開口部を有するアトリウム空間の屋内温熱環境特性と
空調負荷に関する研究STUDIES ON CHARACTERISTICS OF INDOOR THERMAL ENVIRONMENT
AND AIR-CONDITIONING LOAD IN ATRIUMS WITH OPENINGS諏訪好英*, 藤井修二**, 湯浅和博***, 佐藤陽子****
Yoshihide SUWA, Shuji FUJII, Kazuhiro YUASA and Yoko SATO

Characteristics of indoor thermal environment and air-conditioning load in atriums with openings were studied using a simplified prediction model. Influence of draft airflow through openings was modeled using the result of CFD analysis, and the model was improved to investigate indoor thermal environment with natural ventilation.

Difference of thermal distribution and air-conditioning load were studied under several conditions, and the most effective condition for energy conservation was investigated. Finally, a periodic control method of openings was suggested. In this method, outside air will be adaptively introduced according to the outside temperature and intensity of solar irradiance. As the result of thermal load prediction through a year, it was found that this method is effective to reduce thermal load for a long period during spring to autumn, and more than 20 % of yearly air-conditioning energy will be reduced.

Keywords : atrium, indoor thermal environments, natural ventilation, air - conditioning load, simplified prediction model
アトリウム, 屋内温熱環境, 自然換気, 空調負荷, 簡易予測モデル

1. 緒 言

近年, 大型建築物のシンボルとして, また都市空間へのアメニティの提供を目的として各種のアトリウムが建設されるようになった。これらアトリウム空間の多くはガラス面を多用した大空間構造物として構成されており, 太陽光の取り込みと視覚効果とによって利用者に屋外環境的な開放感を与えている。しかしガラス面の割合や天井高が大きなアトリウム空間では一般に温度のばらつきや空調負荷が大きくなる傾向がある¹⁾。このためアトリウム空間の温熱環境制御には多くの課題が残されている。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, 大容量の空調設備およびその運転コストが必要となる。アトリウム空間の温熱環境制御には空調消費エネルギーの削減も重要な課題となっている。

これらの問題を改善するひとつの方法として自然通風の積極的な利用が考えられる。一般に天井高の大きな吹き抜け空間では成層的な垂直温度分布が形成されるため, その上層部に高温の空気による熱だまりを生じる。アトリウム空間の利用方法として上層部分を利用する場合, 熱だまりの存在は直接的な問題となるが, 低層部分のみを居住域とする場合にも上下温度差の発生は空間内の温熱環境制御に少なからぬ障害をおよぼす。上層部分に適当な開口を設けて自然通風を導入すると熱だまりの除去が可能となるとともに, 外部気象条件との関係を十分考慮して開口

の開閉操作を行えば外気冷房的な効果が得られ, 空調消費エネルギーを削減することも可能と考えられる。本研究では大空間の熱負荷計算手法として用いられている温熱環境予測モデルを応用し, 自然通風の利用による温熱環境制御と空調消費エネルギー削減の可能性を考察した。

2. 外部気流の影響を考慮した温熱環境予測モデル

2.1 既往の研究との関係

大空間構造物の温熱環境予測手法についてはこれまで多くの研究が行われており, 流体の数値解析手法 (CFD : Computational Fluid Dynamics) を応用したもの²⁾と, いわゆるマクロモデルを用いた現象予測手法とが試みられている。先述したように天井高の大きなアトリウム空間では温度成層が発達しやすく, 垂直方向にのみ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, 空間内を垂直方向に分割して各層の流量収支, 熱量収支から屋内の垂直温度分布を計算するもので, 垂直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。マクロモデルではCFD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垂直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

* (株)大林組技術研究所数値解析研究室 工博

** 東京工業大学大学院情報理工学研究科 教授・工博

*** 東京工業大学建築学科 助手・工博

**** (株)東京ガス商品技術開発部

Computational Eng. Dept., Tech. Research Inst., Obayashi Corp., Dr. Eng.
Prof., Graduate School of Information and Sci. and Eng., Tokyo Inst. of
Technology, Dr. Eng.
Research Assoc., Dept. of Arch. and Building Eng., Faculty of Eng., Tokyo Inst. of
Technology, Dr. Eng.
Residential Energy Systems R&D Center, Tokyo Gas Co., Ltd.

図1 アトリウム内温熱環境予測モデルの概要

ている。

マクロモデルによる屋内上下温度分布予測手法の研究は宮川ら³⁾、⁴⁾、伊藤ら⁵⁾に端を発するものと考えられるが、海外でも同時期にGautierら⁶⁾、Bouiaら⁷⁾による研究が行われている。なお初期のモデルでは層間熱移動の割合などを経験定数として扱っていたため、対象に合わせた定数の割り出しが必要であったが、後述するように戸河里ら⁸⁾～¹⁰⁾、石田ら¹¹⁾、¹²⁾以降のモデルでは予備実験を必要としない汎用的な手法として大系化されつつある。

また従来の手法ではいずれも屋内を独立した閉鎖空間として扱っており、外部環境との空気のやりとりに伴う熱量授受を考慮することは困難であった^[註1]。本研究で対象とする自然換気効果については、重力換気の応用と外部気流による自然通風の応用とが考えられるが、前者についてはManzoni and Rongère¹³⁾が、後者については筆者らがマクロモデルへの組み込みを試み、既報¹⁴⁾(以下前報と呼ぶ)においてCFDとの比較により冷房時、暖房時のアトリウム内垂直温度分布とその日変化を定量的に予測できることを示している。本報では刻々変化する外部条件を気象データから読み込みながら屋内温熱環境と空調負荷の予測を行い、その特性を検討するため、前報で報告したモデルにいくつかの改良を試みている。

2.2 アトリウム内温熱環境のモデル化の方針

マクロモデルでは屋内を図1に示すような層に分割し、層間の熱移動に関する平衡式から各時刻における屋内の垂直温度分布を動的に計算する。なお図中に下線付きで示した部分が前報において自然換気効果を考慮するため追加されたモデルである。先述したように戸河里ら以降のモデルでは壁面流や空調気流による層間の空気移動とこれに伴う熱移動とを同時に扱う方法が用いられるようになり、外部条件の変化や屋内の分割層の設定などに対して十分な任意性が得られるようになった。このような方針に基づき現象予測した結果が実験的に求めた熱量配分係数を比較的精度よく再現できることは、既往の研究¹¹⁾においてすでに確認されている。前報で構築したモデルは、戸河里ら以降のモデル化の方針に従い、これに開口部から流入する外気の流れを非等温噴流モデルとして組み込んだものである。

表1に本モデルで用いた基礎式と各式で考慮した環境要因とをまとめて示す。表中の各式は各層の熱移動量、空気移動量に関する平衡式および壁体温度に関する熱平衡式をそれぞれ表している。屋内各層の空気移動が壁面流、空調気流および開口からの外気の流入により駆動されるも

表1 予測モデルで用いた熱量、流量の平衡式

平衡式	想定した環境要因
<p>[層間熱移動の平衡]</p> $M_j \frac{dT_j}{dt} = \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} r_{ijn} A w_n \alpha_{cn} (T_{si} - T_i) + \sum_{i=j-1, i \neq j}^{j+1} C_{pr} Q_{rji} (T_i - T_j) + \sum_{i=j-1, i \neq j}^{j+1} C_{bj} A_j (T_i - T_j) + H_j + H_{JET}^{AC} + H_{JET}^N \quad (1)$ $H_{JET}^{AC} = \sum_{k=1}^j C_{pr} Q_{JOUT_k}^{AC} (T_k - T_j) + C_{pr} Q_{JET}^{AC} (T_{JET}^{AC} - T_j)$ $H_{JET}^N = \sum_{k=1}^j C_{pr} Q_{JOUT_k}^N (T_k - T_j) + C_{pr} Q_0 (T_0 - T_j)$	<ul style="list-style-type: none"> 壁面流による熱移動 層間空気移動に伴う熱移動 乱流拡散による熱移動 内部発熱 空調噴流による熱供給 外気流入による熱供給
<p>[空気移動の平衡]</p> $\sum_{k=1}^{N_k} (Q_{win,k} - Q_{wout,k}) + \sum_{i=j-1, i \neq j}^{j+1} Q_{rji} + Q_{JET}^{AC} + Q_0 - (Q_{JOUT}^{AC} + Q_{JOUT}^N + Q_{RET}^{AC} + Q_{OUT}^N) = 0 \quad (2)$	<ul style="list-style-type: none"> 壁面流による空気移動 空調噴流に伴う空気移動 外気流入に伴う空気移動 各要因に伴う誘引
<p>[壁体の熱平衡]</p> $\alpha_{ci} (T_i - T_{si}) + K_i (T_{ref} - T_{si}) + \dot{H} + T m^3 \sigma \epsilon_{ci} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_k+2} B_{ij} (T_{sj} - T_{si}) = 0 \quad (3)$ <p>ガラスの内表面: $T_{ref} = T_0, \dot{H} = J A_s$ 床表面: $T_{ref} = T_i', \dot{H} = \tau J A_s$</p>	<ul style="list-style-type: none"> 壁体内部の熱伝導 壁表面での対流熱伝達 壁間の相互放射 日射、照明による長波長成分の吸・放熱

のと仮定すると、これらに伴う各層間の空気移動量を(2)式から求めることができる。また空調吹き出し、外気流入および内部発熱により供給される熱量と乱流拡散に伴う層間熱移動とを考慮すると、屋内各層の温度分布が(1)式により求められる。(1)式、(2)式の計算で必要となる内壁表面温度は(3)式から算出する。本研究では(1)～(3)式を順次反復計算することにより、それぞれの相互作用を含めた現象予測を行った。

なお本手法では乱流による熱拡散効果を計算する際に、唯一の経験定数として Cb 値を用いる。 Cb 値については、これを一定としても十分現象を再現できることが既往の研究において示されており、本研究でも戸河里らの例¹⁵⁾に従い $Cb=2.326W/m^2k(2.0kcal/m^2h)$ とした。また冬季には絵内ら¹⁶⁾が指摘するように上層温度が下層温度よりも低くなる逆転現象の発生が予測されるため、このような場合についてのみ $Cb=\infty$ として上下層の熱拡散を促進させる方法を採用した。以下、本報で用いた予測モデルに関して前報からの変更点を中心に細述する。ただし前報および参考文献においてすでに論じられている部分については再掲となるが、モデル化の流れを把握できるようこれらについても簡単に示すこととする。

2.3 各種環境要因の計算方法

日射、熱質流や壁面流などの要因は(1)～(3)式右辺の各項として評価される。外気の流入を除く要因のモデル化はすでに既往の研究で検討されており、本研究で用いた方法も基本的にはこれらを基礎として構成されている。以下、代表的な環境要因について本報で用いた計算方法を以下に示す。

[壁面流と空調気流のモデル化]

壁面流のモデル化は基本的に戸河里らが提案した方法と同様である^[註2]。着目する層と壁面との温度差から上昇流、下降流の場合分けを行い、着目層から各層への熱移動に関する影響係数を順次計算していく。

空調気流のモデル化にはいくつかの方法が検討されているが、ここで

は石田らと同様の非等温噴流モデルの経験式^[注3]を用いた。これにより気流が各層界面を機切る際の誘引量計算と供給熱量の到達層判定を噴流軌跡に沿って順次行うことが可能である。

[内表面温度の計算]

ガラス面、床面などの内表面温度の計算には熱伝達、熱貫流および壁体間の相互放射を考慮する。前報では相互放射の計算に形態係数法を用いたが、ここでは Gebhart の吸収係数法^{[17][注4]}を採用した。この方法によればガラス面を含めた内表面温度は (3) 式に示したように統一的に扱え、また日射吸収率 A_s の導入によりサッシ枠により遮蔽される日射成分を吸熱成分として扱うことが可能となる^[18]。

[日射受熱量の計算]

日射受熱量の計算も基本的に前報で採用した方法^[注5]と同じである。各面における日射投影面積を透過面ごとに幾何学的に計算し、各面での入射角度と透過率を考慮して受照面積比で重み平均した値として日射受照量を計算する。ただし本研究ではサッシの枠による日射入射量の損失分を見込み、透過成分について損失分差し引いた値を、ガラス面での日射吸収率について損失分割り増した値をそれぞれ用いることとした。

2.4 開口からの流入気流のモデル化

前報では流入気流による影響についてモデル化の方針を検討した。以下前報からの変更点を中心に示し、重複する部分については考え方のみ簡単に示すこととする。まず開口から流入する外気の影響は次の3つの要素によりモデル化できるものとする。すなわち、

- ・外気の流入流量
- ・開口部での外気の流入角度
- ・屋内に流入した後の気流の広がり角度と主流の軌跡

以下、それぞれの要因に関して本研究で用いた計算方法を示す。

[外気流入量の算出]

開口部での外気流入量は、建築物外壁表面における圧力係数の分布を用いて次式により算出する。すなわち、

$$\sum_{i=1}^N Q_{0i} = \frac{2g}{\gamma} \sum_{i=1}^N \alpha_i A_i \frac{|\Delta P_i|}{\sqrt{\Delta P_i}} = 0 \quad (4)$$

この方法による通風量予測の妥当性については既に前報で議論している。なお外壁表面における各部風圧係数は、あらかじめ CFD により計算して結果をデータバッファに保管し、開口設置位置に合わせて線形補間して用いる。

[開口部における外気の流入角度]

前報において外気の流入角度は開口の設置位置により一意に定まるものと仮定し、開口設置高さの関数として近似する方法を用いた。本報での現象予測には比較的長期の熱負荷計算を想定しており、各時刻における風向、風速条件は大きく変化する。ここでは風向、風速条件ごとにあらかじめ集計した流入角度のデータを風圧係数の場合と同様のバッファに保管し、各時刻の条件ごとにその値を参照することとした。なお想定した開口位置がバッファ内の定義点と一致しない場合には、風圧係数の場合と同様に線形補間した値を使用する。

[屋内流入後の外気の流れ]

屋内流入後の流れは空調気流と同様の非等温噴流として近似^[注6]、外気の到達層および流入気流に伴う各層界面での誘引流量を空調噴流の場合と同様にして順次計算する。このとき非等温噴流モデルの吹き出し角度は外気流入角度とする。

2.5 参照用データの作成

各時刻における外部気流状況に合わせて 2.4 節に示した 3 つの要素を計算するためには、風圧係数、外気流入角度などの分布に関する参照用データが必要となる。このため、想定される外部気流の風向、風速条件について CFD による建築物周辺気流の解析を実施し、現象予測に必要なデータをあらかじめテーブル化してデータバッファに保管した。

CFD による建築物周辺気流解析の概要と集計したデータ内容を表 2 および表 3 に、また解析対象とした建築物形状を図 2 にそれぞれ示す。当然ながらここで解析対象とした建築物は、後述する屋内環境解析の対象建築物と同様の外部形状としている。解析領域全体の大きさは主流方向、スパン方向に建築物一辺の 4 倍、鉛直方向に対象建築物高さの 2 倍とし、流入境界での風速および乱流統計諸量のプロファイルの設定は文献^[19]に準じた。ここでは外部気流の風向、風速条件を表 3 の条件に合わせて変化させ、開口のない場合について解析した結果から外壁表面での風圧係数分布と壁面に平行な方向の風速分布^[注7]を、また図 2 に併記

表 2 CFD による気流解析に用いた手法の概要

基礎方程式	Navier-Stokes 方程式	
移流項の離散化	QUICK 法	
アルゴリズム	SIMPLE 法 (収束判定値 = 10^{-3})	
乱流モデル	標準 $k-\varepsilon$ モデル	
計算領域	$80m(W) \times 80m(L) \times 80m(H)$	
計算格子	直交格子系, スタッガード変数配置 計算格子数 : $64(W) \times 64(L) \times 55(H)$	
境界条件	流入境界	$1/4$ 乗則プロフィール: $u_1 = x_3^{0.25}$, $k = 0.0025$, $\varepsilon = \sqrt{C_\mu} k \partial u_1 / \partial x_3$, $C_\mu = 0.09$
	流出境界	自由流出
	側面, 上部	すべり壁
	壁面, 地表面	対数則壁関数: $k = C_\mu^{-1/2} \tau_W / \rho$, $\varepsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / (\kappa h_p)$ $\kappa = 0.4$

表 3 作成した参照用データ

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

図 2 参照用データ作成のための CFD 解析対象

した18箇所にそれぞれ開口を設けた場合について解析した結果から外気流入角度を集計した。なお各時刻の外部条件として参照した気象データの分解能に合わせ風向条件は22.5°づつ変化させることとし、外壁表面での風圧係数および壁面での風速分布については1m×1mの分解能でデータを集計した。またマクロモデルの計算に必要な非等温噴流モデルの吹き出し角度は鉛直方向成分であるから、流入気流の角度に関しては鉛直方向成分のみを集計した。パフファに保管した参照用データは、図3に風圧係数分布の例を示すように既往の研究による実験結果²⁰⁾とも定量的によく一致している。

2.6 空調制御のモデル化と空調負荷の評価

前節までの内容を2.1節に示した考え方に合わせて組み合わせ、屋内温熱環境予測モデルの形にまとめた。空調時間帯における空調制御方法に関してはCAV制御を想定し、各時刻において次のように吹き出し温度の制御を行うこととした。すなわち、

- (1) 最大空調容量に相当する吹き出し温度を設定し、各層の温度を計算する。

- (2) 空調制御層の温度と設定温度とを比較しながら、次式により吹き出し温度を反復的に修正する。

$$\begin{aligned} T'_{JET} &= T_{JET} - C_{AC} \operatorname{sgn}[T_j - T_{SET}](T_{JET}^{MAX} - T_{SET}) \\ C_{AC} &= 2^{(1-n)} \end{aligned} \quad (5)$$

また各時刻における空調負荷については、吹き出し温度が設定温度以上の場合を暖房負荷、設定温度以下の場合を冷房負荷とし、空調制御層の温度をバランスさせるのに必要な供給熱量として集計することとした。屋内の負荷が最大空調容量を越えた場合には、空調負荷は空調機を最大容量で運転したときの供給熱量として評価される。

3. 開口部を有するアトリウム内の温熱環境に関する考察

3.1 対象建築物の設定

開発した屋内温熱環境予測モデルを用いて、外気を導入した場合のアトリウム内温熱環境および空調負荷特性を考察した。想定した対象建築物の概要を図4および表4に示す。ここでは基礎的な特性の把握を目的としているため、対象建築物は20m(W)×20m(L)×40m(H)の単純な立方体形状とし、壁面はすべて熱反射ガラスで構成されているものとした。ここでは屋内を6層に分割し、対向する2つの壁面には1m(W)×3m(H)の単純開口をそれぞれ5ヶ所ずつ1列に配置することとした。なお以下の検討では風上側、風下側の開口設置高さを変化させて現象予測を行った。本論文では風上側開口をm層、風下側開口をn層に設置した場合を便宜的にm-n開口条件と呼び、以下同様の表記を用いることとする。

3.2 外気導入による屋内温熱環境への影響

開口の設置による影響を考察するため、開口を設けた場合(5-5開口条件)、開口のない場合の夏季における温熱環境の日変化を比較した。計算に用いた気象データおよび計算結果を図5にまとめて示す。空調制御層および空調吹き出し口、レターン吸い込み口はいずれも第1層に設定し、8時から19時まで設定温度26℃として空調を行った。なお計算結果の再現性を確保するため、ここでは同一気象データにより連続10日間分の計算を行った。図はその最終日の結果を示している。

いずれの場合も屋内空間温度は8～10時および16時近傍に極大値を、また冷房負荷は正午過ぎに最大値を示している。屋内空間温度の極大値が2つのピークを示すのは気象データの日射量と外気温のピーク

図3 パフファに保管した風圧係数分布

図4 計算対象としたアトリウムのモデル

表4 対象とした建築物諸元

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	吸収率
	0.67	483.0	0.60	0.30	0.10
	床面:				
開口部	構成材料		熱伝導率 kcal/mh °C	容量比熱 kcal/m³°C	
	マーブル (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	
空調設定	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			
	空調対象:	第 1 層 (居住域) の温度			
	空調時間:	8 時 ~ 19 時, 日曜, 休日でも運転			
	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 スロー定数 5.6			
	吹き出し, 吸い込み位置:	いずれも第 1 層			

が異なること、透過吸収および熱貫流による熱移動速度が異なることなどに起因すると考えられる。計算結果から、開口を設けた場合には屋内上下温度分布のばらつきが改善され、冷房負荷が大幅に低減できることがわかる^[注6]。

3.3 開口の設置高さによる特性の違い

開口の設置高さを変化させた場合について同様の計算を行い、その影響を考察した。図5と同様の気象条件で開口設置高さを変化させて計算した結果を図6に示す。図6a)は風上側、風下側開口設置高さと同じ

図5 夏季における温熱環境の日変化

図6 開口設置高さによる屋内温度分布の違い

図7 換気回数による冷房負荷の違い

場合、図6b)は風上側、風下側開口設置高さが異なる場合について13時における垂直温度分布を比較した結果である。2-2開口条件以外の場合には、開口部よりも上層側での温度が開口の設置により低減されており、熱だまりを除去する効果が得られている。なお2-2開口の場合に第1層、第2層の温度が上昇しているのは、空調設定温度よりも高い温度の外気が直接居住域に流入するためである。開口設定層の温度が外気温度よりも高い場合には、外気の導入により熱だまりの除去効果が期待できると考えられる。

各種条件について比較した結果、風上側、風下側の開口設置高さが異なる場合には、より高い位置にある開口の影響が支配的となることがわかった。図6b)はいずれか一方の開口を第6層とした場合であるが、開口設置位置が第2層以上にある6-6、6-4および4-6開口条件の場合には垂直温度分布がほぼ一致している。いずれか一方の開口設置高さを第5層、第4層として比較した場合にも同様の傾向が認められた。

3.4 換気回数による冷房負荷削減効果の違い

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。図7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。各条件での冷房負荷の特性は開口の設置高さによって異なるが、いずれの場合も換気回数の増加に伴い単調に減少しており、換気回数2～3回/hを越えるとほぼ一定値となることがわかった。外部風速がある程度以上の場合には開口の設置による負荷の低減が十分見込めると考えられる。

4. 外気導入による熱負荷削減効果に関する考察

3章までの検討により、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。ここでは年間を通じ

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。

4.1 空調負荷特性の通年変化

3章と同様のアトリウムを対象として外気導入のある場合、ない場合についての空調負荷の通年変化を比較した。ここでは東京に立地するアトリウムを想定し、第1層での設定温度を年間を通じて24℃、空調時間帯を8時～19時として計算を行った。空調制御方式にはCAV制御を想定し、期間熱負荷から求めた必要空調容量²¹⁾を空調機の最大空調容量として表5のように設定した。なお外気を導入した場合には開口設置位置を5-5開口とし、常時開放したままとした。

空調負荷の通年変化に関する計算結果を図8に示す。外気を導入した場合には夏季の冷房負荷を削減できるが、中間期から冬季までの期間では当然ながら暖房負荷が大幅に増大する。空調負荷の問題のみに限定すれば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、4～6月および9月についても条件によっては空調負荷の削減は可能であり、暖房負荷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。

4.2 開口の開閉操作条件に関する検討

図8に示した計算結果をもとに、外気導入による空調負荷削減が可能な条件を検討した。ここでは4月から10月までの期間についての計算結果を用いて気象条件と冷房負荷、暖房負荷との関係を比較した。

[外気温度および日射量と空調負荷との関係]

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とされる。ここで

図8 外気を導入した場合、しない場合の空調負荷の通年変化

表5 想定した空調機の最大供給容量

冷房時	420,000 (kcal/h)
暖房時	500,000 (kcal/h)

a) 外気温度と暖房負荷との関係

b) 外気温度と冷房負荷との関係

c) 効果温度と暖房負荷との関係

d) 効果温度と冷房負荷との関係

図9 外気温度、効果温度と空調負荷との関係

図10 空調負荷の削減効果

は拡張デグリーデーに用いられる考え方²²⁾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、次の効果温度 θ を定義する。

$$\theta = T_0 + \eta J/K, \quad \eta = \tau + As\alpha_{in}/(\alpha_{in} + \alpha_{out}) \quad (6)$$

図9は外気温度および(6)式による効果温度をパラメータとして冷房負荷、暖房負荷との関係を整理した結果である。ただしここではデータのばらつきを排除するため、各日の空調時間帯についての平均値を用いた。いずれの場合も空調負荷と外気温度、効果温度の間には明確な関係が認められる。すなわち外気を導入した場合、しない場合の空調負荷は、外気温度や効果温度が特定の値となった時点を境にそれぞれ異なる勾配の直線で近似できる。空調負荷が立ち上がるときの外気温度、効果温度にはいずれの場合も3～5℃の違いがあり、この差の範囲内において開口の開閉操作を行えば空調負荷の削減を可能とする制御が行えるものと考えられる。

ただし中間期には冷房を必要とする条件と暖房を必要とする条件とが混在する。実際にはこの時期は冷房運転、暖房運転のみ行うまたは空調を停止することになるから、冷房負荷の削減のみに着目すると適切な空調制御を行うことはできない。中間期については冷房、暖房を含めた総合的な空調消費エネルギーの面から、外気を導入した場合、しない場合のどちらが有利となるかを判断すること必要がある。ここでは冷房時と暖房時の2次エネルギー側COPの比率を用いて冷暖房負荷に重み付けした値から空調負荷の削減効率を考えることとした。図10はヒートポンプを用いた場合を想定し、冷房時、暖房時のCOPの比を2:3と仮定²³⁾して図9の結果から評価した削減効率である。本研究で対象とした建築物では、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外気を導入すると、暖房負荷を増大させることなく冷房負荷を削減できると考えられる。

[外気風速と空調負荷との関係]

3.4節の結果から、外気風速が大きいほど冷房負荷の削減効果を得ら

図 11 外気風速と冷房負荷削減効果との関係

れることが示唆された。外部風速と冷房負荷削減量との関係について集計した結果を図 11 に示す。外部風速は時刻ごとに大きく変化するため、ここではデータを 1 時間単位で集計し、(6) 式による効果温度ごとに整理した。特性にはかなりのばらつきがあるが、いずれの場合も風速に対して冷房負荷の削減効果が增大する傾向が認められる。また効果温度が 30℃を越えると外部風速が大きくても負荷の削減効果は頭打ちとなることがわかる。暖房負荷とのかねあいを考えると、効果温度 25～30℃の範囲で 2m/s 以上の風速がある場合には外気導入の効果が見込まれると判断できる。

4.3 開口の開閉制御による熱負荷削減効果

[開口の開閉操作条件の設定]

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を予測した。ここでは東京、大阪、札幌、福岡の 4 地域を想定し、それぞれの地域について 4.2 節と同様の検討を行った結果から表 6 のような開閉操作条件を設定した。なおここでは以下に示すような 4 種類の制御方法を想定し、それぞれについて同様の計算を行った。

- ・CASE-1: 外気を導入せず、空調設定温度を 24℃一定とした場合
- ・CASE-2: 外気を導入せず、空調設定温度を一日単位で可変とした場合
- ・CASE-3: 外気を導入せず、空調設定温度を時間単位で可変とした場合
- ・CASE-4: 表 6 に従い開口の開閉操作により外気を導入した場合

CASE-2 は、空調設定温度 22℃, 24℃, 26℃の 3 とおりについて各日の計算を行い、空調消費エネルギーが最も小さくなる条件をその日の空調条件として採用したもの、CASE-3 は同様の操作を時間ごとに行ったものである。実際にはこのような制御は不可能であるが、ここでは外気導入を行わずに理想的な空調制御を行った場合の比較用データとしてこれらの CASE を想定した。

[月ごとおよび年間の空調負荷削減効果]

年間にわたっての計算結果を月ごとに集計し、期間空調負荷の削減量の推移を考察した。各 CASE における期間空調負荷から CASE-1 の期間負荷を差し引いた値を負荷削減量とし定義し、集計した結果を図 12

表 6 想定した開口開放条件

建設地	外気温度	日射相等温度
東京	20℃以上	25℃以上
大阪	20℃以上	25℃以上
札幌	24℃以上	30℃以上
福岡	18℃以上	25℃以上

図 12 月ごとの空調負荷削減量

に示す。CASE-2、CASE-3 では 7 月、8 月の負荷削減量が大きくなるのに対し、CASE-4 では夏季から中間期までの長期にわたる効果が期待できる。特に 3～5 月および 10 月、11 月において、いずれの地域でも CASE-4 による効果が CASE-2、CASE-3 よりも大きくなっており、開口の開閉操作による選択的な外気導入は中間期における空調負荷削減に有効なことがわかった。

なお札幌では冷房が必要となる期間が短い、この時期における空調負荷削減量は他の地域に比べて数割程度大きくなるということがわかった。外気導入による温度制御は外気温度が空調制御温度に近い場合に最も効率的であると考えられる。寒冷地では夏季から中間期までの比較的長期にわたって外気温度がそのようなレベルにあるため、本方式の適用が最も有利となるものと考えられる。年間空調負荷の削減率を地域別に集計した結果でも札幌での空調負荷削減率が最も大きな値を示した。

5. 結 言

開口部を有するアトリウムを対象として、自然換気により外気を導入した場合の屋内温熱環境と空調負荷特性を検討した。本研究では屋内垂直温度分布と開口部からの外気流入の影響とを考慮した温熱環境予測モ

デルを開発し、外気を導入した場合の屋内温熱環境の特性と消費エネルギーの削減に効果的と思われる開口の開閉制御方法などを考察した。ここでは空調制御対象として顕熱のみをアツかったが、潜熱制御を考慮すると外気導入による効果が期待できる条件はかなり厳しくなるものと考えられる。今後空調システムの違いや潜熱の影響などについて検討を進め、より詳細な考察を行っていく予定である。

〔記号〕

A	: 開口面積	(m^2)
A_f	: 床面積	(m^2)
A_s	: 日射吸収率	
Aw_n	: n 壁の面積	(m^2)
B_{ij}	: ij 面間の Gebhart の吸収係数	
C_{bji}	: ij 層間の乱流熱移動の係数	($W/m^2 K$)
C_{pr}	: 空気の容積比熱	($J/m^3 K$)
g	: 重力加速度	(m/s^2)
h_p	: 壁面から隣接セル中心までの距離	(m)
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}	: 外気流入により供給される熱量	(W)
J	: 日射量	(W/m^2)
k	: 乱流エネルギー	(m^2/s^2)
K	: 熱貫流率	($W/m^2 K$)
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_{OUT}^{AC}	: 空調噴流による誘引量	(m^3/s)
Q_{OUT}^N	: 外気流入に伴う誘引量	(m^3/s)
Q_{OUT}^{OUT}	: 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_{rji}	: i 層から j 層に流入する流量	(m^3/s)
Q_{winji}	: i 壁側から j 層に流入する壁面流	(m^3/s)
Q_{woutji}	: j 層から i 壁側で流出する壁面流	(m^3/s)
r_{ijn}	: n 壁側の ij 層間熱取得配分係数	
$sgn[\]$	: $[\]$ 内の符号をとる演算子	
T_0	: 外気温度	(K)
T_j	: j 層空気温度	(K)
T_{JET}^{MAX}	: 最大供給容量での吹き出し温度	(K)
T_m	: 300	(K)
T_{sn}	: n 壁の内壁表面温度	(K)
T_{SET}	: 空調設定温度	(K)
T'	: 隣室 (地下) 温度	(K)
T'_{JET}	: 修正後の吹き出し温度	(K)
$u_1 \sim u_3$	: 各座標方向の速度成分	(m/s)
$x_1 \sim x_3$	: 各方向の座標	(m)
α	: 流量係数	
α_c	: 対流熱伝達率	($W/m^2 K$)
α_{in}	: 内壁側総合熱伝達率	($W/m^2 K$)
α_{out}	: 外壁側総合熱伝達率	($W/m^2 K$)
α_r	: 放射熱伝達率	($W/m^2 K$)
ΔP	: 開口前後の圧力差	(Pa)
γ	: 空気の比重	(N/m^3)
ε	: k の散逸率	(m^2/s^3)
ε_r	: 放射係数	
ρ	: 空気の密度	(kg/m^3)
σ	: Stefan-Boltzmann 定数	($W/(m^2 K^4)$)
τ	: 日射透過率	
τ_W	: 壁面剪断応力	(Pa)

〔注〕

〔注 1〕 従来の手法でも外気流入の影響はすきま風的な扱いで考慮されているが、外部気流状態によりその特性が大きく変化する自然換気流の影響は、これまでの手法では考慮されていない。

〔注 2〕 着目する壁面の内表面温度とこれに隣接する層およびその上下層温度を比較して場合分けすると、壁面近傍で上昇流、下降流を生じた場合の壁面流温度と壁面流-隣接層間での流量収支が算出でき

る。下降流の場合には上層からの流れが、また上昇流の場合には下層からの流れが混合するため、それぞれの場合にあわせ上層または下層側から順次場合分けの操作を行うことで内壁表面での対流熱伝達と壁面流による層間熱移動量が計算できる。戸河里ら^{8),10)}のモデルでは同様の操作により熱取得配分係数 r_{ijn} を計算しており、層間熱移動の平衡式に壁面流の効果を表現している。

〔注 3〕 石田ら^{11),12)}が用いた非等温噴流モデルの経験式は以下に示すとおりである。すなわち、

$$y = x \tan \alpha + Ar \left\{ \frac{x}{D_0 \cos \alpha} \right\}^2 D_0 \times \left\{ 0.51 C_S \left(\frac{x}{D_0 \cos \alpha} \right) + 0.11 \right\}$$

ここに Ar : Archimedes 数, D_0 : 吹き出し口相当径, C_S : 展開係数であり、噴流が水平方向に距離 x 進行したとき、その中心軸が鉛直方向に距離 y だけずれることを示している。噴流軌道から噴流到達層を判別し、また噴流が通過した層界面での断面方向の風速プロファイルから誘引風量のフラックスを計算することができる。

〔注 4〕 空間内において着目するひとつの面要素が放射する熱量は、その面が他のすべての面から吸収する熱量の総和に等しい。したがってそれぞれの面要素から他の各面に配分され、実質的に吸収される放射熱の割合を求めておけば、壁間の相互放射による熱量授受が計算できる。Gebhart の吸収係数は完全拡散面を仮定した場合の放射熱配分の割合を示すものである。本研究で対象とした空間を構成する各層壁面および床面、天井面の各面要素間での形態係数は比較的容易に求まるので、形態係数の相反則と壁面温度を常温と仮定した線形化を用いることにより (3) 式の左辺第 4 項が導出できる。

〔注 5〕 建築物を構成するすべての面が日射を透過するものと仮定すると、着目する面が受照する領域はいくつかの異なる面を透過した日射投影面から構成されていることとなる。このときの各投影面の面積比はその時刻における太陽位置と建築物の方位とを考慮して幾何学的に求められる。着目する面での日射受熱量は各面での入射角度と透過率を考慮して投影面積比で重み付けして計算することとした。

〔注 6〕 本研究では外壁表面における対流熱伝達率を外壁に平行な風速成分 w_w の関数として評価しており、風向、風速条件ごとの w_w をデータバッファから参照して用いることとした。ただし対流熱伝達は各層外壁面を単位として評価するので、実際にはデータバッファの風速から算出した熱伝達率を面内で平均して用いている。

〔注 7〕 ただし本研究では湿度に関する評価を行っていない。ここではいずれも顕熱負荷についてのみ言及している。

〔参考文献〕

- 1) 日本建築学会編:アトリウムの環境設計 (1994), 彰国社.
- 2) Chikamoto, T. et al: Proc.of ISRACVE(1992 Tokyo), 26.
- 3) 宮川:空気調和衛生工学会論文集, No.13(1990 6), 1.
- 4) 宮川:空気調和衛生工学会論文集, No.13(1990 6), 13.
- 5) 伊藤ほか:日本建築学会計画系論文報告集, 398(1989 4), 59.
- 6) Gautier, B. et al: Proc.of HBPSA(1991, Nice).
- 7) Bounia, H.: Modélisation simplifiée d'écoulements de convection mixte internes; application aux échanges thermo-aérauliques dans les locaux, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers(1993).
- 8) 戸河里ほか:日本建築学会計画系論文報告集, 427(1991 9), 9.
- 9) 戸河里ほか:日本建築学会計画系論文報告集, 435(1992 9), 11.
- 10) Togari, S. et al: ASHRAE Trans., 99 1(1993), 84.
- 11) 石田, 宇田川:空気調和衛生工学会講演論文集 (1992 10), 77.
- 12) 石田, 宇田川:空気調和衛生工学会講演論文集 (1992 10), 81.
- 13) Manzoni, D. and Rongère, F.X.: Proc.of 5th.Int.Conf.on ROOM VENT Vol.2(1996 Yokohama), 443.
- 14) 諏訪ほか:日本建築学会計画系論文報告集, 486(1996 8).
- 15) 戸河里ほか:日本建築学会計画系論文報告集, 435(1992 5), 11.
- 16) 絵内ほか:日本建築学会計画系論文報告集, 419(1991 1), 21.
- 17) Gebhart, B.: ASHRAE Trans., 65(1959).
- 18) 近藤:空気調和衛生工学会シンポジウム, 「大空間を中心とした最近の熱負荷計算」資料, (1993 3), 46.
- 19) 日本建築学会耐風設計資料小委員会編:流体計算と風荷重評価 (1994 11).
- 20) 森川:日本建築学会大会学術梗概集, D(1989 10), 455.
- 21) 空気調和衛生工学会編:空気調和設備計画, 設計の実務の知識 (1995), オーム社.
- 22) 木村 編:建築環境学 1(1992, 第 3 版), 丸善.
- 23) 井上:空気調和ハンドブック (1991, 第 3 版), 丸善.

(1995 年 9 月 26 日原稿受理, 1996 年 8 月 23 日採用決定)