

(論文)

アーク溶接の熱流体解析

Thermal Fluid Dynamics Modeling for Arc Welding



佐藤伸志*¹
Shinji SATO



野口 暁*² (博士(工学))
Dr. Satoru NOGUCHI

Efficiency in the arc welding in welding construction and quick decisions as to the most suitable welding conditions are expected along with a reduction in the lead time of machine development. To achieve this, it is necessary to know what is really going on during complicated arc welding, but that is something difficult to observe experimentally. Therefore, as a result of building the arc welding analytical technique that integrated the heat flux body analysis of the molten pond with arc plasma analysis, we were able to correlate the analysis with the experiment and build a basic technology for the arc welding analysis.

まえがき = 近年、機械製品の開発スピードは上がってきており、なかでも溶接施工におけるアーク溶接の高効率化や、安定して品質が確保できる最適溶接条件の迅速な決定が望まれてきている。アーク溶接現象は、アークプラズマ現象、溶接ワイヤの溶融と溶滴の落下、母材の溶融、溶融池の形成、ワイヤ溶融による母材の肉盛など考慮しなければならないことが多いうえに複雑であり、その挙動を正確に把握することは難しい。そのため、一般的には溶接条件の決定は実験を繰り返し、時間をかけて最適溶接条件を見出しているのが現状である。また、アーク溶接中における溶融池の現象を理解することは溶接施工の技術開発や品質向上に大きく寄与できるものの、表面は直接観察できるが、溶融池内部の直接観察は高度な透過観察システム¹⁾を使用しない限り難しい。

そこで、溶接条件の事前最適化の検討や、溶融池の現象解析に有効な手段となるのが数値解析によるシミュレーションである。

本稿では、アークプラズマ解析と溶融池の熱流体解析をリンクさせ、溶接ビードの表面形状および溶融池内部の現象を再現することを目的としてアーク溶接解析のモデル化を試みた。解析結果事例について報告する。

1. 数値解析手法と解析モデル

前述のように、アーク溶接現象は多くの現象が複雑に関係している。これまでも消耗式電極を模擬したアーク溶接モデルを構築した技術は多数ある^{2)~16)}。しかし、多くのアーク溶接モデルの特徴としては、溶接棒の溶滴落下後の表面形状を、自由表面を伴う熱流体解析ではなく、溶滴量と溶融池表面の力の釣り合い計算により決定している。また、入熱およびアーク圧力分布についてはガウス分布を仮定で定義して解析を実施しており^{2)~13)}、

熱流体解析とアーク圧力分布の統合モデル^{14)~16)}はほとんどない。そのため、アークからの入熱による物性値の変化や、熱流体の温度分布による対流の発生など、ビード形状と溶け込み形状に及ぼす重要な因子を考慮した解析がなされていないのが現状である。

アークプラズマの現象は溶融池の変動現象と比較して時間的に非常に高速な現象であり、解析を実施する場合は、溶融池の変動現象を表現する熱流体解析に対して、アークプラズマ解析の非定常計算において収束性を得るための繰り返し計算で時間刻みを非常に細かくする必要がある。そのため、アークプラズマ解析と熱流体解析を連成させた解析を実施した場合、計算機能力において現実的な時間で解析ができないことが課題となっている。

そこで、アークプラズマ解析と溶融池ビード形状解析を分け、支配方程式の異なる二つの解析の間の懸け橋となるUser Defined Function (以下、UDFという)を作成することによって統合したアーク溶接解析モデルを構築した。このUDFの主な機能は、溶融池ビード形状解析で用いているVolume Of Fluid (以下、VOFという)法で表現された母材および表面要素を抽出し、アークプラズマ解析で得られたアーク圧力および熱流速を境界条件として与える機能、および計算速度を向上させるための並列化計算手法の導入である。

この手法により、アークプラズマ解析と溶融池ビード形状解析の計算における時間刻みをそれぞれ最適な間隔で実施することができる。さらに、溶接ビード形状に及ぼす因子を考慮可能な解析が、現在の計算機スペックにおいても現実的な時間で解析可能となった。そのアルゴリズムを図1に示す。

ここで、アークプラズマ解析については汎用物理シミュレーションソフトCOMSOL Multiphysics[®]を用い、二

*¹ 技術開発本部 機械研究所 *² (株)コベルコ科研 エンジニアリングメカニクス事業部 CAE技術部

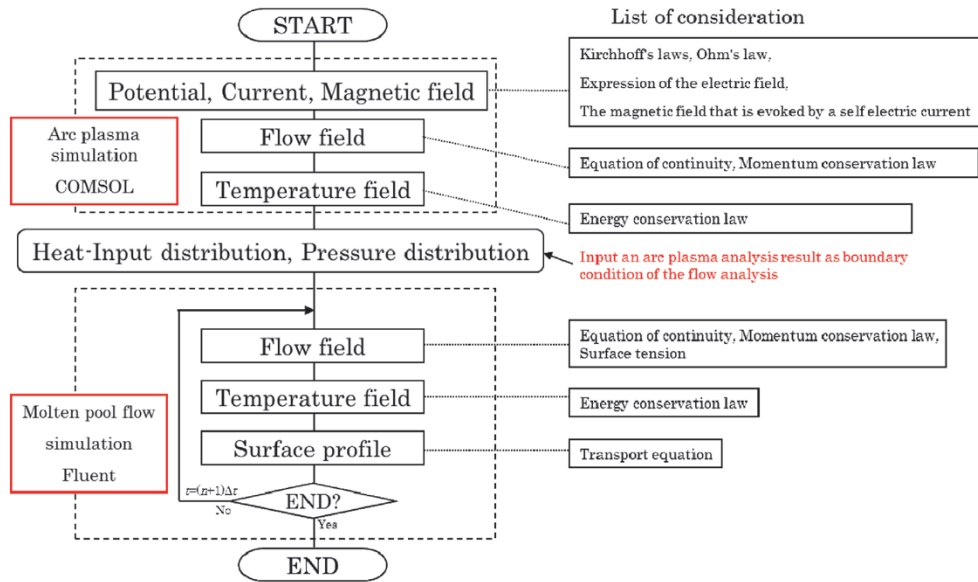


図1 解析アルゴリズム
Fig. 1 Algorithm of welding analysis

次元軸対称定常解析とし、電極の溶融は考慮していない。また、溶融池およびビード形状解析については自由表面を取り扱えるVOF法を用い、汎用熱流体解析ソフトウェアANSYS Fluentにて解析を行った。

2. 二次元モデル解析結果

基礎解析手法の構築を目指すため二次元モデルとした。溶接条件は電流値：300A、電圧値：30V、シールドガス：Ar100%、シールドガス流量：10L/min、溶接速度：30cm/min、ワイヤ径：φ1.2mm、ワイヤ供給速度10m/min、溶材と母材はSUS、肉盛り溶接として最も単純な平板上を直線で溶接するビードオンプレートにてMetal Inert Gas（以下、MIGという）溶接として解析を実施した。溶滴の設定方法は、ワイヤ先端位置である4.5mmの高さに溶融金属を湧出させ、ワイヤ供給速度と溶滴移行の周期から算出した1滴あたりの体積を球と想定し、その断面積に達した時に溶滴は落下するとした。さらに、溶滴の湧出位置は溶接速度で移動させることでビードを形成させた。アークプラズマ解析結果を図2に示す。アークプラズマ解析では二次元軸対称モデルにて実施し、熱源の移動、母材表面の変形、電極の溶融は考慮せず、電場、磁場、速度場、圧力場、温度場を連成して計算を実施した。

この計算結果から、母材表面における熱流束分布およびアーク圧力分布を抽出したものが図3である。この分布を溶融池およびビード形状解析の熱流体解析への境界条件として入力する。ビード形状解析では、アークプラズマによって発生するプラズマジェットを模擬するため、プラズマジェットを圧力に換算して付与することでモデル化した。溶接開始から0.5秒および1.5秒の時の溶融池ビード形状解析結果におけるビード形状と溶融池内部のベクトル図をそれぞれ図4、図5に示す。解析では、時間経過に伴ってビードが正常に形成され、約1.2mmから約2.5mmのビード高さに成長する状態が得られた。また、アーク圧力によって溶融池に渦が発生して

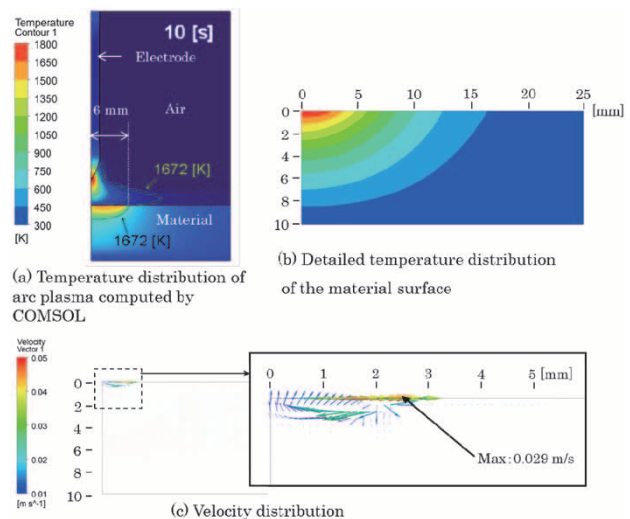


図2 アークプラズマ解析結果
Fig. 2 Analysis results of arc-plasma by TIG arc welding

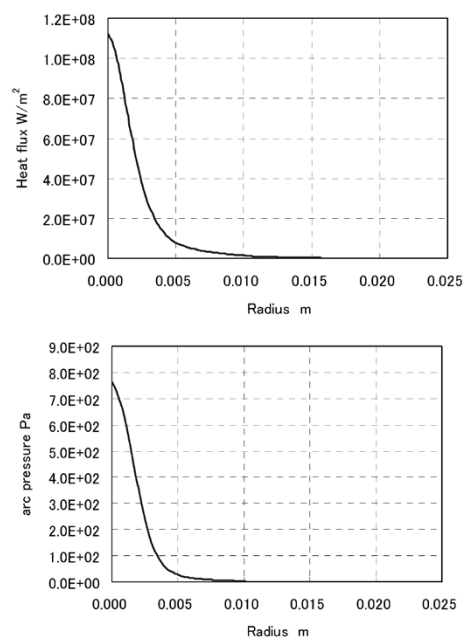


図3 母材表面における熱流束分布（上）とアーク圧力分布（下）
Fig. 3 Heat flux (upper) and arc pressure (lower) at surface of molten pool computed by COMSOL

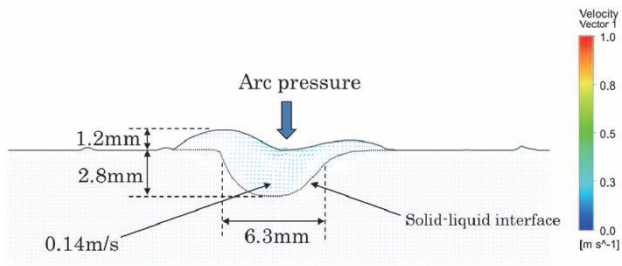


図4 0.5秒時の溶融池の表面形状と流速ベクトル
 Fig. 4 Surface shape and flow vector in molten pool of MIG welding at 0.5s

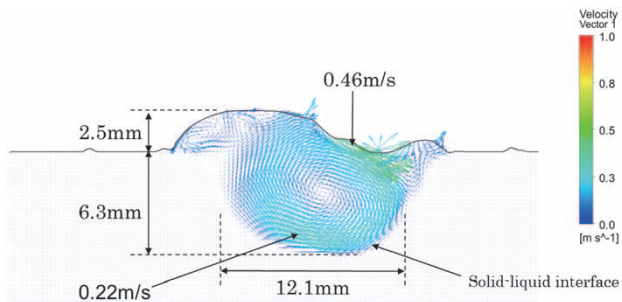


図5 1.5秒時の溶融池の表面形状と流速ベクトル
 Fig. 5 Surface shape and flow vector in molten pool of MIG welding at 1.5s

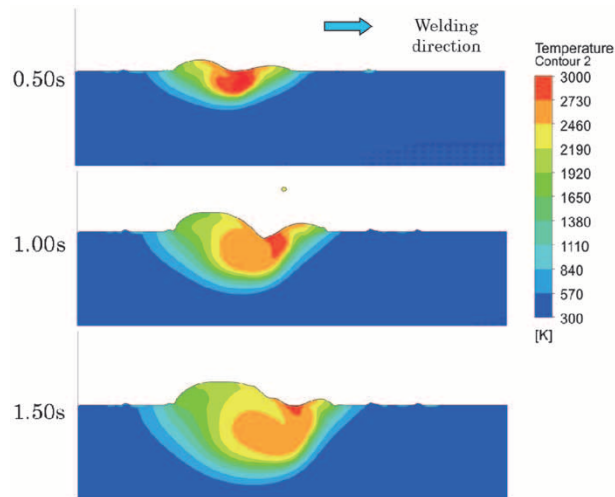


図6 溶接方向断面における溶融池の温度分布
 Fig. 6 Temperature distribution in molten pool

おり、時間経過に伴い渦が大きく成長する結果となった。この渦は溶融した金属の流動を意味しており、渦の大きさは溶融深さを表している。これは、図6に示す温度分布結果からもわかる。しかしながら、解析に用いた溶接条件において、実際には図5に示す渦の大きさほど深い溶け込みが生じることはない。これは、本解析が二次元解析であり、溶接線直交方向の放熱ロスを考慮していないことに起因して、金属の溶融量が増加したためと推測している。この結果から、二次元解析は放熱ロスを考慮した三次元解析に拡張させる必要がある。

3. 三次元モデル解析結果

前述の二次元モデルを三次元に拡張し、ビード形状や溶融池の対流を検討した。図7に示すように母材は、板厚10mm、板幅50mm、長さ60mmの平板とした。二次元解析との相違点は、溶滴はワイヤ供給速度から換算し

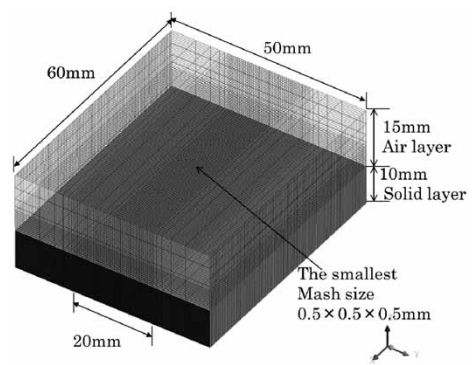


図7 MIG溶接三次元解析モデル
 Fig. 7 FEM mesh model for three-dimension MIG welding analysis

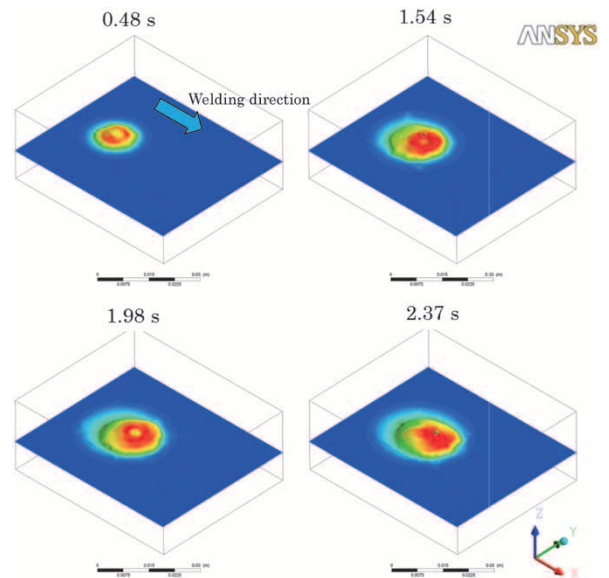


図8 MIG溶接のビード形状解析結果
 Fig. 8 Results of bead formation process computed for the MIG welding

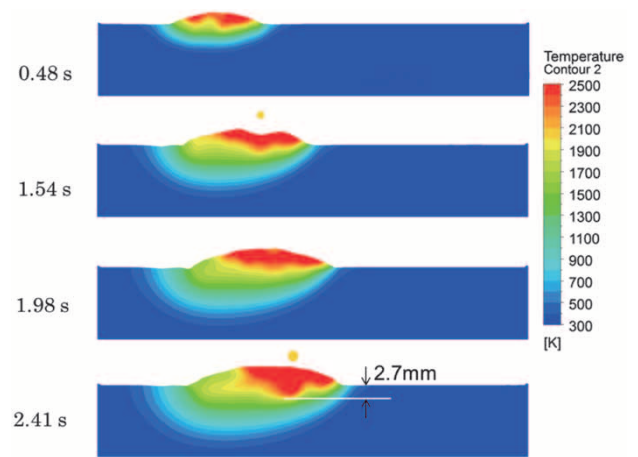


図9 溶接方向断面における温度分布
 Fig. 9 Temperature distribution of cross-section of welding direction

た体積を溶滴移行の周期に合わせて滴下すること、および三次元的な放熱ロスを考慮していることである。

溶接開始0.48秒から2.37秒までの解析結果（温度分布）を図8に示す。二次元解析と同様に時間経過とともにビードが形成されており、放熱ロスを考慮した三次元解析ではビード後端の冷却が表現されている。また、図9に示す溶接線方向の断面における解析結果（温度分布）に

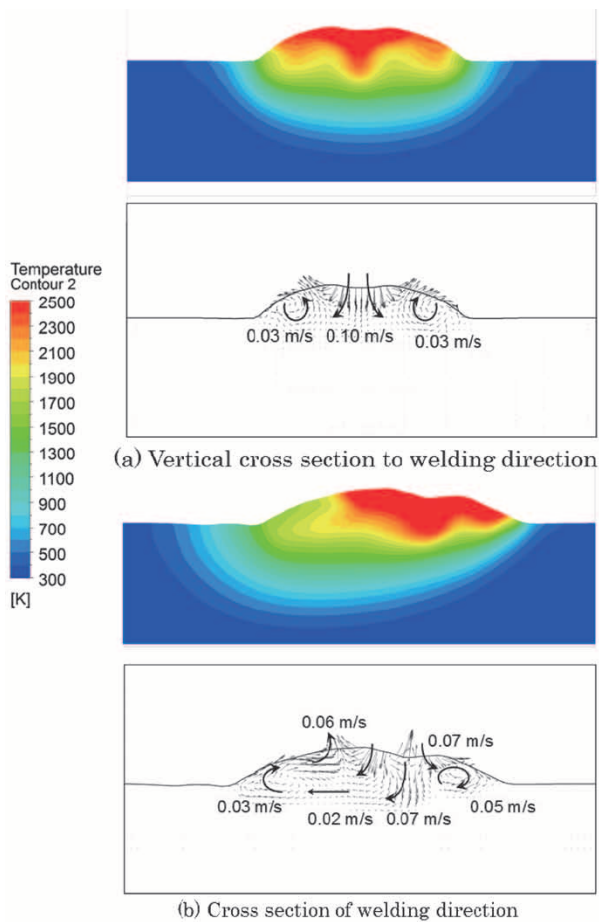


図10 2.37秒時の温度分布および速度ベクトル
Fig.10 Temperature distribution and velocity vector of MIG welding analysis at 2.37s

において、溶融深さは二次元解析と比較して浅くなっていることが明らかになった。図10に2.37秒後の溶接線に直交する断面および溶接方向の断面における溶融池内部の温度分布と速度ベクトルを示す。溶滴の落下とアーク圧力によって鉛直下向きの強い流れが発生している。また、鉛直下向きの流れによって、高温の溶融金属が内部へと輸送されており、その流れが駆動力となって、ビード前方側と後方側に二つの渦が発生しているのがわかる。溶滴落下による鉛直下向きの流れはLaoら¹⁶⁾によっても同様の結果が得られている。このように、開発したこの三次元解析では、溶融池内部の挙動および温度分布が予測できるようになった。

4. 三次元解析結果と実験結果との比較

前述の三次元解析結果と実験結果との比較を行った。実験では便宜上板材にSM490を使用し、MIG溶接を実施した。溶接電流・電圧・速度は解析条件と同じである。図11に試験材の断面写真と凝固温度以下の位置での温度分布の解析結果を示す。実験は、ビード幅14mm、ビード高さ3.5mm、溶け込み深さ3.5mmに対して、解析結果のビード幅は17.4mmと25%程度広く、ビード高さは3.8mmとほぼ一致、溶け込み深さは最高到達温度を検証したところ2.7mmとなり、わずかながら浅かった。実験結果との差異は、材料の粘性の差と解析の溶滴供給量過多が要因と考えられる。しかしながら、本解析結果はお

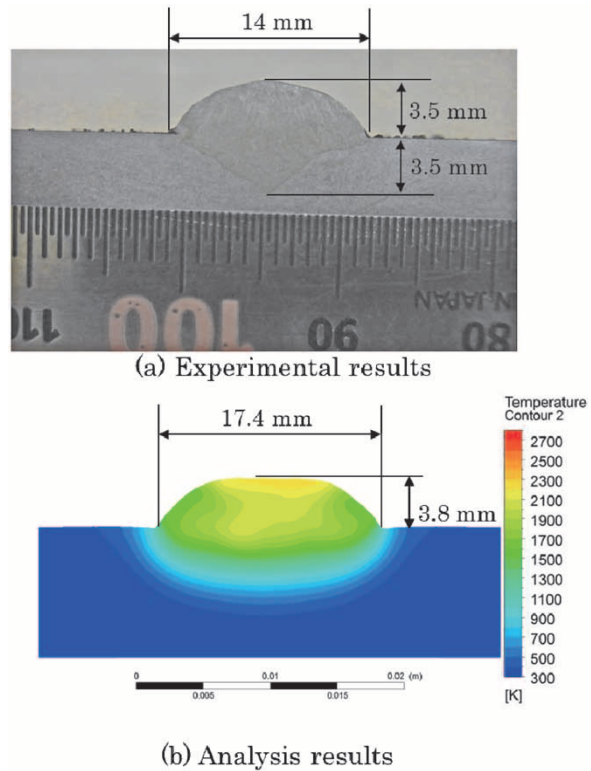


図11 実験結果と解析結果の形状比較結果
Fig.11 Compare with analysis results and experimental results

おむね実験結果を再現できており、今後はこれらの高精度化を進めていくことで、数値解析によるビード形状の予測技術への適用が期待できる。

5. 今後の展開

現状は、シールドガスにArガスを用いたMIG溶接にて解析を実施しているが、より実用性がある技術に発展させるためには、鉄鋼材料の接合に多用されるCO₂溶接やMetal Active Gas (以下、MAGという)溶接での解析技術が必要である。CO₂溶接とMAG溶接ではMIG溶接とシールドガスの物性値が変化するため、アークプラズマの熱分布が変化する。そのため、まずはこれらのシールドガスの物性値の取得を行い、開発を進めていく予定である。

また、本解析技術を実際に設計・開発に利用していくために、様々な溶接継手 (例えば突合せ継手、隅肉継手) での解析が可能となる必要があり、さらに多様な溶接条件 (例えば多層溶接、ウィービング、トーチ角度) を再現できるようにUDFを改良していく必要があると考えられる。

むすび=アーク溶接のアークプラズマ解析と溶融池ビード形状解析の統合解析技術を開発し、三次元解析に拡張することによって、実験結果との相関が得られる解析結果を得ることが可能となった。このことにより、アーク溶接の溶接中現象の再現、ビード形状の予測、溶け込み形状の予測などが可能となる解析技術の基礎ができたといえる。

参 考 文 献

- 1) 井戸諒治ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2012, Vol.91, p.40-41.
- 2) A. KUMAR et al. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A. 2007, Vol.38, Issue 3, p.506-519.
- 3) E. Le Guen et al. Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover.
- 4) B. Ribic et al. Science and Technology of Welding and Joining. 2008, Vol.13, Issue 8, p.683-693.
- 5) 宮坂史和ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2010, Vol.86, p.130-131.
- 6) 山崎洋輔ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2004, Vol.75, p.108-109.
- 7) 宮坂史和ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2005, Vol.77, p.82-83.
- 8) 吉岡佑一郎ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2011, Vol.89, p.334-335.
- 9) 越智申久ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2012, Vol.91, p.236-237.
- 10) 野村和史ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2013, Vol.92, p.116-117.
- 11) 萩野陽輔ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2013, Vol.92, p.120-121.
- 12) 辻 陽子ほか. 溶接学会論文集. 2000, Vol.18, p.527-533.
- 13) 山崎洋輔ほか. 溶接学会論文集. 2006, Vol.24, p.368-372.
- 14) 野口 暁ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2012, Vol.91, p.238-239.
- 15) 野口 暁ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2013, Vol.93, p.66-67.
- 16) Z. H. Lao et al. Journal of Applied Physics, 2010, Vol.107, Issue 5.