

# アドバンス・シミュレーション 第5回 ・セミナー 2022

2022年10月28日(金) 離

## プログラム

1. アドバンスソフト株式会社のご紹介 主催者あいさつ ..... 1
- 招待講演  
2. 「航空機実機実飛行条件における空力特性評価技術の実現に向けて」 ..... 3  
国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構  
准教授 高木 亮治 様
3. アドバンスソフトからの情報提供 ..... 29

## 講演概要

### 「航空機実機実飛行条件における空力特性評価技術の実現に向けて」

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構  
准教授 高木 亮治 様

数値流体力学 (CFD) はものづくりにおける重要な設計・開発ツールとして活用されていますが、複雑な機器形状に対する計算格子作成は依然として困難な状況であります。また実機形状をより忠実に再現する、第一原理的なモデルを用いた高精度解析を実施するためには計算格子も大規模となり、その作成はますます困難となっています。

本講演では、大規模計算格子の自動生成を実現すべく研究開発を進めている、階層型等間隔直交格子法と独自の埋め込み境界法を組み合わせた手法について紹介すると同時に、基礎的な形状での検証結果、更にはスーパーコンピュータ「富岳」を利用した解析結果について紹介します。



アドバンスソフト株式会社 セミナー事務局

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目3番地 新お茶の水ビルディング 17階西

TEL: 03-6826-3971 FAX: 03-5283-6580

URL: <http://www.advancesoft.jp/> E-mail: [office@advancesoft.jp](mailto:office@advancesoft.jp)

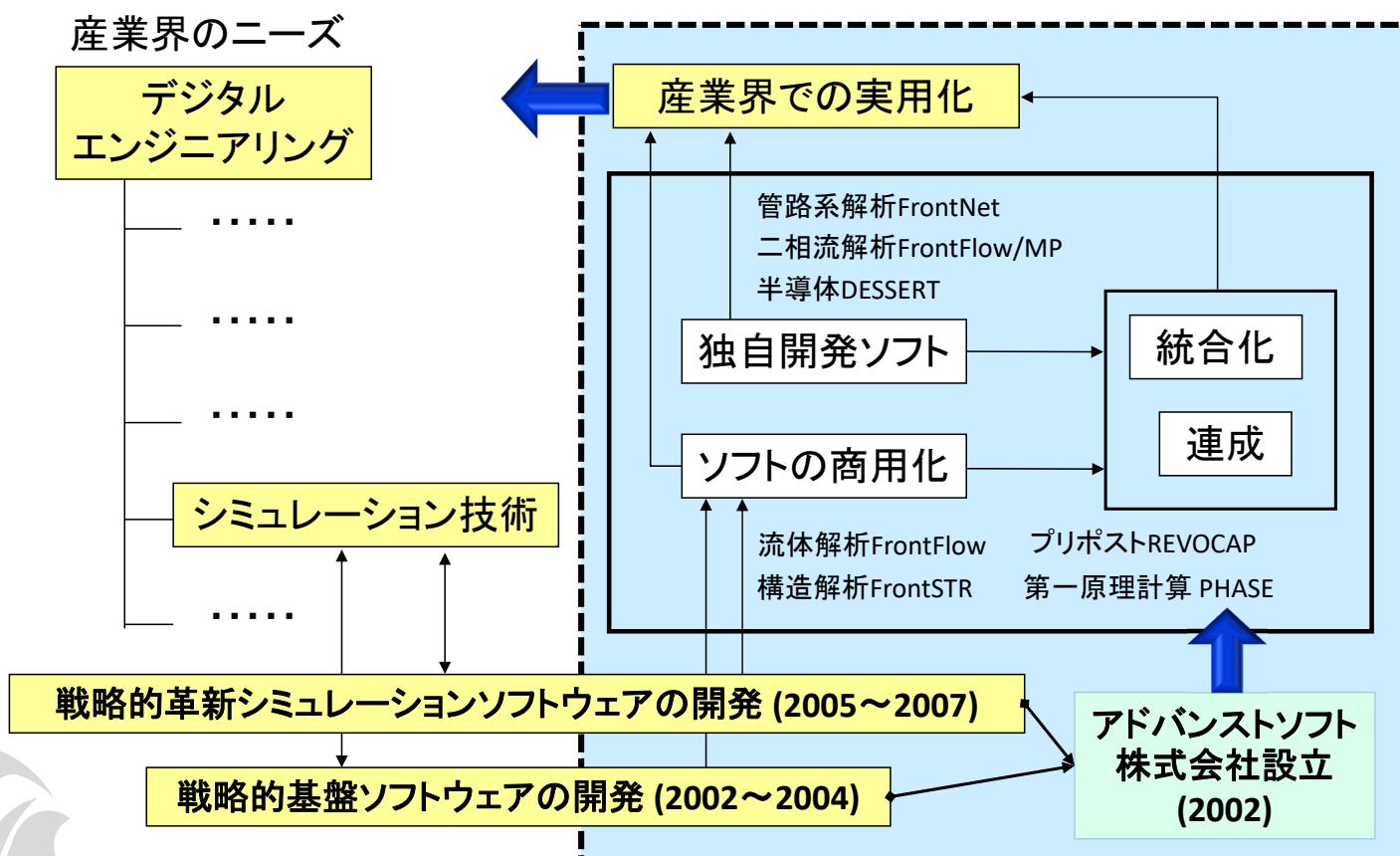


# アドバンスソフト株式会社のご紹介

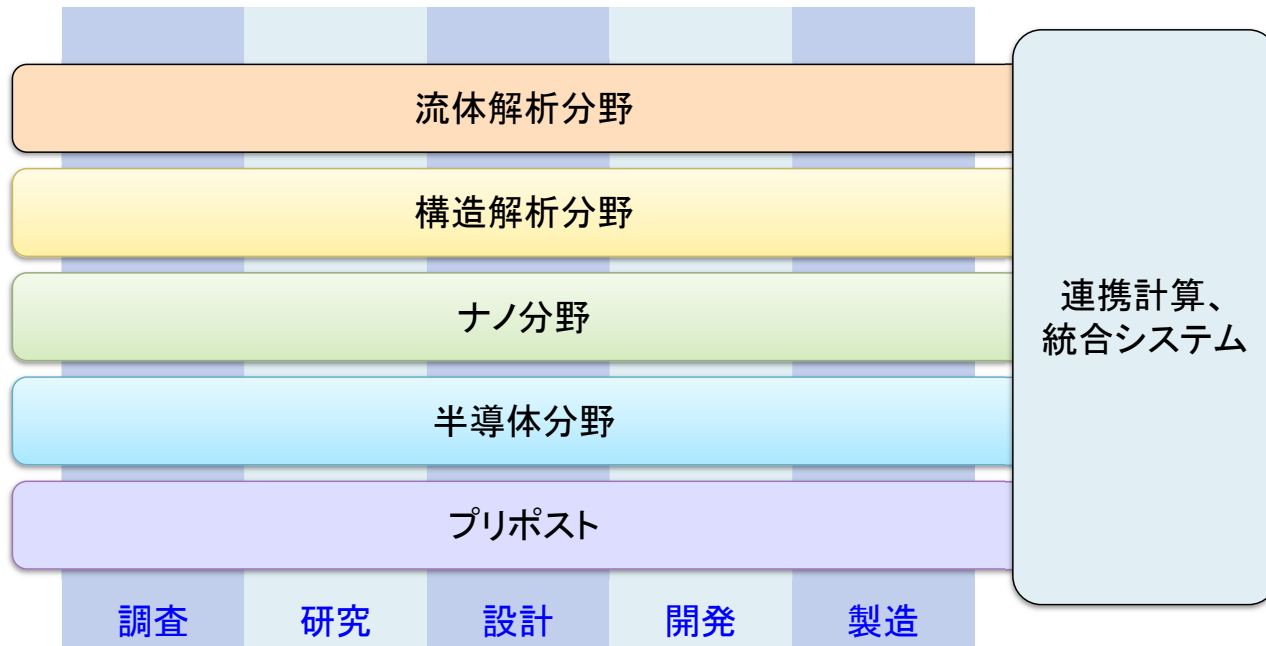
第5回 アドバンス・シミュレーション・セミナー  
(宇宙航空研究開発機構 高木 亮治 准教授 ご講演回)

2022年10月28日 (金) 開催  
アドバンスソフト株式会社

## アドバンスソフトとは



# 事業分野



産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、科学技術計算によるソリューションをご提供します。

# ソフトウェアご紹介

<p>第一原理計算ソフトウェア <b>Advance/PHASE</b></p> <p>密度汎関数理論に基づき、物質の性質を原子・分子レベルから解析する第一原理計算ソフトウェアです。</p> <p><b>ナノ材料</b> GUI 付属</p>	<p>ナノ材料解析統合 GUI <b>Advance/NanoLabo</b></p> <p>材料解析ソフトウェア QuantumESPRESSO と LAMMPS に対応した統合 GUI です。</p> <p><b>ナノ材料</b> プリポスト</p>	<p>流体解析ソフトウェア <b>Advance/FrontFlow/red</b></p> <p>非圧縮性から圧縮性流れまで、広範囲で複雑な流れに対応した汎用 3次元流体解析ソフトウェアです。</p> <p><b>流体</b></p>	<p>圧縮性流体解析ソルバー <b>Advance/FOCUS-i</b></p> <p>非構造格子に対応した圧縮性流体解析ソルバーです。特に超音速や超音速の流れに適しており、高い並列化効率で計算出来ます。</p> <p><b>流体</b></p>
<p>大規模 3次元 TCAD システム <b>Advance/TCAD</b></p> <p>超微細半導体デバイスからパワーデバイスまで、高度な機能と使いやすい GUI を備えた 3次元 TCAD システムです。</p> <p><b>半導体デバイス</b> GUI 付属</p>	<p>ニューラルネットワーク分子動力学システム <b>Advance/NeuralMD</b></p> <p>Neural Network Potential に基づいた分子動力学のソフトウェアです。第一原理計算の結果を教師データとして分子力場を作成します。</p> <p><b>ナノ材料</b> AI・機械学習</p>	<p>気液二相解析ソフトウェア <b>Advance/FrontFlow/MP</b></p> <p>沸騰と凝縮を伴う気液二相流の流動特性や伝熱特性を 3次元で解析するソフトウェアです。</p> <p><b>流体</b></p>	<p>管路系流体過渡解析ソフトウェア <b>Advance/FrontNet</b></p> <p>配管や流体機器から成る管路系内流体に対する 1次元過渡解析の実用的なソフトウェアです。</p> <p><b>流体</b> GUI 付属</p>
<p>大規模電磁波解析ソフトウェア <b>Advance/ParallelWave</b></p> <p>マクスウェル方程式を FDTD 法で 3次元的に解く電磁波解析ソフトウェアです。アンテナの電波解析から光の干渉や回折を考慮した光波解析まで幅広く適用できます。</p> <p><b>光波・電磁波</b></p>	<p>構造解析ソフトウェア <b>Advance/FrontSTR</b></p> <p>固体の変形や熱伝導を、有限要素法を用いた 3次元で解析するソフトウェアです。</p> <p><b>構造</b></p>	<p>大気拡散影響予測システム <b>Advance/Emerg</b></p> <p>大気拡散物質の挙動予測と影響評価のためのソフトウェアシステムです。</p> <p><b>流体</b> GUI 付属</p>	<p>深層学習用ツール <b>Advance/iMacle</b></p> <p>機械学習のうち、ニューラルネットワークによる深層学習に特化、最小限度の機能に絞り込んだ比較的軽いツールです。</p> <p><b>AI・機械学習</b></p>
<p>汎用プリポストプロセッサ <b>Advance/REVOCAP</b></p> <p>解析の一連の流れをスムーズに行う事を実現した汎用プリポストプロセッサです。</p> <p><b>プリポスト</b></p>	<p>音響解析ソフトウェア <b>Advance/FrontNoise</b></p> <p>環境騒音、機器内の共振等における音場を有限要素法を用いた 3次元で解析するソフトウェアです。</p> <p><b>音響</b></p>	<p>自社による開発（国プロ含む） 開発チームによる質の高いサポートサービス カスタマイズや機能追加も応相談 並列数無制限（追加料金なし）</p>	



# 航空機実機実飛行条件 における空力特性評価 技術の実現に向けて

高木亮治

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所

1

## 内容

- 自己紹介
- ものづくりにおける流体解析（数値シミュレーション）の立ち位置
- 航空機実機実飛行条件の空力解析
- FFVHC-ACE
- 「富岳」向け高速化チューニング
- まとめ

# 自己紹介

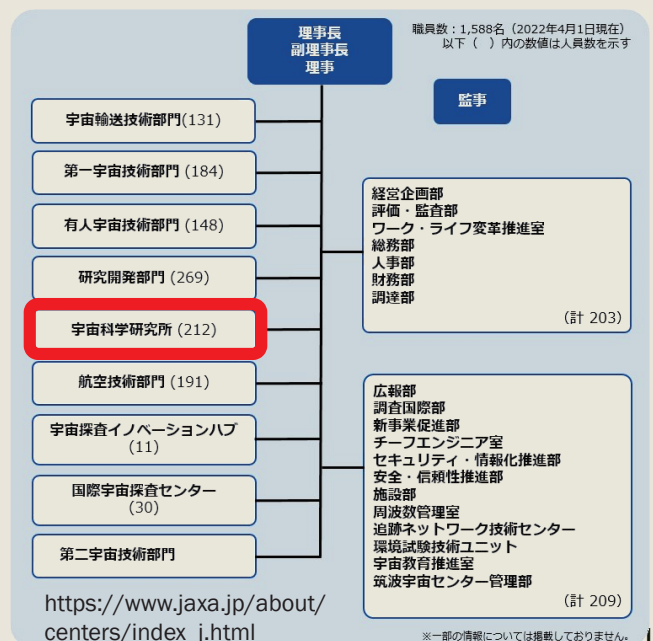
- 高木亮治
- 出身：岡山県
- 所属：宇宙航空研究開発機構
  - 宇宙科学研究所
    - 学際科学研究系
    - 科学衛星運用・データ利用ユニット
  - 研究開発部門 第三研究ユニット
  - セキュリティ・情報化推進部
  - 総合研究大学院大学物理化学研究科宇宙科学専攻
- 専門：圧縮性流体力学、高性能計算、（データ同化）
- 業務：
  - HPCを用いた流体解析技術に関する研究・開発
  - 科学衛星運用のための地上系システムの研究・開発
    - EDISON（工学データベース）、ISACS-DOC（異常監視・診断システム）、...



## 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

- JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency
- 2003年（H15）にISAS、NAL、NASDAが統合
- 職員数：1,588名（2022年4月1日現在）
- 本予算：約1,500億円

[https://www.jaxa.jp/about/org/index\\_j.html](https://www.jaxa.jp/about/org/index_j.html)





## ものづくり（航空宇宙分野）での役割

- 工業製品の設計・開発（・運用）
  - 信頼性向上、開発期間の短縮、コスト削減、先進的技術の開発、...
  - 数値シミュレーション技術は必須技術
- 流体の数値シミュレーション
  - 単純な問題から複雑な問題へ：形状的、現象的
  - 流体は本質的に非定常・非線形（マルチスケール）
    - 定常解析から非定常解析へ
    - 第一原理的な物理モデル：RANS → LES → DNS
  - 大規模解析の必要性
- 大規模解析が必要
  - High Performance Computing（HPC）技術の活用

# 大規模解析

- Capacity Computing : 小・中規模の多数計算
  - 設計としての重要性
- Capability Computing : 大規模な単一計算
  - 現象理解の重要性
- CapabilityからCapacity
  - 計算能力の向上とともに
- CapacityからSurrogate model
  - 機械学習で物理シミュレーションを代替
  - 設計・開発のみならず、新たに運用での利用

7

# 目指す世界

- Capability : 現象理解と新しいブレイクスルー
  - より複雑な現象の解明、定性的から定量的へ
- CapabilityからCapacityへ : 高度な解析の活用範囲の拡大
  - 「解析できる」+「大規模なパラスタ」= 設計に使える
  - 「解析できる」+「大規模なパラスタ」が「実時間より速くできる」= 運用に使える (予測シミュレーション)
- 機械学習・データ同化との連携 :
  - サロゲートモデルによる更なる高速化+データ同化による高精度化 = 運用に使える → デジタルツイン

課題解決(現象理解)

設計で利用

運用で利用

解析ができる

パラスタができる

パラスタが実時間より速くできる

最適化・データ同化・機械学習

開発の高度化/必要とする計算能力の増加/新たな技術

# 航空機実機実飛行条件の空力解析

「富岳」成果創出加速プログラム（東北大学、JAXA）



9

## 航空機実機実飛行条件の空力解析

- 複雑な乱流現象の高精度解析が必要⇒第一原理的解析
    - 流体のマルチスケール性 ( $Re$ 数)、非定常性が問題
      - 昆虫 < 模型飛行機 ~ 風洞模型 < 実機
      - 定常解析 → 非定常解析
- 河合@東北大
- 複雑な実機形状への対応 ⇒ 複雑形状への自動格子生成
    - 形状設計なのに形状変更数ヶ月
    - 2D翼→3D翼→翼胴→実機簡易形状（翼胴+尾翼+エンジンナセル）→実機詳細形状
  - 高速計算 ⇒ 計算機（富岳）向け高速化チューニング 今日の内容
    - 設計=最適解探索（パラスタ）
    - 各種データベースの構築（機体制御、...）
  - その他
    - 流体-構造連成（振動）
    - ...

## 実飛行条件 (=高 $R_e$ 数流れ) の解析 (1/2)

- 巡行状態 = 付着流れの (定常) 解析は設計に使えるレベル : RANS解析
  - 数億点規模の解析で設計要求に対応可能
  - 設計ツールとしては膨大なパラスタが課題 :
    - 設計探査 : 形状変更
    - 空力・加重DBの作成 : 数百万ケース
- 剥離を伴う流れの (非定常) 解析はまだまだ
  - 離着陸時の高揚力形態 ( $C_{Lmax}$  の予測)、遷音速バフエットなど。
  - LES解析など**第一原理的な解析**が必要。
    - $R_e = 10^6$  のLES解析 (自動車、翼など) は「京」で実用化
    - 壁近傍の境界層 (小さな渦) を詳細に解像することが必要  
→ Wall-resolved LES

11

## 実飛行条件 (=高 $R_e$ 数流れ) の解析 (2/2)

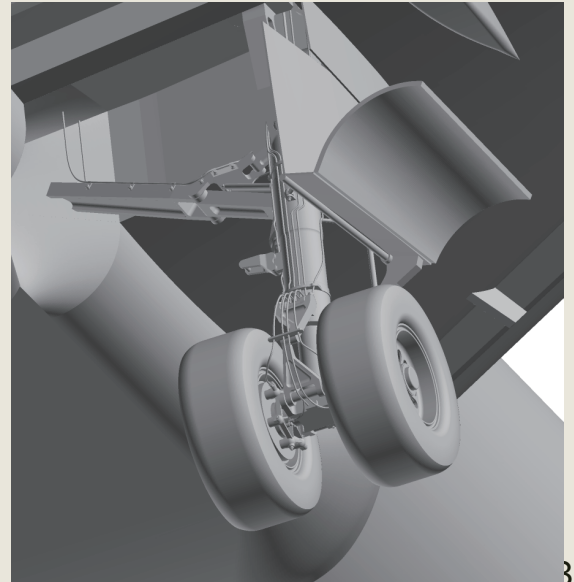
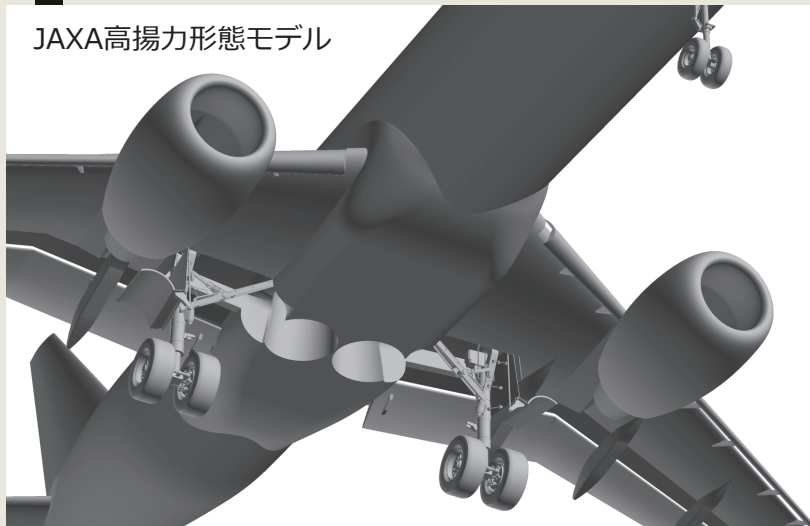
- Wall-Resolved LES : 格子点数が $R_e^{\frac{13}{7}}$  に比例
  - 「富岳」でも不可能 → LES壁モデルが必須
- Wall-Modeled LES : 格子点数が $R_e$  に比例
- WMLESの片翼形態 (AR=9.5) での予測
  - WRLESで陽解法を仮定すると、比は更に10倍

$R_e$	Wall-Resolved LES (陰解法仮定)		Wall-Modeled LES (陽解法仮定)		比
	格子点	ステップ数	格子点	ステップ数	
$2 \times 10^6$ 風洞模型	約2,500億	16万	約492億	60万	12
$1 \times 10^7$ SpaceJet	約7.3兆	667万	約2,000億	123万	172
$4 \times 10^7$ B777	約117兆	2,668万	約8,000億	246万	1,343

12

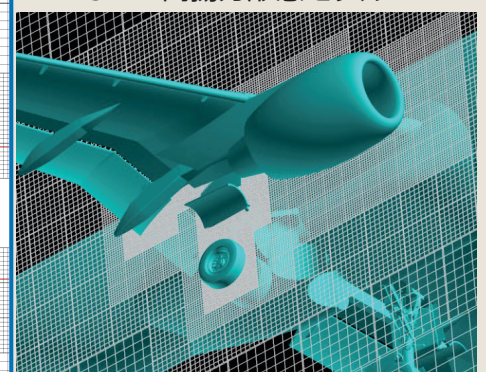
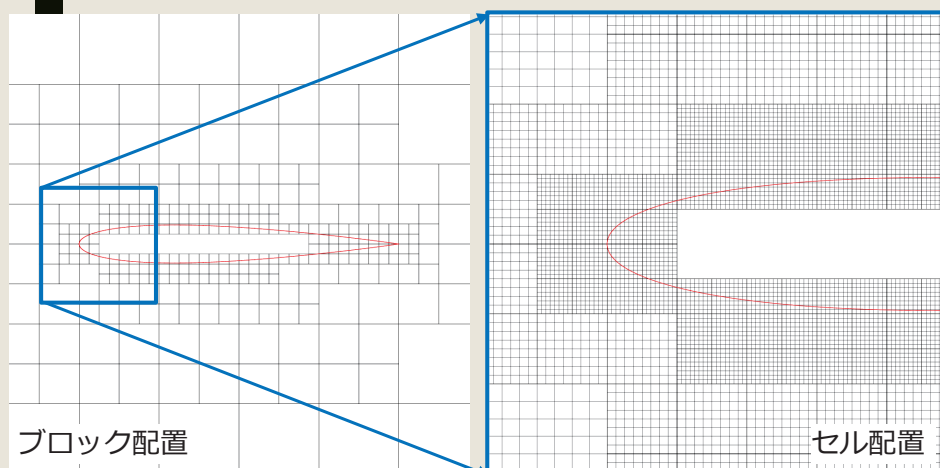
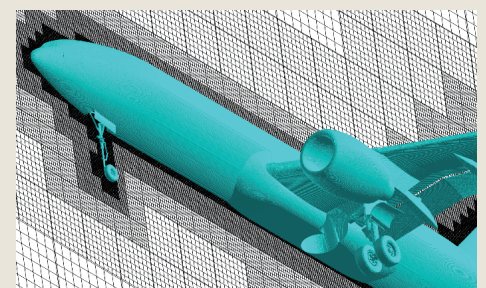
# 実機（複雑）形状の解析

- 実機複雑形状への大規模計算格子の**自動**作成
  - 空力設計 = 形状設計なのに形状変更が困難
    - 形状変更すると計算格子の作成に数ヶ月
  - 手動で大規模LES用計算格子（数千億点規模）を作成できるか？



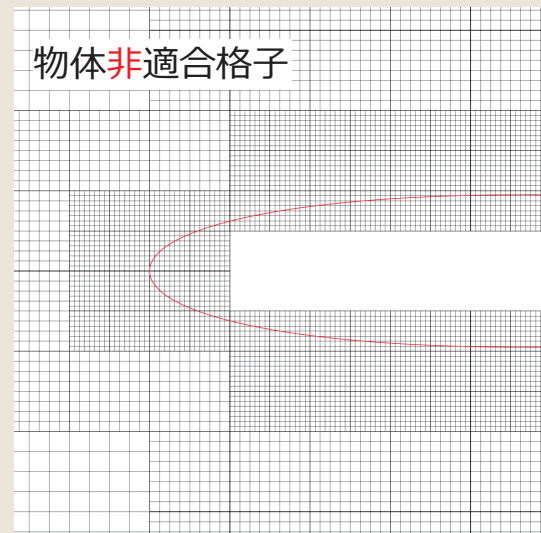
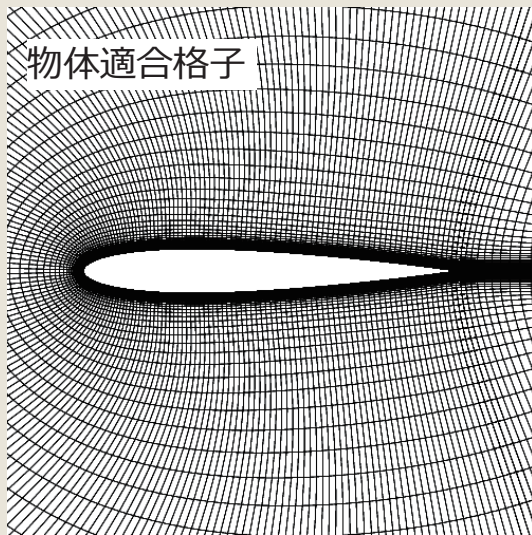
## 階層型等間隔直交構造格子法

- 階層型等間隔直交構造格子法  
(BCM: Building Cube Method)
  - 計算領域を八分木（3D）、四分木（2D）でブロック分割
  - 各ブロックは等間隔直交構造格子



# 埋め込み境界法

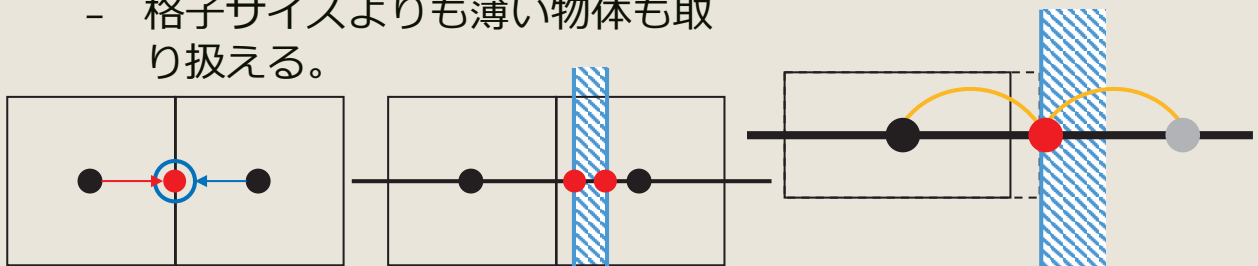
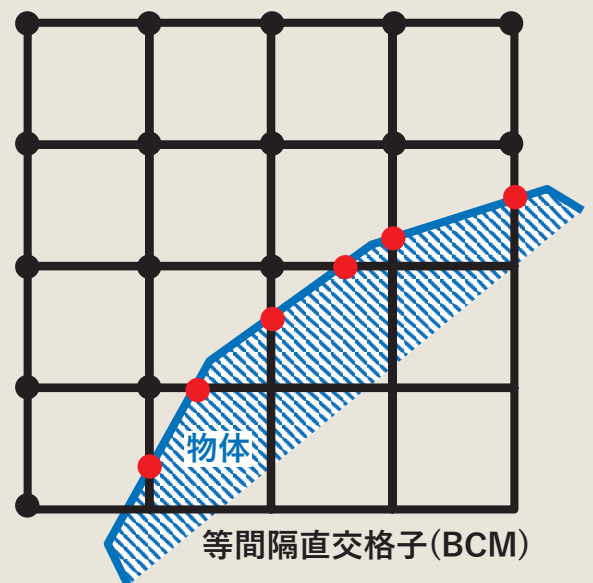
- 埋め込み境界法 (IBM: Immersed Boundary Method)
  - 従来手法：物体適合格子
    - 物体を計算格子で表現⇒支配方程式の座標変換で記述
  - IBM：物体非適合格子
    - 物体（主に壁）をアルゴリズムで表現



15

## 物体形状の取り扱い (形状壁モデル)

- 物体形状をアルゴリズムで表現
- 物理量定義点 (=セル中心) ● を結ぶ線と物体との交点 ● で流束を評価
  - 交点 ● に関する情報 (交点の有無、交点までの距離など) を保持。
  - 壁を考慮 (対称条件 or NFIP) して流束を計算
- 共通流束を別々に評価
  - 流束の計算が2倍 (if文の排除)
  - 格子サイズよりも薄い物体も取り扱える。



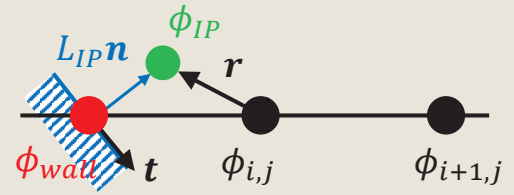
16

# 近傍場IP(Near-field ImagePoint)

- $\phi_{IP} = \phi_{i,j} + \left(\frac{\partial\phi}{\partial x_k}\right)_{i,j} r, L_{IP} \sim 0.5\Delta x$  (近傍場)

IPが遠過ぎると、壁での状態の計算に壁最近傍セルの情報が入らない

- $\left(\frac{\partial\phi}{\partial x_k}\right)_{i,j}$  の計算：中心差分、壁がある場合は
  - 物理条件の利用 (速度=0、等温壁： $T_w$ )
  - 片側差分 (密度、圧力)



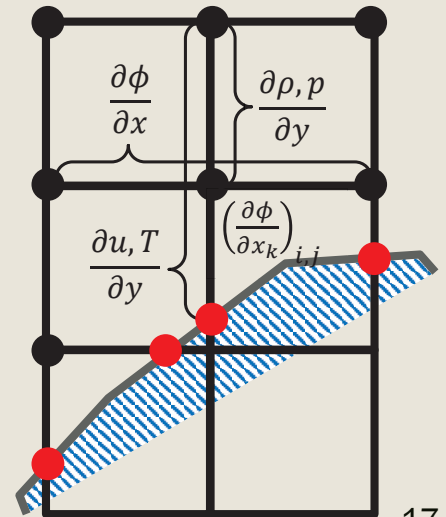
- 対流項：

- 密度、圧力： $\phi_{wall} = \phi_{IP}$
- 速度：0

- 粘性項：

LES壁モデルとの親和性

- $\tau_w = -\mu \frac{U_{IP} \cdot t}{L}, \tau_{xy} = \tau_w (n_x t_y + n_y t_x)$
- $\frac{\partial T}{\partial n} \sim \frac{T_{IP} - T_w}{L}, \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial n} n_x, \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial n} n_y$



17

## 流束計算点の導入

- 流束計算点@壁

- 有限差分法的 (≠有限体積法) な扱い

- 物体近傍で保存性は満足されない

- エラーは比較的小さく、格子解像度を向上させると減少
  - 厳密に保存性を満足させることもできるが。

- 表面分布 (物理量、物体形状)

- 格子解像度を向上させると滑らかな分布が得られる。

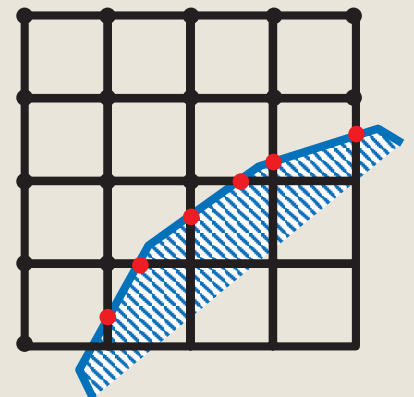
- 表面積分も可能 (面積要素のモデル化が必要)

- 誤差は格子解像度を向上させると1次精度で減少。

- 各種情報 (流体/固体、壁の有無、壁までの距離) を保持

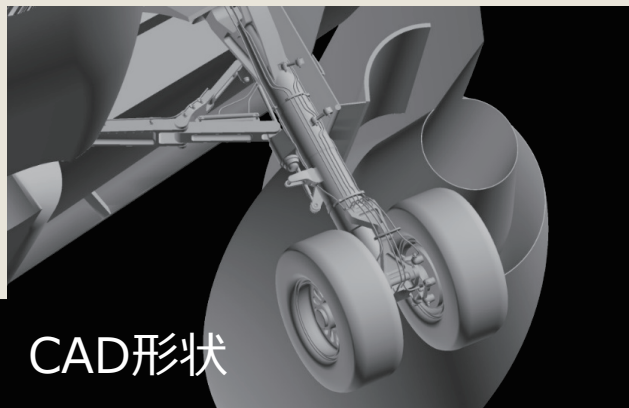
- 移動、変形する物体の取り扱いも可能

- 計算格子はそのままで、情報を修正する。

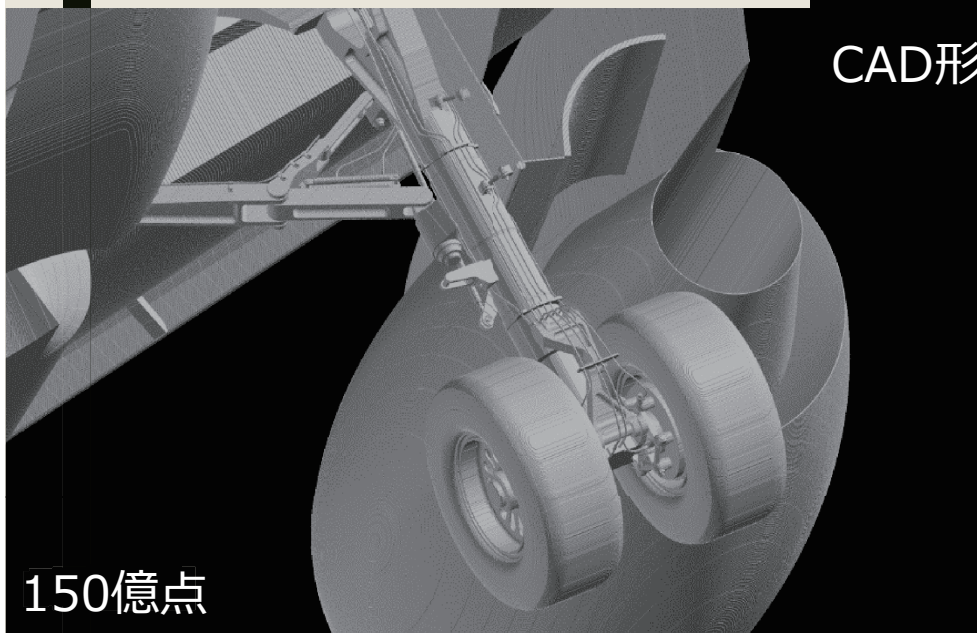


18

# 形状の正確な表現



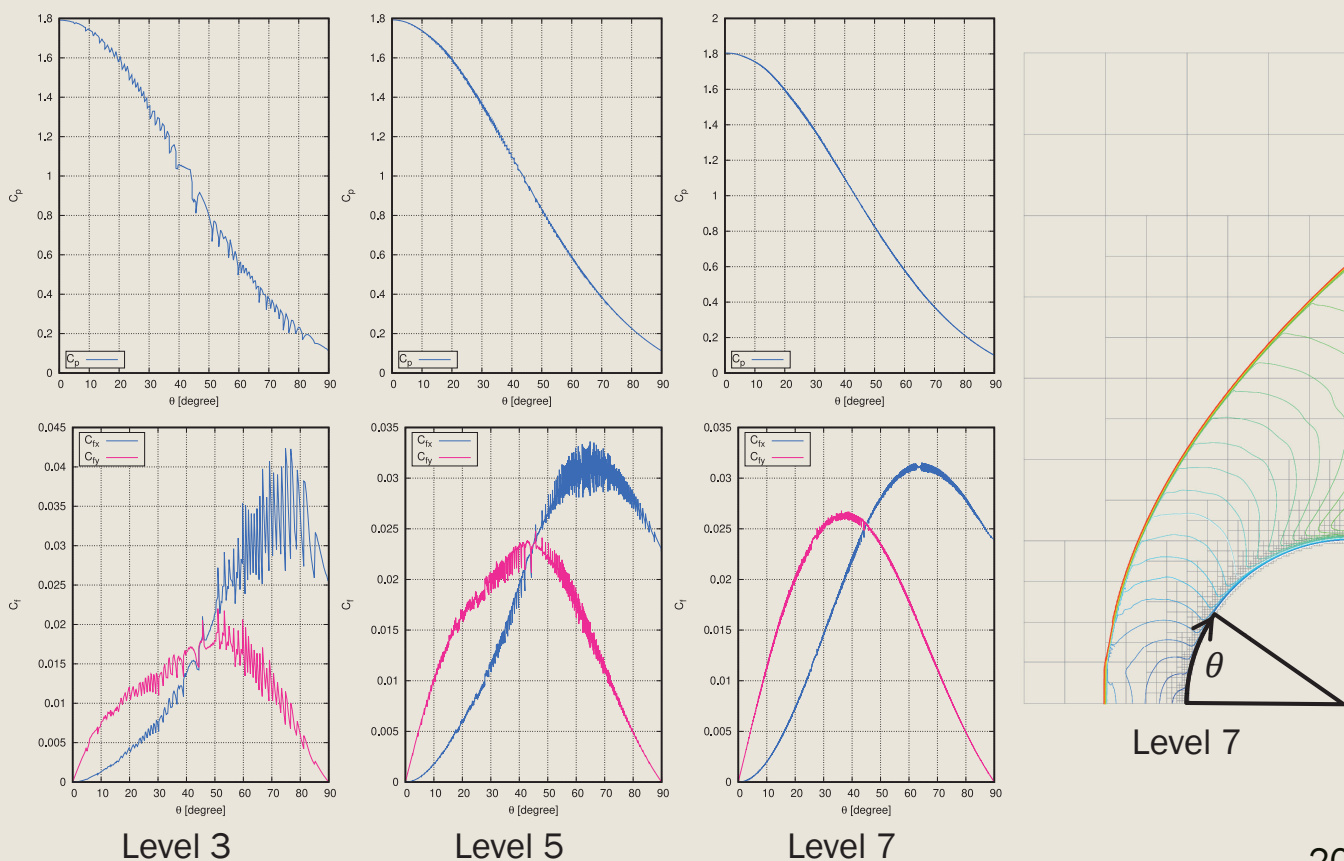
CAD形状



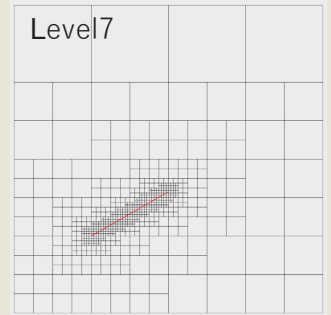
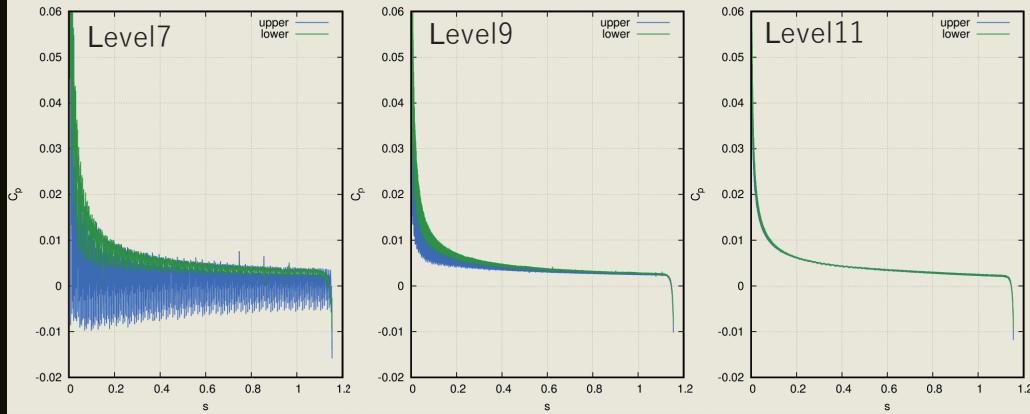
150億点

格子点数増加による物体形状再現性が向上  
セルサイズ未満の構造は無視

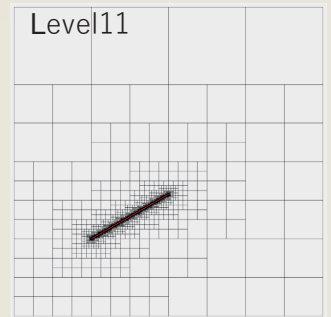
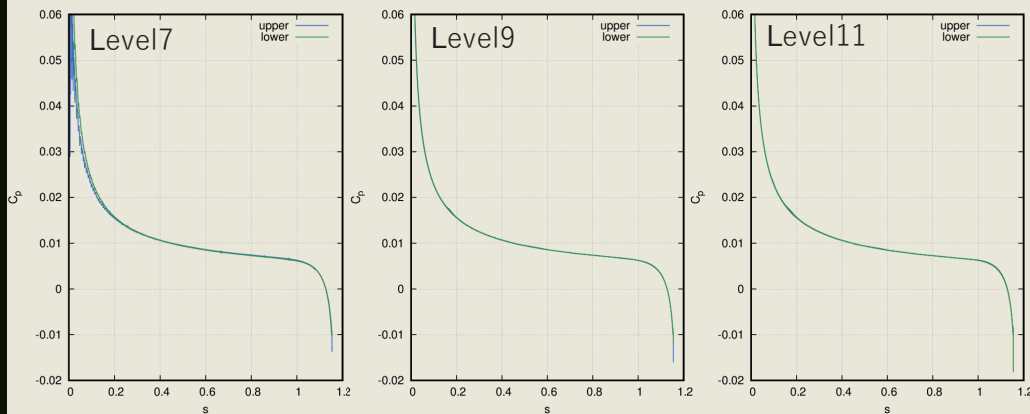
## 2D円柱 ( $R_e = 10^3, M_\infty = 4, C_p, C_f$ 分布)



# 2D平板 ( $R_e = 10^5, M_\infty = 5, C_p$ 分布)

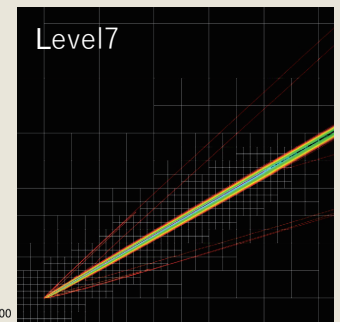
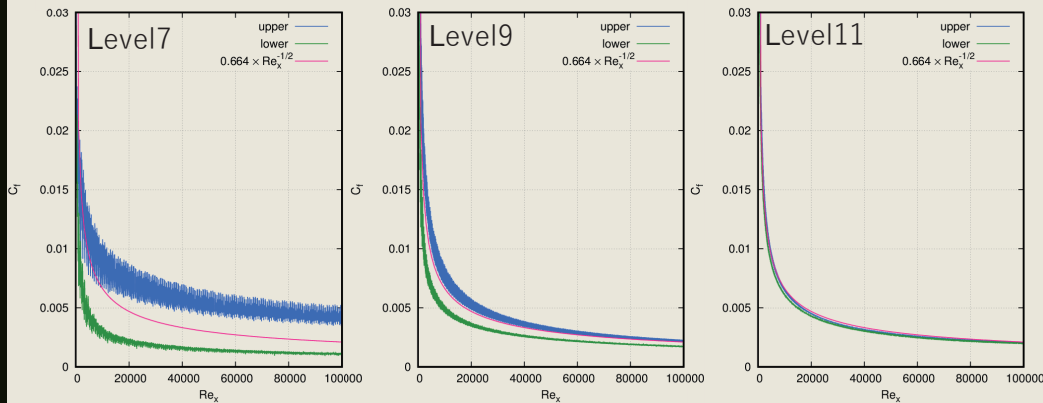


等温壁 ↑ 断热壁 ↓

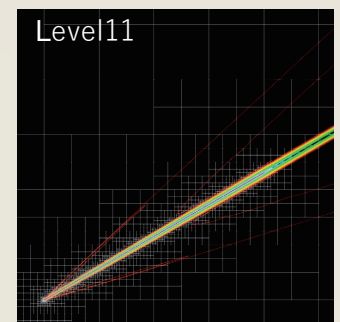
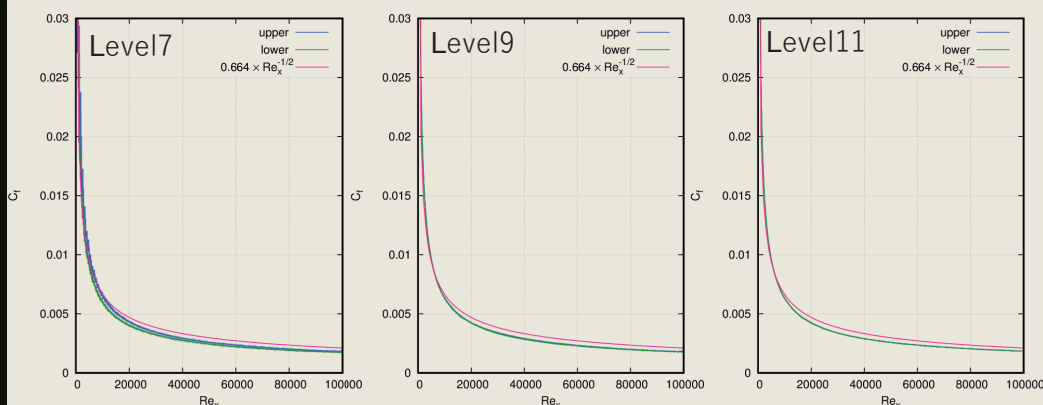


21

# 2D平板 ( $R_e = 10^5, M_\infty = 5, C_f$ 分布)

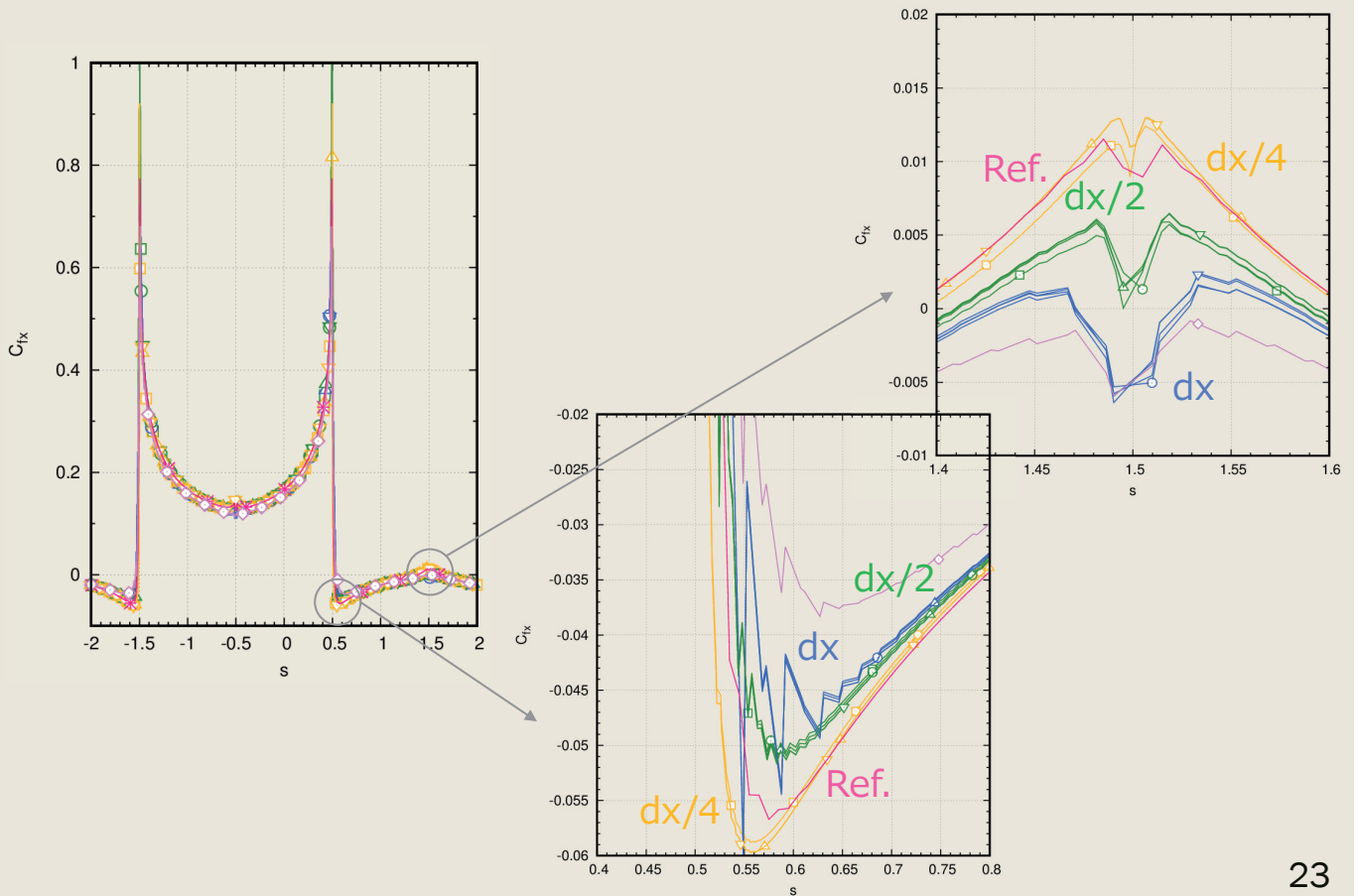


等温壁 ↑ 断热壁 ↓

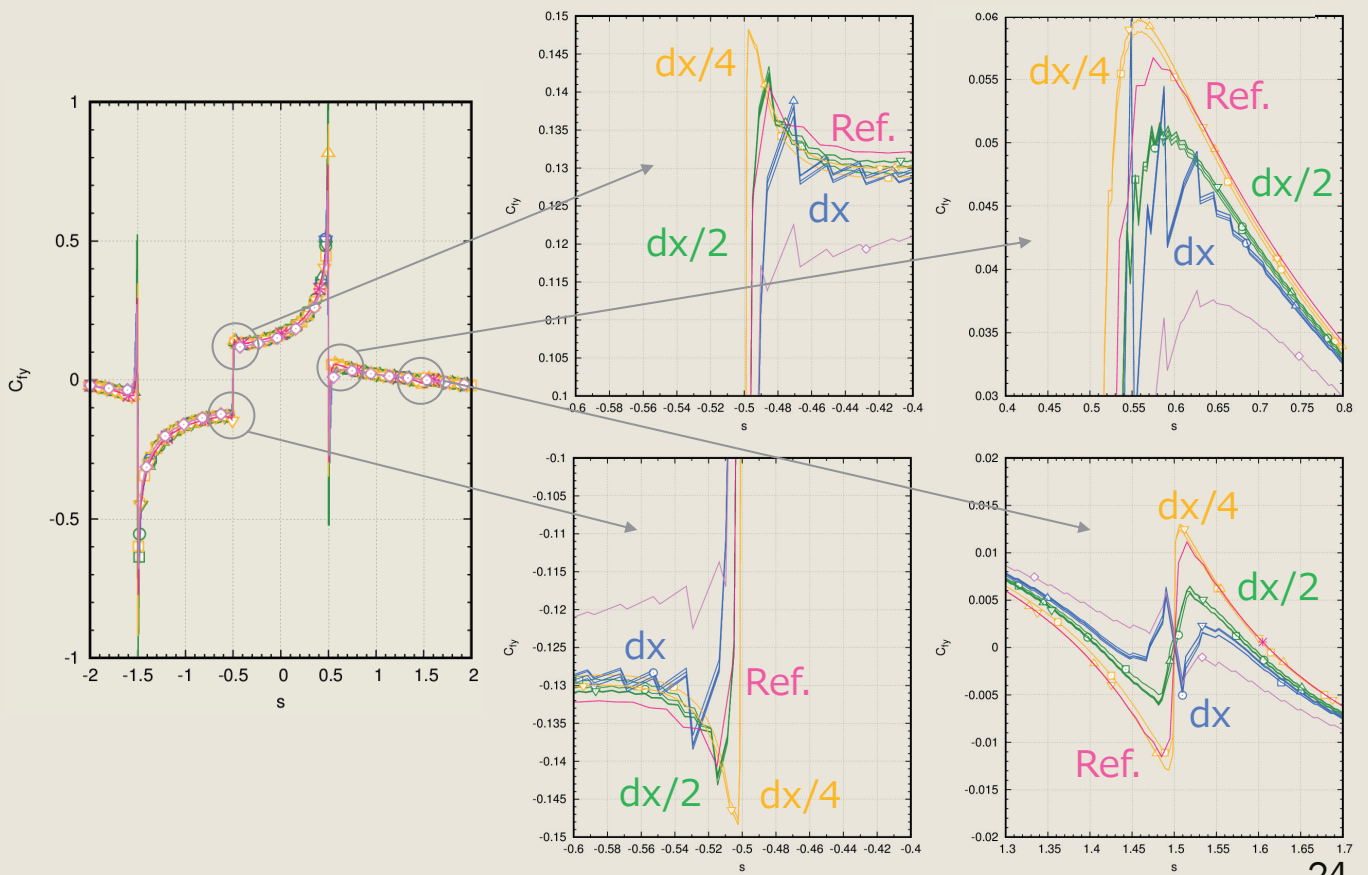


22

# 2D角柱 ( $R_e = 10^2, M_\infty = 0.1, C_{fx}$ 分布)

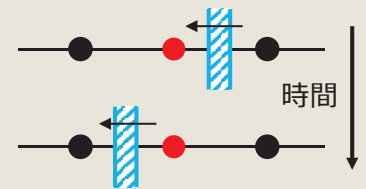


# 2D角柱 ( $R_e = 10^2, M_\infty = 0.1, C_{fy}$ 分布)



# 移動物体の取り扱い

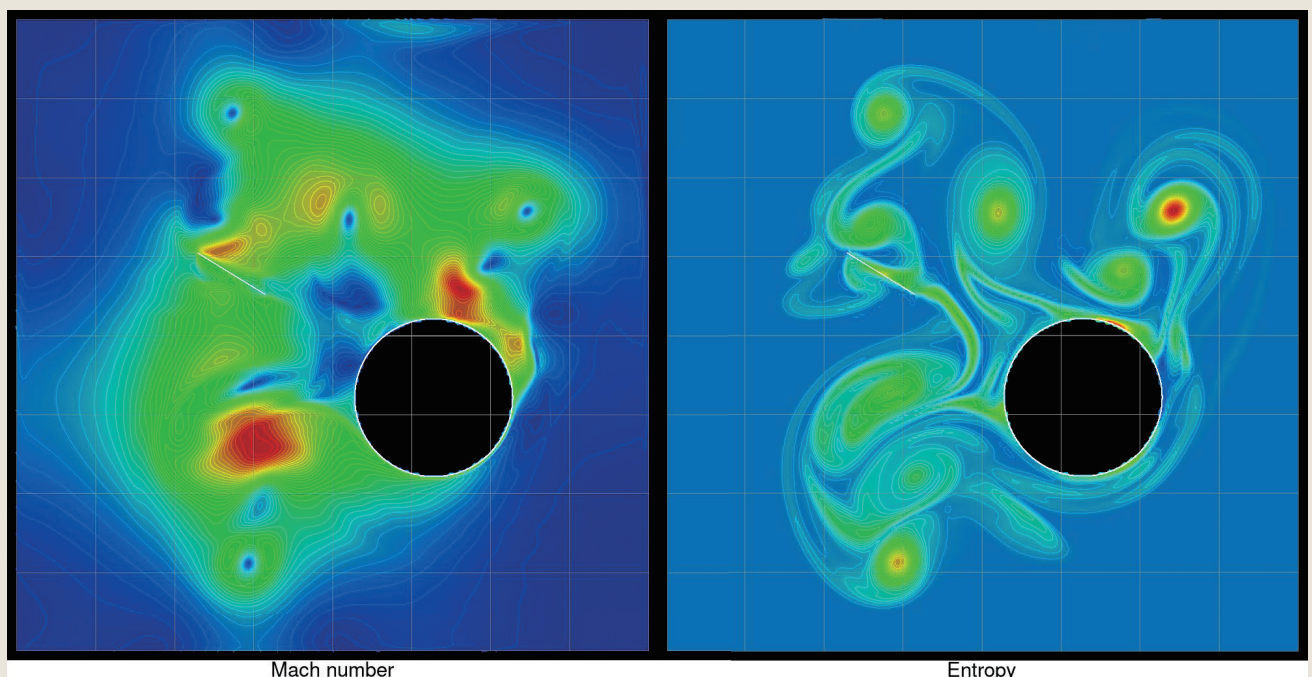
- 物体の移動：
  - 物体の位置情報を更新
  - 物体表面と格子線との交差を計算し、各種情報 (pid, cutid, cutd,...) を更新
    - 移動前の情報などを使って高速化
- 流体計算：
  - 流束@壁の計算時に、壁の速度を考慮
- 属性 (流体or固体) が変化したセルの物理量：
  - 流体 → 物体 (内部) : 特になし
  - 物体 (内部) → 流体 : 壁向こうを除外した周りの流体セルで補間
  - 薄板の通過 (流体 → 流体) も対象
    - 壁が反対方向に移動したことで検知



25

# 移動物体の解析例 (2D)

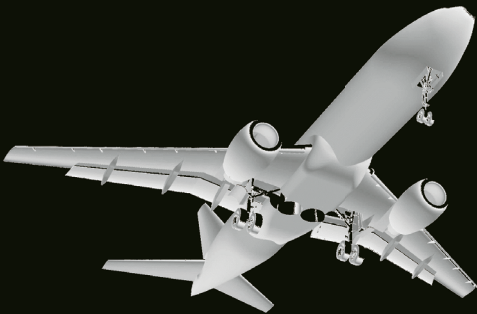
- 回転する円柱と薄板



Mach number

Entropy

# FFVHC-ACE



27

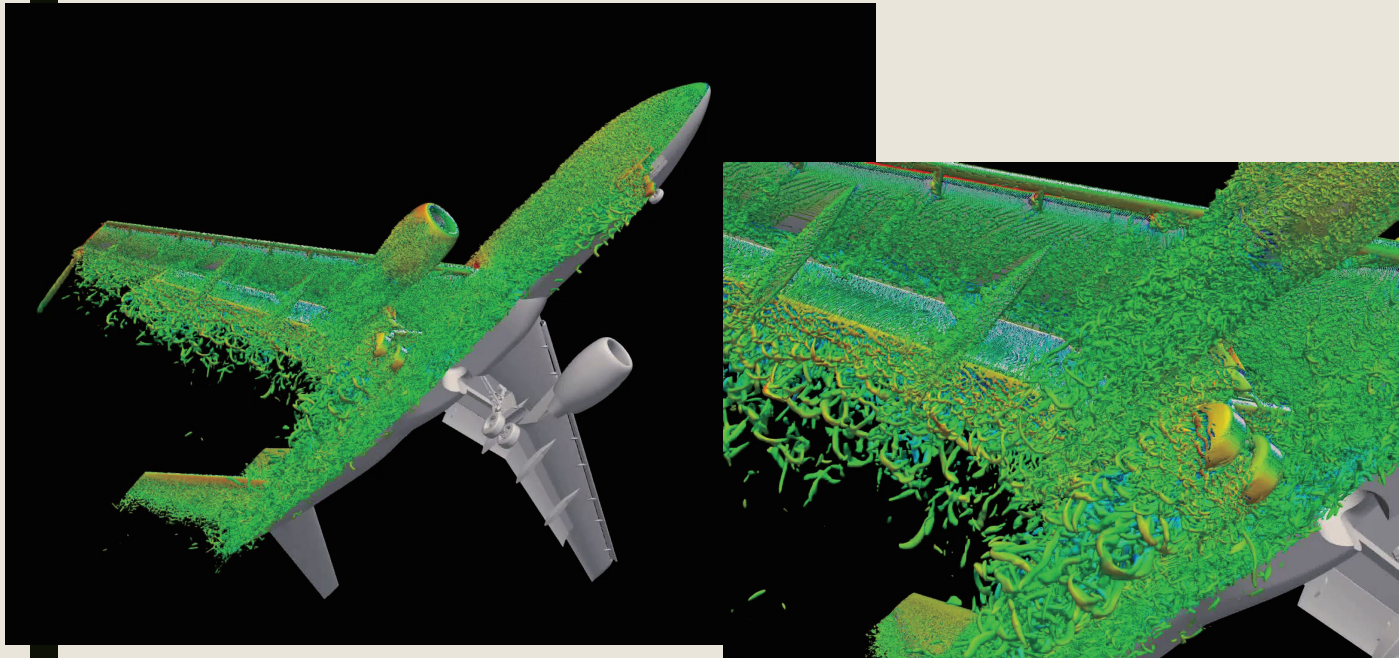
## FFVHC-ACE

- 「富岳」関連プロジェクトで開発
  - ポスト「京」重点課題⑧
    - 航空機的设计・運用革新を実現するコア技術の研究開発
  - 「富岳」成果創出加速プログラム
    - 航空機フライト試験を代替する近未来型設計技術の先導的実証研究
      - $C_{Lmax}$ の予測が目標
- キー技術
  - 複雑形状への自動格子生成
    - 階層型等間隔直交構造格子法+埋め込み境界法
  - 高レイノルズ数流れの高精度解析
    - 壁面モデルLES
    - 低散逸・高安定なKEEPスキーム
  - 「富岳」向け高速化チューニング
- 形状データ (STLデータ) 入力のみで、完全自動・ロバスト (・高速) な解析を実現

# FFVHC-ACE (試計算)

## ■ JAXA高揚力形態モデルの試計算

- $M_\infty = 0.2, R_e = 10^6, \alpha = 7^\circ$
- 全体 : 45億点 (流体 : 31億点)



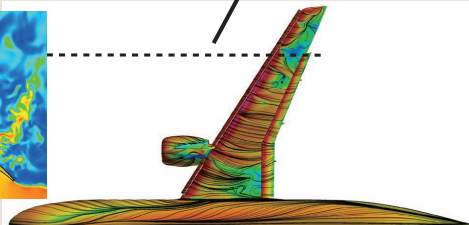
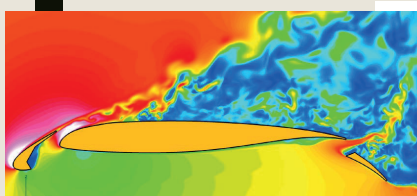
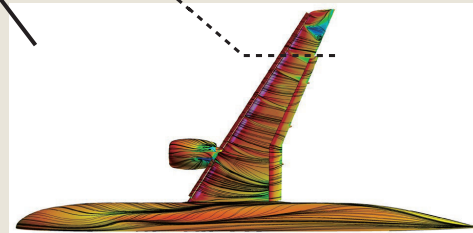
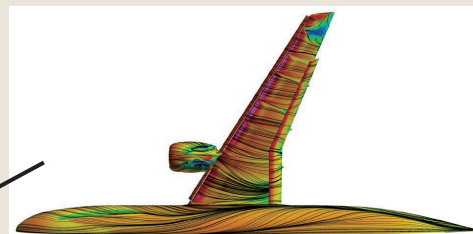
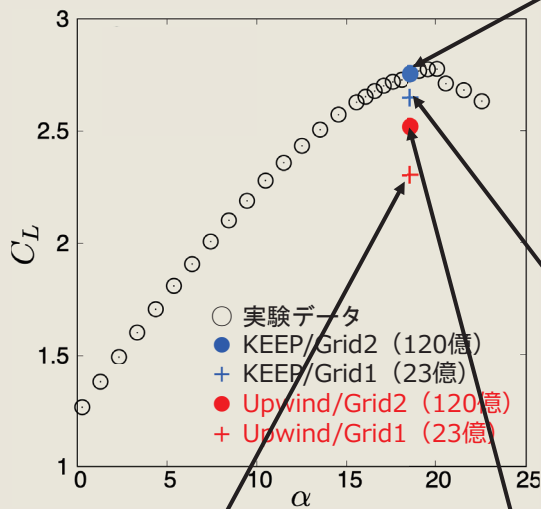
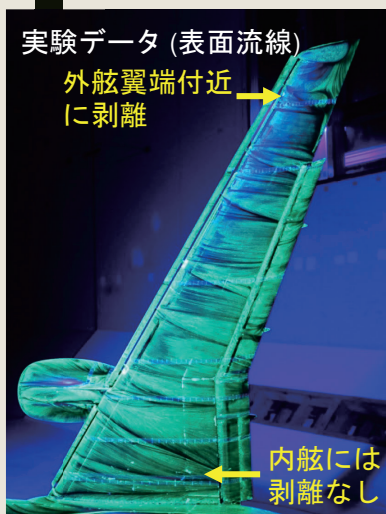
29

# FFVHC-ACE (検証1)

## ■ JSM (JAXA Standard Model)

- $R_e = 2 \times 10^6, M_\infty = 0.172$

Asada & Kawai (AIAA, 2021)

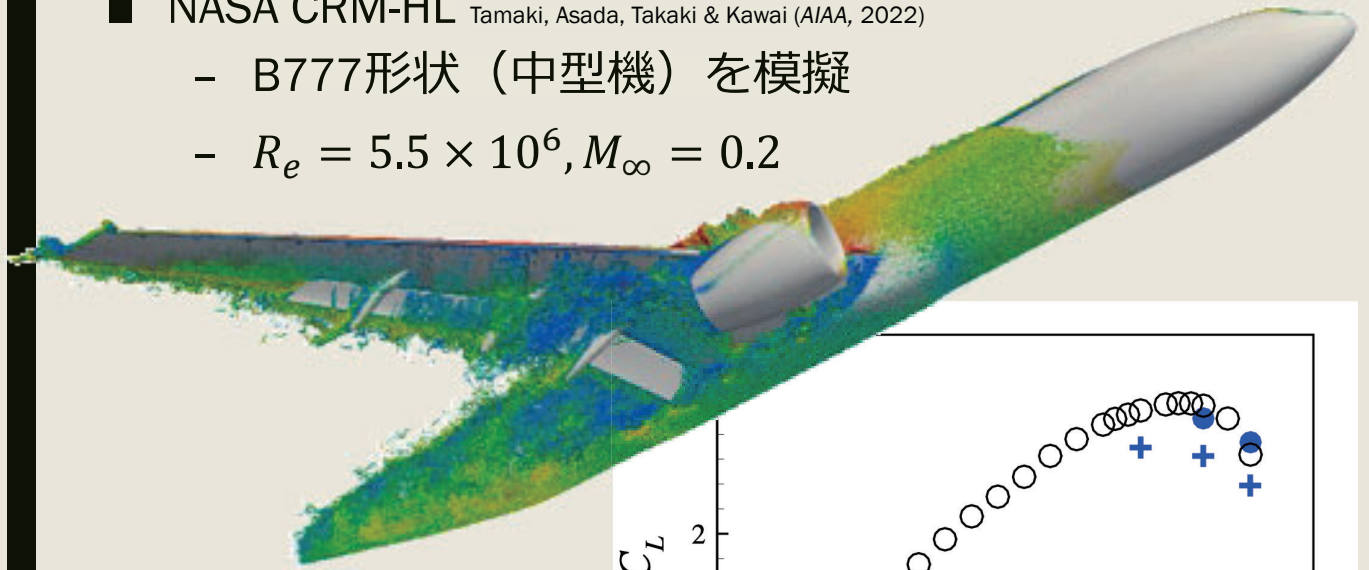


30

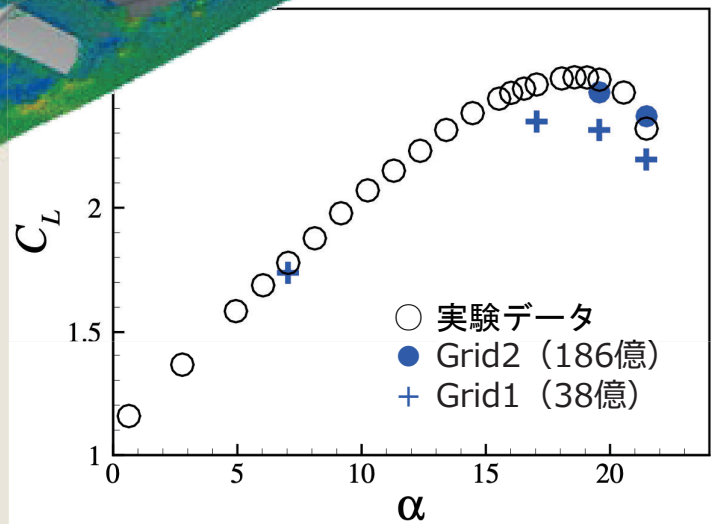
# FFVHC-ACE (検証2)

■ NASA CRM-HL Tamaki, Asada, Takaki & Kawai (AIAA, 2022)

- B777形状 (中型機) を模擬
- $R_e = 5.5 \times 10^6, M_\infty = 0.2$



他にも、  
Mitsubishi SpaceJetの  
実飛行試験で検証



31

# 「富岳」向けチューニング



32

# スーパーコンピュータ「富~~嶽~~岳」

<https://www.fujitsu.com/jp/about/resources/publications/technicalreview/2020-03/>



<http://japanese-warship.com/aircraft/fugaku/>

33

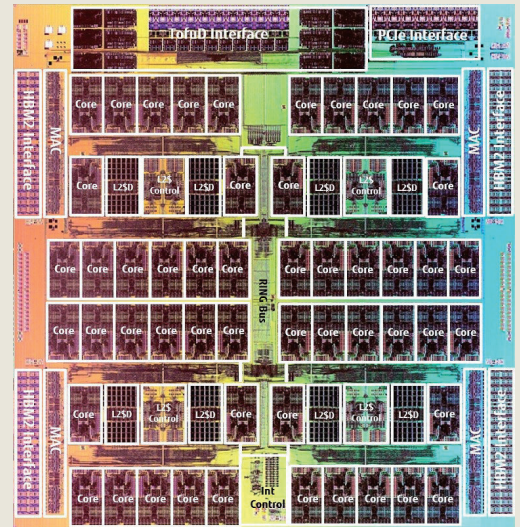
## スーパーコンピュータ

- スーパーコンピュータ：科学技術計算用途で大規模・高速な計算能力を有するコンピュータ。演算処理速度がその時代の一般的なコンピュータより極めて高速なコンピュータ（専用機 → 汎用品の大規模集合体？）
- H/Wの高速化
  - トランジスタ回路の増設：微細化加工の恩恵
    - ムーアの法則：1.5年で2倍 → ムーアの法則の終焉
  - 周波数の向上：MHz→GHz → 電力削減は最重要課題（「富岳」は30MW）
  - 各種高速化の仕組み：並列処理
    - 演算：ベクトル、パイプライン、スーパースカラ、SIMD、マルチ/メニーコア、クラスター
    - メモリ：L1\$,L2\$, 高速メモリ（HMC,HBM）
- S/Wの高速化
  - H/Wの特性に合致したS/Wを作らないと性能を活かせない
    - CFDプログラムは比較的メモリアクセス性能に影響される。
  - アルゴリズム・実装、専用言語、専用ライブラリ、コンパイラ
  - 高速化チューニング（コンパイラとの対話）

34

# 「富岳」 (PRIMEHPC FX1000)

- 総演算性能 (倍精度) : 537PFLOPS (158,976ノード)
- 総主記憶容量 : 4.85PiB
- CPU : A64FX (Armv8.2+SVE)
  - 3.3792TFLOPS (倍精度演算)
  - 2,0GHz or 2.2GHz
  - 48コア+アシスタントコア
  - 12コアがL2\$を共有 (CMG)
- メモリ : HBM2
  - 32GiB、1,024GB/s
- インタコネクタ : TofuインターコネクタD
  - 40.8GB/s×双方向



A64FX (富士通提供)

35

## BCM+IBMの実装上の特徴

- 流体の計算 : 右図の●
  - ステンシル計算 ( $q(i,j,k,n) = F(q(i\pm 1,...), q(i\pm 2,...), ...)$ )
  - $l,j,k \sim 0 (< 100)$ 、 $n=5$
- 壁の処理 (壁での流束計算) : 右図の●
  - if文の分岐処理

```
do k=istart, iend
```

```
do j=istart, iend
```

```
do i=istart, iend
```

```
  流体の計算
```

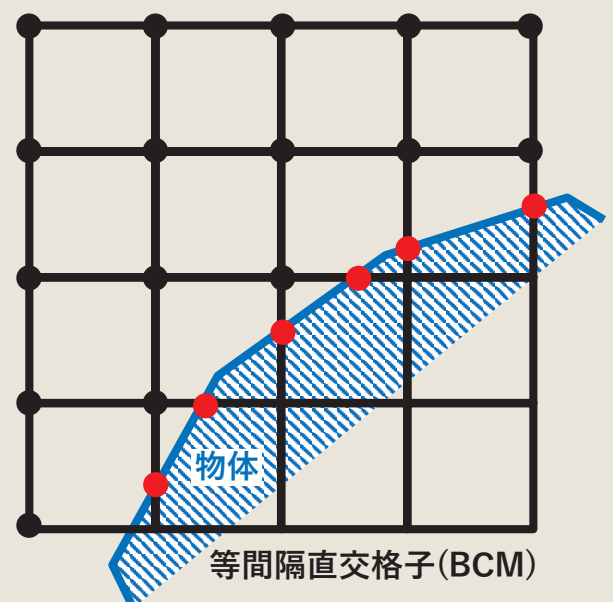
```
  if(壁がある) then
```

```
    壁の処理
```

```
  endif
```

```
enddo; enddo; enddo
```

通常の物体適合格子ソルバーにはない処理



36

# If文の高速化

- if文を含むループ：
  - マスク処理：対流項
    - if文の真偽率で性能は変化しないが演算量が増大
  - if文の真と偽でループを分割：粘性項
    - 計算領域全体：物体無しとして計算
    - 壁の処理を分離して別ループ（9ループ、リストアクセス）
    - if文の真偽率で性能が変化
- 対流項：ステンシルが長く、場合分けが多い ⇒ マスク処理
- 粘性項：隣接ステンシルだけ ⇒ ループを分割
- if文を削除した多重ループ ⇒ 一般的な構造格子ソルバーと同じ

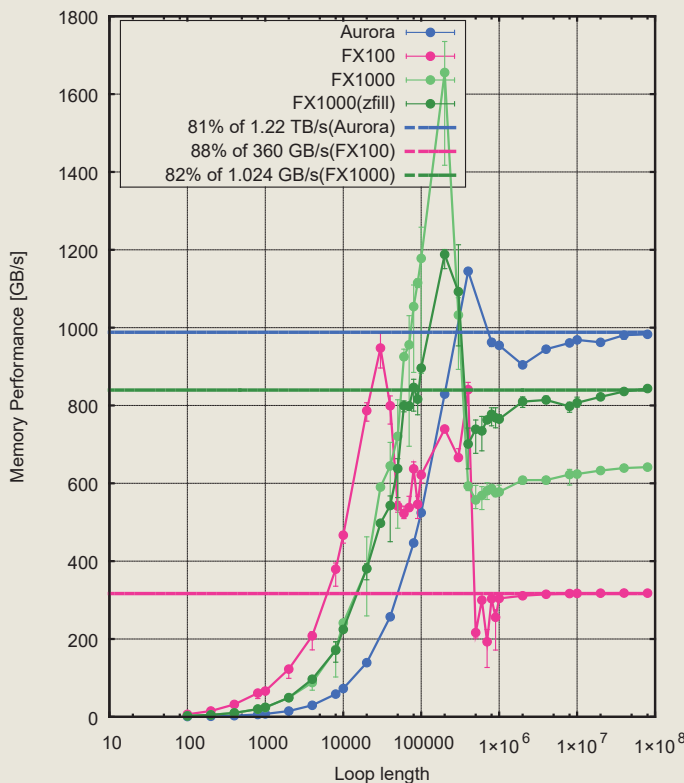
37

## 「富岳」 (PRIMEHPC FX1000) の課題

- 演算：
  - レジスタ不足 (FX100 : 256 → FX1000 : 32)
    - S/W、SIMD、XFILL (ZFILL) の同時適用が困難
    - ループボディが大きい
- メモリアクセス：
  - メモリアクセス性能を出し切るためには
    - 連続アクセスかつ長いループ長が必要
- ネットワーク：
  - まだ顕在化していない
- ファイルI/O
  - ある種、諦めの境地 (データの利活用が不明)

38

# メモリ性能の実力 (1/3)



## ■ TRIAD : メモリ性能のBM

```
do n=1,nmax
  a(n) = b(n) + S × c(n)
```

enddo

- B/F = 24
- 演算効率 : 1.3% (FX1000)

## ■ 理論メモリ性能 (B/F) :

- FX100: 0.48GB/s (0.43)
- FX1000 : 1.0TB/s (0.30)
- Aurora : 1.2TB/s (0.50)

## ■ メモリの実力値 : 80%程度

39

# メモリ性能の実力 (2/3)

- 多次元配列 実アプリの実装モデル
- ovlp (袖) : a(1-ovlp:ndim+ovlp,1-ovlp:ndim+ovlp,1-ovlp:ndim+ovlp), ...
- マルチブロック (MB) : キャッシュの影響は排除し、メモリ性能を測定
- 総格子点数 : 2,700万点 (10x10x10 x 27,000ブロック ~ 300x300x300 x 1ブロック)

### MB-TRIAD1D (1次元化)

```
type blkDataType
  real(8), dimension(:, :, :), allocatable :: a,b,c
end type blkDataType
```

```
type(blkDataType), dimension(:), allocatable :: blk
do nb=1,nbmax
  call kernel(blk(nb)%a,blk(nb)%b,blk(nb)%c,...)
enddo
```

```
subroutine kernel(a,b,c,...)
  real(8), dimension(*) :: a,b,c
  do n
    a(n) = b(n) + scalar*c(n)
  enddo
```

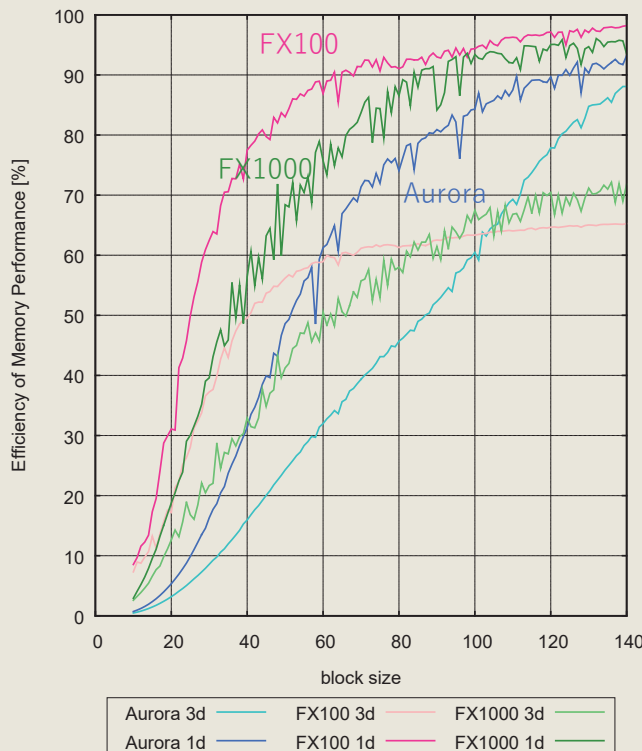
### MB-TRIAD3D

```
type blkDataType
  real(8), dimension(:, :, :), allocatable :: a,b,c
end type blkDataType
```

←構造体ではなく配列渡し  
(コンパイラの問題)

```
subroutine kernel(a,b,c,...)
  real(8), dimension(:, :, :), :: a,b,c
  do k; do j; do i;
    a(i,j,k) = b(i,j,k) + scalar*c(i,j,k)
  enddo; enddo; enddo
```

# メモリ性能の実力 (3/3)



- MB-TRIAD : キャッシュの影響を排除し純粋にメモリ性能を評価
  - do n=1,NB
  - do k=1,N; do j=1,N; do i=1,N
  - blk(n)%a(i,j,k) = blk(n)%b(i,j,k) + S × blk(n)%c(i,j,k)
  - enddo; enddo; enddo
  - enddo
  - N: block size, NB: # of blocks
- MB-TRIAD3D vs MB-TRIAD1D
- ループ長の立ち上がりに注目
  - ある程度のループ長が必要

41

## 多重ループの高速化

- 「富岳」 (PRIMEHPC FX1000) の課題
  - レジスタ不足 (FX100 : 256 → FX1000 : 32)
    - S/W、SIMD、XFILL (ZFILL) の同時適用が困難
    - ループボディが大きい
  - メモリアクセス性能を出し切るためには
    - 連続アクセスかつ長いループ長が必要



- 高速化 : ループ1重化+ブロッキング+ループ分割 :
  - ループ長の確保 (負荷バランス) → ループ1重化
  - レジスタ不足 → ループ分割 (←ループ長の減少)
  - 分割ループ間でのメモリアクセスの削減 → ブロッキング

# 多重ループの高速化

```
!$omp parallel do collapse(2)
do k=1,N
do j=1,N
do i=1,N
  a3d(i,j,k) = b3d(i,j,k)+S*c3d(i,j,k)
enddo; enddo; enddo
!$omp end parallel
```



```
real(8), dimension(:, :, :) :: a3d, b3d, c3d
```

```
call kernel(a3d, b3d, c3d)
```

contains

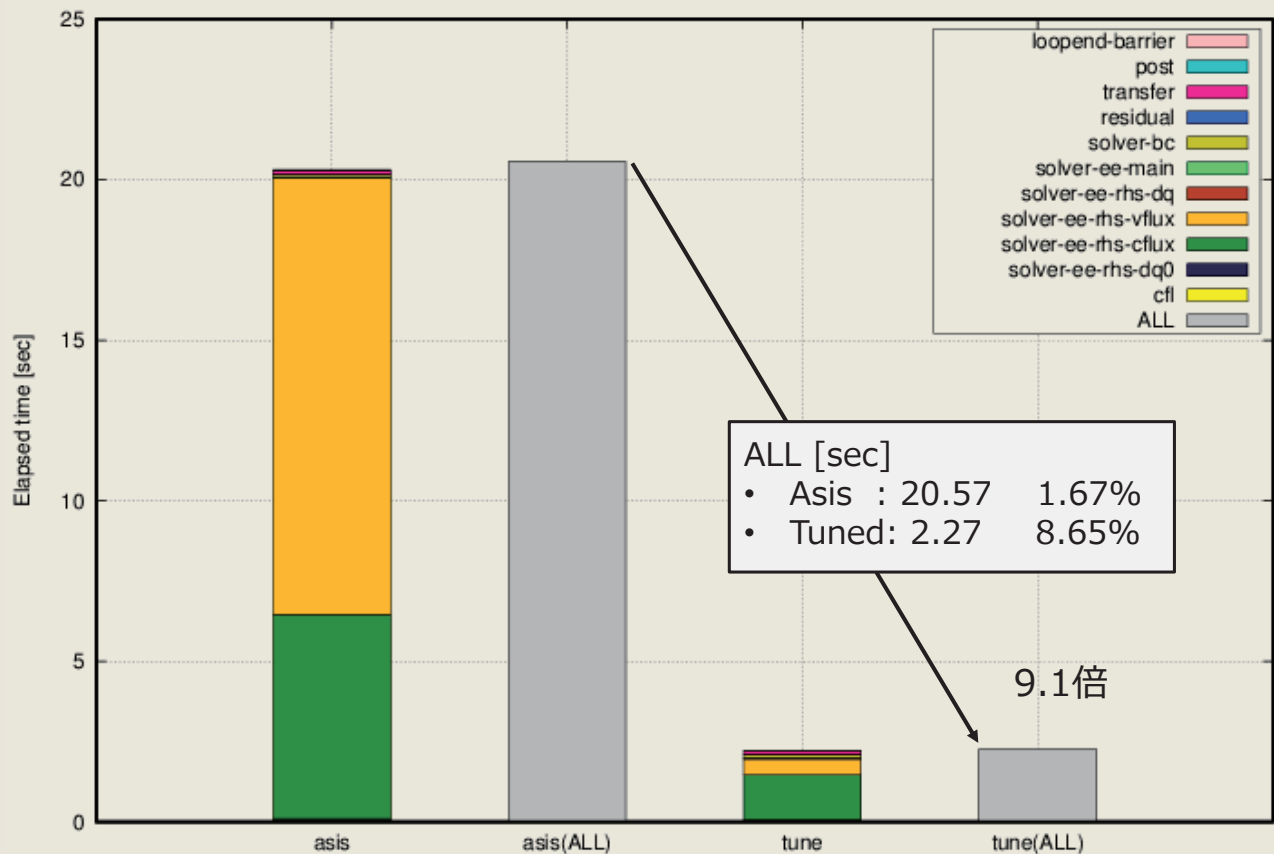
```
subroutine kernel(a, b, c)
real(8), dimension(*) :: a, b, c
!$omp parallel
!$omp do
do lb=lbsrt, lbend, lsize
locl loop_fission_target(LS)
locl loop_fission_threshold(40)
locl prefetch_sequential(soft)
do l=lb, lb+ lsize-1
a(l) = b(l) + S*c(l)
enddo; enddo
!$omp end do
!$omp do
locl loop_fission_target(LS)
locl loop_fission_threshold(40)
locl prefetch_sequential(soft)
do l=lbsrt_rest, lbend_rest
a(l) = b(l) + S*c(l)
enddo
!$omp end do
!$omp end parallel
```

- 3重ループの1重化：サブルーチンで変換
  - ← 連続アクセス&ループ長の確保
- ループ分割：!oclの利用（富士通コンパイラ）
  - ← レジスタスピル対策
- ブロッキング：手書き
  - ← メモリアクセスの削減（L2\$の利用）

```
j=1;k=1
!$omp parallel do
do i=1,N*N*N
  a3d(i,j,k) = b3d(i,j,k)+S*c3d(i,j,k)
enddo
!$omp end parallel
```

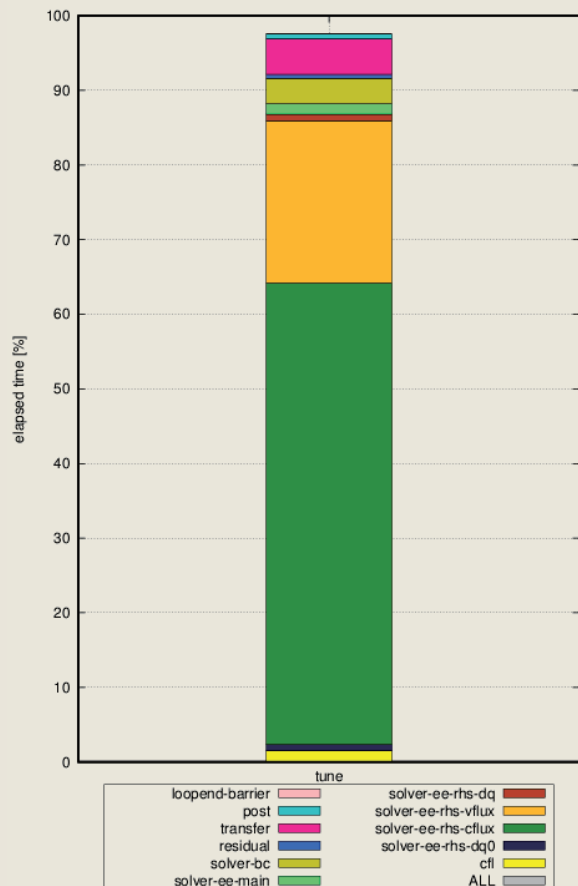
43

## 高速化結果（プロトタイプ）



44

# ホットカーネル (プロトタイプ)

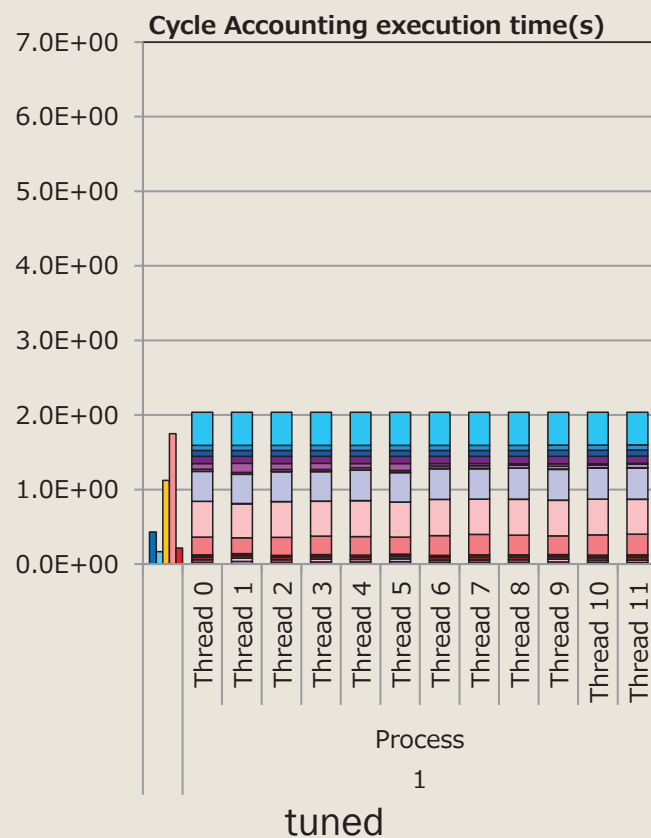
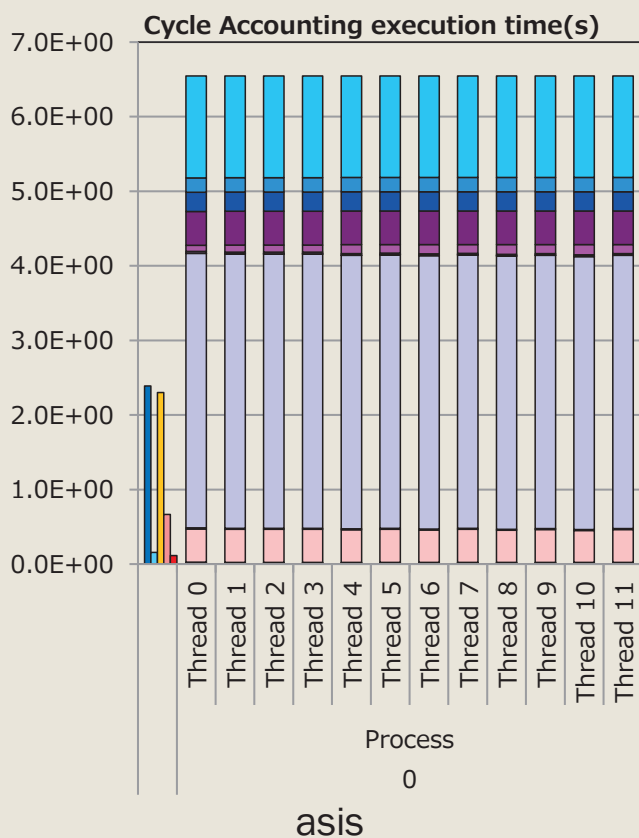


- 対流項 (cflux) がホットカーネル
  - 2番目が粘性項 (vflux)
- 対流項は15%程度は出て欲しい
  - L2\$に対するループラインモデルによる推算
  - 更なる高速化が可能か?

効率 [%]	対流項	粘性項
演算	7.9	9.2
メモリ	10.66	65.28
SIMD	54.81	50.89

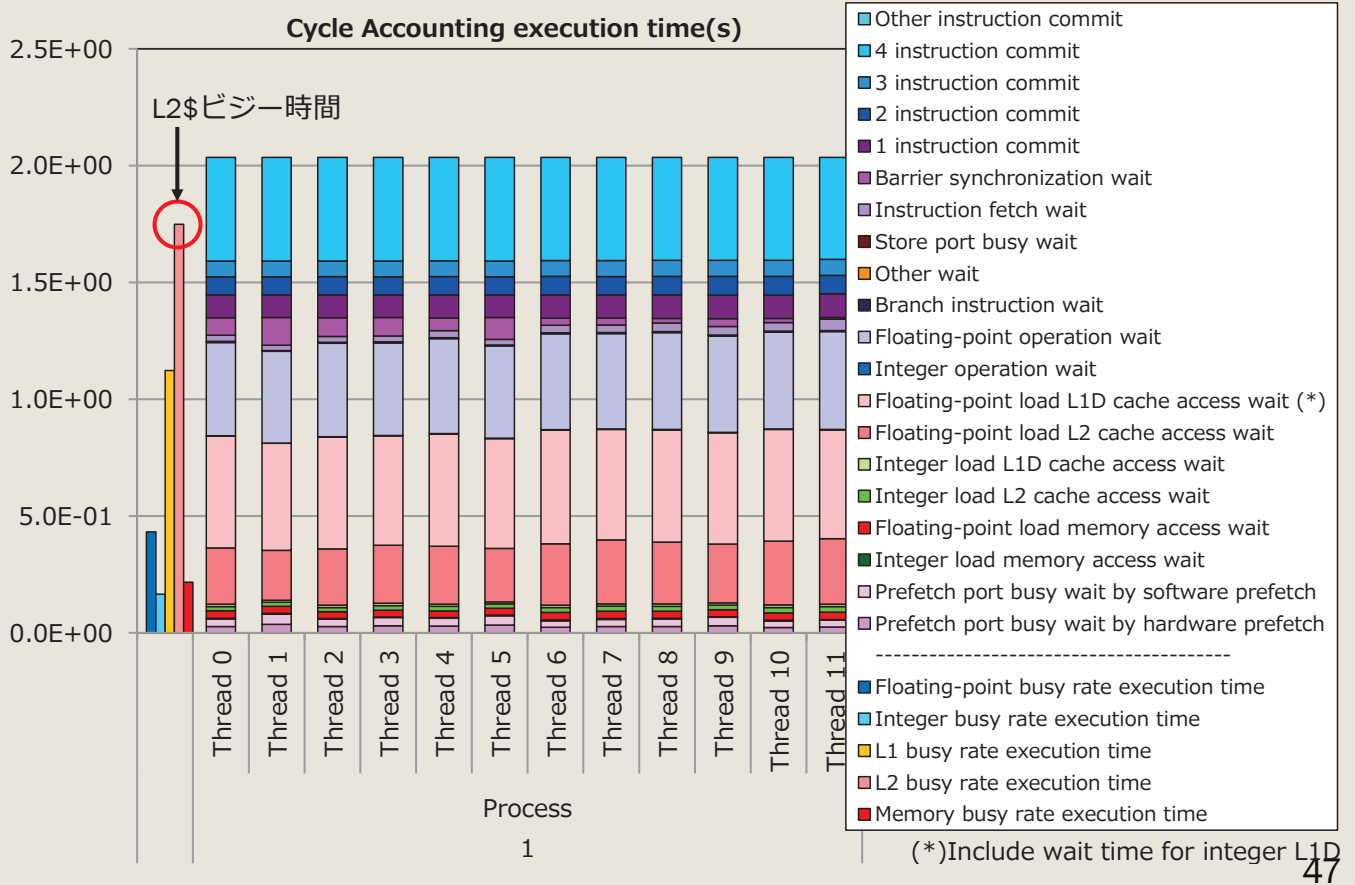
45

## CPU性能解析レポート (対流項) 1



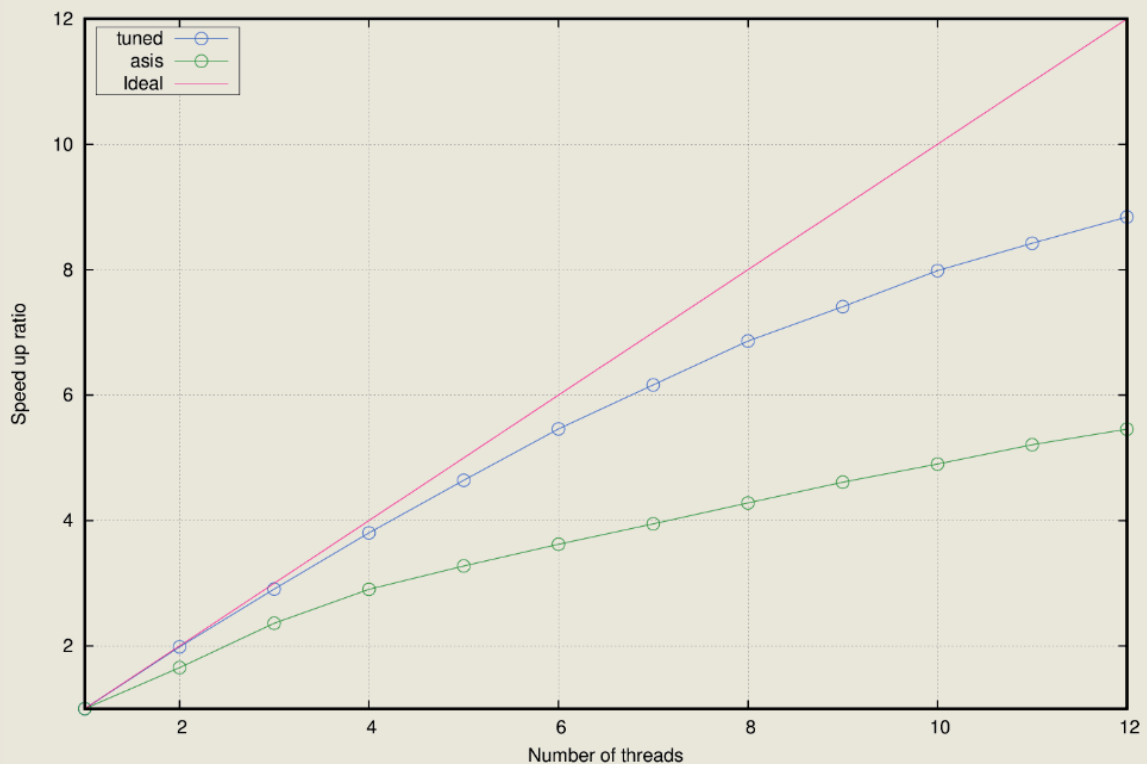
46

# CPU性能解析レポート (対流項)

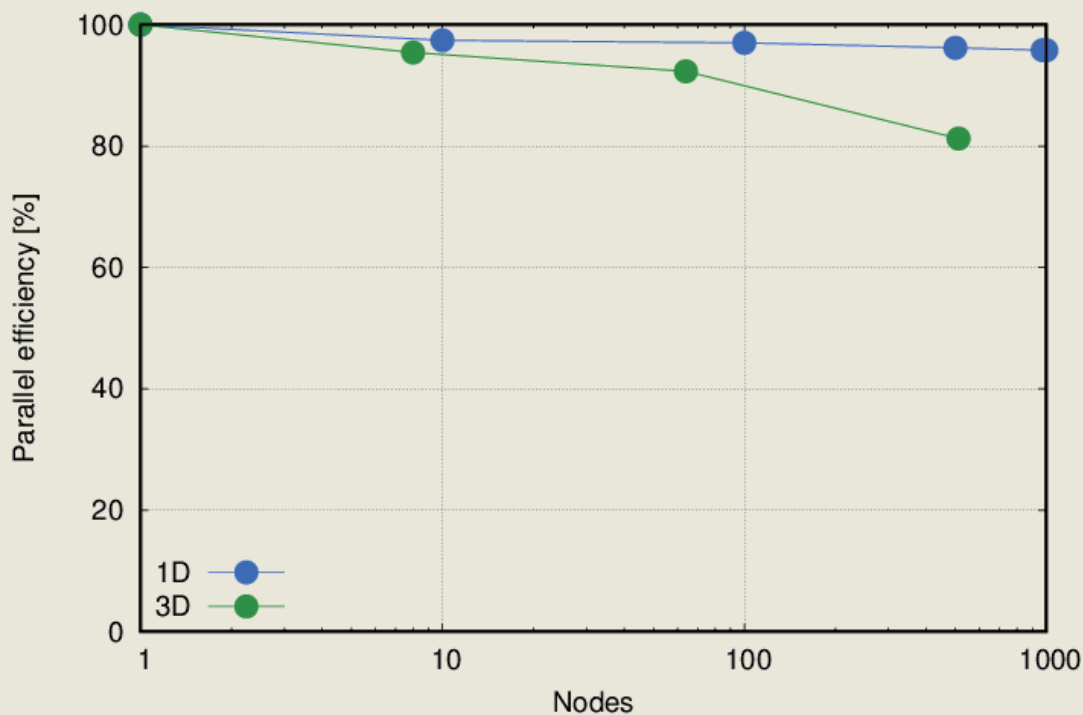


## スレッド並列の効率@CMG

■ Tune版で72%@12コア

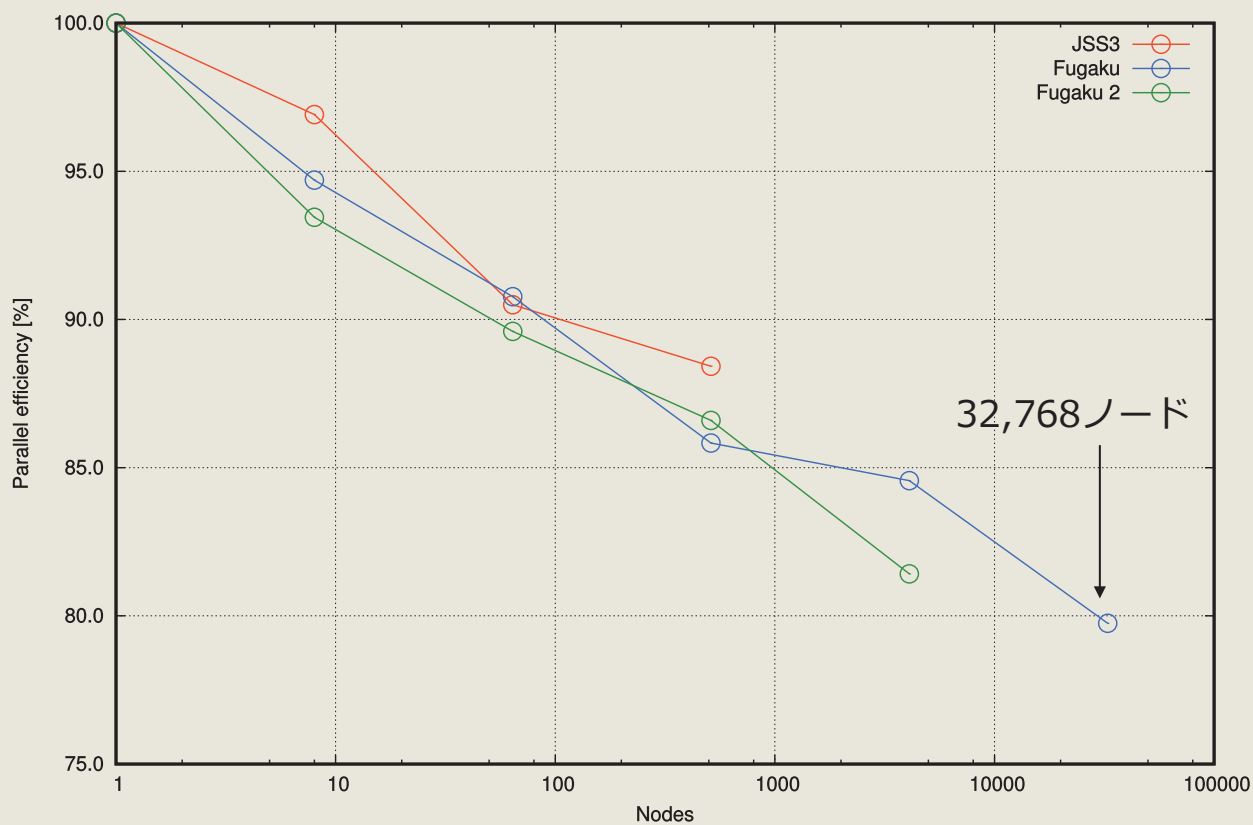


# プロセス並列の効率 (Weak-scaling)



49

# FFVHC-ACEのWeak-scaling (3D分割)



50

# まとめ

- 「富岳」プロジェクトで進めている、航空機実機実飛行条件における空力特性評価技術実現のためのキー技術を紹介。
  - 実機飛行条件である高レイノルズ数流れの高精度解析
  - 実機複雑形状が扱える自動格子生成
  - 「富岳」向け高速化チューニング
- 実アプリFFVHC-ACEとして実装。
  - 形状データ（STLデータ）入力のみで、完全自動・ロバスト（・高速）な解析を実現。
  - Mitsubishi SpaceJetの実機飛行試験解析に適用。
- 特に、複雑形状への大規模計算格子の自動生成技術は、流体機器の設計開発におけるCFDの活用を一段と高めると思われる。
- さらに、「ものづくり」における数値シミュレーションの重要性はますます高まっており、今後はサロゲートモデル、データ同化など機械学習、データ科学との連携により、設計開発のみならず、運用への適用も期待される。

## アドバンスソフト からの情報提供

1. セミナー 今後の予定
2. 当社最新情報
3. シミュレーションサービスについて

## 1. アドバンスシミュレーション・セミナー 今後の予定

No.	開催日	講師の先生方	テーマ
第6回	11月11日（金）	国立研究開発法人 海洋研究開発機構 付加価値情報創成部門 研究員 廣部 紗也子 様 グループリーダー代理 西浦 泰介 様	産業応用を見据えた JAMSTECの研究開発
第7回	11月25日（金）	東京大学大学院 工学系研究科 マテリアル工学専攻 教授 渡邊 聡 様	ナノ・AI
第8回	12月 9日（金）	東北大学 流体科学研究所 航空機計算科学センター 教授 大林 茂 様	流体・データ同化
第9回	12月23日（金）	国立研究開発法人 海洋研究開発機構 付加価値情報創成部門 主任研究員 土井 威志 様 グループリーダー 松岡 大祐 様 主任研究員 宮腰 剛広 様	JAMSTECの 最先端地球科学
第10回	1月 20日（金）	早稲田大学 総合研究機構 グローバル科学知融合研究所 研究院教授 高橋桂子 様	計算科学と社会科学

## 2.弊社最新情報

### 弊社パッケージソフトご紹介セミナーのご案内

①2022年11月10日（木）

ナノ材料解析統合GUI NanoLabo 新機能、  
新製品 ニューラルネットワーク分子動力学システム GPU版 NeuralMD Pro  
ご紹介セミナー

②2022年11月17日（木）

アドバンスソフトの半導体デバイス、電磁波解析のご紹介  
～DX、グリーンイノベーションを加速する数値解析シミュレーション～

3

## 2.弊社最新情報

### パッケージソフトの最新情報

#### 圧縮性流体解析ソルバー Advance/FOCUS-i

##### 【概要】

非構造格子に対応した圧縮性流体解析ソルバーです。  
特に遷音速や超音速の流れの解析に適しており、高い並列化効率で計算をすることができます。

また、DDT（爆轟遷移）をモデル化したG方程式を実装しており、詳細反応モデルよりも比較的低い計算コストで燃焼解析が可能です。

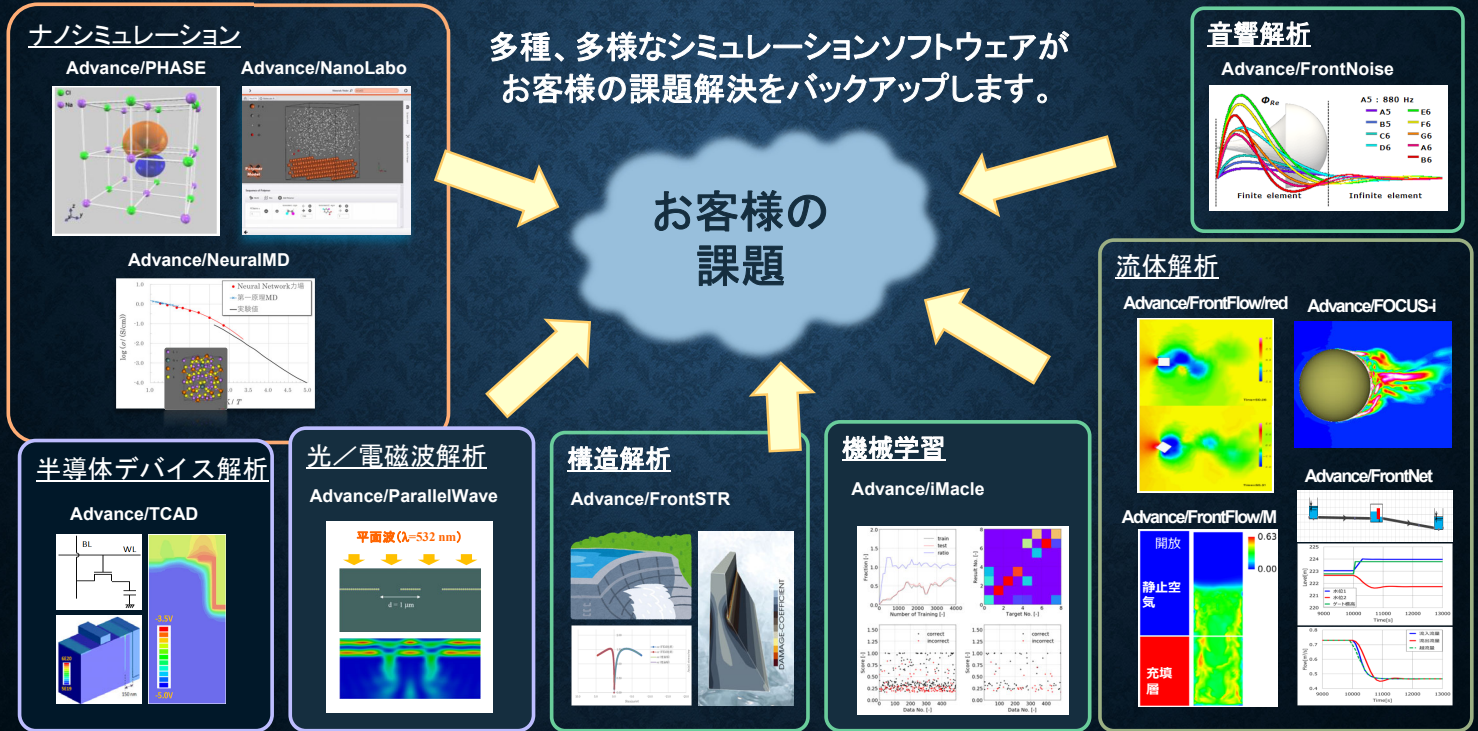
##### 【特徴】

密度ベースソルバーを採用し、圧縮性流体の解析を高精度かつ高速処理  
非構造格子による任意形状に対応  
MPI 並列による高速計算  
G方程式による低コストの爆燃、爆轟解析  
CHEMKIN®形式の入力ファイルからNASA多項式の係数を自動取得

\* CHEMKIN は米国およびその他の国における Reaction Design 社の登録商標です。

4

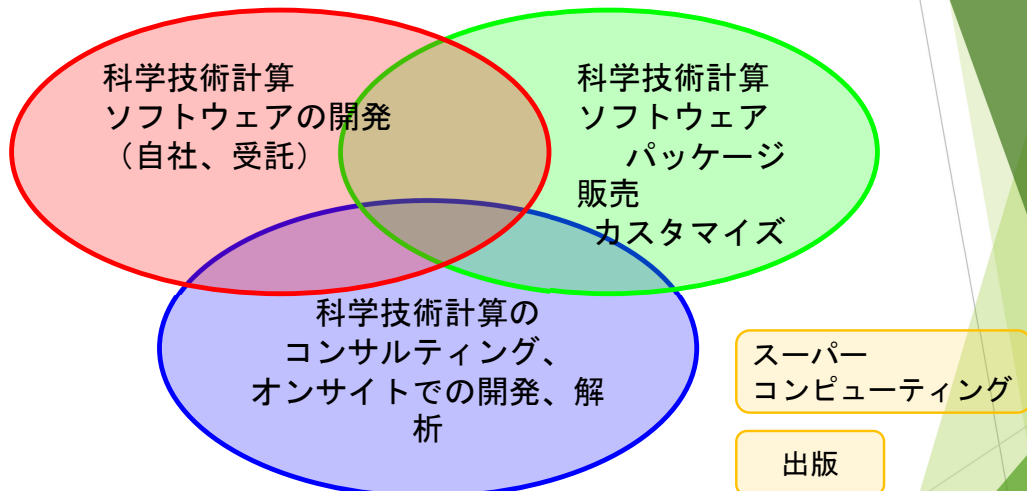
# アドバンスソフトが開発・販売するソフトウェア



Copyright ©2022 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

## 事業内容

### アドバンスソフトがご提供するサービス



科学技術計算ソフトウェアの開発を基礎とした、科学技術計算に関する様々なソリューションをご提供します。

# パッケージソフトウェアの解析事例

解析事例Webページをリニューアルしました。

アドバンスソフト 事例集

検索

<http://case.advancesoft.jp>

- ソフトウェア名からだけでなく、産業分野別、解析分野別の検索が可能となりました。
- 最新の事例を掲載しました。今後も逐次最新事例を紹介していきます。

産業分野別	解析分野別
自動車・運輸	流体
材料・化学	爆発・燃焼
産業機械	構造
航空宇宙	振動音響
エレクトロニクス	ナノ・バイオ
建設土木	プリポスト
原子力	半導体デバイス
エネルギー	光・電磁波
環境・防災	

## facebook、YouTubeでも関連記事を掲載中

<http://www.facebook.com/advancesoft.jp>



<http://www.youtube.com/user/advancesoft>







**警告**

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。