

日本機械学会計算力学部門
設計と運用に活かすデータ同化研究会 2022年3月22日

物理モデルとデータ同化を用いた 風力発電装置の挙動モニタリング

関連論文

[N. Namura et al., *AIAA Journal*, 59\(12\), 5130-5140, 2021.](#)
[K. Muto et al., 8th ICRERA, Brasov, Romania, 2019.](#)

苗村 伸夫

(株)日立製作所 研究開発グループ
信頼性科学研究部



苗村 伸夫
なむら のぶお

2016.3 東北大学 工学研究科 航空宇宙工学専攻 博士課程修了

- 航空機用ボルテックスジェネレータの設計最適化
 - 数値流体力学
 - ベイズ最適化、多目的最適化、進化計算

2016.4 株式会社 日立製作所 研究開発グループ

- 風力発電装置のモニタリング技術開発
 - データ同化、1D-CAE、空力弾性、疲労破壊
- 風力発電装置の概念設計・最適化
- 医用機器のモニタリング技術開発
- オンライン発想支援システムの開発

1. 研究背景

- ・ 風力発電のコストと保守効率化
- ・ 研究目的

2. 風車ブレードのモニタリング手法

- ・ モニタリング対象の風車
- ・ 物理モデル：風速分布、外力、動的応答
- ・ データ同化：カルマンフィルタ
- ・ 疲労評価

3. 実風車データを用いた検証試験

- ・ 挙動モニタリング
- ・ 疲労モニタリング

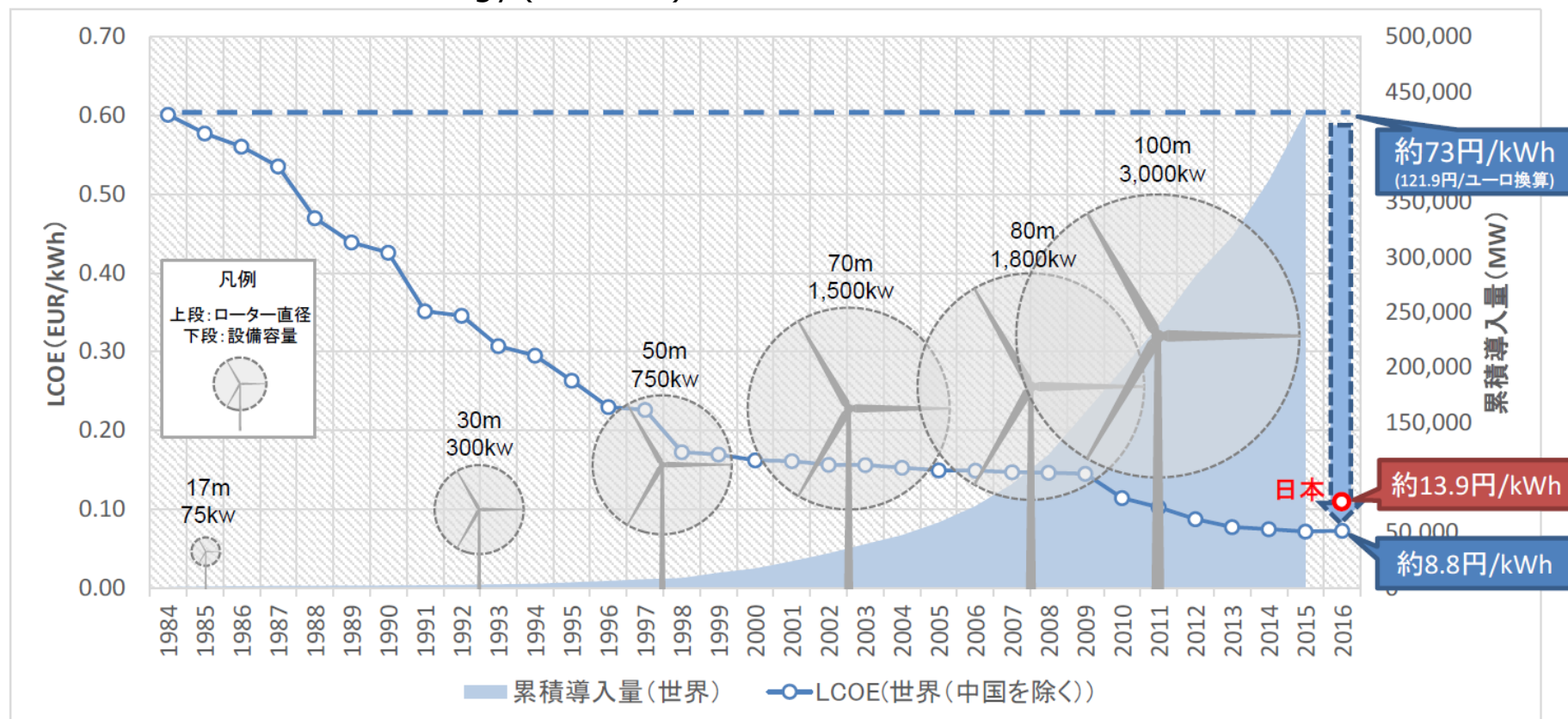
4. まとめ

5. 謝辞

風力発電のコスト

- 世界の風力発電コストは、8.8円/kWhまで低下（火力、原子力と同等以下）
- 欧州では風力が電力生産の20%程度となる国が複数存在（ドイツ、スペイン、英国等）
- コスト低減には、風車の大型化と保守効率化が寄与

LCoE: Levelized cost of energy (発電コスト)



モニタリングによる保守効率化

種々のセンサを用いて風車の運転状態をモニタリングすることで、状態基準保全や寿命延長による発電コスト低減が可能

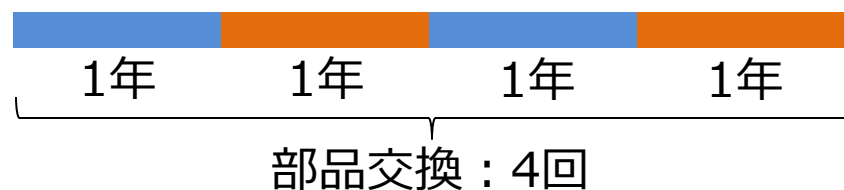
状態基準保全：Condition-based maintenance (CBM)

- 風車の運転状態や荷重に基づいて保守間隔を適性化することで、時間基準保全よりも保守頻度を低減

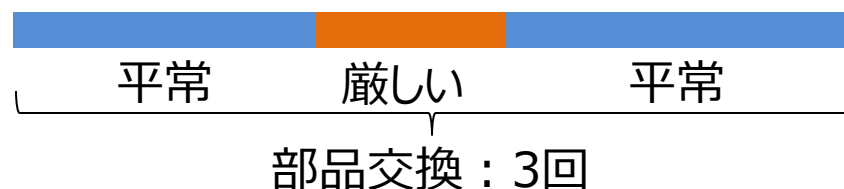
寿命延長

- 風車建設地の実風況(風速頻度分布)が設計条件よりも緩やかな場合、風車の運転寿命(通常20年)を延長できる場合がある

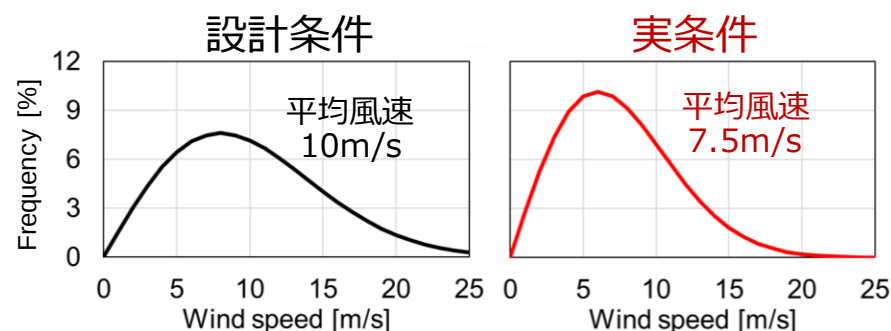
時間基準保全



状態基準保全



時間経過 →



20年

25年

寿命延長

直接計測

ひずみセンサまたは加速度センサ

- 精度：高
- 費用：高（計測位置の数に依存）
- 評価位置：少数（翼根での計測が多い）

シミュレーション

物理モデル、回帰モデル

- 精度：低（入力データに依存）
- 費用：低
- 評価位置：任意（翼全体を評価可能）

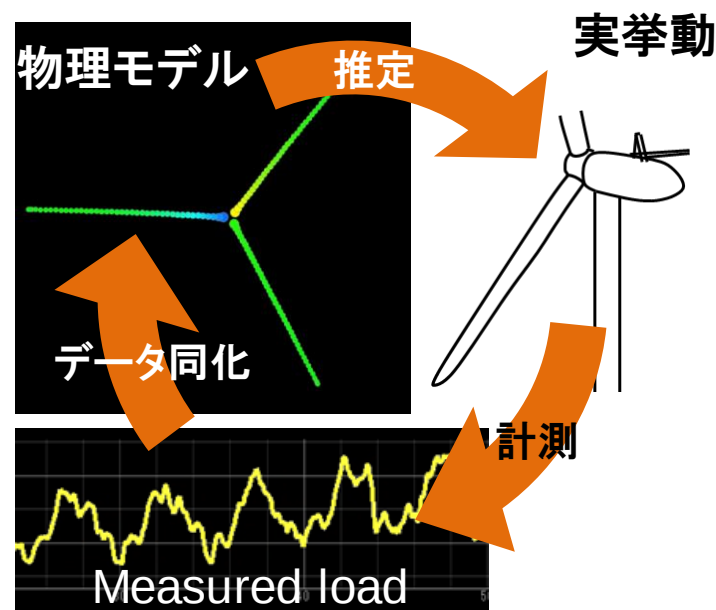
その他

例：カメラ、レーザ、音響などの非接触計測

- 継続的な挙動計測は研究段階

データ同化

- 精度：高
- 費用：中
- 評価位置：任意



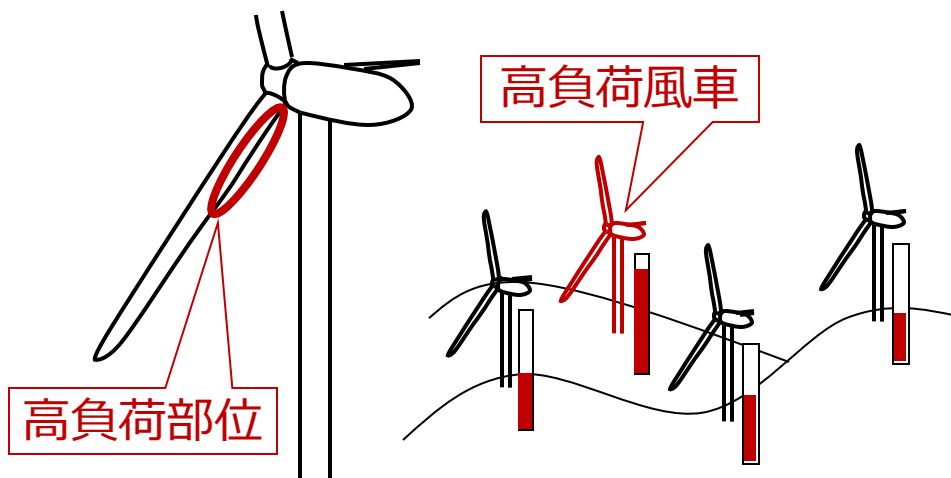
風車の保守効率化のため、ブレード挙動のモニタリングにより、下記を実現する。

- 風力発電所内の高負荷な風車や部位を特定し、優先的に保守するCBM
- 構造部材の疲労評価に基づく寿命延長
- 台風などによる高負荷発生後の運転再開判断

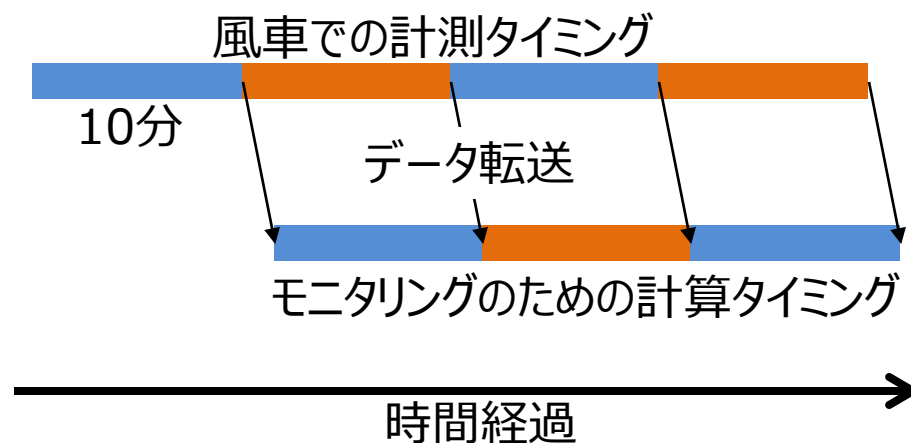
課題

- 風車間の荷重の違いを把握できる程度の精度が必要
- 最小限の計算資源で、実時間以内でのシミュレーション、データ同化、疲労評価が必要

CBMによる高負荷風車、部位の特定



実時間シミュレーションでの常時モニタリング



1. 研究背景

- 風力発電のコストと保守効率化
- 研究目的

2. 風車ブレードのモニタリング手法

- モニタリング対象の風車
- 物理モデル：風速分布、外力、動的応答
- データ同化：カルマンフィルタ
- 疲労評価

3. 実風車データを用いた検証試験

- 挙動モニタリング
- 疲労モニタリング

4. まとめ

5. 謝辞

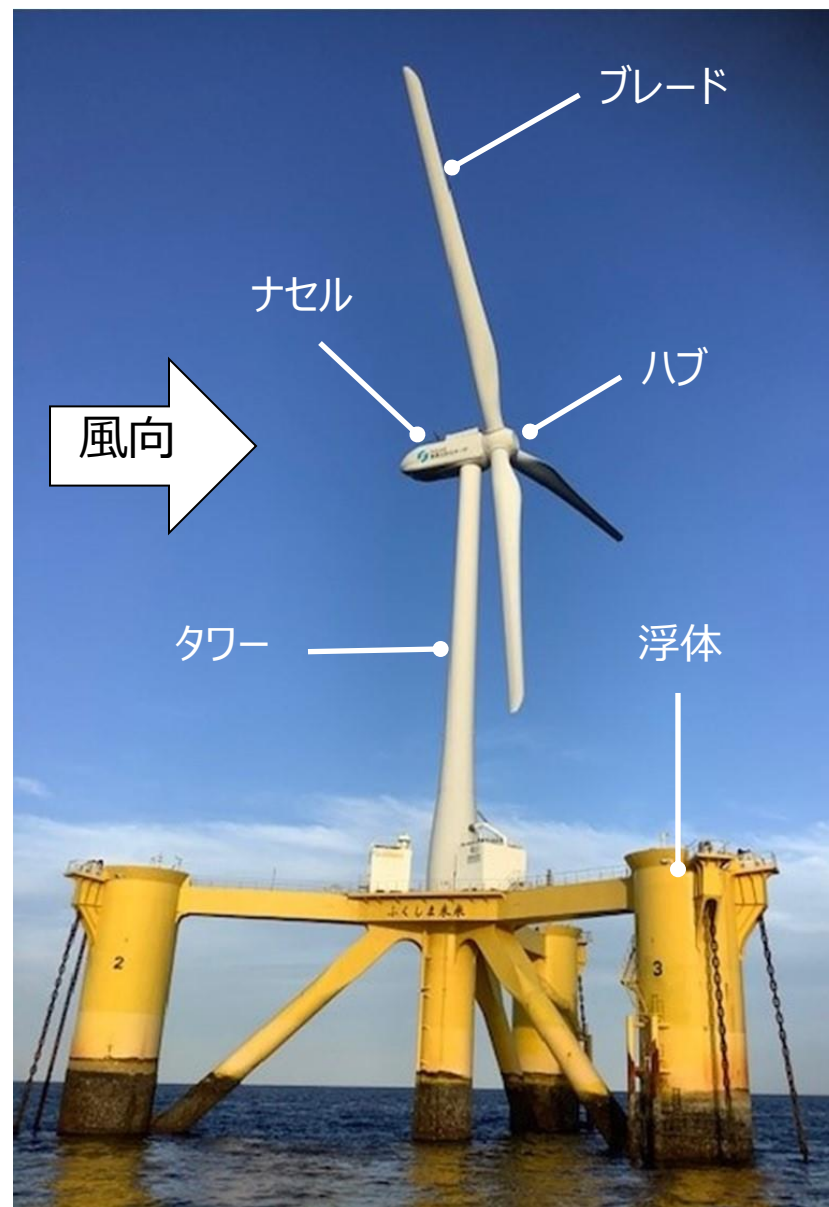
モニタリング対象の風車

福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業の
2MW風車

- ・ ダウンウィンド型 : ブレードがタワー後流を通過
- ・ 浮体式 : タワーが風下方向に傾斜

対象風車の諸元

Parameter	Value	Unit
Rated power	2	[MW]
Rotor diameter	80	[m]
Hub height	66.2	[m]
Tilt angle	-8	[deg]
Cone angle	5	[deg]
Rated rotational speed	17.5	[min ⁻¹]
Rated wind speed	13	[m/s]
Cut-in wind speed	4	[m/s]
Cut-out wind speed	25	[m/s]

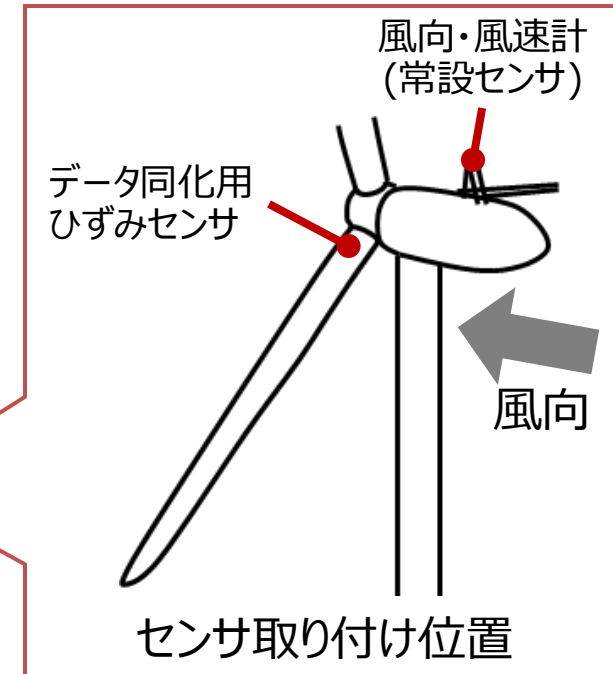
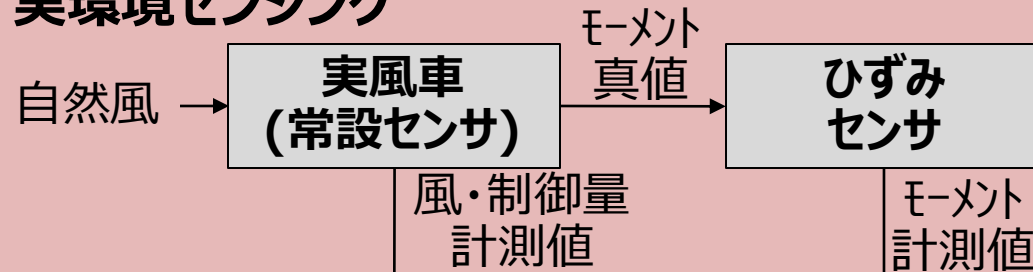


モニタリングシステムの全体構成

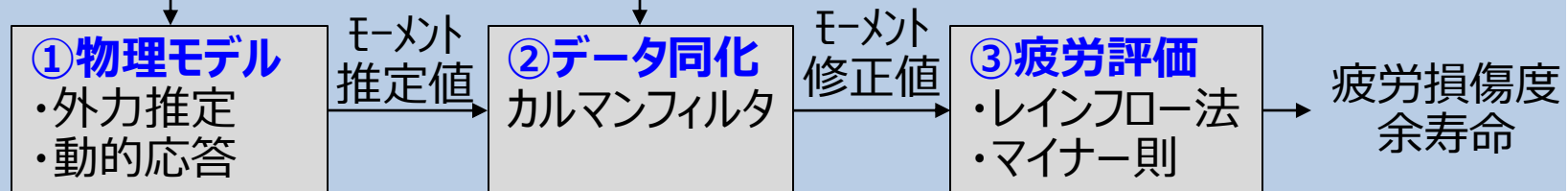
- 常設センサ(SCADA)のデータから曲げモーメントを推定し、ひずみセンサのデータで修正
- 10分間の時系列データを10分以内に評価

開発項目	要件
①物理モデル	計算高速化
②データ同化技術	高精度化
③疲労評価	部位別診断

実環境センシング



モニタリングシステム



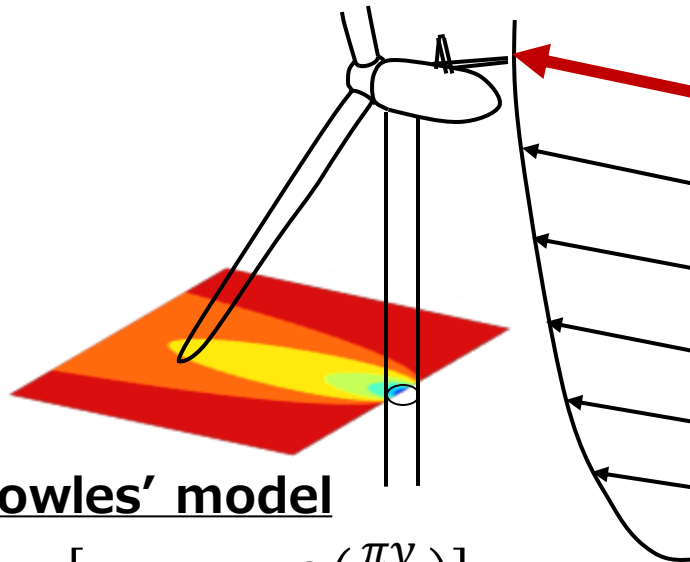
ブレード余寿命評価技術の全体構成

ウィンドシア

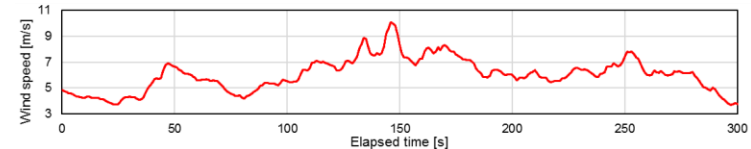
- 高さ方向の風速分布は、風車上部の風速計とべき乗則でモデル化

タワーシャドウ

- Powles' model に基づきタワー後流での風速現象をモデル化



風速計 $V(z_{ref}, t)$



ウィンドシア：べき乗則

$$V(z, t) = V(z_{ref}, t) \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha$$

z : 高度

z_{ref} : 風速計の高度

t : 時間

$\alpha (= 0.14)$: べき指数(パラメータ)

タワーシャドウ：Powles' model

$$V(x, y, z, t) = V(z, t) \left[1 - e \cdot \cos^2 \left(\frac{\pi y}{Wd} \right) \right]$$

$$e = e_{ref} \left(\frac{x}{x_{ref}} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad W = W_{ref} \left(\frac{x}{x_{ref}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad x_{ref} = [x/d]_{ref} \cdot d(z)$$

空気力

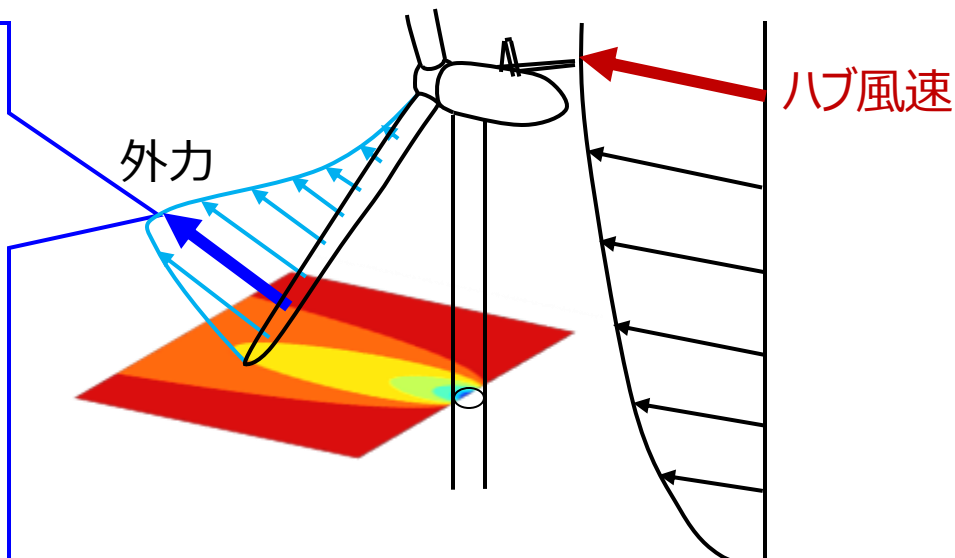
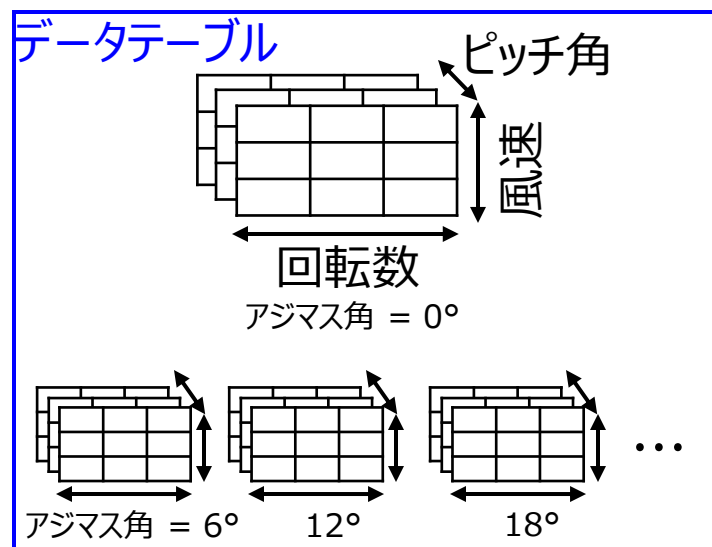
- 翼素運動量理論(BEM)で計算 (OSS : NREL CCBladeを使用)
- 動的応答計算のため、BEMから空力減衰係数を算出

重力・遠心力

- ブレードの質量分布、ロータ回転数、アジマス角(ロータの回転位相)から計算

計算高速化

- BEMは収束計算を含み、計算時間の要件を満たさないため、データテーブル化
- ハブ風速、ロータ回転数、ピッチ角(ブレード取付け角)、アジマス角から、空気力、減衰係数を内挿計算
- タワーの傾斜やヨーエラー(風向きと回転軸のずれ)は、メモリ節約のため無視



バネ・マス・ダンパ系

- エッジ方向(翼弦方向)、フラップ方向(翼厚方向)の変位を、独立に各々20モードで計算

$$m_i \ddot{x}_i + 2\sqrt{m_i k_i} \xi_i \dot{x}_i + k_i x_i = f_i \quad (1 \leq i \leq 20)$$

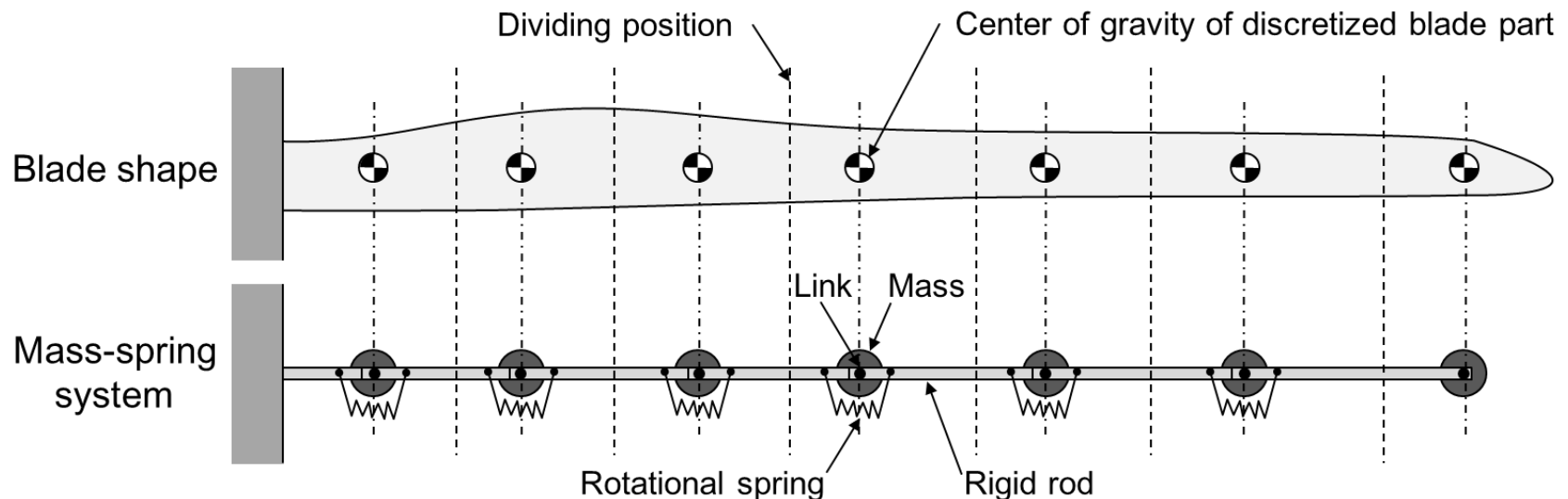
x_i : i 番目のモード変位
 ξ_i : i 番目のモード減衰比

- 時間発展をNewmark- β ($=1/4$)法(平均加速度法)で計算 $\Rightarrow$ システムモデル

$$\mathbf{u}^{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{u}^t + \mathbf{B}\mathbf{f}^t \quad \text{where} \quad \mathbf{u}^t = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}^t \\ \dot{\mathbf{x}}^t \\ \mathbf{x}^t \end{bmatrix}, \quad \begin{array}{l} \mathbf{x}^t: \text{モード変位ベクトル} \\ \mathbf{f}^t: \text{モード外力ベクトル} \end{array}$$

- モード変位を曲げモーメントに変換 $\Rightarrow$ 観測モデル

$$\mathbf{y}^t = \mathbf{C}\mathbf{u}^t \quad \mathbf{y}^t: \text{任意の位置(翼根)での曲げモーメント}$$



データ同化 : Kalman filter (KF)

- 単純化した外力を修正するため、外力の補正項を用いて、状態変数ベクトルを拡張

システムモデル

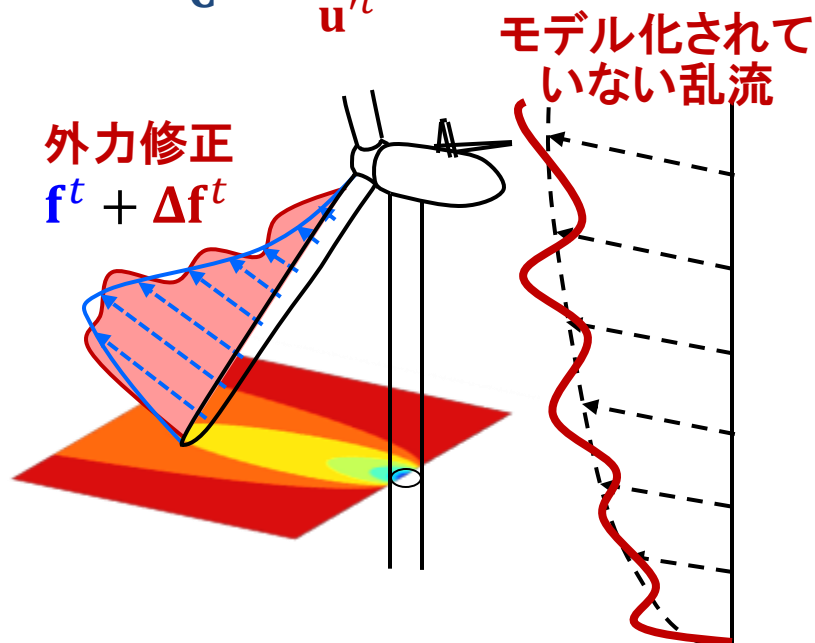
$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}^{t+1} \\ \Delta \mathbf{f}^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{O} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}^t \\ \Delta \mathbf{f}^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{O} \end{bmatrix} \mathbf{f}^t + \mathbf{w}^t$$

拡張状態変数ベクトル $\mathbf{u}'^{t+1}$ は $\begin{bmatrix} \mathbf{u}^t \\ \Delta \mathbf{f}^t \end{bmatrix}$ であり、 $\mathbf{A}'$ と $\mathbf{B}'$ は上記のマトリクスに対応する。図中の赤い矢印は、 $\mathbf{u}^t$ と $\Delta \mathbf{f}^t$ が状態変数と外力の補正項として組み込まれていることを示している。

観測モデル

$$y^t = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{O} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}^t \\ \Delta \mathbf{f}^t \end{bmatrix} + v(k)$$

観測ベクトル y^t は、状態変数 $\mathbf{u}^t$ と外力の補正項 $\Delta \mathbf{f}^t$ の線形結合で表される。

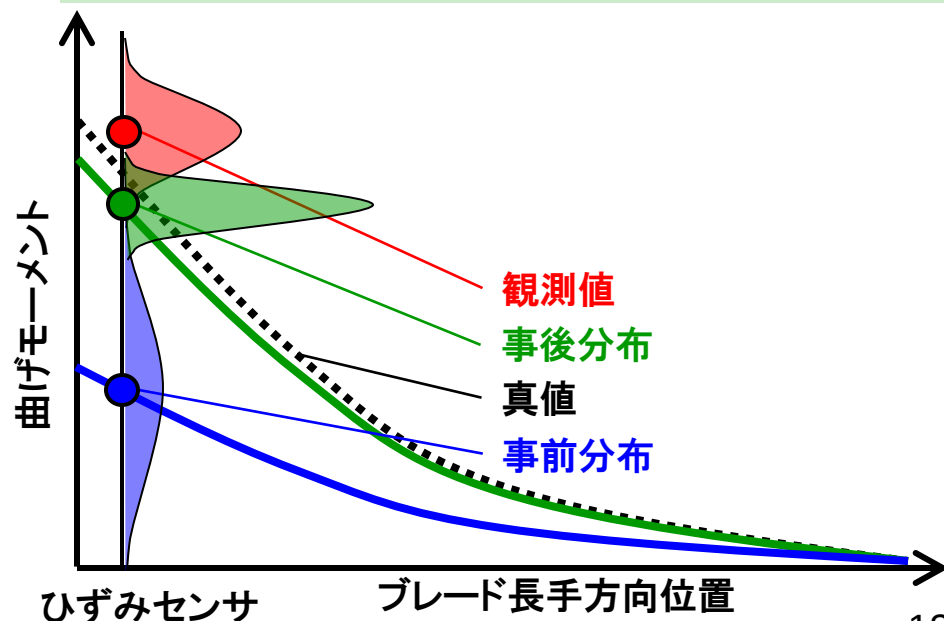


予測

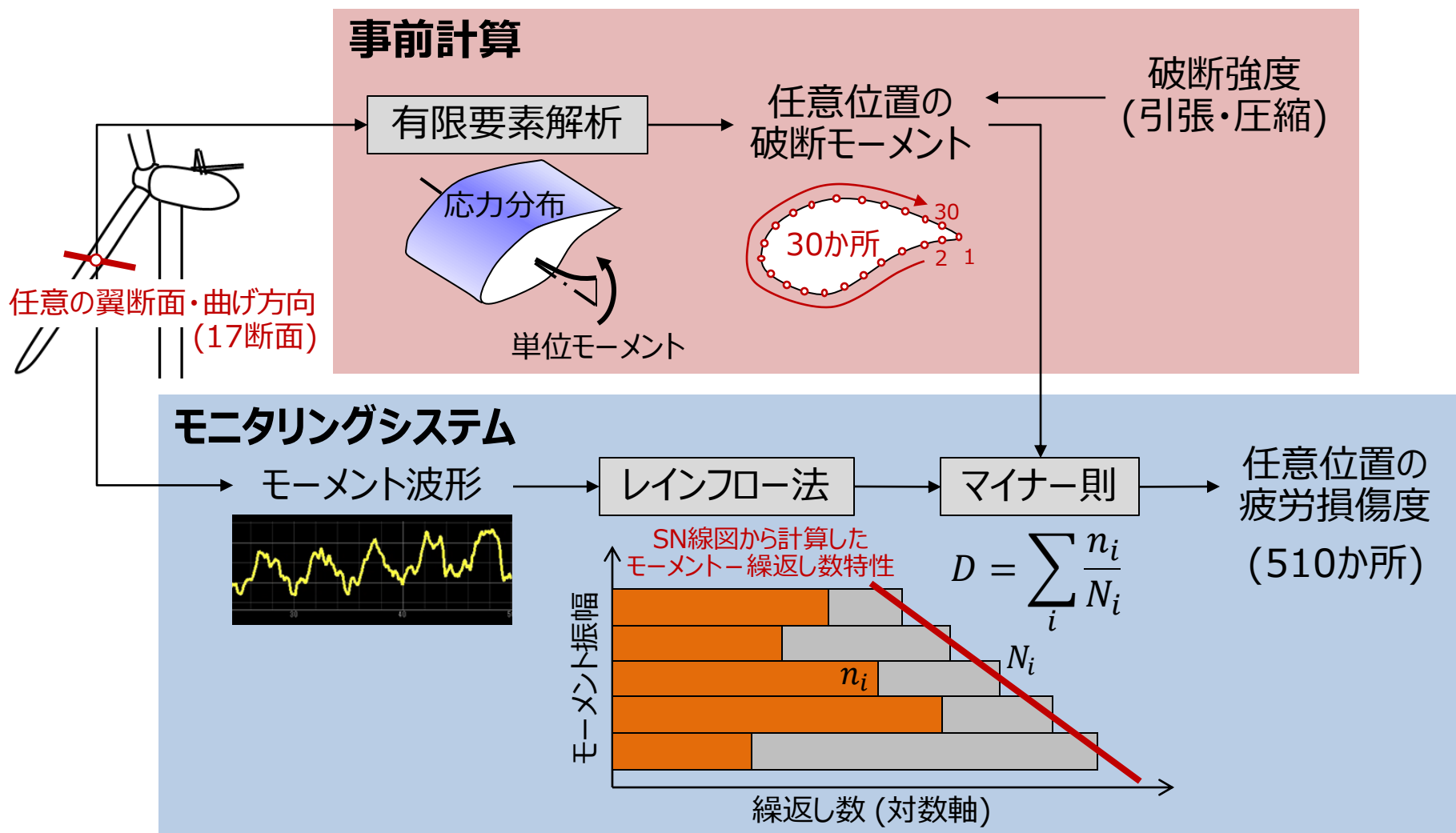
$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{u}}'^{t+1|t} &= \mathbf{A}' \hat{\mathbf{u}}'^{t|t} + \mathbf{B}' \mathbf{f}^t \\ \mathbf{V}^{t+1|t} &= \mathbf{A}' \mathbf{V}^{t|t} \mathbf{A}'^T + \mathbf{Q}' \end{aligned}$$

フィルタリング

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{u}}'^{t+1|t+1} &= \hat{\mathbf{u}}'^{t+1|t} + \mathbf{K}^t (y^{t+1} - \mathbf{C} \hat{\mathbf{u}}'^{t+1|t}) \\ \mathbf{V}^{t+1|t+1} &= \mathbf{V}^{t+1|t} - \mathbf{K}^t \mathbf{C} \mathbf{V}^{t+1|t} \\ \mathbf{K}^t &= \mathbf{V}^{t+1|t} \mathbf{C}^T (\mathbf{C} \mathbf{V}^{t+1|t} \mathbf{C}^T + r)^{-1} \end{aligned}$$



- ・ 事前に行った有限要素解析の結果を用いて、ブレード上の510か所での疲労損傷度を計算
- ・ 10分毎にモーメント波形から疲労損傷度を計算し、これまでに蓄積した疲労を定量化



1. 研究背景

- 風力発電のコストと保守効率化
- 研究目的

2. 風車ブレードのモニタリング手法

- モニタリング対象の風車
- 物理モデル：風速分布、外力、動的応答
- データ同化：カルマンフィルタ
- 疲労評価

3. 実風車データを用いた検証試験

- 挙動モニタリング
- 疲労モニタリング

4. まとめ

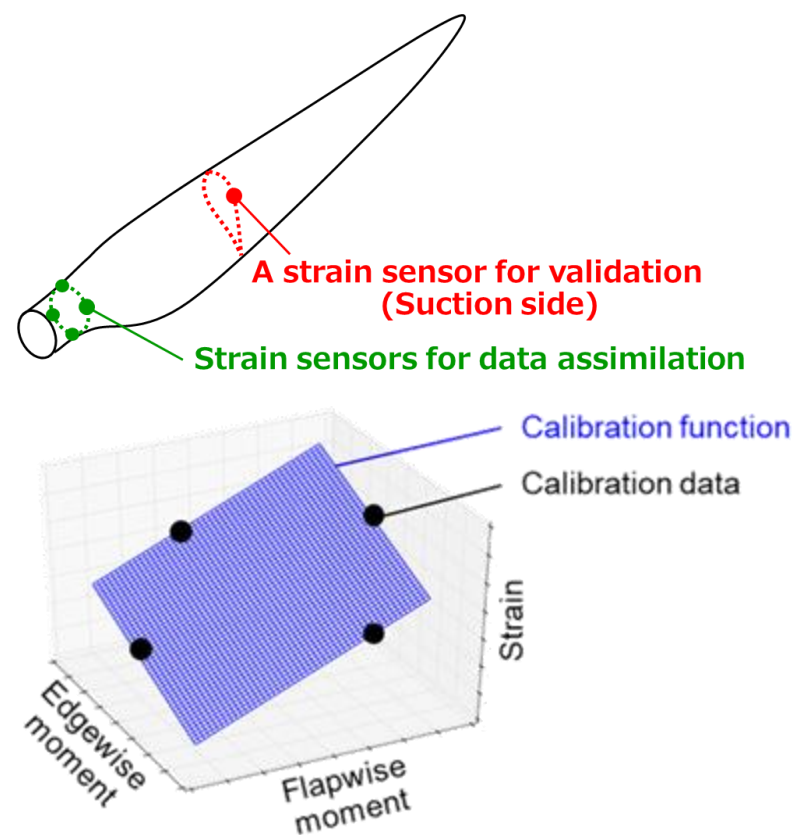
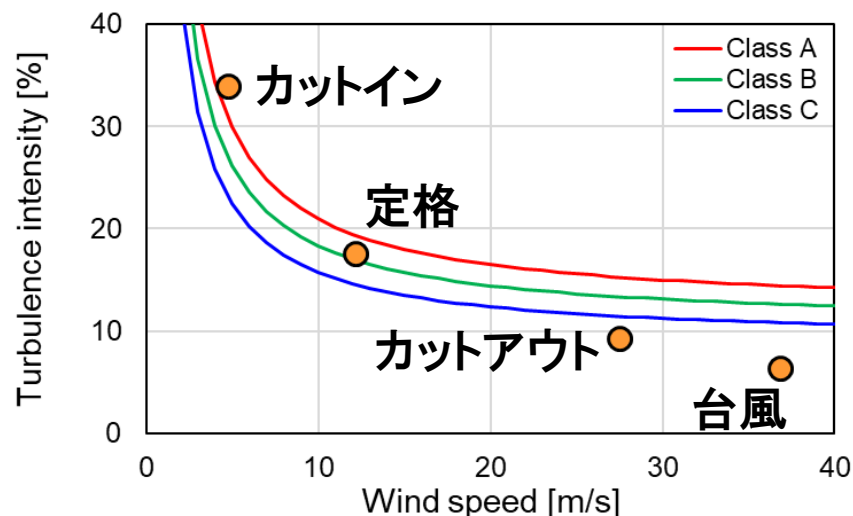
5. 謝辞

検証条件

- 4つの代表的な風況での観測データ(各10分)を使用：定格、カットイン、カットアウト、台風

検証方法

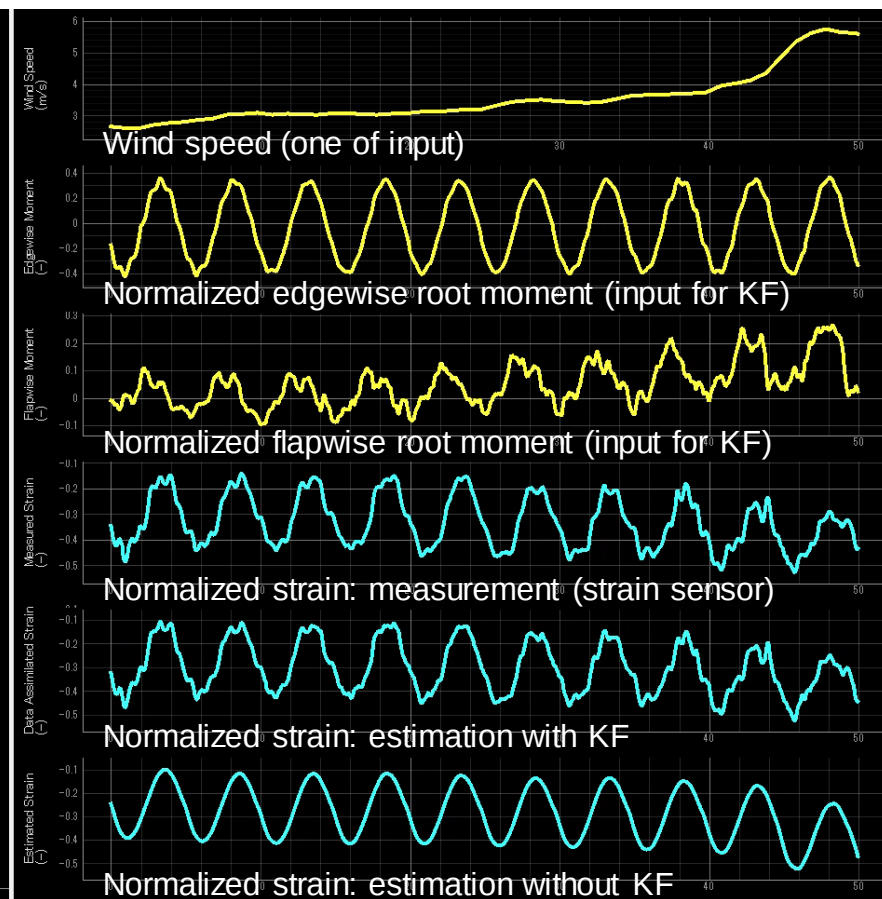
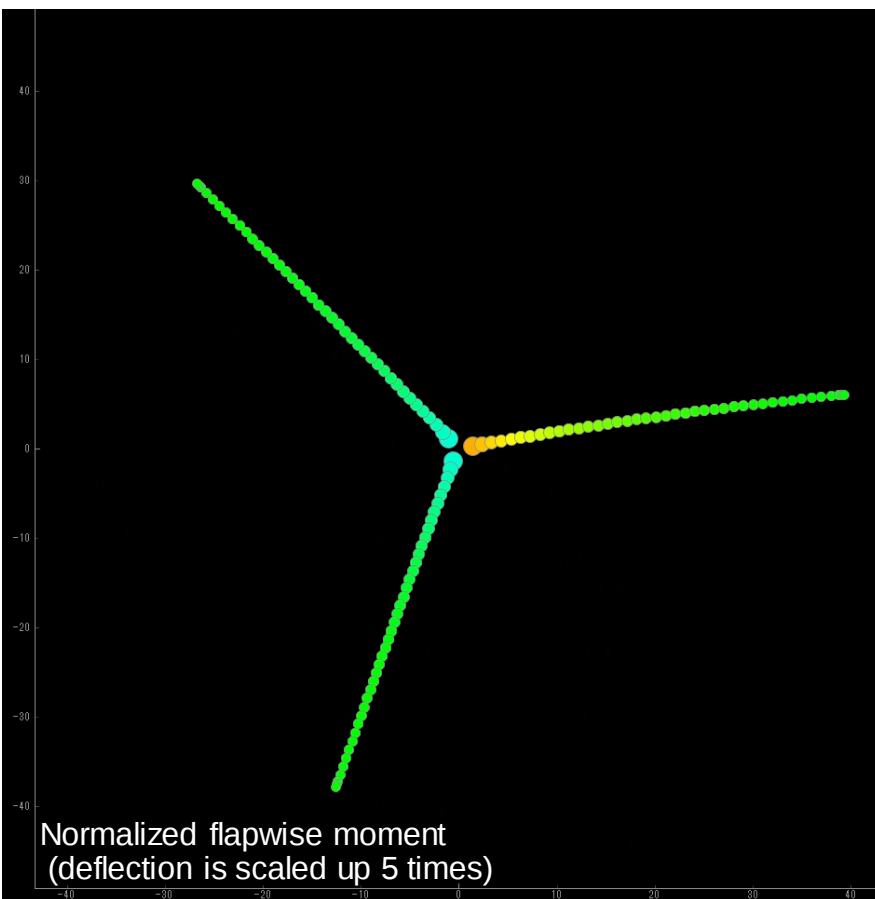
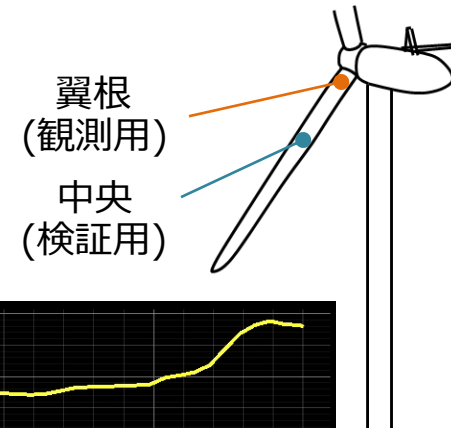
- ブレード中央付近に設置されたひずみセンサでの観測値をモニタリングシステムで推定
- ひずみセンサの校正試験結果を用いて、センサ位置での曲げモーメントをひずみに変換



No.	Wind condition	Turbine condition	Mean wind speed [m/s]	Turbulence intensity [%]
1	Rated	Operated	12.2	17.5
2	Cut-in	Operated	4.8	33.9
3	Cut-out	Operated	27.5	9.2
4	Typhoon	Parked	36.9	6.3

検証結果：モニタリングシステム

- ブレード全体の挙動、荷重をデジタルツインとして再現
- KFを導入することで、ひずみ波形の細かな変動を捉えられている

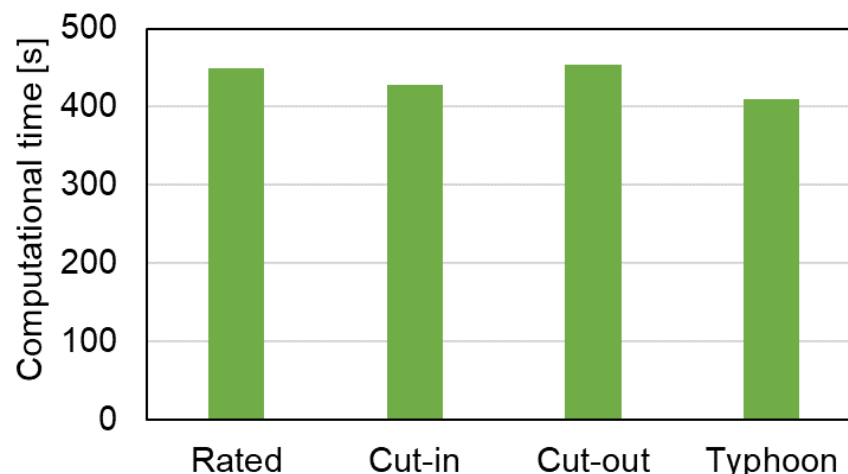
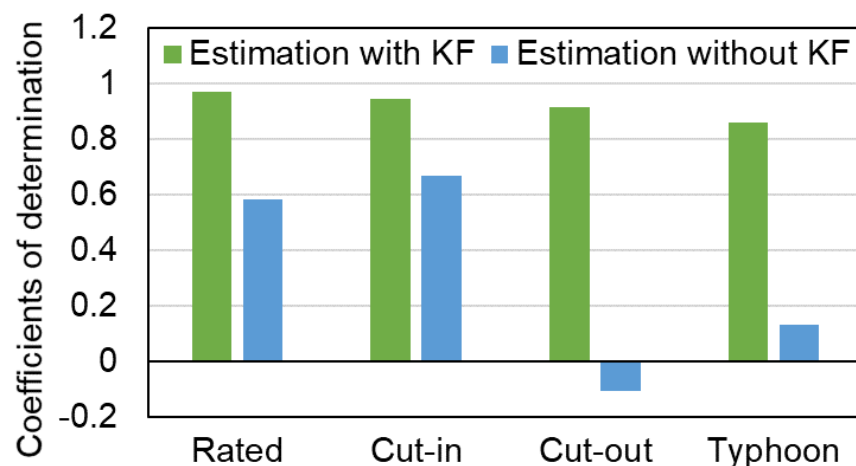


推定値：KF有り

- 4つの風況のいずれでも決定係数(R^2)は0.85以上
- 疲労評価完了までの計算時間は7分程度であり、要件であった10分以内を達成

推定値：KF無し

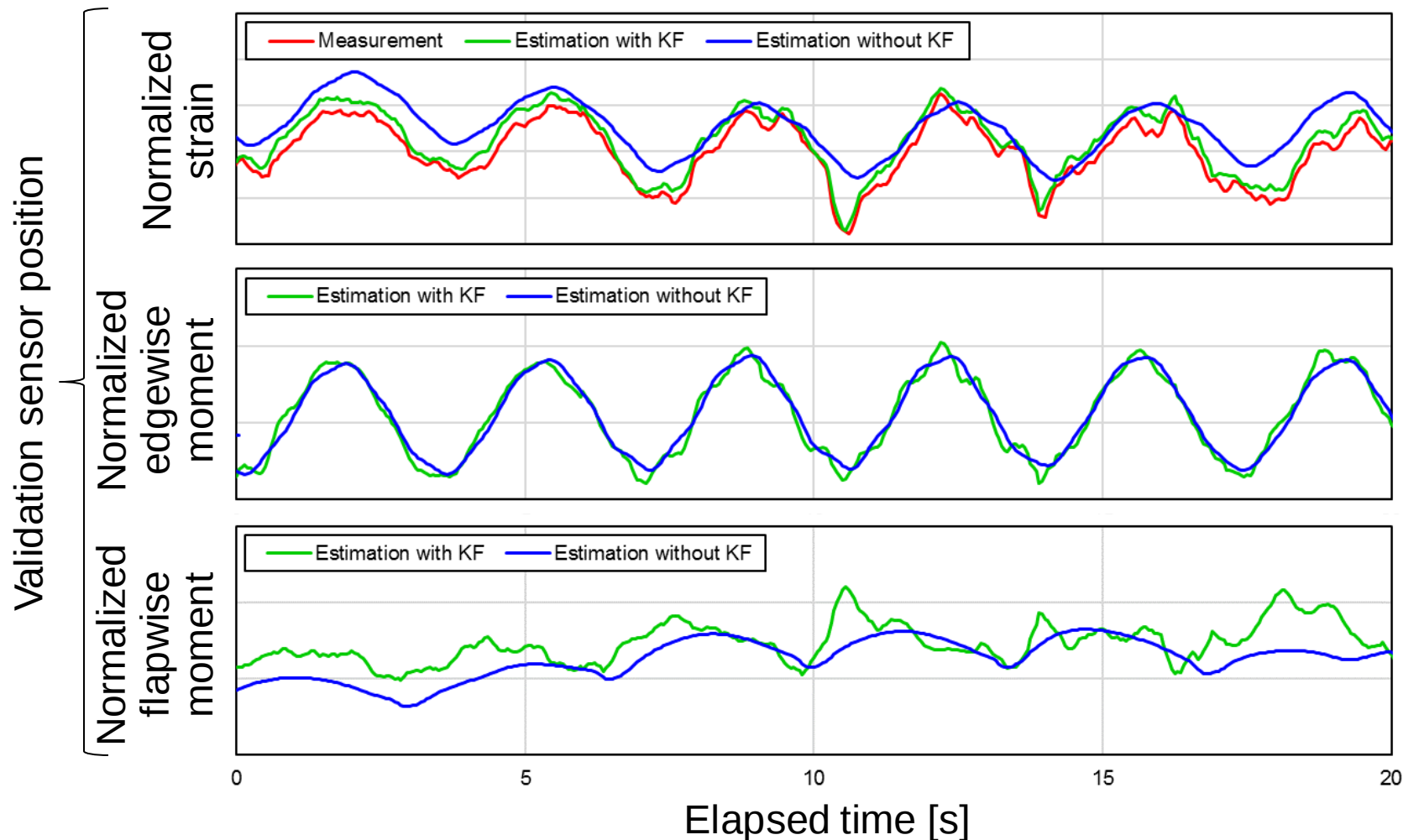
- 全体的に決定係数が小さく、特に高風速時の精度低下が著しい



Wind condition	R^2 of estimation with KF	R^2 of estimation without KF	Computational time [s]
Rated	0.972	0.585	449
Cut-in	0.944	0.670	428
Cut-out	0.914	-0.105	454
Typhoon	0.862	0.132	410

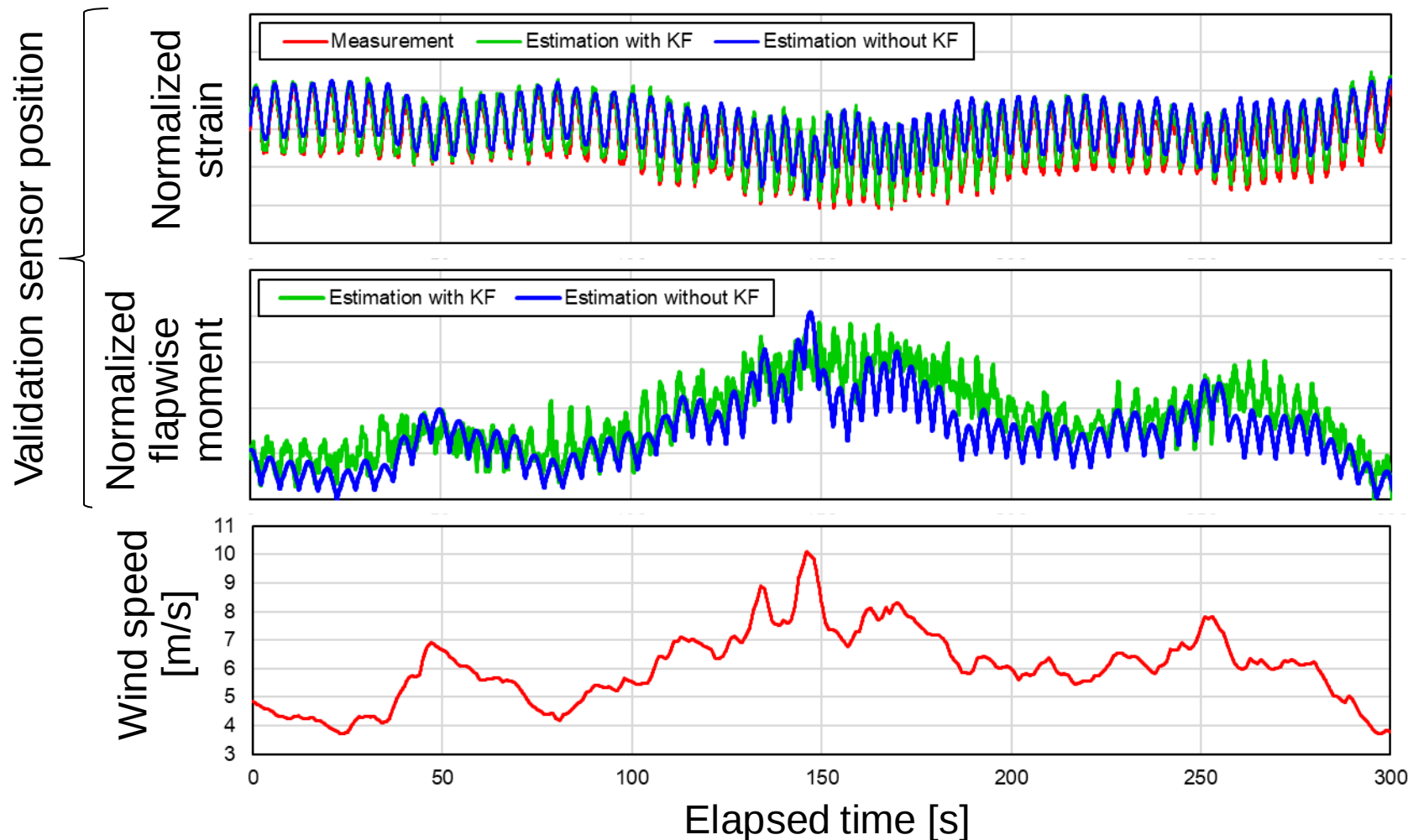
検証結果：定格条件

- KFにより、フラップ方向の乱流の影響とエッジ方向の振動の影響がひずみに反映されており、**風車間の差、ブレード間の差を再現可能**
- KFの有無に依らず、ロータ回転に伴う周期的な変化は再現されている



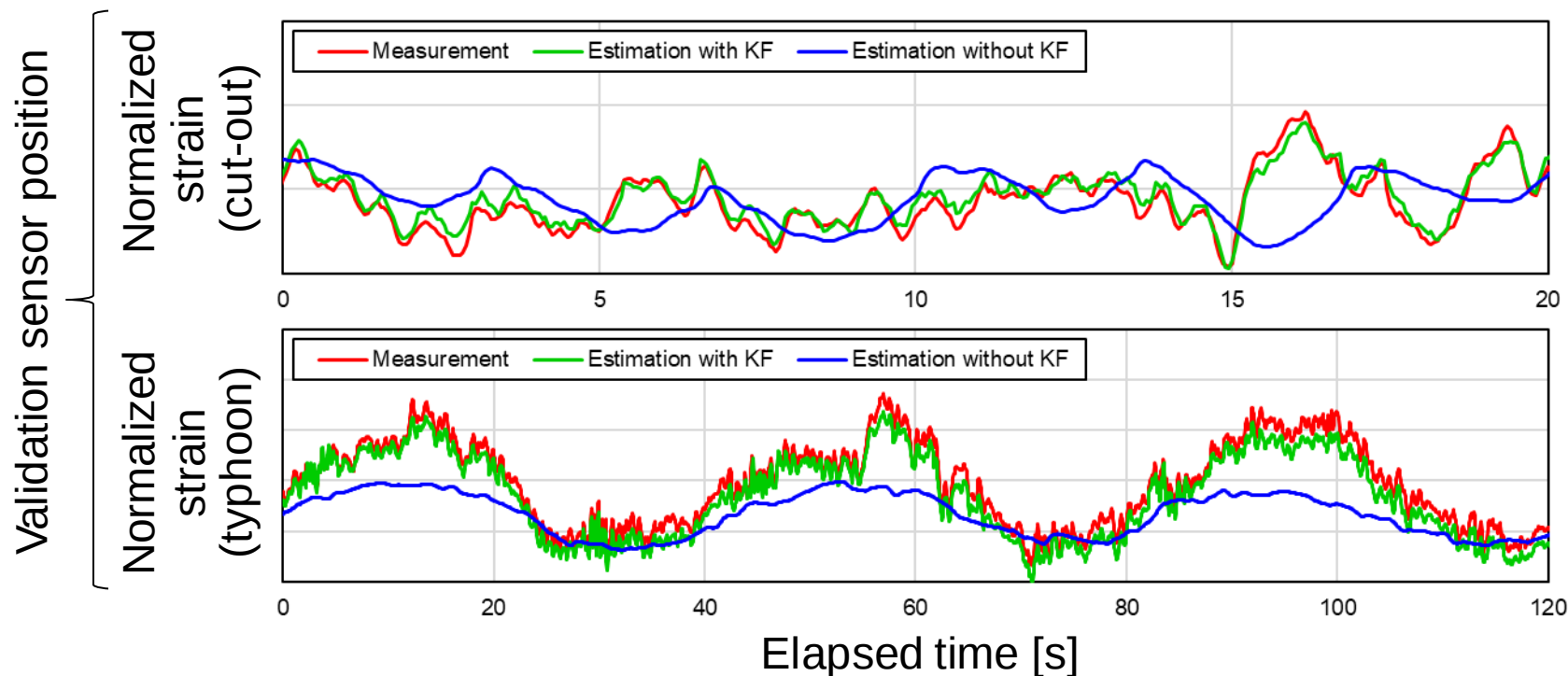
検証結果：カットイン条件

- KF無しでも風速の変化に伴うマクロな変化は再現可能
- KFによる状態変数の修正と外力の補正項によって、ウィンドシアの強弱やタワーの傾斜といったモデル化されていない要素の影響を加味した推定が可能



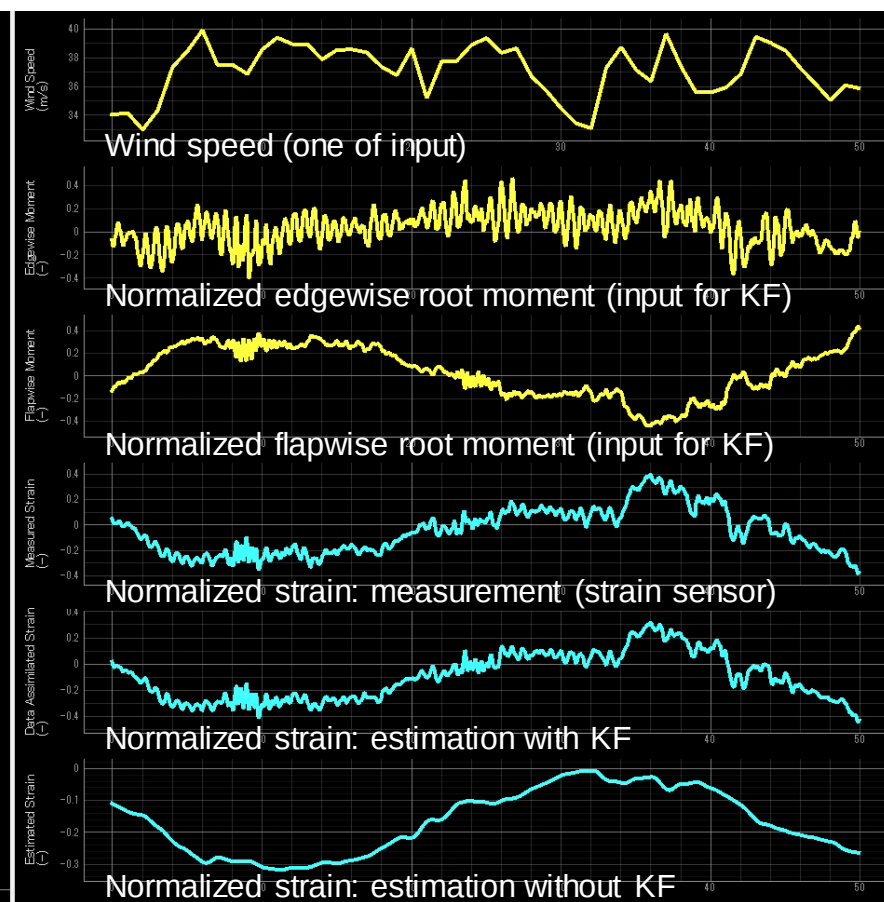
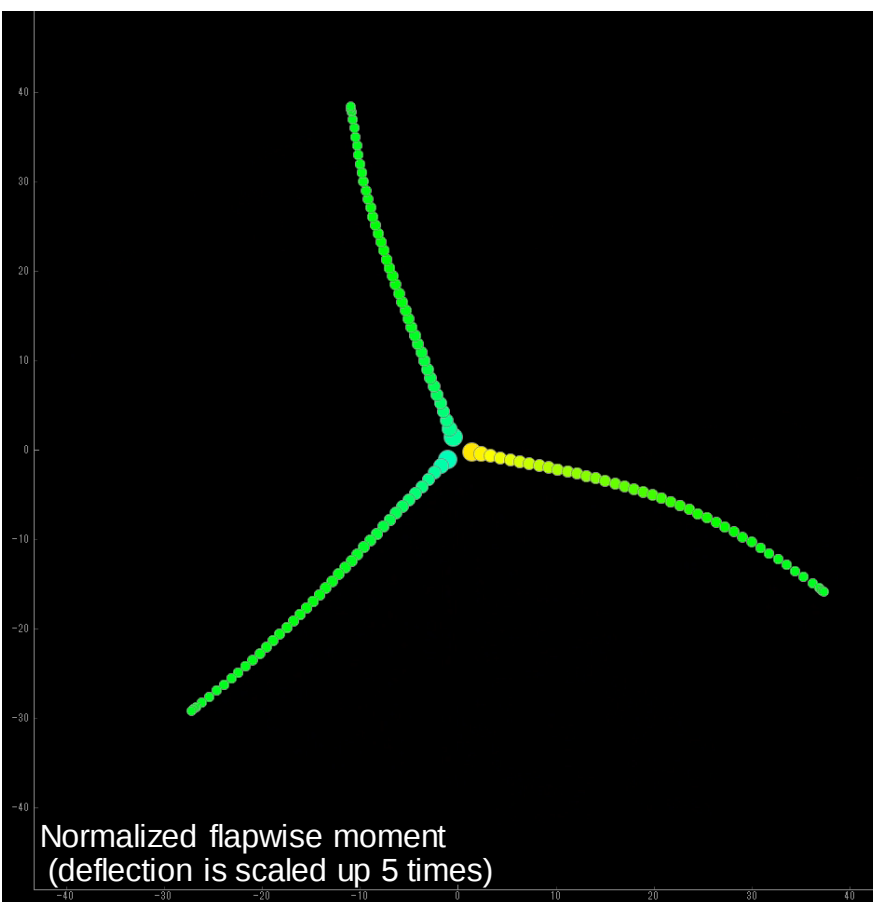
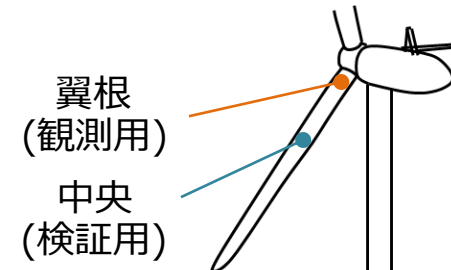
検証結果：カットアウト条件、台風条件

- KFを用いることで乱流による風速・風向変動の激しい高風速でのひずみを再現可能
- カットアウト条件では、回転による周期的なひずみの変化よりも、乱流の影響が支配的であり、KF無しの推定値は、観測値を全く再現できていない
- ウィンドシアのベキ指数(0.14)は運転中を想定しており、台風時の強風ではKFによる補正項が重要な役割を果たす



検証結果：台風条件

- モニタリングシステムでは、マクロ、ミクロな傾向をともに再現
- 台風や地震などによって作用する極値荷重を把握し、運転再開の判断に利用可能



検証条件

- 2016年度の観測データ(1年分)を使用

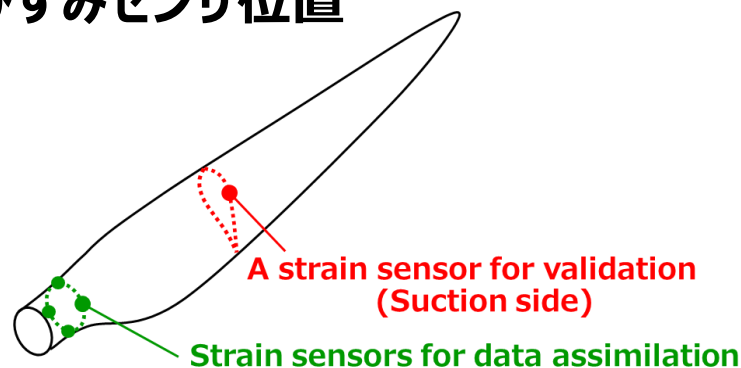
検証方法

- 検証用ひずみセンサ位置での疲労損傷度を、KFを用いた応力の推定値および観測値から計算して比較
- 主要な強度部材(桁フランジ、後縁補強材、ブレードハブ締結ボルト)の疲労損傷度を計算

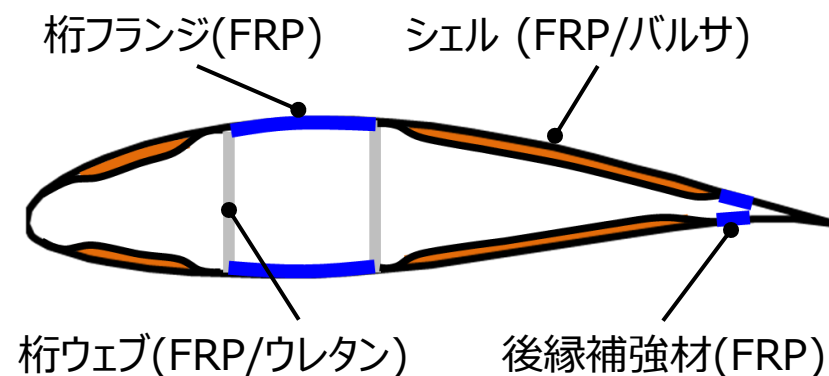
※疲労損傷度は、部材ごとに1年間での蓄積量で正規化

(2016年4月1日での疲労損傷度を"0"として、2017年3月31日で"1"になるように変換)

ひずみセンサ位置



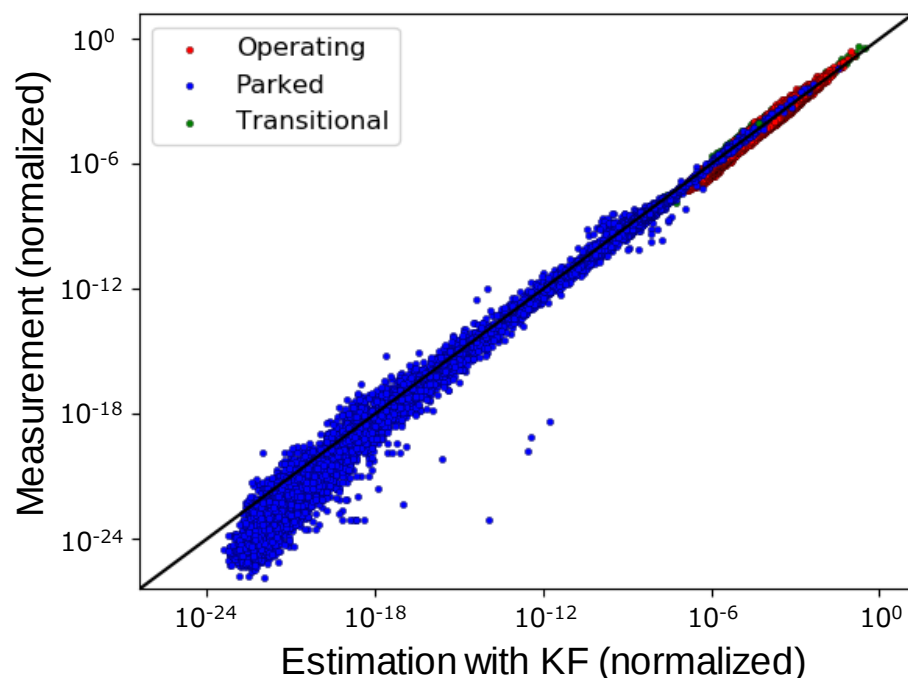
ブレード断面



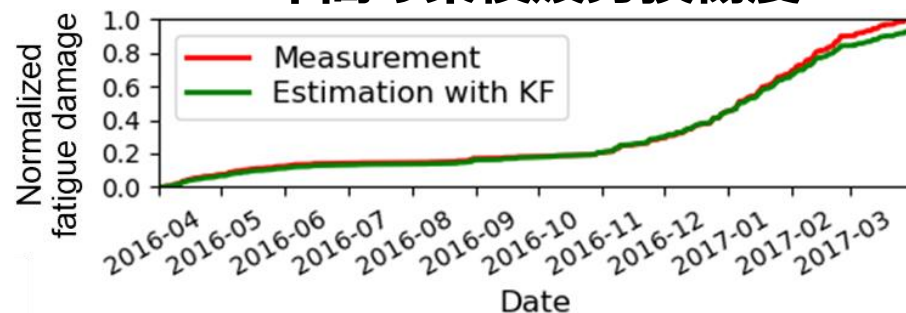
検証結果：疲労損傷度の推定精度

- 1年分のデータに対して安定してモニタリングが可能であることを確認
- 運転状態に依らず、10分間での疲労損傷度を高精度で推定可能（年間での誤差－7%）
⇒ 運転開始からの疲労蓄積を定量化することで、寿命延長に使用可能
- 累積疲労損傷度の大部分は、風の強い冬季に蓄積している
- 台風の影響によって、8月の累積疲労損傷度は7、9月と比較して大きい

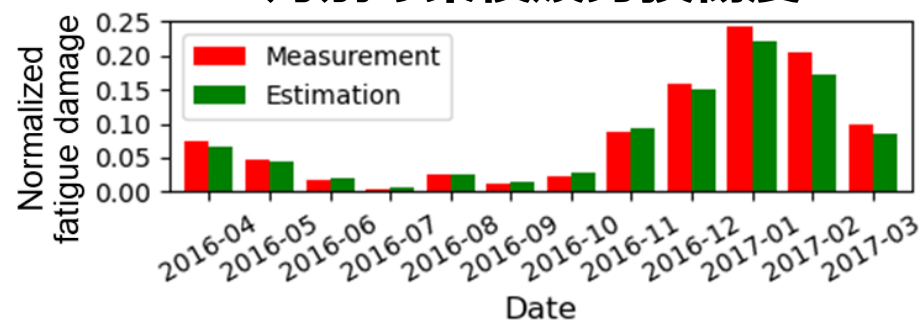
10分間の疲労損傷度の比較



年間の累積疲労損傷度



月別の累積疲労損傷度

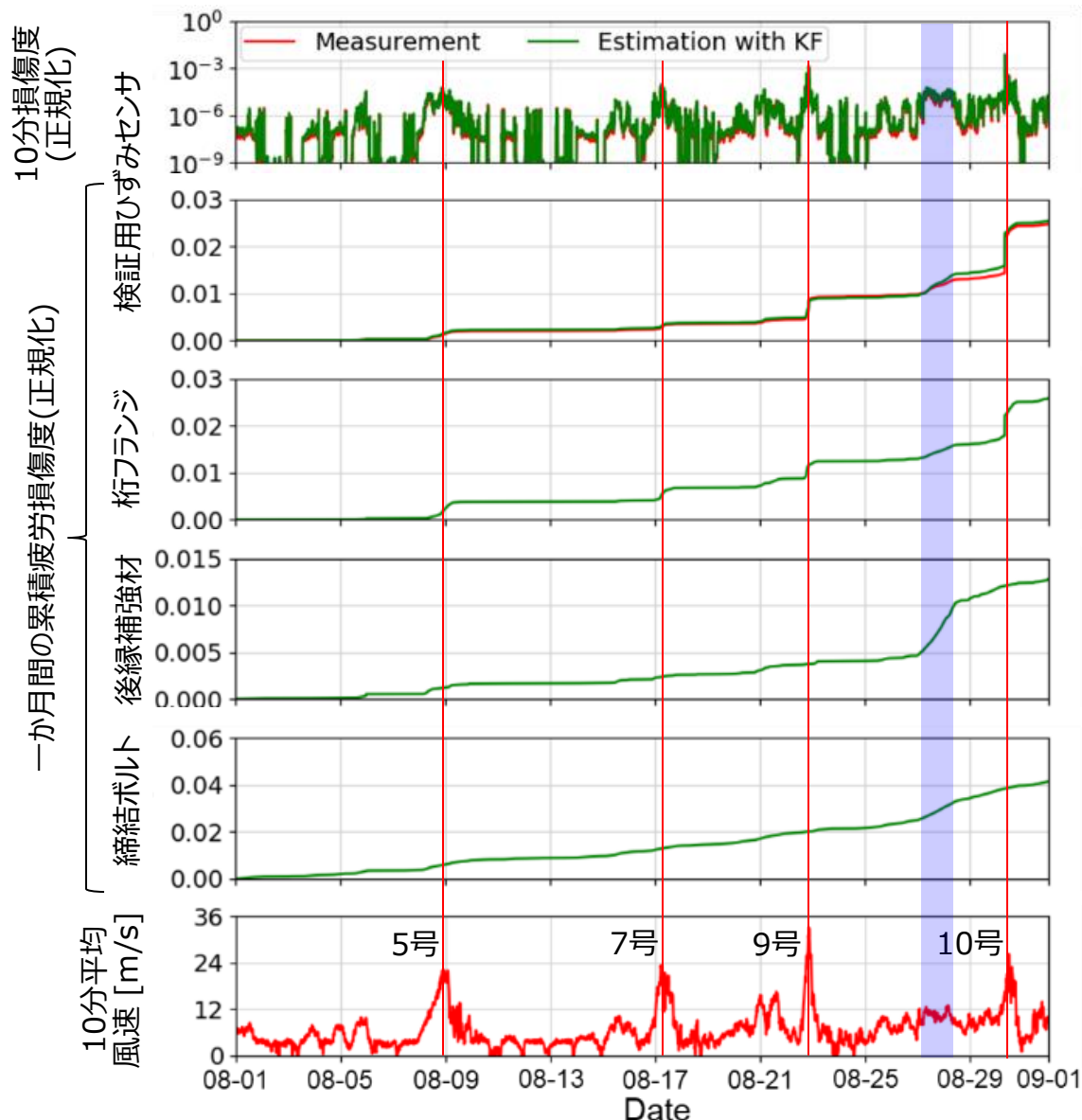


検証結果：主要部材の疲労損傷度（8月）

- 検証用ひずみセンサと桁フランジでは、**台風による強風時**に疲労が蓄積
- 後縁補強材では**定格風速 (13m/s) 付近**で疲労が蓄積

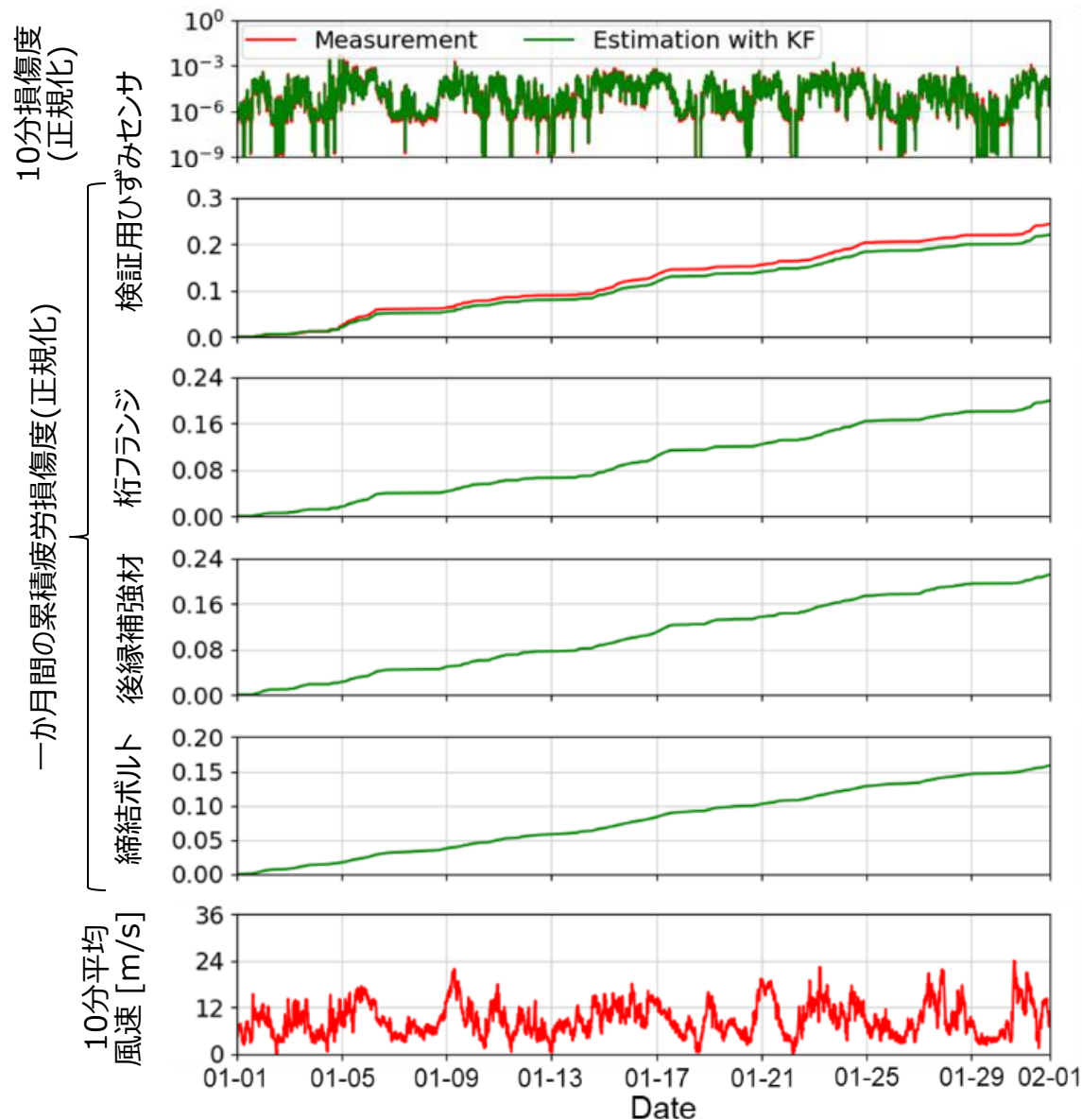


- 部材や位置によって、疲労の蓄積トレンドが異なる
- 物理モデルとデータ同化によって、少数のセンサのみで、ブレードの寿命を構成部材ごとにモニタリング可能
- ロータ以降の機械部品(ギアボックス、発電機、タワー)をモデル化し、データ同化したブレード荷重を入力とすることで、風車全体のモニタリングも実現可能



検証結果：主要部材の疲労損傷度（2月）

- 冬季は、風が強まり、定格風速付近での運転頻度が増加
- 何れの部材でも概ね一定の変化率で疲労が蓄積
- 10分間での疲労損傷度は、台風10号の通過時よりも小さいが、一カ月間の累積は、下記の10倍程度になる



物理モデルとカルマンフィルタによるデータ同化を用いた、風車ブレードのモニタリングシステムを開発し、2MW浮体式洋上風車に適用した。

- 常設センサとブレード根元のひずみセンサにより、ブレード全体の挙動および疲労損傷度の推定が可能となった。
- 物理モデルの簡素化により、実時間以内での疲労評価を実現した。
- カルマンフィルタを用いることで、乱流やブレードの振動など、モデル化で考慮されていない要素の影響を加味できた。
- 疲労損傷度を誤差7%で推定でき、CBMや寿命延長に利用可能な見込みを得た。

本研究は、経済産業省の浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業の一環として実施されました。関係者の皆様に深く感謝の意を表します。

HITACHI
Inspire the Next 