



ミニ特集・2

高度溶接技術

溶接プロセスシミュレーションモデルの開発

Development of Welding Process Simulation Model

黄地尚義
Takayoshi Ohji

大阪大学 大学院工学研究科
知能・機能創成工学専攻 教授

1 はじめに

平成12年度に経済産業省のプロジェクト『溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発』がスタートした。このプロジェクトは、5年計画で、“シミュレーションによるアーク溶接技術の高度化”を目指している。計画を具体化するため、アーク溶接のシミュレーションに関する3つの分科会：溶接プロセス、金属組織、溶接変形、が設置されている。ここでは、溶接プロセスシミュレーション分科会における検討課題とそこでの検討状況を簡単に報告する。

2 プロセスシミュレーションの目標と課題

溶接現象の解析手法としてシミュレーションが有用であることは言うまでもないが、施工法の選択、施工条件の設定・最適化など、技術者の意思決定を支援するツールとしてもシミュレーションは重要である。

このような観点から、プロセスシミュレーション分科会では、アーク溶接プロセスのシミュレーション技術を確立し、その成果をベースに、溶接技術者の意思決定を支援できるシステムを提案することを目標としている。

もとより、アーク溶接現象は、溶接プールにおける対流熱輸送現象、電極ワイヤの溶融・移行に伴う溶接プールの動的な挙動など、極めて複雑である。このため、ここではまず、重力、表面張力、電磁力など、アーク溶接プロセスを支配する要因とその作用機構を明らかにする。併せて、これらの作用機構をモデル化し、実際のティグ (TIG) およびマグ (MAG) 溶接を対象とした溶接プロセスのシミュレーションプログラムを開発することを目標としている。

最近、アーク溶接の自動化・ロボット化の動きを背景として、溶接プロセスのシミュレーションを目的とした研究¹⁻⁵⁾

が、米国、ドイツなどで積極的に進められているが、課題も多く残されている。たとえば、対流熱輸送現象に関しては、多くの研究者の努力により、その定性的理解はかなり深められたといえるが、モデル計算の結果に対する実験的裏付けが乏しく、定量的理解が十分であるとは云えない。また溶接プロセスのシミュレーションに関しても、実際の溶接施工において広く採用されている隅肉溶接や多層溶接、また、実際の溶接施工において問題となるアンダカットのような不規則ビード (欠陥) の形成現象を予測・推定できるものがない等、課題を残している。

上述のような観点から、本分科会では次の2つの課題を中心に検討している。

- 課題① アーク溶接における対流熱輸送シミュレーションモデルの構築
- 課題② 実溶接プロセスに対する熱伝導シミュレーションモデルの構築

これら2つの課題は、それぞれに重要、かつ独自に解決すべき問題を抱えている。このため、本分科会では、これら2課題を並行して検討することとした。

前者 (課題①) は、アークプラズマと溶接プールにおける対流熱輸送のメカニズムの解明を目的としたものである。信頼できるアークプラズマモデルと溶接プールの対流熱輸送モデルの構築が基本となる。当面は、これら両モデル／アークモデルと溶接プールの熱輸送モデル／の開発をそれぞれ独立に進め、その後、二つのモデルをリンクさせる。

後者 (課題②) では、実際の生産現場におけるマグ (MAG) およびティグ (TIG) 溶接プロセスを対象とした計算モデルを構築し、そのシミュレーション技術を確立することが、目標となる。具体的には、隅肉および突合せのマグ溶接、パイプの円周ティグ溶接などを対象としている。なお、モデルの複雑さを回避し、かつ演算時間を短縮するため、溶接部の熱輸送に関しては、熱伝導を主体としたモデルを考えることと

した。図1に本分科会で構築予定のモデルとその具体的課題を示す。

3 シミュレーションの結果とその考察

ここでは、上記2課題に対する分科会での検討状況を簡単に紹介する。

3.1 アークと溶接プールの対流熱輸送モデル⁶⁻⁸⁾

アーク溶接プロセスを物理的に厳密に把握するには、信頼できるアークプラズマモデルの開発が必要である。たとえば、アーク溶接の対流熱輸送問題の解決には、アークプラズマと溶接プールの相互作用を考慮する必要があり、相互作用を支配しているアーク放電の電極メカニズムを考慮したモデル解析が不可欠になる。このような観点から、ここでは、アークプラズマと溶接プールを一体化したモデルの開発を目標としている。

図2は、田中らによるもので、アークの電磁流体力学モデルと母材の対流熱輸送モデルとを連立させた一体化モデルによる計算例である。図では、軸対称を仮定し、アルゴンシールドの静止ティグアーク（電流 $I=150\text{A}$ ）による母材（SUS304）の熔融状態を推定している。

ティグアークによる鋼の熔融現象が、母材中に含まれるS（硫黄）含有量の微量な差により、強く影響されることが実験的に知られている⁹⁻¹²⁾。図は、このS含有量の影響を、開発したモデルを用いて検討している。左図が母材中のS含有量が少ない場合（10ppm）を、右図が多い場合（220ppm）を示している。いずれも、点弧から20秒後（ $\tau=20\text{s}$ ）のアークプラズマの状態と母材中の温度分布である。図のように、計算の結果は、ティグアークによる母材の熔融状態が母材中

に含まれる硫黄含有量に強く依存することを示しており、定性的には、実験結果を的確に説明している。

図3は、ヘリウムシールドのティグアークについての計算例である。ヘリウムシールドアークでは、アルゴンの場合に比べ、アークプラズマが球形に近づくこと、また、母材の溶込みが大きくなること等が、実験的に知られている。図は、このようなヘリウムアーク特徴をうまく表現しているように思える。

アーク溶接における対流熱輸送問題を解決するには、アークと溶接プールの相互作用を考慮する必要があり、図2、図3のような一体型モデルによる解析が不可欠である。今後は、溶接プール形状、温度場、対流のパターンと速度などを対象に、計算と実験の対比を積極的に進める必要がある。

本分科会では、上述の一体化モデルに加え、溶接プールの3次元対流熱輸送モデルについても検討している。なお、このモデル化に際しては、アークから母材へ供給される入熱 q 及び熱源半径 Rh とアノード半径 Ra が既知であると仮定している。

図4は、平田による計算例で、S（硫黄）含有量の高いステンレス鋼上を速度 v で移動するティグアークによる溶接プールである。図は、溶接プール内の流れの状態と温度場を示している。例えば、上部中央の図は、溶接プール表面上の温度場（左）と流れ場（右）で、下図は、熱源直下のプール横断面上の温度場と流れ場である。この例では、表面張力と電磁力を駆動力とする対流の結果、下図に示されるように、深い溶

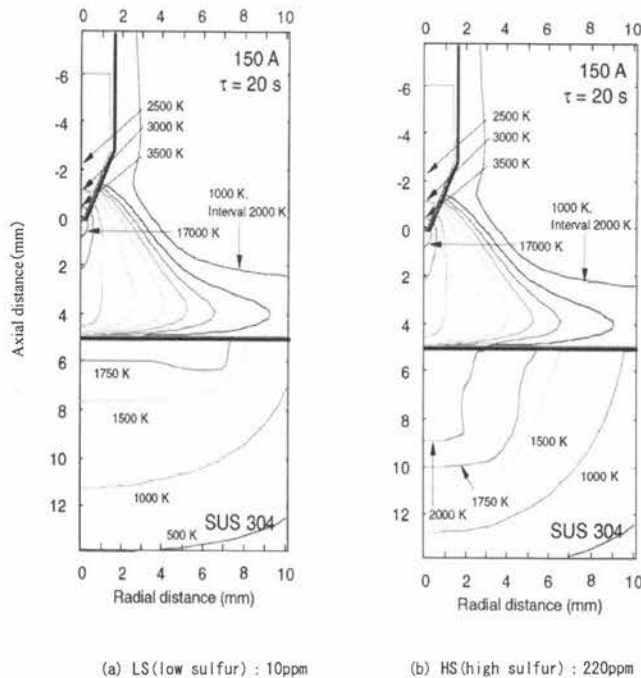
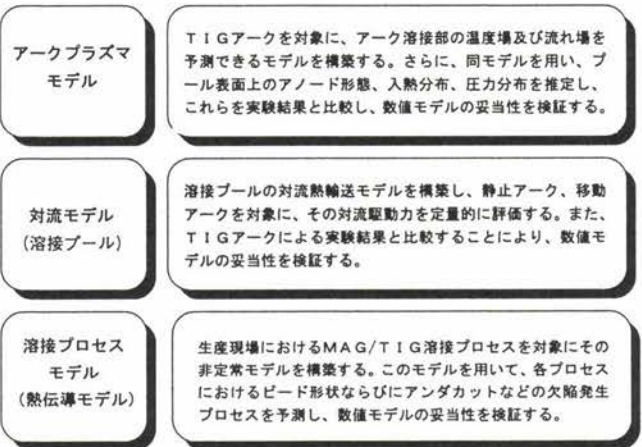


図2 母材の熔融特性に及ぼす微量元素の影響（一体型モデル）
[TIG, Ar, $I=150\text{A}$, SUS304]（田中）⁶⁾

図1 検討中のモデルとその課題¹⁾

込みが形成されている。

図5は、ヘリウムシールドのティグアークによる溶込み形状に関する計算結果を実験結果と比較したものである。なお、図の縦軸は、溶込み深さ D と溶融幅 W の比である。図において、△と○印が計算の結果を、▲と●印が対応する実験の結果を示している。図から、シミュレーションモデルが、ティグアークによる母材の溶融現象を的確に表現していることが分かる。すなわち、図は、溶接部（陽極）に流入する電流と熱の流れが正確に把握できれば、ティグアークによる母材の溶融現象が、定量的にも、かなりの程度まで予測できることを示している。

これまでの、溶接プール表面を平坦であると仮定し、3次元対流熱輸送モデルを開発した。さらに、モデルの適用範囲

を広げるためには、溶接プール表面の変位を考慮したモデル、すなわち自由表面モデルが必要である。

3.2 溶接プロセスモデル^{13,14)}

アーク溶接のシミュレーションにおいて解決すべき課題の一つは、実際の溶接プロセスを対象としたモデルの開発である。すなわち、多層溶接やウィーピングを伴う溶接現象、アングカットのような不規則ビードの形成現象などに適用可能なモデルの開発である。

ここでは、このような観点から、実際の溶接施工において広く利用されているマグ溶接およびティグ溶接を対象としたモデルの開発を目標としている。なお、上述したように、溶接プロセスモデルにおいては、モデルの複雑さを回避し、か

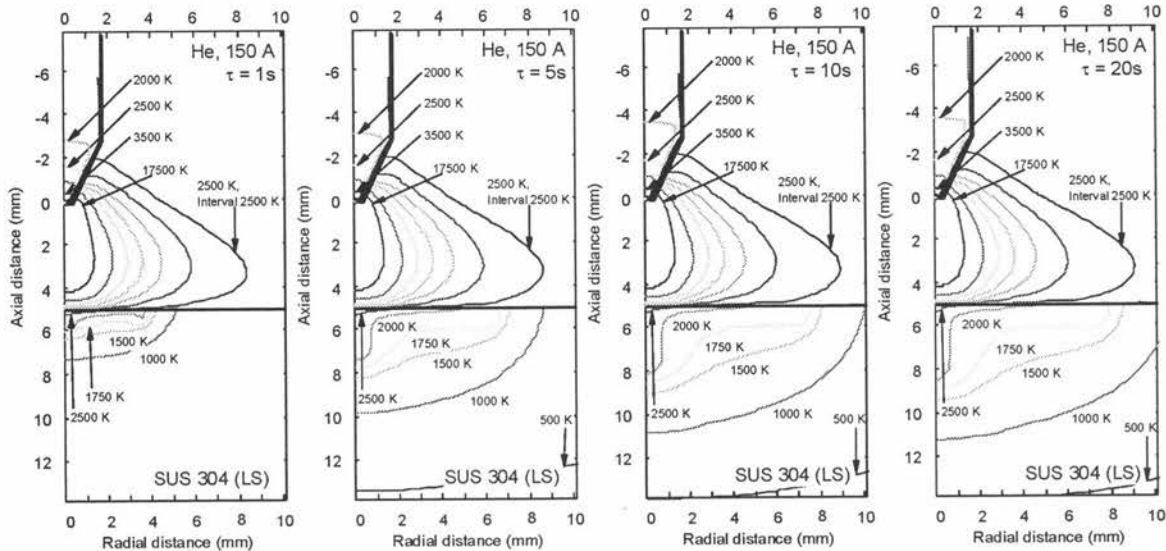


図3 一体化モデルによる計算例：ヘリウムアークの場合 [TIG, He, $I=150A$, SUS304 (LS)] (田中)⁶⁾

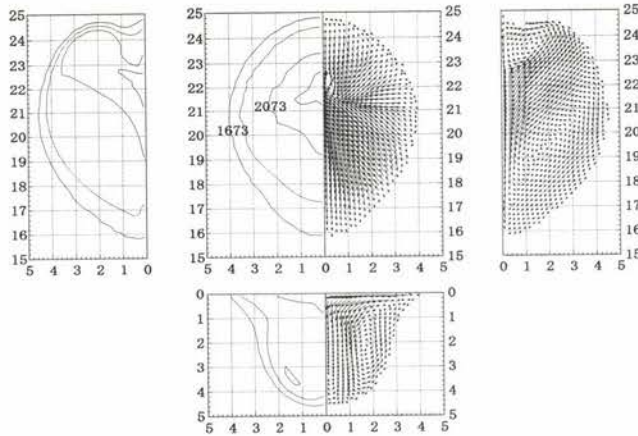


図4 3次元対流モデルによる移動ティグ溶接プールの計算例 (SUS304, S: 250ppm) [$q=2000W$, $I=200A$, $v=2mm/s$, $Rh=4mm$, $Ra=3mm$] (平田)⁶⁾

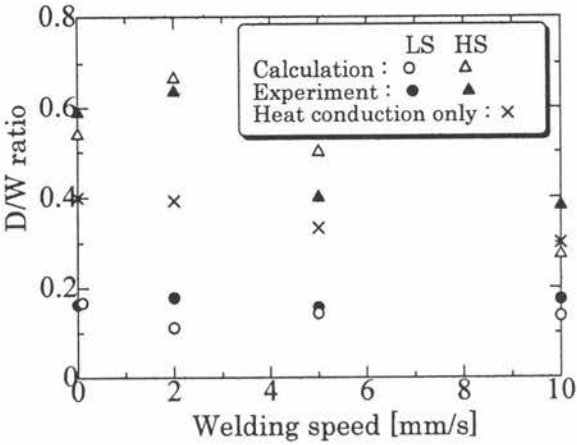


図5 溶込み形状に関する実験と計算の比較 [He, TIG, SUS304] (平田)⁶⁾

つ演算時間を短縮するため、溶接部の熱輸送は熱伝導により支配されると仮定している。

図6は、マグ溶接プロセスモデルによる計算例で、水平隅肉溶接におけるビード外観と矢印で示す位置でのビード断面形状である。図は、ビード形成に及ぼすアーク圧力 Pa の影響について検討したもので、(a)がアーク圧力を無視した場合を、(b)がアーク圧力を1000Paとした場合を示している。図は、アーク圧力が強くなると、ビード形成が不規則となりアンダカットが形成されること、またアーク圧力により溶接プール表面が押下げられる結果、溶込みが深くなること等を示している。

図7は、マグ溶接プロセスモデルによる計算例で、多パスの下向隅肉溶接に関するものである。図から、パス数の増加とともに、母材に熱が蓄積される結果、溶融断面積が増大していくことが分かる。

図8は、マグ溶接モデルの計算結果を実験結果と比較した

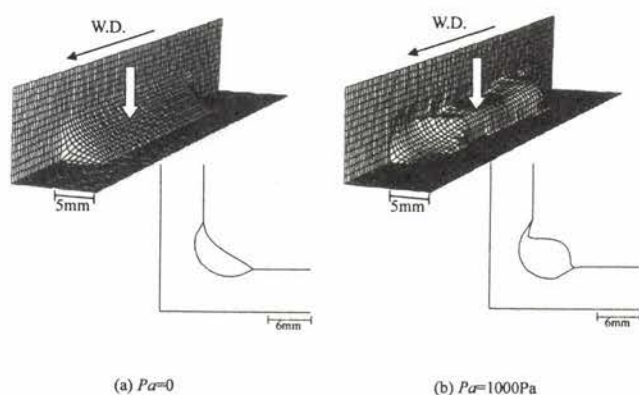


図6 プロセスモデルによる計算例（水平隅肉溶接）
[$I=230A$, $V=25V$, $v=40cm \cdot min^{-1}$, $Rh=4mm$, $Rp=9mm$]

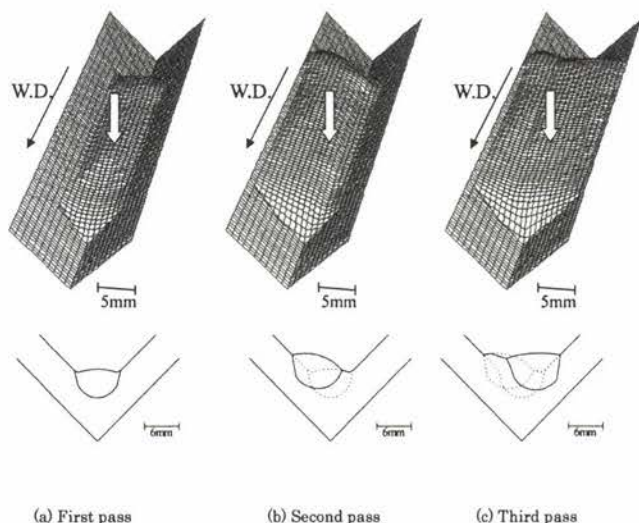


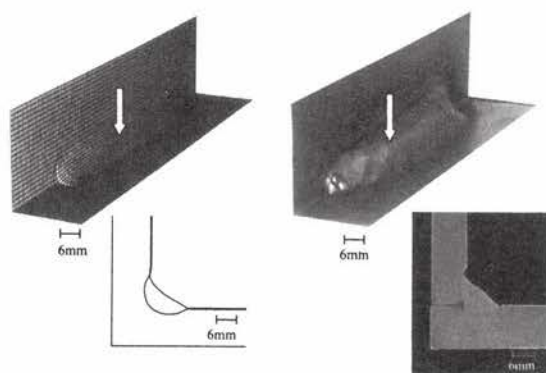
図7 マグ溶接モデルによる計算例：下向隅肉の多パス溶接
[$I=230A$, $V=25V$, $v=40cm \cdot min^{-1}$, $Pa=800Pa$, $Rp=4mm$, $Rh=4mm$]

例である。(a)は水平隅肉溶接、(b)は立向下進の隅肉溶接に関するものである。図から、いずれの場合においても、両者は良い一致を示していると言える。すなわち、アーク熱源やアーク圧力の分布等、いわゆるモデルパラメータを“うまく”選定してやれば、ここで提案した熱伝導モデルは、実溶接プロセスのシミュレーションツールとして有用であると判断できる。

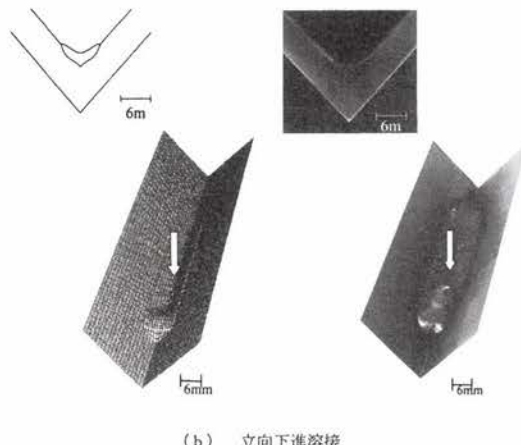
このような結果を背景に、上記モデルの適用範囲の拡大を図るため、突合せ継手を対象とする溶接モデル、パイプと平板の溶接モデルやパイプ交差部の鞍形溶接モデル等を開発している。

図9は、突合せ継手のマグ溶接プロセスモデルによる計算例である。板厚12mmの銅(SM490)を対象としたもので、(a)が初層溶接の結果である。図は、V開先部を3層4パス溶接した場合の各ビード断面を示している。このモデルは、図のような多パス溶接やウィービング溶接等、生産現場で必要となる溶接プロセスに容易に対応できる。

図10は、アルミニウムのパイプと平板のティグ溶接に関するシミュレーション例である。アルミニウム合金の溶接では、図のように一定入熱で溶接すると、溶接の進行につれて、



(a) 水平隅肉溶接



(b) 立向下進溶接

図8 マグ溶接モデルに関する実験的検討
[$I=230A$, $V=25V$, $v=60cm/min$, $Rh=Rp=4mm$, $Pa=500Pa$]

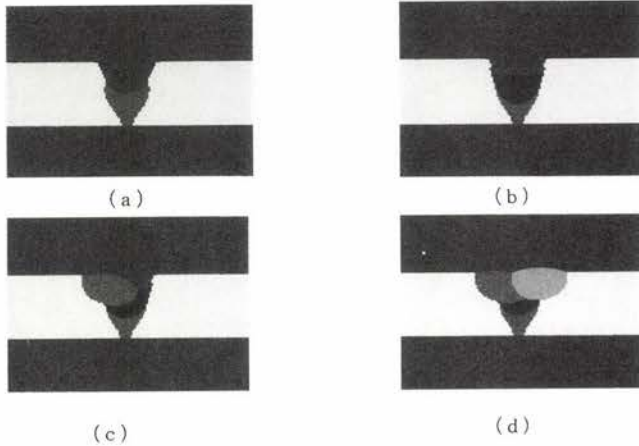


図9 突合せマグプロセスモデルによる計算例(多パス溶接)
[MAG, $I=230\text{A}$, $V=26\text{V}$, $v=40\text{cm/min}$, SM490, 12mmt, V-groove (50°)]

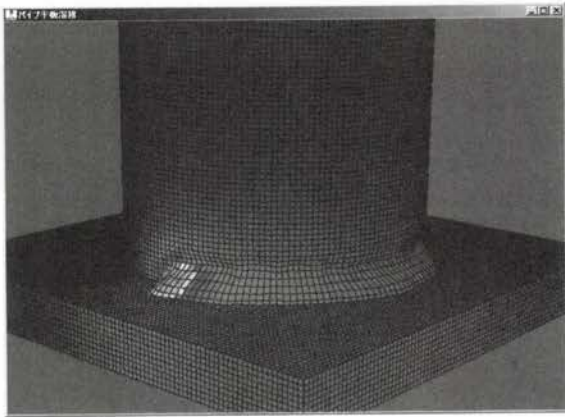


図10 パイプと平板の溶接モデルによる計算例
[TIG, A1050, $q=1500\text{W}$]

母材の溶込みが増加する。このため、一定の溶込みを確保するには、入熱の制御が不可欠となるが、ここで提案したモデルは、このような場合の最適入熱条件推定のツールとして有効になるものと考えている。

4 結び

本報告では、経済産業省の“高度溶接”プロジェクトにおけるプロセスシミュレーション分科会の活動状況を簡単に紹介した。このプロジェクトは、平成12年の開始以来、すでに4年を経過し、最終段階に入っている。各委員の努力によ

り、ほぼ期待通りの成果が得られており、その成果は、国際的にも注目されている。なお、ここでは、紙面の都合上、検討内容の詳細を割愛した。詳細については、報告書⁶⁻⁸⁾を参照してほしい。

参考文献

- 1) 黄地：溶接学会誌, 70 (2001), 281.
- 2) T. Zacharia, A.H. Eraslan and D.K. Aidun : Weld.J., 67 (1988), 18 s.
- 3) T. Zacharia, S.A. David, J.M. Vitek and H.G. Kraus : Weld.J., 74 (1995), 353 s.
- 4) J. Haidar and J.J. Lowke : IEEE Trans. on Plasma Sci., 25 (1997), 931.
- 5) U. Dilthey and S. Roosen : Theoretical Prediction in Joining and Welding (Ed.Ushio, M.), 133, JWRI, Osaka University, (1996)
- 6) 溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発, 成果報告書, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (2004.4)
- 7) 溶接学会特別セッション, 溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発, (2003.4)
- 8) 日本鉄鋼協会, 創形創質工学部会, 接合・結合フォーラム, 溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発, NEDO プロジェクト成果報告会要旨集, (2004.9)
- 9) B.E. Paton, et al : Automatic Welding, 27 (1974), 1.
- 10) A.M. Makara : Automatic Welding, 30 (1977), 57.
- 11) C.R. Heiple and J.R. Roper : Weld.J., 60 (1981), 143 s.
- 12) 黄地, 三宅, 田村, 井上, 西口 : 溶接学会論文集, 8 (1990), 54.
- 13) 山本, 辻, 宮坂, 黄地 : 溶接学会論文集, 19 (2001), 628.
- 14) T. Yamamoto, T. Ohji, Y. Tsuji and F. Miyasaka : Mathematical Modelling of Weld Phenomena 6, (Ed. Cerjak, H.), 193, IOM, Maney Pub., London, (2002)

(2004年11月4日受付)