

高周波誘導加熱を用いた板材の曲げ加工プロセスの定量化

京都大学大学院 エネルギー科学研究科 エネルギー変換科学専攻

助教授 今谷勝次

(平成9年度奨励研究助成 AF-97025)

キーワード：曲げ加工，高周波誘導加熱，有限要素法

1. 研究の目的と背景

船舶の外板は、一般に板厚が10~30mm程度の板材から構成されているが、特に船首や船尾部では、プレス機械では成形できない非常に複雑な曲面をもっている。このような曲板を形成するにあたっては、古くから「線状加熱曲げ加工」と呼ばれる手法が用いられてきた。この手法は、ガスバーナーなどの加工熱源を用いて厚板鋼板の表面を局所的に加熱し、それによって生じる熱応力によって曲げ変形を達成しようとするものである。従来の線状加熱曲げ加工では、熟練工による手作業がほとんどであり、加工プロセスの熱・力学的把握(1),(2)およびそれに基づく種々の曲げ変形の理論的な解明が望まれている。

図1に示すように板材の表面近傍が局所的に加熱された場合を考える。温度変化が大きいため板厚方向および板幅(平面)方向に大きな温度勾配が生じる。このとき加熱部近傍で圧縮の熱応力が生じ、温度上昇によって降伏応力が低下することとあいまって、部材の一部が降伏する。加熱部分を適当な速さで移動するとともに周囲を冷却することによって、曲げ変形を得ることができる。ここでの変形は温度変化による線膨張に支配されるので約0.5%程度であるが、特別な工具を必要としないので板厚の大きくプレスでの加工が困難なものでも比較的簡単に加工ができる特長を持つ。

通常の線状加熱曲げ加工ではガスバーナーが用いられることが多いが、入熱の再現性で問題があり、安定した熱源の導入が不可欠である。このような観点から、本研究では曲げ加工原理の解明とその数値解析による変形挙動の把握を試みた。解析では、高周波加熱によって板材に生じる渦電流解析、渦電流から生じるジュール熱による非定常熱伝導解析、さらに温度変化による熱弾塑性変形の解析を行い、一連のプロセスでの入・出力系の評価と最終的な曲げ変形を検討した。また高周波誘導加熱を熱源とする曲げ加工装置を用いて、実際の曲げ変形と比較検討した。

2. 解析の基礎式

2.1 渦電流解析

渦電流場の支配方程式は Maxwell の方程式である。これ

を数値的に解く方法はいくつかあるが、ここではベクトルポテンシャル A と電気スカラーポテンシャル ϕ を未知数とする(3)。最終的には

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = -J_0 + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (1)$$

を解くことになる。ここで μ は比透磁率、 σ は電気伝導率であり、 J_0 はコイルに流れる強制電流の密度である。高周波電流のような周波数の高い交流を扱う場合には、ベクトルポテンシャルの時間変化に複素近似法が用いられる。このとき式(1)の右辺第2項は

$$\frac{\partial A}{\partial t} = j\omega A \quad (2)$$

と表わされるので、時間増分を取る必要はなく、すべての変数を複素数で表わし、単位時間あたりの諸量が算出される。ここで ω は周波数であり、 j は虚数単位である。これらを通常の手続きにしたがって有限要素法に適用した。

得られたベクトルポテンシャルから鋼板表面近傍に生じる渦電流 J を評価するにあたっては、

$$J = -j\omega \nabla A = \omega \sigma (jA_R \cos \alpha x + A_T \sin \alpha x) \quad (3)$$

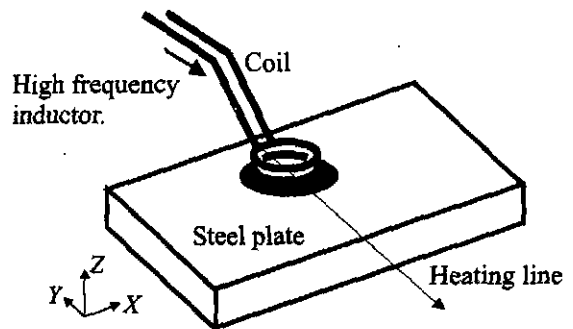


図1 平板における局所加熱と熱応力

とすればよい。\$A_R\$は複素数値\$A\$の実部であり、\$A_I\$はその虚部を表わしている。渦電流から単位時間あたりのジュール熱\$Q\$を算出するには、瞬間のジュール熱\$J^2/\sigma\$の時間平均をとり、

$$Q = \frac{\sigma \omega^2}{2} (A_R^2 + A_I^2) \quad (4)$$

を用いた。このように電磁場の支配方程式を解く際には現象論的な数値はまったく不要である。ただし、解析領域は鋼板だけでなく空間も含んだすべての領域を解析対象とするので、本研究対象の場合、原理的に3次元の解析が不可欠となる。

2. 2 非定常熱伝導解析

上式で得られる熱量\$Q\$を湧き出しとする熱伝導方程式は、

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (5)$$

で表わされる(4)。ここで\$\rho\$は密度、\$c\$は比熱、また\$k\$は熱伝導率であり、温度\$T\$を求めることになる。境界条件として適当な対称性を利用すると、厚板鋼板の中央断面で断熱境界、その他は熱伝達境界となる。実際の曲げ加工では水による強制冷却を伴うが、本研究では周囲の空気による自然冷却とした。有限要素法での取扱いでは、上式を離散化した後、Crank-Nicolson法を用いて時間について半陰的な差分近似を行った。ここでも解析対象は3次元とし、各点における温度データを次の熱弾塑性解析に供した。

2. 3 熱弾塑性解析

解析対象とする鋼板の熱弾塑性変形の特徴は次のとおりである。

1. 熱ひずみによる変形であり、ひずみは比較的小さい。
2. 板厚方向に温度分布があり、3次元的な変形である。
3. 熱応力による曲げ変形が支配的である。

このような変形を効率的に解析するために、ここでは微小変形の平面応力問題であるとし、Mindlinタイプの厚板要素(5)を用いることとした。これによって3次元ソリッド要素を用いるよりもはるかに少ない要素数で精度のよい解析が可能となる。このとき、各節点あたりの自由度は変位3と中立面上の回転角2の合計5である。構成関係としては、等方線形熱弾性と移動硬化を考慮した線形硬化塑性体とした。本研究では比較的小さいひずみでの応力ひずみ関係の精度が重要となるが、ここでは簡単のために加工硬化係数は一定として取り扱った。

3. 解析プロセスと解析結果

3. 1 解析手続

これまでに述べてきたそれぞれの手法をすべて結合す

ることで実際のプロセスが解析できることになるが、極めて複雑な連成関係となっており簡略化が不可欠である。ここでは次のように個々のデータをハンドリングして最終的な変形を算出することにした。一連の手続きを図2にフローチャートとして示す。

まず、渦電流解析のために空間を含む1/4の領域に対して3次元の有限要素分割を施し、鋼板中に生じる渦電流を求めた。その結果からジュール熱の分布を次式で近似した。

$$Q = Q_{max} \exp[-ax^2 - b(y - v_c t_k)^2 - cz] \quad (6)$$

ここで、\$Q_{max}\$、\$a\$、\$b\$、\$c\$は定数であり鋼板の板厚に依存するとした。\$v_c\$はコイルの走査速度であり、\$t_k\$は時間である。コイルの走査方向を\$y\$、板厚方向を\$z\$としている。

つぎに熱伝導解析では、このジュール熱の湧き出し分布が平行移動すると考え、非定常熱伝導方程式(5)をコイルが端から中央に至るまでを3次元解析し、コイルの走査途中での温度分布を決定した。得られた全領域の節点温度を離散化データとして応力解析に供した。したがって鋼板端部での著しい表皮効果は現われないことになる。また、熱伝導解析では比熱や熱伝導率は温度の関数としているものの、渦電流解析では材料定数を一定としているため、温度が上昇したときの電気伝導率の低下を表わすことができない。実際の加工では磁気変態点(700℃)を越えることはないものの、電気伝導率が低下することは明らかであ

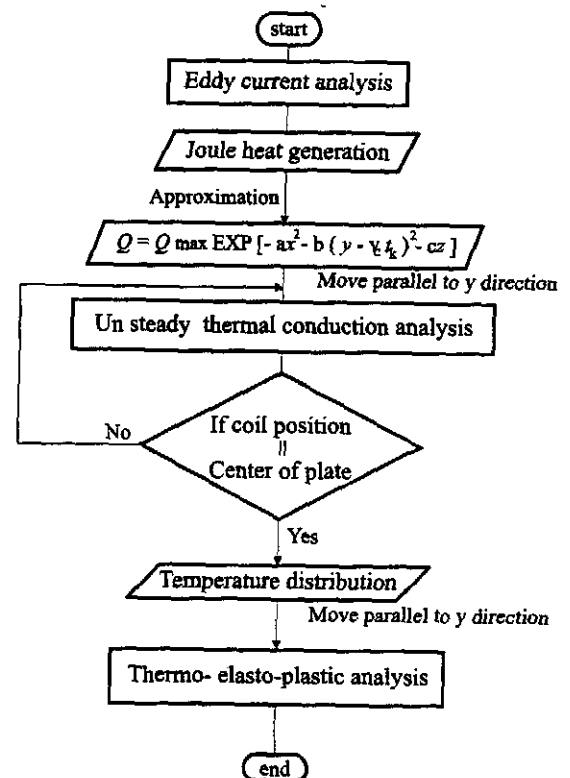


図2 解析のフローチャート

り、渦電流解析の結果をそのまま用いるとジュール熱が過小評価される。このような欠点を補うために、次節で述べる実験で得られた最高温度をよく表わすように、 Q_{max} の値を調節した。

節点温度を内挿補関して応力解析での積分点位置での温度データを求めた。この温度分布がコイル走査方向 y に平行移動するとして、応力解析での境界条件とした。このときも弾性係数や降伏応力は温度依存性を示すものの鋼板端部特有の温度変化は考慮されないことになる。

3. 2 解析結果

有限要素法で得られた渦電流密度に基づいてジュール熱に換算したのが図3である。よく知られているように、表皮効果のため渦電流は導電体の表面近傍、特にコイルの直下に著しく現れ、それがジュール熱となっていることがわかる。ただし本解析では要素分割が粗いようであり、実験での円筒形状のコイルを再現していないため、得られたジュール熱の分布でも円筒状の分布が得られているとは言い難い。

このジュール熱を式(6)で近似して板厚 12mm の鋼板中の非定常熱伝導解析結果が図4である。図(a)はコイルの

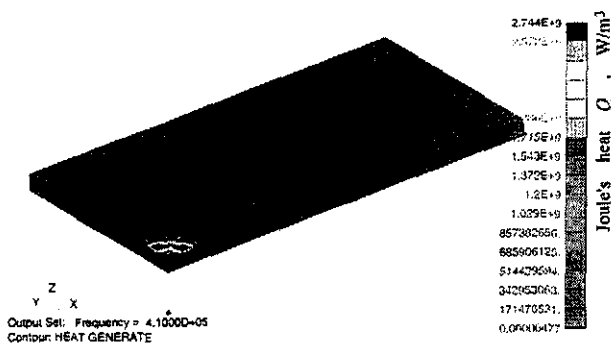
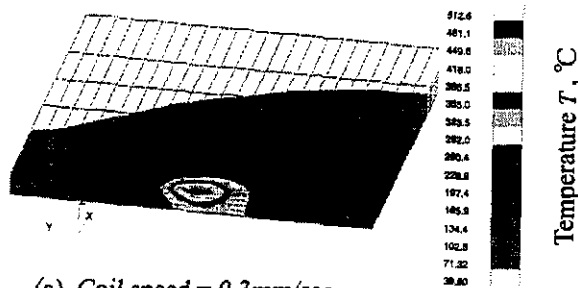
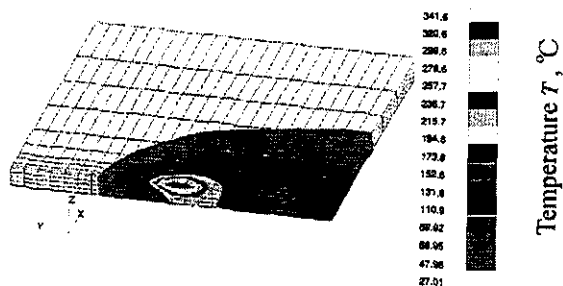


図3 渦電流解析におけるジュール熱の分布



(a) Coil speed = 0.3mm/sec.



(b) Coil speed = 1.0mm/sec.

図4 非定常熱伝導解析における温度分布

走査速度が 0.3mm/s であり、中央部だけでなく周囲まで温度が上昇しているのがわかる。図(b)はコイルの走査速度を 1.0mm/s とした場合である。周囲への温度分布の広がりが限られたものとなっているだけでなく、中央部の最高温度も図(a)より 200°C 近く低いことが示されている。鋼板の加工では変態点を越えてはならないが、十分に曲げ変形を与えるためには、少なくとも板厚方向に大きな温度変化（温度勾配）が必要であり、局所的に大きな加熱と周囲特に裏面からの強制冷却が不可欠である。従来のがスパーナーによる作業が熱・力学的に合理性を持っていることが伺える。

板厚 12mm でコイル走査速度を 0.3mm/s としたときの鋼板の曲げ変形を図5に示す。対称性を考慮して走査軸 y 上を中心 ($x=0$) にしてある。明らかに曲げ変形が予測されており、線状加熱加工が原理的には局所加熱と温度勾配によって塑性変形が誘起されるものであることを証明している。150mm × 300mm の鋼板について一度の走査で 0.1mm 程度の曲げ変形を受けることになる。これらの結果を次節での実験結果と比較する。

3. 3 曲げ加工実験

実験装置の概要を図6に示す。本装置では加熱コイルを固定して試験体鋼板（寸法 150mm × 300mm の S45C）をアクチュエータで移動する構成である。コイルで加熱した

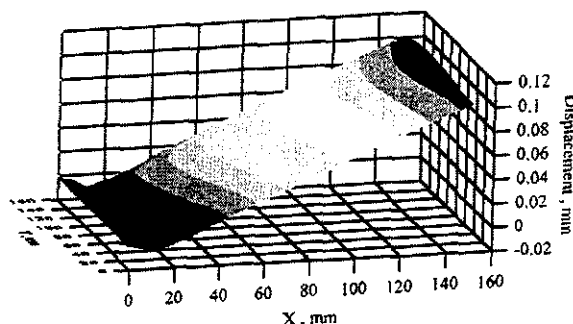


図5 熱弾塑性解析による曲げ変形

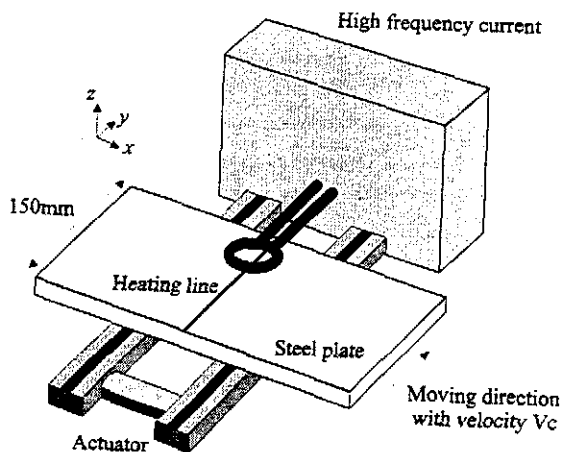


図6 実験装置の概要

から試験体を移動する際に、鋼板内の温度分布を測定するため、熱電対を加熱面上、中央部および裏面にスポット溶接を施し9点での温度の時系列データを得た。実際の線状加熱曲げ加工では、加熱源を何度も走査し、冷却を繰り返しながら目的とする形状に加工していくが、本研究は加工原理の検証を目的とする観点から、試験体を1回走査した後、レーザー変位計で鋼板の凹凸を測定し、曲げ変形量を求めた。

温度測定の結果の例を図7に示す。图中、実線が実験結果であり、点線が解析結果を表わしている。実験では一般に温度が高く、加熱源直下からやや離れた位置でも温度が高いだけでなく、加熱源が通過した後も冷却速度が小さいようである。解析結果では温度勾配が大きくなっていることがわかる。この結果の差異は、鋼板端部での表皮効果と電気伝導率の温度依存性にあると考えられる。また、非常常熱伝導解析における熱伝達係数も鋼板の冷却に大きな影響を与える。これらの結果は、次の応力解析での曲げ変形の予測に大きな影響を与えると考えてよい。

1回の試験体の走査で得られる鋼板の曲げ変形の鳥瞰図を図8に示す。板厚と走査速度は図5と同じであり、寸法も同じである。板厚は12mmである。実験で得られた曲げ変形量は、解析で予測される変形より数倍も大きくなっていることがわかる。この原因としては、温度の境界条件(時系列データ)での差異を挙げることができる。数値解析では加熱部周囲の温度がやや低く見積もられており、これによって変形解析での曲げ剛性が増大する。したがって変形が小さくなる。また、ここでのひずみは小さく0.5%であることにも注意が必要である。解析モデルは比較的簡単な線形加工硬化体としているが、実際のプロセスでは降伏応力をわずかに越えた領域での応力-ひずみ曲線が変形に支配的な影響を及ぼす。したがって、構成式の近似精度によってもるためと考えている。

4. 結論

これまで熟練作業に頼っていた線状加熱曲げ加工について、加工原理の確認と理論的な解析の可能性を検証するとともに、高周波誘導加熱による曲げ加工実験を行って数値解との比較を試みた。おもな結果は以下のとおりである。

- (1) 線状加熱曲げ加工は、局所的な加熱と周囲の拘束による熱応力によってなされる加工法である。したがって、加熱源としてはガスバーナーに限ることはなく、再現性のよい加熱源を任意に選んでよい。むしろ適切な加熱源を用いることによって、プロセスの最適化をはかることが可能である。
- (2) 本加工法は板厚方向への温度勾配を利用したものであるから、加熱源と冷却を適切に選ぶことによって薄板の曲げ加工にも適用することができる。
- (3) 加熱源として高周波誘導加熱を用いた場合、曲げ加工は磁場・温度・応力の連成した問題として取り扱うことができる。実際の曲げ加工プロセスを数値解析によって評価

するためには、各種材料パラメータの温度依存性、さらに正確な応力-ひずみ関係を用いることが必須となる。

(4) 本研究で用いた解析方法は、各種のプロセスを極めて簡略化したものであり、実際の変形とは数倍もの差異が観察された。今後、連成解析手法を導入することで、定量的な評価につながることを期待できる。特に温度と応力の連成解析は、最終的な製品形状を決定するために必要不可欠な要素技術となる。

5. 謝辞

本研究の一部は、平成9年度天田金属加工機械技術振興財団研究助成(AF-97025)によることを記し、深甚の謝意を表します。

6. 参考文献

- (1) 石川, 機械設計, 15-5 (1971) p.77.
- (2) 上田, 村川, R.Mohamed, 日本造船学会論文集, 170 (1991) p.577.
- (3) 坪井, 内藤, 数値電磁解析法の基礎, (1994) 養賢堂.
- (4) 例えば O.C.Zienkiewicz, The Finite Element Method, 1, (1988) p.261, McGraw-Hill.
- (5) 例えば O.C.Zienkiewicz, The Finite Element Method, 2, (1991) p. 66, McGraw-Hill.

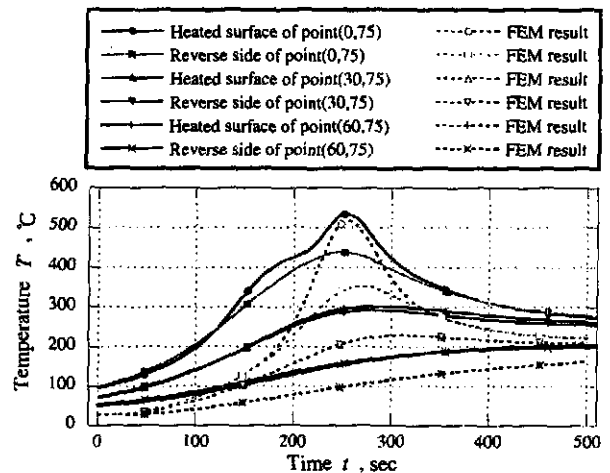


図7 実験における温度測定結果

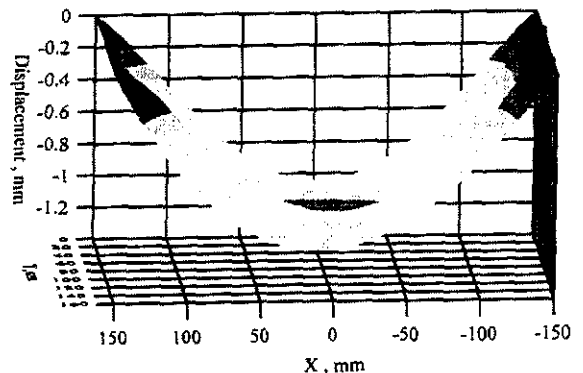


図8 実験における鋼板の曲げ変形