

1. 赤外線高速イメージングによる管内流熱伝達の測定

Heat Transfer Measurements of In-Pipe Flow by High-Speed Infrared Imaging

キーワード：計測，対流，熱伝達，管内流，乱流，赤外線イメージング，時空間変動測定
Instrumentation, Convection, Heat transfer, Pipe flow, Turbulence, Infrared imaging, Spatiotemporal measurement

中村 元 Hajime NAKAMURA

1. はじめに

熱の輸送や熱交換は管内流の形態で行われることが多い。そのため、熱の輸送量や熱交換量、さらには機器の温度や伝熱性能を見積もるには管内流の熱伝達率を知る必要があり、熱伝達率を予測するための経験式がこれまでに数多く提案されてきた。たとえば、円管内の強制対流乱流では Dittus-Boelter の式や Gnielinski の式などが有名である。また、浮力の影響を伴う共存対流や、沸騰あるいは凝縮を伴う流れについても、数多くの経験式が提案されてきた。

これらの経験式で予測できるのは時間平均的な熱伝達率である。そのため、熱伝達が流れとともに大きく変動する場合であっても、それに伴う機器の温度変動を予測することはできない。また、そもそも対流熱伝達は流れ場の変動に対応した非定常な現象である。つまり、熱伝達のメカニズムを明らかにするには、非定常な挙動を定量的に把握することが必要になる。

筆者は、流れの乱れに伴う熱伝達変動を測定するために、高速度赤外線カメラを用いた手法を開発してきた。赤外線カメラでは面の時系列情報を得ることができるため、熱伝達率の測定に加え、熱が流れとともにどのように移動しているかを動画を通して把握することができる。これまでに、平板境界層乱流をはじめ、ステップ流れや管内流の熱伝達測定を行ってきた。本稿では、冷凍空調機器とも密接に関連する管内流の測定に焦点を当てて、伝熱模型の構造や測定手法を紹介した上で、いくつかの測定例について紹介する。

2. 測定方法

2.1 伝熱模型の構造

管内水流の測定を行うにあたり考案した伝熱模型^{1,2)}を図1に示す。アクリル製円管（内径 20 mm）の一部を矩形状に切り取り、内面に厚さ 20 ~ 40 μm のチタン箔

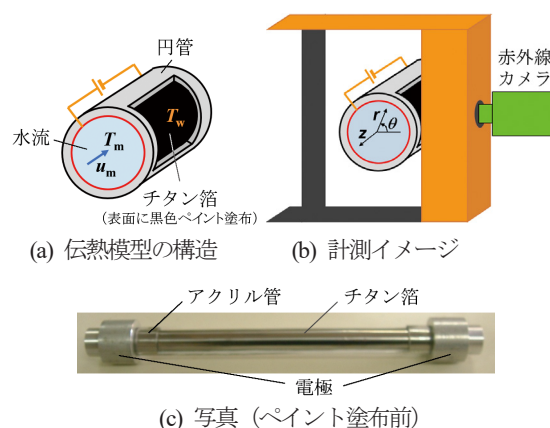


図1 伝熱模型

を接着した構造になっている。伝熱模型の両端に設置された電極を介してチタン箔を通電加熱すると、円管内の流れに対応した熱伝達変動により、チタン箔の温度が高速に変動する。この温度変動を円管外部から図1(b)のように赤外線カメラで測定することにより、熱伝達変動を測定することができる。

チタン箔を用いているのは、金属の中では熱容量が小さく温度変動しやすいのに加え、比較的剛性が大きく変形しにくいためである。薄ければ薄いほど熱伝達変動による温度変動を捉えやすくなるため、チタン箔面が振動しない範囲で、できるだけ薄い箔を使用した。ちなみに、チタン箔の振動をレーザ変位計で測定したところ、流れが乱れている場合であっても振幅は最大で数 μm であり、乱流渦構造に比べて十分小さいことを確認している。ただし、薄いチタン箔を用いているといっても、伝熱面の熱容量・熱拡散による温度変動の減衰は避けられない。そのため、2.3節で示す後処理によって減衰を復元し、定量的な熱伝達率変動を求めた。

2.2 赤外線カメラを用いた測定

本測定では、高速な温度変動を低ノイズで測定するため、量子型の高速度赤外線カメラ (SC4000,

FLIR, ~ 1000 Hz, 雑音等価温度差 0.02°C 以下) を使用した。また, 管内流では測定面が曲面であるため, 周囲からの環境放射が測定面で様々な方向に反射する。そのため, チタン箔の外面に黒色塗料 (アクリルラッカー スプレー) を塗布して反射の影響を抑えた。ただ, 塗布が薄すぎると反射の抑制が不十分となり, 厚くなると赤外線カメラで測定される塗料外面温度がチタン箔より低くなる。いろいろと試した結果, 塗布厚さは $10\sim 20\ \mu\text{m}$ とした。この場合, 表面の放射率は 0.9 程度となり, 塗料による温度低下も無視できる程度となった。また, 図 1 (b) に示すように, 黒色塗料を塗布した銅板で伝熱面の周囲を覆うことにより, 環境放射を極力一様にした。こうすることで, 後述の式 (1) を用いて周囲環境放射 (右辺第 2 項) の影響を除去することができる。

赤外線カメラで温度を測定するには, 伝熱面の放射率を正確に知る必要がある。測定面温度を T_w , 放射率を ε_w , 周囲環境温度を T_{amb} とすると, 赤外線カメラの各画素の輝度値 U は次式で表される (周囲環境の放射率が十分高く, 測定経路上での赤外線の吸収・放射が十分に小さい場合)³⁾。

$$U = \varepsilon_w U_b(T_w) + (1 - \varepsilon_w) U_b(T_{\text{amb}}) \quad (1)$$

ここで, $U_b(T)$ は校正関数であり, 黒体炉の温度を T とした時の熱画像の輝度値を示している。式 (1) より, 赤外線カメラで熱画像 U を取得すると, T_w , ε_w , T_{amb} のうち 2 つが既知であれば, 他の 1 つを算出することができる。通常の温度測定では ε_w と T_{amb} を既知にして T_w の分布を測定するのであるが, T_w と T_{amb} を既知にすると, 放射率 ε_w の分布を測定することができる。ここでは, 伝熱面を非加熱とし, 熱伝達測定時の伝熱面温度 (室温 $+10^\circ\text{C}$ 程度) になるように加熱した水を円管内に流し, その時の伝熱面温度 ($\approx$ 水温) T_w , 周囲銅板温度 T_{amb} , および熱画像の輝度値 U から, 伝熱面の放射率 ε_w を評価した。

2.3 熱伝達率の算出方法

赤外線カメラによる測定により, 伝熱面の瞬時温度分布とその時系列データを得ることができる。この温度データ T_w から, 次式を用いて, 瞬時熱伝達率 h 分布の時系列データを算出した (詳細は文献 2) または 4) 参照)。

$$h = \frac{\dot{q}_{\text{in}} - \dot{q}_{\text{cvr}} - \dot{q}_{\text{rdr}} + \lambda_e (\delta_t + \delta_p) \left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial (R\theta)^2} \right)}{T_w - T_m} - \frac{(c_t \rho_t \delta_t + c_p \rho_p \delta_p) \frac{\partial T_w}{\partial t}}{T_w - T_m} \quad (2)$$

上式には, T_w の空間微分項 (伝熱面内の熱拡散) と時間微分項 (伝熱面の熱慣性) が含まれているが, 熱伝達

変動に対して時空間的に十分な分解能で温度データを取得できていれば, これらの微分項を計算することにより, 熱拡散および熱慣性による温度変動の減衰を復元することができる。なお, 微分項を計算する際には測定ノイズも増幅されるため, フィルター処理などによりノイズを低減する必要がある⁴⁾。

3. 測定例

3.1 円管内の層流と乱流

円管内に水を流し, 伝熱面を水温 $+10^\circ\text{C}$ 程度になるように加熱した時の熱画像を図 2 に示す。(a) は層流 (レイノルズ数 $Re = 1100$), (b) と (c) は乱流 ($Re = 8700, 15700$) の場合である。層流では流れが乱れていないため, 伝熱面温度は時間的に変動しない。ただし, 浮力の影響で加熱された流体が上方へ移動するため, 上壁 ($\theta = 90^\circ$) 付近の温度が上昇している。一方, 乱流では, 流れ方向に伸びた筋状の温度分布が現れている。これは一般に壁乱流に見られる特徴であり, 壁面近傍に形成される渦構造 (乱流ストリーク構造) を反映したものである。熱画像の動画を見ると, この構造が流れとともに揺動しながら下流へと移動していく様子が確認できる。また, Re 数の上昇とともにストリーク構造が細かくなることがわかる。この渦構造により管内の流れが混合されるため, 流れが乱流になると熱伝達が上昇するとともに, 浮力による円管上部の温度上昇が見られなくなる。

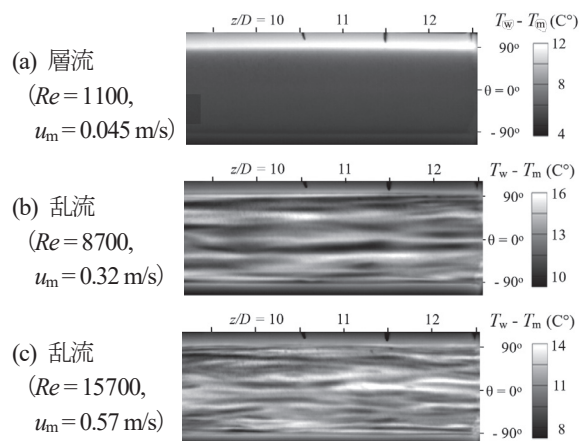


図 2 測定面の瞬時熱画像

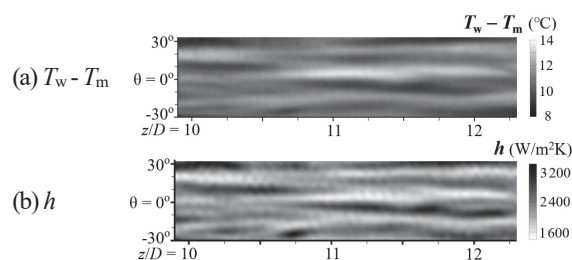


図 3 瞬時の温度分布と熱伝達率分布 ($Re = 10100$)

図3に、 $Re=10100$ における瞬時温度分布 $T_w - T_m$ (T_m は水流の混合平均温度)と、式(2)から算出した熱伝達率 h の瞬時分布を示す。式(2)の微分項を計算することにより温度変動の減衰が復元され、より明瞭なストリーク構造が現れている。これが、乱流によって実際に引き起こされる熱移動の様相である。得られた熱伝達率分布の時系列データを統計解析した結果、平均値は従来の経験式(低レイノルズ領域から適用される Gnielinski の式)とよく一致しており、変動振幅やストリーク平均間隔は直接数値計算の結果とよく一致することを確認した。すなわち、本手法により管内流の熱伝達率変動を定量的に測定できることを確認した⁴⁾。

3.2 はく離・再付着流れ

次に、円管内の挿入物により流れがはく離・再付着する場合について調べた。ここでは、図4(a)のように開口比0.5のオリフィス板を円管内に設置して測定を行った。この場合、オリフィスで絞られた流れがはく離し、下流側で円管内壁に再付着することがよく知られている。また、流れが再付着する位置で熱伝達率が高くなることもよく知られている。

図4(b)にオリフィス下流側で測定した瞬時熱画像を、図5(a)に熱画像の破線領域において算出した瞬時熱伝達率分布を示す。流れが再付着する領域では、非常に細かな熱伝達構造を呈していることがわかる。時空間的な構造が細くなるほど伝熱面内の熱拡散・熱慣性の影響が大きくなり温度変動の減衰が大きくなるが、式(2)により熱伝達構造を復元できている。

なお、流れが再付着する位置を「再付着点」と呼ぶことが多いが、図4(b)および図5(a)を見ると、流れの再付着による高熱伝達率のスポットが、オリフィス下流側の広範囲にわたって存在していることがわかる。すなわち、流れの再付着は常に同じ位置で起こるのではなく、

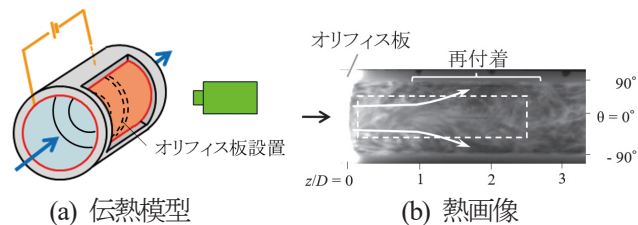


図4 オリフィス板を設置した測定 ($Re = 12000$)

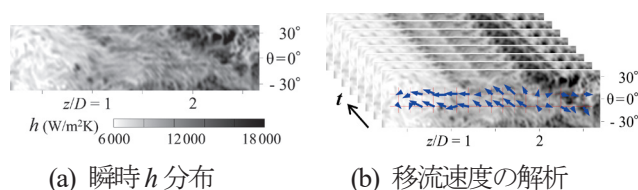


図5 瞬時熱伝達率の移流速度解析 ($Re = 13000$)

はく離した流れが細かく複雑な渦構造を形成し、それが広い領域にわたって断続的に壁面に付着していることが窺える。その結果、壁近傍では順流と逆流が複雑に入り混じり、流れの混合が促進されて熱伝達が大きく上昇することが理解できる。

本測定では、時々刻々と変化する瞬時熱伝達率分布の連続画像が得られるため、PIV解析ソフトウェアにより、壁近傍における熱流動の瞬時の移流速度分布を求めることができる(図5(b))。この解析により、時間平均的な流れの再付着位置(移流速度の流れ方向成分が0となる位置と定義)を求め、時間平均的な熱伝達率の極大位置との関係を調べた。その結果、両者は一致せず、再付着位置よりも上流側で熱伝達率が極大になることが示された⁵⁾(注:ここでは再付着位置を流れの観測ではなく熱移動の移流速度から評価したが、本手法で測定した熱伝達変動は壁面近傍の速度変動と強い相関があることを確認しており⁶⁾、流れの再付着位置を正しく評価できていると考えている)。また、上流側に再付着するほど熱伝達への寄与が大きくなり、これが再付着と熱伝達極大の位置が一致しない原因であることが示された。

ちなみに、オリフィスの下流側では流れの再付着位置より上流側で配管の減肉が起こりやすいことが知られている。熱伝達と物質伝達には強い相関があるため、オリフィス下流側の配管減肉現象も、本測定結果と密接に対応していると考えられる。

3.3 旋回流

次に、流れを旋回させた時の熱伝達変動を紹介する⁷⁾。らせん溝やねじりテープを設置して管内流に旋回を与えると、効果的に伝熱促進されることが経験的によく知られている。ただし、旋回により伝熱促進されるメカニズムについてはあまり明らかにされていないようである。たとえば、円管を軸方向に回転させて流れに旋回を与えると乱れが抑制されて伝熱が抑制されることが知られているが、円管を固定して流れに旋回を与えると伝熱促進されるのは、考えてみれば不思議である。

ここでは、図6のように円管内にねじりテープを設置し、その下流側に伝熱模型を設置して赤外線カメラによる測定を行った。ねじりテープの下流側で測定したのは、挿入物による乱れの影響を極力排除し、旋回のみ効果を明らかにしたかったからである。

図7に、ポンプ動力 P_L (測定部の圧力損失と流量の

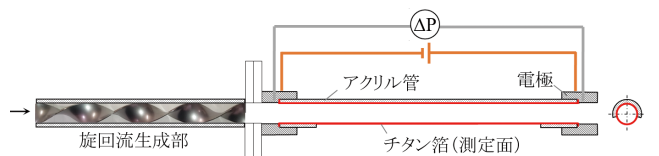


図6 旋回流生成部と測定部

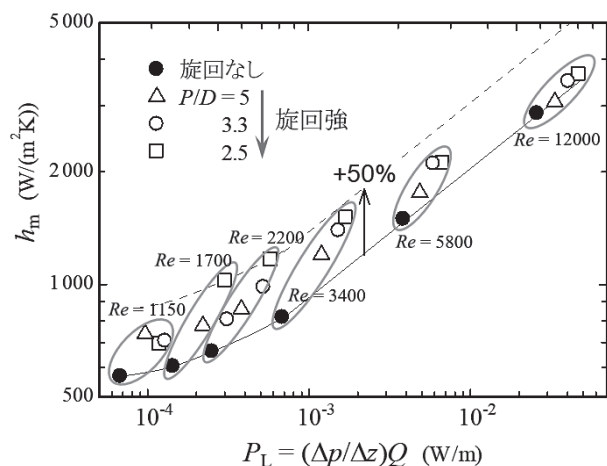
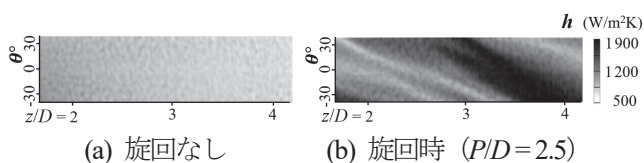


図7 旋回流の伝熱促進

図8 瞬時熱伝達率分布 ($Re = 1700$)

積)に対する平均熱伝達率 h_m を示す。流れに旋回を与えると、同一ポンプ動力において最大で50%程度の伝熱促進が得られていることがわかる。特に、層流と乱流の間の遷移域 ($Re=2000$ 程度) では大きな伝熱促進が得られている。従来の研究においても、流れを旋回させると層流域では Re 数が高いほど、乱流域では Re 数が低いほど伝熱促進されることが示されている。すなわち、管内流を旋回させると、遷移域において大きな伝熱促進が得られると言える。

図8に、 $Re=1700$ における瞬時熱伝達率分布を示す。ねじりテープの無い場合(図8(a))や、ねじりの無い平らなテープを挿入した場合は流れが層流であり、熱伝達率は時間的に変動しないが、ねじりテープを挿入して流れに旋回を与えると、図8(b)のように旋回方向に傾いた非定常な筋状の構造が現れる。この渦構造により流れの混合が促進され、熱伝達率が上昇することが窺える。

流れの旋回によって伝熱促進されるメカニズムについては現在も検討を進めているところであるが⁸⁾、赤外線カメラで得られた可視化データは、現象を理解する上で大いに役立っている。

4. おわりに

本稿では、これまで行ってきた水の単層流の熱伝達測定について紹介したが、沸騰を伴う熱伝達についても赤外線カメラを用いた測定が可能であり、いくつかの測定例がある。筆者の研究室でも、沸騰を伴う熱伝達変動を高速かつ定量的に測定する取り組みを行っているところである⁹⁾。

なお、本稿で紹介した実験データは、当時防衛大学校理工学研究科学生の椎原尚輝氏および菅原義徳氏が取得したものである。また、防衛大学校機械工学科熱工学講座の皆様をはじめ、多くの方にご協力およびサポートをいただいた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) 椎原尚輝, 中村元, 山田俊輔: Thermal Science & Engineering, **21** (4), 105 (2013).
- 2) 椎原尚輝: 大学改革支援・学位授与機構 博士学位論文, 82646第558号, (2017).
- 3) 中村元: 光アライアンス, **27** (8), 1 (2016.8).
- 4) H. Nakamura, N. Shiibara and S. Yamada: Int. J. Heat Fluid Flow, **63**, 46 (2017).
- 5) 椎原尚輝, 中村元, 山田俊輔: 機論, **82** (840), 16-00067 (2016).
- 6) S. Yamada and H. Nakamura: Int. J. Heat Fluid Flow, **61** (A), 174 (2016).
- 7) 菅原義徳, 山田俊輔, 船見祐揮, 中村元: 日本機械学会熱工学コンファレンス2021講演論文集, G221, (2021).
- 8) H. Nakamura, Y. Sugawara, S. Yamada and Y. Funami: Proc. 12th Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena, 339, Osaka, Japan (Online) (2022).
- 9) 吉田雅輝, 山田俊輔, 船見祐揮, 中村元: 冷空論, **38** (2), 145 (2021).



中村 元 Hajime NAKAMURA

東京工業大学大学院博士後期課程修了
防衛大学校システム工学群機械工学科
National Defense Academy
教授

原稿受理 2022年5月11日