

複合グリッドシステムを用いた LES による 2次元角柱周辺流れの解析

Large Eddy Simulation of Flow past 2D Square Cylinder
based on Compsite Grid System

村上 周三*・持田 灯**・石田 義洋***・富永 禎秀**
Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA, Yoshihiro ISHIDA and Yoshihide TOMINAGA

1. 序

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、また建物近傍のグリッド分割は充分細かくする必要がある。また、風向の変化に応じて何ケースもの数値シミュレーションが要求されることが多い。この際、風向に応じてグリッドを作り直すことに多くの時間が要求される。複数の独立したグリッドから成る複合グリッドシステムを採用すれば、一方のグリッドの座標系のみを風向に応じて回転させることにより、グリッド作成の手間を大幅に削減することができる。さらにグリッドの接続面は建物から離れた位置に設定できるから、建物近傍においてはすべてのケースにわたり、同一のグリッドが適用され、グリッドの差異による影響を小さくすることができる。

本研究では、複雑な形状、あるいは多様な計算条件に、速やかに対応可能な高精度の気流数値解析法の開発を目的として、解強制置換法¹⁾に基づく複合グリッドシステムを用いた Large Eddy Simulation (LES) による数値解析手法を開発した。ここではまず2次元角柱まわりの層流解析で風向角 0° 、 45° の場合の速度場、圧力場の接続状況をチェックした後、風向角 0° の場合の LES による3次元乱流解析に適用した例を示す。

2. 数値解析手法の概要

2.1 セミスタガードスキームによる定式化

本研究では MAC 法のアルゴリズムを用いた複合グリッドシステムによる数値解析法を開発した。また、ここでは圧力と速度を同一点で定義する collocation グリッドを採用している。collocation グリッドを使用した場合、圧力振動

*東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター

**東京大学生産技術研究所 第5部

***鹿島建設(株) 情報システム部

の発生がしばしば問題になる。本計算では collocation グリッドの節点で定義する速度に追加して、コントロールボリュームの界面(節点間の中点)における速度も計算して移流項に与えるセミスタガードスキームを採用している^{2),3)}。通常 collocation グリッドの節点で定義された速度は、連続式を高精度では満足しないが、界面における速度は staggered グリッドにおける速度と同様、連続式を高精度で満足する。これを移流項に与えて計算精度の向上を計る^{注1)}。

2.2 解強制置換法による複合グリッドシステム

図1に風向が建物に直交しない場合の計算に用いる2つのグリッドからなる複合グリッドシステムの一例を示す。粗いグリッド(グリッドB)は解析領域全体をおおい、細かいグリッド(グリッドA)は建物周辺の重要な領域のみを解析する。図2に2つのグリッドの接合領域を示す。接続領域においてグリッドA, Bをスムーズに接続するため、本手法では解強制置換法¹⁾を導入し、運動方程式および圧力のポアソン方程式に解強制置換項を付加している^{注2)}。

グリッドAで成立する主流方向(x_1)の運動方程式および圧力のポアソン方程式は表1ようになる。(1), (2)式の下線部は付加された強制置換項である。添え字 $A(\)$, $B(\)$ はそれぞれグリッドAまたはグリッドBの値であることを示す。たとえば $Au_{1, i, j, k}$ はグリッドA上の節点

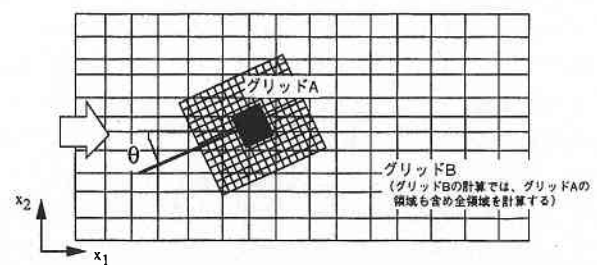


図1 任意方向の2つのグリッドの接続

研究速報

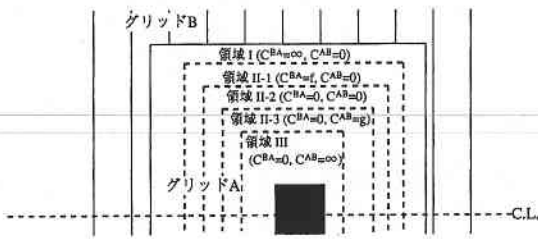


図2 接続領域とスイッチングパラメータの分布

表1 グリッドAで用いられる強制置換法による緩和式³⁾
(グリッドBの場合は上付添字のAとBを入れ替えた形となる)

運動方程式(x_1 方向)

$$\rho u_{ijk}^{n+1} = \rho u_{ijk}^n + \Delta t \left[\frac{(\rho u_{ijk}^{n+1/2} + \rho u_{ijk}^n) / \Delta t - \rho HX_{ijk}^{n+1/2} + \rho FX_{ijk}^{n+1/2} - \rho PX_{ijk}^{n+1/2}}{(1/\Delta t + PVP)_{ijk} (1 + C_{ijk}^{BA})} + \frac{(\rho u_{ijk}^n - \rho u_{ijk}^{n+1/2}) C_{ijk}^{BA}}{(1 + C_{ijk}^{BA})} \right] \quad (1)$$

圧力方程式

$$\rho p_{ijk}^{n+1} = \rho p_{ijk}^n + \Delta t \left[\frac{\rho D_{ijk}^{n+1/2}}{PVP_{ijk} (1 + C_{ijk}^{BA})} + \frac{(\rho p_{ijk}^n - \rho p_{ijk}^{n+1/2}) C_{ijk}^{BA}}{(1 + C_{ijk}^{BA})} \right] \quad (2)$$

$A_{(i,j,k)}$: グリッドAの節点(i,j,k)の値
 $B_{(i,j,k)}$: グリッドBの値をグリッドAの節点(i,j,k)上に補間した値
 HX, FX, PX: 移流項, 拡散項, 圧力項
 PVP, PVP: 対角項の係数和
 ω^u, ω^p : 減速緩和係数, D_{ijk} : 速度のDivergence
 n : 時間積分のStep数, l : 緩和計算のStep数
 C^{BA} : グリッドBからグリッドAへの置換の重みを調整するためのスイッチングパラメータ

(i,j,k) における値であることを示し, $B_{u_1(i,j,k)}$ はグリッドB上の値を用いてグリッドAの節点(i,j,k)上に補間された値であることを示す。強制置換項における C^{BA} は置換の程度を調整するスイッチングパラメータである。スイッチングパラメータは図2のグリッドAに覆われた領域に分布させる。添え字 ()^{BA} はグリッドBからグリッドAへの強制置換を示す。同様に添字 ()^{AB} はグリッドAからグリッドBの置換を示す。 C^{BA} , C^{AB} は計算領域において0から ∞ まで変化する。表1の運動方程式を例に取れば, $C^{BA} = 0$ のとき, (1)式の下線部は消え通常の運動方程式となる。反対に $C^{BA} = \infty$ のとき(1)式他の項は無視できるので $A_{u_1(i,j,k)} = B_{u_1(i,j,k)}$ となる。すなわちグリッドAの値はグリッドBの値で完全に置き換えられる。 $C^{BA}_{i,j,k}$ が有限の値を持つ場合, グリッドAの風速 $A_{u_1(i,j,k)}$ は, グリッドBより補間された $B_{u_1(i,j,k)}$ とブレンドされる。すなわち $A_{u_1(i,j,k)}$ は, グリッドAとグリッドBの値の重み付け平均となる。このブレディングにより, 接続領域における滑らかな強制置換が実現される。 C^{BA} が大きくなるほど, 重み付け平均における $B_{u_1(i,j,k)}$ の寄与が大きくなる^{注3)}。グリッドAからグリッドBへの強制置換の場合もまったく同様である。この場合, スwitchingパラメータは C^{AB} で表される。

3. 計算結果

3.1 2次元層流解析

(1) 計算概要 まず正方形断面の2次元角柱まわりの層流解析を行い, 本手法の有効性を調べる。ここで角柱一辺(D)と流入風速(U_0)で定義されるレイノルズ数(Re)は100である。解析領域は主流(x_1)方向に25D(角柱風上側に4.5D, 後方に20.5D), 横(x_2)方向に10.0Dとした⁷⁾。図3に計算に用いたグリッド分割を示す。グリッド数は解析領域全体を覆うグリッドBは35(x_1) \times 20(x_2), 建物周辺の任意の角度に回転可能なグリッドAは30(x_1) \times 30(x_2)^{注4)}。角柱壁面に接するグリッドの幅は0.1D。境界条件を注5)に示す。

(2) 計算結果 図4に2ケース(風向角 0° , 45°)の平均速度ベクトルの分布を示す。各ケースで速度は滑らかに接続されている。また風向角 0° の結果は, 以前に筆者が行った単一グリッドを用いた解析結果⁸⁾とよく一致している。本計算で使用した総グリッド数は, 単一グリッドの

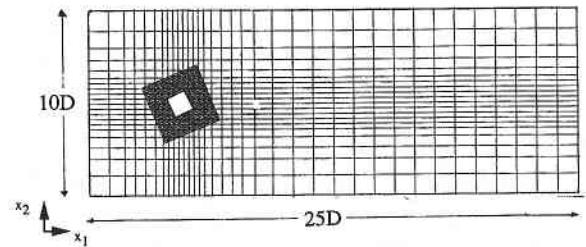
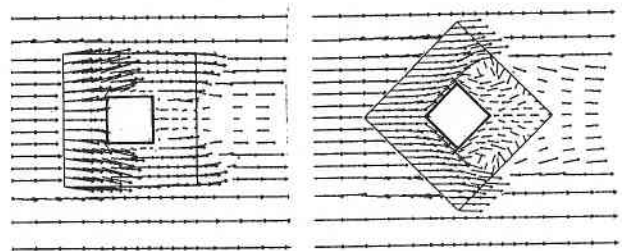
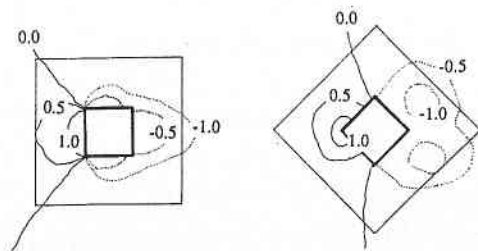


図3 計算領域およびグリッド分割(2次元層流)



(1) $\theta=0^\circ$ (2) $\theta=45^\circ$
図4 平均風速ベクトル (Re=100)



(1) $\theta=0^\circ$ (2) $\theta=45^\circ$
図5 平均圧力分布 ($\langle p \rangle / \rho U_0^2$) (Re=100)

場合の約 1/3 であり、本手法の有効性を示すものといえる。図 5 は 2 ケースの平均圧力分布 ($\langle p \rangle / \rho U_0^2$) である。この場合も各ケースとも滑らかに接続されている。

3.2 LES による 3 次元乱流解析

(1) 計算概要 計算条件は文献5), 6)参照。Re=2.2×10⁴。LES の Subgrid Scale モデルは Van Driest 型の wall damping function を併用した通例の Smagorinsky モデル。Smagorinsky 定数 C_S は 0.13。ブレンディング領域のスイッチングパラメータは図 2 の領域 II-1 で (C^{BA}=1.0, C^{AB}=0), 領域 II-3 で (C^{BA}=0, C^{AB}=1.0) として与えた。計算に用いたグリッド分割を図 6 に示す。グリッド数は解析領域全体を覆うグリッド B は 57(x₁)×41(x₂)×10(x₃), 建物近傍のグリッド A は 63(x₁)×44(x₂)×20(x₃)。角柱壁面に接する格子の幅は 0.01D。

(2) 計算結果 図 7 (1), (2) に水平断面, 鉛直断面 (角柱側方) における瞬間の風速ベクトルを示す。また図 8 に図 7 (1), (2) と同時刻, 同断面の圧力分布を示す。速度, 圧力は接続面において滑らかに接続されていることがわかる。また図 7 (3) は従来の筆者らが行った単一グリッドによる 2 次元角柱周辺流れの解析結果の一例である⁶⁾。

瞬時の風速ベクトルをみると, 複合グリッドを用いた今回の結果では, 単一グリッドによる結果では観察されない細かいスケールの速度変動, 特に活発な鉛直方向成分の変動が観察される^{注6)}。このように複合グリッドシステムの採用により, 同程度の総グリッド数でもより微細な流れ場の構造を解析することが可能となる。従来の筆者らの単一グリッドを用いた LES の解析^{5), 6)}では, 角柱後方の速度変動のエネルギーのレベルが実験に比べて低いという問題が残っているが, グリッド分割が十分細かくないこともそ

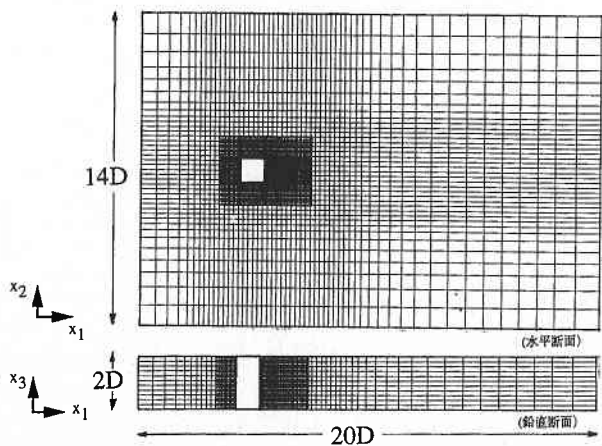


図 6 計算領域およびグリッド分割 (3 次元 LES)

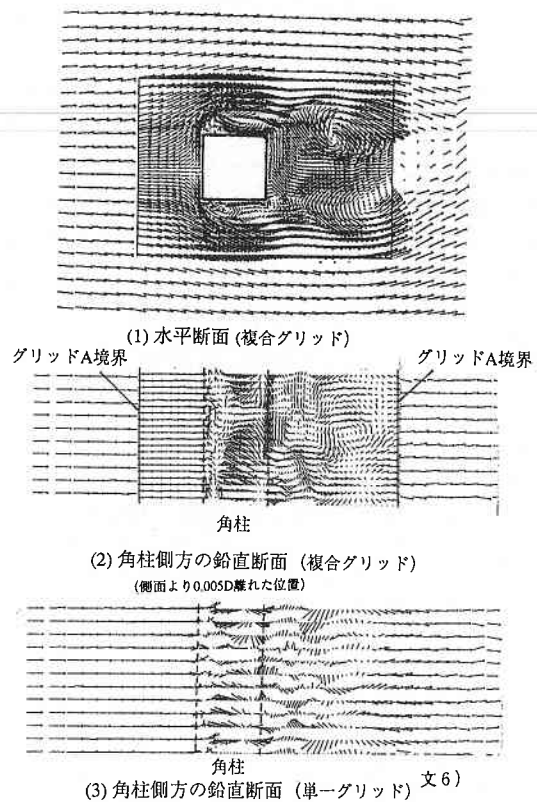


図 7 瞬時速度ベクトル (Re=2.2×10⁴)
(複合グリッド: 55×39×10(グリッドA), 63×44×20(グリッドB))
(単一グリッド: 104×69×10⁶)

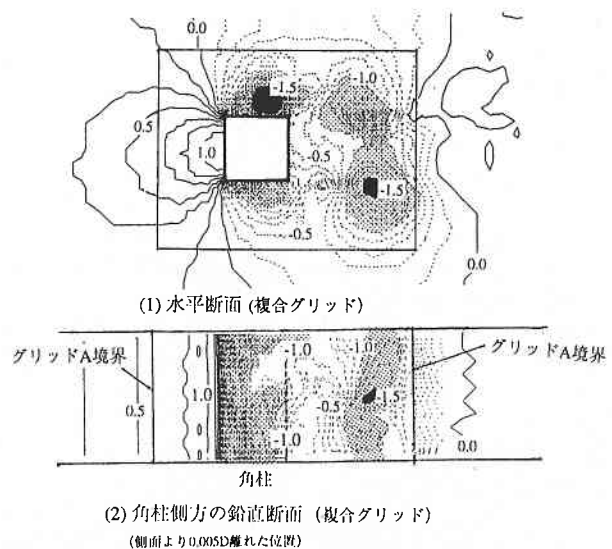


図 8 瞬時圧力分布 (ρU_0^2 で無次元化, Re=2.2×10⁴)

の原因の一つと考えられる。今後, 複合グリッドシステムを用いた本手法により, さまざまな統計量の分布を算出する予定である。

研究速報

4. 結 論

解強制置換法を用いて、複数のグリッドの任意方向の接続を可能とする複合グリッドシステムを開発し、2次元層流解析、LESによる3次元乱流解析を行った。本手法はさまざまな風向における構造物周辺の非定常流れ場、圧力場の性状の解析が必要とされる風工学分野の解析にきわめて有効であると考えられる。(1993年12月27日受理)

参 考 文 献

- 1) 藤井, 第5回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 1992.12
- 2) C.M. Rhie and W.L. Chow, AIAA Journal Vol. 21, No. 11 1983. 11
- 3) 石田, 村上, 加藤, 持田, 日本建築学会計画系論文報告集第451号, 1993.9
- 4) A. Mochida, Y. Ishida and S. Murakami, The 7th U.S. National Conference on Wind Engineering, 1993. 7
- 5) 持田, 村上, Rodi, 坂本, 第6回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 1993.12
- 6) 持田, 村上, 富永, 小林, Dynamic Subgrid-Scale Modelに基づくLESによる2次元角柱周辺流れの解析, 生産研究, 1994.2 (掲載予定)
- 7) 日本機械学会, 第1回CFDワークショップ成果報告集, 1988
- 8) 松井, 村上, 持田, 日本建築学会関東支部研究報告集(投稿中), 1994.3

- 注1) 本計算では固体壁等の境界面をコントロールボリュームの界面に設定する。この場合、境界に一番近い節点における、境界に直交する速度の運動方程式を解く際に、この節点における圧力勾配が必要となる。ここでは境界に接する1/2コントロールボリュームを考え、その節点のコントロールボリュームが連続式を満足するように壁面上の圧力を決定し、これを用いて第1節点の圧力勾配を与えた³⁾。
- 注2) 空間の離散化には2次精度の中心差分を、時間に関しては移流項に2次精度のAdams-Bashforth、拡散項にCrank-Nicolsonのsemi-implicitスキームを用いた。
- 注3) 図2で、領域I ($C^{BA}=\infty, C^{AB}=0$)はグリッドAの計算において、グリッドBで計算された速度、圧力の補間値

(Bu_i, Bp)をグリッドAの外側の境界条件として課す領域である。領域III ($C^{BA}=0, C^{AB}=\infty$)はグリッドBの計算において、グリッドAで計算された建物近傍における速度、圧力を補間によりグリッドBに境界条件として返す領域である。領域II ($0 < C^{BA} < \infty, 0 < C^{AB} < \infty$)は、有限なスイッチングパラメータを用いて、ブレンディングを行う領域である。領域II-1 ($0 < C^{BA} < \infty, C^{AB}=0$)ではグリッドAの速度、圧力がグリッドBの値とブレンドされる。すなわち、グリッドAの諸量がAとBの重み平均となる。このとき、グリッドBの諸量は置換項なし ($C^{AB}=0$)で解かれる。反対に領域II-3 ($C^{BA}=0, 0 < C^{AB} < \infty$)ではグリッドBの下での計算において、グリッドB上の諸量がグリッドAの値によりブレンドされる。グリッドに余裕がある場合は領域II-1と領域II-3の間に、領域II-2 ($C^{BA}=0, C^{AB}=0$)を設けるとさらによりよい。なお、接続領域IIを特に設定しなくとも、ほぼ滑らかな解の接続が得られる。

- 注4) 本研究では層流計算の場合、グリッド間の接続は一つの領域(図2, 領域I)で行われており、ブレンディングの手法は用いていない(図2の領域IIを設けていない)。しかしこの場合でも層流解析では図4, 図5に示すようにグリッドA, B間で解はスムーズに接続されている。一方, 3.2に示すLESによる乱流解析の場合、スムーズな接続を行うためにはブレンディングの手法が必要とされる。
- 注5) 流入面では $u_1=U_0, u_2=0$ 。流出面では $\partial u_1/\partial x_1=0, \partial u_2/\partial x_1=0$ 。解析領域側面ではslip壁 ($u_2=0, \partial u_1/\partial x_2=0$)。角柱壁面上ではno-slip。
- 注6) 図7(3)の単一グリッドの解析は総グリッド数71,760、一方、今回の複合グリッドの解析はグリッドA, B合わせて総グリッド数76,890であるが、角柱背後のグリッド幅は単一グリッドでは角柱より1.5D後方で x_1 方向のグリッド幅が0.08Dであるのに対して、複合グリッドでは同じ場所で0.04Dである。

記号

- x_i : 空間座標の3成分, u_i : 風速の3成分
 ($i=1$:主流, $i=2$:主流直角(横), $i=3$:角柱スパン方向)
 f : 変数 f の瞬時値, $\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均値
 U_0 : 流入平均風速(空間および時間についての平均)
 D : 角柱一辺の長さ, $Re=U_0D/\nu$
 無次元化は U_0, D を用いて行う。