

動的シミュレーションHVACSIM⁺の再現性の検証と パラメータの調整に関する研究

鄭 明 傑*¹ 林 茂 広*²
西 谷 義 彦*¹ 中 原 信 生*³

空調システムの非定常特性を把握するためには、精確な再現性を有する動的シミュレーションプログラムを用いる必要がある。本研究では動的シミュレーションプログラム HVACSIM⁺(J)の計算アルゴリズムと実物の差異がその再現性に及ぼす影響を考察すると同時に、要素モデルにおけるパラメータの調整方法についても検討した。HVACSIM⁺(J)を用いた単一ダクト定風量方式の空調システムの正常状態と故障状態の計算値と計測値の比較を行うことにより検討した結果、実システムの計算に必要なアルゴリズムの追加および一部のパラメータの適度な調整によって、HVACSIM⁺(J)は十分な精度を持った再現を行うことが可能であることを示した。

キーワード：動的シミュレーション、空調システム、HVACSIM⁺(J)

はじめに

空調システムの研究開発および設計業務における基本計画、基本設計において、シミュレーション手法を利用すれば、各種機器のシミュレーションモデルを組み合わせることによって、様々なシステム構築や、システムの性能、制御パラメータの設定・変更が自由に行える。また、一般に空調システムの非定常特性の把握、システム制御パラメータなどがシステムの動特性に及ぼす影響の解析には、従来の静的シミュレーションにより検討することはできないため、動的シミュレーションプログラムを用いる必要がある。

これまでに、各々の研究者によって開発された幾つかの動的シミュレーションプログラムについて、実用化に向けての研究が行われているが¹⁾、本研究に用いるHVACSIM⁺(Heating Ventilation and Air Condition system SIMulation + other system)は米国のNIST(国

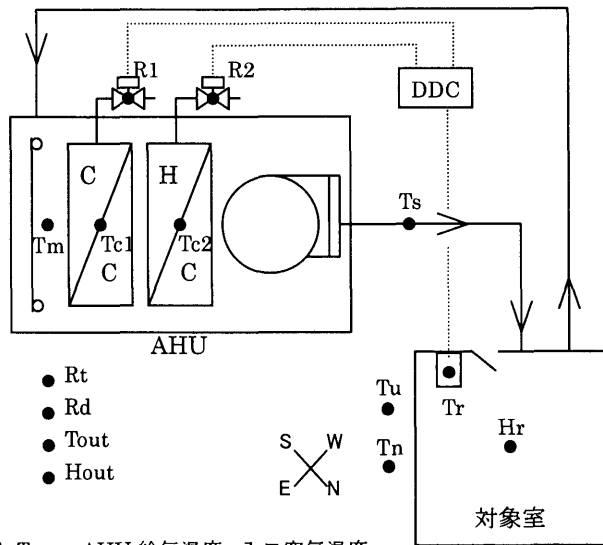
立標準技術研究所)によって開発されたモジュール方式を持つ動的シミュレーションプログラムである。HVACSIM⁺はこれまでに日本の空調システムに対応させるべく改良が行われ¹⁾、HVACSIM⁺(J)として公開され、現在、空調システムの動特性の検討に用いられつつある²⁾。しかし、これまでに実建物を対象としたシミュレーションによる計算値と計測値の比較により、このプログラムの再現性を検証することがまだ行われていない³⁾。そこで本研究では単一ダクト定風量方式の空調システムを対象とし、正常状態と故障状態(冷水バルブを12:30~14:30全閉させる状態)の二つの状態に対して、計測値と計算値の比較により、①HVACSIM⁺(J)の計算アルゴリズムと実物の差異がこのプログラムの再現性に及ぼす影響、②要素モデルにおけるパラメータの調整方法について検討したうえで、HVACSIM⁺(J)の再現性の検証を試みた。

1. 対象物件および実験概要

1.1 対象空調システム

つくば市にある研究施設の会議室空調システムを対象空調システムとする。対象室と空調システム概要を表-1、表-2および図-1に示す。

*¹ (株)三見空調技術研究室 正会員
*² 豊橋技術科学大学大学院 学生会員
*³ 環境システック中原研究処/
神奈川大学工学部建築学科 正会員



Ts, Tm : AHU 給気温度, 入口空気温度
 Tr, Hr, Tn, Tu : 室内温度, 室内相対湿度, 隣室温度, 上階温度
 Tc1, Tc2 : 冷水コイル, 温水コイル水の入口水温
 R1, R2 : 冷水二方弁, 温水二方弁の要求開度信号
 Rt, Rd, Tout, Hout : 全日射量, 直達日射量, 外気温度, 外気湿度
 図-1 空調システムの概要および計測点

表-1 対象室の概要

構造	R C造建物の一部	床面積	180 m ²
用途	会議室	天井高	3.0 m

表-2 空調システム概要

空調方式		単一ダクト定風量方式	
定格仕様	ファン	送風量	2600 m ³ /h
		全静圧	0.45 kPa
仕様	冷水コイル	冷却能力	13.5 kW
		設計最大冷水流量	32 l/min
		冷水温度	7℃→13℃

1.2 計測方法

計測は中央監視システムとロガーを用いて行った。シミュレーションモデルの簡易化を図り、AHU に外気導入は行わないこととする。実験の諸条件を表-3 に示す。

1.3 計測データ

図-1 に示す建物敷地内の外気温湿度、日射量と AHU 各点の温度および室内温湿度を含む 14 点を 3 分間隔で測定した。ただし、室内相対湿度センサを室内中央の床上 1.8m に設置したが、図-1 に示す入り口付近南西壁面の床上 1.8m のところにある、本来室温制御用温度センサをそのまま室温センサとして用いた。また、気象データについて HVACSIM⁺では 1 時間ごとのデータとして用いられるため、図-2、図-3 に示す正常・故障状態の気象条件の計測データを 1 時間ごとの値に変換した。

2. シミュレーションモデルの作成

HVACSIM⁺はコイル、バルブ、ファンなどといった各空調システムの要素を TYPE と呼ばれるサブルーチンで

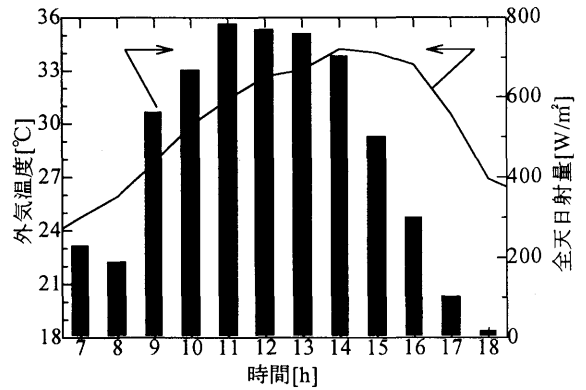


図-2 正常状態日の気象条件(97年8月7日)

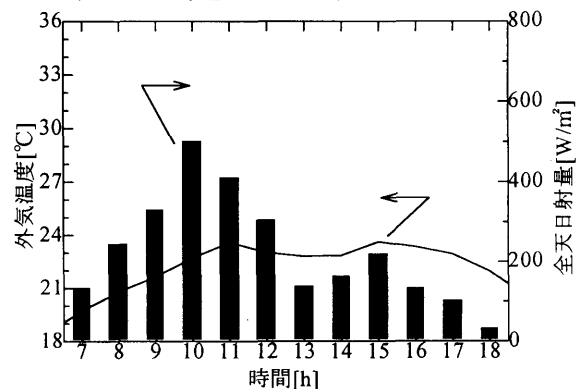


図-3 故障状態日の気象条件(97年8月17日)

表-3 計測の条件

システム状態	正常状態	故障状態
実験日	97年8月7日	97年8月17日
天候	晴れ時々曇り	曇り
測定時間	7:00~17:30	7:00~17:30
空調運転時間	8:00~17:30	8:00~17:00
設定温度(上階)	26℃(26℃)	25℃(25℃)
隣室設定温度	24℃	25℃
PI制御パラメータ	比例帯 2℃ 積分時間 4分	比例帯 2℃ 積分時間 4分
照明電力	2.88 kW	2.88 kW
在室人数	7名 (16:00~17:30)	なし

表現し、これらを組み合わせることにより、全システムの計算を行うようなアルゴリズムによって構成されている。したがって、シミュレーションを行う前に、まず図-4 に示す対象システムのシミュレーションモデルを作成する必要がある。表-4 に示す計算に必要な各変数の初期値を実空調システム的设计値または計測値を参考にして設定した。図-4 の中で、T は HVACSIM⁺に添付された TYPE の番号を示し、U はシステムモデリングファイルを構築するときに必要な各 UNIT の番号を示す。また、計算の収束性を高めるために、システムモデルを図-4 における破線で示した 5 つの SUPERBLOCK に分割した。モデリング時に次の①~⑤の仮定を行った。
 ① 室内温度は室内中心点温度を代表値として用いる。

動的シミュレーションHVACSIM+の再現性の検証とパラメータの調整に関する研究

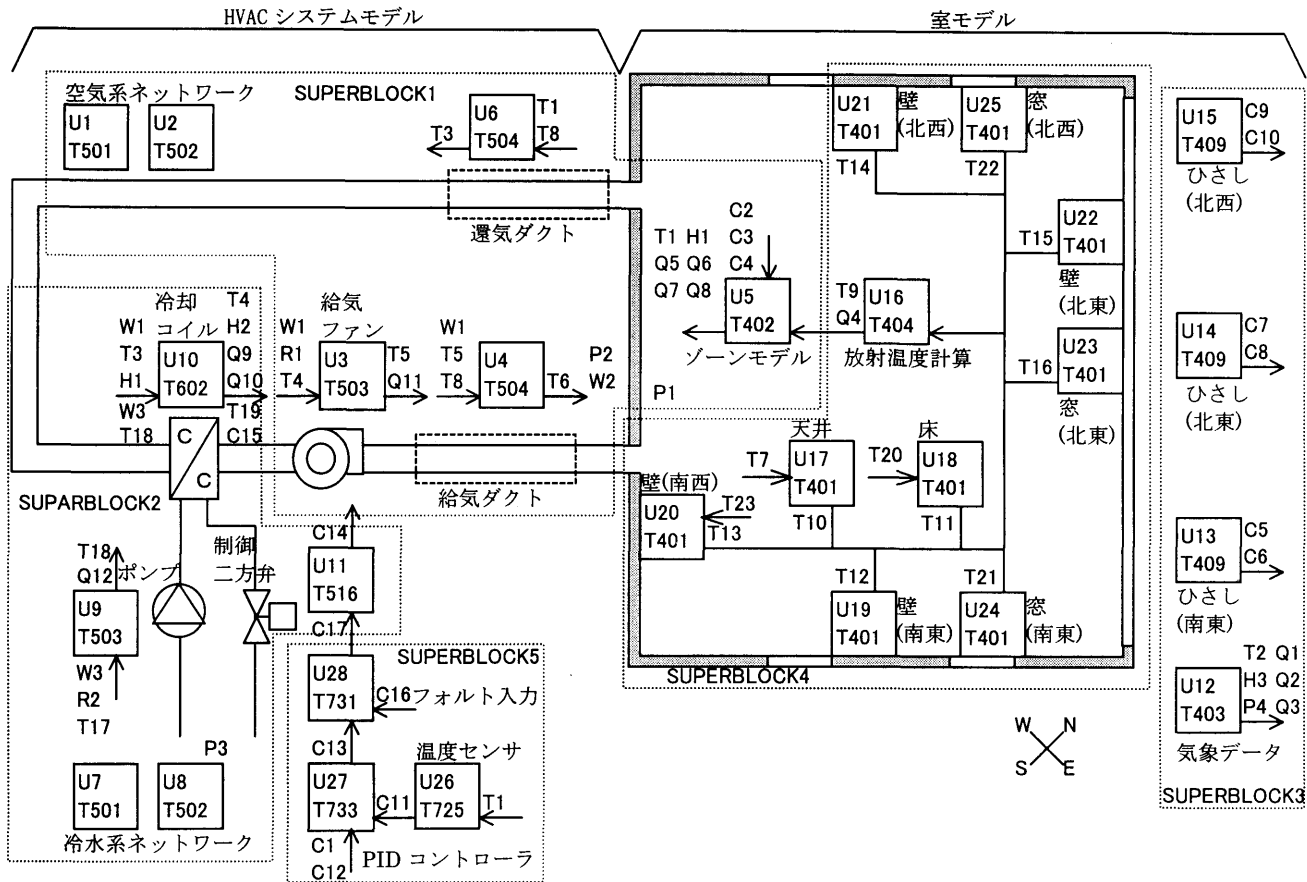


図-4 システムモデル作成図

表-4 各変数の説明およびその初期値

記号	初期値	名称	記号	初期値	名称	記号	初期値	名称
P1	101.7 kPa	室内圧力	T16	25 °C	北東窓温度	C15	0	コイル表面湿り係数
P2	101.7 kPa	吹出圧力	T17	8 °C	冷水供給温度	C16	0	フォルト信号
P3	101.7 kPa	冷水圧力	T18	8 °C	冷水コイル入口水温	C17	0	要求開度
P4	101.7 kPa	大気圧	T19	25 °C	冷水コイル出口水温	R1	0 rev/s	ファン回転数
W1	0 kg/s	空調機風量	T20	26(25) °C	床下温度	R2	0 rev/s	ポンプ回転数
W2	0 kg/s	吹出風量	T21	25 °C	南東窓温度	Q1	0 W/m ²	直達日射量
W3	0 kg/s	冷水流量	T22	25 °C	北西窓温度	Q2	0 W/m ²	散乱日射量
T1	27.2(25.8) °C	室内温度	T23	24(25) °C	隣室温度	Q3	0 W/m ²	全日射量
T2	25(22) °C	外気温度	C1	0	ON-OFF スイッチ	Q4	0 kW	壁からの伝達熱量
T3	26 °C	冷水コイル入口気温	C2	0 人	在室者数	Q5	0 kW	短波放射熱量
T4	26 °C	冷水コイル出口気温	C3	0	機器運転状態	Q6	0 kW	長波放射熱量
T5	26 °C	給気温度	C4	0	照明点灯状態	Q7	0 kJ/s	顕熱負荷
T6	26 °C	吹出温度	C5	0	南東壁日陰係数	Q8	0 kJ/s	潜熱負荷
T7	26(25) °C	上階温度	C6	0	南東窓日陰係数	Q9	0 kW	冷水コイル全熱負荷
T8	24(25) °C	ダクト周囲温度	C7	0	北東壁日陰係数	Q10	0 kW	冷水コイル顕熱負荷
T9	25 °C	放射温度	C8	0	北東窓日陰係数	Q11	0 kW	ファンエネルギー消費
T10	25 °C	天井温度	C9	0	北西壁日陰係数	Q12	0 kW	ポンプエネルギー消費
T11	25 °C	床温度	C10	0	北西窓日陰係数	H1	0.013 kg/kg(DA)	室内湿度
T12	25 °C	南東壁温度	C11	27.2(25.8) °C	室内温度信号	H2	0.013 kg/kg(DA)	吹出湿度
T13	25 °C	南西壁温度	C12	26(25) °C	設定室内温度	H3	0.013 kg/kg(DA)	外気湿度
T14	25 °C	北西壁温度	C13	1	要求開度信号			
T15	25 °C	北東壁温度	C14	0	冷水バルブ開度			

注1: ()内は故障状態の値を示す。注2: 影を付けている変数は全システム計算に必要な入力変数である。

- ② 測定中は温水が使用されていないため、AHUをファンと冷却/除湿コイルの2つの要素モデルで構成する。
- ③ 実際には建物の南東、北西にそれぞれ2つの出窓がある

るが、簡略化のため、それぞれ2つの出窓の面積を合計して、各面1つずつの窓とした。

- ④ 実建物の送水設備において対象AHUに単独のポンプ

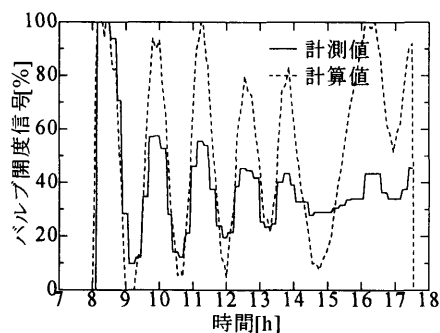


図-5 要求開度信号(正常・要素・条件 A)

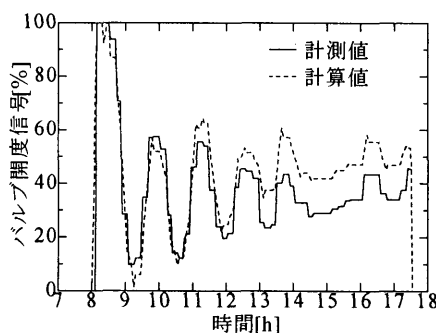


図-6 要求開度信号(正常・要素・条件 B)

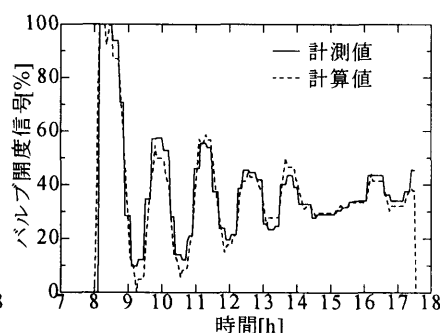


図-7 要求開度信号(正常・要素・条件 C)

表-5 要素レベル, 正常状態のパラメータ調整

条件	A	B	C
PID コントローラ不感帯[°C]	0.	0.1	0.1
設定温度誤差 [°C]	0.	0.	0.004

が用いられておらず, 対象建物では, 冷水流量を正確に計測することが困難である. そこで対象系統の設計よう程と設計最大流量によって仮定のポンプを選定し, バルブ特性を実際のバルブ仕様と同様にイコールパーセント特性として, 冷水流量を計算した.

⑤ 計算に必要な床下温度, ダクト周囲温度を計測しなかったため, それぞれ室内温度, 隣室温度とおいた.

3. 要素レベルの検討とパラメータの調整

本研究では, 全システムでの検討を行う前に, 要素レベルの検討として, 対象とする TYPE の入力に計測値を用いて, 出力の計算値と計測値の比較によって, 幾つかの TYPE のアルゴリズムと実物の差異が再現性に及ぼす影響の検討を行うと同時に, 要素モデルにおけるパラメータの調整方法についても検討した. 検証用データは正常状態(97年8月7日)のデータとし, 計算開始時の誤差を考慮して, 前日(97年8月6日)の気象データを用いて助走計算を1日行った後の値を評価した. また, 時間進行法は固定時間ステップ 10 s とした.

3.1 PID コントローラ

対象システムでは冷水バルブが PI 制御によって制御されているが, 計算上, HVACSIM+ の PID コントローラの TYPE を用い, 微分時間を 0 s とすることによって, PI 制御を再現させた. 図-5~図-7 は正常状態日の室内温度の計測値を入力として, 出力であるバルブ要求開度信号の計算値と計測値の比較である. 図-5 は比例帯と積分時間をそれぞれ設計値の 2°C, 4 分として, 制御パラメータ, 比例ゲイン $K_p=0.5$, 積分時間 $T_i=240s$ としたものである(条件 A). 図-5 より, バルブ要求開度信号の計算値の各極値において行き過ぎる現象が見られる. このことは, 実システムの PI コントローラに存在する不

感帯のアルゴリズムが, この TYPE に含まれていないことより起こったと考えられるため, これを追加した. 不感帯の値は, 一般に試運転時に調整されるので, 設計図書には与えられていないため, これを試行錯誤法で 0.1°C に調整した. その結果を図-6 に示す(条件 B). 図-6 では不感帯の追加により計算値が安定し, その振動周期も計測値に近づいているが, 時間経過とともに計測値と計算値の偏差が大きくなっている. これは, 実際の PI コントローラは何らかの原因で生じた微小な機械誤差を有するために室温設定値と若干異なる値によって室温は制御されているが, 計算では室温は実際の室温設定値そのものの値によって制御されるために, 計測値と計算値の間に差異が生じたと推察される. このことを解決するために, 設定温度にわずかな誤差を与えた. 図-7 は設定温度に 0.004°C の誤差を与えたときの結果である(条件 C). この調整により, バルブ要求開度信号の計算値が計測値をよく再現できた. 以上のことは, 計算に必要なアルゴリズムの追加, 修正により, 要素モデルの出力を計測値に合わせるという HVACSIM+ の構造そのものの適用実例を示した. 表-5 に各計算のパラメータの値を示す.

3.2 冷水コイル, バルブ

対象システムの計測値には冷水流量がないため, 冷水コイルとバルブの組合せを, AHU 入口空気温度とバルブ要求開度信号の計測値を入力として, 給気温度の計算値と計測値の比較によって, 2 つの TYPE の再現性を合わせて検討した.

(1) 冷水コイルパラメータの決定

コイルのパラメータは, チューブ直径やフィン厚さなど, 普段入手することが困難な値を用いる必要がある. しかし, 今回の計算ではこれらのデータを手に入れたので, それらに基づいて各パラメータを決定した. 冷水コイルパラメータの値を表-6 に示す.

(2) 配管系統抵抗係数の導出

実建物の空調システムにおいて冷水は対象系統に単独で送水されていないため, 対象系統の設計流量

動的シミュレーションHVACSIM+の再現性の検証とパラメータの調整に関する研究

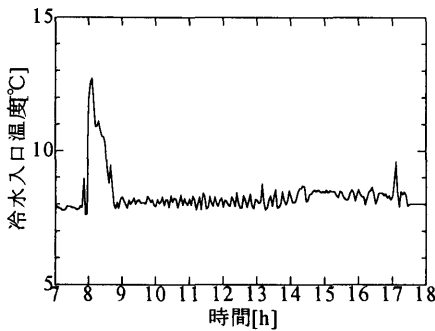


図-8 冷水入口温度(実測値・正常状態日)

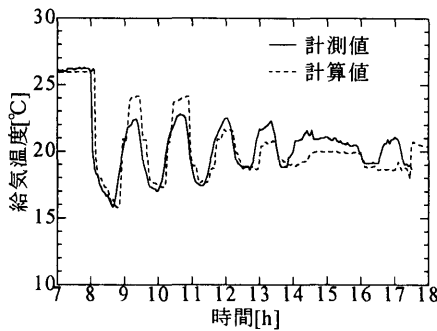


図-9 給気温度(正常・要素・条件 C)

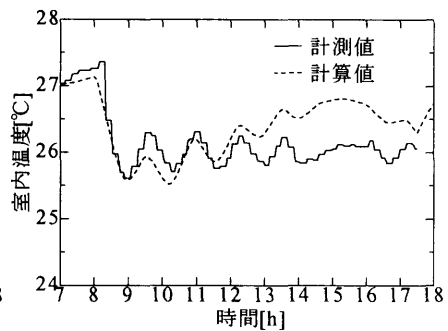


図-10 室内温度(正常・要素・条件 C)

表-6 冷水コイルパラメータ

フィン形状		プレートフィン
コイル正面面積	[m ²]	0.33
エレメント長さ	[m]	860
チューブ本数	[本]	10
コイル列数	[列]	4
フィン枚数	[枚/cm (枚/inch)]	4.72 (12)
チューブ外径	[mm]	16.3
チューブ内径	[mm]	15.3
フィン厚さ	[mm]	0.15
気流方向チューブ中心間距離	[mm]	33
列方向チューブピッチ	[mm]	38.1
フィン熱伝導率	[kW/(m·K)]	0.203
チューブ熱伝導率	[kW/(m·K)]	0.386
フロー形式		ハーフフロー

表-7 バルブの各パラメータ

Cv		3.7
バルブの全開時の圧力降下	[kPa]	30
バルブオーソリティ		0.05
全開時の抵抗係数	[kPa/(kg/s) ²]	41.37
リーク率(レンジアビリティの逆数)		0.02
ヒステリシス	[%]	10
動作時間	[s]	63
イコールパーセント特性の重み係数		1

(32 l/min)とよう程(600kPa)によって仮定のポンプを選定した。これらを用いて、HVACSIM+(J)における流体ネットワークバランス計算モデルの計算に必要な配管系統抵抗係数を、式(1)によって計算した結果、2068.59 kPa/(kg/s)²となった。

$$\Delta p = Kw^2 \quad \dots\dots(1)$$

ここに、

- Δp : 圧力差 [kPa]
- w : 質量流量 [kg/s]
- K : 配管系統抵抗係数 [kPa/(kg/s)²]

(3) 冷水バルブ特性の決定

バルブの計算に必要なパラメータはイコールパーセント特性の重み係数、全開時の抵抗係数、リーク率、ヒステリシス、動作時間などである。バルブTYPEの計算アルゴリズムにより、イコールパーセント特性の重み係数を1とすると、バルブ特性は実際と同じくイコールパーセント特性となることがわかる。また、バルブ全開時の抵抗係数をバルブオーソリティ(0.05)と配管系統抵抗係数によって計算し、41.37 kPa/(kg/s)²となった。さらに、リーク率、ヒステリシス、動作時間は同程度性能のバルブのこれらの値を参照して表-7のように設定した。

(4) 計算結果と考察

計算に用いた正常状態日の冷水入口温度の計測値を図-8に、以上により決定した各TYPEにおけるパラメータ

の値を用いた給気温度の計算結果と計測値の比較を図-9に示す。これにより、給気温度の計算値は計測値によく一致していることがわかる。このことは、冷水コイル、バルブ、および流体ネットワークバランス計算モデルのパラメータが正確に設定されたことで、HVACSIM+のこれらのTYPEの計算アルゴリズムは、実システムの動きをほぼ再現することが可能であることを示している。

3.3 室計算モデル

(1) 建物外皮の構成材料の熱特性データの追加

HVACSIM+で用いられている室計算モデルは、図-4に示したように、建物外皮、ゾーンモデル、ひさしなどの要素モデルで構成される。HVACSIM+ではあらかじめ準備した各種厚さの材料を組み合わせて、建物外皮を構成する方法を用いている。しかし、NISTより提供された原プログラムに添付されていた米国仕様の建物外皮データには、表-8に示す対象建物の仕様に合った材料の熱特性データがなかったため、それらのデータを追加した。

(2) 室内設備有効熱容量

HVACSIM+での室温計算アルゴリズムは以下に示す熱収支の計算式である⁴⁾。

$$(C_{fur} + C_{air}) \frac{dT_i}{dt} = \dot{Q}_c \quad \dots\dots(2)$$

ここに、

- T_i : 室温 [°C]
- C_{fur} : 室内設備有効熱容量 [kJ/K]
- C_{air} : 空気の熱容量 [kJ/K]
- \dot{Q}_c : 給気・隙間風・壁面・照明・人体・機器・混合損失による顕熱取得 [kW]

室内設備有効熱容量について、対象室には机 20 脚、

表-8 各部位の構成材料仕様

部位	構成材料	厚さ [mm]
天井	タイルカーペット	8
	コンクリート	180
	空気層	150
	石膏板	9
	岩綿吸音板	12
床	ポリエチレンフィルム	0.3
	スタイロフォーム	100
	コンクリート	180
	タイルカーペット	8
内壁	ラスタータイル+モルタル	40
	コンクリート	150
	石膏板+ビニールクロス	30
外壁	ラスタータイル+モルタル	40
	コンクリート	180
	石膏板+ビニールクロス	40
窓	フロート板ガラス	8
出窓	フロート板ガラス	6

椅子 80 脚があるだけなので、それぞれの大きさ、材質の熱特性値から熱容量を概算すると、400~500 kJ/K 程度の値になる。しかし、HVACSIM⁺の建物外皮モデルでは柱の熱容量が躯体の計算に含まれていないため、柱の中で室内空間に含まれる部分の一部が室内の熱容量に寄与すると仮定すると、その熱容量は 7000 kJ/K 程度となる。しかし、柱の熱容量がどれほど室に影響しているかは判断しがたいため、机、椅子、柱を合わせた室の熱容量に関しては 3000~7500 kJ/K 程度の範囲で室温変動を調整するパラメータとして扱う。また、対象室では、アネモ型吹出し口を使用することで、室内温度分布の均一化が図られているが、日射、放射温度などの影響があると考えられ、室内各点の温度が完全に一致するとは言えない。さらに、図-1 に示したように室温センサの設置位置は室内中央の代表点でない。式(2)に示す HVACSIM⁺の室温計算式は完全混合アルゴリズムに基づいたものであるため、上述の対象室の温度分布や、温度センサの位置の影響を完全に再現することが不可能である。よって、この計算アルゴリズムと実物の違いによる室温の計算値と計測値の差異は室内設備有効熱容量の適切な調整によってある程度吸収されると想定する。

(3) 水分乗数

HVACSIM⁺での室内湿度の計算アルゴリズムは以下に示す水分収支の計算式である⁴⁾。

$$\rho_i V_i e_m \frac{dW_t}{dt} = W_o + W_s \quad \dots \dots (3)$$

ここに、

W_i	： 室内絶対湿度	[kg/kg(DA)]
ρ_i	： 空気の密度	[kg/m ³]
V_i	： 空気の体積	[m ³]
e_m	： 水分乗数	[-]

W_o : 給気、隙間風による絶対湿度の増加量 [kg/kg(DA)]

W_s : 人・機器による発湿量 [kg/kg(DA)]

e_m は湿気容量に対する補正係数であり、物理的に考えると、水分拡散の不完全程度や、室内設備の材質からの吸放湿特性などが、 e_m の値に影響を与えると考えられる。この室計算モデルでは $e_m=1$ とすると、給気温度が振動し、室内設備有効熱容量を調整しても室温が計測値から外れる結果となる。よって、室内相対湿度の計算値を計測値に合わせるために、 e_m の値を調整する必要がある。

(4) 室モデルの計算方法

HVACSIM⁺では、ゾーンモデルを計算する前に、まず応答係数法を用いて建物外皮モデルにより壁、天井、床などの内表面温度を固定時間間隔で計算する。応答係数法の計算時間間隔は、壁の厚さに制限されるため、今回の計算では各壁面の温度が正確に計算される最小値の 10 分とした。次にこれらの室内各表面温度に基づいて、ゾーンモデルにより室内温・湿度などの状態値の動的シミュレーションはより短くかつ変時間間隔で行われる。この固定時間間隔より計算した室内の各表面温度と変時間間隔により室内温・湿度の計算の整合方法は計算ブロックの階層化 (UNIT/BLOCK/SUPERBLOCK) および図-4 に示した建物外皮モデルを含む SUPERBLOCK4 と残りの SUPERBLOCK の計算時間間隔を別々に指定するような方法によって行われる。

(5) 各パラメータの調整と計算結果

室モデルの計算アルゴリズムの再現性および各パラメータが再現性に及ぼす影響を調べるために、気象条件、隣室・上階温度、給気温度の計測値および床下温度を室モデルに入力して、上述した室内設備有効熱容量と水分乗数を調整しながら、室モデルだけを用いたシミュレーションを行った。正常状態日の計算において、室内設備有効熱容量と水分乗数をそれぞれ 6000kJ/K、40 に設定した場合、図-10 に示す室内温度の計算値が計測値に近づけるようになった。ただし、室温の計算値は、午前中は計測値より低いが、午後には高くなっている。これは、表-3 で示したように、計測は午前7時から行われたため、計測時間以前の室温などの状態が確認できず、前日の気象条件を用いて助走計算を行ったものの、計測時間以前の躯体への蓄熱などの影響が正しく含まれなかったために、午前中の計算温度が低くなったものと考えられる。更に午後になるにつれて、室内温度の計算値が上昇していることは、在室人員のないときに、室内負荷が照明負荷のみで一定であるため、外気温度、日射量が室内に及ぼす影響が大きく計算されていると考えられる。このことは室温と室内各表面温度の計算時間間隔の差異や応答

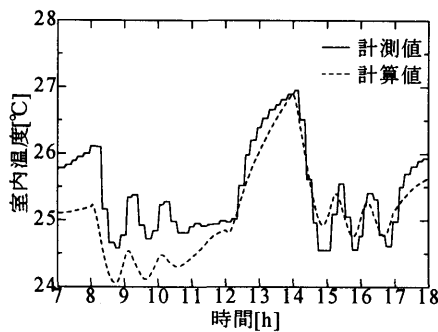
動的シミュレーションHVACSIM⁺の再現性の検証とパラメータの調整に関する研究

図-11 室内温度(故障・要素・条件 C)

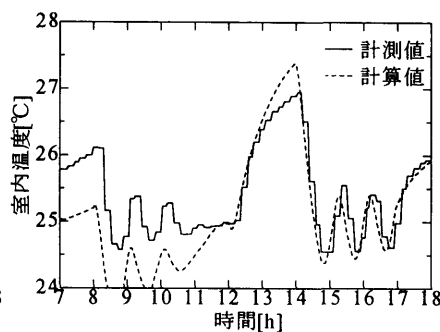


図-12 室内温度(故障・要素・条件 D)

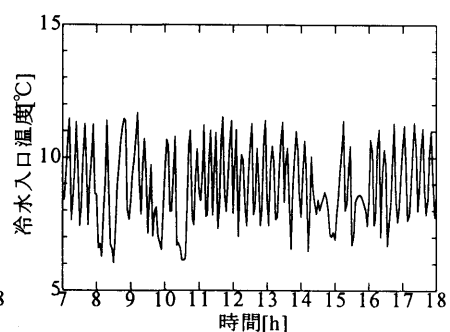


図-15 冷水入口温度(実測値・故障状態日)

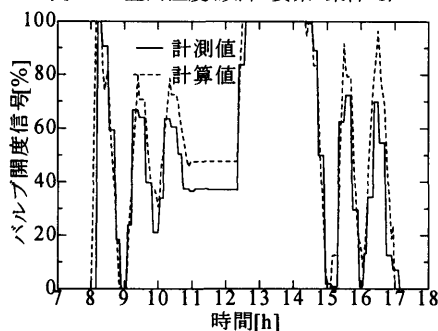


図-13 要求開度信号(故障・要素・条件 D)

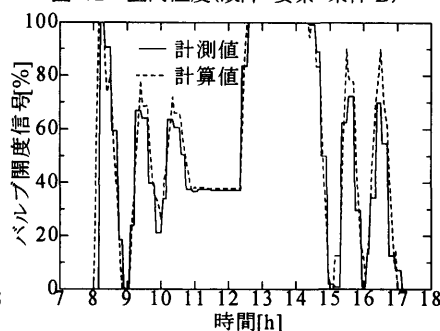


図-14 要求開度信号(故障・要素・条件 E)

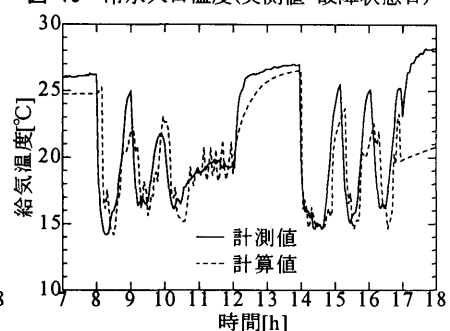


図-16 給気温度(故障・要素・条件 E)

係数法の時間間隔が原因と考えられる。また、室内温度分布や温度センサの設置位置の影響なども考えられ、これらは既存のゾーンモデルの限界であると言える。しかし、計算値と計測値の差異の絶対値は 1°C 以内であり、一般的に温度センサの測定誤差が $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度であることから、上述の2つのパラメータを調整した室モデルの充分な再現性が認められるであろう。

3.4 故障状態

(1) 室計算モデル

正常状態で決定したパラメータを用いた故障状態日の室内温度の計算値と計測値の比較を図-11に示す(条件C)。これにより、計測値に比べ計算値の振幅が小さいものの、両者の傾向は似ていることがわかる。前述した正常状態の室温変動傾向を考慮し、また、後述する全システム計算では同一パラメータを用いると室温の周期が長くなってしまったため、室内有効設備熱容量を 3250kJ/K に変更した。そのときの室内温度を図-12に示す(条件D)。この変化により、室温の振幅が同程度となり、フォルト終了以降の動きが計測結果に追従するようになった。

(2) PIDコントローラ

正常状態で決定したパラメータを用いた冷水バルブ要求開度信号の計算値と計測値の比較を図-13に示す。この図により、実冷水バルブを12:30~14:30の間に全閉させたので、室内温度が設定値よりも高くなるため、この時間内のバルブ要求開度信号は全開となっていること

がわかる。また、計算値が計測値に比べて全体的に大きな値をとっているのは、設定温度が正常状態日の 26°C から 25°C に変更されているため、この変更に伴い設定温度の機械誤差も変動されたものと考えられる。そこで設定温度誤差を 0.012°C に再調整した結果を図-14に示す(条件E)。この調整によって冷水バルブ要求開度信号の計算値が計測値にほぼ一致した。

(3) 冷水コイル、バルブ

計算で用いた故障状態日の冷水入口温度を図-15に、正常状態で決定したパラメータを用いた給気温度の計算値と計測値の比較を図-16に示す。これより、10:30~12:00の間に給気温度の計測値が安定しているのに対し、計算値にはやや振動が生じていることがわかる。これは、図-15で示した冷水入口温度の振動が顕著に現われたものと考えられる。しかし、この時間内バルブ開度が一定であるため、計測値では、そのような現象は見られない。HVACSIM⁺の冷水コイルTYPEにおけるチューブ外表面の熱伝達係数の計算アルゴリズムを調べ、フィンやスリットの詳細な構造やフィン外表面の汚れなどの要因がモデル化されていないことがわかる。よって、計算上冷水コイルの熱交換特性が実際よりもやや敏感に反応したと考えられる。このことが正常状態日の計算で現れなかったのは、図-8に示した正常状態日でのコイル入口の冷水温度の振幅が小さいからである。ただし、図-16の給気温度の計算値はやや振動があっても、その変動傾向は

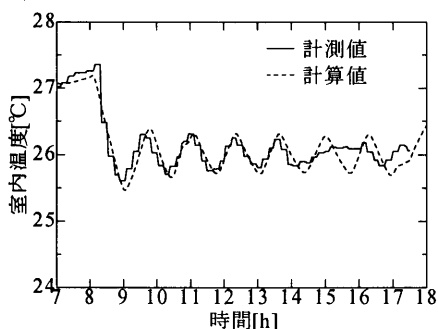


図-17 室内温度(正常・全体・条件 C)

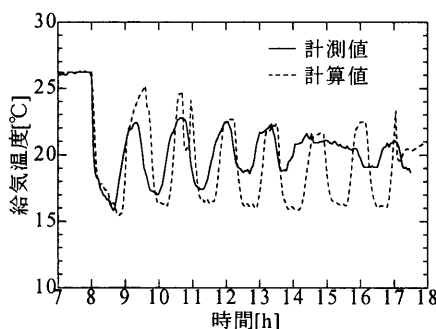


図-18 給気温度(正常・全体・条件 C)

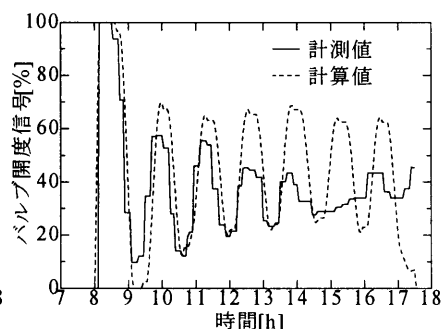


図-19 要求開度信号(正常・全体・条件 C)

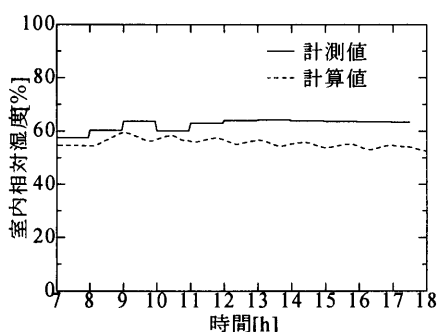


図-20 室内相対湿度(正常・全体・条件 C)

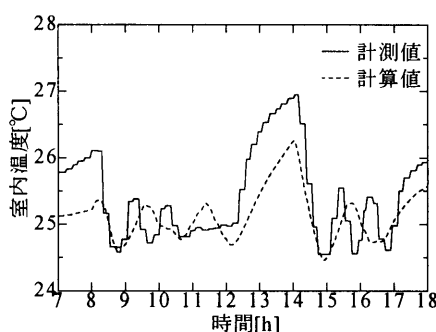


図-21 室内温度(故障・全体・条件 C)

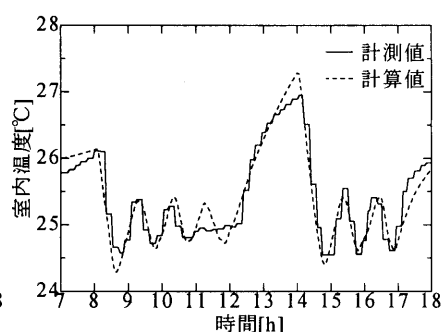


図-22 室内温度(故障・全体・条件 E)

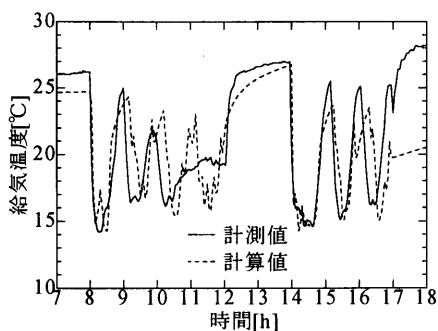


図-23 給気温度(故障・全体・条件 E)

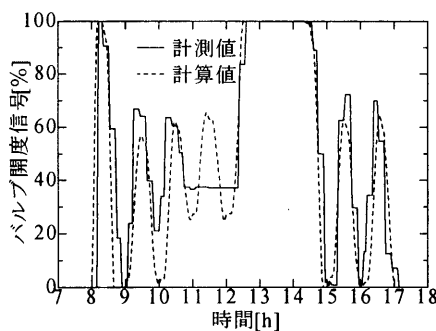


図-24 要求開度信号(故障・全体・条件 E)

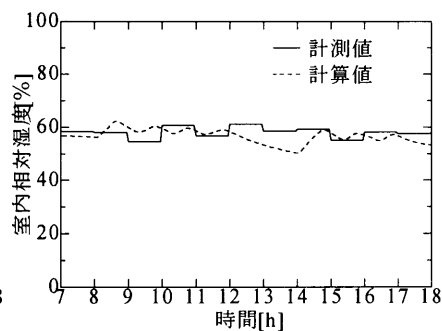


図-25 室内相対湿度(故障・全体・条件 E)

表-9 要素レベル，故障状態のパラメータ調整

条件	C	D	E
室内設備有効熱容量 [kJ/K]	6000	3250	3250
PID コントローラ不感帯 [°C]	0.1	0.1	0.1
設定温度誤差 [°C]	0.004	0.004	0.012

表-10 各検証計算で調整した最適パラメータ

システム状態	正常状態	故障状態
室内設備有効熱容量[kJ/K]	6000	3250
水分乗数 [-]	40	40
コントローラ不感帯 [°C]	0.1	0.1
設定温度誤差 [°C]	0.004	0.012

計測値に一致しているから，十分な再現性が認められる。

以上の結果より，実物の計算に必要なアルゴリズムの追加や，一部のマクロなパラメータの適切な調整によって，故障状態でも良い再現性を示すことがわかる。故障状態で調整したパラメータの値を表-9に，要素レベルで得た両状態の最適パラメータを表-10に示す。

4. 全システムのシミュレーション結果と考察

4.1 正常状態

要素レベルでの検討により得た各TYPEにおけるパラメータをそのまま用いて，対象システム全体をシミュレートした時の正常状態の室内温度，給気温度，冷水バルブ要求開度信号，および，室内相対湿度の計算値と計測値の比較を図-17，図-18，図-19，および図-20に示す。図-17より，室内温度は14:00～17:00での計測値の滑らかな動きを除けば，ほぼ一致している結果となった。図-18の給気温度，図-19のバルブ要求開度信号では，計測値は振動が減衰しているが，計算値は一定の振幅が続く。

動的シミュレーションHVACSIM⁺の再現性の検証とパラメータの調整に関する研究

これは実際の冷水供給が他システムとまとめて行われており、他システムの影響による圧力差の変化を計算では再現出来ないことや、室内負荷が正しく再現されていないこと等が原因と考えられる。また、給気温度や冷水バルブ要求開度信号が計測値から外れているのに対し、室内温度が一致していることは、要素レベルの検証でも示した既存の室計算アルゴリズムの限界によってずれるべき室内温度が、適切な室温制御によって調節された結果と考えられる。図-20の室内相対湿度は1日中5~10%程度小さく計算されるが、これは冷水コイルTYPEの冷却/減湿効果が実冷水コイルより顕著に現れたためと考えられる。しかし、湿度センサの計測誤差と乾球温度の偏差を考慮すると満足できる値であると考えられる。

4.2 故障状態

故障状態の全体モデル計算において、まず、表-5(条件C)の正常状態でのパラメータを用いた場合の室内温度の計算値と計測値の比較を図-21に示す。これにより、室内温度の変動周期が大きく計算されていることがわかる。これは、図-2、図-3から判るように正常状態と故障状態の計測日の気象条件が異なり、躯体蓄熱などの要因がうまく再現されていないことや、センサ設置位置や室内温度分布などの室内空間的要因のためと考えられる。そこで、室内設備有効熱容量、設定温度誤差の二つのパラメータを表-9(条件E)に示す故障状態の要素レベル検証で用いた値に変更して計算を行った。図-22~図-25にそれぞれ室内温度、給気温度、バルブ要求開度信号、室内相対湿度の計算値と計測値の比較を示す。これらにより、計算値と計測値がよく一致していることがわかる。ただし、図-23の給気温度、図-24のバルブ要求開度信号の計算値では、フォルト発生直前で、計測値が一定値になっているのに対して計算値では振動を続ける結果となった。このことは正常状態と同様に、室モデルの計算アルゴリズムと実物の差異によるものである。また、要素レベルの計算結果のようなフォルト発生直前の給気温度の微小な周期の振動が現れなかった。これは、冷水コイルTYPEにおける、熱交換特性に影響を与える時定数は実物よりやや小さいが、これによる若干の応答速度の誤差は全システムの時定数に吸収されたと考えられる。さらに、図-25の室内相対湿度の計算値は、図-20の正常状態と比較すると、計測値によく一致している。これは、正常状態日に比べ、故障状態日の室温と室内相対湿度が低いため、正常状態日より故障状態日の室内空気の絶対湿度は低いと考えられ、冷水コイルTYPEの冷却/減湿効果が正常状態日より少なくなったためと判断できる。

4.3 再現性の考察

両状態日の全体モデルの計算値と計測値の差異の原因

として次のことが考えられる。①冷水コイルにおいて、実際にはフィンのスリットの影響、フィン外表面の汚れなど、単純にモデル化できない要因が含まれている。②計測時に実冷水コイル流量が測定できず、最大設計流量を参照値として計算に使用せざるを得なかった。③計算用ゾーンモデルの計算アルゴリズムでは、センサ位置や室内温度分布などの影響が考慮されていない。④各TYPEを検証するときの計算値と計測値の差異は小さく見えても、これらのTYPEを組み合わせて計算すると、それぞれが積算され、計算値が計測値から外れる。

しかし、全体システム計算の場合、要素レベルで調整したわずかな設定温度誤差による計算値と計測値の乖離が見えなくなるため、その値を0℃として計算を行っても、ほぼ同様な結果が得られる。よって、室内設備有効熱容量の調整を除けば、同一パラメータを用いた両状態の計算値とその変動傾向は計測値とよく一致していることにより、HVACSIM⁺は信頼性のあるシミュレーションが可能であると言えよう。

まとめ

本研究では、動的シミュレーションプログラムHVACSIM⁺のパラメータの調整を行い、得られた計算値を計測値と比較することで、その再現性を検証した結果を以下に記す。

- 1) 実PIコントローラに存在する不感帯のアルゴリズムを追加することによって、バルブ要求開度信号の計算値を計測値に近づけさせた。このプロセスは、TYPEを追加ないし修正・調整するなどの手段により実システムの挙動にシミュレーションモデルを合わせるという、HVACSIM⁺のプログラム構造そのものの適用事例であるということができよう。
- 2) HVACSIM⁺の冷水コイルの計算アルゴリズムでは、フィンやスリットの詳細な構造など単純にモデル化できない要因やフィン外表面の汚れの影響を完璧に再現はできず、コイルの熱交換特性は実システムよりもやや敏感に応答したが全体の傾向をよく捉えている。ただし、このような小さい時定数を持つTYPEにおける若干の応答速度の違いは全システムの時定数に吸収されてシステム全体の再現性に対して問題にはならないという一般化され得る知見が得られた。
- 3) 既存の室計算モデルでは、センサ位置や室内温度分布などの室内空間的要素と壁面計算に問題があるが、本計算例では、室内設備有効熱容量と水分乗数の調整により、ある程度満足できる計算値が得られた。これはモデル化が不十分な場合、一部のマクロなパラメータを調整して近似させるというプロセスの必

要性と可能性を示しており、より精度高く応用性のあるモデルを開発する必要性をも示している。

- 4) 全システムの計算においては計測値に近い計算結果が得られる。しかし、給気温度・冷水バルブ要求開度信号の計算値は計測値から離れる結果となっており、上記 2)・3)の原因が考えられるものの、これらの再現性においては不満が残る。
- 5) 室内相対湿度の計算では、冷水コイルの冷却/除湿効果が実際よりも大きく現れるが、湿度センサの計測誤差と乾球温度の偏差を考慮すると満足できる値であると考えられる。

今後、対象室の室温分布や温度センサ位置を考慮したゾーン計算モデルの新規開発、不明確なパラメータの決定方法が HVACSIM+(J)の課題であると言える。また、HVACSIM+は米国で開発されたため、幾つかの TYPE とパラメータを日本製の機器に対応させれば、更なる精度の上昇が期待できる。ただし、HVACSIM+(J)を用いて、空調システム計算を行う際に、プログラムの理解、シミュレーションモデルの作成、各 TYPE のパラメータの調整などに多くの作業時間と経験が必要であり、現段階では研究レベルのプログラムであると考えられる。今後、このプログラムの利便性の改善が行われるべきである。

謝 辞

本研究にあたり、多くのデータを提供して頂きました

新菱冷熱工業(株)中央研究所の関係各位に記して謝意を表します。また、この研究は(社)空気調和・衛生工学会 蓄熱最適化委員会 HVACSIM+WG(主査:丹羽英治氏, 日建設計)の研究の一環として行われたもので、助言を頂きました委員の皆様へ謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 空気調和・衛生工学会 蓄熱最適化委員会：蓄熱式空調システムの異常診断・適正制御の研究 平成9年度報告書(1998-3)
- 2) 中原信生・朱 穎心・楊 靖・丹羽英治・渡邊 剛：空気調和システムの動的シミュレーションとフォルト検知に関する研究、その1~4, 8, 日本建築学会学術講演梗概集(1993, 94, 95)
- 3) Daniel R. Clark, William B. May, Jr. : HVACSIM+ Building Systems and Equipment Simulation Program - Users Guide, National Bureau of Standards NBSIR 85-3243(1985-9)
- 4) 中原信生・岡田勝行・鄭 明傑・西谷義彦・林 茂広：動的シミュレーション HVACSIM+の再現性とパラメータの調整に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(1998-8)
- 5) 林 茂広・岡田勝行・鄭 明傑・西谷義彦・丹羽英治・中原信生：動的シミュレーション HVACSIM+の再現性の検証, 日本建築学会東海支部研究報告集(1998-2)
(平成 11. 3. 2 原稿受付)

A Study on Verification of the Reproducibility and Adjustment of a Parameter of Dynamic Simulation HVACSIM+(J)

by Mingjie ZHENG*1, Yoshihiko NISHITANI*1, Shigehiro HAYASHI*2 and Nobuo NAKAHARA*3

Key Words : Dynamic Simulation, HVAC System, HVACSIM+(J)

Synopsis : In order to accurately evaluate the dynamic behavior of HVAC system, it is necessary to use dynamic simulation program with accurately verification. In the present paper, the reproducibility of a dynamic simulation program called HVACSIM+(J) was verified by comparing the actual measurements and simulated results in two kinds of

states, normal and fault, for a HVAC system with single duct and constant air volume. As the result, it was verified that the program could reproduce the dynamic behavior of the system with sufficient accuracy, if users correctly input characteristic values of the real system and properly adjust some parameters in the component model as well.

(Received March 2, 1999)

*1 Research Laboratory, SANKO Air Conditioning CO., LTD., Member

*2 Graduate School of Engineering, Toyohashi University of Technology, Member

*3 Nakahara Laboratory, Environmental Syst-Tech/ Department of Architecture, School of Eng., Kanagawa University, Member