

データセンター向け高効率空調システム「Cool Air Capture™」の開発

諏訪 好英 井口 日文

(本店 設備設計第1部)

Cool Air Capture™: A High-Performance Air-Conditioning System for Data Centers

Yoshihide Suwa Hihumi Iguchi

Abstract

In internet data centers (IDCs), a large amount of heat generated by server machines must be removed efficiently from the server rooms so that the room temperature can be controlled at a suitable level to keep these machines in good working condition. In this study, we carried out a computational fluid dynamic (CFD) simulation for various air-conditioning systems, and we compared their ventilation and air-conditioning performance. We found that a system with both supply and return openings on the ceiling showed the best performance. We named this system Cool Air Capture™. This system exhibited better performance than any other conventional systems. In addition, it was flexible with regard to the arrangement of server racks, and it performed well even in case of large heat generation.

概要

iDC（インターネットデータセンター）の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。本研究ではさまざまな空調システムについて熱・気流シミュレーションを実施し、換気性能、空調性能の違いを比較した。その結果、天井吹出し・天井吸込みを採用した空調方式が最も良好な性能を示すことを見出し、このシステムを「Cool Air Capture」と名付けた。検討の結果、本システムはサーバラックのレイアウトに対する冗長性を有しており、発熱量の大きなサーバにも対応できるなど、従来方式に比べ良好な性能を持つことがわかった。

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^{1),2)}、より効果的な空調システムが求められるようになった^{3),4)}。

既報⁵⁾では、現状のデータセンター用サーバールームにおける空調システムの問題点を考察し、ショートサーキットの発生要因等を明らかにした。本研究ではさらに、吹出し口、吸込み口レイアウトなどを変更したさまざまなシステムについてシミュレーションを実施し、換気・空調性能に優れた空調システム「Cool Air Capture」を開発した。本報ではCool Air Captureの性能を従来方式との比較により検討した結果を紹介する。

2. 各種サーバールームにおける換気・空調性能

既報¹⁾の検討結果から、サーバールームの吹出し口、吸込み口レイアウトを変更すると換気・空調性能に大きな違いを生じる可能性のあることを示した。そこで、さまざまな

吹出し、吸込み方式のサーバールームについて気流シミュレーションを実施し、それぞれの性能を比較した。

2.1 規準サーバールームのモデル

標準的なサーバールームモデルをFig.1およびTable1のように設定した（以下規準モデルと呼ぶ）。ここでは発熱量2kWの従来型サーバラックを想定し、1列あたり9本のラックからなるラック列を基本としてホットアイル、コールドアイルを形成するレイアウトを想定した。給気はフリーアクセス床を利用した床吹出し方式、空調システムは壁面に配置したパッケージエアコンによるものとし、レターンは室の片側の壁面上部で行うこととした。床面の吹出し口は主としてコールドアイルに配置したが、一部は作業域の冷却のためホットアイルにも設置した。想定した規準モデルは、現状のサーバールームにおいて一般的に採用されている方式である。

2.2 各種空調システムのモデル

規準モデル(CASE-1)に対し、吹出し口、吸込み口レイアウトを変更した場合として、Table2およびFig.2に示す各種空調システムをモデル化した。いずれの場合も、サーバラックの本数、発熱量、送風量はすべて統一し、また吹出し温度、室内の空調戻り温度の設計値も同一と仮定した。

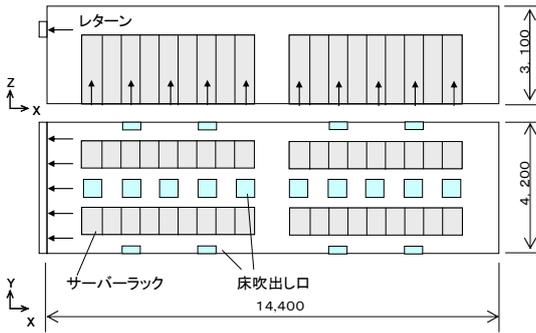


Fig. 1 想定したサーバールーム標準モデル
Basic Server Room Model

Table 1 サーバールーム標準モデルの諸元
Specifications of Basic Server Room Model

床面積(m ²)	60.48
床吹出し温度(°C)	17
床吹出し口の数	14
空調風量(CMH)	27,000
発熱量	2kW/rack×36=72kW
ラックの寸法	600mm(W)×900mm(D)×2,100mm(H)
ラックの風量(CMH)	360

Table 2 CASE-1～CASE-7の吹出し，吸込み口条件
Supply and Return Air Conditions for CASE-1 to CASE-7

CASE-1	標準モデル (Fig.1, Table1)
CASE-2	ホットアイル側吹出し口を削除
CASE-3	吹出し口，吸込み口を各6箇所として吸込み口を天井に配置
CASE-4	吹出し口，吸込み口を各10箇所として吸込み口を天井に配置
CASE-5	天井吹出し・天井吸込み(各10箇所)
CASE-6	ホットアイル側に床吹出し口を集中
CASE-7	ラック・天井間にセパレータを設置し，ラックを横断する方向のショートサーキットを排除

2. 3 シミュレーションおよび結果の評価方法

非等温SGSモデル^{6),7)}によるLES (Large Eddy Simulation: Table3)を適用し，非定常な乱流現象をシミュレーションした。モデルの壁面は断熱と仮定し，境界条件としては気流速度，熱ともに対数則を適用した⁸⁾。なお，流入気流は本来大きな乱れを有するが，空調用吹出し口に関して十分な実験データが得られていないこと，大局的な気流分布に関しては室内に導入された後の乱れの生成が支配的と考えられることから，ここでは風速固定として給気口流入条件を与えることとした。サーバラックの排気条件についても同様の理由から，気流速度については各時刻のラック吸込み側境界値(モデルから見て自由流出境界)をそのまま，また温度については吸込み側境界値にラック内の発熱分上昇温度を加え，排気側境界条件として逐次与える方法を適用した。

以下，本報に示す気流分布，温度分布等の図はすべて瞬時値から作成したものであり，平均温度，SVE-3平均値(後

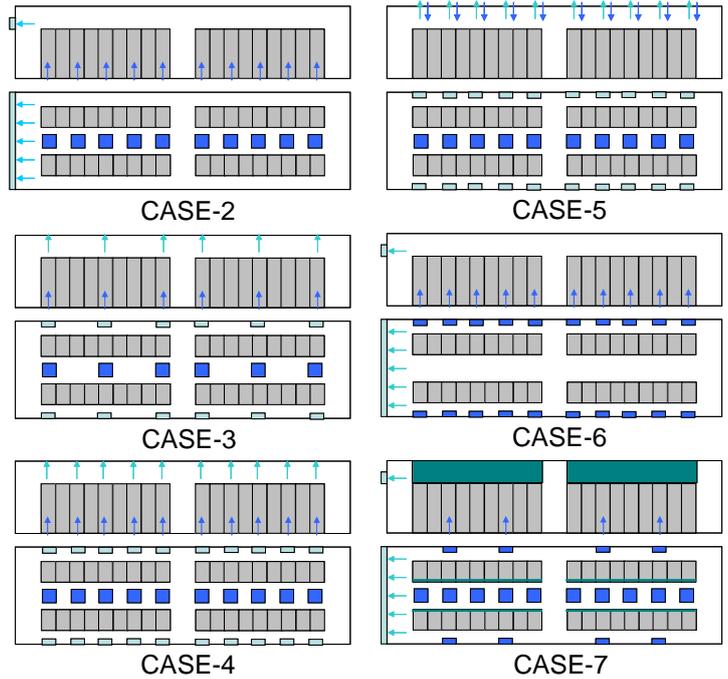


Fig. 2 想定した各種サーバールームのモデル
Tested Server Room Models

Table 3 基礎方程式および非等温型SGSモデル
Basic Equations and Non-isothermal SGS Model

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

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

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

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

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

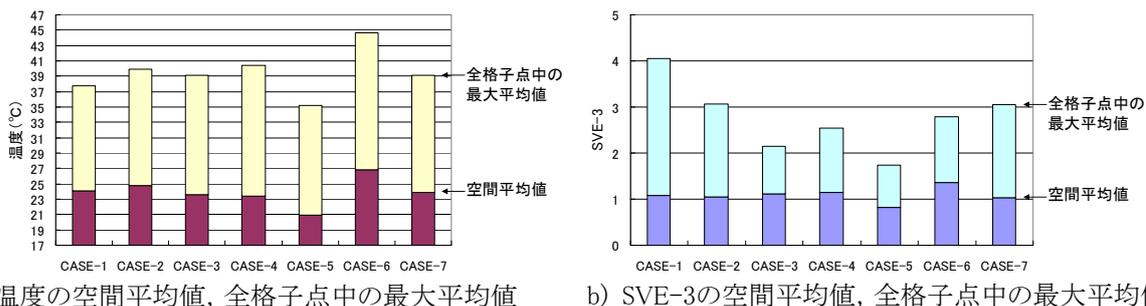
$$\phi = (1 - Rf)^{1/2} \quad (Rf < 0)$$

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

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

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 ($Cs = 0.1$),
 Δ : 格子スケール ($\Delta \equiv (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$),
 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

注: 基礎式の変数は格子スケールでフィルタリングされている



a) 温度の空間平均値, 全格子点中の最大平均値

b) SVE-3の空間平均値, 全格子点中の最大平均値

Fig. 3 各CASEにおける温度, SVE-3の比較
Comparison of Temperature and SVE-3 in each CASE

述)等の値は流れ場が統計的定常状態に達した時点からの時間平均値として計算したものである。

室内の換気性能評価にはSVE-3⁹⁾ (Scale for Ventilation Efficiencyの三番目の指標) およびその室内平均値を用いた。SVE-3は、仮想的なトレーサーを室内一様発生させたときの各点の濃度を瞬時一様拡散濃度で無次元化した値であり、空気齢 (その場所の空気塊が室内に供給されてから経過した時間) を名目換気時間で無次元化した値に等しい。すなわち、室内気流が完全混合状態にある場合には $\langle \text{SVE-3} \rangle = 1.0$ (記号 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均を表す), ピストン流の場合には $\langle \text{SVE-3} \rangle = 0.5$ であり, SVE-3の室平均値により各室の換気性能を定量化できる^{10), 11)}。

2.4 シミュレーション結果

(1) 室内温度およびSVE-3の比較

各ケースについてのシミュレーション結果から各格子点について室内温度, SVE-3の時間平均値を求め, 全格子点の値の平均値, 最大値 (以下それぞれ空間平均値, 全格子点中の最大平均値と呼ぶ) を求めた。結果をFig. 3に示す。吹出し・吸込み方式の違いにより, 換気・空調性能には大きな違いが認められた。特にホットアイル・コールドアイルの考え方に従わないCASE-6では, 換気性能, 空調性能ともに大きく低下することが確認された。床吹出し・天井吸込みとしたCASE-3, CASE-4やサーバラック上部にセパレータを設けたCASE-7も, 特に良好な結果は得られなかった。比較した7種類のうち, 最も良好な換気性能, 空調性能が得られたのは, 天井吹出し・天井吸込みを採用したCASE-5の場合であった。

(2) CASE-1およびCASE-5における温度, SVE-3の空間分布

シミュレーション結果からまとめたCASE-1およびCASE-5における温度分布, SVE-3分布をFig. 4に示す。シミュレーション結果は, コールドアイルの床吹出し口から供給された気流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を示している。ここではパッケージエアコンを部屋の左側に設置した場合を想定しているが, CASE-1の場合, 室内の気流はレターン側に引かれる傾向 (偏流) を示している。このためレターンから遠い部分の気流がよどむ傾向となり, 室内右側端部にはSVE-3が大きな値を示す領域が認められる。

コールドアイルのラック吸い込み面では, 室内上部や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るが, ラックの上部やラック列の端部では, サーバの冷却効率が低下する可能性もあることがわかった。

一方CASE-5では, 天井から供給された気流がコールドアイル内に広がっており, サーバラックの吸込み口に冷房気流を安定に供給できることがわかる。またCASE-5ではよどみも少なく, CASE-1に認められたようなSVE-3の大きな領域は室内に認められなかった。既報¹⁾の考察から, 床吹きを用いたシステムでは, 吹出し風速が過大な場合にも不足した場合にもサーバを冷却する性能が低下する可能性があると考えられる。

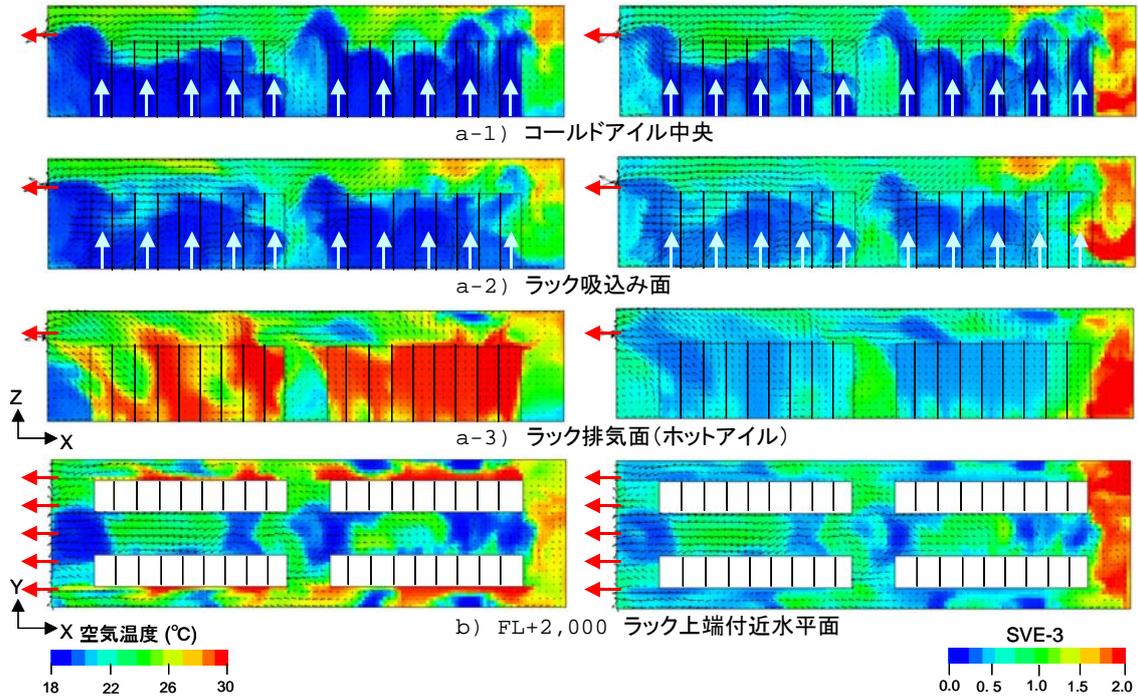
天井吹出しの場合, 吹出し風速が過大であっても, 気流が床面に衝突してコールドアイル内に広がるため, サーバラックの吸込み口に冷房気流を安定して供給できると考えられる。さらに天井吸込みと組合せたCASE-5では, サーバラックからの熱排気を天井面で回収するため, 壁吸込みのように室内上部を高温の排気が通過することがなく, 良好な換気・空調性能が得られたものと思われる。給気側を床吹きとしてレターンのみを天井吸込みとしたCASE-3, CASE-4は, CASE-5ほどの性能を得ていないことから, 良好な換気・空調性能を得るには, 天井吹出し・天井吸込み双方の効果が重要と考えられる (CASE-3, CASE-4では天井吸込みにより熱排をよどみなく回収できるが, 床吹きのためサーバラックの吸込み口に冷房気流を安定に供給する効果が得られていない)。

筆者らは, ホットアイル・コールドアイル方式に天井吹出し・天井吸込みを組合せた空調システムを, コールドアイル内に供給された冷房気流を捕らえるという意味で「Cool Air Capture」と名付けた。本報においても, 以下, 天井吹出し・天井吸込みを採用した空調方式をCool Air Captureと呼ぶこととする。

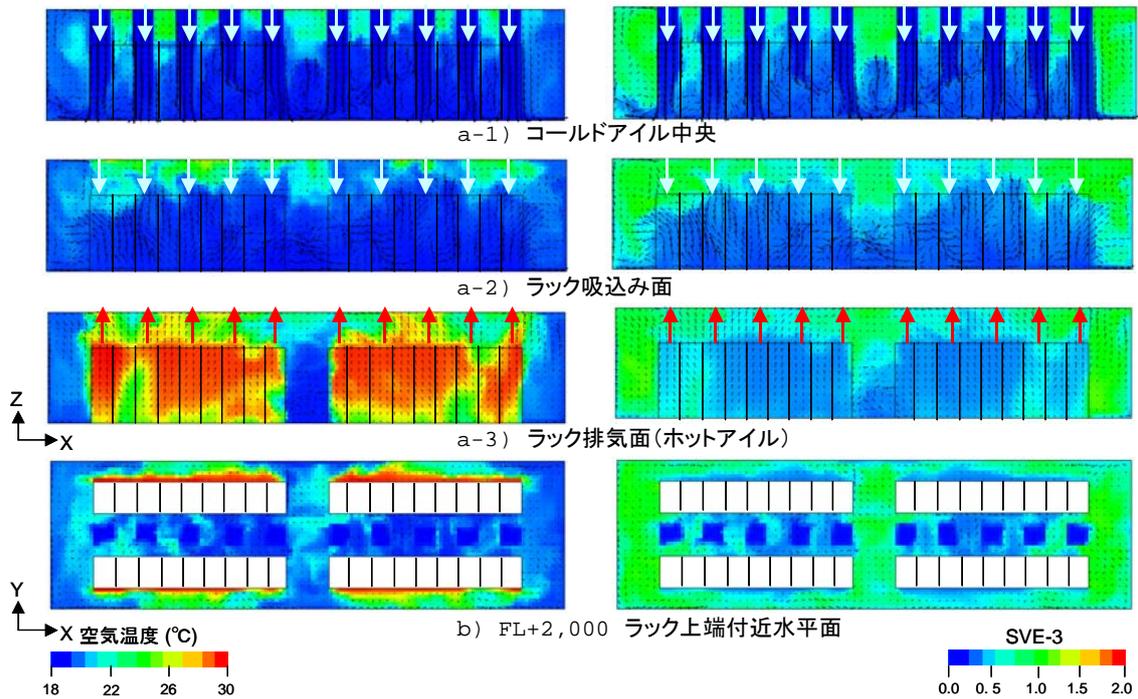
3. 従来方式とCool Air Captureの性能比較

3.1 温度分布等の時間的安定性

Fig. 5, Fig. 6は, 従来方式 (規準モデル: CASE-1) とCool Air Capture (CASE-5) のサーバラックについて三次元的な温度分布の時間変化をそれぞれ示したものである。



(1) 従来方式(CASE-1)の温度分布(左), SVE-3分布(右)



(2) Cool Air Captureの(CASE-5)の温度分布(左), SVE-3分布(右)

Fig. 4 従来方式とCool Air Captureの温度分布, SVE-3分布 (瞬時値)
Temperature and SVE-3 Distributions in Conventional System and in Cool Air Capture

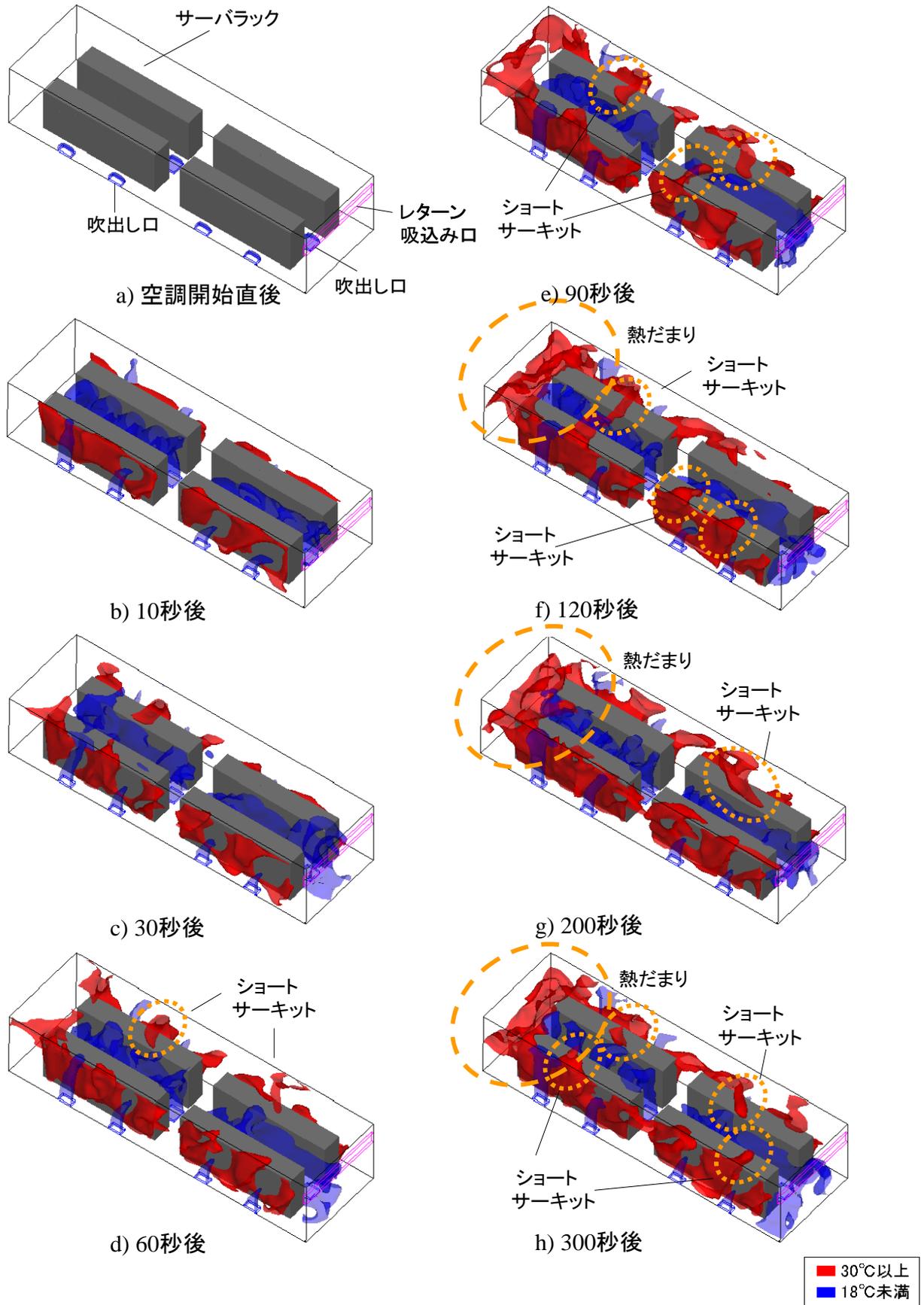


Fig. 5 従来方式における三次元温度分布の時間変化
Time-dependent Change of 3-Dimensional Temperature Distributions in Conventional System

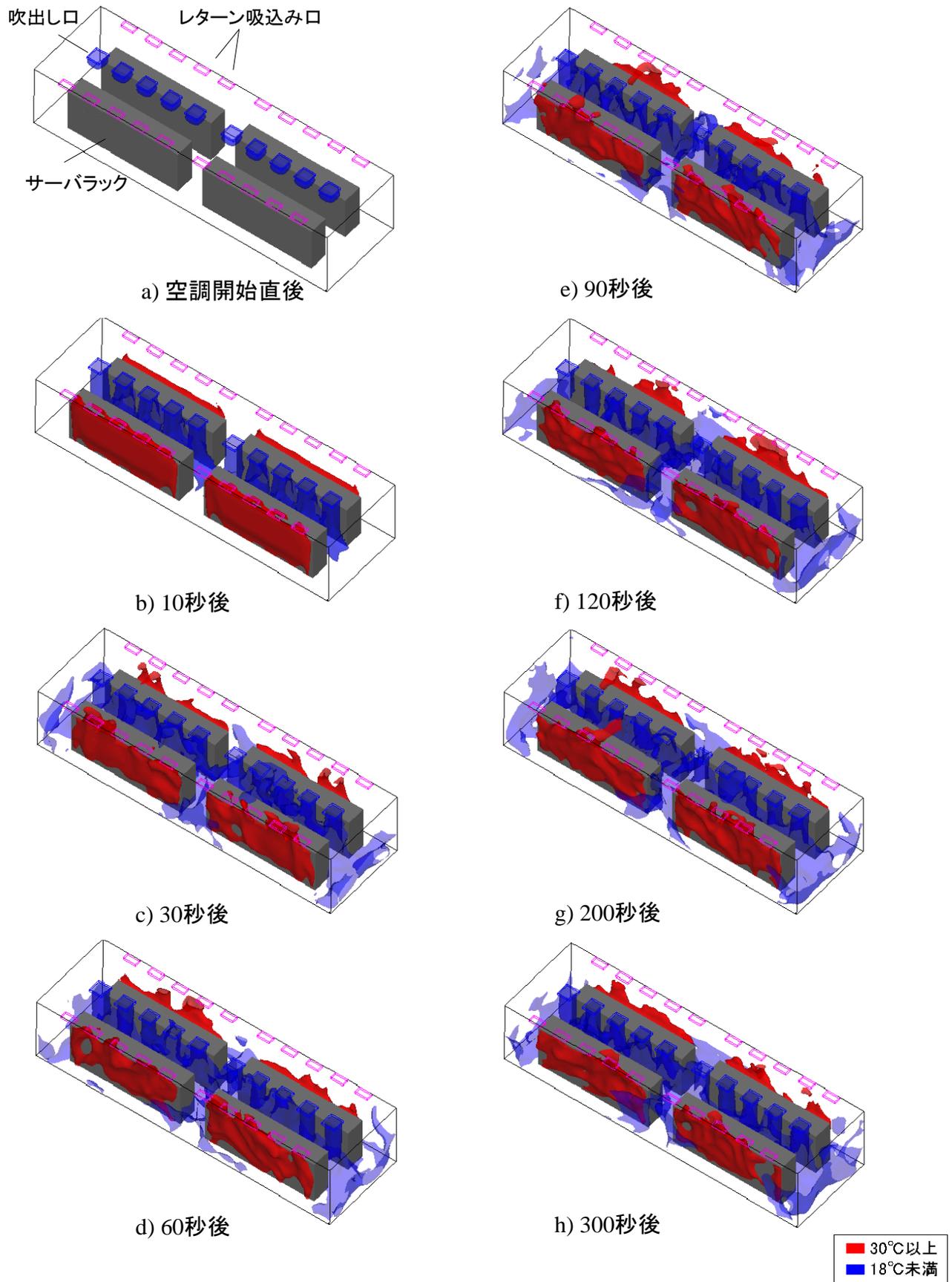


Fig.6 Cool Air Capture における三次元温度分布の時間変化
Time-dependent Change of 3-Dimensional Temperature Distributions in Cool Air Capture

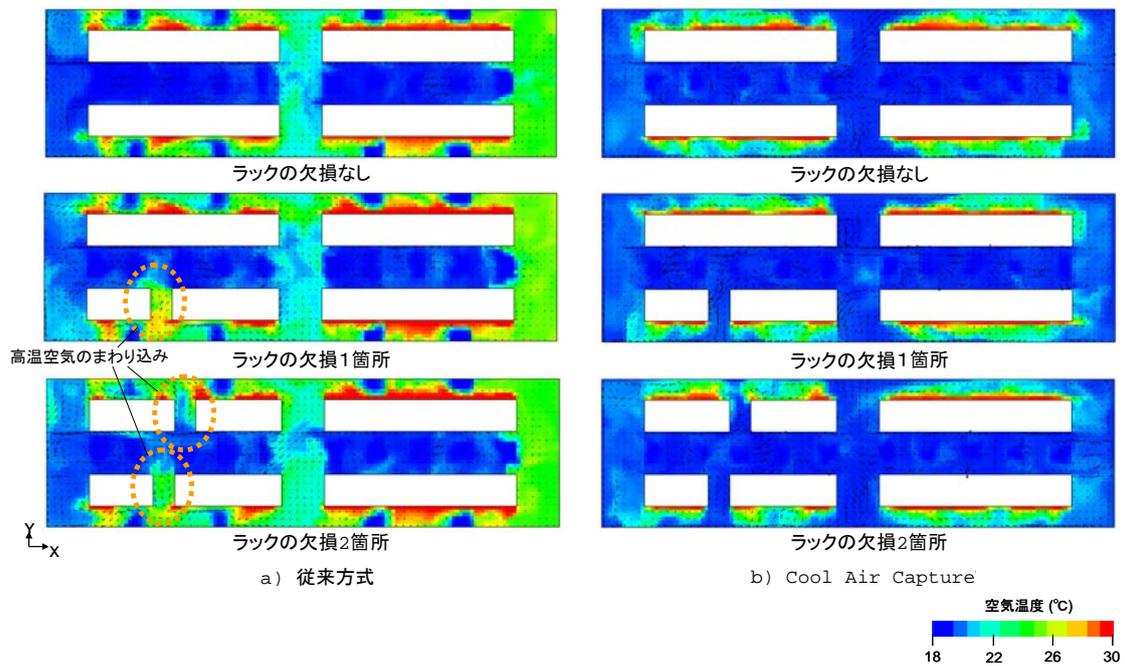


Fig.7 サーバラックが一部欠損したレイアウトでの性能(温度の瞬時値の分布)
Performance of air-conditioning System when some gaps exist between server racks

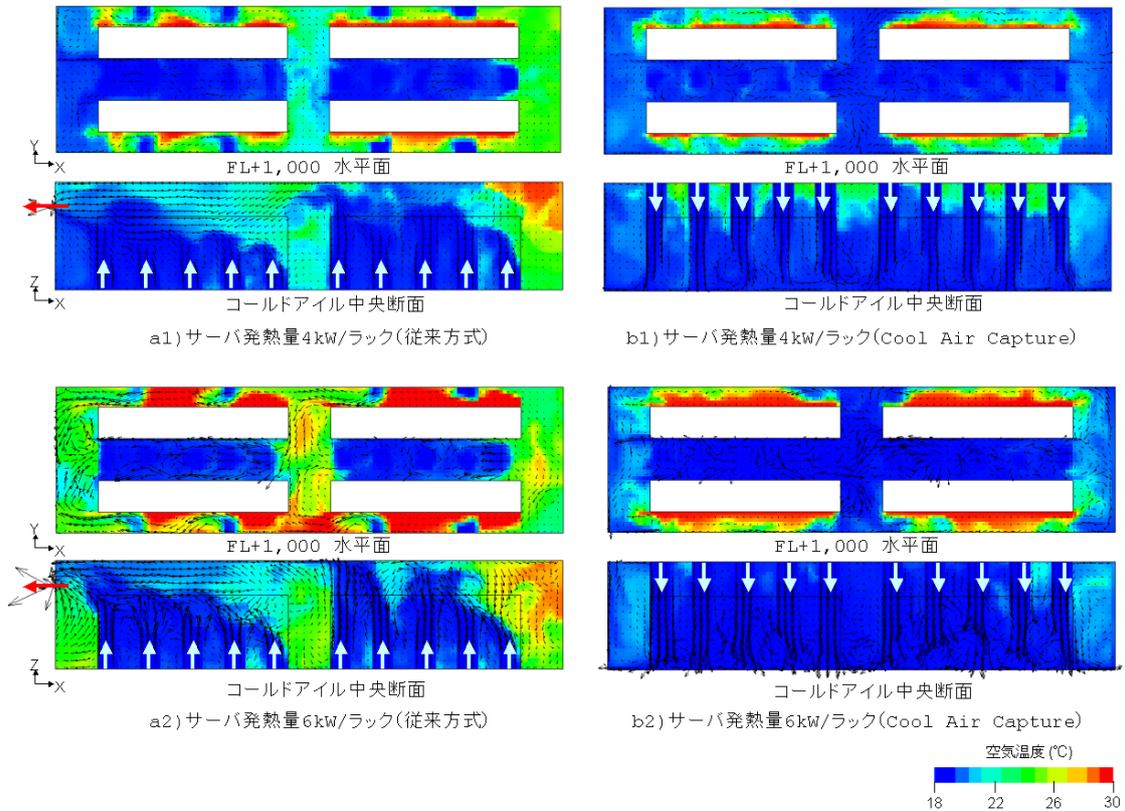


Fig.8 サーバの発熱量が増加した場合の温度分布(瞬時値)
Temperature Distributions in Server Rooms when the Heat Generation from Server Machines was increased

図は、温度分布を18°Cおよび30°Cの等値面で示している。従来方式では、レターンから遠い端部においてFig. 4に見られたような高温領域が認められる。この高温領域はサーバの発熱開始とともに成長し、最終的には天井まで達する熱だまりに発達した。一方、Cool Air Captureの温度分布は安定しており、細かな変動はあるものの温度分布は概ね時間的に変化しないことがわかった。なお、図にはサーバラックの上部を乗り越え、ホットアイルの高温気流がコールドアイル側にショートサーキットする様子が捉えられているが、その発生頻度は明らかに従来方式の方が多かった。

3.2 サーバラックのレイアウトに対する冗長性

Fig. 7は、ラック列のうち一部のサーバラックが欠損した場合についてシミュレーションを行った結果である。従来方式では、ラックの欠損部分においてホットアイルの高温気流がコールドアイル側に流れ込む様子が認められ、コールドアイルの気流温度は若干上昇した。

一方、Cool Air Captureでは、コールドアイルの床に衝突した供給気流が床欠損部分からホットアイル側に広がる流れを生じており、温度分布は比較的安定することがわかった。

3.3 サーバの発熱量増加への対応性

冒頭にも述べたように、最近ではブレードサーバ等の高密度実装方式のサーバマシンが採用される割合も増えており、ラックあたりの発熱量が大幅に増加してきている。従来方式とCool Air Captureについて、ラックあたりの発熱量が増加した場合にどこまでの対応が可能かを検討した。サーバ発熱量を4kW/ラック、6kW/ラックとした場合を想定し、シミュレーションした結果をFig. 8に示す。吹出し温度および室内の空調戻り温度の設計値はこれまでと同様とした。

サーバ発熱量が増加すると室全体の温度制御に必要な循環送風量も増加する。従来方式の場合、一方の壁面に設置されたレターンに室内気流が偏った形となり、レターンから遠いラック端部では、よどみ領域の高温空気がラック吸込み口に回り込んでいることがわかる。この場合、レターンに近い個所の床吹き風速は過剰となり、冷房気流が天井まで到達してそのままレターンから排気されてしまっており、二重の意味で換気・空調性能を低下させる要因となっている。一方Cool Air Captureの場合、サーバの発熱量や室の循環送風量が増加しても気流性状に大きな違いは認められず、サーバの発熱量増加に対しても安定した性能を発揮できると予測される。

4. まとめ

さまざまなサーバールームの空調システムについて熱・気流シミュレーションを実施し、換気性能、空調性能の違いを比較した。その結果、天井吹き出し・天井吸込みを採用し

た空調方式が最も良好な性能を示すことを見出し、このシステムを「Cool Air Capture」と名付けた。検討の結果、本システムはサーバラックのレイアウトに対する冗長性を有しており、発熱量の大きなサーバにも対応できるなど、従来方式に比べ良好な性能を持つことがわかった。

さらに本システムは、床下を配線専用で使用できること、高さの異なるサーバラックにも対応できることなど運用上のメリットも多く、今後さらに最適なシステム構成やレイアウトについて検討していきたいと考えている。

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) 植草, 藁谷, 木下, 三宅: データ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, pp. 1235-1238, (2007).
- 4) 角田, 木下, 金子, 植草: データ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, pp. 1243-1246, (2007).
- 5) 諏訪, 井口: 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, 大林組技術研究所報, No. 72, (2008).
- 6) 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, pp. 505-506, (1992).
- 7) 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, pp. 153-156, (1992).
- 8) 飯塚, 持田, 村上: LESにおける壁面境界条件に関する検討(その1) 速度の壁面境界条件について, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 233-236, (1998), 小杉, 村上, 加藤, 飯塚, 土屋: LESにおける壁面境界条件に関する検討(その2) 熱の壁面境界条件について, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 237-240, (1998).
- 9) 村上, 加藤: 新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法, 空気調和・衛生工学会論文集, 32, pp. 91-101, (1986).
- 10) 諏訪, 名倉, 与謝: クリーンルーム気流性能の評価手法に関する研究(その1) 換気性能指標の導入とその効果-, 第18回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会, 日本空気清浄協会, pp. 240-242, (2000).
- 11) 名倉, 諏訪, 与謝: クリーンルーム気流性能の評価手法に関する研究(その2) 換気性能指標を用いたクリーンルーム設計-, 第18回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会, 日本空気清浄協会, pp. 243-246, (2000).