

NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025 プログラムNo.2-1

2024年度「NEDO先導研究プログラム／
エネルギー・環境新技術先導研究プログラム【エネ環】」

浮体式洋上風力発電のHPC*1とAI連携活用 型解析技術の基盤開発

発表：2025年7月17日

* 1 High Performance Computing

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

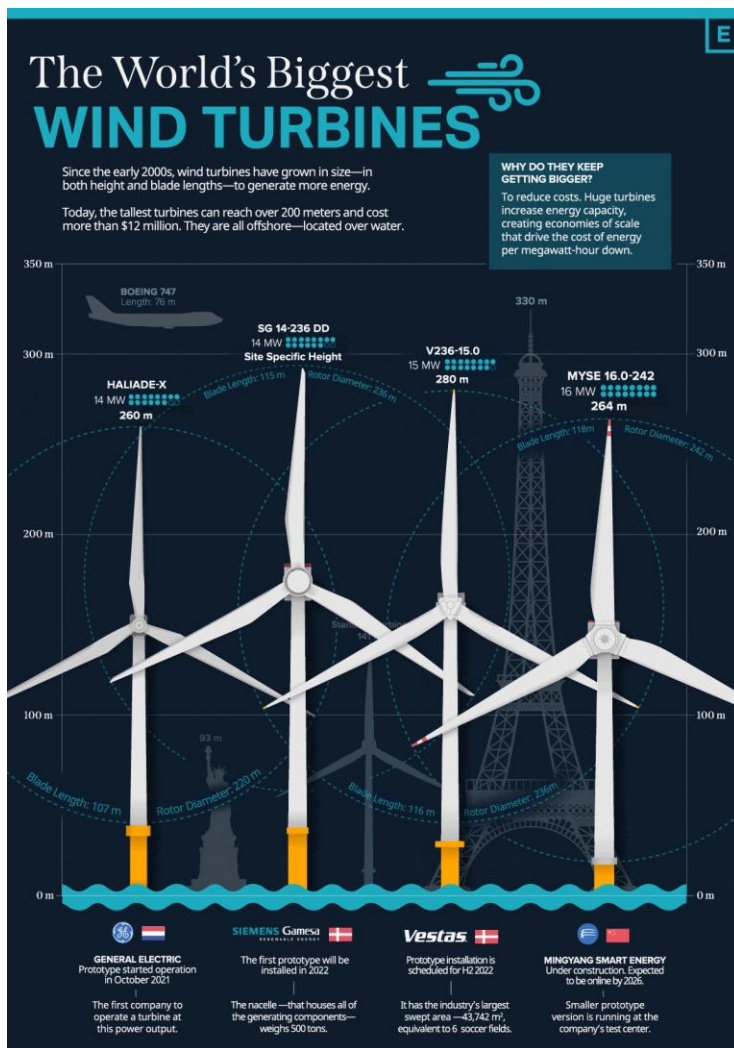
発表者名 吉村忍

団体名（企業・大学名など） （国）東京大学、（国）豊橋技術科学大学、（株）ウインドエナジーコンサルティング、東芝エネルギーシステムズ（株）、電源開発（株）、（一財）日本海事協会

問い合わせ先 （国）東京大学 E-mail: syoshi@edu.k.u-tokyo.ac.jp, TEL: 04-7136-3876

1. 背景&目的(1/3)

- 発電効率向上・コスト低減のため、超大型化する洋上風車
- 欧州と比べて厳しい自然環境条件



欧州と日本・アジアの自然環境(設計条件等)の違い

項目	欧州	日本
地形(陸上)	平坦	複雑
水深(洋上)	遠浅 (北海、離岸距離50kmで50m)	急峻 (離岸距離30kmで200m)
年平均風速	高 IECクラスI相当 (年平均風速10m/s)	低～中 IECクラスII～III相当 (年平均風速7.5～8.5m/s)
極値風速	IECクラスI(低気圧起因) (50年再現10分平均風速50m/s)	IECクラスT(台風起因) (50年再現10分平均風速57m/s)
乱流強度	IEC カテゴリB～C (低・中乱流Iref=0.12～0.14)	IEC カテゴリA+ (高乱流Iref=0.18)
地震	500年再現	地震レベル高 レベルI地震動: 160gal レベルII地震動: 320gal
落雷	LPLI(300C)	LPLIを超える電化量の大きな雷 (600C)
地盤(海底)	砂(北海)	砂、泥、岩

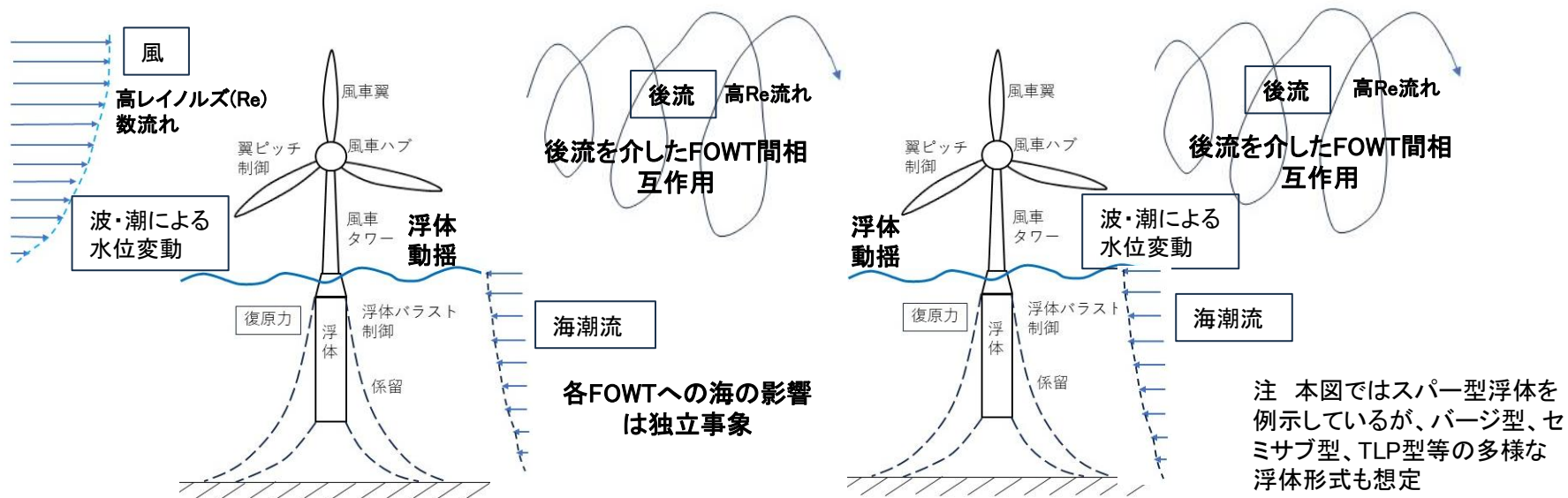
Boeing777-200 最大離陸重量**247ton**、全長63.7m、全幅60.9m

回転数 約12 rpm(**1回転/5秒**)、約**10⁸回転/20年**

5MWブレード3枚 重量 **51ton**、直径**123m**
15MWブレード3枚 重量**195ton**、長さ**234m**

1. 背景 & 目的(2/3)

浮体式洋上ウィンドファーム(FOWF)の実スケール実環境
＝ 多種多様な現象が関連するマルチスケール非線形連成現象



本研究開発の概要:

厳しい気象海象環境下で運用される浮体式洋上風力発電システムの発電性能, 後流影響, 流体構造連成応答, 風車浮体係留連成応答, 疲労損傷等の解析・評価技術を高精度・高効率化し, 浮体式洋上風力発電システムの設計合理化に資するために, 「富岳」等を活用したHPC とAI 連携手法に基づき, 浮体式洋上風力発電システムの実スケールバーチャル実証試験環境の構築に向けた基盤技術を開発し, 適用例を示す。

1. 背景 & 目的(3/3)

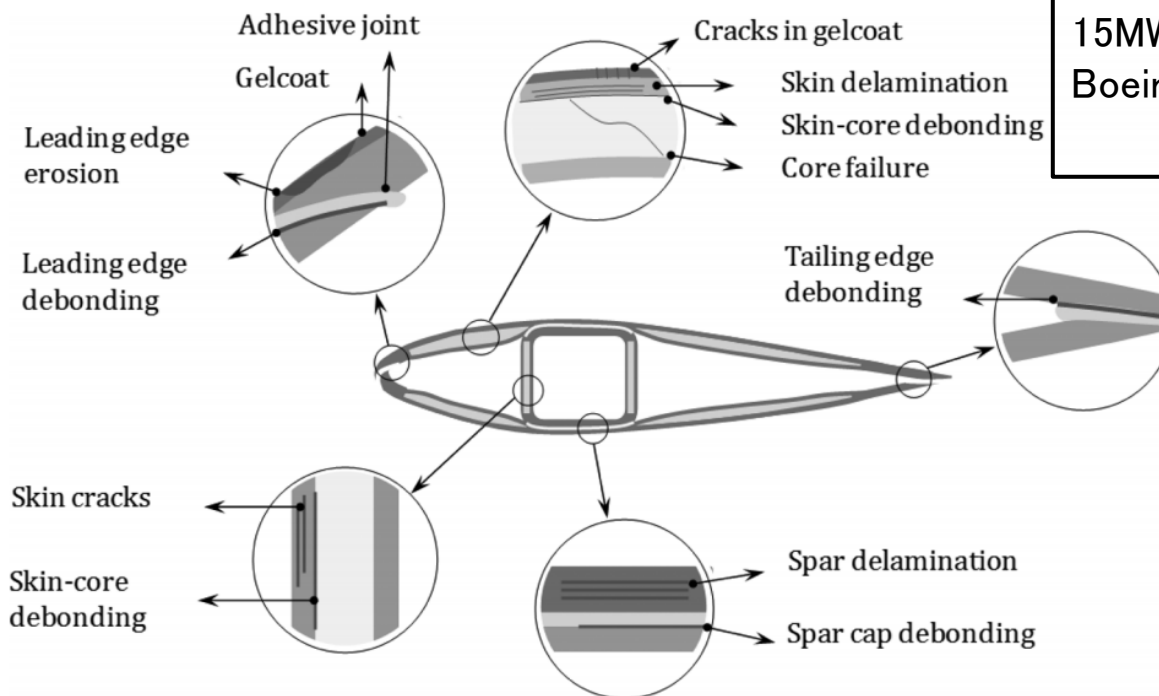
- 通常風力(大気変動、乱流、シェア、後流)、暴風、台風 → **日本近海の風況の特徴: 低い平均風速 & 強い乱流強度、時折訪れる暴風・台風**
- 損傷メカニズム

- ✓ **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

5MWブレード3枚 重量**51ton**、直径123m
15MWブレード3枚 重量**195ton**、直径234m
Boeing777-200 最大務燃料重量**191ton**、
全長63.7m、全幅60.9m



URL:

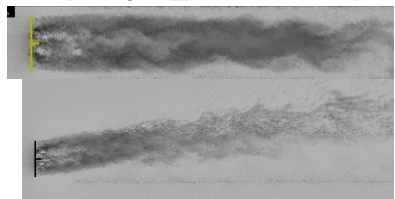
<https://blackburnnews.com/sarnia/sarnia-news/2015/08/03/storms-reportedly-damage-wind-turbine/#!prettyPhoto>.

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.

2. 開発目標・研究開発戦略

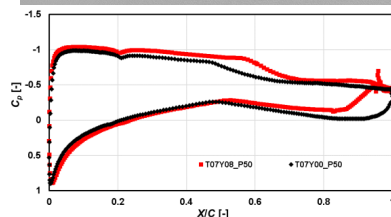
解析コード① (HPC／富岳)

HPC解析コード群 (FFB／FFX, ADVENTURE, REVOCAP on 富岳) によるFOWT／FOWFの実スケール解析
・・・ 世界で最も高精度・高信頼度の解析結果を生み出す (世界最先端)



ヨー角0と8° の
LES乱流解析

累積疲労
損傷解析



ヨー角0 (黒) と8° (赤) の翼端近傍
の翼弦周りのCp分布

TSR	YAW [°]	出力 係数	最大相当 応力 [Mpa]	年間累積疲 労損傷度
7	0	0.45	147.4	0.0582
7	2	0.47	115.7	0.0009
7	4	0.42	120.7	0.0043
7	6	0.42	133.7	0.0108
7	8	0.41	109.0	0.0025

ヨー角を変えた時の出力係数と最大
相当応力、年間累積疲労損傷の解析例

高精度低計算量サロゲートモデル構築のチャレンジ

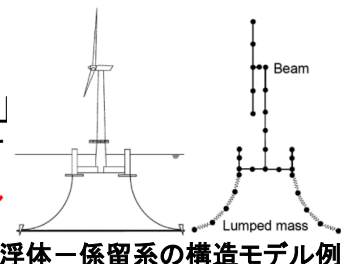
・・・ 高Re空力ー風車ブレードの非定常非線形連成現象に焦点を絞り、上記で得られるHPC解析結果をAI／POD-ROM技術により縮約し、高精度低計算量サロゲートモデルを構築

このチャレンジの成功を受けて、今後、FOWT／FOWFの他のパーツの
高精度低計算量サロゲートモデル構築へ展開する道が拓かれる。

解析コード② (既存連成解析)

UTWind, Bladed等

・・・ FOWT単機に関わる様々な力学現象 (空力ー風車ー浮体ー波・潮流ー係留ー制御) の連成をほぼ網羅。ただし、すべての現象は簡易工学モデルで近似



風車ー浮体ー係留系の構造モデル例

コード構造, 連成アルゴリズム, 解法を分析

連成解析の収束性向上, Δt 増加, 解法高速化, サロゲートモデルとの連携等に関して、改良戦略の構築

今後、この改良戦略に基づき、様々な既存の連成解析コードの改良が可能となる。

動揺

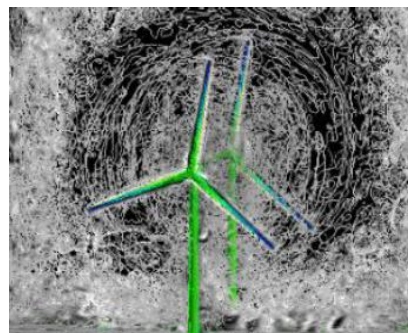
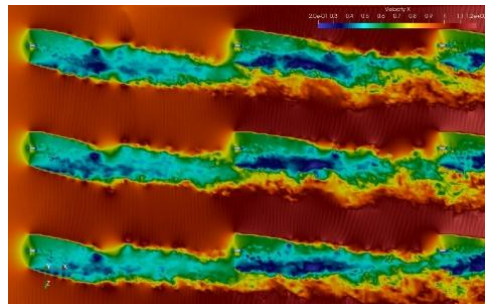
荷重

連携

3. 実施内容(1/4)

洋上ウィンドファームの発電性能, 構造信頼性の同時評価

FFBのLES乱流解析による詳細計算結果を用いたパラメータチューニングによるActuator Line Modelの高精度化



FFX:

- ・FOWF全体の格子ボルツマン法に基づくLES乱流解析
- ・各サイトの風車配置や浮体動揺に応じた発電性能評価, 流体力評価
- ・Actuator Line Model (BEM理論)
- ・**数十億要素**
- ・モデル構築, 解析条件変更が容易

FFB:

- ・タンデム配置される大型風車周りの流れ場の高忠実風車モデルによるFEMに基づく詳細LES解析
- ・**数億要素**

FFBのLES乱流解析による詳細計算結果を用いた高精度工学後流モデル構築

REVOCAP_Coupler:

- ・並列カプラー



片方向連成

風車ブレード等に作用する流体力(空間分布・時間変化)



ADVENTURE_Solid3, _Fatigue:

- ・**数10万積層ソリッド要素**による大型ブレードの動的構造応答, 累積疲労損傷解析
- ・FOWT主要構造機器の動的応答, 累積疲労損傷解析

3. 実施内容(2/4)

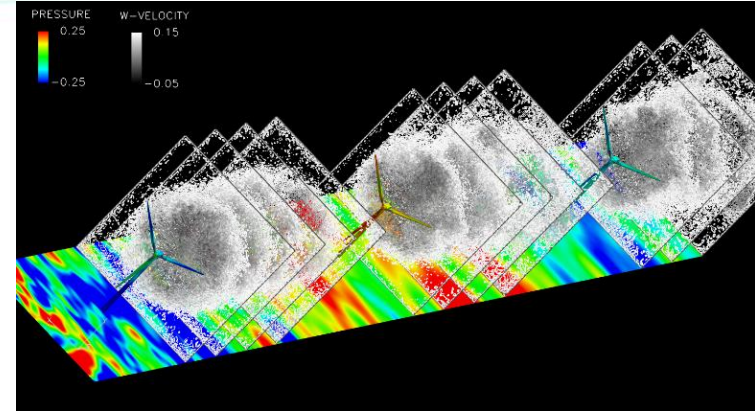
FFBとFFXを活用したFOWFの乱流場及び発電性能、
流体力の高精度高効率評価に関する技術開発

LES × 高忠実風車 (回転) × HPC(富岳)

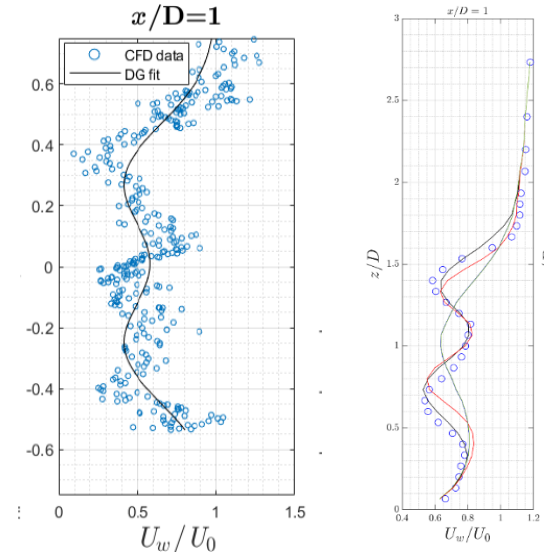
様々なヨー角, 風車の動揺(傾き, 垂直変動), 前後風車の
回転軸のずれ(フル/パースシャルウェイク)や回転速度を変
更した解析を自由自在に行えるようにFFBコード改良

(数億~10億要素 × 数100万ステップ) 20~30ケース

Cp, Ct, ユニット発電性能, ウェイク特性, 流体力



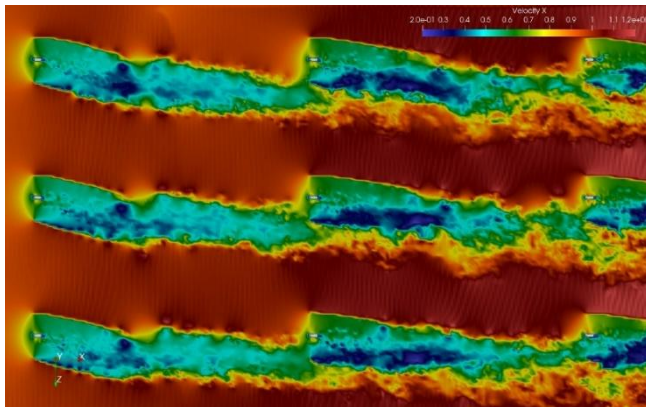
5MW風車3台のタンデム配置のFFB解析例



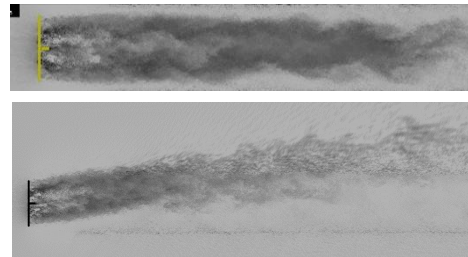
水平方向

垂直方向

FFB結果(○)とウェイク分布モデル(実線)



ヨー角20° 流入風, 5MW風車9台(回転無)のFFX解析例



ヨー角0と8° のFFBによるLES乱流解析

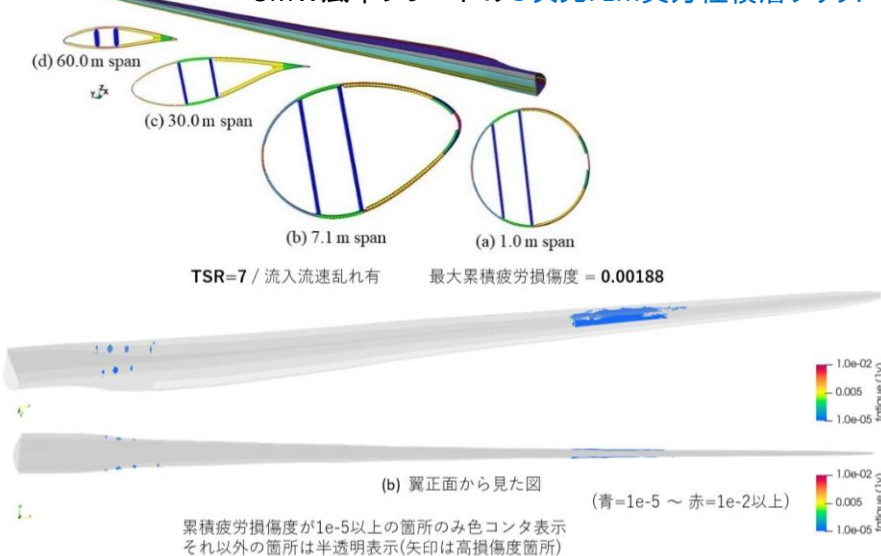
3. 実施内容(3/4)

ADVENTURE, REVOCAPを活用したFOWTの主要構造機器の構造健全性と疲労損傷の高精度評価法の開発

流体構造連成・損傷 × 高忠実FOWT × HPC(富岳)
[100万自由度×数千ステップ 60~80ケース]
NREL5MW, 15MW風車ブレード, ドライブトレイン,
タワー, 浮体のジェネリックモデル

ユニット構造健全性／ユニット年間累積疲労損傷
(構造的弱点部材の抽出)

5MW風車ブレードの3次元FEM異方性積層ソリッドモデル



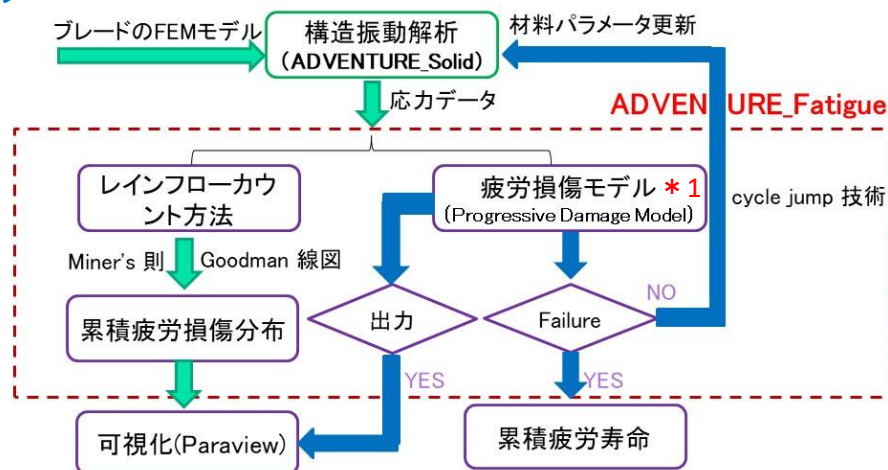
TSR=7、乱流強度10%の一樣乱流に対する年間累積疲労損傷分布解析例

Jiang, Y.Y., Yoshimura, S., Kato, C. et al., *Journal of Fluid & Structures* **23**, 531-544 (2007)

Yoshimura, S. et al., *Trans. Atomic Energy Society of Japan* **18**(3), 135-190 (2019)

Chen, S., Yoshimura, S. et al., *Journal of Wing Engineering & Industrial Aerodynamics*, in Submitting

*1 PDM(Progressive Damage Model)を用いた疲労解析では, 疲労損傷の進行に伴い局所的な剛性が変化し, それが構造応答に影響を与え, ひいては疲労損傷に影響を与える効果を定量的に評価



3. 実施内容(4/4)

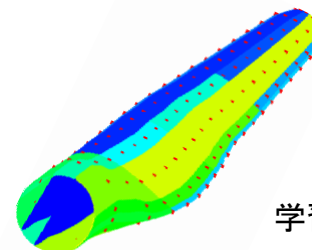
FOWT主要構造機器の構造応答と疲労損傷に関する高精度低計算量サロゲートモデルの構築

FFB→REVOCAP→ADVENTUREを用いて得られるNREL5MW風車ブレードの流体構造連成応答のHPC解析結果を分析・縮約し、構造健全性と疲労損傷に関するサロゲートモデル*1を構築(AI/POD-ROM*2)

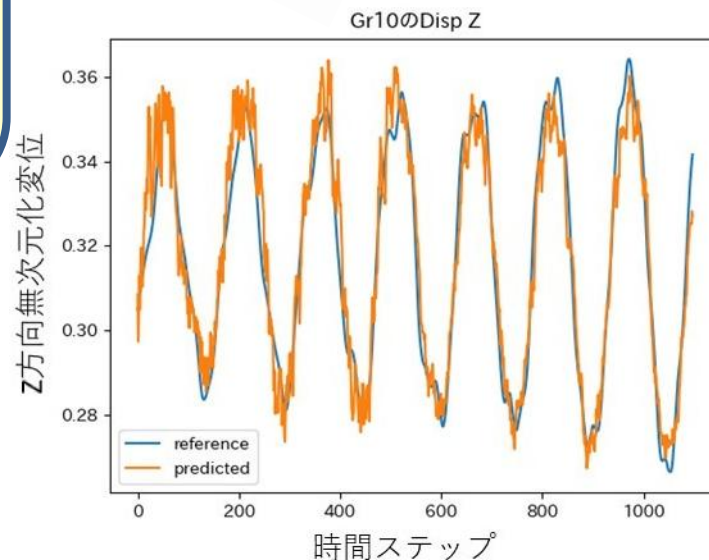


* POD: Proper Orthogonal Decomposition
ROM: Reduced Order Modeling

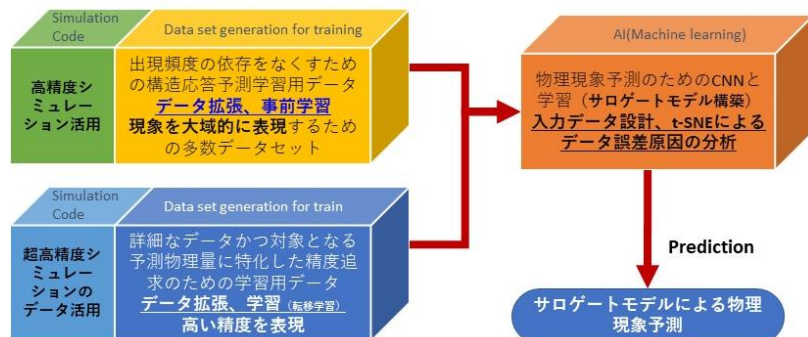
サロゲートモデル用数理モデル構築、HPC結果の再現性・未学習データの予測精度・計算時間等を評価



学習・推定に用いる節点群



TSR=7の場合のNREL5MW風車ブレード長手方向中間位置でのz方向変位のHPC解析結果とAIによる予測結果の比較の例



HPCとAI連携のサロゲートモデル構築イメージ

*1 従来の簡易工学モデルは、ある力学的仮定に基づき設定された理論式の係数パラメータ等を、経験的あるいは実験室規模の実験結果から設定した低計算量モデル

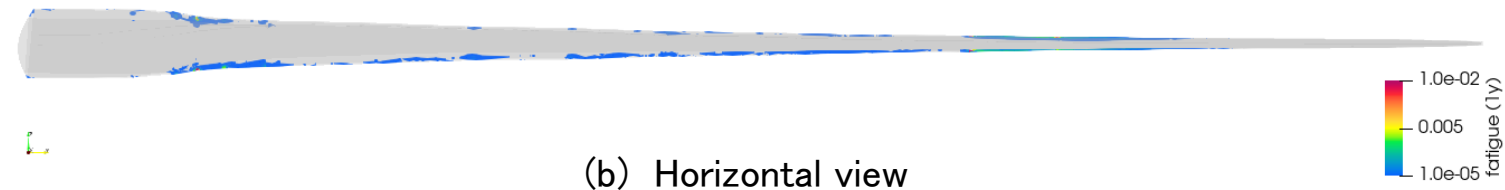
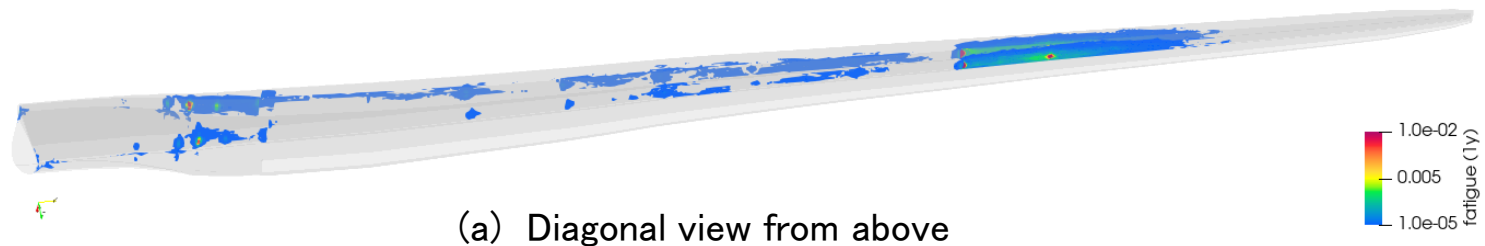
本先導研究で提案するサロゲートモデルは、多数の実スケールのHPC解析結果を再現できるようにAI等を活用してモデルパラメータをチューニングしたものであり、低計算量であるが、高精度なモデル

4. 実施内容 & 研究成果(進捗概要)(1/2)

NREL5MWブレードの年間累積疲労損傷の解析事例

入力風: TSR=6 / 乱流強度10%
年間累積疲労損傷の最大値 = 0.158

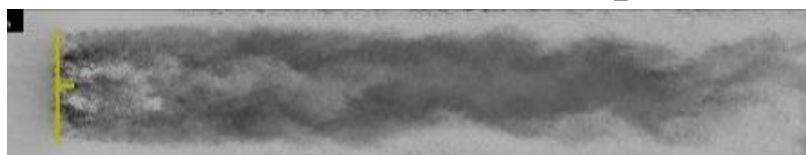
TSR (Tip Speed Ratio) =
Peripheral velocity / Inlet wind velocity



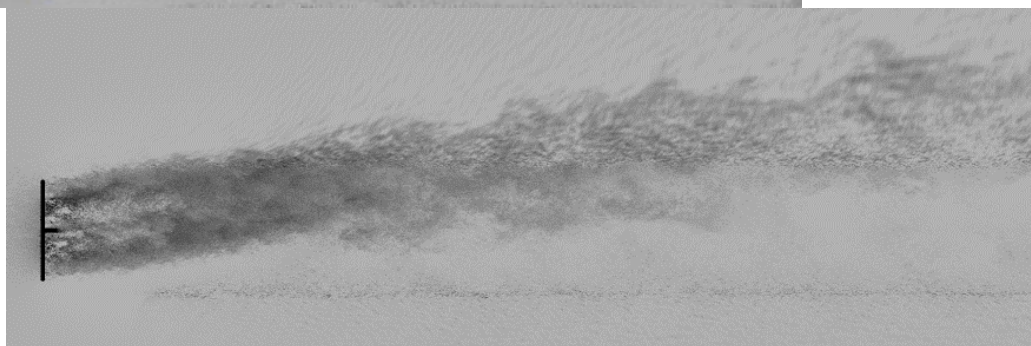
ここでは、年間累積疲労損傷値が 1×10^{-5} 以上の部分のみをカラーで可視化し、他は半透明表示としている。

4. 実施内容 & 研究成果 (進捗概要) (2/2)

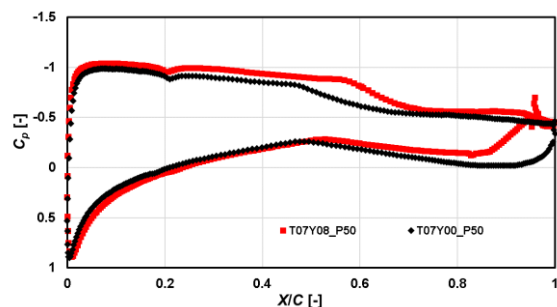
NREL5MWブレードの年間累積疲労損傷 (入力風: TSR = 7 / 乱流なし)



ヨー角 0°



ヨー角 8°



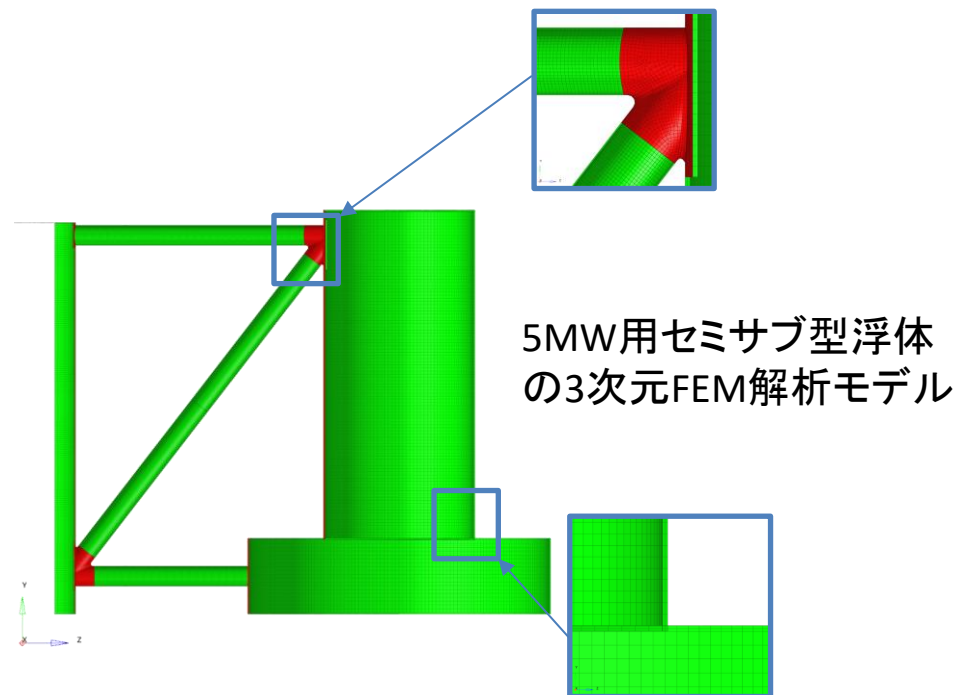
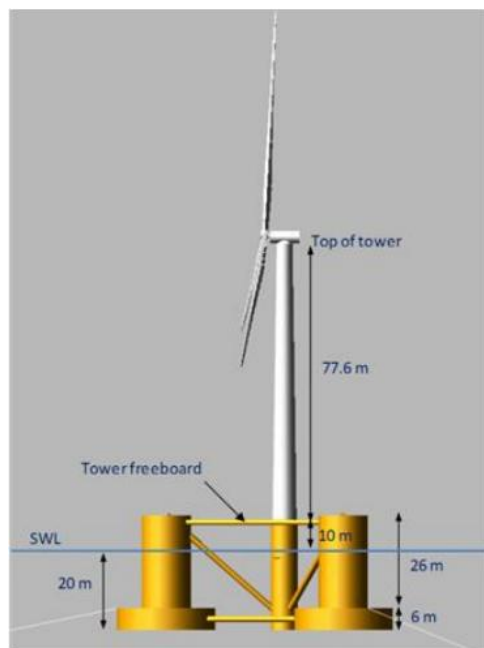
2つの異なるヨー角に対する翼周りのCp値
(ヨー角 0° (黒) & 8° (赤))

TSR	YAW [°]	Cp	Max. Stress [MPa]	Max. Annual Fatigue Damage
7	0	0.45	147.4	0.0582
7	2	0.47	115.7	0.0009
7	4	0.42	120.7	0.0043
7	6	0.42	133.7	0.0108
7	8	0.41	109.0	0.0025

5. 今後の技術課題とまとめ

5MWのFOWTに対して、通常運転条件DLC1.2と暴風条件DLC6.1の元で、本HPCとAI連携解析技術と、UTWind、Bladed等の既存連携解析技術との比較検討を通して、本解析技術の検証を進めるとともに、本HPC解析ならではの特徴的な結果を得る。

5MWのFOWT／FOWFを対象として、HPCとAI連携解析の準備が整った。本研究開発を通して、洋上風力発電事業の工学共通基盤となるHPC解析ツールや解析DBを構築し、着実な低コスト化に結び付ける。



5MWの風車浮体一体型3次元構造解析モデル