



研究室紹介

防衛大学校システム工学群機械工学科 熱工学研究室

キーワード：対流，熱伝達，熱伝導，冷却，計測，可視化，赤外線イメージング，時空間変動測定
Convection, Heat transfer, Thermal conduction, Cooling, Instrumentation, Visualization, Infrared imaging, Spatiotemporal measurement

教授 中村 元 Hajime NAKAMURA

1. はじめに

防衛大学校は、神奈川県横須賀市に所在する幹部自衛官を育成するための大学校である。三浦半島東端の小原台という高台に位置しており、晴れた日には東京湾を一望にでき、天気が良ければ富士山を裾野まで拝むこともできる。このような風光明媚な環境のもとで教育・研究が行われている。

防衛大学校では、一般大学と同じように、文部科学省の定める大学設置基準に準拠した幅広い教育・研究が行われている。同時に、本校独自の防衛学（防衛に関する学術分野）の教育も行われている。本科（学部に相当）の学生は、2学年進級時に専門学科に配属されると同時に、陸上、海上、航空の各要員に配分される。4学年では、一般大学と同様に研究室に所属して卒業研究を行う。また、研究科（大学院に相当）も設置されており、大学院設置基準に準拠した教育・研究も行われている。なお、特別研究員（非常勤職員）の制度もあり、研究補助または教育補助で収入を得ながら研究科学生として研究室に所属し、修士または博士の学位取得を目指すことも可能である。

2. 研究室の概要

筆者は、システム工学群機械工学科に所属しており、その中で熱工学に関する教育・研究を行っている。熱工学研究室には、教育・研究を担当する教官として筆者、山田俊輔准教授、船見祐揮講師の3名が在籍している。学生は、現在は研究科後期課程（博士後期課程に相当）の吉田雅輝君と本科4年生7名が所属している。図1は、令和元年度の教官および学生の写真である。当時は、フランス海軍士官学校から留学生を2名受け入れていた。

熱工学研究室では、五十嵐保先生（1970年代～、現、防衛大学校名誉教授）の頃から、主に対流熱伝達（固体－流体間の熱移動）の基礎研究が行われてきた。二次元柱状物体（円柱や角柱）など基本的な形状をした物体まわりの流れ場や熱伝達が実験的に詳細に調べられ、流れ場と熱伝達との関係を明らかにするとともに、機器の熱設



図1 研究室の教官と学生（令和元年度）

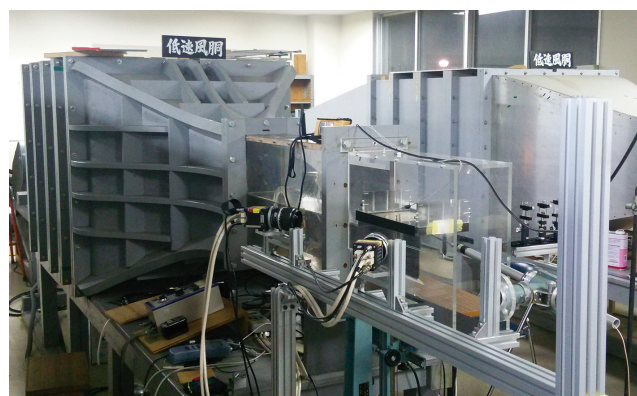


図2 低速風洞実験装置

計で必要となる相関式が提案されてきた。その頃に整備された低速風洞（図2）は現在も稼働している。

筆者が防衛大学校に着任したのは1997年である。それ以来、当研究室において対流熱伝達の基礎研究に従事してきた。また、着任して数年後に、量子型センサを搭載した高速度赤外線カメラを導入し、これを機に、対流熱伝達の時空間変動を赤外線カメラで測定する手法の開発を進めてきた。また、日本機械学会に設置されている電子実装の信頼性に関する研究分科会の中で、産業界のニーズに基づいた熱設計の精度向上の研究にも取り組んできた。

2010年には、はく離・再付着流れが専門の山田先生が着任し、赤外線カメラと粒子画像流速測定法（PIV）を

併用した測定など、対流による熱流動挙動のメカニズムを明らかにする取り組みを進めている。2018年からは、日本冷凍空調学会の熱交換技術に関する調査研究プロジェクトに参加しており、流動沸騰熱伝達の動的挙動を赤外線カメラで測定する取り組みを進めている。また、ハイブリッドロケットエンジンの燃焼が専門の船見先生が着任したのをきっかけに、境界層内の熱物質伝達（酸化剤と燃料の混合促進）など、燃焼効率向上に関する研究にも取り組んでいる。

以降では、当研究室で行っている研究の中で、赤外線カメラによる熱伝達測定や、機器の熱設計精度向上の取り組みについて、冷凍空調の分野とも関わりのありそうなテーマをいくつか取り上げて紹介する。

3. 赤外線カメラを利用した熱伝達の 時空間変動測定

3.1 研究を始めた経緯

はじめに、赤外線カメラで熱伝達変動の測定を始めた経緯について紹介したい。高速度赤外線カメラを導入した当初、風洞内に設置した加熱円柱を赤外線カメラで観測したところ、円柱背面の温度が妖しげに揺動している様子が確認できた。「この変動をはっきり観たい」という単なる好奇心からこの研究はスタートした。

まず、伝熱面の熱容量を小さくした円柱模型の製作を試みた。試作した模型の一例を図3に示す。亚克力製の円管の中央部を半円状に切り取り、外面に通電加熱用のステンレス箔（厚さ $10\mu\text{m}$ ）を接着したものである。この模型を用いると、円柱背面近傍に形成される3次元渦構造に対応した温度変動を観測することができた¹⁾。ただし、熱流束センサを用いた測定に比べると高速な変動は明らかに減衰しており、実際の熱移動に対応した現象を捉え切れていないこともわかった。

そこで、減衰のない熱伝達変動をいかに測定するかに取り組んだ。測定対象には乱流境界層を選んだ。これは、模型の製作が容易であるのに加え、数多くの実験データや直接数値計算（DNS）結果が存在しており、これらと比較して測定データの妥当性を検証できるからである。試行錯誤しながら製作した模型の一つを図4²⁾に示す。通電加熱用の金属箔には、熱容量の小さいチタン箔（厚さ $2\mu\text{m}$ ）を選んだ。また、箔裏側への熱損失によ

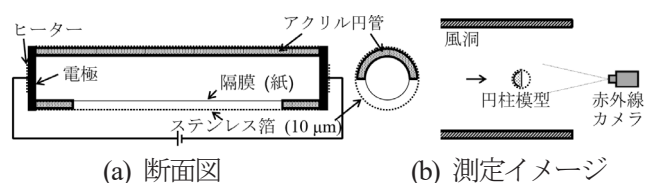


図3 円柱模型の一例

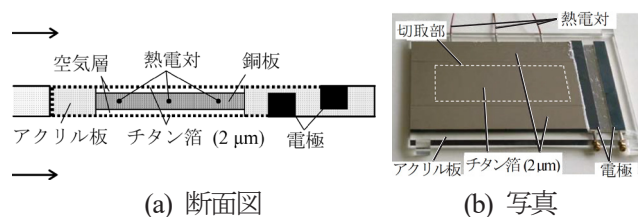


図4 平板模型の一例

り変動が大きく減衰することがわかったため、平板内部に銅板を挿入し、チタン箔と銅板の間には厚さ 1mm の空気層を設けた（こうすることで、空気層内の非定常3次元熱伝導解析を行ってチタン箔裏側への熱流束変動を求め、対流による熱流束変動を正確に評価することができる）。その結果、乱流境界層のストリーク構造を反映した熱伝達変動をはっきりと確認できるようになった。熱伝達の空間分布や変動振幅についても、DNSの結果と比較して妥当な値であった²⁾。すなわち、赤外線カメラを用いた測定によって、時空間的に減衰のない熱伝達変動の測定が可能であることが示された。実際の熱移動を観たいというこだわりから続けてきた研究であったが、考えてみれば、これが現在の当研究室の基盤となる計測手法になっているように思う。

3.2 対流熱伝達の測定

その後、図4の平板と上流側の平板との間に段差を設けて後ろ向きステップを形成し、はく離・再付着流れに伴う熱伝達変動を測定してみた。測定結果の一例を図5に示す。従来は、はく離・再付着流れの熱伝達は熱電対や熱流束センサなどの点計測で調べられてきたが、赤外線カメラで観た高速かつ複雑に変動する面の熱伝達の様相は、これまでのイメージを覆すものであった。

その頃、研究科学生として当研究室に所属していた高木明佳さん（現、海上自衛隊）がこの測定を進めてくれた。後ろ向きステップに加え、前向きステップや鈍頭平板の測定も行ったところ、いずれの場合も再付着長さ（流れのはく離点から再付着位置までの距離）と熱伝達の変動特性がよく対応していることが確認できた³⁾。その後、はく離・再付着流れの熱伝達のメカニズムをPIVを併用して明らかにする取り組みを、山田先生を中心に進めている⁴⁾。

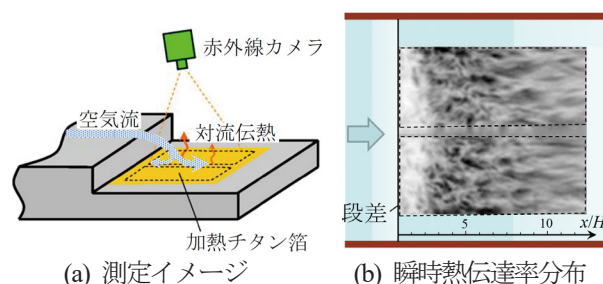


図5 はく離・再付着流れの熱伝達

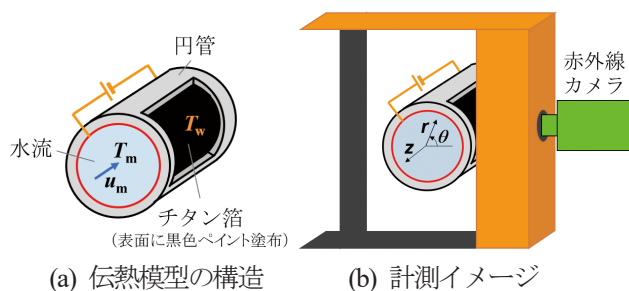


図6 円管模型の一例

上記は、風洞装置を用いた空気流の測定であったが、管内流実験装置を用いた水流の熱伝達測定も行っている。この測定は、椎原尚輝君（研究科前・後期課程、現、陸上自衛隊）のテーマとして立ち上げた⁵⁾（管内流の熱伝達測定については、「冷凍」2022年8月号でも紹介している）。まず、実験装置および供試模型（図6）を製作し、円管内乱流の熱伝達変動を赤外線カメラで定量的に測定可能であることを検証した。その上で、オリフィス後方のはく離・再付着流れや、管内流に脈動を与えた測定を行い、各流れ場の熱伝達には特異な変動特性があることを明らかにした。その後、齋藤陸君（研究科前期課程、現、航空自衛隊）は流れが急加速・急減速した時に見られる熱伝達の遅れを調べ、脈動による熱伝達変動を予測する基礎データを取得した⁶⁾。また、菅原義徳君（研究科前期課程、現、陸上自衛隊）は、円管内にねじりテープを挿入して流れに旋回を与えた測定を行い、圧力損失一定の条件であっても、遷移域近傍では伝熱促進が可能であることを明らかにした⁷⁾。現在も、管内の脈動流や旋回流の熱伝達特性および伝熱促進について、実験的に明らかにする取り組みを進めている。

3.3 沸騰熱伝達の測定

赤外線カメラを用いた熱伝達変動の測定は、伝熱面の温度変動さえ測定できれば他の流れ場にも適用可能である。沸騰熱伝達に関しては、2009年頃からダルムシュタット工科大学やマサチューセッツ工科大学などで赤外線カメラを用いた測定が試みられている。ただし、熱交換器などの設計で必要となる管内の流動沸騰については赤外線カメラによる測定例が少なく、特に、近年開発が進んでいる微細流路内の熱伝達変動を赤外線カメラで十分な時空間分解能で測定した例は見当たらない。そこで、吉田雅輝君（研究科前・後期課程）のテーマとして現在チャレンジしているところである。

沸騰の測定では大きな圧力変動が生じるため、図7のような、赤外線透過窓材（フッ化カルシウムやサファイアなど）に赤外線不透過の薄膜（金属や酸化インジウムスズ（ITO）など）を成膜した伝熱面が用いられる。当研究室では、流路内の沸騰気泡の挙動と熱伝達変動を流路

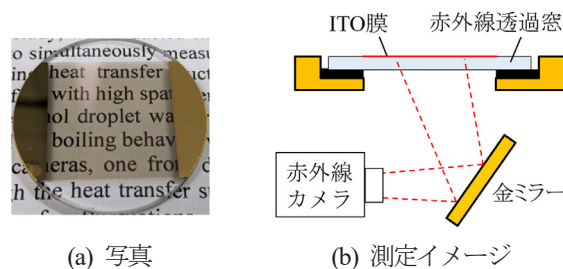


図7 沸騰熱伝達測定用の伝熱面

の外側から同時に測定できるように、薄膜には可視光を透過するITOを選んだ。

試しに、液滴を高温面に滴下した時の沸騰熱伝達を測定したところ、沸騰気泡の生成、成長、崩壊に伴う高速な熱伝達変動の測定が可能であることを確認できた⁸⁾。現在は、辺長2mmの矩形微細流路内の沸騰熱伝達を測定する実験装置および供試模型を製作して、気泡流やスラグ流など、沸騰形態の違いによる熱伝達の変動特性を調べているところである⁹⁾。

4. 機器の熱設計精度向上に寄与する研究

熱伝達に関する基礎研究に加え、企業のニーズに基づいた研究も行っている。その中から、熱電対による表面温度測定と空冷ファンの研究について紹介する。

4.1 熱電対による表面温度測定の誤差解析

講演会などで温度測定の基礎的な話をした際に、熱電対で物体の表面温度を正確に測るにはどうすればよいか、という質問をしばしば受けてきた。測定誤差を低減する指針は従来から数多く示されてきたが、経験的な指針にとどまっていたため、当研究室で改めて検討してみた。

熱電対で表面温度を測定するイメージを図8に示す。この伝熱経路を単純化すると、測定誤差を解析的に求めることができる¹⁰⁾。表面との接触に関わる未知のパラメータは実測データをもとに評価した。その結果、各種パラメータ（熱電対の種類、素線径、接着剤の熱伝導率、リード線を等温面に這わせる長さなど）による測定誤差の変化を定量的に示すことができた。特に、接着剤の熱伝導率とリード線を這わせる長さの影響が大きいこと、また、素線径の100倍程度の長さを等温面に這わせると誤差を十分小さくできる（それ以上長く這わせても誤差が小さくならない）ことがわかった。この時に作成した

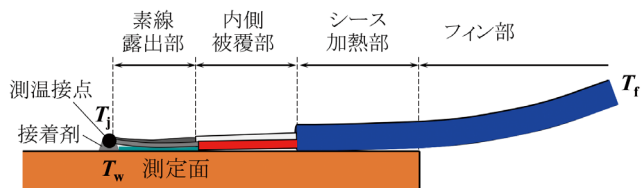


図8 熱電対による表面温度測定

誤差計算用の Excel シートは、研究室のホームページ¹¹⁾で公開している。

4.2 空冷ファンのモデル化

PC などの空冷機器を設計する際には、空冷ファン周囲の流れ場を数値流体力学 (CFD) 解析することが多い。ファンの回転翼まで計算すると計算負荷が非常に重くなるため、熱設計の現場では、通常はファンの圧力-流量 (PQ) 特性を用いた簡易モデルが用いられている。しかし、従来のモデルでは風量を正確に予測できないのに加え、吐出口の速度分布も現実と異なっていた。そこで、日本機械学会の研究分科会における研究の一環として、ファンモデルの精度を向上する取り組みを行ってきた。

精度良いモデルを作成するためには、まずファン前後の圧力や速度分布を正確に把握する必要がある。そこで、小型ファンの PQ 特性を測定できる装置を自作し、様々な軸流ファンを用いて、圧力差や回転数を系統的に変化させながらファン周囲の流れ場を測定してきた。その結果、従来のモデルで風量が合わないのは圧力差の定義の問題であることが明らかになり、この圧力差さえ補正すれば、ほぼ正確な風量を再現できることが示された。

また、ファン吐出口の速度分布は、旋回力係数 (ファンの回転翼が流体に与える力を無次元化した値) を導入することで簡易にモデル化できることもわかった¹²⁾。この係数は無次元数であり、ファンの大きさや回転数にほとんど依存しない定数とみなせる。この係数を導入することで、ファンまわりの時間平均的な流れ場を簡易に再現できることが示された。提案したファンモデルのイメージを図 9 に示す。このモデルは、市販の熱流体解析ソフトウェアにも導入されている¹³⁾。

5. お わ り に

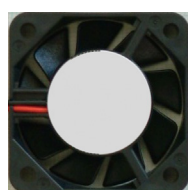
当研究室で取り組んできた対流熱伝達の分野では、単純な流れ場であれば直接数値計算 (DNS) が可能になっている。また、市販の数値計算ソフトウェアが充実してきたこともあり、数値計算を主体とした研究開発が主流になってきた。その一方で、CCD カメラや赤外線カメラなどの撮像装置の性能が著しく向上しており、多次元非定常の現象を実験的に捉えることも可能になっている。数値計算は、実験で取得するのが難しい三次元非定常の結果を容易に取得することができ、複雑な現象を理解す

る上で大きな助けとなるが、得られた結果が妥当であるかを検証するには正確な実験データが欠かせない。また、沸騰熱伝達の分野では、現状では実験モデルなしに数値計算することは不可能であり、現象を正確に理解するためには、また数値計算のモデルを構築するためには、多次元非定常のデータを定量的に測定することが必要になる。

本稿で紹介したように、当研究室では、これまで「熱伝達現象をいかに正確に測定するか」に注力し、現象を正しく理解することに努めてきた。今後も、これまで築いてきた計測のノウハウを活用し、若手教官や学生の新たな発想を取り入れつつ、実現象を肌で感じながら、現象を正しく理解する取り組みを続けていきたい。

文 献

- 1) 中村元, 五十嵐保: 機論, **69** (681), 1224 (2003).
- 2) 中村元: 機論, **73** (733), 1906 (2007).
- 3) H. Nakamura, S. Takaki and S. Yamada: Proc. ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conf., AJK2011-25020, Hamamatsu, Japan (2011).
- 4) S. Yamada and H. Nakamura: Int. J. Heat Fluid Flow, **61** (A), 174 (2016).
- 5) 椎原尚輝: 大学改革支援・学位授与機構 博士学位論文, 乙第558号, (2017).
- 6) H. Nakamura, R. Saito and S. Yamada: Int. J. Heat Fluid Flow, **85**, DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2020.108661 (2020).
- 7) H. Nakamura, Y. Sugawara, S. Yamada and Y. Funami: Proc. 12th Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena, Osaka, Japan (Online), paper 339, (2022).
- 8) 吉田雅輝, 山田俊輔, 船見祐揮, 中村元: 冷空論, **38** (2), 145 (2021).
- 9) 吉田雅輝, 山田俊輔, 船見祐揮, 中村元: 2022年度冷空講論, D224, 岡山 (2022).
- 10) 中村元: 機論, **84** (867), DOI: 10.1299/transjsme.18-00216 (2018).
- 11) <http://www.nda.ac.jp/~nhajime/document.html>: (2022.9.30 閲覧).
- 12) 中村元: 第48回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.167-168, 岡山 (2011).
- 13) <https://www.cradle.co.jp/media/interview/a193>: (2022.9.30 閲覧).



二重円筒
+
支柱

図9 ファンモデル



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

National Defense Academy

システム工学群機械工学科教授

原稿受理 2022 年 10 月 5 日