

有限要素法によるボイドスラブの非定常伝熱解析 (3)スラブ内通過時における調和空気の温度変化

小原 聡司, 赤坂 裕, 黒木 荘一郎
(受理 平成 3 年 5 月 31 日)

AN ANALYSIS OF TRANSIENT HEAT CONDUCTION OF VOID SLABS USING FINITE ELEMENT METHOD

(3) Temperature variation of conditioned air in the void-slab

Satoshi OBARA, Hiroshi AKASAKA and Soitiro KUROKI

In the previous paper, we examined the thermal characteristics of the void slabs, based on the calculations of transient heat conduction and temperature distribution for the cross section of the slabs using the finite element method (FEM).

In the present paper, we expand the capacity of the previous simulation program in order to calculate the void air temperature variation in the direction of void air flow. The temperature variations of void air are calculated when the voids are used as duct spaces of a heating or cooling air conditioning system.

The following results are obtained.

- (1) When voids in an uninsulated floor slab are used as heating ducts, outlet air from the voids loses over 50% heat flux of the required sensible heat load. But when the inside surfaces of the voids are insulated with 30mm thick insulation material, the loss of the heat flux is only 10% of the required heat load.
- (2) Although the exterior surface of a roof void slab is pasted with 50mm thick insulation, both the rate of temperature drop of void air during heating and temperature rise during cooling of void air are very high. To avoid the heat loss or gain from the void to the outside, insulation on interior surface of the void as well as insulation on the exterior surface of the roof should be required.

1. 序

ボイドスラブを空調用のダクトとして使用する場合、強制対流状態にある管内流（供給調和空気）とスラブ内壁面との間に熱授受が生じる。その結果、吹出し口における供給空気の温度および湿度が変化すると考えられる。筆者らは、これまでFEMを用いた2次元非定常伝熱解析プログラムを用いて、ボイドスラブ内部の中空部分が自然対流（非空調時）の場合、および強制対流（空調時）の場合について伝熱性状の検討を行ってきた^{1),2)}。今回、2次元の非定常伝熱解析

プログラムを拡張してボイドスラブを3次元的に取り扱える機能を追加し、暖房時および冷房時の供給調和空気が吹出し口に達するまでの温度変化およびスラブ表面の温度分布について、室温の日周期変動を考慮した検討を行ったのでその結果を報告する。

2. 計算手法

2.1 ボイドスラブの3次元モデル化

ボイドスラブを3次元的に扱うため、図1に示すようにボイド入口から吹出し口までの距離 L を長さ Δl ($=1m$)で N 分割したモデルを考える。このモデルに

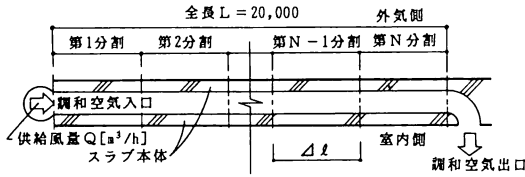


図1 ボイドスラブの3次元モデル化(単位[mm])

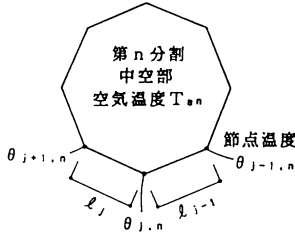


図2 第n分割断面のモデル化

ついて、第t時間ステップにおける各分割出口断面の温度分布およびその断面を通過する空気温度を以下の手法により求める。

2.2 中空部表面節点の温度と中空部空気温度との約合式

式(1)は第n分割における中空部表面節点の温度と中空部空気温度との約合式を示す。

$$\frac{1}{3.6} Q \rho c \frac{\partial T_{an}}{\partial t} = \sum_{j=1}^J \alpha_j \ell \frac{\ell_{j-1} + \ell_j}{2} (\theta_{jn} - T_{an}) \dots (1)$$

$$\alpha_j = f(\nu, T_{an}, \theta_{jn}) \dots (2)$$

ここで、

θ_{jn} : 第n分割出口断面 (n=1~N, N:スラブの分割数) における中空部表面の節点温度, [°C]

J: 中空部表面の節点数 T_{an} : 第n分割出口における中空部空気温度, [°C] Q: 供給風量, [m³/h]

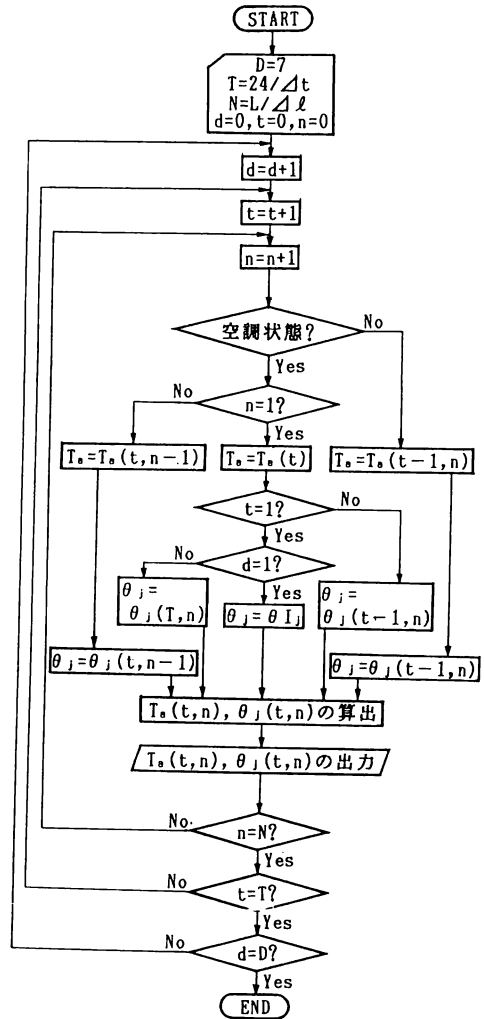
L: ボイド全長, [m] ℓ: 分割長さ, ℓ = L / N, [m]

α_j : 節点jにおける対流熱伝達率³⁾, [W/m²·K]

ℓ_j, ℓ_{j-1} : 中空部分を近似させた正多角形の1辺の長さ, [m] (図2参照) ρ: 空気密度, [kg/m³]

c: 空気の比熱, [kJ/kg·K] ν: 空気の流速, [m/s]

式(1)を時間ステップΔtで差分近似し、t時における分割断面の固体部分の温度分布および中空部空気温度をn=1~Nについて逐次求める。これをt=1~T



記号説明:

D: 計算日数, [日] d: 現在の計算日数, [日]

T: 1日あたりの計算回数, [回] t: 現在の計算終了回数, [回]

Δt: 計算時間間隔, [h]

N: スラブの分割数(または全長)に対する計算繰り返し回数, [回]

n: 現在の計算分割位置

Δℓ: スラブの1分割あたりの長さ, [m]

L: スラブ (=ダクト) の全長, [m]

T_a : 前回の計算による中空部空気温度, [°C]

θ_j : 前回の計算によるスラブ節点温度, [°C]

$T_a(t, n-1)$: t時, 第n-1分割の中空部空気温度, [°C]

$T_a(t-1, n)$: t-1時, 第n分割の中空部空気温度, [°C]

$T_a(t, n)$: t時, 第n分割の中空部空気温度, [°C]

$T_a(t)$: 毎正時の供給調和空気の温度, [°C]

$\theta_j(t, n-1)$: t時, 第n-1分割の節点温度, [°C]

$\theta_j(t-1, n)$: t-1時, 第n分割の節点温度, [°C]

$\theta_j(t, n)$: t時, 第n分割の中空部空気温度, [°C]

$\theta_j(T, n)$: 前日の最終時(24時)における第n分割の中空部空気温度, [°C]

θ_{Ij} : スラブ節点の初期温度, [°C]

図3 2次元非定常伝熱解析用プログラムを3次元に拡張した場合のフローチャート

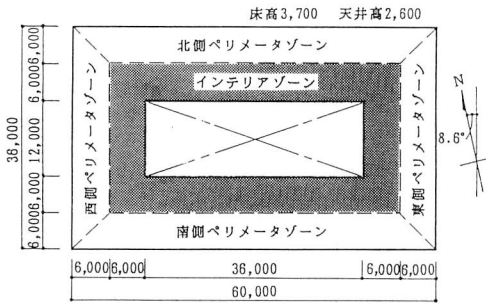


図4 熱負荷計算を行った事務所ビルの平面(単位[mm])

(MICRO-PEAK/1987添付のデータ“SAMPLD”より)

(T：1日あたりの計算繰り返し回数， $T=24/\Delta t$) について，計算を繰り返すことにより，温度分布の経時変化を求めることができる。本手法を2次元の非定常伝熱解析プログラムに組み込んだ場合のフローチャートを図3に示す。なお，中空部表面間の相互放射については，既報1)と同様，図2に示す各面間のGebhartの放射吸収係数を用いて厳密に処理した。

3. 計算条件

3.1 境界条件

今回の計算ではボイドスラブが事務所ビルの基準階または最上階において冷暖房用の空調ダクトとして使用される場合を想定した。この場合，スラブ上下の空気温(室温または外気温)は外界条件や室内発熱により日周期的に変動する。そこで，この室温変動については周期非定常空調負荷計算プログラムMICRO-PEAK/1987⁴⁾により，建物条件および建物使用条件としてはMICRO-PEAK/1987の“SAMPLD”を(図4参照)用い，外界条件としては東京における暖冷房時の設計用気象データを用いて，インテリアゾーンの時刻別室温を求めた。計算結果を表1(1)~(3)に示す。また，最上階のスラブにおける外界条件としては，相当外気温度SATを使用した。この場合，MICRO-PEAK/1987で使用する設計計算用気象データ“WDATA”“MEANWD”(空調和・衛生工学会方式，東京における平均年の統計値，TAC10%)の内，乾球温度，法線面直達日射量，水平面天空日射量，水平面夜間放射量，風速の時刻別データを用いて式(3)⁵⁾により，時刻別の相当外気温度を求めた。結果を図6(2)(3)に示す。

$$SAT = \theta_o + \frac{1}{\alpha_o} (a_s J - \epsilon J_n) \dots \dots \dots (3)$$

- α_o ：外気側総合熱伝達率， $[W/m^2 \cdot K]$
- J ：スラブに入射する全日射量， $[W/m^2]$
- a_s ：スラブの日射吸収率(=0.7)
- J_n ：スラブの夜間放射量， $[W/m^2]$
- ϵ ：スラブの長波長放射率(=0.9)

3.2 室顕熱・潜熱負荷と供給空気温度

日周期変動する室温と同様，空調機によって供給される空気温度も時刻別の値を与えた。以下にその概要を述べる。

3.2.1 室顕熱・潜熱負荷

3.1と同じく，MICRO-PEAK/1987により，暖房時は室温22℃，室内相対湿度50%または40%の条件で，また冷房時は室温26℃，相対湿度50%の条件のもとで，時刻別の室内顕熱・潜熱負荷を求めた。計算結果を表1(1)~(3)に示す。

3.2.2 供給空気温度

供給空気温度とスラブ(または室温)との温度差の大小が伝熱性状に与える影響を検討するため，供給風量が大きなる場合(流速6m/s)と小なる場合(流速3m/s)を想定した。空調方式は定風量式である。供給空気と室温との差は，空調開始時において，流速6m/s時が約4~5℃，流速3m/s時が約8~10℃である。また，空調時間中(午前8時~午後7時まで)は，室顕熱・潜熱負荷により供給空気温度が変化する。各流速における供給空気の時刻別温度の変化を図6(1)~(3)に示す。なお，空調開始後11時間目(午後7時)以降は空調停止のため，調和空気は供給されない。よってスラブ内中空部は自然対流状態になるものとして既報1)と同様に空気温度，相対湿度を逐次計算した。

3.3 計算対象モデル

図5(1)~(4)に示すような断熱・非断熱仕様の4種類のスラブについて，スラブ全長を20mとし，1m間隔ごとの断面における非定常伝熱計算を行った。スラブを構成する各材の熱物性値を表2に示す⁶⁾。非断熱仕様のスラブについては，流速の大小すなわち供給空気温度とスラブ温度間の差の大小による伝熱性状の違いを検討するため，3.2.2で述べたように冷暖房時それぞれ2種類の供給風量を想定した。断熱仕様のスラブについては，中間階の場合が中空部表面に30mmの断熱を，また最上階の場合は躯体蓄熱の効果を考慮し

表1 時刻別室内顕熱・潜熱負荷, 室内空気温度および相対湿度

(1) 中間階・暖房時(室相対湿度50%)

時刻[h]	1a.m.	2a.m.	3a.m.	4a.m.	5a.m.	6a.m.	7a.m.	8a.m.	9a.m.	10a.m.	11a.m.	12a.m.
室内顕熱負荷[W]	0	0	0	0	0	0	0	6955	6955	6955	4602	7479
室内潜熱負荷[W]	0	0	0	0	0	0	0	-1386	-2799	-2875	-2875	-1437
室内温度[℃]	21.0	20.9	20.8	20.8	20.7	20.6	20.6	20.9	21.7	22.0	22.0	22.0

時刻[h]	1p.m.	2p.m.	3p.m.	4p.m.	5p.m.	6p.m.	7p.m.	8p.m.	9p.m.	10p.m.	11p.m.	12p.m.
室内顕熱負荷[W]	2959	1990	1075	235	-511	5277	0	0	0	0	0	0
室内潜熱負荷[W]	-2875	-2875	-2875	-2875	-2875	-287	0	0	0	0	0	0
室内温度[℃]	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	21.5	21.4	21.3	21.2	21.1	21.0

(2) 最上階・暖房時(室相対湿度40%)

時刻[h]	1a.m.	2a.m.	3a.m.	4a.m.	5a.m.	6a.m.	7a.m.	8a.m.	9a.m.	10a.m.	11a.m.	12a.m.
室内顕熱負荷[W]	0	0	0	0	0	0	0	71013	71013	71013	71013	63610
室内潜熱負荷[W]	0	0	0	0	0	0	0	-1248	-1248	-3099	-3344	-3344
室内温度[℃]	16.8	16.8	16.4	16.2	16.0	15.8	18.7	18.7	21.1	22.0	22.0	22.0

時刻[h]	1p.m.	2p.m.	3p.m.	4p.m.	5p.m.	6p.m.	7p.m.	8p.m.	9p.m.	10p.m.	11p.m.	12p.m.
室内顕熱負荷[W]	65207	58056	54921	51787	48767	45979	50950	0	0	0	0	0
室内潜熱負荷[W]	-1672	-3344	-3344	-3344	-3344	-3344	-344	0	0	0	0	0
室内温度[℃]	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	18.3	17.8	17.5	17.3	17.1	17.0

(3) 最上階・冷房時(室相対湿度50%)

時刻[h]	1a.m.	2a.m.	3a.m.	4a.m.	5a.m.	6a.m.	7a.m.	8a.m.	9a.m.	10a.m.	11a.m.	12a.m.
室内顕熱負荷[W]	0	0	0	0	0	0	0	60767	60767	60767	55907	55679
室内潜熱負荷[W]	0	0	0	0	0	0	0	5201	5201	8893	8894	8894
室内温度[℃]	29.7	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	26.8	26.8	26.0	26.0	26.0

時刻[h]	1p.m.	2p.m.	3p.m.	4p.m.	5p.m.	6p.m.	7p.m.	8p.m.	9p.m.	10p.m.	11p.m.	12p.m.
室内顕熱負荷[W]	47486	55407	55779	56343	56919	57419	44059	0	0	0	0	0
室内潜熱負荷[W]	4447	8894	8894	8894	8894	8894	890	0	0	0	0	0
室内温度[℃]	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	29.2	29.6	29.6	29.6	29.6

て、建物外気側に50mmの断熱を施した。計算を行ったスラブの名称と仕様、計算条件等を表3に示す。なお計算初日の計算時間ステップ $t=1$ におけるスラブの初期温度は、中間階のスラブについては表1に示した時刻別室温の平均値、最上階のスラブについては時刻別室温と相当外気温度の平均値とした。なお、計算時間間隔 Δt は0.1時間、計算日数は7日分とした。

4. 計算結果

4.1 スラブ表面の温度分布

図7はタイプ3の場合について、入口からの距離20mの断面におけるスラブ上階側の平均表面温度の経時変化を示す。タイプ3は断熱仕様であるため、周期定常に達する日数が最大になると考えられる。図より空調開始1時間目では、1日目21.2℃、2日目22.7℃、7日目22.75℃であり、2日目と7日目ではほとんど

差がない。この結果から、周期定常に達する日数は、タイプ3で3日程度であると思われる。図8(1)(2)はタイプ2および3のスラブの場合について、スラブ上階側平均表面温度の変化を、供給口からの距離1, 10, 20mについて比較したものである。いずれの距離の温度も、空調開始後6時間(=午後2時)で最大値をとるが、これは室内熱負荷が最大となる空調開始5時間後(=午後1時)前後の熱負荷(図6(1)参照)のピーク時と約1時間の遅れを生じている。図8(1)に示す非断熱仕様タイプの2では、各距離における平均表面温度は、1mで23.7℃、20mで22.9℃であり、供給口から吹出口までの温度差は0.8℃程度となっているが、図8(2)に示す断熱仕様のタイプ3では、タイプ2と比較して、距離による温度の差はほとんど生じていない。また、全体的に温度変化が比較的平坦になっている。この結果は、ボイド表面に断熱材を貼布することにより、室

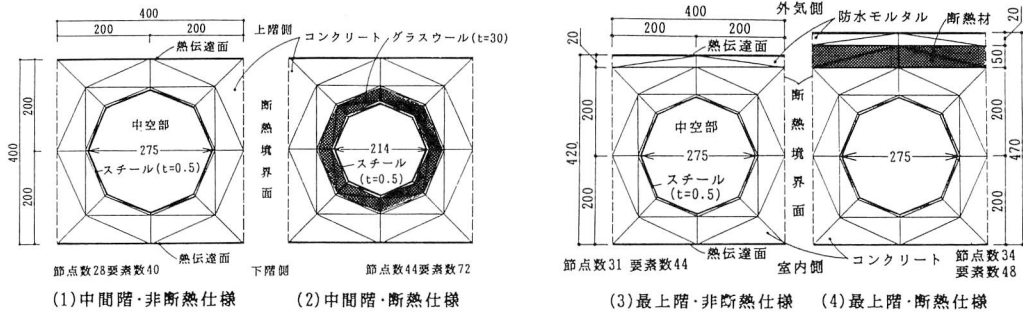


図5 計算を行ったボイドスラブの断面

表2 空気および各材の熱物性値

材名	空気	コンクリート	防水モルタル	スチール	断熱材
比熱 c [kJ/kg·K]	1.005	0.879	0.795	0.419	4.480
密度 ρ [kg/m ³]	1.20	2200	2000	7800	20
熱伝導率 λ [W/m·K]	0.022	1.105	1.302	44.20	0.041

表3 計算を行ったスラブのタイプとその仕様

名称	階	空調モード	供給空気流速	断熱有無	図5の断面形状
タイプ1	中間階	暖房	6[m/s]	無	(1)
タイプ2			3[m/s]		
タイプ3			3[m/s]		
タイプ4	最上階	暖房	6[m/s]	無	(3)
タイプ5			3[m/s]		
タイプ6			3[m/s]		
タイプ7	最上階	冷房	6[m/s]	無	(3)
タイプ8			3[m/s]		
タイプ9			3[m/s]		

内側表面の温度分布が均一になることを示している。

4.2 中空部空気温度の距離および時間による変化

4.2.1 有効熱量比ETR

ボイドへの流入熱流あるいはボイドからの流出熱流により、ボイド入口から各吹き出し口に達するまでに供給空気の温度は変化すると考えられる。そこで、ある時刻における室温を θ_R 、供給空気のボイド入口温度を $\theta_{d=L}$ とし、距離 L の位置における空気温度の変化を、室温 θ_R とボイド入口の空気温度 $\theta_{d=0}$ の温度差で基準化し、有効熱量比ETR (Effective Thermal Ratio) として、次式のように定義する。

$$ETR = (\theta_{d=L} - \theta_R) / (\theta_{d=0} - \theta_R) \times 100 [\%] \dots (4)$$

4.2.2 中間階・暖房時の場合

図9(1)~(3)は、タイプ1~3のスラブの場合について、供給口からの距離による中空部空気温度の変化を空調開始後1, 2, 5, 6時間で比較したものである。いずれのタイプもボイド入口(距離0m)において最大値をとる。一般的に、暖房空調開始後は、スラブ内への蓄熱の影響により、中空部空気温度が時間とともに上昇するはずである。しかし、時刻別供給空気の温度によっては、低下することもある。たとえば空調開始後

6時間後(午後2時台)の温度分布が他の時間の分布より低く、かつ温度低下の度も小さくなっているのは、供給空気の温度が他の時間の温度より低く、また室温との差も小さいため(図6(1)参照)と考えられる。一方、断熱仕様のタイプ3では全般的に、供給口の温度を吹き出し口まで維持していることがわかる。

タイプ1~3のスラブの場合について、供給口から吹き出し口までの中空部空気温度変化例(空調開始5時間後)を表4(1)に示す。表よりタイプ1と2を比較すると、タイプ1では供給時の26.3℃から距離20m(吹き出し口)の25.01℃へ約1.2℃の低下であるが、タイプ2では30.6℃から26.49℃へ約4.1℃の低下である。また、断熱仕様のタイプ3では30.6℃から29.69℃へと約0.9℃低下している。これらを有効熱量比ETRで比較すると、距離20mにおいてタイプ1は70.0%、タイプ2は52.2%、タイプ3は89.4%である。この結果から、同じ断熱仕様(タイプ1と2)であれば、供給空気と室温の差が小さい場合(タイプ1)の方が、吹き出し口まで暖房空気としての効果を維持していることがわか

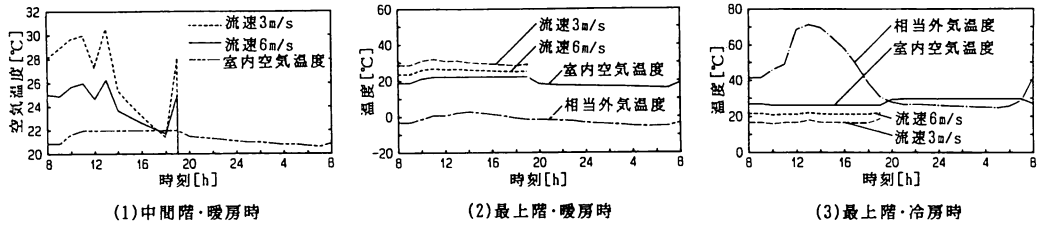


図6 計算対象室の室温・供給空気温度および相当外気温度の時刻別値

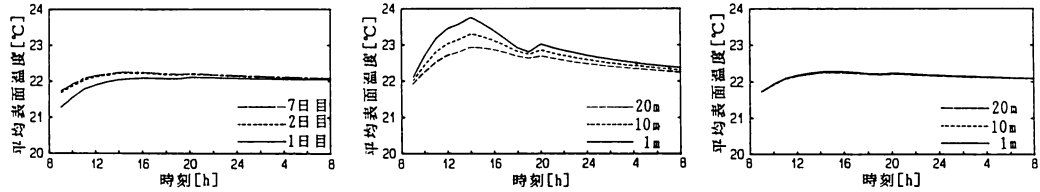


図7 スラブ上階側平均表面温度の経時変化の比較(タイプ3・暖房時・入口からの距離20m)

図8 入口からの距離によるスラブ上階側平均表面温度の変化(暖房時・計算7日目)

る。また、断熱仕様のポイドスラブ(タイプ3)は非断熱仕様のスラブ(タイプ1, 2)に比べ、温度変化(低下)が $1/3 \sim 1/5$ と小さいこともわかる。一般の断熱されたダクトにおける送風機から吹き出し口までの熱損失は顕熱負荷の約1割程度⁷⁾であることと比較すると、非断熱仕様であるタイプ1, 2はいずれも温度変化が大きい。また、断熱を施したタイプ3でも20mの距離でETRが89%へ低下(11%の熱損失)しており、吹き出し口における供給空気の温度低下を防ぐためには、通常のダクトの場合より、やや多めの割り増し負荷を設定する必要があると考えられる。

4. 2. 3 最上階・暖房時の場合

最上階のスラブであるタイプ4～6の場合について、供給口から吹き出し口までの中空部空気の温度変化例(空調開始5時間後)を図10(1)～(3)および表4(2)に示す。図10(1)～(3)をみると、各タイプとも供給空気の温度低下の割合(傾き)が、中間階のタイプ1～3より大きい傾向であることがわかる。表4(2)において、タイプ4の中空部空気温度の変化をみると、ポイド入口の 26.6°C から、距離20mの位置で 21.61°C へ低下していることがわかる。これは設定された室温 22°C より 0.39°C 低く、暖房空気としての効果はなくなっているといえる。タイプ5は、タイプ4に比べ供給空気の流速を半分($6\text{ m/s} \rightarrow 3\text{ m/s}$)にし、供給空気の温度を高めた場合である。タイプ4と同様に外気側表面に断熱

材を持たないため、20mの位置における温度の低下は $31.2 - 20.64 = 10.56^{\circ}\text{C}$ であり、ETRの値も -14.8% と、タイプ4の -8.48% に比べ、さらに大きくなっている。このように最上階の場合も、中間階の場合と同様に、供給流速(風量)を大きくし、温度差を小さくした方が暖房としての効果を維持しやすいことがわかる。しかし、20mの位置における供給空気の温度はいずれも設定された室温 22°C を下回っており、最終的には室を冷房する結果となっている。このように、最上階のスラブで暖房用供給空気の温度が過度に低下する原因は、相当外気温度(2.38°C)が設定室温(22°C)に比べ、極端に低いにもかかわらず、断熱を行っていないためと考えられる。そこでタイプ5のスラブに対し厚50mmの断熱材を施したタイプ6の場合についてみると、20mの位置でETRが47.8%と、暖房の効果をほぼ半分近く維持しており、断熱材による効果が現れていることがわかる。しかし、全体的に最上階のスラブは、中間階の場合に比べ温度低下が著しく、厚50mm程度の断熱材では、外気側表面へ流出する熱流に対して、断熱性能が不足していると考えられる。

4. 2. 4 最上階・冷房時の場合

最上階のスラブであるタイプ7～9の場合について、供給口から吹き出し口までの中空部空気の温度変化例(空調開始5時間後)を図11(1)～(3)および表4(3)に示す。表4(3)より、各タイプの20mの位置におけるETR

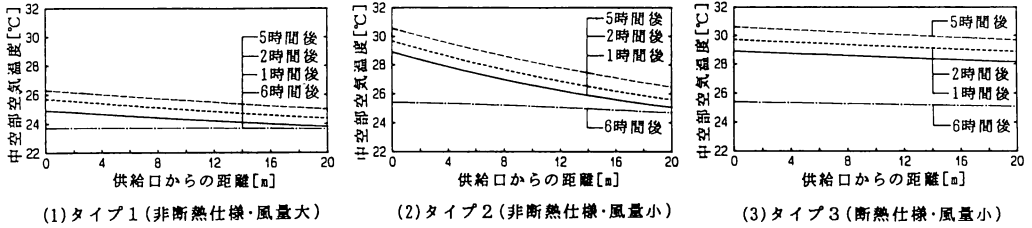


図9 入口からの距離による中空部空気温度の変化の比較(暖房時・計算7日目)

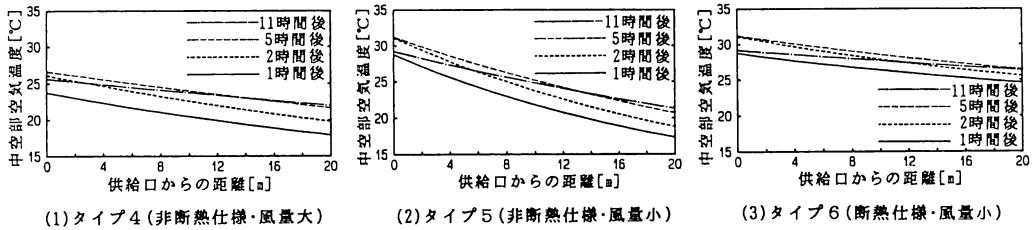


図10 入口からの距離による中空部空気温度の変化の比較(暖房時・計算7日目)

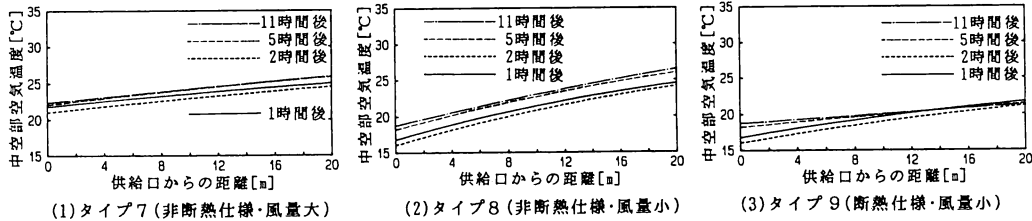


図11 入口からの距離による中空部空気温度の変化の比較(冷房時・計算7日目)

をみると、タイプ7は3.59%、タイプ8は0.13%と、極めてわずかではあるが、冷房効果を保っていることがわかる。また、外気側表面に断熱を施したタイプ9では58.8%と、タイプ7、8に比べ、ETRの変化が小さい。このように、冷房時の供給空気温度変化は、暖房時ほど激しくないことがわかる。しかし、暖房時同様、中間階に比べるとその変化量は大きい。

4.3 最上階スラブにおける熱流入・熱流出

中間階のスラブの場合、中空部空気温度の変化は、スラブ本体の冷却あるいは加熱という現象を伴っており、室の顕熱負荷を低減する効果があるといえる。しかし、最上階のスラブでは、たとえば暖房時の場合、中空部からスラブに流入した熱流は外部へ流出し、大量のエネルギーを建物外へ放出している可能性がある。表5(1)は最上階・暖房時において室内外表面から流出する熱量を各タイプ別にまとめた例(空調開始5時間後、午後2時)である。断熱を施さないタイプ4

および5では、外気側表面における流出熱量が $65.7 \sim 79.9 \text{ W/m}^2$ 、室内側表面における流出熱量 $10.4 \sim 14.2 \text{ W/m}^2$ となっており、外気側への熱損失が室内側の5～8倍に達していることがわかる。これに対し、断熱を施したタイプ6では、外気側 7.53 W/m^2 、室内側 11.9 W/m^2 であり、外気側への流出熱量はタイプ5を1としたときの約1割に減少し、また室内側への流出熱流が外気側へのそれより大きくなっている。しかし、その絶対量 11.9 W/m^2 はタイプ4、5の室内側への流出熱量とほぼ等しい。よって供給空気温度低下による損失熱量は、室内側へ流出するのではなく、もっぱらスラブ本体の温度上昇に費やされているといえる。従って、最上階の場合も、中間階と同様、中空部表面に断熱処理を施すことが必要ではないかと考えられる。表5(2)は同じく最上階・冷房時について室内外から流入する熱量の一例(空調開始5時間後、午後2時)である。この場合、外気側表面における流入熱流は、タイプ7、8が約 320 W/m^2 であり、暖房時における

表4 中空部空気温度の変化

(1) 中間階・暖房時(7日目・空調開始5時間目・室温 $\theta_R=22.0^\circ\text{C}$)

供給空気入口からの距離 L [m]	5	10	15	20	
タイプ1 非断熱仕様 流速6[m/s] 温度差小 $\theta_{d=0}=26.3^\circ\text{C}$	中空部空気温度 $\theta_{d=L}$ [°C]	25.94	25.60	25.29	25.01
	室空気温度との差 ($\theta_{d=L}-\theta_R$) [°C]	3.94	3.56	3.29	3.01
	有効熱量比ETR[%]	91.6	82.8	76.5	70.0
タイプ2 非断熱仕様 流速3[m/s] 温度差大 $\theta_{d=0}=30.6^\circ\text{C}$	中空部空気温度 $\theta_{d=L}$ [°C]	29.32	28.22	27.29	26.49
	室空気温度との差 ($\theta_{d=L}-\theta_R$) [°C]	7.32	6.22	5.29	4.49
	有効熱量比ETR[%]	85.1	72.3	61.5	52.2
タイプ3 断熱仕様 流速3[m/s] 温度差大 $\theta_{d=0}=30.6^\circ\text{C}$	中空部空気温度 $\theta_{d=L}$ [°C]	30.37	30.13	29.91	29.69
	室空気温度との差 ($\theta_{d=L}-\theta_R$) [°C]	8.37	8.13	7.91	7.69
	有効熱量比ETR[%]	97.3	94.5	92.0	89.4

(2) 最上階・暖房時(7日目・空調開始5時間目・室温 $\theta_R=22.0^\circ\text{C}$ ・相当外気温度 2.38°C)

供給空気入口からの距離 L [m]	5	10	15	20	
タイプ4 非断熱仕様 流速6[m/s] 温度差小 $\theta_{d=0}=26.6^\circ\text{C}$	中空部空気温度 $\theta_{d=L}$ [°C]	25.23	23.94	22.74	21.61
	室空気温度との差 ($\theta_{d=L}-\theta_R$) [°C]	3.23	1.94	0.74	-0.39
	有効熱量比ETR[%]	70.2	42.2	16.1	-8.48
タイプ5 非断熱仕様 流速3[m/s] 温度差大 $\theta_{d=0}=31.2^\circ\text{C}$	中空部空気温度 $\theta_{d=L}$ [°C]	27.94	25.13	22.72	20.64
	室空気温度との差 ($\theta_{d=L}-\theta_R$) [°C]	5.94	3.13	0.72	-1.36
	有効熱量比ETR[%]	64.6	34.0	7.83	-14.8
タイプ6 断熱仕様 流速3[m/s] 温度差大 $\theta_{d=0}=31.2^\circ\text{C}$	中空部空気温度 $\theta_{d=L}$ [°C]	29.79	28.54	27.41	26.40
	室空気温度との差 ($\theta_{d=L}-\theta_R$) [°C]	7.79	6.54	5.41	4.40
	有効熱量比ETR[%]	84.7	71.1	58.8	47.8

(3) 最上階・冷房時(7日目・空調開始5時間目・室温 $\theta_R=26.0^\circ\text{C}$ ・相当外気温度 71°C)

供給空気入口からの距離 L [m]	5	10	15	20	
タイプ7 非断熱仕様 流速6[m/s] 温度差小 $\theta_{d=0}=22.1^\circ\text{C}$	中空部空気温度 $\theta_{d=L}$ [°C]	23.16	24.14	25.04	25.86
	室空気温度との差 ($\theta_{d=L}-\theta_R$) [°C]	-2.84	-1.86	-0.96	-0.14
	有効熱量比ETR[%]	72.8	47.7	24.6	3.59
タイプ8 非断熱仕様 流速3[m/s] 温度差大 $\theta_{d=0}=18.2^\circ\text{C}$	中空部空気温度 $\theta_{d=L}$ [°C]	20.60	22.67	24.46	25.99
	室空気温度との差 ($\theta_{d=L}-\theta_R$) [°C]	-5.40	-3.33	-1.54	-0.01
	有効熱量比ETR[%]	69.2	42.7	19.7	0.13
タイプ9 断熱仕様 流速3[m/s] 温度差大 $\theta_{d=0}=18.2^\circ\text{C}$	中空部空気温度 $\theta_{d=L}$ [°C]	19.07	19.90	20.68	21.41
	室空気温度との差 ($\theta_{d=L}-\theta_R$) [°C]	-6.93	-6.10	-5.32	-4.59
	有効熱量比ETR[%]	88.9	78.2	68.2	58.8

表5 最上階において室内外表面から流出入する熱流

(1) 暖房時(空調開始5時間後・室温 $\theta_R=22.0^\circ\text{C}$ ・相当外気温度 2.38°C)

タイプ	4	5	6	
外気側	表面平均熱流 [W/m ²]	79.9	65.7	7.53
表面	タイプ5に対する比	1.22	1	0.11
室内側	表面平均熱流 [W/m ²]	10.4	14.2	11.9
表面	タイプ5に対する比	0.73	1	0.84

(2) 冷房時(空調開始5時間後・室温 $\theta_R=26.0^\circ\text{C}$ ・相当外気温度 71°C)

タイプ	7	8	9	
外気側	表面平均熱流 [W/m ²]	325.6	321.0	82.65
表面	タイプ8に対する比	1.01	1	0.26
室内側	表面平均熱流 [W/m ²]	4.60	6.67	20.2
表面	タイプ8に対する比	0.69	1	3.03

65.7~79.9W/m²の約4倍に、またタイプ9では約83W/m²であり、暖房時における7.53W/m²の約11倍へと大幅に増加している。また、室内側表面から流入する熱流がタイプ7, 8で4~6W/m²、タイプ9で約20W/m²であり、タイプ9以外は外気側の値が室内側に比べ、著しく大きい。これは日射量を考慮した相当外気温度(71°C)とスラブの温度(約22.5°C)差の方が、室温(26°C)とスラブの温度差より極端に大きいためと考えられる。このように、最上階における冷房時には、日射による建物外部からの流入熱流の影響が、暖房時の熱流出による影響以上に大きく、スラブの外気側表面を断熱することが不可欠であるといえる。しかし、厚50mmの断熱を施したタイプ9においても、冷房時には大量の流入熱流を防ぎきれているとはいえず、断熱性能が絶対的に不足している。このような場合、更に断熱材厚を増す必要がある。

5. おわりに

ポイドスラブの2次元非定常伝熱解析プログラムを拡張して、ポイドスラブの冷暖房時における伝熱性状を3次元的に取り扱った。その結果、中間階・暖房用

として用いる場合、ボイド表面に厚30mm程度の断熱材を貼布すれば、供給空気の温度低下に対し相当の効果が有り、通常の断熱ダクトよりやや顕熱負荷を割り増しして供給する程度でよいことがわかった。しかし、最上階の場合は、厚50mmの断熱材を建物外側に貼布しても、相当外気温度の影響により、熱流の流入出による熱損失あるいはスラブのコンクリート部分への蓄熱が多く、ボイド表面の断熱も含め、より断熱化を図る必要があることがわかった。

参考文献

- 1) 小原・赤坂・黒木：有限要素法によるボイドスラブの非定常伝熱解析(1)ボイド内部が自然対流の場合について、鹿児島大学工学部研究報告第31号，1989.11, pp.141～150
- 2) 小原・赤坂・黒木：有限要素法によるボイドスラブの非定常伝熱解析(2)ボイド内部が強制対流の場合について、鹿児島大学工学部研究報告第32号，1991.11, pp.155～161
- 3) 小原・赤坂・黒木：有限要素法によるボイドスラブの非定常伝熱解析(その3 中空部熱伝達率設定の影響)，日本建築学会大会学術講演梗概集，1988.10, pp.505～506
- 4) MICRO-PEAK/1987 COGEN-DE 1 利用者マニュアル，日本コージェネレーション研究会，日本空調設備士協会，1988.1, pp.13～28
- 5) 渡辺要編：建築計画原論Ⅱ，丸善，1970.3, p.52
- 6) 日本建築学会編：建築設計資料集成1 環境，丸善，1978.6, p.119
- 7) 空気調和衛生工学会編：空気調和衛生工学便覧Ⅱ 空調設備篇第11版，1987.12, Ⅱ-64