

シミュレーションによるデータセンターのエネルギー改善

沼田 祈史 岡村 英幸 佐々木 秀樹 野村 太一郎

Energy Efficiency Simulation Model of Data Centers

Kifumi Numata, Hideyuki Okamura, Hideki Sasaki and Taichiroh Nomura

データセンターの熱設計・対策をシミュレーションで行うとき、部屋内部の熱分布や風の流れの解析によるサーバーラックやCRAC(Computer Room Air Conditioning)のレイアウトの改良を目的とした場合は、データセンター内部の熱解析に限ることができるため、モデルの境界条件を断熱設定で行うことで十分に有効なソリューションを提供できる。しかし、実際のデータセンターには、サーバーラックからの熱に加えて、部屋や建物の外部から熱の流入があり、エネルギー使用効率の改善まで見積もる場合には、この外部からの熱の影響を考慮する必要がある。CRACの温度設定を変えることによって生じる省エネルギーを見積もるための基本的なシミュレーションモデルの構築手法を紹介する。

In current data center thermal simulations, the analysis is concentrated on the temperature and airflow distribution of the rooms as affected by the layout of the server racks and CRAC (Computer Room Air Conditioning). Therefore, an ideal simulation configured with only the internal equipment of the data center used, and heat from outside of the rooms is ignored. If the target is restricted to the cooling capabilities, effective solutions can be provided by this approach.

In actual data centers, besides the major heat sources of the server racks, there is heat transfer into and out of the data center and the building. To estimate the energy savings, these external heat effects must be considered. We will show a basic simulation approach that can estimate the energy efficiency improvements of data centers by considering changes in the temperature settings of the CRAC.

Key Words & Phrases: データセンター, 熱流体シミュレーション, 省エネルギー, 冷却技術, 電力削減
data center, thermal simulation, energy efficiency, cooling, power saving

1. はじめに

CPUの高性能化による発熱量増加やサーバー統合ニーズを受けたサーバーの高集積化により、データセンターの排熱と消費電力、エネルギー効率の問題が急速に重要な課題となってきている。調査会社IDCによると、2006年に、コンピューターのハードウェア価格1ドル当たりにかかるエネルギー・コストはおよそ50セントで、これが今後4年間に54%も上昇すると予測され^[1]、IBMでも2007年5月にデータセンターにおけるエネルギー危機に対し、電力消費を抑制する取り組みを発表し、全社でデータセンターの省エネルギーを促進する方針展開を示している。

IBMでは以前より、データセンターにおける温度分布

や気流分布を三次元熱シミュレーションで行い、お客様の冷却・発熱問題を解決する熱解析サービスを提供してきている(図1)。これまでに、データセンターにおける熱問題の解決手法や、サーバーラック、CRAC(Computer room air conditioning: データセンター専用の空調機)の配置レイアウトの適正化手法は、実測とシミュ

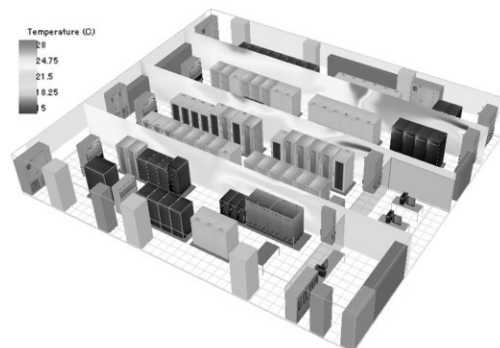


図1. データセンターの熱シミュレーション例

提出日: 2007年5月21日 再提出日: 2007年12月20日

レーション結果の比較を含め、多数、報告されている[2][3][4]。また、シミュレーションを用いたCRACの冷却負荷については、複数台あるCRACのそれぞれに必要なエネルギーをシミュレーションで事前に予測することによって、CRACそれぞれに適切な温度設定を行う検討がされている[5]。これは、サーバールーム内部におけるサーバーの発熱分布の偏りをシミュレーションで予測するものであるため、サーバールームの外からの熱の影響を省略されており、またこの結果からサーバールーム全体の省エネがどの程度可能であるかについては具体的に計算されていない。

本論文では、データセンターの外部からの熱の影響を考慮したシミュレーションにより、データセンター全体の省エネルギー化について見積もることができるかについて検討・考察を行った。

2. データセンターの熱解析

2.1 データセンターの熱シミュレーション

データセンターの熱設計では、サーバーの吸気温度をある規定値以下に保つことが第一の課題であり、一般的に次の3点に重点を置き、課題を解決していく[6] (図2)。

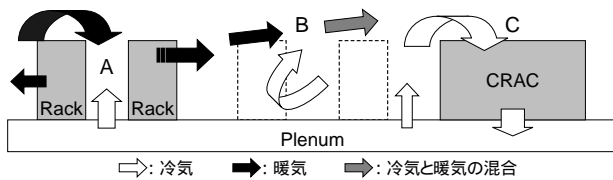


図2. データセンターのパフォーマンスを最大にするための注意点
出展 R. K. Sharma et al [6]

- A) サーバールックの吸気口付近に冷気を集中させ、暖気の侵入を防ぐ。
- B) サーバールックからの高温の排気を冷気の流れに逆流させずにCRACに戻す。
- C) CRACから供給される冷気がCRACに直接戻るのを防ぐ。

シミュレーションによる熱設計でも、この3点に主眼を置き、データセンター内の気流を操作し、改良していくが、これらの改善の後でもサーバーの吸気温度が高い場合は、CRACの設定温度を下げることになる。

このように、データセンターの熱シミュレーションでは、内部のサーバーの熱分布や気流解析に主眼が置かれるため、外部環境からとの熱のやり取りを省略して、データセンター内部に限った理想的な計算、つまり断熱状態での計算を行うことが一般的である。データセンター内に設置された機器の冷却を目的とした熱解析に限った場合には、この手法で十分有効なソリューションを提供

できる。

一方、実際のデータセンターでは、主要熱源となるサーバー以外に室外や屋外などの外部からの熱の出入りがあり(図3)、CRACは、この外部からの熱も含めて冷却しているため、エネルギー改善を考える際には、外部からの影響も含めて考えなければならない。さらに、CRACは、データセンター外部に接続された冷凍機・冷却塔と連携して空調機能を行っている。これらの装置が外気から受ける影響も考慮しなければならない。

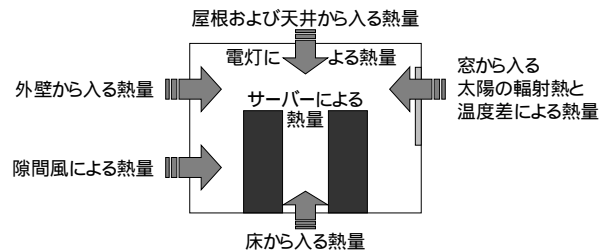


図3. データセンターへ入る熱量

2.2 エネルギーを含めたモデリング手法の検討

定常状態を解析する熱シミュレーションでは、計算領域内のすべての物理量が安定した状態となる。断熱条件の場合は、断熱の壁で囲まれた部屋の中で、熱源であるサーバーの発熱量とCRACの冷却負荷は、定常状態でつりあっていなければならない。従って、部屋内部のレイアウトがどのような条件になろうとも、部屋の温度分布や定常状態に達するまでの時間に違いは出るが、定常状態に達した後の発熱量(サーバー)と排熱量(CRAC)は等しくなる。

もし両者が等しくなく、例えばサーバーの発熱量の方が大きいとすると、差し引き分の熱量がデータセンター内にたまり続け、部屋の温度は無限に上昇してしまう。この場合、熱シミュレーションで行われる計算は収束せず、温度は非現実的な値となる。

このため、断熱条件で定常状態に達したモデルの場合には、CRACの設定温度を上げた場合でも、下げた場合でも、シミュレーション上のCRACの冷却負荷は変化しない。よって、断熱条件では、エネルギー改善の見積もりは不可能となる。

2.3 冷却負荷計算手法

CRACの冷却負荷 $W [w]$ は風量が一定ならば、CRACに戻ってくる空気の温度と、CRACから吹き出す空気の温度差で決まるため、次式で算出される。

$$W = Q \cdot T \cdot C_{air} \cdot \dots \text{(式 1)}$$

(ただし、 Q は風量[m^3/sec]、 T は空気の入出力温度差、 C_{air} は空気の比熱[$J/kg \cdot$]、 ρ は空気の

密度 [kg/m³] .)

断熱条件の場合には ,CRACの設定温度が低ければ ,サーバーの排気温度も低くなり ,CRACに戻ってくる空気の温度も低くなるので ,それらの温度差は ,CRACの設定温度が高いときと同じになり ,CRACの冷却負荷は ,設定温度が高くて低くとも同じである .これは ,温度でなく ,風量を変化させた場合も同様である .

外部からの熱の影響がある場合には ,CRACに戻ってくる空気に ,室外から流入した熱量分の違いがあるため ,この温度の差分が冷却負荷の違い ,つまり省エネルギーとなる .これをシミュレーションで求めるためには ,シミュレーターに外部からの熱の影響を設定する機能が必要である .

実際には ,CRACの設定温度を上げると冷凍機・冷却塔を含めた冷房の冷却効率COP(Coefficient of performance)が改善される .このため ,さらに省エネルギー効果が高まるが ,今回はデータセンター内部のモデリングについてのみ考慮し ,外部の冷凍機などまでは考えない .

3 .エネルギー改善事例

CRACの温度緩和による省エネルギー化のシミュレーション解析で ,エネルギー使用効率を算出する手法について ,前章までの考察内容の検証を事例を用いて行う .数値流体解析には ,有限要素法や有限体積法 [7] などの手法がある .詳細は異なるが ,どの手法も ,空間を格子点に分割し ,それぞれに流体の支配方程式を用いて ,圧力や速度などの物理量が時間および空間的にどのような変化が起こるかを予想するものである .産業用熱流体シミュレーションの分野では ,使用するコンピューターのメモリー ,CPUへの負荷が重い有限要素法より ,粗いグリッドでもエネルギー保存が確保される有限体積法を用いたものが多い .よって今回のシミュレーションにも有限体積法が使われたFlotherm[8]を用いた .

3.1 断熱モデルでの熱設計の改善

サーバーラックとCRACが図4のように配置されたデータセンターのモデル

を考える .詳細は以下のとおりである .

- 部屋の大きさ : 11m×13m×2.6m (底面143m²) .
- サーバーラック : 前面吸気・背面排気 .

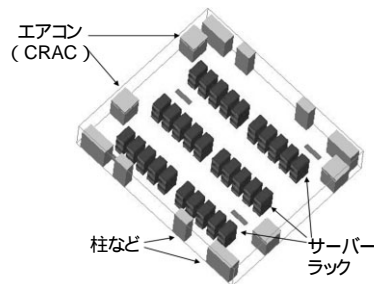


図4. データセンターのモデル

排熱量3kW/ラック .ラック総数30台 .

- サーバーラックの総消費電力 : 90kW
- CRAC : 供給温度13 .台数4台 .
- サーバーラックの吸気温度のスペックは28 が上限とする .

このデータセンター内の温度・気流分布を断熱条件で解析した結果が図5の左図である .サーバーラックの吸気温度の最高値は33.9 となり ,上限温度28 を約6 超えている(表1の改善前) .

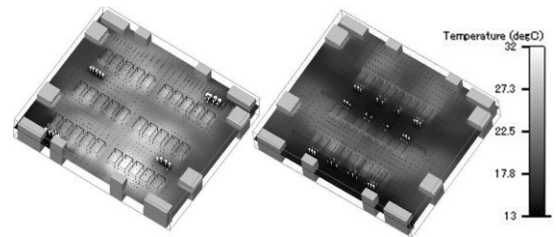


図5. 断熱条件での解析結果 :改善前(左)と改善後(右)

このデータセンターの熱設計は ,複数回の計算と解析の後 ,以下の対策で改善可能なことが分かった .

1. サーバーラックの向きと床からの冷気の取り入れ口の配置を換え ,通路に冷氣通路と暖気通路を設置 . (図2-A)
2. 隣り合うサーバーラック同士の間隔をなくし風の逆流を防止 (図2-B)
3. サーバーラック内の空きスペースにブランクパネルを取り付け ,風の逆流を防止 (図2-B)
4. サーバーラックの端に仕切り板を取り付け ,冷機がCRACに直接戻るのを防止 (図2-B ,C)

改善の結果 ,図5のように改善前と比較して全体に温度が低下し ,サーバーラックの吸気温度の最高値は24.9 となった(表1の改善後) .

表1. 断熱条件でのシミュレーション結果

	CRAC 設定温度	サーバー ラック 吸気温度 (最高値)	サーバー ラック 吸気温度 (平均値)	CRAC 戻り温度	CRACの 設定温度と 戻り温度 の差	CRACの 冷却負荷
改善前	13	33.9	24.3	19.4	6.4	90kW
改善後	13	24.9	16.0	19.4	6.4	90kW
改善後 省エネ対策	16	27.9	19.0	22.4	6.4	90kW

この例では ,上限温度を約3 下回っているため ,CRACの設定温度を3 上げることが可能となる .断熱条件で行うシミュレーションでは ,CRACの設定温度を3 上げるとCRACへ戻る気体の温度も3 上がる(表1の改善後省エネ対策) .よって ,式1で計算される冷却負荷は ,CRACの設定温度を上げた場合も ,元の内部発熱量の合計90kWと同じとなり ,省エネルギー効果は

見積もることはできない。

3.2 外部からの影響を考慮したモデルでのエネルギー計算

3.1と同様のレイアウトのデータセンターで外気と熱のやり取りのある条件でモデリングし計算を行う。断熱条件ではない開放空間の中に壁で囲まれたデータセンターをモデル化し、開放空間の温度・風や日射などの条件、データセンターの壁の材質、厚みなどを設定する。これによって、計算領域すべてをデータセンターとして、境界条件に温度や壁の材質の条件付けをする手法より、正確な熱の流入が計算できる。データセンターの多くは日射の影響を受けないよう設計されているため、今回は日射を省略し、また簡単のため無風状態として、以下の条件を設定した。

- ・データセンターの壁は20cmのコンクリート材
- ・壁の外の外気温は28
- ・一方向の壁の2/3のエリアがガラス窓(厚み2mm)
- ・一方向の壁の20%のエリアが5%の開口率で外気と内気の入りがある
- ・蛍光灯の熱量3.6kW(一般に25W/m²より)
- ・CRACによる換気はない

計算の結果、CRACの設定温度が13の場合に、外部からの熱の流入(蛍光灯の熱量含める)は11.9kWあり、CRACの冷却負荷は102kWとなった(図6)。断熱条件での改善後の結果(図5の右図)と比較すると、図7の断面図のようにサーバーラック近辺の温度はほとんど変わらず、壁近傍の空気温度にのみ1程度の差がある。

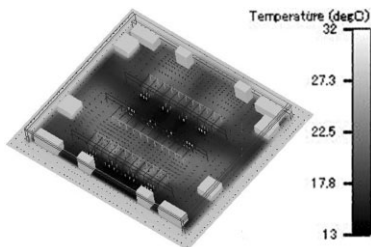


図6. 外部条件がある場合の解析結果

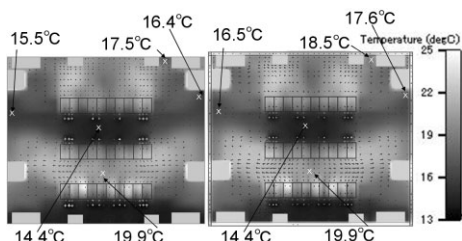


図7. 断熱条件(左)と外部条件あり(右)での解析結果の比較

このモデルで、CRACの温度を3上げた場合に同様に計算を行った結果、サーバーラック近辺の温度分布は全体に3の温度上昇があるのみだが、データセンターの壁や壁周辺の空気温度分布に違いが見ら

表2. 外部条件がある場合のシミュレーション結果

	CRAC 設定温度	サーバー ラック 吸気温度 (最高値)	サーバー ラック 吸気温度 (平均値)	CRAC 戻り温度	CRACの 設定温度と 戻り温度 の差	CRACの 冷却負荷
改善後	13	24.7	16.2	20.2	7.2	102kW
改善後 省エネ対策	16	27.6	19.1	23.0	7.0	98.7kW

れた。つまり、壁の温度と内部空気の温度差が縮まることで、外部から入ってくる熱量が少なくなる。この変化でCRACの冷却負荷は98.7kWと減少し、もともと102kW必要だった冷却負荷に対し3.3kW削減されることが分かった(表2)。

このモデルでは、データセンター外部の冷凍機・冷却塔における外気の入りを考慮していないが、CRACのみのエネルギー使用効率だけで、もともとの冷却負荷102kWに対し3.2%の改善となる。

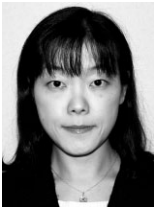
3.3 解析結果についての考察

以上のシミュレーション解析により、データセンターの省エネルギー効率を求めるには、断熱モデルではなく、外部との熱のやり取りのあるモデルである必要が検証された。

一般に夏場の冷房の温度を1上げると約10%のエネルギー削減になるといわれる[9]が、これは家庭やオフィスなど、人の出入りによる外気の影響が多く、冷却負荷が約100W/m²の場合に、外部の冷凍機・冷却塔の効率まで考慮した値である。今回のモデル例は、外気の影響が比較的少ない、データセンターのみの値であり、冷却負荷も713W/m²と大きい。CRAC設定温度の変更による冷却負荷の違いの多くは、外部から入ってくる熱量に依存するため、もともと冷却負荷の大きいデータセンターの場合には改善されるエネルギーの割合も少ない。

同様のモデルで、サーバーラックの熱量やCRACの設定温度などを変更させて、複数のパターンで冷却負荷の削減量を計算してみたところ、サーバーラックの熱量が約500W/m²の一般的なデータセンターでは、CRAC設定温度の10上昇に対し、約13%の冷却負荷の減少が見られること、つまり1の改善で約1%の減少が期待できることが分かった。

この結果から、電力削減量とCO₂削減量を求めるには、以下のように行う。エアコンの冷却負荷と消費電力の関係は、一般に1対1ではなく、消費電力は冷却負荷の何分の1かである。CRACのCOPを一般的な値を用いて3、つまり、冷却負荷の1/3のエネルギーが消費電力として必要と仮定する[9]。COPは設定温度によって多



日本アイ・ピー・エム株式会社
技術開発センター
スタッフR&Dエンジニア

沼田 祈史 Kifumi Numata

[プロフィール]

1998年に日本IBM入社。ストレージ関連製品の開発経験の後、熱設計開発に従事。ノートブック製品、サーバー製品(ブレード・サーバー、BlueGene/S)などを担当。

kifumi@jp.ibm.com



日本アイ・ピー・エム株式会社
技術開発センター
スタッフR&Dエンジニア

岡村 英幸 Hideyuki Okamura

[プロフィール]

1973年日本IBM入社、電子部品の評価/認定業務に従事。1990年より電子部品実装基板のテスト技術エンジニア担当。1993年より液晶パネル開発品質保証業務に従事。2003年より現職。ノートブック製品、ワークステーション、サーバー製品の熱設計およびデータセンター・サーマル・シミュレーションを担当。

y13181@jp.ibm.com



日本アイ・ピー・エム株式会社
技術開発センター
アドバイザーR&Dエンジニア

佐々木 秀樹 Hideki Sasaki

[プロフィール]

1988年IBM入社、ドットインパクトプリンター、ノートブックPCなどの機構部品生産技術・機構部品設計を経験後、2000年11月より熱流体シミュレーションに基づく熱設計に関わる業務に従事。ノートブックPC、ワークステーション、お客様製品他多数の熱設計を担当し、データセンター熱シミュレーションを担当。

f20457@jp.ibm.com



日本アイ・ピー・エム株式会社
技術開発センター
シニアマネージャー

野村 太一郎 Taichiroh Nomura

[プロフィール]

1983年IBM入社、半導体生産技術、コンポーネント信頼性技術業務などに従事。2000年から大和サーマルラボ立ち上げに参画し、現在では機構・ソリューション技術開発グループを担当している。

jl04364@jp.ibm.com