

Adaptive Gridによる建物周辺気流の解析

Numerical Simulation of Air Flow around Building with Adaptive Grid Technique

村上周三*・持田 灯*・村上里美**・山村真司*
Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA, Limi MURAKAMI and Shinji YAMAMURA

Adaptive Grid Methodは、粗いメッシュ分割による解の誤差を評価し、誤差の大きい領域のみを新たな計算領域として設定し計算を進めていくという手法である。本稿では、**Adaptive Grid Method**で用いられる誤差の推定法について概説するとともに、本手法中の**Passive Method**を建物周辺の3次元乱流場の数値予測に適用した結果について報告する。

1. はじめに

建物周辺気流の数値シミュレーションでは、一般的に解析領域はなるべく広く、また、建物近傍のメッシュ分割は十分細かく設定する必要がある¹⁾。したがって、限られた計算機能力の中で誤差の少ない解を得るためには、どの部分をどの程度細かく分割するべきかという点に対して、正しい選択がなされなければならない。Adaptive Grid Methodはこのような要求に答えるものとして開発され、2次元の層流計算では、すでにその有効性が確認されている。本手法ではメッシュ分割による解の誤差を推定し、誤差の大きい領域のみを取り出し、細かいメッシュ分割で再計算していく²⁾³⁾⁴⁾。

本稿では、Adaptive Grid Methodを3次元乱流場に適用する方法について検討するとともに、本手法を建物周辺の気流解析に適用した結果について報告する。

2. Adaptive Gridの概要

Adaptive Gridの手法はBurger, Olingerにより双曲型の層流に対して用いられ、これをCaruso, Ferzigerらは楕円型の層流へと発展させた²⁾³⁾。

Adaptive Gridでは、粗いメッシュ分割による計算結果における誤差の評価を行い、誤差の大きい領域のみを新たな計算領域として設定して、細かいメッシュ分割により再計算するという操作を繰り返すことにより計算を進めていく。従来のメッシュ分割では、建物近傍のメッシュ分割を細かくした場合に、建物から離れた速度勾配の余り大きくない位置のメッシュも同時に細かくなってしまふという不都合が生じたが(図1)、Adaptive Gridの場合はこのような問題は発生しにくく、限られた計算機のメモリー容量の中で比較的細かい差分分割が可能と

記号

| | | | |
|------------|---|----------|-----------------------|
| h | : メッシュ幅 | α | : カルマン定数 |
| Hb | : 建物高さ, 風洞実験では Hb=20cm | e | : solution error |
| h_p | : 建物に接するセルのメッシュ幅 | τ | : truncation error |
| U | : 風速 | EPS | : 収束判定値 |
| U_t | : 風速の接線方向成分 | L | : 微分演算子 |
| U_n | : 風速の法線方向成分 | L_n | : メッシュ幅hの差分演算子 |
| k | : 乱流エネルギー | Γ | : 拡散係数 |
| ϵ | : kの散逸 | suffix h | : メッシュ幅hの計算結果であることを示す |
| ν_t | : 渦動粘性係数, $\nu_t = C_0 k^2 / \epsilon$ | EX | : 真の解を示す |

なる。

3. Adaptive Gridにおける誤差の推定法の概要

(1)数値計算における誤差の種類

Adaptive Gridでは計算領域の決定を誤差の評価に基づいて行う。この場合に用いられる誤差評価手法はシミュレーション結果にリチャードソンの補外法の原理を適用するものである⁵⁾。数値計算においては誤差に2種類のもの考えられる。1つは計算結果そのものの真の解との差である。つまり、あるメッシュ分割により得ら

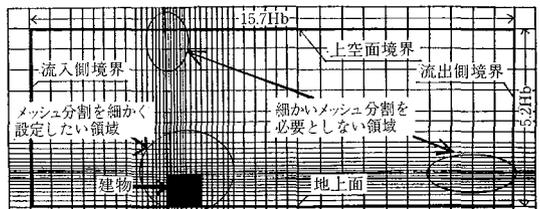


図1 従来のメッシュ分割

*東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター

**農業土木試験場 元受託研究員

れた結果とメッシュを無限に細かく分割した場合に得られる結果との違いということになる。この誤差を solution error と呼ぶ。2 つめは差分式の打ち切り誤差 (truncation error) である。つまり微分方程式を差分方程式により解くことによる誤差である。truncation error は流れの中の風速勾配の緩やかな部分では少なく、主に大きな風速勾配のある場所で発生すると考えられる。solution error はこの truncation error が移流・拡散されて生ずる error と考えることができる。つまり、建物周辺気流の計算でいえば、建物近傍で発生した truncation error はその後流にまで影響を及ぼし、truncation error の小さい場所でも solution error は大きくなる場合があるということである。これら 2 つの誤差の評価手法について述べる。

(2) solution error

今、メッシュ幅 h のメッシュ分割において p 次精度のスキームを用いた計算から得られた風速 U_h の solution error は、Taylor 級数を用いて次式で評価できるものとする。

$$e_h = U_{EX} - U_h = h^p f(x) + h^q g(x) + \dots \quad (1)$$

U_{EX} は真の解、 U_h は差分間隔 h の場合の解を示す。

誤差 e_h は、leading error $h^p f(x)$ のほかに高次誤差項 $h^q g(x)$ を含む。

メッシュ幅を 2 倍にした場合には次のようになる。

$$e_{2h} = U_{EX} - U_{2h} = (2h)^p f(x) + (2h)^q g(x) + \dots \quad (2)$$

(2) 式から (1) 式をひき、 $2^p - 1$ で割ることにより (1) 式右辺の leading error $h^p f(x)$ を評価することができる。

$$\tilde{e}_h = \frac{U_h - U_{2h}}{2^p - 1} = h^p f(x) + \frac{2^q - 1}{2^p - 1} h^q g(x) + \dots \quad (3)$$

(3) 式右辺は leading error $h^p f(x)$ のほか、高次誤差項を含む。 \tilde{e}_h をメッシュ幅 h の場合の solution error の推定値とする。(3) 式より推定される solution error は $O(h^q)$ の精度である。

(3) truncation error

微分方程式を微分演算子 L を用いて次のように表す。

$$L(U_{EX}) = F \quad (4)$$

メッシュ幅 h の計算における差分方程式は次のように表される。

$$L_h(U_h) = F \quad (5)$$

truncation error τ_h は微分方程式と差分方程式の差として定義される。したがって、

$$\tau_h = L_h(U_{EX}) - L(U_{EX}) \quad (6)$$

(4) 式、(5) 式の関係を用いると、

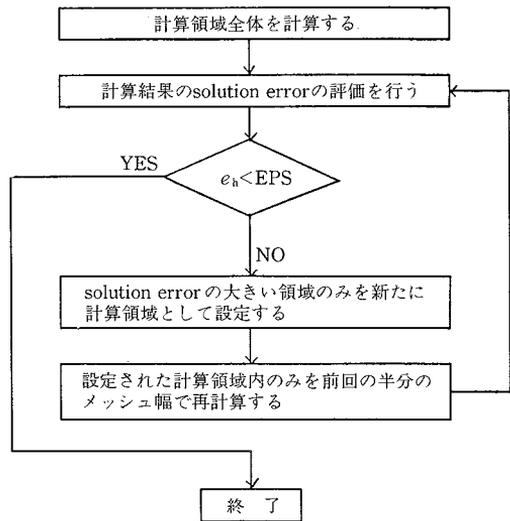


図 2 Passive Method の計算方法

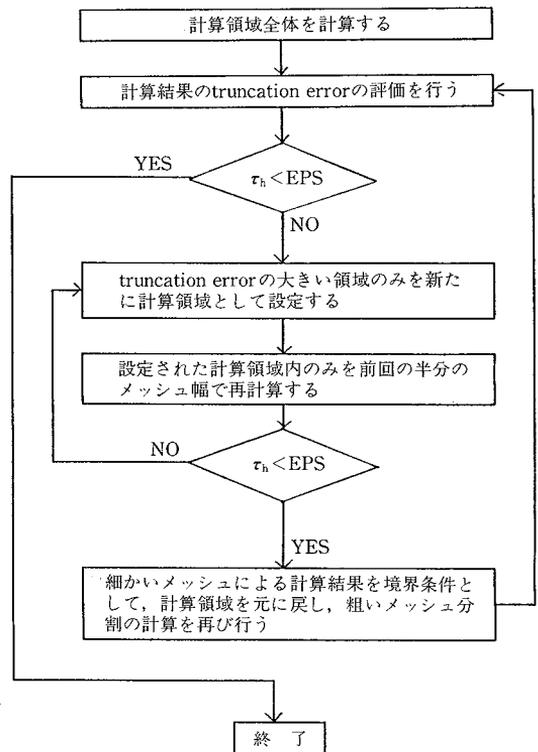


図 3 Active Method の計算方法

$$\begin{aligned} \tau_h &= L_h(U_{EX}) - F \\ &= L_h(U_{EX}) - L_h(U_h) \end{aligned} \quad (7)$$

L_h が線形な関数ならば, solution errorとtruncation errorの関係式が次のようにして求まる.

$$\begin{aligned} \tau_h &= L_h(U_{EX} - U_h) \\ &= L_h(e_h) \end{aligned} \quad (8)$$

L_h が非線形な関数の場合には, U_{EX} の推定値として次式を用いる.

$$\tilde{U}_{EX} = U_h + \tilde{\tau}_h \quad (9)$$

U_{EX} を \tilde{U}_{EX} の推定値として用いて, (7)式を計算する. ただし, $\tilde{\tau}_h$ は $O(h^q)$ の精度であるためここで推定される U_{EX} も $O(h^q)$ の精度である.

truncation errorの推定値 $\tilde{\tau}_h$ は次式で評価される.

$$\begin{aligned} \tilde{\tau}_h &= L_h(U_h + \tilde{\tau}_h) - F \\ &= L_h(\tilde{U}_{EX}) - L_h(U_h) \end{aligned} \quad (10)$$

(4) 誤差の生成と移流・拡散

ここでsolution errorとtruncation errorの関係について考えるため, 次の輸送方程式を考える.

$$U \frac{\partial \phi}{\partial x} + V \frac{\partial \phi}{\partial x} = \Gamma \nabla^2 \phi + S \quad (11)$$

ここでは速度場, U, V がすでに与えられている場合のパスピスカラー ϕ の移流, 拡散を差分方程式を用いて計算することを考える.

(11)式を差分演算子を用いて表せば次式となる.

$$L_h(\phi_h) = S \quad (12)$$

ここで ϕ_h はメッシュ幅 h の計算により算出される ϕ の値であるので次のように記述できる.

$$\phi_h = \phi_{EX} - e_h \quad (13)$$

(13)式を(12)式に代入すれば

$$L_h(\phi_{EX} - e_h) = S \quad (14)$$

ここでは, 線形な方程式を考えているので,

$$L_h(\phi_{EX}) - L_h(e_h) = S \quad (15)$$

ここで(15)式に(12)式を代入して整理すれば,

$$L_h(e_h) = L_h(\phi_{EX}) - L_h(\phi_h) \quad (16)$$

(16)式の右辺は, (7)式で定義される ϕ_h のtruncation error(τ_h)である. したがって(16)式を書き直せば, 次式となる.

$$U \frac{\partial e_h}{\partial x} + V \frac{\partial e_h}{\partial x} = \Gamma \nabla^2 e_h + \tau_h \quad (17)$$

(17)式はsolution error(e_h)は ϕ と同様に流れ場の中で移流, 拡散し, truncation error(τ_h)がその生成項として働くことを意味している.

4. Passive MethodとActive Method

Adaptive Gridには2種類の方法がある. 1つは楕円型流れの中でも, 比較的流れの相互作用が弱いような流れに対して開発されたものであり, もう1つは強い相互作用を持つような流れに対して開発されたものである.

1つめはPassive Methodと呼ばれ, 2つめはActive Methodと呼ばれる. この2つの手法について次に述べる.

(1) Passive Method

ここでいう相互作用が比較的弱い流れとは, 流れのある1部分が変化しても, その部分からはなれた場所の流れに与える影響が比較的小さい場合を指す. 建物周辺気流を例に取れば, 建物近傍の流れの変化が, 建物から離

表1 境界条件

| | case 1 | case 2 (case 1をAdaptive Grid用に改良したもの) |
|------------------|---|--|
| 流入面 | 風速, k, ϵ : Region 1は風洞実験の結果を, Region 2以下は前のRegionの結果を用いてデリクレ型で与える. (メッシュ分割の変更に伴う補間は図9(1)を使用) | 左に同じ (ただし, メッシュ分割の変更に伴う補間は図9(2)を使用) |
| 流出面 側面 上空面 | 圧力: Region 1では0. Region 2以下は前のRegionの結果を用いてデリクレ型で与える. U_t, k, ϵ : free slip | 圧力: 左に同じ U_t, k, ϵ : 計算領域の内側の勾配より外挿(図10). |
| 地上面 建物壁面 | $\cdot U_t : Z^{1/4}, U_n = 0$ $\cdot k$: free slip $\cdot \epsilon(h) = C_D k^{3/2} / \ell$ $\ell = C_D^{1/4} x h_p / 2$ | 左に同じ (ただしどのRegionでも ϵ の境界条件に用いられる h_p は $H_b/24$) |

れた風上側や上空の流れに与える影響は小さいと考えられる。このような流れにおいては、建物からはなれた領域は粗いメッシュで1度計算してしまえば、建物近傍の流れが正確に計算された後でも、再計算する必要性は低いと思われる。Passive Methodでは、まず計算領域全体を粗いメッシュ分割により計算し、その収束解の誤差の大きい領域のみを細かいメッシュ分割により再計算する。再計算した結果における誤差がまだ十分に小さくなければ、再び同様の操作を繰り返していくわけである。Passive Methodにおいては1度誤差が十分に小さいと判断された領域は再び計算されることはない。したがって、計算領域の決定に際しては真の解の推定値との差 ϵ_n (solution error) を用いる²⁹⁾。図2にPassive Methodにおける計算の流れを示す。

(2) Active Method

強い相互作用のある流れでは、流れのある部分の変化が流れ場全体に与える影響は大きい。たとえば吹き出し、吸い込みを持つ室内気流等においては、吹き出し口近傍の流れが多少変化しただけで室内全体の流れが大きく変わってしまうことも発生する。このような流れでは、吹き出し口近傍と室内全体は同時に解かなければならない。

Active Methodでは、計算領域全体を計算した後、各定義点におけるtruncation error, τ の評価を行い、 τ の大きな領域のみを細かいメッシュ分割により再計算する。その結果においても τ の大きい領域がまだあれば、その部分だけをさらに細かいメッシュ分割により再計算する。 τ が十分に小さくなるまでこれを続けた後、今度は逆に計算領域をもとに戻し、細かいメッシュ分割により計算された部分は変化しないようにして、再び粗いメッシュ分割による計算を行う。この一連の操作を、打ち切り誤差の推定値 ϵ_n が判定基準以下となるまで繰り返すわけである。Active Methodでは粗いメッシュ分割と細かいメッシュ分割は交互に計算されるので、計算領域の決定は、solution error, ϵ_n ではなく、誤差の発生源であるtruncation error, τ_n で十分である³¹⁾。図3にActive Methodにおける計算の流れを示す。

5. Passive Methodによる立方体モデル周辺の気流解析

Adaptive Gridをk- ϵ 型2方程式モデルによる3次元乱流解析に用いるためには、k, ϵ の境界条件、メッシュ分割の変更に伴う3次元の補間方法等に関する検討が必要となる。以下では、これらの点について検討すると共にPassive Methodを用いて建物周辺気流の解析を行った結果について述べる。

5.1 解析対象空間とメッシュ分割

本解析では、図4に示すメッシュ分割を用いた計算を第一段階(Region 1, $h=Hb/6$)として、solution error

に基づいて計算領域を削減し、第三段階(Region 3, $h=Hb/24$)まで計算を実行した。各Regionの計算領域を図5に示す。

5.2 数値シミュレーションの概要

k- ϵ 型2方程式モデルにより立方体モデル周辺の流れ場を、表1に示す2通りの境界条件を用いて、3次元MAC法により解析³⁾。時間差分はAdams-Bashforth、空間差分は2次精度の中心差分を使用。ただし、スカラーの移流項に関してはQUICKスキーム¹⁾を使用。なお、以下に示す結果はすべてRegion 1の棟高の U_1 と建物高さ Hb で無次元化されている。

5.3 境界条件の改良と計算結果

(1) 建物周辺における誤差の発生と分布の傾向

(case 1, Region 1)

まず、比較的広い計算領域(Region 1)を粗いメッシュ($h=Hb/6$)で分割し(図4)、表1のcase 1の条件により計算した場合の誤差の分布を図6に示す。case 1の条件は、計算領域が建物サイズに比べて比較的広い場合に、筆者らが通例用いてきた境界条件である³⁾。図6(1)をみると、スカラー風速のtruncation errorは建物の前面で大きな値を示しており、建物周辺気流の計算の場合、風

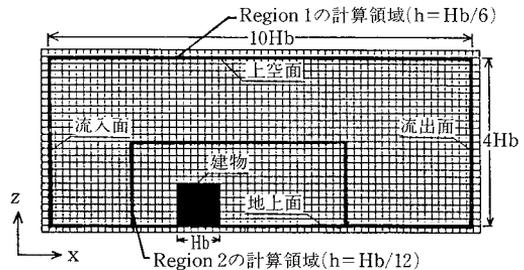


図4 case 1におけるRegion 1のメッシュ分割 ($h=Hb/6, 62(X) \times 23(Y) \times 26(Z)$)

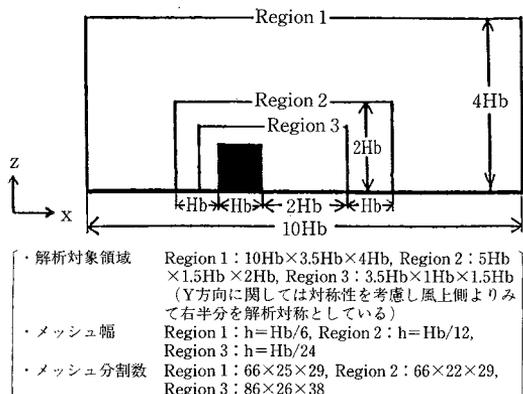


図5 解析対象空間の領域削減

速の誤差の主要な発生源は、建物風上壁面周辺に集中していることがわかる。このtruncation errorが移流、拡散された結果、風速のsolution errorは建物の風上隅角部で最大値を示し、wake内から風下側に広く分布している(図6(2))。Caruso, Ferzigerらは風速のsolution errorから計算領域を設定し、周囲の境界条件としては風速をデリクレ型で与えている²³⁾。しかし、ここに示す計算では、風速のsolution errorは風下側に広く分布しており、Carusoらの方法をそのまま用いることは難しい。一方、圧力のsolution errorの分布(図6(3))を見ると、solution errorの大きい領域は風下側でも比較的限定されていることがわかる。そこで、本研究では流入側の領域削減に際しては、風速のsolution errorを、また、流出面、側面、上空面領域削減については、圧力のsolution errorを参考にして決定し、流入側の境界では風速を、流

出面、側面、上空面の境界では圧力をそれぞれデリクレ型で与えることとした。

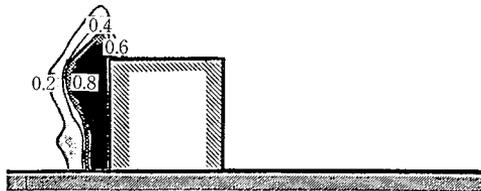
次に、Region 1における風速と圧力のsolution errorの分布を基に計算領域を図4に示すRegion 2に削減し、メッシュ幅を細かくし($h=Hb/12$)、case 1の条件を用いて行った計算結果の誤差の推定値を図7に示す。風速のsolution errorは建物近傍からwake内にかけて非常に大きな値を示し、Region 1の結果(図6(2))に比べむしろ大幅に増加している。この結果は「メッシュを細かくすればerrorは減少する」というAdaptive gridを適用する際の前提条件に反している。case 1の場合、壁面の ϵ の境界条件はメッシュ幅にそのまま依存する形式のものを用いられている($\epsilon \sim k^{3/2}/h_p$)。このため真の解の推定に用いられるメッシュ幅 h の解と $2h$ の解では、メッシュ幅だけでなく壁面における ϵ の境界条件も異なっている。周知のように ϵ の境界条件は結果に大きな影響を及ぼすことが多い¹⁷⁾。このため、case 1の条件の場合メッシュ幅 $2h$ の解と h の解を用いてメッシュ幅 0 の解(真の解)を外挿により推定するプロセスにメッシュ幅以外の要因が関与し、この結果、真の解との差として定義されるsolution errorの推定値にも大きな誤差が含まれたものと推察される。

(2)境界条件の改良(case 2)

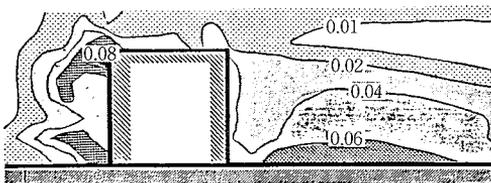
case 2(表1)では上記の点を考慮し、さらに計算領域外周の境界条件に関しても改良を加え、case 1を以下のように変更している⁴⁾。

- ①いずれのメッシュ分割においても ϵ の境界条件に用いられる長さスケール l が等しくなるように、建物壁面および地上面に接するセルは常に $h_p=Hb/24$ とする(図8)。
- ②メッシュ分割が変更されても流量が保存されるように補間方法を変更する(図9(2))。
- ③流出面、上空面、側面の境界外仮想セルの U_t, k, ϵ に関して計算領域内側の勾配を用いて直線外挿する(図10)⁶⁾。

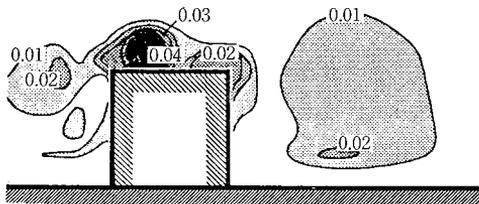
case 2を用いた場合のRegion 1の風速のsolution



(1)スカラー風速のtruncation error



(2)スカラー風速のsolution error



(3)圧力のsolution error

図6 case 1, Region 1($h=Hb/6$)における誤差の分布

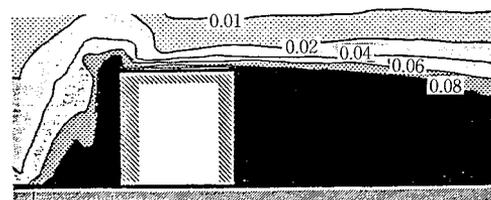


図7 case 1, Region 2($h=Hb/12$)におけるスカラー風速のsolution error

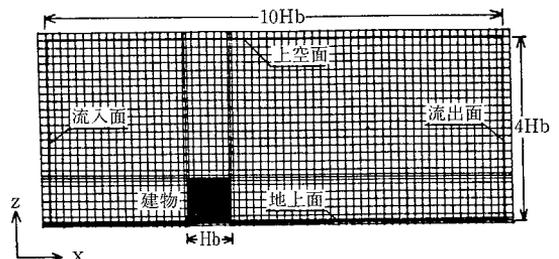


図8 case 2におけるRegion 1のメッシュ分割 ($h=Hb/6, h_p=Hb/24, 66(X) \times 25(Y) \times 29(Z)$)

errorの分布を図11に示す, case 1(図 6 (2))と比べ全体的にやや減少する傾向にあるが, 風下側の遠方まで誤差が存在している点に関してはcase 1と同様である. 次に, case 2の場合のRegion 2の風速のsolution errorの分布を図12に示す. case 1ではRegion 1よりもRegion 2のほうがsolution errorが大幅に増加したがcase 2ではメッシュ分割が細くなるにつれてsolution errorも大幅に減少しており, 十分に満足すべき結果となっている. これは, Adaptive Gridの主旨に合致するものであり, case 2の条件を用いれば計算領域の削減がスムーズに行われるものと考えられる.

(3)改良を加えた境界条件を用いた計算結果

(case 2, Region 3)

つぎにcase 2の境界条件を用いて, 図5に示すRegion 3まで領域を削減した場合の結果について示す.

①スカラー風速のsolution errorの比較(図12, 図13)

Region 3の風速のsolution error(図13)は, Region 2(図12)に比べて, 部分的に増加する領域もあるものの, 全般的に誤差は小さくなる傾向にある. wake内に関しても, 建物背面付近の一部を除いてRegion 2よりも小さくなっている.

②kの誤差の比較(図14, 図15^(a2))

Region 1に比べてRegion 3では, kのtruncation error, solution errorともに値が大幅に減少している. 特にRegion 1の場合, 建物の風上側だけでなく風下側でも大きなtruncation errorが発生しており, その周辺でsolution errorが非常に大きくなっているのに対して, Region 3ではこの部分のtruncation errorは非常に小さく, 建物背後のsolution errorも全般に小さくなっている.

③平均風速ベクトルの比較(図16)

wake内の風速ベクトルはRegion 1(図16(2))からRegion 3(図16(4))まで領域を削減していきながら小さくなっていき, 風洞実験(図16(1))の結果に近づく傾向にある. しかし屋根面の再付着については表

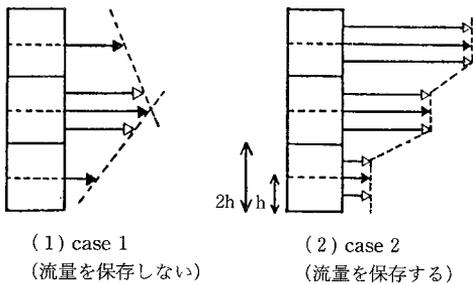


図9 メッシュ分割の変更に伴う風速の補間方法
{メッシュ幅2hでの値(→)を図に示す方法で
補間し, メッシュ幅hでの風速(→)とする}

現されておらず, この点に関しては今後さらに検討が必要である^(a3).

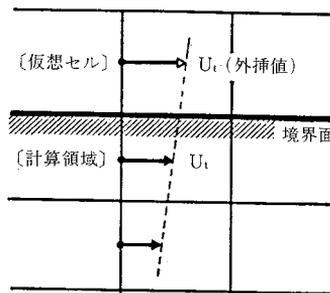
④kの分布の比較(図17)

k-εモデルの結果が建物の風上側のkを過大に評価する傾向は既往の計算例と同様である^(a). しかしRegion 3(図17(4))の結果は, Region 1(図17(2))の結果に比べてwake内のkの値が増加し, 実験(図17(1))との対応は, Adaptive Grid手法を用いない通常の計算結果^(a)に比べて格段に向上している. これはメッシュ分割が細くなるのに伴って, wake内の速度勾配が大きく計算されるようになり, kの生産が大きく評価された結果と考えられる. すなわち, 従来の計算におけるメッシュ分割(約8万メッシュ程度で, $h = H_b/24 \sim H_b/3$)では, wake内のkの生産を正しく評価するには, メッシュ分割がまだ不十分であることを示唆している. また, wake内のuの値もメッシュ分割が細くなるのに伴って, 多少増加していく傾向にあった. 以上のように, wake内の平均風速, kの予測精度の向上にAdaptive Grid手法の利用が有効となりうるといえる.

5. ま と め

Adaptive Gridによる流れの数値解析方法について概説し, 本手法を3次元乱流場に適用する際の境界条件の与え方について検討した. また, Passive Methodを用いてk-ε型2方程式モデルによる建物周辺気流の解析を行い以下の結論を得た.

- ①領域を削減し, メッシュ分割を変更する場合の境界条件の与え方や補間の方法について検討し, これらの点を十分考慮して領域の削減を行えば, 全般的に誤差は減少することを確認した.
- ②計算領域を削減し, メッシュ分割を細かくすることに



{注) 計算領域を削減していく場合, 境界面でfree slip (勾配0)の条件(case 1)を用いることは, より広い計算領域の結果から見て明らかに無理があったので, 本条件に改良した.

図10 case 2における流出面, 側面, 上空面の仮想セルのU_iの境界条件の与え方 (k, εについても同様の外挿法を用いる)

より、wake内のkの生産が大きく評価されるようになり、従来の計算では過小評価されていたwake内のkの分布を非常によく実験と一致させることができた。また、これに伴ってwake内の v_t の値が増加し、結果としてwake内の風速は小さくなり、風洞実験に近づいた。

③以上のように、k- ϵ 型2方程式モデルによる建物周辺気流の数値予測に関してAdaptive Grid手法(Passive Method)の利用は有効となりうる。今後さらに境界条件等に関する検討を加え、本手法を利用した予測の精度向上を図ってきたい。

謝 辞

本研究を進めるに際して、J.H. Ferziger 教授 (Stanford Univ.) が外国人客員研究員として、1986年度に本所に滞在中に多くのご指導とご提言を賜った。また、本所、加藤信介助教授および、鹿島建設設計部、大和田淳氏(当時東大大学院学生)から有益なご助言をいただいた。あわせてここに感謝し、謝辞とする次第である。最後に、本研究の一部は文部省科学研究費試験研究(2)の助成を受けて行ったものであることを付記する。

(1987年10月24日受理)

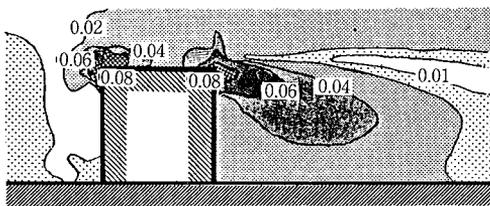


図11 case 2, Region 1 ($h = H_b$, $h_p = H_b/24$) におけるスカラー風速のsolution errorの分布

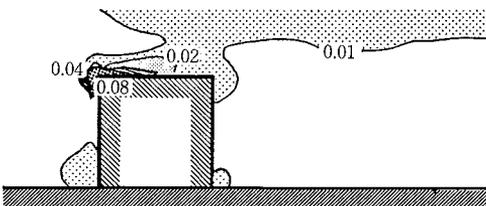


図12 case 2, Region 2 ($h = H_b/12$, $h_p = H_b/24$) におけるスカラー風速のsolution errorの分布

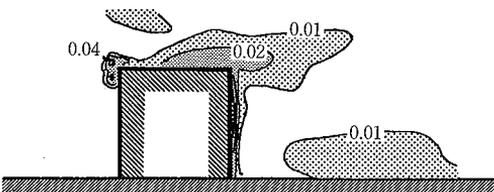
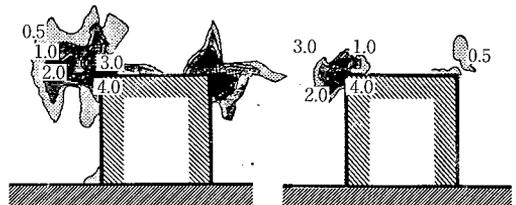


図13 case 2, Region 3 ($h = H_b/24$) におけるスカラー風速のsolution errorの分布

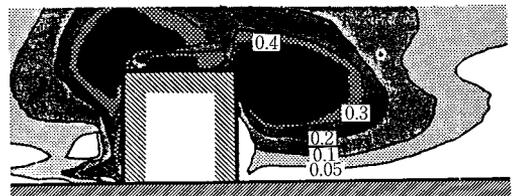
- 注 1) solution errorが大きな値を示す領域は、truncation errorが大きい領域より一般に大きい。
- 注 2) 図11に示すkのsolution errorはRegion 1における流入側の高さ H_b のkの値で無次元化されている。
- 注 3) 本報では、k, ϵ の輸送方程式の移流項にQUICKスキームを用いているが、1次精度の風上差分を使用した計算ではこの部分の逆流が再現されている⁷⁾。

参 考 文 献

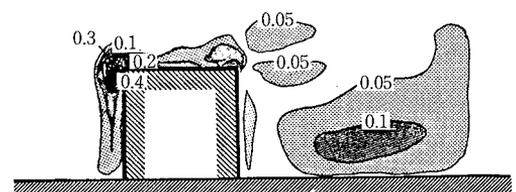
- 1) 村上, 持田, 大和田, ほか: 「建物周辺気流の数値シミュレーションの診断システム 差分スキーム, メッシュ分割, 境界条件に関する検討」生産研究, 38. 12, 1986, 12
- 2) Caruso S.C., Ferziger J.H., Olinger J: "ADAPTIVE GRID TECHNIQUES FOR ELLIPTIC FLUID-FLOW PROBLEMS". Rept. TF-23. Mech. Engrg. Dept., Stanford Univ., 1985. 11
- 3) Caruso S.C., Ferziger J.H., Olinger J: "ADAPTIVE GRID TECHNIQUES FOR ELLIPTIC FLUID-FLOW PROBLEMS". AIAA Paper No. 86-0498., 1986. 2



(1)Region 1 (2)Region 3
図14 case 2におけるkのtruncation errorの分布



(1)Region 1

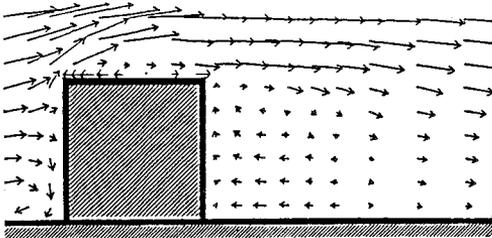


(2)Region 3

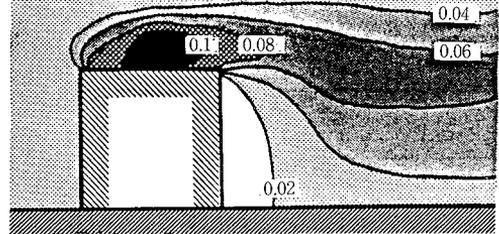
図15 case 2におけるkのsolution errorの分布

- 4) 村上, 持田, 大和田, ほか:「建物周辺気流の数値予測 (第 7, 8 報) Adaptive Gridによる立方体モデル周辺の気流解析(その 1, 2)」, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1987. 7
- 5) たとえば, 篠原能材著:「数値解析の基礎」日新出版, 1982. 4
- 6) 村上, 加藤, 永野, ほか:「室内気流数値解析の診断シ

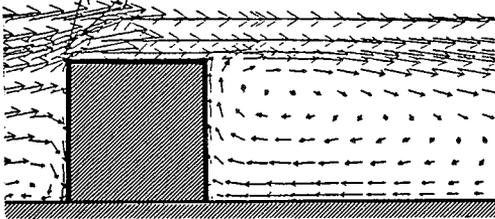
- ステムに関する研究(第12報) 差分分割に伴う数値誤差の推定, 評価方法について」生産研究, 39. 4, 1987. 4
- 7) 林, 村上, 持田:「建物周辺気流の数値シミュレーションの診断システムに関する研究(第 4 報) 建物近傍のメッシュ分割, およびεの境界条件に関する検討」生産研究, 40. 1, 1988. 1



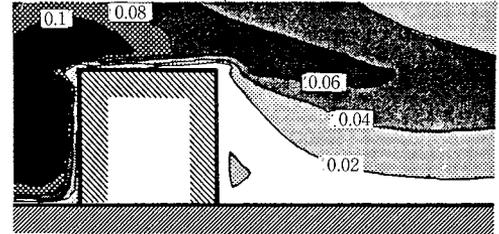
(1) 風洞実験 ($Re = 7 \times 10^4$)



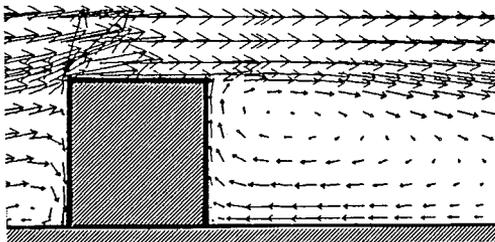
(1) 風洞実験



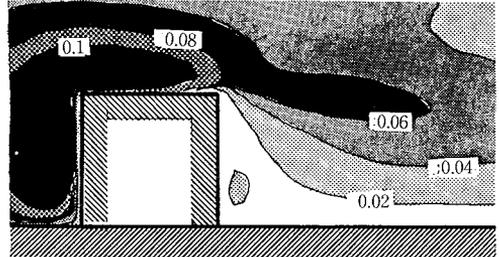
(2) Region 1 ($h = Hb/6$)



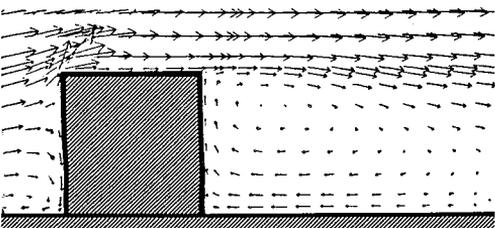
(2) Region 1



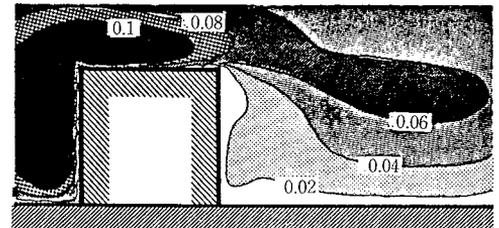
(3) Region 2 ($h = Hb/12$)



(3) Region 2



(4) Region 3 ($h = Hb/24$)



(4) Region 3

図16 平均風速ベクトルの比較

図17 kの分布の比較