伝熱実験における基板内熱伝導評価と熱流束の可視化*

功 刀 資 彰^{*1}, 秋 野 詔 夫^{*1}
一 宮 浩 市^{*2}, 高 木 一 郎^{*3}Evaluation of Heat Conduction and Visualization of Heat Flux in a Plate
Making Use of Heat Transfer ExperimentsTomoaki KUNUGI, Norio AKINO,
Koichi ICHIMIYA, and Ichiro TAKAGI

This paper describes the evaluation method of heat conduction and visualization of local heat flux in a heated plate. In the first stage, the temperature distribution of the heated plate was measured in detail by the 'thermocamera' which we developed, using liquid crystal with high resolution (0.01°C). In the next stage, the deviated heat flux in the plate was evaluated by solving numerically the three-dimensional equation of heat conduction. As a result, the heat flux distribution was visualized locally.

Key Words: Thermal Engineering, Heat Transfer, Heat Conduction, Liquid Crystal, Numerical Analysis, Heat Flux Visualization

1. 緒 言

対流伝熱実験を行う場合、伝熱面に一様熱流束加熱などの熱的境界条件を設定することが多い。このような熱的境界条件を設定する際には伝熱面を構成する基板内の熱伝導量の定量的な評価が重要となる。伝熱促進体などの突起物を伝熱面に設置した場合、突起物自身およびその周辺の熱伝達、温度、熱流束は伝熱面基板内の熱伝導の影響を受ける。この影響は低レイノルズ数の流れや自然対流などの熱流束が比較的小さい条件で大きく現れる。これは熱伝導と熱伝達の結合問題であるが、基板内熱伝導量の定量的評価がないため、適切な実験データ処理法も確立されておらず、ほとんどの場合基板の厚さを無視した一次元熱伝導補正が適用されている。しかし、突起物の寸法が小さい場合など必ずしも厚さが無視できない場合も多い。また、伝熱促進の実験では、促進体要素からの伝熱量が必要となるが、直接計測する方法はない。一方、著者らは「伝熱の可視化」の有力な手段である感温液晶を用いた温

度分布の可視化法を用いて原子炉の燃料棒のスペーサリブなどの伝熱流動に与える効果を研究してきた^{(1)~(3)}。最近、著者らは液晶による温度分布の可視化法を改良し、赤外線カメラに匹敵する簡便で高精度な測定システムである「液晶サーモカメラ」の開発に成功した⁽⁴⁾。本方法の特徴は、液晶で可視化された色分布を極めて多量(テレビの空間分解能=数十万点)の温度に変換して計測・画像表示でき、また極めて高い温度分解能(0.01°C)を有することができる。

本報は、この液晶サーモカメラを用いて伝熱面上の温度分布を周密に計測し、これを境界条件として基板内の熱伝導方程式を解くことにより、基板内熱伝導量の評価と種々の補正方法の定量的検討を行ったものである。結果として三次元の偏差熱流束分布が得られ、熱流束の可視化が可能となった。また、設定した熱流束分布と偏差熱流束分布を積算することによって伝熱面に取付けた促進体要素からの伝熱量の評価が可能になった。

主要な記号の説明

H : 流路間隔

q : 熱流束

Q : 熱量

Re : レイノルズ数

* 昭和63年6月2日 第25回日本伝熱シンポジウムにおいて講演。原稿受付 平成元年9月29日。

^{*1} 日本原子力研究所 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村)。

^{*2} 山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田4-3-11)。

^{*3} 鈴木自動車(株) (〒432-91 浜松市外高塚)。

T : 温度

U : 流路断面平均流速

2. 液晶サーモカメラ

温度測定に使用される液晶は、主にコレステリック系の液晶である。これは、鎖状分子が平行に配列している層状構造であり、各層間で分子軸の方向に角度のずれを有し、全体としてヘリカルな構造となっている。このヘリカルピッチが可視光の波長の程度であるため、選択光散乱現象が生じ美しい「色」を呈する。このピッチが温度により変化するので色と温度の関係が定まることになる。液晶サーモカメラに関する詳細は文献(4)に譲り、ここでは、その概要を述べる。

液晶サーモカメラでは温度 T の液晶からの散乱反射光を色分解光学フィルタで三つの色成分に分解して色成分輝度を測定し、つぎの一次回帰式によって温度予測値 T^* を求めることができる。

$$T^* = \alpha + \beta r + \gamma g + \delta b + O(r^2, g^2, b^2) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は定数である。 r, g, b は色成分輝度比であり、ビデオカメラの出力信号は A-D 変換した 8 bit の R, G, B 輝度値として得られるので、総和を $S=R+B+G$, バックグラウンドを BG として次式で定義した。

$$r = (R - BG)/S, \quad g = (G - BG)/S, \\ b = (B - BG)/S \dots \dots \dots (2)$$

また、重回帰式への当てはめ計算は、最小二乗法に基づき、正規方程式を Gauss-Jordan 法で解き、定数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を校正実験の観測値(熱電対の指示値) T との最大誤差が許容値(本実験では 0.2°C)内になるように求めた。なお、 $O(r^2, g^2, b^2)$ は残差項である。本

実験で得られた定数は、 $\alpha=25.98, \beta=4.36244, \gamma=5.78944, \delta=11.3555$ である。

この結果、 27°C から 31°C の温度範囲で $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 程度の精度および 0.01°C の分解能で測定が可能になった。

3. 伝熱実験

対流伝熱実験の一例として、原子炉燃料棒の伝熱面上に存在するスペーサリブ周辺の熱伝達実験を取り上げる。本実験は、一般の伝熱促進体の効果を調べる実験と基本的に同一である。実験装置の概要を示すと、試験部は長さ 2100 mm, 幅 230 mm, 流路間隔 10 mm のアクリル製平行平板流路であり、作動流体としては空気を用いた。加熱区間(長さ: 750 mm)の流路上板は図 1 に示すように、流体と接する側より抵抗発熱用ステンレスはく(厚さ: $50\mu\text{m}$)、液晶膜、透明アクリル板で構成されている。実験は、直径 20 mm, 高さ 10 mm の真ちゅう製円柱 1 個を、流路中央に円形面を流路壁に密着させて行った。流れ場の条件としては、低レイノルズ数の場合に基板内熱伝導が伝熱量の評価に大きく影響を与えることを考慮し、流路間隔 H の 2 倍を基準としたレイノルズ数 $Re(=2U \cdot H/\nu)=1000$ を取り上げた。液晶の発色画像は流路上面のアクリル板の上方から液晶サーモカメラで取り込み、画像処理し、色分布を温度分布に変換した。伝熱面上に出現した色分布のうち、円柱を含んだ周辺 $270 \times 88.8\text{ mm}$ の長方形の領域が 16000 画素($200 \times 80: 1$ 画素の寸法は $1.35\text{ mm} \times 1.11\text{ mm}$)に分割された色成分輝度値の画像データ(R・G・B各 8 bit で合計 48000 個のデータ)として得られ、式(1)の温度変換式から 16000 点の二次元温度分布が得られた。このときの等温線図を図 2 に示す。図 2 中の温度刻みは 0.5°C である。

4. 熱伝導補正法の検討

4.1 熱伝導補正法および熱流束の可視化 従来の基板内熱伝導量の評価は、ほとんどの場合基板の厚さを無視した一次元熱伝導補正が適用されている。しかし、本液晶サーモカメラにより伝熱面の周密な二次元温度分布(16000 点)が得られたので、これを基板の

図 1 試験部の概要

図 2 等温分布

伝熱面側の境界条件として、基板内部の三次元温度分布を熱伝導数値解析により求め、基板内の熱移動量を評価した。また、ヒータであるステンレスはく内での熱移動量も評価した。座標系と境界条件を図3に示す。観察面側の流路上面が座標の原点である。

基板内の熱伝導方程式は、発熱がないので次のラプラス方程式で記述され、通常の有限差分法で温度分布が求められる。

$$\nabla^2 T = 0 \dots\dots\dots (3)$$

境界条件として、伝熱面には液晶温度計測で得られた16000点の温度分布を与え、伝熱面以外の基板の側面には断熱条件を与えた。得られた基板内の温度分布から基板内を移動する熱流束分布 q_A を求めた。

また、ステンレスはくは非常に薄く液晶膜と密着しており、液晶温度計測から得られた温度がステンレスはくの温度を示していると考えられる。したがってステンレスはくを計測点に対応した16000個の微小要素(ステンレスはくの厚さは一定)で置き換え、計測した温度分布における二次元(x - y)ステンレスはくの微小要素を通過する熱量 Q_s の移動を次の保存式から評価した。

$$\text{div}(Q_s) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $Q_s = q_s \delta_s$ 、 q_s ははく内の局所熱流束、 δ_s ははく内の厚さである。

液晶温度計測から得られた温度分布は分解能

(0.01°C)以下のばらつきを有しており、上式の q_s を評価するうえではこのばらつきが非現実的な振動を示した。したがって実際には着目点(x, y)の温度は図4に示すような周囲13点から最小二乗法で求めた温度 T' と計測温度 T との差 ΔT から温度勾配を評価し、 q_s および Q_s を求めた。

図5は基板内三次元温度分布より求めた基板内から伝熱面への熱流束の分布(これを印加した一様熱流束条件からの偏りと考え、「偏差熱流束」と呼ぶことにする)を示す。一様熱流束条件にもかかわらず伝熱面上の局所的な温度分布のために基板内部に温度分布が生じ、結果として偏差熱流束が発生し、高温部分から低温部分へ熱が流れ込んでいる様子がわかる。図5は熱流束が可視化されたものである。補正手法の検討の際の副次的な結果であるが、熱流束の可視化は「伝熱の可視化」の中でも極めて例の少ないものであり、その意味で本手法は画期的なものと言えよう。

4.2 各種熱伝導補正法の検討 本実験の体系の熱伝導補正法には、一次元、二次元、三次元の方法がある。座標系と境界条件は図3と同様である。一次元手法は多くの伝熱実験で行われている簡便な手法であり、測定された伝熱面温度分布の一次元方向の温度こう配から偏差熱流束を算出する方法であるため、基板内の熱移動量の評価はされない。二次元手法は伝熱面温度分布を境界条件として基板内の熱移動量をパーソナルコンピュータなどで数値計算して偏差熱流束を求める手法である。本系の場合、座標系間の相違を調べるため直交座標(x - y)と円筒座標(r - z)の2とおりの補正を行った。最後に、三次元手法は上述の「熱流束の可視化」で説明した手法である。計算は大形計算機で行い、基板方向(z)の格子分割数に依存するが、約8MB程度の容量とSOR法による計算で約20min程度の計算時間を要した。図6は、各補正法間の偏差熱流束の見積もりの相違を示したもので、流れの入口から円柱までの流路上面の中心線上の分布である。一次元補正は温度こう配が急峻なところで過大な値を示している。二次元の場合、座標系間の相違は本実験ではそれほど大きくなかったが、円柱上流側約25mmの

図3 座標系と境界条件

図4 格子点

図5 偏差熱流束分布

図 6 各補正間の比較

図 7 最大偏差熱流束

位置で三次元計算による補正量の約 2 倍、約 15 mm の位置で約 1/2 の値を示した。

次に、本実験の基板厚さは 10 mm であり、上述の補正計算はすべてこの寸法で行ったが、基板の厚さの効果を調べるため、基板の厚さを仮想的に調べた。ただし、伝熱面側の温度は同一とした。図 7 は、偏差熱流束の最大値の変化を示す。一次元補正は基板厚さを考慮していないので実線のように一定のこう配を持つ。二・三次元補正では基板厚さが増加するに従って偏差熱流束も増加するが、5 mm 以上ではほぼ同一の値を示しており無限厚さとみなせることがわかった。また、基板を 1 mm 程度の厚さとしなければ一次元補正法は使えないことがわかった。最後に、ステンレスは熱伝導率が大いので、はく内部の熱移動量の検討を行った。この量の評価はステンレスはくを二次元平板と仮定し、測定した温度分布を用いて温度点を含む微小要素についての熱伝導方程式を全点で解き、偏差熱流束を求めた。

したがって、伝熱面で考慮すべき熱流束は、抵抗加熱による熱流束(設定値)と式(3)より求められる基板内および式(4)より求められるステンレスはく内を移動する熱量より得られる偏差熱流束との総和というこ

とになる。ちなみに、全発熱量 12 W(一様熱流束条件: 69.6 W/m²)の場合、一様熱流束条件から決まる促進体要素への入熱量は 0.0219 W、アクリル製基板内移動熱量は 0.013 W、ステンレスはく内移動熱量は 0.00684 W であった。この量をすべて評価することにより伝熱面に取付けた促進体要素からの伝熱量の評価が可能となった。

5. 結 論

流路内に伝熱促進体が設置された場合を対象に、伝熱面基板内の熱伝導の影響を定量的に求めた。液晶サーモカメラを使用して伝熱面温度分布を詳細に計測し、それを境界条件にして熱伝導方程式を解くことにより熱流束の可視化が得られた。また伝熱促進体要素からの伝熱量の評価も可能となった。

文 献

- (1) 秋野・ほか 3 名, 流れの可視化, 3-8(1983), 40.
- (2) 功月・ほか 2 名, 機論, 53-485, B(1987), 241.
- (3) Ichimiya, K., ほか 3 名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **31**-11(1988), 2215.
- (4) Akino, N., ほか 3 名, *Trans. ASME, Ser. C*, **111**-2(1989), 558.