

シンポジウム参加報告 - 乱流関連セッション -

Review of Turbulence Researches in the 16th CFD Symposium

森西 洋平*

*名古屋工業大学 工学部 機械工学科

Youhei Morinishi

*Nagoya Institute of Technology

E-mail:morinishi@cfm.mech.nitech.ac.jp

1 はじめに

本稿では第 16 回数値流体力学シンポジウムにおける乱流関連セッションの参加報告をさせていただきます。ここでいう乱流関連セッションはシンポジウム初日および 2 日目の E 室で行われた DNS 1 ~ DNS 5, LES 1 ~ LES 3 および RANS の計 9 セッションとします。これらのセッションは概ね DNS, LES および RANS に関する基礎研究で構成されております。前回 (第 15 回) のシンポジウム参加報告で梶島先生 (阪大) が過去の数値流体力学シンポジウムにおける乱流関連セッションの数の推移をまとめられておりますが (日本数値流体力学会誌第 10 巻第 1 号, <http://wwwsoc.nii.ac.jp/jscfd/j-jscfd/101/con101.html>), これと比較すると今回のシンポジウムでは DNS が増加, LES はほぼ横這い, RANS が減少となっております。DNS の増加は計算機の進歩に加え DNS の計算手法についても広く理解されるようになってきたことを反映しているように思われます。LES に関する研究は今後しばらくは盛んに行われるでしょう。RANS の減少についてはレイノルズ平均乱流モデル自身がほぼ成熟の域に達し, 乱流と他の現象 (化学反応, 燃焼, 混相流等) との干渉問題のモデリングへ研究の中心が移ったと見るべきでしょう。以下 DNS, LES および RANS それぞれのセッションについて概要を述べさせていただきますが, 各研究の引用は第 16 回数値流体力学シンポジウム講演要旨集の論文番号 (例えば E11-1) で行います。

2 乱流関連セッションの参加報告

DNS 1 ~ DNS 5 では合計 20 件の研究発表が行われました。これらのうち DNS 4 の E14-1 ~ E14-3 は DNS の計算手法に関する研究で, それぞれ IDO 法 (局所補間微分法), CCD 法 (結合コンパクト差分法), MDQ 法 (修正微分求積法) の検討がなされています。これら以外では, スペクトル法 (E11-3, E12-4), B-スプライン法 + スペクトル法 (E11-1), 6 次精度コンパクト差分法 (E14-4), 4 次精度中心差分 + スペクトル法 (E12-2, E15-4), 4 次精度中心差分 + 周波数フィルター (E15-2, E15-3), 2 次精度中心差分 + 4 次精度中心差分 (E12-3), 3 次精度風上差分 (E12-1), 2 次精度中心差分 (残りの 7 件) が空間的離散化手法に使用されていま

原稿受理 2003 年 2 月 14 日

す．4 次精度中心差分（壁面方向）とスペクトル法（周期方向）の組み合わせが見られますが，これはスペクトル法で壁面方向の離散化に使用されるチェビシェフ級数ではある程度以上の格子点数になると精度が落ちることによります．今後高レイノルズ数の壁乱流の DNS を実行するには気を付けるべき点でしょう．解析対象としては，今回は混相流関連の乱流の DNS (E11-4, E13-1, E13-2, E13-3) が 4 件と多めで，次いで噴流が 3 件 (E15-1, E15-2, E15-3)，乱流熱伝達関係が 2 件 (E11-2, E15-4)，回転系乱流が 2 件 (E12-3, E12-4)，圧縮性乱流が 2 件 (E11-1, E14-4)，バックステップ乱流が 1 件 (E12-1)，DNS 定番の平板チャンネル乱流については格子数 $512 \times 796 \times 384$ を用いた $Re_\tau = 800$ までの計算結果が報告されております (E12-2)．E13-4 では粘弾性被膜まわりの流れが扱われていますが流れ場は層流のようです．DNS による数値実験では計算結果を整理して乱流構造あるいは乱流に関連した現象を詳細に解析したものが増え，とりあえず計算してみましたという研究は以前よりだいぶ減ってきました．また噴流の 3 件にも見られるとおり空間発展型問題への DNS の適用も増えてきました．出口境界条件は移流境界条件 ($\partial \phi / \partial t + U_c \partial \phi / \partial x = 0$) でほぼ固まってきた様です．

LES 1 ~ LES 3 では合計 12 件の研究発表が行われました．内訳は，SGS モデリングに関する研究が 5 件 (E26-2, E26-3, E26-4, E28-1, E28-4)，LES の数値計算手法に関する研究が 1 件 (E26-1)，LES の応用研究が 5 件 (E27-1, E27-2, E27-3, E27-4, E28-2) です．E28-3 は関連論文との兼ね合いで LES 3 に入っていますが内容は境界適合格子対応の擬スペクトル法を用いた気液界面物質拡散の DNS です．SGS モデリングに関する研究では，外力の効果や非等方性を考慮した SGS モデルおよび 1 方程式型 SGS モデルの検討が行われています．今後輸送方程式を解くタイプの SGS モデルの検討が進むように思われます．DNS データを用いた SGS モデルの *a priori test* も 3 件 (E26-3, E28-1, E28-4) 報告され，DNS の普及が LES の SGS モデリングに着実に反映されるようになってきました．LES の数値計算手法に関する研究では Wiggle (チェッカーボード状の非物理的な空間数値振動) の抑制方法が検討されています．LES および DNS では散逸および分散誤差の少ないスペクトル法や中心差分の使用が推奨されますが，非線形不安定性を抑制するためにスペクトル法ではエイリアス誤差の除去，差分法ではエネルギー保存形の中心差分の導入が行われます．しかし中心差分自身では Wiggle の発生を抑えることはできないので，応用問題では部分的に数値粘性を加えたり空間的フィルターを掛けたりして Wiggle の発生を抑えているのが現状でしょう．LES の応用範囲を広げるためにも，Wiggle 発生の特定期間およびダメージの少ない除去法の確立が急務です．LES の応用研究では DES (LES と RANS のハイブリッド計算) が 1 件 (E27-4) あるのみで，残りではスマゴリンスキー型の渦粘性モデルが使用されています．

RANS では合計 5 件の研究発表が行われました．内訳は，乱流モデリングに関するものが 3 件 (E29-1, E29-2, E29-3)，非線形 $k-\varepsilon$ モデルの応用が 1 件 (E29-4)，応力方程式モデルの応用が 1 件 (E29-5) です．RANS の乱流モデリングでは，これまで手強く手付かずであった乱流燃焼での逆勾配拡散のモデリング (E29-1) と応力方程式モデルでの圧力拡散項の速度歪効果のモデリング (E29-2) が試みられています．

3 参加報告後記

第 1 回数値流体力学シンポジウムの開催と同じ年(1987)に Moin & Kim による平板チャネル乱流の DNS の論文(JFM, Vol.177, pp.133-166)が発表されました。設定レイノルズ数 $Re_\tau=180$ は今では低レイノルズ数の部類に入れられてしまっていますが、当時としては非常に大規模な格子数 $192 \times 129 \times 160$ での計算、スペクトル法の適用、壁面乱流渦構造の再現等、CFD を利用した新たな壁乱流の研究手段の出現に驚きかつ心躍るものがありました。その後、スーパーコンピュータ先進国であった我が国でも幾つかのグループが先導して DNS を用いた乱流研究が行われ、本シンポジウムでも盛んな議論が行われました。Moin & Kim の論文から 15 年経った現在、メモリーを少し欲張り時間さえかければ同程度の DNS が WS レベルでも実行可能となってきました。しかしパイオニアとしての Moin & Kim の論文の価値は少しも下がることはありません。ここでこの研究の先見性を改めて考え直してみると、壁乱流の組織渦構造の本質を調べるために最も単純で理想的な平板チャネル乱流が研究対象として選ばれていること、設定レイノルズ数が $Re_\tau=180$ であること、チェビシェフ・タウ法とフーリエ・スペクトルを用いたナビエ・ストークス方程式の高精度・高効率の計算アルゴリズムが新たに開発されていることにあると私は考えます。研究対象の選定が大切なのは CFD に限られたことではありませんが、この場合には一様な方向が 2 つあるということが効率的な計算アルゴリズムの構築にも結び付いています。 $Re_\tau=180$ はまさにマジックナンバーです。以前は何故こんな中途半端な数なのかと思ったものですが、これよりわずかに低い $Re_\tau=150$ では対数速度領域が現れなくなります(カルマン定数の逆数 $1/\kappa = y^+ dU^+ / dy^+$ をプロットすると定数域が消滅します)。当時の計算機環境でぎりぎりの選択だったのでしょう。本稿は数値流体力学シンポジウムに関する記事なのでここでは最後の計算アルゴリズムに特に着目してみます。当時までに提案されていた壁乱流に対するスペクトル法の計算アルゴリズムとして、Orszag & Kells (1980) のスプリッティング法では壁面上で壁面粘着条件が連続の式のいずれかが犠牲になり、Moin & Kim (1980) のチェビシェフ・ガラーキン法は正確だが計算効率が低いという問題がありました。Kleiser & Schumann (1980) によるチェビシェフ・タウ法を用いた直接解法は本来理想的なものだったのですが原論文で重要な部分に 1 箇所ミスがあり Wern(1995) による修正まで使い物になりませんでした。Moin & Kim (1987) の論文では、圧力を消去した壁面方向速度の方程式と壁面方向渦度の方程式をチェビシェフ・タウ法で解いて速度 2 成分を求め、残りの 1 成分を連続の式から定める、という方法が取られました。この方法の根本は平板間流れの安定性問題で扱われる Orr-Sommerfeld 方程式の固有値問題の解析方法と同じなのですが、それと同じことを数値的に行ったのです。このように見ると、数値計算の規範はやはり解析解にあり、CFD から流体力学のブレイクスルーを起こすような研究には数値計算手法にも新たな提案がある、と考えられます。今後は乱流と他の現象との干渉問題の CFD に対する需要がますます増えてくると思われそうですが、それらに対しては現在の計算手法では不十分な問題が数多く存在します。従来手法をだまされ使用するのはなく、解析対象に最も適した計算手法を常に求めながら研究を実施すると、CFD から流体力学のブレイクスルーを起こせる機会がやってくるかも知れません。

参加報告後記が長くなってしまいましたが、自戒を込めて書かせて頂きました。