

圧縮性流れ・流体音に関する発表を概観して

Review of Presented Researches in Compressible Flows and Acoustics

高倉 葉子*

*東京農工大学工学部

Yoko Takakura

*Tokyo Noko University

E-mail: takakura@cc.tuat.ac.jp

1 はじめに

第 16 回数値流体力学シンポジウムの直前になって筆者に表記題名による原稿の執筆依頼が届きました。おそらく受諾される方がなかなか見つからず廻ってきたものと思われませんが、他に適任者がおられるものをお引き受けしましたのは、直前のご辞退は会誌編集に差し障ろうということの他に、(研究としての)数値流体力学が難しい局面に直面していると言われている現在、その方向性に関する私見(以下に記述)から、本シンポジウムにおいてはどのような方向性が現われているのであろうかという点に興味を覚えたためでもあります。

数値流体力学は広範囲の分野に浸透し、実験、解析的方法と並ぶ第 3 の手法としての位置を占めつつある。「数値流体力学の手法開発は終り、道具としての適用の時代である」とも言われる現在、数値流体力学はどのような方向性を持ちうるのであろうか？ 1) 手法開発という点では、ここ 20 年間の実用面での急激な進歩は見られなくなったものの、非線形多次元保存則に対する高精度数値計算法の開発は必要であろうし、欧米の応用数学分野では離散化モデルを含めた数学モデルに関する議論はまだまだ盛んである。2) また、乱流モデル、高温反応モデルに代表されるような物理モデルの開発も必要であろう。3) 道具としての適用という点では、その適用分野は今なお広がりつつあるが、個別の現象説明にとどまっているように見受けられる。3a) 真の意味での物理現象の解明(すなわち個別の現象捕獲から一般法則を導き出すこと)、3b) 本来の意味での工学的実用性の追求(すなわち実際のものづくりに役に立つ知見を得ること)こそが、道具としての数値流体力学の能動的な役割ではなかろうか？ 4) その他、PSP/TSP(感圧/感温塗料)による測定や PIV(粒子画像流速測定法)などの実験計測法が数値計算に歩み寄ってきていることも、その展開に興味が引かれるものがある。

最後に記した方向性 4 は本シンポジウムには直接関連しないので除外するが、本稿においては上記方向性 1) 2) 3a) 3b) がどのように現われているのか(あるいはいないのか)にも触れたいと思う。

2 圧縮性流れに関する講演

シンポジウム初日に圧縮性流れの講演が 4 セッション設けられた。午前中の 2 セッションでは主に物理モデルと数学モデルに関する講演が、午後の 2 セッションでは航空機まわりの流れや推進器関連の流れについての講演が行われた。最近の数値流体力学の実用面における手法の飽和状態から、物理モデルや現象解釈に向かおうという傾向が見られる。

2.1 物理モデルと数学モデル

初日午前中の 2 セッションにおける講演を数学モデルと物理モデルという観点で眺めてみると、非定常準 1 次元流モデルと非定常ピストン運動摩擦モデル (C11-2)、衝突動力学による酸素原子 酸素分子の振動遷移モデル (C11-3)、アブレーションと輻射モデル (C11-4)、DSMC 法による窒素分子の回転 振動遷移モデル (C12-1)、非定常アブレーションモデル (C12-2)、電磁流体力学方程式における低磁気レイノルズ数モデル (C12-3)、圧縮性流体の有限要素法離散化モデル (C12-4)、とまとめられよう。

講演 C11-2 以外はすべて高温下における現象を取り扱っている。お定まりの乱流モデルについては進展が見られないためか発表はなく、上記に現われた物理モデルはすべて非定常 / 連成モデルと言えよう。はじめに述べた方向性 2 が顕著に現われたセッションであった。MUSES-C 計画に代表される宇宙開発プロジェクトが、高温物理モデル開発の動機付けを行っているのであろうか？

2.2 外部流 (航空機まわりの流れ)

初日午後の最初のセッションでは、航空機まわりの外部流に関して講演がなされ、活発な討論が行われたので、議論の一端をご紹介します。

本セッションでは後退翼とデルタ翼という“古典的”な 3 次元翼問題への回帰が着目される。後退翼問題 (C13-1) では、後退角による衝撃波発生の抑制について 2 種類の説明が提示され、亜音速においては、および遷音速で衝撃波が存在しても後退角が小さければ、翼に垂直な速度成分が減少するためとする説が正しい、と結論づけている。それに対して会場の質問者から、正しいとされた説は多くの古典的教科書に載っている線形理論であり、粘性流や非粘性流で議論するとすれば、単純化した理論から定量的にどの程度ずれるかを論点とすべきという指摘がなされた。数値計算によりどの理論が成立しているのかを判定しようとするのは、数値計算の特性を生かすポジティブな方向性と思われるが、理論を巻き込もうとすると逆に“理論”を中心に据えた議論も湧き上がる。数値計算がこの方向性を確立していく上で、克服していかなければならない過程であろう。ここでは個々の現象説明にとどまらず一般法則を見出そうとする方向性 3a が見られる。(なお蛇足ながら筆者自身も、どの理論が成立しているかという観点からキャビティ渦騒音問題を扱ってきた者である。)

低マッハ数における高迎角デルタ翼の前縁剥離渦問題 (C13-3) では、フィルター付き高精度コンパクト法 (空間 6 次精度) を用いると、Roe 平均 MUSCL 法 (空間 3 次精度) に格子再分割法を組み合わせたアプローチよりも渦や圧力分布が明瞭に捕らえられたことが報告されている。高精度コンパクト法と格子再分割法を組み合わせるとこの古典的問題に終止符を打っ

て欲しいというコメントがでるのも自然の流れであろう。しかし乱流モデルは数値解にどのように影響しているのであろうか、まだ問題は残る。なおコンパクト法は音響問題でその有用性が確認されている（第 3 節参照）ものであるが、既存のソフトウェアで十分という風潮もある空力分野でも別の手法が取り入れられていることはやや注意を引く。

多要素翼解析 (C13-2) も古くから取り組まれている課題であり、ここではスラットとフラップという高揚力装置を有する翼型まわりの 2 次元粘性流を非構造格子法により解いている。格子点密度と配置に留意することにより、前縁スラットからの後流と主翼上面の境界層との干渉場の速度分布に良い結果を得ている。このような場合乱流モデルは問題ないのであるか？

次世代航空機 NEXST-1 の音速近傍流れ場解析 (C13-4) では、風洞試験時の主翼の空力弾性変形効果、支持棒効果などを数値計算に取り入れて、風洞試験と数値計算との定量的比較を追及している。ただし格子収束性をどこまで詰めているのかという質問もなされた。現在道具として使える CFD 空力解析力を総動員したプロジェクト仕事との印象を受けるが、これは数値流体力学が工学的実用性に寄与しうる方向性 3b を目指しているのであろう。実験機の後、日本製の次世代航空機が飛ぶ日は来るのであるか？

2.3 内部流（航空宇宙推進器に関する流れ）

初日午後の 2 番目のセッションでは、主に次世代超音速機の推進システムに関連する流れが発表された。これらも工学的実用性 3b を目指すものであろう。

受動キャビティ問題 (C14-1) では、エアブリージングエンジンの空気取り入れ口にて流れを超音速から亜音速に減速するとき生じる 3 次元衝撃波と乱流境界層の干渉を抑制するために、最適なキャビティ形状が検討されている。キャビティ前部に覆いが突き出ている、かつキャビティ中央部にもブロックの覆いがあるものが、高い抑制効果を有するとの結論である。これはエアブリージングエンジンへの適用のみならず、通常の航空機の翼などにおいても衝撃波抵抗の低減に有効となり得るのではないであろうか？

スクラムジェットエンジンの超音速燃焼器内の燃料噴射孔形状を遺伝的アルゴリズム (GA) により決定する試み (C14-3) においては、燃料を主流に垂直に吹き出すとき、通常トレードオフの関係にある混合性能向上と全圧損失低減が両立するよう最適化されている。結果として得られた噴射孔形状は複雑でランダムそのものに見えるが、上流側には噴流上流を予圧縮役割の噴射孔を有し、下流側には頂点が上流に向いたくさび型噴射孔を有する形状と特徴づけられる、とのことである。この特徴を有する単純化された形状で性能検討計算を行えば、工学的な知見により繋がるのではないであろうか？

これに対し講演 (C14-4) では、スクラムジェットエンジンにおいて燃料を主流に平行に吹き出すとき、超音速混合を促進して燃焼効率を上げるため、縦渦を導入するような形状を有する燃料噴射器 (AW スラット) が調べられている。ランプ角が異なる 2 種類の形状のスラットについて、燃料が縦渦に運ばれて混合する過程が示され、ランプ角が大きい方が混合効率は良いが総圧損失はほとんど差がない、と結論づけている。

他の実用計算としては、低レイノルズ数下での圧縮機翼列の流れ解析において、経験的な

遷乱流移モデルと 2 方程式乱流モデルを準三次元 Navier-Stokes 解析に適用したものの (C14-2), 破損の原因となるロケットノズルの横推力はノズル内の剥離点の急激な移動が原因であるとし, ノズル内の段差の位置や形状と剥離点の移動との関係を調べたもの (C11-1) が発表された.

3 流体音に関する講演

流体音に関する講演を大別すると, 大規模直接シミュレーションによるものと, 基礎方程式等に工夫を凝らしたものの, の 2 種類となる.

3.1 流体音の基礎方程式及び数値計算法に関して

流体音は, 手法に関する発表 (方向性 1) がまだ見られる分野であろう. フリーメッシュ有限要素法によるエッジトーンの流体解析 (A13-1) においては, 流れのレイノルズ応力が音源となりそれが伝播していくとする Lighthill 理論に基づき, 非圧縮性流体の解を求めてから線形理論により遠方に伝播する音場を求める方法と, 弱圧縮性流体の方程式を解く方法の 2 種が示された. 並列計算により 3 次元エッジトーン解析を行った結果, 非圧縮性解析と線形理論による音場予測の組み合わせでも音の周波数は実験式と合うものの, 現象面では弱圧縮性を含む計算のほうがジェットの振幅が大きくなる, とまとめられている.

引き続き講演 (A13-2) においては, 2 次元エッジトーン流体音解析が差分格子ボルツマン法を用いた直接計算により行われ, そこには噴流とくさびの相互干渉により生じる微弱な音圧変動が捕らえられている. くさび近傍での音圧の発生が上流の噴流による渦の発生を誘起するというフィードバック機構に言及されたが, 数値計算のメリットをなお一層生かせば, 音圧の上流側への伝播形態と渦の発生メカニズムを明らかにして “現象モデル” の提示へと持っていけるのではないであろうか?

講演 (A13-4) では, 最初に紹介した Lighthill 理論の立場に立つ計算モデルが, 右辺に音源たるレイノルズ応力を持つ音波方程式として構築されている. 非圧縮性流体の解により右辺項を計算してから, 圧縮性流体で使用される双曲型スキームにより音波方程式を解いた結果, カルマン渦から発生する流体音が捕らえられている. ただし講演 (A13-1) にて, 弱圧縮計算と非圧縮計算との現象の違いが報告されているので, この方法の有効範囲を論じていく必要がある.

さて, 直接シミュレーションに伴う計算機誤差 (丸め誤差や桁落ち等) を減少させる方法として, 実際の流れ場と非圧縮性流れ場の物理量の差を音響場と考えて解析する分離解法がある. 講演 (A13-3) では, このような音場の方程式が直接シミュレーションで用いられる高精度数値計算法 (空間の離散化は 6 次精度コンパクト法 + フィルタリング + 2 階人工粘性; 時間積分は 4 段階ルンゲクッタ法; 境界条件は無反射条件) により解かれている. 計算の安定化のためには 2 階人工粘性は必要とのことである. 円柱から発生するエオルス音の予測を行った結果, 遠方領域での音場が予測できていることが示された.

その他には, ガウスパルス圧力波と矩形パルス圧力波のダクト端からの放出を, MacCormack 法の高精度化スキームで計算した発表 (A14-4) もある.

3.2 大規模直接シミュレーション

圧縮性流体の基礎方程式を高精度スキーム（空間の離散化は 6 次精度コンパクト法；時間積分は 4 段階ルンゲクッタ法；境界条件は無反射条件）を用いた大規模直接シミュレーションにより解き，2 次元渦騒音の解析を行った講演が 3 件行われた．円柱まわりのカルマン渦と関連して発生するエオルス音の制御に関するシミュレーション（A14-1），高迎角翼型まわりの流れから発生する音波のシミュレーション（A14-2），渦と渦の干渉により発生する音波のシミュレーション（A14-3）などである．多分膨大な計算時間を費やして得られたであろう貴重な計算結果に関しては，ここで雑な説明を加えるよりも講演論文を直接ご覧いただきたい．

それでは，低マッハ数・低レイノルズ数における渦騒音問題は（手法に関しては）終りを告げ，計算機にかけさえすれば渦と音波が捕獲される状況なのであるだろうか？ しかしながら，よりマッハ数が低くなると，スキームを高精度化しても丸め誤差や桁落ちなどの計算機誤差は必ず入るので，音波という微弱な圧力波を捕らえるためには 3.1 節で紹介した講演（A13-3）のような音場の直接シミュレーションが有望なのではあるまいか？ ただこの場合 2 階の人工粘性による解の精度低下が気になる．何らかの誤差コントロールが必要となろう．

4. 終りに

「～の発表を概観して」という標題をいただきましたので，わが身を顧みず評論家風になっているかもしれませんが，ご容赦いただければ幸いです．2.2 節「外部流」のセッションでは議論が盛り上がったと聞き及びましたが，筆者は流体音のセッションの聴講のため不在でしたので，廣瀬直喜氏（航空宇宙技術研究所），藤井孝蔵氏（宇宙科学研究所），澤田恵介氏（東北大学）のご意見，ご感想を参考にさせていただきました．特に廣瀬氏からは外部流セッションの講演全般について，拙原稿よりもはるかに膨大なご見解をお寄せいただきました．ここに感謝の意を表します．