

## 同一面上の複数熱源を用いる溶接プロセスにおける角変形量の定式化

富永 玄紀\* 竹下 晋正\*

### Formularization of Angular Distortion Induced by Multiple Heat Sources on the Same Surface

Genki TOMINAGA \* and Kunimasa TAKESHITA \*

(Received February 6, 2015)

A preceding heat welding is proposed for reducing weld distortion. In this welding process, MAG welding is followed by a preceding heating with TIG on the same surface side of welding. The influence of a distance between heat sources of TIG and MAG on the angular distortion is investigated by numerical simulation for a bead-on-plate welding performed using simulation software (SYSWELD). From the calculated results, it is found that the angular distortion is reduced and has a minimum value in the case where the distance between heat sources is shorter than a certain one according to a welding condition. The reduction in angular distortion is discussed in accordance with the heat input parameter and the distribution of mechanical melting temperature region in the plate thickness section. In addition, the angular distortion induced by preceding heat welding can be formalized by using the maximum depth of mechanical melting temperature region in the plate thickness section as an explanatory variable.

**Key Words** : Angular Distortion, Multiple Heat Sources, Numerical Analysis, Extent of Mechanical Melting Temperature Region

#### 1. 緒言

材料を溶接した際に発生する溶接変形は、製品の寸法精度、性能に悪影響を及ぼすため低減する必要がある。溶接変形は面内変形、面外変形に分類される。面内変形には縦収縮、横収縮があり、これらに対しては溶接後の変形を考慮した設計をする等の対策が一般に行われる<sup>[1]</sup>。一方、代表的な面外変形である角変形は、溶接を行うとVの字形に横曲り変形する溶接変形であり、溶接対象物の構造によっては構造全体に悪影響を及ぼす。通常、角変形への対策には、あらかじめ逆方向に変形させておく逆ひずみ法が用いられる。しかしながら継手形状の制約から逆ひずみ法が適用できない場合もあるため、角変形そのものの低減が強く望まれている。近年、溶接施工中に行う溶接変形制御手法の中で、

複数熱源を用いるツイン・タンデム溶接が実用化されはじめている。このツイン・タンデム溶接は溶接速度を高速化することで、生産性を向上させる事が目的ではあるが、同時に溶接変形も低減される傾向にあることが知られている<sup>[2]</sup>。さらには溶接プロセス中に行う角変形制御手法として、裏面から加熱源を与える「裏面加熱法」については、その有効性が既に報告されている<sup>[3]</sup>。しかしながら溶接対象物の構造によっては、裏面から加熱源を与える裏面加熱法は必ずしも適用できるとは限らない。そこで本研究では、Fig.1に示されるような同一面上の複数熱源を用いる溶接プロセスに着目し、角変形の低減を試みる。このプロセスでは、溶接を目的としないTIGでの加熱の後に、任意の熱源間距離を空けMAGで溶接を行う。更に、この溶接プロセスが角変形に及ぼす影響について数値シミュレーションの結果を基に調査し、その影響因子を用いて角変形量の定式化を試みる。

\*大学院工学研究科機械工学専攻

\*Mechanical Engineering Course, Graduate School of Engineering

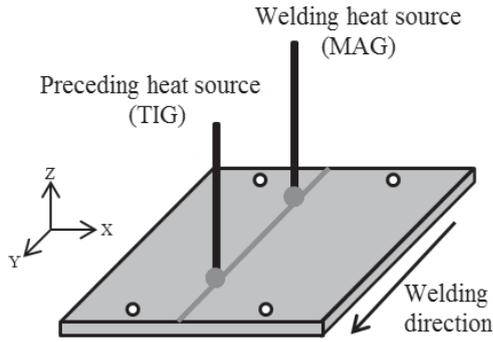


Fig. 1 Schematic illustration showing preceding heat welding process.

## 2. 解析

### 2.1 解析モデル

解析には板長 160mm, 板幅 130mm, 板厚 4mm と 6mm の 2 種類, 材質は S45C の平板モデルを用い, 溶接・熱処理用有限要素解析ソフトウェア (SYSWELD) を用いて解析を行った. 解析モデルの寸法形状を Fig.2 に示す.

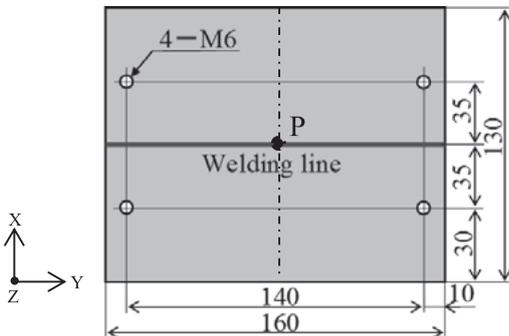


Fig. 2 Model used for numerical analysis.

### 2.2 解析条件

解析では Fig.2 の板中央に示した溶接線上にビードオン溶接を行うものとした. 解析条件を Table1 に示す. 拘束条件はねじ穴内面を X-Y 方向に完全拘束し, ねじ穴近傍の板上面を Z 方向にばね拘束した. その際のばね定数は 22.9N/mm とした.

解析パターンを Table2 に示す. Table2 に示す 6 パターンにおいて, TIG と MAG の熱源間距離を 0~150mm の間で 12 パターン変化させ, 計 72 パターンの解析を行った.

角変形量の評価方法は, 溶接後に溶接線を境界線と見なして片側を接地させ, もう片側と底面のなす角の 1/2 を角変形量  $\delta$  とし, 単位は rad を用いた. 評価箇所は, Fig.2 において溶接線の中央点 P と直交する線上とした.

Table 1 Analytical conditions.

Air temperature [°C]	20
Initial temperature [°C]	20
Welding heat input (MAG) [W]	2,850
Thermal efficiency (TIG) [%]	90
Thermal efficiency (MAG) [%]	65
Number of elements	114,272

Table 2 Analytical patterns.

Thickness, h[mm]	Welding speed, v[mm/s]	Preceding heat input(TIG) [W]
4	15	800
		1000
6	7	800
		1000
	15	800
		1000

### 2.3 解析結果

Fig.3(a),(b),(c)に同一面上の複数熱源を用いる溶接プロセスにおける角変形量と熱源間距離の関係を示す. (a)は板厚4mm, 溶接速度 15mm/s, (b)は板厚6mm, 溶接速度 7mm/s, (c)は板厚 6mm, 溶接速度 15mm/s の場合である. 図中のそれぞれの一点鎖線は, MAG 単独で解析を行った場合の角変形量を示している.

Fig.3(a)から, MAG 単独の場合を基準にして, いずれの TIG 入熱量の場合も角変形量は熱源間距離およそ 20mm を境に, それより短い場合に減少, それより長い場合に増加していることがわかる. また, 熱源間距離 3.75mm のときに角変形量は極小値をとり, その値は TIG 入熱量 800W の場合に比べ, TIG 入熱量 1000W の場合の方がより小さくなることがわかる.

Fig.3(b)から, MAG 単独の場合を基準として, TIG 入熱量 1000W の場合は熱源間距離 25mm, TIG 入熱量 800W の場合は 30mm を境にそれより短い場合に減少, それより長い場合に増加していることがわかる. また, Fig.3(a)と同様に熱源間距離 3.75mm のときに角変形量は極小値をとり, その値は TIG 入熱量 800W の場合に比べ, TIG 入熱量 1000W の場合の方がより小さくなることがわかる.

Fig.3(c)から, MAG 単独の場合を基準として, 角変形量は熱源間距離が短い場合で増加し, 長い場合は同程度であることがわかる. また, TIG 入熱量 1000W の場合は熱源間距離 1.0mm, TIG 入熱量 800W の場合は熱源間距離 3.75mm のときに極大値をとることがわかる.

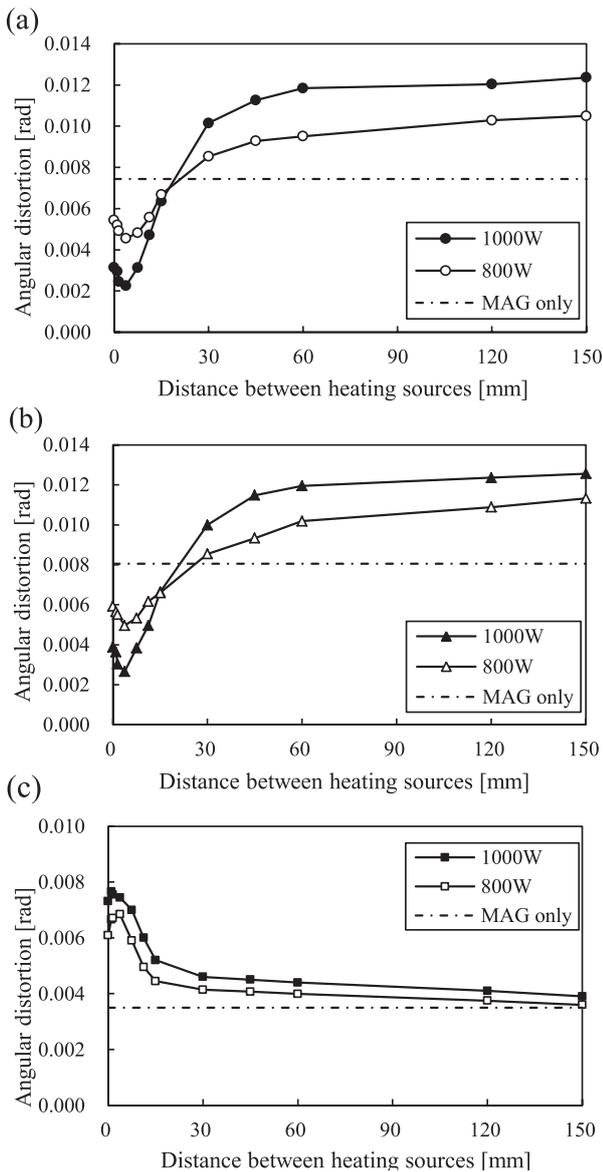


Fig. 3 Influence of distance between heat sources on angular distortion: (a)  $h=4\text{mm}, v=15\text{mm/s}$ , (b)  $h=6\text{mm}, v=7\text{mm/s}$ , and (c)  $h=6\text{mm}, v=15\text{mm/s}$ .

### 3. 解析結果に対する考察

#### 3.1 入熱パラメータによる考察

解析結果では、それぞれ MAG 単独の場合を基準にして、熱源間距離を変化させることで角変形量が増減した。その要因について、入熱パラメータの観点から考察する。入熱パラメータとは、入熱量  $Q$  を溶接速度で除した単位溶接長あたりの入熱量  $Q_{net}$  を、さらに板厚の 2 乗で除した値で、一般に角変形量はこの値に依存することが知られている<sup>[4]</sup>。TIG 単独と MAG 単独の角変形量と入熱パラメータの関係を Fig.4(a),(b)に示す。

Fig.3(a)の、熱源間距離が短い場合について考察する。熱源間距離が短い場合は、TIG 入熱量 800,1000W と MAG 入熱量 2850W を合算した MAG 入熱量 3650,3850W の一つの熱源であるとする。入熱パラメータは、MAG 入熱量 2850W の  $11.88\text{J/mm}^3$  から、 $15.21, 16.04\text{J/mm}^3$  に変化する。入熱パラメータが増えたことにより Fig.4(b)に示すように、角変形量のピーク位置から離れたため角変形量が減少したと考えられる。なお、このときの角変形量は、MAG 入熱量 3650,3850W の場合で 0.0055,0.0046 rad である。熱源間距離が長い場合は、TIG と MAG が独立した 2 回の入熱となり、それぞれの角変形量が重畳されたことで全体の角変形量が増加したものとする。Fig.4(a),(b)から角変形量は TIG 入熱量 800,1000W の場合で 0.0032,0.0041rad, MAG 入熱量 2850W の場合で 0.0074rad であることがわかる。これらを合算した 0.0106,0.0113rad は、Fig.3(a)の熱源間距離が長い場合と概ね一致する。

Fig.3(b)についても同様に考察する。熱源間距離が短い場合、入熱パラメータは、MAG 入熱量 2850W の  $11.30\text{J/mm}^3$  から、 $14.48, 15.27\text{J/mm}^3$  に変化する。入熱パラメータが増えたことにより Fig.4(b)に示すように、角変形量のピーク位置から離れたため角変形量が減少したと考えられる。なお、このときの角変形量は、MAG 入熱量 3650,3850W の場合で 0.0060, 0.0053 rad である。熱源間距離が長い場合について、まず Fig.4(a),(b)から角変形量は TIG 入熱量 800,1000W の場合で 0.0025,0.0039rad, MAG 入熱量 2850W の場合で 0.0080rad であることがわかる。これらを合算した 0.0105,0.0119rad は、Fig.3(b)の熱源間距離が長い場合とそれぞれ一致する。

Fig.3(c)についても同様に考察する、熱源間距離が短い場合から考察を行う。熱源間距離が短い場合の入熱パラメータは、MAG 入熱量 2850W の  $5.28\text{J/mm}^3$  から、 $6.76, 7.13\text{J/mm}^3$  に変化する。入熱パラメータが増えたことにより Fig.4(b)に示すように、角変形量のピーク位置に近付いたため角変形量が増加したと考えられる。なお、このときの角変形量は、MAG 入熱量 3650,3850W の場合で 0.0062, 0.0068 rad である。熱源間距離が長い場合について、まず Fig.4(a),(b)から角変形量は TIG 入熱量 800,1000W の場合で 0.0008,0.0012rad, MAG 入熱量 2850W の場合で 0.0035rad であることがわかる。これらを合算した 0.0043,0.0047rad は、Fig.3(c)の熱源間距離が長い場合と一致する。

以上のことから、MAG 単独の場合を基準にして、熱源間距離が短い場合は、2 つの熱源が 1 つの大きな熱源として振る舞うことで入熱パラメータが変化

し、角変形量が増減する。また、熱源間距離が長い場合は、独立した2つの熱源による角変形量が重畳することで、角変形量が同程度又は増加すると考えられる。

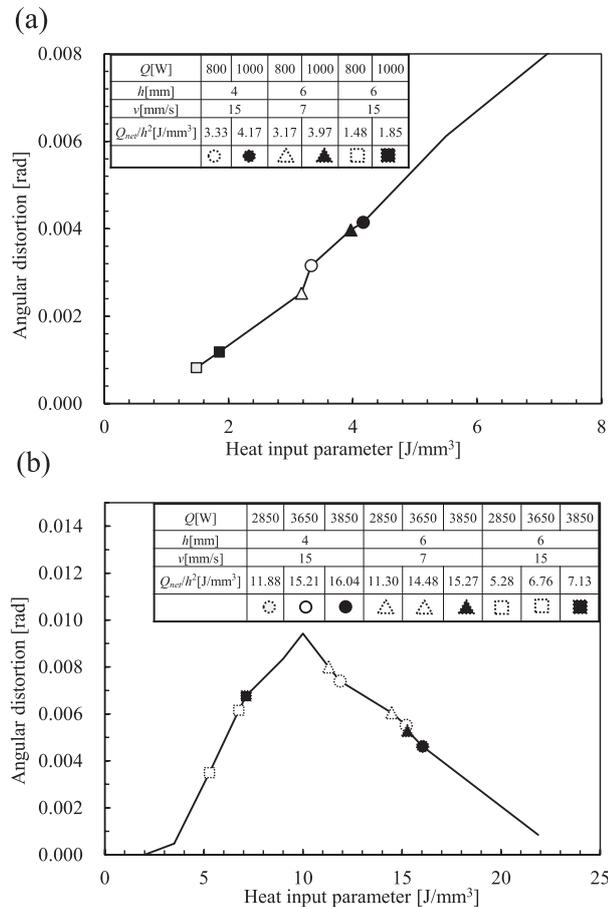


Fig. 4 Relationships between heat input parameter and angular distortion: (a) TIG, and (b) MAG.

### 3.2 力学的溶融温度域による考察

Fig.3(a),(b)において、角変形量が熱源間距離3.75mmのときに極小値をとり、その値はTIG入熱量800Wの場合に比べTIG入熱量1000Wの方がより小さい。Fig.3(c)では、角変形量の極大値をとる熱源間距離がTIG入熱量で異なる。これらの要因について力学的溶融温度域の観点から考察する。ここで、力学的溶融温度とは、降伏応力の温度依存性により降伏応力がほぼ零と見なせる温度であり、鉄鋼材料では約800°Cである。角変形量はこの力学的溶融温度域の最大深さ  $D_{800}$  の影響を著しく受け、力学的溶融温度域の最大深さが板厚中央の場合で、角変形量は最大となる。また、力学的溶融温度域の最大深さが板厚中央からさらに深くなるほど角変形量は小さくなる<sup>[5]</sup>。

Fig.5(a),(b),(c)に熱源間距離に対する力学的溶融温

度域の最大深さの関係を示す。(a)は板厚4mm、溶接速度15mm/s、(b)は板厚6mm、溶接速度7mm/s、(c)は板厚6mm、溶接速度15mm/sの場合である。力学的溶融温度域の最大深さは、熱源がFig.2に示される溶接線中央点Pに位置するときに評価した。

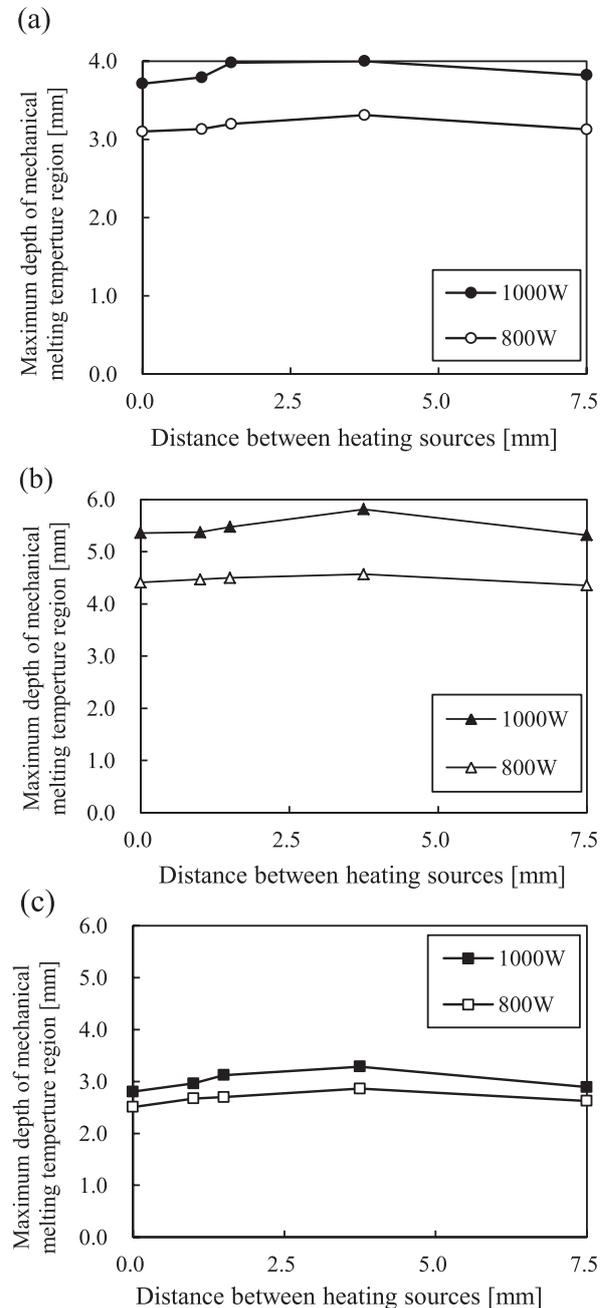


Fig. 5 Influence of distance between heat sources on maximum depth of mechanical melting temperature region: (a)  $h=4$ mm,  $v=15$ mm/s, (b)  $h=6$ mm,  $v=7$ mm/s, and (c)  $h=6$ mm,  $v=15$ mm/s.

Fig.5(a),(b)から、力学的溶融温度域の最大深さは、いずれのTIG入熱量の場合も、熱源間距離3.75mmのときに最大であることがわかる。このことが、Fig.3(a),(b)において角変形量が熱源間距離3.75mm

のときに極小値をとる要因と考えられる。また、熱源間距離 3.75mm のときの力学的溶融温度域の最大深さは、TIG 入熱量 800W の場合に比べて、TIG 入熱量 1000W の場合の方がより深い。そのために角変形量の極小値は TIG 入熱量 1000W の場合の方が小さくなったと考えられる。

Fig.5(c)から、力学的溶融温度域の最大深さは、いずれの TIG 入熱量の場合も熱源間距離 3.75mm のときに最大となることがわかる。力学的溶融温度域の最大深さが最も板厚中央に近いのは、1000W の場合で熱源間距離 1mm, 800W の場合で熱源間距離 3.75mm である。Fig.3(c)で、角変形量の極大値をとる熱源間距離が TIG 入熱量で異なるのは、そのためと考えられる。以上より、同一面上の複数熱源を用いる溶接プロセスにおける角変形量は、力学的溶融温度域の最大深さの影響を大きく受けることがわかる。

#### 4. 角変形量の定式化

Fig.3(a),(b)に示される解析結果と考察から、同一面上の複数熱源を用いる溶接プロセスにおける角変形量は、熱源間距離が短い場合に低減可能であることがわかる。そこで、熱源間距離が 0~7.5mm と短い場合の角変形量について定式化を試みる。角変形量の予測式を式(1)に示す。式(1)の説明変数は、板厚に対する力学的溶融温度域の最大深さの比である。 $\alpha$ 、 $\beta$ は単回帰分析により求まる値であり、それぞれ  $\alpha = -0.00981$ 、 $\beta = 0.00756$  である。また相関係数は 0.977、修正済み決定係数は 0.952 である。

$$\delta = \alpha |D_{800}/h - 0.5| + \beta \quad (1)$$

Fig.6(a),(b),(c)に式(1)を用いて求めた角変形量の予測値と解析値を示す。(a)は板厚 4mm, 溶接速度 15mm/s, (b)は板厚 6mm, 溶接速度 7mm/s, (c)は板厚 6mm, 溶接速度 15mm/s の場合である。

Fig.6(a),(b),(c)から、角変形量の極小・極大値をとる熱源間距離は、予測値と解析値で一致していることがわかる。

解析値に対する予測値の平均誤差は、Fig.6(a),(b),(c)の場合でそれぞれ 7.4, 5.3, 3.8%である。よって同一面上の複数熱源を用いる溶接プロセスにおける角変形量は、説明変数に板厚に対する力学的溶融温度域の最大深さの比を用いた式(1)によって、予測可能であると考えられる。

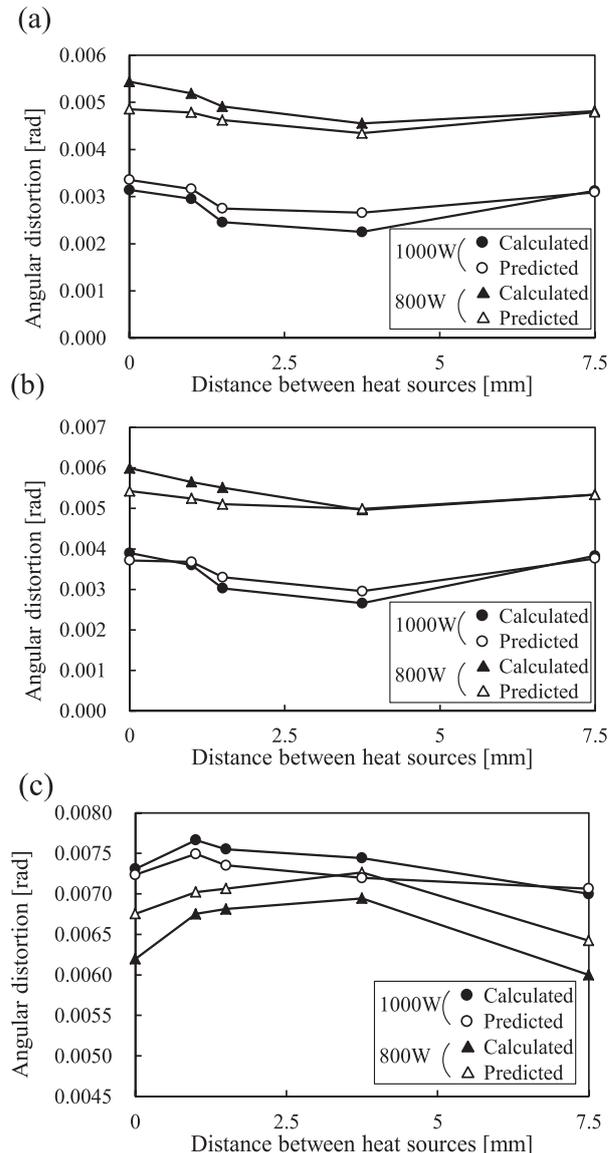


Fig. 6 Influence of distance between heat sources on calculated and predicted angular distortion:(a)  $h=4\text{mm}, v=15\text{mm/s}$ , (b)  $h=6\text{mm}, v=7\text{mm/s}$ , and (c)  $h=6\text{mm}, v=15\text{mm/s}$ .

#### 5. 結言

本研究では、同一面上の複数熱源を用いる溶接プロセスにおける角変形量に関して検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 平板において、板厚、入熱量、溶接速度に応じた適切な熱源間距離を設定することで、同一面上の複数熱源を用いる溶接プロセスにおける角変形量は低減が可能である。
- 2) 同一面上の複数熱源を用いる溶接プロセスにおける角変形量は、各熱源の入熱パラメータ及び

力学的溶融温度域によって左右される．熱源間距離が短い場合，熱源はひとつの大きな熱源として振舞い，熱源間距離が長い場合には独立した2回の入熱として振舞うことで，角変形量が変化する．

- 3) 同一面上の複数熱源を用いる溶接プロセスにおける角変形量は，説明変数に板厚に対する力学的溶融温度域の最大深さの比を用いた関数を使用することで，定式化が可能である．

#### 参考文献

- [1] 芝田之克：溶接学会誌，60-9，472-477 (1991).
- [2] 岡野成威，望月正人，豊田政男：溶接学会論文集，24-4，324-330 (2006).
- [3] 岡野成威，望月正人，豊田政男：溶接学会論文集，25-1，95-105 (2007).
- [4] 寺崎俊夫：溶接学会誌，8-2，139-146 (2009).
- [5] 岡野成威，松下和憲，望月正人，豊田政男：溶接学会論文集，28-32，72-280 (2010).