



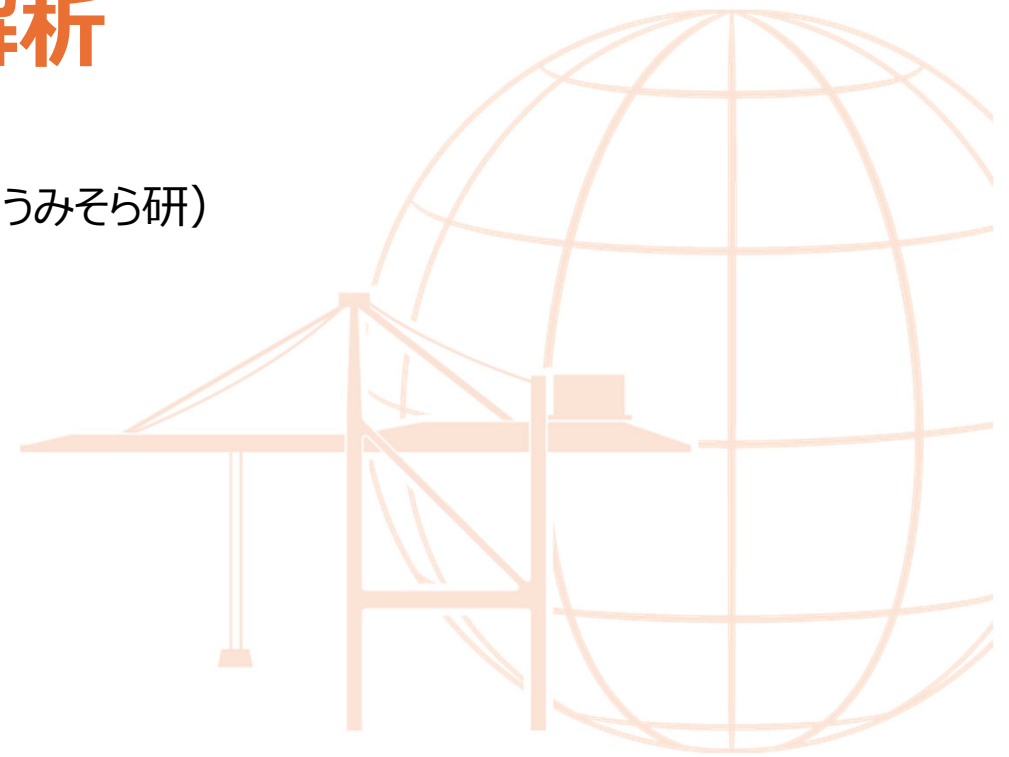
風・波・地震の連成を踏まえた 洋上風力発電施設の応答解析

国立研究開発法人 海上・港湾・空港技術研究所（うみそら研）

港湾空港技術研究所（港空研，PARI）

海洋利用研究領域 海洋利用研究グループ

加 島 寛 章



自己紹介（加島寛章, Hiroaki Kashima）



略 歴



- 港湾空港技術研究所 海洋利用研究領域
- 海洋利用研究グループ グループ長
- 東京海洋大学学術研究院 海洋AI開発評価センター 准教授（クロスアポイントメント制度）
- 海洋インフラ・洋上風力技術センター 併任
- 博士（工学）（京都大学：2014.3, 主査：間瀬肇教授）：海岸工学分野
「浅海域における暴波浪の特性解明と港湾・海岸構造物の設計法への応用」
- 修士（工学）（大阪市立大学：2007.3, 主査：角野昇八教授）：海岸工学分野
「気液混相流場における気泡運動の画像計測法の開発と砕波帯への応用」
- 研究分野：海洋波・沿岸波の力学、風車力学
- 研究キーワード：うねり, 極大波（一発大波）, 越波・浸水現象, 洋上風車応答解析
- 所属学会：土木学会、日本風力エネルギー学会



職 歴

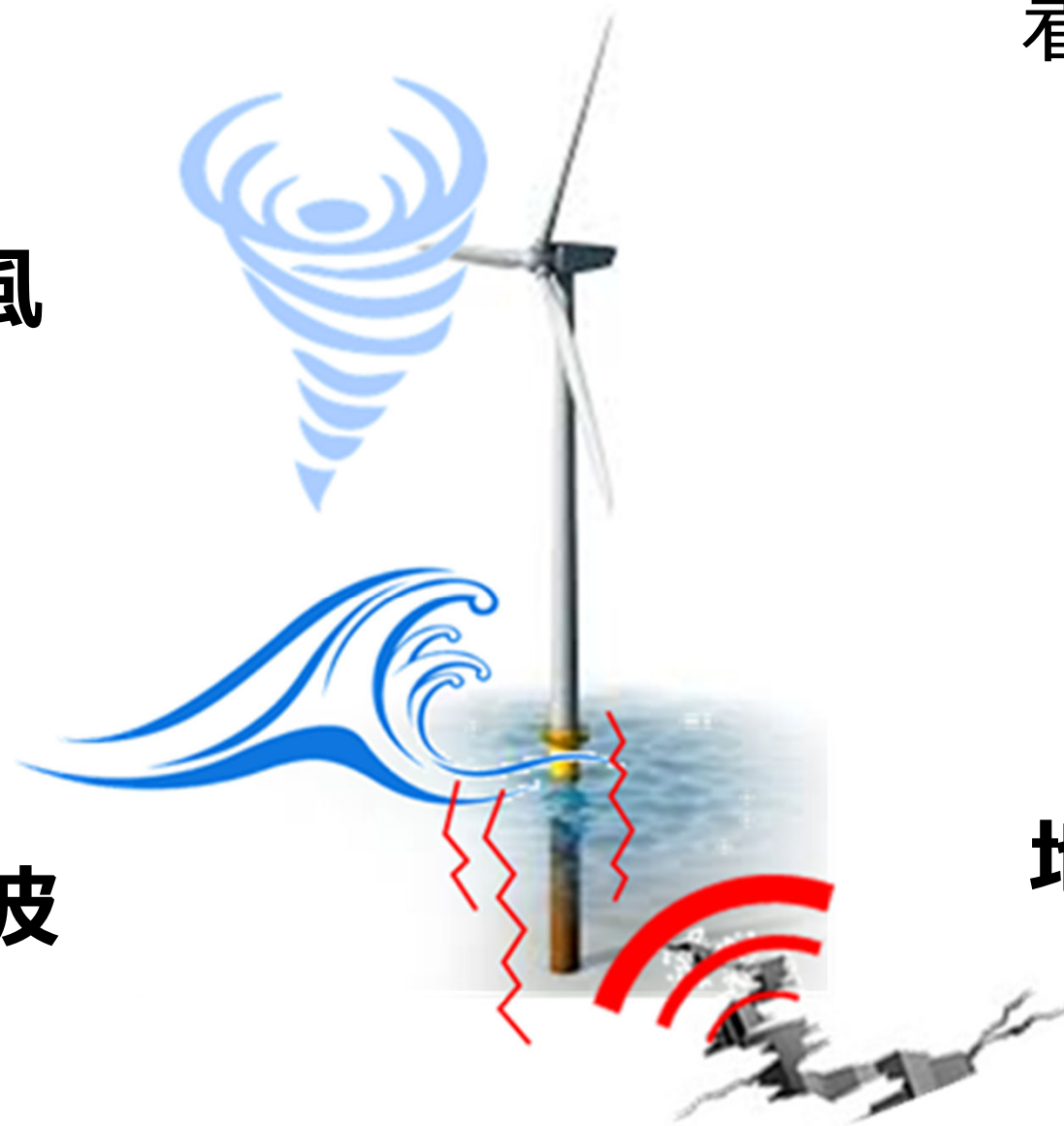
2007年	4月～2014年	3月	港湾空港技術研究所	波浪研究グループ	研究官
2014年	4月～2016年	7月	港湾空港技術研究所	波浪研究グループ	主任研究官
			港湾空港技術研究所	海洋インフラ技術推進センター	（併任）
2015年	7月～2016年	6月	IFREMER		長期在外研究員
2016年	8月～2019年	3月	国土交通省 港湾局	技術企画課 技術監理室	課長補佐
2019年	4月～2022年	9月	港湾空港技術研究所	海洋利用研究グループ	主任研究官
			港湾空港技術研究所	海洋インフラ・洋上風力技術センター	（併任）
2022年	10月～現	在	港湾空港技術研究所	海洋利用研究グループ	グループ長
			港湾空港技術研究所	海洋インフラ・洋上風力技術センター	（併任）
2023年	6月～現	在	東京海洋大学学術研究院	海洋AI開発評価センター	准教授（クロスアポイントメント）

着床式

風

波

地震

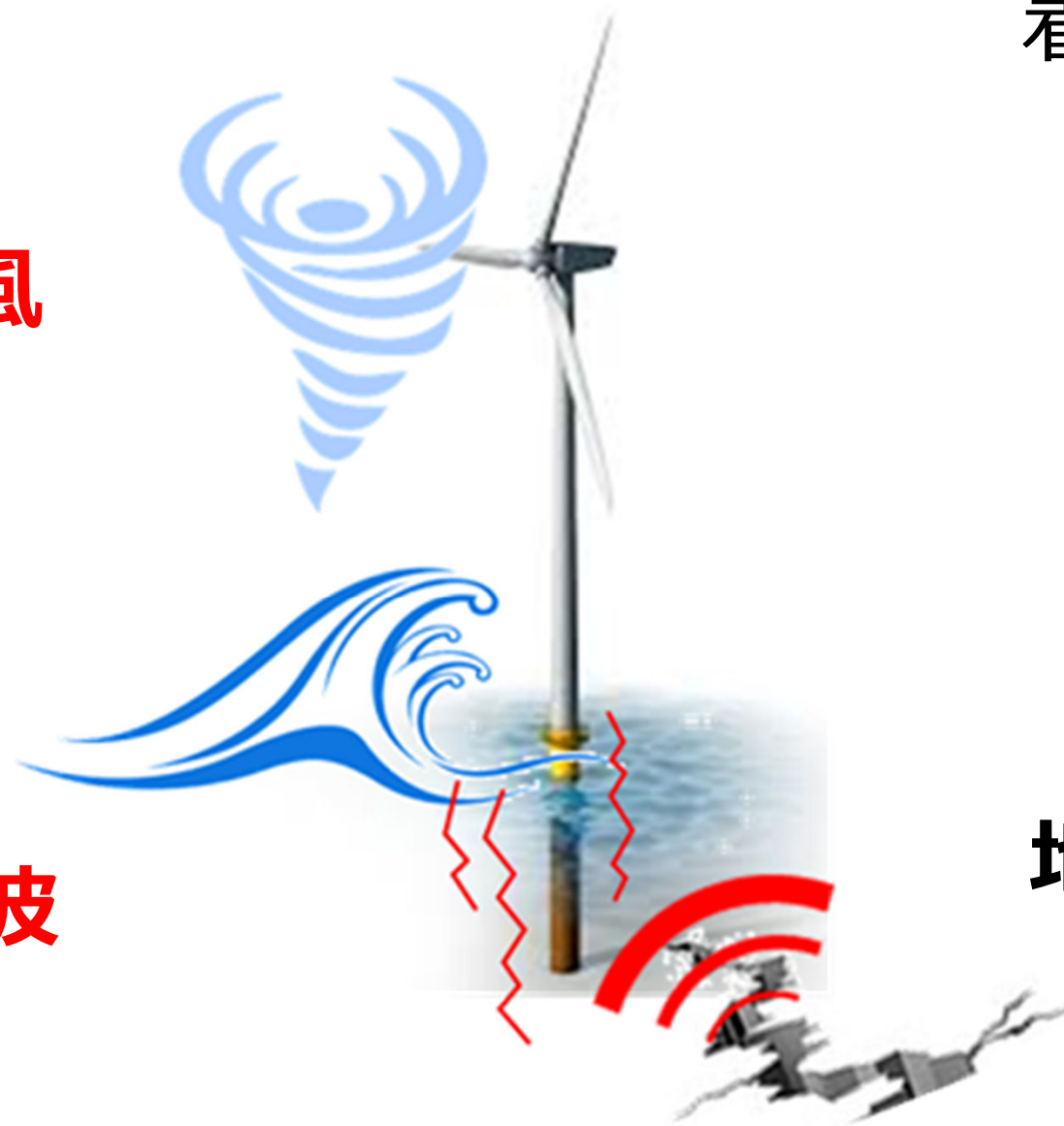


着床式

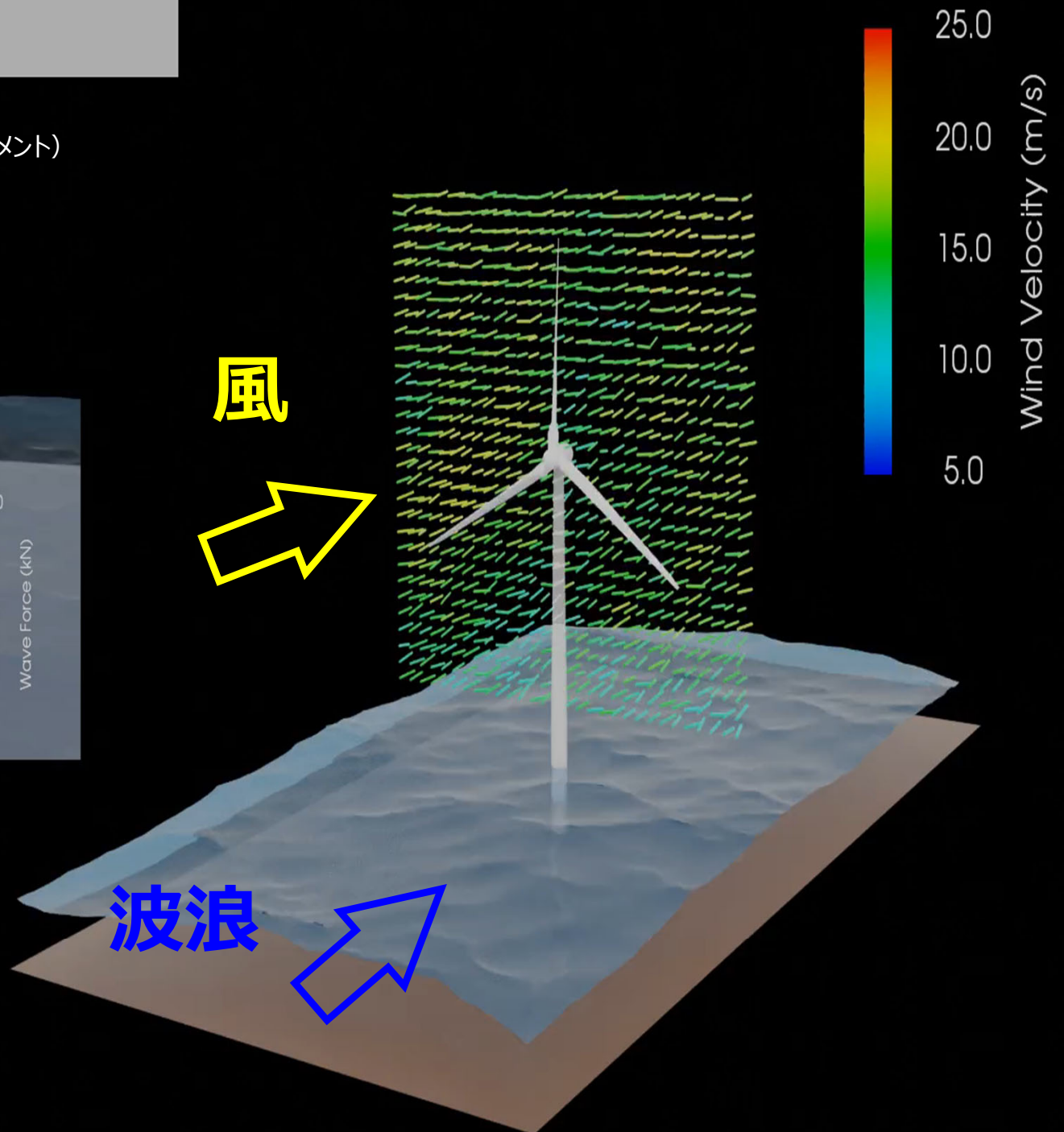
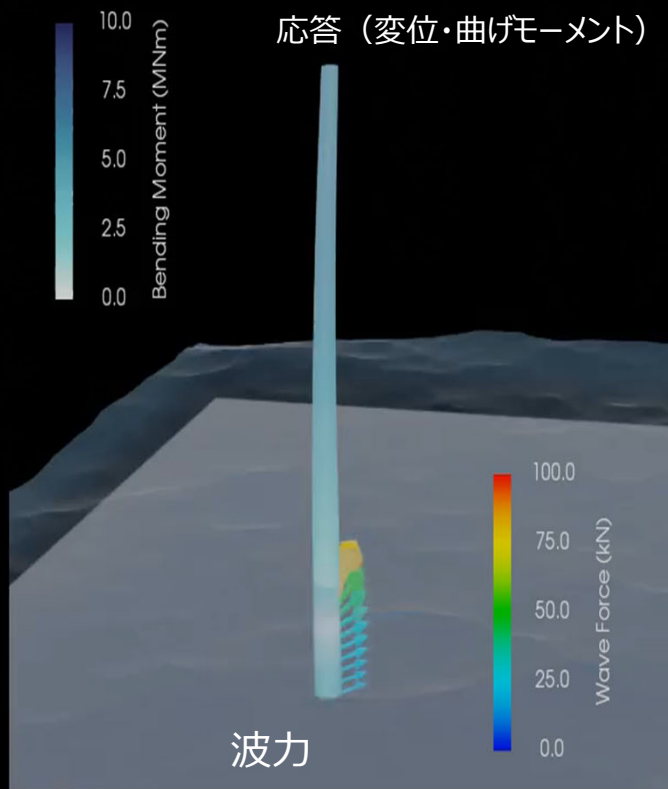
風

波

地震

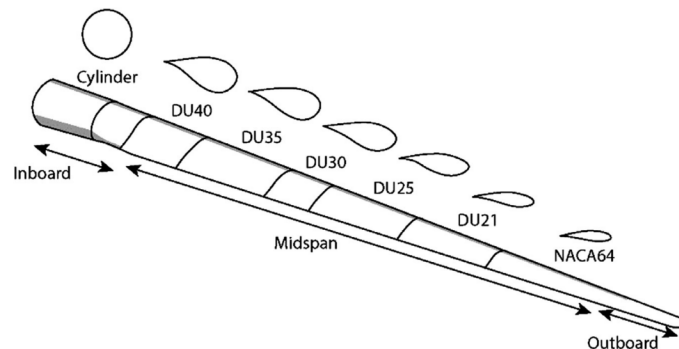
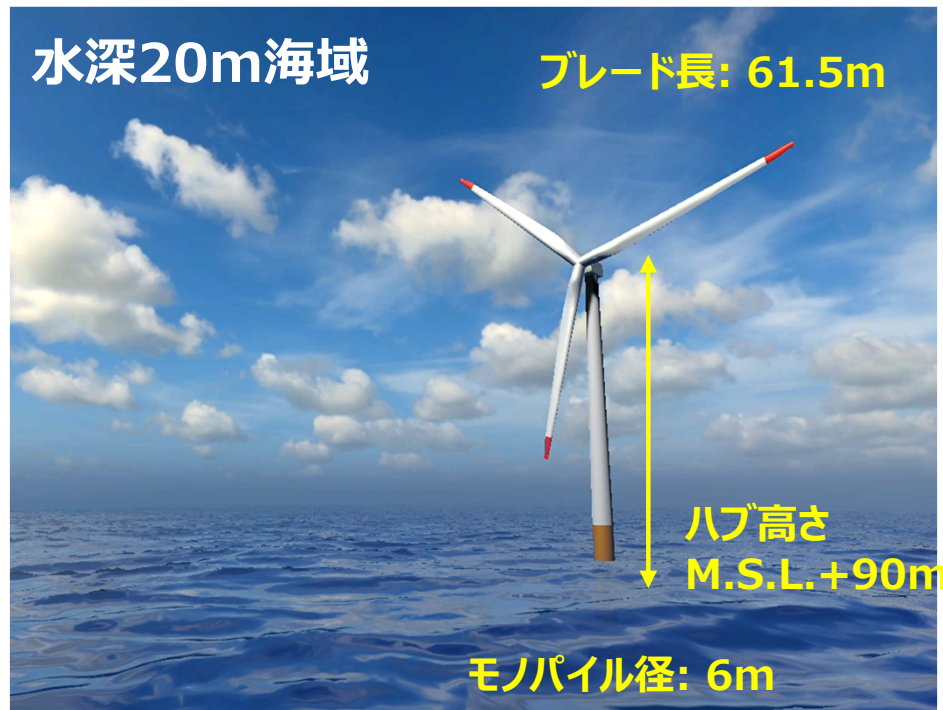


Um: 16.0 m/sec, Ts: 8.0 sec, Hs: 4.0 m
elapsed time: 0.00 sec



●5MWモノパイル型洋上風車モデル

- IEA Wind TCPの解析コード比較検証で採用された定格出力

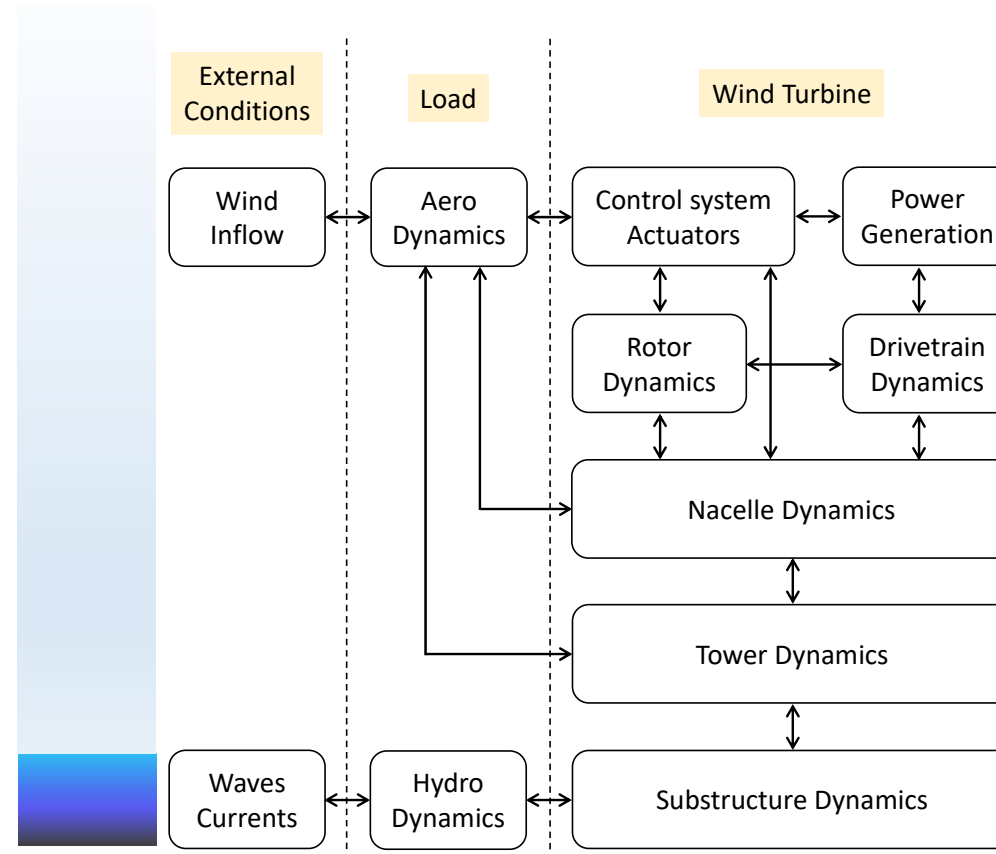


項目		諸元値
タワー頂部	高度	M.S.L.+87.6 m
	径	3.87 m
	厚さ	19 mm
タワー基部	高度	M.S.L.+10 m
	径	6 m
	厚さ	27 mm
モノパイル部	高さ	30 m
	径	6 m
	厚さ	60 mm
ハブ	高度	M.S.L.+90 m
ブレード	長さ	61.5 m
カットイン風速		3 m/s
定格風速		11.4 m/s
カットアウト風速		25 m/s

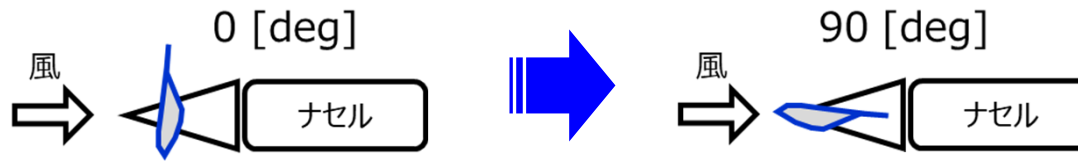
● OpenFAST (NREL, 2021)

- 空力弾性解析 : 翼素運動量理論
- 流体力解析 : モリソン式（構造物の振動を考慮）
- 振動解析 : モーダル法, マルチボディダイナミクス法

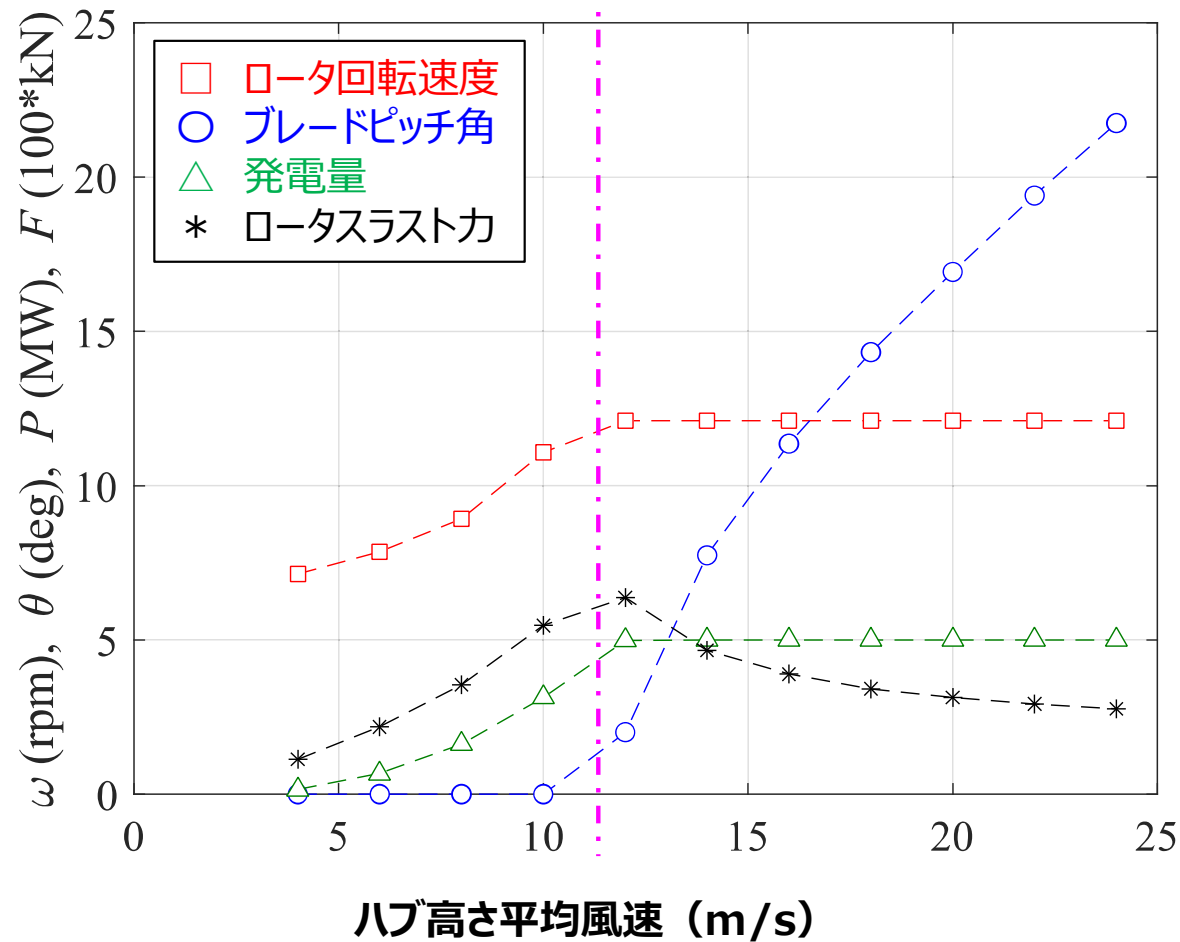
※ 地盤-構造物の相互作用, 碎波力は未考慮



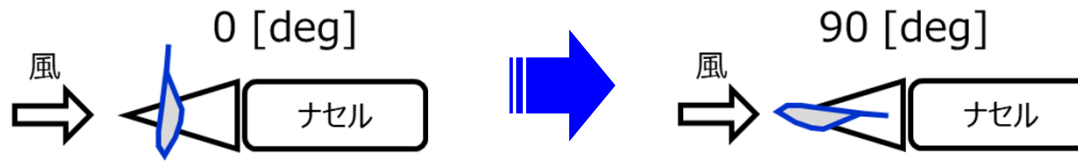
一定風が作用した時の風車応答



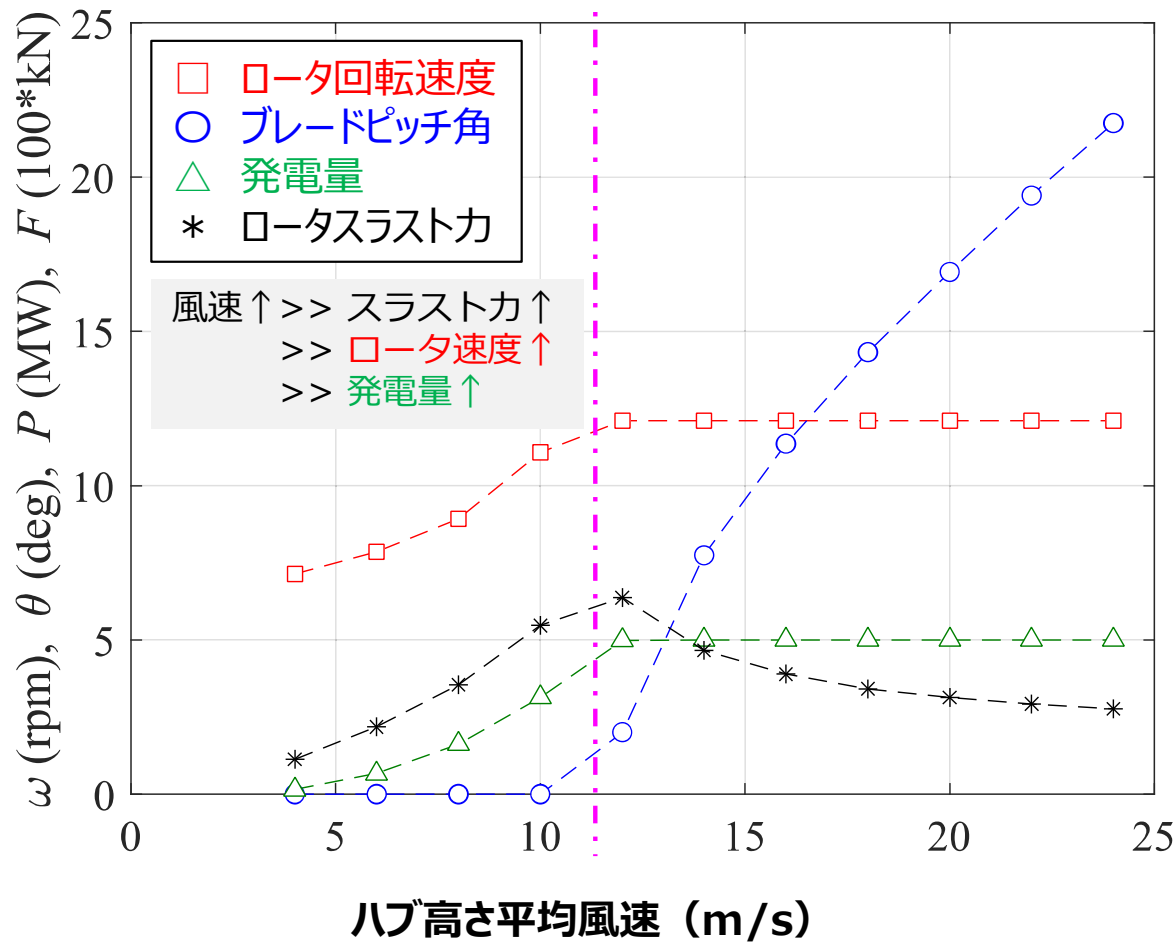
定格風速: 11.4 m/s



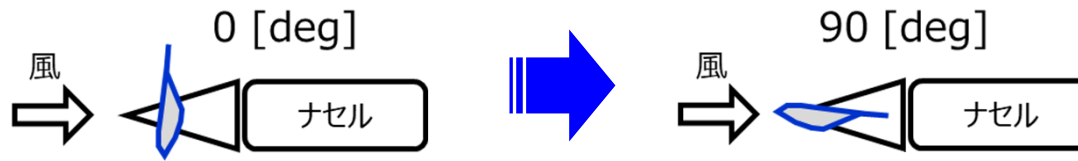
一定風が作用した時の風車応答



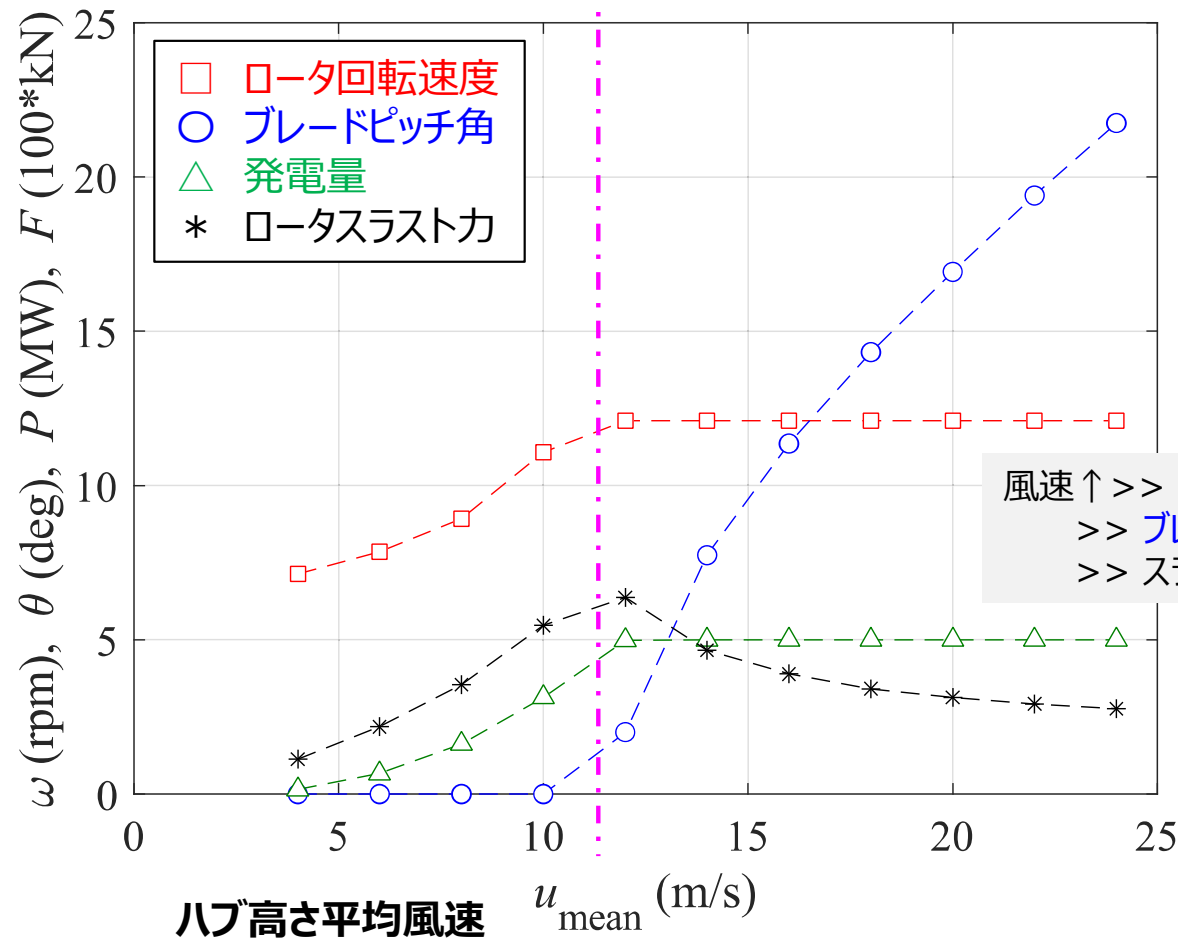
定格風速: 11.4 m/s



一定風が作用した時の風車応答



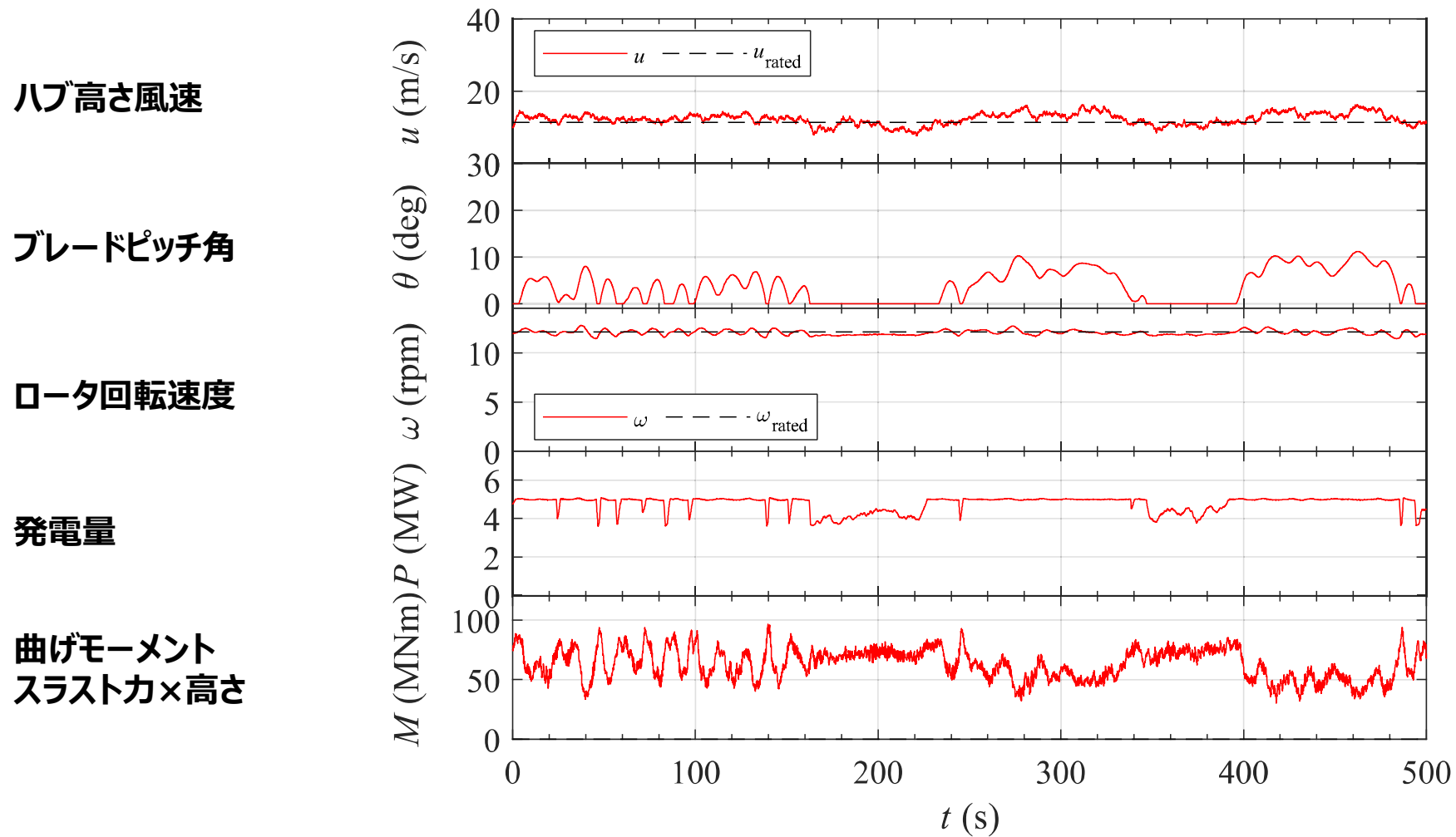
定格風速: 11.4 m/s



変動風が作用した時の風車応答



- ハブ高さ平均風速：12 m/s ≡ 定格風速

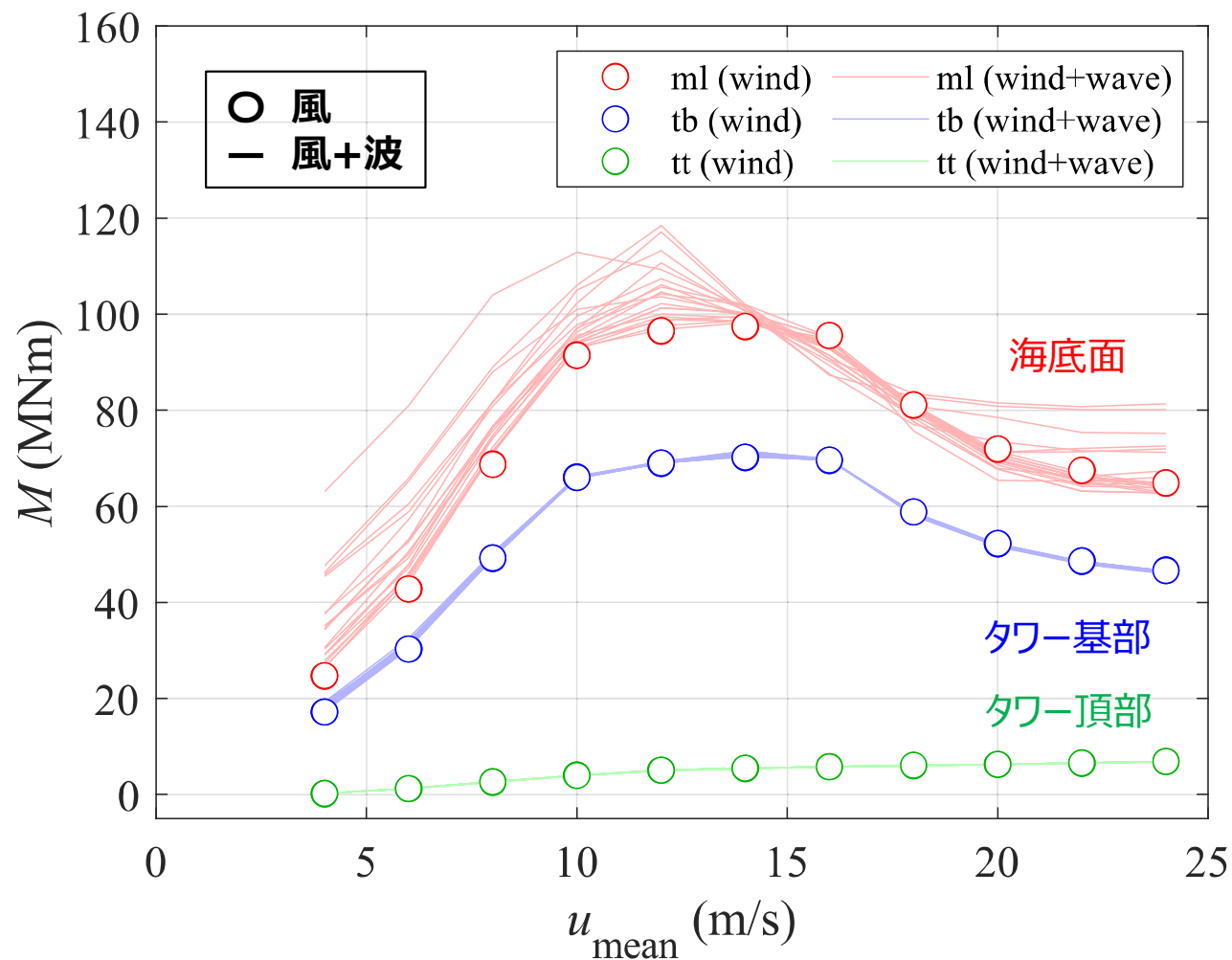


ブレードピッチ制御に起因する風車特有な応答特性（風速に対して非線形な応答）

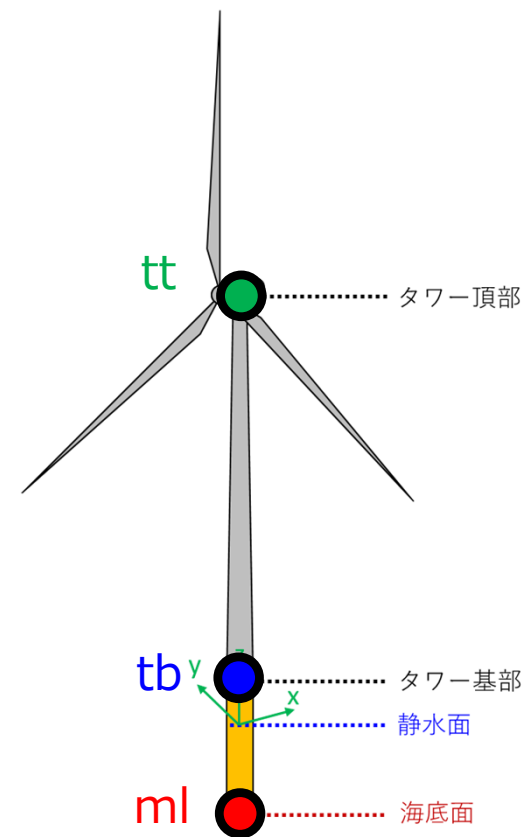
風と波が同時作用した時の風車応答



最大曲げモーメント



ハブ高さ平均風速

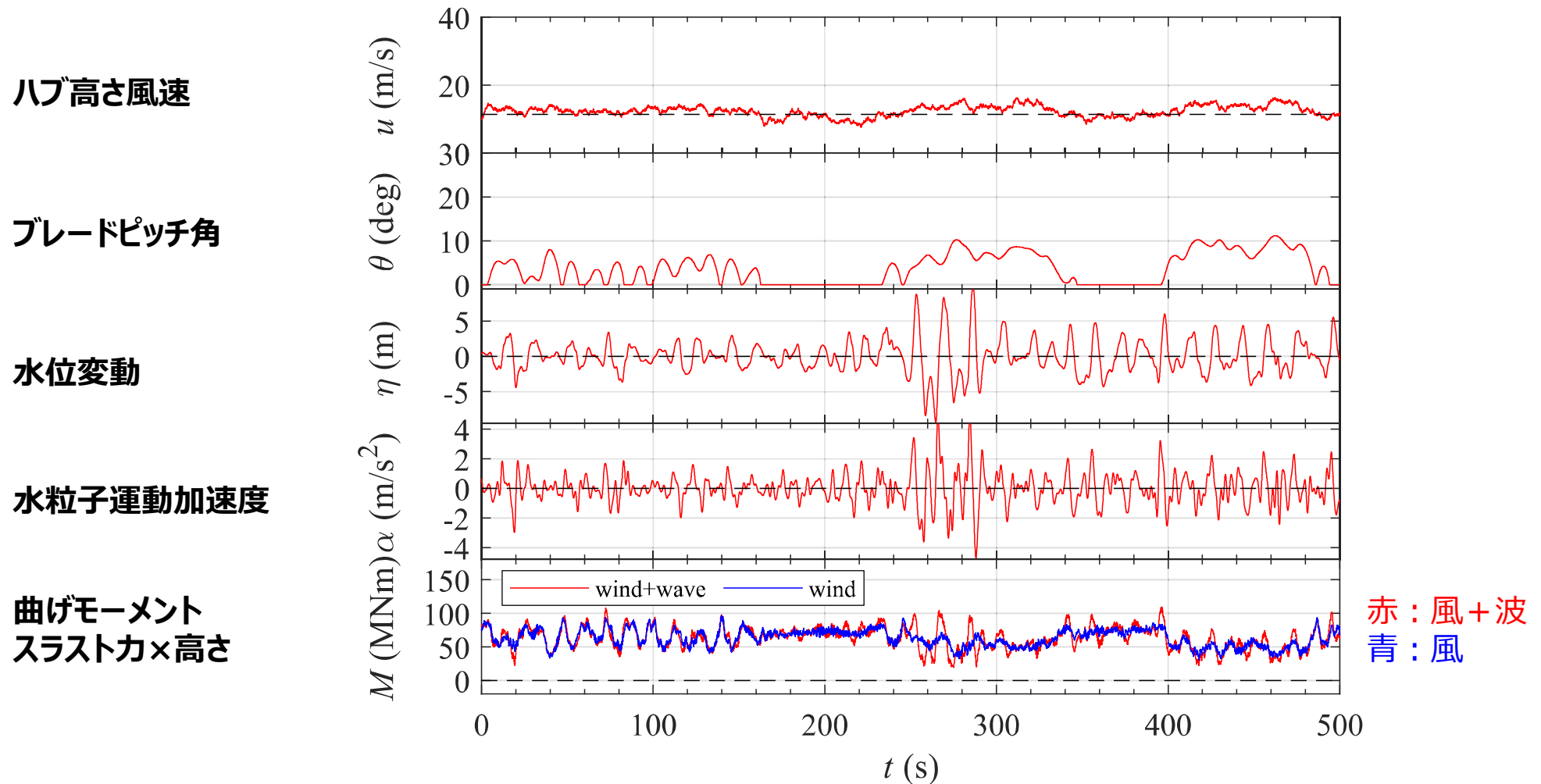


海底面において波の影響が極大

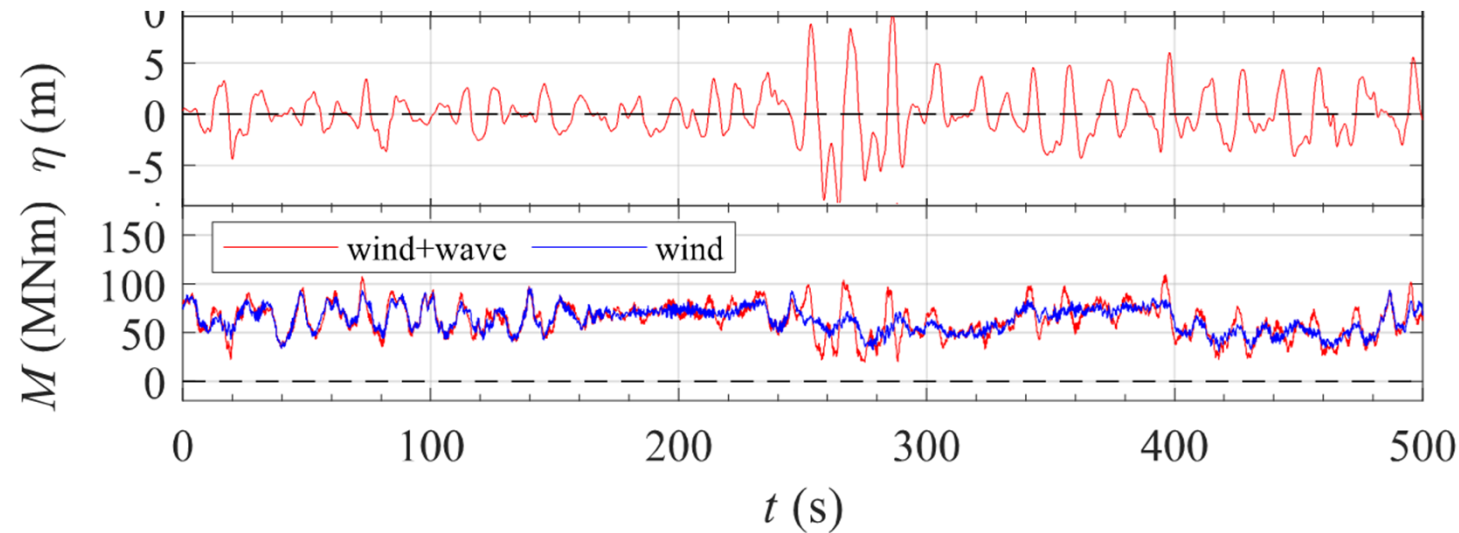
風と波が同時作用した時の風車応答



- ハブ高さ平均風速 : 12 m/s ≡ 定格風速, 波高 : 8 m, 波周期 : 16s



波作用による風車応答の増幅効果



赤：風＋波
青：風

波による曲げモーメント
の増幅率 (A_M)

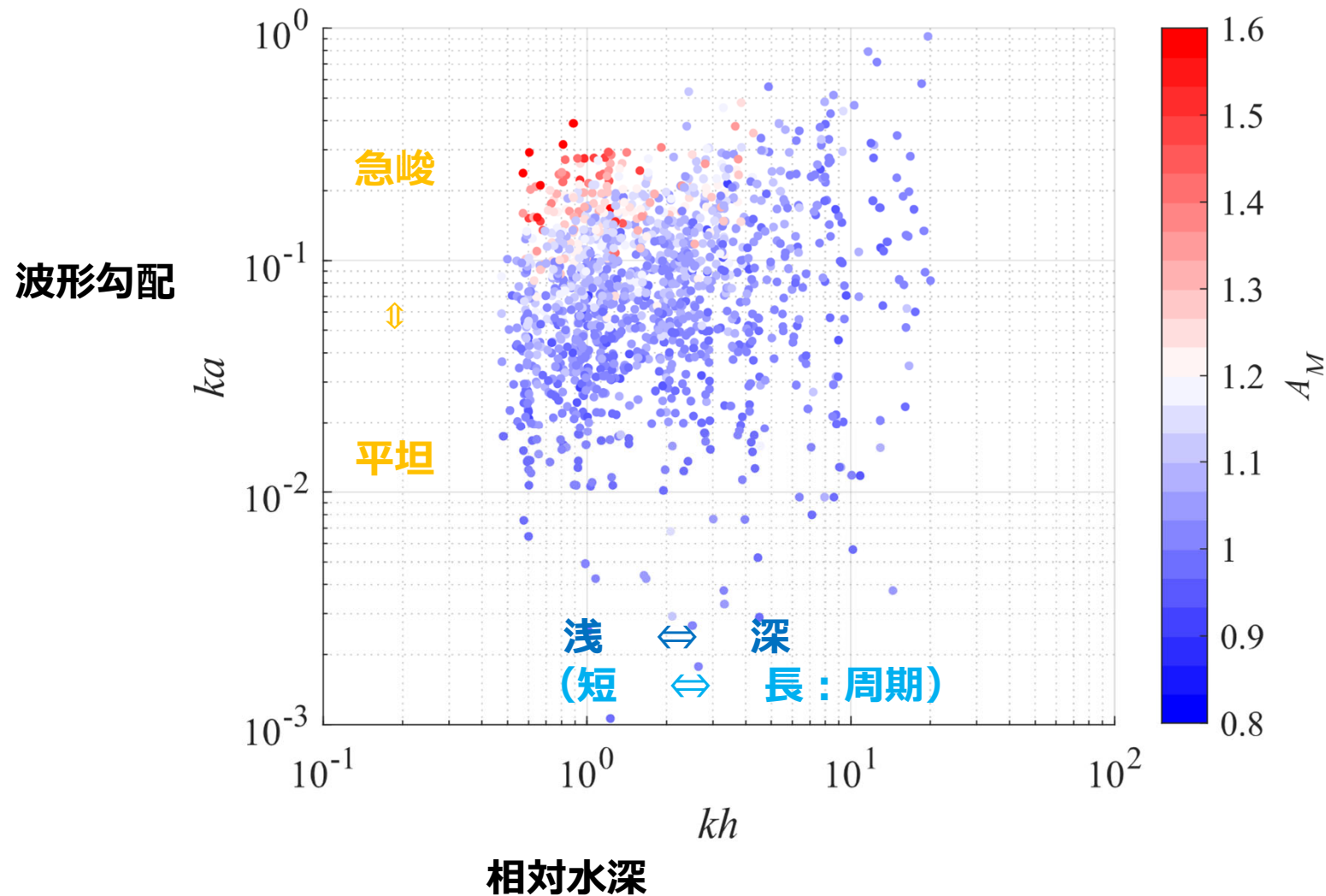
=

波・風荷重作用下における個々波に対応する曲げモーメント
風荷重作用下における個々波に対応する曲げモーメント

波作用による風車応答の増幅効果



- ハブ高さ平均風速：8 m/s << 定格風速



風車応答の簡易推定

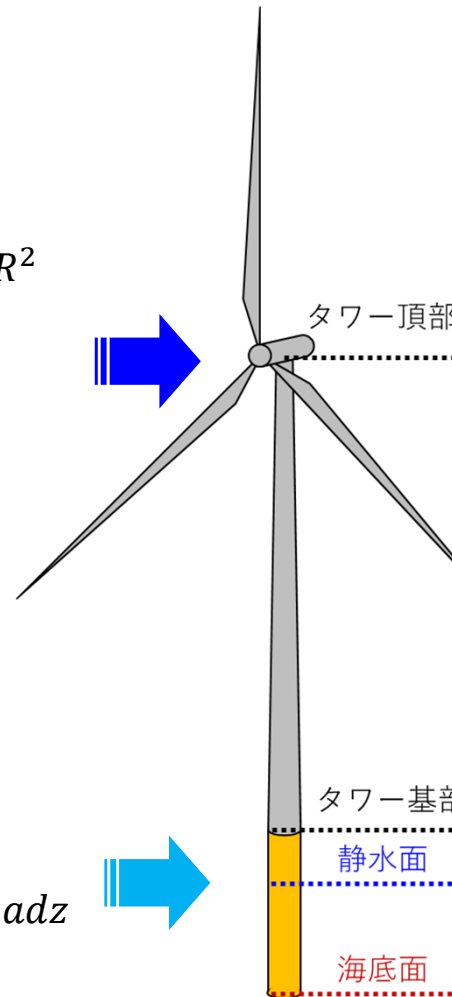


静的解析（力のつり合い）

①風荷重=ロータに作用する荷重

1) 平均風荷重 $F_{wind}^{mean} = \frac{1}{2} \rho_a u_m^2 C_T \pi R^2$

2) 最大風荷重 $F_{wind}^{max} = G_D F_{wind}^{mean}$
(石原・石井, 2010)



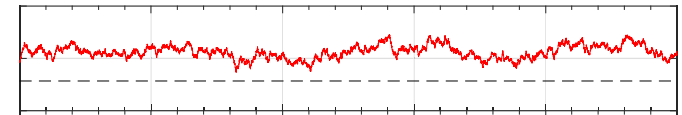
②波荷重=モリソン式による荷重

$$F_{wave} = \int_{-h}^0 \frac{1}{2} C_D \rho_w dv^2 dz + \int_{-h}^0 C_M \rho_w \frac{\pi d^2}{4} a dz$$

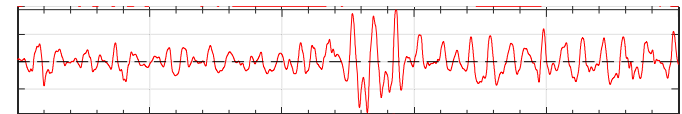


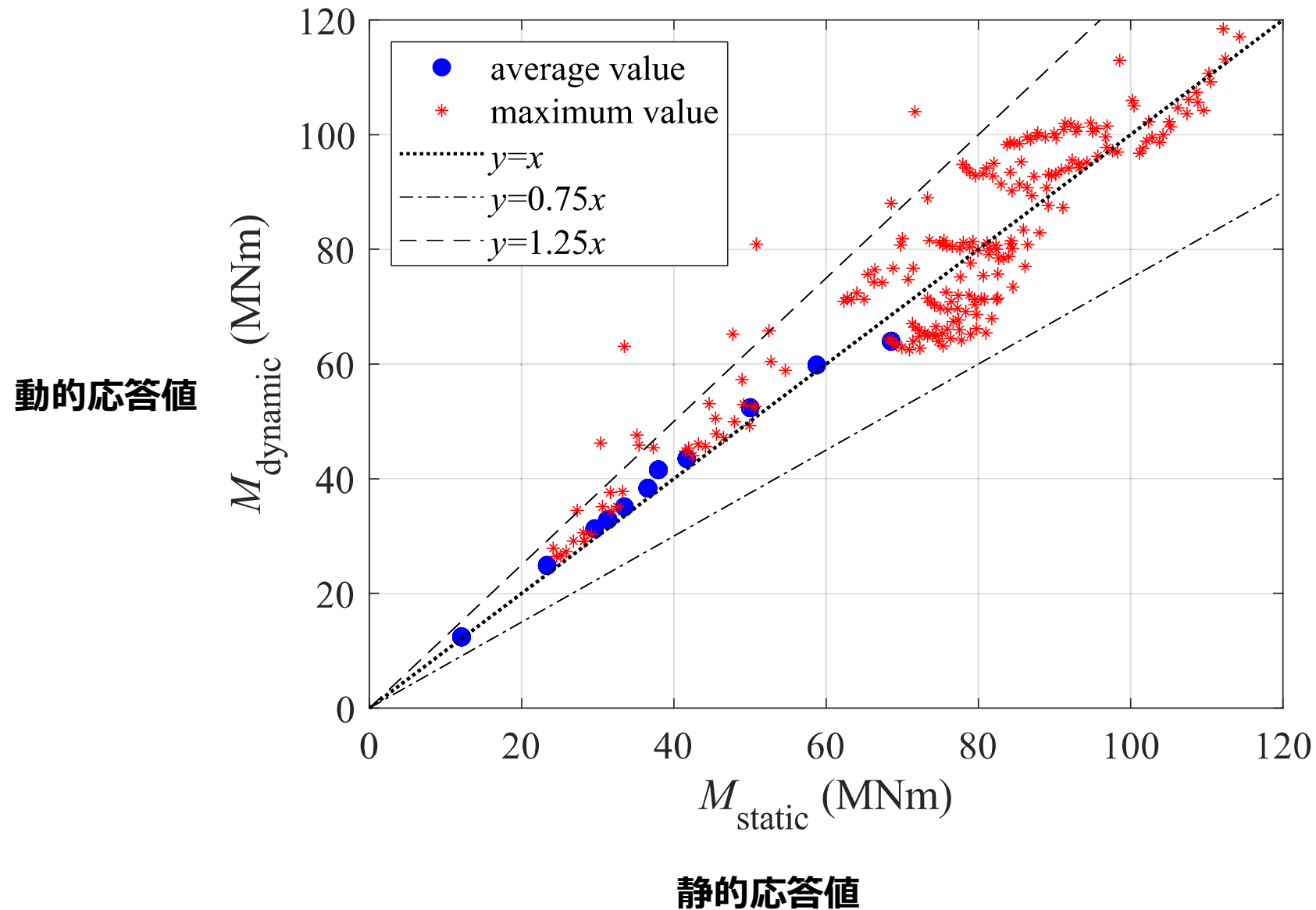
動的解析（時刻歴解析）

①風荷重=風速変動



②波荷重=水位変動





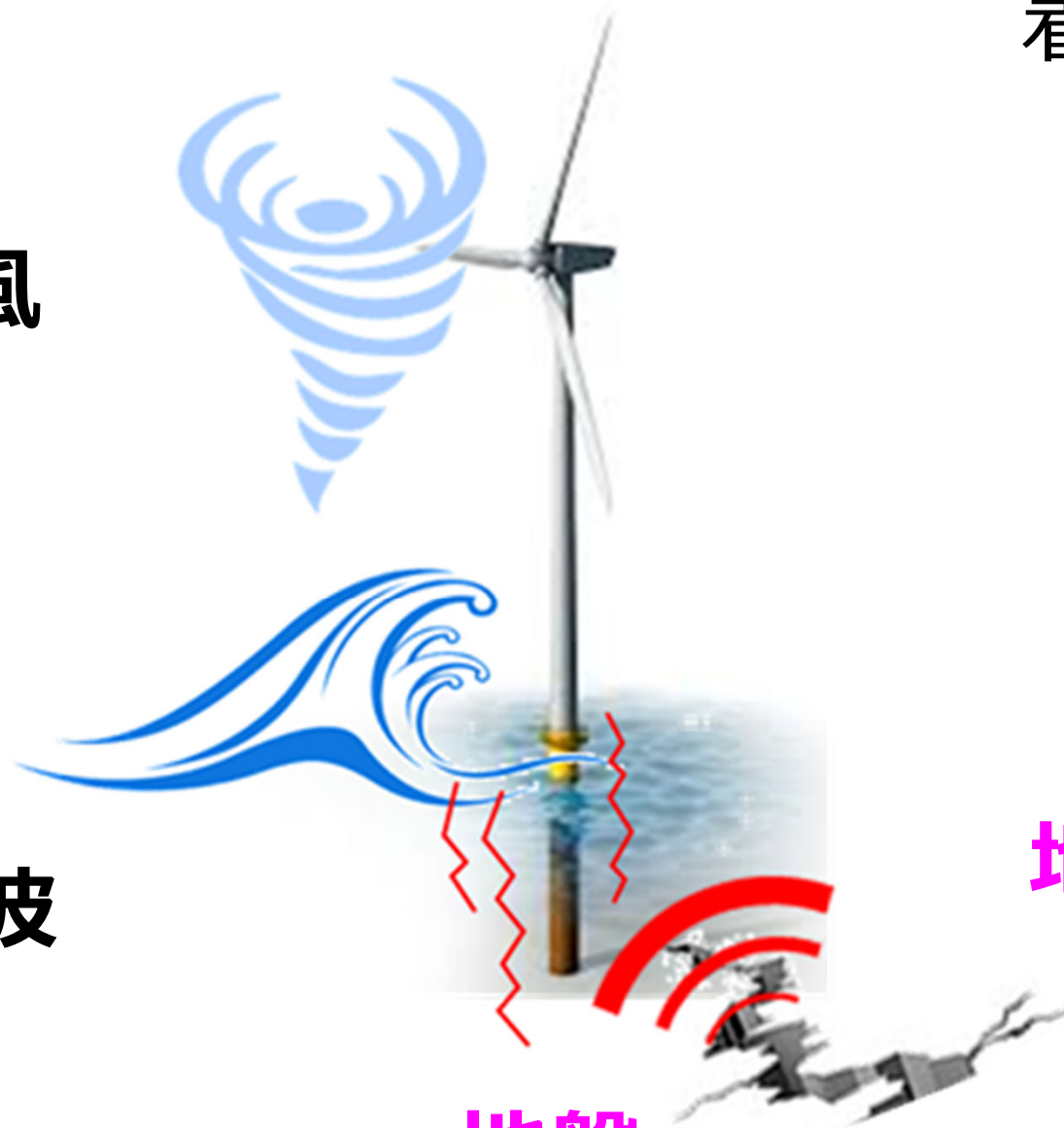
着床式

風

波

地震

地盤



風と波と地震が同時に作用した時の風車応答



●モノパイル式洋上風力発電施設（洋上風車）の地震時荷重

- 風と波に対する空力弾性解析
- 地震に対する地震応答解析



- * 荷重の相互作用や増幅効果など構造物の複合的な応答を評価できない
- * 経済面で不利な設計断面となる可能性がある

●風と波と地震を同時に考慮して洋上風車の応答を評価することが重要

風＋波



+

地震

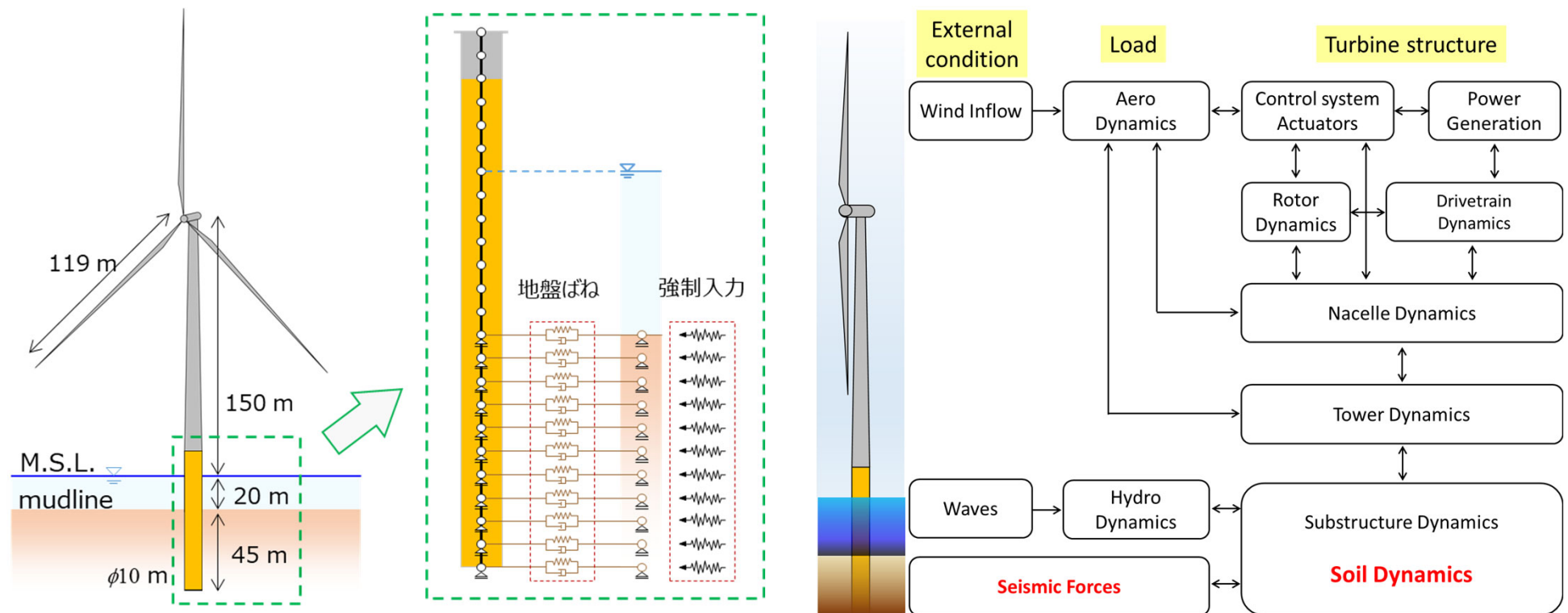


風＋波＋地震



●改良OpenFAST (加島ら, 2023)

- 空力弾性解析 : 翼素運動量理論
- 流体力解析 : モリソン式 (構造物の振動を考慮)
- 振動解析 : モーダル法, マルチボディダイナミクス法
- 地震力 : 強制入力 (FLIP結果)
- 地盤-構造物相互作用 : 地盤ばねモデル (線形)

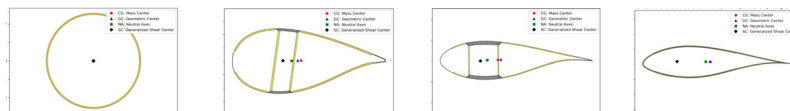


●15MWモノパイル型洋上風車モデル

- IEA Wind TCPの解析コード比較検証で採用された定格出力



項目		諸元値
タワー頂部	高度	M.S.L.+144.5 m
	径	6.5 m
	厚さ	24 mm
タワー基部	高度	M.S.L.+15 m
	径	10 m
	厚さ	41 mm
モノパイル部	長さ (根入れ)	80 m (45 m)
	径	10 m
	厚さ	60 mm
ハブ	高度	M.S.L.+150 m
ブレード	長さ	119 m
カットイン風速		3 m/s
定格風速		10.6 m/s
カットアウト風速		24 m/s



Section side

Trailing edge

解析条件



●風条件

- 変動風：Kaimal乱流スペクトル
- 平均風速：4, 8, 10, 12, 16, 18, 24 m/s

●波条件

- 不規則波：JONSWAPスペクトル
- 波高：2-8 m
- 周期：6-16 s

●地震条件

- 最大地震加速度：122 Gal, 712 Gal
- 地震作用時刻：0 s

●地盤条件

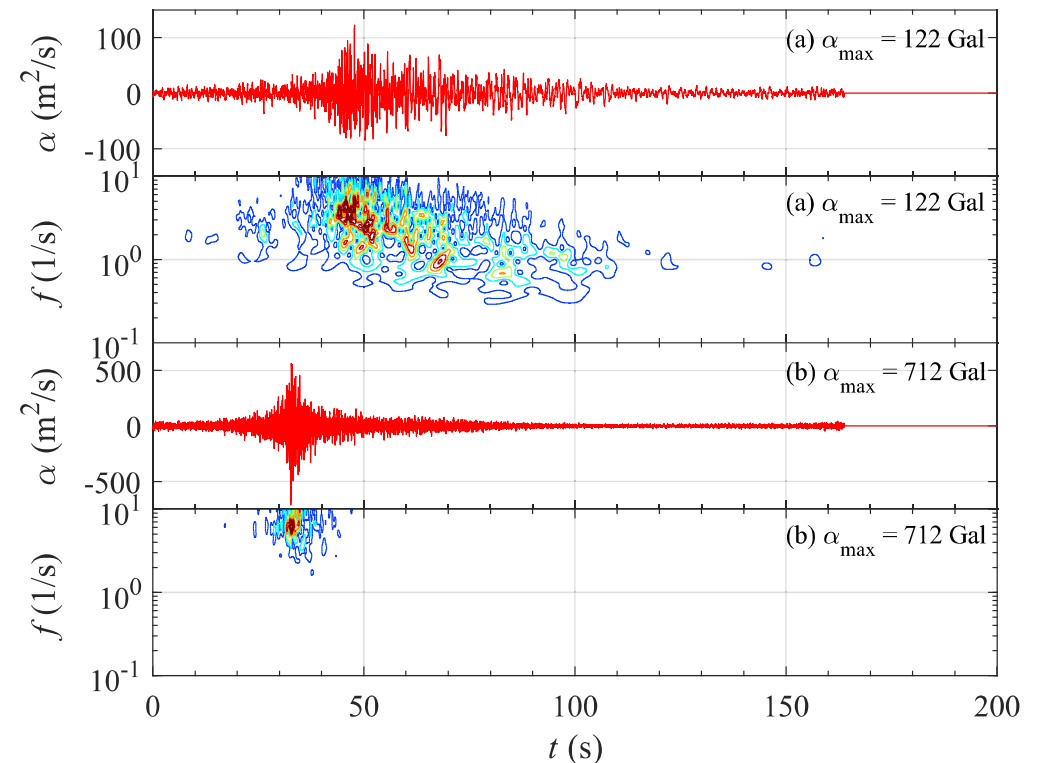
- 変位なし：海底面固定
- 変位あり（液状化は考慮なし）
 - N値：5, 50
 - 地盤ばね：地盤反力係数×負担面積

$$k_{CH} = 1500 \cdot a \cdot N \text{ (Chang, 1937)}$$

●演算条件

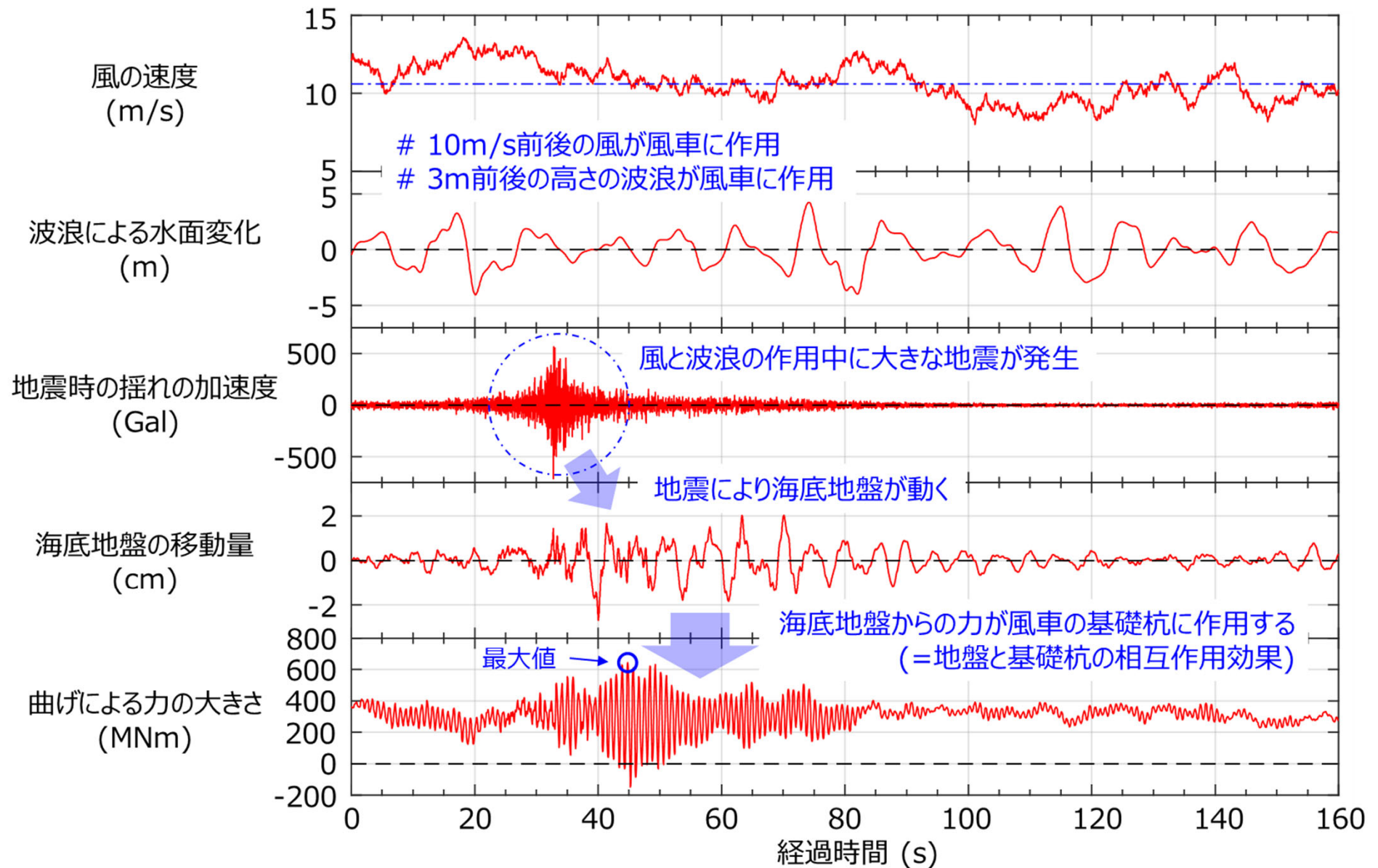
- 出力サンプリング周波数：20 Hz
- 解析時間：600 s

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H_{in} (m)	3	2	4	2	4	6	8	4	8	2
T_{in} (s)	6	8	10	12	12	12	12	14	14	16

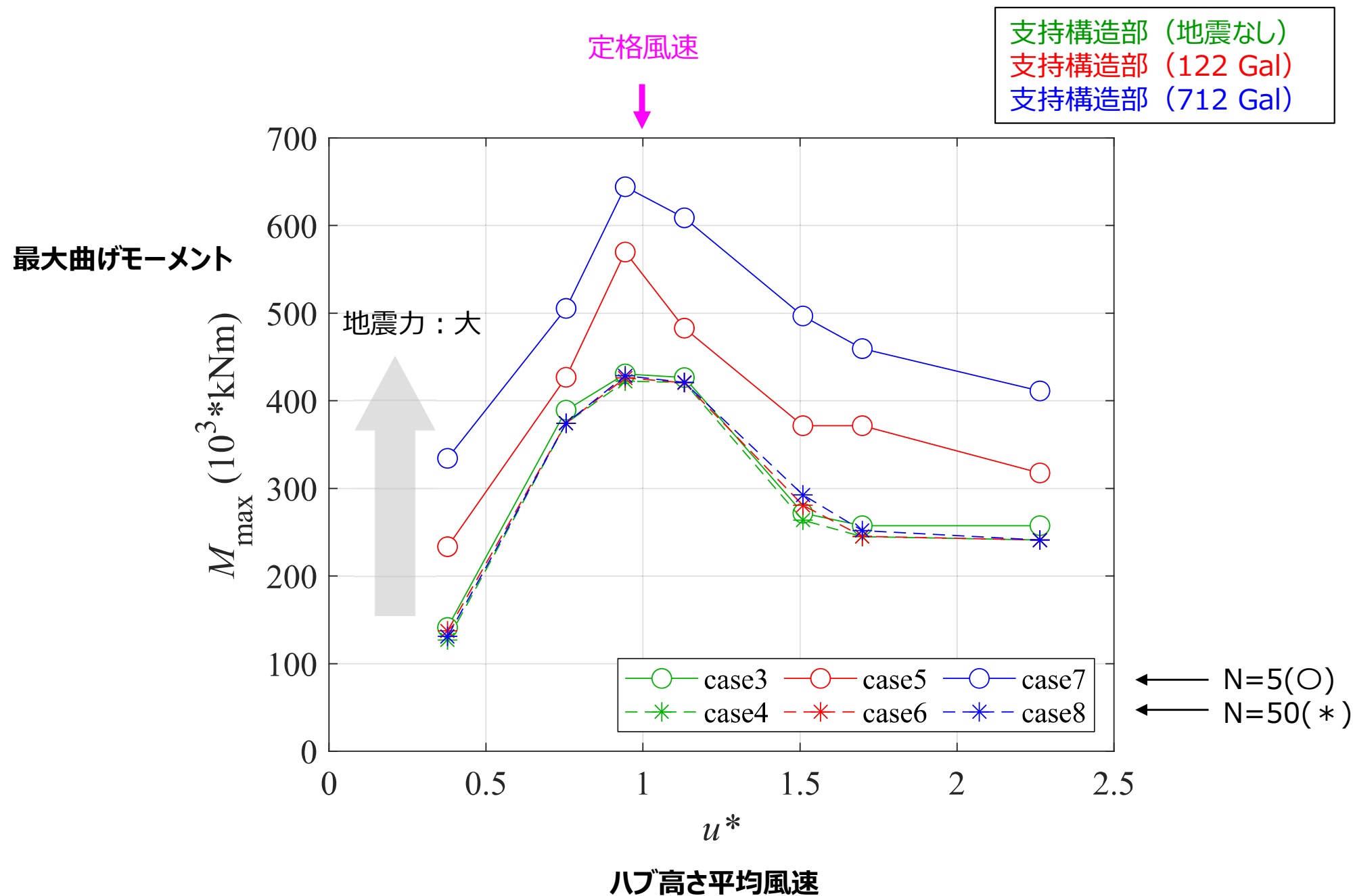


N値	せん断弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン比	単位体積重量 (t/m)	せん断波速度 (m/s)	Rayleigh減衰
5	$4.5 \cdot 10^4$	0.33	2.0	150	$7.64 \cdot 10^{-3}$
50	$1.8 \cdot 10^5$	0.33	2.0	300	$3.82 \cdot 10^{-3}$

地震が作用した時の風車応答



ハブ高さ平均風速と曲げモーメントの関係

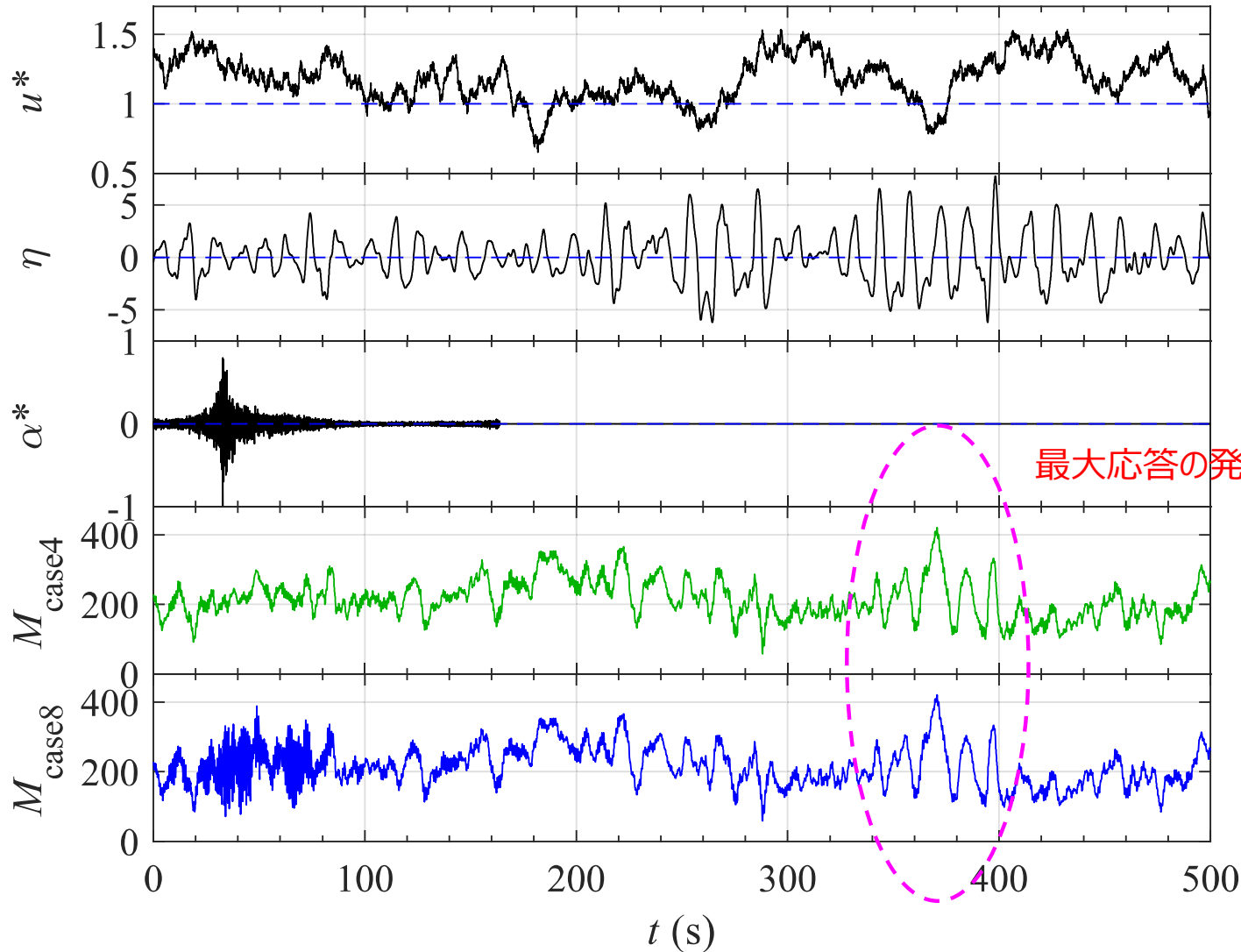


作用外力と最大応答発現の関係



●N値=50

ハブ高さ風速



曲げモーメント
(地震なし)

曲げモーメント
(地震あり)

最大応答の発現

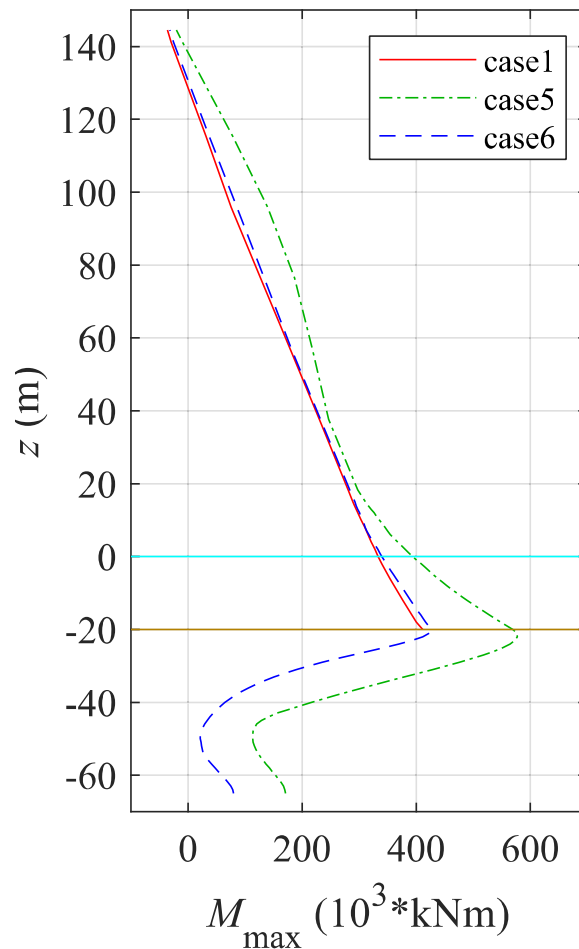
曲げモーメントの鉛直プロファイル



- ハブ高さ平均風速：10 m/s

海底面 ($N=\infty$)
支持構造部 ($N=5$)
支持構造部 ($N=50$)

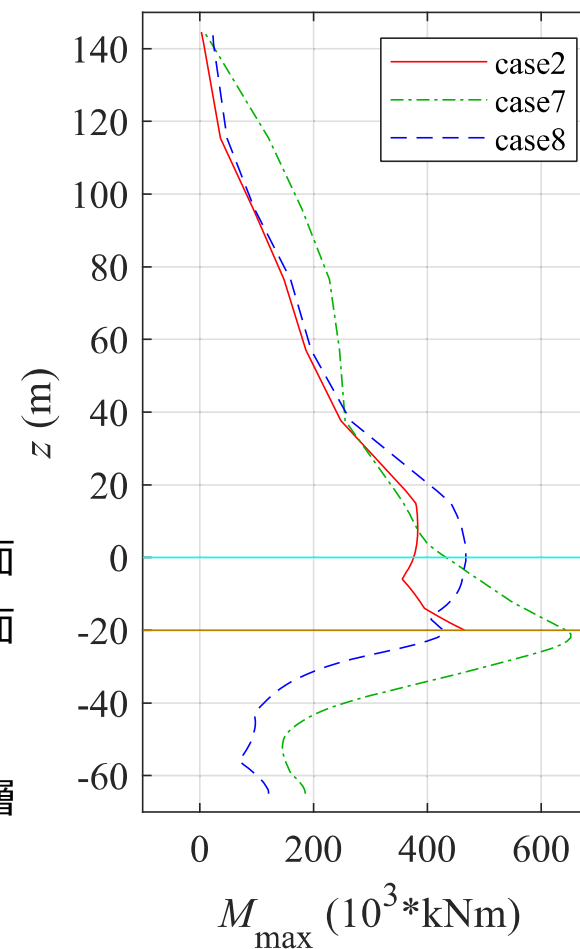
地震波 (122 Gal)



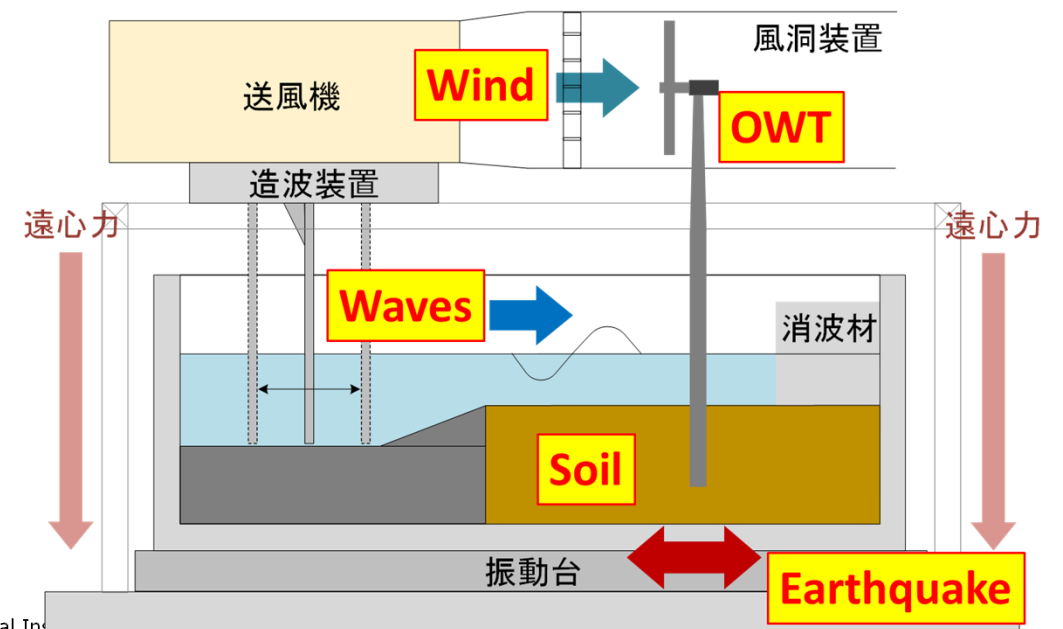
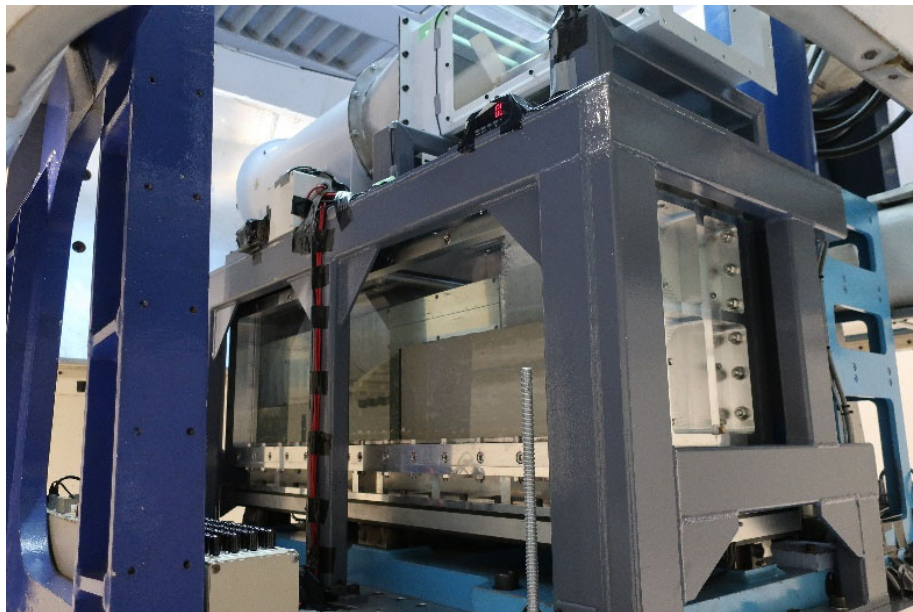
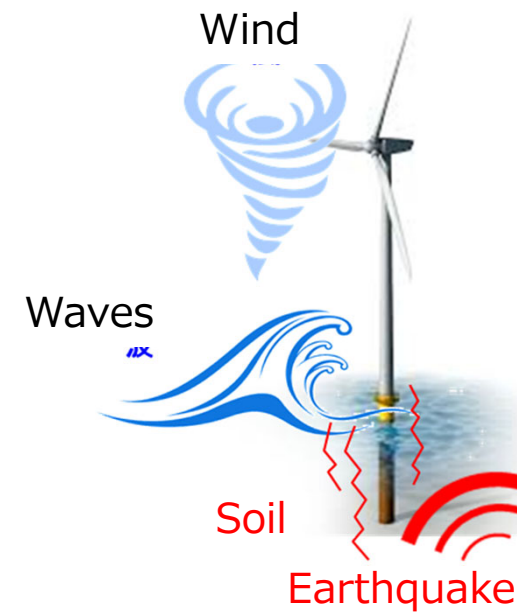
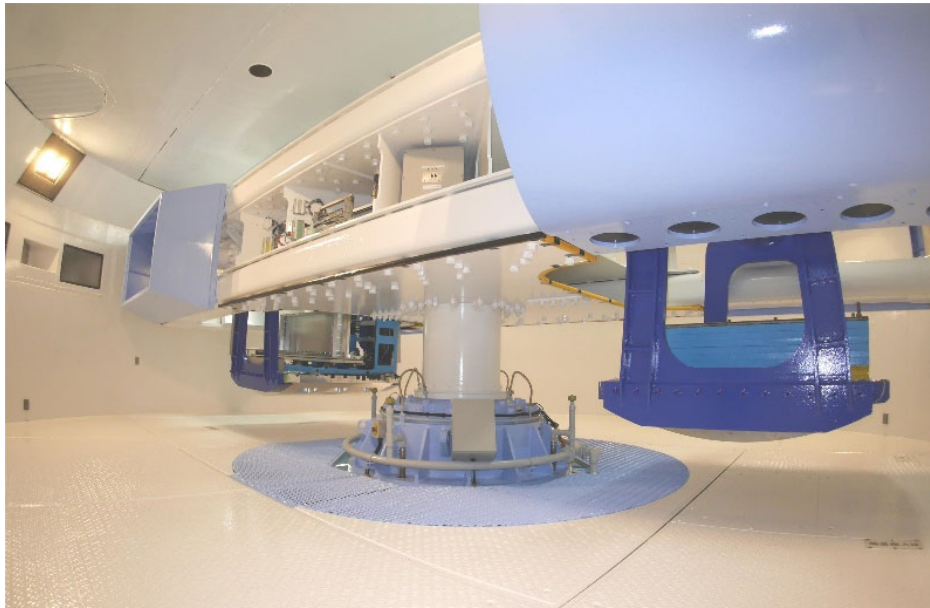
地震波 (712 Gal)

タワー
トップ

静水面
海底面
支持層



遠心模型実験（実験装置の開発）



風・波・地震による複合外力作用下の 着床式洋上風車の遠心模型実験

高橋 英紀¹・土田 雄大²・加島 寛章³・
大矢 陽介⁴・栗原 大⁵・市川 友弘⁶

¹ 正会員 東京海洋大学 学術研究院 海洋資源エネルギー学部門 (〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7)
E-mail: takahashi-h@kaiyodai.ac.jp (Corresponding Author)

² 正会員 (株) エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4) (出向先: 港湾空港技術研究所)

³ 正会員 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 海洋利用研究領域
(〒239-0826 神奈川県横浜須賀市長瀬 3-1-1)

⁴ 正会員 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域
(〒239-0826 神奈川県横浜須賀市長瀬 3-1-1)

⁵ 正会員 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 地震研究領域
(〒239-0826 神奈川県横浜須賀市長瀬 3-1-1)

⁶ (株) ジオデザイン 技術課 (〒108-0023 東京都港区芝浦 3-20-6)

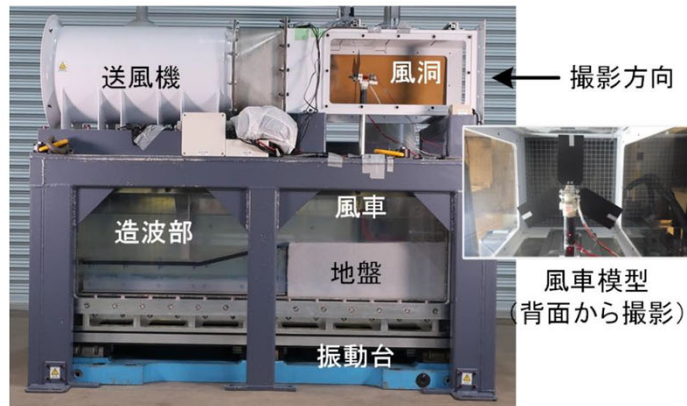


図4 開発したシミュレータ (実験準備室で撮影)

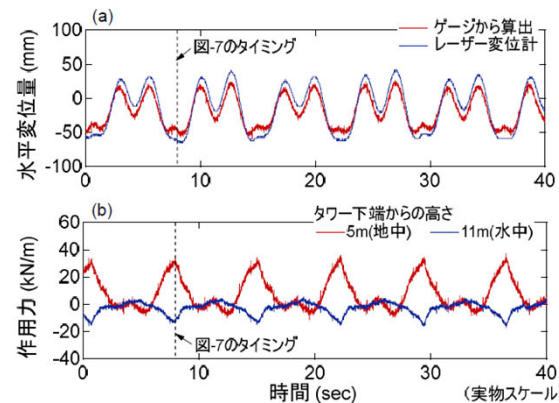
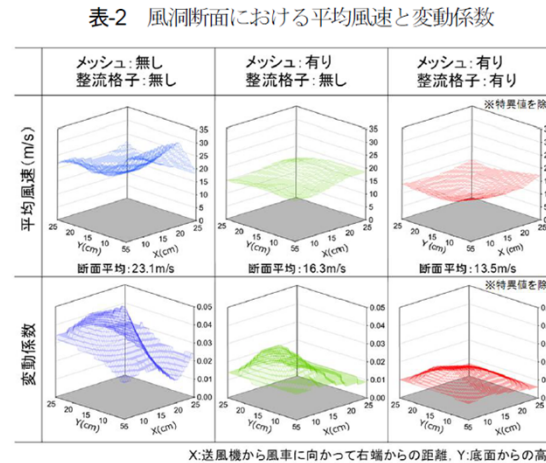
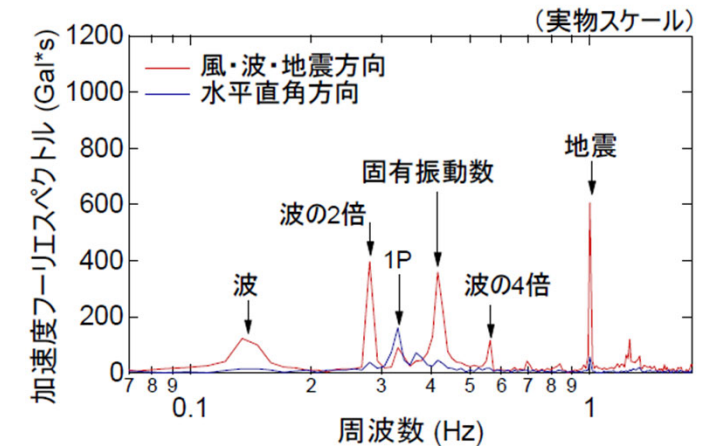
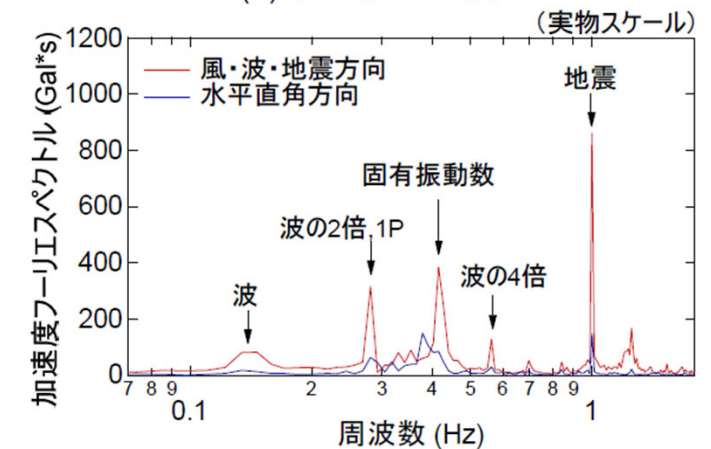


図8 タワー・基礎杭の水平変位量と作用力の時刻歴
(風上方向の変位と作用力が正)



(a) 風・波・地震



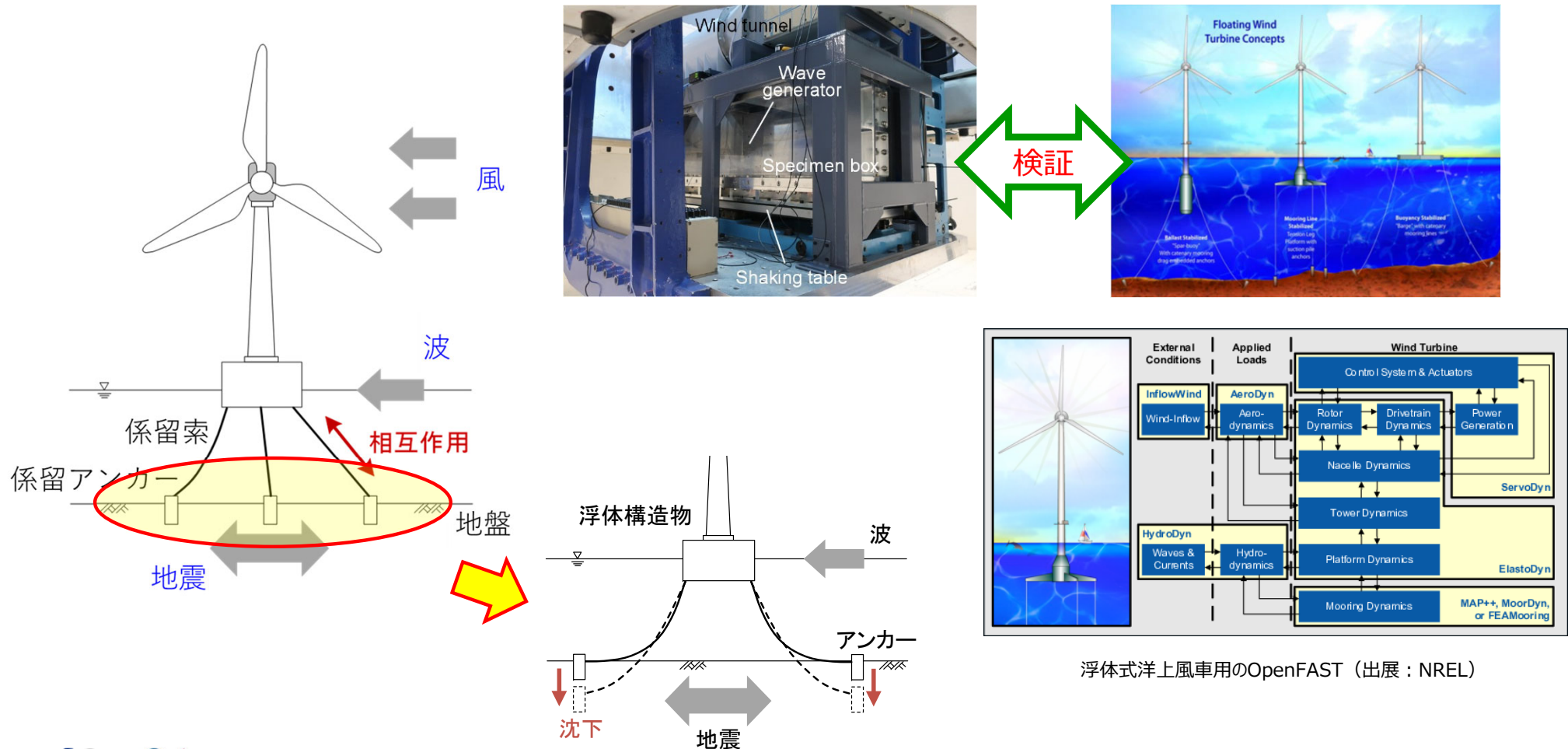
(b) 風・波+地震

図9 ナセルの加速度フーリエスペクトル

まとめと今後



- 風，波，地震作用下の着床式洋上風車の応答 → ジャケット式等の複数杭構造
 - 風-波-地震-地盤-構造連成解析コード
- 浮体式洋上風車の応答評価，係留アンカーの耐震性評価



浮体式洋上風車用のOpenFAST（出展：NREL）