

局所加熱による厚板の曲げ加工プロセスの解析

今谷勝次*

1. はじめに

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、プレス機械では加工できない非常に複雑な曲面を持っている。このような曲板を形成するにあたっては、「線状加熱曲げ加工」と呼ばれる手法が用いられている(1)(2)。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部的に加熱し、それによって生じる熱応力で曲げ変形を行お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、プロセスの高度化と自動化が望まれている(3)(4)。

ここでは加熱源として安定性と再現性に優れた高周波誘導加熱装置を用い、実験的検証による曲げ加工原理の解明と有限要素法による板材の変形挙動の解析を試みた。解析にあたっては、高周波誘導加熱に伴う渦電流解析、渦電流から生じるジュール熱を発熱源とする非定常熱伝導解析、さらに温度変化を考慮した熱弾塑性解析を行い、一連の加工プロセスの入・出力系の評価と曲げ加工量を検討した。

2. 線状加熱曲げ加工の原理

本加工法の原理を図1に示す。板材の表面近傍が局部的に加熱されているとき(図(a))、温度変化が大きいので板厚方向と板平面方向に大きな温度勾配が生じ、加熱部近傍では圧縮の熱応力が生じる(図(b))。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厚板の一部が降伏し、板面方向に圧縮の塑性変形が発生する(図(c))。周囲を冷却しながら加熱部分を適当な速さで移動することによって残留ひずみが生じるが、これが板材の曲げ変形となる(図(d))。ここでのひずみは線膨張によって支配されているため残留曲げひずみは0.5%程度であるが、加熱操作を何度も繰り返すことによって目標とする曲率を持つ曲板を形成することができる。特別な工具を必要としないので、板厚の大きくプレス加工が困難なものでも比較的簡単に加工できる利点を持っている。

本加工法の特徴を挙げておく。例えば、加熱部分を移動しないで1点だけを局部的に加熱しても、周囲の部材の曲げ剛性による拘束のため曲げ変形はほとんど生じない。したがって、加熱源は適切な速さで線状に移動することが必須である。このように加熱源の移動速度と加工量は密接な関係があると考えられるが、一方で温度分布と温度勾配にも関係するため、熱源の強さや周囲の冷却状況にも複雑に依存する。これが本加工法の高度化や自動化を妨げている原因となっている。また、通常の鋼板は700℃以上の高温では変態点を持つ。したがって、素材の機械的性質を保証する観点からは、特定の温度以上に素材を加熱してはならない。さらに、本加工法では曲げ変形を生じるために有限な板厚の素形材が必要である。薄板を同様のプロセスで加工するためには、高度な温度制御が不可欠となる。膜構造には適さない。本加工法は、プレス機械が使用できない程度の厚板に対するフレキシブルな曲げ加工法であると言える。

3. 数値解析手法

3.1 渦電流解析

高周波誘導加熱において鋼板に誘起される熱量は、交番磁場による渦電流に伴うジュール熱であって、結局のところMaxwellの方程式が基礎式となる。これは、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 を未知数とするとき、

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

と表わされる。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は複素近似法が用いられる。

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

$$J = -j\omega\sigma A = \omega\sigma(jA_R \cos \omega t + A_I \sin \omega t) \quad (2)$$

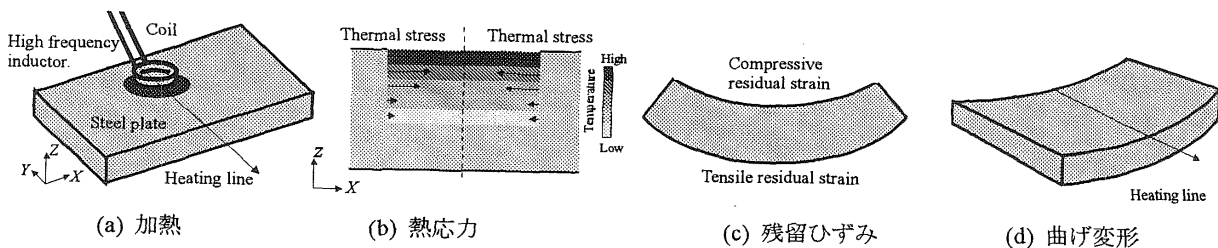


図1 線状加熱曲げ加工の原理

とする。 j は虚数単位であり、 ω は周波数である。 A_R は A の実部を表わし、 A_I は A の虚部を表わしている。 この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/σ の時間平均をとり、

$$Q = \frac{\sigma \omega^2}{2} (A_R^2 + A_I^2) \quad (3)$$

とする。

扱う変数は複素数として扱うが、有限要素法における離散化の手続きは、通常の場合と変わらない⁽⁹⁾。電場や磁場を対象とする有限要素解析では、鋼板やコイルだけでなく空間も要素分割することになり、加熱方向の非対称性を考慮に入れると、原理的には3次元の解析が必要となる。

3.2 非定常熱伝導解析

上式で得られる単位時間あたりの熱量 Q を湧き出しとする非定常熱伝導方程式は

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (4)$$

で表わされる。ここで ρ は密度、 c は比熱、 k は熱伝導率である。式(4)と式(1)は形式的に同一であるが、実時間上のスケールはまったく異なっている。

数値解析にあたって加熱線での対称性を利用すると、加熱線断面で断熱境界、その他は熱伝達境界とすることができる。上式を離散化した後、Crank-Nicolson法を用いて時間について差分近似し、微小な時間ステップごとの鋼板内の温度分布を求める。加熱線が移動し、さらに板厚方向の温度勾配が大きいため、ここでも3次元の解析となる。

3.3 熱弾塑性解析

速度形の運動方程式

$$\dot{\sigma} \cdot \nabla = 0 \quad (5)$$

について、応力-ひずみ関係に熱・弾・塑性構成式

$$\dot{\sigma} = (D^e - D^p) \dot{\epsilon} - \theta \dot{T} \quad (6)$$

を導入して解くことになる。ここで $(D^e - D^p)$ は弾塑性係数であり、 θ は温度依存項である。等方弾性体に線膨張と弾性係数の温度依存性を考慮し、塑性変形では移動硬化を考慮した線形硬化体とした。

有限要素法解析において効率的に解析するために、平面応力問題であるとして、Mindlin タイプの厚板要素⁽⁶⁾を用いた。各節点での自由度は5であるが、3次元要素を配列するよりも要素数は著しく減少する。これによって3次元要素を用いるよりもはるかに少ない自由度で精度のよい解析が可能となる。

3.4 解析の手続き

これまでに述べてきたそれぞれの解析手法をすべて結合する。実際の加工プロセスでは極めて複雑な連成関係を持っている。渦電流は温度に影響を与え、また温度変化は電気伝導率の変化をもたらす。さらに温度の変化は

応力やひずみに影響を及ぼすことになる。しかしながら、ここでは簡単のために、各解析で得られたデータを次々にハンドリングして、連成を考慮しないで最終的な変形を算出することにした。解析の手続きを図2に示す。

まず渦電流解析のために空間を含む 1/4 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

$$Q = Q_{\max} \exp \{ -ax^2 - b(y - v_c t_k)^2 - cz \} \quad (7)$$

で近似した。ここで Q_{\max} 、 a 、 b 、 c は定数であり v_c は熱源の走査速度である。 t_k は走査開始後の時間である。ここで、コイルの走査方向を y 、板厚方向を z としている。

非定常熱伝導解析では上式の分布をした熱の湧き出しが平行移動すると考え、熱源が鋼板の端から中央に至るまでを3次元解析した。渦電流は表皮効果のため鋼板の端部で大きくなることが知られているが、ここでは無視していることになる。さらに、熱伝導解析での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たため温度上昇に伴う電気伝導率の低下などは考慮していない。渦電流解析での結果から式(3)を用いると、実際のジュール熱が過小評価されることがわかったので、前節での実験結果で得られた最高温度をよく表わすように、パラメータ Q_{\max} を調節した。

熱伝導解析で熱源が中央にあるときの節点温度データを出力し、この温度分布が鋼板内を y 方向に平行移動するとして熱弾塑性応力解析に供した。節点温度データを内挿補間して応力解析での積分点位置での温度データとし、温度変化に伴う応力と変形を解析した。

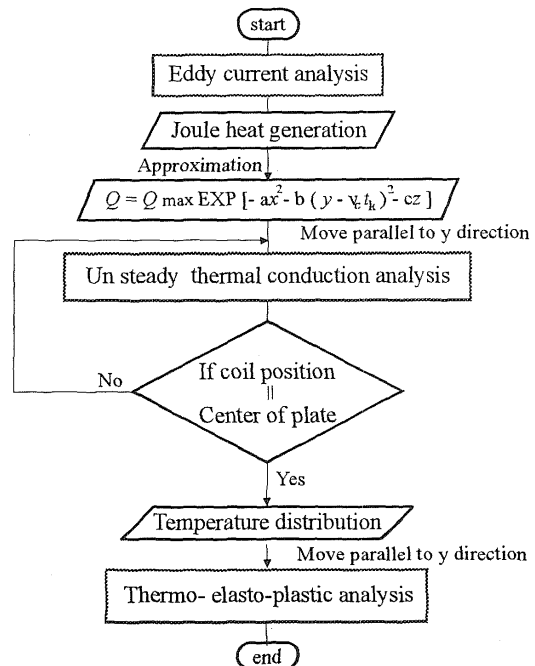


図2 解析手続き

3. 5 解析結果

解析の例として板厚 12mm にコイルの速度を 0.3mm/s で走査したときの温度分布と鋼板の変形を図 3 に示す。図 3 (a) は鋼板の中央部まで熱源が移動したときの温度分布であり、この温度分布が鋼板の一端から他端まで平行移動したと仮定したときの変形が図 3 (b) に示されている。高周波誘導加熱によって、局部的に温度が上昇しており、加熱位置の前方で急速な加熱、後方で空気による徐冷がなされていることがわかる。また板厚方向にも十分な温度差が生じている。一方、変形解析では線状に加熱することで、素形材が曲がっていることが確認できる。一般にコイルの走査速度が速いほど表面の最高温度は上昇せず、また表裏の温度差が生じないため、曲げ変形量も小さくなることがわかった。後述するが、数値解析結果は曲げ加工プロセスを定性的に記述するものの、定量的には変形を過小評価することが多い。これには様々な原因があると考えられるが、実在の温度に依存する材料パラメータの設定が困難であることに起因すると考えている。

4. 実験による曲げ変形の検討

4. 1 実験装置と実験条件

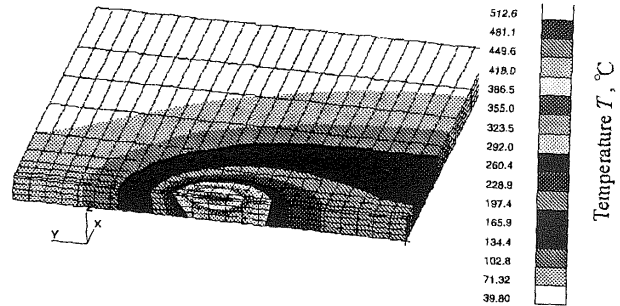
本加工法では熱応力によって加工がなされるため、そのプロセスを解明するためには、温度の制御と計測が最も重要な因子となる。通常の高スパーナーによる加熱では入熱量の把握が困難であるため、再現性に優れた加熱装置を用いる必要がある。このような観点から、本研究では高周波誘導加熱装置を用いることとした。実験装置の概略を図 4 に示す。ここでは、曲げ加工そのものよりも本加工プロセスの解明に重点を置いているため、比較的小規模なものとした。誘導加熱コイルを固定して、厚さ約 10mm 前後の鋼板をアクチュエータで移動させることで相対的に熱源を移動させた。鋼板の厚さと送り速度を種々変更するとともに、鋼板裏面の冷却についても検討している。加熱途中の温度分布の計測を行うとともに、変形を計測した。実際の加工では走査を何度も繰り返して曲率を大きくしていくが、ここでは走査 1 回あたりの変形を観察した。

高周波加熱では、鋼板の表面近傍に渦電流が生じ、そのジュール熱によって鋼板が加熱される。表皮効果による渦電流の深さは与える周波数に依存し、一般に周波数が小さいほど渦電流の深さが大きくなることが知られている。ここでは、2 ターンの誘導コイルを用いて、出力が 12A、410kHz 一定のもとで加熱を行った。

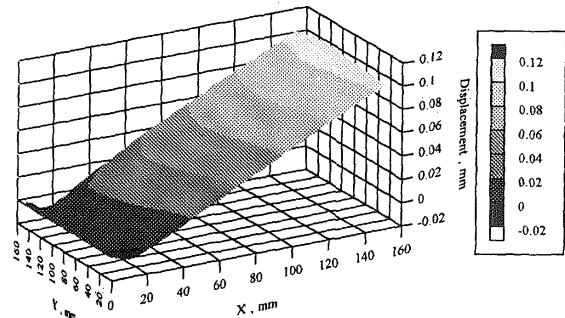
試験材料には寸法 150mm×300mm の S45C を用いた。鋼板の移動速度と板厚を種々設定し、曲げ加工実験を行い、それぞれ温度、変形量を測定した。ここでの曲げ変形は非常に小さいので、平行に 5 回の加熱走査を行い、走査終了後にレーザー変位計で曲面形状を決定した。数値解析と比較する際には、1 回あたりの変形量を比較す

ることとした。

試験体を移動して加熱源を走査している途中の温度を測定するために、熱電対を加熱面上、板厚中央部、および裏面にスポット溶接を施し、加熱（中央）線上、加熱線から 30mm および 60mm 離れた位置での温度を計測し、合計 9 点での温度の時系列データを得た。



(a) 走査途中の温度分布



(b) 鋼板の曲げ変形プロファイル

図 3 線状加熱曲げ加工の数値解析

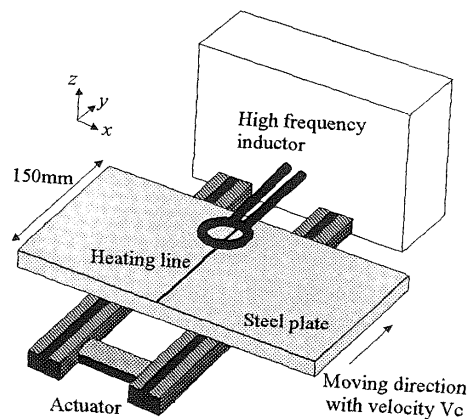


図 4 高周波誘導曲げ加工装置の概要

4. 2 温度履歴

先に示した板厚 12mm、走査速度 0.3mm/s での温度の時系列データを図 5 に示す。実線は実験結果であり、点線は対応する位置での解析結果を表わしている。加熱点直下の温度差は最大で約 100℃であり、一方 30mm 離れ

た位置での温度差は 250℃にもなることがわかる。一般に温度勾配が大きいほど得られる曲げ変形も大きいことがわかっており、表裏面および平面内で十分な温度差を確保することが局所的な曲げ変形を達成するために必要となる。

実験結果と解析結果を比較すると、実験での温度履歴に比べて解析では高温部分が局在しており、温度変動が過大に計算されていることがわかる。解析では表面上での最高温度がほぼ一致するように式(7)での Q_{max} を設定しているが、このような傾向はすべての解析結果で観察されている。熱伝導率や電気伝導率の温度依存性を精度よく導入するとともに、解析領域の端部での渦電流の表皮効果のような空間的・時間的に非定常な因子、さらには適切な熱伝達係数の設定など、実際の条件を反映した解析手法をとることが望まれる。

4. 3 曲げ加工量の評価

図6は加工後の表面状態である。加工後にレーザー変位計を用いて表面をスキャンし、表面の変位を鳥瞰図で表わしている。加工条件は先と同じにしている。鋼板の端部で曲げ変形が抑制されているが、図3(b)に示した鋼板のプロファイルと同様の傾向が観察される。数値解析では鋭い曲げ変形が得られているのに対して、実験では丸みのある曲げが得られている。これは温度分布に起因すると考えてよい。図5に示したように、実験では高温の領域が比較的大きく、熱応力で降伏している領域もまた大きいものと推察される。

実験では5回加熱走査を繰り返しているため、解析結果と直接比べることはできない。実際に、図6の変位は図3(b)に示した解析結果による変位の10倍以上の値となっている。そこで1回あたりの曲げ変形量を曲げ角度に変換して、鋼板の走査速度と曲げ角度の関係を解析結果とともに図7に示す。走査速度と曲げ角度には、明確な負の相関関係が見られる。走査速度が小さいほど温度が上昇するため温度勾配も大きくなり、最終的な曲げ変形も大きくなるためである。このような傾向は、解析結果でも定性的には一致するが、曲げ角度は実験結果の1/5程度となっていることがわかる。これは先の温度解析での差異とともに応力-ひずみ関係の精度にも関係する。本加工法で生じるひずみは比較的小さいので、わずかな差異が変形に影響を及ぼす。したがって、数値解析では、降伏応力の温度依存性や降伏応力近傍の複雑な応力-ひずみ関係を精度よく表わすことが必要である。

なお、板厚を変えて同様の実験を行ったところ、必ずしも走査速度が小さいときに曲げ変形が大きくなるとは限らないことがわかった。特に板厚が小さくなると裏面の温度も上昇するため、温度差(温度勾配)が小さくなり、曲げ変形量が小さくなったものと考えられる。したがって、最適な曲げ角度を実現するためには、表裏の温度差を適切に保つコイルの印加電流とコイルの速度を検討する必要がある。

5. おわりに

従来のガスバーナーを用いた線状加熱曲げ加工プロセスを高度化するために、高周波誘導加熱によって曲げ加工を試み、数値解析による曲げ変形の検討を行った。曲げ加工は熱応力によって行われ、鋼板の表裏に生じる温度勾配に強く依存することが明らかになった。本加工法に関わる渦電流、非定常熱伝導、および熱弾塑性変形を有限要素法を用いて数値解析的に評価するシステムを開発した。提案した解析手法では曲げ変形が小さく評価され定量的な評価には至らなかったが、定性的な傾向は表わすことができた。

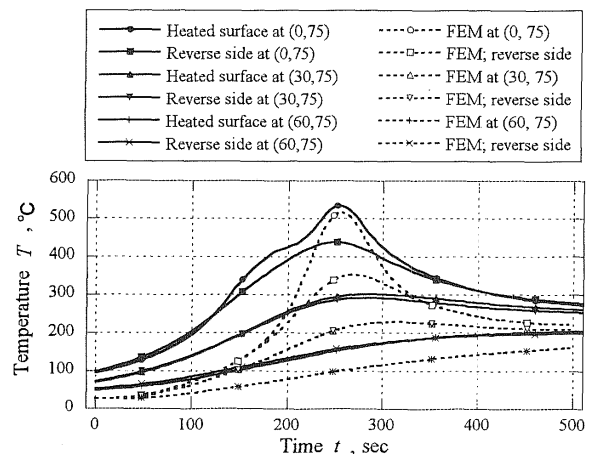


図5 加工中の温度分布

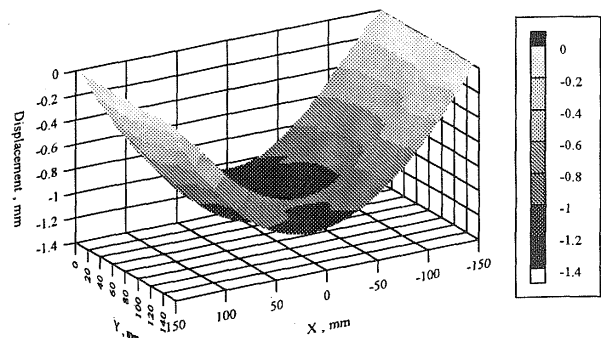


図6 加工後のプロファイル

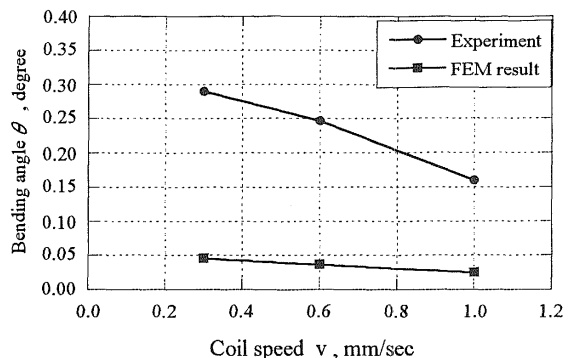


図7 曲げ角度とコイルの走査速度の関係

本加工法は熱応力によってなされるため、工具を必要としないのが大きな利点であって、元来大きな曲げ変形を与えるためのものではなく、厚板に対して複雑な形状を達成するためのものである。加工法の高度化の観点からは、今後、複雑な曲面を形成するための方策、すなわちコイルの走査方向とその順序付け、さらには形状の修正も含めたプロセスを確立することが望まれる。また、本加工法では必然的に曲げの残留応力を伴うので、最終製品の精度や残留応力などの品質の保証について更に検討が必要となる。

なお、本研究の一部は財団法人天田金属加工機械技術振興財団から研究助成を受けてなされたものであることを記し、深く謝意を表します。

参考文献

- (1) 線状加熱板曲加工法（第一報）,石川島技報,11-35,(昭29) pp.54-62.
- (2) 石川隆庸,線状加熱による鋼板の曲げ加工,機械設計,15-5,(昭46) pp.77-83.
- (3) 野本,大森,後藤,榎沢,青山,斉藤,線状加熱による板曲げ加工シミュレーターの開発,日本造船学会論文集,168(平2) pp.683-695.
- (4) 上田,村川,R.A.Mohamed,奥本,神近,計算機支援板曲げ方案自動作成システムの開発,日本造船学会論文集,170(平3) pp.577-586.
- (5) 坪井,内藤,実践数値電磁解析法(平6)養賢堂.
- (6) R.K.リプスレー,エンジニアのための入門有限要素法(昭59),151,サイエンス社.