

線状加熱による船体外板成形の シミュレーションのための伝熱推定法の開発



研究ノート

大 沢 直 樹*

Development of Heat Input Estimation Technique for Simulation of
Ship Shell Forming by Line-Heating

Key Words : Line heating, Gas flame, Induction heating,
Heat transfer, Ship fabrication technique

1. はじめに

英語で船の代名詞に SHE が用いられるのは、水線面下の船体の流麗な曲面が女性の体を連想させるからであるといわれる。大型船の場合、この曲面は、辺長数m、板厚10mm ~ 30mm の鋼板を3次元曲面に成形したものを数百枚貼りあわせて形成される。曲面の形状は船体中央部を除くと場所ごとに異なり、1隻で100種類以上の形状が使用される。大型船は基本的に単品生産であり個船ごとに船体形状は異なる。形状の数が膨大で、板が厚く、同一形状の板が高々数枚であるため、曲面成形をプレスで行うことはできない。

船体に鋼鉄が使用されるようになって以来20世紀前半までは、全体が赤熱するまで加熱した鋼板をハンマーで叩いてこの曲面を成形していた。この苦役から作業者を解放したのが、わが国の造船所で発明された「線状加熱」である。ガス火炎で鋼板表面を線状に加熱すると、加熱線に垂直な縮みと折れ変形（これらを「固有変形」とよぶ）が生じる。加熱線を適切に配置すると任意の曲面形状を作ることができる。この線状加熱により曲面成形の生産性が大幅に向上した。最近では、移動熱源をガス火炎から高周波誘導加熱に代えて、さらなる生産性の改善を達成した造船所もある。線状加熱による鋼板成形を「ぎょう鉄」とよぶ。

ぎょう鉄作業は熟練技能者の経験と勘を頼りに行われてきた。今世紀初頭に加熱線配置決定手法が発明され、自動線状加熱装置も開発されたが、船首尾の大曲率板での加工精度が十分でなく、今日でもぎょう鉄作業の完全自動化を達成した造船所はない。大曲率板加工の自動化が困難な理由は、これらの加工で多用される非直線加熱（繰返し加熱、ウィーピング加熱など）で生じる固有変形を正確に推定できないことにある。固有変形推定精度の悪化は、非直線加熱中の鋼板への伝熱を精度良く推定できないため生じる。

著者らは、ぎょう鉄作業の伝熱評価法の高精度化に取り組み、ガス加熱、高周波誘導加熱の双方について、非直線加熱時の正確な伝熱評価を可能にする新しい解析方法を開発した。以下で、それらの概要を紹介する。



Fig. 1: Ship shell plate forming process by line heating using gas flame.



*Naoki OSAWA

1961年1月生

現在、大阪大学大学院工学研究科 地球
総合工学専攻 教授、
工学博士 船舶海洋工学
TEL : 06-6879-7576
FAX : 06-6879-7594
E-mail : osawa@naoe.eng.osaka-u.ac.jp

2. ガス線状加熱の伝熱解析

従来、ガス線状加熱はトーチ周りに時間で不変な同心円状熱流束分布を仮定する移動分布熱源問題として扱われ、その熱流束分布は直線状加熱試験の鋼板温度時刻歴から同定していた。この方法で同定し

た熱流束分布により非直線加熱時の鋼板温度を計算すると大きな推定誤差が生じる。このことは、直線加熱以外では熱流束分布の時間非依存性が成立していないことを示している。

鋼板への伝熱は熱伝達に支配されると考えられる。この場合、ガス炎内の熱流場を調べることにより、熱流束の時間変化を予測できる。著者らは、高性能レーザー誘起蛍光法(LIF法)計測装置(Fig. 2)を使用して線状加熱中の加熱ガス炎内の過渡温度場を世界で初めて測定し、ガス炎内のトーチ周り熱流場がほぼ時間で不変で、かつ点加熱時の熱流場と概ね一致することを見出した[1]。この結果は、造船ぎょう鉄の加熱条件では、鋼板加熱面の各点で、板直近ガス温度 T_G と局所熱伝達率が時間で不変で、かつ点加熱時の値と一致すると近似できることを示している。

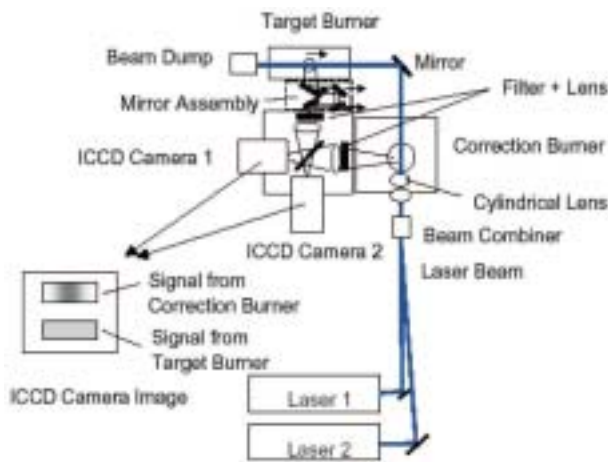


Fig. 2: Optical setup of LIF measurement system.

点加熱試験中の加熱面上熱流束 q の時間・空間変化は、鋼板裏面温度から熱伝導逆解析により推定できる。 T_G と q が時間で不変なら、各点の熱流束の時間変化からこれらの空間分布を同定できる。線状加熱中のトーチ周り T_G は点加熱と同じ分布であると近似できるので、トーチの移動につれて点加熱の T_G 分布を移動させながら加熱面の熱伝達と鋼板内の熱伝導を解析すれば、非直線加熱を含む任意のトーチ移動履歴に対する鋼板温度変化を推定できる。

著者ら[2]は、点加熱試験で鋼板裏面温度測定とLIF法ガス温度計測を同時に実施し、熱伝導逆解析で同定したガス温度がLIF法計測温度によく一致することを示し(Fig. 3)、提案法の妥当性を証明した。

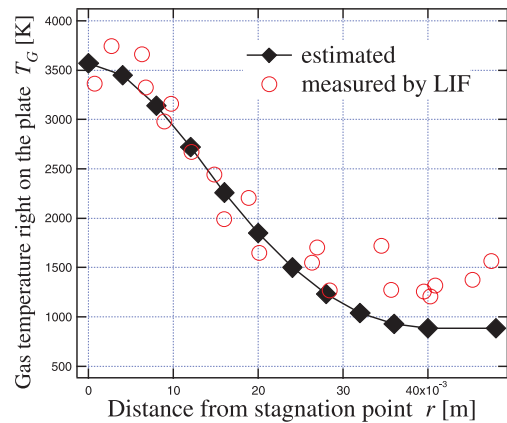


Fig. 3: Distribution of the identified and measured gas temperature right on the plate T_G .

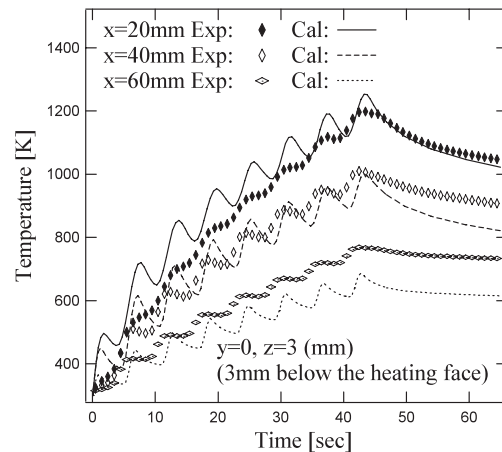
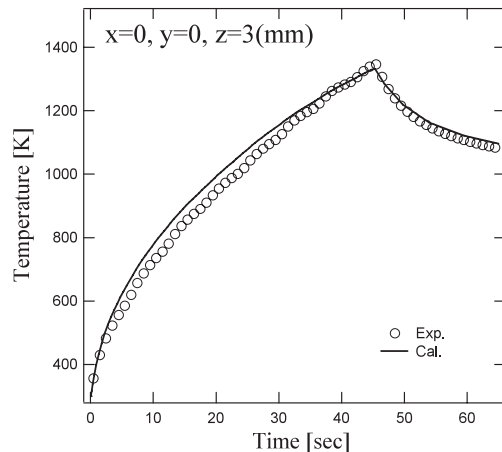
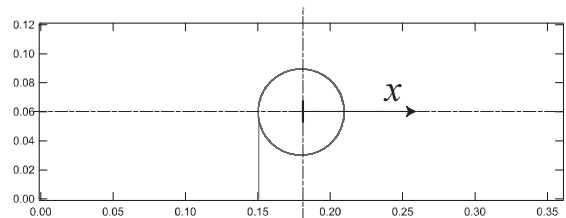


Fig. 4: Comparison of the calculated and the measured plate temperatures during the repeated circular heating experiments.

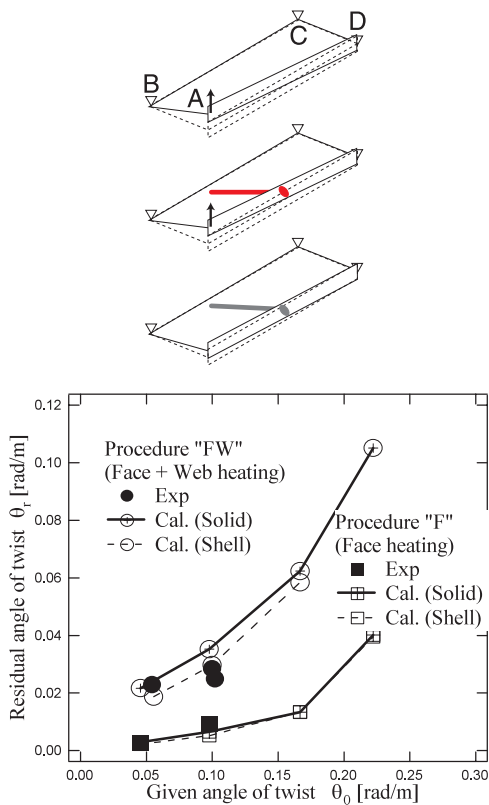


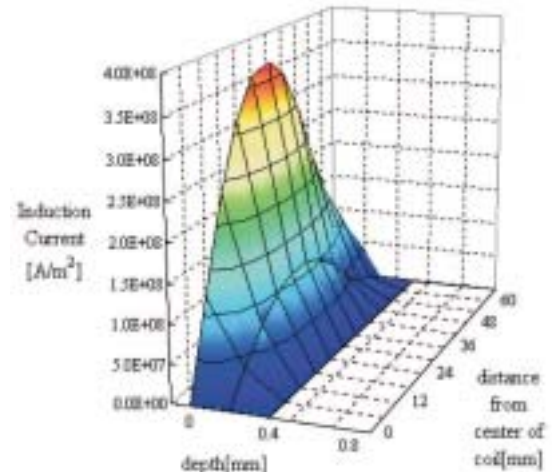
Fig. 5: Comparison of the calculated and measured residual angle of twist generated by gas heating.

そして、提案法により繰返し円状加熱時の鋼板温度 [3] (Fig. 4), 骨材熱振り加工時時の部材変形量 [4] (Fig. 5)などを解析し、点加熱試験結果のみから、非直線加熱時の鋼板温度および変形量を高精度で計算できることを示した。以上の研究により、大曲率板加工の自動化の前提条件である高精度な非直線加熱時の固有変形推定が、初めて可能になった。

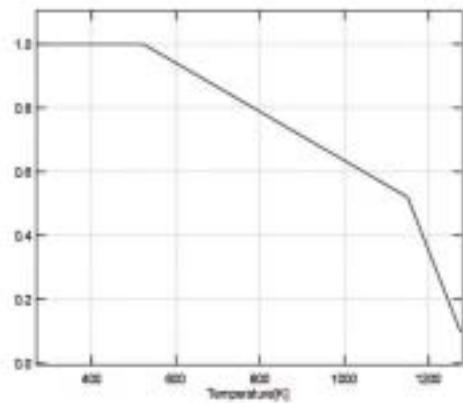
3. 高周波線状加熱の伝熱解析

高周波誘導線状加熱中の鋼板温度解析法は、これまでほとんど研究されなかった。過去にガス加熱と同様にガウス分布形状の表面熱流束を仮定した温度推定が試みられたが、実用に耐える精度は得られなかった [5]。

誘導加熱現象は調和磁場・熱伝導解析により計算できるので、原理的には汎用電磁場解析ソフトウェアにより鋼板温度解析を実施できる。しかし、磁場解析には、無限遠方まで空気層のモデル化が必要であること、mm オーダーの代表寸法をもつコイル断面を表現可能な細密メッシュが必要なこと、発熱が



(a) $I_0(r, z)$



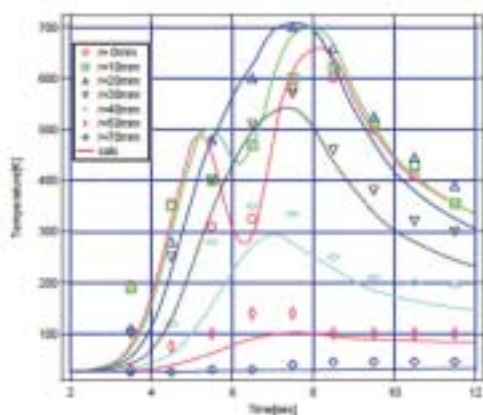
(b) $w(T)$

Fig. 6: Identified Initial distribution of the induction current I_0 and temperature correction function $w(T)$ for $t=25\text{mm}$.

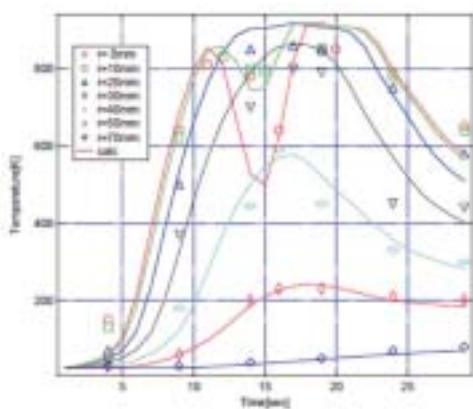
生じる 0.1mm 以下の厚さの鋼板表皮内温度勾配を表現できる超細密メッシュが必要なこと、といった計算モデル作成にあたっての困難が伴うため、コイルが移動しない軸対称問題を除けば、その実施が事実上不可能とされてきた。

磁場熱伝導連成解析は、磁場解析で得た誘導電流の自乗に電気抵抗を乗じて内部発熱を評価することにより行われる。よって、直接磁場解析によらず誘導電流の時間・空間変化を推定できれば、熱伝導解析の枠組みの中で熱サイクルが評価でき、コイル移動時の解析も現実的工数で実現できる。

著者ら [6]は、高周波誘導加熱による点加熱試験の軸対称調和磁場熱伝導連成解析を実施して、点加熱中の誘導電流の時間・空間変化を調べ、点加熱中の鋼板内各点の誘導電流 I が、コイル中心からの相対位置 (r, z) と鋼板温度 T の関数として近似的に



(a) Coil speed = 1000 mm / min.



(b) Coil speed = 300 mm / min.

Fig. 7: Comparisons of the measured and calculated plate temperatures during line heating tests.

$I(r, z, T) = I_0(r, z)w(T)$ と表すことができることを示した。そして、点加熱試験により $I_0(r, z)$ および $w(T)$ を同定した (Fig. 6)。そして、移動するコイルの中心まわりに、点加熱試験で同定した $I_0(r, z)$ および $w(T)$ を与えて内部発熱を評価することによって線状加熱中の鋼板温度を計算し、計測温度と比較して提案法の有効性を示した (Fig. 7)。ここで、 r はコイル中心から温度評価点の距離、 z は鋼板加熱面からの深さ、 T は鋼板温度である。

前節のガス加熱と同様に、 $I_0(r, z)$ および $w(T)$ はコイルの移動履歴によらないと考えられるので、点加熱試験で同定した $I_0(r, z)$ および $w(T)$ を用いれば、任意のコイル移動履歴に対する熱サイクルを高い精度で推定できる。

以上の研究により、大曲率板加工の自動化の前提条件である、高精度な非直線加熱時の固有変形推定が、高周波誘導加熱の場合についても初めて可能になった。ここで開発した温度計算手法は、大阪大学

および(株)アイ・エイチ・アイマリンユナイテッドの共同で、「高周波誘導加熱時熱サイクルの高速シミュレーション方法」として特許出願中である。

4. おわりに

本稿では、著者らが開発したぎょう鉄作業の高精度伝熱評価法について紹介した。開発した伝熱評価法は、造船会社における大曲率板用自動線状加熱装置の開発で使用されているほか、産官学連携で推進中の、造船技能継承支援組織「造船技能開発センター」における教材開発にも応用されている。

今後は、開発した伝熱評価法を、厚板用ガス溶断装置の予熱ガス種と切断性能の関係の研究にも応用する予定である。

参考文献

- [1] 富田康光, 大沢直樹, 橋本聖史, 新海信隆, 澤村淳司, 杉山圭一, 坪内大泉, 出口祥啓, 山浦剛俊, "線状加熱における燃焼流場から鋼板への熱移動に関する研究(その3)", 日本造船学会論文集, 190, pp. 479-487, 2001.
- [2] N. Osawa, K. Hashimoto, J. Sawamura, J. Kikuchi, Y. Deguchi and T. Yamaura, "Development of Heat Input Estimation Technique for Simulation of Shell Forming by Line-Heating", Computer Modeling in Engineering & Sciences, 20, 1, pp. 43-53, 2007.
- [3] 大沢直樹, 尾上仁久, 谷和彦, 浪越正至, 神永肇, 村川英一, "船体骨材フェイス繰返し円状加熱の熱サイクル推定" 日本造船学会論文集, 196, pp. 25-33, 2004.
- [4] 大沢直樹, 神永肇, 尾上仁久, 村川英一, 谷和彦, 浪越正至, "船体骨材振り変形の熱弾塑性有限要素解析" 日本造船学会論文集, 196, pp. 35-46, 2004.
- [5] 日本造船研究協会第246研究部会, 平成14年報告書, 2002.
- [6] 大沢直樹, 橋本聖史, 田中宏典, 石山隆庸, 丹後義彦, "高周波誘導加熱による線状加熱時の非定常熱伝導場の数値シミュレーション", 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 4, pp. 529-532, 2007.