

制御系・搬送系を考慮した建物の空調システムシミュレーション

井崎, 智伸
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻修士課程

赤司, 泰義
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

渡辺, 俊行
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

山下, 周一
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻修士課程

他

<https://doi.org/10.15017/19040>

出版情報：都市・建築学研究. 5, pp. 79-86, 2004-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

制御系・搬送系を考慮した建物の空調システムシミュレーション

Building Air-Conditioning System Simulation Considered with Automated Control and Pump/Fan Systems

井崎智伸*¹, 赤司泰義*², 渡辺俊行*², 山下周一*¹, 國吉敬司*³
Tomonobu IZAKI, Yasunori AKASHI, Toshiyuki WATANABE,
Shuichi YAMASHITA and Keiji KUNIYOSHI

The purpose of this study is to build a dynamic air-conditioning system simulation considered with automated control and pump/fan systems including a building thermal calculation. First, the building thermal behaviors calculated by two typical simulation programs, which are 'HASP' developed in Japan and 'HVACSIM+' developed in USA, are compared together, and some problems existing in HVACSIM+ are pointed out. Second, the models in HASP for the building calculation and the models in HVACSIM+ for the pump/fan systems' calculation are integrated as one dynamic air-conditioning system simulation tool to enable to reproduce a real air-conditioning system behaviors. Last, the integrated simulation tool is applied to a simple building and air-conditioning system model, and the results are shown.

Keywords: Building Air-Conditioning System, Dynamic Simulation, Automated Control System, Pump/Fan Systems
空調システム, 動的シミュレーション, 自動制御系, 搬送系

1. はじめに

建物の空調システムは、コイルやファン、ダンパなどの多種の要素機器から構成され、温度や圧力、流量などの様々な状態量を用いて制御されると同時に、それが建物の熱特性と密接に影響しあうなど非常に複雑な挙動を示す。エネルギー消費量の算定を主たる目的とした従来の空調システムシミュレーションにおいては、空調システムの挙動を分秒単位で再現していく必要性があまりなく、システム全体の時間単位の熱収支に基づいた計算方法がとられてきた。しかしながら、近年注目されている自動制御の適正化やシステムの故障検知・診断などを検討する場合においては、分秒単位の空調システムの挙動をできるだけ確度高く模擬することが必要となる。

日本の代表的な空調システムシミュレーションプログラムの1つにHASP/ACLD/8501¹⁾, HASP/ACSS/8502²⁾があげられる(通常、両プログラムはリンクして利用されるので、これらをまとめて、ここでは「HASP」と表記する)。日本では建物の動的熱負荷計算が研究開発において先行した経緯もあって、HASPは1時間ステップの熱収支に基づくシミュレーションプログラムとなっており、そのために制御

系や搬送系の分秒単位のシステム挙動を再現できない。一方、制御系や搬送系の計算が充実した空調シミュレーションプログラムの1つに米国の国家標準技術研究所(NIST)が開発したHVACSIM+が挙げられるが(日本では、幾つかの新規モジュールを追加してHVACSIM+(J)³⁾として公表されているが、ここでは「HVACSIM+」と表記する)、米国におけるこの種のシミュレーションプログラム開発は、主に機械分野を中心に行われてきた関係で、制御系や搬送系の計算に対してある程度の配慮がなされている反面、建物の熱挙動計算においては不安な点が残る。

本稿では、HASPとHVACSIM+による基本的な建物計算結果の比較検討を行ってHVACSIM+の問題点を指摘するとともに、HASPによる建物計算とHVACSIM+による制御系・搬送系の計算の統合化を図り、建物も含めた分秒単位のシステム挙動が再現できる空調システムシミュレーションを構築したのでこれを報告する。

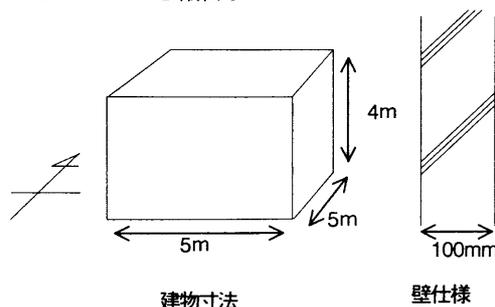


図1 建物モデル

*1 空間システム専攻修士課程
*2 都市・建築学部門
*3 建築学科学生

2. HASP と HVACSIM⁺における建物計算の比較

HASP と HVACSIM⁺の基本的な建物計算の比較検討を簡易モデルで行った。建物モデルを図1に示す。厚さ100mmの普通コンクリート（熱伝導率 $\lambda=1.2[\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}]$ 、比熱 $c=0.21[\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}]$ 、密度 $\rho=2200[\text{kg}/\text{m}^3]$ ）で構成された $5\text{m}\times 5\text{m}\times 4\text{m}$ の箱を対象とした。気象データは福岡の標準気象データを用い、内部発熱はないものとした。

図2にHASPとHVACSIM⁺による建物の自然室温の計算結果を示す。一般に、夏季の最大室温はHASPが大きくなり、冬季の最大室温はHVACSIM⁺が大きくなる傾向がある。また、夕方から明け方にかけてHASPの自然室温はHVACSIM⁺よりも 2°C 程度小さくなり、特に、天気の良い日（例えば1月6日など）は日中を通してその差異が残る。

HVACSIM⁺における壁体の熱伝導計算は、本来、無限項をもつべき熱流応答を最大5次元で打ち切って計算する。また、各壁体の対流・放射熱伝達率を時変とし、壁体表面近傍の空気層を各壁体の熱伝導計算から分離して壁体表面温度を計算する。一方、HASPではラプラス領域で室全体の伝達関数のs系列に基づく近似式（伝達ベクトル法）を用いるので、各壁体の伝達関数を求めて総和する手順が不要となり計算効率がよい。しかしながら、壁体の対流・放射熱伝達率を固定値で与え、壁体表面近傍の空気層を壁体表面境界層として取り扱っている関係で各壁体の表面温度が算出されないなどの制限もある。

HVACSIM⁺における壁体の対流・放射熱伝達率をHASPの固定値にあわせて自然室温を計算し、HASPによる自然室温と比較した（図3）。自然室温の差異が小さくなっており、原因の1つが対流・放射熱伝達率の取り扱いの影響であったことがわかる。しかしながら一方で、HVACSIM⁺で

は大気放射の影響が考慮されていないことも判明しており、HVACSIM⁺の自然室温はHASPよりも大きくなる傾向が残る。また、HVACSIM⁺の計算では気象データの風向を計算に考慮しておらず、外表面の対流熱伝達率の計算や隙間風の換気量計算に不安が残る。

前述したように、HVACSIM⁺における壁体の熱伝導計算は、熱流応答を最大5次元で打ち切って計算するので、計算ステップによっては大きな誤差を生じる危険性がある。

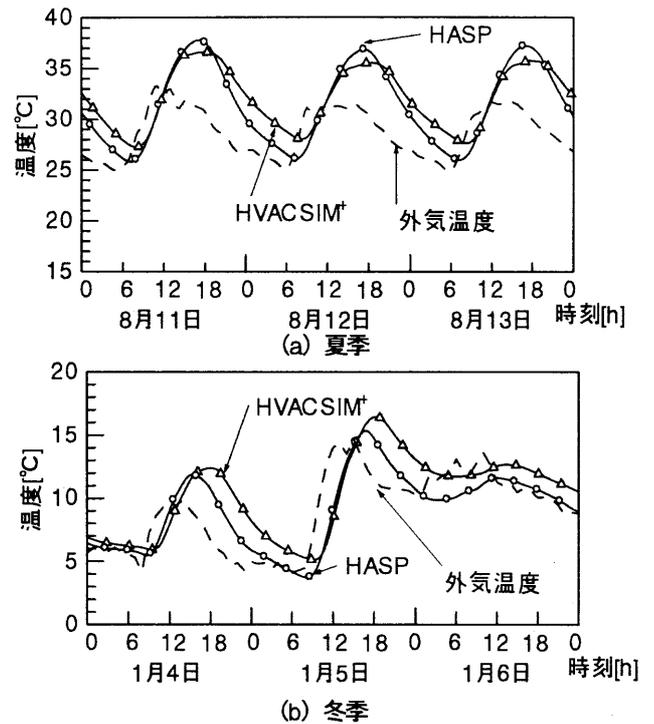


図2 HASP と HVACSIM⁺の自然室温の比較 1

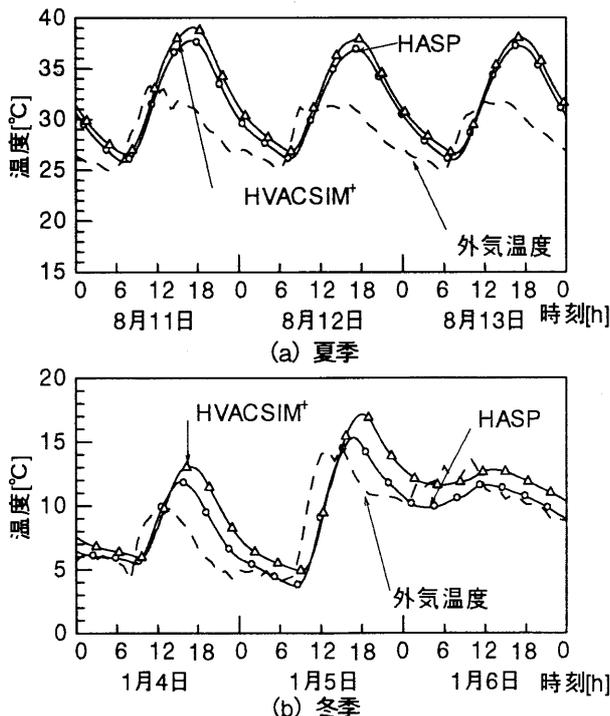


図3 HASP と HVACSIM⁺の自然室温の比較 2

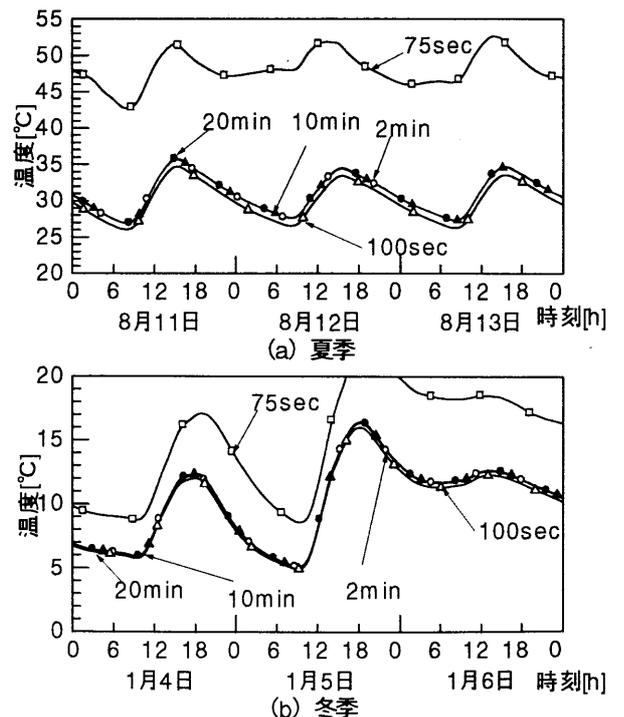


図4 HVACSIM⁺における計算ステップの影響

計算ステップを変えた HVACSIM⁺ の自然室温を図 4 に示す。夏季・冬季ともに 75 秒以下の計算ステップでは計算結果が発散してしまう。建物仕様にもよるが、HVACSIM⁺ の計算では安全側を取る意味でも 20 分程度の計算ステップが必要だと思われる。空調システムの自動制御の観点から考えると、仮に計算ステップを 20 分とした場合は 20 分前の室温に基づいてシステムの挙動が決定されるので、本来の空調システムの挙動とはかけ離れてしまう。一方、これまでの開発経緯から元来の HASP では計算ステップが 1 時間と固定されているが、今回、シミュレーションの適用性を拡張するために、計算ステップを 1 分まで短く取れることを可能とした。計算ステップを変えて自然室温を計算した HASP の結果を図 5 に示す。1 時間間隔から 1 分間隔までほぼ同じ値を示しており、HVACSIM⁺ のように発散することはない。

総じて、HASP の建物計算については、壁体表面温度や対流・放射熱伝達率に対して制限があるものの、HVACSIM⁺ に組み込まれている建物計算と比較すれば、分秒単位のシステム挙動を再現するような空調システムシミュレーションに対してより有用であると考えられる。

3. 制御系・搬送系の計算モデル^{3,4)}

3.1 PID 制御モデル⁵⁾

従来は設定室温を実現するように搬送系の流量や処理熱量などを収束計算により求めることで制御モデルに替えていた。ここでは、実際のフィードバック制御で広く用いられている PID 制御のモデルを取り入れた。

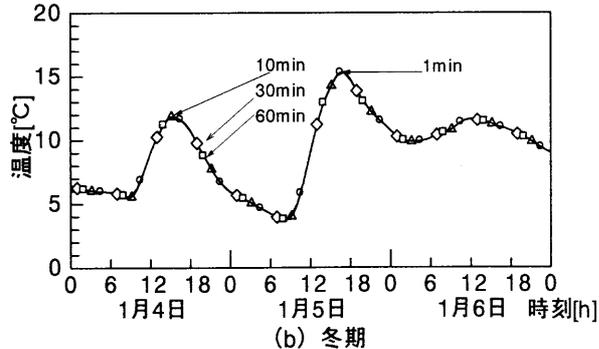
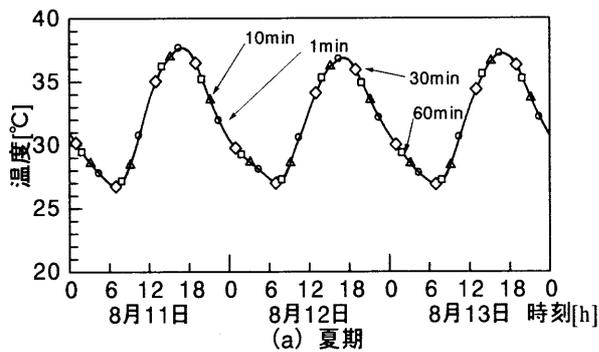


図 5 HASP における計算ステップの影響

PID 制御とは比例動作 (Proportional mode)、積分動作 (Integral mode)、微分動作 (Derivative mode) の 3 つの動作により成り立つ。各動作が制御結果に与える影響について図 6 に示す。比例動作により制御値は設定値に近づくが、比例動作だけではオフセットが生じてしまう。これに積分動作を加えることでオフセットの問題を解消し、制御値と設定値の偏差を 0 に近づけることができる。また、そこに微分動作を加えることにより積分動作による位相の遅れを解消できる。このように 3 つの動作が補い合うことにより制御を実現することができる。このモデルにおける計算式を以下に示す。

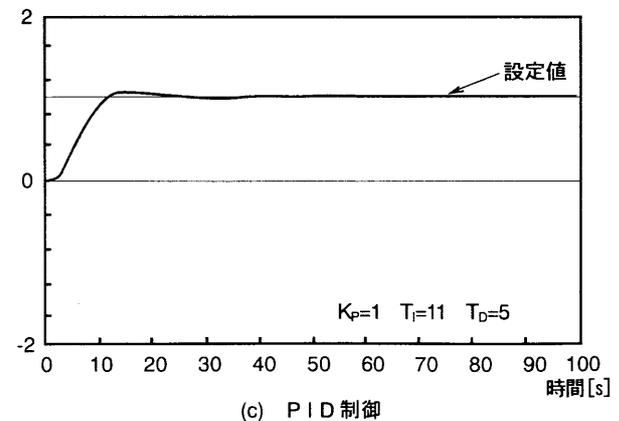
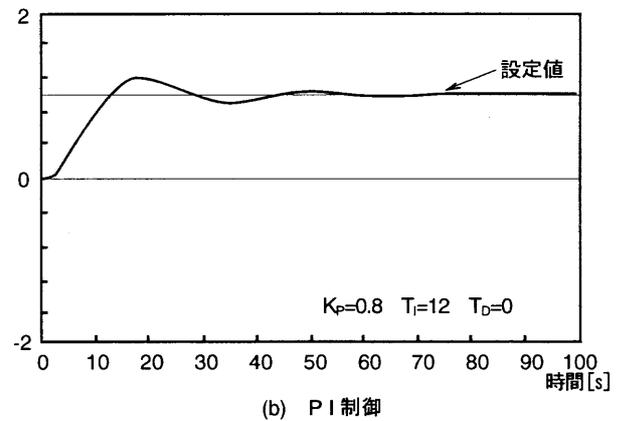
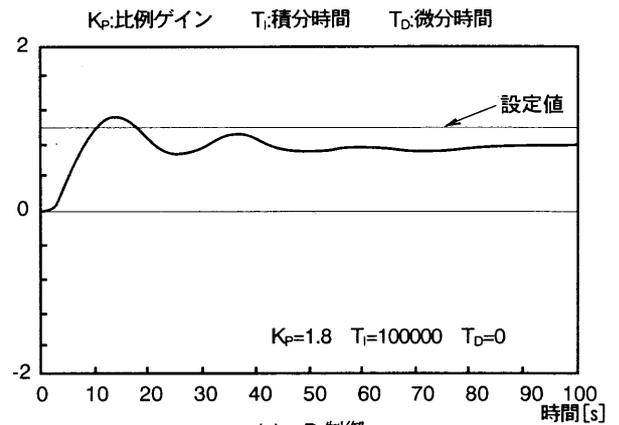


図 6 PID 制御における各動作の制御結果

$$\text{CTRL} = K_{c,n} \left\{ (PV_n - SP_n) + \frac{1}{T_I} \sum_{i=0}^n (PV_i - SP_i) \Delta T + T_D \frac{((PV_n - SP_n) - (PV_{n-1} - SP_{n-1}))}{\Delta T} \right\} \quad (1)$$

ここで、

CTRL : 制御量, K_c : 比例ゲイン, PV : 制御値, PS : 設定値, T_I : 積分時間, T_D : 微分時間, ΔT : 計算ステップ

3.2 流量計算モデル

このモデルは、空調システムの搬送経路における水頭差と抵抗をもとに経路の圧力差と流量を算出するモデルである。このモデルを用いるには経路に枝と節を定義しなければならない(搬送ネットワーク)。枝と節の定義の例を図7に示す。各枝の両端の圧力差は式(2)を用いて算出される。

$$\Delta P = SG^2 - \Delta H + \Delta Z \quad (2)$$

ここで、

- ΔP : 枝の両端の圧力差 [kPa]
- S : 枝の抵抗係数 [kPa/(kg/s)²]
- G : 枝の流量 [kg/s]
- ΔH : ポンプによる圧力増加 [kPa]
- ΔZ : 枝の両端の高度差による圧力差 [kPa]

式(2)が搬送ネットワーク上の各枝で成立し、更に各節で以下の2つの式が成立するように収束計算を行うことによって各枝の圧力差と流量を求める。ここで、圧力差ベクトル、流量ベクトルとは、圧力差や流量の状態量に流れ方向の情報を加えて定義されるもので、各節においてそれらの総和は0になっておく必要があるということである。

$$\sum \overline{\Delta P} = 0 \quad (3)$$

$$\sum \overline{G} = 0 \quad (4)$$

ここで、

$\overline{\Delta P}$: 圧力差ベクトル, \overline{G} : 流量ベクトル

3.3 バルブの抵抗計算モデル

バルブの開度により抵抗係数がどう変化するかを計算するモデルである。抵抗係数を求める式は以下となる。

$$K = \frac{W_f K_0}{\{(1-\lambda)C + \lambda\}} + (1 - W_f) K_0 \lambda^{(2C-2)} \quad (5)$$

ここで、

- K : バルブの抵抗係数 [kPa/(kg/s)²]
- K_0 : バルブ全開時の抵抗係数 [kPa/(kg/s)²]
- λ : 漏洩パラメータ [-]
- C : バルブ開度 ($C=0$ のとき全閉) [-]
- W_f : 抵抗係数のリニア特性の重み [-]

バルブの抵抗係数はリニア特性と指数関数特性の和から計算され、リニア特性の重み W_f は全体に対するリニア特性の割合を示す。リニア特性の重みが抵抗係数にどのような影響を与えるかを図8に、リニア特性の重みが流量にどのような形であられるかを図9に示す。ここでは、バルブ全開時の抵抗係数 $K_0=60$ 、漏洩パラメータ $\lambda=0.05$ で計算を行った。

3.4 ポンプによる水頭差モデル

ポンプによる圧力を算出するモデルである。ポンプの特性として次の係数を求めておく必要がある。

$$C_h = a_0 + a_1 C_f + a_2 C_f^2 + a_3 C_f^3 + a_4 C_f^4 \quad (6)$$

ここで、

- C_h : 圧力水頭係数 [-]
- C_f : 流量係数 [-]
- $a_0 \sim a_4$: 水頭対流量の曲線係数

また、 C_h と C_f は式(7)、式(8)で定義される。

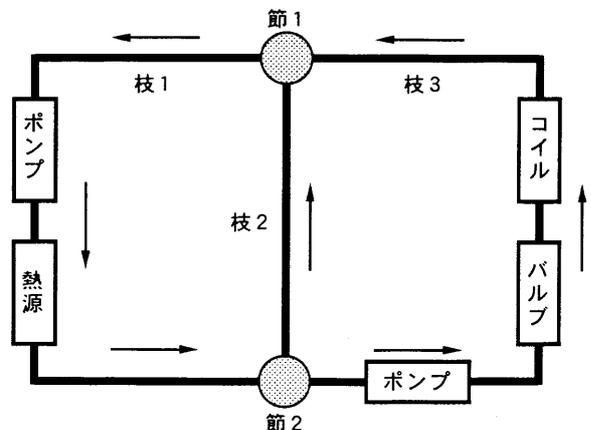


図7 流量計算モデルの枝・節の定義の例

$$C_f = \frac{G}{\rho N D^3} \quad (7)$$

$$C_h = \frac{\Delta H}{\rho N^2 D^2} \quad (8)$$

ここで、

- G : 流量 [kg/s]
- ρ : 流体密度 [kg/m³]
- N : 回転翼回転速度 [rps]
- D : 回転翼直径 [m]
- ΔH : ポンプによる圧力増加 [kPa]

計算手順としては、はじめにカタログ等から式(6)の $a_0 \sim a_4$ を求めておき、式(7)の C_f を式(6)に代入して C_h を計算する。その C_h を式(8)に代入してポンプによる圧力増加 ΔH を得る。これが先に述べた流量計算モデルで用いられる。

4. 計算例

4.1 計算条件

簡易な建物・空調システムモデルに制御系・搬送系を考慮した空調システムシミュレーションを行った。建物モデルを図10に示す。2節で対象とした厚さ100mmの普通コンクリートの4m×5m×5mの箱の南面に3m×1.7mの窓面を設けたもので、窓仕様は普通ガラス6mmのブラインドなしである。また、内部発熱はパソコン3台分の機器発熱があるものとし、気象データは福岡の標準気象データを用いた。

空調システムモデルを図11に示す。空調はファンコイルユニット(FCU)にて行い、バルブの開閉による変流量方式で室温調整を行う。室温を制御値としPID制御によりバルブ開度を求めている。また、熱源機器を容量制御で運転し、送水温度は夏季7℃(6月～9月)、冬季50℃(12月～3月)とした。空調時間は8時～21時、設定室温は夏季26℃、冬季22℃である。夏季、冬季以外の中間季は空調を行わない。

また、建物モデルの最大負荷計算を基にカタログからFCUと熱源機器を選定した。最大負荷と選定したFCUと熱源機器の定格能力・入力を表1に示す。熱源機器の部分負荷特性については、HASPで用意されているデフォルトの値を使った。更に、熱源機器やFCUの冷水流量が定格流量になるようにポンプの回転翼回転速度を調整した。バルブ全開時の抵抗係数と漏洩パラメータは3.3節で示した値と同じで、計算ステップは1分である。

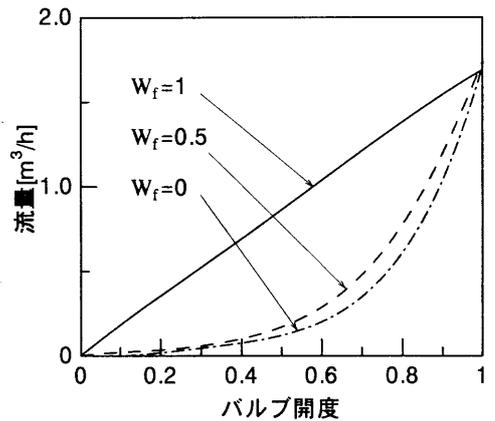
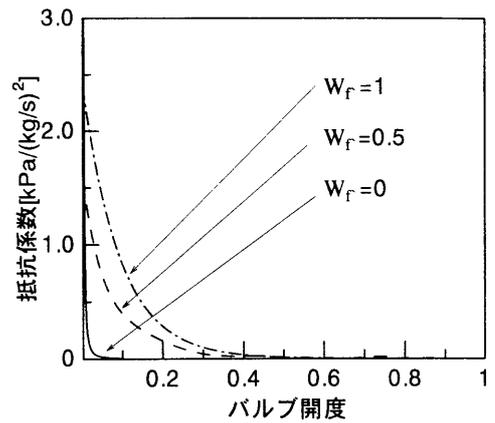


図9 バルブによる流量の変化

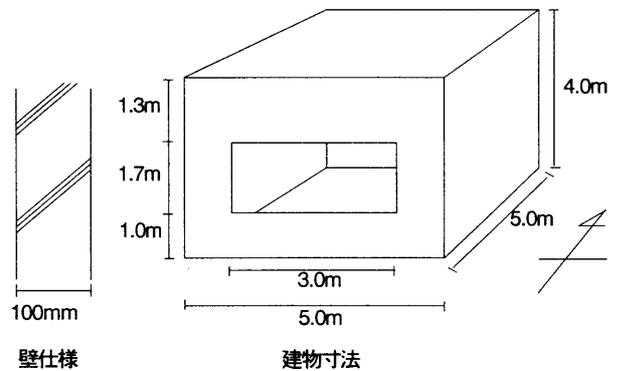


図10 建物モデル

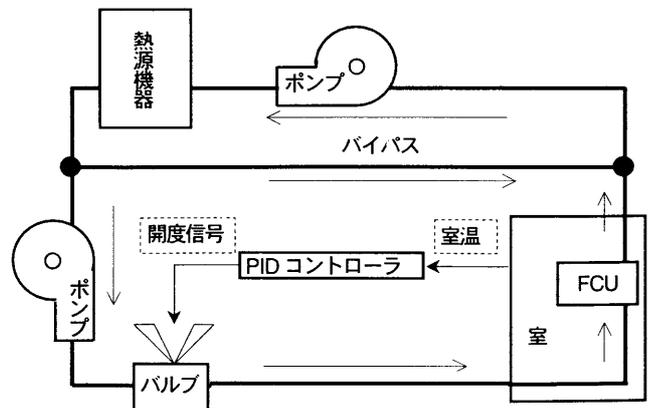


図11 空調システムモデル

4.2 計算結果

夏季と冬季の代表日における室内温度と冷温水温度、バルブ開度、消費電力などを図 12 に、空調時間帯における PID 制御による室温変化、熱源機器の流量変化、ポンプ消費電力の変化に着目して図 12 の一部を拡大したものを図 13、図 14、図 15 に示す。

PID 制御のチューニングには様々な方法があるが、今回は試行錯誤法を採用した。PID 制御によって、設定室温近傍に室温が十分に制御されていることがわかる (図 13)。当然のことながら、制御系を組み込めば、前ステップまでの室温変化に基づいてバルブ開度が操作されるので、厳密には設定室温とはならない。今回の場合、計算ステップは 1 分であり、現実の制御時間に比べれば依然として大きいものと考えられるが、制御上の問題は生じていない。ただし、対象が極めて簡易なモデルなので、実際の建物・空調システムを対象とするときに計算ステップが 1 分で十分かどうかは検討する必要がある。空調開始時の室温変化に注目すれば、設定室温の近くに安定するまでの時間は、夏季で約

20 分、冬季で約 1 時間である。

従来の熱収支に基づく空調システムシミュレーションでは、バイパスによって熱源機器を流れる冷温水の流量は一定に保たれ、1 次側ポンプの消費電力も一定となる。しかし、今回、流量計算モデルを導入したことによって、バルブが閉まると搬送系全体の抵抗値が上昇し、それによって熱源機器の流量が減少して、1 次側ポンプの消費電力も小さくなるといった現実のシステム挙動に近い現象が再現できるようになった (図 14、図 15)。ただし、熱源機器の流量に関しては、バルブが閉まると減少し、バルブが開くと上昇す

表 1 最大負荷と熱源機器能力・入力

	冷房	暖房
最大負荷[W]	8433	10158
FCU 定格能力[W]	8570	13620
熱源機器定格能力[W]	11200	14000
熱源機器定格入力[W]	3800	3700

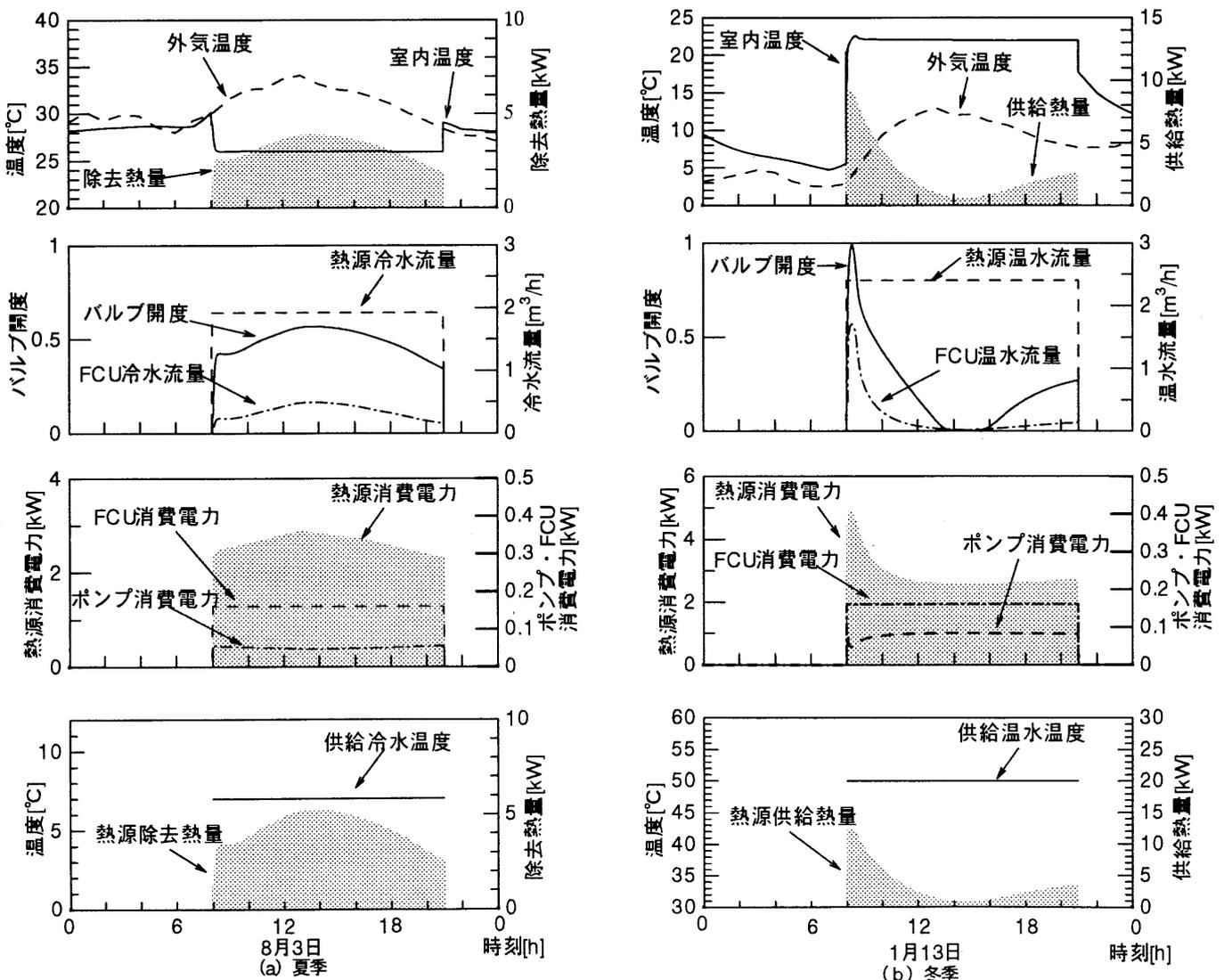


図 12 夏季、冬季代表日における計算結果 (熱源容量制御の場合)

るといふ計算結果を得ているものの、簡易なモデルを対象としているために、その様子がグラフ上でほとんど見て取れない。これについても、PID 制御と同様に実際の建物・空調システムを対象に検討を重ねる必要があるだろう。ポンプの消費電力は以下の式によって計算される。

$$E = \frac{G \Delta H}{\eta \rho} \quad (9)$$

ここで、

- E : 消費電力 [kW]
- G : 流量 [kg/s]
- ΔH : ポンプによる圧力増加 [kPa]
- η : 効率 [-]
- ρ : 流体密度 [kg/m³]

4.3 熱源機器の制御方法の違いによる影響

前節では熱源機器を容量制御運転した場合の計算結果を述べたが、それを ON/OFF 制御運転に変えた場合のシミュレーションを行った。夏期は熱源機器入口水温が 10℃を超える場合、冬期は 45℃を下回った場合に熱源機器を起動させ、夏期は 5℃を下回った場合、冬期は 55℃を超えた場合に熱源機器を停止するようにした。計算結果を図 16 に示す。

熱源機器を ON/OFF 制御運転すると室温が全く安定しない。これは PID 制御のチューニングの問題ではなく、熱源機器の ON/OFF 制御に伴う冷温水温度の変動によるものである。室温は設定室温近辺で振動する。

熱源機器を容量制御運転する場合と ON/OFF 制御運転する場合の電力消費量期間積算値を表 2 にまとめた。熱源機器の電力消費量について、容量制御の方が ON/OFF 制御よりも 2 倍以上大きい。原因は、ON/OFF 制御運転では室温

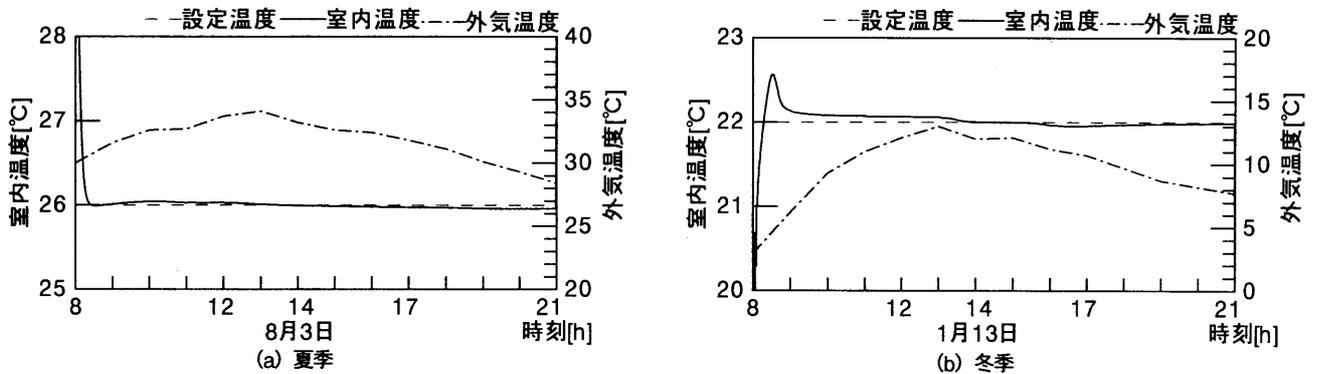


図 13 PID 制御による室温の変化

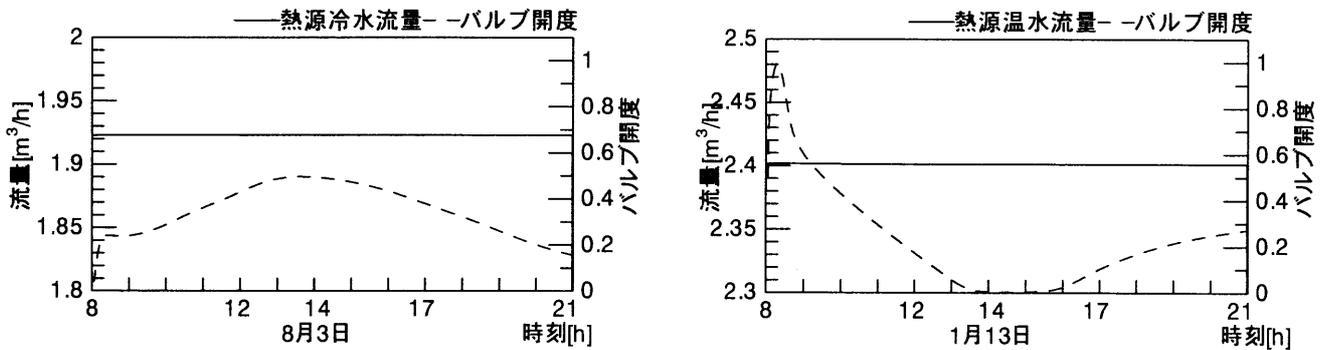


図 14 熱源機器の流量域変化

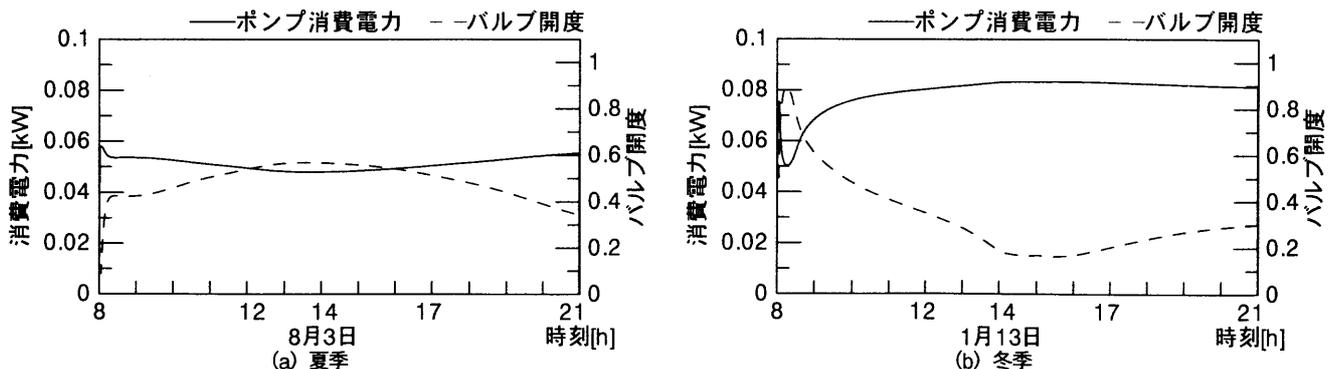


図 15 ポンプ消費電力の変化

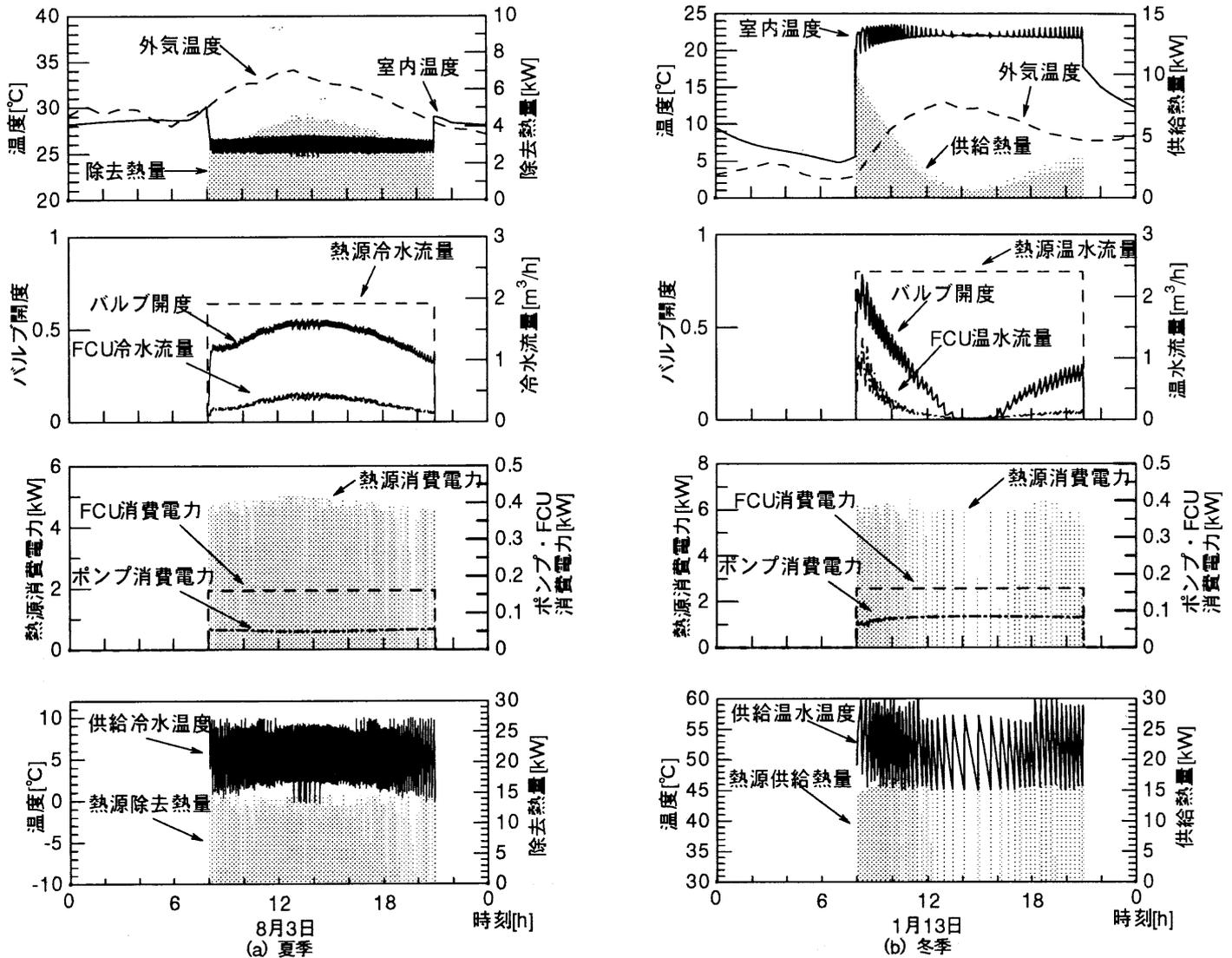


図 16 夏季, 冬季代表日における計算結果 (熱源 ON/OFF 制御の場合)

が設定室温を満足せず, 熱源機器電力消費量が小さくなっていること, 熱源機器の部分負荷時の効率が全負荷運転時よりもかなり悪いものであることが考えられる。

5. おわりに

本稿では, HASP による建物計算と HVACSIM⁺による制御系・搬送系の計算の統合化を図り, 建物も含めた分秒単位のシステム挙動が再現できる空調システムシミュレーションを構築して計算例を示した。これにより, 制御パラメータの最適化や故障検知・診断などの検討に適用されるシミュレーションツールとして発展させることができることを確認した。

研究の初期段階ということもあって, 今回の検討は簡易な建物・空調システムモデルを対象としたが, 今後は, 実際の建物・空調システムに近いモデルを想定し, 本稿の空調システムシミュレーションをベースに改良と検討を重ねていく予定である。

表 2 電力消費量 [kWh]

		ポンプ	熱源機器	FCU	合計
容量制御	夏期	87.1	3629.0	255.3	3971.3
	冬期	126.2	4516.6	253.2	4895.9
	年間	213.2	8145.5	508.4	8867.2
ON/OFF 制御	夏期	87.8	1241.8	255.3	1584.9
	冬期	127.2	2122.3	253.2	2502.7
	年間	215.1	3364.2	508.4	4087.6

参考文献

- 1) 建築設備技術者協会: HASP/ACLD/8501 解説, 1986.2
- 2) 建築設備技術者協会: 空調システム標準シミュレーションプログラム HASP/ACSS/8502 プログラム解説書, 1986.2
- 3) 空気調和・衛生工学会コミッショニング委員会 WG: HVACSIM^(J) 利用者マニュアル, 1998.4
- 4) 空気調和・衛生工学会: 空気調和衛生工学便覧 第12版 空気調和設備設計篇, 1995.3
- 5) 山本重彦, 加藤尚武: PID 制御の基礎と応用, 朝倉書店, 1997.4

(受理: 平成 15 年 12 月 4 日)