自由界面を有する矩形容器内自然対流の伝熱現象と赤外線計測*

稲垣 照美^{*1}, 金児 敏信^{*2}
羽鳥 雅一^{*2}, 椎名 保顕^{*3}Heat Transfer Phenomenon of Natural Convection in an Open Vessel
and Its Infrared SensingTerumi INAGAKI^{*4}, Toshinobu KANEKO,
Masakazu HATORI and Yasuaki SHIINA^{**} Mechanical Engineering, Ibaraki University,
4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi-shi, Ibaraki, 316-8511 Japan

As infrared thermography has a convenient feature that we can diagnose two-dimensional temperature fields nondestructively and simultaneously at every picture element, it has widely been applied to various engineering applications. Therefore, in this paper, the free surface temperature field was visualized and measured by sensing infrared energy emitted from the liquid-gas interface directly as electromagnetic waves. The heat transfer phenomena were also discussed by analyzing the temperature data statistically. Another aim is to confirm the applicability of infrared thermography to quantitative heat transfer measurement for a liquid-gas interface.

Key Words: Infrared Thermography, Thermal Visualization, Liquid-gas Interface, Heat Transfer, Natural Convection

1. 緒 言

赤外線サーモグラフィーは、対象物から発せられる熱エネルギーを感知し、その表面温度を非破壊リモートセンシングに評価する手段であるとともに、複雑な形状を有する二次元温度場をリアルタイムに、かつ画素毎に診断・評価することが可能な手段である。そのため、この手法は、工学、理学、医学あるいは産業界を始めとする様々な分野で広く利用されている。一方、伝熱学の分野においては、これまで主に加熱固体壁面の温度計測あるいは伝熱計測⁽¹⁾に利用されてきたが、赤外線計測の気液界面現象への定量的な適応性や有効性については十分な知見が得られているとは言い難い。

このことから、本研究では、気液界面伝熱現象の代表例として、片面に自由界面を有する有限矩形容器内のベナールセル対流を取り上げ、その可視化や温度・伝熱計測に赤外線サーモグラフィーを応用することにした。すなわち、自由界面に接するベナールセル対流に及ぼす容器アスペクト比、粘性係数、流体層深さ及び加熱量の影響について実験と数値シミュレーションの両面から併せて考察を進め、赤外線サーモグラフィーによる気液界面伝熱計測への適応性や有効性の確立を図ることとした。さらに、赤外線サーモグラフィーによる気液

界面の定量的な温度計測を実施し、本手法の定量化を進めた。気液界面の伝熱現象を解明する上では、赤外線サーモグラフィーのような非接触な計測が望ましいと言える。なお、上下面とも固体壁面で拘束されたベナールセル対流に関しては、従来から多くの研究が行われている(例えば文献(2))が、自由界面を有する場合^{(3),(4)}はあまり多くの研究がなされていない。

2. 実験装置及び計測方法

2.1 赤外線サーモグラフィーの特性 ここでは、赤外線サーモグラフィーの基本的な特性や具体的なデータ処理法について述べることにする。本研究で利用している赤外線サーモグラフィー装置は、NEC 三栄製 TH3102MR 型サーモトレーサ(スターリング冷却方式、Hd-Cd-Te センサ、検出波長域 8~13 [μm], 温度測定範囲 $-50 \sim +2000$ [$^{\circ}\text{C}$], 最小検知温度分解能 0.1 [$^{\circ}\text{C}$])である。ある 1 つの熱画像は、水平方向に 255 画素、それと直交する垂直方向に 239 画素から構成されている。一般に、1 つの熱画像当たりの水平及び垂直走査範囲は、赤外線サーモグラフィー装置の検出部と計測対象との距離によって異なる。例えば、500 [mm] において水平走査範囲:308 [mm], 垂直走査範囲:292 [mm] 及び 1000 [mm] において水平走査範囲:576 [mm], 垂直走査範囲:546 [mm] である。一方、熱画像生成時間は、1 つの熱画像が 239 本の水平走査ラインで構成されているの

* 原稿受付 2003 年 11 月 20 日。

^{*1} 正員、茨城大学工学部(☎ 316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)。^{*2} 茨城大学大学院理工学研究科。^{*3} 正員、日本原子力研究所大洗研究所(☎ 311-1934 東茨城郡大洗町成田町新堀 3607)。

E-mail: inagaki@mech.ibaraki.ac.jp

で、ある1つの水平ラインを走査して次の走査までに3.125 [ms]を要する。この走査時間3.125 [ms]の中には、CRT表示時間1.25 [ms]が含まれている。従って、1画像生成時間は、 $3.125 \text{ [ms]} \times 239 \text{ 本} = 0.75 \text{ [s]}$ となる。その他、赤外線サーモグラフィによる定量計測では、最小検知寸法⁽⁵⁾、ノイズ相当温度差⁽⁶⁾及び熱画像ひずみ⁽⁷⁾などが及ぼす影響を考慮に入れる必要がある。なお、ラインスキャンモードを利用すれば、任意水平走査線上の温度や任意点の温度を最高3.125 [ms]の速度で採取することが可能になる。

以上は、赤外線サーモグラフィ装置から直接得られた界面温度(見掛け温度 T_a)に関する取り扱いである。熱伝達率を評価する上で重要な真の界面温度 T_s は、シリコンオイルを充填した恒温水槽による検定実験から得られた検定直線に基づいて見掛け温度から求めている。すなわち、検定用の恒温面を計測して対比させている。なお、矩形容器内に充填したシリコンオイルを容器底面から加熱しながら界面を赤外線サーモグラフィ装置で撮影すると同時に、界面極近傍(界面から300 [μm]液側に溶接部全体を浸潤)の温度を予め検定した直径300 [μm]のC-A熱電対を用いて計測し、参照した。ここでは、校正した温度を T_g として真の温度と見なしている。気液界面では、赤外線の透過率が小さく、かつ表面の放射率(0.98 ± 0.01)が大きいため、例えば放射率がこの範囲で変化しても十分な計測精度(1 [%]以下)が得られる。

2.2 実験装置と計測方法 図1と図2は、実験装置の概略を示したものである。伝熱面は、上から銅板(厚さ1 [mm])、そして熱源であるステンレス箔(幅10 [mm]の短冊上に加工、厚さ30 [μm])の順に張り合わせ、周囲を十分に断熱した厚さ10 [mm]の水平なアクリル矩形容器(濡れ縁面積 $A_0 = w_1 \times w_2 \text{ [mm}^2\text{]}$)の底面に固定した。実験では、 $w_1 \times w_2 = 100 \text{ [mm]} \times 100 \text{ [mm]}$ (Type A)、 $100 \text{ [mm]} \times 200 \text{ [mm]}$ (Type B)及び $100 \text{ [mm]} \times 300 \text{ [mm]}$ (Type C)の容器アスペクト比が異なる3種類のアクリル矩形容器を用いている。但し、矩形容器の高さは20 [mm]で同一である。伝熱面は、銅板を設置していることから、温度一定条件下で加熱できる。伝熱面(加熱面)温度の計測は、予め検定した直径100 [μm]のC-A熱電対を銅板の裏面に5ヶ所スポット溶接して行った。また、矩形容器底部裏面からの漏洩熱量を計測するため、ゼネレクス社製BF-04型の熱流束センサ(サイズ:25 [mm]×25 [mm]、標準感度:10 [mV/(W/cm²)], 最小感知熱量:0.008 [W/cm²]、使用可能温度範囲:-50 [°C]~+180 [°C])を底部に直接貼り付けて正味熱流束 q の補正を行った。さらに、多重反射

Fig. 1 Experimental Apparatus

Fig. 2 Measuring System

の影響を極力避けるため、一定温度に空調された暗室内に赤外線サーモグラフィ装置の検出部と実験装置を同時に設置し、気液界面温度計測を検出部から0.45 [m]の距離で一連の計測を実施した。実験では、ベナールセル対流に及ぼす粘性の影響と流体層深さ δ の影響を評価するため、作動流体として様々な粘度を有するシリコンオイルを矩形容器内の様々な高さまで充填した。すなわち、動粘度 ν が50, 100, 300, 500 [cst]の4種類を用意し、流体層深さ δ を5, 10, 15 [mm]と変化した。加熱は、短冊状にしたステンレス箔を直流定電圧電源(CUSTOM CPS-1850)でジュール加熱することで達成した。そのため、配線間には電流計(YOKOGAWA 7541)と電圧計(YOKOGAWA 2807)を挿入して電流及び電圧を計測している。周囲流体温度としての暗室内温度は、直径300 [μm]のC-A熱電対を検出部と装置の中間付近に2ヶ所取り付け計測した。各種の温度データは、零点補償した後、リモートスキャナー(NEC SAN-EI製DE1200)を通してコンピューターに採取され、各種の無次元数を計算した。これら無次元数に供すべき物性値は、液相内の場合、加熱面温度 T_w と周囲流体温度 T_g の平均温度(膜温度)に基づいて決定している。赤外線サーモグラフィ装置から得られた熱画像データは、データキャプチャプログラム(NEC SAN-EI TH31-402)により各画素毎の温度に加工した。なお、一連の計測は、各熱電対や熱流束センサ及び赤外線サー

モグラフィで観測している加熱面・表面温度や熱流束が定常状態に至った後、実施している。データキャプチャの際は、自動環境補正を行い、レンジ(−504~+200 [°C]), オートフォーカスを設定して計測を行った。

一方、本研究では、気液界面において、如何なる流動現象が生じているのかを確認するため、アルミパウダーを併用した流動パターンの可視化も同時に行った。これは、赤外線計測によっても熱流動現象の様子を充分に観察できることを実証するためでもある。なお、撮影は、流れが定常となった段階からデジタルビデオカメラで行い、気液界面とカメラの距離は0.45 [m]とした。

3. 実験結果及び考察

3-1 気液界面温度場の可視化 図4~図10は、気液界面上に発生する自然対流の伝熱・流動現象を赤外線サーモグラフィにより可視化した結果の一例である。これらの温度場可視化画像では、色パターンを例示した図3に示すように高温領域が赤色系、低温領域が青色系で表示されている。図中のレイリ数 Ra_l は、流体層側のレイリ数 $[Ra_l = Pr_l g \beta_l (T_w - T_g) \delta^3 / \nu_l^2]$ であり、重力加速度 g 、体積膨張率 β_l 、プラントル数 Pr_l を用いて算出することができる。下付添字 l は、液層を意味する。また、表1は、各実験装置毎のベナール対流発生条件である臨界レイリ数 $Ra_c^{(8)}$ を示したものである。レイリ数がこれらの値を越えた付近から、流体層内は熱伝導支配下から対流支配に移行し、ベナールセルが発生し始めることになる。下付添字 c は、臨界値を意味する。

Table 1 Critical Rayleigh number

Apparatus	δ [mm]	Ra_c
Type A ($A_0=100 \times 100$)	5	1107
	10	1124
	15	1150
Type B ($A_0=100 \times 200$)	5	1104
	10	1114
	15	1129
Type C ($A_0=100 \times 300$)	5	1103
	10	1111
	15	1123

Fig. 3 Concept Model of Visualized Thermal Pattern

図4~6の(a)~(c)は、実験装置 Type A, Type B, Type C において、 $v=100$ [cst], $\delta=5$ [mm] と固定し、加熱量 q

を増加させて可視化した気液界面温度場の様子である。いずれの装置においても、表1に示す Ra_c 以下の時、つまり加熱量が非常に小さい時、気液界面は均一な温度分布となっていることが図4~6の(a)から分かる。また、流体層深さが小さい場合、熱画像の縮尺の関係で分かりにくい、どの装置、どの加熱量においてもセル寸法はほぼ同一であり、乱流遷移しにくい。

図7~9の(a)~(d)は、実験装置 Type A, Type B, Type C において、 $v=100$ [cst], $\delta=10$ [mm] と固定し、加熱量を増加させて可視化した気液界面温度場の様子である。加熱量が増加することでベナールセル対流が発生し、セルが発生した後、最終的に崩れていく様子が図7~9の(a)~(d)から分かる。この際、セル寸法や形状、発生位置が時々刻々と変化し始める。すなわち、図7~9の(d)に示すように、セルの出現位置と形は不規則に変化し、かつ非定在的になる。一方、 $\delta=5$ [mm] の場合と同様に、加熱量が非常に小さいと気液界面は均一な温度分布になる。加熱量が増加すると、セル同士が合体した後、図7~図9の(c)に見られるようにセル同士が合体・成長して発生数が減少し、最終的に崩壊する。

図10の(a)~(d)は、実験装置 Type A, Type B, Type C において、 $v=100$ [cst], $\delta=15$ [mm] と固定し、可視化した気液界面温度場の様子である。Type A では、前述の実験結果と同様に、加熱量が増加するとセルが発生し、最終的に崩壊する様子が(a), (b)から分かる。また、流体層深さが大きくなると、いずれの容器アスペクト比に対しても、セル寸法が増大していることが分かる。

図11は、実験装置 Type A において、 $\delta=10$ [mm], $q \approx 170$ [W/m²] 付近に固定し、動粘度を増加させて可視化した気液界面温度場の様子である。 $v=50$ [cst] におけるセル寸法については、他の粘性のものより大きくなっているが、他の粘性については顕著な違いは見られない。

以上の結果から、赤外線計測は、気液界面の温度場を可視化する上で有効な手段であると言える。

3-2 気液界面の温度場と流れ場の可視化 図12の(a)と(b)は実験装置 Type A における $v=300$ [cst], $\delta=5$ [mm] に対して、図13の(a)と(b)は実験装置 Type A における $v=300$ [cst], $\delta=10$ [mm] に対する気液界面温度場と流れ場の同時可視化画像を示したものである。温度と速度場の動画像を解析すると、加熱面で暖められた流体が赤や桃を呈した部分の気液界面へ向かって上昇し、界面で冷やされた後、青や緑を呈した部分から加熱面へ向かって下降していた。その結果、気液界面では幾何境界の影響を受けつつ、様々な色や形をした模様が発現する。このことから、赤外線計測で明らかになっ

(a) $Ra_l = 1.73 \times 10^2$
 $q = 18.8 \text{ [W/m}^2\text{]}$

(b) $Ra_l = 3.87 \times 10^3$
 $q = 462.3 \text{ [W/m}^2\text{]}$

(c) $Ra_l = 8.37 \times 10^3$
 $q = 824.4 \text{ [W/m}^2\text{]}$

Fig. 4 Visualized Thermal Patterns (Type A, $v=100$ [cst], $\delta=5$ [mm])

(a) $Ra_l = 2.73 \times 10^2$
 $q = 19.8 \text{ [W/m}^2\text{]}$

(b) $Ra_l = 5.24 \times 10^3$
 $q = 414.4 \text{ [W/m}^2\text{]}$

(c) $Ra_l = 1.04 \times 10^4$
 $q = 714.2 \text{ [W/m}^2\text{]}$

Fig. 5 Visualized Thermal Patterns (Type B, $v=100$ [cst], $\delta=5$ [mm])

(a) $Ra_l = 3.75 \times 10^2$
 $q = 22.0 \text{ [W/m}^2\text{]}$

(b) $Ra_l = 3.41 \times 10^3$
 $q = 237.2 \text{ [W/m}^2\text{]}$

(c) $Ra_l = 6.26 \times 10^3$
 $q = 413.6 \text{ [W/m}^2\text{]}$

Fig. 6 Visualized Thermal Patterns (Type C, $v=100$ [cst], $\delta=5$ [mm])

(a) $Ra_l = 4.39 \times 10^2$
 $q = 20.4 \text{ [W/m}^2\text{]}$

(b) $Ra_l = 2.39 \times 10^3$
 $q = 117.5 \text{ [W/m}^2\text{]}$

(c) $Ra_l = 8.58 \times 10^3$
 $q = 454.7 \text{ [W/m}^2\text{]}$

(d) $Ra_l = 2.08 \times 10^4$
 $q = 754.3 \text{ [W/m}^2\text{]}$

Fig. 7 Visualized Thermal Patterns (Type A, $v=100$ [cst], $\delta=10$ [mm])

(a) $Ra_l = 1.05 \times 10^3$
 $q = 6.6 \text{ [W/m}^2\text{]}$

(b) $Ra_l = 5.98 \times 10^3$
 $q = 69.4 \text{ [W/m}^2\text{]}$

(c) $Ra_l = 7.17 \times 10^4$
 $q = 768.5 \text{ [W/m}^2\text{]}$

Fig. 8 Visualized Thermal Patterns (Type B, $v=100$ [cst], $\delta=10$ [mm])

Fig. 9 Visualized Thermal Patterns (Type C, $v=100$ [cst], $\delta=10$ [mm]) Fig. 10 Visualized Thermal Patterns ($v=100$ [cst], $\delta=15$ [mm]) Fig. 11 Visualized Thermal Patterns (Type A, $\delta=10$ [mm], $q \doteq 170 [W/m^2]$)

Fig. 12 Visualized Patterns

(Type A, $v=300$ [cst], $\delta=5$ [mm], $Ra_l = 1.25 \times 10^3$)

Fig. 13 Visualized Patterns

(Type A, $v=300$ [cst], $\delta=10$ [mm], $Ra_l = 3.49 \times 10^4$)

た熱流動現象とアルミパウダーで可視化した熱流動現象は良好に対応しているものと推察できる。すなわち、赤外線計測は、気液界面の熱流動現象を可視化する上でも有効な手段と言える。

3.3 数値解析結果 本研究では、前述の赤外線計測から得られた可視化結果について、その有効性をさ

らに検証するために数値解析の面からも比較・考察した。解析体系は、図 14 に示すように矩形容器液層内の熱流動現象を想定している。この際、運動量式中の浮力項にはブジネスク近似を適用し、流体の物性値は可視化実験により得られた加熱面温度と周囲流体温度との膜温度 $T_f = (T_w + T_g)/2$ で評価した。なお、計算対象の

Fig. 14 Analytical Co-ordinate System

Table 2 Boundary Conditions

Surface	For Velocity	For Temperature
Cooled Surface	$(\partial u, w / \partial y), v = 0$	$q = \text{const} (< 0)$
Heated Plate	$u, v, w = 0$	$T = T_w$
West	$u, v, w = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} _{\text{west}} = 0$
East	$u, v, w = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} _{\text{east}} = 0$
North	$u, v, w = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} _{\text{north}} = 0$
South	$u, v, w = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} _{\text{south}} = 0$

(a) $\bar{T}_s = 10.01$ [°C]
 $q = 2.67$ [W/m²]

(b) $\bar{T}_s = 17.58$ [°C]
 $q = 66.44$ [W/m²]

(c) $\bar{T}_s = 23.49$ [°C]
 $q = 169.54$ [W/m²]

Fig. 15 Visualized Thermal Patterns (Type A, $v=50$ [cst], $\delta=10$ [mm])

(a) $\bar{T}_s = 9.98$ [°C]
 $q = 2.67$ [W/m²]

(b) $\bar{T}_s = 17.39$ [°C]
 $q = 66.44$ [W/m²]

(c) $\bar{T}_s = 22.34$ [°C]
 $q = 169.54$ [W/m²]

Fig. 16 Analyzed Isotherms of Surface Temperatures (Type A, $v=50$ [cst], $\delta=10$ [mm])

(a) $\bar{T}_s = 15.27$ [°C]
 $q = 2.14$ [W/m²]

(b) $\bar{T}_s = 28.02$ [°C]
 $q = 199.6$ [W/m²]

(c) $\bar{T}_s = 41.06$ [°C]
 $q = 456.4$ [W/m²]

Fig. 17 Visualized Thermal Patterns (Type A, $v=100$ [cst], $\delta=10$ [mm])

(a) $\bar{T}_s = 15.09$ [°C]
 $q = 2.14$ [W/m²]

(b) $\bar{T}_s = 27.41$ [°C]
 $q = 199.6$ [W/m²]

(c) $\bar{T}_s = 40.62$ [°C]
 $q = 456.4$ [W/m²]

Fig. 18 Analyzed Isotherms of Surface Temperatures (Type A, $v=100$ [cst], $\delta=10$ [mm])

寸法は、実験装置と同一である。

ここでは、有次元のままコントロールボリューム法を用いた輸送方程式の離散化をハイブリッド法で行い、3次元定常数値解析を行った。流れ場の計算には、SIMPLE法を用いている。計算では、実験条件を可能な限り再現するため、境界条件を表2のように設定した。すなわち、実験データに基づいて、加熱面を等温条件で加熱し、冷却面をエネルギーバランスに基づいた等熱流束条件で冷却し、四方側面部は断熱条件とした。すなわち、全て実験において得られた値を適応している。冷却面については、自由界面を想定してすべり境界とした。次に格子分割であるが、 x, z 方向については、諸寸法に対して1 [mm] 毎に等分割している。 y 方向については、液層深さに対して0.5 [mm] 毎に等分割している。一方、初期条件は、計算領域全体に亘って速度 $u, v, w=0$ 、流体温度 $T=T_w$ とした。

図15、図16は実験装置 Type A における $v=50$ [cst]、 $\delta=10$ [mm]、図17と図18は実験装置 Type A における $v=100$ [cst]、 $\delta=10$ [mm] の気液界面温度場に関する実験結果と数値解析結果をそれぞれ比較したものである。これらの図から、実験と数値解析的で得られたベナールセルの分布状況が良好に対応していることが分かる。従って、本数値解析は、赤外線による気液界面の定量的な温度計測を裏付ける上で有効な手段となり得る。

3.4 気液界面の温度計測結果 図19は、気液界面におけるエネルギーバランスの模式図を示したものである。周囲を十分に断熱された有限矩形容器内の気液界面では、次式のようなエネルギーバランスが成立する。

$$q = q_{conv} + q_{rad} \quad (1)$$

ここで、 q は界面流入熱流束、 q_{conv} は対流熱流束、 q_{rad} はふく射熱流束である。

ベナールセル対流の発生以前は、流体層内が熱伝導支配であると考えられるため、伝熱面温度一定とした界面流入熱流束は次式で表される。

$$q = \lambda_l \frac{(T_w - \bar{T}_s)}{\delta} \quad (2)$$

一方、ベナールセル対流が発生した後は、気液界面の温度場が不均一となるので、本研究では伝熱面熱流束一定として次式で示すような印加ジュール加熱量 q と置き換えて考える。

$$q = \frac{VI}{A_0} - q_{loss} \quad (3)$$

但し、 V は印加電圧、 I は印加電流、 A_0 は濡れ縁面積 ($w_1 \times w_2$ [mm²]) である。 q_{loss} は、前述の熱流束センサで計測した実験装置底部からの漏洩熱流束である。また、

Fig. 19 Energy Balance at Gas-liquid Interface

q_{rad} は、界面平均温度 $\bar{T}_s$ と周囲流体温度 (気温) T_g を用いて次式により求められる。

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (\bar{T}_s^4 - T_g^4) \quad (4)$$

なお、気液界面の放射率 ε は、次式⁽⁹⁾で求めることができる。

$$a_s = \left(\frac{\bar{T}_r}{\bar{T}_s} \right)^{4.3069} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{a_s - (T_g/\bar{T}_s)^{4.3069}}{1 - (T_g/\bar{T}_s)^{4.3069}} \quad (6)$$

ここで、 a_s は射度係数であり、 $\bar{T}_s$ と $\bar{T}_r$ はそれぞれ濡れ縁面積当たりの平均界面温度と平均見掛け温度である。上式より、本研究で使用した温度範囲内におけるシリコンオイルの放射率は、平均で0.98となった。従って、赤外線サーモグラフィは、流体層表面の温度をほぼ正確に測定しているとも考えられる。これらから、気液界面における平均対流熱伝達率 h 及び平均ヌセルト数 Nu は、次式で求められる。

$$h = \frac{q_{conv}}{\bar{T}_s - T_g} = \frac{q - q_{rad}}{\bar{T}_s - T_g} \quad (7)$$

$$Nu = \frac{hw_e}{\lambda_g} \quad (8)$$

式(8)における λ_g は、空気の熱伝導率を表す。また、空気側修正レイリー数 Ra_g^* は、次式で求められる。

$$Ra_g^* = Pr_g \frac{g \beta_g q_{conv} w_e^4}{\lambda_g v_g^2} \quad (9)$$

式(9)における β_g は空気の体積膨張係数、 v_g は空気の動粘度である。気相の物性値は、平均界面温度と周囲流体温度との膜温度 [$T_f = (\bar{T}_s + T_g)/2$] で評価した。ここで、(8)、(9)式における w_e は、他の容器アスペクト比を考慮して、等価直径 [$w_e = 4w_1w_2/2(w_1 + w_2)$] とした。

これらを踏まえて、図20は実験装置 Type A, Type B, Type C における $v=50, 100$ [cst] について、流体層深さ毎に気液界面の平均ヌセルト数を空気側修正レイリー数に対して示したものである。参考として併記した線群は、次式で示される熱流束一定条件下の鉛直固体加熱平板における層流自然対流^{(10),(11)}、及び熱流束一定条件下の水平加熱平板における自然対流⁽¹²⁾の平均ヌセルト数である。

Fig. 20 Measured Average Nusselt Number

Vliet, et.al.⁽¹⁰⁾:実線

$$Nu = \frac{5}{4} [0.60 Ra_g^{*0.2}] \quad (10)$$

甲藤⁽¹¹⁾:一点鎖線

$$Nu = \frac{5}{4} [0.53 Ra_g^{*0.2}] \quad (11)$$

北村ら⁽¹²⁾:二点鎖線

$$\text{範囲 } 1.6 \times 10^3 < Ra_g^* < 1.6 \times 10^7$$

$$Nu = 1.25 Ra_g^{*0.167} \quad (12)$$

$$\text{範囲 } 1.6 \times 10^7 < Ra_g^* < 8 \times 10^8$$

$$Nu = 0.04 Ra_g^{*0.33} + 9.7 \quad (13)$$

(10), (11) 式の適用は、水平面周辺が開いた上向き加熱の場合、層流については鉛直面の式を適用してよいとされている伝熱工学資料第4版⁽¹³⁾に依る。また、点群(計測値)は、液層内が熱伝導支配下、ベナールセル対流発生時、及び乱流状態までの結果を示している。

図20から、液相内でベナールセルが発生した後も、気液界面における平均熱伝達率と一連の伝熱相関式は、流体層内の対流状態に依存することなく、良好に対応していることが分かる。さらに図20中の×印は、平均界面温度に関する数値解析結果から熱伝達率を算出したものであり、実測値や伝熱相関式とも良好に対応していることが分かる。このことから、赤外線による気液界面の定量的な温度計測を実験と数値解析の両面からも裏付けることができた。

結 言

本研究は、気液界面の可視化計測や気液界面における温度計測を例に取り上げて、自然対流の赤外線計測の有効性を検証したものである。非接触な赤外線計測は、気液界面における温度場の可視化や定量的な温度計測を実施する上で有効な手法であることを確認することができた。従って、赤外線計測は、様々な実用上の温度・伝熱計測にも対応できるものと考えられる。赤

外線サーモグラフィによるリモートセンシング計測では、画素毎の二次元的な温度計測が可能のため、複雑な形状を有する伝熱面の性能をリアルタイムかつ広範囲に評価する上で極めて都合が良いと言える。

文 献

- (1) T. Inagaki and Y. Okamoto, *Measurement of Turbulent Heat Transfer Coefficients Using Infrared Thermography near Ambient Conditions and Its Quantitative Error Estimation*, J. of JSME International, Series B, Vol.42, (1998), 275.
- (2) P. Cerisier, S. Rahal, and N. Rivier, *Topological correlations in Benard-Marangoni convective structures*, PHYSICAL REVIEW E, Vol.54, Number.5, (1996), 5086.
- (3) 浅枝・玉井・安久・高橋, 大水深および大きな Rayleigh 数における熱対流の性質について, 土木学会論文報告書, 323, (1982), 121-131.
- (4) 浅枝・玉井, 大きな Rayleigh 数をもつ熱対流セル内のブリュームについて, 土木学会論文報告書, 336, (1983), 65-73.
- (5) 黒川・稲垣・安久・岡本, 赤外単素子センサを用いた機械的走査型サーモグラフィ装置の最小検知寸法に及ぼす要因分析, 可視化情報学会誌, 19-74, (1999), 51.
- (6) K. Kurokawa, T. Inagaki, and M. Agu, *A Study on Characteristics of Fundamental Performances for Thermograph*, J. of JSME International, Series B, 43-4, (2000), 671.
- (7) 黒川・稲垣・笠井・宮本, 機械的走査型サーモグラフィ装置の熱画像ひずみ, 機論 C, 69-699, (2003), 633.
- (8) 日本流体力学会編, 流体力学ハンドブック 第2版, (1998), 292.
- (9) T. Inagaki and T. Ishii, *On the Proposal of Quantitative Temperature Measurement by Using Three-color Technique Combined with Several Infrared Sensors Having Different Detection Wavelength Bands*, Infrared Physics & Technology, Vol.41, (2000), 325.
- (10) C.G. Vliet and C.K. Liu, *An Experimental Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layer*, J. of Heat Transfer, Vol.91, (1969), 517.
- (11) 甲藤, 伝熱概論, (1996), 88, 養賢堂.
- (12) 北村・木村, 水平加熱平面上に生じる自然対流の流動及び熱伝達(高レイリー数域の伝熱・流動特性), 機論 B, 60-570, (1994), 566.
- (13) 日本機械学会編, 伝熱工学資料 第4版, (1986), 68.