

サーバ集約を考慮した局所冷却システムの効果

The efficiency of the close coupled cooling system for consolidated servers

本村真一 †, 大野賢一 †, 木本雅也 †, 目黒一成 †,
井上仁 †, 石田雅 †, 西田英樹 †

Shin-ichi Motomura†, Ken-ichi Ohno†, Masaya Kimoto, Kazunari Meguro,
Masashi Inoue, Masaru Ishida and Hideki Nishida †

motomura@tottori-u.ac.jp, ohno@tottori-u.ac.jp, kimoto@tottori-u.ac.jp,
meguro@tottori-u.ac.jp, masashi@med.tottori-u.ac.jp,
ishida@tottori-u.ac.jp, nishida@tottori-u.ac.jp

鳥取大学総合メディア基盤センター †
Information Media Center, Tottori University†

概要

大学の情報系センターにおけるサーバールームは、高速計算機の設置を前提として設計されていることが多い。しかしながら、近年では高速計算機の設置を取りやめる大学も増え、また設置されるサーバもラックマウント型サーバやブレードサーバのように小型化し、単位面積当たりの発熱密度が増加している。さらにはサーバ仮想化技術の普及によって、サーバに搭載する CPU やメモリが増加し、サーバ単体の発熱量も増加する傾向にある。このような変化により、サーバールームに占めるサーバの設置面積は減少しつつも、サーバ単体の発熱量は増加している。そのため、空間的な熱の偏りが発生し、従来の部屋全体を冷却する方式では対応できないことがある。また、電力使用量の点からも適切でないと考えられる。これらの対策として、部屋全体を冷却するのではなく、サーバを搭載するラックを集中的に冷却する、局所冷却方式が注目されている。鳥取大学総合メディア基盤センターでは、サーバールームの冷却方式について比較検討した結果、APC 社製 InRow RP DX という精密空調装置と HACS ソリューションを用いることで局所冷却を実現し、サーバの適切な冷却と電力使用量の削減を実現した。

キーワード

冷却システム, サーバルーム, サーバ集約, 仮想化, 省エネルギー

1 はじめに

大学における学内共同利用施設としてのメディア基盤センター、総合情報処理センター及び情報処理センター（以下、「情報センター」という。）のサーバールームは、多くの場合、高速計算機と呼ばれる比較的大型の計算機の設置を目的として設計されている [1]。体積及び発熱量ともに大きな計算機を設置するため、それなりに広い

面積と比較的規模の大きい冷却装置を備えていることが多い。これらのサーバールームでは、通常図 1 に示すような Computer Room Air Conditioner（以下、「CRAC」という。）と呼ばれる精密空調装置が、部屋の片側もしくは両側に設置されている。この冷却方式では、暖気がサーバールームの上方に溜まる性質を利用して、2 重床のフリーアクセスフロア下に冷気を送風し、計算機からの排熱を天井に配置した暖気通路から回収するよう設

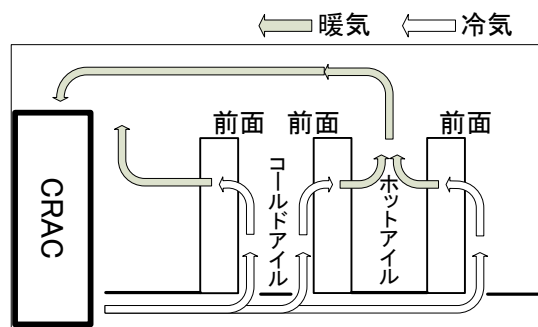


図- 1: 一般的なサーバールームの模式図

計されていることが多い。また、CRAC は空気の攪拌機としても機能し、部屋全体を冷却する役割を果たす。サーバールームの大部分を高速計算機が占めていた環境では、高速計算機自体は高発熱であったものの、単位面積当たりの発熱密度が比較的小さかったため、この冷却方式で十分機能していた。しかしながら、19 インチラック（以下、「ラック」という。）に搭載するラックマウント型サーバが普及し始めた 1990 年後半から、この冷却方式では適切に冷却できない状況が発生した。規格化されたラックにサーバを搭載する関係上、サーバの前面に冷気吸入口、背面に排熱排気口を配置することが一般的となり、またサーバ筐体の高密度化に伴いラック当たりの発熱密度が高くなった。ラック前面にはサーバの冷気吸入口があることから冷気を集中させる必要があり、ラック背面は多数のサーバからの排熱によって暖気が集中している状態になる。この状況下において、サーバを効率的に冷却するためには、CRAC の冷気がサーバの排熱と混ざることがないように、冷気と暖気を分離させる必要がある。そこで、図 1 に示すように、ラックの前面同士を向かい合わせに配置することで、「コールドアイル」と呼ばれる冷気通路と「ホットアイル」と呼ばれる暖気通路をつくり、冷気と暖気の分離を実現する。コールドアイルとホットアイルの分離を行うことで、CRAC からの冷気とサーバからの排熱による暖気を混ぜにくくして、冷却効率を向上させることができる。

このような工夫により、CRAC による部屋全体冷却は近年まで適切に機能していたが、ブレードサーバと呼ばれる高密度サーバの出現により新たな問題が発生した。通常、ブレードサーバは高さ 10U (17.5 インチ) 程度の筐体に 15 台程度のサーバを収容し、5kVA 程度の電力を消費するため [2, 3]、より高い発熱密度となる。ブレードサーバには冷却に対して注意する点もあるが、次のような利点から近年導入が盛んになっている。一つ目は、複数のブレードサーバで電源部を共有できるため、エネルギーロスが少なくなり、省エネルギー化が図れること。二つ目は、運用管理性が良いことがあげられる。また、サーバ仮想化技術の普及もサーバの発熱密度の向上を促進させている。サーバ仮想化技術とは、物理

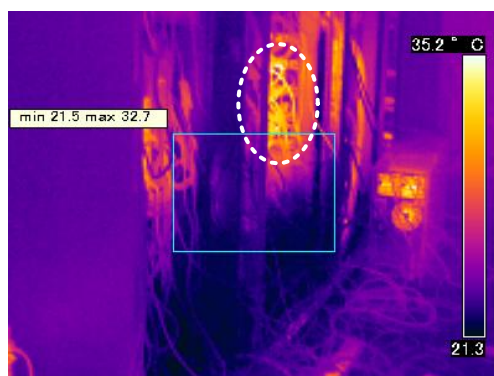


図- 2: 仮想化用物理サーバ背面の赤外線写真

サーバ上にエミュレートされた仮想サーバを提供する技術である。通常、一台の物理サーバで複数の仮想サーバを動作させることができるため、ハードウェアリソースを効率的に使用することができ、設置する物理サーバ数を削減することができる。一般的に、仮想化用物理サーバは複数の高性能な CPU 及び大容量のメモリを搭載するため、物理サーバ単体の消費電力は増大し、発熱密度が高くなる。例として、図 2 に鳥取大学総合メディア基盤センター（以下、「当センター」という。）で稼働していた仮想化用物理サーバ背面の赤外線写真を示す。図 2 の破線で囲んだ部分が当該部分であり、同ラックの上下及び近接ラックに比べて温度が高いことが分かる。このような高発熱密度のサーバを適切に冷却するためには、相応の冷気を供給する必要があるが、図 1 に示すように、CRAC からの送風は CRAC に近い位置にあるラックほど風量が多く、CRAC から遠い位置にあるラックほど少なくなる。また、2 重床には電源ケーブルや LAN 配線などがあるため送風を妨げることがあり、CRAC を用いて高発熱密度のサーバに対して適切な量の冷気を供給するためには何らかの手段が必要となる [4]。

大学の情報センターにおいて、部屋全体を冷却する方式には、前述の高発熱密度のサーバに対する冷却以外にも課題がある。1993 年度から全国共同利用施設が設置され、全国の大学向けに大型の高速計算機の提供が行われている。そのため、近年では高速計算機を設置しない情報センターが増加している。また、インターネットの重要性が増すとともに、設置する計算機の稼働目的も変化しており、計算機が消費するスペースも小さくなっている。例として、図 3 に 2009 年度当初の当センターのサーバールームの見取り図を示す。本サーバールームの大きさは約 14m × 9m である。図中に示す四角形がラックであり、図の左側に示すように CRAC が 2 台設置されていた。2004 年度までは、サーバールームの面積に占めるサーバの設置スペースの割合が大きかったが、ラックマウント型サーバの導入やサーバ仮想化技術の利用

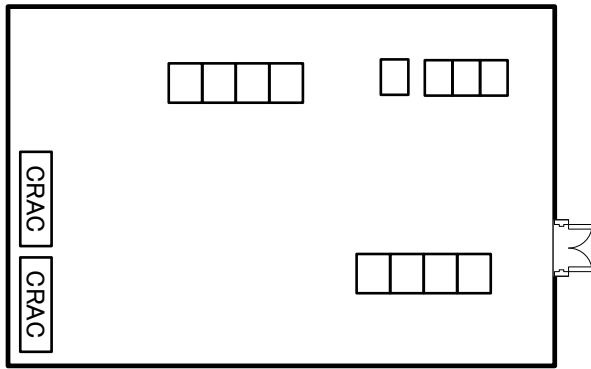


図- 3: 当センターのサーバールームの見取り図

によって、図3に示すように急激にその割合が減少していた。そのため、部屋全体を冷却することは電力使用量の点から非効率になっていた。近年の省エネルギーに対する意識の高まりから、サーバールームにおいても省エネルギー化を図ることが重視されており、なかでも電力使用量の多い冷却システムにおいてはその削減が社会的にも求められている。

上述のような状況にあるサーバールームにおいては、部屋全体の冷却では非効率となり、また高発熱密度のサーバに対しては冷気を多量に提供できる冷却システムが必要となる。そこで、部屋全体の冷却を目的としたCRACを配置するのではなく、ラックの近くにCRACを配置する、局所冷却方式を用いることが考えられる。以下の章では、サーバールームにおける冷却方式について述べたのち、当センターで導入した局所冷却システムとその効果について述べる。

なお、本論文では空冷式サーバの冷却についてのみ考察しており、水冷式サーバについて考慮していない。

2 サーバルームの冷却方式

本章では、部屋全体を冷却する部屋単位冷却と、部屋の一部だけを冷却する局所冷却方式として、ラック列単位冷却及びラック単位冷却について述べたのち、それらの比較を行う。

2.1 部屋単位冷却

前章で述べた部屋全体冷却のことであり、部屋全体の発熱量に対してCRACの冷却容量を設計する方式である。本方式では、図4に示すように部屋の片側もしくは両側にCRACを配置する。CRACの障害時において冷却容量が不足しないよう、複数のCRACを配置することが一般的である。ラックが配置されているサーバールームでは、冷却効率を向上させるためにコールドアイルとホットアイルを分離するように設置する。

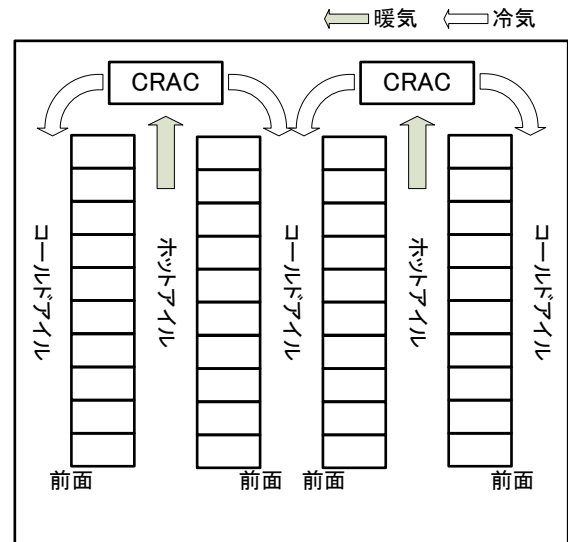


図- 4: 部屋単位冷却の概念図

本方式の長所としては、サーバールームの設計の容易さが増えられる。設置するCRACは、サーバールームにおけるサーバ全体の発熱量に対して必要な冷却容量を確保すれば良い。また、CRACの冷却容量が不足した場合には、新たにCRACを追加することで冷却容量を拡張できる。ただし、冷気の送風及び暖気の回収通路を適切に確保する必要があることから、単純にCRACを追加設置できるとは限らない。場合によっては、CRACだけでなくラックを含めた再配置が必要になる。

本方式の短所としては、前章でも述べたように高発熱密度のサーバに対して適切に冷却できない場合があることと、部屋全体を冷却することがコスト的に非効率になることがあげられる。本方式では、基本的に部屋全体の発熱量が均一であることを前提としており、部屋全体に冷気を送風し攪拌する。部屋の一部に高発熱密度のサーバがある場合は、隣接するサーバを低発熱密度のサーバにする、もしくは特殊な送風設備を準備するなどの対策が必要となる[5]。また、CRACからサーバまでの冷気通路が長くなりがちであることや、2重床のフリーアクセスフロアにケーブル類の障害物が存在するため、冷気の流れは複雑になり適切にサーバに到達しないこともある。さらには、CRACから送出した冷気そのまま暖気通路から戻ってくることもあり、その場合、設計されたCRACの冷却容量よりも実際の冷却容量は小さくなる。

2.2 ラック列単位冷却

一列に並べたラック全体の発熱量に対してCRACの冷却容量を設計する方式である。図5の破線で囲んだ部分が冷却単位となるラック列である。本方式では、図5に示すように、ラック間やラックの上下などラックの近

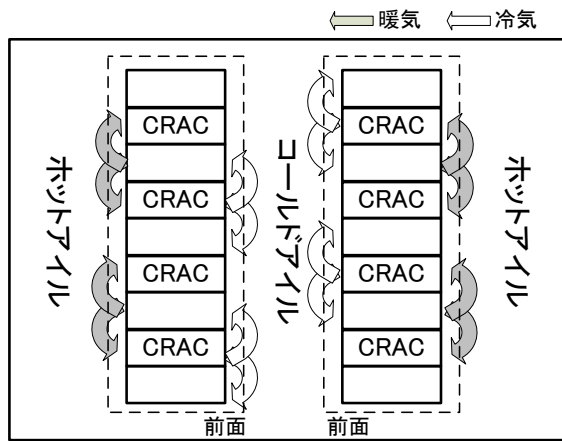


図- 5: ラック列単位冷却の概念図

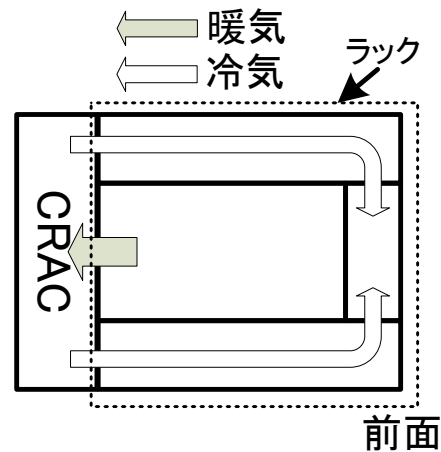


図- 6: ラック単位冷却の概念図

くに CRAC を配置する。CRAC はサーバから排出される暖気を回収、冷却してラック前面に冷気を供給する。

本方式の長所としては、やはり設計の容易さがあげられる。CRAC をラックの近くに配置することから、冷気の送風及び暖気の回収通路が短くなるため、部屋単位冷却に比べて効率的な冷却が可能となり、実際の冷却容量が設計値に近くなる。また、高発熱密度のサーバに対しては、近くに配置した CRAC から冷気を多量に送風することができるため、適切に冷却することができる。

本方式の短所としては、CRAC の台数が多くなりがちなことである。この対策として、冷気もしくは暖気を囲うアイルキャッピングという方法の併用があげられる。その場合は、単純に一行のラックを冷却単位とするのではなく、冷気もしくは暖気を共有するラック列群を単位とすることになるため、ラック一列に対して CRAC を用意することに比べて CRAC の台数を削減できる。また、アイルキャッピングは冷気と暖気を完全に分離するため、冷気に暖気が混ざることがなく、さらなる冷却効率の向上も図れる。

なお、図 5 では部屋全体を冷却する CRAC を省いているが、本方式は一部の高発熱密度のサーバへの対策として、部屋単位冷却と併用することが可能である。

2.3 ラック単位冷却

ラック毎に CRAC を配置し、ラックの発熱量に対して CRAC の冷却容量を設計する方式である。図 6 に示すように、通常は排気側であるラック背面に CRAC を取り付ける。CRAC はサーバから排出される暖気を直接取り込み、冷却してラック前面に冷気を供給する。冷却効率を最大化するため、通常は冷気通路もラック内に閉じ込める。

本方式の長所としては、優れた冷却効率があげられる。冷気と暖気を完全に分離しているため、冷気が無駄になることがなく、また冷気の送風及び暖気の回収通路

を最短にすることができる。高発熱密度のサーバに対しても、必要な冷却容量の CRAC を設置するだけである。

本方式の短所としては、可用性があげられる。通常はラック毎に一台しか CRAC を取り付けないため、CRAC 故障時にはサーバを冷却できなくなり、結果としてそのラックに搭載しているサーバを停止する必要がある。ラック一台に複数の CRAC を取り付けることは可能かもしれないが、その場合コストの問題が発生する。また、拡張性についても問題を抱えている。サーバの発熱量が CRAC の冷却容量より大きくなった場合は冷却できない。他の方式でも同様の問題があるが、複数のラックを単位としてするため、単一のラックに比べて影響が出にくい。

なお、本方式もラック列単位冷却と同様に、部屋単位冷却と併用することが可能である。CRAC 障害時の影響を考慮すると、むしろ高発熱密度のサーバへの対策として、本方式を部屋単位冷却に追加した方が効果的であると言える。

2.4 冷却方式の比較

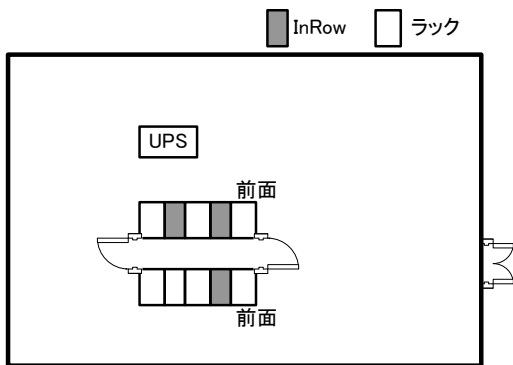
上述の 3 方式において、冷却効率、可用性及び拡張性の観点から比較を行う。

(a) 冷却効率

部屋単位冷却では、サーバ毎に異なる発熱密度によって生ずる発熱ムラへの対処が難しい。ラック列単位冷却では、ラックの近くに配置した CRAC からサーバに対して冷気を供給できるため、異なる発熱密度のサーバに対して適切に冷却できる。ラック単位冷却では、ラック毎に冷却容量を設定できるため、最も冷却効率が高い。

(b) 可用性

部屋単位冷却及びラック列単位冷却では、対象とな



(a) 見取り図



(b) 写真

図- 7: InRow と HACS を導入した当センターのサーバールーム

る冷却容量を複数の CRAC で満たすことで、CRAC の障害に備えることができる。ラック単位冷却では、通常ラック毎に一台の CRAC で運用するため、CRAC の障害に弱い。

(c) 拡張性

部屋単位冷却では、冷却容量を超えるサーバを設置する場合、新たに CRAC を設置すれば良いが、冷気通路もしくは暖気通路の関係から、CRAC やラックを再配置しなければならない可能性がある。ラック列単位冷却では、ラック列に CRAC を追加する、もしくは新たにラック列を作ればよい。ラック単位冷却では、新たにラックと CRAC の組み合わせを追加することになる。ただし、ラック単位冷却は他の 2 方式と比べて、冷却対象とするサーバ数が大幅に少ない。そのため、冷却単位当たりの発熱量が平準化されにくく、他の 2 方式よりもサーバの発熱量が増減する影響を受けやすい。

上述の比較結果をまとめたものを表 1 に示す。表中において最も良いものを「 \square 」、最も悪いものを「 \times 」、中間に位置するものを「 \square 」と表記する。

冷却方式の優劣については、サーバールームや設置するサーバによって条件が異なるため、一概にどの方式が優れているとは言えない。しかしながら、1 章に示したサーバールームの条件、すなわちサーバールームに占めるラックの設置面積が小さく、かつサーバの発熱密度が高い場合は、ラック列単位冷却が優れていると言える。

3 局所冷却システムの導入と効果

3.1 局所冷却システムの導入

当センターのサーバールームの CRAC は、建物を竣工した 1987 年に設置されたものであり、2 台のそれぞれが 34.5kW の冷却容量を持つものであった。CRAC の

表- 1: 冷却方式の比較

項目	部屋単位	ラック列単位	ラック単位
冷却効率	\times		
可用性			\times
拡張性			

更新計画が承認された 2009 年の時点で 22 年以上経過していたため、サーバールームに設置しているサーバも、竣工時と比較してその役割や設置方法が大きく異なっていた。当センターでは、2006 年度にサーバ仮想化ソフトウェアである VMware 社製 ESX を導入し、サーバの集約を行いサーバ数の削減に努めていたが、それでも 2009 年度当初は約 80 台の物理サーバと約 40 台の仮想サーバが稼働していた。2010 年 2 月に実施したサーバの更新に際しては、より積極的にサーバの集約を行うべく、HP 社製 C7000 エンクロージャーに 16 台のブレードサーバを搭載し、それまで 3 台だった ESX ホストを 6 台に増加させた。その結果、物理サーバが 30 台程度、仮想サーバが 100 台程度の構成となった。また、当センターでは高速計算機の導入をとりやめ、京都大学学術情報センターの提供する、スーパーコンピュータサービスを利用することとした。

このような、サーバールームに設置するサーバ環境の変化により、当センターのサーバールームはその面積に対してサーバが占める割合が小さくなり、設置するサーバはより高発熱密度のものとなった。前章までの検討結果から、当センターではラック列単位冷却システムの導入を行うこととし、また CRAC の導入数が増えすぎないように、アイルキャッピングを行うこととした。これらの要件を満たす製品として、APC 社製 InfraStruxure InRow RP DX (以下、「InRow」という。) という CRAC と、アイルキャッピングを実現する HACS ソリューションを 2010 年 1 月に導入することで局所冷却を実現した。なお、既存の部屋単位冷却用の CRAC は 2010 年 2 月

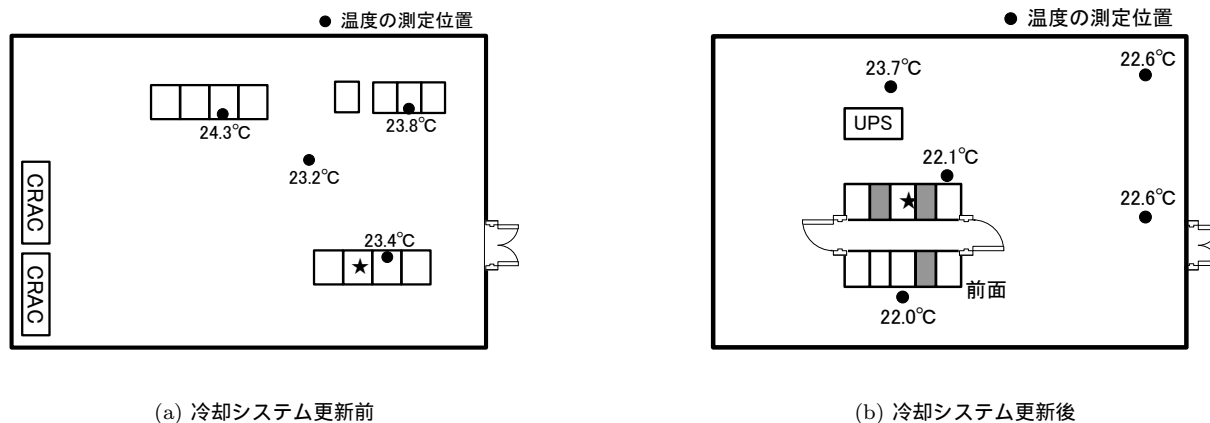


図- 8: サーバルームの温度分布

に停止し、3月に撤去している。

図7(a)に冷却システム更新後の当センターのサーバールームの見取り図を、図7(b)に実際の設置写真を示す。図7(a)に示すように、3台のInRowを7本のラック間に設置している。ラックは背面同士を向かい合わせ、ホットアイル部分を覆う天井と扉を設置することで暖気を閉じ込め、ホットアイルキャッピングを実現している。そのため、ラック列は2列あるが、2列のラック列群全体の発熱を3台のInRowで冷却する。2010年4月の時点では、4本のラックにサーバを搭載し、InRowを2台稼働させている。それぞれのInRowの冷却容量は31kWであり、今後導入予定のサーバも含めたサーバ全体の発熱量から設計している。なお、2010年4月の時点では冷却容量に余裕のある設計となっているが、これは鳥取大学の他部署のサーバールームを2010年度中に廃止し、当センターのサーバールームにサーバを移設するためである。

3.2 冷却システムの制御

更新前のCRACでは、温度を制御するために冷気通路である2重床のフリーアクセスフロア下と、暖気通路である天井裏に温度センサーを配置することで、温度変化を検知し制御を行う方式であった。しかしながら、この制御方法だけではサーバに対して適切に冷気を供給できていないため、図8(a)中に示すラックの床上約1mのところに温度センサーを設置し測定していた。これらの温度センサーを管理装置に有線で接続し、SNMP(Simple Network Management Protocol)を用いてサーバでグラフ化していた。この情報を元にして、2台のCRACの冷却設定を手動で調整することで、サーバの適切な冷却と冷却コストに無駄が発生しないように努めていた。図8(a)に、温度センサーで測定したサーバールームの温度分布(平均値)を示す。それぞれのラックにおいて24程度の冷気の供給を目指し

て設定していたが、CRACからラックまでの距離があることや、独立した2台のCRACから送付される冷気が干渉するため、一部のラックにおいては23程度となっていた。また、部屋の一ヶ所にも温度センサーを設置していたが、部屋の温度も23程度になっていた。

更新後のCRACであるInRowでは、それぞれのラックの上部と下部の二ヶ所に温度センサーが設置されており、ラックへ供給する冷気温度を設定できるため、運用が自動化されている。2010年4月時点では、供給冷気温度を23に設定して運用しており、この時のサーバールームの温度分布を図8(b)に示す。これらの温度は、床上約1mのところを赤外線温度センサーにより測定したものである。ラック以外の箇所に発熱体が存在しないため、結果として部屋の温度もInRowにより冷却された状態にある。

3.3 冷却効果

冷却システムの更新と時を同じくしてサーバの更新を行ったため、同一条件下で冷却効果を測定することは不可能である。しかしながら、入れ替えを行わずに別のラックへ移設したサーバがあるため、その表面温度を赤外線で測定した結果から冷却効果を検討する。

このサーバは、図8(a)及び図8(b)中において「」で示したラックに設置しており、HP社製Proliant DL360G5である。冷却システム更新前のサーバの表面温度を赤外線で測定したものが図9(a)の破線で示す部分であり、更新後の測定結果が図9(b)の破線で示す部分である。

冷却システムの更新前の温度は約26であり、更新後は約24となっている。サーバへ供給する冷気は24程度を目標としているため、冷却システムの更新によって適切に冷却できていることが分かる。



(a) 冷却システム更新前



(b) 冷却システム更新後

図- 9: サーバの表面温度

3.4 コスト削減効果

新しく導入した CRAC は、既設の CRAC に比べて省エネルギー化を実現しているため、冷却方式の違いによるコスト削減効果の比較は難しい。また、冷却システムの更新と同時期にサーバの更新も行っているため、さらに比較を困難としている。そもそも当センターでは、冷却システムやサーバの電力使用量を把握する設備がないため、以下のように推測し、コスト削減効果について検討する。

まず、全てのサーバは UPS に接続しているため、UPS の負荷率からおおよその消費電力を算出する。更新前のサーバが接続していた UPS と消費電力をまとめると表 2 のようになり、約 17kW であったことが分かる。なお、表中の皮相電力及び有効電力はそれぞれの UPS の合計値である。更新後のサーバの消費電力についてであるが、サーバに併せて UPS も更新しており、APC 社製 Symmetra PX を導入している。本 UPS は皮相電力 40kVA、力率 1.0、有効電力 40kW のものであり、2010 年 4 月の負荷率が約 40% であることから、約 16kW の消費電力であることが分かる。以上のことから、更新の前後で消費電力の差は 1kW 程度であることが推測できる。サーバを更新する際に、高速計算機の導入取りやめや、導入するサーバを省エネルギーのものにするなどの対策を行っているが、新たに Cisco 社製 Catalyst6509E をはじめとするネットワーク機器をサーバールームに移設したため、結果として大きな変化は生じなかった。

次に、2008 年度 4 月から 2010 年度 6 月までの当センター全体の電力使用量を図 10 に示す。ただし、当センターには、サーバールーム以外に 83 台の演習用パソコンが設置された演習室や教職員用として 5 つの居室があり、図 10 にはこれらの消費電力も含まれている。2008 年度と 2009 年度では電力使用量に大きな違いはないが、冷却システムとサーバの更新を行った 2009 年度 3

表- 2: サーバ更新前の消費電力

UPS 名	台数	皮相電力 (VA)	力率	有効電力 (W)
Smart UPS750	11	3,750	0.7	2,625
Smart UPS3000	2	3,000	0.7	2,100
IBA140	1	5,600	0.8	4,480
Symmetra LX	1	11,200	0.7	7,840
合計				17,045

月 (2010 年 3 月) は、2009 年度 2 月に比べて大きく減少している。冷却システムの更新による電力使用量の変化については、2009 年度 3 月及び 2010 年度 4 月とその前年同月 (2008 年度 3 月及び 2009 年度 4 月) の電力使用量を比較することで推測する。この比較から、約 6,000kWh 減少していることが分かるが、サーバの更新に伴う電力使用量の削減値として、消費電力が 1kW の削減と推測しているため、720kWh (1ヵ月を 30 日として計算している。) が相当していると考えられる。そのため、残りの 5,280kWh 程度が冷却システムの更新に伴い削減できた電力使用量と考えられる。

4 おわりに

現代の大学におけるサーバールームでは、比較的大きな部屋の一部にサーバ、特に高密度のサーバを設置していることがある。このようなサーバールームにおいては、従来の部屋単位冷却では高密度のサーバを十分に冷却できない可能性があり、また電力使用量の点からも適切でないと考えられる。そこで、当センターではラック列単位冷却とホットアイルキャッピングを組み合わせた

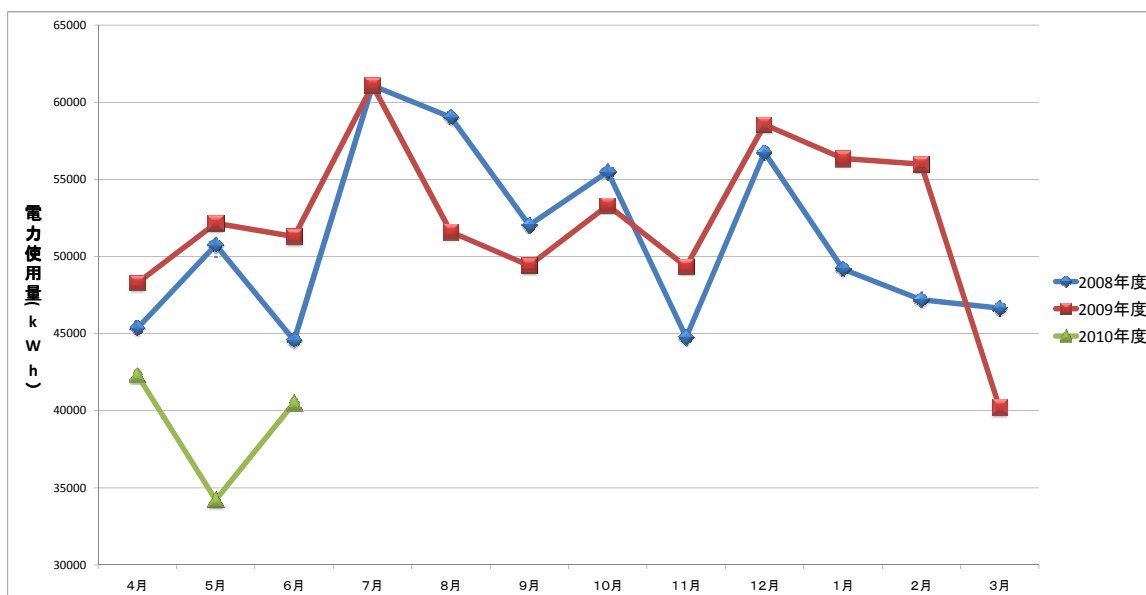


図- 10: 当センターの電力使用量

APC 社製 InfraStruxure InRow RP DX と HACS を導入し、局所冷却を実現した。この新しい冷却システムによって、サーバが適切に冷却できていることを示した。また、昨年度までと比較し、電力使用量が削減できていることを示した。

今後の課題として、サーバ及び冷却システムにおける電力使用量を把握することを検討している。現状を的確に把握することで、より適切な電力使用量の削減方法を検討できると考えている。

謝辞

本論文にて使用しているサーバの赤外線写真及び赤外線による温度測定は、株式会社エーピーシージャパンのアセスメントサービスにて撮影、提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 学術情報基盤の今後の在り方について(報告).
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/06041015.htm, 2006.
- [2] Hp bladesystem power sizer.
<http://h71019.www7.hp.com/ActiveAnswers/cache/347628-0-0-0-121.html>.
- [3] 消費電力算出ツール.
http://www.dell.com/content/topics/topic.aspx/global/products/pedge/topics/en/config_calculator?c=us&cs=555&l=en&s=biz.

[4] 竹内憲治, 坂下行範. サーバルームにおけるコールドアイル・ホットアイル空調方式の問題点. 日本建築学会大会学術講演概集, pp. 995-996, 2009.

[5] Chandrakant Patel Ratnesh, Rakant D. Patel, Ratnesh Sharma, Cullen E. Bash, and Abdmonem Beitelmal. Thermal considerations in cooling large scale high compute density data centers. In "In ITHERM 2002 - Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems", pp. 767-776, 2002.