CFD 思い出話- 航空宇宙関連を中心に

30 years' CFD Research - focusing on the aerospace applications

藤井　孝藏*,
*文部科学省宇宙科学研究所

Kozo Fujii
*The Institute of Space and Astronautical Science
E-mail:fujii@flab.eng.isas.ac.jp

1.　はじめに

数値流体力学会ができて 12 年余りになる．賛否は分かれるところであろうが，いろいろないきさつから流体力学会と一体化することになった．この原稿に何が期待されているか私自身もう一つ把握できていないが，転換期という意味で思い出話をしてみようと思う．どうしても身の廻りで起こった変化が中心になるし，場合によっては大宮司先生が書かれる記事との重複もあるかも知れないがご容赦いただきたい．なお， CFD 研究の最近の展開についてはすでに流体力学会誌「ながれ」の第 21 巻，第 1 号に私なりの意見を述べさせていただいているのでそちらを参照いただきたい．ここでの報告は，主にこれまでの経緯を綴った話題提供である．

2.　70 年代から 80 年はじめ

1970 年代は航空宇宙分野での CFD の基礎が出来た時期と言っていいであろう．ポテンシャルやオイラー方程式ではあったが，AIAA（アメリカ航空宇宙学会）の会議において遷音速における 2 次元翼型まわりの流れが計算できること，課題であった翼面上の局所衝撃波がこのような実用形状でも自動的に捕獲できることが示された．当時の論文を読み返してみると，すでに解適合法のアイデアや直交格子でいかに翼を扱うかに関するアイデアなどが示されていて驚いてしまう．私自身は，宇宙研（当時東京大学宇宙航空研究所）の大学院生としてシミュレーションに関する研究を始めていたが，航空分野の論文を読んだり，国内学会に参加する程度で実体験として海外での研究動向を知るすべを知らなかった．もちろん航空以外の分野での活動などはほとんど知らなかった．扱っていたのはポテンシャル流れである．私の記憶に間違いがなければ，すでに東京大学工学系研究科航空学専攻（当時）では大島耕一先生の大学院講義「数値流体力学」が始まっていた．70 年代，機械系などの分野でどのような研究が進んでいたかの知識はないが，少なくともターボ機械関連の雑誌に CFD 絡みの記事がいくつもあったことを記憶している．乱流モデルなどについての記事も多数あったと思う．

この時代，少なくとも航空宇宙分野に関して言えば日本の CFD は世界に全く認知されていなかったし，実際に影響力も無い時代ではなかったかと思う．

3.　1980 年代

1980 年 に開かれた第 7 回の ICNMFD(International Conference on Numerical Methods in

©日本数値流体力学会

Fluid Dynamics)会議は日本の CFD,特に航空関係の CFD にとって大切な会議であったと思う．開催場所は NASA Ames R．C.とスタンフォード大学であった．日本からの参加者は，大島先生をはじめ私も含めて 7,8 名であったと思う.参加者のほとんどがその後 NASA Ames Research Center に NRC 研究員として滞在することになる．当時この会議はシングルセッション制で総ての参加者が１つの大会場で講演を聞く形式であっただけに発表にはかなりの緊張感を強いられたことを記憶している．多くの方がご存じのように，この ICNMFD 会議は CFD の計算法などを知る上では最も重要な会議であったが，そのようなことは参加するまで知る由もなかった．私自身は，宇宙研の学術振興会奨励研究員であったが，たまたま案内が廻ってきたので博士論文を発表するいい機会と考えて応募した．今考えると，大島先生がみなに会議案内を廻されたのではないかと思う．発表も聞いてはいたが Flux，Flux Jacobian とか MultiGrid などという言葉の意味が全く分からずそこで何が話されたのかを私が理解できたのは NASA Ames R.C.に滞在することになった１年以上後である．会議の場所が NASA Ames R．C.とスタンフォード大学であった関係でジャーナルでしか知らなかった Lomax，MacCormack，Steger，Kutler，Beam，Warming，Deiwert といったいわゆる Ames グループの著名な研究者が多数参加していた．その後 Boeing の CFD グループのリーダーになった W．Jou なども居た．個人的なことで恐縮であるが，航空宇宙技術研究所の廣瀬直喜氏の計らいで，現東北大流体研の井上督先生と３人で Steger 氏の家に行った後，Victoria Station で夕食をともにしたのはいい思い出となっている．実はこの会議では Roe 氏が有名な Roe 法についての講演を行っていたが，その後 5 年以上が経過するまで多くの人がこの講演の価値を認識していなかったのではないかと思う．ちなみに van Leer の MUSCL 法に関する論文は本人の弁によると ICNMFD に応募したが何度か reject されたそうである．矢部先生の CIP 法も同様に認知されるのに時間を要したが，有意義な計算法に気がつくのは簡単なことではない.

なお，ICNMFD 会議は，1985 年発足の ISCFD(International Symposium on CFD)と合体し，ICCFD(International Conference on CFD)として 2000 年に京都で第１回が，本年 7 月シドニーで第 2 回が開催されている．これについて後述する.

1980 年代の航空宇宙における CFD はいわば発展期であったと思う．民間航空機設計のための道具として遷音速流れ解析用のプログラム開発が進んだのが 70 年代から 80 年代はじめとすると，80 年代は剥離渦の計算技術を利用した軍事絡みのシミュレーションや再突入などの宇宙絡みのシミュレーションが広く行われるようになった時期である．背景には，大きな防衛予算と宇宙開発の機運があったことは言うまでもない．遷音速の非線形ポテンシャル方程式から３次元のナヴィエ・ストークス方程式を利用したシミュレーションへと利用する方程式も変化した．これは一重にスーパーコンピュータの開発に寄るところが大きい．70 年代後半の CRAY-1 に始まり，80 年代に入り日本初のスーパーコンピュータが数多く生まれた．1985 年から 86 年にかけて GFLOPS の性能を持つ製品が開発され，それを利用した 3 次元ナヴィエ・ストークス方程式による民間機の実用翼形状や翼胴結合体周りのシミュレーションは AIAA の学会誌 Aerospace America でも流体力学及び応用空気力学分野の 1986 年の年間トピックスとしても取り上げられた． コンピュータの性能に助けられた側面はあるとは言え，航空宇宙分野において日本の CFD が認められ始めた時期と言っても良いと思う.

©日本数値流体力学会

1985 年には大島先生が発案され，東京で第 1 回の ISCFD 会議が開催された．この会議には海外から多数の CFD 研究者が参加した．先端的な研究に触れることができて日本の CFD 研究を促進する大きな足がかりとなったと言っても良いであろう．

私自身は，航空宇宙技術研究所で 2 年ほど YXX などをターゲットとした遷音速流れに関する CFD 研究をした後,1980 年台はじめに続いて再び NASA Ames 研究所で研究する機会を得た．1 年半弱の滞在の後，1987 年秋に帰国してみると，当時名古屋大学の保原充先生，東北大学の大宮司久明先生らを中心に科学研究費「数値流体力学」の研究グループが立ち上がっていた．私は設立の経緯を知らないが，このグループこそが今の数値流体力学会の母体と言ってもいいと思う．またこのグループが発足したことが日本の数値流体力学研究を大きく発展させることになったことは間違いない．特に，機械系，建築土木系，航空宇宙系，物理系など広い分野の研究者が一同に会する機会を作った点においてその意義は計り知れない．他国においてはこういった分野横断的なグループが組織化された例をあまり知らない．この組織作りに尽力された先生方の貢献は大いに評価されてしかるべきであろう．合わせて， 12 月にその後定例となる数値流体力学シンポジウムの第 1 回目が開かれた．たまたま，私がシンポジウム直前に帰国したこともあって，NASA Ames 研究所で行っていたデルタ翼流れの研究に関して特別講演の１つを行う機会を与えられた．ちょうどクリスマスイブの日だったことを記憶している．今井功先生が前の方の席にぽつんと座られていて，真剣に聞いて下さっていた．読者もご存じのように，このシンポジウムは 10 数回を数え，多くの参加者を集める意義あるシンポジウムとして継続している．このシンポジウムを通じて多くの情報が発信されたり，交換されたりしていることは言うまでもない．

4．1990 年代

より実用化の図られた時代と考えることができよう．圧縮性流体のシミュレーションではいわゆる TVD 法が 80 年代後半に確立し,ほとんどの研究者が利用するようになった.AUSM+, AUSM-DV, HHLLE, SHUS などこれらの発展型のスキームも応用例によって広く利用されるようになった．しかしながら，基本となるスキームの考え方よりも，それらを利用した利用技術の発展が議論されたのがこの時代である．第１は非構造格子の利用であろう．次第に複雑形状を扱うことが要求されるようになってくると，80 年代中盤まで利用されてきたいわゆる単一の構造格子では格子生成が絶望的に難しくなってくる．対応策として，当然のことながら非構造格子，特に四面体を利用した格子を利用することで複雑物体を扱う手法が定着した．おそらく現在主流となっているほとんどの市販コードが非構造格子を利用しているものと思われる．一方で，実質的な格子解像度，必要計算機メモリーサイズ，などを考えると構造格子も捨てがたい．非構造格子の利用が進むのに並行して，構造格子を複雑形状に適用するためのアプローチとして 80 年代中盤に Steger らによって提案された CHIMERA 法と呼ばれる重合格子の利用が進んだ．複雑形状に利用する際に生ずる問題をさまざまなやり方で克服し，可成り複雑な形状に対しても構造格子を利用したシミュレーションができるところまで来ている．米国においては，NASA で開発されたプログラムが希望すれば誰でも利用でき，またそのサポートのために多数の研究者や予算が投入される．重合格子に不可欠なブックキーピン

©日本数値流体力学会

グ用のプログラムや内挿に関するプログラムなどといった補助ソフトウェアの普及も大きな支えとなっている．その結果，大学，研究所などでは必ずしも非構造格子ソフトウェアを利用しているわけではない．おおまかに言えば，極度に複雑な形状に対しては非構造格子が，それなりの複雑さであれば構造格子を使った重合格子の利用が向いている．多少複雑でも特定の形状に限ったシミュレーションで多少の経験のある利用者であれば重合格子によるシミュレーションを，種々の形状や流れを解析する必要があり，経験が少ない利用者であれば非構造格子を利用するのが得策かもしれない．この辺りは議論の残されているところであろう．

非構造格子を利用したとしても，格子形成は容易ではない．実際に非構造格子で複雑形状廻りの流れを解いている研究者からは，非構造格子といえども格子生成に関してかなりの経験を積んだ学生がいないと複雑形状廻りの格子は作れないという話も聞こえてくる．このような背景から 90 年代に入って直交格子の再利用の工夫が数多く発表されるようになってきた．いろんな課題はあるにしても，単純な直交格子を利用すれば物体形状に関わらず格子生成は可能である．物体の内部，外部の判定が簡単なことからある程度形状を認識することもできる．後は計算法の工夫で，最近では非粘性流れであればある程度の近似度でシミュレーションできることが示されている．航空宇宙の利用ではレイノルズ数が高い流れのシミュレーションが主である．境界層はかなり薄くなり，一方で剥離現象などその影響は大きい．このような状況を正しくシミュレーションできる粘性計算用の直交格子手法はまだ確立しているとは言えない．今後も興味のある研究課題と言えよう．

5.　現在とこれから

私自身が考える現在の CFD の課題については，まえがきにも書いたように流体力学会誌に書かせていただいているので省略し，１つだけ補足的な話題を取り上げることにする．1980 年代の項に書いた第 1 回数値流体力学シンポジウムでの私の講演タイトルは「剥離渦の高精度シミュレーションを目指して」であった．もちろん，当時の数値シミュレーション技術とコンピュータ能力からして限界に近いシミュレーションであり，いろいろな現象を明らかにすることができた点でも価値がないわけではなかったが，実験事実と比較すると大きな不一致が残されていた．15 年以上のブランクの後，計算法にも変化が起こりつつあることを受けて，2 年ほど前から再度この問題に取り組んでいる．格子点数を 400 万点に増やし，さらに断面内で各方向３倍の重合格子を利用しても十分な結果が得られなかったが，コンパクト法という手法を利用することで最近かなり実験に近い結果を出せるようになった．別の言い方をすると，このような流れ場に関してもやっと離散化の誤差が希望する範囲に収まってきたということになる．これは１つの例であるが，CFD 発展の中でやり残してきたことはたくさんある．さらに複雑な形状とかさらに複雑な流れ現象とかにチャレンジすることなど先端的な話題を追うことも大切であるが，やり残したことを再確認しそれらを１つ１つ片づけていくことが CFD の普及につながると信じている．

本年 7 月にシドニーで第 2 回の国際数値流体力学会議(ICCFD-2)が開かれた．すでに述べたように，この会議は CFD 分野で最も伝統のある ICNMFD と 1985 年に当時宇宙研の大島耕一先生が作られた ISCFD の２つの会議が合体したものである．私自身は ICNMFD は 1980 年から

©日本数値流体力学会

ISCFD は第 1 回から全部ではないがかなりの回に参加してきた．参加する顔触れもかなり変わってきた．2002 年夏の ICCFD-2 の会議の顔ぶれは 20 年前とは大きく異なっている．特に航空宇宙色がかなり薄まり，機械系や環境系，バイオといった応用分野に関わる研究成果が多数発表されている．計算法などは停滞気味という印象を受けた．国際会議があまりに多いこと，会議案内の circulation，航空宇宙に予算がつかなくなったことなども原因であろうが，会議の重要性も正直言うと少し薄れてきている印象である．

このシドニーの会期中に ICCFD 会議運営の国際委員の集まりがあった．日本からは，里深，中橋，私の３名（中村先生は欠席）の他に途中から大島先生も名誉委員として列席された．この席で International Society of CFD（仮称）の設立が決定された．同時に名誉会長として大島耕一先生が選出された．事務局は提案者である U．C．Davis が受け持つ．そもそも多数の学会が乱立しているところに更に新たな組織を作ることには多少の抵抗があったが，会費を取らない，各国の CFD グループからなる緩やかな組織で国際会議のアナウンス，CFD 研究情勢などの記事を掲載するウェブサイト中心の活動を行うとのことでみなに了承された．ご存じの方もいると思うが，IACM(International Association of Computational Mechanics) の日本側の組織として東工大の矢部先生，東大の吉村先生を中心に JACM がこの 8 月に設立された．この組織もまた，個人からは会費などを徴収しない（IACM は代表組織から会費を徴収している），計算力学の国際会議 WCCM のオーガナイズドセッションセッションなどを企画するといった活動を主眼としている．このような国際的な組織とうまく連携していくことが学会の活性化につながり，結果として会員を増やすことにもなると思う．

6．　学会活動について

他の学会の話で恐縮だが，今年たまたま「可視化情報シンポジウム」の実行委員長を務める機会を得た． 30 周年ということで，大島裕子先生（(株）リコー）と李家賢一先生（東大）にご尽力いただいて過去のシンポジウムの講演論文数と参加者数を一覧表にした．見て驚いたことがある．ご存じの方は少ないだろうがこのシンポジウムは宇宙研，当時東京大学宇宙航空研究所でスタートした．1973 年の第 1 回流れの可視化シンポジウムでは講演数は 36 件であった．その後 10 年間ほとんど変化はない．今考えるととても講演数は少ない．一方参加登録者数は 697 人で，この数字もしばらくは変化がない．登録の仕方が日ごとということで実質参加者はその半分くらいであろうが，それでも 300 名程度の参加者があったはずである．参考までに本年のシンポジウムでは講演数が 142 件，参加者が 315 名である．ここで，講演数対参加者の比率で考えると今のシンポジウムとの大きな違いが見えてくる．かつては講演を聞きに行く多数の参加者がいた．今のシンポジウムはどうかというと，「講演を聞きに行く場」ではなく「講演をやりに行く場」となってしまっている．可視化シンポジウムはかなりましな方だと自負しているが，シンポジウムによってはオーガナイズドセッションと称して無理矢理多数の研究発表数を確保して参加者のほとんどが発表者だけとなっているシンポジウムも少なくない．確かに，学問にはいろんな時期があるので，これだけでシンポジウムの良し悪しは議論できないが，この数字はシンポジウムを考え直す良い参考と思える．これからは講演数は少なくてもたくさんの方が参加したくなるようなシンポジウムを目指す努力を

©日本数値流体力学会

していきたいと思う．

一般に学会なるものの活動内容として，学会誌を発行する，シンポジウムを運営する，講習会を企画する，といったことが定着している．しかし，インターネットで様々な情報が手に入るようになったこと，電子メールで遠距離にいてもいつでも議論ができるようになったことなどを考えると，学会活動のあり方も原点に帰って見直すことが必要であろうと思う．単にホームページを開設したり，費用削減のために学会誌をウェブ掲載にするといったことだけでなく，最新の技術や情報化をもう少し前向きに利用した活動をみなで考えていく時代に入ってきたのではないだろうか．

7．おわりに

流体の数値シミュレーションは，実際にやってみるとそれぞれにいろんな障害がある．格子生成，数値計算の不安定性，精度の不足，信頼性評価の難しさ，などなど越えなければいけない，もしくはシミュレーションはしたけれど自信を持って語れない部分もたくさんある．それにも関わらず，シミュレーション結果はいろんなことを教えてくれる．シミュレーション結果を何度も眺めていると，現象の本質がわかってきたり，ディスカッションを何度も重ねていくうちに，支配している現象は実に単純なことであることがわかってきたりすることが何度もあった．いろんな困難さはあるものの，流体の数値シミュレーションの面白さは尽きることがないように思える．

一方で，設計の観点に立つと，流体だけを考えて設計できることはまれで構造，熱，飛翔などと連携したいわゆる「多分野融合シミュレーション」が要求されている．数値流体のシミュレーションはある意味流体という基盤単独では成り立たず，流体力学会と合体し，流体力学という枠に収めてしまっていい学問領域なのか疑問がないわけではない．一方，計算科学というくくりで数値流体力学を考えてしまうと，流体力学抜きでシミュレーションを考えてしまうような印象を受けるので，これにも違和感がなくはない．いずれにしても，数値流体力学会は流体力学会と合体したのであるから，ここを基盤に新たな活動を進めていかなければいけない．

©日本数値流体力学会