

赤外線で観た乱流伝熱の世界*

中村 元**

Unsteady Heat Transfer for a Turbulent Flow Measured Using Infrared Thermograph

Hajime NAKAMURA

1. はじめに

一般に、物体と流体間の熱移動(熱伝達)は物体表面で一様ではなく、流れの様相により時間的にも一定ではない。つまり、乱流のように空間的にも時間的にも複雑に変化する流れにおいては、熱伝達もそれに応じて複雑に変化する。しかし、従来ほとんどの研究では熱伝達率は時間平均値として扱われてきた。これは、流れの変動に相応する熱伝達変動が問題となることが少なかったからである。実際に、機械工学便覧¹⁾や伝熱工学資料²⁾でも熱伝達の非定常性に関する実験データは取り扱われていない。

しかし、近年になって原子力発電をはじめとするプラントの配管が熱伝達の非定常性によって高サイクル熱疲労を引き起こし損傷する事例が散見され³⁾、熱伝達の非定常性に関する知見の重要性が増してきた。また、対流伝熱の研究分野では、時間平均的な熱伝達測定だけでは解明できない現象(例えば、はく離・再付着によって引き起こされる伝熱促進など)が未解決のテーマとして残されており、これらのメカニズムを解明するには熱伝達の空間分布だけでなく流れの変動に相応した高速な熱伝達変動のパターンも捉える必要がある。

こうした熱伝達の時空間的な特性を熱電対や熱流束センサといった接触式のセンサを多数並べて測定した例もあるが、十分な空間分解能を得ることは難しく、また、センサの設置自体が温度場を乱す原因となってしまう。その点、赤外線熱画像装置(以下、赤外線カメラと呼ぶ)を用いれば面の温度分布を非接触で測定することができるため、このような多点計測には非常に有利である。また、赤外線カメラの性能は近年著しく向上しており、かつては困難であった高精度測定や高速測定にも対応できるようになってきた。それに加え、赤外線カメラの最大の特長は温度変動のパターンを視覚的に、しかもリアルタイムで捉えることができることにあり、実際に起

こっている現象を目で確認しながら実験条件を選択・変更していくことが可能である。すなわち、実験をしながらその場で最適条件を見つけ、また、特異な現象が発生した時にはそれを見逃すことなくその場で精査することが可能である。

赤外線イメージングに関しては、これまでにいくつかの優れた解説書(例えば文献⁴⁻⁷⁾)が書かれてきたが、最近の機器の高性能化に対応したものは無いように思われる。また、高性能なイメージング装置の能力を十分に活用した可視化・計測例も現状では少ないように思われる。そこで本記事では、乱流熱伝達の非定常測定を例にとり、最近の赤外線カメラではこんな測定も可能であるという一例を紹介したいと思う。

2. 可視化・測定方法

2.1 実験装置

Fig. 1に、実験装置の概略及び伝熱模型の構造を示す。基本的な説明は文献^{8,9)}に記載されているため、ここでは、赤外線カメラを用いた測定を行うにあたり注意した点や工夫した点を中心に記述する。

赤外線カメラを用いた測定では、後述のように伝熱面の温度分布から熱伝達率を算出するため、熱伝達の変化が温度分布・変動となって現れる等熱流束加熱面(通電加熱された金属箔)を使用して実験を行った。また、熱伝達の変動に伴う高速な温度変動を検知するには伝熱面の熱容量が非常に小さくなくてはならないため¹⁰⁾、従来よく用いられてきたステンレス箔ではなく、熱容量の小さなチタン箔を金属箔として用いた。できるだけ薄く、しかも厚みの均一なチタン箔を探したところ、厚さ2 μm のチタン箔(竹内金属箔粉工業)が見つかったので、これを伝熱面として使用した(最近ではさらに薄いチタン箔も市販されているようである)。

チタン箔が壁面に接すると伝熱面の熱容量が大きくなって温度が変動しなくなるため、Fig. 1(b)のように、チタン箔の裏面には厚さ1mmの空気層を設けた。すなわち、被測定面はペラペラの状態になっている。ただし、好都合なことに、チタンよりも母体のアクリルの方が熱膨張率が大きいいため、加熱するとチタン箔が引っ張

* 原稿受付 2008年12月26日

** 正会員 防衛大学校システム工学群機械工学科

(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20, E-mail: nhajime@nda.ac.jp)

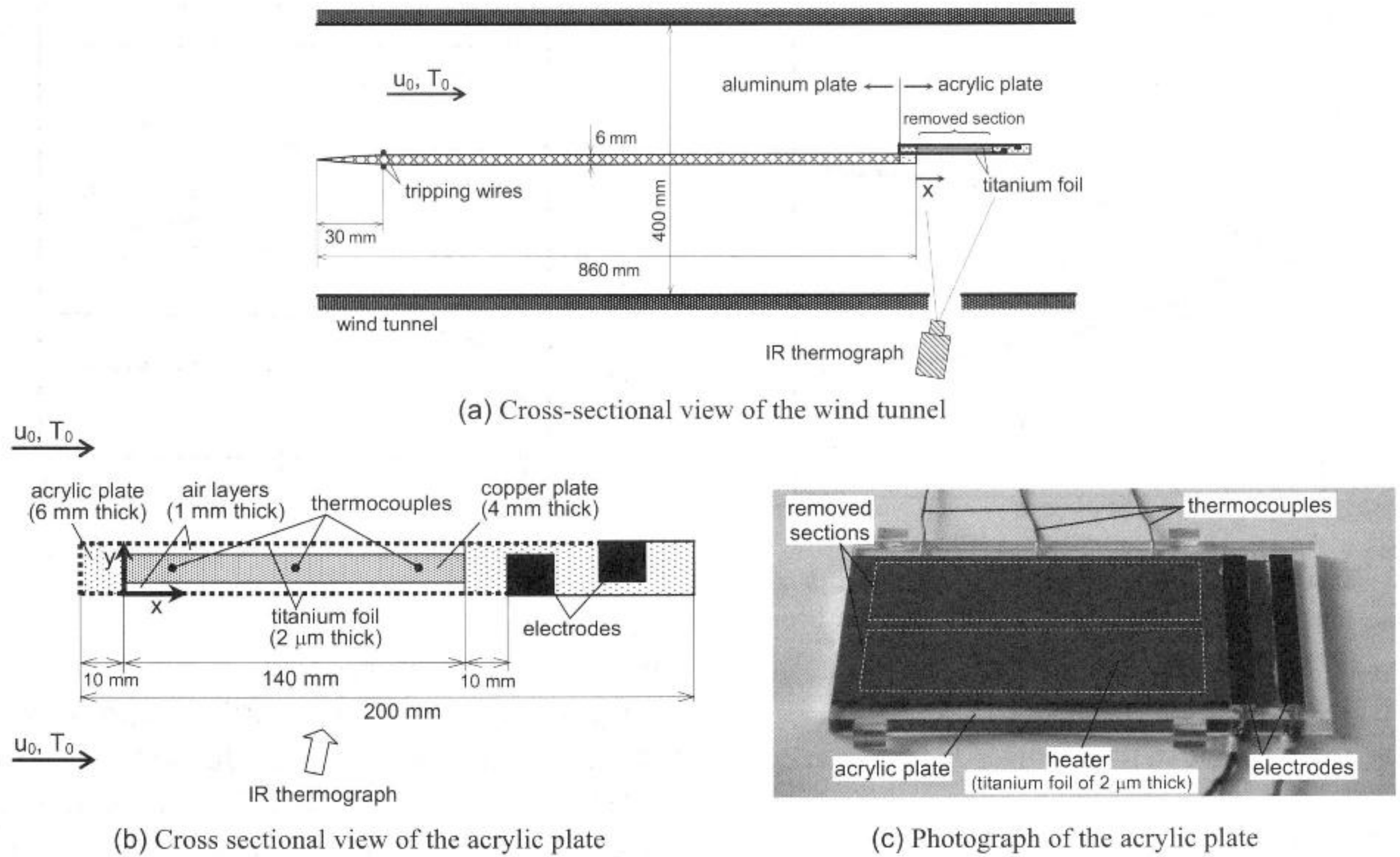


Fig. 1 Experimental apparatus.

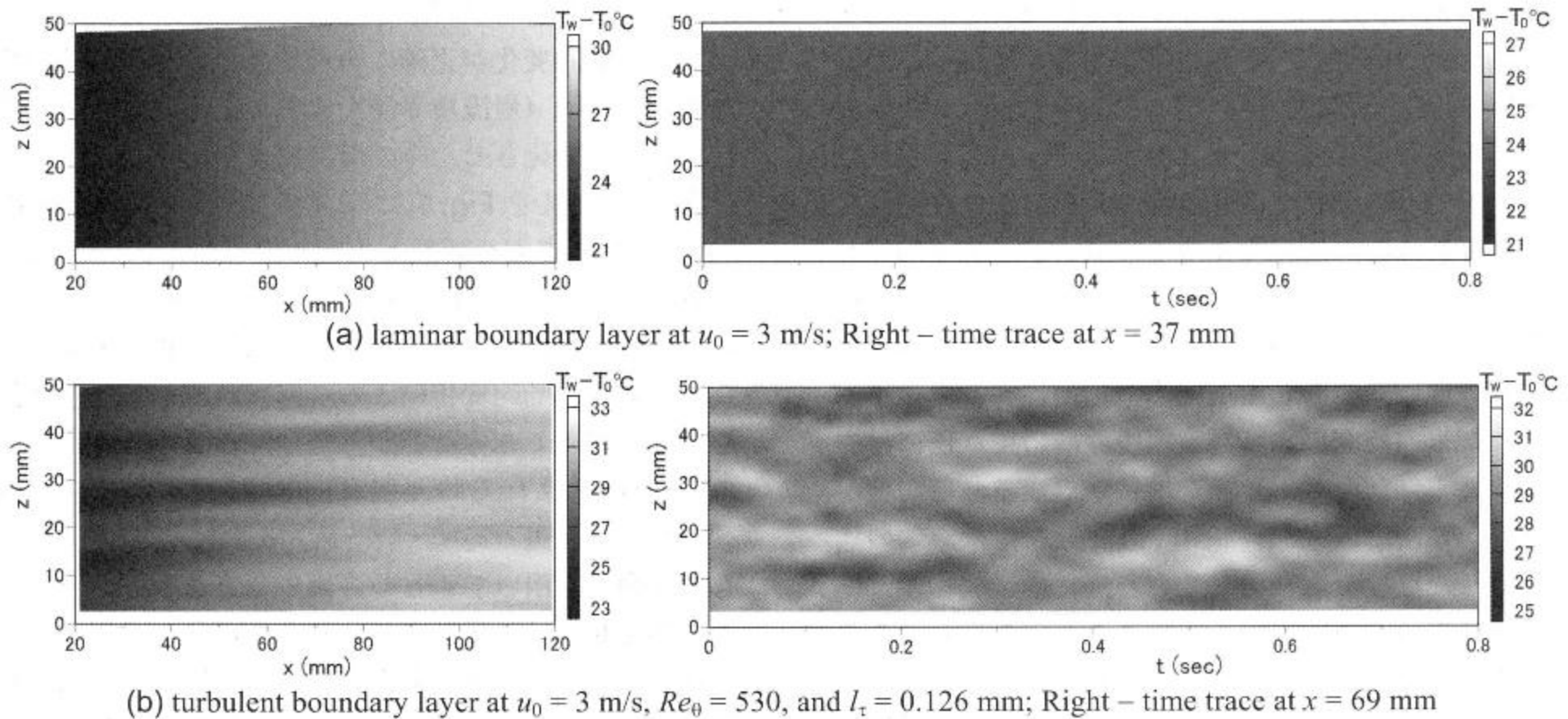


Fig. 2 Temperature distribution $T_w - T_0$ on the titanium foil measured using infrared thermography (TVS-8502, AVIO) : Left-instantaneous distribution : Right-Time trace along z

られてピンと張った状態になる。そのため、流れの変動が激しい乱流状態であっても箔は振動しなかった（厳密には、流速が6 m/sになると振幅 $10 \mu\text{m}$ 程度以下の僅かな振動が発生したが、流れに与える影響は非常に小さいと考えている）。また、空気層は薄いため内部で自然対流が起こらず、空気層内の熱移動は熱伝導のみで扱うことができる。

また、伝熱面の熱容量を極力抑えるため、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。つまり、

伝熱面の放射率が低いため外乱光の影響を受けやすい状態になっている。そのため、風洞の内壁には黒ペイントを塗布し、また、赤外線カメラは Fig. 1 (a) のように被測定面に対して $15^\circ \sim 20^\circ$ 程度傾けて設置した（傾けないと、赤外線カメラからの放射が伝熱面で反射し、自身で受光してしまう）。こうすることで、周囲からの熱放射が均一化され、その影響を容易に除去することができる。また、赤外線カメラの測定温度は、実際に使用したチタン箔（別模型）を用いて校正した。赤外線カメラを用い

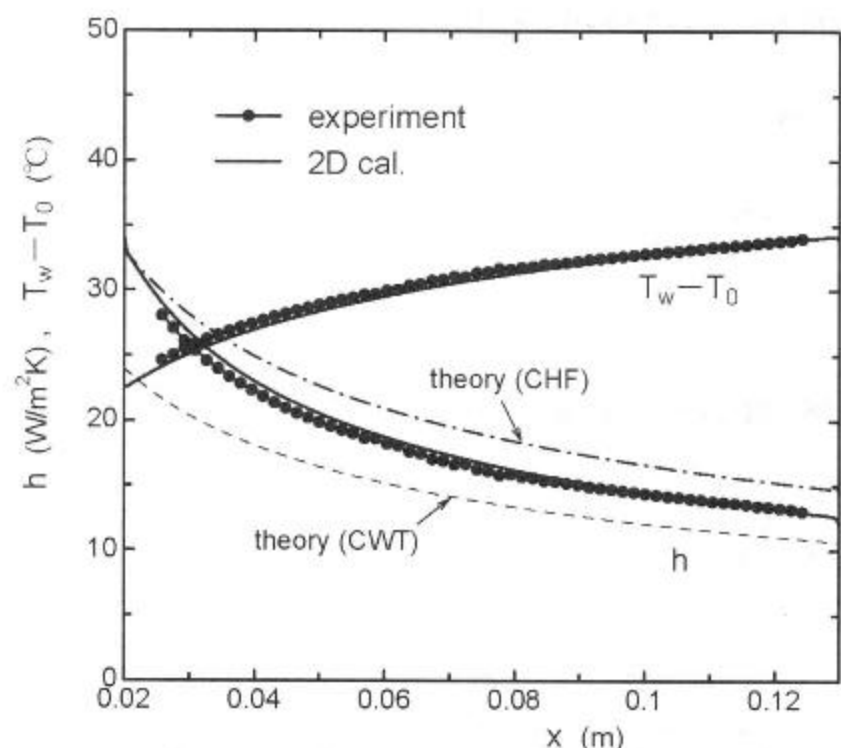


Fig. 3 Distributions of heat transfer coefficient h and temperature difference $T_w - T_0$ for laminar boundary layer at $u_0 = 4$ m/s

た測定に関する一般的な注意点や校正方法の詳細については文献¹¹⁾を参照されたい。

2.2 測定結果

Fig. 2 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。ここで用いた赤外線カメラは、 256×236 pixels の熱画像を 120 Hz の速度で取得することができる。また温度分解能 (雑音等価温度差) は黒体の場合 0.025°C 程度である。Fig. 2 (a) が層流境界層の場合、Fig. 2 (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、時間的な変動も見られない。それに対し、乱流境界層の場合は流れの乱れに相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、Fig. 2 (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。

実験中に肉眼で被測定面を見てみると、静止したチタン箔の周囲に風が緩やかに流れているという、何の変哲もない光景がそこにあるだけなのであるが、一旦赤外線カメラのモニターを通して見ると、そこには目にも止まらぬ速さで激しく揺動しながら後方へと流されていく乱流伝熱の世界が繰り広げられている。

2.3 測定値の検証

赤外線カメラを用いた測定では、定性的な情報は得られても、本当に定量的に正しく測定できているのだろうか? という懸念が常に付きまとう。特に、本測定のように金属箔の低放射率面を測定する場合はなおさらである。実際、この懸念を著者自身が払拭できるようになるまでにはある程度の年月を要した。しかし現在では、いくつかのポイント (文献¹¹⁾ 参照) に注意を払いさえすれば、接触式のセンサで多点計測するよりも精度良い測定が可

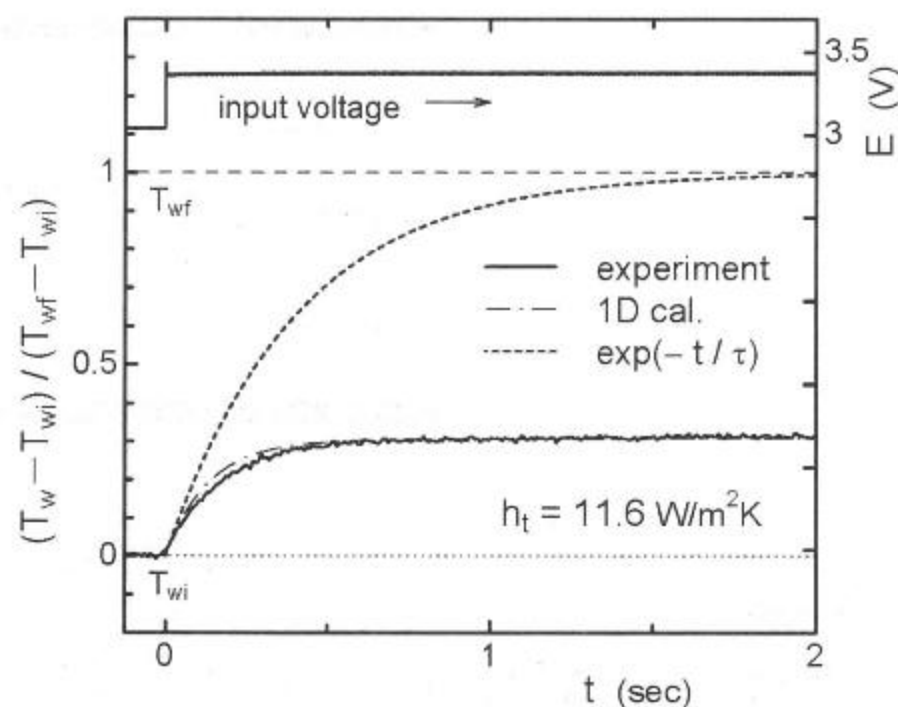


Fig. 4 Response curve of the surface temperature against a stepwise change of input heat flux

能であるという信念を持つに至っている。

Fig. 3 には、赤外線カメラで測定した層流境界層の温度分布及び熱伝達率分布を示す。比較のため、二次元数値解析の結果 (速度分布に解析解を与え、通電加熱熱流束 \dot{q}_{in} に実験値を与えたもの) を実線で示した。両者はよく一致しており (差は 3% 以内)、少なくとも定常状態においては金属加熱面であっても赤外線カメラで精度良く測定できることが示された。

次に、動的変化が正確に再現できるかどうか確かめるため、定常流 (層流境界層) において通電加熱電流をステップ的に変化させた時の温度変化を赤外線カメラで測定した。結果を Fig. 4 に示す。比較のため、解析解 (チタン箔の裏面を断熱と仮定) を点線で、一次元数値解析結果 (チタン箔裏面の空気層及び銅板も含めた場合) を一点鎖線で示す。測定値は数値解析結果とよく一致しており、動的変化による時間遅れも本測定手法により正確に再現できることが示された。この結果は、後述の式 (3) に含まれる時間遅れ $cp\delta(\partial T_w/\partial t)$ や、空気層への熱伝導損失 (局所・瞬時値) $\dot{q}_{ca} = -\lambda_a(dT/dy)_{y=0+}$ も本計測系を用いて正しく評価できることを示している。仮に熱電対などの接触式センサを多数並べて測定したとすれば、センサやリード線の物性値や壁面との接触熱抵抗に至るまで正確に見積もることができなければ、このような動的特性を正確に再現するのは難しい。

3. 熱伝達率の算出方法

次に、赤外線カメラで得られた熱画像から熱伝達率を算出する方法について述べる。Fig. 5 に座標系と記号を示す。熱伝達率は、通電加熱による熱流束 \dot{q}_{in} (あるいはそれから熱損失を差し引いたもの) を壁温と主流の温度差 $T_w - T_0$ で除せば簡単に求めることができる。しかし、対流熱伝達率の変動を求める場合は、伝熱面の熱容量に起因した時間遅れが大きな影響を及ぼす¹⁰⁾。また、時間平均的な値を求める場合であっても、伝熱面に細かな温度分布がある場合には面方向の熱伝導 (熱拡散) の

影響が大きくなる¹⁰⁾。

金属箔内のエネルギーバランスは次式 (熱伝導方程式) で表される。

$$c\rho\delta\frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda\delta\left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2}\right) + \dot{q} \quad (1)$$

$$\dot{q} = \dot{q}_{in} - \dot{q}_{cv} - \dot{q}_{cd} - \dot{q}_{rd} - \dot{q}_{rai} \quad (2)$$

c, ρ, λ, δ は、それぞれ金属箔の比熱、密度、熱伝導率、厚さである。なお、金属箔は十分に薄く、金属箔の厚さ方向には温度 T_w が一様であるとする。また、 \dot{q}_{cv} は空気への対流熱流束 ($=h(T_w - T_0)$, h は熱伝達率), \dot{q}_{cd} は裏面の空気層への伝導熱流束 ($=-\lambda_a(dT/dy)_{y=0+}$, λ_a は空気の熱伝導率), $\dot{q}_{rd}, \dot{q}_{rai}$ はそれぞれ金属箔外部および内部への放射熱流束である。式(1)を変形すると、熱伝達率 (局所・瞬時値) は次式で表される。

$$h = \frac{\dot{q}_{in} - \dot{q}_{cd} - \dot{q}_{rd} - \dot{q}_{rai} - c\rho\delta\frac{\partial T_w}{\partial t} + \lambda\delta\left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2}\right)}{T_w - T_0} \quad (3)$$

$c\rho\delta(\partial T_w/\partial t)$ は箔の熱容量による時間遅れを、 $\lambda\delta(\partial^2 T_w/\partial x^2 + \partial^2 T_w/\partial z^2)$ は箔の面方向の熱拡散を表している。対流熱伝達率の時間・空間的な分布を求める場合は、厳密には式(3)のすべての項を評価して熱伝達率 h を計算する必要がある。

幸いなことに、赤外線カメラを用いた測定では面の温度分布が空間的に非常に高分解に得られるので、 $(\partial^2 T_w/\partial x^2 + \partial^2 T_w/\partial z^2)$ の値を比較的容易に評価することができる。また、高速な赤外線カメラを用いればフレーム間の時間差 dt を小さくできるので、 $(\partial T_w/\partial t)$ の値を評価することができる。また、裏面への熱伝導損失 (局所・瞬時値) $\dot{q}_{cd} = \lambda_a(dT/dy)_{y=0+}$ は、空気層内の非定常熱伝導解析を行うことで評価できる⁸⁾。

なお、式(3)を用いて復元できる熱伝達の時空間構造は、時間的には dt (=フレーム間隔) の4倍程度まで、空間的には dx, dz (=熱画像のピクセル間隔) の8倍程度までであり、それより細かな構造は減衰が大きくなる⁸⁾。本測定の場合は $dt = 1/120$ 秒, $dx = 0.58$ mm, $dz = 0.54$ mm であるので、復元できるのは時間的に 33 ms (=30 Hz) 程度、空間的に 4~5 mm 程度までである。

4. 乱流熱伝達の時空間的挙動

4.1 平板境界層乱流

平板境界層乱流 (Fig. 2 (b)) における一連の熱画像から算出した熱伝達率の時空間分布を Fig. 6 に示す。主流速度が $u_0 = 2$ m/s (Fig. 6 (a)) の場合は、壁近傍の速

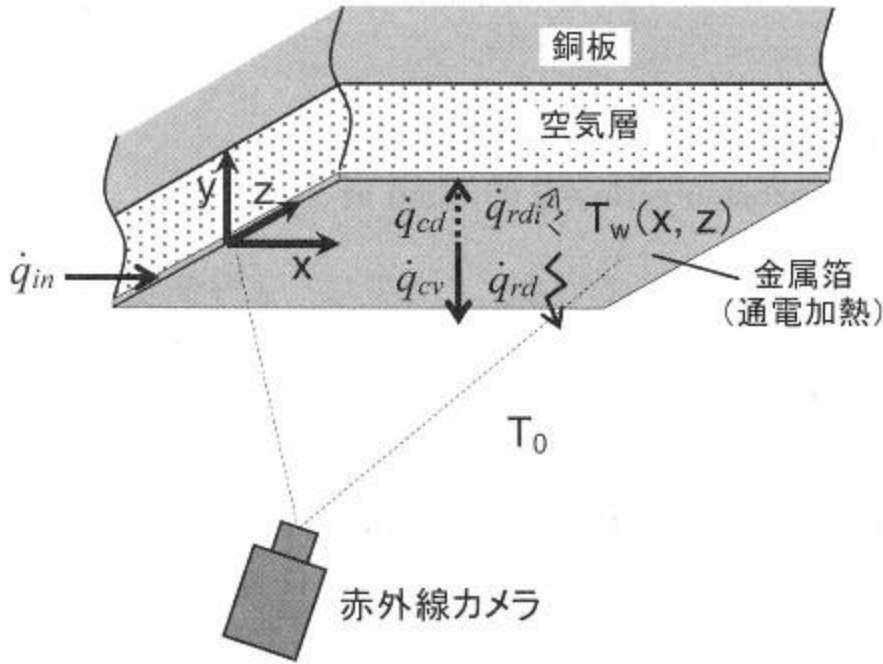


Fig. 5 Coordinate system and symbols

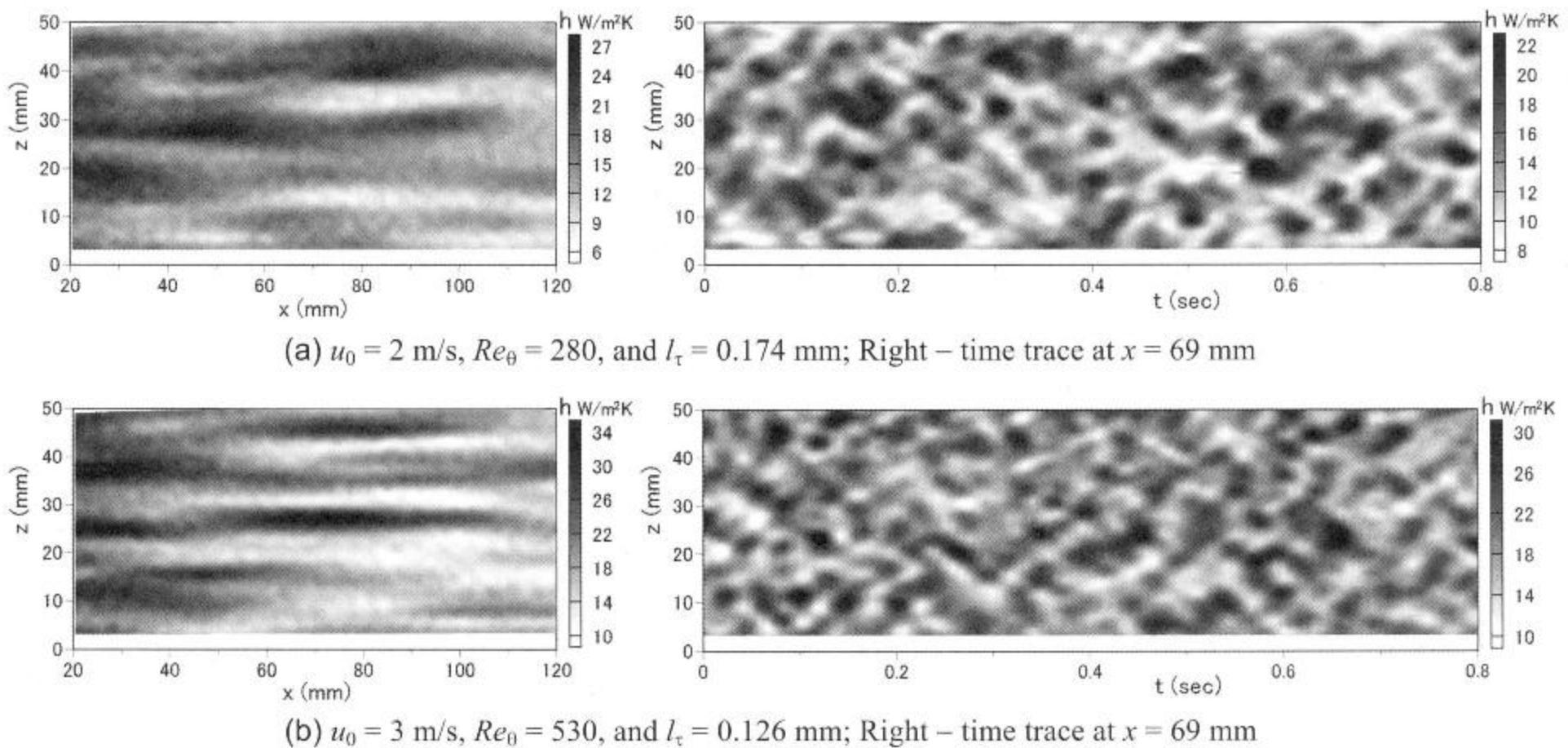


Fig. 6 Time-spatial distribution of heat transfer coefficient on the wall of a turbulent boundary layer : Left-instantaneous distribution; Right-Time trace along z

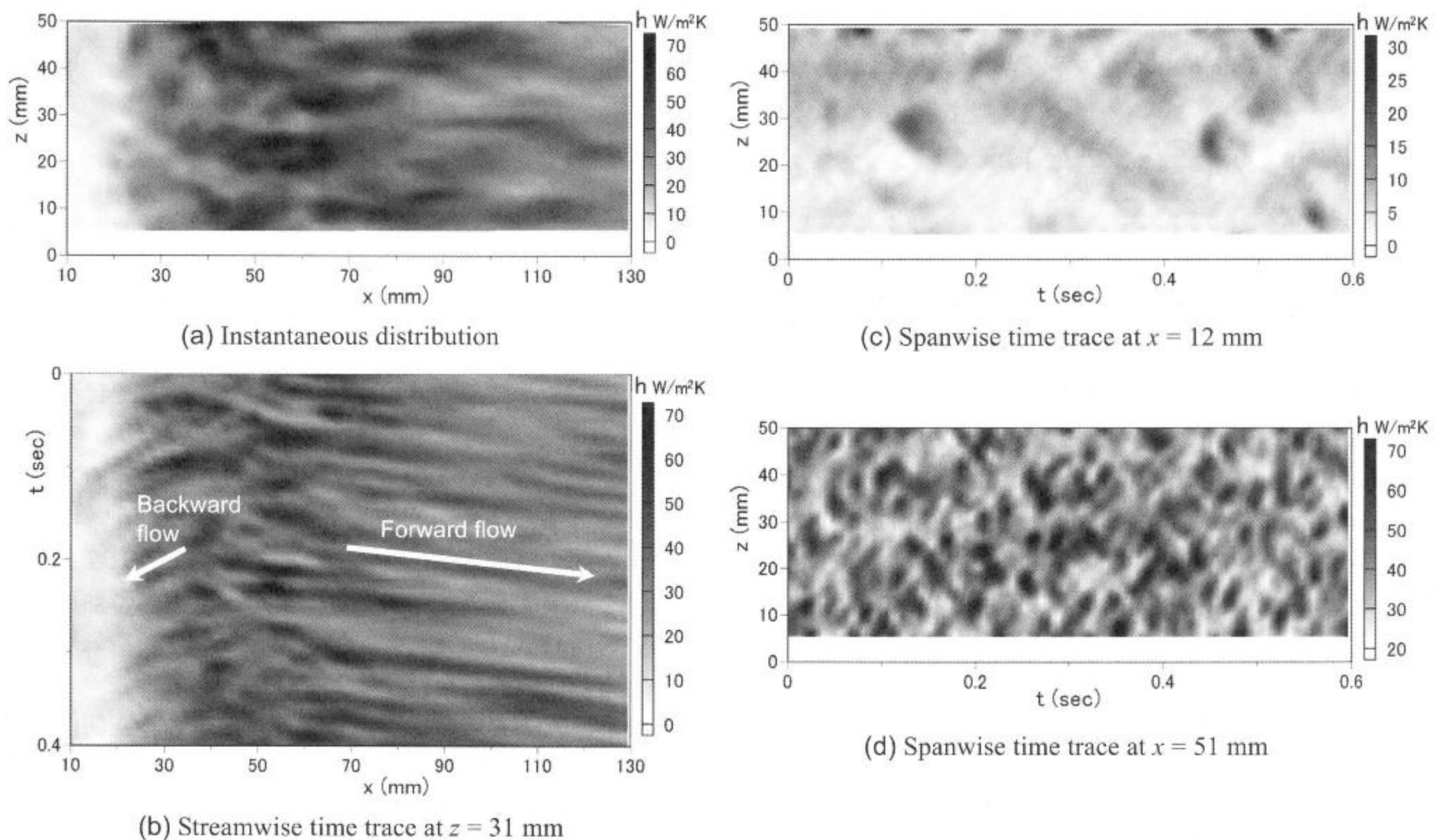


Fig. 7 Time-spatial distribution of heat transfer coefficient behind the backward facing step :
 $u_0 = 4 \text{ m/s}$, $H = 10 \text{ mm}$, $Re_H = 2300$, aspect ratio = 15, expansion ratio = 1.05, step at $x = 0$

度変動エネルギーのほとんど (90%以上) が 30 Hz 以下であるため⁸⁾, 熱伝達率の時空間分布がほぼ完全に復元できていると考えられる。一方, $u_0 = 3 \text{ m/s}$ (Fig. 6 (b)) の場合は, 細かな時間構造は減衰しているものの, $u_0 = 2 \text{ m/s}$ の場合と比べて温度ストリークの間隔が狭くなり, また特徴的な変動の周期も短くなっていることが確認できる。また, 熱伝達率の変動やストリーク間隔の統計量を調べた結果, 従来の直接数値計算 (DNS) や可視化実験の結果と比べて妥当な値となっており⁸⁾, 本手法により, 乱流伝熱現象の定性的な可視化だけでなく, 定量的な時空間分布も測定できることが確認できた。

なお, ここで復元できたのは時間的に 30 Hz 程度, 空間的に 4~5 mm 程度までであったが, この値は赤外線カメラの性能に制約されたものであり, 現在市販されている上位機種 (例えば SC 4000, FLIR 社: 420 Hz, $320 \times 256 \text{ pixels}$, 雑音等価温度差 0.018°C) を用いれば, 時間的に 100 Hz 程度まで, 測定領域を限定すれば空間的に 1 mm 程度までの時空間構造を復元できると考えている。また, 赤外線カメラの性能は今後とも向上していくことが期待されるため, 伝熱面の改良と相まって, 将来的にはさらに細かな時空間構造が測定できるようになるであろう。

4.2 はく離・再付着流れ

次に, 流れがはく離・再付着したときの熱伝達機構を調べるため, 平板に段差を設けた実験装置 (Fig. 1 (a), 後向きステップ) を用いて段差の後方における熱伝達挙動を赤外線カメラで測定した。装置や実験条件の詳細は

文献⁹⁾に記述されている。ここでは, より高速な現象を捉えるため, 赤外線カメラには FLIR 社の Phoenix (325 Hz , $128 \times 128 \text{ pixels}$, 雑音等価温度差 0.025°C) を用いた。

測定した熱画像から求めた熱伝達の時空間分布を Fig. 7 に示す。Fig. 7 (a)が瞬時の熱伝達率分布, Fig. 7 (b)が流れ方向分布 ($z = 31 \text{ mm}$) の時間履歴, Fig. 7 (c), (d)がそれぞれステップ直後の澱み領域 ($x = 12 \text{ mm}$) および流れの再付着領域 ($x = 51 \text{ mm}$) におけるスパン方向分布の時間履歴である。この時空間分布には, 従来の研究では十分に明らかにされてこなかったはく離・再付着流れの熱伝達機構に関する幾つの特徴が現れている。最も顕著な特徴は, 流れの再付着領域 (Fig. 7 (a), $x = 35 - 70 \text{ mm}$) では, 瞬間的には熱伝達率がスパン方向に一様ではなく, 数多くのスポット的な高熱伝達領域が形成されることである。そしてこの高熱伝達領域は, 時間的・空間的にある規則性を持って生成消滅を繰り返している (Fig. 7 (b), (d))。

再付着領域の前方 ($x = 35 - 20 \text{ mm}$) では, 表面近傍の流れが逆流するため, Fig. 7 (b)の時間履歴には前方に向かう軌跡が現れる。この軌跡から求めた逆流速度は主流速度の 0.05-0.1 倍程度であり, 非常にゆっくりとした流れ場となっている。さらに上流側 ($x < 20 \text{ mm}$) では, 逆流の軌跡がほとんど無くなり澱み領域が形成されているが, ときおり僅かな熱伝達上昇が見られる (Fig. 7 (c))。

再付着領域の後方 ($x > 70 \text{ mm}$) では, スポット的で

あった高熱伝達域が徐々に流れ方向に伸びた形になり、乱流境界層のストリーク構造に近づいていく (Fig. 7 (a))。また、この構造は、時間履歴の軌跡 (Fig. 7 (b)) から主流速度の0.5-0.6倍の速度で後方に流されていることがわかる。ただし、スパン方向の平均的な間隔は乱流境界層のものとは大きく異なっており、乱流境界層のストリーク構造に回復するまでにはかなり長い距離を要することが示唆される。

ステップ高さや主流速度を変化させた数多くの実験を行った結果、再付着領域におけるスパン方向の構造にはかなり強い周期性があり、平均的な波長は (レイノルズ数 $Re_H = u_0 H / \nu$ が2000程度以上の場合) ステップ高さ H の1.2-1.3倍程度であることがわかった⁹⁾。つまり、再付着領域には(1.2-1.3) H 程度の間隔で渦構造が形成され、この構造が時空間的に変動することによって、ここで見られるような熱伝達の時空間変動が引き起こされている。

乱流境界層で見られるストリーク構造の場合は、スパン方向の間隔が壁摩擦長 ($l_\tau = \nu / u_\tau$) に支配されることが知られているが、上記の再付着領域における渦構造はステップ高さに支配されており、壁摩擦長とは無関係である。すなわち、双方の流れでは渦構造の発生機構が全く異なっている。しかし、熱伝達率分布の時間履歴を見ても、乱流境界層 (Fig. 6 右図) とステップ後方の再付着領域 (Fig. 7 (d)) とでは、その変動パターンが空間的にも時間的にも良く似ているように思われる。すなわち、たとえその発生機構が異なるとしても、乱流には何らかの普遍的な性質が秘められているのではないかと思われる。

以上のように、赤外線カメラという媒体を通すことで、肉眼では決して見ることでできない乱流伝熱の世界を容易に可視化できることを示した。また、対流熱伝達率の時空間分布といった定量的な測定も可能であることを示した。本記事では、空気への対流伝熱に関するほんの2、3の測定例を示したにすぎないが、原理的には、熱容量の小さな伝熱面さえ構成できれば、自然対流、共存対流、物体まわりの流れなど、さまざまな流れ場においてこの測定手法を適用することができる。たとえ流体が液体や混相流の場合であっても、ほんの少しの工夫でこの測定

手法が適用できる (はずである)。

5. おわりに

「対流伝熱」の分野では、最近ではCFD解析の信頼性が向上してきたため、実験を主体とした研究開発者が非常に少なくなってきたように思う。しかし、いくら信頼性が向上したからといってもCFDはあくまでバーチャルリアリティーの世界であり、本当に正しいかどうかは、その人の判断にゆだねられなければならない。解析結果が本当に正しいかどうかを検証するためにも、あるいは解析結果を見てそれが正しいかどうか判断できる能力を養うためにも、可視化を取り入れた計測技術は今後ともますます重要性を増していくのではないかと考えている。

参考文献

- 1) 日本機械学会編：機械工学便覧 (基礎編 α 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) 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).
- 4) Lloyd, J. M., Thermal Imaging Systems, Plenum Press (1975).
- 5) 赤外線技術研究会編：赤外線工学—基礎と応用—, オーム社 (1991).
- 6) 久野治義：赤外線工学, コロナ社 (1994).
- 7) Astarita, T., Cardone, G. M., Carlomagno, G. M., and Meola, C., A Survey on Infrared Thermography for Convective Heat Transfer Measurements, Optics & Laser Technology, Vol.32 (2000) pp.593-610.
- 8) 中村元：導電性薄膜を伝熱面とした対流熱伝達の時空間分布測定, 機論 B, 73 巻 733 号 (2007) pp.1906-1914.
- 9) Nakamura, H.: Measurements on Three-Dimensional Unsteady Heat Transfer Behind a Backward-Facing Step Using Infrared Thermography, Proc. of 13th Int. Symp. Flow Visualization (2008) CDROM 118.
- 10) 中村元：導電性薄膜を伝熱面とした対流熱伝達測定の周波数応答および空間分解能, 機論 B, 73 巻 726 号 (2007) pp.601-609.
- 11) 中村元：赤外線カメラを用いた熱伝達計測, 熱設計技術解析ハンドブック, 三松株式会社 (2008), pp.198-237.