湿度による浮力の影響を考慮した室内温熱環境予測

室内空気中の水蒸気が空間温度分布に与える影響 (その1)

BUOYANCY EFFECT CAUSED BY INDOOR HUMIDITY AND
NUMERICAL SIMULATION BASED ON k- ϵ MODEL

Effect of water vapor on temperature distribution in rooms (Part 1)

近藤 靖史*, 長澤 康弘**, 藤村 淳一***

Yasushi KONDO, Yasuhiro NAGASAWA and Jun-ichi FUJIMURA

This paper describes the simulation method of the indoor humidity and temperature distributions that is important to study the wet area in rooms.

(1) Buoyancy Effect of Humidity Ratio

The air density depends not only on temperature but on mass concentration such as humidity, therefore the buoyancy effect of humidity may be appeared in some spaces where the spatial distribution of humidity is very large. The treatment method of this effect into the k- ϵ turbulence model was discussed in this paper.

(2) Near Wall Mass Transfer

In order to study the airflow and humidity distributions near wall region, the two-dimensional cavity flows was simulated based on the Low-Reynolds number k- ϵ model.

Keywords : buoyancy effect, mass concentration, water vapor, coupled simulation, CFD

浮力効果, 物質濃度, 湿気, 連成解析, 数値流体力学

1. はじめに

近年、快適な室内温熱・空気環境を効率的に実現しようとする機運が高まり、このため計画段階における室内環境予測は非常に重要な設計プロセスのひとつとなっている。特に詳細な室内気流分布、温度分布、汚染物質濃度分布などの検討に適しているCFD(数値流体力学)は代表的な設計ツールとして定着しつつあり、またさらなる予測精度向上が期待されている。本研究では、建築分野では今までほとんど考慮されていなかった現象である、室内湿度(水蒸気)が空間温度分布に与える影響について検討し、これを建築室内ではどの程度考慮すべきであることを明らかにする。すなわち、次の2点の現象を検討する。

①室内湿度分布に起因する浮力の影響

②室内空気中の水蒸気が吸収・放散する放射エネルギーの影響

上記の現象については気象学や機械工学の分野ではかなり以前から研究がなされている^{1), 2)}。例えば、気象学のように大スケールの現象においては、高湿度地域における上昇気流や、日射熱が地表面に到達するまでに水蒸気や二酸化炭素が放射エネルギーを吸収する現象が存在することは周知の事実である¹⁾。また、機械工学のように比較的小さいスケールにおいても水蒸気やその他のガスによる浮力の影響が詳細に検討され、また炉まわ

りの高温・高湿度状態での水蒸気の放射エネルギー吸収などが検討されている²⁾。これに対し、建築分野では数例の研究事例³⁾はあるが、実際に室内温熱環境予測に適用された例はほとんど存在しない。

本研究では、上記2点についてCFD解析に上記の影響を組み込む手法を示し、またこの方法に基づいた数種類の解析結果を示した。これらの結果から、室内水蒸気の室内温度分布への影響をどのような場合に考慮すべきであるかを検討した。本報(その1)では、『室内湿度分布に起因する浮力の影響』について検討している。また次報(その2)では、『室内空気中の水蒸気が吸収・放散する放射エネルギーの影響』についての結果を報告する予定である。

2 気体分子運動論による気体の密度算定

周知のように気体の密度はその分子量により算定できる。このことは、気体の状態方程式から導かれる。

$$PV = nRT \quad (1)$$

ここで、 P : 圧力 [$\text{Pa}(=\text{N}/\text{m}^2)$], V : 体積 [m^3], n : モル数 [mol], R : 気体常数 ($=8.31451$) [$\text{J}/\text{K} \cdot \text{mol}$], T : 絶対温度 [K] である。次に、対象とする気体の質量を G [g] とし、また分子量を m とすれば、アボガドロの法則より次式が成り立つ。

本論文は、日本建築学会関東支部研究報告集(1997)、大会学術講演会(1998)および空気調和・衛生工学会学術講演会(1998)において発表した内容をもとにしている。

* 武蔵工業大学 助教授・博士(工学)

** 武蔵工業大学 技術員・修士(工学)

*** 大成建設 修士(工学)

Assoc. Prof., Musashi Institute of Technology, Dr. Eng.
Technical Staff, Musashi Institute of Technology, M. Eng.
Taisei Corp., M. Eng.

$$n = \frac{G}{m} \quad (2)$$

(2)式を(1)式へ代入し、整理することで対象とする気体の密度 ρ [g/m³]を導くことが出来る。すなわち、

$$\rho = \frac{G}{V} = \frac{P}{RT} \cdot m \quad (3)$$

(3)式は、同温・同圧の下においては、気体の密度はその分子数に比例することを示している。

なお、本報では標準的な乾燥空気の組成から、その平均分子量を $m_{DA}=28.9$ (添字 DA は乾燥空気[Dry Air]を表す)とし、(3)式から空気の基準密度を $\rho_{DA}=1.17 \times 10^3$ [g/m³]=1.17[kg/m³]とする(ただし 27[°C](=300[K]), 1[atm](=1.01×10⁵[Pa]))。

3 水蒸気などを含有する空気の分子量の同定

湿り空気を、乾燥空気と水蒸気の混合気体と見なせば、その分子量は次式で与えられる。

$$m_a = \frac{G_a}{n_a} = \frac{m_{DA} \cdot n_{DA} + m_V \cdot n_V}{n_V + n_{DA}} \quad (4)$$

ここで、 m_a :湿り空気の分子量、 G_a :湿り空気の質量[kg]、 n_a :湿り空気のモル数[mol]、 m_V :水蒸気の分子量(18.0)、 n_{DA} :乾燥空気のモル数[mol]、 n_V :水蒸気のモル数[mol]である。(4)式から絶対湿度 X [kg/kg(DA)]の湿り空気の分子量は次式で与えられる。

(3)、(4)式より、湿り空気の密度 ρ [g/m³]は、絶対温度 T および絶対湿度 X の関数として、次のように与えられる。

$$\rho(T, X) = \frac{P}{R} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{1+X}{X/m_V + 1/m_{DA}} \quad (5)$$

4 浮力効果の表現方法

4.1 体膨張率の定義と密度変化

温度および湿度による密度変化は、運動方程式に組み込む際には、体膨張率を用いて表現しておくことと利用しやすい。体膨張率は次のように定義される^{2, 4)}。

$$\beta_T \equiv -\frac{1}{\rho_r} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T} \equiv -\frac{1}{\rho_r} \cdot \frac{\rho(T, X_r) - \rho_r}{T - T_r} \quad (6)$$

$$\beta_X \equiv -\frac{1}{\rho_r} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial X} \equiv -\frac{1}{\rho_r} \cdot \frac{\rho(T_r, X) - \rho_r}{X - X_r} \quad (7)$$

ただし、 $\rho_r = \rho(T_r, X_r)$

ここで、添字 r は参照値を表す。また、 β_T :温度による体膨張率、 β_X :湿度による体膨張率である。

(5)式を(6)、(7)に導入する事で、各々の体膨張率は次のように表される。

$$\beta_T = \frac{1}{T} \approx 1/300 \quad (8)$$

$$\beta_X = \frac{1-M}{(1+X_r)(X+M)} \approx \frac{1-M}{M} \approx \text{約 } 0.6 \quad (9)$$

ここで、 M :乾燥空気と水蒸気の分子量比($M \equiv m_V/m_{DA} = 0.623$)である。また、 β_T 算定に関しては建築内における代表的な温度として $T = 27$ [°C](300[K])を用いた。また、(9)式において、 X_r, X についてはそのオーダーから無視しても誤差は少ないと判断した。

空間に温度および湿度の分布がある場合の空気密度の変化

表 1 浮力項[(19)式]における各項のオーダーの比較

	$\bar{T} - T_r$	$\bar{X} - X_r$	(A)項	(B)項	(C)項
想定ケース1	30	0.01	0.02	1	0.06
想定ケース2	15	0.01	0.03	1	0.12
想定ケース3	15	0.005	0.03	1	0.06

$\Delta \rho$ は、温度による効果にさらに湿度によるそれを加えたものである。すなわち、

$$\Delta \rho = \rho(T, X) - \rho_r = \Delta \rho_T + \Delta \rho_X \quad (10)$$

ここで(6)式より、温度差による密度変化 $\Delta \rho_T$ は次のように表せる。すなわち、

$$\Delta \rho_T = \rho(T, X_r) - \rho_r = -\beta_T \cdot \rho_r \cdot (T - T_r) \quad (11)$$

同様に、(7)式から湿度差による密度変化 $\Delta \rho_X$ は次のように表せる。

$$\Delta \rho_X = \rho(T, X) - \rho(T, X_r) = -\beta_X \cdot \rho(T, X_r) \cdot (X - X_r) \quad (12)$$

ここで、(6)式を次に示すように変形する。

$$\rho(T, X_r) = \rho_r - \beta_T \cdot \rho_r \cdot (T - T_r) = \rho_r \{1 - \beta_T \cdot (T - T_r)\} \quad (6')$$

(6')式を(12)式へ代入すると、次式が得られる。

$$\Delta \rho_X = -\beta_X \cdot \rho_r \{1 - \beta_T \cdot (T - T_r)\} \cdot (X - X_r) \quad (13)$$

(11)、(13)式を(10)式へ代入することで、次式が得られる。

$$\Delta \rho = -\rho_r \{-\beta_T \beta_X (T - T_r)(X - X_r) + \beta_T (T - T_r) + \beta_X (X - X_r)\} \quad (14)$$

4.2 運動方程式における浮力項への組み込み

運動方程式における浮力項は一般的に次式のように表される。

$$F_i = g_i \frac{\rho(T, X) - \rho_r}{\rho_r} \quad (15)$$

ここで、 g_i :重力加速度[m/s²]($g_1 = g_2 = 0, g_3 = -9.8$)である。

次に、(14)式を(15)式へ代入することで、浮力項を体膨張率を用いて表現することができる。

$$F_i = -g_i \{-\beta_T \beta_X (T - T_r)(X - X_r) + \beta_T (T - T_r) + \beta_X (X - X_r)\} \quad (16)$$

4.3 浮力項のレイノルズ平均とオーダーエスティメイト

(16)式を運動方程式へ組み込むために、レイノルズ平均操作を施す。すなわち、温度および湿度を次に示すように平均成分と変動成分に分解する。

$$T = \bar{T} + t \quad (17)$$

$$X = \bar{X} + x \quad (18)$$

ここで、 $(\bar{\quad})$:平均化記号、 t :絶対温度の変動成分[K]、 x :絶対湿度の変動成分[kg/kg(DA)]である。

(17)、(18)式を(16)式に代入し、レイノルズ平均操作を行う。

$$F_i = -g_i \left[\underbrace{-\beta_T \beta_X (\bar{T} - T_r)(\bar{X} - X_r) + \bar{t}x}_{(A)} + \underbrace{\beta_T (\bar{T} - T_r)}_{(B)} + \underbrace{\beta_X (\bar{X} - X_r)}_{(C)} \right] \quad (19)$$

(19)式は、下線で示す(A)～(C)の3項に分けて考えることができる。(A)項には未知量 $\bar{t}x$ が含まれており、厳密にはモデル化して解く必要がある。しかし、(A)項について、考えうる最大値として $\bar{t}x = 0.5$ を想定し、オーダーエスティメイトを試みたところ、この項を無視し得るという結果が得られた。表1は(B)項を基準として

表 2 湿度による浮力効果を考慮した低 Re 数型 k-ε モデル

連続の式	$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0$	
運動方程式	$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) - g_i \{ \beta_T (\bar{T} - T_r) + \beta_X (\bar{X} - X_r) \}$	
熱輸送方程式	$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \overline{u_i T} \right)$	D_T : 温度拡散係数 ($= 2.19 \times 10^{-5}$)
拡散物質(湿気)輸送方程式	$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial \bar{X}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_X \frac{\partial \bar{X}}{\partial x_i} - \overline{u_i X} \right)$	D_X : 湿度拡散係数 ($= 2.53 \times 10^{-5}$)
k 輸送方程式	$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} + P_k + G_k - \varepsilon$	$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j}$
ε 輸送方程式	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} f_1 P_k + C_{\varepsilon 3} f_1 G_k - C_{\varepsilon 2} f_2 \varepsilon)$	$G_k = -g_i (\beta_T \overline{u_i T} + \beta_X \overline{u_i X})$
渦粘性係数, 相関項など	$\nu_i = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ $-\overline{u_i u_j} = \nu_i \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$	$-\overline{u_i T} = \frac{\nu_i}{\sigma_T} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i}$ $-\overline{u_i X} = \frac{\nu_i}{\sigma_X} \frac{\partial \bar{X}}{\partial x_i}$
モデル関数、その他定数	$f_\mu = \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{y^+}{14} \right) \right\} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{Rt^{3/4}}{2.4} \right) \right\} \left(1 + \frac{1.5}{Rt^{5/4}} \right)$ $y^+ = \frac{u^* y}{\nu} \quad \left(u^* \equiv \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \right) \quad Rt = \frac{k^2}{\nu \varepsilon}$ $\sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad \sigma_T = \sigma_X = 0.9 \quad g_i : (g_1 = 0, g_2 = -9.8) \quad \beta_T = 1/300 \quad \beta_X = 0.6$	$f_1 = 1.0 \quad f_2 = \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{y^+}{3.1} \right) \right\}^2 \left[1 - 0.3 \exp \left(-\left(\frac{Rt}{6.5} \right)^2 \right) \right]$ $C_\mu = 0.09 \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad C_{\varepsilon 3} = 1.44 \quad (G_k < 0 : C_{\varepsilon 3} = 0)$

表中で下線を付した項が、湿度差による浮力の寄与を考慮したことによる付加項である。また、 $f_\mu = f_1 = f_2 = 1$ とすれば、標準型 k-ε モデルとなる。

図 1 屋内プール解析モデル

各項のオーダーを表したものである。これによれば、(A)項の全体に占める割合はいずれのケースにおいても 3[%]未満であり、本報ではこれを無視しても計算精度に影響を与えることはないと判断した^{注1)}。以上から、湿度差による浮力効果を考慮した浮力項は、次のように表される。

$$F_i = -g_i \{ \beta_T (\bar{T} - T_r) + \beta_X (\bar{X} - X_r) \} \quad (20)$$

4.4 乱流エネルギー k の浮力による生産・消散

乱流エネルギー k の浮力による生産・消散項 G_k については、次式のように湿度変動に関する寄与分が付加される。

$$G_k = -g_i (\beta_T \overline{u_i T} + \beta_X \overline{u_i X}) \quad (21)$$

ここで、 $\overline{u_i X}$ は乱流湿気フラックスである。

5 k-ε 型 2 方程式モデルの構成

本報では、乱流モデルに k-ε 型 2 方程式モデルを用いる。表 2 は、村上・加藤・近本^{※5)}が提案した低 Re 数型 k-ε モデルの基礎式に、前述した湿度差による浮力効果を組み込んだ式である^{※2), 注3)}。

6 数値解析

前節で示したモデルを用い、数値解析を行った。湿度差による浮力効果の寄与の大きさを検討するために、従来のように温度

図 2 屋内プール解析結果 (鉛直断面図)

差による浮力のみを考慮した case1、および温度差による効果にさらに湿度差による浮力を加味した case2 について解析を行い、両者の結果を比較検討する。なお解析対象としては、①水面が加熱・加湿面となることで自然対流の発生する屋内プール(3次元)、②加熱・加湿面と冷却・除湿面が設置され、循環流が生じるキャビティー(2次元)の計2モデルとし、各々について湿度による浮力効果の流れ場への影響を検討する。

6.1 屋内プールの3次元解析^{※4)}

(1) 解析概要

図1に屋内プールの解析モデルを示す。図1(a)鉛直断面に示したように、空気は水面近傍で加熱・加湿され上昇し、一方でガラス面において冷却・除湿されることで下降し、空間内には左右対称な循環流が生じる。その他の面については断熱・断湿条件とした。なお、水面およびガラス面には図1(a)に示したような固定された表面温度、湿度を与えたが、対流熱・物質(湿気)伝達率については次のような値を用いた。

熱伝達率: $\alpha = 9.3 [\text{W}/\text{m}^2\text{C}] (= 8.0 [\text{kcal}/\text{m}^2\text{hC}])$

物質(湿気)伝達率: $\alpha' = 9.7 \times 10^{-3} [\text{kg}/\text{m}^2\text{s}(\text{kg}/\text{kg}(\text{DA}))]$
 $(= 35 [\text{kg}/\text{m}^2\text{h}(\text{kg}/\text{kg}(\text{DA}))])$

なお、物質(湿気)伝達率については、熱と拡散物質(湿気)の伝達現象の相似性を述べたルイスの関係を用い、熱伝達率の値から推定したものである。また、屋内プールモデルについては標準型 $k-\epsilon$ モデルを用いて解析した^{※4)}。

(2) 解析結果および考察

図2に屋内プールの解析結果を示す。なお、各図は図1(b)

図3 2次元キャビティーモデル^{※5)}

図4 速度分布に関する検討 ($Y=H/2$)

図5 乱流エネルギーの分布に関する検討 ($Y=H/2$)

平面図に示した位置における鉛直断面図であり、左図(a 図)が温度による浮力効果のみの case1、右図(b 図)が温度および湿度による浮力を考慮した case2 を表している。

図 2(1)風速ベクトルから、循環流が形成されていることが確認できる。湿度による浮力効果を加味した case2 の方が、中央部における上昇流の風速が若干大きいと言えるが、このことは、図 2(2)絶対風速においても見られる。すなわち case2 の方が case1 と比較して上昇流が発達している。一方で、空間に左右対称で現れた滞留域(絶対風速 0.1[m/s]以下の領域)の範囲は、case2 において狭くなっている。次に、図 2(3)乱流エネルギー k において、絶対風速同様に case2 においてその値が大きくなる傾向が見られた。これは、湿度による浮力効果により上昇流が発達し、速度勾配が大きくなったことが原因であると考えられる。図 2(4)温度、(5)湿度では、その分布に顕著な差は見られなかった。

6.2 2次元キャビティの解析

(1) 解析概要

図 3 に 2 次元キャビティの解析モデルを示す。左側の壁面 1 近傍で空気は加熱・加湿され上昇し、一方で右側の壁面 2 において冷却・除湿されることで下降し、キャビティ内には図中に矢印で示したような循環流が生じる。また、天井、床面については断熱・断湿条件とした。本解析では、表 2 に示す低 Re 数型の $k-\epsilon$ モデルを用いた。前節における屋内プールの解析に用いた標準型 $k-\epsilon$ モデルと比較して、境界層の流れも解析するため、計算負荷が大きくなる傾向がある。ただし、本解析のように流れが部分的に層流化したり、あるいは境界面における熱・物質伝達現象を厳密に取り扱うべき場合においては、伝達率の仮定を必要としないため有効な解析手段と言える⁵⁾。

(2) 解析結果および考察

流速分布および浮力項

図 4(a), (b)に高さ $Y=H/2$ における速度プロファイルを示す。case1 に比べて case2 では壁面近傍での風速が大きくなる傾向が見られた。これは、図 4(c)に示した浮力項の値が表すように、湿度差による浮力項 $-g\beta_x(\bar{X}-X_r)$ の寄与によるものであるが、その大きさは温度差による浮力項 $-g\beta_T(\bar{T}-T_r)$ の約 1/5 である。しかし、壁から離れた領域では case1 と case2 で速度の差はほとんど見られなかった。

乱流エネルギー

図 4 図 5(a)~(c)に $Y=H/2$ における乱流エネルギー k 、生産項 P_k および浮力生産項 G_k のプロファイルをそれぞれ示す。図 5(a)によれば、壁面近傍において case2 の方が case1 と比較して乱流エネルギー k の値が大きい。これは、以下の理由による。すなわち、壁面近傍においては、速度勾配による k の生産項(図 5(b), P_k)の値に、湿度の浮力による差異が表れている。また、 G_k の湿度差による寄与分の項(図 5(c), G_k)が温度差による項(図 5(c), G_k)の 1/4 程度の値を示した。これらの要因が、乱流エネルギー k の分布に影響を及ぼしたと考えられ、このように詳細を見ると湿気伝達面近傍における湿度差による浮力効果は無視できない存在であると考えられる。

温度・湿度分布

図 6 に温度分布、図 7 に湿度分布をそれぞれ示す⁶⁾。両者の

図 6 温度分布[°C]

図 7 絶対湿度分布[kg/kg(DA)]

分布形は、ほぼ相似であると言えるが、前述した case1 と case2 における風速分布の差異に対応した若干の相違があることが確認できるが大きい。

7 まとめ

湿気の分子量は 18 であり、標準的な空気の約 29 に比べて小さく、密度が小さいため高湿度空気は浮力効果により上昇する傾向がある。この効果を既存の $k-\epsilon$ モデルに組み込むために、運動方程式の浮力項に湿度の浮力効果を導入した。それに伴い、乱流エネルギー k および散逸率 ϵ 輸送方程式についても湿度の浮力による項を付加した。

また、これらの基礎式に基づいて、数値解析を行った。①標準型 $k-\epsilon$ モデルによる屋内プールの 3 次元解析では、水面近傍で加湿され、窓面で除湿された空気の湿度差による浮力効果が

流速分布に影響を与える様子が確認できた。②加熱・加湿面と冷却・除湿面を設置したキャビティについては、低 Re 数型 $k-\varepsilon$ モデルを用いて 2 次元解析を行い、熱・湿気伝達現象をより厳密に取り扱った。その結果、同様に湿度による浮力が流速や乱流エネルギー k の分布に影響を及ぼすことを明らかにした。

以上の解析結果より、湿度の空間分布が大きい場合、これによる浮力効果を加味することが望ましいことを示した。また、この効果を考慮することによる計算負荷の増大は比較的大きくない。

[注]

注 1) 未知の相関 $\overline{kx}$ の想定値については、温度および絶対湿度のオーダーからその値が 0.5 を超える確率はほとんど無いと考えられる。したがって、表 1 中の想定ケース 1 および 3 においては (A) 項と (C) 項のオーダーに大きな差が無いように見受けられるが、これは $\overline{kx}$ がかなり大きめに評価されたことによる。

注 2) k, ε の値は壁面近傍において数値計算上不安定になりやすい。したがって、以下の方程式を用いる。(D, E 項については対象空間全体で与える^{*)}。)

$$\begin{aligned}\frac{Dk}{Dt} &= D_k + P_k + G_k - (\tilde{\varepsilon} + D) \\ \frac{D\tilde{\varepsilon}}{Dt} &= D_\varepsilon + \frac{\tilde{\varepsilon}}{k} (C_{\varepsilon 1} f_1 P_k + C_{\varepsilon 3} f_1 G_k - C_{\varepsilon 2} f_2 \tilde{\varepsilon}) + E \\ D_\varepsilon &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_j} \right\} \quad \nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\tilde{\varepsilon} + D} \\ \varepsilon &= \tilde{\varepsilon} + D \\ R_t &= \frac{k^2}{\nu(\tilde{\varepsilon} + D)} \quad D = 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2 \quad E = 2\nu \nu_t \left(\frac{\partial^2 \overline{U}_i}{\partial y^2} \right)^2\end{aligned}$$

注 3) 乱流エネルギー k の浮力生産項 G_k については、通常の EDM を用いて評価する場合、空間の大部分で負となる(図 5(c)参照)ために k を消散させる作用がある。そこで、 G_k については以下に示す式を用い、WET モデルを近似して評価することにより、過剰な k の消散を防ぎ、数値計算を安定化させた。

$$G_k \cong -g_2 \frac{k}{\varepsilon} \left(C_\theta \beta_\theta \nu_t \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} \frac{\partial \overline{U}_2}{\partial x_i} + C_X \beta_X \nu_t \frac{\partial \overline{X}}{\partial x_i} \frac{\partial \overline{U}_2}{\partial x_i} \right)$$

ここで、 $C_X \beta_X = 0.53$ とする^{*)}。

注 4) 屋内プールの解析では、標準型の $k-\varepsilon$ モデルを用いた。これは、低 Re 数型 $k-\varepsilon$ モデルと比較して、境界面近傍を解く必要がないため、要素数が抑えられ、同時に時間差分間隔も大きくすることが可能であるので、少ない計算資源で解析が可能である。したがって、3 次元解析などを比較的容易に実行できる利点がある。反面、水面やガラス面などには熱・物質伝達率を仮定する必要がある。

注 5) 2 次元キャビティの解析では、低 Re 数型 $k-\varepsilon$ モデルを用いて境界層内部まで細かく解析いるため、対流物質伝達率を与える必要がなく、プールの解析において用いたルイスの関係は不要である。また、同モデルによれば、対流熱伝達率、物質伝

達率が流れ方向に一樣でなく、本研究における 2 次元キャビティ一のように流れが遷移するような場においても、精度良く熱・物質フラックスを解析することができる。なお、表 2 中の、熱輸送方程式および拡散物質(湿気)輸送方程式の相似関係から、ルイスの関係は常に自動的に満足されるが、本研究ではこのことを計算結果のチェックの際に利用した。

注 6) 本解析の条件においては、case1, case2 ともに壁面近傍および空間下部で過飽和領域(相対湿度が 100% を越える領域)が若干見られた。これらの領域では、水蒸気が凝縮して霧状になることが予想されるが、本報でこの影響を考慮していない。

[本論文に関連する既発表論文]

- ① 長澤康弘・近藤靖史・藤村淳一・入交麻衣子: CFD における湿度による浮力効果およびルイスの関係: 日本建築学会関東支部研究報告集(1997)
- ② 長澤康弘・藤村淳一・近藤靖史・村上周三・加藤信介: 気流と物質拡散(湿気輸送)の連成解析による室内温度・濃度分布に関する研究 (その 1) 湿度差による浮力の定式化と標準 $k-\varepsilon$ モデルによるケーススタディ, (その 2) 低 Re 型 $k-\varepsilon$ モデルによる 2 次元キャビティ内自然対流場の数値解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1998)
- ③ 近藤靖史・村上周三・加藤信介・長澤康弘・藤村淳一: 気流と物質拡散(湿気輸送)の連成解析手法およびケーススタディ, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(1998)

[参考文献]

- 文 1) たとえば、竹内清秀・近藤純正: 大気科学講座 I 地表に近い大気/2 章 エクマン層の構造/p.60, 東京大学出版(1981)
- 文 2) たとえば、甲藤好郎: 伝熱概論 / 第 16 章 熱放射/pp.337-371, 養賢堂(1964)
- 文 3) 森太郎・絵内正道・荒谷登: 大規模吹き抜け空間を対象とした温湿度・気流分布の数値解析手法の提案 (その 2) 含湿浮力の温度場、湿度場、流れ場への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1997)
- 文 4) 吉澤徹・村上周三・小林敏雄・谷口伸行・戴毅・黒田明慈 他: 乱流解析 数値流体力学シリーズ 3/8.8 浮力流の解析/pp.270-287, 東京大学出版会(1995)
- 文 5) 村上周三・加藤信介・近本智行: 低 Re 数領域にも適用可能な新しい $k-\varepsilon$ モデル(その 1), 日本建築学会計画系論文集(1995)
- 文 6) Cheesewright.R., King.K.J., Ziai.S.: Experimental Data for the Validation of Computer Codes for the Prediction of Two-Dimensional Buoyant Cavity Flows, ASME Winter Annual Meeting HTD.60 (1986)

(1999年12月8日原稿受理, 2000年4月13日採用決定)