

先進的スマート溶接システムの実現に向けて

大阪大学大学院工学研究科
マテリアル生産科学専攻
生産プロセス講座加工物理学領域 教授

浅井 知

1. はじめに

35年の企業生活を経て、平成27年4月に、マテリアル生産科学専攻教授として着任した。もともと、マテリアル生産科学専攻の前身である溶接工学科を卒業し、重電機器メーカーに就職後、発電プラント機器の製造に携わり、研究所ではなく、一貫して生産現場で、ものづくりにかかわってきた点では、大学では、異色の経歴であろう。このような経歴で、教育、研究生活に携わることになったのも、近年求められる多様性の一環であると感じている。永年、企業において、溶接プロセスの高効率化や溶接自動化システムの開発、実用化に取り組み、アーク溶接のセンシング、モニタリング技術を主に専門としてきた。

溶接は、ものづくりの中核をなす生産工程であり、構造物の破壊などその品質が社会問題となる重要な技術であるが、匠の技の側面も強く、未だ、自動化、ロボット化の割合が低い状況である。これは、溶接が、熱源としての電極、高温場のアークプラズマの相互作用やダイナミックな変動を伴う溶融池形成など複雑な現象からなり、物理的なメカニズムが十分に解明されておらず、さらに実施工での外乱要因も多いことが原因と言える。

そこで、日本のものづくりを担う革新的生産プロセスの開発、実用化をめざし、技能を必要とせず、匠の技を作りこんだ自動化システムとして、外乱に対して自律的に判断でき、最適な条件を選定する知的で高度な溶接自動化システムの構築をすすめている。さらに、溶接作業が ISO に位置づけられる特殊工程から脱却することを目指し、溶接施工中にその場で品質を確認、保証できる溶接自動化システム（筆者は、先進的スマート溶接システムと呼んでいる）の実現に取り組んでいる。本稿では、これらの取り組みについて紹介したい。

2. 画像計測による溶接現象のセンシングと制御

図1は、溶接の電極、アークプラズマ、溶融池を模式的に示したもので、アークプラズマの温度は、10,000Kをこえる高温場であり、これらの現象を理解するために数



図1 アーク溶接の状況

値シミュレーションによる温度解析が行われている。このような、アークプラズマから形成される溶融池挙動が、溶接の品質を決定づける。これらの溶接の挙動を可視化、センシングし、制御するための方法として画像計測が有効な手法である。CCD カメラや CMOS カメラに代表される視覚センサを用いて溶接部を撮影し、得られた映像を画像処理することで数値化し、溶接品質に関わる特徴量を抽出する。そして、これらの特徴量を用いて適正に溶接パラメータを制御することができる。この場合、強烈なアーク光のもとで、溶接状況を可視化するためには、溶融池や電極形状、開先面などの鮮明な映像を獲得する撮像手法がポイントとなり、①光学フィルタの選択②シャッタによるタイミング制御③ワイドダイナミックレンジセンサの使用などを検討する必要がある。たとえば、溶融池を可視化するためには、アーク光の分光特性に基づき、溶融池周辺

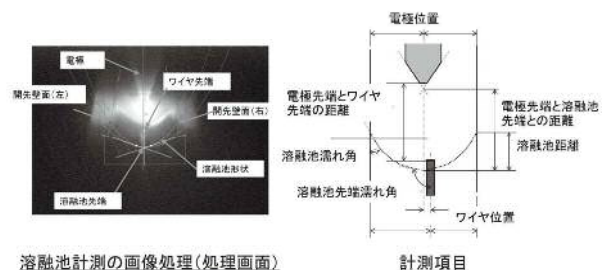


図2 画像計測による溶融池の計測項目

とのコントラストをあげる必要があり、単純に ND フィルタを使ってアーク光の減衰をはかるのみでは全体が暗くなるだけで効果はないため、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を強調する方法や溶融池のピーク波長から離れた帯域のフィルタを用いて溶融池を暗く写し、開先等を明るくする方法などが考えら

れ、検出対象に応じ赤外カットフィルタやバンドパスフィルタなどの波長選択を行う必要がある。図2に、TIG アークにおける画像計測による溶融池形状の計測例を示す¹⁾。CCD カメラに狭帯域バンドパスフィルタや ND フィルタなどを組み合わせて得られる溶融池映像を輝度差およびベクトル画像からの解析を用いて画像処理し、特徴量とする計測項目を抽出している。図3は、溶接不良となる欠陥発生時の溶融池形状の変化を示したもので、画像計測により、特徴量と品質の相関を明示できることがわかる。

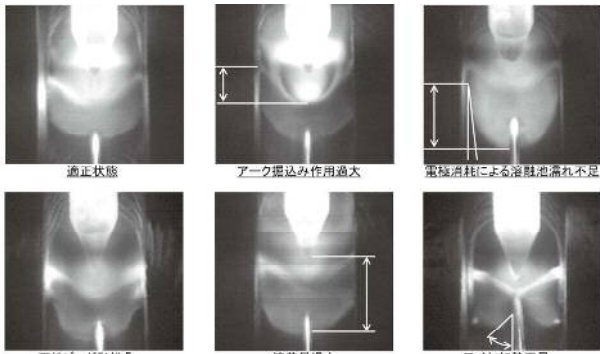


図3 欠陥発生時の溶融池形状変化

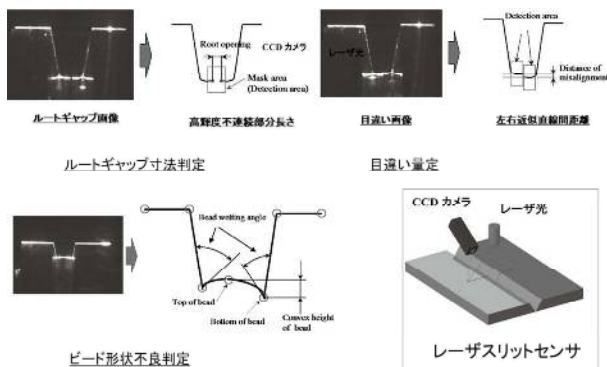


図4 レーザスリットセンサによる溶接ビード形状計測

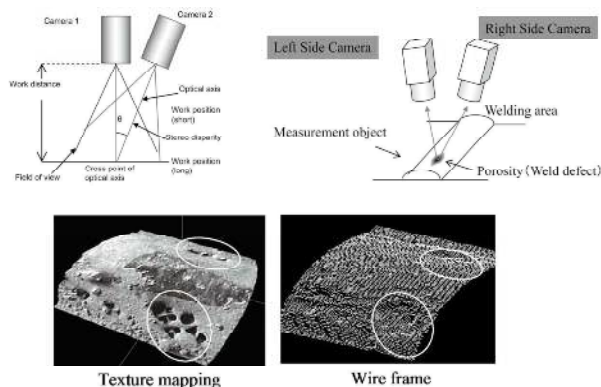


図5 CCDカメラによる溶接ビード形状計測

一方、開先や溶接後の溶接ビードの形状は、品質に関わる重要な指標であり、これらの形状計測には、レーザスリット光センサや CCD カメラを用いている。図4は、レーザスリット光センサを用いて溶接部の形状計測の例を示したものである。ルートギャップや目違いなどの開先合わせ

の寸法不良や溶接積層後のビード形状不良の自動検出が可能である。また、図5は、CCD カメラによる形状計測の例を示したもので、2つの CCD カメラによるステレオ視により、人間の目と同様な3次元形状を計測できる。画像計測手法を検討することで、欠陥の自動識別やポロシティのような欠陥の大きさを検出し、異常停止など溶接システムへのフィードバックを実施できる。このような溶接中にその場で実施できる3次元形状計測手法も進化しており、さらに高精度化をすすめる。

このように CCD カメラなどを用いた高温場の溶接中でその場計測できるセンシングシステムの開発では、計測制御アルゴリズムの構築、制御精度、処理速度、低コスト化など技術課題も多いが、得られる情報量の多さと応用の広さから、今後の適用拡大を目指し、さらなる研究をすすめていきたい。

3. 匠の技の可視化、定量化

現代の名工に代表されるように熟練溶接士の技能は匠の技と評される。この熟練溶接士の技能を数値化、定量化できれば、従来 OJT の名のもと行われてきた溶接技能訓練や技能継承を効率的に行うことができる。さらに、この情報を活用することで、溶接自動化システムの高度化、知能化をはかることが期待できる。

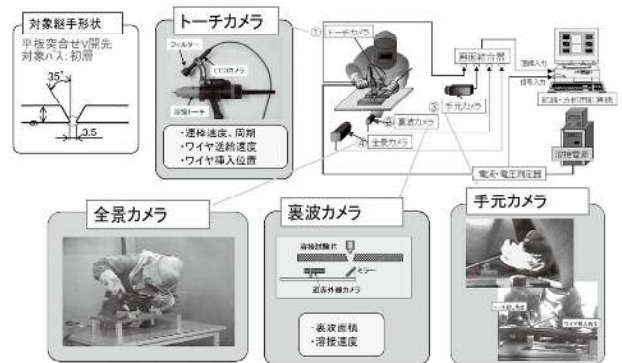


図6 溶接技能デジタル化システムの例

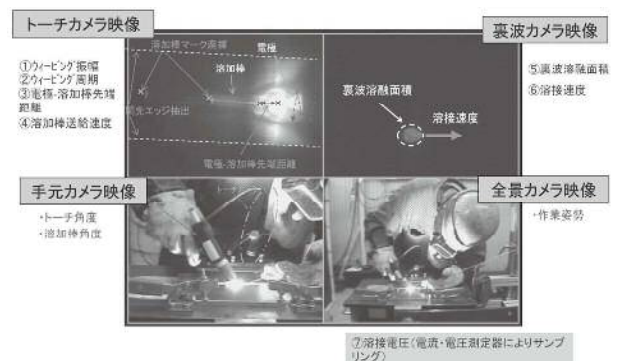


図7 カメラ映像と計測項目

そこで、複数のカメラにて溶接士の挙動計測を行い、

その映像を画像処理し、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溶接技能デジタル化システムの開発をすすめてきた。図6は、高い技能が要求される TIG 初層溶接を対象とした溶接技能デジタル化システムの構成を示したものである²⁾。4台の CCD カメラにて多方向より溶接士の挙動を計測するシステムで、図7に示す7項目の特徴量を抽出する。この抽出する特徴量の決定が重要で、あらかじめ、多くの抽出項目を熟練溶接士と比較し、有意となる抽出項目を特徴量としている。

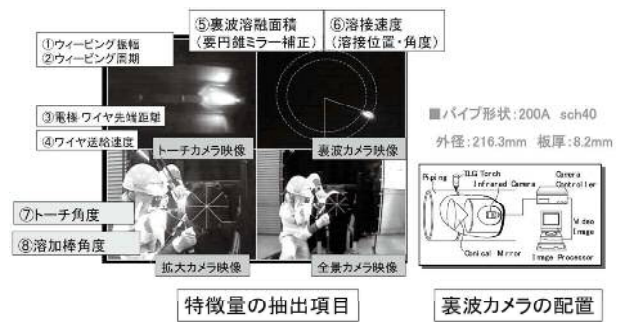


図9 配管溶接の計測項目とカメラ構成

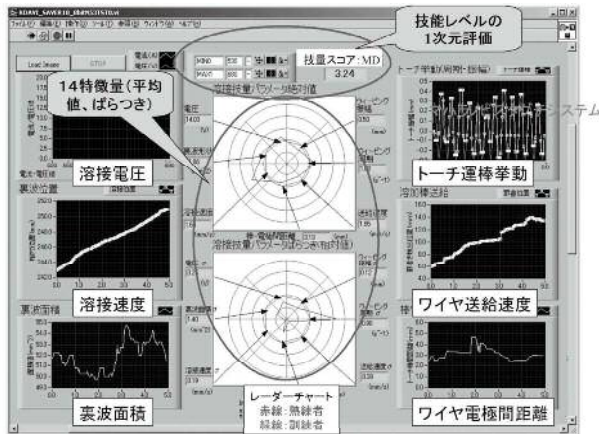


図8 解析結果表示画面

さらに、図8は、解析結果を示す画面で、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、レーダー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、品質工学手法であるマハラノビスタグチ法を用いて 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り、中級者で2~10、初級者は10をこえるスコアとなる。本システムは、熟練溶接士との比較を数値にて明示することが可能であることから、技能訓練に有効に活用できる。

また、熟練溶接士の挙動を同様なシステムにて撮影し、分析することで「技」を数値化し、技能継承に活用できる。

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。近年ベテランの熟練溶接士が高齢化してきていることから、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

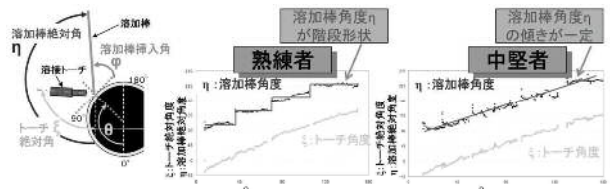


図10 配管全姿勢溶接における溶加棒挿入挙動の計測結果

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ると言える。図9は、配管固定管全姿勢溶接への適用例を示したもので、カメラ構成と計測項目を示している³⁾。

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 カメラにて撮影される。前記の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ている。図10は、画像計測により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。これらの結果から熟練溶接士の「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る。

このように、技能を数値化できれば、教育訓練のみならず自動化、ロボット化へ適用することで、熟練溶接士の技能を取り入れた高度な溶接自動化システムの構築をはかることができる。

4. 高度先端技術によるその場計測とインプロセス品質保証

以上のように、アークや溶融池の状況をカメラなどの視覚センサを用いて画像計測することは、溶接自動化シス

テムにおいて重要な技術であることを示してきた。しかしながら、現状得られるのは表面から観察した2次元情報のみであり、溶接の品質に直接かかわる溶け込みの状態などの内部情報を得ることが必要である。すなわち、先進的スマート溶接システムを構築するためには、3次元内部情報を溶接施工中その場で、遠隔で計測できる手法が要求される。図11は、溶接におけるセンシング対象と適用センサを示したものであり、内部情報を得るセンサとしては、実用的には、超音波かX線が考えられる。しかしながら、これらの通常手法では、溶接中その場でかつ遠隔にてセンシングすることは困難である。そこで、高温場で非接触の計測が可能なレーザ超音波法に着目し、溶接への適用検討をすすめてきた⁴⁾。図12にレーザ超音波法の原理を示す。パルス幅が数 ns のレーザを照射すると表面がプラズマ化し、その反力により対象物の内部に体積波の超音波を発生する。体積波は、溶接部を透過し、溶接欠陥などで反射、散乱した波が表面に達し、対象物表面に微小変位を生じる。この変位を照射した受信用のレーザ干渉計にて測定する。

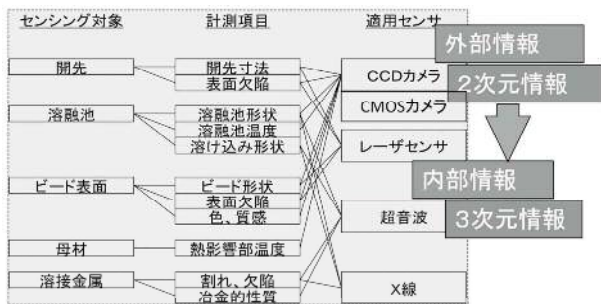


図11 センシング対象と適用センサ

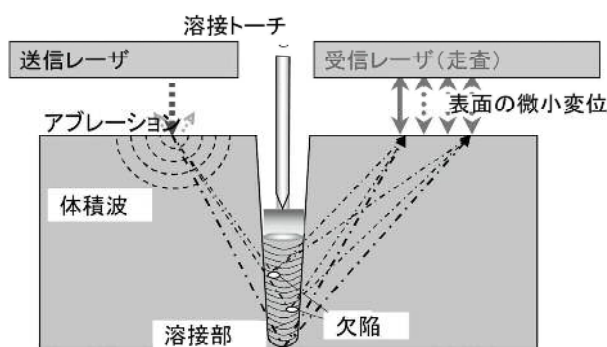


図12 レーザ超音波法の原理

本手法を溶接インプロセス品質管理システムに適用する場合のシステム構成を図13に示す。レーザ光源にはNd:YAG 基本波 (波長 1064nm) を用い、パルスレーザ光 (パルス幅 10nm、エネルギー約 700mJ) 溶接金属表面に照射する。受信用レーザも Nd:YAG 基本波を用い、光学ヘッドを通じて表面に約 1.0mm のスポット径で照射する。対象からの戻り光は、光学ヘッドで集光さ

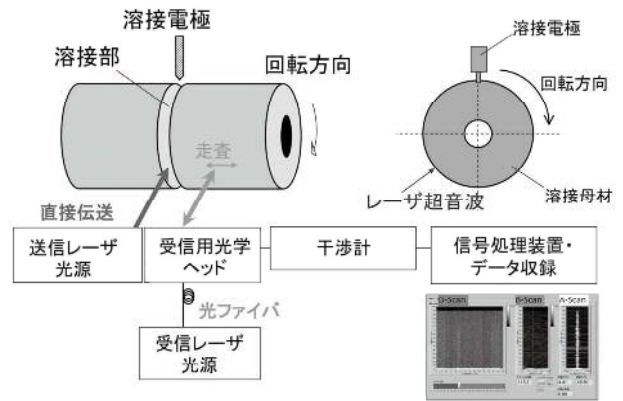


図13 レーザ超音波による溶接インプロセス品質管理システム

れ光ファイバを通じて干渉計へ伝送される。そして、受信用光学ヘッドをスキャンさせることでデータ収録し、信号処理を行う構成としている。このように、レーザ超音波法を用いることで、溶接中にその場で欠陥検出を行い、溶接しながら溶接部の品質を保証できる可能性があることがわかる。これらのシステムは一部すでに実用化されている⁵⁾。

レーザ超音波法の展開としては、溶接時の欠陥検出に加えて、溶込み形状などを溶接中に直接計測することでさらに品質評価性能を向上することが期待できる。図14は、レーザ超音波による溶込み形状のその場計測システムの構成例と計測結果の一例を示したものである。未だ検出精度や検出範囲など課題も多く、今後さらに研究を深めていきたい。

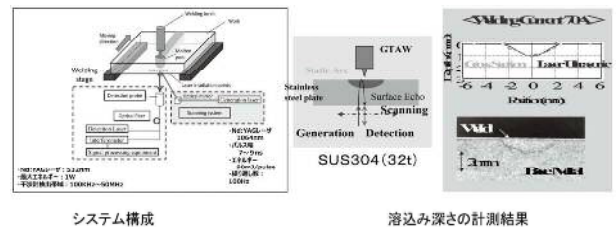


図14 溶込み深さのその場計測システム

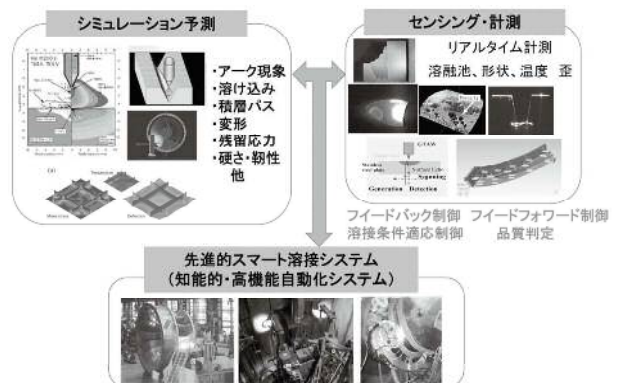


図15 先進的スマート溶接システムの構築

また、現在進歩が著しいプロセスシミュレーションとインプロセスモニタリングの実計測の融合により、溶接状態の予測が可能となり、実施工での品質作りこみ、性能保証を

はかることができる。図 15 は、これらの概念図を示したものであるが、変形シミュレーションなども加えたプロセスシミュレーションとモニタリング、計測技術の融合により、高度で知能的な溶接自動化システムである先進的スマート溶接システムの構築が図れるものと考えている。

5. おわりに

本稿では、永年の溶接自動化システムの取り組みと今後目指す先進的スマート溶接システムへの取り組みについて紹介した。先進的スマート溶接システムは、溶接中に検査をしながら品質を保証するという溶接界として画期的なシステムであり、従来の製造工程を革新するものである。これを実現するためには、以下の要素研究を今後すすめていく必要がある。

- (1) 溶接状態を自動検知する高度なセンシング技術、計測技術
- (2) センシング情報から溶接品質を判断するための情報処理技術とその制御技術

(3) 溶接プロセスシミュレーション技術と計測、センシング技術の融合

未だ、企業時代のエンジニア感覚のまま、研究者としての感性が不足している面もあるが、今後、次世代の日本のものづくりを支える教育、研究に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 浅井 知, 溶接学会誌, 第 81 巻 (2012), 第 1 号, p34-44
- 2) S.Asai,T.Ogawa,H.Takebayashi, Welding in the World, Vol.56 , No,9-10,pp26-34,2012
- 3) 浅井 知, 設計工学, Vol.44,No.1,2009,p21-29
- 4) 浅井 知, 溶接学会誌, 第 84 巻 (2015), 第 6 号, p37-45
- 5) 浅井 知, 小川剛史, 藤田善宏, 大嶽達哉, 星岳志, 平成24年度火力原子力発電大会 論文集, p139-p146, 2013

(溶接 昭和53年卒 55年修士)