

文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム

# スーパーシミュレーションと AIを連携活用した 実機クリーンエネルギーシステムの デジタルツインの構築と活用

## 第1部 燃焼・ガス化炉の スーパーシミュレーション

- 13:30-13:45 開会挨拶及びプロジェクト概要紹介  
吉村忍(プロジェクト代表者、  
東京大学大学院工学系研究科)
- 13:45-14:15 石炭火力の低炭素化・脱炭素化に向けた  
技術開発の状況と富岳に期待する役割  
牧野尚夫(電力中央研究所)
- 14:15-15:30 燃焼・ガス化炉のスーパーシミュレーション  
吉村 忍(東京大学)  
渡邊裕章(九州大学総合理工学研究院)  
山田知典(東京大学大学院工学系研究科)

## 第2部 洋上ウィンドファームの スーパーシミュレーション

- 15:40-16:10 洋上風力発電のロードマップと「富岳」への期待  
今村 博((株)ウインドエナジーコンサルティング)
- 16:10-17:25 洋上ウィンドファームのスーパーシミュレーション  
飯田明由(豊橋技術科学大学)  
内田孝紀(九州大学応用力学研究所)  
小野謙二(九州大学情報基盤研究開発センター)  
加藤千幸(東京大学生産技術研究所)  
吉村 忍・陳 順華(東京大学)
- 17:25-17:30 閉会挨拶  
黒瀬良一(京都大学大学院工学研究科)

## 第1回シンポジウム

# 資料集

2020/11/30版

2020年  
10月27日(火)

受付開始  
13:30~17:30 13:10

オンライン開催(無料)

お問合せ

cleanFUGAKU-symp@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院工学系研究科

クリーンエネルギー「富岳」シンポジウム事務局

主催：東京大学大学院工学系研究科 クリーンエネルギー「富岳」プロジェクト（代表：吉村 忍）

共催：九州大学応用力学研究所、九州大学情報基盤研究開発センター、九州大学大学院総合理工学研究院、京都大学大学院工学研究科、東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター、豊橋技術科学大学

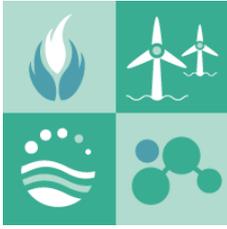
協賛：日本計算力学連合、可視化情報学会、日本応用数学会、日本機械学会、日本計算工学会、日本シミュレーション学会、日本設計工学会、日本船舶海洋工学会、日本エネルギー学会、日本流体力学会

後援：高度情報科学技術研究機構（RIST）、HPCIコンソーシアム、計算科学振興財団（FOCUS）、スーパーコンピューティング技術産業応用協議会、電力中央研究所、東芝エネルギーシステムズ（株）、（株）ユーラスエナジーホールディングス、三菱重工業（株）、三菱パワー（株）

<https://postk6.t.u-tokyo.ac.jp/>

※本資料からの無断転載を禁じます。

クリーンエネルギー「富岳」プロジェクト 第1回シンポジウム プログラム		
タイトル	文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム 「スーパーシミュレーションと AI を連携活用した実機クリーンエネルギーシステムの デジタルツインの構築と活用」 第1回シンポジウム	
日程	2020年10月27日(火)	13:30-17:30 (受付開始 13:10)
開催場所	オンライン <a href="https://zoom.us/webinar/register/WN_32dADaX8SlySPI6IAbddqg">https://zoom.us/webinar/register/WN_32dADaX8SlySPI6IAbddqg</a>	
プログラム		
受付開始	13:10	
開始	13:30	司会 山田知典(東京大学大学院工学系研究科・准教授)
開会挨拶	13:30 13:45	吉村 忍(プロジェクト代表者、東京大学大学院工学系研究科・教授) 開会挨拶およびプロジェクト概要紹介
第1部	燃焼・ガス化炉のスーパーシミュレーション	
		司会 渡邊裕章(九州大学総合理工学研究院・教授)
	13:45	30分 牧野尚夫(電力中央研究所) 石炭火力の低炭素化・脱炭素化に向けた技術開発の状況と富岳に期待する役割
	14:15	20分 吉村 忍(東京大学大学院工学系研究科・教授) プロジェクト全体像
		15分 渡邊裕章(九州大学総合理工学研究院・教授) FFR-CombによるCO2回収型IGCC用ガス化炉解析
		15分 山田知典(東京大学大学院工学系研究科・准教授) ADV_Solidの富岳チューニング & 非弾性解析
		25分 質疑応答
休憩	15:30	
第2部	洋上ウインドファームのスーパーシミュレーション	
		司会 植田祐子((株)ウインドエナジーコンサルティング)
	15:40	30分 今村 博((株)ウインドエナジーコンサルティング) 洋上風力発電のロードマップと「富岳」への期待
	16:10	10分 飯田明由(豊橋技術科学大学・教授) プロジェクト全体像
	16:20	15分 内田孝紀(九州大学応用力学研究所・准教授) 小野謙二(九州大学情報基盤研究開発センター・教授) RIAM-COMPACT富岳チューニングと風車ウエイク解析
	16:35	15分 加藤千幸(東京大学生産技術研究所・教授) FFBの富岳におけるチューニング
	16:50	15分 陳 順華(東京大学大学院工学系研究科・特任研究員) 吉村 忍(東京大学大学院工学系研究科・教授) 洋上大型風車ブレードの流体構造連成・疲労損傷解析
	17:05	20分 質疑応答
閉会挨拶	17:25	黒瀬良一(京都大学大学院工学研究科・教授)
終了	17:30	



文部科学省「『富岳』成果創出加速プログラム」  
第1回シンポジウム(オンライン) 2020年10月27日

## スーパーシミュレーションとAIを連携活用した 実機クリーンエネルギーシステムの デジタルツインの構築と活用

研究開発課題責任者

吉村 忍

東京大学副学長、工学系研究科教授

1

### 開催趣旨

本プロジェクトでは、ポスト「京」重点課題⑥「革新的クリーンエネルギーシステムの実用化」プロジェクトにおいて、「富岳」での活用に向けて研究開発を進めてきたアプリケーション群(ADVENTURE、FFB、FFR-Comb、REVOCAP\_Coupler、RC HPC版)に基づくマルチフィジクス・マルチスケール統合シミュレーション(スーパーシミュレーション)とAIを連携活用し、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CO2回収・貯留技術にも適した次世代火力発電システム、及び洋上windファームのデジタルツインを構築し、それらの開発・設計・運用の最適化に活用することを目指しています。

プロジェクト1年目となる今回のシンポジウムでは、進捗状況と、産業界との連携による社会実装に向けた展望をご紹介します。

2

主 催: 東京大学大学院工学系研究科

「富岳」成果創出加速プログラム「スーパーシミュレーションと AI を連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用」

共 催: 九州大学応用力学研究所、同情報基盤研究開発センター、同大学院総合理工学研究院、京都大学大学院工学研究科、東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター、豊橋技術科学大学

協 賛: 日本計算力学連合、可視化情報学会、日本応用数理学会、日本機械学会、日本計算工学会、日本原子力学会、日本シミュレーション学会、日本設計工学会、日本船舶海洋学会、日本エネルギー学会、日本流体力学会

後 援: 高度情報科学技術研究機構、HPCIコンソーシアム、計算科学振興財団(FOCUS)、スーパーコンピューティング技術産業応用協議会、電力中央研究所、東芝エネルギーシステムズ(株)、(株)ユーラスエナジーホールディングス、三菱重工業(株)、三菱パワー(株)

3

## 電力システムの不可避的移行

日立東大ラボの議論から

従来の電力システム  
大規模電源が主体

不可避的な  
移行



新しい電力システム  
再生可能エネルギー導入拡大、  
分散化、デジタル化、  
電化/電動化などの取り込み

Society5.0を支える電力システムのあるべき姿とは？

パリ協定 2050年にCO<sub>2</sub> 80%減 (2013年度比)

➡ 2050年CO<sub>2</sub>ゼロエミッションへ

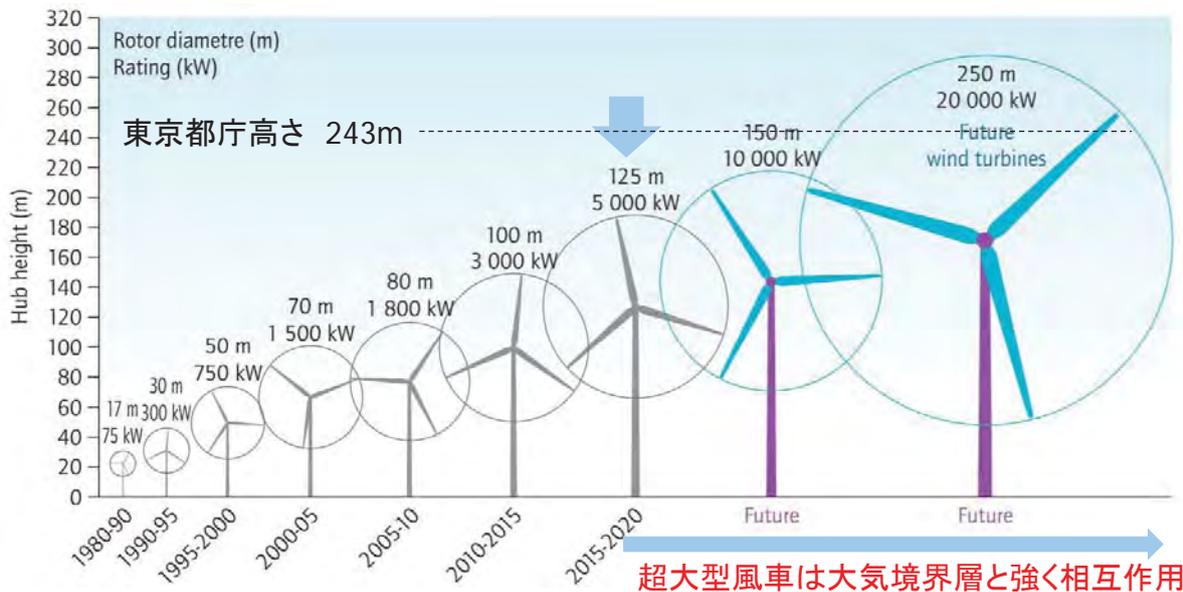
気候非常事態宣言

4



# 「富岳」におけるターゲット問題1

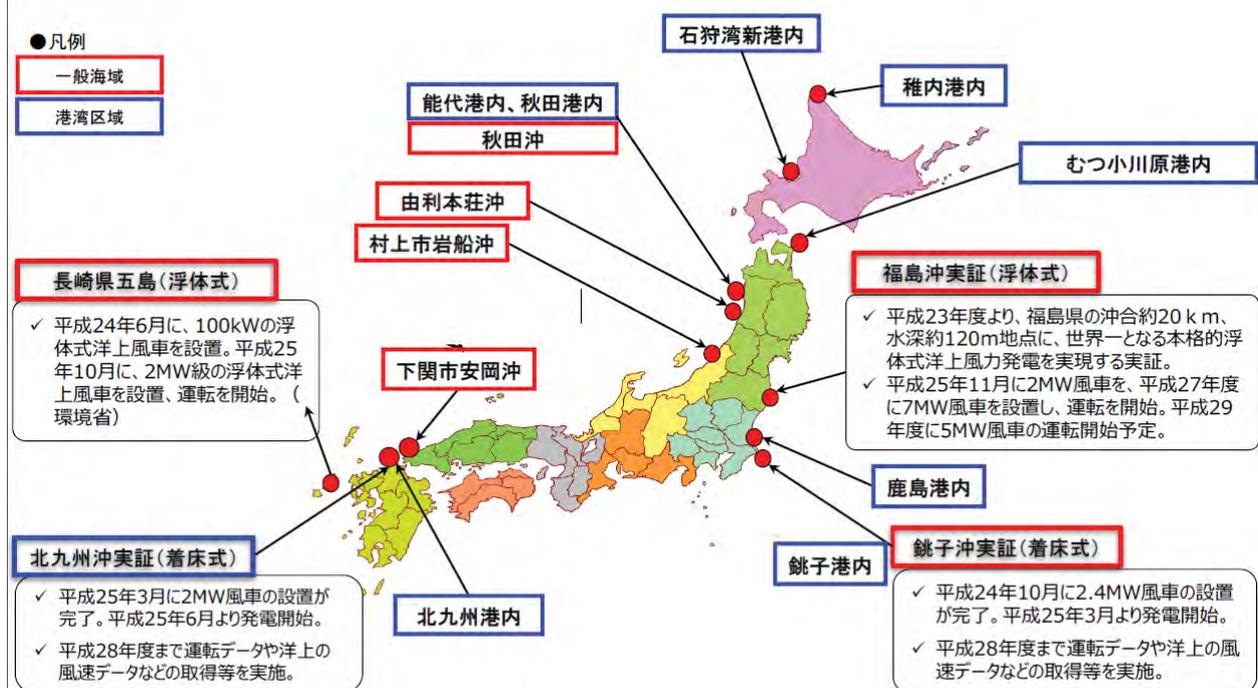
5MW以上の大型発電用風車が並ぶ洋上ウィンドファーム  
 発電効率向上のため次第に大型化する発電用風車  
 (発電効率は、翼長の2乗に比例、風速の3乗に比例)



IEA. Wind energy technology roadmap, 2013 edition.

URL: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind\\_2013\\_Roadmap.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf).

# 日本の洋上ウィンドファーム計画



# 洋上ウィンドファームの解決すべき課題

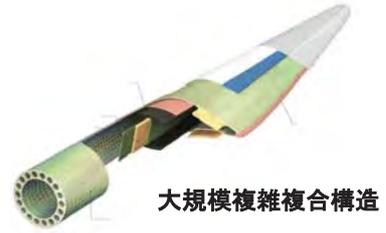
- 後流(Wake)を介した大型風車の相互作用を考慮した洋上ウィンドファームの発電性能の向上
- 洋上ウィンドファームの大型風車の構造信頼性の向上



洋上ウィンドファーム(DK)の後流(Wake)



タンデム配置された風車の後流干渉



大規模複雑複合構造



2016年の台風18号の強風(40m/s)によって壊れた5MW風車(韓国チェジュ島)

[http://www.nrel.gov/news/features/feature\\_detail.cfm/feature\\_id=1995](http://www.nrel.gov/news/features/feature_detail.cfm/feature_id=1995)

# 火力発電技術の開発見通し(1/2)

## 次世代火力発電技術の高効率化、低炭素化の見通し



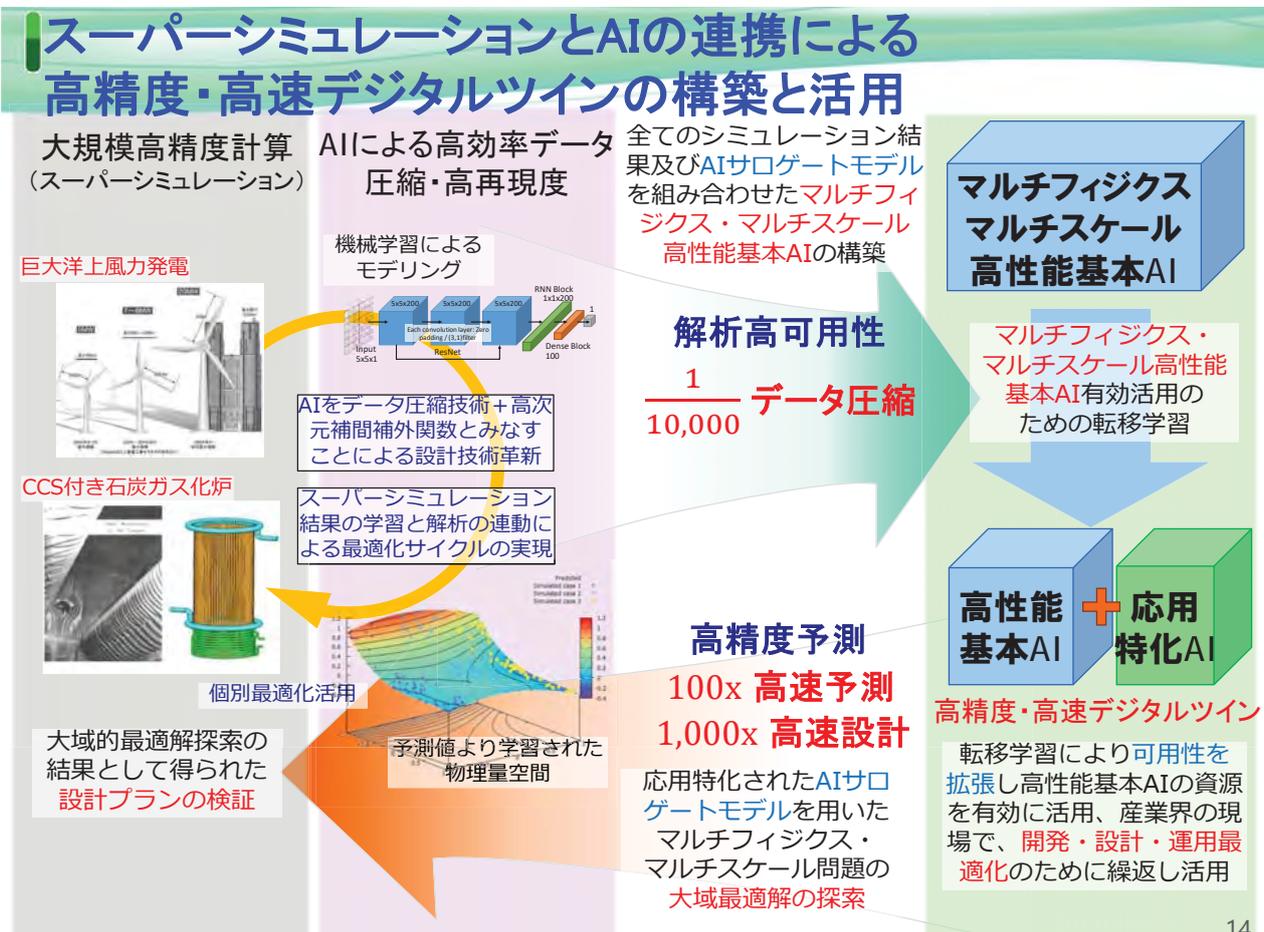


# 本プロジェクトにおける2つの目標

**第1の目標:** CCS (CO2回収・貯留) 技術に適した次世代火力発電システムの主要構成要素 (石炭ガス化炉と超臨界圧CO2ガスタービン)、及び洋上ウインドファームの**スーパーシミュレーション**を、「富岳」上で確実に稼働させ、実機レベルのV&Vを進め、実戦で活用する準備を整える。

ただし、スーパーシミュレーションには「富岳」の膨大な計算資源と計算時間を必要とするため、これを直接、実機の開発や設計、運用最適化のために、数10回から数1000回のオーダーで繰り返し計算することは、産業界において実運用するという観点からは現実的ではない。

**第2の目標:** スーパーシミュレーションとAI (機械学習) を様々なレベルで連携活用し、産業界の現場で、開発・設計・運用最適化のために繰り返し活用可能な、**実機の高精度かつ高速なデジタルツイン**を構築する。



## 本提案において活用する「富岳」向け個別アプリケーション

アプリ	手法・対象	特徴	「富岳」向け tuning 状況	開発体制 (大学)	開発体制 (ベンダ)	ユーザーG・コンソーシアム
ADVENTURE_Solid	FEM／構造(線形・繰返し熱弾塑性・クリープ・複合材)	HDDM-BDD 重点⑥ターゲットアプリ ADVC(商用)	対「京」性能比35倍以上	東大(吉村)及びADV PJ	AE・インサイト・ASTOM	ADVユーザーG、ADVCユーザーG
ADVENTURE_Thermal	FEM／熱伝導・冷却管冷却	同上	同上	同上	同上	同上
ADVENTURE_Fatigue	累積疲労損傷工学モデル、損傷力学	重点⑥	ポスト処理ツール	同上	同上	同上
FFB	FEM／流体 LES・Overset・ALE	重点⑧ターゲットアプリ 重点⑥	対「京」性能比35~40倍	東大(加藤)・豊橋技科大(飯田)	みずほ情報総研	産応協、ターボ機械協会、自動車関連企業、他
FFR-Comb(商用)	FVM／燃焼流 LES・固気液三相	重点⑥	シミュレータで評価中 対「京」性能比8倍以上	京大(黒瀬)・九大(渡邊)	NuFD	理研・燃焼システム用次世代CAEコンソ(10企業・2研究所・8大学)
RC HPC版	FDM・FVMハイブリッド/WF用・LES・アクチュエータモデル	多風向同時解析／発電性能評価／重点⑥	シミュレータで評価中 SGI UV300で性能評価	九大(内田孝紀・小野)		次世代CAE風力産業コンソ(設立予定)(6企業参画)
REVOCAP_Coupler	汎用並列カプラ(MPI, Socket)	片連成・双方向連成(分離反復)、重点⑥	「京」で稼働チューニング中	東大(吉村)及びADV PJ	AE・インサイト	ADVユーザーG、ADVCユーザーG

15

## 「令和4年度まで」と「令和5年度から」何を実現するか

### 事業期間(令和2~4年度)

1. 石炭ガス化炉と超臨界圧CO<sub>2</sub>ガスタービン、及び洋上ウインドファームを対象に、それぞれのマルチフィジクス・マルチスケール統合シミュレーション(スーパーシミュレーション)を構築
2. スーパーシミュレーションとAI技術を連携活用し、高精度かつ高速なデジタルツインを構築
3. スーパーシミュレーション及び高精度かつ高速デジタルツインを実機レベルで実証(V&V、及び開発・設計・運用の最適化のために活用できることを示す)

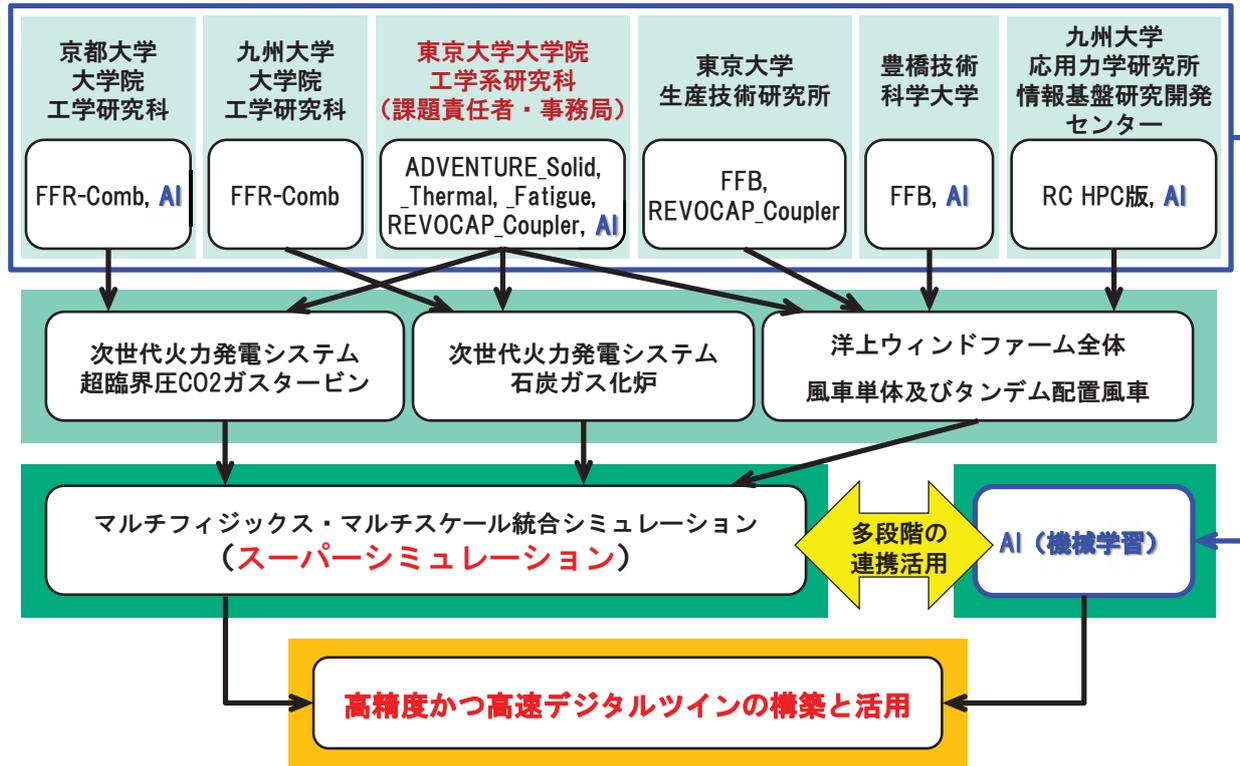
(財)電力中央研究所、三菱重工(株)、三菱日立パワーシステムズ(株)、東芝エネルギーシステムズ(株)(NDAを締結済)と連携し、設計データと試験結果の開示を受ける

### 事業終了後(令和5年度)から

- A. 開発システムの実用化、技術認証、国際的認知度向上を図る。
- B. 実機の開発・設計・運用の最適化(たとえば、次世代火力発電システムでは、機器性能の改善案提示や異なる運用方式の適用性検討等、また、洋上ウインドファームでは、サイト選定やサイト内の風車の最適配置、寿命延伸のための運用支援等)に関する具体的な成果創出を進める。

16

## 実施体制



17

## 「富岳」成果創出加速プログラム「クリーンエネルギー」

「富岳」用アプリケーション群 (ADVENTURE、FFB、FFR-Comb、REVOCAP\_Coupler、RC HPC版) に基づくマルチフィジクス・マルチスケール統合シミュレーション構築 (スーパーシミュレーション)



AI (機械学習)

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しての洋上ウィンドファーム、及びCCS (CO2回収・貯留) 技術に適した次世代火力発電システム (石炭ガス化炉、超臨界圧CO2ガスタービン) の高精度かつ高速なデジタルツインを構築

…> 実機システムの開発、設計、運用の最適化に活用  
各システムの実用化を大幅に加速

上記クリーンエネルギーシステムのみならず、燃焼機器、伝熱機器、流体機械等の幅広い実機に活用可能

様々な企業群、産業界コンソーシアムと協力を連携しながら遂行  
「富岳」を活用した我が国の産業競争力の強化に幅広く大きく貢献

18



# 石炭火力の低炭素化・脱炭素化に向けた 技術開発の状況と「富岳」に期待する役割

電力中央研究所

牧野尚夫

RI 電力中央研究所

© CRIEPI 2020

1



RI 電力中央研究所

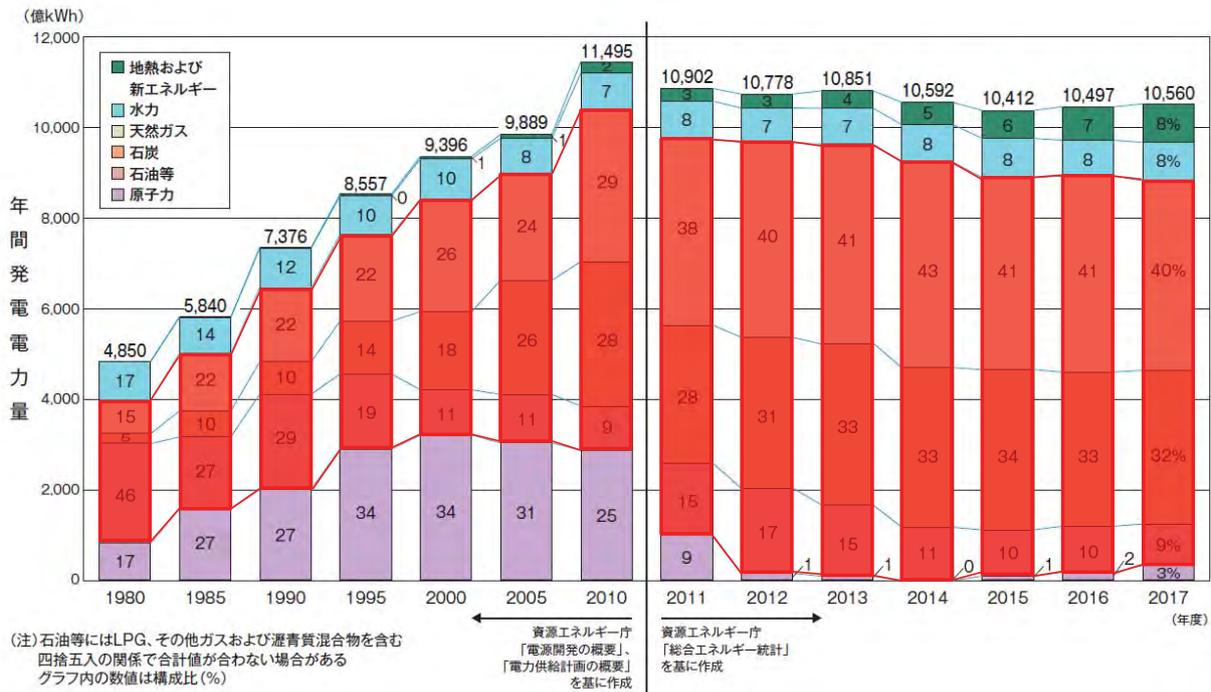
## 講演内容

1. 火力発電の現状
2. 次世代火力発電ロードマップと石炭ガス化の重要性
3. 石炭ガス化技術開発の現状
4. CO<sub>2</sub>回収技術開発の現状
5. 「富岳」を用いたシミュレーション技術への期待

© CRIEPI 2020

2

# 電源別発電電力量の推移



# 世界の化石燃料埋蔵量

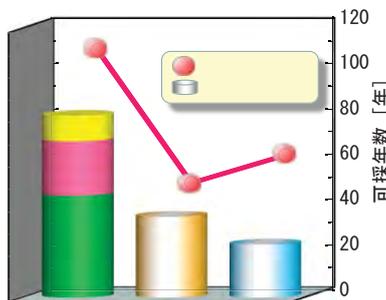


図 世界の化石資源可採埋蔵量・年数

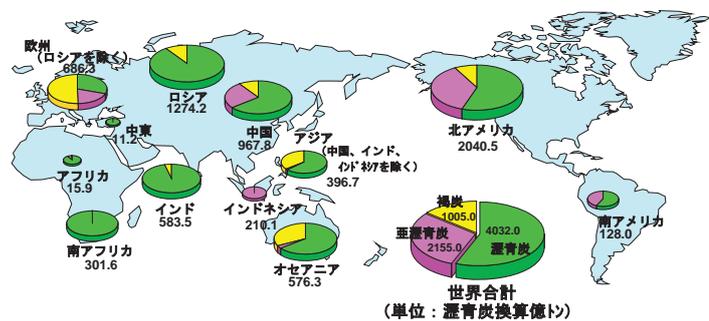


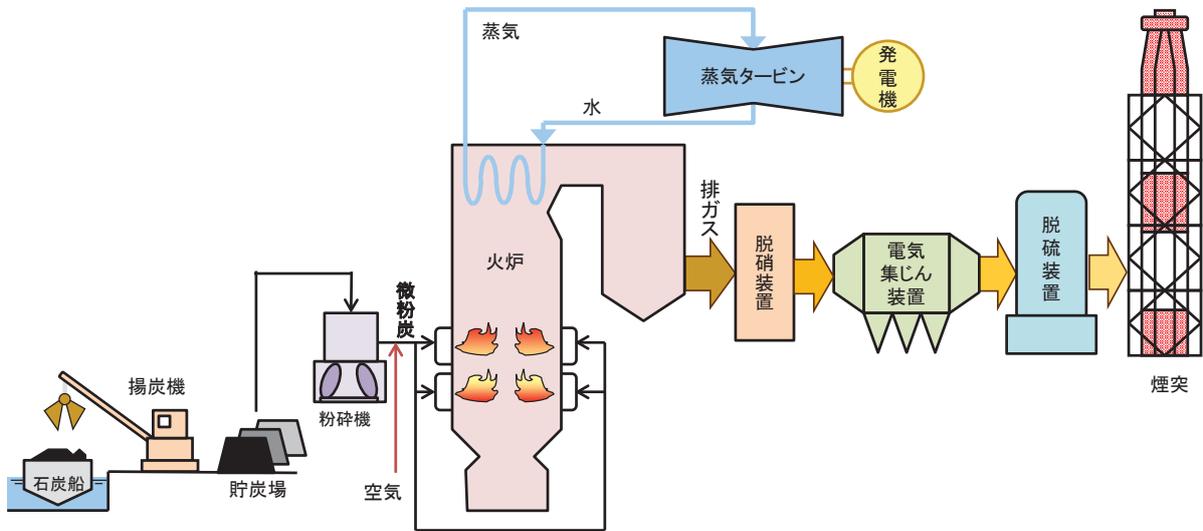
図 世界の石炭可採埋蔵量

出典: 2013 Survey of Energy Resources World Energy Council

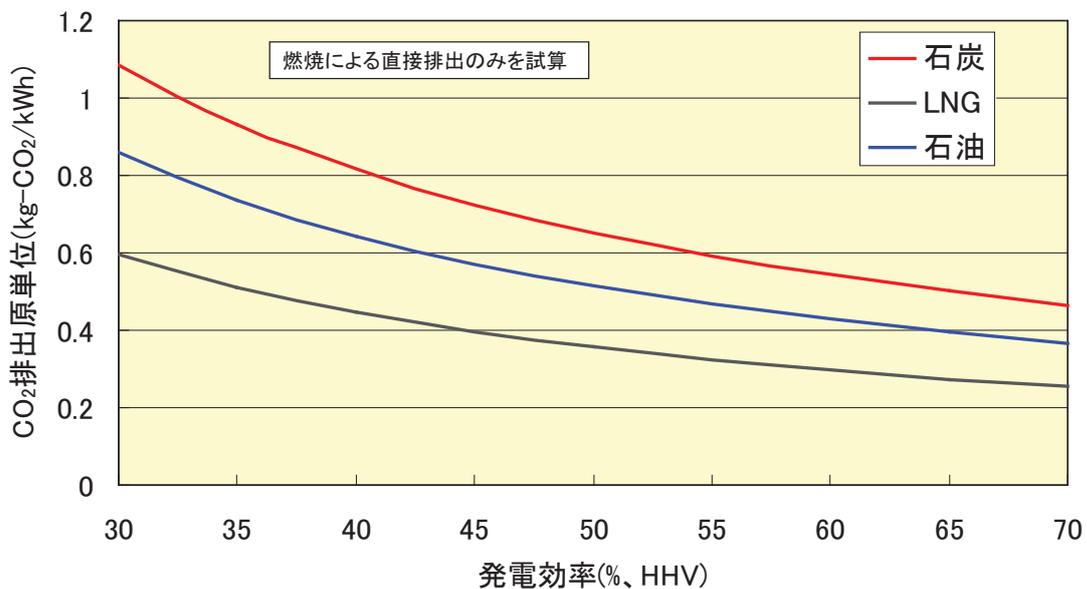
<石炭の分類と炭化度(右ほど炭化度が進む)>



# 微粉炭火力のフロー



# 石炭の持つ問題点 (CO<sub>2</sub>排出原単位)



## 火力発電における主要課題

1. 燃料供給源の強化
2. 高効率発電技術の推進
3. CO<sub>2</sub>排出削減技術の開発

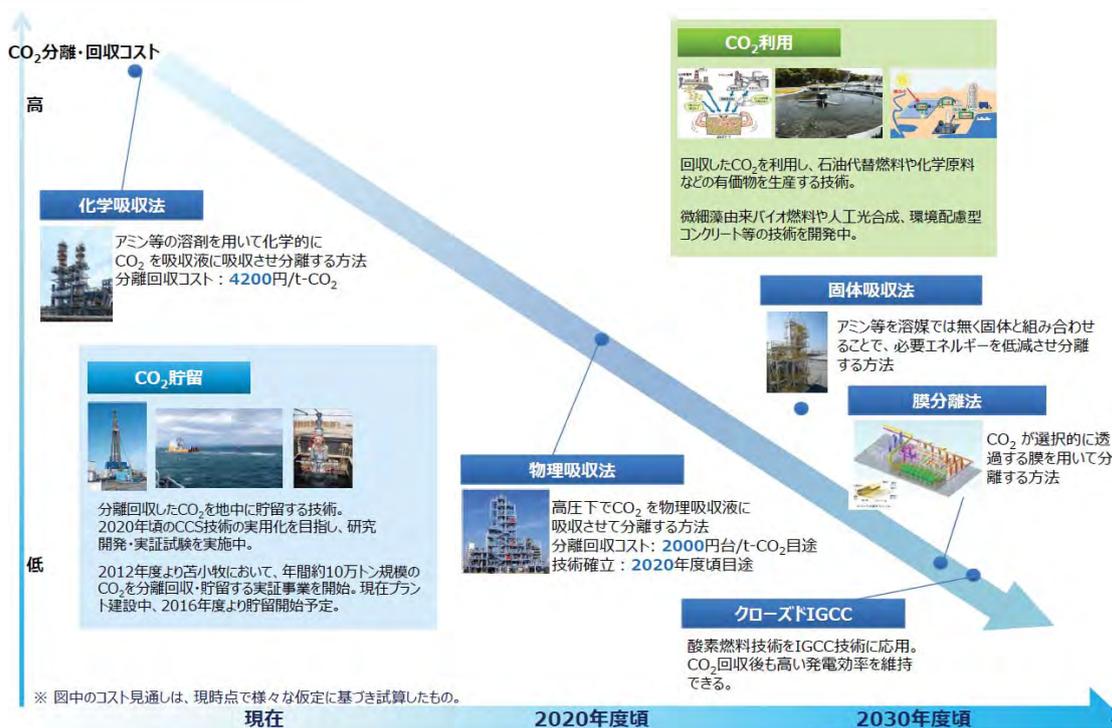
## 講演内容

1. 火力発電の現状
2. 次世代火力発電ロードマップと石炭ガス化の重要性
3. 石炭ガス化技術開発の現状
4. CO<sub>2</sub>回収技術開発の現状
5. 「富岳」を用いたシミュレーション技術への期待

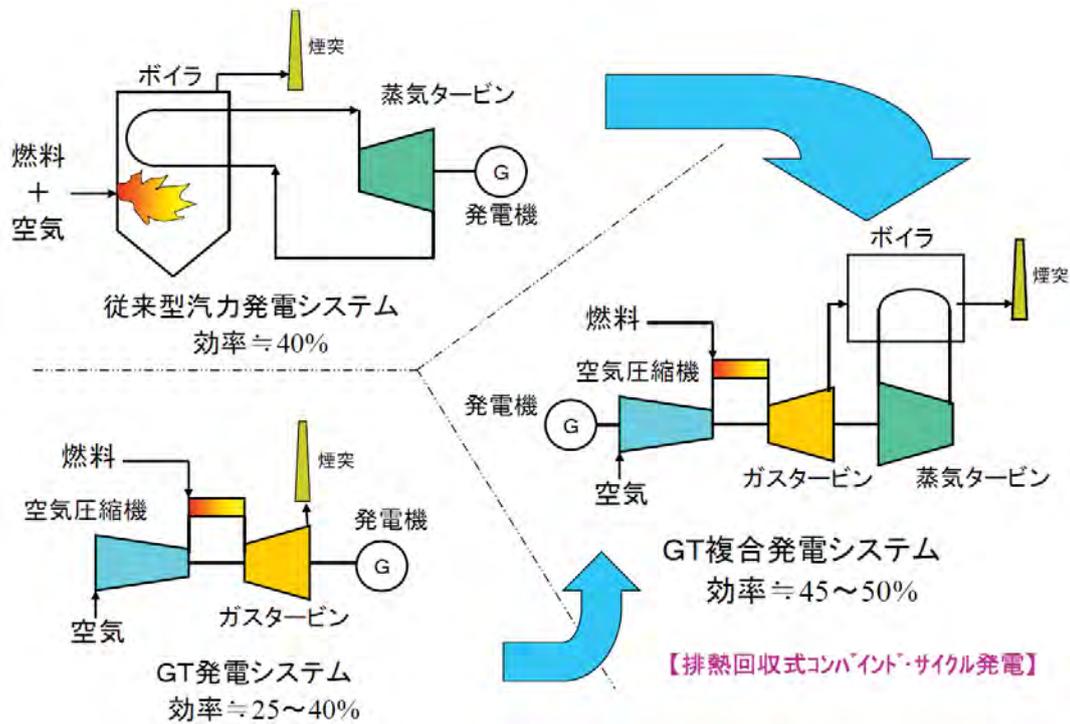
# 次世代火力発電技術の高度化、低炭素化の見通し



# 次世代のCO2回収関連技術の開発の見通し

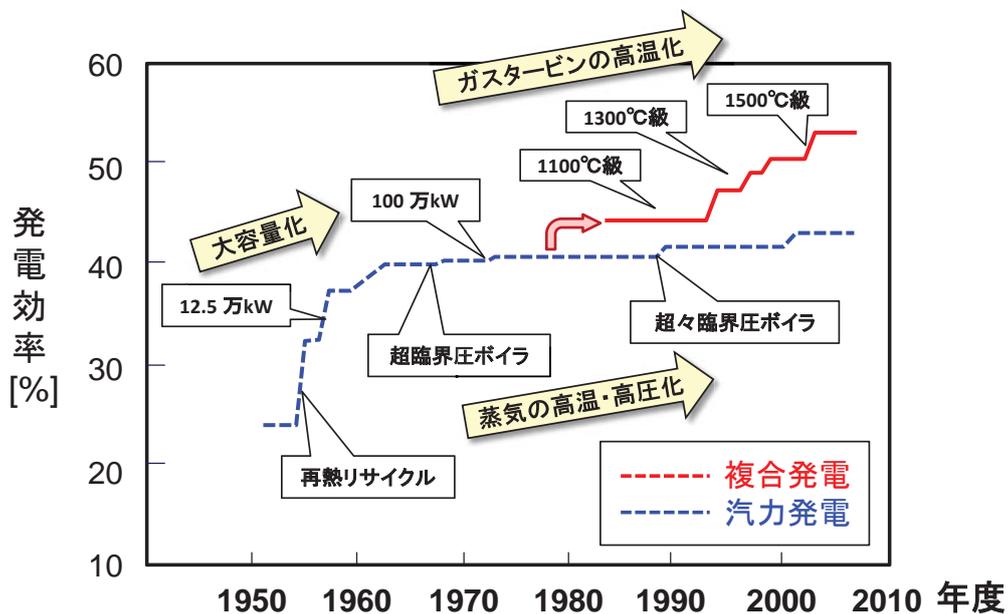


# 蒸気タービンとガスタービンによる複合発電システム



## 日本における火力発電所の 発電効率(発電端)の変遷

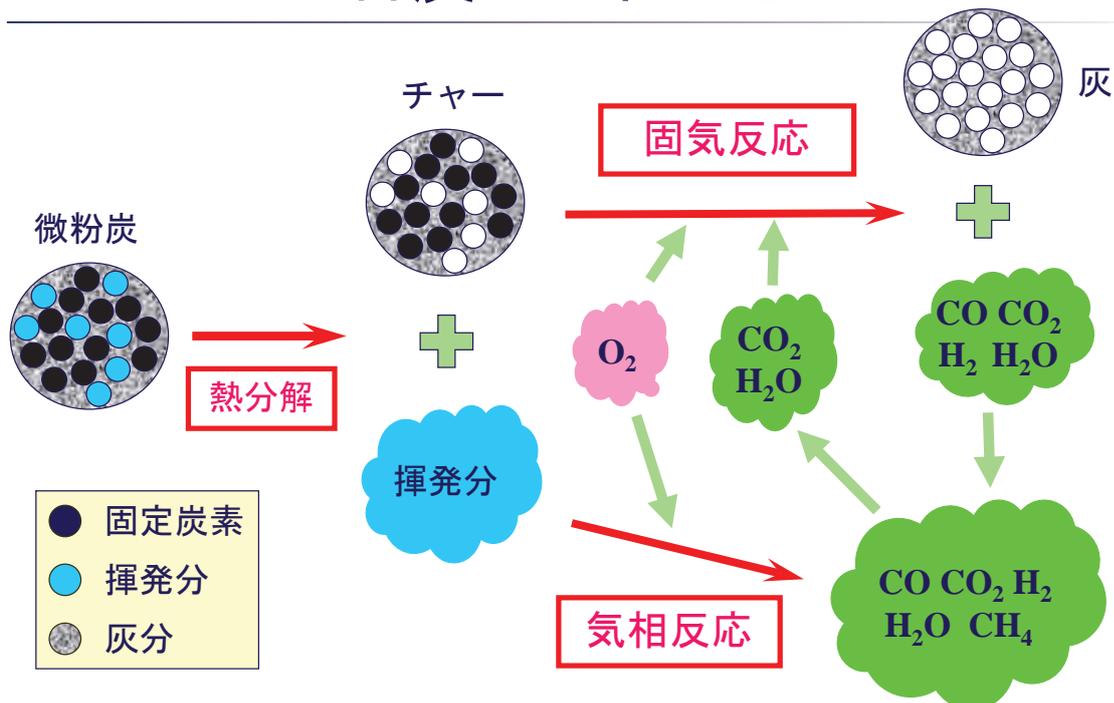
### ◆ 石炭利用複合発電にはガス化が重要



# 講演内容

1. 火力発電の現状
2. 次世代火力発電ロードマップと石炭ガス化の重要性
3. 石炭ガス化技術開発の現状
4. CO<sub>2</sub>回収技術開発の現状
5. 「富岳」を用いたシミュレーション技術への期待

## 石炭ガス化とは？





# 空気吹き二段噴流床ガス化炉の原理

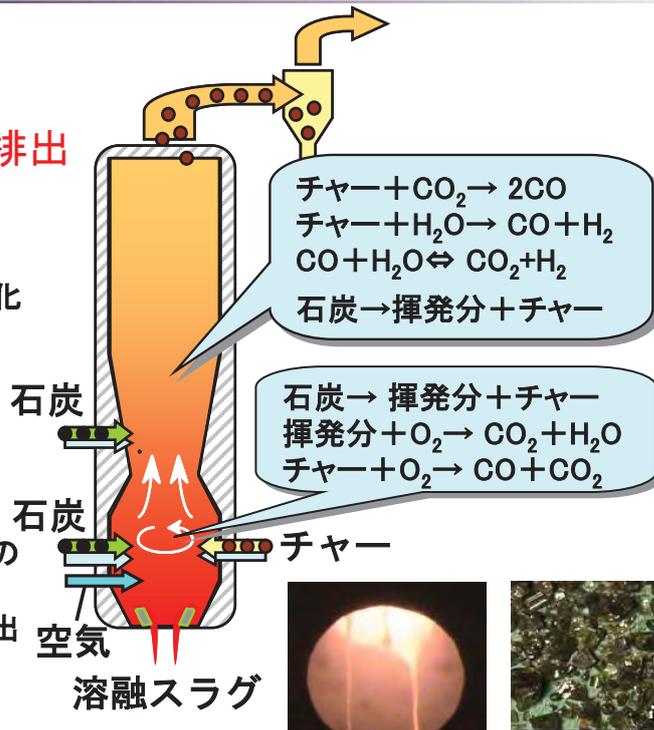
- ◎高温・高圧
- ◎空気中で石炭をガス化
- ◎灰を溶融スラグとして排出

## リダクタ

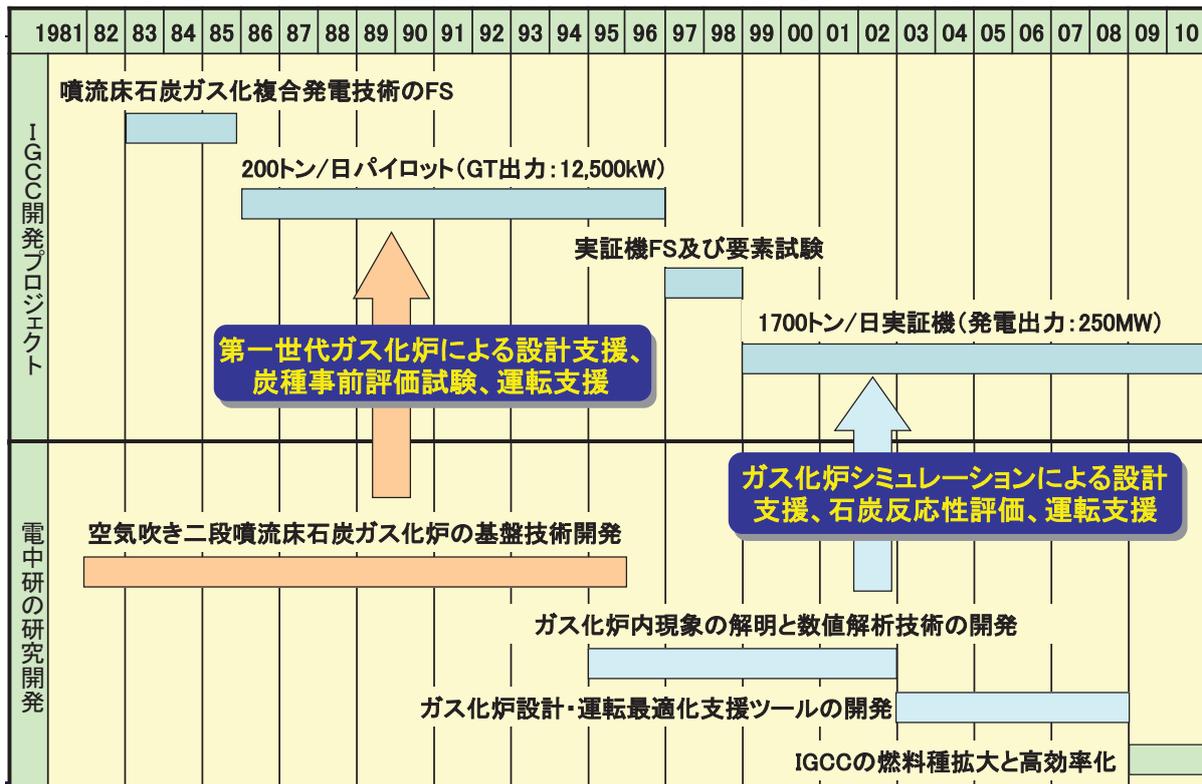
- ・チャーのガス化
- ・ガスの冷却

## コンバスタ

- ・石炭・チャーの燃焼
- ・灰の溶融・排出

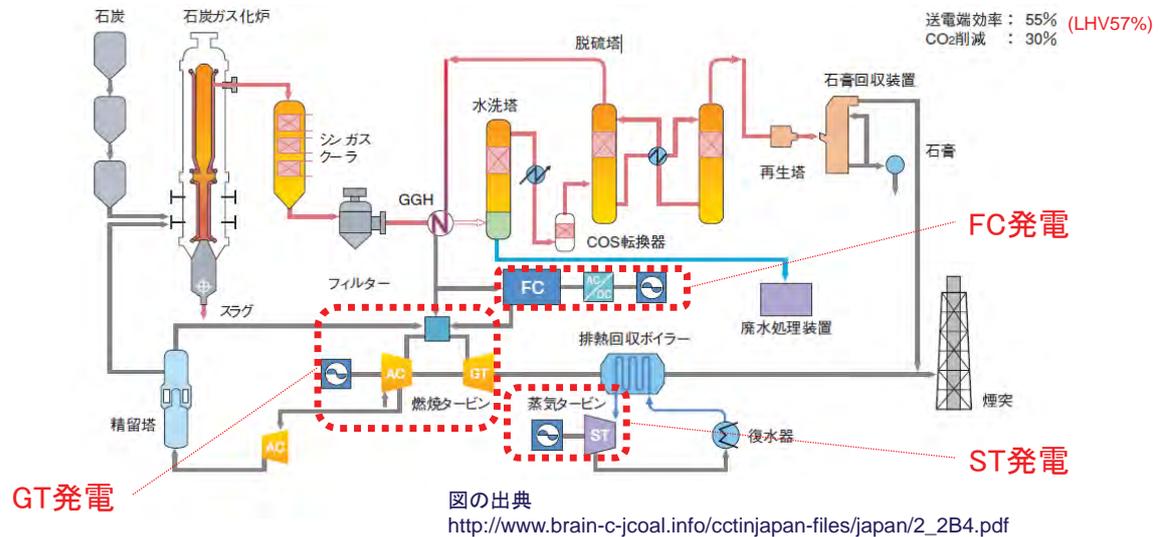


# 国内での空気吹きIGCC開発の経緯



# IGFC(石炭ガス燃料電池複合発電)の例

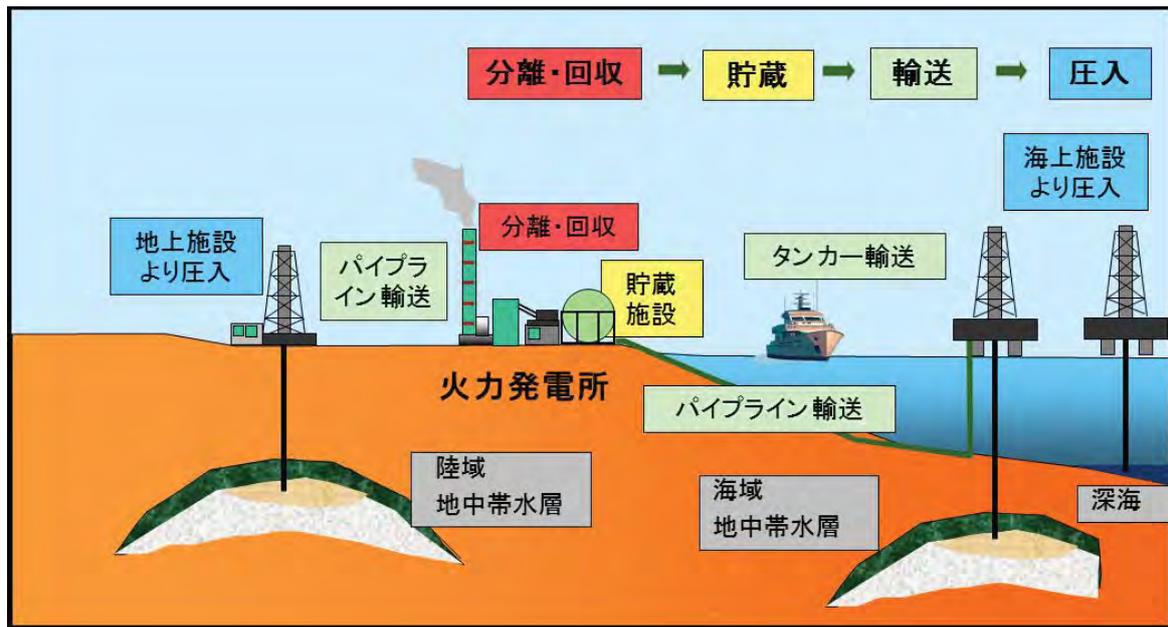
IGFCとはIGCC(GT/STの複合発電)にFCを組み合わせたトリプル発電技術であり、実現できれば、石炭燃料で最も高い発電効率の達成が期待できる。



## 講演内容

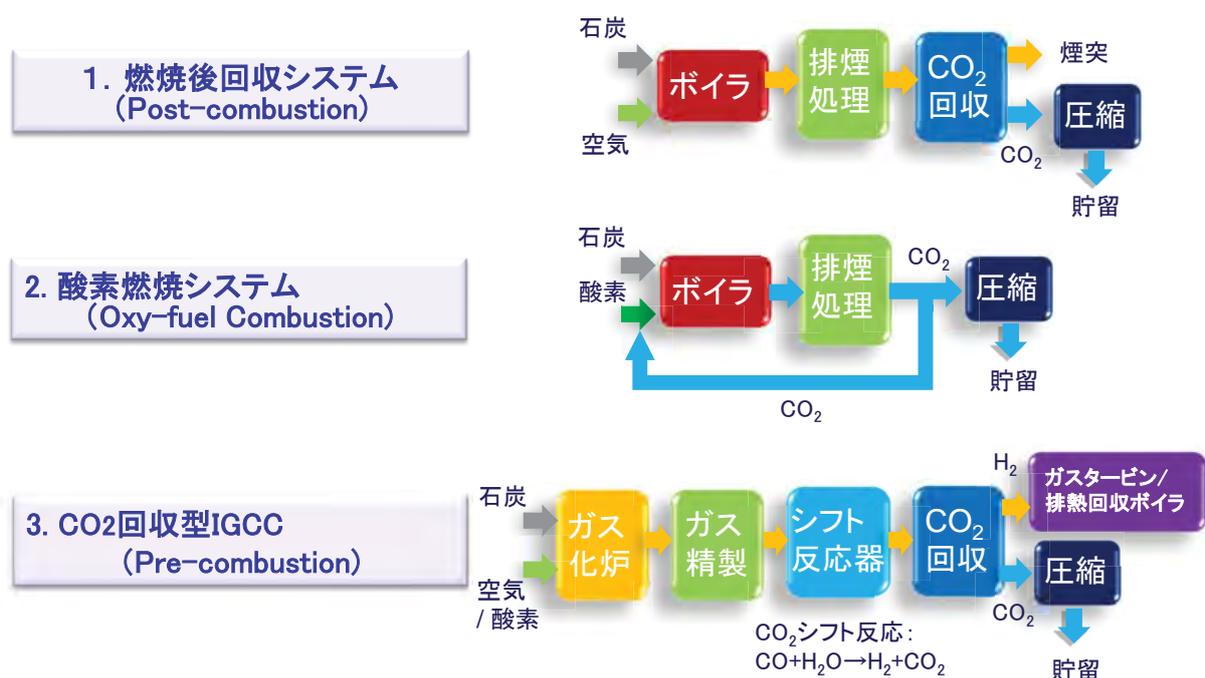
1. 火力発電の現状
2. 次世代火力発電ロードマップと石炭ガス化の重要性
3. 石炭ガス化技術開発の現状
4. CO<sub>2</sub>回収技術開発の現状
5. 「富岳」を用いたシミュレーション技術への期待

# CO<sub>2</sub>回収・貯留技術



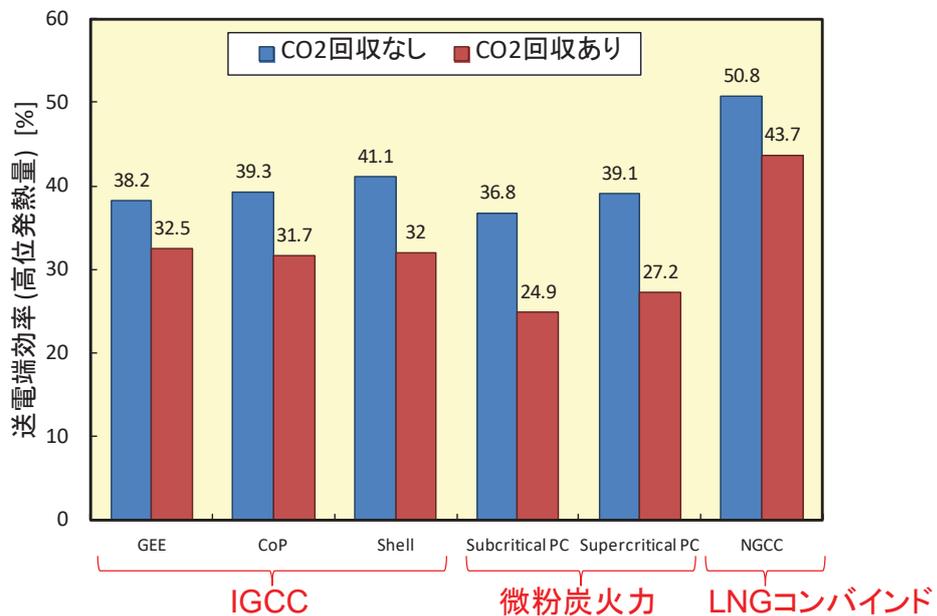
出展：経済産業省，RITEの図面を参照

# 火力発電所からのCO<sub>2</sub>分離回収方式



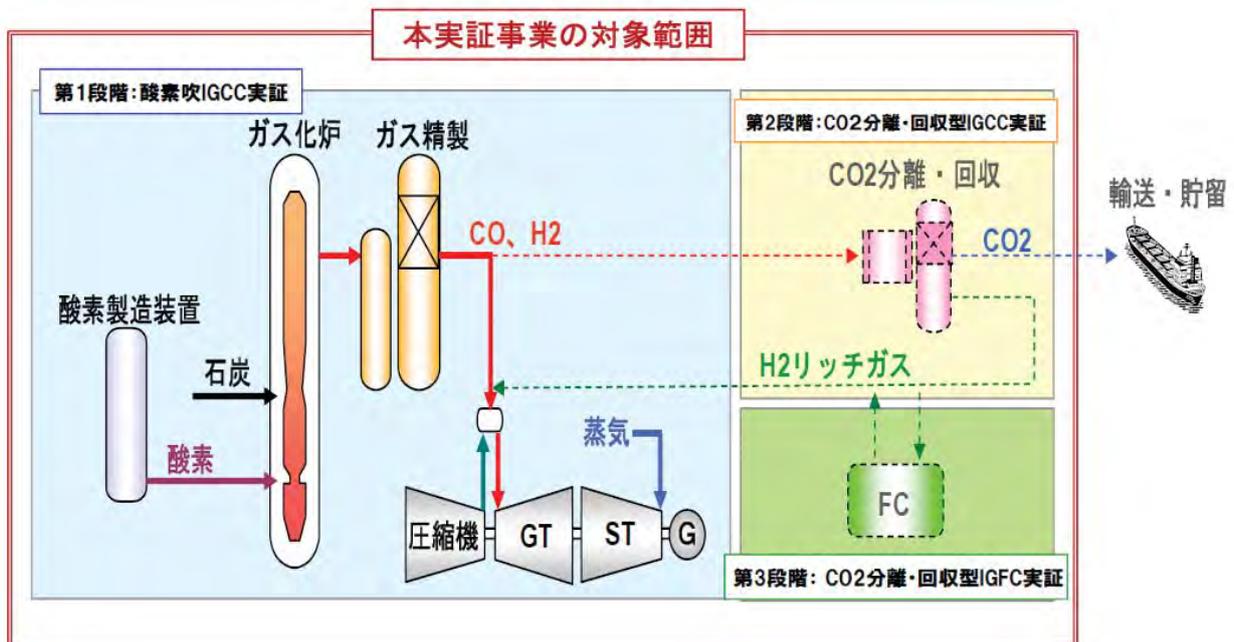
# CO<sub>2</sub>回収型発電システムの発電効率試算例

- CO<sub>2</sub>回収により送電端効率（HHV）は、2割～3割低下。一般に、効率の低下割合は、燃焼後に比べIGCCがやや小さい。



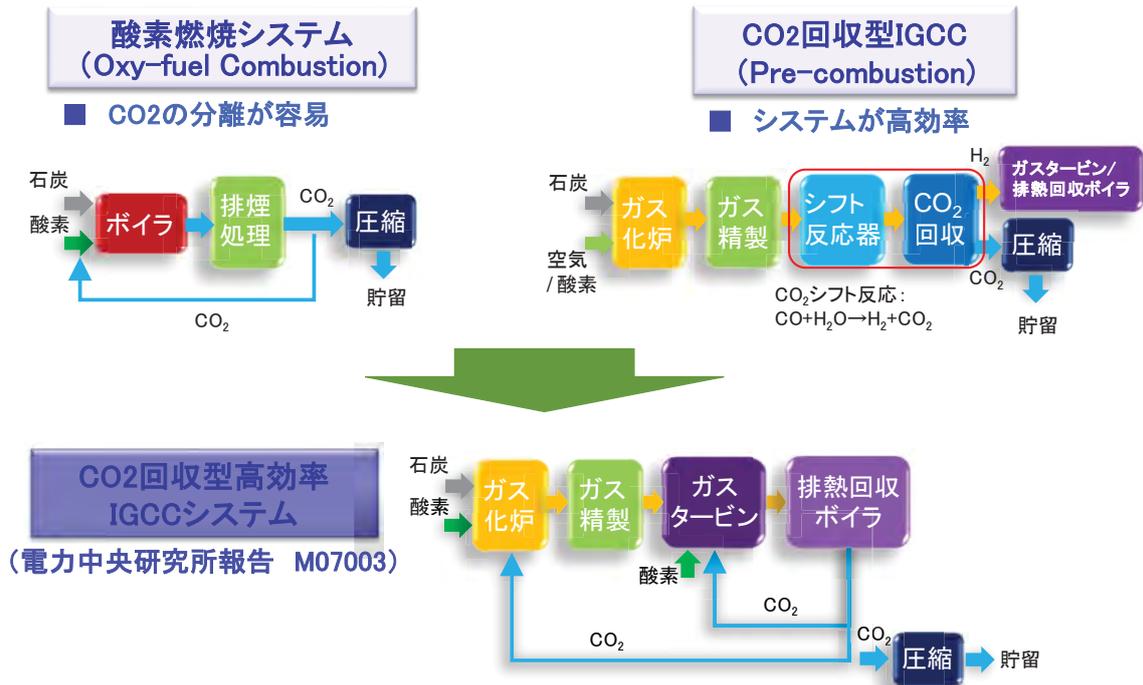
出典：“Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants”, DOE/NETL-2007/1281

# 大崎クールジェン実証試験設備の概要



(総合科学技術会議評価専門調査会、石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業費補助金、第1回評価検討会資料、2011年10月)

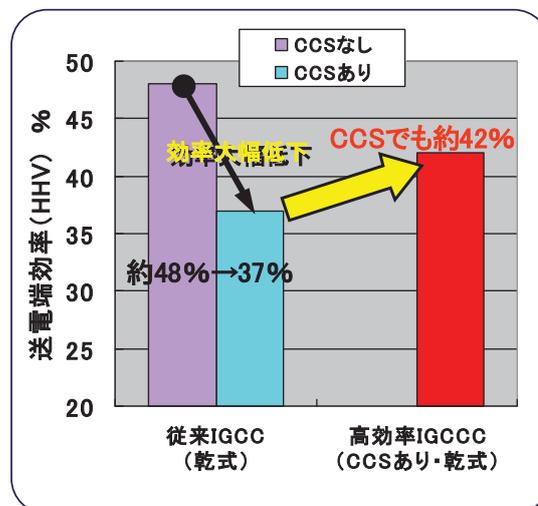
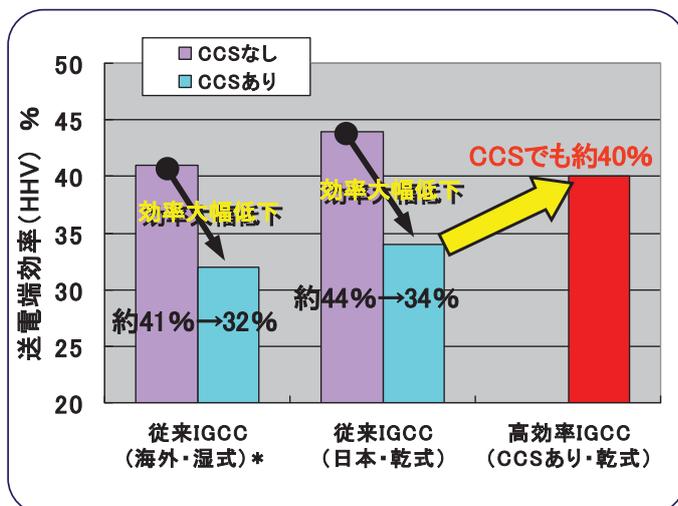
# CO<sub>2</sub>回収型高効率IGCCシステムのご概念



## 各種ガス化(空気吹き、酸素吹き、O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>吹き)の比較

ガス化形式	メリット	デメリット
空気吹き	・酸素製造装置が小規模となり、IGCCで最も所内率が小さい。	・発生ガスの発熱量が低く、容積も大きくなるので、設備容量が大きくなる。
酸素吹き	・発生ガス中のカロリーが高く利用しやすく、CO <sub>2</sub> 回収も容易。 ・ガス化炉温度が空気吹きに比べて高いので、より高灰融点炭も利用可能。	・酸素製造装置が大規模となり、空気吹きに比べ所内率が増大する。
O <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> 吹き	・排ガスのほとんどがO <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub> 、水蒸気になるので、濃縮装置なしでCO <sub>2</sub> 回収が可能。 ・CO <sub>2</sub> がガス化剤として働き、ガスタービンの作動流体としても適性が高い。	・ガスタービンも酸素吹きになるので、酸素製造動力が多く必要。 ・新たな開発が必要な要素が多い。

# CO<sub>2</sub>回収型高効率IGCC発電システムの効率の従来型との比較



a) 1300°C級ガスタービン採用

b) 1500°C級ガスタービン採用

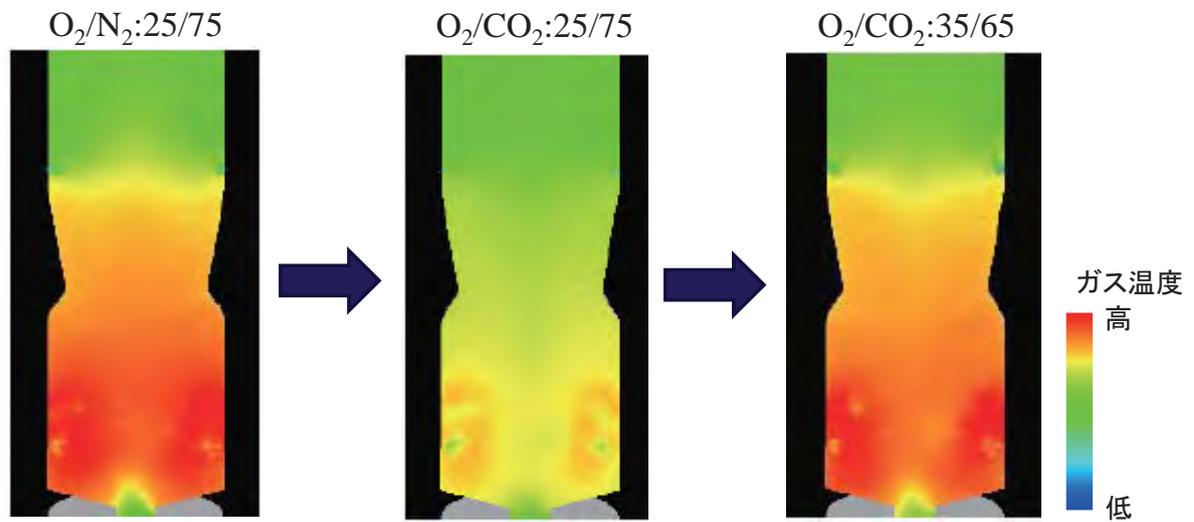
\* Source: "Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants", DOE/NETL-2007/1281

(注) 湿式: 湿式ガス精製、乾式: 乾式ガス精製

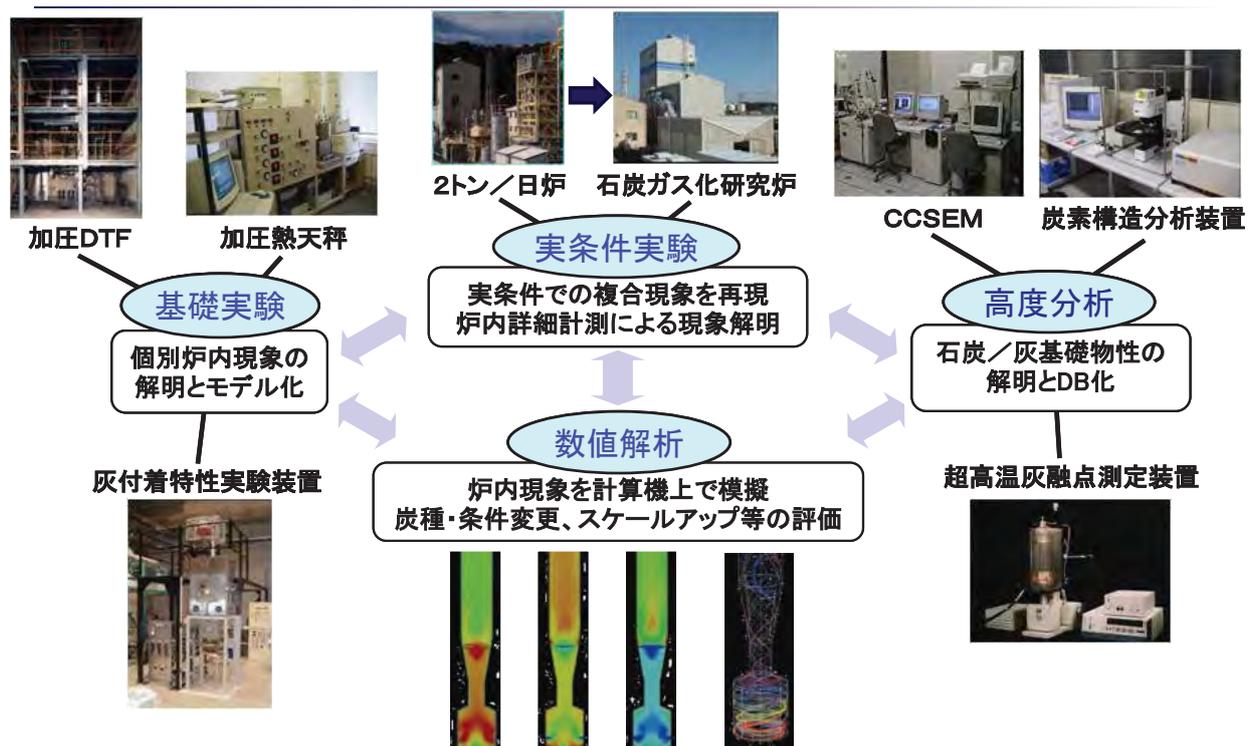
## 講演内容

1. 火力発電の現状
2. 次世代火力発電ロードマップと石炭ガス化の重要性
3. 石炭ガス化技術開発の現状
4. CO<sub>2</sub>回収技術開発の現状
5. 「富岳」を用いたシミュレーション技術への期待

# O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>吹きガス化とO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>吹きガス化の比較



# 石炭ガス化炉設計・運転支援ツール

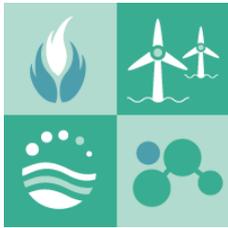


## 「富岳」への期待

- ◆ 新技術開発に当たって段階的にスケールアップするという手順を効率化する。
- ◆ 設備改造の効果を予測し、設計に反映する。
- ◆ 燃料変更時、運転条件変更時の特性を予測し、操作方法の最適化を図る。

## おわりにー今後の展開ー

- 火力技術は、現在の電力使用量の80%以上を供給しており、2030年の電源構成でも50%以上を占めると想定されている。
- 石炭は安価で供給力が高い一方で、CO<sub>2</sub>排出量が多いという問題がある。
- 石炭火力発電技術においては、燃料使用量の低減およびCO<sub>2</sub>排出量抑制の観点から高効率化が望まれており、特にガス化を核とした新しい発電方式が重要である。
- CO<sub>2</sub>の一層の低減が必要となった場合に備え、CO<sub>2</sub>回収型の発電技術も開発しておかなければならない。
- 新たな発電方式の開発ならびに運用などに対しては、高度な数値解析技術が有力なツールとなり、「富岳」への期待は大きい。



文部科学省「『富岳』成果創出加速プログラム」  
スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用  
第1回シンポジウム (2020年10月27日)

## 燃焼・ガス化炉のスーパーシミュレーション 全体概要

吉村 忍

東京大学副学長 大学院工学系研究科教授

山田知典・内田英明(東京大学)

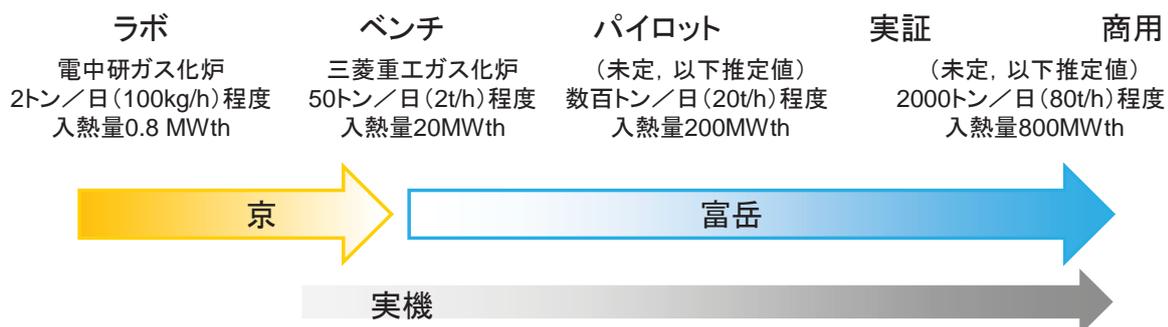
黒瀬良一(京都大学) 渡邊裕章(九州大学)

協力 数値フローデザイン、インサイト、アライドエンジニアリング

1

## 「富岳」のターゲット問題:次世代火力システム

### 石炭ガス化炉

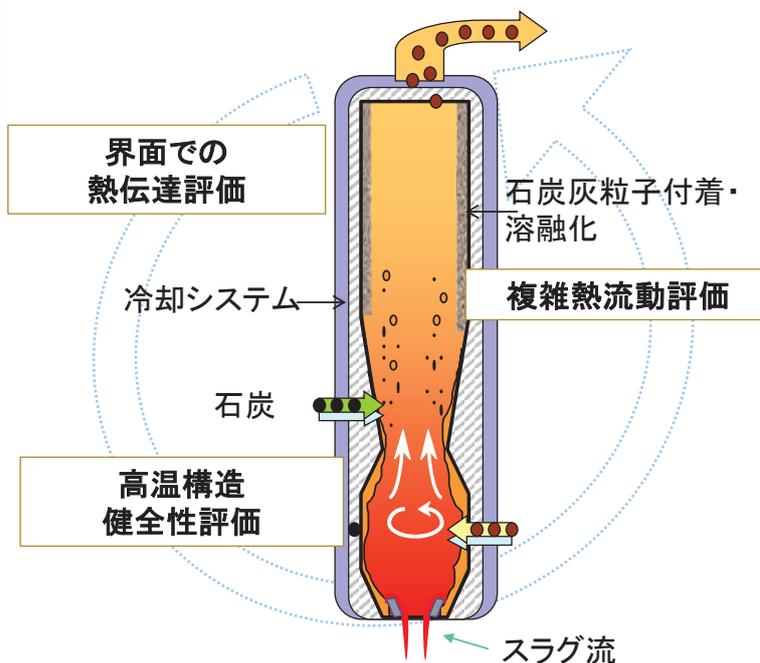


### 超臨界圧CO2タービン



2

# 石炭ガス化炉の概念図



3

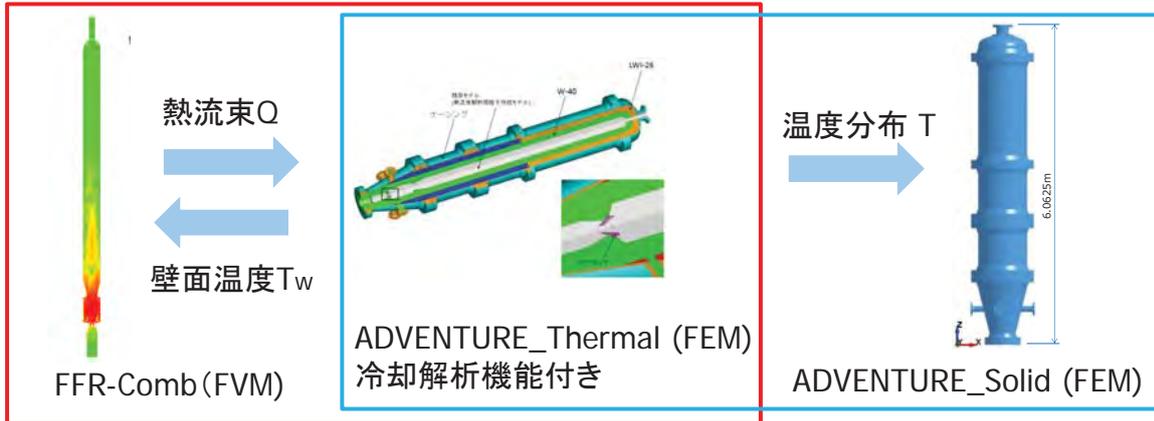
# 本提案において活用する「富岳」向け個別アプリケーション

アプリ	手法・対象	特徴	「富岳」向け tuning 状況	開発体制 (大学)	開発体制 (ベンダ)	ユーザーG・コンソーシアム
ADVENTURE_Solid	FEM／構造 (線形・繰返し熱弾塑性・クリープ・複合材)	HDDM-BDD 重点⑥ターゲットアプリ ADVC (商用)	対「京」性能比35倍以上	東大 (吉村) 及び ADV PJ	AE・インサイト・ASTOM	ADVユーザーG、ADVCユーザーG
ADVENTURE_Thermal	FEM／熱伝導・冷却管冷却	同上	同上	同上	同上	同上
ADVENTURE_Fatigue	累積疲労損傷工学モデル、損傷力学	重点⑥	ポスト処理ツール	同上	同上	同上
FFB	FEM／流体 LES・Overset・ALE	重点⑧ターゲットアプリ 重点⑥	対「京」性能比35~40倍	東大 (加藤)・豊橋技科大 (飯田)	みずほ情報総研	産応協、ターボ機械協会、自動車関連企業、他
FFR-Comb (商用)	FVM／燃焼流 LES・固気液三相	重点⑥	シミュレータで評価中 対「京」性能比8倍以上	京大 (黒瀬)・九大 (渡邊)	NuFD	理研・燃焼システム用次世代CAEコンソ (10企業・2研究所・8大学)
RC HPC版	FDM・FVMハイブリッド/WF用・LES・アクチュエータモデル	多風向同時解析／発電性能評価／重点⑥	シミュレータで評価中 SGI UV300 で性能評価	九大 (内田孝紀・小野)		次世代CAE風力産業コンソ (設立予定) (6企業参画)
REVOCAP_Coupler	汎用並列カプラ (MPI, Socket)	片連成・双方向連成 (分離反復)、重点⑥	「京」で稼働チューニング中	東大 (吉村) 及び ADV PJ	AE・インサイト	ADVユーザーG、ADVCユーザーG

4

# 石炭ガス化炉スーパーシミュレーションにおける各アプリケーションの関係

アプリケーション名	備考
FFR-Comb (FVM)	燃焼流動解析: 固気液三相流
REVOCAP_Coupler #1	オンライン双方向連成
ADVENTURE_Thermal (FEM)	炉容器内熱伝導解析+冷却解析
REVOCAP_Coupler #2	オフライン片方向連成
ADVENTURE_Solid (FEM)	非弾性熱応力解析、構造健全性評価

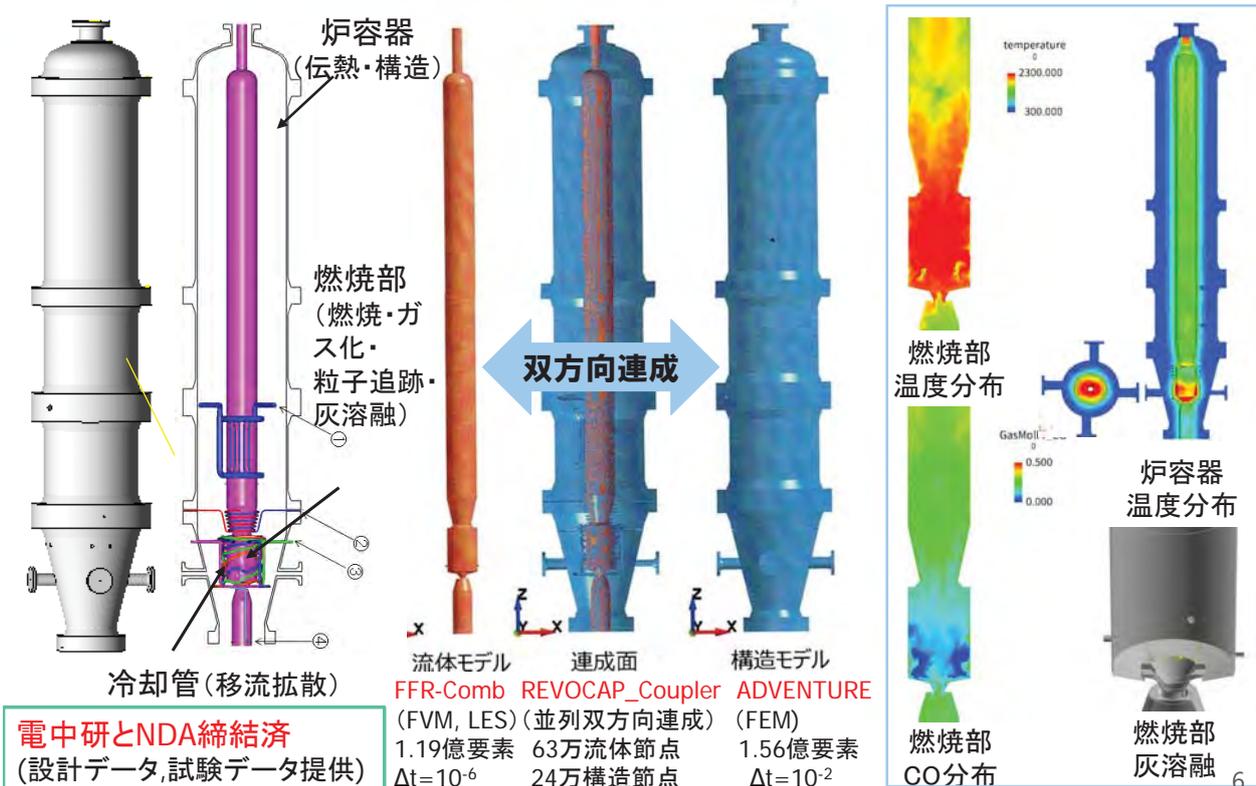


オンライン双方向連成解析

オフライン片方向連成解析

5

## スーパーシミュレーション事例1: ラボスケール石炭ガス化炉(電中研炉)の反応(燃焼・ガス化・粒子追跡・灰溶融)・伝熱・冷却、変形解析



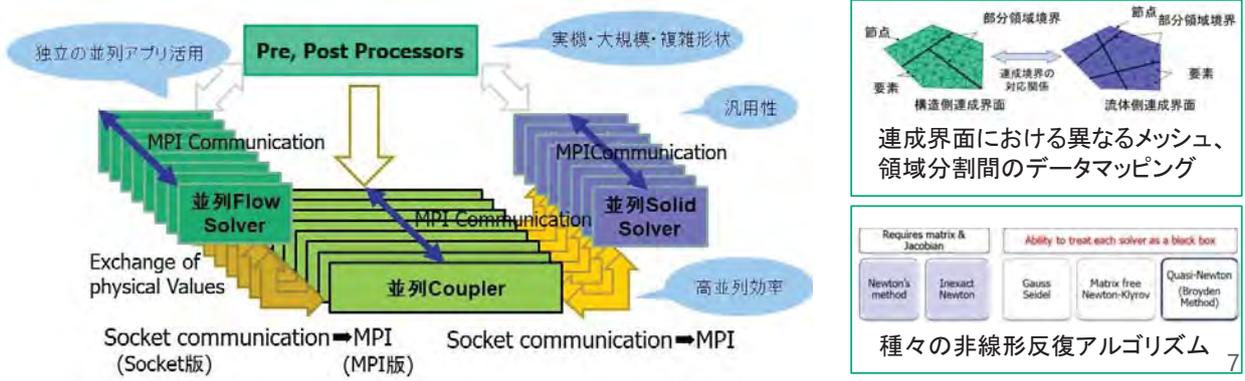
6

# 優れた新規性・独創性、世界的優位性(4)

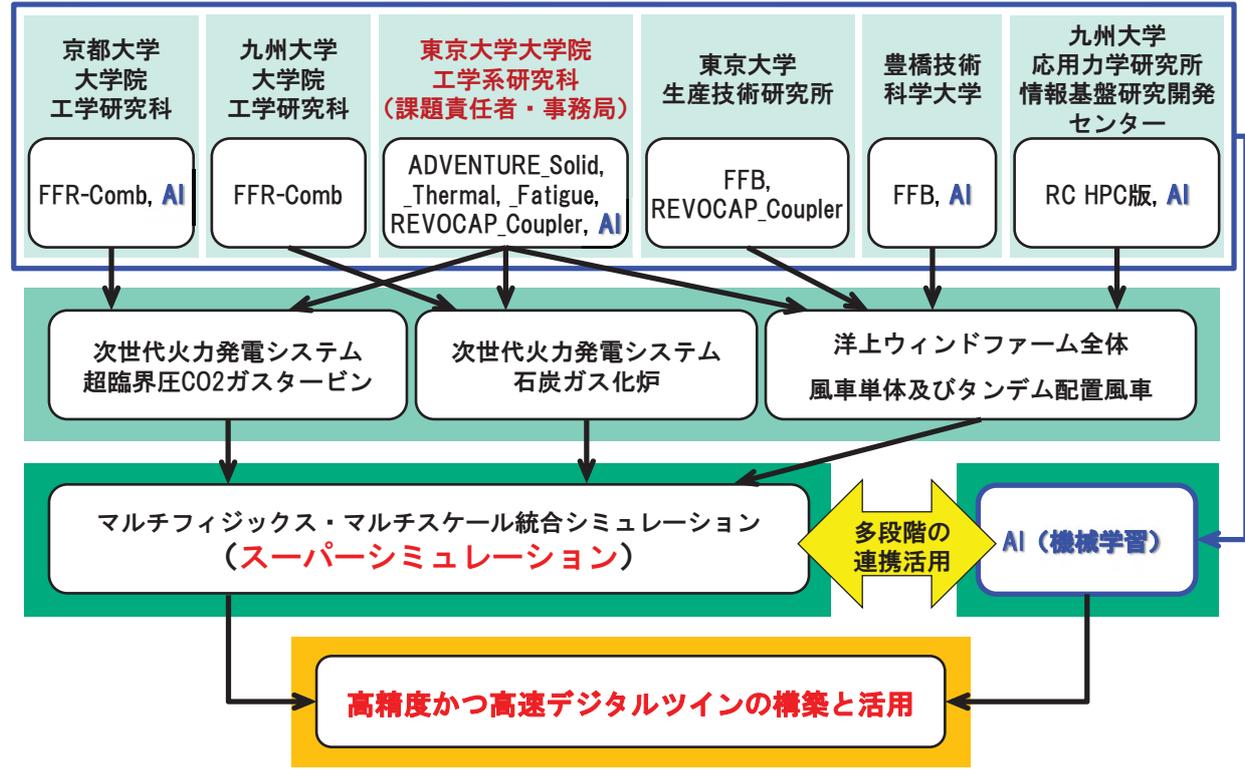
計算科学とデータ科学の融合等による産業競争力の強化に資すること、イノベーションの創出や高いインパクトを有する産業界の具体的課題の解決に貢献すること

(10) 「富岳」向け個別アプリケーション群 (FFR-Comb (乱流燃焼)、FFB (乱流)、ADVENTURE\_Solid (構造)、ADVENTURE\_Thermal (伝熱・冷却)) を、アプリにほとんど手を加えることなく、連携して活用し、高精度かつ高効率な双方向ないし片方向の連成シミュレーションを実現することができる。鍵を握るのが、並列連成カプラ REVOCAP\_Coupler。実機の大規模で任意複雑形状の問題を扱うことができ、様々なアプリケーション間の連成解析を扱え、「富岳」のような最先端並列計算機環境においても高い並列効率を達成可能。このような並列連成解析アルゴリズムとツールは世界的にも存在せず、計算科学的にも大変大きな価値がある。

⇒ S. Yoshimura, Plenary Lecture, WCCM-ECCOMAS2020, Paris, July 2020



# 実施体制



## まとめ

「富岳」用アプリケーション群(ADVENTURE、FFB、FFR-Comb、REVOCAP\_Coupler、RC HPC版)に基づくマルチフィジクス・マルチスケール統合シミュレーション構築  
(**スーパーシミュレーション**)



AI(機械学習)

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してのCCS(CO2回収・貯留)技術に適した次世代火力発電システム(石炭ガス化炉、超臨界圧CO2ガスタービン)、及び洋上ウィンドファームの**高精度かつ高速なデジタルツイン**を構築

…> 実機システムの開発、設計、運用の最適化に活用  
各システムの実用化を大幅に加速

上記クリーンエネルギーシステムのみならず、燃焼機器、伝熱機器、流体機械等の幅広い実機に活用可能

様々な企業群、産業界コンソーシアムと協力を連携しながら遂行  
**「富岳」を活用した我が国の産業競争力の強化**に幅広く大きく貢献



## スーパーミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用

### FFR-CombによるCO<sub>2</sub>回収型IGCC用ガス化炉解析



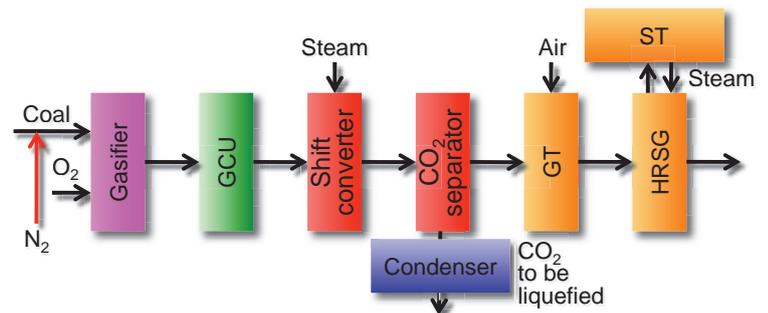
渡邊 裕章

九州大学 大学院総合理工学研究院

## CO<sub>2</sub>回収型石炭ガス化複合発電システム

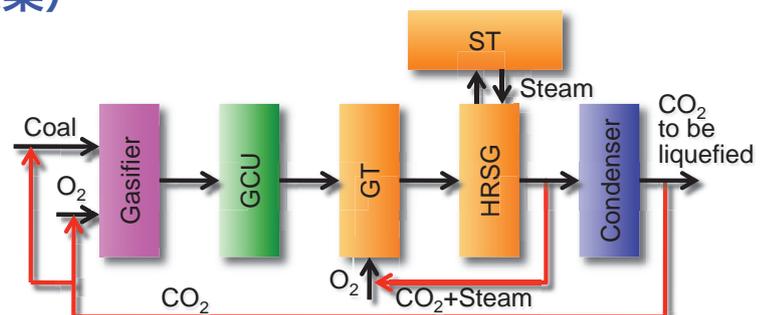
### ❖従来型IGCC + CCS

- CO<sub>2</sub>燃焼前回収方式
- 送電端効率：41% → 32%
- CCS設備運用に大きなコスト



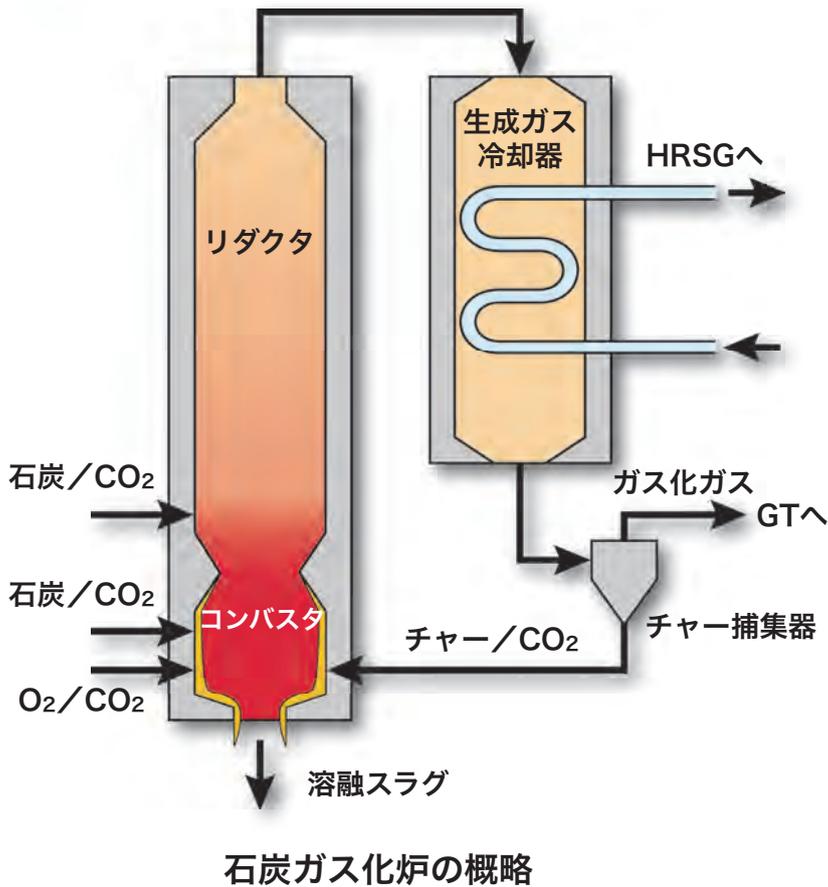
### ❖Oxy-fuel型IGCC + CCS（本提案）

- Oxy-fuel型CO<sub>2</sub>回収方式
- 送電端効率：42%（1500degC GT-ST（試算値））
- シフト変換器やCO<sub>2</sub>吸収装置が不要



Oki et al., Energy Procedia, 4(2011)

# Oxy-fuel型O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>吹きガス化炉



## ❖2室2段噴流床方式

コンバスタとリダクタの2つの反応容器からなる。それぞれにバーナを設置して、空気比を制御する。

## ❖旋回上昇流

旋回流により、溶融した灰粒子を捕集し、高温ガスとの分離を行う。

## ❖溶融スラグ排出

捕集された灰粒子は、溶融スラグとしてコンバスタ底部から流下し、炉外へ排出される。

## ❖チャーリサイクルシステム

未燃粒子のチャーは、チャー捕集器により全量回収されて、コンバスタへ再投入される。

3

# Oxy-fuel型O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>吹きガス化炉の開発課題

## ❖O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>吹き条件における炉内現象の解明と予測技術の開発

### • 石炭粒子のガス化（固気）反応の促進

#### ➡CO<sub>2</sub>の投入による反応温度の低下

イメージ：空気燃焼（O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>=21%/79%）と同等の温度を維持するには、O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>=25~30%/75~70%とする必要がある。

#### ➡CO<sub>2</sub>の投入によるCO<sub>2</sub>ガス化反応の促進



$$\frac{dC}{dt} = f(P_{CO_2}, T_p, \dots)$$

4

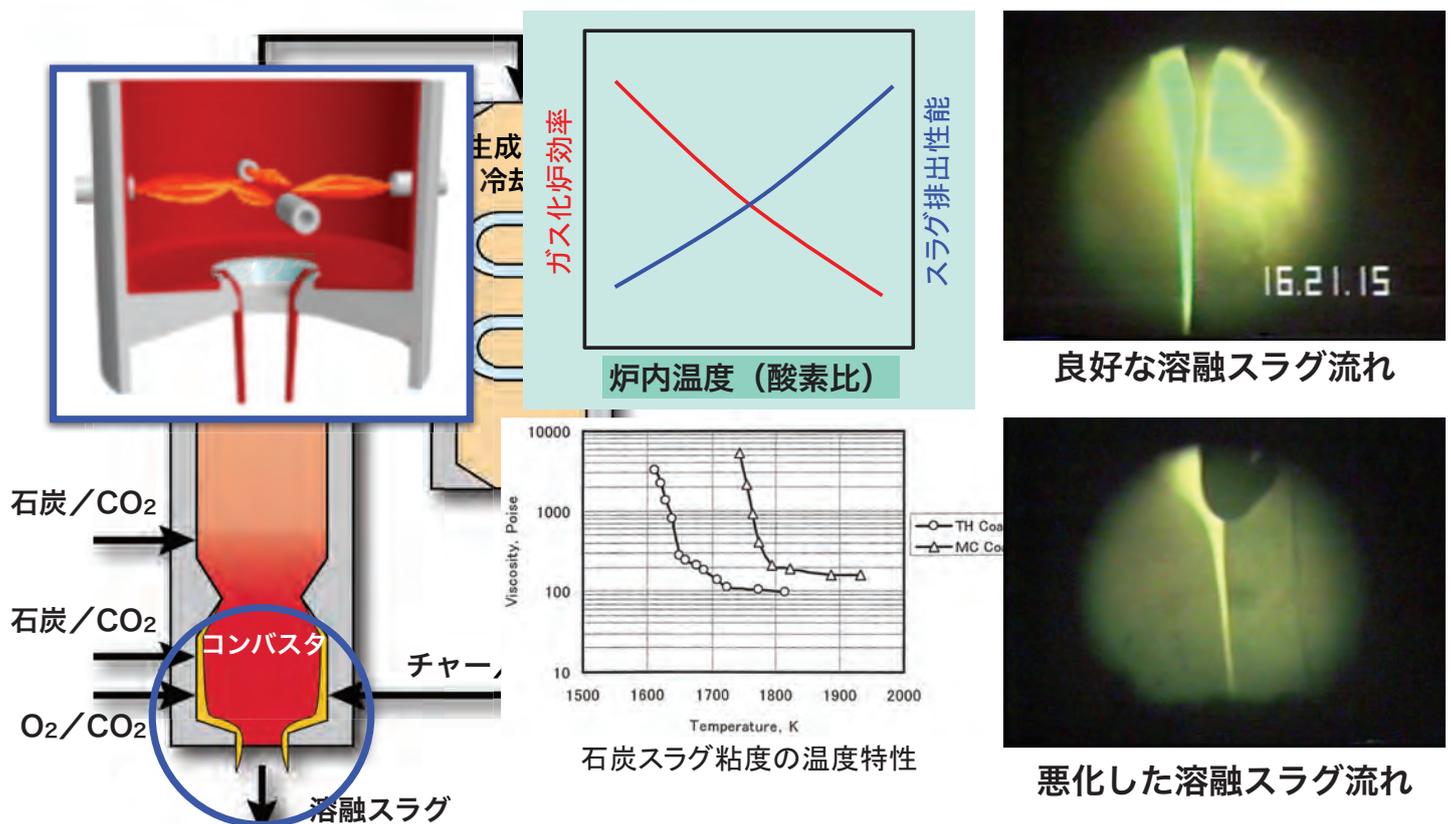
# Oxy-fuel型O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>吹きガス化炉の開発課題

❖O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>吹き条件における炉内現象の解明と予測技術の開発

- 石炭粒子のガス化（固気）反応の促進
- 溶融スラグの安定排出
  - ➔CO<sub>2</sub>の投入による反応温度の低下
  - ➔効率向上のための酸素比低減による反応温度の低下

5

## ガス化炉の効率とスラグ排出の関係



- ガス化炉の効率維持とスラグ安定排出のためには、最適点を見極める必要がある。
- 反応容器の冷却系を含む系全体で熱的なバランスを評価する必要がある。

6

# Oxy-fuel型O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>吹きガス化炉の開発課題

## ❖O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>吹き条件における炉内現象の解明と予測技術の開発

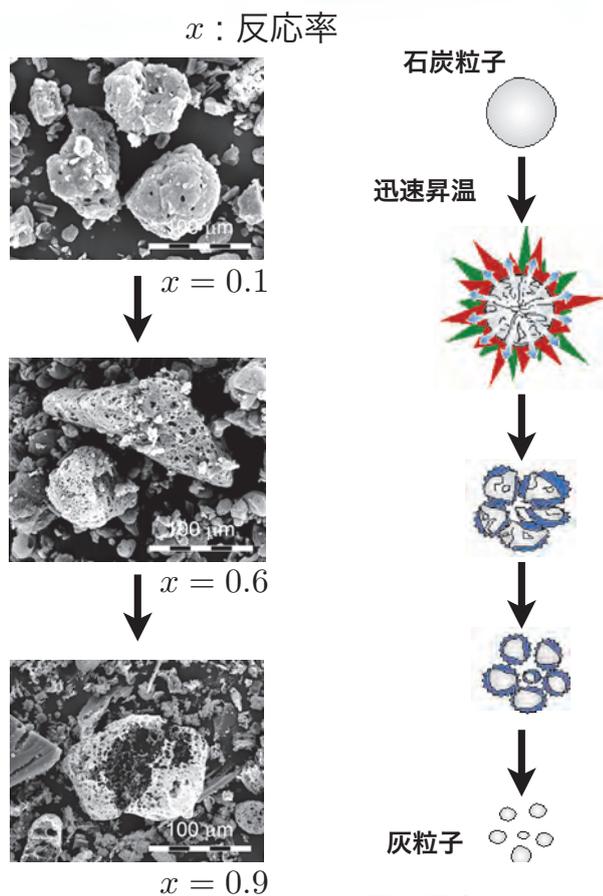
- 石炭粒子のガス化（固気）反応の促進
- 熔融スラグの安定排出

## ❖実機への適用に向けたデジタルツインの構築

- ラボスケール炉におけるV&V
- ベンチスケール炉におけるV&V

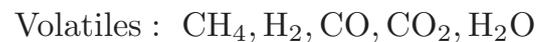
7

# 石炭ガス化反応モデリング

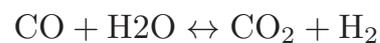
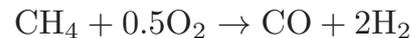


## 3つの化学反応プロセス

### ① 熱分解（揮発分放出）



### ② 気相反応（揮発分燃焼含む）



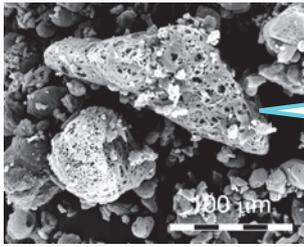
### ③ チャーガス化反応（固気反応）



8

# チャーガス化反応モデル

Umemoto et al., Fuel, 103(2013)



チャー粒子のポーラス構造モデル

$$\frac{dx}{dt} = \sum_i k_{p_i} S_i = \sum_i k_{p_i} (1-x) \sqrt{1 - \Psi_i \ln(1-x)}$$

$$x = 1 - \frac{M_c}{M_{CO}}$$

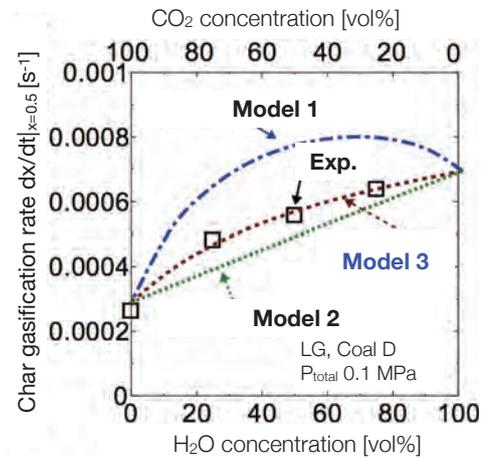
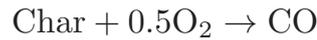
## Model 1: 単純加算モデル

$$k_{p_i} = \frac{k_{11} P_{CO_2}}{1 + k_{12} P_{CO_2} + k_{13} P_{CO}} + \frac{k_{21} P_{H_2O}}{1 + k_{22} P_{H_2O} + k_{23} P_{H_2}}$$

## Model 2: 活性点線形共有モデル

$$k_{p_i} = \frac{k_{11} P_{CO_2}}{1 + k_{12} P_{CO_2} + k_{13} P_{CO} + k_{22} P_{H_2O} + k_{23} P_{H_2}} + \frac{k_{21} P_{H_2O}}{1 + k_{12} P_{CO_2} + k_{13} P_{CO} + k_{22} P_{H_2O} + k_{23} P_{H_2}}$$

## 反応メカニズム



チャー反応モデル予測値と実験値との比較

## Model 3: 活性点部分共有モデル

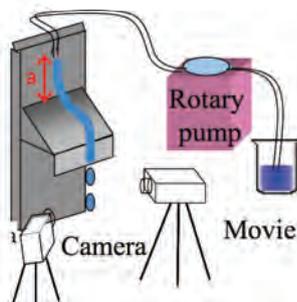
$$k_{p_i} = \frac{k_{11} P_{CO_2}}{1 + k_{12} P_{CO_2} + k_{13} P_{CO} + a/ck_{22} P_{H_2O} + a/ck_{23} P_{H_2}} + \frac{k_{21} P_{H_2O}}{1 + bck_{12} P_{CO_2} + bck_{13} P_{CO} + k_{22} P_{H_2O} + k_{23} P_{H_2}}$$

# 溶融スラグ流モデリング

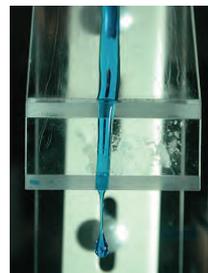
松隈, 日本エネルギー学会誌, 94(2015)

		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
密度	kg/m <sup>3</sup>	994	994	994	994	994	2700
粘度	Pa s	3.6	3.6	6.4	6.4	8.6	5
表面張力	mN/m	55.4	55.4	55.4	55.4	55.4	400
流量	mL/s	0.175	0.476	0.172	0.435	0.339	0.5

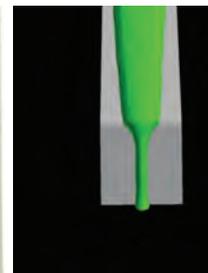
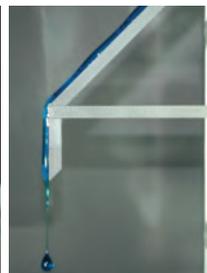
← 模擬流体 → 実条件



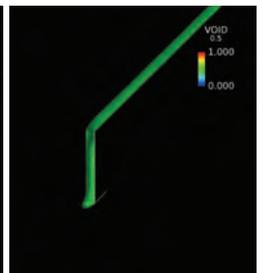
実験装置



Case1: 実験結果



Case1: 解析結果



相対値 (計算値 / 実験値)

- 気液二相流モデル: VOF法
- VOF関数移流項スキーム: HRIC差分
- 表面張力モデル: CSFモデル

	case1	case2	case3	case4	case5
液膜幅	0.69	0.58	0.37	0.61	0.44
液膜厚	0.92	1.01	0.83	1.07	1.04
流速	1.41	1.17	1.28	1.22	1.39
Oh数	1.04	0.99	0.62	0.97	0.99
Fr数	1.47	1.16	1.40	1.19	1.37

# 壁面への付着・衝突

VOF方程式

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \phi}{\partial x_j} = \dot{\phi}$$

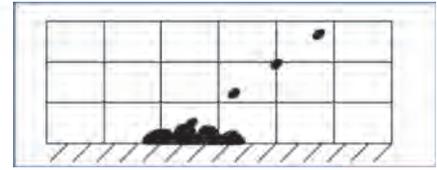
灰粒子付着による生成項

粒子の質量と体積の関係

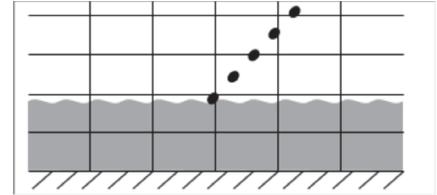
$$m_p = V_p \cdot \rho_p$$

粒子付着とボイド率変化の関係

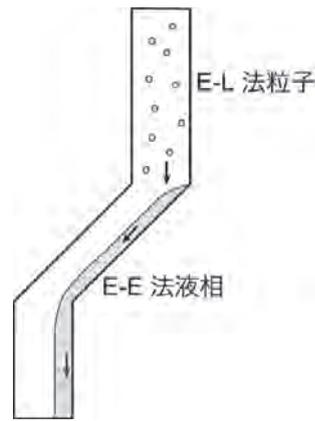
$$\alpha^{n+1} = \frac{\alpha^n V_{CV} + \sum V_p}{V_{CV}}$$



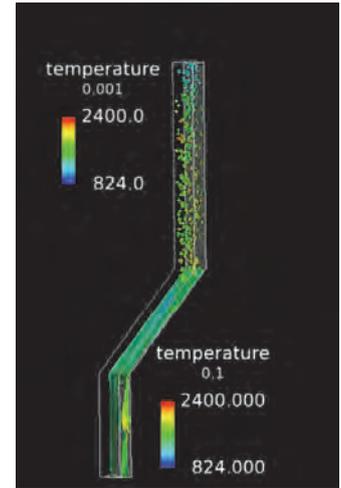
Lagrange粒子の壁面への衝突・付着



Lagrange粒子の液相面への衝突・付着



試算概略



試算結果

# 解析手法

## 固気相

乱流モデル	Dynamic Smagorinskyモデル
流れ場のモデル	圧縮性流体
粒子輸送モデル	Lagrangian method with parcel model
燃焼モデル	Scalar Similarity Filtered Reaction Rateモデル 反応機構: 総括5段反応
固気反応モデル	活性点共有型 Langmuir-Hinshelwoodモデル
移流項離散スキーム	速度: 2次精度中心補間95% 1次風上補間5% 温度・化学種: 2次精度風上補間
時間刻み	5E-6sec

## 液相

液相モデル	VOF法
流れ場のモデル	ニュートン流体
粘性モデル	T-Shiftモデル
移流項離散スキーム	VOF: HRICスキーム 温度・化学種: 2次精度風上補間
時間刻み	5E-6sec

# 解析対象・条件

## 石炭性状

水分	6.9
揮発分	41.2
固定炭素	47.4
灰分	4.5
C	66.38
H	4.86
O	16.1
N	1.03
S	0.1

## 検討ケース

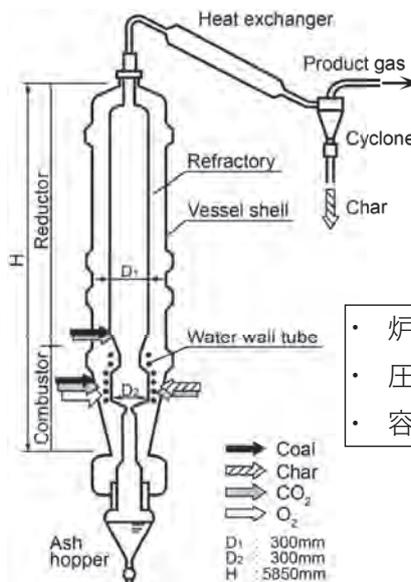
酸素比	0.54
O <sub>2</sub> vol%	25
CO <sub>2</sub> vol%	25
N <sub>2</sub> vol%	50

## 計算条件等

並列数	9,216
時間刻み	5 x 10 <sup>-6</sup> s
物理時間	approx.10 s
Wall clock time	240 hrs.



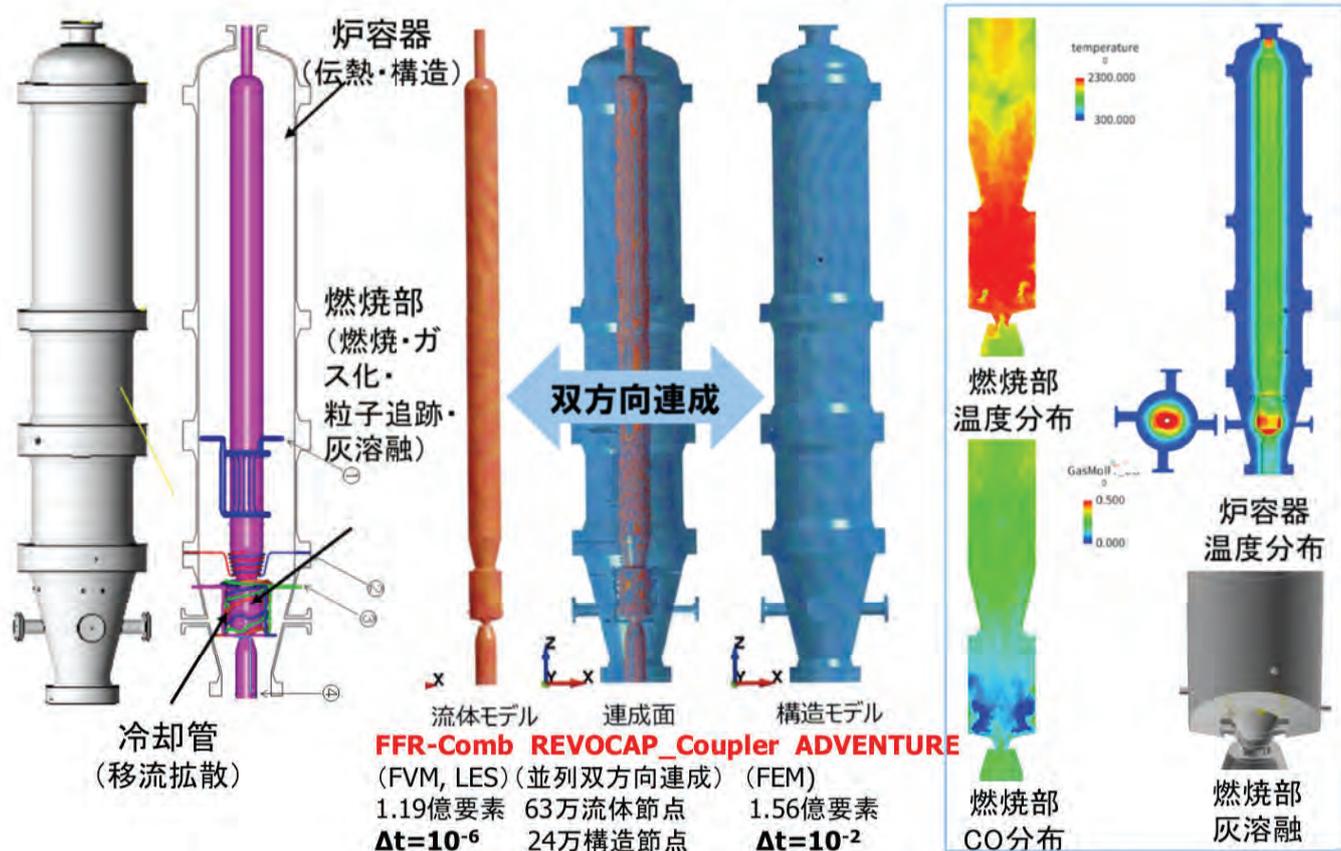
石炭ガス化研究設備  
(電力中央研究所所有)



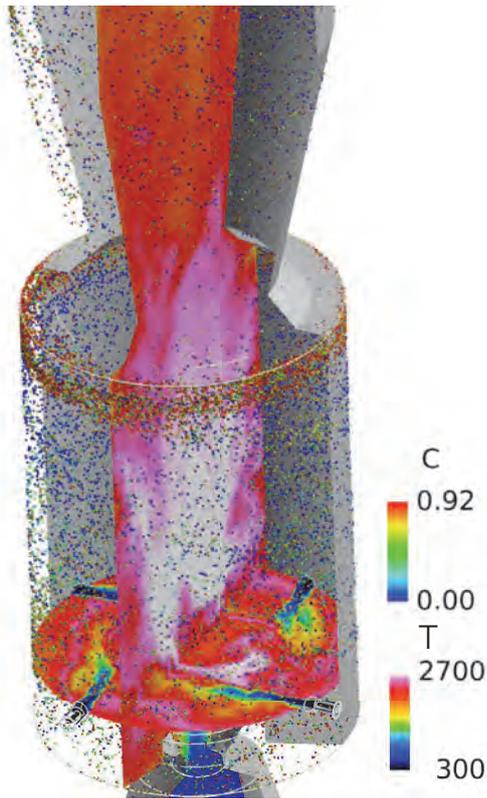
- 炉形式：2室2段噴流床
- 圧力：2.0 MPa
- 容量：100 kg/h (760kWth)

石炭ガス化研究炉の概略

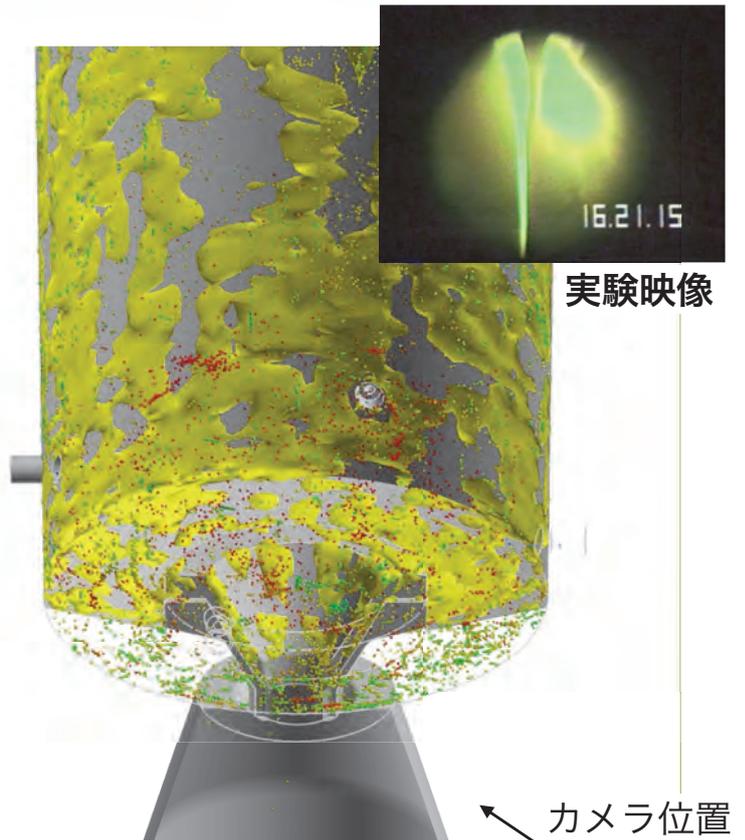
ラボスケール石炭ガス化炉の反応（燃烧・ガス化・粒子追跡・灰溶解）・伝熱・冷却，変形の世界初マルチスケール・マルチフィジクス統合シミュレーション（スーパーシミュレーション）の実現



# ガス化炉内流れの概観

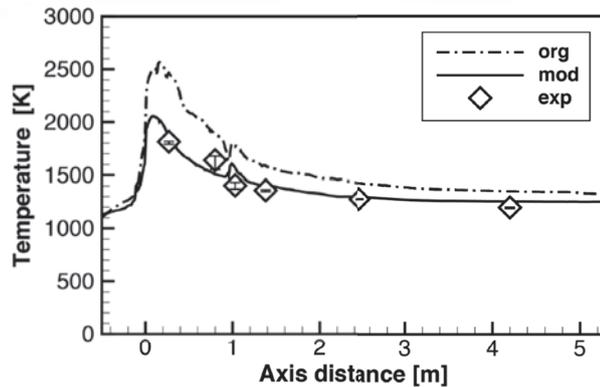
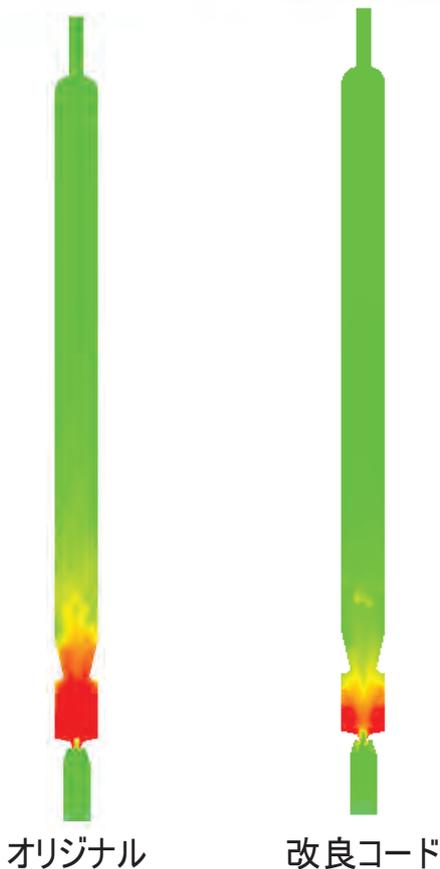


ガス化炉内の温度分布と粒子分布

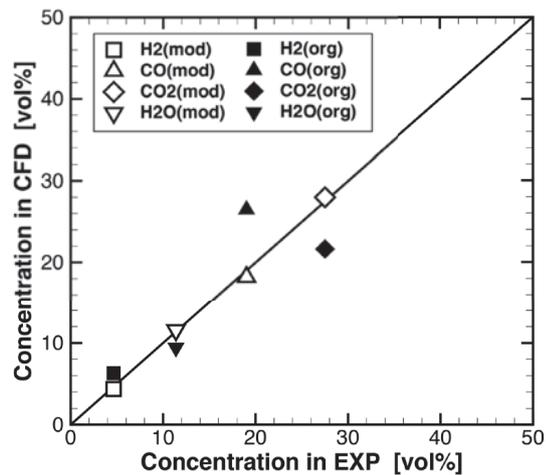


ガス化炉内の溶融スラグ流れ

# 実験との比較, およびコード改良による精度向上

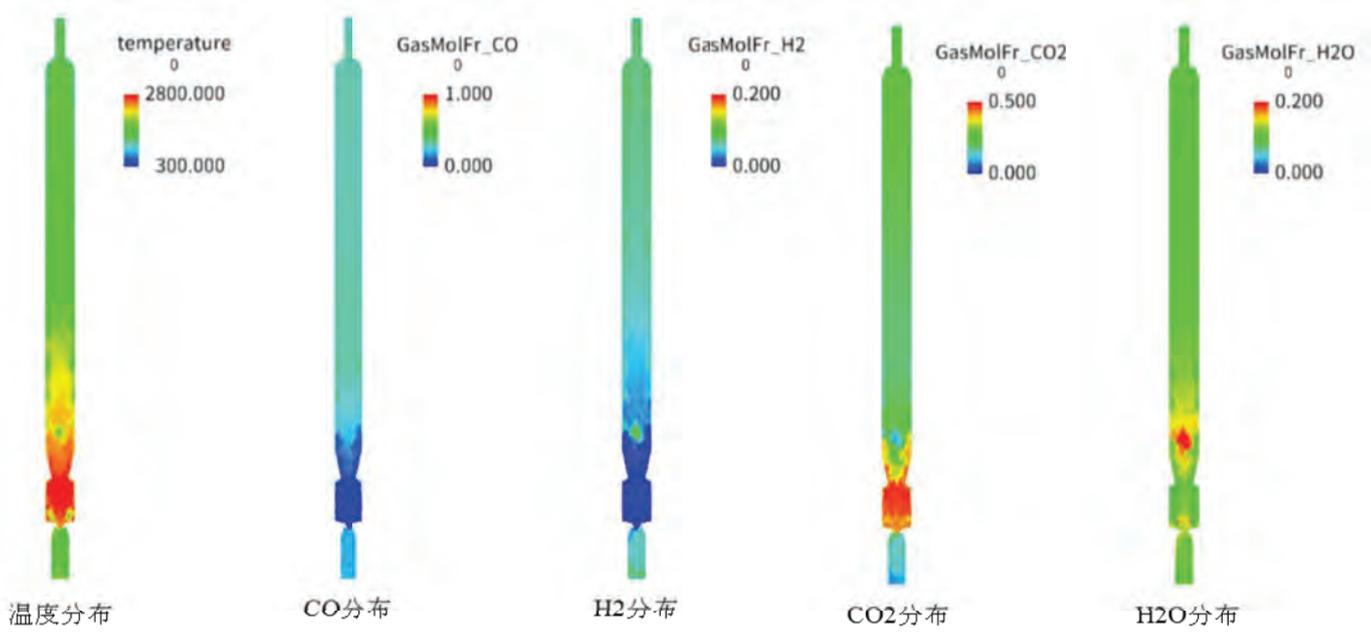


中心軸上ガス温度分布

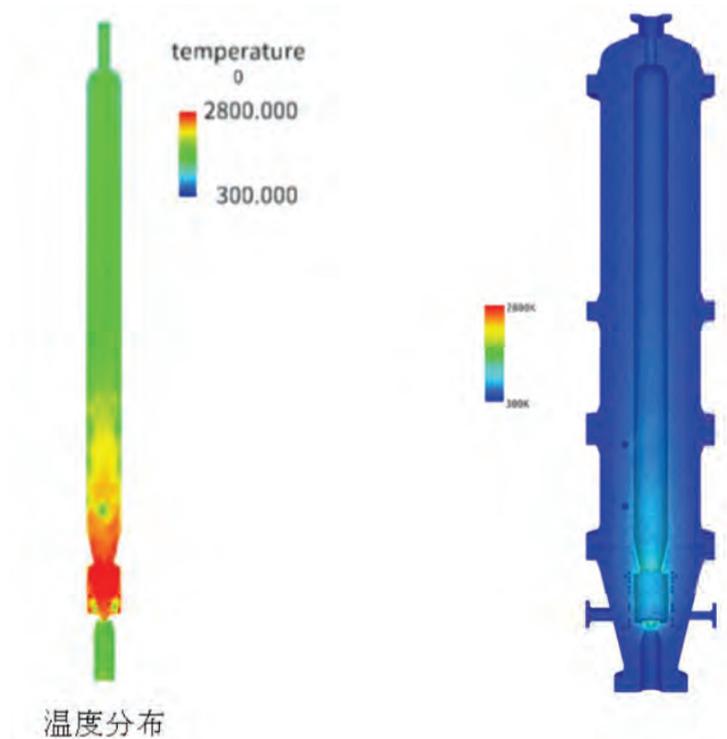


ガス化炉出口ガス組成

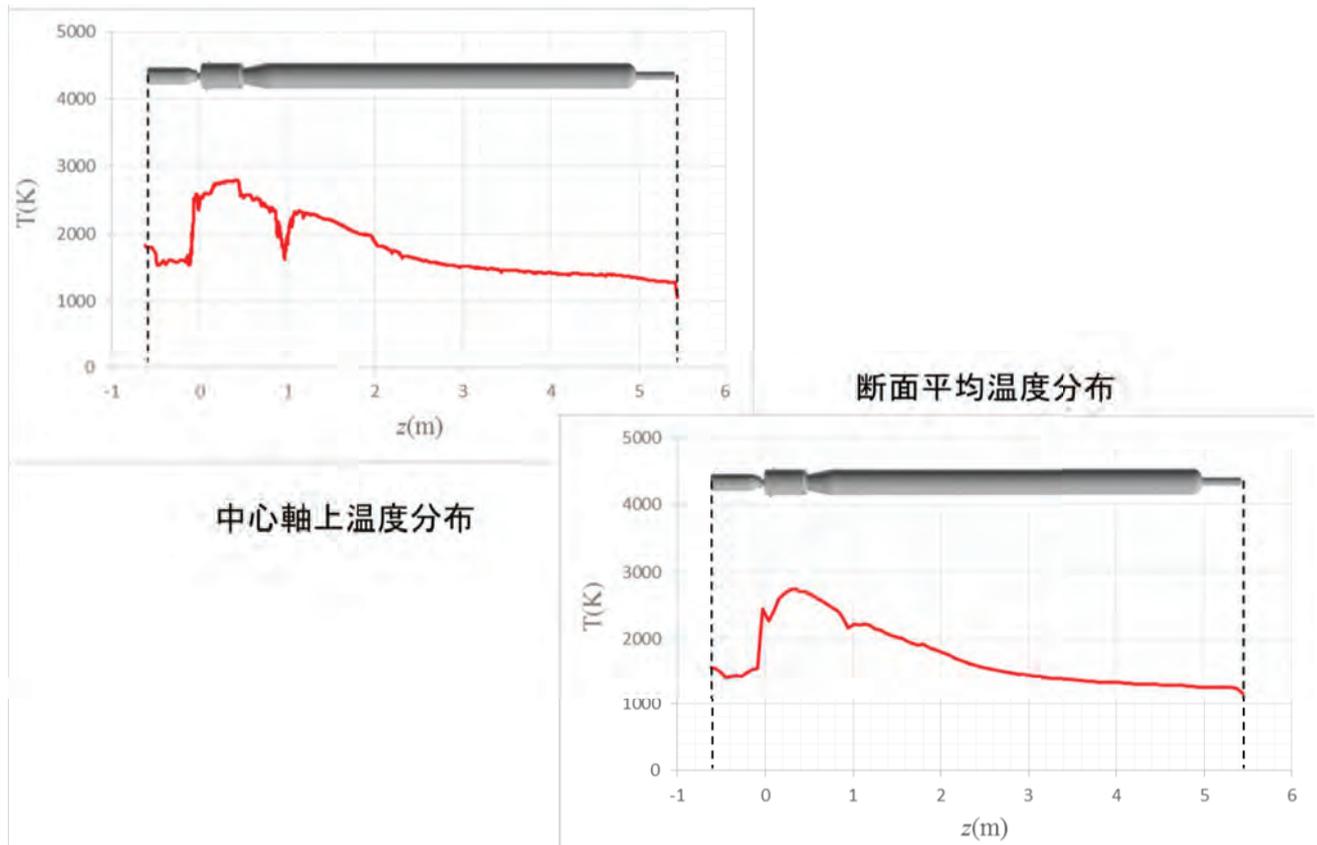
# 双方向連成解析による炉内ガス組成分布



# 双方向連成解析による燃焼部と炉容器部の温度分布



# 双方向連成解析による炉内温度分布



19

## 今後の計画

❖ ラボスケール石炭ガス化炉（電中研炉）の双方向連成解析とV&V

- FFR-Comb ⇔ REVOCAP\_Coupler ⇔ ADVENTURE\_Thermalの双方向連成解析を達成。ほぼ妥当な結果が得られてきている。

➡ ラボスケール炉におけるV&Vへ

❖ ベンチスケール石炭ガス化炉（三菱実験炉）のモデル構築と試解析

20

# 洋上風力発電のロードマップと「富岳」への期待

今村 博

株式会社ウインドエナジーコンサルティング

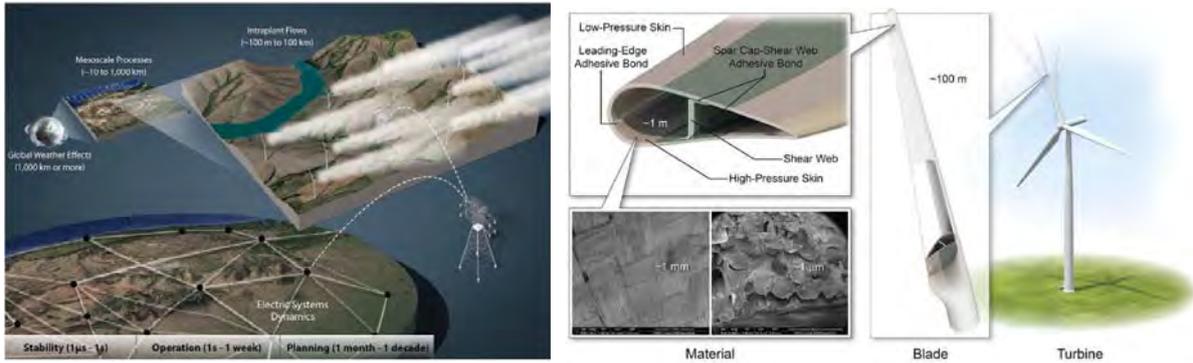
文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム クリーンエネルギー「富岳」シンポジウム 第1回シンポジウム 2020年10月27日

## 内容

- ◆ 「富岳」で目指していること
- ◆ 洋上風力発電の今後の見通し
- ◆ 技術開発の動向
- ◆ 洋上風力とデジタル技術
- ◆ 「富岳」への期待

◆ 高忠実度モデルによるマルチスケールシミュレーションの実用化

- 風力エネルギーの科学的な課題の根底にあるスケールのカスケード：地球レベルでの気象システムから風力タービン翼の境界層までの長さスケールと、気象の季節変動から発電電力量と需要のマイクロ秒の動的制御とバランスを理解し、運転維持を行う必要がある。
- 「富岳」での活用を念頭に開発準備を進めてきたアプリケーション群（ADVENTURE、FFB、FFR-Comb、REVOCAP\_Coupler、RC HPC版）に基づくマルチフィジクス・マルチスケール統合シミュレーション（スーパーシミュレーション）とAI（機械学習）を連携活用し、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CO2回収・貯留技術の適用に適した次世代火力発電システム、及び洋上ウインドファームのデジタルツインを構築し、それらの開発・設計・運用の最適化に活用することを目指す。

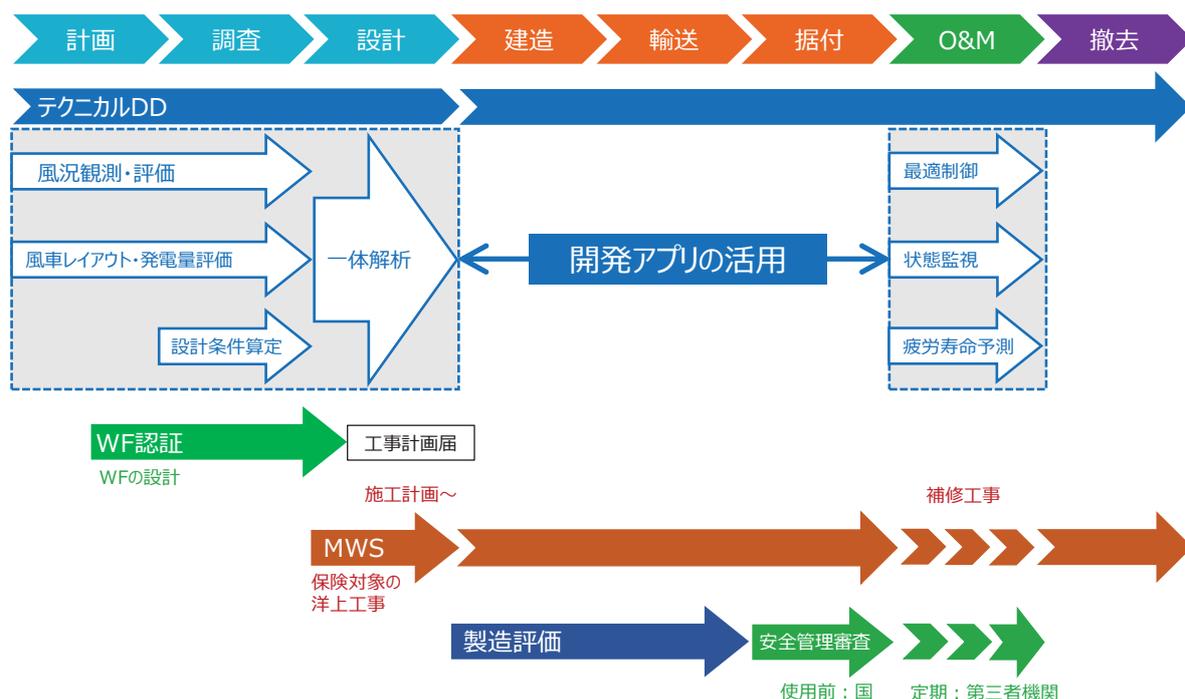


マルチスケールスケールにわたる物理現象の忠実なシミュレーションの実現と社会実装

- 出典
- クリーンエネルギー「富岳」シンポジウム、<https://post6.t.u-tokyo.ac.jp/event/symposium202010.html>
  - Veers他、Grand challenges in the science of wind energy, Science 366, 433, 2019.

洋上風力発電プロジェクトのライフサイクル

◆ 洋上風力発電所のライフサイクルにおける業務の概要



◆ 再生可能エネルギーの「主力電源化」

- 第5次エネルギー基本計画（抜粋）
  - 再生可能エネルギーは、「エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、長期を展望した環境負荷の低減を見据えつつ活用していく必要な低炭素の国産エネルギーである。」
  - 2030年のエネルギーミックスにおける電源構成比率の実現とともに、**確実な主力電源化への布石として取組を早期に進める。**
  - 世界最先端の浮体式洋上風力**や大型蓄電池などによる**新技術市場の創出**など、経済性のバランスのとれた開発を進めていくことが必要である。

■ FIT導入以降、風力発電導入量は増加

➢ 国内の太陽光発電の建設ラッシュが落ち着く一方で、風力発電のFIT認定量は増加、年平均成長率（CAGR）は5%を超えるペースで導入量が増加するものと予想されている(右図)。

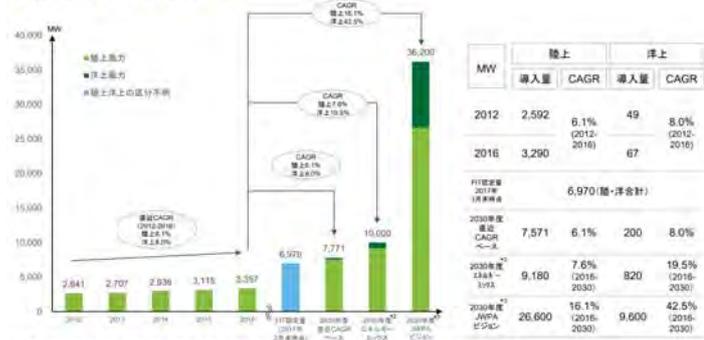
■ 2019年末の日本の風力発電設備容量

➢ 累積：39,23MW（2414基、457発電所）  
 ➢ 単年：270MW（104基、17発電所）

■ 着床式洋上風力発電のポテンシャル(JWPA)

➢ 設備容量：91GW  
 ➢ 設置面積：14,591km<sup>2</sup>

風力発電導入量の推移(発電容量)\*\*



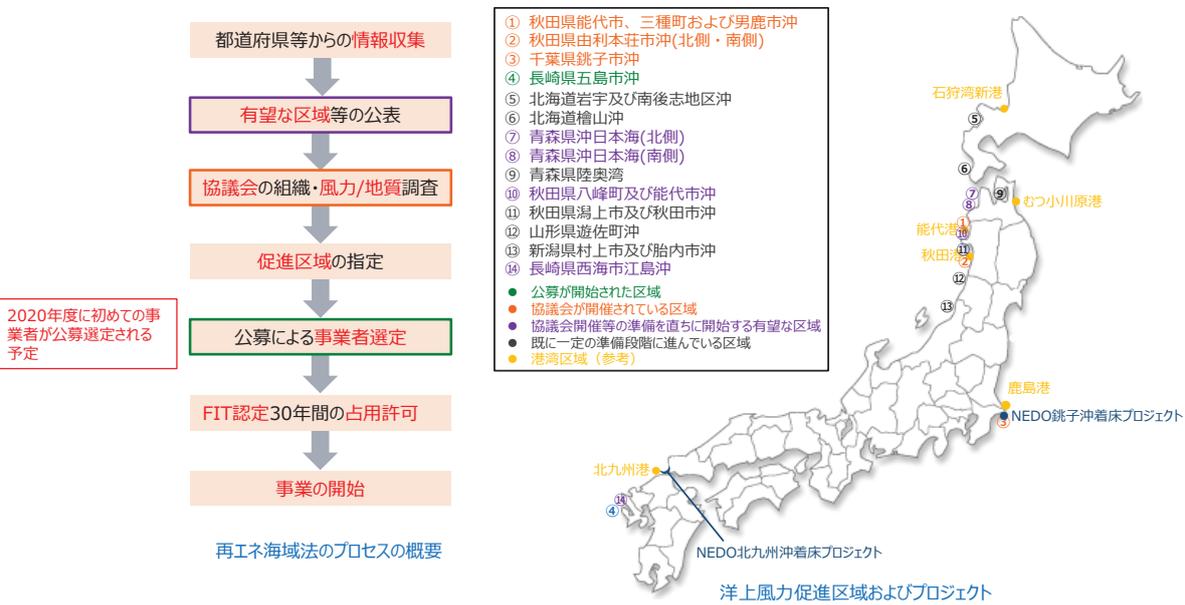
日本の風力発電導入量の推移および見込み

出典：

- 第7回総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会/電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 開催資料（2018年8月29日）
- 経済産業省ホームページ、平成29年度電気施設等の保安規制の合理化検討に係る調査（風力発電業界の構造調査）報告書（2018年3月）

◆ 再エネ海域利用法（2020年4月施行）

- 海外でコスト低下が進み、**再生可能エネルギーの最大限の導入と国民負担抑制を両立する観点から重要な洋上風力発電**が、①海域の占有に関する統一的なルールがない、②先行利用者との調整の枠組みが存在しない、という課題により導入が進んでいなかったことを受け、これらの課題の解決に向け成立した法律。



出典

- 経済産業省、第1回 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会配布資料、2020年7月17日

◆ 浮体式洋上風力発電の導入状況

- 環境省、経済産業省及びNEDOでスパー型、セミサブ型およびバージ型の浮体の実証研究を実施。
- NEDOでは、発電コスト20円/kWhを目指した低コスト化のための実証研究を開始。
- 長崎県五島市沖の公募では浮体式洋上WFの可能性大。

■ 導入目標（JWPA）

- JWPAのWind vision(2019)では、浮体式洋上風力は2030年に3.8GW(洋上風力は10GW)、2050年には18GW(同37GW)の導入目標を提言。
- 2030年以降の早い時期にグリッドパリティ（発電コスト8～9円/kWh）の達成を目指す。

■ 実証研究後に商用運転

- 長崎県五島市沖の促進区域について再エネ海域利用法に基づく公募を開始された(2020年6月24日)。一般海域における最初の商用windファームは浮体式洋上風力発電所となる可能性がある。



出典

- 福島洋上風力コンソーシアム (<http://www.fukushima-forward.jp/index.html>)
- 日本初のバージ型浮体式洋上風力発電システム実証機が完成 ([https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101008.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101008.html))

◆ 10年で原発10基分軸に検討 洋上風力推進へ目標—官民協議会

経済産業省と国土交通省は7月17日、洋上風力発電の普及策を関係業界団体など話し合う官民協議会の初会合を開き、今後10年間で原発10基分に当たる10ギガワットの発電能力を確保する案を軸に、導入目標を検討することで一致した。梶山弘志経産相は席上、「中長期の導入目標は投資判断につながる」と述べ、上積みも視野に入れる意向を示した。

官民協議会は年内にも最初の報告書をまとめ、導入目標や洋上風力普及への課題を示す見通し。1ギガワットは原発1基分の発電能力に相当するとされる。関連企業でつくる一般社団法人「日本風力発電協会」は、協議会に30年までに10ギガワットを確保する目標を提案、梶山氏も参考にする意向を示した。



第1回官民協議会（2020/7/17開催）における赤羽国交相（左）と梶山経産相（右）

◆ 再生エネ「主力電源に」

梶山弘志経済産業相は10月13日、日本経済新聞のインタビューで、太陽光や風力などの再生可能エネルギーを「他の電源に比べ上位の主力電源にしていこう」と表明した。普及の基盤となる高性能な蓄電池や洋上風力の整備などに予算を厚く配分する。原子力発電所については「今後10年間は再稼働に全精力を注ぐ」として新增設に慎重な姿勢を示した。

梶山氏は再生エネについて「（電源構成上で）上限を設けずに比率を引き上げていく」と述べた。再生エネは2018年にまとめた現行のエネルギー基本計画で「主力電源化を目指す」として、発電量に占める割合を30年に22～24%に高める目標を掲げた。18年度時点では17%にとどまる。

梶山経産相の発言のポイント

- 再生可能エネルギーを最大の主力電源に
- 再生エネ普及へ蓄電池や新技術の開発促進
- 原発は今後10年間、再稼働に注力
- 核のごみ問題は「自分たちの世代で方向性」
- 非効率な石炭火力の削減などで国際批判に対応

出典：

- 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会、[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/yojo\\_furyoku/index.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/index.html)
- 時事ドットコムニュース、2020年07月17日、<https://www.jiji.com/jc/article?k=2020071701024&g=eco>
- 日本経済新聞、2020年10月14日、<https://www.nikkei.com/article/DGKKZ064929230T11C20A0MM8000/>

- 第1回洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会（令和2年7月17日）では、国から論点を示しつつ、業界・事業者、有識者からのヒアリングを実施。代表的な意見は以下のとおり。

論点	業界・事業者からの意見	有識者からの意見
①中長期的な洋上風力発電の導入のポテンシャルと課題の分析	○予見性の確保が重要。 ○投資判断に必要な市場規模は、 <b>2030年にかけては100万kW×10年</b> <b>2040年には3000万kW～4500万kW</b>	○年間 <b>100万kW(年2～3区域)</b> は妥当。 ○太陽光の反省を踏まえれば、 <b>導入拡大はコスト低減の成熟度に応じて進めるべき。</b>
②分野別の課題の分析	○ <b>洋上風力関連産業（風車製造工場等）の誘致</b> が必要。 ○基礎工事、据え付け等の <b>低コスト化に向けた技術の確立が必要</b>	
③計画的導入に向けたインフラ環境整備のあり方	○ <b>直流送電も含めた系統整備を適切に実施して欲しい。</b> ○ <b>導入見通しに応じた、計画的な港湾整備が必要。</b>	○使用されない港湾があると <b>税の有効活用の観点や利用料が高くなるため、促進区域指定との整合性をとっていく仕組みづくりが必要。</b>
④事業者（業界）の投資やコスト低減等に関する取組	○発電コストは、 <b>8～9円/kWhを目指す。</b>	○導入見通しに応じて、 <b>事業者がコスト低減の具体的な数字とスケジュールを示すことが有効。</b> ○イギリスのセクターディールも参考に検討すべき。
⑤その他	○ <b>テーマ毎に作業部会を設置し、実行プランを作成するサイクル</b> をつくるようにしてもらいたい。	

**梶山経済産業大臣の締め挨拶**

当面10年間は100万kW/年、2040年にかけては3000万kWを超える規模の見通しがあれば思い切った投資ができるものと思っており、引き続き、本協議会で議論していきたい。また、（本日発言があった）直流送電や港湾についても今後議論が必要。

**赤羽国土交通大臣の冒頭挨拶**

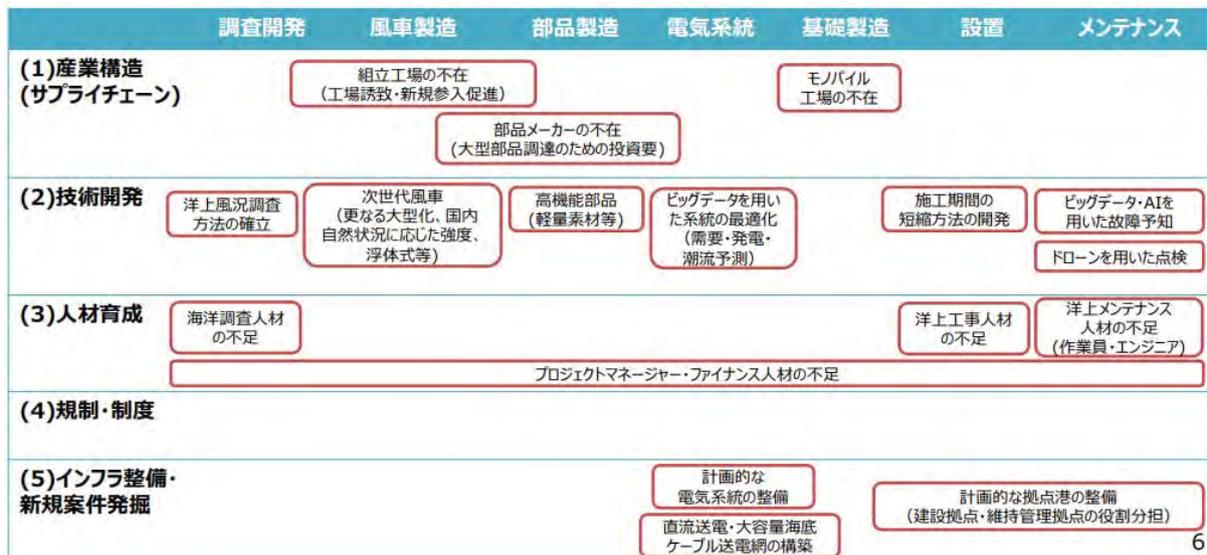
「再エネ海域利用法」や「改正港湾法」の着実な運用を図り、我が国の「エネルギー自給率の向上」に貢献したい。加えて、洋上風力発電の導入拡大は、地元の地場産業の発展や雇用を促進することとなり、地域経済の好循環をもたらすものと期待。

出典

● 第1回 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会作業部会資料3、[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/yojo\\_furyoku/sagyo\\_bukai/001.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/sagyo_bukai/001.html), 2020年9月17日

◆ 検討のための論点

- ①産業構造、②技術開発、③人材育成、④規制・制度、また、導入見通しの具体化に必要な⑤インフラ整備・新規案件発掘
- ビッグデータ・AIなどの活用の検討。



出典

● 第1回 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会作業部会資料3、[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/yojo\\_furyoku/sagyo\\_bukai/001.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/sagyo_bukai/001.html), 2020年9月17日

◆ 導入シナリオと低コスト化

- 欧州及び米国では、JIP方式の技術開発が進行中
- 日本は最後の洋上風力市場 → 経産省・国交省「洋上産業力強化協議会」(7月17日)
- 浮体式洋上風力は主力電源の一部を担う有力な再エネとして位置付

■ シナリオ設定(DOE, 2016)

- 米国のシナリオでは、2027年に着床式と浮体式の発電コスト(LCOE)が逆転する。

■ 洋上風力産業力強化協議会(2020)

- 洋上風力発電の計画的・継続的な導入拡大と、これに必要な**関連産業の競争力強化、国内産業集積、インフラ環境整備**等を、**官民が一体**となる形で進め、相互の「**好循環**」を実現していくため、「洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会」を設立。

■ グリッドパリティ達成ための方策(JWPA, 2018)

- ① 事業環境整備による事業リスクの低減
- ② 洋上風力大量導入に向けた設備投資水深
- ③ 競争促進による大幅なコスト低減
- ④ さらなるコスト低減を実現する研究開発投資活性化
  - 日本の風況に適した洋上風車の開発
  - 台風強い低風速対応ブレード
  - 洋上施工及び運転の効率化
  - 新施工方法の開発、運転システムの高度化・効率化
  - サプライチェーンの強化・効率化など

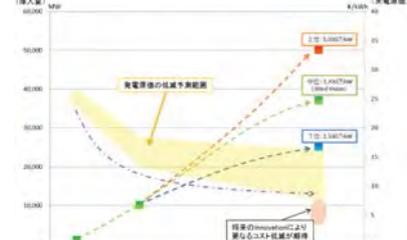


洋上風力発電のコスト低減シナリオ



浮体式洋上風力のコスト削減割合

米国の洋上風力の発電コスト(LCOE)の低減シナリオ



日本の洋上風力の発電コストの低減化(JWPA)

出典

- DOE, National Offshore Wind Strategy, 2016.
- JWPA, 洋上風力発電の導入促進に向けて～再生可能エネルギー大量導入の早期実現、2018

洋上風力発電の現状の技術的課題

◆ 日本市場における課題の克服

- 発電コスト低減は①洋上風力発電の大量導入、②技術開発の推進及び③産業化の進展が前提
- グリッドパリティ目標 (LCOE8~9円/kWh) を達成するための技術開発を実施
- 市場プル型の技術開発、官民一体となったサプライチェーン、インフラ整備の早期実現

Floating Wind JIP (EU) における技術開発検討内容

- **一体設計**  
風車、浮体、係留システム及びダイナミックケーブルの動的挙動及び性能を一体連成解析するツールの開発
- **浮体の最適化**  
コストを低減するために、鋼材、コンクリートを減らすことで、シリアル製造に適した浮体の設計方法の開発。
- **環境及び社会的影響**  
浮体式洋上風車は、施工時に海上におけるバール打設などの作業がないため、環境に対する影響が少ない。しかし、浮体式洋上風車のウインドファームの環境影響を定量的に評価し、他の海面利用者との競合を軽減する必要がある。
- **風車の最適化**  
浮体によるピッチ動揺及び加速度に対して、風車の発電量の最大化や変動の最小化及び構造の運動を抑制するコントロールシステムの高度化。
- **ロジスティクス**  
浮体式洋上ウインドファームの製作、組立、施工及び管理は着床式洋上ウインドファームと比べて新しい開発要素がある。大規模な浮体式洋上ウインドファームは、プロジェクトを計画通り進めるためのシリアル製造技術の開発が必要である。
- **ダイナミックケーブル及び接続**  
浮体式洋上ウインドファームは、ダイナミックアレイケーブル及び送電ケーブルが必要である。ケーブル損傷を防ぐために疲労を低減する必要がある。浮体をケーブルから脱着するケーブルコネクタは、浮体をサイトから港へ輸送する際に必要となる。
- **係留システム**  
大規模浮体式洋上ウインドファームは、100~200本の係留索及びアンカーで構成されるため、コスト及びリスクを低減する最適な係留索設置方法の開発が必要となる。

- **ウェイク及び乱流**  
大規模浮体式洋上ウインドファームにおける浮体の運動による発電量及びウェイク乱流を評価するために、より高度なウェイク影響評価モデルを開発し、風車レイアウトの最適化する必要がある。
- **浮体式洋上変電所**  
大水深におけるプロジェクトには浮体式洋上変電所が必要となる。電気機器やケーブルの疲労を抑制するために、浮体動揺による加速度等を抑制する浮体の設計が必要となる。
- **監視及び点検**  
かなりの数の部品点数で構成される大規模浮体式洋上ウインドファームは、その健全性を確保するために、プロジェクトライフサイクルにおいて監視点検が必要であり、低コストの監視及び点検技術が必要である。
- **維持管理及び修理**  
リモートによる監視及び管理が望ましいが、サイトにおける維持管理及び修理は生じるため、特にサイトから港に曳航して大規模修理する場合の技術開発が必要である。

■ **日本固有の条件**

- 自然環境 (台風、地震、落雷など)
- 社会インフラ (拠点港、系統など)
- サプライチェーン (風車メーカーなど)

↓

■ **開発の優先順位付け**

- 市場プル型の技術開発テーマの抽出

↓

■ **官民一体となった開発**

- 市場プル型の技術開発
- 認証取得の迅速化
- 大量生産、習熟効果

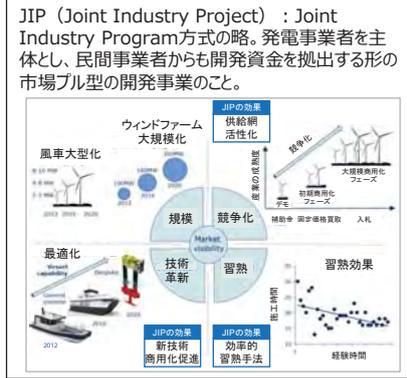
↓

洋上産業力強化協議会がスタート  
(第1回協議会：2020年7月17日)

出典：Carbon Trust

◆ Offshore Wind Accelerator (OWA)

- 2008年に設立され、洋上風力のコスト低減が目標
- 欧州デベロッパー9社+カーボントラスのJIP
- 今まで総額1億 £ 以上のプロジェクトを実施
- 発電事業者中心の市場プル型の開発
- 政府にとって開発を加速する非常に価値があるプログラム
- 参加企業（下表）
- LCOEを15%低減する技術を開発



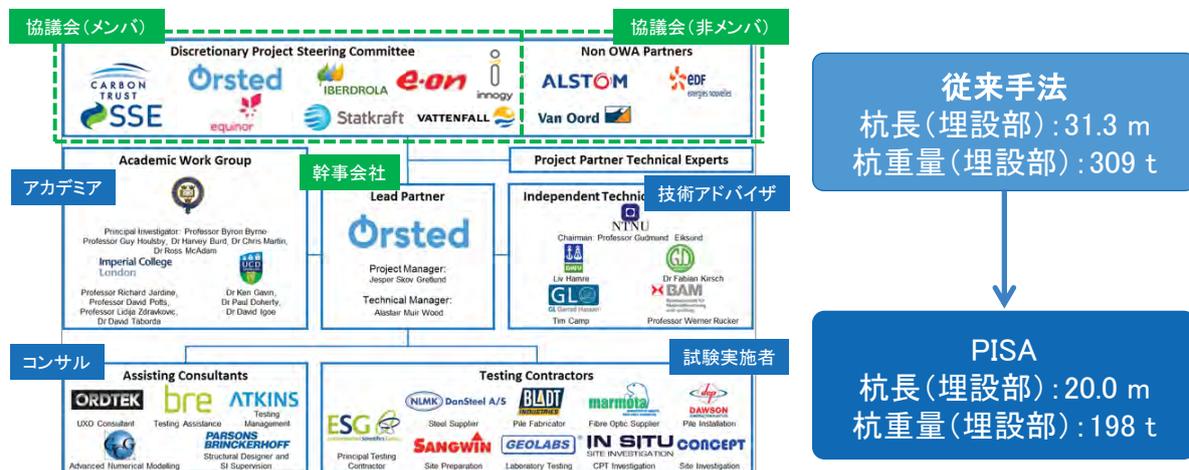
OWA参加企業

企業名	説明
EnBW	ドイツとヨーロッパで最大のエネルギー供給企業の1つ
E.ON (現RWE)	ドイツ最大のユーティリティ
Innogy SE (現RWE)	旧ドイツのRWEグループのヨーロッパ全体の再生可能エネルギー事業
Ørsted	20年以上の経験を持つ、デンマークの大手洋上風力発電開発者
Scottish Power Renewables / Iberdrola	ヨーロッパの陸上および洋上風力発電の大手開発企業
Shell	国際エネルギー企業
SSE Renewables	スコットランドおよびサザンエナジーの再生可能エネルギー開発部門
Equinor	ノルウェーの国際エネルギー企業
Vattenfall Wind Power	スウェーデン国有企業、ヨーロッパ最大の発電企業の1つ



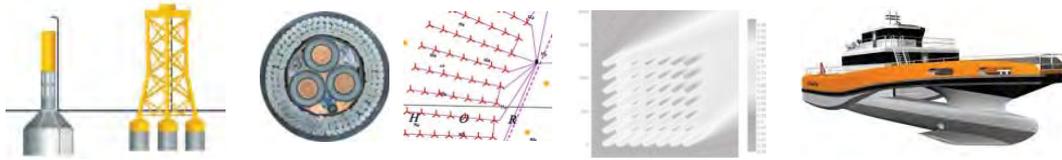
◆ モノパイルの設計手法（荷重評価手法）の開発

- PISA (Pile Soil Analysis) プロジェクト。
- 新しい設計手法により、洋上風車用大口径パイルの荷重低減化及びモノパイル重量低減を実現。
- 4年間で、2カ所の試験サイトにおいて、28本のモノパイルの試験。
- 2019年に成果が論文で公開。



◆ OWA開発技術によりコストが約15%低減

- 基礎構造、アレイケーブル、ウェイクロス評価方法、運転維持管理専用船などを開発



OWAによる開発技術（基礎構造、アレイケーブル、ウェイクロス評価、運転維持管理専用船）



OWAの開発成果による発電コスト低減効果（シナリオに対する開発技術の効果）

◆ 米国版OWA

- 洋上風力研究開発コンソーシアム（2019年スタート）
  - 洋上風力産業関連企業と研究機関で構成された非営利組織。
- 資金
  - 米国DOEとNysesda\*のマッチングファンドで4010万ドル（43億円）を調達  
 \* New York State Energy Research & Development Authority
- 洋上風力のコストとリスクの低減
  - 研究開発の優先順位付け、サポート及び促進
  - 洋上風力開発プロジェクト全体のコストとリスクを削減するためのR&D
  - 米国を拠点とする製造業と洋上風力サプライチェーンのサポート



Virginia DMME  
 Maryland  
 Mass CEC  
 National Grid  
 Brookhaven National Lab  
 Anbaric



◆ デジタルツイン

- デジタルツインとは、物理的なアセットをデジタルで複製したもので、リアルタイムのセンサーデータを使用して、アセットの現在のパフォーマンスを監視・評価し、将来の挙動を予測する。
- 洋上風力の分野でも数年前からDigitalizationがキーワードになっている。

■ ROMEOプロジェクト (EU)

- ▶ ROMEOプロジェクトは、欧州連合 (EU) の「Horizon 2020」プログラムの下、「低炭素エネルギー-LCE-13-2016」というテーマで、洋上風力発電施設の運転・維持管理コストを削減するための先進的な技術ソリューションの開発を目的とした取り組み。
- ▶ 主な目的は、洋上風力発電所の運転中に得られたデータを分析・管理するためのプラットフォームを開発し、収集したデータを風力発電所の運転・維持管理の改善を可能にする戦略の設計に活用すること。



■ デジタルwindファーム (GE)

- ▶ デジタルwindファームは、ハードウェアおよびサービスソリューションと連携してデータ、分析、ソフトウェアアプリケーションを活用し、効率、サイバーセキュリティ、信頼性、収益性をライフサイクルにわたって向上させるエンド・エンドの風力発電システム。



出典  
 ● Ramboll, ROMEO H2020 PROJECT, DIGITAL TWINS FOR STRUCTURAL PARTS IN OFFSHORE WIND TURBINES: REQUIREMENTS, CHALLENGES AND OPPORTUNITIES, Wind Europe Offshore Conference, 2019.  
 ● <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/onshore-wind/digital-wind-farm>

洋上風力のデジタルツインの例

◆ ジャケット基礎の疲労照査 (Ramboll/ROMEO)

- デジタルツインを使用することで、すべてのアセット価値 (コスト、寿命、リスク低減など) を強化することができる。

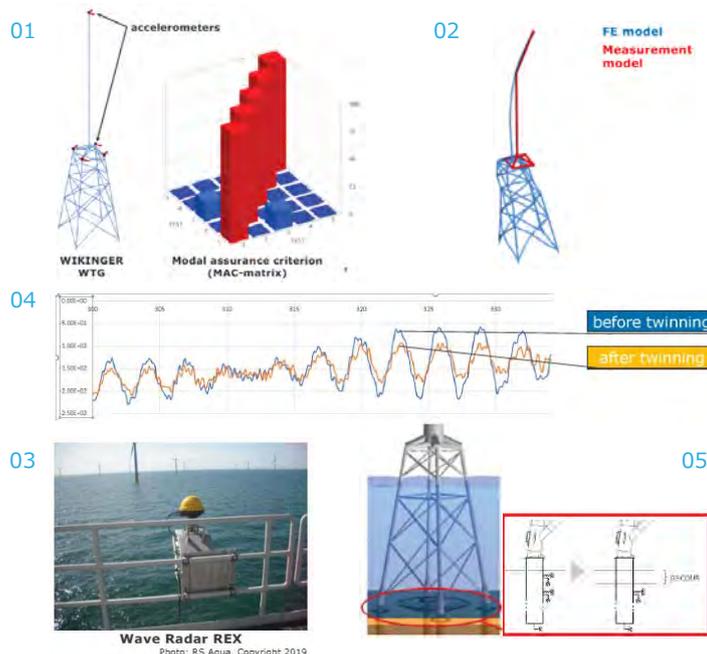
01 センサー取付位置の最適化  
 ● 費用対効果が高く、目的に応じたセンサーレイアウト

02 FEモデルの更新  
 ● モデルパラメータの更新  
 ● 設置された構造物の挙動

03 波浪・風荷重校正  
 ● 波荷重係数の更新

04 不確かさの低減  
 ● 疲労寿命の延長  
 ● 検査コストの削減

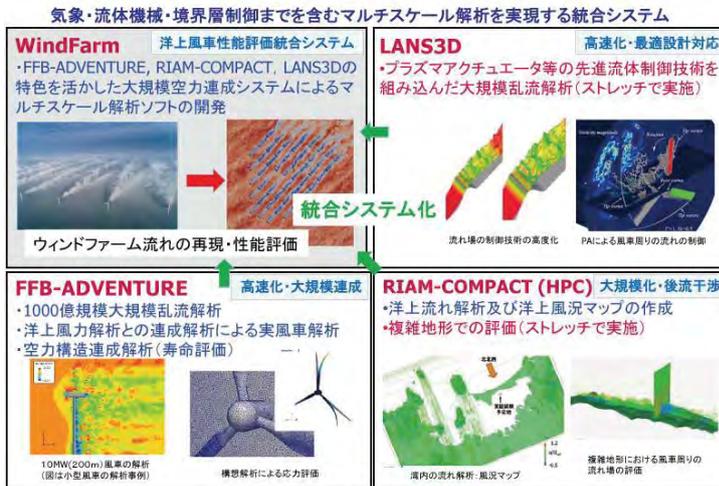
05 損傷検出  
 ● リアルタイムデータの評価  
 ● 傾向と予測に基づく警告



出典  
 ● Ramboll, ROMEO H2020 PROJECT, DIGITAL TWINS FOR STRUCTURAL PARTS IN OFFSHORE WIND TURBINES: REQUIREMENTS, CHALLENGES AND OPPORTUNITIES, Wind Europe Offshore Conference, 2019.

◆ 洋上風力プロジェクトを支える不可欠な技術に

- 主力電源を目指す洋上風力の設計、運転維持に欠かせない技術へ
- ハード・アプリケーションの業界への実装を
- 人材育成を

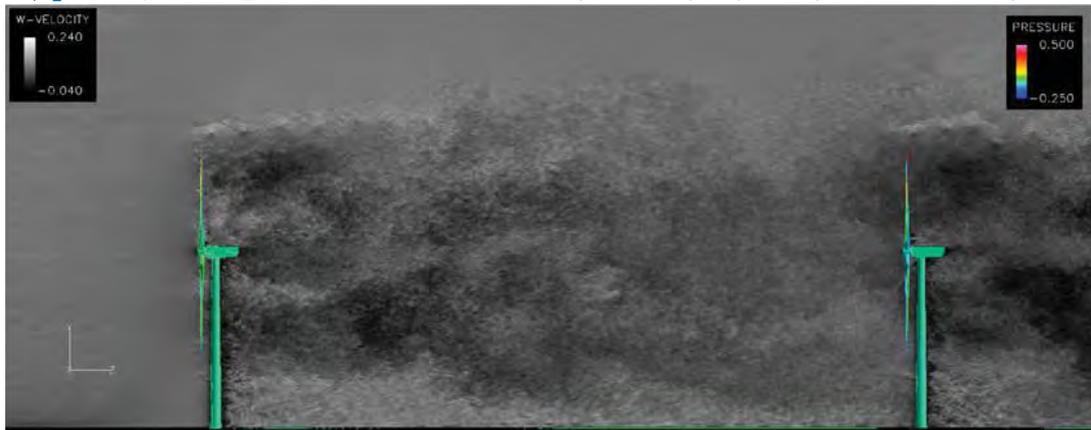


風力業界への実装へ

- マルチフィジクス・マルチスケール統合シミュレーション(スーパーシミュレーション)とAI(機械学習)を連携活用
- 洋上ウインドファームのデジタルツインを構築それらの開発・設計・運用の最適化に活用

出典  
● サブ課題6C、高効率風力発電システム構築のための大規模数値解析、[https://postk6.t.u-tokyo.ac.jp/project/post\\_k/sub\\_c.html](https://postk6.t.u-tokyo.ac.jp/project/post_k/sub_c.html)

## スーパーシミュレーションとAIを連携活用した 実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用 洋上ウインドファームのマルチフィジクスシミュレーション



東京大学・東京大学生産技術研究所, 豊橋技術科学大学  
九州大学, (株)ウインドエナジーコンサルティング  
協力:(株)みずほ総研, (株)インサイト

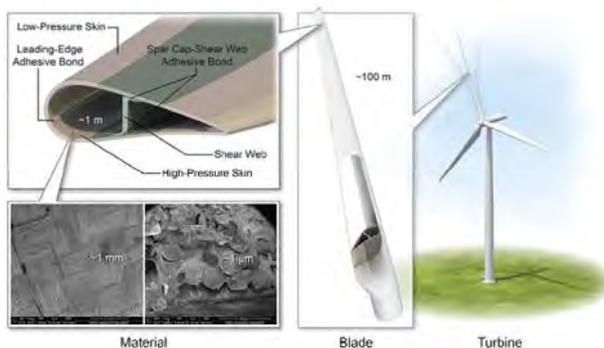
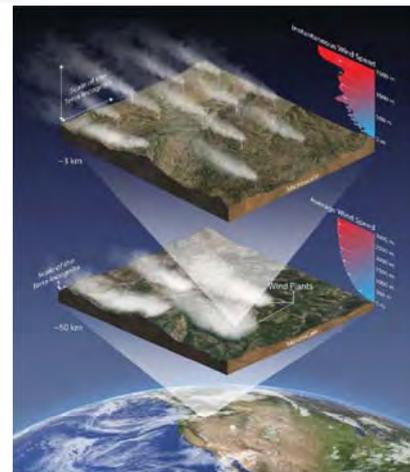
全体概要説明: 豊橋技術科学大学  
飯田 明由

## Grand challenges in the science of wind energy

Science 366, 443 (2019)

Grand challenges in the science of wind energy

- (i) Improved understanding of the physics of atmospheric flow in the critical zone of wind power plant operation
- (ii) materials and system dynamics of individual wind turbines
- (iii) optimization and control of fleets of wind plants comprising hundreds of individual generators working synergistically within the larger electric grid system.



# ポスト「京」開発目標

重点課題	アウトカム		
	目標	「京」時代 (現在)	ポスト「京」時代 (将来)
⑥ 革新的クリーンエネルギーシステムの実用化	<p>大規模洋上ウインドファームの発電性能予測、構造信頼性評価の性能向上による風力エネルギー有効利用技術の革新</p> <p>1) 大気乱流や風車後流を考慮した洋上ウインドファームの発電性能・構造信頼性の高精度評価が可能となる<b>マルチスケール・マルチフィジクス統合シミュレーションシステム</b>を研究開発</p> <p>2) 本システムを活用し、大型風車及び洋上ウインドファームの設計・開発・運用を支援し、日本の風力発電の一層の普及と同産業の国際競争力強化に貢献</p>	<p>・風力発電の効率化に資する大型風車<b>単体</b>の大規模な非定常流体解析や、地形の影響を考慮した非定常解析が可能</p> <p>・流れ場解析データを入力条件としたブレードの変形、構造解析</p> <p>流体解析 風車周り：数千万要素 流体場：数10億要素</p> <p>構造解析 数十万自由度</p>	<p>・大規模洋上ウインドファームにおける<b>風車間の流れの相互干渉 (後流影響)</b>の高精度解析 (現状 誤差30%→10%へ)</p> <p>・<b>多方向同時解析</b>による風況を考慮したウインドファーム流れ場解析</p> <p>・ファーム全体の発電量及び<b>ブレード寿命の評価精度</b>の向上、低コスト化に貢献。</p> <p>流体解析 流体場：数100億要素 ファーム 16方位同時解析</p> <p>流体構造連成解析：双方向連成 数千万自由度</p>
	<p><b>自然エネルギーの安定供給</b> 主要課題</p> <p>発電量予測 (安定) 高効率化 (省エネ) 疲労・寿命予測 (安全)</p> <p>大規模洋上ウインドファームの一例 (風車直径 100 m規模, 風車数10-40 ファーム サイズ: 数100mから数km程度)</p>	<p>構造解析 (ブレードのみ)</p> <p>風車単体解析 (大スケールの渦を解析)</p>	<p>洋上ウインドファームにおける風車後流の様子 (多方向同時解析, 微細渦構造解析)</p> <p>タンデム風車のLES解析 (大規模・長時間解析)</p> <p>振動・疲労解析</p>

## スーパーシミュレーションによる洋上ウインドファームの発電性能、構造信頼性評価

**RC HPC版**

- ・ウインドファーム全体の16(24)方位風向同時並列LES解析
- ・工学Wakeモデル
- ・数億～数十億要素

工学Wakeモデルを実装したRC HPC版の解析結果とFFBによるWake(後流)直接解析結果の比較により、工学Wakeモデルの高精度化

RC HPC版のファーム全体の発電性能評価の高精度化

LES解析による詳細計算結果

FFB: タンデム配置される大型風車まわりの流れ場の詳細LES解析

- ・数百億要素
- ・Wall Model

片方向連成

風車ブレードに作用する流体力(空間分布・時間変化)

東京都庁

2012年竣工の巨大規模 (150m)

2013-2014年の巨大規模 (160m)

2020年の予定規模 (200m)

5MW, 7MW, 20MW

大気境界層の鉛直方向流束分布や乱れ、またWake(後流)のブレード累積疲労損傷への影響評価

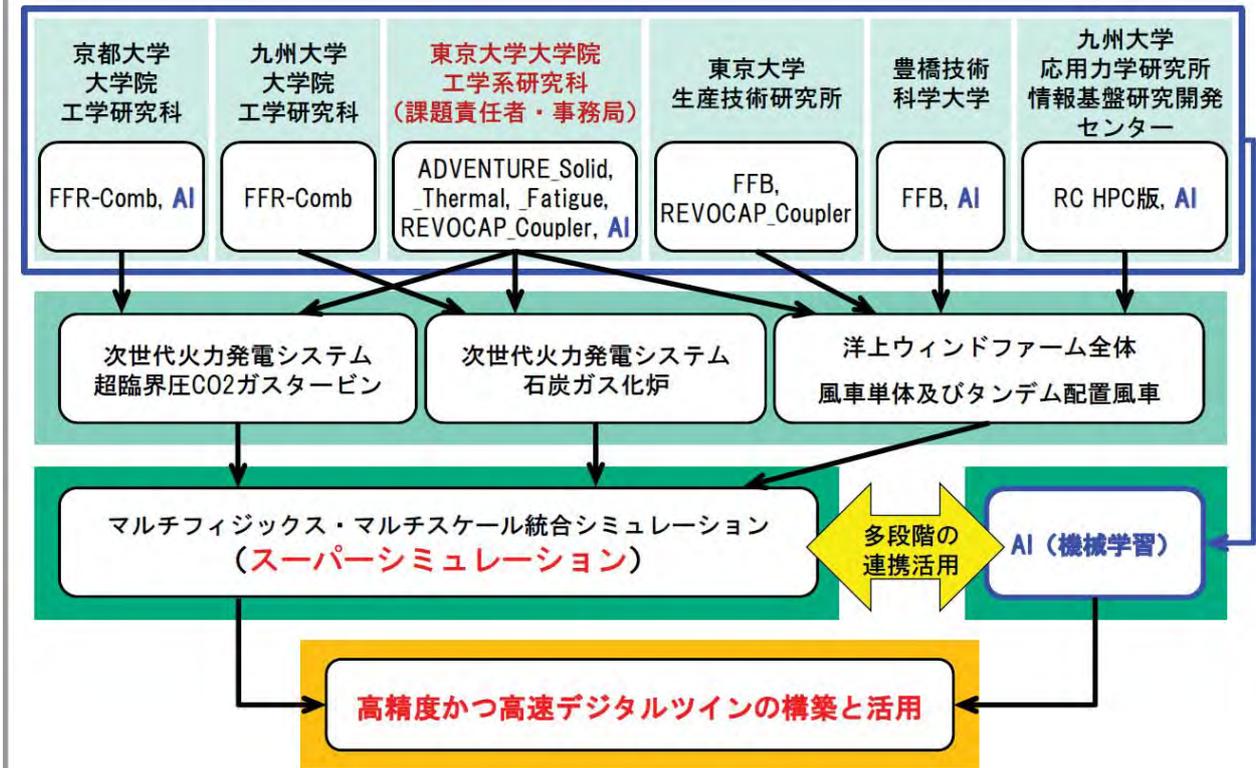
双方向連成

ブレードの変形 (→LES解析)

REVOCAP\_Coupler

ADVENTURE\_Solid: 数10万積層ソリッド要素による大型ブレードの累積疲労損傷計算

## 研究体制



5

## 洋上風車の大規模乱流解析

洋上風車(直径100m級)風車の数値流体解析における課題

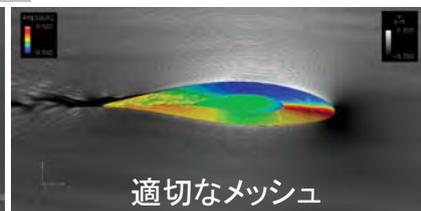
- ・高レイノルズ数  $10^7$  (風車直径/境界層: 2000倍)
- ・後流干渉(空間スケール大)
- ・高アスペクト比(ブレード形状)

→ 風車周りの流れを完全に解像することは困難

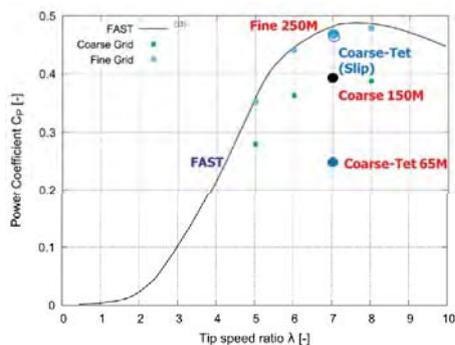
渦スケール及びその成長率を考慮してメッシュ解像度を検討

翼面: 1mm  
後流: 30mm  
全体: 1000mm

→ 風車単体: 2.5億要素



メッシュ解像度が低いと前縁での流れの転向を再現できない



性能評価結果

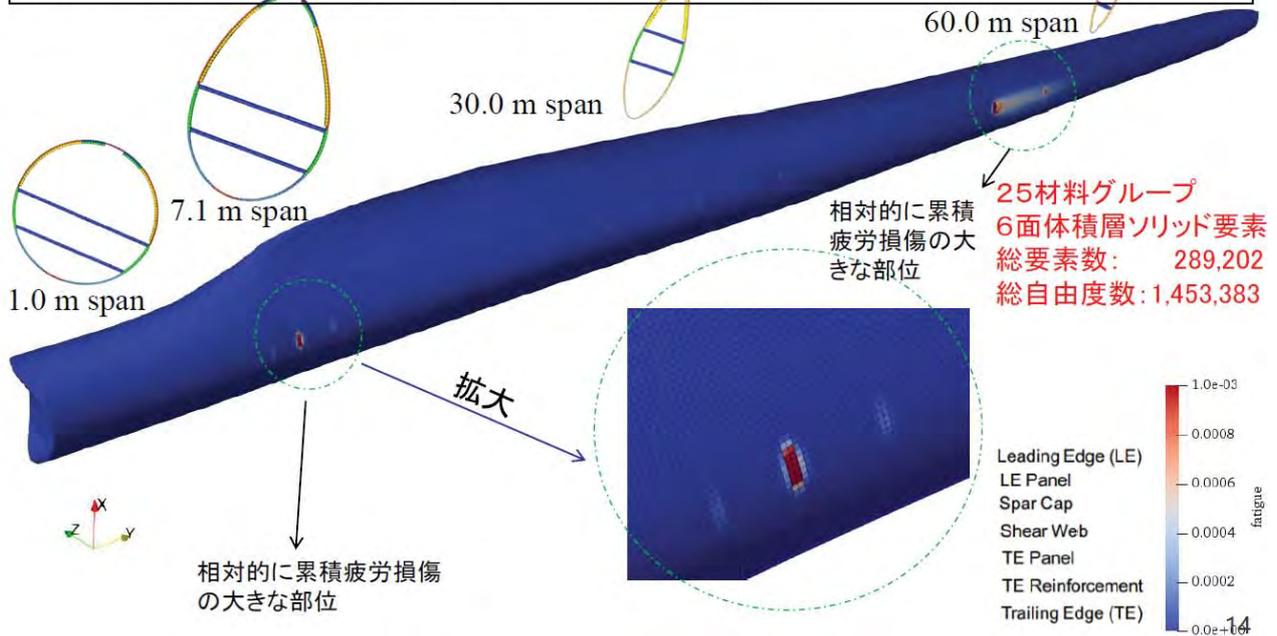


1回転 180 時間 (6万step) × 33回転 「京」 800ノード  
風車間の流れの平均移動時間(1320時間(55日))

6

# NREL5MWブレードの累積疲労損傷評価例 (TSR=7, 20年間)

ブレード表面に作用する流体力分布、時刻歴 (FFB) ← 大気境界層・乱れ、後流(wake)  
 ↓  
 ブレード内3次元応力分布、時刻歴 (ADVENTURE\_Solid)  
 ↓  
 レインフローカウント + Goodman線図 + S-Nカーブ + 年間風況履歴  
 ↓  
 ブレード内3次元累積疲労損傷分布 (ADVENTURE\_Fatigue)

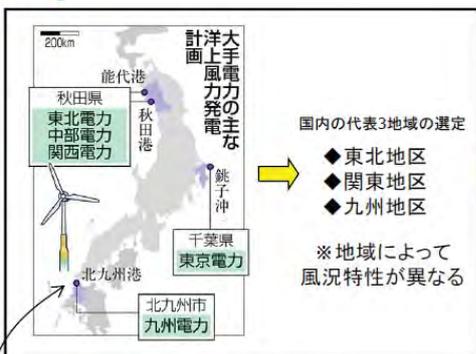


# RIAM-COMPACT HPCによるビッグデータ群を用いた大規模洋上windファームの発電量予測システムの開発

2

テーマ①

## Step1

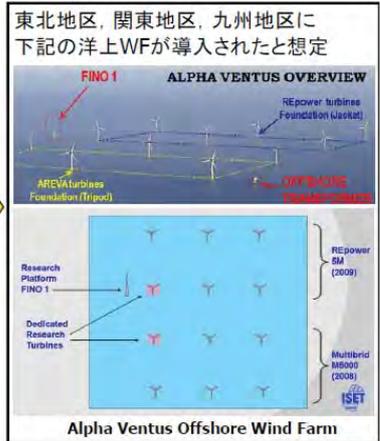


## Step2

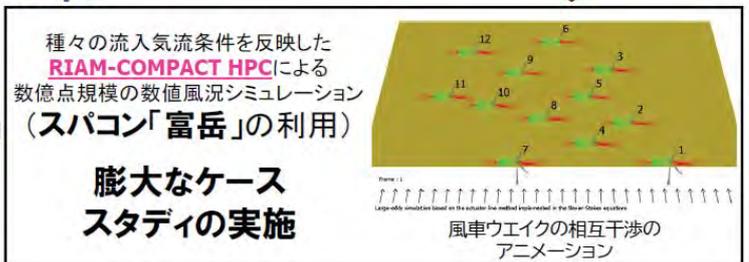
**Big Data**  
 流入条件としての利用を目的としたデータ整理

- ◆速度シアア(海風、陸風)
- ◆大気安定度(不安定、安定、中立)
- ◆流入気流の乱れ
- ◆NEDO: NeoWins(洋上風況マップ)
- ◆各国の(長期)再解析データ
- ◆気象GPVデータ(MSM, LFM)

## Step3



## Step4



## Step7

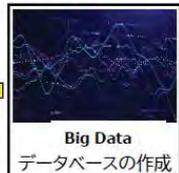
観測データによる予測精度の検証

## Step6 (Goal)

- ◆New Engineering Wake Model (Equation Discovery)
- ◆Lookup Table (発電量評価用)

※データサイエンス的アプローチ

## Step5



## プロジェクト終了後の目標

	令和4年まで	令和5年以降
洋上ウインド ファーム	<p>実スケール大型風車の流体解析、及び流体構造振動解析を用いて、洋上風車の世界的課題である次の2つの課題をクリアする</p> <p>(1) <b>100億要素規模の大規模流体解析と、1億自由度規模の複合材料で構成された風車の構造解析を実現</b></p> <p>(2) 上記スーパーシミュレーションとAIを連携活用し、週間発電量の変化予測、年間発電量の推定、20年間使用時の疲労寿命予測を実現</p> <p>次世代CAEを活用する風力産業コンソーシアム、日本風力発電協会、日本海事協会、IEA Wind及びIEA Wind国内委員会との連携を通し、国内外への本開発技術の普及体制を整える IEA Wind Task31に参加</p> <p>日本海事協会の技術認証に向けた準備</p>	<p>IAE Wind国内委員会と連携し、IEA Wind Task31に参加することにより、開発したシステムの世界的評価を確立し、システムの維持管理を東大生研を中心に取組む</p> <p>日本海事協会を通して開発システムの技術認証を目指す</p>

# RIAM-COMPACT 富岳チューニングと 風車ウエイク解析

内田孝紀 九州大学応用力学研究所

小野謙二 九州大学情報基盤研究開発センター



KYUSHU UNIVERSITY

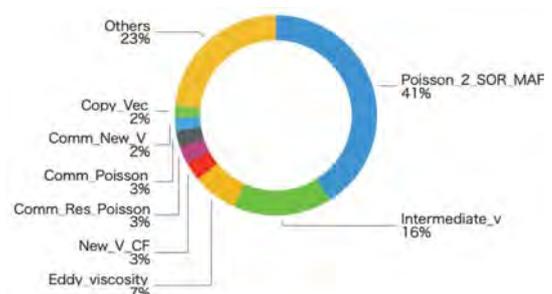


KYUSHU UNIVERSITY

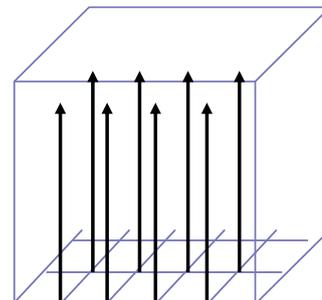
## チャレンジ

1

- 「富岳」ほかの最先端計算機で高性能を達成
- 近年の計算機は低B/Fマシン、つまり、コア内の演算性能は高いが、メモリコア間のデータ転送能力は相対的に低い
- 非圧縮流の計算コストの大部分は圧力ポアソン反復
- 疎行列の連立一次方程式 → B/F高いアルゴリズム
- 目標
  - 実行効率30%(ナイーブ10%、少し頑張ると20%)
  - 低B/Fアルゴリズムの開発



- 省メモリで実装できる反復法をベースに、部分的に直接法を取り入れ、収束性を改善するハイブリッド手法
  - 構造格子系でラプラシアンを二次精度中心差分で近似すると、7点ステンシル
  - 鉛直(Z)方向の三重対角行列を直接法で反転
  - 残りのX,Y方向を反復スイープ



- 三重対角行列の高速解法
  - Z軸方向をLU分解で反転(LUは計算量少ないが逐次アルゴリズム)
  - LU分解の並列化
    - PCR (Parallel Cyclic Reduction)によるスレッド並列化
    - 512WideSIMD実装+メニーコア最適化

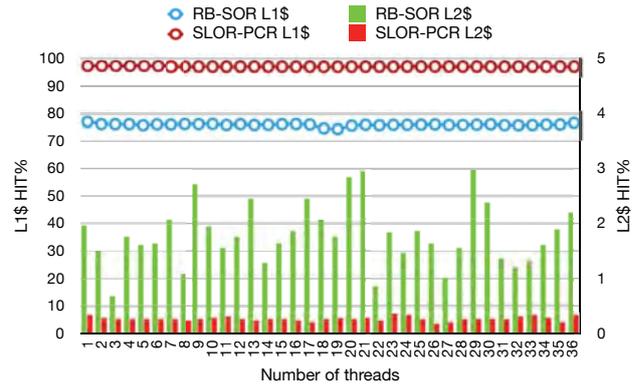
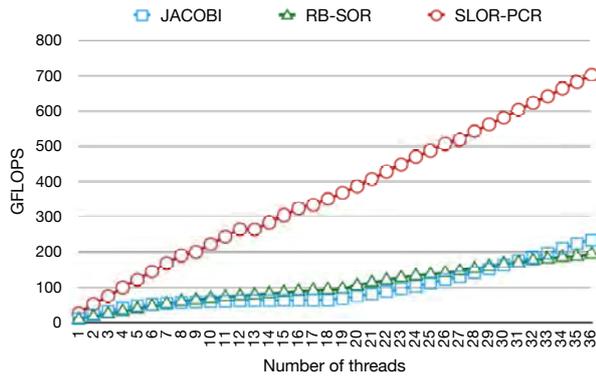
- 異なる4つの計算機で性能評価
- Jacobi, SOR, LSOR-PCRを比較

	Model	Freq. (GHz)	# of core	GFLOPS (node)
Intel	Skylake-SP Xeon Gold 6140	2.3	18 x 2	5,298
SGI UV300	Broadwell-EP	2.2	22 x 4 x 4	24,780
NEC SX-Aurora TSUBASA	A100-1	1.4		4,300
FX1000	A64FX	2.2	48	3,400



## ITO Skylake-SP 18-core x 2socket

- リニアなスレッドスケラビリティ
- JACOBI, RB-SORに比べて、キャッシュの再利用性に優れる
- L1\$のヒット率は96%、L2\$へのアクセスは少ない

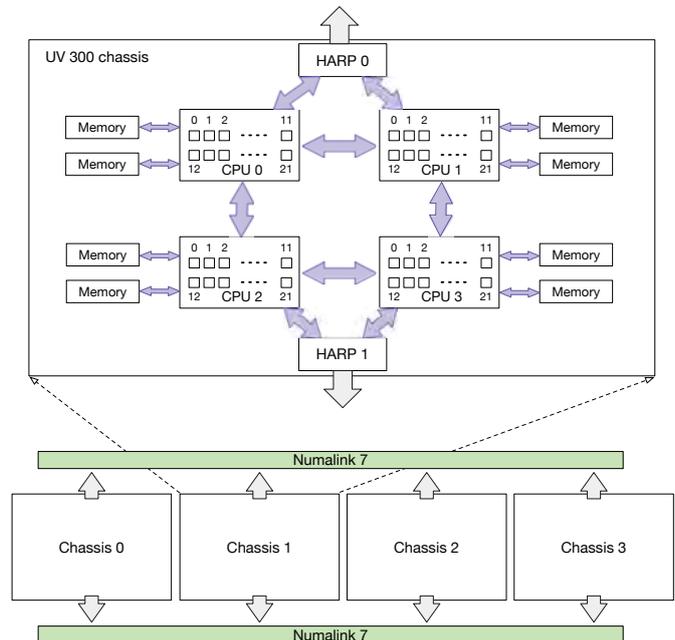
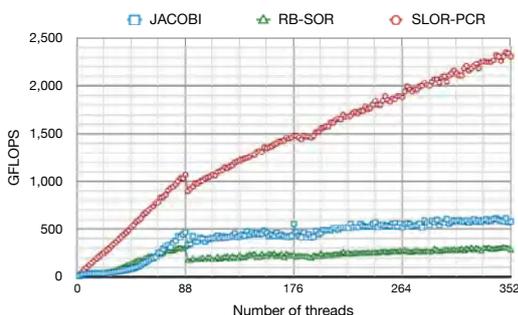


## SGI UV300

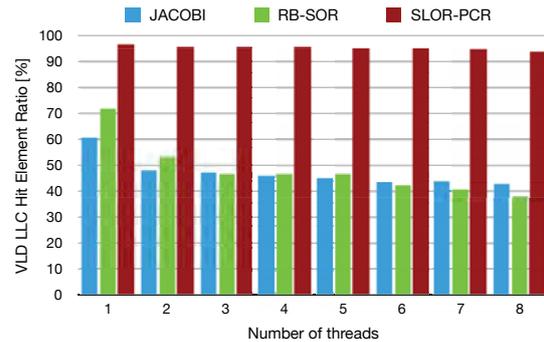
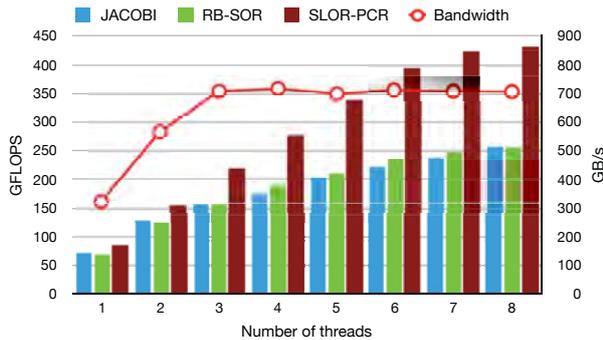
Broadwell-EP 22-core x 4 socket x 4 chassis

メニーコア+リングバス

- 352コアまでスケール
- 1chassis内88コアまでは90%のスケラビリティ

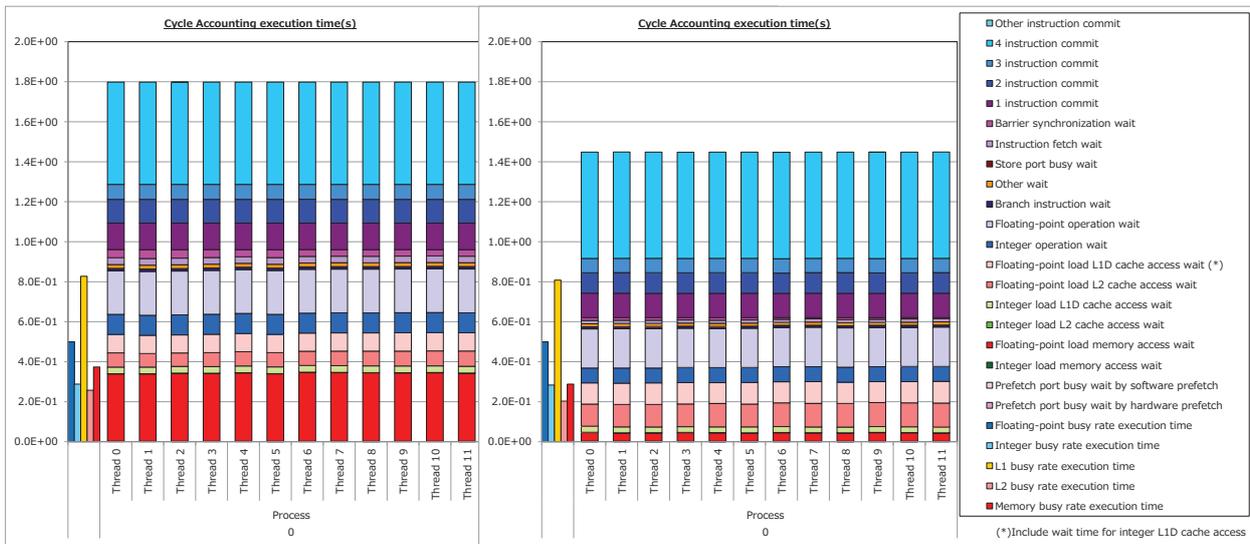


- ベクトル機でも同じアルゴリズムは効果あり
- バンド幅は使い切っている
- 共有キャッシュからのベクトルロード命令は93%以上



## ■ サイクルアカウンティング結果

■ FX1000 12スレッド測定時、左がチューニング前で右がチューニング後

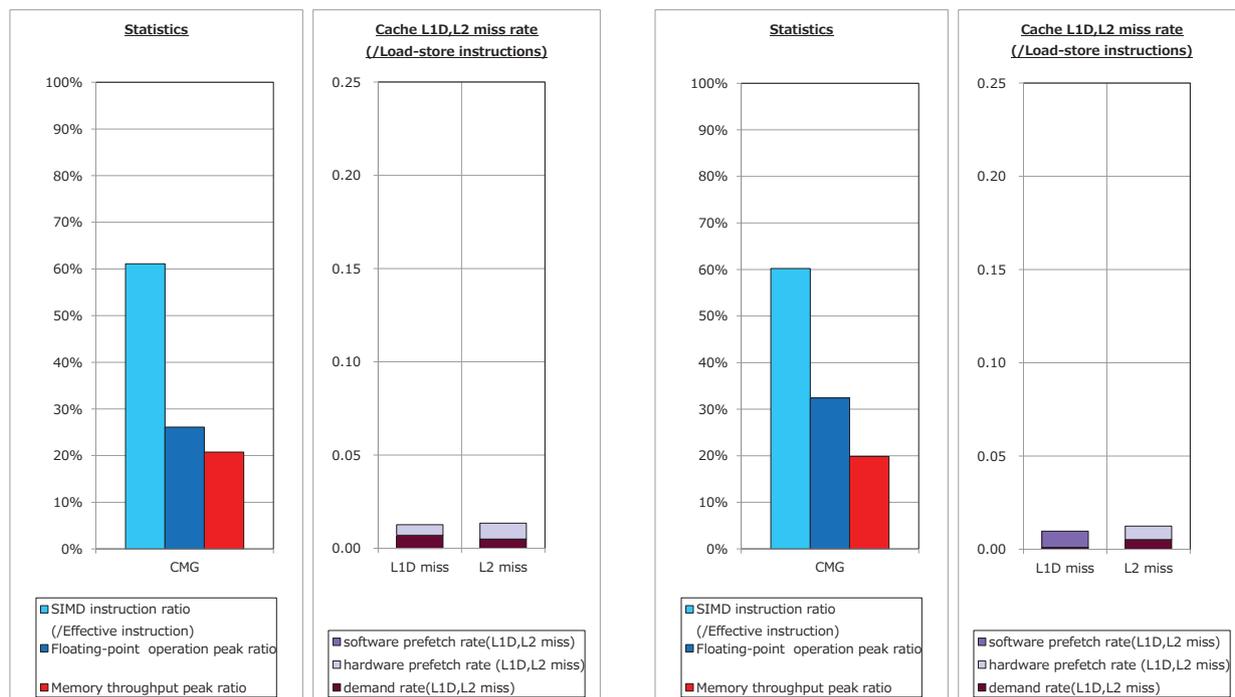


## ■ コードチューニングの結果、メモリアクセス待ち時間が減少

■ プリフェッチ命令の適用により、d(k)を求めるループが1.7倍高速化

## ■ SIMD命令率、演算効率、メモリバンド幅利用率、キャッシュミス率

■ FX1000 12スレッド測定時、左がチューニング前で右がチューニング後



## ■ 計算結果: いずれのケースも284反復で $10^{-5}$ 未満に収束

- FX1000 48スレッド測定時: 「Iter = 284 Res = 9.993678e-06」
- Skylake 48スレッド測定時: 「Iter = 284 Res = 9.993624e-06」

## ■ 計算性能

機種	ソースコード	プロセス構成 [スレッド×プロセス]	SIMD 命令率	演算性能※1 [Gflops]	メモリスループット [GB/秒]	実行時間※2 [秒]
FX1000	リジカル	12×1	61.10%	220.03 (165.63)	53.15	1.784 (1.00)
		48×1	—	(616.85)	—	0.479 (3.72)
	チューニングあり	12×1	60.23%	272.89 (205.31)	50.87	1.440 (1.24)
		48×1	—	(792.77)	—	0.373 (4.78)

- 演算性能の括弧内はPMlibの値(手動カウント)
- ハードウェアカウンタ(HWC)は3割+多い値を示す
- FX1000の48コア実行時のHWC値は推定1,000Gflops、ピーク比29%の実行性能
- PCRソルバーはL1Dキャッシュ負荷が大きく、低B/F、動作周波数の高いCPU向き
- PREFETCHが効く実装

- これまでの結果
  - 性能目標をほぼ達成
  - キャッシュを有効利用でき、メニーコアの並列性を引き出せるアルゴリズム
  - 異なるアーキテクチャでも効果を実証
  - さらに改善アイテムがいくつかあり
- 今後
  - 改善アイテムのテスト
  - 実コード評価
  - 詳細な結果からサロゲートモデルの構築
    - データから方程式を抽出する方法を利用し、モデル構築

- 三項方程式の依存性を分離・縮約
- 縮約と後退代入の2パス
- ステージが進むと並列度が減少する

$$A = \begin{pmatrix} b_1 & c_1 & & & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & & \\ a_3 & & b_3 & c_3 & \\ & & & \ddots & \ddots \\ 0 & & & & a_n & & c_{n-1} & b_n \end{pmatrix}$$

$$a_i x_{i-1} + b_i x_i + c_i x_{i+1} = d_i.$$

#### Forward Reduction

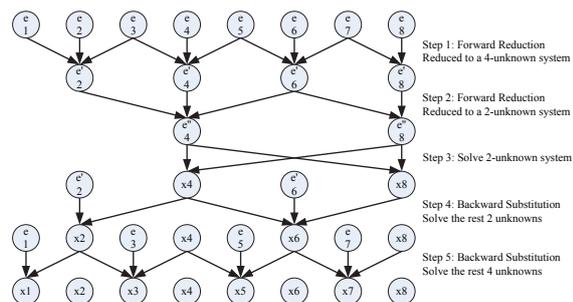
$$a'_i = -a_{i-1}k_1, b'_i = b_i - c_{i-1}k_1 - a_{i+1}k_2$$

$$c'_i = -c_{i+1}k_2, d'_i = d_i - d_{i-1}k_1 - d_{i+1}k_2$$

$$k_1 = \frac{a_i}{b_{i-1}}, k_2 = \frac{c_i}{b_{i+1}}$$

#### Backward Substitution

$$x_i = \frac{d'_i - a'_i x_{i-1} - c'_i x_{i+1}}{b'_i}.$$



**Figure 1.** Communication pattern for CR in the 8-unknown case, showing the dataflow between each equation, labeled  $e1$  to  $e8$ . Letters  $e'$  and  $e''$  stand for updated equation.

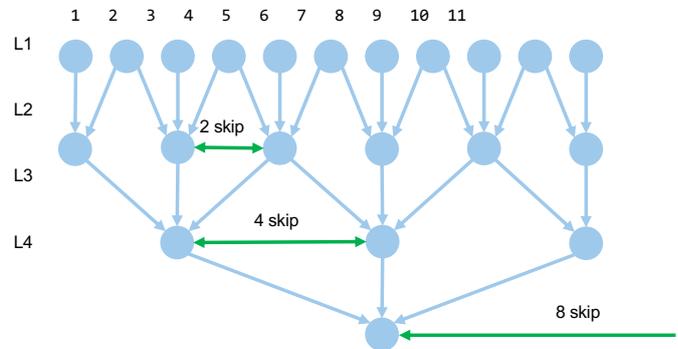
- 1段回の縮約で、 $N$ 元 $\times 1$ 組の方程式が $N/2$ 元 $\times 2$ 組の方程式になる。これを $pn$ 回繰り返すと解が求まる。
- CRを前進消去だけで処理するイメージ(Gauss消去法に対するGauss-Jordan法のイメージ)
- 演算量は増加するが、ステージが進んでも並列度は減少しない ← **メニーコア向け**
- 段数が深くなると、精度低下の恐れもあるので、最終段の一段手前で縮約を止め、最終段の $2 \times 2$ の行列は直接反転

```
void CZ::pcr(const int nx, const int pn,
            REAL_TYPE* d, REAL_TYPE* a,
            REAL_TYPE* c, REAL_TYPE* d1,
            REAL_TYPE* a1, REAL_TYPE* c1, double& flop)
{
    const int ss = 0x1 << (pn-1);

    int s=0;
    for (int p=1; p<=pn; p++)
    {
        s = 0x1 << (p-1); // s=2^{p-1}

        pcr_kernel(nx, s, d, a, c, d1, a1, c1, flop);

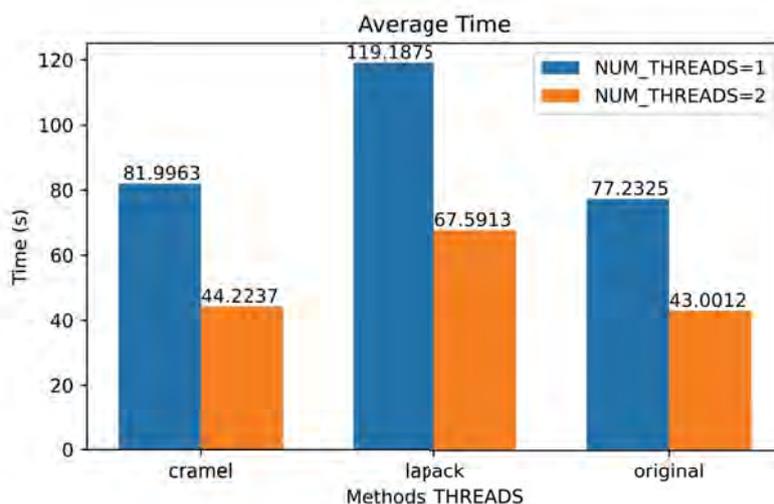
        REAL_TYPE* tmp;
        tmp = a; a = a1; a1 = tmp;
        tmp = c; c = c1; c1 = tmp;
        tmp = d; d = d1; d1 = tmp;
    }
}
```



- 完全に並列処理可能、1パスアルゴリズム
- 1段階縮約する度に、解くべき方程式の数が半減し、組が倍になる
- レベルが進むとメモリアクセスの距離が倍々に増える

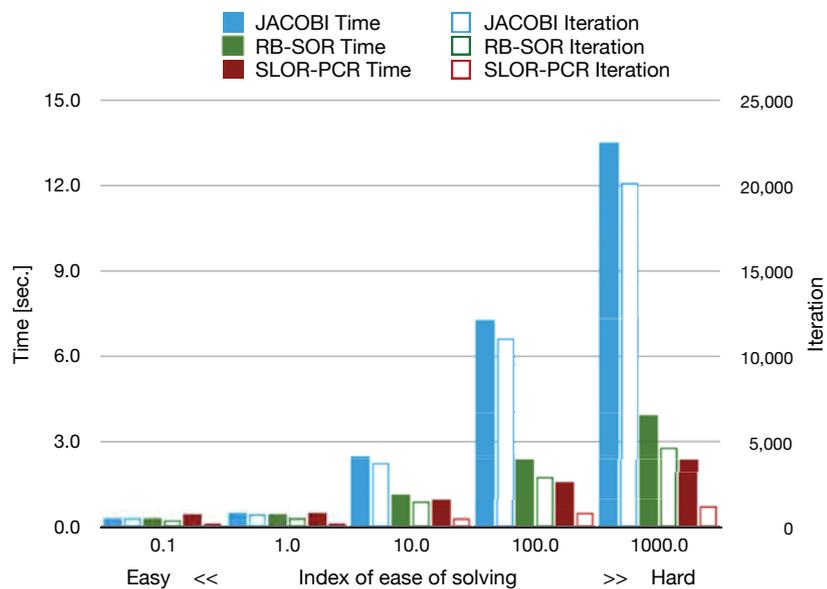
## PCRの縮約段数を2段手前で止める

- 縮約を繰り返す事による精度低下を抑制
- $4 \times 4$ の直接反転 ⇒ 演算量増加=低B/F化
- メモリアクセスの飛幅が小さくなる



original :  $2 \times 2$   
 cramel :  $4 \times 4$   
 lapack : library call

- 計算時間も短い
- 解きがたい(Stiffな)問題で効果あり



# FronFlow/blue (FFB) Optimization for Fugaku and Its Results



Institute of Industrial Science,  
The University of Tokyo



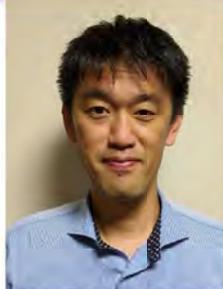
## Our Team



Team leader



Chisachi Kato  
Institute of Industrial Science  
The University of Tokyo



Yoshinobu Yamade  
Mizuho Information & Research  
Institute, Inc.



Katsuhiro Nagano  
Mizuho Information & Research  
Institute, Inc.

Software System  
Coding/Testing

Algorithms  
Performance  
Optimization



Kiyoshi Kumahata  
RIKEN Center for  
Computational Science



Kazuo Minami  
RIKEN Center for  
Computational Science



Tatsuo Nishikawa  
Shipbuilding Research Centre of  
Japan

Ship  
Hydrodynamics  
Towing-tank Tests

## Outline

- FrontFlow/blue (FFB) Flow Solver
- Code Optimizations and Performance Improvement
- Applications

## I. Expectations in Fugaku era

# Expectations in CAE in Fugaku era

- **Replacing Tests**
- **Understanding Unclarified Phenomena**
- **Design Optimization Based on First-principle Simulations**
- **Production of Reference Data for Developing Reduced Method**

# Actual Towing-tank Test

400 m long, 18 m wide, 8 m deep  
water tank with a maximum towing speed of 15 m/s



**We are going to replace these tests  
by fidelity numerical simulations.**



# Classification of Navier Stokes Simulations

## ■ Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

- Model effects of turbulent eddies in all scales. May be tuned for a particular flow, but is least likely to become a complete alternative for tests.

## ■ Wall-resolved LES (WR-LES)

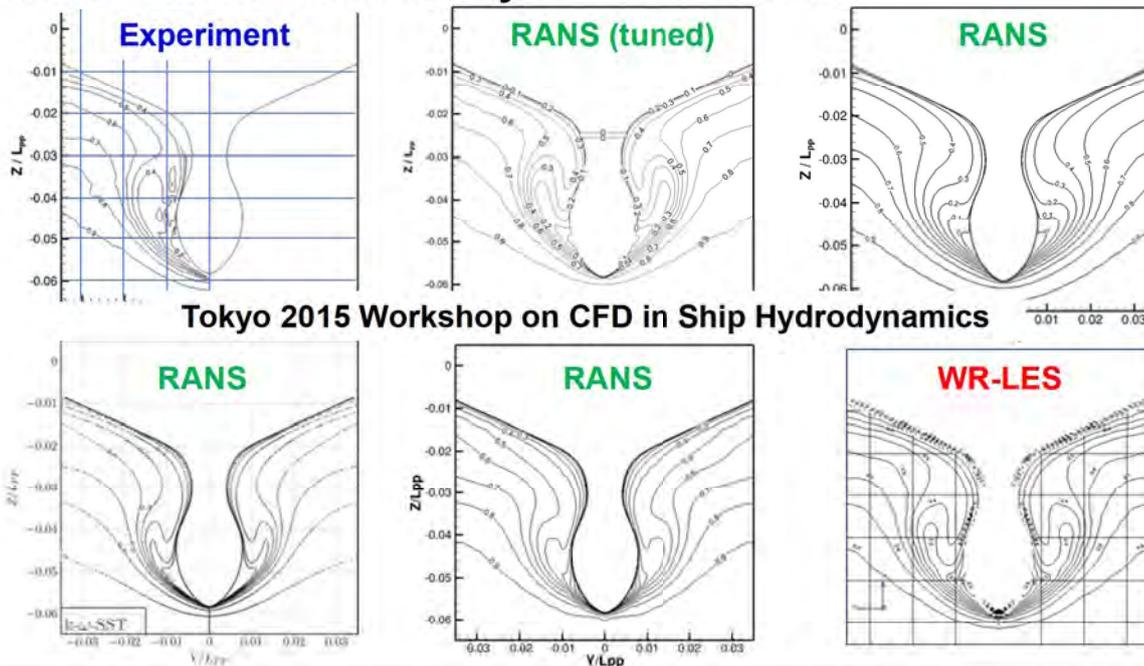
- Directly resolve turbulent eddies in production scale and gives as accurate results as DNS does. Expected to become a complete substitute for testing.

## ■ Direct Numerical Simulation (DNS)

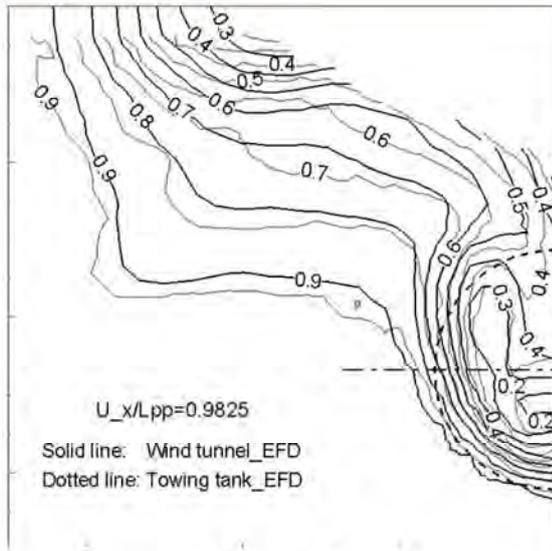
- Unless interested in dissipation, WR-LES should be used at 100 times smaller cost.

# Examples of RANS-based Simulations

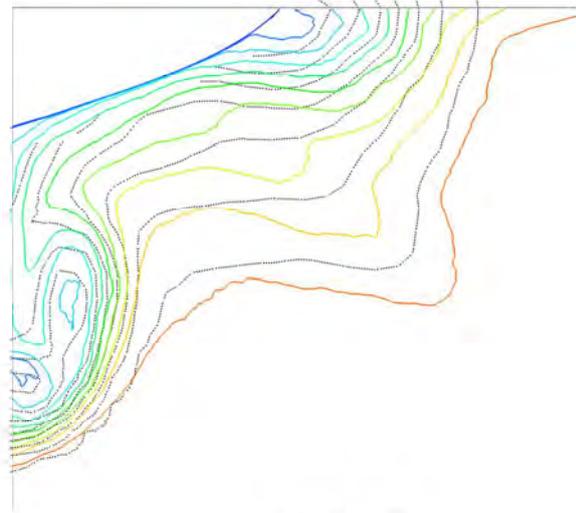
## ■ Wake Profiles Predicted by RANS near Stern



# Wake Predicted by WR-LES at Propeller Plane



Experiment

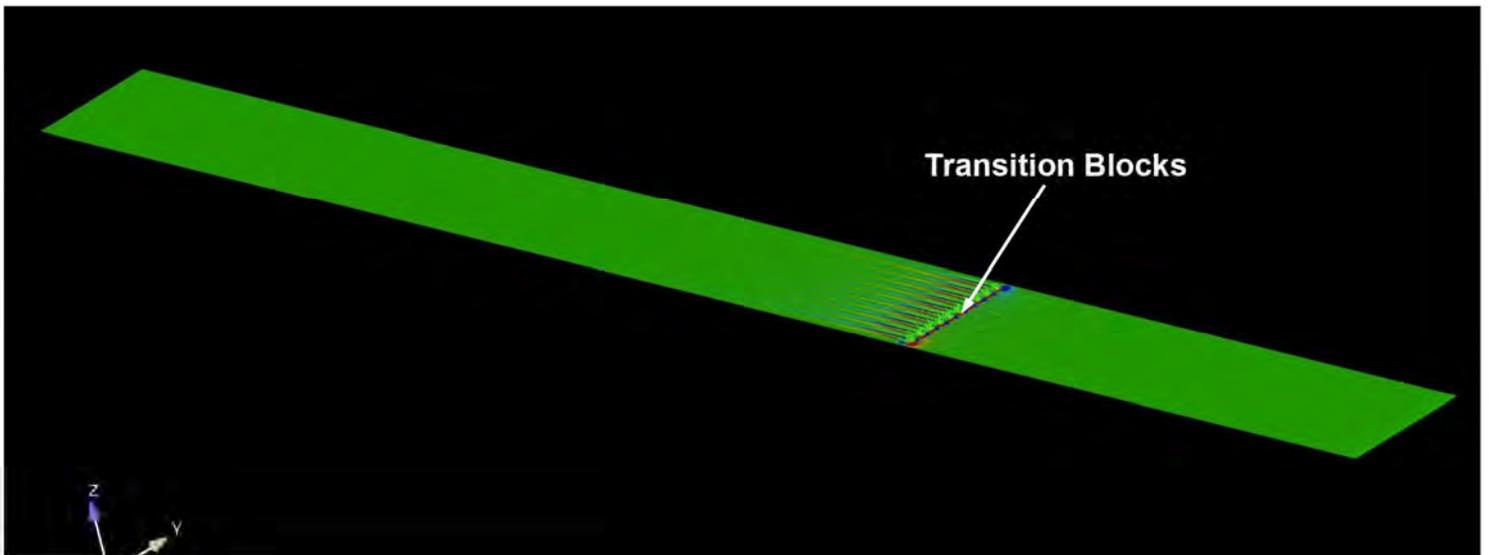


WR-LES

**WR-LES when properly performed guarantees accuracy at all the times.**

# Essential Difficulty for Application of WR-LES

## ■ WR-LES of a transitional turbulent boundary layer



**High-Reynolds number WR-LES requires billions of grids.**

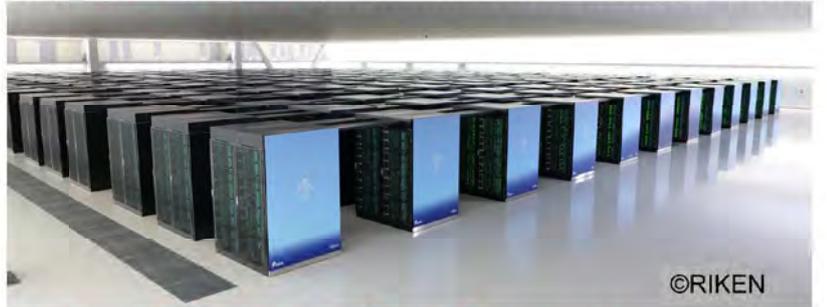
# From K computer to Supercomputer Fugaku

## ■ K computer (2012)

- Compute node: **128 GFLOPS** CPU, 128-bits SIMD (2 GHz) × 8 cores
- Total performance: 88,128 CPUs, **10.51 PFLOPS**

## ■ Supercomputer Fugaku (expected in full service in 2021)

- Compute node: **3,380 GFLOPS** CPU, 512-bits SIMD (2 GHz) × 48 cores
- Total performance: 158,976 CPUs, **415 PFLOPS** (with 95.6% of entire nodes)



**x26.4 Compute-node performance, x39.5 overall performance.**

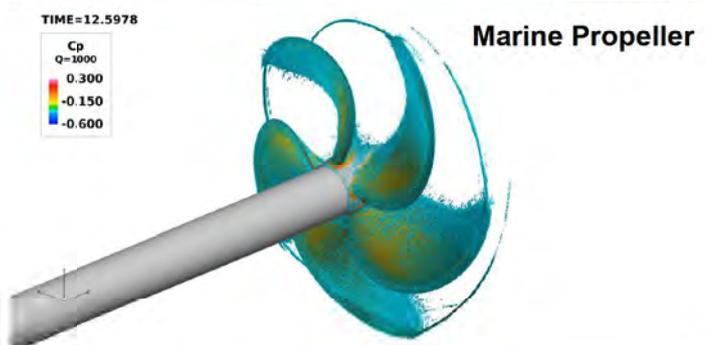
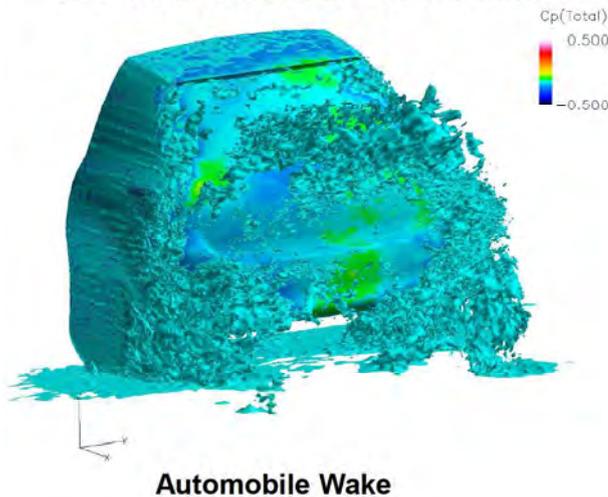
# Our Goal

- To substantially shorten the time for WR-LES by a factor of 30 or more
- To Realize Numerical Towing-tank Test

## II. FLOW SOLVER

### FrontFlow/blue (FFB) Flow Solvers

- FEM based incompressible/compressible Flow Solvers
- Developed for Industrial Applications of WR-LES
- Features Automated Mesh Refinement and Overset Method



# Governing Equations and Solution Algorithm



## Continuity Equation and Navier-Stokes Equations

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (v + v_{SGS}) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + f_i \quad (2)$$

## Solution Algorithms based on Crank-Nicolson and Fractional Step Methods

$$\frac{\tilde{u}_i - u_i^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} u_j^n \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i^n}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} (v + v_{SGS}^n) \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^n}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i^n}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^n}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (3)$$

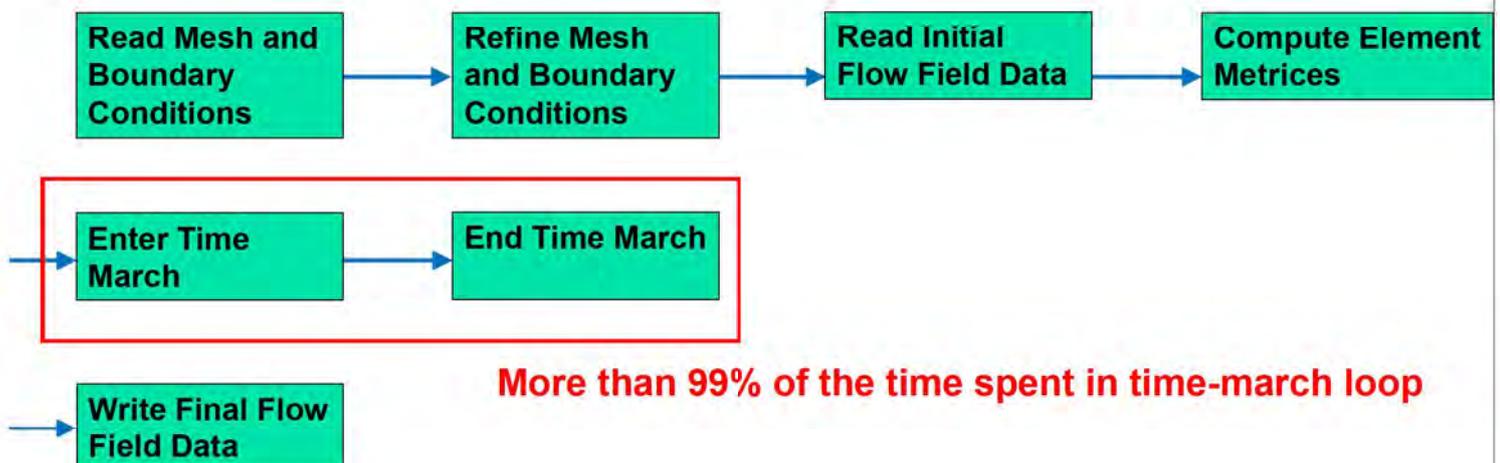
$$\frac{u_i^{n+1} - \tilde{u}_i}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_j} \right) = \frac{\rho}{\Delta t} \cdot \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} \quad (5)$$

# Flow Solver Structures

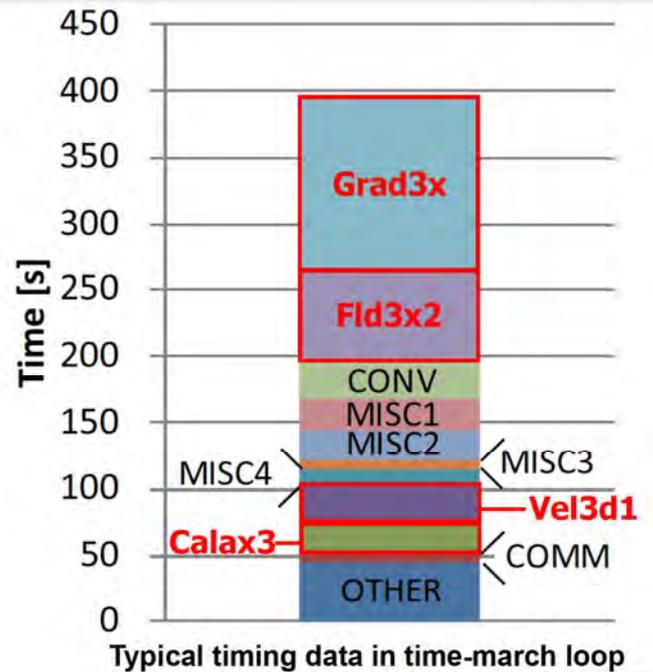


## Each of the mpi processes does:



# Main Kernels Implemented in Flow Solvers

- **Grad3x**
  - Computes pressure gradient at nodes
- **Fld3x2**
  - Computes divergence of velocity and pressure gradients
- **Vel3d1**
  - Computes LHS and RHS of the Navier-Stokes Equations
- **Calax3**
  - Performs Matrix-Vector Multiplication



## III. CODE OPTIMIZATIONS AND PERFORMANCE IMPROVEMENT

# Typical Operations and Essential Bottlenecks 1



## ■ Typical Operations

- Matrix-vector multiplications (Calax3)
- Superimposition of element vector to global vector (Grad3x)
- Superimposition of element matrix to global matrix (Vel3d1)
- Inner product (Fld3x2)

## ■ Characteristics

- High required B/F of 2.5 to 4
- Memory-throughput-bound kernels
- Vector elements referenced by a list vector

## ■ Array-element Load (Bottleneck 1)

- Referencing a list vector
- Scattered elements in memory space
- Frequent L1D/L2 cache miss occurrences

```
ICRS=0
DO IP=1, NP
  BUF=0.0E0
  DO 100 K=1, NPP(IP)
    ICRS=ICRS+1
    BUF=BUF+A(ICRS)*S(LIST(ICRS))
  END DO
  AS(IP)=AS(IP)+BUF
END DO
```

Main operations of Calax3 kernel

# Typical Operations and Essential Bottlenecks 2



## ■ Superimposition of Element Residual Vectors

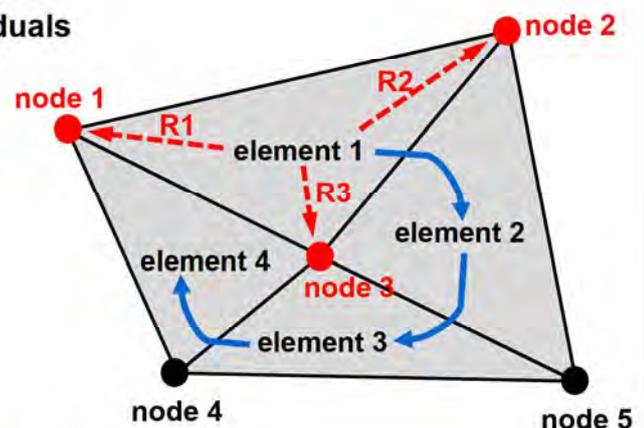
- Element-based loop superimposes element residuals
- Scattered Store

## ■ Features of Latest General-purpose CPUs

- A smaller number of floating-point registers
- Increased latency
- Longer bits SIMD
- More difficult instruction scheduling

## ■ Array Element Store (Bottleneck 2)

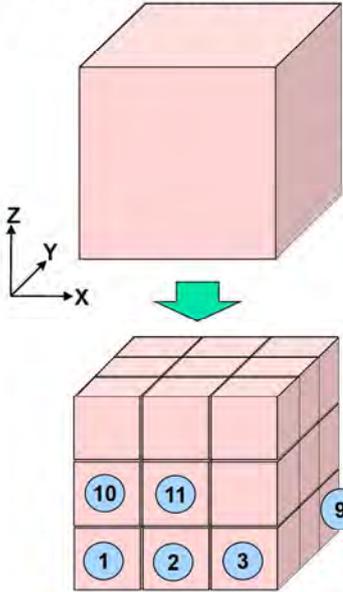
- Scattered store significantly increases L1D busy time
- Considerably deteriorates kernel performance



Superimposition of residuals

# Resolving Bottleneck 1

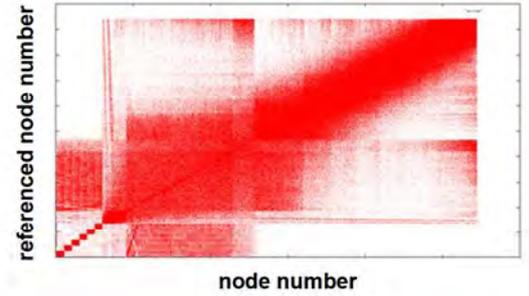
## Reordering of Node Number



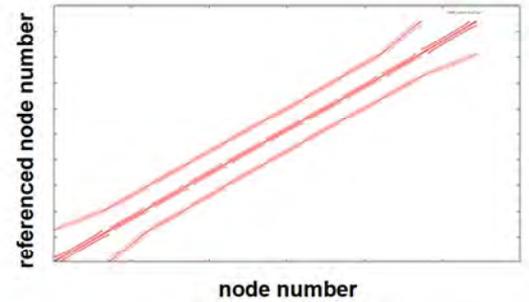
Subdivide entire domain into small blocks

Sequentially number nodes in each small block

before reordering



after reordering

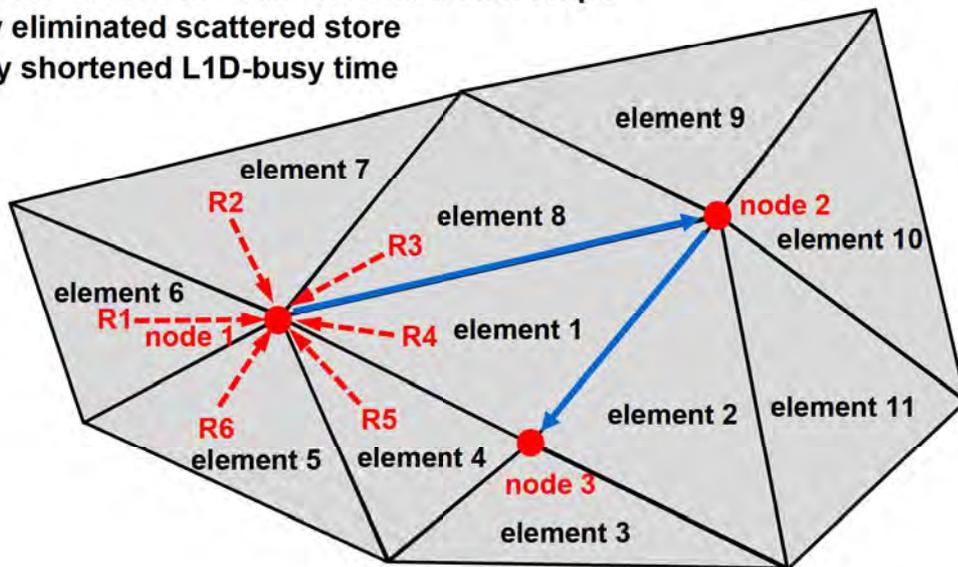


Reordering resulted in x11 speedup of Calax3 kernel on K computer.

# Resolving Bottleneck 2

## Essentially New Code Structures

- Superimpositions are executed in node-based loops
- Completely eliminated scattered store
- Remarkably shortened L1D-busy time

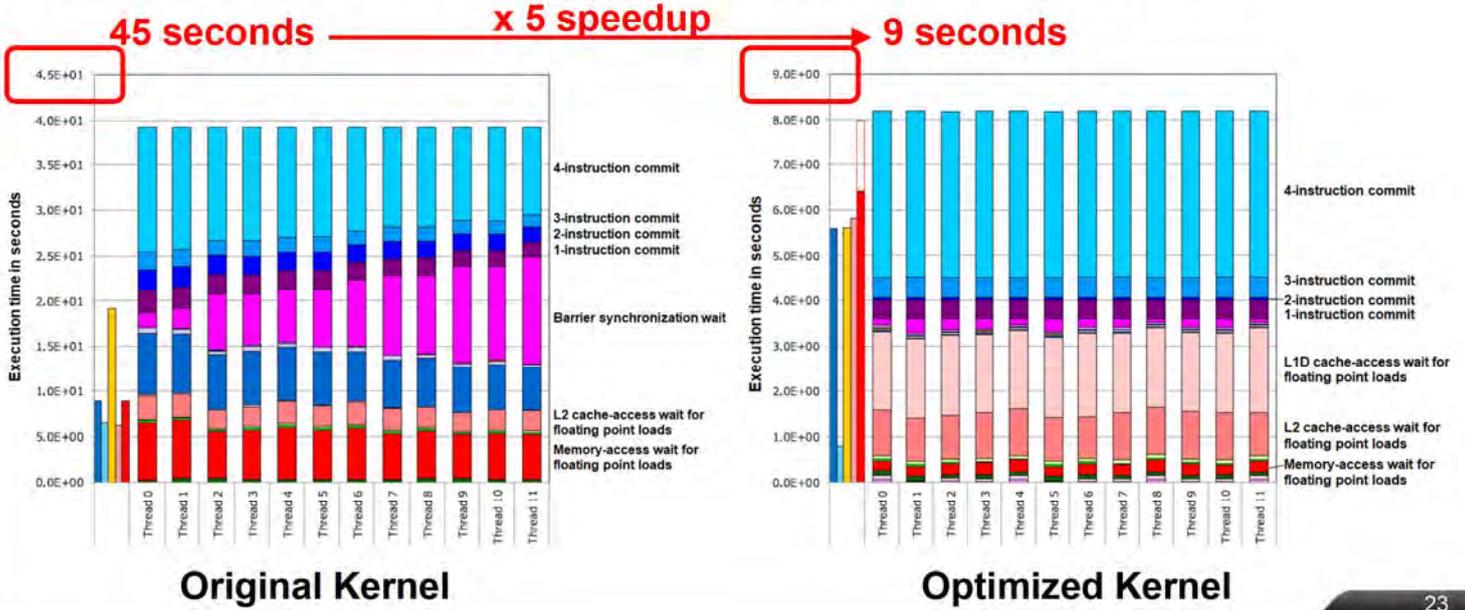


New algorithm resulted in x5 speedup of Grad3x kernel on Fugaku.

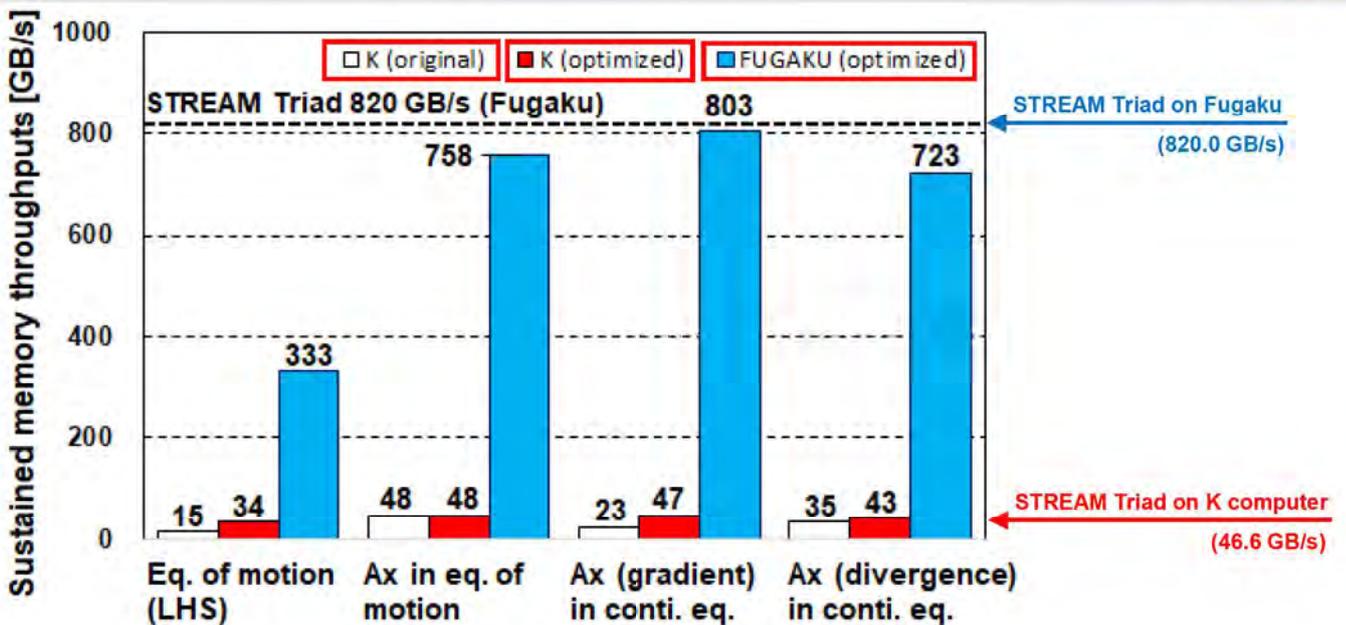
# Improved Performance of Grad3x Main Kernel



## Elapsed Times Spent by Each of 12 Threads running on Fugaku

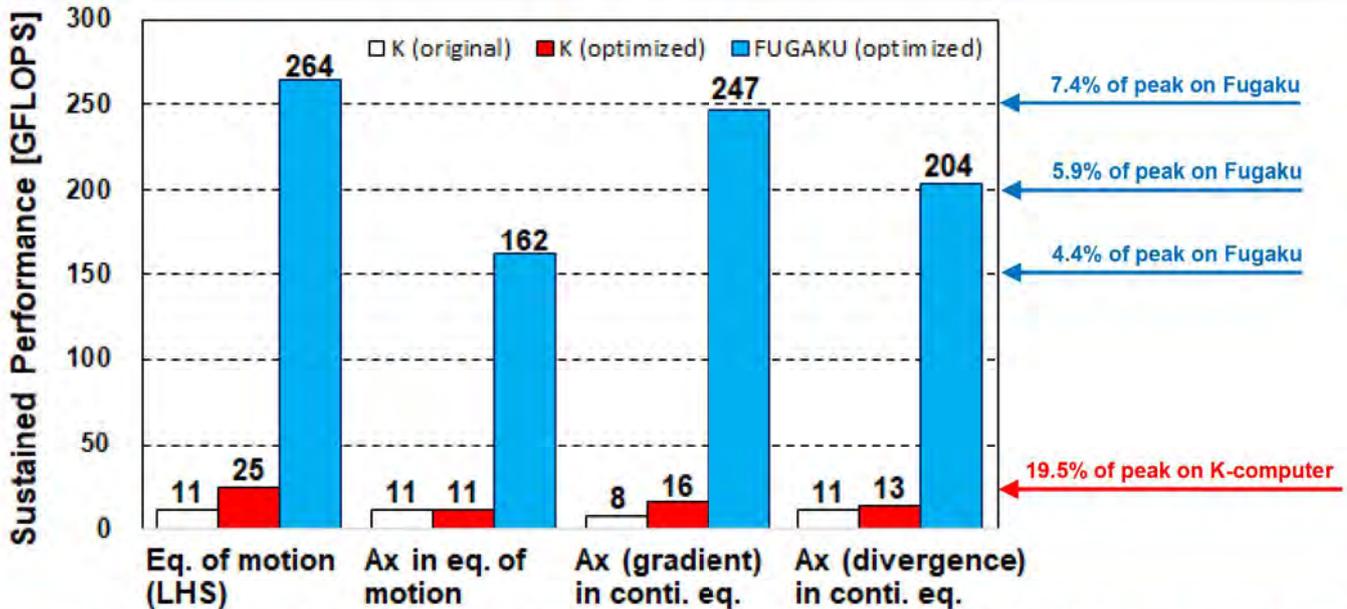


# Sustained Throughputs of Four Main Kernels



**Three of the four main kernels achieved hardware limit.**

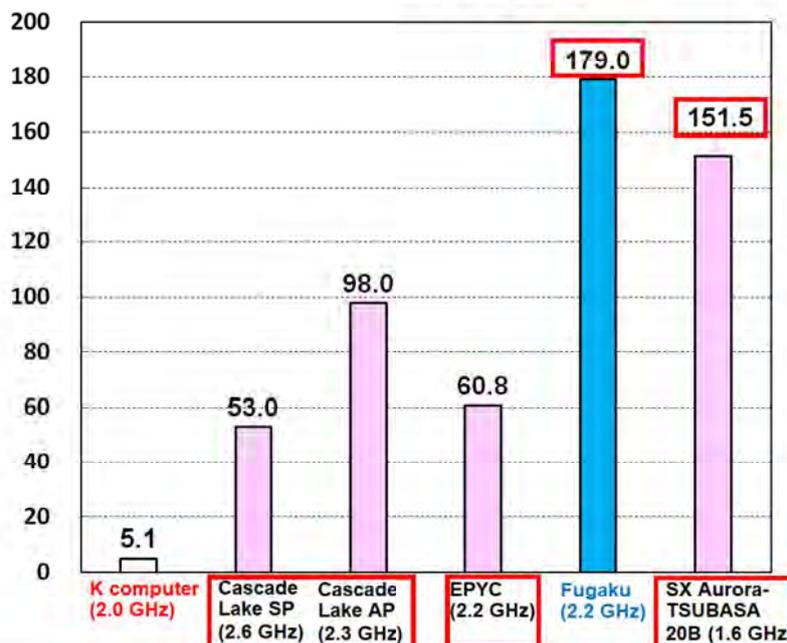
# Sustained Performance of Four Main Kernels



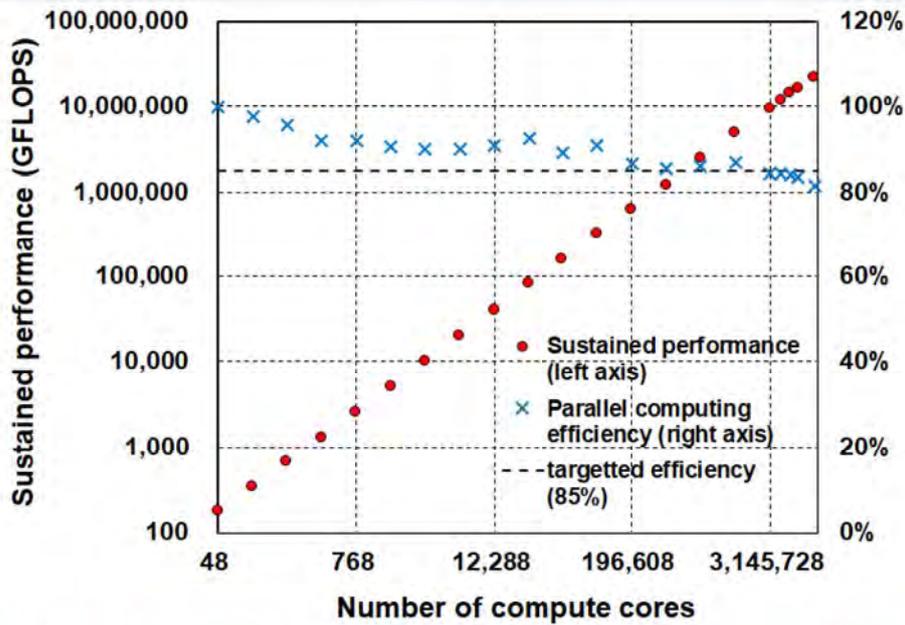
Main kernels achieved a sustained performance of 4.5% to 7.8% of the peak.

# Sustained Node Performance on Various CPUs

Sustained single-node performance in GFLOPS



# Weak-scale Benchmark Test on Fugaku



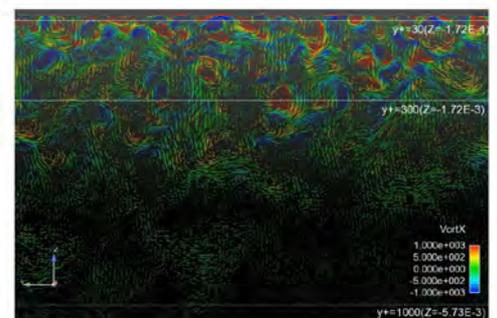
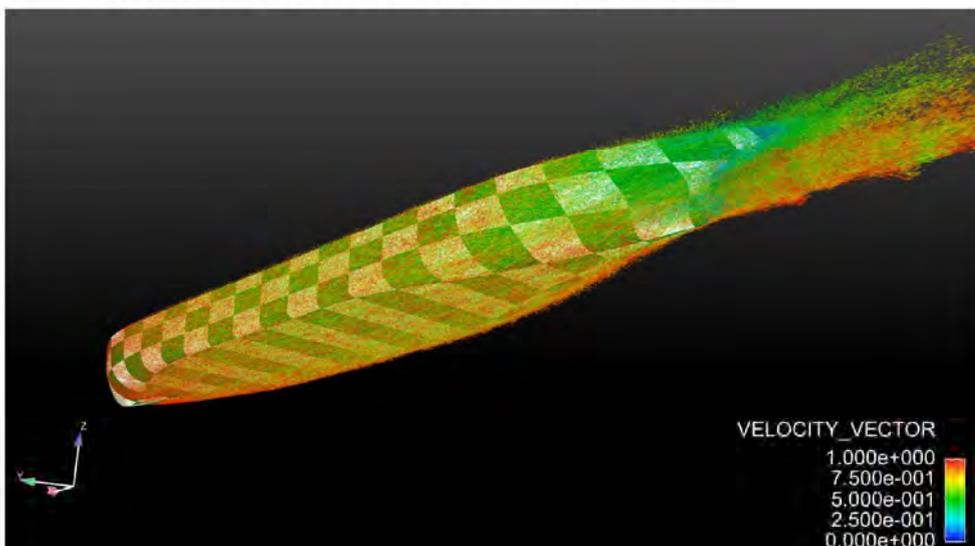
**FFB achieved 22.6 PFLOPS (4.3% of double-precision peak) with 7,630,848.**

## IV. APPLICATIONS

# Numerical Towing-Tank Tests for Ship Hydrodynamics

## Resistance Test for KVLCC2 Vessel

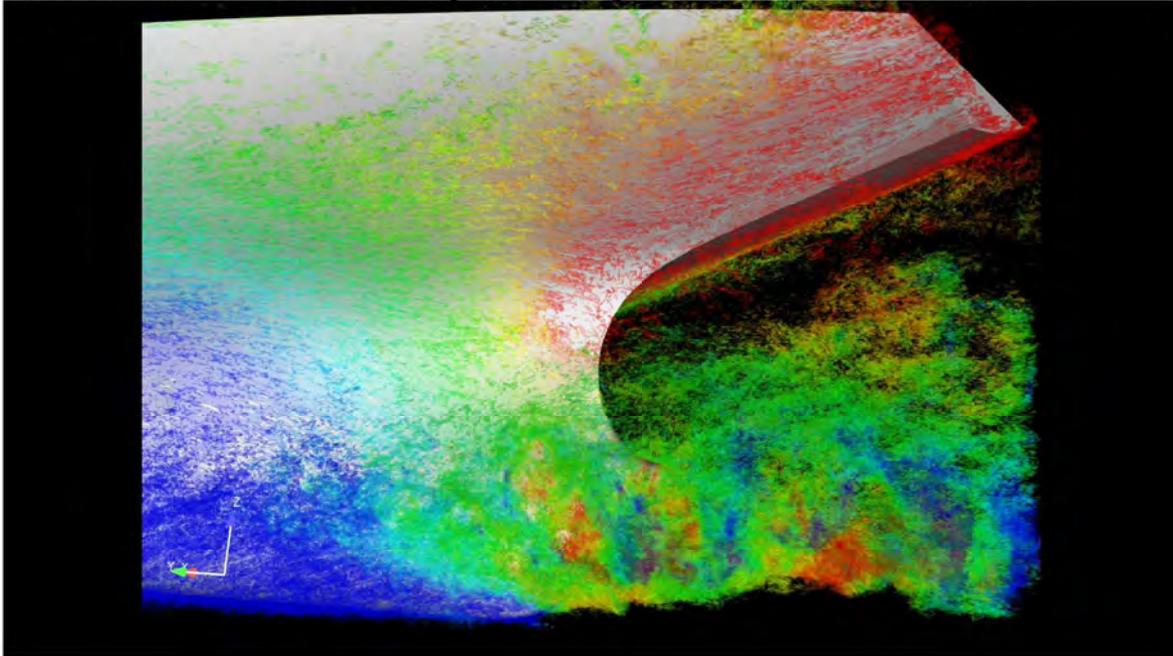
- WR-LES with 32 billion grid points has fully resolved the smallest active eddies in TBL.



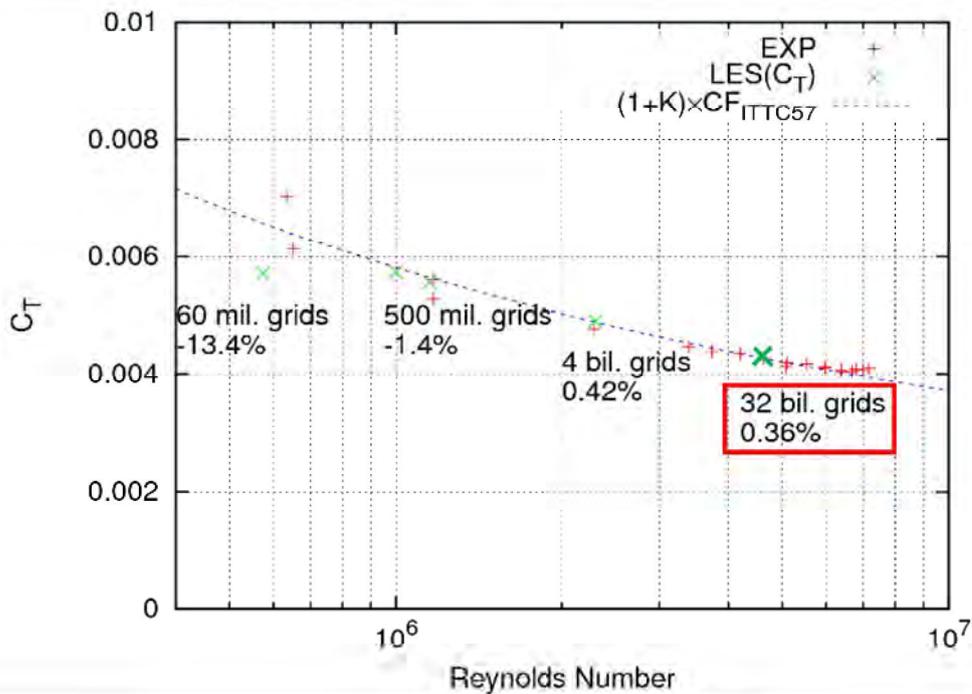
Eddies in mid-ship TBL

# Resistance Test for KVLCC2 Vessel (continued)

## Turbulent eddies computed by WR-LES near Stern



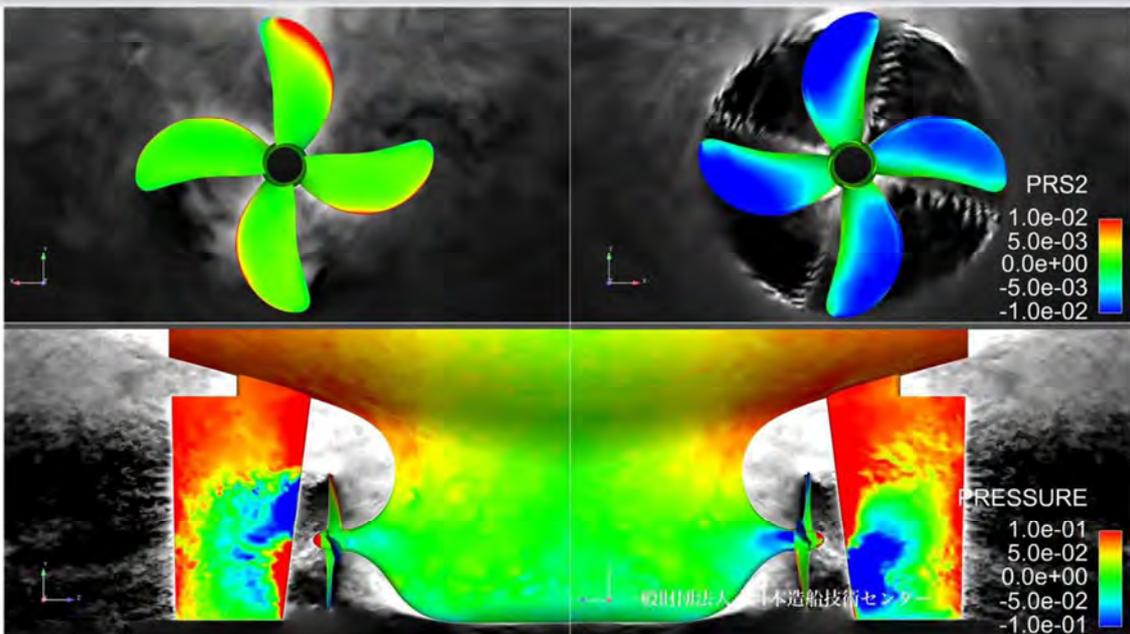
# Predicted Total Resistance of KVLCC2

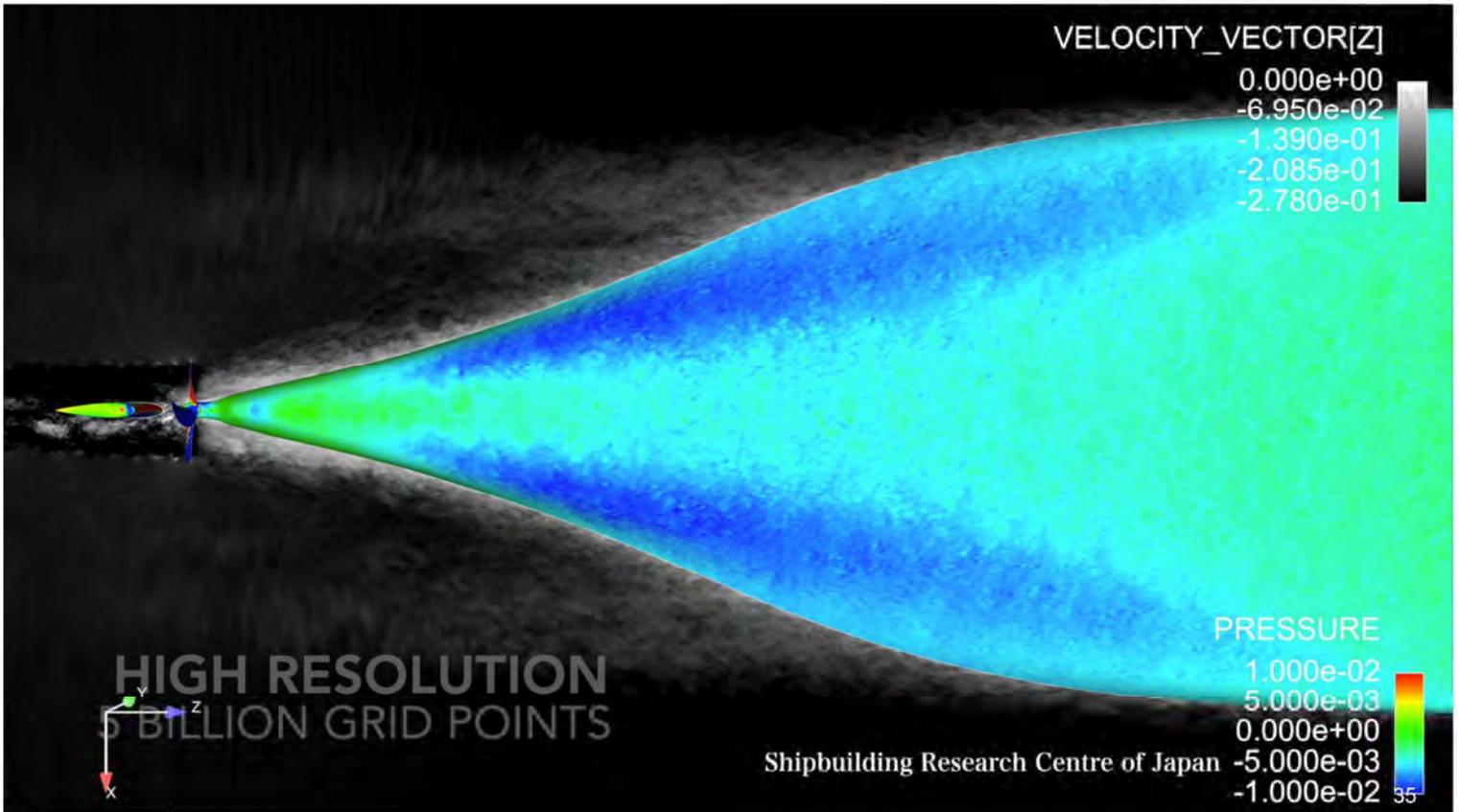


# Prediction of Wave-making Resistance

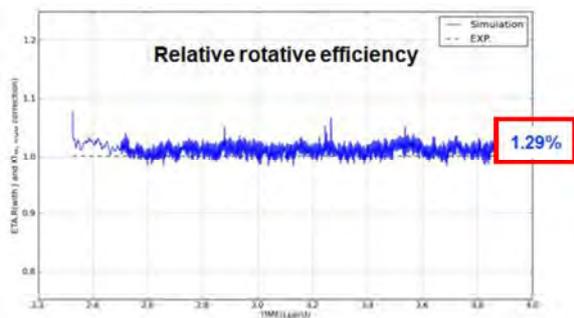
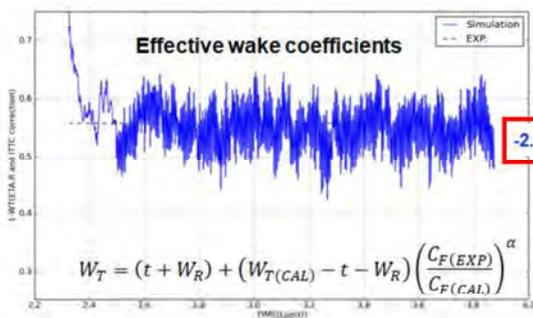
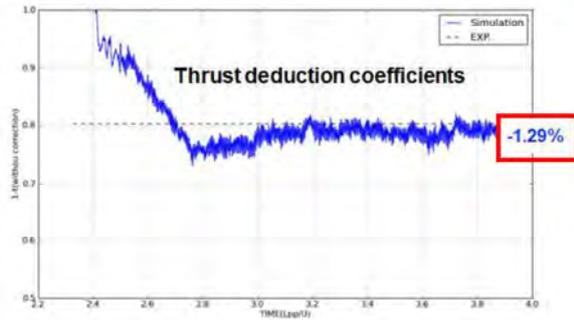
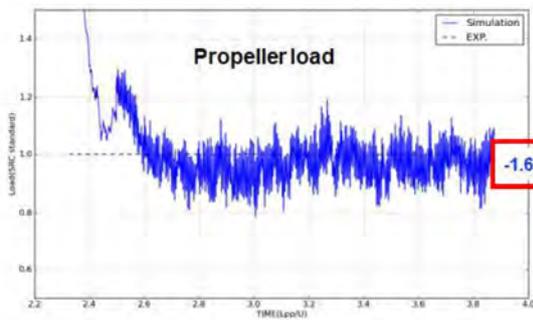


# Self-propulsion Test for KVLCC2 Vessel





## Predicted Self-propulsion Factors (KVLCC2)



# Computational Resources for Replacing Towing-tank Tests

	K computer	Fugaku
Number of compute nodes	24,576	50,000
Number of grids per compute node	1,300,000	640,000
Node performance (GFLOPS)	5.1	179.0
sec/step	5.1062	0.0715
steps/case	32,000	32,000
hours/case	45.4	0.64 (37 min.)
node hours/case (NH)	1,120,000	31,800

## Go beyond the Tests

### Flow around a propeller blade subjected to hull wake



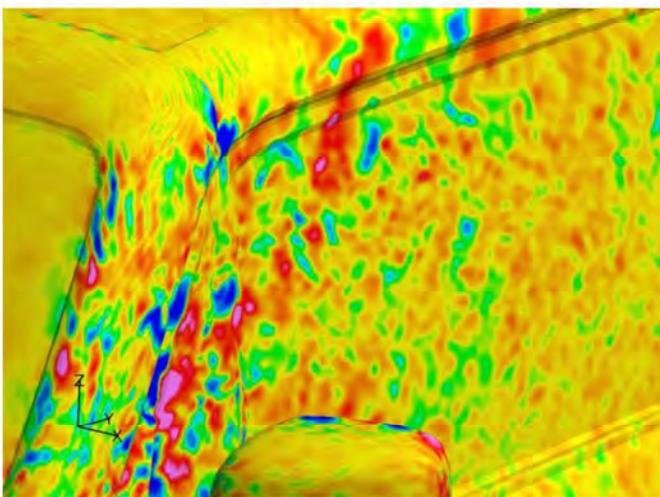
# Numerical Wind-tunnel Tests for Automobile Aeroacoustics

Industrial Partners:

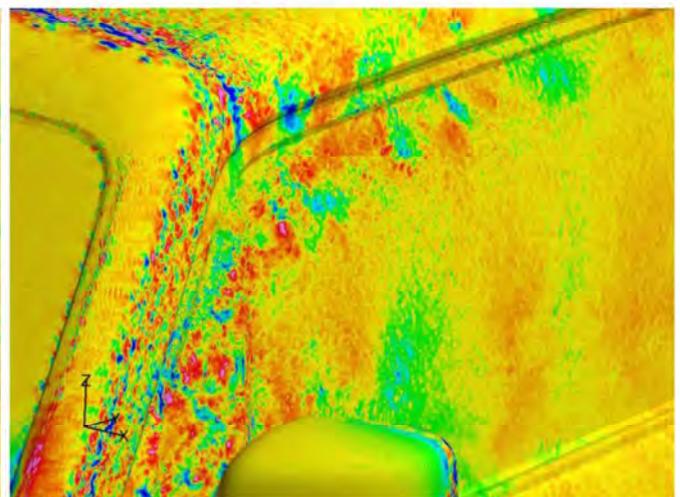
Honda Motor Co., Ltd., SUZUKI MOTOR CORPORATION

## Predicted External Flow and Aeroacoustics

### Hydrodynamic Pressure Fluctuation near A-pillar and Door Mirror



80 million grid WR-LES

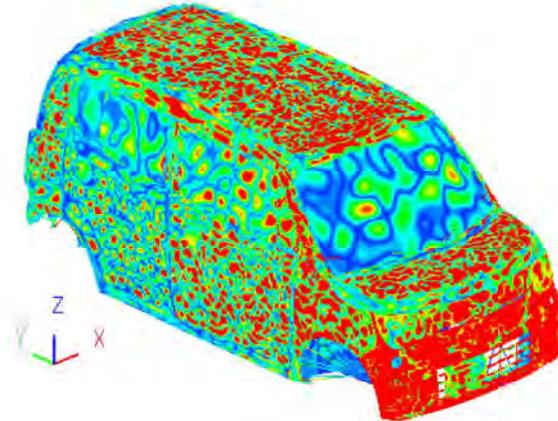


5 billion grid WR-LES

# Prediction of Car-body Vibration

## ■ Surface Vibration

Analysis: Dynamic, Results: Step, Solver: ADVCSolver 4.11-alpha  
Model size: 2472712 nodes, 2483338 elements  
Variable: Acceleration[norm], Time step: 0/100  
Process Name = PROCESS1001 Process Number = 1001  
Time = 1.0000000e+007



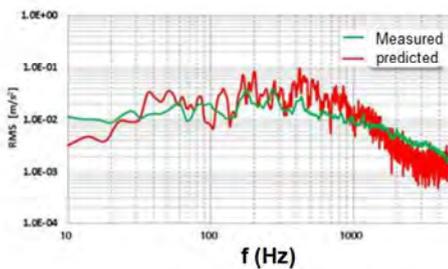
[mm/s<sup>2</sup>], Rainbow[16]



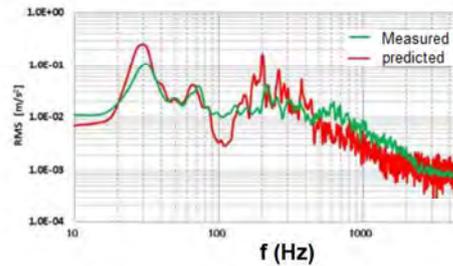
Max: 1.636e+005  
Min: 0.000e+000

# Prediction of Car-body Vibration (continued)

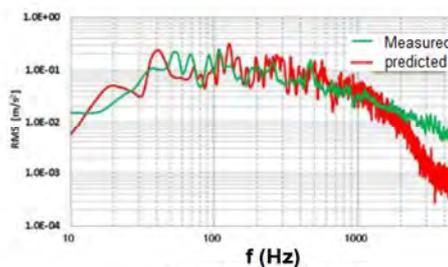
## ■ Surface Vibration



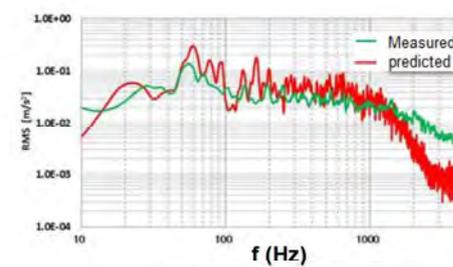
Wind shield (front glass)



Rear panel

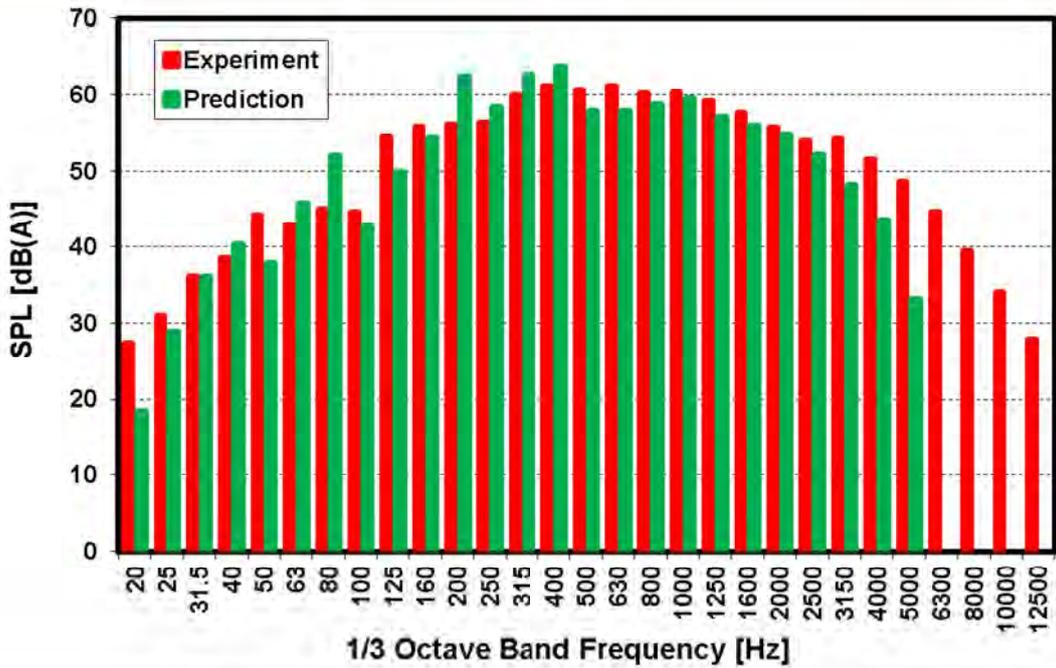


Front side-panel

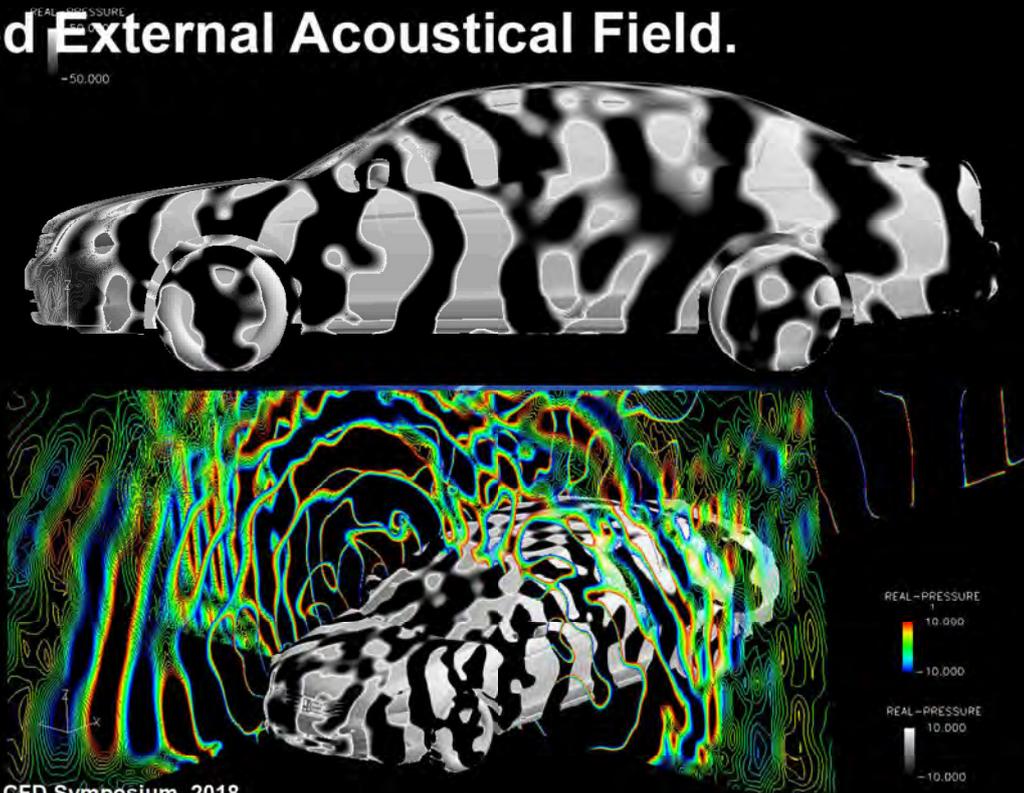


Rear side-panel

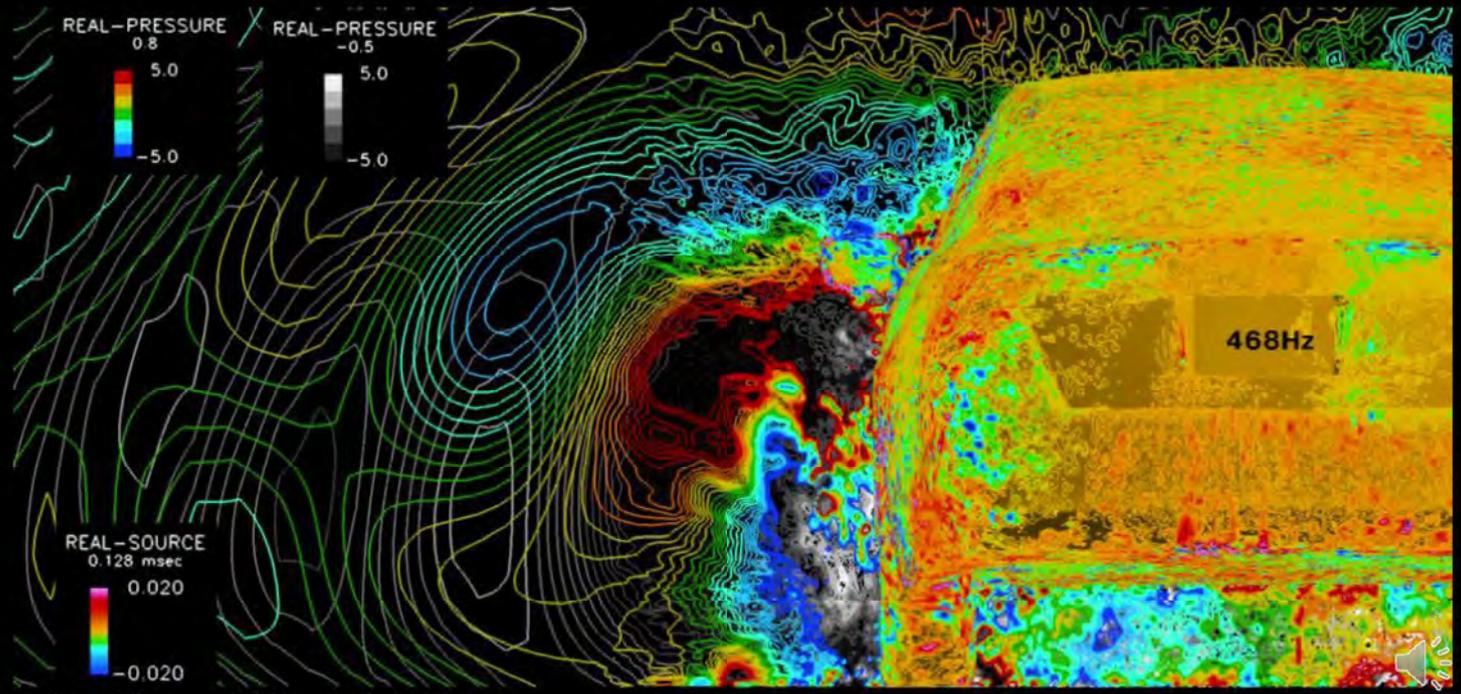
# Predicted and Measured Sound Spectra



## Predicted External Acoustical Field.



Once again, we go beyond the tests.



Iida & Miyazawa, CFD Symposium, 2018

## V. CONCLUSIONS

## Concluding Remarks



- A Finite-Element flow solver, named FrontFlow/blue (FFB), has been fully optimized to completely replace various tests made for the final evaluation of a flow-related industrial product.
- An essentially new algorithm has completely eliminated the scattered stores and the optimized kernels have achieved a sustained memory throughput very close to the effective hardware limit.
- The optimized whole code runs by **35 times faster on Fugaku** and achieved a single-node performance of **179.0 GFLOPS** on Fugaku, corresponding to **5.3% of double-precision theoretical peak performance**.
- FFB has achieved a sustained performance of **22.6 PFLOPS** with **7,630,848 compute cores**, and WR-LES that used **32 billion elements** has been significantly shortened from **almost two days on K computer** to **37 min. on Fugaku**.

The results presented here were obtained in the evaluation environment in the trial phase of the supercomputer Fugaku. They should not be regarded as guaranteeing the computation performance, power-consumption rate and/or any other attributes of supercomputer Fugaku at the start of its full operation.



52

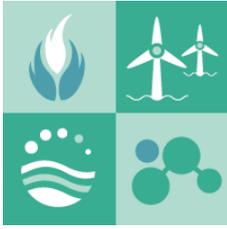
## Acknowledgment



- MEXT for sponsoring this project and providing the computational resources on K computer and supercomputer Fugaku
- Fujitsu Limited for their technical supports with code optimization
- Many industrial partners for cooperation with this project, in particular,
  - Toyota Motor Corporation, Honda Motor Co., Ltd., SUZUKI MOTOR CORPORATION, Hitachi, Ltd., EBARA CORPORATION



53



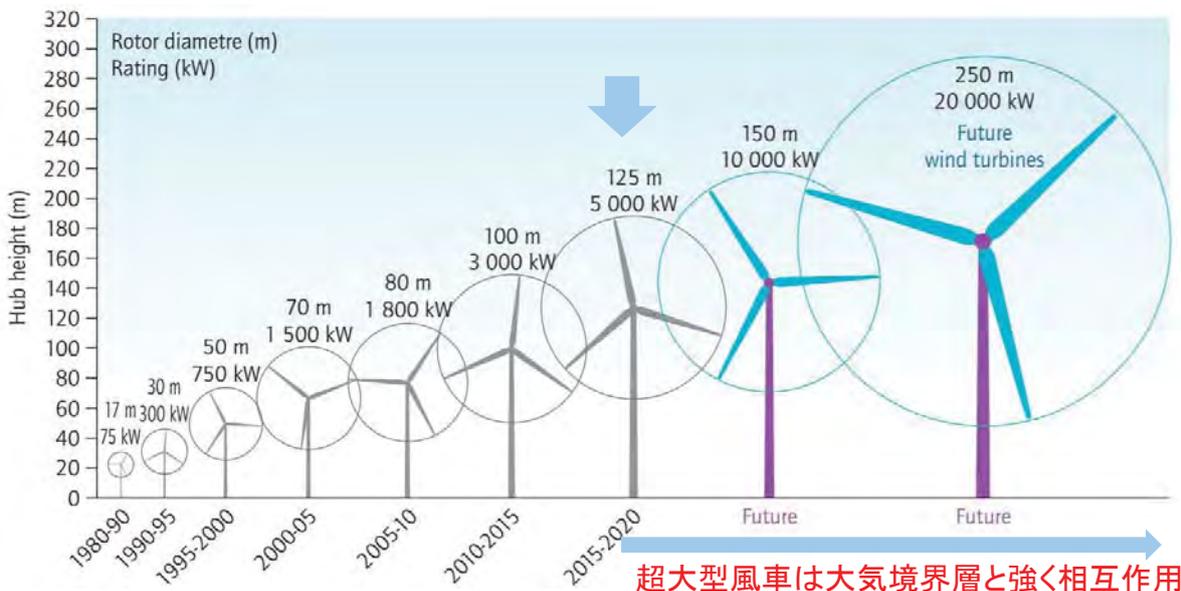
文部科学省「『富岳』成果創出加速プログラム」  
 スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用  
 第1回シンポジウム (2020年10月27日)

# 洋上ウィンドファームスーパーシミュレーション 流体構造連成&疲労損傷解析

陳順華・吉村 忍  
 東京大学 大学院工学系研究科教授

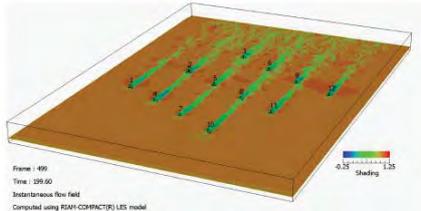
加藤千幸(東京大学) 飯田明由(豊橋技科大)  
 遊佐泰紀(電通大) 山出吉伸(みずほ情報総研)  
 協力 インサイト、アライドエンジニアリング、みずほ情報総研

## 「富岳」におけるターゲット問題例2 5MW以上の大型発電用風車の洋上ウィンドファーム 発電効率向上のため大型化する発電用風車 (発電効率は、翼長の2乗に比例、風速の3乗に比例)

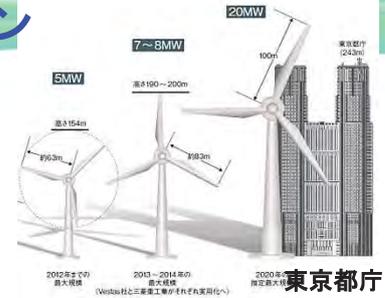


IEA. Wind energy technology roadmap, 2013 edition.  
 URL: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind\\_2013\\_Roadmap.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf).

# スーパーシミュレーションによる洋上windファームの発電性能、構造信頼性評価



LES解析による  
詳細計算結果

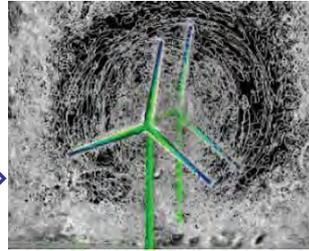


## RC HPC版

- ・windファーム全体の16(24)方位風向同時並列LES解析
- ・工学Wakeモデル
- ・数億~数十億要素

工学Wakeモデルを実装したRC HPC版の解析結果とFFBによるWake(後流)直接解析結果の比較により、工学Wakeモデルの高精度化

RC HPC版のファーム全体の発電性能評価の高精度化



FFB: タンDEM配置される大型風車まわりの流れ場の詳細LES解析  
・数百億要素  
・Wall Model

大気境界層の鉛直方向流束分布や乱れ、またWake(後流)のブレード累積疲労損傷への影響評価

## 双方向連成

ブレードの変形  
(→LES解析)

## REVOCAP\_Coupler

## 片方向連成

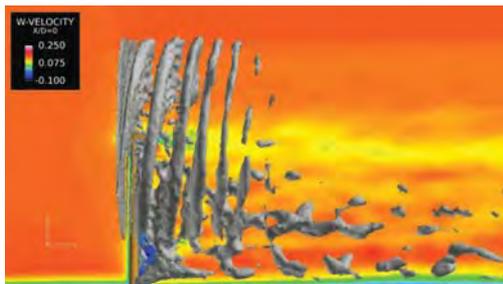
風車ブレードに作用する流体力(空間分布・時間変化)



## ADVENTURE\_Solid:

数10万積層ソリッド要素による大型ブレードの累積疲労損傷計算

# NREL5MWブレードのスーパーシミュレーションの流れ



CFD解析結果(FFB on 京)

(抽出)

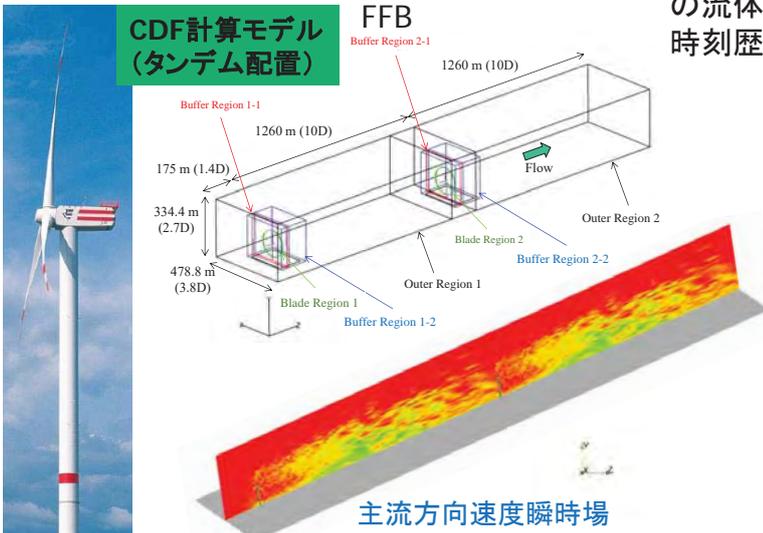
ブレード表面(流体メッシュ)の流体カベクトル分布の時刻歴データ

REVOCAP\_Couplerによるブレード表面(構造メッシュ)の流体カベクトル分布の時刻歴データへのマッピング



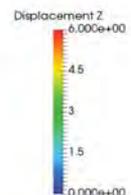
## CDF計算モデル(タンDEM配置)

FFB

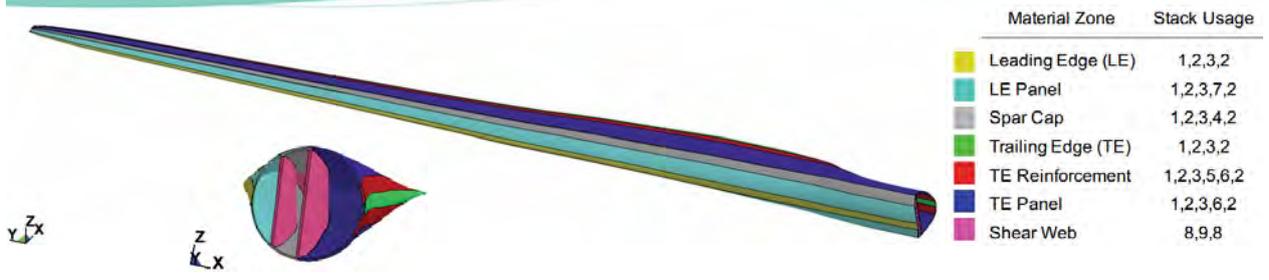


ADVENTURE\_Solid  
積層複合材料応力解析

累積疲労損傷解析



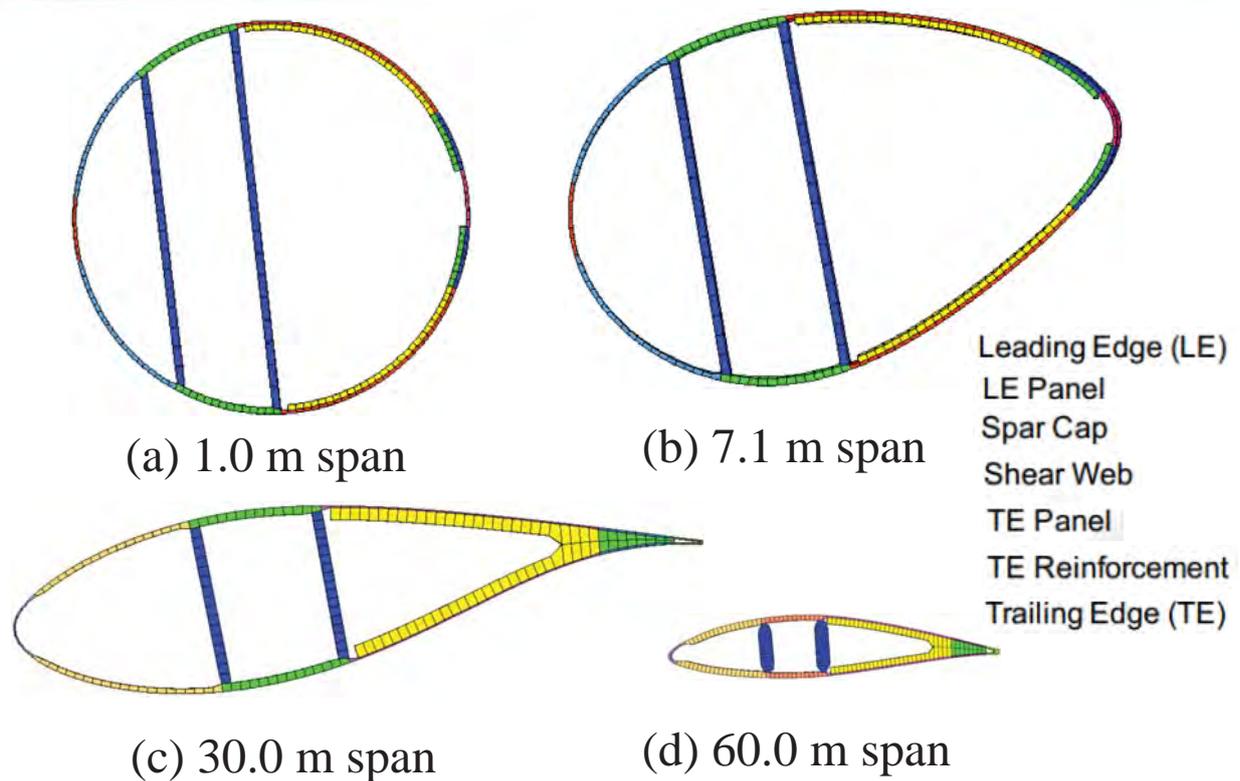
# ブレード詳細構造モデルの材料スタックの材料パラメータ



	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_3$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$G_{31}$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$	$\nu_{31}$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Stack ID	Stack Name	Material
Gelcoat	3.44	3.44	3.44	1.32	1.32	1.32	0.30	0.30	0.30	1235.0	1	Gelcoat	Gelcoat
E-LT-5500	41.80	14.00	14.00	2.63	2.63	2.84	0.28	0.37	0.09	1920.0	2	Triax Skins	SNL Triax
SNL Triax	27.70	13.65	13.65	7.20	7.20	7.20	0.39	0.39	0.19	1850.0	3	Triax Root	SNL Triax
Saertex	13.60	13.30	13.30	11.80	11.80	11.80	0.49	0.49	0.48	1780.0	4	UD Carbon	UD Carbon
Foam	0.26	0.26	0.26	0.02	0.02	0.02	0.30	0.30	0.30	200.0	5	TE UD Glass	E-LT-5500
UD carbon	114.50	8.39	8.39	5.99	5.99	6.47	0.27	0.36	0.02	1220.0	6	TE Foam	Foam
											7	LE Foam	Foam
											8	DB Saertex	Saertex
											9	SW Foam	Foam

[3] Chen, X., Zhao, W., Zhao, X. L., & Xu, J. Z. (2014). Failure test and finite element simulation of a large wind turbine composite blade under static loading. *Energies*, 7(4), 2274-2297.

# ブレード詳細構造モデル(有限要素モデル)の断面



## ブレード詳細構造モデルを用いた固有値解析(1/3)

■ 固有値問題  $(\mathbf{K}^{\text{lin}} - \lambda_i \mathbf{M}) v_i = 0$

ここで、 $\mathbf{K}^{\text{lin}}$ :線形剛性マトリックス、 $\mathbf{M}$ :質量マトリックス、 $\lambda_i$ :モードベクトル $v_i$ に対応する $i$ 番目の固有値

■ 固有値解析

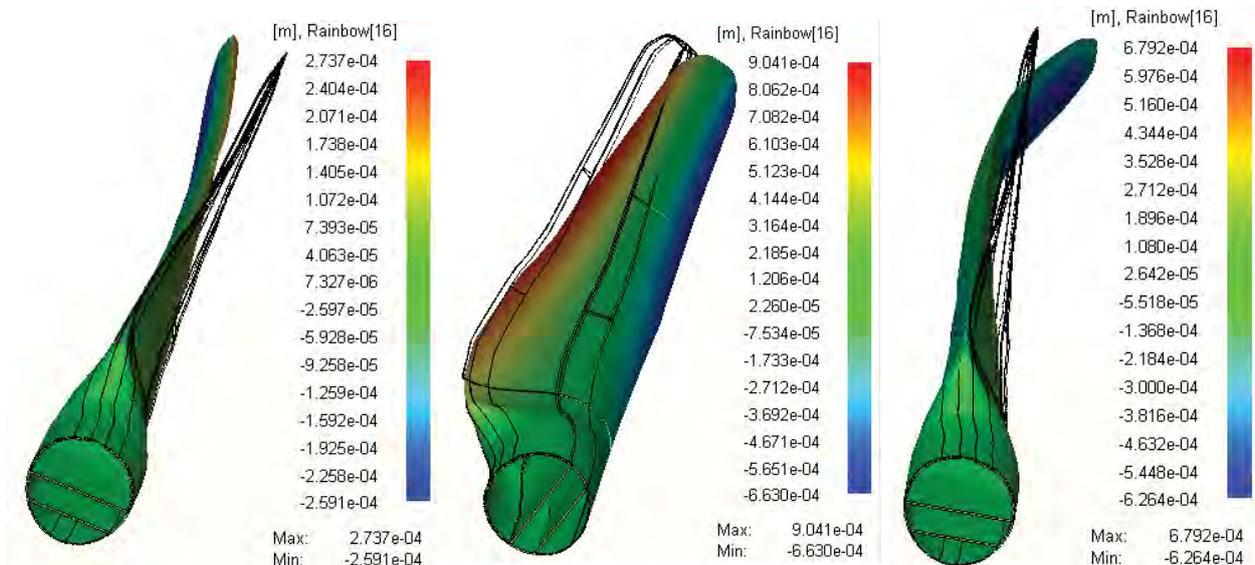
- ✓ ソルバー:ADVENTURECluster
- ✓ 翼根の自由度は拘束、25個の直交異方性材料のグループ
- ✓ シミュレーション結果は文献値[3]と良好に一致

Mode	Frequency <sup>[3]</sup> (Hz)	Frequency (Hz)	Difference	Description
1	0.87	0.80	8.0%	1st flapwise bending
2	1.06	0.98	7.8%	1st edgewise bending
3	2.68	2.28	14.8%	2nd flapwise bending
4	3.91	3.43	12.2%	2nd edgewise bending
5	5.57	5.13	7.9%	3rd flapwise bending
6	6.45	7.39	14.6%	1st torsion

[3] Resor, B. R. (2013). Definition of a 5MW/61.5 m wind turbine blade reference model. Albuquerque, New Mexico, USA, Sandia National Laboratories, SAND2013-2569 2013.

7

## ブレード詳細構造モデルを用いた固有値解析(2/3)



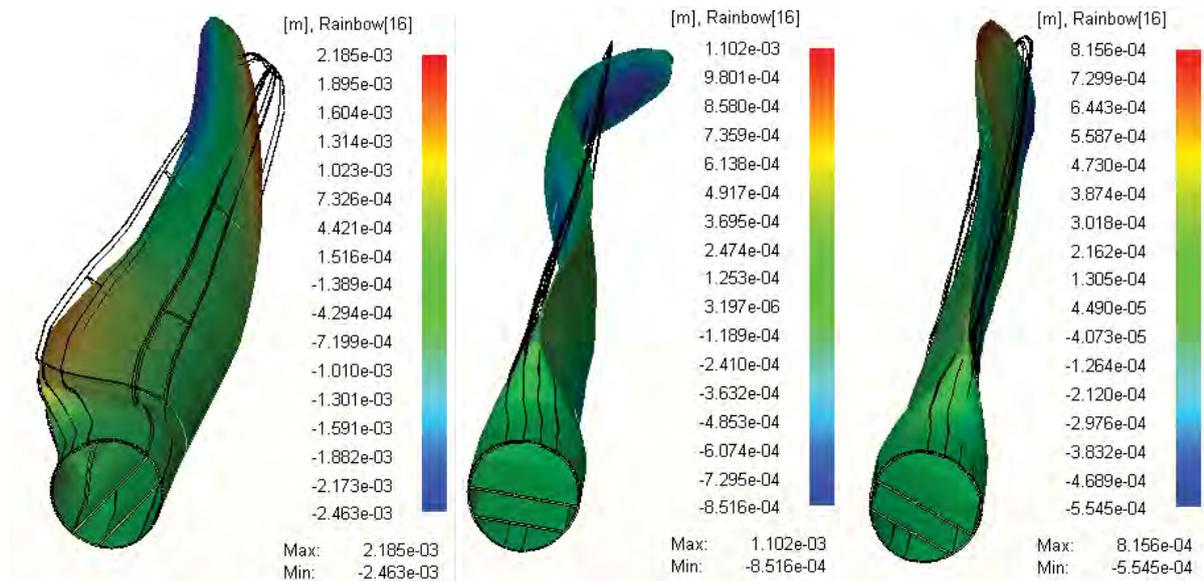
モード1

モード2

モード3

変形は50倍に拡大

## ブレード詳細構造モデルを用いた固有値解析(3/3)



モード4

モード5

モード6

変形は50倍に拡大

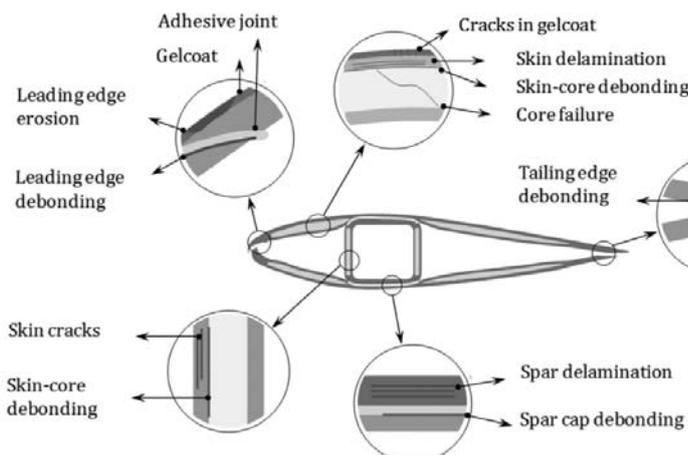
9

## 風車ブレードの種々の破損モード

- 通常風力(大気変動、乱流、後流)、暴風、台風
- 損傷メカニズム
  - ✓ 面内損傷モード (ゲルコート内き裂等)
  - ✓ 板厚貫通モード (スパー剥離、脱着)



激しい暴風雨によって破損したブレード



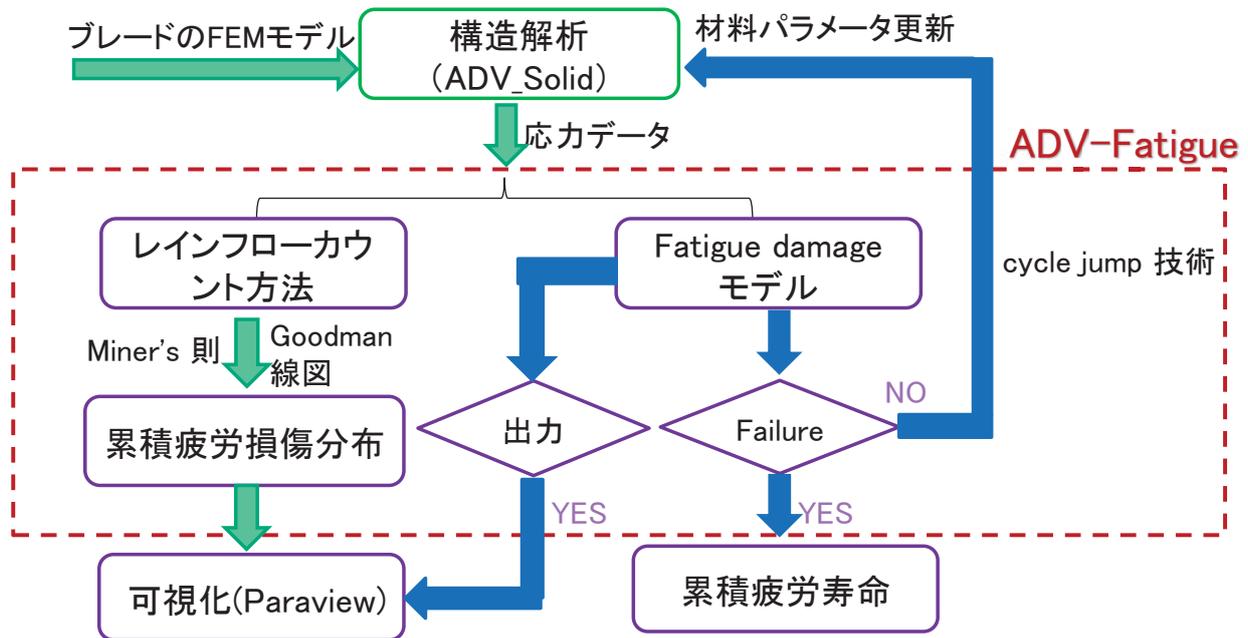
URL:

<https://blackburnnews.com/sarnia/sarnia-news/2015/08/03/storms-reportedly-damage-wind-turbine/#!prettyPhoto>

Katnam K B, Comer A J, Roy D, et al. Composite repair in wind turbine blades: an overview[J]. The Journal of Adhesion, 2015, 91(1-2): 113-139.

10

# ADVENTURE\_Fatigueのフローチャート



11

## 解析事例

### ■ 解析事例:

- ✓ FFBからの流体力データ:
  - 一回転;
  - TSR=7 (vel=11.4 m/s);
  - 一様入力流
- ✓ 4ケースの構造解析と疲労損傷解析:
  - 一回転;
  - ADVENTURE\_Solid; ADVENTURE\_Fatigue;
  - CASE 1: 重力なし、遠心力なし;
  - CASE 2: 重力のみあり (0, -9.8, 0);
  - CASE 3: 遠心力のみあり;
  - CASE 4: 重力あり、遠心力あり
- ✓ 参照解析(流体力なし):
  - CASE 5: 重力のみあり;
  - CASE 6: 遠心力のみあり;
  - CASE 7: 重力あり、遠心力あり

uniform flow

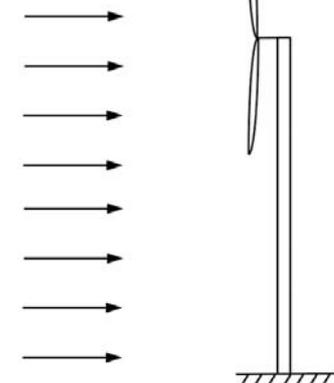
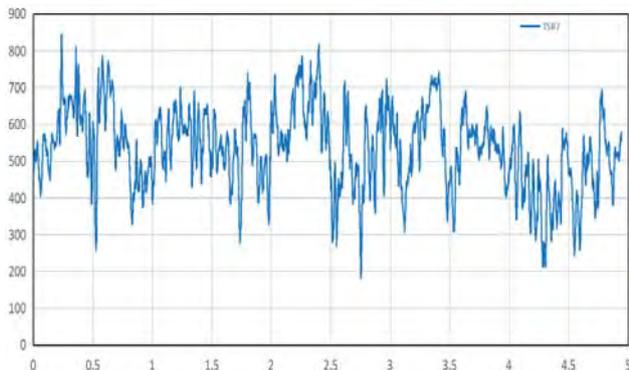


Figure: Schematic diagram of the uniform inlet flow loading.

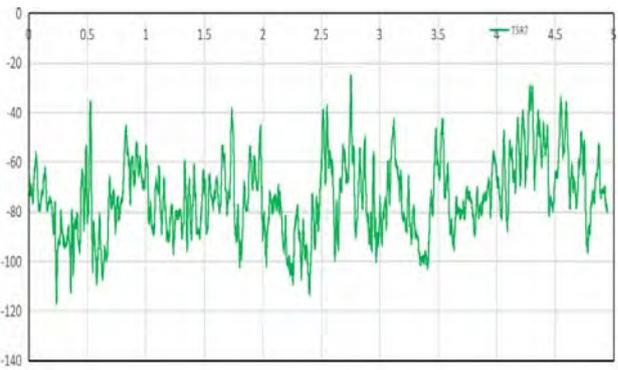
12

## 解析事例

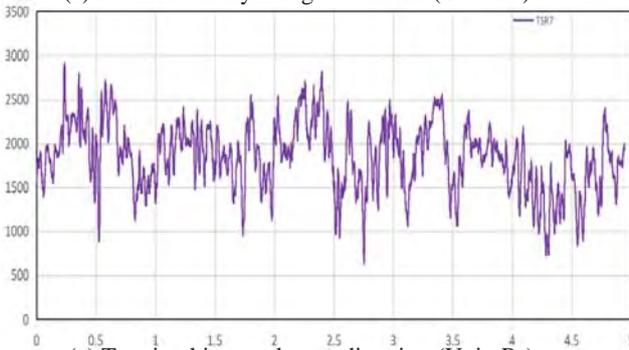
### ◇ 翼先端の流体力の時刻歴応答



(a) Traction history along x direction (Unit: Pa)



(b) Traction history along y direction (Unit: Pa)



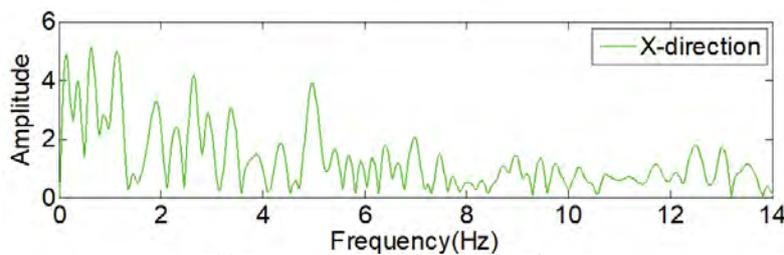
(c) Traction history along z direction (Unit: Pa)

- ✓ TSR=7, 一様入力, 一回転.
- ✓ x, y, z方向の流体カレンジ
- ✓ (200 Pa, 850 Pa), (-120 Pa, -20 Pa),
- ✓ (800 Pa, 3000 Pa)

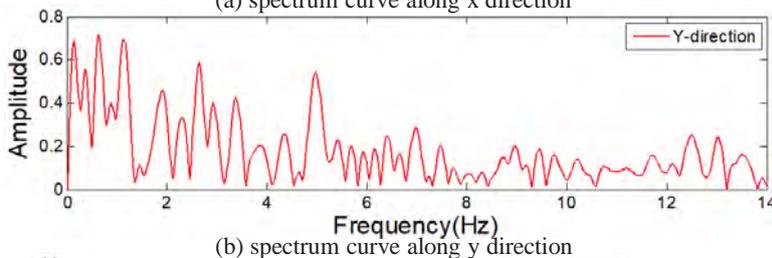
13

## 解析事例

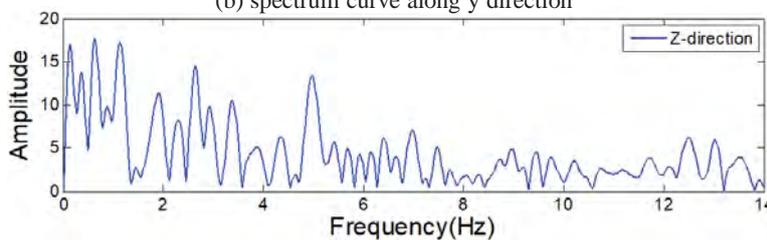
### ◇ 翼先端の流体力のフーリエスペクトラム



(a) spectrum curve along x direction



(b) spectrum curve along y direction



(c) spectrum curve along z direction

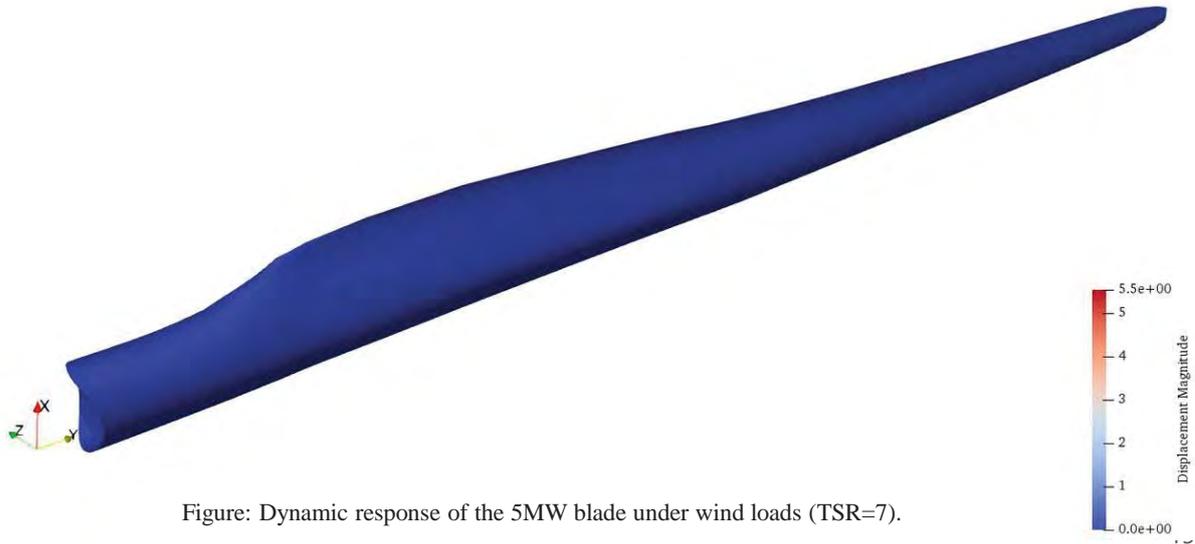
- ✓ 流体力の主たる周波数成分は6.0 Hz以下

14

## 解析結果

### ◇ 流体力下の構造応答(CASE 1)

- 翼根を固定、層状複合材料要素、直交異方性モデル、1回転
- 重力なし、遠心力なし



## 解析結果

### ◇ 疲労損傷分布 (CASE 1)

- 重力なし、遠心力なし

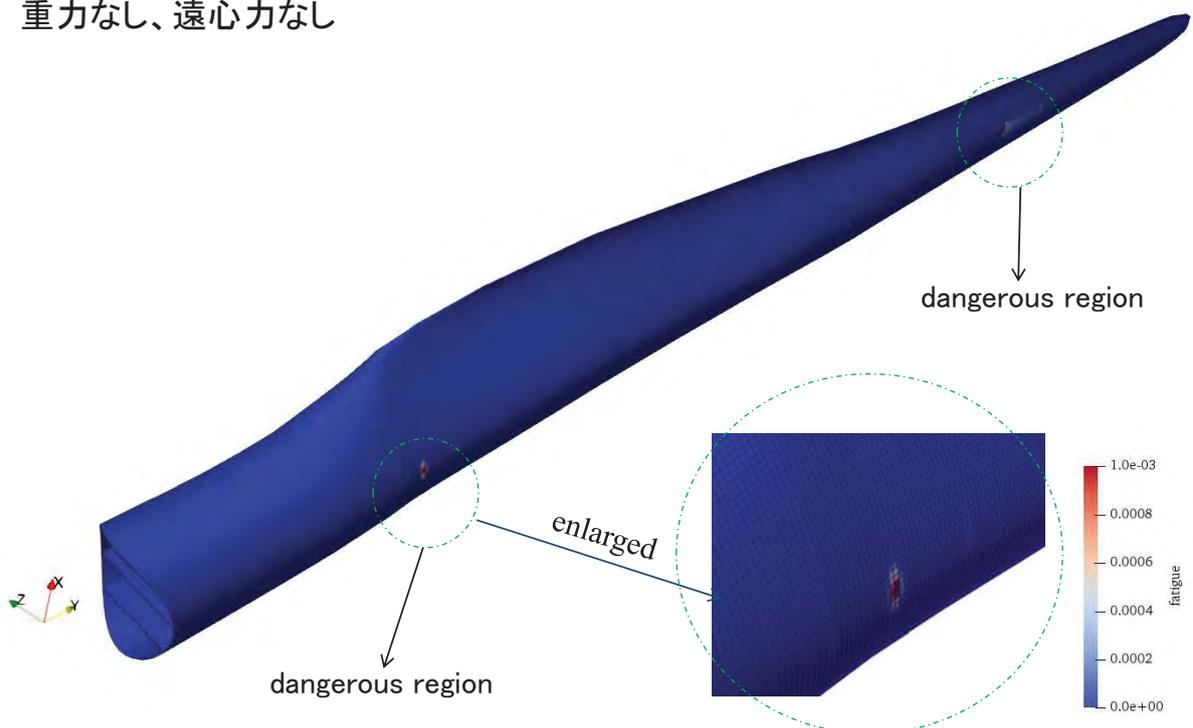
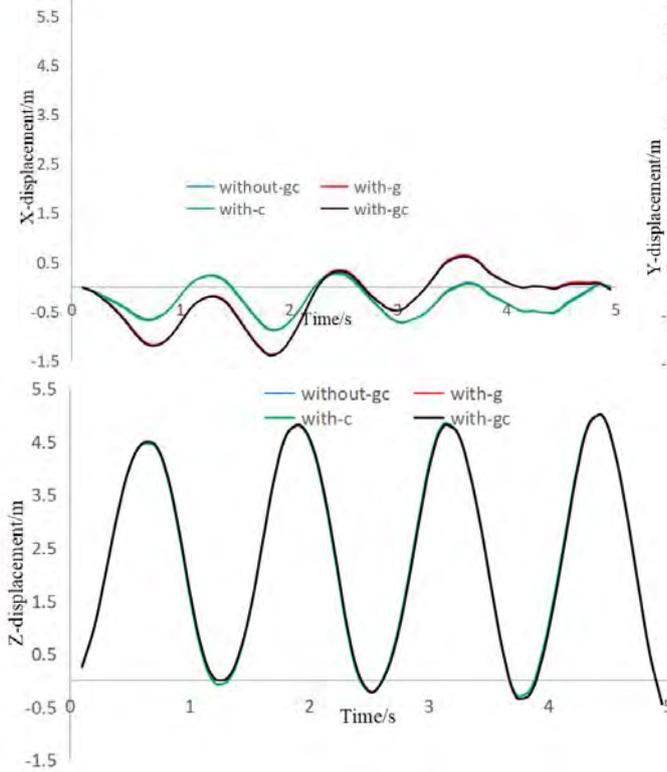


Figure: Fatigue damage distribution of the blade working for 20 years.

## 解析事例

### 翼先端の変位時刻歴の比較(CASEs 1-4)

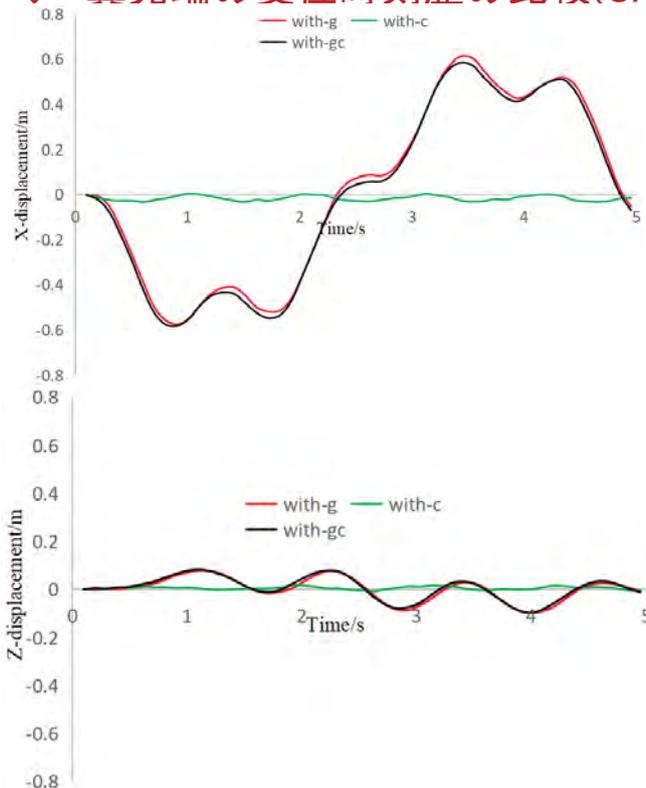


- ✓ 流体力を考慮した解析;
- ✓ 重力はx成分変位に影響するが、遠心力の影響はわずか

17

## 解析事例

### 翼先端の変位時刻歴の比較(CASEs 5-7)

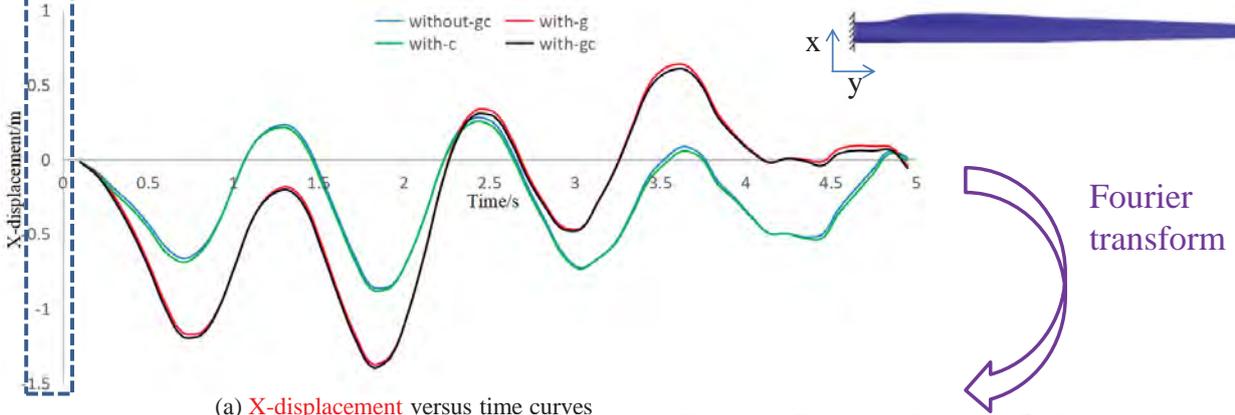


- ✓ 流体力を考慮しない解析;
- ✓ 前の結論と同じ.

18

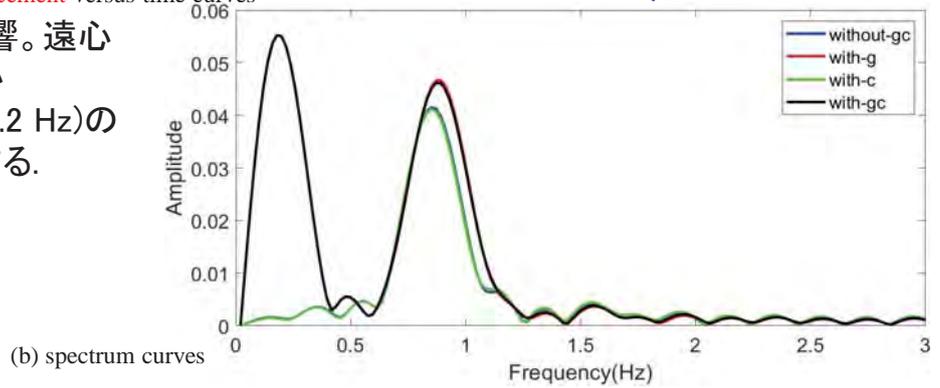
# 解析事例

## 翼先端の変位時刻歴の比較(CASEs 1-4)



(a) X-displacement versus time curves

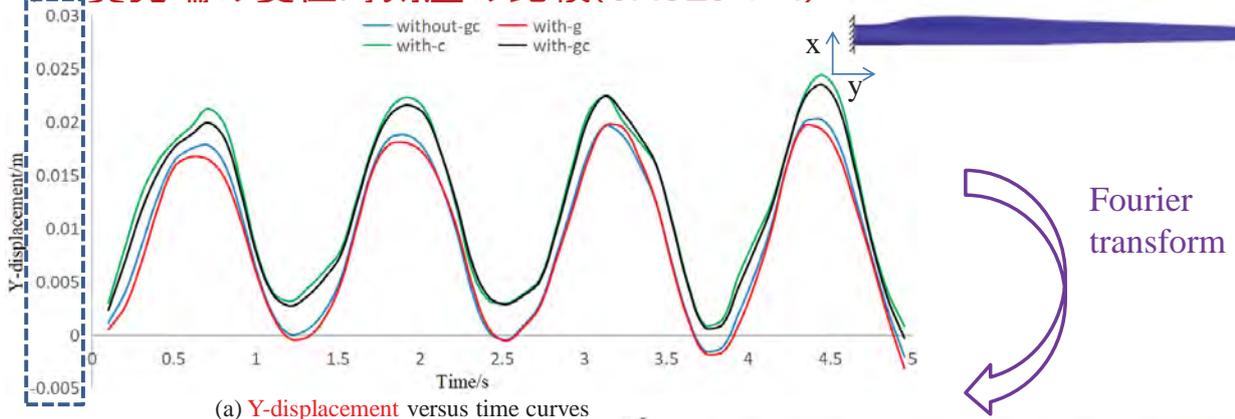
- ✓ 重力はx変位に影響。遠心力の影響はわずか
- ✓ 重力は低周波数(0.2 Hz)の変位変動に影響する。



(b) spectrum curves

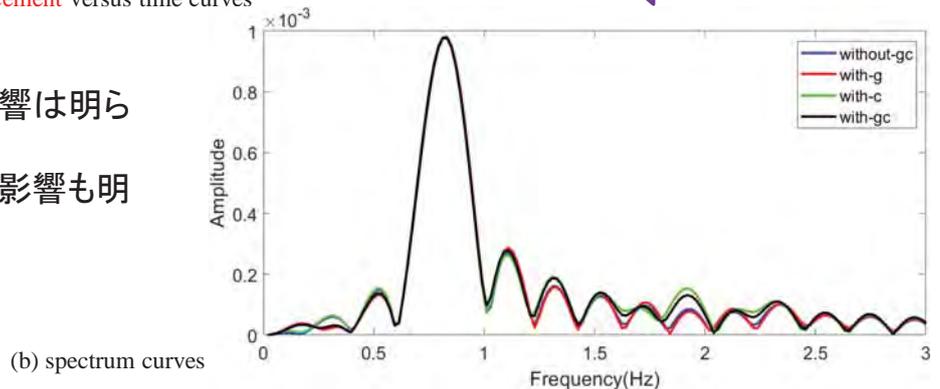
# 解析事例

## 翼先端の変位時刻歴の比較(CASEs 1-4)



(a) Y-displacement versus time curves

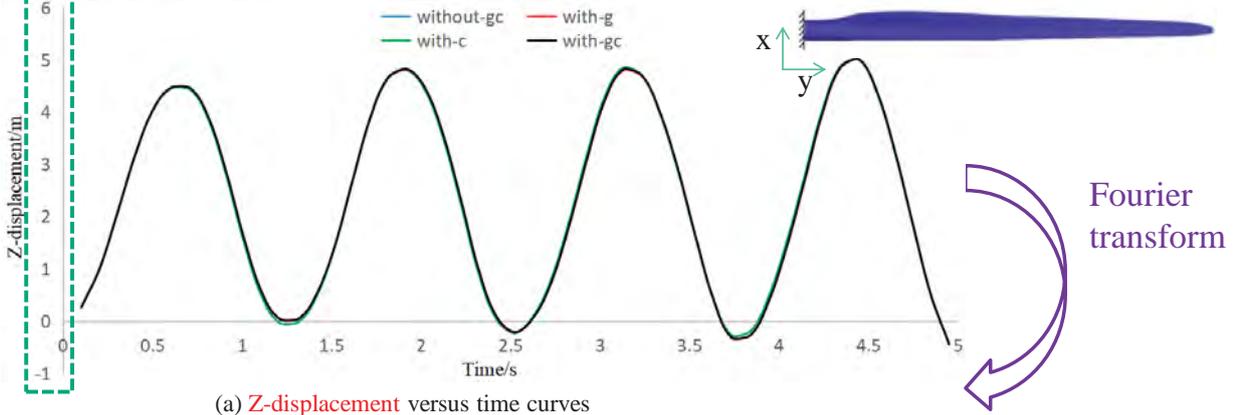
- ✓ 重力と遠心力の影響は明らかでない;
- ✓ 変位変動に対する影響も明らかでない



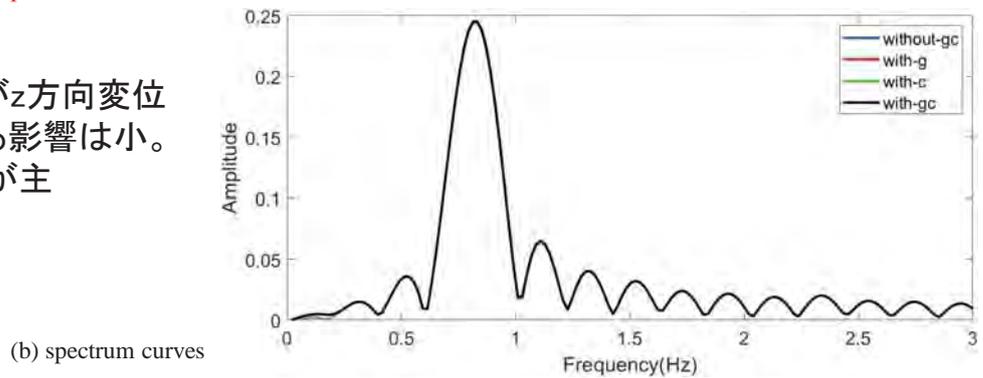
(b) spectrum curves

# 解析事例

## 翼先端の変位時刻歴の比較(CASEs 1-4)

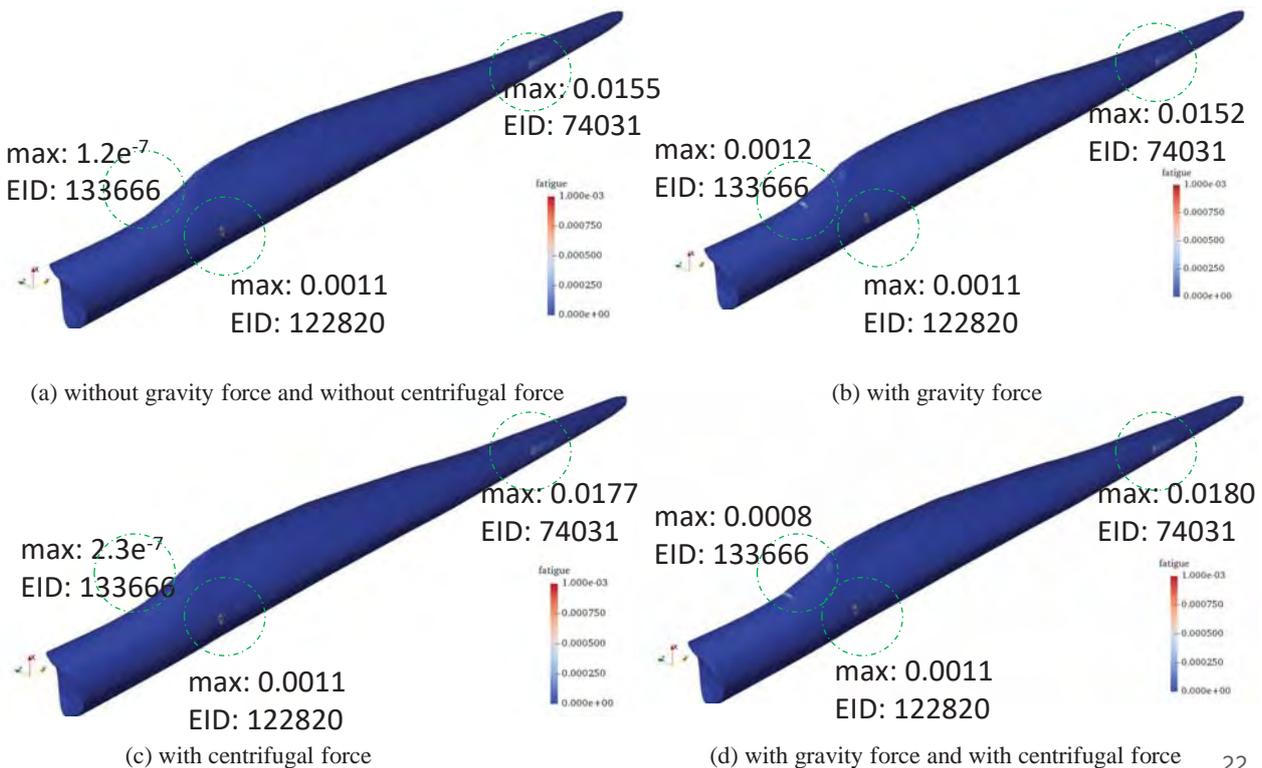


✓ 重力と遠心力がz方向変位や変動に与える影響は小。流体力の影響が主



# 解析事例

## 疲労損傷分布の比較(CASEs 1-4)



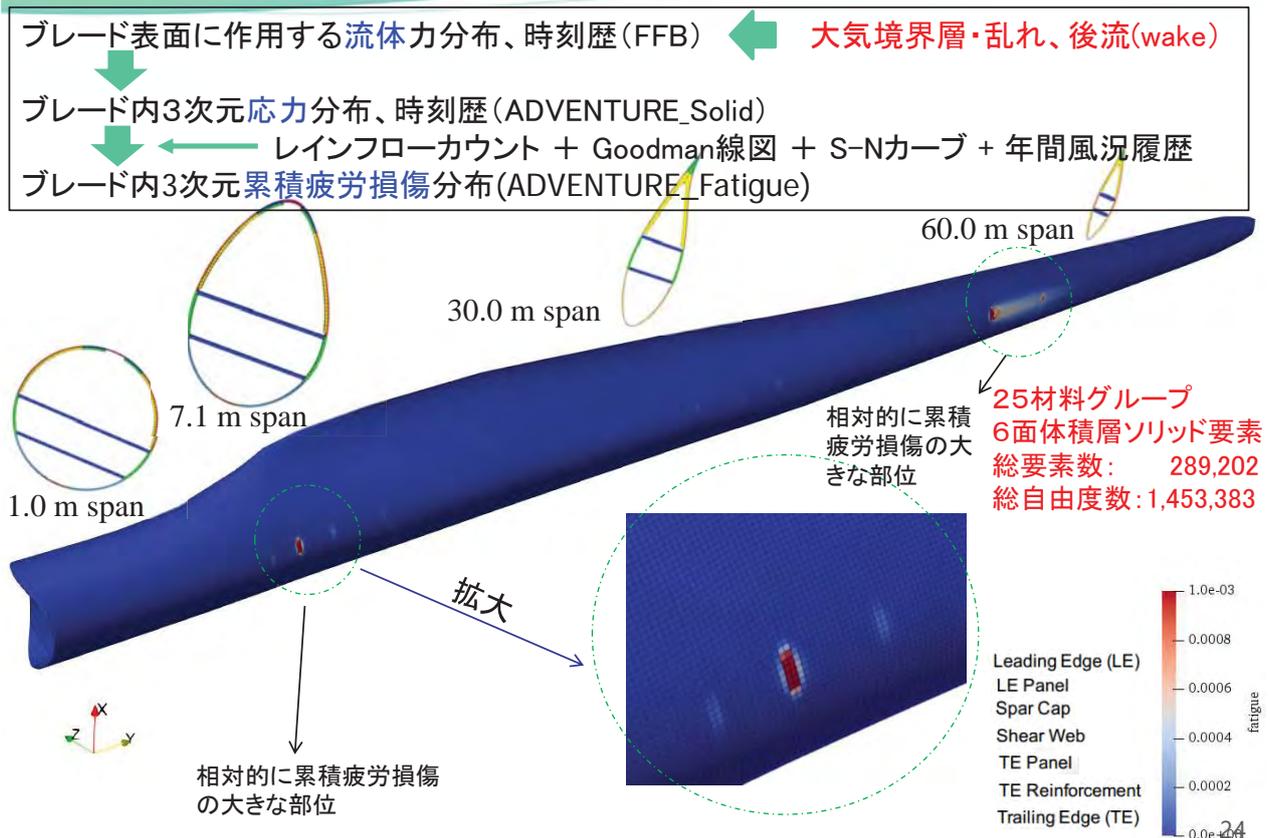
## 今後の計画

単機の解析を対象に、大気境界層の分布、大気の乱れが累積疲労損傷に与える影響を定量的に評価

タンデム解析を行い、後流の乱れが累積疲労損傷に与える累積疲労損傷に与える影響を定量的に評価

23

## NREL5MWブレードの累積疲労損傷評価例 (TSR=7, 20年間)



24