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*

－ 複数熱源を用いた温度場制御による溶接変形制御手法に関する研究（第2報）－

岡野 成威**, 望月 正人***, 豊田 政男***

Study on Angular Distortion Reduction by Temperature Distribution Control Using Back Heating Source*

－ Studies on Welding Distortion Control by Temperature Distribution Control Using Multiple Heat Sources (Report 2)－

by OKANO Shigetaka**, MOCHIZUKI Masahito*** and TOYODA Masao***

Back heating method is proposed for angular distortion decreasing technique. Back heating is expected for angular distortion decrease to the following two effects; that is, bending in the opposite direction and homogenization of temperature distribution through thickness direction. Best condition of temperature distribution control for angular distortion decrease has been evaluated with numerical simulation. Back heating source is appropriately arranged to welding heat source, then, angular distortion is decreased more effective than the above-mentioned effects, and perfectly decreased by back heating of ten percent to welding heat input. In back heating, angular distortion can be decreased by the change in generation behavior of inherent strain according to nonconventional temperature history. Angular distortion decreasing technique is effective in any condition concerning heat input parameter and the best condition concerning multiple-heat-source arrangement is decided to be dependent on the size of mechanical molten pool.

Key Words: back heating source, angular distortion, temperature distribution control, multiple heat sources, heat input condition

1. 緒 言

一般に、溶接施工において溶接変形の発生は避けられない。溶接変形は、製品の美観を損ない、溶接構造物の強度や性能に種々の悪影響を及ぼし得ることが知られており、その制御や低減が重要な技術課題となっている。そのため、従来から種々の有用な溶接変形低減手法が開発されてきている。溶接前に予め処理を施す方法の代表例としては、拘束治具による外的拘束の付加によって変形を抑制する方法^{1)~3)}が挙げられ、溶接後の事後処理の代表例としては、ピーニングなどの機械的矯正法や点状加熱などの熱的矯正法などが挙げられる^{2),4)}。しかし、これらの方法はいずれも溶接施工前後の余分な工程によって何らかの処理を施すものであり、その省力化が望まれている。また、現状として、溶接変形対策は溶接後矯正への依存度が大きいといえるが、この矯正工程は熟練技術者の経験に頼って行われていることが多いため、近年の熟練技術者の引退・減少が、変形対策にかかる労力等の面で産業界において重大な問題となる可能性がある。このように、近年では、溶接変形の低減・制御といった精度管理が、溶接構造物の製造工程の合理化の面からもますます重要となってきて

おり、近年における溶接変形低減手法は、単に変形を低減させるだけでなく、如何に“効率良く”変形を低減させることができるかが重要となっていることがわかる。

一般に、外的拘束などの無い自由継手における角変形は、佐藤・寺崎⁵⁾によって提案された入熱パラメータ Q/h^2 に対して凸型の特性を示すことが広く知られている。このことから、角変形を制御するうえで、溶接入熱の大小が重要な意味をもつことがわかる。このような観点から、超狭開先溶接のように開先形状を工夫することで低入熱化を達成した溶接法などが開発されてきているが、溶接入熱の過剰な抑制は溶接性の面で問題となることがあり、このような過剰な溶接入熱の大小による変形低減手法には限界がある。このため、変形制御に対して新たな観点からのアプローチが求められており、溶接熱源とは別の加熱源^{6)~10)}や冷却源^{4),11)~13)}を用いる方法や溶接順序の適正化による拘束状態の制御^{14),15)}による方法などが提案されている。しかし、このような手法は一部で実用化されているものの、その理論的裏付けがほとんど解明されていないことなどから広範囲には適用されておらず、基礎的な検討とその結果に基づいた汎用的な応用展開が今後の課題となっている。例えば、金ら⁵⁾によって、角変形の発生要因である板厚方向に不均一な固有ひずみ分布をもたらす温度分布の分布勾配を緩和することを目的として、溶接熱源に対してその直下に裏面から加熱源を与える角変形防止法の有効性が報告されている。しかし、当然の事ながら、この手法を用いて変形を防止するためには、変形量の相殺あるいは板厚方向の温度分布の分布勾配の均一化といった、いずれの考え方においても、本溶接と同程度の裏面加熱量が必

*受付日 平成18年8月31日 受理日 平成18年12月23日
平成18年度春季全国大会で発表

**学 生 員 大阪大学 大学院工学研究科 Student Member,
Graduate School of Engineering, Osaka University

***正 員 大阪大学 大学院工学研究科 Member, Graduate
School of Engineering, Osaka University

要となることは明らかである。そのため、溶接プロセスや縦収縮をはじめとする他の溶接変形への影響を考慮した場合、必ずしも汎用的に有意義な変形防止法としての評価にまで至っているとは言い得ない。一方、望月ら⁸⁾は、アルミニウム合金の薄板溶接時に生じる角変形に対して、溶接熱源とは別の加熱源を裏面から一定距離を保持しながら先行させることで効果的に低減できることを報告している。この手法は“先行熱源による逆変形の効果”と“先行熱源によって生じている温度上昇量によって溶接熱源による変形量が低減される効果”を有効に活かしたものであることを示しており、一部で既に実用化されている^{9),10)}。しかし、このような手法が、用いる材料や入熱パラメータなどに対して、汎用的なものであるかについては十分に明らかにされておらず、より使用頻度の高い構造用鋼に対して、その有効性や適正施工条件の考え方について明らかにすることは、より広範囲で実用化されるうえで重要であると考えられる。

一方、著者ら¹⁶⁾は、構造用鋼を対象として、縦列する複数の加熱源によって生じる角変形量の考え方について検討を行った。その結果、縦列する複数熱源によって生じる角変形量は必ずしも継手に与えられる全溶接入熱によって評価されず、熱源間距離や入熱比、入熱パラメータに応じた温度場の変化によって複雑に変化することを明らかにした。また、角変形低減のためには、温度場を制御するための加熱源によっても少なからず変形を生じることや、溶接熱源の入熱パラメータに関する適用範囲が狭いことから、条件に応じた適切な手法の選定が重要であることを明らかにした。

本報では、溶接熱源とは別の加熱源や冷却源を用いて溶接中の温度場を積極的に制御することでインプロセスに溶接変形を制御する手法として、裏面から加熱源を与える“裏面加熱法”を取り上げる。裏面加熱法は、既報¹⁴⁾において検討した結果を踏まえ、さらには利用することで角変形の低減に対してさらに有効な手法となることが期待できると考えられる。そこで、構造用鋼を対象とした場合の角変形低減への有効性やその基本原理について、縦曲り変形などの他の溶接変形への影響を考慮した上で数値解析を用いて総合的に検討を行った。また、実施工を想定して、裏面加熱源の加熱特性の違いが角変形低減効果に及ぼす影響についても検討を行った。最後に、角変形について議論するうえで重要である入熱パラメータを踏まえた検討を行った。これにより、溶接熱源や裏面加熱源の入熱パラメータが、裏面加熱法における制御パラメータ（熱源間距離、あるいは裏面加熱量）と角変形低減効果の係に及ぼす影響について明らかにすることで、溶接施工条件に応じた適正な条件設定の考え方に関する指針を提示するための考察を加えた。

2. 解析方法・条件

複数の加熱源を用いて、溶接しながら角変形を低減する手法として、溶接熱源とは別に裏面から加熱源を与える“裏面

加熱法”を取り上げ、その変形低減効果および基本原理等について三次元熱弾塑性数値解析を用いて検討を行った。ここでは、本研究で用いた数値解析における解析対象・条件、さらには用いた材料物性値等についてまとめて示す。

2.1 解析対象

本数値解析で用いた T 型すみ肉溶接継手モデルについて Fig. 1 に示す。モデルは、比較的薄いリブとフランジからなる板構造となっており、構造設計上必要な脚長が定められるため、変形制御のための溶接入熱の抑制は困難であるといえる。また、このような比較的薄い鋼板の板構造においては、構造設計上定められる脚長を満足する溶接入熱を選定すると、結果的に角変形量がピークとなる近傍の入熱パラメータとなる場合が多い。そのため、角変形が問題とされる場合が多いにも関わらず、変形を低減するためには、拘束治具による拘束や溶接後矯正が欠かせないのが現状であり、高効率かつ効果的に変形を低減する手法の確立が強く望まれている。

Fig. 1 T-joint model for numerical analysis.

2.2 解析条件

数値解析は、汎用有限要素解析コード ABAQUS Ver. 6.4 を用いた有限要素法 (FEM) によって行い、熱源は二重半楕円 Gauss 熱源モデルを用いた。溶接は片側 1 パスずつの計 2 パスとし、溶接の進行に伴う溶着金属の付着を模擬した数値シミュレーションとなっている。一方、裏面加熱に関しては余盛を考慮しておらず、基本的には TIG 溶接を想定したモデルを用いている。なお、後述するようにガス加熱等を想定したプロセスについても検討を加えている。また、入熱量は断熱計算により求めた値とし、溶接速度は 10 mm/s で一定とした。本数値解析で用いた材料物性値について Fig. 2 に示す。本数値解析では、構造用鋼を対象とした物性値を使用しており、各物性値はそれぞれ温度依存性を有している。また、材料が力学的に変形抵抗を失う力学的融融温度を 800°C、融融温度を 1500°C とし、それらはそれぞれ、それ以降の降伏応力やヤング率を極めて小さい値とすることにより模擬した。なお、用いている三次元解析手法が実験結果と比較して十分な精度を有していることは別報¹⁷⁾にて示している。

(a) Physical properties.

(b) Mechanical properties.

Fig. 2 Material properties for numerical analysis.

3. 裏面加熱法による角変形低減効果の検討

まず、裏面加熱法を用いた角変形低減概念について示すとともに、その有効性について検討するため、溶接熱源と裏面加熱熱源の熱源間距離や裏面加熱量を変化させた場合の角変形低減効果に関して数値解析を用いて検討を行った。

3.1 裏面加熱法による角変形低減概念とその有効性

Fig. 3 に裏面加熱法の模式図について示す。図中に示すように、裏面加熱法における制御パラメータは、溶接熱源と裏面加熱熱源の熱源間距離および裏面加熱量である。ここで、熱源間距離 Xh については、裏面加熱熱源が溶接熱源に対して先行する場合を正とした。

Fig. 3 Angular distortion control technique using back heating source.

一般に、裏面から加熱源を投与することは、1)本溶接による角変形に対して逆方向への曲り変形を生じること、あるいは、2)角変形の発生要因である板厚方向に不均一な固有ひずみ分布をもたらす温度分布の分布勾配を均一化させること、の2つの要因から角変形に対する低減効果が期待される。しかし、既報¹⁶⁾でも報告したように、複数の加熱熱源をお互いの温度場が影響し合うような熱源間距離で縦列させると、その温度場の変化に影響を受けて、残留する角変形量は複雑に変化する。したがって、本検討で取り上げる裏面加熱法においても、適切な熱源配置を選定すれば、より効果的に角変形を低減できることが期待される。

Fig. 4 は、溶接熱源のみの場合 (Q_{top}) に対して、裏面加熱熱源を完全に独立して別々に与えた場合(その前後関係に応じて $Q_{top}+Q_{back}$ あるいは $Q_{back}+Q_{top}$)、そして、溶接熱源直下に裏面加熱熱源を与えた場合 ($Xh=0mm$)、さらには、ある熱源間距離条件で与えた場合 ($Xh=-60mm$) の角変形量について示したものである。ここで、角変形量とは、溶接線方向に対して不均一に分布する角変形量の平均値であり、以下、本論文で示す角変形量については、同様の定義に従うものとする。また、溶接熱源の入熱量 Q_{top} は必要脚長 $h/\sqrt{2}$ を満たすことを考慮した結果、 $1.2kJ/mm$ となり、それに対して裏面加熱熱源の入熱量 Q_{back} は $0.36kJ/mm$ で一定とした。これを見ると、裏面加熱熱源を与えない場合の角変形量が $0.058rad$ であるのに対して、裏面加熱熱源を与えると、いずれの条件においても少なからず角変形は低減されるといえる。完全に独立して与えた場合には、裏面加熱熱源による逆変形量の分だけ角変形が低減されているが、その前後関係によって若干の差が見られる。これは、裏面加熱熱源を溶接熱源より先に与えるかどうかで、本溶接による溶着金属の有無による逆変形に対する剛性に違いがあるためである。一方、溶接熱源の直下に裏面加熱熱源を与えた場合には、逆変形による低減効果とは異なった低減量が得られており、これは裏面から加熱熱源を与えることによって温度分布の板厚方向の分布勾配が軽減されたことによる効果であると考えられる。しかし、これらに対して、ある熱源間距離(本検討では $Xh=-60mm$)で裏面加熱熱源を与えた場合には、逆反りの状態となるほど過剰な効果が得られて

Fig. 4 Effectiveness of back heating to angular distortion decrease.

いることがわかる．このように，本研究で取り上げる裏面加熱法においても，溶接熱源と裏面加熱源の温度場がお互いに影響し合う適切な熱源配置の条件を選定すれば，少ない裏面加熱量で効果的に角変形を防止できることが期待される．そこで，次節以降では，裏面加熱法によって得られる角変形低減効果に関して，その制御パラメータである熱源間距離と裏面加熱量の影響について検討を行った．

3.2 角変形低減効果に及ぼす熱源間距離の影響

まず，裏面加熱法を用いた場合の熱源間距離が角変形低減効果に及ぼす影響について明らかにするため，溶接熱源の入熱量 Q_{top} を 1.2kJ/mm ，裏面加熱源の入熱量 Q_{back} を 0.36kJ/mm で一定とし，熱源間距離を種々に変化させた場合に残留する角変形量について検討を行った．その結果を Fig. 5 に示す．これを見ると，溶接熱源と裏面加熱源の熱源間距離が小さく，お互いの温度場が影響し合うような条件ほど，熱源間距離の変化に対して角変形低減効果が大きく異なることがわかる．特に，溶接熱源と裏面加熱源の熱源間距離が極めて小さい条件においてその傾向は顕著であり，適切な熱源配置条件を選定すれば，極めて効果的に角変形を低減できる一方，少しでも条件を誤ると，場合によっては，ほとんど低減効果が得ら

Fig. 5 Effect of distance between two heat sources on angular distortion in back heating.

Fig. 6 History and production mechanism of angular distortion in ahead heating on back surface.

れないことがわかる．こうした傾向は，望月ら⁸⁾が報告したアルミニウム合金の薄板溶接を対象とした検討においても見られており，望月らは，その効果は若干劣るものの，熱源間距離の変化に対して安定して低減効果が得られることから，実用上，先行加熱法を推奨している．

Fig. 6 は，本検討における $Xh=320\text{mm}$ の条件において得られる角変形低減効果に関する基本原理の考え方について，角変形発生挙動に注目して検討を行った結果について示したものである．これを見ると， $Xh=320\text{mm}$ の条件における角変形の発生挙動は，“先行する裏面加熱源による逆変形挙動”と，“溶接熱源が到達する直前に，先行熱源によって既に生じている温度上昇量(本条件では 95°C)に等しい予熱を与えた状態で本溶接を行った場合に生じる変形挙動”を重ね合わせたものに等しいことがわかる．すなわち，本検討で対象としている構造用鋼においても，望月ら⁸⁾が報告したアルミニウム合金の薄板溶接の場合と同様の原理で，先行加熱法によってある程度効果的な低減量が得られているといえる．しかし，本検討で対象としているような比較的薄い鋼板の板構造においては，アルミニウム合金の薄板溶接の場合ほど十分な低減効果が得られているとはいえないため，先行加熱法を推奨することは必ずしも得策ではない．逆に，今後のより汎用的な展開のために，溶接熱源のやや後方(本検討においては $Xh=-60\text{mm}$)に裏面加熱源を与えた場合に，それらの加熱源による温度場が強く影響し合った結果として得られる何らかの効果を活かした，温度場制御による角変形低減手法を，現象を十分に理解した上で確立することが重要であるといえる．

3.3 角変形低減効果に及ぼす裏面加熱量の影響

これまでの検討で，裏面加熱法を用いた場合の熱源間距離が角変形低減効果に及ぼす影響について明らかにしてきたが，Fig. 4 あるいは Fig. 5 を見てもわかるように，条件によっては逆反りを生じるほどの過剰な効果が得られている．一方，継手性能の確保や他の溶接変形および残留応力への影響，さらには実施工時に溶け落ちが生じるなどの溶接プロセスにおける問題点を考慮すると，与える裏面加熱量はより小さい方が望ましいのは明らかである．そこで，先の検討で一定とした裏面加熱量 Q_{back} を 0.36kJ/mm から小さくさせた場合においても同様に，温度場の変化による何らかの効果によって有効な低減効果が得られるかについて検討を行った．そのため，熱源間距離は，最も大きな低減量が得られる条件である $Xh=-60\text{mm}$ で一定とし，裏面加熱量を 0.070kJ/mm ～ 0.36kJ/mm の間で種々に変化させた．裏面加熱源を与えない場合(Q_{top})と $Xh=-60\text{mm}$ で裏面加熱源を与えた場合に生じる角変形量について Fig. 7 に示す．比較検討のために裏面加熱源による逆変形量を単純に差し引いたもの($[Q_{top}] - [Q_{back}]$)についても示してある．これを見ると，裏面加熱源の入熱量に関わらず，裏面加熱法を用いた場合には，単純に逆変形量を

差し引いた場合よりも有効な低減効果が得られており、本検討においては、溶接入熱 1.2kJ/mm に対して、 $1/5$ 程度の裏面加熱量 0.22kJ/mm で角変形を完全に防止できていることがわかる。このように、適切な熱源配置で裏面加熱法を行えば、溶接入熱に対して十分に小さい程度の裏面加熱によって、角変形を完全に防止できることが期待される。

Fig. 7 Effect of heat input of back heating source on angular distortion in back heating.

4. 裏面加熱法による角変形低減原理の検討

これまで、裏面加熱法における熱源間距離および裏面加熱量が角変形低減効果に及ぼす影響について明らかにし、適切な熱源配置の条件で裏面加熱法を用いれば、溶接入熱に対して十分に小さい程度の裏面加熱によって、角変形を完全に防止できる可能性があることを示した。今後、このような手法を汎用的なものとして確立するためにはまず、その基本原理を明らかにすることによって、温度場特性からみた溶接変形制御理論を一般化された形で確立する必要がある。そこで、裏面加熱法における角変形低減原理に関して、溶接変形を直接支配する溶接後の残留塑性ひずみに大きく影響を及ぼす

“最高到達温度分布”および“残留塑性ひずみの発生挙動”に注目して検討を行った。

4.1 最高到達温度分布

まず、溶接後の残留塑性ひずみに大きく影響を及ぼす最高到達温度分布に注目して検討を行った。角変形は、溶接後の板幅方向の残留塑性ひずみの板厚方向の分布勾配によって生じる曲り変形である。一般に、板幅方向の残留塑性ひずみの挙動は両端固定棒モデルで考えた場合、加熱中は両端固定、冷却中は両端フリーの状態に等しいことが知られており¹⁾²⁾、力学的溶融温度以上に加熱される領域を除けば、その大きさは最高到達温度によって決まるといって良い。Fig. 8 は、種々の条件における 1 パス溶接後の最高到達温度分布を示したものである。これを見ると、いずれの場合も裏面加熱源を与えることで最高到達温度分布の板厚方向の分布勾配を軽減することができているが、 $Xh=60\text{mm}$ と $Xh=-60\text{mm}$ を比較するとわかるように、前方側の加熱源の温度上昇量に影響を受けて、後方側の加熱源による最高到達温度分布の拡がりが増長される傾向にある。このため、Fig. 5 に示すように、溶接熱源と裏面加熱源の熱源間距離が極めて小さい場合、その前後関係が異なることによって角変形の低減効果が極めて大きく異なり、裏面加熱源を溶接熱源よりもやや後方とすることで大きな低減効果が得られると考えられる。一方、 $Xh=-60\text{mm}$, $Xh=-20\text{mm}$, $Xh=0\text{mm}$ を比較すると、いずれもその分布勾配を大きく軽減できているが、この範囲内においては熱源間距離が遠くなるほど、最高到達温度分布の拡がりが増長されている領域が表面側から裏面側に僅かではあるが移行していることが確認できる。すなわち、溶接熱源からの距離が極めて小さくなると、溶接熱源による熱の拡がりが増大する一方で、裏面側まで十分に達しないうちに裏面加熱源を与えることになるため、最高到達温度分布の板厚方向の分布勾配を制御するうえで十分に有効な効果が得られないと考えられる。逆

Fig. 8 The highest temperature distribution in each position after back heating weld.

に、熱源間距離が大きくなると、継手全体への熱伝導がすすみ、外気への熱の損失も大きくなるため、この場合も有効な効果が得られなくなることは明らかである。すなわち、角変形を低減するうえで最高到達温度分布を最適に制御する熱源間距離が存在すると考えられる。

4.2 残留塑性ひずみの発生挙動

次に、裏面加熱法を用いた場合の残留塑性ひずみの発生挙動に注目して検討を行った。先にも述べたように、溶接後の残留塑性ひずみは一般に最高到達温度分布に大きく影響を受けて決まるが、本研究で取り上げた裏面加熱法のように、溶接中の温度場を意図的に変化させるような手法においては、任意の点における温度履歴が単一の溶接熱源を用いた従来の溶接の場合と大きく異なることが考えられ、それに伴って、残留塑性ひずみの発生挙動にも変化が生じる可能性がある。Fig. 9 は、1 パス溶接後の熱源直下(図中実線)の板幅方向の残留塑性ひずみの分布を示したものである。裏面加熱源を与えない場合(Q_{top})には、僅かに引張りの残留塑性ひずみが生じている裏面側から、表面側に向かって圧縮の残留塑性ひずみが大きくなっていることがわかる。これに対して、裏面加熱源を用いると、いずれの場合も裏面側に圧縮の残留塑性ひずみが生じていることがわかるが、 $Xh=60\text{mm}$ の場合に限って、裏面側の圧縮の残留塑性ひずみの大きさが明らかに小さいことが確認できる。逆に、 $Xh=-60\text{mm}$ の場合には溶接熱源によって生じるはずの表面側の圧縮の塑性ひずみが小さくなっており、こうした傾向は $Xh=0\text{mm}$ や $Xh=-20\text{mm}$ の場合においては顕著に見られない。すなわち、 $Xh=-60\text{mm}$ あるいは $Xh=60\text{mm}$ という距離に何らかの意味があることが示唆される。そこで、 $Xh=-60\text{mm}$ という熱源間距離について、温度場に注目して検討を行ったところ、先行する溶接熱源によって生じた温度場の冷却過程において、力学的熔融温度($=800^\circ\text{C}$)よりもやや低温となる領域で、裏面から加熱源を与える条件であることがわかった。これはすなわち、Fig. 2

Fig. 9 Residual plastic strain distribution.

に示すように、材料の機械的特性が急激に回復し始める領域であるということがいえる。

裏面加熱源を与えない場合(Q_{top})と $Xh=-60\text{mm}$ で裏面加熱源を与えた場合の表面側および裏面側の残留塑性ひずみの発生挙動について Fig. 10 に示す。これを見ると、裏面加熱源を与えることで、裏面側に圧縮の残留塑性ひずみが生じるとともに、溶接熱源によって表面側に生じるはずの圧縮の残留塑性ひずみの発生が抑制されていることがわかる。すなわち、 $Xh=-60\text{mm}$ の条件のように、材料の機械的特性が回復し始めるが、その大きさが十分でないうちに、裏面から加熱源を与えることで、表面側に効果的に引張りの残留塑性ひずみを生じさせることができると考えられる。逆に、 $Xh=60\text{mm}$ の場合には、裏面加熱源単独の場合に裏面側に生じるはずの圧縮の残留塑性ひずみが、溶接熱源を与えることによって軽減されると考えることができる。そのため、溶接熱源よりもやや前方に裏面から加熱源を先行させても、効果的に裏面側に圧縮の残留塑性ひずみを生じさせることが出来ないということからも、Fig. 5 に示すように、ほとんど角変形低減効果が得られないことが理解できる。

また、Fig. 9 を見ると、熱源直下においては、板幅方向の残留塑性ひずみの分布で $Xh=-20\text{mm}$ と $Xh=-60\text{mm}$ の分布勾配がほぼ等しいといえる。それにも関わらず、Fig. 5 を見てわかるように、角変形の低減量は大きく異なっている。前節で示した結果も踏まえて考察すると、 $Xh=-60\text{mm}$ は、溶接熱源によって生じた温度場の冷却過程において材料の機械的特性が十分に回復していない領域で裏面から加熱源を与えることで、表面側に引張りの塑性ひずみを効果的に生じさせることができる条件である。加えて、先行する溶接熱源による温度上昇の影響によって、裏面側の最高到達温度分布を効果的に広げることができる条件でもある。すなわち、裏面側においてより広範囲で圧縮の残留塑性ひずみを大きくすることが可能であるとともに、表面側においてより広範囲で引張りの残留塑性ひずみを生じさせることができると考えられ、これによって最も大きな低減量が得られると考えられる。

Fig. 10 Residual plastic strain behavior on top and back surface in conventional welding or back heating.

すなわち、構造用鋼を用いた比較的薄い鋼板の板構造を対象とした裏面加熱法においては、溶接中の温度場において力学的溶融温度よりもやや低温で、材料の機械的特性が急激に回復し始める領域において裏面から加熱源を与えることで、以下に示す 2 つの効果によって角変形を効率良く低減することが可能である。すなわち、1) 溶接熱源によって生じる表面側の圧縮の残留塑性ひずみを軽減できること、と 2) 溶接熱源によって生じた温度上昇量の影響を受けて、裏面加熱源によって生じる逆変形量を助長できること、である。これにより、溶接しながら効果的に角変形を低減できると考えられる。

5. 裏面加熱法の適正施工条件の検討

これまでの検討から、適切な熱源配置の条件で裏面加熱法を用いれば、理論上、角変形を完全に防止することも可能であることを示した。ここでは、実施工を想定した検討として、裏面加熱源の加熱特性として加熱幅が異なることが角変形低減効果に及ぼす影響について検討を行うとともに、裏面加熱法を用いた場合の他の溶接変形や残留応力分布への影響について検討を行った。

5.1 裏面加熱源の加熱幅が角変形低減効果に及ぼす影響

これまで、裏面加熱源として TIG 溶接のように比較的エネルギー密度の高い加熱源を想定したモデルを用いてきたが、実施工を踏まえた場合、高周波加熱やガス加熱などのように比較的エネルギー密度の低い加熱源を利用することも考えられる。そこで、入熱量としては等しいが、そのエネルギー密度が異なるような裏面加熱源を用いた場合に得られる角変形低減効果について検討を行った。Fig. 11 は、Fig. 7 に示した裏面加熱量の条件(case A)のうち、加熱量の大きい 3 条件($=0.22\text{kJ/mm}$, 0.30kJ/mm , 0.36kJ/mm)の加熱幅を変化させ、加熱量は変化させることなくエネルギー密度を小さくさせた場合(case B)の角変形低減効果について示したものである。これを見ると、裏面加熱源の加熱幅を変化させても、角変形低減効果には大きな影響はないといえる。

Fig. 11 Effect of heat energy density of back heating source on angular distortion in back heating.

これは、裏面加熱源のエネルギー密度を小さくすると、熱源近傍の温度上昇量は小さくなる(温度分布のピーク温度が下がり、広範囲にわたって緩やかな勾配をもつ分布となる)が、裏面加熱法においては、溶接熱源によって既に生じている温度上昇量の影響を大きく受けることや、力学的現象を議論するにあたって力学的溶融温度以上の温度域の温度上昇は大きな意味をもたないことから、本検討範囲においては、裏面加熱源の加熱幅は角変形低減効果に対して大きな影響を及ぼさないと考えられる。すなわち、TIG 溶接に限らず、高周波加熱やガス加熱といった加熱源を用いた場合にも同程度の低減効果が期待できると考えられる。

5.2 他の溶接変形や残留応力分布への影響

本検討で対象としている裏面加熱法は、これまで示したように角変形の低減に対しては有効であるが、継手に与えられる入熱量としては増加するため、他の溶接変形や残留応力分布に対しても少なからず影響を及ぼすと考えられる。すなわち、裏面加熱法を用いた場合の他の溶接変形や残留応力分布についても、どの程度の影響があるのかを把握し、溶接構造物の製作工程において許容できるものかを判断することが課題となる。

そこで、裏面加熱法を用いた場合の縦曲り変形の比較について Fig. 12(a)に示す。縦曲り変形は、縦収縮とともに固有

(a) Longitudinal bending.

(b) Residual stress distribution.

Fig. 12 Effect of back heating on longitudinal bending and residual stress distribution.

収縮力の概念によって評価できることが知られており、この場合も溶接熱因子として溶接入熱 Q が用いられる。しかし、これを見ると、継手に与えられる入熱量としては等しいにも関わらず、熱源間距離が異なると縦曲り変形の大きさが異なっていることがわかる。熱源間距離が小さいほどその大きさが大きくなる傾向にあり、裏面加熱源を熱源直下に与えた場合には、継手に与えられる入熱量の増加に相当する程度の変形量の増加があると考えてよい。しかし、本手法においては、角変形低減からみた最適な熱源間距離が $Xh = -60\text{mm}$ であることなどから、金ら⁹⁾が報告している従来の溶接熱源直下への裏面加熱と比較すると、熱源間距離、角変形を防止するために必要な裏面加熱量、どちらの観点からも縦曲り変形などの溶接線方向の変形への影響を軽減させることが可能である。すなわち、確かに入熱量の増加による影響は若干あるものの、大きくはないと考えてよいといえる。一方、残留応力分布について Fig. 12(b)に示す。これを見てわかるように、溶接線方向、板幅方向ともに、裏面加熱法を用いた場合の方が部分的に僅かに大きくなっているといえるが、全体的に見ると残留応力の変化は溶接構造物としての強度には大きく影響を及ぼさない範囲であると考えられる。

これらを踏まえると、裏面加熱法を用いる場合には、残留応力分布に関しては大きく影響を及ぼさないと考えられる。それに対して、縦収縮・横収縮などの収縮量の増加はある程度は避けられず、継手形状・寸法によっては、それに伴って生じる縦曲り変形にも影響を及ぼすため、溶接構造物の製作工程において各構造要素、あるいは、その基となる構造部材として求められる寸法精度に応じて、その有用性に関して判断する必要があるといえる。

6. 入熱パラメータを考慮した汎用的な応用展開に向けた検討

これまで、ある条件における溶接温度場に対して、裏面加熱源を与えることによる角変形低減効果および条件設定の考え方について明らかにしてきたが、汎用的な角変形低減手法として確立していくためには、入熱パラメータを踏まえた検討が不可欠である。そこで、裏面加熱法を用いる場合の角変形低減効果および条件設定の考え方に及ぼす入熱パラメータの影響について検討を行った。

6.1 各入熱量の熱源における入熱パラメータの変化

入熱パラメータを踏まえた角変形低減効果や条件設定の考え方について明らかにするために、Fig. 1に示すモデルにおいて板厚のみを9mmから6mmに変化させたモデルを用いて、これまでと同様に検討を行った。Fig. 13は、このときの各入熱量の加熱源による変形量を入熱パラメータによって評価したものである。なお、溶接熱源については、2パス溶接後の角変形量を、フランジに与えられる入熱量として $2/3Q$ (Q : 溶接入熱) $\times 2$ (パス)を用いた入熱パラメータで評価した

ものであり、裏面加熱源については、ビードオンプレートにおける1パス溶接後の角変形量を入熱パラメータを用いて評価したものである。これを見ると、板厚を9mmから6mmに変化させることで、溶接熱源の入熱パラメータは角変形がピーク近傍となる条件からピークを越えて変形量が減少している条件へと変化している。一方、裏面加熱源の入熱パラメータを見ると、最も大きな入熱量である0.36kJ/mmの場合、板厚9mmでは角変形量のピークよりも十分手前となっているのに対して、板厚6mmではピーク近傍となっており、同じ入熱量の溶接熱源や裏面加熱源であっても、入熱パラメータが大きく異なる条件となっていることがわかる。これらを用いて、これまでと同様の検討を行うことによって、入熱パラメータを踏まえた角変形低減効果および条件設定の考え方について検討を行った。

Fig. 13 Evaluation of angular distortion in each welding heat input by heat input parameter.

6.2 入熱パラメータを踏まえた条件設定の考え方

Fig. 14(a)は、板厚6mmのモデルを用いて、板厚9mmの場合と同様に、熱源間距離が角変形低減効果に及ぼす影響について検討した結果を示したものである。溶接熱源による変形量と裏面加熱源による変形量の相対的な関係が板厚9mmの場合と異なるため、板厚9mmの場合(図中実線)と比較すると、熱源間距離に関わらず、全体的に低減効果が得られているといえるが、熱源間距離に対する低減効果の傾向としては同様であり、 $Xh = -80\text{mm}$ 程度で有効な低減効果が得られていることがわかる。また、板厚9mmの場合と比較して、その熱源間距離が若干異なるのは、力学的溶融温度以上となる領域の大きさが若干異なることに対応していた。一方、最も大きな低減量が得られる熱源間距離については、望月ら⁸⁾が報告しているアルミニウム合金の薄板溶接時の場合と同様に、ある程度先行させた距離(本検討においては $Xh = 320\text{mm}$)であるといえる。板厚を6mmとした本検討における溶接熱源の入熱パラメータが、望月らが行ったアルミニウム合金の薄板溶接を対象とした検討のそれとほぼ同程度であると考えられることから、入熱パラメータに応じて、角変形低減のための適切な熱源配置の条件が異なることが示

Fig. 14 Effect of heat input parameter on angular distortion reduction in back heating.

唆される．そこで，Fig. 14(b)および(c)に示すように，熱源間距離 $Xh=-80\text{mm}$ および $Xh=320\text{mm}$ の場合における角変形低減効果に及ぼす裏面加熱量の影響について検討を行った． $Xh=-80\text{mm}$ の場合を見ると，角変形低減効果は裏面加熱源単独で生じる角変形量と同様に裏面加熱量に対してピークを示すことが確認できる．すなわち，与える裏面加熱源の入熱パラメータがピーク近傍である場合，溶接熱源によって生じている温度上昇量の影響を受けた結果，裏面加熱源による変形量は見かけ上，溶接入熱が大きくなる方向へ変化するため，生じる逆変形量は逆に小さくなってしまい，得られる角変形低減効果は小さくなると考えられる．一方， $Xh=320\text{mm}$ の場合には，本検討範囲内においては，裏面加熱量の増加に対して逆変形量は単調増加し，溶接熱源が到達する直前に生じている温度上昇量についても同様に単調増加すると考えられるので，その低減原理上，裏面加熱量に対して，得られる角変形低減効果は単調に増加している．ただし，裏面加熱量をさらに大きくすると，裏面加熱源による逆変形量がピークを越えて減少し始めるため，得られる低減効果もこれに伴って減少すると考えられる．

すなわち，溶接熱源の入熱パラメータが角変形量のピークを越え，裏面加熱源の入熱パラメータが角変形量のピークへ向かって上昇し，これらの相対的な変形量の差が小さくなる場合が起こり得る薄板の溶接時には，その低減原理上，裏面加熱源を溶接熱源のやや後方に与える場合よりも，ある程度の熱源間距離で先行させる場合の方がより大きな低減量を得ることができる場合があるといえる．しかし，実用上の問題として，1)角変形を逆反りとならない程度に低減・防止すること，2)与える裏面加熱源の入熱量は出来る限り抑制するべきであること，を踏まえると，構造用鋼においては，溶接熱源の入熱パラメータに関わらず，溶接熱源によって生じる温度場の冷却過程において，力学的熔融温度よりもやや低温となるような，溶接熱源のやや後方で裏面加熱源を与えることが，角変形低減のための最も効果的な熱源配置のあり方であるといえる．また，その条件で裏面加熱法を用いれば，入熱パラメータに関わらず，溶接入熱に対して十分に小さい程度の裏面加熱によって，完全に角変形を防止できることが期待されるといえる．ただし，板厚に対して極めて溶接入熱・裏面加熱ともに小さい場合には，温度場が互いに影響しにく

い状態となることは容易に想像でき、温度場制御による効果的な低減量は得られない可能性があることは、本手法を用いるにあたって、注意すべき点であるといえる。

以上を踏まえると、溶接熱源とは別に裏面から加熱源を与える裏面加熱法では、種々の熱源配置に関する条件設定に応じた異なる現象によって種々の変形低減効果が得られる。その中でも、小さい裏面加熱量でより大きな変形低減効果を得るためには、本検討で対象とした構造用鋼においては、溶接によって生じている温度場の冷却過程において、力学的溶融温度よりやや低温となる領域で裏面から加熱源を与えることが有効である。これは、溶接後の残留塑性ひずみ分布に大きく影響を及ぼす最高到達温度の分布や残留塑性ひずみの発生挙動そのものをインプロセスに制御できることによる効果である。すなわち、他の溶接変形制御に対しても、その発生要因となる残留塑性ひずみの分布や発生挙動を適切に制御するための温度場特性を明らかにすることで、同様のインプロセス制御手法を提案することが可能となると考えられる。また、本検討で制御対象とした角変形についても、温度場を制御する手法として他にも、別の箇所での加熱源や冷却源、さらには新しい溶接プロセスを用いた手法なども考えられる。本検討で得られた結果は、溶接変形のインプロセス制御手法としての温度場制御法の有効性およびその制御のあり方に関する一例であり、今後、その制御対象や制御手法に関してさらなる検討を行っていく必要があると考えられる。これらの検討によって、広く実用化され、かつ、有効なインプロセス溶接変形制御手法が確立されることが期待される。

7. 結 言

本研究では、構造用鋼を対象とし、溶接熱源とは別に裏面から加熱源を与える裏面加熱法による角変形低減手法について、その有効性を示し、最適な低減効果が得られる条件およびその原理を明らかにするとともに、汎用的な手法として確立することを目的として、数値解析により種々の検討を行った。以下に得られた結論を示す。

- (1) 裏面加熱法による角変形低減効果に及ぼす熱源間距離の影響に関して検討を行った結果、溶接熱源よりやや後方で、力学的溶融温度よりもやや低温となる領域において、裏面加熱源を与えることが最も有効であることがわかった。
- (2) 最も大きな低減効果が得られる原理について検討を行った結果、適切な熱源配置を選定することで、最高到達温度分布および残留塑性ひずみの発生挙動が効果的に制御されることを明らかにした。
- (3) 裏面加熱源の加熱特性が角変形低減効果に及ぼす影響について検討した結果、TIG 溶接のようなエネルギー密度の高い加熱源に限らず、高周波加熱やガス加熱など比較的エネルギー密度の低い加熱源を用いた

場合でも同程度の低減効果が期待できることを示した。

- (4) 出来る限り小さい裏面加熱量で角変形を防止することを目的とすれば、入熱パラメータに関わらず、(1)で示した条件が適切な熱源配置の条件であることを示した。
- (5) 適切な熱源配置で裏面加熱法を用いれば、溶接熱源の入熱パラメータに関わらず、溶接入熱に対して十分に小さい程度の入熱量の裏面加熱源を与えることで、溶接施工時に生じる角変形をインプロセスに完全に防止し得ることを示した。
- (6) 本検討により、“溶接中の温度場を制御することによって、生じる残留塑性ひずみの分布や大きさをインプロセスに制御する”ことで、溶接残留変形を高効率、かつ、効果的に低減できることを明らかにした。これを踏まえると、同様の考え方で、他の制御対象に対して、または、他の温度場制御手法を用いることで有効な低減効果が得られることは十分に期待でき、今後のさらなる検討によって、有効な手法として確立されることが期待される。

本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「構造・機能先進材料デザイン拠点の形成（研究代表者：馬越佑吉大阪大学教授）」事業推進費補助金、ならびに科学研究費補助金・基盤研究（B）：課題番号 17360418 の補助を受けて実施したものである。

参 考 文 献

- 1) M. Watanabe and K. Satoh: Welding Mechanics and the Application, ASAKURA PUBLISHING (1965). (in Japanese)
- 2) K. Satoh, Y. Ueda and T. Fujimoto: Welding Distortion and Residual Stress, SANPO PUBLICATIONS (1979). (in Japanese)
- 3) K. Satoh, T. Terasaki and K. Nohara: Changes of Root Gap During Welding in case of Butt Weld Joint-Report 2-, Journal of the Japan Welding Society, 49-10 (1980), 707-712. (in Japanese)
- 4) T. Okada, Y. Morimoto, T. Watanabe, K. Ishimaru and R. Takayama: Pinched Gas Flame Spot Heating for Removing Distortion on Welded Thin Steel Plate Structures, Journal of the Japan Welding Society, 46-4 (1977), 202-207. (in Japanese)
- 5) K. Satoh and T. Terasaki: Effect of Welding Conditions on Welding Deformation in Welds Structures Materials, Journal of the Japan Welding Society, 45-4 (1976), 302-308. (in Japanese)
- 6) Y. C. Kim, K. H. Chang and K. Horikawa: Prevention of Out-of-Plate Deformation Generated by Fillet Welding, Journal of Japan Steel Construction Engineering, 6-22 (1999), 11-16. (in Japanese)
- 7) M. Ohata, Y. Toda, M. Toyoda and S. Takeno: Control of Welding Distortion in Fillet Welds of Aluminum Alloy, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 17-2 (1999), 301-309. (in Japanese)
- 8) M. Mochizuki, M. Ohata, S. Takeno and M. Toyoda: Characteristics of Welding Distortion and Its In-Process Control by Ahead Heating Method in Aluminum Alloy, Journal of Light Metal Welding and Construction, 38-11 (2000), 536-543. (in Japanese)

- 9) N. Itoyama: Improvement of Aluminium Structure Fabrication by “Pre-lib”, *Journal of Light Metal Welding and Construction*, 34-12 (1996), 602-606. (in Japanese)
- 10) J. Wada: Application of Pre-Ribbed Aluminium Alloy Plate to Architectural Structure, *Journal of Light Metal Welding and Construction*, 41-10 (2003), 472-476. (in Japanese)
- 11) Q. Guan, C. X. Zhang and C. Q. Li: Dynamic Control of Welding Distortion by Moving Spot Heat Sink, *Welding in the World*, 33-4 (1994), 308-312.
- 12) Q. Guan: A Survey of Development in Welding Stress and Distortion Controlling in Aerospace Manufacturing Engineering in China: IIW Doc. X-1413-98, (1998).
- 13) M. Mochizuki, H. Yamasaki, S. Okano and M. Toyoda: Distortion Behavior of Fillet T-joint during In-Process Control Welding by Additional Cooling, *Welding in the World*, 50-5/6 (2006), 46-50.
- 14) C. L. Tsai, S. C. Park and W. T. Cheng: Welding Distortion of a Thin-Plate Panel Structure—The Effect of Welding Sequence on Panel Distortion is Evaluated, *Welding Journal*, 78-5 (1999) 156s-165s.
- 15) M. Mochizuki, M. Zen, T. Hattori, M. Watanabe, K. Nakakado and A. Hashimoto: Improvement of Fatigue Strength through Residual Stress Reduction by Controlling the Sequence of Welding Pass, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineering, Series A*, 64-626 (1999) 2514-2520.
- 16) S. Okano, M. Mochizuki and M. Toyoda: Thermal Conductivity Theoretical Examination Concerning Characteristics of Welding Distortion Produced by Multiple Heat Sources, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 24-4(2005), 324-330. (in Japanese)
- 17) Y. Mikami, Y. Morikage, M. Mochizuki and M. Toyoda: Numerical Simulation of Welding Distortion of T-joints with Low-temperature Transformation Welding Wire, *Proceedings of 1st International Conference on Distortion Engineering (IDE 2005)*, (2005), 453-460.