

1. 気象海象の観測

浮体式洋上風力発電の導入計画、設計、事業性の評価等には、風況に係る実測データが必要である。水深 30m 以浅の比較的浅い海域では、着床式風況観測塔が設置されて観測が行われているが（NEDO 実証研究の例：図 1-1）、浮体式洋上風力発電の対象海域では水深が深いことから建設コストも非常に高額で、観測塔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ている。なお、NEDO は「洋上風況観測技術開発研究」により着床式洋上風況観測塔と同程度の精度を有するとともに、低コストで簡易な浮体式風況観測システムの開発中である。

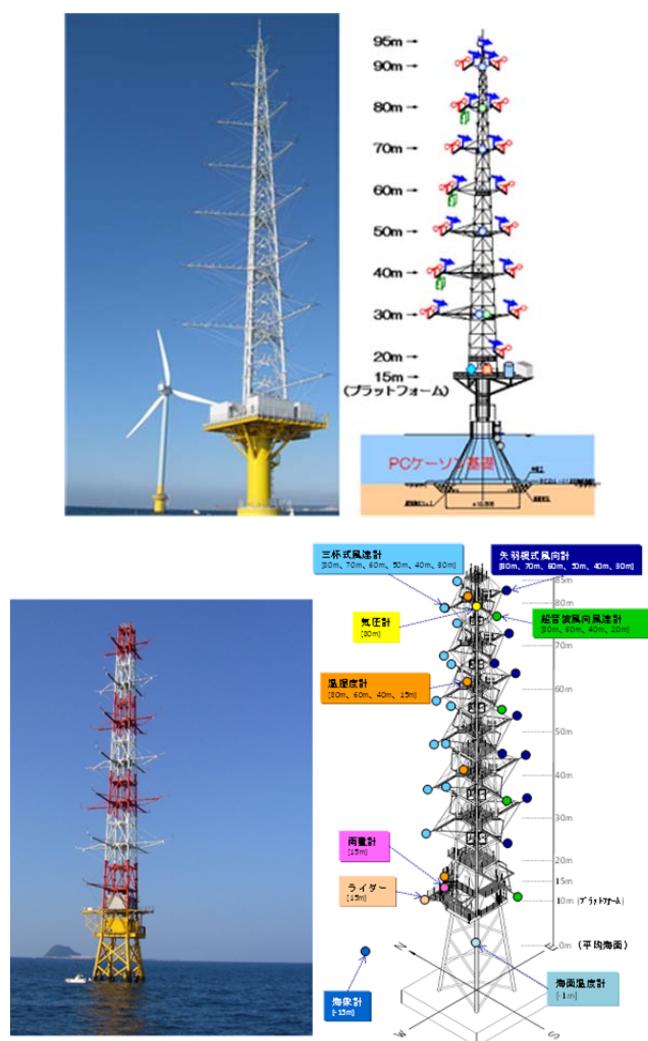


図 1-1 着床式洋上風況観測設備と観測機器の設置状況（上図:銚子沖、下図:北九州市沖）¹

浮体式洋上風況観測システムにおいて、風車のハブ高さにおける風況データを取得するための測器として、「ドップラーライダー」を挙げることができるが、その課題は以下のように整理される。

- ドップラーライダーの精度・信頼性の向上
- 動揺補正機能を有する浮体式洋上風況観測システムの開発
- 低動揺性・耐環境性の浮体構造の開発

最初に掲げた「ドップラーライダーの精度・信頼性」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ーの測定精度が評価されている。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ー計測値の比較が行われ平坦地形条件下ではライダーによる計測の有効性、複雑地形条件下では測定誤差の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が言及されている。

浮体式洋上風況観測システムにおいて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、これについては 1.2 項で最近の研究事例を紹介する。また、低動揺性・耐環境性の浮体構造の開発は、浮体式洋上風力発電設備の荷重・構造評価に係るもので、3 節の「水槽試験」、4 節の「連成解析モデル」、5 節の「流体解析モデル」および 6 節の「構造解析モデル」を参照されたい。

1.1 風況観測システムの事例

風況観測システムは、以下に示すように、実証試験が行われており、その一部のシステムは販売されている（ただ、ここで取り上げている観測システムでは動揺補正機能は備っていない）。なお、Carbon Trust (2014) ²は、DNV GL が従来の気象マストと FLiDAR の風況データを比較し、良好な検証結果を得たことから、浮体ドップラーライダー技術が商業化に向けて一歩踏み出したとしている。

1.1.1 SeaZephIR

開発者：DNV/ ZephIR

風況観測機器：ZephIR

浮体形式：スパー型、ディスク型、TLP 型（図 1.1-1）

平均測定誤差（波高 5m のケース）

スパー型:-1.0%（図 1.1-2）、ディスク型:-2.0%、バージ型:-0.2%

【特長】

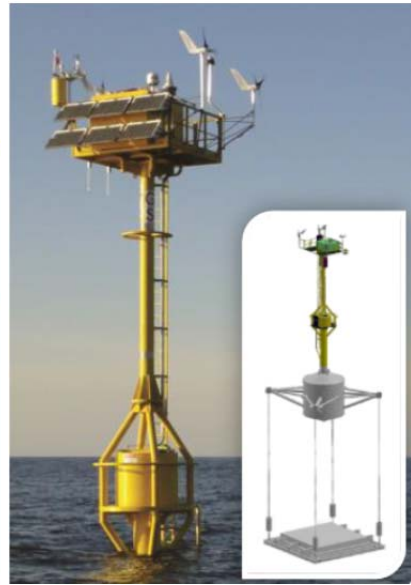
長期設置型

【開発状況】

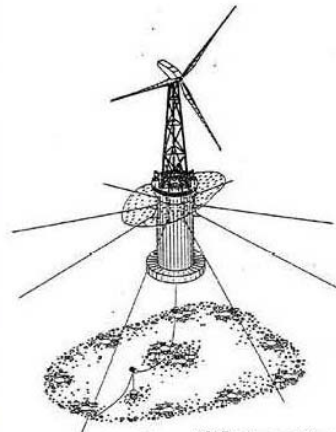
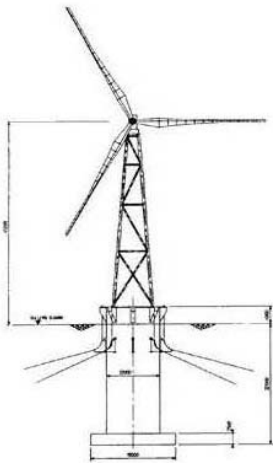
2009 年 6 月より実証試験開始。最初の商用機がニュージャージー州の Deep Water Wind 計画に採用され、2011 年 4 月に設置されたが、数日で転倒。2014 年現在、TLP 型の浮体構造物が開発されている。



スパー型³



TLP 型⁴



(出典: Garrad Hassan)

ディスク型⁵

図 1.1-1 浮体形式の違いによる浮体式洋上風況観測システムの事例

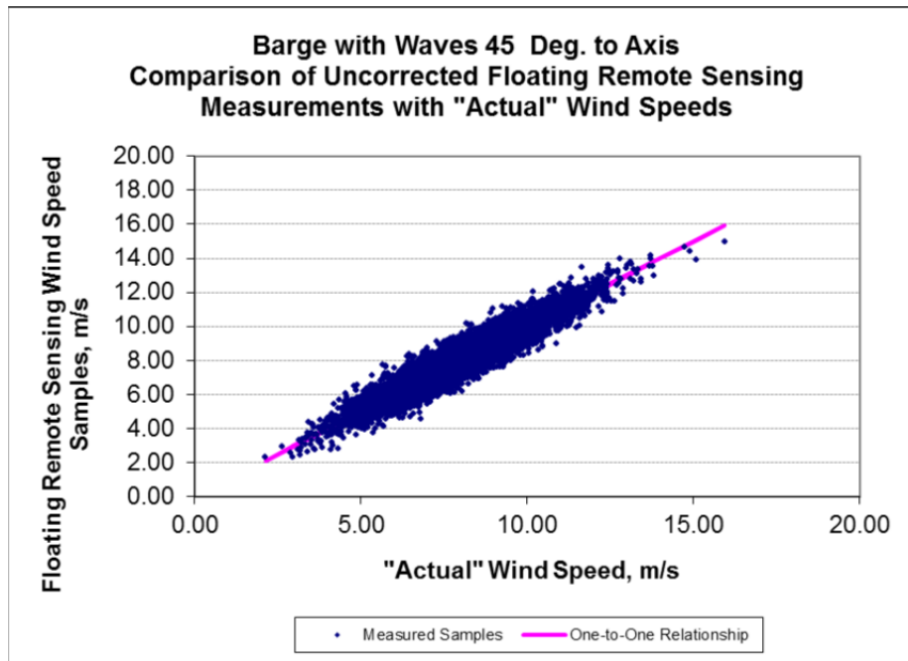


図 1.1-2 ドップラーライダー風向速計による風速と参照風速との関係（海面上 5m）³

1.1.2 FLiDAR (floating LIDAR)

開発者：3E/OWA

風況観測機器：WINDCUBE（測定高 40-200m）

浮体形式：ブイ型（図 1.1-3）

【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、ドップラーライダー風向速計による風速と参照風速とは良好な関係を得ている（図 1.1-4）。



図 1.1-3 浮体式洋上風況観測システム（ブイ型）の事例⁶

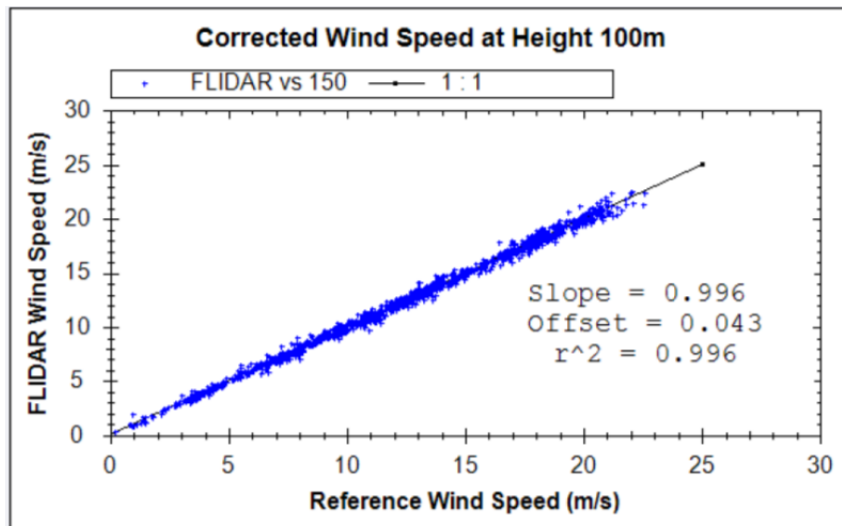


図 1.1-4 ドップラーライダー風向速計による風速と参照風速との関係（海面上 100m）⁶

1.1.3 WindSentinel

開発者：Grand Valley State Univ. (MAREC:Michigan Alternative and Renewable Energy Center) and Univ. of Michigan (Phoenix Energy Institute)

風況観測機器：Vindicator（測定高 30-150m まで 6 層、特別仕様では 250m まで可能）

浮体形式：船型（図 1.1-5）

係留方式：WindSentinel 法（NOMAD ブイ・プラットフォーム; アンカー質量 5t）

コスト：1.5million\$（1.5 億円; 100 円/\$）

その他：50t の船舶により曳航可能

【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ーによる計測値（図 1.1-6）は、陸上のライダーの計測値と比較して誤差 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。



図 1.1-5 浮体式洋上風況観測システム（船型）の事例⁷

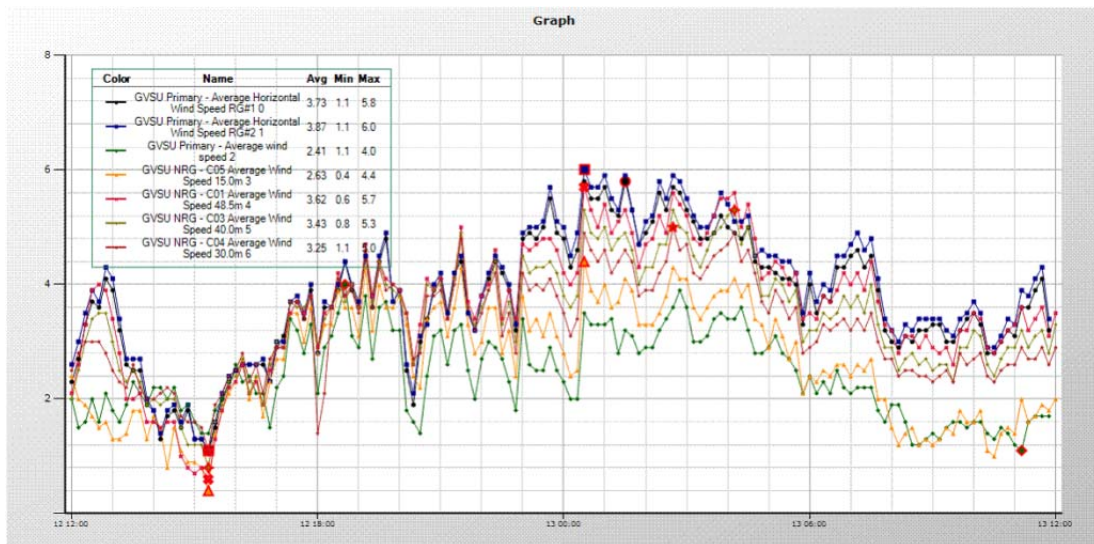


図 1.1-6 ドップラーライダー風向速計による風速の時系列図⁷

1.2 浮体式洋上風力発電の実証研究における気象海象観測

わが国において、浮体式洋上風力発電に係る実証研究は、経済産業省による福島沖の「福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」と環境省による長崎県五島桮島沖の「浮体式洋上風力発電実証事業」を挙げることができる。ここでは、主として山口ら（2017）⁸、若林ら（2014）⁹、川東ら（2014）¹⁰等を基に気象海象観測の概要を取りまとめた。

福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業では、気象海象調査の目的として、「動揺する浮体上での気象観測技術を確立するとともに、実施海域に設置した浮体上での気象・海象観測を実施し、わが国周辺の外洋の大水深海域における気象・海象特性を明らかにすること」が挙げられる。そのため、福島沖浮体式洋上風況観測タワー上で気象・海象の観測を実施するとともに、浮体の動揺を計測し気象観測に浮体動揺が与える影響について、動揺補正法が開発されている。なお、実証研究の範疇で、観測データの信頼性を確保するため、「1つの観測項目に対して、複数種類の観測機器を配置し、相互検証とバックアップ体制を構築する」ことを基本として、各センサが設置されている。

1.2.1 気象観測

福島沖浮体式洋上風況観測タワーに設置されている気象観測機器の一覧を表 1.2-1に示す。

表 1.2-1 気象観測機器の一覧^{8, 10}

No.	項目	形式	設置位置	数量	測定間隔
①	風速	三杯式風速計	マスト上	3 高度×3 方向：計 9 台	20 Hz
②	風向	矢羽根式風向計	マスト上	3 高度×3 方向、頂部：計 10 台	20 Hz
③	風向風速	超音波式風向風速計	マスト上	3 高度×3 方向：計 9 台	20 Hz
④	風向風速	ドップラーライダー	上部デッキ	1 台	1 Hz
⑤	視程	現在天気計	マスト下	1 台	1 Hz
⑥	雨量	雨量計	上部デッキ	1 台	1 hour
⑨	気圧	気圧計	計測室	1 台	1 Hz
⑩	日射量	全天日射計	上部デッキ	1 台	1 Hz

図 1.2-1に示すように、福島沖浮体式洋上風況観測タワー上部構造（デッキ上の三角断面鋼管トラス構造）のマスト上（最上部：海面上60m高）には風向風速関連機器が配置されている。タワーの海面上40m、50m、60mの高さに計3本のブームが方位角120°間隔で水平に張出され、その先端に三杯式風速計、矢羽根式風向計および超音波式風向風速計が取り付けられている。また、風向・風速計として超音波式風向風速計およびフラックス等を計るために温度差計が配置されている。

風況マスト下部には、一般的気象観測機器として、気温湿度計、全天日射計、雨量計等を設置し、計⑩室内には気圧計が置かれている。さらに、風況観測にリモートセンシング技術の1つであるドップラーライダーをデッキ上に置いて、約300mの高度までの風向風速を観測する。ドップラーライダーの評価に関わる観測として、視程、雨量および浮体定常変位や動揺の計測を行う。

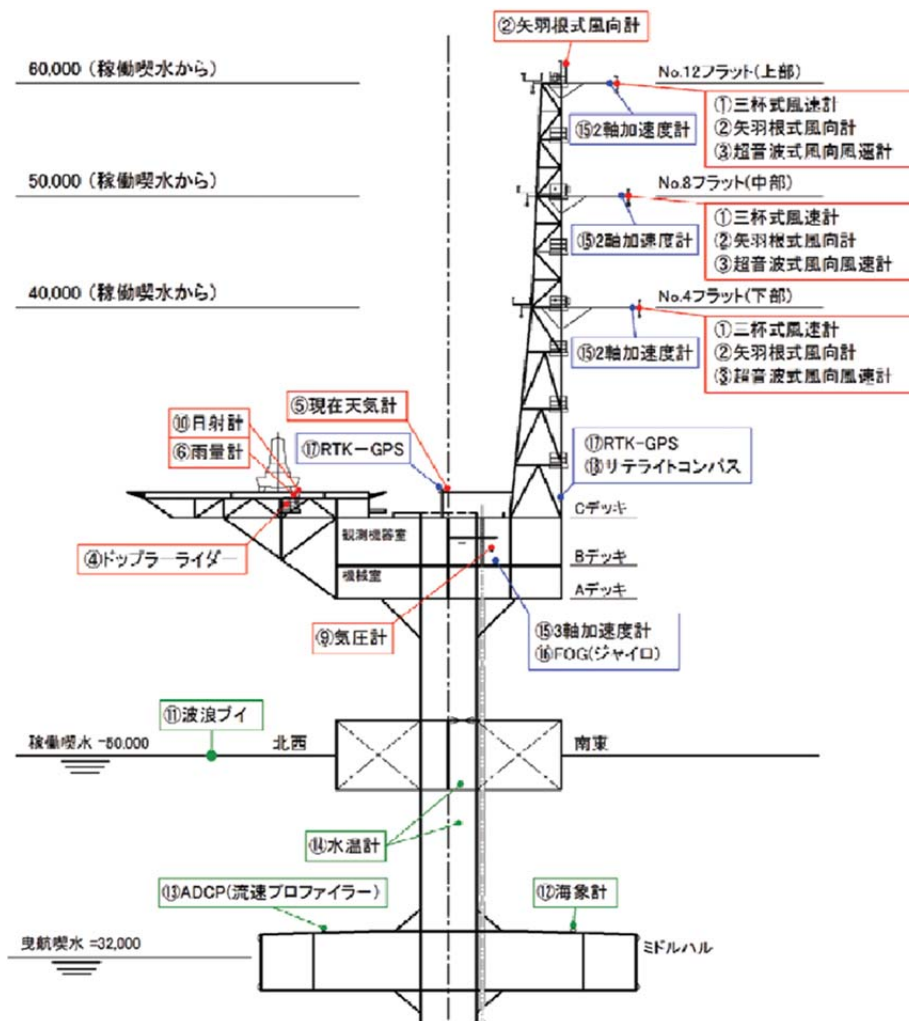


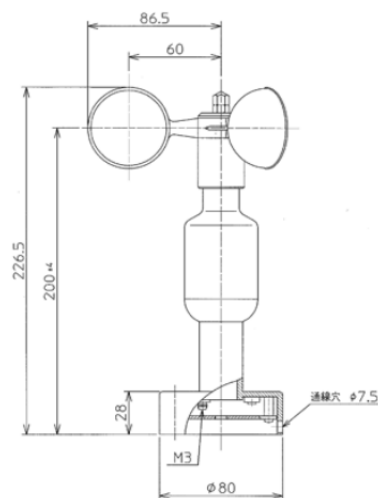
図 1.2-1 福島沖浮体式洋上風況観測タワーにおける観測機器の配置¹⁰

浮体の座標系は、風況マストとヘリデッキを結ぶ線をセンター、風況マストを船首と定義して方位0度とする（1.2.2 海象観測で記述する ADCP の基準、1.2.3 浮体動揺に関する計測で記述する動揺センサの基準）。この船首方位を E 方位とした時の N 方位が風況センサ設置基準となる。

表 1.2-1に掲げた主な観測機器の仕様と概観図を示す。なお、ここに示す観測機器は一般に入
手可能なものである。

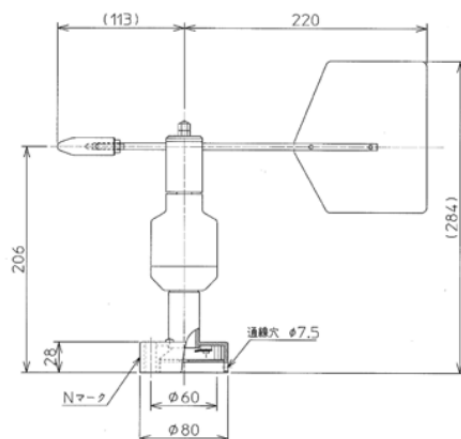
① 三杯式風速計

項目	仕様
品名	SOW21-1型
検出方法	交流発電機
測定範囲	1.0～60m/s相当
起動風速	1.0m/s未満
耐風速	90m/s以上
精度	±2%以内(IEC手順構成にて)
出力	交流電圧(0-110Hz)
寸法	約173φ×227mm
質量	約0.4kg



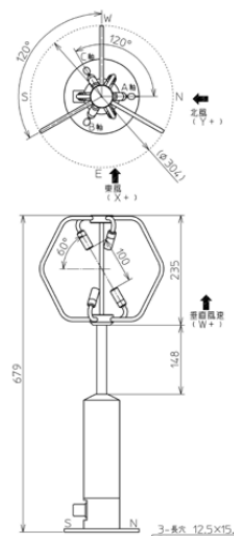
② 矢羽式風向計

項目	仕様
品名	SOW24-1型
検出方法	ポテンションメータ式
測定範囲	0～350°
起動風速	1.5m/s未満
耐風速	90m/s以上
精度	±2° 以内
出力	5VDC印加時0-5V
寸法	約320×284mm
質量	約0.44kg



③ 超音波式風向風速計

項目	仕様
品名	SAT-600B型
測定方式	時分割送受切替型超音波パルス方式
演算方式	超音波伝播時間逆数差演算方式
測定範囲	風速: 0～60m/s 風向: 0～540°
精度	風速: ±(読み値の3%+0.05m/s) 風向: ±3°
出力分解能	風速: 0.01m/s 風向: 0.1°
測定繰返し	20回/秒
平均化時間	1～15min(1分毎に設定可能)



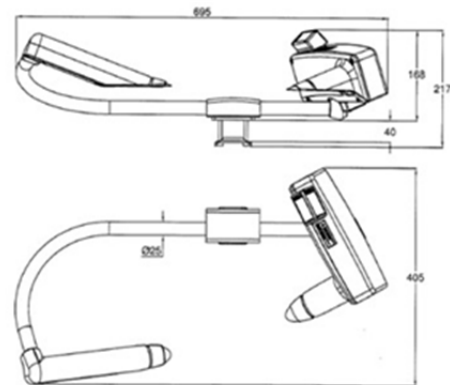
④ ドップラーライダー

項目	仕様
品名	WINDCUBEv2 offshore
測定方式	パルス式
レーザー照射角度	28°
使用環境温度	-30°C～+45°C
測定高度	40m～200m
測定高度数	12高度
高度分解能	10m
測定範囲	風速:0～55m/s
	風向:0～360°
精度	風速:0.1m/s
	風向:2.0°
寸法	543×552×540mm
質量	45kg



⑤ 現在天気計

項目	仕様
品名	PWD12
測定方式	前方散乱方式
測定範囲	10～2000m
測定精度	10～1000m: ±10%
	1000～2000m: ±15%
外形寸法	695×199×404mm



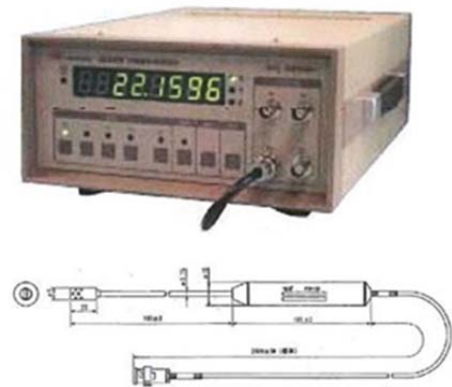
⑥ 雨量計

項目	仕様
品名	CYG-50202
測定範囲	50mm
起動雨量	1mm
測定精度	±2mm
外形寸法	H=65cm/14cm φ
質量	約2.5kg



⑦ 気温湿度計

項目	仕様	
品名	水晶温度差計 (DMT-624)	水晶温度差プローブ (PTR-123)
動作方式	水晶発振式	—
測定精度	±0.05℃	—
測定範囲	-50℃～+200℃	—
測定媒体	—	気体温度
熱時定数	—	1.5秒
寸法	約210×320×100mm	約285×φ18mm
質量	約4kg	約100g



⑧ 温度差計

項目	仕様
品名	HMP155
検出方法	気温: pt100 RTD 1/3 ClassB IEC 751 湿度: 静電容量式
測定範囲	気温: -40℃～+60℃ 湿度: 0～100%
測定精度	気温: ±(0.176-0.0028×気温)℃ (-80～+20℃) ±(0.07-0.0025×気温)℃ (+20～+60℃) 湿度: ±(1.0+0.008×読み値)%RH (-20～+40℃)
寸法	約279×φ24mm
質量	約86g(プローブ部)



⑨ 気圧計

項目	仕様
品名	PTB210
検出方式	シリコン静電容量式
測定範囲	800～1100hPa
測定精度	±0.30hPa(+20℃において)
寸法	120×50×32mm
質量	約0.11kg



⑩ 全天日射計

項目	仕様
品名	CHF-LP02
ISOクラス	Class-2
経年変化	±1%
最大入射エネルギー	2000(W/m ₂)
傾斜誤差	±2%
日積算制度	±10%
視野角	180度
動作温度	-40～+80℃
寸法	78φ×107mm
質量	650g



1.2.2 海象観測

海象観測は、波浪と海潮流を対象とし、それらの機器の一覧を表 1.2-2に示す。

表 1.2-2 海象観測機器の一覧^{10, 8}

No.	項目	形式	設置位置	数量	測定間隔
①	波高	波浪ブイ	約 500m 海域	1 台	—
②	波高・流速	海象計	没水ハル上部	1 台	2Hz
③	流速	ADCP (流速プロファイラー)	没水ハル上部	1 台	1Hz
④	水温	白金温度計	没水カラム	1 台	1Hz

波浪ブイは、波浪によるブイの上下動と回転運動をGPS等により計測し、あらかじめ設定した動揺特性から波高と方向分布を算定するもので、福島沖浮体式洋上風況観測タワーから約2km離れた海域（2MW風車搭載の浮体式洋上風力発電設備近傍）に係留設置されている。海象計（超音波式波浪計）は、福島沖浮体式洋上風況観測タワーの没水体上面に設置され、センサと波面までの超音波送受信時間から波高を計測するほか、3方向に角度をもって送信される超音波のドップラー信号により水粒子速度成分を計測し、それらから波の方向スペクトルを算定する。このとき、同時に流れ成分が計測できるため、多層流速計としての機能も持つことになる。

海潮流の計測は、ADCP（音響ドップラー流速プロファイラー）を第一没水体上部に設置して行う。計測原理は超音波式波高計と同様に3方向に超音波を照射してドップラーシフト成分から流速を算定するものであるが、高いサンプリング速度と10～20層という深度分解能を持つ。

他の項目として水温を計測する。水温は風力発電や気象分野等と関連が高いと思われる海面付近と数m下面における計測を実施する。

表 1.2-2に掲げた主な観測機器の仕様と概観図を示す。なお、ここに示す観測機器は一般に入手可能なものである。

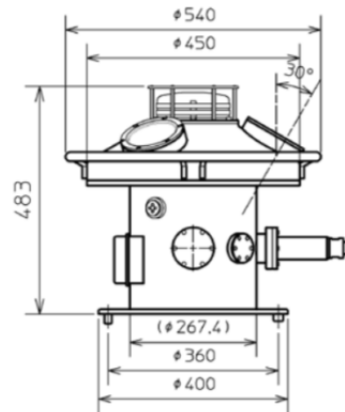
① 波浪ブイ

項目	仕様
品名	DWR-G
センサー	GPS
測定範囲	±20m
測定精度	1.0～2.0cm
周期	1.6秒～100秒
寸法	φ 0.7m
質量	約95kg



② 海象計

項目	仕様
品名	USW-2000
測定方式	水粒子速度:超音波ドップラー方式 表面波:超音波伝搬時間測定方式
測定範囲	表面波(波高): ±15m 流速: 0～5m/s
測定周期	0.5秒
寸法	540 φ × 483mm
質量	65.0kg



③ ADCP (流速プロファイラー)

項目	仕様
品名	ワークホースセンチネル
測定方式	超音波ドップラー多層流向流速計
測定範囲	±5.0m/s
測定精度	±2.5cm/s
設定層数	1～128層
寸法	229 φ × 396mm
質量	約13kg



④ 白銀温度計

項目	仕様
品名	SOT-4
測定方式	白金抵抗体 pt100Ω at 0℃ JISA級
測定範囲	-40℃～+60℃
測定精度	0℃の時 ±0.15℃
寸法	15φ×100mm
質量	0.5kg



1.2.3 浮体動揺に関する計測

前述した風向風速計のドップラーライダーは、その計測の特性上、浮体動揺の影響を強く受けることから、その影響を補正するための計測を行う。福島沖浮体式洋上風況観測タワー浮体動揺に関する計測機器の一覧を表 1.2-3に示す。

表 1.2-3 福島沖浮体式洋上風況観測タワー浮体動揺計測機器の一覧

No.	項目	形式	設置位置	数量	測定間隔
①	並進運動	加速度計	計測室	1台(3軸)	20Hz
②	回転運動	FOG (ジャイロ)	計測室	1台	20Hz
③	位置	RTK-GPS	デッキ上3点	3台	10Hz
④	方位	GPS 方位計	デッキ上3点上	1台	10Hz

動揺計測は、3軸加速度計、光学式ジャイロスコープ (FOG:Fiber Optical Gyro) および RTH-GPS (Real Time Kinematic-GPS) とともに、方位の計測は GPS 方位計が用いられる。なお、絶対変位の把握は3軸加速度計と光学式ジャイロスコープではできないが、RTH-GPSは可能であるものの、高周波の数値ノイズの除去・平滑化が必要であり、受信不良等によるデータ取得率の低下が問題視されることもあって、複数のシステムが併用されている。

表 1.2-3に掲げた主な観測機器の仕様と外観図を示す。なお、ここに示す観測機器は一般に入手可能なものである。

① 加速度計

項目	仕様
品名	JA-5V型
測定方式	サーボ式
測定範囲	±19.62m/s ²
測定精度	9.81×10 ⁻⁶ m/s ²
寸法	38φ×37mm
質量	72kg



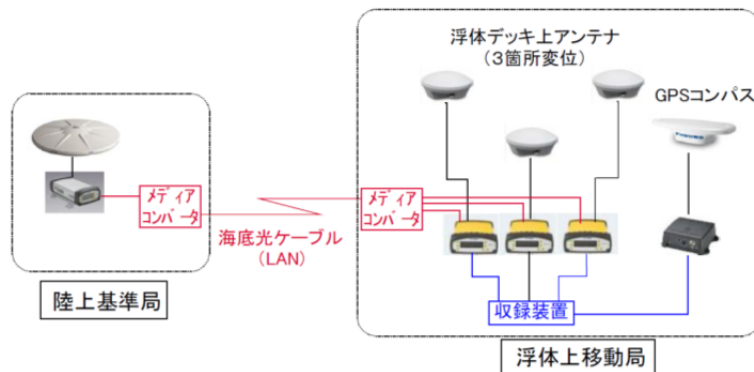
② FOG (ジャイロ)

項目	仕様		
品名	JCS7402-A		
測定方式	光学式		
測定範囲	ロール角ピッチ角	3 軸加速度	3 軸角速度
	±45°	±19.6m/s ²	±100° /s
測定精度	±0.15°	±0.5m/s ²	±5° /s
寸法	170×170×139mm		



③ RTK-GPS

項目	仕様
品名	SPS852
測定方式	Real Time Kinematic 方式
測定範囲	水平精度: 8mm+1ppmRMS
	垂直精度: 15mm+1ppmRMS



④ GPS 方位計

項目	仕様
品名	SC-30
測定精度	0.5° RMS
追従速度	45° /s
整定時間	約3分
寸法	253×685×141mm



1.2.4 データ収集・通信システムの構築

福島沖浮体式洋上風況観測タワーで観測されるデータを統合する陸上側データ管理システムが構築され、これらを結ぶネットワーク網が整備されている。

1) 観測データ

福島沖浮体式洋上風況観測タワーで得られる観測データを表 1.2-4 に示す。

表 1.2-4 福島沖浮体式洋上風況観測タワーで得られる観測データ

項目	観測・計測機器	収録データ
気象関係	三杯式風速計	風速
	矢羽式風向計	風向
	超音波式風向風速計	風向・風速
	ドップラーライダー	風向・風速（高度別）
	現在天気計	視程・気象種類・降水強度・降水量・積雪量
	雨量計	雨量
	温度差計	温度差
	気温湿度計	湿度
	気圧計	気圧
	全天日射計	日射量
海象計	波浪ブイ	波高
	海象計	波高・流速
	流速プロファイラー（ADCP）	流速
	水温計	水温
浮体動揺関係	加速度計	加速度
	FOG	角速度・加速度・ロール角度・ピッチ角度・方位角度
	RTK-GPS	緯度・経度・高度
	GPS 方位計	方位

2) データ収録システム

福島沖浮体式洋上風況観測タワーで計測された観測データは、海底ケーブルを通じて陸上基地に設置された各コンソーシアムシステム内の地上サーバに保管される。観測・運転データ収録システムが各コンソーシアムシステム内のサーバにアクセスして観測・運転データを取得し、本システム内にデータを保管する。これらのデータのうち研究用データは東京大学に配信されている。また、福島沖浮体式洋上風況観測タワーで撮影する浮体式風力発電設備の映像は映像データ配信システムにより、気象・海象データの代表的なデータは気象・海象データ配信システムにより、交流センターに配信され表示される。

1.3 浮体上のドップラーライダーによる動揺補正の観測事例

福島沖浮体式洋上風況観測タワーで計測されたドップラーライダーの観測値は、浮体動揺の影響を強く受けていることから、風況解析にあたって動揺補正を行う必要がある。ここでは、Yamaguchi and Ishihara (2016)¹¹、若林ら (2014)⁹による6自由度の動揺を考慮した補正方法を紹介する。

1.3.1 ライダーの計測原理

ライダーは、上空に向けてレーザー光を照射し、空気中のエアロゾルに反射して返ってくる光のドップラーシフト成分から風速を計測する装置である。

本ライダーは、パルス式と呼ばれるタイプで北方向、東方向、南方向、西方向、鉛直の順に計5方向にレーザー光を照射する。レーザー光の照射間隔は約1秒で、約5秒間で照射方向が一巡する。東西南北方向に照射する際の鉛直からの角度は28°である。図1.3-1に静止状態のレーザー照射方向の平面図と東西鉛直断面図を示す。

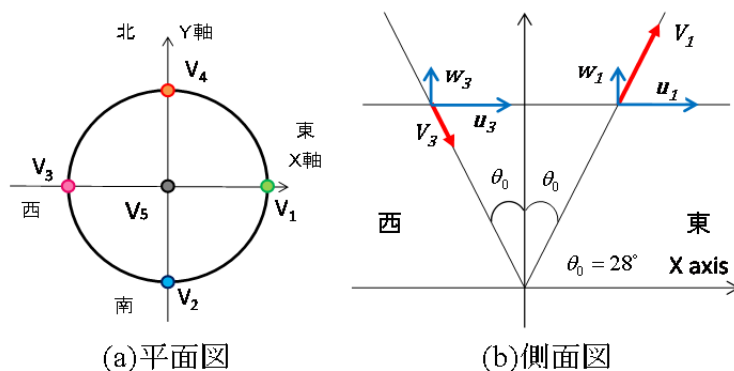


図 1.3-1 静止状態のレーザー照射状況⁹

これら5方向の照射により風速の各照射方向成分（視線風速）を計測し、風速の水平・鉛直成分を求める。その方法を以下に示す。東方向の視線風速を V_1 、西方向の視線風速を V_3 とする。また、 V_1 および V_3 を計測した位置での風速の東西方向成分と鉛直方向成分をそれぞれ、 u_1 、 w_1 、 u_3 、 w_3 とする。照射角を θ_0 とすると、 V_1 および V_3 はそれぞれ式 1.3-1、式 1.3-2 により表される。

$$V_1 = -u_1 \sin \theta_0 + w_1 \cos \theta_0 \quad \text{式 1.3-1}$$

$$V_3 = u_3 \sin \theta_0 + w_3 \cos \theta_0 \quad \text{式 1.3-2}$$

ここで、

V_1 : 東方向の視線風速 (m/s)

V_3 : 西方向の視線風速 (m/s)

u_1 : V_1 での風速の東西方向成分 (m/s)

u_3 : V_3 での風速の東西方向成分 (m/s)

w_1 : V_1 での風速の鉛直方向成分 (m/s)

w_3 : V_3 での風速の鉛直方向成分 (m/s)

θ_0 : 照射角 (°)

ここで、 $u_1 = u_3 = u$ 、 $w_1 = w_3 = w$ と仮定すると、風速の水平成分 u 、鉛直成分 w が次式のように求まる。

$$u = \frac{-V_1 + V_3}{2 \sin \theta_0} \quad \text{式 1.3-3}$$

$$w = \frac{V_1 + V_3}{2 \cos \theta_0} \quad \text{式 1.3-4}$$

ここで、

u : 風速の水平成分 (m/s)

w : 風速の鉛直成分 (m/s)

V_1 : 東方向の視線風速 (m/s)

V_3 : 西方向の視線風速 (m/s)

θ_0 : 照射角 (°)

なお、ここでは各レーザー照射時間内における風速は定常であり、空間的にも一様であると仮定している。このため、ライダーの計測結果は時間空間方向の平均的な値となる。

1.3.2 補正方法の定式化

1) 高度補正

ピッチ方向、ロール方向にライダーが傾斜すると図 1.3-2 (a) のようになる。この時、各ビームの計測高度が目標高度からずれることにより、誤差が生じる。そのため、目標高度を挟む2点の計測高度から、線形内挿により目標高度の視線風速を求められている。高度補正後の視線風速計測地点の位置ベクトルを p_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$)とする (図 1.3-2 (b))。

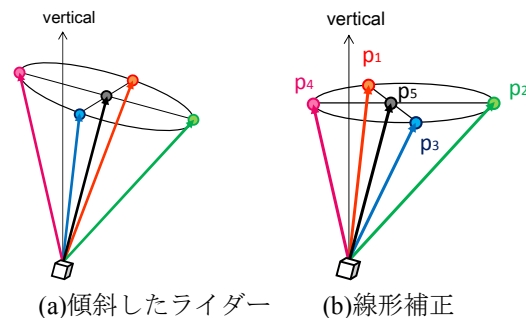


図 1.3-2 傾斜したライダーとその視線風速⁹

2) 傾斜補正

風速のベクトル p_2 と p_4 で張る平面 (面 p_2p_4) 内の水平成分 ($u_{2,4}$) を算出する。浮体のピッチ角を β とすると、水平面から見た視線風速の角度はそれぞれ $\varphi_2 = 90^\circ - \theta_0 - \beta$ 、 $\varphi_4 = 90^\circ + \theta_0 - \beta$ となる (図 1.3-3 (b))。視線風速 V_2 、 V_4 は、風速の面 p_2p_4 内の水平成分 $u_{2,4}$ と面 p_2p_4 内で水平風

速に直交する成分 $w_{2,4}$ を用いて、式 1.3-5 と式 1.3-6 により表せる。この式を連立して解くと、 $|u_{2,4}|$ が式 1.3-7 のように求まる。

$$V_2 = |u_{2,4}| \cos(\varphi_2) + |w_{2,4}| \sin(\varphi_2) \quad \text{式 1.3-5}$$

$$V_4 = |u_{2,4}| \cos(\varphi_4) + |w_{2,4}| \sin(\varphi_4) \quad \text{式 1.3-6}$$

$$|u_{2,4}| = \frac{V_2 \cdot \sin \varphi_4 - V_4 \cdot \sin \varphi_2}{\sin \varphi_4 \cdot \cos \varphi_2 - \sin \varphi_2 \cdot \cos \varphi_4} \quad \text{式 1.3-7}$$

ここで、

- V_2 : 南方向の視線風速 (m/s)
- V_4 : 北方向の視線風速 (m/s)
- $u_{2,4}$: 風速の面 p_2p_4 内の水平成分 (m/s)
- $w_{2,4}$: 面 p_2p_4 内で水平風速に直交する成分 (m/s)
- φ_2 : $90^\circ - \theta_0 - \beta$ (°)
- φ_4 : $90^\circ + \theta_0 - \beta$ (°)
- β : 浮体のピッチ角 (°)
- θ_0 : 照射角 (°)

ベクトル p_1 と p_3 で張る平面(面 p_1p_3)内の水平成分($|u_{1,3}|$)も同様にして求めることができる。

次に、風速の水平成分 $|u|$ とその方向 \hat{u} を求める。視線風速計測地点の位置ベクトル p_i を用いて、 $u_{2,4}$ の方向 $\hat{u}_{2,4}$ と $u_{1,3}$ の方向 $\hat{u}_{1,3}$ は、式 1.3-8 と式 1.3-9 のように表される。

$$\hat{u}_{2,4} = \frac{u_{2,4}}{|u_{2,4}|} = \frac{p_2 - p_4}{|p_2 - p_4|} \quad \text{式 1.3-8}$$

$$\hat{u}_{1,3} = \frac{u_{1,3}}{|u_{1,3}|} = \frac{p_1 - p_3}{|p_1 - p_3|} \quad \text{式 1.3-9}$$

ここで、

- $\hat{u}_{2,4}$: $u_{2,4}$ の水平成分の方向
- $u_{2,4}$: 風速の面 p_2p_4 内の水平成分
- \hat{u} : 風速の水平成分の方向
- p_j : 視線風速計測地点 j の位置ベクトル

$u_{2,4}$ と $u_{1,3}$ との間の角度を ψ 、 $u_{2,4}$ と u との間の角度を ψ_u とすると、 ψ と ψ_u は次式のように表すことができる。また、 $u_{2,4}$ と u の関係から、水平風速 $|u|$ とその方向 \hat{u} は式 1.3-12 と式 1.3-13 のように表される。

$$\psi = \arccos(\hat{u}_{2,4} \cdot \hat{u}_{1,3}) \quad \text{式 1.3-10}$$

$$\psi_u = \arctan\left(\frac{|u_{1,3}| - |u_{2,4}| \cos \psi}{|u_{2,4}| \sin \psi}\right) \quad \text{式 1.3-11}$$

$$u = \frac{|u_{2,4}|}{\cos\psi_u} \quad \text{式 1.3-12}$$

$$\hat{u} = \begin{pmatrix} \cos\psi_u & -\sin\psi_u & 0 \\ \sin\psi_u & \cos\psi_u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} u_{2,4} \quad \text{式 1.3-13}$$

ここで、

ψ : $u_{2,4}$ と $u_{1,3}$ との間の角度 (°)

ψ_u : $u_{2,4}$ と u との間の角度 (°)

\hat{u} : 風速の方向成分 (m/s)

u : 水平風速 (m/s)

$|u_{2,4}|$: 風速の面 p_2p_4 内の水平成分 (m/s)

最後に、鉛直風速を算出する。鉛直風速は、各視線風速から算出される鉛直風速の平均値として計算され、式 1.3-14 のように表される。

$$w = \sum_{i=1}^5 \frac{V_i - u_x \hat{p}_{ix} - u_y \hat{p}_{iy}}{\hat{p}_{iz}} \quad \text{式 1.3-14}$$

ここで、

u_x : 水平風速の東西成分 (m/s)

u_y : 水平風速の南北成分 (m/s)

\hat{p}_{ix} : 視線方向の単位ベクトルの東西成分

\hat{p}_{iy} : 視線方向の単位ベクトルの南北成分

\hat{p}_{iz} : 視線方向の単位ベクトルの鉛直成分

p_i : 視線風速計測地点の位置ベクトル

\hat{p}_i : 視線方向の単位ベクトル

となり、 u_x 、 u_y は式 1.3-15により表される。また、視線方向の単位ベクトル \hat{p}_i は式 1.3-16のように表される。

$$(u_x, u_y) = u \quad \text{式 1.3-15}$$

ここで、

u : 水平風速 (m/s)

u_x : 水平風速の東西成分 (m/s)

u_y : 水平風速の南北成分 (m/s)

$$(\hat{p}_{ix}, \hat{p}_{iy}, \hat{p}_{iz}) = \hat{p}_i = \frac{p_i}{|p_i|} \quad \text{式 1.3-16}$$

ここで、

\hat{p}_{ix} , \hat{p}_{iy} , \hat{p}_{iz} : 視線方向の単位ベクトル \hat{p}_i の東西成分、南北成分、鉛直成分

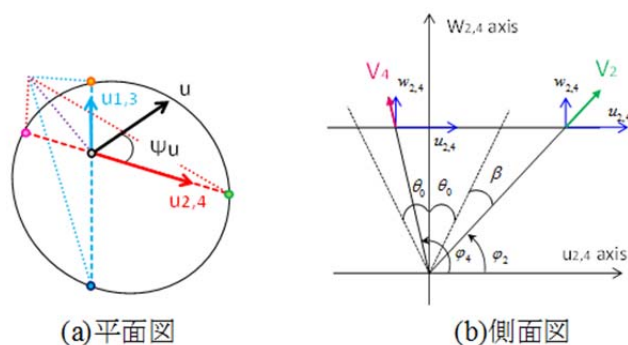


図 1.3-3 傾斜時のレーザー照射状況⁹

3) 速度補正

移動物体上に設置したライダーにより求めた風速には移動速度成分が含まれているため、この移動速度を差し引き、式 1.3-17 により風速成分を求める。

$$u_{true} = u - u_t \quad \text{式 1.3-17}$$

ここで、

- u_{true} : 風速成分 (m/s)
- u : 傾斜補正後のライダー算出風速 (m/s)
- u_t : 移動速度 (m/s)

1.3.3 検証方法と結果

検証は、福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業での観測結果に基づき、1.3.2 の補正手法を用いてシミュレーションと観測値により行われている。

図 1.3-4 の実線は 3 台の RTK-GPS により求めた 2014 年 10 月 6 日 13:30~13:40 の 10 分間 (台風時) の 6 自由度の動揺成分である。ライダー補正手法を検証するために、仮想的な風速場を発生させ、ライダーが動揺していると想定して、ライダーによって計測される視線風速が算定されている。次に、この視線風速から上述の補正手法を用いて風速場を推定し、検証は、この結果を発生させた風速と比較することにより行われている。ライダーの動揺としては、図 1.3-4 の実線に示す台風時の 6 自由度動揺成分を Case1 とし、Case1 の各動揺成分を 3 倍した Case2、6 倍にした Case3 の計 3 ケースが実線と鎖線で描かれている。

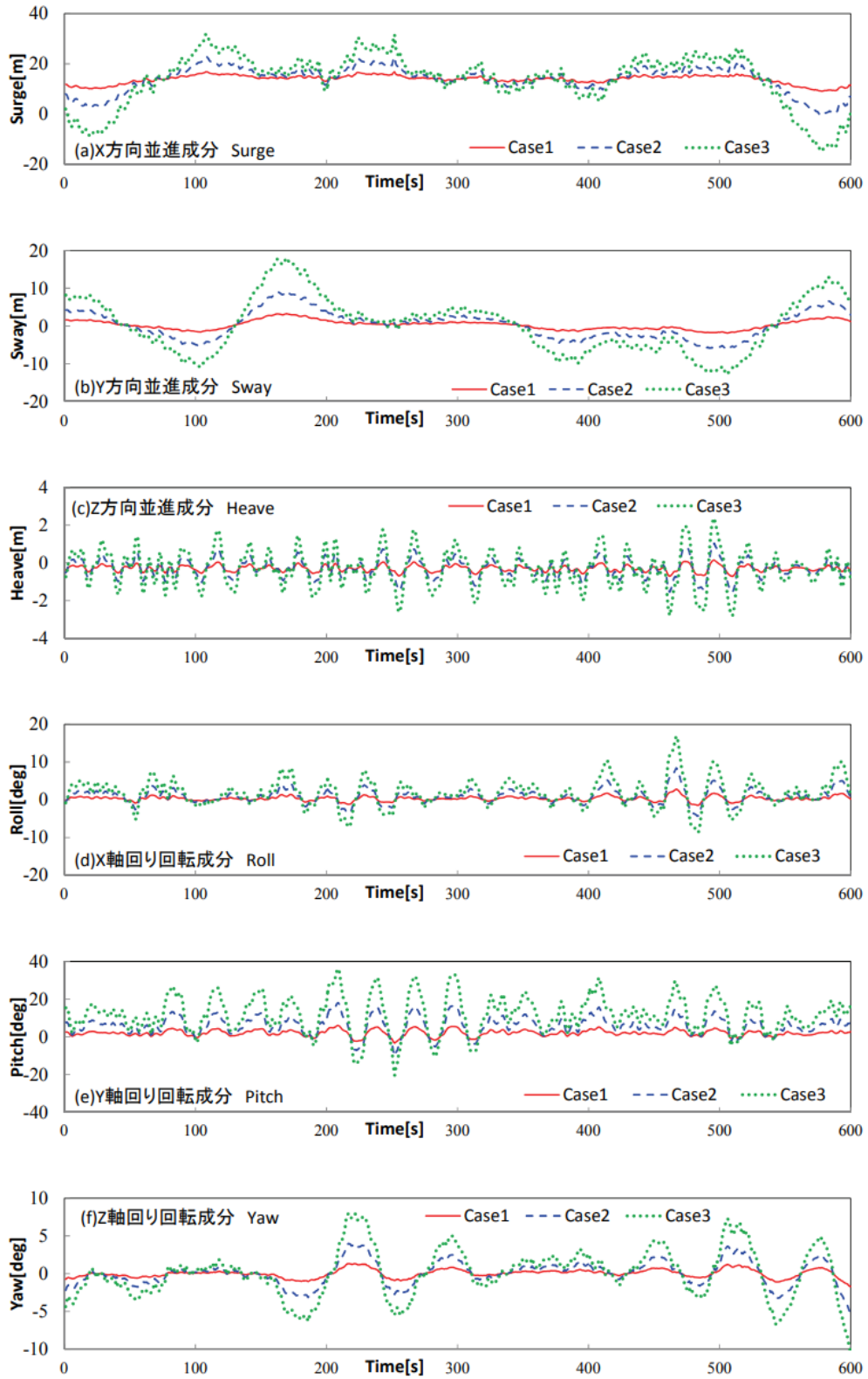


図 1.3-4 シミュレーションに用いた動揺データ⁹

1) シミュレーションによる検証

図 1.3-4 に掲げた各ケースについて、発生させた風速 (True)、動揺がないと仮定した補正なしの風速(raw LIDAR)および補正により6自由度の動揺を考慮して推定した風速(After correction)の10分平均値を図 1.3-5 に示す。補正なしの風速は、動揺が大きくなるほど誤差が大きくなることが分かる。例えば、最大傾斜角が36度のCase3では、水平風速の誤差が1.5%になるが、補正を行うことにより誤差を0.3%まで低減することができている。また、鉛直風速については、ライダーが傾斜することにより、風速の水平成分を鉛直成分として計測してしまうため、過大となっているが、補正によりこの誤差が低減されている。

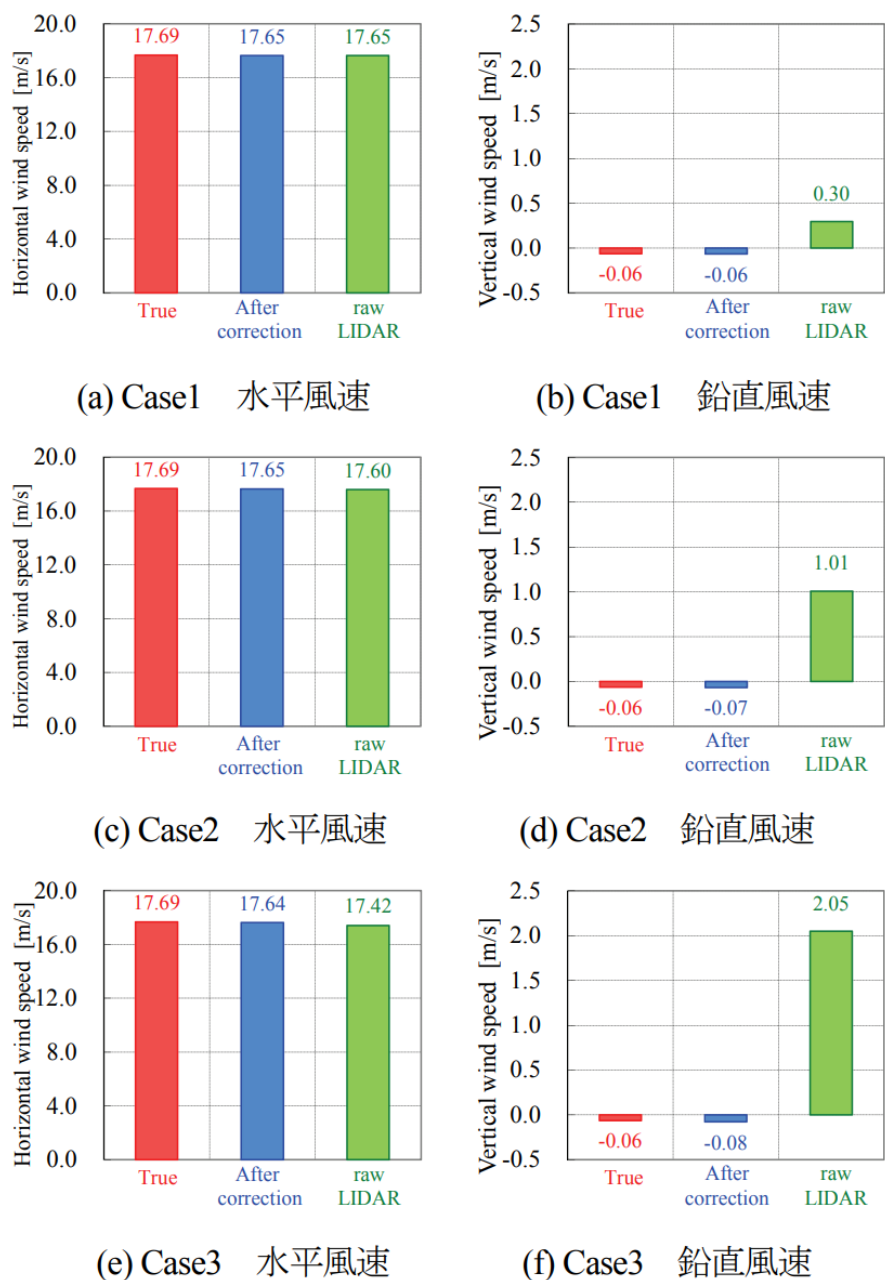


図 1.3-5 10分平均風速のシミュレーションによる検証結果⁹

2) 観測値による検証

検証は、ライダーにより観測された風速を補正し、福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業の三杯式風速計観測値と比較方法がとられている。検証に用いた 10 分間の動揺は 2013 年 5 月 29 日 02:20~02:30 に観測されたものであり、最大動揺角度は 1 度である (図 1.3-6)。

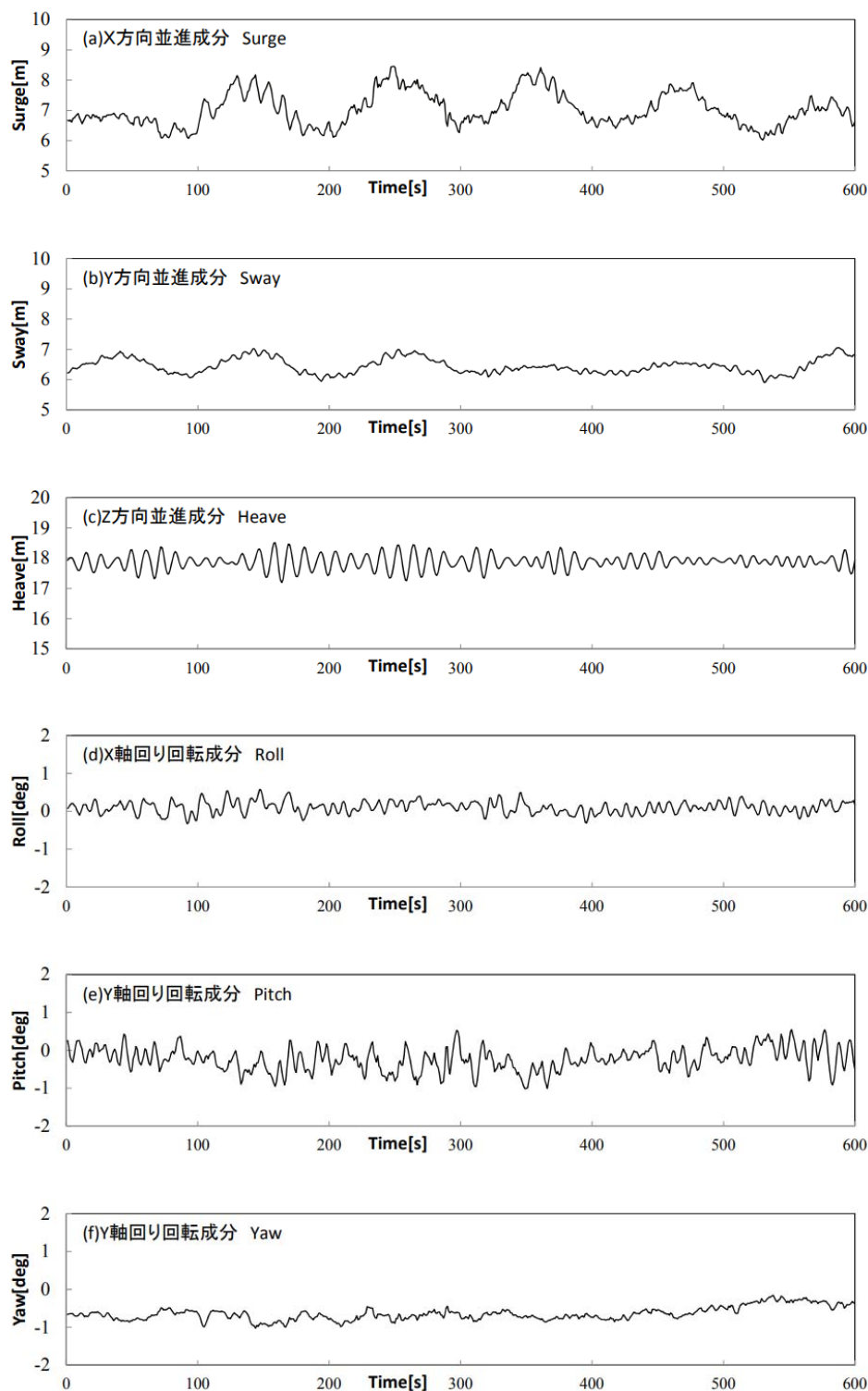


図 1.3-6 動揺に関する観測値 (2013 年 5 月 29 日 02:20 から 02:30) ⁹

図 1.3-7 に三杯式風速計観測結果、補正を行った場合と行わない場合のライダー観測結果の水平風速 10 分間平均風速値を示す。なお、三杯式風速計も浮体に搭載されているため、座標変換による動揺補正済の値となっている。

観測値による検証結果は、シミュレーションと同様の結果となり、動揺補正手法が福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業の福島沖浮体式洋上風況観測タワーの浮体動揺補正に適用できることが示されている。

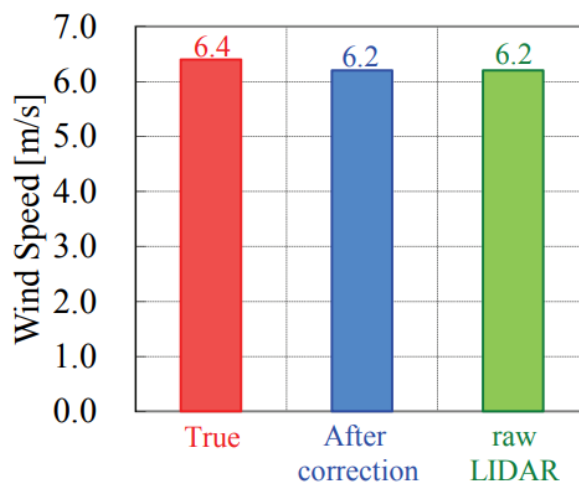


図 1.3-7 水平風 10 分平均風速の観測値による検証結果⁹

1.3.4 GPS と慣性センサを利用した浮体動揺観測システムの開発と検証

若林ら (2014)⁹の報告は、浮体動揺が既知であるとして、動揺時のドップラーライダーの計測原理に基づいて動揺の影響を補正する手法を提案し、数値シミュレーションと実測データにより検証を行っている。

一方で、山口・石原 (2015)¹²は、福島沖浮体式洋上風況観測タワー (図 1.3-8) を対象として、慣性センサ、テライトコンパスおよび RTK-GPS システムを用いて浮体の 6 自由度動揺 (並進 3 成分: サージ・スウェイ・ヒープ、回転 3 成分: ロール・ピッチ・ヨー) を計測し、同定する手法を実測データにより検証している。



図 1.3-8 福島沖浮体式洋上風況観測タワー¹²

1) 浮体動揺の計測

(1) 計測装置

本研究で使用された計測装置の一覧を表 1.3-1 に示す。各センサの特徴は以下の通りである。

表 1.3-1 福島沖浮体式洋上風況観測タワーでの浮体動揺計測装置¹²

センサ	計測項目	サンプリング周波数	装置数
RTK-GPS	緯度・経度・高度・GPS測定モード	1Hz	3
サテライトコンパス	方位角	1Hz	1
ジャイロ	ロール角・ピッチ角・ヨー角	20Hz	1
加速度計	方向加速度3成分	20Hz	1

RTK-GPS センサ

浮体動揺の並進 3 成分・回転 3 成分を計測するために、浮体上の 3 点の変位の計測に、3 台のセンサが使用されている。浮体から 20km 離れた陸上の変電所に設置されている RTK 基準局のデータを参照することにより高精度な絶対変位を計測可能で、測位精度は標準偏差が数 cm 程度である。ただ、衛星の受信状況によっては RTK モードで測位できない場合があり、その場合には測位精度が大幅に低下するため、本研究では欠測として扱っている。

サテライトコンパス

GPS により浮体の方位角を同定するセンサである。ジャイロによって計測されたヨー角は大幅にドリフトするため、ヨー角の同定にはサテライトコンパスが使用されている。

ジャイロ

浮体の回転運動 3 成分を計測することとしているが、ヨー角についてはドリフトが大きくなるため、ロール角とピッチ角のデータのみを用いた。

加速度計

GPS と併用することにより浮体の並進成分を測定するために用いられている。

(2) RTK-GPS による浮体動揺の計測

浮体上の一直線上にない 3 点の変位が捉えられれば、浮体を剛体と仮定することにより、浮体動揺の 6 成分を同定することが可能となる。浮体が動揺していない場合の GPS センサの重心からの位置ベクトルを p_i ($i = 1, 2, 3$)、動揺時の GPS センサの観測値を $p'_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$)、動揺時の浮体重心の変位ベクトルを $x_g(t)$ とすると、浮体重心と各センサ間の距離は同様の前後で変化しないため、式 1.3-18 が成り立つ。

$$|p_i| = |p'_i(t) - x_g(t)| \quad \text{式 1.3-18}$$

ここで、

p_i : 浮体が動揺していない場合の GPS センサの重心

- p'_i : 動揺時の GPS センサの観測値
- x_g : 動揺時の浮体重心の変位ベクトル

この式から浮体重心の変位、すなわち浮体動揺の並進成分を求めることができる。浮体動揺後の GPS センサ観測値 $p'_i(t)$ は、浮体重心の変位 $x_g(t)$ 、浮体動揺の回転行列 $R(t)$ および GPS センサの位置ベクトル p_i を使って、式 1.3-19 のように表され、これを解くことにより、浮体運動の回転成分を求めることができる。

$$p'_i(t) = x_g(t) + R(t) p_i \quad \text{式 1.3-19}$$

ここで、

- $p'_i(t)$: GPS センサ観測値
- $R(t)$: 浮体動揺の回転行列
- p_i : GPS センサの位置ベクトル

この方法により 3 台の GPS センサを用いれば、浮体動揺の全成分を同定することが可能であるが、山口・石原 (2015)¹² は RTK-GPS に必要な二周波対応 GPS センサは高価であることとともに、浮体の大きさが小さい場合には浮体上 3 点の絶対座標から浮体運動の回転運動を求めることは現実的でないとしている。このため、ジャイロなどの慣性センサと 1 台の GPS を組み合わせて浮体動揺を計測することが考えられており、ジャイロセンサによって浮体動揺の回転成分が計測できれば、式 1.3-19 から 1 台の GPS 観測値を用いて浮体重心の変位、すなわち浮体動揺の並進成分が求められている。

しかし、式 1.3-19 を解く上での問題として、以下の 2 点が挙げられている。

- 浮体に対してジャイロセンサを取り付けた角度を正確に知ることができないため、ジャイロセンサの初期値が不明であること。
- 浮体動揺を計測するためには、RTK モードでの GPS 計測の精度が必要であるため、陸上の RTK 基準局との距離が遠く RTK モードで計測できなかった場合には、浮体動揺が計測できないこと。

2) 浮体動揺の補正

(1) 回転成分の補正

浮体の傾斜角を計測するためにジャイロセンサを用いることが多いが、取付面の誤差等が、微小な傾斜角を求める際に問題になることがある。その対策として、長期間の浮体傾斜角の平均値をゼロと仮定して、その平均値をジャイロによる計測値から引くことでピッチ角・ロール角の補正を行うことが試みられている。図 1.3-9 は、平均化時間を変化させ、3 台の GPS から求めた傾斜角を参照値とした場合の誤差の分布図である。

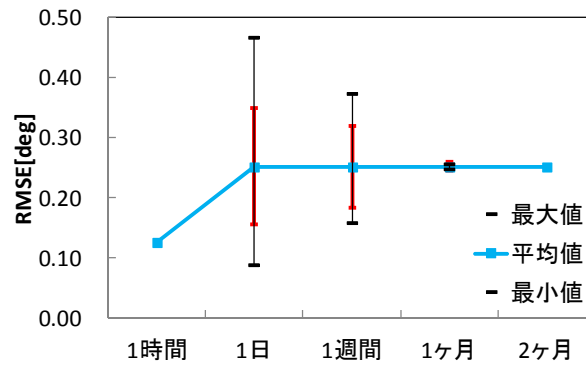


図 1.3-9 平均化時間を変化させた場合の浮体のピッチ角の誤差分布¹²

本図から、平均化時間を1日とした場合にはばらつきが大きいですが、平均化時間を1カ月以上取れば、ばらつきが無視できるほど小さくなることが認められる。図 1.3-10 には平均化時間を1カ月として推定した浮体のピッチ角と、3台の RTK-GPS を用いて求めた浮体のピッチ角（参照値）が比較されている。両者はほぼ一致していることから、本手法の有効性が分かる。

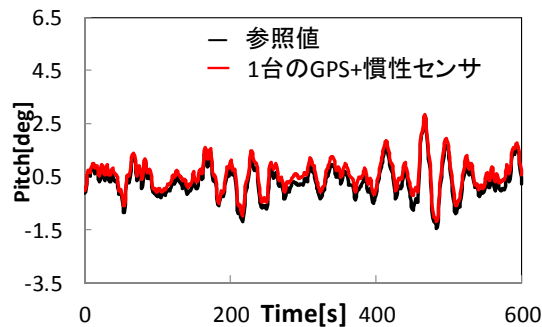


図 1.3-10 浮体のピッチ角¹²

(2) 並進成分の補正

RTK モードが測定できなかった場合、加速度計と RTK-GPS を併用して浮体動揺（並進成分）を計測する手法がある。ここでは、GPS データと加速度計を積分して求めた変位データを周波数空間で合成することにより GPS センサ位置の変位が求められている。なお、表 1.3-1 に示したように、GPS と加速度計ではサンプリング周期が異なっている。しかし、本研究では数十秒周期の浮体動揺を対象とし、加速度計のデータは1秒平均を行い、GPS と同じサンプリングレートに変換して解析されている。

報告書では提案したアルゴリズムの有効性を実証するため、欠測がなかった期間の GPS 観測データを参照値とし、人工的に疑似欠測 GPS データを作成するとともに、加速度データは同時刻の実際の加速度データを浮体の回転運動を考慮して GPS センサの位置に変換したものが用いられている。最初は、加速度データは2階積分して変位が求められたが、疑似計測 GPS の変位のパワースペクトルは小さな値を示すことがあることから GPS 計測値と加速度計の2階積分値のフーリエ変換の実部・虚部それぞれに対して、式 1.3-20 に示すように周波数別の重み付き平均が求められている。

$$R[F_p^{(j)}(f)] = g(f)R[F_{gps}^{(j)}(f)] + [1 - g(f)]R[F_{acc}^{(j)}(f)]$$

式 1.3-20

$$T[F_p^{(j)}(f)] = g(f)T[F_{gps}^{(j)}(f)] + [1 - g(f)]T[F_{acc}^{(j)}(f)]$$

$$g(f) = \begin{cases} 1 & (f \leq f_a) \\ \frac{f - f_b}{f_a - f_b} & (f_a < f \leq f_b) \\ 0 & (f_b < f) \end{cases}$$

式 1.3-21

ここで、

- $F_{gps}^{(j)}(f)$: 時刻 f の時刻歴データのフーリエ変換値
- $F_{acc}^{(j)}(f)$: 時刻 f の加速度データを 2 階積分して求めた変位
- $g(f)$: 式 1.3-21 に示す重み関数
- f_a, f_b : 重み関数の周波数閾値、 $f_a = 0.02(\text{Hz})$ 、 $f_b = 0.09(\text{Hz})$

すなわち、x 方向変位について参照値と加速度積分値との比較結果から、0.02Hz 以下では GPS から求めた変位を用い、0.09Hz 以上では加速度計を積分して求めた変位を用い、その間では両方のデータを重み付けして用いることが提案されている。このようにして求めた $F_p^{(j)}(f)$ をフーリエ逆変換することにより、式 1.3-22 から GPS センサ位置の変位の時刻歴 (式 1.3-23) を求めている。

$$x_p^{(j)}(t) = \mathcal{F}^{-1}[F_p^{(j)}(f)]$$

式 1.3-22

$$\mathbf{x}_p(t) = (x_p^{(1)}(t) \quad x_p^{(2)}(t) \quad x_p^{(3)}(t))^T$$

式 1.3-23

ここで、

- $F_p^{(j)}(f)$: 時刻 f の時刻歴データのフーリエ変換値、加速度データの積分値および両方のデータを重み付けして用いて得られた変位
- $\mathbf{x}_p(t)$: GPS センサーの変位の時刻歴

このようにして求められた GPS センサ位置の変位は、GPS 欠測区間内の平均値が欠測区間の両端の値と極端に異なっている場合に大きな誤差を有する。6 秒から 12 秒の間の GPS データ欠測期間の x 方向の変位の拡大図を図 1.3-11 に示す。N=1 で表される線が上記の方法により求めた変位で、欠測期間全期間にわたって、参照値とのずれが大きくなっている。これを回避するために、GPS 欠測区間の両端における参照値と同定値の差の平均値を GPS 欠測区間内の中点において線形内挿した値に加え、新たにこの点と欠測区間両端の間を線形内挿したものを GPS 観測値とし、再度同じプロセスにより新たな変位が求められている。この過程を 5 回繰り返し、最終的な変位を求めた。図 1.3-11 には n=1 回を含め、5 回までの反復回数の変位を示しているように、推定値と参照値は反復回数が 4 回を超えるとほとんど差がなくなっている。

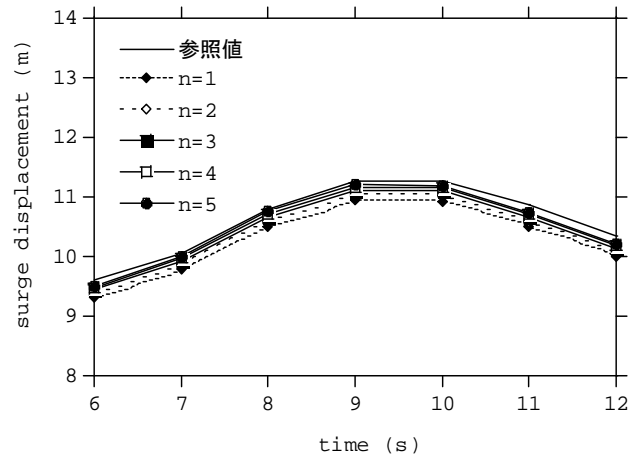


図 1.3-11 GPS 欠測期間における x 方向変位¹²

以上から GPS が欠測する場合には、加速度計による積分と GPS による変位を周波数空間で合成する手法が有効であること、欠測期間両端での誤差は 4 回以上の反復回数による補正で小さくなることが認められている。

【留意事項】

「観測データの信頼性確保」および「欠損なくデータを連続取得する」ための留意事項を取りまとめた。

1. 気象観測

風速計は、観測タワーに取り付けてデータを取得するものの、風向によってはタワーの影響 (Tower Shading) を受けて正確な風速を測定できない^{13, 14}。

図-1は、気流がタワーによってどの程度の影響を受けるかを示したもので、図中の数値は円柱直径の倍数を示す。風が図中のタワー (白丸) の左方向から吹く場合、タワーの風上側と風下側に減速域、側面側に増速域がみられる。例えば 1.02 は円柱の影響により、風速が 2% 増速することを示す。円柱直径の 7 倍程度離れていれば、下流側 (ウェーク領域) を除いて、円柱の影響が 1% 程度以下になることが分かる。また、上流側 45° の方向では円柱の影響がほとんどゼロになることが分かる。

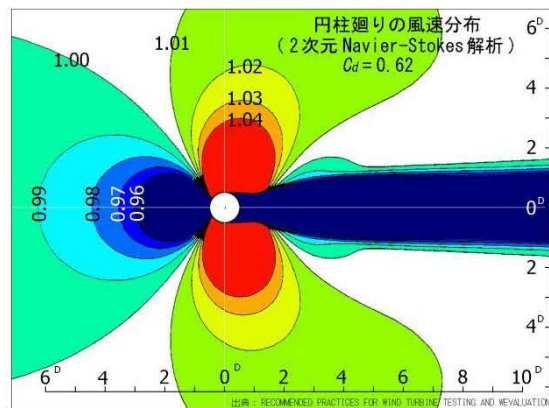


図-1 気流に及ぼすタワーの影響^{13, 15}

図-2は、タワーの風上側中心線上にある風速計について、タワーからの距離と風速の関係を示したもので、縦軸は相対風速 (タワーの影響を受けていない風速に対する距離別風速比)、横軸は円柱直径の倍数 (風速計からタワー中心までの距離/タワー直径) を示す。本図からはタワーから風上側にタワー直径の 3 倍離れた点では相対風速が 0.960 (タワーの影響が 4%)、6 倍離れた点では相対風速が 0.990 (タワーの影響が 1%) となることが分かる。

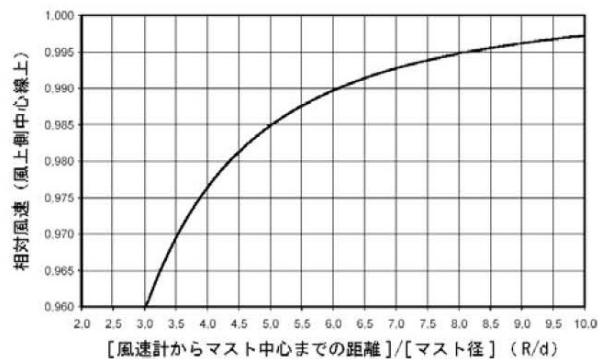


図-2 タワーからの距離と風速の関係^{13, 15}

タワーの風速計取付けブームやその方向は、以上のことを勘案して決定することが望ましい。以下、IEC 61400-12-1¹⁵の他、既往の知見を参考に、適切な風速計の設置に係る留意点を示す。

➤ 観測タワーのブーム

- ・張り出し方向：主風向に対して $\pm 45^\circ$ の方向が理想的である。

出典：谷垣三之介，風況よもやま話—教科書に載っていない風の話あれこれ—

「銚子沖」ブームは三角断面鋼管トラスの各辺から真北から 67.5 度、 187.5 度および 307.5 度の 3 方向に張り出し。

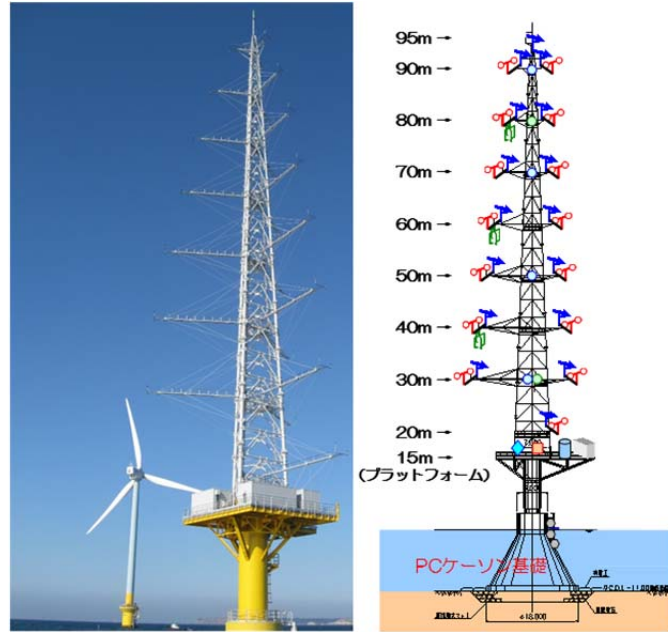


図-3 銚子沖観測タワー（着床式）¹⁶

「北九州市沖」ブームは方形断面鋼管トラスの各辺から 0 度（真北）、 90 度、 180 度および 270 度の 4 方向に張り出し

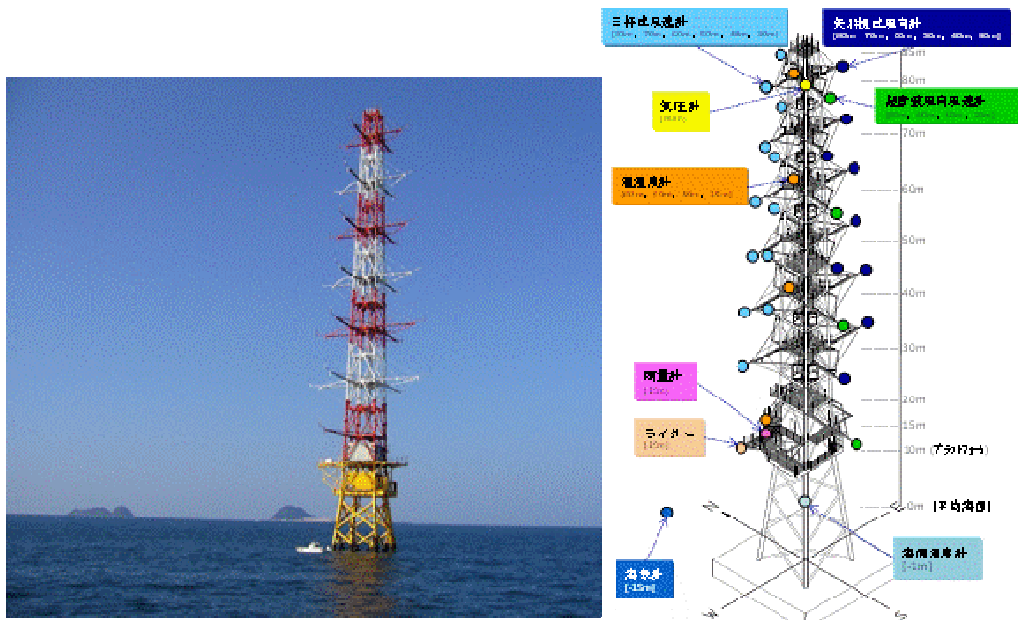


図-4 北九州市沖観測タワー（着床式）（電源開発資料）

「福島沖」ブームは三角断面鋼管トラスの各辺から 120 度間隔で 3 方向に張り出し。

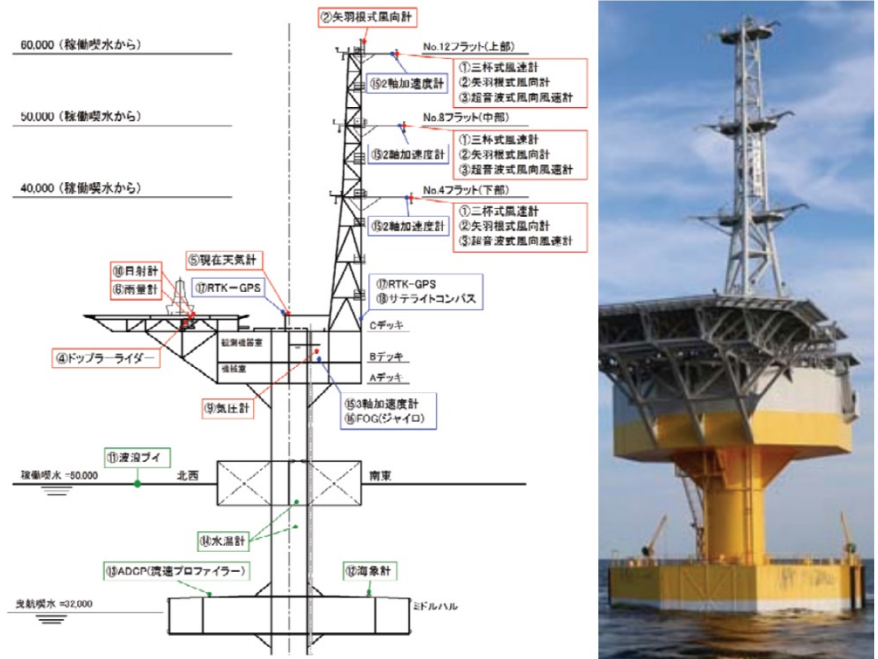


図-5 福島沖浮体式洋上風況観測タワー¹⁰

- ブームからセンサの立ち上がりの長さ：推奨値はブーム長/ブーム径の値が 15 倍以上。

➤ 観測機器

- 1つの観測項目に対して複数種類の観測機器を設置し、観測機器の相互確認を行う。これにより、いずれかの機器に不具合が生じても他の機器で補い、欠損なくデータを連続取得することが可能である（川東ら,2014）¹⁰。
- 参考までに、銚子沖、北九州市沖および福島沖における風況観測機器の設置状況を表-1～表-3に示すように、各観測層において複数種類の観測機器が設置されている。

表-1 観測高度別風況観測機器の設置（銚子沖）

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		
-2～0						
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		

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

表-2 観測高度別風況観測機器の設置（北九州市沖）

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
-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

表-3 観測高度別風況観測機器の設置（福島沖）

稼働喫水からの観測高度(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
Cデッキ							1
40	○	3	○	3	○	3	
50	○	3	○	3	○	3	
60	○	3	○	3	○	3	
頂部			○	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

➤ 観測データの処理

観測データの処理は、観測タワーの影響を考慮してデータを選択する必要がある。

- 銚子沖の場合、図-6 と図-7 に示すように、オランダの Egmond aan Zee 洋上風力発電所におけるデータ処理例を参考に、最上部の各時刻における 10 分間平均風向を決定した上で、風向計・風速計を選択し、データ処理が行われていたが（林田ら,2015）¹⁷、最近、ドイツの FINO3 を参考に風速計の選択方法が見直されている（図-8）。

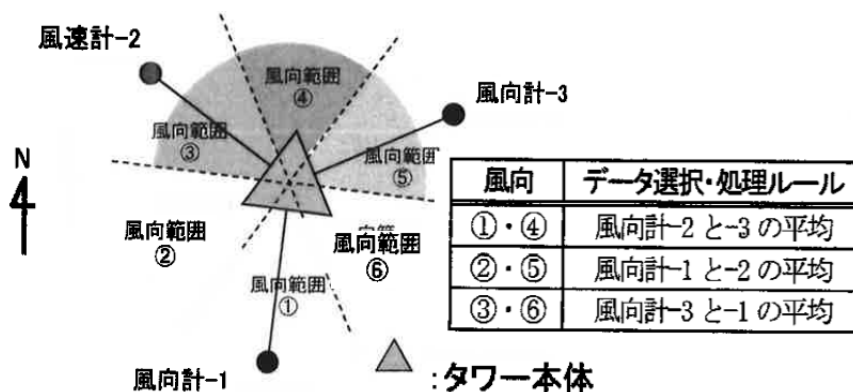


図-6 風向範囲と風向データの選択¹⁷

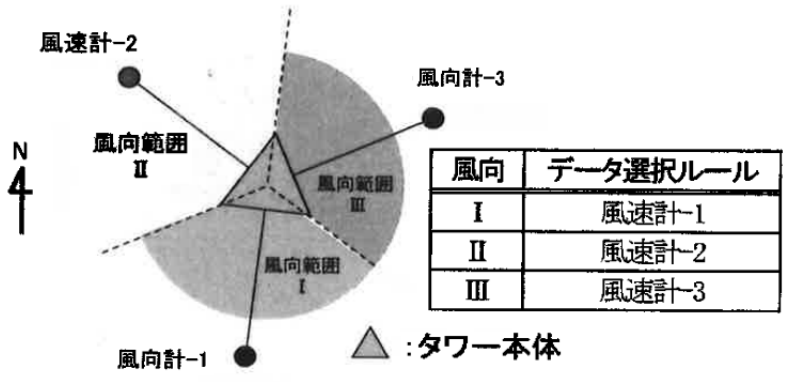


図-7 風向範囲と風速データの選択¹⁷

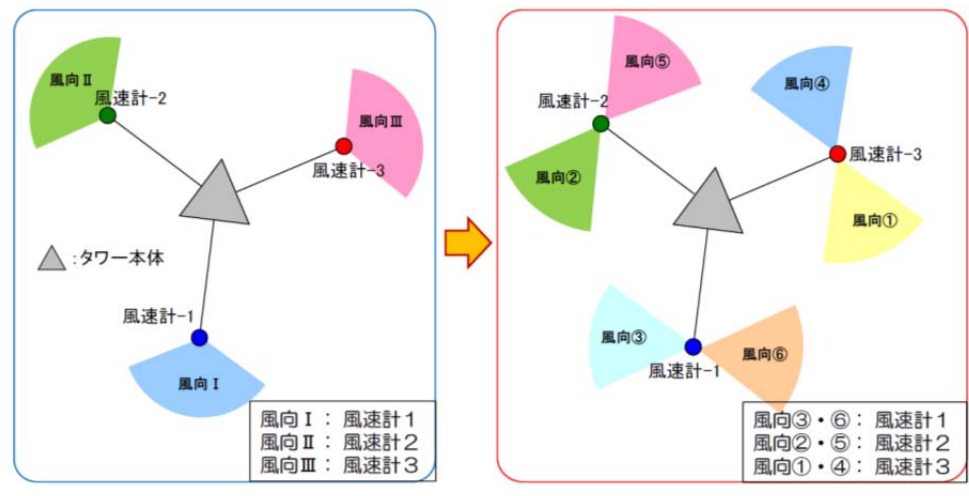


図-8 見直された風向範囲と風速データの選択¹⁶

- 北九州市沖の場合、図-9 に示すように、風向が ENE～SE および WSW～NW では北側の三杯式風速計、風向が SSE～SW および NNW～NE では西側の三杯式風速計のデータを使用して処理している（電源開発,2013）。

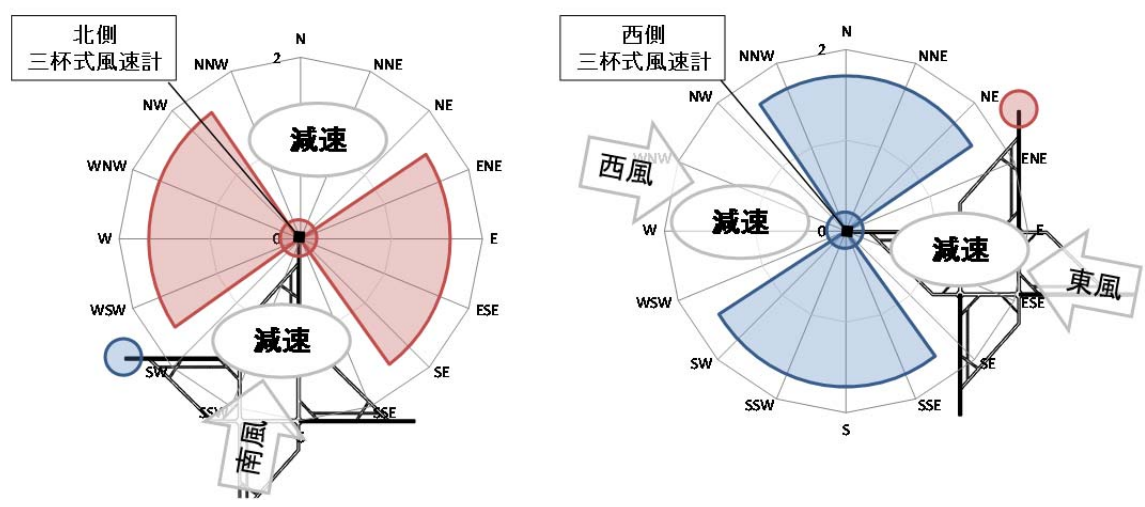


図-9 風向範囲と風速データの選択（電源開発,2015）

2. 海象観測

- 福島沖での実証の福島沖浮体式洋上風況観測タワーにおける超音波式海象計と流速プロファイラー（ADCP）は、機器のメンテナンスが容易なように、浮体施設の最下部（ローハル）よりもミドルハルに設置されている。これは、ミドルハルは曳航喫水まで浮体を浮上させた際に大気中に露出するため、観測機器に直接アクセスしてメンテナンスを行うことができるためである。このように、観測機器の設置位置はメンテナンスの作業性を考慮して決定する必要がある（川東ら,2014）¹⁰。
- 流速プロファイラー（ADCP）は、流れと波の観測が可能であるが、Dataの欠測がある場合には、波高は超音波式海象計により補うことが可能であるため、海象観測機器においても複数種類の観測機器を設置が望ましい。

3. 浮体動揺観測

浮体動揺は、「3台のGPSから求める方法」と「1台のGPSとジャイロ、サテライトコンパスから求める方法」がある。

ただ、GPSによる方法は高価なGPSが3台必要なこと、浮体と陸上基地局の距離が離れている場合には天候の状況によりGPSの欠測が多いことから、後者の「1台のGPSとジャイロ、サテライトコンパスから求める方法」が推奨される。これにより浮体の6自由度動揺（並進3成分:サージ/スウェイ/ヒープと回転3成分:ロール/ピッチ/ヨー）を同定して解析するが、GPSが欠測する場合には加速度計による積分とGPSによる変位を周波数空間で合成することによる方法が有効である（川東ら,2014；山口・石原,2015）^{10, 12}。