

洋上風力発電（着床式）事業における 地震・津波対策について

早稲田大学名誉教授、沿岸技術研究センター上席客員研究員、洋上風力審査機関の委員長
清宮 理



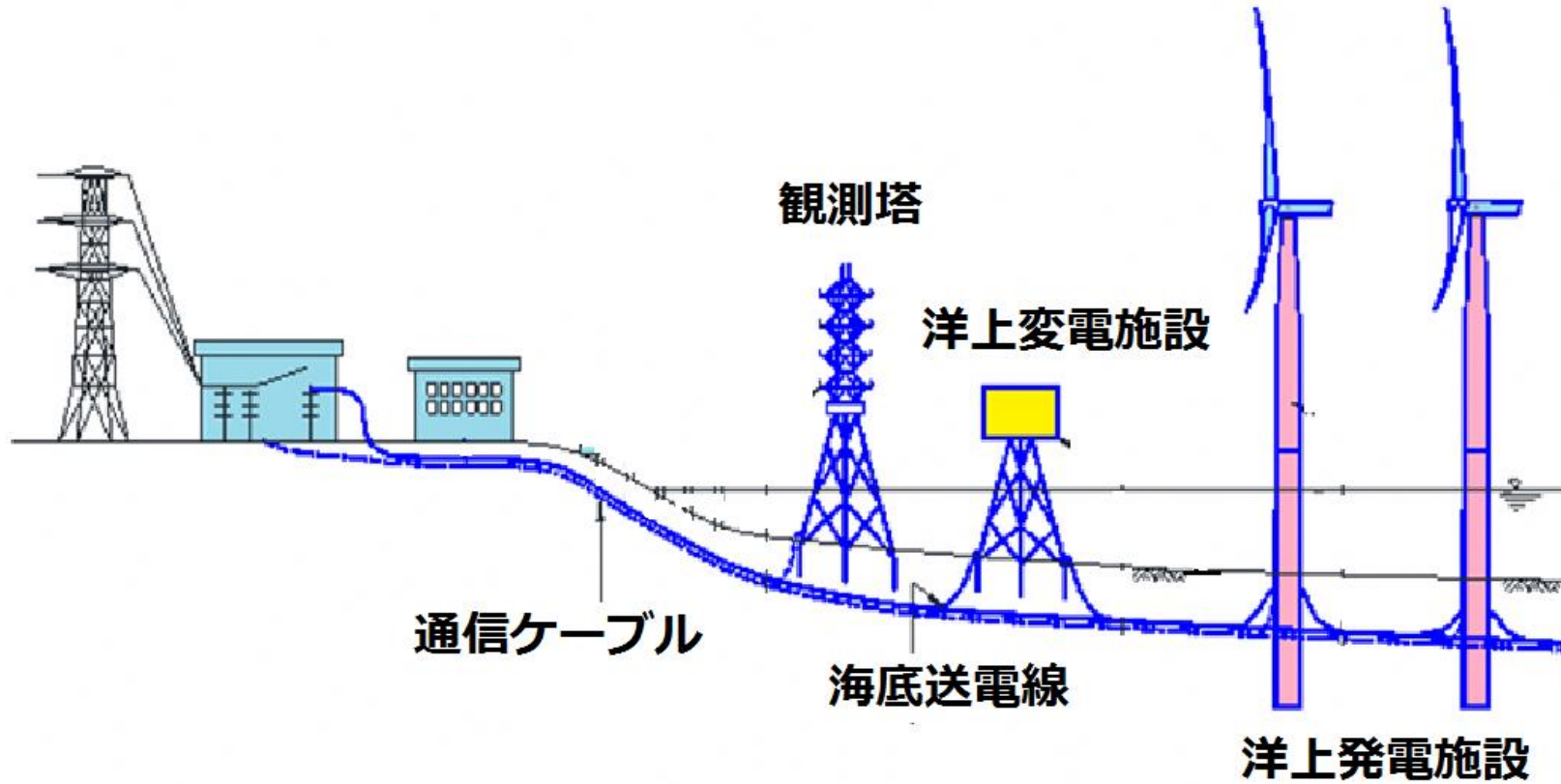
秋田能代での洋上風力発電

今日の内容

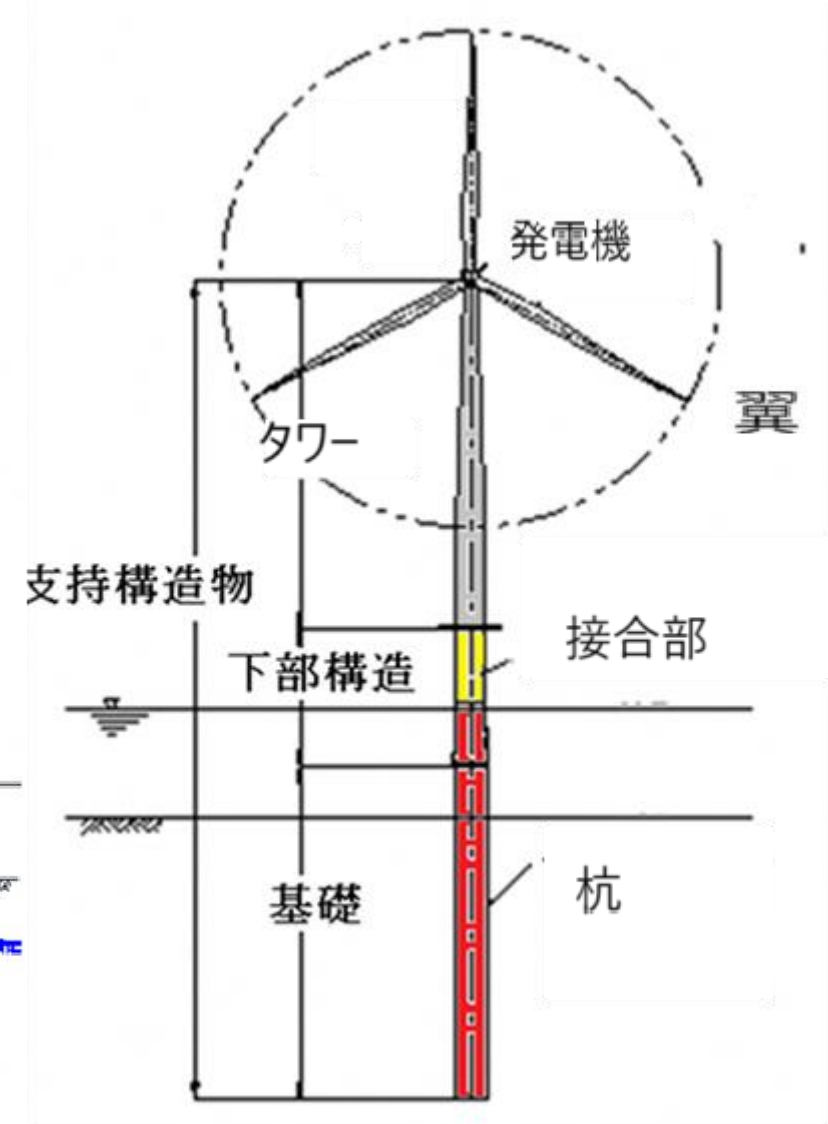
- (1) 洋上風力発電施設の概要
- (2) 風力発電施設での事故
- (3) 設計の概要
- (4) 地震への対応
- (5) 津波への対応

2025.6.29 酒田市市民勉強会

洋上風力発電施設

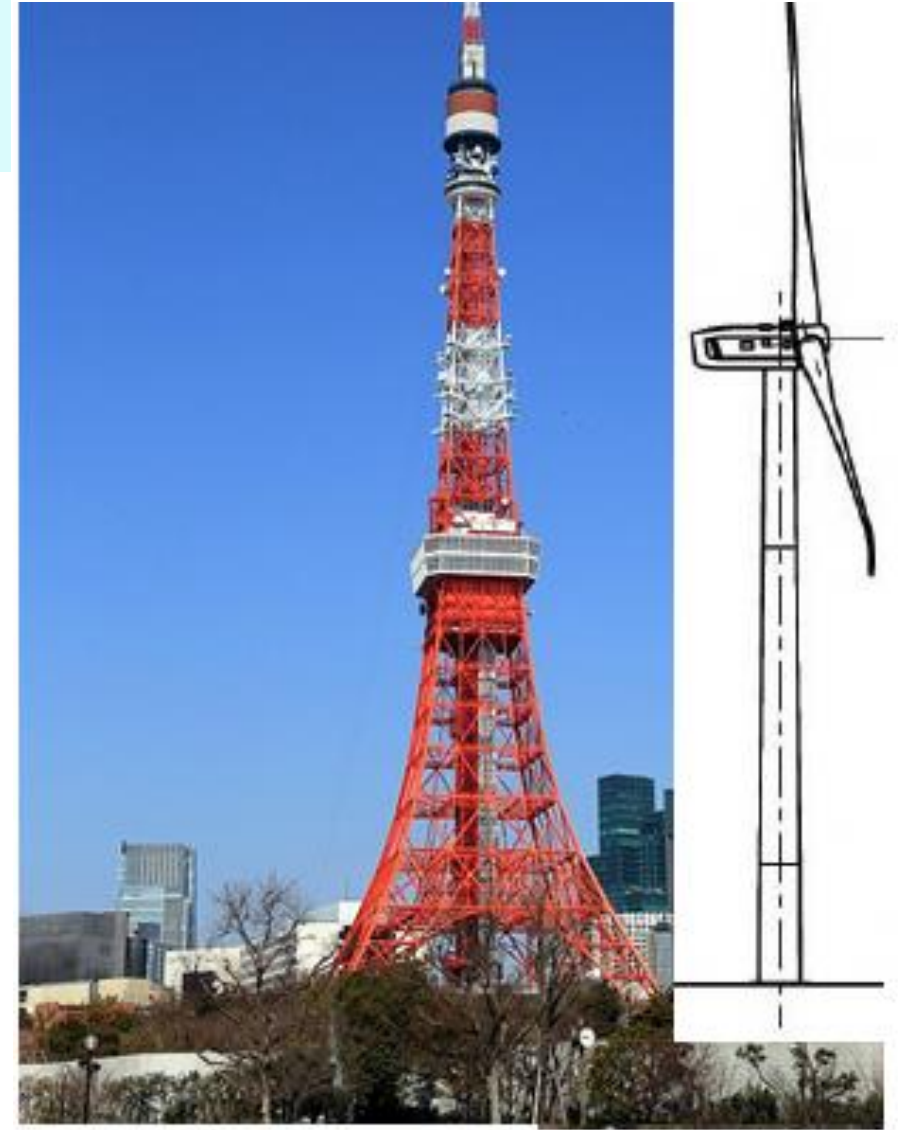
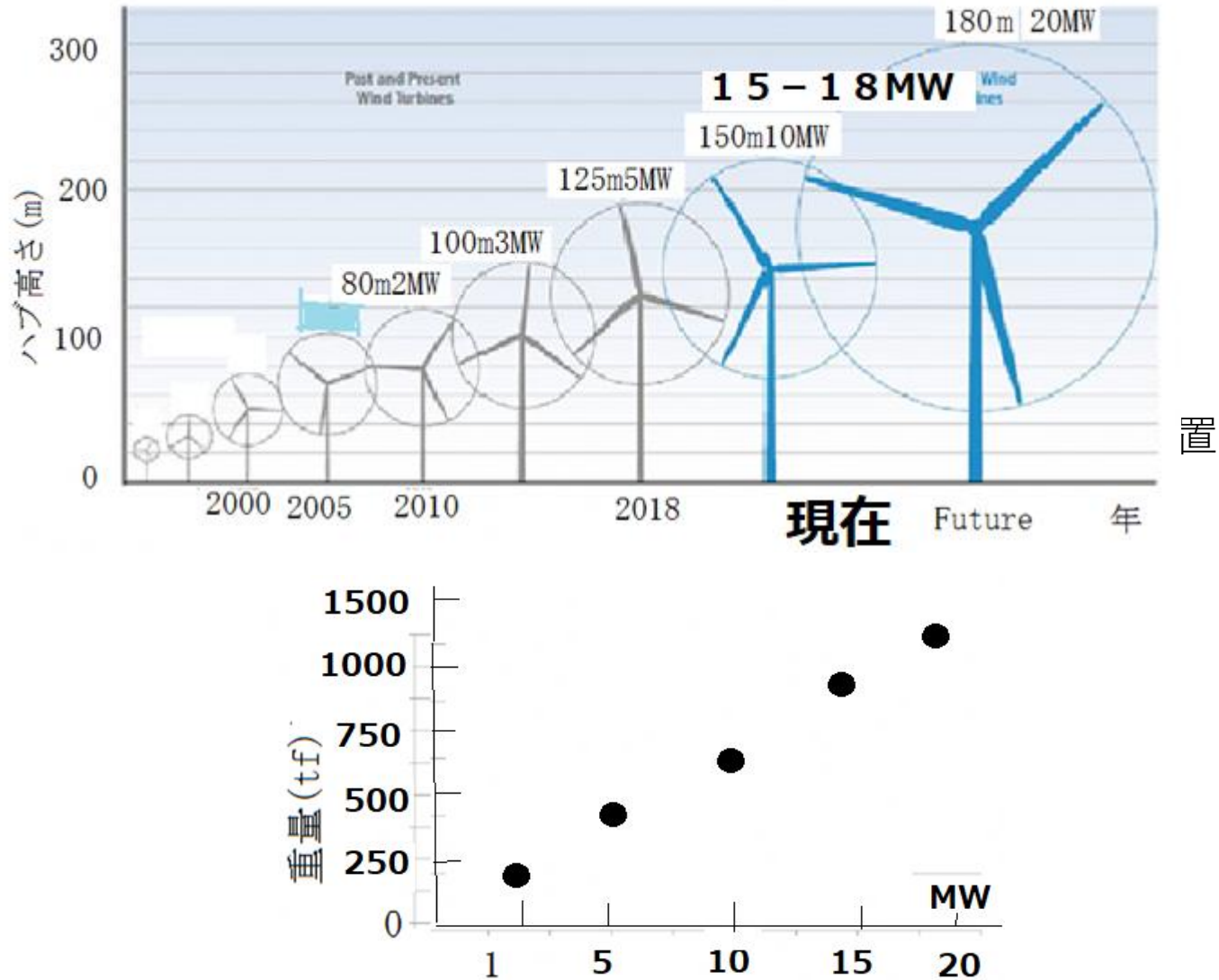


対象施設



支持構造物の名称

大型化 発電機（ハブ）の高さとタワーの重量



東京タワー 高さ333m

着床式洋上風力発電の候補地点

現在の各地域における区域の状況（2025年6月16日時点）



事業計画の位置



実働中

洋上風力発電施設の建設の現況(2025.6月時点)

場所	現況	主事業者	海域	規模 MW x 基数	基礎形式
秋田港	送電開始	丸紅	港湾区域	4.2x13	モノパイル
能代港	送電開始	丸紅	港湾区域	4.2x20	モノパイル
石狩湾新港	送電開始	GPI	港湾区域	8x14	ジャケット
入善沖	送電開始	ウエンティ	一般海域	3x3	モノパイル
北九州港	建設中	九電みらい	港湾区域	9.5x25	ジャケット
五島市沖	建設中	戸田建設	一般海域	2.1x8	浮体スパー
鹿島港	審査中	WPG	港湾区域	8x19	モノパイル
由利本荘市沖	審査中	三菱商事	一般海域	12.6x65	モノパイル
能代三種男鹿市沖	審査中	三菱商事	一般海域	12.6x36	モノパイル
銚子市沖	審査中	三菱商事	一般海域	12.6x31	モノパイル

風車の現況

- (1) 24年度で国内では陸上洋上で2720基ほど建設,5840MW
ただ世界的には小規模
- (2) 環境問題、漁業との共生、建設費の高騰などへの対応
- (3) 風車、ブレード（翼）など主要部分は海外生産
国内業者が撤退したが 海外からの企業誘致中
- (4) 最近5年間で約200件の事故報告、約30件ほど翼の事故

風力発電施設での自然災害 (1) 風による被害



タワーの転倒(2018淡路島)

原因：台風時の強風を考慮してない
(風速と乱れ)

不十分なヨー制御：原因は停電など

➡ 耐風設計の改良、維持管理の徹底



ナセルの破断



ブレードの破損



(宮古島)

タワーの倒壊 2003. $U_{max}=80\text{m/s}$

(2) 洋上での 落雷被害



日本海側で多発

IEC TR6140-24で落雷対策・設計



避雷針の設置

タワーなので落雷受けやすい

ブレードの損傷のメカニズム（受雷部、雷線を設置しても）不十分

落雷後の検査,補修,交換は洋上では容易でない：

わずかの損傷で運転再開後ブレードが破損する事例ある

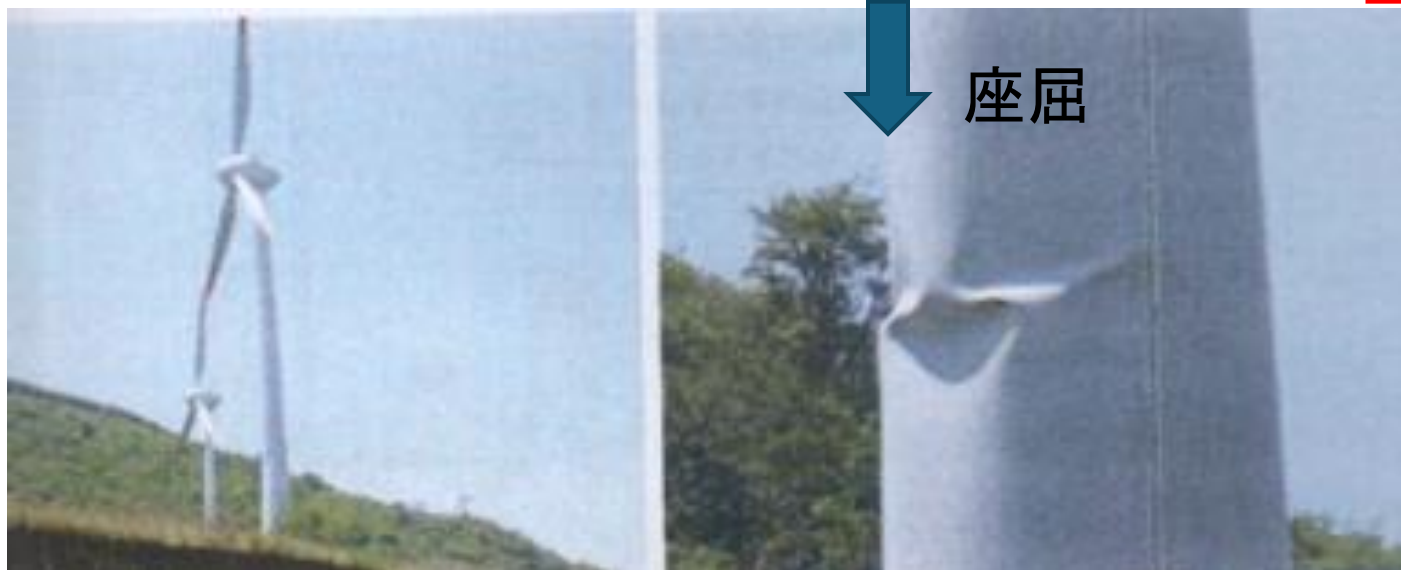
風車施設への地震、津波による影響

- (1) 東日本(東北)地震、熊本地震、能登半島地震での経験
 (2011) (2016) (2024年)

想定地震(設計) レベルに対して被害は限定的
 被害を受けた風車は再建造

- (2) 津波被害はなかった

(3) 地震被害



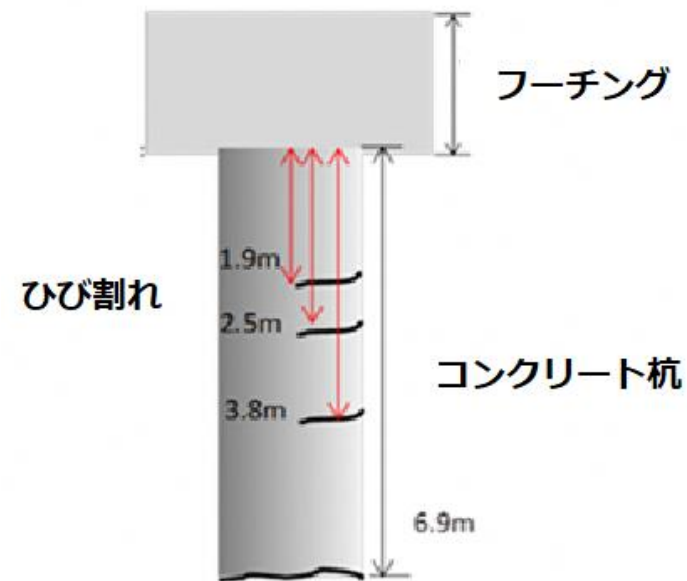
熊本地震2016 設計地震動を超えた

タワーの局部座屈と杭基礎の被害
フーチング付け根、コンクリート杭頭部付近にひび割れ
確認

1基撤去 他の数基は補修後再利用

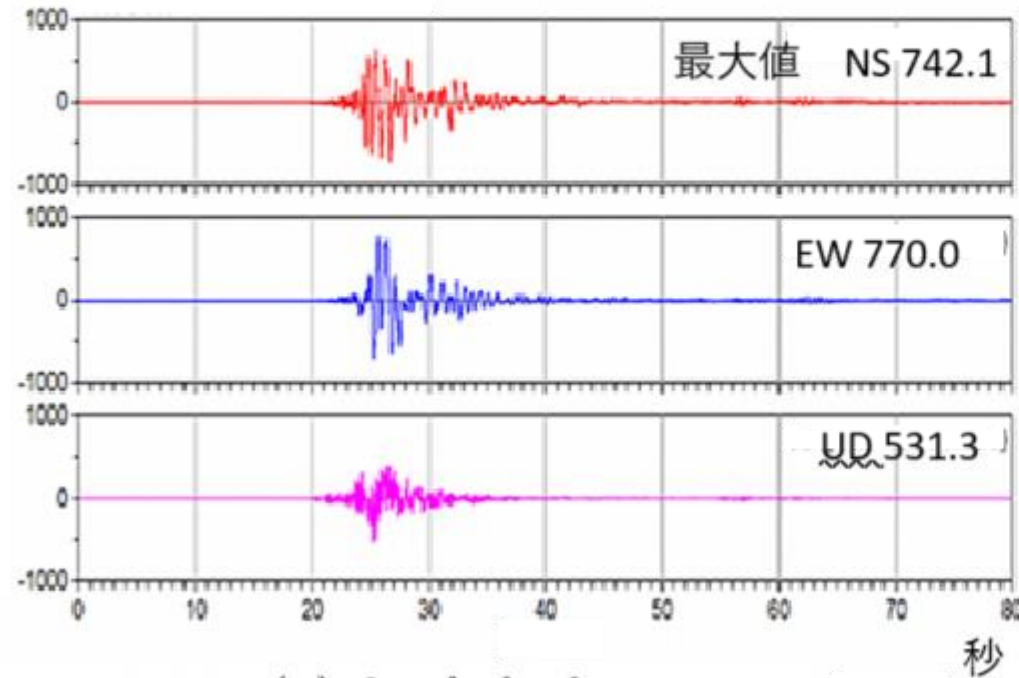


全体的には被害限定的

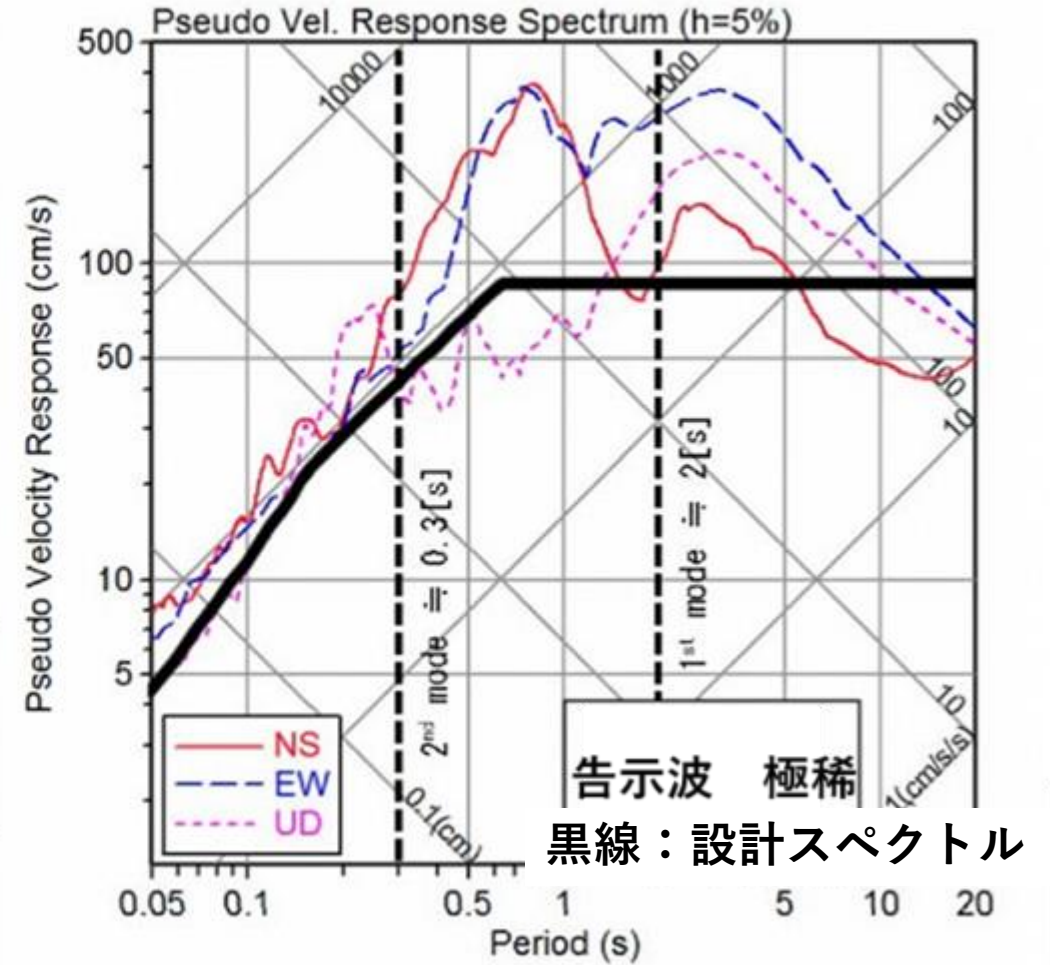


地中部の被害¹⁰

熊本地震 2016.4.16



(a) 加速度波形 Gal



(耐震設計法、地震動の見直しなどしてない)

2024年能登半島地震



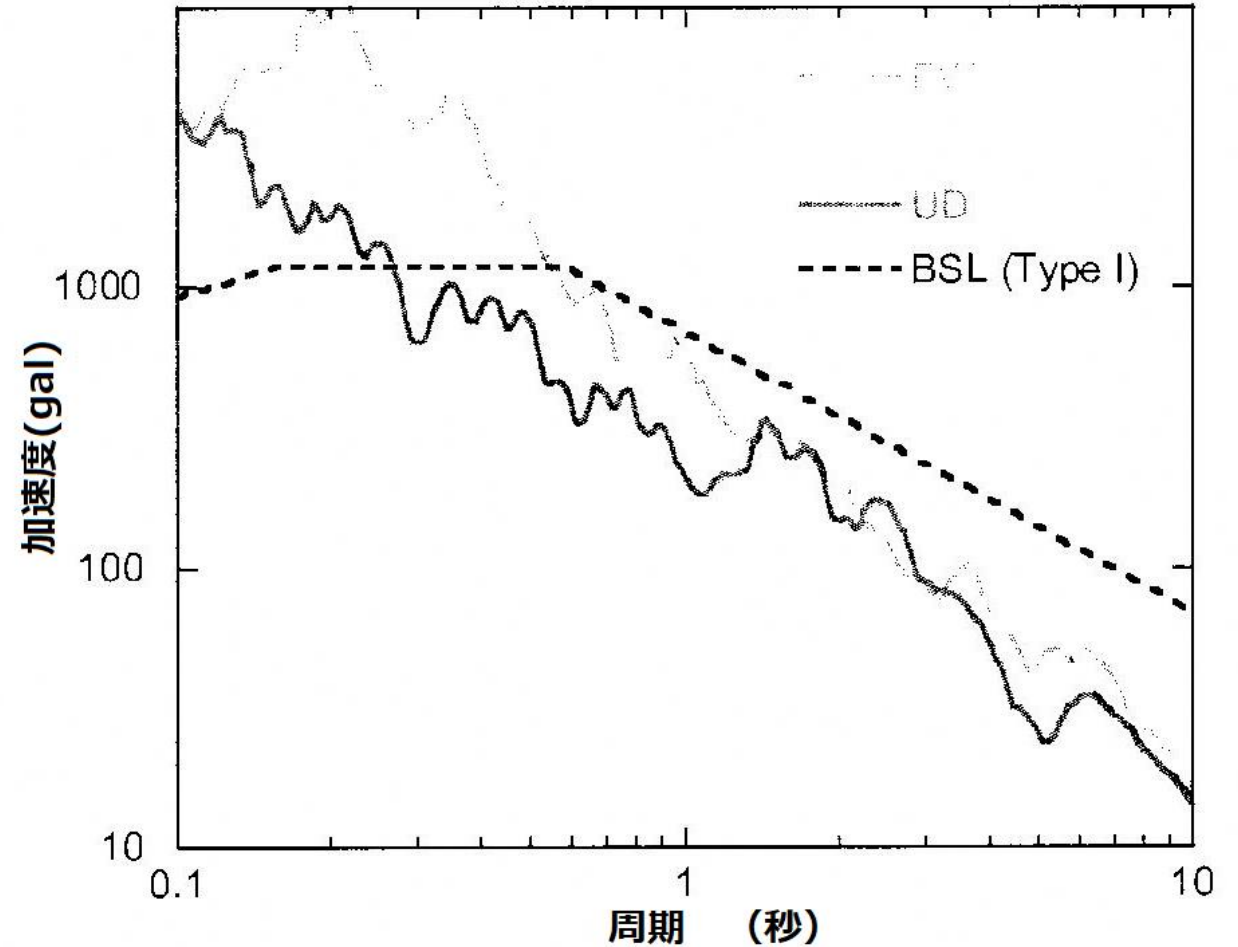
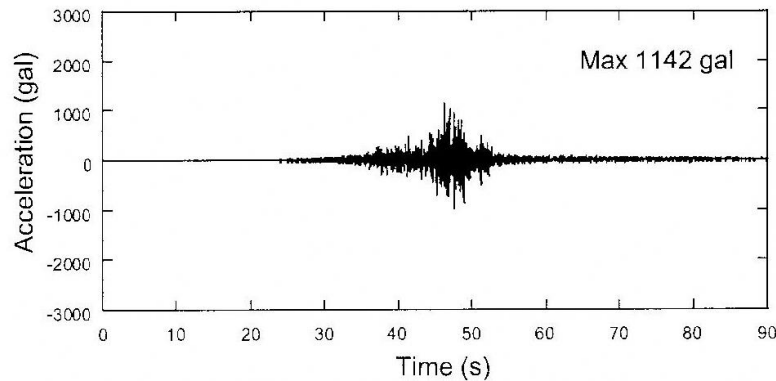
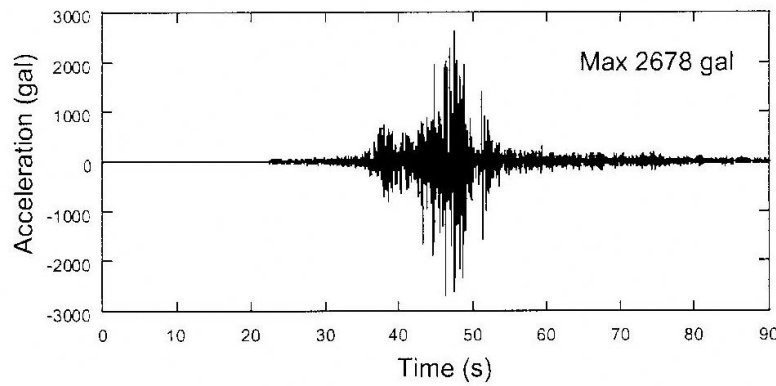
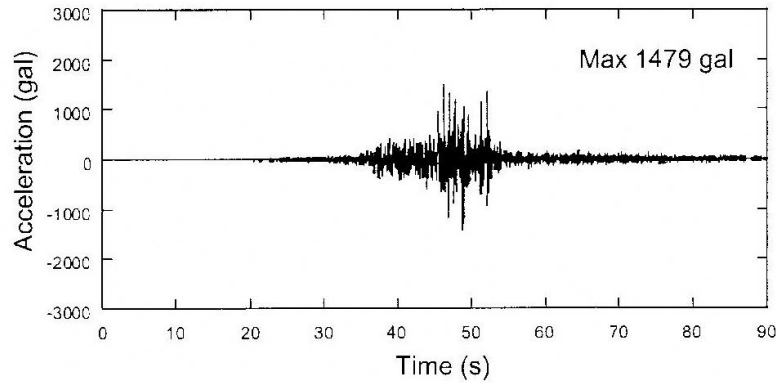
2基でブレードの破損
(無風状態)



基礎地盤の破壊

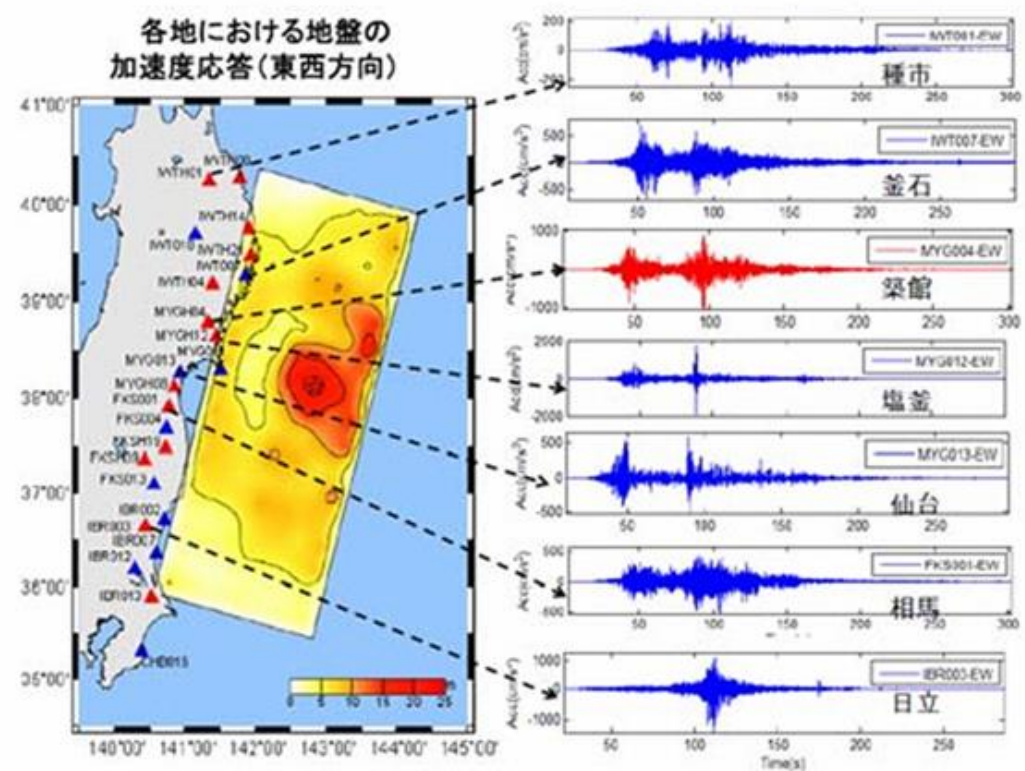
73基の風車が安全装置作動と電源喪失から全機停止、
2基でブレードの破損、基礎地盤の破壊

能登半島地震



(耐震設計法、地震動の見直しなど
してない)

東日本地震（震度7、マグニチュード9.0）



最大水平加速度 (cm/s ²)	観測点
2765	K-NET 築館 (MYG004)
1970	K-NET 塩竈 (MYG012)
1913	港湾地域強震観測 小名浜事-G
1844	K-NET 日立 (IBR003)
1807	K-NET 仙台 (MYG013)

日本風力協会に所属する199の風力発電施設（1150基）
で運転不能の風車は報告されなかった



土木施設で耐震設計法、津波対策など大幅な改定

神栖洋上風力発電での東日本自身津波の来襲

波高5m程度でハッチが10m高さ位置であったので浸水被害なし



陸上風車での故障・事故の集計

平成16-18年度 経産省NEDO資料より
設計不良は計測機関連が大半

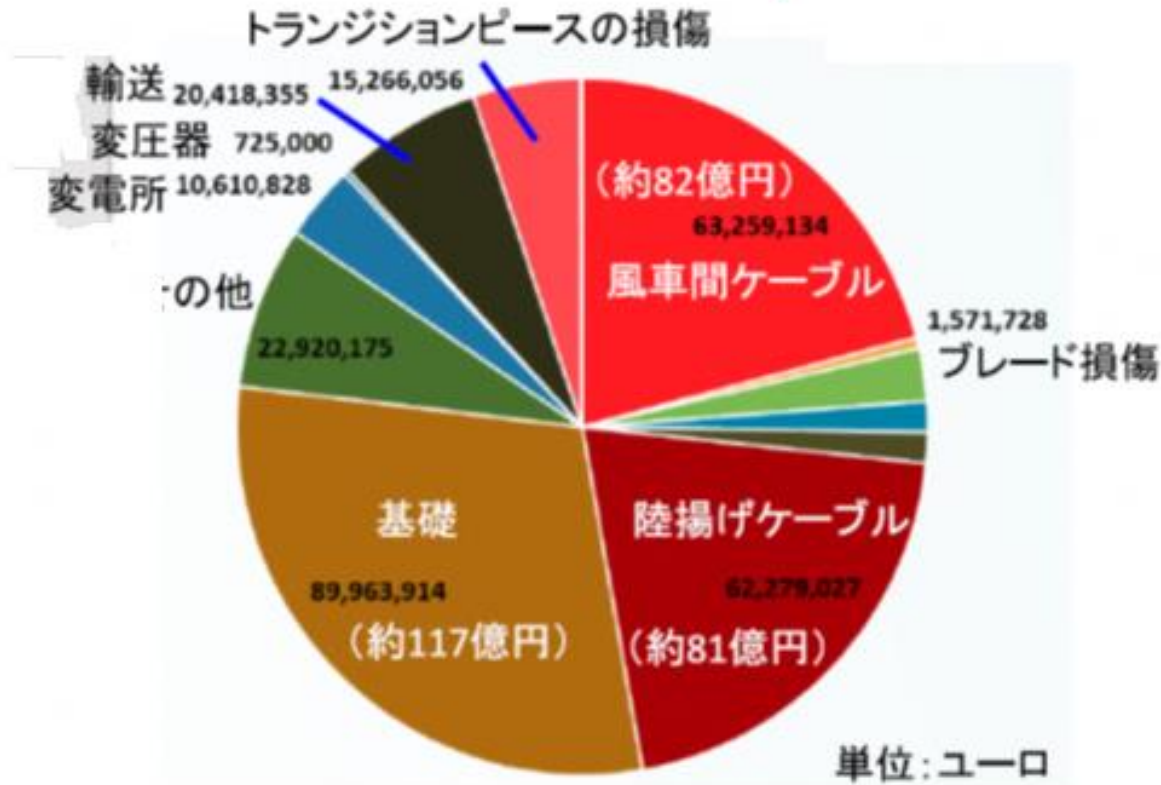
	要因	件数	構成率
自然現象	暴風	22	6.2
	落雷	91	25.8
	乱流	4	1.1
	竜巻、塩害、凍結	9	2.5
風車機器故障	設計不良	53	15.0
	製造不良	45	12.7
	施工不良	11	3.1
人的要因	メンテ不備	10	2.8
系統故障		4	1.1
その他	経年劣化	5	1.4
	二次災害等	13	3.7
	原因不明	86	24.4
	合計	353	100 (%)

洋上での課題：故障・事故などの調査、修理、部品交換がすぐできない。

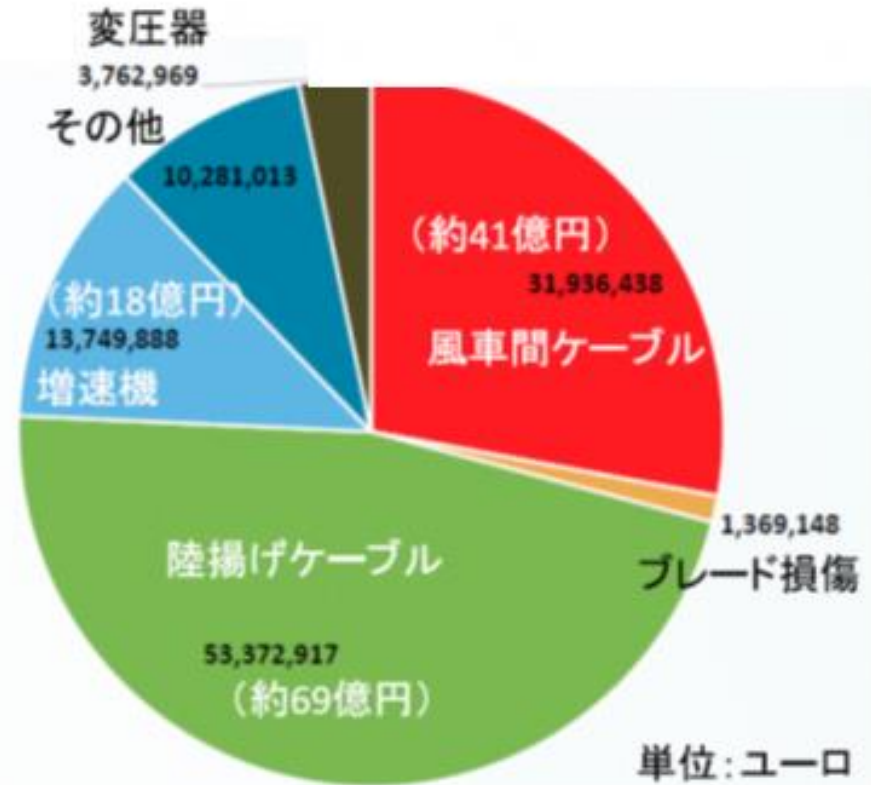
（特に日本海側は冬期に長期にわたりアクセスや作業困難）

対応：遠隔監視管理の徹底（ドローン等）、部品・修理手段の事前準備、頑丈な機器類の仕様など

欧州での洋上風力施設の事故の統計



建設工事における事業施設の物的損害



操業中における事業施設の物的損害

欧州と日本では事故の内容が異なる：ケーブル関連の事故が多い
日本では厳重な審査実施（ケーブルの埋設化、構造設計の厳密化など）

風力発電施設の法律的な現状

(1) 電力施設は電気事業法を適用（経済産業省）

(2) 支持構造物は各構造物の設置形態により適用が異なる
（国土交通省）

陸上風車

洋上風力

建築物として建築基準法の適用

着床式 港湾施設としての適用

浮体式 船舶としての適用

大型風車

高層の構造物の構造設計は国内の建築基準法に従う



建築基準法 60m以上で耐震設計に動的計算を採用

産業施設：煙突、溶鉱炉、鉄塔など

洋上風力発電施設で使用する基準

IEC 61400 : Design requirements for offshore wind turbines	IEC
JIS C 1400 : 3部 洋上風車の設計要件	JIS
DNV – GL : Loads and site conditions for wind turbines, Support structures for wind turbines, Corrosion protection for wind turbines. etc	DNV-GL
Recommendation Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms	API
ISO 19902:2007 Fixed Steel Offshore Structures	ISO
風力発電設備支持物構造設計指針・同解説	土木学会
建築基礎構造設計指針	日本建築学会
港湾の施設の技術上の基準・同解説	日本港湾協会

国内外の多くの基準を満足させる

日本における洋上風力発電施設での 技術的な課題：ヨーロッパと異なる条件

- (1) 台風（波・風）、地震、落雷、地盤などの自然条件
 - (2) 設計計算モデル：上記の妥当性の検証が必要：国内と欧州の設計ソフトの併用・・・耐震設計は日本独自
 - (3) 大型風車の国内製造困難、作業船の不足、作業基地の不足など、風力発電施設の基盤産業が発達途上で整備中
- ➡ 海外の技術導入が前提：日本の条件で設計施工法を構築する

求められる耐震性能

(1) レベル1地震

(稀に発生する地震、再現期間50年程度)

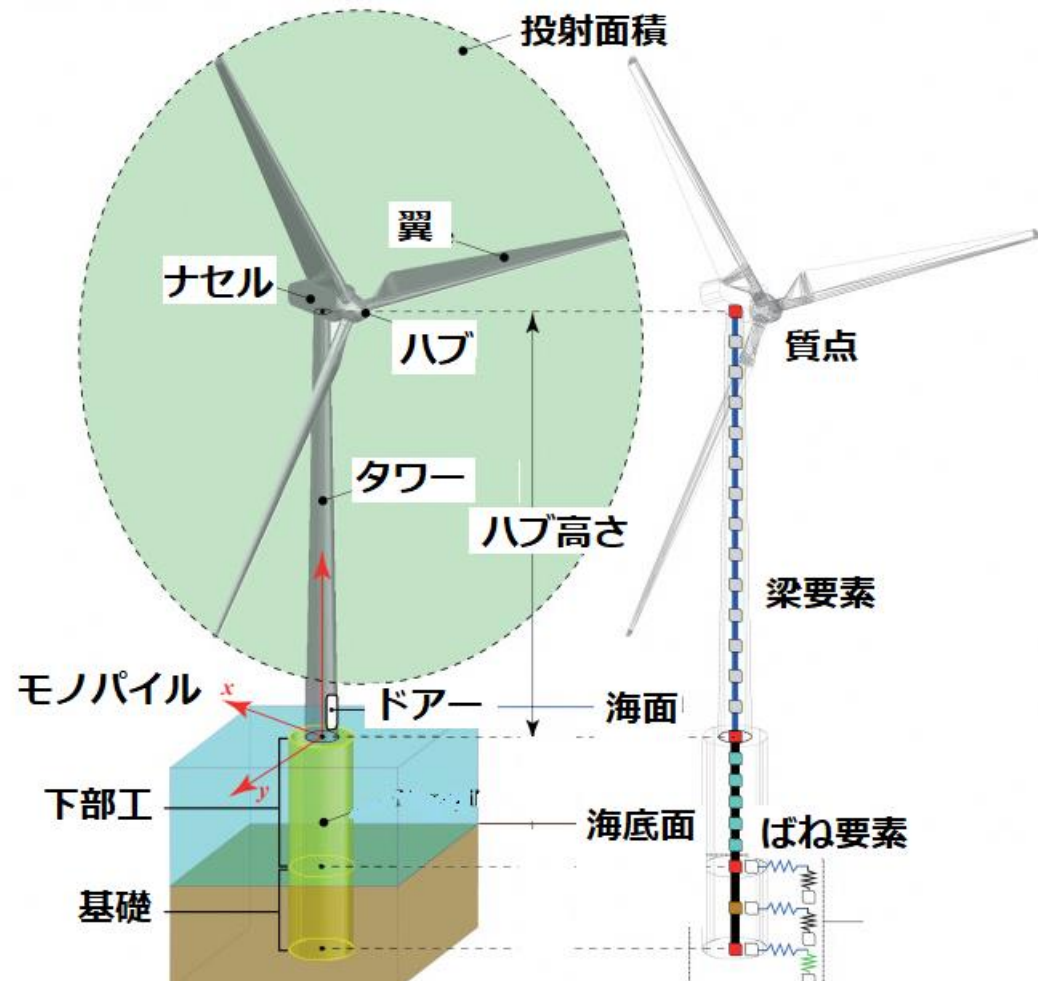
部材が破損しない。継続して運転可能

(2) レベル2地震

(極まれに発生する地震、再現期間500年程度)

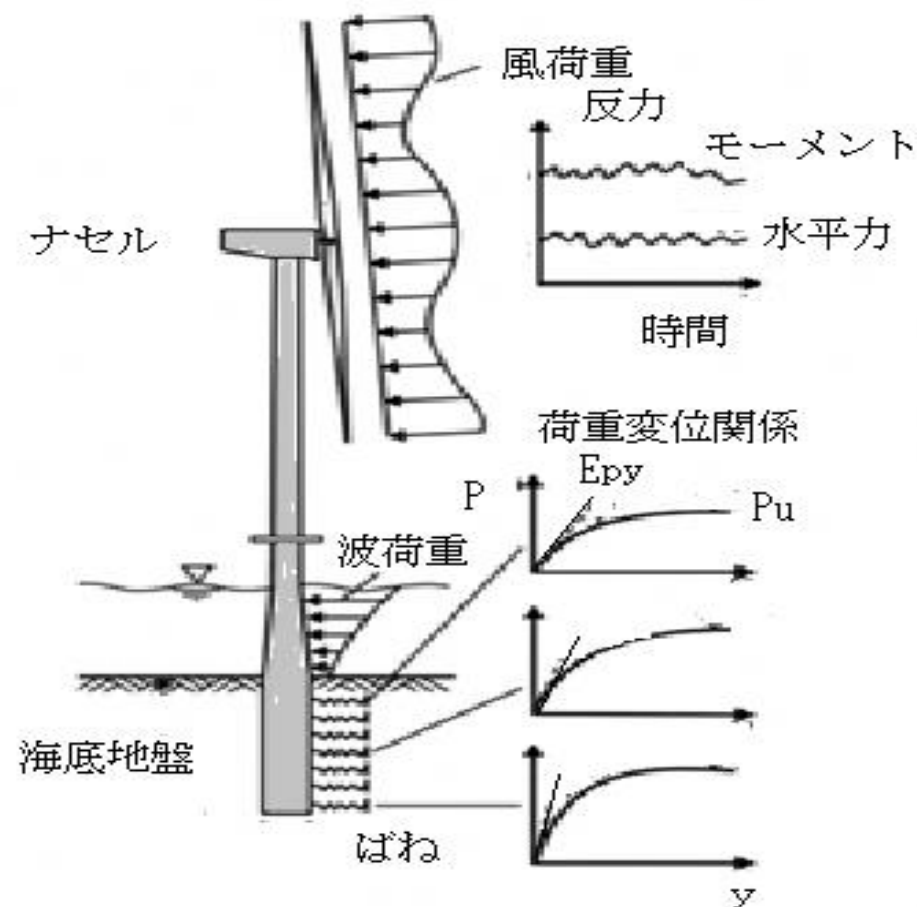
倒壊しない

洋上風力施設の計算モデル



ナセル：発電機

ハブ：回転軸



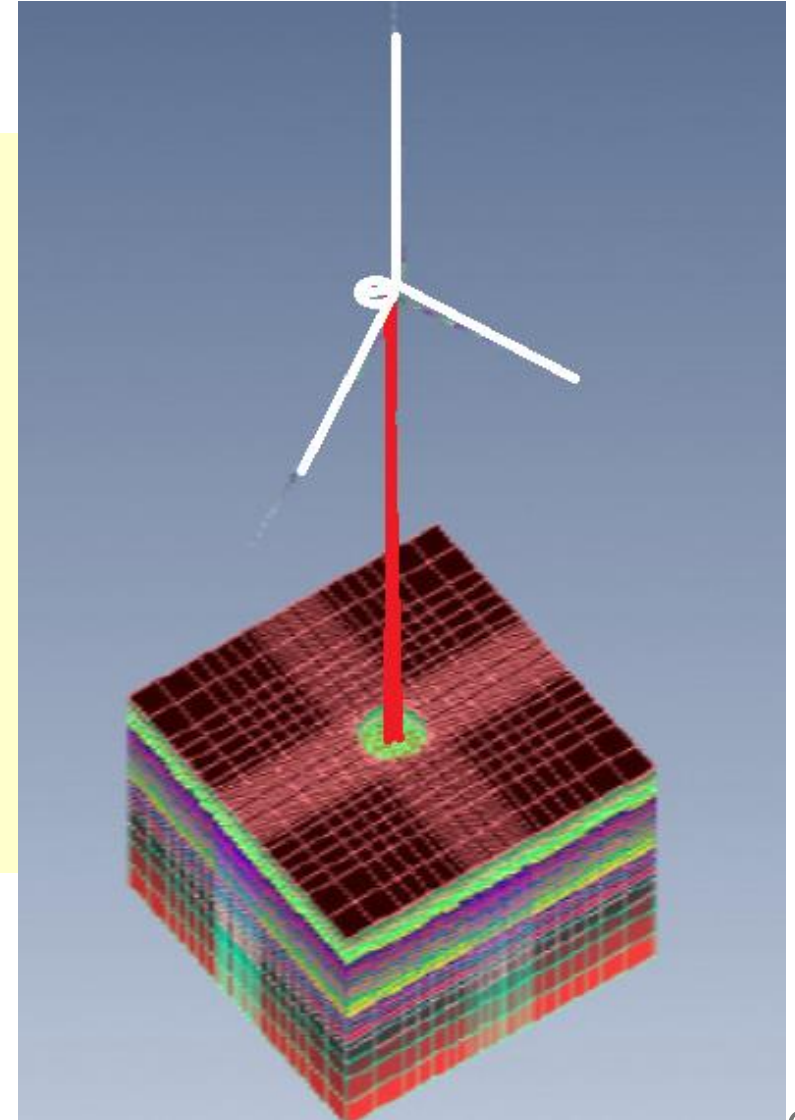
有限要素法による応力解析

(1) 三次元の効果への考慮、特に地震時液状化の影響に対しての解析が要求されてきている

(3) FLIP,LICA,LS-DINA、SOIL-PLUSなどの日本既存プログラムによって対応

世界的に最高レベルの耐震設計法

高度で精緻な計算



荷重条件 (DLC : design load combination)

地震時の荷重の重ね合わせ

- (1) 定格風速時 (日本は1年確率の風)
- (2) 緊急停止時
- (3) 停止時 (無風とアイドリング)

地震と風の方角の違い0, 90度

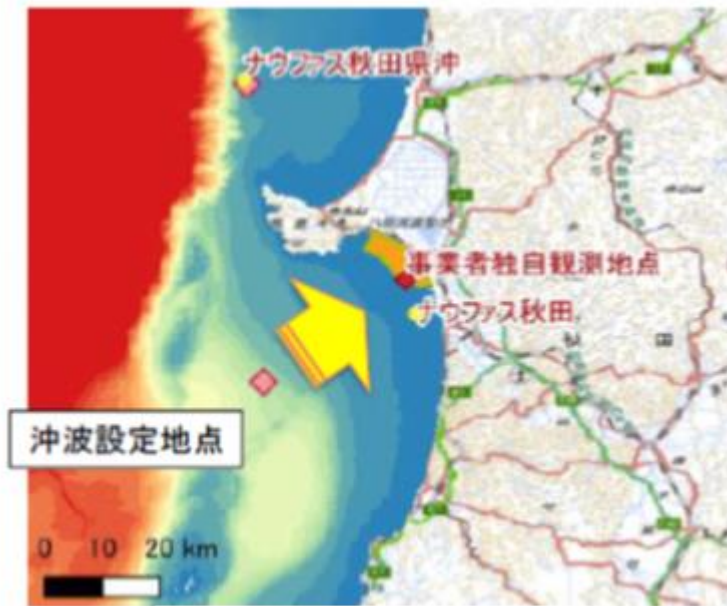
入力地震波は建築分野の告示波と海洋構造物の港湾波

津波対策

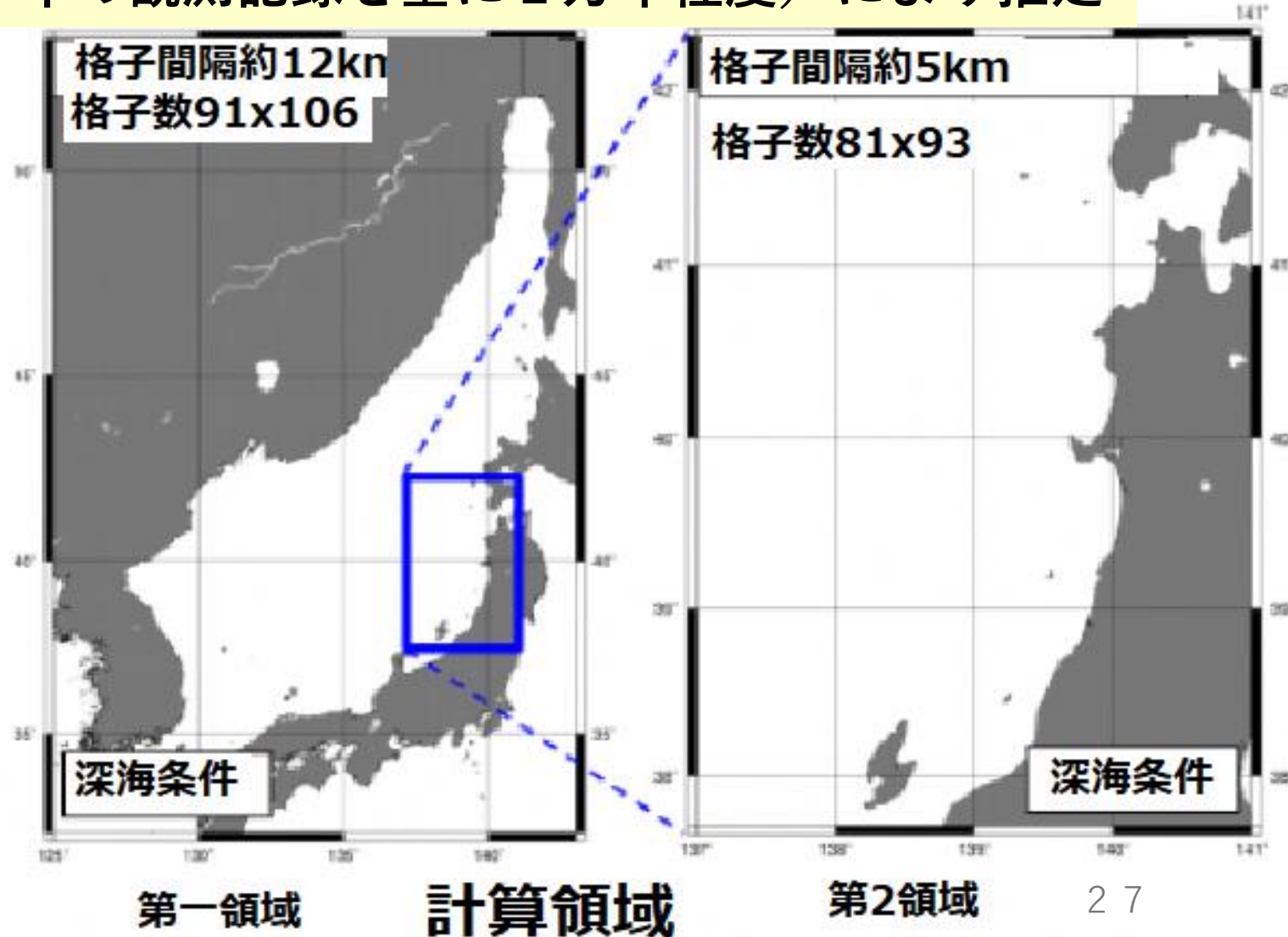
- 地震と同じくレベル1津波、レベル2津波を考慮
- 津波規模は地域防災計画に準ずる
- 波浪による外力と比較して沖合では津波波力は一般的に小さい
- 早い流れに対して洗掘防止工を実施

数値計算による風車設置位置の波と風の計算

多数の模擬台風（40～50年の観測記録を基に1万年程度）により推定

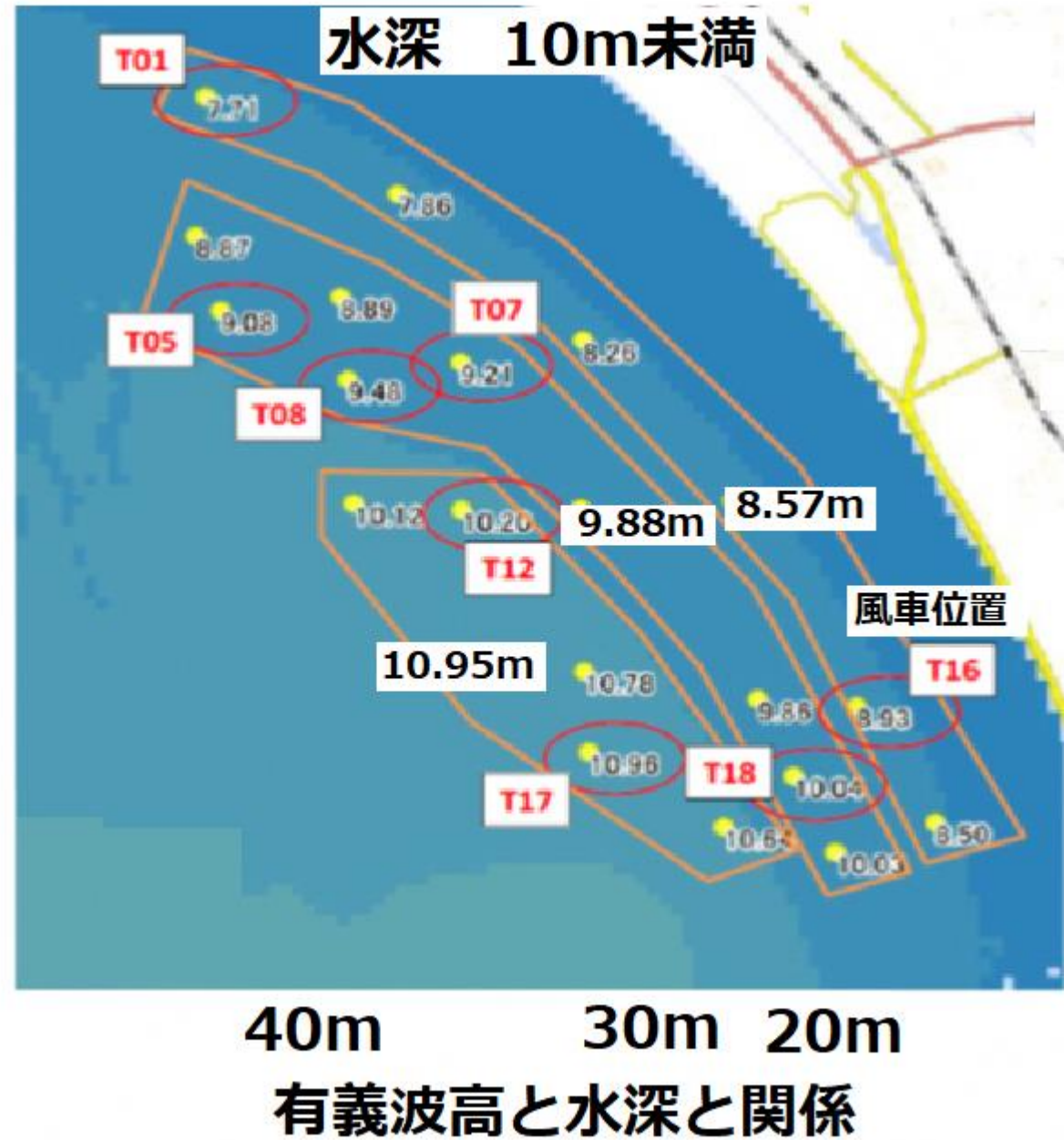


波浪計算のモデル

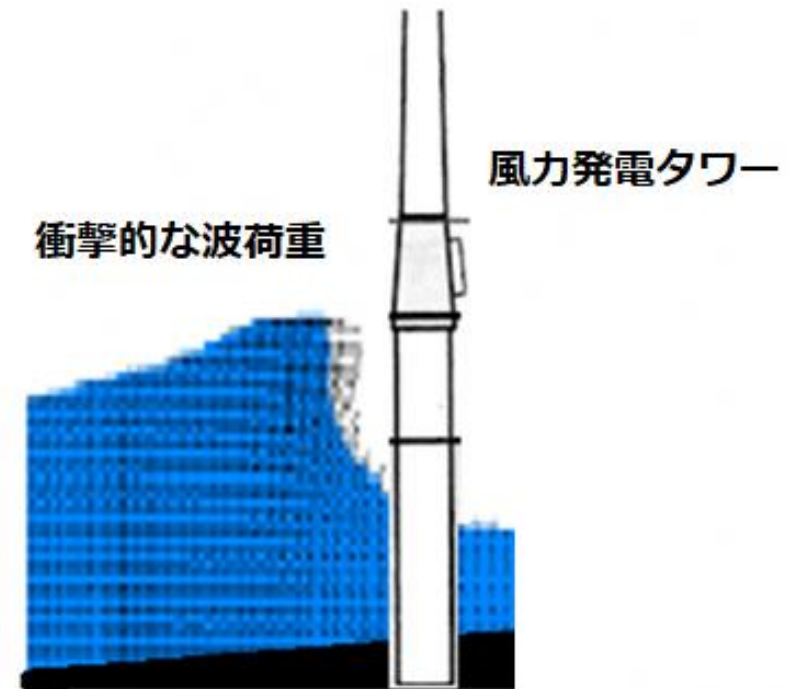
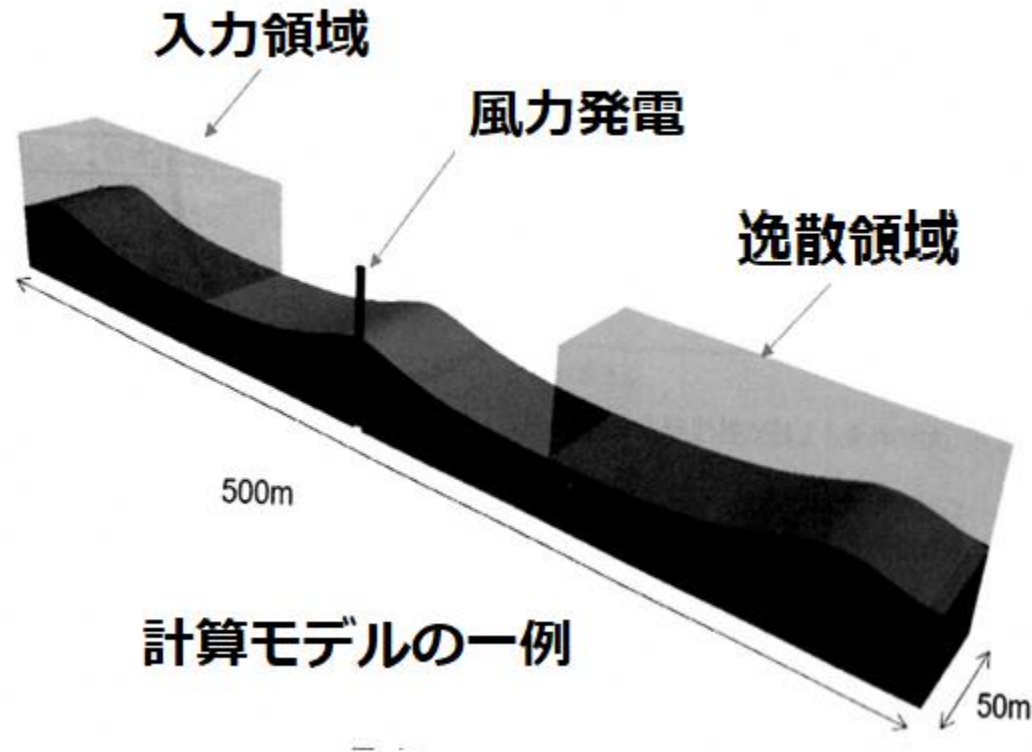


波浪変形計算結果

波向 (°)	有義波高 Hs (m)	有義波周期 Ts (秒)
210	7.01	10.5
240	12.68	14.1
270	12.63	14.1
300	12.21	13.9
330	10.89	13.1

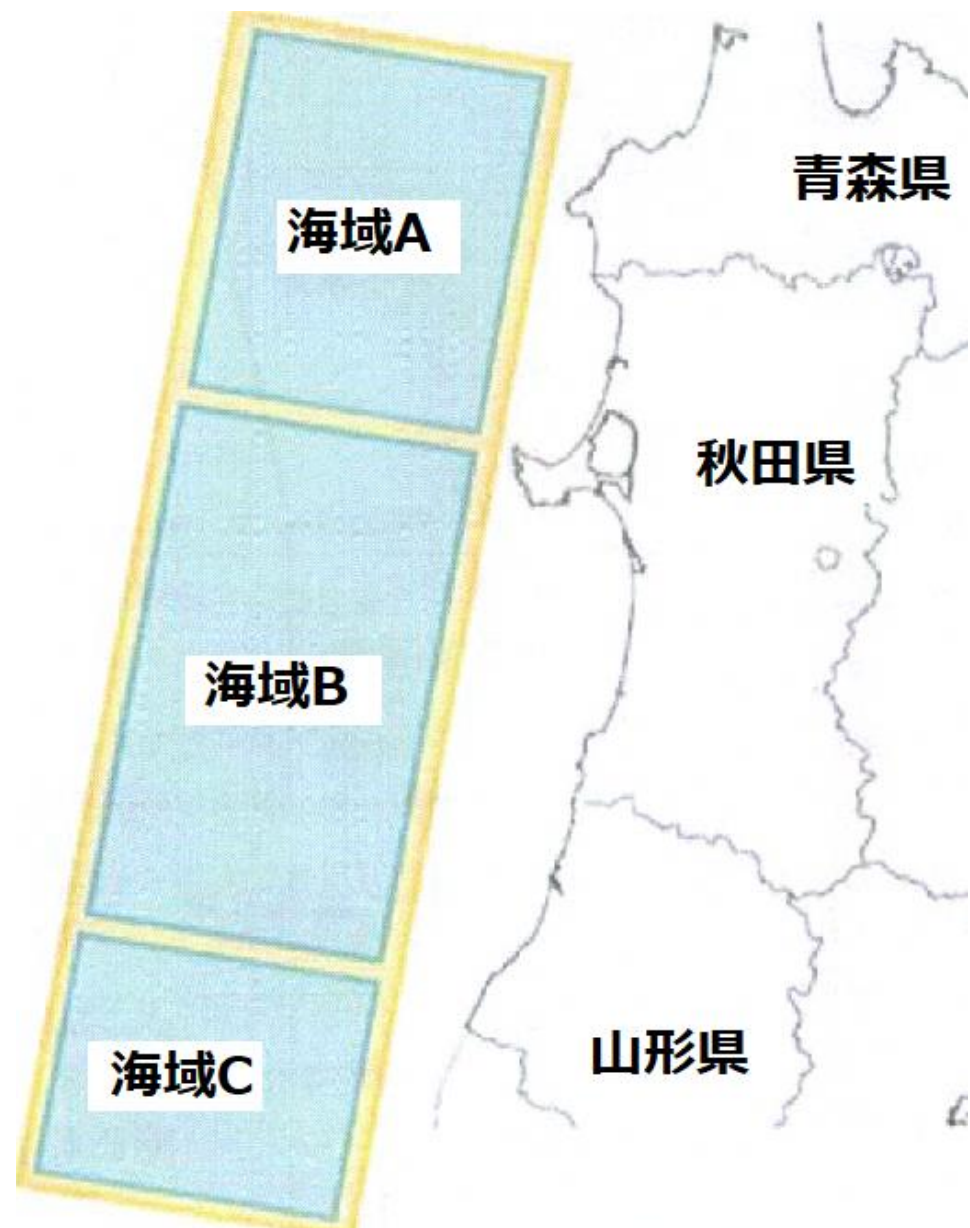


数値計算によるタワーへの波浪荷重の計算モデル例

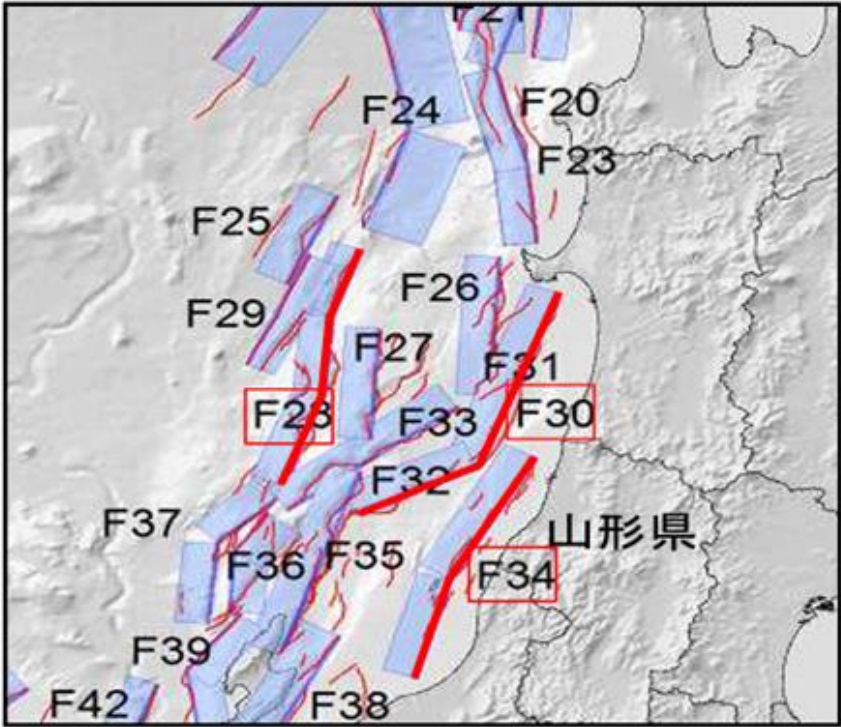


砕波：衝撃的な荷重が作用

日本海側での津波の推定



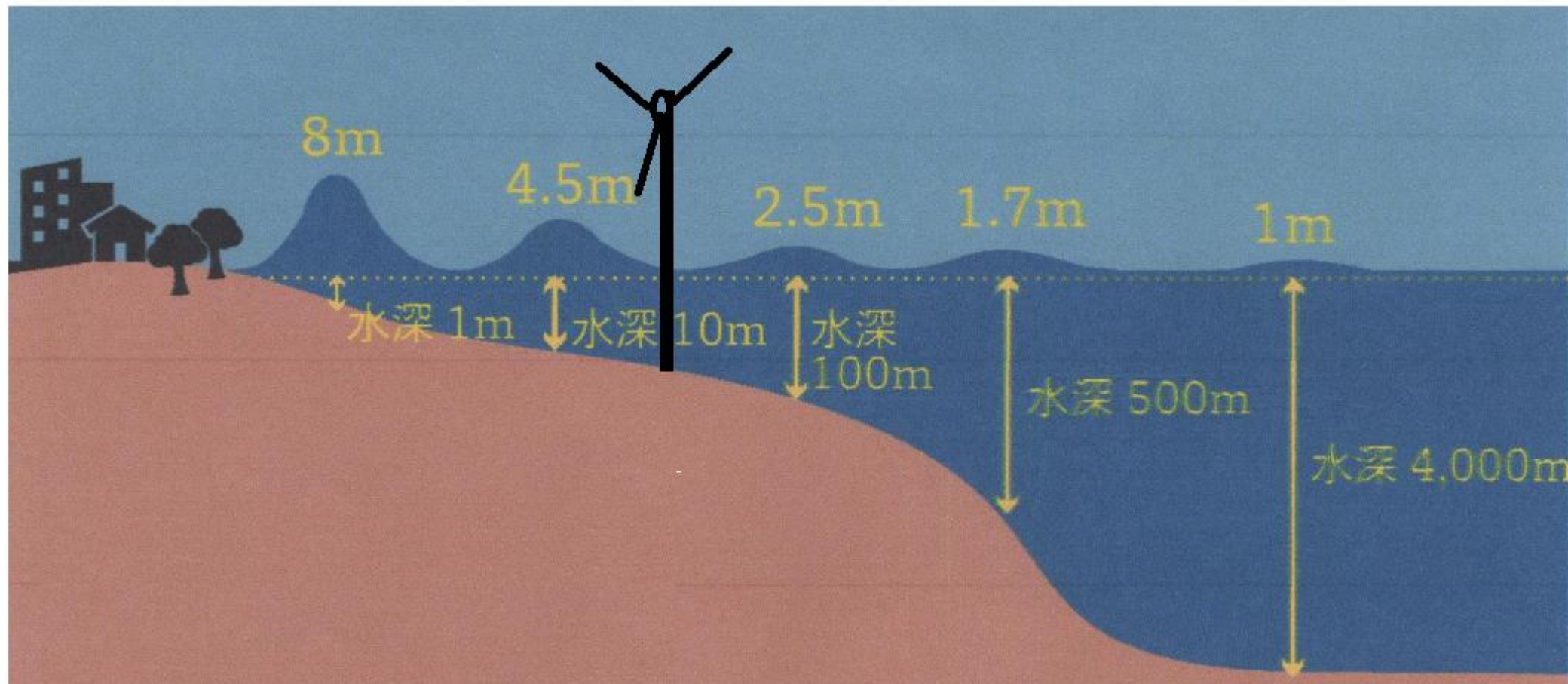
選定した津波断層モデル（位置図）



断層パラメーター

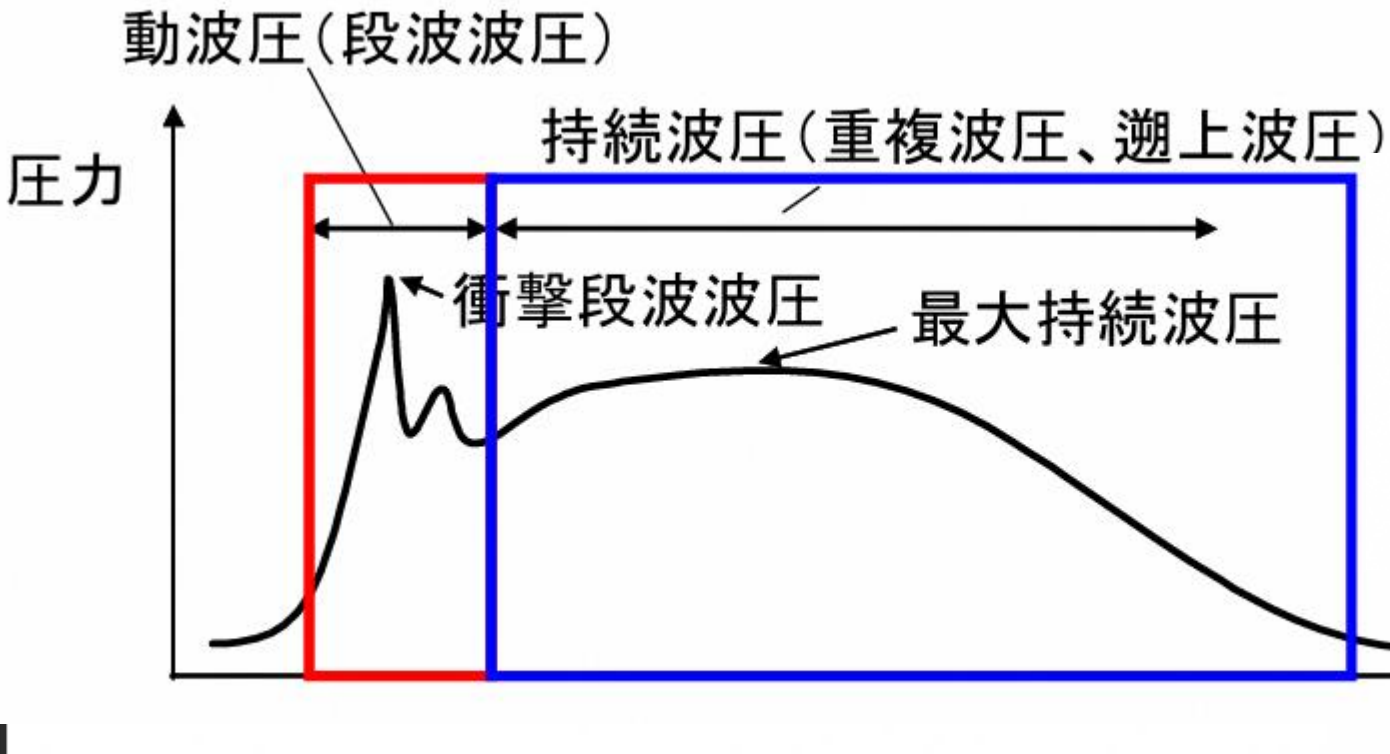
津波断層モデル	マグニチュード(Mw)	断層長さ (km)
F 28	7.7	126
F 30	7.8	153
F 34	7.7	124

津波波高と水深との関係



浅くなると波高急激に大きくなる

$$(\text{波高} / \text{参照波高}) = (\text{参照水深} / \text{水深})^{1/4}$$

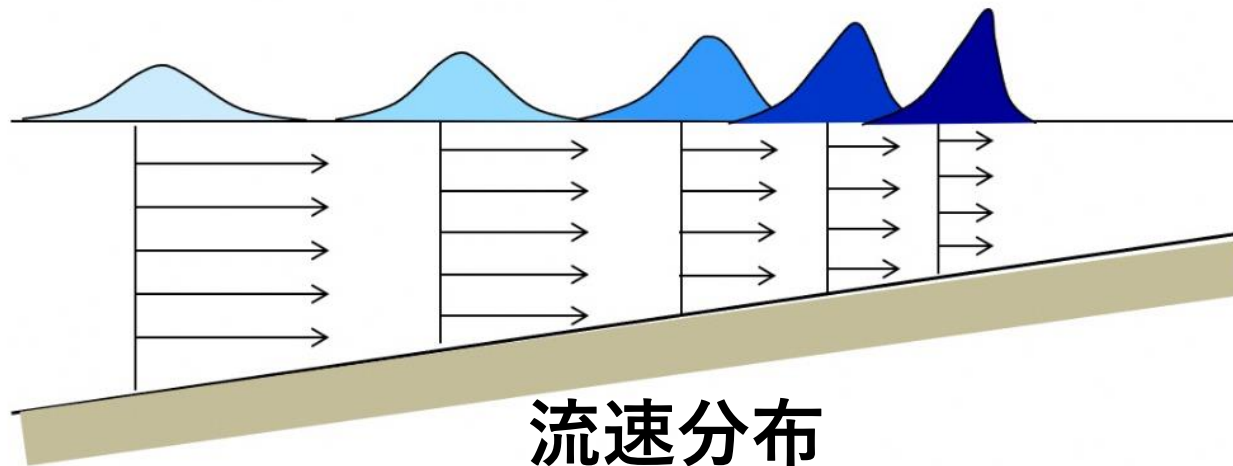


海域A,B,Cで3連動した時

$$(\text{波高}/\text{参照波高}) = (\text{参照水深}/\text{水深})^{1/4}$$

$$(X/15) = (1/20)^{1/4}$$

$X=7.1\text{m} < 12.7\text{m}$: 有義波高



波浪より津波の波高は低い
津波流速は数m/s : 洗掘対策必要

陸上の発電施設は被害が予想 : 対策

まとめ

- (1) 風力発電施設の事故例は少なくない
日本の地震、台風、維持管理などの対策とられている：最善を目標
- (2) 洋上風車の耐震設計は高層ビルと同程度の高い水準
(数百年に1度の地震を考慮で倒壊しない)
- (3) 過去の大地震で大きな被害は生じてない。
(現行耐震設計の妥当性証明)
沖合では津波荷重は波浪荷重より小さい
- (4) 洋上風力発電の構造設定や設計法は欧州の基準以上に厳しい
日本の現設計体系に合わせて構築している