

電縫溶接現象の電磁伝熱有限要素解析

岡部 能知*・剣持 一仁*・坂田 敬*

Electro Magnetic and Heat Conductive FE Analysis on High Frequency Tube Welding Process

Takatoshi OKABE, Kazuhito KENMOCHI and Kei SAKATA

Synopsis : A three-dimensional high frequency tube welding heat model has been developed by using electro magnetic and heat conduction finite element methods. Eddy current density distribution at a static state is calculated by means of a frequency response analytic law. Heat transfer in the tube circumferential and longitudinal direction is calculated with heating and cooling. This model is verified by experiments with laboratory-scale electric resistance welding mill. The analysis has good agreement with the actual measurement. This model can satisfactorily simulate the eddy current density distribution and the temperature distribution in the high frequency tube welding. The influences of welding frequency, welding speed, and magnetic permeability of impeder on a temperature distribution of a tube are quantitatively clarified.

Key words : high frequency; finite element method; electro magnetic analysis; heat conductive analysis; electric resistance welding.

1. 緒言

ラインパイプや自動車の重要保安部品に電縫鋼管が使用されつつある。多くの電縫鋼管は、鋼板をロール成形して、その端部接角部に高周波電流を集中させる高周波誘導溶接により製造される。これら鋼管に要求される品質特性は厳しく、特に溶接部の機械的特性を確保することは重要である^{1,2)}。

電縫鋼管溶接部の品質は、鋼板の材料特性、ロール成形形状、溶接条件、インピーダなどの多くの因子により影響を受けるため、溶接部の品質とこれらの因子との関係は充分明らかにはされていない。

一方、溶接品質を管理する指標としては、溶接部の温度履歴が有効であると考えられている。これまでシーム部の温度を直接測定した報告はあるが、急熱急冷であることや測定環境の厳しさ等により、高精度な計測は難しいとされてきた³⁾。また、溶接現象は複雑であるために、有限要素解析 (FEA; Finite Element Analysis) 等により溶接部の温度を解析した報告はわずかである^{4,5)}。したがって、溶接部の温度分布と上記の諸因子との関係についても不明瞭な点が多かった。

そこで、電縫鋼管溶接部の品質に及ぼす諸因子の影響を明らかにするために、高周波誘導加熱による鋼管の加熱状況を推定できる3次元FE解析手法を開発した。磁場解析により管の渦電流密度分布を計算して、伝熱解析により温度分布を求める解析手法を用いて、電縫鋼管の加熱分布や投入電流に及ぼす溶接機の周波数と溶接速度の影響につい

て検討したので、以下に述べる。

2. 解析モデル

Fig. 1に電縫鋼管製造方法の概要を示す。Table 1に基準の解析条件を示す。管の形状の異なる2条件の解析モデルを作成した。条件1で加熱に及ぼす溶接諸条件の影響を調査した。条件2で、解析モデルに対応する電縫溶接実験を行い、解析精度を検証した。Fig. 2に条件1の磁場解析モデルの全体像を示す。管周方向に対称な1/2モデルであり、Fig. 2はコイルと管部分のみを全周表示している。メッシュは全て四角形要素で構成した。溶接点に相当する部分は、管周方向の厚さが0.01 mmの四角形要素である。管の形状は外径150 mm×板厚3.5 mm×長さ1000 mmであり、コイルの形状は、外径190 mm×板厚10 mm×長さ50 mmである。磁場解析の総メッシュ数は約8万であり、伝熱解析の総メッシュ数は約1000である。

電縫鋼管の溶接現象を解析するにあたり、下記に示されるような特徴や課題がある。

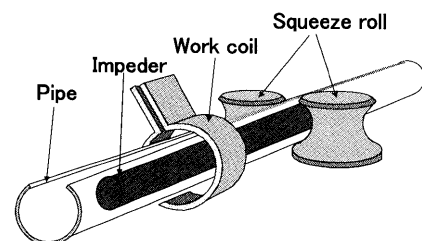


Fig. 1. Manufacturing method of ERW tube.

平成18年10月2日受付 平成18年12月6日受理 (Received on Oct. 2, 2006; Accepted on Dec. 6, 2006)

* JFEスチール(株)スチール研究所鋼管・鋳物研究部 (Tubular Products and Casting Research Dept., Steel Research Laboratory, JFE Steel Corp., 1-1 Kawasaki-cho Handa 475-8511)

Table 1. Analyses conditions.

Conditions	Condition 1	Condition 2
Outer diameter (mm)	150	60
Wall thickness (mm)	3.5	2.5
Welding speed (m/min)	20~100	5.0
Maximum temperature (°C)	1520	1520
V-shape angle (°)	3	3
Frequency (kHz)	10~300	250
Relative permeability of tube	1	1
Cross section area of impeder (mm ²)	1200	500
Relative permeability of impeder	200	200
Inner diameter of work coil (mm)	170	80
Distance from work coil to weld portion (mm)	180	140

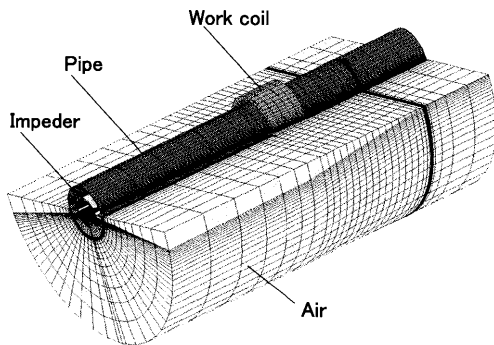


Fig. 2. Outline of electro magnetic analysis model.

- (1) 管が移動しつつ溶接は常に同じ位置で行われる。
- (2) 磁場解析の初期条件として必要なコイルに入力する電流量が実測しにくい。
- (3) 溶接前後の電縫管の形状を、正確に解析に反映させることは難しい。また、形状が複雑になるに伴い、メッシュ作成および解析に膨大な時間を要する。
- (4) 溶融部の物性値には不明なものが多い。また、インピーダや銅管の比透磁率を正確に与えることは困難である。

2.1 磁場および伝熱解析

Fig. 3に解析の概要を、Table 2に解析プログラムを示す。上記(1)について、以下に示す磁場解析法および伝熱解析法を用いた。

溶接中の磁場分布は静止状態の分布と同じと考えて、周波数応答解析法により静止状態の渦電流密度分布を求めた。磁場解析には汎用ソルバーのJMAG-STUDIOによるA-Φ法を使用した。

伝熱解析には、汎用ソルバーのMARC2000を用いた。伝熱解析の概要をFig. 4に示す。長手方向に1メッシュの微小長さを有し、かつ管周方向に全周のメッシュを有する微小体積モデルを作成する。磁場解析により得られる管の渦電流密度データを抽出して、伝熱解析用に、時間の関数として再配列させる。時刻 t_1 における端部のメッシュ d_1 の

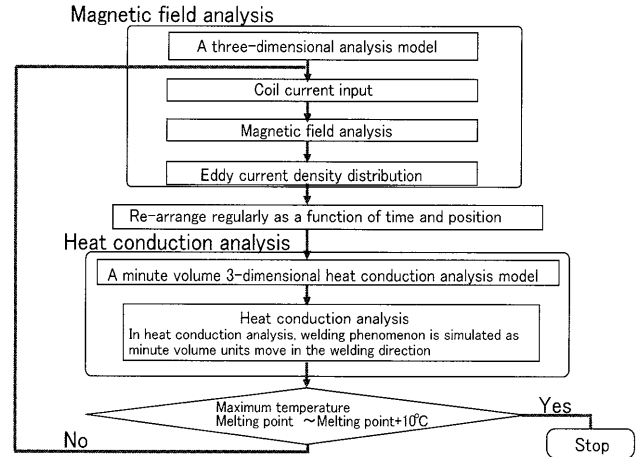


Fig. 3. Analysis flow of electro magnetic and heat conduction FEA.

Table 2. Analytic tools.

Analysis step	Analysis tools
Magnetic analysis pre-post processor	JMAG-studio
Magnetic analysis solver	JMAG-works
Eddy current pick up	Original Model Fortran program
Eddy current re-arrange	Original Model Fortran program
Heat conduction analysis pre-post processor	MENTAT
Heat conduction solver	MARC

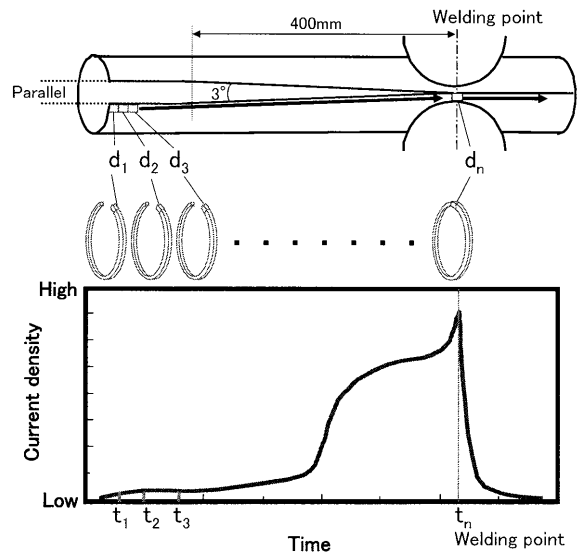


Fig. 4. Outline of heat conduction FEA. (Re-arranged eddy current density data is inputted in each mesh of heat conduction model. Welding phenomenon is simulated as minute volume units move in the longitudinal direction.)

渦電流密度データを d_1 に入力する。このように、時刻 t_1 において、微小体積モデルの各メッシュに、対応する渦電流密度データを入力する。 t_1 では常温の物性値を用いて伝熱

解析を行い、微小体積モデルの温度分布を求める。次に、時刻 t_2 における端部の渦電流密度データをメッシュ d_2 に入力する。同様の方法で、 t_2 の各メッシュに、対応する渦電流密度データを入力する。 t_1 で計算された温度分布を初期値として t_2 の伝熱解析を行い、 t_2 の微小体積モデルの温度分布を求める。時刻 t_3 では、 t_2 で計算された温度分布を初期値として伝熱解析を行う。これを繰り返すことにより、管全体の温度分布を求めた。

発熱量は、渦電流密度の二乗と電気抵抗率の積として計算した。管の表面からの放冷計算には以下の方法を用いた。管の外部への熱伝達機構としては、通常の空気への伝達とふく射熱伝達が考えられる。管の温度が低い領域では両者の効果はほとんど無視できるが、高温域ではふく射による熱損失が増加すると考えて、本解析ではふく射による伝熱のみを考慮した。ふく射の伝熱係数 h は、管の温度 T_s 、大気温度 T_a 、ステファン-ボルツマン定数 σ 、係数 A を用いて(1)式より求めた⁶⁾。

$$h = \sigma A (T_s^2 + T_a^2) (T_s + T_a) \dots \dots \dots (1)$$

管の外表面と内表面と端面を境界条件として、各節点について伝熱解析で求められる T_s を(1)式に代入して h を求めた。係数 A は全放射率と形態係数の積であり、管の形状や測定環境等により変化する値であるが、正確な値を求めることは難しいことから、本解析では $A=0.6$ で一定にした。大気温度 T_a は 25°C とした。

解析に用いた物性値として、各温度の比熱と熱伝導率と電気伝導率をTable 3に示す。各温度間の物性値はTable 3の値を線形補間して求めた。密度は温度によらず 7850 kg/m^3 とした。

2.2 コイル電流

初期値として所定の電流をコイルに入力して磁場解析と伝熱解析を行い、溶接部の最高加熱温度を求める。その結果をもとに、再びコイルに入力する電流値を変更して上記

の解析を行い、溶接部の最高加熱温度を求める。これを繰り返して、溶接部の最高加熱温度が融点~融点 $+10^\circ\text{C}$ の範囲になるまで収束計算した。本解析では、いずれも約5回程度の繰り返し計算を要した。

2.3 鋼管の形状

電縫溶接部は複雑な3次元の形状変化を伴う。管の加熱分布に及ぼす溶接諸条件の影響を定量化するうえで、十分な解析精度を有して、かつ、メッシュの作成時間および解析時間を短縮すべく、以下のようにモデルを単純化した。

長手方向の各断面において、管は同一半径の円弧形状であり、ロール成形から溶接点に至るまで円弧の角度は増加する。Fig. 4に示すように、溶接点の400 mm手前までの端面は 3° を保つ直線であり、それより手前の端面同士は平行である。スクイズロールの加圧に伴う形状変化は考慮していない。

2.4 溶接部の物性値

電縫溶接の溶融量は一般の溶融溶接法に比べて少ないことと、加熱分布に及ぼす溶融部の物性値の影響は小さいと考えられることから、溶融部の物性値を無視しても十分な精度は確保できると考えられる。融点以上の物性値は、比熱と熱伝導率と電気伝導率についてはTable 3の 1500°C の値を用いて、密度は 7850 kg/m^3 として解析した。

次に、鋼管の比透磁率について示す。周波数300 kHzにおける α 鉄の比透磁率は約200で浸透深さは約0.03 mmであり、 γ 鉄の比透磁率は約1で浸透深さは約0.8 mmである⁷⁾。磁場解析の精度を確保するためには、端部の管周方向のメッシュ厚みを浸透深さの1/3以下にする必要があり、 α 鉄では0.01 mm以下、 γ 鉄では0.2 mm以下のメッシュが要求される。

低温では α 鉄である低炭素低合金鋼の解析には、端面を全て0.01 mm以下のメッシュにしたモデルを作成して、磁場解析と伝熱解析を繰り返し計算し、磁場解析の比透磁率を決定しなければならないが、これには膨大な計算時間が必要になる。

一方、全ての温度において鋼管の比透磁率=1として計算した場合、 α 鉄の解析には誤差が生じるものの、 γ 域以上に加熱された部分の解析精度は確保されと考えられる。そこで、解析時間を短縮するために、今回は全ての温度において鋼管の比透磁率=1として、端部のメッシュ厚み=0.1 mmとして計算した。また、インピーダの比透磁率は200と仮定して計算した。

3. 実験方法

Table 1の条件2に相当する電縫溶接実験を行い、溶接後の溶接部の外表面温度を放射温度計により測定した。実験材には0.15mass% C-0.2mass% Si-1.0mass% Mnの鋼板を使用した。管の外径は60 mmで板厚は2.5 mmである。250 kHz

Table 3. Physical properties value of heat conduction FEA.

Temperature ($^\circ\text{C}$)	Specific heat (J/kg \cdot K)	Thermal conductivity (W/m \cdot K)	Electrical resistance rate (m \cdot μ Ω)
0	469	59.4	0.12
200	519	53.6	2.54
400	594	44.7	4.64
600	745	36.0	7.50
700	854	31.8	9.50
750	1138	29.7	10.1
800	962	28.5	10.6
900	812	26.7	11.3
1000	653	27.7	11.7
1100	661	30.0	12.0
1200	661	29.7	12.2
1300	669	29.7	12.5
1500	753	34.3	13.9

の高周波誘導加熱装置を用いて速度 5 m/min で溶接した。溶接部の温度測定には、2048 画素の CCD シリコンリニアアレイの検出素子を有する一軸走査型放射温度計を用いた。放射率は 0.8 とした。電縫溶接後の管長手方向の 3 箇所に温度計を設置して、電縫溶接部を中心に管周方向に約 50 mm 区間の温度を測定して最高加熱温度を求めた。電縫溶接部の断面を 3% ピクリン酸溶液で腐食して板厚中央部の Heat-Affected Zone (HAZ) 幅を測定した。

実験と Table 1 の条件 2 の FE 解析により求められる、溶接部の温度と HAZ 幅を比較して、FE 解析モデルを検証した。

実験では、溶接時にスクイズロールにより加圧されて塑性変形したあとの HAZ 幅が測定される。一方、FE 解析ではスクイズロールによる加圧前の HAZ 幅が計算される。両者の HAZ 幅を以下に示す方法で比較した。溶接前後の管の外周長の差を測定することにより、中立軸の長さの変化量 a を求める。 a はスクイズロールによる管全体の絞り量である。その大部分は変形抵抗の小さい高温加熱部であると考えられる。 a は加圧による HAZ 幅の変化量であると仮定した。FE 解析で計算される加圧前の中立軸の HAZ 幅から a を除去した値を、FE 解析の加圧後の HAZ 幅として、実験値と比較した。

4. 解析モデルの検証

4.1 FE 解析結果と実験結果の比較

Fig. 5 に、電縫溶接部の外表面の冷却曲線の解析値と実測値を示す。何れの位置においても実測値と解析値の温度差は 10°C 以内であり、ほぼ合致している。

Fig. 6 に実験と解析の HAZ 幅を比較した結果を示す。FE 解析結果のほうが実験結果よりもやや広いものの誤差は 10% 以内である。この誤差は、 α 域の鋼管の比透磁率を考慮していないことと、実験時のアプセット量の測定誤差等により生じたと考えられる。以上の結果より、解析値は実測値とほぼ合っていると考えられる。

4.2 磁場解析および伝熱解析結果

Fig. 7 に、磁場解析例として、Table 1 の条件 1 の周波数 300 kHz で溶接速度 100 m/min における渦電流密度分布図

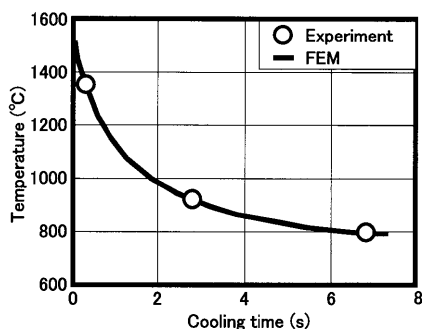


Fig. 5. Cooling curve of welded seam temperature.

を、Fig. 8 に溶接部の拡大図を示す。高周波誘導加熱による渦電流は、コイル直下の管の円周面と、コイル直下から溶接点までの端面に回路を形成して流れることが知られている⁷⁾。コイル直下の端面同士が離れている部分では、表皮効果により管の端面のほうに管全体に比べて渦電流密度は大きくなる。溶接点に近づくに伴い、端面同士は接近するために、表皮効果に加えて近接効果が現れて、端面の渦電流密度はさらに増加するとされている⁷⁾。

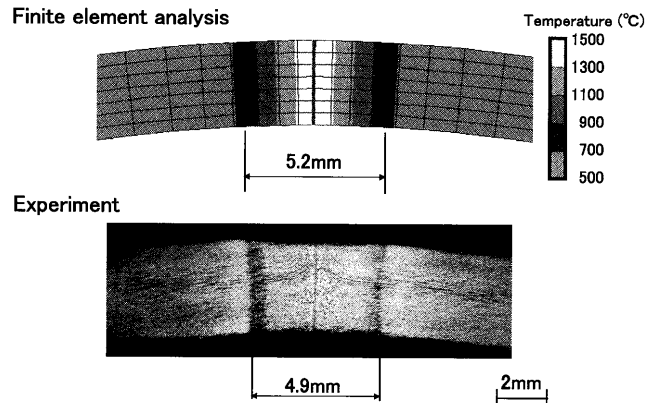


Fig. 6. The width of heat-affected zone.

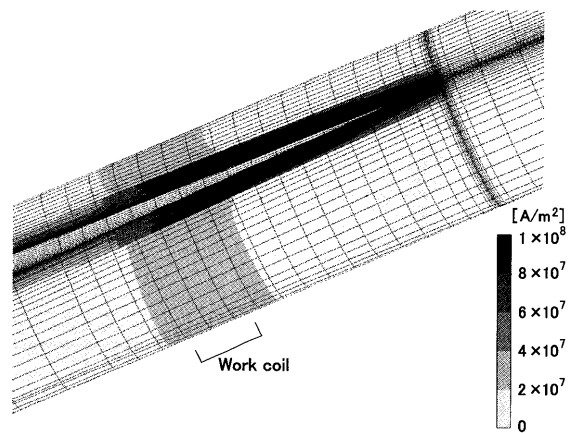


Fig. 7. Contour map of eddy current density.

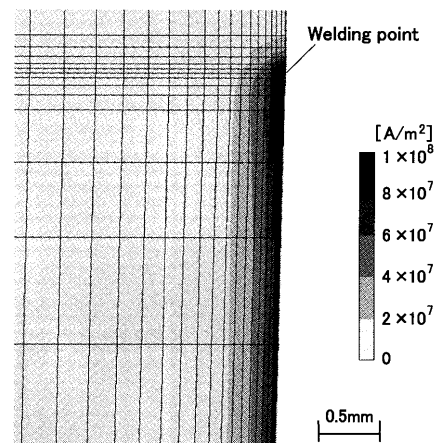


Fig. 8. Eddy current density distribution of welding portion.

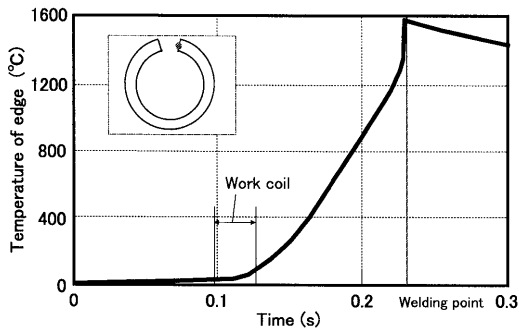


Fig. 9. Relationship of the temperature of edge and time.

Fig. 7より、電流密度はコイル直下と端部に集中しており、コイル直下では管周方向全体に約 10^7 A/m²程度の渦電流が流れていると推定される。コイルの入側から端面に渦電流は集中しており、コイル出側の端面は約 10^8 A/m²程度である。コイル出側から溶接点にかけて端面の電流密度は増加する。Fig. 8より、端面の電流密度は溶接点で最も高くなる。溶接点を超えると急速に電流密度は減少して、溶接点より0.2mm出側では 10^7 A/m²以下になる。Fig. 7とFig. 8より、従来から知られている高周波誘導加熱時の渦電流の挙動とよく合致した解析結果が得られていると考える。

Fig. 7の磁場解析結果をもとに伝熱解析を行い、端面の温度を解析した結果をFig. 9に示す。端面はコイル中央部より加熱され始め、コイル出側から溶接点入側にかけて直線的に温度上昇して、溶接点直前から溶接点にかけてさらに急激に温度上昇したのち徐々に低下する。

Fig.10に端面および溶接面からの各位置における外表面の等温線図を示す。1000°C以上の高温部では溶接点で最高加熱温度であり、溶接点で管周方向に最も広く加熱されている。溶接点を超えると、Fig. 7に示されるように渦電流はほとんど生じないために、長手方向および管周方向ともに冷却される。一方、900°C以下の、たとえば200°Cに加熱される等温線は、最初に溶接点より約0.5m手前の端面が加熱されて、溶接点では管周方向に約3.5mm加熱される。溶接点以降も管周方向の加熱は進み、溶接点から0.5m出側では約5mm加熱される。200°Cに加熱される部分は、溶接点以降も熱伝導により管周方向に加熱されると考えられる。HAZ部に相当する800°Cに加熱される部分は、溶接点では管周方向に約1.6mmであるが、溶接点より0.2m過ぎたところでは管周方向に約1.7mm加熱される。800°C以上の領域をHAZ部と仮定した場合、HAZ幅は片側1.7mmになる。つまり、溶接点におけるHAZ幅に比べて、片側につき0.1mm程度、HAZ幅は広がると考えられる。

このように、電縫溶接部のHAZ幅は溶接点の温度分布を表しておらず、溶接後の熱伝導によりHAZ幅は変化していると考えられ、その変化量は溶接条件や管形状により

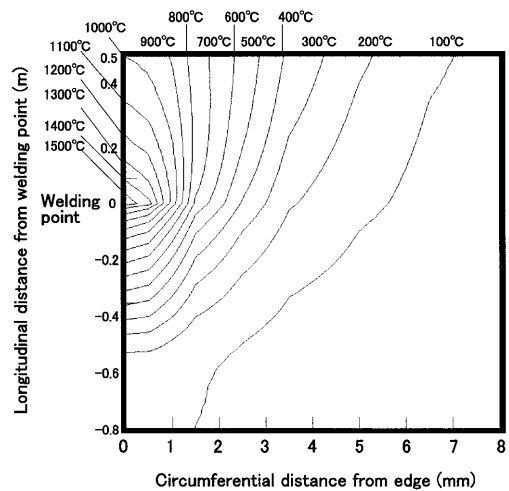


Fig. 10. Temperature distribution of outer surface.

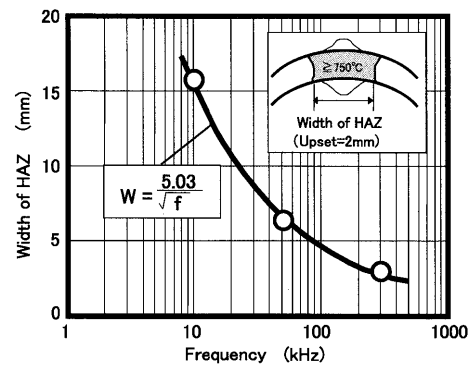


Fig. 11. Effect of frequency of welder on the width of heat-affected zone.

異なると推測される。

5. 本解析を用いた応用例

Table 1の条件1において、周波数 f と溶接速度 v をそれぞれ3水準変化させて解析を行い、管の加熱に及ぼす f と v の影響について調べた。Fig.11に、 $v=50$ m/minとして、溶接点のHAZ幅に及ぼす f の影響を解析した結果を示す。 f の増加に伴いHAZ幅は減少し、 $f^{1/2}$ に反比例すると考えられる。渦電流の浸透深さも $f^{1/2}$ に反比例することから、HAZ幅と浸透深さとは良い相関があると考えられる。

Fig.11の解析条件において、溶接部を融点まで加熱するために必要なコイル電流量と f の関係をFig.12に示す。 f の増加に伴いコイル電流は減少する。これはFig.11に示されるHAZ幅の変化と同様の傾向である。 f の増加により、近接効果は強まり、端面は電流密度が集中して有効に加熱される。その結果、少ないコイル電流すなわち低い溶接入熱で溶接可能になると推察される。

Fig.13に、 $f=50$ kHzと300 kHzのそれぞれについて、加熱に必要なコイル電流と v の関係を示す。 v の増加に伴いコイル電流は増加する。電流の二乗は電力に比例し、電力

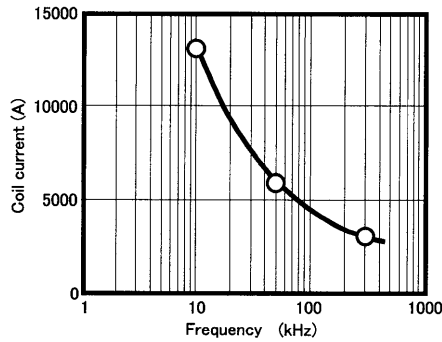


Fig. 12. Effect of frequency of welder on the coil current.

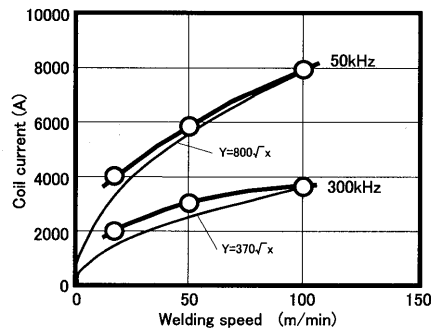


Fig. 13. Effect of welding speed (m/min) on the coil current.

は v に比例すると考えた場合⁷⁾、コイル電流は $v^{1/2}$ に比例することになる。この関係式を図中に示す。50 kHzと300 kHzともに、 v が低下するに伴い関係式とのずれは大きくなる。低速では関係式よりも多くのコイル電流が必要になると推測される。 v の低下に伴い、加熱時に端面から管周方向への熱伝導が大きくなるために、より多くのコイル電流が必要になると考えられる。

5. 結言

高周波誘導加熱による鋼管の溶接部の加熱状況を解析可能な3次元FE解析手法を開発した。本法により、従来から定性的に述べられていた現象を定量化することが可能となり、実験に要する時間を短縮するとともに、実験困難な

現象についても解析することが可能になった。

(1) 周波数応答磁場解析法により管の渦電流密度を計算して、管の長手方向と周方向について熱収支計算を行う電縫溶接部の温度解析手法を開発した。本解析により、電縫鋼管溶接部の渦電流密度分布と温度分布が明らかにされた。

(2) 渦電流密度は、コイルの入側から管の端面に集中し始めて、コイル出側から溶接点にかけて増加する。溶接点で最大値となり、溶接点を超えると急速に減少すると考えられる。

(3) 管の端面は、コイル中央部より加熱され始めて、コイル出側から溶接点入側にかけて直線的に温度上昇して、溶接点直前から溶接点にかけてさらに急激に温度上昇したのち溶接点を超えると徐々に温度は低下すると考えられる。

(4) 実験に対応する解析を行い、冷却速度とHAZ幅を比較して、解析は十分な精度があることを確認した。

(5) 管の形状や物性値などを単純化して解析時間を短縮した。溶接部の最高温度が融点~融点+10°Cになるまで繰り返し計算して、加熱に必要なコイル電流を求めた。

(6) 溶接機の周波数 f に及ぼすHAZ幅の影響を解析した結果、HAZ幅は $f^{-1/2}$ とよい相関があった。

(7) 電縫溶接時のコイル電流に及ぼす、溶接速度と周波数の影響を解析して、これまで定性的に知られていた現象を定量化した。

文 献

- 1) T.Katanosaka: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **123** (1982), 736.
- 2) M.Tatsuwaki, T.Takamaka and I.Horita: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 1045.
- 3) S.Izuro, Y.Enomoto, I.Takahashi, I.Komine, Y.Mihara and K.Suzuki: *NKK Tech. Rep.*, **113** (1986), 19.
- 4) H.-J.Lessmann and A.Muiznieks: *Tube Pipe Technol.*, **6** (1993) 5, 83.
- 5) T.Toyoda, T.Miyakawa, K.Ueyama and T.Morisue: *CAMP-ISIJ*, **5** (1990), 542.
- 6) 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門, 丸善株式会社, 東京, (1985), 336.
- 7) 高橋勘次郎, 深町成一, 渡辺哲哉, 久保田喜郎: 高周波の工業への応用, 東京電機大学出版局, 東京, (1979).