

サーバ吸気温度と エネルギー消費の関係

デヴィッド・モス (Dell, Inc.)

ジョン・H・ビーン Jr. (APC)

ホワイトペーパー#138



要約

データセンタの効率向上を図り、さまざまな対策が提唱される中、最適な温度に関する関心が高まっています。先頃、ASHRAE TC-9.9委員会では、サーバ吸気温度および湿度の推奨設計範囲を拡大させました。一般的な仮説としては、サーバ吸気温度が高いほど、データセンタ全体の消費電力が減少するとされています。このホワイトペーパーでは、複数台のサーバで構成される複合環境の電力消費ベースラインを吸気温度の関数として用い、このデータをさまざまな空調アーキテクチャに適用することによって、仮説を検証し、IT負荷と空調負荷が最小限になる最適な温度範囲を探り出します。このホワイトペーパーで使用するデータは、複数のシステムからなる複合サーバの動作シミュレーションによって、さまざまな空調システムを調整して実施したテストに基づいています。テストの結果、サーバの電力消費量とデータセンタ全体の電力消費量の間には複雑な相互関係があり、最適な温度範囲を維持することによって省エネを実現することが判明しました。最適な温度範囲は、機器、コンテインメントソリューション、およびその他の要因によって異なります。

©2009 American Power Conversion. All rights reserved.

本書に記載の内容は、著者に無断で保存、使用、複製、複写、転用することを禁じます。

www.apc.com

WP#138 改訂0

はじめに

電力の有用性とエネルギーコストに対する近年の関心の高まりを受け、データセンタの効率改善策が新たに注目され始めています。データセンタにおける膨大な電力消費の対策として、ASHRAE TC9.9委員会では、データセンタにおける温度の推奨設計範囲を拡大させました。これは、データセンタの温度を上げることによって、屋外への排熱に必要な電力を削減し、データセンタの空調設備に掛かる電力消費を削減しようという試みですが、IT機器の冷却ファンの運転特性によって、空調システムの効率が相殺される場合もあります。通常、サーバ吸気温度が25°C(77°F)以上になると、風量を増やす必要性が生じてサーバの冷却ファンが作動するため、サーバの消費電力が増加します。このホワイトペーパーでは、IT機器の消費電力上昇と空調設備の消費電力低下との相関について調査し、特に空調設備とサーバの両方を含む全体の電力消費量に対する影響に着目します。

サーバベースライン

サーバ/IT機器のテストは、Dellの熱伝導研究所(テキサス州ラウンドロック)で実施しました。すべての電力測定は、幅広い温度帯で一定温度を維持できるサーマルチャンバ(図1)内で、Instek製のGPM-8212電力計を使用しました。IT機器には低電圧(110ボルト)で給電したため、電力の測定値は高電圧(208ボルト)の場合よりも高くなっています。テストには、冷却ファンの運転が異なる複数のITサーバ機器を使用しました。

図1 サーマルチャンバ



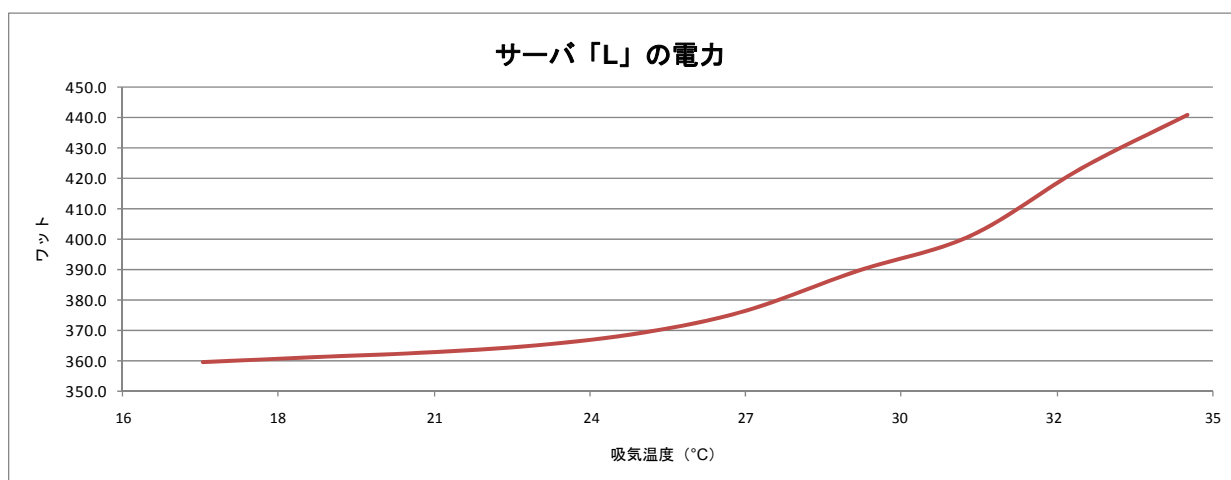
ITサーバのファン運転は、大別すると3種類になります。定速ファンを搭載しており、吸気口の温度が変化しても、システム電力にはほとんど変化がないもの。周囲温度や構成、ITサーバの稼働状況の違いに応じて風量が段階的に変化するもの。また、常に風量が変化するものがあります。

一般的なデータセンタの複合的なIT機器の動作をモデル化するため、3種類のサーバシステムを選定しました。これらのシステムは便宜上選定したのですが、さまざまなファン制御の種類を適切に代表するものです。3種類のシステムのうち、2つのシステムは比較的低スペックの構成であるため、定格負荷テストを実行してモニタリングしました。もう1つのシステム(サーバ「L」)は、スペック構成が高く、クラスタタイプのベンチマークを実行したため、ほかの2つのシステムと比べてベースレベルが数段高くなっています。

タイプ「L」サーバの動作

サーバ「L」は、室温の上昇に応じて、電力消費がなだらかな線を描いて上昇しています(図2)。これは、主として、室温の上昇に対して変速ファンが継続的に応答するためです。17°C(62°F)～35°C(95°F)の範囲で、電力消費は80ワット以上上昇します。このサーバタイプで、ファン速度を固定してテストした結果、システム電力の上昇は1°Cあたり0.9ワット(1°Fあたり0.5ワット)未満でした。この電力消費の増加は、半導体の漏れ電流が増えることが原因であると考えられます。タイプ「L」システムは、構成程度が高く、高負荷で稼働しています。主流のTier-1型の典型的なサーバで、高度なアルゴリズムによってファン速度が制御されています。

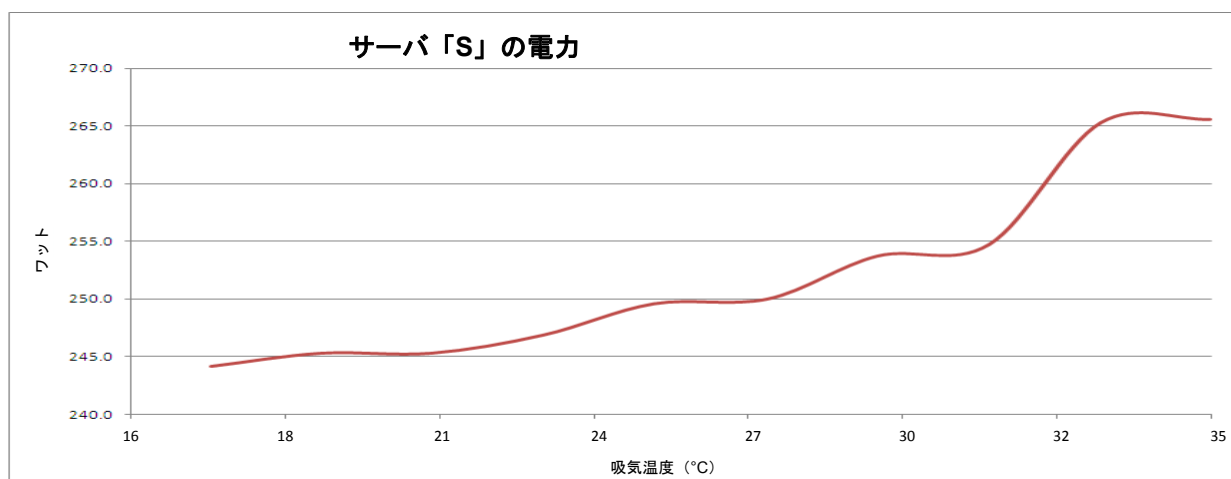
図2 タイプ「L」サーバの電力と吸気温度の関係



タイプ「S」サーバの動作

サーバ「S」は、同じ温度範囲で段階的に電力消費が上昇しています。これは、ファン制御アルゴリズムがさほど高度ではない製品において一般的な現象です。このシステムは、中程度の負荷向けの構成として典型的なものです(図3)。

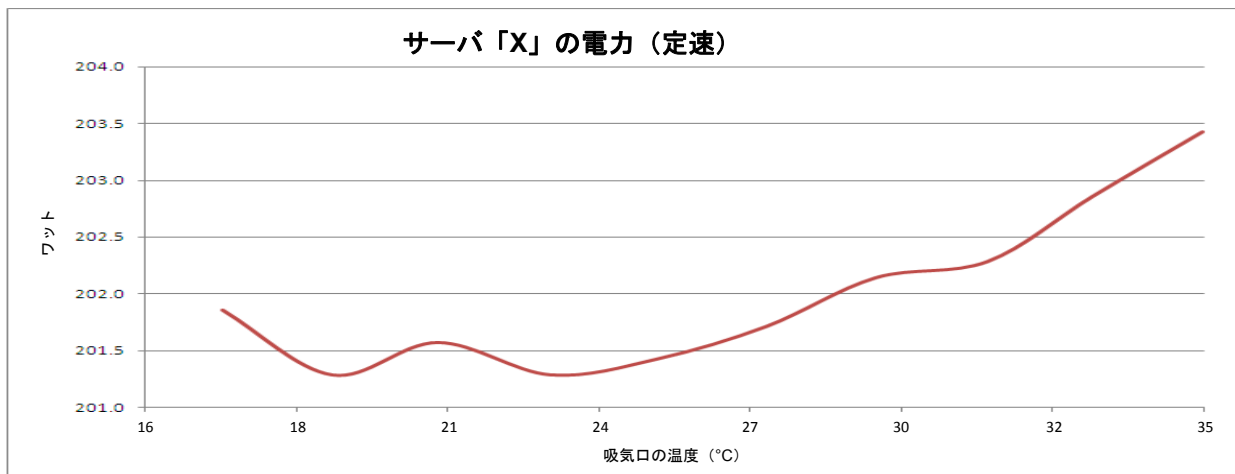
図3 タイプ「S」サーバの電力と吸気温度の関係



タイプ「X」 サーバの動作

サーバ「X」は、定速ファンが搭載されているシステムです。この場合に見られる電力変動の大部分は、測定誤差とみなせる範囲にあります。図4では、電力消費が若干上昇する傾向が示されていますが、これも、高温での漏れ電流の増加が原因であると考えられます。このシステムは、多くのノンブランドサーバによく見られるように、広い範囲の吸気口温度に対して、ほぼ一定の電力を示します。実際に複数サーバが収容されているのは筐体であるため、単体システムの電力消費は202ワットでほぼ一定です。このシステムは、低負荷向けの構成として典型的なものです。

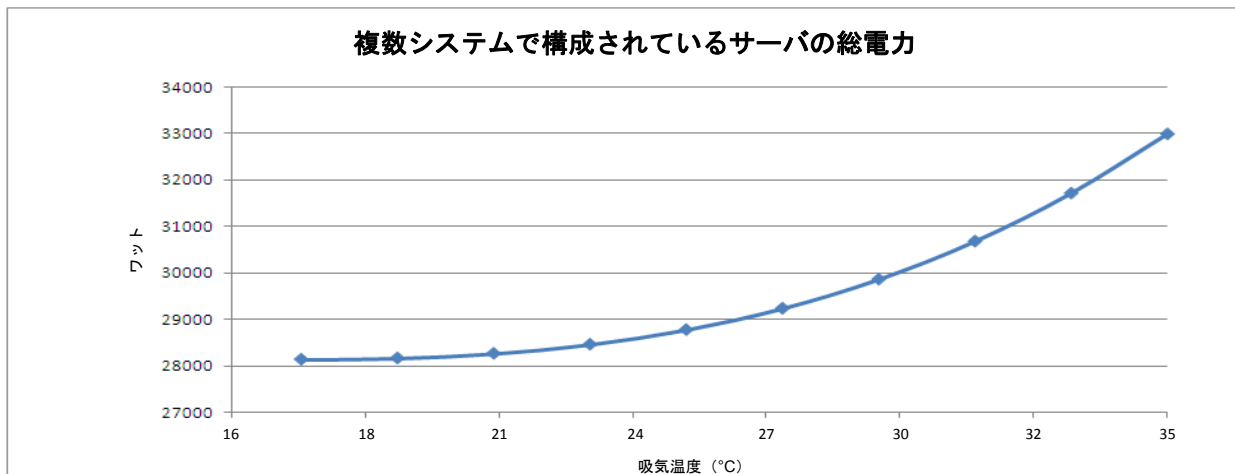
図4 タイプ「X」サーバの電力と吸気口温度の関係



複合サーバの動作

テストでは、3種類の機器が混在する一般的な構成になるように、上記の3種類のシステムを組み合わせました。この調査の目的は、IT機器と空調の合計電力消費量が最小限になる最適な温度範囲を探ることにあるため、電力消費量が一定の機器と、状況によって電力消費量が異なる機器とが混在する典型的な状況を反映したものであることが重要です。調査者の判断で、Tier-1型サーバの動作を典型的に表している「L」システムの割合は全体の50%にし、他の2つのシステムは、それぞれ25%ずつになるように構成しました。この割合で3種類のサーバを混在させた場合、複合IT機器の総電力と温度の関係は、図5のようになります。テストにおける設備部分に関しては、APCの熱/エアフローの負荷シミュレータによって行いました。

図 5 複数システムで構成されているサーバの総電力と吸気温度の関係



考察対象の空調アーキテクチャ

この調査では、3種類の列単位空調方式、すなわち、冷水 (CW) を用いる2つのケースと、内蔵圧縮機による直膨型 (DX) 空調システムを用いる1つのケースについて考察しました。CWソリューションについては、コンテインメントなしの列構成と、ホットアイルコンテインメントシステム (HACS) を併用した構成について調査しました。このホワイトペーパーで考察する3種類の空調構成は、以下のとおりです。

1. CW InRow - InRow RC + HACS (ΔT (InRow吸入口と吹出口の温度差) および給気温度のコントロール)
2. CW InRow - InRow RC (開放設置) (ラック吸気口および給気温度のコントロール)
3. DX InRow - InRow RD[※] + HACS (ΔT (InRow吸入口と吹出口の温度差) および給気温度のコントロール)

各構成のテストには、3種類のAPC InRow[™]冷却モジュールを使用しました。公称冷却能力は、InRow RC(CW) (ACRC100) が20kW、InRow RD(DX) (ACRD101) が11kWです。各モジュールは、標準ITラックの定格幅の1/2の筐体 (W=300mm) が適用されています。この物理構成は、IT機器の列環境への統合を容易にするためのものです。InRow RC(CW)テストのIT機器の負荷は28kW (低室温) ~32kW (高室温) で、InRow RD(DX)のIT機器の負荷の上限は30kWです。このテストの範囲は、一般的なデータセンタのモジュールに相当する限定的なものです。実際のデータセンタにおける導入規模を再現しています。サーバシミュレータは、さまざまな動作温度で、3種類のサーバクラスの複合構成について、ベンチマーク済みの電力消費と風量の反応を模倣するように調整されています。

ホットアイルコンテインメントシステム (HACS) のテストは、ファン速度を「中」に設定して実施し、複数の空調モジュールで ΔT (InRow吸入口と吹出口の温度差) が一定 (11°C (20°F)) になるよう維持されています。

3種類のテストで、コールドアイルの温度は、17、18、21、23、25、27、29、31°C (63、65、70、73、77、81、84、88°F)、冷水の供給温度は4、6、8、10、12、14、16、18°C (39、43、46、50、54、57、61、64°F) です (水冷式空調ソリューションによって異なります)。冷水の温度は、冷水と給気エアフローの温度差が一定になるように調整しています。これにより、コールドアイルの温度が高めになるため、空調設備の効率が向上します。

水冷式DXシステムの冷却水温度は十分な低さを保っており、圧縮機の吐出圧力が意図した動作範囲を超える心配はありません。各テスト条件は、この間にエネルギー消費がkW-Hr/Hrに正常化し安定した後、2.5~4時間にわたって実施しました。

※InRow RD(DX)は日本での販売は未定です。

ラックと冷却モジュールで構成されるテスト装置は、床から天井までの断熱壁によって一時的に閉鎖し、室内の温度環境から隔離されています。

すべてのテストで、周囲の露点温度は13°C (56°F)に設定されており(誤差 $\pm 2.8^{\circ}\text{C}$ (5°F))、乾球温度は $22^{\circ}\text{C} \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ (72°F $\pm 3^{\circ}\text{F}$)に維持されています。これには除湿/加湿用の空調機を使用しました。空調機が露点と室温の制御のために消費する電力についてはモニタリングしておらず、評価の対象外としています。3種類のテスト中、冷却コイルは乾いた状態を維持し、結露は発生していません。

8台のITサーバシミュレータを使用し、室内温度範囲で複合サーバの電力およびエアフロー負荷がどのように変化するか、シミュレーションしました。サーバシミュレータは10Uでラックに搭載されており、最大定格消費電力は5,750ワット、最大風量は316 L/秒(670 CFM)です。シミュレータは、250ワット単位で調整可能な段階的な電力設定に合わせて、較正済みの風量調整を行います。**図6**は、典型的なサーバシミュレータの設置状況を示したものです。撮影のためシミュレータの最上部にあるブランクパネルは取り外してありますが、実際のテストでは、すべての空きUスペースにブランクパネルを取り付けました。

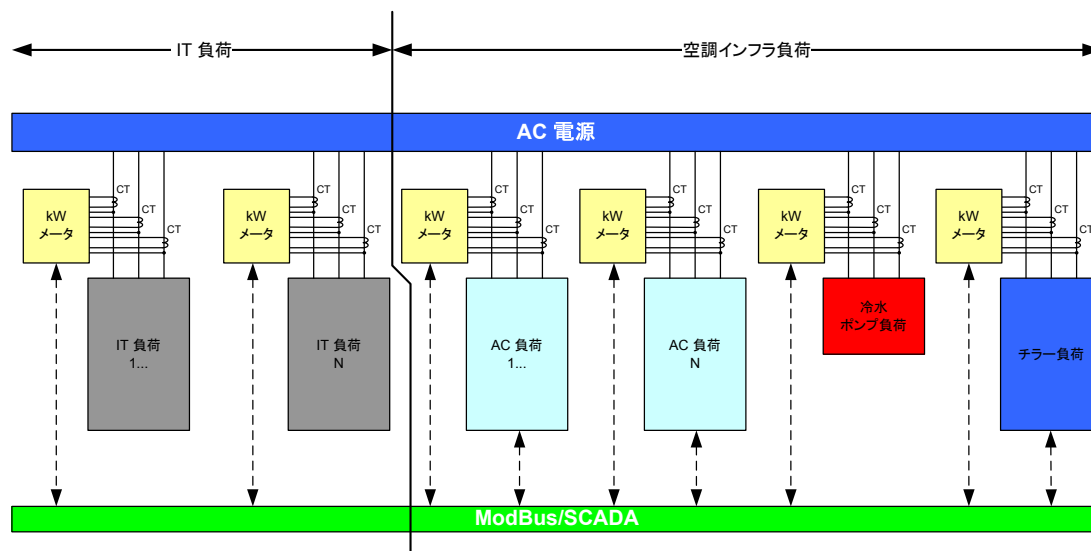
図 6 サーバシミュレータ



図7は、テストに使用した電力監視装置です。すべての測定値は、Square D Power Logicメータ(モデルPM-210)を使用して取得し、ModBusインターフェイス経由で収集したデータを使用しました。電力メータの測定値は、電圧、アンペア、力率、および合計エネルギー消費です。テスト中は、以下の対象について電力/エネルギー消費を個別に監視しました。

1. チラー
2. InRow冷却 DX
3. InRow冷却 CW
4. IT機器の負荷
5. 冷水ポンプ

図 7 テスト中の電力測定点



テスト結果

前述の3種類の構成を同じ手順でテストし、8段階の乾球温度で電力/エネルギー要件を調べました。評価にあたり、InRow CW冷却ソリューションでは、冷水の供給温度のリセットをコールドアイルの空気温度の関数として使用しました。各テストとも30秒間隔でデータを収集および保管し、分析のために全データをExcelファイルにインポートしました。

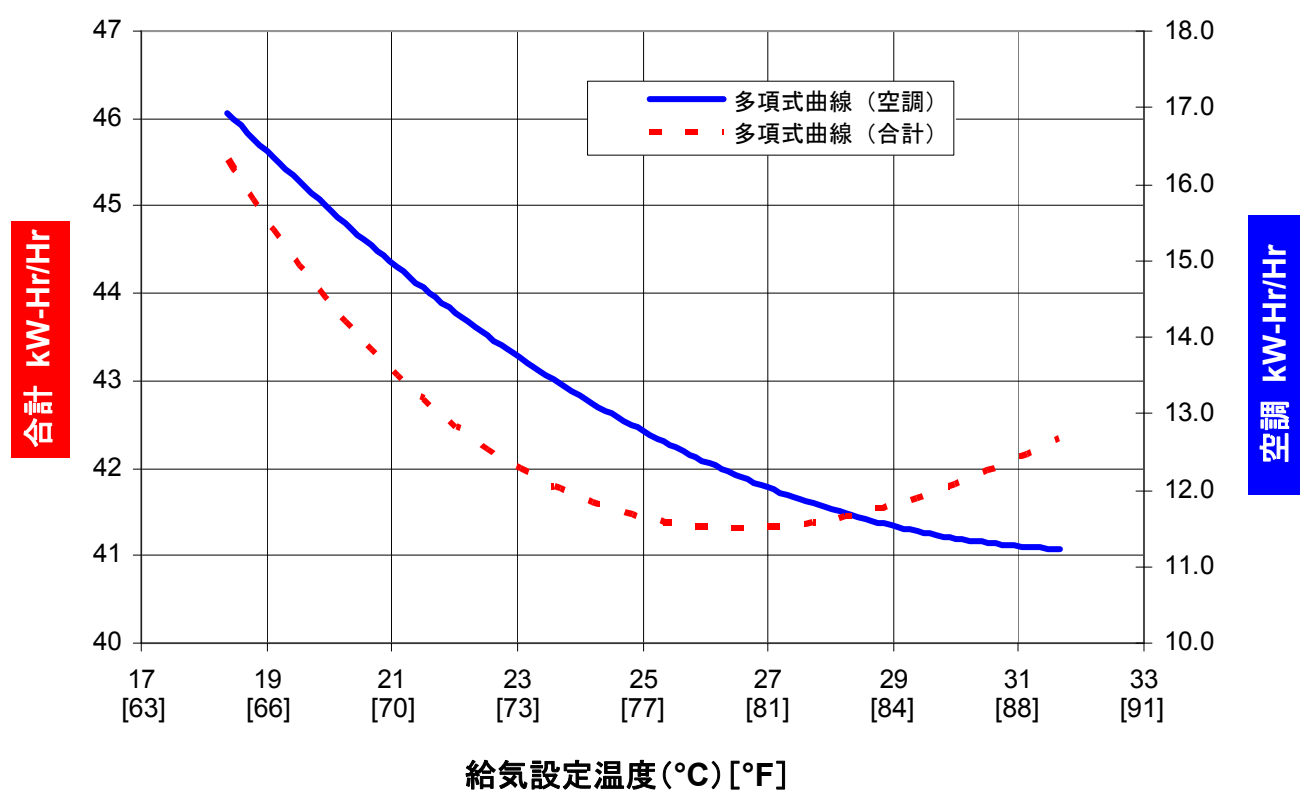
冷水システムのテストでは、一般的でないチラー構成となっております。チラー設備（冷却設備）は負荷に対して極端に大型なもの（オーバーサイズ）になっており、二次ポンプ方式の一次側配管経路内に大型のストレージタンクがあります。チラーとストレージタンクとの間の一次側冷水は定流量で循環しており、一次側は二次側より数度低く維持されています。二次側冷水は、インバータポンプによって循環しており、InRow冷却装置に必要な定格流量を提供しています。ただし、二次側の供給温度を一定に保つため、チラーの一次側と二次側が定期的にミキシングされます。このミキシングの頻度は、二次側の冷水を適温に保つために、電子制御装置によって調整されています。このような特殊なチラー構成により、通常予測される性能係数（COP）よりも低い数値が計測されましたが、結果として示される曲線の形状には影響しません。

COPは、冷却装置の冷却能力を消費電力で割って算出します。たとえば、冷却能力が30kWで、消費電力が10kW（チラー、ポンプ、空調機）の場合、COPは3です。COPが高いほど、空調システムの効率は高いとみなされます。

InRow RC(CW) + HACS方式

図8は、HACSを使用したInRow RC(CW)冷却方式における空調システムの消費電力(青線)と合計(IT機器+空調)消費電力(赤線)を二次多項式曲線で示したものです。コールドアイルの温度が29°C(84°F)を超えると、空調に必要な消費電力(乾球温度の関数)の減少率が小さくなっています。チラーのCOPは、29°Cを超えても上昇し続けますが、熱負荷(サーバのエアフローと消費電力の関数)も上昇します。空調とIT機器に必要な合計電力量が減少し、消費電力が最低になるのは25°C~27°C(77°F~81°F)の範囲です。すなわち、このテスト用システムの場合、この温度範囲を超えてコールドアイルの設定温度を上げても、必要となる合計消費電力量が下がることはないと判断できます。

図8 RC 冷却ソリューションの合計消費電力 (IT 機器+空調システム) :
コンテインメントを使用した場合



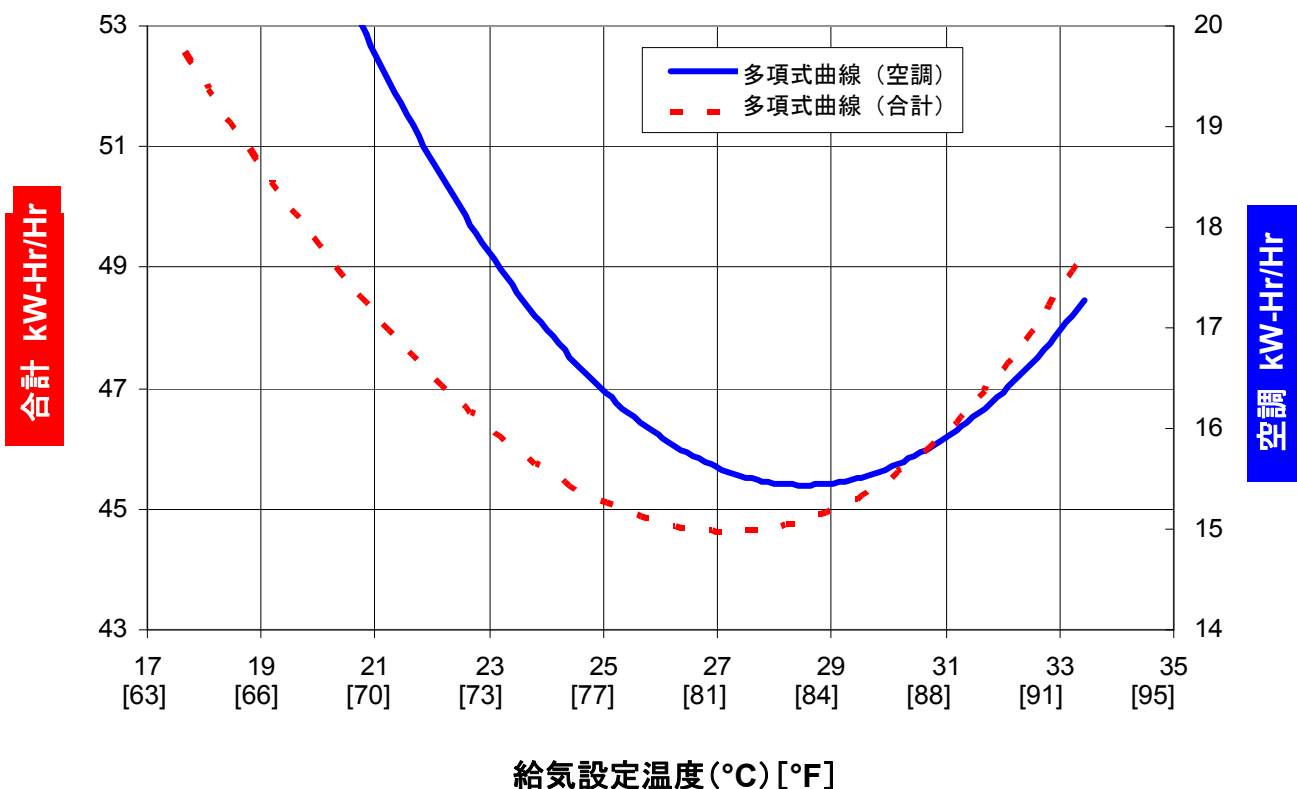
InRow RC(CW)開放設置方式（コンテインメントなし）

図9は、HACSを使用しない開放型のInRow RC(CW)冷却方式における空調システムの消費電力（青線）と合計（IT機器+空調）消費電力（赤線）を二次多項式曲線で示したものです。29°C（84°F）を境に、空調に必要な電力（コールドアイルの乾球温度の関数）の減少は止まり、消費電力は上昇に転じています。この空調ソリューションの場合、チラーのCOPは上昇し続けますが、チラーの総消費電力と列空調の消費電力（サーバのエアフローと消費電力の関数）も上昇するため、室温の上昇とともに、必要な時間あたりの電力量も増加するようになります。

HACSソリューションと開放型（コンテインメントなし）のソリューションで動作が異なるのは、開放型ソリューションの方が低温のエアフローに対してより敏感に反応するためです。空調システムの消費電力が増加に転じるポイントは、合計（IT機器+空調）消費電力が増加に転じるポイントよりも後ですが、全体としては、27°C（81°F）を境に合計消費電力が急増しています。この例では、33°C（92°F）の場合に、21°C（70°F）の場合と同程度の合計消費電力になります。

空調とIT機器に必要な合計電力量から換算すると、消費電力が最小限になるのは27°C（81°F）です。すなわち、このテスト用システムの場合、この温度を超えてコールドアイルの設定温度を上げても、必要となる合計消費電力量が下がることはない判断できます。

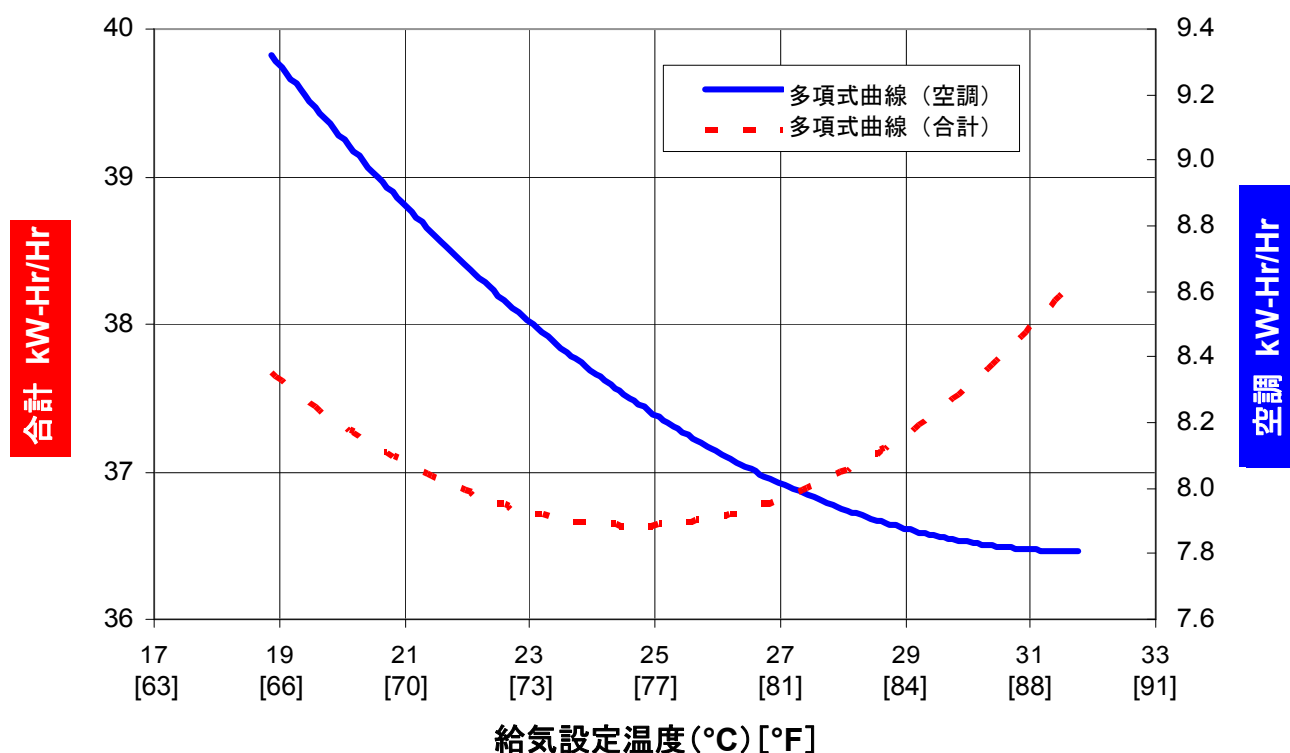
図9 RC 冷却ソリューションの合計消費電力（IT 機器+空調システム）：コンテインメントなし



InRow RD(DX) + HACS方式

図10は、HACSを使用したInRow RD(DX)冷却方式における空調システムの消費電力(青線)と合計(IT機器+空調)消費電力(赤線)を二次多項式曲線で示したものです。「テスト結果」セクションの冒頭で説明した特殊なチラー構成の貢献により、このシステムの空調COPは、先の2種類の水冷式ソリューションよりも大幅に高くなっています。ホットアイルコンテインメントを使用した先のテスト結果と同様、29°C(84°F)を超えるあたりで、空調システムの消費電力の減少率は低下し始めています。列空調の場合、IT機器の風量の増加に合わせて、空調風量を増加させる必要があります。また、この例の場合、総電力に占める空調の割合が小さいため、合計消費電力は、より低い温度で増加し始めています。このテスト用システムの場合、24°C(76°F)で最適な効率(最小限の合計消費電力)を達成できます。

図 10 RD 10kW 冷却ソリューションの合計消費電力 (IT 機器+空調システム) :
コンテインメントを使用した場合



熱性能に基づいてIT機器を選択する際の注意事項

通常、動作温度設定が高くなるにつれて、冷却ソリューションの消費電力が減少するため、高温動作時の消費電力増が小さいIT機器を選択するのがよいと考えられがちです。しかし、高温になっても機器の風量が増加しない場合は、低温になっても風量は減少しません。ファンは、温度の上昇に応じて内部温度を適切に保つことができ、温度の上限に対応できるものでなければなりません。そのようなファンは、低温になると、適温を維持するのに十分な程度にまで風量が減少します。周囲環境に合わせて風量を調節できないIT機器は、低温時の省エネ効果は期待できません。可能な場合は、幅広い温度帯でのIT機器のファン消費電力について、ベンダーに確認することを推奨します。

システム設計に関する考察事項

今回の調査と分析では、IT機器の吸気温度に主眼が置かれています。列単位の空調機の場合、IT機器吸気温度は空調システムからの給気温度とほぼ同じですが、一般的な部屋単位の空調システムの場合は、空調システムからの給気温度の方がIT機器の吸気温度よりもはるかに低温になります。たとえば、一般的な部屋単位の空調システムの給気温度は13°C (55°F) ですが、IT機器の吸気口の温度は約21°C (70°F) です。この違いは、部屋単位の空調システムの場合、室内で熱気と冷気が混じり合うことによって、空調機の効率と能力に悪影響が及ぶことが原因です。熱気と冷気の混合を軽減するような変更（列単位の空調やコンテインメントなど）をシステムに施すことにより、上記のような温度差を縮め、空調システムの効率を改善することができますが、データセンタ全体の効率が改善するとは限りません。

このホワイトペーパーで紹介したデータには、消費電力が最も低いポイントが示されているだけでなく、動作温度を高めに設定すると省エネにも相対的な効果があることが示されています。ただし、動作温度を上げることによって、すべてのデータセンタで効果があるとは限りません。これまでの経験から、部屋単位の空調の場合は、室温が不均衡になることがわかっています。熱気と冷気の混合やホットスポット（温度が空調の給気温度より極端に高い場所）の出現は、IT機器の一部によく見られる現象です。室温を上げることによって、ホットスポットに配置されているシステムに悪影響が及ぶ恐れがあります。この問題は、列単位の空調では格段に軽減され、さらに空調システムにコンテインメントを施すことで完全に解消されます。動作温度を上げることで省エネ効果を得るには、データセンタで使用する空調システムやエアフロー管理技術（コンテインメントなど）を考慮に入れる必要があります。

結論

IT機器の風量は一定ではないため、データセンタの合計消費電力が最も低くなる最適温度が存在します。必ずしも、温度が「高ければ高いほどよい」わけではないことが判明しました。このホワイトペーパーでは、3種類のシナリオに基づいて調査し、合計消費電力が最低になるのは24°C (76°F) ~ 27°C (81°F) の範囲であることを示しました。各ケースとも分岐点は、IT機器のファン消費電力の上昇が、部屋の冷却に必要な空調消費電力の減少を相殺し、上回るようになる設定温度でした。最適温度以外の部分については説明を省略しましたが、**図8と9**の合計消費電力を比較すれば、コンテインメントを追加することによって約10%の省エネ効果が得られることがわかります。

今回の実験に使用したDXソリューションは、「テスト結果」セクションの冒頭で説明した特殊なチラー構成により、実際には、2つの水冷式システムのテストよりも高効率で稼働していました。全体的な電力消費という点では、IT機器に比べて空調ソリューションは影響が小さいものの、空調ソリューションの相対的な効果としては最適温度を低下させる傾向にあります。これは、高効率で稼働しているデータセンタによく見られる現象です。

最も高効率な空調システムを実現するには、最適温度で稼働させることが不可欠です。この目標を達成するには、冷却システムで消費される電力とIT機器の冷却ファンの消費する電力を考慮に入れるとともに、最適な空調ソリューションとエアフロー管理技術を採用する必要があります。給気温度は上げる必要がありますが、その前に、あらゆるIT機器への影響を十分に考慮に入れる必要があります。データセンタの室温を上げることに成功すれば、チラーに大きな省エネ効果があり、湿度制御でも省エネ効果が期待できます。さらに、省エネモードの稼働時間を延長できる可能性もあります。

著者について

デヴィッド・モスは、防衛エレクトロニクスでの8年間、Dellでの18年間を含め、エレクトロニクス実装分野において26年間の実績があります。ノート型PCからサーバまでさまざまな製品を設計し、Dellにおいては主として熱工学部門の特許を20件以上所有しています。数年前、サーバシステムのアーキテクチャからデータセンタ戦略に移行し、現在はデータセンタインフラ部門のVPとして、Dellの電力/空調戦略の決定に携わっています。ASHRAE電気通信技術委員会(TC9.9)の投票委員、Green Gridの会員です。

ジョン・H・ビーン Jr.は、American Power Conversion (APC) のInnovation for Racks Cooling Solutionsのディレクターです。現職に就任する前は、APC Cooling SolutionsのWorld Wide Engineering Managerとして、複数の新製品プラットフォームの開発や、米国とデンマークでエンジニアリング/実験施設の設立を指揮した実績があります。APCに入社する前は、ミッションクリティカルな空調ソリューションの開発と製造に携わる企業で、エンジニアリングマネージャを務めていました。