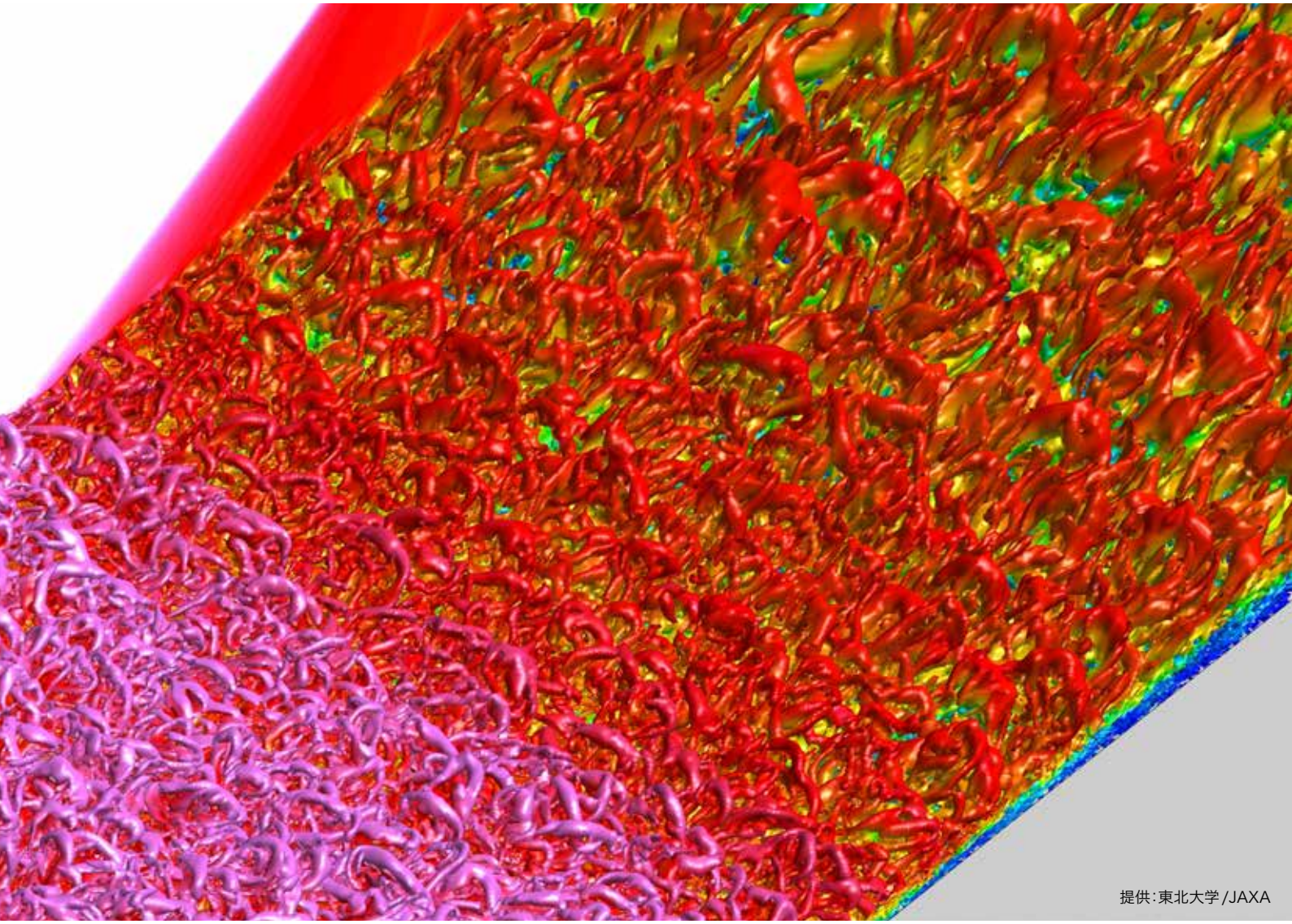
ものづくりにHPCを活用するためのツールとケーススタディー

計算工学ナビ

計算工学ナビ・ニュースレター2017年秋号



提供：東北大学/JAXA

炭素繊維強化プラスチック製造シミュレータの開発

東京大学 吉川暢宏

航空機の設計と運用を革新する 高速・高精度乱流解析技術の開発

JAXA 高木亮治

VOL. 13

炭素繊維強化プラスチック製造シミュレータの開発

東京大学生産技術研究所
吉川暢宏 教授

水素燃料自動車の普及に不可欠な高圧水素容器や、より安全で高効率な航空機エンジンの素材として期待されている炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の製造技術を、シミュレーション技術の面から研究開発している東京大学生産技術研究所の吉川暢宏教授に話を聞きました。ポスト「京」クラスのコンピュータによって初めて実現可能となるCFRP製造シミュレータの姿が見えてきました。

現在、吉川研究室で進めているプロジェクトについて教えてください。前回こちらに伺ったときは、水素燃料用高圧容器の強度評価に関する研究が成果をあげたところでした。【本誌Vol.8】

その続きでお話するとしたら、村田機械、帝人の2社と共同で進めている多給糸フィラメントワインディングによる複合容器の設計高度化に関する話から始めるのがいいでしょう。

前回見て頂いたタンクは1本の繊維束をぐるぐる巻いていく方法で作っていました。今回研究しているのは一度に90本の繊維を巻いてしまう機械【図1】を使う方法です。この機械を使うと加工の速さもさることながら、強度的にもかなり有利なのです。この特長は我々が行ったシミュレーションにより明らかになりました。

なぜ有利なのでしょうか？

1本ずつ巻いていく場合、繊維は必ず重なります。重なって交差したところにどうしても問題が起こりやすい。90本をいっぺんに巻くと、繊維が繊維を乗り越えて重なる部分がなくなります。まずこれが有利な点のひとつめです。次に、1本ずつ巻くと繊維が滑って最適なルートからはずれてしまいうまく巻けないことがあるのですが、いっぺんに巻く場合は繊維同士がぎゅうぎゅうに押しつけられた状態になるので、滑らずに最適なルートで巻くことができます。もし滑ったとしても、力学的に有利な方向に滑るよう巻くこともできる。

これら2つの利点を生かせる最適な設計手法を見つけ、ものづくりの現場で利用できるよう検証すべきところは検証するのが本研究の目的です。実は地下の実験室にこの機械があって、実際に作って試す態勢もできています。

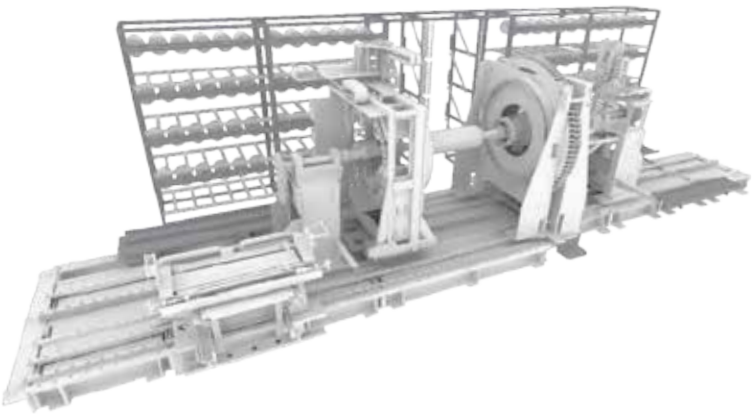
運用は大変かもしれませんが計算機上でのシミュレーションと実機での検証を同時に進められるのは素晴らしいことですね。次は、ポスト「京」に向けて加えられた研究課題について教えてください。

ジェットエンジンの一番先頭にあるファンブレードを対象に、製造シミュレーターの開発をIHIと一緒に進めています。

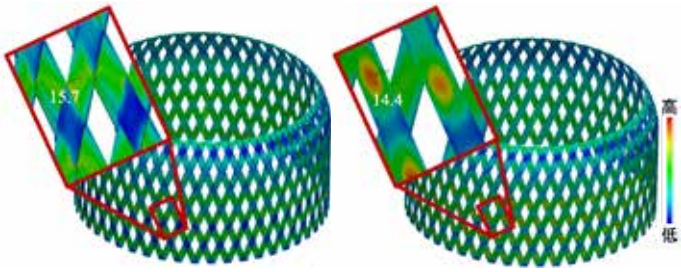
このファンブレードの信頼性を損なう一番の要因はバードストライクです。CFRP性のブレードは衝撃に弱いのですが、離陸時の目一杯エンジンを回しているときに鳥がぶつかっても壊れないものにしたい。そのための設計に必要な強度評価の技術を確立するのがこの研究の目的です。

ファンブレード用のCFRPは、タンクに使うものとは違うのでしょうか？

CFRPに使われる樹脂には、大きく分けて熱硬化性と熱可塑性の2種類があり、タンクの場合は熱硬化性を使います。炭素繊維に液状の樹脂をつけて巻いてから加熱して固めるのが熱硬化性のプロセスです。一方、ファンブレードの製造に使われるのは熱可塑樹脂で、シート状の炭素繊維と樹脂



［図1］CFRPを成形するフィラメントワインダー（村田機械株式会社）



単給糸フィラメントワインディング　多給糸フィラメントワインディング

［図2］メゾスケールモデルによる繊維束の局所応力評価
多給糸フィラメントワインディングにより、交差部の屈曲を回避して局所応力の上昇を軽減できることがわかった。

[1] FrontCOMP 複合材料強度信頼性評価シミュレーター
http://www.cenav.org/kdb/?page_id=336

に熱を加えて成形し、冷やして固めるというプロセスです。

熱可塑CFRPには、成形速度が速い、生産コストが安い、リサイクルが可能といった利点がある反面、成形後に発生する皺や反りといった初期欠陥の予想が困難という課題があります。

ファンブレードの形は炭素繊維シートを洋服のパターンのように切って1枚1枚重ねて作ります。このシートの厚さは1ミリ以下。それを何百枚というオーダーで重ねていきます。ところが、成形の過程で炭素繊維の状態がどう変化するのか、まだよくわかっていない部分があって、それをコントロールできるのか、できないのかを解明する必要がまずあります。できないとしたらそれを前提にモデル化しないといけないし、できるのであればうまくコントロールして性能を上げる方法を見つけたい。そういった観点で成形プロセスを追っていけるシミュレーションソフトウエアを開発しています。

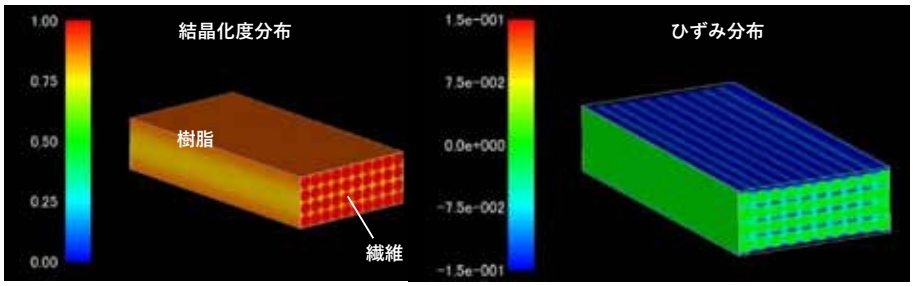
ソフトウエアはこれまでどおり吉川研究室で開発してきたFrontCOMP[1]を使うのでしょうか？

はい。タンクのために開発した熱硬化性樹脂のアルゴリズムは、かなりの部分が熱可塑性樹脂にも使えます。

基本的な考え方はタンクの場合と同じで、シート1枚1枚を炭素繊維と樹脂に分けてちゃんとモデル化し、動的な破壊シミュレーションをするというものです。これは「京」ではできなかった計算です。

ポスト「京」であれば可能な計算ですか？

実はポスト「京」でも難しいかもしれない。ハードルは高いです。おそらく基礎モデルを積み上げていくだけでは実機の大きさまでは辿り着けないでしょう。まず、シート1枚ずつをちゃんとモデル化できる材料モデルと、そのモデル化に必要なツールを開発し、次にポスト「京」の能力の範囲で、ジェットエンジン用ファンブレードの成形の問題を解決するという想定です。



［図3］熱可塑CFRPの成形後残留ひずみ予測ミクロスケールシミュレーション

微細な材料がたくさん重なってできる大きな部品ですから計算量が大きくなるのは理解できるのですが、CFRP特有の難しさはどこにあるのでしょうか？

炭素繊維と樹脂、この2つの性質が全然違うことから生じる難しさですね。炭素繊維は強度が高くて化学的にとても安定な材料です。熱を加えてもほとんど伸びないし（逆に少し縮む）、高温でも材料定数はほとんど変わりません。一方で樹脂にはいろんな非線形性が現れます。膨張しながら固まって、終わったら冷えていって縮みます。炭素繊維はその間全然変わらずに元のまま。その結果、残留ひずみ、残留応力が生じ、隙間が空くといった欠陥ができる事もよくあります。当然、欠陥は少ないほうがいいのですが、それが入るなら入るなりに強度評価のシミュレーションにその情報を反映させることができれば、製造プロセスの改善に役立つ知見が得られるはずです。

吉川先生の言う「ちゃんとしたモデル化」とは、ミクロスケールからマクロスケールまで数学的な裏付けのあるモデルを作り、計算機で正しく扱えるようにするということだと思いました。そういうアプローチでCFRPの問題に取り組んでいる例は、世界的に見ても他にないと聞きます。それはどうしてですか？

モデルを作る際の計算負荷が高いため、京クラスのスーパーコンピュータが自由に使える環境が必要というのが理由のひとつでしょう。計算だけでなく、開発まで含めて最先端のスパコンを使いながら研究を進められる環境は世界的にもなかなかないのだと思います。

それから、CFRPの製品開発が、これまであまりにもシミュレーションから遠かったという理由もあるかもしれません。評価のために、とりあえず作って壊すという世界だったのです。非常に複雑な材料の挙動をシミュレーションに取り入れるという発想がそもそもなかった。

我々が、この2つの問題点を解決して、CFRPの製造シミュレーションを実証的にデモンストレーションすることができれば、その価値も普及していくだろうと考えています。

航空機の設計と運用を革新する高速・高精度乱流解析技術の開発

宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所
高木亮治 准教授

ポスト「京」の能力を活用することで、これまで不可能と思われていた実機スケールにおける航空機の飛行状態の再現が可能になります。新しいシミュレーション技術がより良い設計を実現し、さらには日常の運航をもっと安全で効率の良いものに変えようとしています。ポスト「京」プロジェクト重点課題⑧サブ課題Dの責任者である宇宙航空研究開発機構（JAXA）の高木亮治准教授に開発の状況とこれからの展望を聞きました。

これまで本誌では航空機を1機丸ごとの規模で扱う事例を取り上げたことはありませんでした。「運用」という切り口も初めてです。

これまで我々はシミュレーションを活用して良いものを作ることに注力してきましたが、技術の進歩により大きなシミュレーションができるようになり、色々な状況で使えるようになってくると「開発だけでなく運用にも使えるよね」という話になってきたのです。

もし、10分先の現象を5分間で計算できるとしたらリアルタイムの予測ができます。しかもその計算を何百ケースも一度にできるとなれば、ある状況で次にどう行動するのが最適かを事前に判断することも可能でしょう。たとえば、衛星からのテレメトリーデータを事前にシミュレーションで検討しておき、実際に送られてきたデータに異常がないかをリアルタイムに判定するといった使い方が考えられます。

シミュレーションはものづくりだけでなく、それを運用するときにも役立つのではないでしょうか。

「運用とシミュレーション」については、後でもう一度聞かせてください。いま航空機を取り上げる理由についてはいかがでしょう？　本誌ではこれまで自動車の事例は多く取り上げてきました。風洞実験の代替という大きな課題を前進させる成果が上がっています。

「京」の段階で自動車に対して細かな渦もある程度解像するシミュレーションができるようになりました。しかし、ジャンボジェットなどの航空機のレイノルズ数は自動車に比べて一桁上がります。つまり、より細かな渦を大きな機体に対して解像しなくてはいけないことになり、計算規模が大きくなります。

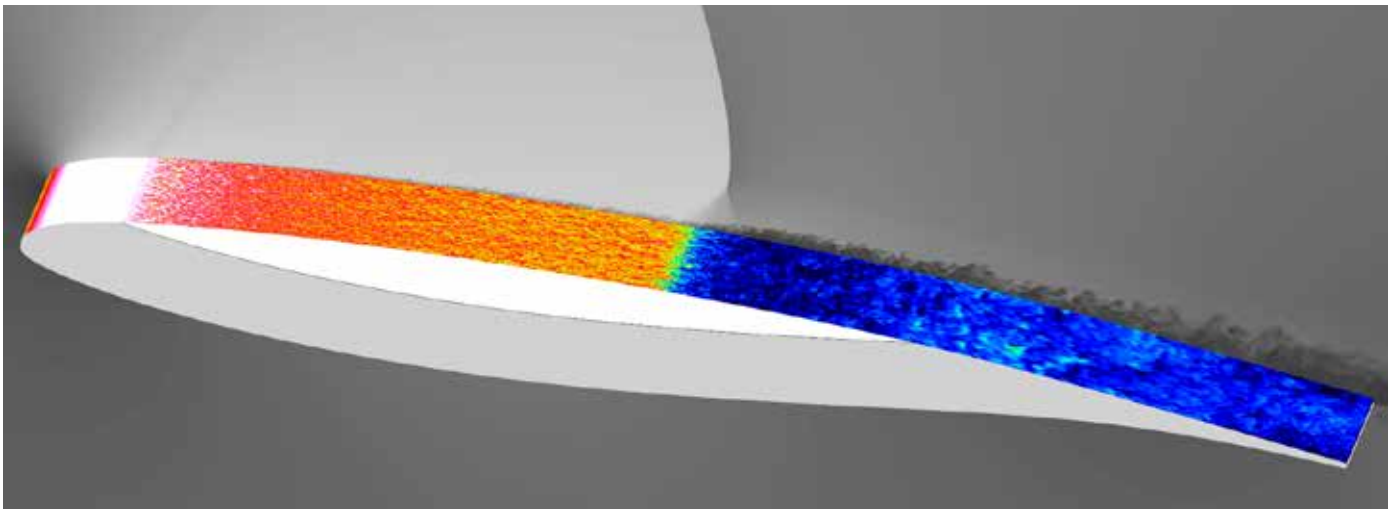
一般にレイノルズ数が一桁上がると、計算規模はだいたい100倍から1000倍になるといわれています。京の100倍高速と言われるポスト「京」を使えば、飛行機の巡航時のレイノルズ数に対応できそうですが、実際にはちょっと厳しいので、いくつか新しい技術を入れなくてはいけません。

新しい技術とはどんなものですか？

LES壁モデルと階層型直交格子について説明しましょう。

計算空間のなかで「解くべき物体がここにあります」と定義するのが壁の役割です。従来は計算格子がそのまま壁を表現していました。この方法は簡単で計算精度も良いのですが、格子を作るのがとても大変で、単純な形状の航空機でも専門家の手で1か月くらいかかってしまうこともあり、ものづくりには使いにくいものでした。

この問題を解決するのが、階層型直交格



［図1］京コンピュータによるLES壁面モデルによる遷音速バフェット解析
手法のチューニング無しに高レイノルズ数・遷音速バフェット現象の再現に、現実的な計算コストで成功した。

[1] Large Eddy Simulation
[2] FrontFlow/violet Hierarchical Cartesian 本誌Vol.7に詳しい記事がある

子です。手作業で作ったら1年かかるような複雑な形状も、1時間ほどの計算処理で格子に変換することができます。その代わり、壁を格子ではなくソルバーのアルゴリズムで表現する必要があり、ここでポイントとなるのがLES壁モデルです。

流れのなかにある壁の近傍には非常に細かい渦が生じます。LES[1]を使うとそれを解像することができますが、格子も同様に細かくしていかないといけません。しかし、あまり細かいとメモリに収まらないし、計算時間も膨大になってしまいます。そこで、ある程度まで細かくしたら、そこから先はモデルを使って計算量を減らそうというのがLES壁モデルの考え方です。

計算量を一桁減らすことができるLES壁モデルの開発によってはじめてポスト「京」の能力で実機の飛行状態の解析ができそうだという見通しが得られました。

シミュレーションソフトウエアの開発は始まっているのでしょうか？

今回、我々のチームはFFV-HC[2]をベースに新しいプログラムを作っています。自動車用に開発されたFFV-HCに速い流れの解法とLES壁モデルを取り入れて、航空機の実機・実フライト条件の解析を実現するというのが開発の方針です。

ポスト「京」と新しいソフトウエアによって、まずどのような現象を解明しようとしているのですか？

航空機が高速で飛行すると「遷音速バフェット」と呼ばれる現象が発生することがあります。翼面の衝撃波が原因となって、ある物理的メカニズムにより振動が始まるのです。そうすると翼から流れが剥がれて失速したり、振動によって機体が破損したりします。

従来、この遷音速バフェットの問題はスーパーコンピュータを使っても解けませんでした。それをLES壁モデルの導入により京の上で解いたのが我々の成果です。ただし、当時の機体の規模は小さくて、実機の1/10程度、つまり模型飛行機くらいの大きさでした。ポスト「京」ではこのシミュレーションを実機のスケールで実施し、遷音速バフェットや更には失速のメカニズムを解明します。そして、それが航空機の運用を改善する知見として役立つと考えています。

冒頭にあった運用とシミュレーションの話に繋がってくるわけですね。

何が飛行機で怖いかというと、失速です。飛行中に揚力を失ったら落ちるしかありません。当然、開発者は簡単に失速しないよう設計します。その上で「この飛行機はこの範囲だったら失速しません」という境界（フライトエンベロープ）を設定して、絶対にその外では飛ばないようにするのです。ただし、従来はその境界を設計時の計算で決めることができませんでした。試験飛行の時に敢えて危険な飛び方をして、「これ以上はダメだ」という限界を知る必要があったのです。

我々の開発目標のひとつは、こうした危険な試験飛行を行う前に、シミュレーションだけで境界に関する情報を得られるようにすることです。

設計と運用の両方で役立つ知見ですね。

はい。ただし、まだ問題は残ります。設計で想定したとおりの機体を作っても、実際の飛行状態では、複数の乱気流が生じるとかパイロットの操作ミスといった要因により失速に陥る可能性があります。実際にそういう事故が起こっていますね。

実は、航空機が失速したときにどういう挙動を示すかはよくわかっていないのです。フライトシミュレータも正しい挙動を再現できていない可能性があります。我々のシミュレーションの結果をフライトシミュレータに入れることができれば、訓練の質が向上して、パイロットはもっと自信を持って失速からリカバリーできるようになるのではないでしょうか。

他にも運用とシミュレーションに関するアイデアがあれば教えてください。

航空機の翼端に発生する渦の解析によって、空港の発着枠をもっと増やせるようになるかもしれません。

常に混雑している羽田空港や成田空港では、航空会社が発着枠の獲得を争っている状況があります。発着枠の決定にはいくつかの考慮すべき要素があって、そのひとつは翼端渦の問題です。

飛行機が離陸するときに、翼の両端で渦ができます。機が大型になればなるほど強くなって、離陸したあとにも空中に渦が残ります。小さな飛行機にとってこの渦はまさに乱気流で、とても危険なため、前機の翼端渦が減衰する時間を見込んで発着枠を決める必要があるのです。しかし、現在は実験や経験を基にかなりマージンをとって規制をしています。このマージンはもっと削れる可能性があるのですが、原理がよくわからないから安全サイドに振っているという状況です。我々のシミュレーションによって、翼端渦が実際どの程度残るのかを示せれば、発着枠決定の仕組みを改善できるでしょう。

我々が考えている航空機運用のシミュレーションとは、これまで実験と経験に頼っていた部分を大規模な計算によって置き換え、安全性と効率をさらに向上させる試みと言えます。

『HPCものづくり統合ワークショップ』は最先端スパコンの利活用者による利活用者のための議論の場

2017年9月12日、東京大学生産技術研究所で開催される『HPCものづくり統合ワークショップ』は京やポスト「京」に代表される最先端スパコンを駆使する専門化集団をおもな対象とする議論の場です。比較的少人数の参加者で進められる予定ですが、この場で交わされる議論の内容について関心をもつ本誌読者は少なくないと思われます。そこで、本ワークショップの問題意識を共有することを目的に、内容の概略と世話人の2教授からのメッセージをお伝えします。

開催趣旨

●近未来のものづくりには、高度な知識に基づく科学技術イノベーションの継続的創出が不可欠の要因になってきており、最先端スパコン（京、ポスト「京」）を駆使することによって得られる新しい知見の重要性が増しています。

●技術分野別の専門家集団（研究機関＋産業界）による「HPCシミュレーション技術」に関するより深い技術的議論の場を設けることにより、有用なアプリ機能の見極め、利活用者の理解度の増強、成果の効果的展開等に資することが本ワークショップの目的です。

●ポスト「京」プロジェクト重点課題⑧・⑥各サブ課題の横串を通した、アプリケーションごとのテーマを設定しました。

部門構成

[I] 熱・流体・構造連成 …… 世話人：JAXA 高木亮治

●物体形状の取り扱い
BCMにおけるDirty CADデータの取り扱いについて（理化学研究所 大西慶治）
LBMベースの流体解析システムFFXの開発（みずほ情報総研 山出吉伸）
航空機実機詳細形状の解析実現に向けた取り組み（JAXA 高木亮治）
圧縮性流体解析ソルバーUTCartの概要と壁面境界条件について（東京大学 今村太郎）
●流体・構造・音響連成
オイラー解析に基づく流体構造統一解法について（理化学研究所 西口浩司）
並列計算機環境における汎用的な流体構造連成解析技術（東京大学 吉村忍）
●LES壁モデル
航空機フライトレイノルズ数・圧縮性流れのLES（東北大学 河合宗司）
乱流渦構造に基づく LES 壁面モデルの開発（東京大学 鵜沢憲）

[II] 材料・構造・信頼性 …… 世話人：東大生研 吉川暢宏

製造シミュレーションの課題とHPC活用の期待（慶應義塾大学 高野直樹）
●CFRP成形シミュレーション
マルチフィジックス・マルチスケールを考慮したCFRP成形シミュレーション技術の紹介（JSOL 西正人）
弾塑性材料特性を考慮したCFRP成形シミュレーション（サイバネットシステムズ 柚木和徳）
熱可塑CFRP材料のマルチスケール成形シミュレーション（東京大学 吉川暢宏）
●溶接シミュレーション
溶接シミュレーションの革新と産業への展開（大阪府立大学 河原充）
溶接解析の産業利用の現状と課題（JSOL 功刀厚志）
溶接シミュレーションに適した大規模解析手法の検討（東京理科大 遊佐泰紀）
FrontISTRの展開（東京大学 奥田洋司）

[III] 合同セッション

スーパーコンピュータ「京」上でのFrontFlow/blueの性能チューニング（理化学研究所 熊畑清）
構造格子系プログラムによるPRIMEHPC FX100の特性評価と高速化（JAXA 高木亮治）
非構造格子系プログラムFrontISTRにおける疎行列・ベクトル積ベンチマーク（東京大学 奥田洋司）
メニーコア環境における核融合プラズマ乱流シミュレーションの高速化（日本原子力研究開発機構 井戸村泰宏）
OakForest-PACS上でのFMO計算プログラムABINIT-MPのパフォーマンス（立教大学 望月祐志）
フラッグシップ2020プロジェクトについて（理化学研究所 南一生）

部門世話人からのメッセージ

[I] 熱・流体・構造連成……高木亮治

熱・流体・構造連成部門では、「壁」というキーワードを軸に「形状としてどう扱うか」、「流体構造連成のインターフェイスとしての壁」、そして「物理現象としての壁の扱い」を順に考えていく、そんな形のセッションを組みました。

まず始めに「物体形状の取り扱い」として、壁を物理的にどう扱うかを議論します。ここでは直交格子積み上げ法（Building Cube Method, BCM）の話がメインです。次の流体・構造・音響連成の解析というテーマでは、流体側の計算と構造側の計算を接続するデータ交換という位置づけで壁が重要になるでしょう。最後に、この２つをまとめるLES壁モデルを取り上げます。壁の近傍で起こる物理現象をどうモデル化して計算をラクにするか、という話ですね。

このワークショップを企画する際、産業界の方々ともいろんな議論をしました。従来の方法ではみんな苦労していて、特に格子を作るのが大変だから、なかなかシミュレーションを現場で使えないという声をよく聞きます。一番大きな問題ですね。それに対して、「BCMは格子を自動で作りますよ、どんな形状でも解析できるようになりますよ」という話をします。これはメーカーから見てうれしい技術ではないでしょうか。産業界の期待にも応えられる内容にしたいですね。

上記2氏へのインタビューからなる関連記事が
本誌2〜5ページにあります。併せてご覧ください。

[II] 材料・構造・信頼性……吉川暢宏

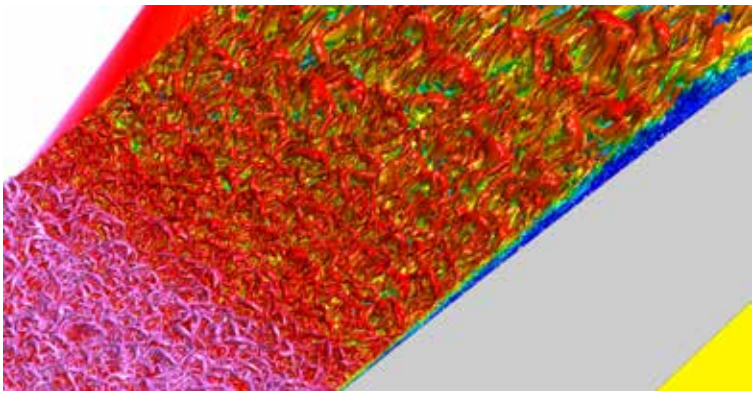
自分でCFRPや溶接のシミュレーションを手がけようと思っている人、あるいは手がけたことのある人たちが集まって、技術的な問題点を再認識し、次の展開を考えるワークショップです。

それぞれの企業、研究者の現状をまず紹介して、その上で将来的な方向を示したいと考えています。今、CFRPや溶接のシミュレーションにはどういう難しさがあるのかを共有し、それを解決するためには、やはりポスト「京」のようなスパコンが必要だという前提で、ソフトウエア開発の方向性を議論します。

シミュレーションしたい現象がマクロスケールのものでも、その根幹にはミクロスケールの現象があるはずです。結果として必要なのはマクロな変形や欠陥の情報だからそこだけ合えばいいという考えでミクロの議論を飛ばしてしまうと、新たな展開は見えてこないと思っています。

そういう意味で、ポスト「京」における新たな展開というのは、材料をみるスケールをもっと細かくするということでしょう。強度、軽さ、信頼性についてもう一歩深く立ち入って、本当にきわどい設計をやろうとしたら、材料の基本的なモデルまで遡って、シミュレーションソフトウエアとしてきちんと組み上げる必要があります。ものづくりの観点からは、これが正確なモデルに基づいた加工シミュレーションへと繋がっていくはずです。

CFRPや溶接に限らず、製造シミュレーションといわれる分野には共通の課題があるのではないでしょうか？　削ったり切ったりというシミュレーションもたぶんまだうまくできていないと思うのです。ミクロスケールを見るときに必要なモデルの解像度とか、材料の複雑な依存性を考慮したモデルの必要性といった話題は、製品の分野に関わらず製造シミュレーションに興味を持っている方々みなさんにとって有益だと考えています。



今号の表紙

遷音速バフェット現象のLES解析

翼面上を発達する乱流境界層と非定常に振動する衝撃波との干渉剥離流れ前後の乱流渦構造の可視化図（流れ方向速度で色付け）。航空機周りの高レイノルズ数流れ解析を可能とするLES壁面モデルと「京」を用いた大規模解析により、遷音速バフェット現象の高精度LES解析に始めて成功した。

東北大 河合宗司
JAXA 高木亮治

編集後記

航空機の話題が多い号となりました。最先端のシミュレーション技術がアビエーションのハードウエアとソフトウエアにどのような変化をもたらすのでしょうか(F)

計算工学ナビ オフィシャルサイト

本誌のPDF版やソフトウェアライブラリ、ニュースなどのコンテンツを提供しているWebサイトは下記のURLからアクセスできます

http://www.cenav.org/

計算工学ナビ

計算工学ナビ Vol.13

発行日：2017年9月12日
発　行：東京大学生産技術研究所
革新的シミュレーション研究センター
〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1
office@ciss.iis.u-tokyo.ac.jp