

グリーンビルディングを支える 次世代のオフィス空調

高木 康夫

最近、米国では高効率グリーンビルディングという言葉がある種のブームの様相を呈している。実際、建築物のCO₂排出量は、米国全体のCO₂排出量の約1/3を占め、産業分野や輸送分野と並んで、主要排出セクターである。建築物の排出するCO₂は、燃料の使用に関する部分と電気の使用による部分があるが、とりわけ目立つのは、電気使用量である。オフィスと住宅の電気消費量は米国全体の電気消費量の72%を占めるという統計がある[1]。この電気の消費量の40%程度は空調に使われているので、この空調を合理的に省エネルギー化できれば、米国全体のCO₂排出量の削減に大きな貢献が可能である。本稿では、オフィス空調の省エネルギーのために開発した、最適制御を応用した最新の空調技術を紹介する。

キーワード：空調，オフィスビル，制御，最適化，給気温度，冷水温度，冷凍サイクル

1. はじめに

米国において、最近、グリーンビルディングが話題となっていることを述べたが、一方、日本国は、京都議定書が2005年2月16日発効したのに伴い、2008～2012年における温室効果ガスの排出量を1990年比6%削減することを求められている。この温室効果ガスの中で、エネルギー由来のCO₂は87%を占める。したがって、温室効果ガス削減には省エネルギーが重要である。一方、日本のエネルギー由来のCO₂排出量は2005年度で1990年度比13.6%増加している。特に、事務所ビルが属する業務その他部門は44.6%増加と、運輸・旅客部門に次ぐ増加となっている[2]。この事務所ビルの消費エネルギーの約40%は空調に係るエネルギーであるので[3]、空調システムの省エ

ネ性能が事務所ビルのエネルギー性能を大きく左右する要素となっている。

本論文では、より少ないエネルギーで快適なオフィスビルの空調環境を実現する次世代空調システムおよびその制御方式を提案する。同時に、その性能を評価するため、モデルビルを仮定した上で空調システムシミュレータを開発し、提案空調システムの省エネ性能を評価した。これにより、十分な省エネ性能のあることを検証した。

2. 次世代ビル空調システム

現在の一般的なビル空調では、冷房時は建物内部での発熱（顕熱負荷）の冷却と、建物に取入れる新鮮外気の冷却除湿（潜熱負荷）を、同じ冷水コイルで実施している。このため、中央熱源から供給される冷水温度は7℃前後となっている。しかし、7℃の冷水を必要とするのは新鮮外気の除湿のみで、建物内部発熱の冷却には15℃前後の冷水で十分まかなえる。また、新鮮外気の除湿に必要なエネルギー（7℃の冷水）は空調負荷全体の20～30%であるため、残りの70～80%の顕熱負荷を上質な（無駄な）エネルギーで冷却していることになる。この無駄をなくしてビル空調の省エネルギー実現を狙い、次世代業務用空調機を開発した。

また、実在の空調システムでは低中間負荷での運用が大部分を占めている。そこで、部分負荷時において、空調機・熱源機・ポンプからなる空調システム全体の消費エネルギーを最小化する最適化制御システム（連

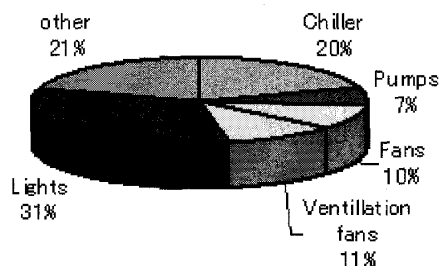
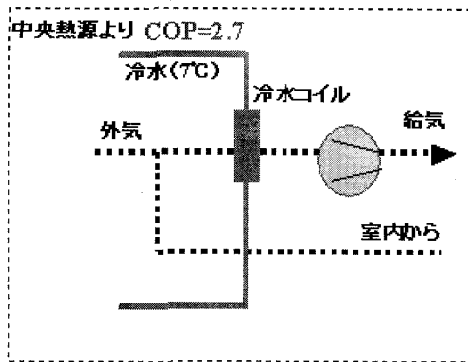
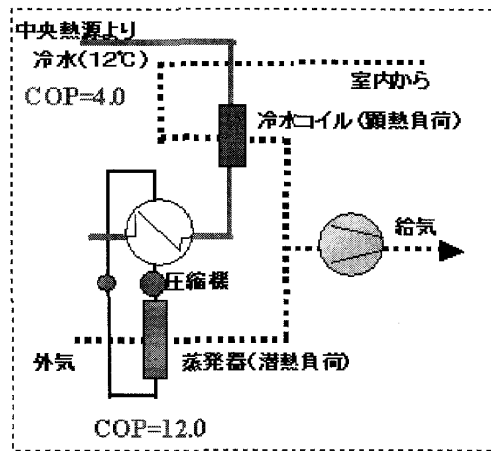


図1 オフィスビルのエネルギー消費



従来方式空調機



開発方式空調機

図2 次世代空調機と従来空調機

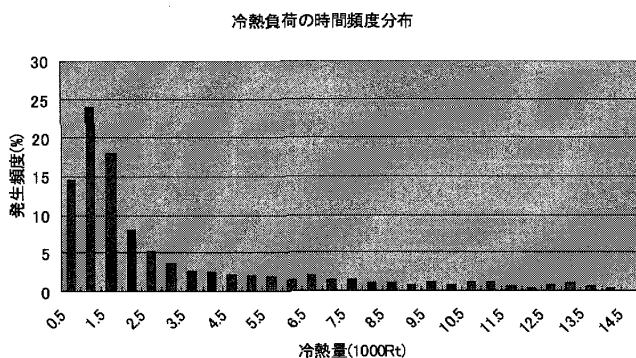


図3 地域冷暖房負荷の分布例

携省エネ空調制御)を構築することで、搬送動力、冷凍機動力を低減することができる。

2.1 次世代の業務用空調機

現行のビル空調の本質的な無駄を省くために、2つのコイルを内蔵し、1つのコイルを中央熱源の冷水で、他方のコイルを内蔵する冷凍サイクルにより冷却する空調機(湿度制御強化型空調機)を開発した。これにより、空調負荷の70~80%を占める顕熱負荷を15°C

前後の冷水を使用する冷水コイルで冷却し、20~30%を占める潜熱負荷を内蔵冷凍システムの直膨コイルで冷却除湿することで、中央熱源の効率(COP)を改善する。冷水の温度が7°Cから12°Cに上昇することにより、中央熱源のCOPは冷凍サイクルの原理から明らかかなように、大幅に向上することが見込まれる(図10(b))。

2.2 連携省エネ空調制御

実在の空調システムでは低中間負荷での運用が大部分を占めている[4]。したがって、中低負荷時のHVACシステムのエネルギー効率がきわめて重要である。

中央熱源式のビル空調システムは、図4に示すように、中央熱源と冷却塔からなる冷水製造装置と、その冷水を各部屋に運ぶ搬送ネットワーク、この冷水と部屋の空気を熱交換させ、同時に換気も行う空気調和機、そして、この空気調和機で整えられた空気を各部屋に給気するダクトネットワークから構成される。すなわち、オフィスビルの空調システムは水のネットワークと空気のネットワークがあり、それが空気調和機でつながっていること、また、チラーの運用が全体のエネルギー消費に大きく影響を与えることがわかる[4]。紹介する「連携省エネ空調制御」はこれらのシステムを互いに連携させ、快適性を維持しながら最も省エネを実現するように空調システムを制御する。

現行の代表的空調制御方式にはCAVとVAVがある。CAVは、給気量を一定に保つ一方で給気温度を調整することにより室温を目的温度に制御する方式である。この方式では、空調負荷が大きくても小さくても一定のファン動力が必要になり、中低負荷の運用が大半を占めるビル空調においてはエネルギー消費の側面から見ると不利な制御方式である。もう一つの代表的な制御方式はVAVである。この方式では、部屋の温度を給気流量により調節する。この結果、負荷の大きな暑い日には、大きな給気量となり消費動力が増加する。また、流量制御のためのダンパーによりダクト抵抗が増加し、むしろ、増エネルギーになる。

これに対して、提案する連携制御では、空調システム全体の消費エネルギーが与えられた条件下で最小となるように、空調システムの運用条件を最適化演算により求める。

$$\begin{aligned}
 (\text{評価関数}) \quad J = & \text{冷却塔消費エネルギー} \\
 & + \text{中央熱源消費エネルギー} \\
 & + \text{送水ポンプ消費エネルギー}
 \end{aligned}$$

(1) +ファン動力

(制約条件) 機器の動作範囲

部屋温度, PMV (快適度予測指数)

上式に示したように, ビル空調の省エネルギー実現のために, その熱源を含めた最適化を行う. 空調システム消費エネルギーの多くを占めるチラーは, 冷却水温度が低い方が, また, 製造する冷水の温度が高い方が, その冷凍サイクルの原理から効率が高いことが知られている. しかるに, 現状の空調システムでは冷却水温度は1年を通して32度, 冷水温度は7度に設定されている. 例えば, 春または秋, 外気温度が低いときは容易に20度程度の冷却水を製造することができる. これを用いれば, 冷凍機の効率を改善できるのは自明である. 本連携省エネ空調制御では, 外気温度や湿度, それに, 室内の空調負荷に合わせて, (1)式の最小化制御を実施する(図5).

実際に, 冷水温度と冷却水温度を変化させたときの, ビル空調システムの消費電力予測値の計算結果を, 図

6に示す. 冷却水温度については, ある程度低い条件のとき消費動力は減少するが, あまり低くしようとすると, そのための冷却塔ファン動力が増加し, 空調システムの消費動力が増加してしまう. 冷水に関しても, 室内空調機の給気ファン動力を削減するには低い方が良いが, 冷水を製造する冷凍機消費動力を削減するには, 高い方が良い. その結果この図に示したような最適運転点が存在する.

次に, 連携省エネ空調制御を用いた空調システムの構成を図7に示す. 従来, 空調システムの省エネルギー解析を中心とした機能を持った中央監視装置に設けられたBEMS上に, 最適化コントローラ (Optimizer) を設ける. ここに, 冷却水の温度や流量, 冷水の温度や流量, 給気温度や流量を集め, 空調システムの状態を判断しながら, 最も省エネルギーになる運転状態を出力する. 具体的には, 冷却水の送水温度と流量 (可変であるならば), 冷水の送水温度と流量 (可変な場合), および, 給気流量と給気温度である.

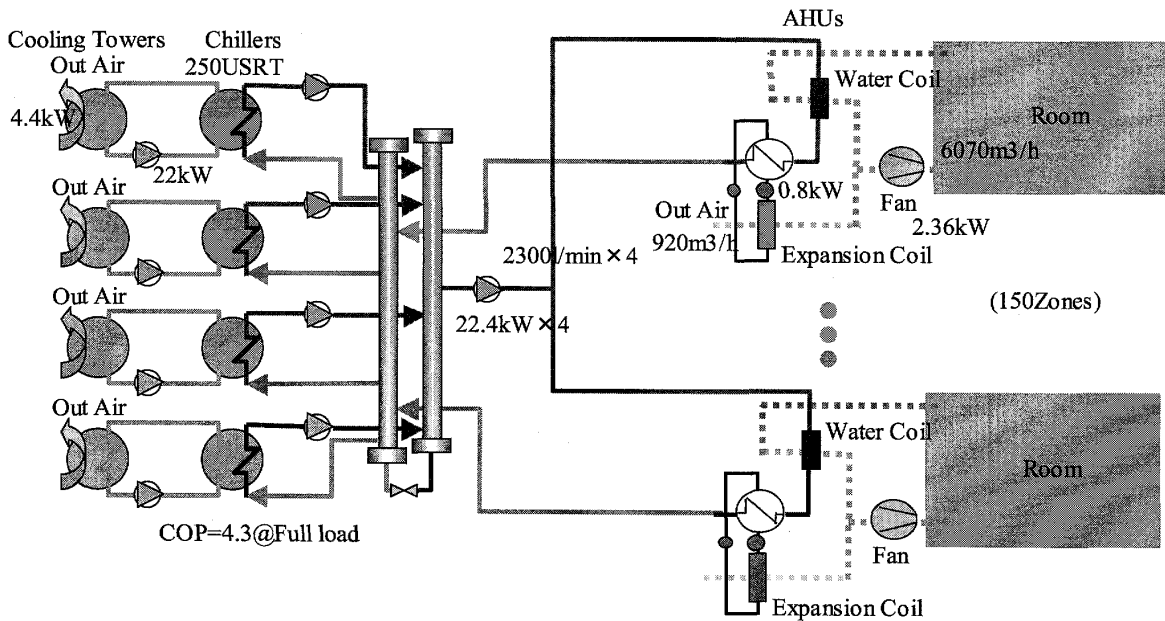


図4 オフィスビルの空調系統

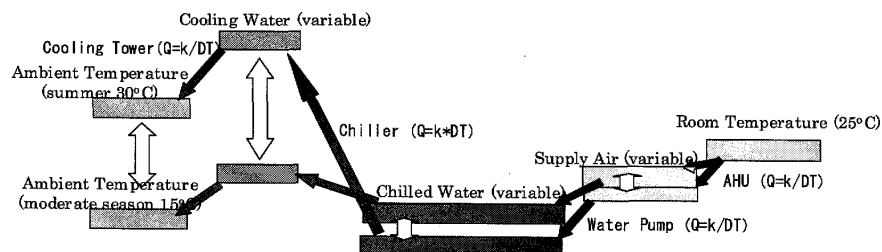


図5 空調システムの最適運用

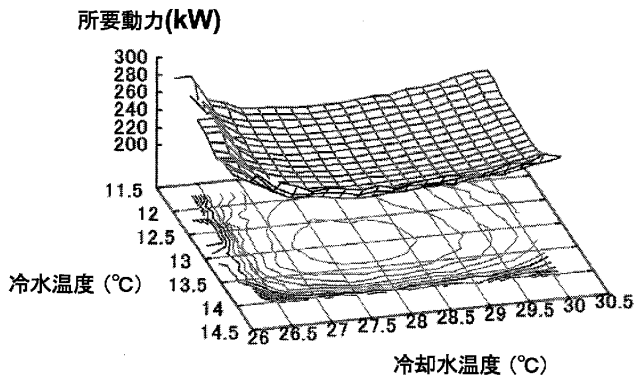


図6 電力消費量の冷水と冷却水温度依存性

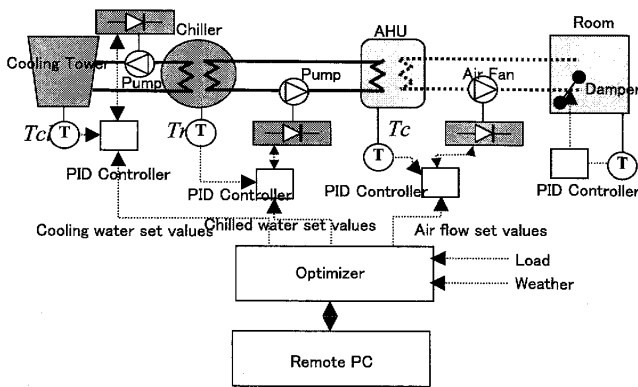


図7 空調最適運用システムの構成

最適化計算に用いるモデルが正しければ、この制御システムにより空調システムの消費エネルギーは最小に抑制される。これが経年劣化などにより変化した場合には、必要に応じて、測定データを用いてモデルを修正する。この機能は遠隔PCにて実現される。

3. 連携省エネ空調制御の運転関数

前節で提案した連携省エネ空調制御を実現する運転関数を、モデルとしたビルに対して求めた結果を紹介する。空調システム最適化計算は下記の空調条件を所与として、SQP法(逐次2次計画法)を用いて行う。

- ・ 外気条件 (温度, 湿度)
- ・ 換気最低風量制約
- ・ 負荷条件 (顕熱発生量, 潜熱 (水蒸気発生量))
- ・ 空調空間条件 (温度, 湿度, PMV)

この空調システム最適状態量の算出をリアルタイムで実行する必要があるが、最適解の得られない場合が想定される。そこで、空調システム運転の実務上、最適化計算の安定性確保と結果のリアルタイム出力を実現するために、得られた最適状態量と上記空調条件との関係を運転関数で表すことにする。ここでは k 番

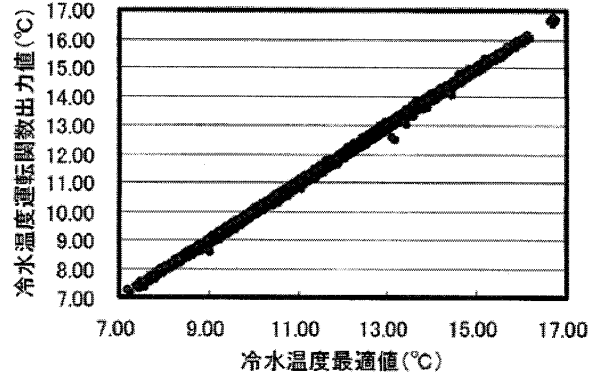
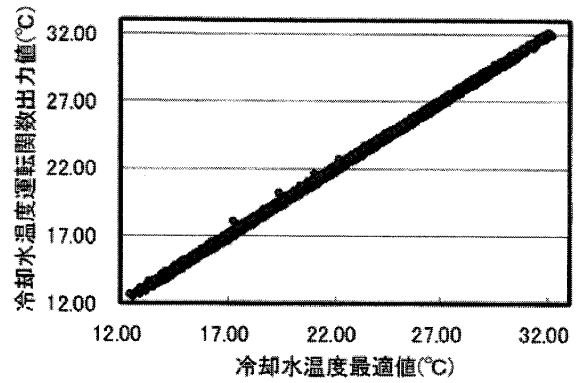


図8 最適値と回帰データ

目の状態量 Y_k を、 c_{ijk} を2次式の係数として

$$Y_k = c_{00k} + \sum_{i=1}^m c_{i0k} X_i + \sum_{i=1, j=i}^m c_{ijk} X_i X_j \quad (2)$$

で表す。ここで m は変数の個数、 X は以下の状態を表す。

X = 空調空間設定温度/湿度, 外気温度/湿度, 室内顕熱/水蒸気発生量

Y = 冷水温度, 冷却水温度, 冷水流量, 冷却水流量, ……

図4に示すビルモデル設定の下に空調システムの最適化計算を行い、運転関数を決定した。空調空間の設定温度と湿度はそれぞれ26°C, 55%で固定した。外気条件(温度/湿度)は5月から10月までの東京の気象データに基づいて乱数を用いて生成したもので、これにより空調条件の季節性を考慮した省エネ効果を評価することができる。空調空間負荷についても運転関数を求めるために乱数を用いて数多くの値を発生させた。これより得られた数多くの空調条件に対する最適解を、最小2乗法を用いて2次関数で近似し(2)式の運転関数を作成した。図8に運転関数出力値と元データとの関係を表す散布図を示す。代表例として、冷却水温度と冷水温度を示す。

同図より、回帰曲線により良い近似で元データを再現できることを確認した。

4. 省エネ性能の評価

提案する次世代空調システムの性能を検証するために、ビル空調システムシミュレータを開発した。本節では、その概要とシミュレータによる省エネ性能評価の結果について述べる。

4.1 モデルビル

省エネ性能を評価するためのモデルビル空調システムは、図4のオフィスビルである。このシステムの各機器の特性を以下に示す。

(冷却塔)

冷却塔はHVACSIM+(J) [5]に採用されたモデルを用いて計算している。モデルの特性を図9に示す。

(中央熱源)

モデルは文献[6]のチラーモデルを用いている。仮定したCOP特性を図10(a)(b)に示す。

(空気調和器)

ここで交換される熱量を以下の式で表現する。

$$Q = Nr \times Fa \times K \times Cws \times \Delta T \quad (3)$$

Nr : コイルの列数

Fa : コイル正面面積

K : 熱貫流率 W/m^2K

Cws : ぬれ面係数

ΔT : 対数平均温度差

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{5117.9 \cdot v_w^{0.8758}} + \frac{1}{728.95 \cdot v_a^{0.6045}} + 0.00022 \quad (4)$$

(4)式の熱貫流率を冷水の流速と風速に対してプロットした特性を図11に示す。

(ポンプ・ファン)

ポンプおよびファンは、流量の3乗則に従う。

$$P_{pump} = P_0 (F_w / F_0)^3$$

また、空調負荷は表1の仮定とした。

以上のモデルを組み合わせて空調システムシミュレ

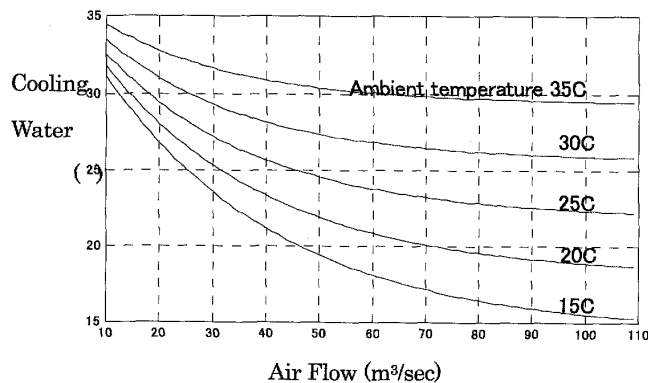


図9 冷却塔の特性

ータを構成した。

4.2 消費エネルギーのシミュレーション比較

5月から10月までの月別エネルギー消費量の比較結果を図12(上)に示す。冷房負荷の小さい10月や5月の次世代空調機—連携省エネ空調制御の省エネ率が最も高いことを見て取れる。特に、冷房負荷の最も小さな10月はCAV方式に比べて約50%の省エネ率となっている。モデルビルはインバータ制御を適用したCAVである。したがって、本研究の省エネ率とし

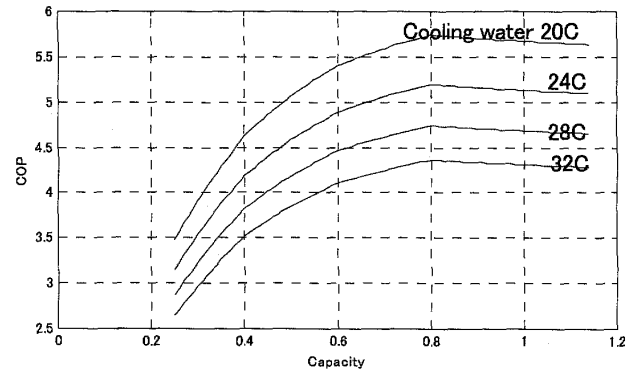


図10(a) 冷却水温度依存性

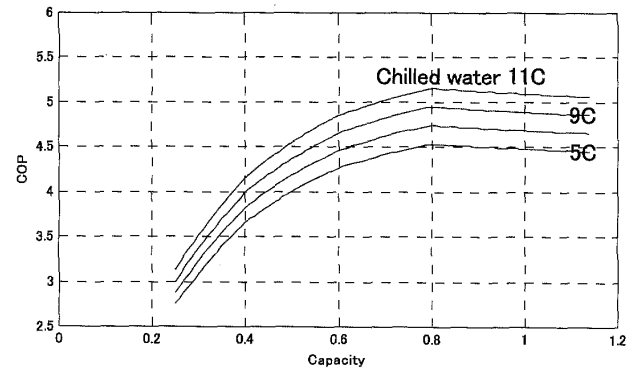


図10(b) 冷水温度依存性

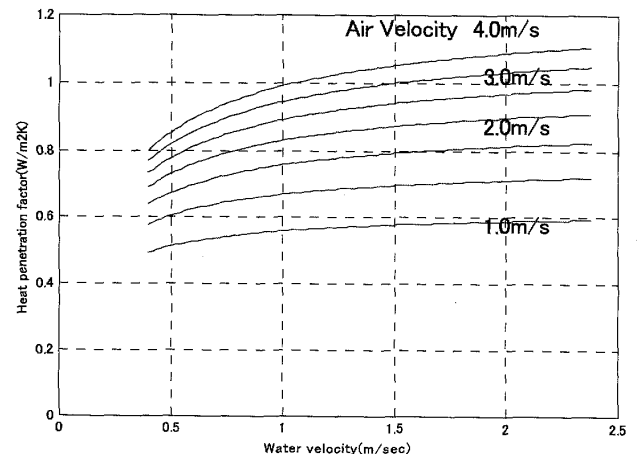
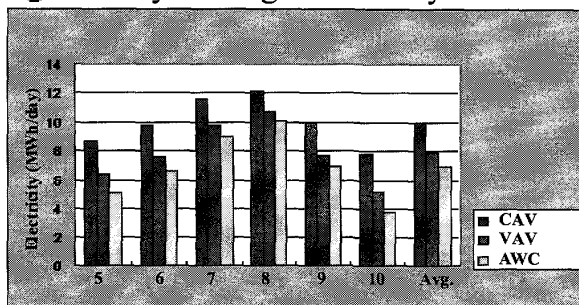


図11 空調機コイルの特性

表1 部屋負荷

Heat Load/Room	
Human(kW)	2.17
Apparatus(kW)	5.61
Light(kW)	3.74
Room Volume(m ³)	486
Steam generation(g)	1

① Monthly Average Electricity



② Electricity for each apparatus

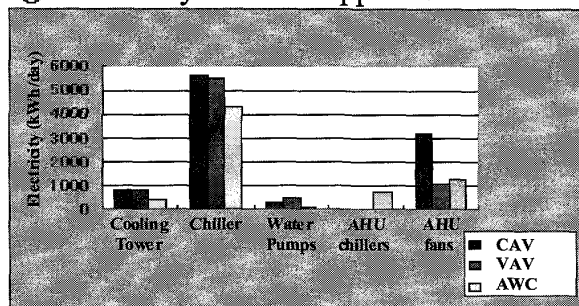


図12 最適運用による省エネ評価結果

てはCAV方式との比較を行うが、参照としてインバータ制御タイプのVAV方式をモデルビルに適用した場合も評価した。インバータ制御VAV方式は、図12(下)の機器別消費エネルギーによると、空調機ファン動力においては最も省エネルギーとなっているが、中央熱源の消費エネルギーやポンプ動力において次世代空調機より消費エネルギーが大きい。

以上述べたように、すべてのシステム機器を最適省エネ制御している効果が現れている。なお、この最適化制御による空調運用条件の日変化の一例を図13に示す。

5. 終わりに

オフィスビルの空調は、低中間負荷運用が多い上に、

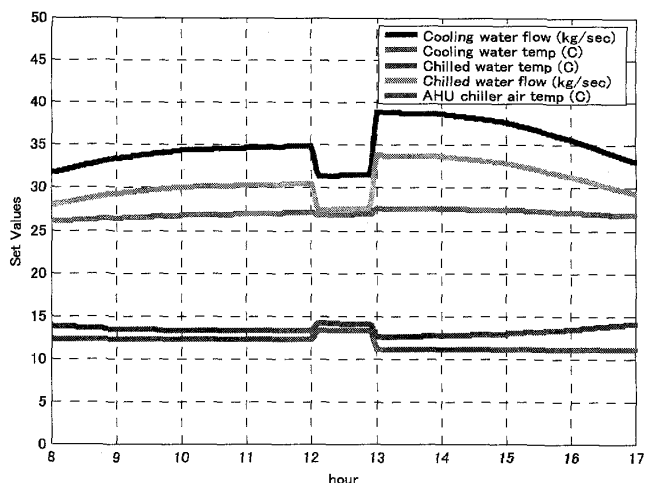


図13 最適運用による空調運用

顕熱の比率が高い。そこで、低温と中温のコイルを持つ次世代空調機により中央熱源の効率改善を図る次世代業務用空調システムが有効である。また、ビル空調の水のネットワークと空気のネットワークを連携させて制御する「連携省エネ空調制御」が有効である。

なお、本研究はNEDO技術開発機構から「エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発/次世代業務用空調機とシステムの研究開発」に係る開発を業務委託されて行った研究の一部である。

参考文献

- [1] <http://www.usgbc.org/ShowFile.aspx?DocumentID=5033>
- [2] 省エネルギーセンターホームページ, <http://www.eccj.or.jp/audit/build06/01-01.html>
- [3] 建築設計資料集成, Vol. 10, 技術, 日本建築学会編, 丸善.
- [4] 田中良彦, 「空調システムの最適化を目的とした統合的設計・運転手法の必要性について」, エネルギーソリューションフェア'06 講演資料 (2006).
- [5] 空気調和・衛生工学会編, HVACSIM+(J) 利用者マニュアル, (1999).
- [6] 高木, 岩淵, 他, 「空調システム評価のための熱源器モデルの開発」, 計測自動制御学会論文誌, Vol. 40, No. 7, pp. 762-769 (2004).