

オフィス空間における室温分布に関する実験的研究  
(その5)- 要因の分析と快適性の検討 -

正会員 ○木橋 悠士\*  
正会員 羽山 広文\*\*  
正会員 絵内 正道\*\*\*  
正会員 菊田 弘輝\*\*\*\*  
正会員 木下 学\*\*\*\*\*

オフィス 室温分布 模型実験  
実用的相似則 影響度 快適性

1. はじめに

オフィス空間は規模が大きく在室人数も多いため、室内で様々な熱負荷が発生する。中間期・冬季にはOA機器や照明からの冷房負荷と、開口部や換気による暖房負荷が並存し、室温の分布に偏りが生じる。室温の偏りを抑えるため、窓側のインテリアゾーンと室内側のペリメータゾーンにゾーニングを行い、空調の個別制御が可能になるように計画するのが一般的である。しかし空調の個別制御は空気調和と運搬にかかるエネルギーが増すばかりだけでなく、混合損失を発生させる要因となる。

現在、ゾーニングをする際の明確な基準はなく、設計者の経験則に基づいてゾーン分けを行っているのが現状である。室内の条件から室温分布の程度を予測することができれば、適切な空調設計が可能となる。本研究では、模型実験を手法として、室内の状況(形状、内部負荷、外皮性能など)から室温分布を予測し、快適性を検証する方法を提案することを目的とする。

2. 小規模模型実験

2.1 模型実験の概要

模型実験を行うことにより、室内の温度分布に対する影響因子を明らかにし、その大きさを検討した。室内を均一に空調制御した冬季・中間期のオフィスを想定し、室温の標準偏差を計測した。オフィスビルの基準階において、窓面からコア部分までを切り取るように模型で再現した(図1)。実験に使用した模型図面を図2に示す。模型における室内の寸法は奥行き×幅×高さが(4m×0.64m×0.56m)である。室内で発生する冷房負荷はブロック毎の面状発熱体から、窓面の暖房負荷は水槽の水温を調節して発生させた。空調は天井吹出し天井吸込みと天井吹出し床吸込みの2種類を検討した。また、間仕切りの位置を変えて空間の奥行きを変えられるようにした。実験は、負荷の発生状況や奥行き長さを変化させた実験を210パターン行った。行った実験の一覧を示す(表1)。実験において変化させたパラメータは、室内の規模、窓面温度、冷房負荷の発生状況、吸込み口の位置である。

2.2 実用的相似則

模型は1/5のスケールで作製した。実物と空気の流れを同等に扱うために、室内での空気を乱流として扱い、アルキメ

デス数と乱れのグラスホフ数のみを一致させ、実用的相似条件<sup>1)</sup>を満たすこととした。縮率に関して式(1)、(2)を示す。

$$n_u = n_{gh}^{1/3} n_l^{-1/3} \quad (1) \quad n_\theta: \text{温度の縮率} \quad n_u: \text{速度の縮率}$$

$$n_\theta = n_{gh}^{2/3} n_l^{-5/3} \quad (2) \quad n_{gh}: \text{発熱量の縮率} \quad n_l: \text{長さの縮率}$$

2.3 実験結果

実験番号Vにおける、暖房負荷と室温の標準偏差の関係を奥行き長さをパラメータにして図-3に表す。奥行き長さが大きくなるほど室温の標準偏差が大きくなっている。実験番号III IVにおける暖房負荷と室温の標準偏差の関係を、冷房負荷の重心から窓面までの距離をパラメータにして図-4に表す。重心位置が窓面から離れるほど、室温の標準偏差の値が大きくなっている。また、図(3)、(4)ともに暖房負荷が大きくなるほど室温の標準偏差が大きくなっている。奥行き長さ、冷房負荷の重心の位置、暖房負荷の大きさは室温の標準偏差に影響を与えていることがわかる。

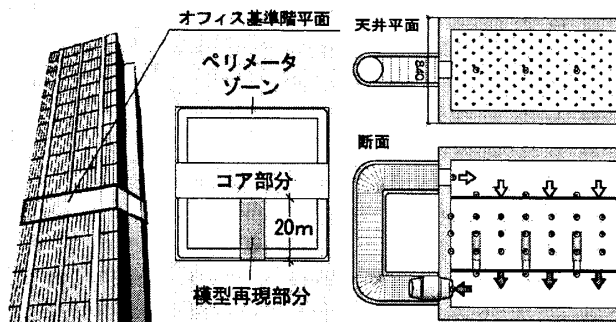


図-1 概念図 図-2-1 模型図面(床吸込)

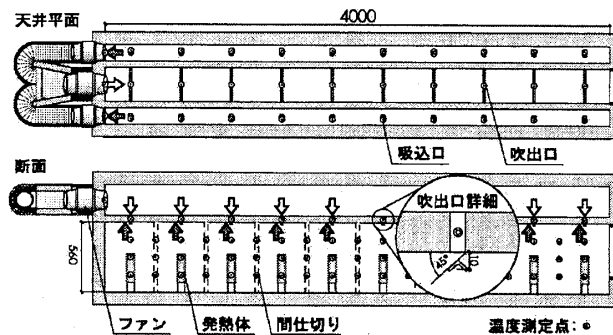


図-2-2 模型図面(天井吸込)

Experimental Study on Room Air Temperature Distribution in Offices

KOHATA Yuji, HAYAMA Hirofumi, ENAI Masamichi, KIKUTA Kouki, KISHITA Manabu

### 3. 大規模模型実験

#### 3.1 実験の概要と目的

北海道立北方建築総合研究所の環境シミュレーション室において小規模模型実験と同様の、中間期・冬季のオフィスを想定した実験を行った。小規模模型実験と異なる縮尺において、実用的相似則を適用し実験を行った。北総研において行った大規模模型実験のパラメータを表2に示す。小規模模型実験の結果と比較し、整合性を検討することにより、小規模模型実験の正確性と実用的相似則の妥当性を検証した。

大規模模型実験の縮尺は1/1.76~1/2.94とした。環境シミュレーション室は天井高さが可変である事を利用し、階高と奥行きの比率を小規模模型実験と同様にし、実験を行った(図5)。環境シミュレータ室の寸法は奥行き×幅×階高を(6.8m×5.7m×0.95~1.58m)とした。冷房負荷は模擬発熱体から、暖房負荷は外気室の温度を変化させ発生した。周囲の部屋の温度は環境シミュレータ室の平

表-1 実験一覧

実験番号	長さ[m]	窓面[°C]	発熱密度[W/m <sup>2</sup> ]	ばらつき	吸込口			
I	10~20	13~20	37~46	あり	床			
II	20	10~19	25~60					
III	10~20	16~19	40					
IV	20	14~20	25~55					
V	10~20	19~13	30					
H	12~20	12~20	50	なし	天井			
L			30					
HC			50			中央		
HR							窓側	
HL								奥側

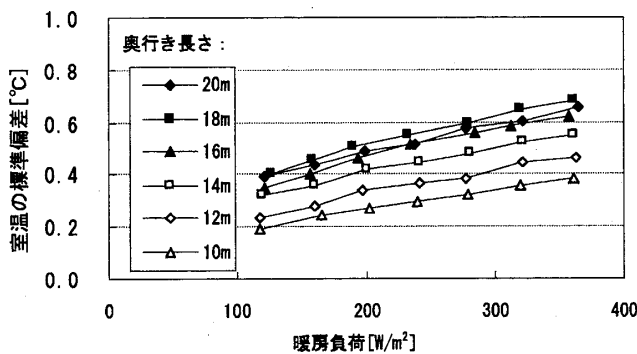


図-3 暖房負荷と室温の標準偏差の関係その1

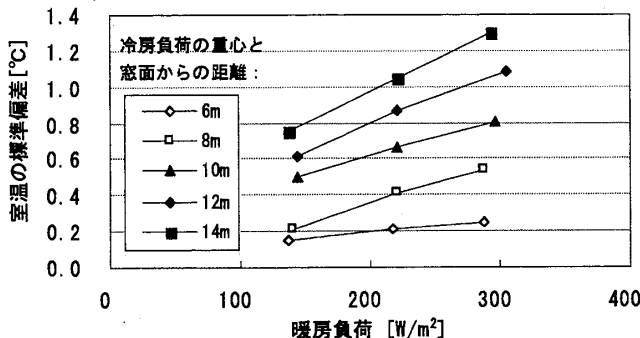


図-4 暖房負荷と室温の標準偏差の関係その2

均温度と等しくし、熱の移動を極力抑えた。空調は天井吹出し天井吸込みとし、定風量方式で行った。空気の吹出しはシミュレータ室に付設したラインファンから行った。空気の吸込みは、天井と壁とのすきまから行った。

#### 3.2 模型実験との結果の比較

大規模実験と小規模実験の比較を図-6に示す。異なる縮尺で室内の状況を再現したにもかかわらず、室温の標準偏差の値はほぼ一致した。値の差は、実験の誤差の範囲内に収まっていると考えられる。よって、実用的相似則の適用による室温の標準偏差への影響はなく、想定した空間の室温分布の程度を再現している。

### 4. 影響因子の特定と影響度

#### 4.1 各因子の水準への割り付け

実験結果から、室温の標準偏差に影響を与えているとみられた因子を抽出し、各因子の値によって水準に割り付けた。水準の基準値の一覧を表-3に示す。

表-2 北総研における実験の一覧表

実験番号	奥行き	冷房負荷発熱密度	暖房負荷	換気回数
[-]	[m]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m]	[n/h]
1-1~5	20	36	-89~-350	12.8
2-1~5	16		-57~-334	11.2
3-1~4	12		-77~-360	10.8

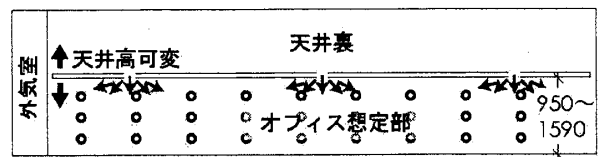
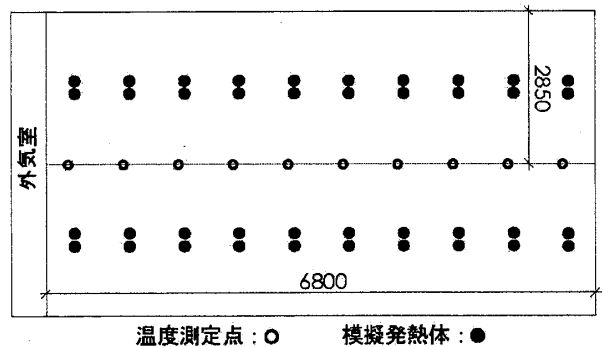


図-5 大規模実験(上:平面図,下:断面図)

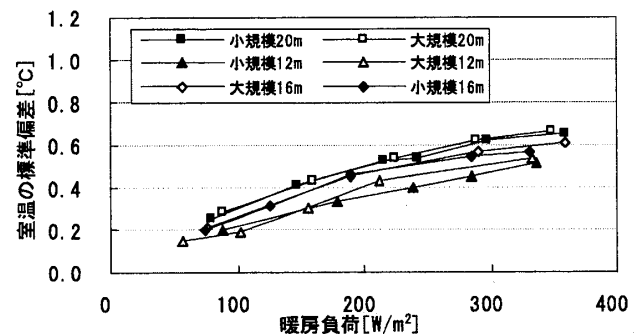


図-6 大規模と小規模模型実験の結果

### 4.2 影響度の検証

影響因子毎に、あてはまる水準の値を1、あてはまらない水準の値を0として扱った。すべての水準を説明変数、室温の標準偏差を目的変数とし、重回帰分析を行った。説明変数の回帰係数が、その水準における影響因子の、室温の標準偏差に対する影響度の大きさとして評価することができる。ここでの影響度とは、因子が変化した場合の室温の標準偏差の変化量である。影響因子の影響度を図-7に示す。影響度、相関係数の値がともに大きかった暖房負荷、冷房負荷の位置、奥行き長さ、発熱密度の差を影響因子として特定した。空調方式(吹出口の違い)、発熱密度は相関係数が小さく、影響度が小さかったことから影響因子としては扱わないこととした。

### 4.3 影響因子の評価指標

冷房負荷の位置の偏りを評価する指標として重心距離Gを定義する(式(3))。Gは、室中央から冷房負荷の重心までの距離を表す。室内の規模を評価する指標として高さ奥行き比Rを定義する(式(4))。Rは階高の違いを考慮するため、階高と奥行きの比で表す。冷房負荷の偏りの程度を表す程度として冷房負荷ldcの式を定義する(式(5))。ldcは室内の発熱密度の差を表す。暖房負荷の大きさを評価する指標としてldhで表した。冷暖房負荷の偏りの程度を表す程度として冷房負荷ldcの式を定義する(式(5))。ldcは室内の発熱密度の差を表す。暖房負荷の大きさを評価する指標としてldhで表した。冷暖房負荷の偏りを総合的に表す指標として負荷の偏在ldを定義する(式(6))。

表-3 影響因子毎の水準の基準値

影響因子	A 空調方式			B 暖房負荷の大きさ[W/m <sup>2</sup> ]				C 奥行き長さ[m]		
	水準1	水準2	水準3	水準1	水準2	水準3	水準4	水準1	水準2	水準3
上限	床吸込	天井吸込	-300	-200	-100	0	20	17	14	
下限			-400	-300	-200	-100	17	14	10	
D 冷房負荷の位置[m]					E 発熱密度の差[W/m <sup>2</sup> ]			F 発熱密度[W/m <sup>2</sup> ]		
水準1	水準2	水準3	水準4	水準5	水準1	水準2	水準3	水準1	水準2	
-2	-0.5	0.5	2	4	150	100	50	60	30	
-4	-2	-0.5	0.5	2	100	50	0	30	0	

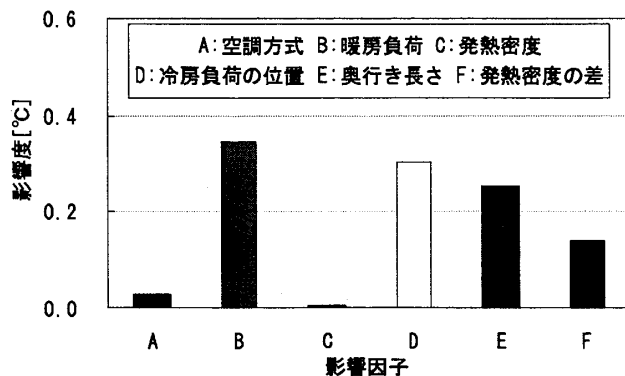


図-7 影響因子と影響度の関係

### 4.4 重回帰分析による予測式

評価指標(R, ld, G)を説明変数として重回帰分析を行い、室温の標準偏差σの予測式をたてた(式(7))。

$$\sigma = -0.31 + 0.077 \cdot R + 0.0013 \cdot ld + 0.10 \cdot G \quad (7)$$

重相関係数R<sup>2</sup>は0.92と高い値となった。説明変数同士の相関係数は0.2以下であり、マルチコ現象は生じていないことを確認した。この予測式を用いることにより、評価指標から室内の温度分布の程度を予測することが可能となった。

### 5. 快適性の検討

#### 5.1 PMV・PPDと室温の標準偏差の関係

室内の快適性の評価のため、快適予想申告(PMV)と予想不満足率(PPD)を用いた。室温の分布は、概ね正規分布であると仮定した。正規分布の特徴として平均値±3σに全データの99.7%が含まれる。この性質を用い、室温標準偏差σと平均温度T<sub>ave</sub>から最高温度T<sub>max</sub>と最低温度T<sub>min</sub>を予測することができる(式(8))。

$$3\sigma = T_{max} - T_{ave} = T_{ave} - T_{min} \quad (8)$$

PPDから最高温度T<sub>max</sub>と最低温度T<sub>min</sub>を定めることによって、目標とする室温の標準偏差σを算出することができる。室温とPPDの関係とPPDの算出に用いた条件を示す(表-5)。

$$G = \frac{\int_0^L (W_i \times L_i) dx}{\int_0^L W_i dx} \quad (3) \quad R = \frac{L}{h} \quad (4)$$

$$ldc = (S_{max} - S_{min}) \quad (5) \quad ld = (|ldc| - |ldh|) \quad (6)$$

G: 重心距離[m], R: 高さ奥行き比[-], ld: 負荷の偏在[W/m<sup>2</sup>], ldc: 冷房負荷の偏在[W/m<sup>2</sup>], ldh: 暖房負荷[W/m<sup>2</sup>], W<sub>tot</sub>: 冷房負荷の総発熱量[W], W<sub>i</sub>: 微小面積における発熱量[W], S<sub>min</sub>, S<sub>max</sub>: 発熱密度の最小, 最大[W/m<sup>2</sup>], L: 奥行き長さ[m], h: 階高[m]

表-4 重回帰分析の結果

n=180	回帰係数	標準回帰係数	偏相関係数	t値	P値	
R <sup>2</sup> =0.92	Const	-0.31	-0.31	-14	7E-30	
	R	0.077	0.46	0.85	22	8E-52
標準誤差=0.06	ld	1.3E-03	0.61	0.91	29	2E-68
	G	1.0E-01	0.46	0.86	22	6E-53

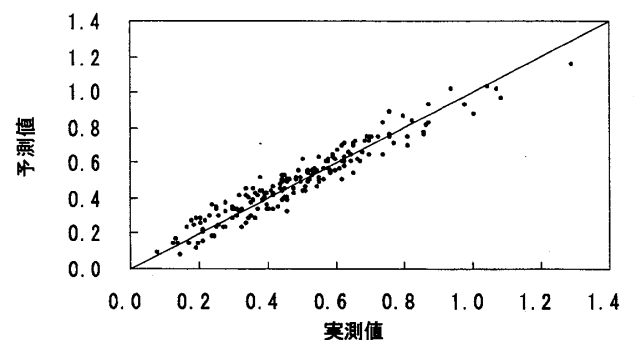


図-8 室温標準偏差の実測値と予測値

### 5.2 奥行きと外皮性能の快適性への影響

快適性に与える影響について検証するため、負荷の偏在と室温の標準偏差の関係を奥行き長さをパラメータにして図9に表す。計算条件を表6に示す。負荷の偏在が大きくなるほど、室温標準偏差が大きくなる。また、それに伴い、PPDの値も大きくなっている。PPD10%を満たすならば、奥行き長さ12mの場合、 $ld$ を420W/m<sup>2</sup>より小さく、奥行き長さ20mの場合、 $ld$ を300W/m<sup>2</sup>より小さくする必要がある。

### 5.3 室温分布を考慮した設計手法

具体的な空間を想定することにより得られる与条件から、快適性を考慮した設計が可能となる。図10のようなオフィスを想定した場合の室内条件を示す(表7)。単一空調による制御を目指した場合の外皮性能について検討する。PPD10%を満たすならば、中空層12mmの複層ガラスを、PPD7%を満たすならば、中空層12mmのLow-eガラスの選択が必要となる。このように室内状況を想定することにより、室温分布を考慮した設計が可能となる。検討の流れを図11に示す。

表-5 温熱要素と快適範囲となる標準偏差

温熱6要素	PPD	温度[°C]			
		窓表面	最低	最高	標準偏差
代謝量 1.2 [met]	10%	12	19.4	23.7	0.72
着衣量 1.0 [clo]		16	19.2		0.75
相対湿度 50 [%]		20	18.9		0.80
風速 0.1 [m/s]	7%	12	20.3	22.9	0.43
機械的仕事量 0 [W/m <sup>2</sup> ]		16	20.2		0.45
		20	19.9		0.50

表-6 計算条件

窓面の高さ	2m	高さ奥行き比 R	3.4~7.1
窓面の熱貫流率	2.9W/m <sup>2</sup> K	奥行き長さ	12m~20m
重心距離 G	0	負荷の偏在 $ld$	0~500W/m <sup>2</sup>
冷房負荷の偏在 $ldc$	0~150W/m <sup>2</sup>	窓面の形態係数	0.21
暖房負荷 $ldh$	0~350W/m <sup>2</sup>	室内側熱伝達率	8.6W/m <sup>2</sup> ·K

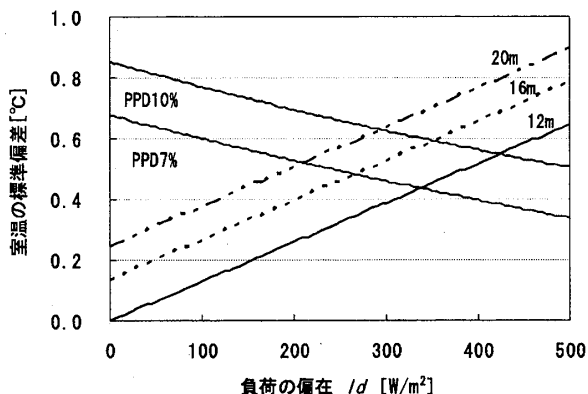


図-9 快適範囲外となる割合

\* NTT ファシリティーズ・工修  
 \*\* 北海道大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)  
 \*\*\* 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博  
 \*\*\*\* 北海道大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)  
 \*\*\*\*\*NTT ファシリティーズ研究開発本部・博士(工学)

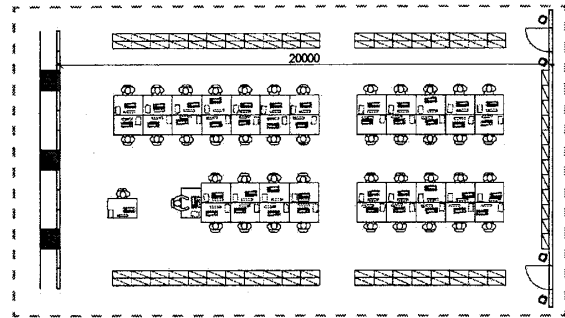


図-10 オフィスのモデル

表-7 快適性検討の結果

室内条件		外気条件		結果		
評価指標	窓面高さ=2.0m	札幌	一月の平均気温	ガラス	$\sigma$	PPD
G=1.0	面積=192m <sup>2</sup>	一月の平均気温	-3.2°C	Low-e: 1.8W/m <sup>2</sup>	0.44	10% 〇 7% 〇
$ldc=40$	人数=44人	発熱量=5.6kW		ペア: 2.9W/m <sup>2</sup>	0.52	〇 ×
R=7.41				シングル: 6.0W/m <sup>2</sup>	0.73	× ×

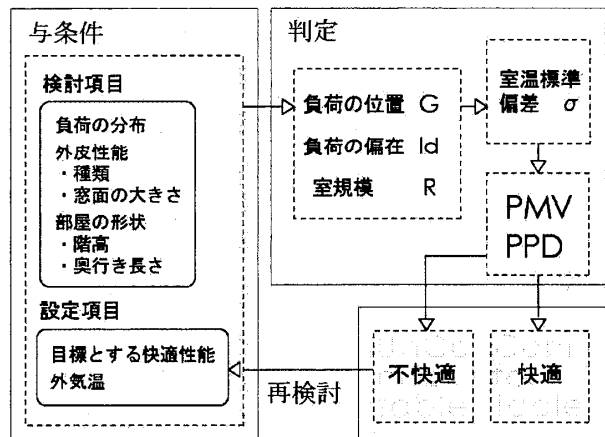


図-11 設計のフローチャート

#### まとめ

1. 模型実験を異なる縮尺で行い、実用的相似則の整合性を示した。
2. 水平方向の室温分布に対する影響因子として冷房負荷の発熱状態(大きさのばらつきと位置)、暖房負荷の大きさ、奥行き長さとした。
3. 室温分布の偏りを減らすためには、外皮の断熱能力を高め、冷房負荷の大きさのばらつきを抑える必要があることを示した。
4. 想定したオフィスにおいて、室温の偏りに関する快適性を検討する設計方法を示した。

#### 参考文献

- 1) 勝田高司・土屋喬雄: 室内空気分布の模型実験法に関する研究, 第1報-室内空気分布の実用的相似則, 空気調和衛生工学会論文集, No17, 1981, 10
- 2) 羽山広文、木下学、倉淵隆、絵内正道 空調機停止後の発熱分布を考慮した室温上昇に関する研究 日本建築学会計画系論文集、第543号, 2001, 5

\* NTT Facilities Inc., M. Eng.  
 \*\* Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.  
 \*\*\* Prof., Graduate school of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.  
 \*\*\*\* Assis. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.  
 \*\*\*\*\* Research and Development HQ, NTT Facilities Inc., Dr. Eng