

第 I 部門

一般座標系での IBM による複雑地形上気流の解析

神戸大学工学部

学生員 ○千秋 雅信

神戸大学大学院自然科学研究科 正会員 中山 昭彦

1. 序論

橋梁や鉄塔などの耐風対策や都市開発の影響にはある気象条件下による局所の気流特性の評価などが必要となりその評価には数値流体力学的予測手法が有効になると期待され、基礎的研究が進められている。自然現象を対象とする際には複雑境界地形の扱い方法が問題となり、効率的でかつ正確さを保持できる手法が求められている。最近では Navier-Stokes 方程式の外力項により境界を表現する IBM(Immersed Boundary Method)も種々の流れに適応されている^{1), 2)}。本研究ではこれまで主にデカルト座標系に用いられてきた IBM をシグマ座標系や一般座標系に用い、同格子数における効率性を比較し複雑な自然形状を IBM で表現する方法の構築とその検証を目的とする。

2. IBM の概要

複雑境界を扱う際、境界に沿って形成される境界適合格子や複数の格子を用いる重合格子などが用いられるが、境界適合格子は自然地形への適応は不可能であり、重合格子のかえって式が煩雑になるなどの問題点がある。IBM はその様な格子形成は行わず、N-S 方程式の外力項により境界を表現しようとする方法である。その原理は、体積力 $\mathbf{f}$ を場所と時間の関数として $\mathbf{f}(\mathbf{x}_b, t)$ とおくことにする。体積力 $\mathbf{f}$ は時刻 t で境界位置 $\mathbf{x}_b$ に作用する。 $\mathbf{f}$ は流速によるので非定常であり、境界が移動境界の場合は $\mathbf{x}_b$ も $\mathbf{f}$ も時間の関数となる。またグリッド位置と境界が一致していない場合は $\mathbf{f}$ のグリッド位置への内挿も必要となる。 $\mathbf{u}$ を速度とし、この $\mathbf{f}$ を N-S 運動方程式に組み込むと式 (1) のようになる

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \cdot \mathbf{u} = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (1)$$

体積力 $\mathbf{f}$ の与え方には Feedback forcing と Direct forcing の二通りあるが本研究で用いた Direct forcing について述べる。式(1)を差分すると式(2)が得られる。

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n}{\Delta t} = \mathbf{RHS}^n + \mathbf{f}^n \quad (2)$$

右辺第一項には対流項、粘性項、圧力勾配が含まれる。 $\mathbf{u}^{n+1}$ が境界条件 $\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{V}^{n+1}$ を境界で満たすような $\mathbf{f}^n$ を求めたいなら式(2)から単純に

$$\mathbf{f}^n = \frac{\mathbf{V}^{n+1} - \mathbf{u}^n}{\Delta t} - \mathbf{RHS}^n \quad (3)$$

と与えられる。この場合の $\mathbf{f}$ は力学的なプロセスを要せずに境界で直接的に境界条件を強いる点で *direct forcing* といえ、各タイムステップにおいて境界条件が保たれる。そして、一般にグリッド位置と境界が一致していることは稀であり、その際には周りの点の速度から内挿してきたグリッド位置での速度を用いなくてはならない。

3. 一般座標系での運動方程式

気流解析でよく用いられる一般座標系での運動方程式は座標変換を行い得られるものである。そして先に述べた Direct forcing を考慮すると(4)を得る。

$$J^{-1} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi_m} \left\{ U_m u_i + A_i^m p - \nu G^{mn} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_n} - \nu J^{-1} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial \xi_n} \right\} = \frac{J^{-1}}{\rho} f_i \quad (4)$$

A_i^m , G^{mn} は勾配演算子である.

4. 複雑地形への適用

計算法検証のためのモデル地形の選定にあたり, 基礎的な力学原理を抑えられさえすれば, 実際の流れ場への応用は可能なはずである. その基礎的な力学原理を抑えることを考え, 選定にあたった. 計算領域と設置した構造物を図-1, 図-2 に示す.

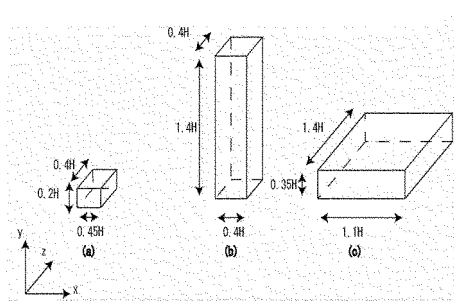


図-1 構造物

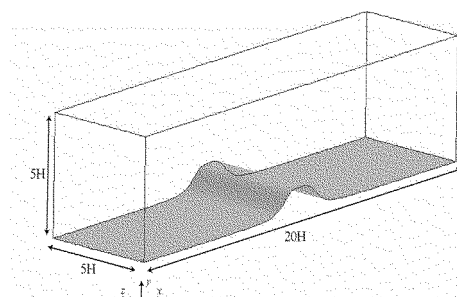


図-2 計算領域

5. 解析結果と考察

図-2 の地形において構造物(a)を設置した時の三座標系における流線図を示す. ここで格子数は流れ方向, 高さ方向, 奥行き順に $90 \times 50 \times 25$ である. 平均流速と丘の高さを基にしたレイノルズ数を 200 としている.

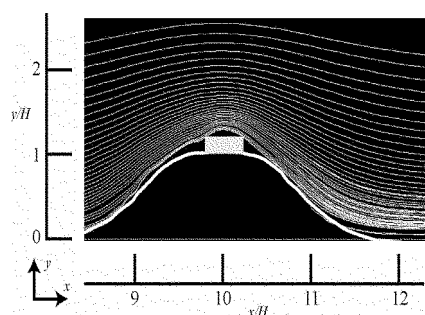


図-3 直交座標系

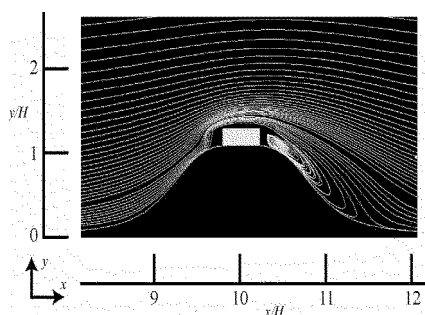


図-4 シグマ座標系

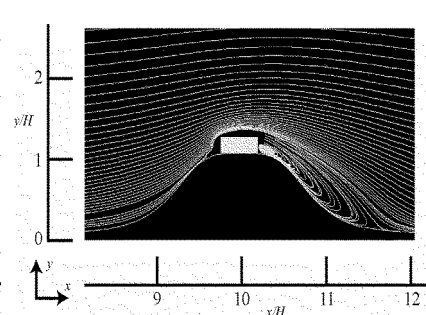


図-5 一般座標系

上図の比較より, シグマ, 一般座標系では構造物の後方に置いて渦が確認でき, 丘後方においても剥離領域が確認できる. しかし, 直交座標系においては両方とも確認できない. これは, 直交座標系においては $y=0$ から格子が密になっており, 丘の上などにおいて格子間隔が大きくなってしまい解像できなかったものと考えられる. しかし, シグマ, 一般座標系においては, 丘に沿うように格子が形成されており構造物付近でも格子が密であるため渦や剥離を捉えることができたと考えられる.

6. 結論

本研究では複雑地形上気流解析における IBM での境界表現と格子の違いによる効率性の評価を行った. IBM がこれまで多く用いられてきた直交格子と複雑地形上気流解析で多く用いられるシグマ, 一般格子による比較では, 同じ格子数では直交格子は構造物の位置により再現性が低下し, 複雑地形に対して有用ではない事が確認できた. 今後, 任意位置の境界も表現できるように内挿の導入についても検討が必要となる. また, 実地形上に建物などが存在する流れ場の応用が必要となる.

参考文献

- 1) Yu-Heng Tseng. and Joel.H.Ferziger Environmental Fluid Mechanics Laboratory, Stanford University. 2002.
- 2) Jungwoo Kim. and Dongjoo Kim. and Haecheon Choi Journal of Computational Physics, 171 , pp.132-150, 2001.