ワークショップ 3

RANS モデルの拡張への取り組み

Attempts for the Extension of Turbulence Models Based on RANS

正 小尾晋之介(慶大)

Shinnosuke OBI, Dept. Mechanical Engineering, Keio University, Yokohama 223-8522

1. はじめに

計算機の発達に伴う計算速度および記憶容量の増大、さらには複雑形状を扱うことのできる数値解析技術の進展によって、LES が持つ工学的な重要性はますます高められてきている。商用 CFD コードに LES がオプションとして採用されることがトレンドであり、近い将来、ほとんどすべての商用コードが LES を標準装備としてゆくことだろう。一方、RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) モデルは本来の適用範囲を超えた問題をも含めて様々な場面で使い古された結果、あまり精度の高い結果が期待できないというような印象を与えつつある。今日までの 20 年ほどの間、商用コードの普及と共にまではやされた $k-\epsilon$ モデルを代表とする RANS モデルは、前世紀の遺物、簡易版 CFD の代名詞、といった評価に甘んじてしまうのだろうか。

現在の計算機環境を中心とする周辺事情は LES の適用範囲を飛躍的に広げることに役立ってきた。しかし、計算機性能の向上速度に基づく現実的な予測では、これまで RANS モデルで取り扱われてきたような問題が近い将来すべて LES によって置き換えられることはないと考えられている。壁面近傍領域のモデルや、流入境界条件の設定の煩雑さに加え、SGS モデルの選択を誤ると、ごく単純な流れ場でも正しい結果が得られない問題も指摘されている⁽¹⁾。トレンドにまかせて妄信的に LES の導入を進めた先に失望が待っていることは、CFD 技術の普及によって逆に $k-\epsilon$ モデルの不備が明らかになったという経験から容易に推測できる。これらの状況から CFD ユーザが学ぶべきことは、モデルの性能についての正しい知識を持って問題に臨む能力をユーザ自らが備える必要があるということに尽きる。

2. RANS モデルの拡張と LES との棲み分け

計算速度を基準に考えれば、RANS モデルは LES に比べて 2 桁以上の優位性がある。その特長を生かし、有用なエンジニアリング・ツールとして有効に使うために、最近、RANS モデルを従来の枠組みから外れた問題に適用する試みが増えてきた。その典型は、平均流そのものが強い非定常性を有するような流れ場への適用で、例えば鈍い物体からの渦放出を伴う流れ⁽²⁾や、ゆっくりした自然対流場⁽³⁾などが例として挙げられる。RANS モデルはその名の通り、平均化された方程式を基礎としていることから、このような適用に際しては平均操作の物理的な解釈が本来のレイノルズの平均法とは若干異なる。そのため、まだ議論の余地は多く残されているが、RANS モデルの適用の拡大という点では興味深い。

一方、LES の SGS モデルの再検討を目的としてレイノルズ応力の輸送方程式の性質を考慮する試み⁽⁴⁾に代表されるように、RANS モデルの考え方は LES の基礎ともなっている。前述の点とも考え合わせれば、RANS モデルの可能性は単に時間平均運動量式のレイノルズ応力を求めるための関係式に留まらない。このような、RANS と LES の間を接合する概念についてはすでに様々な解説がある⁽⁵⁾。

3. モデルの相互評価

RANS モデル、LES を問わず、乱流 CFD の適切な利用を実

現するためには、様々な流れ場を対象とした多角的な比較検討を通じ、知識データベースを蓄積することが重要である。ここではヨーロッパにおける乱流研究のグループを統括する ERCOFTAC (European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion) が中心となって過去 10 年以上にわたり開催してきたワークショップについて紹介する。ERCOFTAC に設置された分科会のひとつ、Special Interest Group for Turbulence Modelling では、IAHR (International Association for Hydraulics Research) との連携で組織的なワークショップをほぼ毎年定期的で開催し、すでに 40 以上のテストケースについてモデルの相互評価を行っている。これらに関する情報は <http://ercoftac.mech.surrey.ac.uk/> に公開されている。

図 1 および図 2 に、最近の 2 回のワークショップで取り上げられたテストケースを示す。昨年行われた第 9 回では、(a) 燃焼器内の旋回流、(b) 滑らかな表面からはく離流、(c) 周期的な変動を有するはく離流、(d) 自動車を模した 3 次元物体周りの流れ、の 4 つが取り上げられた。課題の選定に際し、モデルの相互評価に適した物理現象を包含すること、精度の高い実験又は DNS データがあること、数値解析技術上困難すぎないもの、といった条件設定のほかに、なるべく参加者の興味を引くことが考慮された。最後の点は乱流モデルに対する工学的な要請を考えると非常に重要な点で、実際的な問題を取り上げることで企業ユーザからの参加を促した。図 1 (d) はそのような点が最も考慮された課題であり、表 1 に示すとおり、計 18 通りの計算結果が集まった。他の 3 つのテストケースが 2 次元であることを考慮すると、このテストケースへの関心が高かったことが明らかである。

第 8 回と第 9 回で、それぞれのテストケースに対して提出された結果の数を表 1、2 をもとに比較すると、第 9 回のケース 2 が 36 件、第 8 回のケース 3 が 24 件で、それぞれもともと参加者の関心を集めていることがわかる。これらに共通することは、境界条件の設定が容易であること、非直交格子による 2 次元の定常計算であること、はく離・再付着を伴うことであり、計算を実行する際の障害の低さと、実際的なアプリケーションに近い問題であることが関心を集めることを証明している。また、いずれのケースとも、渦粘性モデルと高次モデルの差異が顕著に現れ、テストケースとしては理想的なものとなった。

使用されるモデルに関する近年の傾向として、複雑すぎず、かつある程度の計算結果が得られるもの、という認識が定着しつつある。ASM (代数応力モデル) を含む非線形渦粘性モデルが適用される例が増えてきた。第 8 回では ASM の適用例は 2 件、非線形 $k-\epsilon$ モデルは 0 件だが、第 9 回ではそれぞれ 3 件と 9 件であり、トレンドの変化が見える。また、RSM や $k-\omega$ モデルの適用例が多いのは、参加者の研究対象や嗜好を反映している。

4. おわりに

乱流モデルの性能の理解には相互比較による知識データベースの積み上げが最重要である。計算技術の向上を含めて、情報の共有が CFD の健全な発達を促すものである。

Table 1: Referred Models in the 9th Workshop

Test Case	1	2	3	4
$k-\epsilon$	4	17	2	10
NL $k-\epsilon$	3	6	0	0
$k-\omega$	0	7	2	2
ASM	3	0	0	0
RSM	5	5	4	5
LES	0	1	0	1
Others	0	0	2	0
Total	15	36	8	18

(a) Case 1. Swirling flow in a model combustor

(b) Case 2. Periodic flow over a 2-D hill

(c) Case 3. Periodically perturbed separated flow

(d) Case 4. Flow around a simplified car body

Fig.1 Test cases considered for the 9th ERCOFTAC/IAHR Workshop on Refined Flow Modeling (2001).

Table 2: Referred Models in the 8th Workshop

Test Case	1	2	3
$k-\epsilon$	2	0	6
NL $k-\epsilon$	0	0	0
$k-\omega$	2	4	8
ASM	1	0	1
RSM	0	1	7
LES	2	0	2
Others	1	0	1
Total	7	5	24

(a) Case 1. Flow in a matrix of surface-mounted cubes

(b) Case 2. Plane turbulent Couette flow subjected to spanwise rotation with rotation numbers up to 0.5

(c) Case 3. Flow through an asymmetric plane diffuser

Fig.2 Test cases considered for the 8th ERCOFTAC/IAHR Workshop on Refined Flow Modeling (1999).

参考文献

- (1) 例えば 加藤ら, 第 16 回生研 NST シンポジウム講演論文集(2001), P. 48.
- (2) Lubcke, H. ら, J. Winds Engineering and Industrial Aerodynamics, 89 (2001), 1471-1485.
- (3) Kenjeres, S., Hanjalic, K., Int. J. Heat and Fluid Flow, 20 (1999), 329 - 340.
- (4) Davidson, L., 2nd Int. Symp. Turbulence, Heat and Mass Transfer (1997), 481 - 490.
- (5) 例えば Spalart, P. R., Int. J. Heat and Fluid Flow, 21 (2000), 252 - 263.