Fig. 6 Relation between total burn-off quantity and tensile strength.

って継手性能を硬さの点から評価すると、圧接部の熱影響による硬化域が広く、しかもこの領域の圧接部内が均一の硬さになる圧接条件に引張強さの最適点を見いだすことができる。

3.3 寄りしろと引張強さの関係

Fig. 6 は応答曲面法に基づいて行った全ての実験点における寄りしろ U_t と引張強さ σ_B の関係を示したものである。図中●印が応答曲面法で求めた最適点を表す。ここで、引張強さが●印を越える実験点が存在するが、これは制御が比較的に困難なブレーキ時間を圧接因子としたことが実験点に若干の誤差を含む要因となったものであり、式(8)の実験誤差の大きさの範囲内(1次誤差項 $e_{\beta 1} = \pm 9.1$, 2次誤差項 $e_{\beta 2} = \pm 9.4$, $e_{\beta 12} = \pm 12$)にほぼ収まっている。さらに、本研究においては、ブレーキ時間を圧接因子に含めたために、結果としてブレーキ時間を長くする方向に最適点が存在し、必然的に寄りしろが増大する結果となった。このことより、寄りしろ制御を考慮した従属変数 y の設定が今後の課題であり、また、応答曲面法を摩擦圧接に適用する場合にはブレーキ時間を

固定した方が得策であると考えられる。

以上、統計的手法の1つである応答曲面法の最適摩擦圧接条件の選定への応用に関しては、得られた最適点が母材値をはるかに越えている事実から、幾つかの課題を提示しながらもその適用は有意義であると考えられる。

4. 結 論

(1) 本研究においては、とくにS45C炭素鋼摩擦圧接部の引張強さを大とする圧接条件の組み合わせを最適摩擦圧接条件(最適点)とみなし、応答曲面法を用いて最適点を求めた。そして、同法の摩擦圧接への適用性を検討した。その結果、最適点を表すモデル式が推定され、同式を用いて再度確認実験を行った結果モデル式の最適点への適合性を確かめることができ応答曲面法の摩擦圧接への適用は有意義であるとの確信を得た。

(2) 本研究ではブレーキ時間を圧接因子の1つとしたため、結果としてブレーキ時間を長くする方向に最適点がみいだされ、必然的に寄りしろが大きくなった。したがって今後は、継手強度を大にし、しかも寄りしろを少なくする方向への応答曲面法の適用の改善が必要である。

(3) 圧接部の組織および硬さを調べた結果、最適点近傍では圧接界面および熱影響部のフェライトおよびパーライト組織が微細化し、しかもその領域が広くなることを確かめた。

(4) 本研究の結果から推測して、他の材料とくに圧接部の引張強さが母材のそれに到達し得ない場合や、接合が困難とみなされる材料の組み合わせに対する同法への適用の有用性が考えられる。

参 考 文 献

- 1) G.E.P. Box, K.B. Wilson: J.R. Stat., Soc., B, Vol. 13, No. 1, (1951), pp. 1-38.
- 2) S.M. Wu: Trans. ASME, Series B, Vol. 86, No. 2, (1964), pp. 105-116.
- 3) 小川, 山口, 菅, 坂口: 高温学会誌, Vol. 17, No. 5, (1991), p. 263-273.
- 4) 安藤, 仲田, 福井: 溶接学会誌, Vol. 40, No. 2, (1971), p. 137-151.
- 5) 久曾神, 西本, 乙部, 金井, 小笠原: 日本機械学会論文集C, Vol. 40, No. 400, (1980), p. 1406-1414.

TIG 溶接における温度の過渡応答特性に及ぼす 材料物性値の影響*

里中 忍**, 播 宏二***, 松本 芳昭***

Effects of Material Properties on Transient Response in TIG Arc Welding*

by Shinobu Satonaka**, Koji Hari*** and Yoshiaki Matsumoto***

*原稿受付 平成4年2月12日 平成2年秋季全国大会で発表

**正 員 熊本大学工学部 Member, Faculty of Eng., Kumamoto Univ.

*** 熊本大学(院) Graduate School of Kumamoto Univ.

Effects of thermal and physical properties of materials on the transient response of temperature to a step change in welding speed were investigated using TIG arc welding and FEM calculation of three-dimensional heat conduction. The materials used in this study were stainless steel, mild steel, aluminum alloy, brass and copper 9 mm in thickness.

In TIG arc welding of low heat-conductive materials, large difference in maximum temperature appears in the period between former quasi-state and latter one. On the other hand, high heat-conductive materials indicate large difference in temperature gradient, but a little change in maximum temperature. In addition, the high heat-conductive materials require longer distance or time to be in latter quasi-state. The transient response from former to later quasi-state is characterized by the fraction of maximum temperature and temperature gradient to those at both quasi-states. These experimental results are confirmed by FEM calculations based on three-dimensional heat conduction. It is also clarified that although the maximum temperature mainly depend upon the thermal conductivity and thermal diffusivity, the transient response is dominated only on the thermal diffusivity. Therefore, the high thermal diffusive materials show slower response to a step change in welding speed.

Key Words: Transient response, Temperature, Temperature gradient, Material property, Thermal diffusivity, TIG, FEM

1. 緒 言

自動アーク溶接では健全な溶込み形状を得るために溶接パラメータの制御が必要となり、種々のセンサー¹⁾や制御法²⁾が考察されている。筆者らも自動溶接で重要と考えられる溶接パラメータの変化に対する温度や溶込み形状の過渡応答挙動を、TIG 溶接法による実験と有限要素法による数値計算から調べてきた^{3,4)}。TIG 溶接実験と熱伝導の計算結果を比較すると、溶接条件のステップ状の変化に対する温度や溶込み形状の過渡応答挙動は溶融池内の流動あるいは熱輸送特性に依存した変更点近傍の局所的な変動と溶融池から周辺の母材部への熱伝導に依存した溶接条件変更前の準定常状態から変更後の準定常状態に指数関数的に変化する遅れ現象から成り、その特性は変更点前後の準定常状態に対する変化率で整理できることを明らかにした。さらに、溶接速度を変化させた場合の遅れ現象は溶接速度の変化量に関係なくほぼ一定の特性を呈し、変化量に依存した特性となる溶接電流を変化させた場合とは異なることを示した。遅れ現象のこのような特性を熱伝導論的にみると、溶接速度を変化させた場合には材料内の熱の流れの方向が変化すること、溶接電流を変化させた場合には熱流束の強さが変化することに基因していることも明らかにした。このような溶接条件の変化に対する溶融池の熱輸送特性や材料の熱伝導特性は材料の化学組成や物性値にも依存することから、過渡応答特性と材料の物性値との関係を明らかにすることは解決すべき重要な課題である。

過渡期における溶融池の挙動を予測したり、直接観察することは困難であるが、本研究では溶接速度のステップ状の変化に対する過渡応答挙動を物性値の異なる種々の材料の TIG 溶接法による溶接実験と有限要素法による熱伝導の計算から調べた。これらの結果を基にして、過渡応答挙動、特に遅れ現象に及ぼす溶接材料の影響を温度の変化から明らかにし、材料の物性値と過渡応答特性の関係を検討した。

2. 実験方法

溶接条件のステップ状の変化に対する温度や溶込み形状の過渡応答特性と材料の物性値の関係を調べる場合、溶接条件の変化量が過渡応答特性に及ぼす影響は少なく、材料の物性値の影響のみを取り出せる方法が望まし

Fig. 1 Specimen for measurement of temperature.

い。そこで、本研究ではステップ状の変化を与える溶接条件として溶接速度を選び、供試材として軟鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金、黄銅、純銅を用いた。また、材料の物性値と過渡応答特性の関係は溶接実験と有限要素法による熱伝導の数値計算から調べた。

溶接実験では板厚 9 mm の平板中央軸に TIG 溶接を用いてビードオンプレート溶接を施した。Fig. 1 はその概略を示したものであり、S 点が溶接開始位置、C 点が溶接速度を変更する位置、E 点が溶接終了位置である。溶接条件は溶接開始位置 S 点から終了位置 E 点までのアーク電圧、溶接電流がほぼ一定に保たれるようにあらかじめ母材-電極間距離を一定にし、C 点で溶接速度のみを変化させた。このような溶接条件のステップ状の変化に対する過渡応答挙動は溶込み形状と温度に現れる。既報⁴⁾でも明らかにしたように、板厚 9 mm 程度の中板の裏面における最高温度は溶込み形状の変化とほぼ同じような過渡応答特性を示し、しかも熱伝導の数値計算との比較も容易なことから、本研究でも溶接線直下の裏面における最高温度の変化から過渡応答特性を調べた。温度の測定には C-A 熱電対を用い、その測定位置は Fig. 1 および Table 1 に示すとおりで、変更点近傍に集中的に配置している。一方、数値計算では溶接速度のステップ状の変化に対する温度変化を三次元非定常熱伝導問題として取り扱い、有限要素法を用いて計算した。Fig. 2 は計算に用いた試験片の要素分割を示す。計算は対称性を考慮して、溶接線を含む試験片片側の要素で行ったが、本

Table 1 Typical position of thermocouple.

Thermocouple No.	Distance from shifting point C (mm)	
	Mild steel	Brass
1	-100	-100
2	-70	-70
3	-50	-50
4	-30	-30
5	-20	-20
6	-10	-10
7	-5	-5
8	0	0
9	5	5
10	10	10
11	20	15
12	30	20
13	50	30
14	80	50
15	110	80
16	140	110

Fig. 2 Finite element mesh pattern and coordinate system.

研究では熱伝導率の大きい純銅、黄銅、アルミニウム合金をも対象としているため、モデル試験片は既報^{3,4)}の場合より大きく、節点数1968、要素数7920としている。熱の供給は図に示す斜線部の加熱要素に表面から熱を加える表面熱源とし、同時に加熱される要素は2個とした。2個の加熱要素の入熱量はアークの位置によって変化し、前の要素に対する入熱量の割合はアークの中心が後の要素の中央にある場合の0%から前の要素の中央にある場合の100%まで直線的に変化し、後の要素に対する入熱量は逆に100%から0%に変化する。前の要素の入熱量が100%になった時、新たに1個の加熱要素が加えられ、入熱量0%の後の要素は加熱要素から取り除かれる。このように、加熱要素は溶接速度に対応して斜線部を1個ずつ前進する方法を採用した。また、境界からの熱の損失はこれまでと同様、輻射や溶融金属の潜熱は考慮せず、表面、裏面、側面からの熱伝達のみとした。

以上の方法で得られた結果から、材料の違いによる準定常状態や過渡期における最高温度や温度上昇率の変化を調べ、数値計算から求めた温度分布を用いてその特徴を明らかにした。また、溶接速度のステップ状の変化に対する過渡応答特性はこれまで採用してきた変更点前後の準定常状態の最高温度に対する変化率の他に、温度上昇率の変化率も考慮して材料による過渡応答特性の差を調べた。さらに、熱伝導率、密度、比熱の種々の組み合わせによる数値計算から物性値が過渡応答特性に及ぼす影響を検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 温度曲線における過渡応答挙動

既報³⁾において、溶接条件の変化に対する温度や溶込み形状の過渡応答特性は溶融池の熱輸送特性と母材の熱伝導特性に依存することを明らかにした。このうち、溶融池の変化は直接測定することができなかったが、溶融池と母材裏面の距離が短い中板では、溶融池の変化が母材裏面の温度変化に反映されることを示した。一方、溶接条件の変化に伴う母材の熱伝導は遅れ現象に影響を及ぼし、その挙動は材料の物性値に依存していることが考えられる。ここでは、溶接速度の変化に対する温度の変化を物性値の異なる二つの材料、ステンレス鋼と黄銅と比較し、過渡応答挙動を明らかにした。

Fig. 3は溶接速度の変化に対する温度の時間曲線をTIG溶接実験から求めたもので、図(a)はステンレス鋼の場合で、アーク入熱2.3 kJ/s、溶接速度を4 mm/sから1.1 mm/sに、図(b)は黄銅の場合で、アーク入熱2.9 kJ/s、溶接速度を4.2 mm/sから0.91 mm/sに変化させている。熱伝導率 (673 K で20.7 W/mk) や熱拡散率 (673 K で $4.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) の小さいステンレス鋼では溶接速度

Fig. 3 Temperature change during welding of stainless steel and brass.

変更前の準定常状態と変更後の準定常状態における最高温度の差が大きく、しかも変更後の準定常状態に到達するまでの時間(約80 s)が短くなっている。また、過渡期における温度変化の特徴は最高温度に現れ、変更後の準定常状態に次第に漸近している。これに対し、熱伝導率(673 K で156 W/mk)や熱拡散率(673 K で $3.94 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)の大きい黄銅ではアーク入熱がステンレス鋼より大きいにもかかわらず、溶接速度変更前後の準定常状態における最高温度やその差が小さく、最高温度に到達するまでの温度上昇率も緩やかになっている。過渡期の特徴は最高温度の他に温度上昇率にも現れ、ステンレス鋼に比較すると変更後の準定常状態に到達するまでの時間(約125 s)が長い。これらの挙動は次に示す熱伝導の計算でも現われ、材料の熱伝導特性に依存するものと考えられるが、その他に黄銅では変更点近傍に Fig. 3 (b)の④で示すような最高温度の低下する領域があり、これは熱伝導では説明できない溶融池の局所的な変化によるものと思われる。これについては溶融池の挙動の予測とともに今後の検討課題である。Fig. 4 は同じ材料の溶接線直下裏面における温度変化を有限要素法による三次元非定常熱伝導の計算から求めたものである。溶接条件はいずれもアーク入熱1.51 kJ/s で、溶接速度を溶接開始42.5 s 後に1 mm/s から4 mm/s へ変化させている。Fig. 3 と比較すると、溶接速度の変化が逆になっているため、変更

前と変更後の最高温度や温度上昇率は逆になっているが、過渡期の挙動は実験結果と類似した傾向を呈している。溶接速度の変化に対する温度曲線のこのような過渡応答挙動は最高温度到達時間を一致させて温度曲線を比較すると、その特徴がさらに明確になる。Fig. 5 はその一例として Fig. 4 に適用した結果を示す。準定常状態の温度曲線は上限と下限の重なった温度曲線で、その間の温度曲線から過渡期の変化が観察できる。過渡期の特徴の一つは最高温度で、これは最高温度到達時間(一点鎖線)における温度差や温度曲線の数から判断できる。ステンレス鋼では温度差が大きく、過渡期にあると思われる温度曲線の数すなわち節点の数も少ないことから、溶接速度の変化に対する応答性の良いことが示され、黄銅では最高温度差が小さく、過渡期の温度曲線も密集していることから、応答性の悪いことが確認できる。もう一つの特徴は過渡期における温度上昇の時間的变化、すなわち温度勾配(以下温度上昇率と呼ぶ)と最高温度到達後の温度下降の時間的变化(以下温度下降率と呼ぶ)である。過渡期におけるこれらの値の変化はステンレス鋼では小さく、黄銅では大きいことが示されている。

材料による最高温度や温度上昇率の差は後述するように、材料の物性値に依存すると思われるが、材料表面や内部の温度分布にも現れている。Fig. 6 は変更前後の準定常状態および過渡期における溶接線を含む x-z 断面の温度分布をステンレス鋼では200 K 間隔、黄銅では100 K 間隔で示したものである。Fig. 4 において溶接速度を変化させた時刻は42.5 s であることから、時刻 $t=40, 50, 60$ または 70 s の温度分布はそれぞれ変更前の準定常状態、過渡期、変更後の準定常状態となっている。これらの状態における材料の温度分布の特徴は次のようになっている。ステンレス鋼では変更前の準定常状態で1573 K 以上の温度領域が加熱点近傍にあり、1373 K 以下の温度領域は等温線の間隔が次第に広がって、熱量の集中

Fig. 4 Temperature change calculated by FEM.

Fig. 5 Comparison of temperature change.

Fig. 6 Temperature distribution on longitudinal section passing weld center line.

している領域と分散している領域が分かれている。溶接速度を速くすると、過渡期の50 sでは変更前の準定常状態の温度分布を保持するのに必要な熱量が十分供給されず、熱の再配分が起って、変更前の準定常状態の1573 K以上の領域と同じ大きさを有する等温線は1173 Kとなり、その領域における200 Kごとの等温線の間隔も狭くなっている。60 sの変更後の準定常状態では熱の再配分がほぼ完了し、973 K以上の等温線の広がりや間隔もさらに狭くなっている。これに対し、黄銅では変更前の準定常状態における773, 573, 373 Kの等温線が広い間隔で分布して熱量が広い領域に及んでいることがわかり、加熱点近傍の等温線も773 Kとなって低い。溶接速度が速くなると、これらの等温線が狭くなる傾向はステンレス鋼と同じであるが、等温線の間隔は依然として広い。ここに示した二つの材料における温度分布の差は材料の物性値、特に熱伝導率と熱拡散率に大きく依存し、定性的には次のような影響が考えられる。すなわち、材料内の熱の流れは熱伝導率が小さくなるほど少なく、また加熱点近傍に蓄えられる熱量は熱容量が大きく、温度が高いほど大きい。したがって、熱伝導率や熱拡散率の小さい材料では供給された熱量は拡散されにくいことから、加熱点近傍に集中して温度も高くなる。これに対し、熱伝導率や熱拡散率の大きい材料では供給された熱量は拡散されやすく、その影響は広い範囲に及び、加熱点近傍の温度が低く、等温線の間隔も広くなる。その結果、広い範囲の影響を受ける黄銅では溶接条件の変化に対して広い範囲の温度分布の変化が必要となり、準定常状態に到達するまでの時間も長くなる。そのために熱伝導率、熱拡散率の大きい黄銅の応答性は悪くなることが推察される。しかしながら、熱伝導率と熱拡散率の個々の影響については二つの材料の結果だけでは十分明らかにできない。これについては後述する。

3.2 各種材料における過渡応答特性

溶接速度の変化に対する温度曲線の過渡的变化は材料によって異なり、その特徴は最高温度と温度の上昇率に現れることが明らかとなった。しかしながら、最高温度や温度上昇率は溶接条件の変化量によっても異なり、そ

Fig. 7 Transient response of maximum temperature.

Fig. 8 Transient response of temperature gradient.

の絶対量から材料間の過渡応答特性を比較することは容易でない。そこで、既報^{3,4)}と同様、溶接速度変更前後の準定常状態に対する最高温度と温度上昇率の変化率から過渡応答特性を比較した。これは変更前の準定常状態における最高温度と温度上昇率の値を T_1 , α_1 , 変更後の準定常状態におけるそれぞれの値を T_2 , α_2 , 各々の測定位置における最高温度と温度上昇率を T , α とし、最高温度の変化率 T^* , 温度上昇率の変化率 α^* を

$$T^* = |T - T_2| / |T_1 - T_2|$$

$$\alpha^* = |\alpha - \alpha_2| / |\alpha_1 - \alpha_2| \quad (1)$$

で与えるものである。 T^* および α^* は変更前の準定常状態では1, 変更後の準定常状態では0となり、過渡応答特性は1から0へ変化する割合で評価できる。

Fig. 7は各種材料の過渡応答特性を有限要素法による計算とTIG溶接実験から得られた最高温度の変化率と比較したものである。横軸は変更点からの距離で整理しているが、実験ではアルミニウム合金と純銅の変化率は黄銅と同程度となることや最高温度の変化量が小さいためばらつきがあることから省略している。図から明らかなように、熱伝導率や熱拡散率の小さいステンレス鋼や軟鋼では溶接速度を変更した位置から比較的短い距離で変更後の準定常状態に到達することが示され、応答性の良いことがわかる。熱伝導率や熱拡散率の大きい黄銅や純銅、アルミニウム合金では変更後の準定常状態に到達するまでの距離が長くなって応答性は逆に悪いことを示している。また、実測値は若干のばらつきがあるものの、計算から求めた変化率と比較的よく一致している。

Fig. 8は計算によって求めた温度上昇率の変化率から

各材料の過渡応答特性を比較したものである。温度上昇率は最高温度に到達するまでの6秒間における温度の時間的変化を最小二乗法を用いて求めた。温度上昇率の過渡応答特性はわずかな変動があるものの、最高温度の変化率と同様の特性を示し、ステンレス鋼や軟鋼では応答性が良く、アルミニウム合金、黄銅、純銅では変更後の準定常状態に到達するまでの距離が長く、応答性の悪いことがわかる。ここでは、温度上昇率を最高温度に到達するまでの6秒間で求めたが、その間の温度変化は線形ではなく、また、溶接速度の変化量が異なる場合や温度上昇率を求める時間帯が異なる場合にはその影響が現れる。これらのことを考慮すると、溶接条件の変化に対する過渡応答特性を評価する場合には最高温度の変化率を用いる方が有利である。

3.3 過渡応答特性におよぼす物性値の影響

溶接速度の変化に対する温度の過渡応答特性は材料の物性値に依存し、最高温度や温度上昇の変化率によって把握できることが明らかとなった。しかしながら、材料のどの物性値が過渡応答特性を支配するかは明確にされていない。そこで、熱伝導率と熱容量を変化させた場合の最高温度やその変化率を調べて、過渡応答特性、特に、変更前の準定常状態から変更後の準定常状態へ変化する遅れ現象に及ぼす材料の物性値の影響を検討した。

Fig. 9は熱容量を一定として熱伝導率を変化させた場合の溶接線直下裏面における最高温度の変化と最高温度の変化率を計算によって求めたものである。溶接条件はアーク入熱1.51 kJ/s、溶接速度を1 mm/s から4 mm/s に変化させている。図には物性値を熱伝導率と熱拡散率で示しているが、熱容量が一定の場合、熱伝導率が大きくなると熱拡散率も大きくなり、溶接速度変更前後の準定常状態における最高温度とその温度差は小さくなる。また、最高温度の変化率から求めた過渡応答特性は変更後の準定常状態に到達するまでの距離が長くなって応答性の悪いことがわかる。

移動点熱源による半無限物体の熱伝導解析³⁾による

Fig. 9 Effect of thermal conductivity on maximum temperature and transient response.

と、熱源の位置を原点とした準定常状態における任意の位置 (w, y, z) の温度上昇 T は

$$T = \frac{Q}{2\pi\lambda} e^{-\frac{(v/2\kappa)R}{R}} \quad (2)$$

λ : 熱伝導率, κ : 熱拡散率, Q : アーク入熱, v : 溶接速度, (w, y, z) : 熱源からそれぞれ熱源の進行方向, 板幅方向, 深さ方向にとった位置の座標値, R : 熱源からの距離,

で示される。過渡期の温度上昇も瞬間点熱源の解析解を重ね合わせることで予想できるが、半無限体では温度の変化が無限に続くために定量的な評価は困難となる。したがって、物性値の温度上昇に及ぼす影響を準定常状態でみると、式(2)から熱伝導率と熱拡散率が関係している。準定常状態では温度上昇は熱伝導率が大きくなるほど低くなることを示し、Fig. 9の結果とも一致している。しかしながら、温度上昇は熱伝導率と熱容量の比である熱拡散率にも依存し、熱伝導率のみで温度の特性は説明できない。そこで、アーク入熱と溶接速度の変化量を Fig. 9と同じ条件にして、3種類の熱拡散率に対してそれぞれ2種類の熱伝導率を選び、最高温度と最高温度の変化率による過渡応答特性を調べた。Fig. 10にその結果を示す。図から明らかなように、熱拡散率が同じであれば熱伝導率の小さいほど、また熱伝導率が同じであれば熱拡散率の大きいものほど最高温度が高くなることが示されている。したがって、最高温度に対しては熱伝導率と熱容量あるいは熱拡散率が大きく影響し、熱伝導率や熱拡散率の小さい材料は Fig. 4からも推察されるように、アーク入熱の拡散が小さく、熱源近傍に熱が集中して、材料の温度を高くしている。一方、最高温度の変化率は熱伝導率や熱容量に関係なく熱拡散率にのみ依存し、熱拡散率が同じであれば最高温度に関係なく同じ変化率を示している。このことは最高温度に溶接条件の変化量や物

Fig. 10 Effect of material properties on maximum temperature and transient response.

Fig. 11 Effect of thermal diffusivity on transient response of maximum temperature.

性値による差があっても、過渡応答特性は最高温度の変化率で評価できることを意味している。Fig. 11 は過渡応答特性に及ぼす熱拡散率の影響をさらに詳細に調べたもので、種々の熱拡散率に対する最高温度の変化率を比較している。最高温度の変化率は熱拡散率が小さくなるにしたがい、溶接速度変更点から比較的短い距離で 0 に近づき、変更後の準定常状態に早く到達して応答性の良いことが示されている。熱拡散率が支配的因子となる理由としては熱拡散率が大きくなると入熱量の影響の及ぶ範囲が広く、溶接速度の変化に対する温度場の再分布には広い範囲の変化が必要となり、それに要する時間や変更点からの距離も長くなることが考えられる。

以上の結果から、溶接速度の変化に対する温度の過渡応答特性は熱拡散率に支配されることが明らかとなったが、今後、過渡応答特性に対する材質、板厚、溶接条件などの溶接パラメータの影響や溶融池の挙動あるいは熱輸送特性の影響を統一的に評価できる手法が望まれる。

4. 結 言

本研究では温度と溶込み形状がほぼ同様の挙動を示す板厚 9 mm の中板を対象として、溶接速度にステップ状の変化を与えた場合の温度の過渡応答特性に及ぼす材料

の物性値の影響をステンレス鋼、軟鋼、黄銅、純銅、アルミニウム合金の TIG 溶接実験や有限要素法による数値計算から調べ、過渡応答特性を支配する因子を明らかにした。得られた主な結果は次の通りである。

1) 溶接速度のステップ状の変化に対する温度の過渡的な変化は溶融池の変化によると思われる局所的な変化と、変更前の準定常状態から変更後の準定常状態へ指数関数的に変化する遅れ現象から成ることが熱伝導率、熱拡散率の大きい黄銅でも確認された。

2) 遅れ現象は最高温度の他に温度上昇率の変化にも現われ、その挙動は材料の熱伝導率や熱拡散率に依存する。また、溶接速度変更前後の準定常状態に対する変化率で与えた最高温度と温度上昇の過渡応答特性は類似した特性を示し、熱拡散率によって支配される。

3) 熱伝導率や熱拡散率の大きいアルミニウム合金、黄銅、純銅では溶接速度変更前後の準定常状態における最高温度や温度上昇率は小さく、溶接速度の変化に対しては広い範囲の温度変化を必要とするために最高温度や温度上昇率の変化は緩やかである。また、変更後の準定常状態に到達するまでの距離は長く、約 80~110 mm である。

4) 熱伝導率や熱拡散率の小さい軟鋼やステンレス鋼では準定常状態における最高温度や温度上昇率は大きく、溶接速度の変化に対する過渡応答性も良い。また、変更後の準定常状態に到達するまでの距離は 40~50 mm で短い。

参 考 文 献

- 1) 例えば、大嶋、森田、藤井、山本、窪田：パルス MIG 溶接における溶融池の画像処理とデジタル制御、溶接学会論文集、5-3 (1987)、304-311。
- 2) 例えば、杉谷、西：溶込み深さの最適制御方法に関する基礎的検討、溶接学会論文集、7-1 (1989)、15-21。
- 3) 立川、里中、石橋、橋本：自動 TIG 溶接における温度および溶込み形状の過渡応答挙動、溶接学会論文集、7-3 (1989)、336-340。
- 4) 里中、立川、橋本：自動 TIG 溶接の過渡応答特性に及ぼす溶接条件の影響、溶接学会論文集、8-4 (1990)、439-444。
- 5) D. Rosenthal: Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting, Welding Journal, 20-5 (1941)、220s-234s。