

幅広いファシリティに対応できる トータル省エネソリューション

Total Energy-Saving Solution for Wide Variety of Buildings

高木 康夫 酢山 明弘 山崎 謙一

■ TAKAGI Yasuo ■ SUYAMA Akihiro ■ YAMAZAKI Kenichi

空調や電気を供給してビルや工場を支える機能をファシリティと呼び、施設の消費エネルギーの大きな部分を占める。近年、空調をはじめとしたファシリティの省エネが極めて重要な課題になっている。

東芝は、ビルから工場やデータセンターまで幅広いファシリティに対応するトータル省エネソリューションを開発した。このソリューションは、扱うプロセス、例えば、ビル空間の基礎特性を重視した忠実なモデルと、そこで活動する人の感性に基づいた快適性指標を用いることを特徴としている。熱や電気、空気や蒸気の現象を忠実に現したシミュレータをベースに、表面的な調整では到達しえない真の省エネを実現する。更に、対象の深い理解によるモデルと統計学に基づいた高信頼保全システムを構築した。

There is growing demand for energy-saving solutions for air-conditioning and electricity supply in a wide variety of facilities including buildings and factories. In response to the broad range of needs for energy conservation in recent years, various so-called optimal systems have been put on the market.

Toshiba has developed a total energy-saving solution that is based not only on accurate modeling of the basic characteristics of a building space, but also the sensitivities of the people engaged in activities there. This solution incorporates a simulator that faithfully simulates heat, electricity, and air and vapor phenomena, achieving a superior level of energy saving that has never been realized by more cursory methods. We have also developed a highly reliable maintenance system using thermodynamics, fluid dynamics, and statistical methods.

1 まえがき

京都議定書の発効に伴い、わが国は2008～2012年の期間中に、温室効果ガス排出量を1990年に比べ6%削減することが求められている。しかし、オフィスビル（以下、ビルと略記）が属する業務その他部門では、2005年度で1990年比約45%増加と、主要部門では最大の増加となっている⁽¹⁾。更に、このビルの消費エネルギーの40～50%は空調にかかわるエネルギーであり、空調システムの省エネ性能が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。また、工場や近年急激に増大しているデータセンターでも、空調をはじめとしたファシリティの省エネは極めて重要な課題である。

東芝は、ビルから工場やデータセンターまで幅広いファシリティに対応するトータル省エネソリューションを開発した。提供するソリューションは、対象プロセスの基礎現象を忠実にモデル化した“モデルベース開発”によって構築した技術である。ここではビル空調を例に、その基本的な考え方について述べる。

2 トータル省エネソリューションを支えるシステム

当社の省エネソリューションは、顧客価値の最大化を目指して、顧客の要望に応えた設計からシステム構築、メンテナンスまで、ライフサイクル全般にわたるすべてのプロセスを、その基

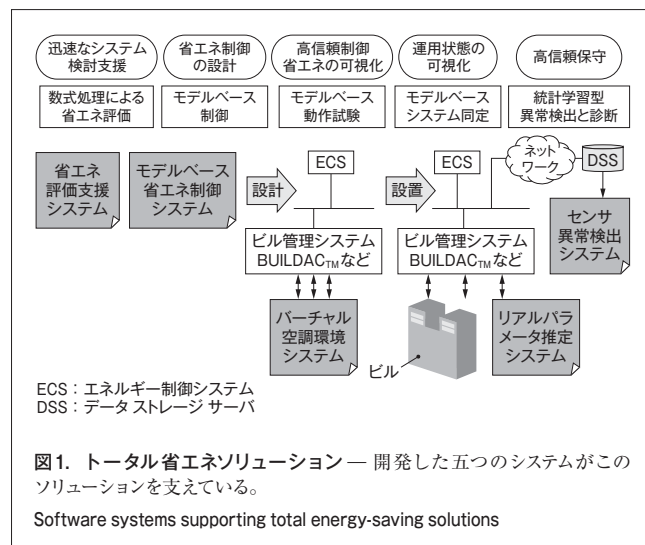


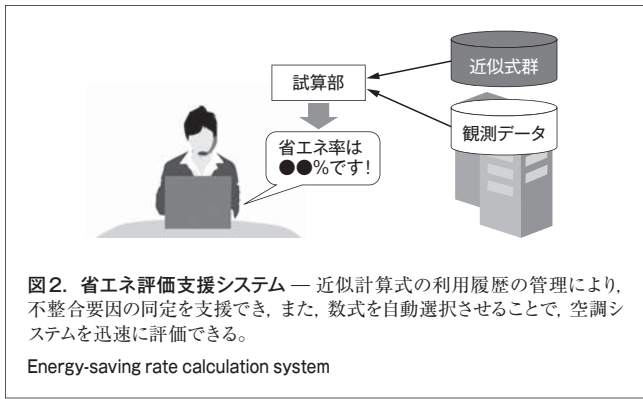
図1. トータル省エネソリューション— 開発した五つのシステムがこのソリューションを支えている。

Software systems supporting total energy-saving solutions

礎現象に立ち返ったモデルベース開発により実現した。同時に、省エネ性能などをわかりやすく可視化することで、省エネを達成することを目指している。このソリューションは図1に示すように、省エネ評価支援、モデルベース省エネ制御、バーチャル空調環境、リアルパラメータ推定、及びセンサ異常検出のシステムで構成されている。

2.1 省エネ評価支援システム

近年、ビルの競争力を保つうえでリニューアルが重要になっ

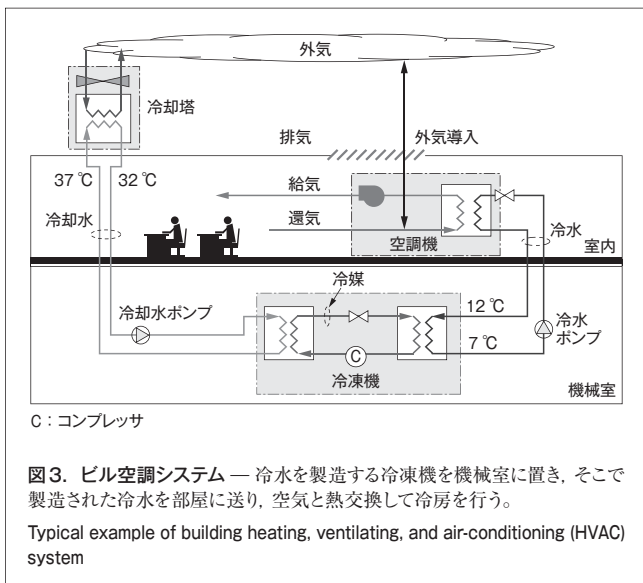


ている。空調設備をリニューアルする場合、その前後でのエネルギー削減量は設備の採用可否を決める重要な要素の一つである。もっとも単純な省エネ量は、更新前後で同程度の冷暖房能力を前提に、必要な消費エネルギーの差として求める。しかし、試算の元となるデータが不足していることも多く、経験式や仮定値を用いた近似計算が不可欠となる。例えば、空調と照明を合わせた電力量しか記録されていなければ、照明の定格や使用時間などから計算された照明使用分を差し引いて空調使用分とする。近似計算は部分的に妥当な値が得られているように見えても、全体で見直したときに不整合が生じる可能性がある。ビルの規模が大きくなると不整合を引き起こす要因の同定が難しくなる。

開発した省エネ評価支援システム(図2)は、数式で記述された近似計算式の利用履歴を管理することで不整合要因の同定を支援する。また、利用可能な数式をわかりやすくガイダンスすることにより、顧客の要望に応じた空調システムの評価を迅速に行い、きめ細かな提案を実現する。

2.2 モデルベース省エネ制御システム

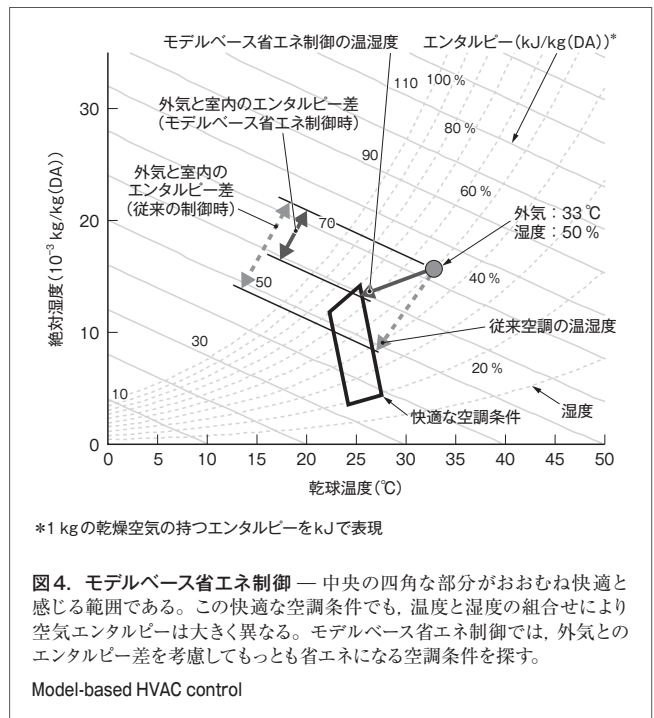
図3に示すビル空調システムは、地下の機械室に冷凍機が



設置され、冷却塔が屋上に設置される典型的な空調システムの例である。そこで製造された冷水を空調空間に供給する。ビルマルチエアコンといわれる分散型空調システムも近年増加している。空調空間ではこの冷水と部屋の空気を熱交換することで部屋の温度と湿度を整える。また、外気の適切な導入も空気質を確保するために重要である。モデルベース省エネ制御システムは、このビルの特性を忠実に表現するモデルを用いて、その特性を利用することで省エネを実現する空調制御システムである。

実際のビルモデルは、多数の部屋と複数の冷凍機があり、複雑なものとなる。特にエネルギー消費に大きな影響を与える特性としては、部屋の熱を外気に放出する冷凍機の冷凍サイクル特性と、部屋や外気の空調条件とそのエンタルピー(注1)を表した空気線図がもっとも重要である。冷凍サイクル特性は熱をくみ出す効率に大きく影響する。空気エンタルピーは空調負荷そのものに関係する。

また、空調はそこで働く人が快適に過ごすためにあり、消費エネルギーが小さければそれだけでよいというものではない。当社は人の快適性を表す指標としてPMV (Predicted Mean Vote) 指数⁽²⁾を採用している。この指標は、人の発熱と熱の放散バランスから快適性を指標化したもので、熱が体内にこもり体温が上昇したり、逆に熱が逃げて体温が下がると、その程度に応じた“不快さ”を表す。また、温度や湿度のほか、気流速や人の活動量、着衣の量も考慮できる実用性の高い指数で



(注1) 熱力学で用いる物理量で、圧力と体積の積に内部エネルギーを加えた量。

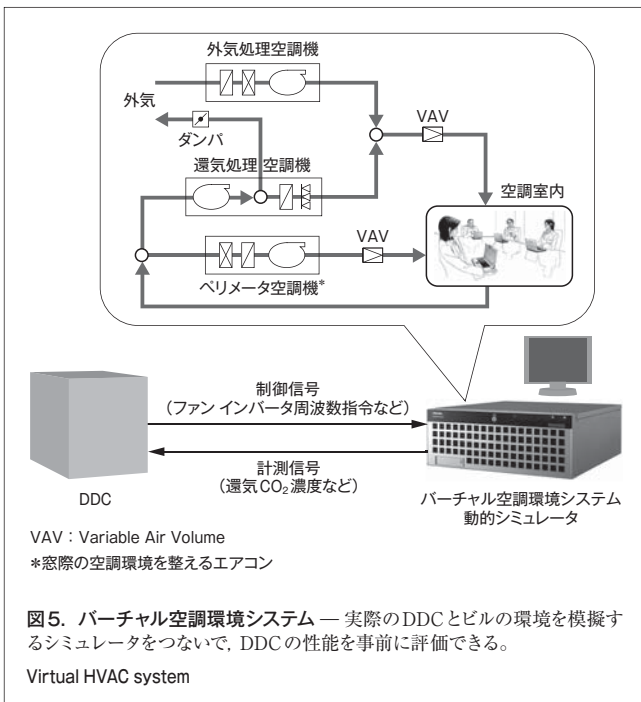
ある。PMVがゼロ近辺のとき、もっとも多くの人は快適と感じ、正側に外れるほど暑く、負側に外れるほど寒く感じる。

開発したモデルベース省エネ制御システムでは、これらの重要な特性モデルを十分な精度で再現し、ビルのエネルギー消費モデルを作成する。そして、この特性に従って快適性を確保しつつ省エネを達成する空調条件を、事前に外気条件や部屋空調負荷の関数として表す。空調システムをこの指示値に従って動作させることで、快適性と省エネ性能を両立させることができる。

モデルベース省エネ制御による空調制御の省エネ性能の一つを空気線図(図4)を用いて述べる。空調空気の特徴は空調負荷に大きな影響を与える。そこで、湿り空気エンタルピー特性をモデル化し、人の快適性をPMV指標を用いて確保しながら、もっとも消費エネルギーが少なくなるように空調環境を制御する。中央部の四角の内側が、ほぼ快適とみなせる空調条件であり、PMVは-0.5～+0.5の範囲内である。この範囲内でも湿り空気エンタルピーは図に示すように湿度に大きく依存する。モデルベース省エネ制御では、この空気の特徴に基づき、もっとも望ましい部屋条件や空調条件を実現する。

2.3 バーチャル空調環境システム

ビルの空調負荷は年間を通じて大きく変化する。盛夏には能力いっぱいの冷房を求められる一方、厳冬期には暖房も要求される。また、風薫る5月には、外気をもっとも快適である。これに対応した空調システムの制御は従来ブラックボックス化した経験と勘で調整されてきており、その仕上がりを外から見ることは難しかった。そこで、これを可視化し、安心して空調システムを使えるようにするために、空調システムの動的



なふるまいをリアルタイムで模擬するシミュレーション環境“バーチャル空調環境システム”(図5)を開発した。

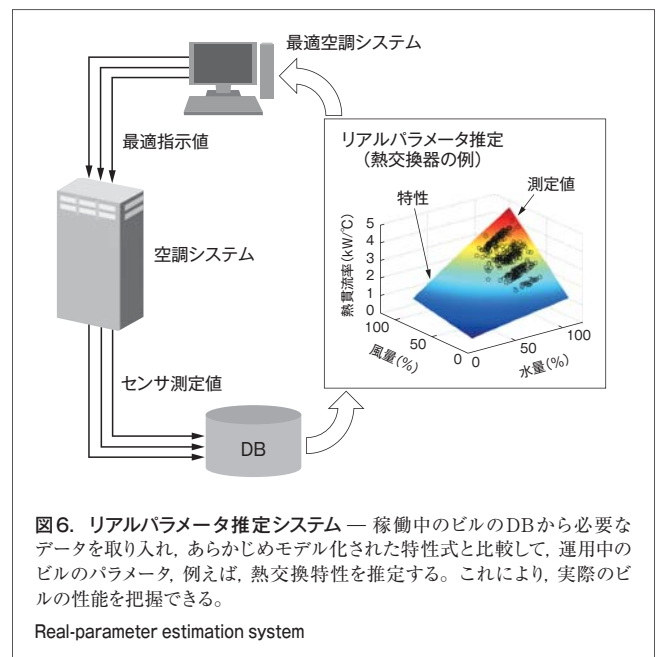
空調設備の熱交換特性や通風系統の風圧バランス、空調室内の蓄熱特性などを高速に模擬するシミュレーションモデルで構成し、空調設備への制御信号と外気温や日射データなどを入力として、空調システムの温度、湿度、及び二酸化炭素(CO₂)濃度変化などを動的に模擬した計測信号をリアルタイムで出力する。

このシミュレーションモデルを搭載した動的シミュレータは、空調コントローラDDC(Direct Digital Controller)と信号を入出力するインタフェースを備えており、空調コントローラと動的シミュレータを連係して行うHILS(Hardware in the loop simulation)試験により空調コントローラの制御動作の検証と調整ができる。

バーチャル空調環境システムを用いることで、年間を通じた空調システムを短時間で評価でき、システムの信頼性向上に大きく貢献している。

2.4 リアルパラメータ推定システム

実際のビル特性は、稼働状態にあるビルから得られたデータを解析しないと十分な精度を得ることは難しい。リアルパラメータ推定システムは、空調設備の代表特性である熱交換や消費電力の特性の経年変化に追従し、ビル性能を検証したり、また、モデルベース省エネ制御の効果を維持し確保するための仕組みである。熱交換器、ファン、ポンプ、及び冷凍機は、空調システムを構成する代表的な機器である。これらは、経年変化に伴い熱伝達率が変化したり、フィルタの目詰まりなどで電力消費量が増加したりする。省エネ性能を維持するために、稼働中の空調システムの特徴を推定し、モデルベース省



エネ制御に反映することが求められる。

このシステム(図6)では、ビルエネルギー管理システム(BEMS: Building Energy Management System)のデータ収集機能により稼働中のビルの測定値をデータベース(DB)に蓄積し、リクエストに応じて各種装置のパラメータを最小二乗法により推定する。構築したビルモデルに基づきデータを解析するモデルベースの同定を行うので、効率よく的確にパラメータを推定できる。これにより、ライフサイクルにわたってビル設備の性能を検証し、また、モデルベース省エネ制御の効果を最大限引き出すことができる。

2.5 センサ異常検出システム

ビル空調の計装システムで省エネと快適性を保証するには、大規模ビルで数千~数万台にも及ぶセンサとアクチュエータの点検作業が必須である。従来は全数を対象に標準器との比較及び単体動作確認をする全数点検方式であったため、多大な作業時間を必要とした。また、点検作業のため車両を使用した出勤を何度も伴いトータルでは環境負荷を増加させる問題があった。

実際のシステムでは、較正(こうせい)や修理をするセンサとアクチュエータは年間で全数の5%未満と少ない。点検頻度を減らす方法も考えられるが、省エネと快適性制御に対する信頼性を維持するため、状態監視保全技術に対する期待が高まっている。

センサ異常検出システムは、データストレージサーバ(DSS)

に蓄積されるビル空調システムの状態量時系列データを入力として、各センサとアクチュエータのメンテナンスの必要性を定量評価し視覚化する状態監視型の保全システムである。点検する必要があるセンサとアクチュエータを事前に絞り込むことができ、信頼性を下げないで作業効率の向上と出勤回数を低減できる(図7)。

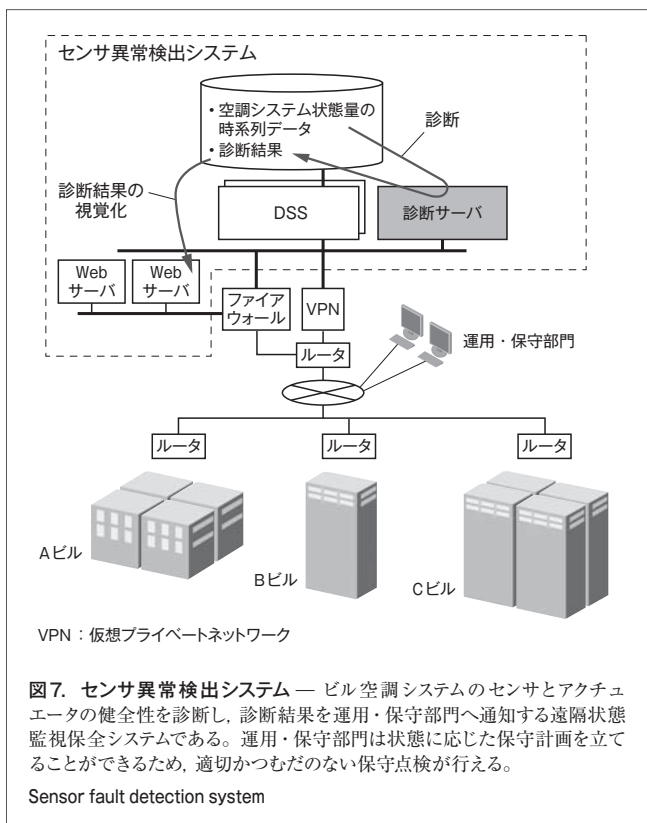
センサ異常検出の診断には、隣接センサ傾向やエネルギー保存則などをモデルとした構造化残差法を適用している。構造化残差法はシステム状態量から異常要因を分離する手法である。実システムでは可観測状態量に制約が存在するため、開発にあたり、制約条件の下で、多様な空調システムに対して異常診断パフォーマンスが最大になるように構造化残差モデルを設計した。この診断方式の導入によって、診断用のセンサを追加することなく、全数点検方式と比べて作業時間を60%短縮できる。

3 あとがき

ここでは、対象プロセスの本質をとらえた物理モデルに基づき、ファシリティのライフサイクル全般を支えるモデルベース技術について述べた。これは、システム提案や省エネ実現のための制御、性能の検証、メンテナンスなど、必要な主要機能を含んでいる。今後は、このシステムを広範に普及させ、地球温暖化の防止に寄与したい。

文献

- (1) 温室効果ガスインベントリオフィス。"日本の2007年度5月版温室効果ガス排出量データ(1990~2005年度)". 国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス ウェブページ。 <http://www.gio.nies.go.jp/aboutghg/data/2007/n001_6gas_2007-gioweb_J1.5.xls>, (参照2010-04-20).
- (2) Fanger, P.O. "Calculation of Thermal Comfort. Introduction of a Basic Comfort Equation". ASHRAE Trans. 1967, p.III.4.1 - III.4.20.



高木 康夫 TAKAGI Yasuo, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 制御システム開発部主幹, 工博。制御システムの開発に従事。計測自動制御学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



酢山 明弘 SUYAMA Akihiro, D.Eng.

研究開発センター システム技術ラボラトリー研究主務, 工博。データマイニングに関する研究・開発に従事。人工知能学会, 情報処理学会会員。
System Engineering Lab.



山崎 謙一 YAMAZAKI Kenichi

社会システム社 府中事業所 社会インフラシステムソリューション部主務。ビル管理システム及び快適空調制御システムの開発・設計に従事。
Fuchu Complex