

# 建築・設備の連成シミュレーション Integrated Simulation for Buildings and MEP Systems

郡 公子<sup>1)</sup>, 石野 久彌<sup>2)</sup>, 長井 達夫<sup>3)</sup>, 村上 周三<sup>4)</sup>  
Kimiko KOHRI, Hisaya ISHINO, Tatsuo NAGAI and Shuzo MURAKAMI

- 1)宇都宮大学、准教授、工博  
Utsunomiya University, Associate Professor, Dr. Eng.
- 2)首都大学東京、名誉教授、工博  
Tokyo Metropolitan University, Emeritus Professor, Dr. Eng.
- 3)東京理科大学、准教授、工博  
Tokyo University of Science, Associate Professor, Dr. Eng.
- 4)建築研究所、理事長、工博  
Building Research Institute, Chief Executive, Dr. Eng.

This paper discusses a new integrated simulation technique for solving thermal balances of a building and its MEP system. The proposed technique was introduced into the BEST program and has the two remarkable features. One is switching the two solution methods and the other is using variable simulation time intervals. This technique makes it possible to simulate the building energy consumption for various types of HVAC systems as well as to calculate speedily the conventional building thermal loads.

BEST, 連成計算, エネルギー消費量, 室内熱環境, 空調システム  
BEST, Integrated simulation, Energy consumption, Thermal environment, HVAC system

## はじめに

建築全体のエネルギー消費量と室内環境を、なるべく正確に推定評価するためには、建築と設備システムの相互影響を考慮した上で平衡状態を求める連成計算が必要となる。特に、室内環境をコントロールする空調システムと建築との連成が重量であり、実用的であると同時に、多様な空調システムに対応可能とするためには、どのような計算法を利用するかが問題となる。本報では、建築エネルギーシミュレーションツール BEST (Building Energy Simulation Tool) のために開発されたシミュレーション法を、主に建築計算の視点から報告する。連成に適するシミュレーション法を構築する過程で、解法の切替え、計算時間間隔可変などの建築熱計算法の特徴が生まれた。

## 1. 建築計算法の特徴

まず、BEST の建築計算法の特徴を述べる。連成計算に対して、従来の熱負荷計算を建築単独計算と呼ぶ。

- 1) 設備システムとの連成計算と建築単独計算の両方が可能である。
- 2) 年間計算のほかに、建築単独計算による日周期定常最熱大負荷計算も可能である。
- 3) 空調システムとの連成計算を行う時間帯とそうでない時間帯とで解法を切り換えられる。
- 4) 計算時間間隔が可変である。
- 5) ゾーン間の相互影響を考慮できる。
- 6) 温熱環境指標の値が得られる。
- 7) 豊富な窓・壁性能値データベースをもち、窓について

はエアフローウィンドウの計算も可能である。

- 8) 熱計算のほか、簡単な入力データで昼光調光計算が可能である。
- 9) データベースとユーザ入力データに、再利用性の高い XML 形式を導入し、プログラムでの読み込みに、JAXB の自動インスタンス化機能を利用している。

## 2. ゾーン熱平衡式と解法

ゾーン間の相互影響を考慮する計算を行うことを前提として、各ゾーンの室温、絶対湿度を未知数とする熱平衡式をたてた。表面温度は未知数としない。また、自然通風、壁面流、噴流などを考慮する換気計算は、将来の目標とし、現在は行っていない。時間ステップ  $n$  における、ゾーン  $i$  の顕熱平衡式は、係数を整理すると次式になる。

$$C_i \cdot \dot{\theta}_{i,n} = K_{i,i,n} \cdot \theta_{i,n} + \sum_k K_{i,k,n} \cdot \theta_{k,n} + F_{i,n} + q_{i,n} \quad \dots(1)$$

ここに、

$\theta_{i,n}$ 、 $\dot{\theta}_{i,n}$  : ゾーン  $i$  の室温[°C]、室温の時間微分[K/sec]

$C_i$  : ゾーン  $i$  の室熱容量[J/K]

$K_{i,k,n}$  : ゾーン  $i$  の熱平衡式の室  $k$  に関わる係数[W/K]

$F_{i,n}$  : ゾーン  $i$  の熱平衡式の定数項[W]

$q_{i,n}$  : ゾーン  $i$  の空調供給熱量[W]

式(1)に対して、2つの解法を使い分けて計算することにした。建築側の熱の現象は、高次遅れを示すが線形化して扱えるものが多いのに対して、空調システム側は、非線形でかつ不連続な現象が多い。そのため、建築側と空調システ

ム側では適する解法が異なる。また、空調システム側は、多様な方式があり、それらに対して確実に解を得る方法が必要である。このような点から空調システムの計算は、インプリシット法ではなくエクスプリシット法を採用することにした。建築計算は、空調システムとの連成計算を行う時間帯には、空調システムに合わせてエクスプリシット法を使用し、それ以外の時間帯は、建築に適する解法であるインプリシット法に切り換えることにした。

エクスプリシット法では、現在の室温などの状態値を既知とし、次ステップの状態値を未知数として扱う。多数室の熱平衡式を連立させて解く必要はなく、4次ルンゲクッタ法を利用して各室の状態値を求めることとした。式(1)の空調供給熱量 $q_{i,n}$ は、次のようなPID制御操作量の式を利用して求める。

$$q_{i,n} = K_p(\theta_{i,n} - \theta_{sp}) + \frac{K_p}{T_i} \sum_{j=0}^{\infty} (\theta_{i,n-j} - \theta_{sp}) \Delta t_{n-j} + K_p \cdot T_d \frac{(\theta_{i,n} - \theta_{i,n-1})}{\Delta t_n} \quad \dots(2)$$

ここに、

$K_p$  : 比例ゲイン

$T_i, T_d$  : 積分時間、微分時間[sec]

$\theta_{sp}$  : 設定室温[°C]

$\Delta t_n$  : 前ステップとの時間間隔[sec]

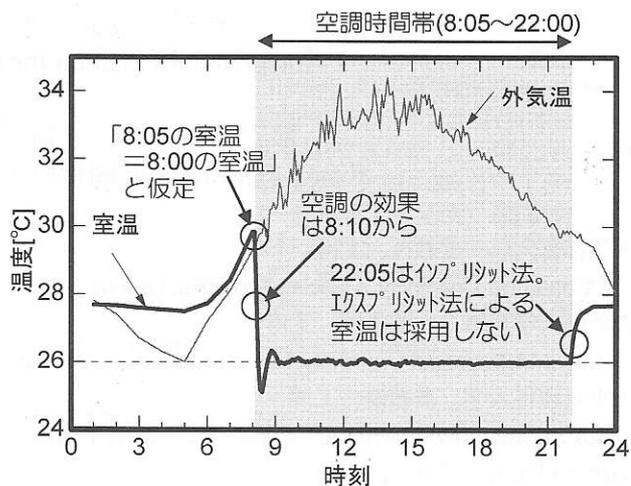
エクスプリシット法は、精度上の制約から計算時間間隔は短くする必要がある。しかし、その結果、外乱や空調供給熱量に対する室内温湿度応答を細かく詳細に把握できる。

インプリシット法では、式(1)の左辺を後退差分で表し、現在の自室温 $\theta_{i,n}$ および隣室温 $\theta_{k,n}$ を未知数として扱い、多数室熱平衡式を連立させて解く。この解法は、非空調時間帯のほか、具体的な空調システム仕様を想定しない建築単独計算の際にも利用する。計算時間間隔は短くする必要はなく、建築の本来の特性を活かした計算が可能である。

時間帯によってインプリシット法とエクスプリシット法とに切り換える場合、それぞれの解法に適する計算時間間隔に、随時設定変更できることが重要となる。図1に、解法切換え例を示す。計算時間間隔は、空調システムとの連成計算を行う空調時間帯は5分、非空調時間帯は1時間を基本とした場合である。解法の切換え時刻には、計算上のルールを導入する必要がある。インプリシット法からエクスプリシット法に切り換えたときは、現在の状態値は前時間ステップの状態値と等しいと仮定する。エクスプリシット法からインプリシット法に切り換えたときは、エクスプリシット法による解とインプリシット法による解の2種が得られるが、インプリシット法による解を採用することとした。

### 3. 壁体熱計算法

壁体非定常伝熱計算法は、計算時間間隔可変に対応できなければならない。この点から、HASP/ACLDを初めとし



(解法) 8:05~20:00 : イクスプリシット法、  
20:05~8:00 : インプリシット法  
(時間間隔) 8:00~22:30 : 5分、  
22:30~23:00 : 30分、23:00~8:00 : 1時間

図1 建物側解法の切換え例

て、従来の熱負荷計算プログラムによく利用されてきた応答係数法は、適さない。そこで、項別公比法<sup>9)</sup>を拡張して、計算時間間隔可変に対応できる式に変形し、これを利用した。各時間ステップの外乱や空調熱量は、不等辺三角波励振で表される。

前述のように、表面温度は未知数としないことにした。表面温度を未知数とすると、対流・放射の取扱いが明快で、熱平衡式自体はわかりやすいものの、面对面の形態係数を求める上で、どの程度自由な空間形状を対象とするか、家具類の扱いをどうするかなど難しい点がある。また、連立方程式の未知数が多くなる、形態係数計算に時間がかかる恐れがある、空間の3次元情報の入力も必要となるなどの欠点もある。そこで、対流・放射を近似的に分離する従来の考え方を踏襲することにした。HASP/ACLDでは、熱取得に対する熱負荷の重み係数を利用することで、対流・放射の近似分離を行っている。BESTでは、松尾の方法を利用して、まず、熱取得に対する熱負荷応答に関する室伝達関数 $W$ を求め<sup>9)</sup>、これを用いて熱負荷応答に関する壁体伝達関数式を表し、さらにこの式を変動2根で近似<sup>10)</sup>する方法を採用した。

### 4. 設備システムの計算法

現在の室内温湿度を既知として、ゾーンへの供給熱量や機器の運転状態を計算する。TRNSYSなどと同様に、各機器の計算部分を独立したモジュールクラスとして記述し、モジュール(モジュールクラスのインスタンス)を自由に接続することによって全体システムを構成する。種々のシステムを表現でき、モジュールクラスの追加拡張も容易である。詳細計算のための細かい機器単位のモジュールクラス、概略計算のための複数機器をまとめたモジュールクラスなどを用意すれば、計算法の選択も可能となる。建築を切り離れたシステムだけの計算、部分システムの計算も可

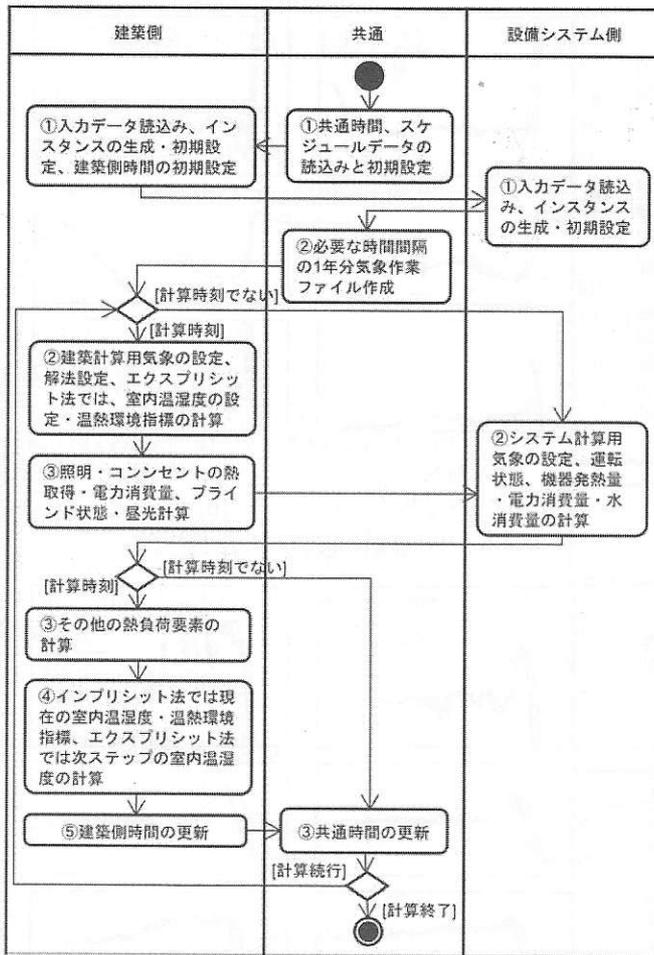


図2 建築・設備システムの計算順序 (アクティビティ図)

表1 建築と設備の情報伝達用モジュール

モジュールクラス名	機能
ZoneAirModule	ゾーン温度を空調システムへ伝え、空調供給熱量に関する情報を建築に伝える。
ZoneEnvModule	PMVや作用温度などのゾーン温熱環境情報を空調システムへ伝える。このモジュールを利用すると、PMV制御や作用温度制御が可能である。
ZoneEPLoadModule	照明・コンセント電力消費量を電気システムへ伝える。
ZoneHeatGainModule	空調・電気・衛生システムの配管や機器の放熱量を建築へ伝える。
ZoneDaylightModule	屋光照度を電気システムへ伝える。
ZoneModule	上記5つのモジュールの機能を組み合わせ利用できるモジュール。

能である。モジュール1つ1つを接続するため、接続操作が膨大になる傾向があり、その操作軽減や入力しやすさの工夫も重要である。複数のモジュールを統合するマクロモジュールを導入することも考えられるが、BESTでは、モジュール間を移動する多量の伝達をまとめて1つのインスタンスにする方法やGUIにテンプレート機能を用意するなどの方法を採用している。各モジュールは、時々刻々の入力情報として、上流のモジュールからの空気・水などの熱媒状態値、運転・制御信号を受け取り、計算結果の状態

値を、下流のモジュールに出力する。

#### 4. 建築と設備システムとの接点

図2は、建築と設備システムおよび共通部分の計算順序を示したものである。入力データの読み込みと初期設定は、共通、建築、設備システムの順に行う。気象データは、建築と設備システムで計算時間間隔が異なる時間帯もあり得るため、それぞれ該当する時間間隔のものを用意する。時間ループ内の処理は、建築側の昼光照度・電力消費量計算、システム側の状態値・エネルギー消費量計算、建築側の室内温湿度状態値計算、の順となる。

BESTの建築プログラムと設備システムプログラムは、基本的に独立している。連成計算を行うときには、建築と設備システム間の情報交換が必要となり、その役目を担うモジュールクラスが、システム側に用意されている。建築側は、スケジュールに沿って解法を切り換え、エキスプリシット法で計算する時間帯には、基本的に、各ゾーンの空調、非空調の状態を識別せずに計算する。建築と設備システム間の情報伝達のモジュールクラスの概要を表1に示す。照明・コンセント電力消費量は、建築計算とする場合のほかに、電気システム計算とする場合が考えられる。建築計算とする場合は、ZoneEPLoadModuleを利用して電力消費量を電気システム計算部へ伝える。電気システムで計算する場合は、ZoneHeatGainModuleを利用して、照明熱取得を電気システムから受け取る。また調光計算する場合は、ZoneDaylightModuleを利用して、昼光照度を電気システム計算部へ伝える。

#### 5. 連成計算時の計算時間間隔と制御パラメータ

連成計算時の空調時間帯の計算時間間隔は、エキスプリシット法で解くことと制御の安定性の点から、あまり大きく取ることはできない。また、PID制御を利用して熱平衡状態を求めているため、その制御パラメータを設定する必要がある。制御パラメータは、建物やシステムの応答性のほか、計算時間間隔によっても異なる設定としなければならない可能性がある。そこで、共通の制御パラメータを使用した場合、計算時間間隔を長く設定すると、室内環境や熱負荷にどのような影響を及ぼすかを、あるオフィスビルについて検討した。計算対象とした基準階平面図を図3に示す。空調方式は、図4に示すファンコイルユニット(FCU)併用CAV方式とし、熱源システムは計算対象としない。インテリアゾーンに温湿度センサーのある空調機は、インテリアゾーンのほかペリメータゾーンにも冷温風を供給していて、リターン空気はインテリアゾーンから回収している。ペリメータゾーンはFCUによって室温制御されている。本試算では、ZoneAirModuleとAHUModuleの2種のクラスのみを利用し、8つのゾーンそれぞれに対応するゾーンモジュール、1台の空調機、6台のFCUにそれぞれ対応する機器モジュールを想定した。モジュール接続は、空気ループに合わせて行う。

【注記：基準計算条件】

- 気象 2006年大阪 (1分値)
- 建築 オフィス基準階
  - 計算対象室：南室、北室各4ゾーン (ペリメータ奥行き5m)
  - 窓：窓面積率68%、 $\text{low-}\epsilon$  グリーン複層ガラス (内側に中間色ブラインド)
- 内部発熱 (最大値)：
  - 照明  $20\text{W}/\text{m}^2$ 、在室者  $0.15\text{人}/\text{m}^2$ 、OA機器  $15\text{W}/\text{m}^2$
- 基準計算時間間隔と解法：
  - 8:00-22:30 は5分 (エクスプリシット法)
  - 22:30-23:00 は30分、23:00-8:00 は60分 (インプリシット法)
- 空調 (FCU併用CAV空調機方式)
  - 室内設定温湿度：(夏期)  $26^\circ\text{C}$ 、湿度無制御、(冬期) インテリア  $22^\circ\text{C}50\%$ 、ペリメータ  $22^\circ\text{C}$ 湿度無制御
  - 冷温熱源：夏期は冷水のみ供給、冬期は空調機には冷温水、FCUには温水のみ供給
  - 外気取入量：1.4回/h

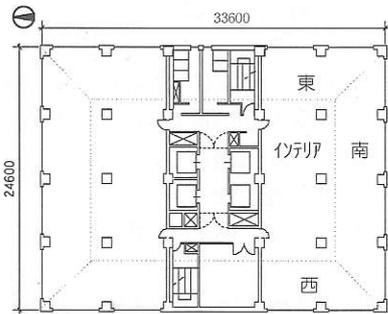
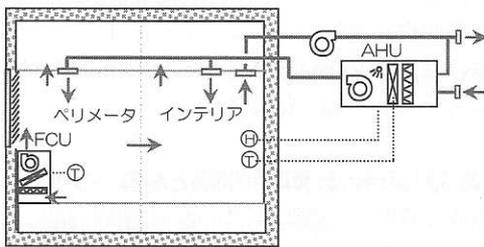
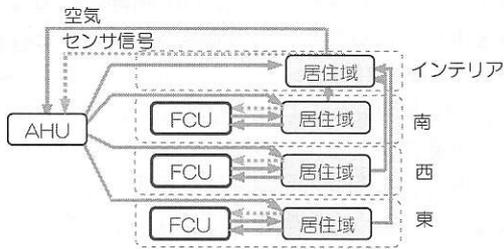


図3 計算対象オフィス基準階

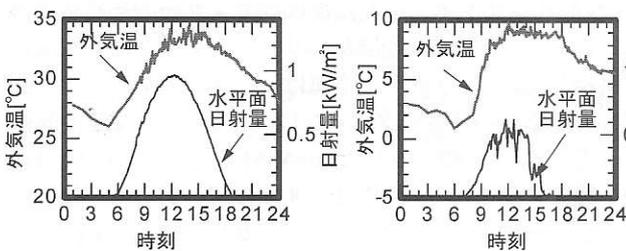


(a) システム図



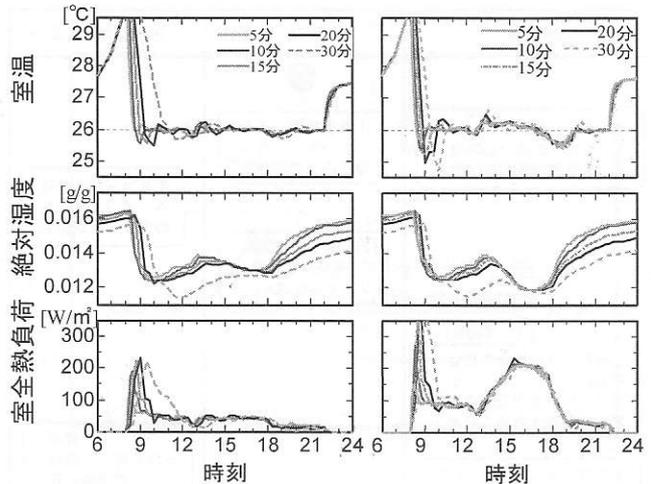
(b) 空気ループ説明図

図4 FCU併用空調機方式

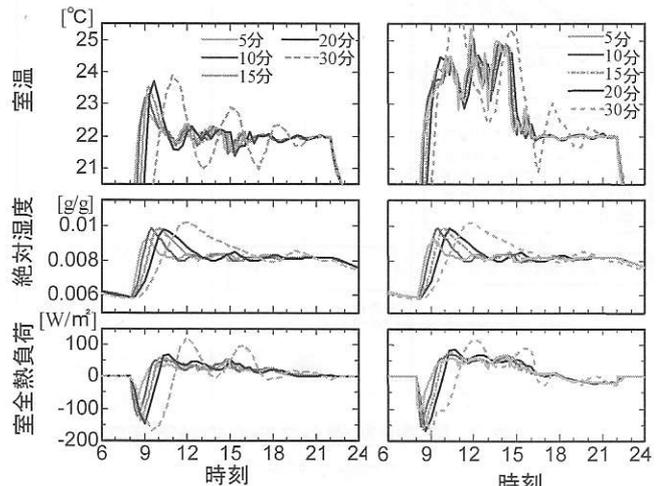


(a) 夏期代表日 7/28(金) (b) 冬期代表日気象 1/27(金)

図5 夏期冬期の代表日気象 (大阪)



(a) インテリアゾーン (b) 西ゾーン  
(1) 夏期代表日 (7/28(金))



(a) インテリアゾーン (b) 南ゾーン  
(2) 冬期代表日 (1/27(金))

図6 計算時間間隔と室内環境と室負荷 (大阪)

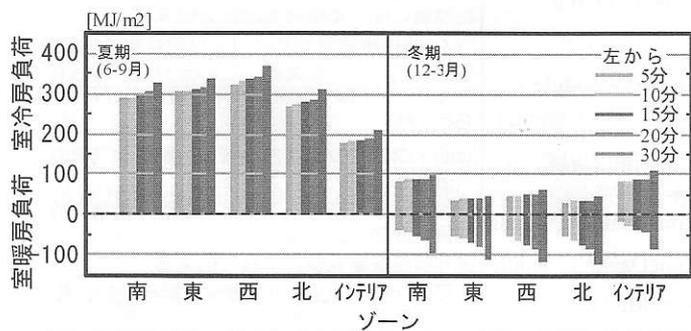


図7 計算時間間隔と5ゾーン期間積算負荷 (大阪)

大阪の1分値気象データを利用して、空調時間帯の計算時間間隔の基準条件である5分に対して、10分、15分、20分、30分に変えたケースについて、年間計算を行った。制御パラメータは、夏期と冬期の代表日について、まず5分間隔の場合について適する値を求め、さらに、その他のケースに対してもなるべく使用できるように多少修正した。夏期冬期代表日の気象を図5に、主要2ゾーンの室内

温湿度、室負荷の時刻変動を図6に示す。計算時間間隔の違いは、空調開始後の制御の安定性の差として現れ、計算時間間隔を長くすると、行き過ぎ量が大きくなり、また30分間隔の場合はハンチングが大きくなる場合がある。冬期のペリメータゾーンに対しては、FCUは冷房を行わないため、室温が設定値より大きく上昇する場合がある。図7に、期間負荷の比較結果を示す。本検討では、空調開始後の冷暖房過剰量が影響して、計算時間間隔を、5分に対して長くするほど期間負荷も増加した。時刻変動解析に対しては、30分間隔以外は、共通のパラメータを利用できる可能性があるが、積算熱量比較の場合は、共通パラメータの利用は難しい。

## 6. 建築・空調連成シミュレーション例

システム構成をモジュール接続により表現し指定する計算法とすることで、従来計算が難しかったケースについても、特別なプログラム変更をせず、計算できるようになる。その例として、作用温度制御、床吹出空調、躯体蓄熱空調のシミュレーション例を示す。

### 6.1 作用温度制御

インプリシット法で、作用温度制御やPMV制御のケースを数値計算するには、方程式を追加変更したり、収束計算が必要になるなど、簡単ではない。エクスプリシット法の場合、センサーで検出する状態値の指定を室温から作用温度に変更するだけで、作用温度制御の計算が可能になる。PMV制御に対しては、検出状態値のほかに、PID制御パラメータの変更も必要である。

図3、4に示したオフィス基準条件での室温制御に対して作用温度制御に変更したケースを試算し、両者の比較を行った。夏期代表日の南室4ゾーンの室内環境・室負荷の時刻変動を図8に示す。平均放射温度は、ASTで代用している。作用温度制御の場合も室温制御と同様に、空調時には設定温度に近い状態を保っている。作用温度制

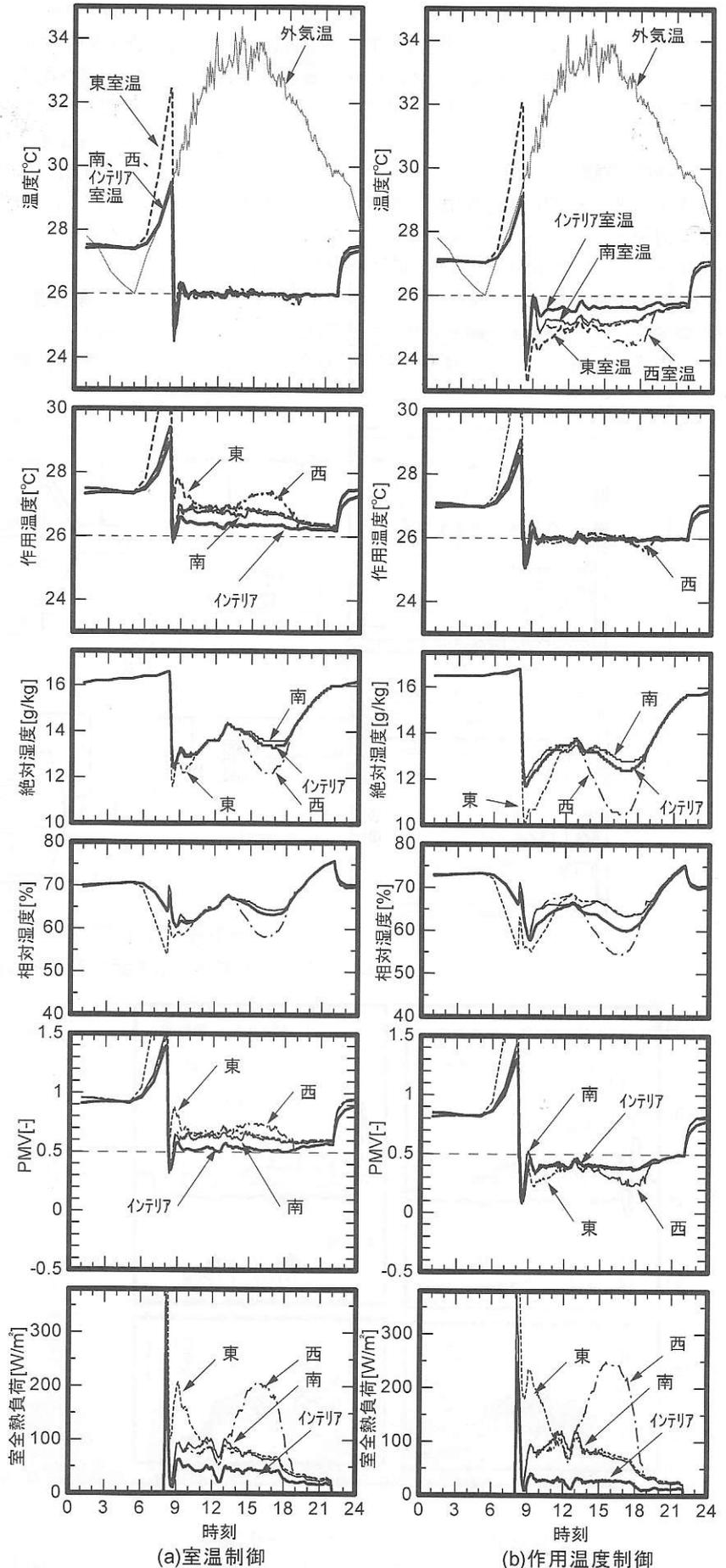


図8 室温制御と作用温度制御の比較 (大阪、7/28(金))

御とすると、室温制御の場合に対して、放射環境が良くなるだけではなく、成り行き除湿量も増え、PMVはゾーンにより0.1~0.5程度快適側の値になり、日最大室負荷は、西ゾーンの場合2割程度大きくなる。

### 6.2 床吹出空調

床吹出空調と天井吹出空調の比較を行った。図3の南室を計算対象として、南、西、東、インテリアそれぞれをさらに床内空間、居住空間、天井内空間に分割し、計12ゾーンの相互影響を考慮した計算を行った。図9に空調システムの概要を示す。床吹出空調と天井吹出空調ともに天井リターン方式である。2ケースの夏期代表日の温度と装置負荷

の時刻変動を図10に示す。装置負荷は南室の単位床面積当たりの値で示し、各装置の処理割合がわかるようにした。床吹出方式は天井吹出方式に対して、非空調時の室温が1K程度低い、空調時には床内温度が低下するだけでなく、天井内温度も1K程度低くなる。また、午前中の装置負荷が天井吹出方式より大きい。床吹出方式の年間装置負荷は、図11に示すように、天井吹出方式に対して、1割程度大きくなった。

### 6.3 躯体蓄熱空調

図3のオフィスビルが東京にあるものとして、南室に対して躯体蓄熱空調を適用したケースを試算した。計算上

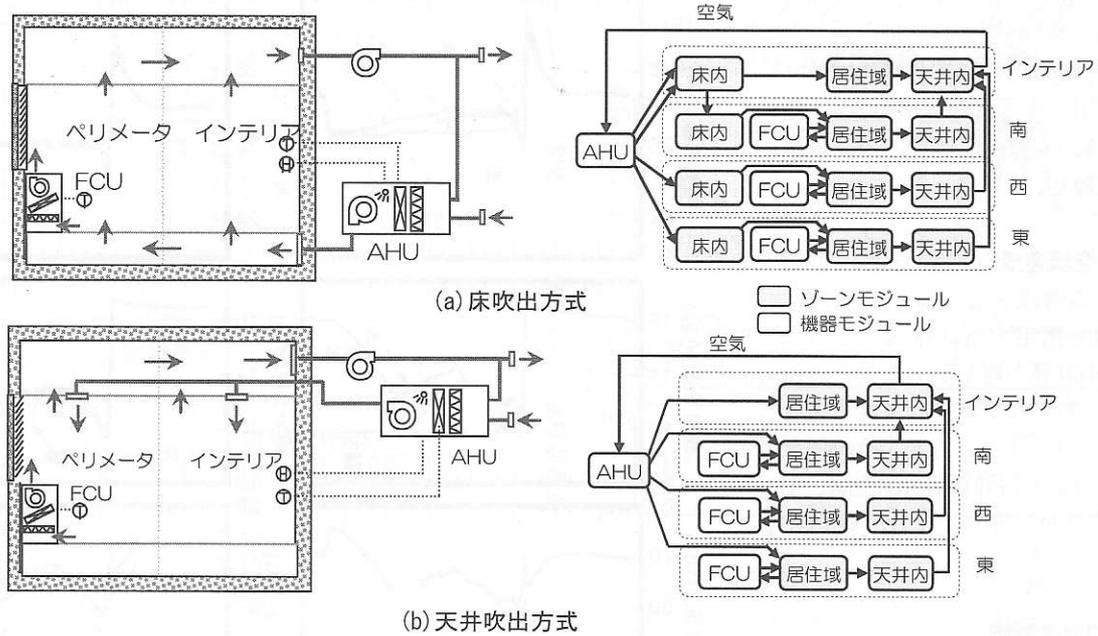
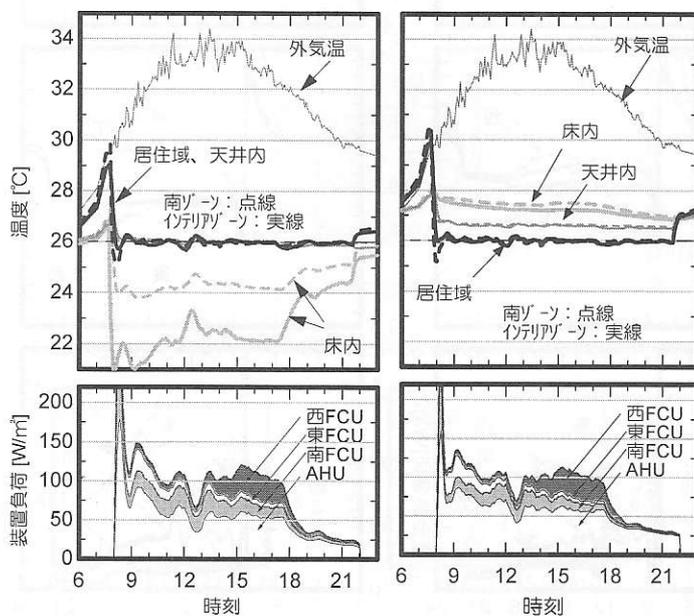


図9 床吹出・天井吹出方式のシステム図と空気ループ説明図



(a) 床吹出 (b) 天井吹出

図10 空調方式と室温・室負荷 (大阪、7/28(金))

【注記：図10、11の計算条件】

計算対象ゾーン：オフィス基準階南側の南、西、東、インテリアの居住域、天井内、二重床内の計12ゾーン。その他の条件は、図3の基準条件と同じ

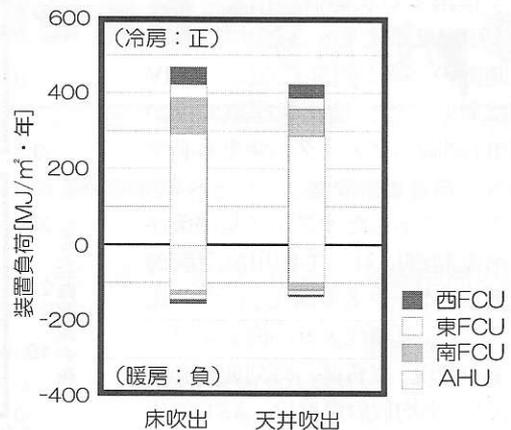
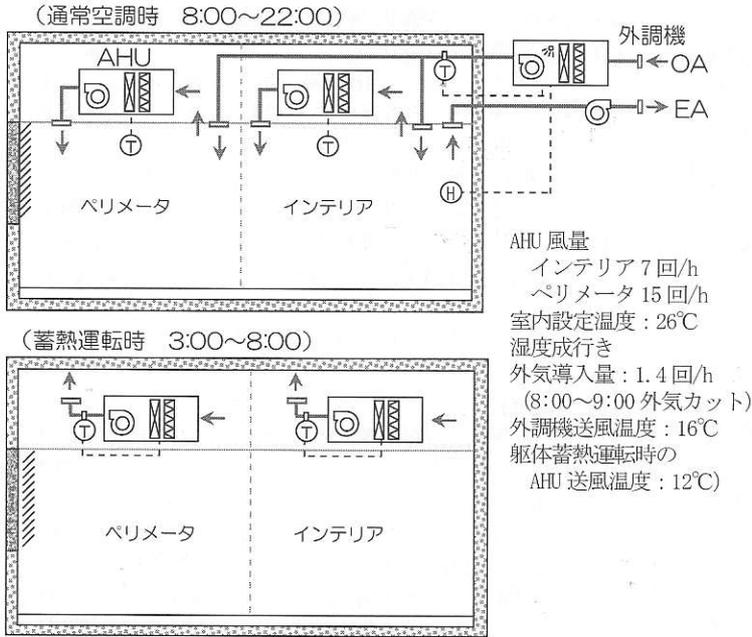
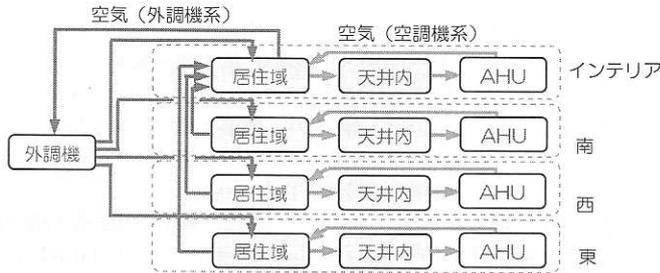


図11 空調方式と年間装置負荷 (大阪)



(a) システム図



(b) 空気ループ説明図 (日中空調時)

図12 躯体蓄熱空調のシステム図と空気ループ説明図

【注記：躯体蓄熱空調の計算条件】

●都市：東京

●建物条件

対象ゾーン：標準オフィス基準階南側の居住空間と天井空間の計8ゾーン

梁：厚さ 350mm、表面積 0.6 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>の壁に換算

天井板漏気量：1回/h (居住空間容積基準)

その他の条件は、図3の基準条件と同じ

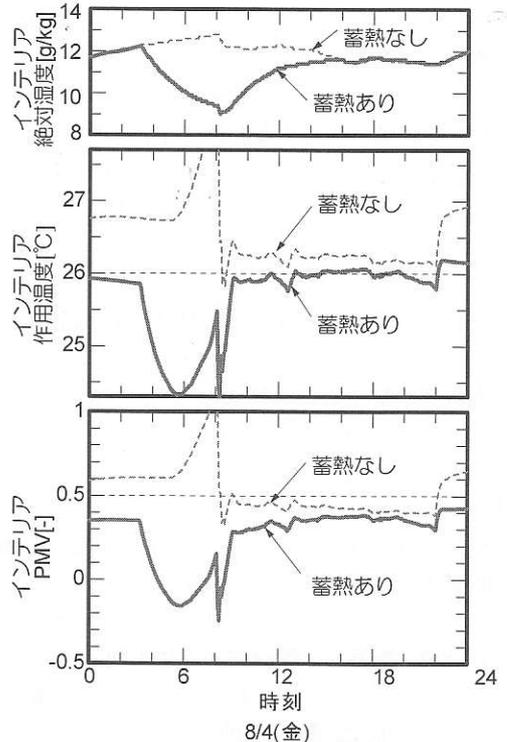


図14 躯体蓄熱有無と室内環境 (東京 8/4(金))

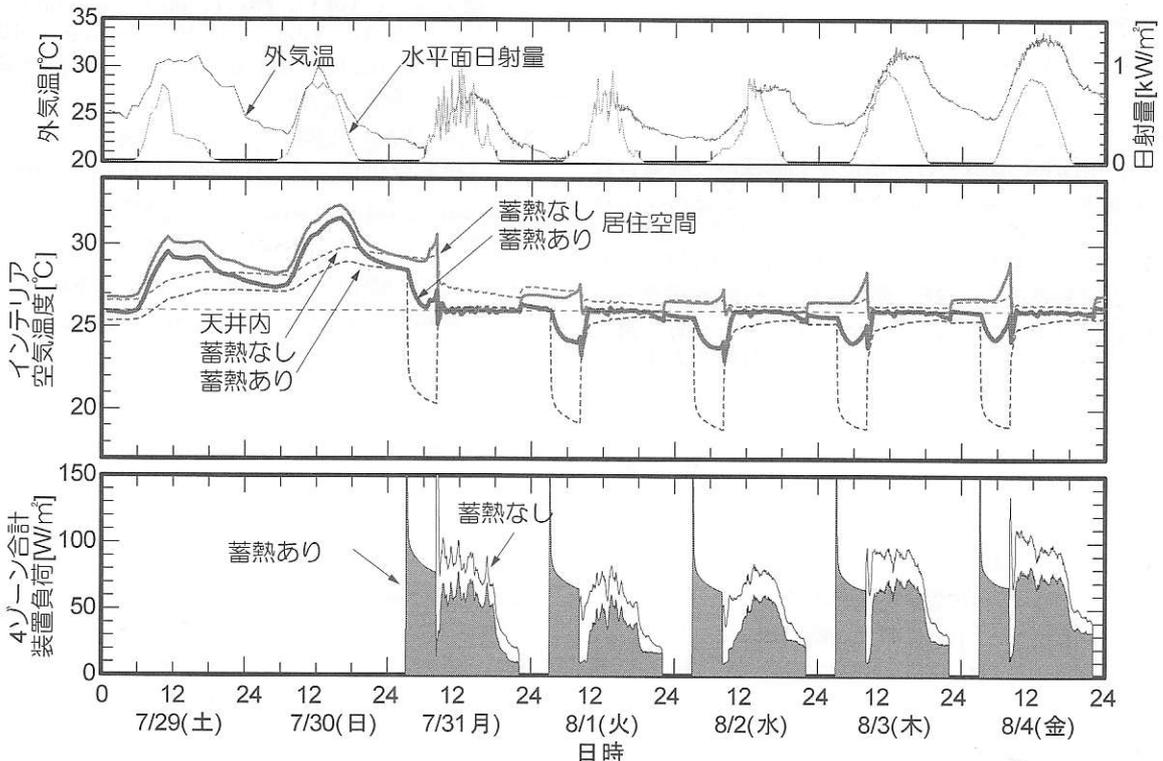


図13 躯体蓄熱有無と夏期代表1週間の室温・装置負荷 (東京)

は、躯体蓄熱運転時の空調機と昼間空調時の空調機が別々に存在するものとして扱った。空調システムの概要を図12に示す。天井吹きつけ方式を想定し、天井内に4つの空調機がある。空間は、天井内と居住空間を分割し、計8ゾーンの相互影響を考慮する計算とした。各空間は均一室温であり、壁面の対流熱伝達率はどの面も $4.5\text{W/m}^2\text{K}$ と仮定されるなど、条件設定での限界はある。図13に、躯体蓄熱運転をする場合としない場合の、夏期代表1週間の室温・装置負荷の変動を示す。8/4の4ゾーン合計装置負荷(全熱)で評価すると、夜間移行率は29%、ピークシフト率は26%であった。代表1週間の負荷増加率は9%程度であった。夏期代表日として8/4の室内熱環境の時刻変動を図4に示す。本試算では、躯体蓄熱運転を行うと、蓄熱時間中にかなり除湿され、その影響が昼間にも残り、適切な外調機送風温度設定とすれば、湿度上昇の問題は回避できることが示された。空調中のインテリアゾーンの作用温度は躯体蓄熱運転することにより $0.2\sim 0.3\text{K}$ 低下した。午前中のPMVは、 $0.2\sim 0.3$ ほど低下する。

## 7 結

建築と設備の連成シミュレーションとして、BESTのために開発された方法を示した。インプリシット法とエクスプリシット法を切り換えることにより、建築計算の長所を生かしつつ、多様な空調システムにも対応できる連成計算を実現できた。システム側は、広い範囲の空調方式や計算法を組み込み可能で、高い発展性をもつが、複雑で多量な入力操作となる性質があり、これを補う工夫が重要となる。今後、建築計算では、ブロックモデルを組み込み、壁面流、噴流の影響を考慮した上下温度分布を計算できるモデルと改良することを目指している。

### 【謝辞】

本報は、(財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BESTコンソーシアム」・「BEST企画委員会(村上周三委員長)」および専門版開発委員会(石野久彌委員長)、行政支援ツール開発委員会(坂本雄三委員長)、クラス構想WG(石野久彌主査)の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表するも

のである。クラス構想WG名簿(順不同) 主査：石野久彌(首都大学東京名誉教授)、委員：井上隆、一ノ瀬雅之(以上、東京理科大学)、上田博嗣、角谷亜璃砂(以上、大林組)、内海康雄(宮城工業高等専門学校)、木下泰斗(日本板硝子)、工月良太(東京ガス)、黒本英智(東京電力)、郡公子(宇都宮大学)、菰田英晴(鹿島建設)、芝原崇慶(竹中工務店)、菅長正光(菅長環境・設備一級建築士事務所)、瀧澤博(元鹿島建設)、長井達夫(東京理科大学)、二宮秀與(鹿児島大学)、野原文男、二宮博史、丹羽勝巳、田端康宏(以上、日建設計)、平林啓介(新日本空調)、柳井崇(日本設計)、事務局：生稲清久(建築環境・省エネルギー機構)

### 【参考文献】

- 1) 村上周三、石野久彌ほか：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その1)～(その38)、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.1972-2040、2007.9、pp.1077-1156、2008.8
- 2) 村上周三、石野久彌ほか：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その39)～(その61)、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2009.9
- 3) 村上周三、石野久彌ほか：建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発 第1報～第8報、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp.1027-1042、2008.9
- 4) 村上周三、石野久彌ほか：建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発 第9報～第22報、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、2009.8
- 5) 村上周三、石野久彌ほか：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」に関する総合的研究、空気調和・衛生工学、Vol.82、No.11、pp.67-73、2008.1
- 6) 村上周三ほか：特集 The BEST Program、空気調和・衛生工学、Vol.82、No.11、pp.3-73、2008.11
- 7) 村上周三ほか：特集 The BEST Programの概要と今度の展望、IBEC、No.170、Vol.29-5、建築環境・省エネルギー機構、2009.1
- 8) 松尾：大量・迅速処理を目的とした畳込演算の近似解法、日本建築学会関東支部第41回学術研究発表会(1970)
- 9) 松尾：空調負荷計算におけるふく射熱の取扱い、空気調和・衛生工学、59-4(1085-4)、pp.5-11
- 10) 松尾：伝達関数数値逆変換の一解法、日本建築学会大会学術講演梗概集(1983-9)、pp.513-514