

〔特別企画〕

特別企画：数値流体力学シンポジウムの30年
～できたこと，できなかったこと～

東洋大学 総合情報学部／計算力学研究センター

東北大学 流体科学研究所

大阪大学 工学研究科

宇宙航空研究開発機構 研究開発部門

運輸安全委員会

理化学研究所 情報基盤センター

東京理科大学 工学部

九州大学 工学研究院

東京理科大学 工学部

田村 善昭*

大林 茂

梶島 岳夫

嶋 英志

中橋 和博

姫野 龍太郎

藤井 孝藏

古川 雅人

山本 誠

Special Session: 30 Years of CFD Symposium
～ What Have Been Done, What Have Not Been Done ～

*Yoshiaki Tamura, Information Sciences and Arts / Center for Computational Mechanics Research, Toyo University

Shigeru Obayashi, Institute of Fluid Science, Tohoku University

Takeo Kajishima, Graduate School of Engineering, Osaka University

Eiji Shima, Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency

Kazuhiro Nakahashi, Japan Transport Safety Board

Ryutaro Himeno, Advanced Center for Computing and Communication, RIKEN

Kozo Fujii, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science

Masato Furukawa, Faculty of Engineering, Kyushu University

Makoto Yamamoto, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science

*E-mail for correspondence: tamura@toyo.jp

1 はじめに

本稿は、平成28年12月12-14日に開催された第30回数値流体力学シンポジウム（以下、本シンポジウム）において行われた特別企画についてまとめたものである。この章では企画の趣旨説明と当日の内容を述べ、第2章では、登壇者の発表内容や意見をそれぞれがまとめて記し、第3章でコーディネーターである田村が一言を付け

加える構成になっている。

1.1 企画趣旨

本シンポジウムは今回で30回となる。本シンポジウムが、特に日本においてCFDの発展に大きく寄与してきたことは疑いようもない。田村は第3回から参加しているが、当初と比べると、分野も広くなり、また30年という年月もあって、参加者もだいぶ変わってきているように見受けられる。そこで、

- ・ 本シンポジウムの30年を振り返る.
- ・ (日本の) CFDの30年を振り返る.
- ・ できたことをちゃんと残してきたか.
- ・ できていないことを明らかにしているか.
- ・ 本シンポジウムは(CFDに対して)何かの役に立ってきたか. これからはどうか.

を考える機会にできればと思い、本シンポジウム実行委員長として田村がこの企画を提案した。企画の当初から、これは本シンポジウムの第1回からずっと参加されている方にご意見をいただくのがよいと思っていたので、まずはその人選から始め、上記のような内容をアンケート形式で問い合わせ、同時に当日、ご登壇いただけるかどうかを尋ねた。登壇者が少なければ、アンケートの内容を集約して田村が発表しようかと思っていたが、幸いにも8名の方に登壇いただけることになったので、田村は司会進行に徹することにした。一方で、ご都合により参加いただけなかった方などもあり、結果として登壇者の分野に偏りが出てしまったことは否めず、これは偏にコーディネーターである田村の不手際をお詫び申し上げる次第である。

1.2 当日の内容

特別企画は、シンポジウムの2日目、12月13日の午後3時20分から2時間に亘って開催された。はじめに、田村が上記の趣旨説明を行い、次に登壇候補者に送ったアンケートを示した。以下のようなものである。

1. この30年で何ができるようになったと思いますか.
2. ご自身はこの30年で何ができるようになりましたか.
3. この30年で、CFD業界としてチャレンジしたにも関わらずまだできていないことは何だと思いますか.
4. この30年で、CFD業界としてチャレンジしていないことは何だと思いますか.
5. 3. 4. を進めるには今後何が必要だと思いますか.
6. まとめると、この30年はCFDにとってどういふものであったと思いますか.

後に、CFD業界とは何を指すのかという問いがあったが、ここでは、「CFDを業とする職種・業種」のつもりで書いていて、具体的には「CFDの研究」「CFD関連ソフトウェアの開発」「CFDを利用する業務」等を想定している。この後、8名の登壇者が、アンケートの回答を含めて各自の意見を10分ずつ述べ、そのあとにフリーディスカッションを行った。本稿では、登壇者自身がそれらの意見・内容をまとめたものを次章に記す。

2 登壇者の意見

ここでは、各登壇者の意見を当日の登壇順(50音順)

に記す。なお、登壇者により内容や文体にばらつきはあるが、極力そのまま掲載している点はあらかじめご了解願いたい。

2.1 大林茂(東北大学)

この30年で、シミュレーション技術はソフト・ハードとも大きな進歩があった。特に、航空宇宙分野では、航空機の全機形状周りの流れ場を解き、設計に生かせるようになった。これは、企業が真剣にCFDを取り入れてきた成果であるともいえる。

筆者らのグループでは、主に多目的設計探索の開発と実用化に取組み、進化計算法や自己組織化マップなど、他分野のツールを取り入れた多分野融合設計支援ツールの開発と、設計学の理論に基づく最適化法の応用方法の考案を行った。流体分野を越えて他分野のアイデアを取り込むことが研究の進展につながったと思う。いつの時代も、分野を越えて融合するところに科学技術の新しい進展が芽生えるのだと思う。

CFDの進歩にかかわらず、まだできていないこととして、遷移のモデル化と現実の流れをあげたい。遷移がモデル化できれば現実的な計算時間でより優れた流体設計が可能になるし、現実の流れとして、例えば、今この瞬間の空港の実際の風況をもとに離発着する機体周りの流れをリアルタイムに解くことも、近似モデルを用いなければまだできていない。リアルタイムシミュレーションは、今後、センサー技術とデータ同化技術の発展により、IoTの活用方法として実用化されていくことになるだろう。

30年前に筆者らが初めて3次元ナビエ・ストークス方程式の計算を行った格子点数が 10^4 点、現在学会発表で見られる標準的な格子点数が 10^8 点、30年で1万～10万倍の発展があった。格子点数から見て、この30年は、シミュレーションの規模が約2年で2倍進歩してきた倍々ゲームの時代であったといえる。半導体ではムーアの法則が有名だが、CFD研究は、ハードの進歩にやや遅れ気味ながらも、よく追従して発展してきたといえるのではないだろうか。

2.2 梶島岳夫(大阪大学)

特別企画に先立って行われたアンケートの項目に沿いつつ、当日の議論をふまえて若干の加筆をして、CFDのこの30年に対する個人的見解を記しておきたい。

(1) 何ができるようになったか:

非圧縮の乱流については、流れ場の形状やレイノルズ数に大きな制約があるものの、実験に比べて遜色のない質の高いデータを取得できるだけでなく、基本的な乱流渦構造に関する新たな知見を提供できるレベルまで発達した。その要因としては、計算機の大規模化・高速化、解法の高精度化・高解像度化は無論であるが、CFDによ

って乱流現象の理解が深まったこと、着目すべき物理量に対する定量的な表現方法が進展したことが大きい。

(2) 自身の周辺で何ができるようになったか：

見た目には30年前にもある程度はできていたのかも知れないが、より適切な方法でできるようになったという意味では、多相系の乱流、流体・構造連成問題が挙げられる。当研究室では、十数年来にわたって開発・改良を続けている埋め込み境界法がたいへん有用であった。これにより粒子に対する旧来の質点モデルから解放され、粗さは残るものの個々の粒子の周りの流れが直接計算され、粒子と乱流との相互作用が伝熱も含めてとらえられるようになった。連成問題についても、非常に柔らかい構造物と流体の相互作用を扱うことが可能となり、生体流れへの応用の展望をもつことができるに至った。

(3) まだできていないことは何か：

乱流の壁法則、界面現象の取り扱い、流出・流入・遠方の条件など、境界の扱いに多くの未解決問題を残している。例えば乱流のLESでは現在のところ、壁近傍ではDNS並に細かい格子を設定しなければ、壁面応力を正確に算出できないようである。LESに適した普遍的な壁法則が見いだされない限り、工業的な要請である複雑流路の高レイノルズ数流れに応用することは難しいであろう。また、相界面の問題は分子レベルの現象と連続体力学の関係、遠方条件は詳細解析する領域と周囲の関係であり、いずれもマルチスケールの課題である。これらは当初から認識されているが、CFDとして使い物になる手法は完成していない。

(4) チャレンジすらしていないことは何か：

あらゆる可能性にチャレンジしたはずであるが、真の意味でチャレンジであったかどうか疑問なものもある。例えば、相変化のある界面や固体表面上の気液界面の挙動に対して、巨視的な収支から辻褃を合わせて界面の移動を決めるタイプの計算例はあるが、相変化速度や動的接触角を陽的に与えてナヴェ・ストークス式の計算に組み込んだ例は見当たらない。

(5) 今後何が必要か：

依然として「測定値と比較したのか」という質問はなくならないが、数値計算を手法として自立させる努力も必要である。地球環境の予測、重大な事故や災害など、実験が不可能または実施すべきでない課題に対して、数値計算に対する期待は高まる一方である。これらは利害の対立しやすい問題でもある。中立的な観点からCFDが信頼されるためには、いわゆるV&V (Verification and Validation)の方法の確立が不可欠である。一方、前述のCFD固有の課題に対しては、理論的な研究によって解決され、実験的な研究によって検証されなければならないであろう。

(6) この30年はCFDにとって何だったか：

計算スキームの開発や乱流モデルの研究については、前世紀にピークを過ぎたと感じている。例えばLESについては、1990年以降には枠組みを大きく変えるような提案はない。今世紀に入ってから、上述の未解決課題に対してはある程度の妥協をしつつ適用範囲を拡大し、産業応用的にはかなり成熟した期間であったと考える。実際、市販ソフトウェアの発展・充実は目を見張るものがある。一方、基礎研究としては、何かを解明するツールから何かを発見するツールとして自立する途上にあると思う。

2.3 嶋英志 (JAXA)

航空宇宙エンジニアリングにおけるCFDの30年

筆者の関わってきた航空宇宙エンジニアリングにおけるCFDのチャレンジのこれまでとこれからを軸に論じる。当シンポの始まった80年代半ば、航空分野での将来展望の一つが、CFDによる風洞実験の代替であった。まず、その観点からCFDの進歩を概観する。

航空機の飛行状態では空気力は最大の外力となり、性能への影響は甚大なので、流体力学的検討は死活的に重要である。高価かつ潜在的に危険な実機実験以外に、複雑な現実的形状周囲の流体现象把握手段としては長らく風洞実験に替わるものがなかった。航空機の高性能化に伴い、要求される風洞実験データ量は増大、技術的にも高度化が必要とされ、それに要する費用コストが莫大なものになる恐れがあった。

遷音速流れ解析の成功、ベクトル型スーパーコンピュータの登場、一般曲線座標や有限体積法による任意形状の計算可能性などを踏まえて、遠くない将来にCFDで風洞実験を代替することが現実の目標となったのが、80年代後半の状況であった。国内状況を振り返ると、RANS解析が翼型→三次元翼→翼胴形状と進み、STOL実験機的全機Euler解析、更には旅客機全機形態の自動格子生成を併用したNS解析による旅客機形態的全機解析が実現されるなど急速な進歩があった。また、90年代半ばにはNumerical Wind Tunnelと名付けられた当時世界最速のスーパーコンピュータがNALに設置され簡略化された三次元全機NS解析は充分手の届くものとなった。しかしながら、設計に使うにはコスト・期間ともに過大かつ定量性も十分ではなく、これを以て、風洞代替とはならなかった。

一方、90年代には、形状適合性に優れる非構造格子法とその格子生成法、軽量かつ堅牢な風上法の改良、複雑形状にも利用しやすい二方程式型乱流モデルの研究、等が進み、現在の空力解析ソフトウェアで用いられるアルゴリズムが出そろった。

2000年頃には、コンピュータの高速・低廉化も相まっ

てメーカーレベルでも3次元CFDが設計ツールとして十分利用可能になった。川崎 P-1, C-2 等が国内でCFDをフル適用して開発された初の機体となる。翼胴形状などでの基本設計には間に合わなかったが、設計開発上で発生する装備品荷重予測、逆噴射時の流れ場把握など風洞実験が難しい対象に威力を発揮した。実機開発では実験的検証は欠かせず、それを通じてCFDの検証も進み、開発時には風洞実験との食い違いが指摘されたものが、むしろCFDが正しかったことが実証されるなど、CFDに対する信頼性が上がった。

抵抗や最大揚力の定量的予測に関しては、現在も世界的WSが開催されている状況で、風洞実験を100%再現できる段階には達していない。また、実機レイノルズ数の乱流・乱流遷移予測は大きな課題で、RANS等による予測は望み薄、LESの実現はまだ先である。しかし、風洞実験ならば容易ということもなく風洞実験との一致を目標にするということにはなっていない。風洞実験を補助的に使いはするがCFDが航空機の主力空力設計ツールにのしあがったといえよう。

数値風洞の30年を振り返ると次の点が指摘できる。

- (1) 基本的なスキームや物理モデルは20-30年以前に提案されているものもある。先を見た研究の必要性を示している。
- (2) NALで全機RANS解析が実現されてからメーカーで利用されるには10年を要した。検証の進捗もあるがスパコンの低廉化も大きい。最新スパコンの利用は時代を10年先取りすることを意味する。
- (3) 実機開発において、基本問題と考えてきた翼胴形状計算での利点は限定的で、その他の部分の貢献が大きかった。開発開始前にはCFDで何ができるのか何が必要かの理解がなかった。真のニーズの把握には開発者との深いコミュニケーションが必要である。

一方、航空機から離れて宇宙機に目を向けると、一部の空力問題以外、同分野のCFDは航空機空力設計のレベルには達していない。CFDをこの分野の設計開発の主力にするチャレンジは、まさに現在進行中である。JAXAでは次期基幹液体ロケットエンジンの設計開発のために必要と考えられるCFD技術研究に10年ほど前から取り組んでいる。計算技術そのものは、空力等で使われるものと大差なく、現在の市販コードで十分な機能があった。しかし、例えば、液体酸素・液体水素を使うロケットエンジンの設計開発においては、極低温から3000°Cの高温、100気圧以上の高圧などでの、解析のベースとなる物性や物理モデルが明らかでない、あるいは検証が十分でない状況にあった。現在は、整備・検証も進み、RANS解析を用いて設計点での挙動を再現することは概ね可能となり、設計検証、実験の裏付け、一部の最適化設計など

に利用できるレベルに達している。しかし、例えば、実機ロケットエンジンでの壁面熱伝達の正確な予測（構造寿命やターボポンプ駆動のために重要）にはRANSでは現象が十分にとらえられず、LESでは計算能力の制限から100倍程度粗い格子しか取れない状況であり、計算手法・物理モデル含めて課題は多い。

今後、再利用宇宙システムの開発などにおいて、実験はますます困難になり、CFDの重要性はより増していくものと思われる。更に、これまでは実験的にしか確認できなかったものがCFDにより可能になれば、宇宙開発においてブレークスルーをもたらすようなチャレンジは数多く残されていると思われる。例えば、近年の人工衛星は10年を超えて運用されるが、その寿命を決めるものの一つが姿勢制御用ホイールの軸受け寿命であり、そこでは真空中でのグリース潤滑という未解明の現象がかかわっている。このように一見、流体とは関わりなさそうな分野であっても、実は流体が設計のカギを握っているものは他にも色々あるのではないかと考えている。

新しいチャレンジには20-30年先を見た基礎研究や開発現場との真摯な対話が重要であるというのが、数値風洞の30年から得た教訓である。

2.4 中橋和博（運輸安全委員会）

2.4.1 航空CFDの発展を振り返って

CFDは今日、さまざまな流体機械の開発や流体物理の解明に大きな役割を担っているが、ここでは航空CFDについての発展を振り返る。

航空CFDの発展を整理するのにいくつかの視点があるが、図1では筆者の研究歴の紹介も兼ねて計算格子で整理してみた。航空機では機体形状とその周りの空間を計算機内で忠実に再現することが大事であり、そのための計算格子が航空CFD実用化のキーファクターと考えるからである。

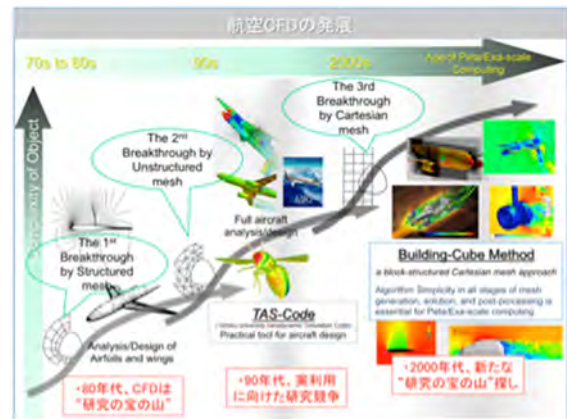


図1 航空CFDの発展

航空CFDの最初の大きな進展は、70年代に提案された境界適合格子（BFC）、いわゆる構造格子である。こ

れにより特に遷音速翼の解析・開発が可能となり，研究が加速した。

計算機の発達で機体全体が解析対象になると，構造格子の限界が見えてきた。それを打破するために非構造格子 CFD の研究が 80 年代後半から始まる。現在，CFD は航空機開発の必須のツールとして，単に風洞試験の置き換えとしてだけでなく，風洞試験だけでは得られない，より高性能な形状を生み出すための手段として不可欠になっている。MRJ 開発にもすべての飛行条件での解析・最適化に活用され高性能機体を実現している。

非構造格子 CFD は，2000 年代に入ってから市販ソフトも出てきて，研究としては，成長の S 字カーブの後半である成熟期に入った感がでてきた。高解像計算における非構造格子 CFD の限界も見えてくる。そのため，筆者も新たな方向性として直交格子 CFD の研究を開始した。他にも様々な挑戦がなされている。

計算機の進歩はまだ続き，その使われ方も変わるなか，CFD はまだ研究意欲を掻き立てる興味深い分野である。

2.4.2 次を目指して

CFD は流体力学に関連した理学・工学で大きな役割を果たしている。航空分野では，旅客機の空力性能を過去 30 年ほどで少なくとも 20% 以上改善しただろう。エンジンの性能・信頼性改善にも大きく貢献し，その御蔭で今日，私達が容易に海外旅行を楽しむことができるようになった。貢献が陽には見えないものの，CFD 開発をしてきた者が威張れる成果である。

しかし，CFD でもってゲーム・チェンジとなるような空飛ぶ機械ができたか，と問われると明確な回答を持たない。次世代機として研究開発が進む高効率な翼胴一体型機，あるいは低ブーム超音速機等には CFD が大きな役割を果たしてはいるものの，CFD なり流体力学が革新的な機械を創るなり驚きの発見をもたらしていないのは残念である。

是非とも，若い CFD・流体力学研究者が画期的な学術的発見や革新的な機械の創出といった，大きな驚きを我々にもたらしてくれることを期待したい。

2.4.3 おわりに

この 30 年間，わが国 CFD 研究の発展において“数値流体力学シンポジウム”の果たした役割は非常に大きい。そのシンポジウムを発足された先輩先生方の英断，またそのシンポジウムを育ててきた同僚あるいは後輩の関係者に敬意を表したい。

2.5 姫野龍太郎（理化学研究所）

自動車の空力解析にみる発展

自動車の空力設計は車の美的なデザインと密接に関係する。このため，一旦デザインが決まってから空力性能

だけを向上させようとしても大きな向上は期待できない。そこでデザイン初期から模型を作り風洞実験を行うことが行われてきた。しかしながら模型を使っても美的なデザイン検討と同時に進められないため，風洞実験を数値流体力学を使ってコンピュータに置き換える試みが 1980 年代から行われてきた。図 2 は 1985 年から 10 年間における乗用車の車体周りの流れの解析の変遷である。

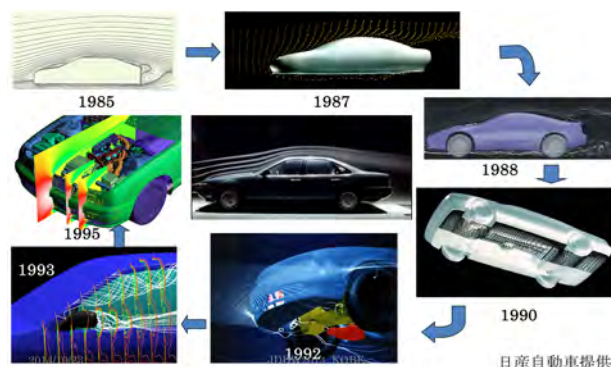


図 2 自動車の車周りの流れ解析の変遷(1985-1995 年)¹⁾

この変遷において，一番大きな貢献はコンピュータの速度向上とメモリー量の増大である。現在もこのコンピュータの性能向上は続いている。図 3 はこのコンピュータの速度向上のようすを 1940 年代から示したものである。

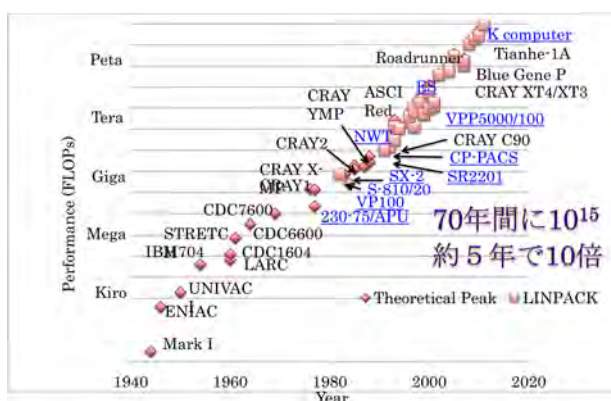


図 3 コンピュータの速度向上のようす¹⁾

自動車の車体周りの流れは航空機とは違い，基礎方程式も非圧縮性の仮定が成り立つ。遷音速での衝撃波が問題となる航空機に対して，大きな剥離のある後流での圧力を正確に求める必要がある。このように，航空機周りの流れの解析で発展した計算方法をそのまま適用することはできない。しかし，当然のことながら航空機を対象にした数値流体力学の発展は良い教師となり，メッシュ生成や計算結果の可視化に関しては直接的に活用が可能であった。このソルバー・プリ・ポスト処理におけるソフトウェアの開発と発展が，この領域の発展を支えた二つ目の大きな要素である。

このように1980年代から1990年代にかけて、国産のスーパーコンピュータの発達と普及によって、日本では航空機と自動車の両分野で世界的に見ても最先端の結果を出してきた。残念なのはそれらを支えたソフトウェアは、多くの場合共有されず、一般に広く使われるようになってこなかった。Linuxに代表されるようにオープンソースとして公開し、多くの人が改良や機能追加などに協力するような方策を、我々の世代がとらなかつたことが反省点である。おそらく今でもオープンにする価値があるソフトウェアはあることと思う。これを契機に研究室や個人で保管・利用されているソフトウェアをオープンソースとして、これからの世代の役に立つようなライブラリーを整備していこうではないか。

2.6 藤井孝藏（東京理科大学）

CFDの今後に向けて²⁾

第1回の数値流体力学シンポジウムから30年、数値流体力学は大きな発展を遂げたことは言うまでもない。図4に第1回（1987年）と第30回（2016年）のセッション構成の比較を示す。特に気がつくことは、(1)乱流や渦流れは相変わらず大きな課題である、(2)30年前はナビエ・ストークス方程式を解くこと自体が目新しかったが、現在は当たり前になりセッション構成が応用別になっている、(3)計算法は相変わらず重要だが、差分法、有限体積法、有限要素法といった分類からより幅広い手法へと変化している、(4)純粋な流体解析から多分野融合の解析が大きく増加した、といった点に気づく。この間、コンピュータの速度はおよそムーアの法則に従って10年ごとに百倍近く向上してきた。結果、1987年当時に世界最先端のスーパーコンピュータを必要とした計算が手元のPCでもできる時代となり、大学や研究機関だけでなく産業界でのCFD利用も大いに進んだ。計算手法は洗練されたものへと変化し、形状は複雑になり、対象とする流れも多岐になった。大いなる発展といえる。

しかし、広い視野で考えてみると、既存の製品や既存の流れ場を対象とした解析の枠を超えていないという意味で、やっていること自体には大きな変化がないとも言える。数値シミュレーションに代表される計算科学が「第3の科学」と呼ばれる所以は、解析や試験の代替（コスト削減）や複雑現象の解明（新たな解析手段の獲得）に加えて、バーチャル空間の構築の容易さにある。すなわち、手軽に斬新なアイデアを試すことができるというのが元々数値シミュレーションの持つ大きな利点であった。コスト削減や新たな解析手段獲得といった観点での利用は大きく進んだし、このことは重要だが、「思いもかけない製品」とか「驚くような考え方」とか、シミュ

レーションが本来持つ最大の利点を活かす研究成果はほとんど見られない。CFDという商品は、第1回のシンポジウムが開催された80年代に急激に発展し、今それが定着する時代に至った。「もう（純粋な）流体のCFD解析では新しい研究テーマはない」という意見を聞くこともあるが、そのような意識では普及以上のCFDの発展はなく、その有用性もじり貧かもしれない。CFDの黎明期からこのシンポジウムに参加してきた立場から、「新たなものを創造する」という第2世代のCFD利用が多くの若い研究者、技術者から生まれ、さらなる飛躍を遂げることを大いに期待したい。

第1回 1987年12月22日-24日	第30回 2016年12月12日-14日
特別講演 7件	特別企画 1件
以下はセッション数	以下はセッション数(3以上のみ)
乱流 5	乱流、渦、波動 6
熱・反応を伴う流れ 1	混相流体、相変化、反応、界面 5
希薄流 1	種々の連成問題 4
高速流 2	複雑流体の流れ 3
各種流れ問題 2	地域環境と防災 8
非圧縮性NS方程式 3	輸送用機械に関連する流れ 7
圧縮性NS方程式 5	エネルギーに関連する流れ 4
計算法 3	非圧縮流れ・圧縮流れ解法 3
渦法 2	連続体力学的解法 4
有限要素法 2	離散要素型解法 4
境界要素法 2	原子・分子の流れ 3
言語とGraphics 1	
3日間 36セッション	その他を含め61セッション

図4 数値流体力学シンポジウム —第1回と第30回のセッション構成比較

2.7 古川雅人（九州大学）

ターボ機械における圧縮性流れのCFDという観点から、この30年間にわたるCFDの発展を振り返るとともに、今後の展開への期待について述べる。

1980年代はベクトル型スーパーコンピュータの普及が進むとともに、TVDスキームに代表されるような数値計算スキームの提案、乱流モデルの構築、ならびに計算格子生成技術の開発が精力的に展開され、正にCFDの創成期であった。この頃には、衝撃波を伴う二次元遷音速翼列流れを定量的にも再現できるようになり、直線（二次元）翼列試験がCFDで代替されつつあった。90年代には、スーパーコンピュータやワークステーションなどの計算機環境のさらなる向上と商用コードの普及が図られて、CFDは成熟期に入り、ターボ機械についても三次元CFD解析の実施が容易となった。2000年代以降は、スーパーコンピュータがベクトル型から超並列スカラ型へと移行するとともに、CFDと最適化手法との融合が一段と進められ、ターボ機械の空力設計においてもCFDは不可欠なものとなり、CFDは実用期に達したと言える。

以上のとおり、ターボ機械の場合、単相流れであれば、全体性能特性の予測だけでなく、非定常三次元流動現象

の解明が可能となり、CFDはターボ機械の設計ツールとして実用に供されるようになった。しかしながら、ターボ機械のように複雑な内部流れ場における流動現象の解明では、問題となる現象をCFD計算結果から抽出すること自体が困難であることが多い。そのような場合には、知的可視化手法（渦構造の同定法、限界流線のトポロジー解析など）を適用することにより、計算結果データから流体力学的に意味ある情報を的確に抽出することが可能である。筆者は大規模CFD計算結果に知的可視化手法を適用することによって、実験で捉えることが容易でない、翼端漏れ渦の崩壊現象や旋回失速の初生メカニズムなどを解明することができた。今後、計算機の性能向上と低廉化がさらに進むことにより、超大規模CFD計算がますます身近になってくることを考えると、ビッグデータとしてのCFD計算結果から現象を抽出するための技術、すなわちデータマイニング技術が今以上に重要になってくることは言うまでもない。

ターボ機械のCFD分野において今後のチャレンジが期待されることとして、以下の項目を列挙したい。いずれもターボ機械のCFDに特有のことではないが、あえて挙げておく。

- (1) 非定常CFD結果から得られた知見の設計への反映
- (2) 特性時間のスケールが大きく異なるマルチフィジックス現象の定量的予測
- (3) 相変化を伴う流れ場のマイクロからマクロスケールまでの直接計算
- (4) 前処理および後処理への人工知能（知識工学）の積極的導入の推進

上記(1)については、非定常CFD解析がますます普及するであろうことを考えると、非定常CFDから得られた知見を設計へ反映させる方法論を確立することが大いに望まれる。上記(2)の具体的な事例として圧縮機のサージング予測が挙げられるが、この現象は圧縮機での失速現象と配管系全体の1次元的な流体振動現象のカップリングの結果から発生する現象であり、両現象を支配する特性時間のスケールが大きく異なることから、非定常三次元計算により実用的な時間内で圧縮機サージングを予測することは未だにできていない。上記(3)は蒸気タービンでの凝縮やポンプおよび水車でのキャビテーションを伴う流動現象にかかわる項目であるが、相変化の核生成から成長までのプロセスを再現するミクロスケールの流れ計算と相変化を含むマクロスケールの流れ計算とを同時に取り扱う試みはまだ着手できていない。言うまでもなく、この項目(3)は項目(2)と本質的に同じ要素を含んでいる。上記(4)については、計算格子生成および可視化（データマイニング）への人工知能（知識工学）の適用は僅かに

散在するものの、その積極的導入は進んでおらず、今後の展開が期待される。以上のとおり、解決すべきテーマは山積しており、若い研究者や技術者が失敗を恐れず、大いにチャレンジしていくことを望むしだいである。

2.8 山本誠（東京理科大学）

この30年間でCFDが長足の進歩を遂げたことは、誰も異論を挟むことができない事実であろう。30年前には、当時のスーパーコンピュータを用いても、単純形状の物体や流路に対して何とか3次元計算ができる程度の技術レベルであった。今から思えば、格子依存性のない解が本当に得られていたのか怪しい状況であったと言える。それが現在では、各種流体機械・機器の設計にCFDが妥当な精度で活用できるようになっている（少なくとも単相流では）。これは、RANSやLESのような乱流モデルを始めとする物理モデルや計算スキームが洗練され、実用的な精度で解が得られるようになったことによると思われる。もちろん、コンピュータの低廉化や高速化、記憶容量の大規模化もCFDの普及に大いに役立っていることは言うまでもないであろう。

著者の研究室でも、1990年代には乱流モデルの開発や流体機械の2次元計算が研究の主流だったが、現在では、卒業論文においても、ほとんどの学生が実用問題の3次元計算に取り組んでいる。さらに、ここ10年ほどは、産業界で技術課題となっているサンドエロージョン、着氷、粒子付着、固気液3相流などのマルチフィジックス現象がデスクトップPCで解けるようになってきている。2000年頃には、マルチフィジックス現象のシミュレーションに手も足も出なかったことを考えると、CFDの長足の進歩には目を見張るものがある。

しかしながら、未だに解決していない問題も残されている。例えば、平板境界層などのような理想的な状況ではなく、自動車やターボ機械など実用的な機械において生じる層流/乱流遷移の正確な予測はまだ十分達成できていない。実験データに基づくRANS系の遷移モデルが産業界では利用されているが、その汎用性や普遍性には改善の余地が大きく残されている。遷移現象の物理的理解も30年前と大きくは変わっていないことを考えると、理論、実験、数値計算を駆使して遷移現象の理解を深めることが必要であろう。また、フラッターなど流体構造連成の高精度な予測も実現できていない問題のように思われる。流体構造連成は実用機械において頻繁に遭遇する現象であり、機械の故障や破壊に直結するため、構造解析とCFDのより精緻なカップリング手法の開発が必要である。コンピュータがもう少し高速化して記憶容量も大きくなれば、解決に至るような気がするが、どうであろうか。

一方、CFD研究者、技術者がこの30年間ほとんど取

り組んでこなかったテーマも存在する。機械は運転を続けていると必ず劣化が生じる。これまでのCFDでは、設計時の理想的状態を模擬することばかりに目が向けられて来たが、経年変化により機械が劣化した状態や破壊に至るプロセスのシミュレーションが行われた例は著者が知る限り存在しない。機械のライフサイクルを通じた性能予測が可能になれば、メンテナンスのタイミングの設定やライフサイクル全体の運用効率の評価も可能になり、機械の経済的価値を飛躍的に高めることができるように思われる。また、これだけCFDが普及したにもかかわらず、残念ながら、CFDに基づいて新たな機械が開発されたという話を聞いたことがない。CFDは流体现象を理解するための強力なツールであるが、所詮はツールであり、最終的な目的は、CFDというツールを使って社会により便利なものを提供し、人々をより幸福にすることにあるであろう。その意味では、CFDはまだ世の中の役に立っているとは言えないのではないだろうか。

最後に、これまではCFDにとって実用化に邁進した30年だったのではないかと思う。しかし、上述のように、未解決の問題や未着手の問題もまだまだ数多く残されている。次の30年は、CFDが真に社会に役立つツールに育つことを祈念している。

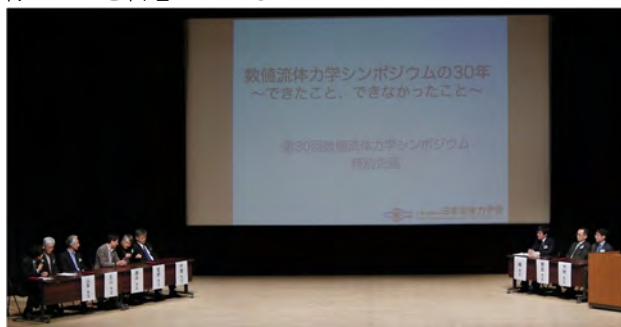


図5 フリーディスカッションの様子 (画像は合成)

3 コーディネーターから

まず、当日はご都合でご登壇できなかったが、東京大学の加藤千幸先生からアンケートの回答をいただいていたので、田村が簡単に紹介した。要点のみ記すと、LESの産業応用が実用的になってきたこと、ただし、LESの壁面モデルはまだ開発途上であること、2000年ころからは大きな進歩は見られないのではないかと、などであ

る。

コーディネーターの役割は、意見を述べることや、登壇者の意見をまとめて1つの方向に結論を導くことではないと考えていたので、当日も質問はするが、話をまとめるようなことはしなかった。結果として、第2章にあるように、登壇者それぞれで、見方も一通りではないが、いずれもこれまでに業績を上げられた方々の発言だけに重みがある。どの意見に共感し、あるいは少し異なる印象を持たれるかは、企画を聴講された方々や本稿の読者諸氏に委ねたいと思う。

フリーディスカッション (図5) において、コーディネーターから、「最近、大学等では研究業績として投稿論文(やその被引用)数が求められており、国内会議での発表は業績にならない。そのような状況で、今後も本シンポジウムは必要か?」という少しひねくれた質問を試みた。登壇者からは「必要である」との答えが大勢を占め、理由として、土木・建築・機械・航空などの幅広い分野に跨ったユニークなシンポジウムであることが上げられた。上記に留まらず、分野を拡大していくことが本シンポジウムの1つの方向性かもしれない。

4 おわりに

本稿は、第30回数値流体力学シンポジウムで行われた特別企画の報告であり、当日の様子が多少なりとも伝われば幸いである。最後に、本特別企画に参加/登壇された方々や客席で聴講された方々、シンポジウム会場となったタワーホール船堀および特別企画を行った大ホールの東京舞台照明に感謝申し上げたい。

引用文献

- 1) 姫野龍太郎: 絵でわかるスーパーコンピュータ (講談社, 2012).
- 2) Fujii, K.: Progress and future prospects of CFD in aerospace-Wind tunnel and beyond, *Progress in Aerospace Sciences*, 41 (2005) 455-470.