開口部を有するアトリウム空間に対応した
温熱環境予測モデルの開発DEVELOPMENT OF A SIMPLIFIED PREDICTION MODEL
FOR INDOOR THERMAL ENVIRONMENTS
IN ATRIUMS WITH OPENINGS

諏訪好英*, 藤井修二**, 湯浅和博***

Yoshihide SUWA, Shuji FUJII and Kazuhiro YUASA

A simplified prediction model was developed to predict indoor thermal environments in atriums with openings. Characteristics of cross ventilation through openings were studied using CFD technique based on the standard $k-\epsilon$ model. According to the simulation results under several conditions, modeling strategies were obtained to predict draft airflow volume, inlet airflow angle and the airflow state in atriums.

Finally, a simplified prediction model was developed as a computer software to calculate indoor thermal environments in atriums with openings. Predicted results on temperature distribution using this software showed a good agreement with CFD results, and it was verified that developed model provides accurate predictions on indoor thermal environments.

Keywords : atrium, openings, indoor thermal environments, natural ventilation, simplified prediction model

アトリウム, 開口, 屋内温熱環境, 自然換気, 簡易予測モデル

1. 緒 言

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, 空調制御された屋内環境の中で屋外環境と同様の開放感を享受できるなどの利点を有する反面, ガラス面の割合が大きいこと, 天井高の大きな大空間となることなどに起因して空調制御が難しくなる傾向がある¹⁾。特に天井高の大きなアトリウムでは温度成層の発達により垂直方向の温度分布に大きなばらつきを生じる傾向があり, 屋内居住域での温熱快適性や空調負荷の予測には垂直温度分布を考慮した温熱環境設計手法が必要となる。これまでアトリウム内の空調制御法や現象予測手法に関して各種の研究が行われており, 垂直温度分布を考慮した屋内温熱環境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開発されてきた^{2)~7)}。

ところで実際のアトリウムでは, 熱だまりの除去などを目的として半開放式構造や開閉式の開口部を設けた構造がしばしば採用される。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, 外部風や煙突効果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^[注1]。また内部容積の大きなアトリウム空間では, 自然通風などを利用した外気の導入により屋内の換気・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, 省エネルギー設計の観点からも自然通風を考慮したアトリウム内温熱特性の検討が重要と考えられる。

開口部を有するアトリウムでは開口を介して外気の流入や屋内空気の流出を生じるが, その主な駆動源のひとつが外部風に起因するものと考えられる。本研究では流体の数値解析手法を用いてアトリウム内外の気流解析を実施し, 各種風向, 風速条件および開口設定条件についての数値解析結果から, 開口部における通風特性の考察を行った。また考察の結果得られた諸特性をマクロ的な予測モデルの形にまとめ, 開口による自然通風の影響を考慮したアトリウム内温熱環境予測モデルを構築した。本報では数値解析による自然通風特性の検討結果と, 構築した温熱環境予測モデルの概要について報告する。

* ㈱大林組技術研究所 数値解析研究室

** 東京工業大学大学院情報理工学研究所
教授・工博

*** 東京工業大学建築学科 助手・工博

Computational Eng. Dept., Technical Research Inst., Obayashi Corp.
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.

2. 数値解析による自然通風特性の考察

2.1 数値解析手法および対象モデル

外部気流により駆動される自然通風の特性を把握するため、開口部を含めたアトリウム内外の気流状態を数値解析した。計算には SIMPLE 法⁸⁾による 3 次元定常解析手法を適用し、運動量方程式の移流項の離散化には 3 次精度 QUICK 法⁹⁾を用いた。また乱流補正には標準 $k-\epsilon$ モデル¹⁰⁾を用いた。なおここでは基本的な通風特性の考察を目的としているため、自然対流のような熱的要因による成分は考慮していない。数値解析に用いた手法および境界条件の概要を表 1 にまとめて示す。

対象とした建築物は図 1 に示すような $20m(L) \times 20m(W) \times 40m(H)$ の矩形断面を有する中空構造とし、想定した境界層流中に単体で存在するものと仮定した。対象建築物を含めた解析領域全体の大きさは $80m(L) \times 80m(W) \times 80m(H)$ である。基本モデルでは風上側壁面の中央 6 箇所 に $1.5m \times 1.5m$ の開口を、また風下側壁面に $11m \times 38m$ の開口を設け、これらの開口部を介して連結されるアトリウム周辺気流と屋内気流とを同時に数値解析した。

2.2 自然通風による外気流入量の考察

先述したように開口部での自然通風量は外部気流の状態により大きく変化するため、本来は想定した条件ごとに屋内外の気流状態を解析する必要があると考えられる。しかし本研究で指向するような簡易予測手法では、外部気流状態に関する膨大なデータを各時刻について扱うことは困難である。ここでは風圧係数を用いた簡易的な通風量予測手法についてその適用の可能性を検討した。建築物外表面での風圧係数は、対象建築物高さにおける流入境界での風速を基準として次式により定義した。すなわち、

$$C = \frac{2g}{\gamma} \frac{P_w}{v_0^2} \quad (1)$$

図 1 に示した基本モデルについて屋内外気流の数値解析を行い、その外表面における風圧係数の分布を算出した。開口を設けた場合、開口なしの場合について解析した垂直断面内の気流分布を図 2 に、また図 2 のそれぞれの場合および開口なしの条件で風速を変化させた場合について集計した風上側壁面での風圧係数の垂直分布を図 3 に示す。壁面に開口を設けるとその近傍での風圧係数は局部的に変化するが、全体的な分布状態は開口なしの場合の傾向を保持している。風圧係数の値そのものについては開口の設定条件とある程度独立に考えてよいものと判断できる。また今回想定した範囲では、風速を変化させても風圧係数の値はほとんど変化しないことがわかった。これらのことから、基準となる開口条件、風速条件についてあらかじめ数値解析した風圧係数を参照することとすれば、任意の条件についての通風量予測が可能と考えられる。ただし風圧係数の分布は風向により大きく変化するため、参照用の風圧係数のデータは風向条件ごとに用意しておく必要がある。

本研究では開口なしの条件について求めた風圧係数を用

表 1 数値解析手法の概要

基礎方程式	Navier - Stokes 方程式 熱伝導方程式*
浮力モデル*	Boussinesq 近似*
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ モデル
計算格子	直交格子系、スタッガード変数配置
移流項の離散化	3 次精度 QUICK 法
圧力補正 アルゴリズム	SIMPLE 法 (収束判定値 = 10^{-3})
境界条件	流入境界: 1/4 乗則プロファイル 流出境界: 自由流出 側面境界: すべり壁 壁面、地表面: 対称則壁関数

注: *は熱対流連成解析で用いた内容を示す

図 1 対象建築物のモデル

図 2 対象建築物周辺気流の数値解析結果

図 3 風上側壁面での風圧係数の分布

いて通風量予測を行うこととした。それぞれの開口部での通風量は、流入側、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。

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

図4 通風量予測計算と数値解析との比較

各種の風向、風速条件および開口条件について、(2)式による予測手法でどの程度現象を再現できるかを確認するため、開口を設けたモデルにより別途実施した数値解析の結果と比較した。各種風速条件、開口条件についての通風量予測結果の比較を図4に示す。ここで、数値解析による通風量予測結果は開口部分での速度成分から直接換算した値を示している。いずれの条件においても、(2)式により算出した予測値は数値解析により求めた通風量とよく一致しており、(2)式のような簡易的な方法でも開口からの外気流入量を十分評価できることが確認された。

2.3 開口からの外気流入角度に関する考察

図2に示した気流解析結果からは、開口の設置位置の高さによって外気の流入角度が異なることがわかる。図5は建築物高さの異なる場合、風下側開口条件が異なる場合について比較した外気流入角度の垂直方向の分布である。開口からの外気の流入角度は開口位置の絶対値に依存するものではなく、建築物高さに対する開口設置位置の高さの比によって決まるものと考えられる。この仮定にしたがって整理した図5.a)では、建築物高さ40mの場合と20mの場合の流入角度の分布はよく一致している。また図5.b)の結果からは、風上側開口部における流入角度が風下側の開口条件に依存しないことがわかった。図2の結果からもわかるように、開口から流入した気流は強い慣性力を有しており、屋内においては後流側の影響を受けずほぼ直進する傾向がある^[注2]。

建築物高さに対する開口設置位置の高さの比 r_H と風上側流入角度 θ_{in} との関係を2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。

図5 開口位置と流入気流の角度との関係

$$\left. \begin{aligned} \theta_{in} &= 14.984 - \left\{ (0.897 - r_H) / 0.117 \times 10^{-2} \right\}^{1/2} \\ &: r_H < 0.897 \\ \theta_{in} &= 14.984 \\ &: r_H \geq 0.897 \end{aligned} \right\} (3)$$

2.4 屋内流入後の気流状態に関する考察

2.3節でも考察したように、開口から流入した気流は屋内でも強い慣性力を有しており、噴流的な気流状態を形成している。容積の大きなアトリウムでは開口部の面積が相対的に小さく、開口部からの通風気流は噴流吹き出し口における絞り効果と同様の作用を受けるものと考えられる。

(3)式から $\theta_{in} \approx 0^\circ$ と予測される $r_H = 0.65$ の位置に開口を1ヶ所のみ設けて前節までと同様の解析を行い、屋内へ流入した後の気流状態を考察した。ここでは開口近傍での計算格子をさらに細分割したモデルを用いた。解析結果を図6に、また噴流理論から求まる軸対称噴流の径方向プロファイル^{[11][注3]}および軸方向速度の減衰特性^[12]と比

図6 流入気流の数値解析結果

a) 軸方向速度の径方向プロファイル

b) 軸方向速度の減衰特性

図7 流入気流の状態と噴流理論との比較

較した結果を図 7 に示す。解析結果はいずれの理論ともよく一致しており、開口から流入した流れにより形成される屋内気流分布は噴流として近似できるものと判断した。なお、噴流理論を用いて評価した流入気流のスロー定数は $K_p = 5.08$ であり、長方形吹き出し口についての文献値 ($K_p = 5.0$) とほぼ一致した。

3. 外気の影響を含めたマクロモデルの構築

アトリウム内では温度成層が発達しやすく、屋内の温度は垂直方向に分布を持つが、水平方向には大きな温度差を持たない場合が多い。いわゆるマクロモデルを用いた温熱解析ではこの性質を利用し、垂直方向に分割した屋内各層での流量収支、熱量収支から層間での熱移動を計算する。

本研究ではマクロモデルに流入外気の影響を加え、開口部を有するアトリウムを対象としたマクロ的な屋内温熱環境予測モデルを構築した。本章では開発した予測モデルの概要を示す。なおマクロモデルを用いた屋内温熱環境の計算方法としては宮川^{2),3)}、戸河里^{4),5)}、石田^{6),7)}の方法がすでに報告されており、基本的にはこれらのモデルを参考として予測モデルの開発を行った。本研究では開口部からの流入外気の扱いに力点を置いているので、ここでは全体的なアルゴリズムの基本的な考え方と開口からの流入気流の扱いについてのみ詳述する。

3.1 層間熱移動と流量収支

アトリウムの内部空間を図 8 に示すような層に分割し、層間の流量収支、熱量収支を考える。各層の 4 方向の壁面には、壁表面温度と壁面流評価のための 2 次元領域を想定している。

各層の熱量収支を考えると、 j 層についての熱平衡式は次のように表される。

$$\begin{aligned}
 M_j \frac{dT_j}{dt} &= \sum_{i=1}^{Nb} \sum_{n=1}^{Nk} r_{ijn} A w_n \alpha_{cn} (T_{si} - T_i) \\
 &+ \sum_{i=j-1, i \neq j}^{j+1} C_{pr} Q_{rji} (T_i - T_j) \\
 &+ \sum_{i=j-1, i \neq j}^{j+1} C_{bi} A_f (T_i - T_j) + H_j + H_{JET}^{AC} + H_{JET}^N \\
 H_{JET}^{AC} &= \sum_{k=1}^j C_{pr} Q_{JOUTk}^{AC} (T_k - T_j) \\
 &+ C_{pr} Q_{JET}^{AC} (T_{JET}^{AC} - T_j) \\
 H_{JET}^N &= \sum_{k=1}^j C_{pr} Q_{JOUTk}^N (T_k - T_j) + C_{pr} Q_0 (T_0 - T_j)
 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで右辺は第 1 項から順に、

- ・壁面流による熱移動、
- ・層間の空気移動に伴う熱移動、
- ・乱流拡散による層間熱移動、
- ・内部発熱、

図 8 流入気流を考慮したマクロモデルの概念図

- ・空調噴流により与えられる熱量、
 - ・開口からの外気流入により与えられる熱量
- を表す。また各層における流量収支は次式で計算できる。

$$\sum_{k=1}^{Nk} (Q_{winjk} - Q_{woutjk}) + \sum_{i=j-1, i \neq j}^{j+1} Q_{rji} + Q_{JET}^{AC} + Q_0 - (Q_{JOUT}^{AC} + Q_{JOUT}^N + Q_{RET}^{AC} + Q_{OUT}^N) = 0 \quad (5)$$

ここで壁面流、空調吹き出し噴流などの扱いには戸河里^{4),5)}、石田^{6),7)}と同様の方法を採用した。屋内各部での空気移動と熱移動とを同時に計算する戸河里ら、石田らのマクロモデルでは、層間熱移動に関して配分係数など経験的な定数の設定を必要としない。この考え方により算出した熱量配分係数が実験的に求めた配分係数とよく一致することはすでに石田⁶⁾が論じている。一方 2 章での検討結果からは、開口からの流入気流は噴流として近似できるものと考えられる。噴流モデルなどの適用により外気流入に伴う屋内各部の空気移動量を評価することができれば、外気寄与率のような経験定数を用いることなく現象を再現できると考えた。

なお、本予測モデルの計算に必要な経験定数として乱流拡散に関する C_b 値があるが、これを固定値としても十分な精度で現象予測できることが従来の研究において示されている。ここでは戸河里¹³⁾の計算例に従い、 $C_b = 2.0 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$ を採用した。ただし冬季には下層温度が上層温度よりも高くなる逆転現象を生じ、層間での熱移動量が非常に大きくなる場合がある¹⁴⁾。このような場合については一時的に $C_b \approx \infty$ として上下層の温度を均一化させることとした。

3.2 外気流入特性のモデル化

2 章での考察結果と 3.1 節に示した基本的な考えにしたがい、風上側開口から自然通風により流入する外気の特徴をモデル化した。以下その内容を示す。

[外気流入量および外気流入角度の算出法]

開口部での外気流入量の算出には (2) 式を用いることとした。流入風量を決定するための風圧係数は、あらかじめ風向ごとに数値解析した結果から開口設置位置にあわせ線形補間して求めることとし、これらの値をテーブルとして

図9 バッファに保管した参照用風圧係数の分布

参照用バッファに保管した。アトリウム水平断面形状が正方形であると仮定すると、風向が異なる場合の風圧分布は風向角 90° ごとに回転対象となる。また風向角 $0 \sim 90^\circ$ の間では 45° を境に鏡対象の分布状態が現れるため、結局参照用バッファには風向角 $0 \sim 45^\circ$ の間で風向角ごとのデータを用意すればよいこととなる。本研究で用いた気象データの風向分解能は 22.5° であるので、参照用バッファには風向角 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ の場合について求めた3種類の風圧分布を保管することとした。各壁面での風圧係数のデータ集計には2次元等間隔格子(格子間隔 $1\text{m} \times 1\text{m}$)を用い、数値解析結果から各格子中央点での風圧係数を換算してバッファ内の2次元配列に割り当てた。参照用データとして集計した風圧係数の分布を図9に示す。

なお各開口部での流入、流出判定には対象時刻における風向データを用い、外気流入角度の決定には(3)式を用いることとした。

[屋内での外気流れと熱移動量の扱い]

屋内流入後の外気の流れは非等温噴流モデルにより近似した。周囲温度との差による浮力効果を考慮すると、噴流中心軸の軌跡は次式で与えられる。

$$y = x \tan \theta_{in} + Ar \left(\frac{x}{D_0 \cos \theta_{in}} \right)^2 \times D_0 \left\{ 0.51 C_s \left(\frac{x}{D_0 \cos \theta_{in}} \right) + 0.11 \right\} \quad (6)$$

$$Ar = g D_0 \frac{T_0 - T_a}{Q_0^2 (273.16 + T_a)}$$

なお式中の θ_{in} , K_p (式中では C_s として間接的に用いられている) には、2章で得られた結果を利用する。

開口から流入した気流を噴流として扱えば、その中心軸上における風速および温度は(8)式から次のように求められる。

$$V_s = \frac{V_0 \cdot K_p \cdot D_0}{s \cdot p}, \quad T_s = T_a + 0.83(T_0 - T_a) p^2 \frac{V_s}{V_0} \quad (7)$$

ここでは噴流速度が 0.25m/s 以下となった時点、または噴流軌跡が壁面に到達した時点でその到達層を決定することとし、流入気流の有する熱量は直接到達層へ輸送されるものとして熱移動量を計算した。なお噴流の軌跡は以下の

各式で与えられる。

$$s_n = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y_i^2}, \quad p_n = \left\{ 1 + \left(\frac{\Delta y_n}{\Delta x} \right)^2 \right\}^{-1/4} \quad (8)$$

噴流軌跡の計算には Δx ごとに周辺温度と噴流温度とを比較しながら順次 Δy を求めて行く方法を採用した。

なお、外気流入に伴う到達層以外での熱移動は誘引によって引き起こされる。噴流軌跡が層間を横切る時点での風量は次式で与えられる。

$$Q_{J_i} = 0.9 \times \left\{ \pi \frac{V_s}{2(K_p/s)^2} \right\}_{r \rightarrow \infty} \quad (9)$$

噴流が $i-1$ 層から i 層へ流入するものとする、 i 層における誘引風量が次のように求まる。

$$Q_{JOUT_i} = Q_{J_i} - Q_{J_{i-1}} \quad (10)$$

3.2 壁表面温度の算出

壁面流や輻射熱伝達の評価に必要な壁表面温度は、屋内外空気との対流熱伝達、透過日射による受熱、壁体内部での熱伝導および各内壁間での相互輻射による熱交換などの熱平衡から求められる。壁表面温度に関しても(4)式と同様の熱平衡式が以下のように表せる。

$$\lambda \frac{\partial T_{s_n}}{\partial x} \Big|_{x=s} = \alpha c_n (T_j - T_{s_n}) + \sum_{k=1}^{N_w} \alpha r_{kn} \Phi_{kn} T_{s_k} + R_{s_n} \quad (11)$$

(6) 式の各項は順に以下の要因による熱移動を表す。

- ・壁体内部の熱伝導、
- ・壁表面での対流熱伝達、
- ・壁間の相互輻射、
- ・日射、照明などによる長波長成分の吸・放熱

同様の熱平衡式を裏面についても立て、内壁表面温度について整理すると、壁表面温度に関する連立方程式が以下のように得られる。

$$T_{s_n} - E_{s_n} \sum_{i=1}^{N_w} \Phi_{in} T_{s_i} = E x_n + E_0 T_j \quad (12)$$

$$E_{s_n} = \left(1 - \frac{K_g}{\alpha_i} \right) \frac{\alpha r}{\alpha_i},$$

$$E x_n = \frac{K_g}{\alpha_i} + \left(1 - \frac{K_g}{\alpha_i} \right) \frac{R_s}{\alpha_i},$$

$$E_0 = \frac{\alpha c}{\alpha_i} \left(1 - \frac{K_g}{\alpha_i} \right)$$

(11) 式の各項については後述する検証計算に必要な事象のみを考慮した。壁体内での熱伝導(熱貫流)や相互輻射などの熱移動要因についてはこれまで多くの研究が行われており、さまざまなモデルが提案されている。本研究で

開発した予測モデルではそれぞれの要因による取得熱量の計算と(11)式による表面温度の計算とが独立した形となっているため、各要因に関するモデルの追加、修正は比較的容易に行える。ただしガラス面の割合が大きなアトリウムでは、日昼の取得熱量として透過日射が支配的となる。また壁表面での対流熱伝達については壁面近傍での気流状態や空気側温度との差により熱伝達率が大きく変化する。ここでは、開発した予測モデルで採用した透過日射と対流熱伝達率の扱いについて示しておく。

[透過日射の扱い]

屋内へ入射する透過熱量は透過面での日射の入射角度により異なる。このため内壁の各部で受照する透過日射熱量は、その透過光がどのガラス面から入射したかによって違ってくる。簡単のため天井面およびすべての透過側壁面がガラスの場合を想定すると、受照面での各透過面からの受照面積比は次のようにして算出できる。

図10.a)は天井面からの透過光が床面に投影する場合を示している。いま床面と同レベルの無限平面を仮定すると、天井の角点 $a1(x_{a1}, y_{a1}, z_{a1})$ の投影点 $a3(x_{a3}, y_{a3}, z_{a3})$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x_{a3} &= (z_{a1} - z_{a3}) \times \cos |A| / \tan h \\ y_{a3} &= p \times (z_{a1} - z_{a3}) \times \sin |A| / \tan h + y_{a1} \quad (13) \\ p &= 1 \quad : (-90^\circ < A \leq 0^\circ) \\ p &= -1 \quad : (0^\circ < A \leq 90^\circ) \end{aligned}$$

図では $a1$ の投影点 $a3$ が床面 $\square(a2, b2, c2, d2)$ の内部に存在するが、投影点の位置は幾何学的な関係から以下の3通りのパターンをとる。すなわち、

- ・投影点が床面に存在する場合
- ・投影点が床面に存在しない場合(アトリウムの外側にある場合)
- ・投影点が床面を構成する各辺上にある場合

投影点が床面に存在する場合、床面で受照する日射は壁面 $\square(d1, d2, a2, a1)$ 、 $\square(a1, a2, b2, b1)$ および天井面 $\square(a1, b1, c1, d1)$ を透過した日射の3種類であり、その面積比は

$$\square(a2, a3, f, d2) : \square(a2, b2, e, a3) : \square(a3, e, c2, f)$$

となる。一方、投影点が床面の外部または各辺上に位置する場合には1または2箇所の透過面から入射していることとなる。壁面での受照についても同様の関係から図10.b)のような受照状態が予測できる。ただし壁面の場合、各層のレベルごとに受照面積比を計算する必要がある。図の例では第4層のみが3種類の透過光を、他の層では2種類の透過光を受照しており、それぞれの層壁面において受照面積比が定義できる。本研究ではそれぞれのパターンについて場合分けを行い、各透過面、受照面での入射角を考慮して各面での透過面積比から受熱量の算出を行った。

[壁表面での熱伝達率]

外壁表面屋内外壁表面での空気との熱伝達率はそれぞれ以下の式で評価した。

図10 透過日射の受照面積比の算出方法

内壁表面:

$$\left. \begin{aligned} \alpha c &= 0.138 \Delta T^{0.25} & : \text{水平下向き} \\ \alpha c &= 2.18 \Delta T^{0.31} & : \text{水平上向き} \\ \alpha c &= 1.78 \Delta T^{0.32} & : \text{垂直} \end{aligned} \right\} \quad (14-1)$$

外壁表面:

$$\left. \begin{aligned} \alpha c &= 5.3 + 3.6 v_w & : v_w \leq 5.0 \\ \alpha c &= 6.47 v_w^{0.78} & : v_w > 5.0 \end{aligned} \right\} \quad (14-2)$$

ここでは建築物外表面の熱伝達率に関して風圧係数と同様のテーブルを作成し、あらかじめ屋外気流解析の結果から算出した熱伝達率の分布を参照用バッファに保管した。

3.3 マクロモデルの計算アルゴリズム

3.1, 3.2 節に示した計算モデルを組み合わせ、温熱環境解析ソフトウェアの形にまとめた。計算のアルゴリズムを図11に示す。層間熱移動および壁表面温度の計算式((4)および(12)式)について後退差分法を適用すると、各方程式は行列式の形となる。ここに開口からの外気流入や日射による壁面の受熱、空調や内部発熱による熱量供給の影響などはすべて係数行列の要素中に考慮されることとなる。このため計算アルゴリズムの主要部分は、係数行列の作成、行列式の計算および温度、流量フラックスなど物理量の算出といった操作から構成されている。

なお層間熱移動と流量収支、内壁表面温度とは熱伝達や屋内気流状態などの変化を介して密接かつ相互に関連し合う。すなわち各層の温度が変われば噴流軌跡が変化し、その結果、外気や空調気流の到達層が変化する。また層間熱移動と内壁表面温度との関係についても壁面流と対流熱伝達率の変化により同様の相互作用が生じる。ここでは層間熱移動と流量収支、内壁表面温度の計算を連成させ、各時刻での状態予測に10回程度の収束計算を行うこととした。

4. マクロモデルによる試計算と検証

4.1 予測モデルと数値解析との比較

試作した温熱環境解析ソフトウェアを用いて開口部を有するアトリウムについての温熱特性予測を行い、同じ条件について実施した数値解析結果と比較した。数値解析の手法は2章に示したものと同様であるが、屋内外各部の温度差による浮力効果を考慮するため熱対流連成解析を行っている。

図 1 1 試作したソフトウェアの計算アルゴリズム

計算対象とした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た。想定したアトリウムの構造を図 12 に、その構造概要を表 2 にそれぞれ示す。ここでは第 5 層の東西壁面に各々 5 ヶ所ずつの開口を設けた場合を想定し、図 13 に示すような気象条件について屋内温熱環境の予測を行った。図に示した風速条件は地上 30m の観測値であるが、ここでは屋外気流の垂直方向プロファイルが 1/4 乗則にしたがうものと仮定し、開口設置高さでの気流速度を算出して計算に用いた。なおアトリウムの建設場所は東京（北緯 35.68°, 東経 139.77°）を想定した。

夏季(8月)および冬季(2月)晴天日について実施した本モデルによる予測結果と数値解析結果を図 14 に示す。夏季には成層的な温度分布が形成されること、冬季には上昇流、下降流による熱移動量が大きく、屋内温度が均一化されることなど、本予測モデルによる結果は数値解析の結果とよく一致している。空調気流や開口からの流入気流が壁面まで到達する部分では、これらの気流と壁面流とが干渉する。このため壁面近傍での気流状態には、両者の間に若干の違いも認められた。ただし垂直温度分布は定量的に一致しており、全体的な流量収支、熱量収支については本予測モデルで十分な精度で現象を再現できるものと判断できる。なお冬季条件についての数値解析結果では第 4～第 5

図 1 2 検証計算の対象としたアトリウム構造

表 2 想定したアトリウムの構造概要

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	容量比熱	透過率	反射率	吸収率
	kcal/mh °C	kcal/m³°C			
	0.67	483.0	0.60	0.30	0.10
構成材料	床面:				
	構成材料		熱伝導率	容量比熱	
			kcal/mh °C	kcal/m³°C	
	マープル (10mm)		1.35	561.0	
	モルタル (20mm)		1.12	382.15	
開口部	RC (150mm)		1.20	461.93	
	ポリスチレン (100mm)		0.03	7.17	
	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			
		スロー定数 5.6			
	吹き出し,				
	吸い込み位置:	いずれも第 1 層

図 1 3 計算に用いた気象条件

層付近に空調吹き出し噴流と流入気流との干渉が認められるが、干渉後の流入気流は緩やかに下降しながら本来の噴流軌跡を保存しており、噴流間の干渉を考慮しない予測モデルの結果ともよく整合している。これは開口からの流入気流が有する慣性力によるものと考えられ、噴流間での干渉を含むような場合でも開発した予測モデルによる現象予測はある程度可能と考えられる。

4.2 各種条件での垂直温度分布の比較

図 13 に示した気象条件を用いて各種条件でのアトリウム内垂直温度分布を試計算した。図 15 は開口を設けた場合、開口なしの場合について、隔月ごとの垂直温度分布の変化を予測した結果である。開口を設けて外気を導入した

図 1-4 数値解析結果と予測モデルによる計算結果との比較

場合には屋内上部に形成される熱だまりが除去され、いずれの場合も上層部の温度が低下することがわかる。外気温度が空調設定温度よりも低い2月、12月を除外すると、開口部設置による熱だまりの除去効果を最も得られるのが中間期の4月であることなど、本モデルによる予測結果は経験的な事実とも整合する。

中間期について外部気流速度を変化させた場合の垂直温度分布の違いを比較した。各種風速条件について予測した結果を図16に示す。屋内上部の温度は風速に対して単調に低下しており、またこれに伴い変化する全体的な温度分

布の勾配も本予測モデルで再現可能なことがわかった。

4.3 各季節における各層温度の日変化

季節ごとのアトリウム内各層温度の日変化を試計算した。計算対象日の気象条件と合わせ、各季節についての予測結果をまとめて図17に示す。4.1, 4.2節でも考察したように、いずれの季節とも開口部を設置した場合には屋内上層部での温度の低下が認められる。図に併記した天井表面温度、床表面温度の日変化は各層の温度変化と一致しておらず、ピークの現れる時刻が2～3時間のずれを生じている。これは日射量と外気温度の日変化のずれに起因するものと考えられ、定性的には妥当な結果と考えられる。また夏季の各層温度は2ヶ所のピークを示しており、特に開口を設けた場合にはその傾向がより顕著に現れている。本予測モデルでは日射、熱貫流および外気の流入による効果を考慮しており、ここで得られた結果はこれらの相互作用による結果と解釈できる。気象条件と比較すると、開口なしの条件における正午近傍での屋内温度の低下は天空日射量の低下によるもの、開口を設置した場合の結果はさらにこの前後での外気風速が大きくなることに起因するものと考えられる。

5. 結 言

開口部から流入する自然換気流の特性を数値解析により検討し、開口部を有するアトリウム空間に対応したマクロ温熱環境予測モデルを構築した。標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いた数値解析の結果、得られた知見は以下のとおりである。

1) 風上側壁面での風圧係数の分布状態は風速や開口の有

図 17 季節ごとの各層温度の日変化の比較

無に影響されない。このため、開口のない場合について求めた風圧係数分布を用いて任意の開口条件に関する通風量予測を行うことが可能である。この方法で予測した通風量は、数値解析により求めたものと定量的に一致した。

2) 開口からの流入気流の角度は、開口の設置高さにより変化する。建築物高さに対する開口設置位置の比と流入角度とは2次曲線で近似することが可能で、建築物高さや風下側開口条件が異なる場合の特性も同一の近似曲線で評価することが可能である。

3) 建築物の内部空間に対して開口面積が十分小さい場合、屋内に流入した後の流入気流は噴流的なふるまいを示す。解析結果から算出した主流域でのスロー定数の平均値は、長方形吹きだし口からの噴流の値とほぼ同等の値を示した。

考察結果をもとに開口からの流入気流の特性をマクロモデルに加え、開口を有する場合の屋内温熱環境予測モデルを構築した。また本モデルを用いた試行計算を行い、以下の結果を得た。

4) 夏期および冬季晴天日について本モデルによる屋内温度分布、気流分布の予測を行い、数値解析による予測と比較した結果、両者はよい一致を示した。

5) 夏季、冬季および中間期について開口を設けた場合、開口なしの場合の屋内垂直温度分布や屋内温度の日変化を試計算した。その結果、中間期には開口の設置により熱だまりの除去効果が期待できること、風速の違いにより屋内温度分布が変化することなど、本予測モ

デルにより定性的に妥当な特性を再現し得ることを確認した。

以上の結果から、本予測モデルを用いて開口を有するアトリウム空間の温熱特性を十分な精度で予測できることを確認した。今後、開口条件をさまざまに変化させた場合や、季節ごとの屋内温熱環境特性の違いなどについて検討を進める予定である。

記号

A	: 太陽方位角 ($^{\circ}$),
A_i	: 開口 i の開口面積 (m^2),
A_f	: 床面積 (m^2),
Ar	: アルキメデス数,
Aw_n	: n 壁の面積 (m^2),
C	: 風圧係数,
Cb_{ji}	: ij 層間の乱流熱移動に関する係数 ($kcal/hm^2^{\circ}C$),
Cpr	: 空気の容積比熱 ($kcal/kg^{\circ}C$),
C_s	: 展開係数 $[= 1/(2K_p)]$,
D_0	: 開口の相当直径 (m),
g	: 重力加速度 (m/s^2),
h	: 太陽高度 ($^{\circ}$),
H_j	: j 層の内部発熱 ($kcal/h$),
H_{JET}^{AC}	: 空調噴流により供給される熱量 ($kcal/h$),
H_{JET}^N	: 開口からの外気流入により供給される熱量 ($kcal/h$),
Kg	: ガラスの熱貫流率 ($kcal/m^2h^{\circ}C$),
K_p	: スロー定数,
M_j	: j 層の空間熱容量 ($kcal/^{\circ}C$),
N	: 開口の総数,
Nb	: 壁面の総数,
Nk	: 層の分割数,
p	: 軌道定数,
P_w	: 風圧力 (kg/m^2),

Q_0	: 外気流入量 (m^3/h),
Q_{ji}	: i 層から流出する風量 (m^3/h),
Q_{JET}^{AC}	: 空調吹き出し流量 (m^3/h),
Q_{OUT}^{AC}	: 空調噴流による誘引量 (m^3/h),
Q_{OUT}^N	: 開口からの外気流入に伴う誘引量 (m^3/h),
Q_{RET}^{AC}	: 空調レターン吸い込み流量 (m^3/h),
Q_{OUT}^N	: 開口からの流出流量 (m^3/h),
Q_{rji}	: i 層から j 層に流入する流量 (m^3/h),
Q_{winji}	: i 壁側から j 層に流入する壁面流 (m^3/h),
Q_{woutji}	: j 層から i 壁側で流出する壁面流 (m^3/h),
r	: 噴流半径 (m),
r_{ijn}	: i 層, n 壁の熱取得が壁面流により j 層に与える影響,
Rs	: 内壁への吸収熱量 ($kcal/h$),
s	: 噴流の軌道距離 (m),
T_0	: 外気温度 ($^{\circ}C$),
T_a	: 噴流の周辺温度 ($^{\circ}C$),
T_j	: j 層空気温度 ($^{\circ}C$),
T_{JET}^{AC}	: 空調吹き出し温度 ($^{\circ}C$),
T_{sn}	: 内壁表面温度 ($^{\circ}C$),
v_0	: 基準点風速 (m/s),
v_w	: 壁表面における気流速度 ^[注4] (m/s),
V_0	: 開口部での流入風速 (m/s),
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),
α_c	: 対流熱伝達率 ($kcal/m^2h^{\circ}C$),
α_i	: 開口 i の流量係数,
α_i	: 内壁側総合熱伝達率 ($kcal/m^2h^{\circ}C$),
α_r	: 内壁側放射熱伝達率 ($kcal/m^2h^{\circ}C$),
γ	: 空気の比重 (kg/m^3),
λ	: 壁体の熱伝導率 ($kcal/mh^{\circ}C$),
ΔP_i	: 開口 i 前後の圧力差,
ΔT	: 壁表面と隣接空間との温度差 ($^{\circ}C$),
Δy_n	: 噴流中心軸のずれの変化量 (m),
ΔY	: 各層の中間点で定義した層間距離 (m),
Φ_{in}	: 放射熱交換係数,

注

[注 1] 従来のマクロモデルでも、外気の流入はすきま風の扱いとして考慮されている。本研究では、外部気流によって駆動される流入気流を開口により積極的に屋内に導入する場合を想定しており、対象とする外気流入の形態、すなわちその物理的特性は従来対象とされてきたものと異なる。

[注 2] 流入気流の直進性は、風上側壁面積に対する相対的な開口面積が小さいことに起因する絞り効果的なものと考えられる。本解析では建築物高さを基準としてレイノルズ数 10^4 を想定しているが、開口部での局所的なレイノルズ数は 10^3 程度あり、

流入気流は十分大きな慣性力を有する。

[注 3] ここで対象としている開口は矩形であり、厳密な意味では軸対象噴流との比較は妥当ではない。しかし空間に対する吹き出し口スケールが小さいことから、十分後流側での特性は軸対象噴流に近いものと考えた。

[注 4] 壁表面での熱伝達率は壁表面温度と温度境界層外側温度との差によって定義されており、ここで用いる風速 v_w には温度境界層外側の値を適用する必要がある。本研究では対数則による壁関数を用いており、壁表面における風速プロファイルの立ち上がりは急峻であると考えられる。このため壁面に隣接する定義点での値を近似的に用いて熱伝達率を求めた。本研究ではスタガード格子系を用いているので、壁面から隣接定義点までの距離は格子幅の $1/2$ となる。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：アトリウム環境設計 (1994), 彰国社.
- 2) 宮川：変分原理を用いた大空間の上下温度分布の計算法 (第 1 報), 空気調和衛生工学会論文集, 13(1990 6), 1.
- 3) 宮川：変分原理を用いた大空間の上下温度分布の計算法 (第 2 報), 空気調和衛生工学会論文集, 13(1990 6), 13.
- 4) 戸河里, 荒井, 三浦：大空間の空調・熱環境計画手法の研究 (その 1), 日本建築学会計画系論文報告集, 427(1991 9), 9.
- 5) 戸河里, 荒井, 三浦：大空間の空調・熱環境計画手法の研究 (その 2), 日本建築学会計画系論文報告集, 435(1992 9), 11.
- 6) 石田, 宇田川：上下温度分布を考慮した熱負荷計算 (その 1), 空気調和衛生工学会学術講演論文集, (1992 10), 77.
- 7) 石田, 宇田川：上下温度分布を考慮した熱負荷計算 (その 2), 空気調和衛生工学会学術講演論文集, (1992 10), 81.
- 8) Patankar, S.V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp. (1980).
- 9) Leonard, B.P.: A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Up-stream Interpolation, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 19 (1979), 59.
- 10) Launder, B.E. and Spalding, D.B.: Mathematical Models of Turbulence, Academic Press (1972).
- 11) Schlichting, H.: Boundary-Layer Theory (1979 7th. ed.), MacGraw Hill, 729.
- 12) 井上：空気調和ハンドブック (1991, 第 3 版), 丸善, 349.
- 13) 戸河里, 荒井, 三浦：大空間の上下温度分布予測のための非定常計算モデル (その 2), 日本建築学会計画系論文報告集, 435(1992 5), 11.
- 14) 絵内, 荒谷, 久保田, 松村：温度積層空間を上中下の 3 仮想室に分割した非定常解析手法と大規模吹抜け空間への適用結果, 日本建築学会計画系論文報告集, 419(1991 1), 21.

(1995年 9月10日原稿受理, 1996年 2月26日採用決定)