

博士論文審査報告書

論文題目

エネルギーシステム

汎用解析シミュレータの構築と

ヒートポンプの大域的数値解析

Construction of General Purpose

Energy System Simulator and

Global Simulation of Heat Pump

申請者

大野	慶祐
Keisuke	OHNO

機械科学専攻 機械システム制御工学研究

2014年2月

本研究はエネルギーシステム汎用解析シミュレータの構築とヒートポンプの大域的数値解析に関するものである。

世界的なエネルギー需要の高まりや、安全保障上の観点から、我が国においてエネルギーシステムの高効率化は非常に重要となってきた。従来エネルギーシステムの高効率化には、構成要素の高性能化、システムの大規模化などによって行われてきた。とりわけ、本研究で対象としているヒートポンプは Cool Earth・エネルギー技術革新技術計画に選定されていることから、非常に注目されているものである。すなわち、省エネルギー化への貢献が期待されており、研究開発が一層加速するものと予測される。

エネルギーシステム全体としてみても高性能化が重要な課題となるが、構成要素の高性能化がシステム全体としての高性能化に必ずしも結びつかないことがある。また、簡略化された数理モデルを用いたエネルギーシステムの検討では、定格設計点を大きく外れた動作点で高性能化が達成できているかは不明である。このように、エネルギーシステム全体をとらえつつ、システムを構成する要素の物理現象を精度よく再現した数理モデルによる検討が重要となる。大規模エネルギーシステムとなれば、実験的に検討を進めることは困難であることから、シミュレーションによる検討が必要不可欠となる。

従来、シミュレーションによる検討は数値流体力学、制御解析、システム解析として個別には行われてきた。しかしながら、詳細な特性が解明できる数値流体力学では、様々な要素が複雑に組み合わされたエネルギーシステムには適していない。一方で、システム制御解析ではエネルギーシステム内部の速度、圧力、温度分布まで分析することは困難である。同時に制御解析においては、システムの平衡点近傍について線形化したモデルを用いることが一般的であり、非線形の強いエネルギーシステムの力学的挙動を分析することは困難である。

以上のように、様々な要素、システムを統一的に取り扱うことのできるエネルギーシステムシミュレーションによって、今後のエネルギーシステムのさらなる効率向上が期待できるといえる。

また、本研究で取り扱うエネルギーシステムである圧縮式ヒートポンプは、高効率であることから、給湯機、空調機、冷凍機などに応用され、広く活用されている。我が国の圧縮式ヒートポンプ技術レベルは世界を圧倒しており、例えば家庭用空調機の省エネルギー性では APF（年間エネルギー消費効率）が 7 を超えるものもある。

これまでの圧縮式ヒートポンプの省エネルギーには、主として要素技術の性能向上が取り組まれてきた。たとえば、ヒートポンプ内部の熱交換器では、管表面に伝熱促進加工を施した高性能伝熱管が採用され、圧縮機も定速機からインバータ技術により可変速圧縮機となり、幅広い運転域で連続運転が可能となっている。

これらの高性能化によって定格設計点近傍での効率は大きく向上してきた。

しかしながら、年間を通じた運転に着目すれば、夏期の冷房や冬季の暖房、また、中間期の低負荷での運転や寒冷期での着霜など多様な運転状況が発生する。そのため、これらの運転状況では、システムの最適化は実現されていない。また、一日の運転に着目しても、ヒートポンプへの熱負荷は一定ではなく、負荷変動が発生するため、一日の運転においても高負荷から低負荷までの運転状況を考慮しなければならない。

特に低負荷運転では、多くの場合は、システムが発停を繰り返す断続運転なども発生するため、規格などで提示された性能よりもはるかに低い効率で運転されていることは、容易に推定される。このため、様々な条件を想定した圧縮式ヒートポンプの検討が必要となるが、これらの検討を実験ベースで行うことは時間やコストの観点から非常に困難であり、圧縮式ヒートポンプの運転状態を大域的に精度よく予測できる数理モデルとそれを取り扱う高度なシミュレーション技術の確立が求められている。圧縮式ヒートポンプの大域的な運転状態を精度よく予測するためには、圧縮式ヒートポンプ内部の二相流伝熱現象や、圧力損失といった非常に複雑な現象を考慮する必要があり、課題は多い。

また、圧縮式ヒートポンプに用いられている冷媒は次々と新しい冷媒が開発され、短期間に実機に採用された場合の性能を評価することが求められるようになってきている。ヒートポンプのサイクルについても、単段サイクルから、エジェクターサイクル、インジェクションサイクルと様々なサイクルの検討が行われている。

このような場合、簡易なサイクル計算では本質的な性能が評価できない。また、合理的な数値解析が実現できなければ、サイクルや冷媒、熱交換器、圧縮機の構造等が異なるたび数理モデルから作成し直す必要があり、多くの時間と労力を要することになってしまう。このため、今後は高精度でありながら、合理的で汎用性のあるシミュレーション技術の確立が求められる。以上のように、圧縮式ヒートポンプの大域的数理モデルとそのシミュレータが必要となっている。

これを受けて本研究では圧縮式ヒートポンプに着目し、その内部の伝熱現象や圧力損失を詳細に考慮した広範囲に適応可能な数理モデルを構築する。これら構築した数理モデルは実機による実験によってその妥当性を検証する。実験としては定常および非定常実験を実施する。特に非定常状態では、システムが発停を繰り返す断続運転についても、その妥当性を検証する。さらに、モジュラー解析手法を基本ロジックとしたエネルギーシステム汎用解析シミュレータである“ENERGY FLOW +M”を構築する。

本論文は、2部11章で構成される。ここにその概要を示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べ、そして従来のいくつかの重要な研究について紹介し、本研究の位置づけを明確にしている。

第1部として、第2章から第6章においてヒートポンプの大域的数値解析

について述べている。

第 2 章では、圧縮式ヒートポンプのサイクルと基本的な構成要素の形式について述べ、本研究で対象とするヒートポンプの動作原理を明確にしている。第 3 章では、圧縮式ヒートポンプの数理モデルとして、仮定事項、支配方程式、境界条件等を述べている。第 4 章では、3 章で述べた数理モデルの数値解析手法としてのモジュラー解析手法について述べている。第 5 章では、定常状態に着目して実験機を用いた実験を行い、第 3 章で構築した数理モデルの妥当性を検証している。第 6 章では、非定常状態、特に断続運転に着目して実験機を用いた実験を行い、第 3 章で構築した数理モデルの妥当性を検証している。

第 2 部として、第 7 章から第 10 章においてエネルギーシステム汎用解析シミュレータの構造について述べている。

第 7 章では、エネルギーシステム汎用解析シミュレータの全体的な構成を説明している。特に、本シミュレータは計算層、制御層、入出力層から構成されていることを述べている。第 8 章では、本シミュレータの第 1 層である計算層について述べ、計算層の役割である物理現象の数理計算を明確にしている。第 9 章では、本シミュレータの第 2 層である制御層について述べ、多様な構成要素を接続し、システム全体として数値解析を実現する役割について説明している。第 10 章では、本シミュレータの第 3 層である入出力層について述べている。本研究では入出力層としてエクセルを用いており、この GUI の基本構造について述べている。

第 11 章では、本研究を通じて得られた成果についてまとめている。さらに本研究における今後の展望について述べている。

以上要するに、本研究はエネルギーシステムの熱流動状態から、制御解析までをも統一的に実施し、圧縮式ヒートポンプに対して本エネルギーシステム解析が可能であることを示した。数理モデルの妥当性についても実験を行って検証し、妥当であることを確認している。この成果は、大規模圧縮式ヒートポンプシステムの設計や、各種エネルギーシステムの性能評価などを可能とし、エネルギー分野にかかわる熱工学、制御工学の発展に大きく貢献するものである。よって、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。

2014 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