

博士論文概要

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5月

本論文は、消費電力量の低減が強く求められているデータセンタにおける空調システムを対象に、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への指針を得ることを目的とした研究結果を取りまとめたものである。

近年、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。一般的に、ICT 装置は、情報通信用建物やデータセンタにおいて、集中的に管理されている。また、データセンタには、ICT 装置の他に、運用に必要な電源・空調システムが設置されている。近年、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きている。重要性が高まるにつれて、データセンタの消費電力量もますます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も消費電力量の削減が求められている。

ICT 装置は、運用時に常時大量の発熱を伴うため、専用の空調システムにより冷却が行われている。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、その消費電力の削減がデータセンタ全体の消費電力に与える影響は大きく、これまでも消費電力削減に向けて種々の研究や取り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、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なくす手法の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消費電力削減を実現するもう一方の手段である空調システム自体の効率向上に着目する。空調システム自体の効率向上に向けては、年間冷房を行うという特徴から、中間期から冬期の低温外気の有効利用が効果的である。そこで本研究では、低温外気を有効活用する手法の検討を行い、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。

空調システム自体の効率向上に向けては、機器の構成要素から、空調機としての高効率化まで種々の研究が行われている。しかし、更なる消費電力削減に向けては、機器単体での効率化のみでは、限界があり、データセンタ空調の年間冷房という特徴を活かした効率化技術の確立が求められる。近年、年間を通じて冷房を行う観点から、低温外気の有効利用（外気冷房）に注目されており、種々の研究が行われている。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。

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挙げられるが、冷媒ポンプにより冷媒を搬送させるため、低外気温度時には消費電力の低減が期待できるが、高外気温度では運用できない。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。

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り、方式毎に導入効果に関する研究は進められているが、最も年間での消費電力が小さくなる低温外気利用方法は明確になっていない。

そこで、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する。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、一台の機器で、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を試算する。

第1章では、本研究に至る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既往

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た。

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た。

第3章から第6章は、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実用化に向けた研究成果について述べた。

第3章では、ハイブリッド型空調システムの実現に向けたシステムの特徴把握に必要な、高精度数理モデルを構築した。さらに構築した数理モデルの妥当性を検証すると共に実験的にも所要の性能が得られることを検証するため、実際に機器を製作し、実際の運用環境を模擬した試験室に機器を設置し、詳細な実験を行った結果を示した。

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て、解析により、システムの静特性および動特性を示すとともに、設計・制御指針を示した。

第6章では、実際に製作したハイブリッド型空調システム本空調機を運用中の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と省エネルギー性の評価結果を示した。また、国内5都市の気象データを用いて、従来の一般電算機用空調機に対する本空調機の消費電力量の低減率を試算した結果を明らかにし、本システムの有効性を示した。

第7章では、本研究で得られた成果をまとめ、研究の総括を行った。

以上のように本論文では、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得ることができた。また、更なる年間での消費電力量の低減に向けて、一台の機器で、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・制御指針を示す共に、導入効果の試算も行い、システムの有効性を示した。なお、本研究成果は、情報通信分野に限らず、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、有用性は高い。

本研究では、情報通信用建物やデータセンタの消費電力低減に向けて、低温外気利用による空調システムの高効率化に関して検証を行ったが、今後も空調システムのみで取組んでいては、消費電力量の低減には限界がある。今後は、ICT装置技術や電源装置技術と整合を図り、冷却技術を発展させていく必要がある。具体的には、空気を介さずに液体でICTの冷却を行う装置液冷技術の確立や空調システムの高効率化に加え、ICT装置および電源装置と一体となった連係制御技術の確立が今後の課題となると考える。

早稲田大学 博士(工学) 学位申請 研究業績書

氏名 宇田川 陽介



(2014年7月現在)

種 類 別	著者名：題目、発表・発行掲載誌名、巻号頁、発表・発行年月等
論文 ○	宇田川陽介、関口圭輔、柳正秀、齊藤潔、大野慶祐：情報通信装置向けフリークーリング併用型ハイブリッド空調システムに関する研究 第1報 高精度数理モデルの構築と静特性解析、日本冷凍空調学会論文集 (Vol. 31, NO. 2)、pp. 157-168、2014年6月
論文 ○	Y. Udagawa, K. Sekiguchi, M. Yanagi, T. Uekusa, Y. Naito : Development of an Outdoor Air Cooling-Type Air-Cooled Package Air Conditioner for Data Centers , ASHRAE Transactions(vol.119,Part 1), pp.167-175, January 2013
論文 ○	宇田川陽介、関口圭輔、柳正秀、福光超、齊藤潔：データセンタにおける外気冷房型空調システムに関する研究、空気調和・衛生工学会論文集(第189号)、pp.1-10、2012年12月
総説	関口圭輔、植草常雄、宇田川陽介、内藤靖浩、齊藤潔：50%の省エネルギーを実施した革新的な情報通信用空調機器の開発、日本機械学会誌 第116巻(第1134号)、p.14、2013年5月
総説	宇田川陽介、柳正秀：データセンタ向け空調システムについて、冷凍 第87巻(第1012号)、pp.94-99、2012年2月
総説	宇田川陽介：都市型データセンターに適したIT装置用省スペース型空調機/外気冷熱を利用したIT装置用間接外気冷房型空調機、空気調和・衛生工学 第85巻(第12号)、pp.976-980、2011年12月
総説	柳正秀、宇田川陽介、藁谷至誠：データセンタにおける外気冷熱を利用した冷却技術、電気学会誌 第131巻(第7号)、pp.424-428、2011年7月
講演	K. Saito, Y. Udagawa, K. Ohno, Y. Naito : Development of Hybrid Compression-Type Air Conditioning System with Free Cooling Cycle for Data Center, The 3rd ICSERA, 場所, 出版元, 2013-148, October 2013
講演	宇田川陽介、関口圭輔、柳正秀、齊藤潔、大野慶祐：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、日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、東京、日本冷凍空調学会、pp.531-534、2013年9月
講演	宇田川陽介、関口圭輔、柳正秀：データセンタ用間接外気冷房型空冷パッケージ空調機の開発(その1) ポンプサイクルの性能特性検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、長野、空気調和・衛生工学会、pp.273-276、2013年9月
講演	関口圭輔、宇田川陽介、柳正秀：データセンタ用間接外気冷房型空冷パッケージ空調機の開発(その2) フィールド評価と導入効果試算、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、長野、空気調和・衛生工学会、pp.277-280、2013年9月

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	著者名：題目、発表・発行掲載誌名、巻号頁、発表・発行年月等
講演	宇田川陽介、関口圭輔、柳正秀：データセンタ向け外気冷房型空冷パッケージ空調機の開発（冷媒循環量がポンプサイクルに与える影響）、第23回環境工学総合シンポジウム講演論文集、東京、日本機械学会、pp.384-385、2013年7月
講演	宇田川陽介、関口圭輔、柳正秀、齊藤潔、大野慶祐：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・冷凍連合講演会講演論文集、東京、日本機械学会・空気調和・衛生工学会・日本冷凍空調学会、pp.71-74、2013年4月
講演	Y. Udagawa, K. Sekiguchi, M. Yanagi, T. Uekusa, K. Saito, K. Ohno, Y. Naito : Development of an Air-Cooled Package Air Conditioner with Refrigerant Pump for Data Centers, ICCR2013, Hangzhou China, IIR, B-3-08, April 2013
講演	宇田川陽介、大野慶祐、齊藤潔、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1報）空調機のモデル化および妥当性検討、日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、札幌、日本冷凍空調学会、pp.559-562、2012年9月
講演	大野慶祐、齊藤潔、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、日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、札幌、日本冷凍空調学会、pp.563-566、2012年9月
講演	宇田川陽介、関口圭輔、福光超、柳正秀：データセンタ空調の外気冷熱利用に関する研究（各空調方式の年間消費エネルギーおよびリスク評価比較）、第22回環境工学総合シンポジウム講演論文集、仙台、日本機械学会、pp.314-316、2012年7月
講演	関口圭輔、柳正秀、宇田川陽介、福光超：データセンタ空調の外気冷熱利用に関する研究（ポンプサイクルを併設する空冷パッケージ空調機の開発）、第22回環境工学総合シンポジウム講演論文集、仙台、日本機械学会、pp.311-313、2012年7月
講演	宇田川陽介、柳正秀、藁谷至誠、福光超：データセンターの室内環境条件に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、東京、日本建築学会、pp.1279-1280、2011年8月
講演	Y. Udagawa, S. Waragai, M. Yanagi, W. Fukumitsu : Study on Free Cooling Systems for Data Centers in Japan, INTELEC 2010, Orlando USA, IEEE, pp.454-458, June 2010
講演	宇田川陽介、柳正秀、藁谷至誠：外気冷熱を利用したデータセンター空調システムの検討、第20回環境工学総合シンポジウム講演論文集、横浜、日本機械学会、pp.223-225、2010年6月
講演	藁谷至誠、宇田川陽介、植草常雄、福光超：データセンターを対象としたフリークーリングシステムの検討(第1報)システムモデル検討と年間消費エネルギー検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、熊本、空気調和・衛生工学会、pp.1895-1898、2010年9月

早稲田大学 博士 (工学) 学位申請 研究業績書

種 類 別	著者名：題目、発表・発行掲載誌名、巻号頁、発表・発行年月等
講演	宇田川陽介、藁谷至誠、植草常雄、福光超：データセンターを対象としたフリークーリングシステムの検討(第2報)日本における年間エネルギー消費量比較、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、熊本、空気調和・衛生工学会、pp.1899-1902、2010年9月
その他 (記事)	Y. Udagawa : Energy-saving Technology of Air-conditioning Systems for Datacenters, NTT Technical Review Vol.12 (No.3), NTT, March 2014
その他 (記事)	宇田川陽介、関口圭輔、吉井存、木幡悠士、月元秀樹、中田達也：情報通信用空調ソリューションの省エネルギー技術、NTT技術ジャーナル 第26巻(第1号)、PP.19-23、2014年1月
その他 (記事)	宇田川陽介：外気冷熱を活用して省エネルギーを追求するIT装置用外気冷房型空調機の導入開始、NTT技術ジャーナル 第24巻(第5号)、PP.34-37、2012年5月 以下、博士論文に直接関係しない講演を記す
講演	宇田川陽介、関口圭輔、柳正秀、町田勝美、三野洋介：データセンタにおける高発熱ラックの冷却に関する検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、札幌、空気調和・衛生工学会、pp.1839-1842、2012年9月
講演	宇田川陽介、吉井存、柳正秀、藁谷至誠、三野洋介：データセンタにおける空調停止時の室温上昇に関する検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、名古屋、空気調和・衛生工学会、pp.441-444、2011年9月
講演	宇田川陽介、吉井存、柳正秀、藁谷至誠：アイルキャッピング併用時におけるラック型空調機の風量制御に関する検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、山口、空気調和・衛生工学会、pp.2127-2130、2010年9月
講演	Y. Kohata, K. Sekiguchi, M. Yanagi, Y. Udagawa : Study on cooling of the high exothermic racks in data centers, INTELEC 2013, Hamburg Germany, IEEE, pp.553-557, October 2013
講演	吉井存、宇田川陽介、関口圭輔、柳正秀：圧力分布実測によるラック型空調機を用いたデータセンターの風量制御設計検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、長野、空気調和・衛生工学会、pp.189-192、2013年9月
講演	木幡悠士、関口圭輔、柳正秀、宇田川陽介：データセンタにおける高発熱ラックの冷却に関する検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、長野、空気調和・衛生工学会、pp.193-196、2013年9月
講演	月元秀樹、宇田川陽介、吉井存、関口圭輔：データセンター商用電源停電時における温度上昇抑制手法に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、北海道、日本建築学会、pp.1303-1304、2013年8月 その他 講演 17 件