

〔特別講演〕

# 数値流体力学の今昔

名誉教授 京都工芸繊維大学/滋賀県立大学

里 深 信 行

## Computational Fluid Dynamics: Past and Present

Nobuyuki Satofuka, Professor Emeritus, Kyoto Institute of Technology/University of Shiga Prefecture

### 1 はじめに

私が数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics; CFD) の研究を始める契機となったのは、今から 50 年近く前、東京大学大学院航空学専攻の博士課程 1 年の時で、修士課程では、超音速風洞でオブリーク翼の実験を行っていたが、博士課程ではそれと違ったテーマに取り組みたくて、面白そうなテーマがないかと図書室に通い詰めていた最中だった。たまたま手に取ったロスアラモス研究所のレポートに掲載されていた PIC (Particle-in-Cell) 法による極超高速衝突の計算結果のマイクロフィルムレコーダのグラフィック出力に感動し、研究テーマとして CFD による圧縮性流れの数値計算を選んだ。当時は CFD という言葉すら存在せず、圧縮性流れの数値計算に取り組んでいたのは、日本で私一人だけであった。

最初は、東大大型計算機センター、航技研 (現 JAXA) の HITAC5020 を使って、PIC 法により衝撃波管流れの計算に取り組んだが、定量的な結果を得るのには PIC 法は不相当であると判断し、FLIC (Fluid-in-Cell) 法に変更した。結局、二次元および軸対称衝撃波管内の衝撃波形成に及ぼす有限破膜時間の効果を FLIC 法で計算した結果を中心として纏めた論文で博士の学位を得た。当時は数値計算の正当性がなかなか理解してもらえなくて、指導教官を説得するのに苦労した。

### 2 数値流体力学の黎明期の研究

京都工芸繊維大学に赴任してからは、京都大学大型計算機センターの FACOM230-60 で Lax 法、Lax-Wendroff 法、MacCormack 法などの散逸的差分法の衝撃波形成・伝播、逆噴射ジェットの流れ場の

計算への応用や三次精度以上への高精度化を試みていた。1974 年にコロラド州ボルダーで開催された第 4 回 ICNMF (International Conference on Numerical Method in Fluid Dynamics) に軸対称爆縮衝撃波問題を各種の差分法で解いた結果を比較した論文が採択されたが、それは日本人が数値流体力学の国際会議に寄与した最初の一つであった。この会議には日本からもう一篇、当時日立の原田らの論文が採択されている。

### 3 エームス研究センターへの留学

転機となったのは 1980 年から約 1 年間の NASA エームス研究センターへの NRC (National Research Council) の研究員としての留学であった。留学に際しては、CFD 副部門長だった、故 井上守氏に公私ともに大変お世話になった。当時のエームス研究センターは CFD 研究のメッカで、部門長の H. Lomax はじめ、R. W. MacCormack, R. F. Warming など、多くの有名な研究者が在籍し、また、米国内のみならず世界各国の CFD 研究者との活発な交流が行われていた。さらに、現在欧米の各国で CFD 研究の重鎮として活躍している研究者の多くが、この時期に大学院生、あるいはポスドクとしてエームスに籍を置いていた。また、夏季には故 A. Harten が訪れ、DEC の TSS システムで後に TVD (Total Variation Diminishing) 法として実を結ぶ仕事を手掛けていた。

渡米直近には、R. Bellmann の提案した微分求積法からヒントを得た高次精度線の方法の、乱流の DNS、ソリトンの伝播、Vlasov および Boltzmann 方程式の数値解への応用を研究していたが、エームスでの MacCormack の二重対角行列スキームに関する講演に刺激され、定常流に対する高効率計算法の研究に取り組んだ。その結果、A. Wambecq の有理ルンゲ・クッタ法を時間積分に用いる線の方法が生まれた。

\* 〒615-8293 京都市西京区松室庄田町 2 6 - 3

† E-mail: satofuka.n@cocoa.plala.or.jp

この方法を、1982年にダブリンでの BAIL II (Boundary and Interior Layers II), 1983年にローマでの GAMM (Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik) コンファレンスで発表したところ大きな反響が得られた。特に、A. Jameson, R. Glowinski, J. Periaux らに注目され、その後の交流に繋がった。

帰国後は、多重格子法との組み合わせによる有理ルンゲ・クッタ法の更なる高速化と非圧縮性、非ニュートン、更に、希薄気体流へと、その応用分野の拡張に注力した。

#### 4 数値流体力学に関する国内外の会議への関与

CFD の概念が確立されるに伴い CFD に関する最初の国際会議、ICNMF (International Conference on Numerical Method in Fluid Dynamics) が1969年に旧ソ連のノボシビルスクで開催され、翌1970年に第2回が米国バークレイで、以後2年毎に1998年フランス、アルカションまで、引き続き世界各国で開催された。アジアでは1986年に北京で開催されたのが最初である。

此れに先立ち、宇宙研 (現 JAXA) の大島耕一教授の尽力により1985年に東京で ISCFD (International Symposium on Computational Fluid Dynamics) が開催された。従って、これがアジアで最初の CFD 会議と言える。以来、ISCFD は1999年ブレーメンでの第8回会議迄、隔年で開催された。

一方、欧州では GAMM の圧縮性ナビエ・ストークス流に関するワークショップが1985年に、圧縮性オイラー流に関するワークショップが1987年に、フランスで開催された。著者はどちらの会議にも、日本から唯一人参加、有理ルンゲ・クッタ法による検定課題に対する解を発表した。1986年には第1回 WCCM (World Congress on Computational Mechanics) がオースチンで、1987年には第1回 ICIAM (International Congress on Industrial and Applied Mathematics) がパリで開かれ、前者では Glowinski の、後者では O. Pirroneau の企画セッションに招待され講演した。WCCM には、NASA から CFD の研究者が多数出席していたが、バンケットで主催者側が計算力学への有限要素法の寄与のみを強調したので、エームスから参加していた故 J. Steger が“もう二度と参加しない”と激怒していたこと、圧縮性オイラー流のセッションで T. Hughes と私が GAMM ワークショップの検定課題に対する有限要素法と差分法による計算結果を、前後してそれぞれ発表したのが、当時の水準では差分法の結果の方が圧倒的に優れてお

り、NASA の連中が喜んだことが印象に残っている。

我が国においても、1987年に科学研究費補助金、重点領域研究に名古屋大学の保原充教授を代表者とする「数値流体力学」が1989年まで3年間の計画で採択され、その研究成果発表の場として、第1回数値流体力学シンポジウムが1987年12月に中央大学理工学部で開催され、以後今日まで毎年開催されている。さらに、1989年には第3回 ISCFD が名古屋で開催された。これらを契機として、1992年に日本数値流体力学学会が大島耕一教授を初代会長として設立された。引き続き、大島教授の努力により日ソ、日中などの2国間の CFD に特化した会議が創設された。

1990年代に入ると欧州版スペースシャトル開発の機運の高まりに呼応して、1<sup>st</sup> Workshop on Hypersonic Flows for Reentry Problems が1990年にフランスのアンティープで開かれ、日本から東北大学の南部教授と私が参加した。領域分割法に特化した国際会議、ICDDM (International Conference on Domain Decomposition Methods) の日本での開催の打診があり、状況把握のため、モスクワでの第4回会議に日本人として最初に参加した。この分野の当時の日本の研究状況から開催は次期尚早であり、結局1999年千葉大学の河原田教授が千葉で主催するまで延期された。また、1992年には ECCOMAS (European Community on Computational Methods in Applied Sciences) の第1回 CFD 会議がベルギーのブリュッセルで開催され、国際科学委員を委嘱されるとともに、乱流の企画セッションで招待講演を行った。

#### 5 計算機環境の変遷

CFD と計算機は切り離せない関係にあるが、私が CFD に携わり始めた当時使用したのは、演算速度がキロ FLOPS (Floating Point Operation per Second) オーダーのスカラー計算機、日立 HITAC5020 であった。京都工芸繊維大学に赴任してからは、富士通 FACOM230-60, 230-75, M-100, M200 と専ら京大大型計算機センターのスカラー計算機を使用した。エームスでは、当時主力の計算機は CDC6600 であり、有名な並列計算機 ILLIAC IV はスタンフォードの連中が乱流のシミュレーションに使っていた。帰国と前後して、ベクトル計算機の CRAY 1 が導入されたが、残念ながら使う機会がなかった。その後、我が国でもベクトル計算機の時代になり、京都では富士通の VP シリーズを主に使用した。

UNIX ワークステーションによる分散処理が主流

になってからは、東芝の UX300, UX700 に始まり、数十台に上る殆んどすべてのメーカーのワークステーションを研究室に導入した。特に HP720, HP730 等の RISC (Reduced Instruction Set Computer) ワークステーションを初めて使用したとき、その速さに感動したのを今も鮮明に覚えている。

計算機の性能は、メガ FLOPS, ギガ FLOPS のベクトル計算機, テラ FLOPS, さらに、ペタ FLOPS を超える超並列計算機へと 50 年弱の間に、アーキテクチャ、性能ともに目覚ましい進歩を遂げ、我が国でも 10 ペタ FLOPS 級の現在世界最高速の計算機「京」が開発された。我々もこのような動向に沿って、CFD に並列計算機を用いる研究を 1980 年代の後半から、nCUBE, FPS T-20 などの並列計算機を導入して、我が国で先駆的に行った。この分野に特化した国際会議、Parallel CFD Conference は 1989 年に米国のマンハッタンビーチで初めて開催され、以来毎年、欧米の各地で開かれてきたが、我々の実績が評価され、1994 年にアジアで最初の会議が京都で開催された。

## 6 ICCFD の開催から現在まで

CFD の国際会議は ICNMF D と ISCFD が 1985 年以降、交互に開催されて来たが、1996 年米国モンタレイでの ICNMF D で両者の統合の話が持ち上がり、協議が重ねられたが、結局、私が A. Lerat, M. Napolitano, M. Hafez らと交渉して、2000 年に第 1 回の統合会議、ICCFD (International Conference on Computational Fluid Dynamics) を京都で開催する合意を得、1998 年の ICNMF D で正式に承認された。京都での ICCFD に引き続き、私の還暦を記念する国際シンポジウムが Hafez, 森西, Periaux らによって開催された。ICCFD は第 2 回が 2002 年に豪州シドニーで、2008 年にはアジアで 2 回目の ICCFD5 が韓国ソウルで、今年、第 7 回がハワイで開催される。2014 年には ICCFD8 が中国北京で開催の予定である。

計算機がペタ FLOPS 級のスカラー超並列機が主流となった現在、並列加速率の向上、動的負荷分散が喫緊の課題となっている。国際会議に見る CFD 研究の現況は、従来の高次精度法、風上差分法、乱流モデリング、極超音速/反応性流などに加えて、バイオ、ナノ、マイクロ流れへの応用、格子生成時間の短縮の課題に対応してデカルト座標と埋め込み境界法の組み合わせによる複雑形状物体まわりの流れの計算が注力の対象となり、計算の大規模化に伴い、乱流モデルも RANS から LES に移行しつつあり、予測性の向上に従いシミュレーションから設計、特に

遺伝的アルゴリズム等との組み合わせによる最適設計への応用が実用化されつつある。また、流体力学単独の問題のみならず流体と構造の連成問題への関心も高まっている。

## 7 おわりに

10 年程前から、マルチスケールの流動現象の解明に関連して、格子ボルツマン法などのメソスコピックな解法に興味を持っている。特に、格子ボルツマン法には、BGK(Bhatnagar Gross Krook)模型方程式の差分分解に取り組んだ経験から早くから注目し、格子気体法を手始めに、格子ボルツマン法をこれまで CFD の分野で試みられた様々な手法と組み合わせ、高速化、広適用範囲化する試みに取り組んできた。特に、非圧縮非定常流の解法として準平衡格子ボルツマン法、正規化格子ボルツマン法などの最新の方法に興味を持っている。最近では、GPU による並列計算が各分野で流行となっているが、格子ボルツマン法は、元来、並列計算に適した方法であることより、現在、それを GPU に実装することに若い人たちと取り組んでいる。

本稿は第 25 回数値流体力学シンポジウムを大阪大学で開催するに当たり、我が国に於ける CFD 研究の発展を、私の個人的な関わりを通して披露して欲しいとの梶島実行委員長の依頼で行ったと特別講演を纏めたもので、関連するより詳しい内容は引用文献 1 を参照されたい。

## 引用文献

- 1) Satofuka, N.: *Forty Years of CFD in Japan: Personal Overview, Computational Fluid Dynamics Review 2010* (World Scientific, 2010) 493-515.