

東京大学情報基盤センターにおける計算機室の空調環境最適化

平野光敏*¹, 三浦藤明*¹, 石崎勉*¹, 大日方一男*¹

小澤芳幸*², 高橋正勝*³

*¹ 東京大学情報基盤センター

*² 株式会社日立製作所

*³ 株式会社日立インフォメーションテクノロジー

1. はじめに

近年、コンピューター機器は性能向上と大規模化に伴い、発熱量の増加が著しい。したがって、このようなコンピューター機器を導入している計算機室の総発熱量も非常に大きくなる。計算機室の空調システムは、この大きな熱を冷却するために、計算機室専用に設計された空調機を複数台連動させ、常にその冷却能力の合計が発熱量を上回るように、かつ個々の空調機に均等に負荷を分散させて各々の冷却能力をオーバーしないように制御する必要がある。概して簡単に思われがちな空調システムだが、大規模な計算機室では空調機の台数が増えれば増えるほど安定な運用が難しくなる。

本稿は、約一年をかけて行ってきた東京大学情報基盤センターにおける計算機室(以降、本計算機室と呼ぶ。)の空調環境の最適化について述べる。

2. 計算機室の概要

本計算機室は、フリーアクセス床を用いた二重床構造をしており、フリーアクセス床下に向かって冷風を吹き出す床下空調方式の空調機を採用している。

図1に本計算機室に導入しているコンピューター機器と空調機のレイアウトを示す。また、コンピューター機器と空調機の仕様を表1に示す。

本計算機室に設置されているコンピューター機器はベクトル並列型スーパーコンピューターSR8000、大型汎用コンピューターMP5800/320、RAID (Redundant Arrays of Independent Disks)、および MTL (Magnetic Tape Library)と端末などである。これらコンピューター機器は床下空調を必要とし、コンピューター機器の入気温度仕様は 16~22°Cである。

空調機は室内据え付けタイプの PAC1-1, PAC1-2, PAC2-1, PAC2-2, PAC2-3 と建屋の地下(本計算機室は 2 階にある)に設置した空調設備からダクトで冷風を送るタイプの AC1, AC4 の合計7台である。これら7台の空調機で本計算機室の空調を行っている。

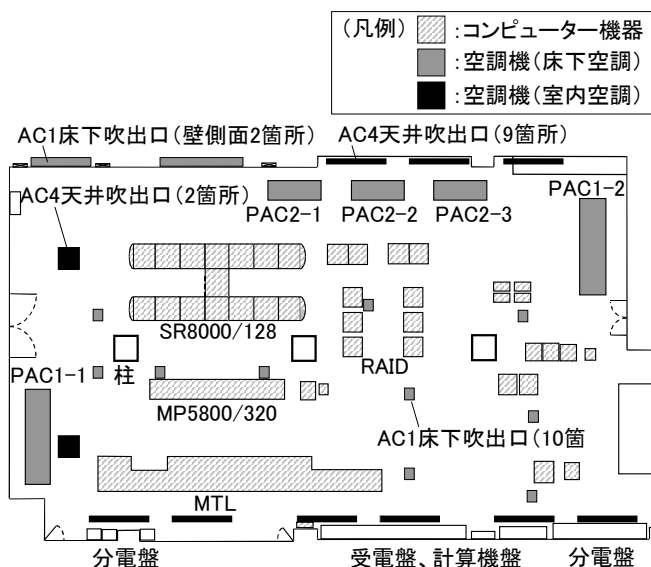


図1 計算機室のレイアウト

表1 コンピューター機器と空調機の仕様

分類	装置名	台数(台)	1台あたりの仕様	
			発熱量(kW)	冷却能力(kW)
コンピューター機器	SR8000/128	1	242~327 ^{*1}	-
	MP5800/320	1	8.2	-
	RAID	6	2.7	-
	MTL	1	13	-
空調機器	PAC1-1, PAC1-2	2	-	78
	PAC2-1, PAC2-2, PAC2-3	3	-	43
	AC1	1	-	234
	AC4	1	-	52
合計			289~364	571

*1: 242kWは本センターでの運用状態における発熱量を、327kWは装置仕様の発熱量を示す。

(注) 発熱量が1kW以下の装置は、全体の発熱量に比べて少ないため省略した。

3. 空調環境の最適化

本計算機室は、コンピューター機器の総発熱量の大部分をSR8000 の1システムで占めるという特徴がある。このような熱源の偏存は、熱源に近い空調機に熱負荷が集中し、遠い空調機に熱負荷が少なくなるなど、それぞれの空調機が冷却能力を十分に発揮できないことがある。そのため、表1のようにコンピューター機器の最大の発熱量 364kW に対し、大きな冷却能力 571kW を用意し、熱負荷のばらつきにも対応できる空調環境で計算機室を運用してきた。

一方、SR8000 は CMOS ロジックを用いたコンピューターであることから、処理するジョブによって発熱量が大きく変化する。そのため、計算機室には常に最大の発熱量 364kW があるというわけではない。そこで、省エネルギー化をも考慮して、日々の運用状態における発熱量 289kW に適した冷却能力となる空調機の運転台数での運用を行うことを考えた。

本章では、コンピューター機器の発熱量に適した空調機の運転台数での運用に至るまでについて述べる。

3.1 空調環境の検討におけるシミュレーションの適用

計算機室の最適な空調環境を実現するためには、計算機室の構成や導入しているコンピューター機器、並びに空調機のレイアウトをよく考えて設計しなければならない。また、その設計の確認には、試行と評価を繰り返すという作業が必要となり、それにはかなりの時間と費用がかかる。しかし、最近ではこの試行を行わずシミュレーションによる方法が行われるようになってきた[1][2]。

そこで、本センターでは、このシミュレーションによる方法により計算機室環境の改善を図ることを考え、日立製作所にソフトウェア(呼称:AirAssist)*¹による解析を依頼した。このソフトウェアを用いることにより、計算機室内の風速、温度、および湿度を計算機上で解析することが可能となる。

具体的には、

- (1) 室内の最適な機器レイアウト設計を支援し、空調のための消費電力を抑えられること。
- (2) 計算機室内の空調が適切に制御できない状態に至った場合には、その状態をシミュレーションにより再現し、原因究明と対策を支援することが可能であること。
- (3) 最適な空調環境の絞込みが可能となり、シミュレーション結果の確認評価を行うことだけで最適な空調環境を実現することが可能となるため試行時間を大幅に短縮できること。

などである。

3.2 空調環境のシミュレーションによる検討

まず、上記ソフトウェアにより、本計算機室においてのコンピューター機器の総発熱量に対する空調機の運転台数の最適化を検討することにした。

目標は、

- (1) 空調機の複数台停止。
- (2) 一定期間ごとの停止空調機ローテーション。
- (3) グリル板の配置*²による最適な風向と温度制御の実現。

である。

最適化実施前の計算機室の状態について行ったシミュレーション結果を図2に示す。

図2(a)は最適化実施前のグリル板の配置である。これを見て分かる通りグリル板の位置がSR8000 に最も近いPAC2-1の前に集中している。これは、PAC2-1、PAC2-2、PAC2-3の3台を動かした場合のシミュレーション結果に基づいているが、負荷がかかると思われるPAC2-1の負荷を軽減するためである。

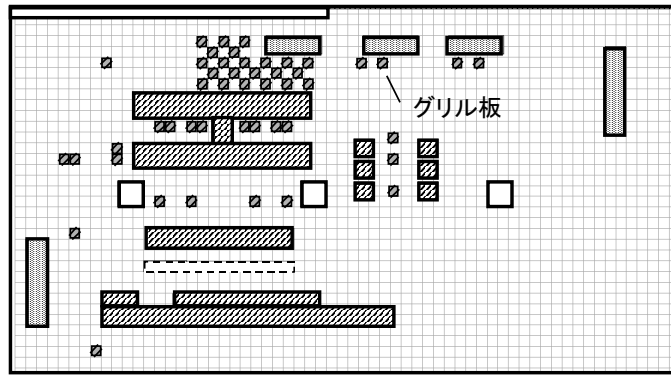
図2(b)はフリーアクセス床下20cmの温度分布と空調機の稼働率*³である。この図により空調機が設定温度20℃(AC4は23℃)の冷風を正確に吹き出し、フリーアクセス床下の温度も20℃均一であることがわかる。また、空調機の稼働率はすべて100%以内で極端な偏りもなく、冷却能力に十分な余裕があることがわかる。

図2(c)に室内(フリーアクセス床上150cm)での温度分布を示す。SR8000の周辺一部が約32℃となる以外は、部屋全体では約23℃である。以上より偏在した熱負荷に対し、十分な冷却能力があると言える。

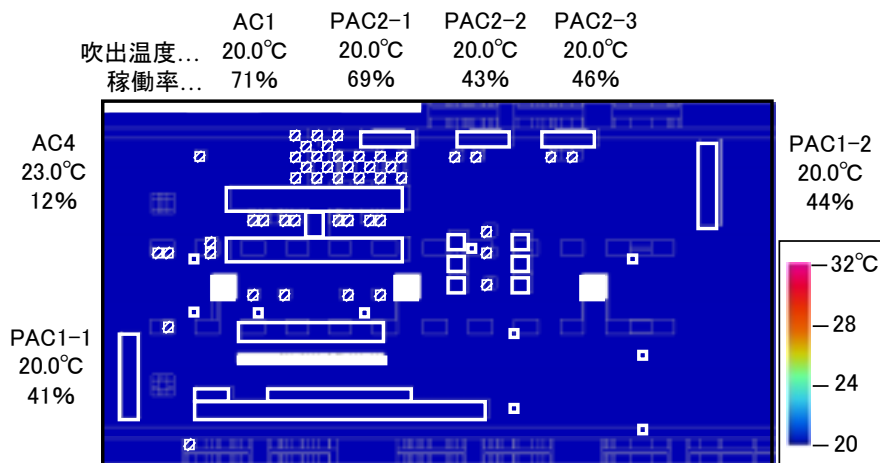
*1: 計算機室を3次元のメッシュ状に分割し、有限体積法を用いた流れと熱の解析を行うソフトウェア

*2: フリーアクセス床下の冷風を室内に導くメッシュ状の床板

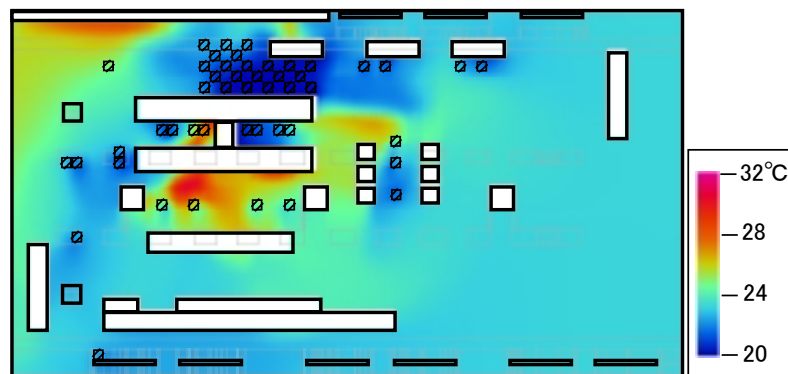
*3: 空調機の冷却能力仕様を100%としたときの冷却能力仕様と運転時の冷却能力との比



(a) グリル板の配置



(b) フリーアクセス床下 20cm の温度分布



(c) 室内 (フリーアクセス床上 150cm) の温度分布

図2 最適化実施前の運用状態における空調環境の解析結果

冷却能力に十分な余裕があることが分かったので、次に空調機 PAC2-1, PAC2-2, PAC2-3 の運転停止を考え、様々なパターンのシミュレーションを行った。

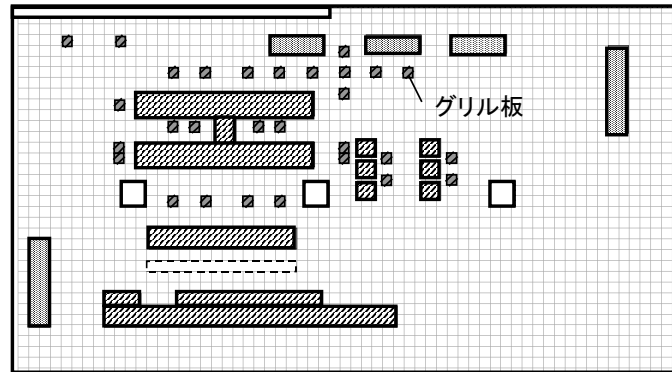
まず、空調機1台を停止した場合のシミュレーションを行ったが、これについては特に問題がなかった。次に空調機2台を停止した場合のシミュレーションを行った。図3は空調機 PAC2-1, PAC2-3 の2台を停止した場合のシミュレーション結果である。図 3(a)はこの状態でのグリル板の配置を表しているが、ご覧の通りグリル板の位置が空調機3台を動かした時と違っている。これは、空調機2台を停止した場合の最適なグリル板配置をシミュレーションにより求め、それに従ったためである。

図3 (b)はこのグリル板配置で、PAC2-1, PAC2-3 の2台を停止した時のフリーアクセス床下 20cm の温度分布と空調機の稼働率である。この図により、空調機が設定温度 20°C (AC4 は 23°C) の冷風を正確に吹き出し、フリーアクセス床下の温度も 20°C 均一であることがわかる。また、空調機の稼働率はすべて

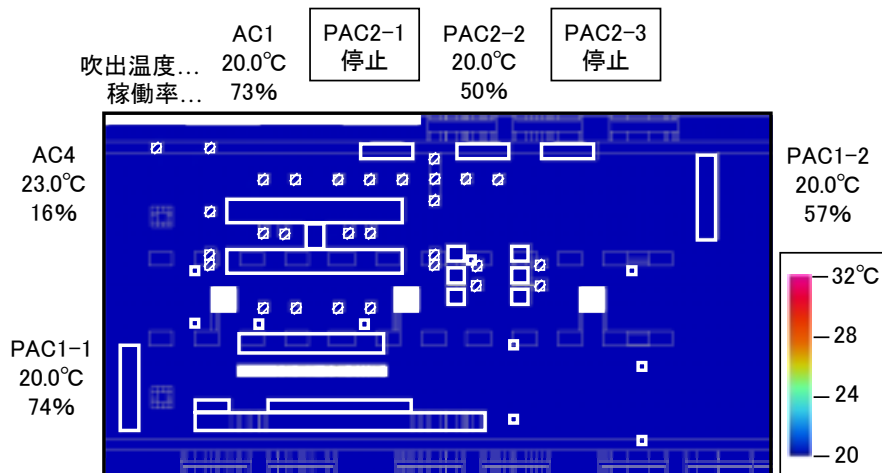
100%以内であり、極端な偏りもない。また、図3(c)は室内(フリーアクセス床上 150cm)での温度分布であるが、計算機室の左上周辺が約 30℃とやや高いほかは、部屋全体では約 25℃と安定しており入室者が不快と感じるような低温部は生じていない。

以上のことから、本計算機室は空調機2台を停止した場合の冷却能力においても最適な温度に制御できる空調環境であるという解析結果を得た。

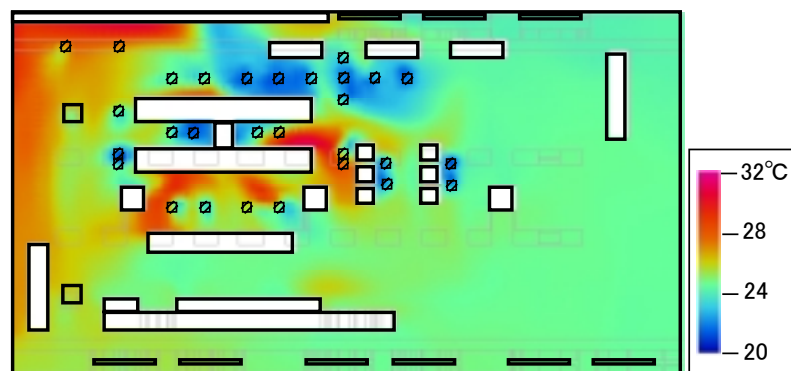
では、空調機3台を停止した場合はどうか。図4は空調機3台を停止した場合のシミュレーション結果であるが、図4(b)のようにSR8000 本体中央の床下に入気温度仕様の上限22℃を超える高温部が生じてしまっている。これは、床下に空調機から送り出される十分な風がなく、近くのグリル板から室内の空気を吸い込んでしまっているからである。したがって、空調機 3 台停止するのは無理と判断した。



(a)グリル板の配置

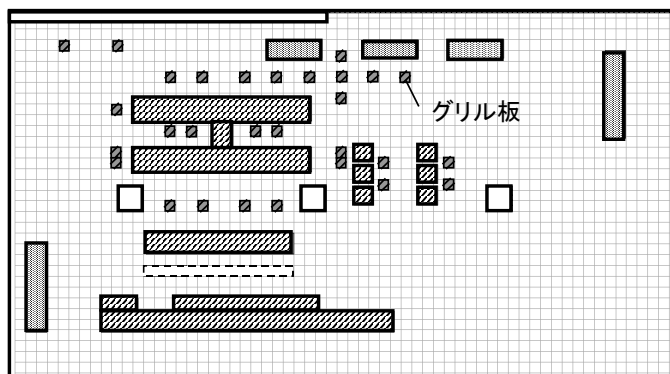


(b)フリーアクセス床下 20cm の温度分布

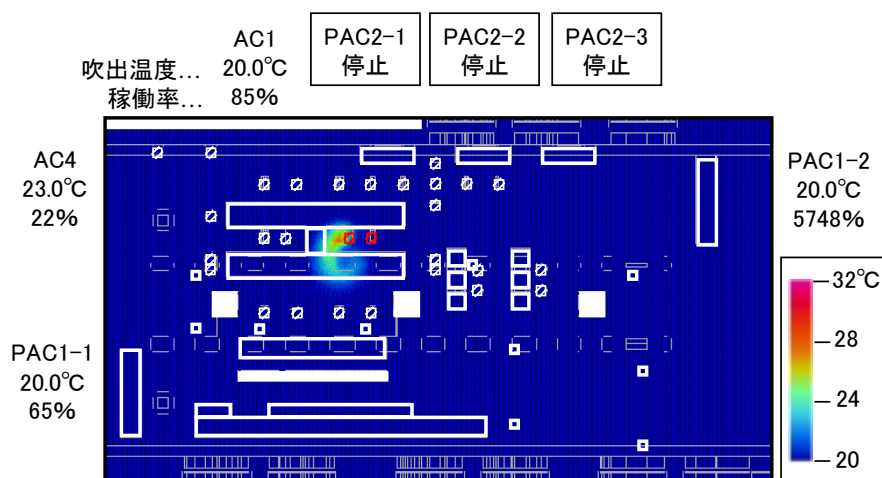


(c)室内(フリーアクセス床上 150cm)の温度分布

図3 PAC2-1, PAC2-3 の2台を停止し、グリル板を最適にした時の空調環境の解析結果

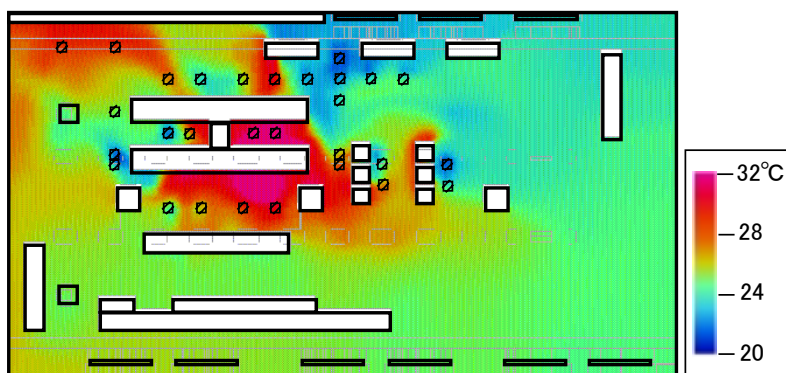


(a)グリル板の配置



(注) 赤色のグリル板は、室内の空気が床下に流れ込むことを示す。

(b)フリーアクセス床下 20cm の温度分布



(c)室内(フリーアクセス床上 150cm)の温度分布

図4 PAC2-1, PAC2-2, PAC2-3 の3台を停止した時の空調環境の解析結果

3.3 空調環境の実測評価による確認

次に、シミュレーションで求めた空調環境が実測においてはどうかということを確認するために、本計算機室のフリーアクセス床下と室内の温度分布を測定した。

(1) 最適化実施前の計算機室の空調環境

まず確認に先立ち、本計算機室においての空調機の吹出温度と設定温度には差があることが当初より分かっていたので、この差を取り除くことから始めた。

本計算機室における空調機のセンサーの位置は、以前は良しとされていたコンピューター機器の近くの

床下にしていたが、空調機が増えるにしたがい各空調機から来る風の干渉が起こるようになり自身が吹き出した風を自身のセンサーで検出できなくなるという現象が起きてしまった。そこで、今回、このセンサーの位置を空調機の吹出口近くに移動し、空調機の吹出温度を確実にセンサーで検出し制御できるように変更した。

図5に空調機のセンサーの設置位置を変更する前と後の位置と空調機の吹出温度の測定結果を示す。図5(a)のように、センサーの設置位置変更前は、PAC1-1(R)は設定温度 18.5℃に対して吹出温度が 13.8℃と-4.7℃の差が、PAC2-3 は設定温度 18.0℃に対して吹出温度が 14.9℃と-3.1℃の差を生じていた。しかし、図5(b)のようにセンサーの設置位置変更後は、PAC1-1(R)は設定温度 18.5℃に対して吹出温度が 18.4℃、PAC2-3 は設定温度 18.0℃に対して吹出温度が 16.6 と、それぞれ空調機の設定温度に近づけることができた。

以上のように、センサーの位置を変更することで、空調機の温度制御を確実に行えるように改善ができた。

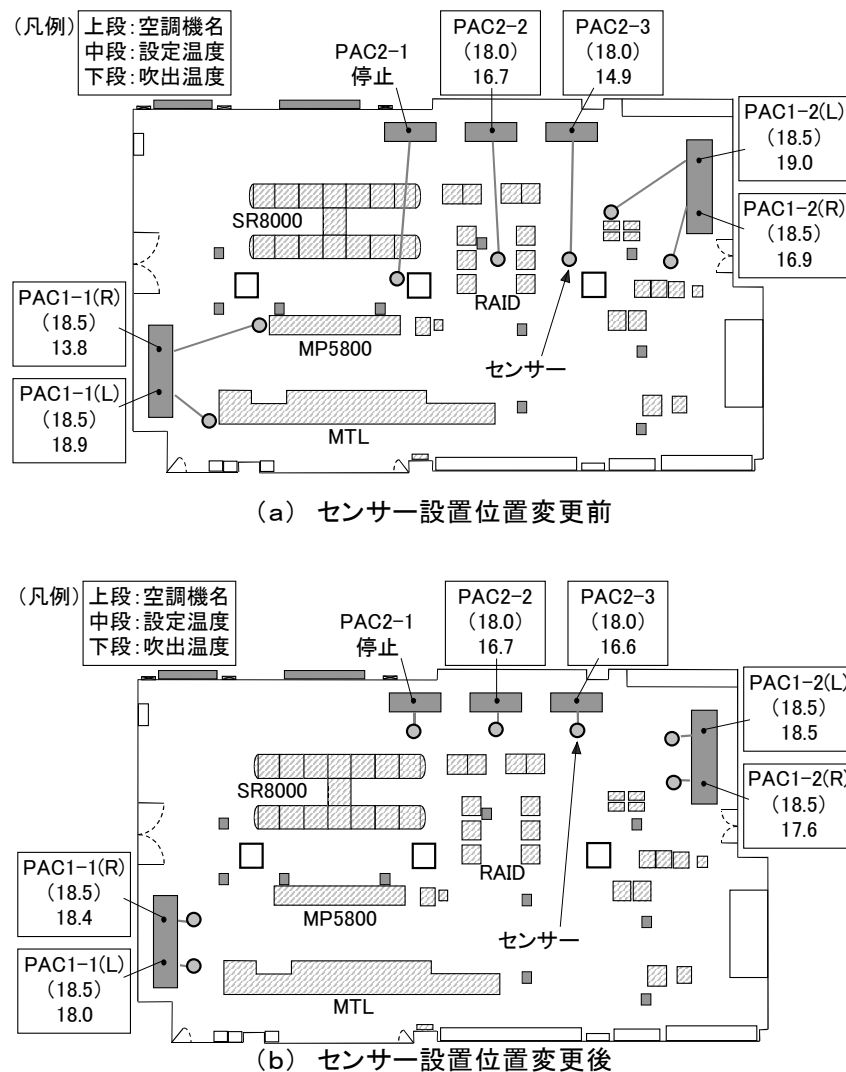


図5 空調機のセンサー設置位置、および空調機の吹出温度の測定結果

(2) 最適化実施後の計算機室の空調環境

前項で述べたように空調機の温度制御を確実に行えるようにできたので、シミュレーションで求めた空調環境と同じ空調機を2台停止した状態について、本計算機室のフリーアクセス床下と室内の温度分布を測定した。図6にフリーアクセス床下の温度測定位置を示す。測定位置は各空調機の吹出口4箇所(①～④)とSR8000の入気口8箇所(⑤～⑫)、MP5800/320の入気口2箇所(⑬、⑭)の計14箇所である。

表2にこれらの位置での温度測定結果を示す。各空調機の吹出温度は設定温度の-0.4～+0.1℃とほぼ設定温度である。また、SR8000の入気温度は 17.8～18.4℃、MP5800/320の入気温度は 18.7～

18.8℃と、それぞれ入気温度仕様(16~22℃)の範囲内である。よって、床下は適切な空調環境であることが言える。

また、図7は室内の温度測定位置を現したものである。測定ポイントは室内の発熱集中部を縦4分割、横5分割した交点20箇所(①~⑳)のフリーアクセス床上 150cm の位置である。表3に室内の温度測定結果を示す。この表を見てもわかるように室内の温度分布は 20.0~26.6℃であり、計算機室への入室者が不快と感じるような高温部は生じていない。よって、室内についても適切な空調環境であることが確認できた。

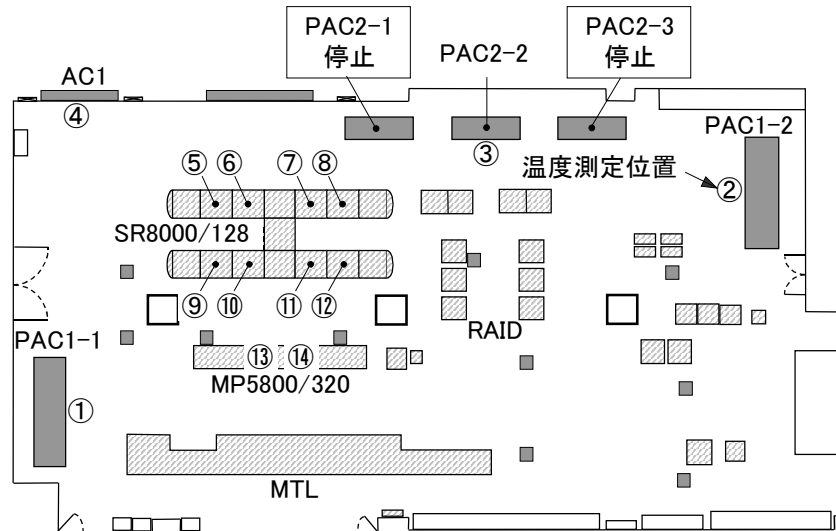


図6 フリーアクセス床下の温度測定位置

表2 フリーアクセス床下の空調機吹出温度と入気温度の測定結果

空調機運転状態	空調機/装置	PAC1-1	PAC1-2	PAC2-1	PAC2-2	PAC2-3	AC1	SR8000	MP5800
(凡例) □:稼動 ■:停止	測定位置	①	②	停止	③	停止	④	⑤~⑫	⑬, ⑭
	設定温度(℃)	18.5	18.5		18.0		18.0	—	—
	入気温度仕様(℃)	—	—		—		—	16.0~22.0	16.0~22.0
PAC2-1 2-2 2-3 1-1 1-2	吹出温度(℃)	18.4	18.1	17.8	18.1	—	—		
	入気温度(℃)	—	—	—	—	17.8~18.4	18.7~18.8		

(注)SR8000, MP5800の入気温度は、各測定箇所の最小値と最大値の範囲で表す。

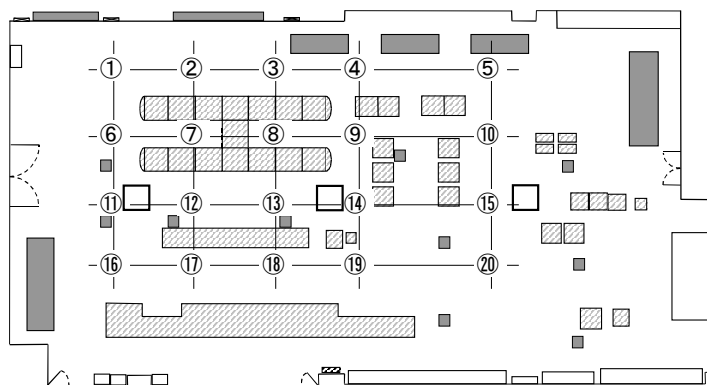


図7 室内の温度測定位置(フリーアクセス床上 150cm)

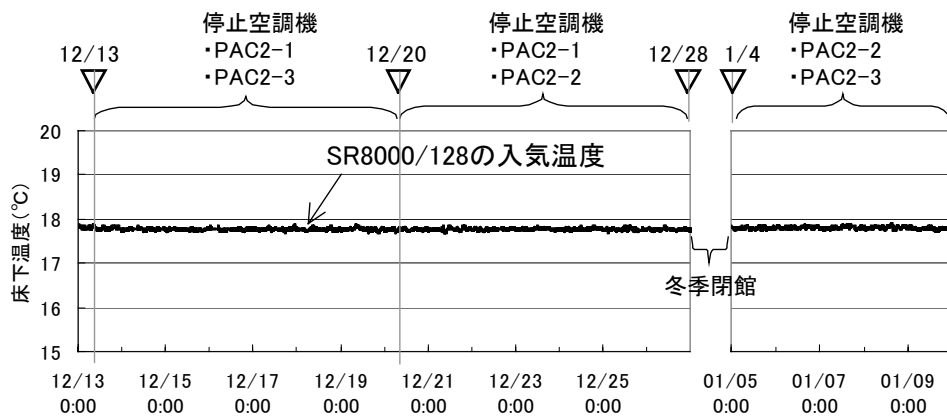
表3 室内の温度測定結果

測定位置	①	②	③	④	⑤
温度(℃)	22.4	21.9	22.5	24.2	20.0
測定位置	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
温度(℃)	23.2	21.8	23.7	26.0	21.6
測定位置	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮
温度(℃)	23.1	25.2	26.5	26.6	21.9
測定位置	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳
温度(℃)	23.0	23.4	22.8	24.6	23.1

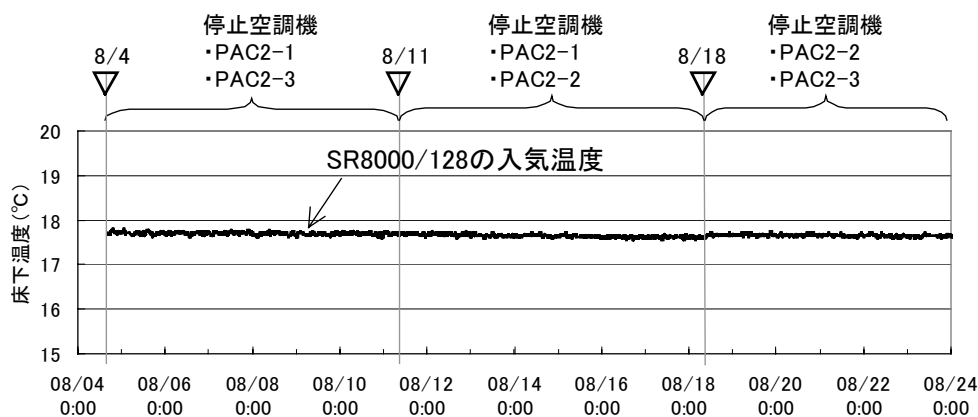
このように、シミュレーション結果と同様、実測評価による床下および室内の温度分布の測定結果からも安定した空調環境であることが確認できた。また、他の空調機2台停止の各組合せについても同様な評価を実施したが、安定した空調環境であることが確認できている。

この一連の評価に基づき、本計算機室においては PAC2-1, PAC2-2, PAC2-3 の3台のうち2台を停止し、一定期間ごとに停止空調機をローテーションさせるという運用形態を採用することにした。この運用形態により、空調機2台分の消費電力 15kW が削減できたことになる。

また、日々の運用においても空調環境が安定しているかどうかを確認するために、空調機2台を停止した状態で冬季と外気温度が上昇する夏季に床下温度の監視を行った。その結果、図8(a)(b)のように SR8000 の入気温度は約 17.7~17.8℃と年間を通して安定しており、温度に起因するコンピューター機器の障害も発生していないことから、当初予定していた空調機2台の停止とそのローテーション、即ちコンピューター機器の発熱量に適した空調環境の構築ができたと考える。



(a)冬季の場合



(b)夏季の場合

図8 SR8000 の入気温度変化

4. おわりに

今回の空調環境最適化の検討により、以下の成果を得たと考えている。

- (1) 本計算機室において、コンピューター機器の発熱量に適した空調環境が構築できた。
- (2) 従来の試行による最適な空調環境の構築には、時間と費用を要する大変な作業であったが、この空調環境の解析を専用のシミュレーションソフトウェアを使って行うことで、各ケースの比較評価の時間を大幅に短縮できることが理解できた。
- (3) 空調機2台を停止できたということで、省エネルギー化を図ることができた。
- (4) 本計算機室の空調環境の最適化を通して、必要最小限でかつ効果的な空調環境の構築の難しさと重要性が明らかになった。

参考文献

- [1] 西原敦夫, 郷博, 笹尾桂史, 木下浩一郎, 中島忠克, 頭士鎮夫:「計算機室内の空調環境シミュレーション」, 熱工学シンポジウム講演論文集, 日本機械学会, 1997年7月17日.
- [2] Atsuo Nishihara, Keiji Sasao, Hiroshi Go, Kouichirou Kinoshita, Shizuo Zushi:「Numerical Simulation of the Air-Conditioning Environment in a Computer Room」, ASHRAE TRANSACTIONS 1998 V.104 Pt.2., July 10, 1998.