室内空気分布に関する各種数値解析法の比較

赤坂　　裕・荘　　達民
（受理　平成５年５月31日）

Comparison of Various Numerical Methods for the Analysis of Indoor Air Distribution

Hiroshi AKASAKA and Damin ZHUANG

Finite difference schemes for the convective term of the governing equations of fluid flow have a great influence on the computational time, accuracy and stability of the numerical solution. In this paper, Up-Wind, Hybrid, PLDS, QUICK, Optimal and Approximate LODA Schemes are used to compute the turbulent flow in a 3–D room. The computational time consumptions to reach the convergence of the flow are compared with each other. Several time steps are set to the Schemes to get faster convergence.

The results are as follows:

(1) The computed flow patterns are reasonably coincide with the experimental results.

(2) Quick Scheme and New Quick Scheme have the higher accuracy with shorter computational time.

(3) The selection of suitable time step for each Scheme can greatly decrease the time consumption for the computation.

１．はじめに

大型汎用計算機で室内気流分布を解析し，時間前進ステップ，差分スキームが計算精度，計算速度に与える影響を調べた。基本プログラムには "NISTIR 89–4211" に登録された "EXACT" [1] を利用したが，差分スキームは，現在国内，外でよく使われる差分スキームをまとめて比較を行った。

２．非定常一次元微分方程式および差分近似式

差分スキームを入れ換えることに着目すると，運動方程式，k, ε 方程式などは式(1)で表示される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial u\phi}{\partial x} = \Gamma\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + S \tag{1}$$

式(1)の ϕ はそれぞれ運動方程式，k, ε 方程式，エネルギー方程式の $u, k, \varepsilon, \theta$ を代表する。一方，パタンカーによる全流束[2]は次のように表示される。

$$J_x = u\phi - \Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial x} \tag{2}$$

式(2)を式(1)に代入して，図１に示すコントロール・ボリュームで積分すると，MAC 法の差分近似式は次のようになる。

$$(\phi_i^{n+1} - \phi_i^n)/\Delta t = [f(\phi_i)]^n \tag{3}$$

$$\begin{aligned} f(\phi_i) &= \frac{J_w - J_e}{\Delta x} + (S_c + S_i\phi_i) \\ &= \frac{(u_w\phi_w - a_w(\phi_i - \phi_{i-1})) - (u_e\phi_e - a_e(\phi_{i+1} - \phi_i))}{\Delta x} \\ &\quad + S_c + S_i\phi_i \end{aligned} \tag{4}$$

ここで n は時間ステップを示す。a_w, a_e は拡散流束項 $-\Gamma_\phi\dfrac{\partial\phi}{\partial x}$ を離散化した後の同一形係数を示す。S_c, S_i は全流束以外の項を代表する。

これまでに，数値計算の定安性を改善し精度を上げるために，いろいろな差分スキームが開発されている[2,3,4,5]。それらは，対流項中の ϕ_w, ϕ_e を修正する差分スキーム，拡散項係数 a_w, a_e を修正する差分ス

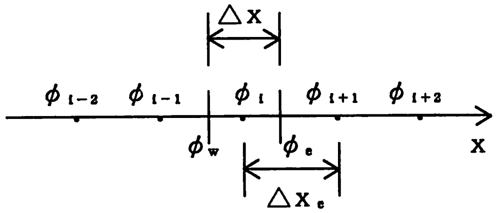


図1　1次元コントロール・ボリューム

キーム，および対流項中の ϕ_w, ϕ_e と拡散項係数 a_w, a_e を同時に修正する差分スキームに分類される。以上のそれぞれについて，本報告で扱う差分スキームをまとめることにする。なお，ここでは ϕ_e, a_e を対象としてその表示式を以下にまとめたが，ϕ_w, a_w の表示式は ϕ_e, a_e の表示式と同じ形で，$(i-1)$ の位置だけずれている。すなわち，$\phi_w = \phi_e(i-1)$，$a_w = a_e(i-1)$ 等と表現できる。各式の D_e, D_w は拡散コンダクタンス（$D = \Gamma/\Delta x$）で，常に正である。また P_e, P_w はペクレ数（$P_e = u_e/D_e$）で，流れの方向により正負いずれも取り得る。《　》はこの中に含まれる最大値を取ることを表す。また，2次元と3次元の場合も，差分近似式及び同一形係数の誘導は上記の方法と全く同じであるが，その詳細は省略した。

2．1　対流項中の ϕ_w, ϕ_e を修正する差分スキーム

a）風上法（UPWIND法）[2]：

対流項に対して風上差分を適用する場合を考える。例えば，$\dfrac{\partial u\phi}{\partial x}$ をコントロール・ボリュームで離散化すると，次のようになる。

$$\left.\begin{array}{l} u_e>0,\ u_w>0\ \text{の場合} \\ \quad \phi_e = \phi_i \\ \quad a_e = D_e \\ u_e<0,\ u_w<0\ \text{の場合} \\ \quad \phi_e = \phi_{i+1} \\ \quad a_e = D_e \end{array}\right\} \tag{5}$$

式(5)を対流項に代入すれば次のようになる。

$$(u\phi)_e = u_e\frac{\phi_E + \phi_P}{2} - |u_e|\frac{\phi_E - \phi_P}{2} \tag{6}$$

式(6)の右辺第2項がなければ中心差分[2]となる。この場合，$|u|$ の値によってはパタンカーの正係数法則[2]を満たさない可能性があり，計算が不安定になる。言い換えれば，風上法では，式(6)の第2項のように数値的に粘性を加えて計算の安定化を図っている。一方，計算の安定化を図る代償として，計算誤差が生じる。計算誤差は流れと座標軸がなす角度が増加するに従って大きくなる。

b）オリジナル QUICK法（Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics[3]）：

$$\left.\begin{array}{l} u_e>0,\ u_w>0\ \text{の場合} \\ \quad \phi_e = \dfrac{\phi_i + \phi_{i+1}}{2} - 0.125\,(\phi_{i-1} - 2\phi_i + \phi_{i+1}) \\ \quad a_e = D_e \\ u_e<0,\ u_w<0\text{の場合} \\ \quad \phi_e = \dfrac{\phi_i + \phi_{i+1}}{2} - 0.125\,(\phi_i - 2\phi_{i+1} + \phi_{i+2}) \\ \quad a_e = D_e \end{array}\right\} \tag{7}$$

QUICK 法は風上差分のような数値粘性の発生を緩和するために，Leonard によって開発されたスキームであり，コントロール・ボリューム界面における値を前後の定義点における値を用いた2次曲面で近似する手法である。

c）新 QUICK 法[4]：

新 QUICK 法は Hayase らが内挿係数の異なる QUICK スキームを分析する上で，差分近似式をパタンカーの四つの基本ルール[2]にしたがって誘導し，さらに，差分近似式をオリジナル QUICK 法と一致するようにまとめた。新 QUICK 法の最大の利点は SIMPLE 法[2]で流れ分布を解析する時，境界条件が簡単に処理できる点である。

$$\left.\begin{array}{l} u_e>0,\ u_w>0\ \text{の場合} \\ \quad \phi_e = \phi_i + 0.125\,(-\phi_{i-1} - 2\phi_i + 3\phi_{i+1}) \\ \quad a_e = D_e \\ u_e<0,\ u_w<0\text{の場合} \\ \quad \phi_e = \phi_{i+1} + 0.125\,(3\phi_i - 2\phi_{i+1} - \phi_{i+2}) \\ \quad a_e = D_e \end{array}\right\} \tag{8}$$

d）新 QUICK 法＋近似 LODA 法[5]

QUICK 法がパタンカーの四つの基本ルールを満足しても，under-shoot によって振動が発生することがある。この場合，差分スキームを1次精度風上差分スキームに入れ換えると安定な解析ができるが，数値粘性の影響が無視できない。この影響を最少限に抑えるためには，LODA 法[5]（$\phi_e^{LODA} = \gamma_e\phi_e^{QUICK} + (1-\gamma_e)\phi_e^{UPWIND}$）のような差分スキームを用いるほうがよい。ここでは，新 QUICK 法について，式(9)のように式(8)の ϕ_e の式に重み係数 α を追加して $0 \leqq \alpha \leqq 1$ の値を与え，LODA 法の加重係数 γ_e（関数）の役割を担当させることにした。

$u_e>0,\ u_w>0$ の場合

$$\left.\begin{array}{l} u_e>0,\ u_w>0 \text{ の場合} \\ \quad \phi_e = \phi_i + 0.125 \times \alpha(-\phi_{i-1} - 2\phi_i + 3\phi_{i+1}) \\ u_e<0,\ u_w<0 \text{ の場合} \\ \quad \phi_e = \phi_{i+1} + 0.125 \times \alpha\,(3\phi_i - 2\phi_{i+1} - \phi_{i+2}) \end{array}\right\} \quad (9)$$

$\alpha=0$ の場合は１次精度風上差分スキーム，$\alpha=1$ の場合は新 QUICK 法に一致する。なおオリジナル QUICK 法についても以上のような扱いをすることが望ましいが，ここではそのような計算例は取り上げなかった。

e）OPTIMAL スキーム[6)]

松尾らによって開発された高精度差分スキームである。温度，濃度等に関するスカラー輸送方程式の差分解を求める場合，計算域の大半で生産項が０となることが多く，高精度差分スキームを用いることが望ましい。OPTIMAL スキームは解析セルペクレ数の絶対値が２以下の場合は中心差分を，それ以上では QUICK 法を経由して最終的には２次精度風上となるように，内挿法の風上成分への重みを対流作用の強さに応じて連続的に調整する。ここでは，傾斜流れを計算する際，OPTIMAL スキームを利用する。

$$\left.\begin{array}{l} u_e>0,\ u_w>0 \text{ の場合} \\ \quad \phi_e = \dfrac{\phi_i + \phi_{i+1}}{2} - CF_e\,(\phi_{i-1} - 2\phi_i + \phi_{i+1}) \\ \quad a_e = D_e \\ u_e<0,\ u_w<0 \text{ の場合} \\ \quad \phi_e = \dfrac{\phi_i + \phi_{i+1}}{2} - CF_e\,(\phi_i - 2\phi_{i+1} + \phi_{i+2}) \\ \quad a_e = D_e \\ \text{ただし，} \\ \quad CF_e = max\left(0, \dfrac{1}{2} - \dfrac{1}{|Pe_e|}\right) \\ \quad |Pe_e| = 0 \rightarrow CF_e = 0 \end{array}\right\} \quad (10)$$

２．２　拡散項係数 a_w, a_e を修正する差分スキーム

a）ハイブリッド法[2)]：

中心差分法と１次精度風上差分スキームを組み合わせる方法である。１次精度風上差分スキームは計算の安定性が優れているが，計算精度は他の差分スキームより劣る。一方，中心差分は計算精度が高いけれども，セルペクレ数の絶対値が２を超えると計算が不安定になる。ハイブリッド法はこの二つを組み合わせた方法であり，格子セルのペクレ数が２以下の場合は中心差分となり，２以上の場合は拡散をゼロとした風上差分に転換される。

$$\left.\begin{array}{l} \phi_e = \phi_{i+1/2} \\ a_e = D_e\langle\!\langle -P_e, 1 - \dfrac{P_e}{2}, 0\rangle\!\rangle \end{array}\right\} \quad (11)$$

b）ベキ乗法(Power Law Defferencing Scheme)[2)]：

ハイブリッド法では，セルペクレ数の絶対値が２を超えると中心差分が風上差分に転換されるが，ベキ乗法ではこの点が改良され，セルペクレ数の絶対値が２を超えると風上差分に漸近する。

$$\left.\begin{array}{l} \phi_e = \phi_{i+1/2} \\ a_e = D_e\,(\langle\!\langle 0, (1-0.1\,|P_e|)^5\rangle\!\rangle + \langle\!\langle -P_e, 0\rangle\!\rangle) \end{array}\right\} \quad (12)$$

２．３　対流項中の ϕ_w, ϕ_e と拡散項係数 a_w, a_e を同時に修正する差分スキーム

例えば計算精度が QUICK 法に匹敵する EXQUISITE 法[7)]等があるが，本報では検討を省略する。

３．差分スキームと時間進行ステップによる計算精度，計算時間

村上[8)]，鎌田・倉渕[9)]らは差分スキームによる計算精度の比較を行った。ここでは差分スキームに加えて時間進行ステップが計算精度，計算時間に与える影響を調べる。

利用する計算機を表１に示す。図２，３に計算対象

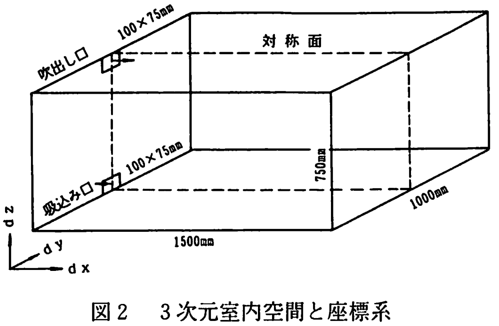


図２　３次元室内空間と座標系

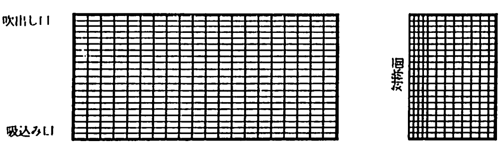


図３　計算域メッシュの分割（22×13×22）

表１　利用される計算機の性能の比較

	鹿児島大学	九州大学
計算機型式 主記憶容量 システム記憶 処理速度	IBM 3090-18S 128MB 21.3MIPS	FACOM VP2600/10 512MB 1GB 5GFLOPS （スカラー演算時80MIPS相当）

表２　境界条件および初期値

吹出し口:水平流(1) 傾斜流(2)	U_N=1.0　U_T=0.0　k =0.002　l=0.1 U_N=0.5　U_T=0.866　k =0.002　l=0.1
吸込み口：(1)に対応する (2)に対応する	U_N=-1.0 U_T=0.0　k,ε :free slip U_N：圧力型の流出境界条件
固定壁	U_N=0.0　U_T:1/7 th power profile
対称面	U_N=0.0 U_T:free slip k,ε :free slip

の３次元室内空間と座標および計算域のメッシュの分割を示す。表２に初期値および境界条件を示す。表３に差分スキームの組み合わせおよび計算時間等を示す。表３のケース１～７の計算は鹿児島大学情報センターの大型汎用計算機で行ったが，ケース８の計算のみは九州大学スーパーコンピュータで行った。

３．１　時間進行ステップΔtの決め方

普通，時間進行ステップΔtの値は対流と拡散項の計算安定性によって決められる。Δtは，計算の収束性，計算精度，計算時間に大きな影響を与えるから，最適なΔtを選ぶ必要がある。

流れの数値的安定性解析において，FTCS[10]法によるΔtの最大値は次のように表示される。

$$\Delta t \leqq \frac{2}{\dfrac{2\Gamma}{\Delta x^2}+\dfrac{u}{\Delta x}} \tag{13}$$

無次元速度 u ≦ 1，本計算の拡散係数$\Gamma \leqq 0.05$の上限値を式(13)に代入すると，式(13)は次のようになる。

$$\Delta t \leqq \frac{2}{\dfrac{2\times 0.05}{\Delta x^2}+\dfrac{1}{\Delta x}}=\frac{2\Delta x^2}{0.1+\Delta x} \tag{14}$$

図３の不等間隔メッシュの分割では，最小メッシュの間隔が0.1であり，これを式(14)に代入するとわかるように，本計算のΔtの最大値は0.1程度である。

３．２　水平流の場合

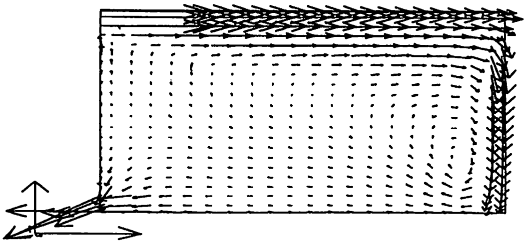
Δtの影響を調べるため，ケース１では計算が終わるまでΔtを0.01に固定させる。ケース２，３，４ではΔtを計算のCYCLE数によって変化させる。最初の13000 CYCLEでは流れ場が形成中であると仮定し，ケース１，２，３，４とも$\Delta t=0.01$を設定する。図４，５，６，７のａ）にそれぞれCYCLE＝13000, $\Delta t=0.01$，ケース１，２，３，４の速度ベクトル図を表示する。ケース１，２は差分スキームが同じ（内挿式が違う）であるから，流れのパターンも全く同じである。ケース３，４の場合，セルペクレ数の絶対値が10を超えると差分スキームが同じになるから，流れのパターンはほとんど同じである。CYCLE＝13000を起点として，ケース２，３，４のΔtを0.05に増大させ，3000 CYCLEを追加計算した後の計算結果が図５，６，７のｂ）に示されている。一方，ケース１で$\Delta t=0.01$のままにして，15000 CYCLEを追加計算した後の結果を図４のｂ）に示す。流れのパターンはケース２，３，４に近い。すなわち，ケース１で15000 CYCLE ($\Delta t=0.01$) を増す効果は近似的にケース２，３，４のΔtを５倍とし，3000 CYCLE計算する効果と同じである。言い換えれば，ケース２，３，４，の場合，$\Delta t=0.01$を取ると計算時間が５倍増える。さらにケース３，４，５のΔtを最大の0.1に取り，6000 CYCLEを追加計算した後の収束したとみなされる計算結果を図５，６，７のｃ）(CYCLE＝22000, $\Delta t=0.1$）に示す。これに対して，ケース１の場合で収束したとみなされる計算結果を図４のｃ）に示す。$\Delta t=0.01$であるから，45000 CYCLE必要である。

図８はケース５，計算途中で差分スキームを入れ換えた例である。図８のａ）(CYCLE＝8000，平均Δt＝0.4125）では運動方程式，k，ε式とも新QUICK法で解析している。一方，CYCLE＝9000の前後で流れの変化が激しいから，図８のｂ）に示すようにk，ε式の差分スキームに重み係数０（風上差分）を導入した。さらに，図８のｃ）ではk，ε式の差分スキームに重み係数0.3（近似LODA法相当）を導入している。この計算では12000 CYCLEで収束解が得られた。図９は実験結果[9]である。計算結果と実験結果の比較でわかるように各計算結果がΔt値を調整したにもかかわらず，ほぼ満足な解が得られたといえる。

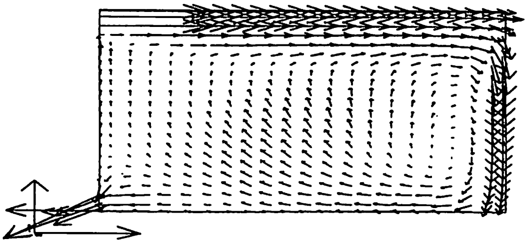
上記の計算結果をまとめると，

ａ）時間進行ステップΔtの選択によって計算時間を節約することができる。

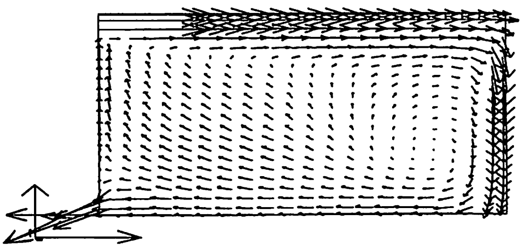
ｂ）各ケースの流れパターンは基本的にはほぼ同じである。すなわち対称面の流れについて述べると，壁噴流は天井面に沿って対向面に衝突した後放射状に広が



a）Δt =0.01, CYCLE =13000

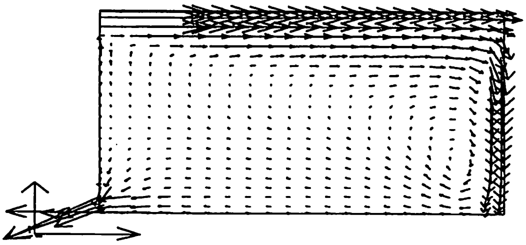


b）Δt =0.01, CYCLE =28000

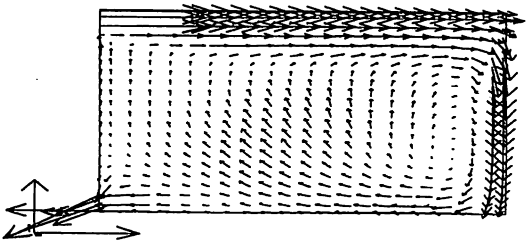


c）Δt =0.01, CYCLE =45000

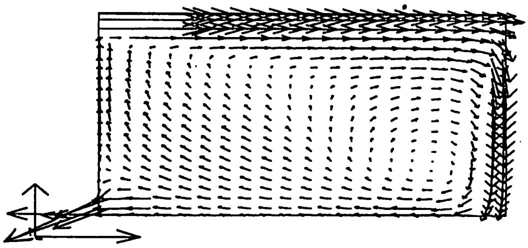
図4　ケース1の速度ベクトル図(Re =25000)



a）Δt =0.01, CYCLE =13000

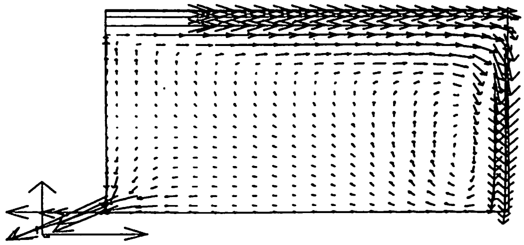


b）Δt =0.05, CYCLE =16000

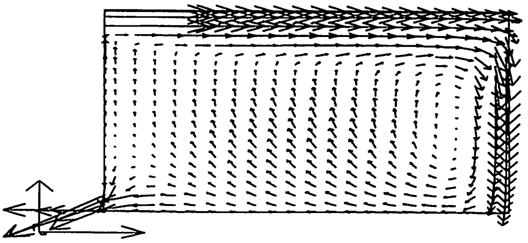


c）Δt =0.10, CYCLE =22000

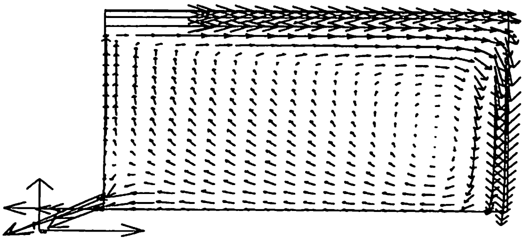
図5　ケース2の速度ベクトル図(Re =25000)



a）Δt =0.01, CYCLE =13000

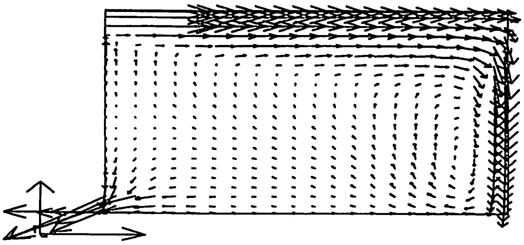


b）Δt =0.05, CYCLE =16000

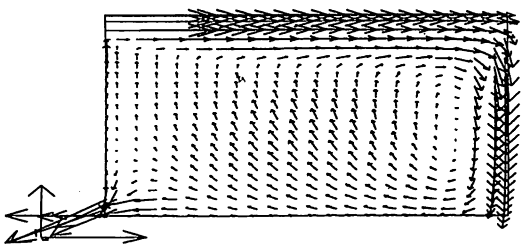


c）Δt =0.10, CYCLE =22000

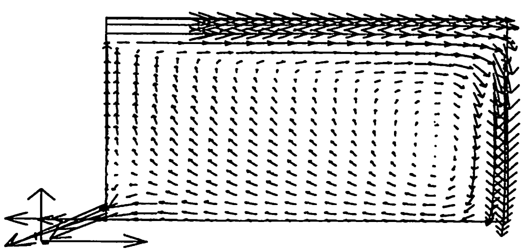
図6　ケース3の速度ベクトル図(Re =25000)



a）Δt =0.01, CYCLE =13000

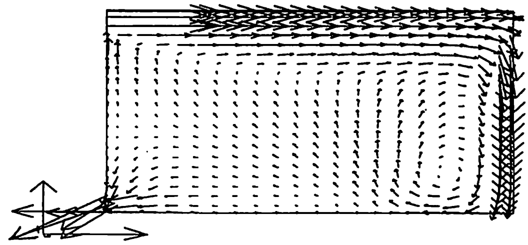


b）Δt =0.05, CYCLE =16000

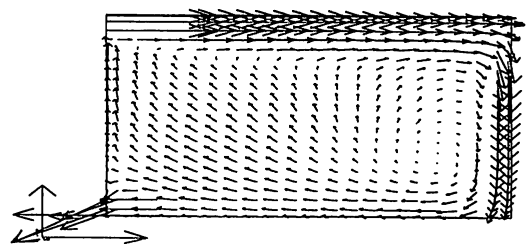


c）Δt =0.10, CYCLE =22000

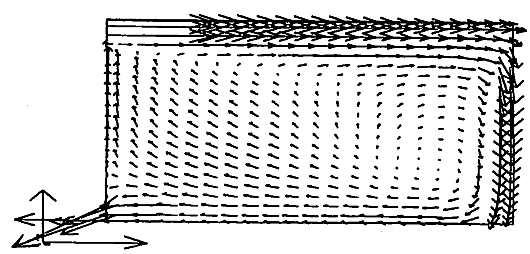
図7　ケース4の速度ベクトル図(Re =25000)



a）平均 Δt =0.04125, CYCLE =8000



b）平均 Δt =0.0275, α = 0, CYCLE =10000



c）平均 Δt =0.05, α =0.3, CYCLE =12000

図8　ケース5の速度ベクトル図(Re =25000)

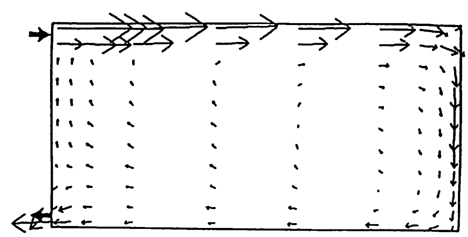


図9　実験結果[9)]

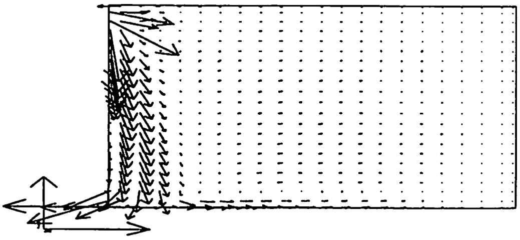
り下向き気流となる。床面付近では，吸い込み口に向かう気流が形成され，除々に上昇して吹き出し噴流に誘引される対角線的な流れとなる。対向面の床付近を中心とし，室全体に広がる大きな時間回りの循環流が形成される。また，計算結果は実験結果に大体整合している。

c）ケース1，2の差分近似式は同じであるから流れのパターンは同じである。ケース3，4の運動方程式の移流項にはベキ乗法およびハイブリッド法を利用しているが，流れのパターンは類似している。一方，ケース3，4をケース1，2に比べると，図の右下の渦の位置がやや上に移動している。これは計算の収束性および精度がケース1，2よりやや劣ることによると考えられる。

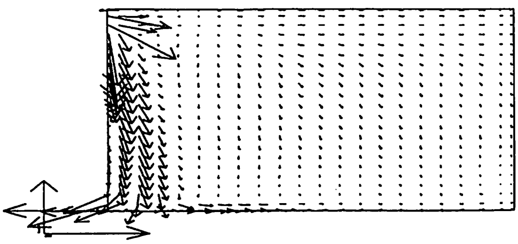
d）新 QUICK 法がパタンカーの四つの基本ルールを満足しても，under-shoot が発生することがある。その場合，1次精度風上差分スキームまたは近似 LODA 法を代入すると安定な解が得られた。

3．3　傾斜流れの場合

エアコンの吹き出し角度による室内空気分布は省エネルギーや居住者の快適性に影響する。ここでは空気は天井と傾斜60°で吹き出され，室内空間形状とメッシュの分割は図1，2と同じであると設定している。

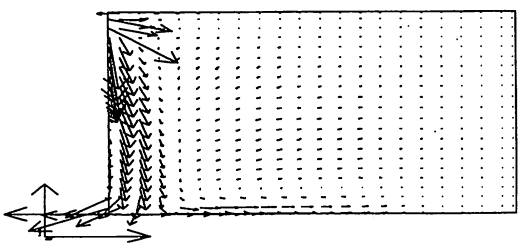


a）平均 $\Delta t=0.015$, CYCLE $=24000$

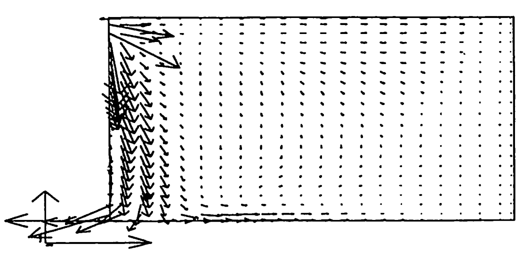


b）平均 $\Delta t=0.0206$, CYCLE $=33000$

図10　ケース６の速度ベクトル図 (Re $=25000$)



a）$\Delta t=0.05$, CYCLE $=8000$



b）$\Delta t=0.05$, CYCLE $=15000$

図11　ケース７の速度ベクトル図 (Re $=25000$)

ケース６，７では運動方程式の移流項の差分スキームに QUICK を採用し，k，ε式の移流項にそれぞれベキ乗法と OPTIMAL スキームを採用する。図10，11のａ）はそれぞれケース６，７の計算途中の結果である。図11ａ）の計算 CYCLE 数は図10ａ）の1/3程度であるが，時間進行ステップ Δt は図10ａ）に比べれば約３倍程度大きく，両図面の流れのパターンはほぼ同じである。一方，傾斜流れ場の形成までに何回か流れのパターンに変化が表れる。図10，11のａ）では吹き出し口からの空気は吸い込み口へとショートサーキットするが，それ以外は底部に到着した後逆時計回りの循環流を形成している。図10，11のｂ）では計算 CYCLE の増加に従って逆時計回りの循環流が段々時計回りの流れになっているが，収束状態になるまでにはまだ相当の計算を要する。ケース８（差分スキームはケース６とほぼ同じ）はスーパーコンピュータで計算した。図12にその計算結果を示す。図12のように，計算メッシュの分割が荒い等の問題によって，吹き出し口の対向面からの逆流がある位置で止まっている。

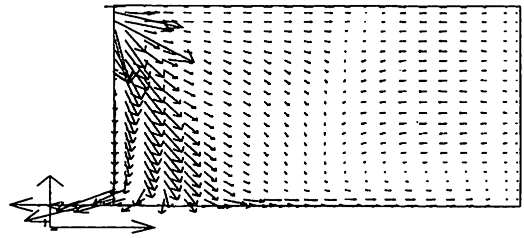


図12　ケース８の速度ベクトル図
（$\Delta t=0.05$, Re $=25000$, CYCLE $=210000$）

４．差分スキームによる計算時間の比較

上記の計算結果でわかるように，ケース１～４とも計算の安定性は優れている。しかし，計算にかかる時

表３　各ケースの差分スキーム，吹出種類と計算時間，計算安定度の比較

Case No.	差分スキーム		吹出種類	1000CYCLEにかかる時間 (S)[1]	計算安定度
	運動方程式移流項	k，ε 方程式移流項			
Cass 1	QUICK法	ベキ乗法	水平吹出	1.0 (鹿大)[2]	良好
Cass 2	新QUICK法	ベキ乗法	水平吹出	1.035 (鹿大)	良好
Cass 3	ベキ乗法	Hybrid法	水平吹出	1.592 (鹿大)	良好
Cass 4	Hybrid法	Hybrid法	水平吹出	1.458 (鹿大)	良好
Cass 5	新QUICK法	新QUICK法＋近似LODA法	水平吹出	0.96 (鹿大)	普通良好
Cass 6	QUICK法	ベキ乗法	傾斜流れ	0.993 (鹿大)	良好
Cass 7	新QUICK法	OPTIMAL法	傾斜流れ	1.456 (鹿大)	良好
Cass 8	新QUICK法	ベキ乗法	傾斜流れ	0.0962(九大)[3]	良好

注：1)Cass1の2188(S)/1000CYCLEを基準とする。
2)鹿大は鹿児島大学大型汎用コンピュータ IBM 3090-18Sで計算する。
3)九大は九州大学スーパーコンピュータ FACOM VP2600で計算する。

間が差分スキームによってかなり異なる。表3に各ケースの繰り返し計算ステップが1000 CYCLEごとに要する計算時間等を示した。ケース3はケース1に比べれば，計算時間が1.6倍ぐらいかかり，計算精度も多少落ちる。またケース3の計算時間がかかるのは，差分スキームにIF文やベキ乗計算が多く，代数式のQUICK法より計算時間がかかるからである。ケース6，7を比較すると，ケース7の方が計算時間が多くかかっている。しかし，ケース6，7とも途中で計算を打ち切っているために，計算精度に対する差分スキームの影響の比較は行わなかった。

一方，ケース6と8は差分スキームが殆ど同じであって，それぞれ汎用大型計算機とスーパーコンピュータで計算されているため，計算機による計算速度を比較することができる。ケース8の計算速度はケース6の10倍程度である。

まとめ

1．水平吹き出しには汎用計算機で十分に計算できる。吹き出し口から流れが傾斜的に入る場合は汎用計算機では計算時間がかかり，スーパーコンピュータを使う方がよい。

2．差分スキームによる計算精度，計算速度の影響を調べた。QUICK法は計算精度が高いばかりでなく，反復計算にかかる計算時間も短い。

3．時間進行ステップΔtは計算の安定性に影響する。一方，Δtの選択によって計算時間に数倍の差が生じる。本報告では，計算途中の結果を判断して適切なΔt値を選択しているが，今後，最適なΔtを自動的に発生させるようにプログラムを改良する予定である。

4．傾斜流れの計算ではメッシュの分割などが計算精度に影響を与える。差分スキームや計算メッシュの分割を含めた研究が必要である。

謝　辞

“EXACT”プログラムの使用に当たり東京理科大学倉渕講師から貴重な助言を頂いた。本研究の一部は鹿児島大学工学部と㈱大気社技術研究所との共同研究として行われた。

参考文献

1) T. Kurabuchi and J. B. Fang: A NUMERICAL METHOD FOR CALCULATING INDOOR AIRFLOWS USING A TURBULENCE MODEL, NISTIR 89–4211, 1989

2) スハスV. パタンカー原著，水谷幸夫・香月正司訳：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析，森北出版，1985年

3) B. P. Leonard : A STABLE AND ACCURATE CONVECTIVE MODELLING PROCEDURE BASED ON QUADRATIC UPSTREAM INTERPOLATION, COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING, 19, 59–98, 1979

4) T. Hayase, J. A. C. Humphrey, and R. Greif : A Consistently Formulated QUICK Scheme for Fast and Stable Convergence Using Finite-Volume Iterative Calculation Procedures, JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS 98, 108–118, 1992

5) J. ZHU and M. A. LESCHZINER : A LOCAL OSCILLATION-DAMPING ALGORITHM FOR HIGHER-ORDER CONVECTION SCHEMES, COMPUTER MATHODS IN APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING, 67, 355–366, 1988

6) 松尾他：移流・拡散方程式の高精度差分近似法に関する研究（その1），OPTIMALスキームの開発およびLODA, ULTRA-SHARPスキームとの比較検討，建築学会学術講演梗概集，pp. 489-490, 1992年

7) B. P. Leonard : A SURVEY OF FINITE DIFFERENCES WITH UPWINDING FOR NUMERICAL MODELLING OF THE INCOMPRESSIBLE CONVECTIVE DIFFUSION EQUATION, Computational Technichques in Transient and Turbulent Flow, Vol. 2, 1–35, Pineridge Press Limited Swansea U. K. 1981

8) 村上他：移流項差分における一次精度風上，QUICK，中心差分スキーム等の比較検討(2)，日本建築学会計画系論文報告集，第390号，1988年

9) 室内空気分布の数値予測法の実用化に関する研究：研究代表者，鎌田，元康，平成元年～3年度科学研究費補助金（一般研究B）研究成果報告書，1991年

10) P. J. Roache，高橋亮一他（訳）：コンピュータによる流体力学（上，下），構造研究刊，企画センター，1970年