

# 「富岳」ショーケース

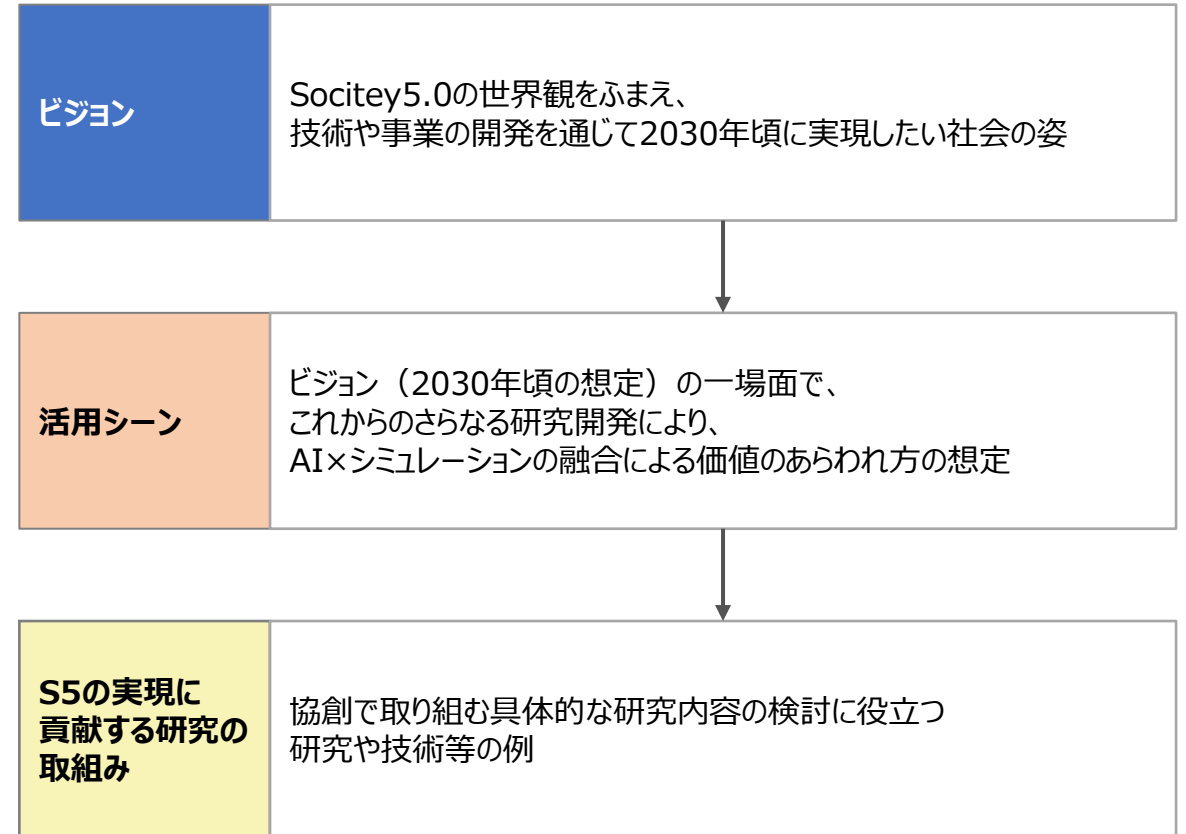
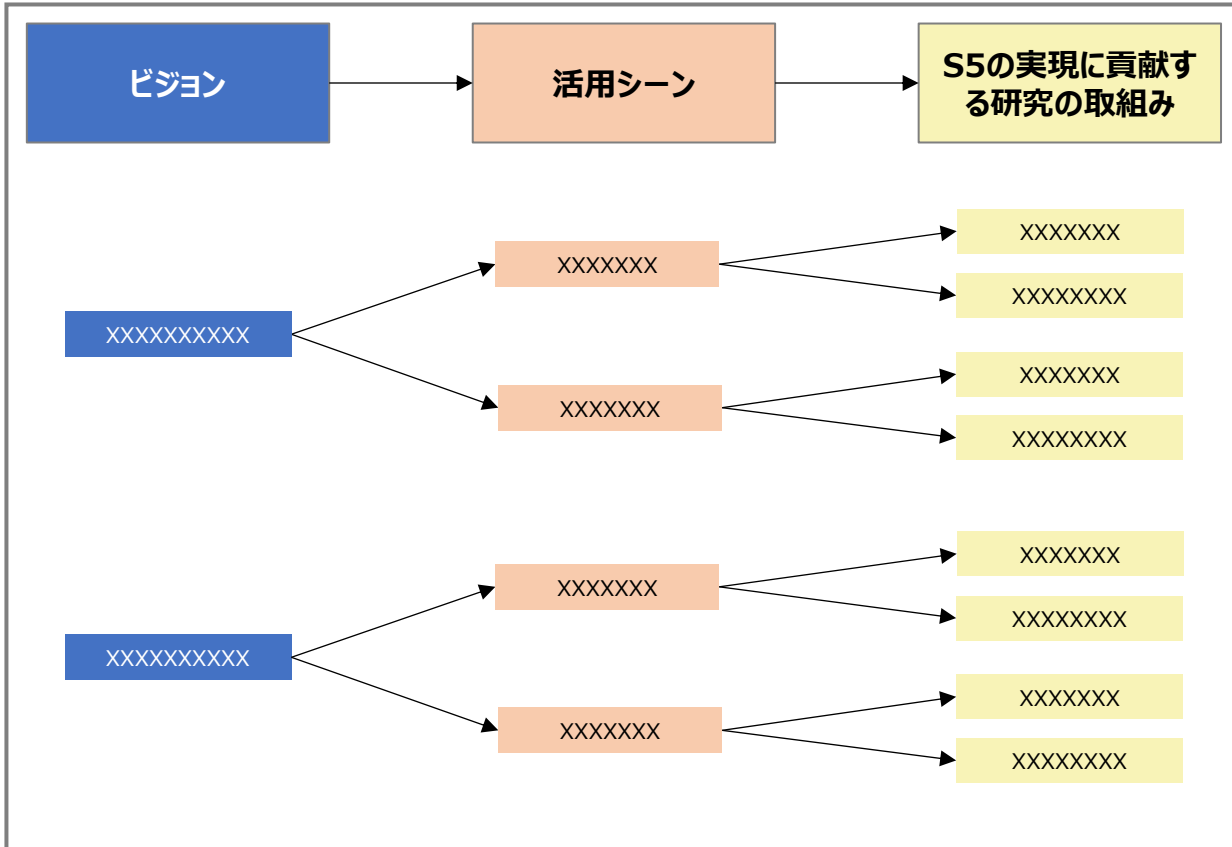
未来のものづくり

2025年7月3日

理化学研究所 計算科学研究センター「富岳」society5.0推進拠点

# 資料の解説

Society5.0の世界観をふまえ、技術や事業を通じて2030年頃に実現したい社会の姿（ビジョン）＞一場面における価値の現れ方の想定（活用シーン）＞関連する研究や技術等の例（S5の実現に貢献する研究の取組み）、とバックキャストिंगでストーリーを紹介しています。



# 資料の構成

各分野の冒頭1ページ  
 各分野の2ページ目以降  
 S5の実現に貢献する研究の取組み

: 当該分野における「ビジョン」と「活用シーン」の概要を紹介しています。  
 : 当該分野における「ビジョン」と「活用シーン」の解説を紹介しています。  
 : 「活用シーン」に関連する研究の取組みを紹介しています。

## <冒頭1ページ>

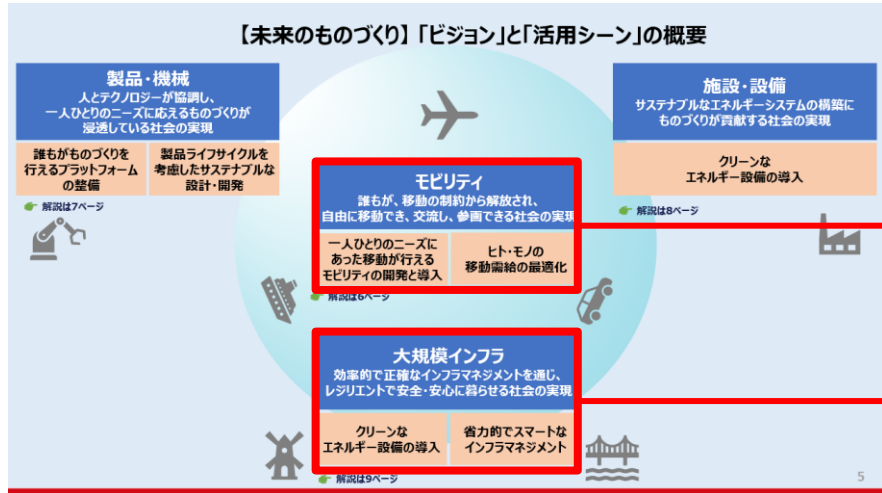
当該分野における「ビジョン」と「活用シーン」の概要を紹介

## <2ページ以降>

「ビジョン」と「活用シーン」の解説を紹介

## <S5の実現に貢献する研究の取組み>

「活用シーン」に関連する研究の取組みを紹介



### 1.【未来のものづくり】モビリティ

#### モビリティ

誰もが、移動の制約から解放され、自由に移動でき、交流し、参画できる社会の実現

都市の仮想空間と現実空間の融合により、日本全国に住む誰もが不便を感じることなく移動できる社会が実現している

**一人ひとりのニーズにあった移動が行えるモビリティの開発と導入**

高機能でエネルギー効率が良く一人ひとりのニーズにきめ細やかに応える陸海空のモビリティ開発と導入が進んでいる

11,12,13,14ページ

**ヒト・モノの移動需給の最適化**

都市全体の交通量や混雑状況などの予測により、移動手段の供給とヒト・モノの移動需給の最適化が進んでいる

15ページ

### 高次元空間を考慮したAI支援多目的最適化による自動車空力デザイン

坪倉先生 (R-CCS)

機械学習によるシロゲートモデル-リダクションモデルの開発

シロゲートモデル-リダクションモデルとシミュレーションを併用したAI支援多目的最適化

性能設計空間 (空気抵抗, 前後軸のバランス, 横風安定性...) + デザイン特性空間 = エンジニアとデザイナーの協調作業の実現!

出典: HPCシミュレーションAI活用によるSociety 5.0時代のスマートデザイン [http://www.ecce.kobe-u.ac.jp/assets/files/2021/210907tsubokura\\_HPCsummer.pdf](http://www.ecce.kobe-u.ac.jp/assets/files/2021/210907tsubokura_HPCsummer.pdf)

### 4.【未来のものづくり】大規模インフラ

#### 大規模インフラ

効率的で正確なインフラマネジメントを通じ、レジリエントで安全・安心に暮らせる社会の実現

デジタルツイン空間を活用したインフラ建設・保全・マネジメントを通じ、事故なく一人ひとりが安全・安心に暮らせる社会が実現している

**クリーンなエネルギー設備の導入**

グリーンで革新的なエネルギー技術が開発され、発電設備等への導入が進むことで、環境負荷の少ないエネルギーミックスへと転換が進んでいる

研究シーズは 21,22,23,24ページ

**省力的でスマートなインフラマネジメント**

高精度なインフラ強度・疲労予測が大規模インフラ建設時の設計・デザイン、建設後の保守に活かされている

研究シーズは 25ページ

### 「富岳」が拓く次世代航空宇宙モビリティとその社会システムへの展開

伊藤先生 (東京大学)

研究の背景と目的

- 本研究では航空宇宙モビリティシステムを対象に、空港間、空港地上面、空港内マネジメントにおいて複雑ネットワーク、待ち行列理論、セル・オートマトンシミュレーションという異なる統計解析モデルを用途に応じて連成させるマルチスケール解析をスーパーコンピュータ「富岳」において効率的に実現するソフトウェアを開発し、大規模航空交通シミュレーションを実現することを目的とする。

研究成果

- 羽田空港に到着・出発し空港面を移動する航空交通流の動的制御手法として時変流体待ち行列ネットワークモデルを新たに開発し、当該手法を用いて「富岳」において航空交通シミュレーションを実施した結果、全体の約18%の出発機に対して最大で17分程度目の目安で出発時間を調整することにより、出発待機および空港面混雑を適切に削減できることが明らかになった。
- さらにこの時変待ち行列ネットワークモデルをASEAN区域における航空交通流に応用した結果、航空機の出発時間を動的に制御することで航空交通の混雑度を45%低減できることが「富岳」を用いたシミュレーションで初めて示された。
- 一方、複雑ネットワーク理論に基づいて我が国の航空ネットワークの特性を解析したところ、顕著なBarabási-Albert (BA) 型に分類できることが明らかになり、事故発生時を想定したシミュレーションによって航空網の脆弱性を定量的に予測する手段として複雑ネットワーク理論が有効であることが本課題により明らかになった。

出典: <https://www.hpc-office.jp/output/hp20198/outcome.pdf>

# 未来のものづくり ～ビジョンと活用シーン～



# 【未来のものづくり】「ビジョン」と「活用シーン」の概要

## 製品・機械

人とテクノロジーが協調し、  
一人ひとりのニーズに応えるものづくりが  
浸透している社会の実現

誰もがものづくりを  
行えるプラットフォーム  
の整備

製品ライフサイクルを  
考慮したサステナブルな  
設計・開発

👉 解説は7ページ

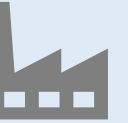


## 施設・設備

サステナブルなエネルギーシステムの構築に  
ものづくりが貢献する社会の実現

クリーンな  
エネルギー設備の導入

👉 解説は8ページ



## モビリティ

誰もが、移動の制約から解放され、  
自由に移動でき、交流し、参画できる社会の実現

一人ひとりのニーズに  
あった移動が行える  
モビリティの開発と導入

ヒト・モノの  
移動需給の最適化

👉 解説は6ページ



## 大規模インフラ

効率的で正確なインフラマネジメントを通じ、  
レジリエントで安全・安心に暮らせる社会の実現

クリーンな  
エネルギー設備の導入

省力的でスマートな  
インフラマネジメント

👉 解説は9ページ



# 1.【未来のものづくり】モビリティ

## モビリティ

誰もが、移動の制約から解放され、  
自由に移動でき、交流し、参画できる社会の実現

都市の仮想空間と現実空間の融合により、  
日本全国に住む誰もが不便を感じることなく移動できる社会が実現している

### 一人ひとりのニーズにあった 移動が行える モビリティの開発と導入

高機能でエネルギー効率が良く  
一人ひとりのニーズにきめ細やかに応える  
陸海空のモビリティ開発と導入が進んで  
いる

👉 研究シーズは  
11,12,13,14ページ

### ヒト・モノの 移動需給の最適化

都市全体の交通量や混雑状況などの  
予測により、移動手段の供給と  
ヒト・モノの移動需要の  
最適化が進んでいる

👉 研究シーズは  
15ページ

## 2.【未来のものづくり】製品・機械

### 製品・機械

人とテクノロジーが協調し、  
一人ひとりのニーズに応えるものづくりが浸透している社会の実現

需要予測を踏まえ製造プロセス全体が連携・連動して全体最適化されており、  
一人ひとりのニーズにきめ細やかに応えるものづくりが行われている

#### 誰もがものづくりを 行えるプラットフォームの整備

プラットフォーム上に集約・一元化された  
製造ノウハウなどの情報を  
アクセスして活用できるようになることで、  
誰もがものづくりを行えるようになる。

#### 製品ライフサイクルを 考慮したサステナブルな 設計・開発

環境負荷の分析結果に基づき、  
材料選定や生産プロセスが実行されること  
で、品質保持と資源循環の効率化を  
両立できている。

 研究シーズは  
16,17,18,19ページ

### 3.【未来のものづくり】施設・設備


#### 施設・設備

サステナブルなエネルギーシステムの構築に  
ものづくりが貢献する社会の実現

地球環境が保全され、誰もが自由に、持続的に、  
エネルギーを利用できる社会が実現している

#### クリーンな エネルギー設備の導入

クリーンで革新的なエネルギー技術が開発され、  
発電設備等への導入が進むことで、  
環境負荷の少ないエネルギーミックスへと転換が進んでいる

 研究シーズは  
20,21,22,23ページ

## 4.【未来のものづくり】大規模インフラ

### 大規模インフラ

効率的で正確なインフラマネジメントを通じ、  
レジリエントで安全・安心に暮らせる社会の実現

デジタルツイン空間を活用したインフラ建設・保全・マネジメントを通じ、  
事故なく一人ひとりが安全・安心に暮らせる社会が実現している

#### クリーンな エネルギー設備の導入

クリーンで革新的な  
エネルギー技術が開発され、  
発電設備等への導入が進むことで、  
環境負荷の少ない  
エネルギーミックスへと転換が進んでいる

👉 研究シーズは  
20,21,22,23ページ

#### 省力的でスマートな インフラマネジメント

高精度なインフラ強度・疲労予測が  
大規模インフラ建設時の設計・デザイン、  
建設後の保守に活かされている

👉 研究シーズは  
24ページ

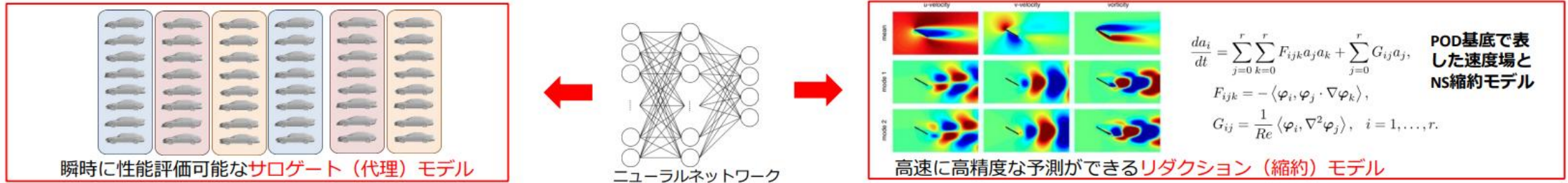
# 未来のものづくり ～S5の実現に貢献する研究の取組み～



# 意匠空間を考慮したAI支援多目的最適化による自動車空力デザイン

## 坪倉先生 (R-CCS)

### 機械学習によるサロゲートモデル・リダクションモデルの開発



### サロゲートモデル・リダクションモデルとシミュレーションを併用したAI支援多目的最適化

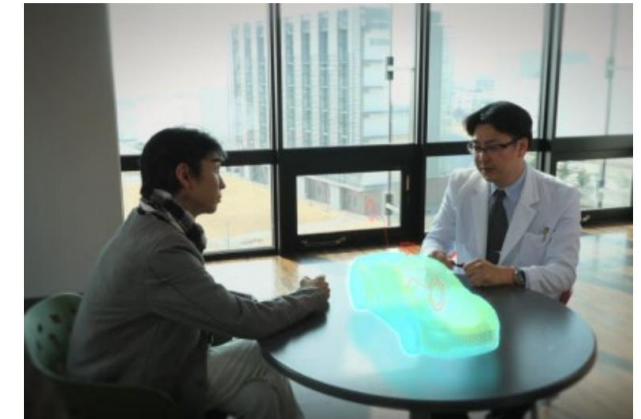
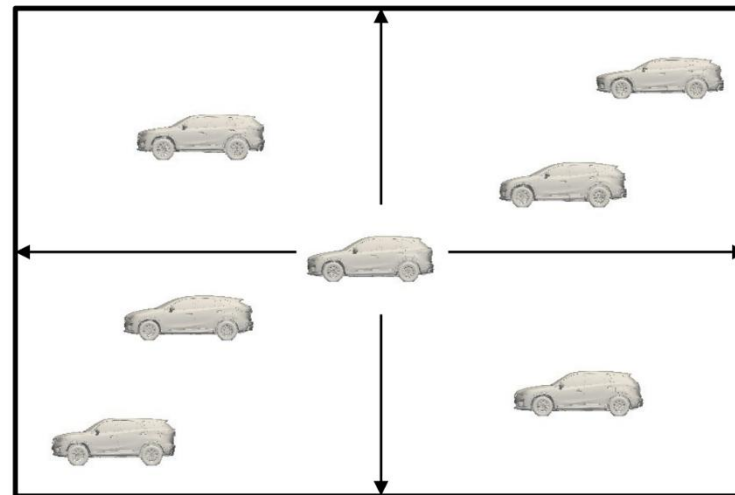
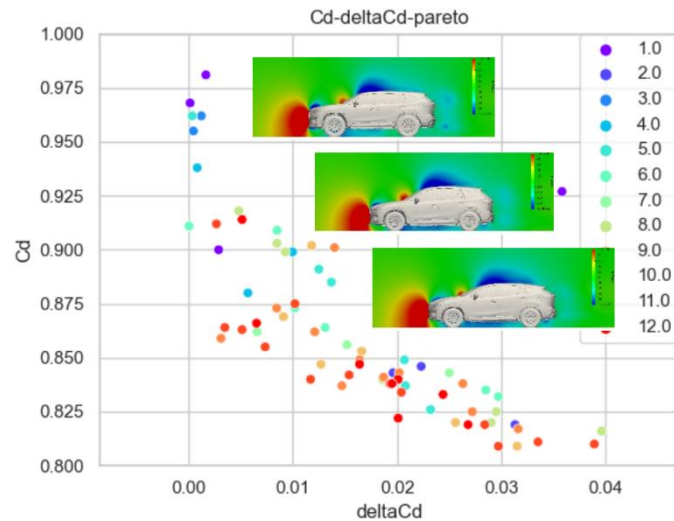
性能設計空間

(空気抵抗, 前後揚力バランス, 横風安定性...)

+

デザイン特性空間

= エンジニアとデザイナーの協調作業の実現!



# HINOCAを活用した自動車用超高効率エンジン研究 自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）

## 1. 目的

- 自動車用内燃機関の筒内現象は時間・空間的にスケールが大きく異なる物理的・化学的過程が絡み合う複雑な現象であり、詳細な現象を再現して高効率燃焼の指針を得るには、膨大な計算機リソースが必要とされる。
- 本研究では、ガソリンエンジンに関連する4研究課題とディーゼルエンジンを対象とした1課題、両エンジンに共通する1課題を題材として、スーパーコンピュータ「富岳」を活用した大規模なエンジン燃焼計算を行った。

## 2. 概要

- 本研究では、「富岳」の計算機パワーを活用し、企業や大学等では通常は実施が困難な詳細な計算を行うことにより、カーボンニュートラル実現を目標とした超高効率な自動車用内燃機関の研究開発に資する6つのサブ研究課題に取り組む。

## 3. 成果

- 「富岳」上でしか実現できない複数の吸気ポート形状でサイクル間変動計算を行い、乱流強度が高くかつ変動が小さいものを選定した。
- 副室燃焼と自着火燃焼の組み合わせを活用した超希薄急速燃焼による高効率ガソリン燃焼の可能性を見出した。
- 筒内水噴射について、噴射時期・方向について、効果的なものを選定を行った。
- 課題実施時点で作製が可能な遮熱膜1種でのエンジン燃焼計算を行い熱効率向上の可能性を把握した。
- 大型トラック用ディーゼルエンジンの燃焼について検証計算を実施し、高効率化検討のための準備を行った。
- 粒子状物質の計算については、壁面近傍の保存性の影響を強く受けることが今後の課題として明確となった。

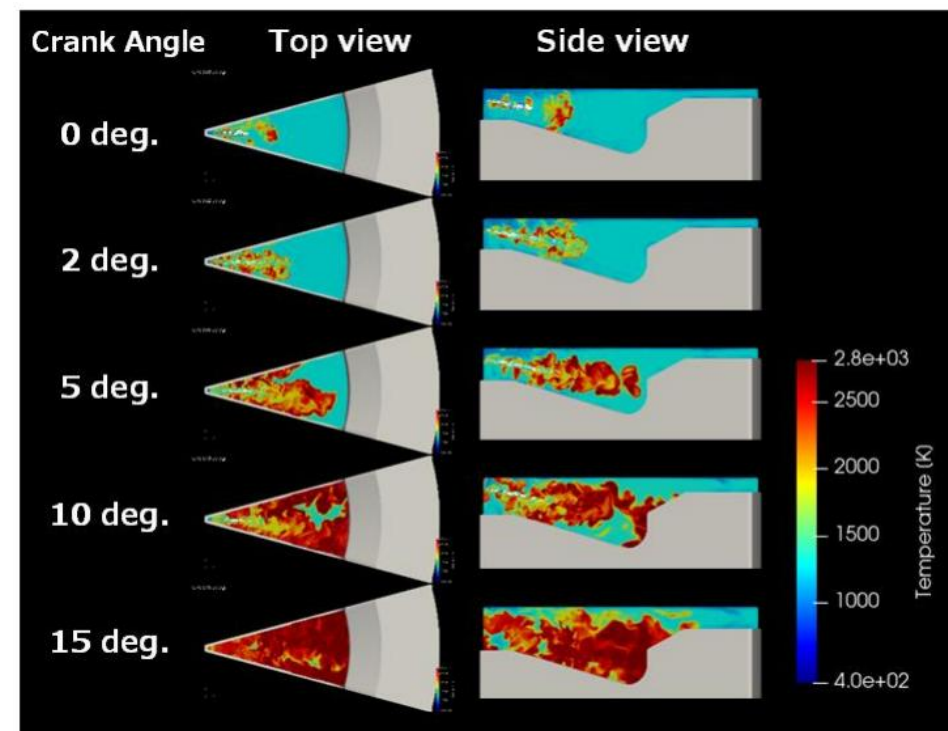


図1. 大型ディーゼル燃焼シミュレーション結果の可視化例（温度分布）

# 数値曳航水槽の実現と省エネデバイスによる推進効率の向上

## 加藤先生（東京大学）

### 概要

最大1,200億要素のWall-Resolved LES（Large Eddy Simulation）解析計算によって、船のまわりの乱流境界層を完全に解像する予測を実現し、曳航水槽試験を完全に数値シミュレーションに代替し得ることを実証するとともに、さらなる高効率な省エネデバイスの開発に貢献する。

本研究では、「富岳」の性能を引き出すようチューニングされたアプリケーションを用いた大規模数値計算が、船の性能試験を代替し得ることを証明することができた。

### 数値曳航水槽の実現

数値曳航水槽の実現の検証のため、船長4.4mと8.1mの相似模型船を対象とした数値シミュレーションを実施し、水槽試験結果と比較した（図1）。8.1mの計算はほぼ実験と一致しているが、4.4mの計算は実験より若干大きい値が得られた。図中、実線と点線は摩擦抵抗係数を使った全抵抗値の外挿ラインである。実験で4.4mと8.1mの外挿ラインが一致しない理由は、8.1mでは船体表面全面で乱流になっているが、4.4mでは層流領域が残っているためであることを確認した。

### 省エネデバイスによる推進効率の向上

省エネデバイスが船尾近傍の流れ場および自航要素にあたる影響を調査するため、付加物をつけない裸殻、舵フィンのみを付けた場合、舵バルブのみを付けた場合、および、舵フィン・舵バルブを付けた場合の4種類の条件の自航計算を実施した（図2）。舵バルブと舵フィンがついた状態では舵バルブによるハブ渦の拡散によって舵フィンが有効に働いていることがわかった。

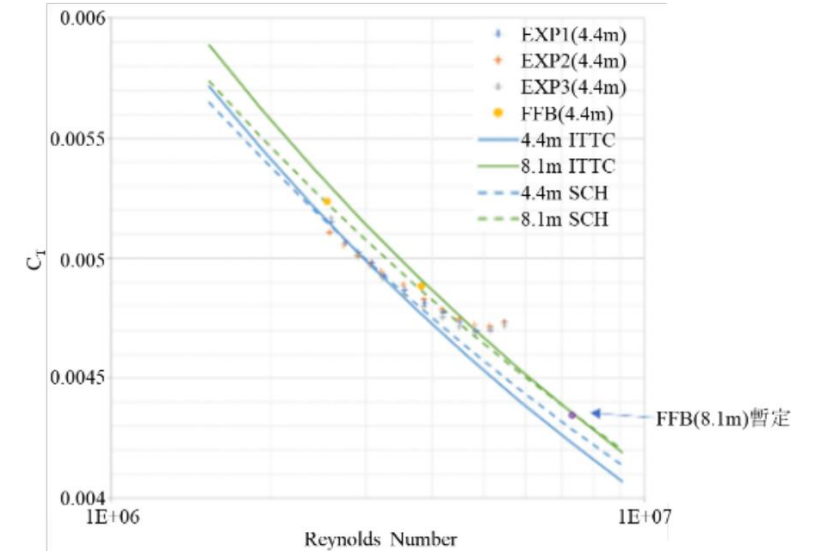


図1. 曳航水槽試験と計算の全抵抗値（CT）の比較

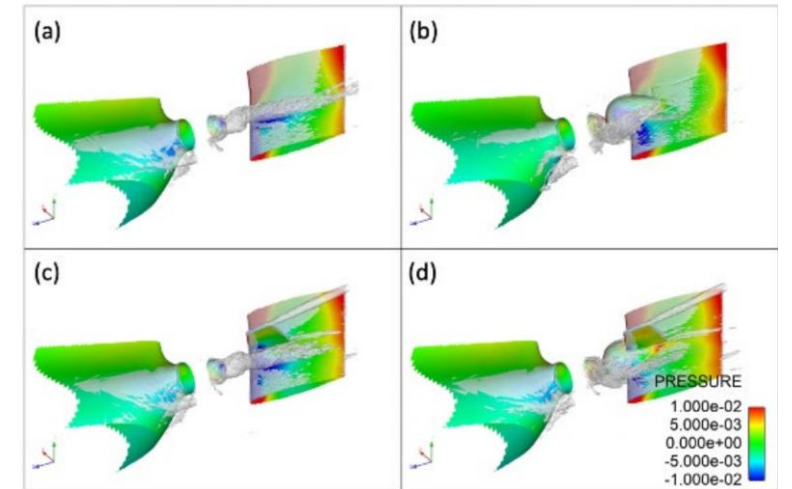


図2. 省エネデバイスを付加した場合の船尾のハブ渦の構造と圧力分布 (a)付加物なし (b)舵バルブつき (c)舵フィンつき (d)舵バルブ・舵フィンつき

# 航空機デジタルフライトが拓く機体開発DXに向けた実証研究 河合先生（東北大学）

## 概要

- 高忠実・数値流体シミュレーション技術とスーパーコンピュータ「富岳」を用いて、世界初となる航空機全機周り・実フライト高レイノルズ数条件での高忠実・圧縮性Large-eddy simulation (LES) 解析による航空機空力現象の予測評価の実現を先導的に実証する。
- 三菱重工グループと共同で、高忠実LES解析技術で実機フライト試験を代替する次世代の航空機設計開発プロセスへの展開を図る。
- 本プロジェクトで開発を進める圧縮性LES基盤ソルバーFFVHC-ACEは、航空機メーカーなどの産業界や大学などの学术界を含め、航空宇宙分野におけるHPC圧縮性LES基盤ソルバーとして広く公開することを目指す。

## 研究成果

- 高揚力装置を含む非常に複雑な航空機全機形状に対して、形状データの入力のみで完全に階層型等間隔直交格子を生成し、ロバストで高忠実な準直接（壁面モデルLES）解析を実現した。
- 本研究で対象とした高レイノルズ数条件における航空機実機複雑形状周りの壁面モデルLES解析、および主翼基本形状周りのLES解析は、数百億点規模の大規模解析が必要となる。このため本解析は、開発しているFFVHC-ACEと「富岳」を用いることによって初めて実現され、得られた研究成果となる。

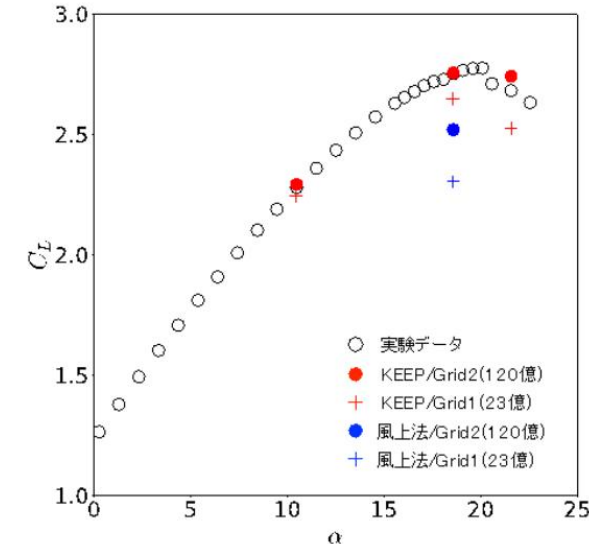
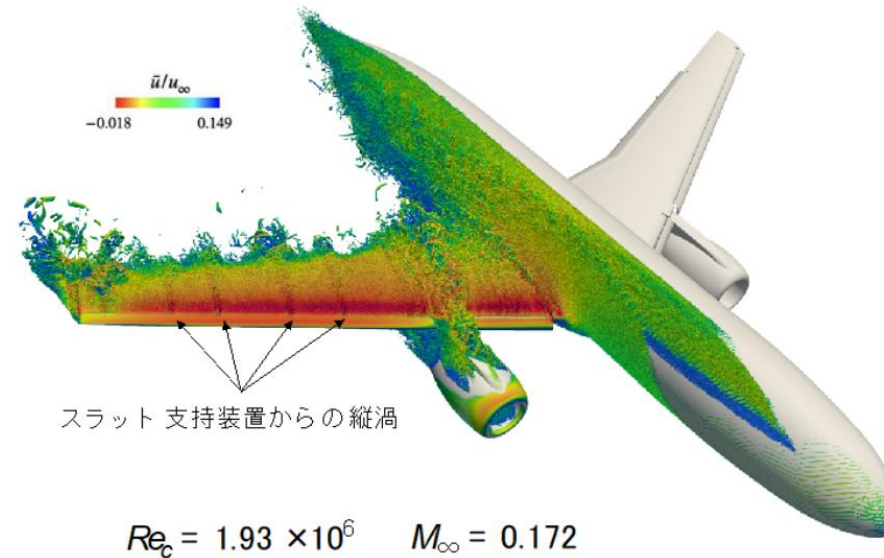


図1 FFVHC-ACEによる航空機全機まわり（JSM形状）まわりの壁面モデルLES. 左：Q値の等値面，右：迎角に対する揚力係数.

# 「富岳」が拓く次世代航空宇宙モビリティとその社会システムへの展開

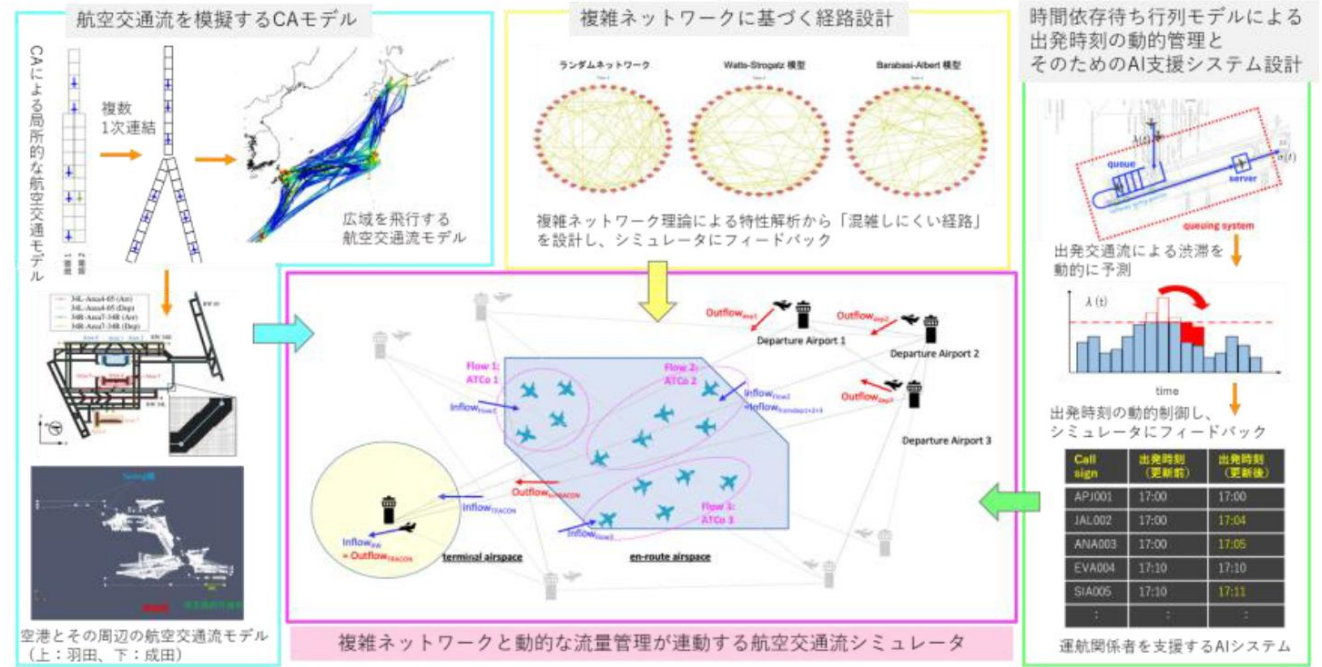
## 伊藤先生（東京大学）

### 研究の背景と目的

- 本研究では航空宇宙モビリティシステムを対象に、空港間、空港地上面、空港内マネジメントにおいて複雑ネットワーク、待ち行列理論、セル・オートマトンシミュレーションという異なる統計解析モデルを用途に応じて連成させるマルチスケール解析をスーパーコンピュータ「富岳」において効率的に実現するソフトウェアを開発し、大規模航空交通シミュレーションを実現することを目的とする。

### 研究成果

- 羽田空港に到着・出発し空港面を移動する航空交通流の動的制御手法として時変流体待ち行列ネットワークモデルを新たに開発し、当該手法を用いて「富岳」において航空交通シミュレーションを実施した結果、全体の約18%の出発機に対して最大で17分程度の目安で出発時間を調整することにより、出発待機列および空港面混雑を適切に削減できることが明らかになった。
- さらにこの時変待ち行列ネットワークモデルをASEAN空域における航空交通流に応用した結果、航空機の出発時間を動的に制御することで航空交通の混雑度を45%低減できることが「富岳」を用いたシミュレーションで初めて示された。
- 一方、複雑ネットワーク理論に基づいて我が国の航路ネットワークの特性を解析したところ、顕著なBarabási-Albert (BA) 型に分類できることが明らかになり、事故発生時を想定したシミュレーションによって航路の脆弱性を定量的に予測する手段として複雑ネットワーク理論が有効であることが本課題により明らかになった。



# CO<sub>2</sub>フリー燃焼に向けたアンモニアバーナーの最適化設計

## 奥村先生（香川大学）

### 1. 目的

- 近年、水素を効率良く運搬・貯留するためにアンモニアがキャリアとして注目されている。工場ではアンモニアを水素用途のみではなく、直接的に燃料として熱利用することが実用的観点から望まれる。アンモニアは、カロリーベースの高い燃料（383kJ/mol）でありながら、その火炎伝搬速度が低いために燃料としての利用度は低く、かつ強制的に燃焼させると大量のNO<sub>x</sub>を生成する。CO<sub>2</sub>フリー燃焼の実現のためには、アンモニアの最適な燃焼設計とNO<sub>x</sub>生成・消滅機構の解明が必要である。
- 本研究では、CO<sub>2</sub>フリー燃焼に向けたアンモニアバーナーの最適化設計を行うために、本研究では信頼できるアンモニア反応スキームについて調査した。

### 2. 概要

- CO<sub>2</sub>フリー燃焼に向けたアンモニアバーナーの最適化設計を行うために3種類のアンモニア反応スキームを試行し、計算と実験結果（火炎構造、NO<sub>x</sub>排出）を比較することにより、NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>燃料に対する最適かつ精度の高いスキームを選出する。

### 3. 成果

- CRECK-Mechスキームを使用して得られた解析結果は、火炎構造とNO<sub>x</sub>排出レベルにおいて実験結果とよく一致した。実験と数値計算（燃焼速度と火炎構造）を比較すると、H<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub>燃料の条件下で、GRI-Mech3.0とOkafor-Mechの反応進行は過小評価されることがわかった。
- CRECK-Mechスキームを使用することにより、NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>燃焼におけるNO<sub>x</sub>の生成/還元メカニズム（反応パス）が明らかにされた。OHラジカルとHラジカルが乱流によって供給されると、大量のNO<sub>x</sub>が誘導される。同時に、NO<sub>x</sub>とNH<sub>3</sub>の混合および還元反応が促進され、その結果、NOがN<sub>2</sub>に還元される。
- NO<sub>x</sub>の還元反応は、高温領域内の生成反応周辺（特にNH<sub>3</sub>燃料が過濃な領域）で激しく起こりNO<sub>x</sub>の増加を抑制する。従って、NO<sub>x</sub>がN、NH、およびNH<sub>2</sub>と十分に反応できる還元ゾーンをアクティブに配置することがバーナーの設計において重要である。
- 水素保炎型のアンモニア乱流燃焼バーナーを開発できた。

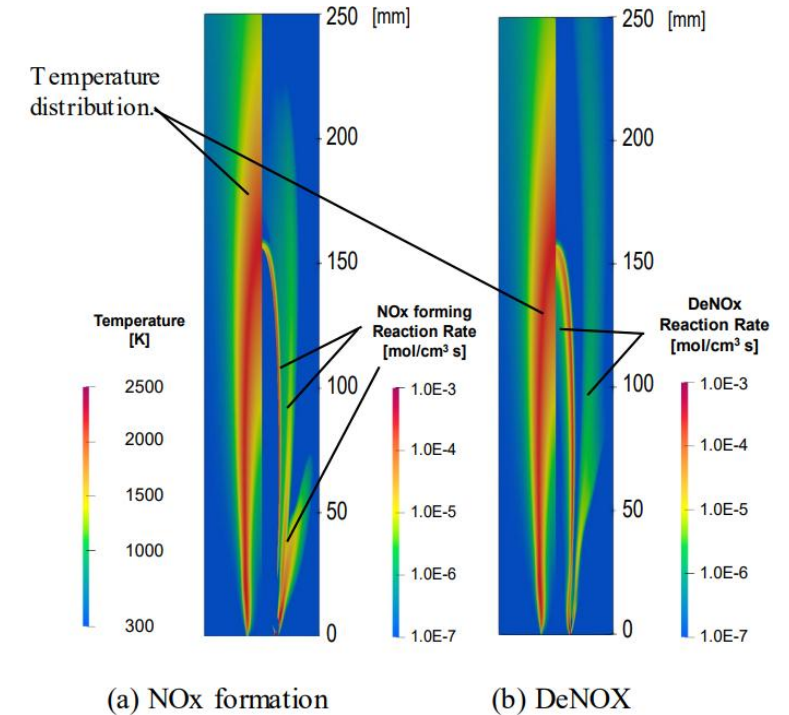


図1. 温度分布(左半分)と、(a)NO<sub>x</sub>生成 (b)NO<sub>x</sub>消滅の反応速度分布(右半分) (CRECK-Mech使用)

# 大規模LES解析によるファン乱流場の再現と空調・冷却技術の検討 デンスー

## 1. 目的

- カーボンニュートラル社会における車両の電動化に伴い、車室内空調装置や機器冷却装置の小型化、省電力化が益々重要になっている。装置の小型化により送風機と熱交換器が近接し、送風機後流の乱れた流れが整流されずに熱交換器へ流入するため、さらなる高効率化には乱流場を考慮した熱交換器・送風機的设计最適化が課題となる。
- 本研究では、送風機後流乱流が熱交換器伝熱面の熱伝達率に与える影響とメカニズムを解明することを目的とする。

## 2. 概要

- 車載用熱交換器（ラジエータ）のルーバフィン列を抽出したモデルを解析系として使用し、非構造格子系流体解析ソルバ NuFD/FrontFlowRed を用いて大規模LES解析を実施し、流入する空気の乱流が熱交換器伝熱面の熱伝達率に与える影響を明確化する。

## 3. 成果

- 熱交換器伝熱面に対して送風機後流の乱れが与える影響として、以下のことが明らかになった。
  - 乱流中の伝熱フィン、一様流中の伝熱フィンと比較して全フィン面平均熱伝達率が約10%上昇する。
  - 乱流中の伝熱フィンの熱伝達率向上はフィン前方から1枚目と3枚目のルーバで顕著である。この理由として、主流の乱れによりフィン表面の渦構造が微細化し、主流と伝熱面の熱交換が促進するためと考えられる。
- 「富岳」による大規模解析によりルーバ周りの微細な渦構造を可視化し、熱伝達率向上の詳細なメカニズムを考察することができた。今後は「富岳」で得られた知見を元に実機評価を行い、熱伝達率向上メカニズムの仮説を検証する。

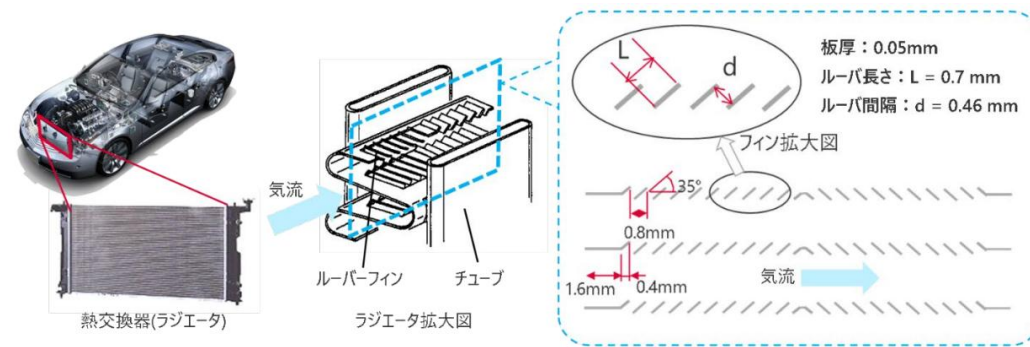


図1. ルーバフィン列のモデル

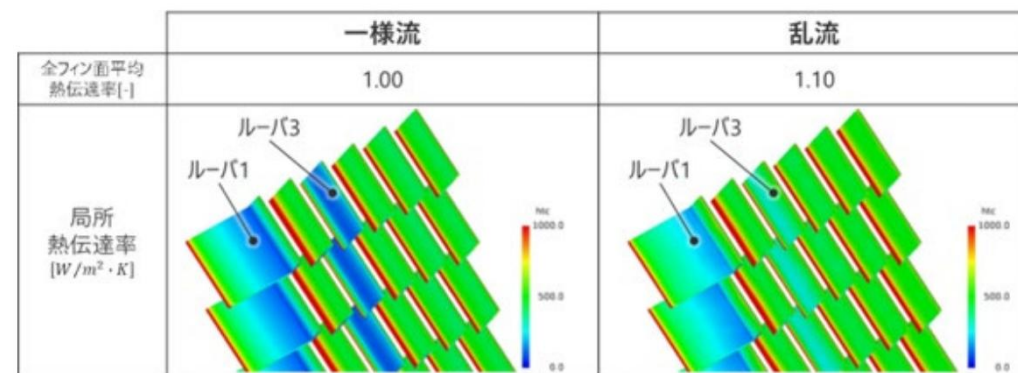


図2. フィン列の熱交換性能と局所熱伝達率分布

# ヒートポンプ用ファンの性能向上 加藤先生、長谷川先生（東京大学）

## 目的

- ・ サロゲートモデルを活用し、従来は検討されていなかった広範な設計パラメータを探索することによって、従来性能を大幅に凌駕するプロペラファンを設計する。

## 概要

- ・ ヒートポンプ用プロペラファンの設計パラメータの抜本的な見直しを実施した。
- ・ ファン性能と流れ場の予測を目的として、RANS（Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation）とLES（Large Eddy Simulation）による流体解析を実施した。
- ・ 流体解析のソルバーとして、「富岳」の計算ノード（CPU）上で高速な計算が実施できるように最適化されているFrontFlow/blue（FFB）を使用した。

## 結果

- ・ 実機ファンの3次元形状測定に基づく設計とモデリングを行う環境を構築した。
- ・ ヒートポンプ用プロペラファンの設計パラメータ範囲を大幅に拡大し、薄型化とディフューザを備えた改良ファンの概念設計ができた。
- ・ 改良ファンは、各部の形状の最適化は未実施であるものの、現時点の予測ではファン単体と筐体に組み込んだ状態でのいずれの性能評価においても、現行ファンの性能を上回る結果が得られており、概念設計の有効性を確認することができた。

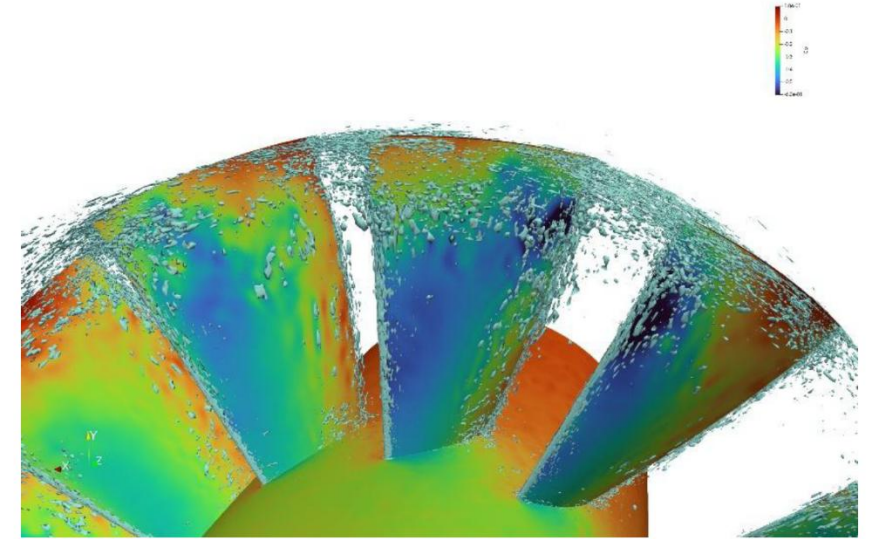


図1. FFBを用いたLES解析により得られた、静圧係数の瞬間分布

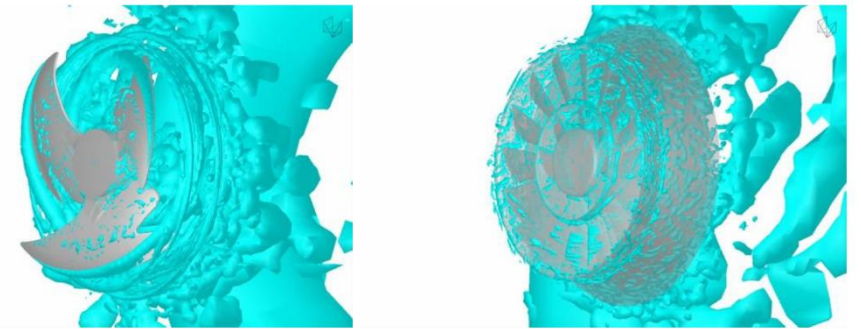


図2. 現行ファン（左）と改良ファン（右）の羽根まわりの渦構造の比較

# 水まわり住宅設備機器のためのミスト状微小水滴飛散シミュレーション TOTO

## 1. 目的

- 水まわりにおけるエコ・快適性・清潔性を両立した「サステナブル・プロダクト」を開発するため、昨年度までにスーパーコンピュータ「富岳」を用いてシャワーや浴室における1mmレベルの微小水滴や薄膜流れの気液混相流を計算し、製品の性能を評価するシミュレーションのフレームワークを構築した。
- 非構造格子流体計算において、シャワー内部の微細構造における1億5千万メッシュの混相流シミュレーションが実用的な計算時間内でできるようになり、これまで衛生陶器製品に限定されていた混相流シミュレーションが、水栓やシャワー、浴室など他の部位にも適用できることが分かっている。
- 本研究では、0.1mmレベルのミスト状微小液滴の飛散および製品性能評価のシミュレーション技術の確立を目的とし、今後のミスト状吐水製品の開発に活用するシミュレーション技術の構築を目指す。

## 2. 概要

- シャワーや浴室における微小水滴や薄膜流れ等の気液混相流を計算する数値モデルを開発し、0.1mmレベルのミスト状微小液滴の飛散および製品性能評価のシミュレーション技術の確立する。

## 3. 成果

- シャワーの吐水から飛散、着水のシミュレーションのフレームワークを用いて、ホロコーン型ミスト生成シミュレーションを行い薄い水膜が分裂してミストを形成することを確認した。
- ミスト状微小液滴の飛散を評価するために空気抵抗をモデル化し直交格子の空気の流れとの強連成によるSPH粒子法の計算技術を構築することにより、微小液滴が空気抵抗を受けて速度低下しながら飛散する様子を自社で初めて実用的に計算することができた。また皮膚の溝と汚れをモデル化し、一般シャワーに比べてミストシャワーの洗浄力が高いことを示した。
- これらの流体計算を活用することにより、シャワーに限らず様々なミスト吐水を含む製品の快適性・衛生性・洗浄力性能を事前評価できるシミュレーション技術の確立できたと考える。

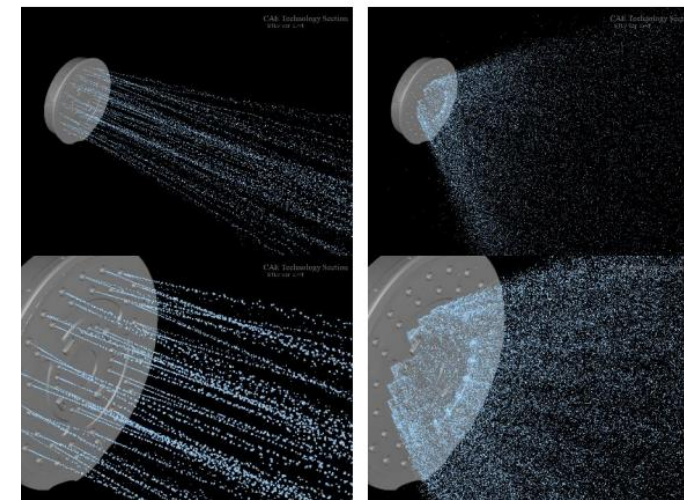


図1. 一般シャワー吐水(左)、ミストシャワー吐水(右)のシミュレーション結果

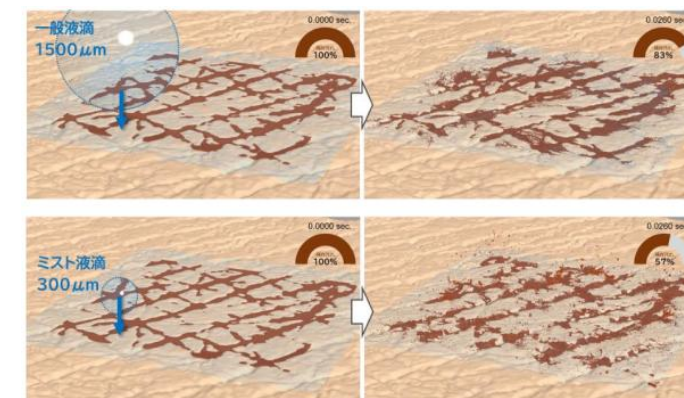


図2. 液滴が皮膚表面に衝突し、汚れが除去されるシミュレーション結果：一般シャワー(上)、ミストシャワー(下)の汚れの除去シミュレーション結果

# 超臨界CO<sub>2</sub>タービンのデジタルツインの構築と活用

## 吉村先生（東京大学）

### 研究の背景と目的

Society5.0を支える電力システムの主要クリーンエネルギーシステムとなる CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) 技術の適用に適した次世代火力発電システム（超臨界CO<sub>2</sub>タービン等）のデジタルツインを構築することを目的とする。

### 結果

- Flamelet/ANN (Artificial Neural Network) 燃焼モデルを実装したFFR-Combを用いてスーパーコンピュータ「富岳」上で20,000並列の計算を行った。燃焼器全領域の大規模LES燃焼解析を3日程度の短期間で完了でき、実機実圧の超臨界燃焼場を高精度に予測するうえで有効な手法であることを確認した。
- 「富岳」を用いて、パイロットスケール超臨界CO<sub>2</sub>タービン（東芝ESS製）の、実圧28.5MPaに関するスーパーシミュレーションを実施し、実機の高度化に向けた知見を抽出可能な見通しを得た。
- 燃焼器出口における温度分布を実測値及び想定値と比較することにより、本シミュレーションが十分に高い精度で行われていることを確認した。
- Flamelet法とAI（機械学習）を連携活用した高精度かつ高効率のサロゲート燃焼モデルを構築し、それをFFR-Combに実装することによって、超臨界CO<sub>2</sub>タービンのデジタルツイン技術を構築した。本手法により、シミュレーションの予測精度を保ったままで、Flamelet法で用いるデータベースの容量、およびシミュレーションの使用メモリを大幅に削減することに成功した。

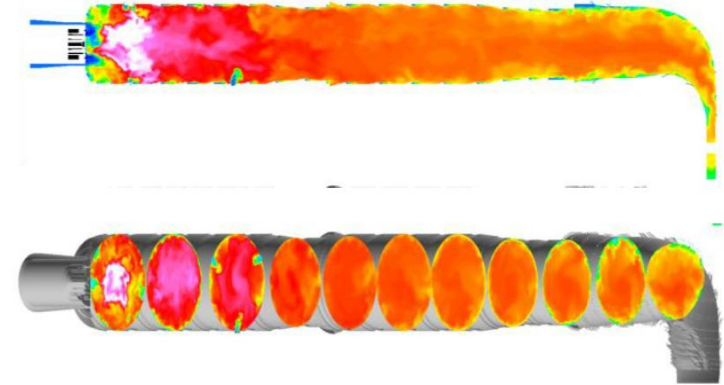


図1. 燃焼器内瞬時温度の中心断面及び垂直断面瞬時分布

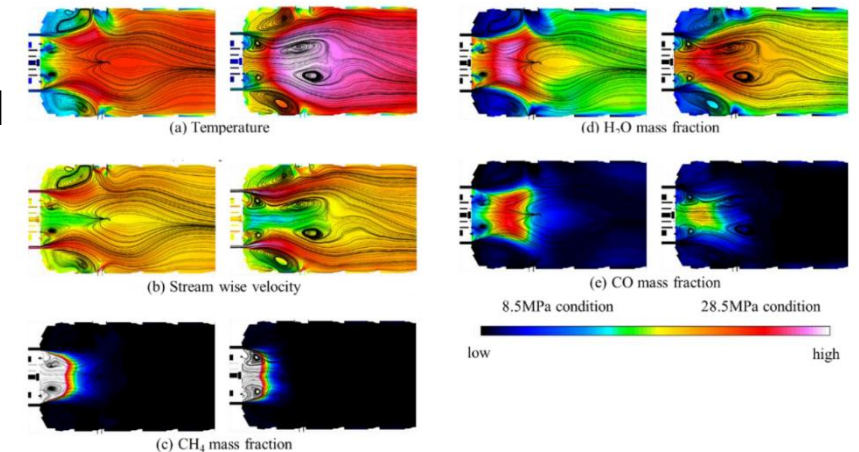


図2. バーナ近傍の時間平均温度、流速、及び化学種質量分率（CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, CO）の中心断面分布

# タンデム配置の大型洋上風車のデジタルツインの構築と活用

## 吉村先生（東京大学）

### 研究の背景と目的

- Society5.0を支える電力システムの主要クリーンエネルギーシステムとなる CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) 技術の適用に適した洋上windファーム（タンデム配置の大型洋上風車等）のデジタルツインを構築することを目的とする。

### 結果

- 3台の大型風車を、風車間距離を実際のwindファームに近い直径Dの7.5倍でタンデム配置し、FFBによりLES解析を行い、後流の回復特性を明らかにした。風車間距離が大きくなると解析規模、解析時間が膨大になり、従来のコンピュータではLES解析を行うことが難しかったが、「富岳」を用いることによりこれらの解析が可能となった。
- 米国再生可能エネルギー研究所（NREL）が公開している5MW風車（NREL5MW風車）3台の解析において、「富岳」400ノードを用いてFFBによるLES詳細解析を行った。得られた風車近傍と風車遠方の全領域の流れ場データをもとにWake分布モデルを構築したことにより、風車遠方場のみならず風車近傍についても良好な予測を行うことが可能となった。
- 「富岳」上での累積疲労損傷解析環境を整備し、タンデム風車モデルを使って動作試験を行った。これにより、流体-構造-疲労損傷の全ての解析を「富岳」で連続して実行する環境を実現した。

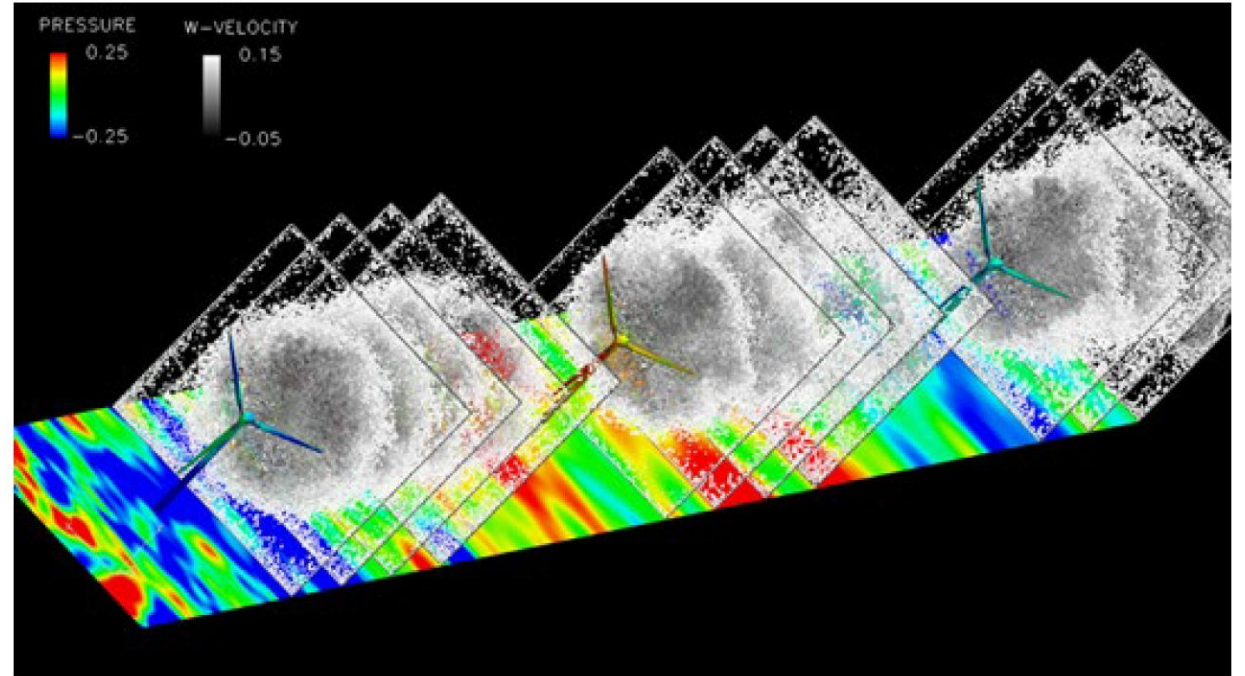


図1. windファーム周辺の流れと水面圧力の鳥瞰図

# 核燃焼プラズマ閉じ込め物理の開拓

## 渡邊先生（名古屋大学）

### 研究の背景と目的

磁場核融合の科学的実証に向けたITER（国際熱核融合実験炉）が目指す核燃焼プラズマ状態を維持するには、装置内部のプラズマ密度や温度分布がいかにして形成され、電磁場揺らぎをともなって自発的に発生する擾乱に対してプラズマがどのように応答するかを理解することが極めて重要となる。

本研究では、スーパーコンピュータ「富岳」を用いた大規模な第一原理シミュレーションにより、磁場閉じ込め核融合プラズマ乱流による粒子・運動量・熱輸送ならびに高エネルギー粒子の輸送機構解明に取り組む。

### 核燃焼プラズママルチスケール乱流シミュレーション

「富岳」向けに最適化されたGKVコードを用いて、核燃焼プラズマを想定した燃料・灰混合プラズマかつ高電子温度領域でのマルチスケール乱流シミュレーションを実現し、異種乱流間の相互作用により電子熱輸送束が低減しうることを新たに発見した。

### 「富岳」における大域的乱流輸送解析コードの最適化

「富岳」ではじめて利用可能となった可変精度演算を活用した省通信型行列解法により、「富岳」数千ノードを用いてITER規模の数値実験を現実的な計算時間で実行できることを実証した。

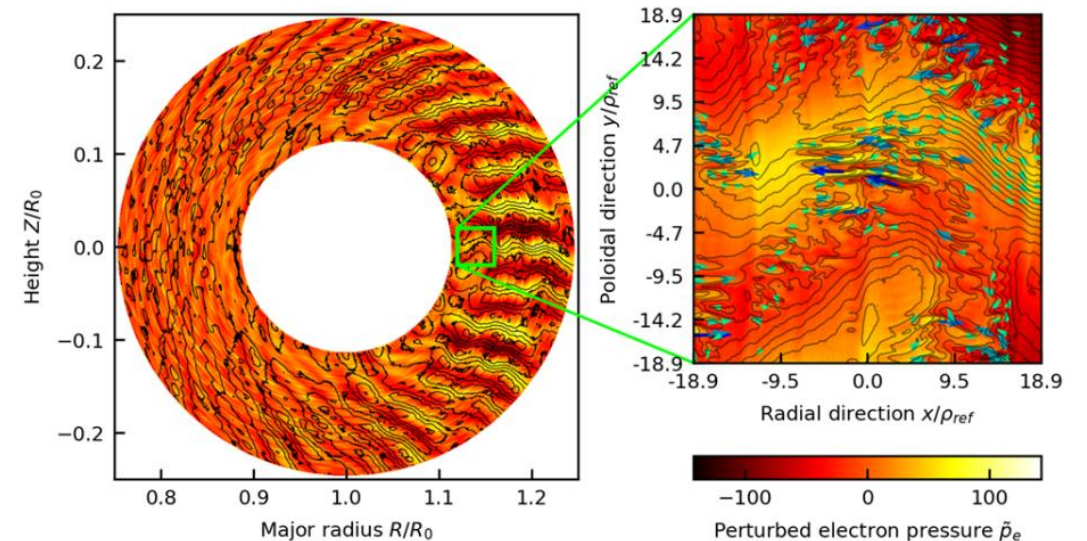


図1. 電子圧力揺動 $\tilde{p}_e$ のカラーマップおよび乱流揺動の流線（黒線）のポロイダル断面図

上図の左には、比較的大きなスケールでTEMの揺らぎが発生し、流線が半径方向に長く伸び、それと重なるように高温部分が外側へ、低温部分が内側へ輸送されていることが分かる。一方、右の拡大図を見ると、さらに微細なETG乱流の揺らぎが共存していることが確認できる。これは、TEMが作る半径方向への流れに移送される電子圧力揺らぎが、小さなスケールのETG乱流によって乱され、TEM乱流の発達が阻害されるという物理過程を示唆している。こうした電子スケール乱流揺動は正味の熱輸送束にも影響を与える。

# IGCC実機ガス化炉のマルチスケール・マルチフィジクス過渡応答性の評価

## 三菱重工業

- ### 1. 目的
- 発電分野におけるCO<sub>2</sub>排出量削減には、短・中期的には化石燃料発電の高効率化とCO<sub>2</sub>回収貯留技術との統合、中・長期的には褐炭ガス化により製造されたブルー水素利用発電が期待されている。ガス化炉はこれらの基幹設備であり、高効率・安定的な炉の開発が強く求められている。
  - 本研究では、実機ガス化炉内熱流体反応場のLESを実施するとともに、過渡的状态における溶融スラグ層のガス化炉内壁面上への発達や離脱といった現象を構造解析により捉えることを目的とする。

- ### 2. 概要
- 従来のEulerian-Lagrangian法による固気二相反応流LESに対して、溶融スラグ流を考慮するVOF (Volume of Fluid) 法をカップリングした固気液三相反応流LESを実機スケールガス化炉に対して適用し、実機スケールガス化炉内反応流解析を行う。
  - IGCC実機ガス化炉内の非定常固気二層反応流れ解析と伝熱・構造/固液スラグ層モデルとの片連成解析による検討を進め、ユニットセルモデルによる固液分離スラグ層を考慮した伝熱・構造解析を行う。

- ### 3. 成果
- 実機スケールガス化炉内に発達する反応流れ場については、VOF法をカップリングした固気液三相反応流LES法は従来のLES法と同等の結果が得られることを確認した。
  - ガス化炉内壁面において灰粒子が付着し、溶融スラグ層を形成する過程を計算した。定性的には実現象に合致するものと思われるが、溶融スラグ流れの時定数が極めて大きいことから、今後の課題として更なる計算の高速化手法が挙げられた。
  - 反応流れ解析と伝熱・構造/固液スラグ層モデルとの片連成による伝熱・構造過渡解析を実施した結果、急速負荷変化により急速加熱が行われた際スラグ層内応力分布の結果から、固体スラグ層の破壊可能性領域を評価することに成功した。

出典：<https://www.hpci-office.jp/output/hp230091/outcome.pdf>

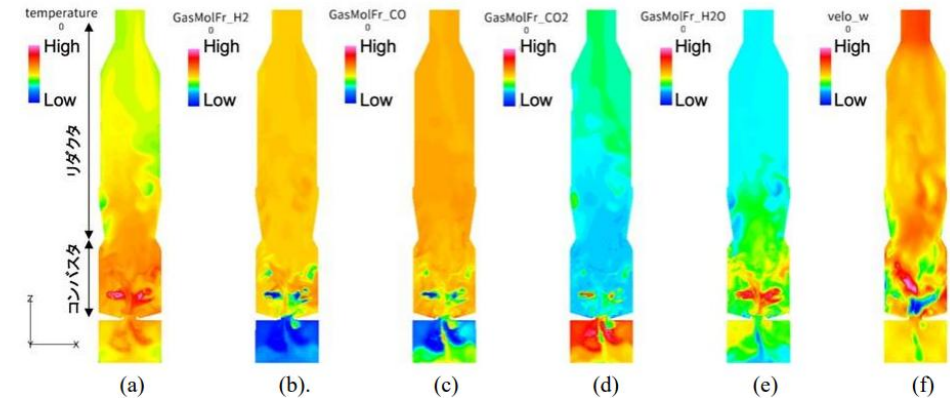


図1. ガス化炉内の各物理量の瞬間分布  
(a)ガス温度、(b)H<sub>2</sub> モル分率、(c)CO モル分率、(d)CO<sub>2</sub> モル分率、(e)H<sub>2</sub>O モル分率、(f)軸流速 (スラグなし条件)

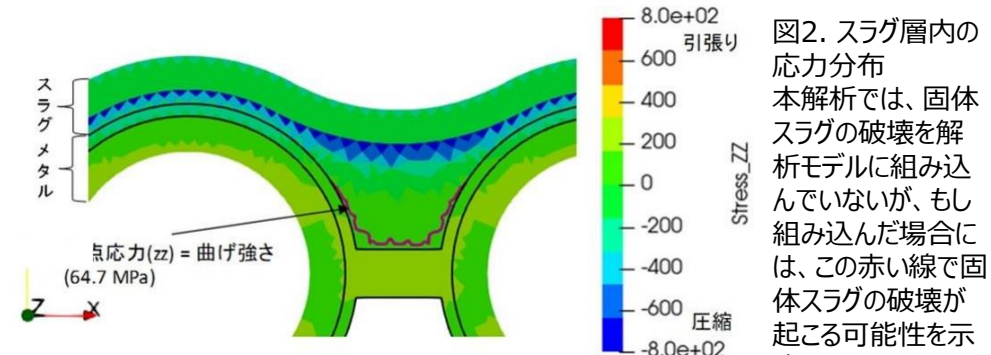


図2. スラグ層内の応力分布  
本解析では、固体スラグの破壊を解析モデルに組み込んでいないが、もし組み込んだ場合には、この赤い線で固体スラグの破壊が起こる可能性を示唆している。

# 長大斜張橋全橋を対象とした流体—構造物連成解析による耐風設計 阪神高速道路

## 1. 研究開発の目的

- 世界最大規模の多径間連続斜張橋（全長約2700m）の耐風設計の一環として橋梁全体を対象とした流体—構造物連成解析を実施し本橋の耐風安全性を検証することを目的とする。

## 2. 概要

- 主塔単体模型ならびに主桁断面模型の風洞試験で確認されている振動現象を流体—構造物連成解析にて計算し、その再現性の確認するとともに、橋梁全体をモデル化した解析を行い耐風設計への適用に向けた課題の検証を行った。
- 本研究で実施する計算は要素数が膨大であり、かつ空力振動の統計量を算出するためにトータル時間（計算時間）を長くとる必要がある。特に橋梁全体では要素数約2億の計算格子でトータル時間は600秒である。このような計算は通常のコンピュータでは実施不可能であり、HPCIのなかでも「富岳」でのみ現実的に計算可能な計算ケースと言える。

## 3. 成果

- 主塔単体と主桁断面の流体—構造物連成解析、ならびに橋梁全体を対象とした気流解析により、本手法の妥当性が確認された。また、橋梁全体の流れの様子が確認でき橋梁の耐風設計に資する有益な知見が得られた。
- 主塔単体の計算結果では、振動による主塔周りの風の流れや渦のはく離順序を可視化することと共に、空力不安定振動の発生メカニズムを確認することができた。また、主桁断面の計算結果では、耐風付加物（フラップ）による主桁の空力不安定振動の制御の可能性について示すことが出来た。
- 橋梁全体モデルを対象とした計算では、主桁の部位ごとに平均抗力係数と平均揚力係数が異なることを示した。この結果は橋梁全体モデルを対象とする計算を実施した本研究が初めて示した性状である。
- 今後は、この計算結果を参照し橋梁全体モデルによる流体—構造物連成解析を実施し、橋梁全体の空力不安定振動の性状を調査する予定である。

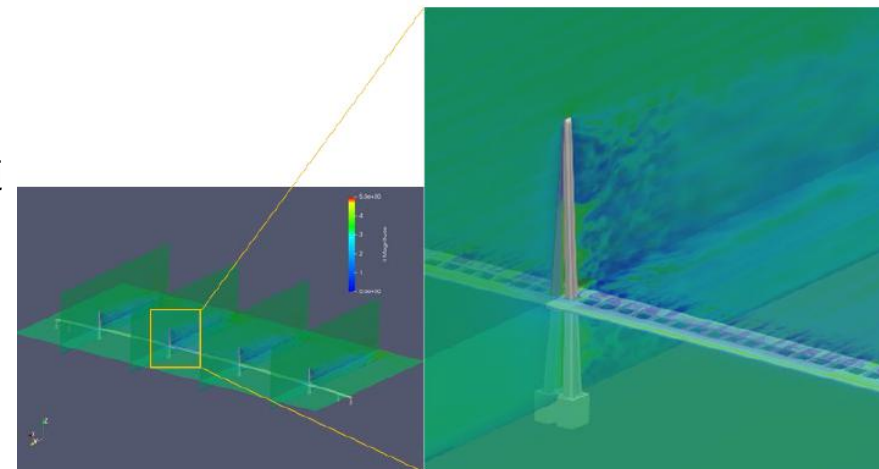


図1. 橋梁全体モデルの計算結果（風速コンター [m/s]）

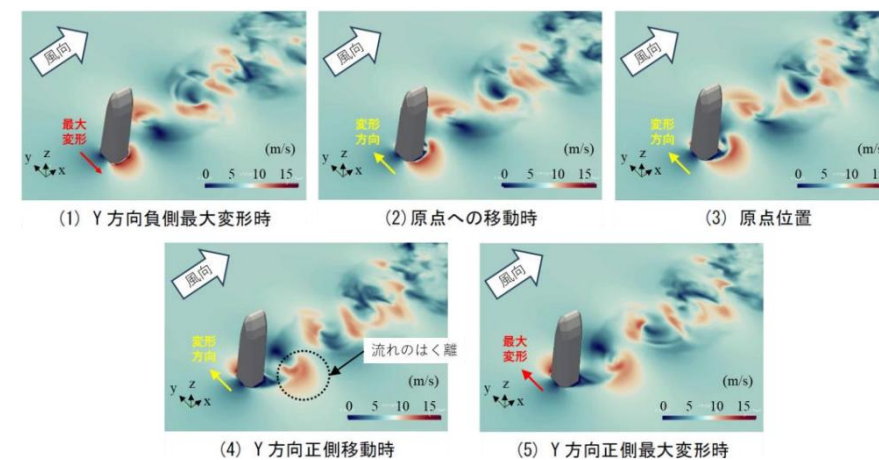


図2. 主塔周りの風速の絶対値のコンター図

## 【未来のものづくり】社会実装事例の一覧 (1/4)

「富岳」を活用したものづくり分野における多様な社会実装事例を紹介するため、革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ(HPCI)の利用報告書から関連する利用課題をピックアップしました。

産業界で「富岳」を利用した課題のうち、「研究分野」が「工学・ものづくり」となっているものを一覧化しています。

実施期間	課題名	機関名
令和2年度	高速鉄道車両の大規模非定常CFDシミュレーション	川崎重工業株式会社
令和2年度	商用CAEアプリケーションの動作検証と性能評価	富士通株式会社
令和2年度	富岳を活用した自動車先端CAEの試行と評価	一般社団法人 日本自動車工業会
令和2年度	WHEELの動作確認	合同会社ロングテールソフトウェア
令和2年度	「富岳」による構造最適設計に向けた試行計算	富士電機株式会社
令和2年度	航空エンジンファンの動静翼同時最適化	株式会社IHI
令和2年度	住宅設備機器開発のための並列GPU気液二相流体解析プログラムのA64fx並列システムへの移植	TOTO株式会社
令和2年度	実用的CAEソフトウェアの性能評価による数値解法の予備的検討	アドバンスソフト株式会社
令和2年度	工作機械のデジタルツイン加工シミュレーション技術開発	DMG森精機株式会社
令和2年度	タイヤ用ゴム材料のマルチスケール・シミュレーション	住友ゴム工業株式会社
令和2年度	熱流体解析アプリケーションscFLOWの動作検証と性能評価	富士通株式会社
令和2年度	電磁界解析アプリケーションJMAGの動作検証と性能評価	富士通株式会社

## 【未来のものづくり】社会実装事例の一覧 (2/4)

実施期間	課題名	機関名
令和3年度	微細気泡および飛沫を含む気液二相流シミュレーションの住宅設備機器適用	TOTO株式会社
令和3年度	乱流の直接シミュレーションによる曳航水槽代替技術の実用化	一般財団法人日本造船技術センター
令和3年度	大規模LES 解析による車室内流れの再現と飛沫感染症防止技術の検討	株式会社デンソー
令和3年度	スーパーコンピュータ「富岳」を活用した自動車先端CAEの開発	一般社団法人日本自動車工業会
令和3年度	多段多孔穴を用いた調節弁の低振動と低騒音化に関する研究	アズビル株式会社
令和3~4年度	航空機の大規模高精度非定常CFDシミュレーション	川崎重工業株式会社
令和3~5年度	HINOCAを活用した自動車用超高効率エンジン研究	自動車用内燃機関技術研究組合
令和3年度	工作機械のデジタルツインテストカット技術開発	DMG森精機株式会社
令和3年度	乱流微粒化モデルを統合した大規模LESによる航空用エンジン燃焼器性能の推定	株式会社IHI
令和3年度	熱流動解析コードの動作検証及び並列化効率の評価	三菱FBRシステムズ株式会社
令和3年度	CFDソフトウェアの動作確認及び適用性の検討	株式会社数値フローデザイン
令和3年度	流体解析アプリケーションscFLOWの超大規模並列性能改善	富士通株式会社
令和3年度	AVL FIREの富岳での動作検証	株式会社三井E&Sマシナリー
令和3年度	航空エンジンファン動翼・静翼同時最適化	株式会社IHI
令和3年度	熱流体解析アプリケーションAnsys Fluentの動作検証と性能評価	富士通株式会社
令和3年度	富岳スーパーコンピュータ上でのHELYX性能検証	GLM株式会社
令和3年度	熱流体解析アプリケーションscFLOWによる産業利用に向けた実証実験	富士通株式会社
令和3年度	富岳スーパーコンピュータ上でのHELYX-Adjoint性能検証	GLM株式会社
令和3年度	新規メモリ向け半導体シミュレーションの高速計算	キオクシア株式会社

## 【未来のものづくり】社会実装事例の一覧 (3/4)

実施期間	課題名	機関名
令和4年度	商用CAEソフトウェアSimcenter STAR-CCM+の動作検証と性能評価	シーメンス株式会社
令和4年度	大規模気液二相流シミュレーションの水まわり住宅設備空間への適用	TOTO株式会社
令和4年度	大規模LES解析によるファン乱流場の再現と空調・冷却技術の検討	株式会社デンソー
令和4年度	長大斜張橋全橋を対象とした流体—構造物連成解析による耐風設計	阪神高速道路株式会社
令和4年度	多様なサービス要求に応じた高信頼な高度5Gネットワーク制御技術の研究開発	株式会社KDDI総合研究所
令和4年度	「富岳」を利用した船舶上部構造物周りの大規模数値流体シミュレーション	一般財団法人日本造船技術センター
令和4年度	CFDソフトウェア Cradle CFDによる空力弾性解析	エムエスシーソフトウェア株式会社
令和4~6年度	熱流体解析アプリケーションscFLOWによる産業利用に向けた実証実験	株式会社ソフトウェアクレイドル
令和4年度	粒子法による大規模樹脂流動シミュレーションの動作検証と性能評価	株式会社神戸製鋼所
令和4年度	富岳の活用に向けたチェーンアセンブリモデル解析の高速化	株式会社樫本チエイン
令和4年度	粒子法鋳造CAEシミュレーターの実用化	リョービ株式会社
令和4年度	商用CAEソフトウェアSimcenter STAR-CCM+の富岳における実行環境の調査と検証	シーメンス株式会社

## 【未来のものづくり】社会実装事例の一覧 (4/4)

実施期間	課題名	機関名
令和5年度	IGCC実機ガス化炉のマルチスケール・マルチフィジクス過渡応答性の評価	三菱重工業株式会社
令和5年度	圧縮性Wall-resolved LESによる遠心式ターボ機械の性能予測技術の構築	株式会社 日立製作所
令和5年度	流体—構造物連成解析による長大斜張橋全橋の耐風安定性検討	阪神高速道路株式会社
令和5年度	水まわり住宅設備機器のためのミスト状微小水滴飛散シミュレーション	TOTO株式会社
令和5年度	革新的ガス化炉設計に向けた固体炭素資源ガス化の高精度数値シミュレーションと多数目的最適化	一般財団法人 電力中央研究所
令和5年度	鉛直円管内気液二相流を対象としたVOFモデルの適用性評価	MHI原子力研究開発株式会社
令和5年度	飛行性CbAに向けた航空機の失速CFDシミュレーション	川崎重工業株式会社
令和5年度	粒子法による鋳造凝固解析のコスト把握	リョービ株式会社
令和5年度	樹脂混練装置内の大規模樹脂流動シミュレーションの粒子法による性能評価と精度の検証	株式会社神戸製鋼所
令和5年度	富岳でのOpenFOAM2.4.0の動作検証	MHI NSエンジニアリング株式会社
令和6年度	流体音響解析アプリケーションの動作検証と性能評価	ヤマハ株式会社
令和6年度	OpenFOAMを用いた旋回失速シミュレーション	日機装株式会社
令和6年度	HBMを用いたシミュレーション	株式会社SUBARU
令和6年度	自動車部品用鋳造解析のベンチマークおよび性能評価	マツダ株式会社
令和6年度	富岳におけるSimcenter STAR-CCM+の動作検証	シーメンス株式会社

## 問い合わせ先

- 理化学研究所 計算科学研究センター「富岳」society5.0推進拠点 横山昌弘

[masahiro.yokoyama@riken.jp](mailto:masahiro.yokoyama@riken.jp)

- 委託先 株式会社JSOL 松崎 健一

[matsuzaki.kenichi@jsol.co.jp](mailto:matsuzaki.kenichi@jsol.co.jp)