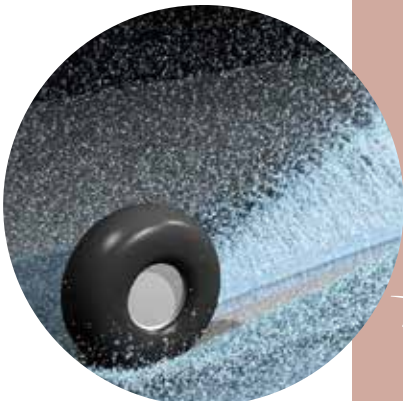
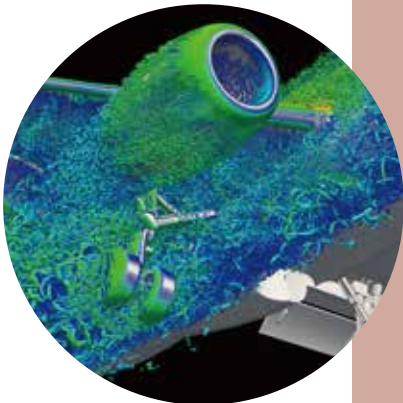
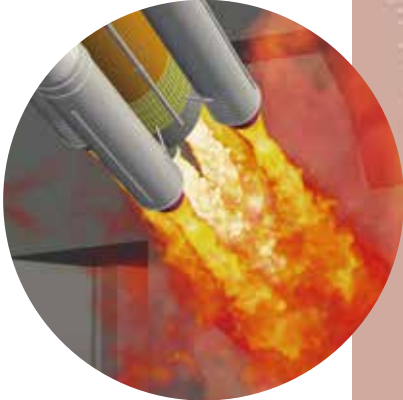


# JSS3/TOKI

2023~2024



YouTubeにJSS3紹介動画の  
オープニングをアップしています。  
スマートフォン、タブレット端末  
でご覧いただけます。





# 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: TOkyo and ibaraKI



調布航空宇宙センター

## 1 TOKI-SORA HPCシステム

SORA: Supercomputer for earth Observation, Rockets, and Aeronautics



FUJITSU PRIMEHPC FX1000  
FUJITSU Processor A64FX

理論演算性能: 19.4 PFLOPS  
(3.37 TFLOPS/ノード)  
総メモリ量: 180 TiB  
(1 CPU, 32 GiB/ノード)  
総ノード数: 5,760  
(48 コア/ノード)

HPCシステム(TOKI-SORA)は、JSS2から「SORA」の名称を継ぐ JSS3 の中核を担う計算機で、19PFLOPS を超える理論演算性能を持つスカラー型並列計算機です。

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

TRURI: Tukuba all-RoUnd Role Infrastructure



理論演算性能: 145 TFLOPS  
総メモリ量: 10.8 TiB  
総ノード数: 49 (36コア/ノード)

TST PRIMERGY RX2540 M5  
137 TFLOPS = 2.99 TFLOPS/ノード x 46 (36コア/ノード)  
8.62 TiB = 192 GiB/ノード x 46 (36コア/ノード), Quadro x1 基

TGP PRIMERGY CX2570 M5 \*水冷システム  
5.98 TFLOPS = 2.99 TFLOPS/ノード x 2 (36コア/ノード)  
768 GiB = 384 GiB/ノード x 2 (36コア/ノード), Tesla V100 x4 基

TLM PRIMERGY RX2540 M5  
2.99 TFLOPS = 2.99 TFLOPS/ノード x 1 (36コア/ノード)  
1.50 TiB = 1.50 TiB/ノード x 1 (36コア/ノード), Quadro x1 基

## TOKI-TLI 筑波ログインシステム

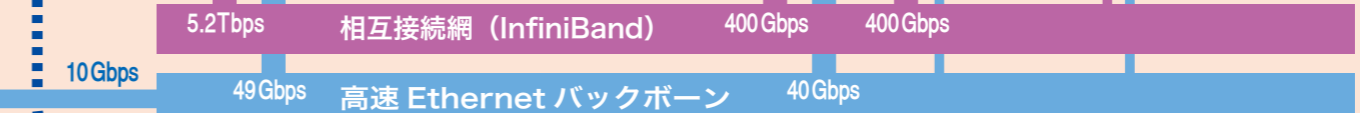
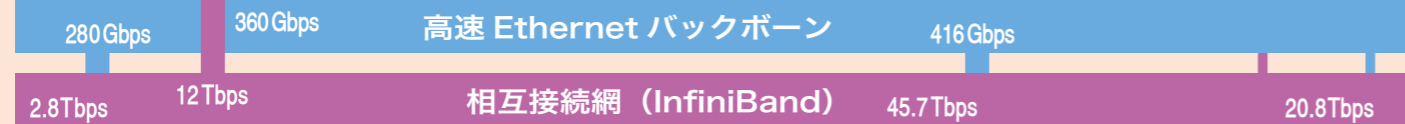
TLI: Tukuba LogIn system

PRIMERGY RX2540 M5 x 2ノード (36 コア/ノード)  
5.98 TFLOPS = 2.99 TFLOPS/ノード x 2 (36コア/ノード)  
768 GiB = 384 GiB/ノード x 2 (36コア/ノード), Tesla V100 x1 基

## TOKI-TFS 筑波ファイルシステム

TFS: Tukuba File System  
ファイルシステム: FEFS  
総実効容量: 0.4 PB

筑波運用管理システム



80 Gbps

## 2 TOKI-RURI 汎用システム

RURI: all-RoUnd Role Infrastructure



汎用システム (TOKI-RURI) は、大容量メモリを搭載した計算機、GPU を搭載した計算機など、ユーザの様々な計算のニーズへの対応を可能とするようなシステム構成となっています。

理論演算性能: 1.24 PFLOPS  
総メモリ量: 104 TiB  
総ノード数: 416 (36コア/ノード)

ST: STandard  
PRIMERGY RX2540 M5  
1,121 TFLOPS = 2.99 TFLOPS/ノード x 375 (36 コア/ノード)  
70 TiB = 192 GiB/ノード x 375 (36 コア/ノード), Quadro x1 基

GP: GPgpu \*水冷システム  
PRIMERGY CX2570 M5  
95.6 TFLOPS = 2.99 TFLOPS/ノード x 32 (36 コア/ノード)  
12.0 TiB = 384 GiB/ノード x 32 (36 コア/ノード), Tesla V100 x4 基

XM: eXtra large Memory  
PRIMERGY RX2540 M5  
5.98 TFLOPS = 2.99 TFLOPS/ノード x 2 (36 コア/ノード)  
12.0 TiB = DCPMM 6.00 TiB/ノード x 2 (36 コア/ノード), Quadro x1 基

LM: Large Memory  
PRIMERGY RX2540 M5  
20.9 TFLOPS = 2.99 TFLOPS/ノード x 7 (36 コア/ノード)  
10.5 TiB = DCPMM 1.50 TiB/ノード x 7 (36 コア/ノード), Quadro x1 基

### 水冷式の計算機

TOKI-SORA は高密度で発生する熱を効率的に取り除くために、水冷式が採用されています。



CMU (CPU Memory Unit)

## 【アーカイバ基盤】 J-SPACE

### 5 J-SPACE

J-SPACE: Jaxa's Storage Platform for Archiving, Computing, and Exploring



ディスクキャッシュ容量: 3 PB  
テープ容量: 70 PB



## 3 TOKI-LI ログインシステム

LI: LogIn system

PRIMERGY RX2540 M5 x 最大14ノード (36コア/ノード)  
41.8 TFLOPS = 2.99 TFLOPS/ノード x 14 (36コア/ノード)  
5.37 TiB = 384 GiB/ノード x 14 (36コア/ノード), Quadro x1 基

## 4 TOKI-FS ファイルシステム

FS: File System



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



調布航空宇宙センター スーパーコンピュータ棟

2 YouTubeでJSS3のシステム紹介動画をご覧ください。





# 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」、問題を解決する「解き」のイメージに加え、システムが東京と茨城に設置されていることから来ています。

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、多くの人々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。

### TOKI-RURIの各種ノード

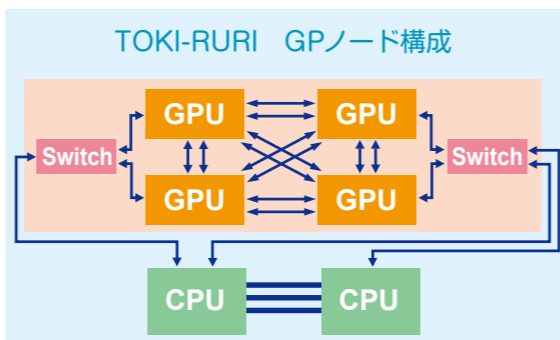
STノード	Standard	375ノード
	通常のプログラムの計算	
GPノード	GPgpu	32ノード
	AIなどの特殊な計算	
XMノード	eXtra large Memory	2ノード
	特に大きなメモリーを必要とする計算	
LMノード	Large Memory	7ノード
	大きなメモリーを必要とする計算	

## 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、そのノードが調布事業所のTOKI-RURIには32ノード、筑波事業所のTOKI-TRURIには2ノード用意されています。



# 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

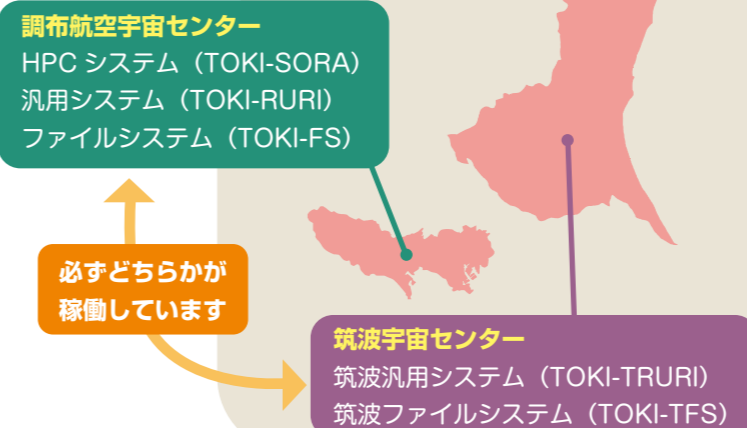
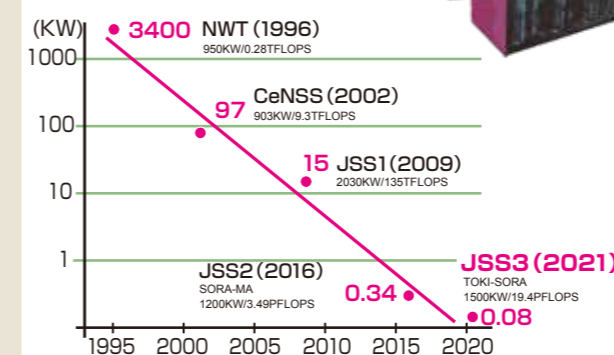
スパコンの運用にはいくつかの解決すべき課題がありますが、問題解消のために製造メーカーと連携して技術改善を行ったり、ユーザーにはスパコンで効率よく計算するためのプログラムのチューニング情報等を提供しています。

## 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。

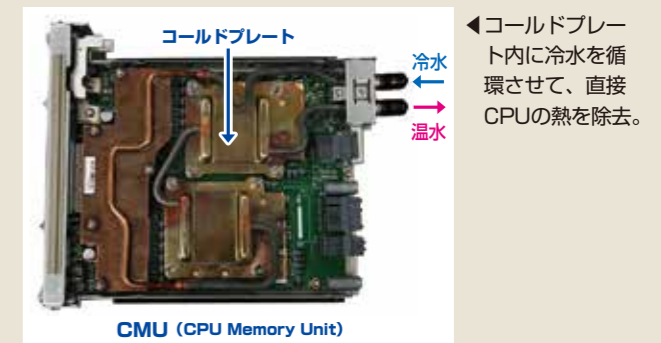
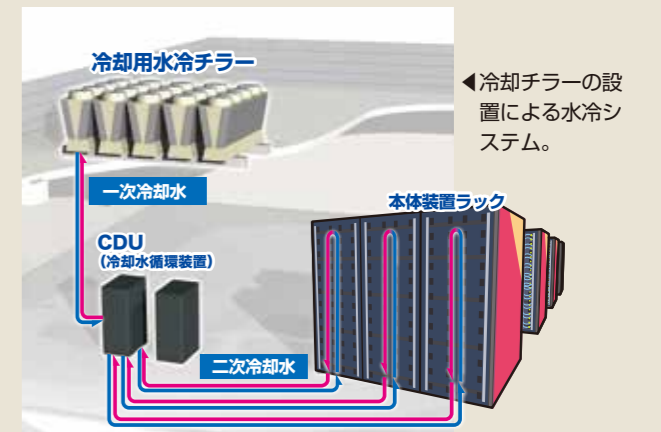
1TFLOPS当たりの電力量 (1時間あたりの電力量 ÷ 理論演算性能)	
JSS2	0.34kW
JSS3	0.08kW



## 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 無停止運用サービス

### 365日使えるスパコンシステム

スパコンを使って研究している研究者にとっては、できるだけ運用の保守点検等の停止期間に影響を受けることなく計算を続けられるシステムが理想的です。

JSS3には東京と筑波の拠点それぞれに汎用システムとファイルシステムが設置されているので、どちらかのシステムが運用を停止した場合でも研究を継続できるような計算機システムとなっています。



# パワフルな可視化システムを装備

## “可視化”の重要性

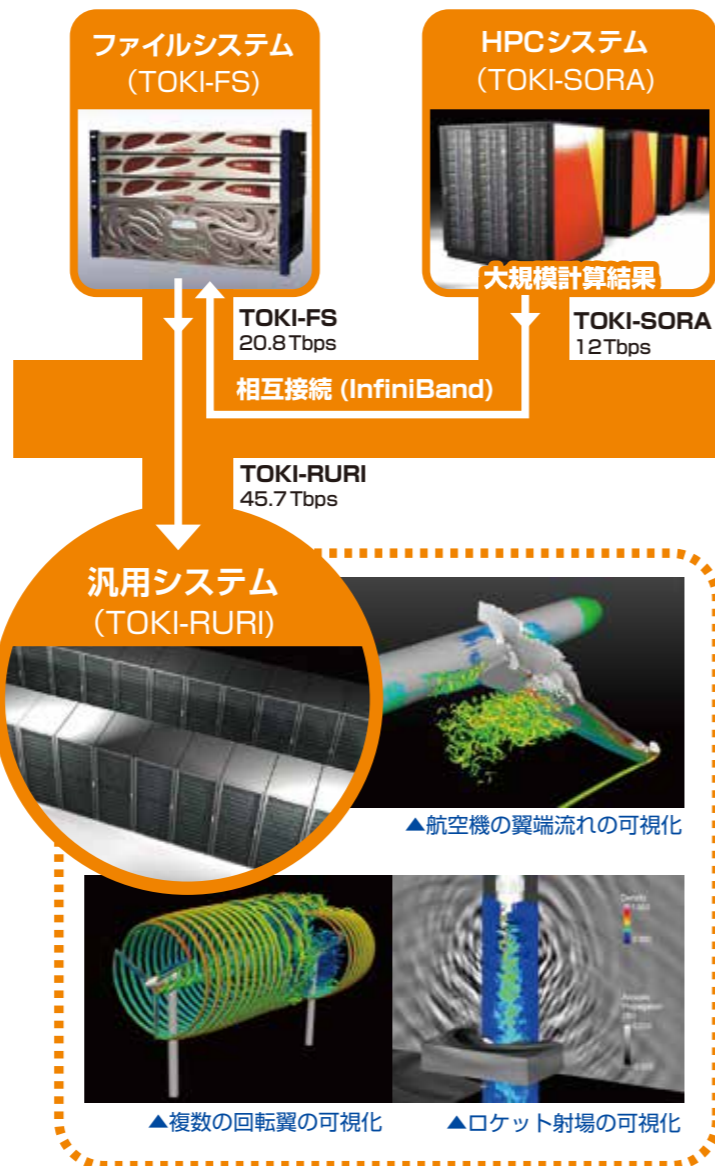
スパコンで計算された数値シミュレーション結果はコンピュータの中に数値データとして存在するだけで、そのままでは人間が理解できません。そのデータを「グラフにする」「画像に表示する」「アニメーションにする」など、人間が理解できる形にする技術を「可視化」と呼びます。可視化は、研究開発を進める上で欠かせない技術となっています。

## 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どんどん大きくなり、その大規模な計算結果を可視化する計算機の重要性が高まっています。

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。

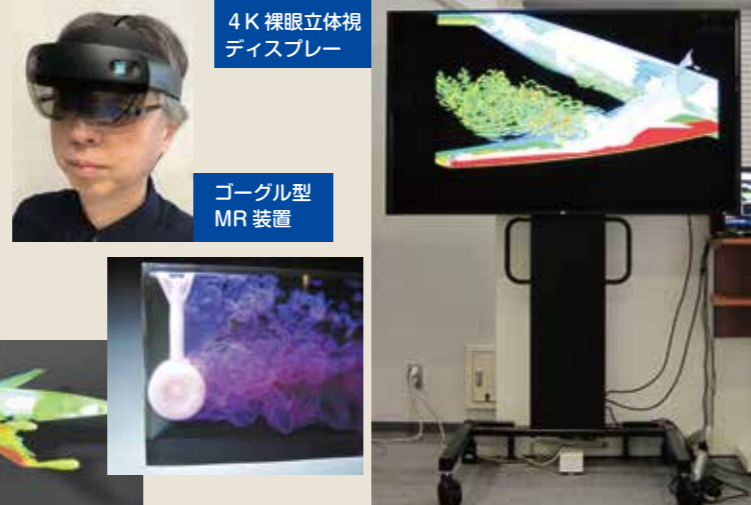


## 多様化する3次元可視化デバイス (立体画像出力装置の利用)

### 2次元の画像から3次元の立体画像へ

グラフィックモニターに2次元の画像を出力するのが可視化技術の中心でしたが、可視化デバイスの進化により3次元立体画像でのデータ検証ができるようになってきています。

スパコン活用課可視化チームは高解像度の裸眼立体視ディスプレイをはじめ、3Dプリンタの活用、ゴーグル型MR装置を用意し、新時代の可視化技術を準備しています。



# 大規模ストレージ J-SPACE で膨大なデータを保存

## データを保存する方式を選ぶ

電子データを保存する方法は幾種類もあり、データの使い方の仕方、どのくらいの期間保存するのかによって記録方式を選択できるのが望ましいシステムと言えます。電気を使って記録するメモリーは書き込み、読み出しが速く、データを頻りに利用する場合には適していますが、電源がなくなると消失してしまうこと、大量のデータを保存できない等で、膨大なデータの長期保存には向いていません。JSS3には重要な計算資産を長い期間保存しておく J-SPACE というアーカイバ基盤が用意されています。



## 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使用しています。磁気テープには大量データの長期保存に適した特徴があります。媒体の劣化が殆どなく安定している、普段は電力を必要とせず省電力である、ハードディスクドライブと比べ部品が少ない分故障が少ない、オフサイト(遠隔地)保管が容易である、などです。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でも需要が増えています。磁気テープは「古くて新しい先端メディア」なのです。

## 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、大量の磁気テープの管理と、迅速な読み書きです。J-SPACEはテープ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」、「文書保管庫」です。

イメージとしては、頻りに利用される本(データ)を納める棚、しばらく読まないけれど重要な本を収める棚、ながらく利用はないが今後も保管する価値のある本を納める棚...のように、使用頻度や重要度によって分類されている書庫といえます。また、蔵書カードのような目録の維持管理やユーザーへのサービス窓口の機能も備えています。

図書館全体の運営・管理を行います。蔵書(データ)の管理・保守やユーザーの利用窓口も行います。

新着図書や特集企画の棚など、用途によって異なる棚に蔵書が収められています。



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

J-SPACEでは、テープとその中のデータに関する情報は一元管理されていて、テープのラックへの保管やテープ・ドライブへの装填・取り出しはロボットが指示に従って行います。

▲ロボットが上下、左右に動いて、カートリッジを出し入れします。

雑誌など、頻りに参照・追加・更新される本(データ)は取り出しやすい棚にあります。

必要な時に迅速・確実に取り出せるよう、分類(用途)や年代などに従って分類・収納されています。

## J-SPACEのイメージ





# スパコンのことをもっと知りたいです！

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。



そらくん るりちゃん

いらっしやい  
ですよ！



**スパッコ**  
けいさんき  
「鶏算喜」という  
計算がとても  
得意な  
にわとり。

私がなんでも  
紹介しましょう



**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。



調布航空宇宙センター スーパーコンピュータ棟

## 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パートナー (Partner) は効率よくスパコンを運用することで、  
優秀な研究者の要求に最大限応えています。その成果が航空宇宙分野の開発に活か  
され、私たちの生活が豊かになるのです。

## 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機械なので  
すが、規模が大きいのので運用するには多くの仕事が必要です。まず、ユーザーの登  
録とどの位のサイズの計算をするかの管理、実際に計算するプログラムの順番の制  
御、計算結果の記録。もちろんスパコン本体のメンテナンス、温度管理、電力管理  
など。当然、次期スパコン導入の構想も考えないとなりません。

ここではその仕事を担っている SCO (SuperComputer Office) の仕事を紹  
介しましょう。

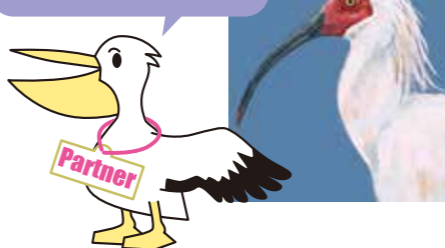


## ペリカンパートナーの仕事の分担

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、SCO の活動とすべての  
マネージメント担当
- Bob** [サブマネージャー] チーフマネージャーのサポートおよび契約等の事務  
とりまとめ担当
- Connie** [事務処理サポート] SCO の活動に必要な事務処理担当
- Donna** [QMS 事務局] QMS (品質管理システム) の事務局の担当
- Edward** [ツールサポート] センターツール担当
- Frank** [システムアプリケーションサポート] JSS3 のアプリケーション対応担当
- Grace** [新ネットワークサポート] 新ネットワークの構築担当
- Henry** [運用チーフオペレータ] JSS3 運用の全般のオペレーション担当
- Ichiro** [運用管理オペレータ] JSS3 運用の業務アプリ開発兼サーバ管理担当
- Jane** [ユーザ管理オペレータ] JSS3 ユーザ / 事業コードの登録、管理担当
- Kevin** [可視化ツールオペレータ] 可視化アプリケーションの管理担当
- Lucy** [QA オペレータ] 運用に関するユーザからの質問、返答管理担当
- Mark** [可視化新デバイスサポート] 可視化分野の新デバイス活用担当
- Nick** [次期システムサポート] 次期システムの調査及び構成検討担当
- Oustin** [可視化、広報サポート] 解析結果の可視化とスパコンの広報活動担当

私たちがスパコンを  
運用しています！



「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  
達がパートナーとして、力を合わせてスパコン  
運用しているようなイメージをしました。

# 実験が困難な現象の解明に活用されています。

航空機、宇宙機を開発するためには、自然物理現象の理解が必要です。

自然物理現象の解明は非常に難しい研究テーマですが、航空機、宇宙機の開発には欠かせません。  
スパコンはその研究を行う重要なツールとして活用されています。

スパコンは研究  
開発で、どのよう  
に使われているん  
ですか？



**宇宙航空分野で、実験が  
困難な現象を計算で解き  
明かします。**

宇宙航空分野の研究開発では、いろい  
ろな物理現象を解明する必要があります。地  
上で実験できる現象は、人工的に空気の流  
れを発生させる風洞実験などで確かめられ  
ますが、高い空を飛行する超音速状態や宇  
宙での無重力状態など地上で再現が難しい  
現象、また極々小さい現象などは実験や観  
測ができません。そこでスーパーコンピュ  
ータ内に数値的な仮想実験装置を作り、その中  
で宇宙機や航空機を飛ばす数値シミュレ  
ーションを行って、飛行中の物理現象を研究  
しています。これで、実験設備がなくても、  
いろいろな研究開発を進めることができ  
るのです。

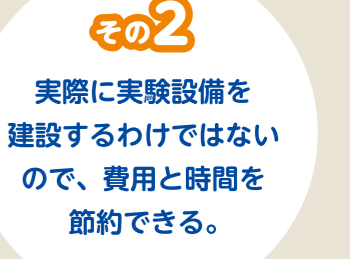
**スパコン3つの利点**

**その1**  
観測が難しい宇宙空間や、  
実験が困難な超音速飛行  
などのシミュレ  
ーションが行える。



開発中の超音速機を  
飛ばしたらどうなるか  
というシミュレーション  
も行える！

**その2**  
実際に実験設備を  
建設するわけではない  
ので、費用と時間を  
節約できる。

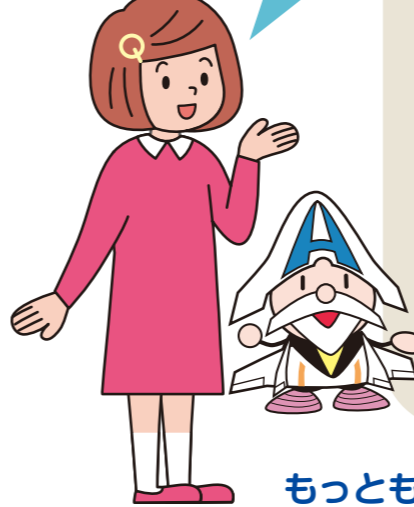


**その3**  
実験対象の機体の形状や、  
空間の条件を変更して、  
何回でも仮想実験  
ができる。



ロケット  
エンジン  
内部の解析  
も行える！

計算結果は  
どうやって確かめ  
るんですか？



**風洞実験で検証し、計算結果の信頼性を  
向上させます。**

計算で求めた結果が正しいかどうかは、  
現実の現象や、実験の計測値と比較し検証  
します。現在 JAXA では、数値シミュレ  
ーション技術の研究と風洞実験を並行して進  
め、風洞実験の計測値と計算結果を比較し  
ています。その検証結果を活かして、より  
精度の高い数値シミュレーション技術の開  
発を目指しています。

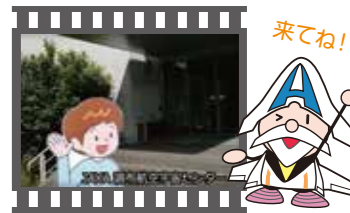
風洞実験をしながら  
数値シミュレーション  
を同時に行って結果を  
検証していますよ。



## 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」を公開しています。

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





# 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。

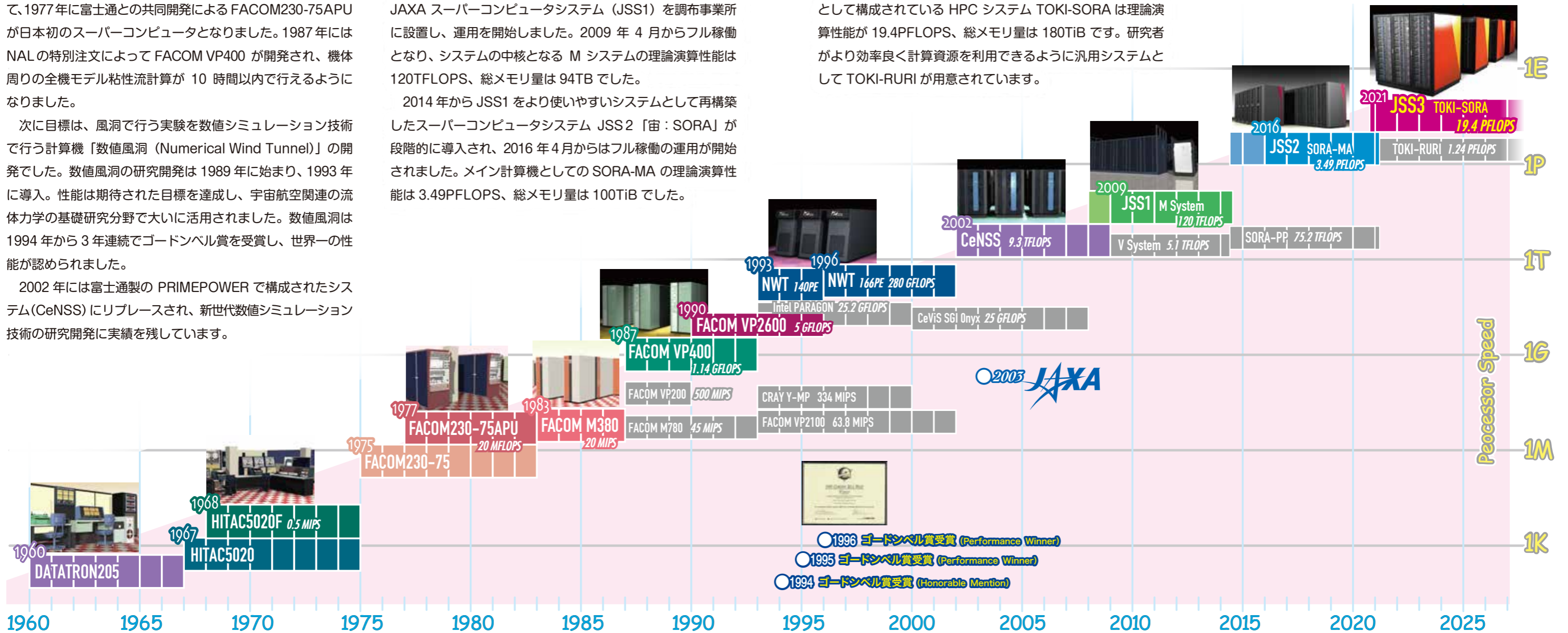
次に目標は、風洞で行う実験を数値シミュレーション技術で行う計算機「数値風洞(Numerical Wind Tunnel)」の開発でした。数値風洞の研究開発は1989年に始まり、1993年に導入。性能は期待された目標を達成し、宇宙航空関連の流体力学の基礎研究分野で大いに活用されました。数値風洞は1994年から3年連続でゴードンベル賞を受賞し、世界一の性能が認められました。

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>Transonic Buffet</b> 航空機の高迎角剥離流の非定常解析  2016	<b>Aircraft</b> 航空機解析コア技術開発  2018
--	--	--	---	--	--	---	--	---	--	---	--



# 航空機の機体設計における利用

## 航空機解析コア技術開発

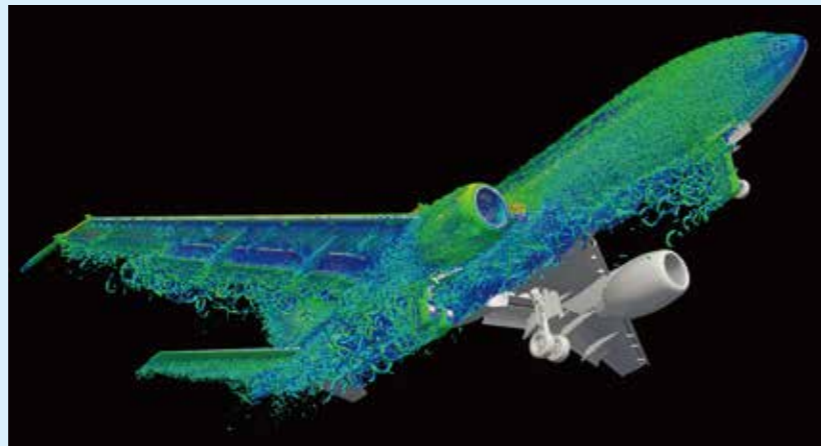
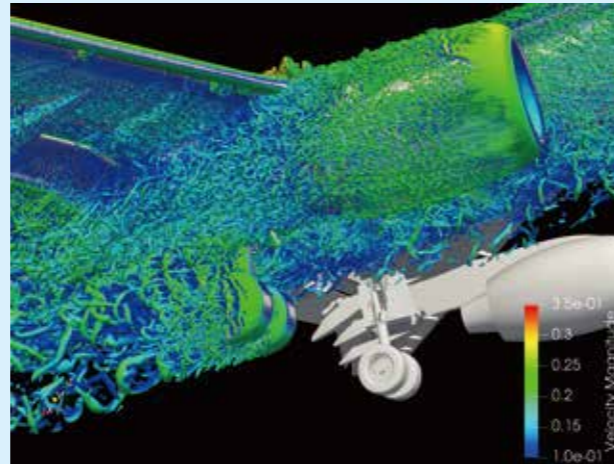
航空機の開発には、実機フライト環境を忠実に再現したうえで、設計や運用における重要な課題を解決し、格段の効率化、高性能化、安全性向上を実現するコア技術の確立が必要です。

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した。

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示しています。

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)

## 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を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。

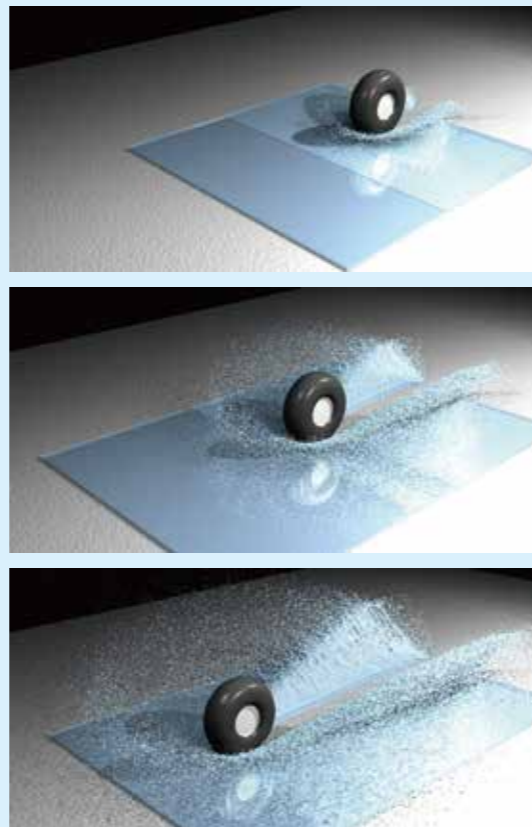
メタボール技法とレイトレーシング描画を使った液体表現とアニメーションにより、水が跳ねる様子が可視化されています。



「航空機タイヤ、水跳ね予測」のアニメーションをご覧いただけます。



粒子法を用いた水跳ねのシミュレーション結果▶



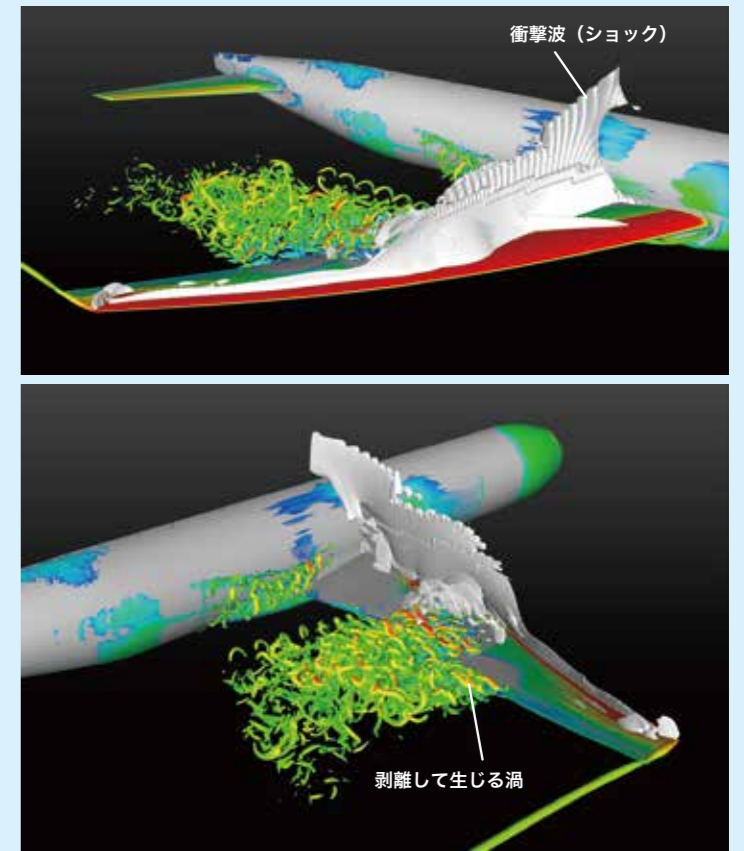
## 航空機の高迎角剥離流

航空機は衝撃波が発生するほど速い速度で飛行している時に迎角を大きく上げると、主翼上の衝撃波の背後で流れが剥離します。それにより衝撃波が振動を起し、主翼にかかる力が大きく変化するので機体に振動が発生します。これはパフエットと呼ばれる現象で、さらに速度を上げていくと失速し、墜落する可能性があります。

通常は、このような大きな迎角で飛行しませんが、航空機を開発する際には、どこまで迎角を上げることができるのか、予め知っておく必要があります。



「航空機の高迎角剥離流の非定常解析」を解説したWebサイトをご覧ください。



▲Q値による等値面とショックの表示 (色はマッハ数)

## 地面付近での4ロータードローン周りの空力解析



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

▲4ロータードローン周りの渦の分布 (ボリュームレンダリング表示)

最近ではドローンの大型化が進んでおり、さらに複数名搭載のマルチコプタの開発も進んでいます。しかしながら、互いに回転方向が異なる隣接する複数ロータが誘起する流れ場は複雑であり、特に地面近くで飛行する際は地面効果もこれまでのシングルロータのものとは異なると考えられます。

可変ピッチ制御のクワッドロータのドローンをベースに計算モデルを作成しました。地面からの距離が変化するに従い、ドローンの性能変化と共に、ドローン周りの流れ場と地面に沿う流れ場の様子を解析しました。マルチコプタの地面効果はシングルロータと比べて、複雑な変化をすることがわかりました。



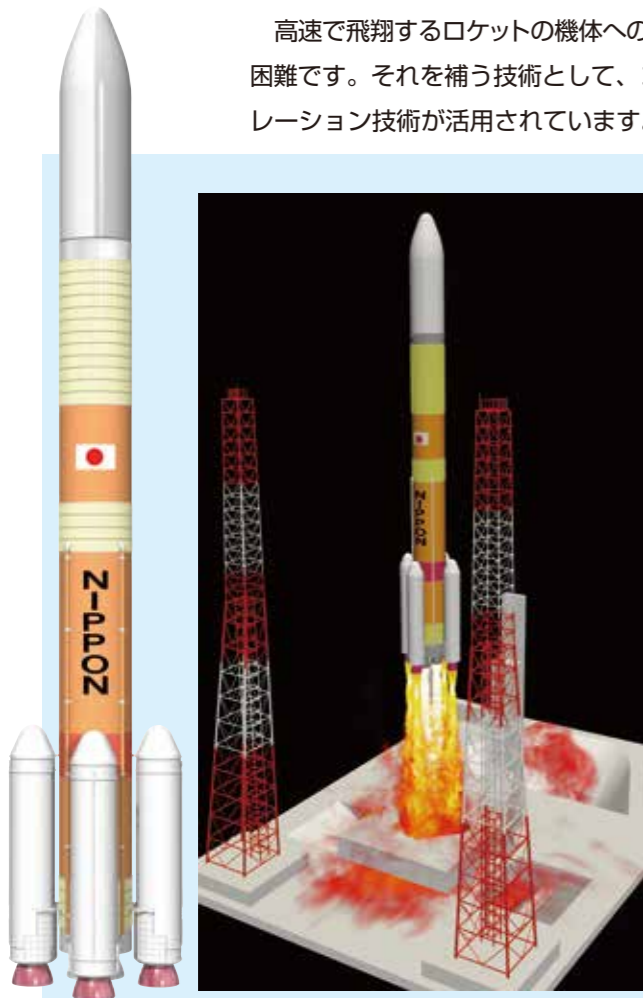
「回転翼機の空力解析」を解説したWebサイトをご覧ください。



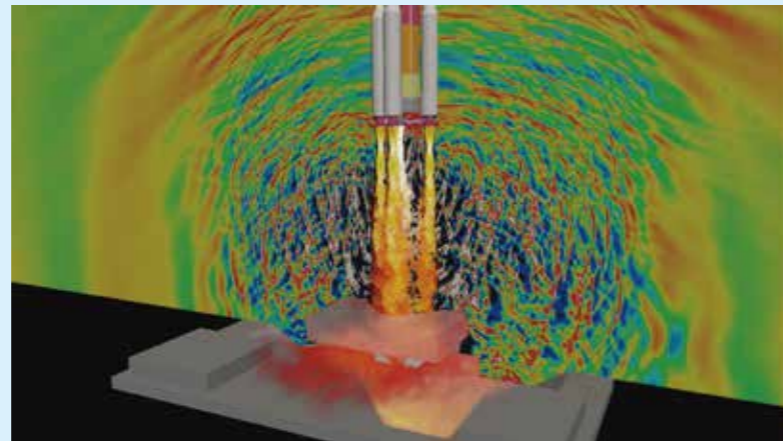


# ロケットシステムの設計における利用

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。



## H3ロケットの音響解析



日本の次期基幹ロケットとなる 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。

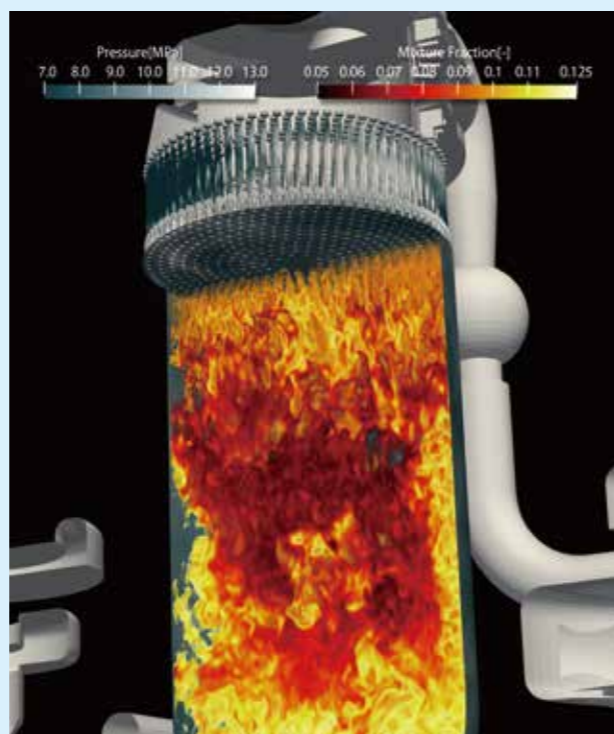
メインの液体燃料エンジン2基と、固体ブースター4基から噴射された排気ジェットをボリュームレンダリングの技法で可視化しています。また、音響波を圧力分布で表示しており、その影響が発射後に上昇を続けるロケット本体にまで届いている様子がわかります。

## 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。



▲フルスケール燃焼器 LES の結果

研開部門 / 第三研究ユニット (JEDI センター)



「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 サイトをご覧ください。

# 衛星データの高速処理における利用

## GOSAT 10 年分の観測データの再処理 (アルゴリズムアップグレード毎に実施)

▶温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT) は、宇宙から主要な温室効果ガスを観測する人工衛星です。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、国立環境研究所 (NIES)、環境省 (MOE) と共同で GOSAT プロジェクトを推進しています。

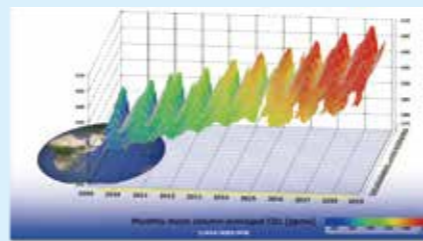


図 1: GOSAT で観測された緯度ごとの平均 CO<sub>2</sub> 濃度 (2009 年 -2019 年)

10 年に渡る GOSAT の地球全体の観測データを見ると、CO<sub>2</sub> 濃度が年々増加して、400 ppm を超えていることがわかります。北半球の季節変動が大きいことは、夏の CO<sub>2</sub> 排出量が多く、植物の光合成が強いことを示しています。

入力データ	83TB (12 年間)
出力データ	35TB (350 万プロダクト)
計算コア数	360 コア
実行時間	30 日

表 1: 計算資源

赤い丸のところを下層部の濃度が高いところと、青い丸のところを上層部の濃度が高いところと推定されます。赤い丸が排出源で風に乗って青い丸のところに行くと推定されます。

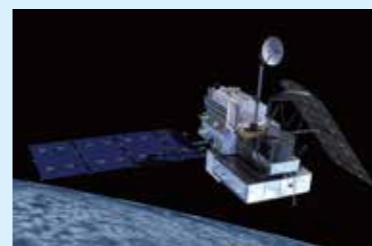


図 2: GOSAT データから導出したメタン (CH<sub>4</sub>) のカラム濃度の対流圏上層部と下層部の差分 (2019 年、カリフォルニア州)



図 3: GOSAT データから導出した二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) のカラム濃度の対流圏上層部と下層部の差分 (2019 年、カリフォルニア州)

## GPM データを含む地球観測衛星データにおける数値気象予報モデルのデータ同化手法の開発



◀全球降水観測 (GPM) 主衛星は 2014 年 2 月 28 日に打ち上げられました。GPM は、全世界の 90% の地域での雨の強さの観測と約 1 時間の分布を観測することができます。

この研究では、データ同化手法を用いて、GPM 全球降水マップ (GSMaP) データや GPM/DPR データ等の地球観測衛星データを数値天気予報モデルに同化する手法を開発します。衛星データ等をもとに、気象予報モデルによってシミュレーションされた大気状態を修正する手法を「データ同化」と呼び、それにより、気象予報精度を向上させています。

NEXRA (NICAM-LETKF JAXA Research Analysis) を可視化したホームページ「世界の気象リアルタイム」を 2018 年 11 月に公開しました。  
(<https://www.eorc.jaxa.jp/theme/NEXRA/index.htm>)

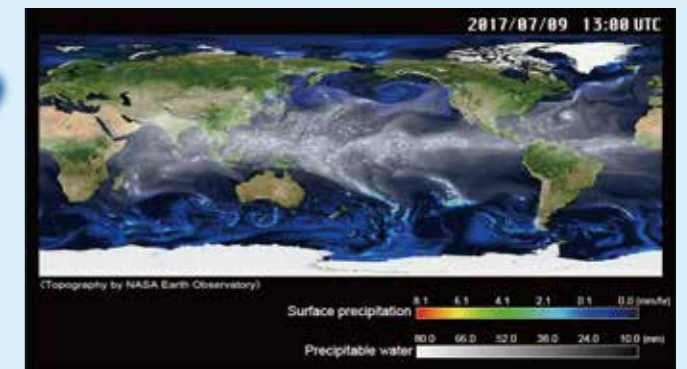


図 1: 数値モデルによって表現された 2017 年 7 月の気象場。降水量 (カラー mm hr<sup>-1</sup>) と大気中の水蒸気量 (白黒 mm)。

実行期間	5 年 (GPM 主衛星打上げ後)
入力データ	毎 6 時間あたり 約 100 GB (年間 142 TB)
出力データ	毎 6 時間あたり 約 58 GB (年間 83 TB)
計算コア数	480 コア
実行時間	毎 6 時間中 約 2 時間

表 1: 計算資源

Kotsuki S., Terasaki K., Kanemaru K., Satoh M., Kubota T. and Miyoshi T. (2019): Predictability of Record-Breaking Rainfall in Japan in July 2018: Ensemble Forecast Experiments with the Near-real-time Global Atmospheric Data Assimilation System NEXRA. SOLA, 15A, 1-7. doi: 10.2151/sola.15A-001



# スパコンの未来を考えてみよう！

## スパコンの計算速度がもっと速くなったら？（Exa Flops: 1秒間に $10^{18}$ 回演算する性能）

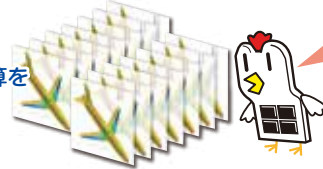
そらくん：スパコンの計算性能がどんどん速くなると、未来はどうなりますか？

ドクターエアロ：スパコンの処理速度が世界的にもエクサフロップスという計算処理速度に近づきつつあり、それによって航空宇宙開発分野でも大きな成果が期待されているんだよ。例えば



### <航空分野の開発を Exa Flops のスパコンで行なった場合>

レイノルズ平均を施した方程式 (RANS) を用いた 1 億点の格子点数の計算を 500 万ケース計算するのにかかる日数は 25 日。  
(新型航空機的设计に必要な計算量)



TOKI-SORAだと約60倍の1500日(約4年と3ヶ月)かかりますよお。

### <宇宙分野の開発を Exa Flops のスパコンで行なった場合>

格子点数 30 億点のロケット射場の音響周波数の最適化計算を 160 ケース計算するのにかかる日数は 30 日。  
(ロケット射場の设计に必要な計算量)



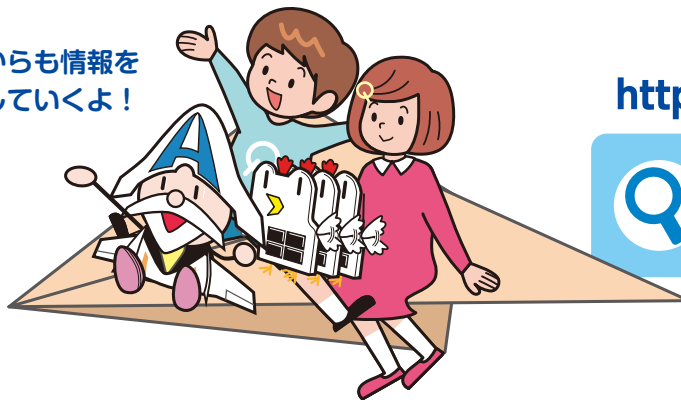
TOKI-SORAだと約60倍の1800日(約5年)もかかりますよお。

そらくん：それらの計算が実現すると、どんどん設計が進みますね！

ドクターエアロ：いやいや、実はそんなに単純じゃないんだよ。計算で開発出来る範囲には限りがあるし、計算の速度もエクサフロップスですら、全然足りないんだ。では、もっとスパコンを速くできるかと言うと、現実ではスパコンの速度の向上は限界点に達していると言われているしね。これからは、革新的なアイデアのコンピュータや計算方法が必要とされているんだよ。



これからも情報を発信していくよ！



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



JSS 公開ページをご覧ください。



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