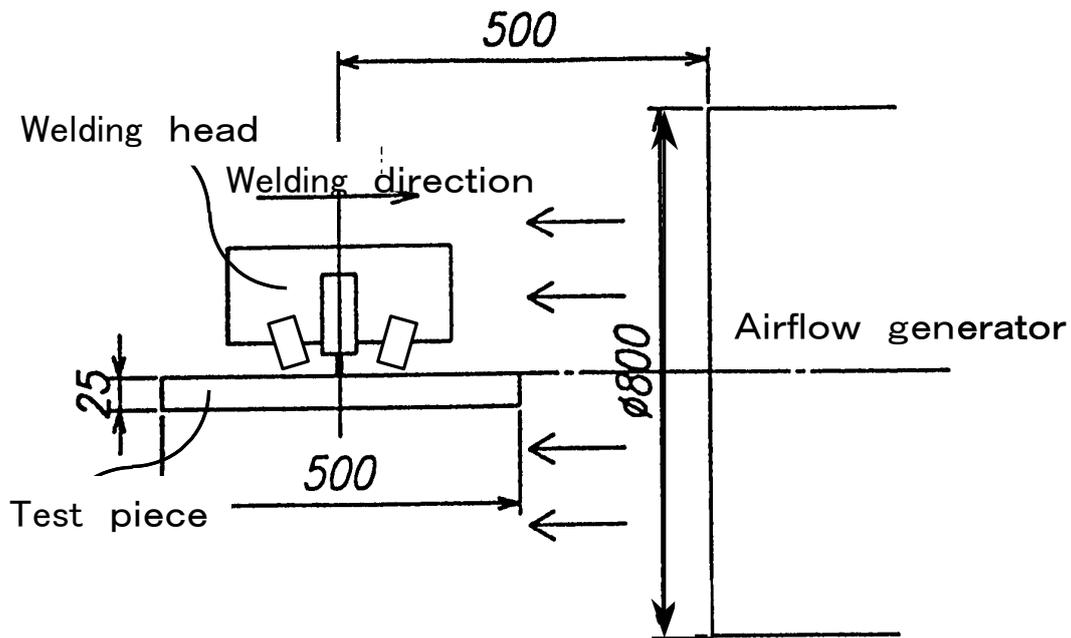


Fig.4.15 Lay out for air flow test.

4.5.2 溶接条件制御機能検証試験結果

Fig.4.16 は、すみ肉溶接におけるトーチねらい位置制御機能の試験結果の一例を示したものである。これは、あらかじめトーチねらい位置を垂直方向に 2.5mm ずらせた状態で溶接を開始後、途中で適応制御機能を作動させることで機能確認を行なったものである。

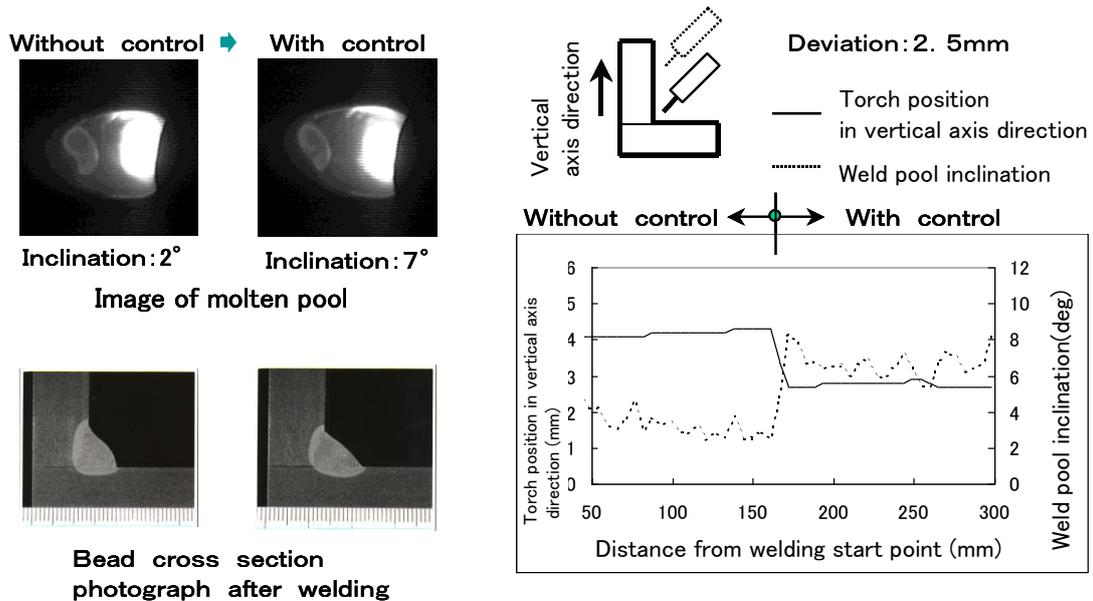


Fig.4.16 Test results of torch position control at fillet weld.

IR-CCD カメラにて計測した溶融池の傾きが 2° から目標値の 7° になるようにトーチ位置が制御されており、ほぼ、目標値の $\pm 10\%$ の範囲になっている。また、溶接後切断して調べた断面マクロからもトーチねらい位置が適正に制御されたことがわかる。また、水平方向のずれに対しても検証試験を行い、同様の結果が得られている。

また、**Fig.4.17** は、突合せ溶接ルートパスにおいてトーチねらい位置制御機能の検証を行なった結果を示したものである。あらかじめトーチねらい位置を開先中心から 2mm 水平方向にずらせた状態で溶接を開始後、途中で適応制御機能を作動させたもので、同様に溶融池の傾きが 10° から 0° に制御され、その結果としてトーチねらい位置がほぼ開先中心に制御されていることがわかる。また、断面マクロからも適正に制御されたことがわかる。なお、溶接開始時の溶接条件としては、平均溶接電流 232A 、溶接電圧 26.8V 、ワイヤ送給速度 $8000\text{mm}/\text{min}$ 、溶接速度 $150\text{mm}/\text{min}$ であった。

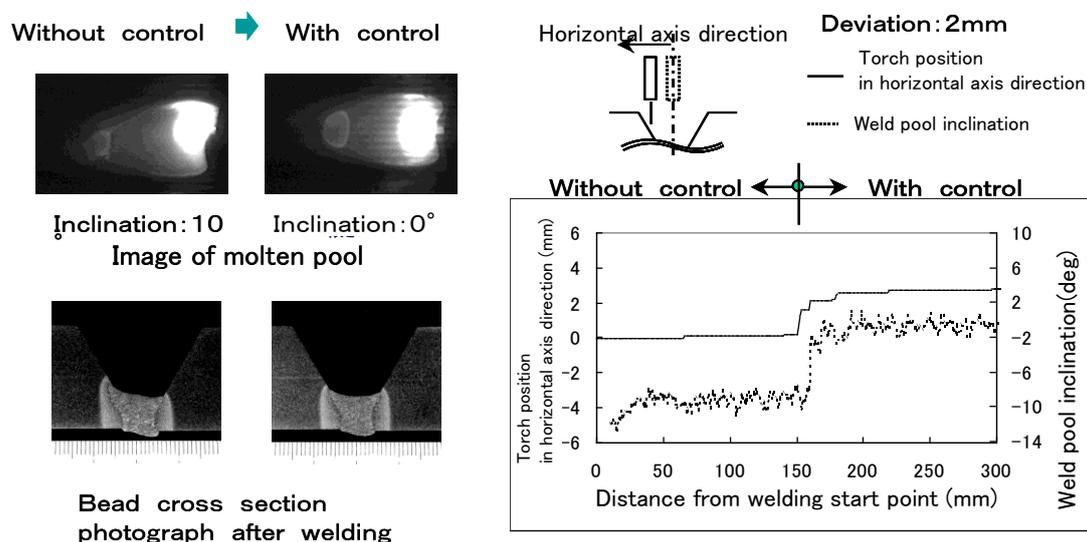


Fig.4.17 Test results of torch position control at groove weld.

さらに、**Fig.4.18** は、ウィービングパス時のトーチねらい位置制御機能の検証を行った結果を示したものである。同様に、あらかじめトーチねらい位置を開先方向に 2.5mm ずらせた状態で溶接を開始し、溶接位置 150mm で適応制御を作動させたもので、ウィービング中心が開先中心方向に適正に制御されていることがわかる。使用した溶接条件は、平均溶接電流 246A 、溶接電圧 26.8V 、ワイヤ送給速度 $8000\text{mm}/\text{min}$ 、溶接速度 $170\text{mm}/\text{min}$ である。

次に、溶接条件制御の検証結果について述べる。

Fig.4.19 は、突合せ溶接ルートパスにおいて、溶接電圧を標準条件よりも小さく設定した状態、すなわち溶融池のサイズが標準よりも小さい状況で溶接を開始し、途中で適応制御機能を作動させた結果を示したものである。その結果、IR-CCD カメラの計測に基づき

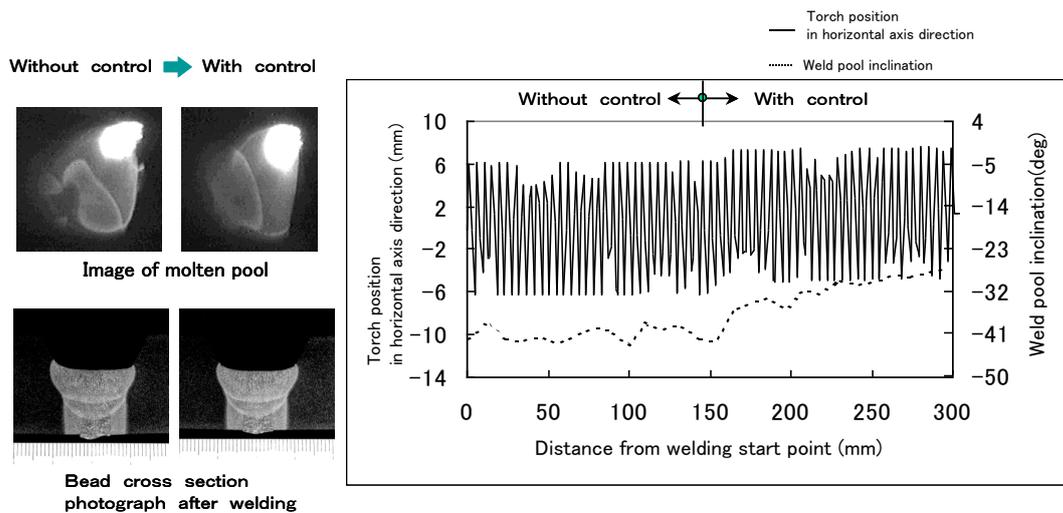


Fig.4.18 Test results of torch position control in weaving pass.

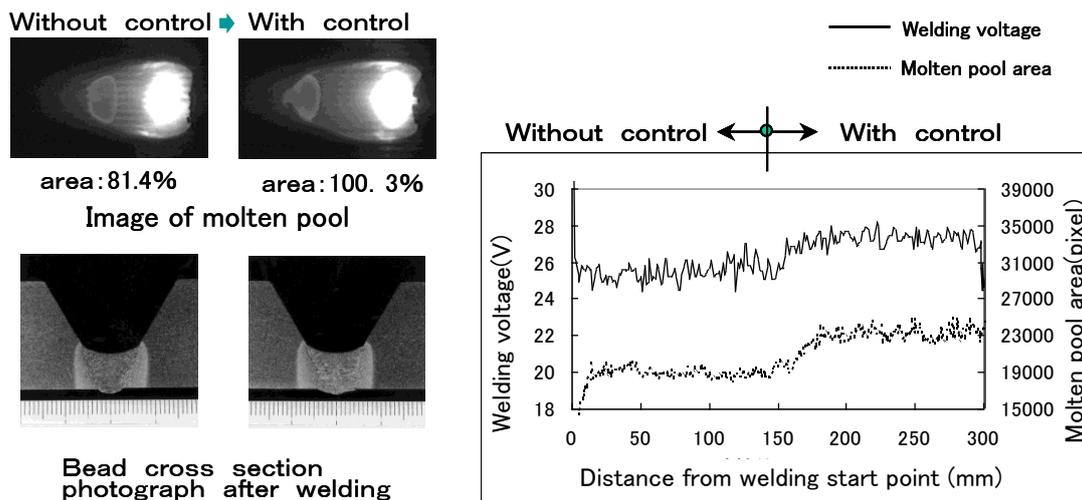


Fig.4.19 Test results of welding condition control at root pass in groove weld.

溶融池面積がデータベースにより設定されている標準値(100%)の±5%の範囲になるように溶接電圧が適正に制御されていることがわかる。なお、ルートパスの標準溶接条件は、溶接電圧27V、ワイヤ送給速度8000mm/min、溶接速度150mm/minである。一方、Fig.4.20は、溶接電圧を標準条件よりも大きく設定することにより溶融池面積を過大な状況で溶接を開始し、同様に途中で適応制御を作動させた結果を示したもので、溶融池面積を標準条件の大きくなるように溶接電圧が適正に制御されていることがわかる。溶融池面積は、標準値の±5%の範囲に制御され、最終的に溶接電圧は、28.2Vから26.7Vに制御されている。

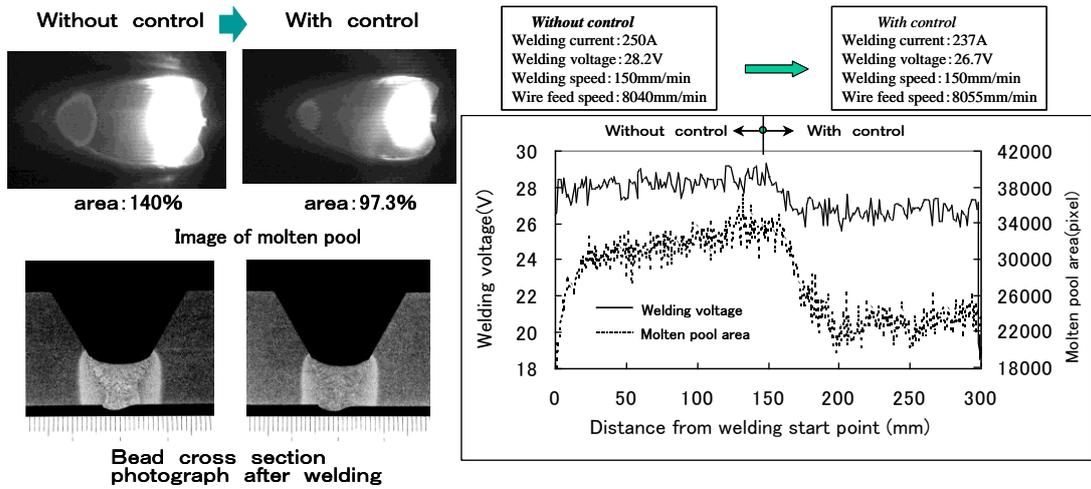


Fig.4.20 Test results of welding condition control to change large molten pool area to standard molten pool area at root pass in groove weld.

また、Fig.4.21 は、ウィービングパス時における同様の試験結果を示したもので、溶融池面積を標準値よりも大きく設定した状態で溶接を開始し、途中で適応制御を作動させたもので、初期値の設定が過大でないため変化割合は小さいが、溶融池面積が適正になるように溶接電圧が制御されていることがわかり、ストレートビード同様にウィービングパスにおいても溶接条件制御が可能であることが示された。

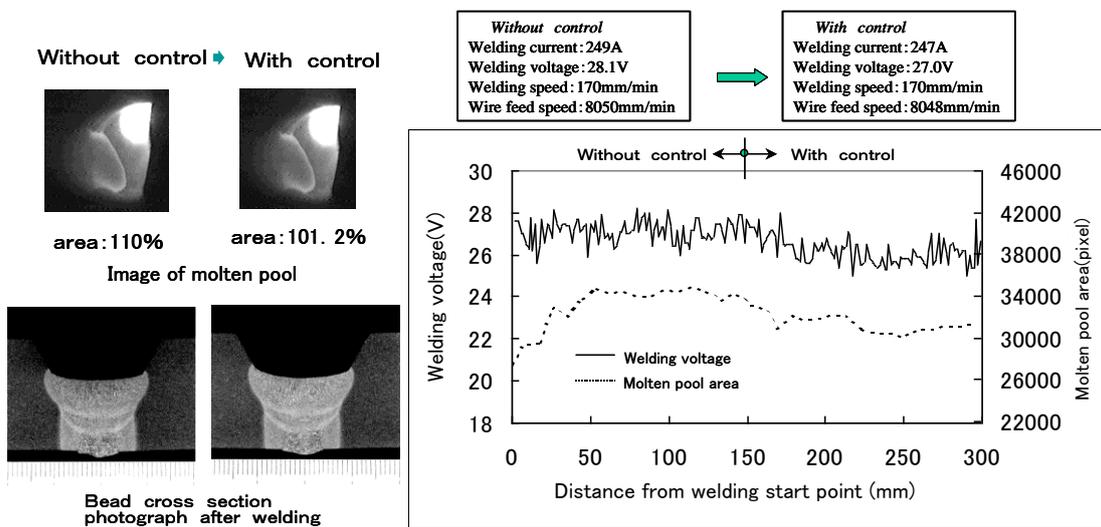


Fig.4.21 Test results of welding condition control at weaving pass in groove weld.

次にルートギャップの変動に対する溶接条件制御の検証試験結果について示す。

Fig.4.22 は、標準ルートギャップが 3.0mm に対し、条件として限界である過大な 6mm に設定した状態で、標準溶接条件のもとで溶接を開始し、途中で適応制御を作動させた結果を示したもので、溶融池面積が適正になるように溶接電圧が制御されていることがわかる。

同様に、**Fig.4.23** は、ルートギャップを 1.0mm と小さく設定した状態で、標準溶接条件のもとで溶接を開始し、途中で適応制御を作動させた結果を示したもので、溶け込みを確保するように溶融池面積が標準値になるように溶接電圧が適正に制御されていることが

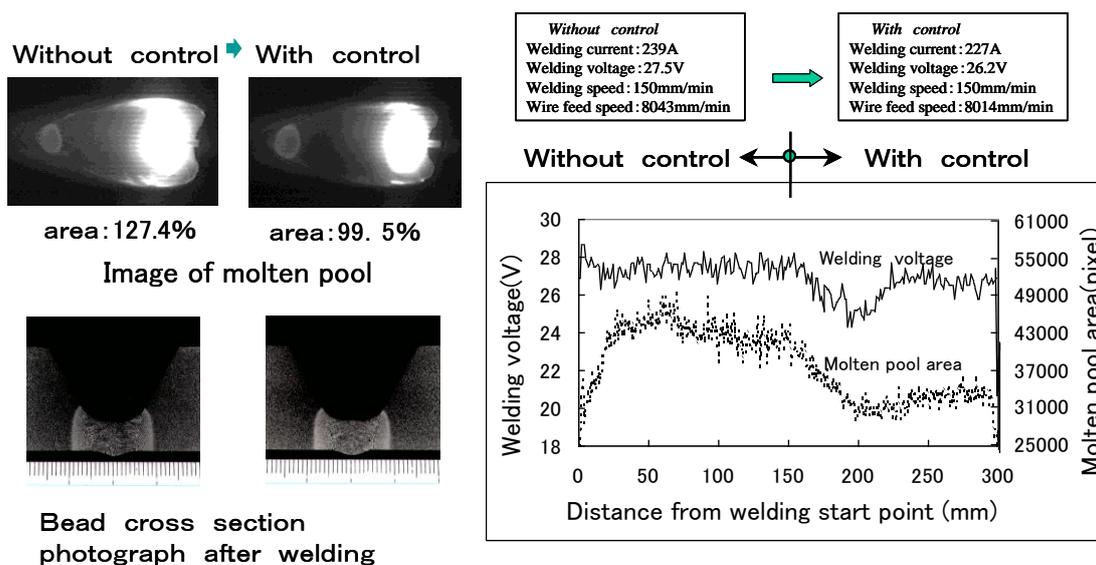


Fig.4.22 Test results of welding condition control at root gap 6mm.

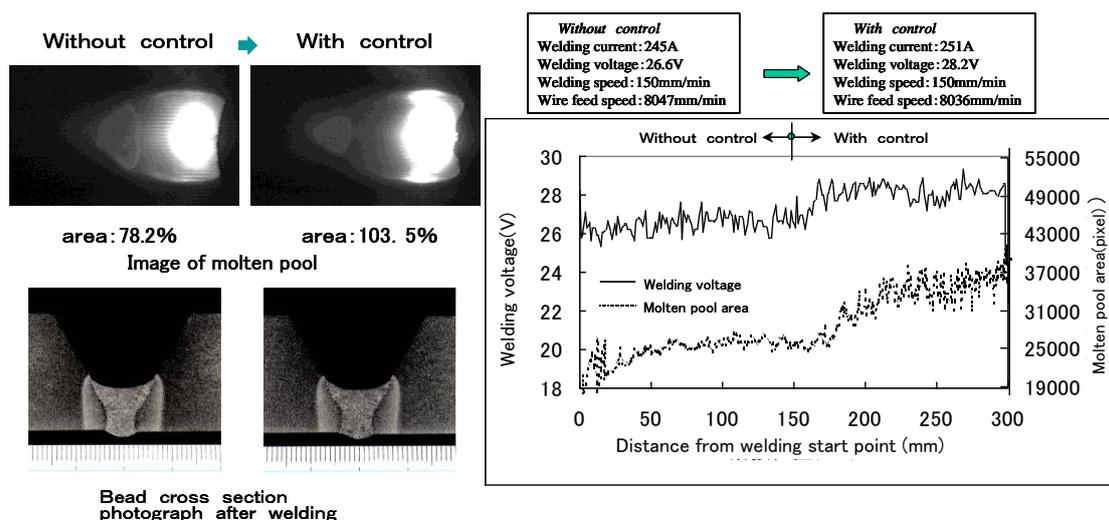


Fig.4.23 Test results of welding condition control at 1mm root gap.

わかる。この場合、溶融池面積を標準値まで大きくするため、溶接電圧が 26.6V から 28.2V まで上昇している。このように、開先ルートギャップが変動した場合には、第 2 章でも述べたように溶融池面積が変化する。このため、同一溶接条件のまま溶接を継続した場合、融合不良や溶け落ちなどを生ずる可能性があり、溶融池寸法を管理し、溶接条件を制御することが有効であると考えられる。今回、変動の範囲を適正な溶け込みが得られる条件範囲内としたため、制御をかけない場合においても断面マクロ上にも欠陥は認められていないが、溶融池の傾きや溶融池面積を指標にしたトーチねらい位置制御や溶接条件制御により溶け込み状況が変化している様子は十分確認できている。

また、**Fig.4.24** は、チップー母材間距離を変化させた場合における溶接条件制御の有無を比較したものである。溶接条件制御機能を用いない場合、チップー母材間距離の増加とともに溶接電圧は増加し、溶融池面積もそれにつれ増加している。一方、溶接制御機能を作動させた場合、溶融池面積の増加を抑え、標準の溶融池面積になるように溶接電圧が制御されていることがわかる。この場合、**Fig.4.25** に示すように、溶融池面積を制御しても平均溶接電流の減少は、変わらず減少する。すなわち、この変動に対する制御の有効性は、溶接電流が適正範囲内であるといえる。以上の結果から、チップー母材間距離変動に対し、溶融池面積を適正化することで溶け込み深さを適正に制御することが可能であることがわかり、本溶接条件制御機能が有効であることが検証された。

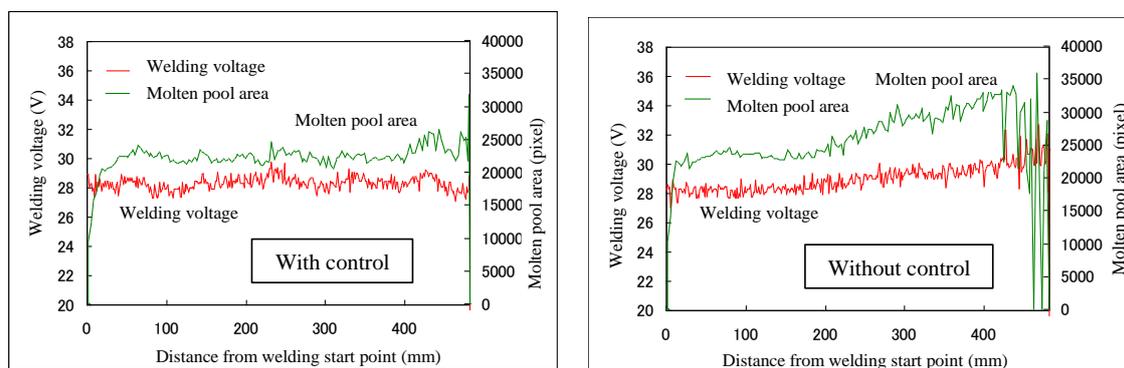


Fig.4.24 Test results of welding condition control for change of the distance from tip to base metal.

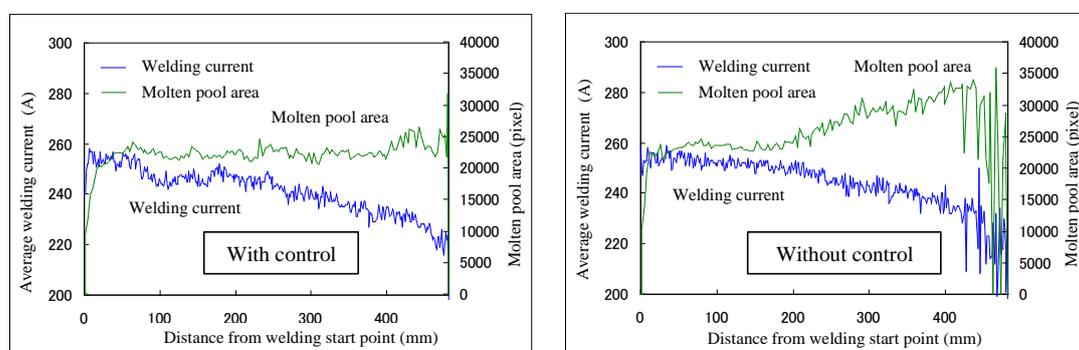


Fig.4.25 Effect of welding condition control on welding current for change the distance from tip to base metal.

4.5.3 品質確認機能検証試験結果

あらかじめ溶接欠陥としてアンダカット、オーバラップを設けた溶接ビード表面を複視差 CCD カメラにて計測を行なった結果を Fig.4.26、Fig.4.27 に示す。また、ビードの凹凸を設けた試験片の計測結果を Fig.4.28 に示す。それぞれ、ワイヤフレームおよびテクスチャマッピングの出力表示とそれらの結果を加工し、ビードの凹凸をわかりやすく表現した 2 次元表示として計測結果を示しており、アンダカットは、0.6mm、オーバラップは 2.4mm、ビードの凹凸は 1.6mm と計測された。アンダカット及びオーバラップあるいはビードの凹凸については、いずれもビード断面の凹凸量として計測し、次パスの溶接にて融合不良を生ずると設定された凹凸量の閾値と比較することにより品質確認が行なわれる。

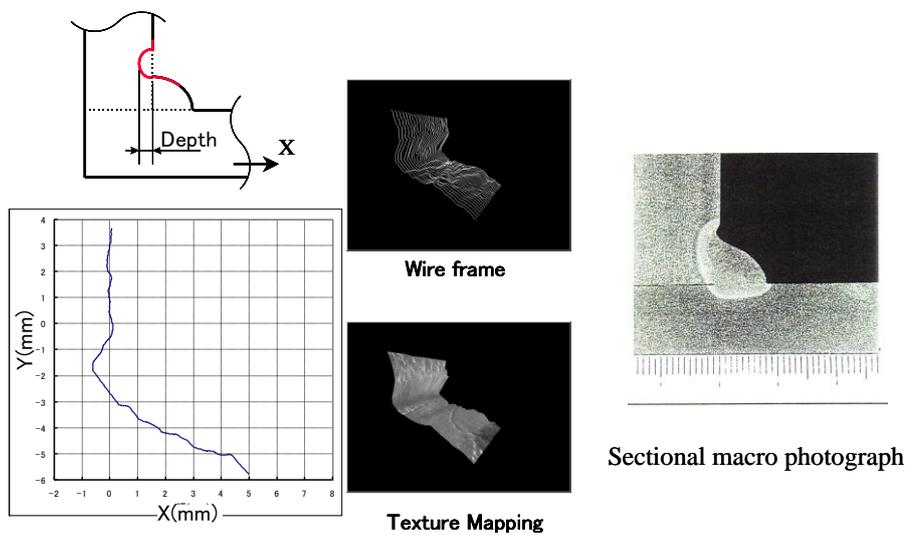


Fig.4.26 Result of measuring weld bead shape with undercut.

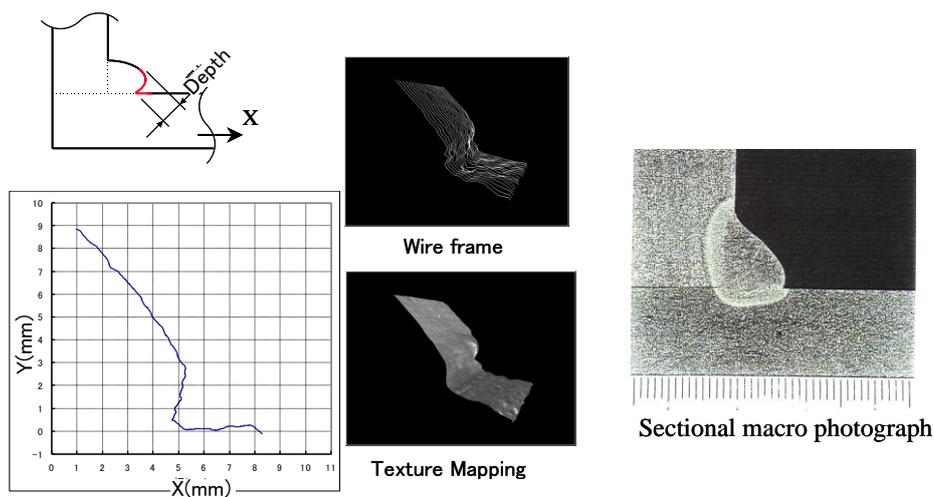


Fig.4.27 Result of measuring weld bead shape with overlap.

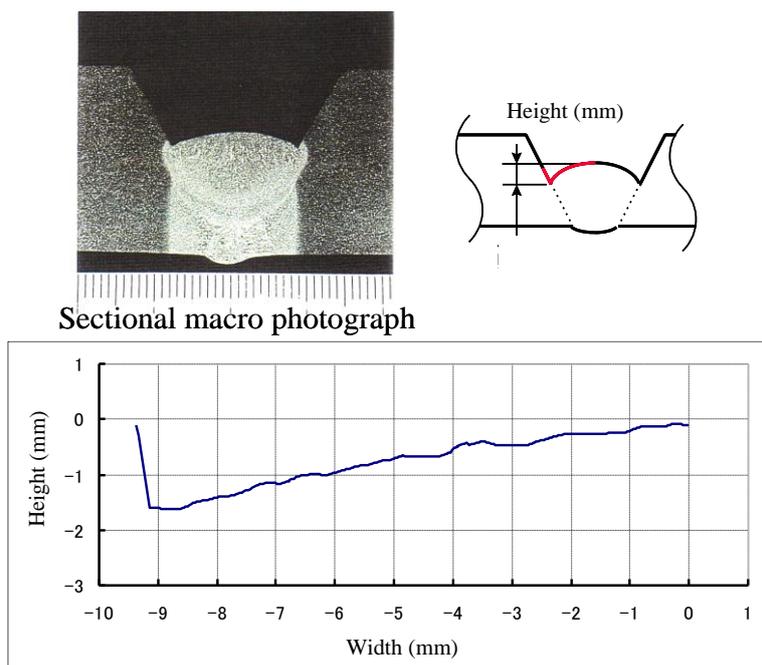


Fig.4.28 Result of measuring weld bead shape with concavity.



Fig.4.29 Display for stop of next pass welding.

これらの閾値は、次パスでの溶融を実験的に評価し、設定することができ、閾値を越え異常と判断されたものについては、次パス溶接継続不可の表示が出力される。Fig.4.29にモニタ上の出力表示を示す。

また、Fig.4.30は、ポロシティに対する計測結果を示したものである。ポロシティについては、画像処理速度を考慮して、溶接ビード表面の窪みの傾斜が実験的に求めた閾値(55°)をこえた場合を簡易的にポロシティと識別する手法を採用した。試験結果では、ポロシティの深さは2.5mm、幅2.1mm、傾斜70.7°と計測され、ポロシティと識別され、

閾値の 55° を超えていることから、次パス溶接不可のメッセージ表示とともに溶接を中断した。

以上のように、複視差 CCD カメラによるビード形状計測結果に基づき、異常があれば全自動溶接システムが、オペレータの監視なく溶接を自動的に中断することを検証した。

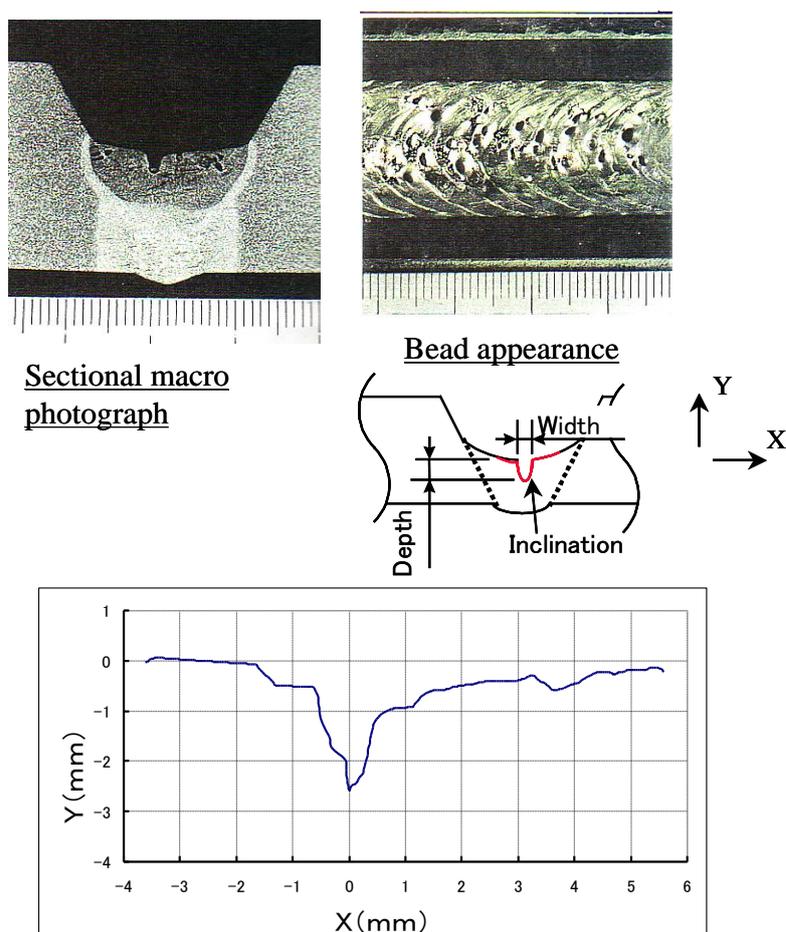


Fig.4.30 Result of measuring weld bead shape with porosity.

4.5.4 異常事象確認検証試験結果

Fig.4.31 にチップー母材間距離変動試験結果を示す。溶接開始後、チップー母材間距離の増加に伴い、溶接電圧が増加するが、溶接条件制御機能により、溶融池面積を標準値に保つように溶接電圧が一定に制御される。しかしながら、チップー母材間距離の増加に伴い、平均溶接電流は減少し、最終的に平均溶接電流の適正範囲の下限值である 230A になった時点で品質確認機能がはたらき、溶接が停止した。Fig.4.32 は、緊急停止を表示した

モニタ画面を示したものである。溶接が停止するまでのビード外観および断面マクロ調査結果では、いずれの位置においても溶接部には融合不良等の欠陥は認められておらず、システムが正常に機能したことが確認できた。

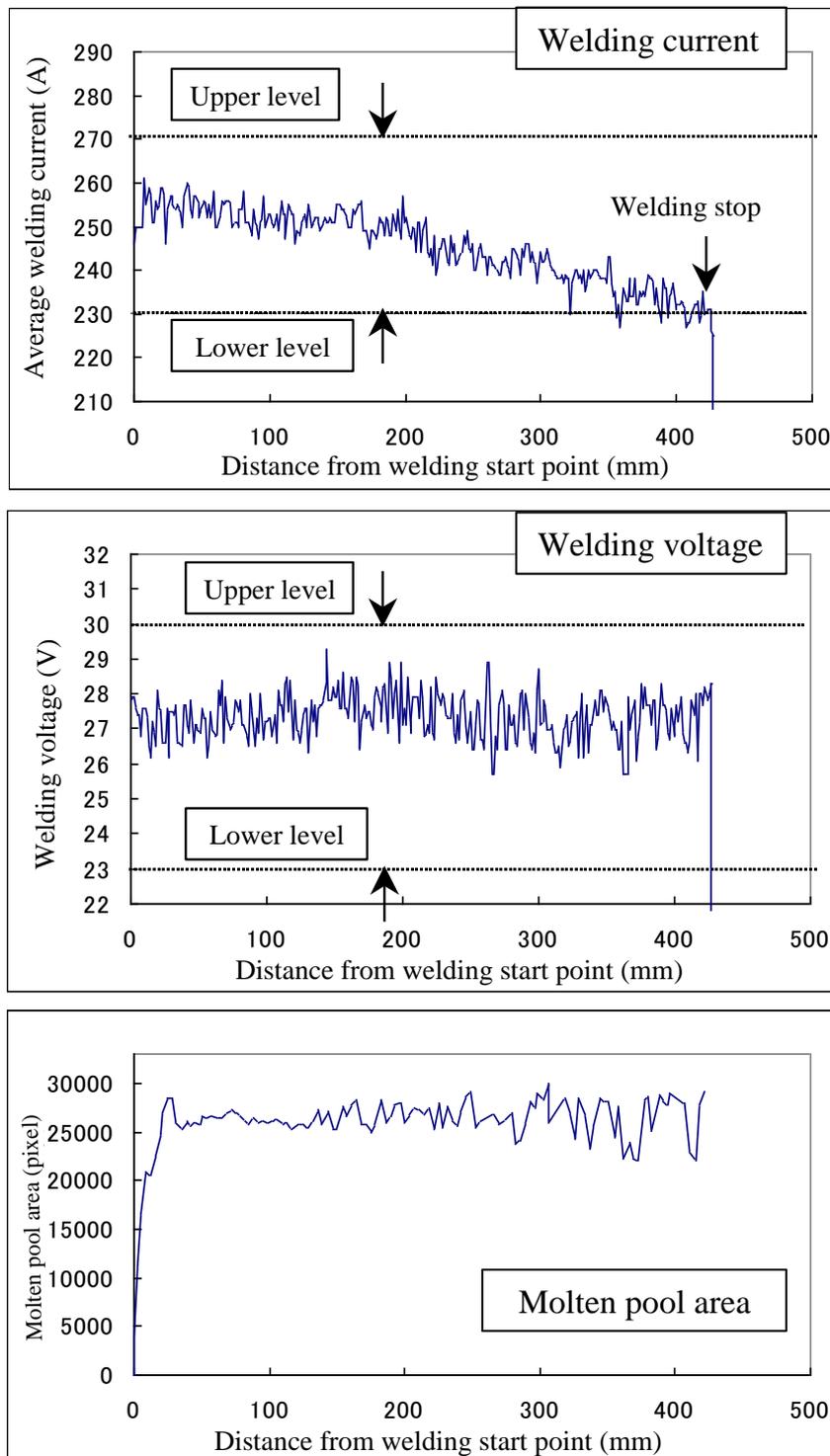


Fig.4.31 Test results of changing the distance between tip and base metal.

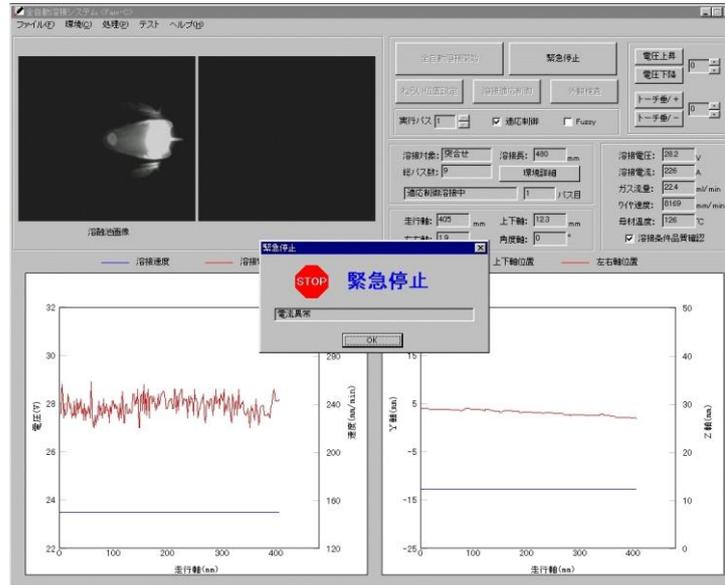


Fig.4.32 Display of welding stop.

Fig.4.33 は、開先寸法変動試験におけるビード幅および開先深さの変化を示したものである。溶接開始後、溶接角変形により開先幅が収縮し、逆にルートギャップは角変形により広がる。それに伴い溶接条件制御機能がはたらき溶融池面積を一定にするように溶接電圧を下げる方向に溶接条件制御が行われた。この場合、ルートパスの溶接が終了するまで品質確認機能による溶接の中断は行われなかった。ただし、次パスの溶接条件を補正するために複視差 CCDカメラにより計測したビード幅に基づいて算出された溶接速度が、適正条件の閾値を超えたため、Fig.4.34 に示すように、品質確認機能がはたらき異常判断により次パス溶接不可となり溶接が中断された。中断するまでの溶接部のビード外観および

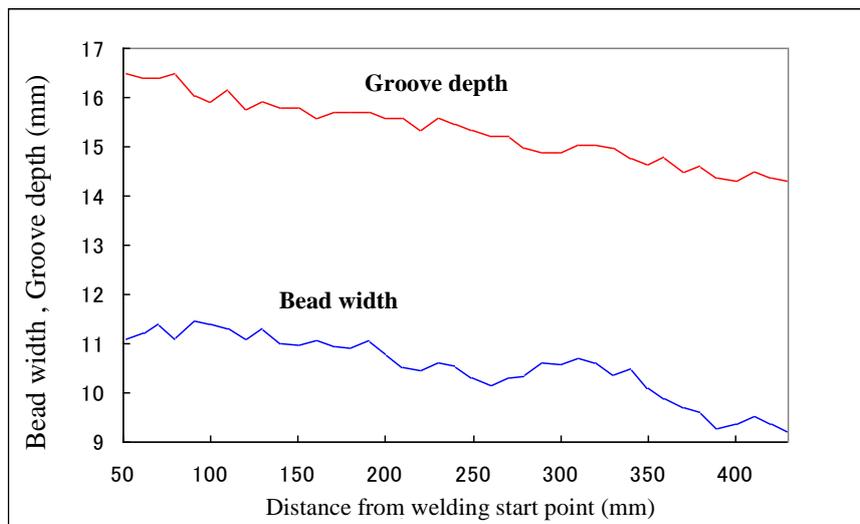


Fig.4.33 Test results for change of groove dimension.

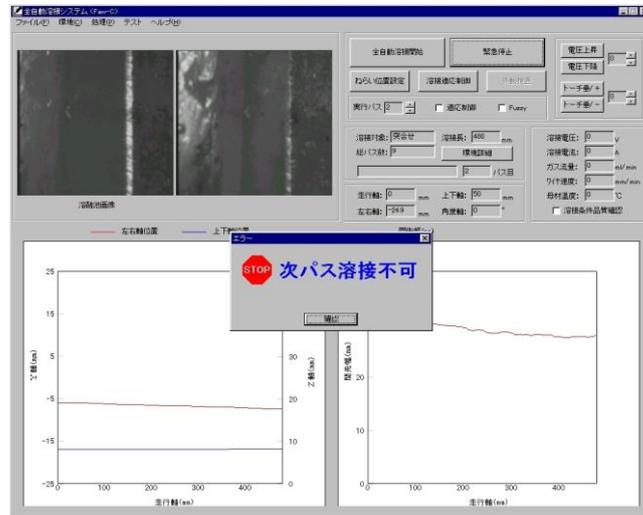


Fig.4.34 Display of stop for next pass welding by welding condition setting function.

断面マクロ調査結果により、溶接部には融合不良等の欠陥は認められず、健全な継手が得られていた。このように、溶接が停止するまで健全な品質を維持する能力があり、異常事象に対して正常にシステムが作動したことが検証できた。

次にオペレータの監視がない状態で環境的外乱がシステムに加わった場合の信頼性の検証を行なった。環境的外乱としては、電氣的ノイズ、温湿度、電圧降下、風などがあげられる。ここでは、風の影響についての試験結果を示す。試験は、気流発生装置を用いて風速 1.5 m/s 及び 2.0m/s の風を溶接中に溶接進行方向並びに直角方向に負荷するものである。試験結果を Table4.3 に示す。風速 1.5m/s を負荷した場合には、システムは正常に作動し全層溶接を完了し、健全な溶接継手が得られた。一方、風速 2.0m/s を負荷した場

Table 4.3 Air flow test results for confirmation of wind influence.

Direction of air flow	Flow rate	Results of welding	Confirmation test results after welding				Evaluation of system performance
			Bead appearance	PT	RT	Bead macro section test	
Welding direction	1.5 m/s	Whole passes completed.	Good	Acceptable	Acceptable	Good	Effective
	2.0 m/s	Automatically stopped by quality check function after the 6th. pass finished.	N.G.	Not acceptable	Not acceptable	N.G.	Effective
Right angle direction	1.5 m/s	Whole passes completed.	Good	Acceptable	Acceptable	Good	Effective
	2.0 m/s	Automatically stopped by quality check function after the 4th. pass	N.G.	Not acceptable	Not acceptable	N.G.	Effective

合は、両負荷方向共に溶接ビード表面にポロシティが生じた為、軸方向では5層目、直角方向では4層目終了後に溶接ビード形状計測による品質確認機能により、次パス溶接継続不可と判断して溶接が自動停止した。Fig4.35 にモニタ画面を示す。また、生じたポロシティの外観、断面マクロ写真、複視差CCDカメラにて計測したビード形状の2次元出力結果を Fig.4.36 に示す。

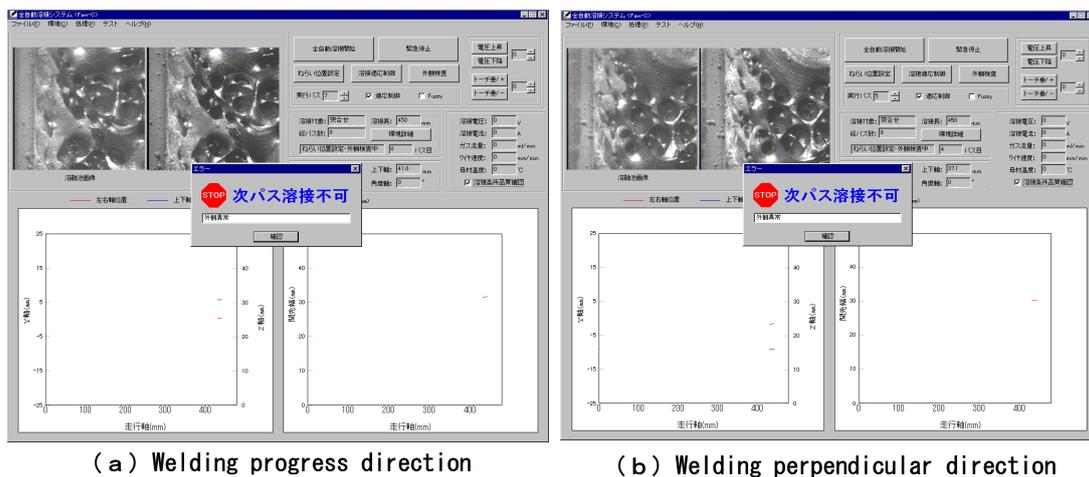


Fig.4.35 Display of stop for next pass welding in air flow test.

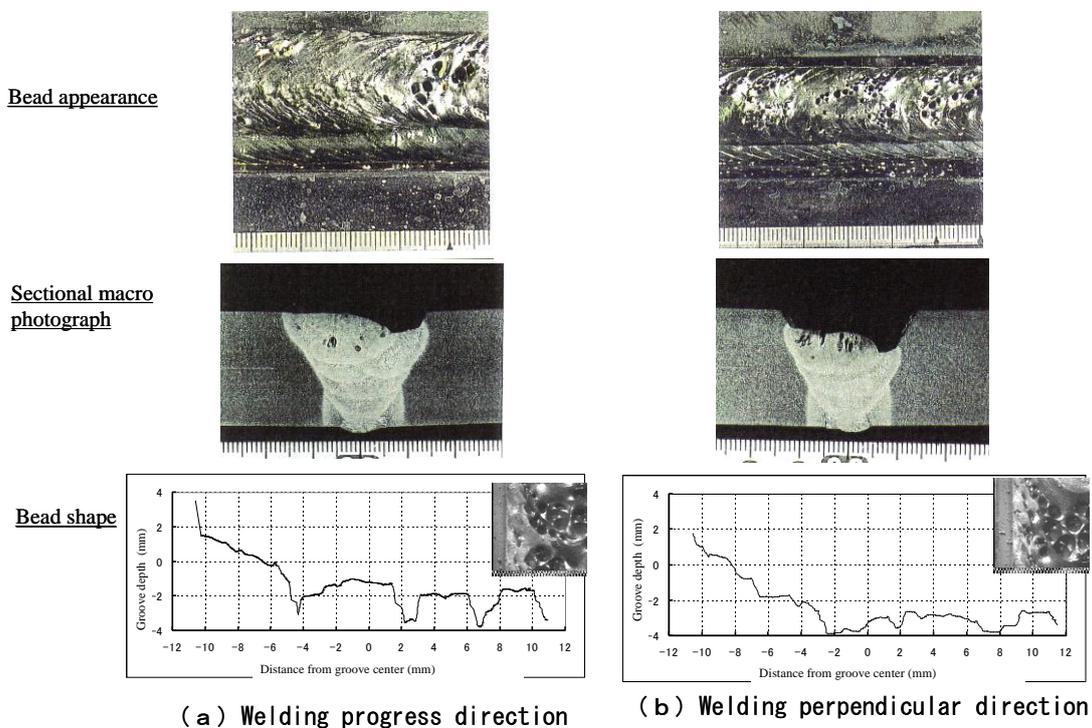
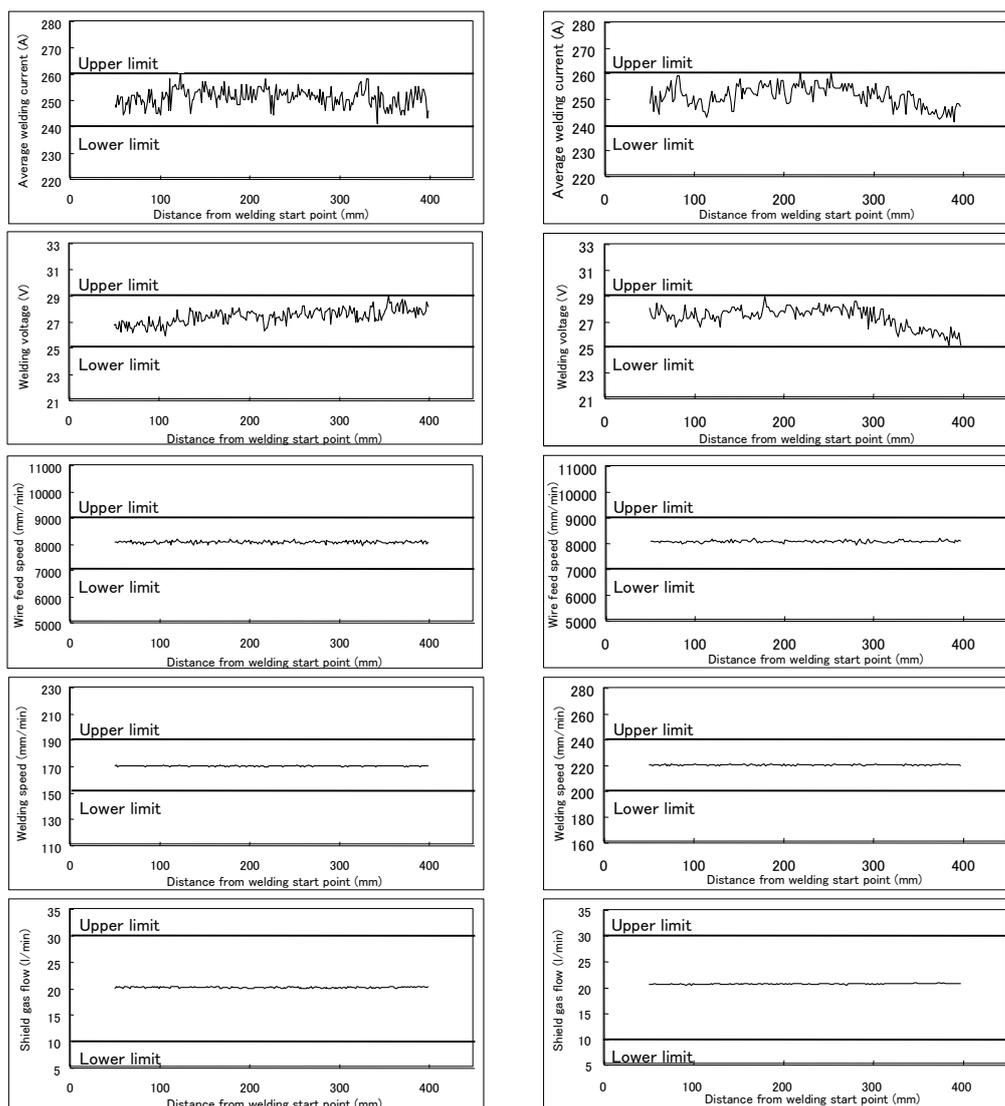


Fig.4.36 Porosity occurred by air flow test.

今回の溶接ビード表面のポロシティの発生は、**Fig.4.37**に示すように溶接条件関連センサでは異常としては検知できなかった。このことは、従来の自動機のように溶接条件の変化だけをモニタしても効果がないことを示しており、視覚センサの有効性が実証された。

以上のように環境的外乱として風の影響について試験を行なった結果、全自動溶接システムの機能が正常に作動することで溶接品質に関わる異常を自動的に検知する能力を有することが確認でき、作業者の監視を不要とすることが可能であることを明らかにした。



(a) Welding progress direction (b) Welding perpendicular direction

Fig.4.37 Welding condition record.

4.6 結言

本章では、視覚センサを搭載した実用レベルの GMAW 全自動溶接システムの製作を行い、その機能検証を行うことで全自動溶接システムの有効性について評価した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 全自動溶接システムのコンセプトは、熟練溶接士が行っている視覚判断である溶接前の開先状況の確認、溶接中の溶融池状況の観察、溶接後のビード外観確認を視覚センサにおきかえ、視覚情報に基づく画像処理センシング技術にて溶接状況の適応制御と品質確認を行う機能を有するものであり、オペレータには、熟練度が不要であり、基本的に無監視で溶接作業が行われる。
- (2) GMAW 全自動溶接システムの視覚センサとしては、溶融池から情報抽出を行う IR-CCD カメラとビード表面形状を計測する複視差 CCD カメラの2種類を用いた。
- (3) 全自動溶接システムの構成は、パルスMAG溶接電源、溶接ヘッドとそれに取り付けた前記の2つの視覚センサ及びそれらを統括する制御装置、さらに溶接中の溶接条件の監視とその記録を行うモニタ装置から構成され、マンマシンインターフェイスは、グラフィカルインターフェイスを採用し、オペレータはマウス操作ですべての操作が行える。
- (4) IR-CCD カメラでは、溶融池形状をセンシングし、画像処理により、溶融池の傾き、溶融池面積を計測する。また、複視差 CCD カメラでは、開先形状および溶接ビード形状（ビード凹凸、アンダカット、オーバラップ、ポロシティ、割れ）を抽出できる。
- (5) 全自動溶接システムにおける溶接制御機能は、複視差 CCD カメラの情報をもとに行う各パス溶接開始時のトーチねらい位置設定および溶接設定条件と IR-CCD カメラの情報をもとに行うパス溶接中のトーチねらい位置制御および溶接条件制御であり、データベースにて設定された標準条件になるように条件制御するシステムである。
- (6) 品質確認機能は、複視差 CCD カメラの情報をもとに行う開先形状確認、溶接ビード形状確認と電気信号によりモニタする溶接条件確認であり、標準条件範囲を逸脱すると溶接を中止し、異常の警告を出すしくみとした。
- (7) トーチねらい位置制御方法は、溶融池の傾きとその時間的変化量を入力して標準条件の溶融池の傾きの値になるようにトーチ軸をファジィ制御するもので、すみ肉溶接および突合せ溶接において確認試験を行い、トーチねらい位置ずれが適正に制御されることにより、制御機能を検証した。
- (8) 溶接条件制御手法は、溶融池面積とその時間的変化量を入力として標準条件の溶融池面積になるように溶接電圧を制御するもので、あらかじめ標準条件を逸脱し、途中で制御機能を作動させることにより、ルートパス、ウィービングパスの溶接条件変動やルートギャップ変動ならびにチップー母材間距離変動に対し、溶接条件制御が有効に機能することが検証された。
- (9) あらかじめ試験片に溶接欠陥としてアンダカット、オーバラップ、ビードの凹凸を

設けておき、複視差CCDカメラによる品質確認機能の確認を行った結果、閾値をこえ、異常と判断されたものについては次パス溶接継続不可の表示とともに溶接が中止することで品質確認が有効に機能することを検証した。

- (10) システムの総合検証として、異常事象を想定して、チップー母材間距離変動および開先幅変動試験を行った結果、溶接条件制御機能と品質確認機能が有効に作動し、適正条件を逸脱したところで溶接が中止した。
- (11) 環境的外乱として風の影響について試験を行った結果、溶接表面にポロシティを生じたところでビード形状計測による品質確認機能が作動し、溶接が自動停止することでシステムの信頼性が兼用された。
- (12) GMAW全自動溶接システムを製作し、システムの機能検証試験をおこなうことで熟練溶接士が不要で、無監視で自動溶接が可能である高機能自動溶接システムが実現可能であることを示した。

第5章 固定配管高能率狭開先自動G T A Wシステム

5.1 緒言

第1章で述べたように、配管溶接は、プラント機器において多数用いられ、その溶接部には高い品質が要求される。とりわけ、発電プラント配管においては、電気事業法に基づき、技量資格が要求され、極めて高い技量が必要である。一方、近年の熟練溶接士不足を背景として、技能確保が困難であることから、自動溶接装置の開発が行われ、適用がすすめられてきた^{5.3)}。しかしながら、固定管の溶接は全姿勢溶接であり、単純に熟練溶接士の技能を自動溶接に置き換えることは、難しいため、視覚センサを代表としたセンサを活用することが検討されているが^{5.4), 5.5)}、実用化した報告例は少ないのが現状である。

さらに、発電プラントの高圧給水管などでは、肉厚が40~120mmと大きいことから、品質のみならずコスト削減から高能率化も要求されてきている。そこで、材料が、炭素鋼をはじめとしてCrMo鋼、9Cr鋼と多岐にわたることから、品質面で問題のあるMAG溶接が適用できないため、狭開先TIG溶接の適用がすすめられてきた。しかしながら、能率面では必ずしも十分でないため、さらに高溶着化をはかるには、ホットワイヤを利用した狭開先TIG溶接の適用が有効であると考えられる。ところが、狭開先ホットワイヤTIG溶接を固定配管の全姿勢溶接に適用する場合、高電流、高溶着量であるがゆえに通常のTIG溶接に比べ溶接欠陥の発生要因も多く、さらに欠陥発生時の補修溶接に多大な時間を要することになるため、多岐にわたる溶接パラメータの精密な制御が必要となる。

そこで、高能率・高品質溶接の実現をめざし、溶接制御の高度化を可能とする視覚センサを用いた自動溶接システムの開発を行った。

本章では、視覚センサを用いた自動溶接システムの製作を行い、高電流・高溶着溶接であるホットワイヤ狭開先TIG溶接に要求される視覚センサの機能を明確にするとともに、実際の高圧給水管の溶接に適用し、システムが実用的にも有効に機能した結果について述べる。

5.2 自動溶接システムの構成

本自動溶接システムの構成をFig.5.1に示す。本システムは、配管各位置での溶接パラメータをプログラム制御できるTACSシステム^{5.6)}を基本機能とした制御装置およびTIG溶接電源、ホットワイヤ電源に加え、溶接制御を行うセンサとしてレーザスリット光センサ^{5.7)}と視覚センサ(IR-CCDカメラ)を搭載した溶接ヘッドから構成される。尚、IR-CCDカメラは、第2章で示したものを適用した。

これらのセンサによって得られた画像は、センサ制御装置により情報抽出され、溶接条件やトーチ狙い位置の設定値と補正值が算出される。そして、これらの値を溶接制御装置にフィードバックすることにより、溶接台車の動作制御、溶接電源及びホットワイヤ電源の出力制御が行われる。

システムの基本機能は、開先計測と溶接制御に分けられる。溶接開始前に、レーザスリ

ット光センサによる開先計測を行い、溶接中は、IR-CCD カメラによる溶接制御を行われ、それらを交互に動作させることにより、オペレータの監視無しで連続して溶接を行うことを可能とする。

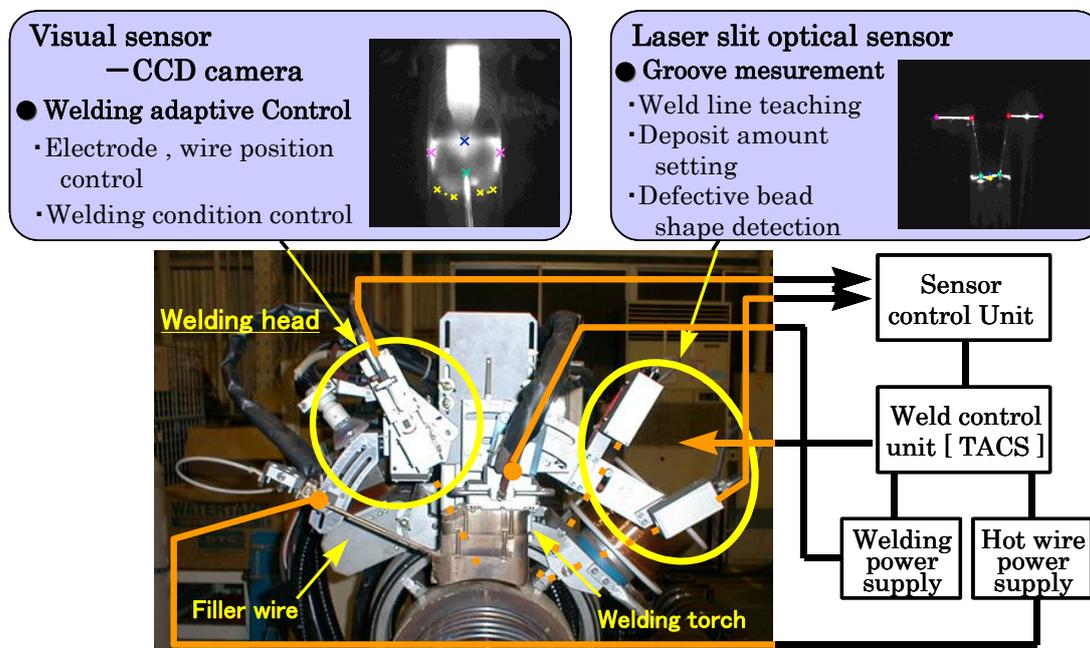


Fig.5.1 Configuration of orbital automatic narrow gap pipe GTAW system with visual sensors.

5.3 レーザスリット光センサによる開先形状計測システム

5.3.1 計測項目

溶接前にレールを走行して1回転し、レーザスリット光センサにより開先断面形状の計測を行う。計測位置は、周上0.1°ピッチで設定可能である。レーザスリット光センサは、開先形状およびビード形状として、**Fig.5.2**に示すように開先表面4点とビード表面20点の座標値を計測する。**Fig.5.3**は、これらの座標値から算定する開先形状およびビード形状の計測項目を示したものである。基本的な計測項目は、開先形状では、開先幅、開先

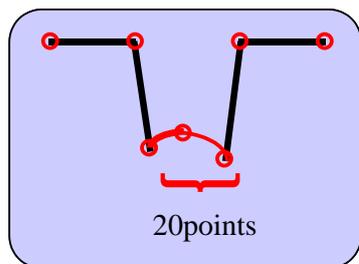


Fig.5.2 Detection points of groove shape.

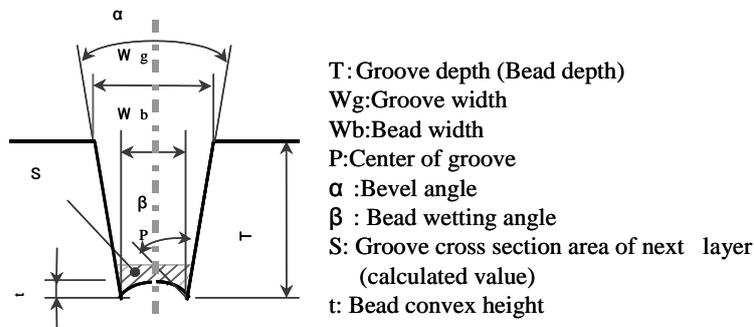


Fig.5.3 Measuring items of groove and bead shape.

角度、ビード形状では、ビード幅、ビード深さ、ビード濡れ角、ビード凹凸高さであり、これらの情報から開先断面積が計算される。そして計測結果は、Fig.5.4 に示すようにC R T上に表示、保存される。

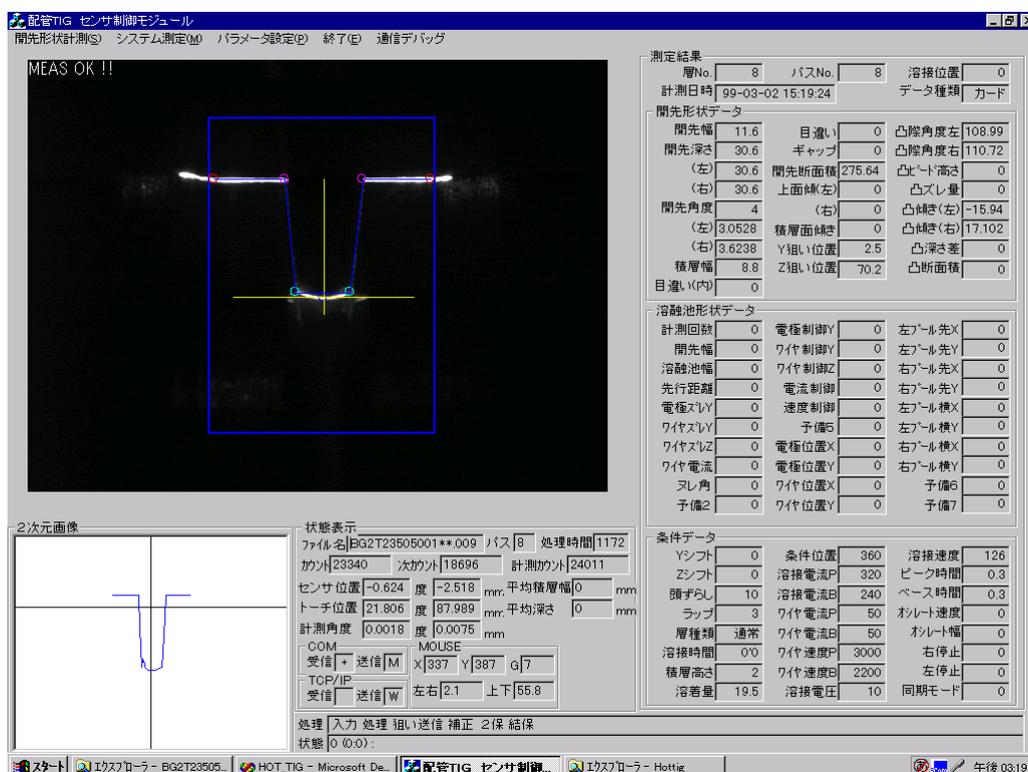


Fig.5.4 Display of measuring results.

5.3.2 システムの機能

開先計測システムとしては、計測結果をもとに下記の次パス溶接のための設定、判定機能を有している。

(1) 溶接線教示

開先両端位置を検出することにより各溶接位置でのトーチ狙い位置(開先センター位置)を記憶し、再生する。これは、各パス終了時の計測結果をもとに次パスの溶接線が自動的に教示される。

(2) 溶着量設定

拘束条件の変化により開先幅の周上での変動あるいは、各層での変動が生じる場合がある。狭開先溶接では、各パスの積層高さが重要であり、大きくなると融合不良の主たる可能性が高いことから、周上に積層高さ 2.0mm一定に保つように条件設定されている。そこで、各パス時には、ビード幅計測結果から、あらかじめ設定されていたデータベース上の適正溶接条件(溶接電流・電圧、ワイヤ送給速度・ホットワイヤ電流、等)をベースに一定積層高さ (2.0mm) を保つように溶接速度を算出し、次層の溶着量を設定している。この場合、周上の各位置で適正な溶接速度に条件補正される。

(3) 開先形状およびビード形状不良検知

溶接開始時の開先計測において、開先合わせ精度（ルート間隔、目違い）が、溶接条件によりあらかじめ設定された適正範囲を逸脱していた場合、溶接は開始せず、アラーム表示が出されることにより、オペレータが開先合わせを再度やりなおすことになる。

Fig.5.5 は、ルート間隔（ギャップ）不良の計測方法を示したものであり、マスク領域中の高輝度ラインの不連続長さを計測することでルートギャップを算定している。閾値としては、ここでは、0.5mm以下としており、それを超えた場合はアラーム表示される。

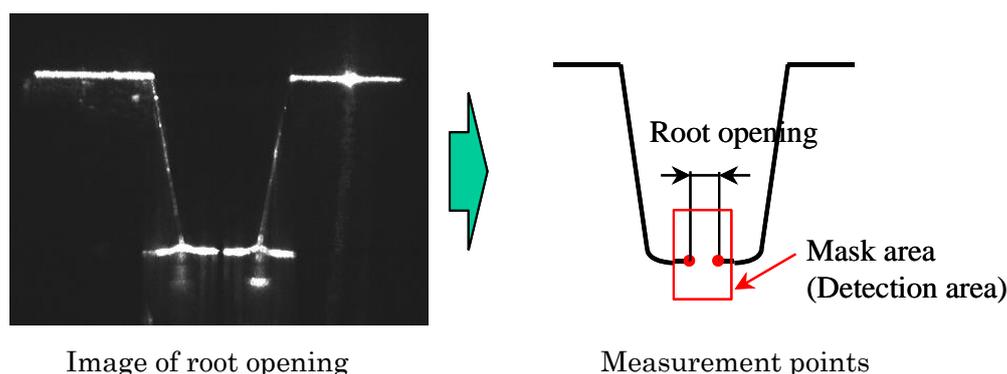


Fig.5.5 Measurement of root opening.

また、**Fig.5.6** は、目違いの計測方法を示したものであり、左右に設けたマスク領域での近似直線間の距離差を目違い量として算定している。目違い量の適正範囲は、0.5mm以下として、それを超えた場合は、アラーム表示される。

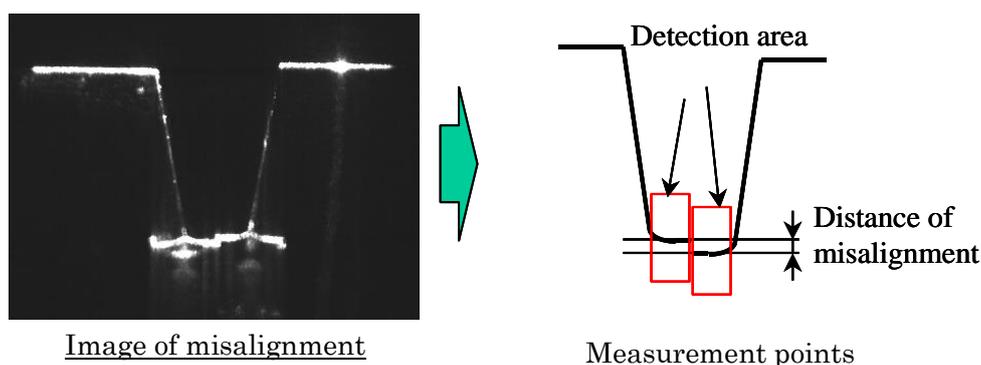


Fig.5.6 Measurement of misalignment.

さらに、2層目以降を対象として、溶接ビードと開先側壁との濡れ角度ならびに凸ビード高さを検出することにより、次パス溶接時の開先際の溶融可否を判定し溶接の続行、中断の判断が行われる。**Fig.5.7** は、ビード形状の計測項目を示したものである。凸ビード高さは、ビード上の最高ポイントと最低ポイントを検出することにより算出され、適正範囲は、1.0mm以下である。また、ビード濡れ角は、ビード止端部近傍の近似直線と開先

面間の角度と定義し、 90° 以下の場合に不良と判断し、次層溶接不可のアラームを出力する。

Fig.5.8 は、異常時のCRT画面の表示例を示したもので、どのパスのどの位置で開先合わせ不良やビード形状不良が生じているかが表示ならびに記録される。

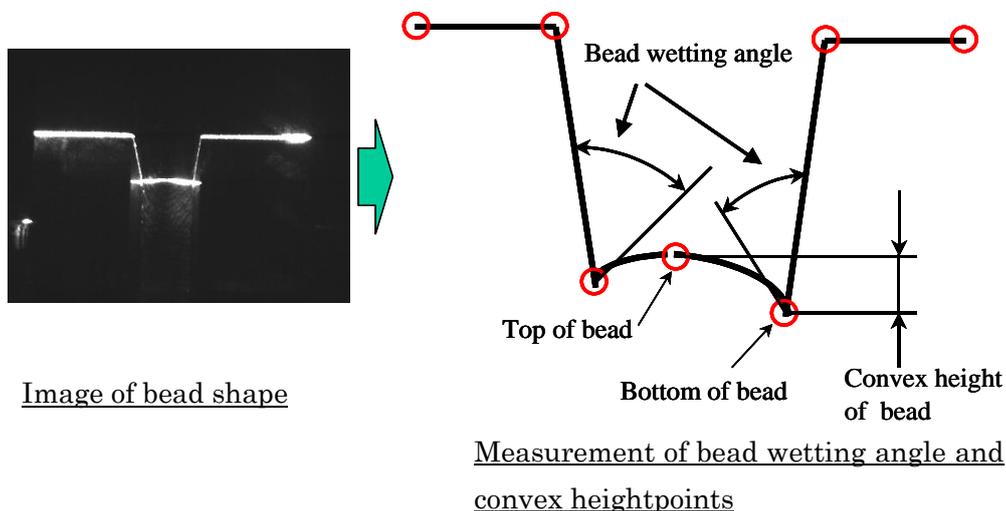


Fig.5.7 Measurement of bead shape.

測定結果

層No	8	パスNo	8	溶接位置	0
計測日時	99-03-02 15:19:24			データ種類	カード

開先形状データ

開先幅	11.6	目違い	0	凸陰角度左	108.99
開先深さ	30.6	キャップ	0	凸陰角度右	110.72
(左)	30.6	開先断面積	275.64	凸ビード高さ	0
(右)	30.6	上面傾(左)	0	凸ズレ量	0
開先角度	4	(右)	0	凸傾き(左)	-15.94
(左)	3.0528	積層面傾き	0	凸傾き(右)	17.102
(右)	3.6238	Y狙い位置	2.5	凸深さ差	0
積層幅	8.8	Z狙い位置	70.2	凸断面積	0
目違い(内)	0				

溶融池形状データ

計測回数	0	電極制御Y	0	左フール先X	0
開先幅	0	ワイヤ制御Y	0	左フール先Y	0
溶融池幅	0	ワイヤ制御Z	0	右フール先X	0
先行距離	0	電流制御	0	右フール先Y	0
電極スレY	0	速度制御	0	左フール横X	0
ワイヤスレY	0	予備5	0	左フール横Y	0
ワイヤスレZ	0	電極位置X	0	右フール横X	0
ワイヤ電流	0	電極位置Y	0	右フール横Y	0
スレ角	0	ワイヤ位置X	0	予備6	0
予備2	0	ワイヤ位置Y	0	予備7	0

条件データ

Yシフト	0	条件位置	360	溶接速度	126
Zシフト	0	溶接電流P	320	ピーク時間	0.3
頭ずらし	10	溶接電流B	240	ベース時間	0.3
ラップ	3	ワイヤ電流P	50	オフレート速度	0
層種類	通常	ワイヤ電流B	50	オフレート幅	0
溶接時間	0'0	ワイヤ速度P	3000	右停止	0
積層高さ	2	ワイヤ速度B	2200	左停止	0
溶着量	19.5	溶接電圧	10	同期モード	0

状態表示

ファイル名|BG2T23505001**010 パス|8 処理時間|1172
 カット|3452 次カット|18696 計測カット|24011
 センサ位置|-19.20 度|-77.49 mm; 平均積層幅|88 mm
 トーチ位置|3.2252 度|13.013 mm; 平均深さ|317 mm
 計測角度|0.0018 度|0.0075 mm
 COM: MOUSE
 受信|K 送信|J X|514 Y|384 G|6
 TCP/IP: 受信|送信|W 左右|26.2 上下|55.1

処理 | 溶接開始データ転送
 状態 | (0:0):

Fig.5.8 Display for check results of groove and bead shape.

5.4 IR-CCDカメラによる溶融池センシングシステム

5.4.1 画像抽出方法

視覚センサを用いて溶融池形状を計測する場合、画像処理を行える鮮明な画像の抽出方法が課題となる。通常、TIG溶接において、溶融池周辺の映像から制御対象を抽出するには、輝度の高いアーク光の影響を受けるために、パルス電流のピーク・ベース時それぞれの画像から分けて抽出され、アーク光領域内にある電極先端は、アークの輝度が弱いベース時に、アークから離れている開先肩(又は側壁)、溶融池輪郭、ワイヤ先端はアークの輝度が強いピーク時に抽出するのが一般的である⁵⁾⁸⁾。しかしながら、高電流を用いた高能率溶接の場合、パルス電流は、ピーク・ベース共に高い値が必要となり、アークの輝度に大きな差を設ける事が困難である。したがって、従来のフィルタリング手法による溶融池画像では画像処理を行ってもアーク光領域内あるいはアーク周辺いずれかの情報が得られないことになる。そのため、アーク光強度にかかわらず、必要とする全ての制御対象の抽出が可能な溶融池画像の獲得が必要となる。

今回これらを解決するために、画像抽出法としてフィルタリング手法に着目して、透過率分布変化フィルタを用いた多重フィルタリング方式を採用した。この方式は、IR-CCDカメラの前面に、透過率分布変化 ND フィルタと狭帯域フィルタを設けた構造であり、Fig.5.9 にその光学系の構成を示す。

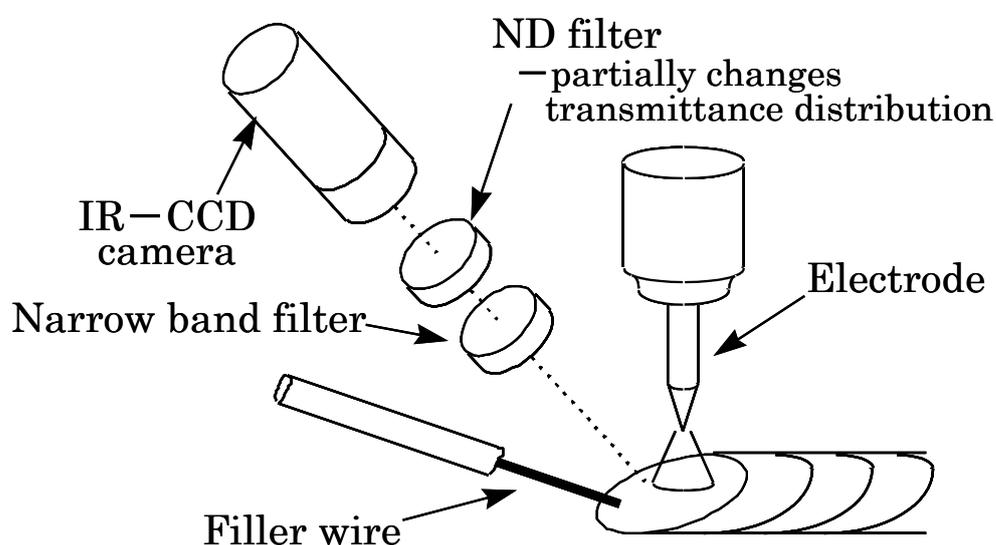


Fig.5.9 Structure of optical system.

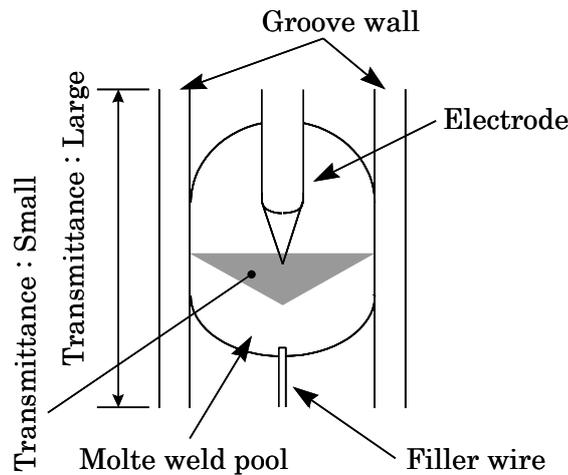


Fig.5.10 ND filter with transmittance distribution changed partially.

一般的に、NDフィルタはアーク光の減衰をはかることを目的としているが、画角全体を減光すると、アークの反射光を利用する開先やワイヤまで暗くなり画像抽出が困難となる。そこで、**Fig.5.10** に示すように、NDフィルタの透過率分布を部分的に変え、アーク光領域の透過率を5%、その他の領域の透過率を約100%にすることによって、アーク周辺輝度が低下することなくアーク光領域の輝度を下げることが可能となり、電極先端、ワイヤ先端、開先、熔融池輪郭が同一画像から抽出可能となる。

また、狭帯域フィルタは、アーク光及びアーク反射光に対する熔融池の相対輝度を上昇させて熔融池輪郭を明瞭にするために、一般的に、アーク光輝度が弱かつ熔融池輻射強度の強い波長域を選定するのが望ましい。

TIG溶接のアーク光のスペクトル特性 (A_r) は、700~900nmにおいて高強度の波長域が存在することが知られている⁵⁹⁾。また、約1500°Cの熔融池輻射光のスペクトルはプランクの法則により、ピークが約 $1.6\mu\text{m}$ で赤外域にある⁶⁰⁾。そこで、**Fig.5.11** に示すように、近赤外領域が撮影可能なIR-CCDカメラを使用し、1064nmを主透過波長とする狭帯域バンドパスフィルタを使用することにより、明瞭な熔融池輪郭画像の獲得を可能とした。

これら2種類のフィルタを組み合わせることにより、アーク周辺輝度を落とさずにアーク光領域の輝度が低減される。**Fig.5.12** は、フィルタの違いによる熔融池画像の比較を示したものである。一般的にTIG溶接の熔融池の画像抽出に使用される633nmの狭帯域バンドパスフィルタでは、アーク光の影響で、高電流域では、熔融池が明瞭に観察することはできていない。また、1064nmの狭帯域バンドパスフィルタでは、若干熔融池の輪郭が観察できる改善されているが、特徴量の抽出は困難である。一方、2種類のフィルタを用いた多重フィルタリング法の場合、高電流域においても、アーク光輝度の影響を受けずに電極形状、熔融池形状、開先端部などが同一映像にて明瞭に観察できることがわかる。

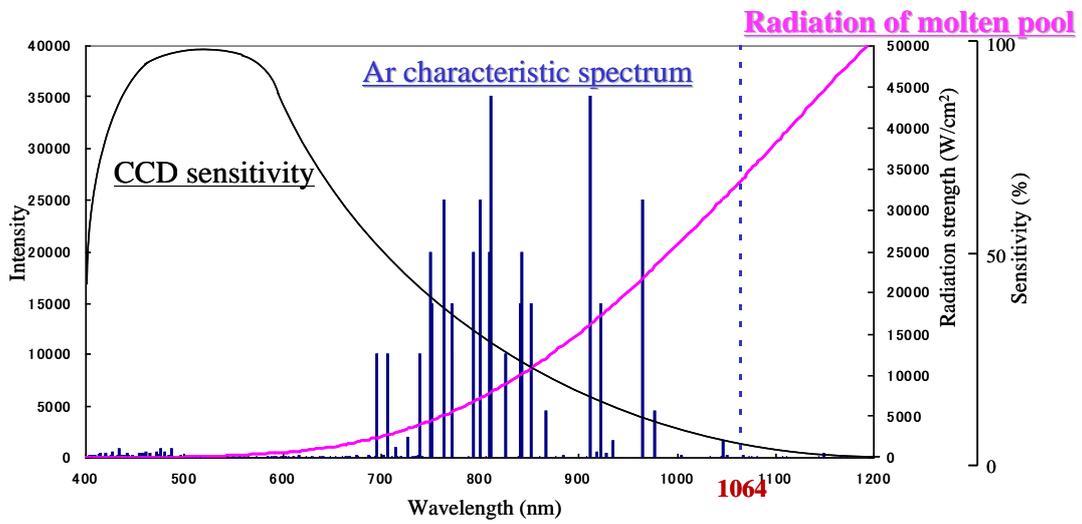


Fig.5.11 Selection of band pass filter.

		Conventional filter (633nm narrow band filter)	1064nm band pass filter	Multiple filtering system (1064nm band pass + special ND)
Monitoring image molten pool	Peak current at 340 A			
	Base current at 240 A			

Fig.5.12 Comparison of molten pool image by each filter.

5.4.2 画像処理による特徴量の抽出

多重フルタリング法を用いて得られた画像は、Fig.5.13 に示すように画像処理され下記の方法にて特徴量の抽出が行われる。

(1)電極先端形状の抽出方法

電極先端位置は、溶融池画像の横方向への微分処理から電極左右端を複数検出し、左右それぞれの輪郭近似直線を求め、その交点を電極先端と定める。この輪郭近似直線は直線回帰する検出点を変えて複数の直線を作成することにより交点検出回数を増加しているのので、誤検出による先端位置ズレの発生を少なくなる。

(2)開先位置の抽出方法

開先位置は溶融池画像の指定領域内を横方向に微分処理することで開先側壁の下端（ビード両端）を検出し、近似直線を求める。微分処理は指定領域内の輝度値を縦方向に加算してから行うことによって、輝度変化量を増幅し検出精度向上をはかっている。

(3)ワイヤ先端位置の抽出方法

ワイヤ先端位置はまず溶融池画像の横方向への微分処理からワイヤ左右の輪郭近似直線を求め、ワイヤの中心線を作成する。この中心線を微分処理することにより輝度変化量が指定値を越える位置をワイヤ先端位置と定める。

(4)溶融池形状の抽出方法

溶融池は溶融池画像を縦方向、左上から右下方向、右上から左下方向の3方向で微分処理を行い、これらの結果を加算し、指定領域内で輝度変化量が指定値を越える位置を溶融池輪郭と定める。3方向からの微分処理により曲線の輪郭を明瞭化する。

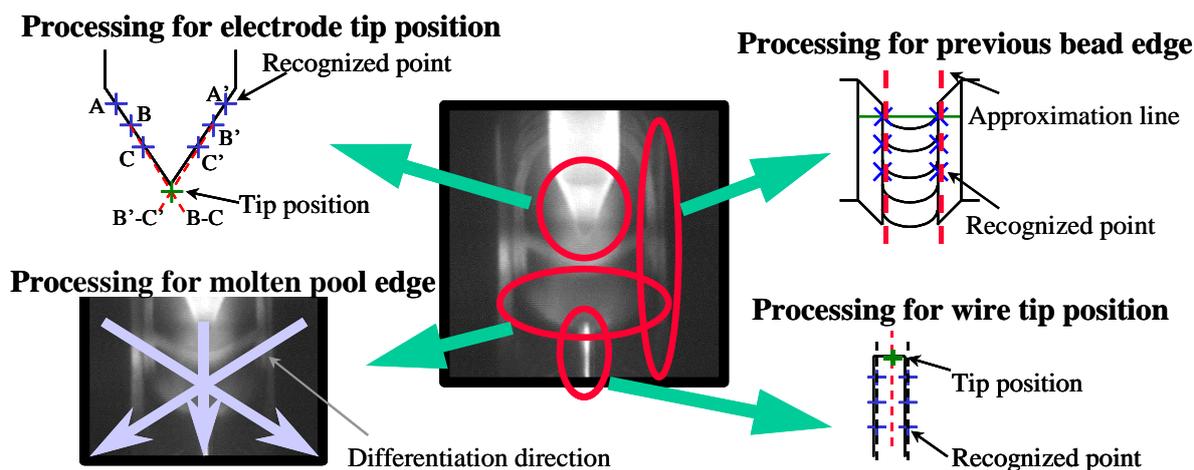


Fig.5.13 Image processing method.

5.4.3 計測項目と溶接制御への適用

前記の画像処理により求めた溶融池周辺形状の特徴量から Fig.5.14 に示す計測項目を算出し、溶接中に下記の溶接条件制御が行われる。

(1) 電極・ワイヤ狙い位置制御

左右の開先側壁と電極先端との距離 WeR と WeL を算出し、それらが等しくなるように開先中心へ電極狙い位置が補正される。また、同様に、ワイヤ挿入位置は、開先側壁とワイヤ先端との距離 WwR と WwL を算出し、ワイヤ挿入位置が開先中心になるように制御される。さらに、ワイヤ挿入位置 (Lw) の計測により前後方向の挿入位置が制御される。

(2) 溶接条件制御

溶融池形状としては、基本的に溶融池ぬれ角 (θ)、溶融池先行距離 (Lp)、溶融池前縁の傾き (β) の計測を行い、適正条件との比較により溶接条件の補正あるいは溶接中止の判断を行う。また、次項で述べるが溶接欠陥を特徴づける溶融池中央部の凹み量 (h) やワイヤ挿入位置近傍の溶融池先端凹み量 (Lc) も計測される。

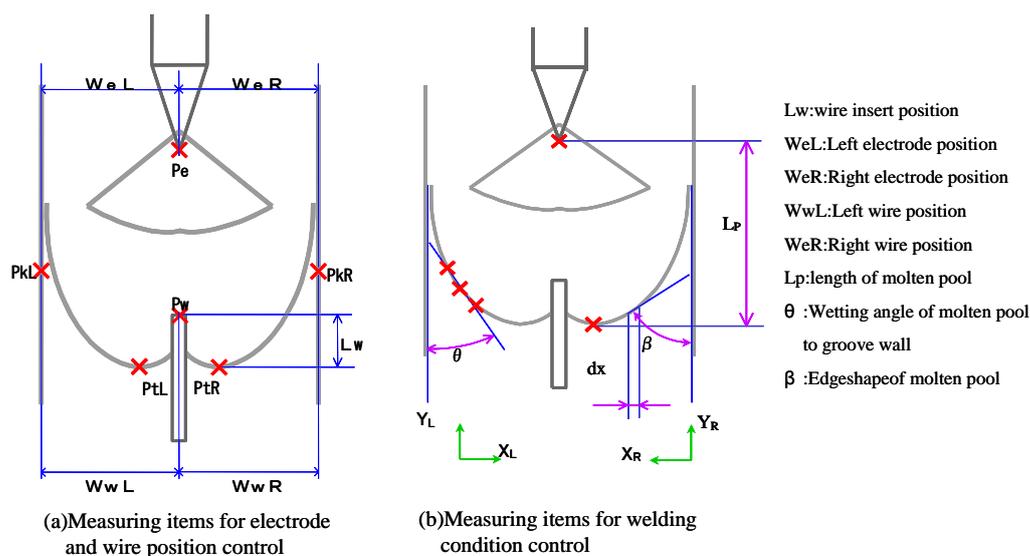


Fig.5.14 Measuring items for welding condition control.

5.5 溶接条件の適応制御

5.5.1 溶接欠陥と溶融池形状の相関

ホットワイヤを用いた狭開先TIG溶接においては、高電流、高溶着であるがゆえに通常のTIG溶接と異なった特有の溶接欠陥の発生が認められる。そこで、溶接中に外乱により欠陥が発生する場合に、溶融池の形状変化によりその兆候を認識することができれば高品質な自動溶接を実現することが可能となる。溶融池の輪郭形状を数値化し、正常状態

の形状と比較することで外乱の発生を認識し、溶接条件の適応制御を行うためには、溶接欠陥の発生を示す溶融池形状パラメータの抽出が必要である。

ホットワイヤを用いた狭開先TIG溶接において特徴的な溶接欠陥（融合不良）発生要因としては、以下の5項目があげられる。

- ① アーク掘り込み作用過大
- ② 溶融池ぬれ不足
- ③ 下地ビード形状不良
- ④ 溶着量過大
- ⑤ ワイヤ加熱不足

Fig.5.15 は、これらの要因が生じている場合の溶融池画像を示したものである。さらに、これらの溶融池画像から下記の溶融池形状パラメータを計測することにより要因の特徴化を検討した結果を **Fig.5.16** に示す。

- ① 溶融池先行距離： L_p
- ② 溶融池ぬれ角： θ
- ③ 溶融池前縁の傾き変化量 ($d\beta/dx$)
- ④ 溶融池中央部の凹み量（溶融池中央部の高輝度領域の高低差）： h
- ⑤ ワイヤ挿入位置近傍の凹み量： L_c

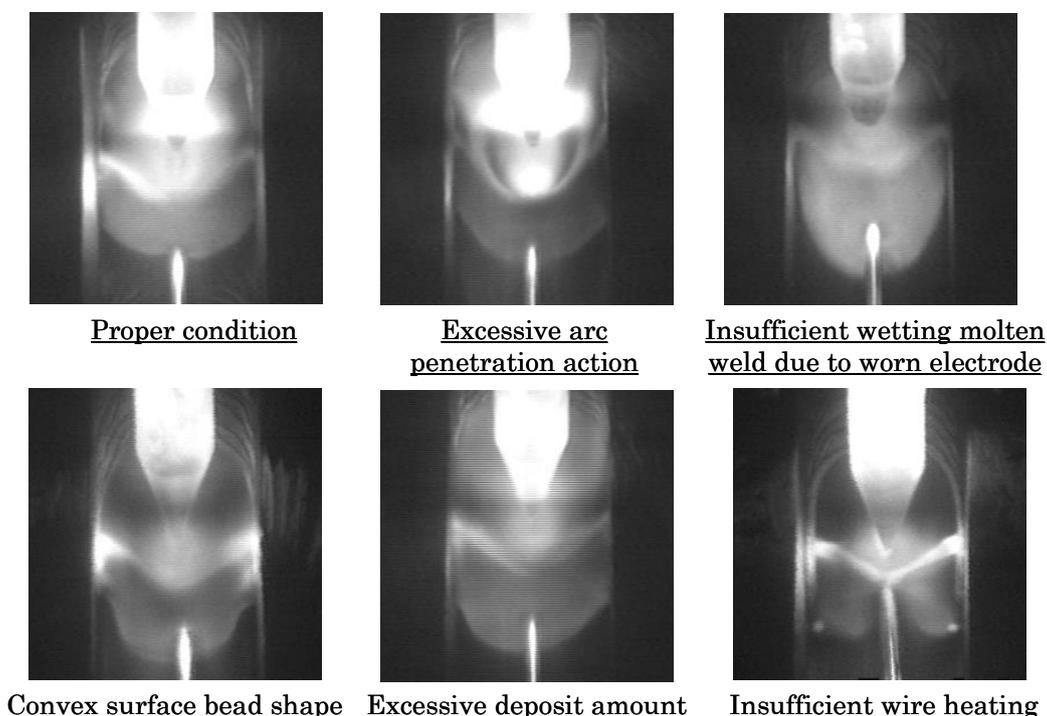
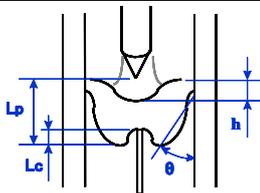


Fig.5.15 Molten pool image of typical defects for hot wire orbital welding.

	Excessive arc penetration action	Insufficient wetting of molten weld pool	Convex surface bead	Excessive deposit amount	Insufficient wire heating
L_p	●	●	●	◎	
θ		●	●		●
$d\beta / dx$		◎	◎		
h	◎				
L_c					◎



● : Numerical value different from normal condition
◎ : Numerical value that characterizes defect causing factor

Fig.5.16 Distinct features of molten pool shape by defect factor.

アークの掘り込み過大は、溶融池中央部の凹み量 h 、ワイヤ加熱不足は、ワイヤ挿入位置近傍の凹み量 L_c の値が標準状態と異なることで欠陥要因の識別が可能である。また、溶着量過大は、溶融池先行距離 L_p のみが標準状態と差異がないことで他の要因と区別可能である。

一方、溶融池のぬれ不足は、電極が異常消耗等により、アークにより溶融池を広げる力が弱くなると開先側壁への溶融池の濡れが不足することにより生じる事象であり、ビードは、Fig.5.17 に示すように平坦あるいは凸形状になり次パス溶接時にビード両端部で融合不良が発生する可能性が高くなる。このとき、溶融池形状は、開先側壁と溶融池との接触点が後退する一方で溶融池先端が前へ伸びていく状況が観察される。従って溶融池先行距離 L_p 、溶融池先端から開先側壁にかけての溶融池前縁の傾き変化量 ($d\beta / dx$)、溶融池ぬれ角 θ を計測することによって溶融池と開先側壁との濡れ状態を認識することができる。

また、通常の狭開先 TIG 溶接ではビードは凹み形状になるため開先側壁近傍で溶融池と開先側壁、下地ビードが良く馴染んでいるが、前述したアーク状態の変化などにより下地ビードが平坦或いは凸になると、開先側壁とで角が出来るため、溶融池の馴染みが悪くなり、Fig.5.18 に示すような融合不良が発生する。溶融池は、下地ビード両端部と馴染む前に開先側壁と接触するため、側壁近傍でくびれた形状を呈する。この場合も、溶融池のぬれ不足と同様に、溶融池先行距離 L_p 、溶融池先端から開先側壁にかけての溶融池前縁の傾き変化量 ($d\beta / dx$)、溶融池ぬれ角 θ が、標準状態と異なった特徴量を示すことかわかる。

したがって、以上の溶融池形状の変化を計測することで、欠陥要因の自動識別が可能で

あり、要因に応じた溶接条件制御への利用が考えられる。

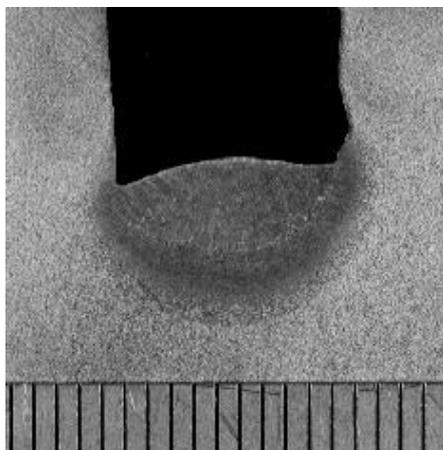


Fig.5.17 Cross sectional macro with insufficient wetting.

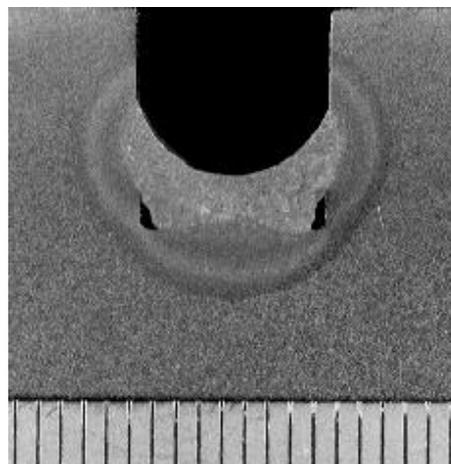


Fig.5.18 Cross sectional macro with poor previous bead shape.

5.5.2 溶融池形状パラメータの抽出

前項で述べた欠陥要因のなかで、アーク掘り込み作用過大、溶着量過大、ワイヤ過熱不足は、適正条件が決定されると基本的には溶接装置の機械的あるいは電氣的異常が生じないかぎり、おこりがたい事象である。すなわち、これらは、外乱というよりも故障などの異常が要因で発生するものであり、常時、溶融池形状を計測してこれらを制御する必要はないと言える。しかしながら、溶融池のぬれ不足や下地ビード形状不良は、電極の異常消耗や変形による開先幅の変動等の外乱により1層溶接中に生じえる事象であり、溶接条件の適応制御対象となる。

そこで、溶融池ぬれ不足と下地ビード形状不良を認識するため、抽出する溶融池形状パラメータを決定する必要がある。Fig.5.19は、標準状態と溶融池ぬれ不足ならびに下地ビード形状不良において、溶融池先行距離 L_p 、溶融池前縁の傾き変化量 $d\beta/dx$ 、溶融池ぬれ角 θ の計測結果を比較したものである。

溶融池ぬれ不足と下地ビード形状不良共に、溶融池先行距離 L_p と溶融池ぬれ角 θ の値が標準状態と異なることで外乱の発生を認識することが可能であることがわかる。しかしながら、溶融池先行距離 L_p と溶融池ぬれ角 θ はほぼ同様の値であることから両者を区別するには、下地形状不良の際に生じる溶融池のくびれを検出する必要がある。これは、溶融池前縁の傾き変化率 $d\beta/dx$ が、下地ビード形状不良の場合、開先側壁近傍で負の値となる事で区別することが可能である。

以上のことから溶接中の適応制御を行う上で、溶融池画像より抽出する溶融池形状パラメータは、溶融池先行距離 L_p 、溶融池前縁の傾き変化量 $d\beta/dx$ 、溶融池ぬれ角 θ の3項目とした。

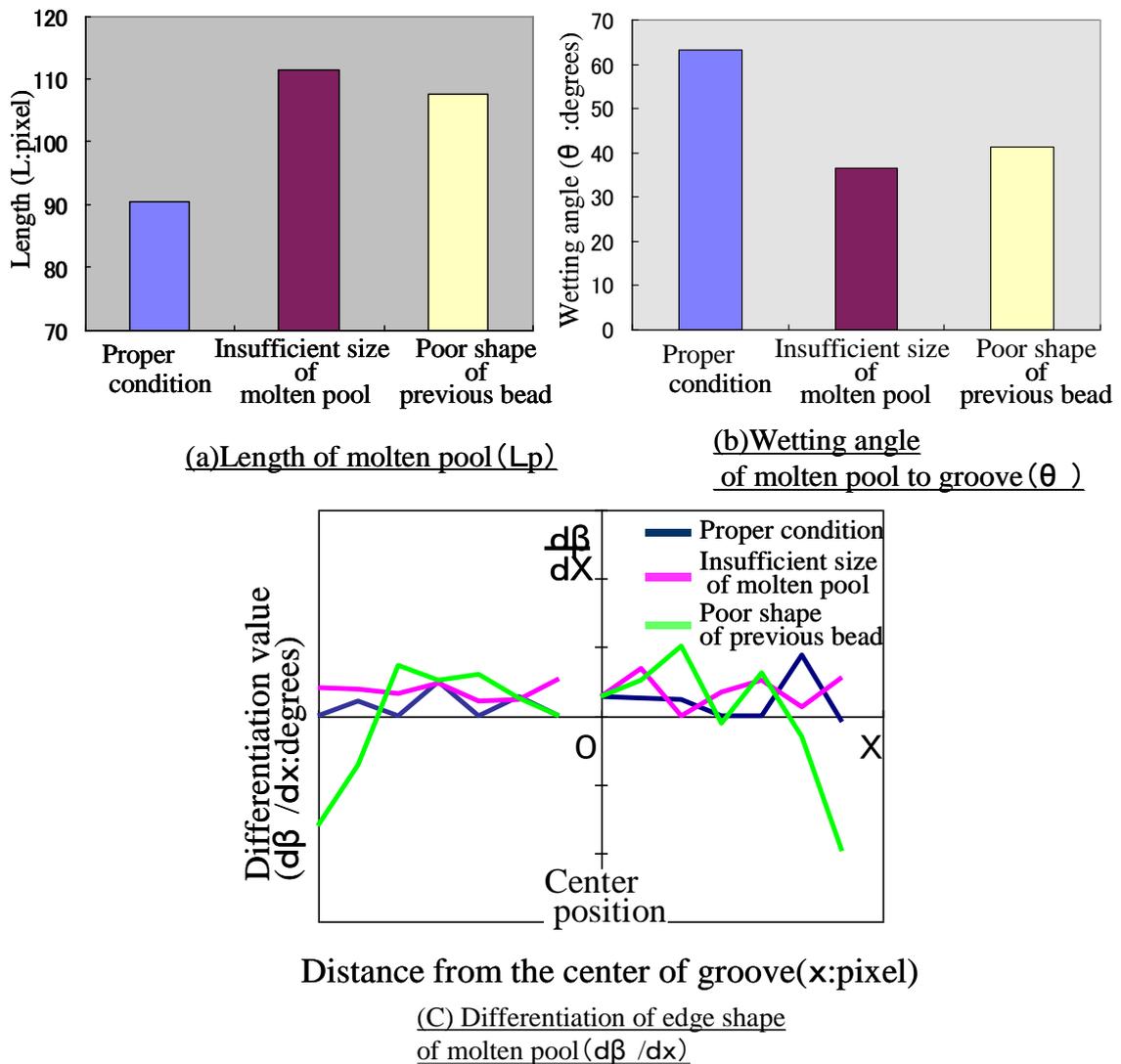


Fig.5.19 Comparison of molten pool shape parameters between proper condition and unsuitable condition.

5.5.3 溶接条件制御方法

溶融池ぬれ不足と下地ビード形状不良を生じた場合、適正な状態に溶融池形状を制御する必要がある。この場合、ともに融合不良を防止する観点からは、溶融池サイズを大きくできる溶接電流の制御が有効と考えられる。本溶接では、パルス電流を採用していることからピーク電流値を制御因子として選定し、それを制御することで溶接欠陥発生抑制が図れるかの確認を行った

(1) 下地ビード形状不良

下地ビード形状を凹から凸に徐々に変化させたワークに、ピーク電流を上げて溶接を行

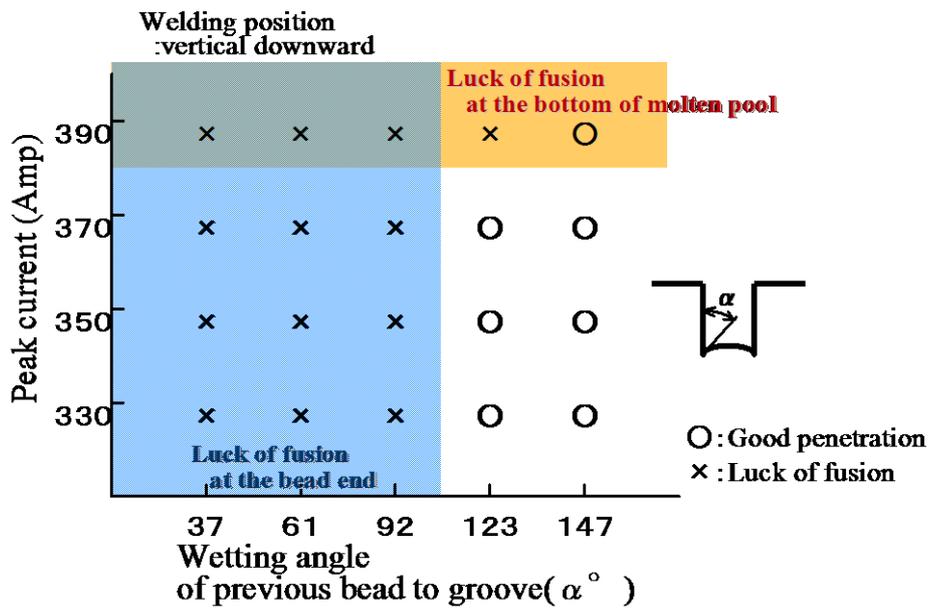


Fig.5.20 Relation between previous bead shape and welding peak current.

い、欠陥の有無を調査した結果を Fig.5.20 に示す。下地ビードの濡れ形状が 92° より小さくなるものについてはピーク電流値を増加しても開先両端の融合不良をなくす事は出来ないことがわかる。

この時の溶融池形状の計測結果を Fig.5.21 に示す。下地ビード形状が凹から凸になるに連れて開先側壁近傍の溶融池のくびれが大きくなっており、溶融池の濡れ角度は小さく、

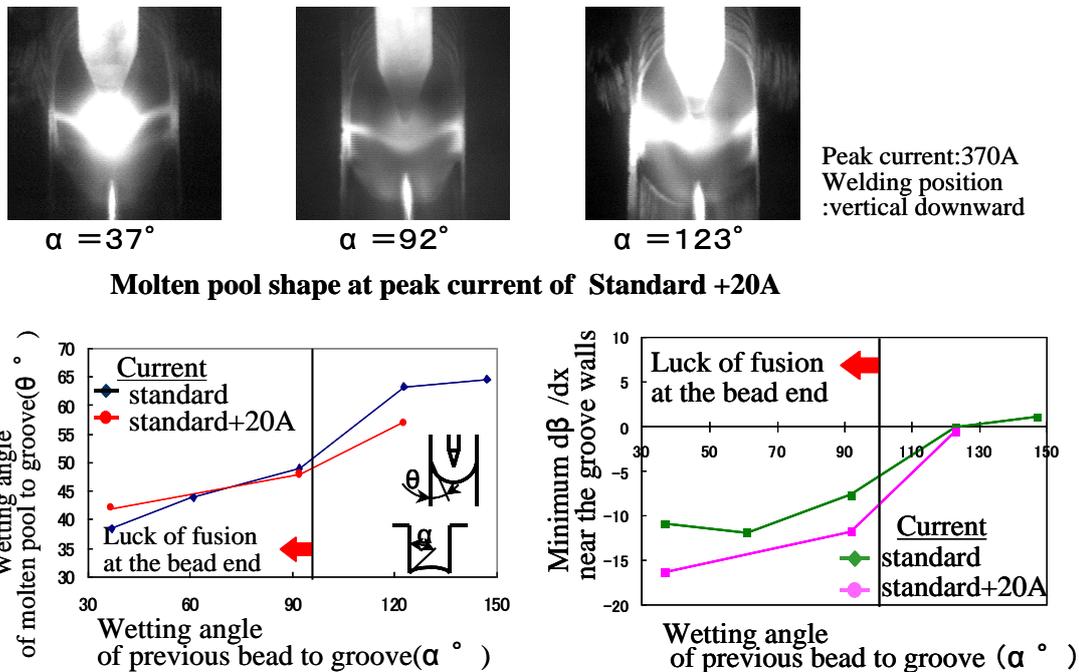


Fig.5.21 Correcting welding current for poor previous bead shape.

溶融池先端形状の変化量最小値は小さくなっている。これらの値はピーク電流を上げてても大きな変化は認められない。従って、下地ビード形状不良に対してはピーク電流上昇による条件補正を行っても融合不良の防止は図れず、溶融池形状もほとんど変化していない事が分かる。

(2) アーク状態の変化(電極消耗による溶融池と開先側壁とのぬれ不足)

電極消耗の程度を変えるために電極先端径を変えて溶接を行った時の溶融池ぬれ角度と凝固後の溶接ビードの開先側壁とのぬれ角度との関係を Fig.5.22 に示す。

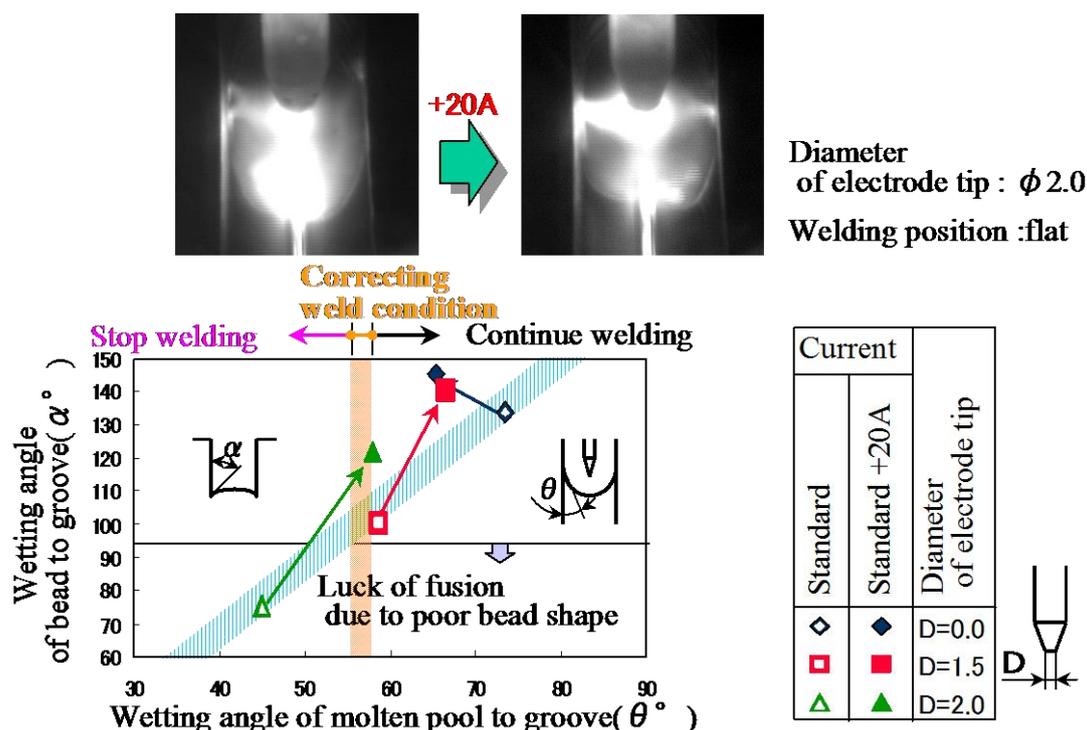


Fig.5.22 Correction of welding current for insufficient molten pool size.

電極の消耗が酷くなるにつれて溶融池のぬれ角が小さくなり、それに応じて溶接ビードの開先側壁との濡れ角度も小さくなっている。しかし、電極消耗の場合、ピーク電流を増加する事により溶接ビードの開先側壁との濡れ角度は大きくなり、溶融池のぬれ角度も増加している事が分かる。従って電極消耗による溶融池と開先側壁との濡れ不足の場合、ピーク電流増加による溶接欠陥発生防止を図る事が可能である。

以上の結果から溶接条件制御は、Fig.5.23 に示す手順となる。まず溶融池形状計測時に左右不均一にならないよう電極位置及びワイヤ挿入位置の補正を行う。次に溶融池形状計測を行い、正常状態との形状比較により外乱発生の有無を認識し、溶融池形状変化の特徴によって外乱因子を特定する。この場合、 $L_p > 100\text{pix}$, $\theta > 50^\circ$, $d\beta/dx \leq 0$ であれば、下地形状の不良と判断し、条件補正による溶接欠陥発生防止が図れないと判断して溶接中止を選択する。一方、 $L_p > 100\text{pix}$, $\theta > 50^\circ$, $d\beta/dx > 0$ であれば、溶融池のぬれ不足と判断

する。そして、 θ が 45° から 50° の範囲であれば、溶接電流による制御を行うが、 45° より小さい場合には条件補正を行ってもぬれが改善されないため、溶接は中止される。

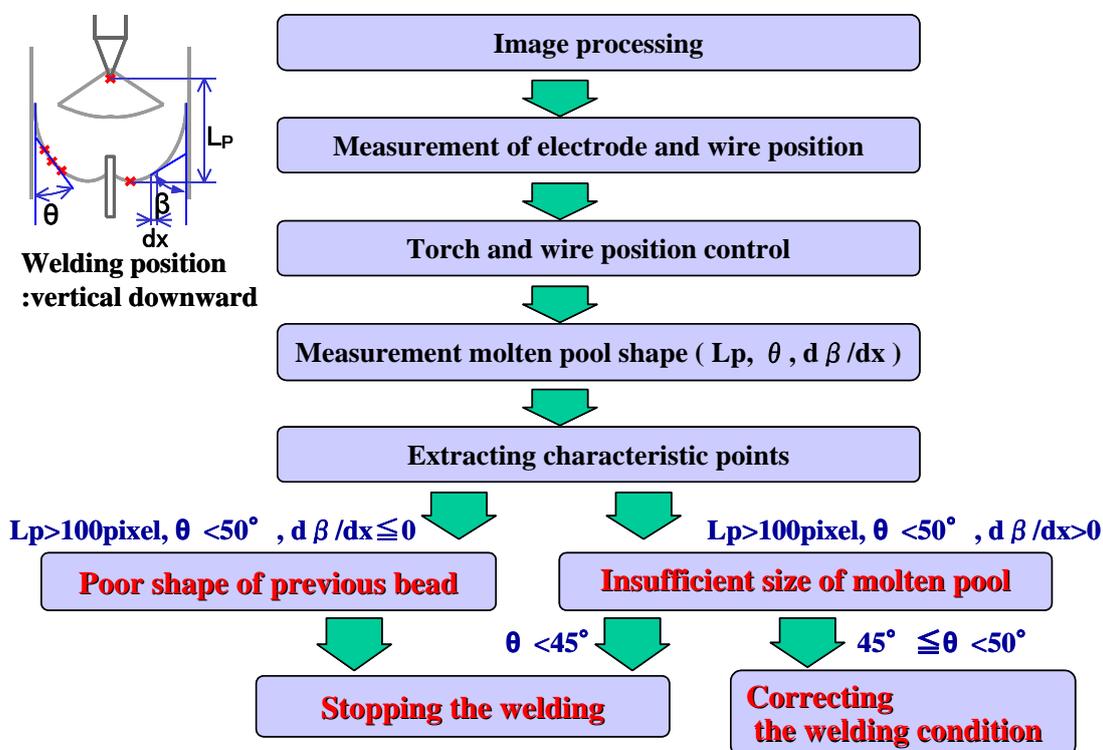


Fig.5.23 Sequence of welding condition control.

5.6 自動溶接システムの動作シーケンス

配管自動溶接システム全体の動作シーケンスを Fig.5.24 に示す。まず、溶接開始前にレーザーリットセンサによる開先計測システムにより、開先形状が計測され、それにもとづき、溶接線教示および溶接条件の補正が行われる。そして、開先合わせ（ルートギャップ、目違い）が、適正範囲を逸脱していた場合、溶接は開始されず、アラーム出力が出される。溶接開始後は、IR-CCD カメラによる溶融池センシングシステムが動作し、応接条件の適応制御が行われる。まず、はじめに電極およびワイヤ位置の検出を行い、適正位置に制御される。その後、溶融池形状の計測を行い、溶融池形状パラメータに応じて溶接電流の制御が実施される。その際、用湯値形状パラメータが、制御範囲を逸脱していると判断した場合、溶接はその時点で中止され、アラーム出力が出される。問題がなければ、溶接は、1パス終了し、再びレーザーリットセンサによる開先計測システムが作動し、ビード形状計測が行われる。この場合、ビード形状が、適正範囲を逸脱していると判断された場合、アラーム出力が出され、溶接は開始されない。以降、同様のシーケンスを繰り返す。

このように、異常が認められた場合には溶接が自動的に中断されるシーケンスとしたのは、補修作業を容易にするためである。実際、厚板の狭開先溶接では、溶接終了後の非破壊検査で内部欠陥が検出された際、その位置にもよるが、溶接部を局部的にグラインダやガウジングによりはつりとるか、機械加工にて開先を再加工する方法がとられる。この作業には、多大な時間がかかるとともに、開先形状が変化することによる変形など品質の劣化も否めない。このため、異常が生じた時点で溶接を中断し、対応することが、実作業上、時間的にも品質的にも有効であると考えられる。

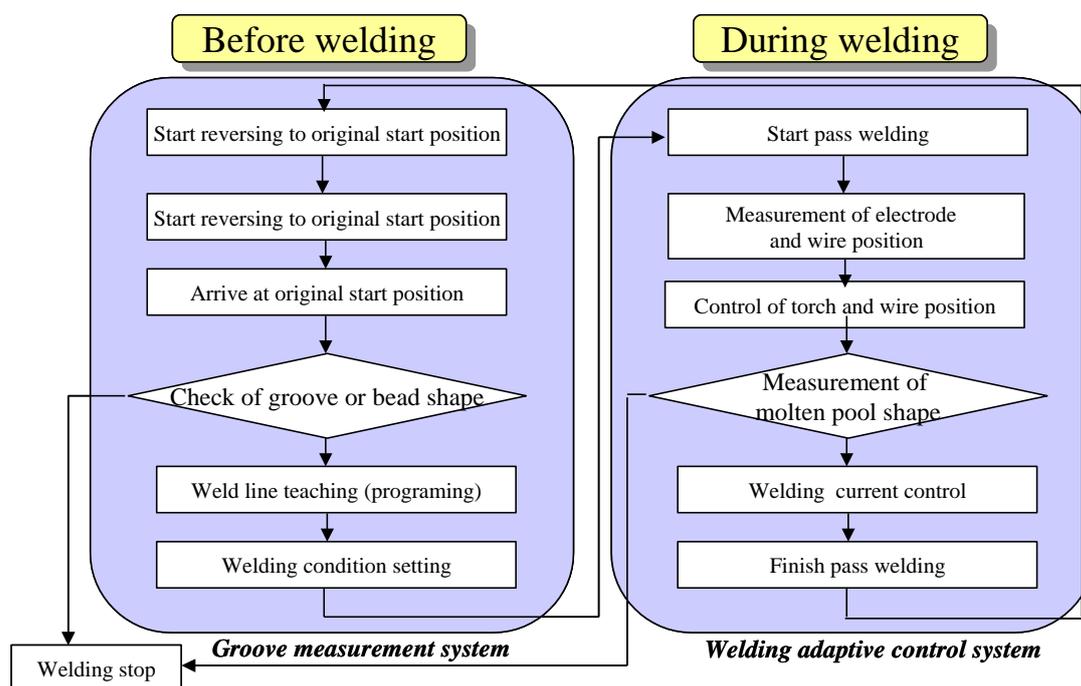


Fig.5.24 Process sequence of hot wire orbital narrow gap GTAW system.

5.7 火力プラント配管溶接への適用

開発したホットワイヤ狭開先配管GTAWシステムを実作業に適用した。対象は、火力プラントの高圧給水管で、外径φ200~600mm、肉厚20~80mmの炭素鋼配管である。実機施工状況を Fig.5.25 に示す。また、実機に用いた開先形状と開始前に行った試験における断面マクロを Fig.5.26、Fig.5.27 に示す。Table7.1 は、溶接条件の一例を示したものである。

溶接施工は、融合不良の発生もなく、高品質な溶接部が得られた。また、溶接施工時は、オペレータは、監視作業が最小限でおこなうことができ、他の自動溶接機との2台持ち作業が可能となり、作業工数の削減がはかれた。また、従来、ホットワイヤを用いた狭開先溶接は、パラメータも多く、溶融現象も若干通常のTIG溶接と異なるため、オペレータ

に熟練度が必要であったが、本システムを適用することで、オペレータに特別なスキルは不要となり、熟練レス化をはかることができた。



(a)Welding operation



(b)Control unit

Fig.5.25 Application to thermal power plant piping in shop welding.

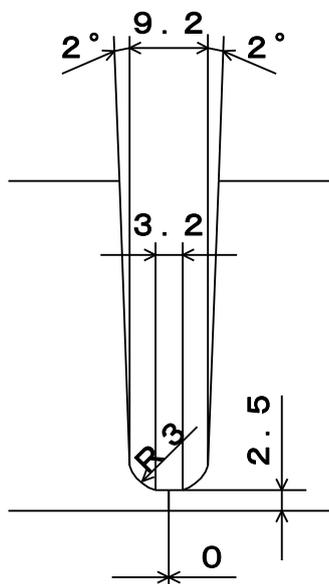


Fig.5.26 Groove shape.

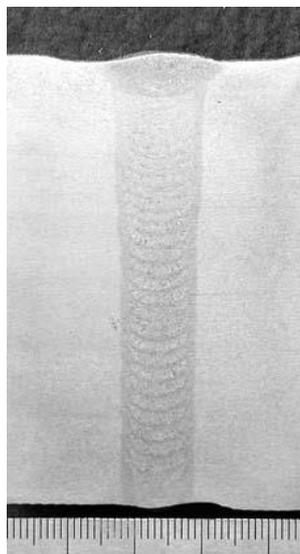


Fig.5.27 Cross-sectional macro photograph of test specimen.

Table 5.1 Example of welding condition.

Pass number	Bead width	Location (degree)	Peak welding current (A)	Base welding current (A)	Peak wire current (A)	Base wire current (A)	Peak wire feed speed (mm/min)	Base wire feed speed (mm/min)	Welding voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Pulse peak time (s)
1 (First layer)	Straight bead	0	220	160	20	20	1800	1800	9.0	90	0.20
		90	220	160	20	20	1800	1800	9.0	90	0.20
		140	220	160	20	20	1500	1500	9.0	90	0.20
		180	220	160	20	20	1500	1500	9.0	100	0.20
		270	220	160	20	20	1500	1500	9.0	100	0.20
		360	220	160	0	0	400	400	9.0	100	0.20
2 (Second layer)	Oscillation	0	250	120	25	25	2000	800	8.5	95	0.25
		10	250	120	25	25	2000	800	8.5	95	0.25
		90	270	120	25	25	2000	800	8.0	95	0.25
		180	270	120	25	25	2000	800	8.2	95	0.25
		270	250	120	25	25	2000	800	8.5	95	0.25
		360	220	120	0	0	600	600	8.5	95	0.25
3 (Third layer)	Straight bead	0	320	170	40	40	2400	1400	8.5	95	0.30
		10	320	170	40	40	2400	1400	8.5	95	0.30
		90	320	170	40	40	2400	1400	8.5	95	0.30
		180	320	170	40	40	2400	1400	8.5	95	0.30
		270	320	170	40	40	2400	1400	8.5	95	0.30
		360	270	170	0	0	700	700	8.5	95	0.30
Pass number ≥ 4	Oscillation	0	280	240	40	40	1800	1800	10.0	90	0.30
		10	280	240	40	40	1800	1800	10.0	90	0.30
		90	280	240	40	40	1800	1800	10.0	90	0.30
		180	280	240	40	40	1800	1800	10.0	90	0.30
		270	280	240	40	40	1800	1800	10.0	90	0.30
		360	260	240	0	0	600	600	10.0	90	0.30
Pass number ≥ 4	Straight bead	0	320	240	50	50	3000	2200	10.0	Calculation	0.30
		10	330	240	50	50	3000	2200	9.7	Calculation	0.30
		90	330	240	50	50	3000	2200	9.7	Calculation	0.30
		180	350	240	48	48	3000	2200	9.7	Calculation	0.30
		270	350	240	48	48	3000	2200	9.7	Calculation	0.30
		360	320	240	0	0	900	900	10.0	Calculation	0.30
Pass number ≥ 4	Oscillation	0	280	240	40	40	1800	1800	10.0	Calculation	0.30
		10	280	240	40	40	1800	1800	10.0	Calculation	0.30
		90	280	240	40	40	1800	1800	10.0	Calculation	0.30
		180	280	240	40	40	1800	1800	10.0	Calculation	0.30
		270	280	240	40	40	1800	1800	10.0	Calculation	0.30
		360	260	240	0	0	600	600	10.0	Calculation	0.30

5.8 結言

狭開先ホットワイヤTIG溶接において、レーザスリット光センサ及び視覚センサ(IR-CCDカメラ)を用いて開先形状変化、狙い位置変化、アーク状態変化、下地ビード形状変化を認識し、狙い位置や溶接条件の補正を自動的に行う事により、監視レスで溶接を行える高機能な固定配管自動溶接システムを開発した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) レーザスリット光センサと視覚センサ(IR-CCDカメラ)を搭載したホットワイヤを用いた全姿勢狭開先配管GTAWシステムを製作した。
- (2) レーザスリット光センサによる開先計測システムは、溶接線教示、開先形状に応じた溶接条件の設定、開先およびビード形状不良の確認の機能を有する。
- (3) 開先計測システムにより、ルートギャップおよび目違い量が適正範囲を逸脱している場合には異常としてアラームが出力され、溶接が開始されない。
- (4) 開先計測システムにより、溶接ビード形状の計測が行われ、ビードぬれ角とビード高さが適正範囲を超えた場合、ビード形状不良と判断して溶接を中断し、次パスの融合不良を防止する。
- (5) 溶融池センシングシステムでは、近赤外域の透過波長を有する狭帯域フィルタと透過率分布変化フィルタを用いた多重フィルタリング方式を採用することで、高電流域においても溶融池およびその周辺形状の画像抽出を可能とした。
- (6) 溶融池センシングシステムにより、電極およびワイヤ位置を画像処理により計測し、

適正位置に適応制御するシステムを確立した。

- (7) 溶融池形状計測結果から、溶融池ぬれ角が通常より小さくなることで外乱の発生を認識し、更に溶融池前縁の傾き変化量により外乱要因が溶融池の濡れ不足又は下地形状の不良の何れかを特定することを可能とした。
- (8))溶融池の濡れ不足の場合、ピーク電流を増加することによりぬれ性が改善されが、下地ビード形状不良の場合、ピーク電流の増加でも開先角部の溶込みは改善できず、融合不良が残存することを明らかにした。
- (9) 溶融池形状抽出パラメータとして、溶融池先行距離 L_p , 溶融池前縁の傾き変化量 $d\beta/dx$, 溶融池ぬれ角 θ を選定し、これらの計測値に応じて、溶融池のぬれ不足と判定された場合には、ピーク電流を制御量とする適応制御を行い、それ以外は異常と判定し溶接を中断するシステムとした。
- (10) 本章で開発した自動溶接システムを火力プラント配管の実機溶接に適用した結果、融合不良がなく良好な溶接部が得られたとともにオペレータに熟練度が不要な高能率・高品質な自動溶接が実現された。

第6章 原子力炉内構造物現地遠隔ロボット溶接システム

6.1 緒言

原子力発電プラントでは安定運転を維持し、運転プラントの長期的な信頼性を図ることが重要である。近年、国内外の損傷事例の解析、研究の進展に伴い、長期の運転を経過したプラントの潜在的損傷発生の可能性を予測し、予め当該部位を最新の技術レベルに処置、交換する工事が推進されている。この現地での工事は、部位によっては放射線環境下の作業となるためロボットを使った作業の自動化が要求される。そこで、原子力炉内構造物の現地交換工事の溶接作業において作業者の被曝低減を目的として放射線環境下で適用可能な小型溶接ロボットシステムを開発し、実プラントへの適用をすすめてきた^{6.1)}。しかしながら、さらに高い放射線環境下の溶接作業へ適用するには、作業者が近づく必要のない、ほぼ完全に遠隔で溶接作業が行える自動溶接システムが必要であり、これらを実現するために、視覚センサを搭載した知能的な溶接ロボットの開発が不可欠である。前章までに述べたように、視覚センサとしては、小型化が可能で狭い部位へ適用できるだけでなく、多くの情報量を得ることができるCCDカメラに着目し、熔融池センシングによる溶接条件制御やステレオビジョンを応用した3次元ビード形状計測などの自動溶接システム技術についての開発をすすめてきた^{6.2)}。

そこで、これらのセンシング技術を応用して、CCDカメラによる視覚情報をもとにGTAWロボットを制御することで遠隔溶接システムの構築をはかった。そして、開発した遠隔ロボット溶接システムを原子力炉内構造物保全工事の現地遠隔溶接に実用化した。

本章では、視覚センサによる自動溶接システムの高機能化の実用化例として、原子力炉内構造物保全工事の現地遠隔溶接への適用を目的として開発したGTAWロボットシステムについて述べるとともに実際に原子力発電所現地にて実機適用した結果について説明する。

6.2 適用対象と開発課題

原子力プラントの予防保全としてシュラウド交換工事が行われている。これは、割れ(SCC)発生感受性の低い材料への変更を目的として新しいシュラウドに現地にて交換を行うもので、その一連の作業の中でジェットポンプ交換時におけるライザブレース取替溶接は、高放射線下の作業となるため、遠隔溶接が必要となる。**Fig.6.1**にシュラウド交換工事の手順を示す。今回の溶接システムの適用対象は、ライザブレース取替工事の中の**Fig.6.2**に示すライザブレースと炉壁溶接部である。この部位は、古いライザブレースを除去し、新しいライザブレースを炉壁に取り付けるもので、構造的に上下からの溶接が要求され、それぞれは、片側からの溶接となる。また、狭隘部位なため干渉の問題から溶接トーチヘッドはコンパクトにする必要があり、取り付け可能なセンサ寸法の制約がある。

また、基本的に裏側からの溶接はスペース的に難しく、その場合には特殊な溶接トーチ

が必要となる。以下に遠隔ロボット溶接システムの開発課題を示す。

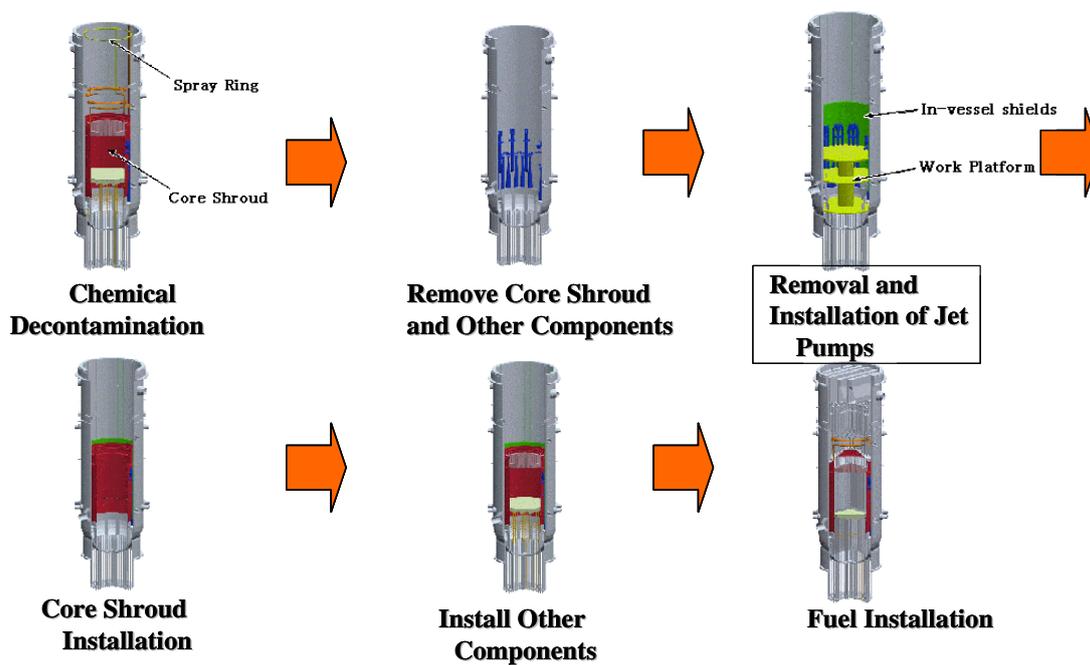


Fig.6.1 Shroud replacement work.

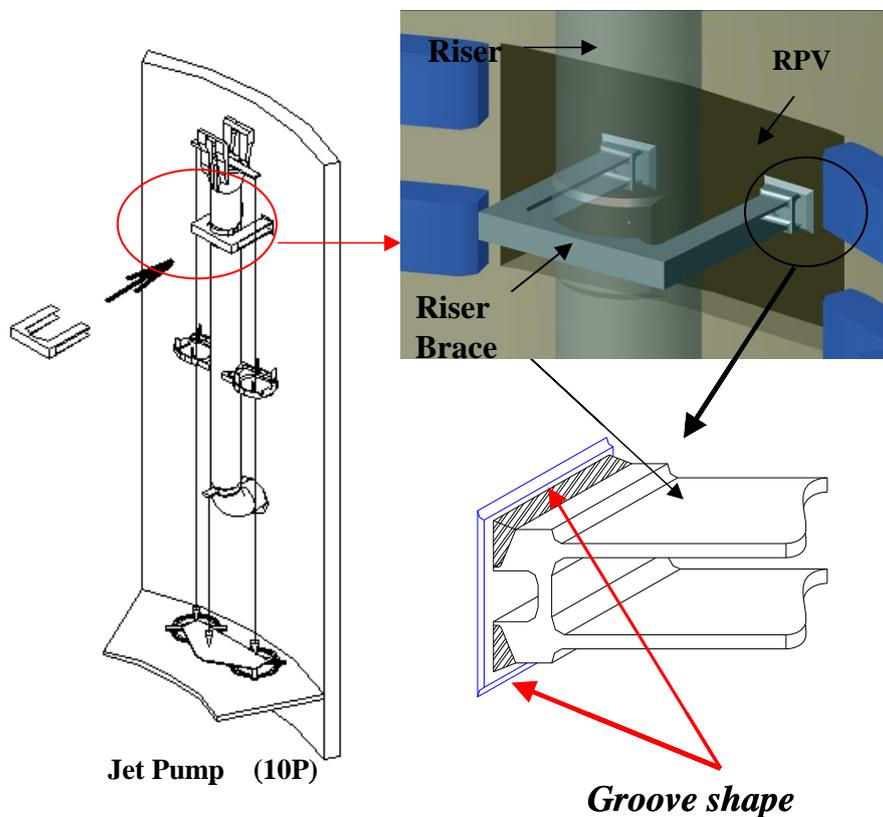


Fig.6.2 Application area of welding robot system.

(1) 放射線による機能劣化

高線量環境下での溶接ロボット機器、部品の機能劣化が懸念される為、耐放射線仕様溶接ロボットの開発が必要である。

(2) 装置の小型・軽量化

現地工事に適用できる可搬式で小型の多関節GTAWロボットシステムの開発が必要である。

(3) 狭隘部への溶接

狭隘部への挿入が可能な小型トーチの設計と開発が必要である。

(4) 遠隔操作技術

遠隔作業を可能とするCCDカメラシステムの開発と遠隔にてロボットの教示作業を可能とするオフラインティーチングシステムの開発が必要である。

(5) センシング技術

作業者の関与を不要とするために、遠隔検査を可能とするビード形状計測システムの開発と安定した初層溶接の溶け込み確保を可能とする溶接条件のリアルタイム適応制御システムの開発が必要である。

6.3 ロボットシステムの構成と機能

本システム適用対象の作業エリアは比較的放射線量の低いオペレーションフロアと高放射線線量下の炉内に分類される。**Fig.6.3**に示すように作業者は、約20m離れたオペレーションフロアで炉内のロボットを遠隔操作し、作業者の被曝低減を図るロボットシステムの構成とした。以下に各装置の機能を述べる。

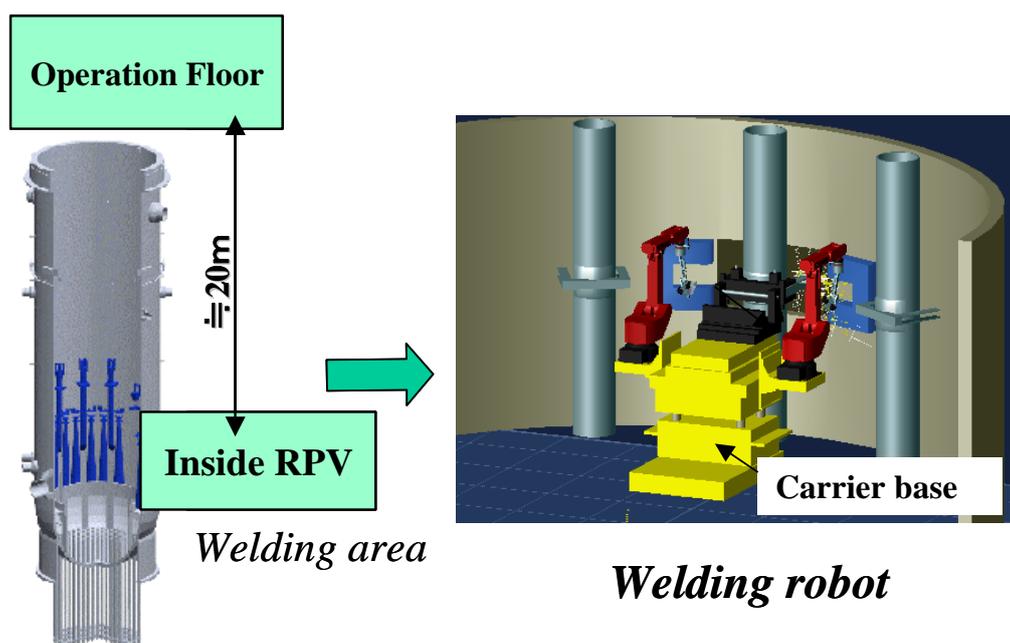


Fig.6.3 System Configuration of welding robot.

6.3.1 溶接ロボット

はじめに放射線のロボットへの影響調査を行うために、部品レベルでの照射試験を行い、放射線で機能劣化するロボット部品を選定した。そして、これらを反映したロボットに対し、コバルト60-ガンマ線照射設備にて加速照射試験を行い、予測線量の10倍以上の耐久性があることを検証した。

溶接ロボットのマニピレータは、重量19kg、可動範囲800mm、6軸の可搬式小型多関節構造である。また、本ロボットは、溶接中任意の位置でトーチ位置及び溶接パラメータが変更可能である機能を有しており、溶接中に遠隔で条件の微調整が可能である。

6.3.2 小型TIGトーチヘッド

溶接適用部位が前述のように狭隘部位であるため、**Fig.6.4** に示す特殊トーチを開発した。このトーチは、約70mm高さの隙間での溶接が可能であり、溶接ワイヤねらい位置調整機構や溶融池監視用 CCD カメラを有している。また、ツールチェンジャ、トーチ姿勢切替機構、タングステン交換、ワイヤ切断などの自動機能を有しており、遠隔作業を可能とした。

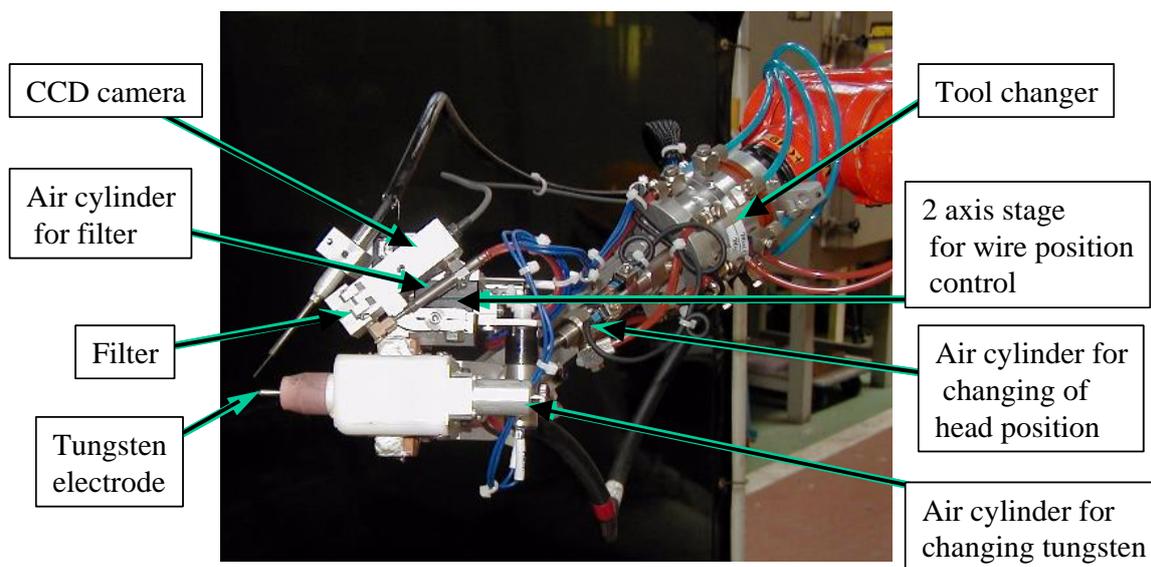


Fig.6.4 Welding torch head.

6.3.3 遠隔操作カメラ

遠隔操作を可能とするために本システムには、ロボット全体の動作確認用カメラ1台、周囲との干渉チェック用カメラ2台とトーチねらい位置確認用カメラ1台の計4台のカメラが装備されている。トーチねらい位置確認用には、溶接中にアーク光下でトーチねらい位置

が修正できるように遠隔で自動開閉が可能な遮光フィルタが装備されている。**Fig.6.5**にそれらの外観を示す。

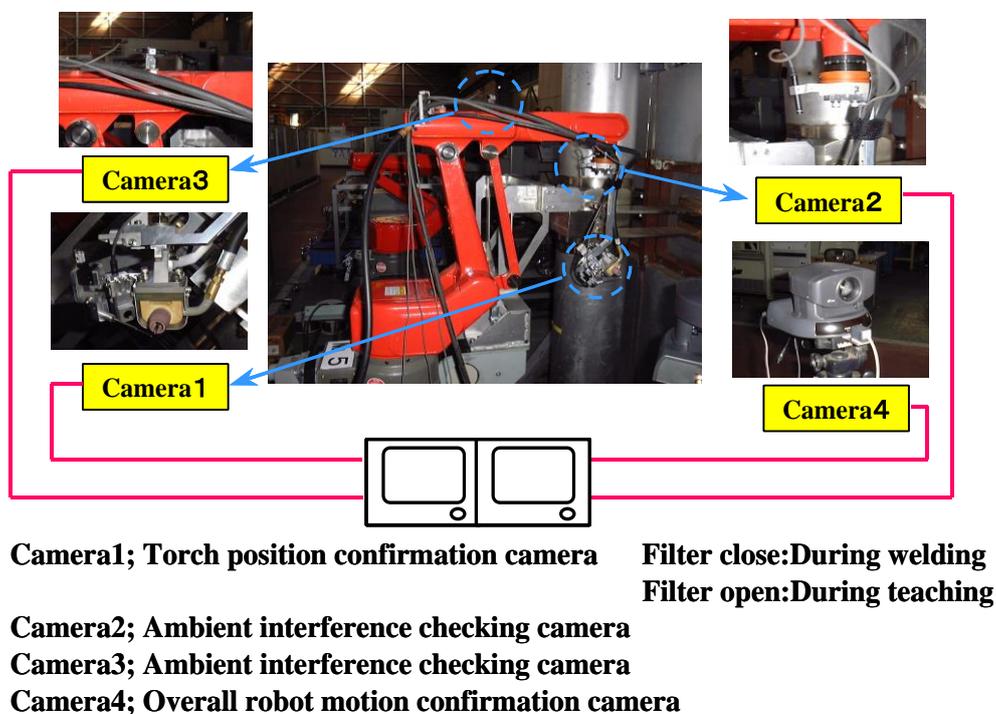


Fig.6.5 Remote control cameras.

6.3.4 オフラインティーチングシステム

Fig.6.6 にオフラインティーチングシステムの概要と作業の流れを示す。

本システムは、汎用ロボットシミュレータ（ROBCAD）を用い、ワークステーション（EWS）上で、ワークモデリング、動作軌跡生成、ロボット配置設定などを行い、ロボット動作プログラムを生成するものである⁶⁾³⁾。とくに、旧ライザブレースの切断精度が乏しいことから、新しく交換するライザブレースの長さが部位ごとに異なる問題がある。このため、ロボット配置の誤差修正は、ライズブレースアームの6箇所をタングテン電極により実際にタッチセンシングすることで、設計値とのずれを演算することで行なうこととした。

この生成されたロボット動作プログラムを通信でパソコン（PC）に送り、PC上でロボット言語に変換し、ロボット動作プログラムをロボットコントローラにダウンロードすることで溶接が開始される。

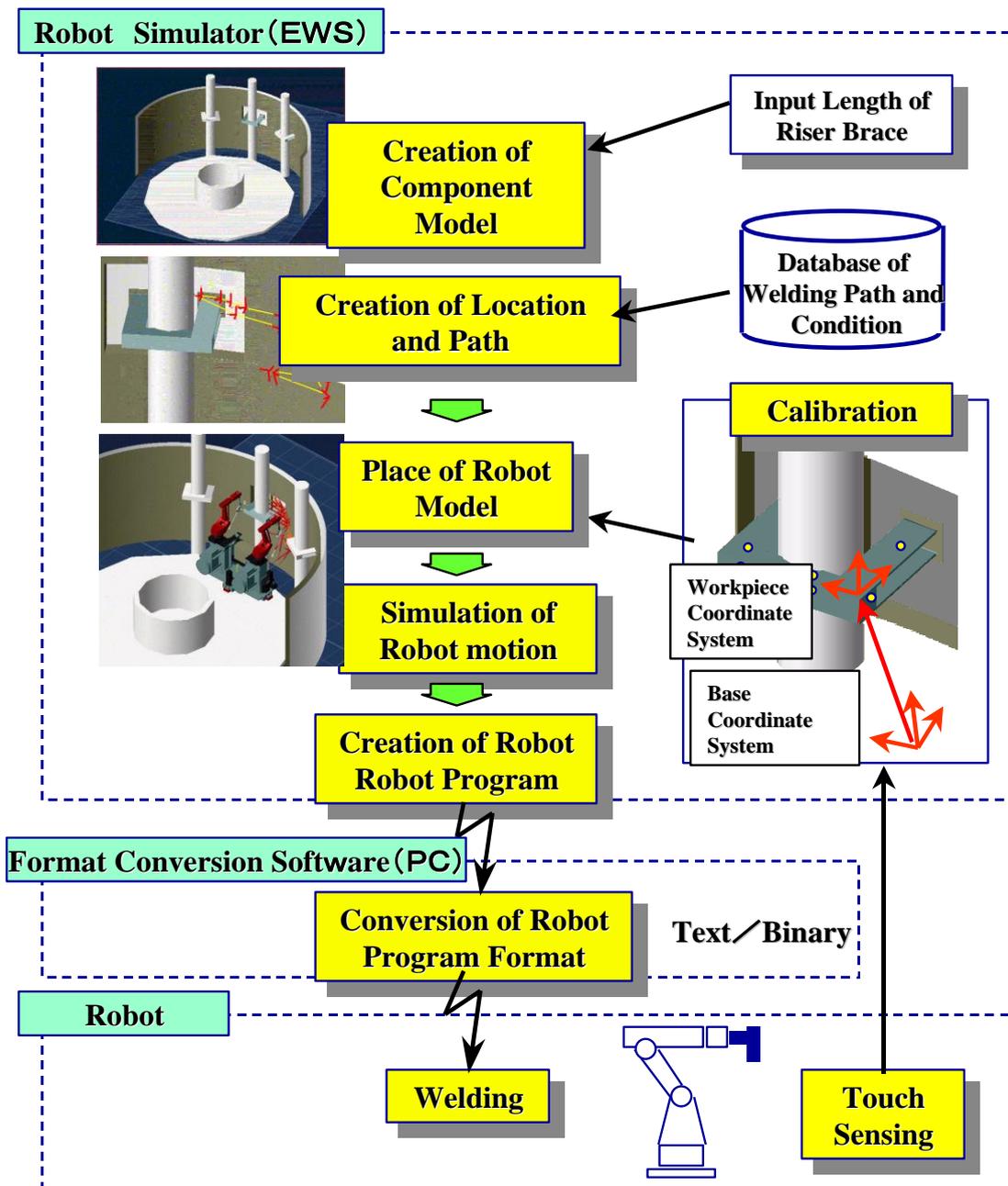


Fig.6.6 Operating flow of off-line teaching system.

6.3.5 視覚センシングシステム

完全に遠隔で溶接作業を行うために、CCDカメラを用いた2つの視覚センシングシステムを開発し、溶接ロボットに搭載した。以下のその機能を述べる。

(1) 3次元形状計測システム

溶接部位は、電気事業法で定められた溶接検査対象部位であり、開先検査が要求される。

このため、遠隔にて溶接前のルートギャップの計測と最終ビード形状の寸法計測が必要となる。また、旧ライザブレース切断残存部の加工精度に限界があるため、ルートギャップにばらつきが生ずる恐れがあり、溶接前にルートギャップを計測し、適正範囲をこえている場合、据え付けをやり直すか設定溶接条件を変更することが必要である。

一般には、形状計測にはレーザセンサが用いられることが多いが、センサが大きく狭隘個所への適用が困難である点とT継手形状計測精度に難があることからCCDカメラを用いた3次元計測手法を採用した。

Fig.6.7は、計測方法を示したもので、対象を一つのCCDカメラで2方向から撮影し、そのCCD画像をステレオビジョン（両眼立体視法）を用いて対象点の3次元座標を算出する方法である。本手法は、任意位置によるカメラ間のパラメータを検出し、2つのカメラ座標系を求めることで3角測量の原理から対象点の座標を算出するもので、基本的な考え方は、第3章のステレオビジョンによる溶接ビード表面外観検査システムに示したものと同様である。具体的には、ロボットアームを移動し、溶接トーチヘッドに取り付けた溶融池観察用のCCDカメラにより同一箇所の画像を2方向から取得する。そして、取得された画像は、Fig.6.8に示すように画像処理され、寸法計測データが出力される。この手法では、画像上に既知の基準寸法を設けることで画像処理による計測値の変換が可能となる。本適用においては、ライザブレースアームが新製であることを利用し、ライザブレースアーム部の計測すべき位置にケガキ線をあらかじめ入れることで基準ポイントを形成することとした。

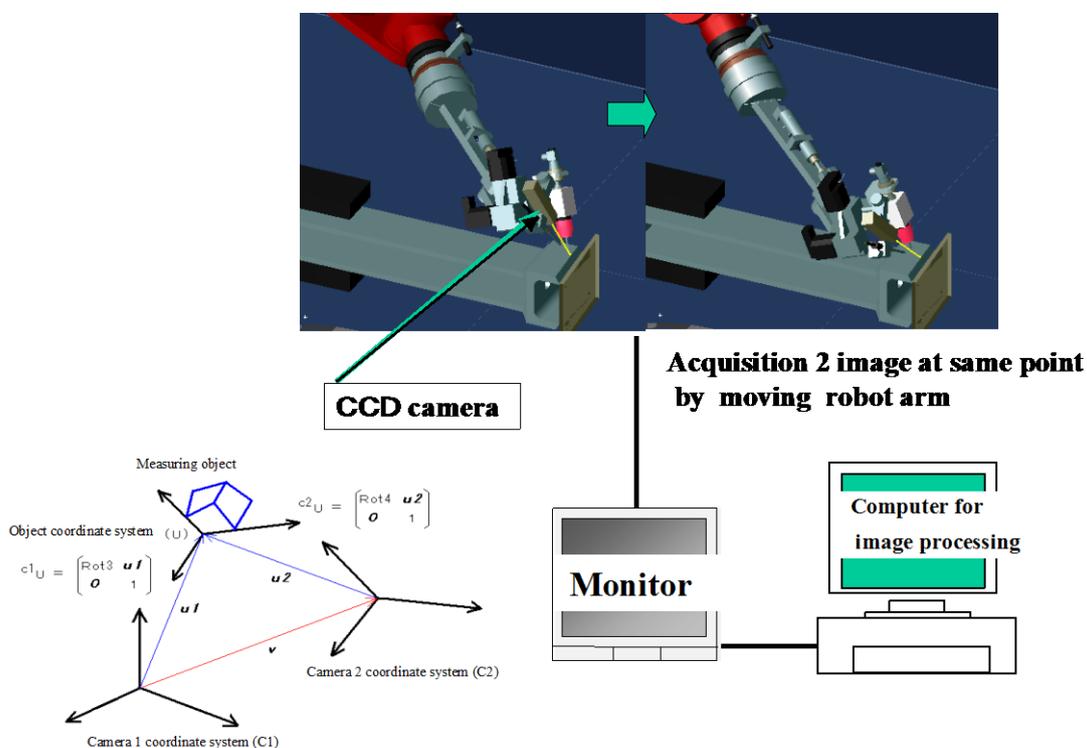


Fig.6.7 3D shape measurement system.

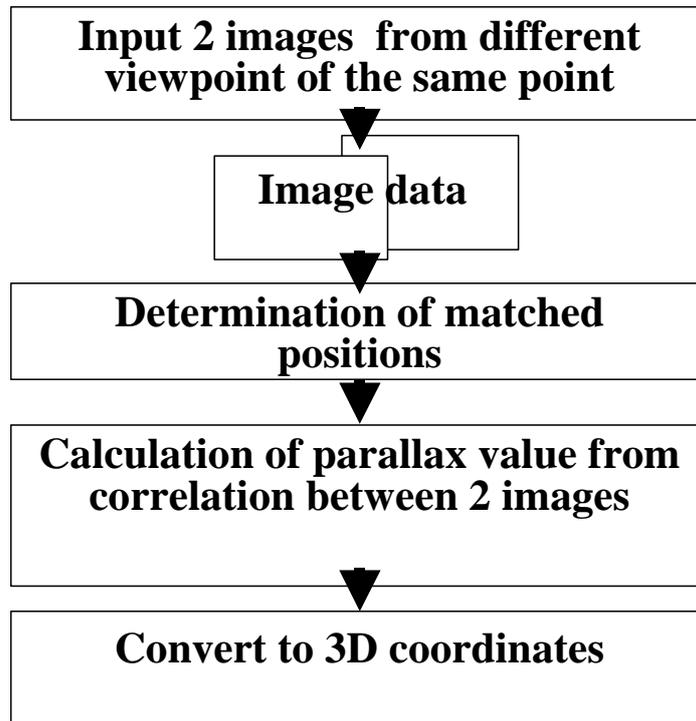


Fig.6.8 Image processing flow for 3D shape measurement system.

(2) 裏波センシングシステム

初層ルートパスは、溶け落ちや溶け込み不良を生じた場合、ロボットによる補修は困難であるため、確実な溶け込みが要求される。また、ルートパスの溶け込みが十分かどうかの確認も要求される。このため、ルートパスの溶け込みを保証するモニタリング機構や溶接条件の制御機能が必要となる。

そこで、ルートパスの溶け込みを保証するため、裏面から直接裏波をセンシングする⁶⁴⁾ことで溶接条件を制御する裏波センシングシステムを開発した。

Fig.6.9 に、裏波センシングシステムにおける光学系のシステム構成を示す。センサには、近赤外線領域に感度を有する IR-CCD カメラを用いた。IR-CCD カメラは、溶接裏面側のライザブレースアーム中央にあけられた穴より挿入配置され、円錐ミラーを介して溶接開始より終了までの裏波状況の映像を連続的に取得できる。**Fig.6.10** に光学ヘッドの外観を示す。光学ヘッドは、IR-CCD カメラと照明用のオプティカルファイバーから構成され、同時に、バックシールドガスホースも取り付けられた構造となっている。そして、それらの映像は、画像処理され、溶接条件制御に使用される。この方法では、IR-CCD カメラを移動、動かすことなく全溶接線の映像を獲得できると同時に下側の上向き溶接時に裏波映像も同じ配置で獲得できる利点がある。また、直接、裏波状況を観察できることから確実に溶接

条件を制御できる。

Fig.6.11 に、画像処理のアルゴリズムを示す。取得した映像をノイズ除去などの平滑化処理を実施した後、マスク処理にて、ライザブレースの上下どちらの映像であるかを識別する。そして、円錐画像から平面画像への変換ならびに映像位置の距離差による補正を実施した後、平面画像を2値化し、裏波面積を算出する。

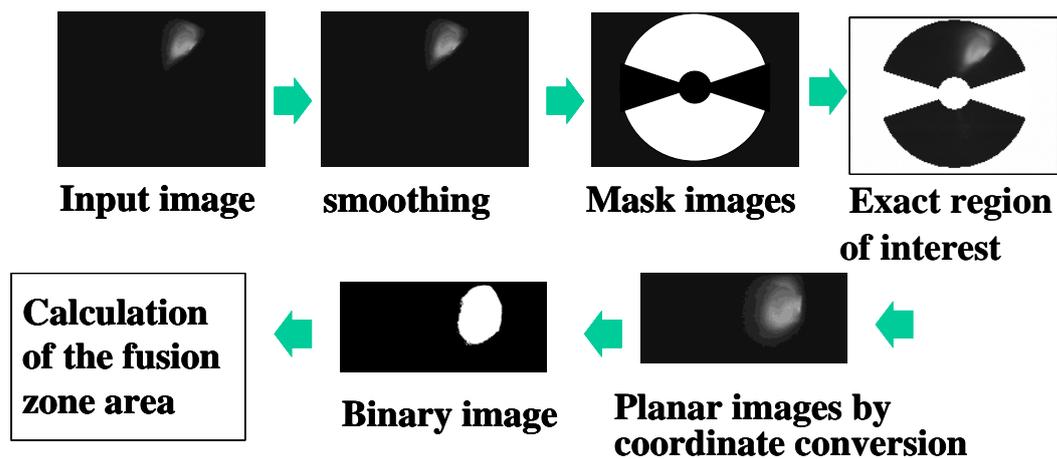


Fig.6.11 Image processing algorithm for penetration bead sensing system.

6.4 機能検証試験

視覚センシングシステムに対して機能検証試験を行った結果について述べる。

形状計測システムはステレオ視を採用しているため、2視点の幾何学的位置関係の誤差や2画像中の同一点指示時に発生する誤差などの誤差が発生する。Fig.6.12 に本システム

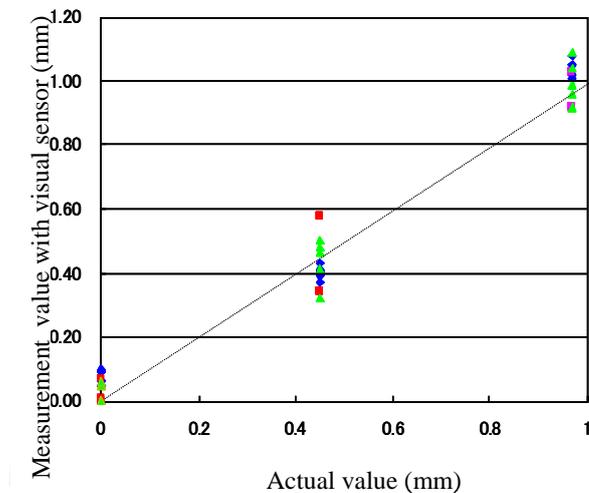


Fig.6.12 Measurement accuracy of shape measurement system.

を用いて実際に既知寸法のものを実測した結果を示す。ばらつきは最大でも約 0.15mm であり、実用上十分な計測精度を有していることが確認できた。また、**Fig.6.13** は、ルートギャップ計測時の 2 方向からの映像と測定結果を表示するパソコンの画面を示したものである。計測手順を **Fig.6.14** に示す。まず、ロボットを計測対象部位に移動させる。そして、あらかじめオフラインプログラミングされた 2 方向から画像を取得する。その後、2 つの画像上で同一の基準点となるケガキ線上の交差する 3 点を設定し、画像間の幾何学的位置を計算する。そして、計測するルートエッジとパッド面の 2 点を同様に 2 つの画像上で設定し、対応点検索から視差量を求め三角測量の原理から 3 次元座標を算出する。この場合、ルートギャップは、1.03mm と計測されている。

また、**Fig.6.15** は、同様に最終パスの余盛の脚長計測を行った結果を示したものであり、余盛部の 3 点を測定し、脚長を求めている。この結果からも、本システムにより作業者は、遠隔にて寸法計測を行うことが可能であることがわかる。

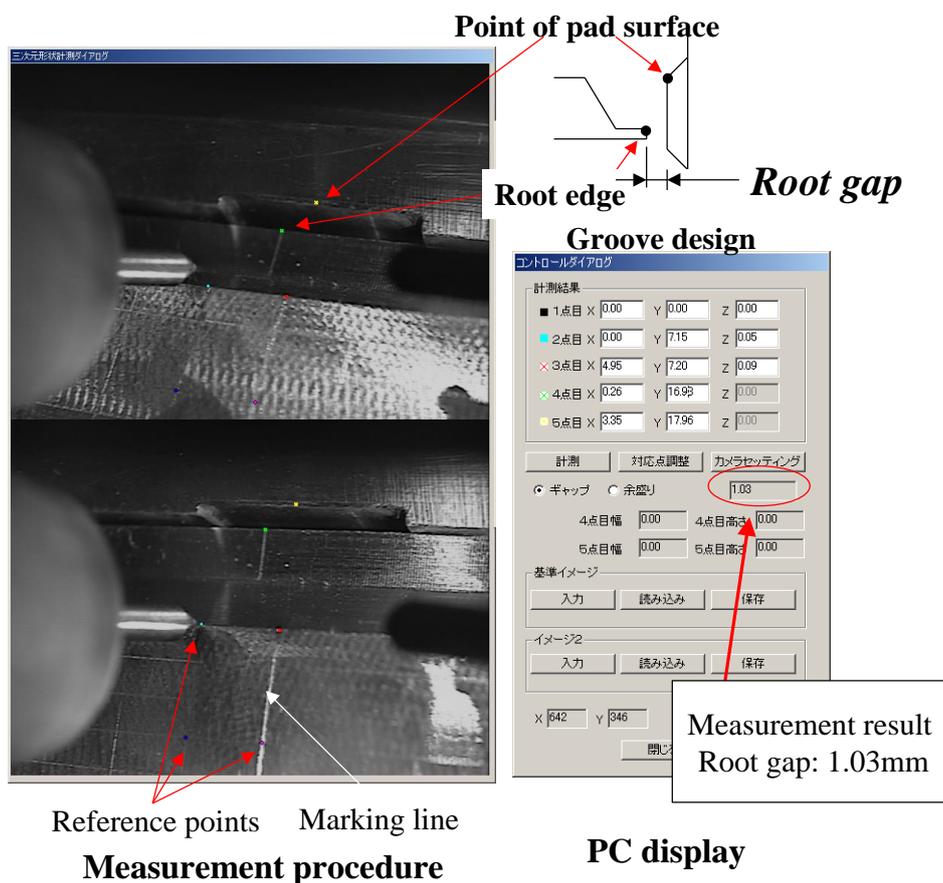


Fig.6.13 Measurement procedure of root gap.

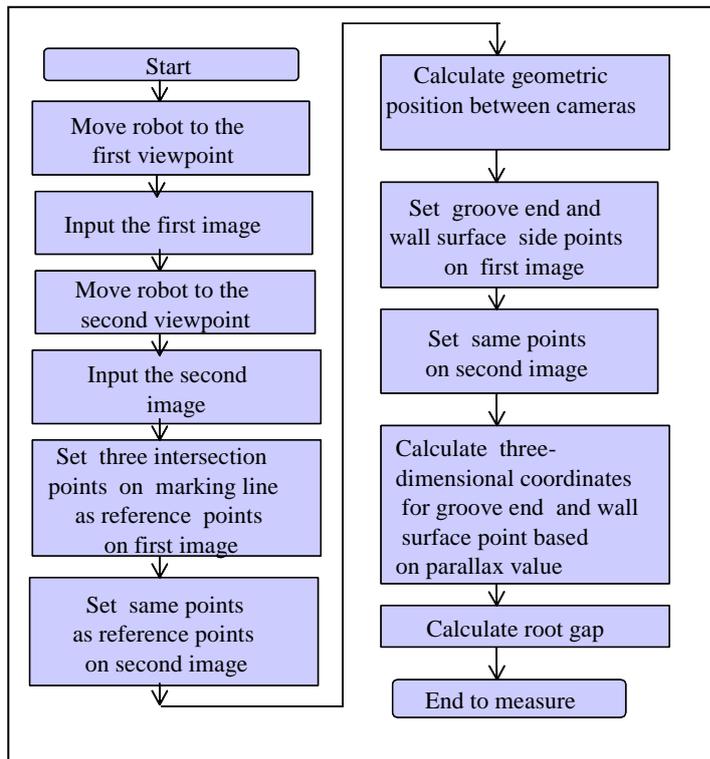


Fig.6.14 Measuring sequence for root gap.

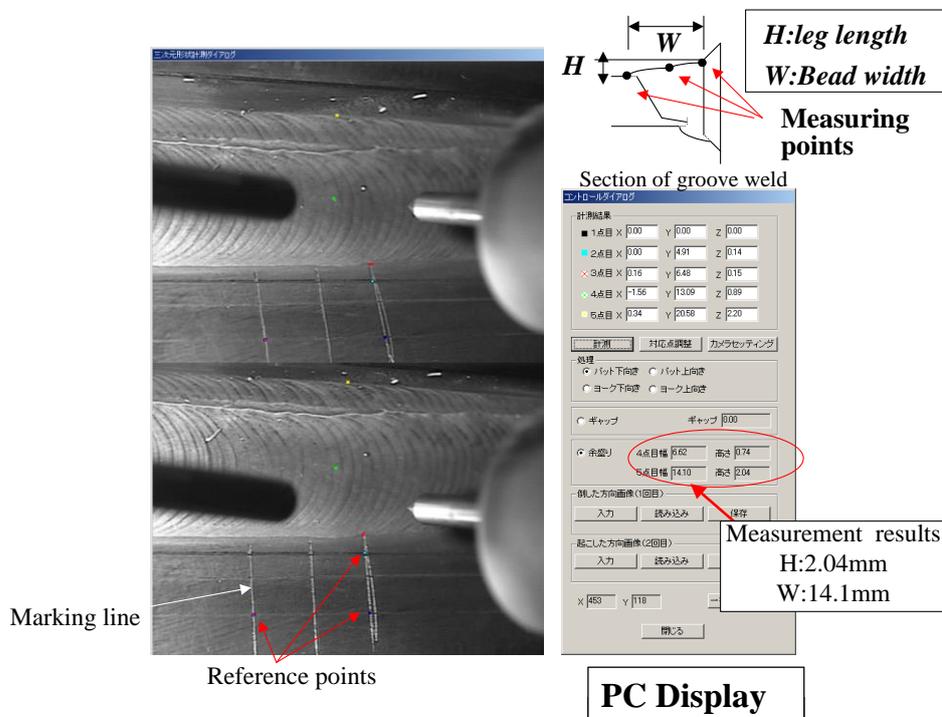


Fig.6.15 Measurement procedure of surface reinforcement shape.

Fig.6.16 は、裏波センシングシステムにおいて、溶接電流を変化させた場合の円錐ミラー映像と処理後の平面画像を示したものである。本手法では、円錐ミラーを用いることからカメラと対象位置との距離変化に対する補正として、平面画像への変換が必要である。平面画像において、溶接電流の増加に伴う高輝度の溶融領域の変化を検出することが可能であることがわかる。また、**Fig.6.17** は、ルートギャップが大きいため溶け落ちが生じた場合の裏波画像の一例を示したものである。アーク光を示す白色部分を画像処理にて検出することで溶け落ちを判断できることがわかる。

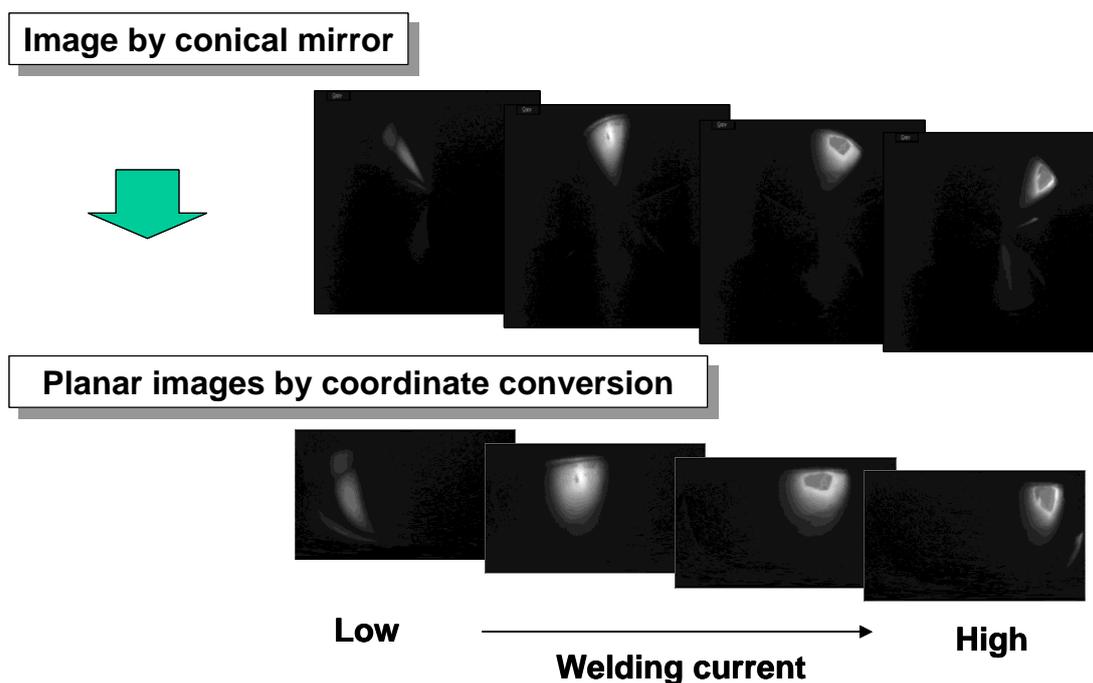


Fig.6.16 Image with variable welding current.

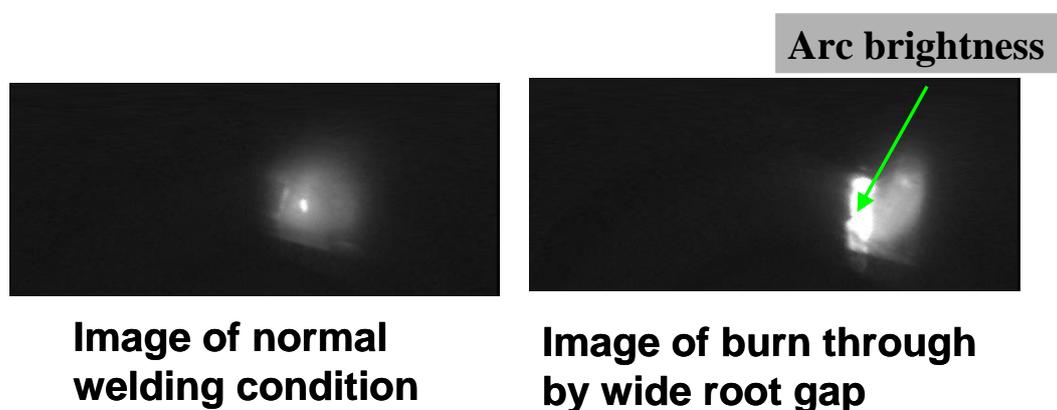


Fig.6.17 Typical images of burn through by wide root gap and normal welding condition.

これらの結果をもとに、溶接条件の制御は、画像処理にて計測された裏波の溶融面積とその時間変化量を入力としてファジィ推論により適正な溶融面積になるように溶接電流（パルスピーク電流）を制御する方法を採用した。今回の対象としている溶接では、溶接の熱変形などの影響により一定溶接電流により裏波の幅を一定にすることは困難であり、溶接条件を随時変化させる必要がある。これらの制御システムを用いて溶接試験を行った結果を **Fig.6.18** に示す。これは、溶接開始時には制御を行わず、途中から裏波センシングシステムを稼働させたもので、横軸は、制御を開始した位置からの距離、縦軸は、裏波溶融面積と初期電流から制御した溶接電流値を示している。制御を開始後、裏波の溶融面積が目標値（約9500画素）になるように溶接電流が制御されているのがわかる。また、溶接後の裏波の状況からも制御が確実に実行されたことが明らかであり、本制御システムの有効性が確認された。

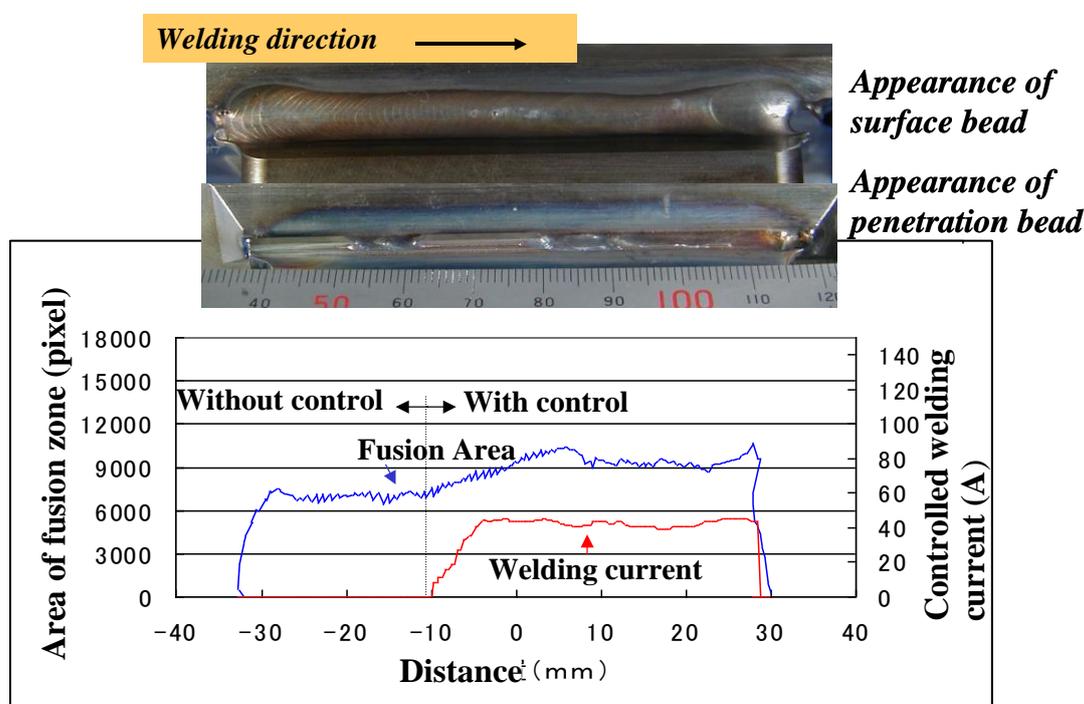


Fig.6.18 Test results of welding condition control.

これらのセンシングシステムを用いた溶接ロボットシステムの全体の動作シーケンスを **Fig.6.19** に示す。全体の動作シーケンスは次の通りである。

まず、ライザブレースがセットされた後、オフラインプログラミングにより溶接条件および動作シーケンスが設定される。そして、CCDカメラによりルートギャップの計測が行われる。ギャップが規定値内であれば溶接が開始する。一方、ギャップが規定値を超える場合は、フィットアップをやり直す。初層ルートパスの溶接時は、裏波センシングシ

テムが作動し、ルートパスの融合不良、溶け落ちを防止する。2層目以降の溶接はCCDカメラにて溶融池を観察し、溶接トーチねらい位置や溶接電流の微調整がモニタを通じて遠隔にて行われる。最終層を完了後、形状計測システムにより余盛形状の寸法計測が行われ、規定の寸法を満足している場合溶接を完了する。以上の動作フローが遠隔にて実施できることをモックアップ試験にて検証した。Fig.6.20 に溶接ロボットシステムの全体外観を示す。

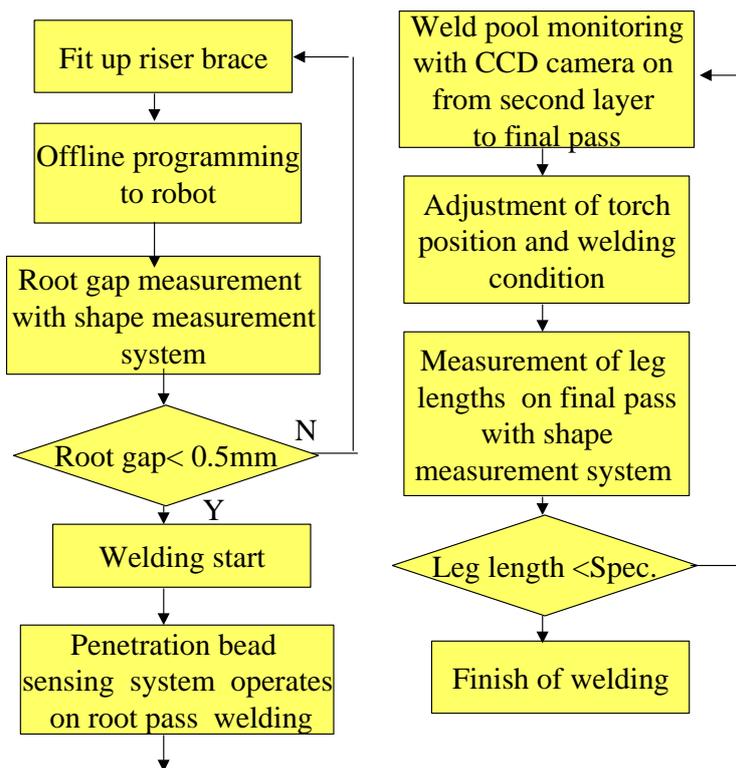


Fig.6.19 Operation sequence of welding robot system.

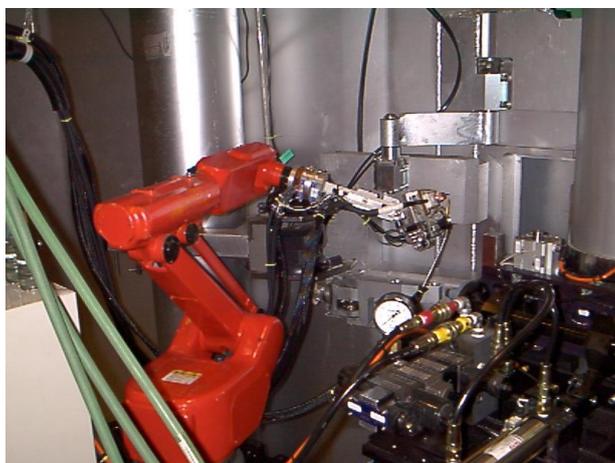


Fig.6.20 Appearance of welding robot system.

6.5 実工事への適用

開発した溶接ロボットシステムを福島第一原子力発電所シュラウド交換工事のなかのジェットポンプ取り替え工事に実機適用した。尚、多関節ロボットによる溶接が、原子炉内で行われたのは世界で初めてである。

Fig.6.21 は、現地における溶接ロボットシステムのライザブレース溶接への適用状況を示したものである。また、**Fig.6.22** および **Fig.6.23** は、遠隔による 3D 形状計測結果を示したものであり、視覚センサによる形状計測システムならびに裏波センシングシステムとともに、十分な性能を発揮し、満足できる工事結果が得られた。とくに、本作業環境は、放射線レベルが高く、規定に定められた被曝量の制限値では、作業者は、5～10分/日しか作業できず、溶接ロボットシステムによる遠隔作業で大幅に被曝量を低減することができた。

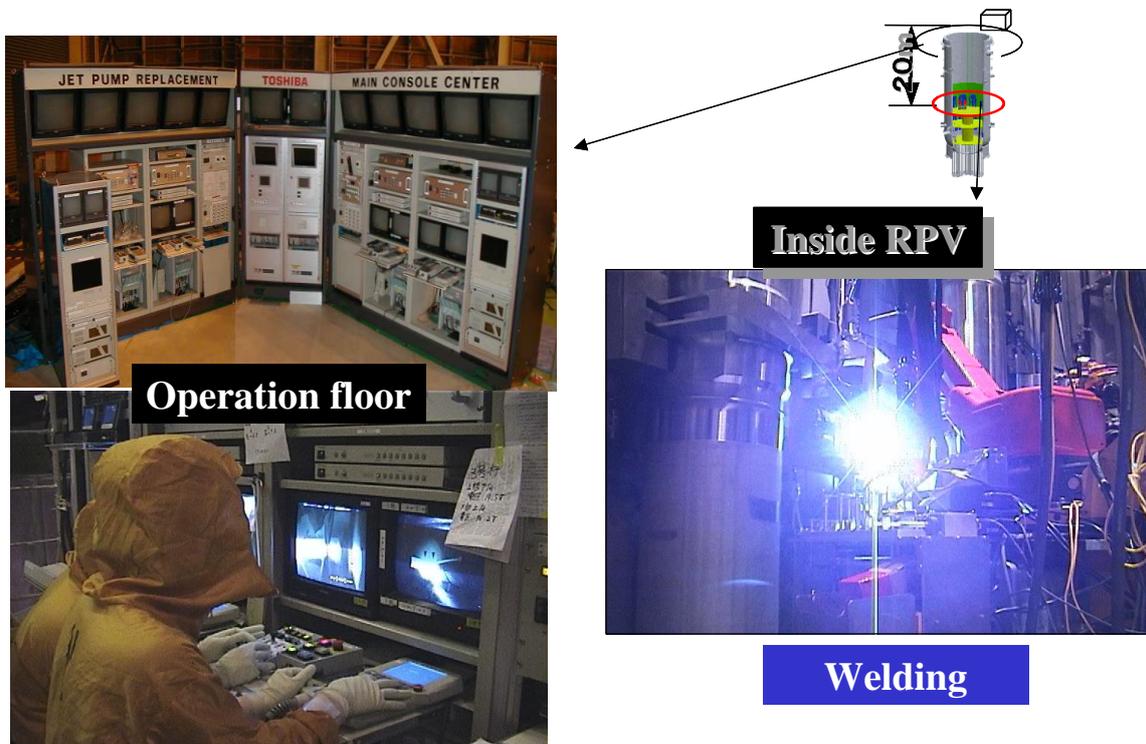


Fig.6.21 Application of welding robot system to field welding at nuclear power plant.

Riser

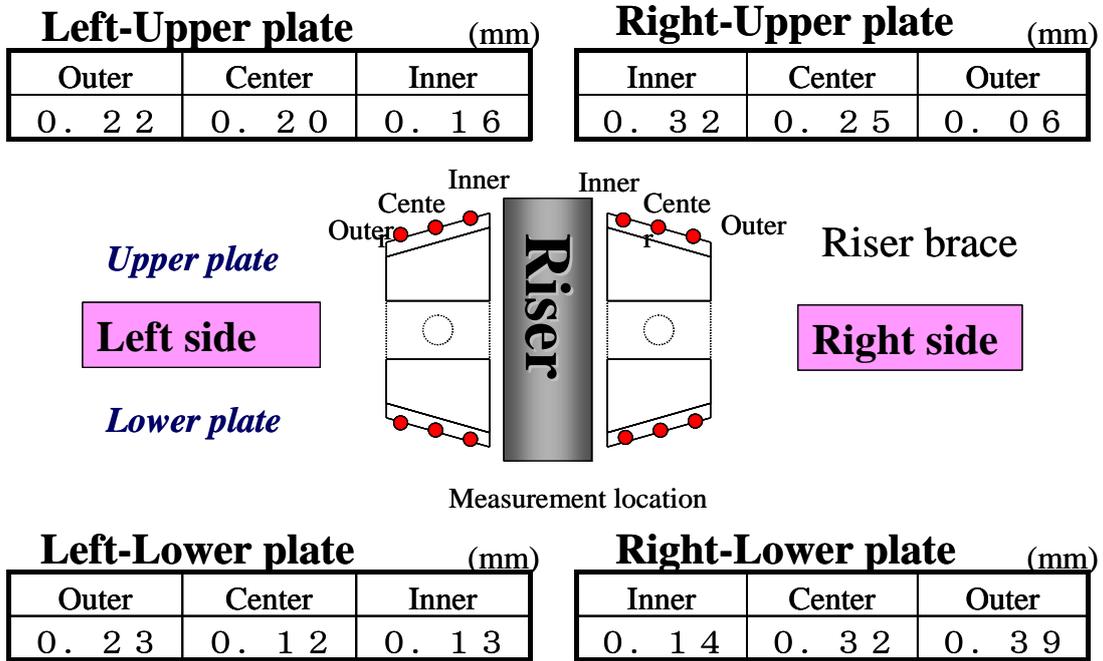


Fig.6.22 Measurement results of root gap in field welding.

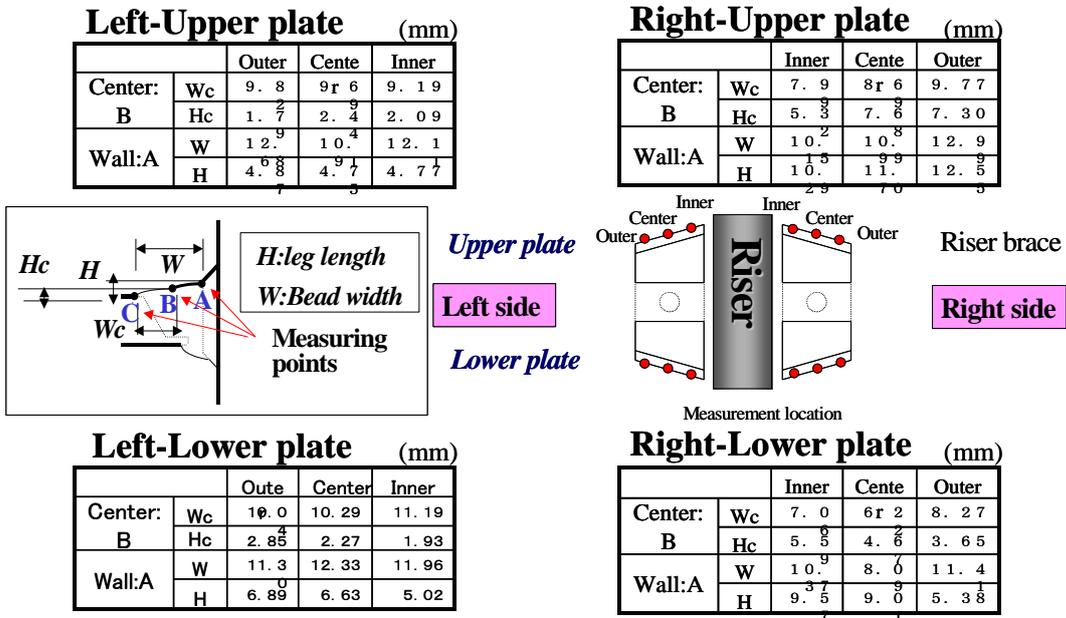


Fig.6.23 Measurement results of reinforcement shape in field welding.

6. 6 結言

本章では、視覚センサによる自動溶接システムの高機能化の実用化例として、原子力炉内構造物保全工事の現地遠隔溶接への適用を目的としてG T A Wロボットシステムの開発を行い、実際に原子力発電所現地にて実機適用した結果について述べた。

以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 原子力保全工事の放射線環境下の溶接作業への適用を目的として完全に遠隔作業を可能とするため、形状計測並びに裏波制御を自動的に行う視覚センシングシステムを有した遠隔溶接ロボットシステムの開発を行った。
- (2) 裏波センシングシステムとして、ルートパスを裏面側に固定した IR-CCD カメラにより円錐ミラーを通じて獲得した連続映像を画像処理し、得られた裏波の熔融面積をファジイ制御により目標値になるように溶接電流を適正化するシステムを開発し、システムが有効に機能することを検証した。
- (3) 形状計測システムとして、溶接ヘッドに配置された CCDカメラを2方向から撮影した映像の視差量から3次元画像を算出することで開先ルートギャップ及び余盛形状の計測を行うシステムを開発し、計測精度が実用上問題ないことを検証した。
- (4) 開発した遠隔溶接ロボットシステムを原子力プラントの現地保全工事に適用し、十分な性能を発揮し、満足できる結果が得られた。

第7章 溶接インプロセス品質管理システム

7.1 緒言

一般的に、溶接部の品質確認は、溶接後の非破壊検査にて行われる。表面欠陥は、P T、MT、内部欠陥は、U T、R Tなどの方法を用いて確認され、許容欠陥を超えるインジケーションが確認された場合、補修溶接が実施される。しかしながら、量産部品や厚肉の溶接では、後工程で欠陥が検出され、補修を行うとなると、多大な時間とコストが生じることになる。このため、溶接施工中のインプロセスで品質確認を行うことができれば、欠陥の発生を未然に防止するとともに、欠陥発生時には、その場で補修等の対応を効率的に行えることになる。また、施工中の品質確認が自動的に行うことができれば、従来、熟練溶接士が判断していたことが、自動溶接においても、溶接士の関与を限りなく少なくした自動溶接システムの実現を可能とすることができる。さらに、溶接後の非破壊検査を省略できる可能性もあり、溶接工程のありかたを一変できるものと考えられる。

従来の自動溶接における品質確認は、主として溶接条件をモニタリングし、適正条件からの逸脱を管理する方法が一般的であった。しかしながら、この方法で全ての品質を保証するのは困難であることは明らかであり、熟練溶接士のように溶接状況をビジュアル的に明示し、評価することが必要である。

そこで、前章までに示した多種のビジュアルセンサ等を活用してアーク現象、溶融池、溶接ビード形状などの溶接部を見える化することにより、健全状態との変化を検出することを可能とし、溶接中の異常を確認できるシステムを開発した。さらに、品質を保証する観点から、従来、溶接中では施工困難であった超音波検査（U T）を可能とするシステムを加えた溶接インプロセス品質管理システムを開発した。

本章では、溶接インプロセス品質管理システムの構成、機能を述べるとともに、きわめて高品質な溶接が要求される蒸気タービンロータの溶接に適用を行い、システムが実用的にも有効に機能した結果について報告する。

7.2 供試材料および実験方法

7.2.1 供試材料

供試した母材は、蒸気タービンロータに使用される、肉厚 150mm、外径 425mm の低合金鋼（Cr MoV 鍛鋼）で、中心孔を有し、内径 70mm であり、配管と同様の形状である。溶接ワイヤは、1.0mm 径の母材に近い組成を使用した。

7.2.2 溶接方法

溶接方法は、精密かつ能率の高いホットワイヤT I G溶接法を用いた。溶接姿勢は、**Fig.7.1** に示すように母材である配管を回転させる下向姿勢とした。また、開先形状は、**Fig.7.2** に示すように、蒸気タービンロータと同様に開先幅 8mm、ベベル角 0.5° の狭開先とし、溶接は、1 層 1 パスにて実施した。溶接時には、低温割れを防止するために、200℃

の予熱を行った。また、溶接後にも同じ温度の直後熱処理を実施した。加熱方法は、インダクションコイルを用いた。

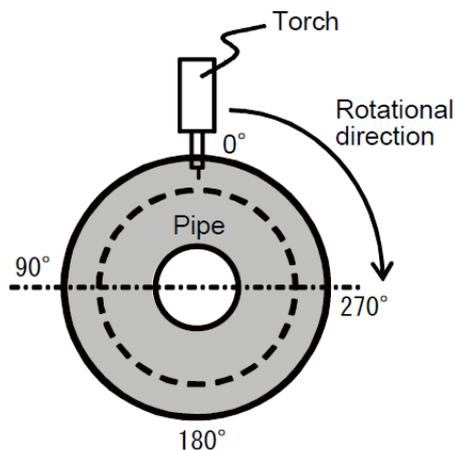


Fig.7.1 Schematic diagram of pipe welding process.

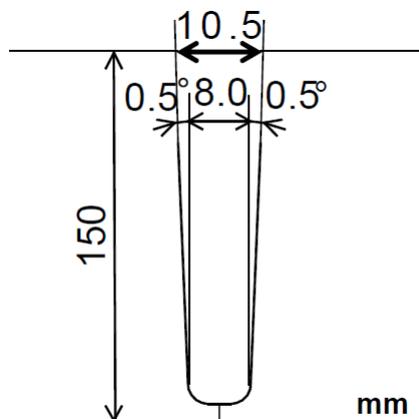


Fig.7.2 Schematic diagram of groove shape.

7.3 溶接インプロセス品質管理システムの構成

一般に、溶接は、対象物の形状誤差および熱変形、または、電源電圧変動、電極ワイヤの曲がりや風などの外乱因子により影響を受ける。これらの外乱因子による変動を認知できるために、溶接インプロセス品質管理システムは、5つのセンシングシステムの構成としている。**Table7.1**に、各システムのセンサとその計測項目を示す。

Table 7.1 Measurement items of in-process quality control system.

System	Monitoring object	Measurement item	Sensor
Monitoring system for welding condition	Welding condition	Welding current, Welding voltage, Wire current, Welding speed, Wire feeding speed	Electric signal
Sensing system for molten pool shape	Molten pool, Electrode, Wire, groove	Weld pool shape, electrode position, Wire position, groove position	CCD camera
Sensing system for backbead shape	Molten pool of back bead	Size of molten pool Appearance of back bead surface	CCD camera
Sensing system for weld bead shape	Bead	Bead appearance, Bead shape, Surface defect	Two CCD cameras (3D)
Sensing system for inner defect	Welded region	Inner defect	LUT (Laser Ultrasonic Testing)

また、**Fig.7.3**に各センサの配置を示す。

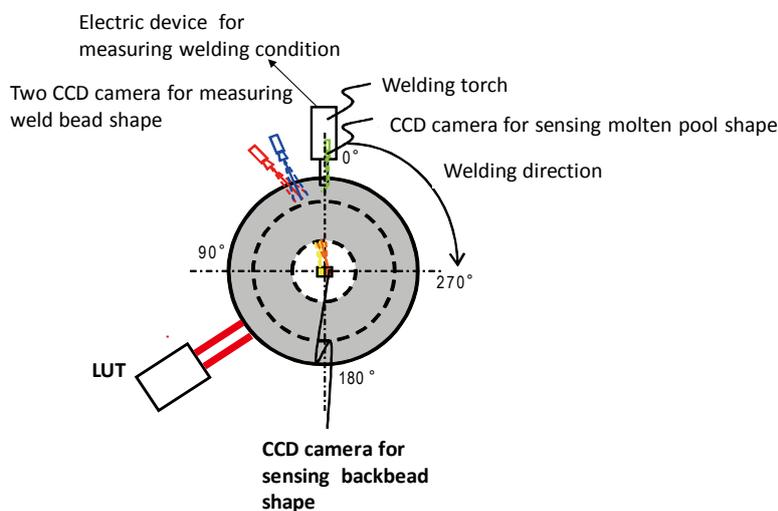


Fig.7.3 Arrangement of sensors.

溶接条件モニタリングシステムでは、ホットワイヤTIG溶接の溶接条件である溶接電流、溶接電圧、ワイヤ速度、ワイヤ電流および溶接速度の各種溶接条件を電気信号にて測定する。あらかじめ、適正条件範囲である上限および下限値の閾値を設け、測定値が閾値を逸脱した場合にどの計測項目が逸脱したか作業者に警告を行う。

溶融池形状センシングシステムでは、溶融池の映像をCCDカメラにて撮影し、映像を画像処理することで溶融池形状、電極位置、ワイヤ位置、開先形状等を数値化している。この場合、強烈なアーク光のもと、溶融池を明瞭に撮影するため、近赤外線に感度をもつIR-CCDカメラを使用し、NDフィルタの透過率を部分的に変化させアーク光の透過率にみを低くした特殊フィルタと1064nmの狭帯域バンドパスフィルタを併用することで高電流溶接においても明瞭な映像を獲得できるようにし、同一画像にて溶融池形状、電極形状、ワイヤおよび開先を検出する手法を適用した。

Fig.7.4に示すように、溶融池形状センシングシステムでは、同一画像にて溶融池形状、電極形状、ワイヤおよび開先を捉え、その映像から、輝度差およびベクトル画像の解析を用いた画像処理にて数値化し、ワイヤ挿入位置、電極位置と電極先端とワイヤ先端間の距離、溶融池距離および開先壁面近傍の溶融池濡れ角度を測定する。そして、これらの計測結果を適正状態時の形状と比較することで、異常を判断できる。これらの画像抽出法、画像処理手法は、第5章に示した通りである。

また、裏波センシングシステムは、裏面からCCDカメラにて初層溶接の溶融状況を観察するとともに溶接後の裏波ビード外観を確認することができる。これは、第6章に示した浦波溶接のセンシング技術を適用している。**Fig.7.5**に裏波センシング用のCCDカメラの構造を示す。2つのCCDカメラから2次元の溶融池、ビード表面状況のみならず裏波ビードの

3次元形状計測を可能にしている。3次元形状の計測手法は次に述べる溶接ビード形状センシングシステムと同様である。

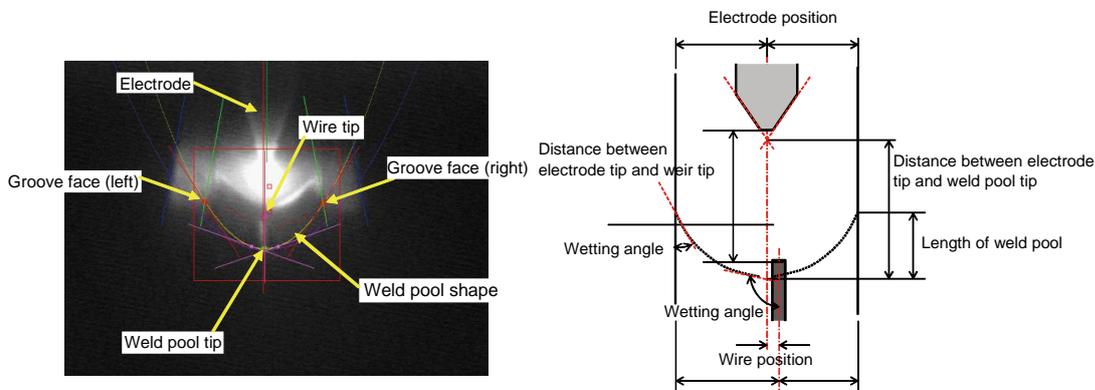


Fig.7.4 Measurement items of molten pool sensing system.

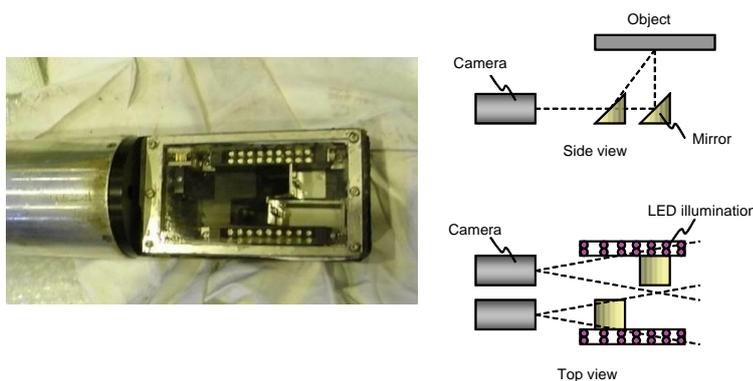


Fig.7.5 Configuration of back bead sensing system.

溶接ビード形状センシングシステムでは、2つのCCDカメラを用いて、ステレオ視によりビード形状を3次元計測する。Fig.7.6に3次元形状の測定原理とカメラの外観を示す。左右2台のCCDカメラを用い、三角測量の原理で同一点を対応するソフトウェアにより、それぞれのカメラの映像から3次元形状を測定できる。これは、第3章で示したものと同様である。

内部欠陥センシングシステムは、レーザ超音波法^{6.5)}を用い、非接触にて溶接内部の欠陥検出を可能としている。内部欠陥センシングシステムに用いたレーザ超音波法の原理を

Fig.7.7に示す。レーザ超音波は、パルス幅数nsのレーザ光を金属材料に照射すると表面から数十nm程度の層がプラズマ化する。そのプラズマの反力により、検査対象面内部に体積波を発生する。発生した超音波は、溶接部を透過し、開先を挟んで受信用レーザにて受

信される。受信レーザは材料内部を伝播した超音波を、母材表面の微小変位として捉えている。なお、レーザは、ND:YAGレーザ(1064nm)、パルス幅は数ns、周波数60Hz、レーザ出力400mJ/pulse以上にて実施した。

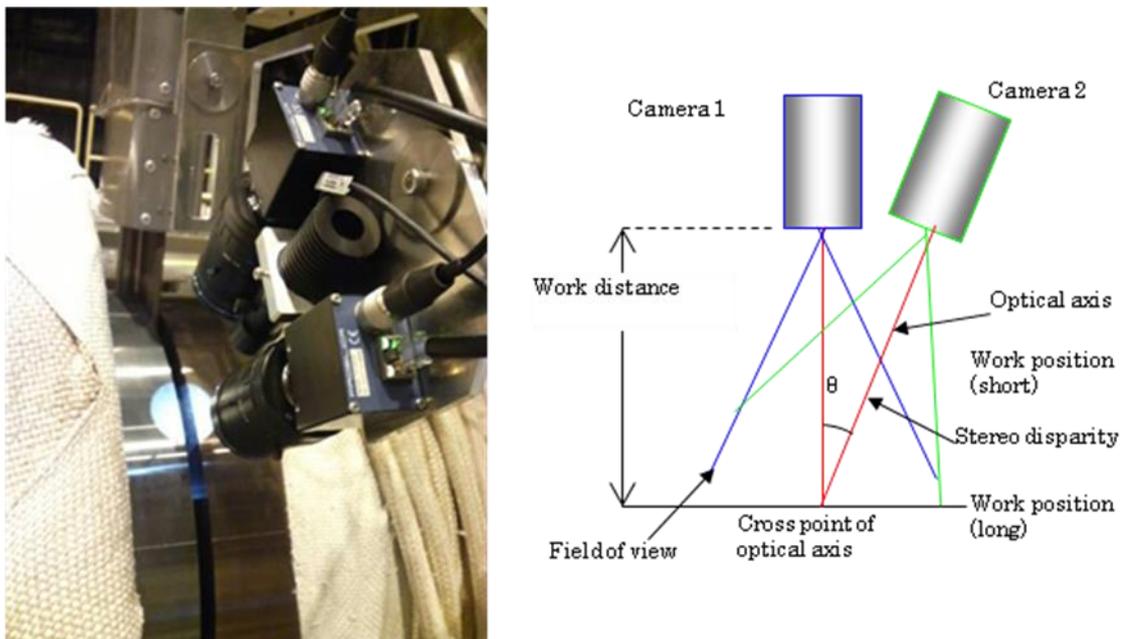


Fig.7.6 Configuration of bead shape sensing system.

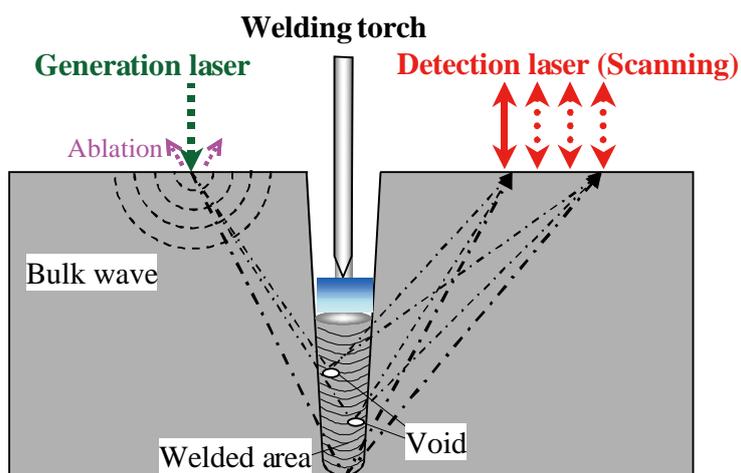


Fig.7.7 Basic concept of LUT.

以上、本システムの運用では、あらかじめ適正に溶接可能な裕度範囲を基に決定した閾値となる数値を与え、施工中に閾値を逸脱した場合、溶接オペレータへ異常を知らせ、条件の修正あるいは溶接の中断を行うことで欠陥発生を未然に防止できる、また、内部欠陥センシングにより溶接中に許容欠陥サイズを超えた欠陥がないことを確認することで品質の保証を行うことができる。

7.4 システム機能検証試験結果

溶接条件モニタリングシステムは、溶接電圧、溶接電流、溶接速度、ワイヤ供給速度、ワイヤ電流などの溶接パラメータをデジタル電気信号としてまとめてデータロガーにて採取し、あらかじめ設定された閾値からの逸脱を判断するソフトウェアを作動させることで、作業者に異常を知らせるようにした。

なお、パルス溶接であるため、パルスの周期に対応し、ピークとベースを分けて検出するようにした。**Fig.7.8**は、製作したモニタ画面を示したもので、各溶接条件の時系列データがリアルタイムで表示されるとともに閾値を逸脱した溶接条件毎に警告表示ができることがわかる。さらに、これらのデータは記録として保存される。

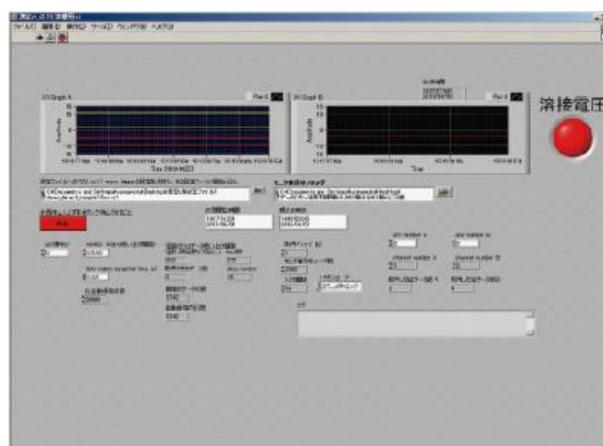


Fig.7.8 Software screen of monitoring system for welding condition.

溶融池形状センシングシステムの機能検証として、異常時と健全時の溶融池形状の計測を行い、その比較を行った。**Fig.7.9**は、溶融池映像に示すように、アークの状態を変化させた場合の溶融池濡れ角と電極先端—ワイヤ先端間の距離の計測例を示したものである。溶融池濡れ角が減少し、電極先端—ワイヤ先端間の距離が大きくなっており、溶融池映像のみでは必ずしも明確にできない健全時と異常時での違いを定量的に把握できることがわかる。また、**Fig.7.10**は、溶融池経常センシングシステムにおける全ての計測項目の時間的変化をモニタ表示画面に示した例である。このように、溶融池形状の定量的な変化を時系列的に計測でき、それぞれの計測項目が閾値を逸脱した場合に警告表示できることがわか

る。

裏波センシングシステムは、配管内面より挿入した CCD カメラにより、溶融池センシングシステムと同様に、初層溶接の溶融池を撮影し、適正な溶融池サイズが維持されていることが確認できる。そして、その計測値により、溶融池がたれ落ちないように、溶接条件の修正がオペレータにより行うことができる。また、溶接後の裏波ビードの外観を溶接後同じカメラで確認し、品質記録として活用できる。

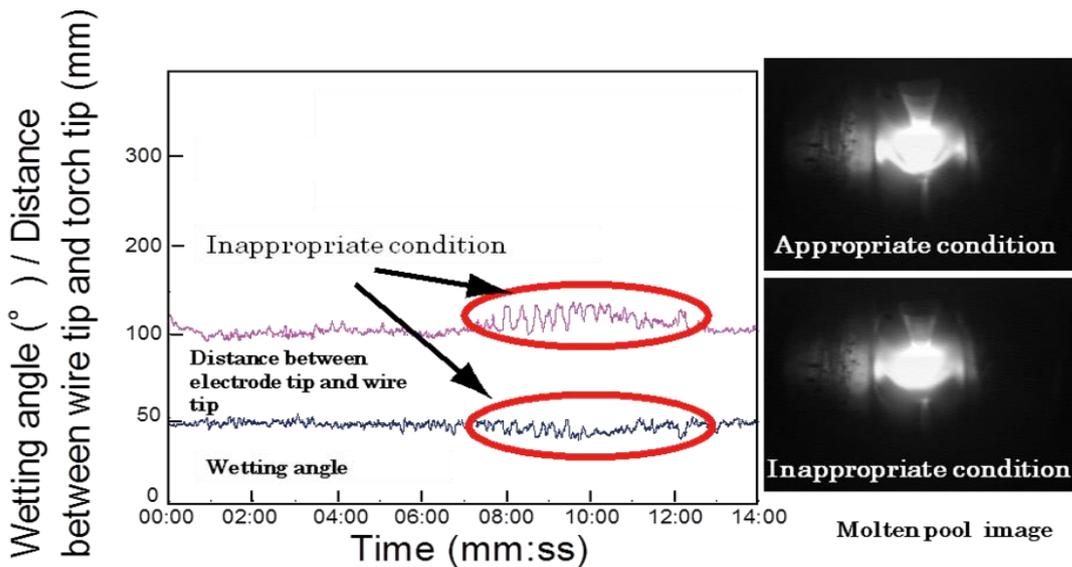


Fig.7.9 Test results of molten pool sensing system.

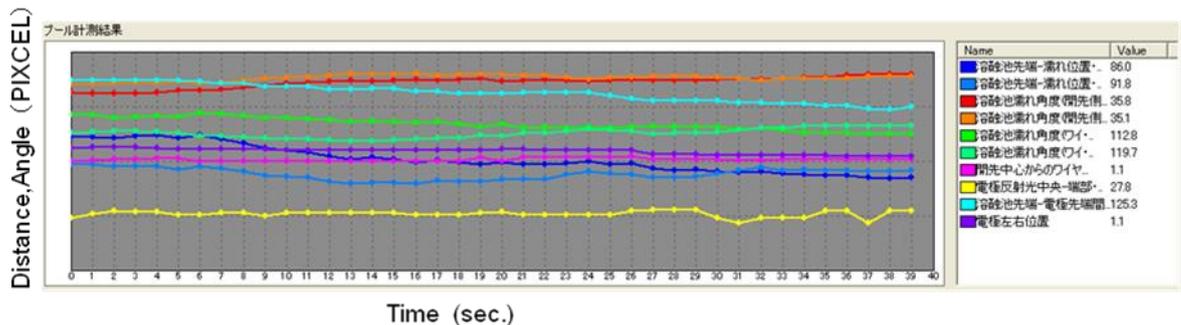
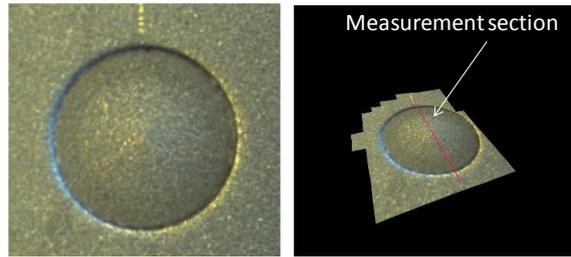


Fig.7.10 Software screen of molten pool sensing system.

溶接ビード形状センシングシステムに関して、3次元計測における精度確認として模擬試験体の計測を行った。Fig.7.11は、溝深さ0.1mmを設けた模擬試験体の外観とその3次元計測表示結果を示したものである。さらに、Fig.7.12は、10断面の計測結果を示したもので計測精度としては、0.11mmと考えられる。この結果は、溶接ビード形状の良否判断を行う上では、十分な精度である。



(a) Test piece shape (b) 3 dimensional shape

Fig.7.11 Configuration of test piece.

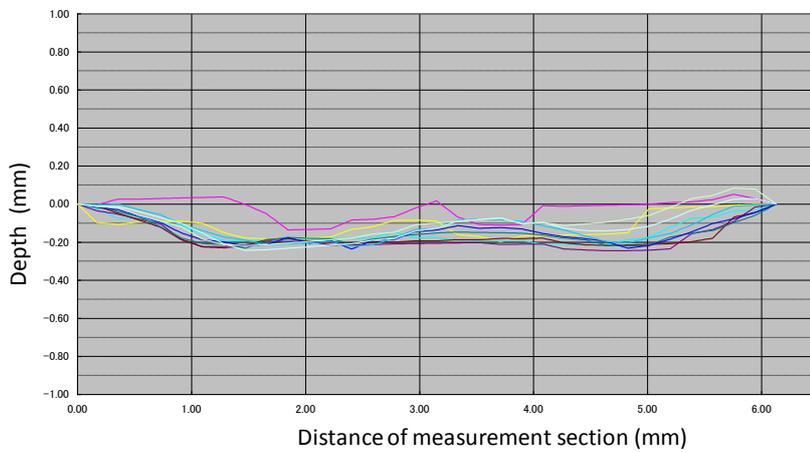


Fig.7.12 Test result of bead sensing system.

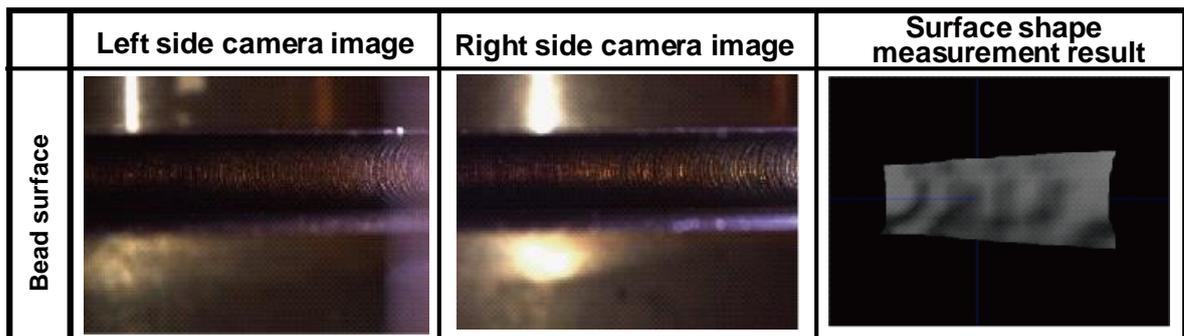


Fig.7.13 Image of bead surface.

Fig.7.13は、2台のカメラにおける左右それぞれのカメラで捉えた溶接ビード外観とこれらから構成した3次元画像を示したものである。3次元画像から、第3章に示したようにテクスチャマッピングやワイヤフレームマッピング等で表示させることにより表面の凹凸や濡れ形状などを的確に把握可能となる。Fig.7.14は、これらの計測手法を用いて、各層のビード表面形状の曲率を半径値にて表示した結果を示したものである。凸形状は正

(+)、凹形状を負(-)としている。値はすべて負を示しており、溶接時のビード形状は凹形状になっていることが確認できる。狭開先溶接の場合、ビード形状が凸になると開先壁面の濡れ性が不足し、次層のパスにて開先壁部位に融合不良を生じやすくなることが知られており、正の値を計測した場合、警告表示にて、溶接を中断し、ビード形状を修正するか、次層の溶接条件を補正する必要があることを溶接オペレータに知らせ、溶接欠陥の発生を未然に防止することが可能である。

裏波形状に関しても、裏波センシングシステムにて同様の計測が可能である。**Fig.7.15**は、試験片における裏波の高さの計測結果を示したもので、正(+)が裏波が出ていることを表している。また、2台のCCDカメラ各々による裏波ビード表面の画像を合わせて示したが、本センシングシステムにて裏波形状の計測が可能であることが確認できた。

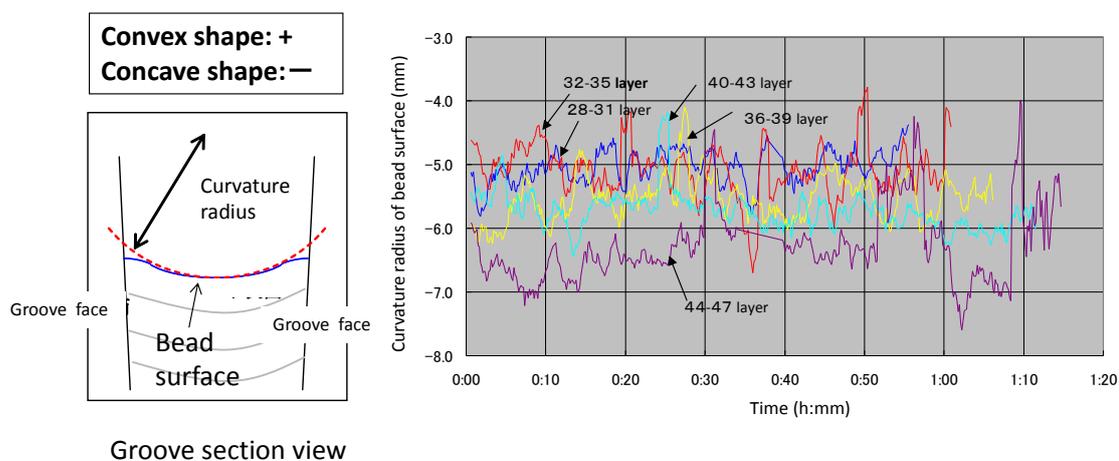


Fig.7.14 Measurement result of bead shape with bead sensing system.

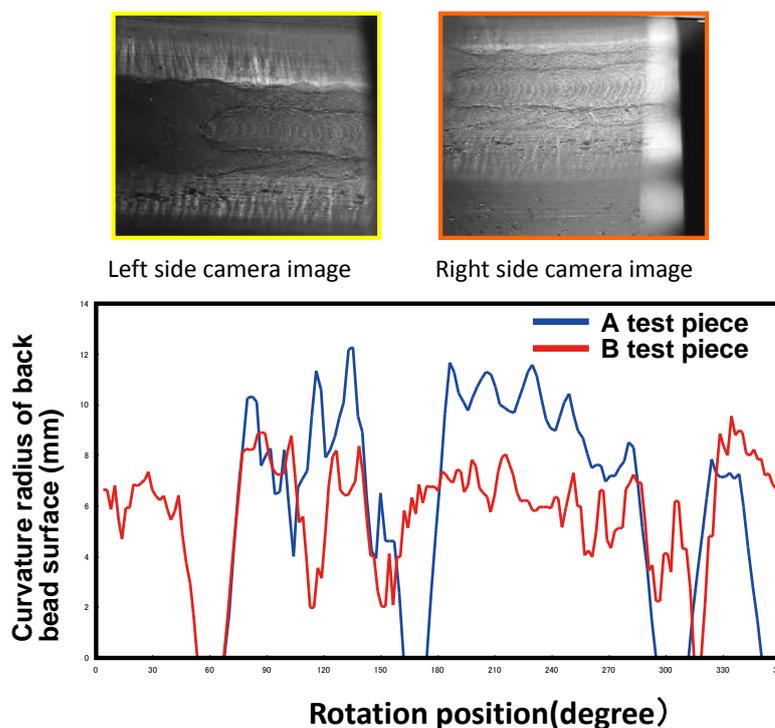


Fig.7.15 Measurement result of bead shape with back bead sensing system.

次に、レーザ超音波（LUT）による内部欠陥センシングシステムの試験結果について述べる。**Fig.7.16**は、模擬欠陥を入れた試験片を用いて、レーザ超音波法の欠陥検出性能を確認した結果を示したものである。試験片は、厚さ150mmの炭素鋼板に欠陥を模擬した $\phi 1.0\text{mm}$ の横穴を深さ15mm(D1)、45mm(D2)、75mm(D3)、105mm(D4)、135mm(D5)の位置へ付与したもので、深さ方向に対する検出精度を調査した。レーザ超音波法は、非接触にて測定できるため対象物が高温でも計測可能であるが、通常のUT（超音波検査）比べ低感度である。このため、受診レーザを溶接方向に対して垂直に走査し、複数点で超音波を受信する開口合成処理^{6,6)}（SAFT: Synthesis aperture focus technique）による信号処理を行うことで、表面近傍から底部近くまでの5つの模擬欠陥に対し、S/N比を十分保持したまま、欠陥の識別が可能であることがわかる。

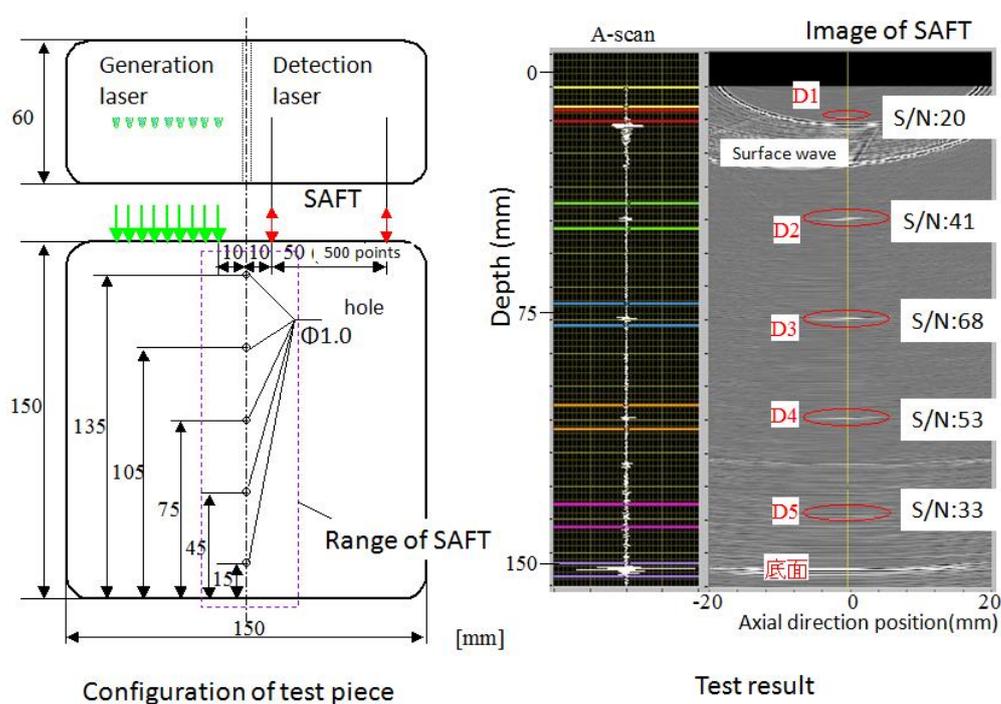


Fig.7.16 Test result of LUT using SAFT.

本溶接では、溶接中に開先が残存するため、この開先が欠陥の検出に影響を与えることが考えられる。**Fig.7.17**に示すように、開先の下に欠陥を模擬した $\phi 1.6\text{mm}$ の模擬欠陥を設け、開先と模擬欠陥との距離Aを5~20mmの間で変化させ、S/N比を測定した。Aの長さが10mm未満の場合S/N比は小さく、ノイズのため開先直下の欠陥は認識できない。一方、10mm以上であれば、S/N比は20以上と大きく検出できる。このことから、開先が残存している場合、超音波の経路が阻害されるため、表面10mm未満は測定が難しくなる。

そこで、開先直下の検出性能を向上させるため、送信レーザをビード上に直接照射する開先直下検査法（Bead surface method）^{6,7)}を適用することにより、開先をはさんで送受信

レーザを配置TOFD(Time of Flight Diffraction) ^{6,8)} 法配置する手法では探傷できなかつた浅い領域の欠陥検出の可能性を試験した。またレーザによる照射痕は溶接でリフレッシュされるため、励起効率を安定させることが可能である。

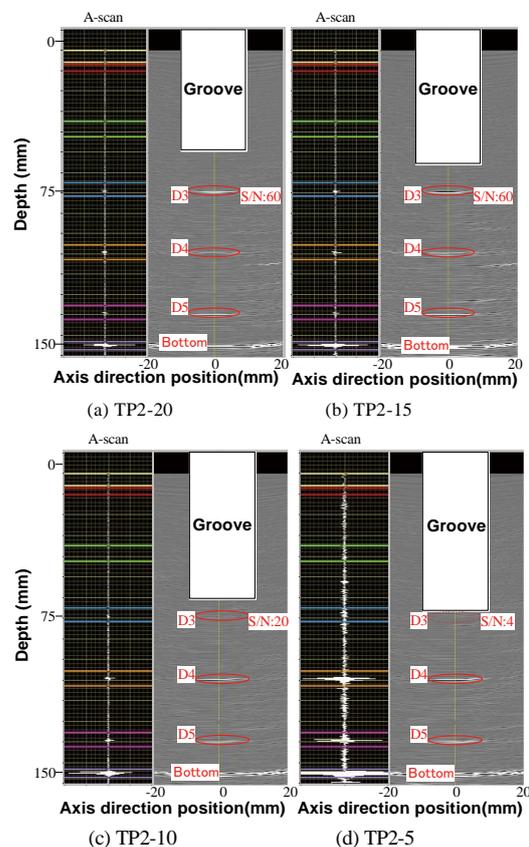
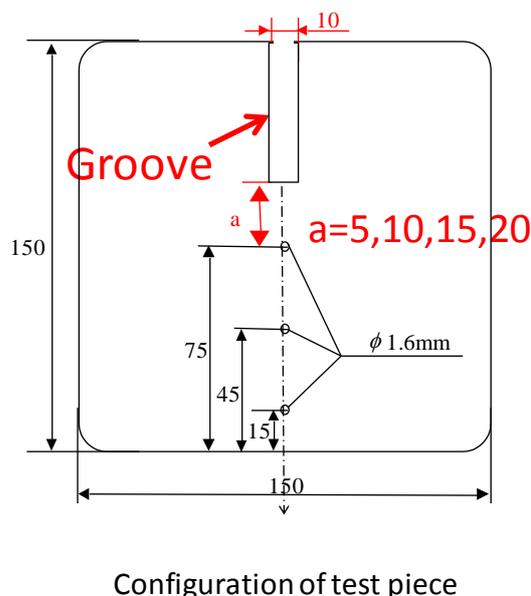


Fig.7.17 Detection result of bead shape with bead sensing system.

Fig.7.18に、150mm×150mm×60mmの炭素鋼のブロック材に開先を模擬した溝および人工欠陥を付与した試験片を用いて、開先直下検査法とTOFD配置での欠陥検出の比較を行った結果を示す。溝は幅10mm、深さ70mmとし、入口欠陥としてφ1.6mmの横穴を溝の下5mm、35mm、65mmの位置に形成した。送信レーザとしてNd:YAG基本波（波長1064nm）のパルスレーザ光を照射した。TOFD配置では検出できなかった直下5mmに位置するφ1.6mmの横穴欠陥を、ビード上に送信レーザを照射した開先直下検査法ではS/N 6.9で検出できることが確認できた。この結果から、溶接中に、表面直下5mm以上の深さの欠陥検出が可能であることがわかる。

また、レーザ超音波の精度を調査するため、溶接中に、意図的に欠陥を発生させ、溶接後、一般的なTOFD—UT法による超音波検査と比較した結果、欠陥サイズがFBH φ1.6以上であれば、欠陥の形状によらず検出できることを確認している。

以上の結果から、各センシングシステムが溶接インプロセス品質管理システムとして適用可能であることを確認した。

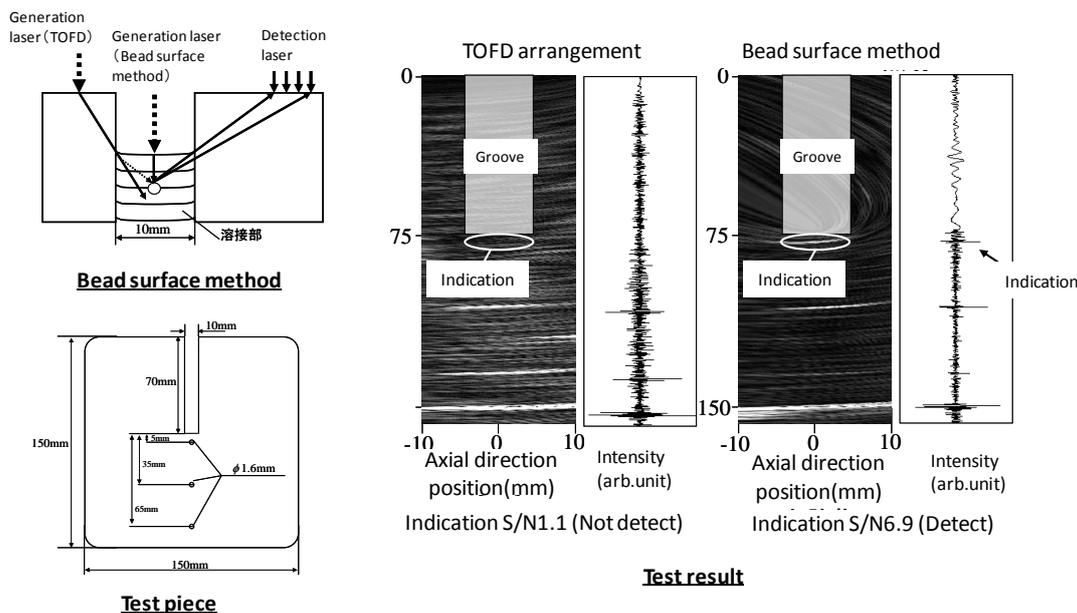


Fig.7.18 Comparison of detection range between Bead surface method and TOFD arrangement.

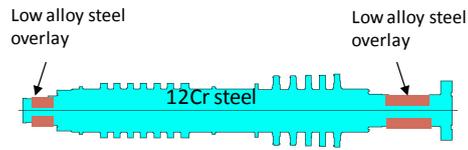
7.5 タービンロータ溶接への実機適用

開発した溶接インプロセス品質管理システムを実機タービンロータの溶接に適用した。

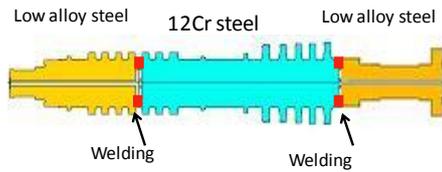
Fig.7.19に蒸気タービンロータの一体型鍛造ロータと異材溶接ロータの構造の一例を示す。異材溶接ロータでは、高圧、中圧、低圧部分をそれぞれ高温強度、靱性等に優れた最も適した材料を採用することが可能であり、加えて小型の鍛造品を活用できる利点がある⁶⁾⁹⁾。ロータ溶接では、溶接の熱影響を低減するため狭開先ホットワイヤTIG溶接を適用している。溶接肉厚は、約150mmでロータを水平状態で回転し、1層1パスにて初層より下向き溶接にて最終層まで自動溶接を行う。溶接に際しては、溶接低温割れを防止するため高周波コイルヒータにて溶接部を200~250℃に予熱を実施している。蒸気タービンロータは、高温中で供用され、長時間運転での信頼性が要求されるものであり、溶接部にはきわめて高い品質が必要である。

Fig.7.20にロータ溶接の状況を示す。ロータ全長は、約8m、溶接部の外径は約1040mmである。溶接トーチには、溶融池センシング用のCCDカメラが内臓されており、溶接ビード形状センシング用のCCDカメラはトーチ後方部に配置されている。また、レーザ超音波は、溶接中に溶接部から90度位置にて適用されている。各センシングシステムにおいて、計測項目に閾値を設定し、異常管理を実施した。

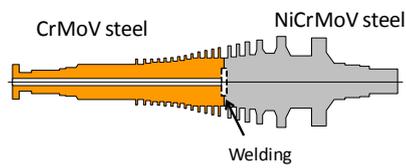
Fig.7.21は、溶接オペレータが監視しているモニタ画面の一例を示したものである。モニタは4分割され、左上画面には、溶接ビード形状センシングシステムにおける2つのカメラで撮影した溶接ビード外観を示している。また、左下画面には、溶融池センシングシステムによる溶接部の映像が表示される。右上画面には、溶融池センシングシステム溶接およびビード形状センシングシステムの時系列の計測結果が表示されるとともに、閾値から逸脱した項目は、瞬時に警告表示される。右下画面は、溶接条件モニタリングシステムにおける溶接パラメータの計測結果が連続的に表示されるとともに、閾値から逸脱したパ



(a) Conventional monoblock forged rotor



(b) Dissimilar welded rotor (HIP type)



(c) Dissimilar welded rotor (ILP type)

Fig.7.19 Structure of welded rotor for steam turbine.

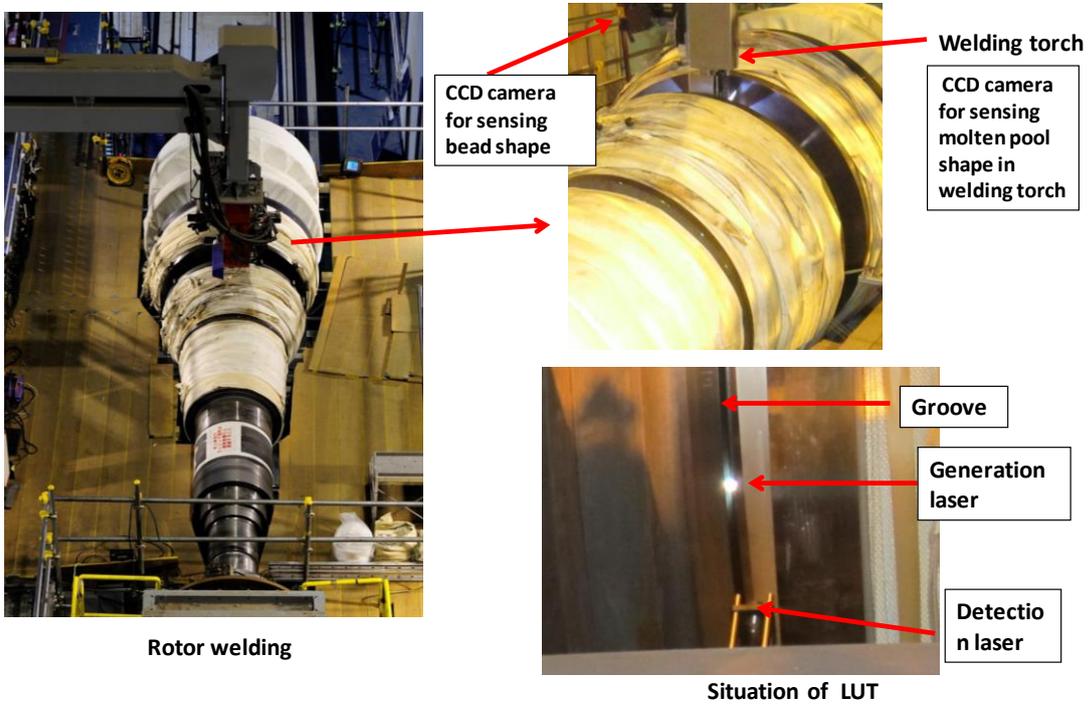


Fig.7.20 Application of In-process quality control system to rotor welding.

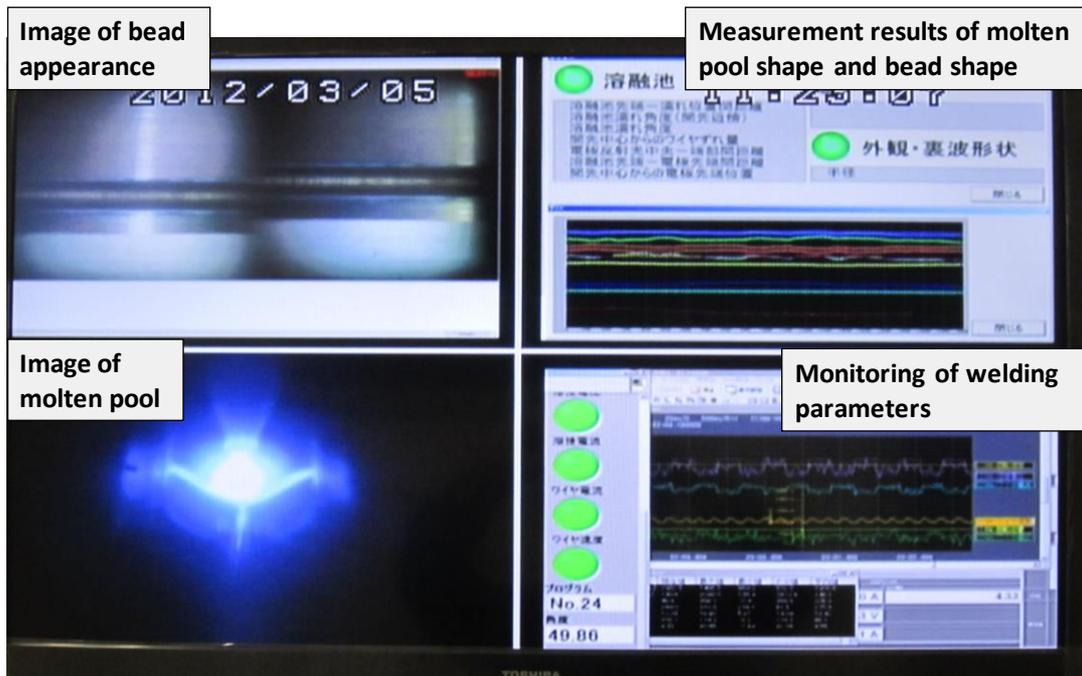


Fig.7.21 Monitoring screen.

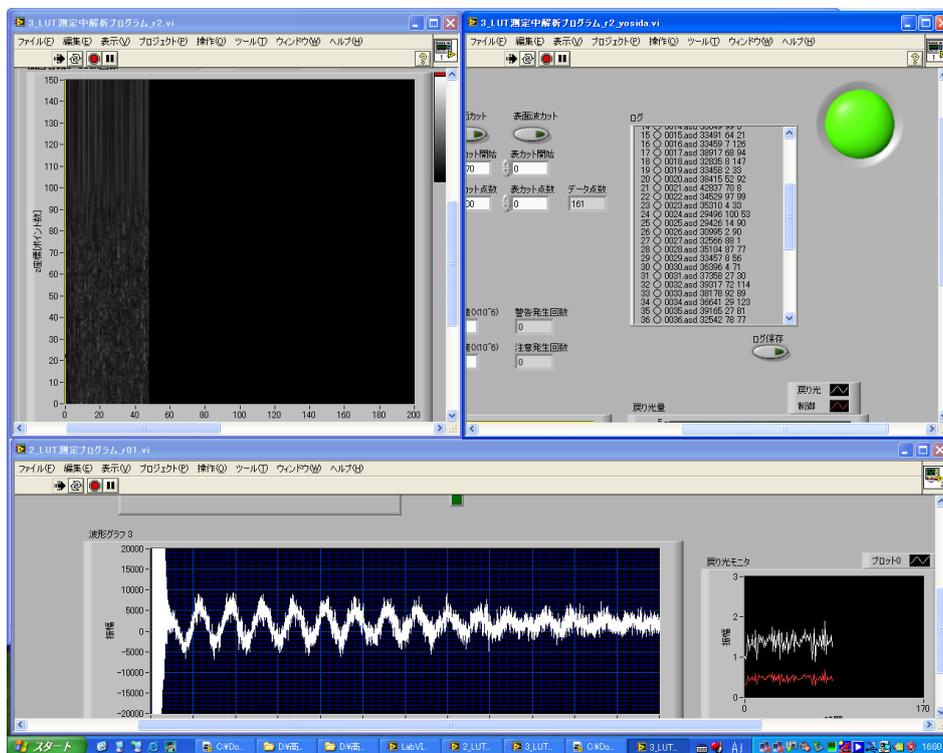


Fig.7.22 Monitoring screen of LUT result.

ラメータは、瞬時に警告表示される。一方、レーザ超音波による検査結果は、溶接中常時表示される。**Fig.7.22**にレーザ超音波結果の表示例を示す。溶接オペレータは、以上の情報をもとに、溶接中に溶接条件の修正を行うとともに、レーザ超音波検査において、許容値を超えるインジケーションが認められた場合には、溶接を中止し、補修作業を実施することになる。本適用では、溶接インプロセスモニタリングの情報をもとに、溶接オペレータが随時溶接条件の修正を実施した結果、許容値を超えるUTインジケーションは確認されなかった。この結果は、本システムが実施工において有効に機能したことを示している。さらに、溶接後の通常実施されるUTにおいても合格であり、レーザ超音波検査により溶接中に品質保証できることも実証された。

7.6 結言

本章では、視覚センサによる自動溶接システムの高機能化の実用化例として、溶接インプロセス品質管理システムを開発し、蒸気タービンロータの溶接に実機適用した結果について述べた。

以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 溶接インプロセス品質管理システムは、溶接条件の異常を検知する溶接条件モニタリングシステム、溶融池形状の異常を検知する溶融池形状センシングシステム、溶接ビード形状の異常を検知する溶接ビード形状センシングシステム、裏波の異常を書く確認する裏波センシングシステム、内部欠陥の有無を検知する内部欠陥センシングシステムの5つのセンシングシステムから構成した。
- (2) 溶接条件をモニタリングするシステムでは、溶接電圧、溶接電流、溶接速度、ワイヤ送給速度、ワイヤ電流などの各種溶接パラメータを検出し、あらかじめ設定された適正条件範囲から逸脱した場合、溶接オペレータに異常を知らせることができることを確認した。
- (3) 溶融池形状センシングシステムでは、近赤外線に感度をもつIR-CCDカメラを使用し、NDフィルタの透過率を部分的に変化させアーク光の透過率にみを低くした特殊フィルタと1064nmの狭帯域バンドパスフィルタを併用することで、同一画像にて得られた溶融池形状、電極形状、ワイヤおよび開先などの形状を画像処理により数値化し、定量化した。そして、本センシングシステムが、それらの形状が適正範囲から逸脱した場合、溶接オペレータに異常を知らせることができることを確認した。
- (4) 溶接ビード形状センシングシステムでは、2台のCCDカメラを用い、ステレオ視により3次元計測を可能にすることで、溶接ビード形状の計測を可能にし、これらの形状を数値化し、定量的に示すことで異常を認識できることを確認した。
- (5) 裏波センシングシステムでは、CCDカメラを用いて裏面より裏波の映像を獲得し、溶接中の異常を検知するとともに、溶接後の裏波ビード形状を3次元計測することで異常を確認できることを確認した。
- (6) 内部欠陥センシングシステムでは、レーザ超音波を用いて、開口合成処理による信号処理を行うことで溶接中に内部欠陥の検出が可能であることを示した。さらに、送信レーザをビード上に直接照射する開先直下検査法を適用することにより、開先直下5mm以上の欠陥検出を可能とした。
- (7) 溶接インプロセス品質管理システムを蒸気タービンロータの実機溶接に適用した結果、システムが有効に機能することが検証でき、溶接品質の向上と溶接作業の効率化が実現できた。

第8章 溶接技能デジタル化システム

8.1 緒言

近年、日本では、熟練溶接技能者の不足が顕在化し、技能継承が大きな問題となってきている。原子力や火力等の発電プラント機器の製造においては、溶接によるトラブル、事故が社会的問題に発展することもあり、品質の維持が重要な課題となっている。この対策として、溶接の自動化、ロボット化が推進されているが、全ての作業を置き換えるには限界がある。一方、熟練技能者の育成には、長い期間と多大なコストが必要とされるが、その訓練および育成方法は、OJT(On the job training)が主体で、結果的には現場指導員に依存した形態ですすめられているのが現状である。さらに、昨今では、その指導員すらいなくなっている状況を考えると、OJT から脱却した効率的な訓練システムの導入が必要である。また、技能、技術の継承に関して、作業のドキュメント化や映像化のみでは限界があり、ノウハウそのものを数値化、定量化することが最も有効な手段と考えられる。

そこで、視覚センサを用いて溶接士の挙動計測を行い、遠隔非接触による計測と多次元特徴量の同期的な抽出を可能とし、さらに、得られた映像を画像処理することで定量化、デジタル化可能なシステムを開発した。このシステムにより、熟練溶接士の技能やノウハウの定量化、デジタル化が可能となり、溶接士の教育訓練ならびに技能継承への活用をはかることができた。

本章では、視覚センサによる自動溶接システムの高機能化の実用化例として、効率的な溶接訓練システムの導入ならびに技能継承への取り組みを目的として開発した溶接技能デジタル化システムについて述べるとともに、実際に、溶接士の教育訓練ならびに技能継承へ活用した結果について述べる。

8.2 溶接技能デジタル化システムの構成と機能

8.2.1 システムの基本コンセプト

近年、技能継承としてよく用いられている手法としては、ビデオカメラなどによる映像化があげられる。これは、熟練作業者の作業を撮影しデータベース化するものであり、作業の標準化には有効であり、組立作業などにおいては威力を発揮する。しかしながら、溶接作業においては、通常のカメラでは強烈なアーク光の影響で最も重要である手元の挙動が不明であることや作業の定量化、数値化が行われなため、映像化のみで、実際の熟練者のノウハウを理解することは困難といえる。また、近年、コンピュータの進歩にともない、シミュレーションやバーチャル技術の活用も増えているが^{70~73)}、技能継承への展開ができないことから、基本動作に実作業のノウハウの明示をはかることを第一とし、実施工中の挙動を解析することを基本としてシステムの構築を行うこととした。

そこで、溶接士の挙動を計測し、評価するシステムとして、手元を含め多方向から計測可能な CCD カメラを中心としたビジュアルセンサを複数用いることで、遠隔非接触による計測と多次元特徴量の同期的な抽出を可能とし、さらに、得られた映像を画像処理する

ことで定量化、デジタル化をはかれるものを基本とした。

Fig.8.1 は、開発した溶接技能デジタル化システムの基本機能を示したもので、複数のカメラにて溶接士の挙動計測を行い、その画像をデータ分析し、特徴量を抽出することにより技能の数値化ならびに技能評価を行うもので、さらに、それらの画像を記録保存し、再生、提示することを可能とした。

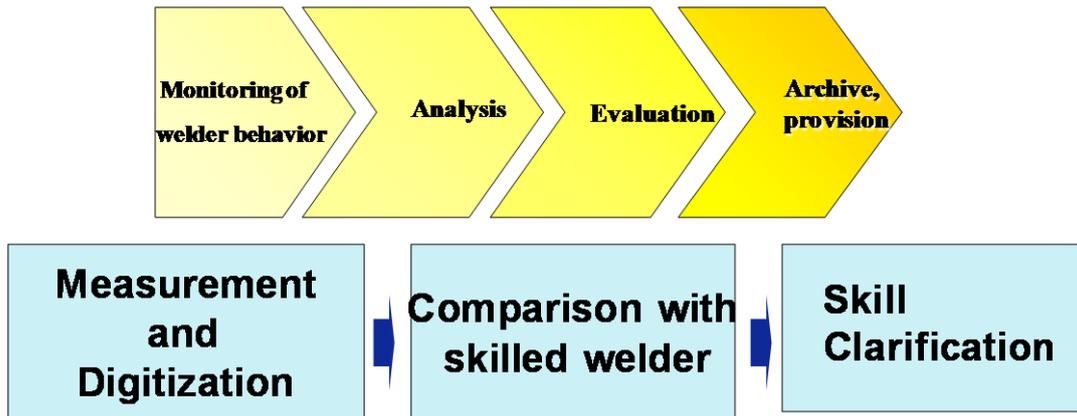


Fig.8.1 Concept of welder skill digitization system.

8.2.2 TIG 溶接技能デジタル化システムの構成と機能

Fig.8.2 に、平板 TIG（ガスタングステンアーク）溶接を対象とした溶接技能デジタル化システムの基本構成を示す。とくに、本システムでは、TIG 溶接で最も技量を要求される初層裏波溶接を対象とした。基本的には、溶接士の全体挙動を撮影する全景ビデオカメラ、主に溶接士のワイヤ送給挙動を撮影する手元ビデオカメラ、溶接トーチの運棒挙動を撮影するためトーチに取り付けられた小型 CCD トーチカメラ、裏波溶け込み状況を撮影するため板裏側にセットする裏波用 CCD カメラの 4 つのカメラとそれらの映像を解析、表示するパーソナルコンピュータおよびディスプレイから構成される。

また、**Fig.8.3** は、これらの映像と抽出する計測項目を示したものである。トーチカメラにより撮影した溶融池映像を画像処理することにより、開先エッジ、開先中心線、電極先端座標、ワイヤ先端座標、ワイヤマーク（あらかじめワイヤにいられた罫書き線）座標などを抽出し、ウィービング速度、周期、ワイヤ送給速度、ワイヤ挿入位置をあらわす電極とワイヤ先端距離を算出する。また、裏波用 CCD カメラからは、裏波溶融池の動画像より画像処理することで溶接速度を求めるとともに溶け込み状況として裏波面積を算出する。一方、アーク長の変動については溶接電圧を電氣的に計測しており、トータルで 7 つの計測項目を技能指標としている。以上は、基本的なオンラインで計測できる項目であるが、オフラインでは、溶融池映像をさらに画像処理し、溶融池形状を求めることや手元カメラによる映像からワイヤ挿入角度やトーチ挿入角度等の情報を抽出することなどへの展開も可

能であるが、基本技能としては、これらの7項目の抽出により熟練度の比較が十分可能である⁵⁾。なお、画像処理手法は、前章までに示した通りである。

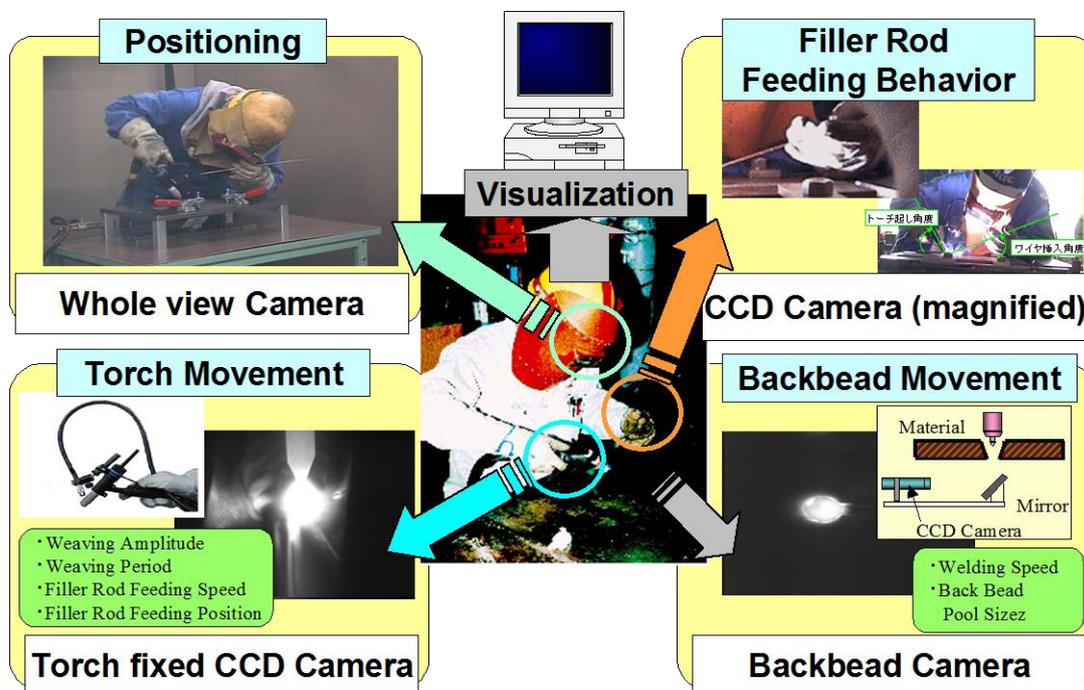


Fig.8.2 Monitoring and measurement system of welder behavior for TIG welding.

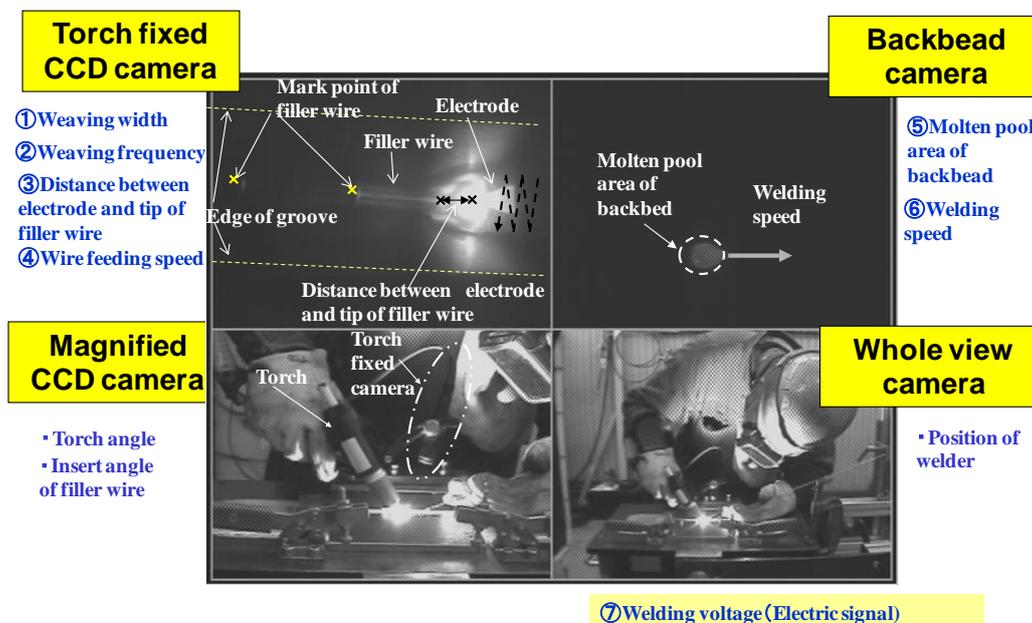


Fig.8.3 Images of 4 cameras and measurement items.

本システムの特徴としては、溶接技能を数値化、ビジュアル化することに加え、熟練溶接士との挙動の違いを比較できることにある。**Fig.8.4**は、技能デジタル化システムにおける計測後の解析・評価結果の表示画面を示したものである。7つの計測項目の時系列変化を表示するとともに、それらの平均値と分散の合計14項目について技能指標として規格化し、レーダチャートに評価結果が示される。次元の異なる複数の技能指標を同時に評価することができ、特徴を直感的に表示することが可能となる。この場合、あらかじめ組み込まれた熟練溶接士のデータが比較表示されるため、どの項目が熟練溶接士に比べ劣っているのかを認識することができる。また、あわせて、技能の評価として、技量スコアを算出している。技量スコア (MD) は、品質工学であるマハラノビスタグチ法^{7.5)} ^{7.6)}を用いて14の計測項目を一次元評価したもので、熟練溶接士のスコアを1とし、技能を定量評価するものである。技能スコアの目安としては、弊社の社内評価では、熟練者で1～2、中級者で2～10、初級者は10をこえる。これらの結果は全て計測後、数分のうちにオンラインで表示される。

本システムを活用した技能訓練の流れを **Fig.8.5** に示す。このように本システムを用いることで、訓練者は、自らの挙動を視覚的、定量的に把握することができ、あらかじめデータ化された熟練者との比較を随時おこなうことで独習が可能となる。この結果、指導員のいない職場においても、練溶接士のデータをもとに効果的な訓練が可能となる。

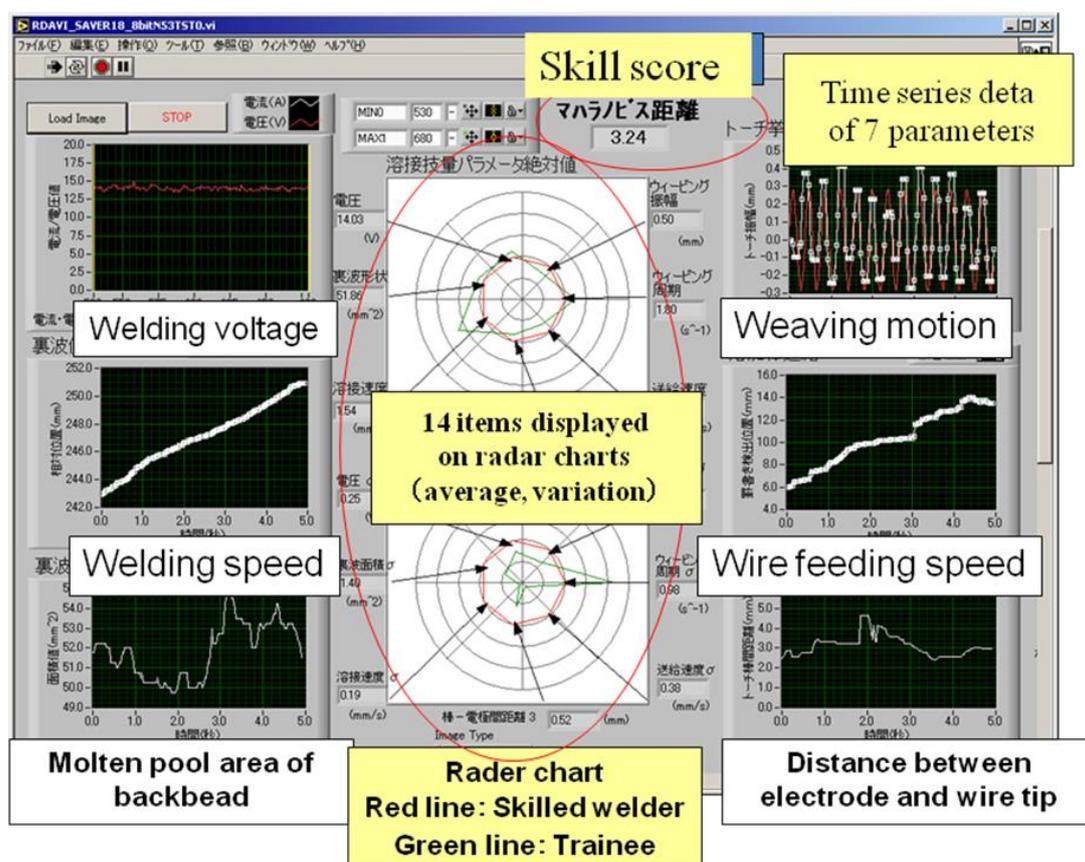


Fig.8.4 Summary display of TIG welding system.

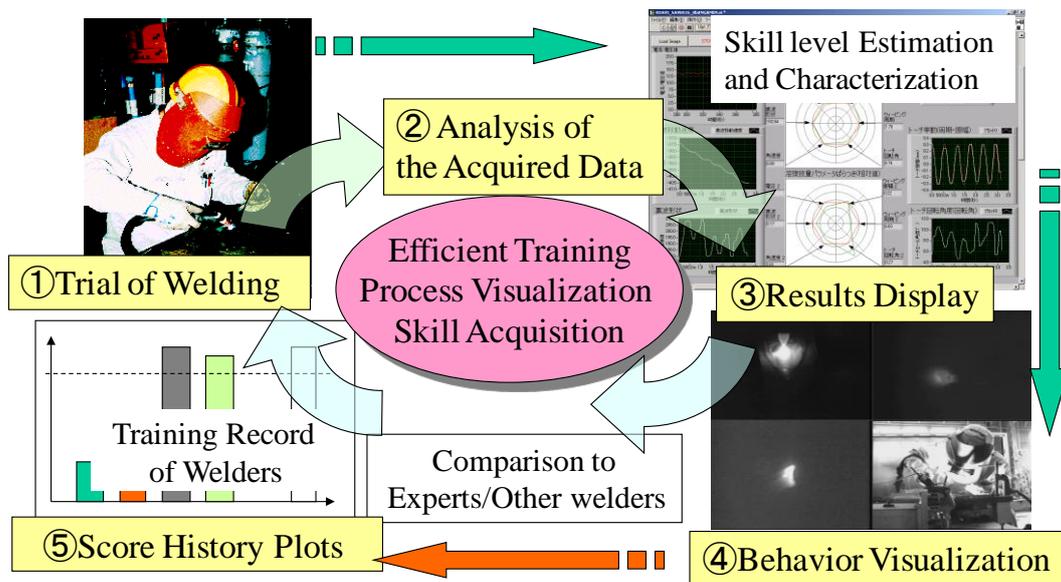


Fig.8.5 Process of welder training.

8.2.3 MAG 溶接技能デジタル化システムの構成と機能

製造現場では、多岐にわたる溶接法が用いられる。精密な溶接に適用される TIG 溶接に対し、MAG(ガスマタルアーク溶接)半自動溶接は、能率を重視した溶接法であり、各産業界で広く適用されている。溶接法により技能評価指標は異なるため、計測項目には、MAG 溶接固有のものを加えた。

品質状況を示す指標である溶融池形状としては、溶融池幅および溶融池先行距離、挙動指標として、チップ母板間距離（ノズルーワイヤ先端の距離）、ワイヤねらい位置、ウィーピング幅・周期、溶接速度を計測項目とした。また、溶接条件の設定値である溶接電圧、ワイヤ送給速度、溶接電流についても同時に計測を行うこととした。

以上の計測項目をふまえた MAG 半自動溶接の下向き姿勢における溶接技能デジタル化システムの構成を Fig.8.6 に示す。溶接士正面に溶接士の全景を撮影する全景カメラ、溶接トーチにとりつけたトーチカメラ、溶接進行方向前方に設置した 2 台の側方カメラ計 4 台のカメラとそれらの映像を解析、表示するパーソナルコンピュータおよびディスプレイからなる計測制御装置から構成されている。さらに、溶接電流、溶接電圧、及びワイヤ送給速度の出力値を電気信号により計測する構成となっている。Fig.8.7 は、それぞれのカメラから得られた映像と画像処理にて計測される項目を示したものである。解析、評価手法は、TIG 溶接システムと同様である。また、解析・評価結果の表示画面には、計測値の時系列データと平均及び分散のレーダチャートが表示される。レーダチャートには、溶融池幅および溶融池先行距離、チップ母板間距離（ノズルーワイヤ先端の距離）、ワイヤねらい位置、ウィーピング幅・周期、溶接速度、溶接電流の 8 項目が表示され、あらかじめインストールした熟練溶接士のデータと試験者の比較が行える。

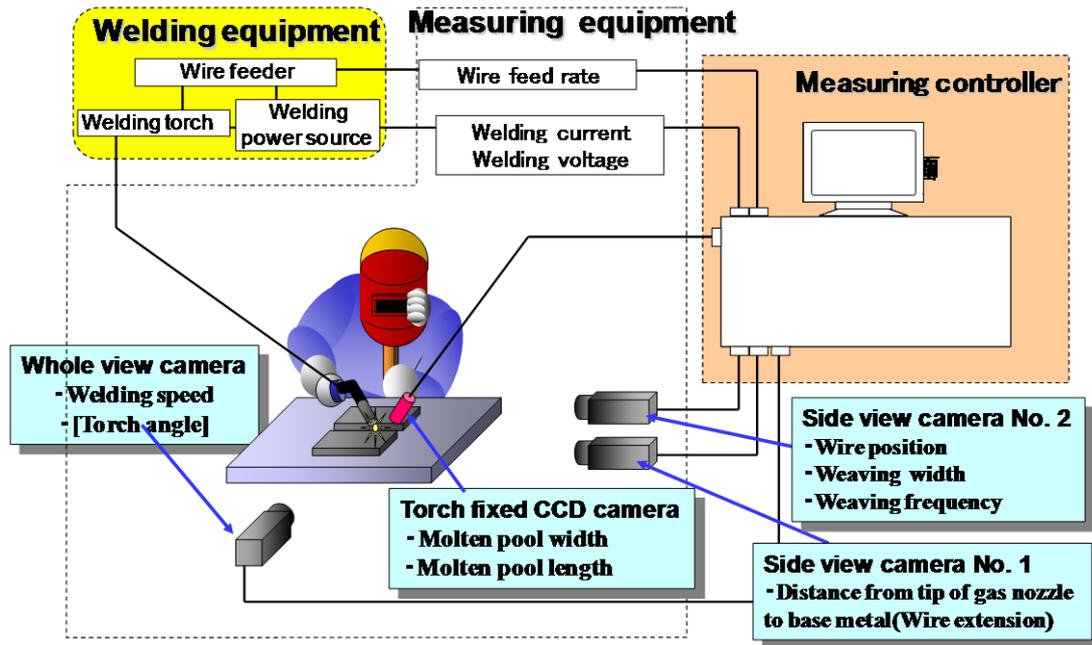


Fig.8.6 System configuration of analyzing welder behavior for MAG welding.

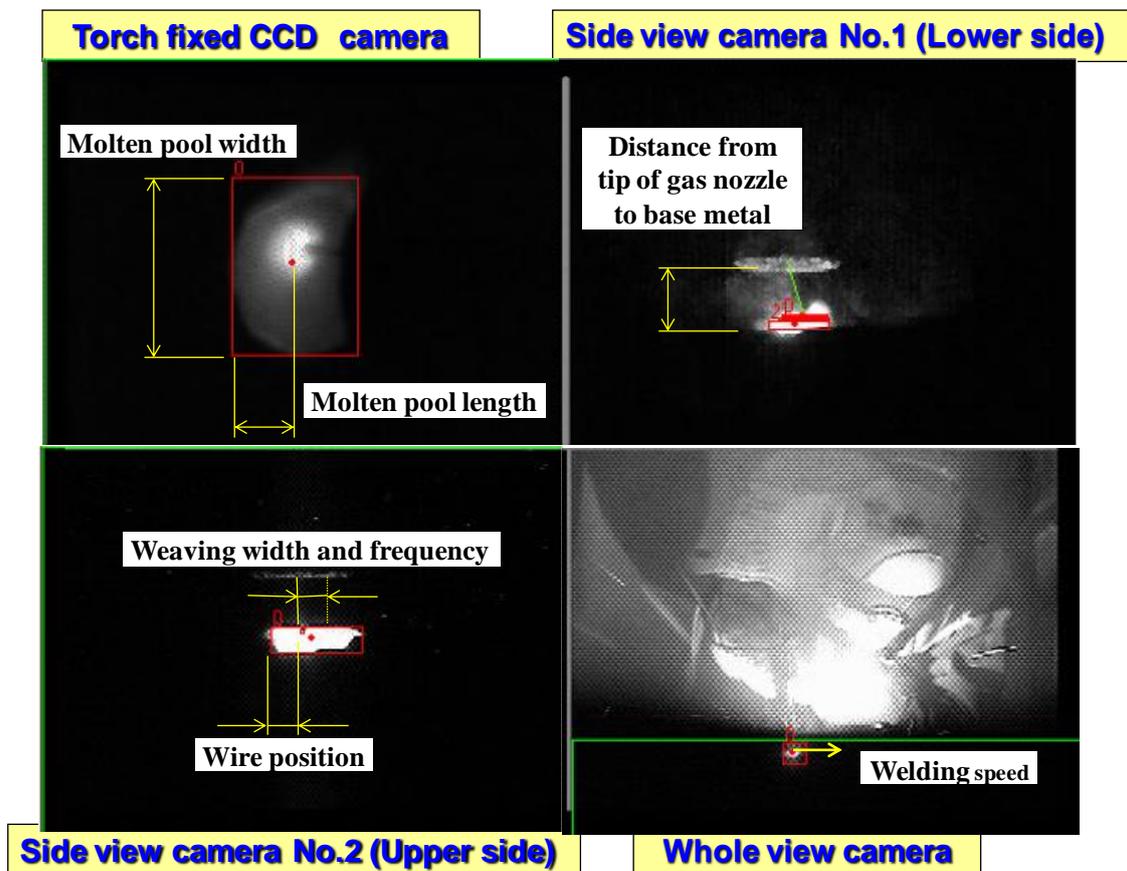


Fig.8.7 Images of cameras and measurement items for MAG welding system.

8.3 溶接技能訓練への適用結果

8.3.1 初心者訓練

TIG 溶接技能デジタル化システムを現場配属 1 年目の新人溶接士の溶接訓練に適用した結果について説明する。訓練は、炭素鋼 V 開先（ルートギャップ 3.5mm）、とくに初層の裏波溶接を対象に 5 名の新人を対象に行った。**Fig.8.8** は、溶接訓練中のカメラの映像をディスプレイ上に 4 画面同時表示した例を示したものである。訓練者は、本システムによる訓練中の映像を収録後、即時に処理結果により、この画面上の情報で自分の挙動の定量的な特徴を把握できると同時に、あらかじめ撮影された模範的な熟練者や他の溶接士の記録映像を再生、確認し、画面上で自らの挙動と比較できる。

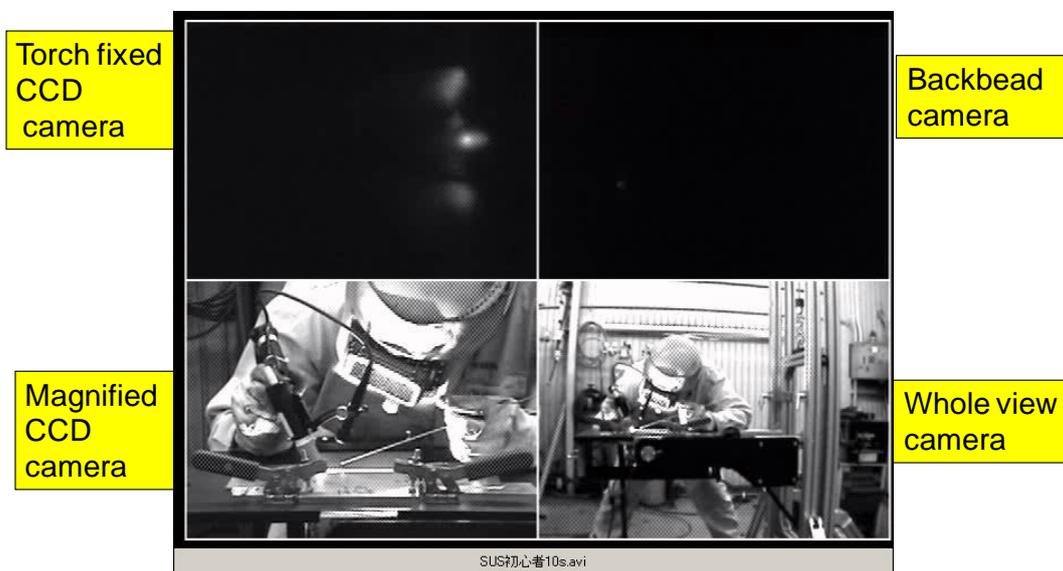


Fig.8.8 Images of welding training by four cameras on a display.

Fig.8.9 は、教育訓練を実施した新人（初心者）と熟練者の技能指標の比較をレーダチャートで示したものである。訓練者は自分の挙動が熟練者と何がどの程度異なるのか、どこに注意して溶接すれば技能が向上するかを容易に把握することができる。さらに、このレーダチャートを使えば、訓練による技能習熟度の可視化も可能であり、訓練により、どこがよくなり、どこがまだ改善されないのかを自ら定量的に実感することも可能となった。

Fig.8.10 は、訓練による習熟度を技能スコアで評価したもので、個人差はあるが、本システム使用前で技能スコアが 400 であった者が、訓練後では、80 まで技能が向上していることがわかる。また、他の訓練者と技能レベルや習熟度の比較を行なうことができるため、訓練のモチベーション向上にも非常に有効であった⁷⁷⁾。

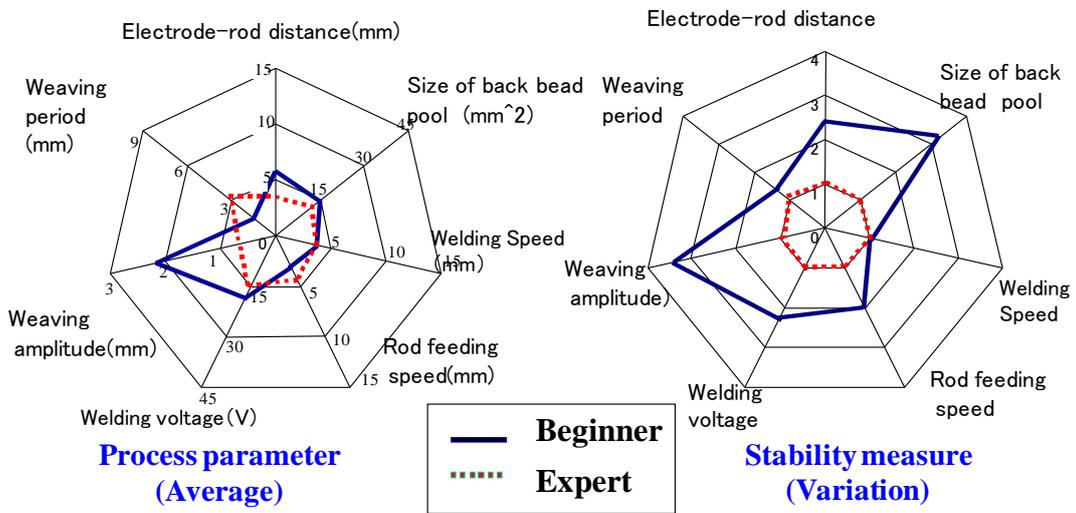


Fig.8.9 Quantitative comparison of behavior between welders on radar chart.

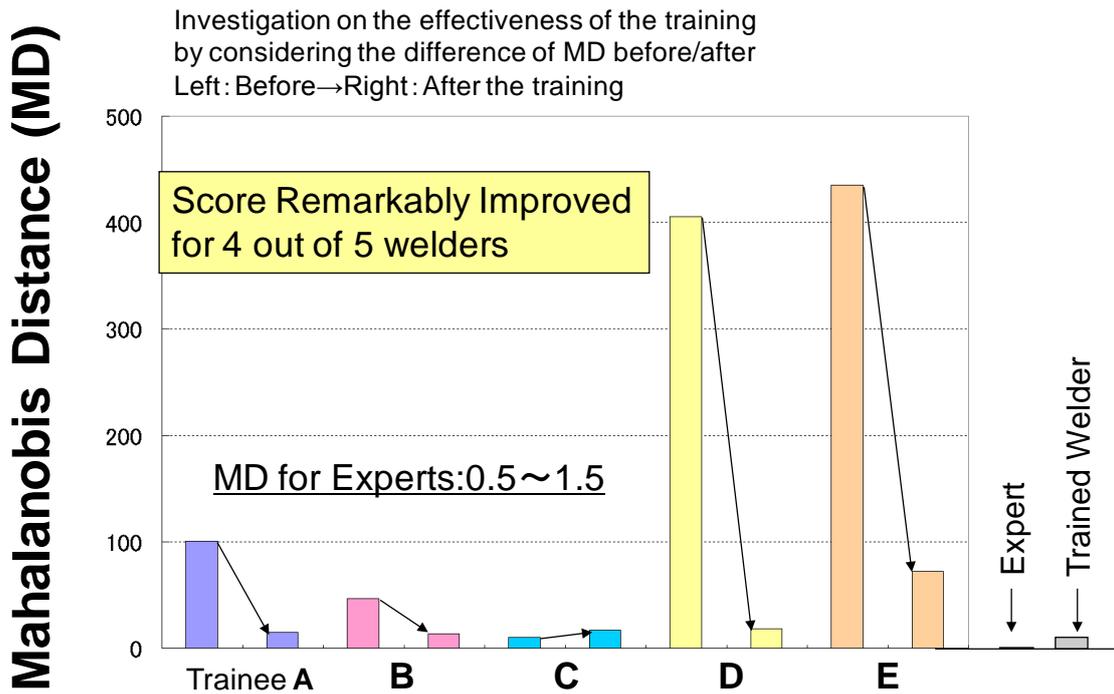


Fig.8.10 Transition of MD score for 5 trainees before and after the training.

8.3.2 溶接技量資格取得訓練

溶接作業には、製品に応じ、溶接技量資格が必要であり、その取得のために訓練が行われる。JIS Z3841 中板試験（裏当てあり）を対象とした技量資格取得訓練に MAG 溶接技能デジタル化システムを適用した結果について述べる。母材は SS400（炭素鋼）、溶接ワイヤは、YGW12（ワイヤ径：1.2mm）、シールドガスは、炭酸ガスを用い、3層溶接を実施した。Fig.8.11 に試験板の開先形状を示す。

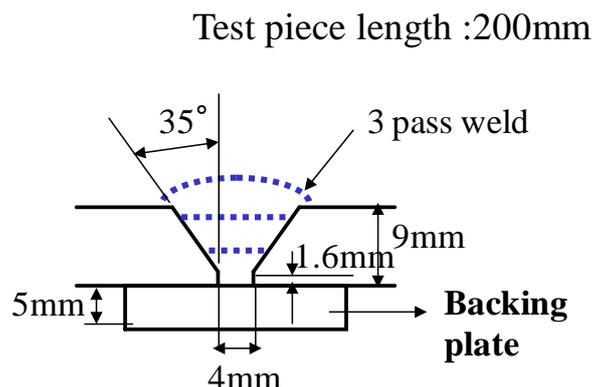


Fig.8.11 Groove shape of test piece for JISZ3841 testing.

初層溶接における溶接挙動検証として、挙動を比較する基本のデータとして、熟練者がトーチウィビングしながら施工した溶接挙動データを使用した。まず、基本データと同一溶接線上で別の位置からサンプリングした挙動計測結果を Fig.8.12 に示す。トーチ狙い位置を示すトーチ振幅の数値が時系列で周期的に変化しておりウィービング動作が計測できていることが分かる。また、基本条件とほぼ同一の溶接挙動に対し特徴点の絶対値、ばらつき共に相対的な差が殆どなく、計測結果に再現性が在る事が分った。

次に、ウィービングを行わずに開先中央付近にアークを出し続けた挙動の計測結果を Fig.8.13 に示す。この場合、トーチ振幅の時系列変化が少なく、レーダチャートで基本条件と比較してもウィービング振幅、ウィービング周期、狙い位置の項目において、絶対値、バラツキともに小さくなっており、トーチ運棒幅の少なさが検出出来ていることが分かった。

次に、3層目(余盛り)溶接における溶接挙動計測を行った。3層目(余盛り)溶接の基本データとして、2層目溶接終了時のビード形状(残り深さ)が左右均等で、且つ3層目溶接におけるウィービング動作のバラツキが少ない熟練者の挙動を使用した。比較対象として、2層溶接終了後のビードが傾いて、開先残り深さが左右均等でない場合の3層目溶接挙動を計測した。開先深さの深い側に溶融池が流れ込み、端部停止後に溶融池先行量が多くなる状況が確認された。この場合の挙動計測結果を Fig.8.14 に示す。溶融池先行距離の時系列計測値をみると周期的に変動しており、また、レーダチャートによる基本データとの比較結果も溶融池先行距離のバラツキに有意な差が現れている。このことから、ウィービン

グ両端停止時の溶融池先行距離の差を数値的に認識出来ることが確認できた。

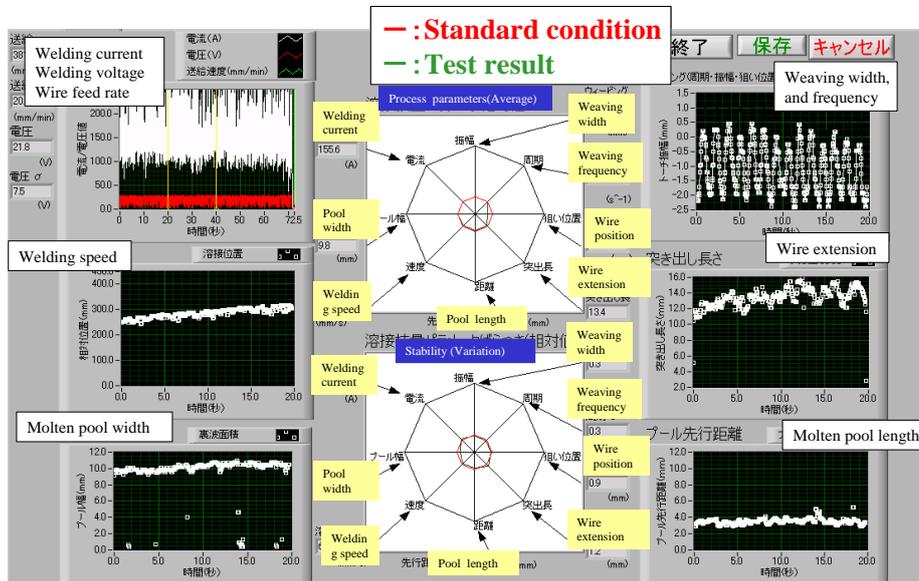


Fig.8.12 Test result of first pass weld with weaving.

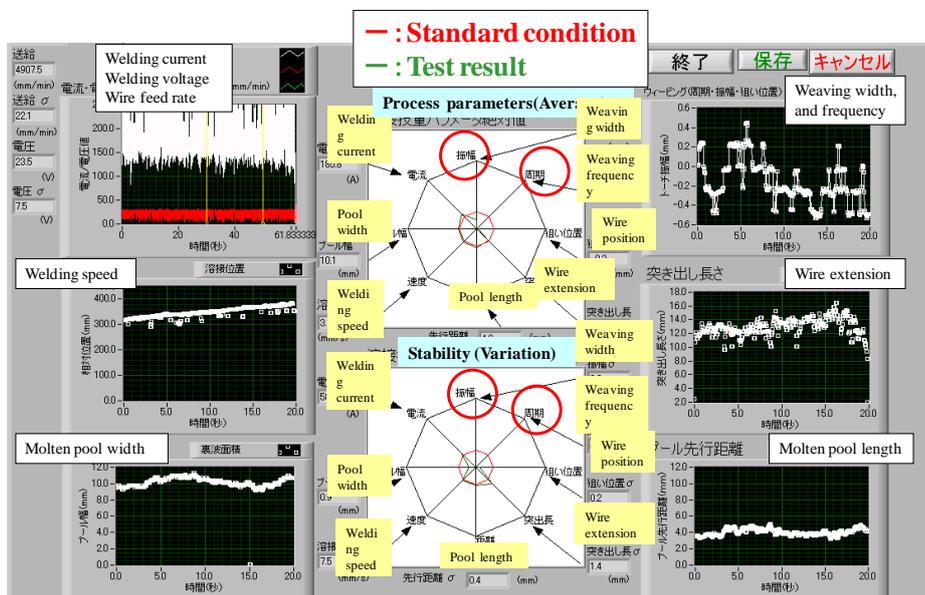


Fig.8.13 Test result of first pass weld without weaving.

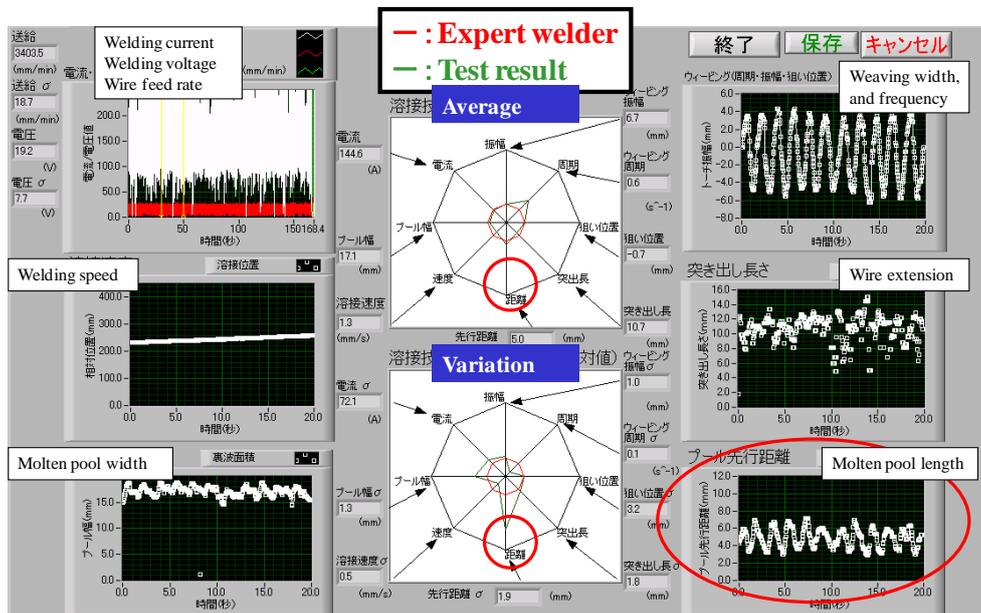
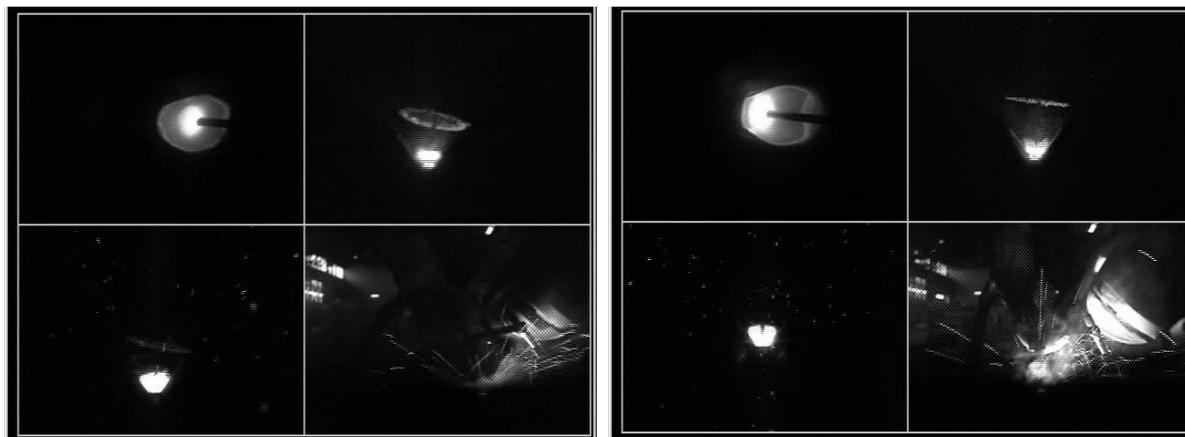


Fig.8.14 Test result of third pass weld on unstable bead.

また、溶接品質と溶接挙動との相関について本システムを活用した結果について述べる。**Fig.8.15** は、初層溶接時に融合不良が発生した場合と健全時の溶接挙動の比較を示したものである。



a) Incomplete penetration

b) Sound weld

Fig.8.15 Comparison of welder behavior between incomplete penetration and sound weld.

溶接部に欠陥が発生していない場合の溶接では、アークは開先中央の熔融池の先端付近に出ており、溶接中に熔融池とアーク位置関係があまり変動することがない。それに対して融合不良が発生した溶接においては、アークの狙い位置が定まらず、開先中央を狙ってい

ない状況が確認できた。これをワイヤ狙い位置計測結果で比較すると **Fig.8.16** のようになる。健全溶接時の狙い位置は開先の中央付近を保ち続けているのに対し、融合不良発生時には開先中央から離れた位置を狙っていることがわかる。このように、定められた試験条件において測定されたデータの蓄積が可能であり、効率的な技量資格訓練を行うことが可能になった^{7,8)}。

以上の結果から、4台の CCD カメラを用いて溶接挙動の特徴点を抽出することにより、JIS 中板突合せ下向き溶接における溶接挙動を定量化し、溶接挙動の差を数値的に認識出来、MAG溶接技能を計測するシステムとしての有効性を確認することができた。

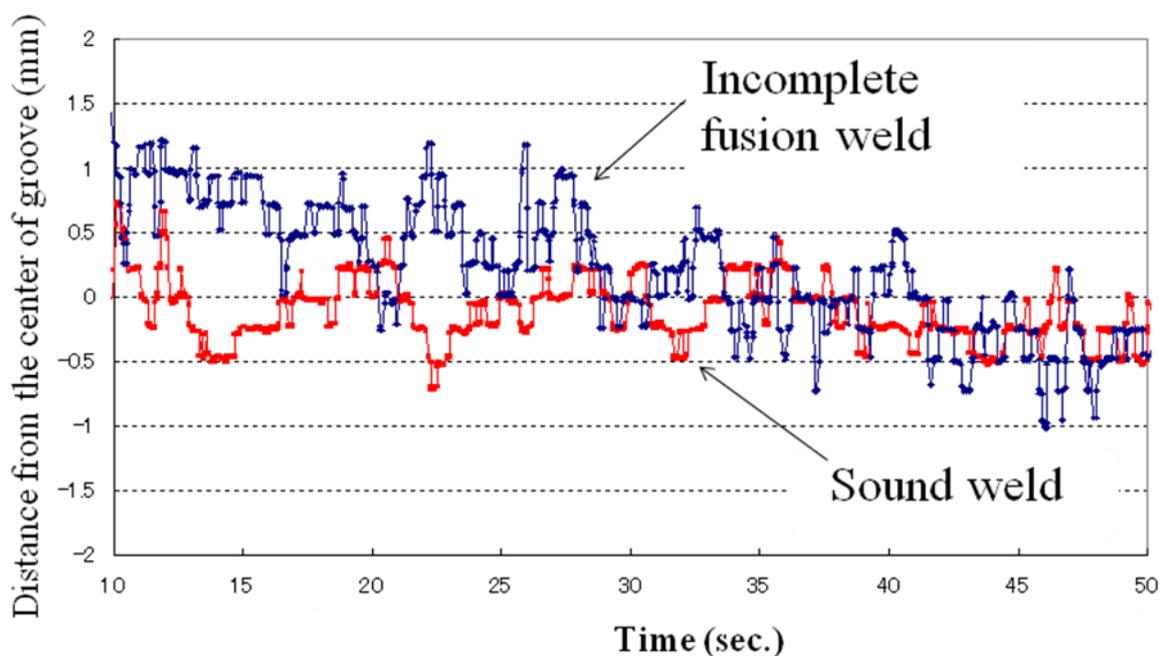


Fig.8.16 Comparison of wire position between incomplete penetration and sound weld.

8.4 技能継承への活用結果

若手の早期育成とともに中堅溶接士のレベルアップが必要であり、熟練溶接士のもっているノウハウや「技」の継承が課題の一つである。ここでは、溶接技能デジタル化システムの機能を使用して、訓練ではなく、実際の溶接の計測に適用することで、熟練溶接士の技能ノウハウの分析に活用した結果について述べる。

8.4.1 配管全姿勢溶接

配管溶接は、姿勢が連続的に変化するため、各姿勢で溶融池にかかる重力の影響が変化するなど適応力が必要であることから高い技量が要求される。たとえば、原子力発電プラントでは、新規プラントの減少から若手の実作業の経験が不足していることやベテランの熟練溶接士が高齢化してくるなどの問題があり、ベテラン溶接士のノウハウを定量化し、溶接技能をデータベース化することにより、効果的な訓練プログラムを作成する必要があった。**Fig.8.17** は、配管全姿勢溶接(配管固定)における特徴量の計測項目を示したものである。配管溶接の初層裏波溶接の計測には、配管内部に取り付けた円錐ミラーを介して CCD カメラにて撮影した。TIG 平板溶接技能デジタル化システムと同様にトーチカメラと裏波カメラの映像から抽出する運棒挙動や溶接速度、裏波サイズ（面積）の7項目の計測データに加えて手元拡大カメラにて、とくに配管の全姿勢溶接で重要と思われるトーチと溶加棒の挿入角度を計測した。

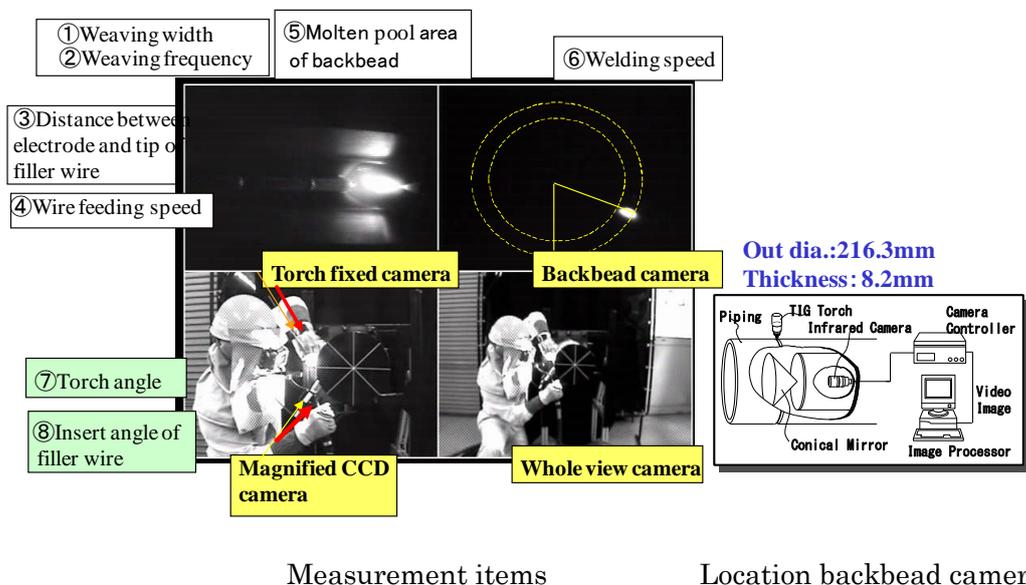


Fig.8.17 Measurement items of orbital TIG welding for piping.

Fig.8.18 は、手元拡大カメラより得られた映像情報をオフラインで画像計測を行い、溶接姿勢における熟練溶接士と中堅溶接士の溶加棒挿入角度を比較した結果を示したものである。熟練溶接士は、溶接姿勢毎（方位 θ ）の 45° ごとに溶加棒挿入角度が変化するのに対し、中堅者は、ほぼ一定の傾きで変化していることがわかる。これは、溶加棒挿入角度とトーチ角度の関係を方位ごとにどのように変化させているのかを定量的に示しているものであり、技能ノウハウを明示しているものと評価できる。これらの結果と裏波品質とあわせ総合的に熟練溶接士の「技」のひとつである全姿勢溶接時の運棒、溶加棒送給挙動の定量化が可能となった。これらのデータは、配管溶接の教育訓練、資格取得のみならず自動化、ロボット化のシステム開発および条件設定にも有効活用できる。

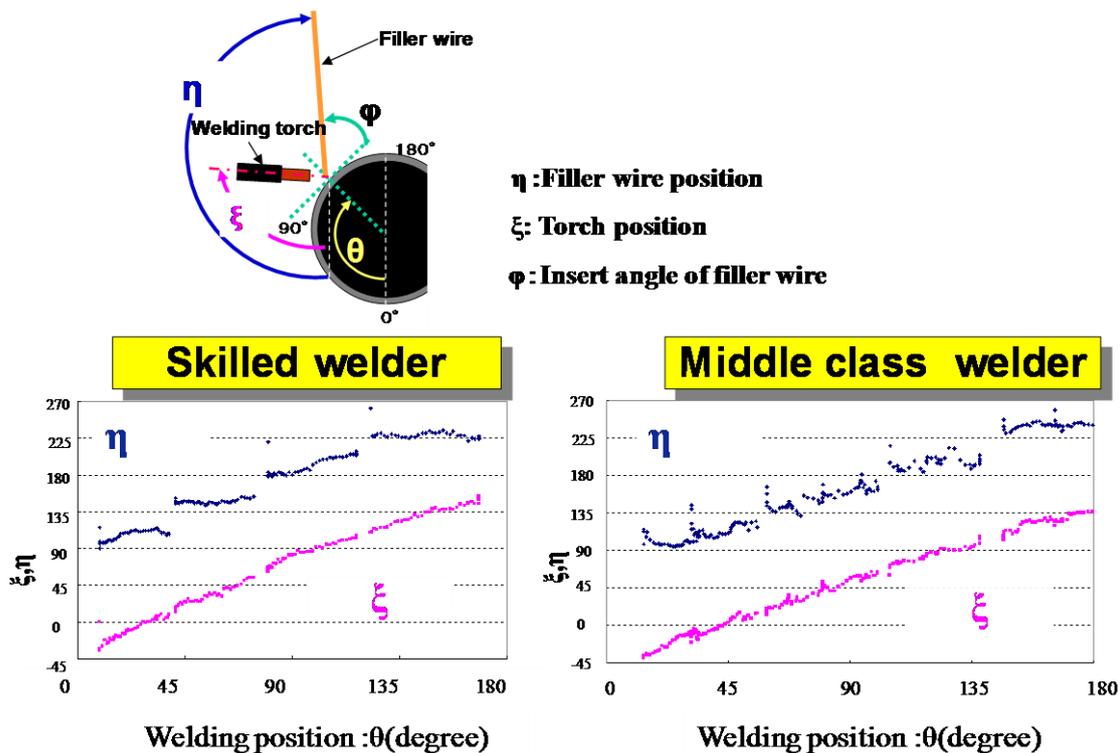


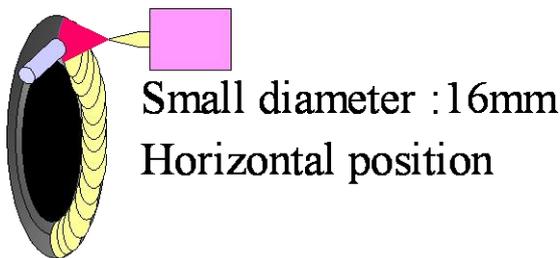
Fig.8.18 Comparison of filler wire and torch position between skilled welder and middle class welder in pipe welding.

8.4.2 管と管板の溶接

熱交換器で用いられる管と管板の TIG 溶接における熟練者のノウハウの分析を行った結果について述べる。管と管板の溶接は、一般的に自動溶接で行われるが、補修等で手溶接が必要となる場合がある。Fig.8.19 に火力プラントで用いられる高圧給水加熱器の管と管板の溶接部の外観とそのトレーニング状況を示す。この溶接は、外径（16mm）の円周溶接を横向き姿勢で行うもので十分な溶け込みと均一なビード形状が要求され、一般の TIG 溶接の熟練者であっても十分な訓練が必要であった。このような場合、溶融池を観察する CCD カメラを前項で述べたようなトーチに取り付ける構造では、溶接作業性が悪いことのみならず、小径であるため溶融池を撮像することが困難であった。そこで、タングステン電極の上方に CCD カメラを配置したトーチ内蔵コアキシャル CCD カメラを製作し、溶融池の撮像を可能とした。Fig.8.20 にその構造を示す。このトーチ内蔵コアキシャル CCD カメラの映像からトーチ移動速度、トーチねらい位置、フィラーワイヤ（溶加棒）挿入位置をオフラインで画像計測にて、算出した。画像処理手法は、前項までに述べたものと同様である。溶接試験は、管と管板の溶接の熟練者と TIG 溶接は熟練者であるものの管と管板の溶接が初心者である 2 名に対し実施し、画像計測により、その特徴を分析、比較し、熟練者の技能ノウハウの数値化、定量化を試みた。



High pressure feeding heat exchanger



Training

Fig.8.19 Appearance of Tube to tube sheet weld for heat exchanger.

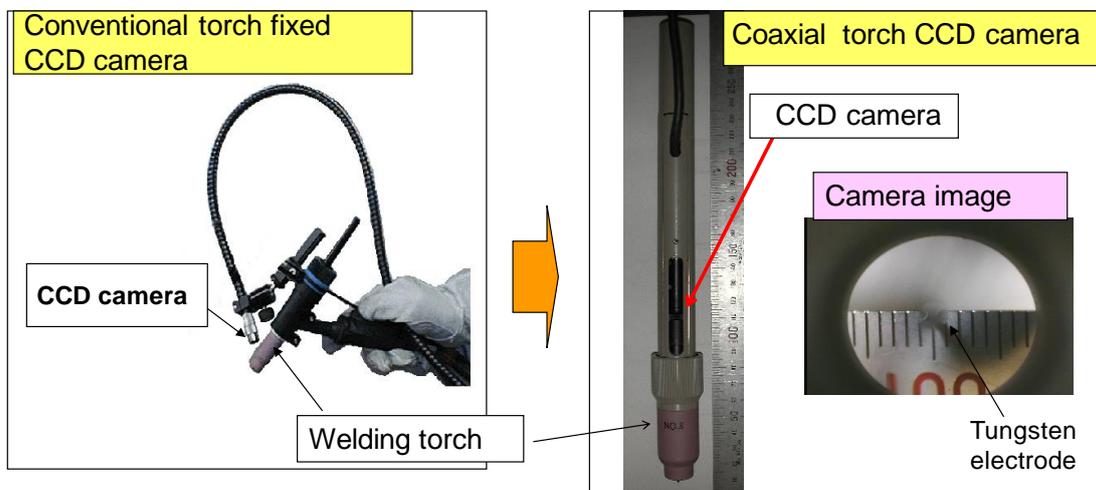


Fig.8.20 Configuration of coaxial torch CCD camera.

Fig.8.21 に、溶接位置（溶接線周上の角度）でのトーチが移動する時間を計測した結果を示す。これは、溶接方位ごとのトーチ移動速度（溶接速度）の変化を意味するものである。トーチ移動速度に関して、初心者は、溶接位置にかかわらずほぼ一定の溶接速度であるのに対し、熟練者は、ビードのたれ落ちに配慮し、 90° ~ 270° の溶接位置では溶接速度を増加させていることがわかる。さらに、**Fig.8.22** にトーチのねらい位置の計測結果を示す。

熟練者は、溶接方位に応じてトーチねらい位置を変化させており、 90° ~ 270° のたれ落ちやすい方位では、トーチねらい位置を管外側にしていることが明らかになった。このように、ノウハウのポイントが映像のみならず定量的に把握することが可能となったため、従来、習熟に数年かかるといわれた作業が1ヶ月の訓練で実作業に投入することができた。

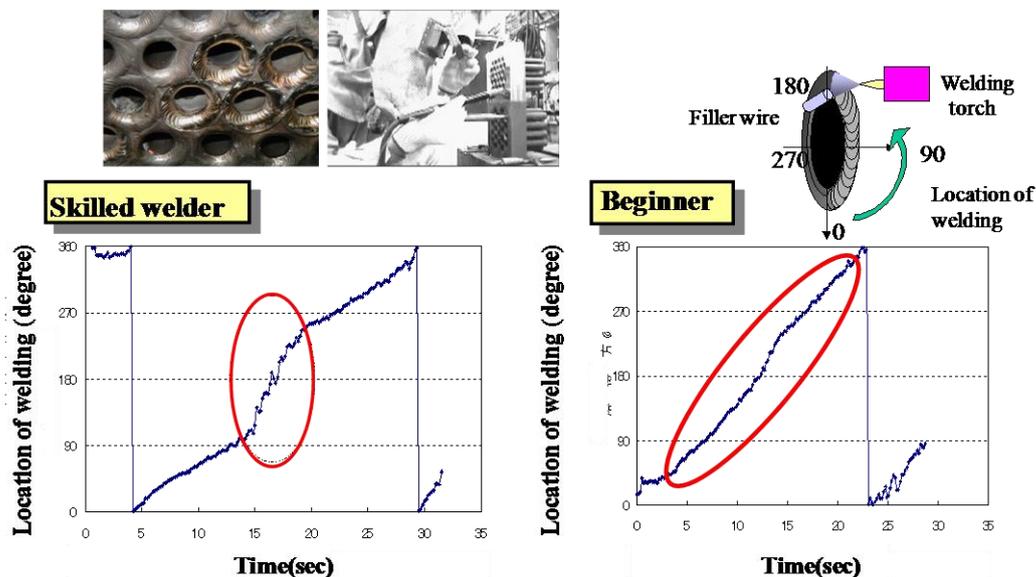


Fig.8.21 Comparison of welding speed between skilled welder and beginner.

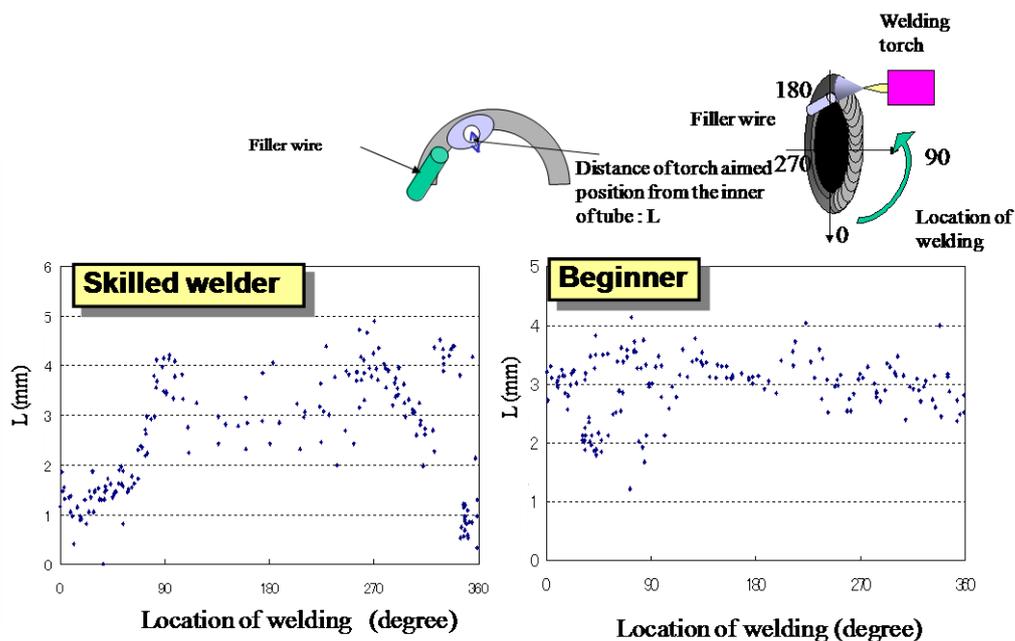


Fig.8.22 Comparison of torch position between skilled welder and beginner.

このように従来ノウハウや「技」と呼ばれていた技能に対して本システムを適用することで定量化、明示化が十分可能であり、技能継承への有力なツールとして活用できることが実証された。

8.4.3 気密容器の溶接

気密が要求されるガス絶縁開閉装置のMAGすみ肉溶接部に関して、溶接後の気密試験の合格率が低く、溶接補修率が高い問題が生じていた。この場合、溶接士により合格率に相違があることがわかったため、最も合格率の高い熟練者の技能を本システムにより分析・評価することで、そのノウハウを明らかにし、他の溶接士の合格率向上に活用をはかることにした。技能分析は、**Fig.8.23**に示すように、実際の容器をモデル化した試験体に対して、トーチカメラと固定手元拡大カメラ2台、全景カメラの4台のカメラを用いて、熟練者と非習熟者の溶接の撮影を行い、得られた画像をオフラインにて画像計測することで特徴量を抽出した。対象は、すみ肉溶接で、立向き下進溶接と水平すみ肉溶接である。なお、画像処理手法は、前項までと同様である。

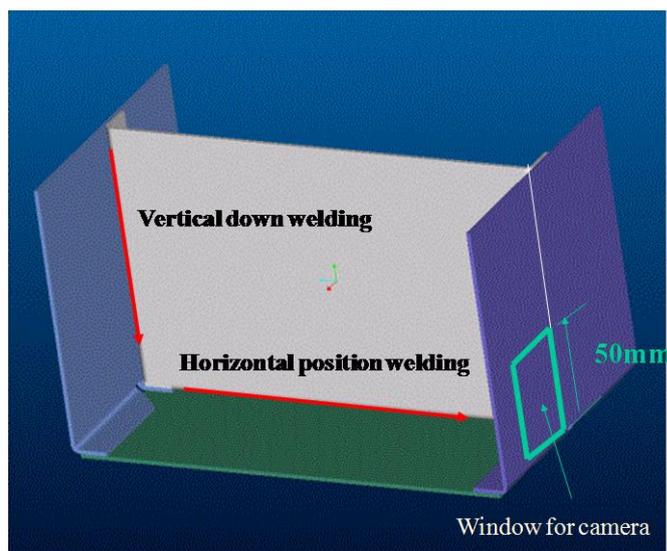


Fig.8.23 Configuration of test piece.

Fig.8.24 は、熟練者と非習熟者2名の水平すみ肉溶接挙動を撮影し、4台のカメラからの映像を4画面同時表示した例を示したものである。これらの映像からも、溶接挙動の違いは把握でき、溶接士には十分参考にはなる。

Fig.8.25 は、溶接挙動を数値化するために、立向き下進溶接における各カメラの映像から画像処理にて計測する特徴量を示したものである。計測項目としては、溶融池形状として溶融池幅、溶融池左右幅比および溶融池先行距離、すみ肉溶接の挙動指標として重要なトーチ角度、ワイヤ突き出し長さ、ワイヤねらい位置、溶接速度とした。

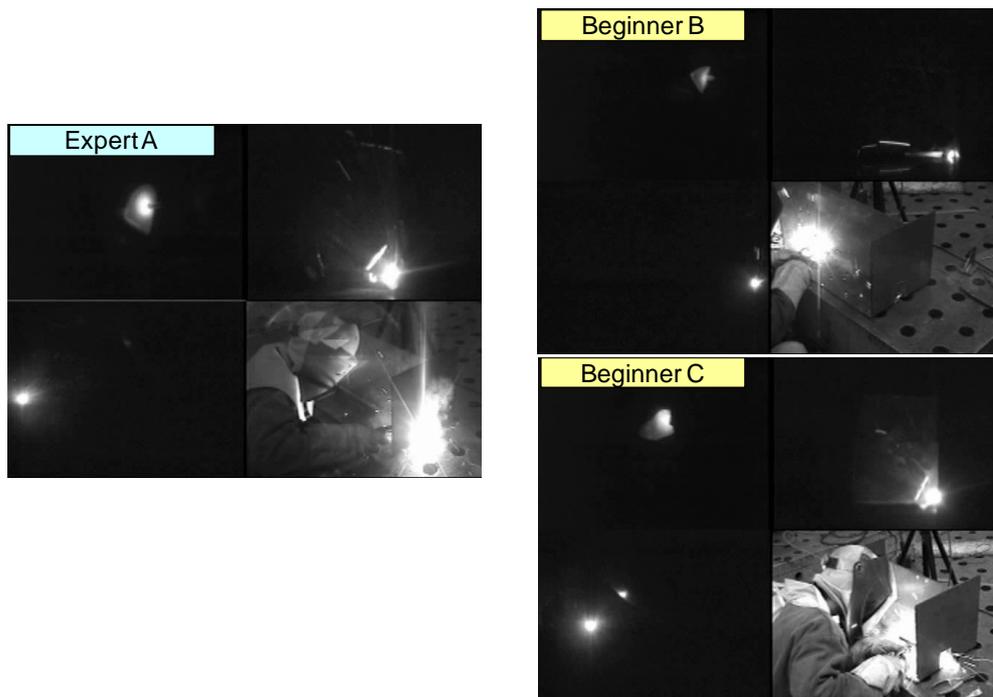


Fig.8.24 Image of horizontal position welding by expert welder and beginner welder.

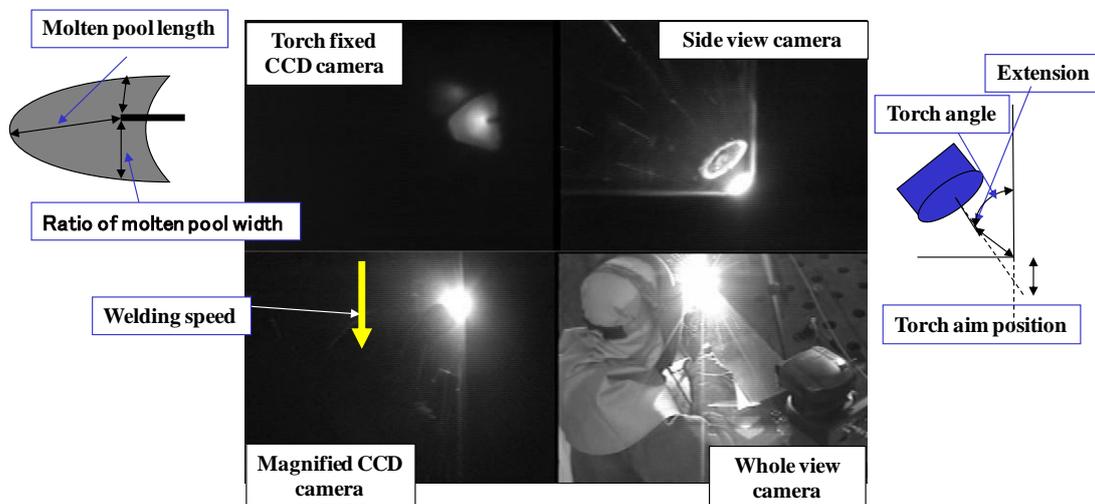


Fig.8.25 Images and measurement items for vertical down welding.

Fig.8.26 は、各計測項目の平均値ならびにその分散（ばらつき）をレーダチャートに表示した結果を示したものである。熟練者に比べ非習熟者が、どの特徴量が異なるか、どの項目が不安定であるかが明確に表示されている。本計測結果と4画面映像をみせて、技能指導することで、各溶接士のスキルアップがはかられ、結果として合格率向上に大きく寄与することができた。

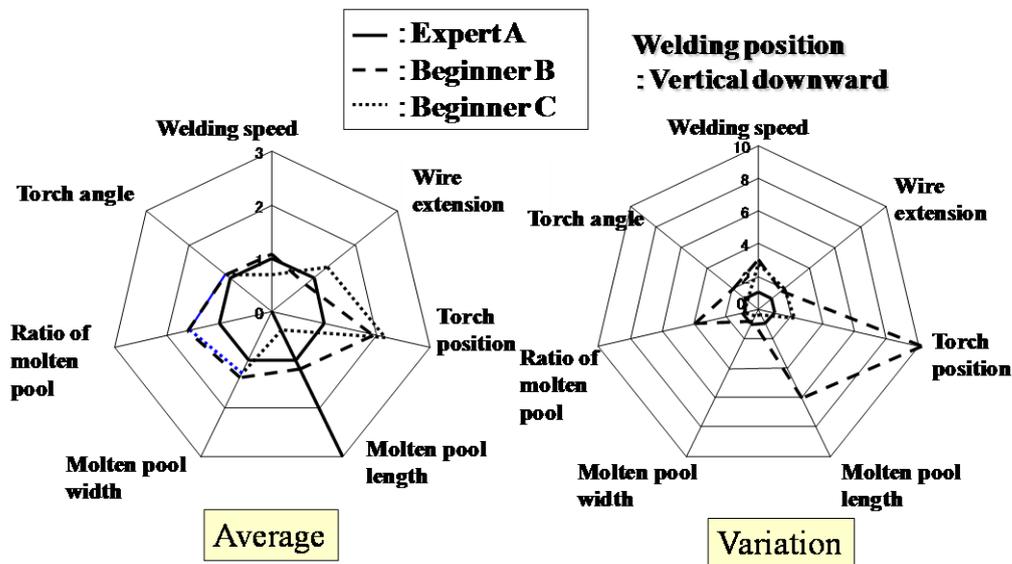


Fig.8.26 Comparison of measurement items among welders on radar chart.

8.4.4 被覆アーク溶接による配管溶接

高C r 鋼厚肉配管全姿勢溶接（配管固定）は、依然として被覆アーク溶接（SMAW）で行われることが多い。これらの作業は、補修の発生による工程の遅延から、品質的に高度な技量が必要とされている。この作業を行う溶接士を効率的に訓練、育成するために、熟練者の挙動を視覚センサにて計測し、画像計測にて、ノウハウの定量化を行った。一般に、本溶接は、2名の溶接士が、配管上部を0° 賭した場合、180° の位置から溶接を同時に振り分けて開始し、立向き上進溶接にて行われる。

Fig.8.27 は、カメラの配置を示したもので、4台のカメラを使用し、3は固定、①代はトーチに取り付けた。撮影項目は、溶融池状況、溶接棒のウィービング挙動、溶接棒の角度とした。

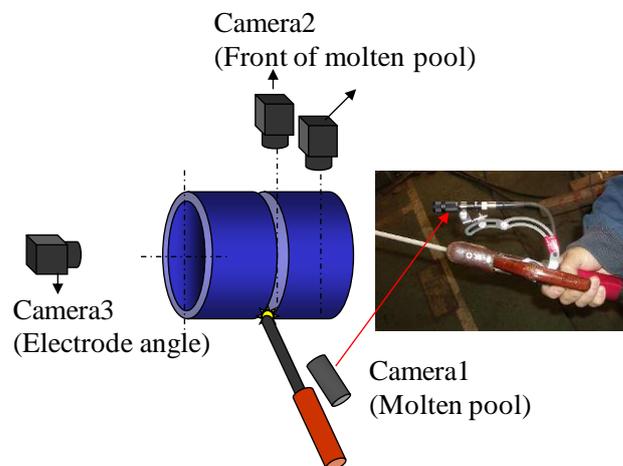


Fig.8.27 Location of cameras for pipe welding by SMAW.

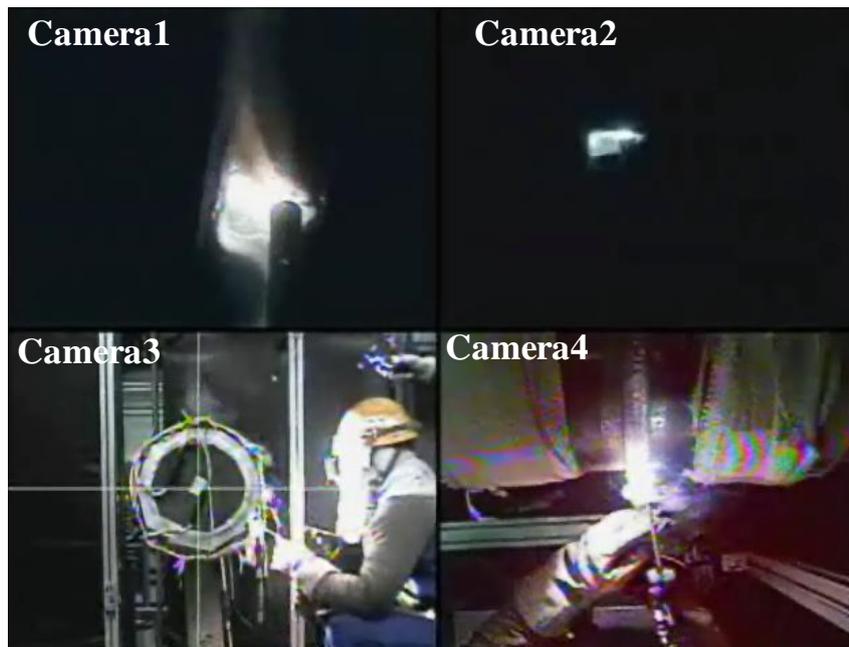


Fig.8.28 Image of pipe welding by SMAW.

Fig.8.28 は、4つのカメラからの映像を4画面表示にて示したものである。従来、困難であった被覆アーク溶接の溶融池状況や運棒挙動が本計測によりビジュアル化することができた。これらの映像から、熟練溶接士と訓練者の運棒挙動を計測した結果を **Fig.8.29** に示す。熟練者は、ウィービング単部位で確実に上方へ運棒するのに対し、訓練者は、一旦下方に下がる挙動を示しており、挙動の違いが明確に把握することができた。

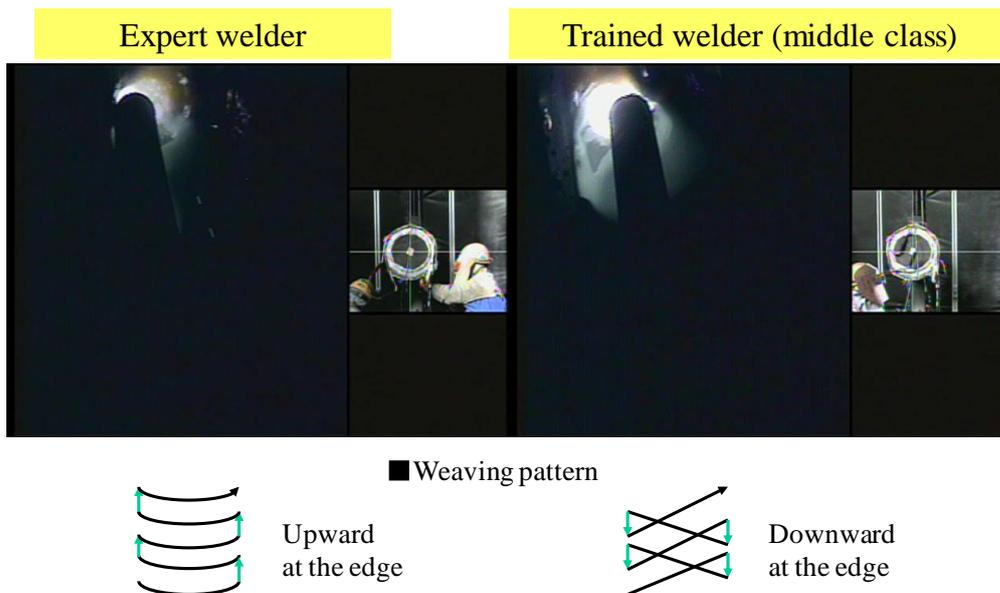


Fig.8.29 Comparison of weaving behavior.

また、**Fig.8.30** は、ビード形状の外観およびレーザセンサによるビード形状計測結果さらにグラインダにて仕上げた後のビード外観をビジュアル化したものである。熟練者のビードは凹形状で次層の開先端部での融合不良の発生を抑制している。このため、熟練溶接士は、グラインダ仕上げも端部を 3～4 mm 程度のみであるの対し、訓練者はほぼ全面グラインダ仕上げを行っていることがわかる。従来より、高 Cr 鋼の溶接では、積層時のスラグの除去、グラインダによるビード仕上げ方が重要なポイントであることが知られていたが、定量的に明示されたことはなかった。このように溶接挙動のビジュアル化を行うことで、熟練者のノウハウやコツを明示できることから訓練の効率化がはかれると同時に映像のデータベース化により技能継承の有力なツールとして活用可能であることがあきらかとなった。

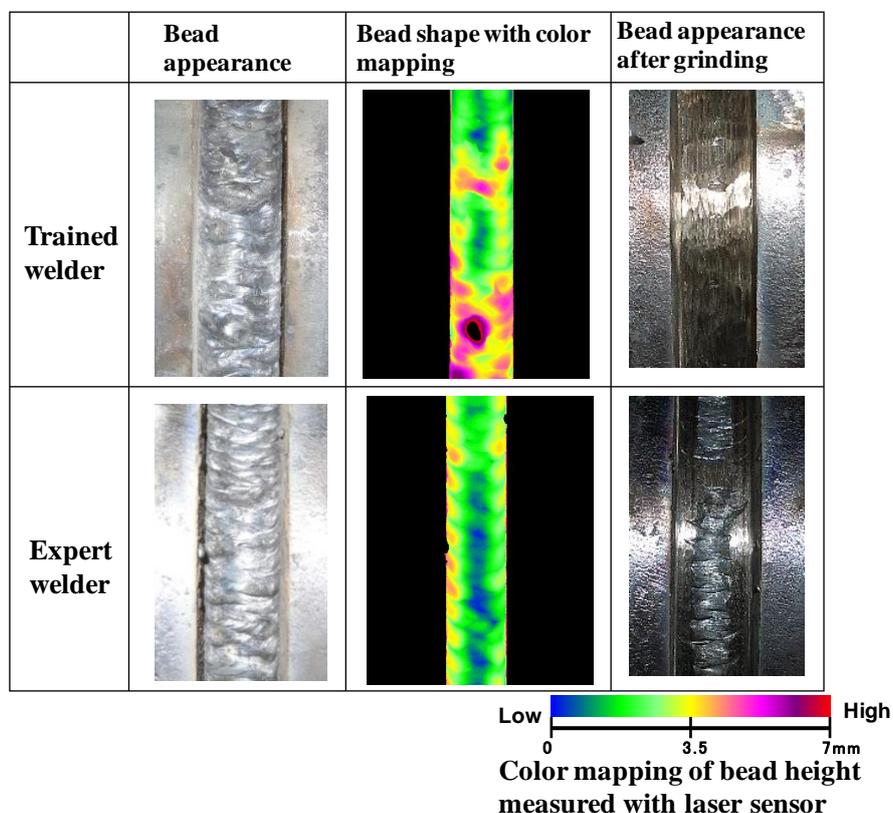


Fig.8.30 Comparison of bead shape before and after grinding.

8.5 結言

本章では、視覚センサによる自動溶接システムの高機能化の応用化例として、溶接士の教育、訓練を目的として、溶接挙動をビジュアル化、デジタル化できる溶接技能デジタル化システムを開発した。これらは、熟練溶接士の挙動を基本としてその差異を映像で確認し、定量評価できるシステムであり、熟練溶接士の早期育成や技能継承に有効に活用できる。実際に、これらのシステムをTIG、MAG、SMAWのそれぞれの溶接訓練や技能

分析に適用し、教育、訓練、技能継承に有効であることを示した。

以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 溶接士の全体挙動を撮影する全景ビデオカメラ、主に溶接士のワイヤ送給挙動を撮影する手元ビデオカメラ、溶接トーチの運棒挙動を撮影するためトーチに取り付けられた小型 CCD トーチカメラ、裏波溶け込み状況を撮影するため板裏側にセットする裏波用 CCD カメラの4つのカメラとそれらの映像を解析、表示するパーソナルコンピュータおよびディスプレイから構成される TIG 溶接技能デジタル化システムを開発した。
- (2) TIG 溶接技能デジタル化システムでは、得られた映像から7つの技能指標を画像処理にて抽出し、その平均値と分散値をあらかじめインストールされた熟練溶接士とレーダチャートにて比較表示が可能で、さらに、品質工学を用いて算出した技能スコアによる評価が可能である。
- (3) TIG 溶接技能デジタル化システムをベースとした MAG 溶接技能デジタル化システムを開発した。MAG 溶接技能デジタル化システムは、4つの CCD カメラから構成され、溶融池幅および溶融池先行距離、チップ母板間距離(ノズルワイヤ先端の距離)、ワイヤねらい位置、ウィービング幅・周期、溶接速度が計測できる。
- (4) 溶接技能デジタル化システムを実用化し、初心者の溶接技能訓練ならびに技能資格取得訓練に適用し、その有効性を確認した。
- (5) 溶接技能デジタル化システムを配管全姿勢 TIG 溶接、管と管板の TIG 溶接、気密容器の MAG 溶接へ適用し、熟練溶接士の技能ノウハウの数値化、定量化を可能とすることで、技能継承に有効なツールとなることを示した。
- (6) 被覆アーク溶接による高 Cr 鋼の配管溶接に溶接技能デジタル化システムを応用化し、熟練溶接士の技能ノウハウをビジュアル化、定量化できることを示した。

第9章 結論

本研究では、視覚センサを用いてビード形状や溶融池現象を直接検知することで抽出する情報と溶接品質との相関を明らかにし、視覚センサから得られる多岐にわたる情報を溶接条件の適応制御や施工中の品質確認評価に活用する手法を提示するとともに、それらを適用した実用的な溶接自動システムを構築することで、溶接自動化システムの知能化、高機能化を実現するための基本的な技術の有効性を明らかにしたものである。

本研究により得られた結果は、各章ごとに詳述したが、ここでは、その内容を総括して述べる。

第1章では、従来の研究成果を概観するとともに、本研究の必要性及び目的について述べた。

第2章では、視覚センサとして近赤外線 CCD カメラを用いた溶融池センシングシステムの構築を行い、画像抽出のための光学システムならびに画像処理手法を確立するとともに溶融池形状と溶接品質にかかわる溶接パラメータの相関を調査し、溶接条件適応制御への適用に関して考察した。

近赤外線 CCD カメラを用いて溶融池およびアークの分光特性を考慮して選定した光学システムにより抽出した溶融池映像は、画像処理を行うことでアーク領域の中心、溶融池面積、溶融池幅、溶融池長さ（溶融池後端距離）、溶融池の傾き、アーク領域の中心からみた溶融池幅の比などの溶融池形状を代表する項目を計測することが可能となる。さらに、溶融池領域の輝度分布（温度分布）から等温線分布を求め、さらに方向距離変換を行うことで各等温線分布を角度と距離で表現することにより、溶融池の温度分布パターンを求めることが可能となり、溶融池状況を特徴化する指標として活用できることが明らかとなった。

これらの溶融池形状の変化と溶接条件には相関が認められ、トーチ位置ずれは、溶融池の傾き、溶接電圧変動は、溶融池面積、幅、長さ、開先ギャップの変化は、溶融池長さと同面積により検出できることを明らかにした。さらに、溶融池温度分布パターンが溶け込み状況をあらわす指標として活用可能であることも明らかにし、溶融池センシングによる溶接条件の適応制御システムの構築は十分可能であることを示した。

第3章では、CCD カメラを用いた溶接ビード表面外観検査システムの構築を行った。ステレオビジョンを用いた3次元形状計測手法を確立するとともに複視差 CCD カメラシステムを製作し、実際の溶接ビード形状および欠陥検出性能の調査により検出性能を評価した。さらに、方向距離変換および写像化手法を用いて、表面欠陥の自動識別手法を確立し、自動溶接システムの品質確認機能への適用が可能であることを示した。

第4章では、第2章で得られた溶融池センシングシステムと第3章で得られた溶接ビード外観検査システムの機能をあわせ、熟練溶接士が不要で無監視が可能な全自動溶接システムを構築した。視覚センサとしては、IR-CCDカメラと複視差 CCD カメラを用い、パルス MAG 溶接の開先突合せ溶接およびすみ肉溶接を対象とした実用的な全自動溶接シ

テムを製作した。そして、それらの溶接条件適応制御機能および品質確認機能に関する機能検証を行うとともに、環境等の異常事象対応機能についても検証試験を行い、全自動溶接システムの有効性を示した。

第5章では、第2章の溶融池センシングシステムの実用化として、レーザスリット光センサと視覚センサ（IR-CCDカメラ）を用いた固定配管狭開先GTAWシステムを構築した。レーザスリット光センサによる開先計測システムは、溶接線教示、開先形状に応じた溶接条件の設定、開先およびビード形状不良確認を行い、IR-CCDカメラによる溶融池センシングシステムでは、電極およびワイヤ位置を画像処理により計測し、適正位置に適応制御することを可能とした。また、溶融池センシングシステムでは、近赤外域の透過波長を有する狭帯域フィルタと透過率分布変化フィルタを用いた多重フィルタリング方式を採用することで、高電流域においても溶融池およびその周辺形状の画像抽出を可能とした。そして、溶融池形状計測結果から、溶融池ぬれ角が通常より小さくなることで外乱の発生を認識し、更に溶融池前縁の傾き変化量により外乱要因が溶融池の濡れ不足又は下地形状の不良の何れかを特定できることを示した。溶融池形状抽出パラメータとして、溶融池先行距離 L_p 、溶融池前縁の傾き変化量 $d\beta/dx$ 、溶融池ぬれ角 θ を選定し、これらの計測値に応じて、溶融池のぬれ不足と判定された場合には、ピーク電流を制御量とする適応制御を行い、それ以外は異常と判定し溶接を中断するシステムを開発した。本章で開発した自動溶接システムを火力プラント配管の実機溶接に適用した結果、融合不良がなく良好な溶接部が得られたとともにオペレータに熟練度が不要な高能率・高品質な自動溶接が実現された。

第6章では、第2章の溶融池センシングシステム、第3章の溶接ビード外観検査システムを総括した自動溶接システムの実用化として原子炉内構造物現地遠隔ロボット溶接システムの構築を行った。溶接ロボットに取り付けたCCDカメラを用いて二方向より対象物を計測することで、ステレオビジョンによる3次元計測手法の適用を可能にし、開先検査およびビード余盛形状検査へ適用した。さらに、円錐ミラーを用いた裏波直視技術を応用し、裏波ビードの画像計測をもとに適正な裏波面積になるように溶接電流をファジィ制御する溶接条件適応制御システムを構築し、有効に機能することを検証した。そして、これらのシステムを作業者のアクセス性に制約のある原子炉内被曝環境下の遠隔溶接作業へ適用し、自動溶接システムの知能化、高機能化の有効性を明らかにした。

第7章では、第2章の溶融池センシングシステム、第3章の溶接ビード外観検査システム、第6章の配管裏波直視技術の実用化として溶接インプロセス品質管理システムについて検討を行った。さらに、第5章で示したインプロセス品質管理手法を活用し、レーザ超音波法による内部欠陥検出手法を加えた統括的なインプロセス品質管理システムの構築を行い、自動溶接の監視レス化として機能することを検証した。そして、これらのシステムを、実際に、火力プラントの蒸気タービンロータの溶接作業への適用し、自動溶接システムの知能化、高機能化の有効性を示した。

第8章では、第2章の溶融池センシングシステムの実用化として、複数の視覚センサを

活用した溶接技能デジタル化システムへの適用検討を行う。画像計測による溶接状況ならびに溶接士の挙動を数値化、定量化する手法の開発ならびにシステムを製作し、溶接技能のデジタル化、ビジュアル化を検討した。そして、実際に、溶接技能デジタル化システムを溶接訓練ならびに実作業分析に適用を行い、訓練の効率化、技能ノウハウの明示化がはかれ、自動溶接システムの応用化として溶接技能デジタル化システムの有効性を示した。

第9章では、本研究の成果を総括し、結論とした。

謝辞

本研究は、(株) 東芝京浜事業所において、長年にわたる業務を通じて成し遂げたものである。本研究の遂行にあたっては、歴代の上司の指導ならびに支援をいただいた。さらに、本研究は、多くの共同研究者ならびに社内関係者の協力のもとに成し得たものであり、これらの方々に深く感謝いたします。

また、本論文の作成にあたっては、大阪大学名誉教授牛尾誠夫博士ならびに大阪大学教授平田好則博士に、懇切丁寧なご指導、ご教示を賜った。さらに、大阪大学教授中田一博博士ならびに大阪大学教授田中学博士には、有益なご助言を頂いた。ここに、深甚の謝意を表します。

最後に、何度も挫折しそうになった時に、叱咤激励し支えてくれた妻寛子に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 山本；自動化のための溶接方法と装置の変遷，アーク溶接の自動化技術（溶接法ガイドブック3），溶接学会溶接法研究委員会編，1995，pI-9—pI-11
- 2) 妹島；日本における溶接自動化技術の変遷，アーク溶接の自動化技術（溶接法ガイドブック3），溶接学会溶接法研究委員会編，1995，pI-3—pI-8
- 3) 浅井；アーク溶接におけるセンシング技術，溶接学会誌，第66巻（1997），第8号，p11—15
- 4) 松縄，牛尾他；アーク溶接におけるセンシングと制御，溶接学会溶接法研究委員会編，1990，I—1
- 5) 杉谷；適応制御におけるセンシング技術，溶接学会誌，第60巻，第2号，p47—51，1990
- 6) Y.Arata, K.Inoue; Automatic Control of Arc Welding by Measuring Molten Pool, Trans. JWRI, 1-1 (1972),99s-113s
- 7) Y.Arata, K.Inoue; Automatic Control of Arc Welding (Report II), Trans. JWRI, 2-1 (1973), 87s-101s
- 8) Y.Arata, K.Inoue; Automatic Control of Arc Welding (Report IV), Trans. JWRI, 4-1 (1975), 101s-108s
- 9) H.W.Mishler, R.E.Monroe ; An Optical Sensor for Adaptive Control of the Welding Arc, Welding in the World, 12-718(1974), 183-192
- 10) 荒田、井上；アーク熱源の自動制御化溶接に関する基礎的研究（第1報），溶接学会誌，第49巻（1979）第7号，p55—60
- 11) 荒田、井上；アーク熱源の自動制御化溶接に関する基礎的研究（第2報），溶接学会誌，第49巻（1979）第9号，p39—44
- 12) 益本，荒谷，庵地，野村；我が国におけるアーク溶接用センサおよびセンサシステムの現状，第52巻（1983），第4号，p11—19
- 13) 藤田；センシング画像技術，第23回実用溶接講座テキスト，溶接学会東部支部，1997，p57—75
- 14) 藤山；レーザ変位センサによる開先ならい制御方法，アーク溶接におけるセンシングと制御，溶接学会溶接法研究委員会編，pII-4—pII-8，1990
- 15) 大嶋、宮澤，飯塚，金子，山根；MIG溶接溶融池の階層型ファジイモデルと制御，アーク溶接の自動化技術（溶接法ガイドブック3），溶接学会溶接法研究委員会編，1995，pII-48—pII-52
- 16) 高宮，大道，勝田，飯島，上田，平山，真明，大久保；レーザセンシング技術を適用した多層自動溶接システムの開発，アーク溶接におけるセンシングと制御，溶接学会溶接法研究委員会編，pII-9—pII-11，1990

- 17) 和田, 真鍋, 井上 ; レーザ光センサによる厚板継手の自動溶接システム, アーク溶接におけるセンシングと制御, 溶接学会溶接法研究委員会編, p II-56—p II-60, 1990
- 18) 柴田, 平井, 石丸, 濱田 ; 視覚センサを搭載した全自動溶接システム, アーク溶接の自動化技術 (溶接法ガイドブック 3), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1995, p II-272—p II-275
- 19) 清原, 久貝 ; レーザセンサを用いた高機能アーク溶接ロボット, 溶接学会全国大会後援概要集, 第61週 (1997), p 100
- 20) J.E.Agapakis, N.Wittela, K.Msubuchi ; Automated Visual Weld Inspection for Robotic Welding Fabrication, IIW Intern.Conf.(1985), Pergamon, Press, Oxford, 151-160
- 21) 高野, 早川, 山本, 高谷 ; 溶接ロボット用スポット光レーザセンサの応用, 容器・配管溶接の最新技術 (溶接法ガイドブック 4), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1999, p II-154—p II-158
- 22) 井上 ; 溶接プロセスのオンライン検出のための画像処理 (第1報), 溶接学会誌, 第49巻, 第9号, 1980, p 25—p 29
- 23) 井上 ; 溶接プロセスのオンライン検出のための画像処理 (第2報), 溶接学会誌, 第50巻, 第11号, 1981, p 94—p 100
- 24) 大嶋他 ; 適応制御のGMA溶接への応用, 電学論D, 108, 3, p 330-337, 1988
- 25) 大嶋, 山根 ; ニューロ・ファジィ制御によるロボット溶接の適応制御技術, 溶接学会誌, 第63巻, 第7号, p 38—p 44, 1994
- 26) 菅 ; 薄鋼板のTIG溶接における溶融池監視による溶込み制御, 容器・配管溶接の最新技術 (溶接法ガイドブック 4), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1999, p II-210—p II-214
- 27) 菅 ; 溶融池の画像解析による溶接線の検出と追従制御, 容器・配管溶接の最新技術 (溶接法ガイドブック 4), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1999, p II-190—p II-194
- 28) 和田, 真鍋, 井上, 寄高 ; 狭開先MIG溶接の群管理システム, アーク溶接におけるセンシングと制御, 溶接学会溶接法研究委員会編, p II-61—p II-64, 1990
- 29) 井口, 飯島 ; LNG地下タンクメンブレン溶接への画像倣いシステムの適用, 容器・配管溶接の最新技術 (溶接法ガイドブック 4), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1999, p II-200—p II-204
- 30) 前田, 一山, 生野 ; 画像処理による狭開先MAG溶融池形状計測技術とその応用, 容器・配管溶接の最新技術 (溶接法ガイドブック 4), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1999, p II-136—p II-140
- 31) 森沢, 後藤, 羽田, 柴田, 芦田 ; 視覚センサを用いた全自動ガスタングステンアーク溶接システムの開発, 容器・配管溶接の最新技術 (溶接法ガイドブック 4), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1999, p II-250—p II-254

- 32) 鴨, 石出, 藤田, 池田 ; 視覚センサを用いた狭開先全自動G T A Wシステムの開発, 容器・配管溶接の最新技術(溶接法ガイドブック4), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1999, p II-255—p II-259
- 33) B.A.Chin, K.H.Madeen, J.S.Doodling ; Infrared Thermography for Sensing the Arc welding Process , Welding Journal, 82-9(1983), 227S-234S
- 34) S.Nagarajan, H.C.Wikle, B.A.Chin ; On-line weld position control for fusion reactor welding, Journal of nuclear materials, 191-194(1992)1060-1064
- 35) 森沢, 高橋, 小出他 ; 画像処理による溶接制御システムの開発, 溶接法研究委員会資料, SW-1728-86 (1986)
- 36) 中島 ; 3次元画像センシング技術の展開, 第8回「外観検査の自動化」ワークショップ, 1996, p33-37
- 37) 小園, 小倉, 梶原, 小沼 ; SUS小径管全姿勢TIG溶接部の表面温度と裏波ビード幅の関係, 溶接学会論文集誌, 第4巻, 第2号, 1996
- 38) 浅井他 ; アンケート調査結果—ガイドブック7溶接プロセスの可視化・シミュレーション技術より—, 溶接学会誌, Vol.81, No.6, p9-21, 2012
- 39) 溶接法研究委員会 ; 産業界におけるアーク溶接自動化技術の現状と課題(アンケート調査結果), アーク溶接の自動化技術(溶接法ガイドブック3), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1995, p I-60—p I-64
- 40) 松縄, 牛尾他 : ‘アーク溶接におけるセンシング技術と制御’, 溶接学会溶接法研究委員会編、溶接法ガイドブック2, ISBN4-906110-23-1, 1990
- 41) 藤田憲 : “システム化における開発の動向、その1. センシングと画像処理”, 溶接学会東部支部第23回実用溶接講座テキスト,
- 42) 東芝カタログ
- 43) 井上勝敬 : “溶接プロセスのオンライン検出のための画像処理技術(第2報)”, 溶接学会誌, Vol. 50 (1981), No. 11, pp94-100
- 44) 佐藤、大久保、黄地、平田 : “紫外線放射測温法による温度分布計測”, 溶接学会論文集, Vol. 15, No. 1, pp64-69, 1997
- 45) 大嶋、山根 : “溶接システムの制御”, 溶接学会誌, Vol. 67, No. 1, pp53-59, 1998
- 46) W.Ohnesorge ; Investigating Surface Quality with an Optical Profilometer, 1986
- 47) Yu .M.Zhang ; Real-time image processing for 3D measurement of weld pool surface, 1994
- 48) O.Ozeki ; Automated Plastic parts with a Laser Probe, 1990
- 49) P.C. Montgomery ; The use of electronic speckle pattern interferometry as an inspection tool, 1995
- 50) Bao Hua Zhuang ; Precision holographic optical probe for displacement and surface measurements, 1995

- 51) 小林, 芦田, 橋本, 藤谷; 全自動アーク溶接システム, 容器・配管溶接の最新技術 (溶接法ガイドブック 4), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1999, p II-241 - p II-245
- 52) 大槻, 浅井, 山口; TACSシステムの重電機器溶接自動化への応用, アーク溶接の自動化技術 (溶接法ガイドブック 3), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1995, p II-77 - p II-81
- 53) 菅, 北岡, 向; 溶接学会全国大会後援概要, 第55集, 1994, p 76-77
- 54) 松本, 名倉, 藤田, 藤谷; TIG溶接における無監視化技術, アーク溶接の自動化技術 (溶接法ガイドブック 3), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1995, p II-25-p II-29
- 55) 小林, 柴田, 今永, 舟本; 全姿勢TIG全自動溶接システム, アーク溶接の自動化技術 (溶接法ガイドブック 3), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1995, p II-276-p II-281
- 56) 浅井, 山口, 竹中; TACSシステムの配管自動溶接への応用, アーク溶接の自動化技術 (溶接法ガイドブック 3), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1995, p II-72-p II-76
- 57) 松縄, 牛尾他: ‘アーク溶接におけるセンシング技術と制御’, 溶接学会溶接法研究委員会編、溶接法ガイドブック 2, ISBN4-906110-23-1, 1990
- 58) 藤田; センシング画像技術, 第23回実用溶接講座テキスト, 溶接学会東部支部, 1997, p 57-75
- 59) 前田, 一山, 生野; 画像処理による狭開先MAG溶融池形状計測技術とその応用, 容器・配管溶接の最新技術 (溶接法ガイドブック 4), 溶接学会溶接法研究委員会編, 1999, p II-136-p II-140
- 60) 井上; 溶接プロセスのオンライン検出のための画像処理 (第2報), 溶接学会誌, 第50巻, 第11号, 1981, p 94-p 100
- 61) S.Asai ,et al, “Development of Portable GTAW Robot System for On-site Maintenance of Reactor Internals”, Proc. of Commission XII IIW 2000, International Institute of Welding, IIW Doc.XII-1624-00
- 62) S.Asai ,et al, “Development of Fully Automatic GMAW System with Visual Sensor”, Proc. of Commission XII IIW 1998, International Institute of Welding, IIW Doc.XII-1546-98,(1998)
- 63) 浅井知, 青山和夫, “汎用シミュレータを用いた溶接オフラインティーチング”, 溶接技術, 11月号, P 102-107, (1999)
- 64) 浅井知 他, “配管溶接における裏波直視技術の開発” 溶接学会全国大会講演概要、第58集、1996、4月
- 65) C. B. Scruby and L. E. Drain, “Laser Ultrasonic Techniques and Applications”, Bristol, Adam Hilger, (1990)
- 66) Ochiai M, et al, “Visualization of surface breaking tight cracks by laser-Ultrasonic F-SAFT”, Review of quantitative nondestructive evaluation, 2003, Vol.22, pp.1497-1503

- 67) 星岳志他、“レーザ超音波による厚肉溶接部の施工中検査技術の開発”, GKS-R-HZN12A061,
(社) 日本非破壊検査協会、非破壊検査協会大会 (2012 年秋季)
- 68) 竹裏英之他：超音波 TOFD 法の応用技術と適用事例、神戸製鋼技報、
Vol. 57, No. 3 (2007), pp38-42
- 69) 浅井知他：大容量・高温化対応蒸気タービンの溶接ロータ、東芝レビュー
Vol. 65, No. 8 (2010), pp12-15
- 70) Porter: Virtual Reality Welder Training, Journal of Ship Production, 22, No.3
(2006) pp.126-138
- 71) National Coalition of Advanced Technology Centers Newsletter, 10, No.2(2009) p.1
- 72) <http://www.vlearn.com/welding/index.php/en/>
- 73) Fronius Virtual Welding, Weld+Vision, No.23(2009) p.13
- 74) M.Sakuma, et al, "MONITORING AND ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF WELDERS
DURING MANUAL WELDING", 保全学, Vol.3, No.2(2004), pp38-44
- 75) Taguchi, G., Chowdhury, S. and Wu, Y.: *The Mahalanobis-Taguchi System*, McGraw-Hill,
(2000)
- 76) Taguchi, G., Jugulum, R., and Rajesh, J.: *The Mahalanobis-Taguchi Strategy: A Pattern
Technology System*, John Wiley & Sons, (2002)
- 77) Sakuma.M, Tsuboi.R, Kubo.K and Asai.S ; "Development of Welder's Training Support System
with Visual Sensors", Proc.IIW Osaka 2004, Commission XII, IIW Doc.XII-1813-04(2004)
- 78) S.Asai, T.Ogawa and M.Sakuma; "Development of the System Analyzing Welder Behavior in
MAG Welding with Visual Sensors", Proc.IIW Qubec2006, CommissionXII,
IIWDoc.XII-1904-06, (2006)

本研究に関する著者の発表論文

[1] 雑誌掲載論文 (査読付き)

1. 浅井 知, 小川剛史, 藤田善宏, 大嶽達哉, 星岳志: タービンロータ溶接インプロセス品質管理システムの開発, 平成 24 年度火力原子力発電大会論文集, p139-p146, 2013
2. Y.Fujita, T.Ogawa, S.Asai, S.Yamamoto, T.Ohdake,M.Ochiai: Development of a Welding Monitoring System for In-process Quality Control of Thick Walled Pipe, Welding in the World, Vol.56 , No,11-12,pp15-25,2012
3. S.Asai,T.Ogawa,H.Takebayashi: Visualization and Degitization of Welder Skill for Education and Training, Welding in the World, Vol.56 , No,9-10,pp26-34,2012
4. S. Asai, T. Ogawa, Y. Ishizaki, T. Minemura, H. Minami and S. Miyazaki: Application of Plasma - MIG Hybrid Welding to Dissimilar Joint between Copper and Steel, Welding in the World, Vol.56 , No,1-2,pp37-42,2012
5. M.Sakuma, K.Kubo, R.Tsuboi, S.Asai, M.Takahashi, M.Kitamura: MONITORING AND ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF WELDERS DURING MANUAL WELDING, 保全学, Vol.3,No.2(2004),pp38-44
6. 浅井 知, 坪井竜介, 青山和夫, 小林雅弘, 久保克己: 原子力炉内構造物現地遠隔ロボット溶接システムの開発, 圧力技術, Vol.40, No.2 , p27- 34, 2002
7. 落合誠, 仏田隆, 千星淳, 久保克己, 浅井 知: 溶接施工中における溶融深さ分布の計測, 溶接学会論文集, Vol.17, No.3, p427-431, 1999

[2] 国際会議プロシーディングス

1. S.Asai, T.Ogawa,Y.Fujita,K.Saito,I.Murakami: DISSIMILAR WELDED ROTORS FOR HIGH TEMPERATURE STEAM TURBINES, Proceedings of IIW International Conference , ICI-181, International Institute of Welding, Chennai, 2011
2. S.Asai,T.Ogawa,H.Takebayashi: Visualization and Digitization of Welder Skill for Education and Training, Proc. of IIW Commission XII, IIW Istanbul 2010, IIWDoc.XII-1955-10, 2010
3. S. Asai, T. Ogawa, Y. Ishizaki, T. Minemura, H. Minami and S. Miyazaki: Application of Plasma - MIG Hybrid Welding to Dissimilar Joint between Copper and Steel, Proc. of IIW Commission XII, IIW Singapore 2009, IIWDoc.XII-1972-09, 2009
4. S.Asai,T.Ogawa,M.Sakuma;" Development of the System Analyzing Welder Behavior in MAG Welding with Visual Sensors" ,Proc.of IIW Commission XII, IIW Qubec2006, IIWDoc.XII-1904-06, 2006
5. Asai S., Ogawa T. , Taki K: USE OF NARROW GAP GTAW FOR VESSEL AND PIPE IN POWER PLANTS, IIW International Congress: Welding and Related Inspection Technologies, 8-10 March 2006, Stellenbosch, South Africa
6. S.Asai, K.Minami, K.Shiihara, Y.Makino, T.Kanehara,M.Shibui: YAG-TIG Hybrid Welding

- Process for Coil Cover Plate of Stainless Steel, Proc. of IIW Commission XII, IIW Praguec2005, IIWDoc.XII-1855-05, 2005
7. S.Asai: Trend and Perspective of Sensing and Monitoring Systems, Proc. of IIW Commission XII, IIW Osaka 2004, IIW Doc.XII-1825-04, 2004
 8. Satoru Asai, Ryusuke Tsuboi, Kenji Kamimura, Toshihiro Yasuda, Hiroyuki Takebayashi: Application of A-TIG Process to Repair Welding in Power Plants, Proc. of IIW Commission XII, IIW Osaka 2004, IIW Doc.XII-1803-04, 2004
 9. S.Asai, R.Tsuboi, T.Ogawa, T.Yasuda, H.Takebayashi: UNDERWATER GTA WELDING WITH ACTIVATING FLUX CORED WIRE, Proc. of IIW Commission XII, IIW Bucharst 2003, IIWDoc.XII-1754-03, 2003
 10. S.Asai, R.Tsuboi, K.Aoyama, T.Yasuda, K.Kubo: GTAW Robot System with Visual Sensor for On-site Remote Welding, Proceedings of 12th International TWI Computer Technology in Welding and Manufacturing Conference, Sydney, 2002
 11. S.Asai, M.Sakuma, K.Kubo, R.Tsuboi, M.Ushio: Measurement and Analysis of Welder's Behavior in GTAW Using Visual Sensors, Proc. of IIW Commission XII, IIW Doc.XII-1692-01, 2001
 12. T.Ogawa, S.Asai, K.Taki, T.Aikawa, K.Kubo: Development of Visual Sensing System for Hot Wire Orbital Narrow Gap GTAW, Proceeding of the 7th International Welding Symposium, JWS, p217-222, 2001
 13. R.Tsuboi, K.Aoyama, S.Asai, K.Taki, M.Kobayashi, K.Kubo, K.Nomura: Development of GTAW Robot System with Visual Sensor for On-site Remote Welding, Proceeding of the 7th International Welding Symposium, JWS, p283-288, 2001
 14. S.Asai, et al.: Development of Portable GTAW Robot System for On-site Maintenance of Reactor Internals, Proc. of IIW Commission XII, International Institute of Welding 2000, IIW Doc.XII-1624-00, 2000
 15. S.Asai, K.Taki, R.Tsuboi, T.Ogawa: Application of Narrow Gap GTAW for Vessel and Pipe in Power plants, Proc. of IIW Commission XII, IIW Doc.XII- 1650-00, 2000
 16. M.Ushio, S.Asai, K.Taki, M.Tanaka: Visual sensors for automatic welding in Japan, Proceedings of the International Symposium on Metal Welding and Applications, The Metallurgical Society of The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 1999
 17. R.Tsuboi, S.Asai, K.Taki, M.Ushio: Application of Laser Sensor for Automatic Welding in Japan, Proc. of IIW Commission XII, IIW Doc.XII-1578-99, 1999
 18. K.Taki, S.Asai, M.Ushio: Application of Visual Sensors for Automatic Welding in Japan, Proc. of IIW Commission XII, IIW Doc XII - 1564 -1999, 1999
 19. S.Asai, K.Taki, K.Kubo, T.Kaneko, K.Nomura: Development of Fully Automatic GMAW System with Visual Sensor, Proc. of IIW Commission XII, IIW Doc.XII-1546-98, 1998
 20. K.Taki, S.Asai, K.Kubo: Study on Welding Parameter Control with Infrared Camera, Proceedings of IWC 96, The Indian Institute of Welding, 1996

[3] 国内シンポジウム等

1. 浅井 知, 佐久間正剛: 溶接技能のデジタル化と溶接士支援システムへの展開, 溶接学会 H14 年度春季全国大会シンポジウム「溶接・接合における IT の活用ー現状と展望」, 溶接学会論文集, 第 20 巻, 第 1 号, 2002
2. 浅井 知, 青山和夫, 大槻政彦, 南宏一: 汎用シミュレータを用いた溶接オフラインティーチングシステム, 溶接学会特別研究会, シンポジウム「生産・加工システムと最適化」, 1998
3. 浅井 知, 多紀圭史, 久保克己, 金子忠昭, 野村賢一: 標準開先GMAW全自動溶接システム, 溶接学会平成 10 年度秋季全国大会技術セッション「溶接の自動化における最新技術」, 1998
4. 浅井 知, 久保克己: 視覚センサによる溶接部の画像処理センシング技術, 平成 9 年度秋季全国大会フォーラム, 溶接学会全国大会講演概要第 61 集, 1997
5. 久保克己, 相川徹郎, 浅井 知, 金子忠昭: 溶接ビード外観検査装置, 第 8 回「外観検査の自動化」ワークショップ, (社) 精密工学会, 1996

[4] 解説・技報など

1. 浅井 知: 溶接自動化とインプロセス品質管理の技術変遷, 溶接学会誌, Vol.81, No.1, p45, 2012
2. 浅井 知: 溶接技能訓練センターにおける人材育成・技能継承, 配管技術研究協会誌 2011. 冬季号. P1-p7
3. 浅井 知: 溶接技能訓練, 配管技術, Vol.52, No.10 ,p24-27, 2010
4. 浅井 知, 斎藤和宏, 村上格: 大容量・高温化対応蒸気タービンの溶接ロータ, 東芝レビュー, Vol.65, No.8, p12-15, 2010
5. 浅井 知: 溶接技能デジタル化システムによる技能伝承, 設計工学, Vol.44, No.1, p21-29, 2009
6. 佐久間正剛, 浅井 知: ビジュアルセンサを用いた溶接技能デジタル化システム, 溶接学会誌, Vol. 75, No. 8 ,p43-47 ,2006
7. 浅井 知: レビュー&トレンド「溶接プロセスのセンシング技術」, 溶接学会誌, Vol. 74, No. 5, p61-79, 2005
8. 浅井 知: 溶接センシング・モニタリングシステムの現状と今後の展開, 高温学会誌, Vol. 32, No. 2, p100-111, 2005
9. 浅井 知, 佐久間正剛: 溶接技能のデジタル化, バルブ技報, Vol. 21, No. 2, p56-64, 2006
10. 佐久間正剛, 浅井 知, 薄正司: 溶接技能デジタル化システム Skill Degitizer™, 東芝レビュー, Vol.61, No.8, p44-47, 2006
11. 浅井 知: 厚板溶接施工と自動化技術, H17 年度溶接工学夏季大学テキスト, 溶接学会, p171-191, 2005

12. 浅井 知, 大嶋健司, 勘定義弘他: 溶接プロセスの高効率化における現状と課題, 溶接学会誌, Vol.72, No.2, p 7-15, 2003
13. 多紀圭史, 浅井 知, 久保克己: “センシング/モニタリング技術”, 溶接学会誌, Vol.72, No.2, p30-33, 2003
14. 浅井 知, 平野正三: 重電機器における溶接作業の IT 化, 溶接技術, Vol. 50, No. 9, 2002
15. 浅井 知, 佐久間正剛: 溶接技能のデジタル化と手溶接支援システムへの展開, 溶接技術, 1月号, p59-64, 2002
16. 浅井 知: 重電機器における溶接作業の I T 化, H14 年度溶接工学夏季大学テキスト, 溶接学会, 2002
17. 浅井 知: 光学センサの使い方, 溶接学会誌, Vol.69, No.2, p40-45, 2001
18. 浅井 知, 青山和夫, 久保克己: I T を用いた溶接遠隔管理システム, 溶接技術, Vol. 49, N0.1, (2001)
19. 浅井 知: 配管溶接の最新技術, 配管技術, 2000 増刊号, p 47-53, 2000
20. 浅井 知: プラント配管における最新溶接技術, 溶接学会誌, Vol.68, No.8, p41-46, 1999
21. 浅井 知: 溶接自動化システムの知能化・高機能化, H11 年度溶接工学夏季大学テキスト, 溶接学会, p119-140 , 1999
22. 牛尾誠夫, 大嶋健司, 浅井 知他: 容器・配管溶接の現状と課題, 溶接学会誌, 第 68 卷, 第 8 号, 1 9 9 9
23. 浅井 知, 青山和夫: 汎用シミュレータを用いた溶接オフラインティーチングシステム, 溶接技術, Vol.47, No.11, p102-107, 1999
24. 大槻政彦, 小川剛史, 平野正三, 多紀圭史, 浅井 知: 厚肉高品質全姿勢自動MAG溶接システムの開発, 溶接法ガイドブック 4「容器・配管溶接の最新技術」, p II -264-268 , 1999
25. 浅井 知: アーク溶接におけるセンシング技術, 溶接学会誌, Vol.66, No.8, p11-15, 1997
26. 山口照夫, 浅井 知, 大槻政彦: “電気機械におけるアーク溶接自動化技術の現状と課題”, 溶接学会誌, Vol.62, No.6, p57-63, 1993