

# 投稿 赤外線サーモグラフィーの対流熱伝達計測への応用

(防衛大学校 中村 元)

## 1. はじめに

熱交換器や電子機器といった伝熱機器を設計する際には、固体と流体の間の熱の移動、すなわち対流熱伝達の知見が必要になる。例えば、高温の流体が流れている配管があり、それが流れ方向・厚み方向にどのような温度分布を持っているか計算するには、高温の液体から配管内壁、および配管外壁から周囲空気への伝熱量を知る必要がある。

しかし、対流による伝熱量を正確に求めるのは、実は容易なことではない。なぜなら、対流熱伝達は流体の物性値（熱伝導率、比熱、密度）だけでなく、流れの状態（層流か乱流か、乱流であるならその渦構造の挙動）にも大きく依存するためである。

とはいっても、機器を熱設計する際には熱伝達率が必要になる。実際どのようにしているかと言えば、通常は、過去に蓄積された経験式（例えば文献(1), (2)）の中から流動状態が近いと思われる式を選び、それを基に熱伝達率を“推測”する方法が用いられてきた。ただし、あくまでも推測にすぎず、信頼性の高い設計を行うためには、どうしても実機に即した実験を行って温度や熱流束を実測する必要がある。（最近ではコンピュータによる熱流体解析が発達してきたため、流れが層流であれば熱伝達率を精度良く計算できるようになった。しかし、乱流の場合には、正確な計算が難しいのが現状である）

そこで、熱伝達率を実測する方法として、赤外線サーモグラフィー（以下 IRT と呼ぶ）を用いた手法が普及しつつある。これは、近年の IRT の低価格化、高性能化（画素数、温度分解能の向上）によるところが大きい。本稿では、IRT が熱伝達測定に利用されてきた歴史を振り返ると共に、最近の高性能な IRT を用いたいくつかの測定事例について紹介したい。

## 2. 赤外線サーモグラフィーによる熱伝達計測の歴史

IRT の熱伝達計測への応用は、既にいくつかのレビュー論文（例えば文献(3)）でまとめられているが、ここではその歴史について、新たな情報や筆者の考えを加えながら簡単に振り返ってみたい。

対流熱伝達の測定に IRT が利用されたのは、IRT が製品化され始めた 1960 年代後半まで遡る。1968 年には、極超音速風洞内に置かれた物体からの熱伝達の評価に IRT が利用された<sup>(4)</sup>。また、1970 年台後半には、IRT で測定された熱伝達が、スペースシャトル再突入時の熱防御システムの熱設計に利用されている<sup>(5)</sup>。

その後、1970 年代後半から 1980 年代にかけて、IRT は

超音速中の表面流れの可視化にも利用されるようになった。例えば、IRT を用いて、物体表面の境界層が乱流遷移（流れが層流から乱流に変化）する現象や、流れがはく離・再付着する現象を検知できることが示されている。

1980 年代後半からは、IRT の高性能化に伴い、常温域（室温+数十℃程度）の熱伝達も測定できるようになった。これによって、熱交換器や電子機器など一般の伝熱機器の熱設計にも、IRT で取得したデータが利用できるようになった。従来の熱伝達測定では、主に熱電対などの点計測が行われてきたが、IRT を用いると面の温度分布が非接触で測定できるため、温度場を乱すことなく“ホットスポット”を特定できるという優位性を持っている。

ほとんどの伝熱機器では、流れのマッハ数が低く、物体表面は空力加熱されないため、熱伝達を測定するには何らかの方法で物体を加熱または冷却する必要がある。良く用いられる手法として、物体表面に金属箔を接着し、それを通電加熱した時に現れる温度分布を IRT で測定する方法（薄膜加熱法）がある。この場合、対流熱伝達率  $h$  は次式で求めることができる。

$$h = \frac{q_{in} - q_L}{T_w - T_0} \quad (1)$$

$q_{in}$  は通電加熱で与えられた熱流束、 $q_L$  は熱伝導や熱放射による損失であり、 $T_w$  は加熱金属箔の表面温度、 $T_0$  は主流温度（加熱面の十分遠方における流体の温度）である。通常は、赤外線反射を抑えるため（放射率を 1 に近づけるため）、金属箔には黒色の塗料が塗布される。この手法を用いて、例えば、平板衝突噴流による熱伝達、一様流中に置かれた物体からの熱伝達、壁面上の突起による伝熱促進といった強制対流熱伝達や、垂直加熱平板からの自然対流熱伝達などが測定されてきた。測定結果は、従来の熱電対等で得られた結果とも良く一致しており、十分に信頼できるデータであることが示された。こうして、IRT を用いた測定法は、物体表面の対流熱伝達分布を簡単に、しかも正確に測定する手法として一般に認知されるようになった。

## 3. 測定事例（時間平均特性）

ここで、強制対流による熱伝達の測定事例として、流れに直交した円柱からの熱伝達率の測定<sup>(6)</sup>について紹介する。円柱は、各種伝熱機器の構造体やピンフィンなどの伝熱促進体として広く利用されており、しかも形状がシンプルで実験が容易なことから、古くから非常に多くの実験が行わ

れてきた。従来は、熱電対や熱流束センサといった点計測が行われてきたが、IRTを用いることによって、これまで明らかにできなかった面の複雑な熱伝達分布が容易に把握できるようになった。

図1に、風洞実験装置及び加熱円柱模型を示す。円柱模型はアクリルパイプでできており、その表面に厚さ  $10\ \mu\text{m}$  のステンレス箔が接着されている。箔の表面には、赤外線放射率を高めるため黒ペイントが塗布されている。この円柱を風洞内に設置し、ステンレス箔を通电加熱した時の温度分布をIRTで測定した。

測定した温度分布の一例を図2に示す。これは円柱の測方から撮影したもので、空気は図の上から下に向かって流れている。円柱の前面では冷たい空気が流入するため良く冷却されるが、円柱表面に沿った流れは側面ではく離するため、その背後で風速が低下し、温度があまり低下しなくなる。なお、円柱前面から側面にかけては円柱の軸方向に温度が一樣であるが、背面では軸方向に非一樣になっている。これは、流れがはく離すると、流れの不安定性により軸方向に非一樣な流れとなるためである。従来の点計測ではこの現象を捉えるのが困難であったが、IRTを用いると、熱伝達の非一樣性を容易に把握することができる。

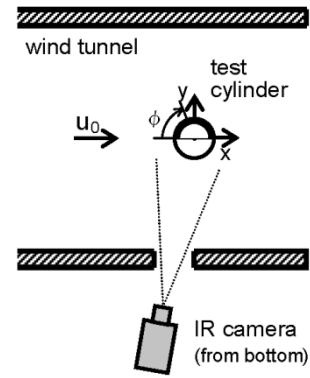
測定した温度分布  $T_w$  から、式(1)により熱伝達率  $h$  を計算し、円流周りの熱伝達率の分布(軸方向平均)を求めた。その結果を図3に示す。ここでは、熱伝達をヌッセルト数  $Nu (= h d / k : k$  は空気熱伝導率) およびレイノルズ数  $Re (= u_0 d / \nu : \nu$  は空気動粘性係数) を用いた無次元数  $Nu/Re^{0.5}$  として表示している。

円柱の前方 ( $\phi = 0 \sim 80^\circ$ ) では流れが層流であるため、 $Nu/Re^{0.5}$  の値はレイノルズ数に依存せず、ほぼ一本の曲線となる。この分布は、従来の熱電対を用いた測定結果 (Igarashi,  $Re = 10000$ ) と良く一致しており、IRTによって十分に精度の高い測定が可能であることが確認できた。

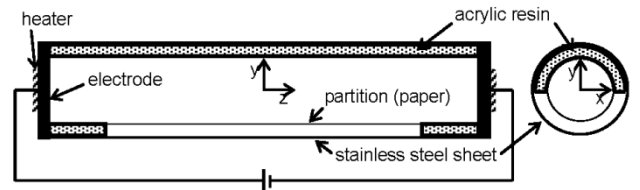
#### 4. 熱伝達の非定常性について

ここまでは、熱伝達の時間平均特性について述べてきた。従来の研究では、ほとんどの場合、熱伝達率は時間平均値として扱われており、この値をもとに機器の熱設計が行われてきた。しかし、流れが乱れると、壁面近傍に乱流渦構造が形成され、それが複雑に変動する。そのため、実際には対流熱伝達は時間的・空間的に複雑に変動している。

この非定常性が機器の熱設計に影響を及ぼすこともある。例えば、原子力発電プラントの配管が熱伝達変動によって高サイクル熱疲労を起こして損傷した事例<sup>7)</sup>も報告されている。そのため、少なくとも、損傷時の影響が大きい機器を設計する場合には、熱伝達の時間・空間的な変動特性を実測し、熱設計に使用できるようにデータベース化してお



(a) 風洞実験装置の断面図



(b) 加熱円柱模型の断面図 (円柱直径  $d = 40\ \text{mm}$ )

図1 流れに直交して置かれた円柱からの強制対流熱伝達測定装置

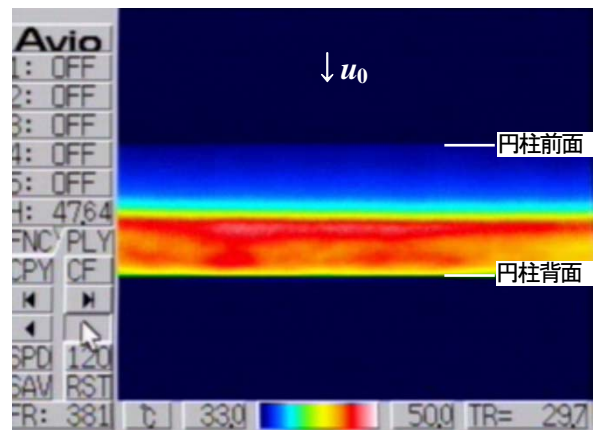


図2 赤外線サーモグラフィで測定した温度分布の一例 ( $u_0 = 4\ \text{m/s}$ ,  $Re_d = 9570$ )

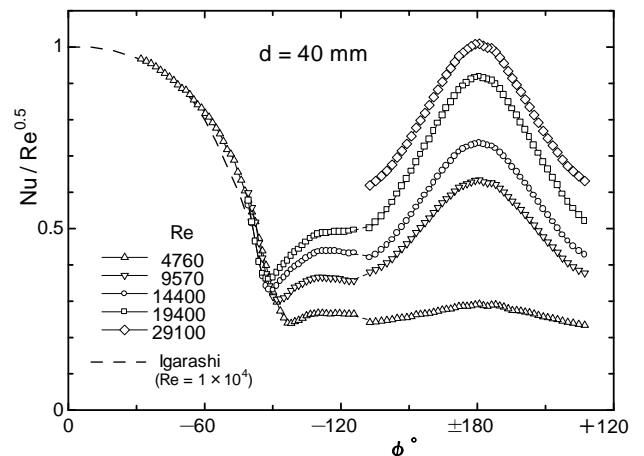


図3 円柱周りの熱伝達率分布

く必要がある。

しかし、乱流熱伝達の非定常特性はこれまでほとんど計測されてこなかった。これは、従来の測定法では、乱流に伴う高速でかつ複雑な熱伝達変動を測定するのが困難であったからである。

それに対し、最近になって IRT の性能（画素数、フレーム速度、温度分解能）が飛躍的に向上してきたため、乱流による熱伝達の時間・空間的な変動を定量的に測定することが可能となりつつある。

## 5. 測定事例（時間・空間変動特性）

次に、乱流熱伝達の時間・空間的な変動特性を測定した事例<sup>6)</sup>について紹介する。

図4に実験装置を示す。これは、平板上に形成された乱流境界層によって引き起こされる熱伝達の非定常性を測定する装置である。低速風洞には長さ 840 mm の平板が設置されており、その後方に加熱平板模型（アクリル製、厚さ 6 mm, 図4(b), (c)）が段差なく接続されている。加熱平板模型のアクリル板は一部がくり抜かれており（図4(c)の removed sections）、くり抜き部を覆うように、厚さ 2 μm のチタン箔が平板上面から下面の電極にかけて弛みのないように接着されている。チタン箔は熱容量が非常に小さいため、通電加熱すると、外部空気への熱伝達変動によって温度が時間的・空間的に高速に変動する。これを IRT で測定して乱流熱伝達の時間・空間的な変動を調べた。

なお、高速な変動を捉えるには、伝熱面の熱容量を極力抑える必要がある。そのため、チタン箔には黒ペイントを塗布せず金属面のままとした。この場合、観測面の放射率が低く周囲からの赤外線が乱反射しやすくなるが、これを抑制するため、観測面の周囲には黒ペイントを塗布し、周囲温度ができるだけ均一になるようにした。また、IRT は図4(a)のように観測面に対して 20° 程度傾けて設置した。これは、IRT から放射された赤外線が観測面で反射され、それを自身で受光するのを避けるためである。

また、チタン箔の分光放射率（IRT の観測波長帯における放射率）を評価するため、加熱した銅板にチタン箔を密着させた模型を作製した。銅板には校正された熱電対を埋め込み、その測定温度と IRT で受光した放射光強度を比較することによって放射率を評価した。ここでは、チタン箔の分光放射率は 0.20（3~5 μm 帯）と評価された。

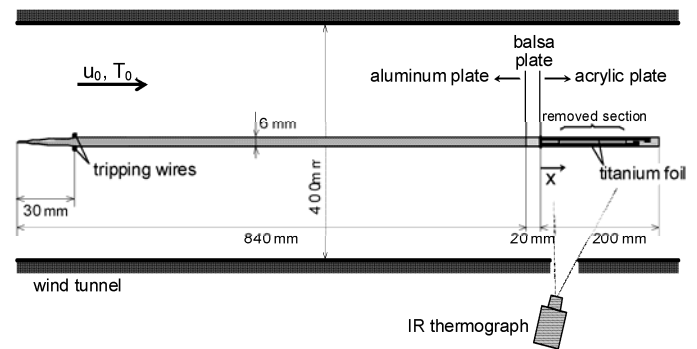
図5に、赤外線カメラ（TVS-8502, 日本アビオニクス社）で測定した伝熱面温度の瞬時分布（左図）およびスパン方向（z 方向）分布の時間変化（右図）を示す。図5(a)が層流境界層、図5(b)が乱流境界層の場合である。層流境界層では流れが二次元的でかつ定常であるため、温度はスパン方向に一様であり、時間的にも変動しない。これに対し、乱流境界層では流れの乱れに対応した温度の非一様性・非

定常性が現れる。従来の研究により、乱流境界層の壁近傍には主流方向に長く伸びたストリーク構造が形成されることが知られているが、図5(b)の瞬時温度分布には、この構造に対応した温度分布が現れている。

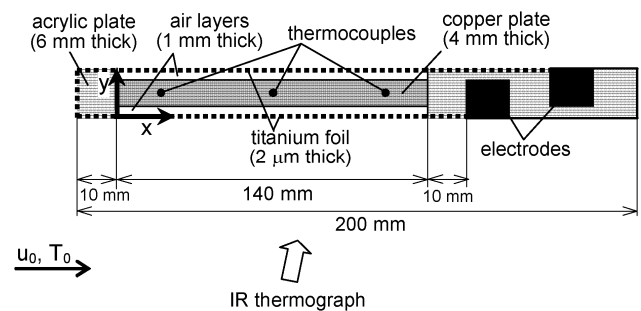
次に、測定した温度分布の時系列データから、熱伝達率の時空間分布を求めた。瞬時・局所の熱伝達率  $h$  は、次式で算出することができる。

$$h = \frac{q_{in} - q_{cd} - q_{rd} - cp\delta \frac{\partial T_w}{\partial t} + \lambda\delta \left( \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \right)}{T_w - T_0} \quad (2)$$

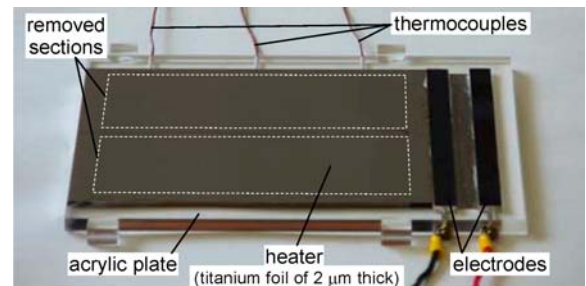
上式は式(1)と同じものであるが、熱損失  $q_L$  として、伝導熱流束  $q_{cd}$  と放射熱流束  $q_{rd}$  だけでなく、チタン箔の熱容量による時間遅れ  $cp\delta (\partial T_w / \partial t)$ 、およびチタン箔の熱伝導による熱拡散  $\lambda\delta (\partial^2 T_w / \partial x^2 + \partial^2 T_w / \partial z^2)$  も考慮されている。IRT で測定した温度分布は、箔の熱容量・熱伝導のため、



(a) 風洞装置の断面図



(b) 加熱平板模型の断面図



(c) 加熱平板模型の写真

図4 熱伝達変動の測定装置



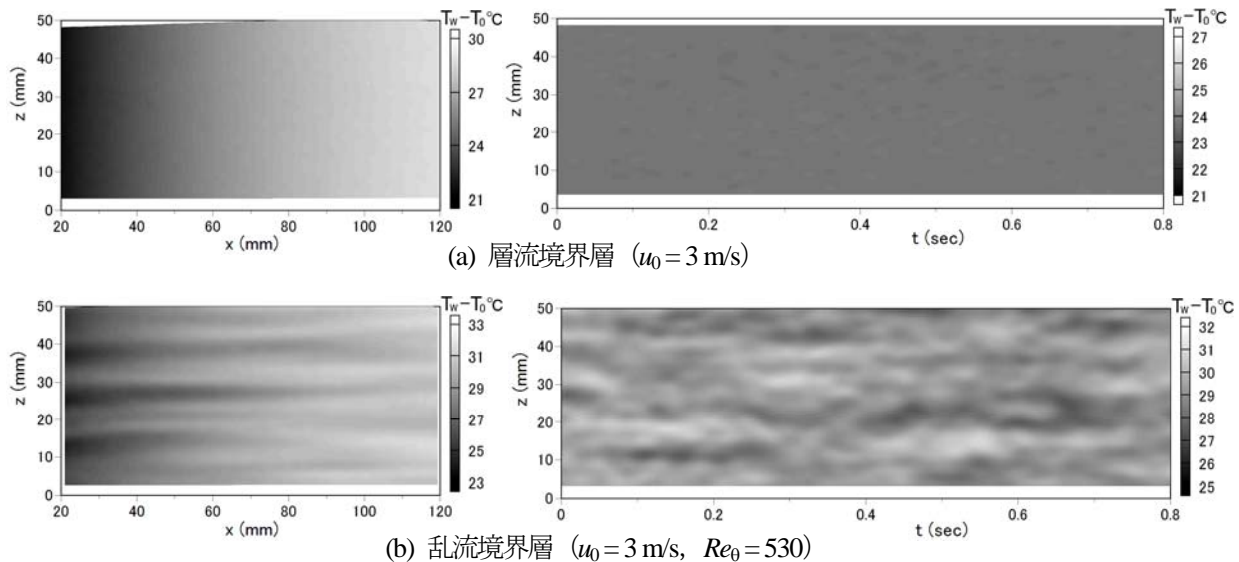


図5 赤外線サーモグラフィーで測定した温度の瞬時分布 (左) とスパン方向分布の時間変化 (右)

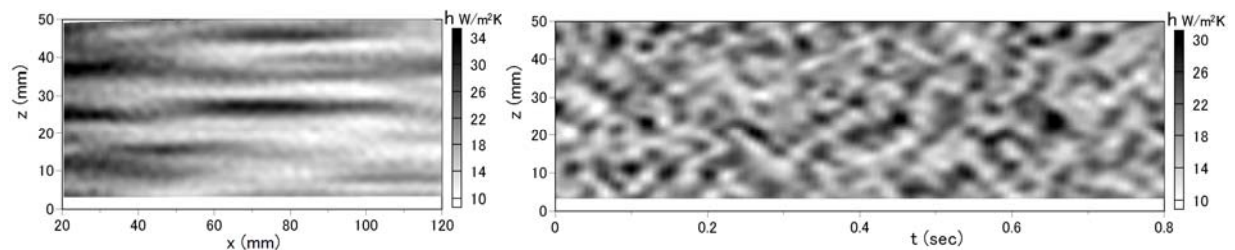


図6 乱流境界層における熱伝達の瞬時分布 (左) とスパン方向分布の時間変化 (右) :  $u_0 = 3 \text{ m/s}$ ,  $Re_0 = 530$

実際の熱移動現象と比較して時間的・空間的に減衰するが、式(2)に従って熱伝達率を計算 (逆解析) することで、時間的・空間的な減衰を復元することができる。

図6に、(2)式により求めた熱伝達率 (図5(b)に対応したもの) を示す。逆解析することにより、乱流渦構造に起因した高速な熱移動現象が明瞭に復元されていることがわかる。

本測定結果を統計解析したところ、熱伝達変動の大きさや空間的な構造 (スパン方向の平均的な空間波長) は、乱流の直接数値計算 (DNS, 渦構造の最小スケールまで解析) の結果と比較して妥当な値であることが確認できた<sup>(8)</sup>。すなわち、最近の高性能なIRTを用いると、これまで不可能であった乱流熱伝達変動の定量的測定も実現できるようになった。

## 5. おわりに

本報では、赤外線サーモグラフィーが対流熱伝達の測定に利用されてきた歴史を振り返ると共に、最近の高性能なサーモグラフィーを用いた測定事例について紹介した。赤外線サーモグラフィーは、面の温度分布が非接触で測定できるため、従来の点計測では困難であった複雑形状や複雑な流れ場における熱伝達も容易に測定することができる。また、伝熱面の熱容量を十分小さくすれば、乱流に伴う高

速で複雑な熱伝達の時間・空間的変動も測定可能である。今後は、赤外線サーモグラフィーの高性能化と相まって、これまで測定できなかったさまざまな伝熱現象が解明されていくことが期待される。

## 参考文献

- (1) 日本機械学会編, 機械工学便覧 (基礎編  $\alpha 5$ ), 日本機械学会 (2006).
- (2) 日本機械学会編, 伝熱工学資料 (改訂第4版), 日本機械学会 (1986).
- (3) Carlomagno, G.M. and Cardone, G, Exp. Fluids, Vol.49 (2010), pp.1187-1218.
- (4) Thomann, H. and Frisk, B., Int. Heat and Mass Transf., Vol.11 (1968) pp.819-826.
- (5) Martinez, A. and Dye, W.H., NASA CR-151401 and NASA CR-151141 (1978).
- (6) 中村 元, 五十嵐保, 機論 B, 68 巻 675 号 (2002), pp.3122-3129.
- (7) 日本機械学会編: 配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針 (JSME S 017), 日本機械学会 (2003).
- (8) 中村 元, 機論 B, 73 巻 733 号 (2007), pp.1906-1914.