

# 熱流体システムのダイナミクスと制御

研究代表者 山口 誠一  
(基幹理工学部 機械科学・航空宇宙学科 准教授)

## 1. 研究課題

本プロジェクトでは、熱流体システムの統合システム化技術や最適制御技術の基盤技術の構築から、その社会実装までも目指した取り組みを進める。ここでは、ソフトウェアとしての制御技術だけではなく、ハードウェアとしての機器やセンサの効果的連動を実現する技術構築を同時に進め、熱流体システムのダイナミクスの究明を進めながら、最適制御の実現を目指していく。この際には、シミュレーション技術などを有効活用し、これまで不明瞭であった熱流体の「見える化」を可能とすることによって、導入効果の予測や検証技術まで行えるエコシステムまでを構築し、柔軟で強靱なエネルギー需給体系を実現した未来社会像の早期実現に貢献する。

## 2. 主な研究成果

### (a) ヒートポンプ用電子膨張弁の流動特性の解明

本研究では、上述の研究課題に対して多角的に研究を展開している。研究成果として、下記の2項目について報告する。

熱流帯システムの一つであり、省エネルギー社会構築のためのキーテクノロジーでもあるヒートポンプに着目し、その制御を担うデバイスである電子膨張弁の流動特性を実験的に明らかにした(図1,2参照)。具体的には、膨張弁の入り口の冷媒状態が過冷却度の大きい領域から定格の運転条件である過冷却度5度程度の領域、運転の遷移時などに起こりうる入口湿り蒸気の領域まで幅広い相状態を含めた広い運転条件での流動特性を解明することを目的として実験を行った。

その結果、膨張弁入口が過冷却状態の場合、過冷却度が増加するにしたがって密度の増加に伴い質量流量が増加することが分かった。また、入口が二相の状態においては乾き度が増加すると大きく密度が低下するためそれに伴い質量流量も大きく低下することが明らかになった。質量流量と膨張弁前後の差圧の関係について過冷却域において質量流量は一般的な弁特性と同様に、差圧の増加に伴って増大する傾向を示すことが分かった。一方、入口が二相状態となると、差圧に対する流量の増加は小さくなり、冷媒密度の低下に起因するチョーク現象が生じていると考えられる流量特性が確認された。流量係数 $C_d$ と $CA$ の傾向について、過冷却域と二相域でそれぞれ一定となることが明らかになった。

### (b) 空調システムにおける人の行動がシステム全体の特性に与える影響の解明

空調システムは、空調機・空調空間・制御系・人の行動などの複雑な相互作用を有する大規模な熱流体システムを構成している。実際の運転環境における空調機の性能を明らかにする次に、ために、空調機・空調空間・制御系・人の各要素を再現したシミュレーションを行った。空調システムを構成する各要素の中で、人の行動に着目し、温冷感にもとづく人の行動の違いが空調システム全体に与える影響を明らかにした。その結果、以下の結論を得た(図3,4参照)。

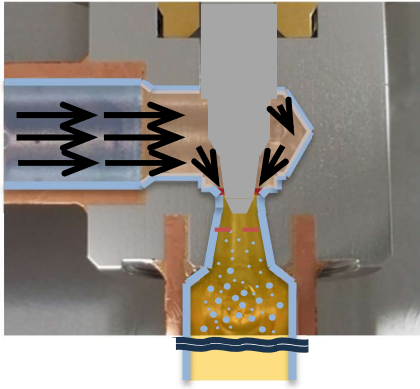


図1 電子膨張弁内部の拡大図

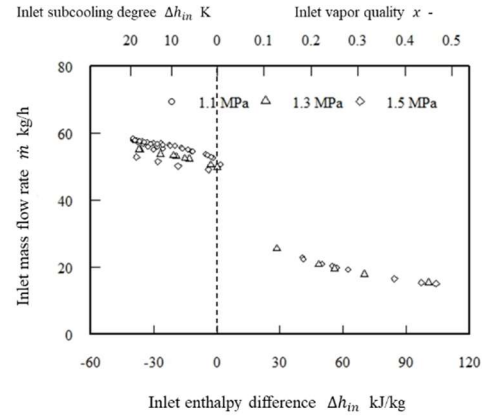


図2 膨張入口比エンタルピー差と質量流量の関係

エアコンが設置された夏場の一人暮らしのワンルームの部屋において、人がデスク前に座っていて快適な状況から、人が30分間の掃除を始め、掃除が終わると再びデスク前に座る状況を解析した。設定温度28℃における定常状態から人が暑さを感じて設定温度を下げ、また寒さを感じて設定温度を上げる。このとき設定温度を小さく変える人、設定温度を大きく変える人、快適な設定温度を予想して変える人がいたときを対象とした。これらの人はPMVを評価指標として快適性を判断し、それに応じて行動を行うようにした。掃除を始めることによって人の代謝が上がり、人は暑さを感じた。設定温度を小さく変える人は5分おきに設定温度を28℃から25.5℃、24℃、23℃、22.5℃と下げていき、掃除開始から30分後にはPMVが0.16になり、快適な状態になった。設定温度を大きく変える人は5分おきに設定温度を28℃から24℃、21.5℃、20.5℃と下げていった。その後吸込み空気温度が20.5℃に達したときには人は寒さを感じ、設定温度を上げる行動をとった。快適な設定温度を予想して変える人は掃除を始めて5分後に設定温度を21.5℃に変更し、掃除開始から20分後にはPMVが-0.05になり、快適さを感じていた。

暑さを感じた人の行動による空調機の省エネルギー性と快適性を比較すると、設定温度を小さく変える人の場合、平均消費エネルギーは低いが、平均PMVは高くなった。設定温度を大きく変える人の場合、平均消費エネルギーは高くなるが、平均PMVは低くなった。これにより省エネルギー性と快適性のトレードオフの関係が確認できた。

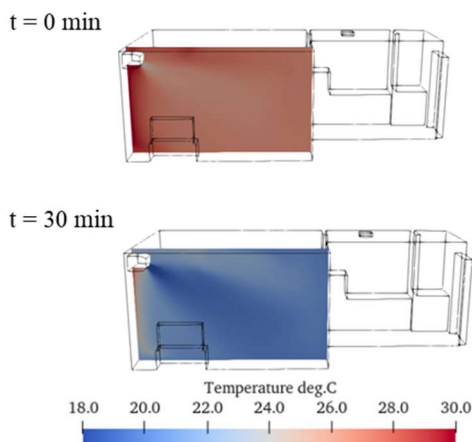


図3 室内温度分布の推移

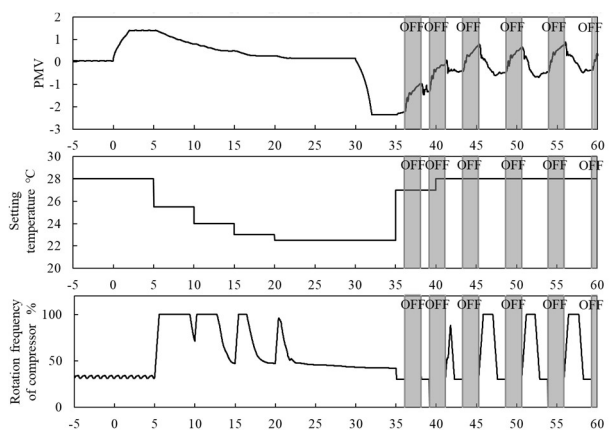


図4 PMV、設定温度、圧縮機回転数の時間変化

### 3. 共同研究者

齋藤 潔 (基幹理工学部・機械科学・航空宇宙学科 教授)  
太田 有 (基幹理工学部・機械科学・航空宇宙学科 教授)  
吉村 浩明 (基幹理工学部・機械科学・航空宇宙学科 教授)  
天野 嘉春 (基幹理工学部・機械科学・航空宇宙学科 教授)  
藤澤 信道 (基幹理工学部・機械科学・航空宇宙学科 准教授)

### 4. 研究業績

#### 4.1 学術論文

- Y. Miyaoka, N. Giannetti, C. Tanaka, D. Dondini, K. Saito, Round-robin tests of commercial air-conditioning units using emulator-type load-based testing methodology – Part 2: feedforward control, Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, in press, 2026. (in Japanese)
- N.I. Ibrahim, C. Vering, N. Giannetti, M. Kim, Sholahudin, T. Storek, D. Müller, K. Saito, State of the art of the digital twin concept in HVAC+R systems for building thermal management, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 229, art. no. 116601, 2026.
- N. Giannetti, C.H. Kim, F. Della Santa, Y. Sei, K. Enoki, K. Saito, Experimental validation of genetic programming for heat exchanger circuitry optimization, Applied Thermal Engineering, vol. 288, art. no. 129517, 2026.
- Sholahudin, N. Giannetti, K. Saito, K. Tanaka, W. Kowa, Nasruddin, N. Putra, M. Suryanegara, Refrigerant leakage detection during field operation of air conditioners using neighborhood component analysis and artificial neural networks, Journal of Building Engineering, vol. 119, art. no. 115293, 2026.
- N. Giannetti, Y. Miyaoka, L. Talluri, A. Milazzo, K. Tanaka, W. Kowa, K. Saito, Non-intrusive performance monitoring method for air conditioners, International Journal of Refrigeration, vol. 181, pp. 74–83, 2026
- Nobumichi Fujisawa, Yuta Yamamoto, Yutaka Ohta, Atsushi Ogino, Ryo Nakayama, Eijiro Kitamura, 「Unsteady Flow Mechanism of Impeller Stall Inception in a High-Pressure Ratio Centrifugal Compressor with Bleed Slots」, ASME Journal of Turbomachinery, 2025
- 川尻俊輔, 賣間弘美, 藤澤信道, 太田有, 「軸流圧縮機のウインドミル状態における静翼内部流れ場と損失構造」ターボ機械協会誌, 2025
- Nobumichi Fujisawa, Yutaka Ohta, Mai Yamagami, Takashi Goto, Dai Kato, 「Unsteady Flow Structure of Rotating Instability in a 1.5-Stage Axial Compressor」, ASME Journal of Turbomachinery, 2025, Vol.147, No.4, pp.041010
- 井上 寛大, 志賀 祐亮, 小屋 ゆい, 吉田 彬, 柏川 貴弘, 木村 浩一, 天野 嘉春, 地域熱供給プラントの運用問題に対する量子インスパイアのアニーリング技術を用いた二段階最適化手法の提案, エネルギー・資源学会論文誌, 2025 年 46 巻 5 号 p. 301-310

#### 4.2 総説・著書

- 日本太陽エネルギー学会編, ソーラーアーキテクチャーガイドブック, 分担執筆 (3-11 デシカント空調担当), 2025 年 10 月

## 5. 研究活動の課題と展望

2025年度は、いくつかの具体的な熱流体システムに対してシミュレーションや実験を行い、その基本的な特性の一部を明らかにした。今後は、それらをベースに熱流体システムのモデリングや解析技術の確立に向けた取り組みを継続するとともに、システムの制御系の検討を進める。熱流体システムでは、強い非線形性を有するため、非線形系の制御技術の構築や線形空間解析への適用等を試みる。

さらに、熱流体システムに対する制御解析を具体的システムに適用して解析を進める。具体例として、熱流体システムとしての普及促進が期待される冷凍・空調・ヒートポンプ技術を対象として前年度までに確立したシミュレーション技術を用いて、最適な制御技術の確立を目指す。