

3 海域・気象・海象調査

洋上風力発電所設置海域の決定、事業化の検討、設計条件等の基本データを得るために、海上風や波浪等の実測調査を行う。候補海域の風況、波浪、海潮流等の観測データは、洋上風力発電のプロジェクト・リスクを低減し、ひいては事業の利益率を上げることにつながるため重要である（本ガイドブックⅢ.10節、事業性評価を参照）。また、施設運開後もオンサイトの観測データを長期にわたって取得することを推奨したい。

ここでは、気象（風況）、海象（波浪、海潮流）、海底地形・土質に関する調査手法の概要を示す。

3.1 風況

洋上風力発電の事業計画を検討するためには、海上風の風速、卓越風向等の風況特性を把握し、事業の可否を検討するデータを取得することが重要である。また、設計に関わる極値風速を推定することも必要である。ここでは、そのための海上風の観測調査と予測方法を示す。なお、「風力発電導入ガイドブック改訂第9版（2008）」も併せて参照されたい。

(1) 海上風の観測調査

ヨーロッパでは、プロジェクトの融資には現場の風況観測データが必要である。そのためには多大なコストをかけることになるが、実測データは、上述のように計画から設計、建設、維持管理等に至るまで、多大な便益を及ぼすことも事実である。海上風の測定設備は「着床式」および「浮体式」、また測定方法は三杯式風速計と矢羽根式風向計に代表される「直接測定」およびドップラーライダ等による「間接測定（リモートセンシング）」に区分される。一方、海上風の測定要件として次の2つをあげることができる（NEDO、日本風力発電協会ら、2007）。

◎測定の正確さが実証されたものであること。

◎測定の不確かさが定量化できるものであること。

本要件から見れば、海底に設備を固定する「着床式」と「直接測定」による観測方法が最もデータの信頼性が高いと考えられる。なお、後述するように、浮体式洋上風力発電を想定した水深の深い海域における海上風観測手法として、特に海外で浮体式海上風観測システムの検討が進んでいる。また、浮体式海上風観測の測定機器としてドップラーライダ等が使用されるが、観測タワー（着床式）においても、実証試験等で研究面から上空の風況特性を調査するために、ドップラーライダ等を搭載している事例が数多く見られる。

1) 洋上風況観測タワーによる海上風観測方法

着床式の洋上風況観測タワー*1による海上風の観測方法について、概要を示す。

*1 洋上風況観測タワーは高額であることから、最近、ドップラーライダによる浮体式洋上風況観測システムが開発されているが（Ⅲ.3.1(1)5参照）、現時点ではファイナンスレベルのデータの精度は検証されていない。

①洋上風況観測高度

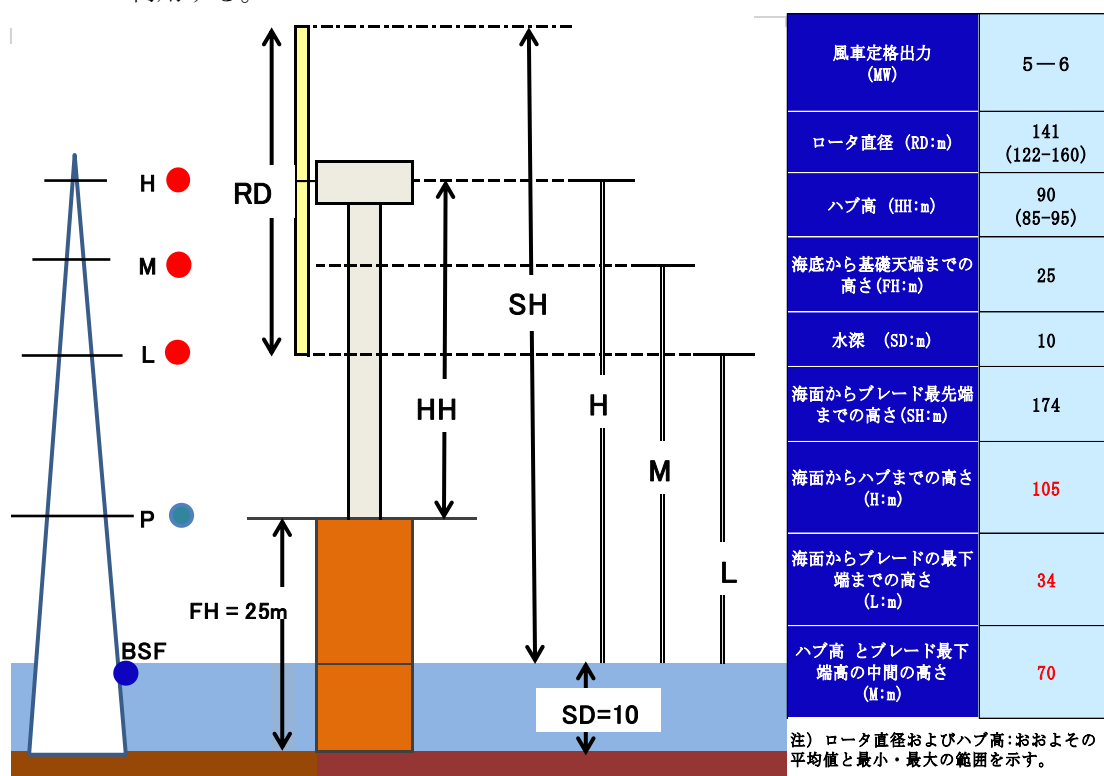
今後、洋上風車は大型化し、5MW以上の風車が主流になると考えられるため、後述する海外の商用洋上ウィンドファームにおける観測タワーの例*2(表Ⅲ.3.1-10、参照)を参考にして、観測タワー高度および観測高度を以下のように設定した。

✓観測タワー高度：100m*2

✓観測高度：3層

- ・ハブ高(約100m)
- ・ブレード最下端(約35m)
- ・両高度の中間(約70m)

#中間高度の観測は、風速の鉛直プロファイルやベキ指数を検討するためのデータに利用する。



図Ⅲ. 3. 1-1 洋上風況観測タワーの高さに係る検討例

②観測項目

観測項目は、以下に示す通りで、観測データのサンプリング周期は1-3秒とし、平均化時間は原則10分間とする。

- ・平均風速
- ・平均風向
- ・最大瞬間風速
- ・風速の標準偏差
- ・気温
- ・湿度
- ・気圧
- ・水温

*2 観測タワー高度は、ハブ高さよりも低い事例が多く、観測層は3層から7層までみられ、3層の事例が半数を占めている。英国では、風況観測の最高高度は最低でもハブ高の2/3の高度で観測することが推奨されている (SeaRoc,2014)。

③観測方法

風況センサ等、観測タワーに取り付ける装置の種類と観測高度を表Ⅲ.3.1-1 に示す。同じ観測高度に、複数個の三杯型風速計と矢羽根式風向計のセンサを取り付けることとしている。それは、風向きによりセンサがタワーの風下側に位置する場合には、タワーによるウエイクの影響により信頼性の高いデータが得られないことによるものである。解析にはウエイクの影響がないセンサのデータを用いる。事業者による研究要素の少ない観測タワーであることを勘案し、表中の超音波風向風速計およびドップラーライダの設置は任意としている。なお、気温、湿度、水温を測るセンサは、大気安定度の影響を捉えるために設置するものとした。

表Ⅲ.3.1-1 観測方法の例

センサ	観測高度(m)					備考
	BSF	P	L	M	H	
風速計(三杯式)			34	70	105	各観測層にセンサを2-3個設置
風向計(矢羽根式)			34	70	105	
超音波風向風速計			34		105	設置は必須ではない。
ドップラーライダ		15				設置は必須ではない。
温湿度計		15	34		105	
温度差計		15			105	
気圧計		15				
水温計	-1					海水面下1m

注) 観測高度の記号は図Ⅲ.3.1-1に対応する。

前述のように、風下側のセンサはタワーに影響を受け、風上側のセンサもある範囲内で風速の減衰が見られる。センサ取り付けブームの長さを設定するために、IEC61400-12-1 では、スラスト係数と許容計測誤差の関係からブーム長を観測タワー幅の何倍離す必要があるか、また、ブームとセンサ間の距離についてブームの直径から何倍離せばよいのか等についての検討例が記載されている（いずれもブーム長/ブーム径の15倍以上離すことが推奨値）。

④観測期間

海上風の観測データが維持管理計画等を立てる上で有用な資料となるため、洋上ウィンドファームの稼働期間（20年間）は継続して測定することが望ましい。

⑤観測点

観測点は、洋上ウィンドファームにおける卓越風向の風上側に設けることとし、観測点数は、理想的には予定している風車の設置台数、候補海域の範囲および海底地形条件等を考慮して複数点とすることが望ましい。なお、デンマークの洋上ウィンドファームの Horns Rev（風車設置基数：70基）では3箇所、同じ Nysted（風車設置基数：70基）では4箇所に風況観測タワーが設置されている。

2) 観測データの処理・解析

風況観測データの処理方法およびデータの解析方法を示す。

① データの処理

前述したように観測タワーの影響を受けていない風速計、風向計の観測データを解析に用いることとし、異常値の確認・処理等の処理を行う。

a. データの取得率

観測データの取得率は90%以上を確保し、連続欠測期間は1週間以内であることが望ましい。条件を満足できない場合はb.の方法で補完を行う。

b. 欠測データの補完

高度別観測データ的一方をバックアップデータとして利用することが可能な場合、相関法、あるいは風向別の指数則や風速比を用いて欠測データを補完する。

② データの解析

風力発電の導入可能性評価ならびに風車設置地点の選定を行うためのデータの解析内容としては、風況と風力エネルギーに関するものがある。表Ⅲ.3.1-2 に一般的な解析内容を示す。解析に用いる風向風速のデータは、10分平均値に基づく1時間平均値（風速は算術平均、風向はベクトル平均によって算出）を基本データとする。

表Ⅲ.3.1-2 解析内容

分類	項目	期間	目的	算出方法
風況	平均風速	年月	風速の概要を評価する。	平均風速 = $\frac{\text{対象期間の全1時間平均値の合計}}{\text{データ数}}$
	風速出現率	年間	風速の出現率（頻度分布）から風速の出現特性を評価する。	風速階級を1 m/s間隔に設定し、各階級の出現率を算出する。
	風向出現率	年間	風向の卓越状況を明らかにする。	全風向を16方位に分割し、平均風向を累積する。
	風向別平均風速	年間	集成型風車の配列を検討するために、主風向を明らかにする。	方位ごとに1時間平均風速に基づく算術平均を行う。
	風向別風速出現率	年間	集成型風車の配列を検討するために、主風向を明らかにする。	方位ごとに各風速階級(1 m/s幅)の出現率を算出する。
	風速の時間的変動	日間 年間	風車の運転計画を検討するために、風速の時間的変動特性を評価する。	時間別に各月の平均風速を算出し、その推移を図表によって明らかにする。
	乱れ強度	年間	風速の瞬時の変動特性および風速変動の大きな風向を明らかにする。	全風速および方位別風速に対して算出。 乱れ強度 = $\frac{\text{風速の標準偏差}}{\text{平均風速}}$
風速の鉛直分布	年間	実測データのある高度の風速を予測するためのべき指数を算出し、実測データと比較する。	べき指数は、下式に各観測高度とその風速値を代入し、最小二乗法により算出する。 $V / V_1 = (z / z_1)^{1/n}$	
風力エネルギー	発電電力量	年間 月別	風車によって取得できる風力エネルギー量を評価する。	風車の出力曲線と風速出現率に基づき、風速ごとの発電電力量(エネルギー取得量)を累積する。
	設備利用率 (Capacity Factor)	年間 月別	風力発電導入の可能性を評価する。	設備利用率 = $\frac{\text{対象期間の発電電力量}}{\text{定格出力} \times \text{対象期間の時間数}}$
	利用可能率 (Availability)	年間 月別	風力発電導入の可能性を評価する。	利用可能率 = $\frac{\text{対象期間の時間数} - \text{同期間の保守および故障による停止時間数}}{\text{対象期間の時間数}}$

3) 評価方法

風況観測データの解析結果に基づき、候補地点での風力発電の導入可能性に係る評価を行う。その際の評価の主な目安を以下に示す。

①風況に関する評価

洋上風力発電に適した風況は、風車のエネルギー取得量の観点から、平均風速が高く、風向が安定しており、乱れ強度が小さいことである。

a. 年平均風速

一般的には事業性評価は、実測あるいはシミュレーションによるハブ高での風速データを基に発電電力量を推定し行う。事業を検討する一つの目安として、海面上 70m 高での年平均風速が 7m/s 以上 (Matthies et al.,1995 から推定) であることが望ましい。

b. 風向出現率

風軸上の年間風向出現率が 60%以上であれば、風向は安定していると評価できる (図 III.3.1-2)。なお、風軸とは 16 方位の風向を対象に、主風向とその隣にある 2 風向およびこれらの風向と対称となる風向の合計 6 方位のことを呼ぶ。

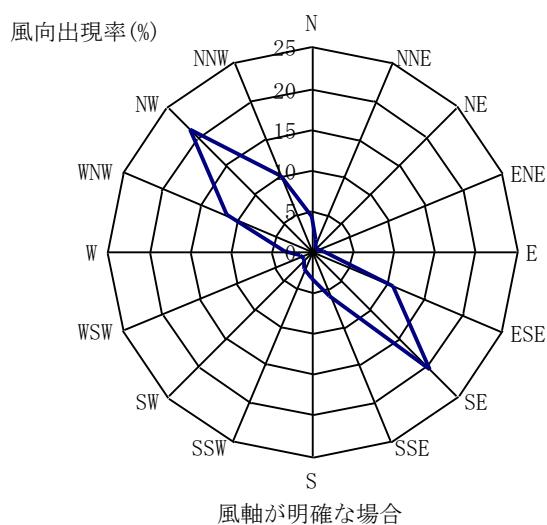


図 III.3.1-2 風配図の例

c. 乱れ強度

乱れ強度は、風速の標準偏差の平均風速に対する比で、指定の時間内に採取した同一の風速データセットから求める。10 分間平均風速が 15m/s の時の乱流強度は I_{15} で示される。

乱れ強度は、陸上では地形条件の影響を大きく受けることから、一概に基準化することは難しいが、一般的に洋上では概ね 0.12 (IEC の I_{ref} カテゴリ C) 以下を示すことが多い (洋上であっても、沿岸海域で陸風が吹く時期には乱れ強度は大きくなる)。乱れ強度が IEC 基準と比較して大きい場合には、導入海域の再検討を行うか、または機種選定に際して風車メーカーに設計条件を確認することが重要である。

②風力エネルギーに関する評価

a. 風力エネルギー密度

年間の風力エネルギー密度 (EP) は、海面上高 70m で 400W/m² 以上 (Matthies *et al.*,1995 から推定) あることが望ましい。

$$EP = \frac{1}{2} \frac{\rho \sum V^3}{T_0}$$

EP : 風力エネルギー密度[W/m²]

ρ : 空気密度[kg/m³]

V : 1 時間平均風速[m/s]

T₀ : 対象期間の時間数[-]

b. 風車の設備利用率 (Capacity Factor)

年間設備利用率が 30%以上であることが望ましい。ただし、正味年間発電量の算出にあたっては、利用可能率は故障時の修理体制等から 90-95%程度、出力補正係数は 90%を考慮することが望ましい。

$$\text{年間設備利用率 (\%)} = \frac{\text{正味の年間発電量 (kWh)}}{\text{定格出力 (kW)} \times 8760 \text{時間}} \times 100$$

* 正味年間発電量 (kWh) = 年間発電量 × 利用可能率 × 出力補正係数

出力補正係数 : 90% (洋上)、95% (陸上平坦地形)、90% (陸上複雑地形)

c. 風車の利用可能率 (Availability)

利用可能率は、前述のように洋上の場合 90-95%程度が望ましい (陸上風力発電: 95-98%)。参考までに欧州の洋上風力発電のケースでは、80-95% (Becki,2011)、90% (Tavner,2014) と言われている。

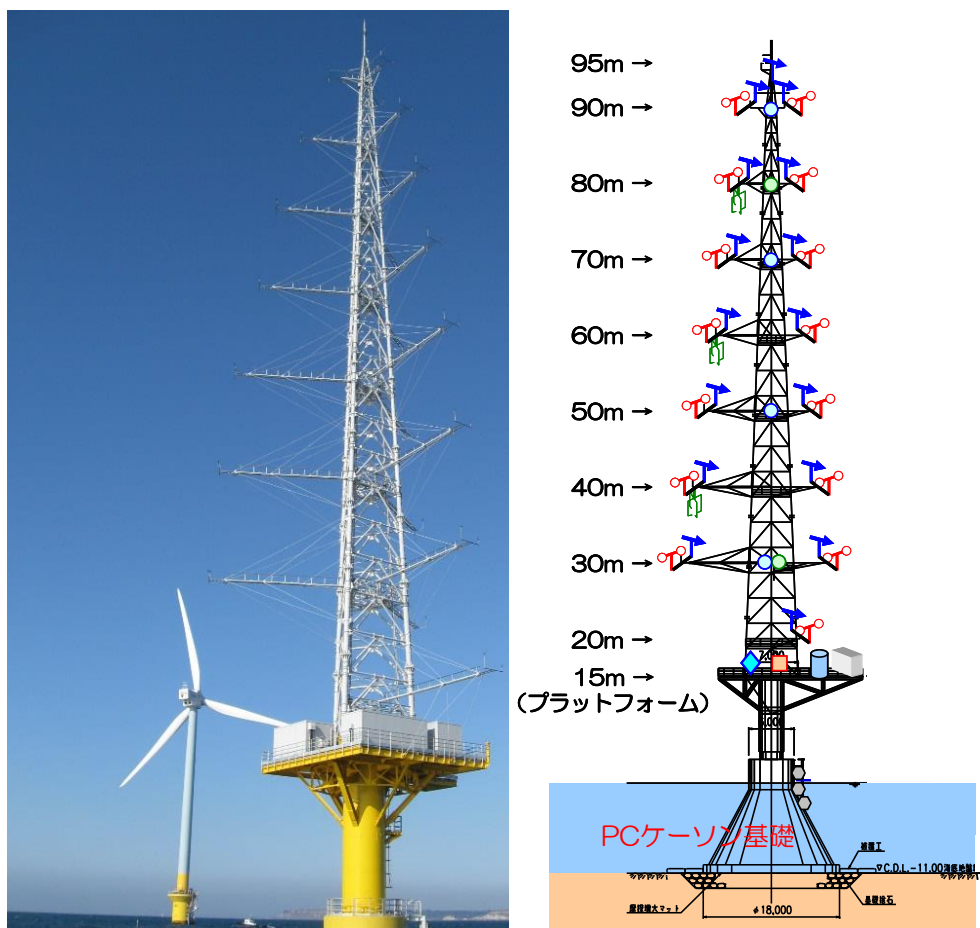
$$\text{利用可能率 (\%)} = \frac{\text{年間暦時間} - (\text{故障時間} + \text{点検時間})}{\text{年間暦時間}} \times 100$$

4) 国内外の洋上風況観測タワー

NEDO は、洋上風況観測システム実証研究において、銚子沖と北九州市沖に洋上風況観測タワーを設置している。ここでは研究概要を紹介し、詳細は別冊に記載する。

① 銚子沖

銚子沖における洋上風況観測タワーは、表Ⅱ.3.2-3 に示した通り、水深 12m、離岸距離 3.1km の地点に 2012 年 8 月に設置された（観測開始は 2013 年 1 月）。観測タワーは、海面からの高さが 100m の三角断面鋼管トラス構造であり、支持構造物は重力式である（図Ⅲ.3.1-3）。表Ⅲ.3.1-3 には観測計画を示している。気象関係の観測機器は 15m から 95m までの 10 層に設置され、タワーによるウエイクの影響を考慮して、同じ観測高度に複数個の三杯型風速計と矢羽根式風向計が取り付けられている（図Ⅲ.3.1-3;表Ⅲ.3.1-4）。



図Ⅲ.3.1-3 銚子沖の洋上風況観測施設（左図）と観測機器の設置状況（右図）

表Ⅲ. 3. 1-3 気象関係の観測計画

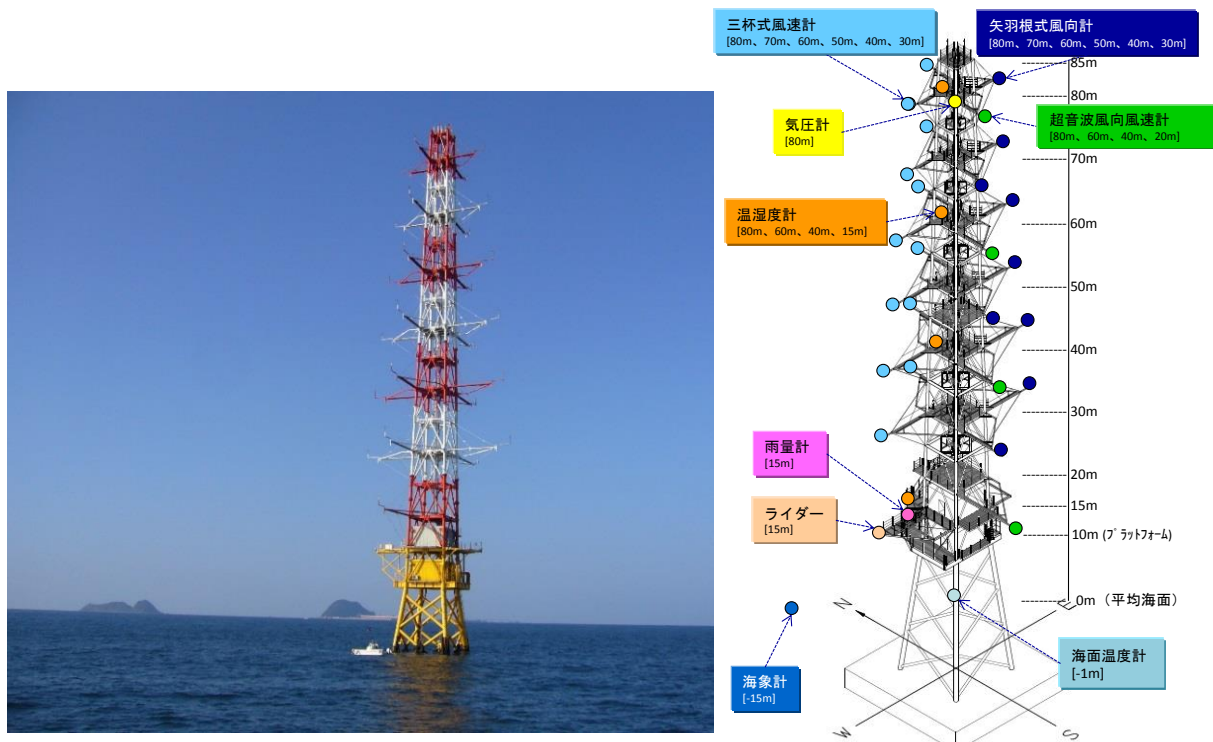
計測項目	計測機器	計測目的
風向・風速	三杯型風速計 矢羽根式風向計	基本風況特性の把握 (平均風速, 最大風速, 乱れ強さ, 風向出現率等)
	超音波式風向風速計	
	ドップラーライダ	ハブ高さ以上の高高度における風況特性の解明
気圧・温湿度・水温	気圧計 湿度計 温度差計 水温計	大気安定度の評価
天候	雨量計 視程計	ドップラーライダの利用可能な環境条件の解明

表Ⅲ. 3. 1-4 観測高度別観測機器の設置状況

海面からの 観測高度 (m)	三杯型 風速計		矢羽根式 風向計		超音波式 風向風速計		ドップラー ライダ	気圧計	温湿度計	温度差計	雨量計	視程計	水温計	
-2~0													○	3
15							○	○			○	○		
20	○	1	○	1										
30	○	3	○	3					○	○				
40	○	3	○	3	○	1								
50	○	3	○	3						○				
60	○	3	○	3	○	1								
70	○	3	○	3						○				
80	○	3	○	3	○	1			○					
90	○	3	○	3					○					
95			○	1										

② 北九州市沖

北九州市沖における洋上風況観測タワーは、表Ⅱ.3.2-4 に示した通り、水深 14m、離岸距離 1.4km の地点に 2012 年 6 月に設置された（観測開始は 2012 年 10 月）。観測タワーは、海面からの高さが 85m の方形断面鋼管トラス構造であり、支持構造物は重力・ジャケットハイブリッド式である（図Ⅲ.3.1-4）。表Ⅲ.3.1-5 には観測計画を示している。気象関係の観測機器は 15m から 81.6m までの 8 層に設置され、タワーによるウエイクの影響を考慮して同じ観測高度に複数個の三杯型風速計と矢羽根式風向計が取り付けられている（図Ⅲ.3.1-4;表Ⅲ.3.1-6）。



図Ⅲ. 3. 1-4 北九州市沖の洋上風況観測施設（左図）と観測機器の設置状況（右図）

表Ⅲ. 3. 1-5 気象関係の観測計画

計測項目	計測機器	計測目的
風向・風速	三杯型風速計 矢羽根式風向計	基本風況特性の把握 (平均風速, 最大風速, 乱れ強さ, 風向出現率等)
	超音波式風向風速計	
	ドップラーライダー	風車性能評価の可能性検討 代替観測手法としての適用性評価
気圧・温湿度・水温	気圧計 湿度計 温度計 水温計	大気安定度の評価

表Ⅲ.3.1-6 観測高度別観測機器の設置状況

海面からの 観測高度(m)	三杯型 風速計	矢羽根式 風向計	超音波式 風向風速計	ドップラー ライダー	気圧計	温度計	湿度計	雨量計	水温計
-1									○
15				○		○	○	○	
20			○	1					
31.6	○	2	○	2					
41.6	○	2	○	1	○	1		○	○
51.6	○	2	○	2					
61.6	○	2	○	1	○	1		○	○
71.6	○	2	○	2					
81.6	○	2	○	1	○	1		○	○

注) 数字はセンサの設置基数。数字のない計器は1基の設置。

③ 海外の事例

海外の洋上風況観測タワーについて、特に資料が揃っているドイツを中心に紹介する。ドイツでは、洋上風力開発におけるリスクを減らし、計画的な洋上風力発電の開発を加速させるためには、大水深で洋上風力発電施設を建設するために利用できる実測データが不足しているとして、2003年以降、いくつかの洋上で気象・海象施設の設置が始まった。

a. ドイツの洋上風況観測タワー

ドイツには北海に3基、バルチック海に3基の計6基の気象・海象観測施設があり(表Ⅲ.3.1-7;図Ⅲ.3.1-5)、このうち、FINO1、FINO2およびFINO3は国家研究プロジェクトにより設置されたものである(その他の観測施設は民間デベロッパーが設置)。

表Ⅲ.3.1-7 ドイツにおける気象・海象観測施設の一覧

海域	洋上風況観測 タワー	所有者	設置年月	設置水深 (m)	離岸距離 (km)	海面上の タワー高度 (m)	支持物構造
北海	FINO1	GL Wind(Germanischer Lloyd Wind Energy) (風力発電機の認証機関)	2003.9	28	45	101	ジャケット
	Amrumbank West	Essent Wind/Amrumbank West (風力発電事業者/E.ON Energyの関連会社)	2005.4	23	35	90	モノパイル
	FINO3	FH Kiel GmbH (Kiel大学が株主の民間会社)	2008.10	23	80	120	モノパイル
バルチック海	Sky2000	GEO GmbH (メンテナンス会社)	2003	21	13	22	モノパイル
	FINO2	Schiffahrtsinstitut Warnemünde (Wismar大学の研究所)	2007.6	20	40	101	モノパイル
	Arkona-Becken	AWE (Australian Worldwide Explorations Ltd.) (石油・ガスの開発会社)	2007.3	24	35	95	モノパイル



図Ⅲ. 3. 1-5 ドイツにおける気象・海象観測施設の位置図 (Rispen *et al.*, 2007)

b. FINO1、FINO2 および FINO3

FINO1、FINO2 および FINO3 の洋上風況観測タワーの概要を表Ⅲ.3.1-8 に、各施設の外觀図を図Ⅲ.3.1-6 にそれぞれ示す。

表Ⅲ. 3. 1-8 FINO1, FINO2 および FINO3 の概要

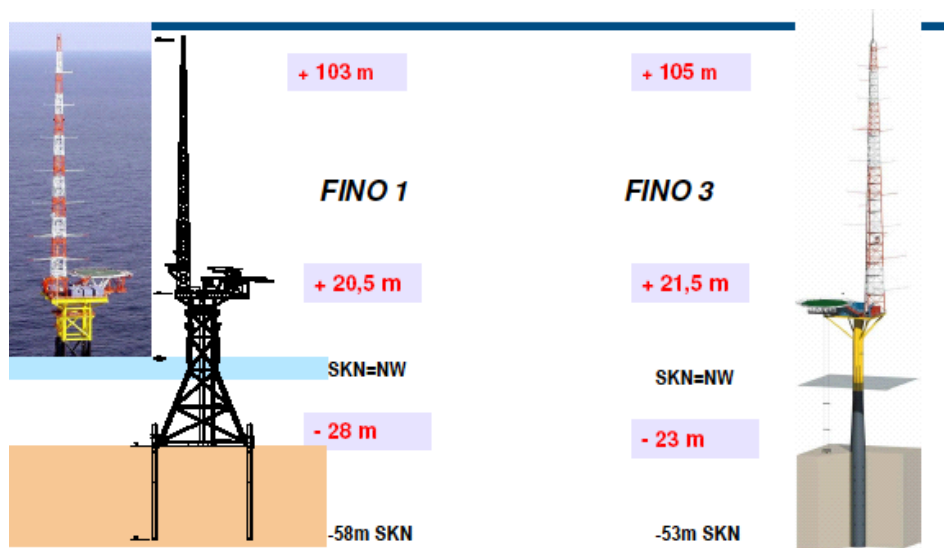
項目	FINO1	FINO2	FINO3
海域	北海	バルト海	北海
位置	54° 0.86' N, 06° 35.26' E	55° 0.42' N, 06° 9.25' E	55° 11.7' N, 07° 9.5' E
水深 (m)	30	20	23
離岸距離 (km)	約45	約39	約80
稼働年月	2003. 9	2007. 6	2008. 10
支持構造物	ジャケット	モノパイル	モノパイル
高度 (m)	103	101	105
質量 (t)	650	434	600
タワー形状	方形断面鋼管トラス	方形断面鋼管トラス	三角断面鋼管トラス
付帯施設	ヘリポート, 居住設備, 5tクレーン	小型クレーン	ヘリポート
建設費 (M€/億円)	8. 5/9. 8	4. 8/5. 5	7. 9/9. 1
研究プログラム	気象学 水理学 生態学 (特に鳥類の渡り (移動))	気象学 生態学 (特に騒音対策) 海上交通	気象学 水理学 生態学 (特に鳥類の渡り (移動) 及び騒音対策)
年平均風速	10m/s (100m高) (2004-2008)	9. 7m/s (100m高) (2007. 6-2007. 12)	10m/s (100m高) (2004-2008)

注) 1€=115円として換算

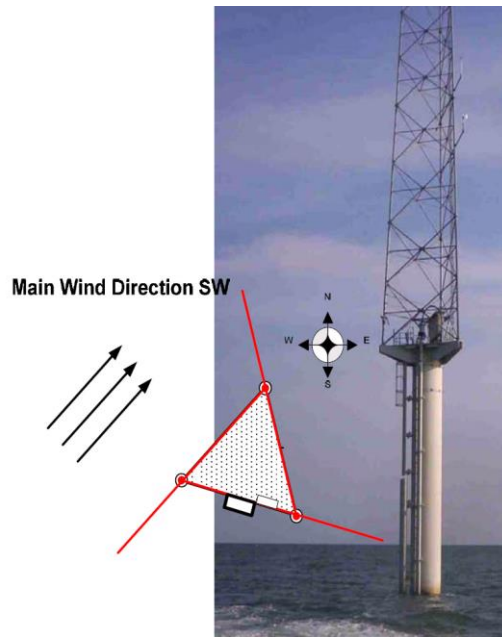


図Ⅲ.3.1-6 FINO1 (左) ,FINO2 (中) およびFINO3 (右) の外観図
 左右 : Kellner (2008) 中 : DNV GL 提供

FINO1 と FINO3 の洋上風況観測タワーは、北海のドイツの EEZ 海域 (水深 : 30m,23m) に設置されており、両施設で異なる構造として支持構造物 (FINO1 : ジャケット式、FINO3 : モノパイル式)、観測タワーの形状 (FINO1 : 方形断面、FINO3 : 三角断面) 等をあげることができる (図Ⅲ.3.1-7;図Ⅲ.3.1-8)。なお、タワーの形状が三角錐であることの特徴として、①同一観測層の風向計・風速計などのセンサが 3 個で良いこと (3 方向の観測ブーム)、②スリムなタワーで軽量化と低コスト化が図られること、等がある。



図Ⅲ.3.1-7 FINO1 と FINO3 の洋上風況観測タワーの比較 (Kellner, 2008)



図Ⅲ. 3. 1-8 FINO3 タワーの形状および観測ブームと卓越風向の関係 (Kellner, 2008)

FINO1 と FINO3 の洋上風況観測タワーにおける、気象および支持構造物の状態監視 (HMS) に係る観測項目と観測高度 (観測水深) を表Ⅲ.3.1-9 に示す。なお、FINO2 についてはこれらの詳細情報が不足しているため、表には載せていない。

表Ⅲ. 3. 1-9 FINO1/FINO3 の気象および支持構造物の状態監視に係る観測項目と観測高度 (水深)

サイト	分類	センサ	センサ設置高度 (m) / 水深 (m)								
			33	40	50	60	70	80	90	100	
FINO1	気象	風速計 (三杯式)	33	40	50	60	70	80	90	100	
		風向計 (矢羽根式)	33		50		70		90		
		超音波風向風速計 (10Hz)	33	40	50		70			100	
		温度計		40		60		80		100	
		湿度計	33		50					100	
		気圧計	33								
		放射計	33								
		紫外線強度計	33								
	HMS	加速度計 (タワー)			50						100
		加速度計 (ジャケット)	-15.5	-4	7						
歪計 (ジャケット)		-25	-17	-5							
FINO3	気象	風速計 (三杯式)	30	40	50	60	70	80	90	100	106
		風向計 (矢羽根式)	28			60		80		100	
		超音波風向風速計 (10Hz)	30			60				100	
		温度計	30			55				95	
		湿度計	30			55				95	
		気圧計	23			55				100	
		雨量計	28			55					
		放射計	28								
		温度差計	28			55					
	HMS	加速度計 (タワー)								100	
		加速度計 (ジャケット)									
		傾斜計 (タワー)								100	
		歪計 (ジャケット)									

*HMS : Health Monitoring Systems

その他の諸外国における洋上風況観測タワーの概要を表Ⅲ.3.1-10に示す。商用洋上ウィンドファームに併設されている洋上風況観測タワーは1990年代後半から2000年代前半に建設されており、ドイツのFINO施設の観測高度と比較して、観測高度が3-5層と少ない。(Vindebyは7層)

表Ⅲ.3.1-10 その他の諸外国における洋上風況観測タワーの概要

国名	デンマーク				スウェーデン	オランダ	
洋上風力発電施設名	Vindeby	Middelgrunden	Nysted	Horns Rev	Lillgrund	Egmond aanZee	
位置	54° 57.98' N 11° 7.55' E	55° 42.1' N 12° 39.45' E	54° 32.45' N 11° 44.76' E	55° 28.77' N 7° 41.39' E	55° 30.01' N 12° 45.6' E	52° 16.43' N 4° 17.77' E	
水深(m)	2~5	4	8	5	3	16~22	
離岸距離 (km)	1.3	2.1	12	18.6	12	10	
観測開始年月	1993.5	1997.1-2000.12 (2001.1船舶が衝突して破損.撤去)	1999.5	1999.6	2003.8	2004	
支持構造物	モノパイル	?	?	モノパイル	モノパイル	モノパイル	
高度(m)	48	51	51	62	65	116	
タワー形状	三角断面鋼管トラス	三角断面鋼管トラス	三角断面鋼管トラス	方形断面鋼管トラス	三角断面鋼管トラス	三角断面鋼管トラス	
センサ設置高度 (m)	風速計(三杯式)	48/43/38/29/20/15/7	50/30/10	50/30/10 (30は2基)	62/58/45/30/15	65/62.5/40/25 (40/25は2基)	116/70/21 (各3基)
	風向計(矢羽根式)	43/20	30	47/28	60/58/43/28	61/23.5	116/70/21 (各3基)
	超音波風向風速計	45/18/6	—	—	40	—	116/70/21
	温度計	10	49/10	50/10	—	8	116/70/21
	温度差計	24-10	49-10	50-10	—	61-8	—
	湿度計	—	—	—	—	—	116/70/21
	気圧計	—	—	—	—	5	20
	雨量計	—	—	—	—	—	70(2基)
風車	風車メーカー	Bonus B35/450	Bonus B76/2000	Bonus B82/2300 Siemens SWT-2.3-82	Vestas V80-2.0	Siemens SWT-2.3-93	Vestas V90-3.0
	定格出力(kW)	450	2,000	2,300	2,000	2,300	3,000
	ロータ直径(m)	35	76	82	80	93	90
	ブレード最先端高(m)	52.5	102	110	110	114.5	115
	ハブ高(m)	35	64	69	70	68	70
	ブレード最下端高(m)	17.5	26	28	30	21.5	25

5) 浮体式洋上風況観測システム

洋上風力開発として対象とした洋上風況観測タワーの建設は、水深が深い海域では建設コストも非常に高額で、設備の建設は非現実的であると言える。そのため国内外で比較的安価で観測可能な浮体式洋上風況観測システムの技術開発が進んでおり、今後、観測精度の高いシステムの構築が期待される。

Carbon Trust (2018)によれば、浮体式ライダ技術には以下のような利点がある。

✓CAPEX (設備投資費)の低減: 浮体式ライダの製作には最大 100 万ポンド (160 円/£とすると、1.6 億円)が必要で、1 日で簡単に設置できる (天候が良好であることが条件)。

したがって、初期費用は既存の風況観測マスト技術と比べてかなり安い。

✓OPEX (運営費)の低減: 浮体式ライダは、欧州の北海海域など、過酷な洋上環境において6ヶ月以上メンテナンスフリーで自動運転できるように設計されているため、維持管理コストは低減されている。

- ✓風況観測の範囲の拡大：風況観測マストの設置は水深の浅い場所に限定されている。そのため、風況観測もその範囲に限定される。これとは対照的に、浮体式ライダはサイトの周囲を移動できるため、風力資源データをカバーできる範囲がその分広い。
- ✓風況観測マストと同等のデータ品質：浮体式ライダは、風況観測マストと同等の品質の風速・風向データを供給することができる。

浮体式洋上風況観測システムの課題として、以下の3つをあげることができる。

- ◎ドップラーライダの精度・信頼性
- ◎動揺補正機能を有するドップラーライダの開発
- ◎低動揺性・耐環境性の浮体構造の開発

最初に掲げた「ドップラーライダの精度・信頼性」については、EUのNORSEWInDプロジェクトで提案された許容誤差に対して、三杯型風速計（IEC/JISの標準風速計）を基準としたライダによる測定精度の評価が行われている。また、NEDOの「次世代風力発電技術研究開発（基礎・応用技術研究開発）」において、平坦地形と複雑地形のライダ計測値の比較が行われ、平坦地形条件下ではライダによる計測の有効性、複雑地形条件下では測定誤差が大きいこと等が示されるとともに、複雑地形下における測定値の補正方法について言及されている。

洋上では新たに動揺補正を施して測定誤差を低減させる必要があり、これは今後の研究課題である。一方、海外でも動揺補正機能を有するシステムは確立されていないが、以下に示すように、一部の業者による浮体式洋上風況観測システムが販売されている。

なお、Carbon Trust（2014）は、DNV GLが気象マストとFLiDARの風況データについて比較し、良好な検証結果を得たことから、浮体式ドップラーライダ技術が商業化に向けて一歩踏み出したとしている。

①SeaZephIR

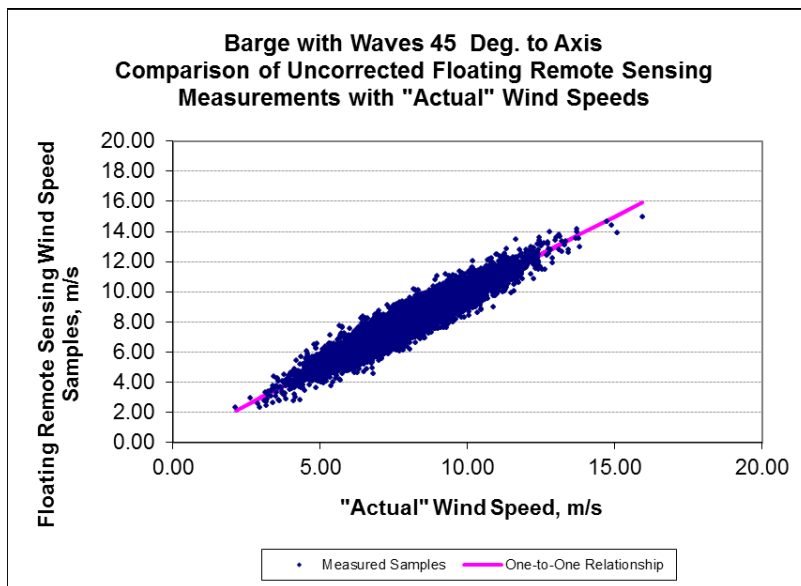
- a.開発者：DNV/ ZephIR
- b.風況観測機器：ZephIR
- c.浮体方式：スパー型、ディスク型、バージ型、TLP型（最近、開発された方式）
- d.平均測定誤差（波高5mのケース）
 - スパー型：-1.0%、ディスク型：-2.0%、バージ型：-0.2%

【特長】

- ・長期設置型

【開発状況】

2009年6月より実証試験開始。最初の商用機がニュージャージー州のDeep Water Wind計画に採用され、2011年4月に設置されたが、数日で転倒。現在、TLP型の浮体構造物が開発されている。



スパー型 (Rogers *et al.*,2011)



TLP 型 (Pears,2014)

②FLIDAR (floating LIDAR)

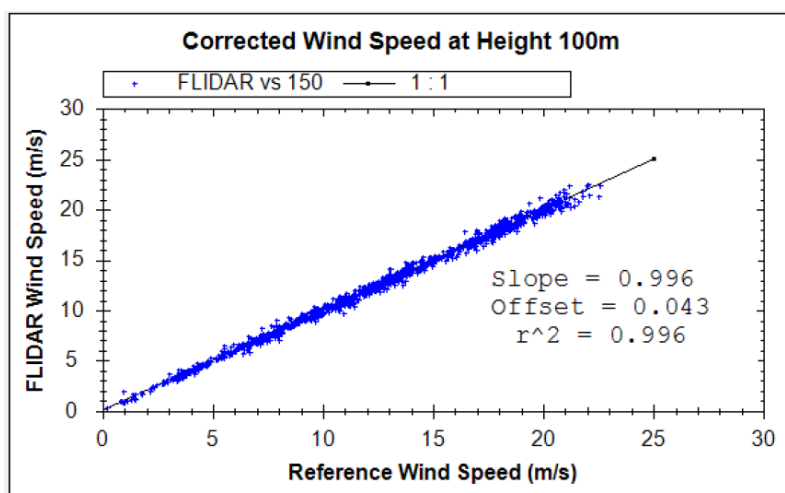
- a. 開発者：3E/OWA
- b. 風況観測機器：WINDCUBE (測定高 40-200m)
- c. 浮体方式：ブイ型

【特長】

- ・ 1 日で移設可能

【開発状況】

ベルギー海域で実証試験が行われている。



ブイ型 (Coppye *et al.*,2011)

③WindSentinel

- a. 開発者: Grand Valley State University (MAREC: Michigan Alternative and Renewable Energy Center) and University of Michigan (Phoenix Energy Institute)
- b. 風況観測機器: Vindicator (測定高 30-150m まで 6 層, 特別仕様の場合は 250m まで可能)
- c. 浮体方式: 船型
- d. 係留方式: WindSentinel 法 (NOMAD ブイ・プラットフォーム; アンカー質量 5t)
- e. コスト: 150 万\$ (1.5 億円; 100 円/\$)
- f. その他: 50t の船舶を使用して曳航可能

【特長】

- ・簡易、低コスト

【開発状況】

2009 年にカナダで実証試験を実施。本方式に搭載されたライダによる計測値は、陸上のライダの計測値と比較して 2% 以下の精度が確認されている (データ取得率: 85%)。最大風速 22m/s 以上、波高 8m で、破損しなかった。



船型 (Boezaart *et al.*,2011)

Carbon Trust (2018) によれば、日本の事業者には、欧州のサプライヤーの既存技術を活用し、独自の検査、特に台風への抵抗力に関する検証試験を行うという機会が開かれているとしている。また、浮体式ライダが商用化されれば、様々な環境で詳細な風況観測ができるようになり、水深の深い日本の海底地形では、特に重要な技術とも言えるとも述べている。

一方 NEDO では、大林組と大森建設に委託し、2013-2016 年度に洋上風況観測技術開発を実施した。本技術開発は、ドップラーライダを搭載した浮体構造物や防波堤上の風況観測タワー等を活用して高精度・低コストで簡易に風況を観測できるシステムを開発することを目的としており、能代港や北九州市沖で実証観測を行った。

【豆知識Ⅲ.3.1-1】

●NEDO による浮体式風況観測システムの研究

「新エネルギーベンチャー技術革新事業」

中小企業等（ベンチャーを含む）が保有している風力発電等の潜在的技術シーズを基にした技術開発を実施する。

- ・着床式洋上風力発電事業のための高所風況観測用低動揺ブイ式プラットフォームの開発（2013 年度～2014 年度：ゼニライトブイ,大阪府立大学）

*経済産業省/環境省では、浮体式洋上風力発電実証事業において浮体式の構造物に風況センサを搭載し、洋上風況観測を行っている。

(2) 海上風の予測方法

海上風の平均風速と極値風速を取り上げ、その予測手法を紹介する。

1) 平均風速の予測

平均風速の予測方法として、「風況観測データに基づく方法」と「気象シミュレーションに基づく方法」の2つの方法を紹介する。参考までに、風況予測手法の分類を表Ⅲ.3.1-11に示す。

表Ⅲ.3.1-11 風況予測手法の分類 (NEDOら, 2007を一部改変)

分類	細分類	入力データ	シミュレーションモデル	
非線形	気象モデル (メソスケール)	GPVデータ	LAWEPS (1-3次)	
			ANEMOS	
			MM5, RAMS等	
	工学モデル (マイクロスケール)	風況観測データ、シミュレーション結果	GPVデータ+風況観測データ	LOCALS
			MASCOT	
			RIAM-COMPACT	
			LAWEPS (4-5次)	
線形		風況観測データ	LES	
			WAsP, AVENU等	

注) GPV:Grid Point Valueの略号で、客観解析値または数値予報値が用いられ、日本ではデータは気象庁から配信されている。

①風況観測データに基づく方法

風況観測データを基に候補海域の海上風を予測するため、風況予測モデルが用いられる。そのモデルとしては、流れの運動方程式中の非線形項を線形化して解く方法（線形モデル：WAsP, AVENU等）や非線形項をそのまま解く方法（非線形モデル：LAWEPS, MASCOT, LOCALS, RIAM-COMPACT等）がある。

本モデルの入力データとして、陸上で測定された風況データ（最低1年間のデータ）を用いて候補海域における海上風を予測するケースが多いと思われるが、最寄りの気象官署のデータと比較・検討して平年補正をする等、代表性の検討を踏まえた風況データを入力データとして用いる。また、予測結果は、近傍の気象官署等のデータを用いて比較・検証する。

風況の予測精度が以下に示す平均風速の比、変動風速の比、相関係数の比等の統計量の範囲を満たせば、予測値は妥当と判断する (NEDO, 2003)。

$$\text{平均風速の比} \quad 0.85 < \frac{U_y}{U_x} < 1.15$$

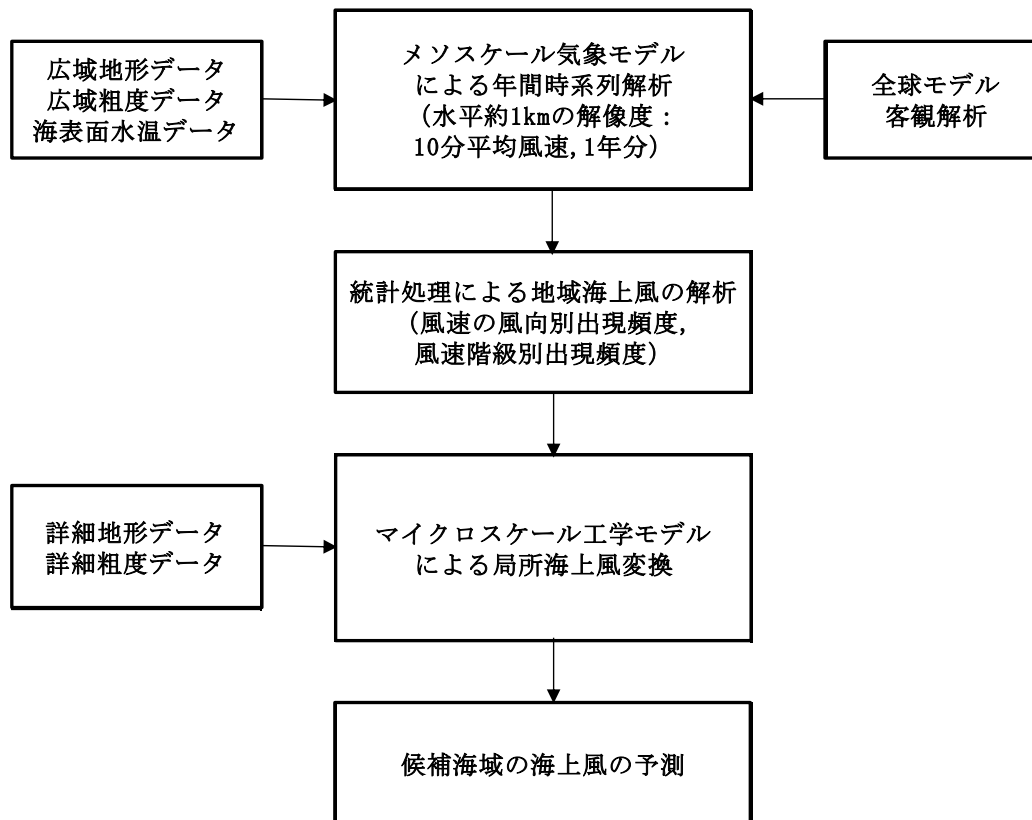
$$\text{変動係数の比} \quad 0.85 < \frac{\sigma_y/U_y}{\sigma_x/U_x} < 1.15$$

$$\text{相関係数の比} \quad \rho_{xy} = \frac{\sum u_{xi}u_{yi}}{\sqrt{\sum u_{xi}^2}\sqrt{\sum u_{yi}^2}} > 0.8$$

ここで、添え字 x、y はそれぞれ風況観測およびシミュレーションのデータを表している。U_xとU_yは当該地点の風況観測およびシミュレーションによる評価期間内の平均風速 (m/s)、σ_xとσ_yは風況観測およびシミュレーションの観測期間内標準偏差 (m/s)、u_{xi}とu_{yi}は風況観測およびシミュレーションによる10分あるいは1時間平均風速をそれぞれ表す。

②気象シミュレーションに基づく方法

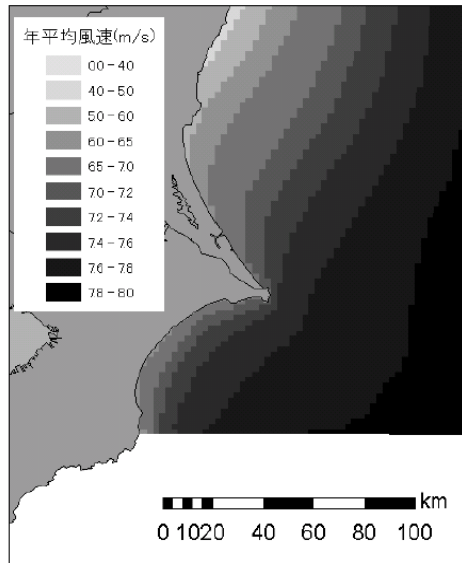
風況観測データを用いる場合には、最低でも1年間のデータが必要であるが、そのデータがない場合は観測をしなければならない。気象シミュレーションに基づく方法は、風況観測データによらない予測手法であり、時間の短縮化につながる。メソスケール気象モデルとマイクロスケール工学モデルを用いて海上風を予測する方法は、図Ⅲ.3.1-9の通りである。最初に全球モデルの客観解析値を初期・境界条件として、メソスケール気象モデルを用いて1年間の気象シミュレーションを行う。その結果から水平距離1km程度の解像度を有する1年分10分ごとの平均風速の時系列データを得る。このデータを基に統計処理を行って、海上風の風速の風向別出現頻度、風速階級別出現頻度を求める。次に、マイクロスケール工学モデルにより水平解像度1km以下の微細地形等の影響を取り入れて、候補海域における地域海上風を実際の風況に合致した局所海上風に変換・予測する。



図Ⅲ.3.1-9 気象シミュレーションに基づく風況予測の流れ（石原ら, 2005 を一部改変）

予測結果は、近傍の気象官署等のデータと比較・検証することとし、前述の通り NEDO(2003)の判断基準に基づいて風況予測の精度を検証する。

気象シミュレーションによる風況予測の例として、石原(2005)の結果を示す。石原は、銚子沖を中心とする房総海域を対象海域として取り上げ、洋上風況を気象モデル RAMS により試算し、水面高 60m における年平均風速を求めている(図Ⅲ.3.1-10)。



図Ⅲ. 3. 1-10 関東沿岸における年平均風速の分布（石原, 2005）

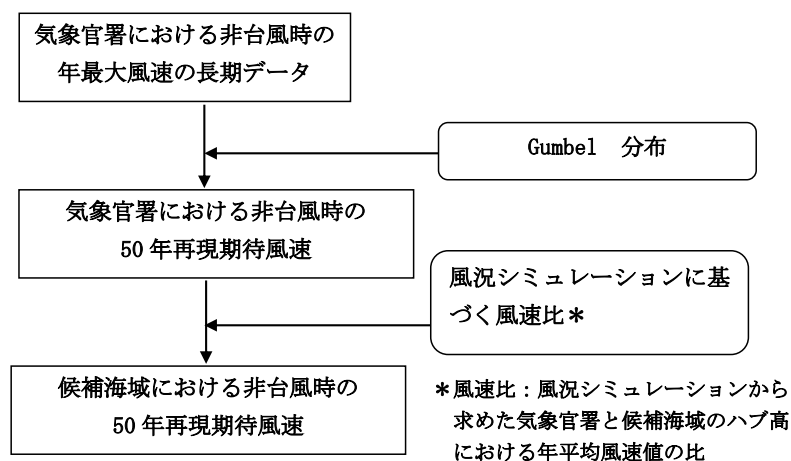
2) 極値風速の予測

極値荷重の算出基礎となる最大風速の 50 年再現期待値（極値風速）の予測方法として、Gumbel（ガンベル）と台風シミュレーション（モンテカルロシミュレーション）による 2 つの方法がある。石原ら（2011）は、日本のように温帯低気圧と熱帯低気圧による強風が存在する場合にはそれぞれの成因別の確率分布を評価し、確率分布を合成することで、精度良く極値風を予測できるとした。ここではその手法の概要を紹介する。

①Gumbel による方法

温帯低気圧（非台風時）による最大風速の非超過確率がガンベル分布に従うとし、積率法により最大風速を基準化変数に対応させて、年最大風速の確率分布を求める手法である。

図Ⅲ.3.1-11 に長年の観測データのある気象官署における非台風時の年最大風速から候補海域における非台風時の 50 年再現風速を求めるフローを示す。



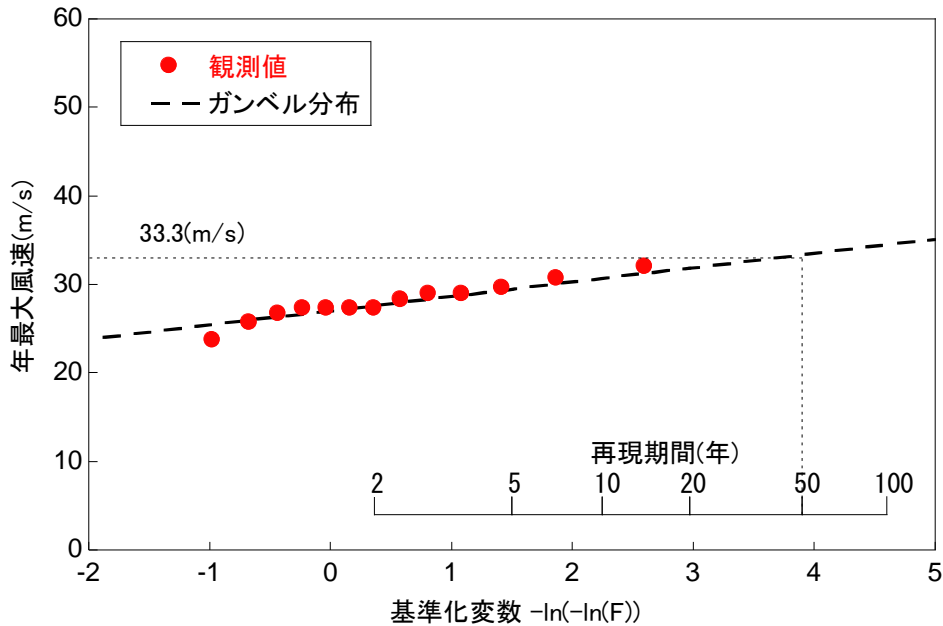
図Ⅲ. 3. 1-11 Gumbel による候補海域における 50 年再現風速（非台風時）の算出フロー

Gumbel 分布では、非超過確率 F 、極値変量 z および再現期間 T は以下の関係にある。

$$F(z) = \exp(-\exp^{-z})$$

$$z = -\ln(-\ln(1 - 1/T))$$

図Ⅲ.3.1-12 に非台風時における年最大風速の確率分布を示す。本手法は、非台風時（温帯低気圧等による最大風速の出現時）のケースでは良好な評価ができると言われている。



図Ⅲ. 3. 1-12 非台風時における年最大風速の確率分布の例（石原ら, 2011）

②台風シミュレーションによる方法

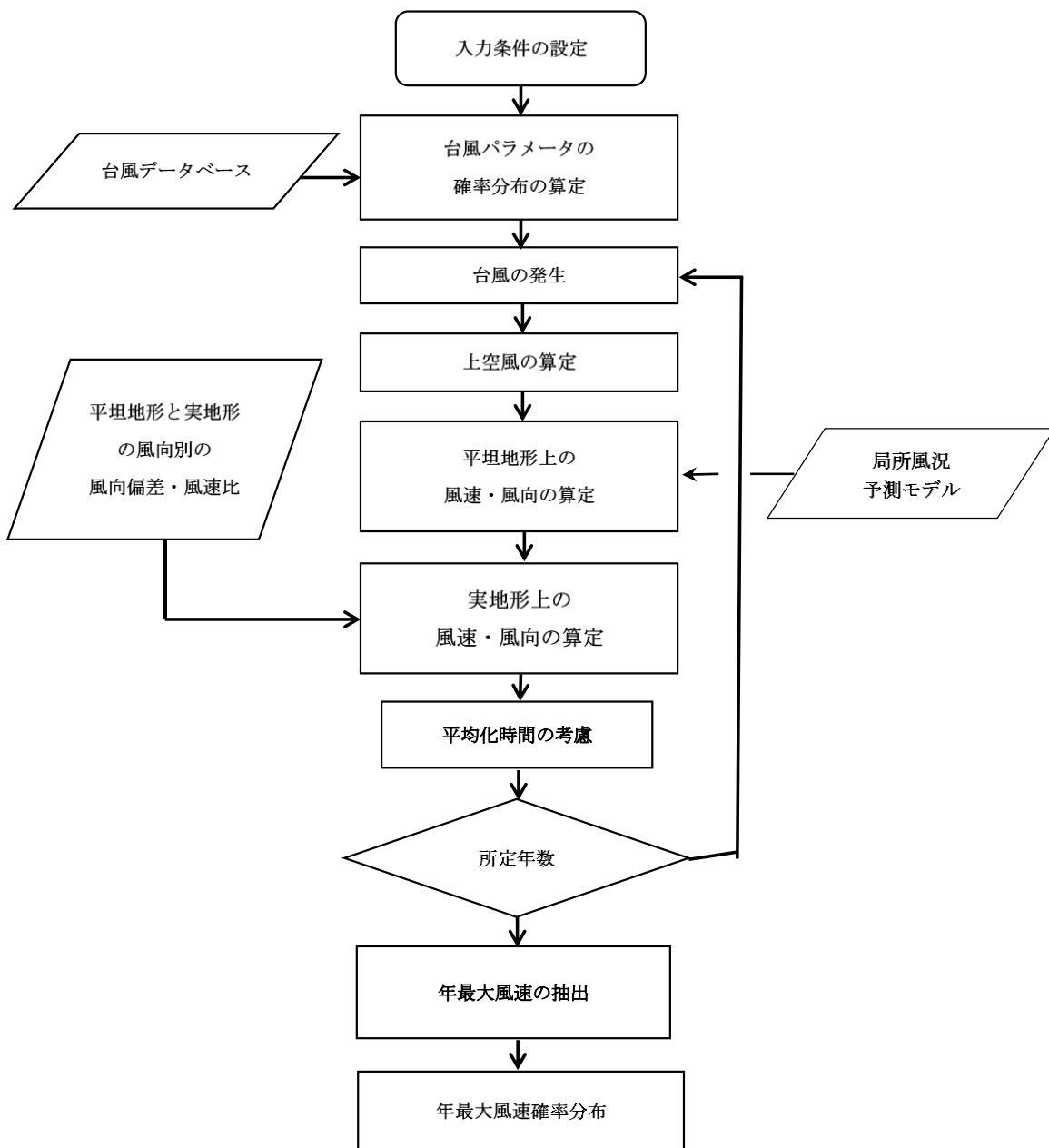
熱帯低気圧（台風時）による年最大風速の算定フローを図Ⅲ.3.1-13 に示す。解析手順は以下の通りである。

1. 過去の台風データ（候補海域を中心に半径 500km を通過した台風）から、候補海域に対して気圧場を表す変数（中心気圧低下量、最大地衡風速半径、進行速度、進行方向、最接近距離）および年発生頻度の確率分布をモデル化する。
2. 作成した確率分布に従って、モンテカルロシミュレーション手法により 100 年分の台風（985hPa 以下）を 100 回、通算 10,000 年分の台風を発生させ上空風を求め、べき法則より平坦地形の地上風速を求める。
3. これを基に局所風況予測モデルを用いて実地形風速、平坦地形風速を求め、これらの風速比から割増係数を算出する。地形による平均風速の割増係数 E_{tv} は、台風シミュレーションの結果に基づき次の式により求める。

$$E_{tv}(\theta_d) = \max\left(\frac{U(x, y, H_h)}{U^P(x, y, H_h)}, 1.0\right)$$

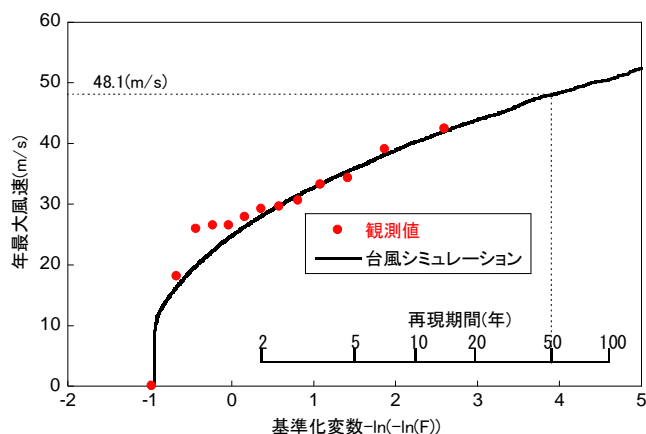
ここで、 $U(x, y, H_h)$ は実地形上の風車建設地点のハブ高さ H_h での年最大風速であり、 $U^P(x, y, H_h)$ は地表面粗度区分 P の平坦地形上のハブ高さにおける年最大風速である。また、照査対象風向 θ_d は $U(x, y, H_h)$ に対応する風向である。

4. 候補海域における年最大風速を昇順に並べて確率分布を求める。



図Ⅲ. 3. 1-13 熱帯低気圧（台風時）による年最大風速の算定フロー

図Ⅲ.3.1-14 に台風時における年最大風速の確率分布を示す。本手法は、台風時のケースでは良好な評価ができると言われている。



図Ⅲ. 3. 1-14 台風時における年最大風速の確率分布の例（石原ら, 2011）

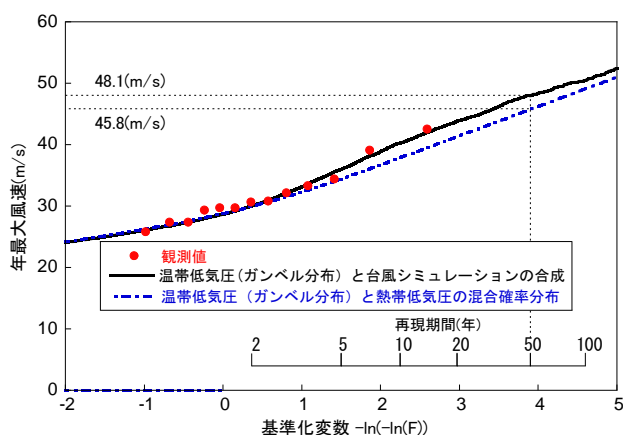
③混合気候における方法

混合気候における方法とは、温帯低気圧と熱帯低気圧による強風が存在する地域において、これまでに概要を紹介した成因別（Gumbel による方法と台風シミュレーションによる方法）の確率分布を合成して予測する方法である。

温帯低気圧に起因する年最大風速 U_E と熱帯低気圧に起因する年最大風速 U_F が独立して起こる事象であると仮定すると、温帯低気圧による年最大風速の非超過確率 $F_E(u_E)$ と熱帯低気圧による年最大風速の非超過確率 $F_T(u_T)$ を合成した混合気候における合成確率分布 F_C は次式で表される。

$$F_C = F_E(u_E) \times F_T(u_T)$$

図Ⅲ.3.1-15 は合成確率分布を示す。本図から広い範囲の再現期間において観測値と良く合致していることが認められ、本手法の有効性が評価されている。



図Ⅲ. 3. 1-15 合成確率分布の例（石原ら, 2011）

3.2 波浪・海潮流

波浪および海潮流に関する実証研究サイトにおける現地観測調査の概要を取りまとめる。

(1) 波浪調査

波浪調査は、波浪を測定して波浪の性質や作用等の実態を把握するもので、工事や維持管理の工程計画の立案に有益な情報を得ることができる。また設計に生かすため、極値波浪の推定を行う。

沿岸波浪の観測は、通常周期 1-30 秒程度の波浪を対象としている。測定点を進行する不規則な海面の変動を、海面水位の時間変化あるいは波浪によって生じる水圧変化や水粒子運動として、直接あるいは間接的に測定する。取得したデータを処理して波浪の諸元（波向、波高、周期）やスペクトル等を求めるものである。

波浪調査の手法を分類すると、目視観測、計測機器（水圧式波高計、超音波式波高計、ブイ式波浪計、レーダー波高計等）に分けられる。調査では、自記式（メモリー式）の水圧式波高計、超音波式波高計およびこれらに電磁流速波向計を組み合わせた多機能型海象観測装置等が適用される。

【観測期間】

- ・ 1 年以上（代表的な季節変化を把握できる期間）であるが、維持管理時の波浪情報を得るためには継続して観測することが望ましい。

【サンプリング方法】

- ・ 1 時間あるいは 2 時間ごとに 1 回、長さ 20 分間（通常は正時を挟む±10 分間）、サンプリング間隔はその海域の波浪特性によって変える（内湾など周期が短い地点では、長さ 10 分間）

【測点数と配置】

- ・ 候補海域において代表的な測点で実施する。

【測器の特徴】

- ・ 水圧式波高計

水深約 10m 程度の海底に設置し、圧力センサにより、波浪によって生ずる水中圧力の時間変化を測定する（図Ⅲ.3.2-1）。

- ・ 超音波式波高計（海底設置型）

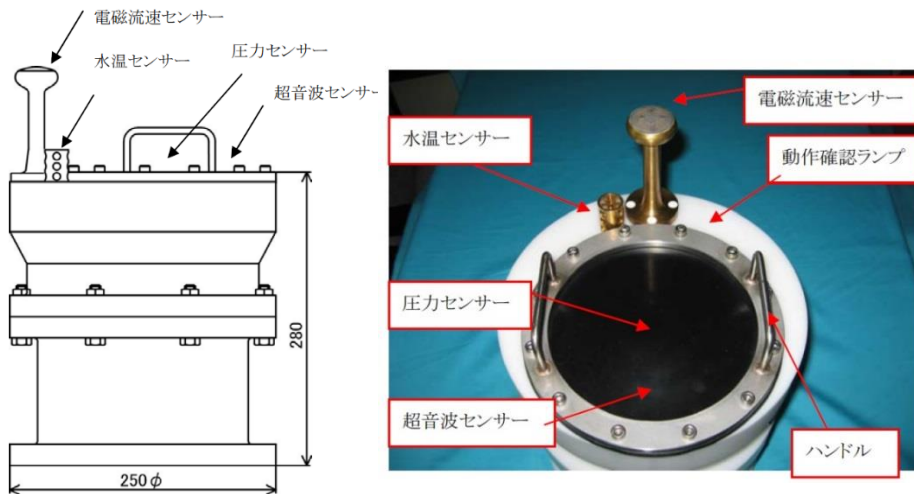
海底 9-50m 深に設置し、表面波形（水位変動）を直接測定する（図Ⅲ.3.2-2）。

- ・ 多機能型海象観測装置

水深 12-50m の海底に設置し、表面波形（水位変動）、水圧波、3 成分水粒子を計測し、その結果から波高、周期、波向、流況、潮位を同時に解析するものである（図Ⅲ.3.2-3）。



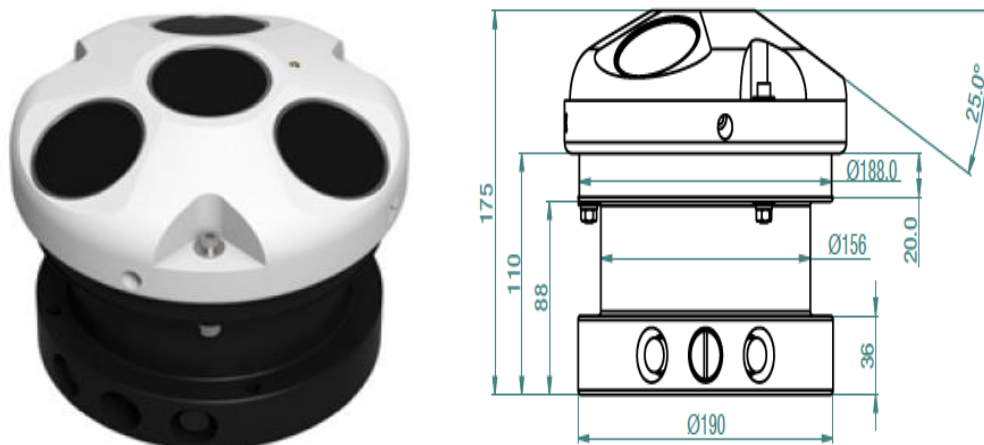
図Ⅲ. 3. 2-1 水圧式波高計 (INFINITY-WH)
(JFE アドバンテック提供)



図Ⅲ. 3. 2-2 超音波式波高計 (WAVE HUNTER08)

(アイオーテック WAVE HUNTER08 取り扱い説明書 :

<http://www.iotechnic.co.jp/products/wh08/manual/to080187Wh08WH-403Manual-05.pdf>)

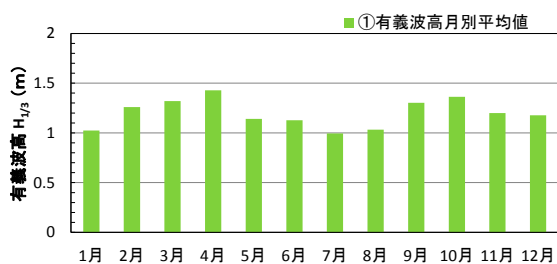


図Ⅲ. 3. 2-3 超音波ドップラー波高波向流速プロファイラー (NORTEK AWAC)
(NORTEK ジャパン提供)

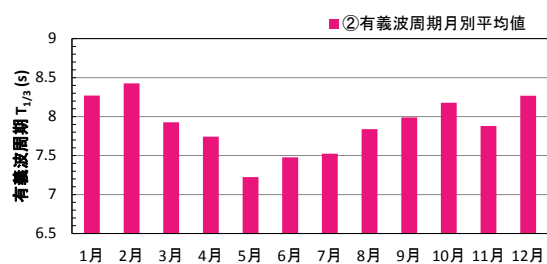
1) 実証研究サイトの波浪概要

① 銚子沖

銚子沖の洋上風力発電実証研究における波浪観測（2010年1月～2014年8月）より得られた、月別平均有義波高と月別平均有義波周期をそれぞれ図Ⅲ.3.2-4 と図Ⅲ.3.2-5 に示す。全期間の平均有義波高は 1.2m で、月別に見ると春季と台風シーズンの波高が大きい傾向にある。また、全期間の平均有義波周期は 7.9 秒で、年間を通じて 7 秒以上となっており、特に冬季の平均有義波周期が長い。なお、2010年1月から2014年10月までの観測期間中に測定された最高波高は、台風1326号により2013年10月16日13時に発生した 9.52m であった。



図Ⅲ. 3. 2-4 平均有義波高の月別変化



図Ⅲ. 3. 2-5 平均有義波周期の月別変化

低有義波高の四季別・階級別平均継続時間を表Ⅲ.3.2-1 に示す。低有義波高の平均継続時間は夏季が最も長い、有義波高が 1.0m 以下となる継続時間は四季ともに 10 時間未満である。なお、1.0m 以下の状態が 10 時間以上継続するのは春季で 11%、夏季で 15%程度となっている。

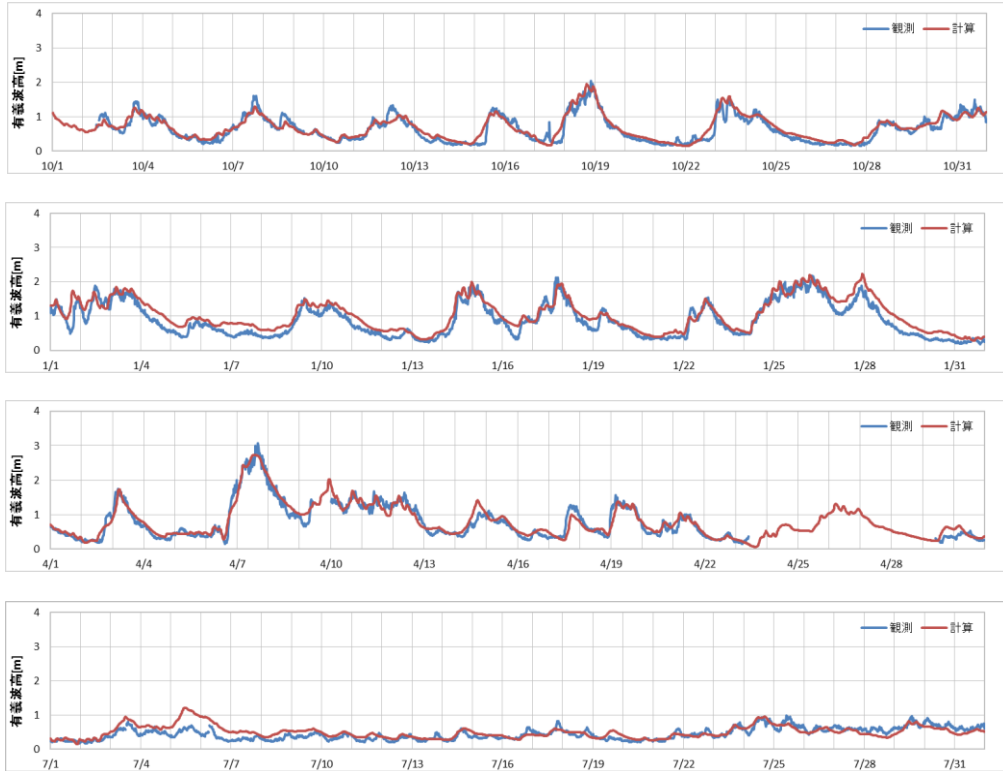
表Ⅲ. 3. 2-1 低有義波高の四季別・階級別平均継続時間

有義波高	春季	夏季	秋季	冬季
$H_{1/3} \leq 0.5\text{m}$	0.9hrs.	0.9hrs.	1.1hrs.	1.3hrs.
$H_{1/3} \leq 1.0\text{m}$	5.0hrs.	9.8hrs.	7.4hrs.	8.3hrs.
$H_{1/3} \leq 1.5\text{m}$	13.8hrs.	20.9hrs.	12.9hrs.	20.1hrs.
$H_{1/3} \leq 2.0\text{m}$	26.7hrs.	40.0hrs.	26.0hrs.	32.1hrs.

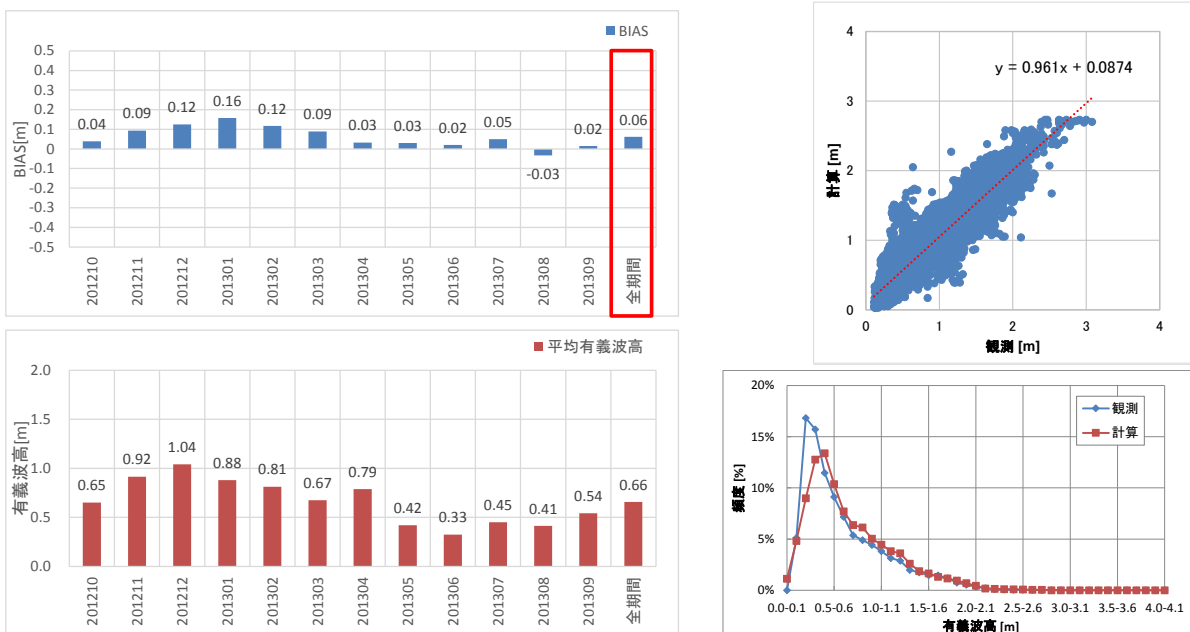
②北九州市沖

北九州市沖における洋上風力発電実証研究で得られた有義波高の時系列図を図Ⅲ.3.2-6 に、波浪シミュレーションより求めた計算値および実測値との BIAS（平均誤差）等の解析結果を図Ⅲ.3.2-7 に示す。シミュレーション結果は以下の通りである。

- ・ 年間の BIAS は 0.06m
- ・ 偏りは冬季に大きい傾向（最大 0.16m）
- ・ 年間の相関係数は 0.936
- ・ 高波高の頻度は過大評価の傾向



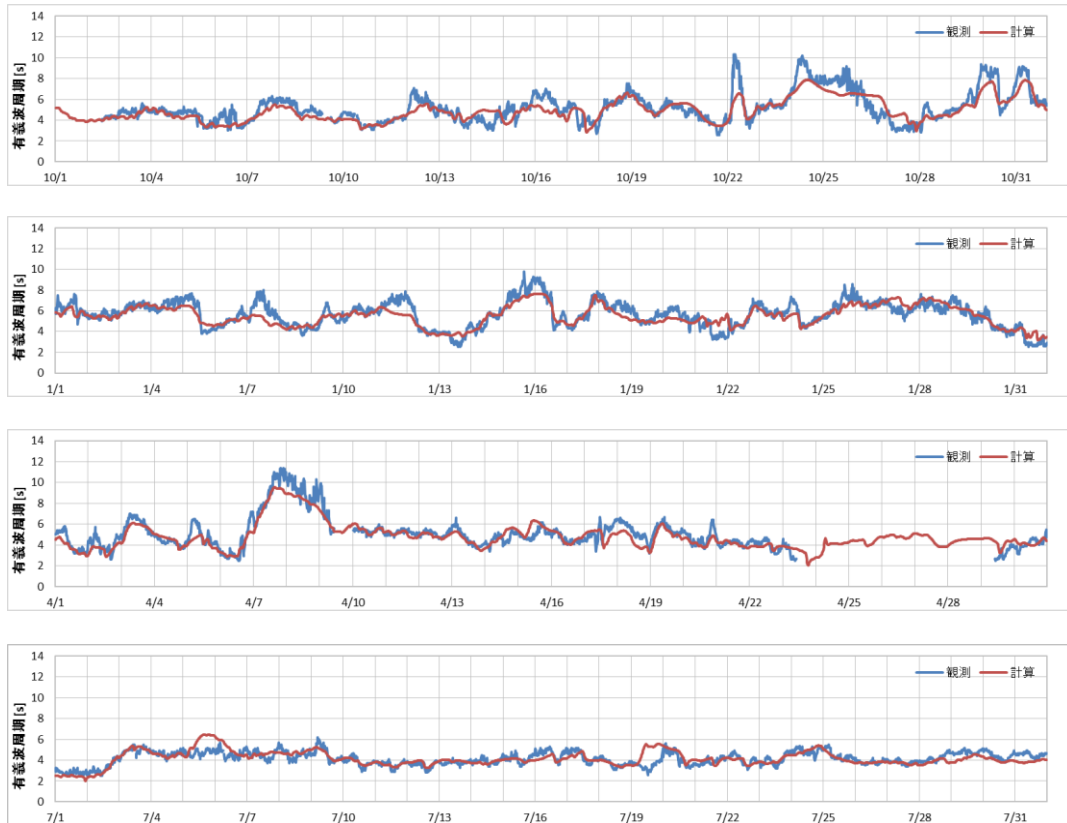
図Ⅲ.3.2-6 有義波高の時系列図（2012年10月～2013年9月）



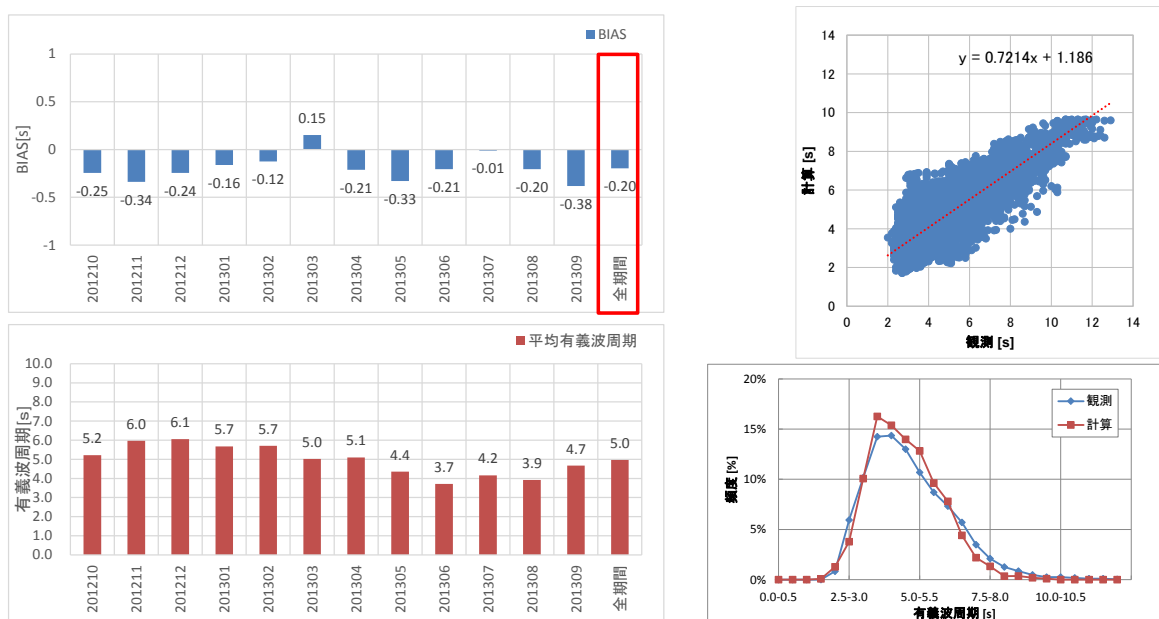
図Ⅲ.3.2-7 有義波高の計算結果と実測値との関係

同様に、北九州市沖の波浪観測結果から、有義波周期の時系列図（図Ⅲ.3.2-8）、波浪シミュレーションより求めた計算値および実測値とのBIAS（平均誤差）等の解析結果を図Ⅲ.3.2-9に示す。シミュレーション結果は以下の通りである。

- ・ 年間のBIASは-0.2秒
- ・ 年間の相関係数は0.867
- ・ 高周期の頻度は過小評価の傾向



図Ⅲ.3.2-8 有義波周期の時系列図（2012年10月～2013年9月）

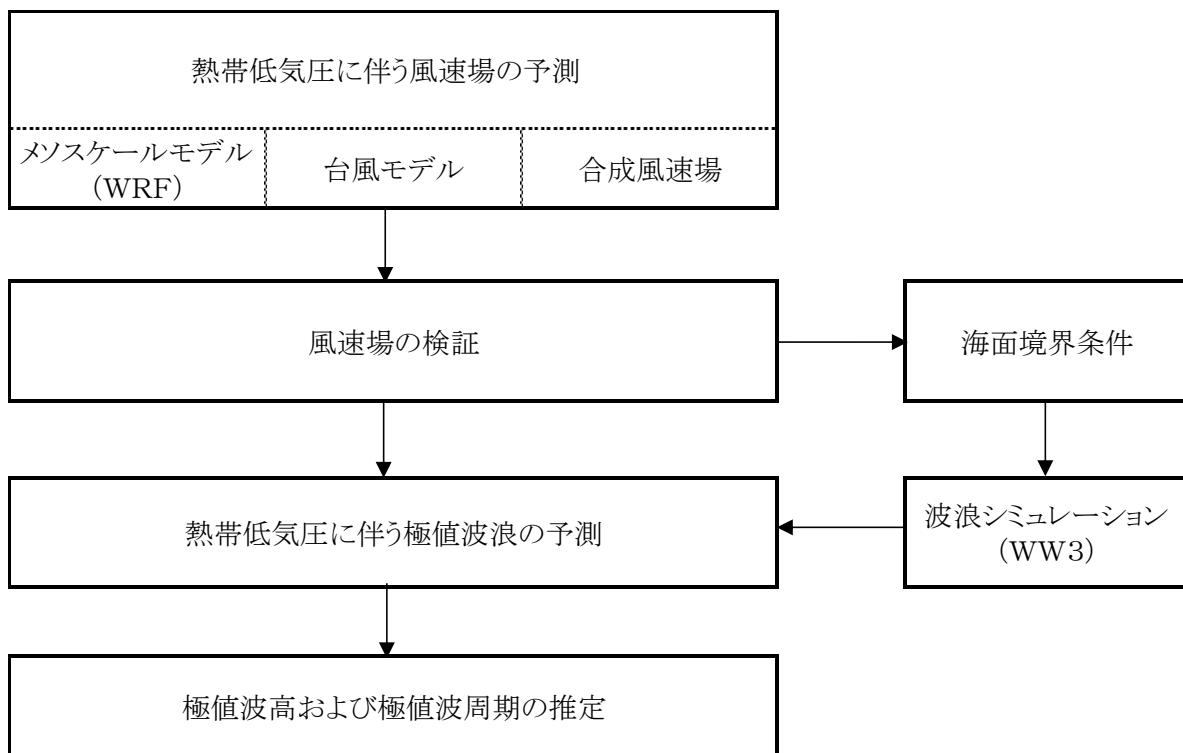


図Ⅲ.3.2-9 有義波周期の計算結果と実測値との関係

2) 極値波浪の予測

種本・石原（2013b）が指摘しているように、洋上風力発電設備の設計波高を評価するためには 50 年再現期間の極値波高を求める必要がある。極値波高を推定する手法として観測値に基づく推定手法があげられ、この手法では長期波浪観測データの年最大波高から極値統計を用いて極値波高を推定することができる。しかし、長期観測データが利用できる場所は限られており、新たな観測箇所の設置には、建設コストやデータ蓄積の時間を要する。そのため、シミュレーションによる推定手法が波浪観測に代替できれば、より低コストで短期間での洋上風力発電設備の導入が期待できる。

数値シミュレーションによる熱帯低気圧に伴う極値波浪予測手法の概要を図Ⅲ.3.2-10 に示す。



図Ⅲ.3.2-10 熱帯低気圧に伴う極値波浪予測手法の概要

①熱帯低気圧に伴う風速場の予測

メソスケールモデルによる風速場と台風モデルによる風速場を合成することにより、熱帯低気圧に伴う風速場の予測モデル（合成風速場）を構築する。

i メソスケールモデル

メソスケールモデルによる風速と風向の予測には、WRF (Weather Research and Forecasting) 等の気象シミュレーションモデルを使用する。計算期間は解析対象海域近傍の気象測候所における熱帯低気圧の最接近時から数日間、計算領域は気象測候所を中心とした 2,000km×2,000km（水平解像度は 10km×10km）等とする。

ii 台風モデル

台風モデルによる風速と風向の推定には、石原ら(1996)により提案された半理論式を用いる。このモデルでは、一様粗度の平坦地形上における地上高さ z での風速 $u_T(z)$ および風向偏角 $\gamma_T(z)$ が、以下に示す式から求められる(種本・石原,2013a)。

$$u_T(z) = u_g \left(\frac{z}{z_g} \right)^{\alpha_u}$$
$$\gamma_T(z) = \gamma_s \left(1.0 - 0.4 \frac{z}{z_g} \right)^{1.1}$$

ここで、 α_u は平均風速のべき指数、 z_g は傾度風高さ、 γ_s は地表面における風向偏角であり、熱帯低気圧の大気境界層の特性量、傾度風 u_g 、地表面粗度 z_0 から半理論的に与えられる(詳細は、石原ら(1996)を参照されたい)。傾度風 u_g は、次式により求め、熱帯低気圧のパラメータである R_m, P_∞ は、前述の WRF から求めた海面気圧の予測値から同定する(詳細は、種本・石原(2013a)を参照されたい)。

$$V_g(r) = \frac{1}{2} \left[-fr + \sqrt{(fr)^2 + \frac{4r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}} \right] \Bigg|_{r=R_{15}} = V_{15}$$

ここで、 ρ は大気密度である。

iii 合成風速場

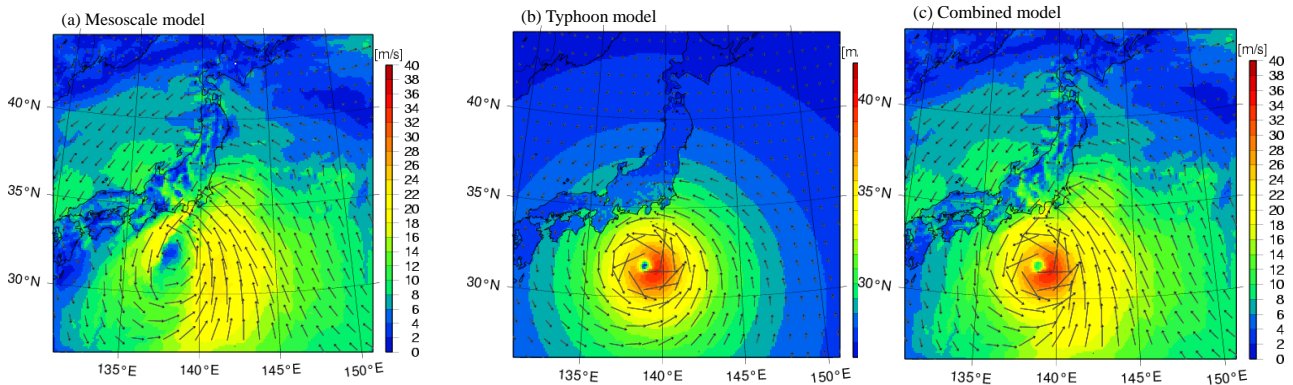
風速場の合成は、大澤(2005)の手法によることとし、合成した風速場 u_C は次式により求められる。

$$u_C = Wu_T + (1-W)u_M$$

ここで、 u_T と u_M はそれぞれ台風モデルとメソスケールモデルにより求めた風速場を示す。 W は重み関数であり、次式により表される。式中の指数 n には、熱帯低気圧による風速の観測値と予測値の誤差が最も小さい $n = 0.5$ が採用されている(種本・石原,2013a)。

$$W = \left(\frac{R_B^2 - r^2}{R_B^2 + r^2} \right)^n$$

図III.3.2-11にメソスケールモデル、台風モデルおよび合成風速場の一例を示す。メソスケールモデルの予測風速は、熱帯低気圧の中心付近で台風モデルより小さい値を示す。一方、台風モデルでは中心から離れるほど予測風速が小さくなる。また、合成風速場では中心付近で台風モデル、中心から離れるとメソスケールモデルの風速場が採用される結果となっている。

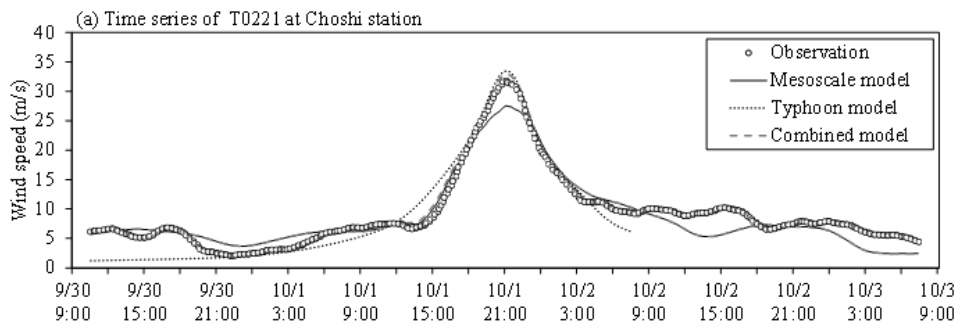


図Ⅲ. 3. 2-11 メソスケールモデル、台風モデルおよび合成風速場により予測された風速場の比較（種本・石原, 2013a）

②風速場の検証

上記に掲げた各予測手法の精度検証を行うために、種本・石原（2013a）は銚子海域において2000年から2009年の10年間を対象として、銚子气象台から半径500km以内を通過し中心気圧が985hPa以下となった熱帯低気圧の風速場を予測し、气象台における風観測データとの比較を行っている。

図Ⅲ.3.2-12は、銚子地方气象台における観測風速とメソスケールモデル、台風モデルおよび合成風速場により予測された風速の時系列の一例である。同図に示すように、銚子ではメソスケールモデルは熱帯低気圧による風速を若干過小評価するが、風速のピークを捉えている。また、台風モデルは熱帯低気圧による風速の最大値をよく再現しているが、熱帯低気圧の通過後の風速を過小評価している。一方、合成風速場は熱帯低気圧による風速の時系列変化を精度よく予測していることが分かる。

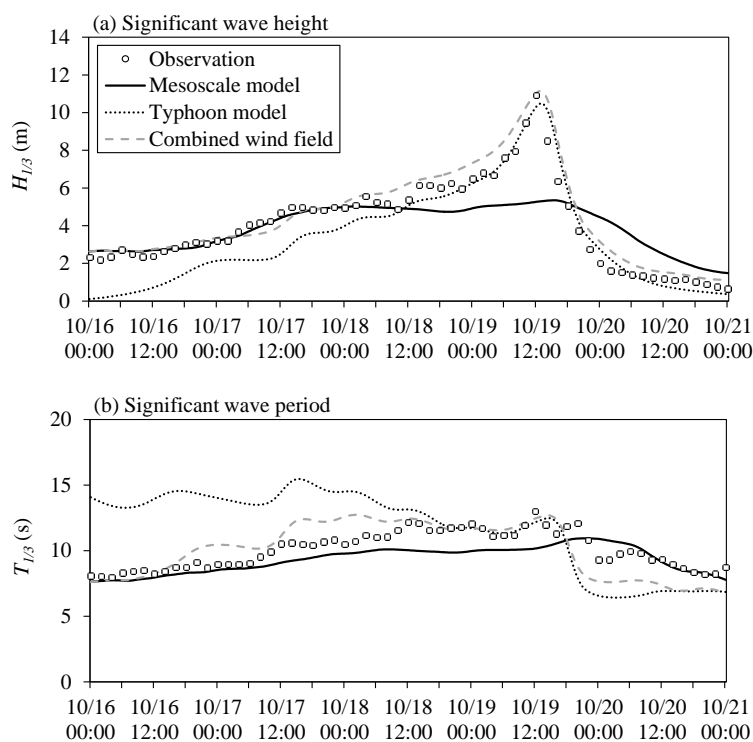


図Ⅲ. 3. 2-12 銚子地方气象台における風速の予測値と観測値の比較（種本・石原, 2013a）

③熱帯低気圧に伴う極値波浪の予測

前述の風速場の検証結果から明らかなように、熱帯低気圧に伴う波浪推算では、合成風速場を海面境界条件として、WW3 (NOAA/NCEP (National Oceanic and Atmospheric Administration/ National Center for Environmental Prediction) により開発) 等の波浪推算モデルにより有義波高と有義波周期を求める方法が推奨される。以下参考までに、メソスケールモデル、台風モデルおよび合成風速場の3種類の風速場を海面境界条件に用いたWW3波浪推算モデルにより、有義波高と有義波周期を求めた時系列結果の一例を示す（図Ⅲ.3.2-13）。本図から、海面境界条件と

して合成風速場を用いた波浪推算結果が、熱帯低気圧に伴う風波とうねりの波高、周期ともに全ての時刻において観測値を精度良く再現できていることが認められる。



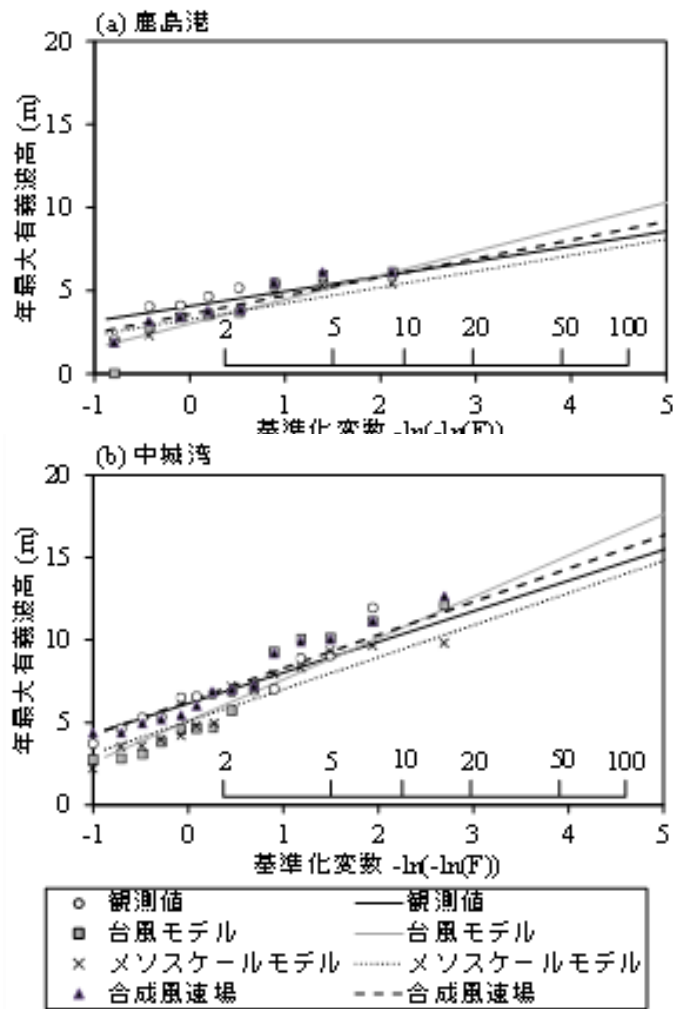
図Ⅲ.3.2-13 波浪シミュレーション結果と観測値の比較 (種本・石原, 2014)

④極値波高および極値波周期の推定

極値波高および極値波周期を推定するために、解析対象海域を中心とした半径 1,000km 以内を通過し、強風半径を持つ熱帯低気圧を全て (20 年以上が望ましい) 取り上げ、波浪シミュレーションを行って各年の極値を算出し、その結果を昇順に並べて確率分布から 50 年再現期待値を求める。なお、有義波周期の極値は観測値の年最大有義波高とそれに対応する有義波周期との関係から、例えば、年最大有義波高と対応有義波周期の関係式 (次式) から求める。ここで、最小二乗法により係数 a および b を同定する。

$$T_{1/3} = aH_{1/3}^b$$

極値波高の解析結果の一例として、鹿島港 (茨城県) と中城湾 (沖縄県) における予測値と観測値から求めた年最大有義波高の極値分布を図Ⅲ.3.2-14 に示すとともに、50 年再現期待値を表Ⅲ.3.2-2 に示す。表に示されているように、波浪シミュレーションにより予測した有義波高の 50 年再現期待値と観測値との誤差は、合成風速場が台風モデルおよびメソスケールモデルによる誤差と比較して最も小さく 5% 程度であり、観測値から求めた有義波高の 50 年再現期待値を良く再現していることが分かる。



図Ⅲ. 3. 2-14 観測値と予測値の年最大有義波高の極値分布（種本・石原, 2013b）

表Ⅲ. 3. 2-2 観測値とシミュレーションによる極値波高と対応する極値波周期（種本・石原, 2013b）

海域	観測値	台風モデル	メソスケールモデル	合成風速場
鹿島港	7.4m	8.7m	7.0m	7.9m
		+14.8%	-7.1%	+4.8%
中城湾	13.5m	14.9m	12.7m	14.1m
		+10.8%	-5.7%	+5.3%

(2) 海潮流調査

海潮流調査では、調査対象海域の建設予定海域の基礎的な現況を把握するため、流速、流向を観測する。そのデータは設計や環境影響評価に活用される。

調査手法は、流速計（ドップラーライダ/ドップラーソーダ等のリモートセンシング機器も含む）を用いた手法、浮標追跡による手法、衛星リモートセンシング手法に大別されるが、このうち本調査には、流速計を用いた手法が一般的である。

流速計には、ペラ・ローター型流速計、電磁流速計、超音波流速計、ドップラー流速計等の種類がある。

【観測期間】

- ・一般に 15 日（代表的な潮流状況を把握できる期間）であるが、支持構造物の海底上の洗掘の情報を得るためには継続して観測することが望ましい。

【定点観測】

- ・観測には、候補海域全体をカバーする面的観測があるが、ここでは定点観測とし、時間的な流動変化を把握するために実施する。

【測点数と配置】

- ・候補海域において代表的な測点で実施する。

【観測層】

- ・観測層は、最低でも表層（風波の影響が小さい海面下 2-3m）と海底上 1-2m の計測とする（後述する ADCP は、最大 128 層まで計測できる）。

【サンプリング方法】

- ・定点観測の場合、データのサンプリング間隔を 10 分にすると、15 昼夜の計測で約 2,000 個のデータが取得でき、調和分解（10 分潮）の解析に供することができる。

【測器の特徴】

- ・ペラ・ローター型流速計（図Ⅲ.3.2-15 の(a),(b)）

従来から最も普及しているタイプである。ペラまたはローターの回転数を記録し流速を定める。ベーンと呼ばれる羽根により、本体を流向に対して常に直角に向かせ、内蔵の磁気コンパスの位置を記録し流向を求める。

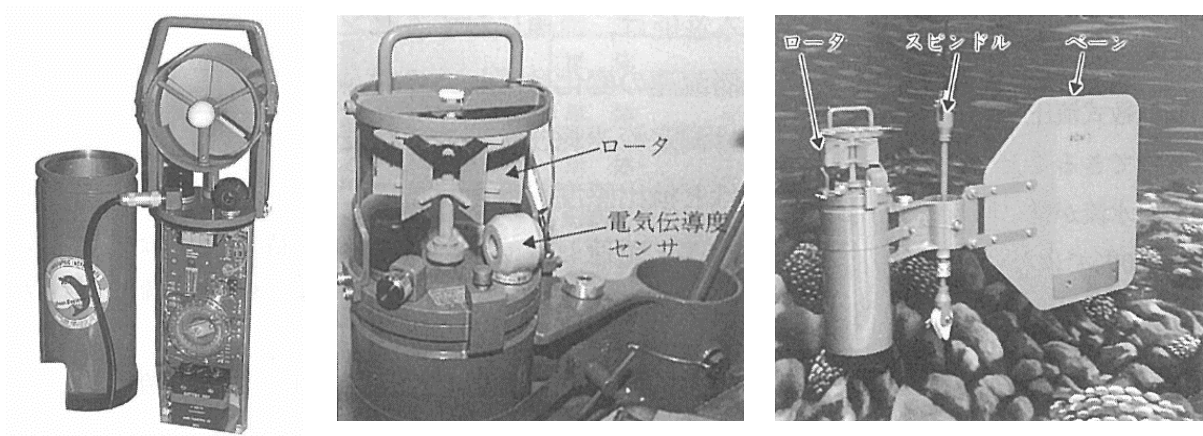
- ・電磁流速計（図Ⅲ.3.2-15(c)）

電磁誘導の原理を利用し、直角な 2 成分の流速を計測し、流速と流向を求めるものである。直角に交わった 2 対の電極の周りに磁場を形成させ、磁界に対し、まわりの海水（導体）が運動すると誘起電圧が発生するというファラデーの法則を利用している。また、電極をさらに鉛直方向に 1 対追加した、3 次元の流速を測定できるものも開発されている。

- ・超音波流速計/ドップラー流速計（ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler）（図Ⅲ.3.2-15 (d)）

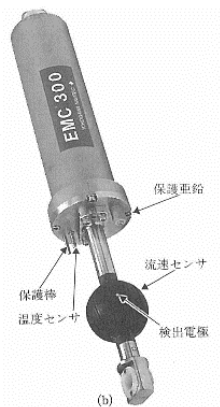
3 個または 4 個の送受信機から超音波パルスを発信させ海中の微小な浮遊物に反射して戻ってくる音波の周波数の変位（ドップラー効果）をそれぞれの送受信機で測定し、その

位相から流向・流速を求める。この流速計の特色は、鉛直的に最大 128 層の 3 次元データを同時に観測できることである。

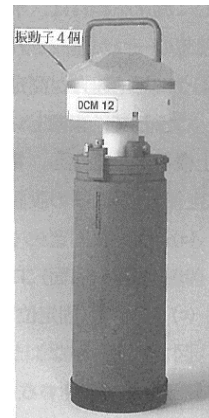


(a) ペラ型流速計

(b) ローター型流速計



(c) 係留式電磁流速計

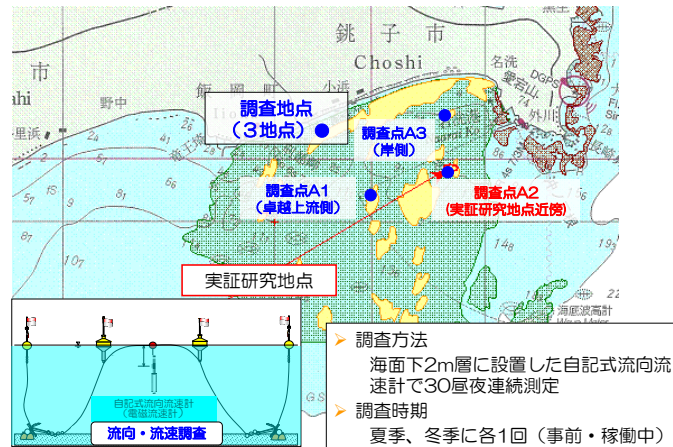


(d) 海底型 ADCP

図Ⅲ.3.2-15 流向・流速計の種類 (田口・田畑, 2001)

1) 銚子沖

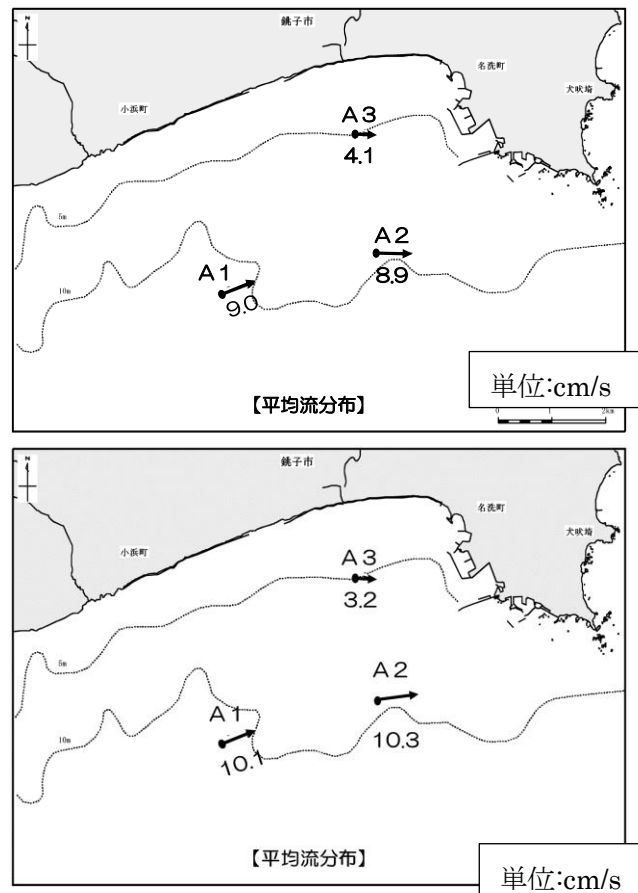
銚子沖洋上風力発電実証研究サイトでは、実証研究地点（調査点 A2;洋上風車と洋上風況観測タワーの間）、その比較対象として研究地点と等深帯で卓越流の上流側の地点（調査点 A1）および岸側の浅海域の地点（調査点 A3）の計 3 地点で海潮流調査（夏季と冬季にそれぞれ事前・稼働中の 2 回（30 日））が行われている（図Ⅲ.3.2-16）。



図Ⅲ. 3. 2-16 銚子沖洋上風力発電実証研究サイトの海潮流調査

【恒流 (平均流)】

流速は、冬季調査よりも夏季調査で事前と稼働中ともに沖合で速く、流向については、いずれの地点も東流が顕著である。また、事前と稼働中の流向・流速に明瞭な変化は認められない。一例として、図Ⅲ.3.2-17に夏季調査における事前と稼働中の恒流 (平均流) の分布図を示す。

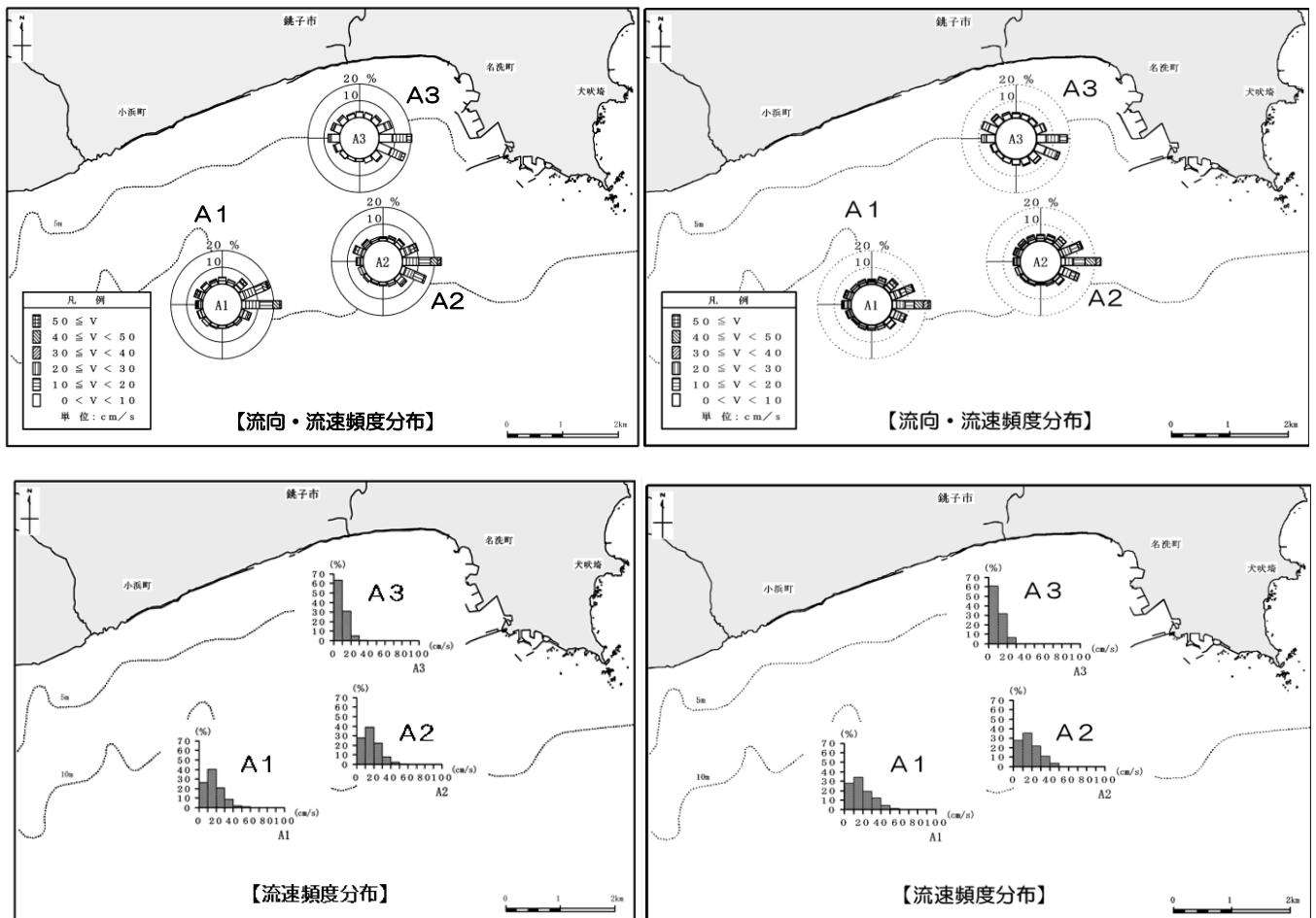


上図：事前調査 (2010.8.7-9.6)、下図：稼働中調査 (2013.8.6-9.5)
 図Ⅲ. 3. 2-17 夏季における恒流 (平均流) の事前調査・稼働中調査結果の比較

【海潮流】

夏季調査：流向については、流向・流速頻度分布および流速頻度分布から3調査地点ともに汀線に沿った東流が卓越し、流速は沖合の調査地点（A1,A2）で速い傾向を示すことがうかがえる。また、事前と稼働中の流向・流速に明瞭な変化は認められない。図Ⅲ.3.2-18に事前と稼働中の調査結果を対比して示す。

冬季調査：流向については、3調査地点ともに汀線に沿った東流と西流が卓越しているものの、地点による流速、事前と稼働中の流向・流速の傾向は夏季調査と変わらない。



事前調査（2010.8.7-9.6） 左上図：流向・流速頻度分布、左下図：流速頻度分布
 稼働中調査（2013.8.6-9.5） 右上図：流向・流速頻度分布、右下図：流速頻度分布
 図Ⅲ.3.2-18 夏季における海潮流調査結果の事前調査・稼働中調査結果の比較

3.3 海底地形・土質

風車の設置位置や規模の設定、支持構造物の選定、海底ケーブルの敷設ルート等の計画に反映させるために、海底の地形や土質を把握する調査を行う。

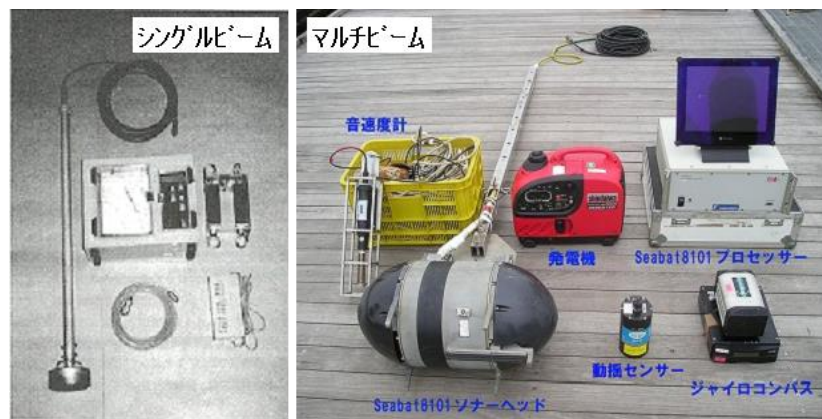
(1) 海底地形調査

海底地形調査では、候補海域における海図、海の基本図等の既往調査資料を参照の上、現地測量等を行って海底地形の形状を把握することが必要である。調査範囲は、地形形状と風力発電システムの規模に応じて検討し、実施する。

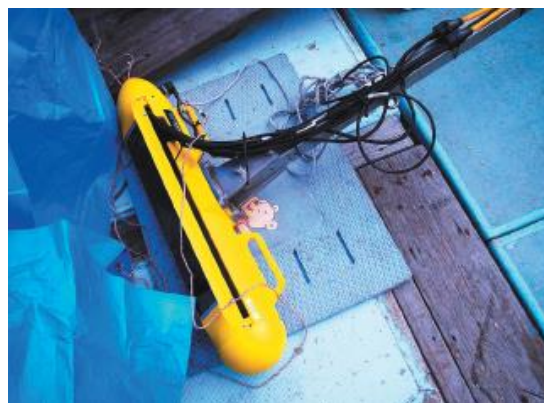
以下、観測機器、測定手法等については、海洋調査協会(2003)および海洋調査技術学会(2004)を参照して取りまとめた。

測深では、音波を用いて行う音響測深法が主流である。音響測深法は、送受波器（以下、素子とする）から発射した音波が海底に反射して、再び戻ってくるまでの時間を測定して正確な水深を得る方法である。測深の方法は、送受波器の数によって単素子音響測深（シングルビーム音響測深：線的な測深、図Ⅲ.3.3-1（左図））、マルチビーム音響測深（面的な測深、図Ⅲ.3.3-1（右図））に分けることができる。その他、海底地形の画像を写真のように得ることができるサイドスキャンソナーを用いる方法があるが、測深はできない。

水深については、観測時の潮位データにより補正して海底地形図を作成し、洋上風力発電施設の平面計画策定の資料とする。



図Ⅲ. 3. 3-1 音響測深機の一部（海洋調査協会, 2003; 海洋調査技術学会, 2004）



図Ⅲ. 3. 3-2 サイドスキャンソナーC3D-LPM（泉ら, 2008）

【測定方法】

- ✓音響測深法では、素子を測量船の舷側に装備して調査を行うが、サイドスキャンソナーでは、船尾から曳航体を曳航する。
- ✓音響測深、サイドスキャンソナーともに測線間隔は水深によって決定される。水深が浅いと音波が海底に達する幅が狭いため測線間隔は狭くなり、多くの測線が必要となる。一方、水深が深いと音波が海底に達する幅が広いいため測線間隔が広くなり、少ない測線で済むようになる。シングルビームはビーム幅が 6° であり、水深10mの海底で測深可能な範囲は半径0.52mの円内となる（水深20mの海底では半径1.04m、水深30mの海底では半径1.56m）。

【観測水深】

- ✓音響測深機で用いられる音波の発振周波数は、音波の減衰率の関係から可測深度に応じた周波数とする。
 - ・単素子音響測深機（PDR-1300）：測深は水深250mまで可能で、使用周波数200kHz
 - ・マルチビーム音響測深機：高精度な計測が可能な水深と周波数の関係は、水深100mまでは450kHz、300mまでは200kHz、3,000mまでは50kHz、11,000mまでは12kHzとなっている。
 - ・サイドスキャンソナー：浅海用、深海曳航用、広域探査型がある。着床式洋上風力発電を対象とした浅海用（KLEIN 5400）では、探査深度150mまでは周波数455kHzを使用する。

(2) 土質調査

土質調査の目的は、設置予定海域における海底土質、地質構造、土質柱状図（ボーリングデータ）等の既存調査資料の収集および地質・土質調査を行い、地盤の性状および構造等を把握することである。

前述のサイドスキャンソナーにより海底表層の底質の判別は可能であるが、支持構造物の検討には海底下の本格的な土質調査が必要である。調査地点、調査間隔および地盤調査の深度は、設置予定地点の推定される地盤状況および風車規模、支持構造物の種類に応じて決定する。地質柱状図の既往調査資料がない場合には、ボーリング調査（図Ⅲ.3.3-3；SEP 船からコアサンプラーを垂下して行う）を実施する。地盤の状況に応じて原位置試験（標準貫入試験、透水試験等）、室内試験（土粒子の密度試験、圧縮試験等）、貫入試験を行い、支持力・沈下特性ならびに基礎工事の施工に必要な地盤の性質を求める。また、改正建築基準法の施行に伴い、孔内水平載荷試験、PS 検層等時刻歴応答解析を行うための調査も行う。

海底土質調査に関して IEC61400-3 の 12.15 では、調査にあたっては1箇所以上のボーリング調査と室内土質試験の実施が必要で、基礎ごとの土質調査が望まれるとしている。日本ではN値による設計法が一般的であるが、欧州ではCPT（Cone Penetration Test）等の比較的経済的な土質調査法が普及している。したがって、CPTとバイブロコアにより収集した試料の室内土質試験と併用し、1箇所のボーリング試験とのキャリブレーションを実施検証することで、高額のボーリング試験を補えるとされている。



図Ⅲ. 3. 3-3 ボーリング調査の例
(大和探査技術提供)

【豆知識Ⅲ.3.3-1】

●ボーリングデータの例

支持基盤を N=30 以上とした場合、海底面下 5.15m 以深で支持基盤または支持基盤に近い層が見られる。

調査名 5国補波修第32-53号

ボーリングNO.

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

事業・工事名

シートNO.

ボーリング名	080128018001	調査位置				北緯	35° 45' 16.0000"				
発注機関	鹿島港湾事務所	調査期間	1993-08 ~ 1993-08			東経	140° 50' 32.0000"				
調査業者名	興亜開発(株)	主任技師				現場代理人	コア鑑定者				
ボーリング名			ハンマー	落下用具		トンビ法					
孔口標高	-5.99 m	角	上 90° 下 0°		方向	北 0° 西 270° 東 90° 南 180°		地盤勾配	水平 0°	使用機種	エンジン
総掘進長	10.40 m	度	0°		方向			ハンマー	ポンプ		

標尺	層高	厚	深	柱状	土質	色	相対	相対	記	地層	孔内	標準貫入試験				原位置試験	試料採取	室内	掘進	
												測定	10cm	打撃	貫入					深度
(m)	(m)	(m)	(m)	図	区分	調	稠	事	区分	水位	(m)	0	10	20	30	(m)	番号	方法	日	
1					細砂 (FS)		適													
	-7.59	1.60	1.60		貝殻混じり細砂 (FS-Sh)		適													
2																				
3																				
4																				
5																				
6	-11.39	3.80	5.40		シルト混じり細砂 (FS-M)		適													
7																				
8																				
9																				
10	-16.39	5.00	10.40																	

出典：茨城県土木部