

高発熱データサーバに対応した効率的iDC空調システムの検討

諏訪 好英 井口 日文
(本店 設備設計第1部)

Air-Conditioning Systems for iDCs with Large Heat Generation Data Servers

Yoshihide Suwa Hihumi Iguchi

Abstract

The demand for iDCs (Internet Data Centers) is increasing because the Internet and IT systems are becoming more popular. Internet servers produce a large amount of heat. Hence, an effective ventilation system is required in server rooms. Velocity and temperature distribution in the server rooms was studied using the CFD technique. As a result, problems and countermeasures concerning Hot-/Cold-aisle-type server rooms were found. Finally, an advanced system which supplies cooling air from the ceiling was proposed. Air exchanging performance of proposed system was confirmed using the CFD technique.

概要

インターネットやITシステムの普及に伴い、iDC（インターネットデータセンター）の需要が増えている。発熱量の大きなiDCのサーバールームでは、効果的な熱換気を行う空調システムが求められている。サーバールームとして多く用いられているホットアイル・コールドアイル方式のシステムについて熱気流シミュレーションを実施し、熱換気の問題点とその対策について検討した。また新たな空調システムとして天井吹き出し方式を提案し、シミュレーションにより効率的な熱換気が実現できることを確認した。

1. はじめに

近年、インターネットやITシステムの普及を背景として、大規模なサーバールームを持つiDC（インターネットデータセンター）の需要が増加している。発熱量の大きなサーバマシンを多数運用するサーバールームでは、機器の安定動作を確保するため、効果的に熱排気し、室内を空調するシステムが求められる。また最近では、サーバマシンの高集積化に伴い、サーバールームに設置される機器の発熱量は大幅に増加しており、より効果的な空調システムが求められるようになってきた。

本研究では、データセンターのサーバールームとして広く用いられているホットアイル・コールドアイル方式¹⁾のシステムについて熱気流シミュレーションを実施し、熱だまりやショートサーキットなど空調効率の低下につながる要因を整理した。またこれらを改善するための対策について検討した。

2. サーバルームの空調方式

サーバマシンはラックに複数台ずつ実装して運用される。最近では従来のラックマウント方式（発熱量0.5~2kW/ラック）に換わり、ブレードサーバやIUサーバと呼ばれる高密度実装方式（発熱量5~20kW/ラック）²⁾が採用されることも多く、ラックあたりの発熱量は急激に増加している。現状のサーバマシンの多くは空冷式であり、ラックに取り付けられたファンにより操作面側から室内空気を取

り込み、背面から熱排気するものが多い。このためFig. 1に示すように、給気を必要とする操作面同士と熱排気を行う背面同士が向き合うようラックを交互に配置するホッ

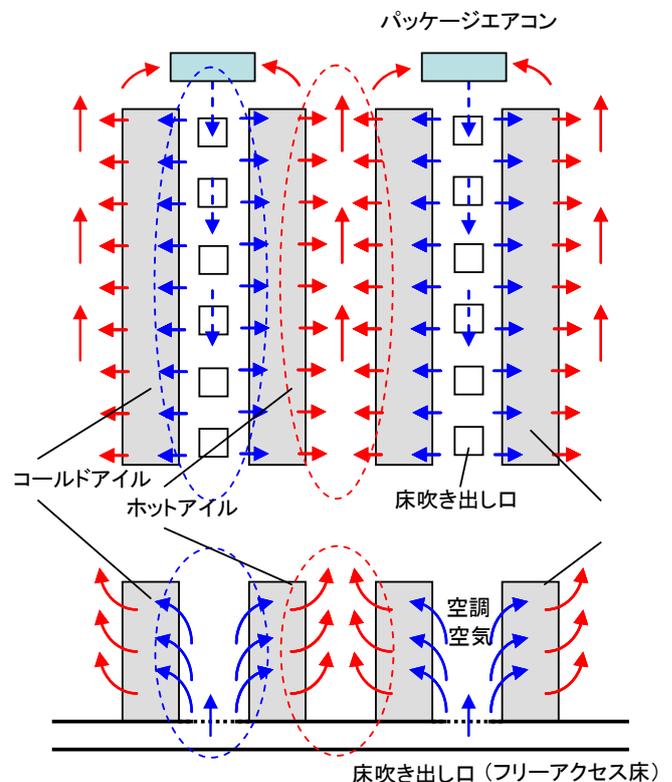


Fig. 1 ホットアイル・コールドアイル方式のサーバールーム
Hot-Aisle/Cold-Aisle Type Server Room

トアイル・コールドアイル方式が多く用いられている。一般にサーバールームでは、空調機が故障した場合などのリスクを分散するため、複数台のパッケージエアコンが並列的に使用される。ホットアイル・コールドアイル方式のサーバールームでは、壁面に配置されたパッケージエアコンからフリーアクセスの床下を介して送風を行い、主としてコールドアイルに設置した床吹き出し口から室内に給気する。サーバラックからの熱排気を含む空気は、ホットアイルを介してパッケージエアコン上部のレターン吸い込み口に回収する。

3. 熱気流シミュレーションによる検討

サーバールーム内に効果的な熱排気と空調を実現するためには、コールドアイル、ホットアイルの気流を分離し、サーバからの熱排気をできるだけ混合させずレターンに回収することが重要である。しかし実際には、熱だまりやショートサーキット等の要因により、期待する空調効率を

十分に得られないことが多い。サーバの発熱量が大きい場合には、空調効率の低下が機器の冷却効率を著しく阻害する可能性も予測され、大きな問題となる。そこで、ホットアイル・コールドアイル方式のシステムを対象として熱気流シミュレーションを実施し、空調効率の低下につながる要因の調査およびその対策を検討した。

3.1 サーバルームのモデル化

サーバールームのモデルとしてFig.2およびTable 1に示す2種類のレイアウトを想定した。モデルAはサーバ発熱量が比較的小さい場合(2kW/ラック)のサーバールームを想定している。モデルBは発熱量の大きなラック(6kW/ラック)と2kWのラックとが混在する場合を想定したもので、2種類の発熱量を持つラックを交互に並べた。各モデルでは、循環送風量の違いにより、ラック列の間隔(ホットアイル、コールドアイルの幅)と床吹き出し口の配置とが異なる。

モデルの各ラックには、操作面側から室内空気を吸い込み、これにサーバの発熱量に相当する温度上昇分を加えた熱排気を背面から排気するよう、境界条件をモデル化して組み込んだ。すなわち本モデルでは、刻々変化するラック吸い込み側の空気温度がそのラックの排気温度に反映される。ラックからの高温の排気がショートサーキットして再びラックに吸い込まれた場合には、さらに排気温度が上昇する悪循環を生じるが、本モデルでは、このようなショートサーキットに伴う現象も再現することができる。なお、ラック内部では、給気された空気とサーバからの発熱が十分混合されるものと仮定し、各ラックからの排気温度は排気面単位で均一とした。サーバラックの給・排気口には様々な形態のものがあるが、モデルAではラック背面側の上部1/3が排気口となっている場合を、またモデルBではラックの背面全面が排気口となっている場合を想定した。

Table 1 モデルA, モデルBの設定条件
Assumed Conditions for Server Room Models

| | モデルA | モデルB ^{*1} |
|----------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 床面積(m ²) | 60.48 | 48.6 |
| 床吹き出し温度(°C) | 17 | 18 |
| 床吹き出し口の数 | 14 | 26 |
| 空調風量(CMH) | 27,000 | 42,300 |
| 発熱量 | 2kW/rack×36 =72kW | 2kW/rack×12 +6kW/rack×12 =114kW |
| ラックの寸法 | 600mm(W)×900mm(D)×2,100(H) | |
| ラックの風量(CMH) | 360 | 2kW/rack : 360 6kW/rack : 1080 |

*1 : サーバルック12本の場合

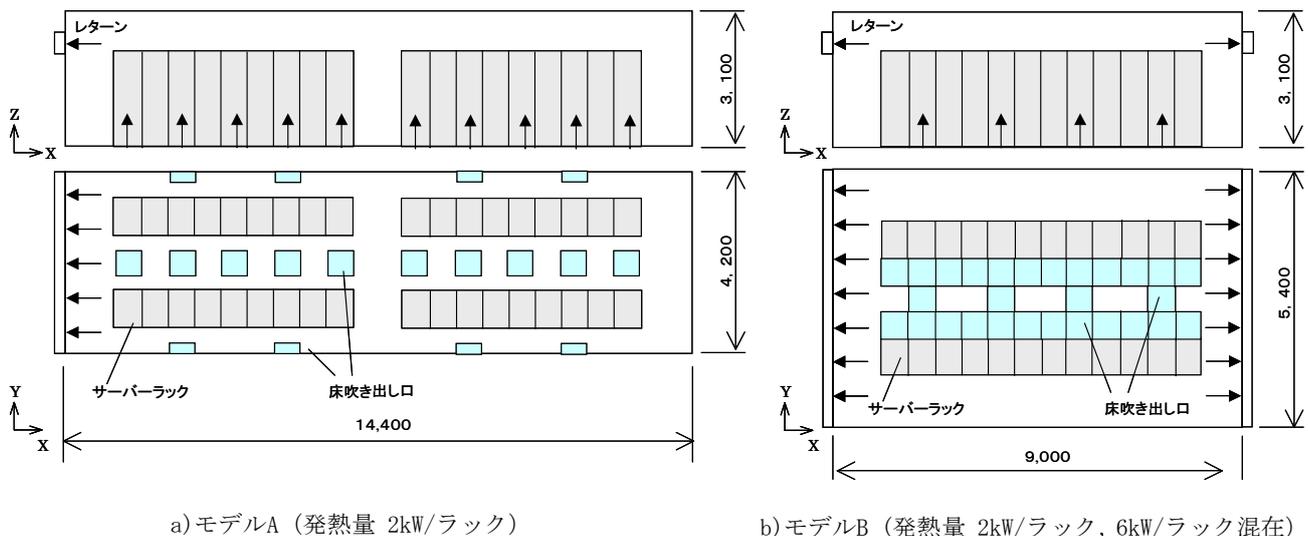


Fig.2 サーバルームのシミュレーションモデル
Simulated Server Room Model

Table 2 基礎方程式および非等温型SGSモデル
Basic Equations and Un-isothermal SGS Model

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (v + v_{SGS}) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} - g\beta(\theta - \theta_0)\delta_{i,3}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial u_i \theta}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\alpha + \alpha_{SGS}) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right\}$$

$$\text{Pr}_{SGS} \alpha_{SGS} = v_{SGS}, \quad \text{Pr}_{SGS} = 0.5, \quad v_{SGS} = \phi(Cs \cdot \Delta)^2 S,$$

$$S = \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad Rf = -\frac{g\beta\delta_{i,3}}{\text{Pr}_{SGS} S^2} \frac{\partial \theta}{\partial x_i}$$

$$\phi = (1 - Rf)^{1/2} \quad (Rf < 0)$$

$$\phi = (1 - Rf/Rf_c)^2 \quad (0 < Rf < Rf_c), \quad Rf_c = 0.33$$

$$\phi = 0 \quad (Rf_c < Rf)$$

u : 速度, x : 座標, t : 時間, p : 圧力, θ : 温度,
 ρ : 密度, g : 重力加速度, β : 体積膨張率,
 ν : 動粘性係数, α : 熱拡散係数, Pr : プラントル数,
 Cs : スマゴリンスキー定数, Δ : 格子スケール,
 Rf : フラックス・リチャードソン数
 添え字 0 : 給気口の値, SGS : サブグリッドスケールの値,
 c : 限界値

熱気流シミュレーションには非等温型SGSモデル (Table 2) ^{3),4)} により非等温場における乱流効果と温度差に基づく浮力効果を考慮するとともに, LES (Large Eddy Simulation) を実施して非定常な乱流現象を再現した。

3.2 サーバルーム内の気流状況

モデルAについてシミュレーションしたサーバールーム内の気流分布, 温度分布をFig. 3に示す。なお, 本論文で示す図はすべて非定常解析の瞬時値である。コールドアイルの床吹き出し口から供給された空調空気がサーバラックに取り込まれ, ラック背面から高温の熱排気としてホットアイル側に排出されることがわかる。

ここではパッケージエアコンを部屋の片側に設置した場合を想定したが, 部屋の天井付近において室内の気流はレターン側に引かれる傾向 (偏流) を示しており, レターンから遠い部分の気流がよどむ傾向となることがわかった。また, コールドアイルのラック吸い込み面では, 偏流の影響でよどみ領域の空気がラックに吸い込まれる様子が認められ, ラックの上部やラック列の端部では, 冷却効率が低下する可能性もあることがわかった。

3.3 両側吸い込みの場合, レターンまでの距離が異なる場合の比較

レターンを部屋の両側に設けた場合やレターンまでの距離が異なる場合について, シミュレーションを行った。

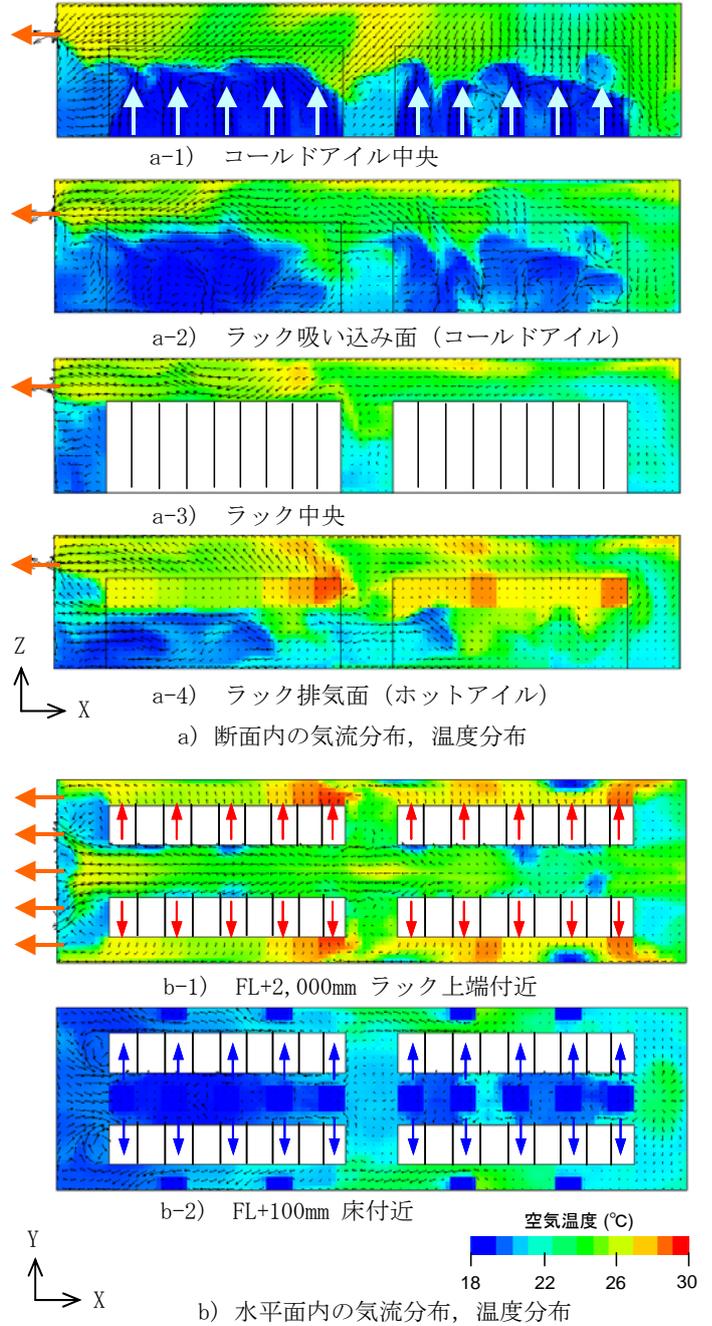


Fig. 3 モデルAサーバールームのシミュレーション結果
Simulated Airflow and Temperature Distribution
in Model-A

ここではモデルBを用い, 部屋のアスペクト比を変更することで発熱箇所からレターンまでの距離が異なる場合を再現し, 比較した。ラックの本数は部屋のアスペクト比に合わせて増やしたが, 各ケースにおいて設計上の室内平均温度が同一となるよう空調風量を調整した。各ケースのシミュレーション結果をFig. 4に示す。図は床上1m (ラック中間高さ) の水平面内の温度分布を示しており, 対称性を考慮してFig. 2 b) の領域を上下に分割した半分のみを示している。

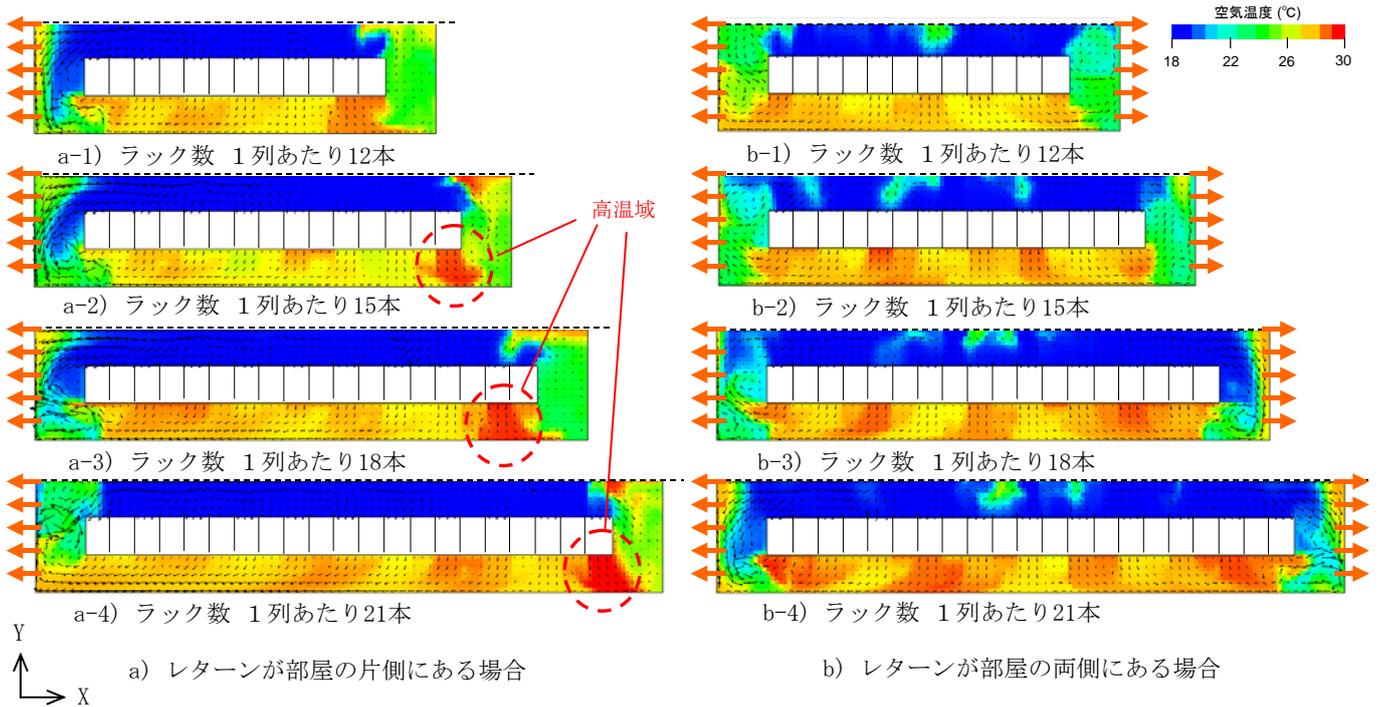


Fig. 4 片側吸い込み／両側吸い込みの場合、レターンまでの距離が異なる場合の比較 (FL+1,000mm, モデルB)
 Comparison of Temperature and Airflow Distributions in Single Sided and Double Sided Return Systems
 (FL+1,000mm, Model-B)

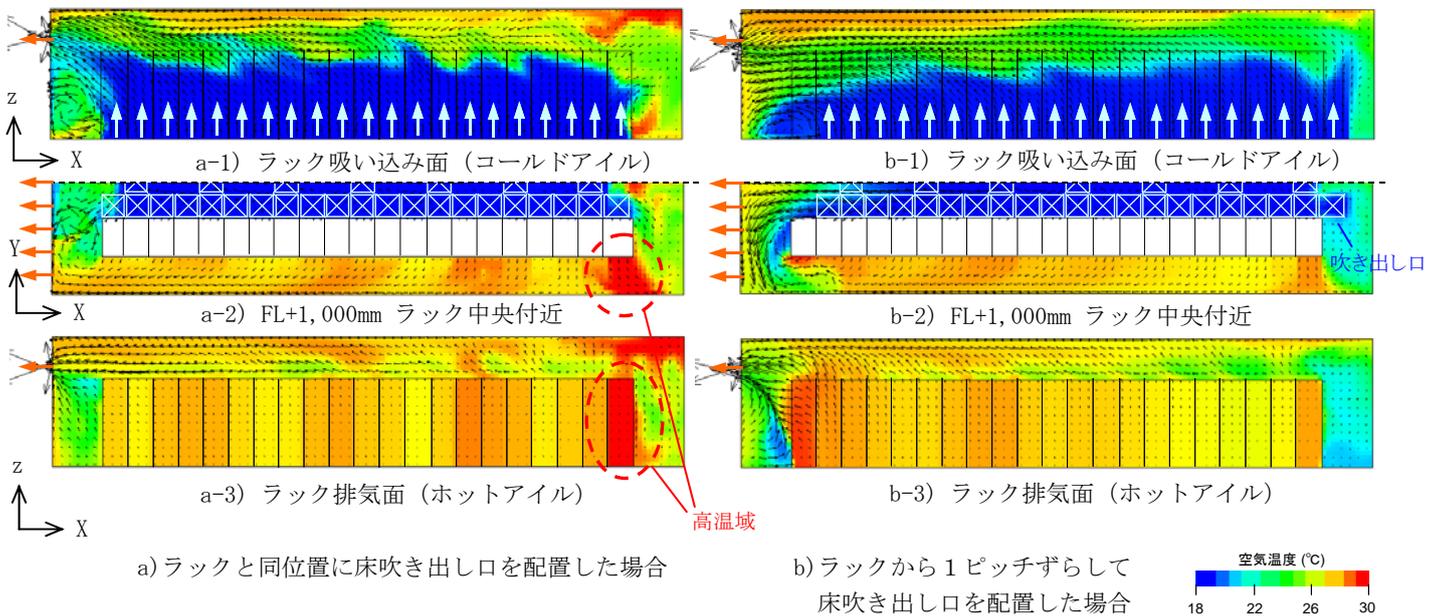


Fig. 5 ラック列の端部に発生するショートサーキットへの対策例 (モデルB)
 An Example of Countermeasure against the Short Circuit which Occurs at the End of Rack Line (Model-B)

レターンが片側のみの場合、レターンまでの距離が大きくなるにつれて偏流的な傾向が顕著となり、レターンから遠い箇所では、室内端部のよどみ領域の空気がラックに吸い込まれ、高温領域を発生することがわかった。また部屋の

アスペクト比が大きくなると換気性能も低下するものと思われ、全体的な室内温度も上昇する傾向が認められた。なおシミュレーションでは、コールドアイルの各吹き出し口における風速を一樣とした。しかし実際のサーバールーム

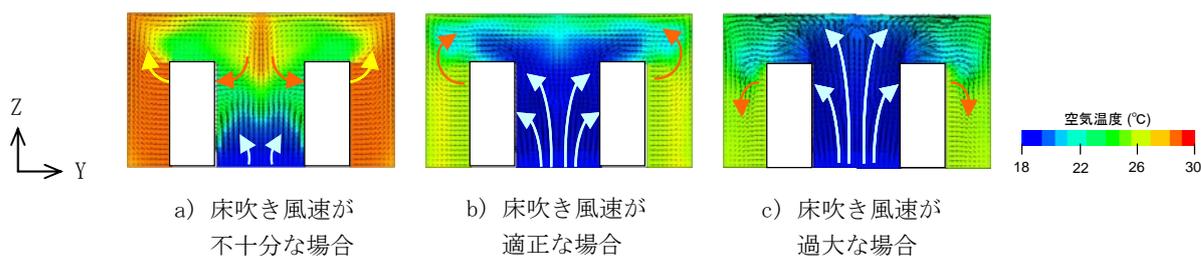


Fig. 6 ラック上部を横断するショートサーキットと床吹き風速との関係
Relation between Supply Airflow Velocity Blowing from the Floor and the Short Circuit

では、運用が進むにつれて床下の配線類が増え、床下給気流路の抵抗が増加するため、これらの傾向はさらに顕著になると思われる。

一方、レターンを部屋の両側に設けた場合（合計風量は片側吸い込みの場合と同じ）には、レターンまでの距離が片側吸い込みの場合に比べ短くなるため、偏流的な傾向は顕著には認められなかった。しかしこの場合も、部屋のアスペクト比が大きくなるとホットアイルの平均温度もしだいに高くなる傾向が認められた。

3.4 ショートサーキットとその対策

サーバールーム内に高温域が形成される要因として、ショートサーキットの発生が考えられる。すなわち、サーバラック背面から排出された高温排気の一部が操作面側に回り込むと、ラックの冷却効率が低下し、さらに排気温度が上昇する。シミュレーション結果から考察すると、ホットアイル・コールドアイル方式のサーバールームにおいては、以下のようなショートサーキットの発生が考えられる。すなわち、

- ・ラック間のすきまを横断する流れにより発生するもの
- ・ラック列の端部において偏流に起因して発生するもの
- ・ラック上部を横断する流れにより発生するもの

このうち、ラック間のすきまやラック列端部に発生するショートサーキットは、水平方向の流れに起因するものと考えられ、床吹き出し口の配置を工夫することで対策可能である。Fig. 5は、この方針に基づき対策を検討した例である。片側吸い込みの部屋では、レターンから遠いラック列の端部にショートサーキットを生じやすいが、床吹き出し口の配置をラック列よりも1ピッチ程度ショートサーキット側にずらして設置すると、端部のショートサーキットが抑制され、高温域を生じないことがわかる。ラック間のすきまを横断するようなショートサーキットが発生する場合にも、ラック間のすきま部分に床吹き出し口を追加することで、同様の効果が得られる。

ラック上部を横断するショートサーキットには、床からの吹き出し風速とサーバラックの吸い込み風速とが関与する。Fig. 6に示すように、床吹き風速が小さい場合には、空調 airflow がラックの低い部分にしか到達せず、ラック上部

にショートサーキットを生じて高温空気を巻き込んでしまう。一方、床吹き風速が大きすぎた場合には、空調 airflow がラックの上方に吹き上げてしまい、その多くがサーバの冷却に寄与せずレターンに回収されてしまう。効果的にサーバへ空調 airflow を供給するには、床吹きの風速や吹き出し方向を適正化する必要がある。しかし、実際のサーバールームではラックのファン稼働状況などにより状況が変化するので、現場調整可能なルーバーや開口率調整機構をあらかじめ吹き出し端末に設けておくなどの工夫が必要である。

4. 天井吹き出し方式の提案

前節のシミュレーション結果から、ラック上部を横断するようなショートサーキットについては、状況に合わせ床吹き風速などを調整する必要があることがわかった。物理的にこの種のショートサーキットを遮断する手法としては、ラック列と天井との間に遮蔽板を設置する方法などが提案されている^{5),6)}。この方法は一時的なショートサーキット対策としては有効であるが、遮蔽板により防火区画が分断されてしまうため、恒久的なシステムとして用いることは難しい。

Fig. 6の例で、室の天井がラックの高さにあったとすると、上方に吹き上げた気流が天井に衝突した後、強制的にラックに引き込まれる。この発想の上下方向を逆転すると、コールドアイルへの吹き出し airflow を天井から行い、強制的に吹き出し airflow を床に衝突させる方式が考えられる。そこで、コールドアイルの天井に空調吹き出し口を、ホットアイルの天井にレターン吸い込み口を設けた天井吹き出し方式を提案し、シミュレーションを実施した。結果をFig. 7に示す。吹き出し airflow はもともと大きな慣性力を持つため、天井から供給された気流は床面まで到達し、衝突する。床面に衝突した気流はその後、拡散的な流れとなってサーバラックに効率よく引き込まれている。またレターン吸い込み口をホットアイルの天井に分散して配置することで、浮力上昇を伴うラックからの熱排気は、よどみやショートサーキットを生じることなく回収されることがわかった。

フリーアクセス床を用いる従来方式のサーバールームで

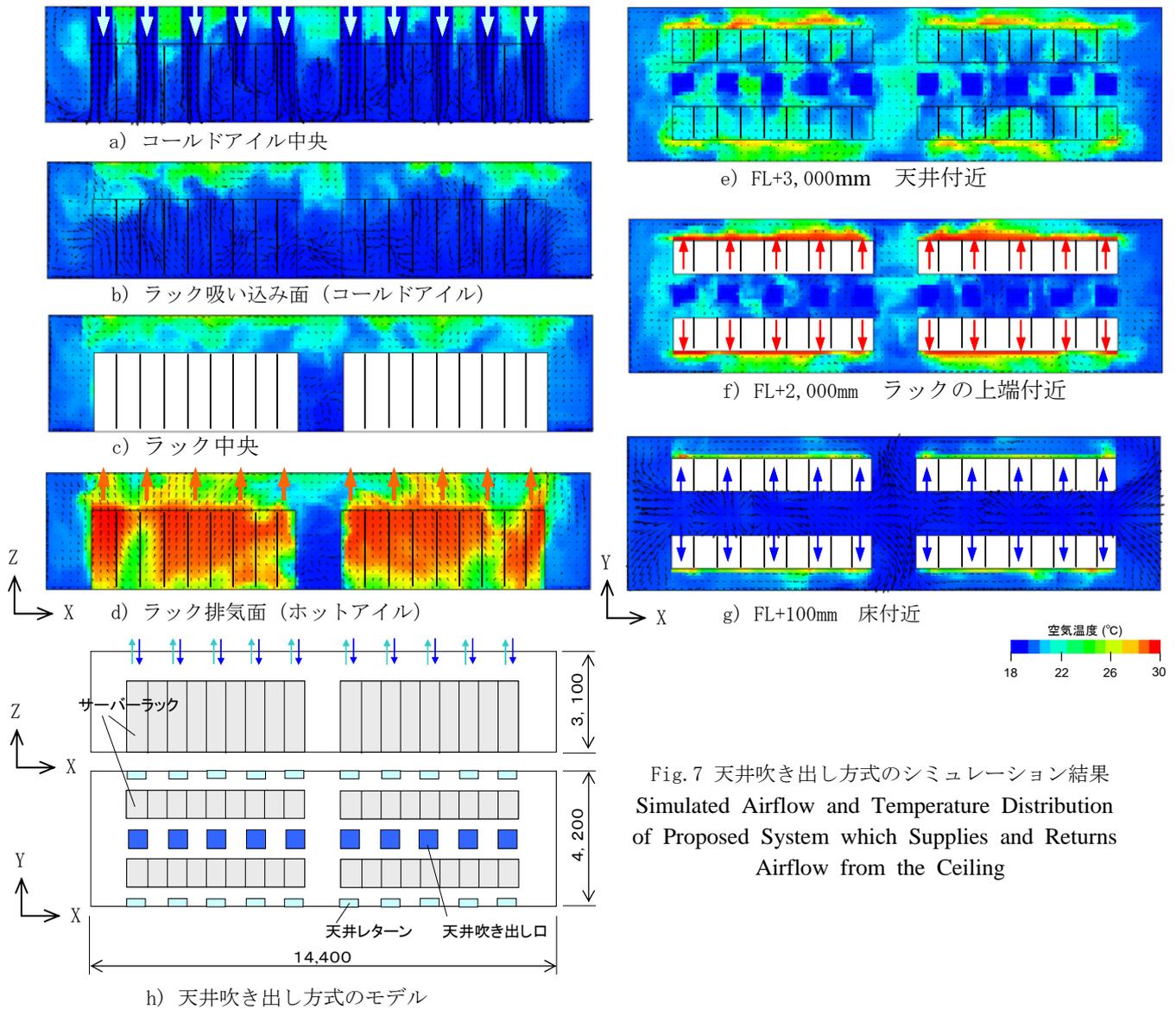


Fig. 7 天井吹き出し方式のシミュレーション結果
Simulated Airflow and Temperature Distribution
of Proposed System which Supplies and Returns
Airflow from the Ceiling

は、床下配線が増えると給気経路の流路抵抗が増加し、各床吹き出し口について均一な風量を得ることが難しくなる。これに対し、天井に吹き出し、吸い込み口を配する本システムは、床下配線の影響を受けず、サーバームの運用開始後も安定した給気特性が得られるものと期待できる。

5. まとめ

iDCサーバーム内の熱気流シミュレーションを実施し、熱排気の問題点とその対策を検討した。その結果、換気効率の低下要因となるショートサーキットの発生原因を明らかにし、また新たな空調システムとして天井吹き出し方式を提案した。今後、サーバマシンはさらに高密度化していくことが予測され、発熱密度も現状の数倍から数十倍に増大する可能性がある^{1),2)}。iDC空調システムとしてさらに効果的な熱換気について検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) Hannaford, P. : Ten Cooling Solutions to Support High-Density Server Deployment, APC White Paper #42, 2006.
- 2) Rasmussen, N. : Strategies for Deploying Blade Servers in Existing Data Centers, APC White Paper #125, 2006.
- 3) 水谷,村上,持田,富永: LESによる非等温室内気流解析(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集,1992, pp.505-506.
- 4) 富永,村上,持田: 浮力のある流れ場を対象としたLESにおけるSGSのモデリング, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1992, pp.153-156.
- 5) 植草,藁谷,木下,三宅: データーセンターにおける空調気流の応用設計技術に関する研究(第1報), 空気調和・衛生工学会学術講演論文集,2007, pp.1235-1238.
- 6) 角田,木下,金子,植草: データーセンターにおける空調気流の応用設計技術に関する研究(第3報), 空気調和・衛生工学会学術講演論文集,2007, pp.1243-1246.