

## 革新的計算科学技術への展望

大林 茂  
東北大学 流体科学研究所

## Future Direction of Innovative Computational Science and Technology

by  
Shigeru Obayashi

## ABSTRACT

This paper discusses the author's vision for future development of Computational Science and Technology related to aerospace engineering. Computational Fluid Dynamics (CFD) has been developed successfully and producing huge data every day. Now, data mining is the first key element of future Computational Science and Technology. As an example, Multi-Objective Design Exploration (MODE) for design optimization is presented. MODE reveals the structure of the design space from the trade-off information and visualizes it as a panorama for Decision Maker. The main emphasis of this approach is visual data mining. The second key element will be measurement integrated simulation. Thanks to the rapid progress in Information Technology, wide variety of measured data can be obtained easily. These data can be integrated to CFD to simulate real flow fields without assuming an ideal uniform flow. Flight-data integration is demonstrated as an example.

## 1. はじめに

ムーアの法則とは、半導体の集積度が1年半～2年で2倍になるというもので、指数関数的増加を示すコンピュータの進化を表す法則としてよく引き合いに出される。半導体の集積度がそのままコンピュータの性能になるわけではないが、コンピュータの性能もほぼ同様の増加を示している。このことは、世界のスパコンランキングを掲載しているTOP500の最新データからも読み取ることができる[1]。図1は、1993年からのスパコン上位500機の総計算能力、第1位の計算能力、第500位の計算能力をプロットし、その傾向を示したものである。第500位の性能変化に着目すると、1993年から2003年にかけて性能が3桁上がっており、コンピュータの性能は10年で1000倍になる。

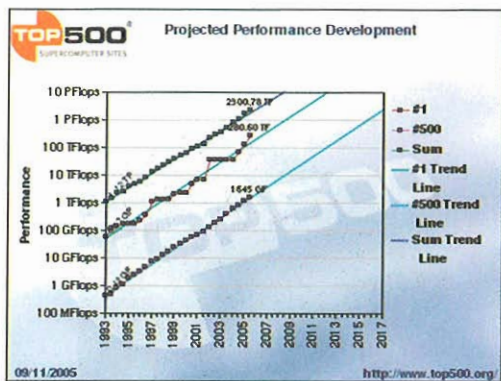


図1 世界のスパコン上位500機の性能変化[1]

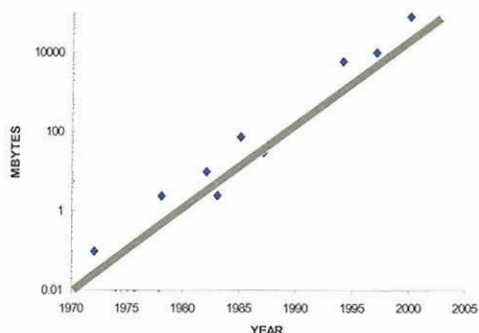


図2 イリノイ大における乱流研究博士論文データ量の変化[2]

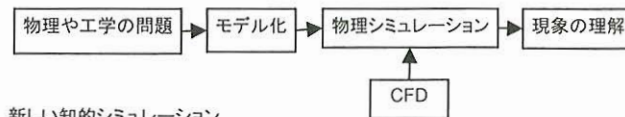
コンピュータの性能が上がることによって、数値流体力学(CFD)の研究にも大きなインパクトがあった。文献[2]では過去の乱流研究の博士論文で取り扱われたデータ量がどのように増加したかが示されている。ハードの進化に比べれば、データ処理が人間の処理速度に制限されているせいか進化は遅いが、図2に示すように10年で100倍に増加している。

本稿では、これらの計算科学を取り巻く発展を背景に、今後の航空宇宙工学における計算科学技術では、どのような研究が必要となるかを、「データマイニング」・「計測融合シミュレーション」というキーワードから考えてみたい。

## 2. 現象の理解から知識の発見へ

データの爆発的増加に対応するためには、データの整理・解釈のための新しいアプローチが必要である。データ数が少ないときは、既存の知識と照らし合わせてデータを分別していくことで整理ができる。しかし、このようなやり方ではデータの一面しか見ていないため、データ数が膨大にあるときには、ほとんどのデータを捨てていることになる。図3に示すように、従来のCFDがデータを作る技術だとすれば、今後はハードウェアの進歩に追いつくだけのデータを生産するとともに、データをまとめる技術が必要である。計算科学分野では、「データマイニング」がキーワードと言ってもよいだろう。

## 従来の物理シミュレーション



## 新しい知的シミュレーション

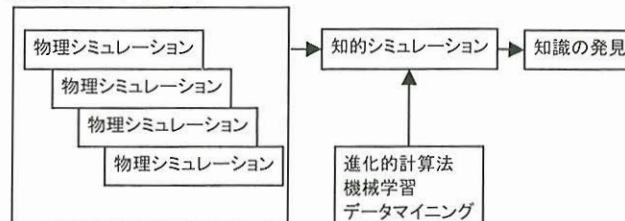


図3 新しいシミュレーション技術の枠組み

## 2-1. 多目的設計探索 (MODE)

単なる「最適化」では、「最適」な解を提示したところで作業が終了するように思える。しかし、設計作業としては、ただ1つの解を持っていたても役に立たない。設計の各段階において、各分

野とのすり合わせで様々なトレードオフが発生するため、設計空間の中で他の設計候補を常に用意していなければならない。そこで著者らのグループでは、多目的最適化によるトレードオフ情報の効率的な提示により、設計空間の構造を俯瞰的に可視化することで、設計者がさまざまな設計候補を容易に選択できる方法を提案している。このアルゴリズムは、実験計画法、応答曲面法、多目的最適化、統計手法、データマイニング手法などからなり、図4のようにまとめることができる[3]。

従来、このように可視化までを含んだ設計知識の抽出・提示に対して、統一的な呼称はなかった。そこで本研究では、「最適化」と区別するために、このアプローチを多目的設計探索(MODE: Multi-Objective Design Exploration)と名付け、アルゴリズムの構築と応用の研究を行った。

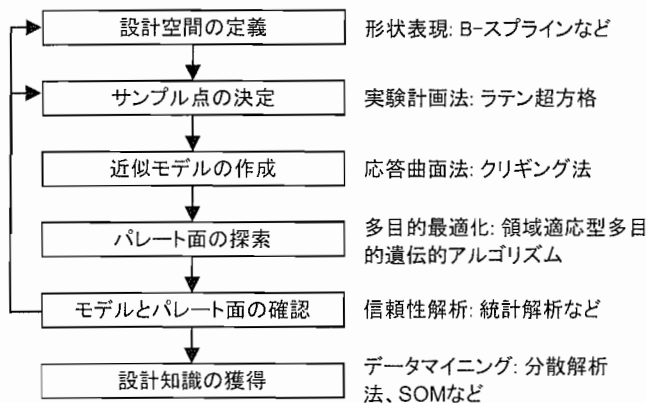


図4. 多目的設計探索(MODE)

相反する目標を含む場合、多目的最適化問題の解は単一の点としての解ではなく、「パレート最適解」と呼ばれる集合になる。「パレート最適解」とは、ある目的関数の値を改善するためには少なくとも1つの他の目的関数値を悪化せざるを得ないような最適解のことであり、目的関数間のトレードオフを示す解の集合を形成する。

実行可能解 A, B を考えよう。解 A が解 B に対して、1 つ以上の目的関数について優れており、その他の目的関数について劣っていない時、「解 A は解 B を支配する」という。そして、解の集合中で他のどの解からも支配されていない解を非劣解という。つまり、目的関数空間の実行可能領域にある非劣解の集合がパレート最適解となる。

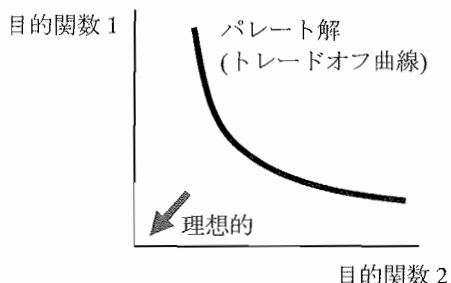


図5. 2 目的関数間のトレードオフ関係

目的関数空間ではパレート最適解の集合はトレードオフ曲面を形成する。このパレート面によって目的関数間のトレードオフに関する情報を得ることができる。ここで、目的関数が2つしかない場合目的関数空間は 2 次元となるので、たとえば一方を良くすれば他方が悪くなる、という単純なグラフが得られる(図5)。この場合、トレードオフの把握は比較的簡単である。しかし、3 目

的、4 目的と増えていくと、特に 4 次元以上ではそのままプロットすることができないので、トレードオフを一目見て分かるように可視化することは困難になる。

MODE の特徴は、トレードオフの可視化法として自己組織化マップを適用していることである。近年、三菱重工との共同研究により、リージョナルジェット機主翼形状に対して CFD と NASTRAN を適用し、空力・構造・空力弾性を考慮した多分野融合最適化システムを構築した。本稿では、この設計探索から得られたデータに基づき、設計空間の構造を自己組織化マップ(SOM: Self Organizing Map)により可視化した例を報告する[4]。

## 2-2. SOM によるトレードオフの可視化

SOM は、提案者の名前を取ってコホネンネットとも呼ばれ、近年脚光を浴びているデータマイニングの一手法である。SOM は、教師なし学習のアルゴリズムを用いるフィードフォワード型のニューラルネットワークモデルである[5]。

SOM は、入力層と出力層の2層からなり、隠れ層はない。第2層を構成するユニットはあらかじめ平面座標を持っている。第1層に提示された情報はすべて第2層に提示され、第2層のユニットは入力情報にどれだけ似ているかを競争する。競争の結果選ばれた勝者ユニットは、重み付けが更新されてさらに入力に近づく。また、その近傍ユニットも近さに応じて重みが更新される。こうして隣り合うユニットは似たような重みを持つようになり、第2層に新たな位相が形成される。通常この第2層(出力層)を SOM の結果として図示する。

SOM は、我々が直感的に理解している地図とは異なる。通常の地図では、方角(座標軸)があり、距離(ユークリッド距離)が定義されている。SOM には、方向性がなくユークリッド距離も定義されていない。隣り合うユニットは類似度が高いが、 $n$  個離れたら類似度が  $1/n$  になるわけではないし、異なるユニットはまわりのユニットに対して異なる近さを持っている。その代わり、SOM は多次元情報を2次元に折りたたんで表現できる。すなわち、SOM を用いると多次元データの可視化ができる。

たとえば3目的最適化の近似パレート集合から目的関数空間の SOM を作る場合、各ユニットは3つの目的関数値に対応した3次元ベクトルを持っている。ユニットの類似度は、この3次元ベクトルのユークリッド距離で測られる。できあがった SOM 上で、ユニットの各成分(3つの目的関数値)について、3つの等高線図を作成することができる。その図を比較すると、トレードオフの有無などパレート面の構造が確認できる。

SOM による可視化には、さらにクラスタリングを組み合わせることができる。もともと SOM では近傍ユニットが似たもの同士になるので、SOM 上でクラスタリングを行うことは、元の多次元データからクラスタリングを行うよりはるかに容易である。クラスタの特徴は、各成分のトレードオフなどから見出すことができる。このように SOM は高次元の可視化ツールと位置づけることができる。本研究では SOM の作成に、Viscovery® SOMine 4.0 を使用した[6]。

## 2-3. 多分野融合最適化

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の援助のもと、YS-11 以来の純国産旅客機研究開発計画が 2003 年より産官学共同研究で進められている。本研究ではその 3 次元主翼形状の設計探索について可視化結果を中心に報告する[4]。

目的関数として、Block Fuel(要求飛行距離に必要な燃料量)の最小化を採択、加えて最大離陸重量及び遷音速亜音速間の抵抗値差分の最小化を考え、計 3 目的による最適化問題を解く。翼平面形・胴体を固定、翼の前後桁も一定位置とした。設計変数は翼断面・捻り・上反角とし、総計 35 設計変数で一個体の形状を表現する。さらに 5 つの制約条件を課した。各々の個体形状は、初期形状からの差分値を用いて移動格子法により生成する(図6)。詳細は文献4を参照されたい。

本システムでは、NASTRAN を用いて構造最適化を行い、荷重による変形やフラッタに関する拘束条件を考慮しつつ、CFD を用いて Block Fuel を評価する。8 個体からなる一世代の評価



に 70 回程の Euler 計算と 90 回程度の N-S 計算を行う必要がある。最適化システムが非常に大規模なものとなったため、最適化自体よりも設計空間の探索を主目的として進化的アルゴリズムだけを適用し、すべての目的関数について初期個体よりも改善が得られた 19 世代で計算を終了した。



図 6. 翼胴形状(左)とCFD 非構造格子・CSD 構造格子(右)

図 7 にその探索により得られた設計空間の俯瞰図を示す。図の右下に 3 目的とも値が低くなるスイートスポットがあることがわかる。一方、図 8 では、同じ自己組織化マップを翼キंक位置での上反角と遷音速抵抗値で色づけした。これより翼が下反角を持つと抵抗が増加するが、上反角の場合は抵抗が高い場合も低い場合もあり、あまり影響がないことがわかる。しかし、上反角を持つことは構造重量の観点からは不利である。

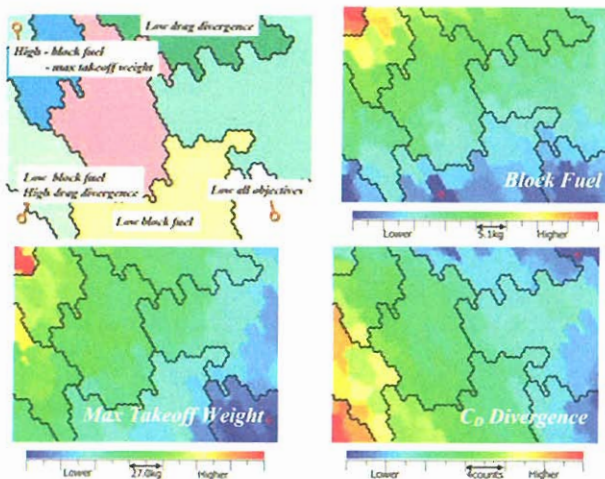


図 7. 自己組織化マップによる設計空間の可視化  
(図中の ×印は各目的関数の最小値を示す)

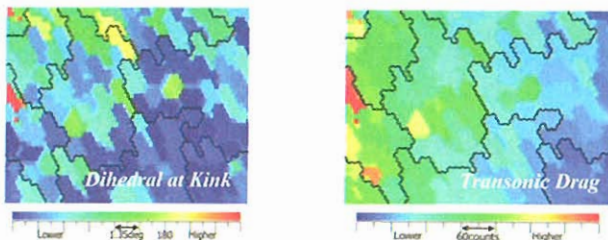


図 8. 翼上反角の遷音速抵抗への影響の可視化

19 世代が終了した時点でのトレードオフ面のほぼ中央にある個体は Block Fuel で 1% の改善しかなかった。しかし、SOM による可視化から上反角は空力性能改善に効果がないことがわかったので、この個体の上反角をゼロとして翼を作り直して評価したところ、Block Fuel で 3.6% の改善を得ることができた。この例は、比較的少数の個体評価による設計探索でも、設計空間に関する適切な知識が得られれば、よりよい設計解を見出すことができることを示している。

### 3. 計測融合シミュレーション

モバイル通信によるデータ転送能力も指数関数的増加を示していることが知られている。この通信能力を活かすと、実験や計測のネットワークと計算を融合させる新しいシミュレーション技術が可能になると予想される。もし飛行中のすべての航空機から気象データを受け取り、リアルタイムで気象シミュレーションができるになれば、精度の高い航空気象予測ができ、航空安全をもたらす新しい技術となることが期待される。IT の世界では「ユビキタス」がキーワードであるが、計算科学分野でもユビキタスネットワークを活用した「計測融合シミュレーション」はこれからのキーワードといえよう。

#### 3-1. 大気中の乱流

大気中の乱流が航空機の飛行に影響を与えるのは、その渦の大きさが航空機と同程度のものであると考えられている。航空機に影響を与える乱流は特に乱気流と呼ばれているが、その影響は軽く揺れる程度のものから、墜落につながる程のものまで様々である。乱気流は原因によって幾つかの種類に分けられる。すなわち、熱対流による熱的乱気流、山岳波などの地形性乱気流、高々度の鉛直方向の風のせん断が強いところで発生する晴天乱気流、大型航空機の後流にできる後方乱気流である。低層の雲中における熱対流による乱気流は航空機に搭載されたレーダによって事前に探知され、回避または警報を出すことができる。しかしながら、晴天乱気流および後方乱気流は雲のない大気中に発生するため、その予知は現在でも困難である[7,8]。

晴天乱気流および後方乱気流への対策として、JAXA において航空機搭載型風計測ライダの開発が進められている[9]。風計測ライダは大気中のエアロゾルあるいは大気構成分子による散乱光のドップラーシフトを測定することにより風速測定を行うため、晴天時の測定や局所的な風速の測定が可能である。したがって、雲のない大気中の速度を計測することにより、晴天乱気流および後方乱気流の探知が期待できる。風計測ライダではレーザ出力方向の速度成分しか得られないため、計測結果を乱気流検知に結びつける必要があり、このために晴天乱気流に関する知見の蓄積が望まれる。

気象予測は CFD の大きな応用分野の一つである。ビル風などの局所気象予測にも用いられており、航空機程度の大きさの詳細な渦構造を知る必要がある乱気流解析にも有効であると考えられる。乱気流解析の結果を用いて乱気流中の航空機の応答を解析するためには少なくとも 50m スケールで正確に流れが再現されている必要がある[10]。さらに詳細な挙動を解析する場合はより細かなスケールで流れを知る必要があると考えられる。航空機への脅威となる数十 m スケールの乱気流現象は後方乱気流を中心に LES によって解析され、実観測データとの比較検討する研究がいくつか行われている[10-12]。しかしながら、晴天乱気流に関しては実測データと比較検討された LES 解析結果は非常に少ない。

#### 3-2. フライトデータ融合シミュレーション

ここでは晴天乱気流の予測に結びつく知見を得るための初期的な検討として、晴天乱気流に遭遇した時のフライトデータをもとに数値シミュレーションによって乱気流を再現した例を紹介する。フライトデータからではすべての初期、境界条件を決定するのは困難であることから、早瀬らによって提案された制御理論における状態観測器の概念を用いた計測融合シミュレーション手法[13]の適用可能性を検討した。この手法に基づき、本研究ではフライトデータと数値シミュレーション結果の差に基づく体積力を数値シミュレーションにフィードバックした[14]。晴天乱気流遭遇時の航空機の激しい揺れは厚さ数百メートルで水平方向に数 km に渡って広がったせん断の層を横切るときに生じるものである。このせん断の層は温度の異なる大気が速度差を持って流れ込むことによって生じる Kelvin-Helmholtz(K-H)不安定に起因する。この計算例では、計測融合シミュレーションによって、

K-H 不安定による晴天乱気流をフライトデータから再現することを試みた。

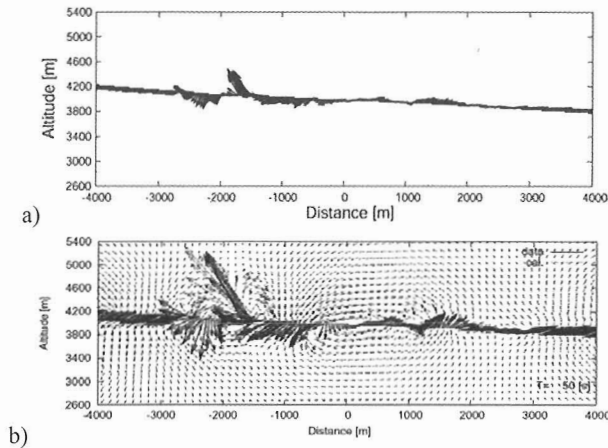


図 9 計測融合シミュレーションによる乱気流の再現; (a)フライトデータ、(b) シミュレーション結果(ベクトルは拡大)

図 9(a) にフライトデータ、図 9 (b) にフライトデータをフィードバックして再現された流れ場の流速ベクトルを示す。太線はフライトデータから求めた飛行経路上の速度ベクトル、細線は計算によって得られた速度ベクトルを示す。図 9 に示す結果で注目すべき点は、飛行経路より高度の高い領域と低い領域で逆方向の速度が誘起され、乱気流に遭遇した高度を中心にせん断層を形成していることである。フライトデータの上側では全体として左向き速度場、下側の領域では右向き速度場が生じている。これは K-H 不安定による乱気流の発生を示唆するものである。

本計算はまだ試計算に近く、今後さらなる高度化に向けた研究が必要である。しかし、一様な乱れを仮定しない乱流計算、実際の気象を取り込んだ計算、あるいは限られたデータしかない航空関連事故時の流れ場の再現など、さまざまな応用分野が予想される。

#### 4. まとめ

本稿では、今後の計算科学の発展の鍵となるとされる「データマイニング」・「計測融合シミュレーション」というキーワードから、著者らのグループで行っている研究活動を紹介した。

ムーアの法則は、いずれ頭打ちになるといわれながら、いくつもの技術革新で限界を乗り越え、法則自体はいまだに成り立っている。今後もこの法則が成立すると期待し、より革新的な計算科学技術を目指していきたい。

CFD における計算技術自体はかなり成熟してきたといえよう。しかし、CFD の使い方が成熟してきたとはまだいえない。CFD を使ってできることには、まだ予想もしていない興味深い問題が数多くあるはずである。多様なアイデアが試され、創造的な利用技術が生まれることを期待したい。

なお、本稿で紹介した小型旅客機主翼形状の最適化は NEDO 援助のもとで三菱重工との共同研究により実施した。また、大気乱気流の融合シミュレーションは、JAXA との共同研究により実施したものである。関係者各位に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) <http://www.top500.org/> (2006 年 4 月)
- 2) R. J. Adrian, "Information and the Study of Turbulence and Complex Flow," JSME International Journal, Series B, Vol. 45, No. 1, 2002, pp. 2-8.
- 3) Obayashi, S., Jeong, S. and Chiba, K., "Multi-Objective Design Exploration for Aerodynamic Configurations,"

AIAA Paper 2005-4666, 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 6-9 June 2005, Toronto Canada.

- 4) Chiba, K., Obayashi, S., Nakahashi, K. and Morino, H., "High-Fidelity Multidisciplinary Design Optimization of Aerostructural Wing Shape for Regional Jet," AIAA Paper 2005-5080, June 2005.
- 5) コホネン, 自己組織化マップ, 改訂版, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2005.
- 6) <http://www.mindware-jp.com/somine/index.html> (2005 年 7 月)
- 7) 加藤喜美夫, 航空と気象 ABC, 成山堂書店, (2003).
- 8) 橋本梅治, 鈴木義男, 新しい航空気象, クライム気象図書出版部, (2004).
- 9) 浅香, 藤原, 稲垣, 張替, 亀山, 安藤, 平野, 「航空機搭載型ライダー飛行試験結果について」, 第 43 回飛行機シンポジウム講演論文集, 3C9, (2005).
- 10) Hamilton, W. and Proctor, F. H., "An Aircraft Encounter with Turbulence in the Vicinity of a Thunderstone," AIAA2003-4075 (2003).
- 11) Proctor, F. H., Hamilton, W. and Bowles, R. L., "Numerical Study of a Convective Turbulence Encounter," AIAA2002-0944 (2002).
- 12) Ahmad, N., Boybeyi, Z., Lohner, R. and Sarma, A., "A Godunov-type Finite-Volume Scheme for Flows on the Meso- and Micro-scales," AIAA2005-1234 (2005).
- 13) Hayase, T., Nisugi, K. and Shirai, A., "Numerical realization for analysis of real flows by integrating computation and measurement," Int. J. Numer. Meth. Fluids, 47 (2005), 543-559.
- 14) 三坂, 大林, 遠藤, 「計測データを用いた数値シミュレーションによる流れ場の再現」, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, PC5-1, 2005 (CD-ROM 講演集).