三次元傾斜差分スキームの研究*
(室内空調気流解析への応用)古藤 悟^{*1}, 山中 晤郎^{*1}Skew Upstream Differential Schemes for 3-Dimensional Fluid Flow
(An Application for Air Conditioning Problem)

Satoru KOTOH and Goro YAMANAKA

Recently, treatment of the numerical heat transfer and fluid flow in airconditioning problems has become popular. Their solution may help to optimize the blowing direction from the air conditioner. In these problems, it is common that the grid line and velocity directions of the flow are not closely aligned, and the Peclet number of flow is large. A large error may result from the false diffusion when upstream differencing of convective terms in the conservation equations is used in that condition. Raithby introduced two new schemes for 2-D problems which reduced this error, but retained the advantages of upstream differencing; they are SUDS and SUWDS. In air-conditioning problems, multidimensionality is required. We propose two new schemes, SUDS-3D and SUWDS-3D, which extend Raithby schemes to 3-D problems. Solutions to some problems were obtained by our new schemes and compared with those obtained by conventional methods.

Key Words: Heat Transfer, Computational Fluid Dynamics, Three Dimensional Flow, Air Conditioning, Differencing Schemes, False Diffusion

1. 緒 言

熱流体シミュレーション技術は、従来原子力関連機器、航空機や環境問題などの比較的大規模なシステムへの応用が顕著であったが、近年のめざましいコンピュータの発達による演算の高速化、大容量化、コストの低廉化とともに、急速に身近なものとなってきた。それとともに、室内空調問題へ熱流体シミュレーションを適用する機会も増加している。最近の空調機にとっての大きな課題の一つは、空調機(室内側)からの吹出し気流の制御による室内温度分布の均一化があり、これにより快適性を向上させることができる。現在、例えば天井に取付けられた室内機からの気流吹出しは天井面に対して一定の角度を有している。その中で、空調気流の吹出し角度の最適化により室内温度分布の均一化を図るため、室内空調気流解析が活用されていることがよく知られている。

この問題を差分法により解く際、差分格子と吹出し方向は必ずしも一致せずむしろ大きな角度で交さる

場合が多く、かつコンピュータの容量制約から格子間隔が粗くなりセルベクレ数が大きくとられがちである。そのため、偽拡散が生じ、結果として得られる温度分布が不正確になる⁽¹⁾。

従来より移流項差分スキームとして取扱いの簡便な Hybrid スキーム⁽¹⁾が多用されているが、偽拡散を低減させる目的で UTOPIA スキーム⁽²⁾、河村スキーム⁽³⁾、QUICK スキーム⁽⁴⁾などの高精度の移流項差分スキームが提案されている。その中で二次元傾斜流れに対しては、数種類の差分スキームの性能比較から Raithby による傾斜風上差分スキーム(SUDS)および重みつき傾斜風上差分スキーム(SUWDS)⁽⁵⁾の精度の良さが報告されている⁽⁶⁾。

しかし、実際上の問題としては三次元問題においても精度の良い移流項差分スキームが必要であるため、著者らは Raithby の手法を三次元に拡張して三次元傾斜風上差分スキーム(SUDS-3D)および重みつき三次元傾斜風上差分スキーム(SUWDS-3D)を得た。本報では、これらの差分スキームの導出法を示すとともに、数値実験による検証および他の差分スキームとの性能比較を行った。また、室内空調気流解析における傾斜吹出しを取り上げ、モデル実験による検証により実際問題へ適用した場合の有効性も示した。

* 昭和62年5月29日 第24回日本伝熱シンポジウムおよび平成元年3月24日関西支部第64期定時総会講演会において講演、原稿受付 平成元年3月29日。

^{*1} 正員、三菱電機(株)中央研究所(〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)。

2. 三次元傾斜差分スキーム

運動方程式, エネルギー保存式などは三次元において一般に式(1)で表せる。ここで, u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の速度成分, ρ は密度, Γ は拡散係数, ϕ は従属変数, S_p, S_c はソース項である。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z} \right) \\ &+ S_p\phi + S_c \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

式(1)を差分化して解く際、コントロールボリューム中心Pに隣接する三次元格子点配置のようすを図1に示す。各点はE(East), W(West), N(North), S(South), T(Top), B(Bottom)と呼び、複合記号もこれにしたがう。次に、 $P(\phi_{i,j,k})$ に対するコントロールボリュームを図2に示す。コントロールボリュームの面と各座標軸の交点を、それぞれ隣接する格子点の記号に対応させて $e, \underline{w}, n, s, t, b$ と呼ぶ。 $\underline{w}$ に流入する流れは、 $x-y$ 面上では x 軸に対して角度 θ_1 で大きさ V_{1w} 、 $y-z$ 面上では z 軸に対して角度 θ_2 で大きさ V_{2w} を保って入ってくる。本報では、 $\underline{w}$ を原点とし、流れの方向に r 軸、 $x-y-z$ 座標系を $\underline{w}$ を中心に x 軸が r 軸と一致するように回転移動した際の y, z 軸をそれぞれ n_1, n_2 軸として新たに $r-n_1-n_2$ 座標系を導入する。

2-1 三次元傾斜風上差分法 (SUDS-3D) まず、三次元流れ場において保存量である ϕ の空間分布を決定するうえで対流が支配的である場合について述べる。式(1)を図2の w 近傍に適用すると、対流が支配的であるため、対流項以外が無視できて式(2)のようになる。

$$\rho_w u_w \frac{\partial \phi}{\partial x} + \rho_w v_w \frac{\partial \phi}{\partial y} + \rho_w w_w \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$= \rho_w V_w \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

流れを横切る方向の ϕ の変化が線形であると仮定される場合、対流流束を見積もるために使われる補間方程式は式(3)のようになる。

$$\phi = c_1 + c_2 n_1 + c_3 n_2 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 c_1, c_2, c_3 は、 w より下流にない格子点において既知である値により得られる定数である。さらに、回転座標変換により x - y - z 座標系に変換すると、式(4)のようになる。

$$\phi = c_1 + c_2 \left(y \frac{u}{V_1} - x \frac{v}{V_1} \right) + c_3 \left(z \frac{V_1}{V_3} - x \frac{uw}{V_1 V_3} - y \frac{vw}{V_1 V_3} \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $V_1 = \sqrt{u^2 + v^2}$ 、 $V_3 = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ である。式(4)を、コントロールボリュームのw面近傍に適用すると、式(5)のようになる。

$$\begin{aligned} \phi = & c_1' + c_2' \left(y' \frac{u_w}{V_{1w}} - x' \frac{v_w}{V_{1w}} \right) \\ & + c_3' \left(z' \frac{V_{1w}}{V_{3w}} - x' \frac{u_w w_w}{V_{1w} V_{3w}} - y' \frac{v_w w_w}{V_{1w} V_{3w}} \right) \\ & \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで、添字 w は点 $\underline{w}$ における値を示す。また、 x', y', z' は $\underline{w}$ を原点とし、それぞれ x, y, z 軸に平行な座標系の座標軸である。

c_1, c_2, c_3 は、 w の上流の ϕ から決定されるので、 w を囲む 18 個の $\phi(P, W, N, S, T, B, NW, SW, TW, BW, NTW, STW, NBW, SBW, NNTTW, SSTTW, NNBBW, SSBBW)$ のうちの 3 点のみを選定して設定する。したがって、式(5)を式(6)に示す境界条件の下に解く。

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi = \phi_{mw} \text{ at } x' = -\frac{1}{2} S_{uw} \delta x_i, y' = 0, z' = 0 \\ \phi = \phi_{qw} \text{ at } x' = -\frac{1}{2} S_{uw} \delta x_i, y' = -S_{vw} \delta y_{kw}, z' = -S_{ww} \delta z_{lw} \\ \phi = \phi_{rw} \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{w_w}{v_w} \right| \leq 1 \text{ の場合 at } x' = -\frac{1}{2} S_{uw} \delta x_i, y' = -S_{vw} \delta y_{kw}, z' = 0 \\ \left| \frac{w_w}{v_w} \right| > 1 \text{ の場合 at } x' = -\frac{1}{2} S_{uw} \delta x_i, y' = 0, z' = -S_{ww} \delta z_{lw} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (6)$$

ここで、 S_{uw}, S_{vw}, S_{ww} は絶対値が 1 で u_w, v_w, w_w と同符号であり、添字は $kw = j + 1/2(1 - S_{vw})$, $lw = k + 1/2(1 - S_{ww})$ である。式(6)によれば、 ϕ_{mw} は u_w の符号により P または W, ϕ_{qw} は u_w, v_w, w_w の符号により NTW, NBW, STW, SBW, NNTTW, NNBBW, SSTTW, SBBW の中の 1 個、 ϕ_{rw} は u_w, v_w, w_w の符号および v_w と w_w の相対的な大きさにより N, NW, S, SW または T, TW, B, BW の 2 群から 1 個の計 3 個の ϕ が選択される。

式(5)を式(6)の下に解くと、 w 面を通過する対流流束は式(7)のように求められる。

$$\rho_w u_w \Delta y_j \Delta z_k \phi_w = (C_w - K_{1v}) \phi_{mw} + (K_{1v} - K_{2v}) \phi_{rw} + K_{2v} \phi_{qw} \quad (7)$$

ここで、 $C_w = \rho_w u_w \Delta y_j \Delta z_k$ であり、 K_{1v}, K_{2v} は式(7)の各係数の非負条件から式(8)のように与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{w_w}{v_w} \right| \leq 1 \text{ の場合 } \left\{ \begin{array}{l} K_{1v} = S_{uw} \cdot \min \left[|C_w|, \rho_w \frac{\Delta y_j \Delta z_k}{\delta y_{kw}} |v_w| \frac{\delta x_i}{2} \right] \\ K_{2v} = S_{uw} \cdot \min \left[|K_{1v}|, \rho_w \frac{\Delta y_j \Delta z_k}{\delta z_{lw}} |w_w| \frac{\delta x_i}{2} \right] \end{array} \right. \\ \left| \frac{w_w}{v_w} \right| > 1 \text{ の場合 } \left\{ \begin{array}{l} K_{1v} = S_{uw} \cdot \min \left[|C_w|, \rho_w \frac{\Delta y_j \Delta z_k}{\delta z_{lw}} |w_w| \frac{\delta x_i}{2} \right] \\ K_{2v} = S_{uw} \cdot \min \left[|K_{1v}|, \rho_w \frac{\Delta y_j \Delta z_k}{\delta y_{kw}} |v_w| \frac{\delta x_i}{2} \right] \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (8)$$

拡散流束に対しては線型分布を仮定する。したがって、 w 面を通過する対流・拡散流束を合せた全流束は最終的に式(9)で与えられる。

$$\begin{aligned} J_w &= \rho_w u_w \Delta y_j \Delta z_k \phi_w - \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_w \Delta y_j \Delta z_k \\ &= (C_w - K_{1v}) \phi_{mw} + (K_{1v} - K_{2v}) \phi_{rw} + K_{2v} \phi_{qw} - D_w \phi_p + D_w \phi_w \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $D_w = \Gamma_w \Delta y_j \Delta z_k / \delta x_i$ であり、他の面に対しても同様に全流束が求められる。

2・2 重みつき三次元傾斜風上差分法 (SUWDS-3D) 次に、三次元流れ場において保存量である ϕ の空間分布を決定するうえで対流と拡散が支配的である場合について述べる。式(1)を図2の w 近傍に適用すると、対流と拡散の相方が支配的であるため、式(10)のようになる。

$$\rho_w u_w \frac{\partial \phi}{\partial x} + \rho_w v_w \frac{\partial \phi}{\partial y} + \rho_w w_w \frac{\partial \phi}{\partial z} = \Gamma_w \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \Gamma_w \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \Gamma_w \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (10)$$

そして、式(10)に対する解は、式(11)のようになる。式(10)中の記号は、2・1節と同様である。式(11)は、コントロールボリュームの w 面近傍の ϕ の分布形を仮定したもので、 w 面を通りぬける対流・拡散流束を見積もるための補間方程式として使われる。

$$\begin{aligned} \phi &= c_1 + c_2 \left(y' \frac{u_w}{V_{1w}} - x' \frac{v_w}{V_{1w}} \right) + c_3 \left(z' \frac{V_{1w}}{V_{3w}} - x' \frac{u_w w_w}{V_{1w} V_{3w}} - y' \frac{v_w w_w}{V_{1w} V_{3w}} \right) \\ &\quad + c_4 \exp \left(\frac{\rho_w u_w x'}{\Gamma_w} + \frac{\rho_w v_w y'}{\Gamma_w} + \frac{\rho_w w_w z'}{\Gamma_w} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

定数 c_1, c_2, c_3, c_4 は $\phi_{i,j,k}$ に隣接した 4 個の ϕ から決定され、 w の上流 3 点と下流の 1 点が使われる。したがって、式(11)を式(12)で示す境界条件の下に解く。

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi = \phi_p \text{ at } x' = \frac{\delta x_i}{2}, y' = 0, z' = 0 \\ \phi = \phi_w \text{ at } x' = -\frac{\delta x_i}{2}, y' = 0, z' = 0 \\ \phi = \phi_{qw} \text{ at } x' = -S_{uw} \frac{\delta x_i}{2}, y' = -S_{vw} \delta y_{kw}, z' = -S_{ww} \delta z_{lw} \end{array} \right.$$

$$\phi = \phi_{rw} \begin{cases} \left| \frac{w_w}{v_w} \right| \leq 1 \text{ の場合 at } x' = -S_{uw} \frac{\delta x_i}{2}, y' = -S_{vw} \delta y_{kw}, z' = 0 \\ \left| \frac{w_w}{v_w} \right| > 1 \text{ の場合 at } x' = -S_{uw} \frac{\delta x_i}{2}, y' = 0, z' = -S_{ww} \delta z_{lw} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)によれば, u_w, v_w, w_w の符号にかかわらず P と W が選択され, ϕ_{qw} は u_w, v_w, w_w の符号により NTW, NBW, STW, SBW, NNTTW, NNBW, SSTW, SSBW の中の 1 個, ϕ_{rw} は u_w, v_w, w_w の符号および v_w と w_w の相対的な大きさにより, N, NW, S, SW または T, TW, B, BW の 2 群から 1 個の計 4 個の ϕ が選択される。

式(11)を式(12)の下に解くと, w 面を通過する対流・拡散流束を合せた全流束は最終的に式(13)で与えられる。

$$J_w = C_w \left[\left(\frac{1}{2} - A'_{1w} - A'_{3w} \right) \phi_P + \left(\frac{1}{2} + A'_{1w} \right) \phi_W + A'_{2w} \phi_{qw} + (A'_{3w} - A'_{2w}) \phi_{rw} \right] - D_w [(1 - A'_{1w} - A'_{3w}) \phi_P - (1 - A'_{1w}) \phi_W + A'_{2w} \phi_{qw} + (A'_{3w} - A'_{2w}) \phi_{rw}] \quad (13)$$

ここで, $A'_{1w}, A'_{2w}, A'_{3w}, A'_{1w}, A'_{2w}, A'_{3w}$ はそれぞれ次式のように与えられる。

$$\begin{cases} A'_{1w} = \left\{ \cosh \left(\frac{P_{xw}}{2} \right) - 1 \right\} A_{1w} \\ A'_{2w} = \left\{ \cosh \left(\frac{P_{xw}}{2} \right) - 1 \right\} A_{2w} \\ A'_{3w} = \left\{ \cosh \left(\frac{P_{xw}}{2} \right) - 1 \right\} A_{3w} \end{cases} \quad (14) \quad \begin{cases} A'_{1w} = S_{uw} \left\{ 2 \sinh \left(\frac{P_{xw}}{2} \right) - P_{xw} \right\} A_{1w} \\ A'_{2w} = S_{uw} \left\{ 2 \sinh \left(\frac{P_{xw}}{2} \right) - P_{xw} \right\} A_{2w} \\ A'_{3w} = S_{uw} \left\{ 2 \sinh \left(\frac{P_{xw}}{2} \right) - P_{xw} \right\} A_{3w} \end{cases} \quad (15)$$

また, A_{1w}, A_{2w}, A_{3w} は, v_w と w_w の相対的な大きさにより式(16)のように与えられる。

$$\begin{cases} \left| \frac{w_w}{v_w} \right| \leq 1 \text{ の場合 } A_{1w} = \frac{1}{B_w} \left\{ \alpha_w - \frac{|\beta_w|}{2} (1 + S_{uw}) \right\}, A_{2w} = \frac{|\gamma_w|}{B_w}, A_{3w} = \frac{|\beta_w|}{B_w} \\ \text{ただし, } B_w = |\gamma_w| \{ 1 - \exp(-P_{zw}) \} \exp \left(-\frac{P_{xw}}{2} \right) \exp(-P_{yw}) \\ \quad + |\beta_w| \{ 1 - \exp(-P_{yw}) \} \exp \left(-\frac{P_{xw}}{2} \right) + 2|\alpha_w| \sinh \left(\frac{P_{xw}}{2} \right) \\ \left| \frac{w_w}{v_w} \right| > 1 \text{ の場合 } A_{1w} = \frac{1}{B_w} \left\{ \alpha_w - \frac{|\gamma_w|}{2} (1 + S_{uw}) \right\}, A_{2w} = \frac{|\beta_w|}{B_w}, A_{3w} = \frac{|\gamma_w|}{B_w} \\ \text{ただし, } B_w = |\beta_w| \{ 1 - \exp(-P_{yw}) \} \exp \left(-\frac{P_{xw}}{2} \right) \exp(-P_{zw}) \\ \quad + |\gamma_w| \{ 1 - \exp(-P_{zw}) \} \exp \left(-\frac{P_{xw}}{2} \right) + 2|\alpha_w| \sinh \left(\frac{P_{xw}}{2} \right) \end{cases} \quad (16)$$

ここで, $\alpha_w, \beta_w, \gamma_w, P_{xw}, P_{yw}, P_{zw}$ は次のように定義した。

$$\begin{cases} \alpha_w = u_w \delta y_{kw} \delta z_{lw} \\ \beta_w = v_w \delta x_i \delta z_{lw} \\ \gamma_w = w_w \delta x_i \delta y_{kw} \end{cases} \quad (17) \quad \begin{cases} P_{xw} = \rho_w |u_w| \delta x_i / \Gamma_w \\ P_{yw} = \rho_w |v_w| \delta y_{kw} / \Gamma_w \\ P_{zw} = \rho_w |w_w| \delta z_{lw} / \Gamma_w \end{cases} \quad (18)$$

なお, 他の面に対しても, 同様にして全流束が求められる。

3. 数値実験による検証

3.1 解析モデル 式(9)により得られた三次元傾斜風上差分法 (SUDS-3D) および式(13)により得られた重みつき三次元傾斜風上差分法 (SUWDS-3D) の精度の検証を行うため, 速度場が与えられた流れ場における温度などのスカラー量の対流・拡散を解いて偽拡散の状況を調べた。

解析モデルを図 3 に示す。速度場は一定方向に一樣な定常流であるとして, x, y, z 方向速度成分 V_{xx}, V_{yy}, V_{zz} を全領域一様に与えた。また, WW, WS, WB は流入境界を, WE, WN, WT は流出境界を表す。このような流れ場において, 無次元スカラー量 ϕ^* を従属

変数として ϕ^* の分布を求める。 ϕ^* の流入条件は, 斜線部分が 100 一定, その他の流入境界は 10 一定とした。

また, 差分格子は図 3 に示したように等間隔きざみとし, 計算領域全体を $15 \times 15 \times 15$ に分割した。

3.2 計算方法 計算条件を表 1 に示す。すなわち, V_{xx}, V_{yy}, V_{zz} の比を変えて, 流れの格子線に対する方向を 3 とおりに変化させた。なお, 各条件のセルペクレ数 P_{xw}, P_{yw}, P_{zw} は 125~625 であり, 対流が拡散に比べて圧倒的に大きい。

次に, 精度の比較のために 従来より用いられている Hybrid スキーム⁽¹⁾, 高精度移流項差分スキームの中でもコントロールボリュームを考える一次元

QUICK スキーム⁽⁴⁾および三次元 QUICK スキーム⁽⁷⁾を用いた。

これらの差分スキームを導入し、ソース項を零とした ϕ^* に対する式(1)を解いて、定常状態における ϕ^* の分布を求めた。次に原点を O、流れ方向に y^* 軸、 x - y 面と平行で y^* 軸と直角に x^* 軸をとり、 ϕ^* の x^* 軸方向の分布から ϕ^* の半値幅を求めた。さらに、この半値幅を流入境界の x^* 軸方向の幅で除して無次元半値幅 W^* を求めた。なお、 y^* は図 4 に示した長さを 1 として無次元化している。

3.3 各差分スキームの性能比較 3.2 節の手順にしたがって、各差分スキームにおける原点 O から流れ方向への無次元距離 y^* に対する無次元半値幅 W^* を求めて図 4 に示した。

本章で扱った条件は、セルペクレ数が十分大きいいため、 W^* は y^* によらず 1 となり、 $W^*=1$ からはずれた分は偽拡散により生じたと考えられる。また、計算条件のうちの Case 1 は、流れ方向と各格子線が等しい角度を成しており、最も偽拡散による影響が大きい条件である。図 4 によれば、従来の Hybrid スキームはこの Case 1 において最も大きな誤差(最大 120%)を生じている。また、高精度移流項差分スキームである QUICK スキームも偽拡散による誤差が大きく現れており、最も厳しい Case 1 における最大誤差は、三次元 QUICK スキームで 97%、一次元 QUICK スキームで 60%生じている。これに対して、三次元傾斜差分スキームは各条件とも最大 15%以内の誤差に抑えられていることがわかる。しかし、SUDS-3D と

SUWDS-3D の精度はほぼ同等であることから、スキームの簡便性を考慮すれば SUDS-3D で十分満足できると考えられる。

4. 室内空調気流解析への応用

4.1 解析モデル 次に、三次元傾斜差分スキームを実際問題へ適用した例について述べる。すなわち、天井埋込カセットエアコンを用いた室内暖房における傾斜吹出し気流解析をとり上げた。

解析は、検証のため実施した実験モデルを対象に行なった。図 5 に二口吹出し方式天井埋込エアコンの構造を示す。ファンにより吸い込まれた空気は、熱交換器を通り設定温度に昇温された後、吹出し口に設けられたペーンにより所定方向へ吹き出される。吹出し風量はチャンバによる測定から片側 $10 \text{ m}^3/\text{min}$ とし、吹出し風速および吹出し方向は熱線風速計による測定から最大風速 $V=8.5 \text{ m/s}$ となる方向 $\theta=60^\circ$ (水平下向き)とした。吸込面積は $0.56 \text{ m} \times 0.56 \text{ m}$ 、吹出し面積は $0.45 \text{ m} \times 43.5 \text{ mm} \times 2$ 口である。ここで、実際の吹出し幅 H_{IN} はペーンの姿勢により変化するため、吹出し風量と吹出し風速より決定した値を用いた。空調の対象となる部屋は、図 6 のように x - y 面内で対称な部分を除き 1/4 室モデルとした。部屋の大きさは $8.0 \text{ m} \times 4.3 \text{ m} \times 2.7 \text{ m}$ であり、エアコンは天井中央に位置している。なお、実験モデルはこの外側に空調された外室を備えており、内室の各面を等温条件に保つことができるため、実験により天井 $T_c=11.7^\circ\text{C}$ 、壁 $T_w=17.3^\circ\text{C}$ 、床 $T_f=17.8^\circ\text{C}$ とした。

表 1 計算条件

Case	$V_{xx} : V_{yy} : V_{zz}$	P_{xu}	P_{yu}	P_{zu}
1	1 : 1 : 1	125	125	125
2	1 : 1 : 2	125	125	250
3	1 : 1 : 5	125	125	625

図 3 解析モデル

図 4 原点 O から流れ方向への無次元距離 y^* に対する無次元半値幅 W^*

4.2 計算方法 本節では温風送風開始後の気流・温度分布を非定常的に予測する必要性から、非定常三次元乱流数値計算を行う。基礎式は、連続の式、 x, y, z 方向の各運動量保存式、エネルギー保存式、また乱流モデルとして $k-\epsilon$ 2 方程式モデル⁽⁶⁾を用いており、乱れエネルギー k およびその散逸速度 ϵ の保存式である。解析に用いた方程式は、重力の方向が異なる以外、文献(9)と全く同一である。

以上の基礎式を用いて差分法により方程式を解いた。差分スキームとしては、3章において得られた結論から三次元傾斜風上差分スキーム SUDS-3D を用い、比較のために従来より室内空調気流解析において多用されている Hybrid スキームを用いた。解法アルゴリズムとしては Patankar の圧力補正法⁽¹⁾に準じ、ADI 法により解いた。

次に境界条件について述べる。まず、エアコンの吹出口においては、吹出し気流 V を直角座標系の各座標軸方向の成分に分解して与える。その際、各座標軸

図5 天井埋込カセットエアコンの構造

(a) 平面図($x-y$ 平面)

(b) 立面図($x-z$ 平面)

図6 解析モデル (1/4 室モデル)

方向の気流速度成分および気流風量成分の相方が、気流の吹出し方向に対応して分解されるべきであると考えた。このようにすれば、速度と風量(質量流量)の積である運動量も各座標軸方向に正しく分配される。そこで、 x 軸、 z 軸方向吹出し速度成分をそれぞれ V_x 、 V_z とし、式(22)~(24)により算出した。

$$V_z/V_x = \tan \theta \quad (22)$$

$$V_x \cdot \Delta z + V_z \cdot \Delta x = |V| \cdot H_{IN} \quad (23)$$

$$\Delta x = \Delta z = H_{IN}/\sqrt{2} \quad (24)$$

ここで、 $\Delta x, \Delta z$: それぞれ V_x, V_z の吹出し幅である。ここでは、 $V=8.5$ m/s, $\theta=60^\circ$, $H_{IN}=43.5$ mm であるから、 $V_x=4.4$ m/s, $V_z=7.6$ m/s, $\Delta x=\Delta z=30.8$ mm とした。また、吹出し温度は実測より 46.3°C とし、吸込口では吹出し風量と吸込面積から算出した吸込速度 $V_0=1.06$ m/s を一様に与えた。吹出し口における k, ϵ はおのおの $0.043, 0.009$ とした。天井、壁、床における温度の境界条件は等温条件、速度、 k, ϵ の境界条件は壁関数を用いた。さらに、初期条件は、室温 20°C 一様で無風状態とした。

差分格子は、吹出し口、吸込口に格子を集めるとともに天井、壁、床近傍のきざみ幅を小さくする不等間隔きざみとし、計算領域全体を $19 \times 14 \times 16$ に分割した。

4.3 室内温度分布測定結果との比較 実験により得られた等温度線図を図8に、計算により得られた等温度線図の中でほぼ定常状態に達した $t=77$ s 後の結果を図9 (Hybrid スキーム) および図10 (SUDS-3D) におおの示した。各図ともに(a)は室内中央の垂直断面($x-z$ 面, $y=0$)内の分布、(b)~(d)は室内の水平断面($x-y$ 面)内の分布であり、それぞれ(b)は $z=1.11$ m, (c)は $z=2.06$ m, (d)は $z=2.65$ m における分布を示す。なお、実験における測定位置と計算における差分格子の位置は若干異なっている。

実験値は、室内に格子状に設置した素線径 $\phi 0.3$ mm の銅-コンスタンタン熱電対により十分定常状態に達した後測定し、壁面からの冷輻射を補正している。なお、図8における室内空間上のプロットは測定位置を示している。ここで、実験による等温度線図は、測定点

図7 吹出し口のモデル

間隔が計算に用いた差分格子よりも粗くてその間を線形補間して描いているため、吹出し噴流近傍での高温部の広がりや、天井および壁近傍での等高線間隔などの精度が良くないことを留意しなければならない。

まず、Hybrid スキームを用いた計算結果 (図 9) と実験結果 (図 8) を比較する。垂直断面内分布 (a) の比較では、吹出し噴流の幅が実験結果より広がっており、噴流は床面まで到達していない。さらに、水平断面内分布 [(b)~(d)] の比較では、吹出し噴流の y 軸方向への広がりが実験に比して小さく偏平になっており、また噴流は左側壁に達している。これは、吹出し速度成分を x 軸、 z 軸方向に分解して与えているため、 x 軸、 z 軸の両方向へ偽拡散が生じて噴流幅が現実よりも広がってしまい、そのため噴流は床面に到達する前に拡散したと考えられる。さらに、吹出し噴流の x -

z 面内での偽拡散による広がり、偽拡散を生じ難い y 軸方向への広がりは現実より小さくなって噴流が偏平になったと思われる。

ところが、傾斜風上差分スキーム SUDS-3D を用いた計算結果 (図 10) と実験結果 (図 8) を比較すると、前述の実験結果の精度に対する留意点を勘案すれば、垂直断面内分布 (a) における吹出し噴流方向や噴流幅、温度の絶対値ともに比較的よく一致しており、また噴流の床面到達の様子も予測できている。さらに、水平断面内分布 [(b)~(d)] における比較も、ほぼ一致していると言える。

次に、計算により得られた $t=77$ s 後の速度ベクトル図を図 11 (Hybrid スキーム) および図 12 (SUDS-3D) におのおの示した。各図の (a)~(d) は、図 9 および図 10 と同様である。Hybrid スキームを用いた計

(a) 垂直断面 (中心断面) 内分布

(a) 垂直断面 (中心断面) 内分布

(a) 垂直断面 (中心断面) 内分布

(b) 水平断面内分布 ($z=1.15$ m)

(b) 水平断面内分布 ($z=1.11$ m)

(b) 水平断面内分布 ($z=1.11$ m)

(c) 水平断面内分布 ($z=1.97$ m)

(c) 水平断面内分布 ($z=2.06$ m)

(c) 水平断面内分布 ($z=2.06$ m)

(d) 水平断面内分布 ($z=2.65$ m)

(d) 水平断面内分布 ($z=2.65$ m)

(d) 水平断面内分布 ($z=2.65$ m)

図 8 実験による等温度線図 (単位: $^{\circ}\text{C}$)

図 9 計算 (Hybrid スキーム) による等温度線図 (77 s 後, 単位: $^{\circ}\text{C}$)

図 10 計算 (SUDS-3D) による等温度線図 (77 s 後, 単位: $^{\circ}\text{C}$)

図 11 計算 (Hybrid スキーム) による速度ベクトル線図 (77 s 後)

図 12 計算 (SUDS-3D) による速度ベクトル線図 (77 s 後)

算結果 (図 11) によれば、垂直断面 [(a)] では吹出し噴流は吹出し口直後から広がりを見せ、噴流から離れた左側壁まで流れを生じている。水平断面 [(b)~(d)] では、中心断面近くに強い x 軸方向の流れを生じ、これが左側壁に衝突して部屋全体にわたる大きな循環となっている。特に (b) や (c) でのこのような流れは実際には考え難く、偽拡散の影響と思われる。

一方、傾斜風上差分スキーム SUDS-3D を用いた計算結果は、垂直断面での噴流の広がり、水平断面でも特に (d) での噴流が床面に衝突した状況など合理的な結果になっている。

以上より、傾斜風上差分スキーム SUDS-3D の実際問題での対偽拡散防止の有効性が明らかになった。

5. 結 論

以上より次の結論が得られた。

(1) 三次元流れ場において偽拡散を抑える効果のある三次元傾斜差分スキーム (SUDS-3D および SUWDS-3D) を提案した。

(2) 速度場を与えた際のスカラー量の対流・拡散を解く数値実験の結果、SUDS-3D および SUWDS-3D は共に十分偽拡散を抑える効果のあることを確認した。しかし両者の性能差は顕著でなく、式の簡便さから SUDS-3D で十分である。

(3) 天井埋込エアコンの斜め吹出しによる室内空調気流解析へ SUDS-3D を導入し、モデル実験結果による検証を行った結果、吹出し噴流が偽拡散により広がるのが抑制されて精度の良い予測ができた。本研究の遂行に際し、大阪大学工学部 高城敏美教授には貴重なご助言をいただいた。また、弊社静岡製作所の方々には室内空調検証実験に対し多大な協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer And Fluid Flow*, (1980), Mc GRAW-HILL BOOK Company.
- (2) Leonard, B. P., *Computational Techniques in Transient and Turbulent Flow*, 2(1981), 1, Pineridge Press, Swansea U. K.
- (3) Kawamura, T. and Kuwahara, K., *Proc. AIAA 22nd Aerosp. Sci. Meet.*, AIAA-84-0340(1984).
- (4) Leonard, B. P., *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **19** (1979), 59.
- (5) Raithby, G. D., *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **9** (1976), 153.
- (6) Leshziner, M. A., *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **23**(1980), 293.
- (7) 村上・加藤・須山, 生産研究, **38-12**(1986), 44.
- (8) Launder, B. E. and Spalding, D. B., *Mathematical Models of Turbulence*, (1972), Academic Press.
- (9) 古藤・山中, 機論, **53-494**, B(1987), 2937.