

データセンターモックアップ試験による空気温度、風向風速分布の確認

森 一顕^{*1}・佐々木 聖弥^{*1}・佐々木 淳嗣^{*2}・高瀬 知章^{*3}・鶴見 祐二^{*4}
藪本 成己^{*2}・小西 崇永^{*5}・内田 祐樹^{*5}

データセンターの省エネルギー性を左右する空調システムの計画に当たっては、CFD が利用されることが多い。データセンターでは熱負荷性状や循環風量などが一般的用途向けの空調と大きく異なることから、精度の検証が必要と考え、その裏付けデータの取得のためモックアップ試験を実施した。壁吹き出し方式を対象としてコールドアイル側を再現し、サーバーラック計6台を設置し模擬負荷を導入した上で、空調吹き出し位置、風量、温度などをパラメータとして計19ケースの試験を実施した。風向風速分布、温度分布の違いからケースごとの特徴が把握された。

キーワード： データセンター、モックアップ試験、温度分布、風向風速分布

1. はじめに

データセンターにおいては、省エネルギー性能が事業性を左右するため、その多くを占める空調計画は重要である。またサーバー保護の観点から温度分布も適正な範囲に管理される必要がある。これらの確保のため、計画時にはCFDにより要求性能を検証しつつ進められることが多い。CFDによる空間温度分布に関する検証事例は多数あるが、データセンターのように一般空調空間と循環風量が大きく異なる空間についての検証事例は多くはない。そのため、実大スケールで各種条件での温度分布・風向風速分布を検証したうえで、CFD解析の今後の解析精度担保が必要と考えた。以上の課題から、本試験では解析の検証に資するデータの取得を目的としてモックアップ試験を実施した。

モックアップ試験の実施にあたり、昨今のデータセンターにおける空調に関する動向、および課題について確認した。昨今のデータセンターでは従来の床吹き出し方式から壁吹き出し方式が主流となっている。空間利用効率や搬送動力低減に優れ、懸念される温度分布についても各種実績から一定水準に収まることが事例を通じて確認されたことによる¹⁾。壁吹き出し方式においては吹出口から近いサーバーにおいて、サーバー隙間を通じてホットアイル側からの逆流現象が問題となる事例が報告されている¹⁾。これはベルヌイの定理により吹出近傍の動圧が大きい空気では、静圧が小さくなることで生じる引き込みの効果による。試験においてはこれらを再現し、解析と突き合わせることで、このような問題予防が可能となる

解析技術を確立することも重要と考える。

以上から、本試験では当社において実績のない壁吹き出し方式でのデータセンターを対象として、サーバー負荷条件、吹出口配置、吹き出し風速等をパラメータとした試験を実施し、温度・風向風速分布を取得しCFDとの突き合わせに向けた基礎データの蓄積を目指し試験を実施する。なお、負荷変動に伴う追従性などもデータセンターの大きな課題であるが、今回の検証では、まずは前述の課題に集中することとして、定常的運用時を対象とした試験とした。本報告では試験データの一部を抜粋して報告する。

2. 試験室概要

本試験は安藤ハザマ技術研究所内、温熱環境施設を用いて実施した。本施設は2023年に改修したもので、屋外環境試験室、屋内環境試験室の2室で構成される。今回の試験ではこのうち屋内環境試験室を利用した。施設概要を写真-1、表-1に示す。写真正面壁に壁吹出口を有し、床面に床吹出口を有する。これらは切り替え利用となり、今回は壁吹出口を利用して試験を実施している。写真左に吸込口を有する。ここから、室外の空調機に戻り、一部排気され、一部外気取り入れされたのち、温湿度調整を経て再び吹き出し、室内空気が循環する。

*1 環境研究部 *2 設備部 *3 建築設計第三部 *4 設備設計部 *5 株式会社関電工 営業統轄本部 施工品質ユニット 空調管工部

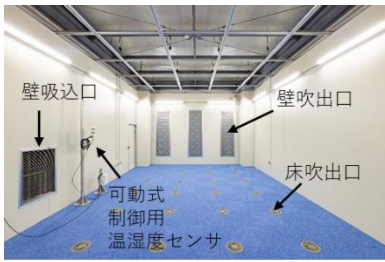


写真-1 屋内環境試験室内観

表-1 試験室概要

室内寸法	: W5.0m × L8.5m × H3.3m
室内空気温度	: 0～40℃
室内空気湿度	: 20～95%RH
隣室室内差圧	: ±100Pa

当該試験室内に模擬負荷、ミキシングチャンバー、送風機など実物大試験設備を構築した。試験室の内観を写真-2に、空気流路概要を併記した試験室の平面を図-1に示す。本試験では、実際に計画されたデータセンターの給気口とサーバーとの関係性について、コールドアイル側、かつ壁面吹出口の直近エリアを再現することを意図し、奥行き方向3台を向い合わせ、計6台のサーバーラックを設置した。その奥にはレタン口（以降RA口と称す）を設置した。サーバーラック内部には、サーバーの発熱や給排気を再現する負荷（以降模擬負荷と称す）を設置した。空調空気は、試験室空調機の北側面壁吹出口より給気され、ミキシングチャンバーを介して試験設備に供給する。写真-3に吹出口を示す。吹出口は3つのグループで構成され、それぞれ切り替えて試験実施できるよう、裏面のシャッターで開閉が可能である。RA口は各種調整を意図し、3面設置したが両側面の2面は実際の試験には利用せず、正面1面のみで試験を実施した。RA口からの戻り空気の一部は空調機へ、一部は天井を介してミキシングチャンバーにて空調吹き出し空気と混合され再び吹出口より供給される。

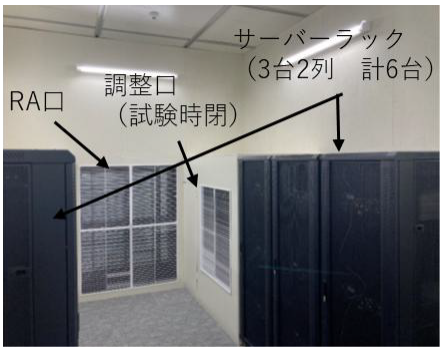


写真-2 試験室内観

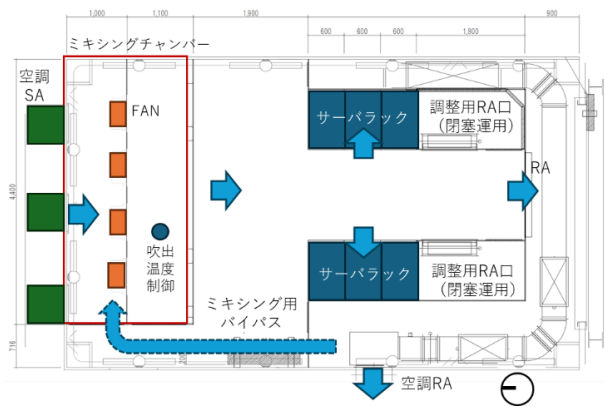


図-1 試験室平面図（空気流路併記）

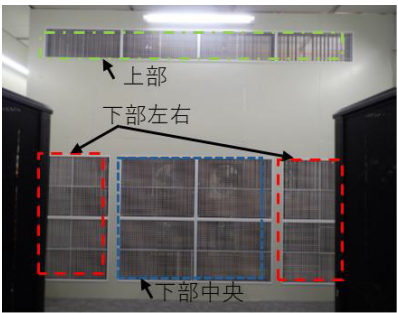


写真-3 試験室内観（吹出口）

サーバーラックの概要を表-2に、内部に設置するサーバーを模擬した負荷の概要を表-3に、それらの外観を写真-4に示す。サーバーラックの正背面はパンチ

表-2 サーバーラック概要

外形寸法	: W 600mm × D 1,001mm × H 1,750mm
パネル取付スペース	: 36U
正背面	: パンチングメタル（開口率83.8%）
パネル側面	: グレーチング開口（試験時閉塞）

表-3 模擬負荷概要

外形寸法	: W 482.6mm × D 213mm × H 130mm (3U)
発熱量	: 850W～2,550W（850W刻み3段階可変）
ヒータ	: シーズヒータ3本内蔵
風量制御	: 344m³/h～836m³/hまで10段階可変式
ファン配置	: 正面側に3台配置



写真-4 サーバーラックおよび模擬負荷

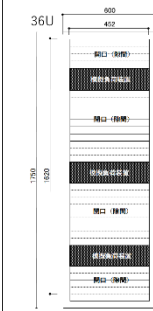
ングメタル，側面は一部グレーチング開口を有する鋼製パネルにて構成されている．試験時には側面開口は別途シートにて閉塞した．

3. 試験概要

3.1 試験ケース

本試験では，空調吹出温度，ミキシングチャンバーから室内への供給風量（以降循環風量と称す），模擬負荷の発熱量（以降サーバー負荷と称す）やその配置，ラックを含む閉塞の程度（以降開口率と称す）などを検討パラメータとして，19 ケースの試験を実施した（1 ケースは中止）．全ケースの設定条件について表－4 に示す．各々のケースにおける定常時の空間の温度分布，および風向風速分布を測定し特徴を把握した．各パラメータについては，以下の通り調整した．循環風量は，屋内試験室に具備する空調機ファンと，ミキシングチャンバー内に設置した有圧扇各々の回転数をインバーターにより制御し調整した．その際，風量と設定周波数の関係を事前に確認調整の上，4 水準を実施した．空調吹出温度については2 水準とし，その制御は，試験室の可動式制御用温湿度センサをミキシングチャンバー内に設置し，試験室の空調機吹き出し温度を自動制御し，チャンバー空気温度が所定温度とすることで調整した．ラック開口率については0%，10%，30%，100%の4 水準を設定している．なお，この数値は暫定的に設定した目安のため注意されたい．ここでの開口率は，サーバーラック正面のパンチングメタルを指すものではなく，ラック格納部自体の正面のうち模擬負荷部分を除いた開口状況を指すものである．具体的にはラック間のブランクパネルやその

表－5 サーバーラック開口率

開口率100%	開口率30%	開口率10%	開口率0%
2Uの模擬負荷3台設置以外のスペースはすべて開口	36Uのスペースのうち8U分の開口とし他にブランクパネル設置	全スペースをブランクパネル設置	ブランクパネル閉塞間、外周隙間をテープ止め
			

他隙間ふさぎ状況により設定しており，その条件は表－5 に示す．空調吹出口位置については，写真－3 に示す3 ケースを設定した．いずれのケースも開口面積は等しい．サーバーラックの発熱量および排気量についても2 水準，各々の模擬負荷の稼働・停止の配置設定についても5 ケースを設定しているが，本報では紙幅の関係からこれらの紹介・考察は割愛する．

3.2 計測概要

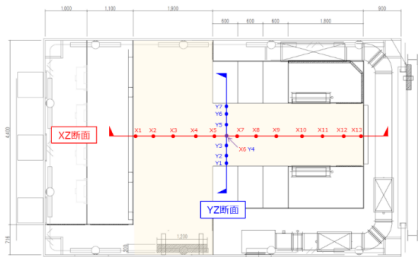
本計測は，まず機器をケースごと定められたように設定し，定常状態となるまで稼働し，その後空間内の温度，風向風速を移動計測により把握した．給排気口温度など位置固定での温度計測も100 点ほど実施しているが本報では割愛する．測定に供した機器を表－6 に示す．定常状態は，空調 RA の温度の変化が十分小さい（おおむね10 分で±0.2K）ことで判定した．定常判定後，移動計測を開始した．その際はボールを用い，平面的には図－2 に示す鉛直方向2 断面を対象として長辺方向13 点，短辺方向7 点を測定した．高さ方向については，温度測定について300 mmピッチで10 点，風向風速について700 mmピッチで4 点を測定した．温度計測においては，応答性に鑑み，移動後1 分経過後の温度を計測結果として採用し，風向風速については乱流の影響に鑑み移動後30 秒の平均値を結果として採用した．定常判定と移動計測中のRA 空気温度の推移の例としてケース2 の結果を図－3 に示す．移動計測にはおおむね2 時間を要すが，いずれのケースも本結果同様，温度はおおむね安定していた．

表－6 測定機器

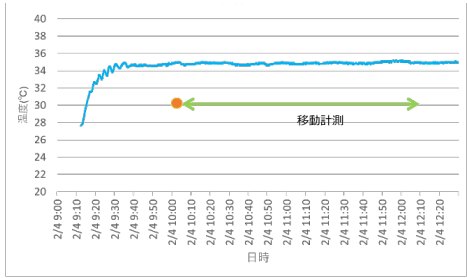
風向風速計：WA-790 3次元超音波風向風速計（カイジョー社）
温湿度計（移動計測）：TR-72 W-S（T&D社）
空間内温度計：T型熱電対 φ0.32
データロガー：LR8532（横河電機社）

表－4 試験ケース

Case名	循環風量 [CMH]	吹出空気 温度 [℃]	想定発生 負荷 [kW]	制気口 開口位置	CM位置	ラック 開口率 [%]	サーバー設定				
							負荷 発生位置	稼働台数 [台]	単体負荷 [W]	総負荷 [kW]	ファン風量 [CMH]
Case1	32,000	31.2	30.3	下部中央	ラック前	0	A	18	1.70	30.6	344
Case2	32,000	31.2	30.3	下部中央	ラック前	10	A	18	1.70	30.6	344
Case3	32,000	31.2	30.3	下部中央	ラック前	30	A	18	1.70	30.6	344
Case4	32,000	31.2	30.3	下部中央	ラック前	100	A	18	1.70	30.6	344
Case5	32,000	31.2	30.3	下部中央	ラック前	10	A	18	1.70	30.6	344
Case6	32,000	31.2	30.3	下部左右	ラック前	10	A	18	1.70	30.6	344
Case7	32,000	31.2	30.3	上部	ラック前	10	A	18	1.70	30.6	344
Case8	32,000	24.0	15.3	下部中央	ラック前	10	B	6	2.55	15.3	504
Case9	32,000	24.0	15.3	下部中央	ラック前	10	C	9	1.70	15.3	344
Case10	32,000	24.0	15.3	下部中央	ラック前	10	D	6	2.55	15.3	504
Case11	32,000	24.0	15.3	下部中央	ラック前	10	E	6	2.55	15.3	504
Case12	4,619	24.0	15.3	下部中央	ラック前	10	B	6	2.55	15.3	504
Case13	4,619	24.0	15.3	下部中央	ラック前	10	C	9	1.70	15.3	344
Case14	4,619	24.0	15.3	下部中央	ラック前	10	D	6	2.55	15.3	504
Case15	4,619	24.0	15.3	下部中央	ラック前	10	E	6	2.55	15.3	504
Case16	4,619	24.0	15.3	下部左右	ラック前	10	C	9	1.70	15.3	344
Case17	4,619	24.0	15.3	上部	ラック前	10	B	6	2.55	15.3	504
Case18	10,300	24.0	30.3	下部中央	ラック前	10	A	18	1.70	30.6	344
Case19	7,700	24.0	30.3	下部中央	ラック前	10	A	18	1.70	30.6	344
Case20	4,619	24.0	30.3	下部中央	ラック前	10	A	18	1.70	30.6	344



図－2 温度・風向風速分布測定点



図－3 空調RA 空気温度

4. 測定結果

4.1 ラック開口率による影響

ラック開口率のみ異なる Case1 から Case4 についての

温度コンターを表－7、表－8に示す。いずれのケースについても 31℃から 32.2℃の範囲で、ケース間の差はわずかである。サーバーラック台数が増加した場合の影響は別途検討が必要と考えるが、本試験においてはコールドアイル側空気温度分布にサーバーラック開口率が与える影響は小さいことが確認された。

表－9に模擬負荷の吸い込み温度，および回り込み率を示す。回り込み率は文献2)を参考に①式にて与えた。

表－9 模擬負荷吸い込み温度と回り込み率

	Case1	Case2	Case3	Case4
吸込温度 (°C)	31.7	31.4	31.7	32.1
回り込み率 (%)	0.5	0.3	0.7	1.8

$$C = \frac{T_s - T_c}{T_e - T_c} \times 100 \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで

C: 回り込み率 (%)

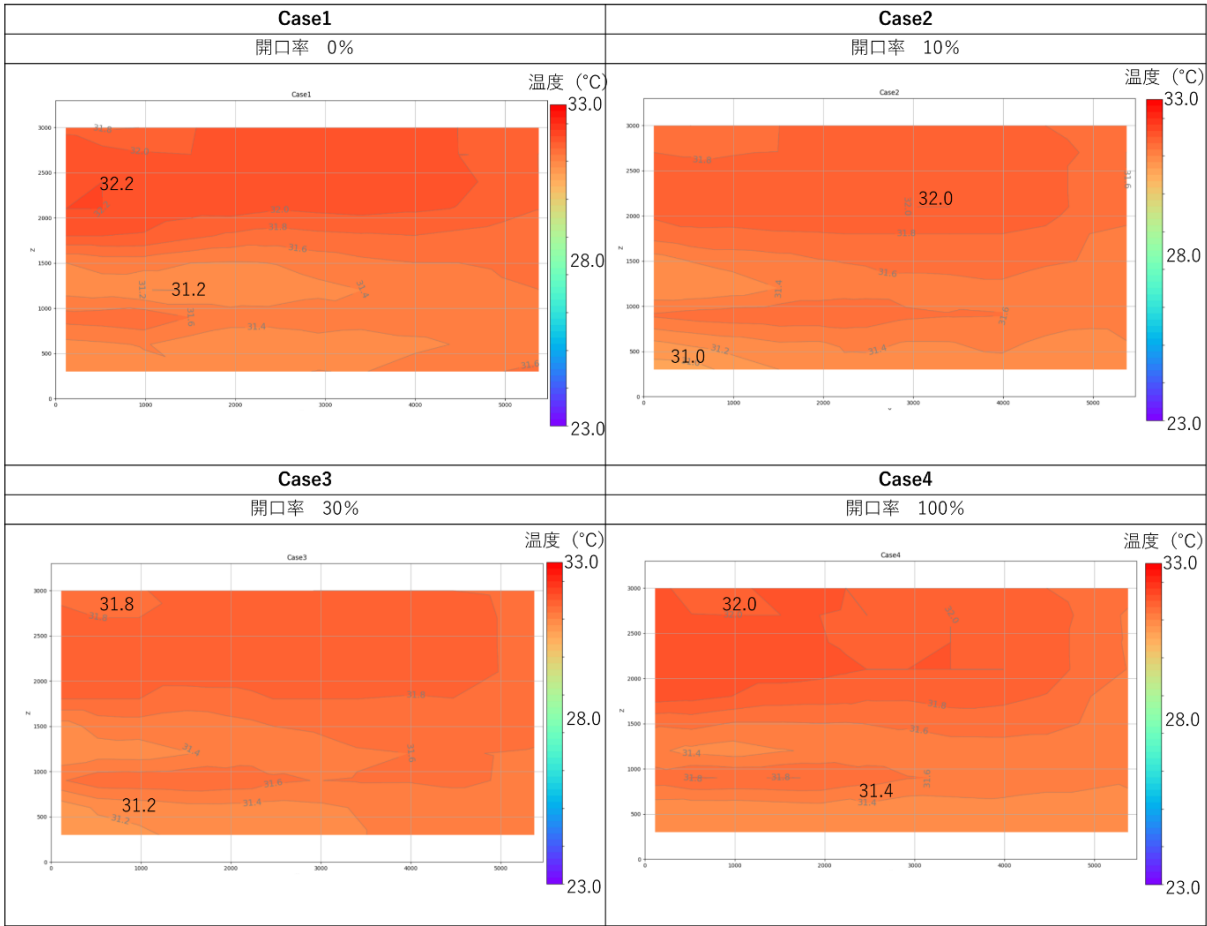
Ts: 模擬負荷吸込温度 (°C)

(短辺断面測温度分布測定時の模擬負荷直近温度を利用)

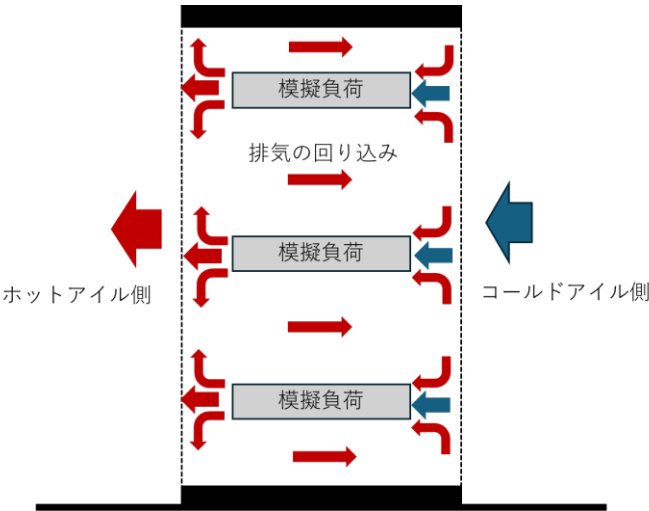
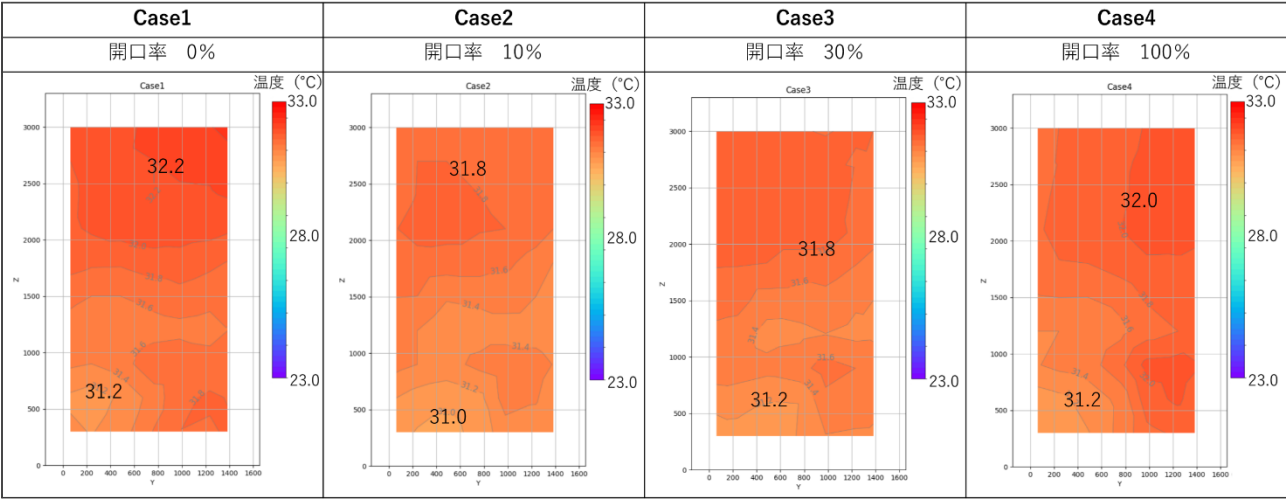
Te: 模擬負荷排気温度 (°C)

Tc: コールドアイル温度 (°C)

表－7 長辺方向鉛直面温度コンター



表－8 短辺方向鉛直面温度コンター



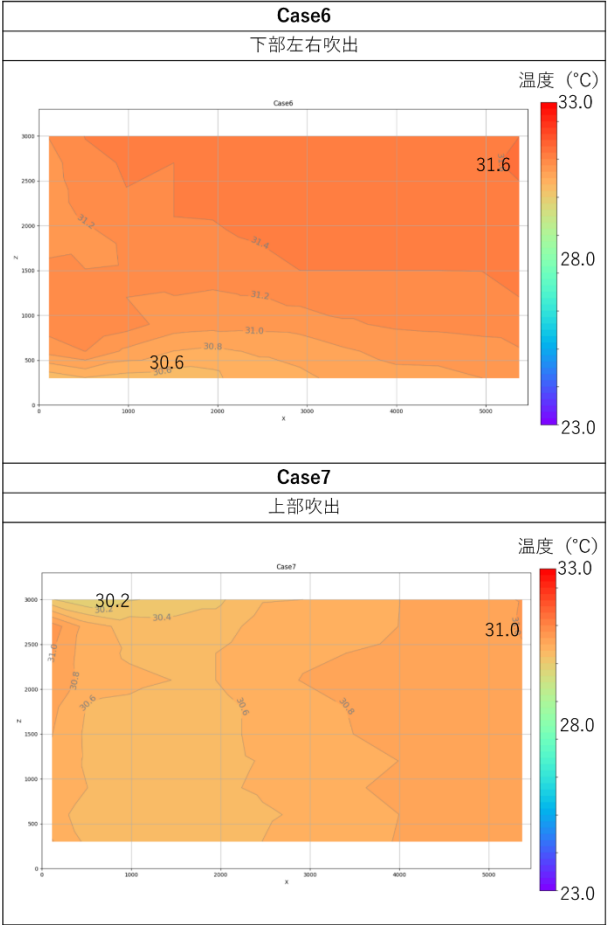
図－4 模擬負荷排気の回り込み

Case1 から Case3 の吸い込み温度は 31.4 ～ 31.7℃ とラック近傍のコールドアイル温度と同程度であるのに対し、Case4 では温度上昇が確認されている。これはサーバーラック内部で模擬負荷排気空気が回り込んでいる影響と考えられる。図－4 に断面模式図を示す。コールドアイル温度とサーバーの吸い込み温度が異なる可能性があり実運用においても留意が必要であること、サーバーラック内にてブランクパネル等で閉塞し開口を小さくすることの重要性が確認された。

4.2 吹出口位置による影響

吹出口位置のみ異なる Case2, 6, 7 の結果について、既出の Case2 を除く Case6, 7 の長辺方向温度コンターを表－10 に、Case2, Case6, Case7 の風向風速分布を表－11 にそれぞれ示す。Case6 温度分布は 30.6℃ から 31.6℃ で分布しており、Case2 と比べてやや低温となっている。上下方向に温度層を形成している分布性状については

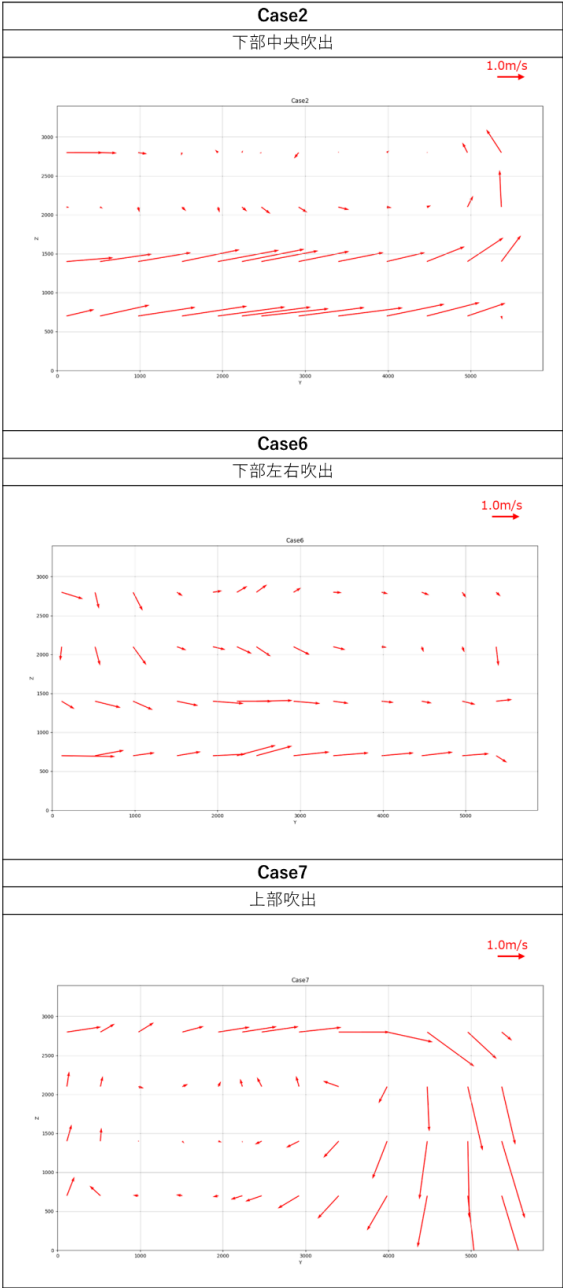
表－10 長編方向鉛直面温度コンター



Case2 と近い。一方 Case7 については 30.2℃ から 31.0℃ と Case6 よりもさらに低温となっている。温度分布については水平方向に分布しており、Case2, 6 と性状が異なる。

風向風速分布では Case2 が下部中央吹き出しの影響で低位で風速が大きく、RA 口に向かう様子が確認される。やや低温の吹き出し空気が直接 RA 口に向かう傾向によ

表－11 長辺方向鉛直面風向風速ベクトル



り、室全体の温度が他のケースよりやや高い結果となったと考えられる。一方 Case7 では低温空気が上部より吹き出し、対向する壁面に当たったのち循環流が生じている。吹き出し空気が室内に拡散されることで室内空気の温度が他のケースと比べ、やや低い傾向を示したと考えられる。本結果の性状をCFD等で再現したのち、実際のサーバーラック数での解析を進めることで、データセンターの省エネルギーにつながる給排気口位置の検討が可能となると考えられた。

5. おわりに

本報ではデータセンターのCFD解析の検証に資するデータの取得を目指し実施したモックアップ試験の結果を報告した。各種パラメータによる特徴などが確認された。今後それらを解析上で再現し、精度の向上、裏付けを進める予定である。データセンターにおける空調システムの解析精度、信頼性の向上を通じてデータセンターの省エネルギー、さらには省CO2へつなげるよう引き続き取り組む予定である。

文末となりましたが本試験にご協力いただきました株式会社 関電工各位に記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 三野洋介ら、データセンタの壁吹出し空調方式における空調風量が装置冷却に与える影響、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2016 鹿児島
- 2) 津田晃宏ら、データセンタにおけるブランクパネル閉塞率とラック内温度環境に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2016 鹿児島

Measurement of air temperature and airflow distribution using a data center mockup

Kazuaki MORI, Seiya SASAKI, Atsushi SASAKI, Tomoaki TAKASE, Yuji TSURUMI,
Naruki YABUMOTO, Takahisa KONISHI and Yuki UCHIDA

When planning an air conditioning system, which determines the energy efficiency of a data center, CFD is often used to verify the plan. Because the heat load characteristics and circulating air volume of a data center are significantly different from those of air conditioning for general use, it was deemed necessary to verify accuracy, and a mock-up test was carried out to obtain supporting data. For the wall-air outlet system, the cold-aisle side was reproduced, and a total of six server racks were installed and a simulated load was introduced. A total of 19 cases of tests were carried out, with parameters such as air conditioning outlet position, air volume, and temperature. The characteristics of each case were identified based on differences in wind direction and speed distribution and temperature distribution.