

特別企画「信頼性向上の研究」座談会

嶋 英志*、中尾 雅弘†、白山 晋‡、小野 謙二§、藤井 孝蔵**、
松尾 裕一††、吉田 憲司††、相曾 秀昭††、口石 茂††、高木 亮治(司会)††

司会：本日最後になりますが、特別企画セッション「信頼性向上の研究」に関する座談会を始めたいと思います。私、司会を務めさせていただきます航技研の高木と申します。まず始めに、今回パネラーをお願い致しました皆様の自己紹介ということで、お名前と御所属、一言御挨拶をお願い致します。

嶋 英志氏：川崎重工の嶋です。私が所属している部署は40人位のグループなのですが、その中で風洞試験用の模型製作、風洞試験それからCFDなど一通りのことをやっています。その辺から言える事があればいいかと思っておりますのでよろしくお願ひします。

中尾 雅弘氏：三菱重工の中尾でございます。私は名古屋の航空宇宙システム製作所の空力研究課という所におります。CFD、風洞実験それから空力設計などをやっておりますので、その辺りでお話をできたらと思ひます。よろしくお願ひします。

白山 晋氏：東大の白山です。所属は環境海洋工学専攻ですが、船のCFDそのものを行っているわけではなくて設計システムの研究に携わっています。ですのでCFDそのものよりもシステム工学的な見方で話せたらと思ひます。

小野 謙二氏：東京大学の小野です。ついこの間まで日産自動車に勤めておりましたので、今日はどちらかというユーザーの立場で発言したいと思ひます。よろしくお願ひします。

藤井 孝蔵氏：宇宙研の藤井です。名古屋より遠い相模原で仕事をしております。2年間このシンポジウムでは色々な事を言い続けてきたので、今日は静かにしておこうと思ひています。

松尾 裕一氏：航技研のCFD技術開発センターの松尾です。私は乱流のモデリングとかシミュレーションをやっています。

吉田 憲司氏：航技研の吉田です。私は次世代超音速機プロジェクトで空力設計をやっています。ユーザー側ですので、色々信頼性について思うこともありますので、その辺りで発言したいと思ひます。

相曾秀昭氏：航技研の相曾と申します。私どもは数学の方から数値計算の保証をうまく行えないかということの研究をしています。その中で、2時間ほど前に発表したように、我々が考えた新しい理屈をどう使うかを考えながら検証用ソフトウェアの開発をしています。

口石 茂氏：航技研の口石です。私の所属は風洞技術開発センターという部署です。まあ実験屋なのですが、

もともとの専門がCFDだったということで、CFDとEFDを結びつけることを考えています。今後航技研での主要な仕事になると考えています。今日はお手柔らかにお願い致します。

司会：ありがとうございました。それでは始めに、本座談会を企画した意図について私の方から説明いたします。最近、CFD、正確にはCFDコードは研究者が研究を行うための研究コードという位置付けから、設計などで実用的なツールとして使われようになったと思ひます。そのため、従来の研究コードという位置付けではなく、実用的なツールとしての信頼性が求められる状況になりました。しかしながら、単にCFDコードを使えばそれだけで流体解析ができるかと言うと、まだまだそういう状況ではありません。CFD研究者はCFDコードを使う上で、蓄積された個人的経験、ノウハウ等を使って格子の生成、計算の実行、更には結果の解析、解釈等を行っているのが現状です。最近特に問題だと考えることは、いわゆるCFDコードを、例えば設計に使うとか、ツールとして使うとかで、CFDをあまりよく知らない人が使っていることです。その場合かなり危険な落とし穴がある状況ではないかという危惧を抱いています。また一方で、日本のCFD基礎技術を発展させるためには、CFDを使うコミュニティの底上げを図ることも重要だと考えます。底上げがないと先端でのブレイクスルーもあまり望めないというのも事実です。そのために、それぞれが研究して持っているノウハウをいかに公開して共有するかといった方法論の構築、あるいは色々な問題や認識の共有を具体的にやりたいと思ひ今回の座談会を開催いたしました。信頼性というのはかなり昔から議論されている話で、一朝一夕にそれを解決するというつもりはありませんし、今回の座談会でいきなり結論がでるということはないと思ひます。ただCFDを用いた解析を行う上でこういった問題点があって、こういった点に注意しなくてはならないという事を再認識する機会にこの座談会がなればと思ひています。

では、座談会を進めていきたいと思ひます。今回、大上段に「CFDの信頼性」というテーマを設定しています。通常、「信頼性を高める」と言う風に使いますが、「CFDの信頼性を高める」というのは具体的にはどういう意味かについてまず議論したいと思ひます。使う側、ユーザーにとっての信頼性という観点から考えますと、使う計算コードもしくは計算格子の特性、さらには適

*川崎重工工業株式会社 航空宇宙カンパニー

†三菱重工工業株式会社 航空宇宙システム製作所

‡東京大学 環境海洋工学

§東京大学 IML

**宇宙科学研究所 宇宙輸送研究系

††航空宇宙技術研究所

用いた数値計算の結果はある程度眉唾物なので、このような使い方がしばらくは続くのかなと思っています。

藤井氏：先ほどのお話にも出ていましたが、それに基づいて提案します。航空宇宙のアプリケーションというのは、ある程度限られていると言ってもいいと思うんですね。ですから、まず典型的なケースというのを持ち出して、それに対して様々なケースをシミュレーションし、膨大なデータを提供する。信頼性は一意に語れるものではないし、利用目的にもよるから、結果の信頼性をどう判断するかはデータを利用する人に任せる。例えば主翼の計算とか、SST や有翼飛翔体の場合だとダブルデルタとか、宇宙輸送系などだと我々がやっているようなリエントリーのような形とか、そういう典型的な問題を持ち出して、計算データを提供する。これは今すぐにも出来る話なので、そういう事から始めたらいいのではないかと思います。

松尾氏：また別の観点なんですけど、その時代あるいはその時に求められている信頼性の中身ってというのがひとつ観点としてあるのではないかと思います。つまり絶対的な信頼性の追求というのは滅茶苦茶大変な話で、それは要するに CFD が始まったときから、CFD の信頼性を高めるとははっきり言って生まれてきた訳です。だから、そういうものに対して、段階的に例えば結論を出しながら、その時代に求められている信頼性というものを出していく事が必要じゃないか、という風に私は思います。今あちこちで、例えばロケットの事故とか失敗に対する認識が高まっていて、信頼性がないというような事象に対する関心が高まっている時代だと思うわけです。そういう時代では必ずしも信頼性を高める必要はなくてですね、計算結果がこの位合わないとか、この位違っているというのが例えばひとつの信頼性という研究に対する観点だと個人的には思います。

吉田氏：設計などで使っている現場としてプリミティブな意見、考えなんですけど、私は例えば信頼性を追求して欲しいし、何よりも一番の目的は適用限界を明確にして欲しいということです。特に卑近な例ですと、オイラーで二次元翼を解いた時に後縁の圧力というのが求まります。その場合、例えば後縁は物理としては粘性が支配的な現象で、そのメカニズムを通して圧力が決まっている部分があるのに対して、オイラーで求まる圧力というのはその真値に対してどういう意味をもっているのか。例えばオイラーは非粘性といっても数値粘性が入っている、あるいは強いバウショックがあれば渦ができるということを知っていて結果を見るのか、知らないで見るのかというのが重要だと思います。オイラーは NS に比べて比較的容易なため、設計に用いるツールとしては先ほど嶋さんが言われたように、パネル法と同じと考えるという意味では私も一緒だと思うのですが、そうは言ってもオイラーみたいに線形理論より汎用性が高い方程式を解けば解くほど、そういう盲点に入ると思います。ですからオイラーとかナビエ・ストークスとかいうものを使うのであれば、なおさら信頼性というものを、つまり適用限界あるいは物理に対してどこまでシミュレートしているかというこ

とを、明らかにしていくことが必要なのではないかと思います。そのためには小さな example を積み重ねて、その結果の物理を十分考察して行くことが非常に大切だと思います。



航技研 吉田氏

相曾氏：私の立場は、吉田さんとは位置的に言うと反対側のはじっここの立場になってしまいます。やはり信頼性というのは非常に大きな問題になってきたと思います。そして、そういうことを何か考える枠組みを作りたいと数年前から考えるようになりました。それまでやってきた事というのは、数学の側から与える信頼性で、それは差分スキームの収束証明ではないかと思っていました。もちろんそういうのをきちんと全部本当にやれば完璧になるのじゃないかと手前味噌で思っているんだけど、まあ完璧にやるのは 100 年たっても無理ではないでしょうか。要するに現実の計算と数学の間の違いのところが依然としてどうもうまく認識されていないことが一つの原因だと思います。また収束するからいいんだと言っても、現実の計算は δx 、 δt 、有限のところで行っているわけで、その時、解が合っている合っていないというのは、いったいどういう風に判断すればいいのだろう、というような問題が出てきて、近頃それに気づいたわけです。そここのところが何によって議論されてきたかという、いわゆるノウハウだと思うんですね。人間の感覚というのは結構いいところをついていると思うんです。しかし、ノウハウも重要なんですけど、なかなか数値化できない。例えば信頼性、先ほどもちょっと言ったんですが、どのくらい信頼できるのかとか、信頼性の度合いというのがわかんない。そこらへんを何とかやれる枠組みを作れないかなというのでやりだしたのが、先程言ったウェーブフロントアナライザーという試みですが、まだこれは本当に端緒についたばかりです。信頼性とかノウハウとか、何かうまい具合に数値化あるいはものさしが一つあれば、それは広く使えるものだと思うんですけど、そのものさしを幾つか増やしていくことによって何かきちんと議論をする根拠というか、拠り所を作っていけないかと考えているんです。

後もう一つは、これは他の方から言われたのですが、我々の場合、あるスキームに何か証明がついた場合、今度こういう場合には駄目ですよという反例は手を振って言えるんですが、「いいですね、そういうできないこ

とを大手を振って言えて」と言われたことがあります。確かに、やはりできなかった例を発表するのは非常に難しいですね。それは逆に考えてみると、計算の場合には数学の理論構築と違って、できた例、このスキームは完全にこの所の所はカバーできてるぞとか、このやり方でこの範囲はかなり信頼してくれて大丈夫ですって言うのは、なかなかしっかりしていないとできないし発表し難い。と言うことで逆説的なんですけれど、そういうことをやるためにもさっき言っていた、小さいことの積み重ねで出来るところをはっきりさせる。それによって、できないところを言いやすい雰囲気を作って、今までノウハウだったものを表に出して理屈付けていけないかと、そういうことを考えています。

口石氏:私は、実は先週アメリカのAnaheimでAIAAのFluid Dynamics Conferenceがありまして出席しました。実はその前にレクチャーコースということで「CFD validation and verification」という講義がありそれにも参加して来ました。インストラクターはパトリック・ローチェ博士という大変有名な方で、二日間のコースでした。その中でローチェ先生の経験を語ってくれたのですが、特に印象的だったのはCFDのvalidation, verificationと言うけれど、全てのマッハ数で、全てのレイノルズ数で、全ての条件で、完全にvalidate, verifyするスキームなんてのは存在しないんだ、そんなものは絵空事であり、それは絶対に認識しなければいけない、ということでした。またvalidation, verificationするのであれば、ある限られた範囲で、どういう形状についてそういったことができるのか、まずそれを認識しておかなくちゃいけないということを非常に強調されていました。それから、先程ちょっとお話がありましたけれど、設計の立場からすると、絶対的な精度というものは必ずしも必要にはならない。最上級の精度を求めるよりはむしろ中程度の精度でより簡便な方向で特性を見積もる事ができれば、それはそれで十分である。とりあえず完璧なものを求める必要は何もない。それは特に設計において、私は設計ということに携わったことがないのでよくわかりませんが、そういう認識が非常に大切になってくると個人的には考えています。

司会:どうもありがとうございました。とりあえず一つ一つ個別にやっていきたいと思えます。まず、全く新しい形状、今まで解析したことのない形状に対する解析結果はこれはもう全然信頼性がないという話が出たと思えます。それに関して、先程のお話にも出ていましたが、検証にはverificationとvalidationという二つの段階があって、verificationの方は、基本的には数値解の信頼性をまず確保する。それは格子依存性であるとかスキームの依存性であるとか、数値解自体の依存性がどれくらいあるかっていうのをある程度見積もって、その範囲内で数値的には一応この結果はそこそこのものですよって言う事は、たぶん言えるんじゃないかと思うのですが、そのあたりについては何かご意見ありませんか。

嶋氏:直接それに関係するのかわからないんですが追加させて下さい。先程初めてやったものに対

して信頼性がないというお話がありましたが、それはCFDだけではなくて風洞試験も同じです。我々のところでは風試もCFDもやってるといいましたが、初めてやった形状に対して(CFDと風試が)結果が違う、そんな時に、合わないから計算がまずいんだと一方的に責められることはなくなってきています。それなりにCFDは信頼されていますので、違ったから風洞試験が悪いんじゃないかという風に疑うことも考えられる。疑ってみてそれで風洞試験の方が間違っていたとかいう事もあります。直接の答えではないのですが、そういう事があるって例です。先程、口石さんが、最高の精度でなくてもいいという風に言われましたけれど、それはそういう場合も多いかもしれませんが、航空宇宙で例えば翼設計をする時にそうは言っていられませんか。今、世界で争っているのは、大体抵抗係数で1カウント、10000分の1の差でいいよとか悪いよとか言っているわけで、その時に計算自身に10カウントの誤差があるということになると、これは使えないです。それで大体盲目的に信じているのが、差であれば正しいだろうという考えです。そんな証拠なんて大してないわけで、誤差自身10カウントあるんだったら、ばらつきがそれくらいあると思ってもいいわけです。そういう場合だと、誤差が多くてもいいとは言えません。それは完全に物に依存します。

司会:ありがとうございます。その辺は口石さん、何か意見はありませんか?確か絶対値には誤差があるというけれど、差を見る場合はまた別だという発表だったと思いますが。

口石氏:今日私がお話した内容の中で、特に重点を置きたかったのに時間がなくて喋れなかったのが先程のお話です。特にEFDのためのCFDという使い方をするのであれば、例えば風洞の気流の偏向角の問題があります。実際には風洞内の流れは完全な一様流れではありません。例えばマッハ数には若干のばらつきがあるとか、気流の角度が若干ずれているとか、そういった可能性があります。他にも模型の取り付け角度が若干ずれているだろうとか、実験側からは計測不可能な程度のずれが存在している可能性が十分考えられます。そういったことに対して実験側が非常に神経質になっています。自分たちの実験の精度というものが、そういったずれに対してどれくらい影響を受けているかという事を知る手段としてCFDを用いた解析に期待を寄せています。そういったことに対してCFDが貢献できるとすれば、EFDのためのCFDという意味では一番意味があることだと思います。これは実は先程のローチェ先生が強調されていたことで、これからのCFDは感度解析ということに対して非常に有用な役割をもってくるはずだと仰っていました。ただし、具体的にどのようにしたらCFDが感度解析という意味において精度を保障できるかについては、残念ながら何のコメントも仰らなかつたんですが、一般的には今日お話ししたけれど、CFDの誤差として計算条件による誤差とよらない誤差というものがある。それらがある意味で分けた場合は、ある条件とある条件との差が非常に小さい場合は、それぞれの計算結果に含まれる誤差要素の

計算条件によらない成分がある程度はキャンセルされて、実際は差分に対する不確かさが非常に減ってくるんじゃないかという期待が当然あるわけです。もちろんそれが本当にそうなのかということは、それはそれで検証する新たな validation 作業が必要になってくると思いますが。とりあえず、CFD の使い方としては、疑いなくこういったことが、特に EFD 側からの要求が非常に大きくなってくると思いますので、予測の差に対する validation というものを、新たにこれからの研究対象としてやっていくべきだと思います。精度は、それこそそれを考えながらどんどん絶対量の validation と同じように論じていけば、ある程度の精度で、これくらいの差についての精度保障は期待できると思っています。私はある程度楽天的かもしれませんが、そういう期待をもっております。



航技研 口石氏

白山氏：抵抗の1カウントっていう問題なんですけど、どのくらいのものなのか、航空以外の人だと掴める人は少ないと思うのですが。実際はどのくらいですか。例えば1カウントの差異をもたらす原因という意味でのアプローチってありますか？

嶋氏：大体カウントでいくと、航空機全体の抵抗っていうのは200カウントとか300カウントくらいですから1カウントっていうと、通常200分の1とか300分の1程度です。ですから、エンジン効率を1%良くするというのは、それは結構な改良になるでしょうから、まあそれくらいのインパクトがあるということです。で、どういうものだったら1カウント位あるかっていうと、よく覚えていないのですが、例えば、胴体に翼をつける時に、翼の前にちょっとした成形をつけますね。その有り無しでどれくらい抵抗が違うかという、5カウント位違うと思います。

白山氏：この座談会の前に、「デルタ翼とダブルデルタ翼の流れの数値シミュレーションの信頼性について」という藤井さんが共著者になっている講演がありましたが、あの場合は単位が全然違うと思うんですが。あれでも空力的には1カウントになるんですか？

藤井氏：デルタ翼の場合は（シミュレーション対象となっている大迎角で言えば）もっと抵抗が大きいので、全体のレベルは大きくなります。

白山氏：200分の1くらいでいいんですか？

藤井氏：いえ、もっともっと大きいです。特にダブルデルタ翼の場合は、モーメントを正しく予測することが非常に大事になります。ダブルデルタの場合に翼後半部の圧力が合わないというのはピッチングモーメントにすごく影響しますから、ピッチングモーメントを正しく予測することは、抵抗の1カウントとか言う話よりずっと大切で、気をつけないと非常に危険なことになります。

司会：1カウントっていうのは、SSTだと4人分くらいのペイロードに相当するとのこと。ちょっと本筋とは違う話ですが。さらに続けたいと思います。信頼性、逆に言うと、現在のCFDを使っている側からすると、あまりCFDを手放して信用はできませんというのが正直ベースな話だと思います。ではそう言った中で、CFD屋さんはどういった判断基準を、もしくは解析結果を見て、これはある程度の解として妥当であるというような判断をするかっていう点が、重要なことになると思います。その辺りを詰めていくと、結果的に解析の信頼性を高める事になると思います。まず最初に計算の収束というのは具体的にどういうことかを考えたいと思います。定常計算をした場合、ある程度計算を行い、収束してその結果がこうなると言う訳ですが、その場合通常ですと残さを見て、それが何桁落ちたから収束という話をします。もしくは、ある着目する物理量、例えば抵抗なら抵抗の履歴を追って行って、それが落ち着いている、もしくはまだ落ち着いていないという判断をする時もあります。また場合によっては、全然残さが下らないような話も結構ごろごろしていると思うのですが、その場合の計算の収束という事に関しては一体どう考えたら良いのでしょうか？

白山氏：先ほどの話からすると1カウントの幅でずれるような収束だったら絶対駄目なわけじゃないですか。それは明確ですよ、目的がそうなっていますから。

司会：それは逆に言うと、例えばその場合は、格子を変えるとかそういった事をするしかないでしょうか？改善をするためにはどういうことをするか。逆に言うと、私が聞くのも変ですが、何をもって収束したと判断されているのでしょうか？

嶋氏：具体的にどうやっているかと言いますと、私がやっているのは C_L 、 C_D と C_M に対して、それぞれの最大の変動が100ステップで1カウント、つまり1万分の1以下に収まったら、収束したと判定しています。ですから、100ステップ計算しても1カウントしか変動しないというのが判断基準です。それでいいかどうかというのはわからないんですが、ただ今までずっと経験的にやってきまして、そこまで落ち着くような計算であれば、それから発散するというような事は滅多にないと考えています。残差がどれくらい落ちればいいのか良くわからないんですけど、結局最終的に見たいのは力であることが多いので力の履歴で判断しています。それが見た目収束しない場合はどうするかということなんですけれども、普通収束を早めるためにローカルタイムステップを使うと思いますが、私の場合まずフィジカルタイムステップに切り替えます。た

だし、計算時間を短くするためにクーラン数を非常に大きくとらないといけなので、時間精度は悪くなりますが、悪くても一応物理現象はおっていることになりまます。で、面白いことに、フィジカルタイムステップに切り替えると収束することが結構あって、それで収束するなら収束解だと思って良いんじゃないかと思っています。

司会：個人的な経験も色々ありますが、例えば、時間積分法を変えると収束しなかったのが収束したりとか、特にローカルタイムステップの場合は、ちゃんと収束しないと結果の物理的な意味なんていうのは結構あやしいと思いますが、そういった観点で他にどなたか、うちはこういう形で収束を見てますというのがありましたらお願いします。

中尾氏：嶋さんと同じような話ですが、でも値はそれぞれケースバイケースで変わります。もしくは必要な精度がどれくらいにも依ります。また絶対値ではなく差分を見たいというケースでは力の値が収束してどの程度までいっているかということで、まあこの辺りでいいでしょうという感じで収束を判断します。力が変動する場合はフィジカルな時間ステップに戻してやることもありますが、ただそうすると結構時間がかかってしまうので、その場合は、えいやっと平均をとってしまうという場合があります。やり方としては嶋さんと大体同じと思っていただいてもいいです。

司会：またまた個人的な事ですが、先程嶋さんのおっしゃったように、100ステップで1カウント変わらなければ、一応それで収束と判断するという話ですが、例えば C_D でも C_L でもいいんですが、着目している値が単調に増加もしくは減少している場合は、ずっと計算を続けていくとひょっとしてその変動が積み重なって大きく変わるのじゃないかという不安が常にあります。その辺はある程度あきらめるしかないのでしょうか。

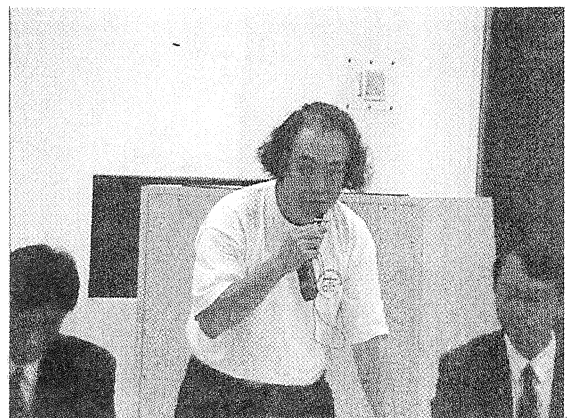
嶋氏：100ステップで1カウントというのは、大体そういうのが起きないぐらいなんです。で、ゆっくりでも変わっていく場合は、もうちょっと早く変わります。まあ、大体それだけで信じているわけではなくて、一応モニターはしています。やっぱり変化していく場合は傾斜がはっきりしているしその場合はもう少し大きい。それはまた時間積分法によりますから、必ずしも100ステップで1カウント、その数値自身が普遍性をもっているとは思わないのですが。まあ結局、それぞれのスキームによって、そういう性質があってそれを使ってやっています。それでもたまたま、それでは時間がかかるのでもうちょっと粗くしてみたところが、実は本来の解にたどり着く前のところでやめてしまっていたということもあります。

口石氏：私の方から先生方に質問なんです。収束といっても、色んな物理量によって収束の度合っているのは当然違ってくると思うんですが。例えば力を評価していて、 C_L はどんどん収束していきただけけれども、その一方で C_f はどんどん振動しちゃう。そういったことは往々にして起こりうると思うんですけど、その場合、自分の計算したい対象は C_L であつたら、 C_f はいくらある程度振動しちゃうてもそれは収束したとみ

なしてよろしいのでしょうか？

嶋氏：例えば力に関して言えば、 C_L とか C_D だけが収束して C_M だけが振動しているということはまずないです。それに類することであるのは、熱の問題です。圧力は割と早く落ち着くんだけれども、温度で見ていると、その10倍も収束にかかるとかはあります。それは何を今計算しているのかという事を考えるべきです。熱に関して見ると、それはまだ収束していないかもしれない。ただその時は別に熱を見ているわけじゃない、ということで、切り捨てているということですね。

相曾氏：まだ、とらぬ狸の皮算用なんですけど、そこら辺に関して我々が今考えていることがあります。先程発表させていただいたように、ある程度厳密解の性質がわかつたら、そいつをフィードバックするっていうかそいつを先回りして使って、出てきた数値解に対しておかしい所を発見しようというトライアルを色々やっているわけです。実はそれがあつた程度役に立つのではないかなと思っているのは、実際今言ったような場合で、おかしなことが起こっている場所が分かれば、それはエンジニアリングで目的意識がはっきりしてやっている計算の場合は、(計算結果に少々不都合がある事が分かっても)それはそれで役に立つのではないかと考えています。もしもおかしなことが起こったとしても、それはあまり興味・関心の所ではない、と言うか、そういうことが起こっていても、全体に影響がないよときちんとかかるような場所だったら、それでもいいかもしれない。そういうことをはっきり数値化できないかということを考えてやっている、もしくはそういう方向のトライアルを我々は考えています。先程口石さんの方で、万能のCFDはないと言いましたけれど、もうちょっと言うと、一つの計算でも全ての場面を全部正しく解くのは難しいかもしれない。そうなるほどの程度にどこができていのかを知ることも必要かということなんです。



航技研 相曾氏

白山氏：ターゲットはこういう狭いところでいいですか？つまり、航空の設計に対するCFDのあり方っていう形で議論を進めていっていいんですか？それとももっと広い意味で言った方がいいんですか？収束するっていう言い方でも、非定常計算をやっている人に対して収束するって言っても何を意味するのかという話になりますね。例えば、気象の計算というのは、対

象が限られていることもあっていくつかの典型的な数値解があります。それらに合わせる事が収束の目安になるんです。例えば、200 キロから 100 キロくらいの格子解像度の計算で、12 月 1 月 2 月を 3ヶ月平均して、アリュージョン低気圧の位置を 1 メッシュで合わせようという努力をするわけです。それで、1 メッシュ合わないとどうするかというと、変な話、プログラムを一行ずつ見直していくようなことまで考えます。そこまで本当にやるのかっていうことですね。

司会：そういう意味では、あまり手を広げられる余裕もないと思いますので、航空宇宙から、小野さんもいらっしゃるのでは自動車とか、そういった辺りを対象にしたいと思います。

藤井氏：先程の嶋さんの 100 ステップ 1 カウントの話なんですけど、そのうち話す機会があるかもしれませんが、最近たまたま宇宙研の ATREX というエンジンのフライト実験計画の機体の計算を学生さんに頼んでやってもらうことができました。胴体に主翼がついた程度の計算なんですけど、これで計算して全然実験データとリフトカーブが合わない。なぜ合わないのか最初はよくわからなかったんですが、何故か計算が一次精度になっていて、それを二次精度にしたら実験のリフトカーブにぴったり合いました。当然一次精度でも収束はしていますから、おそらく先程の嶋さんの言う収束状況には当てはまっていると思うんですね。残差も十分に落ちてる。で、いったい何が起きていたかというと、後ろの胴体のベースのところ剥離した領域では、本当ならば交互な渦放出がある。だから、高い圧と低い圧が交互に出ているはずなのが、一次精度にするとそこに渦が停留していて常に負圧領域がある。そのせいで抵抗も揚力も合わない。そういう事があったんですね。だから、怖いケースも実はあるんだという事だけ申し上げたかったんです。

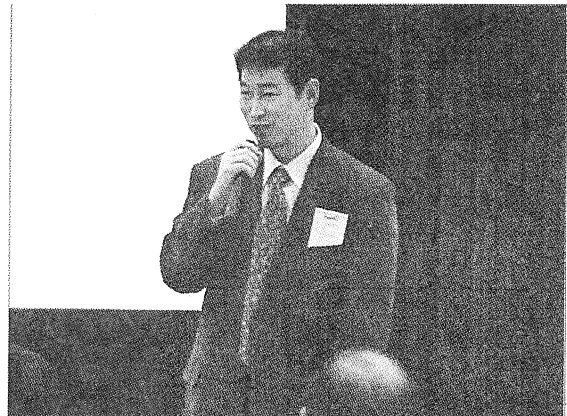


宇宙研 藤井氏

司会：そういう意味では、例えば注意なくちゃいけない点ということで真っ先に挙がるのが、格子がかなり影響を与えるという事です。単純に言えば、粗い格子と細かい格子で比較する、つまり解像度が違うと違った現象を CFD が捕まえてしまう。また先程の藤井先生の話だと、スキームとか解法に関する依存性という事になり、多分全部まとめてると verification という話になると思います。まずは格子についてを考えた

と思います。格子の質が結果を左右するという意見は常識的に言われていますが、その中でいかに格子依存性というものを確認するかについては、具体的には皆さんどのような形で行われているのでしょうか？例えば先程、あまり信頼せずに方向性に使うというお話がありました。小野さんは具体的に設計に使う際には、そういう事はかなり行っていらっしゃると思いますが、いかがでしょうか？

小野氏：日産の場合、以前は BFC 格子と 3 次精度風上法を使って車のまわりの流れを計算していたんですが、それだとやはり格子を作る人によって発散するしがないがありました。つまり、格子の作り方にノウハウが必要であるということです。また、このノウハウは人から人に伝えるのが難しく、設計全体に広がらないという事がありました。設計の人達は基本的に忙しいので面倒なことはやれません。そこで、使ってもらうためにはどうすればいいかという事を考えると、非常に使いやすく、クライテリアがはっきりしているものを導入する必要があるわけです。その観点から、直交格子による解析アプローチを採用していました。直交等間隔格子の場合ですと、パラメータがメッシュ密度だけで非常にシンプルです。もちろん詳細な形状をどう表現するかという問題は残りますけれども、空間部分に関して言えば、基本的には格子の空間密度だけです。車の場合ですと、どこが興味のある領域であるかはもう大体わかっています。それでアダプティブな方法は使わずに、メッシュ密度の異なる階層的な格子を使うことによって、ほとんどの設計計算をこなしています。外部流については表面形状の問題があるので、物体の近似方法の工夫が必要ですが。



東京大学 小野氏

司会：そういう意味では、ある程度のクライテリアを経験から作って、これ位にすれば大体これ位の結果が得られるという形で、直交格子を作るパラメータにフィードバックをかけているという事ですね。中尾さんのところはどのようにでしょうか？

中尾氏：格子に関してはもう職人技でして、これは CFD に限らず、NASTRAN でもモデルの作り方によって解が変わるという話が当然あると思います。NASTRAN もそういうものだと思って使われているわけです。ですから誰でも使えるツールというわけではない。こういう精度が欲しければこういうモデルを使わなきゃ

いけないよという事が、わかっている人が使う。だからCFDもそういう意味で、わかって使う方がいいのじゃないかという気がします。それはさっきの形状を作るということ、それからそれを計算するための格子を作るという流れで、どういふものがあるかというある程度のサンプルは必要かもしれませんが、その辺の知識はやはり最後まで残るのじゃないかという気がします。

白山氏：ひとつだけいいですか。何かいいインフォメーションを与えないといけないので。実際設計に使っているわけじゃないんですが、同じ対象に対する系統的な格子を作るという方針の格子生成法について、学生と一緒に研究を進めています。どういう研究かというと、系統的な格子を、例えば8つ作ったら、それらを8つのプロセッサにポンと投げてどれが生き残るかみたいな話です。なぜそんなことを考えたのかと言いますと、格子の質っていうのは(10年位前から色々な所で喋らせていただいています)が、直交、平滑、何とかあってありますがあの基本的なルールだけでは決まらないんです。だから、それらをもとにしても、良い格子は出来ないわけです。直交格子がいいといっても、粗密っていうパラメータがあって、この依存性が大きいんですよ。ものすごく。しかも、位置のパラメータがあるわけです。また、直交格子でも段階的なものと細かくするものがあるので、直交格子でパラメータが無いってことが言えないんですよ。そういうことがわかったんで、系統的に作って、それらをプロセッサに投げて(実際に計算してみる)ということを始めました。

司会：会場の方から特に何か、今の格子とか収束性に関する話その他、ございますか？では verification に関して話を進めていきたいと思えます。具体的に色々依存性を調べなくてはならないという認識があると思うのですが、具体的に何をどこまでやればいいのかに関しては、各人が経験的に持っていると思えますが、その辺りに関してコメントを頂きたいと思えます。先程の格子依存性に関しては基本的にクライテリアもまだまだ十分でないという話が白山さんからありましたし、依然としてどういふ格子がいいかというのはやってみないとわからない。その中でもある程度、直交性であるとか最小格子幅であるとか、格子点数(基本的にメモリの関係とか解析時間の関係とかでかなり制限を受けると思うのですが)とか指標になりそうなものはあります。そういった中で、格子依存性を調べたいといった場合、具体的にどこまでやるべきなのでしょう？少なくとも、単純に格子点数を倍・倍・倍、3次元ですと8倍した形の1ケースやってそれを比較するっていうことを、私などはよくやるんですけど、それ位で十分なんですか？それとも格子の分布もしっかり見なくちゃいけないとありますか？

白山氏：単純に倍にすると傾向を見ることができない場合がある。スキームによっては、例えば基底ベクトルの様子くらいは正しい形になるように倍にしなければならない。もちろん、どこをどの辺までみるかということに依存します。

松尾氏：乱流などの立場で言うと、例えば境界層で言うと形状係数とか、ログローがきっちり出ているか

とか、そういう流体力学的な知識っていうのは格子依存性というか信頼性という意味で、結構役に立っていると思えます。実際私の場合は役に立っています。



航技研 松尾氏

相曾氏：私が実際にやる計算は、多分ここにいらっしゃる諸先生方から見たら幼稚園児の数学くらいの計算しかやらないんですけども、その場合でも一応本当にうまくいっているかなあと確かめるために、高木さんがおっしゃったように、メッシュの数を倍々にしてみます。もちろんその場合時間の方も倍々にしていきます、とそういうことをやるんですが、残念ながら私の場合幼稚なので、あまり複雑なメッシュというのはやらないんです。そこで、ここにいらっしゃる方にお伺いしたいのですが。メッシュの作り方が違う、要するに色々な作り方のメッシュがあるわけですが、あるAというメッシュで倍・倍・倍・倍にやっていって、それなりに落ち着いた。Bというメッシュで倍・倍・倍・倍にやっていって、それなりに落ち着いた、という時に、それが実はメチャメチャ違っていたということは結構起こり得るのでしょうか？(格子の違いで収束先が違うという例は)非常に単純な場合ですと、同じ差分方程式を計算しても、例えば1次元とあと時間だけという簡単な場合ですが、 $\delta t/\delta x$ を一定にして収束させていけば、それは実は保存則の解になるんですけども、 $\delta t/\delta x^2$ を一定に収束させてしまうと、見た目の差分式に粘性が入ってなくても、収束していく先は粘性の入った解になってしまうんですね。また、同じようなものでちょっと思い出しますと、格子の細かさに対する依存性ではなくて、格子の構造に対する依存性というか、その場合ローカルタイムステップが入って来ると、時間方向の刻み方に対する依存性も当然入ってくると思うのですが、そこら辺りはいかがなものかお聞きしたいのですが。

白山氏：たぶん、一番難しいのは比較だと思うんです。違う格子でデータを比較するとき、グローバルな要求かローカルな要求かで比較が非常に難しくなる。まずは、本当に比較しているのかっていう問題があります。次はその差分です。Aという収束解とBという収束解の差分を取ってみるとわかることはたくさんあると思えます。仮に比較ができたとして、相曾さんの質問に対する私の答ですが、例えば、非定常解のある瞬間をとって見て、その時点で位相はほとんどずれてい

ないような場合でも、A と B の計算精度を高めて計算を続けたときに違うところに到達するという事はままあるんです。原因はよくわからないんですが、そういう事象はあります。ただし、それが本当の定常解、航空で使われているような定常解を求めるようなソルバーに対して言い切れるかどうかはわからないのですが。定常解に至る収束過程のある一瞬に対して、A、B が同じようなものであっても同等の収束条件を満足した後に、あるいは C_D なら C_D を完全に数値まで一致させてみても、全体を調べてみると解が異なるということは結構あると思います。

相曽氏：もう一つお聞きしたいのですが、その場合、どちらを物理的に正しいとか正しくないとか、どちらかがいいとか、結構はっきりとわかるものなんですか？ それとも、そういうのがなくて、ランダムにというか、そういうものなんですか？

白山氏：変な言い方ですけど、どちらも解として正しいんじゃないかと。完全に正しいとは言えませんが、どちらも解として正しいものに近いという可能性はあります。安直な言い方をすると、ナビエ・ストークス解の分岐の問題なんですけど。ナビエ・ストークス方程式自身にそういう性質があるので、どこで分岐するかってというのは細かなところで決まってくるような気がします。カオスのことは言いませんけれど、カオス以前の問題ともいえます。例えば、円柱の計算を細心の注意を払って行くと、対称渦が成長し続ける場合もあれば、カルマン渦に移行する場合があります。カルマン渦に移行する場合において、格子をどんどん細かく切っていくてもやはりカルマン渦になります。B を対称渦のケースだとすると、格子を増やしてもやはり対称渦のままです。言いやすい例でいえば、そういうことです。

相曽氏：ということは、格子の細かさも重要かもしれないけれど、最終的に計算機資源はまだまだどんどん豊かになるでしょうから、そのことを考えると格子の構造というのが計算の質の決め手になるということなんですか。格子の質っていうと、どれだけ細かいとかそういうことも入ってしまうので、そうじゃなくて、作り方のコンセプトというか構造みたいなものがキーになるという意味でしょうか。

白山氏：最初の話に戻って、結局、discipline の問題であると言ってしまうと簡単なんです。要するに流体の現象をどれだけ知っているかが大切なんです。それ（格子の作り方のコンセプト）は勉強して身につけるものであって、素人さんは絶対作れませんよということを、ある一方で言わなければならない。だけれども、そうじゃない仕組みも世の中にはあり得る、ということを確認する必要があります。verification というのはよく意味がわからないですけど、validation の一番良い方法って何だと思いませんか？ verification っていうのは定義だと数値解との話ですよ。まあ、verification でもいいんですけど、もう一度聞きますが、validation で一番良い方法は何だと思いませんか？

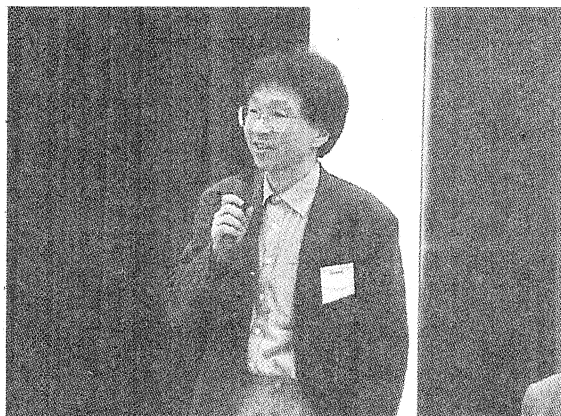
会場： ...

白山氏：詳しい人に聞くっていうのが一番良い方法

じゃないですか!? であれば、詳しい人を見つけるような仕組みを考えればいいんです。

相曽氏：データベースみたいなものですか？

白山氏：いや、私の所属する研究室では、船に損傷が起こった時を想定して、エージェント技術を利用した専門家の推薦システムというものを作っています。例えば、CFD に置き換えると、「こういう条件で発散したのですがどうしましょう」と尋ねると、じゃあ「宇宙研の藤井さんに相談されたし」というふうに自動的にメッセージが返ってくるというシステムです。このようなモデルを突き詰めていくと、同じ領域の人間で固めましょうっていうのをドメインモデルと言うんですがそれがベースになってしまいます。想像に難くないのですが、ドメインモデルを使うとやはり特定の人に集中します。その集中を回避する方法が今真剣に考えられています。そういう世界もあるんです。



東京大学 白山氏

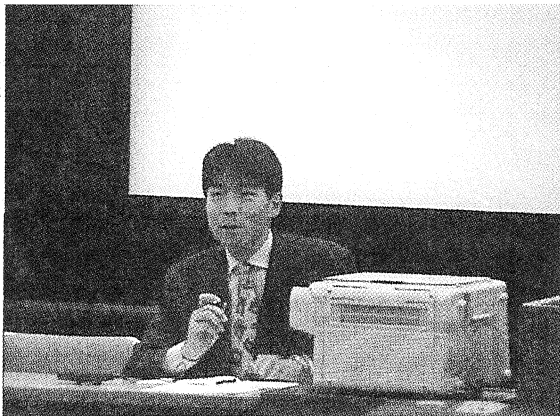
相曽氏：ここにいる皆さんも同じ事をお考えなんですけれど、ノウハウっていうのをできるだけ理屈にしていこうと言うか、ノウハウじゃなくてそれらを論文にできるような形にしたいなと思っています。一方で多分それは見果てぬ夢かなとも思っています。そこら辺はどうなのでしょう？

白山氏：大学に移ってすごく良かったのは、暗黙知を形式知に変えるということの一つのテーマとしている研究室に所属したことです。設計工学の中には、暗黙知を形式知に変えるという仕組みというか方法論が発達しているところがあります。熟練者のノウハウというものから、いかに知識を抽出していくかという方法論です。まだまだ人間的なんですけれども、経験的というか、けれども、そういう方法論があるので、相曽さんの言われるような論文にできるような形にするためにも使えるんじゃないかと思っています。

松尾氏：終わる前に言っておきたいことがあります。格子依存性っていうのは信頼性のひとつの component だと思うんです。格子はパラメータ依存性とも言えますか、その他に精度とか、あるいは再現性とか、robustness とかですね、そういうものがあるんだと言って、そういう信頼性の component を突き詰めていくっていうのは、ひとつ活動の有り方としてあるのかなと思います。例えば乱流モデルを使った計算を私はやっているんですけど、皆さん Baldwin-Lomax という

のはよく使いますよね。で、それを使うとオフデザインなんかだと、たいがい合わないっていうのも皆さんよく知っていますよね。で、合わないのも、どう合わないかっていうところまで良く知っていると思います。しかも、必ずそういう結果がでます。これは信頼性という点では極めて信頼性が高く、必ずショックは後ろにいてしまいます。で、必ず結果も出てくれます。ところが、高次なモデルを使うと、発散したりですね、まあ結果がいい場合もありますけど、そういう意味では再現性が悪いと言えその点ではこれはバツとなります。確かに精度は高く、精度＝信頼性ということで言えば信頼性が高いんですけど、他の観点だと信頼性が低いという風に私は思っています。信頼性と言っても component、まあ格子っていうのはかなり重要なファクターですけど、他の component もあるという風に思います。

司会：すみません、時間の方がもうなくなりまして、司会が不慣れなせいでかなり迷走した座談会になったと思っています。最後に白山さんがいい言葉を残してくれました。「何かわからなかったら宇宙研の藤井先生に聞け」という言葉で締めくくらせていただきたいと思っています。



航技研 高木 (司会)

藤井氏：あまり喋らないつもりだったんですが。あまりいい結論ではないようなので一言。結局、信頼性というのは出てきた計算結果を何を使うかによってすごく違うわけですね。圧力分布が欲しいのか、力でいいのか温度も欲しいのか、それによってすごく違う。従って一概に信頼性というのは議論できなくて当たり前なんですけど、じゃあ何ができるのかっていうと、できることは、こういう格子でこういう計算をしたらこういう結果になっていますよと、もし実験値があればそれもそこに載せておいて、そういうデータを山のように出してあげて、コメントはそれを利用する人に任せるといった形が望ましいのじゃないかと思っています。要するに材料を提供してあげるということを積極的に、特

に航技研は優れた計算機資源がありますから、その利点を生かして、そういうものを大いに提供して頂けるといいと気がしますね。格子についても、結局は白山さんが言ったように流体现象論なんですよ。そこを知らないといけないわけで、闇雲に数でどうだって議論をしても結論は何も出ない。ですから、やれることはさっき言ったのと同じように、データを出す。こういう格子でこういう計算でこうだと。あとはデータを使う人に任せるとするのがひとつ、いいのじゃないかなと思います。

それからもう一つ言申し上げたいことがあります。今議論したような計算上の色々な心配というのはあるのですが、計算上の色々な心配以上に、例えば、CFDは何でもできるんだと思ってその結果を正しいと思ってしまう人の方が世の中には多い。先程昼の部の時に小川さんがそういうコメントを言われていましたよね。ここにいる人達はほとんどそうでない人たちですけど。宇宙機とか航空機を設計する立場で言うと、そういう心配をどうやって排除するかの方が、もしかしたらもっと大事な事かもしれない。それはここで議論することではありませんが、そういうことをどう排除していくかってことにも少し配慮があるといいかなと思います。

嶋氏：これに関して、CFDの計算を頼まれたりする時によく言われるんですが、CFDは難しい難しいと言われる。それで、我々の会社がCFDプログラムを作っていく上でできるだけ使い易くするよう努力しているんですけど、その時によく混同されるのが、CFDプログラムを使うのが難しいということと、流体力学が難しいということを混同されるわけですね。だから、CFDプログラムの機能としては非常に使いやすくてできるかもしれない。でもそれが扱っている対象が流体力学である以上、やはり流体力学はいつまでたっても大学生が落とす単位であるでしょうから、それは簡単にはなり得ないです。だからCFDを使う人は、CFDは初めてでも流体力学は結構知っていないと、ちゃんとした答えが出ないという事になる。その辺は区別しないと、それは流体力学が難しいのかCFDの問題なのか分けないと答えが出ないのじゃないかと思っています。

司会：ありがとうございました。うまくまとまらなかった座談会ですけども、どうもありがとうございました。

本稿は航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2001、特別企画セッション「信頼性向上の研究」で行われた座談会の内容を再現したものです。パネリストとして参加していただいた皆様へ、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

司会：高木亮治