

An aerial view of an offshore wind turbine being installed on a large blue and white supply vessel. The turbine has a yellow base and three white blades. The vessel is equipped with cranes and various equipment. In the background, other wind turbines are visible on the horizon under a clear blue sky with some clouds.

エネルギー研究クラスター
第1回若手研究会

エンジニアリングモデルを用いた 風力発電システムの経済性評価

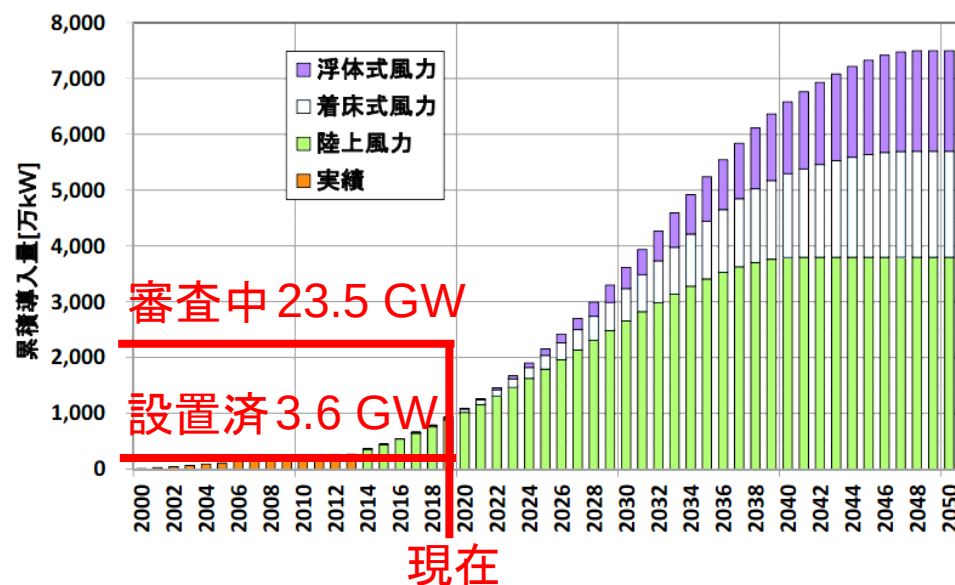
2019年12月13日

社会基盤学専攻
橋梁・風工学研究室
助教 菊地由佳

風力発電の導入拡大

- 2030年再生可能エネルギー比率 22～24% (第5次エネルギー基本計画)
- 2050年までに風力発電による電力供給量は、20%を目指す
- 2019年9月末には、洋上風力で12.6GWの審査完了

導入ロードマップ



陸上風力発電所



陸上

銚子沖洋上風力発電所
2012年建設完了



着床式

福島沖洋上風力発電所
2012年建設完了



浮体式

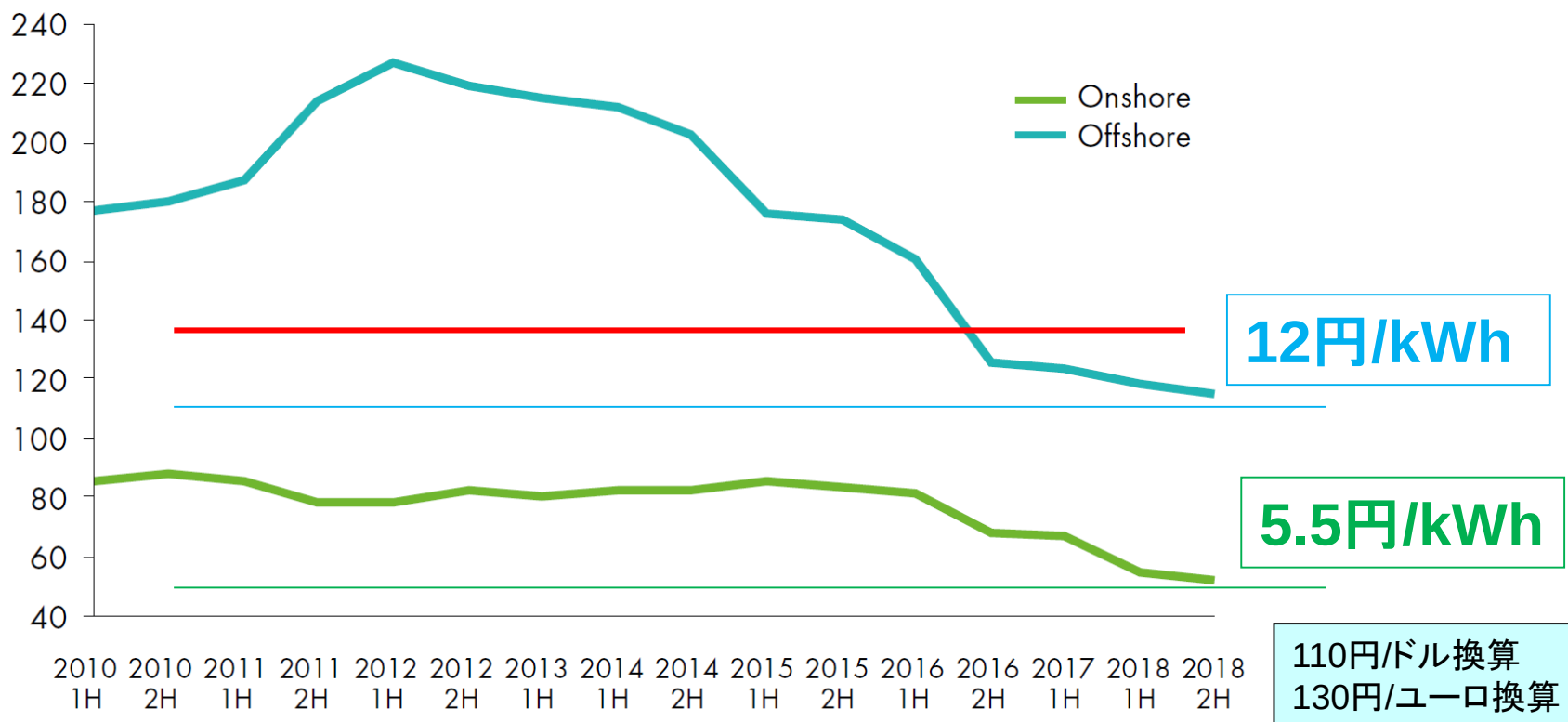
発電コスト低減の必要性

LCOE - Historic development

USD/ MWh

(出典)「 GWEC Global Wind Report 2018 」

LCOE は2030年まで 7.8円/kwh(€ 60/MWh)

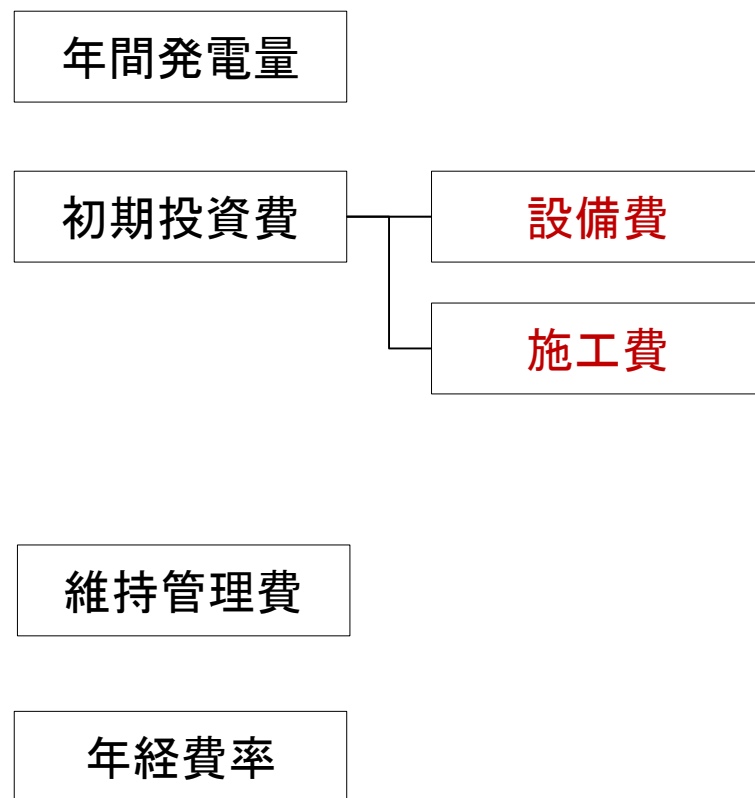


風力発電は世界で最も安い電源
日本における発電コスト低減の必要性

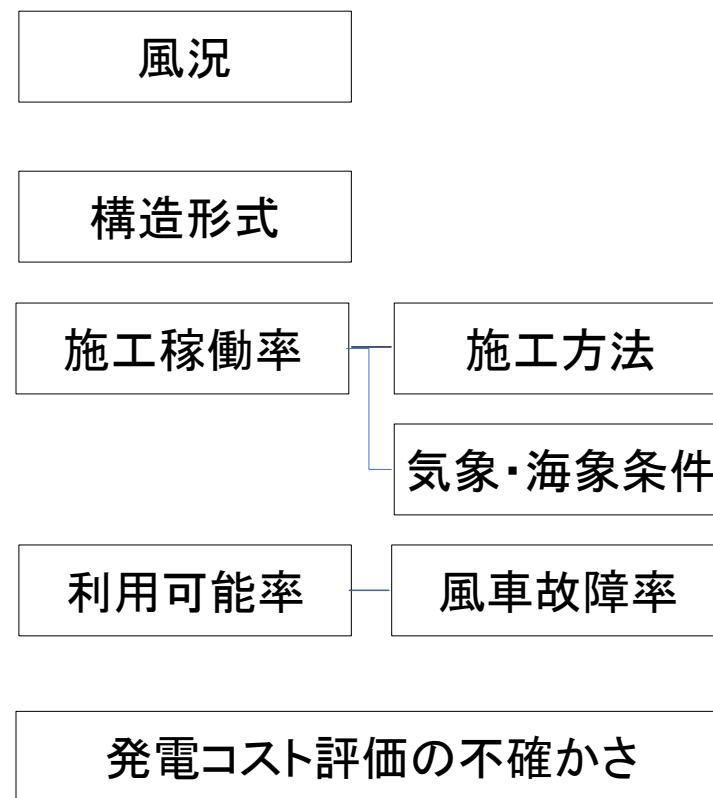
コスト低減の必要性

$$\text{発電コスト} = \frac{\text{初期投資費} \times \text{年経費率} + \text{維持管理費}}{\text{年間発電量}}$$

経済性



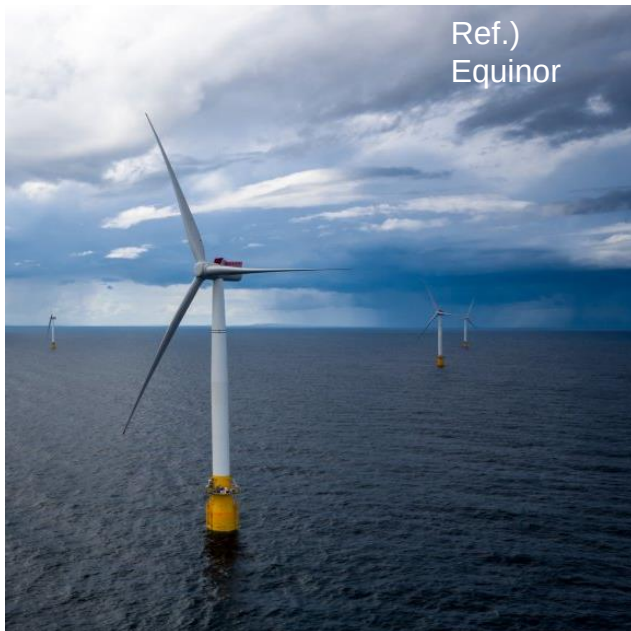
エンジニアリング



エンジニアリングモデルを用いた経済性評価

風車大型化の影響評価

Hywind Project
ノルウェー



Ref.)
Equinor

2.5 MW ➡ 6 MW

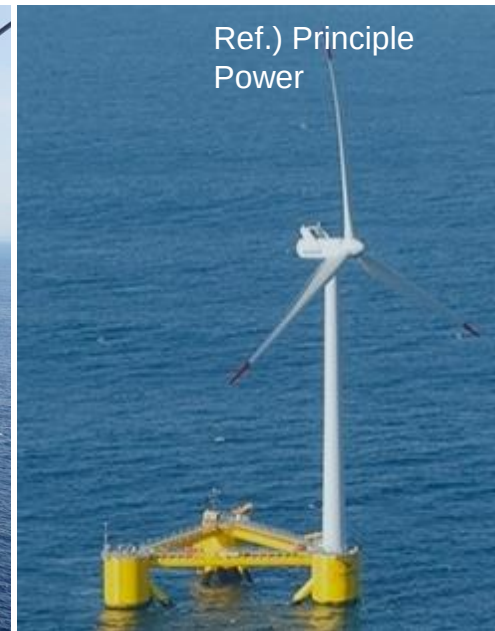
Fukushima FORWARD Project
日本



Ref.) Fukushima FORWARD

2 MW ・ 5 MW ・ 7 MW

WindFloat Project
ポルトガル



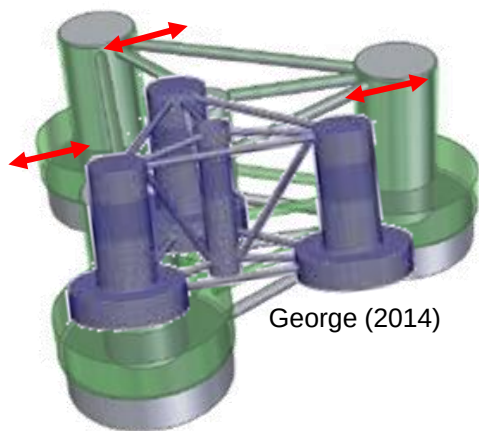
Ref.) Principle
Power

2 MW ➡ 8.4 MW

浮体式洋上風車の大型化が進んでいる

拡大則に関する既往研究

	主要パラメータ	Leimster et al. (2016) NTNU	George (2014) Lisbon Univ.
ヒーブ	喫水	相似則	ドックサイズ
	乾舷	相似則	相似則
ピッチ	カラム間距離	相似則	相似則
	サブカラム直径	静的ピッチ角 $q = F_{55}/C_{55}$	重心と浮心の釣合い
サージ	係留索	係留索の長さ	係留索の取付け角度



法則の優先順位はなにか？
拡大則と浮体動揺および係留力との関係？

施工の制約条件と設計クライテリア

■ 施工の制約条件

喫水	乾舷	メインカラム直径
ドックの大きさと港湾深さ	設計最大波高	タワー基部直径
		

■ 設計クライテリア

Ref.) Fukushima FORWARD

サージ	係留索の剛性
ヒープ	重心と浮心の釣り合い
ピッチ	静的ピッチ角（転倒モーメントと復元モーメントとの比率）

実現可能な拡大方法を提案するため、施工の制約条件を考慮した
浮体の設計クライテリアを評価した

浮体の拡大フロー

排水体積を3乗の法則で決定

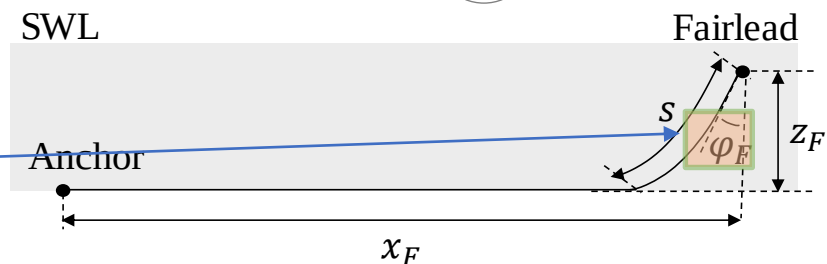
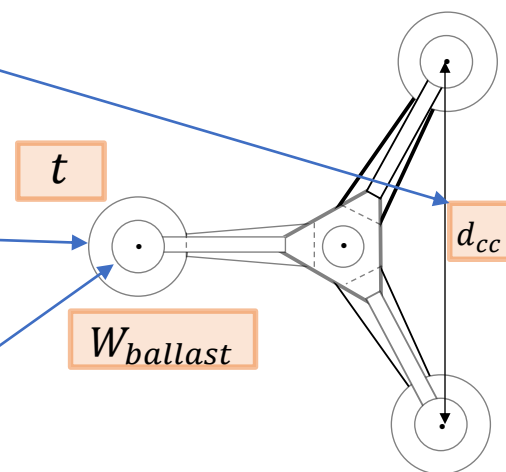
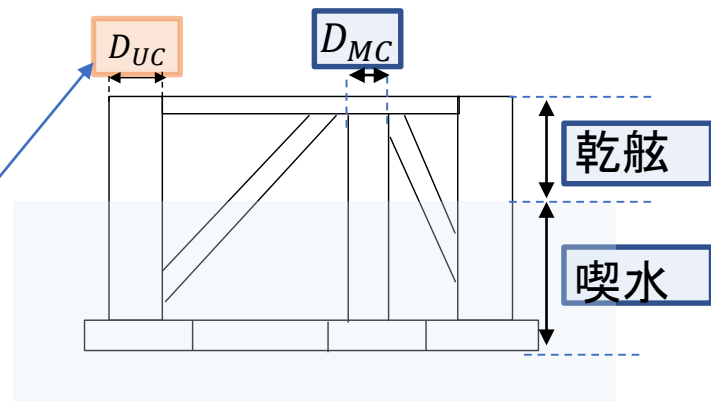
釣り合い式によりアップーカラムの直径を決定

静的ピッチ角度より、カラム間距離を決定

浮体の厚みを静的水圧より決定

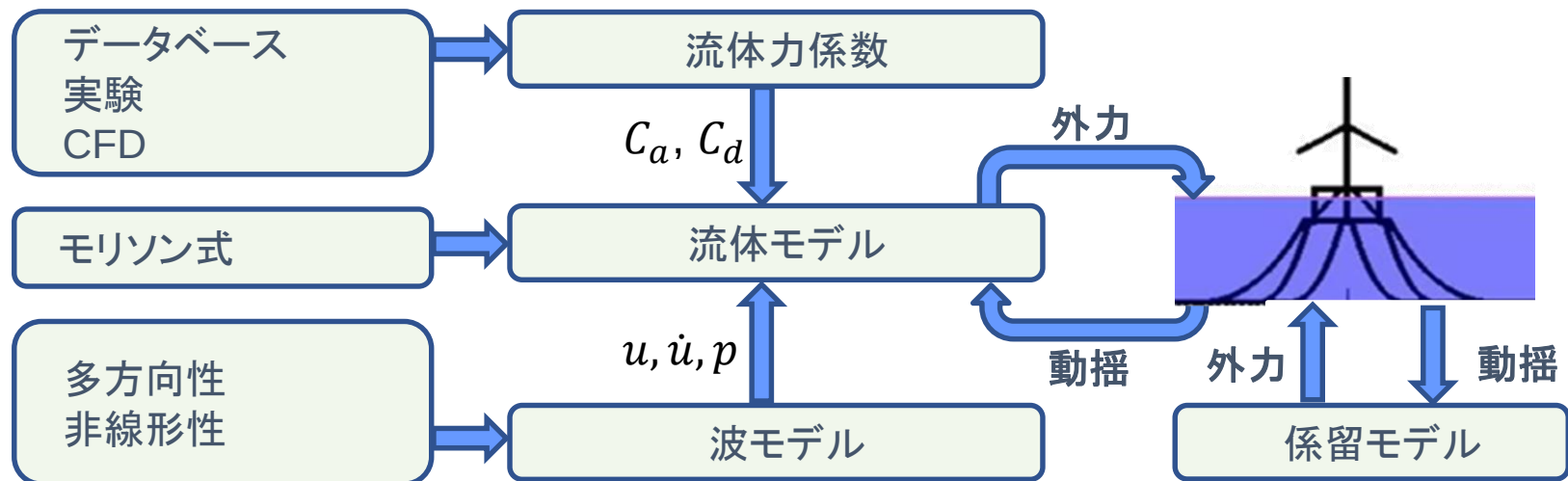
釣り合い式によりバラスト重量を決定

全ての風車に対して、同じ係留索の取り付け角度を設定

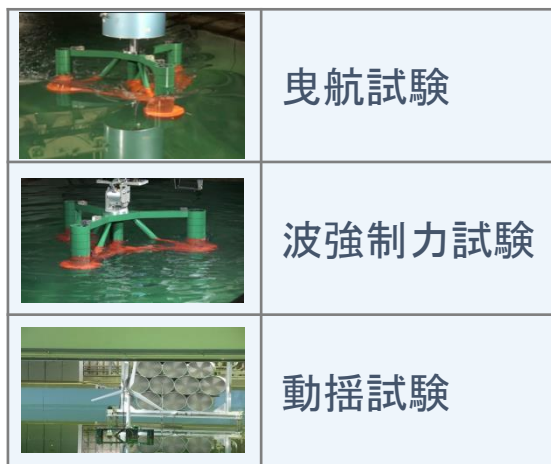


浮体と係留索の拡大

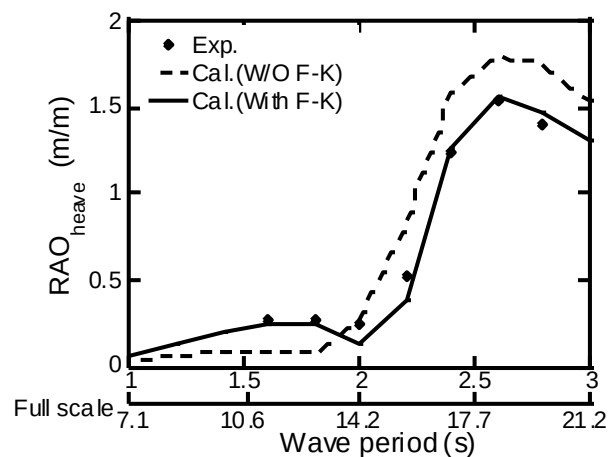
浮体の動揺予測手法の提案



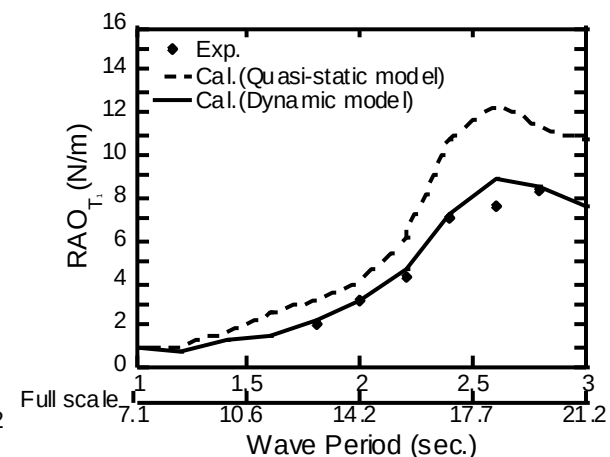
水槽実験



浮体動揺

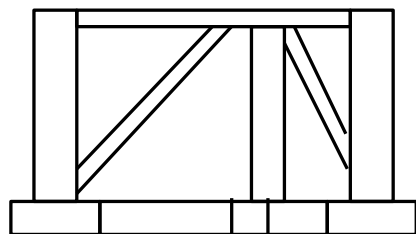


係留力試験

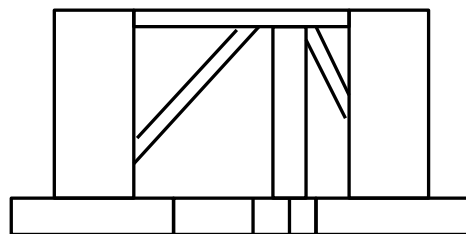


高精度な浮体動揺と係留力の予測手法の提案

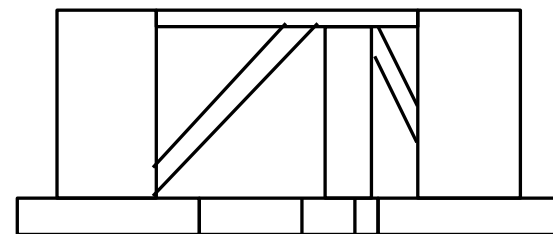
暴風波浪時における浮体動揺の評価



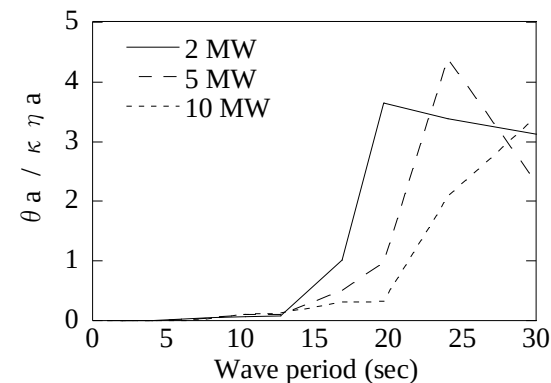
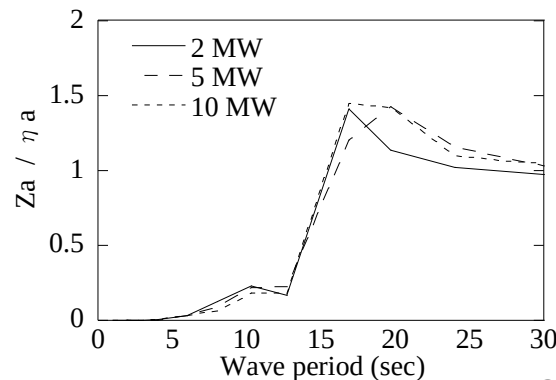
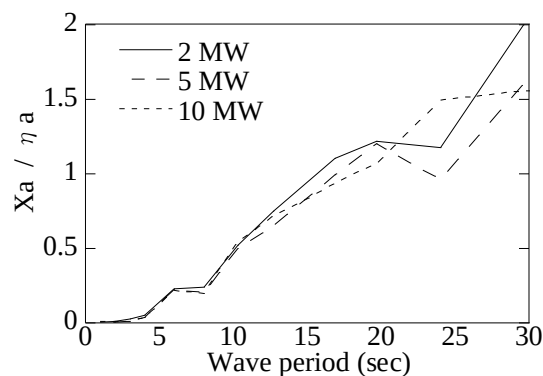
2 MW



5 MW

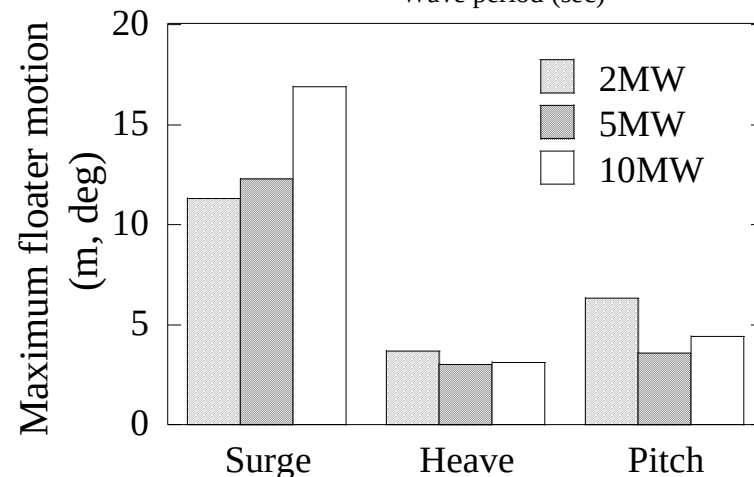


10 MW



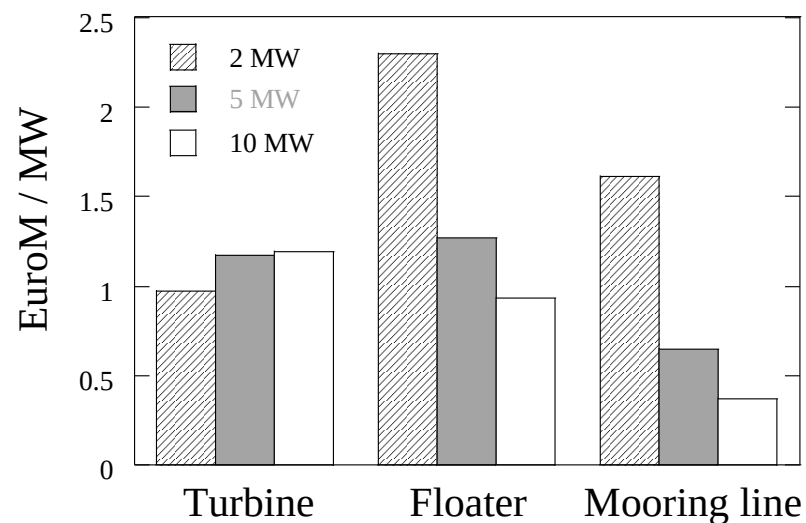
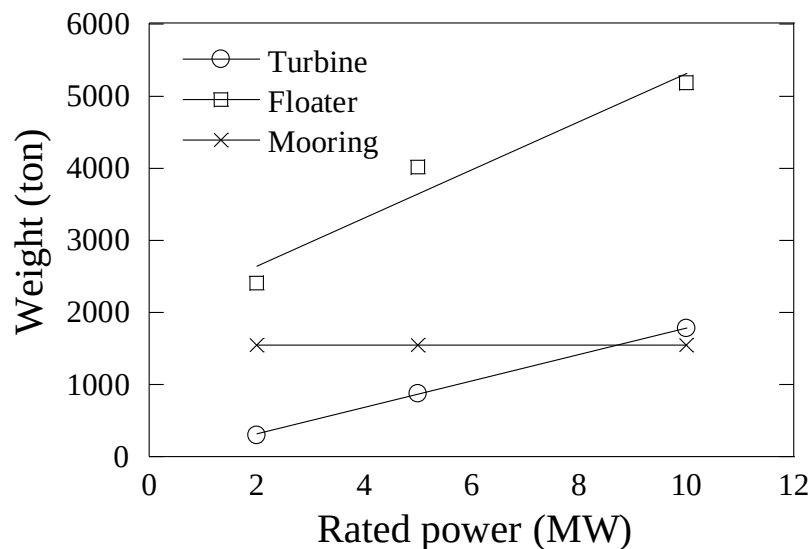
DLC6.1 暴風波浪時の環境条件

風	$U_{50} = 50 \text{ m/s}$	$I = 0.11$
波	$H_s = 11.7 \text{ m}$	$T_p = 14.76 \text{ sec}$
潮流	$U_c = 1.44 \text{ m/s}$	



風車の大型化が浮体の動揺に及ぼす影響を評価

重量から設備費を評価



		NTNU		Lisbon		Proposed	
		5 MW	10 MW	5 MW	10 MW	5 MW	10 MW
喫水	[m]	20.0	24.9	20.0	20.0	21.3	21.3
アッパーコラム	[m]	9.9	14.3	12.0	15.8	12.0	16.0
コラム間距離	[m]	50	58.62	50.0	63.0	50.2	54.3
浮体重量	[kg]	3,567,000 (1)	7,598,000 (2.13)	3,850,000 (1)	5,580,000 (1.45)	4,018,045 (1)	5,180,545 (1.29)
係留索長さ	[m]	835	1045	835	835	673×2	673×2

風車の大型化が浮体と係留索の重量に及ぼす影響を評価

風車の大型化が発電コストに与える影響の評価

	単位	2 MW × 50	5 MW × 20	10 MW × 10
設計	[€k /kW]	0.1	0.1	0.1
風車	[€k /kW]	1.0	1.2	1.2
浮体	[€k /kW]	2.3	1.3	1.0
係留索	[€k /kW]	1.6	0.6	0.4
設置費	[€k /kW]	2.8	1.1	0.5
ケーブル費	[€k /kW]	0.6	0.6	0.6
初期投資費	[€k /kW]	8.4	4.9	3.8
年間維持管理費	[€k /kW/year]	0.22	0.14	0.11
発電コスト	[c/kWh]	32	19	15

風車大型化に伴う初期投資費の低減量を
エンジニアリングモデルを用いて定量的に評価した

(ここでは、発電量は風車規模に拠らないとの仮定)

施工稼働率の評価

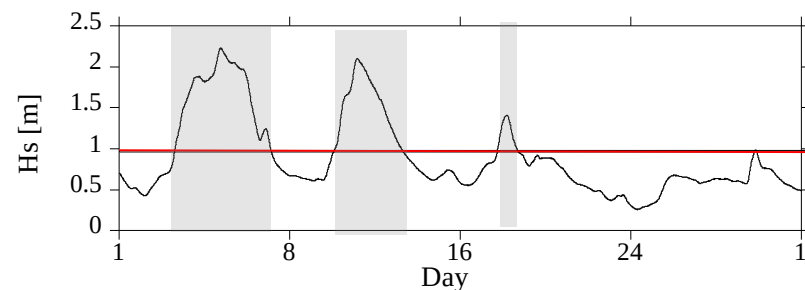
$$\text{施工費} = \text{施工日数} \times \text{作業船の日単位賃料}$$

施工日数の評価方法



問題点

$$\text{施工稼働率} = \frac{\text{気象・海象条件が作業中止条件以下となる施工可能日数}}{\text{全日数}}$$



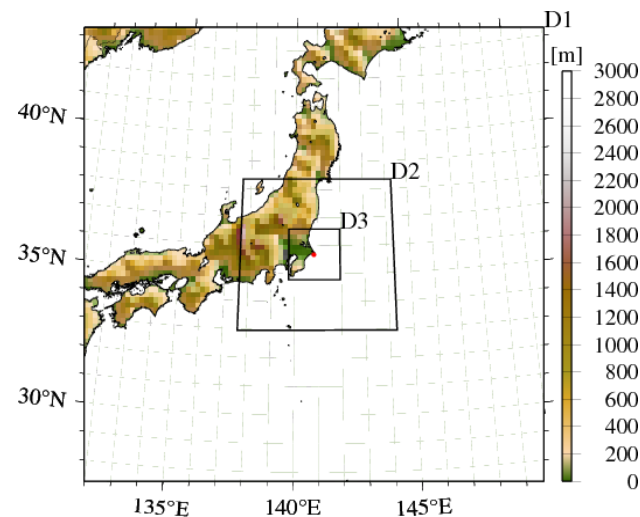
1. 気象・海象条件の予測は、高波浪時を対象とした研究が多く、施工稼働率の算定に必要な低波浪時の予測精度について不明な点が残されている。
2. 実績の少ない日本では、作業限界値の具体的な値が不明

気象・海象条件の評価

最新の気象・海象シミュレーションの予測精度を、銚子沖洋上風力発電所において、2013年2月～2014年1月の1年間のデータを用い、検証する。

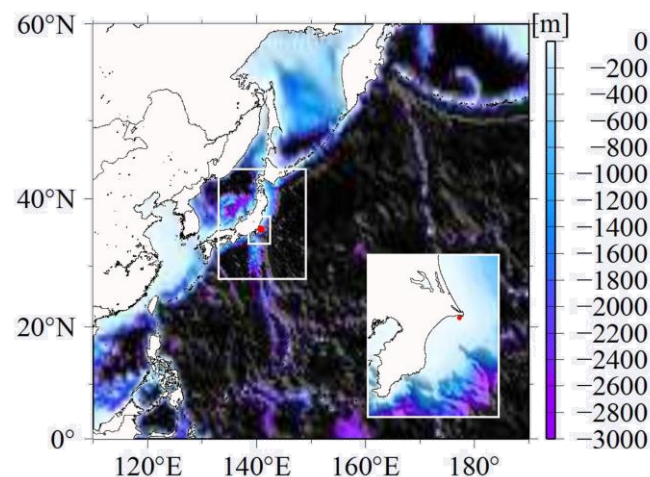
■ 気象シミュレーション (WRF Ver3.4.1)

- 地形・土地利用および海面水温の影響を考慮
- 水平解像度は、18km, 6km, 2km
- 標高データ: 国土地理院50mメッシュ
- 土地利用データ: 国土数値情報100mメッシュ
- 海面水温データ: OSTIA

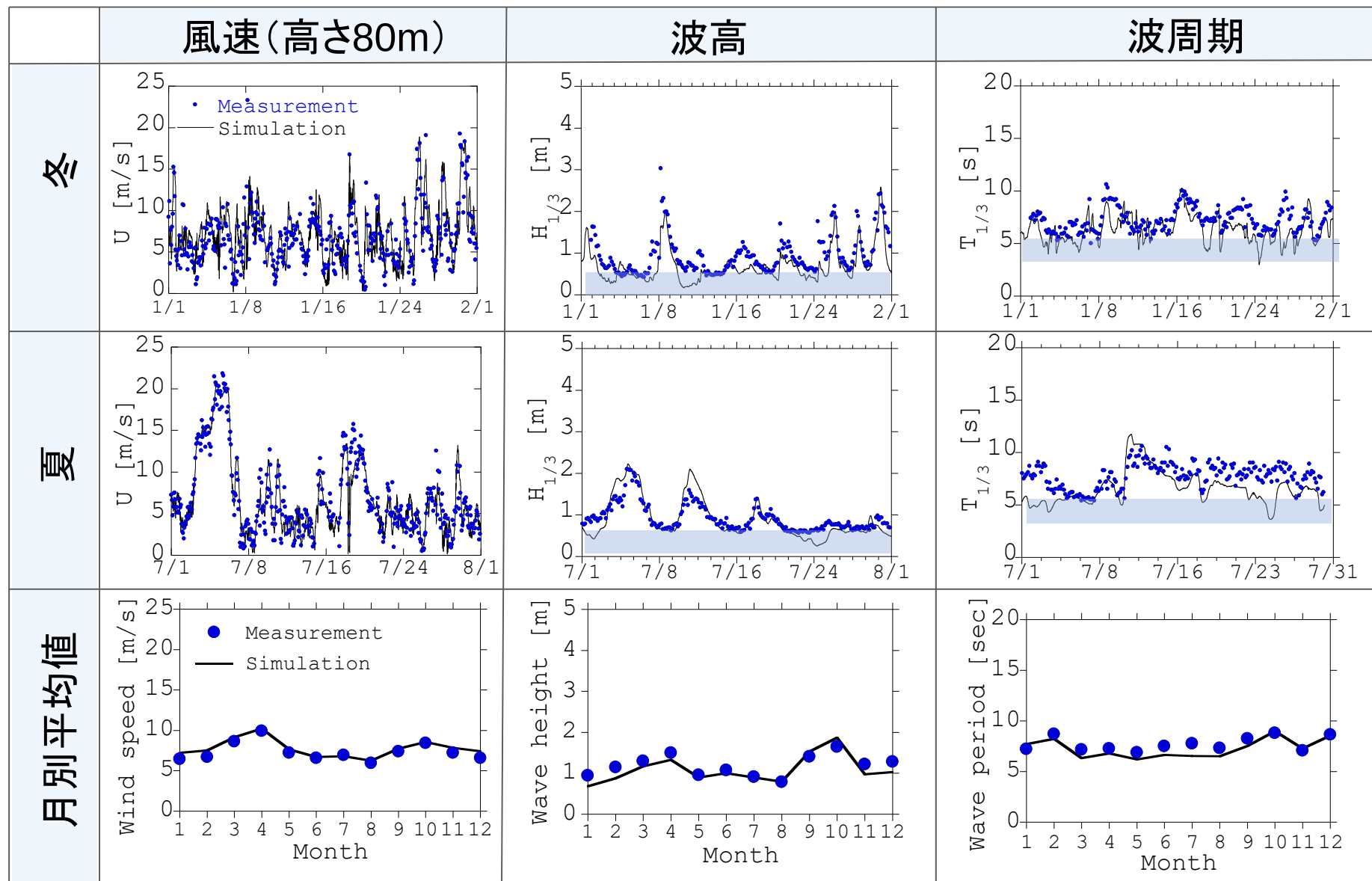


■ 海象シミュレーション (WW3 Ver3.14)

- 波浪推算モデルと合成風速場を用いた風波とうねりの数値予測手法
- 解析領域は4段階に設定し、領域1の海面境界条件には全球客観解析値であるNCEP-FNLを、領域2～4ではWRFの予測風速を用いた。
- 水平解像度は、18km, 6km, 2km



気象・海象条件の予測精度



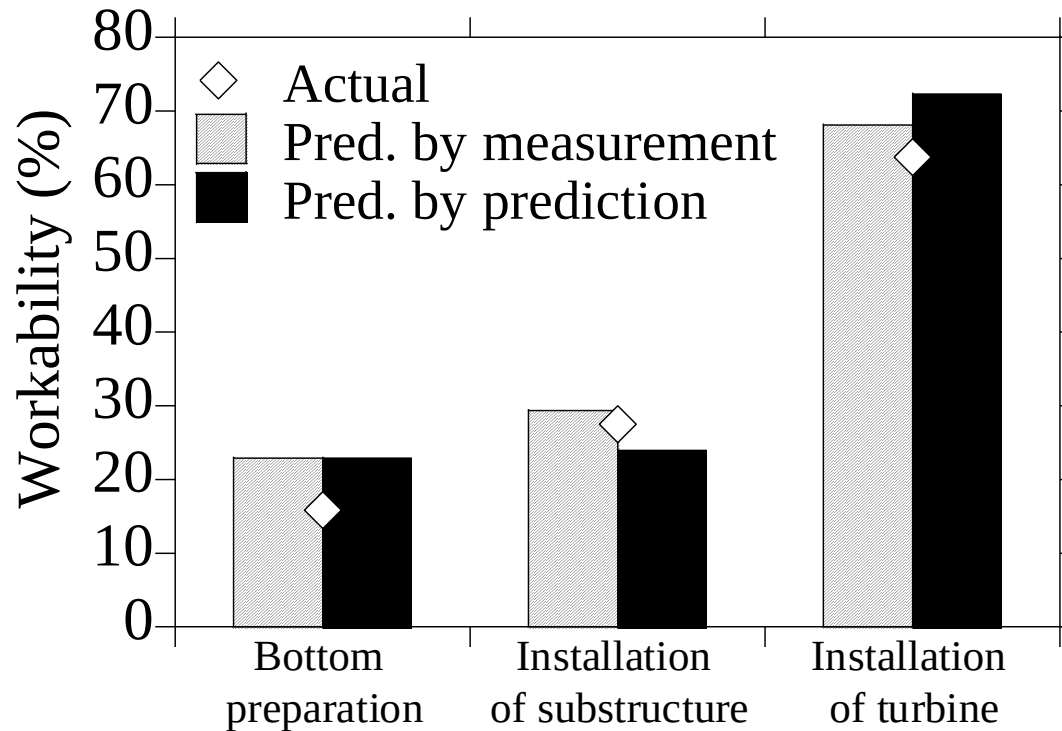
施工方法の調査

銚子沖洋上風力発電所・北九州沖洋上風力発電所の施工方法と作業中止条件をヒアリングにより調査

	銚子	作業限界条件	北九州	作業限界条件
海底整備		$H_s \leq 1.0\text{m}$		$H_s \leq 0.8\text{m}$
支持構造物設置		$H_s \leq 1.25\text{m}$ $T_p \leq 8.0\text{sec}$ 36時間		$H_s \leq 0.5\text{m}$
風車設置		$H_s \leq 2.5\text{m}$ $U \leq 8\text{m/s}$		$H_s \leq 1\text{m}$ $U \leq 6\text{m/s}$

施工稼働率の評価

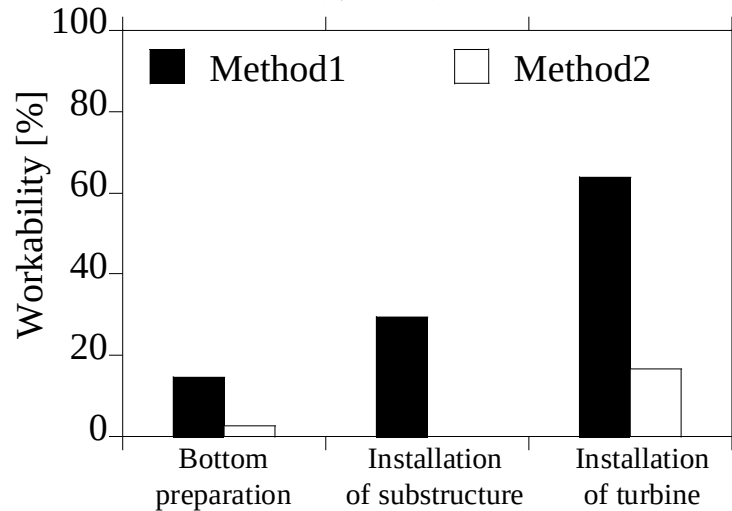
銚子沖洋上風力発電所において、定められた工事期間について、気象・海象条件の予測値から求めた施工稼働率と、観測値から求めた施工稼働率を比較し、その妥当性を検証した。



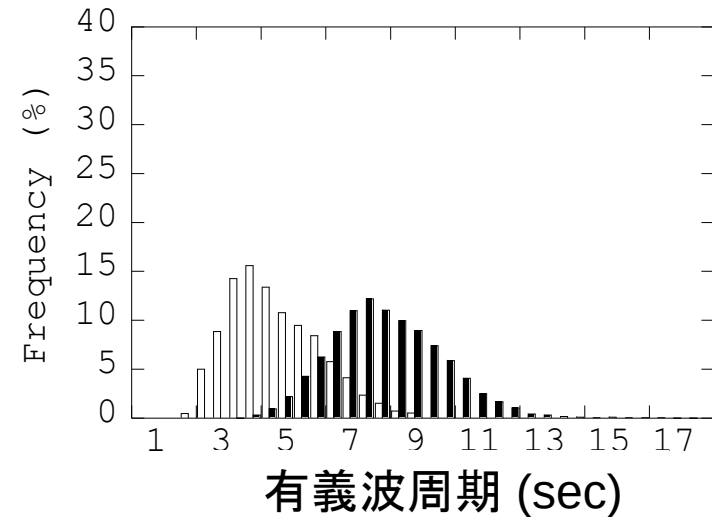
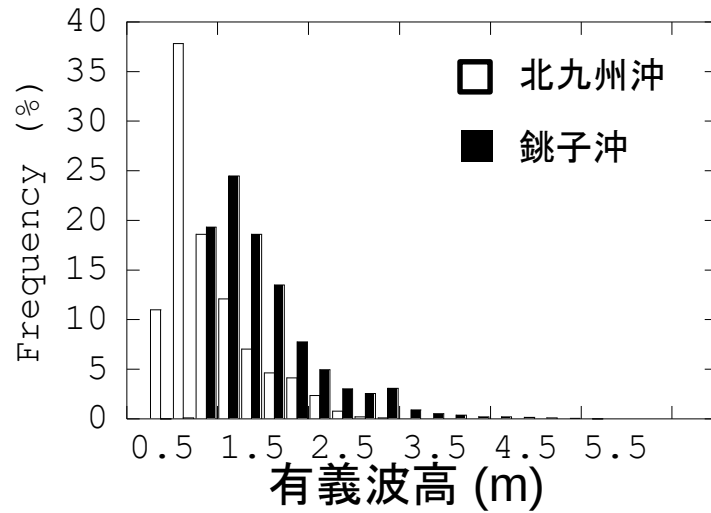
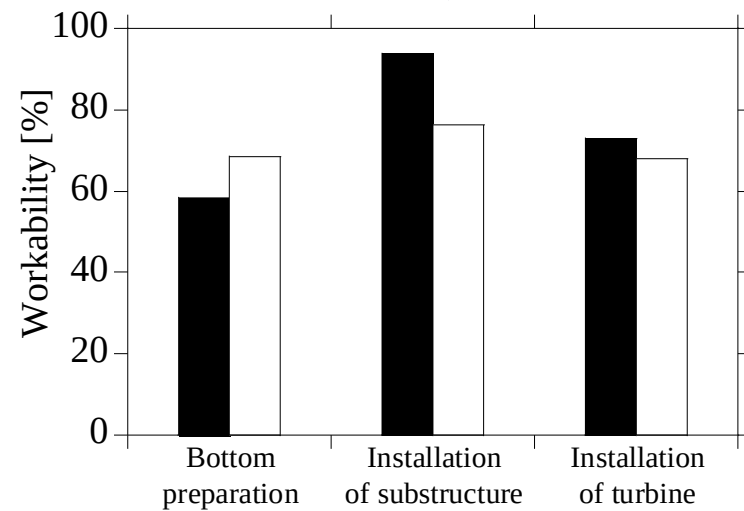
誤差はそれぞれ、35%、9.2%、24%であり、
気象・海象予測による施工稼働率評価の妥当性が示された

太平洋側と日本海側の違い

銚子沖



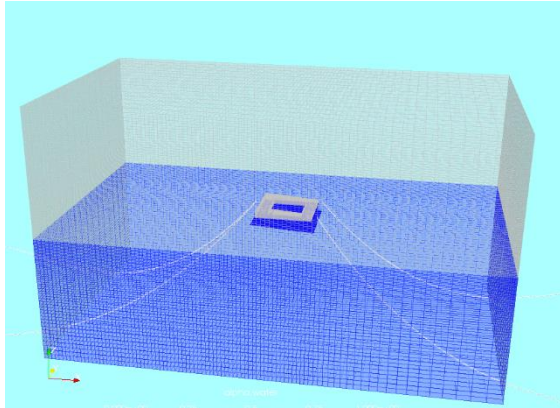
北九州沖



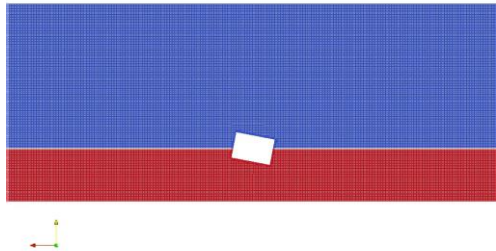
太平洋側と日本海側における気象条件の違いが、
施工方法および施工稼働率に及ぼす影響を定量的に評価した

まとめ ～仮想windファーム建設・維持管理手法の確立～

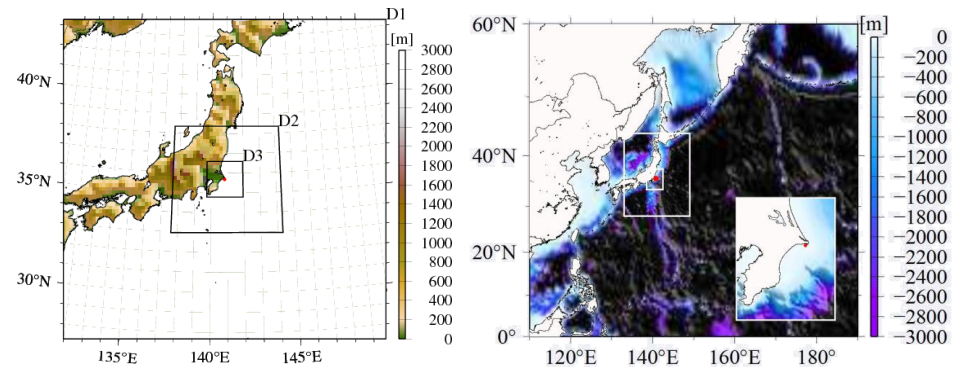
数値流体解析を用いた 高精度な浮体動揺予測手法



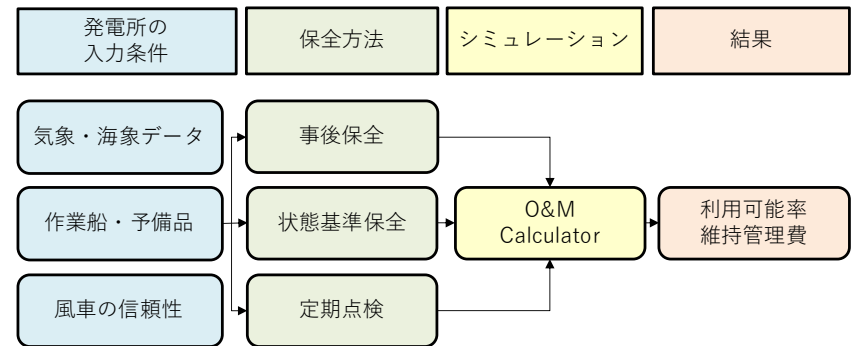
数値水槽



気象・海象条件の評価の高精度化



時系列モンテカルロシミュレーションを 用いた設備・維持管理費の評価手法の開発



発電コストの低減方法の提案
コストを目的関数とした風力発電システムの最適化