

パネルディスカッション

「Can EFD/CFD Integration Maximize Productivity?」

パネリスト（登壇順）： Richard J. Schwartz（ATK at NASA Langley Research Center, USA）

川添 博光（鳥取大）

若井 洋（富士重工業）

橋爪 祥光（スズキ）

渡辺 重哉（JAXA）

司会： 澤田 恵介（東北大）

澤田：コーディネータを承りました東北大学の澤田と申します。よろしくお願いします。本日のパネルディスカッションでは、まず EFD/CFD の融合という切り口、それとパネルディスカッションのタイトルである生産性を最大化するという切り口、この二つで話を進められたらと思っております。



前半の EFD/CFD の融合について、このように一同に集まってさまざまなアイデアや実例を伺えることはなかなかありません。本日は実例を通じて融合のメリットは何か、その先に何があるのかというところを私も勉強したいと思っております。

生産性の最大化については、まず生産性の定義がいろいろあると思われます。パネラーの皆様は

職種も業界も異なりますから、統一的な話にはならないでしょう。こちらも、こういう融合で生産性がこれだけ上がったという実例をお聞きして、その先にある最大化を展望できればよいと思っております。活発な質疑をお願いします。

ではまず、パネリストお一人ずつプレゼンテーションをしていただいてからディスカッションに入りたいと思います。最初に Schwartz さんお願いできますか？

Schwartz: EFD と CFD の融合について一番の課題だと思うのは、これがなぜ必要なのかと考える人が多い点です。このような融合の研究を行うメリットは何かというのも問題です。研究者は大きく二つのグループにわかれます。一部は融合の研究に否定的で、たとえば風洞について我々が行った可視化やグラフィックス化についても、それは今までやってこなかったことであり、今さらそれがどうして必要なのかと言ったりします。従来型の XY プロットで必要なことはわかるからいいじゃないか、カラーで飾ったり、コンピューターグラフィックスで絵を描く必要は別にないじゃないかと言うのです。でも逆に、これなしで風洞実験ができるはずがないというエンジニアもいます。だからなぜ有用なのか、どう役に立つのかを説明するのが大変です。先程のプレゼンテーションでもお話ししましたが、ああいう形にすれば全体的

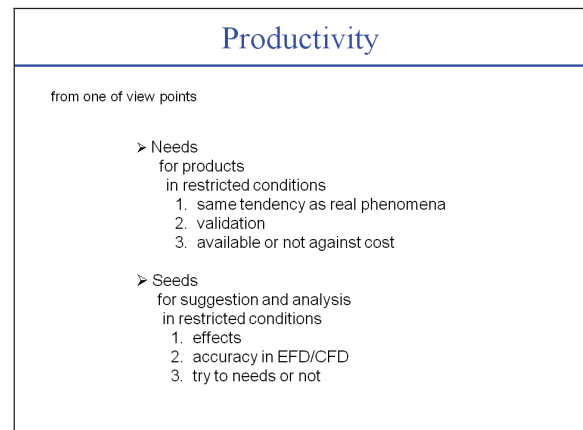
な情報が感覚的にわかるということが大事なのです。

英語のパイロット用語で **situational awareness** というものがあります。飛行機を制御するとき、回りで何が起きているのかできるかぎり多くの情報をリアルタイムに知るという意味です。私は風洞でも同じように考えるべきだと思います。膨大な量のデータが入って来たとき、その情報を完全に理解することはできなくても、少なくともその情報が何を意味しているのかはわかります。圧力や温度が適切であるとか、つじつまが合っているとか。風洞試験に変更を加えたあと、戻ってやり直すというのはほとんど考えられません。だから、何か問題があってデータを失った場合、そのときその場で気づきたいわけです。これが大きな問題としてあります。もうひとつのポイントは、最近では **CFD** が広く普及した結果、可視化で理解を深めるために、計測も **CFD** と同じくらい高い空間解像度で行うようになりました。ここに、**EFD** と **CFD** を組み合わせて比較することの大きなメリットがあると私は思います。

最後にもうひとつ。**NASA** で融合を推進する力は研究者からではなく、プログラマネージャーからきています。プログラマネージャーはプロジェクトで成果を出すことが大事であり、データが正確なら **EFD** で得たものでも **CFD** で得たものでもかまわないわけです。そのデータを使ってプロジェクトの意志決定を行えばいい。だから、**EFD** のチームと **CFD** のチームをまとめて融合を推進するわけです。その結果、ここ数年 **EFD** チームと **CFD** チームの協力がずいぶんと増えました。特に、境界層遷移など解決すべき具体的な課題があるプロジェクトが増えたと思います。

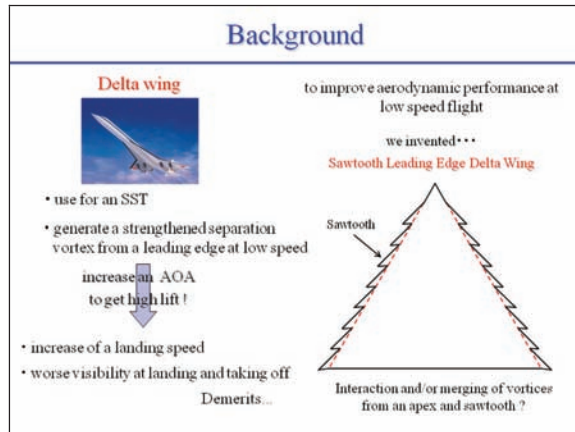
澤田：次は鳥取大学の川添先生お願いします。

川添：融合における生産性ということですが、これはとらえ方がいろいろあって難しい話です。

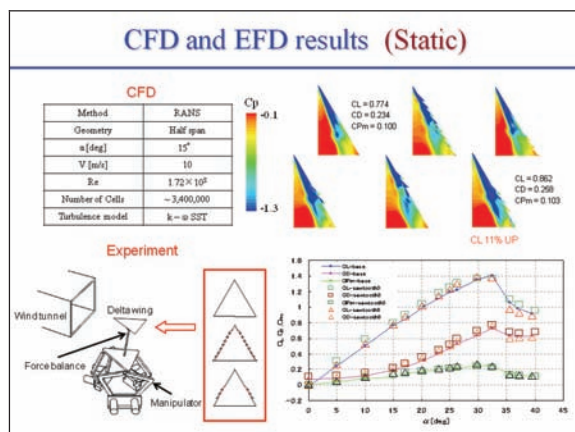


これから三つの点についてお話しします。まず **EFD** と **CFD** の融合。これは必要ですが、これが生きるにはある拘束条件が必要だと考えます。流体という世界は非常にパッシブな領域で、資金や夢という観点ではきびしいものがあります。その理由は、結局、みな解析に終わっているからではないかと。発見などがない、あっても物につながりにくいのが流体の世界なのだろうと思うのです。たとえばニーズとシーズという考え方があります。ニーズは製品とアプリケーションとの間にあるものだと思います。文科省や国土交通省が決めてトップダウンで進めてくれるならニーズとしてやらざるをえないのですが、現実は違います。であれば、シーズから考える必要があるでしょう。シーズでは、「このようなものを作りました」「このようなものがあります」、だから、「よかったら使ってくださいませんか」と提示する。解析や計算精度も押さえる必要がありますが、精度はそれほどいらないかもしれません。でもとにかく、土俵の中で必要なものはあるはずです。たとえば物を作るとき、形状をこう変えたら良くなるのか悪くなるのかさえわかればいい。定性的にさえ合っていれば **CFD** としては **OK** で、それを **EFD** で確認すれば動ける。そういう世界もあります。しかしこちら側では精度もある程度は確保しておいて、「作

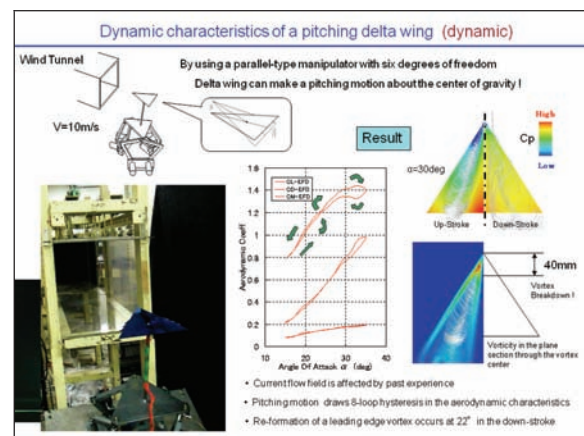
りましょう」「提示しましょう」となるのではないかと思います。いずれにせよ、EFD と CFD の融合は今後必要になると考えています。



二番目の話ですが、EFD、CFD の関係でやってきた例をお話しします。シーズをまくと考えるなら、小さくてもいいからこのようなうれしいことが起こりますよと提示できたらと思うのです。そう思って取りあげたのがデルタ翼です。ちょっとしたデバイスをつけると面白いなどわかれば食いついてもらえるかもしれないと思ったのです。そこでこのような、のこぎり状の羽根をたくさん付けてみました。頂点から出る前縁剥離渦に横から出る渦が干渉したりマージしたりして、よい空力特性が得られるかもしれないという発想です。



これが今の基本形で、あと羽根を 8 枚付けたもの。できれば少ないほうがよいので、どこに付けたらよいのかを探りました。上が数値計算の解析結果、下が実験結果です。どちらでも「3 つをこのあたりに付けるとよい」という結果になったので、あとの作り方は飛行機メーカーのほうで考えてくださいというわけです。このとき、圧力が下がって非線形の渦揚力を少し強めてくれるという結果が得られました。迎角は 15 度です。離発着ではなるべくスピードを遅くしたいけれど、それで揚力を上げようとするれば視界が悪くなる。それが、これをこの位置に付けるとかなり改善されるという結果になりました。15 度にしたのは、コンコルドが 18 度くらいで離発着をするからこのくらいならいいだろうと選んだ数字です。なお、これは静的状態での数値計算と風洞実験の結果です。



今度は動的な話です。飛行機は動的に動いて離発着をしますし、事故が多いのは地面の近くです。突風など擾乱があると普通の飛行機ではダッチロール、デルタ翼ではウィングロックと呼ぶ状態が発生します。ローリングとヨーイングに横滑りが入ったような周期モードのフライトです。しかも地面近くでは地面効果があります。このとき、静的な格好だけでよいのか、それを数値計算で見積もることができたらよいと考えたのです。ここに

示すのはピッチングです。同じ迎角 30 度でも、上げていくときと下げてくるときでは流れがまったく違います。やはり静的な解析だけでは駄目なのです。この計算結果を見ればわかりますが、ヒステリシスループになっています。動的な過去の流れ場の影響を引きずって次に入って行くからです。今度は横方向に±10mm、ローリングで±10度、ヨーイングで 10 度の動きをしたときの全縁剥離渦の可視化結果です。面白いのは、ルートコードの 1/3 くらいの高さで横滑りとヨーイングが無いピュアなローリングをすると不安定なのに、そこにヨーと横滑りが加わると安定方向の動きになることです。こういう話を数値計算である程度まで持ってゆき、実験で確かめるということができればとても面白いと思うのです。

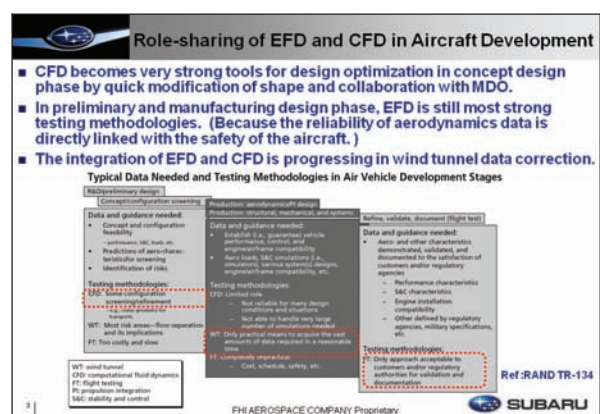
Fluid mech.lab. Aerospace eng. Dept. Tottori University				
Wind Tunnels				
#	Category	Specification	Test Section	Notes
1	Arc plasma	M= 3~7 10.5 kW	Φ 0.02m	designed & made
2	Shock tunnel	M=3, 5, 7	Φ 0.02m	as above
3	Low-speed Gottingen-type	V=5~35 m/s	1.0m × 0.75m	as above
4	Low-speed Blow down	V=2~13 m/s	0.4m × 0.4m × 2m	as above
6	Low-speed Blow down	Up ward V=3~10 m/s	0.495m × 0.495m	as above
7	Surface Wave Plasma			borrowed

風洞の紹介をしてくれと言われているのですが、私のところには今、アークプラズマ風洞、衝撃風洞、ゲッチングタイプ低速風洞、吹き出し型風洞、上向きの風洞があります。あと、変わったものとして表面波プラズマを使った気体を作るものがあります。すべて手作りで、少々借りているものもあります。

澤田：ありがとうございました。たくさんの風洞をお持ちですね。では若井様お願いいたします。

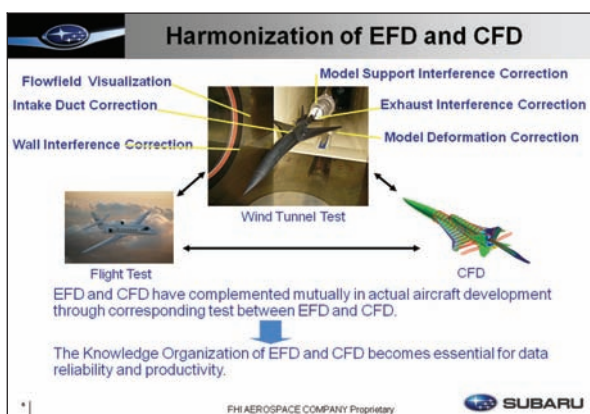
若井：富士重工の若井でございます。風洞、EFD

と CFD の統合による生産性の向上ということで、簡単にまとめてまいりました。航空機開発の現場では EFD と CFD の役割分担についてコンセンサスができています。その EFD と CFD を統合して生産性を上げるとなると、非常に大きな知見が必要になります。実験屋さんが計算する知識を持つ、計算屋さんが実験の知識を持つ必要があるわけで、知見のデータベース化というか整理する必要があると思います。では具体的にどのようなことをしているかと言いますと、



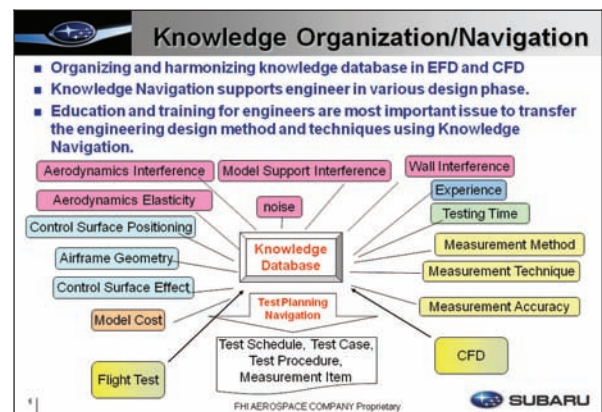
これは、コンセプト設計、基本設計、詳細設計、飛行証明 (flight certification) と航空機開発のフェーズごとに、空力関係を中心になどのような流体ツールが主力なのかを米国のシンクタンク、RAND 研究所が最近まとめたものです。日本もこれとほぼ同じ感じですが。最近では、研究開発からコンセプト設計の段階で形状を絞り込むときには CFD が主役です。CFD なら形状をすばやく変更できるし、MDO (注：多分野最適化 Multi-Disciplinary Optimization) や最適設計ツール等との親和性が高いのもメリットです。失速等、非線形のところは風洞実験で確認しますが。しかし実際に設計が始まったあとは、飛行機は信頼性が安全性に直結します。人の生死に空力設計が関与するので、信頼性を重視して今後も風洞が

主力になるでしょう。RAND 研究所のレポートも同じ意見ですね。絞り込んだ形について信頼できるデータを大量に生成するのは風洞ということですから。そして最後の **flight certification** はやはり飛ばなければならない。大体このような棲み分けになっています。ただ、このフェーズは **EFD** と **CFD** が補完し合っているというのが現状で、だんだんくっついてきているというのが実感です。



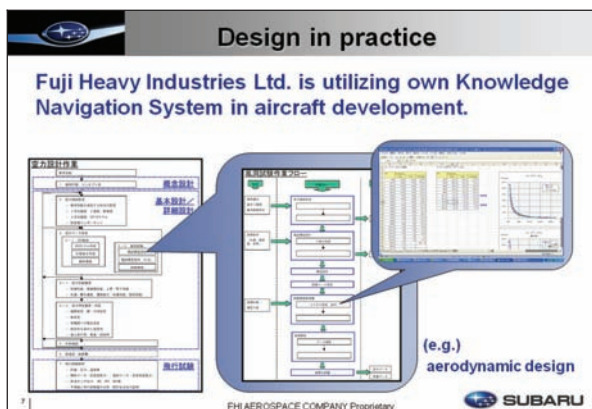
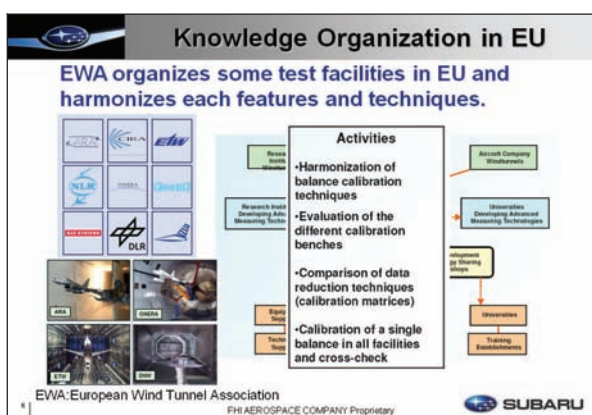
それでたとえば、フライトデータと風洞試験と **CFD** と言うけれど、風洞試験というのは完璧ではないわけです。その補完を限られた予算と期間で開発したいなら、こことここをくっつけて生産性を上げなくてはならない。具体的にはいろいろありますが、例えば模型支持形態です。支持の干渉とか、我々が苦勞している模型の変形とかです。どこまで動いたかはビデオで見られますが、では動かなかったらどれだけの空気力か？ 特に横・方向のデータ等で主翼のたわみは致命的なので変形は非常につらい。あと、インテークダクトの補正、流れの可視化なども **CFD** が得意です。風洞模型は非常に小さいので、インテークダクトの抵抗やピッチングモーメントの補正をしたくても圧力センサーを少ししか入れられません。センサーを増やしたくても大きい模型は風洞に入らない。だから少ない圧力孔の風洞データと **CFD** の計算

結果を使い、風洞実験のデータを絶対値にして **CFD** のトレンド・データを乗せるという形で、モーメントのダクトの中の圧力損失等を細かいカーブで補正したりします。言うほど簡単ではなく、実際はある幅の範囲で最確値を取ろうということになります。こういう融合もあるわけです。とにかく、風洞実験をする人も **CFD** でどこがどのように補正できるのか、どこに **CFD** 的アプローチを組み合わせたらよいデータが取れるのかという具合に「統合」が必要で、扱うデータも知見もとても複雑になっていることが、お金も期間も限られた開発の現場で大きな課題になっています。飛行機メーカー各社が苦勞しているところです。



実験屋さんに完全な **CFD** の知識を求めても扱いきれなくなるので、実際はデータベース化してナビゲーションサポートする必要があるでしょう。従来はある飛行機の模型をあるサイズで実験してある精度を出したいというとき、「どの天秤を選ぶか」「どの風洞を使うか」など風洞の中だけでナレッジの統合をしていました。それが最近では、「**CFD** でどこを補正すればいいか」あたりでも計画の段階である程度詰めておかないと効率的な試験ができなくなりました。また最後は「飛んでなんぼ」であり、フライトデータのデータベース化や比較等もこの段階である程度覚える必要があるのです。

のようなシステムを組んでいます。データベース化には注意しなければならない点もあります。そのデータを読める人間がいなくなってしまうという問題です。機械化を進めると熟練の空力設計者がいなくなってしまうので、エンジニアの教育や育成が大事になります。自動化した上で、それを読み解く人間をどのように育ててゆくのが究極的には一番大きな問題です。「人ですね」が結論ではないけれど、大事なポイントではあるのです。



あと、最近のひとつの風洞で知見を集めることが難しいので、欧州、米国なども含め、「いろいろな風洞で協力して知見を集めよう」「どこの風洞は何が得意」などの取り組みをしています。富士重工では、開発のフェーズに沿って過去、各試験でどのようなデータがあるのかをイントラネットで

貯めて、生産性向上に役立てようと努力しているところです。

澤田：ありがとうございました。では次に、先程ご講演いただいた橋爪様よろしく願いいたします。

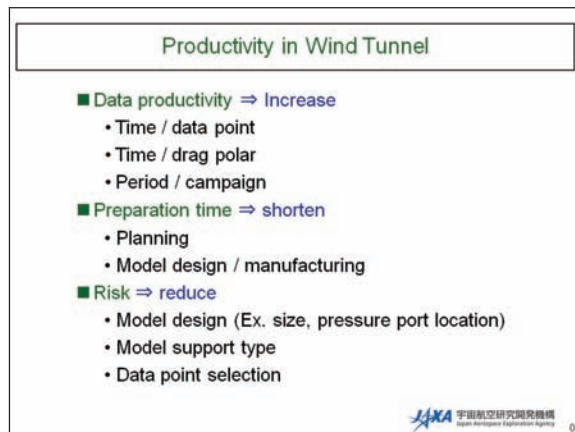
橋爪：スズキの橋爪です。再度よろしく願いいたします。EFD/CFD の融合ということですが、幸い私はエアコンや車体の空力などで CFD も EFD も見なければいけない立場にいます。大事にしているのは、CFD 屋は EFD 屋にだまされないこと、EFD 屋は CFD 屋にだまされないことです。新入社員はまず風洞、すなわち実験をやらせます。実験について 2 年間くらい勉強させたら、やりたい人には CFD をやらせる。CFD は機種開発でつらいので、疲れたら風洞に戻します。風洞の車の上に CFD の結果を乗せたものを最初にお見せしましたが、このようなやり方をしているおかげで部下全員があれをできるわけです。CFD でジョブが飛ぶと、「110 何コマの圧力分布だ」「いや、こっちから見たのだ」「上から見たのだ」と言っているもののパターンが JPEG で自動的に落ちます。それがデータベースにしまわれ、風洞屋が前 45 度、真横、後ろ 45 度で写真を撮ります。また、同じパターンで煙を出すことになっているので、誰でもそれを重ね合わせることができます。このような形で実験と CFD の結果が比較できるようになっています。今のところはまだ圧力分布くらいしか測れませんが、この 5 月ごろに PIV（注：粒子画像流速測定法 Particle Image Velocimetry）が入って流速分布が測れるようになると、議論がもっとできるようになるだろうと思っています。

生産性については、自動車メーカーの場合、まず生産現場の生産性、ラインスピードの速さが問題になります。このあたりは設計によっても生産技術によっても変化します。ただ、車の開発現場における生産性というのは一機種何ヶ月で作れる

かだと思うのです。今は不景気なのでどんどん開発する必要はないのですが、地球環境問題などの厳しい問題があり、人材を投入して技術開発をしなければならないという面があります。そのようなわけで、車の開発のスピードはやはり重要です。そのため、CFD といつか、CAE (Computer-Aided Engineering) の精度が強く問われます。外すとボーナスが無いくらいの感じです。自動車メーカーというのは、なんとか試作を無くしたいと思うわけです。本型で車を作ってテストしてみたら全部一発オーケーが夢といつか、それが我々開発担当にとっての生産性向上だと思っています。

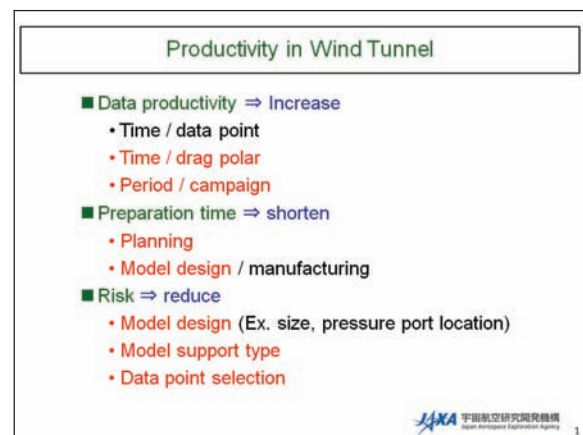
澤田：どうもありがとうございました。それでは、最後に JAXA の渡辺様お願いいたします。

渡辺：さきほど澤田先生から生産性の定義はいろいろあるとのお話がありましたが、私も自分が関係する分野の例を書いてみました。



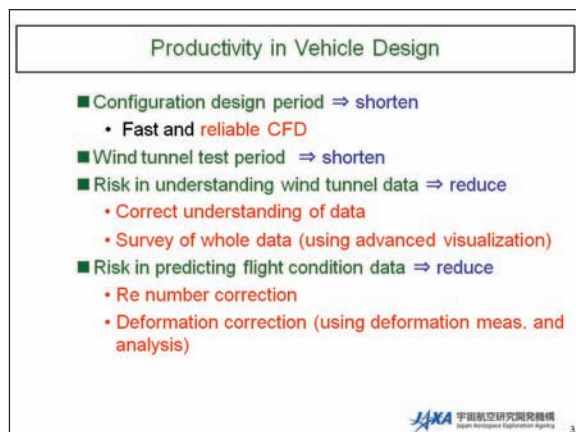
風洞試験の生産性といえば、わかりやすいのはデータの生産性です。1 データ取るのにどれだけの時間がかかるのかですね。さらに大きく考えると、ドラッグポラーを取るのにどれだけの時間がかかるかもあります。次に、一連の試験をやるのにどのくらいの期間がかかるのかです。試験の準備時間も関係します。実際の試験でデータを取る前に計画や模型の製作の時間が必要で、これを

短縮できれば生産性があがります。もうひとつ大事なポイントがリスクの低減です。短時間でデータが取れても、無駄なデータや間違ったデータを取るとやり直しになって生産性が下がってしまいます。模型の設計を間違えない、圧力孔の位置を正しくあける、サイズを正しく選ぶ、模型の支持の方法を選ぶ、データの計測点をどう選ぶかといったことも大事だと思うのです。



EFD/CFD 融合の技術を使えば改善されるであろうと思う点、JAXA が開発中で今日の最初の講演で紹介があった「デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞」、あれができれば改善されるだろうと思う点を赤字で示してみました。ひとつはドラッグポラー当たりの時間です。難しいところがありますが、事前に CFD で大体の特性を押さえ、風洞試験で不要なデータポイントを省ければ、ドラッグポラー当たりの時間を少し減らせるのではないかと思います。これに対し、一番上に書いたデータポイント当たりの時間は基本的に計測系からむので、融合で減らすのは難しいでしょう。それからこのところでも、同じような考え方で計測の形態や試験マッハ数の数を減らすことができればトータルの時間を減らせるのではないかと思います。試験計画については、従来過去の例を参考に試行錯誤で行っていたわけですが、CFD の

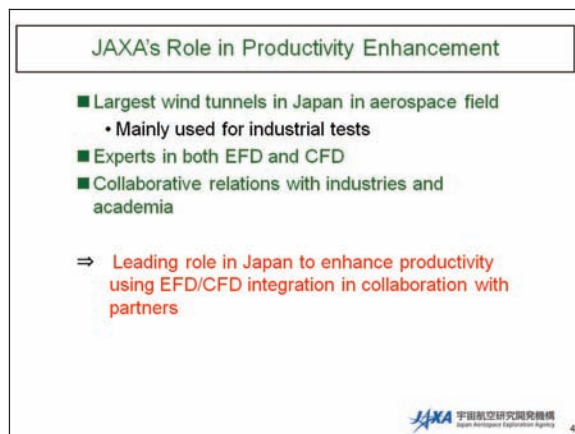
データを参考にすれば効率的なプランニングが可能になるでしょう。模型の設計についても、たとえば圧力分布がわかっているれば圧力孔の位置が効率的に決められるだろうと思います。模型支持方法も、下から支える、後からスティングで支える、上からブレード状のもので支えるなどいろいろな形態があり、支持形態で模型との干渉が変化するので、モデル毎や試験の迎角やマッハ数毎に一番よいものを選ぶのはなかなか難しいものです。これも CFD を活用すれば干渉が少なそうなものを予想できる日が来るのではないかと思います。計測データ点の選択も同じ話で、このように、風洞試験については EFD/CFD の融合によってある程度は生産性が改善できるのではないかと考えています。



もう少し話を広げて実機の設計についてですが、特に航空機や宇宙機の場合、先程主に CFD でやられるという話がありましたが、最初に形状を決める部分では、速い CFD、信頼できる CFD があるとよいだろうと思います。風洞試験のあと、試験データをどう評価するか、理解するかというところにもリスクがあるでしょう。たくさんデータがあっても解釈を間違えればおかしい設計に進んでしまいます。データをどう正しく理解するかという意味では、たくさんのデータの中でどれが重

要なのかがわからない段階において多くのデータを理解しやすい形で見るといったあたりが大事なのではないかと思います。

今日午前中から一番白熱した議論になっているところですが、実際の飛行条件での空力特性データをどう予測するのも問題です。いくらよいデータを取ってもここで失敗しては実機の開発になりませんから。大きく言うとレイノルズ数の補正や先程の模型変形の補正などが課題になるでしょう。それに対して CFD については、EFD/CFD を融合していろいろなパターンの比較・検証をしたり、さまざまなケースに適用して信頼性や適用可能範囲を絞り込んでゆけば、トータルの信頼性を上げられるのではないかと思います。また、実験では限られたデータしか得られないので、それを CFD データで補えればデータを正確に理解して流れ場を把握できるようになるでしょう。先程の Schwartz さんのプレゼンテーションを見ればよくわかるのですが、最先端の可視化手法を活用すれば多くのデータを短時間で深く理解しやすくなると思います。あとレイノルズ数の補正は、風洞試験でもレイノルズ数はある程度変えられるのでその範囲では補正ができること、また、海外には高レイノルズ数風洞があるのでそれも使ってレイノルズ数の変化による特性の変化を CFD で予測する精度を上げてゆくということでしょう。模型変形の問題はいろいろ計測も解析もできるようになってきており、それほど難しくないでしょう。



この中で JAXA の役割は何か、こうあるべきではないかと考えていることを書いてみました。JAXA は航空宇宙分野で日本最大の風洞設備を持ち、企業における実機の開発にずいぶんと使っていただいています。実験も CFD もエキスパートがそろっていますし、企業の方とも大学の方とも良好な協力関係を持っています。ですから、日本における EFD/CFD の融合を引っ張ってゆかなければならない立場なのだろうと考えます。生産性という意味でもそうでしょう。もちろん我々だけでできることではないので、パートナーとのコラボレーションが大事だと考えています。

澤田：ありがとうございます。ではまず、EFD/CFD の融合のメリット、技術課題、デメリットについて検討しましょう。朝からの講演に関連した話でもかまいません。会場の方からのご質問をうけたいと思います。

会場：いろいろと勉強になるお話、ありがとうございます。EFD/CFD の融合というと、いろいろなレベルや形態があるはずですが、私が関わっている仕事は多分、パネリストの若井さんや渡辺さんのところが直接関連していると思います。私の興味の対象は航空機の開発関係なわけで風洞と航空機の CFD となるのですが、その融合というと、たしか前回のワークショップでボーイングの Tinoco さんが話されていた中に、CFD と EFD を

パラに走らせるのではなく、それぞれ相手を助けながら段々精度を上げていくというような議論があったと思うのです。

今日のお話の中ではっきりイメージできるものとして、CFD が風洞実験をどのくらい助けられるのかという点があります。私もさまざまな風洞試験をしていますし、JAXA の遷音速風洞の計測精度を上げようとしているわけですが、ある計測精度、あるレベルの風洞実験データを生産するという意味では今までのやり方でよかったのかもしれないと思います。しかし、レベルがさらに高いことをやりたい場合は、今までの経験に基づいて風洞試験がうまくできる保証がありません。渡辺さんの「リスク」というお話にも関連しそうですが、従来より精度を上げたいとか、設計点だけでなくフライトエンベロープの広い範囲で精度を上げたいとかになると、風洞試験で測っただけでは駄目だと思います。そこに CFD を組み合わせると何が起きるのがわかるし、さきほどの支持干渉についてもそのような干渉があるときの流れ場については CFD がとても参考になるデータを出してくれます。それをもとに議論をしていくと、今まで考えていたことと違うことが起きているらしいとなる。自分たちが先入観で見っていたのとは違うことが出てきたりするわけです。

もうひとつ、若井さんから「ナレッジデータベース」というお話がありました。そちらへ進む面もありますが、少なくとも JAXA の風洞でいろいろな仕事をしていると、風洞自身でやらなければならないことがまだたくさんあるとも感じます。支持干渉を CFD で解析する、CFD で補正するという前に、実験データだけで十分補正できるところがたくさんあるのです。そのあたりを CFD で助けてあげれば、風洞の技術をもっと高められるのではないかと思います。この先には融合からいろいろな情報を取りだすなどがあるのでしょ

れど、その前にやるべきことがたくさんある気がします。CFD のデータベースと実験データベースがあって、それを組み合わせたらいい世界があるとは感じにくい気がして、注意すべきなのではないかと思いました。

澤田：ありがとうございます。それではついでながら、実験サイドではこのようなことに困っているという点をお話しいただきませんか。



会場：ここ数年困っていることはあります。騒音です。フラップやランディング・ギアから出る飛行機の機体騒音を調べようとしているのですが、騒音の計測はスズキの橋爪さんご紹介されたようなオープンな形の風洞で行います。これに対して空力データは完全にクローズな風洞の中で測ります。そうすると両方の風洞で風洞壁補正が必要です。グローバルな空力データに対して補正ができるのはわかっているのですが、空力騒音は非常にローカルな現象で発生しているので、果たして補正できるのかが問題になります。自分たちの風洞では音源探査で音を調べていたのに、オープンカートの風洞では遠方場騒音のデータを取っていたことについて先日気づきました。CFD をいろいろやって気づいたのですが、音の発生場所におけるローカルな速度が大きく違うのです。ではどう補

正すればいいのか。これは航空音響の世界で今後の課題とされている問題で、定量的に 3dB くらいの差がすぐに出てしまいます。

渡辺：今のお話、そのとおりだと思います。我々のハイブリッド風洞も、実験と CFD を比較する機会が増え、実験側がいろいろな問題に気付く機会が増える点がメリットだと思っています。すぐに融合へ行く部分もあれば、実験側でやらなければならないことに気づかされることも期待できるわけです。それから、我々が壁干渉や支持干渉で今後取り組まなくてはいけない点があります。壁干渉/支持干渉は普通、積分量である 6 分力を補正する、あとは気流の状態を補正するということまでであり、たとえば PSP（注：感圧塗料 Pressure-Sensitive Paint）で圧力分布を取っても風洞壁の無い時の圧力分布はわからないわけです。CFD ならやれますが、そのような補正などが EFD/CFD 融合の重要課題のひとつだと思うので、いろいろな方と協力して取り組めればよいと思っています。

若井：まだナレッジオーガナイゼーションやナビゲーションというフェーズではないだろうというお話ですが、そのとおりだと思います。支持干渉については、支持の仕方を変えて尾部をきれいに出すなどの工夫もしますが、開発ではコストも守らなければならないので、最近では CFD でやるしかないことも増えています。飛行機の形が多様なのも問題です。旅客機なら「普通の天秤でいいよね」「普通の模型支持でいいよね」となりますが、午前中のセッションにあったと思うのですが、Scaled Composites 社が開発した SpaceShipOne のように変わった形だと、風洞試験はやらず、ほとんど CFD で設計となったりします。飛行条件が違う、大気条件が模擬できない、変形であるアスペクト比の飛行機が風洞試験ではできないなどいろいろな問題があります。予

算などの制約のなかで CFD に頼らざるを得ないところがあります。

CFD がどのくらい使えるか、どのくらい足並みをそろえて風洞を使えるかなど、企業と大学と研究所とで壁を越えるのはかなり難しいですね。我々が社内でやっているのはミリタリーのデータであったり、会社から契約をいただいてやっているデータだったりするわけで、それをオープンにできれば皆様で結束できるのですが、秘匿性などの壁があるので難しいわけです。このあたりは公共の JAXA なりが主導していただくほうが進むでしょうし、MRJ のように民間のものが進めばその部分のレベルが一気にあがると期待もできるのですが。

会場：さきほどの空力騒音試験のお話で思い出したのですが、私は昔、自動車から発生する空力騒音を、1/10 スケールのモデルで流れ場の外から測ったことがあります。当然、相似則が問題になり、サイズが 1/10 なら渦のスケールは 1/10、つまり周波数は 10 倍になるはずですし、面積は 1/100 になるので音圧は 1/100 になるはずですが、それが本当かどうかをまず確かめようとしたのですが、結局よくわからないままになりました。このあたり、航空機分野ではわかっているのでしょうか。

会場：そのあたりは本当に難しい問題です。レイノルズ数効果まで入ってきますし。ひとつだけ補足させていただくと、空気力は動圧で無次元化して考えられるのですが、騒音のレベルで騒音の発生源を単純化しようとしても、単極子は速度の何乗則で、双極子は何乗則、四重極は何乗則とみな違うのです。速度のずれ分を考慮して六乗則あたりでやると合うかとやってみても大抵合わない。ピークがいくつも立っていればスペクトルの高さやズレからわかりますが、ブロードバンドの音だと何をやっているのかわからなくなります。機体

騒音は乱流が原因で取り扱いが難しいのですが、最近は問題になることが多く、いろいろな議論が行われています。

会場：「何でも融合すればいいのか」という先程のお話に通じるのですが、どのような問題を解いているのかを考える必要があるでしょう。乱れない上流条件で飛行速度も迎角も決まっている。そういうきれいな問題を解くのなら、CFD でどう解いて実験でどう計測するかという話になります。CFD はどこまでシミュレーションできるのか、融合というよりも CFD が EFD にどれだけ近づけるかという話です。一方、飛行中の上流乱れがわからないなど入口条件が不確定な場合、計測データを使って CFD に取り込み、どのくらい合うかという評価をタイムリーにやっていかなければならなくなります。これは融合しないとできないことでしょう。このあたり、問題の切り分けを明確にしたほうがいいと思います。今議論されている融合というのは、前者の「CFD が EFD にどれだけ追い付くか」がまだまだだから、そこをどう効率化しましょうかという話に絞られているような気がします。みなさんはどうお考えでしょうか。



澤田 恵介氏

澤田：「CFD が EFD に追いつこうとしている

段階」というご指摘かと思いますが、それについて、たとえば川添先生、大学でのご研究では使い方がシーズを作るところで、それほど定量性は要求されないとお話になりましたが。

川添：難しい問題だと思います。先程おっしゃられた前半、特に「すべてわかっていてそれをやってみたらどうか」という部分も、私は融合だと考えています。ただそれは、CFD の計算精度を確認するという意味の融合でしょう。CFD も EFD も使い方がいろいろあると思うのです。全て合っていなければいけない場合だけでなく、探索をしたい、パラメータがどのくらい効くのか感度を見たいなど、傾向さえ合っていれば使えるケースもあります。

たとえば 24 年ほど前にルマン 24 でベンツが大勝したことがあります。その主因は吸気ポートがまっすぐに立っていたこと。それを見て「使える」と思いました。悪い砂を使ってシリンダーヘッドをふけば安く作れますし。ただ、その粗さが体積効率にどれくらい効いてくるのかが問題です。また、レース車ならまっすぐでよくても、市販車で物が積めて居住空間が必要でとなると拘束条件が多くなります。「どこまでなら許せる？」と絞り込むときは「精度がどこまで要るのか」と。定性的に合えばいいという使い方もあるのです。それを EFD/CFD の融合と呼んでいますが、この技術を何に適用するか、何が欲しいのかが問題でしょう。私たちはつい合っている、合っていないという議論をしてしましますが、まず使う目的を明確に意識すれば、必要な範囲の使い方ができるはずだと考えています。

会場：川添先生のお話は私もリーズナブルだと思います。あと問題だと思うのは、評価関数が定まっていないという点です。「CL や CD が何%合えばいい」など評価の仕方はいろいろで、評価関数を決めたあと、「このくらいの計算ならこのくら

い簡単でいい」「この評価関数で±2%までなら 1/10 の計算負荷でできて生産性がある」などの方法を具体的に考えていくべきだと思うのです。個別の問題に対して「評価関数で何%だ」などと決め、その計算負荷はこれだけとしてトレード・オフ点を求めることも大切なのではないかということです。



川添 博光氏

川添：おっしゃる通りです。使い方さえはつきりしていればよいのです。極端なことを言えば CD は表面積分したような格好のグローバルな値です。だから CD は意外に合うのですが、表面の圧力分布は違っていたりします。この例のとき、私たちは「CP 分布が合っていればよし」としました。それが今言われた評価関数なのでしょう。これはやはり使う側が明確にするべきです。今話された状況を新入社員でもできるようにすれば、それはうれしいでしょう。しかし私としては、実験屋さんも数値計算屋さんも結果を出す、どっぴり浸って現象を理解し、こうなっているというデータを自信をもって出す。そこからユニバーサルな結果がある程度信じられるようになる。今はその過渡期にあるような気がしています。究極は誰が使ってもきちんと結果が出てくることですが、

今は、その現象を本当に理解している人、どっぴりつかっている人がひねり出すものだと思います。

澤田：橋爪さんは先程、「ドラッグがたとえば8%では駄目」「3%くらいまでいかないと使い物にならない」というようなことで、車の開発の現場ではある種の評価関数をお持ちなのかと思いますが、今の議論を聞かれて何か思われることはございますか。

橋爪：車の開発において CFD で CD 値を予測するとき、何のためにやっているのかが問題になります。燃費のためであって最高速のためではないなどから決まってくるわけです。実車ができたあとどこまで直せるかもあります。いわゆる目標精度は、さきほど説明した通り存在します。ただ川添先生がおっしゃったように、CD は意外なほど合います。ルーフを下げたら CD が下がると思ったのに計算では下がらず、デザイン屋を説得できなかったことがあります。実際作ってみると思いきり悪く、粘土で削ってみるとよかった。CP 分布が合わない则ち本当の信頼性は出ないのです。新入社員がブラックボックスで計算して出せるレベルにはなっていないと思います。

会場：若井さんの発言にあった「交流が進まない」「ミリタリーのデータが出せない」など、必ず参照しにいくデータブックのような形で各社がノウハウを持っているようなお話を聞くのですが、それがブラックボックスになっていて設計する人たちもなぜそうなるのかがよくわかっていなかったりする気がします。例えば CD の話で欧州の人たちは「レイノルズ数の影響」「表面粗さの影響」「風洞の中に飛んでくる粒子の影響」など、また、「突出物が本当は効いているのではないか」「変形はどうか」など、要素に分解して理詰めでやっている気がします。このあたりは共通する話なので、ぜひとも JAXA などに音頭をとっていただいで日本でもみんなが協力できる体制が作ればよいと

思います。

渡辺：欧州のやり方は私も納得できると見ています。なぜ日本でうまく行かないのでしょうか。本質がよくわかっていないのですが、欧州の方に聞くと、利害関係がそれなりにある航空機メーカー同士が何社も入って研究所と大学とセットになって個別の課題の解決を徹底的に追求するんですよね。大きな金を取って来れるというものもあるとは思いますが、このあたり日本でも見習えたらよいと思います。日本でやろうとしたとき障害になるのは、技術の優位性がないと企業は戦えないというあたりでしょうか。乗りこえ方はわからないのですが、EFD/CFD 融合でも他のテーマでもよいですからやりたいですし、そのためには多分 JAXA が頑張らなければいけないだろうと思っています。



若井 洋氏

若井：20 年ほど前、オープンプロジェクトがあったとき、その辺りを横一線で行おうという話がありました。米国がスペースシャトルで得た教訓、要するに CD なり舵効きデータなりが「どのくらいの幅なら設計データとしてチョイスしてよい」という基準をデータベースで作ったのです。「風洞による違いはこのくらいに納めよう」、難しいのは

「フライトと風洞の許容差はこのくらいにおさめよう」などです。HOPE（注：旧宇宙開発事業団/航空宇宙技術研究所が共同で開発していた宇宙往還機 H-II Orbiting Plane）をやられていたりしてご存じの方が多いとは思いますが。日本で HOPE を開発しようという時も、各社非常に怖い思いをしたわけです。うちの風洞データにエラーバーを乗せ、それがシャトルの教訓で定められた基準に入るのか入らないのかが明らかになってしまうという話なので。あれは非常に良い取り組みで、風洞はどうか、それで CFD はどうなのかというあたりを細かくやられたはずです。あれはミリタリーではなく、ナショナル・プロジェクトで民間的な活動というオーガナイズしやすいテーマでした。それ以降なかなかないのですが、過去にはできたことがあるわけです。あのころは対応風試をよくやりました。

もうひとつ。ミリタリーうんぬんという話をしましたが、実際には余力の有無が一番大きいところ。企業では、リソースを割けるのかというあたりが障害になると思います。社内ではちょこちょこやっているのに大きな流れにならないのは、企業の縛りがあるからではないでしょうか。

澤田：Schwartz さん、ViDI システムを作られた時にいろいろな米国企業や軍の方と一緒に作られたのではないのでしょうか。多分ファンドを持ってこられて、要求を聞かれて、その条件に合わせていく時に、いろいろなところが入ってきて一緒に作られたのではないかと思います。しかし日本では HOPE プロジェクトのようなものがなければ、競争する会社が協働してシステムを作っていくのは難しい状況です。米国では、たとえばボーイングやロッキードが協力してやりましようとなることはあるのでしょうか。



Richard Schwartz 氏

Schwartz：それは状況次第でしょう。米国ではここ 20 年から 30 年ほどで航空宇宙関係の企業が大きく減りました。昔はボーイング、マクドネル・ダグラス、ロッキード、ノースロップ、ロックウェルとたくさんありましたが、今はほんの数社になってしまったのです。企業間の協力が増えたのは、その結果だと思います。ある技術についてはある企業が強みを持っている。そこが、他の部分では直接競合する部分が多い他社と協力したりするわけです。もちろんその場合、チームとして協力できるだけの合意が必要です。Ares ロケットの場合はボーイングにノースロップ・グラマン、ATK が協力しましたが、ボーイングと ATK は同じようなプロジェクトで熾烈な競争をくり広げていました。

そのようなわけで、私が試験を行うときも、ある企業が社外秘としている情報を他社に漏らさないという守秘義務契約書にサインしなければならないことがよくあります。また私は ATK のコントラクターでもありますから、利害の衝突がないことも確認する必要があります。だからたとえば ATK が Ares ロケットの初段ブースターを開発したとき、私がロケットの風洞実験をしたのですが、そのとき、私が NASA で取り扱う試験内容や情報

が ATK の設計者に便宜をはかれるようなものではない、違法性はないということを弁護士に確認してもらう必要がありました。もちろん、私は ATK とは別個に仕事をしており、ATK のロケット設計者に会ったこともありませんが、法律的問題はそれとは別ですから。そのようなわけで、法律的にいろいろとややこしい話がありますが、50 年代や 60 年代の全盛期に比べると新規プロジェクトの数が多くありませんし、企業の数も少なくなっていますから、その結果、協力することがとても多くなったわけです。あのよう大きな契約を獲得するには、協力する以外に手はありませんからね。

澤田：風洞試験のやり方や EFD と CFD の融合の仕方など、米国と欧州で方法論やアプローチなどいろいろなところが違うのではないかと思います、そのあたり、いかがでしょうか。

Schwartz：そのあたりはよくわかりません。NASA というのはちょっと特殊なところで、本当にさまざまな組織やグループとコンタクトがあります。欧州のやり方についてのコメントは難しいですね。我々としては、それぞれの条件で総合的なコストとメリットを勘案し、なるべく効率よく進めるようにしているとしか申し上げられません。

会場：私自身少ない経験からの話なので偏った見方なのかもしれませんが、「協力してやれる、やれない」というあたりで典型的なのが、AIAA の Drag Prediction Workshop ではないかと思います。欧州も米国も入り、ある航空機の形状について抵抗値をどのくらい予測できるかというプロジェクトです。実験データはどこかが提供し、皆で CFD 解析をしてみようという形でした。このときも、どの形状にするかで議論になりました。オープンにできるデータというのが難しいですね。欧州対米国となるのも難しい。最初は DLR の公開できるデータを使っていましたが、今年の第 4

回目では NASA がボーイングに委託して差し替わりのない形状を設計してもらい、common research model という模型で協力しようという話になりました。利害関係がある人たちで協力というと、みんなで関わって一緒にいろいろ調べられるモデルを作らなければいけないのではないのでしょうか。

先程 JAXA の役割という話が出ていましたが、こういうことを JAXA はしていかなければならないのではないのでしょうか。JAXA 単独ではできない話ですから、皆様のお話を聞きながらオールジャパンで今後はこういうことを調べていこうと。そのとき「このような模型があるべき」という議論を踏まえてゆけば、JAXA 内部でも上を説得して予算が取れるのではないかと。そんなふうに考えます。

澤田：EFD と CFD の融合という個別の問題より、プラットフォームというか、どのような土台で話を進めましょうかというあたりの話ですね。では、ここまでご紹介いただいたうまくいった話とは逆に、EFD/CFD の融合で「失敗した」「技術的な課題がこのあたりにある」といった話をお願いできますか？

Schwartz：失敗なら、どれからお話ししていいかわからないほどしています。今直面している最大の課題は、多分 CFD 屋さんとの関係でしょう。私は計測畑の出身で、昔は実験ばかりしていたわけですから、CFD 屋さんとの話は文化が大きく違い、なかなか大変です。このコミュニケーションをとるのに、とても長い時間がかかってしまうのです。でもそうですね、失敗や困難という意味では、我々の風洞はとても古く、光学計測装置を念頭に設計されていないのが計測屋としてきびしい点です。さきほど、CFD が進化した結果、それと比較する測定手法も進化させる必要があるとのお話がありましたが、我々も今、まさにその

点に苦勞しているところです。NASA の設備はほとんどが 40 年も 50 年も前に作られたもので、一番新しい風洞でも 25 年前だったりします。この風洞が設計されたころ、デジタルカメラなどというものは想像もできない代物でした。そのため、計測器を設備内に設置するのがとても難しいのです。圧力容器の壁にドリルで穴を開けるわけにはいきませんからね。これは本当に大変な問題です。そのようなわけで、これから新しい風洞を設計するという幸運に恵まれた人は、ぜひたくさんの方の観測窓を設置すべきだと思います。

その他としては、一部の人について、新しいデザインツールが役に立つと説得することがとても難しいことがあります。若いエンジニアは世代が異なり、インターネットやコンピューターゲーム、3D グラフィックスなどに囲まれて育っていますから、このあたりを簡単に受け入れてくれます。でも古参の人たちはそうでもないんですよね。

澤田：Schwartz さんはパイオニアとして大変な苦勞をされたことと思います。さきほど橋爪さんから「新入社員は必ず風洞に入れる」というお話がありました。流体現象を体験し、肌で感じて定量的な感覚をつかむという大事なポイントだと思いますが、同時にスズキは新しい風洞を作られました。これを作られたとき、社員教育を含めて「このように使いたい」という計画があったと思います。EFD/CFD の融合を進める上で、積極的に風洞の設計に要求されたポイントはどこでしょうか。



橋爪 祥光氏

橋爪：実は風洞のことを詳しく知らずに設計したのです。他のメーカーにお願いして作っていただいたのですが、最初はどこを測るのかもよくわかっていなくて、「よその風洞でやっている PIV などが後でできるようにしておいてくれ」とお願いしました。あの時は天から「風洞をやれ」と降ってきたようなもので、自分がやるとは思っていませんでした。作戦らしい作戦はなくて。「変に入れてしまうより、きちんとここが測りたいと言って後で入れたほうがよい」とアドバイスをいただきました。

澤田：ありがとうございました。渡辺さん、その点 JAXA の風洞は何度か改修をされて徐々に取れるデータを増やしてこられたと思うのですが、EFD/CFD の融合に向けて強化してきたポイントはあるのでしょうか。

渡辺：今強化というと非常に大規模なものになってしまうのですが、少なくとも EFD/CFD の融合や検証という意味から、これから作るなら測定部周りが大きく違う風洞を作ることになるでしょう。我々の風洞は非常に古い風洞で、可視化計測は当初シュリーレンやオイルフローくらいしか想定されていませんでした。そのため PIV や PSP 計測をやろうとすると、光学アクセスがないのが

困ります。計器を足すくらいは簡単ですが、風洞の壁を変えるようなことは大変なコストがかかります。だからこれから作るならそのあたりを丁寧に考えてやるべきでしょう。CFDの精度も上がっていて、実験で検証するときに必要とされる精度やデータの量も上がっています。計測技術も進んでいます。それがひとつの大きなプラットフォームになっていけば、融合や比較などを始めやすくなると思います。

会場：私は門外漢ですので、的外れでしたらご容赦ください。CFDとEFDの着実な研究発展について先ほど会場からコメントがありましたが、あの認識には共感できるところがとてもあります。頭の中で融合するのが非常に大切であり、それができる人間を育成していくことが最も大切です。でも人間の育成には時間がかかるので、諸外国に勝つためにもプロセスを加速する必要があります。だから融合はシステムティックにコンピュータ上でやらなければならない。それが宿命だと思います。

そのためにはどのようなことを考えればいいのか。魅力的でもなければなりません、もう少し問題を簡単にしたらどうでしょう。理想的で簡単な実験を高精度にやるのです。それに対してシミュレーションが合うのかを検証します。あるいはシミュレーションで仮想的なデータを作り、ごく一部だけが観測された逆問題を解く。こうしてどれくらいできるのかを確認します。次に実験データを使って逆問題を解いてみる。計算が合わなければ、どういうデータがあったらシミュレーションできるのかを検討する。そういう物理に関連した基礎的な逆問題を地道に解いていくような研究も重要なのではないのでしょうか。さらに言えば、計算屋が実験屋に「このようなデータを取ってくれ」と言うようなことはあるのでしょうか。私はライフサイエンスの方ですが、あちらは実験屋が

王様で計算屋は奴隷です。データを取ってから「モデルを探してください」と言われるので、逆に、「シミュレーションでこの同定をするためには、こういう頻度でここを測ってくれないと」と要求を出してみました。それと同じようなことが、こちらでも考えられるのではないのでしょうか。

もうひとつ、データとシミュレーションでは異なる情報を結びつけるわけで、学習することが必ずあります。その学習プロセスを現実的な問題に応用できる状況を考えておく必要があると思います。たとえば地球関係なら災害予測。シミュレーションを全部やり直すわけにいかないの、部分データを使って学習し、災害予測をするということが実際に始まっています。先程のお話にも不確実な情報を持って一部観測したということがありましたよね。それをどう使ってどう予測するか。これは実学上非常に面白い問題だと思います。そういう着実な進歩を実現するためには、基礎的な問題あるいは実用的な面白い問題を用意しておくといよいのではないのでしょうか。

澤田：大学で聞いた話ですが、製品開発で「100%同じ物が作れるか」「それを実現するためにはどうしたらいいか」「同じようにやって、同じようにできないのはどうしてだ」というあたりを真剣にやられている先生のお話をおうかがいしたことがあります。流体は強い非線形性があり、同じ初期データからスタートしてもどうなるかわからないことがよくあります。ただその一方で「これは合って欲しい」「融合の前にお互いこれはオーケーですね」というものがあって初めて融合が前進する、そういう切り口をいただいたのだと思います。いかがでしょうか。



渡辺 重哉氏

渡辺：今のコメントは非常に大切だと思います。「シミュレーションのほうから実験のほうへ要求」という話がありましたが、最近はそのような段階に来ているのではないかと思います。昔は実験屋から見て多少怪しい実験でも実験データに CFD を何とか合わせ込むところがありましたが、今は CFD でいろいろできるようになってきて、逆に CFD から「この実験はおかしいのではないかと指摘が出るが増えています。つまり CFD の精度が上がった分、高精度な実験をしないと CFD が改善できないといった雰囲気になっています。これを加速することがとても大事でしょう。簡単な問題、簡単な形状という話も、形状は簡単でも現象は複雑だったりするわけです。ところが我々はいくつか見た目がよい形でやってしまい、かえってよくわからないところへ落ちこんでいることがあります。このあたりももう一回足元を見つめてやらなければいけないと JAXA の中でもよく話をしています。

川添：シンプルな問題と複雑な現象との共通課題を設定するというお話、大賛成です。たしか 1984 年あたりにスタンフォードで「後ろ向きステップの剥離の領域をどこまで見積もれるか」という話がありました。あれは数値計算がどんどん入

ってきてどこまで合うのかを競争していたところで、今は状況が違っているので難しいかもしれません。でも私は大賛成です。ぜひやって欲しい。

実験の立場から言わせていただければ、「このようなデータが欲しい」という話は言ってもらいたいことです。単にあつたらいいだけではなく、強いニーズがあればとてもありがたい。我々実験屋は新しい計測を常に考えています。計測方法を生みだしたら今までにないデータが得られるわけですから。それを使ってもらいたいと思いながら我々は仕事をしています。ですから、刺激になる提案をいただけるとありがたいです。

会場：共通の課題を持つのはとても大事です。JAXA も内部だけでやらず、こういう場所で議論すると良いアイデアが出てくるのではないのでしょうか。それから川添先生のお話についてですが、騒音の問題が重要になっていて、皆様マイクロフォンアレーなどでやられています。それならこういうデータが欲しいというのがあればご紹介いただけませんか。

澤田：いかがでしょうか。「マイクロフォンアレーでこのような騒音データが欲しい」というような具体的な要求、希望をお持ちの方、お願いします。

会場：私が 98 年くらいに機械学会論文集に書いたことですが、平板上にフェンスを立てた場合の発生音について、前向き段差で曲率半径が 0 と、高さ 1mm で曲率半径が 1mm、2mm、3mm でどうなるかを実験的に確認したことがあります。車のフロントミラーで剥離する流れからの音がわからないので単純化してみたのです。シミュレーションは別の大学の先生にお願いしたのですが、なかなか上手くいかない。こういう基礎的な実験や計算をしてみただけだと面白いかなと思います。私の実験も 2 次元的な形でやったのに流れ場は 3 次元的ななどあやしいところがあるのですが、

ともかく、理論で言うところの物体表面の圧力変動を計測して積分した値で発生音の順序を比較すると全く合わないことが確認できました。でも、速度分布の乱れ度分布を計測して一番強いところの大小関係で比較すると合うのです。つまり理論は少し怪しいことがわかったわけです。このあたりを計算・実験両面でやると音についての理解が深まると思います。カルマン渦はだいぶわかってきていますが、そのような広帯域の乱流騒音です。

澤田：AIAA が Drag Prediction Workshop をやったりして、それで能力というか予測精度が上がっているのではないのでしょうか。JAXA も旧 NAL 時代から会社や大学組織にも参加してもらって CFD のワークショップを開かれているなど、国内レベルの底上げを実現されてきたと思います。先ほど会場から発言がありましたように、公開のワークショップのようなものをどんどんやったらどうでしょうか。EFD/CFD の融合で必要になりそうなことを JAXA に先行的にワークショップで投資するのを考えていただいたらいいのではないかと思います。そのあたり、飛行機会社のほうから何かやって欲しいことはないのでしょうか。

若井：先程私のプレゼンでもお話したのですが、少し戻って CFD の使い方が形を絞り込む、作るというところはもう十分使い始めています。風洞データが本物かというところは今一所懸命にトライしていて、本丸はフライトと地上の実験、フライトと CFD がどうなのかという 3 ステップになります。米国では膨大なフライトデータによる検証・評価ができますし、ミリタリーも相当なフライトデータを蓄えています。今度 JAXA も実験用航空機を導入されるとのことですが、日本だとフライトはお金がかかりますし新規の開発が少ないのでフライトと風洞、フライトと CFD の評価が進みにくいと思います。そこはかなり広いマッハ数と高度域で飛ぶ Flying Test Bed などがあれば、

たとえば共通形状として標準模型プラス実機のデータの比較をするという CFD や風試をやるのも面白いのではないのでしょうか。実験で悩ましいのがスラストで、推力と全機の抵抗をどう分離するのが永遠の課題なわけです。そのあたりも実機の排気で騒音、総圧を測ってみようなどとやっていただけると結構いいデータが出てくるのではないかと思います。

もうひとつ、本物の飛行機はビスやパネルの継ぎ目があったりするのですが、それが本当のフライトでどう影響するのか実はよくわかっていません。CAD 上で飛行機は単純化された形になっているのですが、本物のフライトデータとの比較があると新しいことがわかるかもしれないと思ったりします。JAXA はそのような環境が少しずつ整っているのではないかと期待しているところです。

澤田：風洞データが今の課題で将来の本丸がフライトデータということですね。風洞データが本当に信じられるのか、EFD/CFD も CFD がまだキャッチアップの段階だというご指摘もありました。CFD から見た風洞データはどうか、実機開発で風洞データはどうかなど、ご指摘がいろいろあるかと思います。例えば、実機のレイノルズ数と風洞で達成できるレイノルズ数の関係や、このようなデータを先行的に取得してワークショップを開くようなこともひとつのやり方かもしれませんね。あるいは先程ありました、現実在即したアトラクティブな問題がひとつの切り口になるかもしれません。会場の方で、「このようなことはないか」とお考えの方がおられたら発言をお願いします。

会場：Drag Prediction Workshop の話が出ましたが、今までは実験データがまずあって CFD の解析データを比較するというのが一般的だったと思います。でも EFD と CFD を融合するという観点からは、CFD でもたくさん計算し、いろいろな

風洞でひとつの対象を実験し、EFD の誤差と CFD の誤差、それぞれを明確にして次のステップに進むことが大事ではないでしょうか。フライトデータもあるとよいと思うのですが、ワークショップでも方法の検証にとどまらず、ある現象についてモデルか何か対象をひとつ決め、それを CFD 屋なら CFD で解き、実験屋なら実験で解いてとやってみないと融合は進まないのではないのでしょうか。

Schwartz : 私のプレゼンテーションの最初で、スペースシャトルの熱分布イメージをお見せしました。あれは HYTHIRM (Hypersonic Thermodynamic InfraRed Measurements) というプロジェクトにおける赤外線カメラによる計測結果です。スペースシャトルの軌道上で境界層遷移を調べるために、3 回のミッションについて、軌道全体の熱分布イメージを様々なマッハ数で取得しました。今年、さらに 2 回のミッションについて測定が予定されています。その熱分布イメージを処理し、慎重に較正してから CFD と比較したわけです。風洞で熱試験も行いました。スペースシャトルについては、予測されるマッハ数で境界層がトリップを起こすように翼にバンプを与えました。最初のミッションはマッハ 12、2 番目のミッションはマッハ 14 から 15 くらいでした。その結果、乱流くさびの発生が確認されて予期したとおりの測定ができました。

このようなお話をしたのは、フライトのデータと CFD を比べたらとてもよく一致していたからです。何週間か前に米国オーランドで開催された AIAA 会議で報告した論文を見ていただければわかりますが、軌道上の境界層遷移実験について 3 つのセッションがありました。我々が行ったイメージング、フライト計測、CFD、風洞試験などすべてのことが話し合われました。CFD 屋さんにも参加しましたし、そのために風洞試験も行ったし、フ

ライトによる試験も行ったし、そのイメージングも行いました。熱電対を取りつけたり、リモートイメージングを行ったりしたわけです。CFD データと EFD データがとてもよく融合されていました。

冒頭に、融合を推進しているのはプログラママネージャーだというお話をしました。このように情報をまとめてそこから何かを得ようと思うとき、プログラママネージャーはそれがどこから出てきたのかを気にしないのです。ただ、情報から知識が欲しいと思うだけであり、そのためには我々が一緒に働かなければならないとなるわけです。

澤田 : シャトルですばらしいご経験があり、EFD、CFD、フライトデータその全てにわたってある種のキャリブレーションができるというのはうらやまい環境だと思いますが、会場からいかがですか？

会場 : 私は余り大きな計算もやらないし、実験のこともよくは知らないのでここでしゃべるのはおこがましい気がしますが、先程の会場からの発言にコメントさせていただきます。EFD と CFD を合わせるというか融合させるためのワークショップというのは、もう 10 年以上はやっている、それなりのトライアルはしていると言えるはずで、風洞試験がターゲットで、それを模擬できるところまで CFD の技術を持っていくのかとか。ただ本当は、若井さんがおっしゃったように究極のターゲットとなるリアルフライトを模擬したい。そのために「風洞試験と CFD の両方から攻めようとするのか」というのは少し色合いが違ってくると思います。たとえば風洞試験を CFD で模擬するときは、風洞試験の条件を CFD 側では予測しがたいところがあり、そこを詳細に合わせていく技術を得るという側面もあると思うのです。そのためのワークショップと、リアルフライトをどうつかまえるかのワークショップとは、色合いが

違うと思うのです。もちろんリアルフライトをとらえるために風洞試験を数値的にきちんと模擬しようというのもベースとしてはあるはずですが、そのあたりを JAXA としてどう計画に組みこめばいいのかですね。JAXA だけではなくオールジャパン、いやインターナショナルなのかも知れません。その辺りについてコメントをいただけるよいのですが。よろしくお願いいたします。

澤田：私の場合ぱっと浮かぶのは、この前 JAXA でやられた NEXST プロジェクト（注：次世代超音速機プロジェクト）の風洞データ、フライトデータ、CFD データの比較ですが、このあたりについてパネラーの皆様、コメントはありますでしょうか。

若井：フライトについてですが、今、飛行試験技術の精度が圧倒的に低いわけですので、そこを高めるという話です。実機の微細なところまで CFD のモデルにするのは CPU パワーだけの問題だと思うのですが、フライトデータを正しく出すという意味では風洞よりも問題が多いわけです。その技術を高めていく必要があります。飛行試験技術を高めないと実は風洞や CFD と飛行試験との対応も無理なのです。昔はおおよそのジャイロの運動から特性を同定しようと苦労していたのだと思いますが、最近は GPS もあり、高精度なジャイロ、高精度なピトー管やセンサー、MEMS 技術も進んでいるので、同定よりももう少し高精度で割とダイレクトなフライトデータが取れるようになってきたのではないのでしょうか。つまりフライトの対応が少ないのはフライトデータの精度が低いからであり、そこを高めるワークショップは先ほどの会場からのコメントの通り、風洞と CFD との対応とは別次元というか別のテーマになります。そうすると、こことはまた違った技術的な知見を持つ人が入ってこないとフライトの話はできない。ここにあまりこだわるとそういう話

になりかねません。そのような難しさは別次元なので、おっしゃる通り違うテーマから入っていく必要があると思います。



会場：EFD/CFD という話をうかがっていて違和感をずっと持っていたのですが、頭の中が少し整理できたのでお話をさせていただこうと思います。CFD は computational fluid dynamics で EFD は experimental fluid dynamics ですが、この議論の大半は計測技術と風洞技術になっていると思います。EFD に一番期待されているのは実験の流体力学をいかに解釈するのかにも関わらず、そこが欠如していると感じます。風洞という私の立場でも、そこを一番重視して問題を解決したいと思っています。ところが、そこに目が向かない。この場も CFD と計測技術の融合の話になっているように感じます。もちろん計測技術など風洞技術との融合も重要ですが、先程お話ししたような視点が足りなくて議論の行き違いがあったり議論が盛り上がらなかったりしている気がします。

もうひとつ、今の EFD は物を作る中で初めて重視されるという面があり、メーカーさんは当然それをやって問題を解決されています。それに対して JAXA は HOPE 以来プロジェクトが止まってしまっている。NEXST はありましたが、その

ような基盤的な場所でそれを重視したアクションがこの 10 年ほど止まっているように感じます。そのネジを巻くという意味で、JAXA としてはこのプロジェクトがきちんと回って欲しいと思っています。そのような見方で EFD/CFD、特に EFD は何なのかというあたりを考える必要があるのではないかと思います。

会場：今のコメントは EFD という言葉について皆様が考えることの中に盲点があるということだと思うのですが、実は CFD のほうにも盲点があります。特に実験の方々に認識していただきたいのは、CFD は入力を与えれば出力が出てくるため、確定的だと感じてしまい、出てきた結果は正しいと思ってしまうのですが、現実の現象を模擬しようとするとは実は入力を与えるのがとても大変です。例えば風洞を模擬するとして、流入と流出の条件をどう与えるのか、壁のところをどう与えるのかなど、その辺りは JAXA が今やられているところですね。また CFD は基本的には離散モデルということで非常に巨大な連立方程式なのですが、その連立方程式が条件過剰にも条件過少にもならず決定性のある問題なのかということも非常に問題があります。だから、そのあたりも融合技術を上手く使ってもっともらしいインプットを与えると。ですから出てきたアウトプットを比較するのではなく、実はインプット側も大変重要であり、そのようなあたりも実験側の人に興味を持っていただきたいと思います。

会場：今指摘されたところは、少し焦点が違うような気がします。ひとつ前のコメントにあったように思いますが、CFD が何を狙っているのかというと別に風洞ではなく、フライトが最終ターゲットなわけです。ただ、流れを一番コントロールした状態で比較する対象として風洞試験データがあるので、それと比べてまずは合わなければならぬということです。ただ CFD で風洞を解くのは

合わせるためではなく、風洞試験の問題点をクリアにしようと思って風洞を計算しているのです。風洞試験結果と CFD を合わせるために風洞を計算するというのはおかしい話ですから。それで、先程入力がわからないと言ったのは CFD 側の問題ではなく、風洞試験のほうで境界条件がわからない状態で試験をやっているのがおかしいと思います。風洞試験がおかしいということではなく、風洞試験はそのような状態でやっていることを認識しなければいけないのだと思います。

会場：少し言い方が悪かったかもしれませんね。ですから、風洞試験を模擬するためにやっているのではなく、風洞試験を物理的に模擬できるだけの技量なら CFD は持っているということです。レベルをもっと高めないとリアルフライトの模擬まではいけませんが。もちろん、模擬するためにやるわけではありません。ただ、CFD の入力も風洞と合うようにしないと、両方が同じものを見ていることにはならないでしょう。

会場：両方の課題でしょう。CFD だけの問題ではない。

澤田：EFD/CFD の融合についてここまでの議論を振り返ると、プラットフォーム化の話、あるいは共通の問題、シンプルな問題、あるいはアトラクティブな問題というようなアプローチそのものに議論がシフトしてしまいました。不慣れな司会で生産性の最大化の話まではたどり着けそうにありません(笑)。その点はお許し頂きたいのですが、とにかく、いろいろな切り口でご意見をいただくことはできました。一方で渡辺さんのやっていらっしゃるプロジェクトはどんどん進んでいます。ですから、方法論的なところにシフトして出た点を取り入れながら、たとえば CFD 屋さん「このような問題はどうか」と問題を提起していただいたり、あるいは EFD のほうで「このようなところが困っている」というような話を出して

いただくなど、プロジェクトとしての進め方とは別にプラットフォームとしてEFD/CFDの融合を進めていく方法論をJAXAに考えていただいたり、あるいは我々も全員で考えていったりすればよいのではないかと考えております。最後に、これだけは言っておきたいと思われる方がおられましたらコメントをお願いします。

会場：このような席ではJAXAへの注文がたくさん出てくるのが常なので、今回は大学への注文を出させていただきたいと思います。CFDも非常に難しいことが計算できるようになりました。20年前などと比べるとここまで来たかという感じです。実験のほうもPIVやPSPなど3次元データや面データが取れるようになり、素晴らしい進歩があったと思います。その中で私が心配していることが一つあります。特にCFDなのですが、CFDがブラックボックスになってきているのではないかということです。つまり、出てきた結果だけを見て議論せざるを得なくなっている気がするのです。たぶん、実験データについても同じようなことがあるのではないのでしょうか。ぜひお願いしたいのは、CFDの可視化したデータや実験データ、PIVの結果など、あれを見たらそこに流体の方程式が見えてくる学生さんを育てて欲しい。結果を鵜呑みにしないということです。特に両方融合していくとなると、先ほどのデータ同化技術なども重要ですが、そもそもの流体力学の基本をきちんと押さえてデータを見られる人がとても重要になってくると思うのです。ぜひお願いします。

澤田：厳しいご注文をありがとうございます。その点は注意していきたいと思います。では、パネラーの皆様どうもありがとうございました。感謝申し上げます（拍手）。