

# 圧縮性乱流のモデリングの研究動向

—平成 11 年度三好研究助成調査報告—  
Research Trends in Compressible Turbulence Modeling

半 場 藤 弘\*  
Fujihiro HAMBA

## 1. はじめに

流速が音速に比べ十分小さくまた流体の温度差が数度以下の場合には流体を非圧縮であると近似できる。この非圧縮性流体に対する乱流理論と乱流モデリングはこれまでにくわしく考察され精密な乱流モデルが確立しつつある。しかし超音速飛行機まわりの流れやそのエンジン内の流れのように、音速かそれ以上に高速な流れでは圧縮性の効果が重要となり乱流拡散に大きな影響を与える。また火災などのように温度差が数十度から数百度に達する流れでは浮力による圧縮性効果が無視できないことが知られている。そのような高速流や高浮力流における圧縮性効果を取り込んだ乱流モデリングは 10 年以上前から研究されているが、非圧縮性流体に比べ多様な物理現象を伴うためモデリングがむずかしく発展途上の段階である。

今回、三好研究助成により米国の University of California, San Diego および NASA Langley Research Center を訪問し、また First International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena に参加し、圧縮性乱流とそのモデリングの研究の現状を調査する機会を得たので報告する。特に数値計算を用いた圧縮性効果の物理的機構の解明および繰り込み理論を含むモデリングの理論的方法について情報交換と議論を行った。

## 2. TSFP-1 シンポジウム

まず California 州 Santa Barbara で開かれた First International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-1) に参加した。これは 1997 年まで隔年で 11 回開催された Symposium on Turbulent Shear Flows を発展させ、新たに始まった第一回のシンポジウムである。これまでの乱流の基礎・応用研究に加え、生物医学分野、地球環境分野の流体现象など境界領域にまでひろげて論文を募集したのが新シンポジウムの特徴である。200 余件の論文が 39

\*東京大学生産技術研究所 第 1 部

セッションに分かれて発表された。パラレルセッションが 3 から 4 へと増えたためか、1 セッションの参加者がやや少なく、興味のある講演が重なってしまったのは残念であったが、全体としては前回までのシンポジウムと同様に盛況であった。

圧縮性流体のセッションで 5 件の発表があり、その他のセッションも含めると圧縮性流体が主なテーマである論文は 10 件ほどあった。内訳は数値計算による研究が 7 件、理論が 1 件、実験が 2 件である。必ずしも件数は多くないが、混合層や衝撃波の直接数値計算による基礎的な研究、対称性やスケールリング則を用いた新しい理論研究が見られた点が興味深かった。特に混合層の数値的研究では後述する圧力揺らぎの効果だけでなく、平均密度差の効果の検証も試みており、より普遍的な乱流モデリングのデータベースとして重要な計算結果であると感じた。

## 3. University of California, San Diego

次に University of California, San Diego の Department of Mechanical and Aerospace Engineering の S. Sarkar 教授を訪問した。San Diego キャンパスは広大な敷地を持ち、建築物が点在している。学科の建物の内部はそれほど広くはないがシンプルでいていねいに作られているという印象を持った。学科の流体力学・燃焼・物理工学の部門には Sarkar 教授を含め 12 人の教授がいる。

Sarkar 教授の専門分野は数値流体力学と乱流で、特に高速の圧縮性流体、反応・成層流体の乱流のモデリングとシミュレーションを研究している。その中でも乱流混合層の直接数値計算による研究は主要なテーマであり、今回の滞在中、主にこれについて議論や情報交換を行った。またセミナーで講演する機会を得て、他の研究者とも議論することができた。

混合層は時間とともに厚くなり成長するが、その成長率が圧縮性効果によって減少することが知られており、これはエンジン内の燃料混合の制御などで重要な現象である。

これまでに成長率の減少の物理的機構として圧力揺らぎの減少が重要だとわかってきた。Sarkar 教授は高速流体では圧力が有限の速度で伝わることによる時間遅れが圧力減少の原因だと指摘している。一方われわれの研究では圧力揺らぎの粘性散逸が圧力減少の主な原因であることを示している。そこで今回の調査では粘性散逸の重要性を調べるため、大学院生に数値計算のデータから必要な統計量を求めてもらったが、統計的揺らぎが大きく残念ながらはっきりした結論が出なかった。その圧縮性効果のモデリングとして乱流混合層に特徴的なマッハ数を求める方法と、より普遍的なパラメータを用いる方法を比較検討した。今後さらに計算と考察を進める予定である。

また今回ドイツ Munchen 工科大学の Friedrich 教授とオランダ Twente 大学の Geurts 助教授も Sarkar 教授を訪問中であり、Large Eddy Simulation (LES) の新しいモデル、特に Defiltered モデルについて意見交換を行った。Defiltered モデルはサブグリッドスケールのモデルとしてではなくあくまでグリッドスケールの応力をより正確に計算する手法として位置づけられていた。この LES は非圧縮性乱流についてのモデルではあるが、圧縮性乱流にも拡張が可能であり今後の研究課題として重要である。

#### 4. NASA Langley Research Center

最後に Virginia 州にある NASA Langley Research Center の Institute for Computer Applications in Science and Engineering (ICASE) の R. Rubinstein 博士を訪問した。California の荒涼とした風景を見ていたせいか、車窓に広がる Virginia の豊かな緑を目にしてほっとした。一方ハリケーンが襲った直後だったので被害を受けた屋根や柵も目についていた。ICASE は航空宇宙の科学技術の基礎研究となる応用数学・物理・計算科学を研究するセンターである。研究スタッフは約 15 人、客員研究員は約 10 人で他の NASA の研究者、大学研究者との交流が活発に行われている。理論数値流体力学は本センターの 3 つの主要な研究課

題の一つである。ただし乱流モデルや圧縮性流体の研究については研究者が他の大学や研究機関に移り、残念ながら衰退気味だとのことだ。

流体力学部門の Rubinstein 博士は圧縮性乱流や成層回転乱流について統計理論を用いた理論的研究を行っている。今回の調査では特に圧縮性乱流の圧力揺らぎの散逸に関連して、圧力スペクトルについて議論を行った。音速と乱流による異なる時間スケールを用いると低波数と高波数で傾きが異なるスペクトル分布が得られること、博士の統計理論を用いればスペクトルが計算可能であることがわかった。今までのわれわれの研究では非圧縮性乱流の拡張として圧縮性乱流を取り扱ってきたが、音波と乱流の相互作用という別の視点からも取り組む必要のあることを、博士との議論の中で強く感じた。

また同センターのコンサルタントであり、以前東大生研の客員教授であった Old Dominion 大学の Demuren 教授と会い、長方形流出口の乱流ジェットに数値解析について議論し、LES の計算方法やダクト流との類似点相違点などを話し合った。

#### 5. お わ り に

以上 TSFP-1 シンポジウムに参加し、University of California, San Diego と NASA Langley Research Center を訪問して圧縮性乱流とそのモデリングについて調査し、情報交換や議論を行った。直接数値計算や統計理論を用いて、乱流の圧縮性効果の物理的機構の理解やそのモデリングは進展してきたが、さらなる計算や考察が必要であることを痛感した。今回の調査と議論をふまえ、今までの研究をさらに進めると同時に、新しい視点から圧縮性乱流の研究に取り組む切り口を見つけたいと考えている。

この機会を与えて下さった財団法人生産技術研究奨励会に深く感謝いたします。

(2000 年 1 月 19 日受理)