

# JAXA総合技術研究本部における 数値シミュレーション研究開発の紹介 Introduction of Computational Simulations at JAXA IAT

宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部  
計算科学研究グループ

中村 孝

宇宙航空研究開発機構（JAXA）総合技術研究本部（総研）では、その前身のひとつである航空宇宙技術研究所（航技研）時代から航空機周り、宇宙機周りの数値シミュレーション、スーパーコンピュータシステム開発とその利用技術等について研究を進めてきた。ここではこれまでの研究状況を紹介します、今後の課題についても示す。

## 1. はじめに

JAXAの前身のひとつである、航技研では、スーパーコンピュータの開発とその運用、それを利用した数値シミュレーションの研究開発を精力的に行ってきた。また、これらのソフトウェアをツールとして、航空宇宙機の周りの流れに関する解析、研究を行ってきた。さ

らに、スパコン利用技術や数値解法に関しても研究を進めてきた。（図1参照）

2003年10月に宇宙三機関（航技研、宇宙科学研究所、宇宙開発事業団）が統合され、JAXAが設立された。JAXAに期待されている数値シミュレーションは、

(1) スパコンを利用した数値シミュレー

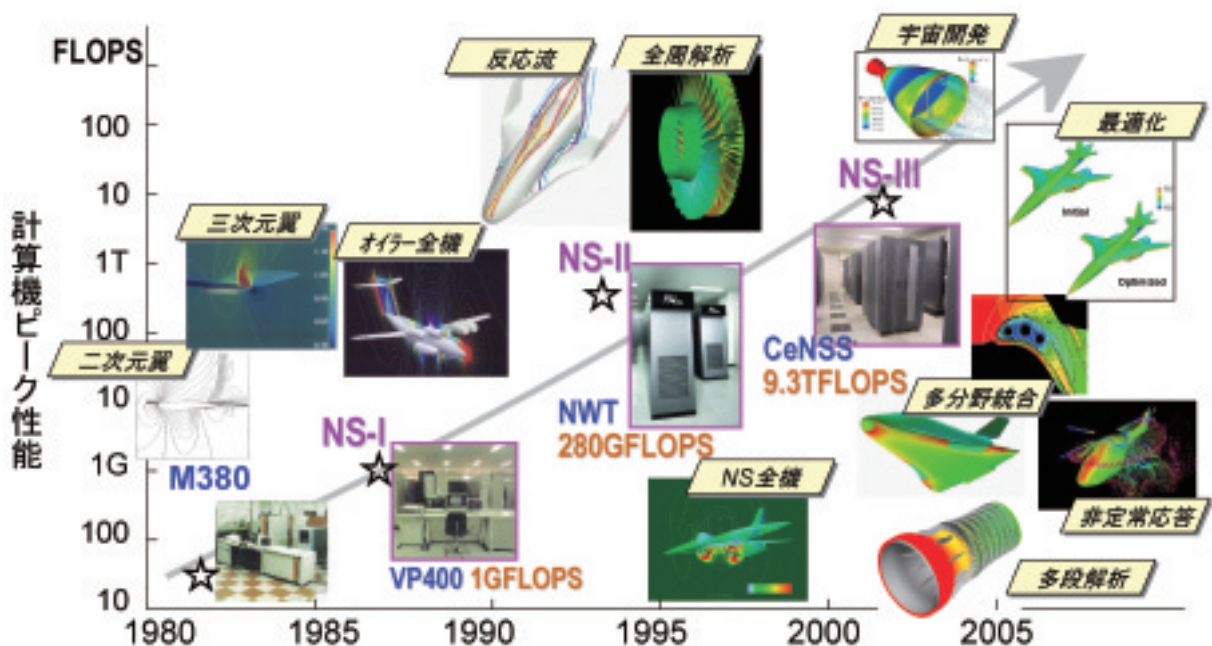


図1 JAXAにおけるスパコンとCFDの発展

ション基盤技術の研究開発、先進計算技術、将来ソフトウェア技術、利用技術、設計開発（ものづくり）に貢献する技術開発、ボトルネックの克服、実用化促進、信頼性の向上

(2) プロジェクトの研究開発支援、ロケット・衛星、小型航空機・エコエンジン（経済産業省NEDOプロジェクト）、パソコンでは実現不可能な大規模な計算の実行、非定常現象のシミュレーション

(3) 産業界への技術移転、CFD技術等高度計算技術の産業界への移転、産業界による利用

等があげられる。

ここでは、JAXA総研がこれまで行ってきた研究開発を紹介する。

## 2. スーパーコンピュータ開発

数値シミュレーションの発展は、スーパーコンピュータ（スパコン）の発達と期を同じくして進められた。市場で手に入る最高の計算機をもってしても、われわれの要求に対し、性能、機能ともに不足し、航技研独自にシステムを作り上げる--必要性があった。1977年には日本初のベクトルコンピュータである、230-75APUを富士通に発注し、運用を開始した。その利用を通じて、航空宇宙の数値シミュレーションの中心である、計算空気力学（CFD）に対して、ベクトル計算機が非常に有効であることが確認された。

その後、本格的に数値シミュレータ計画（NS計画、スパコン開発およびその利用技術研究、ソフトウェア開発研究）をスタートさせた。1987年にVP400（1 GFLOPS、1 GB）を中核とするシステムが導入され、NS-Iと呼ばれた。このシステムでは、三次元翼の圧縮粘性流解析、全機形状の圧縮性非粘性流解析、大気圏再突入時などの結合・乖離などを伴う実在気体効果流れ解析等が行われた。

このNS-Iでは、百万点規模の計算格子点数

のシミュレーションが数十時間必要であったのに対し、設計現場では、10分程度で答えが出てくることが要求され、その性能は、VP400の百倍以上という結論となった。このような性能の計算機を開発するというコンセプトで、NS-IIシステム開発が計画された。それを実現するハードウェアとしては、それまで数個の筐体に収められていたスパコンVP400程度のCPUが、メモリ込みで、電子レンジほどの大きさで、それを百数十台クロスバネットワークで結合した、並列ベクトル計算機が当時のテクノロジーで構成可能との結論に達し、富士通と共同で開発が進められた。ソフトウェアに関しては、その利用において、分散主記憶型の並列プログラミングをユーザに強いることとなり、それが平易に行えることが要求された。そのためには、単体イメージでプログラムが可能な並列フォートランである、NWT Fortran（商用ではVPP-Fortran、現在のXPF）を開発した。また、運用面も考慮し、並列計算機であっても、複数のユーザが同時に利用可能で、なおかつシステム利用率の高い運用システムもあわせて開発した。加えて並列化、ベクトル化、システム利用率向上のための研究も進めた。NS-IIの中核計算機は数値風洞（NWT）と呼ばれ、要素計算機が1.7GFLOPS、256MBであり、それを166台ネットワークで結合し、全体で280GFLOPS、42GBのシステムとなった。ベンチマークテストで有名なLINPACKテストで世界最高性能を実現した。

このNS-Iでは、百万点規模の計算格子点数のシミュレーションが数十時間必要であったのに対し、設計現場では、10分程度で答えが出てくることが要求され、その性能は、VP400の百倍以上という結論となった。このような性能の計算機を開発するというコンセプトで、NS-IIシステム開発が計画された。それを実現するハードウェアとしては、それまで数個の筐体に収められていたスパコン

VP400程度のCPUが、メモリ込みで、電子レンジほどの大きさで、それを百数十台クロスバネットワークで結合した、並列ベクトル計算機が当時のテクノロジーで構成可能との結論に達し、富士通と共同で開発が進められた。ソフトウェアに関しては、その利用において、分散主記憶型の並列プログラミングをユーザに強いることとなり、それが平易に行えることが要求された。そのためには、単体イメージでプログラムが可能な並列フォートランである、NWT Fortran（商用ではVPP-Fortran、現在のXPF）を開発した。また、運用面も考慮し、並列計算機であっても、複数のユーザが同時に利用可能で、なおかつシステム利用率の高い運用システムもあわせて開発した。加えて並列化、ベクトル化、システム利用率向上のための研究も進めた。NS-IIの中核計算機は数値風洞(NWT)と呼ばれ、要素計算機が1.7GFLOPS、256MBであり、それを166台ネットワークで結合し、全体で280GFLOPS、42GBのシステムとなった。ベンチマークテストで有名なLINPACKテストで世界最高性能を実現した。

このNWT上では、全機形状の圧縮性粘性流、ジェットエンジンなどの圧縮機の全周シミュレーションが、可能な待ち時間内に行えるようになった。並列計算機とその利用でその年顕著な性能を達成したシミュレーションに対し、米国のIEEEとACMはスーパーコンピュータコンファレンス(SCシリーズ)において、Gordon Bell賞を発行している。われわれは、2004年に一様等方性乱流のシミュレーションで特別賞を、2005年には、山形大学との共同研究による格子QCDシミュレーションで性能部門賞を、2006年には、ジェットエンジン圧縮機全周シミュレーションで性能部門賞を受賞した。(図2参照)

現在のシステム、NS-IIIは、NS-IIの30倍以上の性能と、そこから出力される大量のデータを高速に保存するストレージシステム、計算結果を可視化して人間の理解を助ける可視化システムからなる複合システムとなり、2002年10月から稼動開始となった。NS-IIIの中核計算機は、富士通PRIMEPOWER HPC-2500 (9.3TFLOPS、3.6TB)であり、NWTの30倍以上の性能となった。この30倍



図2 ゴードンベル賞

は、同時に30人のユーザがそれぞれNWTクラスの性能を享受できることを意味する。もちろん全体で非常に大規模な、たとえば乱流シミュレーション等も行うことが可能である。(図3参照)

### 3. 数値シミュレーション研究

これらのシステムの下で開発され、適用された数値シミュレーションについて紹介する。

まず、CFDがどのように行われるかを簡単に示すと、はじめに図4に示すように、対象となる物体（ここでは航空機）の表面形状のデータを数値化して計算機に入力する。その後、その物体の周りの流れを計算するために、空間に計算格子を生成する。この格子のよしあしが計算結果を左右し、注意深く行うことが要求される。ここまでの、全体の作業の大部分は終わったことになる。この計算格子上で、流体を支配する方程式（Navier-Stokes方程式）を差分法ないしは有限体積法などを利用して離散化して計算する。格子点

は数百万点から数千万点に及び、計算のための繰り返しも数万から多いものでは数億回も繰り返さず。一回のシミュレーションで出力されるデータ量は、数千万バイトから多いもので、数十億バイトにも達する。出力される計算結果は数値の集まりであり、人間が理解するためには、可視化という作業を行う。これで初めてこの機体の性能を評価することが可能になるわけである。もちろん、揚力や抵抗などといった可視化せずとも評価できる場合はこの限りではない。解析では、これで終わりであるが、設計では、必要に応じて形状を変化させ（現在は計算機の中で、逆問題最適化や遺伝的手法による最適化手法を取り入れて自動化されている）格子生成、計算、可視化、評価を繰り返す。

また、2001年から2005年度まで文部科学省（当時は科学技術庁）のプロジェクトである、ITBLプロジェクト（発足当時は、原子力研究所、理化学研究所、物質材料機構、防災科学研究所、科学技術振興機構と航技研で推進、後にそれぞれの機関が多くの大学や研究機

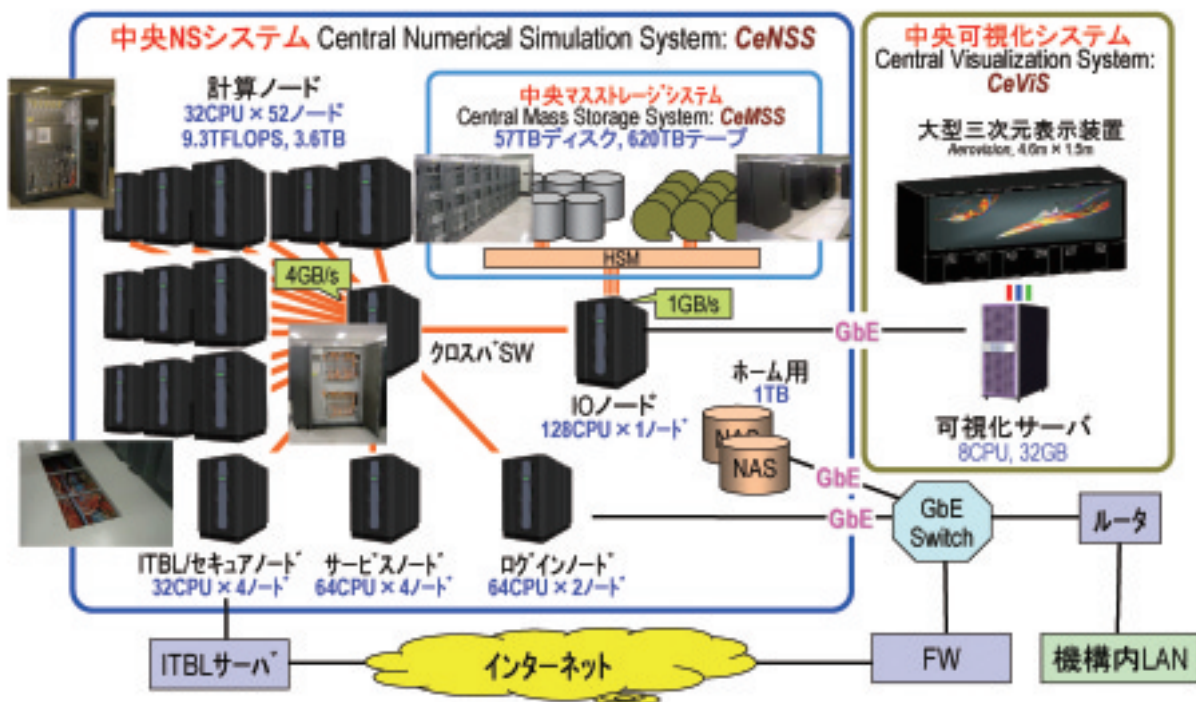


図3 現行システムの構成

関、重工メーカと共同研究契約を結び、ITBL  
協力者として組織的にプロジェクトを進め

た)を推進した。図5にその概念図を示す。  
航技研の担当は、スパコンの提供と、航空宇

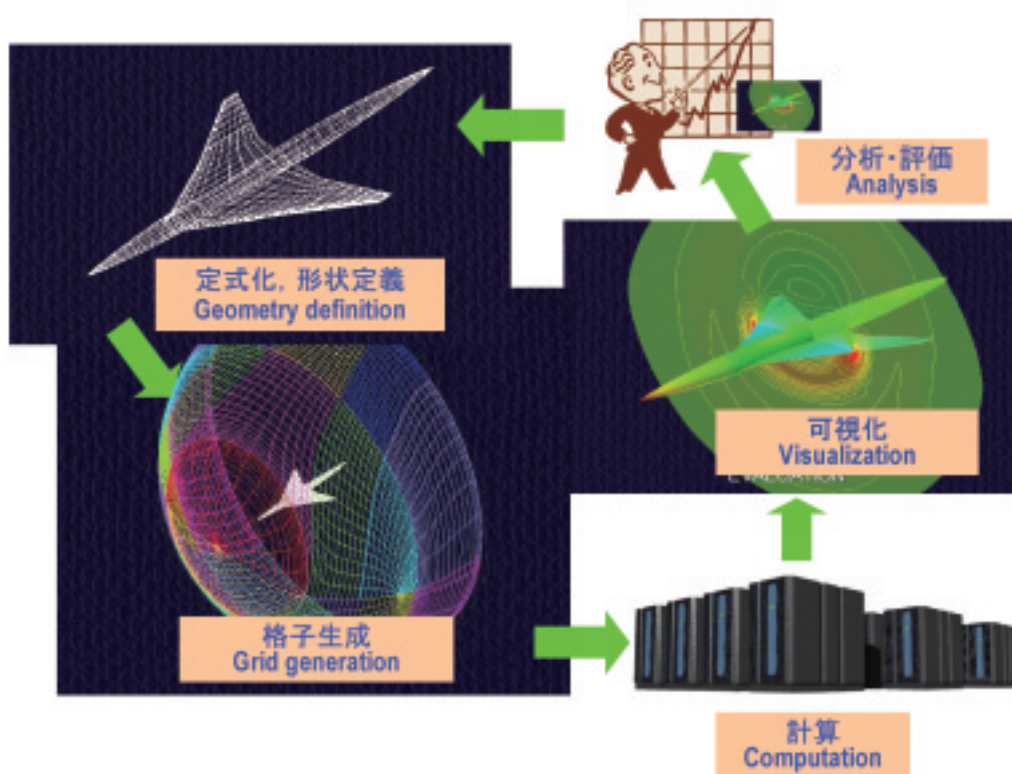


図4 スーパーコンピュータによる数値シミュレーションの流れ

## ITBL (IT-Based Laboratory)

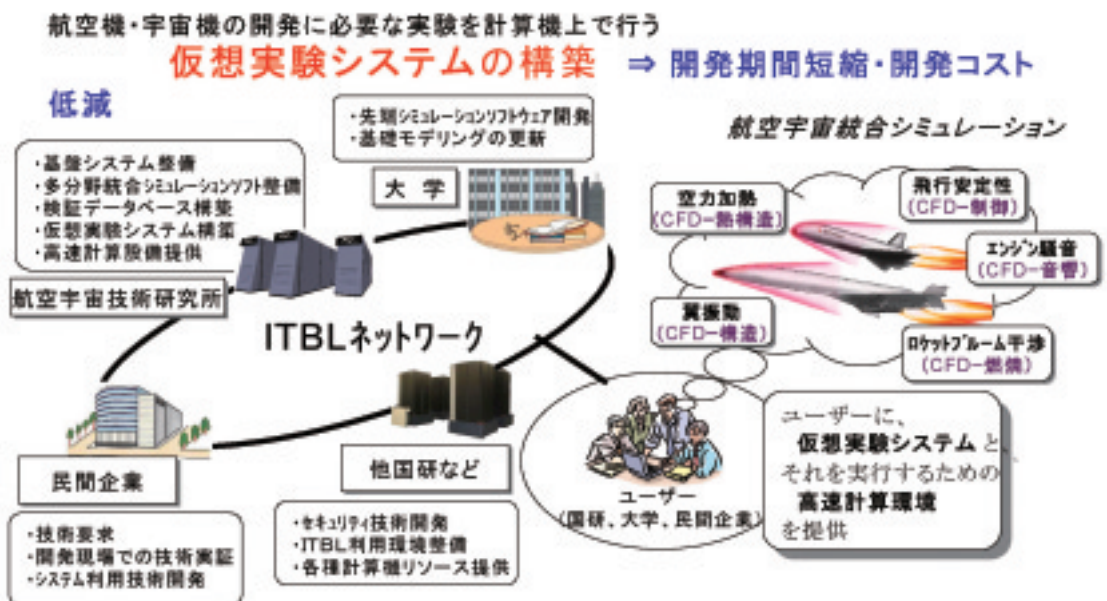


図5 ITBLの構築

宙数値シミュレーションソフトウェアの開発であり、

(1) ロケット推進組み込み打ち上げ飛行シミュレーション

打ち上げからマッハ数6程度までのロケット打ち上げ飛行をシミュレーションするソフトウェア。

(2) 極超音速カプセル再突入飛行シミュレーション

カプセルの極超音速再突入飛行時の熱防御システムを構築するため、軸対象物の熱・化学非平衡超音速流れをシミュレーションするソフトウェア。

(3) ヘリコプタ騒音解析コードMENTOR

ロータブレード1本を覆う単一格子を用いたオイラー/NSコードとFVAを組み合わせて、メインロータおよびテールロータの空力計算を行い、FWH式に基づく音響コードによって、任意の観測点における騒音を予測するソフトウェア。

(4) 航空宇宙統合プラットフォームAeroEX

入力モジュール、解析モジュール、可視化モジュール等をワークフローとして組み合わせ、一連の作業を自動的に実装させるためのプラットフォーム。

の4本のアプリケーションソフトウェアを開発した。これらの解析例を図6に示す。

4. 最近の成果

(1) CFDがかかわった初めての航空機開発プロジェクトである、YXX開発プロジェクトでは、全機周りのCFD空力解析やTakanashi法(逆問題解析法のひとつ)による主翼設計が行われた。このときの経験がB767やB777の国際共同開発につながった。(当時空力性能部)

(2) 航空エンジンの実機の開発においては、大規模CFDが用いられた。ファン・バイパスダクト流れでは、ファン静翼・ストラット改良設計にCFDが利用され、性能改善に活用された。タービン全段にわたる非定常流れ解析により、剥離を抑制する翼型

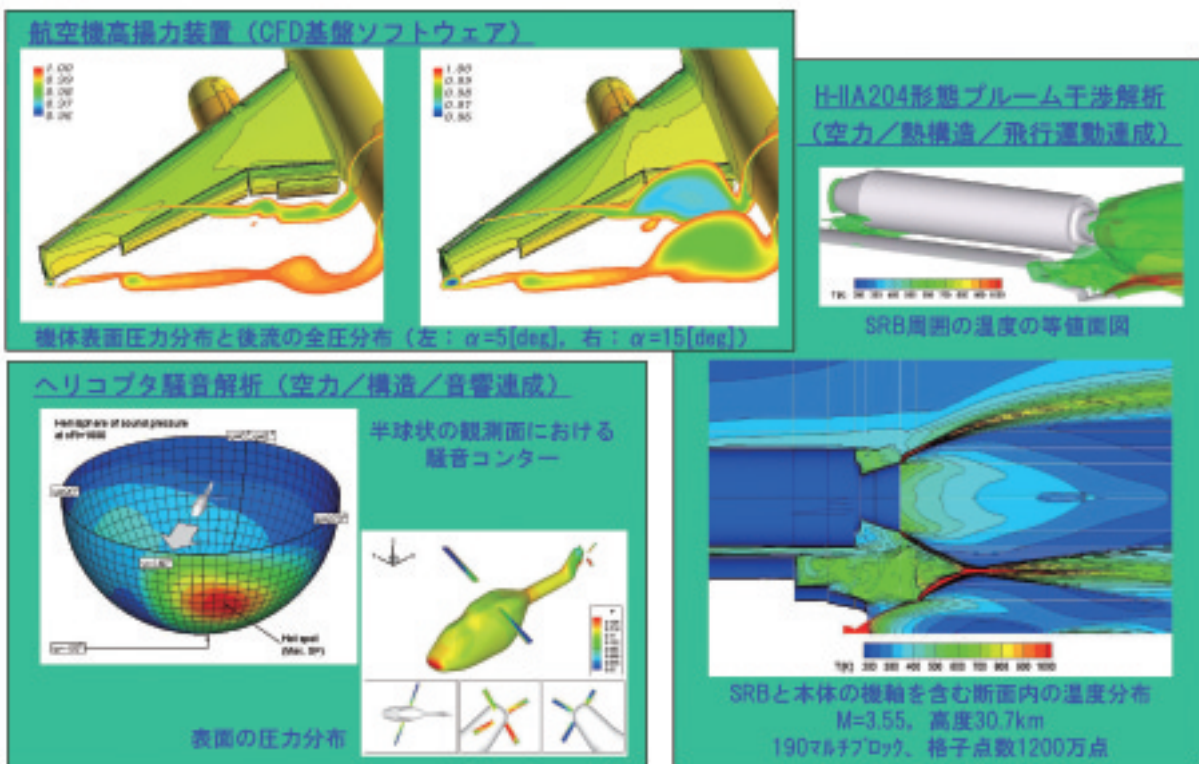


図6 ITBLアプリケーション・ソフトウェアによる解析例

を開発し性能改善を達成した。(航空エンジン技術開発センター)

- (3) 工技院によるHYPR、ESPR等のエンジン開発プロジェクトにおいて、タービンのホットストリークの非定常流れ解析により、燃料バルブ下流の高温部分の拡散を予測した。ファンの非定常空力解析により低騒音ファンの開発に貢献した。このときの成果、経験が、現在の小型航空機エコエンジンのプロジェクト参加につながっている。(航空エンジン技術開発センター) (図7a参照)
- (4) SST実験機プロジェクトにおいては、CFDが設計解析ツールとして利用され、実験機の空力設計に適用された。その中で、自然層流翼の逆問題設計やCFD最適設計技術による抵抗低減が達成された。(航空プログラムグループ、超音速機チーム)
- (5) HOPE、HYFLEX等の宇宙往還機においては、実験が困難な熱防御系の設計や安定性の解析、あるいは、チップフィン形

状などの基本形状の特性把握、遷音速特性の解析や改善などにCFDが積極的に活用された。(計算科学研究グループ)

- (6) 数値風洞とは、NS-IIの中核スパコンの名前でもあったが、計算機の中に風洞を構築し、模型や試験の事前評価による風洞実験の時間とコストを削減することが数値シミュレータの大きな目的であった。風洞全体を模擬できるような計算機性能と複雑形状対応技術の構築、風洞側実験チームとの連携の強化により、実質的な数値風洞化が進展している。(計算科学研究グループ、風洞センター、航空プログラムグループ、国産旅客機チーム) (図7b参照)
- (7) 航空エンジン内の圧縮機やタービンを開発するには、必ず模型を使って、空力設計の妥当性を確認する試験を行うが、過去におけるCFDによるエンジン国際共同開発への参加経験の集大成として、IHIと旧NALの共同でCFDによる仮想性能試験(バーチャルリグ試験)技術を開発した本

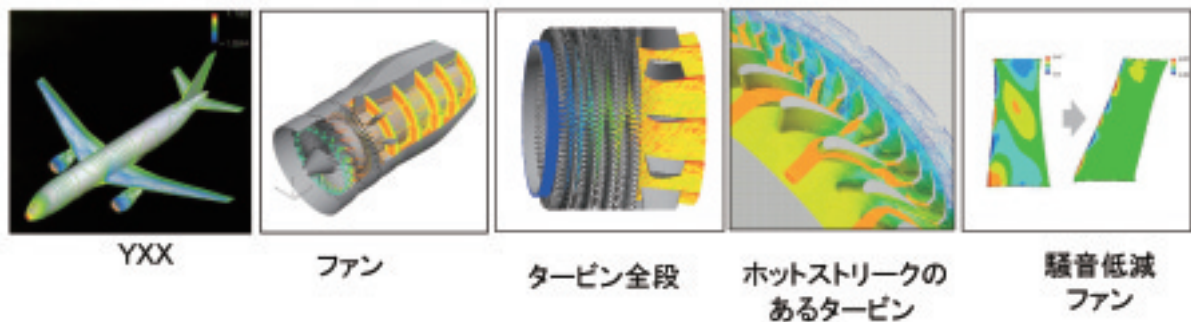


図7a 代表的成果(1)

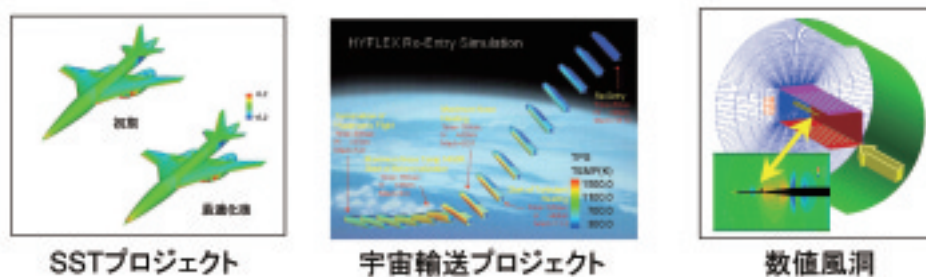


図7b 代表的成果(2)

技術はエコエンジンの開発プロジェクトに利用中である。(航空エンジン技術開発センター)

- (8) ヘリコプタの回転するブレードを過ぎる流れは、本質的に非定常であり、渦と胴体との非定常的空力干渉などの評価や非定常圧力による音源の特定などは非常に重要である。移動重合格子法により非定常解析を行う手法を開発した。(計算科学研究グループ、航空プログラムグループ、航空・安全チーム)
- (9) 空力加熱評価のために、多温度モデル等による化学反応モデルや触媒モデルを含む空力加熱の解析評価技術を開発した。(計算科学研究グループ) (図7c参照)
- (10) 複雑形状への対応は、デジタルモデルの作成、格子生成ツールの導入による生成能力の向上・時間短縮、CFDソルバー複雑形状問題への対応とともに急速に進展してきている。(計算科学研究グループ)
- (11) 扱う対象の複雑化や問題の多様化、各

種並列計算プラットフォームの出現による移植性の問題、コードの信頼性確保などから、プログラムやコードの単独開発が困難になり、共通並列基盤コードのチーム開発とコードの系統的な信頼性検証の動きが進展し、汎用並列基盤コードUPACSの開発と利用推進を行っている。(総研、航空プログラムグループ)

- (12) 実用面での利用とともに、CFDは、流体や燃焼に関する学術的な研究面での強力なツールとなっている。世界最高のレイノルズ数のチャンネル乱流の直接数値シミュレーション(DNS)や、乱流燃焼のDNSを世界で始めて実施した。これにより、チャンネル乱流、乱流・燃焼の基礎物理の解明に貢献し、世界的に高い評価を得ている。乱流・燃焼シミュレーションは乱流制御に関する、開放型融合制度プロジェクトの成果である。(計算科学研究グループ) (図7d参照)
- (13) その他計算科学研究グループでは、H

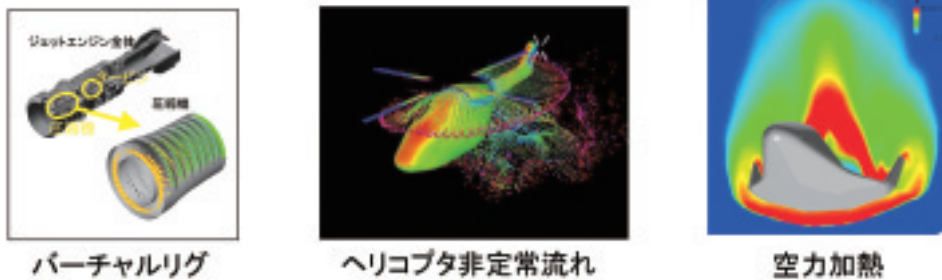


図7c 代表的成果(3)

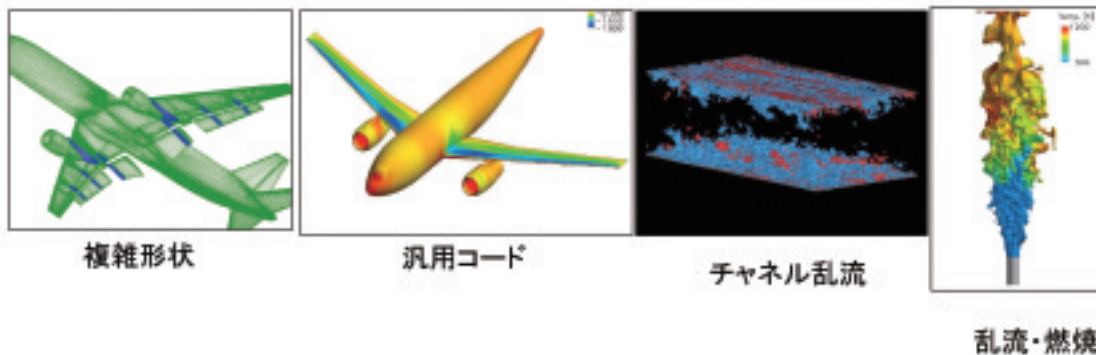


図7d 代表的成果(4)



2Aロケット打ち上げ時の騒音によるロケットペイロードに与える振動問題の解明のための音響伝播解析や衛星振動現象の解明、H2Aロケット等の液体水素燃料によるエンジン超臨界燃焼現象の解明、計算スキームの偏微分方程式と離散化における適合性と信頼性、多体運動問題の解析、計算格子生成の研究、大規模データの遠隔利用におけるネットワークのセキュリティと転送性能の確保のための研究、次世代HPC環境の構築、等の研究が行われている。

## 5. 今後の課題

CFD技術の高精度、高信頼、計算機待ち時間の短縮、多分野統合シミュレーション等の研究開発により、次のようなシステムの構築を進める予定である。

### (1) 仮想実験システム

航空機・宇宙輸送機の開発に必要な要素実験を、ネットワーク上に分散された計算機上でそれぞれの解析モジュールを連携させて行い、複数分野の研究者・技術者グループが同時に解析、検討可能となり、より高い生産性が期待される。

### (2) ジェットエンジンバーチャルリグ

ジェットエンジン各要素を解析するソフトウェアを有機的に結合したシステムをさらに進め、開発期間、コストの削減を目指す。

### (3) バーチャル打ち上げ

ロケットの打ち上げから、制御、分離、宇宙空間での太陽風やデブリとの干渉、再突入時の空力加熱の予測や回収までの安定性等をシステム化することにより、リスク予想、開発期間の短縮、実験の集中化やコスト削減を狙う。

### (4) 安全性、環境適合

空港周辺における安全性・環境適合性の検証に数値シミュレーションを利用し、局所的な気象現象、先行する航空機の作る大きな渦などに対する安全性確保、騒音、排気ガス等の低減などによる環境適合性の高い航空機開発、空港周辺環境構築を目指す。

## 6. 終りに

われわれの研究活動の発信手法として、学会が主催するカンファレンス、シンポジウム、ホームページ上での広報活動はもとより、JAXA総研主催の、航空宇宙数値シミュレーションシンポジウム（ANSS、6月に開催、2007年からは航空宇宙学会主催の流体力学講演会と合同で開催予定）を毎年開催している。詳しくは下記のホームページを参照されたい。

またこの文書を書く際に多くの総研、航空プログラムグループの方にお世話になった。紙面を借りて感謝申し上げる。

総研本部の公開ページは以下

<http://www.iat.jaxa.jp/>

航空プログラムグループの公開ページは以下

<http://www.apg.jaxa.jp/>

JAXAの公開ページは以下

<http://www.jaxa.jp/>

## 6. 参考文献

- 1) SP57 航空宇宙技術研究所特別資料, 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2002論文集, 2003/3.
- 2) Proceedings of the ACM/IEEE SC95, SC96, SC97.