

計 算 互 学 ナ ビ

Quarterly News Letter Spring 2014



宇宙航空研究開発機構 JAXA
多目的設計探査の新展開

ものづくりの現場から
電力中央研究所

ソフトウェアライブラリ
FrontFlow/red



ものづくりに革新をもたらす 多目的設計探査の新展開



宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
宇宙科学研究所
宇宙飛行工学研究系
大山聖 准教授

あちらを立てればこちらが立たず……そうした設計上のトレードオフを解決に導く手法として期待されているのが多目的設計探査です。JAXAでは宇宙探査機の軌道設計やロケット発射場の構造物の設計に関する研究にこの手法を取り入れ、計算によって優れた知見を得るノウハウを磨いています。

ロケット打ち上げ時、衛星が納められたフェアリングには大きな振動が伝わる。ジェットやジェットから発生する音が地面に反射して発生する大音響によるものだ。

従来の射点はジェットを逃がすため単純な斜面になっている。振動をさらに抑えるためには発生する音をフェアリングに集中させない形状が望ましい。射点壁面が受ける圧力を小さくすることも重要だ。だが、あまり複雑な形状にすると建設コストが増す。すなわち相反する設計目的を満たす最適解を探す必要がある。

このような問題を「多目的設計最適化問題」といい、求められた最適解の集合（データベース）から設計に役立つ有効な知見を得ることを「多目的設計探査」という。今回は「京」を使って多目的設計探査を行っているJAXAの大山聖氏に話を伺った。

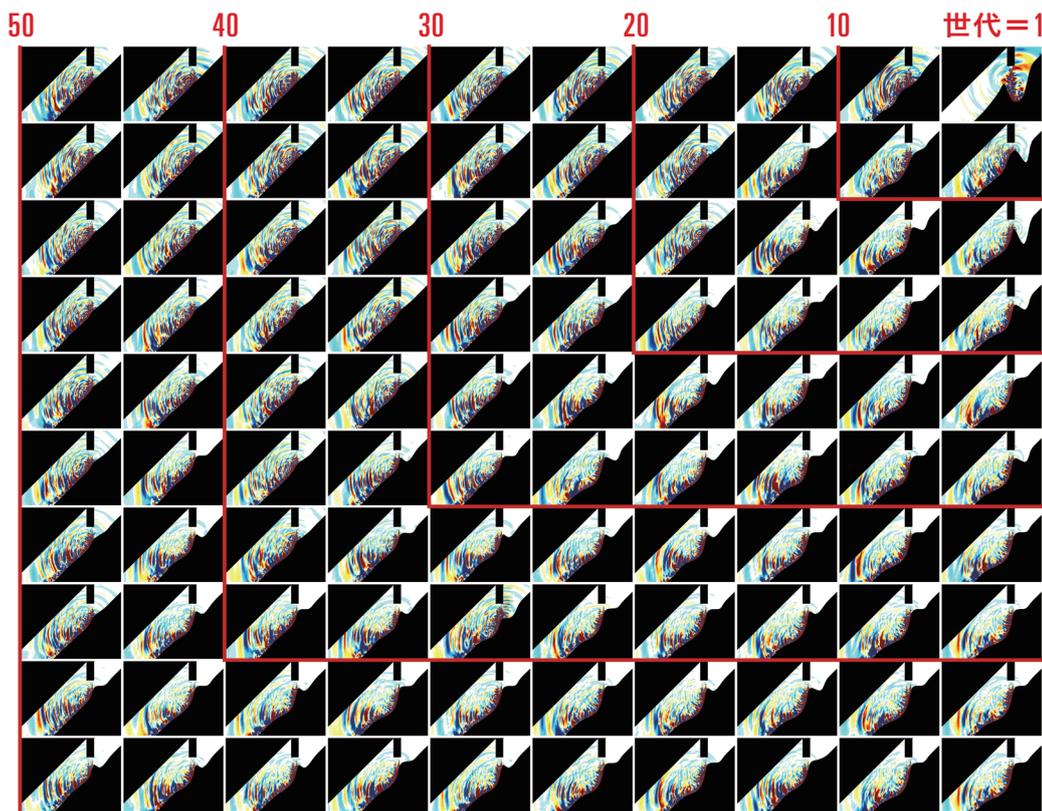
トレードオフの関係にある複数の設計目的を満たす解を探すとき、実際に設計可能な領域の限界面をパレート面といい、パレート面上の解をパレート最適解という。パレート最適解とは、ある目的を改善するためには他の目的で妥協せざるを得ない解のことである。実際の設計はこのパレート最適解の集合

からもっとも適した解を選ぶことになる。**図1**

大山氏らの研究室では、解の探索は多目的進化計算を使って行う。最初の解の集団の中から性能が優れた個体を選択して子供集団を作り、性能を評価する。そしてまた優れたものを選ぶという過程を繰り返すことでより最適解に近づけていく手法だ。問題は計算コストである。必要ケース数と目的関数の評価にかかる時間の積で計算コストは決まる。今回は50個体の集団で50世代、つまり2500ケースの計算を行った。各ケースで行う処理はラージ・エディ・シミュレーション (LES) に基づいた高精度な空力音響解析である。京コンピュータの約7% (6500ノード) を使って約2週間の計算時間となった。

大山氏らは二つの方向で研究を進めている。一つは6目的程度までの最適化問題を解くこと。もう一つは目的関数の評価に必要な時間が大きい問題を解くことである。

前述の空力音響特性の研究は後者にあたる。多目的設計探査の結果、壁面圧力と音圧レベルに関してはトレードオフがないこと、そして追加計算も加えて考察したところ、ジェットが衝突する付近の斜面形状を少しだけ変えたものが一番静かであることが分かった。LESと多目的進化計算により、従来は試行



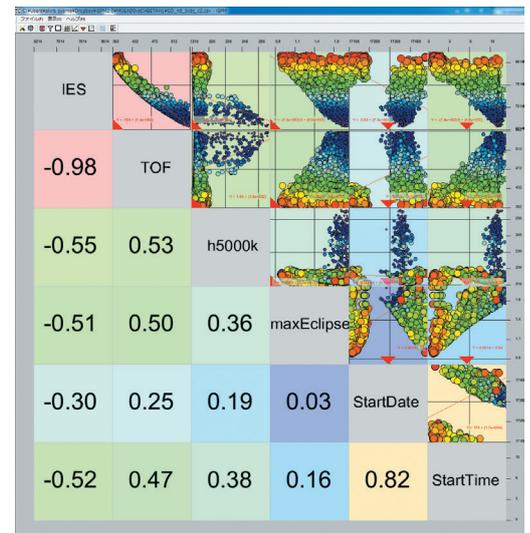
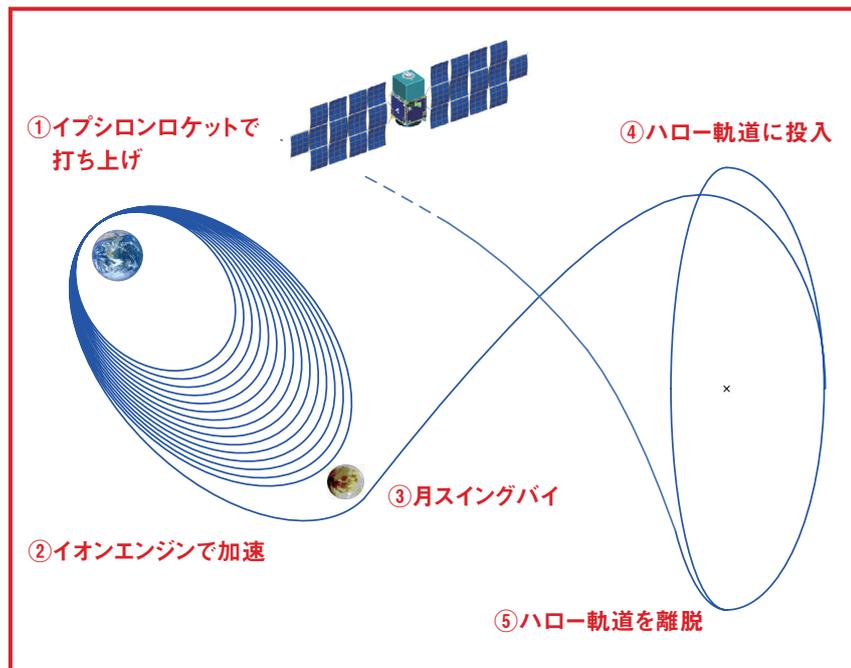
ロケット射点形状の進化計算のようす。黒い斜面の曲線がそれぞれ少しずつ異なるのが分かる。Bスプラインで定義された射点形状の違いによって、発生する音響波がどう変化するか、ひとつひとつLESによる音響解析を行いデータベース化する。実際の計算は2500ケースなので、ここに並べたケース数の25倍である。



提供: JAXA

詳しい解説ビデオがYouTubeで公開されています。 <https://www.youtube.com/watch?v=Y2bo5CbXQ3w>

■ 深宇宙探査技術実験ミッション DESTINYの軌道



散布図行列可視化ツール「iSPM」を使うと、インタラクティブに設計空間を可視化することができる。Windows版が下記のページで公開されている。

<http://flab.eng.isas.jaxa.jp/monozukuri/mode/>

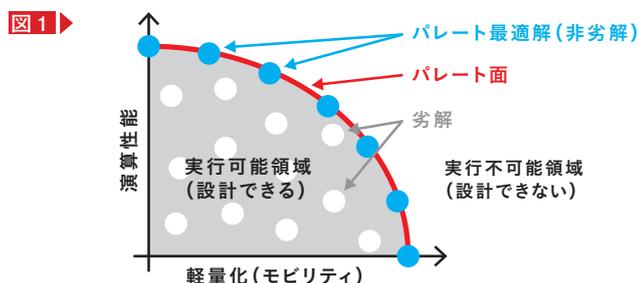
錯誤的にならざるをえなかった空力音響設計がより効果的にできること、すなわち騒音問題における設計最適化が可能になったことを示した意義は大きい。

6関数のトレードオフを解く

もう一つ、大山氏らが新たな手法を開発しながら取り組んでいるのが宇宙機の軌道設計への多目的設計探査の応用である。具体的には2018年の打ち上げを目標としている深宇宙探査技術実験ミッション「DESTINY」の軌道設計である。

DESTINYはイプシロン・ロケットで打ち上げた後、地球を周回しながらイオンエンジンで加速、月を経由してハロー軌道へ投入される。イオンエンジンは化学エンジンに比べて推力が弱いため、新しい発想の軌道設計が必要だ。バッテリーを軽くするため、太陽電池が日陰で発電不能となる時間は短くする必要があり、放射線帯であるヴァン・アレン帯は素早く通り抜きたい。月にも早く到達したい。こうした要求から設定された目的関数は6つあり、そこから最良の設計変数を導くために多目的最適化問題を解くことになる。

従来の多目的最適化問題では、目的関数が増えると、ほとんどの解が何かに優れていることになってしまい、最適化が進まなくなる問題があった。そのため4目的以上の問題で満足できる解は求めることが難しかったという。



大山氏らは解の優劣を見るときに参照点からの距離などを使ってランク付けを行うという新しい手法を用いることで計算コストを削減し、従来手法では見つけれなかった日陰時間が1時間以下となる解を発見した。この知見は実際の軌道に活かされる予定だ。いまのところ打ち上げ時期は年末年始の夜中頃になりそうだという。

2014年度からは京を使って、さらに大規模な人口サイズのシミュレーションを進める予定だ。今回開発した距離によるランク付け手法は並列化にも適しているため、人口サイズを非常に大きくすることも可能だ。

ツールの提供とさらなる事例の蓄積

JAXAは最適化データベースの目的関数のトレードオフ関係などを調べるための解析支援ツールをネット上で公開している。特に多次元のデータベースを可視化するには目的関数同士のトレードオフなどが見える散布図行列がわかりやすく使いやすいという。

大山氏らは他にも、プラズマアクチュエータによる航空機の翼の抵抗最小化と揚力最大化、自動車タイヤの表面形状設計による車体空気抵抗の削減、高速鉄道車両の騒音を軽減する設計手法の開発といった問題にも挑んでいる。多目的設計探査を用いることで、従来の経験が及びにくい領域でも理論的な設計が可能となる。

「多目的探査で日本のものづくりを革新したい」と大山氏は語る。多目的設計探査によって得られる理論に裏付けられた知見を設計者にフィードバックすることで革新的なものづくりを実現したいという。京クラスのコンピュータが企業でも使われる2020年代には、多目的設計探査はより一般的になり、設計の現場でも活用が可能となるだろう。その日に向けて大山氏らの研究開発は進められている。

石炭火力発電の明日をささえる 微粉炭乱流燃焼シミュレーション

電力中央研究所

一般財団法人電力中央研究所(電中研)は1951年に創設された電気事業者の共同研究機関。分野ごとに分かれた8つの研究所に在籍する約700名の研究者がエネルギーと環境の諸課題に取り組んでいます。今回は横須賀のエネルギー技術研究所を訪ね、石炭火力発電の技術開発におけるシミュレーションの貢献について取材しました。

はじめに電中研の成り立ちと活動の方針について、エネルギー技術研究所の渡邊裕章氏に聞いた。

「国内の電力会社が売り上げの0.2%を出し合い、電中研はそれを研究の資金として活動しています。電力会社のニーズ、そして社会一般のニーズを調査をしたうえで課題を設定し、優先順位の高いところから研究開発を進めていきます。研究施設は4つの地区に分かれていて、横須賀ではおもに火力発電、送電、材料に関する研究が行われています。我々は民間の研究機関なので、社会情勢に大きく左右されるというか、そこに貢献していかないといけません。たとえば、火力でいえば、新しい技術を開発するだけでなく、今ある設備を安定的に安く動かす研究にも力を割いています」

渡邊氏の研究テーマは、石炭火力発電で使われる微粉炭燃焼ボイラーの設計と運用にシミュレーションを適用することだ。国内の発電量の26%が石炭火力発電(2013年1月・資源エネルギー庁調べ)という状況にあって、その効率、安定性、環境安全性の向上は重要な課題である。

「世界の石炭需要は右肩上がり、価格も高騰しています。より安い石炭を、今までと同じ効率で発電に使いたい。しかし、安い石炭は品質が悪く、燃えにくいだけでなく有害物質が大量に出る可能性があります。安い石炭ほど、技術がないと使えないのです」

世界全体における石炭火力発電の比率は40%を超え、中国やインドのように60%を上回る国も存在する(2010年・OECD調べ)。他国が避ける低品質な石炭を活用することの経済的メリットは大きい。また、そうした技術を海外に展開す

ることができれば、地球規模の環境問題に対する貢献にも繋がるだろう。

世界初の微粉炭燃焼シミュレーション

それでは、古来より使われているこの燃料にはどういう難しさがあるのだろうか。

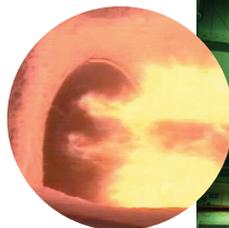
「石炭は反応が遅いのです。木にライターの火を近づければすぐに燃えあがりますが、石炭はいくら火をつけても燃えません。そこでまず40ミクロンくらいの大きさに砕きます。そうすると燃えやすくなる。これを微粉炭といいます。微粉炭と空気を高さ60メートル、幅と奥行きが30メートルほどのボイラへ、側面に設けられた30~40基ほどのバーナーから送り込むと、微粉炭はそのなかをぐるぐる回りながら燃えます。上昇した火炎がまたバーナーに戻ってくる循環流という動きを作ることも重要で、バーナー内部の案内羽根による旋回や炉内全体のバーナー配置などで流れをコントロールして、燃焼の効率を上げていきます。ただ、燃焼効率を上げると、燃焼の結果発生する有害な窒素酸化物(NOx)も増加します。燃焼効率を上げるには温度が高いほどいいのに対し、NOxを減らすには温度を低くするほうがいいという二律背反の関係があるのです」

これまで電力会社やメーカーは経験的な手法でこの問題に当たってきた。渡邊氏らの目標は、コンピュータシミュレーションの導入によって手探りの状態から脱し、最良の設計を理論的に見つける手段を確立することである。

現在は実用化が射程に入った段階といえる。10年に及ぶ研

実機を対象とする
微粉炭の
燃焼シミュレーションは
世界初の試みです

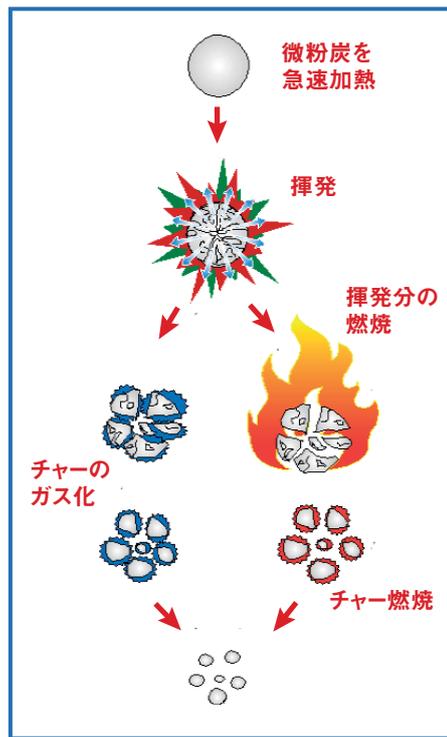
電力中央研究所
エネルギー技術研究所
渡邊裕章 上席研究員



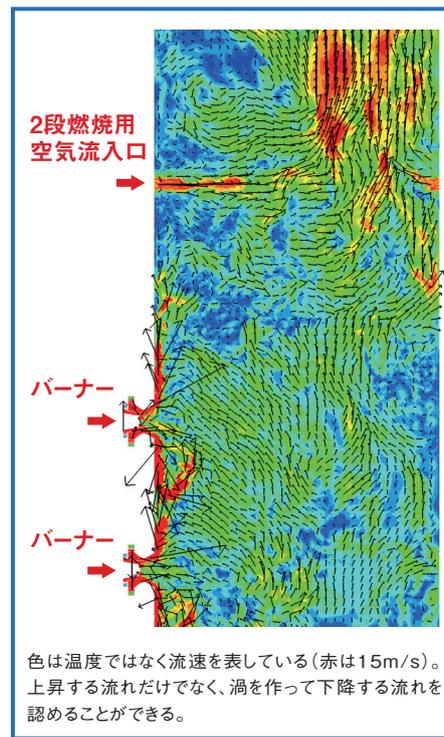
微粉炭火炎

横須賀にある
マルチバーナー燃焼試験炉

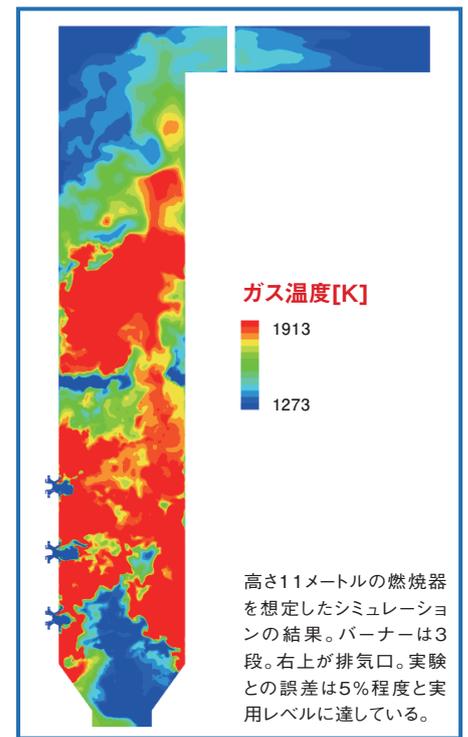
■ 石炭(微粉炭)の燃焼過程



■ 絶対流速と流速ベクトル分布



■ ガス温度分布



究開発は前例のない難問を解くところから始まった。その難しさの根本は、ボイラ内の乱流と微粉炭燃焼という2種類の複雑な現象を同時に解く点にある。

「まず着目したのがラージ・エディ・シミュレーション (LES) という乱流の計算手法です。LESを使えば実用的な計算負荷に抑えながら高い精度を実現できることが分かりました。難しいのは、それと微粉炭の燃焼をマッチングさせることです。石炭は暖められると熱分解を起こして、可燃性ガスとチャーと呼ばれる固体に分かれます。つまり、ガス燃焼と固気反応という2種類の燃焼が共存する場なのです。さらに、それらは組成が一定ではありません。熱の履歴によって組成が変化するので、フレキシブルな表現にしておかないと計算がうまくいかなくなる。こうした極めて複雑な現象を表すことができる乱流燃焼モデルを、京都大学の黒瀬良一先生と試行錯誤しながら見つけ出しました」

渡邊氏がSSFRM (Scale Similarity Filtered Reaction Rate Model) と呼ぶ乱流燃焼モデルの導入によって、はじめて巨大なボイラ内を乱流状態で飛散する粒子とガスの燃焼過程を記述することが可能になった。

実装に当たっては、LESベースの流体解析プログラム FrontFlow/red (FFR) にこの乱流燃焼モデルを独自に付加した。

「ソースコードがオープンで、東大生研を中心にかなり開発が進んでいたことがFFRを使った理由です。開発は順調だったのですが、それでも数年が必要でした。実機を対象に微粉炭燃焼のLESを実現したのは世界で最初です」

現在は電中研が持つ高さ10メートルの試験用ボイラーを対象に検証が進められている段階で、実験データと計算結果は定性的な一致を示し、モデルの妥当性が確認されている。

京を使用した場合の計算時間は約1週間。実用に供するためには、60メートル高のボイラーに対しても1週間程度で結果

が得られることが望ましい。渡邊氏はエクサスケールの時代に入れば産業界の要望に応えられると考えている。

電力の安定供給に果たす役割

今後、石炭火力発電の分野でシミュレーションが貢献する余地は大きい。キーワードはコストと安定性だ。

「電力会社は導入したボイラーを40年から50年、使い続けたいといけません。しかし、その間にどんな石炭を使うかは分からない。石炭は産地が違えば性質もまったく異なります。もしかしら、石炭以外の燃料も燃やさないといけないかもしれない。でも今は燃やしてみるまで正確な燃焼効率や排出物の量は分からないのです。未知の燃料を使って設計を超えた領域で運転した結果、装置の調子が悪くなくても現場の勤で対応するしかない。コンピュータ上で性能や安定性を評価できるプラントシミュレータに興味を持つ電力会社は多いと思います」

今後、比率が高まると予想される再生可能エネルギーを補完するために、石炭や天然ガスを燃料とする火力発電所の技術革新が必要とする見方もある。

「天候や時刻によって発電量が上下する再生可能エネルギーが増えると、同程度の火力発電所も必要になるという議論があります。太陽電池が発電を始めたなら火力の発電量を減らし、太陽が隠れたら増やすといった運用が必要になるかもしれない。その場合、従来の火力発電所よりも発電量の上げ代・下げ代が大きい装置が必要となるでしょう。現在の装置でそれをする、環境負荷が高いモードに入ってしまった、火が消えてしまったりと、いろいろな問題が考えられます。今後はそうした運用にも耐えられるロバストな装置の設計が求められるはず。我々のシミュレーション技術が貢献する余地はそういったところにもあると考えています」

乱流燃焼解析ソフトウェア

FrontFlow/red**FrontFlow/red の特徴**

- LESによる高レイノルズ数乱流拡散の汎用的で正確な予測
- 非定常性の適切なモデル化による空力音や構造連成の予測
- スケール分離の概念に基づく燃焼、混相などの複雑流の合理的モデル
- 温度、密度変化を扱う統一的な解法、モデル
- 1億点相当の大規模計算によるCADデータに匹敵する解像精度
- 非構造型格子と並列計算による実用計算への適用

FrontFlow/red (FFR) はラージ・エディ・シミュレーション法 (LES) を使って複雑な流れを予測するために開発されたオープンソースソフトウェアである。同じFrontFlowファミリーのFrontFlow/blueが、物体周囲の流れの諸問題を計算の速度と精度を重視して解くようデザインされているのに対し、FFRは高い汎用性と拡張性を保ちながら高レイノルズ数乱流の汎用的な予測手段を提供している。

本誌Vol.1で触れたように、走行中の自動車や飛翔するゴルフボールといった複雑な現象の空力解析を行う目的で、すでに多くの企業がFFRを用いており、とくに国内自動車メーカーを中心に組織されたコンソーシアムにおいては次世代空力設計システムの開発と実証に活用されている。

2011年3月までに約210サイト（過半数が企業）からダウンロードされ、現在、下記のページではバージョン3.1のソースファイル一式が公開されている。

<https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/fluid/download/download.htm>

乱流燃焼解析への適用

FFRの利用は空力解析の分野で先行しているが、新たな適用分野に向けた開発も進められている。その分野のひとつが「燃焼」だ。ここからはFFRの燃焼反応解析への適用について、京都大学大学院工学研究科の黒瀬良一准教授の話をもとに解説する。

「LESによる高精度な流れの解析は産業界に取り入れられつつあります。しかし、燃焼のシミュレーションはまだ貢献できて

いるとは言えません。設計開発のライン上で使われるようにはなっていないんですね。その一番の理由は、燃焼を解析するためには、流れ場の計算に加えて、燃料の蒸発や反応といった複雑な現象をより細かい格子と時間の刻みで解く必要があるからです。我々がFFRを拡張して実現しようとしているのは、燃焼器のなかで生じる乱流、粒子の飛散、そして燃焼という3つの異なる現象を十分な精度で計算し、実機の開発に役立てることです」

ここでいう粒子とは、燃焼器内に噴射された燃料を意味する。ジェット燃料であれば液滴、火力発電所などで使われる石炭であれば微粉の形態をとる。そうした粒子が乱流中で分散し燃焼する現象を正確に捉えるには、きわめて膨大な計算量が必要となる。

「もし実際に燃焼器内の液滴を数えたら、数兆個とか数十兆個になるでしょう。当然そんな量は追えないので、計算上は1

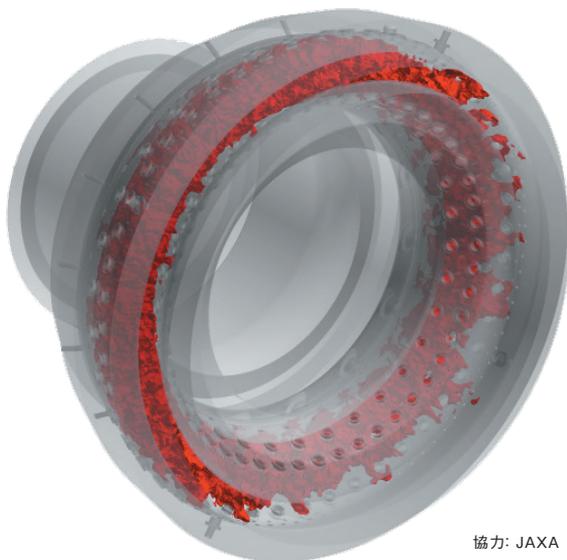
★用語解説

ラージ・エディ・シミュレーション Large Eddy Simulation

乱流を解析する手法のひとつ。非定常現象に対する適用性(再現性)が良いとされている。数値解析では計算領域を多数の計算セル(三次元では六面体形状のセルが多く用いられる)に分割する必要がある。より小さな計算セルを用いることで空間分解能が向上し、より詳細に乱流を解析することができるが、一方で計算負荷は増大する。そこで、計算セルで表現できない小さなスケールの流れ(乱れ成分)はモデル化し、計算セルで表現できる比較的大きなスケールの流れ(渦)は直接計算する手法。

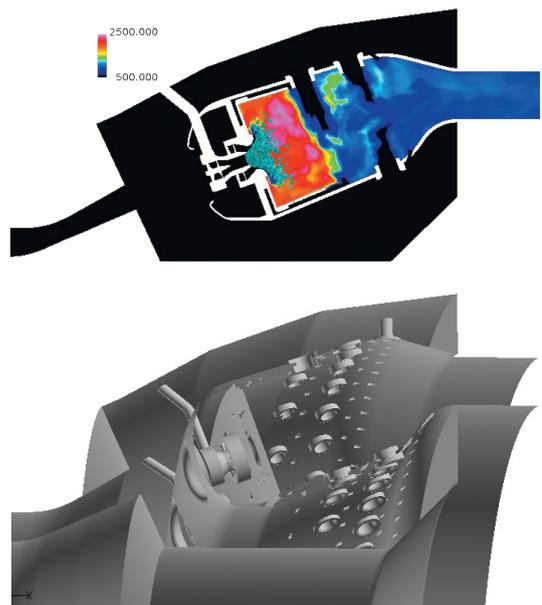
(日本原子力研究開発機構より)

■ ガス温度の等値面



協力: JAXA

■ 燃料噴霧・ガス温度分布



JAXA航空エンジン用アニュラー燃焼器。全体の直径は約0.5m、内部圧力は0.74MPa、要素数は約1.2億。16基のバーナーを同時に解析している。

個の粒子で多数の粒子を代表させ、ラグランジアンで飛ばします。これが粒子のモデルの考え方。燃焼については空間のスケールが流れ場よりもずっと小さいだけでなく、数百の化学種について数千ステップの反応が生じます。こちらも通常の方法で計算できる量ではありません。そこで我々が導入したのがフレームレット法と呼ばれるデータベースを用いる方法です。燃料と空気の反応特性をあらかじめ1次元空間で計算してこのデータベースに入れておき、LESの空間から参照します。本来3次元の反応を1次元の式で表わすことにより、計算量を劇的に削減できます」

フレームレット法の導入によって、流れ場だけを解く場合とほとんど変わらない計算量で燃焼反応を処理できるようになり、京による計算が可能となった。1億格子・1万並列の規模で計算時間は1週間から10日である。

エクサスケールの世代、つまり今後5年ほどで燃焼シミュレーションは実用段階に入るだろうと黒瀬准教授は予測する。その



京都大学大学院工学研究科
黒瀬良一 准教授

日に向けて現在取り組んでいるのが、さらなる精度の向上だ。

燃焼シミュレーションが設計を変える

航空エンジンや産業用ガスタービンといった燃焼器の内部ではどのような現象が起きているのか？ それを詳細に知ることは本質的に難しく、実験も容易ではない。一方で、発電や輸送手段のエネルギー効率を改善し、窒素酸化物（NOx）に代表される汚染物質の発生を抑制することは社会的にも重要度の高い課題となっている。

「燃料を可能な限り使い切り、排出される煤やNOxは最少となる設計が求められているのですが、これまでは費用のかかる実験の繰り返しだけが手がかりでした。シミュレーションによって実験を減らすことができれば、それが産業界への貢献となるでしょう。現在、実験とシミュレーションの間の誤差は、燃焼温度については5%程度です。一方、NOx排出量についてはまだ誤差が大きいため、今後の課題となっています。目標は誤差30%以内。実験を担当する燃焼計測の専門家、大阪大学の赤松史光教授に協力頂きながら研究を進めています」

現在このプロジェクトはHPCI戦略プログラム分野4「次世代ものづくり」の一部として、京都大学、大阪大学、電中研の3者が中心となって進められている^{※1}。産業界からは川崎重工業、三菱重工業、IHI、日立製作所、東芝が参画し、そこにJAXAが加わって多様な事例が生まれつつある。また、プログラムの開発にあたってはFFRに精通している数値フローデザイン社が協力している。産官学共同でものづくり分野の革新を目指す試みとしても注目に値するプロジェクトと言えるだろう。

※1 関連サイト <http://www.fluid.me.kyoto-u.ac.jp/members/kurose/hpci.html>

■ 今号の表紙

イプシロンロケット試験機の打ち上げ

2013年09月14日に内之浦宇宙空間観測所LS栈橋より撮影されたイプシロンロケットの発射風景。爆音が伝わってくるような迫力ある連続写真です。記事では、その「音」がペイロードに及ぼす影響を軽減する射点設計の最適化と、イプシロンロケットによる2018年の打ち上げを目指している深宇宙探査技術実験ミッションDESTINYの軌道設計について紹介しています。



提供: JAXA/JOE NISHIZAWA

■ 編集後記

取材のため相模原のJAXAへ行くと建物の中が少しざわざわしていました。翌日未明のH-IIAロケット23号機打ち上げに向けてパブリックビューイングの準備をしていたようです。立ち働く人々の顔は明るく、宇宙開発の熱気に触れることができた気がして我々も元気が出ました。打ち上げは無事成功し、GPM主衛星と大学7校が作った副衛星が軌道に乗りました。(F)



計算工学ナビ オフィシャルサイト

本誌のダウンロードや、ソフトウェアライブラリ、その他の読み物を提供しているオフィシャルWebサイト

<http://www.cenav.org/>

計算工学ナビ Vol.3
発行日: 2014年3月31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