

# 博士論文概要

## 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

2013年12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。構成要素の高性能化としては、たとえばモーターや熱交換器などは非常に高い性能となってきた。システムについては様々なフローパターンの検討や排熱回収を取り入れることによって大規模化し、たとえばガスコジェネレーションシステムといった高性能エネルギーシステムが現れている。

しかしながら、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もある。また、簡略化された数理モデルを用いての大規模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、大規模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うえでの検討が非常に重要となる。ましてや大規模システムとなると実験的に検討を進めることは非常に困難であることから、数値シミュレーションでこれらの検討を行うことが要求される。

従来、これらの検討は数値流体力学、制御解析、システム解析などで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と言える。また、従来のシステム制御ではエネルギーシステム内部の速度分布や圧力分布などを分析することは困難である。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、要素の非線形的な振る舞いを数値流体力学ほどは分析できない。

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。

次に、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については、投入したエネルギーの3~4倍程度の温熱あるいは冷熱を得ることができ、COP（成績係数）が高く幅広く普及している。例えば給湯機、空調機、冷凍倉庫などであり、枚挙に遑がない。我が国の圧縮式ヒートポンプ技術は非常に高く、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6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化には、主として要素技術の向上が挙げられる。たとえば、ヒートポンプ内部の熱交換器では、平滑管ではなく、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るようになっている。圧縮機も従来は定速機であったものが、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た。

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様々な状況での運転が想定される。そのため、これらの状況で実際に高効率化が達成できているかは不明である。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当然一定ではなく、当然負荷の変動は存在するため、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、実際にどの程度の性能で運転されているかはやはり不明である。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いく。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にシミュレーションコード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。実験ベースで圧縮式ヒートポンプの特性を検討することも可能であるが、バランス型、空気エンタルピ法などを採用することとなり、大容量、高精度な実験設備を長時間稼働させる必要があるため、様々な運転条件下でのシステムの年間性能を評価することは事実上不可能である。このように単なる定格性能ではなく、年間性能の向上が期待される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用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。実験としては定常状態、非定常状態の両者を対象とする。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

一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。

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べた。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 章までを通じでヒートポンプの大域的数値解析についてまとめた。

第 2 章では、圧縮式ヒートポンプの動作原理と基本的な構成要素について述べ、本研究で対象とするヒートポンプの仕組みを明確にする。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、境界条件等を述べる。第 4 章では、3 章で述べた数理モデルの解析する手法として、モジュラー解析手法について述べる。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する。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する。

第 2 部として、第 8 章から第 10 章までを通じでエネルギーシステム汎用解析シミュレータについてまとめた。

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述べる。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、計算層の役割を明確にする。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 について述べる。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る。さらに本研究における今後の展望について述べる。

以上のように、本研究ではエネルギーシステム汎用解析シミュレータの構築と圧縮式ヒートポンプの大域的解析を行った。本研究の成果として、圧縮式ヒートポンプの定常状態から非定常断続運転解析を可能とする大域的数理モデルを構築した。また、エネルギーシステム汎用解析手法であるモジュラー解析手法と本研究で構築した圧縮式ヒートポンプの大域的数理モデルを適応したシミュレータを構築し、本シミュレータで圧縮式ヒートポンプの数値解析を簡便かつ合理的に実施できることを確認した。

今後の展望としては、圧縮式ヒートポンプの内部可視化実験等により初期の冷媒の分布等を解明することによる解析の差異を究明していく事、各種パラメータスタディ等を通じてシステムの最適化の検討を進める事などが挙げられる。エネルギー汎用解析シミュレータは、大規模圧縮式ヒートポンプシステムの設計検討や、各種エネルギーシステムの性能評価などに貢献できると考えられる。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 大野 慶祐 印

(2013年 11月 26日現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	大野慶祐, 齋藤潔, 山口誠一, 岸本哲郎, 松本邦康, 圧縮式ヒートポンプの断続運転解析—第1報: 単段蒸気圧縮式ヒートポンプの数理モデルの構築と数値解析—, 日本冷凍空調学会論文集, 2013年, 107-122.
論文	大野慶祐, 木村健, 山口誠一, 齋藤潔, 糸永俊介, 松田憲兒, 岸本哲郎, HC600aをドロップイン冷媒とした R410A 用ルームエアコンの性能評価, 日本冷凍空調学会論文集, (掲載可).
国際発表	K.Ohno, K.Saito, H.Nakamura, Wide range unsteady-state simulation of compression type refrigerator with modular analysis, Energy Efficiency Best Practice Conference 2008, Melbourne, Australia, IIR, 2008.
国際発表	K.Ohno, K.Saito, GLOBAL UNSTEADY STATE SIMULATION OF COMPRESSION TYPE HEAT PUMP, The Fifth Asian Conference on Refrigeration and Air Conditioning, Tokyo, Japan, 2010, No90.
国際発表	K.Ohno, K.Saito, GLOBAL UNSTEADY STATE SIMULATION OF COMPRESSION TYPE HEAT PUMP WITH MODULAR ANALYSIS, Sustainable Refrigeration and Heat Pump Technology, Stockholm, Sweden, 2010.
国際発表	, I.Hujimoto, K.Saito, K.Ohno, H.Murata, H.Nakamura, Performance Evaluation of VRF Systems -1st report Experimental Evaluation of Steady State Driving-, 10 <sup>th</sup> International Energy Agency HEAT PUMP CONFERENCE 2011, Tokyo, Japan, IEA, 2011, 153.
国際発表	H.Nakamura, H.Murata, K.Saito, K.Ohno, I.Hujimoto, K.Matsumoto, Performance Evaluation of VRF Systems -2nd report: Experimental Evaluation of Transient Driving-, 10 <sup>th</sup> International Energy Agency HEAT PUMP CONFERENCE 2011, Tokyo, Japan, IEA, 2011, 154.
国際発表	M.Kikuchi, K.Ohno, K.Saito, Performance Evaluation of VRF Systems using Compressor Curve Method, 10 <sup>th</sup> International Energy Agency HEAT PUMP CONFERENCE 2011, Tokyo, Japan, IEA, 2011, 155.
国際発表	K.Ohno, K.Saito, H.Nakamura, H.Murata, Y.Jinno, K.Konishi, Y.Nakaso, Unsteady State Simulation of VRF Systems, 10 <sup>th</sup> International Energy Agency HEAT PUMP CONFERENCE 2011, Tokyo, Japan, IEA, 2011, 156.
国際発表	K.Ohno, K.Saito, H.Nakamura, H.Murata, I.Hujimoto, K.Konishi, Y.Nakaso, CD Value of Cooling Seasonal Performance Factor, 10 <sup>th</sup> International Energy Agency HEAT PUMP CONFERENCE 2011, Tokyo, Japan, IEA, 2011, 157.
国際発表	K.Ohno, S.Nakagawara, K.Saito, H.Nakamura, R.Takafuji, Simulation of fin tube heat exchanger based on tube structure, 8 <sup>th</sup> International Conference on Multiphase Flow ICMF 2013, Jeju, Korea, 2013, 538.
表彰	日本冷凍空調学会 平成 21 年度 優秀講演賞 ヒートポンプの大域的非常解析 (圧縮式ヒートポンプの断続運転解析), 日本冷凍空調学会, 2010年5月.

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
表彰	第46回空気調和・冷凍連合講演会 平成24年度 優秀講演賞 エネルギーシステム汎用解析シミュレータ“ENERGY FLOW+M”の開発～エクセルによる圧縮式ヒートポンプシミュレータの非定常解析コードの開発～, 空気調和衛生工学会・日本冷凍空調学会・日本機械学会, 2012年10月.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, エネルギーシステム汎用解析シミュレータ“ENERGY FLOW+M”の開発～吸収式ヒートポンプの特性解析～, 2013年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2013年9月, 日本冷凍空調学会, 2013年, 523-526.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, 圧縮式ヒートポンプの非定常特性解析～制御系設計に必要なパラメータスタディ～, 2013年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2013年9月, 日本冷凍空調学会, 2013年, 519-522.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, エネルギーシステム汎用解析シミュレータ“ENERGY FLOW+M”の開発～二重効用吸収式ヒートポンプの特性解析～, 2013年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2013年9月, 日本冷凍空調学会, 2013年, 457-460.
講演	大野慶祐, 中村啓夫, 齋藤潔, 高藤亮一, フィンチューブ型熱交換器のモデリングと特性解析, 第47回空気調和・冷凍連合講演会, 東京, 2013年4月, 空気調和衛生工学会・日本冷凍空調学会・日本機械学会, 2013年, 135-138.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, 糸永俊介, 松田憲兒, 炭化水素冷媒をドロップインしたルームエアコンの性能評価, 第47回空気調和・冷凍連合講演会, 東京, 2013年4月, 空気調和衛生工学会・日本冷凍空調学会・日本機械学会, 2013年, 107-110.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, 宇田川陽介, 関口圭輔, 柳正秀, データセンタ向け冷媒ポンプ併用型パッケージ空調機に関する研究～(第2報)パラメータスタディ～, 2012年度日本冷凍空調学会年次大会, 北海道, 2012年9月, 日本冷凍空調学会, 2012年, 563-566
講演	大野慶祐, 西山教之, 齋藤潔, 吸収式冷凍機における理論 COP の考察, 2012年度日本冷凍空調学会年次大会, 北海道, 2012年9月, 日本冷凍空調学会, 2012年, 215-218.
講演	大野慶祐, 中村啓夫, 齋藤潔, 高藤亮一, チューブ形状・配列を考慮したプレートフィンチューブ熱交換器の詳細特性解析, 2012年度日本冷凍空調学会年次大会, 北海道, 2012年9月, 日本冷凍空調学会, 2012年, 7-10.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, エネルギーシステム汎用解析シミュレータ“ENERGY FLOW+M”の開発～エクセルによる圧縮式ヒートポンプシミュレータの非定常解析コードの開発～, 第46回空気調和・冷凍連合講演会, 東京, 2012年4月, 空気調和衛生工学会・日本冷凍空調学会・日本機械学会, 2012年, 119-122.

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	大野慶祐, 齋藤潔, 中村北斗, 村田博道, 上野清隆, 藤本勲, 中曾康壽, 圧縮式ヒートポンプの断続運転解析, 2011 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2011 年 9 月, 日本冷凍空調学会, 2011 年, 711-714.
講演	大野慶祐, 西山教之, 齋藤潔, 二重効用吸収式冷凍機の断続運転解析, 2011 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2011 年 9 月, 日本冷凍空調学会, 2011 年, 571-574.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, 中村北斗, 村田博道, 神野幸弘, 小西克浩, 中曾康壽, 冷房期間エネルギー消費効率における CD 値の検証, 2010 年度日本冷凍空調学会年次大会, 金沢, 2010 年 9 月, 日本冷凍空調学会, 2010 年, 619-622.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, モジュラー解析手法を用いたヒートポンプの大域的非常解析 -圧縮式ヒートポンプの断続運転解析-, 2009 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2009 年 10 月, 日本冷凍空調学会, 2009 年, B321.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, エネルギーシステム汎用解析ソフト (ENERGY FLOW+M) インターネット公開版の開発 -吸収式ヒートポンプシステムの静特性解析-, 2009 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2009 年 10 月, 日本冷凍空調学会, 2009 年, C114.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, 西山教之, 単効用吸収冷凍機における断続運転特性解析, 第 19 回環境工学総合シンポジウム 2009, 沖縄, 2009 年 7 月, 417.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, 中村英明, エネルギーシステム汎用解析ソフト “ENERGY FLOW+M” の開発 (第 1 報) 2008 年度日本冷凍空調学会年次大会, 大阪, 2008 年 10 月, 日本冷凍空調学会, 2008 年, 319-322.
講演	大野慶祐, 齋藤潔, 中村啓夫, 汎用熱システム解析手法の確立への試み (第 5 報), 2008 年度日本冷凍空調学会年次大会, 大阪, 2008 年 10 月, 日本冷凍空調学会, 2008 年, 315-318.