

空調システムダイナミックシミュレータ“TACSS”

“TACSS” : Dynamic Simulator for Optimal Design on HVAC Systems

省エネルギーとライフサイクルコストの観点から、空調システムの総合検討を行なうシミュレータを開発した。すなわち、概略仕様の策定と運転経費の算出を行なうTACSS-S、空調システムの挙動を動的に模擬し、空調品質と省エネルギー効果を評価するTACSS-D及びこれと結合して最適制御の検定を行なうTACSS-Cの3プログラムである。実ビルによるシミュレーションの検証では、4%以内の計算精度を示している。外気冷房と設定温度変更による省エネルギー制御例を終わりに示す。

西村征二*	Seiji Nishimura
前川敏明**	Toshiaki Maekawa
亀島鉦二***	Kôji Kamejima
松本邦顕****	Kuniaki Matsumoto
細羽雅雄*****	Masao Hosoba

1 緒言

エネルギーの供給不安とエネルギー単価の高騰を背景として、空気調和(以下、空調と略す。)技術の分野でも省エネルギーの諸施策が進められている。

空調設備のコストに対する考え方もかつてのイニシャルコスト重視からランニングコストも含めたライフサイクルコスト重視へと変遷しつつある。この顧客ニーズに合致した空調システムを実現するには、建物構造、用途、空調方式、設備機器及びそれらの制御までを含めたトータルとして最適なシステム計画、設計を行なう必要がある。

空調系統例を図1に示す。空調の設計は、

→熱負荷予測→設備容量など仕様想定→コスト算出→評価

のループを、

構想→基本計画→基本設計→実施設計

と段階を進めるにつれ、検討内容を細密にしていくのが通常である。すなわち対象建物に適用可能な幾つかの空調システムを想定し、それぞれについて設備費、運転費、制御性(快適性)などの面から比較検討を重ねて、最適なシステムを抽出していく。従来このような検討を詳細に行なうには多大な労力を要するので、概略の比較、検討にとどまっているのが通例であった。ところが、熱負荷は気象条件や居住域の使用状態に依存して変化するため、空調システムはそれに対応し時系列的に複雑な挙動を示すことになる。したがって、空調システムのランニングコストを精度良く把握するためには、挙動を時系列的に追跡する手段が必要である。また制御性の評価に当たっては、フィードバックループでの熱的応答の時間遅れを知る必要がある。以上の認識の基に、省エネルギーを実現する空調システムの設計に当たりその効果を定量的に把握し、空調方式と運用方式の評価をするツールとしてコンピュータによるTACSS(Total Air-Conditioning System Simulator:空調システムシミュレータ)を開発した¹⁾。

2 TACSSシリーズの機能と適用

空調システムの省エネルギー化へのアプローチには経済性への配慮を加えつつ、次の四つの方面から十分な検討を行なわなければならない。

- (1) 建屋構造(材質、形状、方位など)の検討
- (2) 空調用機器の高効率化の検討

(3) 空調方式の検討(適切な機器の種類、容量の決定を含む。)

(4) 運転方式又は制御方式の検討

以上の項目はそれぞれを単独に検討するのは片手落ちで、建屋、空調設備機器とそれを使う人間を一つの有機体、すなわちシステムとして認識し、それぞれ相互への影響を含めて検討すべきである。すなわち空調システムを熱負荷の導出から始めて、空調方式、設備機器及びそれらの制御までを含めたトータルシステムとしてとらえ、定量的裏付けのもとに最適化を図る必要がある。しかし従来は、これらの要因間の多岐にわたる相互関係を大胆に省略し、大部分の条件を固定ないしは仮定して考えていた。ここに実空調システムの挙動を、

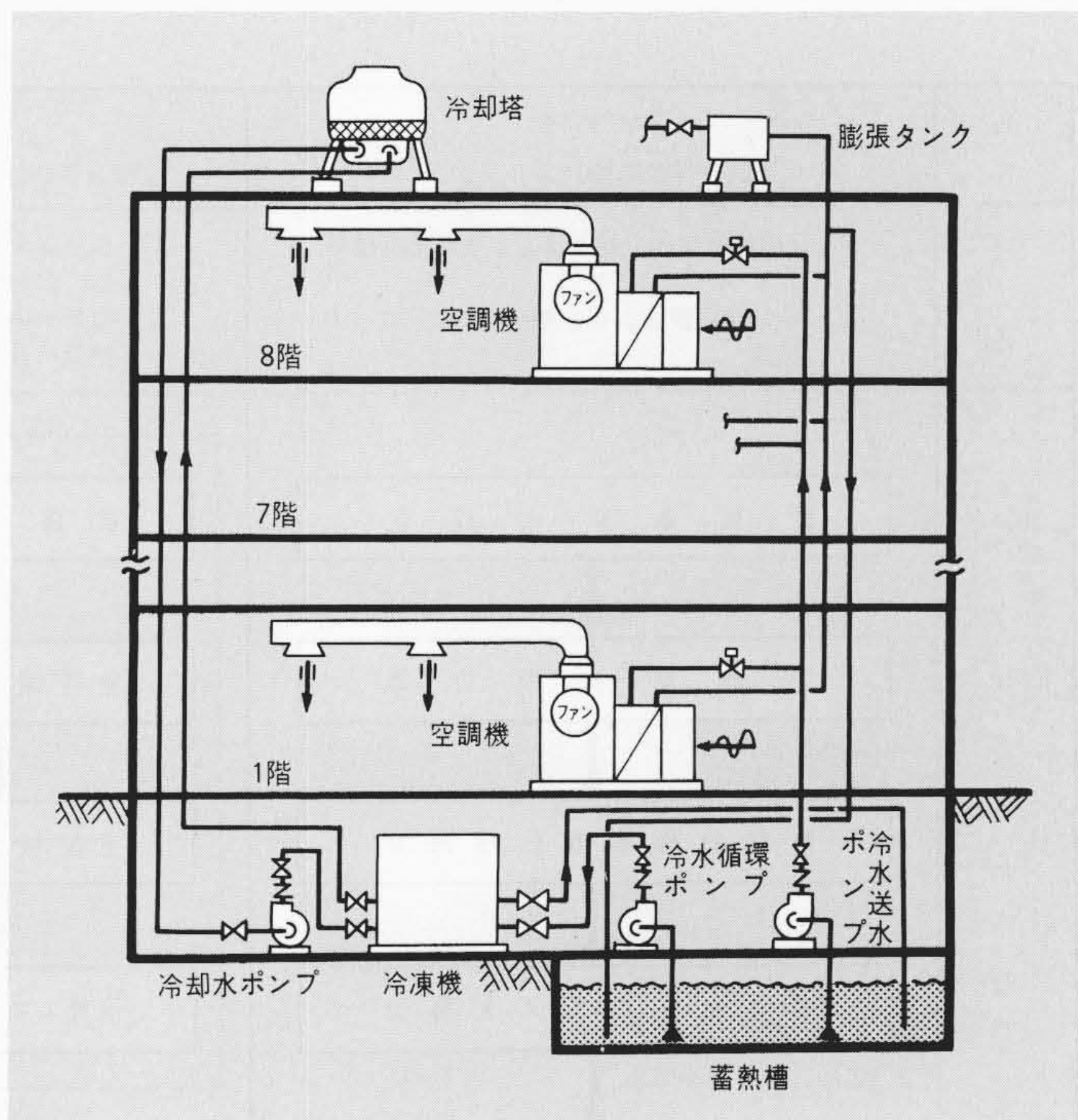


図1 空調系統図(冷房)の例 空調システムは、冷凍機、ボイラなどの熱源系、冷・温水送水ポンプ、配管などの搬送系及び空調機などの空調系から成り立っている。

* 日立製作所システム事業部 ** 日立製作所システム事業部 工学博士
***** 日立製作所機電事業本部

*** 日立製作所機械研究所 **** 日立製作所システム開発研究所

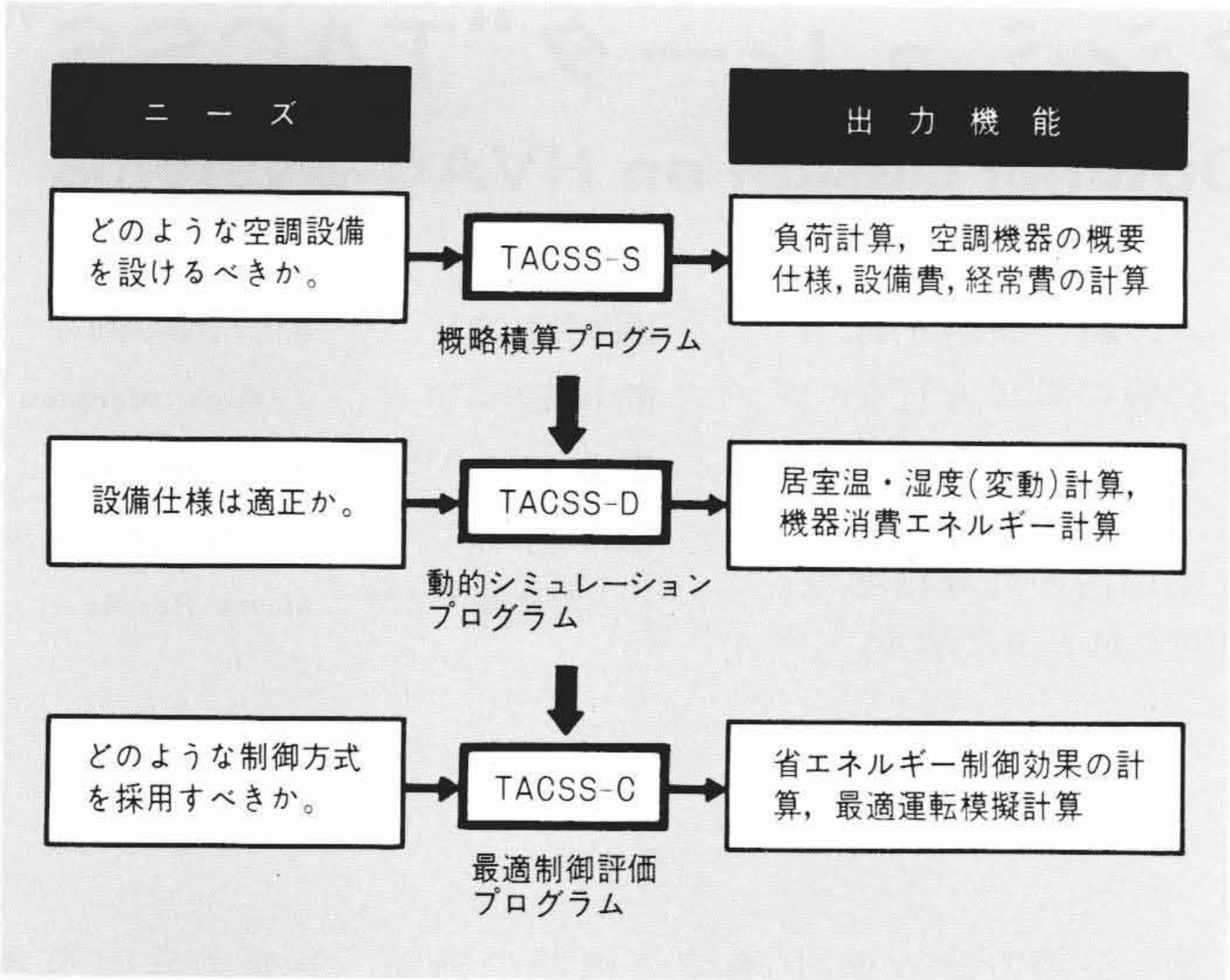


図2 空調システムシミュレータ「TACSS」の種類 計画，設計の各段階のニーズに応じ，各々に対応して3種類のプログラムが用意されている。

コンピュータ上で模擬するシミュレーションプログラムの有用性がある。

今回開発した空調シミュレータTACSSは，三つの独立したプログラム群から構成されており，図2にニーズとそれに対応したプログラム名称及び出力機能を示す。

3 TACSSの概要

図3にTACSS-S，D，C各プログラムの概要を示す。以下それぞれの機能と特徴，処理流れと入出力内容を概説する。

3.1 TACSS-S

TACSS-Sは，与えられた建物の概略仕様に基づき，まず熱負荷の計算を行ない次に適用空調機器の仕様を選定し，設備費を算出し，更に運転費，経常費まで求める。TACSS-Sは主として空調システムの構想，基本計画の段階で各種方式案の比較検討を行なう際の使用を目的としたもので，簡便に使えるように入力の簡素化，設計者の設計意図をプログラム上に自由に表現できるようにプログラム構造の柔軟化を図っている。空調熱負荷計算は周期定常形を採用し，計算精度の向上とともに計算時間を短縮した。入力項目を表1に示すが，情報量の少ない計画初期段階でも利用可能なように必須入力データは(a)～(c)と極力少なくしている。必須データ以外で未知のものは，室の用途などから適当な値が自動セットされ計算が実行される。出力例を図4に示す。

表1 TACSS-Sの入力データ 計画の初期段階でも使用可能なように，必須データ以外の入力データがなくても建物の構造，室の使用用途などにより適当な標準値が自動セットされて，計算が実行される。

項 目	細 目	
(a) 建 物 規 模	延面積・階数	デ ビ ル タ カ
(b) 居住域データ	用途・床面積・壁体面積・窓面積	
(c) 空 調 デ ー タ	空調機方式・ゾーニング	
(d) 建 物 デ ー タ	所在地・階高・壁体仕様・窓仕様	
(e) 設 計 条 件	外気温・湿度・日射量・室内設定温・湿度・人員・照明・外気量・運転スケジュール	
(f) 設 備 デ ー タ	蓄熱槽容積又はピークカット率・機器台数・ダクト方式・換気方式・計装方式	
(g) コストデータ	エネルギー単価・償却方法・償却年数・割り掛け率	

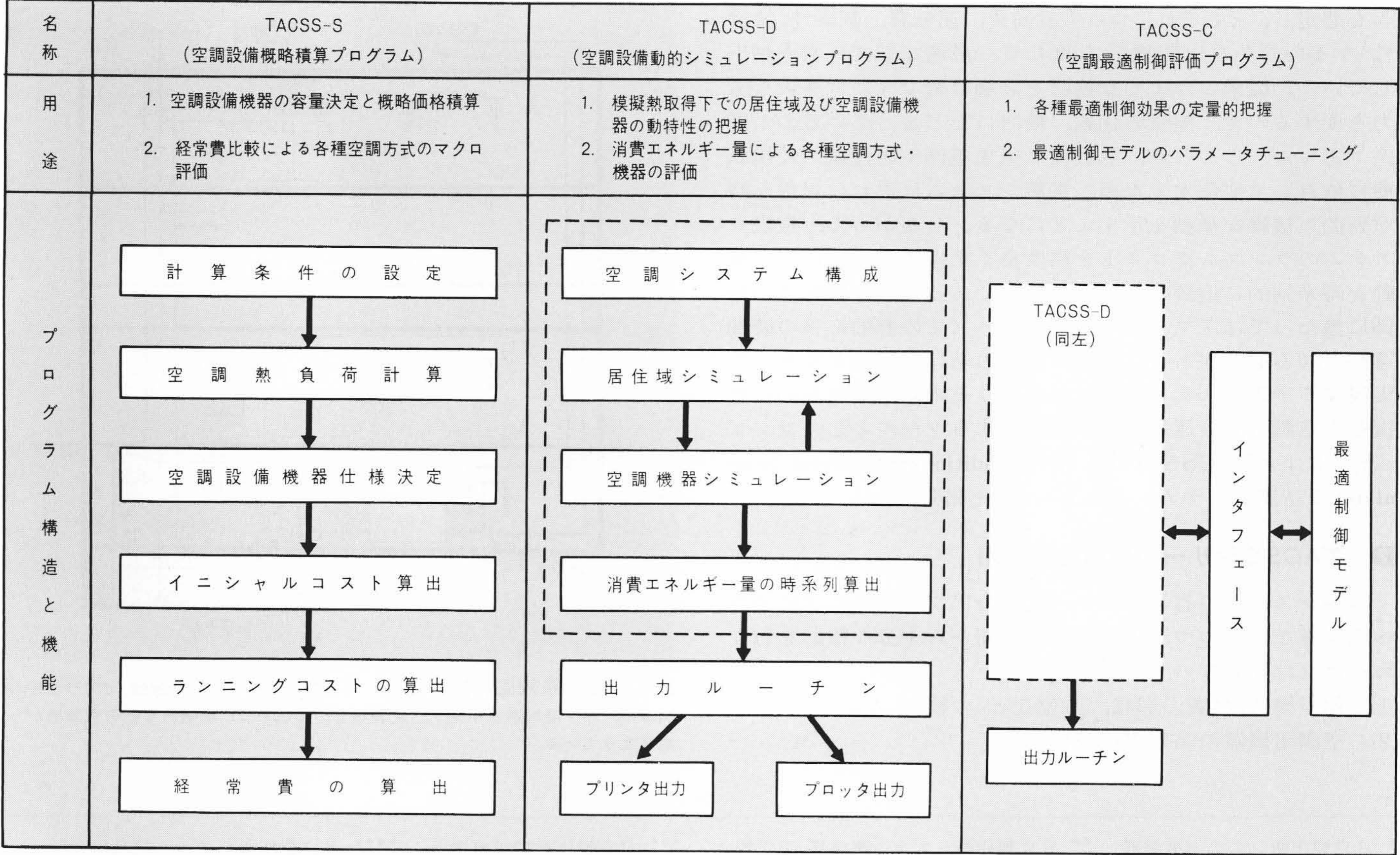


図3 空調システムシミュレータの概要 TACSS-Sは周期定常熱負荷計算方式を，TACSS-D，Cは非定常熱負荷計算方式を採用している。

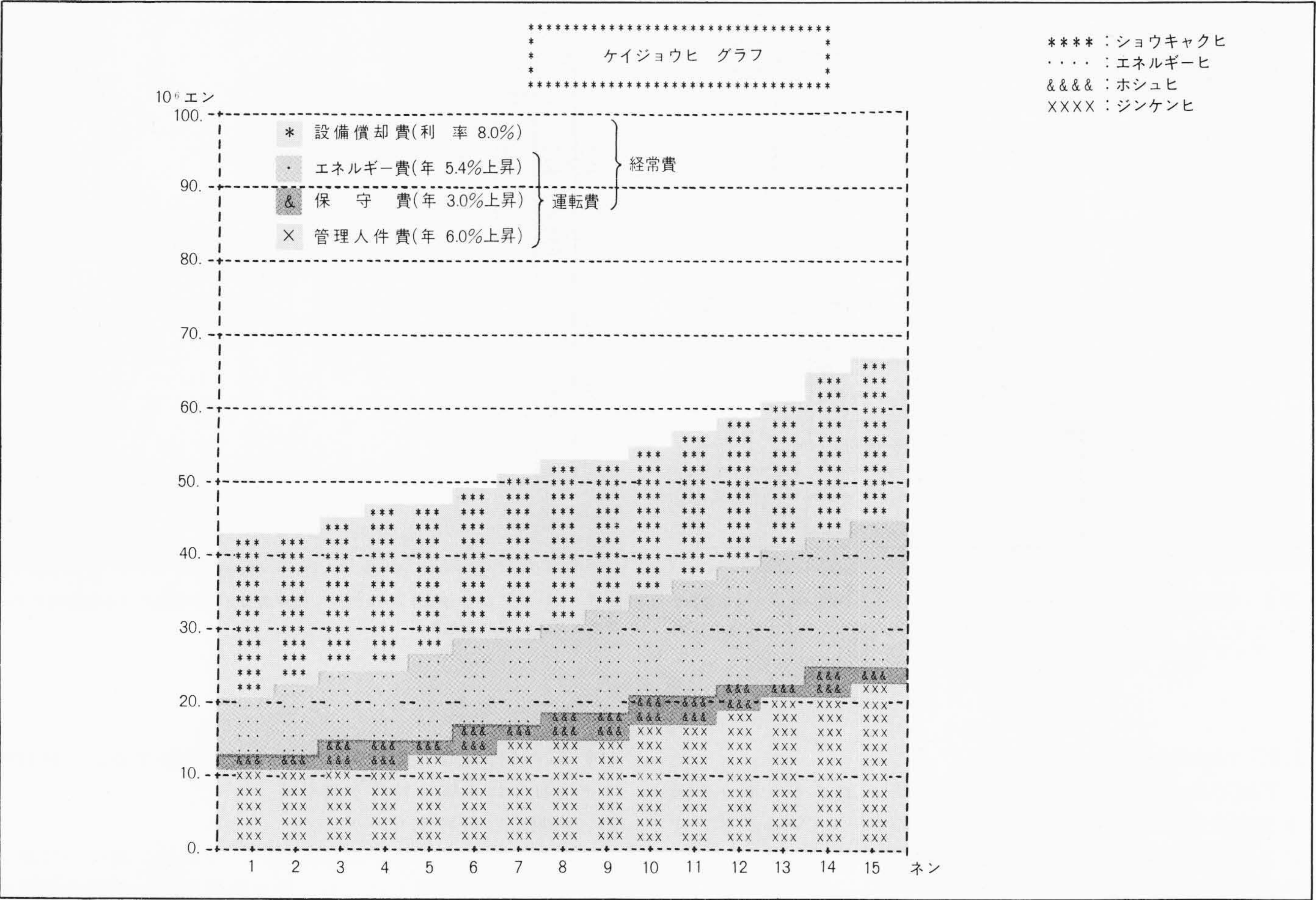


図4 経常費グラフの出力例 TACSS-Sでは経常費グラフのほか、空調システム系統図、設備費(総額、明細)、熱負荷などが要約されて、見やすい形で出力される。

3.2 TACSS-D^{2),3)}

TACSS-Dは、与えられた空調設備機器の挙動を動的にプログラム上で再現するクロズドループのシミュレータで、毎時の熱負荷、機器動作状態(各部の温度、流量、負荷率など)と毎時、毎日、毎月の消費エネルギー量を算出する。本シミュレータは、任意の空調システムの再現とシステム間の比較検討とを可能にさせるため、空調設備の各コンポーネント機能の一つずつモデル化しておき、空調システムの相違によって各々を継ぎ合わせてネットワークを構成しシミュレーションする方法を取っている。使用者は機器ファイルに用意されている各機器コンポーネントから結合パラメータを用いて意図する空調システムを組み上げられる。また、用意されているコンポーネント以外の使用者が作成した機器モデルあるいは制御モデルも、簡便な手続きだけで組み込むことができる。図5に空調システムとそのモデル化の考え方を示し、図6に構成図例を示す。同図で実線は各コンポーネントの状態量の情報流れを、破線は入出力情報を示す。

熱負荷計算は非定常計算法であるResponse Factor法を改良したものを採用し、蓄熱効果などの時間遅れを伴う熱挙動の計算精度を向上させている。なお通年のシミュレーションを簡略に行なうため、代表日計算方式と隔日計算方式のオプション機能を用意しており、これによれば計算時間は大幅に短縮される。出力は使用者の指定に応じて各コンポーネント(空調機器、居住域など)の状態量及び消費エネルギーの毎時値、集計値、平均値を選択的に出力できる。出力例を図7に示す。

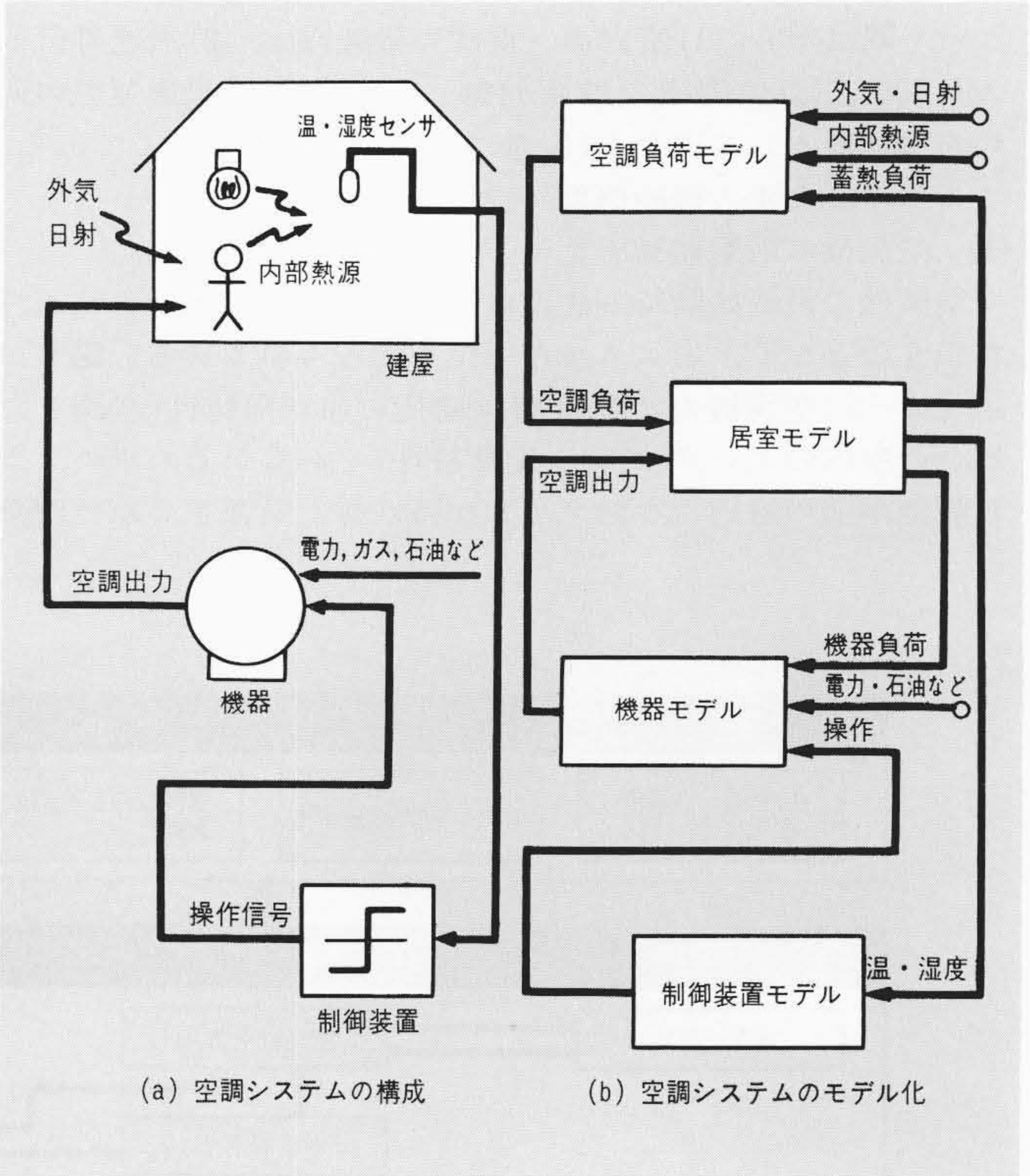


図5 空調システムの構成及びそのモデル化 実際の空調設備とイメージを合わせて、各コンポーネントの一つずつモデル化してあり、使用者にとって実設備とプログラムとの対応が容易である。

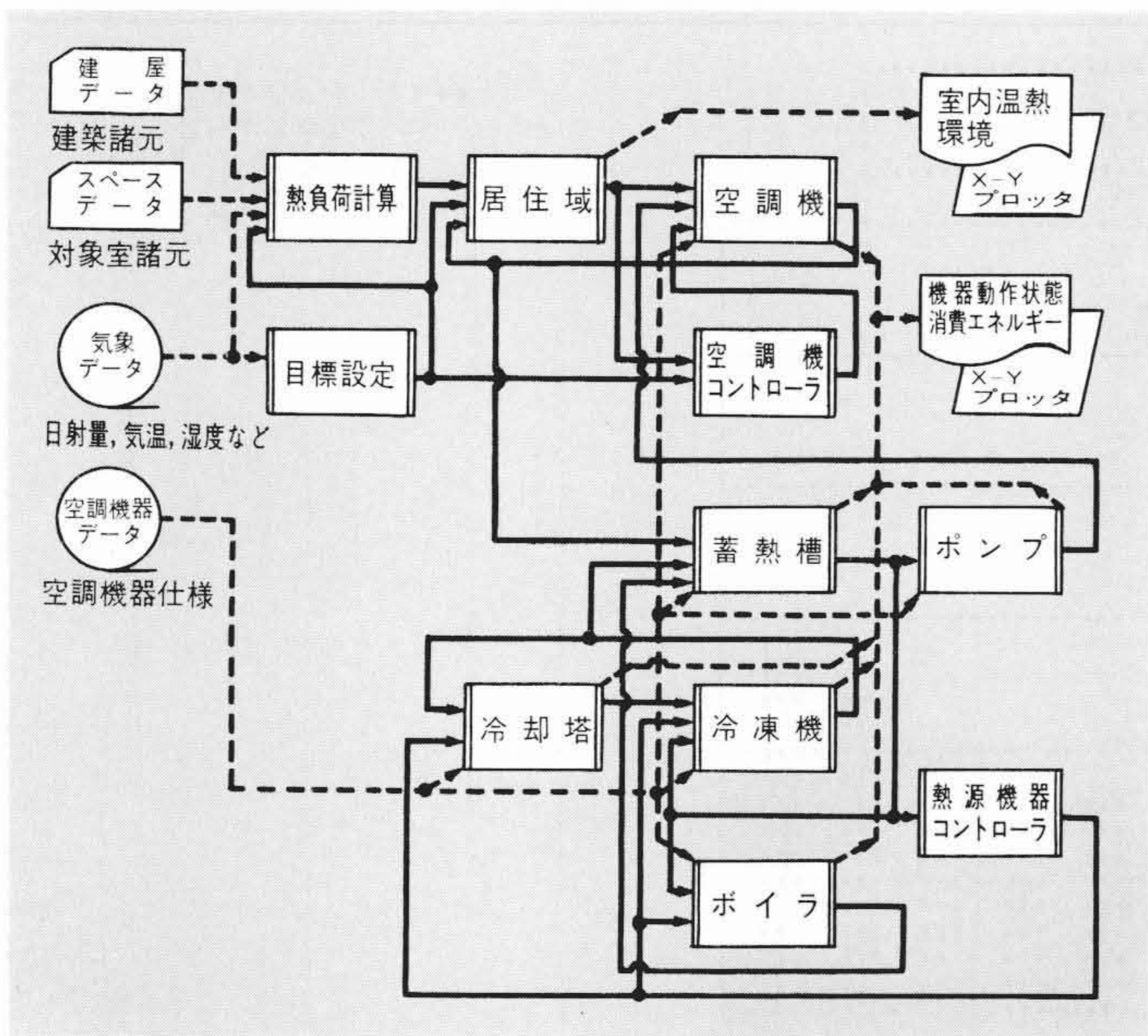


図6 空調システムシミュレータ“TACSS-D”の構成例 使用者は、各コンポーネントのつながりを示すパラメータを入力するだけで、任意の空調システムをプログラム上に再現できる。

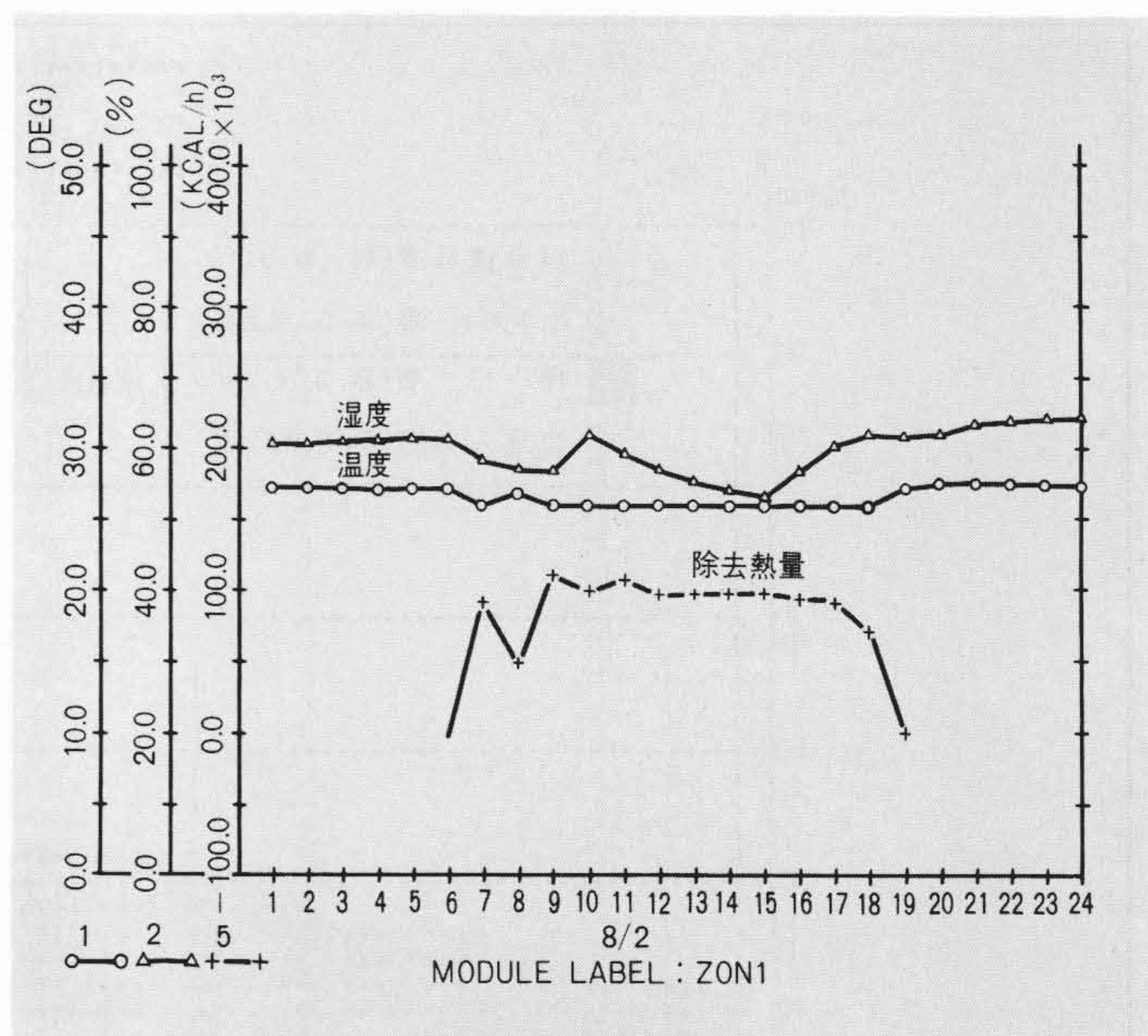


図7 X-Yプロッタ出力の例 使用者は必要な情報だけを選択的にX-Yプロッタ上に出力できる。

3.3 TACSS-C^(4),5)

TACSS-Cは所定の環境を維持しながら省エネルギーを図る空調最適制御の効果を評価するためのツールである。本プログラムの構成は、図8に示すように最適制御方式を模擬する最適制御モデル、空調設備動的シミュレーション部(TACSS-Dの部分)及び省エネルギー効果などを定量的に把握する評価プログラムから成り立っている。

空調の最適制御項目はいろいろあるが、その中でも最適化の効果が著しく、多様な空調システムに汎用的に適用できるという観点から、(1)室内温・湿度の最適設定、(2)最適外気取入れ制御、(3)空調機の最適始動、(4)熱源系の最適運転の四つを主機能として取り上げ、本プログラムに組み込んである。ここでは(3)と(4)の機能概要について述べる。

(1) 空調機の最適始動モデル

空調機の最適始動時刻決定は、ビルの営業時間中の快適性を損うことなく、省エネルギー化を図るものである。図9に示すように空調機の始動時刻は室内の冷暖房特性(空調した場合の室内のエンタルピーの変動特性)をあらかじめ求め、当日朝空調前の室内のエンタルピーが特性線と交差する点の時刻

とする。特性線は日々の実績値を用いて更新するが、休日明けと平日では大幅に特性が異なる。

(2) 熱源系の最適化モデル

このモデルは熱負荷予測を行ない、予測値に基づいて熱源機器の最適運転計画を立てる。熱負荷予測は、空調負荷を内部発生熱(基礎負荷)と外界の侵入熱(気象依存負荷)とに分離し、それぞれ独立に予測する。熱源機器の最適運転計画は、図10に示すように負荷予測値の累計値と蓄熱槽の蓄熱容量から運転計画の実行可能領域を求め、この実行可能領域内で熱源機器の起動損失、運転損失及び蓄熱槽の放熱損失の損失エネルギーが最小となる運転計画を決定する。

4 TACSSの計算例

4.1 実ビルでの実測データとの比較(TACSS-D)

モデルの妥当性を示すものとして実測データによるシミュレーション計算例を示す。方法は図11に示すとおりである。すなわち、

- (1) 実測データから各モデル別に入力に相当するデータと出力に相当するデータを取り出す。

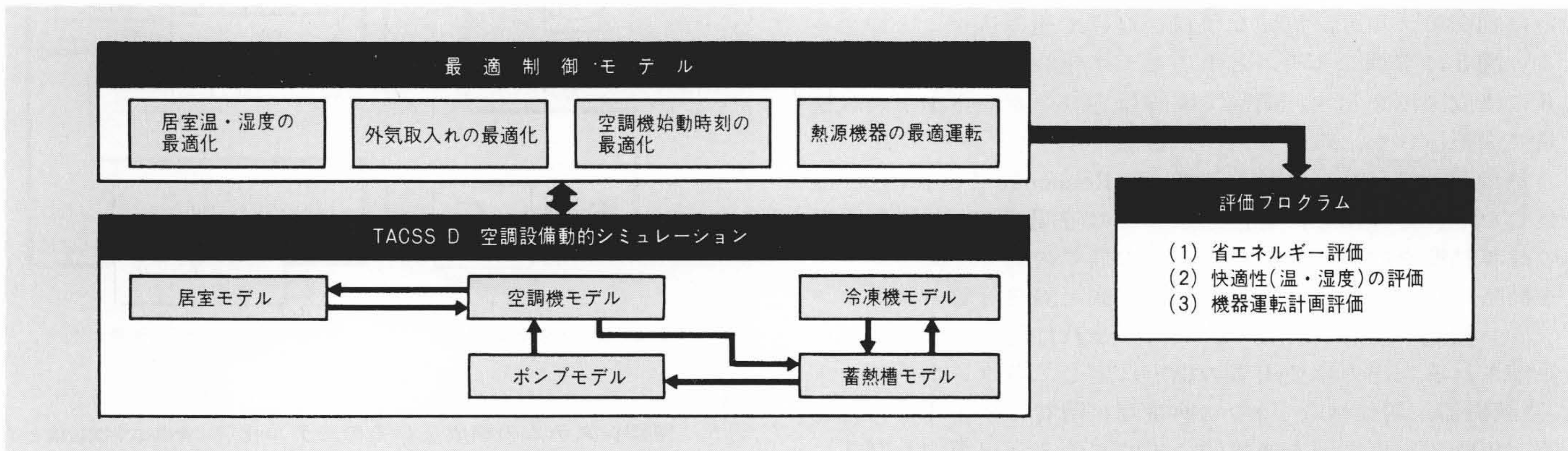


図8 TACSS-Cの構成 TACSS-Cは、空調設備の挙動を模擬するTACSS-Dに四つの最適制御の機能を付加し、その省エネルギー効果の評価を行なう。

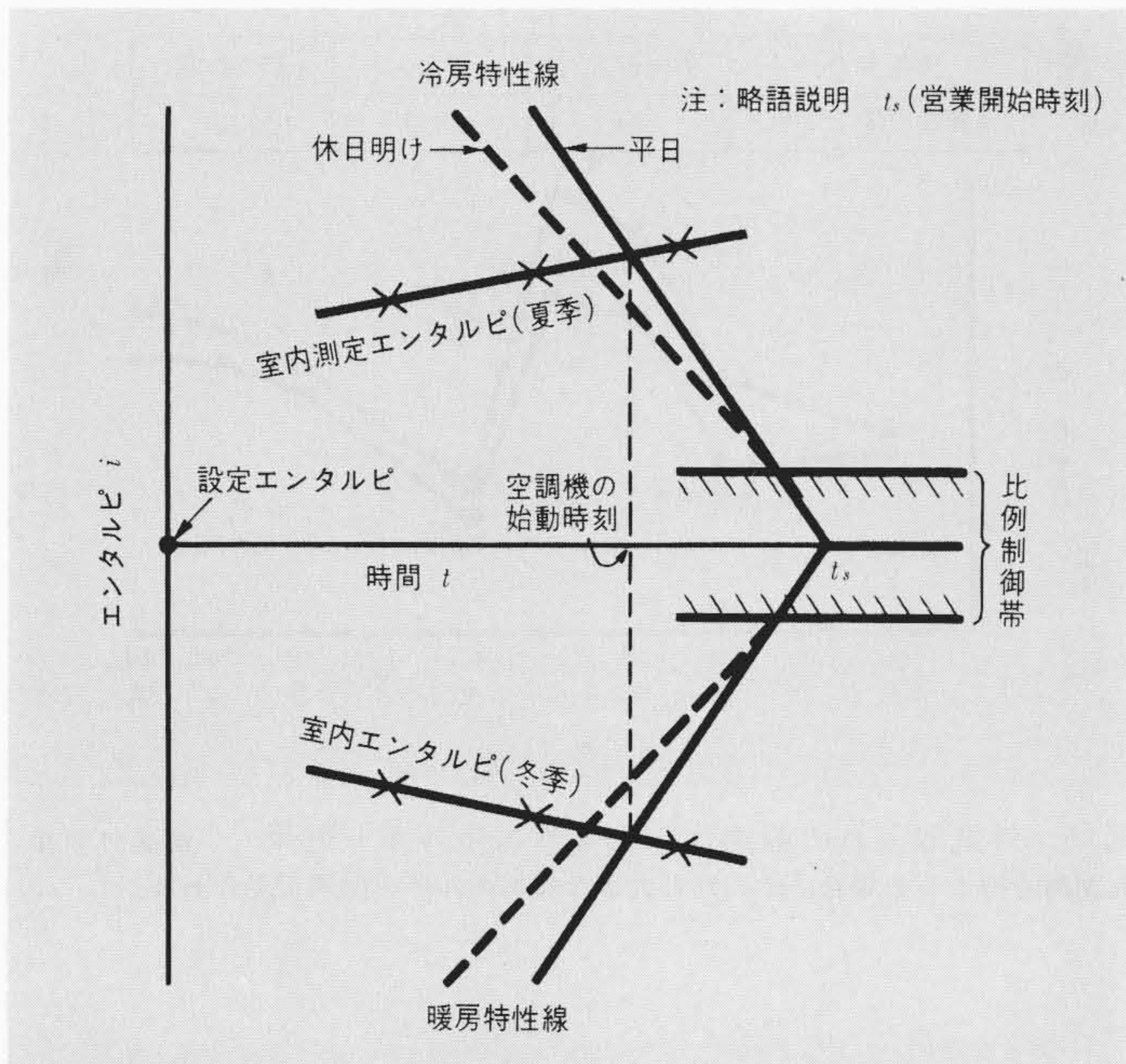


図9 空調機の始動時刻の決定方法 冷暖房特性線は、前日までの実績値により作成し、室内測定エンタルピーは、その日の朝の測定値により予測する。

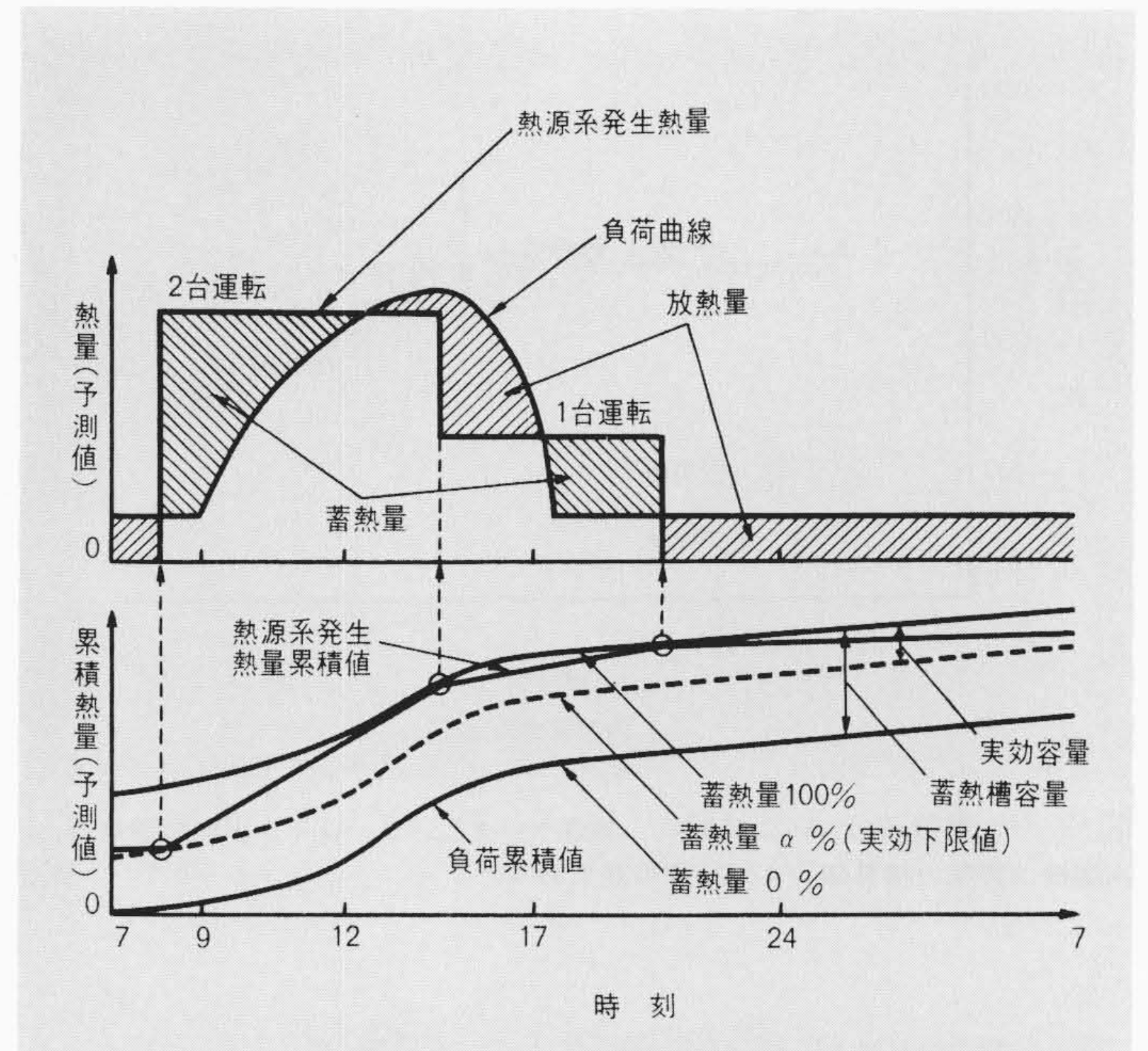


図10 熱源機器の運転計画 蓄熱槽を利用することにより、熱源機器の平滑運転と負荷のピークカットが可能で、余裕のある対応ができる。

- (2) 各モデルに実測入力を与え出力を計算する。
- (3) 出力の計算値を実測値と比較し、各モデルの評価を行なう。このようにして実負荷状態での機器のモデリング精度を評価することができる。また、入力データを時系列的に与えることにより、空調システム構成要素の動特性のモデル化の評価も同時に行なわれることになる。

居室モデルの検証結果を図12に示す。居室モデルによる室内温・湿度の計算値は、温度誤差0.4℃程度、湿度誤差3%程度で実測値と一致しており、この誤差は体感上問題のない値である。また、機器モデルの一例としてターボ冷凍機と蓄熱槽の検証結果を図13、14に示す。同図からターボ冷凍機モデルの負荷状況及び冷水・冷却水温度変動をよく模擬しており、消費電力の計算値と実測値の差は、積算電力で比較して最大4%程度の誤差である。

以上の結果から、本シミュレータは精度良く温・湿度の変化やシステムの運転コストなどを算出できるといえる。

4.2 最適制御効果の計算例

ここでは実際のオンライン制御(BUILMAX-80システム：日立ビル管理システム)で実現されている室内環境の最適設定制御と外気取入量の最適化制御について、従来の制御方式との効果比較をTACSS-Cを用いて事前評価した例を紹介する。

モデルビルは東京都内に実在する一般事務所ビルである。

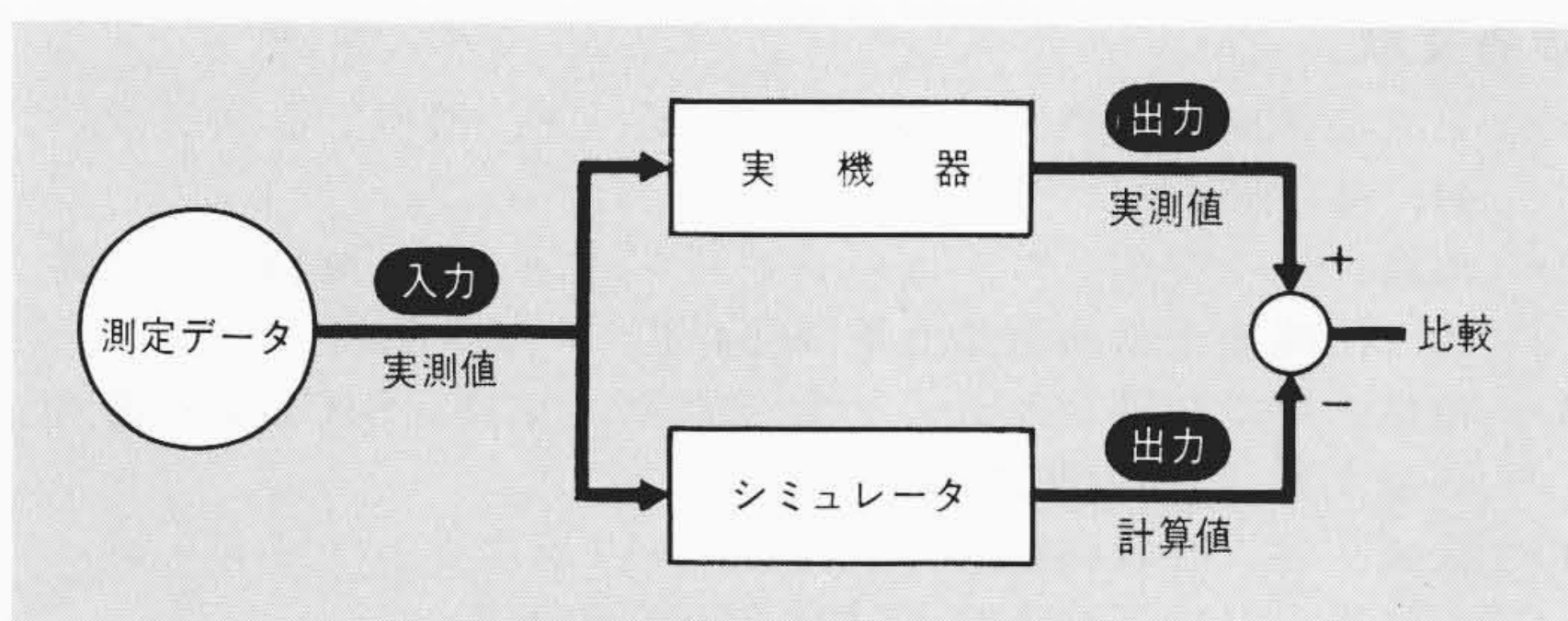


図11 シミュレータの検証方法 実際の一般事務所ビルで稼働中の空調システムの運転実データと、シミュレータの出力とを突き合わせて評価を行なった。

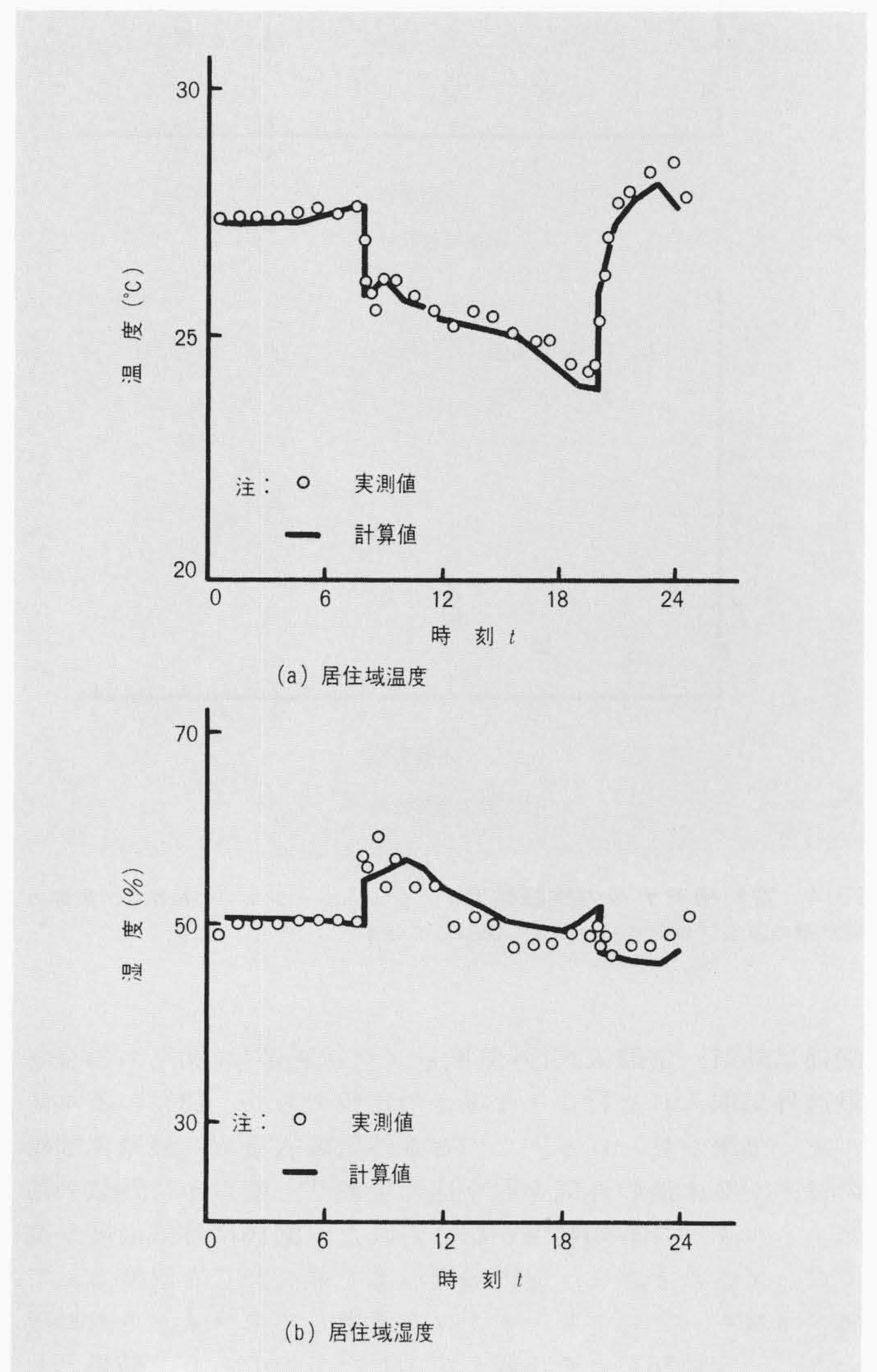


図12 居住域モデルの検証結果 実測データとシミュレータ出力の差異は、居住域の温度誤差が0.4℃程度、湿度誤差3%程度と良好な結果を得た。

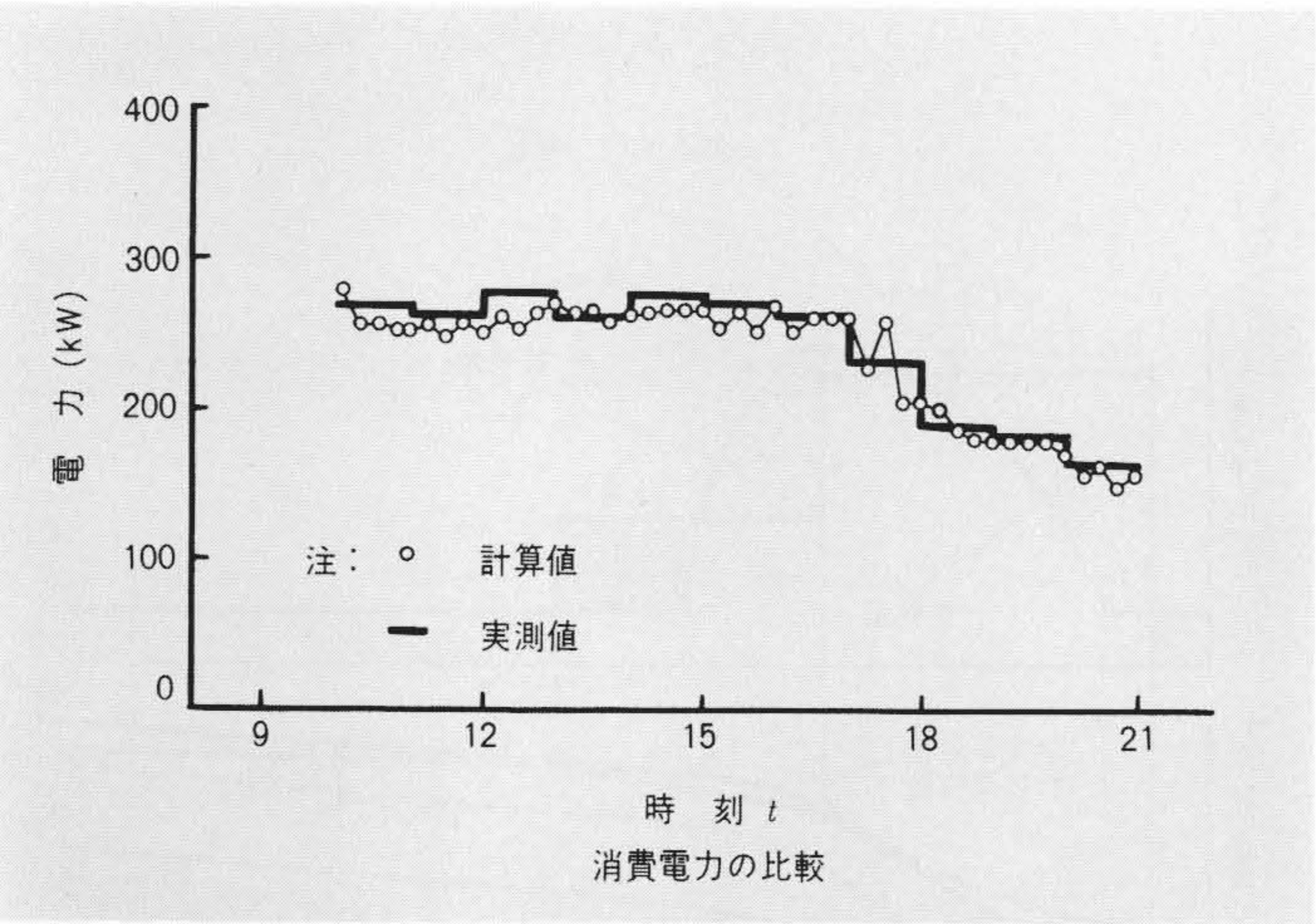


図13 冷凍機モデルの検証 実測データとシミュレータ出力の誤差は、冷凍機消費電力積算値で4%程度の差であった。

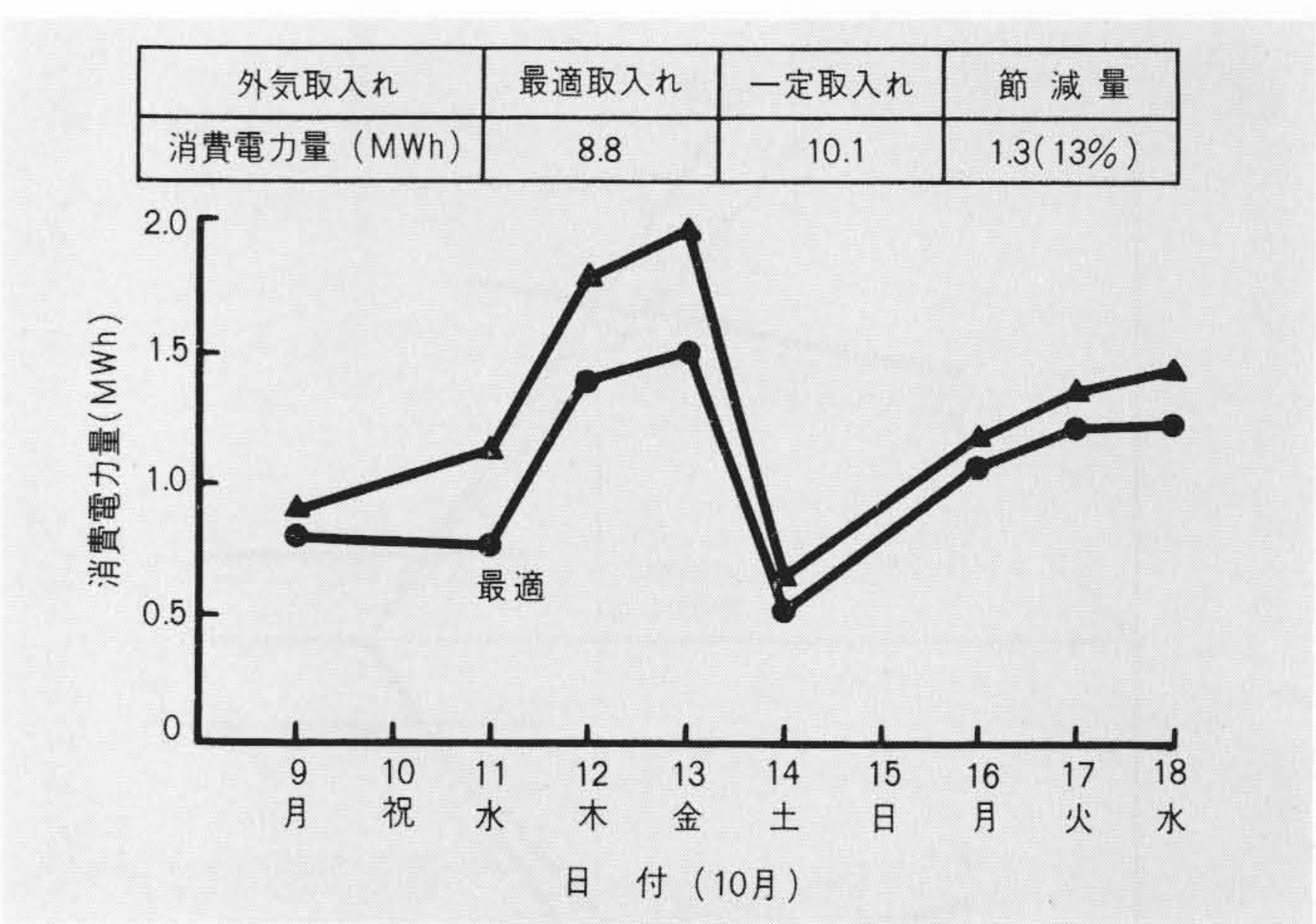


図15 外気取入れの最適化による省エネルギー効果 最適外気取入れ制御を行なった場合、約13%と大きな省エネルギー効果が見られる。

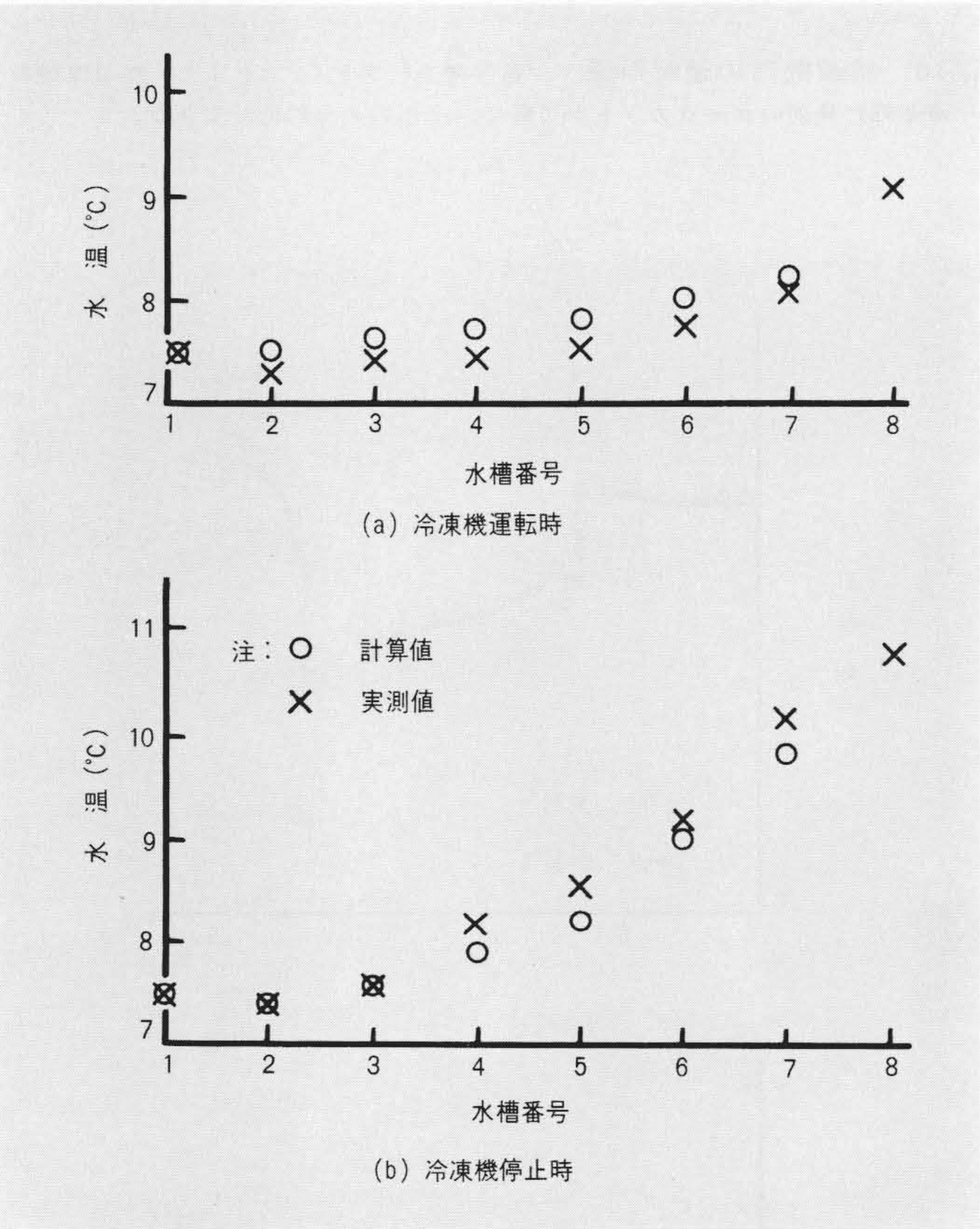


図14 蓄熱槽モデルの検証結果 シミュレーションの結果は、実際の蓄熱槽の温度プロフィールをよく模擬している。

図15は外気一定取入れ(外気風量/全送風量)=20%の場合と最適外気取入れを行なった場合の比較であり、13%の省エネルギー効果が見られる。このとき外気取入量は、最適化制御のほうが2.4倍の外気を取り込んでおり、明らかに外気の冷気エネルギーの有効利用が認められた。図16は外気温度が高くなってきたときに、室内設定温度を最高28℃を限度として省エネルギーとのトレードオフを考慮してスライドさせた場合と、一定値26℃とを比較して示したものである。結果として、8%の省エネルギー効果であるが絶対量では2.3MWhと大きな節減効果がある。

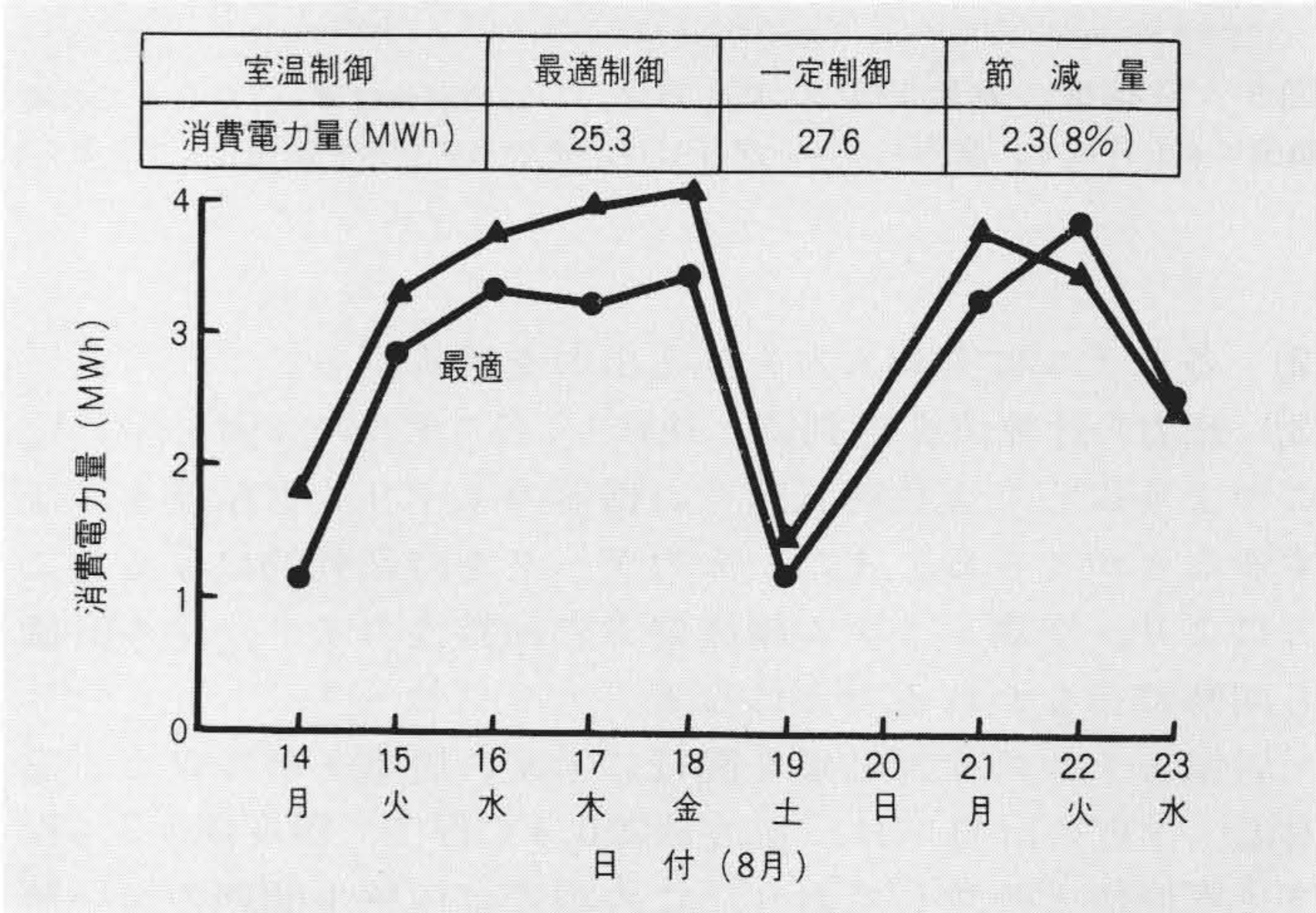


図16 室内温度の最適設定による省エネルギー効果 最適室内温度設定制御を行なった場合、約8%の省エネルギー効果が見られた。

5 結 言

空調システムの最適設計のためのサポートソフトウェア“TACSS”について述べた。これは、実際の空調設備設計に数多く適用され設計時間の短縮に役立っており、省力化と設計精度の向上の両立が可能となった。また、ここで開発された最適制御技術は、日立ビル管理システム“BUILMAX-80”に組み入れ、既に生産工場、一般事務所ビルに納入している。今後とも機能の拡充に努め、より良い空調システムの実現にいささかでも寄与してゆきたいと考える。

参考文献

- 1) 日立製作所：空調システムシミュレータ，設備とシステム，41，4 (昭54-2)
- 2) 亀島，外：空調システムのシミュレーション，第13回空気調和・冷凍連合講演会論文集(昭54-4)
- 3) 亀島，外：空調システムの最適制御，第18回SICE学術講演会論文集，3309(昭54-8)
- 4) 大成，外：計算機制御におけるモデリングとシミュレーション技術，日立評論，61，547～550 (昭54-8)
- 5) 和田，外：ビル管理制御用計算機システム，日立評論，61，577～580 (昭54-8)