

## 学位論文題名

## Study on the variable capacity compact heat pump unit with a desuperheater for space heating and domestic hot water

(暖房・給湯同時とりだし可能なデスパーヒータ熱交換器を有する可変容量  
コンパクトヒートポンプユニットに関する研究)

## 学位論文内容の要旨

The variable capacity compact heat pump with a desuperheater is a monovalent system designed for detached low energy houses for the provision of space heating (SH), space cooling (SC) and domestic hot water (DHW) all year long. The system can adjust to the heating or cooling demand by use of the inverter driven compressor, providing a stable output and reducing the electrical consumption if compared with other options. However, there has been only limited research regarding the operation and control of such systems. Furthermore, studies regarding a single frequency GSHP designed for SH that provide DHW by incorporating a desuperheater in its cycle are common in the literature. As no control techniques for frequency or expansion valves have been examined, the results of such studies can be misleading. A better understanding of the compact GSHP with a desuperheater requires a simulation program, in which the design, control and evaluation of a wide range of conditions can be performed.

Three main objectives are identified in this thesis. First it is desirable to gain a complete understanding of the behavior of the system against changing climate and control conditions. This is achieved both through experimentation and the study of the underlying physical phenomena. The second objective is to identify mechanisms through which the performance of the system could be increased, especially when producing only DHW. The hypothesis drawn from the studies is capitalized through experimentation. The third objective is to apply the knowledge gained in the development of a unique simulation of the system. The simulation can be transparently coupled with a ground heat transfer simulation and/or with a house heat transfer model to obtain a realistic performance estimate of the whole system. This coupling allows the systematic calculation of the seasonal performance factor, which can be used to evaluate different control schemes of the machine.

This thesis is organized in seven chapters. The first chapter presents the background of heat pump technology, and the importance of their development for the mitigation of global warming. The historical development of the general vapor refrigeration cycle simulation is briefly introduced, followed by a classification of the different heat pumps systems. The problematic of the Japanese thermal energy demand is presented and the target unit is introduced. Finally, the objectives of the research are clearly introduced. The second chapter presents the literature review organized in three main fronts: The status of heat pump technology, the vapor refrigeration cycle simulation front, and the heating demand calculation in houses. The third chapter discusses the performance of the objective system. The constructed prototype compact heat pump with a desuperheater is described in detail, as well as the testing station developed. The variable capacity was examined by varying the frequency of the operating compressor. A mapping relating the performance and COP under various climate and control conditions is obtained. Each component's behavior was analyzed. In particular, the overall heat transfer coefficients of the heat exchangers and the performance of the compressor were studied in

detail. As a result, it was observed that without an increase in the refrigerant mass flow rate or the heat exchanger heat transfer area, there was little room for improvement in terms of COP increment. Moreover, the high pressure ratio of the cycle when producing only domestic hot water was identified as a key factor that limits its performance.

The purpose of the fourth chapter is to assert if the evaluation of an internal heat exchanger into the refrigeration cycle results in an enhancement of its performance, according to the conclusions drawn in the third chapter. Only one climate condition was examined, under various control conditions. Additionally, different geometries of the desuperheater were tested to examine the viability of an increase in the heat transfer. The modifications showed to be effective in augmenting the COP of the system from 4.75 to 5.19 for SH mode, from 2.20 to 2.57 for DHW mode, and from 4.50 to 5.10 for combined SH and DHW, representing an increase of 9.3 %, 16.8 % and 13.3 % respectively. At the end of the chapter, a strategy to control the highest COP of the machine when the iHX is used is proposed. The fifth chapter objective is to present the novel vapor refrigeration cycle simulation. Before entering in the algorithms, the assumptions and balance conditions necessary are stated. Four novel algorithms are introduced: The fast adaptive zone heat exchanger algorithm uses boundary conditions to quickly solve the heat balance inside the heat exchangers for one, two or three refrigerant phases; The iHX algorithm is used for the development of the system when the iHX is applied; The mass flow rate conservation algorithm defines the solution space of each junction in the system according to the inlet climate conditions and calculates the discharge pressure of the compressor based on the control conditions and an initial plausible state. Using the models developed, the global convergence algorithm maintains the heat and mass balance throughout each junction of the cycle. Finally, the models developed for each component of the system are described. The results from simulations are then compared with the first setup, exhibiting remarkable agreement for each of the components of the system. The resulting COP agrees within 10 % for 95.77 % of the data, showing good precision with experimental results. Through the application of the simulation, it was demonstrated that a constant superheating degree might not always provide the highest COP for the system when a desuperheater is considered. With the developed simulation, the sixth chapter shows its application to predict the seasonal performance factor of a low energy house. Operation schemes are prepared using different pricing schemes for two Japanese cities, and the performance of the system is examined. The results of each control strategy were compared according to the heating demand of each location, showing that there is no unique strategy that can be applied in both locations; rather control should take into account local climate conditions. Conclusions and the outlook on the technology are presented in chapter seven. Further improvement fronts on the technology and developed simulation are presented.

The work presented in this dissertation is an important contribution to the fields of environmental engineering and human comfort by proposing a novel technology through which our dependence on non-renewable sources of thermal energy can be reduced. In the industry of heating, refrigeration and air conditioning, this dissertation makes a significant contribution by the introduction of the simulation environment, which can be used to make an effective appraisal of the performance and control methodology of a water-to-water heat pump with a desuperheater (and internal heat exchanger). Moreover, the methodology presented and algorithms proposed to solve the refrigeration cycle can be extended to any other cycle in science.

# 学位論文審査の要旨

主 査	教 授	長 野 克 則
副 査	教 授	羽 山 広 文
副 査	教 授	小 川 英 之
副 査	准教授	濱 田 靖 弘

## 学 位 論 文 題 名

Study on the variable capacity compact heat pump unit with  
a desuperheater for space heating and domestic hot water

(暖房・給湯同時とりだし可能なデスパーヒータ熱交換器を有する可変容量

コンパクトヒートポンプユニットに関する研究)

CO<sub>2</sub> 排出量削減のために住宅の熱的高性能化が進んでおり、必要な暖冷房負荷が非常に小さくなっている。このようなローエネルギー住宅では、より小さな温度差で良好な室内温熱環境を維持できるため、ヒートポンプの適用が最も有効である。欧州では暖房・給湯機能をもつ、いわゆるコンパクトヒートポンプユニットが年数十万台の市場規模に成長している。欧州のユニットは一定速型圧縮機による ON-OFF 制御のためバッファタンクが必要であり設置には大きなスペースを要すること、また我が国の生活様式に適合する十分な給湯量を賄うことができない。そこで、筆者は我が国の生活様式にも十分適合できる容量可変型のコンパクトヒートポンプユニットを開発した。このヒートポンプユニットの特徴はインバータ制御型圧縮機を搭載し給湯用熱交換器としてデスパーヒータを採用することにより、1 台の圧縮機で暖冷房出力や給湯出力を任意に可変して連続的に取り出すことができることである。そのため、圧縮機の発停止によるエネルギー損失がなく、安定した室内温室環境や豊富な給湯需要をより低消費電力量、コンパクトな構成で提供できる。これまで一定速型圧縮機を搭載したデスパーヒータ利用のヒートポンプ暖冷房・給湯ユニットに関する研究例はあるものの、インバータ制御型圧縮機を搭載した容量可変型コンパクトヒートポンプユニットに関する研究例はない。この論文の目的は、第 1 は容量可変型コンパクトヒートポンプユニットのプロトタイプ機を開発し、その基本性能を実験的に明らかにすることである。第 2 は、本コンパクトヒートポンプユニットをシミュレートできる冷凍サイクルの数値計算プログラムを開発し、幅広い条件下で性能解析を行うと共に、必要熱負荷を最高効率で賄うための圧縮機回転数と膨張弁開度の制御ロジックを確立することである。第 3 は、容量可変型コンパクトヒートポンプユニットを我が国のローエネルギー住宅に導入する場合の運転方法の制御方法論を構築し、数値シミュレーションにより省エネルギー性と運転コストの評価を行うことである。

本論文は以下の第 1 章から第 7 章で構成されている。

第 1 章は、序論であり、現在の世界的なエネルギーと環境問題、ヒートポンプ技術の現状を概説し、革新的なヒートポンプ技術が如何に地球温暖化防止に貢献についてかについて論じた。その上で、本論文の目的を述べている。

第 2 章は、現在のヒートポンプ技術と冷凍サイクルの数値シミュレーション技術について既往研

究についてレビューを行うと共に、インバータ圧縮機を搭載する容量可変型コンパクトヒートポンプ技術の位置づけを行っている。

第3章は、インバータ制御型圧縮機を搭載する容量可変型コンパクトヒートポンプユニットのプロトタイプ機を開発して、種々の熱出力、圧縮機回転数、熱源温度、取り出し温度の条件下で最高効率を記録する膨張弁開度を求める試験（マッピング試験）を実施して、本ユニットの出力と効率の特性を明らかにしている。一方、数値解析で必要となる機器構成要素の物理特性、例えば、プレート型熱交換器の総括伝熱係数や圧縮機の圧縮効率と消費電力の関係などを明らかにしている。また、最適冷媒封入量についても検討を行っている。

第4章では、液—ガス熱交換器の有用性について実験的に明らかにしている。液—ガス熱交換器は凝縮器出口側冷媒と蒸発器出口側冷媒を熱交換させるものであり、それにより熱出力と効率の向上が期待できる。ここでは数種類の液—ガス熱交換器について試験を実施して、効率が最大 16.8% 改善されることを確認している。

第5章は、容量可変型コンパクトヒートポンプユニットの性能解析を行うため、冷凍サイクル数値解析プログラムの開発を行っている。特徴は、インバータ制御型圧縮機を対象にしてデスーパーヒータを組み込み暖冷房・給湯同時取り出しを可能とした上で、液—ガス熱交換器の効果を検討できることである。計算結果は 10% 以内の誤差で実際の効率を再現できることを検証した上、幅広い条件下で最高効率を得るための圧縮機回転数と膨張弁開度を検討し、制御ロジックを確立した。

第6章は、5章で開発した数値解析プログラムを用いて、札幌と東京に建つローエネルギー住宅に容量制御型コンパクトヒートポンプユニットを導入した場合、省エネルギー性とランニングコスト低減効果を評価するものである。給湯用に 370L の貯湯タンクをもたせて、建物の暖房負荷と給湯負荷を賄うようにヒートポンプユニットを運転させた場合、電力消費量、またはランニングコストが最小になる運転制御の検討を行ったものである。

第7章は総括であり、結論を述べると共に、容量可変型コンパクトヒートポンプユニットの将来展望について述べている。

これを要するには、筆者は、ローエネルギー住宅向けのインバータ制御型圧縮機を搭載する容量可変型暖冷房・給湯用コンパクトヒートポンプユニットのプロトタイプ機を開発して、その基本性能を明らかにしている。同時に、容量可変型コンパクトヒートポンプユニットの挙動を模擬できる冷凍サイクル数値解析プログラムを開発し、実験で得られた構成要素の物理特性を用いることにより高い再現性を得ることを確認した上で、構成部材のサイズや冷媒封入量の最適化、および液ガス熱交換器の効果とその条件、暖冷房・給湯負荷を同時に賄うための圧縮機回転数制御などを数値解析から明らかにしている。最後に、容量可変型コンパクトヒートポンプユニットを札幌と東京に建つローエネルギー住宅に導入する場合に、電力消費量、またはランニングコストを最小化する運転方法の制御方法論を構築したものである。このように、本研究で得られたローエネルギー住宅向けの容量可変型コンパクトヒートポンプシステムに関する研究成果は、民生部門のエネルギー消費量削減と省コストに大きな貢献を果たすものである。これは、建築設備工学、空気調整工学、冷凍工学をはじめ環境工学、機械工学、建築工学の進展、および省エネルギー、省資源、CO<sub>2</sub> 排出量の削減と地球温暖化防止に貢献するところ大である。

よって、筆者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。