

パネルディスカッション

「Can EFD/CFD Integration Minimize Uncertainty?」

パネリスト（登壇順）： Andrew Meade（William Marsh Rice University, USA）
 Edward N. Tinoco（Boeing Commercial Airplanes, USA）
 佐宗 章弘（名大工）
 越智 章生（川崎重工業）
 口石 茂（JAXA）
 司会： 吉田 憲司（JAXA）

吉田：JAXA の吉田でございます。これから僭越ながら本パネルディスカッションの司会をさせていただきますので、宜しくお願い致します。本日はこのテーマを頂きましたが、特に不確かさということにつきまして皆さんで議論をして、今後このEFD/CFD 融合という流れでどこまで何を指すかということをお話し合っ、出来れば課題の幾つかについてJAXAや研究者の皆さんが実際にアプローチして頂けるのを狙いたいと思っております。ということで、フリーかつフレンドリーなディスカッションを期待いたします。



まず最初に自己紹介でしょうか。Meade 先生と Tinoco さんはもうご紹介がありましたが一応簡単な自己紹介と、パネラーの皆様方はご自身の研究のフィールド等を簡単にご紹介して頂きたいと思っております。その後今日のパネルディスカッション

のメインテーマ、“Can EFD/CFD integration minimize uncertainty?” につきまして JAXA の口石が資料を用意しておりますので、それを簡単にご説明致します。その後今日のパネリストのうち佐宗先生と越智さんから簡単なプレゼンを受けてからディスカッションをさせて頂きたいと思っております。それではお願いします。

Meade：Andrew Meade です。Rice 大学の教授をしております。私はデータ融合の航空宇宙分野への応用に関心を持っていて、実験流体力学（EFD）、計算流体力学（CFD）やマシン・ラーニングの研究をしております。EFD/CFD 融合で不確かさを軽減する事ができるか、そしてその手法が実験を行う者にとって実験の向上に役立つか、また CFD を行う者にとっては CFD 技術の改良に役立つか、といったことを考えたいと思っております。

Tinoco：Edward Tinoco です。先ほどお話をいたしました。私の関心は CFD と EFD の両方にありまして、これらを一緒にすることによって両方の精度が増し、理解も深まると確信しております。

佐宗：名古屋大学の佐宗と言います。立場としては EFD サイドだと思います。今回のワークショップは色々な分野の発表が見られるのですが、今日の話に限っては航空機のデザインということ

にかなり特化している内容だと思いますので、自分の立場としては航空の関係する流体の中の実験と計算ということで少し話をしたいと思います。宜しくお願いします。

越智:川崎重工の越智と申します。入社して12、3年くらいずっとCFDがメインで、後は風洞試験もやってきましてCXとかPXなどの開発に携わってきました。今日はメーカー側の視点から何か意見が言えればいいかなと思っております。

口石:JAXAの口石と申します。私は大学の時はずっとCFDをやっていたりまして、卒業してJAXAの前身であります航技研にCFDと風洞試験の橋渡しのようなものやってくれということで雇われました。それから10年近い年月がたったのですが、結局自分はそういうことに関して何もやってこなかったということを今さらながらに気づいて、俺は今まで一体何をやってきたのだらうと自戒の念を込めてパネリストに立候補させて頂きました(笑)。今日は実りあるディスカッションとなることを期待しておりますので、宜しくお願い致します。

吉田:ありがとうございました。先ほど申しましたように、最初に口石の方が立候補しただけのことはありまして資料をしっかりと作ってきましたので、まずプレゼン頂こうと思います。宜しくお願いします。


口石:長丁場のパネルディスカッションは得てして議論が発散する傾向にあると思いますので、一つのテーマの流れに沿って議論をしていきたいという希望から事務局で相談してこういった資料を用意しました。“Can EFD/CFD integration minimize uncertainty?”とタイトルが漠然としているので議論も漠然としかねません。まずは言葉の定義をしっかりとするために、uncertaintyとEFD/CFD融合という2つの言葉の定義を最初におきたいと思っております。

最初に uncertainty ですが、これは色々な分類の仕方もありますし先程の Tinoco さんの発表の中にも同じようなことがありましたが、皆さん基本的に考えていることは同じだと思います。今回ここにいらっしゃる方は大方航空宇宙分野に関わっている方だと思いますが、そういった視点から考えると大体こういった形に大別できるのではないかと思います。

What is Uncertainty?

- **Discrepancy from True Value**
 EFD: measurement uncertainty (calibration, data acquisition,...)
 CFD: computational uncertainty (grid resolution, convergence...)
- **Discrepancy from Flight Conditions**
 EFD: model deformation, wind tunnel interference,...
 CFD: turbulence model,...
 Design: Reynolds number,...

⇒ **Can EFD/CFD integration minimize these uncertainties?**

 宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

最初ですが Discrepancy from true value ということで、これは要するに真値からのずれという意味での不確かさ。これは EFD/CFD それぞれ考え方はあると思うのですが、EFD につきましては計測の不確かさということです。EFD とは例えば風洞試験なら風洞試験で何らかの物理現象を計測するというのですが、計測には大方何らかの不確かさを含んでいますといった意味での uncertainty です。では具体的に EFD でどういった不確かさがあるかということ、較正に起因する不確かさであるとか、データ収集 (data acquisition) における不確かさであるとか、それからデータ処理 (data reduction) の時、生データから何らかの物理量に換算するとき何らかの不確かさを含むといったように一連の測定プロセスの中で色々な不確かさ要因があつてそれがどんどん蓄積されていくという、これが基本的に EFD における不

確かさなのだろうと思っております。それから CFD につきましては、支配方程式を離散化して数値的に解くときに本当に正しく解けているのかということです。具体的に言えば計算空間を格子で分割して解くのですが、それが十分分割できているのかという格子収束性の問題がある。また反復解法によって解を求めていくとしてきちんと収束解が得られているのかという収束性の問題もあって、実際に数値計算で何らかの答えを出そうと思っても常に正しく求められているとは限らない。さらに CFD の物理モデルが、例えば実際の流れとか飛行条件における乱流現象を本当に正しく反映しているのかどうかという問題もあるかと思えます。これらが CFD にとっての **Discrepancy from true value** という意味での **uncertainty** です。


さて仮にこの EFD/CFD それぞれにつきましてこういった誤差がなかったとしても、例えば EFD については計測すべき対象を全く誤差なく計測できているとしても、CFD につきましてもきちんと方程式を離散化して方程式を解いてきちんと正しい答えが出ているとしても、それが実際に我々の求めている答えなのかということと必ずしもそれはそうではないだろうということもあります。何が言いたいかといいますと、我々が最終的に求めたいのは航空分野に特化して言えば実飛行条件における空力性能ということになると思うのですが、EFD で正しく測れてもそれが実条件フライトコンディションに直結しているということは必ずしも言えないという意味での **Discrepancy from flight condition** で、これがもう一つの大きな **uncertainty** になるのではないかと考えております。

これも具体的に言いますと、EFD につきましては風洞試験と言い換えても良いかと思いますが、風洞試験で正しく計測できたとしても実際には風洞の中でモデルを入れますとモデルが風圧で変形しま

すので、デザインした形状とは若干模型が異なってしまう。それからご存知のように風洞には壁がありますのでその影響が無視できない。それから模型を空中に浮かせることは出来ないので支持棒で支える必要がある。その支持棒があるというのは要するにフライトとは違う条件で計測を行っているということですから、風洞試験とフライトの間にはギャップがあるということです。これが一つの **uncertainty** になるということです。それから風洞試験では飛行条件のレイノルズを再現することは一般には難しいということもありまして、こういったスケールリング効果というか、そういったものの **uncertainty** というものも含まれているということ。このように **uncertainty** を分類してみたのですが、問題はそれを小さくする為にはどういった手段があるのか。その一手段として、EFD/CFD を上手く組み合わせることによって諸々の **uncertainty** を **minimize** することが出来るのではないかということを考えてのが今日のモチベーションです。

What is EFD/CFD Integration?


- Simple combination of EFD/CFD data
(e.g.) Double visualization of EFD/CFD data
- EFD for CFD
(e.g.) Use of EFD data to CFD initial/boundary conditions
- CFD for EFD
(e.g.) Wind tunnel interference correction using CFD
- Complimentary use
(e.g.) ??

 宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

2

次にそもそも EFD/CFD 融合というのは何ぞやということです。これも色々な考え方があって思うのですが、大きく分けると4つくらいに分けられるのではないかと考えています。一番単純なのは EFD のデータと CFD のデータを単純に合体

させるというアプローチです。例えば一つの画面で左側に CFD の結果を出して右側に EFD の結果を出して比較するとか、シュリーレン写真に CFD をオーバーラップさせることによって衝撃波の位置がどれくらい合っているかとか、そういったことが調べられます。それに対して EFD for CFD という言い方をしましたが、これは要するに CFD の精度を高める為に EFD を使うということ。具体的には風試データを CFD や EFD の初期条件や境界条件に用いることによって CFD の精度を高められるかもしれません。逆に CFD for EFD という観点では風試の精度を高める為に CFD を使いたいということで、これも具体的に言いますと、いわゆる風洞壁干渉の補正を CFD を使って行う等があります。この CFD for EFD と EFD for CFD の 2 つは、例えば EFD for CFD だったら CFD には EFD によって恩恵を受けますが、EFD 自体は CFD に対して何ら恩恵を受けないといったように一方通行的なプロセスを意味しております。それに対して我々が積極的に目指したいと考えているのは、お互いの complementary な、双方向的な活用です。しかしながらその具体的な例は何なのかというと実は我々にはあまり明確な共通認識というのではないのかもしれませんが、ではどんなものがあるのですかという点について今日は議論できたらと考えています。

Questions
<ul style="list-style-type: none"> ■ Again, what is uncertainty? ■ Do you have a method to minimize uncertainty? <ul style="list-style-type: none"> EFD → CFD EFD ← CFD EFD ↔ CFD ■ Do you have an example of minimizing uncertainty by EFD/CFD integration? ■ What is the challenging issue to realize EFD/CFD integration?


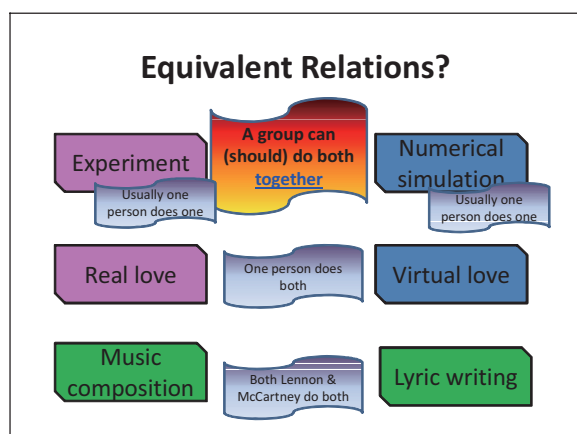
そういうことで uncertainty について定義とか分類をしたのですが、これで本当に十分なのか。他にあるのではないかとか、他の分類の仕方もあるのではないかといったことにつきましてご議論頂きたいということ。それからそういった uncertainty があるとして、それを具体的に minimize するような具体的な方法があるのかどうかということ。EFD から CFD へフィードバックをかける、逆に CFD から EFD にフィードバックをかける、それから EFD と CFD を双方向的に活用する、この 3 つの観点から具体的な方法があるのかということを考えています。それも踏まえまして、本当に EFD/CFD 融合手法として実際に uncertainty を小さくしたような例があるのかどうかということについても考えています。それから最後ですが、EFD/CFD 融合自体は別に今に始まったアイデアではなくて昔から色んな方が考えていたと思うのですが、実用化になかなか結びつかないのは何らかの障害とか技術課題といったものがあつたからではないか、あつたとすればそれは一体何であるかということにつきまして考えています。

吉田: どうもありがとうございました。会場の皆様、こういう主旨で今日は議論したいと思しますので、これを念頭に入れながら後でご意見等をお願いしたいと思います。次に佐宗先生の方からお願い致します。

佐宗: 口石さんが話をまとめられた後でちょっと壊すような話をするかもしれませんが、予め打ち合わせをしていなかったのご勘弁下さい。私は前回のワークショップでも話をさせてもらう機会がありまして、その時の資料をリバイズして話をさせていただきます。

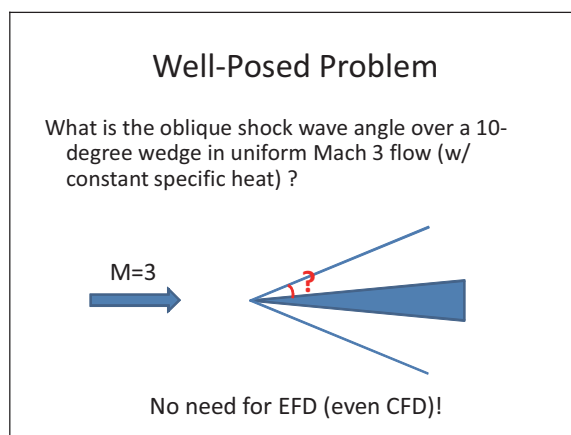
まず “Can EFD/CFD integration minimize uncertainty?” という質問に答えればすぐに懇親会かと思って、イエスと言えればそれで終わりだと

思っていたのですが(笑)、やはりすぐには答えが出せない。やはりこれは説明が少し必要だということです。前回は CFD と EFD はレノン、マッカートニーでないといけないというのがタイトルでした。ビートルズの曲の多くはジョン・レノンとポール・マッカートニーが作って、実際にはかなり一人で作ったものもあるし、コントリビューションはどちらがどちら、どちらが詩でどちらが音楽かということのはっきりと分かれていなかったとか、両方とも両方やっみたいなの話なのですが、要するに CFD と EFD を例えば詩と音楽の関係に置き換えて考えた方がよいのではないかということをお話しました。



そしてもう少し具体的に言いますと、今の曲を作るということと歌詞を作るということは実験と数値計算です。うちでは研究室で新しい学生を入れるときに、「あなたは本当の恋愛をしたいか、バーチャルな恋愛どっちがいい?」「本当が良い」というと、「じゃあ君、実験しようよ」ということで「この研究室に来たらどう?」という誘い方をしています。ミュージックとリディックというのはどっちがリアルでどっちがバーチャルかということではないので色を変えているのですが、言いたいことはジョン・レノンとポール・マッカートニーはそれぞれが音楽も作ったし、歌詞も作ったと

いうことです。Both do both です。それで一人の人間が本当の恋愛をすることもあるし、本を読んだり考えたり映画を観たり、そういうバーチャルな体験もするわけです。そういう意味で一人の人間が両方やるということです。では実験と数値計算はどうでしょうかと言うと、普通は一人の人は大体どっちか。先程口石さんのお話にもありましたが、なかなか同時期に両方やるっていうほどそういうことが適切かどうかということも分からないし、普通は大体役割分担をした方が特に大きなことをする時には効率が良いというわけです。やはりこの2つを比べるとここはどうもちょっと問題があるのではないかというのがあったとして、ではどうすればいいかということ、グループとしては両方出来るでしょう。グループとしては両方やらなければいけない。この together というのが大事なのです。どういうふうに together かと言いますと、例えば同じ部屋でお昼ご飯も一緒に食べて、ディスカッションしながらやりましょうというようなイメージの together。やはりどこでもそうですが CFD の研究室は、大学もそうですが、CFD が主で、実験が主で、なかなか同じ部屋でやるとか、お昼ご飯くらい食べるかもしれませんが、それもなかなか実態として難しいのですが、そういうところで together というところが大事だと思います。




先程 Meade 先生のお話にもあったので釈迦に説法みたいな話なのですが、要するに **integration** が精度を向上できるかという話は問題の性質によってくると思います。例えば先ほど **well-posed**、**ill-posed** というお話がありましたが、例えば **well-posed** の例で超音速流れがあって、楔があったらショックの角度が何度になりますか。これも $\gamma=1.4$ だったら別に計算しなくても実験しなくても何もするまでもなく **well-posed**、条件を与えれば答えが一つに決まるということです。ただここに例えば比熱一定ではなくて段々マッハ数が上がって行って、比熱比温度の関数であったり圧力の関数であったりするとこれは必ずしも **well-posed** ではなくてくる。段々 **ill-posed** になってくるというわけです。これが **well-posed** に関する問題の極端な例です。

これは昨日一生懸命作ったのですが、パネルサイズ 25 というのを知っていますか？これは **ill-posed** の問題で、例えばこのくらいの画像しか見たことがなくてこれが境界条件・初期条件だとして、では何の絵でしょうといったら結構分からないのではないかと思います。ここで例えば実験を試みる、少し可視化を試みる。そうすると少しだけこのくらい分かったと。このくらい分かれば結構大体分かるのではないかと思います。これでも実験というのは全ての情報を与えているわけではない。それではこの絵が何を表しているか、コンピュータでシミュレーションしたら分かるかということ、これは絶対に分からない。どうして分からないかと言うと、これだけの情報ではユニークに決まらないことを我々は見ているわけです。多分これは何の写真かというのはここだけ見れば検討がつくと思うのですが、ではこの辺は何色で何が映っているかということ、これでは分かるわけがないのです。実際にはこれはお祭りでお神輿を担いでいる写真ですが、ここまでくると全部 **well-posed** になる。今度は逆にこの赤いところの一部分を隠しただけだったら、ここはかなり **well-posed** だから答えは恐らく隠れていても分かるということになると思います。

ill-Posed Problem (1)

- Boundary conditions
- Experiment
- Can computer obtain the solution?

No, we don't know sufficient information (even the basic equation)!




shiogamalife.da-te.jp/e31507.html

ill-Posed Problem (1)

- Boundary conditions
- Experiment
- Can computer obtain the solution?

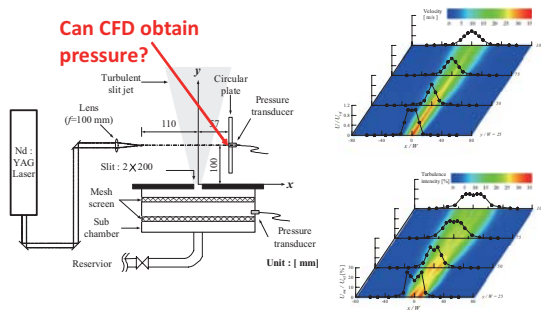
No, we don't know sufficient information (even the basic equation)!



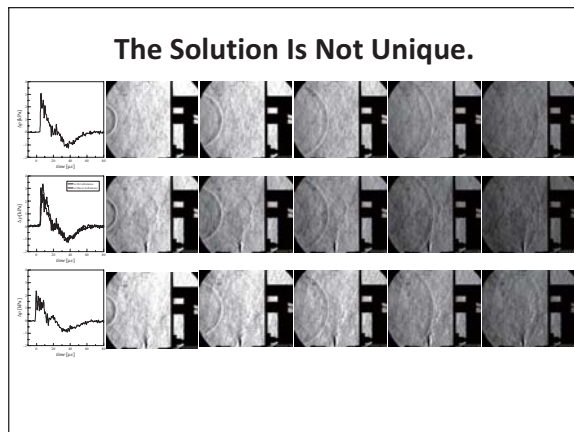
shiogamalife.da-te.jp/e31507.html

ill-Posed Problem (2) Shock Wave-Slit Jet Interaction

Can CFD obtain pressure?



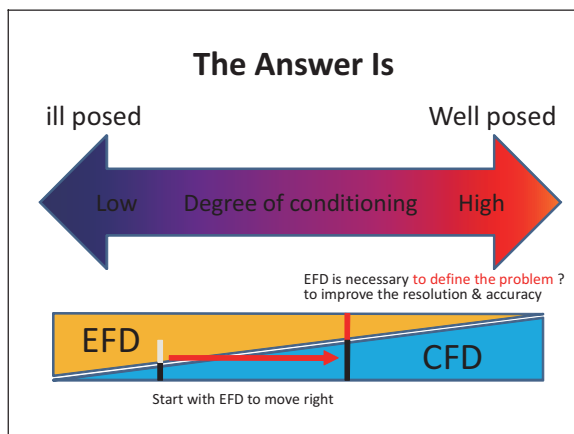
Unit : [mm]



これはある意味で譬えなのですが、衝撃波と乱流の干渉という実験をやっています。その一例ですが、これはここがサブチャンバーになっていて、このチャンバーがもっと大元では1立方メートルくらいの加圧した空気のリザーバーに繋がっていて、ここの中に流れが入ってくる。ここにスリットが上向きにありまして、このスリットの幅が2ミリ×奥手方向に200ミリ、20センチ開いています。ここから噴流が出てくるわけです。ですからこの圧力を適当に設定すると噴流が出てきて、このスリット幅で換算してレイノルズが4万くらいになるのですが、そうすると **shear flow** で乱流が出てきます。平均場を図るとこれが平均速度で、大体出口から5センチ離れたところから測り始めて中心で流速が30メートルくらい。ですから出口なのでもう少し速くなっています。それからこれが乱流強度です。といってもこれは速度のRMSを代表値で割った値ですが、要するに速度変動を測るとこういう分布が出てきます。ではここでレーザーのパルスをフォーカスして、ここで火薬をパチッと発破させたのと同じように、弱いですが衝撃波を作る。そうするとここで測る圧力はどうなるかという訳です。こういう問題です。これはソニックブームへの大気乱流の影響に関する基礎的な実験です。それでこの圧力がCFDで予測できるかと何も見ないでできたらす

ごいと思うのですが、結論から言うと通常の意味では **ill-posed** に近い問題なので答を見てから計算しないといけないし、答を見る必要がある問題だと思います。結果はこうなります。一番上はスリットからジェットを噴出しない場合です。ここに圧力のゲージがこの先端にフラッシュマウントであるのですが、もし何もなければこの辺でレーザーフォーカスで作られたブラストウェーブがこういうふうに広がって行って、ここに反射してここで圧力が上がると。このようなブラストウェーブがあるところに正面に板を置いたらこうなるというような、ノイズは乗っていますがこういう物が出てきます。それから2つ重なって見づらいたのですが、下の2つは全く同じ条件です。噴流を出すところのチャンバーを出すところの圧力も一緒だし、恐らく計った日も一緒だし、レーザーのエネルギーも一緒だし、全部一緒の場合です。こういう場合にも、これは2例しかありませんが2つ重なっているのは、1つはこれがコピーしてあって、もう一つはそれよりも高い圧力というような結果です。そういうような時には、これはちょっと見づらいたのですが、よく見ると、衝撃波の波面というのがもう少し曲率が変わっていて、この圧力センサーのところに当たるといような波形になっています。それから下の図は全く同じ条件で最初の立ち上がりの過重圧が低くなる時です。この場合にもこうなってこうなっていて、結局これはこの画像からこの画像を引き算した絵なのですが、引き算するとわりとショックが2枚分くっきり見えてくるのですが、このように波面でこぼこ乱れがあつてそれで圧力が変わる。結局強くなる時と弱くなる時があるというのは、噴流自体が平均場としては先程のホットワイヤーで計った特性があるのですが、実はもっと時間解像度をもって見ると乱流となって色々な大きさの渦が出ているというのものもあるから、どのタイミングで

どういう状態のときにショックを通過したかということでもかなり結果が変わってくるというようなものです。スリットジェットがある場合と無い場合で比較すればオーバープレッシャーの平均値は下がる。しかし標準偏差が非常に大きくなるので、これを足すと 3.5 になるからジェットなしよりも高い時もありうる。平均すると低いけど高い時もありうる。こんな結果になっています。これを CFD でがんばって解くのですかというのではなく、これはまず実験の結果を知って、それからそれはどういうことが原因かとか噴流はどうなっているかということを実験して、答えを知ってから中を見ていくということが正しいやり方なんじゃないかと思えます。



言いたいことは、要するに ill-posed、well-posed の問題があつて、well-posed の問題であれば本当に 100%であれば CFD だけで、後は CFD の解像度とか計算のコストとかそういう話で全て済んでしまう。それから先程の写真みたいに絶対に分からないというようなこともあつて、これはまず実験をして情報を知ることが最初にやるべきことだと。今の議論はどの辺にあるかはともかくとして、その中間のところを我々はやはり問題の対象にしているのではないかと。例えば、飛行機の形状が決まって全て決まると言っても、じゃあ

全部ダイレクトシミュレーションをするかということとそういうわけではなくて、やはり例えばドラッグが、あるいはリフトが 1 カウントの精度で分かればいいといった場合と 10 カウントでいいといった場合と 0.1 カウントじゃないといけないといった場合と、これはどこまでの情報が必要かということは変わってきますし、そういう意味では飛行機の問題も全部 well-posed の問題では決してなくて、やはりこの辺のどこかにあるのではないかと。結局言いたいことは実験と計算は一緒にやらずにちゃいけなくて、まずは実験をして実験の情報を入れてから数値計算をする。数値計算をするとき数値計算の足りないところが出てくるので、またそれに見合う足りない部分の実験をするという。それでどんどん右側にいって全部分かるというようなイメージと一緒にやるということが大事なのではないかと考えました。

吉田：どうもありがとうございました。答えが一つ出ているような気もしますが、もう一つ越智さんの方から補足のプレゼンを頂ければと思います。

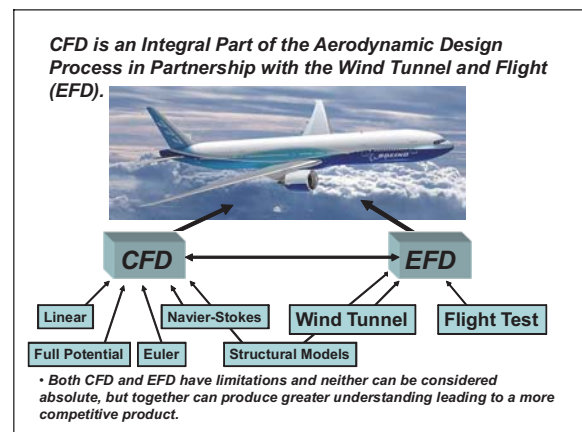
越智：スライドを準備してきていないのでその場でしゃべらせて頂こうかと思います。私の経験としてはハイブリッドという話が最初に頭にあったのは 10 年くらい前なのですが、CFD のデータと風洞試験のデータがなかなか合わなくて、当時は風洞試験の方が正しいと思われていたところもあつて、「CFD 側でどうしてそれが風洞試験と違うのか、それを直せ」と言われました。随分悩んでその時は上手くいかなくて結局出来なかったのですが、それから暫く経って実は風洞試験の方が間違っていて、風洞試験の方を直すとちゃんと CFD と揚力-抗力のポラーの形が合うということが分かって、そこから急速に CFD が社内でも使われるようになってきたという経緯がありました。何を言いたいかということ、ハイブリッドを

する時にまず基本的にお互いがちゃんとしてないと上手いかないと強く感じています。例えば皆さんに部下が二人いて、A、B、C、D、E クラスあって、A クラスの人が二人いればその二人に一つの仕事を任せると恐らくAプラスくらいの結果が出てきて、B クラスの人二人に任せると、B 足す B は A くらいになるかな。C 足す C だと恐らく B か C。ところが、E クラスの人二人に任せると恐らく D ではなくて E マイナスとかそういう結果が出てくるのではないかとこのころで、そういう意味で現状の CFD と風洞試験というのは恐らく B とか C とかその辺りくらいにいるかなと思います。そういう意味では時期的にはハイブリッドするには良いのかと思います。もしお互いがすごく発展して、お互い A になってどちらかやればそれで終わりになるという話になれば、またハイブリッドにするメリットというのもそれほどないのですが、そこまではまだ達していないというふうに思っています。後は不確かなものと不確かなものを2つ用意してそこから何かをより良くしようというのが基本的には非常に難しくて一昔前は私も悲観的になっていたこともあるのですが、一つ良い話はお互いに風洞試験で不確かな話、今までたくさん出てきたのもう挙げないですが、この風洞試験で不確かな話と CFD で不確かな話というのはちょっと種類が違うのです。そこを上手く突いてやって色んな追加の試験なり追加の解析をすることで、確からしさを増していくということは出来るかと思っています。

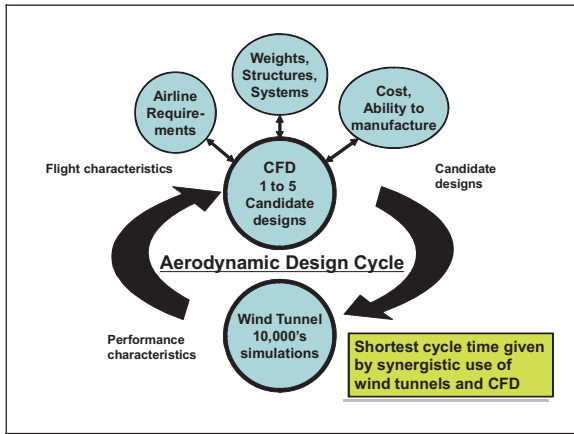
最後に、ハイブリッドにするということが重要だと思うのですが、まずその前に各々 EFD の人は EFD を、CFD の人は CFD を省みてしっかりやるというのが大切ではないかと思います。その一方、私はどちらかと言うと昔 CFD の人間だったので風洞試験の結果はわりと無条件に信じてしまっていたところがあって、逆に風洞試験側の人

から見ると CFD は正しいのではないかという認識があって、お互いお互いをよく知らないと上手いかないというところがあります。私も風洞試験が分かるようになってからは色々出来ることも多くなってきたので、そういう意味で昼ごはんを一緒に食べながらとか机を隣にしてやるとかすごく大事なことで、もしくは人が入れ替わってやったりするというのも良いことなのではないかと思っています。

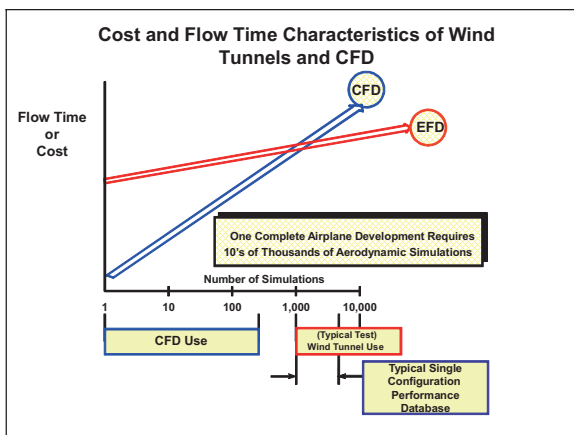
吉田：どうもありがとうございます。これでまず、パネラーの皆さんがお持ちの見解をとということでご説明させて頂きました。最後に Tinoco さんが用意してくださった資料がありましてその後でディスカッションしますので、宜しくお願いします。



Tinoco：CFD と EFD は既にパートナーです。航空機設計を進化させる方法はこれしかありません。我々は EFD、すなわち飛行試験と風洞試験のフレーバーの違いを知っています。模型と実機の構造の違いは非常に重要です。どちらの試験も真値は測れません、というのは我々はそもそも真値がいくらなのか分かりませんから。しかしこれらを組み合わせて考察することは重要です。

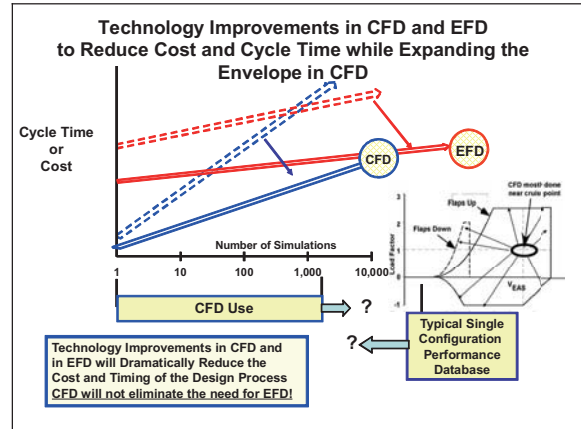


一つ考えなければならないのは、どのように使うかです。典型的な航空機の開発にはこのような設計サイクルがあります。航空会社側からの要求、構造、システム、製造コストなどが与えられると、我々は CFD を大々的に用いて設計の候補案を出し、それらの候補のサブセットとして風洞試験を計画します。何万点というデータポイントの風洞試験です。そこから必要な情報を得て、CFD と組合わせて動作特性や飛行特性を割り出します。このサイクルが迅速に実施できるほど多くの事が分かるし、CFD と風洞試験を一緒にすることでさらに多くの事が分かるのです。



今日では 100 から 1000 のオーダーの数値シミュレーションができますが、シミュレーションは実施回数に比例してコストが増大するので、すぐ

に風洞試験と同じくらいの時間とコストになります。風洞試験の場合には初期コストが高くなりますが、一度模型ができると何千というデータがとれます。



そこでできると良いのは、CFD と風試の両方にかかる時間を減らすこと、つまりこのサイクルを早くこなす、もう一つサイクルを追加してより多くが分かる、より早く製品化に到達することができるといったことです。さらに高速化だけではなく、CFD をより広い flight envelope で使えるようにすることも必要です。

- ### Stumbling Blocks
- Fundamental questions about CFD on real geometries
 - Solution convergence or stagnation?
 - Grids, Grids, Grids
 - Grid generation
 - Grid convergence
 - Solution adaptive grids
 - Turbulence models - are they adequate?
 - Steady or unsteady - when and why?
 - Many questions about differences between CFD and EFD cannot be resolved because of the lack of detail test data.
 - Detail boundary layer measurements
 - Wake data
 - Wind tunnel flow characteristics, walls, mounting system
 - Model or airplane aeroelastics, dynamics
 - Wind tunnel to flight correlations
 - Reynolds number correlations
 - Etc.

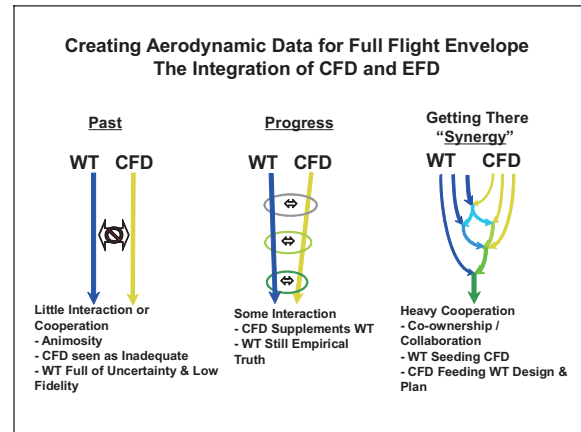
さて、何が障害となっているのか？ CFD に多くありますね。解は本当に収束しているのか、それとも収束の前にある値に留まって収束には程

遠い結果になっているのでしょうか。計算格子にはこれでよしという終わりがありません。格子収束、格子生成、解適合格子、等々。格子収束については Drag Prediction Workshop でずっとやってきましたが、まだ十分ではないと思います。2次元だったらできているのですが、3次元計算の場合はまだ本当に収束しているかどうか分かりません。乱流モデルの精度は十分でしょうか？格子や収束の問題に答えていないのであれば、これらの乱流モデルが適切かどうか分かりませんね。非定常シミュレーションをどんな場面で使うか？LES をどの場面で使うか？こんな訳で CFD には多くの疑問点がありますし、それも含んだ上で EFD との違いがあります。

また、境界層計測は十分にできていないですね。単純な実験ではできていますが、複雑な実験とか3次元の航空機形状ではどうなのか？後流データについても本当に少ししかありません。風洞の流れ特性、これもある程度計測は行ってそれなりのデータはありますが、全ての境界条件が分かっている訳ではないし、といった所です。これらのことはいつも疑問点になっていて、全ての境界条件を完璧に与えて問題を完全に解く事など決してやっていません。そこで本当のところの問題は、これらの不確かさがいかに重要なのか、そしてこれらが最終製品に何らかの影響をもたらすかなのです。もし製品に違いを生じさせないのであれば、こんなことで時間を浪費すべきではありません。もし影響があるのであれば、正しい解が何なのかについて詳しく調べるべきでしょう。

過去、CFD コミュニティと実験コミュニティは分かれていて殆ど言葉を交わしませんでした。今日は両者のコラボレーションが増えています。お互いに言葉も交わします。まだまだ別行動しがちではありますが、現在はシナジーに近づいています。そして CFD で試験計画の支援や結果の補

正をしたり、あるいは風試データを CFD の改良に用いたり、CFD と風洞試験と一緒に活動しています。



そしてここに至って、これらを一緒にすることでより迅速な判断を可能とするデータ融合という考えが出て参ります。何故ならば、CFD、EFDともにその目的は航空機の形状はどうあるべきか、安定性と操縦性能を保証するのに十分な強度を有する機体構造はどうあるべきか、といった設計上の判断を可能たらしめることだからなのです。その為にこんな事をしているわけですね。実際、顧客の航空会社は圧力分布がどうであるかなんてことに興味はない訳です。彼らの関心事は安全性と経済性だけで、設計過程で出てくる詳細は別の誰かが心配することなのです。もっとも我々が安全性や経済性を実現する為に知らなければならないのは、それらの詳細な部分なのですが。

吉田：ありがとうございました。少々長くなってしまいましたが、これからディスカッションをさせていただきます。ポイントとしては EFD/CFD が目指すところに関する皆さんの考えは多分ほぼ一緒に、そうすると不確かさは何であるか。それは例えばリアルフライトとの差と見るのか。あるいは物理モデルの差と見るのか。色々な議論があると思います。そしてそれをどういうふうにする

かという、一緒に食事を食べるというところから始まって、さらにシナジーというところまで持っていくというところで、目指す議論は同じだと思いますが、まず会場の皆さんからこのパネリストの方、あるいはご自身のご意見も含めて何かまず問題提起でも結構ですが、ご発言ありますでしょうか。

会場：CFD と EFD の融合の先にあるのは、例えば CFD は EFD の uncertainty を減らし、EFD は CFD の uncertainty を減らしていった結果として、complete agreement に到達することがそもそもの目的なのではないでしょうか。口石さんにお伺いすべきだと思いますが、融合の最終ゴールというのは一つの真値に到達することなのではないでしょうか。

口石：究極的にはやはり真値を求めるのが目的でしょうが、完全に一致するようなデータというのはまず得られないだろうというのが大前提だと思うのです。その上でその時代に応じて、これぐらいの精度は必要だという要求は当然出てくると思うのですが。航空機に限って言えば、やはりドラッグが何カウントぐらいのオーダーでエラーバーが出せるのかといった目標を具体的に定めるといのが大切で、今具体的に航空機メーカーがどれぐらいを求めているのか、それで決まってくると思うのです。それはどれ位なのでしょう。現時点ではプラスマイナス数カウントぐらいで自分が求めている解がこの範囲内にありますと EFD/CFD 融合で言えることが目標なのではないかと思っています。それが将来、究極的には 0.1 カウントぐらいのオーダーにまで行くのかもしれないのですが、その時その時の要求精度を踏まえて方法論を見直して行って、具体的な目標値に向かってどういうふうに融合を進めていくかを考えていくことが大切なのではないかと思っています。

会場：Tinoco さんと越智さんにお伺いしますが、CFD と EFD がアグリーした解を与えるというこ

とはデザイナーから見た時に究極の目標ですか。設計者は恐らく実フライトのデータを欲しがっているのではないかと思うのですが、今のところ CFD はずっと風洞試験データを再現する努力をしてきている。これから先、設計者は実飛行条件におけるデータがどうなるのかを求めているのではないかと思うのですが、それは正しいことでしょうか。

越智：私の立場からすると、風洞試験と CFD とが一致した答えですといったデータをもたらすことにはあまり意味はなくて、フライトでどうなりますというのをもらうというのが一義的だと思います。ただ現実的にはフライトのデータを見積もるといのはそれはそれで難しい話で、基本的には風洞試験が CFD のデータからどれくらいずれがあるというのを各メーカーとも持っていて、そこでシフトしてやる。そういう意味では、CFD と風洞試験が一致していればそこからの較正というのはやり易い。後はどれぐらいの精度がいるかという話になると、空力の精度として良いことに越したことはないけど、例えば重量で見ても実際作って見たらどれだけ重量が違っていたというのはある程度誤差はあるので、基本的にはそれよりも小さければ良いに越したことはないけど限界というのは当然あるのかと思っています。

Tinoco：CFD と EFD の融合で重要なのは、どうしてそれらの結果が異なるのかを理解することだと思います。おっしゃる通りで両方同じとなるように試みてもおそらく見込みがないでしょう。違いが多すぎます。それよりもなぜ異なるのかを調べ、それらをどう航空機に応用するかについてより良い理解を得ることです。結局重要なのは実際の航空機ですから。

我々はいつも相対的な計測をしています。風洞試験結果を実飛行に適用します。実飛行でも計測します。スケールリングファクターを風洞試験から実飛行を推定する為に適用します。スケールリング

が大きければ大きいほどリスクが大きい。これらのスケールリングファクターを小さくしたいのです。CFD と EFD の融合はその助けになる筈です。また、どちらかを信じるべきではないかといった事を指摘するのにも役立ちます。ですから我々は融合を続けていく必要があると思いますよ。再度申し上げますが、必要なのは理解なのです。速く理解できればできるほど設計サイクルは早まり、より良い製品を製造できるのです。

吉田：今の件に絡んででも結構ですし、また別のご意見でも結構ですが、何かありますでしょうか？



会場：佐宗先生のお話に関連してちょっとお聞きしたいと思ったのですが、先程の乱流と衝撃波の面白い写真を見せて頂いた時に、こういうものは実験でやるべきだろうと。要するに、計算では分からないというようなお話をされたと思うのですが、これというのは原理的に CFD は出来ないという意味なのか、それともこれは実験してしまった方が早いという意味でおっしゃられているのか。その辺に興味があったのでお聞きしたいと思います。

佐宗：最後の図で、要するに **well-posed**、**ill-posed**、**ill** だったらまず実験かということを見せたのですが、その考え方でいくと最初何も分からない時には実験をするとああいう結果が出ると

ということが分かると思う。ですからさっきの図の左から始めるべきであると。ところがあの実験結果が出てしまったら皆実験結果を知ることになるわけですから、その立場はどんどん右の **well-posed** に近づいてくるのです。そこからは正解に辿りつく時に、まず実験も何も見ないで CFD をやると回り道になるけれども、まずここまでは実験結果に合わせたような答えが出るようにやってみましょうというようなところから始めれば。だから問題としてはこれはスリットの形が決まっています、要するにチャンバーの中の気体が理想的な乱れの無い、あるいはどの程度乱れがあるか分かっているものであれば恐らくかなり何も見なくても答えが出ることになるとは思います。実際に噴流として出てくるサブチャンバーの中の乱れ状態とかそういうのは分からないわけで、実験でも定義をしていないし計算でもアприオリには定義できないものですから、まずは結果を知ってから中がどうなっているとかそういうところを掴んでいってということになるのではないかと思います。だから実験でも全部が定義できるわけでもないし風洞で一様流が出るわけではないですから、やはりそれも全部含んで評価をしないといけないし、その時に CFD であれば理想的な状態はこうなるけれども例えば乱れが入ったらこうなりますとか。先程 Tinoco さんの感度に関するお話で衝撃波の場所がすごく敏感に変わるところがあって、このデザインがすごくセンシティブに効くのだとか。今のお話で言うと、チャンバーの中の乱れがこんなに外の状態に効いてくるのだということも含めて、今度は実験だけでは情報が足りない。なんとなく合うような計算をしてみても中がどうなっているか、どれがどういうふうに効くかというところを手探りで一緒に探っていくというようなことで、正解というか理解を深めることに辿り付くのではないかと思います。

会場：ということは、やはり効率とかそういうようなところですか。計算だったら片っ端からいくら CPU 使っても構わないとやってやれば、きっと何か出てくるだろうと思うのです。でもそれをやったらどう見てもサイエンスのやり方としてはあまりにも効率が悪い。やはり実験をやった方がいいでしょうという理解に結局はなるのでしょうか。



佐宗：先程の実験ですと実はもう 10 年位前にアメリカの音響の人がやられていて、我々の実験もその結果に合っています。合っているという意味は、平均的には圧力が落ちて RMS のばらつきは一桁以上上がる。そういうところは合っている。しかし実際は要するに、乱流源としている装置自体は我々の使っている装置の乱れと恐らく彼らが噴流を出したところのプロセスも機械も違いますし、中の流れの状態も恐らくかなり違っていると思いますから、そうすると正解というのは何かということになってしまう。本当に静止したすぐ大きなチャンバーで最初は静止状態を保って、パッと噴き出すというのだとまた話は別だと思いますし、そういうブローアとかコンプレッサとか色々流してやっている時には、やはり装置によっても答えが違う。だから何が答えかと言ってもなかなか正解が一つですとは言えないのです。そういうリアルな問題というのは色々あるのではない

かと思うのです。

会場：今の話とちょっとずれるのですが、それに関連して、要するに我々が今持っている EFD あるいは CFD をやれるリソース、予算であれ装置であれ人であれ、というのはいずれにしても限られているわけですよ。好きなだけ EFD をやっていい、あるいは好きなだけ CFD をやっていいという状況にはないわけですよ。そうすると仮にこれはどなたにお聞きしていいのかわからないのですが、例えば 20 回やっていいと言った時に 10 回 CFD やって 10 回 EFD をやって予測するのがいいのか。それとも 20 回全部リソース使って実験した方がいいのか。それとも 20 回全部 CFD やった方がいいのか。それとも EFD/CFD 融合の何らかの答えが出るのかと。どなたか分かりませんが、ぜひその話を聞きたいと思っています。

吉田：今のご質問の主旨はお分かり頂けましたでしょうか。誰かこれについてまずご意見をお持ちの方いらっしゃいますでしょうか。

佐宗：2 回目の質問に答えてなかったところがあると思いますが、要するに効率の話だと思うのですが、これはやはりケースバイケースで、どういう問題であってそれに対して最終的に何をどこまで得なければいけないかということ、人間が頭で考えるということになるのではないかと思います。その辺が昼ごはんの大切さということです。

口石：今回は議題が不確かさをいかに減らせるかということで効率性を議論の対象にするつもりはなかったのですが、確かに融合の一つの目的として効率化というものがあると思います。今回の我々の世界で原因として考えてみて、例えば JAXA が今開発しているハイブリッド風洞では事前 CFD をやって風洞試験計画を見直す。そういった効率化は当然可能だと思うのです。

吉田：今のご質問だと、ある制約の中でいかに

効率よくやるにはどういう手法かとすると、例えば企業で **Tinoco** さんとか越智さんとかはある制限を与えられた中で目的を達しろと言われたときにどうするかという質問と同じだと思うのですが、何かお考えありませんか。



Tinoco : 一つ注意しなければならないのは、解の違いによってどれだけ差が出るか、もしくは解を求めるにおいてどの程度の違いが生じるのかということです。私のお見せした衝撃波の位置の例では風洞の細かい条件に非常に敏感です。CFD でそれを如何にシミュレーションするかを詳細に考える事はどの程度重要だったのでしょうか。空気力を調べているのであれば結果は変わりません。なぜならば衝撃波は翼上である位置から別の位置に動いてまた元に戻りますので、この繰返しの中で抵抗は結果的に同じとなるからです。衝撃波の位置は動き回るのですが、ピッチングモーメントについてもほとんど変わりませんでした。

こうした視点から見れば、学問的にこれらの感度が何たるかを調べることは重要かもしれませんが、実用的にはそうではありません。マネージャが要求するものは製品を最も安く、早く製造するために必要な答えです。それ以上である必要はありません。リスクはなぜそのような答になるのかを理解できない事にあり、ひょっとして我々にはその理解を得るに十分なリソースがないかもしれ

ません。理解するためのリソースがないのであれば少なくともそれが重要でないとか、それにより差異は生じないと確信できるようにしておくべきでしょう。それ自体もリスクですが。

越智 : 例えば、その問題について自分がどれくらいよく知っているとか、どれくらい解析で合いそうだとかいうことがまずあります。例えば飛行機で言うと、先程のハイスピードラインの設計、巡航の設計が 20 回あるのだったら、15 回か 16 回くらいは CFD で残り 4 回くらいが試験かなと思いますし、例えばそれがロースピードで且つ形が今までやったことがないようなものだとかなかなか CFD というのは難しく、やはり実験でやるということだと思います。

会場 : JAXA の渡辺重哉です。発言し遅れて話に戻ってしまうのですが、これはあくまでも私の意見ですが、航空機であれば基本的にフライトの特性を知りたいというのは設計者だけではなく、我々全てが同じ思いだと思うのです。ではそのフライトのデータがまずあるかということと、フライトでどれだけ正確なデータが取れるかという問題があります。いつも私は分からなくなるのですが、ボーイングとかエアバスのプレゼンテーションで予測値とフライトデータで揚力係数とかポワラーカーブなんかがよく合ったと言うのですが、エンジンの排気の補正をどうするかとかフライトでの飛行条件がどのくらい正確にわかったかとかを考えると、**Tinoco** さんのお話にもありましたが、両者の差が本当に正しかったのかどうかは十分に分からないのではないかと考えています。そうであればまず条件がより正確に分かる環境は何かと言うと、風洞だろうと思っています。もちろん風洞にも色々な **uncertainty** がありますがフライトに比べれば圧倒的に小さい誤差なので、まずはそこで実験と合うようにするというのが **CFD** をより良くする一つの方法ではないかと考えています。

風洞においてもレイノルズ数はそれなりには変えられるので、それによって CFD でレイノルズ数効果を予測できるかをある程度は見ることはでき、まずはそこがファーストステップではないでしょうか。先程越智さんがおっしゃいましたが、まずはそこがマッチするということが一つの出発点になるのではないかと考えています。あとは高レイノルズ数風洞として ETW とか NTF とかがありますので、そういうのも活用しながら CFD をより鍛えていくとよいのではないかと思います。

私は実験が専門なのですが、実験屋は CFD に過剰な幻想を持っているからかも知れませんが、こう考えています。JAXA では PSP とか PIV とかをを用いた面や空間の計測をやっていますが、実験というのは測れたところは計測誤差はあるものの、それなりに信頼性があります。ただ測れないところが出てくるのです。そうすると CFD の有効性について実感が沸きます。設計にこのような計測データを使われる方がこのような測れなかったところをどうやって埋めるかが物凄く難しいとおっしゃっていて、その通りだと思います。その解決策として実験データを境界条件として CFD を使って穴埋めするという考え方があるのですが、これもなかなか難しいとすると CFD であれば全状態量を全空間で計算出来るので、究極では CFD が信頼性のある予測ツールとして使えるようになれば設計上は物凄く有利だというふうに思っています。そうするとまずは実験レベルで CFD の信頼性をちゃんと確認できるようなプラットフォームを作ると、それが将来的にはフライトにも繋がっていくのではないかとというのが私の考えているところです。

吉田：今のは先程の会場からの御質問への回答ということですか。ありがとうございます。会場の方から他に何かありますでしょうか。

会場：今のご意見に関連するのですが、CFD に

とっては風試のレイノルズ数で結果を合わせろというのが非常に難しい。というのは模型スケールのレイノルズ数で考えると遷移が非常にセンシティブになってきて、例えばラフネスの位置をちょっと変えるだけでも実際試験では性能が大きく変わってしまう。そういった遷移位置が不確かな状態の中で CFD を合わせてというのがかなり難しい。むしろ CFD にとっては高レイノルズ数で遷移が固定されているという状態の方が合わせやすいというような現状があることも考慮して頂きたいと思います。

会場：今回のタイトルで EFD は風洞試験のことだと言われているのだけれども、飛行試験のことを言われるのは Tinoco さんだけです。飛行試験の結果がなくて、風洞試験と計算機だけで世の中閉じようとするのがおかしい。さっきから話題になっている衝撃波の位置なんていうのは境界線の厚さによって変わってくるわけですし、風洞の乱れにもよるでしょう。そういう敏感な要素がかなりあるはずで、それを飛行試験と風洞との対応を除いて、風洞とコンピュータだけでやるのはおかしいのではないのでしょうか。

Tinoco：私もそうだと思います。もっと飛行試験が必要だと思います。飛行試験から得る詳細が必要で、ボーイングでは飛行試験はサイズの影響で非常に高価なこともあり、もっぱらの興味は機体強度と安定性・操縦性能を証明することです。会社は CFD や EFD を向上させるための境界層測定などに興味はありません。私達はいつでも「抵抗の少ないより良い翼を設計しろ」といった風に命じられているのですが、現象の詳細を知らなければそれを行うのは難しいのです。

では我々がやるべきことは何なのか。何かはできるのです。3 つの違うコードを走らせれば翼の後縁で起こることの詳細について 3 つの違う結果が出ます。でも風洞試験では模型のサイズ故に翼

の後縁で何かを測るのは非常に困難です。飛行試験をすれば多分出来るのですが、誰もやりません。NASA をその気にさせようとしたのですが、NASA には航空関連の予算がこれ以上ありません。JAXA でできるのであれば、何か共同でやるかもしれません。最終的に私達がしたいのはよりよい飛行機を作ること、そのためにはもっと理解が必要なのですから共同作業は良いことでしょう。CFD と風洞試験はその為の2つの通り道です。3番目は飛行試験です。もっと詳細な情報を取れるようになる必要があるし、それらの情報には意味があるはず。なぜ違いが生じるのか理解しなければならぬが、よく分かっていない。ある程度は分かっていますが。まあ抵抗に関しては簡単ですね。抵抗が大きければエンジン会社のせいだと言えますから(笑)。エンジンが燃料を燃やすぎるからで飛行機の抵抗ではないよと(笑)。でもエンジン会社は、違う違う、飛行機の抵抗が大きすぎるんだって言うでしょう(笑)。どちらも証明するのが難しいのですが。

吉田: やはり実フライトとの差をどう詰めるかというところが、そこにある不確かさをどうするかというところが議論になっていると思います。ひょっとしたらそれだけではないものもあるのではないかというので、先程冒頭で口石の方がそもそも不確かさは何かという定義の話をしたので、後ほどどうやったら減らすかという議論にいきたいのですが、その前にもう一度不確かさとは今議論しているようなことで、皆さんが考える方向で良いか。あるいはこういうのもあるのではないかということもあればもう少し議論したいのですが、何かそういうご意見などありますでしょうか。

会場: 真の値が欲しいと思う時は模型の真の値が欲しいとか風洞の中で真の値が欲しいとかそういう話ではなくて、実機の真の値が欲しいという事ではないかと思うのです。先程から精度の話が

出ていますが、1カウントとか0.1カウントか、我々実機を扱っているものからするととんでもない。そんなもの測りようがない。もともとそんな高い精度のものを要求する必要はないのではないかと思います。要するに、相手は実機だと我々は思っているのです。学会で発表する分には風洞試験とコンピュータだけで話が済むかもしれませんが、実用的には本当の飛行機に対して風洞試験やコンピュータがどういう答えを出してくれるか。真に近いものを出してくれるかということになるので、0.1カウントなんてことまで考えているとしたら、ちょっと話がおかしい様な気がしているのです。



口石: 0.1 カウントは大げさだったかもしれませんが、基本的に風洞試験として最も確からしい値を出して、それが実用上どう役立てるのかが大切だと思うのです。先程会場からもコメントがありました。まずは風洞試験として正しい値を模索するのが我々のファーストステップなのではないでしょうか。それが分かった上で、さらにそこから実飛行条件を予測するためにはどうすればよいかという2つのステップでやっていかなければ、いきなり風洞試験から実飛行条件のデータを出すということは基本的に不可能なので、予測には段階があるのだと思います。あくまで風洞試験として正しい測定が出来ていることを保証するのが

我々の最初のミッションだと思いますので、それが出来た上でさらにそれを実飛行に繋げる為にはどういったステップでやっていけばいいのかということ。その中に EFD/CFD 融合のようなテクノロジーが入っていける余地があるのではないかと、いうふうに考えております。フライトデータについても MRJ という飛行機が出来つつありますし、日本でもこれから必要になってくるのだと思います。

佐宗：今まで CFD というのが、要するに風洞とか理想的な一様流での状態での答えを出すという役割だったと思うのですが、そういう位置づけで今議論が進んでいると思うのです。本来はフライトを実際にしなくても数値計算でフライトの、例えばエンジンのインテグレーションやレイノルズ数効果もそうですが、そういうことが出来るようになるというのが CFD の本来の果たすべき役割じゃないかと思うのです。現状の技術レベルの話ではなくて数値計算だから出来ること。だからもう少し CFD が役に立つようになる為にはフライトの時のシミュレーションが出来るようになるということまでいくべきなんじゃないかと思うのですが、どうでしょうか。例えばちょっと話が違いますが、今私が関わっている宇宙推進でイオンスラスターの流れをシミュレーションしようというところはわりとやっていて、それもまだ片付いている話ではないのですが寿命予測を数値計算でやろうと。流れはそこそこ解けた。合わないこともあるけれども、ある程度それらしい答えが計算できるようになってきたと。今度はイオンスラスターだったらグリッドにどれだけのフラックスの、どれだけのエネルギーのイオンがぶつかってきて、どれだけ消耗するか。それを数値的にやろうと。そうすると数値シミュレーションで良いことは、リアルタイムよりももっと先取りして寿命予測ができる。そんなようなことも今されて

いて、そういう意味では CFD がこれから何をしていくかということで、一部はもちろん Flight Dynamics と Fluid Dynamics のダブルの CFD をやられているところもあるようですが、本来は数値計算がそういうフライトに代わるようなフライトの実験の回数を減らせるようなものになっていくべきではないかと個人的には思います。



越智：メーカーの立場から言うと、何度も言っていますがフライトのデータを予測するというのが一番なのですが、じゃあそれを一体誰がやるのかという話が一方でありまして、それまでを JAXA さんをお願いするのか。そこはやはりメーカーの仕事なのかということがあると思います。基本的にはフライトと合わせるというのは機体によって変わってくる面もあり、ユニバーサルにどんな機体でも飛行の値を見積もるというのは遠い将来の話だと思うので、近未来のターゲットという意味では風洞試験と CFD を合わせるというのはそれほど悪いことではないかと思えます。但し会場からの発言でもあったように、CFD にとって風洞試験の条件というのは逆に難しい面もあるので、最終的には実機を推定するということを忘れずに頭に置きつつ、まずは風洞試験と CFD とを比較していくことでお互いの不確かさを減らしていくというのがアプローチとしては間違っていないかと思えます。

Tinoco : いかなる航空機開発プログラムにおいても、実飛行特性の予測に対しては非常に慎重になる必要があります。そのような特性が燃料消費についてどうなるかといったことを航空会社に対して小さなパーセンテージで保証しなくてはいけない。一旦空に飛ばしたらすぐに安全性を FAA に対して示す必要がある事も忘れてはいけない訳で、このためには航空機に微調整が必要になります。毎回の事です。かつて飛ばしたどの飛行機でもある程度の調整をしなければなりません。そこで小さな調整で済ましたいわけです。そうでないと会社がつぶれかねない。多くの例がありますが、アメリカでは飛行予測ができなくていくつかの会社が航空機ビジネスから撤退しました。風洞や CFD はあくまでこれら飛行予測ツールの一部に過ぎません。ボーイングではこれまでの歴史、私達が開発してきたこれまでの航空機の経験を大いに頼りにしています。作業をどう進めるかについての多くの情報があるのです。過去の風洞試験や CFD を新しい航空機のものと比較して、飛行性能がどうなるかについて最善の予測を立てます。こうした予測を過去の知見無しで盲目的に行うのは不可能でないとしても大変難しい事でしょう。これが飛行試験なしに大型航空機ビジネスに参入することが難しい理由の一つだと思います。つまり、風洞試験のみ CFD のみでは完全な回答が得られないであろう故に、これまでの知見の蓄積が今日でも非常に大きな比重を占めているのです。ですから風洞試験と CFD の 2 つを使って知見を向上させ、その向上された知識を通じて不確かさを減らしていくことを目指しているわけです。



Meade : Dr. Tinoco のおっしゃる事の繰り返しになってしまいますが、基本的に EFD と CFD というのはツールに過ぎず、我々は製品を作ろうとしているわけです。単純機械的に作るだけであれば誰もこんな話はしません。何人かがおっしゃった通り、非常に困難な問題に対して絶対的な真実ではなく許容できる真実を得ようとしているわけです。製品を飛ばす事を可能にする真実を、風洞試験であれ縮小模型の飛行試験であれ CFD であれ、試行錯誤で得ようとしているわけです。分かりにくくなるのはその 3 つの間に相互作用があるからだと思います。究極的には飛行機を飛ばしたい。そのために設計で未知の要素を可能な限り減らしたい。EFD では優れた装置と経験で真実に近づいていると信じている。しかしながら測定できるものはほんのわずかです。CFD は素晴らしいツールですが問題もある。でも少なくとも実験での空白を埋めて実験を補助することができる。実験結果を保証するか、あるいは将来の実験のガイドとして空白を埋めるために使うことができるわけです。繰り返しますがいずれも単に製品を作るためのツールに過ぎないのです。しかしこうした EFD と CFD の融合により空白を埋めて、製品を設計するための許容できる真実により近づこうとする過程の中で不確かさを減らすことが可能になると思います。

吉田：色々意見が出ましてこの話をもっと詰めた気もするのですが、今の話に限定しまして、例えば実際のフライト時の状況を知る為に EFD と CFD を有効に活用するのであれば、どういふふうにも有効に活用する方法があるか。つまり不確かさをいかに減らしていくかという手法です。今回このプロジェクトで目指すものもそうですし、その点についての具体的にこういうのをしたらどうかとか、あるいはこういうのを日本全体でやろうとか、あるいは JAXA にやってくれとか、そういう要望等ありましたら遠慮なく言って頂きたいのですが、その点に関するご意見などありませんでしょうか。如何にお互いが助け合うかという重要性はかなり議論できたような気がするのですが、では具体的にどういふふうにしたら一歩前進、つまり一緒に食事する回数をいかに増やすかという方向の議論だと思うのですが、何かありませんでしょうか。

佐宗：良いアイデアがあるわけではないのですが、東北大学の流体融合センターがやられていることがかなりデータ同化に近くて、要するに上流から素性がよく分かっていない流れがきた時に、例えば円柱を置いてその後流はどうなるかと。それを1点2点の圧力や速度情報だけでフィードバックをかけて、上流の流れを予知しようという試みです。そういう試みは航空に特化した話ではないのですが、その辺りはこのプログラムを見ますと、明日のデータ同化の話も同じだと思うのですが、そういうところは一つはやはりあっていいかなと。ただ風洞試験にリアルタイムで、風洞が動いている間にリアルタイムの情報が来てもそれが何の意味をなすかということがあると思うのですが、目指しているところは数値計算と実験のターンアラウンドをもう少し短くするということが一つ、誰もが一週間や一ヶ月単位でやっているのは駄目だということがあると思うのです。ターン

アラウンドを短くするという意味で、僕が知っている限りでは東北大のグループがやられていることというのは繋がるのではないかと思います。

吉田：ありがとうございます。具体的な解というのは思いつけば皆やっているわけですからなかなか無いとは思いますが、そういうのを思考して少しでもアイデアを出してやっていくというのが重要だと思ひまして、今の先生のお話はありがたいと思います。他に何かそういうアイデア、何でも結構ですが、あるいはこうしたらよいのではないかというコメントなどありましたらお願いします。

会場：今の佐宗先生のお話に関連してですが、データ同化の手法というのはかなり今色々発展していて、我々も何か使えるものがあるんじゃないかということで、試験的に何かリデュースドモデルに適応したりということをやっていると思っています。それで色々調べていこうと。ただ個人的なのですが、航空宇宙に非常に特異な問題は、例えば東北大でやっているカルマン渦のシミュレーションというのは実験自体がかなり知りたい真実に近いわけです。我々の知りたいことに近いそれを計算との比較対象としている。ところが航空宇宙の場合は風洞試験と計算を比較させる。風洞試験も実は物理現象として我々の知りたいことではあるのですが、そこからもう一段ありまして、我々が本当に知りたいのはリアルフライトである。そうすると風洞試験と数値計算というのをまず比較する。これは意味があるのでしょうか、それをデータ同化とか使って近づけることは出来るのではないかという期待があるわけです。で、それをやった後に今度は風洞試験もしくはその風洞試験にかなり合わせたというか、お互い協力してかなり良い結果が出せるようになった数値計算とリアルフライトのところを何とかしないといけない。いわゆるリアルフライトと風洞試験もしくは数値

計算との差分というのを考えなくてはいけないわけで、それが非常にここでの航空宇宙での問題の特異性となっているのではないかと思います。そのようなところにどのように貢献できるか、EFD/CFD 融合の観点から何かこのディスカッションの場で方向性を示して頂けるといいと思うのですが、いかがでしょうか。非常にプリミティブに考えているのは、例えば数値計算だとその差分が非常に出しやすいのではないかと。実験より出しやすいのだったら、その場合は数値計算がリアルフライトを計算すると案外楽かもしれないのです。境界条件とかがまだ複雑にはならないですから。ところが風洞試験だと非常に複雑な様相が境界条件などに入ってくる。そこで数値計算をしつかり出来ればその差で風洞試験とリアルフライトの差が取れるとかいうことがあるのではないかと。このプリミティブな期待をしてしまいます。その辺り実際の会社でやられてご存知の方からお知恵を貸して頂きたいと思うのですが、いかがでしょうか。

吉田：今の質問になかなか明確な回答は難しいと思いますが、ありますでしょうか。

越智：実機というのは風洞試験模型と CFD モデルとは全然違うのですよ。やはり実機の予測というのはまた別次元の話で、巡航だと空力弾性が違ったりとかパネルの表面粗さとかギャップとか、後は色んなところに小さいアンテナがポツポツついていたりして、それが1個につきコンマ何カウント分の影響があったりとか、それでもまだやろうと思えば出来ない話ではないかと思うのですが、ロースピードになると本当に Tinoco さんが言われた通りで、形が分からないのです。どんな形で飛んでいるのか分からないのです。その中でそれを予測するというのは非常に難しく、ちょっと経験則的な方法でやるという形にならざるを得ないというところで、システムチェックにやるのはな

かなか難しいのかと思っています。

会場：そうなりますと、リアルフライトが分からなければ意味がない。これは究極の目標なのですが、その前に風洞試験と数値計算というのを相互作用させて、少なくとも風洞で起こっている物理現象についてはきちんとつかめるようにしたいというのは、こういうプロジェクトを進めていく上で第一ステップになり得るということなのではないでしょうか。その辺りの方向性というのも、いきなりストレートフォワードには行かないのでステップを切っていくと思うのですが、どのようにすればよいのかが知りたい点であるのですが。宜しくお願ひ致します。

Meade：EFD、CFD、飛行試験とステップを踏むことになるのではないのでしょうか。実験からの情報は比較的限られているように思えます。その情報の空白を埋めるために CFD と融合できるでしょうし、その融合過程で CFD の感度や信頼性が分かります。実際、Dr. Tinoco もおっしゃった様に、CFD では格子や乱流モデルなど、多くの問題がありますから。ですからこの融合データを使って大きな不確かさのおこる部分に分かれば、多分それを修正して飛行試験に応用できるわけです。

さて、私の考えですが、飛行試験に行く前に改良されたモデルを採用して感度を調べる。例えば翼やアンテナの形状とか、そんな境界条件を変化させたらどうなるかとか、そしてそれらが飛行試験で計測可能な変数にどう影響するかとか。それで結果が真実に近いか否かも分かります。実施した計測が先ほど言った意味での境界条件の少々の変化の中に納まれば結果にある程度の自信が持てるでしょうし、はるかに外れた所があれば風洞実験と CFD の所にまで立ち戻らなければならぬと分かるでしょう。

Tinoco：簡単な答えはないと思います。全てやって、やり続けるしかないわけです。飛行試験で

データが取れたら比較できることもあるでしょう。飛行試験で 0.1 カウントの抵抗まで調べることはできないでしょう。というのはフライトデータは全てが統合されたもので、そこではエンジンも重要な要素になっているからです。しかし圧力の分布を見ることは可能でしょうし、そのためには機体の実形状を計測するか、もしくはある程度予測しておくことが必要になります。これら全てが意味を持つはずですが、データを取り、統合して一つのストーリーを作ることができるはずですが、もしも一つのストーリーに統合できなければ、何故と問わねばなりません。大方その理由は同じ質問をしていなかった、同じものを測定していなかったからです。風洞から CFD、飛行試験で条件が異なっているとか。最終的にはそれら 3 つで同じ質問をして同じ答えが出たら、大きな前進ということです。言うは易しですが、私達はそうすることから遠い場所にいる様に思いますが、多くの事でここは自信があるという所もあります。ですから私達は飛行機を飛ばすのです。また飛行機を飛ばした時、意外なことが必ず出るわけです。それが修正可能なちょっとした驚きであることを望んでいます。

吉田：時間がそろそろ迫ってきたのですが、何かこういうことをやりましょうとか、このワークショップはまた来年もあると聞いておりますので、それに向けて今このプロジェクトがやっている EFD/CFD 融合の中のコンポーネントにするという提案でもいいですし、何かこういう事をもっとやって欲しいというご提案などありませんでしょうか。

会場：無理を承知でわがままなお願いをします。個人的には最終的に CFD で全て解けたらいいなと。設計もできたらいいなと思っております。今のところその為の検証データとして風洞試験があるのであれば、今欲しいのは実フライトの検証デ

ータということで JAXA には実フライトの、旅客機クラスのレイノルズ数で圧力分布であったり力であったり、そういうデータをぜひとも計測、公表して、日本中なり世界中なりの研究者が検証データとして使えるようなデータベースを揃えて頂きたいなと思います。

それは無理にしてもすぐ何が出来るかという、風洞試験を正確に CFD で模擬できたら、恐らくその CFD のコードはかなり部分で validate なり verify できる。とすると例えば遷音速風洞の中での全体を解いたようなことにも当然なる。昔見たことがあるのですが、風洞を丸ごと解いてしまうような、中に模型が入っている状態を CFD で解いて検証データとして揃えられないのかと。それは力だけではなく、圧力分布のようなものがワンセットあると、地方の大学の研究室でもそれを参考にして CFD のコードを役立てることが出来るかと思しますので、是非ともお願いしたいと思います。

吉田：ありがとうございます。飛行試験はなかなか難しいですが、後者の風洞を丸ごとというのは多分試みはあるでしょうし、JAXA のプロジェクトでもスコープに入っているのですかね。

渡辺：コメントありがとうございます。JAXA に何かやれと言われる方がやらなくていいと言われるよりずっといいので有り難いのですが、フライトデータを予測するのはメーカーの仕事か JAXA の仕事かと切り分けるのではなくて、両方がやるというのがこれからではないかと私は思っています。というのは風洞試験だけやっていると風洞試験条件下での CFD と実験のことばかりを考えるようになってしまうので、フライトデータに JAXA も触れるようなことをしていかないとトータルに日本全体の力も上がらないのではないかとというのが私の思いです。フライトデータは非常にセキュリティの高いデータで JAXA がメーカー

からなかなかもらえないというところがあるので、もらえればそういうこともどんどんやっていきたいと思います。もちろんパブリックにオープンというのは難しいとは思いますが、1 点目のご指摘への回答としては希望として私たちもそういうことをやりたいと思っていますところ。

2 点目については、実際に我々も風洞壁とか支持の補正をやらない実験データと壁も支持もない CFD データを比較してしまっていることが未だにあるので、そういうことがないように壁と支持も含めた CFD が出来るように考えています。ただそれを検証する為の実験データも 6 分力だけでなく、表面圧力の詳細な分布だとか空間の速度ベクトルとか、そういうものをセットにしたデータベースが必要だと考えています。今までデータベースというと実験だけというのが多かったのですが、我々は実験と CFD と同じ条件のデータをセットにしてデータベース化したいと思っていますので、ご要望に応えられるのではないかと考えています。

Tinoco : 指摘しておきたいのですが、NASA は公開していますよ。第 4 回の Drag Prediction Workshop では common research model を使用する予定です。巡航形状でしたらウェブ上で公開されますので、ダウンロードは誰でもできます。また風洞試験は NTF で多分 5 月頃に行われることになっています。その後、同じ模型で Ames の 11 フィート遷音速風洞でも試験される予定です。少なくとも 2 つの試験が行われることになります。その模型は JAXA の遷音速風洞には大きすぎるかもしれませんが、NASA は模型製作の為に形状データを提供できると思います。それから飛行試験についてはボーイング 757 を買われたらよいのではないのでしょうか (笑)。中古機だったらもうそんなに高くないでしょうし、うちの会社は割引しますので、いかがですか (笑)。

渡辺 : これは将来どうなるか分からないのですが、希望としては MRJ が実際に飛んで TC も取った後には飛行試験が出来るような機体として JAXA も含めて維持できるといいなと思っているので、757 を使わなくてもよいかもしいかなと思っています (笑)。

吉田 : ありがとうございます。そろそろ時間ですが、最後にもう 1 言くらいこの機会ですので何かありますか？

会場 : 私は今 uncertainty に皆さん焦点を置き過ぎているのかなという気が多少します。これはまだまだ研究的な要素が非常に大きいところであって、フィジックスを混ぜた場合に上手くいくかどうか分からない。それよりも二人が一緒になるのだったら、一緒にいる時間を作るほうが大事なんじゃないかと。ですから、最初のターゲットとして、productivity とか efficiency というところにもう少し重点を置くのも悪くないのかという気がしています。

それから飛行試験に関して言うと、私はヨーロッパって非常に上手く今やっているなという気がします。High-Lift とかの計画を立てていて、レイノルズ数効果や空力弾性、支持干渉の効果、恐らく次はパワー風試やエンジン排気のシミュレーションの方に行くのだと思うのですが、そういうのを非常に綺麗に積み上げてきている。ぜひ MRJ もしくはボーイング 787 を利用して JAXA やメーカーの中でそういうものを共有できるようにしてもらいたいと思っています。

それからもう一つだけ、佐宗先生のアナロジーで言うと、やはり sensitivity が大事なんでしょうね。異なる二人が一緒にやっていく為には鈍感じゃ駄目だということじゃないかという気がします。

口石 : おっしゃる通り uncertainty に偏りすぎたという点はあるのですが、今回は議論をシャープにする為にあえて uncertainty で限定してテー

マを組んでみたのです。このワークショップは来年以降も続けるつもりなのですが、今回はパネルディスカッションのテーマが既に決まっていて、“**Can EFD/CFD integration maximize productivity?**”、そういう形で5年くらいは持つかなと(笑)。ということで次回もぜひご参加下さい。

吉田：では時間もそろそろ来ましたので、これで終了させていただきます。ここに集まっていられる方はEFDがご専門の方もCFDがご専門の方もいますので、まさに懇親会で**together**をというのが今日の唯一の解(会)ではないかと思うので宜しくお願いします。どうもありがとうございました(拍手)。