

博士論文審査報告書

論文題目

低温外気利用による年間冷房型空調システム
の高効率化に関する研究

High efficiency annual cooling
air conditioning systems using outdoor air

申請者

宇田川	陽介
Yosuke	UDAGAWA

機械科学専攻 機械システム制御工学研究

2014年7月

本研究は、データセンタなどの情報通信用建物を対象とした年間冷房型空調システムの低温外気利用による高効率化を実現しようとするものである。

データセンタとは、データの管理・制御を行うサーバ、ネットワーク回線に接続する情報通信装置、およびデータを蓄積するストレージなどの ICT 装置を集中管理する施設の呼称である。近年、ICT 装置は、社会に広く普及し、社会や経済活動の支えとなっている。データセンタは、電子商取引やコンテンツ配信などのネットワーク活用サービス事業者などに広く活用され、社会インフラとして極めて重要な位置を占めるようになっており、人々の生活を維持していくうえで必要不可欠な存在となっている。

データセンタには、ICT 装置の他に、ICT 装置に電力を供給する電源システムや運用時に常時大量の発熱を伴う ICT 装置を冷却するための空調システムも併せて設置されている。このため、その重要性が高まるにつれて、データセンタの消費電力量は、増加の一途をたどっており、今後もさらに増加することが予想されており、地球温暖化対策の観点から消費電力量の削減が急務となっている。

データセンタで消費される電力のうち、空調システムの消費電力は 30～50%を占めており、空調システムの消費電力削減技術の確立に向けた研究に取り組む意義は非常に大きく、これまでも空調システムの消費電力削減に向けては、種々の研究や取組みが行われている。データセンタにおける空調システムの消費電力削減を実現する主な手段としては、室内気流制御と空調システム自体の効率向上が挙げられる。

室内気流制御においては、空調機からの冷気を効率的に ICT 装置まで搬送することで、送風動力の低減を図ることを目的にした最適な気流方式に関する研究や空調機からの冷気と ICT 装置からの高温排気のみキシングロスによる送風動力の増加を防止する研究などが行われている。

本研究では、データセンタにおける空調システムの空調システム自体の効率を向上することにより、消費電力を低減する方法に着目している。空調システム自体の効率向上を実現するためには、圧縮機や熱交換器など、機器の構成要素の高効率化から、空調機システムとしての制御手法の改善による高効率化まで種々の研究が行われている。しかし、更なる大幅な消費電力削減に向けては、これまでの一般の空調機に対して行われてきた研究開発の延長線上にはない新たなアプローチなしには実現できない。そこで、データセンタ空調が年間冷房である特徴を活かし、中間期から 期の低温外気を有効利用する観点からのアプローチに注目した。

低温外気利用による消費電力低減の手法としては、外気を直接室内に取り入れる「直接外気冷房」と熱交換器等を通じて間接的に低温外気を利用する「間接外気冷房」が挙げられる。低温外気利用については、以下のような研究が行われている。

直接外気冷房については、消費電力低減効果や導入外気条件についての研

究が行われているものの、大量の外気の導入による室内空気質の悪化が安定駆動を求められる情報通信装置に与える影響について十分に明らかにされていないため、導入が進んでいないのが現状である。

一方で、間接外気冷房は、直接大量の外気を室内に導入しないため、上記の問題を回避することが可能となる。間接外気冷房については、外気冷熱を冷水により取り込む方式として、冷却塔を用いたフリークーリングがあり制御方法や外気条件に関しての研究が行われている。しかし、室外の冷却塔から室内の空調機まで冷水を搬送するための多大なポンプ動力が必要になる。また、外気が低温になった場合に配管凍結のリスクもあり、ヒータ等の対策が必要になることから必ずしも大きな消費電力低減効果が期待できない。

その他の間接外気冷房の方式として、外気冷熱を冷媒に取り込む方式があり、低外気温度時に動力を必要としない冷媒自然循環が提案され、制御方法等について研究が行われている。しかし、冷媒の相変化に伴う比重差を駆動力とするため、凝縮器と蒸発器の配置や配管長の制約などが課題となる。

冷媒自然循環の課題を解決する手段として、冷媒ポンプにより冷媒を循環させるフリークーリングサイクルが提案されてきた。本方式では、冷媒ポンプにより冷媒を搬送させるため、低外気温時には消費電力の低減が期待できるが、高外気温度では能力が不足し運用が不能となる。そのため、高外気温度時には、圧縮機を用いた従来の圧縮サイクルが別に必要となり、システムの2重化によるコストアップが避けられないという課題がある。

また、圧縮機を用いた冷凍サイクルについては、低外気温度時に圧縮機が運転可能な圧力比の下限値を緩和し、外気温度に応じて凝縮圧力を低下させることで、圧縮機の動力を低減するという手法があるが、圧縮機を用いるため、消費電力の低減には限界がある。

以上のようにデータセンタにおける年間冷房型空調システムの高効率化に向けた低温外気の有効活用の方式には様々あるが、年間での消費電力を最小化できる最適な低温外気利用方式は明確になっていない。

そこで本研究では、低温外気を有効活用できる各種方式を分析し、データセンタにおける年間冷房型空調システムの高効率化への指針を得ることを目的とする。

本研究では、まず、異なる低温外気利用方式を採用した空調システムの運転条件を解析したうえで、消費電力削減効果の比較を行い、最適な低温外気利用方法を明らかにしている。次に、年間での消費電力量の更なる低減に向けて、圧縮機よりも大幅に小さい動力で冷媒を搬送できるフリークーリングサイクルに着目し、一台で、従来の圧縮サイクルにフリークーリングサイクルを併用したハイブリッド型空調システムの実用化に向けた特性解析を行い、システム設計および制御設計指針を得ると共に導入効果の試算を行っている。

第1章では、本研究の背景を述べるとともに、データセンタ空調の消費電力量の低減手法を示し、年間冷房型空調システムの高効率化に向けた課題を

従来の研究成果と併せて述べたうえで、本研究の目的を明らかにしている。

第2章では、低温外気を利用したデータセンタ向け空調システムの運転条件を精査し、各方式の消費電力量の低減効果を解析し、最適な低温外気利用方法を明らかにしている。

第3章では、更なる年間での消費電力量の低減に向けて、1台の機器で、従来の圧縮サイクルに、圧縮機よりも大幅に小さい動力で冷媒を搬送できるフリークーリングサイクルを併用したハイブリッド型空調システムの解析に必要な高精度数理モデルを構築している。さらに、構築した数理モデルの妥当性を実機の実運転挙動と比較することで確認している。

第4章、第5章では、妥当性が確認された数理モデルを用いた解析により、システムの静特性および動特性を分析することで、ハイブリッド型空調システムの実現に必要なキャビテーション抑制を実現する設計方法やサイクルの最適な切り替え制御指針を明らかにしている。

第6章では、製作したハイブリッド型空調システムを実際にデータセンタに設置し、年間を通じた運転データを分析することで、サイクルの切り替え動作の確認と省エネルギー性能を分析している。また、本空調機の消費電力量の低減率を試算し、本システムにより約50%の省エネルギーを実現できることを示している。

第7章では、本研究で得られた成果をまとめている。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、情報通信建物やデータセンタなどで運用されている年間冷房型空調システムの高効率化の手段として、低温外気の利用に着目し、種々ある低温外気利用方式の運用条件を精査する共に、導入効果を試算し比較検討することで、低温外気利用する際の指針を示している。

また、更なる年間での消費電力量の低減に向けて、一台で、従来の圧縮サイクルにフリークーリングサイクルを併用したハイブリッド型空調システムの詳細な特性を明らかにし、設計・制御指針を示すとともに、導入効果の試算も行い、システムの有効性を示している。

この研究成果は、情報通信分野に限らず、放送分野、大学等の研究機関、金融機関など年間を通して冷房、冷却する空調や冷凍分野においても広く活用が見込まれることからその有用性は高く、今後のエネルギー分野にかかわる熱工学、制御工学の発展にも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あるものと認める。

2014年7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