

次世代ヒートポンプ技術に関する研究

研究代表者 齋藤 潔

(基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授)

1. 研究課題

省エネルギー性が極めて高いヒートポンプのさらなる高効率化, 利用拡大を実現するために, ヒートポンプの要素からシステムの高性能化, 高効率化の実現を目指す. 本年度は圧縮式ヒートポンプの大域的数値解析及び, デシカント空調システムの最適運転・制御手法の検討を進め, 再生可能エネルギー利用機器のモデル化を行い, ヒートポンプの最適制御手法の確立への指針を得ることを目的とする.

2. 主な研究成果

2.1 圧縮式ヒートポンプの断続運転解析

圧縮式のヒートポンプは, その省エネルギー性から冷凍空調分野の多くで採用されている. また, インバータの導入をはじめとする様々な技術革新により年間を通じた多様な運転条件下でも高性能に機器を駆動することが可能となり, その年間性能は大きく向上してきた.

一方で, インバータによる連続運転が困難となる低負荷での運転時間が非常に長くなっている. もちろんこのような運転条件下では断続運転がなされるため機器性能は大きく低下することは容易に推定できるが, 実運転性能がどの程度なのかほとんど明らかになっていないのが現状である.

そこで, 本研究は圧縮式ヒートポンプの断続運転特性を明らかにするとともにその性能改善への方策や, 最適な運転方法を解明することを最終的な目的とする. その第一ステップとして, このような検討に必要な不可欠な圧縮式ヒートポンプの低負荷時の断続運転特性を予測可能な数理モデルを構築するとともに実験によりこの数理モデルの妥当性の検証を行った. 妥当性検証においては, 定常状態と圧縮機が断続的に起動と停止を繰り返す断続運転を対象とした.

Fig.1 に結果を示す. 結果より, 比較的良好に実験結果を再現できていることがわかる. 誤差の要因としては, 熱伝達率を一定値とし, 圧力損失を無視したモデルの簡略化だけでなく, 停止時の冷媒の分布等まだ考慮できていない現象も多く存在することがあげられる. 今後はこれらを考慮したモデルの高精度化が課題となる.

2.2 デシカント空調システムの最適運転

デシカント空調システムは, 熱と物質の同時移動現象を伴うシステムであり, その性能予測や特性把握は容易ではない. また, システム構成が非常に多岐にわたっていることも, 一般的な性能や特性について論じることを難しくしている. このような理由により, デシカント空調システムの最適設計や最適運転に関する研究はあまり多くないのが現状である.

一方, 日本のように年間を通じて外気の温度, 湿度の変動が大きいような場合には, 外気の変動に則した適切な運転を行うことが省エネルギーの観点からは重要となってくる.

そこで本研究では, 低露点環境向けデシカント空調システムを対象に, いくつかの運転パラメータを操作することにより, システムの一次エネルギー消費量を最小化することを目的とした最適化問題について検討した. 具体的には, 外気予冷温度, 再生熱源温度, 再生風量, ロータ回転数を運

転パラメータとし、システム全体で消費される一次エネルギーの総量を目的関数とした。

本研究では、年間の外気条件の変動（月毎）に対して、最適運転を行った場合の全一次エネルギー消費量の推移と、その時の各運転パラメータの変化について検討を行った。

定格運転を行った場合と、最適運転を行った場合の月毎の全一次エネルギー消費量の変化を Fig.1 に示す。Fig.1 より、夏期の設計条件に近い外気条件下においては、最適化を行った場合でも、定格運転を行った場合に比べて大きな違いはない。一方、中間期や冬期においては、定格運転に比べて最適運転を行うことで全一次エネルギー消費量を大幅に抑えられていることが分かる。

次に、最適運転を行った場合の各運転パラメータ（ T_c , T_h , V_R , N_{DW} ）の月毎の変化を Fig.2 に示す。この結果より、外気条件が異なる場合の最適な運転パラメータが分かり、特に今回の結果では、外気湿度の低い冬季においては、再生空気取り込み風量を抑えて、再生温度で対応し、外気湿度が高く、再生空気温度が条件値に達した後は、再生側外気取り込み量を増加させることで、消費エネルギーを最小化できると言える。

以上の様にデシカント空調システムの全一次エネルギー消費量を最小にする最適運転についての検討を行い、最適制御の指針を得た。

2.3 太陽集熱器の数理モデルの構築とその特性解析に関する研究

現在、地球環境問題の深刻化から、再生可能エネルギーの利用が強く叫ばれている。再生可能エネルギーの一つである太陽熱は、給湯や暖房として利用されており、今後は、吸収式冷温水器やデシカント空調機の熱源としての利用が期待されている。

しかし、太陽熱を有効に利用するには、日射の変動、天候、外気温、風などの影響を直接受けるため、それらを十分に考慮したエネルギーシステム全体の設計や運転手法の検討が必要不可欠である。

そこで以上のような検討を可能とするために太陽集熱器の高精度な数理モデルを構築する。本年度では、2種類の太陽集熱器を対象に、光入射角度による依存性を考慮に入れた数理モデルを構築し、その妥当性について検証するため、実機を用いた実運転試験を行った。具体的には、水を熱媒とした平板型太陽集熱器と真空ガラス管型太陽集熱器を対象とする。実験装置は本学に設置し、東京の冬期の運転条件にて集熱器入口の熱媒の温度がその特性に与える影響を検討した。

その結果を Fig.3, Fig.4 に示す。Fig.3 は、実験時の外気温及び日射、実験結果と解析結果それぞれの出口温度を示している。この結果から、実験結果と解析結果それぞれの出口温度は良好に一致していることがわかる。Fig.4 は、実験結果と解析結果それぞれの集熱量の絶対誤差を示している。この結果から、2種類の太陽集熱器共に絶対誤差 300W 以内で精度よく再現できていることがわかる。

以上より構築した数理モデルは良好な妥当性を得られたと言える。今後の展望として、太陽集熱器で得た熱量を利用する機器を接続したシステムでの特性把握を行っていく。

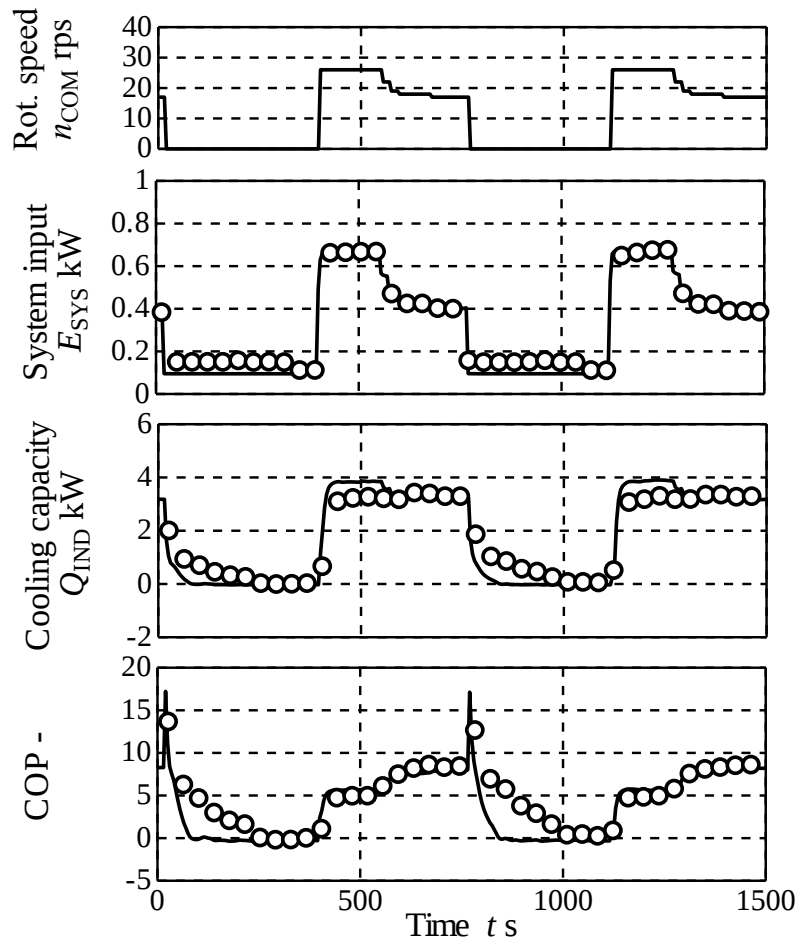


Fig.1 Validation of simulation result

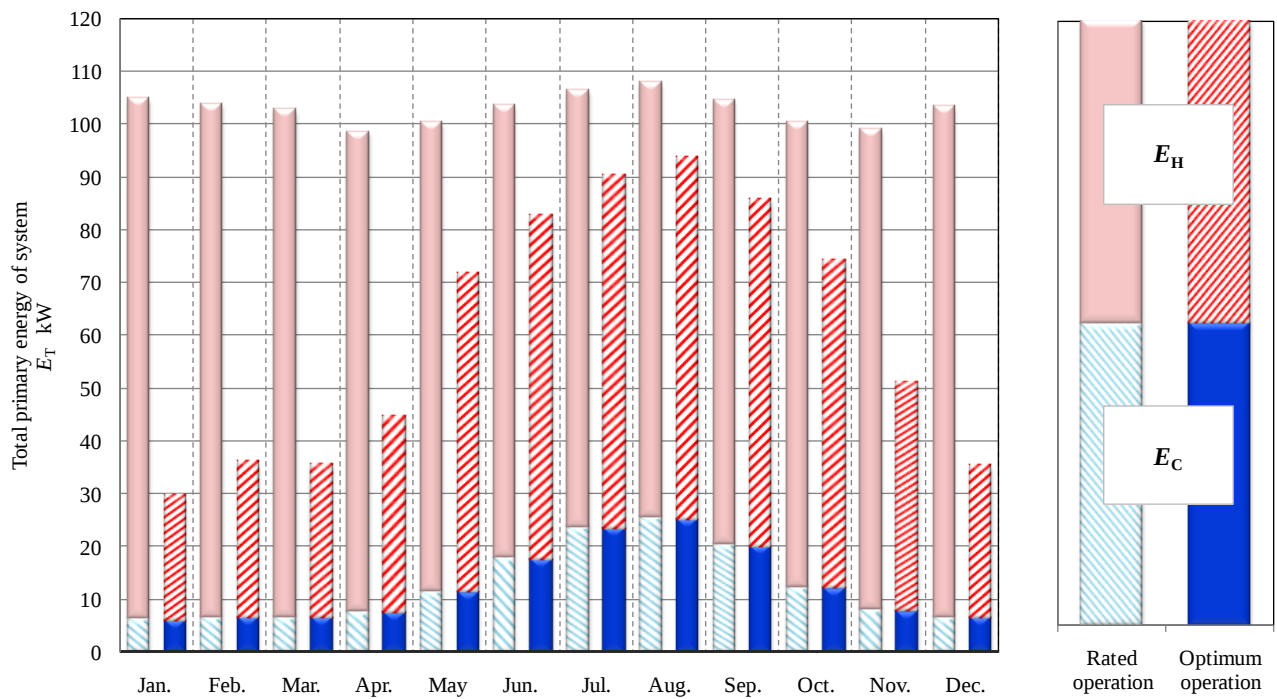


Fig.2 Total primary energy consumption

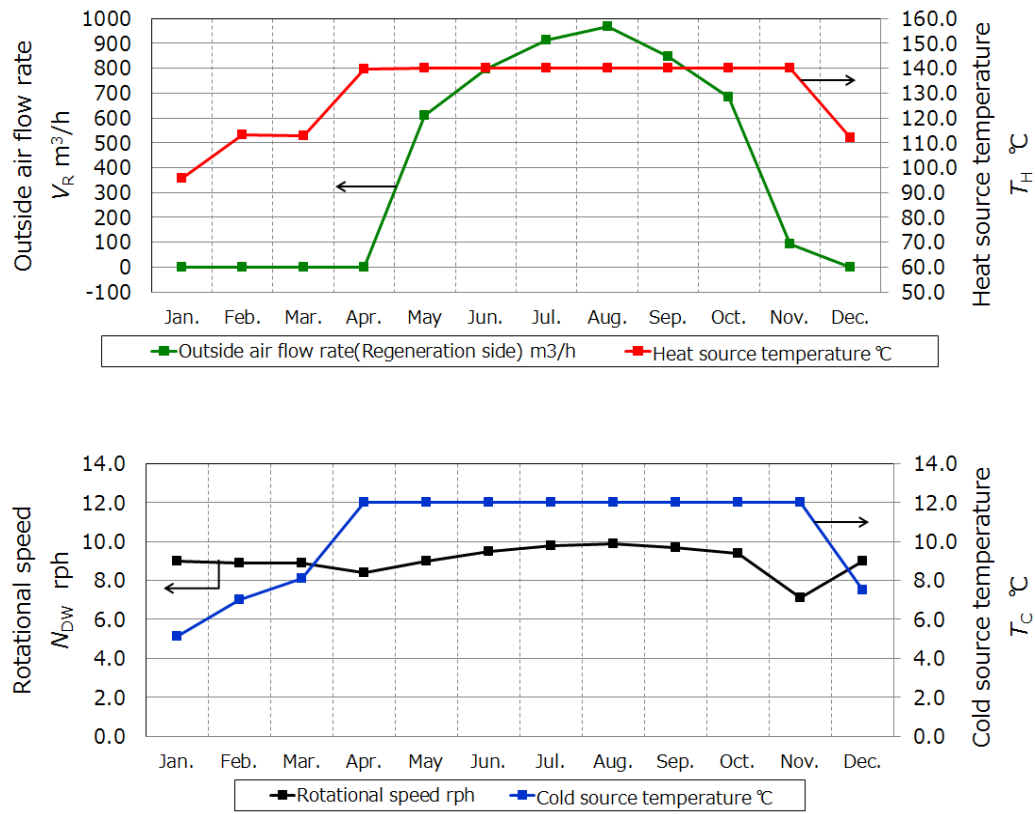


Fig.3 Variation in operating parameters (T_H , V_R and N_{DW} , T_C)

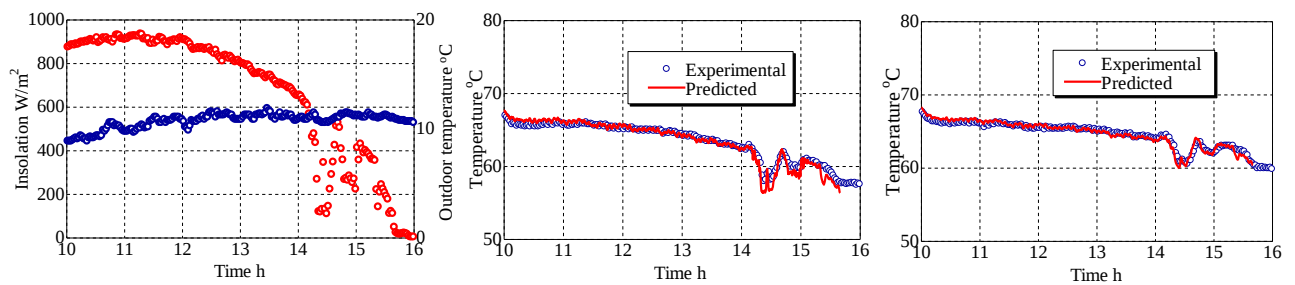


Fig.4 Result of experiment and simulation

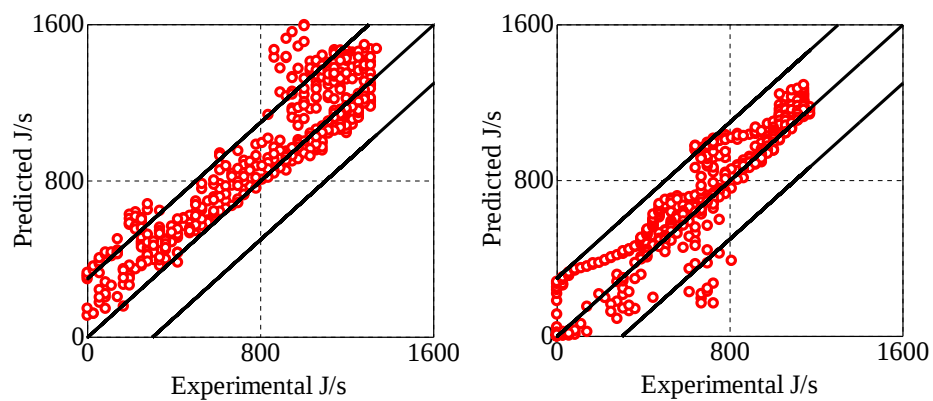


Fig.5 Validation of solar collector model

3. 共同研究者

井上 修行 (理工学研究所 客員教授)	鄭 宗秀 (理工学研究所 客員准教授)
粥川 洋平 (理工学研究所 客員准教授)	山口 誠一 (理工学術院 助教)
東條 健司 (理工学研究所 客員研究員)	大野 慶祐 (理工学術院助手)
前野 一夫 (理工学研究所 客員教授)	

4. 研究業績

4.1 論文

S. Yamaguchi, K.Saito, Numerical and experimental performance analysis of rotary desiccant wheels, International Int. J. Heat Mass Transf. 60,2013, 51-60.

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

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, 30(4), 2013 年, 389-399

4.2 ノート

今林 正剛, 齋藤 潔, 太陽集熱器の数理モデルの構築とその特性解析に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 79 No. 801, 2013, p.814 – 818,

4.3 国際会議

Kiyoshi Saito, Keisuke Ohno, Intermittent Driving Simulation of Compression Type Heat-Pump, The 5th International Conference on Cryogenics and Refrigeration (ICCR2013)

Udagawa Y., Sekiguchi K. , Yanagi M., Uekusa T., Saito K., Ohno K., Naito Y., Development of an Air-Cooled Package Air Conditioner with Refrigerant pump for Data Centers, The 5th International Conference on Cryogenics and Refrigeration (ICCR2013)

Keisuke Ohno, Shiro Nakagawara, Kiyoshi Saito, Hiroo Nakamura, Ryoichi Takafuji, Simulation of fin tube heat exchanger based on tube structure, 8th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2013, Jeju, Korea, 2013-5

Jongsoo Jeong, Kiyoshi Saito, Yosuke Udagawa, Jongtaek Oh, Kwangil Choi, Transient characteristics of carbon dioxide heat transportation system, 8th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2013, Jeju, Korea, 2013-5

Masataka Imabayashi, Takeru Kimura, Kiyoshi Saito, The study of the mathematical model and characteristics of the solar collectors, The6th International Meeting on Advanced Thermofluids(IMAT2013)

Nobuki OHTAa, Seiichi YAMAGUCHI, Kiyoshi SAITO, Optimal Operation of Dehumidification Air-conditioning System, The6th International Meeting on Advanced Thermofluids(IMAT2013)

Jongsoo JEONG, Keisuke OHNO, Kiyoshi SAITO, Hajime YABASE, M. Idrus ALHAMID, Nasruddind, Operation Performance of Solar Heat Recovery Absorption Chiller Based on Indonesian Climate, The6th International Meeting on Advanced Thermofluids(IMAT2013)

4.4 国内発表

山口誠一, 齋藤 潔, 伊藤卓, 大曲康仁, 低露点用除湿空調システムの最適運転に関する研究, 第 47 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京, 2013.4.

太田延樹, 山口誠一, 齋藤 潔, 宮内彦夫, 原田政利, リキッドデシカント用ローター型充填層の熱物質移動に関する研究, 第 47 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京, 2013.4.

太田延樹, 山口誠一, 齋藤 潔, デシカントローター内部運転状態の数値的可視化, 第 47 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京, 2013.4.

大野 慶祐, 宇田川 陽介, 関口 圭輔, 柳 正秀, 齋藤 潔, データセンタ向け間接外気冷房型空冷パッケージ空調機の開発, 第 47 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京, 2013-4.

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, 2013-4.

中川原 史郎, 大野 慶祐, 太田 育秀, 齋藤 潔, フィンチューブ熱交換器の伝熱性能評価, 第 47 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京, 2013-4.

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, 2013-4.

大野 慶祐, 松本 邦康, 森本 研二, 齋藤 潔, 個別分散型空調機の過渡変化時の運転挙動に関する定量評価, 第 47 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京, 2013-4.

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ー “ENERGY FLOW+M” の開発ー二重効用吸収式ヒートポンプの特性解析ー, 2013 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2013-9.

大野 慶祐, 齋藤 潔, 圧縮式ヒートポンプの非定常特性解析ー制御系設計に必要なパラメータスタディー, 2013 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2013-9.

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ー “ENERGY FLOW+M” の開発ー吸収式ヒートポンプの特性解析ー, 2013 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2013-9.

大野 慶祐, 宇田川 陽介, 関口 圭輔, 柳 正秀, 齋藤 潔, 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ー(第 3 報) 動特性に対するシミュレーションモデルの妥当性検討ー, 2013 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2013-9.

今林 正剛, 木村 健, 齋藤 潔, 太陽集熱器の数理モデルの構築とその特性解析に関する研究, 第23回環境工学シンポジウム, 2013-7.

山口誠一, 齋藤 潔, デシカントロータの熱・物質移動特性に関する研究, 2013 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2013.9.

太田 延樹, 山口 誠一, 齋藤 潔, デシカントロータの占有体積最小化に関する研究, 2013 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2013.9.

宮内 稔, 山口 誠一, 齋藤 潔, デシカント空調システムの消費エネルギー最小化に関する研究, 2013 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2013.9.

木村 健, 今林 正剛 齋藤 潔, 太陽集熱器の数理モデルの構築とその特性解析に関する研究, 太陽エネルギー合同発表会 2013, 沖縄, 2013-11.

5. 研究活動の課題と展望

本プロジェクトの主要なテーマである圧縮式ヒートポンプ, デシカント空調システム, 太陽熱集熱器の数理モデルを構築し, シミュレーションによりその詳細な動的挙動の解明が可能となった. 今後は, これら数理モデルを用いて, 各種システムの最適設計・制御の検討を行っていく. また, 冷媒物性評価も開始している. これにより, ヒートポンプに最適な冷媒の探索も進める.