風工学における乱流の数値シミュレーション
Numerical Simulation for Turbulent Flow concerned
with Wind Engineering

池ノ内 昌 弘^{*}
Masahiro IKENOUCHI

最近の数値解析法の進展は目覚ましいものであり、従来解析困難とされ、また、実験的に再現出来ない問題にも有効に活用されるようになってきている。このような中で、風工学会でも一つのテーマとして取り上げてはとの要望があり、村上先生にパネラをお願いして、その一つの分野をまとめていただくことになった。乱流モデルの紹介から例計算結果および数値解析上の問題点まで含めて明解な報告があり、乱流数値解析の解説として啓蒙的でもあった。

パネラの講演に関して活発な討論が進められ、以下にまとめて紹介する。

1) 乱流モデルに関する問題で、よく使われる2方程式モデル($k-\epsilon$ 法)と、LESのそれぞれの特徴等について、田村氏(清水建設)は、2方程式モデルでは平均的な乱れはよいが、変動量など乱れの詳しい性状解析には十分ではないのではないかと、LESでは、スペクトラムにピークが出る場合があるなど細かな議論まであった。土屋氏(日本鋼管)からもLESの意味などについて同様な議論があり、それぞれ適用する対象によってどのようなモデルを使えばよいか関心の的となった。これらの議論に関してパネラは次のように乱流モデルの特徴をまとめている。

2方程式モデルの特徴

- ① 工学の多くの分野で既に適用された実績を持ち、良好な結果を得た例も多く、汎用モデ

ルとしてある程度の評価を得ている。

- ② LESに比べて計算時間が短い。
③ 欠点としては、時空間に関して大きなスケールの流れしか予測出来ないこと、モデルの中に数値定数が多く、この値の妥当性に関する吟味が不十分なこと。

LESの特徴

- ① 乱流統計理論から考えて、モデルの内容や根拠が明快であること。
② モデルの中の定数が少く汎用性が高い。
③ 細かいスケールの時空間の変動を予測することが出来る。
④ 欠点としては、2方程式に比べ計算時間が長いこと。

2) 境界条件について、高梨氏(清水建設)、平野氏(三井造船)から質疑があった。free slip 条件について、壁面近傍でのメッシュ分割、格子点を粘性底層内に取り難いことなどから妥当な条件のようである。高梨氏から凹面のような複雑な壁面でどう考えればよいか質疑があったが、今後の問題として検討されていくことであろう。

3) 風洞実験との照合について、広瀬氏(航技研)より議論が出された。航空機の場合も、N-S方程式を解いた結果と実験とが合わない場合がある由である。広瀬氏によると、風洞実験においては、境界層プロファイル、壁条件等が必ずしも数値実験と一致しているとは言い難い。一方、圧

*三井造船昭島研究所

Akishima Laboratory, Mitsui Eng. & Shipbuilding Co., Ltd

力分布が一致するようにすると、速度や迎角が異なっても、その他の流れ場の特性はよく一致してくる。このように両者の比較は十分注意すると共に、上手に比較すれば良い成果を数値実験で得られるのではないかと意見があった。これらに対し、指摘通りである。但し、例えば差分格子の大きさによる制約等によって両者の条件を希望通り一致させることは難しい場合が多い由、回答があった。

続いて、数値実験の乱流モデル係数は、平衡境界層実験にもとづいていて、非平衡、非定常境界層の解析には必ずしも十分ではない。より精度の高い係数を得るような実験側の協力が今後必要ではないかと意見があった。これについては、その通りで、 C_s の値の影響が大きいことは、本文中で報告しており、更に検討を進めている由、回答があった。

また、田村氏からも同様にLESにおける C_s の影響が大きいことから、差分スキームの工夫で数値粘性を抑えて改良出来るのではないかと意見もあった。

4) メッシュ分割、差分格子点の置き方についても討論があった。広瀬氏は、粘性底層をとらえるために翼型解析では Δh を底層内に1点とるようにして、剥離点の位置、境界層分布の高精度な解析を試みている。剥れた後の流れは、大きな渦をとらえればある程度間に合うから、物体境界近くに格子を集中させるのも一つの方法と考えられないかと意見があった。これについては、その通りであるが、風工学の分野では、翼型まわりの流れのような薄い境界層問題とは異なり、その取り扱うスケールが大きく、壁近くに多くの格子点を設けることが困難な場合が多い由、回答された。これは、本文中のビル風問題でも議論している。

以上、討論は、計算手法に関するものが多かったようである。流れ場の問題として、高梨氏から流速ベクトルのふらつきや、平野氏からカルマン

渦等の問題にも乱流モデルがそのまま適用出来るのかなどの質問があったが、もう少し議論の対象になればと思われた。

風工学で数値解析がテーマとして取り上げられたことは有意義であり、これを機会に数値解析への気運が盛り上げられと願っている。航空分野ではNumerical Wind Tunnelと称する超大型計算機システムによる空力性能設計が進展しているそうである。数値解析の進展に驚きを持たれたのが、多くの方の実感ではないかと思われるが、一方、複雑な問題への適用にはまだ未解明な問題も多く、対象とする問題によって乱流モデルの選定なりに工夫が必要であり、今後の研究が期待される。パネラの報告にもあったように、その使い方において、流体力学的考察を踏まえながら進めることが大切である。誤った適用の結果、数値解析に不当な評価を受けることを恐れるものである。

今回、乱流が主題であったが、層流を含めて風荷重、カルマン渦、非定常空気等についても、別の機会に取り上げていただければ願っている。

以上、筆者の私見も交じえ報告させていただいた。ここに紹介した討論については筆者が適当に調整したところもあり、討論者の意図を十分に反映していないところがあればご容謝願いたい。