

# 住宅の室内環境計測総合評価システムの開発研究（その2）（梗概）

尾島 俊雄  
西岡 哲平

## 目次

1. 本研究開発の目的
2. 快適条件による温熱環境評価基準の検討
  - (1) 温熱的快適条件
  - (2) 温熱指標と PMV 指標
  - (3) PMV を基準とした評価基準
3. 室内熱対流の模型実験
  - (1) 実験方法
  - (2) 相似則の検討
  - (3) 実験結果
4. 室内熱対流の数値シミュレーション
  - (1) シミュレーションの方法
    - ① 基礎方程式
    - ② 基礎方程式の数値解法
  - (2) 計算結果
5. 総合評価システム

### 1. 本研究開発の目的

本研究は前回研究に引き続いて住宅の室内温熱環境計測結果に基づいて、その評価と問題点の抽出さらには改善対策の検討といった作業をパソコンによって一貫して行うシステムの開発を目的としている。つまり住宅室内の温熱環境と温熱性能に関する診断エキスパートシステムの開発と言えるだろう。

システム全体のフローは図1-1に示す通りである。

フローチャートは基本的には前回と同じであるが、次の①～④に示す各項目について、さらに検討を行った。

#### ① 温熱環境評価基準の再検討

前回研究では室内の温度、気流、相対湿度、MRT等の評価基準（5段階評価）を暫定的に提案したが、体感温度指標として近年一般化しているPMV指標を基礎として再検討し、各季節別に温熱感覚評価基準を提案した。

#### ② 冷暖房用エネルギー消費量とコストに関するデータの作成

前回研究で提案した期間エネルギー消費量推定法を用いて冷暖房エネルギー消費量の推定を行うため、札幌、東京、鹿児島をはじめ全国8都市の気象データの分析、エネルギー消費量のモデル計算を行い、前回の推定法が

広く利用出来る事を示した。又、エネルギー量をコストに換算するため、エネルギー単価に関するデータ・ファイルを作成した。

#### ③ 暖房時における室内温度分布の検討

暖房中の室内における温度分布は、室内における快適性や結露の発生に大きな影響を与えている。

本研究では、この室温分布の生成に着目し、内部に暖房発熱のある模型室における温度分布計測実験、2次元

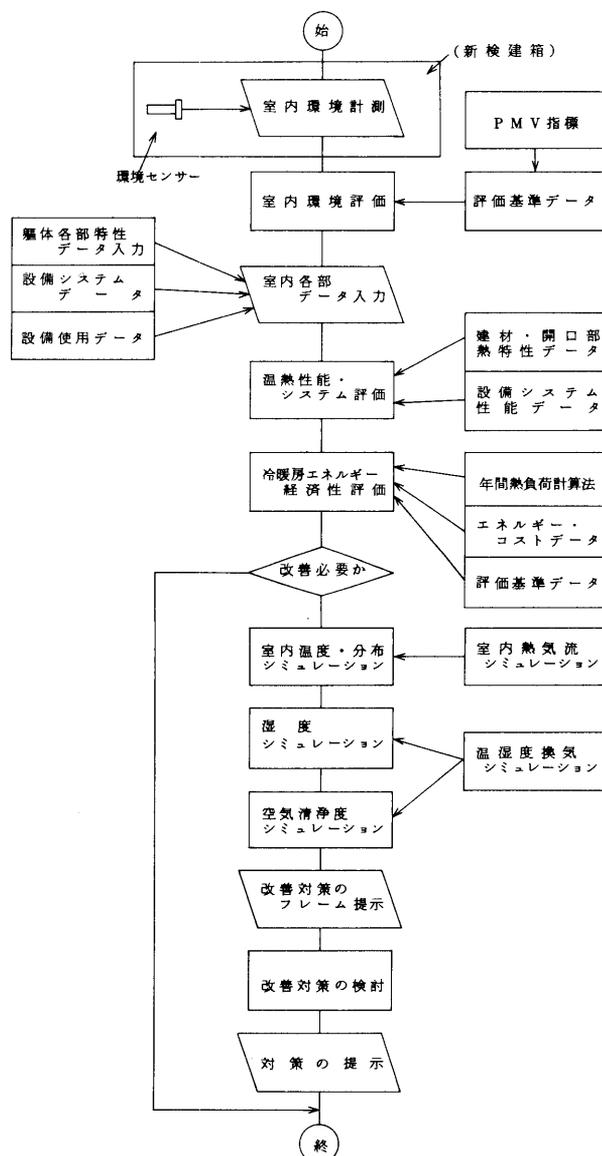


図1-1 温熱環境総合評価システムの全体フローチャート

モデルによる室温分布の数値シミュレーションを行い、その予測法の研究を行った。これらの結果に基づいて検討を行おうとする室内の室温分布、PMV 分布、結露箇所のチェックが行える計算プログラムを作成した。

#### ④新「検建箱」の提案

最近の環境計測センサーやデータ処理システム、パーソナル・コンピュータなどの開発・製品化の動向を調査し、①～③で開発したソフトウェアを生かしたハンドヘルドタイプ・パソコンの制御によるコンパクトな環境計測評価システムを提案する。

## 2. 快適条件による温熱環境評価基準の検討

### (1)温熱的快適条件

室内環境の評価を行うためには室内における各環境指標が居住者の温熱的快適感もしくは不快感にどのような影響を及ぼすのか検討する必要がある。

人体の温熱感は良く知られているように人体を取り巻く環境と人体との熱交換バランスによって説明され、人体を被う着衣量、室温、湿度、輻射エネルギー、気流などの環境指標によって支配されている。

人間の温熱感については古くはヤグローとホフソンの有効温度(ET)をはじめとして修正有効温度(CET)、新有効温度(ET\*)などが提案されてきた。それらはパソコンが普及する以前の温熱感に対する実際にはどちらかと言えば簡易評価を主な目的としたもので、特に前述の各環境指標の任意の組合せについて迅速で明瞭な評価を行うためには実用上かなり問題があった。

それらの評価法に対して近年 PMV 指標(予想平均申告値<以下 PMV と略す>)がパソコンの普及とともに急速に利用されるようになった。PMV は②で説明するように人体と環境の熱収支を記述する熱収支式によって対象となるある環境下での人体の熱収支量を推定し、多数の被験者による実験から統計的に導かれた(熱収支量)/(人体の温熱感)の関係式によって、具体的にどの程度人間が暑く、又は寒く感じるかを指標として定量化する

方法である。

この種の温熱感評価のための熱収支式の計算には輻射の計算や対流熱伝達率の計算に非線型の項が含まれ、コンピュータによる数値解析が前提となる。

パソコンの普及が現場においてこの種の計算を容易にしており、このような背景が PMV 指標の普及に大きな影響を与えている。

以上のような事から、前回研究で提案した温熱環境評価基準を主に PMV 指標から再検討を行ってゆく。

### (2)温熱指標と PMV 指標

PMV 指標は人体と環境との熱収支エネルギー量である人体熱負荷 L (w/m<sup>2</sup>)と新陳代謝量 M (w/m<sup>2</sup>)とによって、(2-1)式のように定式化される。

$$PMV = (0.303e^{-0.36M} + 0.028) L \dots\dots\dots(2-1)$$

各係数はアメリカ及びデンマークにおける1,000人以上の学生を被験者として実施された実験によって得られたアンケート結果を基に統計的に求められたもので、PMV 値は次のように7段階の感覚的評価に対応している。

- +3 寒い (Cold)
- +2 涼しい (Cool)
- +1 やや涼しい (Slightly cool)
- ±0 快適 (neutral)
- 1 やや温かい (Slightly warm)
- 2 温かい (warm)
- 3 暑い (hot)

人体熱負荷 L の算出方法については、多くの文献が出されているので、ここでは説明を省略する。

本研究では PMV 値を計算するコンピュータプログラムを作成し、乾球温度、MRT、相対湿度、気流速度が各々に、PMV 値とどのような関連があるかを分析し、各々の環境指標の評価基準の再検討を行う。

### (3) PMV を基準とした評価基準

PMV の算出の重要なパラメータである着衣量は表 2-1 に示すように季節によって5段階の値を仮定し、各季節における PMV 算出を行う事とした。(各季節は半

表 2-1 半旬平均気温による季節区分と標準着衣量(案)

	上限気温(半旬平均気温)	着衣熱抵抗		衣服の組合せ例	東京における適用例*
		(m <sup>2</sup> ・°C/W)	(cls)		
盛夏期	25°C超過	0.045	0.3	典型的真夏の衣服(ブリーフ、パンツ、半そでの襟なしシャツ、薄い靴下、サンダル)	7月15日～9月2日
夏期	20°C超過～25°C	0.08	0.5	初夏のころの衣服(ブリーフ、軽い長ズボン、半そでの襟なしシャツ、薄い靴下、靴)	5月31日～7月14日 9月3日～9月27日
中間期	12°C超過～20°C	0.11	0.7	軽い作業衣(薄い下着、長そでの綿製作業用シャツ、作業ズボン、毛糸の靴下と靴)	4月6日～5月30日 9月28日～11月16日
冬期	7°C超過～12°C	0.14	0.9		3月7日～4月5日 11月17日～12月21日
厳冬期	7°C以下	0.16	1.0	冬季の典型的な室内用衣服(下着、長そでシャツ、ズボン、長そでセーター、厚手の靴下と靴)	12月22日～3月6日

\* 理科年表(1987年版)による

旬平均気温で区分するものとする。)

次に各環境指標が PMV 値とどのような関係にあるかを順に検討してゆく。

まず最初に相対湿度50%、気流速度0.05m/sとして、PMVに最も影響を及ぼす室温(乾球温度)をMRTと等温とし、様々に変化させてPMV値を計算した。

図2-1が、その計算結果である。5本の線は各々厳冬期から盛夏期までの着衣量でのPMV値を示しており、当然、着衣量の少ない季節ほど温度の変化による温熱感の変化の度合いが大きい事が分かる。又、この結果から各季節における室温もしくはMRTの最適値を求めれば、表2-2のようになる。

次に、室温、MRT、相対湿度、気流速度が単独でPMV値にどのような影響を与えるか検討してみた。

その場合、影響を調べる環境要素以外の各要素については各々次のような定数とした。

- ①乾球温度=各季節の最適値(表2-2の通り)
- ②MRT=乾球温度に同じ
- ③相対湿度=50%
- ④気流速度=0.05m/s

図2-2~5にその計算結果を示す。単独の環境指標としては乾球温度がPMV値に対して最も大きな影響を与え、MRTがそれに次いでいる。しかしながら、相対湿度については図2-4からも分かるように上記の①~②のような温度条件下ではPMV値にほとんど影響を与えない事が分かる。( |PMV| ≤ 0.2 )

気流速度については、0.1m/sより大きい領域でPMV値にかなり影響を与える。当然の事であるが、無風時に

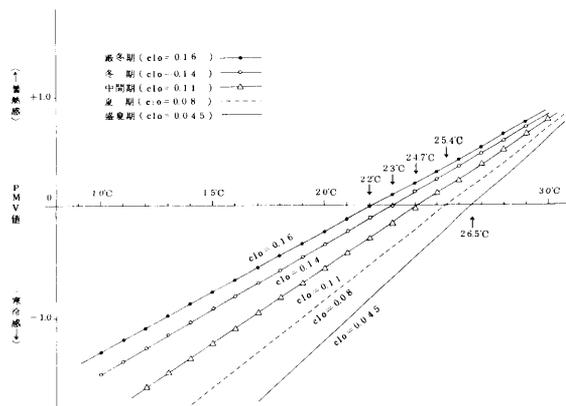


図2-1 温度指標とPMV値(室温=MRT, 相対湿度50%, 気流速度0.05m/s)

表2-2 PMVからみたTa(=Tr)最適値と快適域上限及び下限値\*

	厳冬期	冬期	中間期	夏期	盛夏期	備考
最適値	22°C	23°C	24°C	25.4°C	26.5°C	PMV=0の値
快適域上限値	25.7°C	27°C	27.9°C	28.7°C	29.4°C	PMV=+0.5
快適域下限値	17.5°C	18.8°C	20.5°C	22.2°C	23.8°C	PMV=-0.5

\*他の環境指標は図2-1と同じ

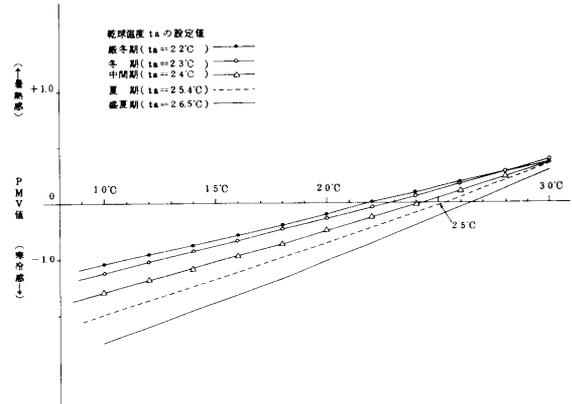


図2-2 乾球温度とPMV値(相対湿度50%, 気流速度0.05m/s)

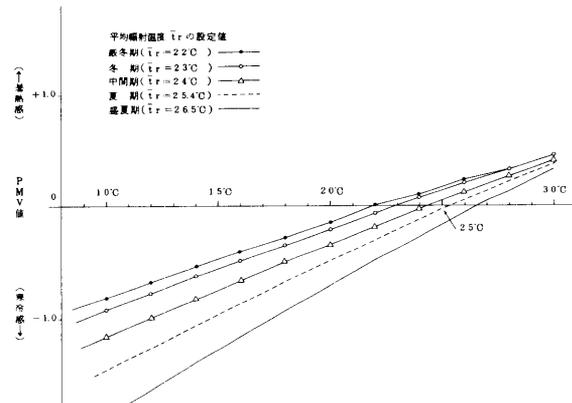


図2-3 平均輻射温度(MRT)とPMV値(相対湿度50%, 気流速度0.05m/s)

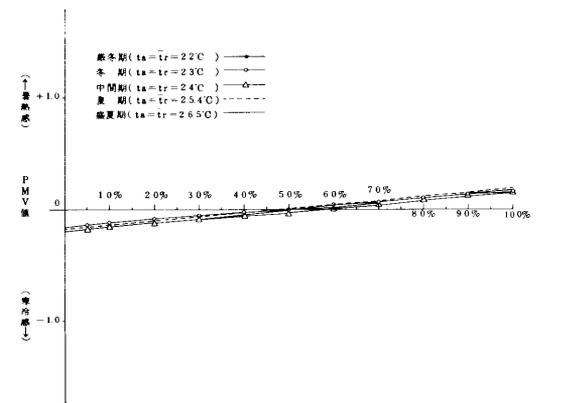


図2-4 相対湿度とPMV値(気流速度0.05m/s)

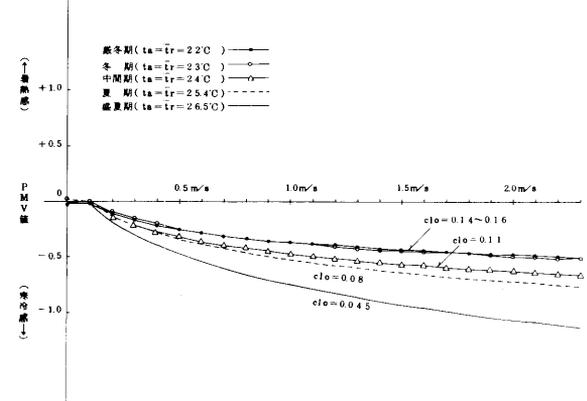


図2-5 気流速度とPMV値(相対湿度50%)

対して PMV 値を減少させる作用をしており、PMV 値への影響が非常に小さい相対湿度とともに、PMV 値を基礎とした評価基準を作成する事は適当でないと考えられる。

そこで、乾球温度、MRT 及びそれらから算出されるグローブ温度については表 2-3 のような PMV 値に基づく 5 段階評価基準を作成した。(他の指標については表 2-4 に示す通り前研究と同じものを使用する事とした。)

PMV 値には(2)で述べたような-3~-3の値に対してよく知られた評価尺度 (cold~hot) が使われている

が、これを日本語に直訳した場合、少なくとも通常の居住空間では必ずしもわれわれの感覚と一致しない。すなわち、この場合の尺度は居住空間における快適性だけを評価するばかりでなく、野外活動を含めたより広い適用範囲を前提としており、例えば±3は各々寒暑感の極限状態に近い状態である。

よって室内環境の評価にあたっては PMV 値が少なくとも±1以内で議論すべきと考える。

表 2-3 の評価基準では PMV 値±0.06の範囲を 5 点とし、±0.8以内を 3 等分して各々 2~4 点とした。

表 2-3 室内環境指標の評価基準 (PMV 基準によるもの)

	季節	5点(優秀)	4点(良好)	3点(可)	2点(やや劣る)	1点(劣る)
①乾球温度 (°C)	盛夏	26~27	25~26, 27~28	23~25, 28~30	19~23, 30~34	19以下, 34以上
	夏期	25~26	23~25, 26~27	21~23, 27~29	17~21, 29~33	17", 33以上
	中間期	24~25	22~24, 25~27	20~22, 27~29	16~20, "	16", "
	冬期	22~23	20~22, 23~25	18~20, 25~29	14~18, "	14", "
	厳冬期	"	" , "	16~20, "	12~16, "	12", "
②M R T (°C)	盛夏	26~27	24~26, 27~29	22~24, 29~31	16~22, 31~36	16以下, 36以上
	夏期	24~26	22~24, 26~28	19~22, 28~31	13~19, "	13", "
	中間期	23~25	21~23, 25~28	17~21, "	10~17, 31~38	10", 38以上
	冬期	22~24	19~22, 24~27	14~19, 27~31	6~14, "	6", "
	厳冬期	21~23	18~21, 23~26	13~18, 26~31	5~13, "	5", "
③グローブ温度 (°C)	盛夏	26~27	25~26, 27~29	23~25, 29~31	18~23, 31~35	18以下, 35以上
	夏期	25~26	23~25, 26~28	20~23, 28~30	15~20, 30~35	15", "
	中間期	24~25	22~24, 25~28	19~22, "	13~19, 30~36	13", 36以上
	冬期	22~24	20~22, 24~27	16~20, 27~30	11~16, "	11", "
	厳冬期	22~23	19~22, 23~26	15~19, 26~30	9~15, "	9", "
PMV基準値*		0.06以下	0.06~0.2	0.2~0.4	0.4~0.8	0.8以上
PPD値		5.1%以下	5.1~5.8%	5.8~8.3%	8.3~18.5	18.5以上

\* PMV 値の絶対値 (|PMV|)

表 2-4 室内環境指標の評価基準

	5点(優秀)	4点(良好)	3点(可)	2点(やや劣る)	1点(劣る)
④相対湿度 (%)	50~55	55~60, 45~50	60~68, 35~45	68~80, 25~35	80以上, 25以下
⑤気流速度 (m/s)	0.2~0.3	0.3~0.4, 0.15~0.2	0.4~0.5, 0.1~0.15	0.5~1.0, 0.1以下	1.0以上
⑥   $\theta_a - \theta_{a'}$   (°C)	0.75以下	0.75~2.0	2.0~4.5	4.5~9.5	9.5以上
⑦ $\frac{\theta_{a'} - \theta_a}{\theta_a - t_a}$	0.10以下	0.10~0.12	0.12~0.13	0.13~0.16	0.16以上
⑧ $\frac{\theta_a - \theta_{a'}}{\theta_a - t_a}$	0.10以下	0.10~0.13	0.13~0.17	0.17~0.24	0.24以上
⑨ $\frac{\theta_{a'} - \theta_{a''}}{\theta_a - t_a}$	0.20以下	0.20~0.25	0.25~0.30	0.30~0.40	0.40以上
⑩ $\theta_g - \theta_a$ (°C)	-0.25~0.40	-0.8~-0.25 0.4~1.0	-1.5~-0.8 1.0~2.0	-3.0~-1.5 2.0~5.0	-3.0以下 5.0以上
⑪ MRT - $\theta_a$ (°C)	-0.5~0.75	-1.5~-0.5 0.75~2.0	-3.0~-1.5 2.0~4.5	-6.0~-3.0 4.5~9.5	-6.0以下 9.5以上

### 3. 室内熱対流の模型実験

#### (1) 実験方法

暖房中の室内では暖房器具による室内空気の加熱と壁体及び開口部による冷却によって生じる特有の熱対流が室内の温度分布を生じ快適性に大きな影響を与える。

この温度分布は暖房器具の種類、暖房熱出力、壁体・開口部の断熱性及び室内外の気密性、室内外温度差によって、その度合が異なる。

本研究では壁体の断熱性と室温分布との関係を検討するため、木製模型室を製作した。模型室は高さ約600mm、縦横約900mmで壁体はベニヤ合板9mm厚を使用、正面の開口部に3mm厚板ガラスを取り付けた。(写真3-1参照) 模型室内部には窓ガラスを含む中心軸上に2次元の室温分布を計測する温度センサー(C-C熱電対)を配置した。室内の加熱源は金属製カバーに収納した白熱灯で後述する相似則により80Wとした。

実験は上記の模型室を写真3-2に示す低温実験室に入れ、周囲温度0℃前後に保ちながら行った。実験室内は図3-2に示すように完全な恒温室でなく0～4℃の間を10～15分周期で不規則に変動している。又、模型室周辺の気流速度は2.3～3.8m/sで、室温分布は極めて小さかった。

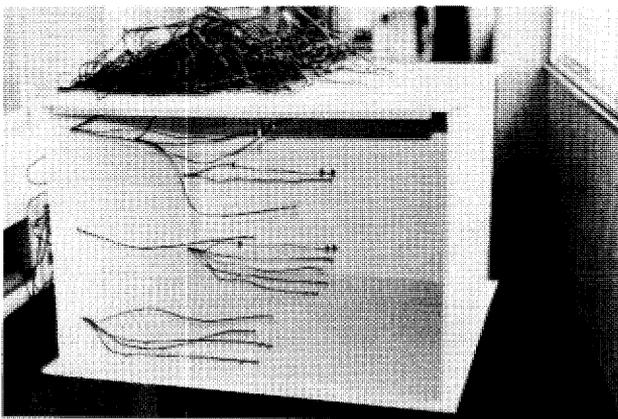


写真3-1 室内模型 (1/4スケール)

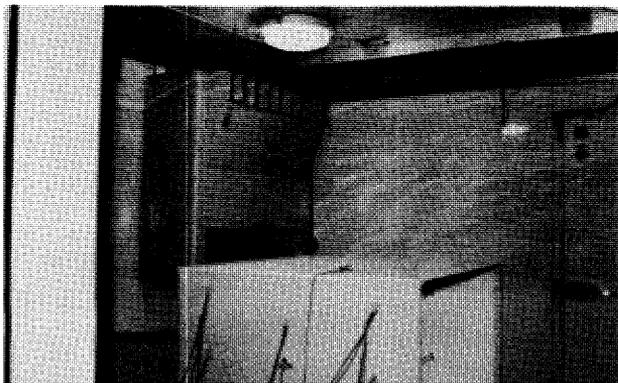


写真3-2 低温実験室 (福井工業大学建築学科)

#### (2) 相似則の検討

模型実験において最も重要な要素が模型と実物の寸法、時間、速度、熱流などに関する相似則である。

模型実験の相似則は対象となる現象を記述する基礎方程式から導かれる無次元数、境界条件比などを一致させる条件から求められる。室内の気流分布を記述する基礎方程式は運動方程式(粘性流体の場合 Navier-Stokes 方程式)、連続方程式及びエネルギー方程式で、これらから導かれる無次元数は本実験のような自然対流を対象とする場合、(3-1～2)式の通りである。

$$Gr = \frac{\beta g l^3 \Delta \theta}{\nu^2} \quad \dots (3-1)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad \dots (3-2)$$

Gr: グラスホフ数, Pr: プラントル数

$\nu$ : 動粘性係数(m<sup>2</sup>/s),  $\beta$ : 空気体積膨張係数(K<sup>-1</sup>)

l: 長さ(m),  $\Delta \theta$ : 温度差(K)

Gr及びPrを一致させるという条件の下に次のような相似則が得られる。

$$n_\theta = \frac{1}{n_l^3} \quad (3-3)$$

$n_\theta$ : 温度比率,  $n_l$ : 縮小比率

又、室内の暖房発熱と周壁における熱収支式から、次のような相似則が得られる。

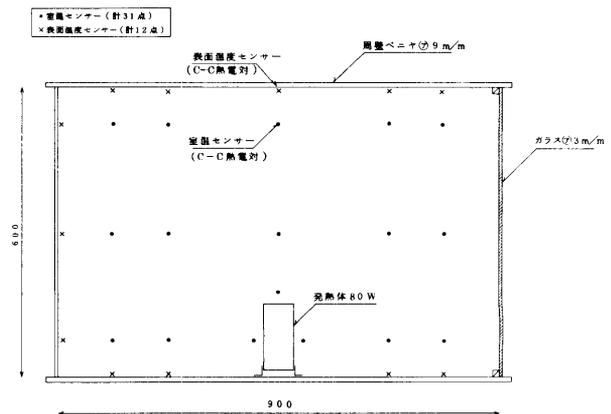


図3-1 模型室内の温度センサー配置 (ガラス面を通る室中心軸上)

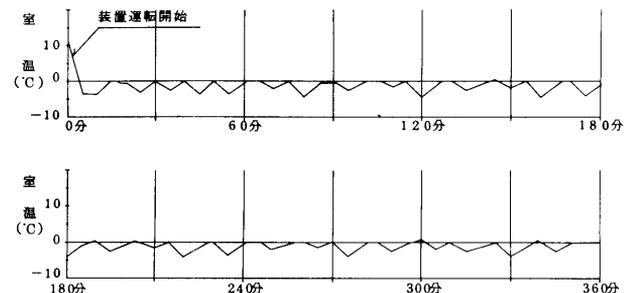


図3-2 低温実験室の室温変動特性

$$n_q = \frac{1}{n_l^2} \quad \dots (3-4)$$

$$n_r = n_l \quad \dots (3-5)$$

$n_q$ : 熱量比率,  $n_r$ : 周壁の熱抵抗比率

しかしながら、これらの厳密な相似則によって実験を行う事は現実的には不可能であるため、次のような近似相似則によって実験を行う事とした。(文献5)~(8)参照

$$n_v = \sqrt[3]{\frac{n_q}{n_l}} \quad \dots (3-6)$$

$$n_\theta = \sqrt[3]{\frac{n_q^2}{n_l^5}} \quad \dots (3-7)$$

$n_v$ : 流速比率,  $n_\theta$ : 温度比率

### (3)実験結果

実験は発熱体の熱出力を(3-7)式により、温度比率が1となるように設定した。又、2次元での考察を行うためガラス窓の両側面の壁体は45mm厚スタイロフォームで常に断熱している。

表3-1に定常時の各断熱モデルの平均室温及び平均内表面温度を、図3-3に代表的な4個のモデルの室温分布推定図を示す。

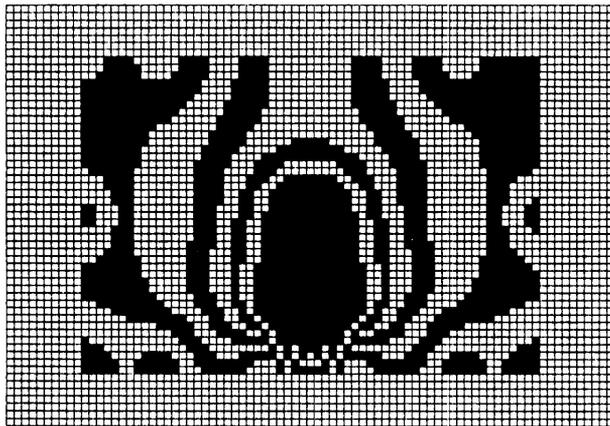
これによれば、断熱効果は断熱材の施工位置により大きく異なり、特に天井における効果が最も大きい事及び断熱材の厚さより、施工面積の方が、断熱効果に対して大きな影響を及ぼす事が分かる。

表3-1 定常時の各断熱モデルにおける模型内平均温度

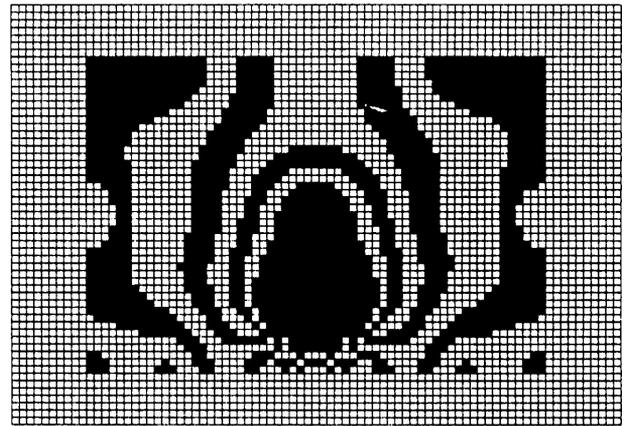
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
断熱材仕様	天井	-	-	-	15mm	-	15mm	15mm	30mm	15mm	30mm	30mm	15mm	30mm
	壁**	-	-	-	-	-	-	15mm	-	15mm	30mm	-	15mm	30mm
	床	-	15mm	-	-	-	-	15mm	-	-	30mm	30mm	15mm	30mm
	ガラス	-	-	15mm	-	30mm	15mm	-	30mm	15mm	-	30mm	15mm	30mm
平均室温(31点)		11.3℃	11.5℃	12.4℃	13.3℃	14.8℃	16.3℃	16.7℃	18.9℃	19.4℃	20.0℃	21.7℃	22.2℃	30.1℃
平均表面温度(12点)		4.7℃	4.7℃	5.5℃	6.1℃	6.6℃	9.1℃	10.4℃	11.5℃	11.2℃	14.1℃	15.3℃	15.3℃	22.5℃

\* スタイロフォームを使用

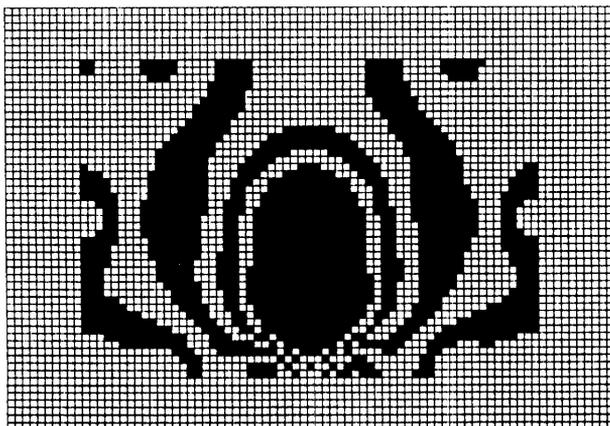
\*\* ガラスの反対側一面のみ(他2面は45mmスタイロフォーム断熱)



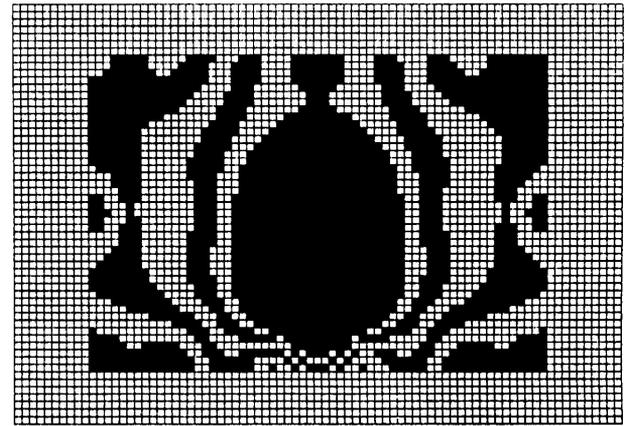
a. 無断熱(向って右側がガラス窓)



b. ガラス窓のみ断熱



c. 天井・床・左側壁断熱



d. 天井・床・壁・ガラス窓すべて断熱

図3-3 15mmスタイロ・フォーム断熱と模型室内の温度分布(中心の暗色40℃以上、各境界は5℃間隔)

#### 4. 室内熱対流の数値シミュレーション

##### (1)シミュレーションの方法

###### ①基礎方程式

室内の熱対流を記述する基礎方程式は通常、流体の運動方程式である Navier-Stokes 方程式(4-7式)、質量保存則である連続の式(4-2式)及びエネルギー保存則(4-3式)であるエネルギー方程式の3つである。各々の式を2次元で表わせれば次の通りである。(ただし、熱伝導率  $\kappa$  及び密度  $\rho$  は定数として扱う。)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= B - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4-1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots (4-2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial Q}{\partial t} + \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - P \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\}$$

$$\begin{aligned} & - \left( \frac{\partial u E}{\partial x} + \frac{\partial v E}{\partial y} \right) + u \left( \frac{D u}{D t} \right) + v \left( \frac{D v}{D t} - B \right) \\ & = 0 \quad \dots (4-3) \end{aligned}$$

ただし、 $\frac{D}{D t} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y}$

$u, v$ : 流速 ( $x$  及び  $y$  方向)

$P$ : 圧力,  $\nu$ : 動粘性係数,  $B$ : 温度差による浮力,  $E$ : 単位質量当りエネルギー量,  $Q$ : 単位時間当り供給熱量,  $T$ : 流体絶対温度

ここで Navier-Stokes 方程式は単純な2次元平行流や円管内の流れを除けば解析解を求める事が困難な非線型方程式であり、後で述べる数値計算によって数値解を求める事が一般的である。

###### ②基礎方程式の数値解法

①で述べた流体の基礎方程式を基に数値シミュレーションを行う方法は電子計算機の性能の飛躍的向上と普及にともなって種々開発されてきたが、本研究では最も一般的な MAC (Marker & Cell)法によりプログラムを作成する事とした。

MAC 法は差分法の1種であり、図4-1のように空間を微小な正方形の格子(メッシュと呼ぶ)に分割し、各格子の圧力、温度などをメッシュの中心で定義し、 $xy$ 各方向の流速を各々、各メッシュの境界で定義すれば(4-1)式は次式のように差分化される。(流速の時間

差分は前進差分で空間差分は中心差分とする。)

$$\begin{aligned} & \frac{U^{m+1}_{i,j} - U^m_{i,j}}{\tau} + \frac{U^m_{i,j} + U^m_{i-1,j}}{2h} \left( \frac{U^m_{i+1,j} - U^m_{i-1,j}}{2} \right) \\ & + \frac{V^m_{i,j} + V^m_{i,j-1}}{2h} \left( \frac{U^m_{i,j+1} - U^m_{i,j-1}}{2} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{h} \\ & + \nu \left( \frac{U^m_{i+1,j} + U^m_{i-1,j} + U^m_{i,j+1} + U^m_{i,j-1} - 4 \times U^m_{i,j}}{h^2} \right) \quad \dots (4-4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{V^{m+1}_{i,j} - V^m_{i,j}}{\tau} + \frac{U^m_{i,j} + U^m_{i-1,j}}{2h} \left( \frac{V^m_{i+1,j} - V^m_{i-1,j}}{2} \right) \\ & + \frac{V^m_{i,j} - V^m_{i,j-1}}{2h} \left( \frac{U^m_{i,j+1} + U^m_{i,j-1}}{2} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{h} \\ & + \nu \left( \frac{V^m_{i+1,j} + V^m_{i-1,j} + V^m_{i,j+1} + V^m_{i,j-1} - 4 \times V^m_{i,j}}{h^2} \right) \\ & + B_{i,j} \quad \dots (4-5) \end{aligned}$$

( $\tau$ : 時間差分間隔,  $h$ : 空間差分間隔,  $i, j$ : 各  $x, y$  方向空間サフィックス,  $m$ : 時間サフィックス)

MAC 法の特長は連続の式の解法にあり、次のような操作によって連続の式を満足する解を収束させてゆく。

まず、(4-1)式にナブラ演算子  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$  を作用させ(4-6)式を導く。

$$\frac{D}{D t} \nabla U = \frac{\partial B}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \nabla^2 \cdot P + \nu \nabla^2 \cdot (\nabla U) \quad \dots (4-6)$$

ここで、 $m+1$ 時に連続の式  $\nabla U (= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}) = 0$

の条件を満足するとすれば、圧力に関する差分化された2次微分方程式を得る。

$$\begin{aligned} \nabla^2_{i,j} P^m &= \rho \left\{ \nu \nabla^2_{i,j} (N^m_{i,j}) - \nabla_{i,j} (N^m_{i,j}) + \frac{N^m_{i,j}}{\tau} \right. \\ & \left. \frac{\partial Y^m_{i,j}}{\partial y} \right\} \quad \dots (4-7) \end{aligned}$$

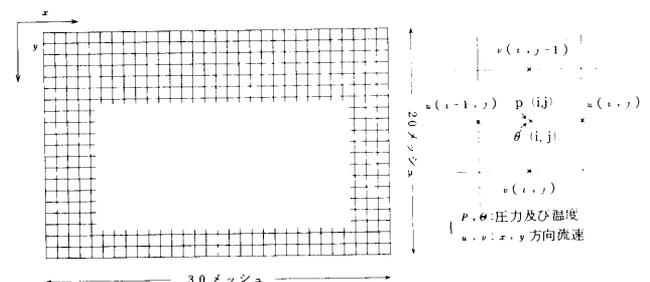


図4-1 差分メッシュと各変数定義点

$$(N_{i,j} = \nabla_{i,j}(U) = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y})$$

これは一般にポアソン方程式と呼ばれ、緩和法などによって比較的簡単に近似解を得る事が可能である。

本研究ではこのポアソン方程式を S. O. R. (逐次加速緩和法) によって数値的に解く事とした。

S. O. R は反復法の 1 種で、コンピュータ・プログラムの作成が比較的容易なため、この種の数値計算に広く用いられており、(4-8)式で第 n 次近似値と第 n-1 近似値の差が任意に定められた収束判定値より小さくなるまで反復して計算される。 $\omega$  は緩和係数で 1 と 2 の間の値とする。

$${}^n P_{i,j} = {}^{n-1} P_{i,j} + \omega \{1/4(h^2 \cdot Q_{i,j} + {}^n P_{i-1,j} + {}^n P_{i,j-1} + {}^{n-1} P_{i+1,j} + {}^{n-1} P_{i,j+1}) - {}^{n-1} P_{i,j}\} \quad \dots (4-8)$$

(n: 近似次数 (= 反復回数),  $Q_{i,j}$  は (4-7) 式の右辺)

実際の計算プログラムは図 4-2 に示すようにまず、初期条件を設定した後、Navier-Stokes 方程式で、次の時間における流速分布を求め、その時点における温度分布及び圧力分布をエネルギー方程式及びポアソン方程式化した連続の式から求めて、それを反復して定常状態に収束させてゆく事とした。又、Navier-Stokes 方程式は

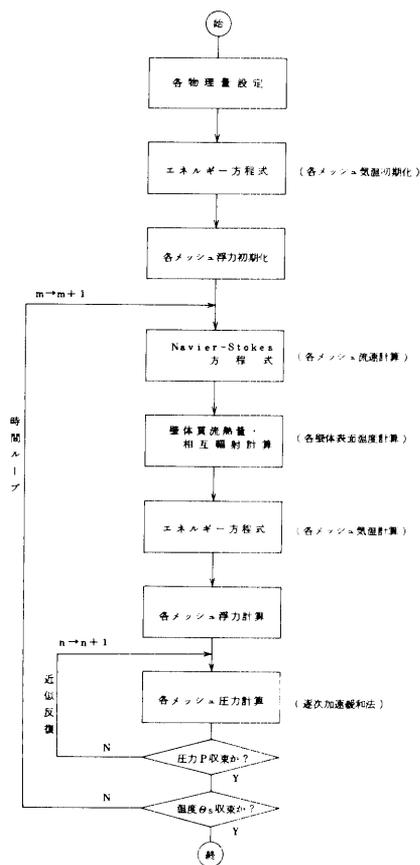


図 4-2 計算フロー

基本的に等温、非圧縮性とし、エネルギー方程式で求めた温度は浮力の形で運動方程式に組み入れる事とした。

各境界 (周壁と接する格子) では流速は 0 とし、各壁体表面对流熱伝達率は以下の値を使用した。(文献13)~14) 参照)

$$\text{(垂直壁)} h_c = 2.03 \{(\theta_s - \theta'_s)/H\}^{0.22} \quad (4-9)$$

$$\text{(天井)} h_c = 2.94 (\theta_a - \theta_c)^{0.25} \quad (4-10)$$

$$\text{(床)} h_c = 1.43 (\theta_a - \theta_f)^{0.25} \quad (4-11)$$

いずれも ( $w/m^2 \cdot ^\circ C \cdot h$ ),  $\theta_s - \theta'_s$ : 壁体上端及び下端表面温度差,  $\theta_a$ : 室温,  $\theta_c, \theta_f$ : 天井及び床表面温度, H: 壁体高さ (m)。

(2)計算結果

②で述べた MAC 法のシミュレーション・プログラムをまず BASIC で作成し、16ビット・パソコン (NEC PC-9800VM) により計算を行った。(MS-DOS コンパイラ使用)

差分メッシュは 2 次元とし、メッシュの数は図 4-1 に示すように水平方向、垂直方向各  $30 \times 20 = 600$  メッシュとした。

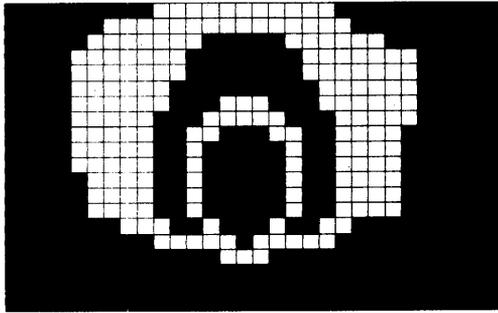
最初実験と全く同じ寸法、断面仕様のモデルを作成し、シミュレーションを行った。

図 4-3 a~b にその結果を示す。図中天井、床及び向って左側の壁がベニヤ合板 9 mm 厚 ( $K$  値  $\approx 5.18 w/m^2 \cdot ^\circ C \cdot h$ ) を右側境界を板ガラス 3 mm 厚 ( $K$  値  $\approx 5.57 w/m^2 \cdot ^\circ C \cdot h$ ) を各々想定しており、外気温度は  $-2.5^\circ C$  一定とした。シミュレーションは 2 次元であるため、実験によって得られた室温分布と単純な比較は出来ないが、発熱体の熱出力を実験の 2.5 倍としたところ、図に示すように、実験の温度分布に近い計算結果となった。(気流速度分布は各メッシュの気流の方向のみを示している。)

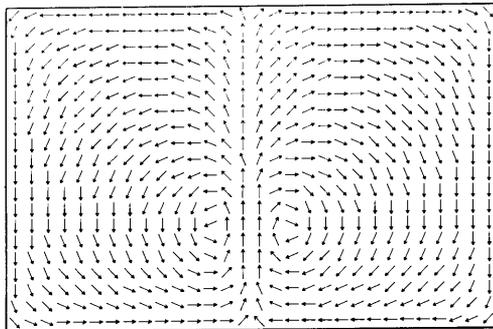
図 4-4 a~b は、これに対して 4 倍にスケール・アップした実際の室内の寸法と同じ室内モデルの計算結果である。(水平方向  $3.6m \times$  高さ  $2.4m$ )

中心部の発熱体は 3 で述べた近似相似則及び、模型と同様に 2 次元である事を考慮して、模型実験の 22.5 倍の熱出力を想定した。

これらの計算は定常状態に達するまでに数日を要した。圧力を決定する S. O. R の反復計算に時間が掛かるためである。これは数値演算プロセッサ 8087 を装備した同機種で FORTRAN コンパイラによっても、なお半日を要した。残念ながら、16ビット機ではこの種の数値シミュレーションは計算時間の関係で現在までのところ、あまり実用的でないと言えるかもしれない。



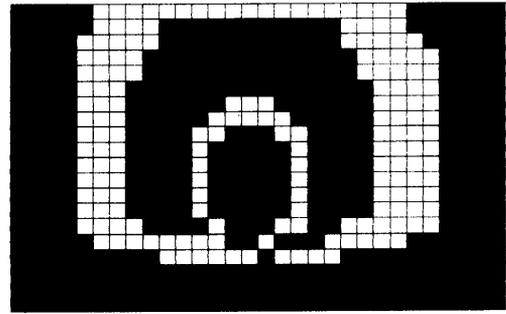
a 室温分布（中心の暗色40℃以上，各境界10℃間隔）



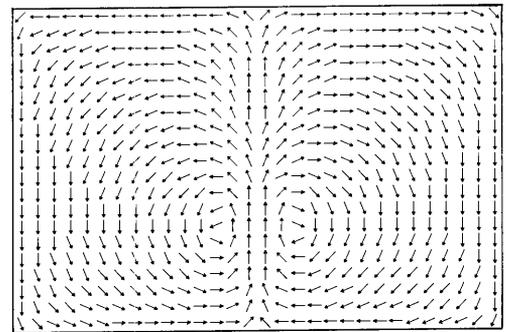
b 気流速度分布

図4-3 模型実験（1/4スケール）の2次元シミュレーション結果

{	天井・床厚さ 9 mmベニヤ合板（長さ0.9m）
	左壁 厚さ 9 mmベニヤ合板（長さ0.6m）
	右壁 厚さ 3 mm板ガラス（長さ0.6m）



a 室温分布（中心の暗色40℃以上，各境界10℃間隔）



b 気流速度分布

図4-4 実寸法室内の2次元シミュレーション結果

{	天井・床厚さ 9 mmベニヤ合板（長さ3.6m）
	左壁 厚さ 9 mmベニヤ合板（長さ2.4m）
	右壁 厚さ 3 mm板ガラス（長さ2.4m）

## 5. 総合評価システム

前回研究で取り上げた「検建箱」システムは開発された時点から既に10年間が経過している。

この間、計測センサーの多様化とローコスト化，データ・レコーダなどの小型軽量化，データ RAM や専用インタフェース（GPIB, RS232C など）によるコンピュータへのデータ入力などは常識化してきた。さらに最近1～2年の間にパソコン側でも，16ビットハンドヘルド・コンピュータの製品化により，一挙にポータブルなシステムの高性能化が進行した。

このような事から，計測システムと評価用コンピュータの組合せは1～2名で簡単に現場へ搬入できる段階に達している。

ここでは2～4の成果を実際の評価に適用した場合の例について説明する。

評価する対象室は東京郊外多摩市内にある木造の2階建住宅である。（前回研究の東京戸建住宅No.2と同じ住宅）

この住宅は延面積131m<sup>2</sup>で，1階LD（19.8m<sup>2</sup>）と2階書斎（9.9m<sup>2</sup>）が，前回研究で計測評価対象となっており，

壁体に断熱材が施工されておらず，室温分布などに問題の多かった建物である。

ここでは，2階書斎について新しいシステムを使った評価について述べる。

まず，2の成果に基づき，室内環境計測結果の評価を行う。図5-1は，そのコンピュータ・ディスプレイのハード・コピー（計測データは前研究と同じものを使用）である。表2-3～4に基づく5段階評価の他に表5-1に示すような分かり易い感覚的評価尺度を参考として表した。

これは表中の右端に示されている PMV 値の評価尺度では neutral（温熱的中立＝快適）とされている範囲をさらに何段階にも区分したものである。

2でも述べたように PMV の評価尺度は住宅などの室内環境評価のためには，かなり範囲が広すぎるため，このように neutral の範囲を細分化して，より細かい評価が必要である。

次に，この室内における年間暖房エネルギー消費量を推定し，1/62円で灯油換算した年間エネルギーコストを算出する。この室のみで，年間暖房コストが2万円を越す事が分かる。（暖房時間1日10時間）

図5-3～5に，寒冷代表日における室温分布のシ

シミュレーション結果及び、それに基づく PMV 値の分布指定図及び結露発生箇所を示す。外側アルミ製雨戸内側一重カーテンのみの開口部はガラス窓面に結露が生じている。

次に、この室内に対して、壁体、天井にグラスウール 50mm を施工し、ガラス窓面の外側に断熱雨戸、内側に 2 重カーテンを設けた改善案について、その効果の検討を行う。図 5-6~9 にその結果を示す。

年間暖房負荷は現状の 1/2 以下となり、エネルギーコストも 1 万円以下に低減される事が分かる。

一方、室温分布、PMV 値とも大幅に改善され、ガラス窓面への結露もなくなるものと考えられる。

表 5-1 温度指標の感覚的評価 (表 2-3 参照)

PMV 値	5段階評価	感覚的評価	PMVにおける評価
0.8以上	1点	暑い	Neutral
0.4~0.8	2点	やや暑い	
0.2~0.4	3点	幾分暑い	
0.06~0.2	4点	ほぼ快適	
-0.06~+0.06	5点	快適	
0.2~-0.06	4点	ほぼ快適	
-0.4~-0.2	3点	幾分涼しい	
-0.8~-0.4	2点	やや寒い	
-0.8以上	1点	寒い	

以上のように、計測結果による評価と、シミュレーションによる検討で、室内環境の特長を具体的に把握する事が可能となる。しかしながら、4で述べた通り、現状の 16ビットパソコンとそれに使用可能なコンパイラでは、気流分布のシミュレーションに計算時間が掛かり過ぎるため(1回の計算に数日必要)現場で簡単に計算結果を得るのは困難である。より簡便な気流分布シミュレーション手法の開発や処理速度の速いソフトウェアの開発が今後の課題である。

室内環境計測値と評価結果 (N氏邸2階書斎) (測定時刻: 2:12 p.m.) (東京)

指標	計測値	体感	5点	4点	3点	2点	1点
1 上部室温	23.5 °C	◎ ほぼ快適		■			
2 中心室温	21.7 °C	◎ ほぼ快適		■			
3 下部室温	16.7 °C	◎ やや寒い				■	
4 上下温度差	6.8 °C	◎ 温度差大				■	
5 MRT	18.3 °C	◎ 幾分涼しい			■		
6 相対湿度	72.5 %	◎ 程良い湿度	■				
7 風速	0.05 m/s	◎ ほぼ無風			■		
8 PMV	0.31	◎ 幾分涼しい			■		

\* 評価の目安 (5点=優秀 4点=良好 3点=水準 2点=やや劣る 1点=劣る)

図 5-1 環境計測結果の評価例 (CRT画面ハード・コピー)

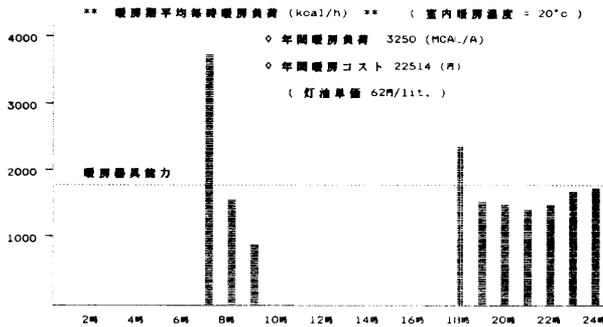


図 5-2 年間暖房負荷及びエネルギー・コスト計算結果 (現状)

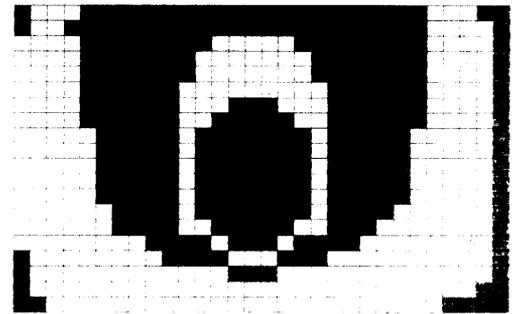


図 5-3 室温分布シミュレーション結果 (現状)

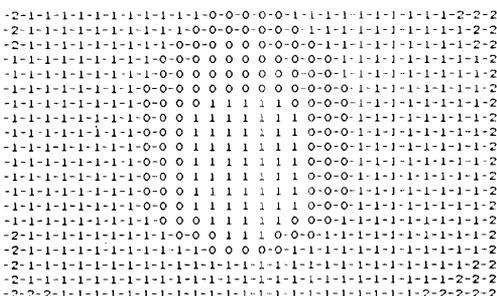


図 5-4 PMV 値分布計算結果 (現状)

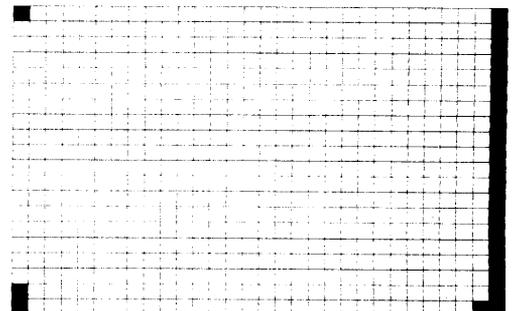


図 5-5 結露分布推定結果 (現状)

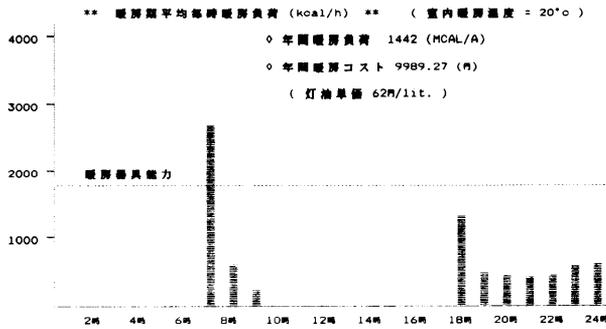


図5-6 年間暖房負荷及びエネルギー・コスト計算結果(改善案)(壁体50mm厚グラスウール施工)

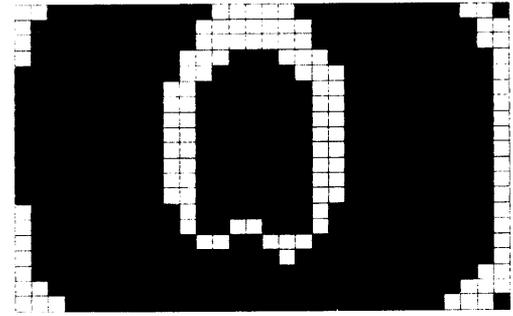


図5-7 室温分布シミュレーション結果(改善案)

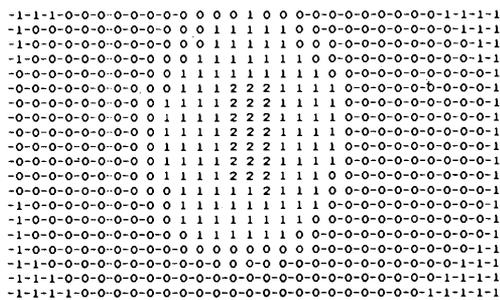


図5-8 PMV 値分布計算結果(改善案)

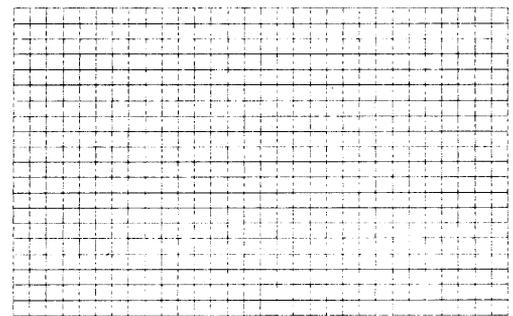


図5-9 結露分布推定結果(改善案)

<参考文献>

- 1) ASHRAE: Hand Book of Foundamental 1985 年
- 2) Fanger P. O: Calculation of Thermal Comfort, Introduction of Basic Comfort Equation, ASHRAE Transactions, Vol 73-II 1967 年
- 3) 堀越哲美: PMV と快適方程式の検討, 空調衛生工学, Vol 60, No.10
- 4) 田中辰明: 適度な温熱環境—PMV と PPD 指標の決定と熱的快適条件の明細, 空調衛生工学, Vol 61, No.3
- 5) 前田敏男: 室内の熱対流の近似相似則, 日本建築学会論文報告集, 第63号, 1959年
- 6) 前田他: 強制換気のある室の熱対流の近似相似則, 日本建築学会論文報告集, 第66号, 1960年
- 7) 小林信行: 室内気流の模型実験, 空調衛生工学, Vol 58, No.3
- 8) 江守一郎: 模型実験の理論と応用(第二版), 技報堂出版, 1985年
- 9) 藤川洋一郎: 電算機による偏微分方程式の解法, サイエンス社, 1981年
- 10) 野村豪他: 気流分布の数値解法について, (その1)~(その4), 日本建築学会関東支部学術研究発表会梗概集, 1971年, 1972年, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1972年, 1973年
- 11) 野村他: 室内空気分布の数値解法について, 空調衛生工学, Vol 48, No.10

- 12) 貝塚正光: 室内気流の数値予測, 空調衛生工学, Vol 58, No.3
- 13) 小林定教: 建築物の室内側熱伝達特性に関する実験的研究 第2報, 日本建築学会論文報告集, 第292号, 1980年
- 14) 伊藤民雄他: 室内対流熱伝達率—最近の研究成果, 空調衛生工学, Vol 61, No.5

<研究組織>

主査	尾島 俊雄	早稲田大学理工学部教授
委員	斎藤 忠義	国土館大学工学部助教授
	森山 正和	神戸大学工学部講師
	西岡 哲平	福井工業大学工学部講師
	王 世 燁	早稲田大学研究員
	佐土原 聡	早稲田大学助手
	須藤 諭	早稲田大学情報科学研究教育センター助手
	村上 公哉	早稲田大学理工学部大学院生