



第22回 海上技術安全研究所研究発表会



# 複数の着床式洋上風車の応答に対する波の影響評価

国立研究開発法人 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  
加島 寛章, 米山 治男

## ■ 洋上風力発電施設の建設や導入が活発化

- グリーン成長戦略の柱である2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現
- 『洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和2年3月版）』の改訂
- 風車の大型化や高出力化等に関する技術開発の加速 → 発電効率や経済性のより高い風車建設

## ■ 大規模な洋上風車を対象とした研究事例

- Wang et al. (2021)
  - 10MWのモノパイル式洋上風車を対象に波の非線形性が風車応答に及ぼす影響を検討
- Xi et al. (2021)
  - 既存の荷重連成解析に地盤と構造の相互作用を導入し、10MWのモノパイル式洋上風車の疲労寿命を検討
- Medina et al. (2021)
  - 5, 8, 10, 15MWのモノパイル式洋上風車を対象に風車規模と地震応答の関係性、地震リスクを検討

## ■ 発電規模の異なる3基（5, 10, 15MW）のモノパイル式洋上風車を対象に、波と風に対する風車の応答特性や風車規模によるこれらの違いについて検討

# 解析概要

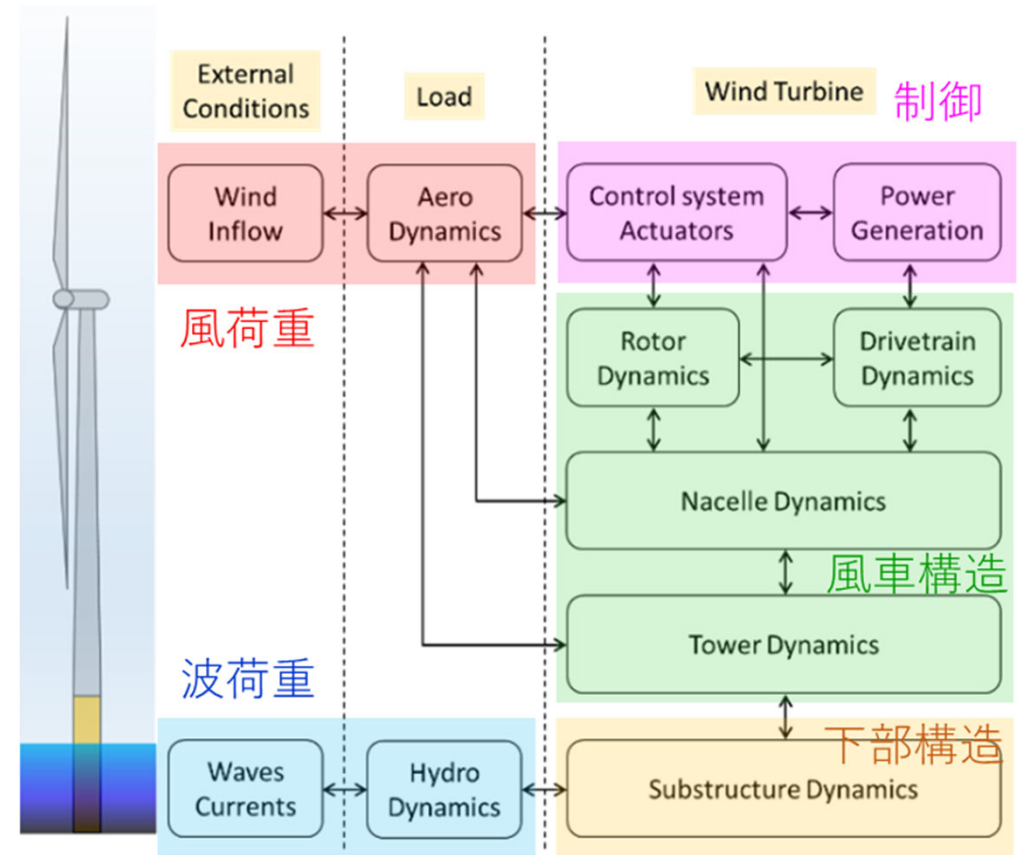


## ■ 解析手法

- 風車解析オープンコード: OpenFAST v3.0.0 (NREL)

## ■ 解析条件

- 風: 変動風
  - 4.0~24.0 m/s
  - IEC61400-1規定の標準乱流モデル
    - 乱流強度カテゴリ: C (洋上風車)
    - 乱流スペクトル: Kaimalモデル
  - 鉛直プロファイル: ベキ乗測 (0.14)
- 波: 一方向不規則波
  - 波高: 2.0~8.0 m, 周期: 6.0~16.0 s
  - JONSWAP型Sp波に2次非線形波を考慮
- 作用方向: 風・波同一方向
- 出力サンプリング周波数: 20 Hz
- 解析時間: 600 s



※ 地盤とモノパイルの相互作用・碎波力は対象外

- IEA Wind TCP（国際エネルギー機関風力技術協力プログラム）の解析コード比較検証で採用された定格出力5, 10, 15MWモノパイル式洋上風車モデル



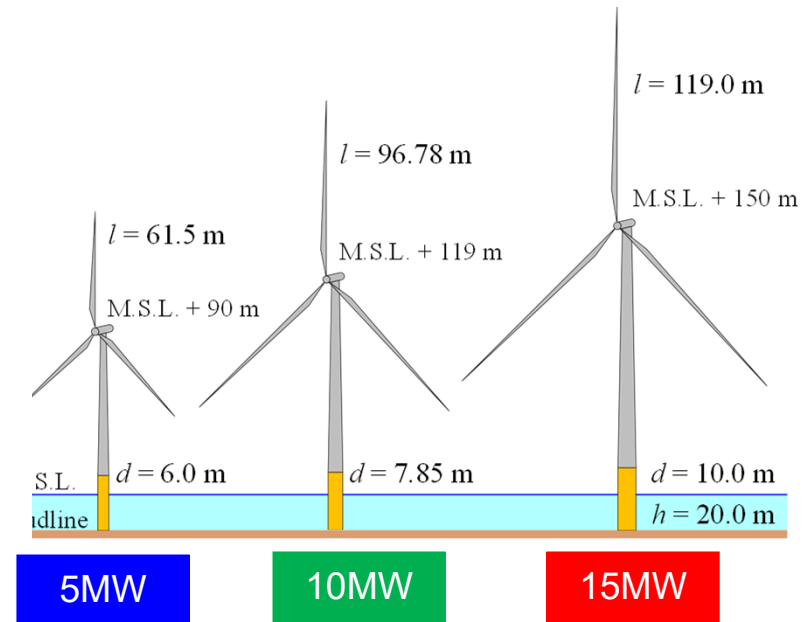
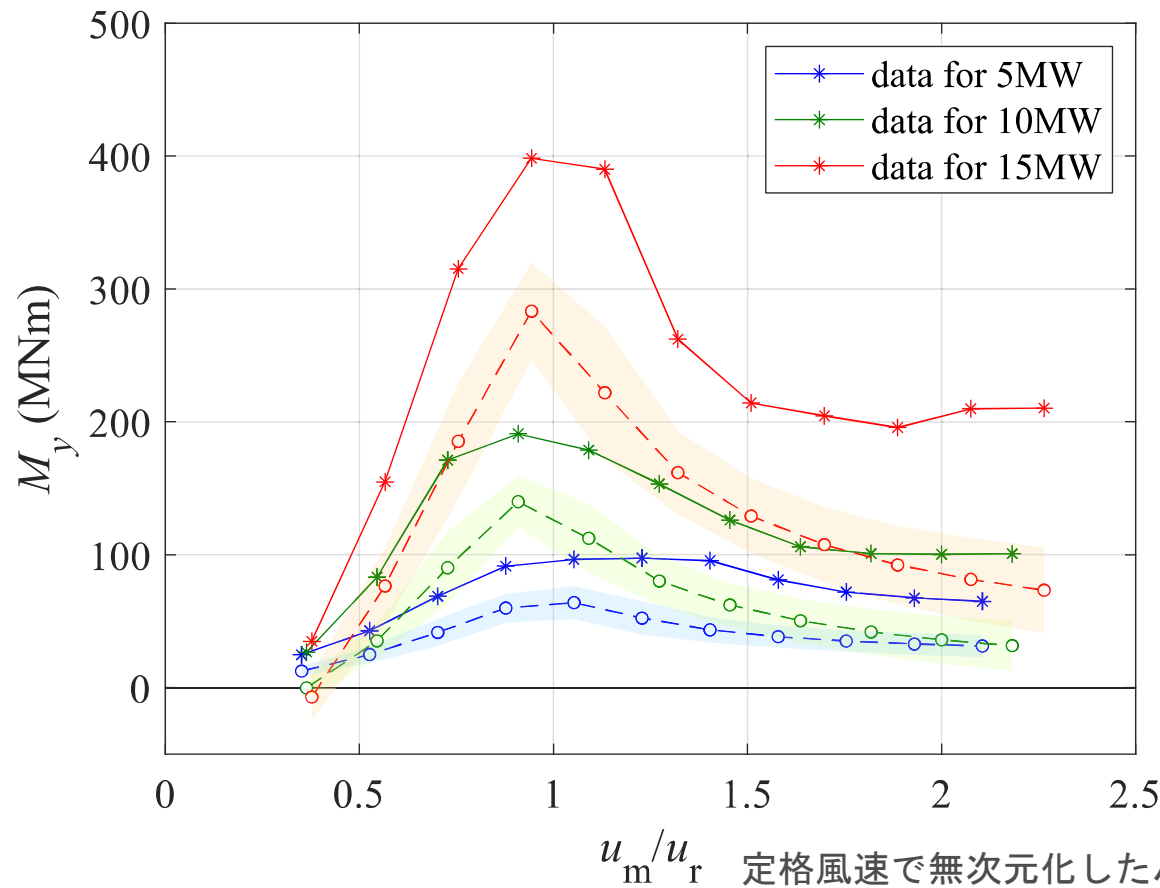
項目		諸元値		
		5MW風車	10MW風車	15MW風車
タワー頂部	高さ (m)	M.S.L + 87.6	M.S.L + 115.6	M.S.L + 144.5
	直径 (m)	3.87	5.50	6.50
	厚さ (mm)	19.0	20.0	24.0
タワー基部	高さ (m)	M.S.L + 10.0	M.S.L + 11.5	M.S.L + 15.0
	直径 (m)	6.0	7.85	10.0
	厚さ (mm)	27.0	38.0	41.0
モノパイル部	高さ (m)	30.0	31.5	35.0
	直径 (m)	6.0	7.85	10.0
	厚さ (mm)	60.0	60.0	60.0
ハブ	高さ (m)	M.S.L + 90	M.S.L + 119	M.S.L + 150
ブレード	長さ (m)	61.5	96.78	119.0
カットイン風速 (m/s)		3.0	4.0	3.0
定格風速 (m/s)		11.4	11.0	10.6
カットアウト風速 (m/s)		25.0	25.0	25.0

※ 水深20m海域での設置を想定

# 風車の風応答特性



## ■ 海底面における曲げモーメント

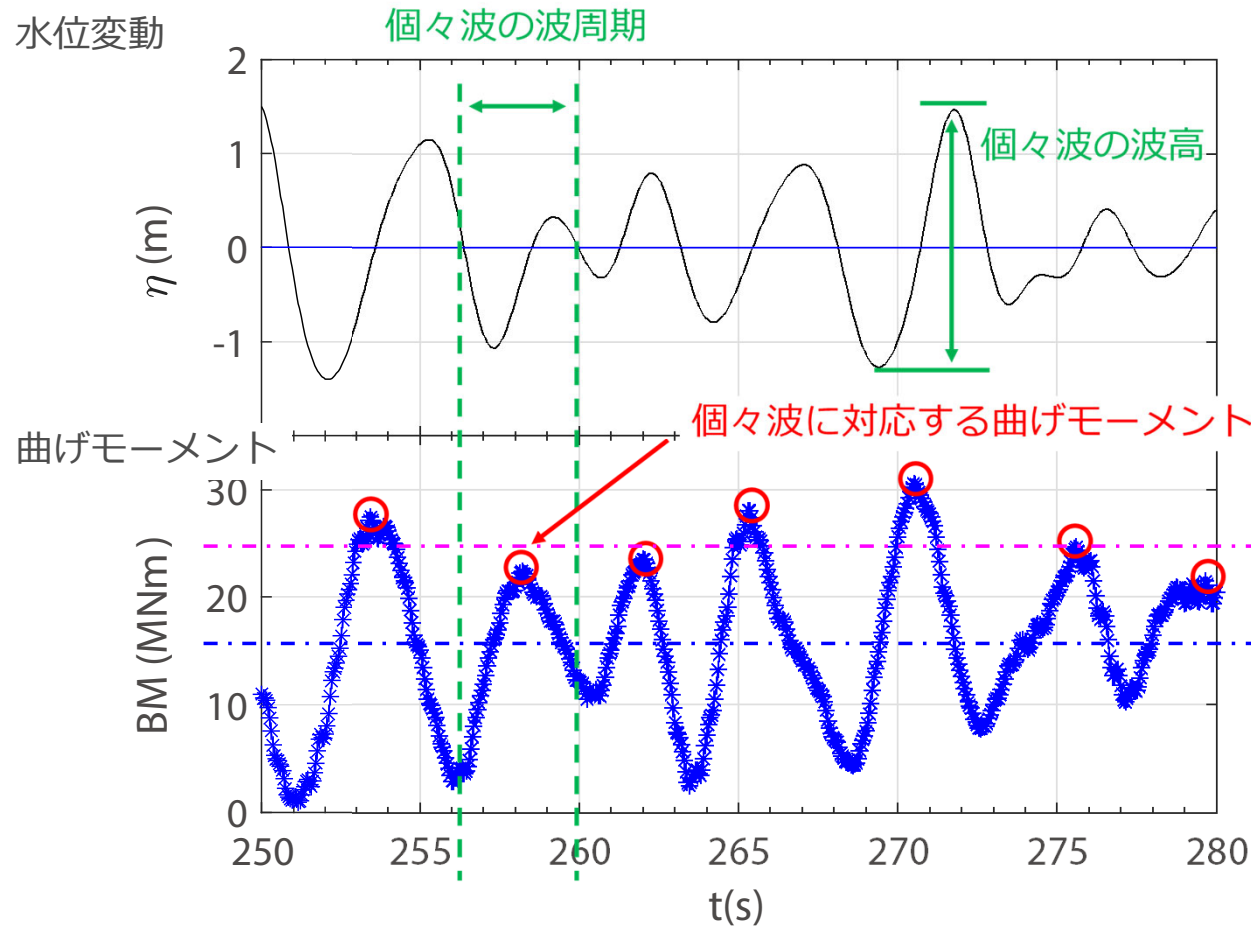


各色 : 発電規模  
 \* : 最大値  
 ○ : 平均値  
 色塗 : 標準偏差

# 波風同時作用下における風車の応答特性



風応答に波浪成分が追随 → 一波一波の応答 → 個々波に対応する曲げモーメント $M_w$



1. 水位変動をゼロダウンクロス法を用いた波別解析により個々波の波高と波周期を算出
2. 個々波の作用時間 (= 個々波の波周期に相当する時間) 中に時々刻々変動する曲げモーメントのうちの最大値を個々波に対応する曲げモーメント $M_w$ を定義

個々波に対応する曲げモーメントの平均値

時々刻々変動する曲げモーメントの時間平均値

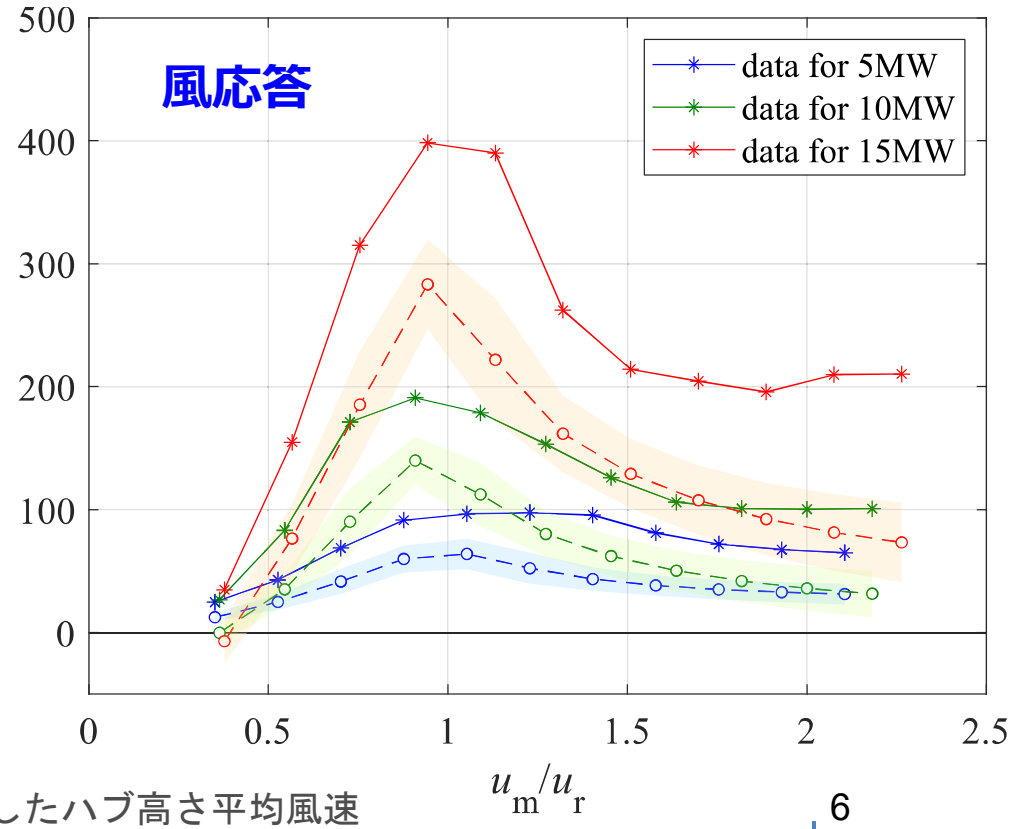
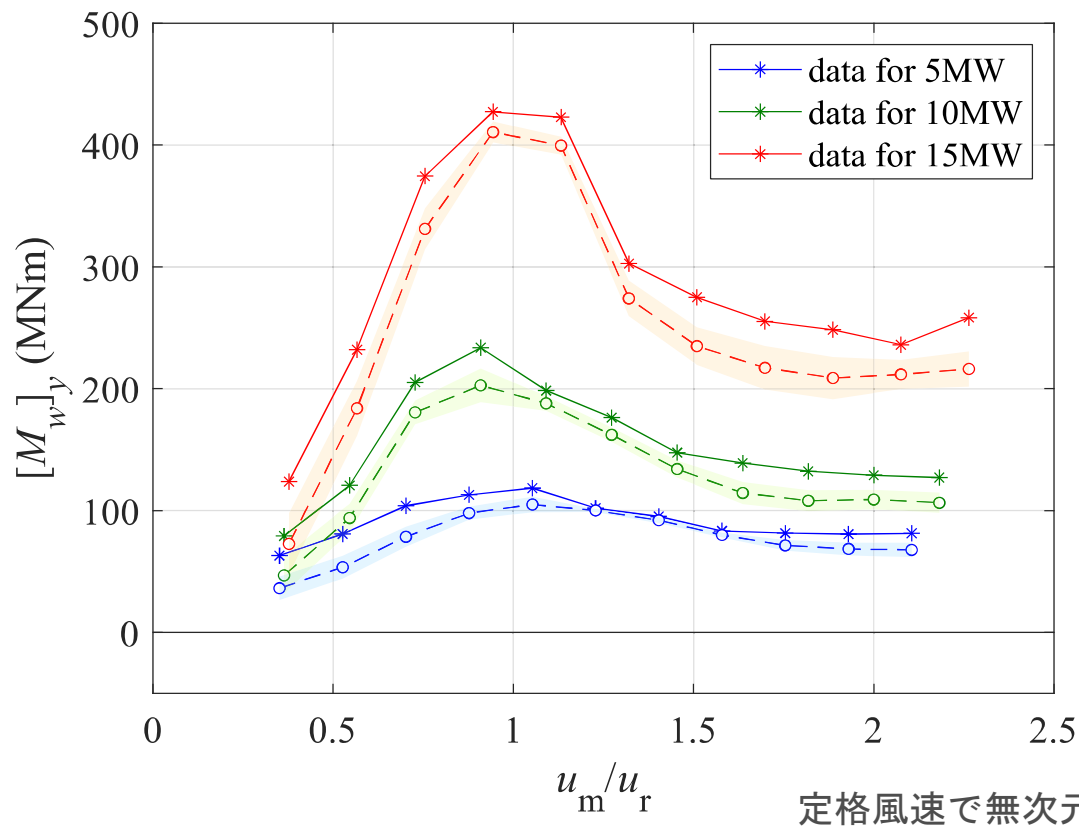
# 波風同時作用下における風車の応答特性



## ■ 海底面における個々波に対応する曲げモーメント

風応答に波浪成分が追随 → 波浪分だけ増大, 風応答と同様な分布

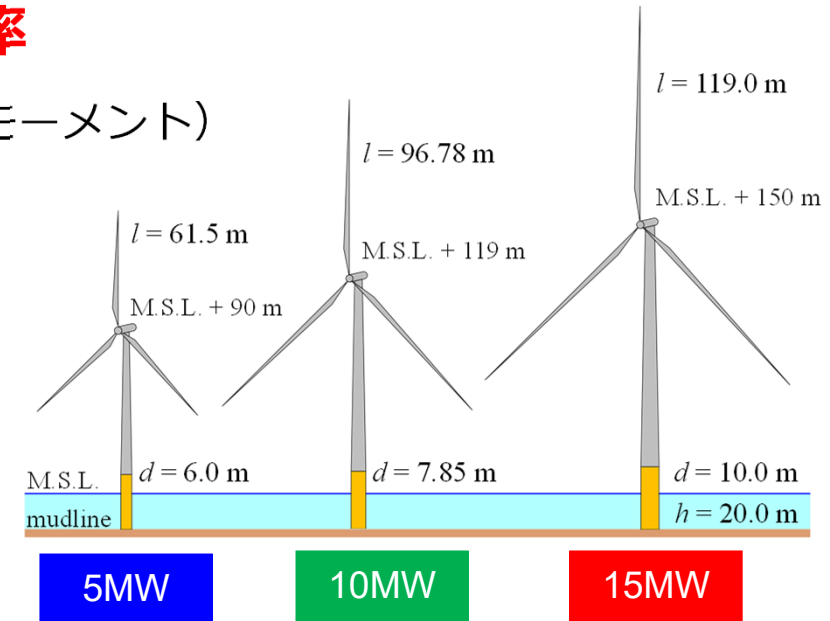
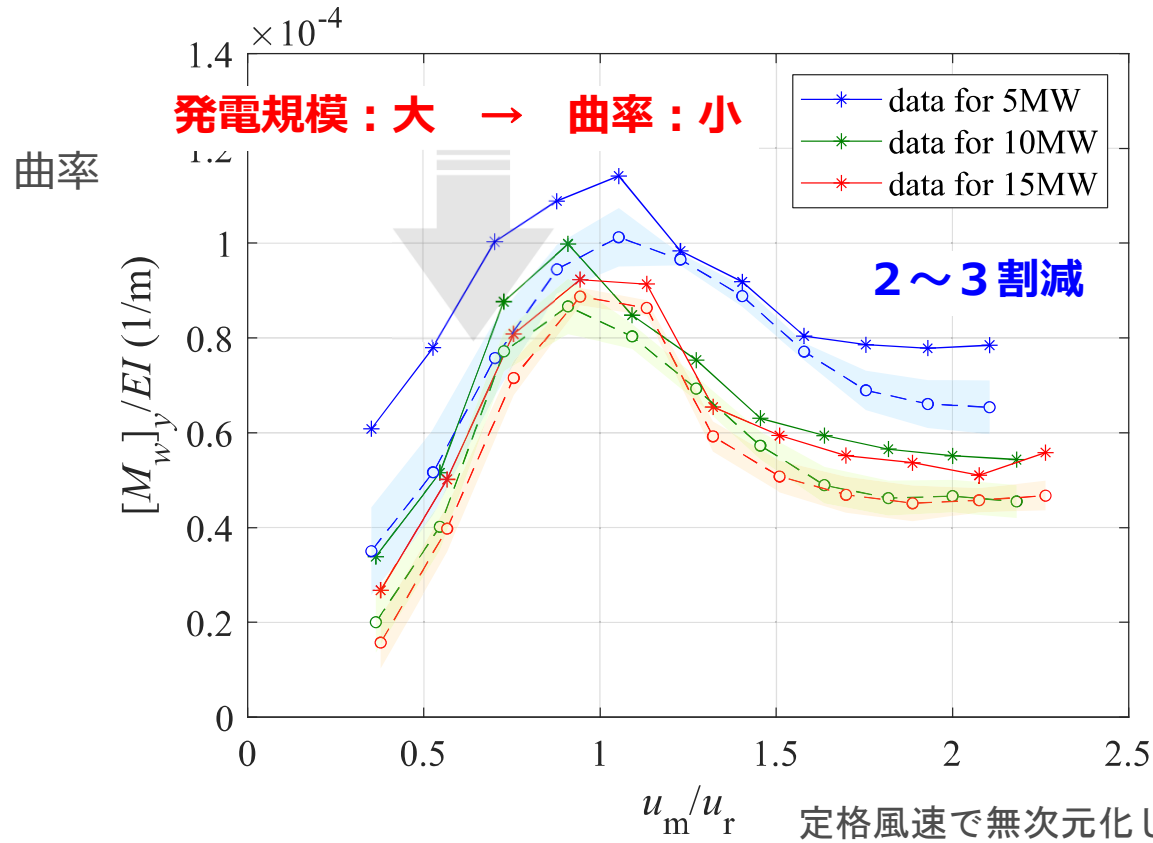
各色 : 発電規模  
 \* : 最大値  
 ○ : 平均値  
 色塗 : 標準偏差



# 波風同時作用下における風車の応答特性



- 構造物の安定性 → 構造特性を含めた応答評価 → **曲率**
- 構造物の耐力指標：EI（**曲げ剛性** = 鋼のヤング率 × 断面2次モーメント）



各色：発電規模  
\*：最大値  
○：平均値  
色塗：標準偏差

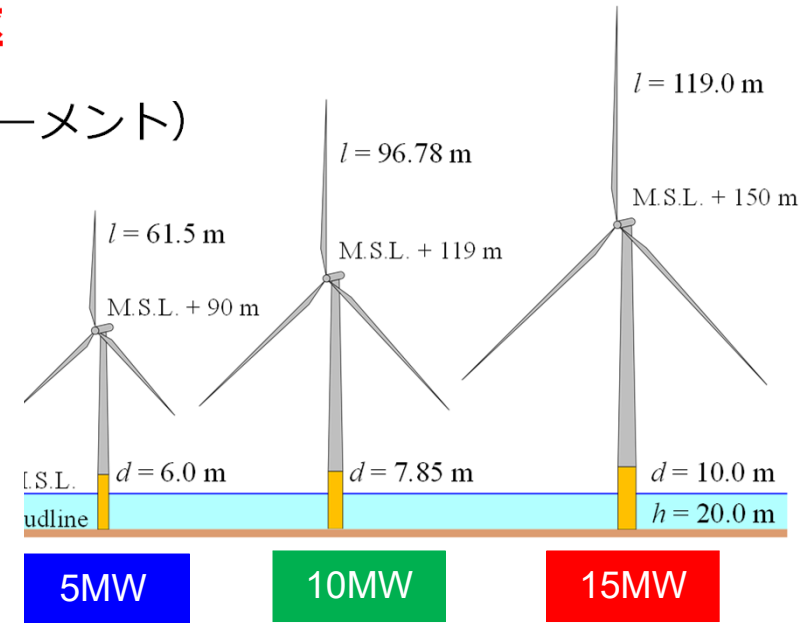
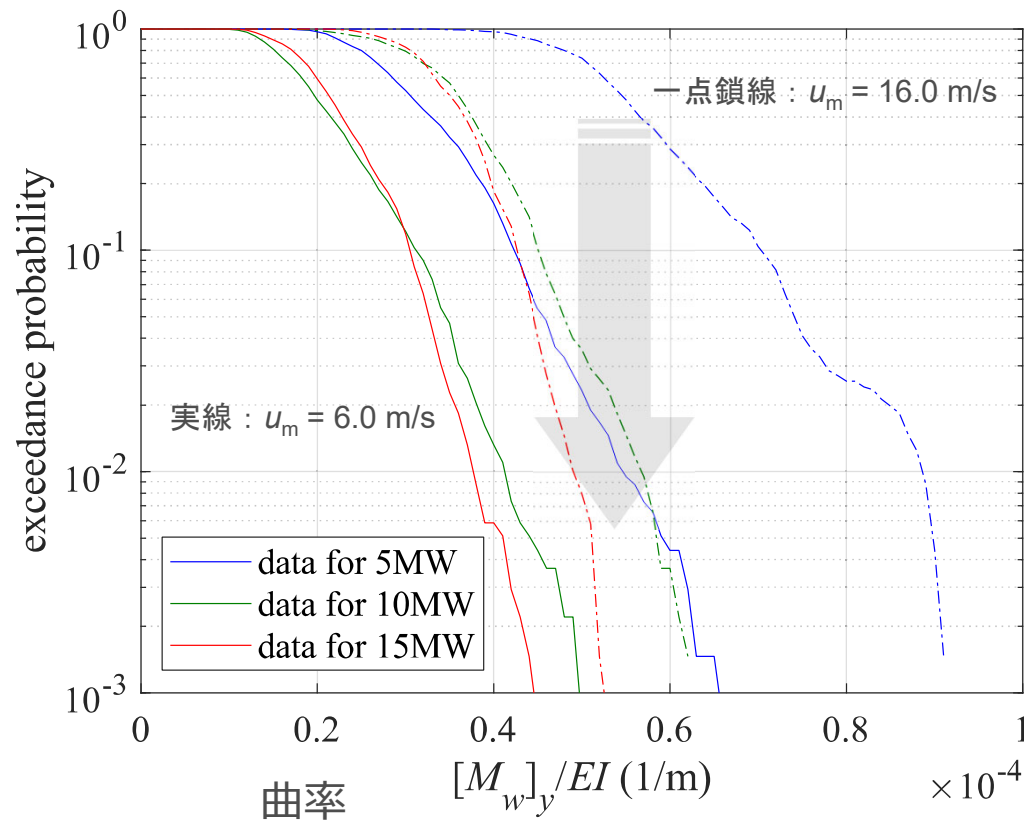


# 波風同時作用下における風車の応答特性



- 構造物の安定性 → 構造特性を含めた応答評価 → **曲率**
- 構造物の耐力指標：EI (**曲げ剛性** = 鋼のヤング率 × 断面2次モーメント)

曲率の  
超過確率



風車の大型化  
↓  
外力に対して構造的に安定

# 波風同時作用下における波による応答増幅特性

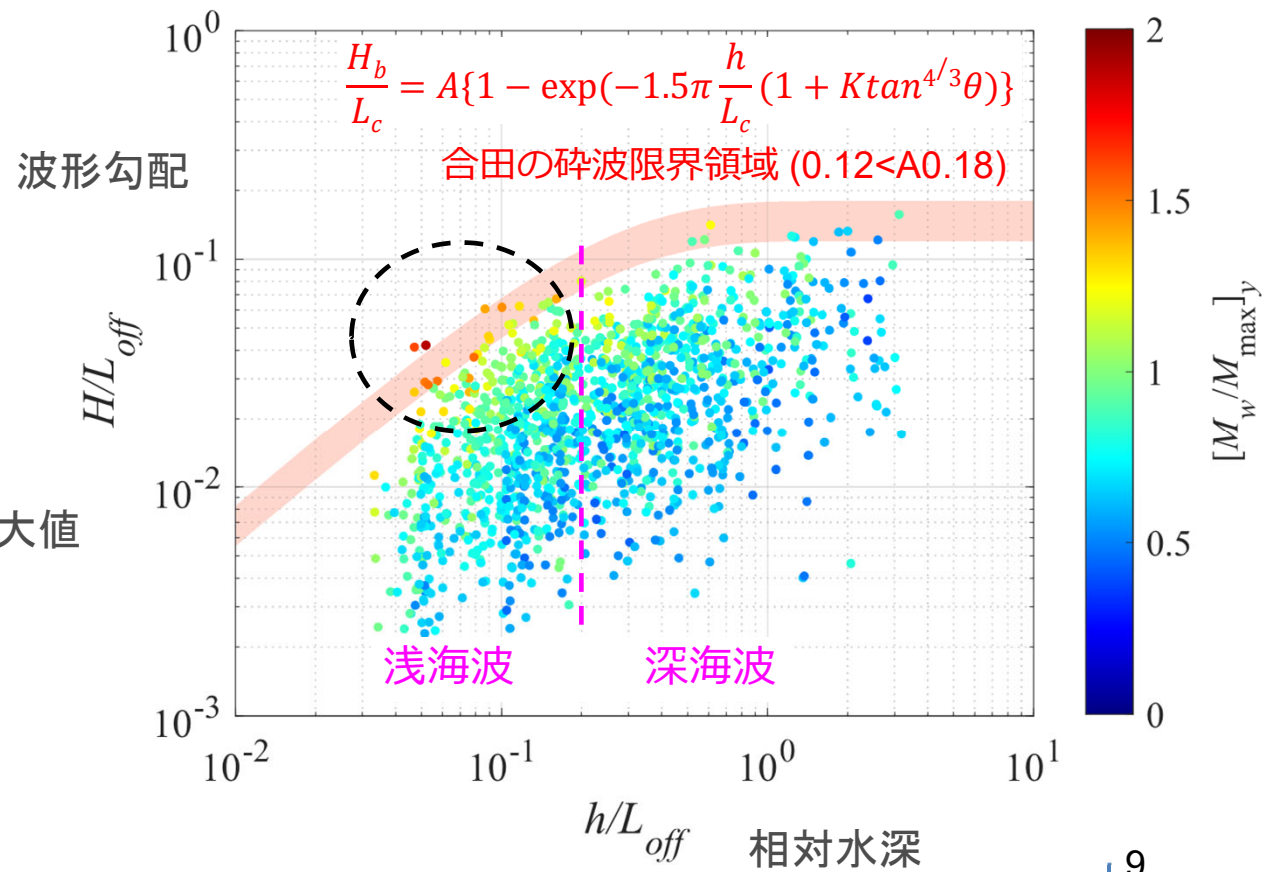


## 波による曲げモーメントの増幅率

$$\frac{M_w}{M_{\max}}$$

$M_w$  : 風・波作用下における曲げモーメント  
 $M_{\max}$  : 風作用下における曲げモーメントの最大値

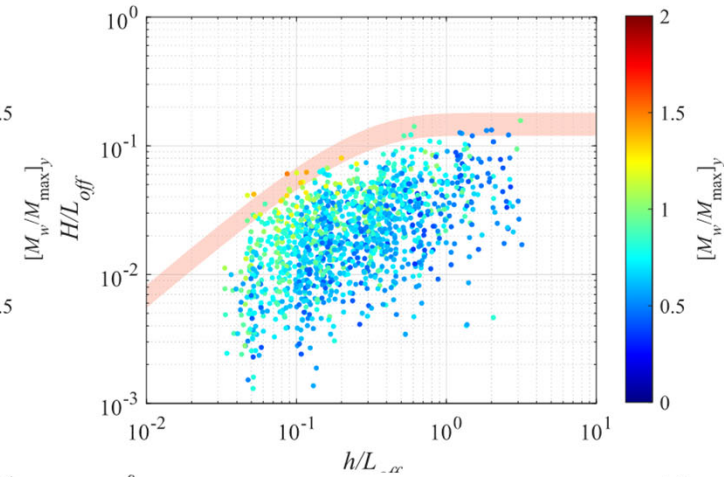
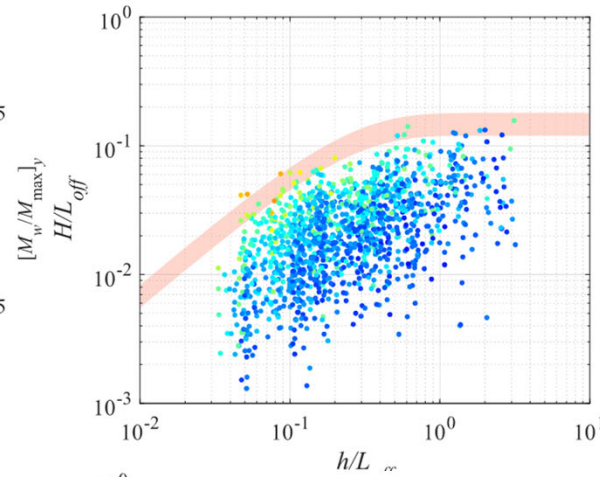
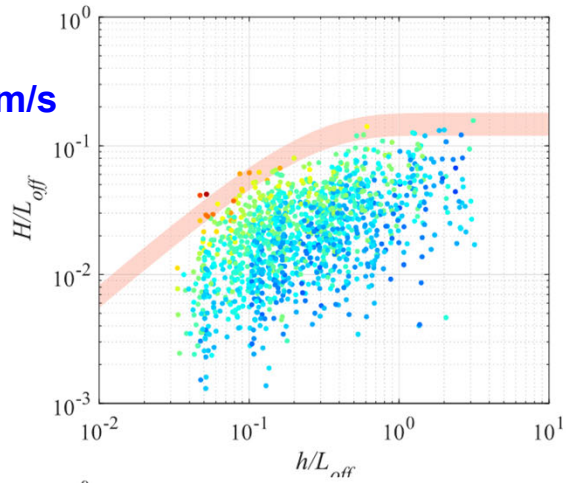
5MW風車,  $u_m = 6.0$  m/s



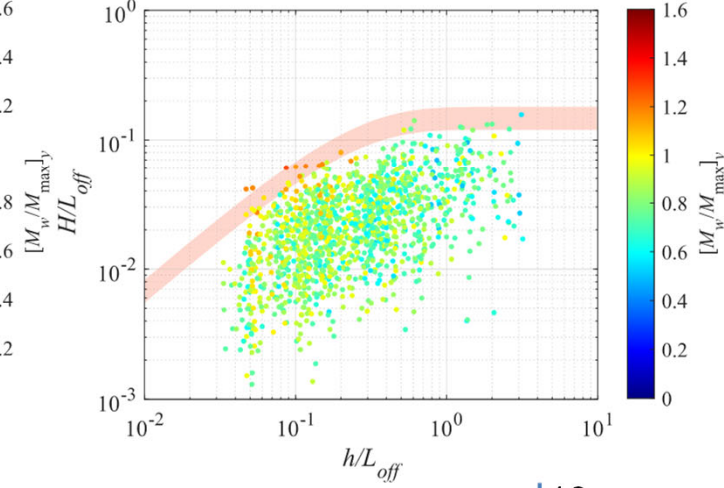
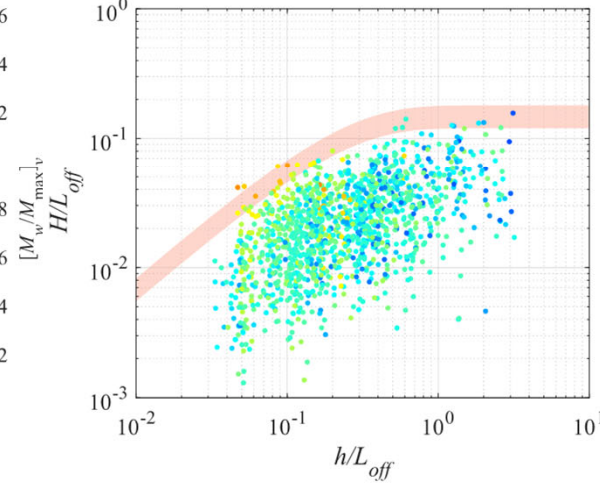
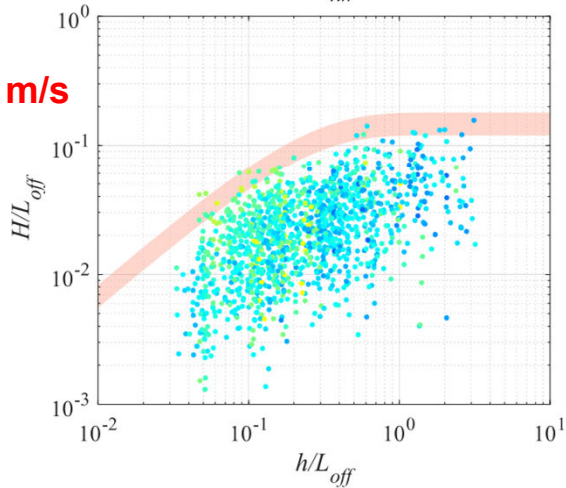
# 波風同時作用下における波による応答増幅特性



$u_m = 6.0 \text{ m/s}$



$u_m = 16.0 \text{ m/s}$



5MW

10MW

15MW

# 波風同時作用下における波による応答増幅特性

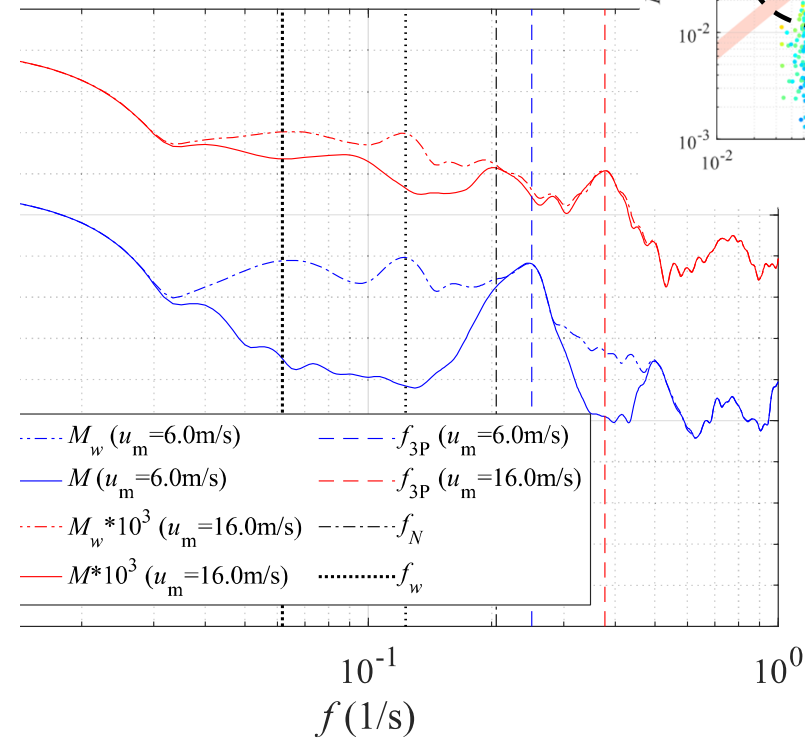
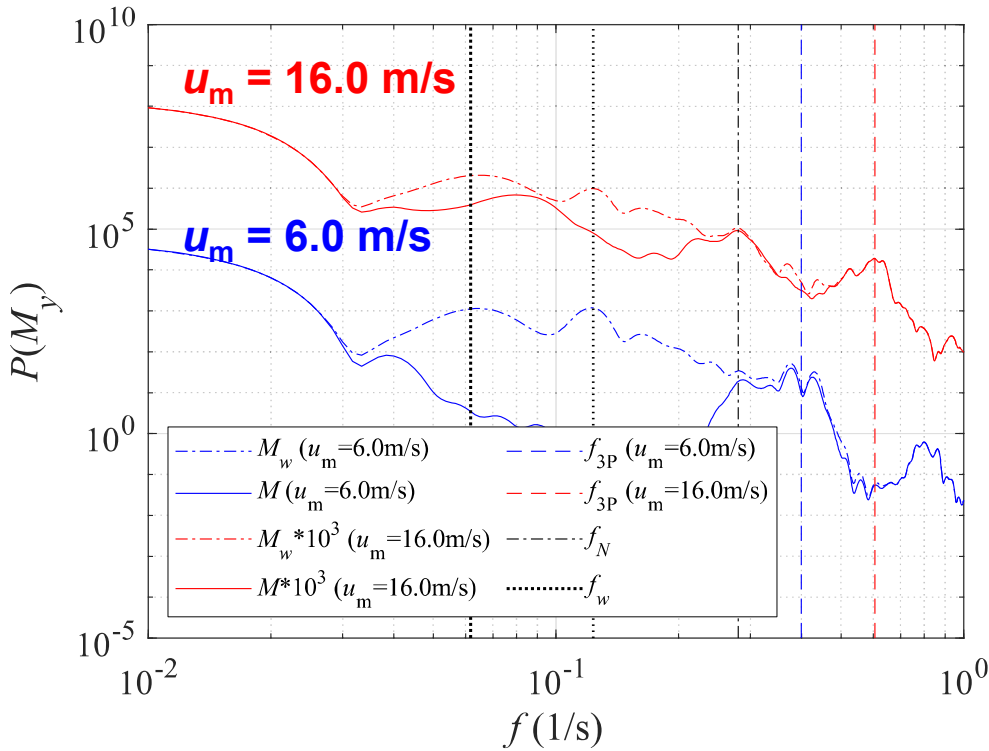
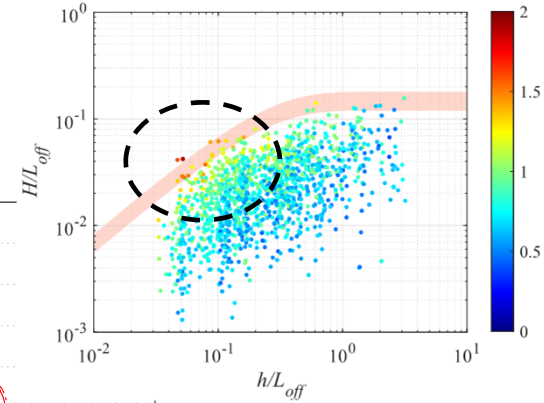


$T_{in} = 16.0 \text{ s}$ ,  $H_{in} = 8.0 \text{ m}$

5MW

実線 : 風のみ  
一点鎖線 : 風+波

15MW



- 発電規模の異なるモノパイル式洋上風車を対象に，波と風の同時作用下における荷重連成解析を行い，波と風に対する風車応答特性や風車規模によるこれらの違いについて検討を行った。
  - 発電規模の異なる風車間の風応答特性は類似している。
  - 発電規模が大きいほど応答値は大きくなるが，風車の大型化により波風外力に対して構造的に安定する。
  - 異なる発電規模の風車に同一条件の波が作用した場合でも，波風同時作用下における各風車応答の周波数特性の違いにより，波による応答増幅特性が異なる。

