

# 自然換気によるアトリウム内温熱環境制御と空調負荷削減に関する研究

諏訪 好英

## 概要

近年、ラウンジやエントランスホールにアトリウムを持つ建築物がさかんに建設されるようになった。しかし一般に天井高や内部容積の大きなアトリウム空間では空調制御が難しく、また大きな空調消費エネルギーを必要とする。本研究では自然換気の利用によるアトリウム内の温熱制御と空調負荷の削減を志向し、開口部を有するアトリウムに対応した屋内温熱環境予測手法を開発した。また本手法を用いた検討の結果、外部気象条件に合わせた開口の開閉操作により夏期から中間期までの比較的長期間にわたって空調負荷の削減が可能となることが判明した。本報では開発した屋内温熱環境予測手法の概要とこれを用いて実施した空調負荷削減に関する検討の結果を報告する。

## 1. はじめに

都市におけるアメニティ空間として、ラウンジやエントランスホールにアトリウムを有する建築物が近年さかんに建設されるようになった。アトリウム空間では天井高やガラス面の割合が大きいことに起因して屋内の空調制御が難しくなる傾向がある。またアトリウムの多くは膨大な内部空間容積を有しており、大容量の空調設備と大きな運転コストとが必要となる。このためアトリウム空間の温熱環境制御には、屋内居住域での快適性確保とともに空調消費エネルギーの削減が重要な課題となっている。しかし内部容積の大きなアトリウム空間では自然換気の利用により屋内の換気・空調に必要な消費エネルギーを大幅に削減できる可能性もあり、外部風の影響に関する定量的な現象把握が必要と考えられる。

これまでアトリウム内の空調制御法に関しては多くの研究が行われており、屋内温熱環境の設計手法としていわゆるマクロモデルを用いた熱負荷計算手法が提案されている<sup>1)~3)</sup>。しかし従来のモデルではいずれもアトリウム内部をある程度独立した閉鎖空間として扱っており、外部風により駆動される通風・換気効果を考慮することは困難であった。本研究ではマクロモデルをさらに発展させ、外部風による自然換気効果を考慮したアトリウム内温熱環境の簡易予測手法を開発した。本報では、開発した手法の概要と、これを用いて実施したアトリウムの空調負荷削減に関する検討結果を報告する。

## 2. 外部風の影響を考慮したアトリウム内温熱環境予測手法の開発

天井高の大きなアトリウム内では温度分布が成層的となり、上下方向に大きな温度差を生じる。マクロモデルはこの特性を利用し、空間内を層状に分割して各層の流量収支、熱量収支から屋内の上下温度分布を計算するもので、鉛直1次元方向に空間分割能を有する一種の熱回路網的なモデルと言える。この種の手法ではCFD (Computational Fluid Dynamics: 流体の運動量方程式および熱輸送方程式に基づくいわゆる数値解析) のように詳細な気流、温度の3次元分布を扱うことはできないが、大空間構造物の温熱環境として重要な上下温度分布の影響を考慮した空調負荷の予測が可能なこと、年間レベルの長期現象予測が可能なことなど、簡易的な温熱環境予測手法として多くの利点を有している。

以下、開発した簡易予測手法の中で既往の研究成果に基づく日射受熱、熱貫流、壁面相互輻射、壁面流、空調気流などのモデル化については説明を省略し、本手法の特徴である外部風の影響に関する部分についてのみ示すこととする。

### 2.1 外気流入特性のモデル化

外部風による自然換気効果を考慮した温熱環境予測手法を開発するため、CFD (k-εモデルに基づく3次元乱流解析) による予備計算を実施し、開口から流入する気流の特性をモデル化した。その結果、流入気流の特性は以下に示す三つの要素により評価できることがわかった。それぞれの要素についてCFD解析結果をもとにモデル化した結果を示す。

**2.1.1 外気流入量** アトリウムに設置された各開口部での通風量は、流入、流出側通風量の総和が等しくなることを利用して次式から求められる。

$$\sum_{i=1}^N Q_{0i} = \frac{2g}{\gamma} \sum_{i=1}^N \alpha_i A_i \frac{|\Delta P_i|}{\sqrt{\Delta P_i}} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで開口前後の圧力差  $\Delta p$  には、あらかじめ開口なしの条件で求めた風圧係数を用いる。この方法により予測した外気流入量は、Fig. 1に示すように開口を設けたモデルを用いて別途実施したCFD解析の結果と任意の風向、風速条件についてよく一致することがわかった。

**2.1.2 流入気流の鉛直方向角度** CFD解析の結果、外気流入角度は建物高さに対する開口設置高さの比  $r_H$  により一意的に決定されることがわかった。Fig. 2は建物高さおよび流出側開口条件を変えてCFD解析した結果である。いずれの場合も  $r_H$  に対する流入角度の変化は同一の曲線に一致している。二次曲線と仮定して最小2乗近似した結果次式が得られた。

$$\begin{aligned} \theta_{in} &= 14.984 - \left\{ (0.897 - r_H) / 0.117 \times 10^{-2} \right\}^{1/2} && \dots \text{when } r_H < 0.897 \\ \theta_{in} &= 14.984 && \dots \text{when } r_H \geq 0.897 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2)$$

**2.1.3 屋内流入後の気流のふるまい** 開口面積が開口を設置した壁面の面積に比べて十分小さいとき、屋内流入後の気流性状は軸対称噴流にきわめて近いことがわかった。CFD解析により求めた流入気流の減衰特性、速度プロファイルを噴流理論と比較した結果、両者はよく一致した。またCFD解析結果からフィッティングした流入気流のスロー定数は  $K_p = 5.08$  であり、噴流理論で長方形吹き出し口に用いる  $K_p = 5.0$  とほぼ一致した。このことから屋内流入後の気流の評価には次のような噴流モデルを用いることとした。

すなわち、

$$\begin{aligned} y &= x \tan \theta_{in} + Ar \left\{ \frac{x}{D_0 \cos \theta_{in}} \right\}^2 D_0 \\ &\times \left\{ 0.51 C_s \left( \frac{x}{D_0 \cos \theta_{in}} \right) + 0.11 \right\} \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

同様のモデルは既往のマクロモデルにおいて空調噴流の評価に用いられている。

**2.2 参照用データの作成**

2.1節の各モデルでは外部風条件ごとのアトリウム外表面の風圧係数分布などが必要となる。本研究では想定される条件ごとにCFD解析を実施し、その結果をデータバッファに保管してマクロモデルでの計算の際にこれを参照することとした。参照用データとして集計したデータの内容と想定した外部風条件をTable 1に示す。なお同時に集計した外表面風速は建築物外表面における熱伝達係数算出のためのものである。

**2.3 外部風の影響を考慮したマクロモデルの構築**

前節までの結果をもとに外部風の影響を考慮したマクロモデルを構築し、アトリウム内温熱環境の簡易予測手法の形にまとめた。開発した手法で想定した環境要因およびこれらに関係付ける熱量、流量の平衡式をFig. 3お

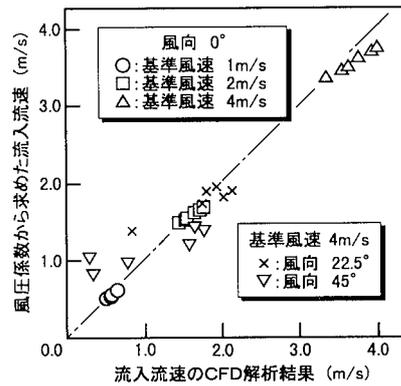
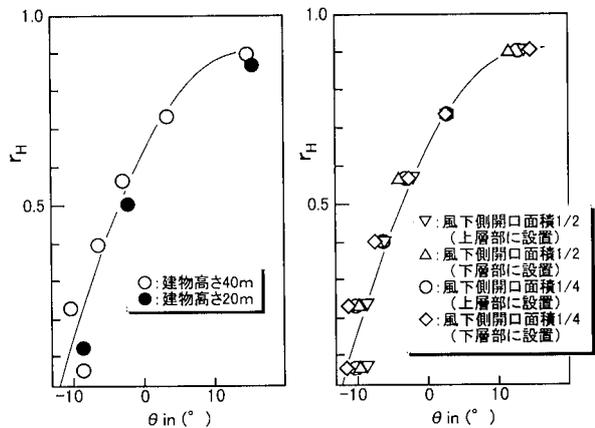


Fig. 1 風圧係数から求めた外気流入量とCFD解析結果との比較  
Comparison of Inlet Airflow Volume Obtained from Pressure Coefficient Model and CFD Analysis



(a) 建物高さが異なる場合 (b) 開口条件が異なる場合

Fig. 2 さまざまな条件における流入気流角度  
Inlet Airflow Angle at Several Conditions

およびTable 2にまとめて示す。なお開発した簡易予測手法では1時間単位の時間積分を行う形とし、外部風速、外気温度、日射量などの外部気象条件およびデータバッファから参照する値などにはすべて1時間単位の平均値を用いた。

空調時間帯における空調制御方法に関してはVAVおよびCAV制御を想定し、空調対象領域の温度が設定温度範囲となるまで反復計算を行ってその時刻における吹き出し流量、吹き出し温度を決定することとした。空調負荷はこのとき供給した熱量の総和により評価される。

**3. 開発した手法による試行計算と検証**

開発した手法によりアトリウム内温熱環境の予測を行い、同じ条件について実施したCFD解析結果と比較した<sup>4)</sup>。対象としたアトリウムの構造をFig. 4に、構成材料その他の諸元をTable 3にそれぞれ示す。アトリウムの天井面、壁面はすべてガラスで構成されているものとし、第5層の東西壁面には各々5箇所ずつの開口を想定した。

Table 1 作成した参照用データの内容  
Contents of Reference Data

データの内容	設定条件
[風圧係数] 集計箇所：各外壁面 分解能：1m×1m 格子点	風向角度 0°, 22.5°, 45°
[外気の流入角度] 集計箇所：風上側18箇所	風向角度 0°, 22.5°, 45°
[外表面の風速] 集計箇所：各外壁面 分解能：1m×1m 格子点	風向角度 0°, 22.5°, 45° 風速 2m/s, 4m/s, 6m/s

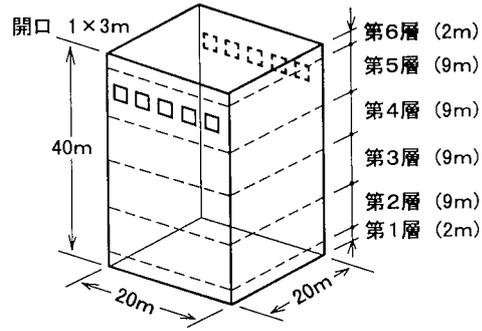


Fig. 4 計算対象としたアトリウムのモデル  
Calculated Atrium Model

Table 2 開発した手法に用いた平衡式と環境要因  
Equations of Volume and Heat Balance and Considered Factors

平衡式	想定した環境要因
<p>[層間熱移動の平衡]</p> $M_j \frac{dT_j}{dt} = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{n=1}^{N_k} r_{ijn} A_{wn} \alpha_{cn} (T_{si} - T_i) + \sum_{i=j-1, i \neq j}^{j+1} C_{pr} Q_{r_{ji}} (T_i - T_j) + \sum_{i=j-1, i \neq j}^{j+1} C_{b_{ji}} A_j (T_i - T_j) + H_j + H_{jET}^C + H_{jET}^N$ $H_{jET}^C = \sum_{k=1}^j C_{pr} Q_{jOUT_k}^C (T_k - T_j) + C_{pr} Q_{jET}^C (T_{jET}^C - T_j)$ $H_{jET}^N = \sum_{k=1}^j C_{pr} Q_{jOUT_k}^N (T_k - T_j) + C_{pr} Q_0 (T_0 - T_j)$ <p>(4)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>壁面流による熱移動</li> <li>層間空気移動に伴う熱移動</li> <li>乱流拡散による熱移動</li> <li>内部発熱</li> <li>空調噴流による熱供給</li> <li>外気流入による熱供給</li> </ul>
<p>[空気移動の平衡]</p> $\sum_{k=1}^{N_k} (Q_{u_{in,k}} - Q_{w_{out,k}}) + \sum_{i=j-1, i \neq j}^{j+1} Q_{r_{ji}} + Q_{jET}^C + Q_0 - (Q_{jOUT}^C + Q_{jOUT}^N + Q_{jET}^C + Q_{jOUT}^N) = 0$ <p>(5)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>壁面流による空気移動</li> <li>空調噴流に伴う空気移動</li> <li>外気流入に伴う空気移動</li> <li>各要因に伴う誘引</li> </ul>
<p>[壁体の熱平衡]</p> $\alpha_c (T_i - T_{si}) + K_i (T_{ref} - T_{si}) + \dot{H} + Tm^3 \sigma \epsilon_r \sum_{j=1, j \neq i}^{N_k+2} B_{ij} (T_{sj} - T_{si}) = 0$ <p>(6)</p> <p>ガラスの内表面: <math>T_{ref} = T_0, \dot{H} = JA_s</math> 床表面: <math>T_{ref} = T_i, \dot{H} = \tau JA_s</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>壁体内部の熱伝導</li> <li>壁表面での対流熱伝達</li> <li>壁間の相互放射</li> <li>日射、照明による長波長成分の吸・放熱</li> </ul>

Table 3 想定した建築物概要  
Outline of Calculated Atrium Model

屋内寸法	20m(W) × 20m(L) × 40m(H)				
構成材料	側面:	熱線反射ガラス (6mm)			
	天井面:	熱線反射ガラス (6mm)			
		熱伝導率 kcal/mh °C	容量比熱 kcal/m³°C	透過率	反射率
		0.67	483.0	0.60	0.30
	床面:	構成材料	熱伝導率 kcal/mh °C	容量比熱 kcal/m³°C	
	大理石 (10mm)	1.35	561.0		
	モルタル (20mm)	1.12	382.15		
	RC (150mm)	1.20	461.93		
	ポリスチレン (100mm)	0.03	7.17		
開口部	形状:	矩形単純開口			
	寸法:	1m(W) × 3m(H)			
	設置位置:	風上側, 風下側に1列5箇所			
空調設定	空調対象:	第1層 (居住域) の温度			
	空調時間:	8時~19時, 日曜, 休日も運転			
	制御方法:	冷房, 暖房とも CAV 制御			
	吹き出し口:	スロット型 相当径 250mm スロー一定数 5.6			
	吹き出し, 吸い込み位置:	いずれも第1層			

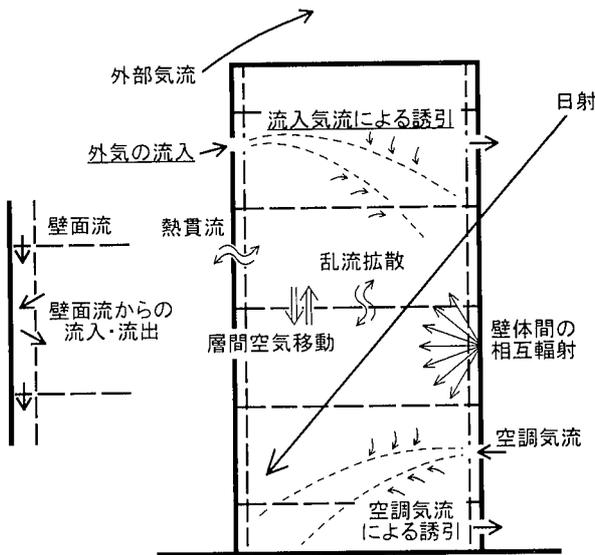


Fig. 3 開発した手法で想定したマクロモデル  
Macro Model Supposed in Developed Calculation Model

Fig. 5は冷房時および暖房時についての計算結果をCFD解析結果と比較したものである。外部気象条件として冷房時には夏期(8月), 暖房時には冬期(2月)晴天日の条件をそれぞれ想定している。冷房時には成層的な温度分布が形成されること, 暖房時には上昇流, 下降流による熱移動のため屋内温度が均一化されることなど両者はいずれの場合も定量的に一致しており, 開発した手法により十分な精度での現象予測が可能であると判断した。

Fig. 6は中間期(4月)および夏期(8月)におけるアトリウム内各層温度の日変化を開口あり/なしの場合について比較した結果である。開口を設けて外気を導入した場合にはいずれも屋内上部に形成される熱だまりが除去されて上層部の温度が低下しており, 外気導入による上下温度ばらつきや冷房負荷の低減が期待できる。

#### 4. 外部風利用による空調負荷削減の可能性

##### 4.1 外部風を利用したアトリウムの温熱環境特性

開発した手法を用いて自然換気によるアトリウム内温熱環境制御と空調負荷削減の可能性を検討した<sup>5)</sup>。Fig. 7はFig. 3と同様のアトリウムについて開口の設置高さを変更した場合の屋内上下温度分布である。いずれの場合

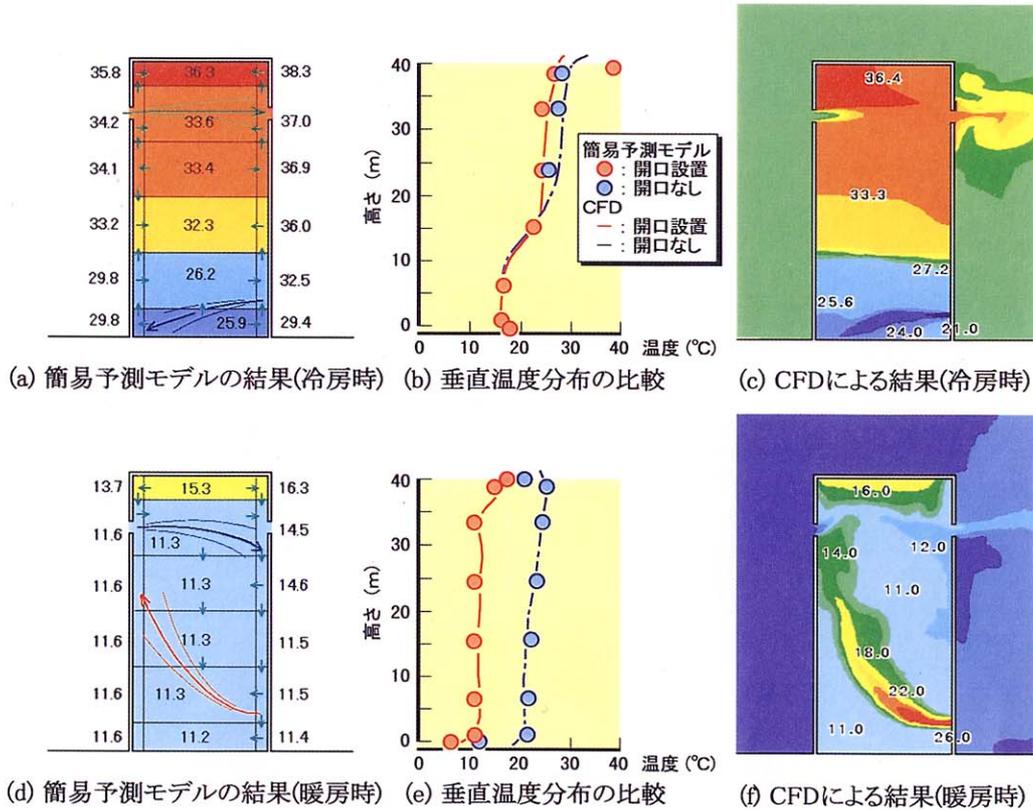


Fig. 5 冷房時, 暖房時温度分布の予測結果とCFD解析結果  
 Predicted Thermal Distribution during  
 Cooling and Heating Conditions

も熱だまり解消の効果が認められるが、開口設置位置が上層にあるほどその効果は大きくなるのがわかる。また開口を最下層に設置した場合には居住域温度が上昇している。これは高い温度の外気が居住域に直接流入するためと考えられ、開口設置位置は居住域との関係を考慮して設定すべきことを示唆するものと考えられる。なおFig. 7では風上側、風下側開口設置高さをいずれも同じ高さとしたが、双方の設置高さが異なる場合には相対的に高い側の特性が支配的となることが同様の予測計算により明らかとなった。

開口を設けた場合の冷房負荷削減効果は外気風速によっても変化すると考えられる。Fig. 8は風速条件を変化させた場合の冷房負荷を換気回数で整理した結果である。冷房負荷は換気回数の増加に伴い単調に減少しており、換気回数が2~3回/hを越えるとほぼ一定値となるのがわかった。Fig. 8の結果から、外部風速がある程度以上の場合には自然換気による空調負荷削減効果が十分見込めると予測できる。

#### 4.2 環境条件にあわせた開口開閉操作の検討

4.1節までの検討により、アトリウムに開口を設置して外気を導入すると冷房負荷の削減が可能となることが確認できた。そこで年間を通じてどの時期にどの程度の空調負荷の削減効果が得られるのか、また気象条件に合

わせて開口の開閉操作を行うとすればどのような制御を行えばよいのかを考察した。Fig. 9は外気を導入した場合/しない場合の空調負荷を年間にわたり比較した結果である。外気の導入により夏期の冷房負荷を削減できるが、冬期には逆に暖房負荷は大幅に増大している。無条件に開口を開放できるのは7月、8月の限られた期間であるが、中間期についても外部気象条件とのかねあいを考慮して外気導入を行えば十分に空調消費エネルギーを削減できるものと考えられる。

Fig. 9の結果をもとに、外気導入による空調負荷削減が可能な条件を検討した。空調負荷の特性が外気温度に対して強い相関を示すことは容易に予測できるが、日射量に関しては天候による影響が大きいためそのままの形でデータを集計すると明確な関係がつかみにくい。ここでは拡張グリデーに用いられる考え方を応用し、対象建築物外表面への総合的な供給熱量として日射量を評価することとした。すなわち日射による供給熱量を温度の単位に換算し、次式のような効果温度 $\theta$ を定義する。

$$\left. \begin{aligned} \theta &= T_0 + \eta J / K \\ \eta &= \tau + A s \alpha_{in} / (\alpha_{in} + \alpha_{out}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

外気温度および効果温度をパラメータとして整理すると、これらが特定の値となった時点を超えて外気を導入した場合、しない場合の空調負荷の違いが増大することがわかった。このときの外気温度、効果温度をしきい値と

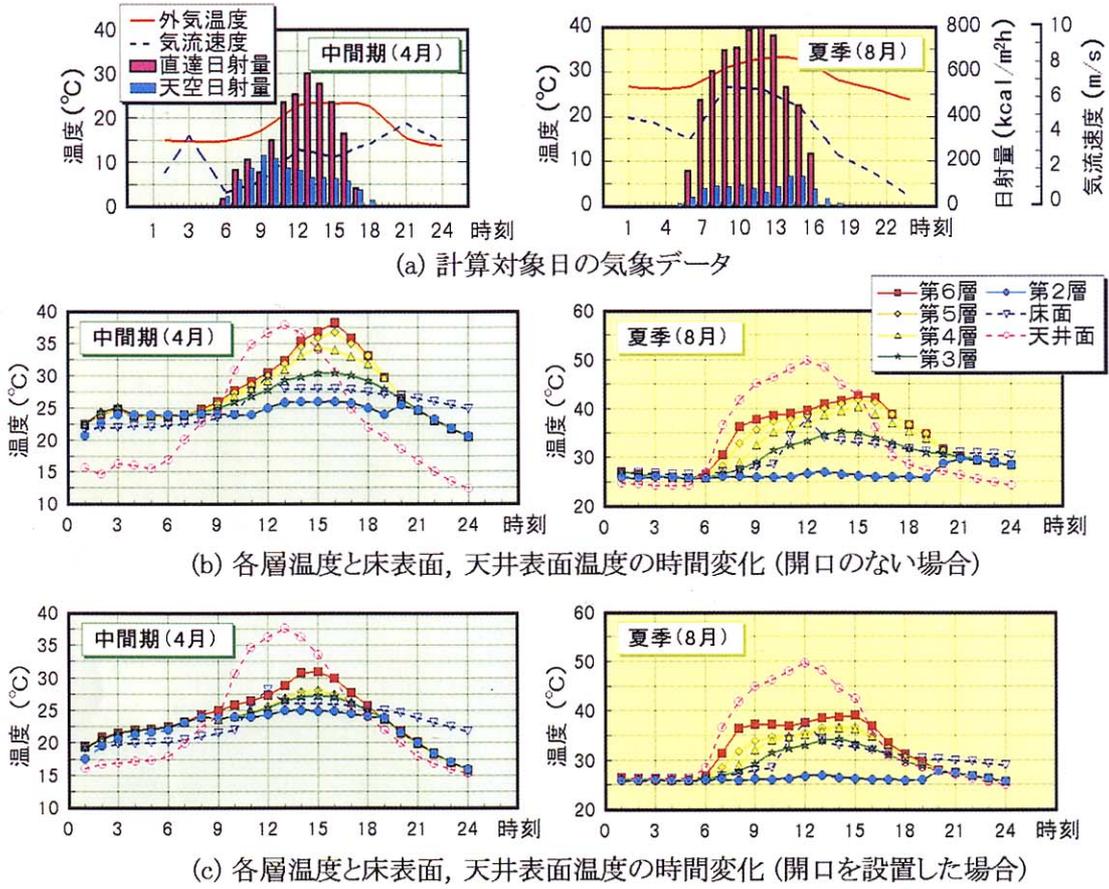


Fig. 6 夏期および中間期のアトリウム内各層温度の日変化  
Time Dependent Change of Indoor Thermal Distribution  
during a Day in Summer and Spring

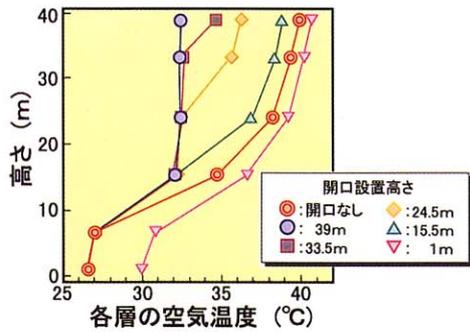


Fig. 7 開口設置高さによる温度分布の違い  
Difference of Indoor Thermal Distribution  
when Openings were Arranged  
at Different Height

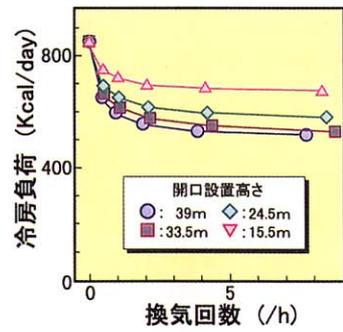


Fig. 8 換気回数と冷房負荷との関係  
Relation between Air-Exchange Rate  
and Cooling Load

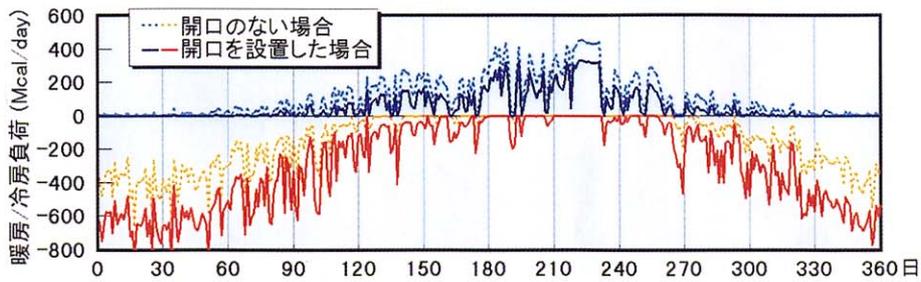


Fig. 9 外気を導入した場合/しない場合の年間空調負荷の推移  
Yearly Change of Air-Conditioning Load when Outside  
Air was Introduced or Not

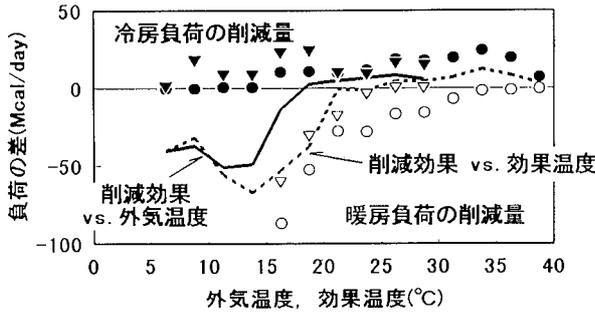


Fig. 10 外気温度、効果温度と空調負荷削減効果との関係  
Relation between Outside Air Temp., Effective Temp. and Air-Conditioning Load

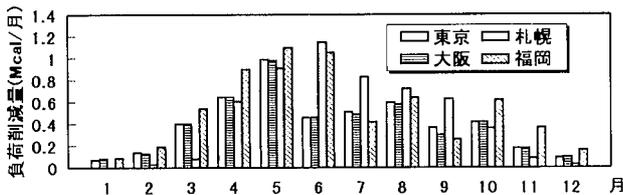


Fig. 11 開口の開閉制御による空調負荷削減効果  
Reduced Air-Conditioning Load by Open/Close Control of Openings

して開口の開閉操作を行えば、空調負荷を削減することが可能となる。そこで各時刻ごとに外気を導入した場合、しない場合およびこれに冷暖房を組み合わせた場合の負荷を計算して比較し、いずれの場合が最も有利となるかを検討した。Fig. 10はアトリウムが東京に建設された場合を想定し、冷房時、暖房時のCOPの比を2:3と仮定して評価した空調負荷の削減効率である。想定したアトリウムでは外気温度で18℃以上、効果温度で24℃以上の場合に負荷の削減効率が正值を示しており、気象条件がこの条件を満足した場合に開口を開けて外気を導入すると、総合的な空調負荷を削減できると考えられる。

### 4.3 選択的な外気導入による空調負荷の削減効果

東京、大阪、札幌、福岡の4地域を想定し、外部気象条件に合わせて開口を開閉制御した場合の空調負荷削減量を比較した。Fig. 11は年間にわたっての計算結果を月ごとに集計し、期間空調負荷削減量の推移として整理したものである。東京、大阪、福岡では4~5月および10月、札幌では4~9月における空調負荷の削減効果が大きくなっており、開口の開閉制御による効果は夏期から中間期までの比較的長期にわたって期待できることがわかる。

## 5. まとめ

開口を有するアトリウムに対応した屋内温熱環境の簡易予測手法を開発し、自然換気による屋内温熱環境制御と空調負荷削減の可能性を検討した。今後、ダブルスキン構造と併用した場合の効果など検討の幅を広げ、アトリウムをはじめとする大空間構造物の省エネルギー設計に役立てていきたいと考えている。

## 記号

$A$	: 開口面積	$(m^2)$
$A_f$	: 床面積	$(m^2)$
$A_s$	: 日射吸収率	
$A_{w_n}$	: $n$ 壁の面積	$(m^2)$
$B_{ij}$	: $ij$ 面間の Gebhart の吸収係数	
$C_{b_{ji}}$	: $ij$ 層間の乱流熱移動の係数	$(W/m^2 K)$
$C_s$	: 展開係数 $[= 1/(2K_p)]$	
$C_{pr}$	: 空気容積比熱	$(J/m^3 K)$
$D_0$	: 開口の相当直径	$(m)$
$g$	: 重力加速度	$(m/s^2)$
$H_j$	: $j$ 層の内部発熱	$(W)$
$H_{JET}^{AC}$	: 空調噴流から供給される熱量	$(W)$
$H_{JET}^N$	: 外気流入により供給される熱量	$(W)$
$J$	: 日射量	$(W/m^2)$
$K$	: 熱貫流率	$(W/m^2 K)$
$K_p$	: スロー一定数	
$M_j$	: $j$ 層の空間熱容量	$(W)$
$N$	: 開口の総数	
$N_b$	: 層の分割数	
$N_k$	: 壁面の総数	
$Q_0$	: 外気流入量	$(m^3/s)$
$Q_{JET}^{AC}$	: 空調吹き出し流量	$(m^3/s)$
$Q_{JOUT}^{AC}$	: 空調噴流による誘引量	$(m^3/s)$
$Q_{JOUT}^N$	: 外気流入に伴う誘引量	$(m^3/s)$
$Q_{OUT}^N$	: 開口からの流出流量	$(m^3/s)$
$Q_{RET}^{AC}$	: 空調レターン吸い込み流量	$(m^3/s)$
$Q_{T_{ji}}$	: $i$ 層から $j$ 層に流入する流量	$(m^3/s)$
$Q_{win_{ji}}$	: $i$ 壁側から $j$ 層に流入する壁面流	$(m^3/s)$
$Q_{wout_{ji}}$	: $j$ 層から $i$ 壁側で流出する壁面流	$(m^3/s)$
$r_H$	: 建物高さに対する開口高さの比	
$r_{ijn}$	: $n$ 壁側の $ij$ 層間熱取得配分係数	
$T_0$	: 外気温度	$(K)$
$T_j$	: $j$ 層空気温度	$(K)$
$T_m$	: 300	$(K)$
$T_{s_n}$	: $n$ 壁の内壁表面温度	$(K)$
$x$	: 開口からの距離	$(m)$
$y$	: 距離 $x$ における噴流中心軸のずれ量	$(m)$
$\alpha$	: 流量係数	
$\alpha_c$	: 対流熱伝達率	$(W/m^2 K)$
$\alpha_{in}$	: 内壁側総合熱伝達率	$(W/m^2 K)$
$\alpha_{out}$	: 外壁側総合熱伝達率	$(W/m^2 K)$
$\Delta P$	: 開口前後の圧力差	$(Pa)$
$\gamma$	: 空気の比重	$(N/m^3)$
$\theta$	: 日射を含めた効果温度	$(K)$
$\theta_{in}$	: 流入気流の鉛直方向角度	$(^\circ)$
$\tau$	: 日射透過率	

## 参考文献

- 1) 宮川：空気調和衛生工学会論文集, 13, p. 1~11, (1990)
- 2) 戸河里, 他：日本建築学会計画系論文報告集, 427, p. 9~19, (1991).
- 3) 石田, 宇田川：空気調和衛生工学会講演論文集, p. 77~78, (1992)
- 4) 諏訪, 他：日本建築学会計画系論文報告集, 486, p. 17~26, (1996)
- 5) 諏訪, 他：日本建築学会計画系論文報告集, 491, p. 41~48, (1997)