第Ⅱ部門　　　　複雑境界及び自由水面を含む境界回りのLES

神戸大学工学部　正会員　　中山　昭彦
神戸大学大学院　学生員　○松井　聰知

1．はじめに

自然地形の影響を受ける局所気流や実河川の流れなどは非常に複雑な境界形状を呈する流れである。形状が複雑であるのみならず、流れにより動揺する樹木や、流れにより移動する砂が含まれる場合など境界条件自体が複雑である。このような複雑境界を有する領域の回りの流れの解析を行うことは、例えば低レイノルズ数モデルを適用すると途方もない計算格子が必要となり、またLESのレベルでも従来から行われている不規則境界形状を無視し、粗度で置き換え、壁相似則の類に頼るにとどまり、境界形状を忠実に表現出来得ない。本研究では、このような複雑不規則境界での乱流予測法を発展させるため、既に[1]坪井らが用いているマスキング法により計算領域上で実際に境界を定義して計算を行う通常のLES計算と、日野ら[2]が提唱している方法に類似したもので複雑境界の平滑化を考え、実際に領域には境界は定義せずに境界の影響を抵抗関数で置き換え計算をする２通りの方法を用いることによりLES法の発展的応用を考える。

2．複雑境界でのLES

2．1　マスキング法

計算領域上に何ら規則性のない複雑な形状をした境界の回りの流れの解析を行うために、矩形格子上で各変数を評価し、有限差分法において非常に有効で流れの物体形状の０次近似という概念に基づいた計算法で格子添点上で関数Fを定義するマスキング法を採用した。つまり、計算格子上で計算領域の対象となる部分（空気の存在する部分）ではF=0、計算領域の対象とならない部分（障害物）をF=1とするものである。

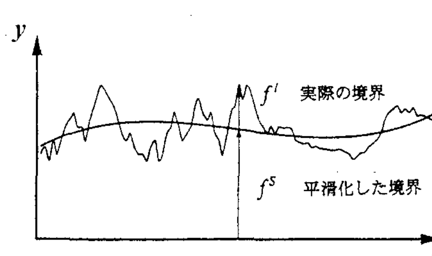
2．2　抵抗関数モデル

通常のLES法では境界形状は変更せず、計算格子で解像可能な流れの大規模変動成分を空間フィルターを施すことにより抽出し、それの従う運動方程式も瞬時運動方程式を空間平均することにより得る。この粗視化により現れる付加項をモデル化する。複雑境界の場合、境界形状も平均化する必要がある。そこで境界の平滑化と流れの空間平均化を分けて考えることにする。

境界を平滑化または簡単化すると流れはもとの領域での流れとは異なる。この仮想的流れの瞬時流速ベクトルをu_i^S、実際の瞬時速度ベクトルをu_i、これらの差をδu_iとすると、

$$\tilde{u}_i = u_i^S + \delta u_i \qquad (1)$$

で、δu_iは境界形状を変えたことによる誤差で、境界形状の解像度が高くなれば小さくなる量である。u_iに空間フィルタリングを施しN-S方程式に代入し空間平均をとると、



図－１　複雑境界の平滑化

Akihiko NAKAYAMA, Akitomo MATSUI

$$\frac{\sigma u_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\overline{u_i}\,\overline{u_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\frac{\tau_{ij}}{\rho}+\nu\frac{\sigma u_i}{\partial x^2{}_j} \tag{2}$$

のようなu_iの方程式が得られる。ここで$\overline{}$は空間フィルター平均、またτ/ρは、

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = -\overline{u_i^{S'}u_j^{S'}}-\overline{u_i^{S'}\delta u_j}-\overline{u_j^{S'}\delta u_i}-\overline{\delta u_i\delta u_j} \tag{3}$$

で、第１項は平滑化された境界でのSGSレイノルズ応力、第４項は境界平滑化による付加応力、第２、第３項は空間平均による変動速度と境界平滑化による変動速度の相関で空間平均と境界平滑化の相互作用による付加応力であるが、これら２種の粗視化は独立に行われるので相関は低いと考えられる。

本研究では、統計的にモデル化するのに平滑化された形状の粗さスケールを用いたモデルで次のように境界からの距離の指数的に減衰するモデルを考える。

$$\overline{\delta u_i\delta u_j} = C_1 e^{-C_2 n/\sigma_f}\,\overline{u_k}\,\overline{u_k} \tag{4}$$

ただし、nは境界面からの垂直距離、またσ_fは$\sigma_f=\sqrt{f'}$でf'は実際にモデル化されるべき境界形状にあたる。本研究では、モデル定数C_1=1.0、C_2=0.1とした。

3．計算法

計算法は、基礎式を離散化し、食い違い格子を用いたMAC法に準ずる有限差分法で、時間に関する進行はAdams-Bashforthの２次精度、移流項、粘性項及び乱流応力項には２次精度中心差分を採用し、ポアソン方程式の解法はSOR法である。また、渦粘性係数ν_TはSmagorinskyモデルにより表現し、その定数は0.1とした。

4．計算例

上述のマスキング法と抵抗関数モデルの検証例として複雑境界としては比較的簡単で一方向にのみ変化する２次元的境界の桟粗度と実地形回りの計算例として但馬空港着陸横断回りの流れを行い、実験値や計算値と比較した。

5．考察

本研究では、何ら規則性をもたない複雑な境界回りの流れの解析を実際に境界を定義して計算を行う方法と複雑境界の平滑化を抵抗関数モデルにより定式化することにより計算をする２通りを用いて解析を行った。前者に関しては、実地形回りの流れの解析に表されたとおり、関数Fにより様々な形状を対象物とすることができることがわかり、また後者については、本研究ではモデルの定数を含め単に１つのモデルに頼ることとなったが、これからさらにモデルを改良することにより単純な形状だけでなく、より複雑な形状を対象にすることができるであろうと思われ、その精度に関しても向上できるはずである。

参考文献

1) 坪井、宮腰、長澤、海部、桑原：すばる望遠鏡ドーム内気流に関する数値実験、第７回数値流体力学シンポジウム講演論文集、pp.359-362, 1993.

2) 日野、神田、稲垣：植性－大気境界面での運動量輸送に関するLESモデルによる検討、水工学論文集第３６巻、pp.689-692, 1992.