第Ⅱ部 溶接・接合工学の最近の動向

Ⅱ 溶接・接合プロセスとシステム化技術

8. システム化技術の動向と展望

山 根 敏*

Trend of Systemizing Technology

by YAMANE Satoshi*

キーワード：溶接ロボット、溶滴移行安定化、協調制御システム、高効率溶接法、低スパッタ化、ティーチング、シミュレーション、インターネット技術、最適経路探索、生産管理システム、スポットレーザセンサ、CCDカメラ、溶接溶融池観察、組織変化モニタリング、溶接技能伝承

8.1 溶接ロボットおよびその周辺技術

2005年のマニピュレータおよびロボットの出荷実績は、日本ロボット工業会の調査によると5287億円（前年比18.4%増）で、国内が2,045億円、輸出は3,242億円となり¹⁾、産業用ロボットの導入が進んでいる。主に、自動車製造業界および電子電機産業界で用いられている。自動車産業界関連では、溶接ロボットは前年比約29%増で4年連続増加しており、その内訳はスポット溶接用およびアーク溶接用が主流であるが、レーザ溶接用も供給されている¹⁻⁴⁾。国際的に見ても、我が国が最もロボットの導入が進んでいる。昨年は人間の作業をロボットにより効率よく行うためにロボット形状を人間に近づけた双腕型のロボットも開発されている⁵⁾。今後、ロボット自身の知能化、CCDカメラなど視覚センサによるセンシングが重要となる⁶⁾。

高効率・高品質溶接を実現するために、ロボット、溶接電源、シールドガスおよび溶接材料が重要である⁷⁾。また、ロボット溶接を支えるために複数電極の使用および低スパッタ化技術などのさまざまな周辺技術が研究・開発されており、2006年に報告された溶接ロボットおよびその周辺技術についてまとめる。

8.1.1 溶接ロボットと溶接電源との協調制御

ロボット溶接を行う場合、再現性、操作性および高速制御などの観点から、溶接電源を含む周辺機器のデジタル化が進んでいる。従来、ロボットと溶接電源は別々に開発されており、RS232Cなどの通信機能を用いて、ロボットと溶接電源を接続し、溶接電源が持っている溶接条件を転送していた。しかし、より精度の高い溶接を実現するためには、これらを同時に協調制御することが重要である。

アーク溶接においては、溶接電流および溶接電圧などをセンシングし、溶接状態を推定し、この推定結果に同期して、インプロセスにて溶接電源、ワイヤ送給速度およびロボットモーションを協調制御する。これにより高品質な溶接結果を得ることができる。これを実現するために、ロボットコントローラと溶接電源を内部バスで直結し、高速データ転送を実現しており、ロボットおよび電源の高速協調制御が行われている^{6,7)}。

高張力鋼板や亜鉛メッキ鋼板などの材料は改良されており、これらが自動車部品に用いられている。このため、スポット溶接においても新たな課題が生じている^{8,9)}。この課題に対応するために、マニピュレータ、サーボガン、ロボットコントローラおよび抵抗溶接用制御装置が組み合わされている¹⁰⁾。これを行うことにより、スポット溶接でのきめ細かな制御および溶接状態の監視が可能となった。具体的には溶接中のチップ間電圧と電流を用いて温度推定を行っている。

8.1.2 ロボット溶接に適した溶滴移行方法

溶接品質を確保するためには、溶接現象の解明が重要である。そこで、溶接現象を高速度ビデオカメラで撮影し、その結果から溶滴移行現象の分類が行われている¹¹⁾。これはロボット溶接に有用である。また、アーク溶接現象のモデル化も行われており、アークプラズマの機構も明らかにされている¹²⁻¹⁴⁾。

8.1.3 溶接電源制御、シールドガスおよび材料による低スパッタ化

自動車製造業界において、ロボットを用いて高品質な片面溶接を行うためには、スパッタの発生量を少なくする必要がある。スパッタの発生には、溶接電源、ワイヤ送給、溶接材料およびシールドガスが関連している。低スパッタ化を実現するために、シールドガスの影響が検討されており、これを行うために溶接現象を高速度ビデオカメラで撮影し、シールドガスによる溶滴移行状態が整理されている¹⁵⁻¹⁷⁾。

a) デジタル・インバータ制御による交流パルスGMA溶接制御

アルミニウム合金の薄板溶接を対象とし、アーク長制御を行う。この場合、電源の極性を切り替えたときに、アーク経路が変化し、異常電圧が発生する場合がある。これがアーク長計測に影響を与え、誤動作の原因となる。そこで、インテリジェントフィルタを用いて、異常電圧

の影響を少なくする方法が開発されている¹⁸⁾。この手法を用いることにより、低アーク圧力を実現する。これにより、低スパッタの高速溶接ができ、ハンピングビードを防止できる¹⁹⁾。

b) CBT (Controlled Bridge Transfer) 法^{20)~24)}

短絡移行域での GMA 溶接では、スパッタの発生は短絡からアークになる瞬間に集中する。このタイミングで発生するスパッタの抑制方法として、短絡からアークが再生する瞬間（ワイヤ先端がピンチ力によりくびれる瞬間）を精度良く検出する。このタイミングに同期して、溶接電流を低減する。さらに、アーク長を安定化するために、溶接電圧を検出し、これを用いて、アーク期間中の溶接電流を最適に制御する。これにより、アーク長が安定化し、短絡周期が一定となり、図1に示すようにスパッタが低減する。

c) 短絡波形制御法 (SP-MAG)^{7), 25)}

Ar ガスを主体とし、CO₂ ガスを含むシールドガス雰囲気中の短絡移行領域では、ワイヤ溶融量に対する母材への入熱量は少なく、アーク長も安定している。しかし、小粒径のスパッタが多い。一方、パルス電流を用いた場合、スパッタを減少させることができるが、母材への入熱が多くなる。このため、薄板溶接におけるギャップ変動がある場合、溶落ちやアークブローなどが問題となる。そこで、上述の両者の特性を合わせ持つように電流の波形制御を行う。まず、ワイヤ先端が短絡したとき、短絡を確実にするために、短絡の検出とともに、微少期間、電流を下げ、その後、ピンチ力を用いて溶滴を移行させるために、電流を増加させる。短絡からアークが再生する前の溶滴と溶融池の接触部分のくびれを検出し、アーク再生前に電流を低減する。アーク期間中は電流を増加させ、溶滴を形成しやすくする。これにより、アーク長および溶滴の形状も安定化できる。この方法は 100%CO₂ シールドガスの短絡移行領域にも適用することができる。

d) CMT (Cold Metal Transfer) 溶接方法^{26)~28)}

Dip 移行領域において、溶滴移行を安定化するために、溶接電流波形だけでなく、ワイヤ送給速度も同時に制御する。これにより、スパッタが発生せずに安定に溶接が行える。具体的には、ワイヤ先端が溶融池に接触したときに、微小短絡を防ぐために溶接電流を低減するとともに、サーボモーターを逆転させる。これにより、低電流

での溶滴移行が行え、スパッタの発生が防げる。溶滴移行後、アークの再生と共に、溶接電流をパルスピーク電流にする。これらの動作を行うために、溶接電源の電流波形制御のみならず、溶滴に同期した高速ワイヤ送給制御が行われており、低入熱での溶接が可能になった。

e) REM 入りワイヤを用いたアークの安定化^{29)~32)}

ワイヤの極性を負にすると、アーク発生点が不安定となり、溶滴が粗大化し、スパッタ量が増大する。ワイヤに REM を添加すると、円錐状のアークが形成され、安定化する。これと共に溶滴移行も微小化する。これにより、CO₂ シールドガス雰囲気中での自由移行領域において、微細かつ連続したスプレー移行を実現されており、スパッタが低減された高能率 CO₂ 溶接が実現される。

ソリッドワイヤよりもスパッタを低減するために、フラックス入りワイヤが用いられており、スパッタも 1/5 程度である。フラックス入りワイヤの場合は各種成分を添加することができる。アルカリ金属はイオン化しやすいので、これを含んだ酸化物をアーク安定剤として少量添加するとアーク安定性が向上する。アーク安定剤、スラグ成分やワイヤの炭素量などを最適化し、低スパッタを実現している^{33), 34)}。

8.1.4 高効率溶接方法

ロボット溶接において、高効率を実現するために、溶接施工法が開発されている。効率を上げるためには、開先角度を狭くすることが有効であるが、溶接不良が起きないように、シールドガス成分、トーチノズル形状およびワイヤの選択が重要である³⁵⁾。縦向き溶接では開先角度を狭くし、I 形において 1 パスで溶接するための方法が提案されている。この方法ではワイヤ溶融速度を調整し、高品質・高能率を実現している^{36), 37)}。

溶接電流を増加させることにより、高溶着量を実現できる。この電流増加に伴い、アーク圧力が増加し、アーク長の不安定化が生じる。そこで、複数電極を用いることにより、1 電極当たりの溶接電流を減少させ、アーク現象を安定化させる。これを薄板高速溶接に適用し、先行電極および後方電極でのパルスタイミングを調整し、安定な溶接品質を得る^{38), 39)}。2 電極を用いた厚板隅肉溶接においては、アーク開始点および終了点でのトーチモーション制御が重要となる。そこで、独立した先行および後行トーチによるトーチチェンジャを用いて良好な溶接結果を得ることができる⁴⁰⁾。水平隅肉溶接において、1 プールの 2 電極溶接を行った場合、先行電極と後行電極の間に溶融池の溜まりが生じる。この溜まりにフィラーワイヤを挿入し、溶融池溜まりの温度を下げ、これにより溶融池の安定化を行い、高溶着量を実現されている^{41), 42)}。

MAG および CO₂ 溶接では、スパッタを低減することができるが、スパッタ発生を無くすることが困難である。一方、TIG 溶接ではスパッタが発生しないが、溶接速度が遅い。溶接速度を向上させるために、フィラーワイヤに電流を流すホット TIG 溶接方法が開発されている。さらに、チップ形状、ワイヤ挿入位置を調整することにより、高速溶接を達成した^{43)~45)}。また、ガスの特性を利用し、2 重シールドガスを用いて、従来よりも深い溶け込みが実現されている⁴⁶⁾。

8.1-図1 CBT 溶接法²³⁾

文 献

- 1) 溶接技術, 54-8 (2006) p.51-54 2) 溶接技術, 54-5 (2006) p.121-133 2) 溶接技術, 54-11 (2006) pp.53-58 3) 溶接技術, 54-11 (2006) pp.98-99 4) 溶接技術, 54-1 (2006) p.59 5) 鈴木: 溶接技術, 54-11 (2006) pp.112-124 松浦: 溶接技術, 54-11 (2006) pp.102-106 溶接ロボット 6) 廣田: 講演概要, 79 (2006) pp.F3-F7 TAWERS 7) 廣田ら: SW-3109-06 TAWERS 8) 沖田ら: 講演概要, 78 (2006) pp.164-165 9) 加治ら: 学会誌, 75-7 (2006) pp.29-32 10) 清水ら: 溶接技術, 54-1 (2006) p.126-130 11) 足立ら: 講演概要, 79 (2006) pp.112-113 12) 田代ら: 講演概要, 79 (2006) pp.114-115 13) 山本ら: 講演概要, 79 (2006) pp.116-117 14) 森崎ら: 講演概要, 79 (2006) pp.118-119 15) 佐藤ら: IIW XII-1892-06 (2006) 16) 佐藤: 講演概要, 79 (2006) pp.F13-F18 17) 池上ら: 学会誌, 75-7 (2006) pp.24-28 18) 西坂ら: 講演概要, 79 (2006) pp.128-129 19) 塩崎ら: 講演概要, 79 (2006) pp.130-131 20) 上山ら: SW3121-06 21) 上山ら: 溶接技術, 54-12 (2006) p.60-67 22) 恵良ら: 学会誌, 75-7 (2006) pp.19-23 23) 恵良ら: IIW XII-1900-06 24) 井手ら: 講演概要, 78 (2006) pp.132-133 25) 浜本: 溶接技術, 54-8 (2006) p.72-77 26) 古川ら: 講演概要, 78 (2006) pp.134-135 27) 古川: 学会誌, 75-8 (2006) p.5 28) 古川ら: sw-3108-06 29) 片岡ら: 講演概要, 78 (2006) pp.136-137 30) 片岡ら: 講演概要, 79 (2006) pp.110-111 31) 片岡ら: 溶接技術, 54-9 (2006) p.62-67 JStar 32) 片岡ら: IIW SG212-1093-06 33) 奥石: 講演概要, 79 (2006) pp.F8-12 34) 橋本ら: 学会誌, 75-7 (2006) pp.14-18 35) 山野ら: 講演概要, 79 (2006) pp.144-145 36) 木治ら: 講演概要, 78 (2006) pp.88-89 37) 木治ら: 講演概要, 79 (2006) pp.126-127 38) 大縄ら: SW-3117-06 39) 上山ら: IIW XII-1883-06 40) 松本ら: 溶接技術, 54-7 (2006) p.110-113 41) 中野ら: 溶接技術, 54-10 (2006) pp.58-62 42) 有田ら: IIW XII-1896-06 43) 篠崎ら: 講演概要, 79 (2006) pp.134-135 44) 明賀ら: 溶接技術, 54-9 (2006) p.68-72 45) 篠崎ら: SW-3122-06 46) 田中: 講演概要, 79 (2006) pp.F24-F30

8.2 CAD/CAMシステム

CAD/CAM システムは種々の生産システムに適用されており, 溶接システムの自動化において重要であり, 溶接教育の一環としても取り入れられている¹⁾。

コンピュータにより設計する場合, 溶接現象をモデリングし, 数値シミュレーションを用いて, 溶接条件の導出, 溶接品質の確認および複数台のロボットの最適動作の決定が重要である。シミュレーション結果を用いて溶接条件の決定およびオフラインティーチングが省人化および効率化を進める。オフラインで得られた情報を用いて溶接を自動で行う。このときに, ワークの位置ずれなど, オフラインでは考慮されていない情報はインプロセスで検出し, ロボットが自動で補正することが必要である。このため, 溶接プロセスの自動化のキーテクノロジーとして, デバイスネットなどのコンピュータネットワークなどが挙げられる。とくに, システム化を行う場合はIT化技術を用いたネットワーク通信機能が重要な役割を果たす。溶接ロボットなどの溶接・切断加工機にLANを用いてコンピュータを接続し, リアルタイムで溶接条件の一括管理, ロボットの最適動作の決定・管理などが行われている。また, 動作状態のリアルタイムでの監視が行われている²⁾。

これらのCAD/CAMを支えている技術に関して, 2006年に報告されたものについてまとめる。

8.2.1 ロボット溶接システム

軽量住宅ユニットの組立の自動化を行うために, 複数台のロボットを用いた溶接が行われている³⁾。オフライン

にてティーチングを行い, 実作業では, CAD データに対してワークに位置ずれが生じる場合がある。この位置ずれを補正するために, レーザセンサが適用されている。これにより3次元位置情報を取得している。センサの取り付け位置がずれた場合でも, 自動補正機能を持っている。さらに, 各ロボットの溶接状態もLANを用いて, 監視しファイルに記録している。

CAD データを活用し, ティーチングを自動的に行うために, レーザビジョンセンサが有用である。ワークの位置ずれに関わらず, ロボット手首に取り付けられたレーザスキャナにより, 溶接線を検出し, これを倣う⁴⁾。このようにティーチング補正が行われている。

8.2.2 数値シミュレーション

基礎実験から構築した数値モデルを用いて, コンピュータ上で, 溶接条件を求めることができる。CADを支える要素技術として, 数値シミュレーション技術が挙げられる。これらのシミュレーション技術の動向についてまとめる。溶接ロボットの導入が最も多い薄板溶接では, 溶接時の熱歪みは部材形状および溶接条件の影響を受け, 試作時などで試行錯誤しながら, 部材の精度を上げており, 工程設計の増大の原因となっている。溶接変形を定性的に把握可能な計算精度での高速な溶接変形解析手法の開発が試みられており, 簡易形状部品を用いて妥当性が検証されている^{5, 6)}。

溶接条件を決めるための溶接溶融池の数値シミュレーションにおいては, アーク圧力およびビード形状を考慮し, 薄板のMAG溶接において, アンダーカットおよびハンピングなどの不整ビードをシミュレーションにより求めることができる数値モデルが提案されている⁷⁻⁹⁾。これを用いて, 高電流・高速溶接の溶接条件を推定することができる。母材への入熱制御を行うことにより, 溶込み深さを制御するための方法が数値シミュレーションにより求められている¹⁰⁾。

多くの数値シミュレーションは有限差分法をベースに開発されている。大規模な計算では, 高速計算が要求されている。これに対応するために, 計算メッシュの構造を温度変化の大きいところを細かくし, 温度変化の緩やかなところのメッシュ間隔を長くする方法が提案されており, この方法は高速計算に役立っている¹¹⁾。

厚板の多層溶接においても, 溶接条件および熱挙動を推定するための数値モデルも開発されている¹²⁾。また, 1パスでの狭間先溶接の数値シミュレーションを有限要素法により行う方法も示されており¹³⁾, 溶接条件の最適化などに役立つ。この方法は一般的な有限差分法よりも高速に計算できる。

8.2.3 複数台ロボットを用いた溶接経路の最適化

造船や橋梁などの大型構造物の溶接で, 図2に示す自走ガントリーを用いたマルチロボット構成によるシステムが実用化されている¹⁴⁾。複数台の溶接ロボットの協調作業におけるロボット相互干渉問題に対して, 動作範囲を拡大させるために, 遺伝的アルゴリズムを用いて, 干渉のない最適動作経路の推定が行われている。

8.2.4 インターネット技術の活用

CAD/CAM システムを活用し, 自動溶接を行う場合,

図2 自走式ガントリー用いたロボット溶接システム¹⁴⁾

遠隔地からの状態監視およびメンテナンスが重要である。これを行うために、インターネットを用いるシステムが構築されている¹⁵⁾。

8.2.5 生産管理システム

切断システムにおいて、24時間効率良く運転させるために、受注から出荷まで一元管理するシステムが構築されている¹⁶⁾。このシステムでは、受注情報による生産計画の自動生成および工程の進捗状況のリアルタイム監視が行える。多品種少量部材の切断の増加は作成する NC プログラミングが増えるので、CAD/CAM システムの負担が重くなる。そこで、自動ネスティングや共通切断線のためのシーケンスを備えた CAM システムが導入されている。

文 献

- 1) 真鍋：学会誌，75-1 (2006) pp.21-26 2) 山本ら：溶接技術，54-3 (2006) p.114-120 3) 勝又ら：溶接技術，54-12 (2006) p.101-108 4) 溶接技術，54-11 (2006) p.49 5) 予語ら：講演概要，78 (2006) pp.212-213 6) 予語ら：講演概要，78 (2006) pp.214-215 7) 宮坂ら：IIW XII-1903-06 8) 山崎ら：講演概要，79 (2006) pp.120-121 9) 山崎ら：論文集，24-4 (2006) pp.368-372 10) 宮坂ら：講演概要，79 (2006) pp.122-123 11) 中谷ら：論文集，24-1 (2006) pp.52-56 12) 宮坂：学会誌，75-4 (2006) pp.32-35 13) 山根ら：講演概要，79 (2006) pp.124-125 14) 勘定ら：JFE 技法，14 (2006) pp.55-59 15) 脇ら：溶接技術，54-12 (2006) p.112-116 16) 細道：溶接技術，54-5 (2006) p.84-88

8.3 センサ／モニタリング

溶接ロボットおよび溶接施工の自動化などを行うためのシステム化技術において、インプロセス制御が重要である。これを行うためには、いかにセンシングするかが課題となる。CCD カメラなどの視覚センサを用いることにより、アーク溶接現象などを撮影し、溶接品質のモニタリング、溶接現象の解析をすることができる。また、次世代の溶接機器においては、小型の視覚センサを溶接トーチ、ワイヤ送給装置などに組み込むことにより、溶接状態に適応して制御し、より良好な溶接品質結果を得ることが期待できる¹⁾。センシングとモニタ技術および、これらを応用した技術について、2006年に報告されたもの

についてまとめる。

8.3.1 視覚センサを用いたモニタリングとインプロセス制御への応用

オフラインティーチングを行っても、ワークの設定位置がずれ、溶接線位置がずれる場合がある。これを補正し、ティーチングの自動化を行うために、スポットレーザ光と視覚センサを組み合わせたレーザセンシングを用いたシステムが開発されている^{2, 3)}。このセンシングシステムでは画像処理の結果からセンシング対象物の3次元位置を計測することができ、ティーチングを補正する場合に有効である。また、同時に、溶接中でも開先形状およびギャップをセンシングできるので、溶接中のギャップ変動に対する適応制御が行える。

裏当材を用いないロボット溶接において、CCD カメラを用いて、溶融池を撮影し、この画像を処理し、ギャップをインプロセスで検出する方法が提案されている。アーク光の相対光強度に対して、溶融池の相対光強度が強くなるため、市販の CCD カメラの分光感度を考慮し、溶融池を明瞭に観察するために 950 nm の干渉フィルタが用いられている⁴⁾。インプロセスで求めたギャップ画像を図3に示す。画像処理によりギャップを検出し、これに従って、溶接条件の適応制御が行われている^{5, 6)}。

近年、天然ガスの需要の増大に伴い、高圧ガスパイプラインの敷設が進んでいる。これに伴い、品質を確保するために自動溶接による接合が進んでいる。パイプ溶接は全姿勢溶接となるために、溶接の進行に伴い、重力の影響を受け、溶融池の湯流れが連続的に変化する。これにより、溶融金属の垂れ落ちや融合不良が生じる。これを防ぎ、安定な裏ビードを得るためにはインプロセスでの適応制御が必要となる。開先形状のセンシングにはスリット状のレーザ光と CCD カメラを用いる光切断法が主として用いられている。また、CCD カメラを用いて、溶融池を直接センシングし、その結果から溶接条件が調整されている⁷⁾。具体的には、溶融池画像から画像処理により、溶融池の形状、開先内でのアーク位置および溶融池の先行量を検出し、これらが望ましい値になるように溶接条件が修正される。

8.3.2 溶接中の組織変化モニタリング⁸⁾

溶接中の組織変化を直接観察することができれば、溶接プロセスの改善に役立てることができる。そこで、赤

図3 スイッチバック溶接における典型的な溶融池画像とその処理⁵⁾

外線ゴールドイメージ炉と共焦点走査型レーザ顕微鏡を用いて、「その場観察」が報告されている。すなわち赤外線ゴールドイメージ炉を用いて高速で溶接時の熱サイクルが再現される。このときに、試料表面をレーザビームにより走査し、試料からの反射光を1次元 CCD アレイにより、反射光強度として計測し、その時の試料の状態が観察されている。この方法により、1500 度を超えるような温度範囲でも組織変化の観察が可能になった。さらに、相変化や析出を直接観察するために、X 線回折法が用いられている。短時間で観察するために、Spring8 にあるアンジェレータビームラインを用いて溶接 in-situ 観察システムが構築された。

8.3.3 計測データを用いた溶接品質のモニタリング

溶接時の電流・電圧を計測し、これを処理することで、溶接品質をモニタリングする技術が開発されている⁹⁾。ここでは、0.5 秒間に電流・電圧を 4000 点計測し、この時系列データから規則性を自動的に推定し、正常溶接なのか不良溶接なのかをリアルタイムで判別している。計測データから規則性を見つける推定アルゴリズムはカオス理論に基づいている。

MHD-Simpler 法を用いて、アークの温度分布を算出する。その温度分布を用いて、放射パワーを計算し、これにより、不良溶接が生じたどうかのモニタリングが行われている¹⁰⁾。

8.3.4 ビジュアルセンサを用いた溶接技能¹¹⁻¹⁵⁾

2007 年度問題に見られるように、熟練溶接技能者が減

少してきており、匠の技の伝承が課題となっている。これに対応するために、溶接現場で得られる情報を元に、溶接技能の評価および伝承を行うシステムが開発されている。TIG 溶接用システムは、すでに開発されている。そこで、MAG 溶接の技能伝承に対応するために、溶接士および溶融池の挙動が CCD カメラによる撮影と電圧・電流の計測によりモニタリングされ、これらが記録されている。この記録されたデータを処理することにより、技能評価が行われている。溶接挙動を調べるために、溶接トーチに 1 台、溶接進行方向に 2 台、溶接士正面に 1 台の合計 4 台の CCD カメラを設置し、溶接挙動を撮影している。それぞれのカメラの設置角度、フィルタの透過波長を適切に選択することにより、MAG 溶接の特徴が検出されやすくなっている。これに加え、電圧・電流波形およびワイヤ送給速度も記録し、溶接挙動の定量化が図られている。このシステムを用いて、溶接欠陥の生じる原因も探ることができる。

文 献

- 1) 平田ら：講演概要, 79 (2006) pp.F19-F23
- 2) 山本ら：溶接技術, 54-3 (2006) p.114-120
- 3) 勝又ら：溶接技術, 54-12 (2006) p.101-108
- 4) 山根ら：SW3124-06
- 5) 山根ら：XII-1902-06
- 6) 高橋ら：講演概要, 78 (2006) pp.138-139
- 7) 児玉ら：溶接技術, 54-11 (2006) pp.107-111
- 8) 小溝：溶接技術, 54-9 (2006) p.55-59
- その場観察
- 9) 大畑：溶接技術, 54-10 (2006) pp.114-117
- 10) 瀬野尾ら：講演概要, 79 (2006) pp.96-97
- 11) 浅井ら：IIW XII-1904-06
- 12) 小川ら：講演概要, 79 (2006) pp.146-147
- 13) 小川ら：講演概要, 79 (2006) pp.148-149
- 14) 佐久間ら：学会誌, 75-8 (2006) pp.43-47
- 15) 小川ら：SW-3094-06