外部気流を利用した大空間構造物の換気・温熱特性に関する研究

A STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF AIR VENTILATION
AND THERMAL CONDITION IN A LARGE INDOOR
SPACE WITH OPENINGS

諏訪好英*, 表 佑太郎**, 本間義教*, 大高一博***, 橋本直樹***

Yoshihide SUWA, Yutaro OMOTE, Yoshinori HOMMA,

Kazuhiro OTAKA and Naoki HASHIMOTO

An adoption of natural ventilation system is one of the most effective strategies on energy conservations for air-conditioning systems in large indoor spaces. Characteristics of air ventilation and thermal condition in a hemispherical large indoor stadium with openings were studied using numerical analysis technique based on the BFC (Boundary Fitted Coordinate system) calculation.

As the result of the study, the following conclusions were drawn ; (1) Air flow around a hemispherical dome makes negative pressure field on the top of the roof. (2) Openings arranged on the roof act as an effective exhaust. Enough air exchange rate was obtained in the stadium when the openings were arranged on side walls and top of the roof. (3) Natural ventilation which is obtained using these openings enables to remove heated air caused by the solar radiation, and energy for air-conditionings will be conserved during spring and autumn.

Keywords : large indoor space, natural ventilation system, characteristic of thermal condition, numerical analysis, BFC, standard $K-\epsilon$ turbulence model

大空間, 自然換気システム, 温熱特性, 数値解析, B F C, 標準 $k-\epsilon$ モデル

1. はじめに

スポーツや展示会, コンサートなど各種イベントに対応した大型の多目的屋内スタジアムが, 近年, 各地で建設されるようになった。これらのいわゆる大空間構造物では, 内部容積や天井高が大きいこと, 居住域と非居住域とが同一の屋内空間に混在することなどに起因して, 一般の建築物とは大きく異なる屋内温熱特性を示す。これまで, 空調設備設計の立場からは大空間構造物に対応した熱負荷計算手法の開発^{1),2),3)}や空調制御方法の検討が, また温熱・気流解析の立場からは温度成層の影響を考慮した非等温乱流モデルによる研究⁴⁾や対流・放射連成解析⁵⁾などさまざまな試みが行われている。

一方, これら大空間構造物の屋内環境制御には, 大容量の空調・送風設備が必要であり, その消費エネルギーも膨大なものとなる。このため大空間構造物の屋内環境計画には, 経済性や外部環境への影響などについてもさまざまな配慮が必要である。

大空間構造物の空調・送風消費エネルギーを削減するひとつの方法として, 自然換気の利用が考えられる。自然換気を効果的に利用できれば, 屋内換気に必要な送風エネル

ギーの大幅な削減が可能である。またスポーツ観戦や大型イベント会場として使用される屋内スタジアムでは人体発熱による熱負荷が大きく, 特にドーム構造のスタジアムでは居住域に対する天井面の輻射形態係数が大きいこと, 日射などの影響により年間を通じて冷房が必要となる場合も多い。局所的な居住域空調と併用して自然換気を行うシステムでは天井面付近に形成される成層的な熱だまりの除去が可能となるとともに, 外気冷房的な効果が得られ, 季節によっては空調エネルギーを削減できる可能性も考えられる。

建築物の自然換気特性には, 外部気流により引き起こされる建築物周辺気流の状態と開口部の設置位置とが大きく関与する。また本研究で対象とするような大空間構造物では, 自然換気により形成される屋内の気流状態の把握も重要な課題である。実験的にこれらの特性を検討する場合, 模型則や風洞寸法の関係から, 屋内気流の検討には縮尺1/40 ~ 1/60, 周辺気流の検討には縮尺1/200 ~ 1/300程度の模型が通常用いられており, 屋内外の現象が同時に作用するようなこの種の問題に対応することは困難である。本研究では気流および熱輸送の数値解析手法を用いて屋

* ㈱大林組 技術研究所

** ㈱大林組 技術研究所・工博

*** ㈱日建設計

Technical Research Inst., OBAYASHI Corp.

Technical Research Inst., OBAYASHI Corp., Dr. Eng.

Nikken Sekkei

内外の現象解析を同時に実施し、外部気流を利用した大空間構造物の自然換気特性、温熱環境特性について考察した。本報では屋内外気流解析の概要と、これを用いて実施した大空間構造物の自然換気特性、温熱環境特性に関する検討結果を報告する。

2. 数値解析手法

2.1 基礎方程式

本研究では、数値解析手法を用いて建築物周辺気流、屋内の自然換気特性および屋内温熱特性の考察を行った。特に屋内の換気、温熱特性の検討には、日射その他の熱的外部条件や空調、照明、人体などからの発熱を考慮した熱対流連成解析を行うこととした。したがって想定した基礎方程式は、流体の運動量方程式、連続の式および熱量輸送に関するエネルギー方程式から構成される。

ここでは曲面的なドーム構造を対象とするため、計算には一般曲線座標系を用いた。乱流モデルとして標準 $k-\varepsilon$ モデル⁶⁾を採用し、一般曲線座標系に写像変換すると、基礎方程式は以下のように表される^[注1]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{|J|} \frac{\partial |J| \rho U_i}{\partial \xi_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{1}{|J|} \frac{\partial |J| \rho u_i U_j}{\partial \xi_j} = - \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial \xi_j} + \frac{1}{|J|} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left\{ 2|J| \frac{\partial \xi_j}{\partial x_k} (\mu + \mu_T) S_{ik} \right\} - R_i + \rho g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{1}{|J|} \frac{\partial |J| \rho U_i h}{\partial \xi_i} = \frac{1}{|J|} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left\{ |J| q_{ij} \left(\lambda + C_p \frac{\mu_T}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial \xi_j} \right\} + \dot{Q} \quad (3)$$

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$p_0 = \frac{\gamma_c - \bar{f}}{\gamma_c} \rho h \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{1}{|J|} \frac{\partial |J| \rho U_i k}{\partial \xi_i} = \frac{1}{|J|} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left\{ |J| q_{ij} \left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial \xi_j} \right\} + G_s + G_T - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{|J|} \frac{\partial |J| \rho U_i \varepsilon}{\partial \xi_i} = \frac{1}{|J|} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left\{ |J| q_{ij} \left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi_j} \right\} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

$$U_i = \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j}, \quad J \equiv \frac{\partial(x_1, x_2, x_3)}{\partial(\xi_1, \xi_2, \xi_3)}$$

$$S_{i,k} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_l} + \frac{\partial \xi_l}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial \xi_l} \right), \quad q_{ij} = \frac{\partial \xi_i}{\partial x_k} \frac{\partial \xi_j}{\partial x_k}$$

$$G_T = \frac{\mu_T}{\rho \sigma_T |J|} \left\{ g_i \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} \frac{\partial |J| \rho}{\partial \xi_j} \right) \right\},$$

$$G_s = 2 \mu_T S_{ij} \frac{\partial \xi_l}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_l}, \quad R_f = - \frac{G_T}{G_s + G_T}$$

なお運動量方程式とエネルギー方程式との連成計算のため、連続の式に現れる密度の項は残す形とした^[注2]。本研究

究では流体運動に伴う密度変化を考慮するような急峻な現象を対象とするわけではない。密度の計算は浮力効果を評価する目的のみに限定することとし、ここでは密度が温度の関数として一意に決定するものと仮定した^[注3]。

2.2 基礎方程式の離散化

(2.2.a) メトリックと基礎方程式の空間への離散化

本研究で用いた数値解析手法には、スタッガート変数配置による離散化方程式を用いた。以下の展開のため、変換のメトリックはあらかじめ図1-a)に示すような定義点に配置することとする。セル界面におけるメトリックは次のように計算する。たとえば ξ 一定面において、

$$\left(|J| \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)_{i+1/2,j,k} = \frac{1}{4} \{ (y_{i+1,j+1,k} + y_{i+1,j+1,k+1} - y_{i+1,j,k} - y_{i+1,j,k+1}) \times (z_{i+1,j,k+1} + z_{i+1,j+1,k+1} - z_{i+1,j,k} - z_{i+1,j+1,k}) - (y_{i+1,j,k+1} + y_{i+1,j+1,k+1} - y_{i+1,j+1,k} - y_{i+1,j+1,k+1}) \times (z_{i+1,j+1,k} + z_{i+1,j+1,k+1} - z_{i+1,j,k} - z_{i+1,j,k+1}) \} \quad (8)$$

ここに各セルでの変換の恒等式、

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(|J| \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (9)$$

が満足される。(9)式は一樣流の連続条件と同値であり、連続の式を厳密に扱うためには(9)式を満足することが必要である。

基礎方程式(1)～(7)の離散化には図1-b)に示すようなスタッガート変数配置を用いた。すなわち従属変数 $\rho, \rho u_i, p, \rho h, \rho k$ および $\rho \varepsilon$ をセル中心で定義し、特性速度としてセル界面に定義した反変成分 $|J| U_i$ を使用する。特性速度に反変成分を用いると、各方程式の離散化に関して保存型の展開が容易となる。

各方程式を空間について離散化すると次式を得る。

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{i,j,k} + \frac{1}{|J|_{i,j,k}} \{ |J|_{i+1/2,j,k} F_{i+1/2,j,k} - |J|_{i-1/2,j,k} F_{i-1/2,j,k} + |J|_{i,j+1/2,k} F_{i,j+1/2,k} - |J|_{i,j-1/2,k} F_{i,j-1/2,k} + |J|_{i,j,k+1/2} F_{i,j,k+1/2} - |J|_{i,j,k-1/2} F_{i,j,k-1/2} \} + S_{i,j,k} = 0 \quad (10)$$

図1 メトリックと変数の定義点

ここに ϕ は各方程式の従属変数、 F はセル界面でのフラックス、 S は生成消滅項である。フラックス F は対流による成分 F_C と拡散による成分 F_D の和として表され、それぞれ以下の形で展開できる。たとえば、

$$F_{i+1/2,j,k}^C = \langle \rho \phi \rangle_{i+1/2,j,k} U_{i+1/2,j,k} \quad (11)$$

$$F_{i+1/2,j,k}^D = -\Gamma_{i+1/2,j,k} \{ (q_{11})_{i+1/2,j,k} (\phi_{i+1,j,k} - \phi_{i,j,k}) + \frac{1}{2} (q_{12})_{i+1/2,j,k} (\phi_{i+1/2,j+1,k} - \phi_{i+1/2,j-1,k}) + \frac{1}{2} (q_{13})_{i+1/2,j,k} (\phi_{i+1/2,j,k+1} - \phi_{i+1/2,j,k-1}) \} \quad (12)$$

$\langle \rho \phi \rangle$ はセル界面での値を示すが、図 1-b) にも示したようにセル界面では独立変数が定義されていない。隣接点からの内挿補間に 3 次精度 QUICK 法⁷⁾を用いると、 $\langle \rho \phi \rangle$ は以下のように表される。

$$U_{i+1/2,j,k} \geq 0: \quad \langle \rho \phi \rangle_{i+1/2,j,k} = \frac{1}{2} \{ (\rho \phi)_{i,j,k} + (\rho \phi)_{i+1,j,k} \} - \frac{1}{8} \{ (\rho \phi)_{i+1,j,k} - 2(\rho \phi)_{i,j,k} + (\rho \phi)_{i-1,j,k} \} \quad (13-1)$$

$$U_{i+1/2,j,k} < 0: \quad \langle \rho \phi \rangle_{i+1/2,j,k} = \frac{1}{2} \{ (\rho \phi)_{i,j,k} + (\rho \phi)_{i+1,j,k} \} - \frac{1}{8} \{ (\rho \phi)_{i+2,j,k} - 2(\rho \phi)_{i+1,j,k} + (\rho \phi)_{i,j,k} \} \quad (13-2)$$

(2.2.b) 基礎方程式の時間方向への離散化

本研究では定常的な特性の検討を目的としている。ここでは形式的に時間依存解法を用いたが、時間積分の過程において現象変化が定常的となった時点での解を定常解として扱うこととした。Euler 陽解法により基礎方程式を時間方向に離散化すると、連続の式、運動量方程式およびその他の輸送方程式はそれぞれ以下のように展開できる。

$$\frac{\rho^n - \rho^{n-1}}{\Delta t} + \frac{1}{|J|} \left(\frac{\partial |J| \rho^n U_i^{n+1}}{\partial \xi_i} \right) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{(\rho u_i)^{n+1} - (\rho u_i)^n}{\Delta t} + \frac{1}{|J|} \frac{\partial |J| U_j^n (\rho u_i)^n}{\partial \xi_j} = -\frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \xi_j} + \frac{1}{|J|} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left\{ 2|J| \frac{\partial \xi_j}{\partial x_k} (\mu + \mu_T) S_{ik}^n \right\} - R_i^{n+1} + \rho^n g_i \quad (15)$$

$$\frac{(\rho \phi)^{n+1} - (\rho \phi)^n}{\Delta t} + \frac{1}{|J|} \frac{\partial |J| U_i^{n+1} (\rho \phi)^n}{\partial \xi_i} = \frac{1}{|J|} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left\{ |J| q_{ij} \Gamma \frac{\partial \phi^n}{\partial \xi_j} \right\} + S^n \quad (16)$$

ここで計算の簡略化のため、連続式の密度の時間微分項および渦動粘性係数については、1 ステップ前の値を代用して用いることとした。速度場、圧力場の補正計算において半陰解法的な扱いを行う場合には、エネルギー方程式、乱流諸量の輸送方程式の計算を反復計算に組み込み、その時点での値を同時に求めることも可能である。しかし先述したように、ここでは過渡的な応答を問題とするわけではないので、時間ステップ内でのこれら諸量の扱いを反復計算に組み込まなくても十分であると判断した^[注4]。

2.3 運動量方程式の解法

運動量方程式の解法には SIMPLE 法⁸⁾を用いた。まず

各方向の成分に対する運動量方程式を圧力勾配項 g^{ui} とその他の空間微分項および外力項 f^{ui} に分けて考える。

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} = f^{ui}(\rho^n, u_j^n, U_j^n) + g^{ui}(p^n) \quad (17)$$

さらに次式、

$$\frac{\partial |J| \rho U_i}{\partial t} = |J| \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} \frac{\partial \rho u_j}{\partial t} = |J| \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} (f^{uj} + g^{uj}) \quad (18)$$

により物理速度を反変速度に変換したものを(10)、(15)式に従って離散化し、 p^{n+1} を1ステップ前の圧力 p^n に置き換えると反変速度の仮定値 U^*, V^*, W^* について次式を得る。

$$(\rho U^*)_{i+1/2,j,k}^{n+1} = (\rho U)_{i+1/2,j,k}^n + \Delta t [(\xi_x f^u)_{i+1/2,j,k} + (\xi_y f^v)_{i+1/2,j,k} + (\xi_z f^w)_{i+1/2,j,k} - \{ (q_{11})_{i+1/2,j,k} (p_{i+1,j,k}^n - p_{i,j,k}^n) + \frac{1}{2} (q_{12})_{i+1/2,j,k} (p_{i+1/2,j+1,k}^n - p_{i+1/2,j-1,k}^n) + \frac{1}{2} (q_{13})_{i+1/2,j,k} (p_{i+1/2,j,k+1}^n - p_{i+1/2,j,k-1}^n) \}] \quad (19-1)$$

$$(\rho V^*)_{i,j+1/2,k}^{n+1} = (\rho V)_{i,j+1/2,k}^n + \Delta t [(\eta_x f^u)_{i,j+1/2,k} + (\eta_y f^v)_{i,j+1/2,k} + (\eta_z f^w)_{i,j+1/2,k} - \{ \frac{1}{2} (q_{21})_{i,j+1/2,k} (p_{i+1,j+1/2,k}^n - p_{i-1,j+1/2,k}^n) + (q_{22})_{i,j+1/2,k} (p_{i,j+1,k}^n - p_{i,j,k}^n) + \frac{1}{2} (q_{23})_{i,j+1/2,k} (p_{i,j+1/2,k+1}^n - p_{i,j+1/2,k-1}^n) \}] \quad (19-2)$$

$$(\rho W^*)_{i,j,k+1/2}^{n+1} = (\rho W)_{i,j,k+1/2}^n + \Delta t [(\zeta_x f^u)_{i,j,k+1/2} + (\zeta_y f^v)_{i,j,k+1/2} + (\zeta_z f^w)_{i,j,k+1/2} - \{ \frac{1}{2} (q_{31})_{i,j,k+1/2} (p_{i+1,j,k+1/2}^n - p_{i-1,j,k+1/2}^n) + \frac{1}{2} (q_{32})_{i,j,k+1/2} (p_{i,j+1,k+1/2}^n - p_{i,j-1,k+1/2}^n) + (q_{33})_{i,j,k+1/2} (p_{i,j,k+1}^n - p_{i,j,k}^n) \}] \quad (19-3)$$

特性速度と従属変数の定義点はスタッガートに配置されているので、(19-1) ~ (19-3) 式では f^{ui} については(11) ~ (13-2) 式により内挿補間し、 g^{ui} は界面で直接計算することとした。

本来の運動量方程式と(19-1) ~ (19-3) 式のそれぞれ対応する項の差をとり、速度と圧力の補正量 $U^C, \delta p$

$$U^{n+1} = (U^*)^{n+1} + U^C \quad (20)$$

$$p^{n+1} = p^n + \delta p \quad (21)$$

についてまとめると、以下のような速度補正式を得る。

$$\begin{aligned} \rho U^C &= (\rho U)^{n+1} - (\rho U^*)^{n+1} \\ &= -\Delta t \left(q_{11} \frac{\partial \delta p}{\partial \xi} + q_{12} \frac{\partial \delta p}{\partial \eta} + q_{13} \frac{\partial \delta p}{\partial \zeta} \right) \quad (22-1) \\ \rho V^C &= (\rho V)^{n+1} - (\rho V^*)^{n+1} \end{aligned}$$

図2 開口部への2種類のモデルの設定

$$= -\Delta t \left(q_{21} \frac{\partial \delta p}{\partial \xi} + q_{22} \frac{\partial \delta p}{\partial \eta} + q_{23} \frac{\partial \delta p}{\partial \zeta} \right) \quad (22-2)$$

$$\rho W^C = (\rho W)^{n+1} - (\rho W^*)^{n+1} \\ = -\Delta t \left(q_{31} \frac{\partial \delta p}{\partial \xi} + q_{32} \frac{\partial \delta p}{\partial \eta} + q_{33} \frac{\partial \delta p}{\partial \zeta} \right) \quad (22-3)$$

(22-1) ~ (22-3) 式を連続の式に代入して、圧力補正式が次のように求まる。

$$\frac{1}{|J|} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ |J| \left(q_{11} \frac{\partial \delta p}{\partial \xi} + q_{12} \frac{\partial \delta p}{\partial \eta} + q_{13} \frac{\partial \delta p}{\partial \zeta} \right) \right\} \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial \eta} \left\{ |J| \left(q_{21} \frac{\partial \delta p}{\partial \xi} + q_{22} \frac{\partial \delta p}{\partial \eta} + q_{23} \frac{\partial \delta p}{\partial \zeta} \right) \right\} \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left\{ |J| \left(q_{31} \frac{\partial \delta p}{\partial \xi} + q_{32} \frac{\partial \delta p}{\partial \eta} + q_{33} \frac{\partial \delta p}{\partial \zeta} \right) \right\} \right] \\ = \frac{\rho^n - \rho^{n+1}}{(\Delta t)^2} + \frac{1}{\Delta t |J|} \\ \times \left\{ \frac{\partial |J| (\rho U^*)^{n+1}}{\partial \xi} + \frac{\partial |J| (\rho V^*)^{n+1}}{\partial \eta} + \frac{\partial |J| (\rho W^*)^{n+1}}{\partial \zeta} \right\} \quad (23)$$

SIMPLE 法による速度補正は (23) 式および (22-1) ~ (22-3) 式から計算した U^C, V^C, W^C と, (19-1) ~ (19-3) により計算した U^*, V^*, W^* により行う。また圧力については緩和係数 α_p を用いて、次式により補正を行う。

$$p^{n+1} = p^n + \alpha_p \delta p \quad (24)$$

本研究では、以下のような手順により方程式系の計算を行うこととした。すなわち、

- (I) 1 ステップ前の圧力を推定値として、(19-1) ~ (19-3) 式により仮の反変速度を求める。
- (II) (20) ~ (24) 式を用いて SIMPLE 法のアルゴリズムにより速度および圧力補正の収束計算を行う。ただし密度の時間微分項および渦動粘性係数については、1 ステップ前の値を代用する。
- (III) (I), (II) の手順によって得られた反変成分を、次の時間ステップのため物理速度に変換しておく。変換は次式による。

$$(\rho u_i)^{n+1} = \frac{x_i}{\xi_j} (\rho U_j)^{n+1} \quad (25)$$

- (IV) (I), (II) の手順により求めた反変速度を用いて、エネルギー方程式および k, ε の輸送方程式を解き、1 ステップ分の時間積分を終了する。

なお (23) 式のマトリクス計算には 5 項行列の解法を基本とし、これを 3 次元方向にスィープする方法を用いた。

2.4 開口部のモデル化

本研究では外部気流を利用した自然換気特性の考察を目的としているため、屋内気流と屋外気流とを同時に解析することが必要となる。ただし屋内と屋外の空間は、解析対象領域に比べてかなり小さな開口部を介して連結されることとなる。このような場合、空間での計算格子分割幅と開口部での分割幅との間に大きなスケール差を生じることとなり、そのままの形で開口部をモデルに再現することは困難となる。ここでは開口部分のセル界面における開口率と流量係数を用いて次のように通風特性をモデル化した。

開口部での流量係数が既知である場合、開口部分に相当する計算セル界面での開口率としてこれを与える方法が考えられる。しかしここで対象とする系では、開口部に相当する計算セル界面の面積も実際の開口面積とは一致していないため、開口面積比としての開口率と流量係数の表現としての開口率とを同時に扱うと、計算上の開口率はかなり小さな値となる。計算安定性の面などから開口率のみによる通風特性のモデル化には限界があるものと考え、流量係数の扱いは別途モデル化して計算に組み込むこととした。以下に開口面積比と通風特性についてのモデル化の方法を示す。

(2.4.a) 開口率による開口面積比の表現

解析対象モデルのセル界面の面積と実際の開口面積との違いについては、開口率によるモデル化を行った。図 2-a) に示すような開口部分で、セル界面に開口率 ψ が与えられたものとする、基礎方程式の移流項を計算する際、セルを通過するフラックスは次式で評価される。

$$\left\{ \int_{S_{i,j,k-1/2}} - \int_{S_{i,j,k+1/2}} \right\} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} ds \\ = \psi_{i,j,k-1/2} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n} S)_{i,j,k-1/2} \\ - \psi_{i,j,k+1/2} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n} S)_{i,j,k+1/2} \quad (26)$$

実際の開口面積に対する解析モデルの開口面積の比としての開口率を定義すれば、圧力補正アルゴリズムにおいて、界面の前後には実際の開口面積に相当する圧力差を生じる。ただしここで得られる圧力差は、流量係数 $\alpha = 1.0$ を仮定した場合に相当する。

(2.4.b) 通風特性を考慮した流量係数の扱い

図 2-b) に示すような開口部において、通風モデルにおける通風量 Q_{tr} と圧力差との関係に (2.4.a) で示した開口率を考慮すると、次式が得られる。

図3 通風モデルの Δp - Q_f 特性

$$Q_{tr} = \alpha \Delta p \sqrt{\frac{2g}{\gamma |\Delta p|}} \times \left\{ \sum_{i=1}^{I2} \sum_{j=1}^{J2} (\psi_{i,j,K2+1/2} S_{i,j,K2+1/2}) \right\} \quad (27)$$

Δp については、開口率 ψ を設定した界面中央の両側にあるセル中心値から評価することとする。

各時間ステップにおける運動量方程式の計算を終了した時点、すなわち2.3節の(I)を終了した時点では Δp には流量係数の影響が考慮されていない。このため(27)式による速度補正を、2.3節の(II)に示されている反復アルゴリズムに組み込んだ。すなわち本モデルを設定した界面については(24)式による圧力補正と(27)式による通風量計算とを反復し、速度補正を行わない。この方法によればその時点での連続の式が満足されない場合を生じるが、これに続く時間ステップでは新たに補正した速度、圧力状態に基づき計算を進めることとなり、時間の更新に伴って質量保存が達成されることになる。

なお図3に示すように、 $\Delta p \approx 0.0$ の近傍では Δp - Q_{tr} の特性を表す曲線は勾配無限大に漸近する。本モデルでは圧力差から通風量の計算を行うので、圧力差の絶対値が小さい場合には反復計算の過程で計算不安定を引き起こすことも予測される。このため Δp が ± 0.5 の範囲では直線近似を適用し、(27)式の代わりに次式を用いることとした。

$$Q_{tr} = (Q_2 - Q_1) \Delta p + Q_1 \quad (28)$$

$$Q_1 = -\alpha \sqrt{\frac{g}{\gamma}} \left\{ \sum_{i=1}^{I2} \sum_{j=1}^{J2} (\psi_{i,j,K2+1/2} S_{i,j,K2+1/2}) \right\}$$

$$Q_2 = \alpha \sqrt{\frac{g}{\gamma}} \left\{ \sum_{i=1}^{I2} \sum_{j=1}^{J2} (\psi_{i,j,K2+1/2} S_{i,j,K2+1/2}) \right\}$$

本モデルでは通風量の評価を開口単位で行うが、開口部が複数の計算セルから構成されている場合には速度分布を再現する必要がある。ここでは、運動量方程式を計算した時点での仮の反変速度のプロファイルを保存する形で通風量を一致させることとした。すなわちセル界面での反変速度 $\widetilde{W}$ は次式により補正される。

a) 屋内平面図

b) 立面図

図4 対象とした建築物

表1 対象建築物の概要

	建築物概要
主要用途	大型イベント、スポーツ観戦
収容観客数	5万人
建築物規模	地下1階、地上9階、塔屋1階 建築物高さ：80m、外周：直径200m アリーナ部分：直径150m、 屋内容積1,200,000 m ³
構造	SRC、RC、S造、ポリカーボネート(屋根面頂部)

$$\widetilde{W}_{i,j,K2+1/2} = W_{i,j,K2+1/2}^* Q_{tr} / \left\{ \sum_{i=1}^{I2} \sum_{j=1}^{J2} (W_{i,j,K2+1/2}^* S_{i,j,K2+1/2}) \right\} \quad (29)$$

(29)式が連続の式を満足するのは W^* と $\widetilde{W}$ とが一致した場合であり、その時点で通風量と圧力差との関係も同時に満足される。

本モデルによる計算では、急峻な速度変化に伴う圧力勾配の急激な立ち上がりを時間方向に緩和する効果が得られるため、流量係数が小さい場合や、通風量に応じて流量係数が変化する場合についても良好な計算安定性を得られる。試行計算の結果、 $\alpha = 0.1$ まで十分な精度での計算が可能で、単純開口に相当する $\alpha > 0.6$ の場合、質量保存が 10^{-3} のオーダーで満足されるまでに必要な時間積分は数十ステップ程度であり、急峻な速度変化に対しても十分追従できることを確認した^[注5]。

3. 対象とした大空間構造物

対象とした大空間構造物の概要を図4および表1に示す。屋内スタジアムとして最も多く採用される建築物形状は、蒲鉾型、半球型などのいわゆるドーム構造物である。ここでは野球場としての使用が可能な規模としてアリーナ部分での直径150m、最高部天井高さ80mの半球型ドーム

図5 周辺気流の解析に用いた計算格子

図6 風圧係数分布の数値解析結果

ム構造の屋内スタジアムを想定した。観客席スタンドなどの配置を考慮すると、屋内容積は約 120 万 m^3 となる。なお本研究で対象としたドーム構造物は、その外周部にトラス状の波形構造物を有しており、外部形状は比較的複雑なものとなっている。

4. 自然換気特性の検討

4.1 建築物周辺気流および風圧分布の特性

予備的な検討として、開口を持たない場合の建築物周辺気流の状態を数値解析した。解析に用いた計算格子を図5に示す。ここではO型グリッドとL型グリッドとの組み合わせにより計算格子を作成し、中央断面で分割した1/2モデルとして解析を行った。なお計算格子の生成にはTrans Finite Interpolation⁹⁾などの代数的手法を用い、緩い収束条件のもとでTompson¹⁰⁾らの楕円形方程式による格子形成法を併用して直交化と平滑化を行った。計算格子点数は $81 \times 55 \times 63$ である。境界条件として、領域の流入側境界面には0.27乗プロファイルを設定して風洞実験の条件と一致させ、すべての壁面、地表面には対数則壁関数による境界条件を設定した。解析結果は建築物表面における圧力値を用いて次式により風圧係数として整理した^[注6]。

$$C_p = 2p / \rho v_0^2 \quad (30)$$

レイノルズ数 $Re = 10^5$ について解析した風圧係数の分布を図6に示す。解析結果は同時に実施した1/200モデルによる風洞実験結果とも定量的に一致しており、本研究で採用した数値解析手法はある程度信頼できるものと判断し

図7 想定した開口の配置と形状

た。また対象建築物表面での風圧係数は、頂部から直径約80mの範囲でほぼ全域にわたり負の値を示すことがわかった。これはドーム形状の建築物を過ぎる流れが比較的表面上に沿って形成されるためと考えられる。なお、対象建築物の外周側面では風上側、風下側ともに正值を持つ風圧係数の極大点が認められた。風上側での極大値は対向流によるもの、風下側での極大値は後流側での逆流に起因するものと考えられる。

4.2 開口部配置の設定

予備解析の結果からは、対象建築物の屋根面頂部近傍および外周側面に開口を設けた構造とすると効率のよい自然換気が得られるものと予測できる。ここでは図7に示すように、外周側面に高さ方向に3列、屋根面に半径10mおよび半径35mの2列の同心円状開口部を設定した。なお屋根面の開口部には雨よけ構造を持つ固定式の開口を、外周側面の開口部には開閉式単純開口を想定した。

4.3 想定した開口による自然換気特性

対象建築物に4.2節で示した開口を設けた場合について、自然換気特性を数値解析により検討した。ここでは対象建築物内外の気流状態を同時に解析する必要があるため、新たな解析モデルを作成した。解析領域は対象建築物の直径をDとして幅方向 $3 \times D$ 、主流方向 $8 \times D$ 、高さ方向 $5 \times D$ の大きさを持つ立方体形状とし、計算格子をL型グリッドで作成した。解析領域全体の計算格子点数は $122 \times 84 \times 64$ である。なお主流方向の風上側には $2 \times D$ 、風下側には $5 \times D$ の領域をそれぞれ設けた。解析に用いたモデルの対象建築物近傍での計算格子を図8に示す。

屋根部の2列の開口部には、先述したような雨よけ構造付きのものを想定した。これらについては1/10および1/60部分模型を作成して風洞実験を実施し、その結果から流量係数($\alpha = 0.27$)を求めて解析に用いた。外周側面開口部についてはすべて単純開口を想定し、 $\alpha = 0.65$ とした。なおここでは夏期に5万人の観客を収容し、座席空調を用いて冷房した場合を想定することとし、各部の温度差に伴う熱対流効果を考慮した形で解析を行った。設定した諸条件を表2に示す。

図8 自然換気の検討に用いた計算格子

表2 想定した設定条件

	設定条件
気象条件	夏期、晴天時 外気温度：35.8℃ 水平面全日射量：604.7 Kcal/m ² h 西風、基準点風速：0.5～5m/s (1/4乗則プロファイルを仮定)
内部発熱	照明負荷：1,500,000 Kcal/h 人体発熱：2,500,000 Kcal/h 透過日射：120 Kcal/m ² h (頂部ポリカーボネートからの透過による)
空調条件	吹き出し温度：22.0℃ 風量：1,454,400 CMH (座席空調を仮定)
開口条件	屋根面開口部：α = 0.27, ψ = 0.25～0.5 外周開口部：α = 0.65, ψ = 0.12～0.25

数値解析により求めた屋内外の気流状態を図9に示す。対象建築物の周辺には屋根面に沿った流れが形成されており、後流側には大規模な逆流領域が形成されている。また外周部のトラス状構造物周辺およびドームの頂部後方には剥離が認められた。予備解析の結果からも予測されたように、外周側面の開口部では風上側、風下側ともに外気が流入しており、側面開口部は流入開口として作用することがわかる。風上側、風下側開口部から屋内に流入した気流はアリーナの中央付近で対向し、緩やかな上昇流に転じた後、屋根面の開口部から効果的に排気されている。屋根面に設定した2列の開口部では、いずれもほぼ全周で流出方向の気流が認められた。

上空30mにおける風速を基準点風速とし、風速を変化させた場合の換気特性を比較した。ただし外周側面に設定した開口部では、流入部分と流出部分とが混在する。ここでは屋根面開口部での流出流量を用いて、屋内の平均換気回数 N_v^* を次式のように評価した^[注7]。

$$N_v^* = \sum_{i=1}^{I2} \sum_{j=1}^{J2} Q_{i,j,K2+1/2}^{out} / V_0 \quad (31)$$

空間内に適当な局所領域を想定した場合、この部分への流入、流出フラックスの絶対値の総和は換気流量の2倍となる。上下スタンドの観客席およびアリーナから高さ3mまでの領域を居住域と定義し、居住域での局所的な換気特性についても評価を行った。座席空調により供給される機械換気を除外すると、居住域での換気回数 N_v は次式で評価できる。

図9 屋内外気流状態の数値解析結果

図10 開口条件による換気回数の変化

$$N_v = \left[\frac{1}{2} \left\{ \sum_{j=1}^{J2} \sum_{k=K1}^{K2} (U_{I1-1/2,j,k} S_{I1-1/2,j,k}) + \sum_{j=1}^{J2} \sum_{k=K1}^{K2} (U_{I2+1/2,j,k} S_{I2+1/2,j,k}) + \sum_{i=I1}^{I2} \sum_{k=K1}^{K2} (V_{i,J1-1/2,k} S_{i,J1-1/2,k}) + \sum_{i=I1}^{I2} \sum_{k=K1}^{K2} (V_{i,J2+1/2,k} S_{i,J2+1/2,k}) + \sum_{i=I1}^{I2} \sum_{k=K1}^{K2} (W_{i,j,K2+1/2} S_{i,j,K2+1/2}) \right\} - Q_{AC} \right] / V_{res} \quad (32)$$

外周側面の開口部を全開とした場合、1/2開放した場合、1/4開放した場合の3種類の条件について解析した換気回数の変化を図10に示す。なお図に併記した居住域換気回数は、側面開口部を全開とした場合の値である。外周側面の開口部を全開とした場合には、風速3m/sの場合でも換気回数4.5回/h程度が得られており、ある程度の風がある日にはファン動力なしで十分な換気を得られることがわかった。なお収容人員ひとりあたりの二酸化炭素放出量を200ml/min、外気濃度を300ppmとして、このときの居住域での二酸化炭素濃度を計算すると、5万人収容時の平均濃度は約320ppmであり、ビル管理法の空気汚れ指標(1000ppm以下)^[11]を自然換気のみで十分満足できることを確認した。

5. 外部気流を利用した場合の屋内温熱特性

5.1 外部気象条件の選定とそのモデル化

外気の取込みによる自然換気は、必ずしも屋内の温熱環境制御に寄与するものとは限らない。ここでは季節ごとの

表3 解析に用いた各月の気象条件

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
外気温度(°C)	19.5	21.3	25.5	31.4	35.2	31.5	22.5
水平面全天日射量 (Kcal/m ² h)	689	714	428	739	682	427	264

図11 6月および8月における屋内温度分布

外部気象条件を想定し、外気温度や日射量が異なる場合の温熱環境の違いを比較した。

冬期には外気温度が屋内空調温度よりもかなり低くなることが予想され、外気を導入する利点は少ない。ここでは夏期から中間期にかけての特性を考察することとし、4月から10月までの晴天日の午後1時における条件について解析を行った。想定した外部気象条件を表3に示す。日射による取得熱量は、想定した建設予定地の緯度、経度(北緯34°4′, 東経135°3′)、建築物外表面の各セル界面についての方位角、傾斜角を考慮して求め、相当外気温度に換算した上、熱貫流率を用いて境界条件に与えた。なお水平面全天日射量からの直散分離には木村、宇田川による推定式¹²⁾を用いた。

ここでは4.3節と同様、屋内に5万人の観客を収容し、

座席空調を併用した場合を想定した。空調吹き出し温度は8月を22°C、7月、9月を24°Cとし、他の月は26°Cとしたが、その他の条件については表2と同様の設定とした。いずれの場合も外周側面の開口部は全開としている。

5.2 季節ごとの屋内温熱特性

基準点風速を2m/sとした場合の、6月および8月における屋内温度分布を図11に示す。いずれの場合も屋内上部で高温となる温度勾配が認められるが、日射量の大きい8月の条件では特に、ドーム中央部から天井面にかけて高温の領域が形成されている。対象建築物内部を7層に分割し、各層の平均温度として垂直方向の屋内温度分布を比較した結果、それぞれの条件における上下温度差は6月の場合、約6°C、8月の場合には約13°Cであった。

図12は4月から10月までの屋内温熱環境を各層での平均温度の垂直方向分布として比較したものである。なおここでは、外周側面の開口を閉じた場合についても同様の解析を実施し、その結果を併記した。観客席とアリーナのある居住域は床面から26mまでの領域である。

外周側面の開口を閉じた場合には、いずれの場合も屋内の上部に熱だまりを生じるが、開口を開けて外気を取込んだ場合には、屋内温熱環境は季節によって大きく変化することがわかる。7月から9月にかけては外気温度が高いため、外気を導入すると居住域温度が上昇し、空調制御が困難となることが予測される。しかし4月から6月および10月の中間期には、自然換気によって熱だまりが効果的に除去されており、外気導入の効果が期待できる。

夏期および中間期の気象条件について基準風速を変化させた場合の影響を比較した。夏期気象条件として8月の条件を、また中間期気象条件として6月の条件を用いて解析した結果を図13に示す。夏期条件では風速の増加に伴って居住域温度が上昇する上、風速5m/s以内の範囲では屋内上部での熱だまりを除去する効果はあまり認められな

図12 4月から10月までの屋内の垂直温度分布

図13 風速による屋内垂直温度分布の変化

い。一方中間期には、風速の増加に伴って熱だまりを除去する効果は増大しており、風速 3m/s 以上の場合には高さ $30 \sim 70\text{m}$ の領域での温度差は $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 程度以内に抑えられることがわかった。また中間期には外気温度が居住域の空調設定温度に近い値となるため、風速が変化しても居住域温度は大きく変化していない。気流条件と外気温度条件が適当な範囲にある場合には、自然換気のみで屋内温熱環境の制御を行うことも可能と考えられる。

6. まとめ

半球型ドーム構造の大規模屋内スタジアムを対象として、外部気流を利用した自然換気方式の可能性を検討した。解析にはスタッガート変数配置一般曲線座標系による乱流解析手法を用い、流体の運動量方程式とエネルギー方程式とを連成して浮力効果を再現した。また開口部の表現として開口面積比と通風特性とをモデル化して屋内外の気流状態を同時に解析した。

数値解析によりドーム周辺気流、ドーム内の自然換気特性および夏期から中間期にかけての屋内温熱特性について考察した結果、以下の知見を得た。

- (1) 半球型ドーム構造では、周辺気流により頂点付近に比較的広い負圧領域が、また風上側、風下側側面には正圧を有する風圧の極大点を生じる。
- (2) ドームの屋根面と側面とに開口部を設けた場合、周辺気流の影響で効果的な自然換気が得られる。このとき、側面開口部は流入開口、屋根面開口部は流出開口として作用する。
- (3) 本研究で対象とした構造では、風速 3m/s の場合に約 4.5 回/h の換気回数を得られ、本構造ではある程度風のある日にはファン動力なしで十分な換気を得られるものと予測できる。
- (4) 自然換気による外気導入の効果は、中間期において特に期待でき、これにより屋内上部に発生する熱だまりを除去することができる。

本研究により、大空間構造物への自然換気方式の採用が可能なこと、自然換気による外気の導入が特に中間期における屋内温熱環境制御に効果的なことなどが明らかとなった。外気導入を併用した空調システムでは、空調消費エネルギーを大幅に削減することも可能と考えられ、外部気象条件に合わせた開口部の開閉制御方法や、エネルギー的な側面からの検討も今後必要になるものと思われる。

記号

C_p	: 定圧比熱
C_{p0}	: 風圧係数
C_μ, C_1, C_2, C_3	: k - ϵ モデルの定数 ^[28]
f^{u_i}	: 空間微分項および外力項
$F, \mathbf{F}$	: セル界面でのフラックス
F^C	: F の対流成分
F^D	: F の拡散成分
g_i, g	: 重力加速度
g^{u_i}	: 圧力勾配項

h	: エンタルピー
$I1, I2, J1, J2, K1, K2$	: 対象領域を規定するセル インデックスの始点, 終点
J	: 変換の Jacobian
k	: 乱流エネルギー
n	: 時間ステップ
$\mathbf{n}$	: 界面の法線方向単位ベクトル
N_v	: 対象領域内の局所的な換気回数
N_v^*	: 屋内の平均換気回数
p	: 圧力
p_0	: 状態方程式の基準圧力
Pr_t	: 乱流 Prandtl 数
$\dot{Q}$	: 発熱量
Q_{AC}	: 空調により対象量域内に供給される風量
Q^{out}	: 屋根面開口部からの流出流量
Q_{tr}	: 通風量
R_i	: 抵抗力
$S_{i\pm 1/2, j, k}, S_{i, j\pm 1/2, k}, S_{i, j, k\pm 1/2}$	: セル (i, j, k) における各セル界面の面積
t	: 時間
T	: 温度
u_0	: 基準点高さ (地上 30m) における風速
u_i	: 物理空間の速度 (u_1, u_2, u_3 or u, v, w)
U_i	: 反変速度 (U_1, U_2, U_3 or U, V, W)
U^C, V^C, W^C	: 反変速度の補正量
U^*, V^*, W^*	: 反変速度の仮定値
V_0	: 屋内の総内部容積
V_{res}	: 対象領域の容積
x_i	: 物理空間の座標 (x_1, x_2, x_3 or x, y, z)
α	: 流量係数
α_p	: 圧力補正式の緩和係数
δp	: 圧力の補正量
Δp	: 開口前後における圧力差
Δt	: 時間ステップ幅
ϵ	: エネルギー散逸率
γ	: 空気の比重
γ_c	: 比熱比
Γ	: 拡散項の係数に関する一般化表示
μ	: 分子粘性係数
μ_T	: 乱流粘性係数
ϕ	: 独立変数の一般化した表示
ψ	: セル界面での開口率
ρ	: 密度
$\langle \rho\phi \rangle$	: セル界面での $\rho\phi$ の値
λ	: 熱伝導率
$\sigma_k, \sigma_\epsilon, \sigma_T$	: k - ϵ モデルの定数 ^[28]
ξ_i	: 計算空間の座標 (ξ_1, ξ_2, ξ_3 or ξ, η, ζ)

注

[注 1] Jacobian の定義については、文献により計算空間から物理空間への変換を定義する場合とその逆の場合とがある。本論文では前者の定義に統一した。

[注 2] 屋内温熱環境の解析で多用されている一般的なブシネ近似では、浮力項の評価に用いられる参照温度が解析対象領域内で一定の値となる。このため温度成層内での浮力効果は、同レベルでの周辺温度差から生じる効果よりも過剰に評価されることとなる。この方法は対象領域が完全な閉鎖空間の場合

合には、上昇流が天井面により拘束されるため妥当な結果を与えられ、本研究で対象とする系は天井部に開口を有しており、ブシネ近似の採用は妥当でないと判断した。

[注 3] その意味では、想定した基礎方程式系には圧縮性を考慮していることとなるが、後述するように各時刻での収束計算において密度変化は定数として扱われるため、通常非圧縮性流体の場合とほぼ同様の扱いとなる。

[注 4] MAC 系のアルゴリズムでは一般にこの方法が採られる。本手法でも時間微分項を陽的に展開しているため Courant 条件を満足するよう Δt を設定する必要があり、諸量の時間的なずれについては大きな問題は生じないと思われる。

[注 5] 通風特性のモデル化に関して試行計算を行った。ここでは単純な 1 次元問題を想定し、領域中央のセル界面に本モデルを設定して一方向流を形成させた。(1)～(7)に示した基礎方程式は、温度一定の条件では完全な非圧縮性流体となる。

a) Δp の立上がり特性

b) $div U_i$ の立上がり特性

補図 1 Δp の立上がり特性

補図 2 急峻な速度変化に対する Δp , $div U_i$ の追従性

スパン方向の領域幅が一定の 1 次元問題では領域内の速度が一樣となり、モデルを設定したセル界面の前後には (27) 式に相当する圧力差が生じるはずである。

補図 1 は流量係数 α を 0.1 から 0.6 まで変化させたときの Δp および $div U_i$ の時間変化を計算した結果である。質量保存は時間積分にしたがって満足されることとなるため、立上がり直後に大きく振れる $div U_i$ は、時間ステップの進行に伴い 0.0 に漸近している。 α が小さくなると $div U_i$ および Δp の立上がりは遅くなるが、これにより開口前後での圧力勾配の急峻な立上がりが緩和され、計算を安定させる効果が得られるものと考えられる。

補図 2 は流入流速を 1.0 ～ 3.0 m/s の間でステップ的に変化させた場合の Δp および $div U_i$ の追従性を示したものである。圧力の変化は急峻な速度変化によく追従しており、 $div U_i \approx 0.0$ の時点での Δp はいずれも (27) 式を満足している。

本論文の解析には $\alpha = const.$ を仮定したが、通風量変化に伴い α が変化するようなモデルを用いる場合には、本手法が有効と考えられる。

[注 6] 本研究では、スタッガード格子系を採用しているため、建築物表面での圧力値は評価されていない。ここでの風圧係数の算出は傾向を把握するための予備計算的な意味で行ったものであるため、表面に隣接するセル中心の値を用いて計算した。

[注 7] 数値解析の結果、側面開口部から流入した外気の一部は屋内換気に関与せずそのまま流出することがわかった。屋内換気に関与するものの多くは屋根面の開口部から排気されることとなるので、ここでは換気回数の評価として便宜的に屋根面開口部での流出流量を用いた。

[注 8] 本研究で用いた $k-\epsilon$ モデルの定数は以下のとおりである。

$$C_\mu = 0.09, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92,$$

$$C_3 = \begin{cases} 1.44 & (G_T > 0.0) \\ 0.0 & (G_T \leq 0.0) \end{cases},$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad \sigma_T = 0.9$$

参考文献

- 宮川：変分原理を用いた大空間の上下温度分布の計算法，空気調和衛生工学会論文集，13 (1990)，1.
- 戸河里，荒井，三浦：大空間の空調・熱環境計画手法の研究，日本建築学会計画系論文報告集，427 (1991)，9.
- 石田，宇田川：上下温度分布を考慮した熱負荷計算，空気調和衛生工学会学術講演論文集，(1992)，77.
- 村上，加藤，近藤，近本：大空間の温熱空気環境に関する数値シミュレーション，生産研究，42，7 (1990)，413.
- 加藤，村上，羽生，曾：対流・放射連成解析による大規模アトリウム空間の温熱環境解析，第 8 回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (1994)，177.
- Launder, B.E. and Spalding, D.B.: Mathematical Models of Turbulence, Academic Press (1972).
- Leonard, B.P.: A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Up-stream Interpolation, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 19 (1979), 59.
- Patankar, S.V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp. (1980).
- Knupp, P. and Steinberg, S.: Fundamentals of Grid Generation, CRC Press (1993).
- Thompson, J.F.: Numerical Grid Generation, North Holland (1982).
- 古賀：ビル衛生管理法，帝国地方行政会 (1971)，40.
- 宇田川，木村：水平面全日射量観測値よりの直達日射量の推定，日本建築学会論文報告集，267 (1978)，83.

(1995年7月10日原稿受理，1995年10月31日採用決定)