

水力学・水理学研究連絡委員会報告

-水力学・水理学分野における計算流体力学の現状と課題-

平成9年2月28日

日本学術会議
水力学・水理学研究連絡委員会

この報告は、第16期日本学術会議水力学・水理学研究連絡委員会の審議結果を取りまとめ発表するものである。

委員長 榎木 亨（第5部会員，大阪産業大学工学部教授）

幹事 岩田 好一朗（名古屋大学工学部教授）

大橋 行三（愛媛大学農学部教授）

梶谷 尚（第5部会員，熊本工業大学工学部教授）

坂口 忠司（神戸大学工学部教授）

三宅 裕（大阪大学工学部教授）

委員 池田 駿介（東京工業大学工学部教授）

井上 和也（京都大学防災研究所教授）

大西 亮一（農業工学研究所水工部長）

神山 新一（東北大学流体科学研究所教授）

亀本 喬司（横浜国立大学工学部教授）

中武 一明（九州大学工学部教授）

姫野 洋司（大阪府立大学工学部教授）

（敬称略）

1. はじめに

日本学術会議第5部水力学・水理学研究連絡委員会は第16期の活動の一環として、最近進展の著しい計算流体力学（Computational Fluid Dynamics, 以下CFDと称する）について、水力学・水理学における普及の状況や将来展望など一定の評価を行うために、関連分野の学会会員を通じてアンケート調査を実施した。本報告はその結果をまとめたものである。

アンケート調査は、機械工学、造船学、農業土木工学、混相流工学、土木工学などの水力学・水理学関連の分野の中の、主としてCFDに関係する研究者、開発担当者を対象とし、平成7年末から平成8年にかけて実施された。回答者の総数は約150名、所属は大学、国公立研究所、民間企業の開発・設計部門や研究所である。アンケートの設問は、回答者の所属、研究経歴や現在の業務、使用した計算機の機種や、CFD関連のソフトウェア、CFDについての現時点での評価や問題点、今後のCFDの展望など多岐にわたっている。

本委員会では、まず各分野についてアンケートのまとめの作業を行い、その結果をそれぞれの分野の学協会等に速報的にフィードバックした。その後、本委員会において各分野の調査結果を比較検討するとともに総合的に評価し、本報告書として取りまとめたものである。

総合取りまとめの方針は、(1)全分野に共通した多数意見の集約、(2)分野間で異なる特徴的な意見の抽出、(3)少数意見であっても将来的に重要と思われる知見の抽出、などを基本とした。また、CFDを用いた研究テーマは各分野内でも多岐にわたっており、しかも分野間ではほとんど共通性がない。これらを統合する際には「流動現象解明」や「流体設計支援」といった概念集約化されたキーワードを用いることにした。さらに、各分野で回答数にかなりの差があることからここでは敢えて回答総数の比較は行わず、各分野での特徴的な意見を取り上げて比較、評価することとした。

2. CFDの開発・利用の現状

2.1 計算環境（設問 1,2,3）

回答者のほとんどは、これまでその専門分野においてCFDコードの開発、CFDを用いた流動解析、設計、流体機器の性能評価に携わって来た研究者・技術者である。使用して来た計算機環境は、スーパーコンピュータ、汎用大型機、ワークステーションであり、CFD関連のソフトウェアは、大学や国公立研究所ではCFDの本計算部分についてはほとんどが自作であり、計算の前処理・後処理にグラフィック関連の処理ソフトウェアが使われている。一方民間企業においては、独自開発のソフトウェアの使用はむしろ少なく、PHENICS, STREAM, FLOW3D, STAR-CDなどの市販の伝熱流動解析コードや、大学との共同開発によるソフトウェアを用いている。

2.2 CFD関連業務（設問 4）

回答者のCFDの関連業務は大別すると研究（流場解析を含む）と設計・評価などの応用に分けられるが、「研究」業務の方がやや多い程度であった。CFDの方法では、有限体積法、有限要素法、差分法など様々な方法が採用されており、対象とする流れは、非圧縮性流れという基本的な流動だけでなく、超高速流、希薄気体、プラズマ、非定常流、乱流、自由表面流、電磁流、気液二相流、固液二相流、密度伝熱流、燃焼、化学反応といった、流動・伝熱・電磁場・反応が複合的に組み合わせられた流れが扱われている。さらに、CFD解析の対象となる技術分野では、熱流体機器、原子炉、船用機器、電子機器の冷却、大気、河川、海洋環境、水利施設、水環境、など、「流れ」を伴うあらゆる自然現象、人工システムに及んでいる。

2.3 CFDの果たした役割（設問 5）

現在CFDによって何がどこまで明らかになっているか？ ここで、個々の計算例について正確な評価を行うことは不可能であるが、幾つかの具体例を上げよう。

室内や建物内部の気流や内燃機関の中の燃焼の様子など、温度や密度変化・混相流を伴う内部流に関してはかなりの計算例が蓄積されている。衝撃波を伴う圧縮性流れ、物体背後の渦流動、工場排水や大阪湾内での物質拡散などの熱対流拡散流れ、河川の洪水流や鳴門の渦、船舶の周りの流れや海岸の津波・砕波などの液面・自由表面を伴う流れの流動解析、あるいは海洋流、気象、成層圏における物質流動などのスケールの大きい流れ、逆に流れの中の乱れの微細構造など、およそ連続体とみなせる物質のあらゆる流動現象がCFDの対象になっている。さらに、気体・液体・固体の混相流についても様々な流れの解析が試みられている。

これらCFDの成果に対して、アンケートによる専門家の評価は次のようなものとなった。まず流体機器の設計・開発・評価については、流場や流体力の解析、設計工数の短縮、最適化、異常現象の解明などの点において、極めて有用な設計開発のツールと評価されている。また、水圏、気圏における環境評価、原子炉等の安全性評価など、実機や模型による実験が困難な場合の安全・環境アセスメントにCFDが活用されている。

一方研究面においては、CFDの特徴として、膨大な時空間データ、高解像度の視覚的手段での現象再現、物理実験の困難あるいは不可能な現象に対する実験代替、実験との併用、新現象の発見、解析解の困難の克服、異なる時間スケールでの現象の再現などが指摘されており、極めて重要な研究手段として認識されていることがわかる。またCFDだけでなく、理論・実験・CFDの間の相補的役割の重要性も併せて指摘されている。

以上のように、CFDは研究のみならず技術応用の面においても極めて重要な役割を果たして来たことが肯定的に評価されている。これは回答者がCFD関連の業務の従事者であることにもよるが、これら専門家の評価は、今後一般の評価として定着するきっかけとなるものと期待される。

2.4 CFDの問題点（設問 6）

上記のような肯定的評価の一方で、現状のCFDの問題点、未達成分野についてもかなりの指摘があった。まずソフトウェアについては、物理モデルに関する問題の指摘が多くあった。すなわち乱流モデル、界面モデル、混相乱流、化学反応、密度混合など様々な物理過程における物理モデルがなお不十分であることが指摘されている。さらに計算技術においても、格子生成、解法スキーム（手順）、計算コードの汎用化などの点で改善されるべき点が指摘された。

また、計算機ハードウェアに関する問題点として、計算速度、メモリ、並列処理などが依然として不足している点が挙げられている。また計算機利用環境として、ネットワークの情報量増大、可視化ソフトウェアの充実などが指摘された。

3. CFDの将来（設問 7）

3.1 近未来（5,6年後）の課題

CFDの今後の発達について、数年後（5,6年後）と10年後に分けた設問で回答を

得た。これらは、CFDの専門家によるいわば未来予測でもある。まず、数年後については、自動格子生成技術の発達、高精度化・高安定化・汎用化などのスキームの高度化があげられ、計算機利用技術については、並列計算機利用の増大、目的別専用化、PC（パーソナルコンピュータ）やEWS（エンジニアリングワークステーション）などの小型計算機の高性能化などが指摘（期待）されている。また、物理モデルについては意見が別れている面もある。工学的乱流モデルの中で現在用いられている2方程式k- ϵ 乱流モデルの代替あるいは改良について、開発の専門家にとっては数年後の状況が未だ明確になっていない反面、造船学や土木工学など乱流モデルの利用者の側には、数年後に乱流モデルの高度化が進展するとの期待や要望に基づく回答が多くよせられた。また、LES（Large Eddy Simulation）の進展や混相流モデルの高度化についても期待がよせられた。一般的なCFDの数年後の未来像については、回答者の多くは肯定的であり、設計支援ツールの実用化、適用対象流場の多様化、化学反応モデルの進展、分子動力学への適用、マルチメディア対応など、現時点での問題点の多くが解決に向かうと予想している。

3.2 10年後の展望

10年後を目標としたCFDの将来展望については、むしろ現状の問題点に縛られない、自由な発想に基づく様々な意見が多々見られた。これについては多数意見の集約だけでなく、むしろ少数意見を重視することも必要であると考えられるので、以下ではできる限りここに紹介する。

まず、計算スキームについては次のような点があげられた。

- ・数値粘性に依存しないスキームの開発
- ・汎用高精度高安定のスキームの進展
- ・自動格子生成
- ・スペクトルエレメント法の発達
- ・リアルタイムの可視化
- ・PC（パーソナルコンピュータ）を用いたCFDの実用化
- ・学習機能保有CFD
- ・並列計算用スキームの開発
- ・最適化技術の構築

つぎに、計算機利用技術としては

- ・並列計算の高度化、普及化、低価格化
- ・高速EWSのPC化

- ・画像処理技術の高度化
- ・仮想流体実験室
- ・目的別ハードウェアの実現
- ・ネットワークコンピューティング

などがあげられた。計算機の利用環境が飛躍的に進展することの期待が現れているものと解される。

計算モデルについての10年後の展望は、開発者にとっては必ずしも明かるいものではなく、意見はむしろまとまっていらないが、利用者にとっての期待は極めて大きいことが察せられる。

- ・RANS（レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式）モデルの進展
- ・極超音速流れに対する乱流モデル
- ・圧縮性、変物性媒体へのLESの実用化
- ・モデル不要の直接計算
- ・悲観論として乱流モデルに本質的な進歩はない。
- ・混相流モデルは進展、直接シミュレーションも可能
- ・分子レベルでの現象把握
- ・流体騒音モデル、多次元2流体モデルの実用化
- ・大規模粒子追跡計算の実現化（10億個）
- ・各種スキームの融合
- ・統一的な物理モデルの出現
- ・宇宙大気海洋統合モデル
- ・広域水理モデル用乱流モデルの開発

最後に、10年後のCFDの未来像についてはかなり明るい未来像が提示されている。

- ・CFDが科学のあらゆる分野にツールとして組み込まれる。
- ・学問分野としてのCFDの消滅
- ・代替実験としてのツール化の進展、環境制御への応用
- ・計算機環境のダウンサイジングの進展、PC化
- ・分子レベル実用計算システムと制御
- ・摩擦抵抗の物理解明と抵抗低減
- ・乱流現象の解明と制御
- ・宇宙開発への展開
- ・地球規模、大規模現象の解明と制御

- ・ 広域水理モデルによる実時間管理・制御
- ・ 実機性能予測，数値水槽
- ・ 混相流動の制御に着手
- ・ CAE（コンピュータ支援エンジニアリング）/CFD援用設計・評価の進展
- ・ VR（Virtual Reality）による解析結果の評価

このように，CFDは分子レベルから地球，宇宙レベルの問題にまで幅広くかつ極めてUser-Friendlyな環境で利用され，現象の解明，予測，制御の研究ツールとして，また開発設計の主体的ツールとして活用されるであろうことが指摘されている。さらにCFDがこれらの社会的技術的ニーズに対応した後は，科学の領域としてのCFDの消滅を予測する見解も現れた。

4. あとがき

今回水力学・水理学関連のCFDアンケート調査をまとめた結果，次のような点が明らかとなった。

CFDは現在，研究・設計・評価の広範囲な分野で利用されており，計算手法も有限体積法，有限要素法，差分法などの各種手法が用いられ，流れは非圧縮性流れだけでなく流動・伝熱・電磁場・反応が複合的に組み合わせられた流れが扱われている。対象となる技術分野では，熱流体機器，原子炉，船用機器，電子機器の冷却，大気，河川，海洋環境，水利施設，水環境，など，「流れ」を伴うあらゆる自然現象，人工システムに及んでおり，CFDが有用なツールとして活用されていることが確認された。

CFDがこれまでに果たした役割として，流場や流体力の解析，設計工数の短縮，最適化，異常現象の解明などの点において有用な設計開発のツールとしての評価がなされ，また環境評価，原子炉等の安全性評価など，実機や模型による実験が困難な場合の安全・環境アセスメントに有用であるとされた。研究面においては，物理実験の困難な現象に対する現象再現，実験代替や，新現象の発見，解析解の困難の克服，異なる時間スケールでの現象再現など，CFDが理論・実験と並ぶ研究手段として確立されたと認識された。

一方，これら肯定的評価だけでなく，現状のCFDの問題点についても多くの点が指摘された。まずソフトウェアについては，対象とする流れの物理モデルの不備ないしは不完全さであり，また計算技術面では格子生成，解法スキーム，ソルバーの汎用化などの点で改善されるべき点が指摘されている。また，計算機ハードウェアに関する問題点として，計算速度，メモリ，並列処理などが依然として不足している点が挙

げられているほか、計算機利用環境として、ネットワークの情報量増大、可視化ソフトウェアの充実などが指摘された。

CFDの今後の発達については、まず数年後、自動格子生成技術の発達、スキームの高度化、さらに並列計算機の利用増大、目的別専用化、小型計算機の高性能化などが指摘ないしは期待されている。また物理モデルについては現在の2方程式乱流モデルの改良について、開発者側にとっては数年後の状況がLES(Large Eddy Simulation)なども含めて未だ明確になっていない反面、造船学や土木工学など乱流モデルの利用者の側には、数年後に乱流モデルの高度化が進展するとの期待や要望が根強くあることが明らかとなった。さらにCFDの近未来像については、回答者の多くは肯定的であり、設計支援ツールの実用化、適用対象流場の多様化、化学反応モデルの進展、分子動力学への適用、マルチメディア対応など、現時点での問題点の多くが解決に向かうと予想している。

一方、10年後を目標としたCFDの将来展望については、むしろ現状の問題点にとらわれない様々な意見が多々見られた。上にあげた計算スキームや物理モデルの進展とともに、分子レベルから地球、宇宙レベルの問題にまで幅広く、かつ極めて使い易いものとなり、現象の解明、予測、制御の研究ツールとして、また開発設計の主体的ツールとして活用されるであろうことが期待されている。

以上のように、CFDは現時点において計算スキームや物理モデル、計算環境に関して様々な問題点をかかえているものの、現状でもかなり流場解析や設計支援に役立っていること、さらに、今後10年間でそれらの問題点を克服した上で更に高度かつ広範囲の利用が期待されていることが判明した。もともと、そのためにはCFDの利用という技術ニーズの更なる進展、CFD開発者や計算機メーカーの一層の努力が必要であることは明らかであり、本アンケート結果がそのために少しでも役立つことを期待したい。

以上