日本流体力学会　年会2002
E231

Immersed Boundary Method を用いた迎角変化を伴う正方形柱周りの流れ解析

Numerical Simulation of the Flow Field around an Inclined Square Cylinder Using the Immersed Boundary Method

○河野孝昭（東工大総理工），田村哲郎（東工大総理工），坪倉誠（東工大総理工）

Takaaki KONO* , Tetsuro TAMURA* and Makoto TSUBOKURA*
*Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta Midori-ku Yokohama 226-8502, Japan

Numerical Simulation of the airflow in an urban area requires the ability to deal with various shapes of buildings. Considering the difficluty to generate the grids for plural arbitrary geometrics , it is reasonable to use the Immersed Boundary Method (IBM) in conjunction with Cartesian grids. However there is no previous research on the applicability of IBM to the the flow field that is sensitive to the separation-reattachment effect, wihch is peculiar to the flow around buildings . Therefore, in this study, we apply IBM to the DNS of the flow field around an inclined square cylinder (a basic building shape) and investigate the accuracy of the simulation for the separation-reattachment effect by comparing the areodynamic properties of a square cylinder with the previous numerical and experimental results.

1. 緒言

建築物群周辺における気流性状の解析は、風通しの評価や汚染物質等の拡散問題への対策を講じる上で、非常に重要である。この解析を数値流体シミュレーションで行う場合、複数の建築物を対象とすることから、格子生成の容易なデカルト座標系の採用が実用的である。デカルト座標系を用いる際に問題となる任意形状への適用性については多くの改善法が報告されている。その中でもImmersed Boundary Method(IBM)は、Navier-Stokes方程式中の外力項を通して統一的に物体形状を再現できるという大きな利点を持つ。しかし、IBMを扱った既往の研究では、物体周りの剥離を伴う流れ場への適用性は検証されているものの、境界面の表現が重要となる剥離・再付着現象に対する再現性の議論は行われていない。この剥離・再付着現象は、物体後流域の渦挙動に大きな影響を及ぼすことが知られている。その為、建築物周辺の気流性状を解析する上では、この現象を精度良く再現することが要求される。そこで本研究では、建築物の代表形状である正方形柱周りの流れをIBMで数値解析し、迎え角を変化させることで、剥離・再付着現象を伴う任意形状への適用性を検討する。

2. 数値計算法

IBMは、物体表面におけるno-slip条件をN-S方程式中の外力項により実現する手法である。これまでに、様々な種類の外力項が提案されているが、本研究ではE.A.Fadlunら[1)]のdirect forcingを採用する。

2．1　基礎方程式

流れの基礎方程式として、連続の式

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \qquad (1)$$

およびNavier-Stokesの運動方程式（N-S方程式）

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla(\boldsymbol{uu}) = -\nabla p + \nu\nabla^2\boldsymbol{u} + \boldsymbol{f} \qquad (2)$$

を用いる。ここで、$\boldsymbol{u}$ は流速、p は圧力関数、ν は動粘性係数、$\boldsymbol{f}$ は外力項を示す。

2．2　外力項

(2)式に対して時間離散化を行うと、

$$\frac{\boldsymbol{u}^{n+1} - \boldsymbol{u}^n}{\Delta t} = \mathrm{RHS}^{n+1/2} + \boldsymbol{f}^{n+1/2} \qquad (3)$$

$$\mathrm{RHS}^{n+1/2} = -\nabla(\boldsymbol{uu})^n - \nabla p^{n+1} + \nu\nabla^2\boldsymbol{u}^n \qquad (4)$$

を得る。ここで、Δt は時間刻み幅、上付き n は時間ステップ数を表している。(3)式より、次時間ステップにおける流速を強制的に $\boldsymbol{u}^{n+1} = \boldsymbol{V}$ と与え込む外力は

$$\boldsymbol{f}^{n+1/2} = -\mathrm{RHS}^{n+1/2} + \frac{\boldsymbol{V} - \boldsymbol{u}^n}{\Delta t} \qquad (5)$$

の形で表すことができる。

静止物体の境界と一致する速度定義点においては、常に $\boldsymbol{V} = 0$ となる。また、Fig.1のように隣接する速度定義点の間に物体境界が存在する場合には、境界上でno-slip条件を満足させる為に、境界外第一点目の速度定義点における $\boldsymbol{V}$ を境界の流速0と境界外第二点目の流速 $\boldsymbol{u}^n$ の線形補間により算出する。それ以外の速度定義点では、$\boldsymbol{f}^{n+1/2}$ の値を0とする。

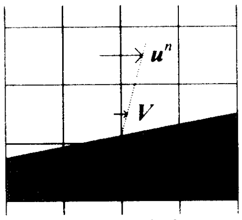

Fig.1 Interpolation procedure

2．3　計算手順

(5)式からは、$\mathrm{RHS}^{n+1/2}$ が時間ステップ n において未知である ∇p^{n+1} を含んでいる為、$\boldsymbol{f}^{n+1/2}$ を算出することが出来ない。そこで、部分段階的な考えを導入することにより、この問題に対処する。本研究では、SMAC法を採用する。

①SMAC法の予測段階の流速 $\boldsymbol{u}^p$ に対して、$\boldsymbol{u}^p = \boldsymbol{V}$ を実現させる外力を次式により算出する。

$$\boldsymbol{f}^{n+1/2} = -[-\nabla(\boldsymbol{uu})^n - \nabla p^n + \frac{1}{\mathrm{Re}}\nabla^2\boldsymbol{u}^n] + \frac{\boldsymbol{V} - \boldsymbol{u}^n}{\Delta t} \qquad (6)$$

②予測速度 $\boldsymbol{u}^p$ を求める。

$$\frac{\boldsymbol{u}^p - \boldsymbol{u}^n}{\Delta t} = -\nabla(\boldsymbol{uu})^n - \nabla p^n + \nu\nabla^2\boldsymbol{u}^n + \boldsymbol{f}^{n+1/2} \qquad (7)$$

③スカラーポテンシャル ϕ のPoisson方程式をSOR法で解く。

$$\nabla^2\phi^{n+1} = \frac{1}{\Delta t}\nabla\boldsymbol{u}^p \qquad (8)$$

④時間ステップ $n+1$ における速度場・圧力場を求める。

$$\boldsymbol{u}^{n+1} = \boldsymbol{u}^p - \Delta t\nabla\phi^{n+1} \qquad (9)$$

$$p^{n+1} = p^n + \phi^{n+1} \qquad (10)$$

3.　計算結果

本研究では、数値的手法としてのIBMの精度検証が目的である為、乱流モデルや数値粘性は導入せずに、DNSを行う。

3．1　解析条件

(1)式及び(2)式に対する空間の離散化を二次精度の中心差分、時間発展を二次精度のAdams-Bashforth法で行う。解析領域の大きさをFig.2に示す様に、20B×10B×B用意する。Bは正方形柱の一辺の長さである。格子系は等間隔(総格子点数：800×400×10)の直交スタガード格子を用いる。解析領域の速度に対する境界条件は、x方向には一様流入条件 $U_0 = 1$、移流型流出境界条件、y方向にはFree slip条件、z方向には周期境界条件を与える。また、スカラーポテンシャル ϕ に対する境界条件は、x,y方向にはNeumann条件、z方向には周期境界条件を与える。Reynolds数($\mathrm{Re} = U_0B/\nu$)は1000とし、時間刻みは、$\Delta t = 0.001$ とする

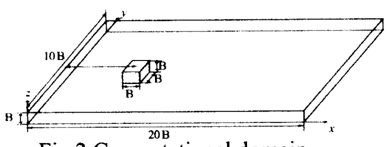

Fig.2 Computational domain

3．2　空気力係数の算出

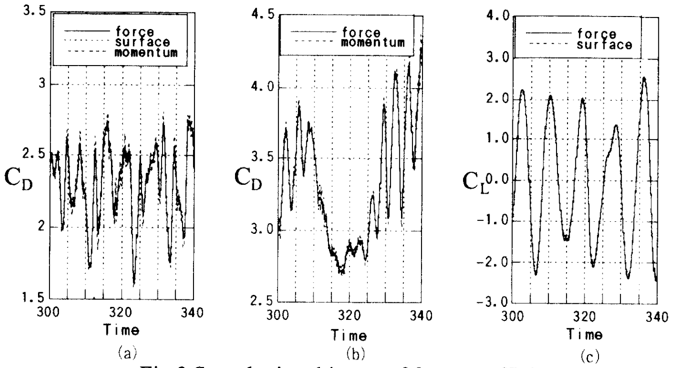

Fig.3 Sample time history of force coefficients.

(a) α =0° (b) α =45° (c) α =0°

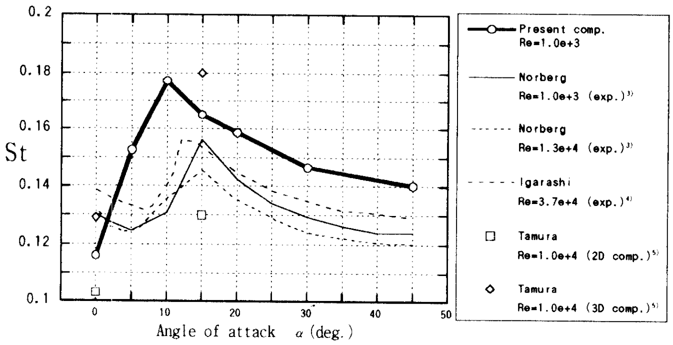

Fig.4 Strouhal number vs.angel of attack

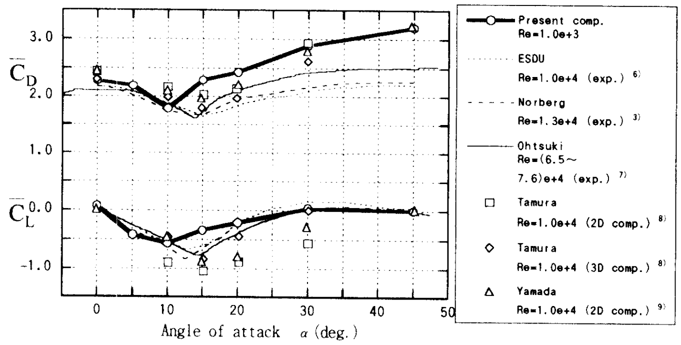

Fig.5 Mean aerodynamic forces vs.angel of attack

本研究では、正方形柱に働く抗力係数C_D (force)及び揚力係数C_L (force)を(6)式で求めた外力項に対して、解析領域全体で体積積分を行うことにより算出した。Fig.3にC_D , C_Lの時系列波形を示す。C_D (surface), C_L (surface)は、圧力とせん断応力を角柱表面上で補間して算出した抗力係数及び揚力係数、C_D (momentum)は解析領域への運動量の流出入りの差により算出した抗力係数[2]である。Fig.3より、(a), (b), (c)それぞれの波形が精度良く一致しているのが分かる。これより、今回用いたC_D , C_L 算出法の妥当性を確認することが出来る。また、角柱近傍における速度変動の卓越周波数とC_Lの時系列波形の卓越周波数は完全に一致し、Strouhal数(St)は一意的に求まった。

3. 3 空力特性の再現性に対する考察

迎え角の変化に伴うStをFig.4に、平均抗力係数$\overline{C}_D$、平均揚力係数$\overline{C}_L$をFig.5に既往の実験・計算結果と共に示す。Tamura, Yamadaの計算は、境界適合格子を使用しており、角柱の前面に発達する層流境界層を解像できる様に正方形柱表面に十分な格子を用意している。また、Tamuraの三次元計算では、スパン方向長さBに対してB/50の格子解像度を与えている。

3. 3. 1 Strouhal数の再現性 Norberg のRe=1000における実験によるとStはα =15° においてピークを持つ。一般に、Stの増減は後流幅との関連が深いことが知られている。剥離せん断層が再付着すると後流幅が狭くなり、Stは上昇する。αの増加に伴って④から剥離したせん断層は瞬間的に③に再付着する頻度が増し、α =15° で定常的な再付着状態となる。α =15° 以降では、見付け幅の増加に伴って後流幅が広がり、Stは減少する。また、α =5° 付近までのStの減少は、瞬間的再付着の発生頻度が低い為、見付け幅の増加の影響を強く受けているのが原因である。

本計算においては、α =10° においてStのピークが得られた。しかし、Fig.7の瞬間渦度分布から、α =10° はまだ定常再付着状態に達していなく、ピークは10° ～15° の間に存在していると考えられる。また、α =5° において、Stの減少傾向を捉えられていないのは、(6)式の$\boldsymbol{V}$を線形補間により求めているのが原因と考えられる。$\boldsymbol{V}$の速度定義点が剥離せん断層の内側に存在し、境界外第二点目の速度定義点が剥離せん断層の外側に存在するとき、$\boldsymbol{V}$は剥離せん断層外側の速い流速により線形補間される為、$\boldsymbol{V}$の値は大きくなり、剥離せん断層の厚さが狭くなって、瞬間的再付着の発生頻度が増加するものと思われる。

3. 3. 2 平均抗力係数($\overline{C}_D$)及び平均揚力係数($\overline{C}_L$)の再現性 今回、Re=1000における実験結果は示していないが、$\overline{C}_D$, $\overline{C}_L$もStと同様にα =15° でピークを有するものと考えられる。剥離せん断層が③に再付着すると、巻き込みの弱い渦が形成される様になり、風下側の負圧が回復して、$\overline{C}_D$は減少する。また、面③④に死水領域が形成されて$\overline{C}_L$も減少する。その為、α =0° ～15° においては、$\overline{C}_D$及び$\overline{C}_L$曲線は単調に下降する。α =15° 以降では、剥離せん断層が面③④に再付着する為、死水領域が減少して、$\overline{C}_L$は増加する。また、③において再剥離を生じ、巻き込みの強い渦が形成される為、

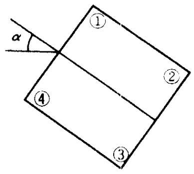

Fig.6 Labeling conventions

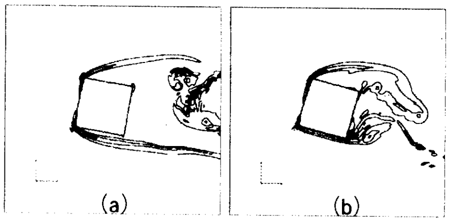

Fig.7 Instantaneous vorticity contours

(a) α =10° (b) α = 15°

負圧が低下して、$\overline{C}_D$は増加する。

本計算においても、$\overline{C}_D$及び$\overline{C}_L$の定性的な傾向を再現できている。また、$\overline{C}_D$は実験値と比べて大きめの値となっているが、2次元計算結果と比べると、定量的な精度も遜色が無いといえる。さらに、Tamuraの三次元計算のように、スパン方向の解像度を上げる事により、精度の向上が期待出来る。

4 結言

剥離・再付着現象及び物体後流域の渦挙動と密接に関連した、迎え角を有する正方形角柱に働く空力特性の定性的な傾向を精度良く再現する事が出来た。また、粗い解像度にもかかわらず、既往の境界適合格子を用いた計算結果と比較して、定量的な精度も遜色が無いと言え、任意形状への適用性の高さを確認することができた。IBMは複数物体への適用も容易であり、建築物群周辺の気流性状を解析する上での有力なツールとなることが期待できる。

引用文献

1)E. A. Fadlun, R. Verzicco, P. Orlandi & J. Mohd-Yusof : J. Comput. Phys. 161 (2000) 35-60
2)堀井・西田・里深：機論 67-654 B(2001), 336 - 341
3)C. Norberg:J. Wind Eng. 49 (1993) 187-196
4)T. Igarashi :Bull. JSME 27 (1984) 1858-1865
5)T. Tamura *et al* :J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 33 (1990) 161-170
6)ESDU :Engineering Science Data Item Number 71016, 1971
7)大築ら：第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム論文集 (1987) 169-175
8)T. Tamura & K. Kuwahara :AIAA-paper, AIAA-89-1805
9)山田ら：第7回数値流体シンポ講演論文集 (1993) 395-398