



# 新時代の宇宙航空分野の研究開発を担う JSS3

## 【コンピュータ基盤】 TOKI



### 調布航空宇宙センター



#### TOKI-SORA: HPCシステム

PRIMEHPC FX1000  
 ノード数: **5,760 ノード** (15ラック)  
 総理論演算性能: **19.4 PFLOPS**  
 総主記憶容量: **180 TiB** (32 GiB/ノード)  
 冷却システム: 水冷

ネットワーク速度  
 相互接続網 (InfiniBand): 12Tbps Ethernetバックボーン: 360Gbps



#### TOKI-FS: ファイルシステム

ファイルシステム: FEFS  
 オールフラッシュ NVMe ストレージ: **10PB**  
 ハードディスクドライブ ストレージ: **40PB**

ネットワーク速度 相互接続網 (InfiniBand): 20.8Tbps



#### TOKI-RURI: 汎用システム

総理論演算性能: **1.24 PFLOPS**  
 総主記憶容量: **104 TiB**

**ST**: PRIMERGY RX2540 M5 x 375ノード  
 (192 GiB/ノード, Quadro x 1 基)

**GP**: PRIMERGY CX2570 M5 x 32ノード \*水冷  
 (384 GiB/ノード, Tesla V100 x 4 基)

**XM**: PRIMERGY RX2540 M5 x 2ノード  
 (DCPMM 6.0 TiB/ノード, Quadro x 1 基)

**LM**: PRIMERGY RX2540 M5 x 7ノード  
 (DCPMM 1.5 TiB/ノード, Quadro x 1 基)

ネットワーク速度  
 相互接続網 (InfiniBand): 45.7Tbps Ethernetバックボーン: 416Gbps

#### TOKI-LI: ログインシステム

PRIMERGY RX2540 M5 x 最大14ノード  
 (384 GiB/ノード, Quadro x 1 基)

ネットワーク速度  
 相互接続網 (InfiniBand): 2.8Tbps Ethernetバックボーン: 280Gbps

#### 運用管理システム

### 筑波宇宙センター



#### TOKI-TRURI: 筑波汎用システム

総理論演算性能: **1.45 TFLOPS**  
 総主記憶容量: **10.8 TiB**

**TST**: PRIMERGY RX2540 M5 x 46ノード  
 (192 GiB/ノード, Quadro x 1 基)

**TGP**: PRIMERGY CX2570 M5 x 2ノード  
 (384 GiB/ノード, Tesla V100 x 4 基)

**TLM**: PRIMERGY RX2540 M5 x 1ノード  
 (DCPMM 1.5 TiB/ノード, Quadro x 1 基)

ネットワーク速度  
 相互接続網 (InfiniBand): 5.2Tbps Ethernetバックボーン: 49Gbps

#### TOKI-TFSS: 筑波ファイルシステム

ファイルシステム: FEFS, 総実効容量: 0.4PB  
 ネットワーク速度 相互接続網 (InfiniBand): 400Gbps

#### TOKI-TLI: 筑波ログインシステム

PRIMERGY RX2540 M5 x 2ノード  
 (384 GiB/ノード, Quadro x 1 基)

ネットワーク速度  
 相互接続網 (InfiniBand): 400Gbps Ethernetバックボーン: 40Gbps

#### 筑波運用管理制御システム

## 【アーカイバ基盤】 J-SPACE

ディスクキャッシュ容量: 3PB  
 テープ容量: 70PB



Powered by HPSS

ネットワーク速度 Ethernetバックボーン: 80Gbps

# JSS3 の性能を発揮する運用



▲HPCシステム (TOKI-SORA)

## JSS2 の後継システムとしての JSS3

JAXA セキュリティ・情報化推進部 スーパーコンピュータ活用課は 2020 年 12 月より、JSS2 の後継となるスーパーコンピュータを中核とする計算機システムとして、JSS3 (JAXA Supercomputer System Generation 3) の運用を開始しました。コンピュータ基盤の総称は「TOKI」と名付けられ、その由来は日本を代表する鳥である「朱鷺」、時空を表す「時」に加え、問題を解決する「解き」のイメージから来ています。

スパコンがその性能を発揮するためには、運用チームが努力すればよいことではなく、ユーザーを初め、多くの人の協力が不可欠です。そのためにも「スパコンを良く知ってもらおう」ことが重要だと考えています。JSS3 を紹介する機会を大切に、多くの人にスパコンの活躍を知ってもらいたいと願っています。

## JSS3 の中核を担う HPC システム (TOKI-SORA)

### 宇宙開発や航空技術のさらなる発展を目指すスーパーコンピュータ

JSS3 のメイン計算機である HPC システム (TOKI-SORA) は、大規模な数値シミュレーション向けの計算システムとして、富士通が開発した「PRIMEHPC FX1000」を 5,760 ノード導入し、理論演算性能が 19.4PFLOPS、総メモリーを 180TiB 有するスーパーコンピュータです。宇宙航空分野での国際競争力の強化に貢献するため、ハイ・パフォーマンス・コンピューティング (HPC) 基盤としての役割を担います。



▲富士通プロセッサ A64FX

## 計算機のタイプを選べる汎用システム (TOKI-RURI)

### 計算するプログラムに合わせて、効率の良いタイプを選べる計算機

ユーザーが計算するプログラムは、小さい計算から、かなり大きな計算まで、その研究によって様々です。汎用システム (TOKI-RURI) は 4 種類のタイプの違うノードで構成されたシステムなので、ユーザーは計算するプログラムに合った最も効率の良いノードを選択することができます。

### AI (人工知能) の計算に対応できる TOKI-RURI GPノードを装備

JSS3 の汎用システムには GPノードという GPGPU を装備したシステムがあり、機械学習用途が目的での計算にも対応可能となっています。

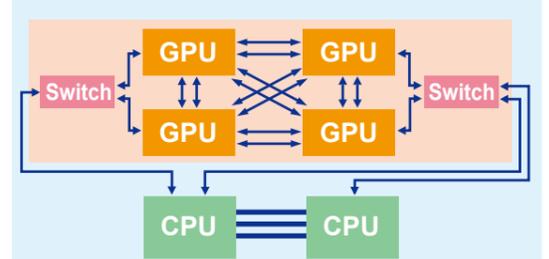
GPGPUとは GPU (グラフィックボード) を数値計算用に利用する技術を採用したシステムで、同じ計算を大量に繰り返す場合に効率良く演算を行うことができます。

GPノードには 1 ノードに「NVIDIA Tesla V100」の GPU が 4 枚搭載されています。

### TOKI-RURI の各種ノード

ノードタイプ	構成	ノード数
STノード	Standard 通常のプログラムの計算	375 ノード
GPノード	GPgpu AI などの特殊な計算	32 ノード
XMノード	eXtra large Memory 特に大きなメモリを必要とする計算	2 ノード
LMノード	Large Memory 大きなメモリを必要とする計算	7 ノード

### TOKI-RURI GPノード構成



# 運用における課題

## スパコン運用課題の解消策を常時模索

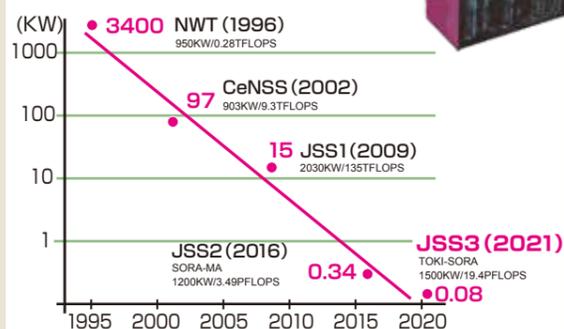
スパコンの運用にはいくつかの解決すべき課題がありますが、問題解消のために製造メーカーと連携して技術改善を行ったり、ユーザーにはスパコンで効率よく計算するためのプログラムのチューニング情報等を提供しています。

### 課題 電力量の削減

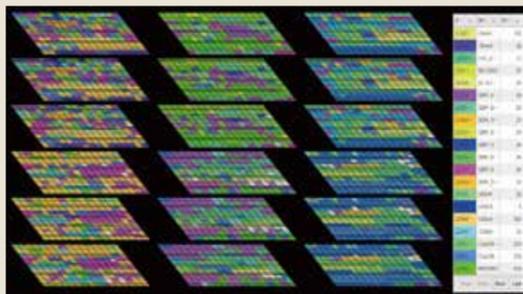
#### 効率化と省エネの両立を

半導体技術の進歩により、単位計算性能当たりの消費電力は劇的に減少していますが、その減少を上回る計算性能向上の要求があるため、スーパーコンピュータシステム全体としての消費電力削減努力がより必要となっています。

1TFLOPS 当たりの電力量 (1時間あたりの電力量 ÷ 理論演算性能)	
JSS2	0.34KW
JSS3	0.08KW



▲ 1 TFLOPS 当たりの歴代計算機の消費電力 (1時間あたりの電力量 ÷ 理論演算性能)

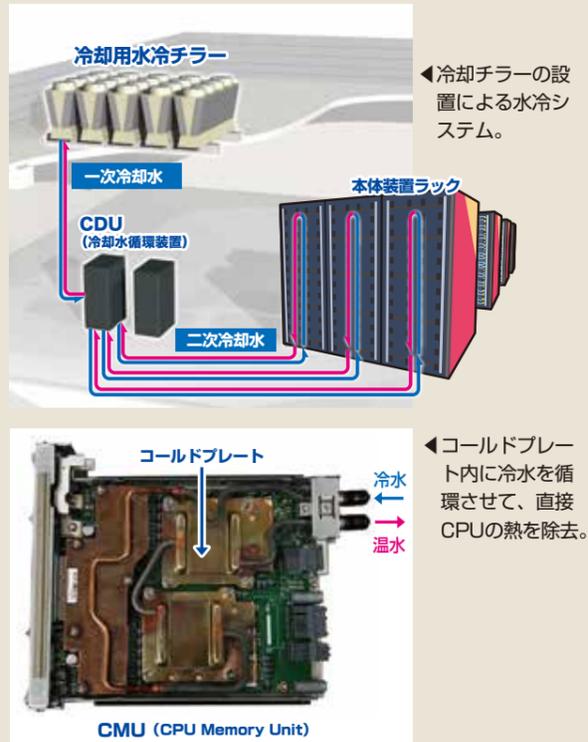


▲ 小さい四角が1台の計算機 (ノード) を表しています。同じ色は同一計算 (ジョブ) であることを表しています。(例: 赤い四角が100個あったら、100台のノードを使用した並列計算の実行中を意味します。)

### 課題 スパコンの発熱除去

#### 空冷から水冷へ

スパコンの回路は、集積度が上がると大量の熱を出すため、従来の空冷方式では冷却しきれなくなります。JSS3 ではコールドプレートを用いた水冷方式を採用し、効率の良い発熱除去を行っています。



### 課題 スケジューラ

#### 稼働率の高い計算機の運用

JSS3のメイン計算機 TOKI-SORA は、5,760台の計算機を並列に繋いだ大規模並列計算機です。共用計算機 (たくさんの人が一緒に使う計算機) は稼働率が重要です。1つの計算が終了すると、すぐに次の計算を入れ、ノードに空きがないようにします。

ただし、次の計算が50台のノードを要求する計算だとします。その時には50台分のノードの空きが出るまで、計算を待機させます。この待機中でも要求ノード数が少なく、短時間で終わる計算があれば、それを優先させて計算し、効率よく計算機を稼働させられるようにスケジュール管理しています。

# パワフルな可視化システムを装備

## “可視化”の重要性

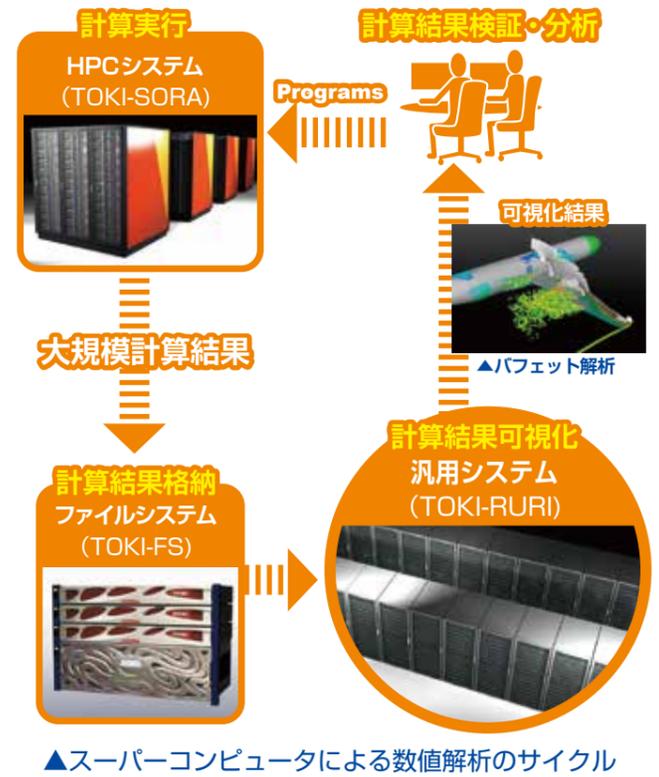
スパコンで計算された数値シミュレーション結果はコンピュータの中に数値データとして存在するだけで、そのままでは人間が理解できません。そのデータを「グラフにする」「画像に表示する」「アニメーションにする」など、人間が理解できる形にする技術を「可視化」と呼びます。可視化は、研究開発を進める上で欠かせない技術となっています。

## より大きなデータを扱える優れた可視化システム環境が必要に

スパコンのスピードが速くなると計算結果が大きくなり、その大規模な計算結果を可視化する重要性が高まります。

JSS3では大規模計算がスムーズに行えるように、計算の前処理と後処理の可視化を行うための計算機、汎用システム (TOKI-RURI) を装備しました。このシステムにより、ファイルシステム (TOKI-FS) に格納された大規模計算結果を直接可視化することが可能です。

可視化アプリケーションとして EnSight、Fieldview、ParaView などを用意しています。また、リモートデスクトップ機能、クライアントサーバ機能など、いろいろな条件の可視化が行えるような環境が整えられています。



## 大規模データを長期保存するテープアーカイバシステム：J-SPACE

### 大量データの長期保存に適した磁気テープ

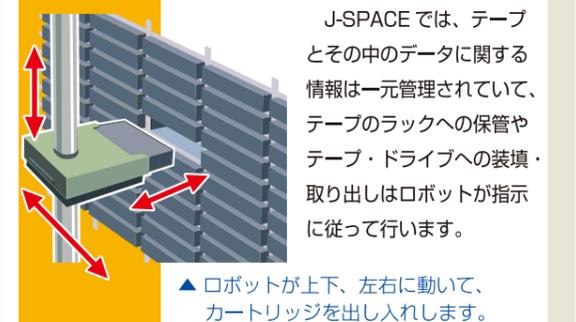
JAXAのスーパーコンピュータシステムでは、以前多くのご家庭にあったカセットテープやビデオテープとほぼ同じ原理の磁気テープを計算結果の長期保存に使用しています。磁気テープは材質の劣化が殆どなく安定しており、記録の維持には電力を必要とせず、またハードディスクドライブに比べてシステムの部品数が少ない分故障が少ないなど、色々なメリットがあります。また、遠隔地に保存をしておいて、必要な時に読み出してデータだけ活用することもできます。記録容量や転送速度の進化により、ビッグデータの長期保管などにも需要が増えています。

### J-SPACEの役割は「図書館」です。

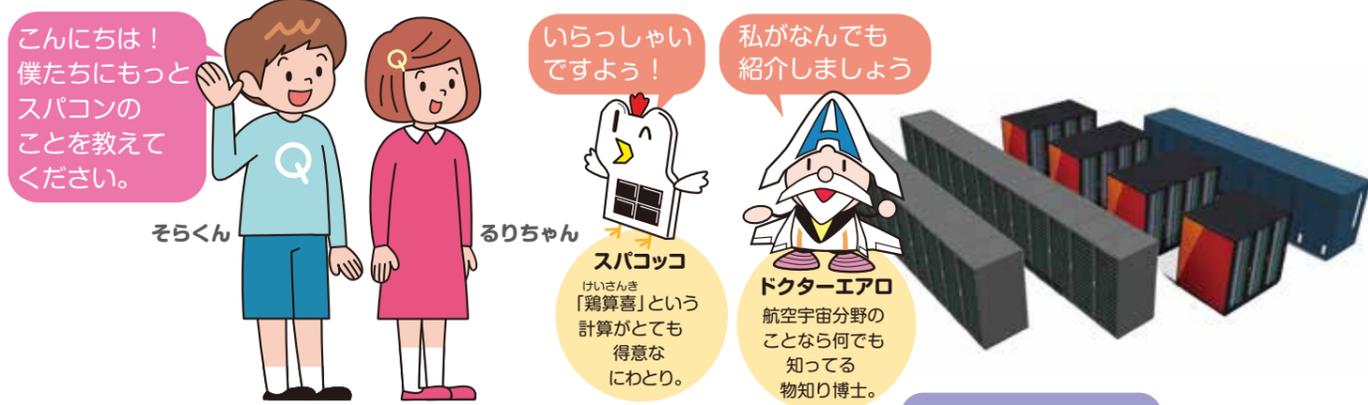
磁気テープへのデータ保管の課題は、テープの管理と迅速な読み書きです。J-SPACEはテープカセットとその中のデータを一元管理するシステムで、いわばデータの「図書館」です。頻繁に利用する本棚と、しばらく読まないけど重要な本棚などに分けてデータを収納しています。

磁気テープカートリッジ  
3592  
記録容量 (非圧縮時)  
最大 20TB/本  
最大転送速度 (非圧縮時)  
400MB/秒

J-SPACEが記録できるデータ量：70PB



# スパコンのことをもっと知りたいです！



## 人が上手に使って、初めてスパコンは活躍します。

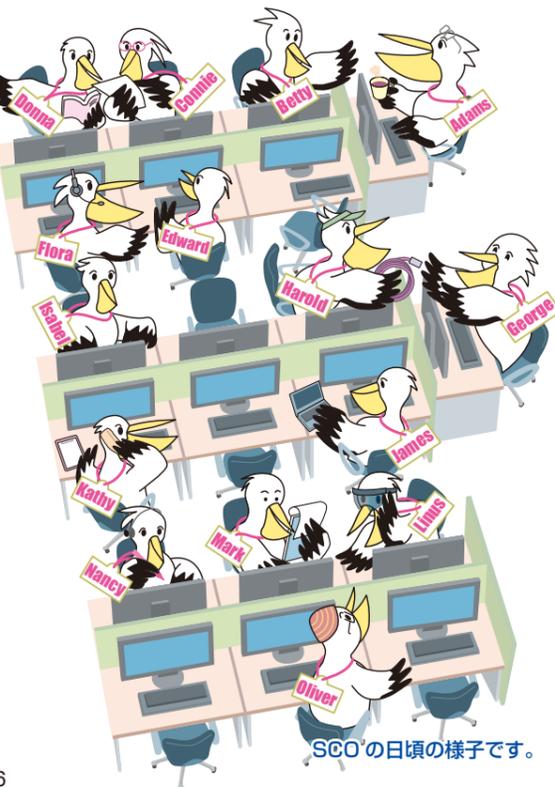
スパコンは単なる計算機なので、人が使ってこそ性能を発揮します。スパコンを運転する経験豊富な運用メンバーが、優秀な研究者が効果的にスパコンを活用できるように日々最大限サポートしています。

## ようこそ、SCO (SuperComputer Office) へ！

スパコンも普通のコンピュータと同じように、プログラムを計算するための機械なのですが、規模が大きいため運用するには多くの仕事が必要です。

研究者がスパコンを使えるようにするための各種申請の受付、ID の登録や管理、プログラムが最適に実行できるように負荷の監視や設定パラメタの調整、ソフトウェアのバージョンアップやハードウェアのメンテナンス、障害対応、利用者の使い方のサポートなどを日々行っています。また、次期スパコンをどうするか構想も考えないとなりません。

こういった仕事を担っている部署が SCO (SuperComputer Office) です。ここでは SCO の仕事を紹介します。



SCO の日頃の様子です。

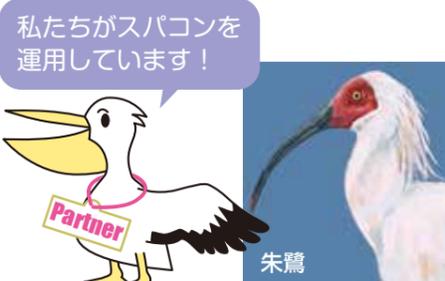
こんにちは！僕たちにもっとスパコンのことを教えてください。

いらっしゃいませですよ！

私なんでも紹介しましょう

**スパコッコ**  
けいさんき「鶏算喜」という計算がとて得意なにわとり。

**ドクターエアロ**  
航空宇宙分野のことなら何でも知ってる物知り博士。



私たちがスパコンを運用しています！

**SCO の仲間達 (パートナー) を「ペリカンパートナー」と名付けてみました！**

JSS3 のスパコンの名前となっている朱鷺はペリカン目に分類されています。そのペリカン達が力を合わせてスパコン運用している様子をイメージしています。

## ペリカンパートナーの仕事の分担

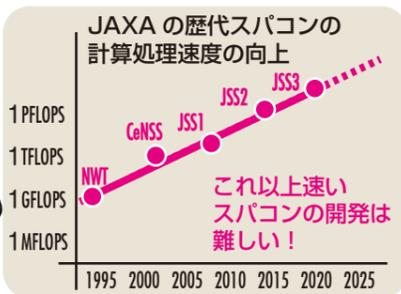
ペリカンパートナーは現在 15 人編成で、それぞれメインに担当している仕事を中心に、好奇心と向上心を持って日々業務に取り組んでいます。

- Adams** 【チーフマネージャー】 スパコンの導入から運用までの SCO 活動のすべてをとりまとめるマネージャー
- Betty** 【サブマネージャー】 チーフマネージャーのサポート、契約事務等のスパコン運営とりまとめ担当
- Connie** 【事務処理サポート】 SCO 活動のための事務処理担当
- Donna** 【事務処理サポート】 SCO 活動のための事務処理担当
- Edward** 【技術サポート】 スパコン運用の問題解決に向けた技術支援担当
- Flora** 【ネットワーク担当】 スパコンのセキュリティの管理担当
- George** 【運用チームリーダー】 運用チームの活動全般のとりまとめ担当
- Harold** 【運用チームサブリーダー】 運用チームリーダーのサポート、サーバ/ネットワーク装置等の機器管理担当
- Isabel** 【運用チームメンバー】 各種申請手続きに関するユーザからの問合せ窓口担当
- James** 【運用チームメンバー】 アプリケーションの利用に関するユーザサポート担当
- Kathy** 【運用チームメンバー】 スパコンの利用に関するユーザからの問合せ窓口担当
- Linus** 【広報チームメンバー】 見学者対応/企画検討、アンケート/スパコン成果の発信などの広報担当
- Mark** 【スパコン運営サポート】 次期システム向けの技術/市場動向調査担当
- Nancy** 【スパコン運営サポート】 スパコンの QMS (品質管理システム) 活動の事務局担当
- Oliver** 【広報チームメンバー】 国際会議の展示企画/準備、見学者対応等、広報活動全般のとりまとめ担当

# 今後のスーパーコンピュータを考えてみました！

これから先のスパコンの活用について Adams さん教えてください。

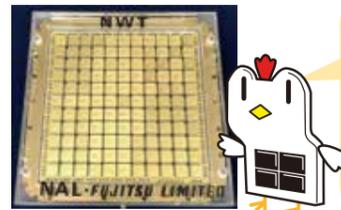
私たちの生活に欠かせなくなってしまう計算技術。今後の JAXA のスパコンがどうなるのか、チーフマネージャーに聞いてみました。



将来の計算機について考える時に重要なのは「今後、計算機単体の計算処理速度は速くならない」ということです。

これまでの 30 年の間に計算機はものすごい早さで進化し続け、計算処理速度は数百万倍以上も向上してきました。現在、物理的な進化は限界に達していて、今後はこれまでのような爆発的な性能の飛躍はないと言われています。ところが航空宇宙分野の研究においては計算能力の需要がどんどん高まってきています。

さあ、どうしましょう？

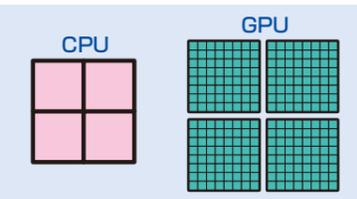


これは、どんどん CPU (中央演算装置) を小さくしていった、もうこれ以上小さい CPU は開発できないということですよ。左の写真は 1993 年の数値風洞 (NWT) の要素計算機！ 1.7GFLOPS という性能で、大きさは一辺が 30cm ありますよ。

私たちは JAXA の今後のスパコンとして、2つの方向性を模索しています。一つは今の技術を効率良く活用するハイブリットシステムの導入と、もう一つは全く新しい計算機の導入です。

## CPU と GPU で構成されるハイブリット型のスーパーコンピュータシステム

現在のスパコンは CPU を搭載した計算機をメインとしていますが、それを増強する形で GPU を大規模に融合するシステムが考えられています。GPU は元々は画像処理に特化した超高速処理を可能としていましたが、画像処理以外の計算用途に適用した GPGPU が急速に普及してきています。その特性から AI の学習や流体力学の数値シミュレーションと相性がよいと言われています。GPU メーカーも GPGPU 向けの支援機能やソフトウェア開発環境の整備に積極的に取り組んでいます。



GPU は一つのプロセッサの中に CPU とは比べ物にならないほどの多数のコアを搭載しています。CPU のような複雑な処理は苦手ですが、単純な計算を大量に並列実行できます。

CPU: Central Processing Unit  
GPU: Graphics Processing Unit  
GPGPU: General-Purpose Computing on Graphics Processing Units



JSS3 には GPU 計算機が一部搭載されています。(4 ページ参照)

## 全く新しい計算方式を持つ量子計算機によるスーパーコンピュータシステム

量子計算機はこれまでのコンピュータ (ここでは古典コンピュータと言う) とは、全く異なる原理で動作するコンピュータです。理論的には、古典コンピュータの数百万倍も高速化できるとされ、世界中で積極的に研究されています。現在は、まだ初歩的なものしか実現できておらず、本格的に実用化されるのは数十年先と言われています。また、特殊な原理のため、超高速で動くソフトウェアは限られるため、古典コンピュータに置き換わるものではなく、古典コンピュータを補完する特化型のコンピュータと期待されています。



未来が楽しみです。



航空宇宙分野の研究開発を支える次期計算機システムを検討しています！

# 数値風洞 (NWT) の歴史的功績を紹介します。

航空宇宙学会で航空宇宙技術資産に認定されました。



## 1993 年「数値風洞」誕生

JAXA の前身である航空宇宙技術研究所は、1993 年に富士通と共同開発したスーパーコンピュータ数値風洞 (NWT:Numerical Wind Tunnel) の運用を開始しました。当時この計算機は世界一を誇る計算能力 (要素計算機台数: 166 台、ピーク性能: 280 GFLOPS) を持ち、多くの研究者がこの計算機を使って革新的な数値シミュレーション技術を開発し、多くの有意義な計算結果を残しました。

その数値風洞が 2024 年に航空宇宙学会の「航空宇宙技術資産」に認定され、その業績が改めて評価されました。

## ベクトル型並列計算機の能力を最大限引き出し、風洞実験設備と同等の成果を目指す

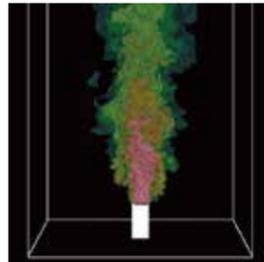
数値風洞の産みの親である三好甫氏は、「数値風洞というのは航空機などの機体形状周りの空間を細かな格子に分割し、得られた差分方程式系を計算機により解くことにより、実際の風洞設備での風洞試験と同じように形状周りの流れ場を求めて、これから実機の空力性能を推算すること」とその概念を定義していました。それを目標に数値風洞は開発され、その計算能力を活かしたジェットエンジン内の翼列を過ぎる流れや往還機の実在気体流れなどの実問題が解析されました。また、物理現象を解明するといった方面へも適用され、複雑な乱流や浮き上がり火炎の詳細解析も行われました。

## 「良いユーザに出会って、良い成果を出してもらって、計算機は初めて良い計算機になるのです。」

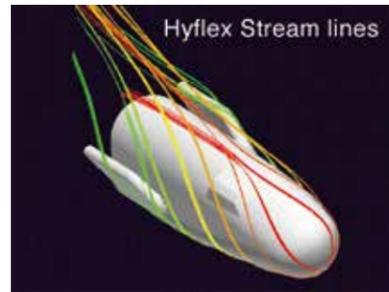
三好さんの言葉です。計算機はそれだけでは成果を出すことはできず、優れた研究者に出会い、研究者の意欲を掻き立て、昼夜を問わずにプログラムを計算し続けてこそ、研究開発に貢献する成果が得られるという意義を表現したものです。



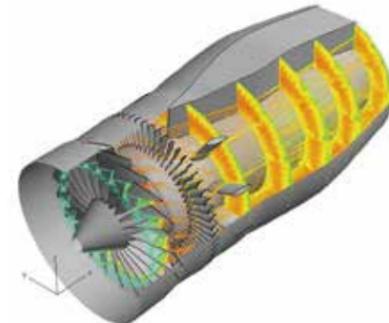
▲数値風洞の産みの親の三好甫氏



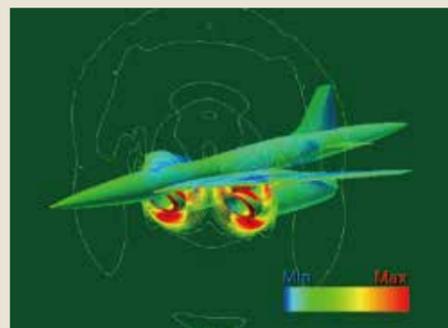
▲燃焼乱流の解析



▲宇宙往還機の空力解析



▲エンジン内部流の解析



▲小型音速実験機の空力解析  
エンジンナセル周りに圧力の高いところが現れています。数値風洞の計算能力により、このような航空機全機の解析が可能となりました。

# 数値風洞から始まった日本のスパコンの歴史

## 1994 年から3年連続世界一を樹立

1994 年、アメリカで毎年行われているスーパーコンピュータのランキングを決めるイベント (SC94) にて数値風洞はゴードン・ベル賞を受賞し、世界一の計算能力が認められました。それから3年連続でその座を守り、スーパーコンピュータの能力において日本が世界をリードする期間となりました。



▲1995 年のゴードン・ベル賞賞状と 1996 表彰式の様子

## 当時、世界最高速の計算速度を可能とした要素計算機

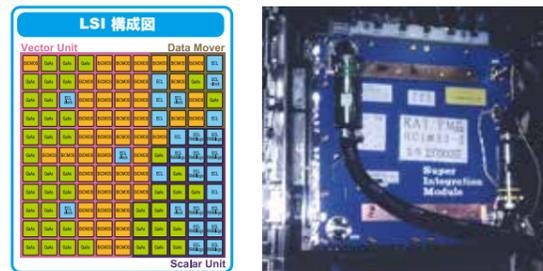
数値風洞の計算ユニットは要素計算機 (Processing Element) と呼ばれ、CPU (中央演算装置) とメモリとで構成されていました。PE 一台のピーク性能が 1.7GFLOPS、主記憶容量は 256MB と、当時のスーパーコンピュータと同等の性能を持ちながらも、そのサイズがピザボックス程度なことにより 140 台を超える並列台数が可能となっていました。CPU ボードでは BiCMOS, ECL, GaAs の 3 種類の LSI が使用されており、CPU ボードの冷却は、内部に冷却水が貫通するバネ性の銅製ペローを LSI に密着させることにより、熱を除去する水冷式が採用されていました。



▲左が CPU ボード、右が冷却装置、奥が「航空宇宙技術遺産」の認定証

## 大規模並列計算機の誕生秘話

第一期の数値風洞は 144 台の PE を並列に繋いだ「ベクトル型大規模並列計算機」としてスタートし、その3年後には第二期として 22 台の PE が増設され合計 166 台の大型並列計算機となりました。当時はまだクロスバーをノード間結合ネットワークに持つ分散メモリのベクトルシステムというハードウェア構成のシステムの存在は少なく、研究者は効率の良い計算を行うためにプログラムの独自開発が必要となり、最初はかなり戸惑ったそうです。そこを乗り越えて多くの研究者が色々な分野の解析に挑戦したおかげで、その時の有意義な成果が現在の研究基盤となっているのは間違いありません。



▲CPU ボードの LSI 配置図と要素計算機 (PE) ユニット

## 問題点の克服から始まる歴史

当時、数値風洞を活用する上で「風洞設備の代わりとなるには計算能力が足りていない」「計算格子を作るためのアプリケーションがない」「計算結果が正しいかどうかを検証するためのノウハウが整っていない」といった3つの問題があげられていました。その後のスパコンの開発、運用、活用で少しずつ問題が改善されて来ており、スパコンはこれかも航空宇宙分野の研究開発に大いに活用されるでしょう。



▲数値風洞の最終的な構成イメージ

## 研究者の探究心を刺激する数値風洞の計算能力

<数値風洞で計算をしていた研究者に聞いてみました！>

Q: 数値風洞とはどんな計算機でしたか?

A: これまでにない大規模並列計算機だったので、この計算機用のプログラムを書くための並列言語も必要でした。NWT-Fortran と呼ばれる並列言語は実際にプログラムを開発する研究者が参加して開発が行われて、その結果流体解析に適した並列言語となりました。今では当たり前となったコデザイン (協調設計) を実施した訳ですが、そのおかげで当時の流体解析プログラムの大規模化・並列化が容易にできたんだと思います。

導入当初は様々なトラブルもありましたが、NWT の本格稼働とともに従来の解析を質・量ともに上回る解析を次々に実現することができました。

## ところで、現在の身近なデバイスと計算能力を比べると...

現在、市場に出ているスマートフォンの最新機種は 2TFLOPS を超えるとも言われており、単純に比較できるものではありませんが数値風洞の 10 倍近い計算速度と考えられます。あの巨大なシステムの 10 倍の性能が手のひらに収まるサイズとなったのです。数値風洞が活用していたころからの約 30 年間における計算機の凄まじい進化がうかがえますね。



# JAXAの計算機システムと数値シミュレーション 技術の歩み

Youtubeで JAXA のスーパーコンピュータの歴史紹介動画をご覧ください。

JAXAの前身である航空宇宙技術研究所(NAL)は、最初の計算機として米国製DATATRON205を1960年に導入しました。その後、国産機である日立社製のHITAC5020の導入を経て、1977年に富士通との共同開発によるFACOM230-75APUが日本初のスーパーコンピュータとなりました。1987年にはNALの特別注文によってFACOM VP400が開発され、機体周りの全機モデル粘性流計算が10時間以内で行えるようになりました。

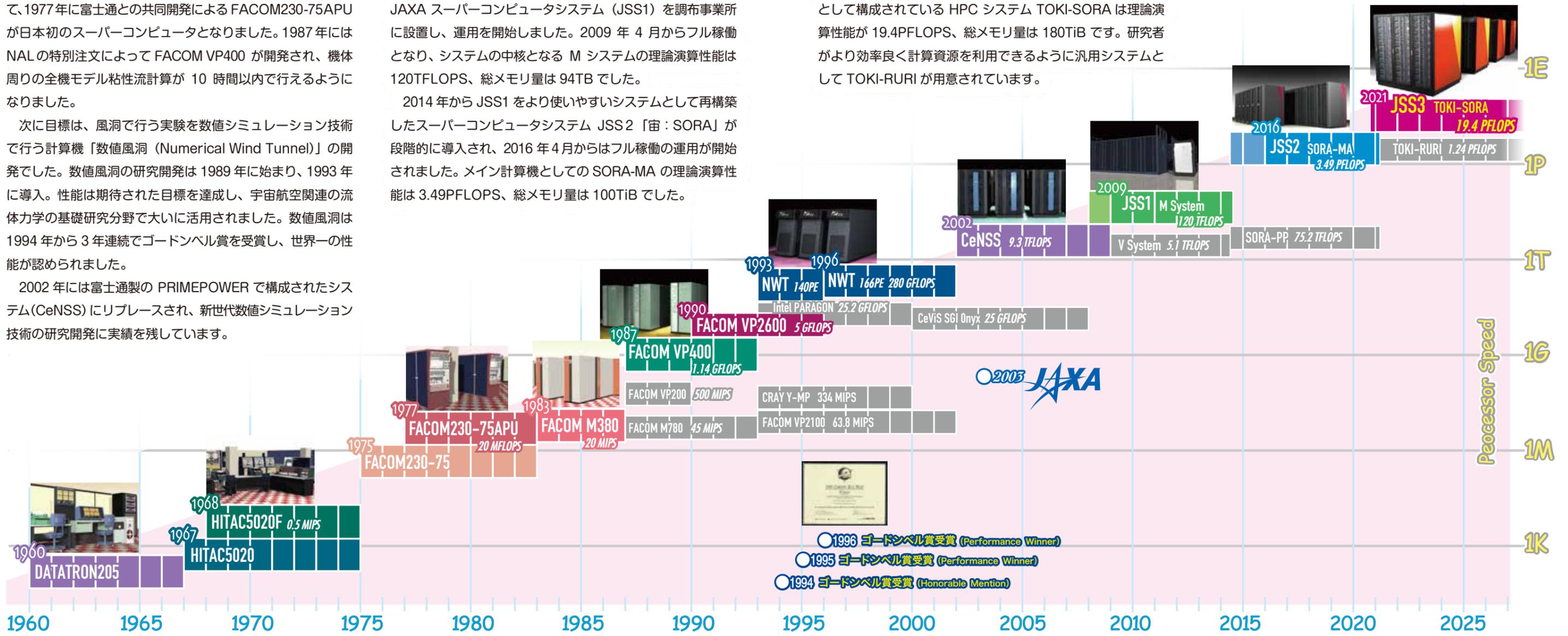
次に目標は、風洞で行う実験を数値シミュレーション技術で行う計算機「数値風洞(Numerical Wind Tunnel)」の開発でした。数値風洞の研究開発は1989年に始まり、1993年に導入。性能は期待された目標を達成し、宇宙航空関連の流体力学の基礎研究分野で大いに活用されました。数値風洞は1994年から3年連続でゴードンベル賞を受賞し、世界一の性能が認められました。

2002年には富士通製のPRIMEPOWERで構成されたシステム(CeNSS)にリプレースされ、新世代数値シミュレーション技術の研究開発に実績を残しています。

その後、2003年にJAXAが発足。さらなる研究効率の強化を図るため、2007年に調布、角田、相模原の各事業所に設置されていた3つのスーパーコンピュータを1つに統合したJAXAスーパーコンピュータシステム(JSS1)を調布事業所に設置し、運用を開始しました。2009年4月からフル稼働となり、システムの中核となるMシステムの理論演算性能は120TFLOPS、総メモリ量は94TBでした。

2014年からJSS1をより使いやすいシステムとして再構築したスーパーコンピュータシステムJSS2「宙：SORA」が段階的に導入され、2016年4月からはフル稼働の運用が開始されました。メイン計算機としてのSORA-MAの理論演算性能は3.49PFLOPS、総メモリ量は100TiBでした。

2020年中旬より、新スーパーコンピュータシステムとしてJSS3の導入が開始され、同年12月より稼働、運用されています。新システムはTOKIという愛称で呼ばれ、メイン計算機として構成されているHPCシステムTOKI-SORAは理論演算性能が19.4PFLOPS、総メモリ量は180TiBです。研究者がより効率良く計算資源を利用できるように汎用システムとしてTOKI-RURIが用意されています。



開拓の時代      技術開発の時代      検証の時代      実用の時代

<b>ASKA</b> ASKA全機モデルによる大規模シミュレーション 1986	<b>HOPE</b> 宇宙往還機HOPEの熱空力設計への応用 1993	<b>SST</b> 次世代航空機SSTの空力設計 1995	<b>3-D Compressor</b> ジェットエンジンの圧縮機の3次元シミュレーション 1995	<b>Combustion</b> 水素の乱流燃焼解析 2001	<b>Helicopter</b> ヘリコプターの遷移飛行シミュレーション 2003	<b>Rocket Launch</b> ロケット射場における音響の影響解析シミュレーション 2006	<b>Atomization</b> 液体燃料の微粒化行程シミュレーション 2009	<b>Rocket Engine</b> LE-Xロケットエンジンの全系ハザード解析 2011	<b>H3 Launch Vehicle</b> H3ロケット射点内部の噴流流動に与えるエンジン配置の影響解析 2015	<b>Aircraft</b> 航空機解析コア技術開発 2018	<b>Rocket Engine</b> 液体ロケットエンジンのフルスケール・ラージエディシミュレーション 2022
--	--	--------------------------------------	---	--	--	---	--	---	--	--	--

# 航空機の機体設計における利用

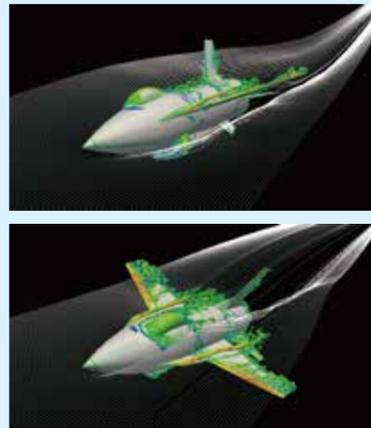


## 動安定解析の研究

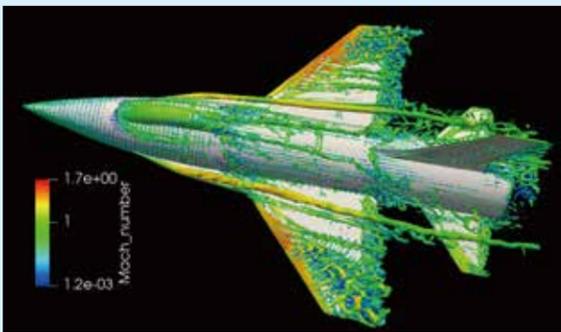
航空機の動安定特性は、飛行安定性の設計に必要不可欠ですが、理論による考察や風洞試験には限界があり、CFD を用いた動安定解析の実用化が期待されています。

この研究は、JAXA で開発されている高速流体ソルバー FaSTAR を動安定解析に適用し、その精度について検証することが目的です。Standard Dynamics Model (SDM) を対象に非定常解析を行い、動安定微係数の推定を実施しました。乱流の計算には Spalart-Allmaras モデルベースの DDES (Delayed Detached Eddy Simulation) 法を用い、主翼上面の乱流渦を計算しました。推定した動微係数と実験結果を比較した結果、FaSTAR による推定は実験結果をよく再現していることが確認できました。

また、航空機が飛行中に不安定になる現象を予測するために、全体安定性解析 (GSA: Global Stability Analysis) を用いた予測技術を開発しました。高い計算性能を持つ線形解析ソルバーにより、従来の CFD 技術による予測より 15 倍高速な予測が可能になっています。また、GSA 解析で得られた不安定モードの分析により、不安定の原因が主翼の上側における流れの変動であることが確認できました。



▲回転する機体周りの流線表示



▲渦度の Q 値による等値面表示 (色はマッハ数)



Unstable GSA mode

## 航空機解析コア技術開発

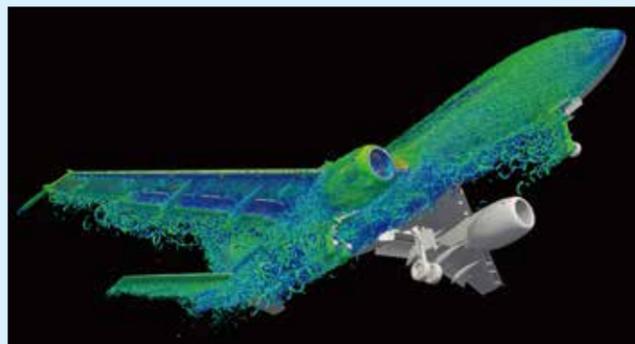
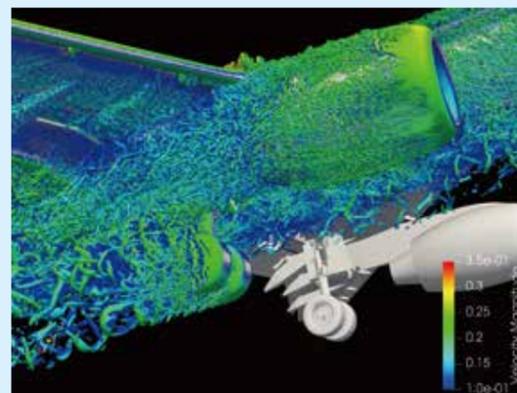
航空機の開発には、実機フライト環境を忠実に再現したうえで、設計や運用における重要な課題を解決し、格段の効率化、高性能化、安全性向上を実現するコア技術の確立が必要です。

また、実機飛行試験など、開発が進んでしまった段階でしか評価できない設計課題の評価を、設計初期段階で評価可能とする技術の開発や、失速特性の高精度予測の実現、非線形飛行力学の導入による航空機の飛行制御技術の抜本的な改善、高度なシミュレーションの活用による高度運航制御モデルの開発なども今後の重要な課題となってきます。

それらの課題に挑戦するため、高解像度な高精度圧縮性解法、壁面形状モデル、LES (ラージ・エディ・シミュレーション) 壁面モデルを開発しています。

それによる、実機詳細形状 (JSM\_CRM\_LEG モデル) に対して埋め込み境界を用いた試計算を実施しました。図はマッハ数が 0.2、レイノルズ数が  $10^6$ 、迎角が 7 度の計算例です。この図では空間の渦度を表しています。

非常に高解像度な計算格子の使用により、高揚力装置や脚の周りも高い精度で渦の形状を確認することができます。

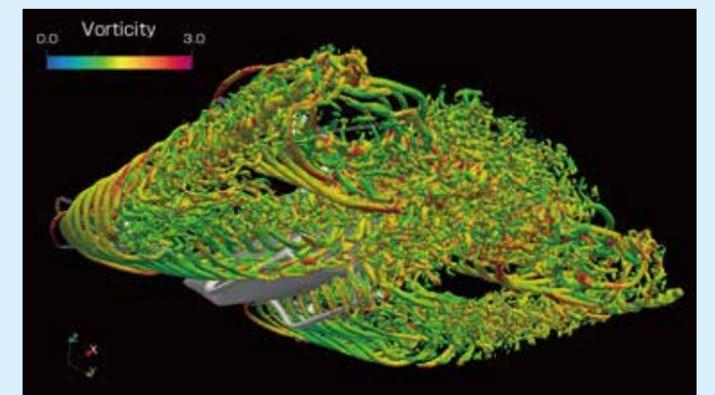
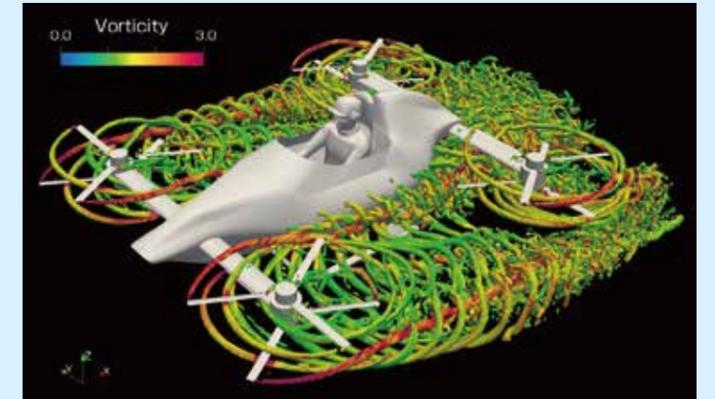


▲渦度の等値面表示 (色は速度)

## マルチロータの空力性能および空力騒音解析

ドローンや電動垂直離着陸機 (Electric Vertical Take-Off and Landing aircraft, eVTOL aircraft) のようなマルチロータ機のロータブレード設計に着目し、空力性能と空力騒音を両立するブレード設計について研究開発を進めています。この事業では eVTOL 機として、マルチコプタ型とリフトアンドクルーズ型機を想定し、ブレード設計パラメータが空力性能と空力騒音に与える影響を調査しています。

回転翼 CFD ツール rFlow3D と回転翼機騒音解析ツール rNoise を用いて、マルチコプタ型の機体を想定し、空力性能と空力騒音を評価しました。マルチコプタのロータは 4 ロータとし、各ロータシステムは二重反転ロータとしています。ホバリング条件と前進飛行条件で数値解析を実施しました。数値解析結果より、二重反転ロータ特有の上下ロータの交差時に発生する急激な圧力変動によって、シングルロータシステムよりも騒音が大きくなることがわかりました。さらに、前方ロータの翼端渦流れが後方ロータに対して複雑に干渉し、空力性能と空力騒音に影響を与えていることが明らかになりました。



▲マルチロータ周りの流れの渦度の Q 値による等値面表示。色は渦度を表示。(機体形状は計算に含まれていません。単座の有人機を想定しています。)



「回転翼機の空力解析」を解説した Web サイトをご覧ください。



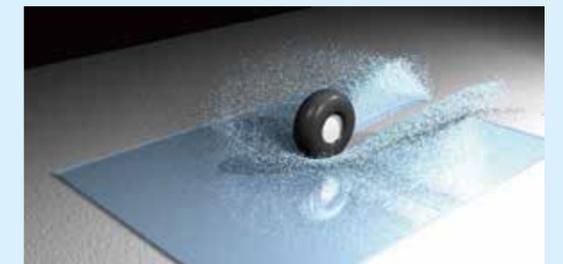
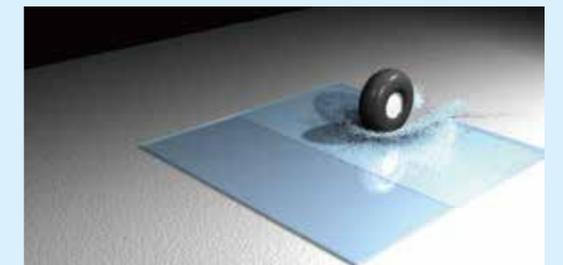
## 航空機タイヤ、水跳ね予測

雨が降り滑走路に水がたまった状態で航空機が離着陸する際、エンジンに過剰な量の水しぶきが流入するとエンジンの不具合が引き起こされる可能性があります。また、離陸時には水の抵抗によって機体の速度が十分に上がらずオーバーランに至る可能性があります。

そのような状況を改善するため、航空機タイヤによる水跳ねの影響予測に向けて粒子法を用いた流体解析ソルバ P-Flow (Particle Flow simulator) を開発しています。

粒子法は流体を粒子の集合で近似し、個々の粒子を流体の支配方程式に従って動かすことで流体挙動を追跡する比較的新しい手法であり、水跳ね現象のように大規模な液体の変形を含む問題を得意とします。

メタボール技法とレイトレーシング描画を使った液体表現とアニメーションにより、水が跳ねる様子が可視化されています。



▲粒子法を用いた水跳ねのシミュレーション結果

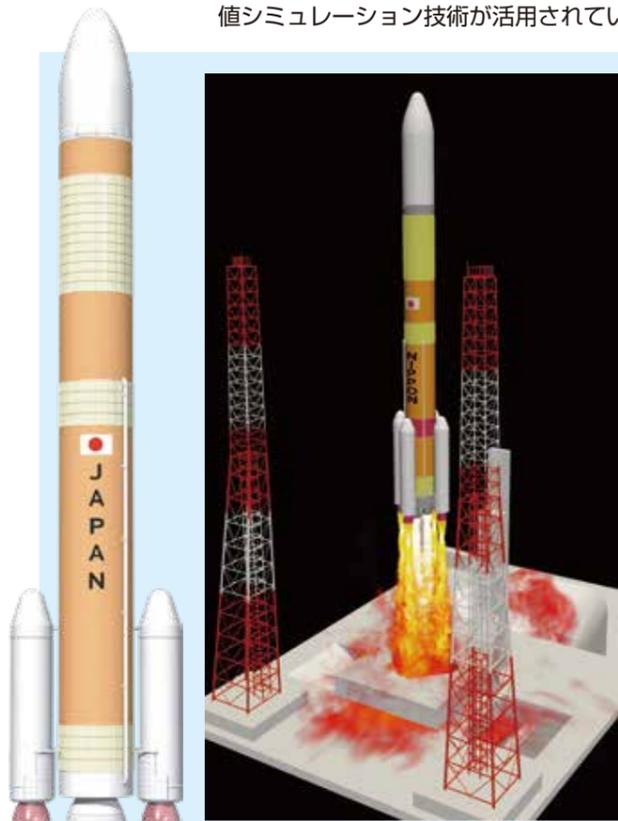


「航空機タイヤ、水跳ね予測」のアニメーションをご覧ください。



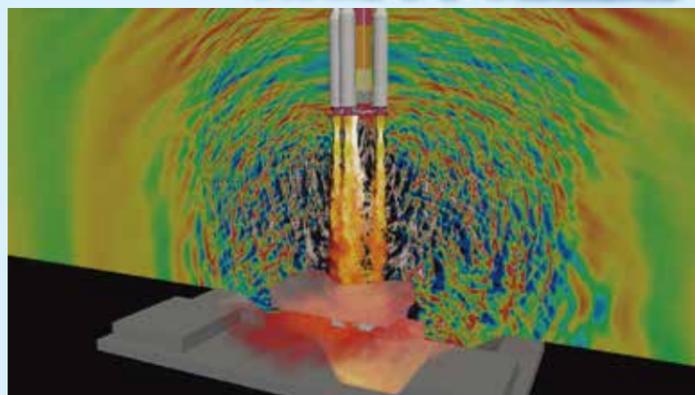
## ロケットシステムの設計における利用

高速で飛翔するロケットの機体への負荷や宇宙空間での無重力状態などの物理現象は、実験による再現が非常に困難です。それを補う設計開発技術として、コンピュータ上で方程式を近似的に計算して物理現象を予測する数値シミュレーション技術が活用されています。



▲排気ジェットのパリュームレンダリング

### H3ロケットの音響解析



▲H3ロケット周りの打ち上げ時の音響波の圧力分布表示

2024年2月に打ち上げ成功したH3ロケットのリフトオフ時に、エンジン排気噴流と射点の干渉によって発生する音響波の発生・伝播メカニズムを解明するため、数値シミュレーション技術が活用されています。

メインの液体燃料エンジン2基と、固体ブースター4基から噴射された排気ジェットをポリウムレンダリングの技法で可視化しています。また、音響波を圧力分布で表示しており、その影響が発射後に上昇を続けるロケット本体にまで届いている様子がわかります。

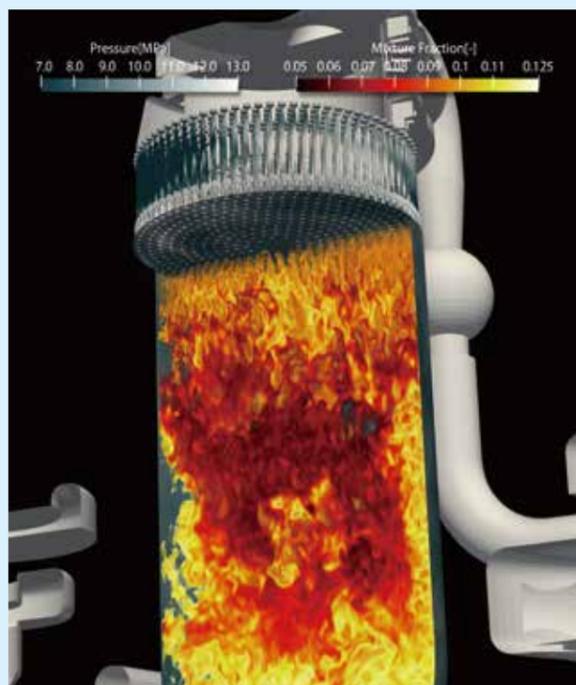
## フルスケール液体ロケットエンジン 燃焼器のLES

液体ロケットエンジン燃焼器の開発における重要なテーマは、燃焼器内部の構造物が圧力変化や局所的な高熱によって破損されてしまう事態を、どうやって回避するかです。しかし、これらの事象は実際のエンジンによる試験で初めて発見されることが多く、また、いつ、どこで起こるか分からない現象であるため、数値流体シミュレーションで事前に予測することは困難でした。JAXAではこれらの事象の予測を実現するため、圧縮性・燃焼 LES (Large Eddy Simulation) ソルバー「LS-FLOW-HO」という解析ソフトウェアの開発を進めています。

LE-Xエンジンのフルスケール燃焼器 LES 解析結果を示します。総計算点数は約26億です。

まだ流れ場は十分に発達していませんが、複雑な火炎の構造が確認できます。同心円の各列では同じリスタート解をマッピングしているため軸対称な構造が見られます。噴射面上の圧力分布もこの時点ではほぼ軸対称です。

「フルスケール液体ロケットエンジン燃焼器のLES」を解説したWebサイトをご覧いただけます。



▲フルスケール燃焼器 LES の結果

研開部門 / 第三研究ユニット (JEDI センター)



## 衛星データの高速処理における利用

刻々と人工衛星から送られる膨大な地球観測データを最新技術で解析

人工衛星から送られてくる地球観測データを解析することで、私たちの生活にとって脅威となる様々な自然災害を予測することができます。このようなデータの解析には、蓄積された過去のデータから変化を読み取る処理が必要ですが、計算にかなりの時間がかかるうえ、データは日々増えていきます。

スパコンによるデータ処理技術とデータ解析技術の進歩により、膨大なデータの中から重要な情報を取り出し、深刻な自然災害の予測や、被害を最小限に抑える対策に活用されつつあります。

### ALOS-2/PALSAR-2 等による 全球土地被覆分類

地球観測研究センター (EORC: Earth Observation Research Center)

#### ■目的

衛星データによる土地利用土地被覆 (Land-Use and Land-Cover, LULC) 分類図は、最も古いリモートセンシング利用分野の一つであり、様々なアプリケーションの基礎情報として重要です。近年の衛星データの多様性・高分解能化・高頻度化に対応したアルゴリズム開発が急務となっています。

#### ■利用事例と意義

JAXA LULC マップの利用事例を右表にまとめました。基盤情報として多数のSDGsに直接的・間接的に貢献しています。

#### ■解析手法と結果

- これまで日本国内を対象に開発してきた機械学習 (CNN) ベースの分類手法を全球へ拡張するための検討を JSS3 にて実施しました。今回はアジア域を対象としました。
- 多時期の ALOS-2/PALSAR-2、GCOM-C/SGLI、GSMaP、AW3D など JAXA 衛星プロダクトを入力データとして使用しました。各衛星の特徴を活用した LULC の広域マップ整備を実施しました。
- アウトプットは 16 カテゴリーとし、合計約 3.6 万点の教師データを取得しました。
- 合計 15 ケースの入力データ組合せで検討、最終成果物は精度 86% を確認しました (右下、図1)。

#### ■JSS3 の利用効果

今回の検討では、特徴量の選定に既存 Linux サーバでは約 215 時間、JSS3 では約 36 時間と約 6 倍の処理高速化を確認できました。今後、全球へ拡張する際には、既存サーバでは約 6 ヶ月の処理時間が見込まれるところ、JSS3 で約 1 ヶ月で処理可能と予測されます。

表1: 計算資源

入力データ	2TB
出力データ	100GB
計算時間	35.8 時間
計算ノード数	10ノード

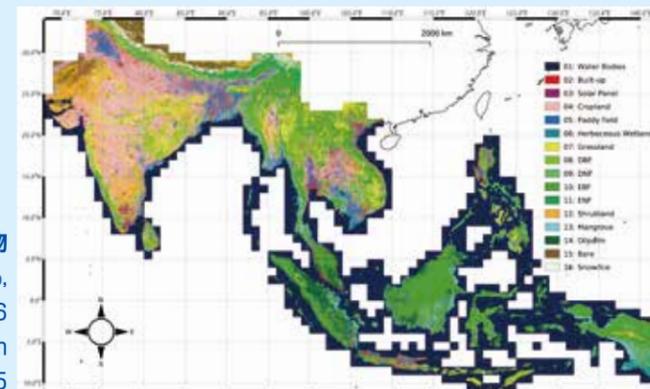
図1: 最終成果物  
全体精度: 86%,  
カテゴリー数: 16  
空間分解能: 25 m  
時期: 2021/06~2022/05



▲陸域観測技術衛星「だいち2号」(ALOS-2) は、「だいち」(ALOS) から地球観測ミッションを引き継いだ人工衛星で、2014年から稼働を開始しています。送られてくる観測データは、災害状況や森林分布の把握、地殻変動の計測など、様々な分野で利用されています。

### JAXA LULC マップの利用事例

エネルギー	電波伝搬計算 水力発電ダム の 漂流算出 太陽光発電所の配置場所検討	7
防災	河川浸水のシミュレーション 災害被害の調査、震災前後の土地利用変化調査 土砂流出解析	11
都市計画	都市計画現況調査、治水計画 土地の利活用、景観の現状把握 盛土地形確認	6
環境 / 生物多様性	里山林の保全 環境アセスメント調査 近畿地方の竹林の位置把握 生態学における景観解析、生物多様性の解析 野生動物の生息環境の解析 鳥類群集と森林構造の関係についての研究 絶滅危惧種の生息適地評価	15 2 3
農業 / 公衆衛生	農作物病害虫の発生予測 農地マップの作成 衛生害虫のリスクマップ作成	13
気候変動	気候変動の影響評価 水文・気象モデルのインプットデータ	4
教育	博物館・写真館等の展示 クイズ番組、放送・報道、大学の講義などで使用	4



# JSS 公開ページ

## スパコンの運用情報を公開

Web の公開コンテンツとして「JSS 公開ページ」を用意して情報を発信しています。JSS3 のシステム構成、利用成果、紹介動画を掲載しています。ぜひ、ご覧ください。

<https://www.jss.jaxa.jp/>

JSS 公開ページをご覧くださいいただけます。

## もっともっと！ JSS3 オンライン展示室

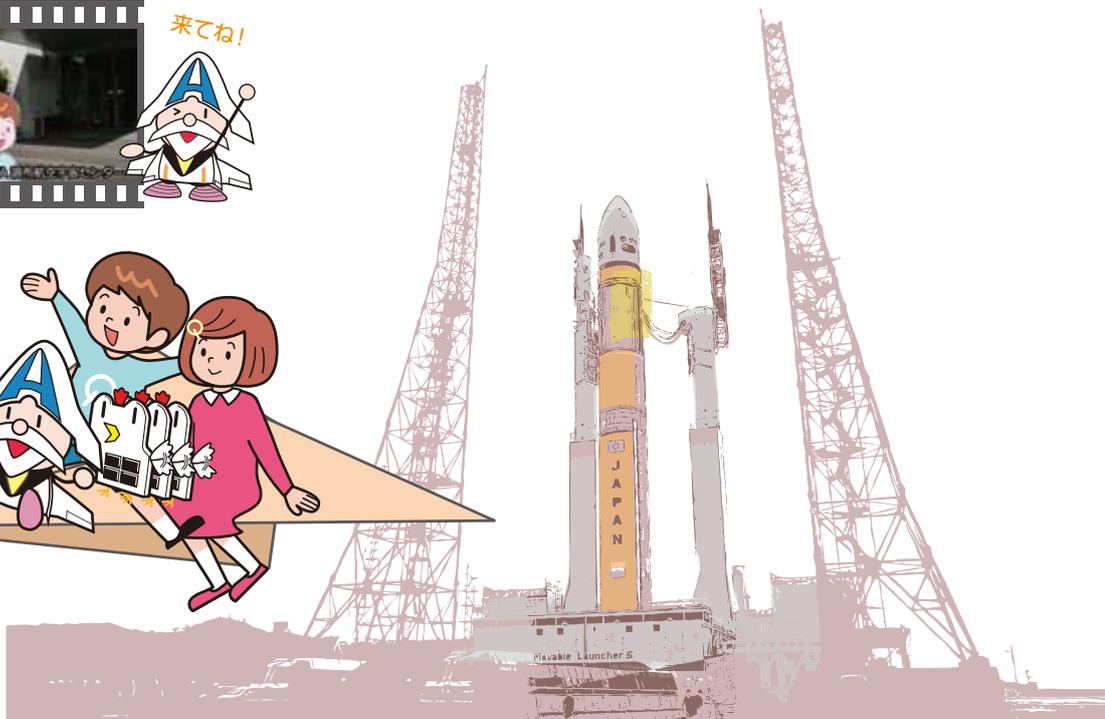
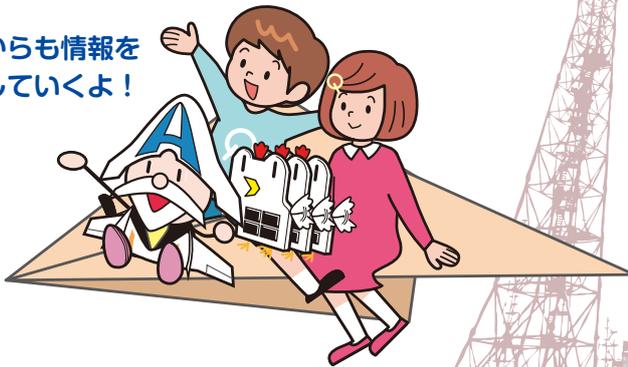
もっと色々なことを知ってもらうために「JSS3 オンライン展示室」を Web で公開しています。

<https://www.jss.jaxa.jp/online-exhibit/>



来てね!

これからも情報を発信していくよ!



国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構  
セキュリティ・情報化推進部 スーパーコンピュータ活用課  
調布航空宇宙センター

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

