

論文・報告

すみ肉溶接の角変形量に与える裏面加熱の効果

Effect of Backside Heating on Angular Distortion of Fillet Weld

小谷 祐樹 *1
Yuki KOTANI

津山 忠久 *2
Tadahisa TSUYAMA

湯田 誠 *3
Makoto YUDA

本論文は、橋梁部材製作時のすみ肉溶接後に生じる角変形の防止法に関する報告であり、ひずみの矯正作業の省力化を目的として、裏面加熱を用いたインプロセスのすみ肉溶接角変形低減工法を検討した。本工法は、すみ肉溶接と同時にフランジ裏面のウェブ直下を加熱する方法であり、裏面加熱源として利用したガスバーナーと溶接トーチ間の距離（熱源間距離）と、ガスバーナーのガス流量によって角変形量が変化し、適正な加熱位置・ガス流量を選定することによって角変形の生じないインプロセス制御法が可能になることが分かった。また、実測した溶接及びガス加熱の温度履歴を基に構築した熱源モデルを用いて、熱源間距離に対する角変形量の傾向を数値シミュレーションにより検討し、シミュレーション結果と実験結果が一致することを確認した。そして、最も効果的なガス加熱条件が推定できることが明らかとなった。

キーワード：すみ肉溶接、角変形、インプロセス制御、裏面加熱、ガス加熱

1. はじめに

鋼構造物製作の溶接施工において、溶接変形の発生は避けられず、溶接の前後に様々な変形対策がとられている¹⁾。例えば、T型のすみ肉溶接においては、フランジがウェブに対して左右対称に折れる角変形の変形対策として、クランプや拘束治具による外的拘束や、予め変形量を見込んで逆方向の変形を与えておく逆ひずみ法などがある。橋梁では、角変形は溶接後に矯正されることが一般的で、ローラー、プレス機を用いた冷間塑性加工による機械的矯正法や、ガスバーナーを用いた線状加熱等の熱的矯正法が用いられている。しかし、このようなひずみ矯正作業は、自動化が困難であるため、熟練作業者の技量・経験に依存するところが大きい。また、熱的矯正法では、加熱、冷却によって鋼材のじん性劣化や強度劣化をもたらすおそれがあるため、道路橋示方書では加熱矯正における鋼材表面温度、冷却方法が規定されている²⁾。

効率的な製作をするためには、上記に示した溶接前後の工程を低減、省略することが有効であり、そのためには溶接変形の発生そのものを抑制もしくは低減すること

が効果的となる。変形の発生を抑制する手段としては、溶接継手、溶接長、溶接入熱の低減、溶接順序の適正化などが報告されている³⁾が、近年では溶接中に溶接熱源とは別の冷却源や加熱源を追従させるインプロセス制御法の検討が報告されている⁴⁾⁻⁸⁾。角変形の発生要因は溶接時に生じる板厚方向の温度差であるため、その温度差を小さくするためにインプロセス制御法では、冷却源や加熱源を利用している。しかし、上記に示した方法の検討では、冷却源・加熱源の位置や吸熱量・加熱量によって効果が異なることが報告されているが、数値シミュレーションによる検討が主であり、実験的に検証された事例はほとんどない。

そこで本論文では、インプロセスのすみ肉溶接角変形低減工法である裏面加熱法の裏面加熱の効果を実験的に検証した結果⁹⁾と、数値シミュレーションと比較・検討した結果¹⁰⁾を報告する。

2. 裏面加熱法の概要

裏面加熱法とは、T型のすみ肉溶接と同時に溶接トーチ後方のフランジ裏面のウェブ直下を加熱する方法である。裏面加熱源にガスバーナーを使用した裏面加熱法の概略

*1 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部四国工場生産開発課

*2 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部四国工場生産開発課 課長

*3 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部栃木工場 次長

図を図1に、溶接中の状況を写真1に示す。ここで、溶接トーチのワイヤ先端とガスバーナー中心位置との距離を熱源間距離と称する。

両熱源の前後位置関係と低減効果については、前方の熱源が後方熱源に対して予熱効果を生じさせると考えられている⁶⁾。溶接熱源の前方を裏面加熱した場合、裏面加熱による予熱効果に溶接による熱が加えられることで表面側の温度が上昇し表裏の温度差を大きくするため、角変形の発生量はより大きくなる。一方で、溶接熱源の後方を裏面加熱した場合、溶接熱源による予熱効果で裏面の温度が上昇し、表裏の温度差が小さくなるような裏面加熱を行うことで角変形の発生が抑制される(図2)。

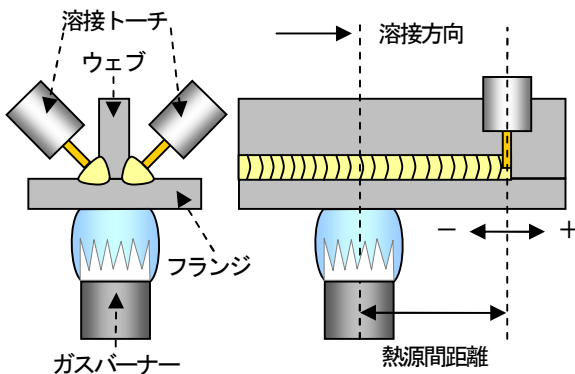


図1 裏面加熱法の概略図

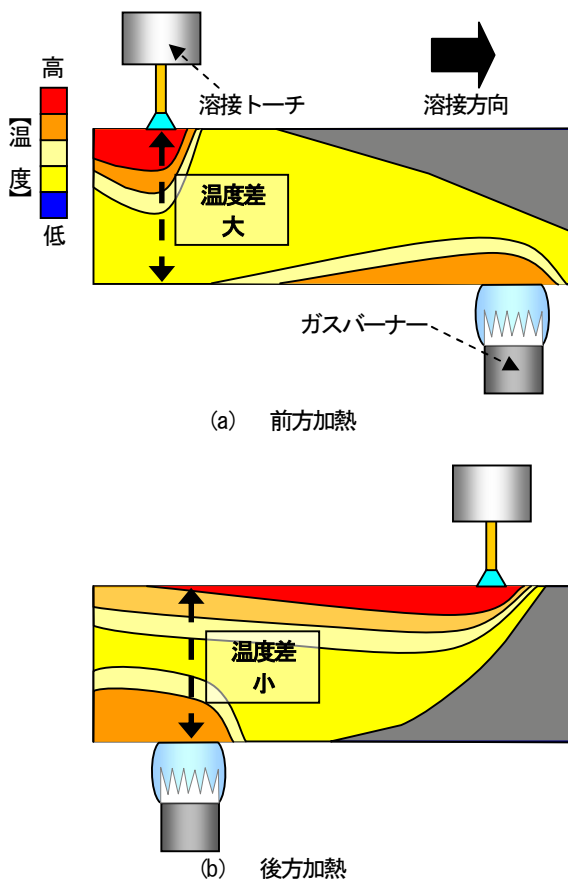


図2 熱源前後関係と温度分布の概念図

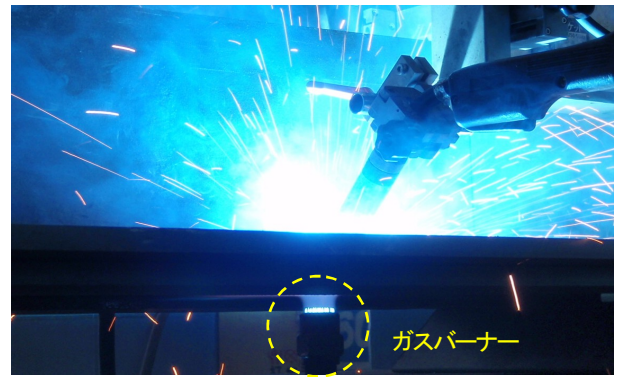


写真1 裏面加熱を適用した溶接中の写真

3. 裏面加熱法の実験的検討

(1) 熱源間距離の影響 (実験①)

a) 実験方法

本実験に使用した鋼板は板厚16 mmのSM400A材、溶接材料は直径1.4 mmのJIS Z 3313 T49J0T1-0CA-UH5、試験体寸法は、フランジ幅400 mm、ウェブ高さ150 mm、長さ500 mmのT型形状とし、6 mm脚長のすみ肉溶接を両側同時に行った。この溶接法を以下ツイン溶接と称する。すみ肉溶接条件を表1に示す。溶接後の角変形量 δ は、フランジがウェブ側へ折れ曲がったものを+、その逆を-とした。変形量が+の場合、フランジ片側を平板に固定した後、その反対側の3点をテーパゲージを用いて計測し、-の場合、フランジ裏面に直尺を当て、ウェブ直下の隙間をテーパゲージで計測した。角変形量は全て計測位置3点の平均値とした(図3)。

加熱源は予熱用ガスバーナーを使用し、加熱位置はフランジ裏面のウェブ直下、溶接進行方向に対する追従速度は、溶接速度と同速の270 mm/minとした。ガスバーナーに用いたLPG、酸素流量をそれぞれ変化させた加熱条件A, B, C, Dを表2に示す。熱源間距離 xh は、溶接トーチに対して後方位置を-、前方位置を+とし、溶接熱源による予熱効果を利用するため裏面加熱位置は溶接熱源よりも後方とした。

本実験では、まずツイン溶接のみの角変形量を計測した。続いて、熱源間距離の影響を確認するため、加熱条件をA (LPG: 11.3 L/min, 酸素: 32.5 L/min) に固定し、熱源間距離を-25~-100 mmの範囲で25 mmごとに変化させたときの角変形量をそれぞれ計測し、溶接のみに対する角変形量の低減率を求めた。

表1 すみ肉溶接条件

溶接法	CO ₂ 溶接 (ツイン溶接)
脚長 (mm)	6
電流 (A)	250
電圧 (V)	30
溶接速度 (mm/min)	270
入熱 ^(※) (J/mm)	1700

※表中の入熱は片側の入熱を示す。

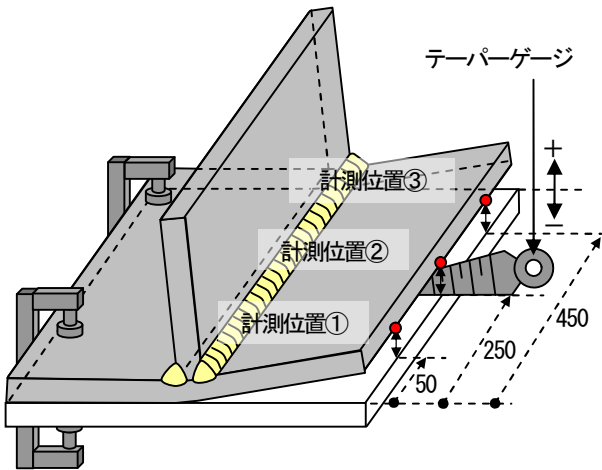


図3 角変形の計測位置

表2 加熱条件

加熱条件	LPG流量 (L/min)	酸素流量 (L/min)
A	11.3	32.5
B	11.3	47.0
C	4.6	12.2
D	4.6	28.1

b) 実験結果

図4に、熱源間距離に対する角変形量の計測結果を示す。溶接のみで5.7 mmであった角変形量は、いずれの熱源間距離においても低減効果が確認され、-50 mmが低減率73%と最も大きい低減効果が得られた。溶接熱源による裏面への予熱効果を利用するためには、2つの熱源はある程度の距離が必要であり、本検討でのフランジ板厚16 mm、溶接入熱1700 J/mmのツイン溶接の条件においては、熱源間距離-50 mmが予熱効果が最大限に得られる位置関係と言える。

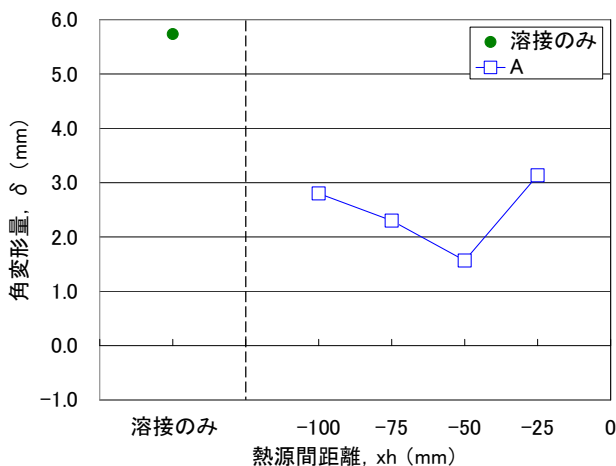


図4 熱源間距離ごとの角変形量

(2) ガス流量の影響 (実験②)

a) 実験方法

溶接条件、加熱位置、加熱速度は実験①と同様とし、熱源間距離を-50 mmに固定し、加熱条件を表2に示すA, B, C, Dの4種とした。各加熱条件の炎の状態を写真2に示

す。加熱条件A, B及びC, DはそれぞれLPG流量は同じであるが、条件B, Dは酸素流量を増加させてガス炎の集中性を高めた。LPG流量11.3 L/min, 4.6 L/minに対して適正な酸素流量の条件A, Cのガス炎を標準炎、酸素を過剰に流した条件B, Dを酸素過剰炎と称した。

本実験では、LPG流量の大小と、酸素流量の大小によるガス炎の集中性が角変形低減効果に及ぼす影響を確認するため、各加熱条件で裏面加熱を行ったときの角変形量をそれぞれ計測し、溶接のみに対する角変形量の低減率を求めた。

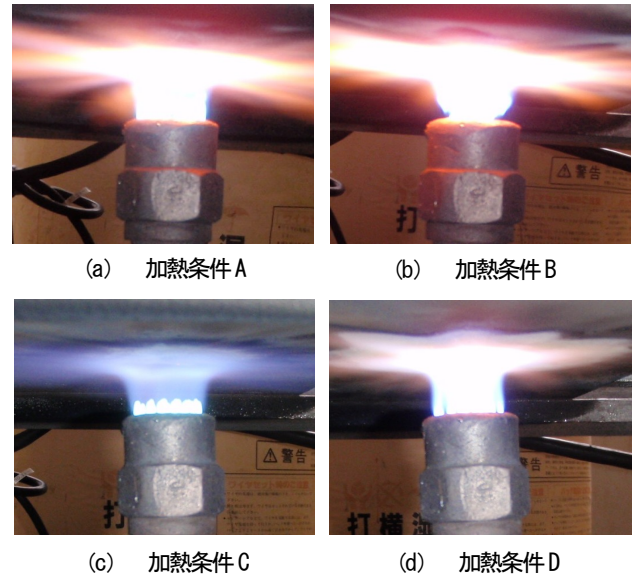
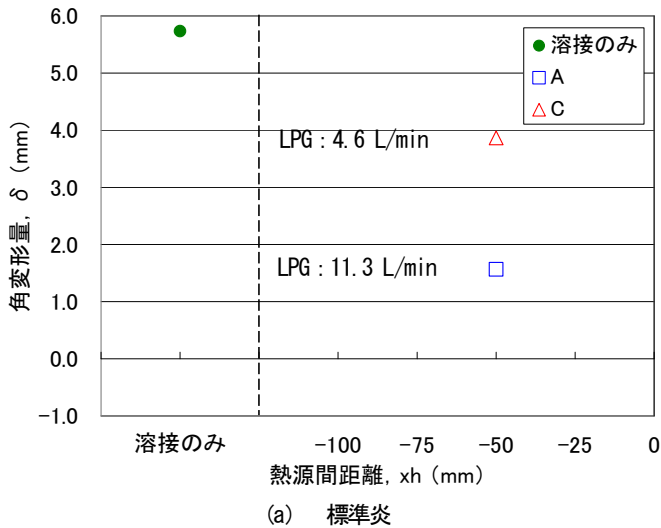


写真2 加熱条件ごとのガス炎の状態

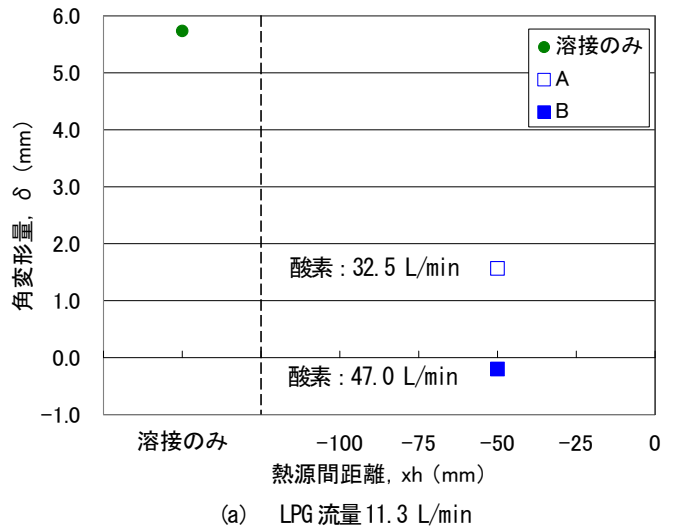
b) 実験結果

LPG流量の異なる標準炎での角変形量を比較した結果を図5(a)に示す。条件A, Cでの角変形量および溶接のみに対する低減率はそれぞれ1.6 mm (73%減), 3.9 mm (33%減)となり、LPG流量が大きい方が角変形量が小さくなることが確認された。同様に、図5(b)に示す酸素過剰炎の条件B, Dにおいても、角変形量はそれぞれ、-0.2 mm (103%減), 2.2 mm (62%減)となり、LPG流量が大きい方が角変形量が小さくなり、加熱条件Bでは角変形量をほぼ0にすることができた。

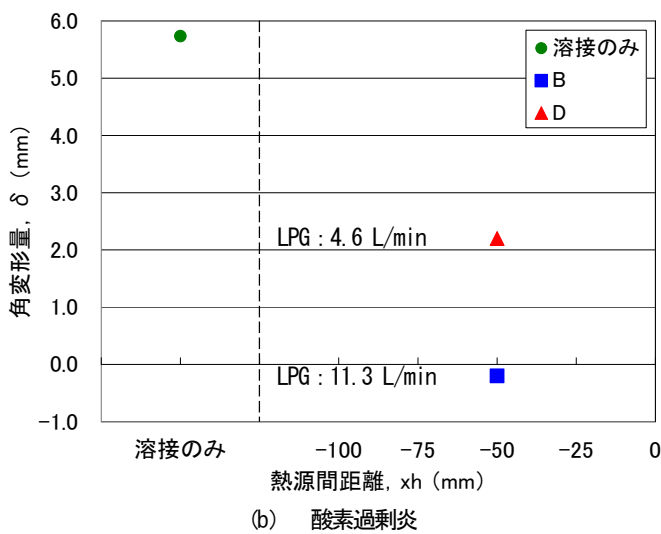
また、LPG流量一定で酸素流量を変化させてガス炎の集中性の影響を比較した結果を図6に示す。図6(a)に示すLPG流量11.3 L/minの場合、標準炎の条件Aで1.6 mmであったのに対し、酸素過剰炎の条件Bでは、-0.2 mmであり、酸素過剰によるガス炎の集中性の増加が、角変形低減により効果的であることが確認された。図6(b)に示すLPG流量4.6 L/minの場合も同様に、標準炎の条件Cでは3.9 mmであったのに対し、酸素過剰炎の条件Dでは2.2 mmであり、ガス炎の集中性が角変形量に大きく影響することが確認された。



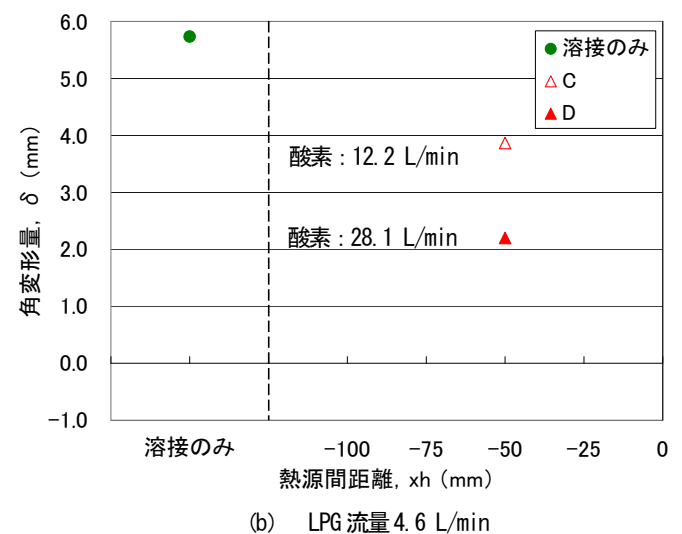
(a) 標準炎



(a) LPG 流量 11.3 L/min



(b) 酸素過剰炎



(b) LPG 流量 4.6 L/min

図5 LPG 流量の影響

図6 ガス炎集中性の影響

以上の結果から、本実験における溶接熱源による温度上昇が裏面に十分に達する熱源間距離-50 mmでは、ガス加熱による温度上昇がプラスされることで表裏の温度差が小さくなり角変形が低減されると考えられる。そして、これらの効果は、LPG流量の大小や酸素流量増加によるガス炎集中性の増加など、ガス加熱炎の状態が大きく影響し、加熱条件Bのように、適正な熱源間距離と加熱条件を選定することができれば、角変形をほぼ0にできることが分かった。

4. 数値シミュレーションによる検討

(1) 検討の目的

溶接・ガス加熱の熱源モデルを構築し、それらを組み合わせたときの裏面加熱の効果を数値シミュレーションで検討し、実験結果との比較・検討を行う。

(2) 熱源モデルの検討と数値解析条件

本検討では、数値解析ソフトJWRIAN¹¹⁾を使用した。本数値解析に用いた溶接T継手とガス加熱平板の解析モデルおよび寸法を図7に示す。なお、材料の物性値はSM400A

鋼を想定した値とした。MAG溶接・ガス加熱の条件は実験での条件(表1, 2)を想定し、数値解析上の入熱条件は実測した温度履歴を基に決定した。温度履歴の計測位置は、MAG溶接ではフランジ裏面の3点、ガス加熱では平板上部の3点とした。ガス加熱条件は、実験で大きな角変形低減効果が得られた加熱条件A, Bを適用した。数値解析上でのMAG溶接のパラメータを表3に、ガス加熱のパラメータを表4に示す。

これらのパラメータから得られたMAG溶接・ガス加熱(加熱条件AおよびB)の温度履歴の実験および解析結果を図8に示す。MAG溶接、ガス加熱どちらにおいても、最高到達温度や冷却過程など温度履歴は解析結果と実験結果は概ね一致した。また、角変形量においても、MAG溶接では、実験値5.7 mmに対し解析値5.6 mmと概ね一致し、ガス加熱では、解析結果、実験結果ともにほとんど生じていなかったことから、溶接・ガス加熱による変形を精度良くシミュレーションできる熱源モデルが構築できたと考えられる。

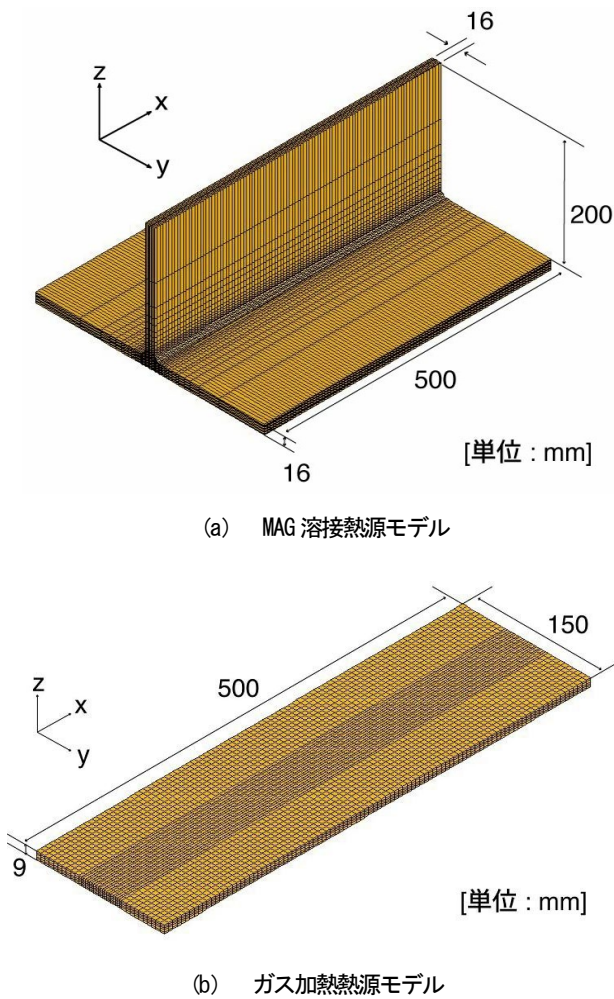


図7 熱源モデル

表3 MAG 溶接の解析上のパラメータ

溶接方向熱源長さ (mm)	熱効率 (%)
15	75

表4 ガス加熱の解析上のパラメータ

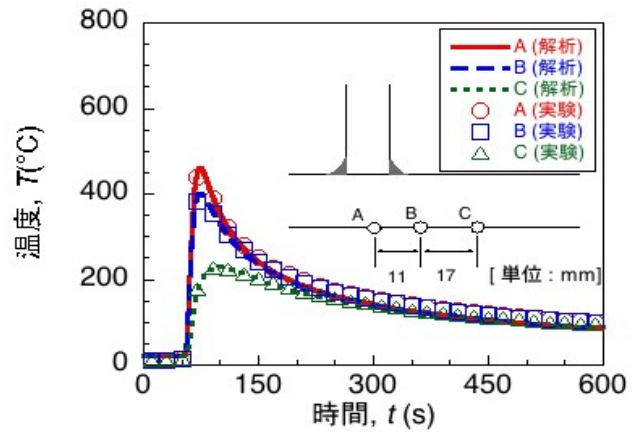
加熱条件	入熱量 (kW)	加熱幅 (mm)	溶接方向熱源長さ (mm)
条件A	7.5	100	100
条件B	12	90	90

(3) 裏面加熱法の数値解析結果

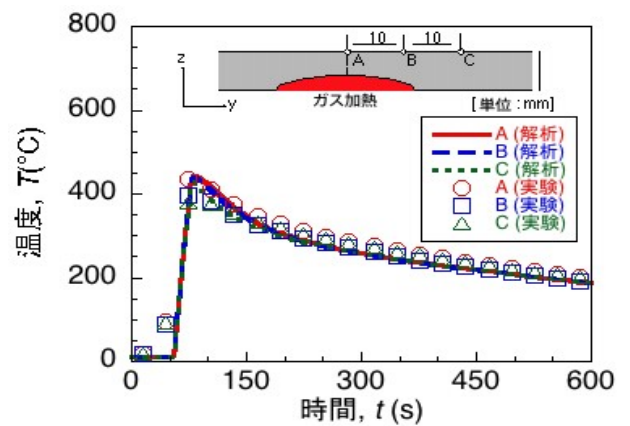
得られたMAG溶接, ガス加熱の熱源モデルを用いて, 加熱条件A, Bにおける熱源間距離 x_h に対する角変形量 δ について, 数値解析を行った結果を図9に示す。角変形量に多少のずれは確認されるが, 熱源間距離に対する傾向は実験結果と解析結果が概ね一致し, 最も角変形の低減効果が得られる熱源間距離が, 実験結果・解析結果ともに-50 mm位置であることが確認された。また, 条件Bにおける-50 mm位置での角変形量が実験結果・解析結果とも

にほぼ0であることも確認された。

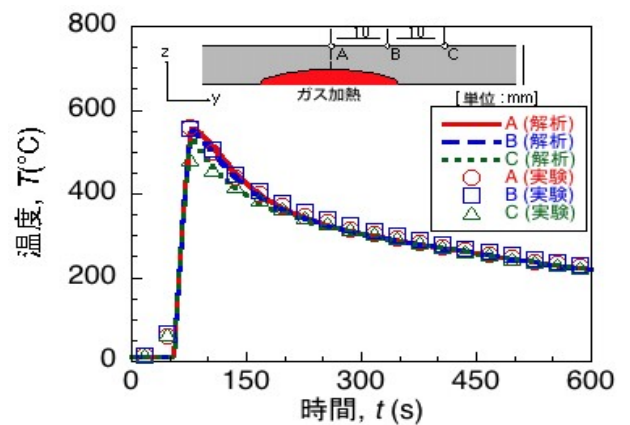
以上の結果から, 本数値シミュレーションの精度は高く, 溶接条件や板厚等を変更した場合においても裏面加熱位置および加熱量を推定できると考えられる。



(a) MAG 溶接



(b) ガス加熱 (条件A)



(c) ガス加熱 (条件B)

図8 温度履歴の解析値および実測値

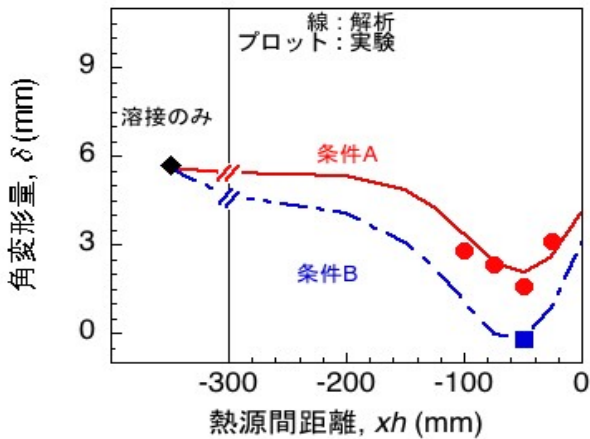


図9 数値解析結果と実験結果の比較

(4) 適正な裏面加熱条件に関する考察

裏面加熱法の角変形低減効果について、温度分布に着目して考察する。熱源間距離0, -50, -100 mmでの温度分布のシミュレーション結果を図10に示す。0 mmの場合、溶接による熱が裏面に十分に伝達する前に裏面加熱を行っているため、裏面の温度はあまり上昇していない。また、-100 mmの場合では、裏面に伝達した熱が裏面加熱する前に冷却されてしまったため裏面の温度が上昇していない。一方で、-50 mmでは、溶接による熱が裏面に十分に伝達し、予熱効果を得やすい位置関係であるため、裏面加熱によって裏面の温度が最も上昇している。この作用により、表裏の温度差が小さくなり角変形が低減されたと考えられる。

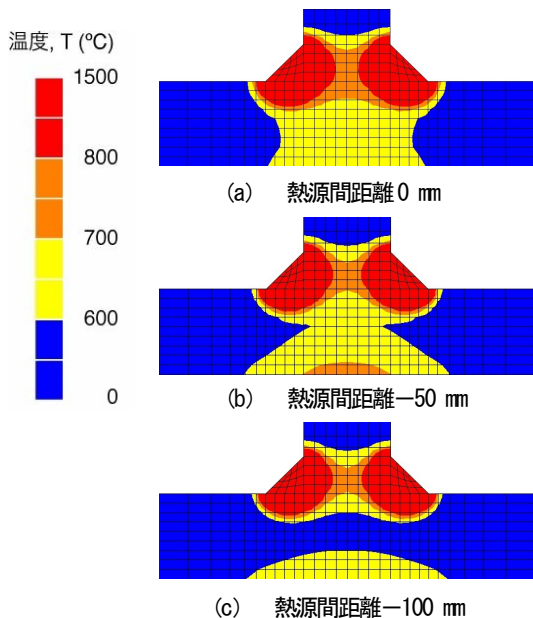


図10 熱源間距離ごとの温度分布

5. まとめ

すみ肉溶接の角変形におけるガスバーナーを用いた裏面加熱の効果について検討した結果を報告した。裏面加

熱法は、溶接熱源や板厚に応じた熱源間距離とガス流量を適正に選定することで、角変形の生じないすみ肉溶接が可能となる方法であることを示した。また、実験結果と数値シミュレーション結果が概ね一致することが確認されたため、他の溶接法や種々の板厚を対象とした角変形低減に有効な裏面加熱条件を数値シミュレーションを用いることで、合理的に推定できると考えられる。

今後の課題として、裏面加熱によって縦収縮、横収縮、縦曲がり変形が増加することが懸念されるため、それらの影響について検討する予定である。

6. おわりに

本研究にあたり、数値シミュレーションによる検討に際して多大な御協力を頂きました大阪大学の岡野成威特任助教、望月正人教授、小林真治氏に深く感謝の意を表します。

なお、本研究に用いた数値解析ソフトの使用にあたっては、大阪大学接合科学研究所の村川英一教授、大阪府立大学の柴原正和准教授にご高配を賜りました。紙面を借りて深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 産報出版：溶接・接合技術特論, pp. 368-370, 2011.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説, pp. 441-442, 2012.
- 3) 金, 張, 堀川：すみ肉溶接で生じる面外変形・残留応力に及ぼす溶接諸条件の影響, 鋼構造論文集, 第6号, 第21巻, pp. 77-82, 1999.
- 4) 岡野, 望月, 豊田：複数熱源による溶接変形特性に関する熱伝導論的検討, 溶接学会論文集, 第24巻, 第4号, pp. 324-330, 2006.
- 5) 金, 張, 堀川：すみ肉溶接で生じる面外変形の防止, 鋼構造論文集, 第6巻, 第22号, pp. 11-16, 1999.
- 6) 岡野, 望月, 豊田：裏面加熱源を用いた温度場制御による角変形低減効果に関する検討, 溶接学会論文集, 第25巻, 第1号, pp. 95-105, 2007.
- 7) 岡野, 望月, 豊田：局所冷却を伴う温度場で生じる溶接残留変形とその低減効果, 溶接学会論文集, 第28巻, 第1号, pp. 72-79, 2010.
- 8) 岡野, 望月, 豊田, 上山：水冷法による角変形低減効果に及ぼす溶接入熱条件の影響, 溶接学会論文集, 第29巻, 第1号, pp. 55-60, 2011.
- 9) 小谷, 津山, 小林, 岡野, 望月：裏面加熱を用いたT型すみ肉溶接継手における角変形低減効果に関する検討(第1報:実験的検討), 溶接学会講演概要集, 第92集, pp. 178-179, 2013.
- 10) 小林, 岡野, 望月, 小谷, 津山：裏面加熱を用いたT型すみ肉溶接継手における角変形低減効果に関する検討(第2報:数値シミュレーションによる検討), 溶接学会講演概要集, 第92集, pp. 180-181, 2013.
- 11) 村川：匠の技に挑戦する溶接シミュレーション, 生産と技術, 第63巻, 第1号, pp. 25-28, 2011.