

Graduate School of Fundamental Science and Engineering
Waseda University

博士論文審査報告書

Doctoral Thesis Screening Result Report

論 文 題 目

Thesis Theme

Thermo-fluid dynamics of falling film type
vapour absorption process

流下液膜式冷媒吸収プロセスの熱流体力学的挙動
に関する研究

申 請 者
(Applicant Name)

NICCOLO	GIANNETTI
ジャンネッティ	ニコロ

Department of Applied Mechanics,
Research on Dynamics and Control of Mechanical Systems

2016 年 2 月

地球環境問題への対策として、エネルギー使用量が特に多い産業分野における環境負荷低減が強く求められている。このため、再生可能エネルギーやプロセス排熱をはじめとした未利用熱エネルギーの有効活用、さらにはヒートポンプや排熱発電システム等の省エネルギー機器の積極的な導入やそれらのさらなる高効率化が求められている。このような状況のもと、産業用として大型化が容易であり、比較的低温の熱を駆動源として冷熱や高温蒸気の供給が可能な吸収式ヒートポンプに対する注目が改めて高まっている。

吸収式ヒートポンプサイクルは、吸収器、蒸発器、再生器、凝縮器、溶液熱交換器を主とした複数の熱交換器を組み合わせることにより構成されている。これらの熱交換器の組み合わせ方や、作動流体である吸収溶液や冷媒の流動経路によって、多様なサイクルの形成が可能である。具体的には、吸収冷凍機、第一種吸収ヒートポンプ、第二種吸収ヒートポンプの3種類に大別される。

吸収冷凍機は冷却を行うものであり、都市ガスなどの燃焼熱を熱源とする。そして、夏季における電力需要のピークカットを主たる目的としてこれまで空調分野で発展してきた。一方で吸収式ヒートポンプは、熱を駆動源として低温側から熱を汲み上げ、高温側の加熱を行うものである。第一種ヒートポンプでは、出力となる高温側の加熱温度より高温の熱を駆動源とする必要があるが、加熱側の熱量を大幅に増加できる。第二種ヒートポンプでは、出力となる高温側の熱量が減少するものの駆動熱源温度より高温の熱を得ることができる。

サイクルとしては吸収冷凍機と第一種ヒートポンプは同様であり、第二種吸収ヒートポンプは、吸収溶液の循環経路を反転させ、冷凍機や第一種ヒートポンプに適用されたサイクルを逆とした形態をとる。吸収式サイクルは、これまでに、主に冷凍機として発展してきたため、ヒートポンプとしての利用はごく限定されたものであった。しかし、今後は、産業分野での活用が視野に入れられるため、ヒートポンプとしての活用も進められ、より多様な利用形態がとられていくものと考えられている。

このような多様な形態をとることが可能なことは、ヒートポンプの優れた点であるが、性能を向上させるためには、熱交換器数を増加させることが必要となり、小型化が大きな技術的課題となる。また、ヒートポンプとしての利用が増加することを考えれば、温度レベルをはじめとして構成熱交換器の設計条件も大きく異なる。そのため、機器の最適設計の実現には、それぞれの熱交換器での広範囲の運転条件において熱流体力学的な現象の把握が強く求められている。

熱交換器の中でも吸収器は、吸収溶液により、冷媒の吸収を行う最も重要な要素であるが、最も大きなスペースを必要としてしまう要素でもある。この吸収器では、流下液膜式熱交換器が一般的に採用されており、水平管管外を吸収溶液が冷媒を吸収しながら流下し、伝熱管管内の水や水蒸気と熱交換を行う。流下液膜は、低流量で流下させ、薄い流下液膜を形成させることで熱抵抗が減少し、伝熱性能を向上させることが可能となる。

一方で、流量を低下させすぎると流下液膜が破断してドライアウト領域が発生し、伝熱性能の大きな低下を招き、結果としてシステムの性能を大きく低下させることにもなりうる。このため、吸収器の最適な設計手法や、最適な溶液循環量制御について十分な検討が必要不可欠である。しかし、いまだに、流下液膜における破断現象が十分には解明されていないのが現状である。

そこで、本研究は、以上のような問題を受け、吸収器の流下液膜の熱流体力学

的な挙動を解明することにより，吸収式ヒートポンプのモデリング及び最適化手法への指針を明確化することを目的としている。

本論文は8章から構成されており，まず，吸収式ヒートポンプ全体の数理モデルの構築から始まり，システムの中でも吸収器の性能がシステム全体の性能に大きな影響を与えることを明確化している．その後，吸収器に注目し，その流下液膜の濡れ性も含めた熱と物質移動性能の予測を可能とする数理モデルを構築している．そして，このモデルを用いた解析を行い，その詳細な特性を明らかにしている．以下に各章ごとの概略について述べる．

第1章は序論であり，ヒートポンプに関連する従来の研究や開発状況を述べるとともに，本研究の目的，位置づけを明確化している．

第2章では，吸収式サイクルの基礎的な特性を一般的な形で把握することを目的に理論解析を行っている．具体的には，システム全体の最適化のために無次元数を導入し，各熱交換器の性能がサイクルとしての性能に与える影響を検討している．エントロピー解析の結果から，特に吸収器がシステム全体の性能に大きな影響を与えることを明らかにしている．これにより，吸収式ヒートポンプにおいては，吸収器の性能向上が重要であることを明確化している．

第3章では，作動流体を臭化リチウム-水系とし，水平に設置された伝熱管管外を作動流体である吸収溶液が流下する流下液膜式吸収器を対象として，複雑な熱・物質移動現象の解析を可能とする数理モデルを構築している．ここでは，システム全体への影響を議論するため，流下液膜は均一で完全に濡れ性を確保できる理想的な条件下でのモデルとする．このモデルを用いて熱力学の第二法則的観点から流下液膜式吸収器の特性を解析し，運転条件による生成エントロピーについて検討している．解析の結果，流下する吸収溶液の質量流量を低減して，流下液膜を薄く均一とすることにより，吸収式ヒートポンプの性能向上及び小型化を可能とすることを明らかとしている．

第4章では，部分濡れ現象を考慮した流下液膜式吸収器のモデル化について述べている．第3章では，理想的な条件で解析を実施したが，実際の現象では，低レイノルズ数，高ウェーバー数の時に流下液膜が破断し，伝熱性能が大きく低下する問題がしばしば指摘されている．このため，実際の運転では，この部分濡れ現象を考慮する必要がある．本章では，流下液膜の安定性と流下液膜破断後の濡れ面積を最小作用の原理をもとに推算し，部分濡れ現象のモデル化を行っている．また，濡れ性に大きく影響を及ぼす表面張力及び，接触角，金属板の表面性状を計測し，数値計算に反映させている．

モデルの妥当性を検証するために，流下液膜の流動状態の可視化実験を行っている．実験では，鉛直に設置した金属平板に，作動流体を流下させ，形成された流下液膜の流動状態の観察及び特性評価を行っている．慣性力，粘性力，表面張力が流下液膜の流動状態に大きく影響すると予想されるため，濡れ面積割合を膜レイノルズ数とウェーバー数を用いて評価している．

実験結果から，吸収溶液の流量により，濡れ面積割合にヒステリシス現象が確認されたが，このような現象についても解析でよく再現できることが示されている．これにより，解析モデルの妥当性を確認している．

第5章では，第4章で構築したモデルを用いて流下液膜式吸収器の熱・物質移動特性の詳細な数値解析を行っている．その結果，慣性力と表面張力が液膜の流体力学的挙動に対して支配的であることが示唆され，液膜の安定性やヒステリシ

ス現象の主たる要因となっていることが示されている。本研究の成果は、従来の研究で検討されてこなかった吸収器の部分濡れ現象の影響を解析することができ、今後、この結果が吸収式ヒートポンプの最適設計の確立に大きく貢献するものと期待される。

第6章では、流下液膜式吸収器モデルの解析解の導出を試みている。前章では、流下液膜式吸収器の熱・物質移動特性を数値解析によって論じている。数値解析は適切に問題の定式化がなされていれば高精度な結果を得られるが、精度の良い解を得るには、複雑な計算を実施しなければならないだけでなく、その妥当性は特定のケースに限られ、運転条件ごとに適切な境界条件の選定も必要となる。これでは、具体的な機器設計にはそのまま活用することが困難である。そこで、モデルに適切な仮定を設定し、解析解の導出を可能としている。これにより、流下液膜の物理現象の把握や機器設計シミュレーションの実現を容易としている。

第7章では、管群からなるより実機に近い条件で構築した数理モデルの妥当性を検証している。具体的には、水平平滑円管を1列10段に配置し、吸収溶液として臭化リチウム-水系を想定して解析を行っている。実験機も同様な条件とし、吸収器側面をアクリルで製作することにより伝熱管管外を観察する。観察には、高速度カメラを用いて管外吸収現象、および伝熱管周りの流下液膜の流動状態を撮影し、解析を行っている。実験と可視化による映像を用いて幅広い運転条件で数理モデルの妥当性を確認している。

第8章は結論であり、本論文の成果がまとめられている。

以上要するに、本論文は、吸収式ヒートポンプにおいて最重要構成要素である吸収器を対象として流下液膜の熱と物質移動を考慮するとともに、部分濡れ現象までをも含めた実現象に対し、解析可能な数理モデルを構築している。そして、具体的な実機を想定した条件下でも十分な精度で解析が可能であることを実験により確認している。さらに、実現象でしばしば指摘されてきた吸収式ヒートポンプの性能を低下する大きな要因であった流下液膜のドライアウトまでをも含めたシステム全体の特性を解析することも可能としている。

この成果は、吸収器の最適設計・最適運転手法の確立に貢献するだけでなく、幅広い運転条件で精度よく適用できることから、冷凍機からヒートポンプとして幅広く活用される吸収式ヒートポンプサイクルの最適設計・制御の実現に寄与していくことが期待できる。

よって、本論文は、冷凍空調工学、伝熱工学、制御工学の発展に大きく貢献できるものであり、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2016年 2月

審査員（主査） 早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 齋藤 潔

早稲田大学教授 工学博士（早稲田大学） 勝田 正文

早稲田大学准教授 工学博士（早稲田大学） 武藤 寛

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 天野 嘉春