

RC-008

環境配慮型データセンタ向け IT 連係空調最適化制御方式
 Air Conditioning Optimum Control Cooperative with IT System for Environment-Conscious Data Center

朝康博[†] 中島忠克[‡] 沖津潤[†] 加藤猛[†] 齊藤達也[†] 頭島康博[§]
 Yasuhiro Asa Tadakatsu Nakajima Jun Okitsu Takeshi Kato Tatsuya Saito Yasuhiro Kashirajima

1. はじめに

近年のクラウドコンピューティング、仮想化技術の急速な発展に伴い、国内データセンタ市場は着実に拡大し、その消費電力量は2013年度まで平均10%で伸長すると予測されている[1]。昨今、地球温暖化対策への意識が高まる中、データセンタの省エネ対策は大きな課題といえる。一般的なデータセンタにおける消費電力の内訳をみると、IT機器の占める割合は約30%であり、それ以外は空調設備やUPS、配電系の電力損失などが占めている。したがって、データセンタの消費電力を削減するには、IT機器、空調設備、給電設備、それぞれの省電力化技術開発が不可欠である[2]。加えて我々は、更なる省電力化を実現すべくIT機器制御と空調制御を連係したシステム(IT設備連係管理システム)の開発を進めてきた[3][4][5]。本システムは、過去におけるIT機器の稼働情報から統計的に算出した将来における各IT機器の予測消費電力と、それに基づき算出した各IT機器の空調電力感度を用い、最適なIT機器制御および空調制御を実現する。

我々と同様なアプローチの研究に、荒井ら[6]の研究があるが、現在のIT消費電力に基づく制御方式であるため、IT消費電力が大きく変化した際に、空調制御が間に合わないといった問題がある。また、ラック配置レイアウトが限定的であるため汎用的とはいえない。一方、我々の手法ではIT予測電力に基づき、先行的な空調制御が可能である。また、三次元熱流体解析によりデータセンタ内の正確な温度分布を算出しているため、様々なレイアウトに対応可能である。

本報告では、IT-設備連係管理システムにおける空調制御側の最適化アルゴリズムについて説明し、実証実験結果に基づきその効果を述べる。IT機器制御側の最適化アルゴリズムについては、別途発表の講演論文「環境配慮型データセンタ向け空調連係IT負荷配置最適化方式」を参照いただきたい。

2. IT-設備連係管理システム向け空調最適化制御

2.1 IT-設備連係管理システム

図1にIT-設備連係管理システムの構成を示す。本システムは、IT機器制御側で算出されるIT予測電力と空調制

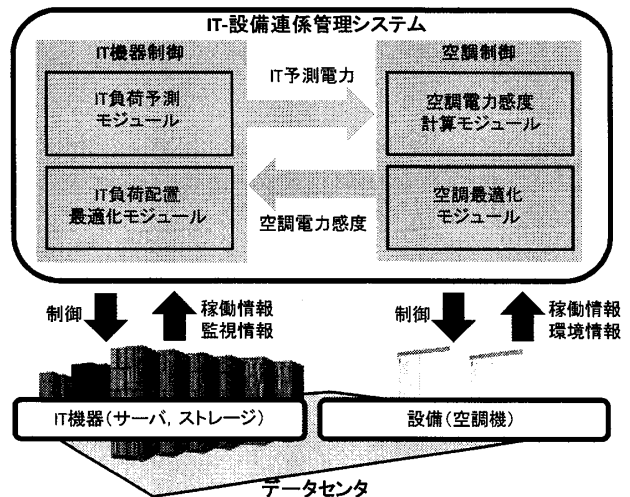


図1 IT-設備連係管理システムの構成

御側で算出される空調電力感度を情報交換することで、より最適な制御を実現し省電力化を図ることを目的とする。

IT機器制御と空調制御の構成モジュールの機能内容を表1に示す。表1に示すように、IT機器制御は、各IT機器の将来の負荷量を予測するIT負荷予測モジュールと、IT負荷を適切に配置するIT負荷配置最適化モジュールで

表1 機能モジュールの説明

制御の種類	モジュール名称	説明
IT機器制御	IT負荷予測モジュール	データセンタ内のIT機器からCPU使用率やメモリ使用量などの稼働情報を取得し、それらの履歴情報に基づいて統計的に将来のIT負荷を予測し電力量を算出する
	IT負荷配置最適化モジュール	空調制御側から受信した空調電力感度によって、将来のIT負荷による各IT機器の空調電力への影響を考慮し、空調電力を抑えるようにIT機器の最適な負荷集約パターンを算出し実行する
空調制御	空調電力感度計算モジュール	データセンタの建物構造やラック・空調機の配置、設備機器のスペックといった環境情報から構築したデータセンタの三次元モデルを用いて、各IT機器が1℃温度上昇した時の各空調機の還気温度および各IT機器の入気温度の上昇値を三次元熱流体解析により算出し、これらの温度分布(温度感度分布)と、IT機器制御側から受信したIT予測電力を用いて、各IT機器の空調電力感度(各IT機器が1kW消費した時の空調機の消費電力)を算出する
	空調最適化モジュール	IT予測電力、温度感度分布、そして空調機の運転シミュレータにより、空調機運転台数および最適な給気温度設定値を算出し実行する

[†] (株)日立製作所 中央研究所
 Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

[‡] (株)日立製作所 機械研究所
 Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

[§] (株)日立プラントテクノロジー 松戸研究所
 Matsudo Research Laboratory, Hitachi Plant Technologies, Ltd.

構成される。IT 負荷予測モジュールにて算出した IT 予測電力は随時空調制御側に送信される。また、空調制御は IT 負荷予測電力に基づいて空調機の電力感度を計算する空調電力感度計算モジュールと、空調機の最適設定値を算出する空調最適化モジュールで構成される。空調電力感度計算モジュールにて算出した空調電力感度は随時 IT 機器制御側に送信される。以下、温度感度分布の導出方法と空調制御を構成する 2 つのモジュールについて説明する。

2.2 温度感度分布

温度感度分布とは、データセンタ内の任意の IT 機器において排気温度が 1℃上昇した時の、各 IT 機器の入気温度および各空調機の還気温度の上昇値を示したものであり、三次元熱流体解析によってデータセンタ内の気流計算と温度計算を行うことで求まる。まず、建物構造やラック、空調機のレイアウトやスペックといった情報によりデータセンタの空間モデルを作成する。そして、このモデルに対して気流計算を行う。データセンタ内の気流は空調機の風量が一定の下では変化しないが、風量が変わる場合や、空調機の運転台数が変わる場合は気流も変化する。したがって、データセンタで想定される気流を全て計算するには、風量の種類と空調機運転台数の組合せの数だけ計算が必要となる。次に、先で求めた気流計算結果を用い、各 IT 機器の排気温度が 1℃上昇した時の各 IT 機器の入気温度および各空調機の還気温度を計算する。これらの計算により、特定の気流計算結果において、各空調機の還気温度および各 IT 機器の入気温度と、各空調機の給気温度および各 IT 機器の温度上昇値を式(1)のようにヤコビ行列で関連付けることができる。

$$\begin{pmatrix} \{T_{ac_i}^{(in)}\} \\ \{T_{ap_j}^{(in)}\} \end{pmatrix} = J \cdot \begin{pmatrix} \{T_{ac_i}^{(out)}\} \\ \{\Delta T_{ap_j}\} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $T_{ac_i}^{(in)}$ は空調機 i の還気温度、 $T_{ap_j}^{(in)}$ は IT 機器 j の入気温度、 $T_{ac_i}^{(out)}$ は空調機 i の給気温度、 ΔT_{ap_j} は IT 機器 j の温度上昇値である。ac は Air-Conditioner, ap は Apparatus の略記である。また、ヤコビ行列 J は次のようになる。

$$J = \begin{pmatrix} \left\{ \frac{\partial T_{ac_i}^{(in)}}{\partial T_{ac_m}^{(out)}}, \frac{\partial T_{ac_i}^{(in)}}{\partial \Delta T_{ap_n}} \right\} \\ \left\{ \frac{\partial T_{ap_j}^{(in)}}{\partial T_{ac_m}^{(out)}}, \frac{\partial T_{ap_j}^{(in)}}{\partial \Delta T_{ap_n}} \right\} \end{pmatrix} \quad \text{ただし, } m=1, \dots, M, \quad n=1, \dots, N$$

このヤコビ行列 J が温度感度分布となる。ここで、M は空調機の数、N は IT 機器の数を示している。

一般的に、データセンタ内で稼働している空調機は、自然対流が無視できるほど流速が速いため、温度場は線形とみなすことができる。したがって、上記のヤコビ行列 J は、定数行列としてテーブル化が可能である。

2.3 空調電力感度計算モジュール

空調電力感度とは、データセンタ内の任意の IT 機器における消費電力が 1kW 増加した時の空調機の総消費電力

がどれだけ増加するかを表した係数である。

まず、式(2)を用いて、各 IT 機器の消費電力が 1kW 増加した時の温度上昇値を算出する。

$$\Delta T_{ap_j} = P_{IT} / Q_{ap_j} \cdot \rho \cdot C \quad (2)$$

ここで、 P_{IT} は IT 機器の消費電力値であり、ここでは 1kW として計算する。 Q_{ap_j} は IT 機器 j の風量 (m^3/sec)、 ρ は空気密度であり、ここでは $1.116kg/m^3$ とする。C は比熱であり、ここでは $1.005kJ/kg \cdot ^\circ C$ とする。

次に、先で求めた各 IT 機器の温度上昇値と、前節の温度感度分布を用い、各 IT 機器の消費電力が 1kW 増加した時の各空調機の還気温度上昇値を求める。こうして算出した各空調機の給気温度と還気温度および外気温度を用いて、空調機運転シミュレータにより各空調機の消費電力を求める。この関係を式で表すと式(3)のようになる。

$$P_{ac} = \sum_i P_{ac_i}(T_{ac_i}^{(in)}, T_{ac_i}^{(out)}) \quad (3)$$

ここで、 P_{ac} はデータセンタ内の空調機の総消費電力、 P_{ac_i} は空調機 i の消費電力である。これらの計算により、各 IT 機器における消費電力が 1kW 増加した時の空調機の総消費電力増加値、すなわち空調電力感度を求める。空調電力感度計算は、事前に全ての給気温度、還気温度、外気温度における空調電力を求めテーブル化(空調機特性テーブル)しておくことで、より高速に処理することが可能である。

2.4 空調最適化モジュール

空調最適化モジュールでは、前述の温度感度分布および空調機特性テーブルを用い、IT 機器制御側から取得した IT 負荷予測情報に対して、空調電力の総和が最小となる給気温度を求める。すなわち、式(3)を目的関数とし、これを最小化する制約条件付き非線形最適化問題を解く。本システムでは、最適化計算手法に最急降下法を用い、

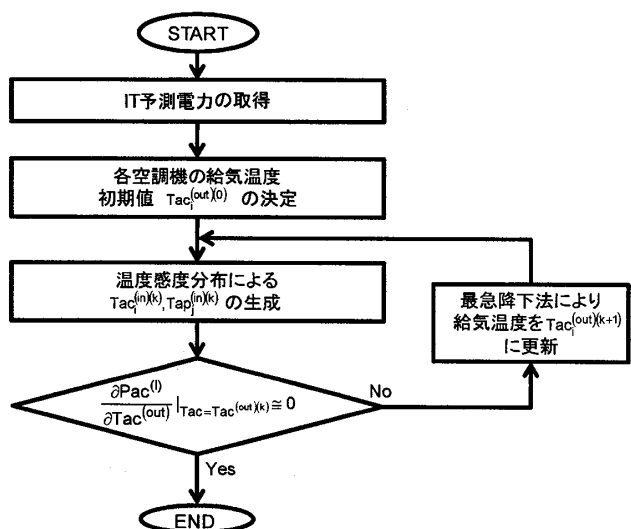


図2 空調最適化モジュールの処理フロー

以下の制約条件にて計算する。

$$Tap_j^{(n)} \leq \text{メーカー仕様値 (IT 機器の上限入気温度)}$$

$$Tac_i^{(n)} \leq \text{建築基準法設定値 (室内上限温度)}$$

空調最適化モジュールの処理フローを図2に示す。まず、空調機*i*の初期値 $Tac_i^{(out)(0)}$ を決定する。局所解を回避するには、この初期値の決め方が重要となる。本手法では、いくつかの代表値に対して計算することで局所解を回避する。そして、IT機器制御側から取得したIT予測電力を用い、式(2)により各IT機器の予測温度上昇値 ΔTap を算出する。これらの ΔTap と空調機の給気温度 $Tac^{(out)(k)}$ を用い、温度感度分布 J を用いた式(1)により空調機の還気温度 $Tac^{(in)}$ 、IT機器の入気温度 $Tap^{(in)}$ を算出する。ここで、 k は収束計算の回数を意味し、初回は $k=0$ である。次に、空調機運転シミュレータを用い、式(3)により各空調機*i*の $Tac_i^{(in)(k)}$ 、 $Tac_i^{(out)(k)}$ に対する空調電力の総和を算出し、最急降下法により最小値か否かを判定する。最小値ではない場合、既定のステップ幅にて設定給気温度を $Tac_i^{(out)(k+1)}$ に更新し、最小値が見つかるまで上記処理を繰り返す。こうして求めた給気温度にて、実際の空調機を制御する。

3. 実証実験

本システムのプロトタイプを開発し、実環境において省エネ効果の検証を実施した。実験環境のレイアウトを図3に示す。実験環境の面積は約 140m²、高さは床上が約 3.4m、床下が約 0.4m であり、図に示すように複数の

表2 三次元熱流体解析の条件

項目	条件
自然対流	なし
最大反復計算数	5000回
収束条件	残差が 1.0×10^{-5}
壁の熱透過率	0 (断熱)
空調機のファン風量	270 m ³ /min
ダミーサーバのファン風量	5.2 m ³ /min
IT機器の総電力量(ダミーサーバは除く)	17.1 kW
メッシュ数(格子点数)	床上: 約210000点 床下: 約43000点

ラック(サーバ)と2台の空調機(電算機専用パッケージエアコン)、サーバを模擬したダミーサーバ、そして、空調機からの冷風を室内に導くグリル板が配置されている。以下、本プロトタイプ構成と実験結果について述べる。

3.1 温度感度分布

図3のレイアウト情報および各ラック、空調機のスペースから空間モデルを作成し、表2に示す解析条件の下、三次元熱流体解析を行うことで温度感度分布を導出する。本実験環境は、一般的なデータセンタに比べ形状が複雑な為、モデルは床上と床下で分け、自然対流はなく、断熱構造とするなど反復計算が収束しやすいよう工夫した。メッシュの格子点間隔は 0.2m 以下とし、境界面に近いほど間隔を狭め計算精度を上げている。今回の実験では、ダミーサーバの負荷が変動することとし、その他のIT機器であるラック全体の電力は 17.1kW 固定として計算する。また、空調機は2台なので、運転の種類(運転モード)は 0-1 運転(空調機 1: 停止, 空調機 2: 運転), 1-0 運転(空

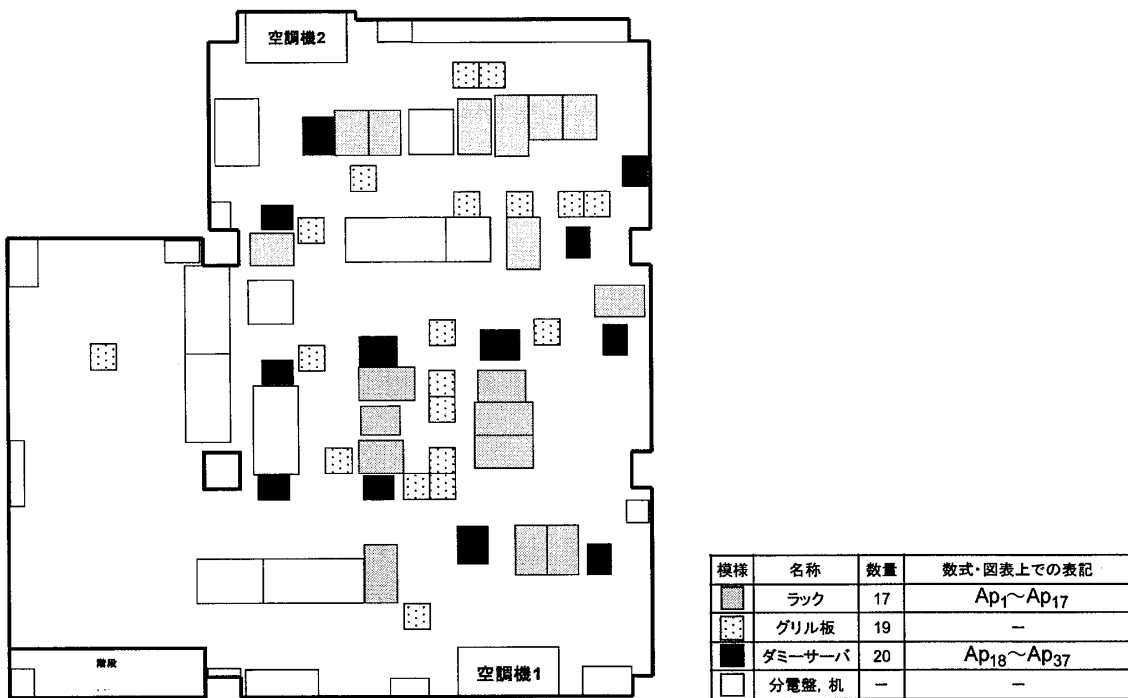


図3 実験環境のレイアウト

表3 温度感度分布 (1-1 運転)

θ / θ	$A_c^{(out)1}$	$A_c^{(out)2}$	$A_p^{(out)1}$...	$A_p^{(out)29}$...	$A_p^{(out)37}$
$A_c^{(in)1}$	0.27029	0.71182	0.00113		0.01665		0.01549
$A_c^{(in)2}$	0.71113	0.27521	0.0326		0.00217		0.00327
$A_p^{(in)1}$	0.94278	0.05357	0.24868		0.00093		0.00024
$A_p^{(in)2}$	0.93765	0.05821	0.17692		0.0012		0.00031
$A_p^{(in)3}$	0.88468	0.1056	0.10351		0.00344		0.001
...							
$A_p^{(in)25}$	0.42269	0.53287	0.00216		0.08417		0.01343
$A_p^{(in)26}$	0.36356	0.59529	0.00179		0.2846		0.01396
$A_p^{(in)27}$	0.34769	0.60087	0.00125		0.04281		0.01357
...							
$A_p^{(in)36}$	0.04237	0.95632	0.00028		0.00025		0.196
$A_p^{(in)37}$	0.05636	0.94118	0.00048		0.00055		0.55283

調機 1 : 運転, 空調機 2 : 停止), 1-1 運転(空調機 1 : 運転, 空調機 2 : 運転)の 3 つである. 空調機の風量は $270\text{m}^3/\text{min}$ で固定としたため, 空間モデルは 3 種類作成することになる. これらの 3 種類のモデルに対して気流計算と温度計算を行う. まず, 床下のモデルにて気流計算することで各グリル板から床上に吹き出す風量を求める. そして, それらの風量を床上のモデルに反映させ気流計算を行なった. 次に, モデル上で各ダミーサーバ, およびラック(サーバ)の温度上昇値を 1°C と設定し温度計算を行うことで, 本実験環境内の各 IT 機器の入気温度, および各空調機の還気温度を求めた. 本実験環境にはダミーサーバが 20 台, ラックが 17 台設置されているので, 各モデルで 37 回温度計算を行うことになる. 前章で述べたとおり, 温度場は線形近似で計算するため, 温度感度分布は定数行列として表わされる. 1-1 運転において求めた温度感度分布の一部を表 3 に示す. 例えばサーバ A_{p29} の排気温度 $A_{p29}^{(out)}$ が 1°C 上昇した時, 空調機 A_{c1} の還気温度 $A_{c1}^{(in)}$ は 0.01665°C 上昇することが分かる.

3.2 空調電力感度計算

各ダミーサーバの消費電力が 1kW 増加した時の空調電力を求める. 表 2 に示すとおり, ダミーサーバのファン風量は $5.2\text{m}^3/\text{min}$ であるので, 式(2)よりダミーサーバの温度上昇値 ΔT_{ap}^{dy} は 10.288°C となる. そして, ΔT_{ap}^{dy} と温度感度分布を用いて空調機の還気温度を求める. 表 4 に 1-0 運転時の温度感度分布におけるダミーサーバの排気温度と空調機の還気温度との関係を示す. ここで, $A_{p18}^{(out)} \sim A_{p37}^{(out)}$ がダミーサーバの排気温度を示している. 表 4 に示すように, 本実験環境では各ダミーサーバと空調機との直接的な温度感度関係に顕著な差がない. したがって, 空調電力感度も差が出ないため, IT 機器制御側で負荷配置を行う際の情報として有効性が低い. そこで, 上記の

直接的な温度感度関係を用いるのではなく, 各ダミーサーバの温度上昇が各サーバの入気温度をどの程度上昇させるかに着目し, その最大値に対して各空調機の給気温度をどの程度低下させるべきか(給気温度低下値 ΔT_{ac}^{dy})を計算しこれを温度感度として用いることにした. 例えば, 表 3 をみると, ダミーサーバ A_{p29} の排気温度が 1°C 上昇した時, 全サーバの中で A_{p26} の入気温度値 0.2846°C が最も高いことが分かる. A_{p26} の上昇温度を解消するための空調機 A_{c1} の給気温度低下値 ΔT_{ac1}^{dy} は $0.21266 (=0.2846 \cdot 0.36356 / (0.36356^2 + 0.59529^2))$, A_{c2} の給気温度低下値 ΔT_{ac2}^{dy} は $0.34821 (=0.2846 \cdot 0.59529 / (0.36356^2 + 0.59529^2))$ であり, これらをダミーサーバ A_{p29} の各空調機に対する温度感度とする.

このようにして算出した温度感度と, 先の ΔT_{ap}^{dy} および現在の給気温度(実測値) $T_{ac}^{cur(out)}$, 還気温度(実測値) $T_{ac}^{cur(in)}$, 外気温度(実測値) T_o^{cur} を用い, 空調機特性テーブルから式(3)の関係により空調電力値 P_{ac} を算出する. 表 5 に空調機特性テーブルの一例を示す. 表 5 は外気温度が 15°C , 風量が $270\text{m}^3/\text{min}$ の時の電算機専用パッケージエアコンの空調機特性テーブルであり, 空調機の還気温度(in)と給気温度(out)の関係に対応した COP (成績係数: Coefficient Of Performance)を示している. 表 5 において値が"0"の箇所は制御範囲外であること

表4 ダミーサーバと空調機の温度感度関係 (1-0 運転)

θ / θ	$A_{p18}^{(out)}$	$A_{p19}^{(out)}$	$A_{p20}^{(out)}$	$A_{p21}^{(out)}$	$A_{p22}^{(out)}$	$A_{p23}^{(out)}$	$A_{p24}^{(out)}$
$A_{c1}^{(in)}$	0.01934	0.01939	0.01944	0.01946	0.01938	0.01934	0.01932
θ / θ	$A_{p25}^{(out)}$	$A_{p26}^{(out)}$	$A_{p27}^{(out)}$	$A_{p28}^{(out)}$	$A_{p29}^{(out)}$	$A_{p30}^{(out)}$	$A_{p31}^{(out)}$
$A_{c1}^{(in)}$	0.01934	0.01934	0.01933	0.01926	0.01926	0.01926	0.01935
θ / θ	$A_{p32}^{(out)}$	$A_{p33}^{(out)}$	$A_{p34}^{(out)}$	$A_{p35}^{(out)}$	$A_{p36}^{(out)}$	$A_{p37}^{(out)}$	
$A_{c1}^{(in)}$	0.01931	0.01931	0.01931	0.01929	0.01924	0.01923	

表5 空調機特性テーブルの一例

IN \ OUT	15°C	16°C	17°C	18°C	19°C	20°C	21°C	22°C	23°C	24°C	25°C
20°C	2	1.94	1.95	1.83	1.25	0	0	0	0	0	0
21°C	0	2.15	2.01	2.12	1.90	1.28	0	0	0	0	0
22°C	0	2.15	2.26	2.08	2.24	1.98	1.31	0	0	0	0
23°C	0	0	2.41	2.49	2.21	2.72	2.21	1.41	0	0	0
24°C	0	0	0	2.89	2.62	2.37	2.97	2.37	1.47	0	0
25°C	0	0	0	2.65	2.92	2.64	3.41	2.97	2.37	1.47	0
26°C	0	0	0	3.46	3.28	3.04	2.77	3.41	2.97	2.37	1.46
27°C	0	0	0	3.81	3.65	3.46	3.23	2.95	3.38	2.95	2.35
28°C	0	0	0	3.92	3.79	3.64	3.44	3.21	3.67	3.38	2.94
29°C	0	0	0	4.05	3.90	3.79	3.63	3.43	3.88	3.64	3.36
30°C	0	0	0	0	4.04	3.92	3.80	3.63	3.99	3.85	3.64
31°C	0	0	0	0	4.03	4.03	3.90	3.79	3.63	4.10	3.84
32°C	0	0	0	0	0	4.13	3.99	3.88	3.78	3.61	4.08
33°C	0	0	0	0	0	0	4.14	3.96	3.88	3.75	3.59
34°C	0	0	0	0	0	0	0	4.09	3.94	3.85	3.73
35°C	0	0	0	0	0	0	0	4.15	4.04	3.88	3.81

■ : 0 ■ : 1以上 ■ : 3以上 □ : 4以上

を意味する。また、今回対象としたエアコンには圧縮機が2台(インバータ機と一定速機)搭載されている。表5の中央付近(INが25°C, OUTが21°Cの付近)においてCOPの傾向に変化が見られるが、これは圧縮機の切替えによる影響と考えられる。さて、具体的な空調電力の導出は、まず、空調機特性テーブルによって現在の実測温度に基づくCOPを求める(COP^{cur})。次に、前述の手順に基づいて、各ダミーサーバの排熱が現在の実測温度よりΔTap^{dy}だけ上昇したときの各空調機の給気温度低下値ΔTac^{dy}を求める。空調機iのCOPは式(4)で表されるため、実測温度に基づく空調電力Pac_i^{cur}、およびΔTac^{dy}だけ低下させた温度に基づく空調電力Pac_i^{dy}が式(5)、式(6)にて求まる。

$$COP_i = \frac{Qac_i \cdot \rho \cdot C(Tac_i^{(in)} - Tac_i^{(out)})}{Pac_i} \quad (4)$$

$$Pac_i^{cur} = \frac{Qac_i \cdot \rho \cdot C(Tac_i^{cur(in)} - Tac_i^{cur(out)})}{COP_i^{cur}} \quad (5)$$

$$Pac_i^{dy} = \frac{Qac_i \cdot \rho \cdot C((Tac_i^{(in)} - \Delta Tap^{dy}) - (Tac_i^{(out)} - \Delta Tap^{dy}))}{COP_i^{cur}} \quad (6)$$

そして、式(7)により、これら空調電力の差分総和をとり空調電力感度Pac^{sence_j}とする。ここで、jはダミーサーバを表している(j=1,...,20)。

$$Pac^{sence_j} = \sum_i (Pac_i^{cur} - Pac_i^{dy_j}) \quad (7)$$

3.3 空調最適化

本来は最急降下法により空調電力が最小となる給気温度を求めるのだが、本実験環境の空調機は2台と少ないため、設定できる給気温度の組合せはそれほど多くない。本プロトタイプの場合、給気温度を15°C~34°Cの1°C刻みとしているので、組合せは400通り(20²:給気温度設

定数^{空調機台数})になる。したがって、処理高速化の観点から、最急降下法ではなく給気温度の総当たりで最適値を算出する。すなわち、IT機器制御側から取得したIT予測電力に基づく各ダミーサーバの排気温度と、先の給気温度の組合せを入力値として、3つの運転モードの温度感度分布により、空調機の還気温度を算出する。そして、給気温度と還気温度および現在の外気温度を入力値として前節の空調機特性テーブルにより空調電力を算出する。この一連の処理を給気温度の全組合せに対して実行し、最も空調電力が小さい運転モードおよび給気温度を最適値とした。ここで、制約条件は以下のように定義した。

$$Tap_i^{(in)} \leq 35^\circ C$$

$$Tac_i^{(in)} \leq 35^\circ C$$

本来Tac_i⁽ⁱⁿ⁾は、建築基準法設定値(=28°C)であるべきだが、実験目的に応じた簡素化のため、本実証実験ではTac_i⁽ⁱⁿ⁾と同じ値に設定した。

3.4 実験結果

20台のダミーサーバに対し表6に示すような負荷がか

表6 ダミーサーバの負荷

ダミーサーバ番号	消費電力値 [kw]
1	2
2	2
3	0.98
4	1.54
5	1.58
6	1.8
7	1.92
8	1.62
9	0.98
10	1.2
11	2
12	0.56
13	1.46
14	0
15	0.86
16	1.72
17	1.92
18	1.96
19	1.92
20	1.66

表7 空調電力感度

(a) 0-1 運転		(b) 1-0 運転		(c) 1-1 運転	
ダミーサーバ番号	空調電力感度	ダミーサーバ番号	空調電力感度	ダミーサーバ番号	空調電力感度
1	0.04901	1	0.45256	1	0.04737
2	0.09669	2	0.17736	2	-0.04735
3	0.26179	3	0.00065	3	0.00015
4	0.25648	4	0.00006	4	0.00008
5	0.04568	5	0.00004	5	0.00005
6	0.17211	6	0.00002	6	0.00851
7	1.00000	7	0.31032	7	1.00000
8	0.08012	8	0.32811	8	-0.02564
9	-0.15605	9	0.29776	9	0.14697
10	-0.06291	10	0.04741	10	0.16607
11	0.01824	11	1.00000	11	0.55634
12	0.14079	12	1.00000	12	0.59043
13	0.09447	13	1.00000	13	0.53882
14	0.07662	14	0.18876	14	0.13747
15	-0.14805	15	0.34084	15	0.16234
16	0.00182	16	0.13532	16	0.00646
17	0.00004	17	0.19989	17	0.00180
18	0.00002	18	0.18314	18	0.00045
19	-0.13127	19	0.05295	19	0.03611
20	-0.11318	20	0.29747	20	1.00000

図4 空調機運転台数制御の省エネ効果

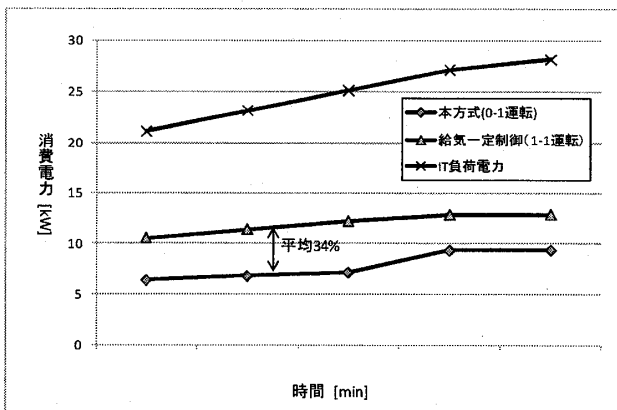
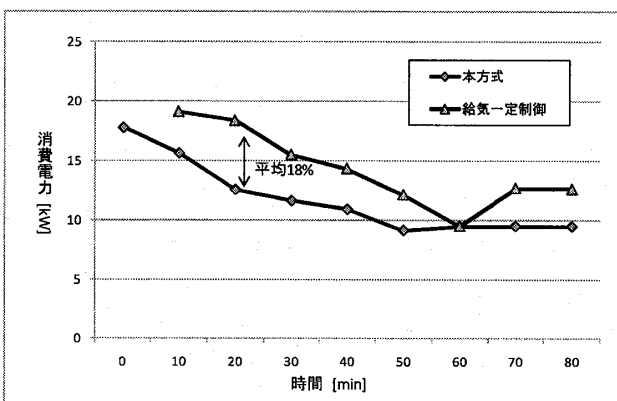


図5 空調機運転台数固定(2台)での省エネ効果



かる時の各運転モードにおける空調電力感度を表7に示す。IT機器制御側は、3種類の空調電力感度の中から現在の空調機稼働状況に応じて選択し、感度の低いサーバに負荷を集約するよう制御を行う。

次に、空調最適化モジュールの空調機運転台数制御による効果を、給気一定制御方式(従来方式)の2台運転時の

消費電力と本方式の1台運転時の消費電力の比較によって示す(図4)。ここで、従来方式の給気温度は19℃である。図4に示すように、従来手法に比べて平均約34%の省エネ効果を確認した。

また、空調機運転台数が同じ場合の比較結果を図5に示す。図5に示すように、本方式は従来方式より平均約18%の省エネ効果があることを確認した。

処理時間については、CPUクロック数3.15GHz、メモリ2GBのマシンにて、空調電力感度計算が約2秒、最適化計算が約0.5秒であった。本実験環境の三次元熱流体解析には、メッシュ数を減らすなどの高速化を行ったとしても数分間は要するため、本方式が処理速度の面でも実用性も高いことが分かる。

4. まとめ

データセンタの省電力化を目的とするIT設備連係管理システム向け空調最適化制御において、三次元熱流体解析に基づく以下の機能を開発した。

- ・空調電力感度計算モジュール
- ・空調最適化モジュール

実環境における検証の結果、従来の給気一定制御に比べて空調機運転台数が異なる場合は平均約34%、空調機運転台数が同じ場合は平均約18%の省エネ効果があることを確認した。

今回は、実験規模が小さかった為、最急降下法を適用せず性能検証に注力したが、今後は検証規模を拡大し、最適化計算の実用性検証を進める予定である。また、テーブル化した温度感度分布については、精度面での検証を進めていく予定である。

参考文献

- [1] (株)ミック経済研究所, “データセンタの消費電力とグリーンIT化の実態調査2009年度版”(2009)
- [2] The Green Grid, “Guidelines for Energy-Efficient Datacenters”, Feb. 2007.
- [3] 沖津潤, 加藤猛, 齊藤達也, 平島陽子, 中島忠克, 頭島康博, “次世代データセンタ向け環境配慮運用管理方式(1)”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-14-4 (2009)
- [4] 平島陽子, 沖津潤, 加藤猛, 齊藤達也, 中島忠克, 頭島康博, “次世代データセンタ向け環境配慮運用管理方式(2)”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-14-5 (2009)
- [5] 中島忠克, 沖津潤, 加藤猛, 齊藤達也, 平島陽子, 頭島康博, “次世代データセンタ向け環境配慮運用管理方式(3)”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-14-6 (2009)
- [6] 荒井大輔, 吉原貴仁, “空調機の電力消費量を考慮したサーバ仮想化とネットワーク動的構成変更によるデータセンタ省電力運用管理手順の提案”, 第8回情報科学技術フォーラム, L-023 (2009)