



洋上風況観測ガイドブック

2023年3月

はじめに

2018年7月3日に閣議決定された「第5次エネルギー基本計画」においては、風力を将来的に大型電源として活用するために、環境アセスメントの迅速化や、規模要件の見直し等の必要な対策を引き続き行うとともに、FIT制度を活用した競争や効率化の促進等に取り組むとされている。特に洋上風力については、「海域利用のルール整備とともに入札制度を導入することにより、ここ数年間で急速なコスト低減が進んでいる欧州の取り組みも参考にしつつ、地域との共生を図る海域利用のルール整備や系統制約、基地港湾への対応、関連手続きの迅速化と価格入札も組み合わせた洋上風力発電の導入支援策を講じていく」とされており、それを受けて2019年4月1日に「再エネ海域利用法*」が施行された。また、2021年10月22日に閣議決定された「第6次エネルギー基本計画」では、洋上風力発電を「再生可能エネルギー主力電源化の切り札」として推進していくこととしており、今後一層の導入拡大が期待されている。

洋上風力発電所の事業計画の検討においては、事業性を評価するため、精度の高い風況データを取得することが重要である。一方で、洋上での風況観測マストの設置は、一般的に地元との調整、許認可手続きや多大なコストを要するため、国内外でドップラーライダー等のリモートセンシング技術を活用した観測が行なわれている。しかし、現状でのリモートセンシング技術では風速の乱れ成分の観測や沖合での風速の鉛直分布等を観測する手法は未だ確立されていない。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構による「着床式洋上ウィンドファーム開発支援事業（洋上風況調査手法の確立）」は、上述のようなリモートセンシング技術等を活用した、日本の海域における洋上風況の合理的な観測手法を確立するための技術開発等を行い、風況観測実施者が実務的に参照できる情報をガイドブックとして取りまとめることを目的としたものである。

「洋上風況観測ガイドブック」（以下「本ガイドブック」という）は、本事業の成果に基づき、国内外の最新の知見も参考としながら、洋上風力発電所の事業計画及び風車設計に必要な風況観測を実施する実務者に向けた、洋上風況観測の推奨方法（リコメンデドプラクティス）として取りまとめたものである。

本ガイドブックの構成は、以下の構成となる。

第1章で本ガイドブックの位置付け及び基本的な考え方を述べ、洋上風況観測に関する概説をし、第2章は風況観測及び風条件の評価について、以下、第3章は洋上風況観測マストによる観測、第4章はデュアルスキャニングライダーによる洋上観測、第5章はシングルスキャニングライダーによる観測、第6章は鉛直ライダーによる観測、第7章はフローティングライダーシステムによる観測について示し、第8章で観測データ欠測時の補完方法及び精度検証を説明し、第9章でレポート作成するにあたっての記載事項を示す。

* 海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律

洋上風況調査手法の確立に関する技術委員会 委員

委員	所属
本田 明弘 (委員長)	国立大学法人弘前大学 地域戦略研究所 所長 教授
石原 孟	国立大学法人東京大学 大学院工学研究科 社会基盤学専攻 教授
日下 博幸	国立大学法人筑波大学 計算科学研究センター 教授
中村 成人	一般社団法人日本風力発電協会 専務理事
原田 文代	株式会社日本政策投資銀行 常務執行役員

(50 音順、敬称略)

改訂記録

改訂番号	改訂日	改訂箇所	改訂理由
-	2022.06	—	中間報告として公開
-	2022.09	—	着床式洋上ウィンドファーム開発支援事業（洋上風況調査手法の確立）の成果物として作成。
0	2022.03	—	公開用として新規制定
0.1	2022.06	4.3.3	式(4.3)の誤記を修正
		文献	表記方法の統一（内容に変更なし）

目次

1. 概説	1
1.1 適用範囲	1
1.2 各章の位置付け	2
1.3 関連法規、規格類	3
1.3.1 関連法規、省令及びその解釈、解説	3
1.3.2 法規に関連する国内規格・指針	3
1.3.3 技術規格	3
1.3.4 ガイドライン、推奨基準類	4
1.4 用語及び略語	5
2. 風況観測及び風条件の評価	8
2.1 風況観測項目及び評価項目	8
2.2 風況の代表性及び観測地点の選定	11
2.3 観測データの評価	12
3. 洋上風況観測マストによる観測	13
3.1 観測地点の選定	13
3.2 風速及び風向の計測	14
3.3 データ解析	15
4. デュアルスキャニングライダーによる洋上観測	16
4.1 観測地点の選定	16
4.1.1 観測地点の選定	16
4.1.2 装置の設置	17
4.1.3 ハードターゲット調整	17
4.2 風速及び風向の計測	18
4.3 データ解析	19
4.3.1 データ解析の流れ	19
4.3.2 フィルタ処理	20
4.3.3 水平風速と風速標準偏差の算出	20
5. シングルスキャニングライダーによる洋上観測	22
5.1 観測地点の選定	22
5.1.1 観測地点の選定	22
5.1.2 装置の設置	22
5.1.3 ハードターゲット調整	22
5.2 風速及び風向の計測	22
5.3 データ解析	23
5.3.1 データ解析の流れ	23
5.3.2 フィルタ処理	24
5.3.3 水平風速の算出	24

6.	鉛直ライダーによる洋上観測	26
6.1	観測地点の選定	26
6.1.1	観測地点の選定	26
6.1.2	装置の設置	26
6.2	風速及び風向の計測	27
6.3	データ解析	27
7.	フローティングライダーシステムによる洋上観測	29
7.1	観測地点の選定	29
7.1.1	観測地点の選定	29
7.1.2	装置の設置	30
7.2	観測方法	33
7.3	データ解析方法	33
8.	観測データ欠測時の補完及び精度検証	34
8.1	システム稼働率及び有効データ率	34
8.2	観測データ欠測時の補完	34
8.3	精度の KPI 及び許容基準	35
8.3.1	風速及び風向	35
8.3.2	風速の標準偏差	36
8.3.3	風速の標準偏差の補正	37
9.	レポートの作成	38
9.1	設置及び観測レポート	38
9.2	評価レポート	39
9.3	検証レポート	39
	文献	40
	附属書 A. ハードターゲット調整	42
A.1	洋上観測点の近傍にハードターゲットがある場合	42
A.2	ハードターゲットが 3 点ある場合	43
A.3	ハードターゲットが 2 点以下の場合	45
	附属書 B. 事前精度検証	47
B.1	事前精度検証	47
B.2	精度の KPI 及び許容基準	47
B.2.1	風速及び風向	47
B.2.2	風速の標準偏差	47
	附属書 C. データ取得率確認	48
C.3	データ取得率確認	48
	附属書 D. FLS の設置工事の例	49

1. 概説

本ガイドブックでは、満足すべき事項を各節の冒頭の枠内に記載し、枠外には満足すべき事項の補足や解説を記載する形としている。

1.1 適用範囲

本ガイドブックは、洋上風力発電所の計画及び開発に必要な風況観測を対象とする。

洋上風力発電の事業計画では、次に示す目的のために、設置海域の風況特性を把握し、精度の高いサイトの風況観測データを取得することが重要である。

- 事業性の検討
- 風車設計条件の検討
- 電気事業法に基づく工事計画届などの許認可の取得

取得されたサイトの風況観測データは、洋上風力発電のプロジェクトリスクを低減し、事業の利益率向上に必要不可欠である。また、風況観測データは、洋上風力発電所運開後も長期にわたって取得することが推奨される。

洋上風況の計測方法は、カップ形風速計及び矢羽根形風向計に代表される「直接測定」及びライダー等による「間接測定（リモートセンシング）」に区分される。現在、最も高精度で、実証が十分なされており、不確かさの定量化が可能な計測方法は、着床式風況観測マストと言える。しかし、洋上での風況観測マストの設置は、一般的に、地元との調整、許認可手続きや多大なコストを要するため、リモートセンシング機器（RSD）を活用した低コストの観測手法の確立が望まれる。また、浮体式洋上風力発電を想定した水深の深い海域に対して、浮体式風況観測システムによる観測手法の確立も望まれる。

ここでは、現時点において技術的に使用可能と判断される風況観測機器を対象としており、その他の観測機器は、対象外とする。

本ガイドブックは、国内外の洋上風況観測に関する最新研究、ガイドライン、国際規格等を参考としながら、風況観測実施者が実務で参照する資料として位置付けるものである。最新の知見等を踏まえた観測方法として、信頼性かつ経済性の観点から最適な風況観測を行う際の一助となるものを目指してまとめられている。

1.2 各章の位置付け

本ガイドブックの各章の内容及びその位置付けは、表 1.1に示す通りである。

表 1.1 各章の内容及び他の章との関係

章	内容	説明	参照すべき章
2	風況観測及び風条件の評価	・ 風況観測に対する要求事項及び採用する観測手法によらず、風条件の評価として満足すべき事項をまとめる。	3章～7章から選択 8章、9章
3	風況観測マストによる観測	・ 風況観測手法として、観測マストを採用する場合の要求事項をまとめる。 ・ 最も信頼性の高い観測である。 ・ 精度の高い乱流強度の観測が可能。	2章、8章、9章
4	デュアルスキャニングライダー（DSL）による観測	・ 風況観測手法として、間接測定（リモートセンシング）をする DSL（スキャニングライダー：SLを2台使用して観測する手法）を採用する場合の要求事項をまとめる。 ・ 機器を陸上に設置して、洋上観測をすることが可能あるが、観測可能範囲に限られる。 ・ 仰角を閾値以下にすることで、精度の高い乱流強度の観測が可能。	2章、8章、9章、附属書A、B、C
5	シングルスキャニングライダー（SSL）による観測	・ 風況観測手法として、間接測定（リモートセンシング）をする SSL（スキャニングライダー：SLを1台のみ使用して観測する手法）を採用する場合の要求事項をまとめる。 ・ 機器を陸上に設置して、洋上観測をすることが可能あるが、観測可能範囲に限られる。	2章、4章、8章、9章、附属書A、B、C
6	鉛直ライダー（VL）による観測	・ 風況観測手法として間接測定（リモートセンシング）をする VLを採用する場合の要求事項をまとめる。 ・ 洋上観測をするには、固定式または浮体式のプラットフォームの上に設置する必要がある。	2章、8章、9章
7	フローティングライダーシステム（FLS）による観測	・ 風況観測手法として間接測定（リモートセンシング）をする VLを搭載した FLS（浮体ブイなどに搭載した VLを使用して観測する手法）を採用する場合の要求事項をまとめる。 ・ 水深が浅い海域から深い海域まで、設置可能なエリアが広い。	2章、6章、8章、9章、附属書D
8	観測データ欠測時の補完方法及び精度検証	・ 3章～7章のいずれかの観測手法を採用した場合において、観測データの補完を実施する場合の要求事項をまとめる。	2章、3章～7章、9章
9	レポート作成	・ 風況観測及び風条件の評価に係るレポートに記載する内容についてまとめる。	2～8章
A	ハードターゲット調整	・ RSDのハードターゲット調整の方法をまとめる。	4章、5章
B	事前精度検証	・ RSDの事前精度検証の方法をまとめる。	4章、5章
C	データ取得率確認	・ RSDのデータ取得率確認の方法をまとめる。	4章、5章

1.3 関連法規、規格類

1.3.1 関連法規、省令及びその解釈、解説

- ・ 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令（平成9年通商産業省令第53号）
- ・ 電気設備に関する技術基準を定める省令（平成9年通商産業省令第52号）
- ・ 発電用風力設備の技術基準の解釈について（平成26年、経済産業省20140328商局第1号）
- ・ 発電用風力設備の技術基準を定める省令及びその解釈に関する逐条解説（令和3年、経済産業省令和3年6月21日一部改正）
- ・ 港湾法施行規則（昭和26年運輸省令第98号）
- ・ 港湾施設の技術上の基準を定める省令（平成19年国土交通省令第15号）
- ・ 公募対象施設等又はその維持管理の方法の基準に関し必要な事項を定める告示（平成28年国土交通省告示第858号）
- ・ 港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示（平成19年国土交通省告示第395号）
- ・ 海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律施行規則（平成31年経済産業省・国土交通省令第1号）
- ・ 海洋再生可能エネルギー発電設備又はその維持管理の方法の基準に関し必要な事項を定める告示（令和2年国土交通省告示第388号）
- ・ 浮体式洋上風力発電技術基準（令和2年国土交通省海事局安全政策課第194号）

1.3.2 法規に関連する国内規格・指針

- ・ 建築物荷重指針・同解説（2015、(社)日本建築学会）
- ・ 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説（2010、((社)土木学会）
- ・ 建築基礎構造設計指針（2019年、(社)日本建築学会）
- ・ 煙突構造設計指針（2007年、(社)日本建築学会）

1.3.3 技術規格

- ・ JIS C 1400-1:2017 風力発電システムー第1部：設計要件
- ・ IEC 61400-1:2019 Wind energy generation system - Part1: Design requirements
- ・ IEC 61400-3-1:2019 Wind energy generation system - Part3-1: Design requirements for offshore wind turbines
- ・ IEC TS61400-3-2:2019 Wind energy generation system - Part3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines
- ・ JIS C 1400-12-1:2010 風車ー第12-1部：発電用風車の性能試験方法
- ・ IEC 61400-12-1:2017 Wind energy generation system – Part12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines
- ・ IEC 61400-50-1(RFDIS) Wind energy generation system – Part50-1: Application of meteorological mast, nacelle and spinner mounted instruments
- ・ IEC 61400-50-2(TPUB) Wind energy generation system – Part50-2: Application of Ground Mounted Remote Sensing Technology
- ・ IEC 61400-50-3:2022 Wind energy generation system – Part50-3: Use of nacelle-mounted lidars for wind measurements

- ・ IEC 61400-50-4(ACD) Wind energy generation system – Part50-4: Use of floating lidars for wind measurements

1.3.4 ガイドライン、推奨基準類

- ・ MEASNET, Evaluation of site-specific wind conditions, Version 2, April 2016.
- ・ IEA Wind Expert Group Report on Recommended Practices 18. Floating Lidar systems, First Edition, 2017.
- ・ Carbon Trust Offshore Wind Accelerator Roadmap for the Commercial Acceptance of Floating LiDAR Technology, Ver.2.0, 2018.
- ・ Carbon Trust, Remote Wind Measurements Offshore Using Scanning LiDAR Systems, 2014.
- ・ NEDO 着床式洋上風力発電導入ガイドブック、2018.
- ・ NEDO 浮体式洋上風力発電技術ガイドブック、2018.
- ・ 経済産業省 浮体式洋上風力発電導入マニュアル、2019.
- ・ 洋上風力発電施設検討委員会 洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説、2020.
- ・ 国土交通省海事局 浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン、2020.
- ・ 海上保安庁 航路標識の設置及び管理に関するガイドライン、2021.11.
- ・ 日本海事協会 NKRE-GL-WFC01 ウィンドファーム認証 陸上風力発電所編、Edition July 2021.
- ・ 日本海事協会 NKRE-GL-FOWT01 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン、Edition December 2021.

1.4 用語及び略語

本ガイドブックで使用する主な用語および略語の定義をそれぞれ表 1.2 及び表 1.3 に示す。

表 1.2 用語

用語 (和英併記)	定義・説明	慣用語・類似語
ウィンドシア wind shear	風向に対して垂直な面上の風速変化。	ウィンドシア、シア
ウィンドシアべき指数 wind shear exponent	ウィンドシアの指数則（べき法則）の指数。	べき指数、 α
ウィンドシア法則 wind shear law	地上高さに対する風速の変化に対して仮定される数学表現。通常、対数則または指数則が用いられる。	
ウインドプロファイル wind profile	風速の鉛直分布。	風速の高度分布
ウェイク wake	物体の後流に発生する速度欠損を伴う流れの事。風力発電の分野では、発電用風車の後ろに発生する流れを意味する事が多い。風況観測マストが風車後流に入った位置にあると速度の減少や乱れに増加などの影響を受ける。	
エアロゾル aerosol	気体中に浮遊する微小な液体または固体の粒子と周囲の気体の混合体。	
オフセット offset	相関解析の一次式 ($y=ax+b$) のオフセット b	切片
カップ形風速計 cup anemometer	鉛直に支えた回転軸の周りに、半球型または円錐形のカップ（風杯）を3方向あるいは4方向に配置したもの。風が風杯に当たると回転し、回転速度（数）を数えることによって風速を計測する。風力発電の分野では、カップ形風速計による観測方法を基準としている。	
キャリア対雑音比 carrier to noise ratio	光や電気信号のキャリア（搬送波）の品質を示す指標で、CN比とも表記される。キャリアの電力を雑音の電力で割った値で通常 dB 単位で表され、大きいほどよい品質とされる。	
仰角 elevation angle	スキャニングライダーの設置面及びレーザー視線と観測点を結ぶ線のなす角度。	
視線風速 radial velocity	風速のレーザー光射出方向成分。	
周囲乱流強度 ambient turbulence intensity	風速の主風向成分の標準偏差を風速で除した値。	乱れ度
スキャニングライダー scanning LiDAR	空気中のエアロゾルによる反射波のドップラーシフトを計測することにより、風速のレーザー光射出方向成分（視線風速）を計測し、複数方向の視線風速計測結果から水平風速を算定する。スキャニングライダーは、レーザーを水平方向、又は鉛直方向にスキャンして風速を計測する。	
セクターサイズ sector size	風向の方位角をある角度毎に区切った方位（セクター）の角度のこと。	風向ビン幅
ダブルバイアス修正 double bias correction	乱流強度に対する MCP 法で用いられるモデルのひとつ。	
デュアルスキャニングライダー dual scanning LiDAR	スキャニングライダーを2台使用し、2台のレーザーの交差する点における視線風速から風速ベクトルを求める計測システム。高度方向に複数点計測する事もできる。	
ハードターゲット hard target	デュアルスキャニングライダーの2つのレーザーの交点を定めるために用いる物理的な目標物。	
ハブ高さ hub height	風車ロータの受風面中心の地上からの高さ。	ハブ高

用語 (和英併記)	定義・説明	慣用語・類似語
フィルタリング filtering	観測者が、ステータス情報とは別に、視線風速の有効又は無効を判別する解析プロセス。ライダーから出力される視線風速又は CNR の生値から異常値を判別。異常値判定には、10 分間の標準偏差や分位値を利用。	
風況観測マスト meteorological mast	風速、風向を計測するために設置する自立型のマスト。カップ形風速計、矢羽根形風速計等を複数の高度で設置する。機器の設置方法は IEC 61400-12-1 や Measnet のガイドラインを参照。	気象マスト、気象観測マスト、風況観測塔
フローティングライダーシステム floating lidar system	鉛直ライダーを浮体ブイなどに設置したシステム。	
矢羽根形風向計 wind vane	鉛直に支えた回転軸に 2 つの先端にそれぞれ重りと板が配置された水平の棒が取り付けられたもの。風向を計測する機器。	
鉛直ライダー vertical LiDAR	空気中のエアロゾルによる反射波のドップラーシフトを計測することにより、風速のレーザー光射出方向成分(視線風速)を計測し、複数方向の視線風速計測結果から水平風速を算定する。鉛直ライダーはレーザーを鉛直上向きの軸周りに回転させるもの。	
環境条件 environmental condition	風車の挙動に影響を与える可能性がある環境(風、高度、温度、湿度など)の特性。	
気流傾斜角 flow inclination angle	水平に対する気流の傾き。	吹上角、流れの傾き角度
傾き slope	相関解析の一次式 ($y=ax+b$) の傾き a 。	スロープ
検証 verification	客観的証拠を提示することによって、規定された要求事項が満たされていることを確認すること。例えば、メーカーの仕様を満たしていること。	バリフィケーション
校正 calibration	標準測定器の値と対象となる測定器の示す値を比較し、どのくらいかたよりが存在しているのかを決定する作業。	
受風面 swept area	ロータが 1 回転中に描く平面を、風向に対して垂直に投影した面。	
重要評価指標(KPI) key performance indicator	機器の性能を評価するために、その性能の目標の達成度合いを計測、監視するための定量的な指標。	
障害物 obstacles	建物及び樹木のように風を遮蔽し、気流にゆがみを発生させる物体。	
精度 accuracy	計測結果と計測対象の真値との間の一致の度合い。	
大気安定度 atmospheric stability	大気为上層と下層の温度差によって影響を受ける状態の程度。	
地表面粗度 surface roughness	地表面の粗さを意味する。地表面粗度は、I~IV の 4 つに区分されている。	
地表面粗度長 roughness length	鉛直方向の風速プロファイルが、高さに対して対数的に変化すると仮定した場合、平均風速が 0 となる外挿入高さ。	
年平均 annual average	十分な期間にわたって集めた十分な量の測定データセットを平均した値であって、測定対象の期待値を推定できるもの。平均を計算する期間は、季節差などの非定常効果をならすため、1 年単位の整数場合とすることが望ましい。	
年平均風速 annual average wind speed	年平均の定義に従って平均した風速。	
不確かさ uncertainty	合理的に対象量に結び付けられる値のばらつきを特徴付けるパラメータ。	

用語（和英併記）	定義・説明	慣用語・類似語
風速出現頻度分布 wind speed distribution	ある長時間内の風速の分布を記載するのに用いる確率分布関数。よく用いられる関数はレイリー分布関数及びワイブル分布である。	風速階級別頻度分布、風速分布
平均風速 mean wind speed	数秒から数年を変数とする所定期間内で平均化した風速の瞬時値の統計的平均。	
流れモデル flow model	気流の運動を数値的に表すモデル。	風況シミュレーション、風況解析
乱流強度 turbulence intensity	平均風速に対する風速の標準偏差の比。	乱れ度
乱流標準偏差 turbulence standard deviation	風速の主風向成分の標準偏差。	
PPI 観測 Plan-Position-Indicator	仰角を固定し方位角を変えながら扇形スキャンを行う方法。他に RHI (Range Height Indicator) 観測がある。RHI 観測は、方位角を固定し、仰角を変えながらスキャンを行う方法。PPI スキャンは方位角方向に高解像度なサンプルの取得に、RHI スキャンは仰角方向に高解像度なサンプルの取得に使用される。	
ロール角 roll angle	スキャニングライダーを架台に設置するときの南北軸周りの回転角。	
チルト角 tilt angle	スキャニングライダーを架台に設置するときの東西軸周りの回転角。	

表 1.3 略語

略語	定義	用語
CNR	Carrier to Noise Ratio	キャリア対雑音比
DBC	Double Bias Correction	
DBS	Doppler Beam Swinging	
DSL	Dual Scanning LiDAR	
FLS	Floating LiDAR Sytem	
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球測位衛星システム
KPI	Key Performance Indicator	重要性能評価指標
LiDAR	Light Detection and Ranging	ライダー
MM	Met Mast	風況観測マスト
MCP	Measure-Correlate-Predict	MCP (観測-相関-予測) 法
MEASNET	Measuring Network of Wind Energy Institutes	
MSL	Mean Sea Level	平均潮位
OWA	Offshore Wind Accelerator	
PPI	Plan-Position Indicator	水平方向スキャン
RHI	Range Height Indicator	鉛直方向スキャン
RSD	Remote Sensing Device	リモートセンシング機器
SL	Scanning LiDAR	
SSL	Single Scanning LiDAR	
TSL	Triple Scanning LiDAR	
VL	Vertical LiDAR	

2. 風況観測及び風条件の評価

2.1 風況観測項目及び評価項目

洋上風力発電所の計画にあたっては、洋上での観測に基づき発電量の予測及び風車設計に必要な風条件として評価する項目を表 2.1 に示す。洋上風況観測に使用可能な観測機器は、(a) 風況観測マスト (MM) およびデュアルスキャニングライダー (DSL)、(b) シングルスキャニングライダー (SSL)、鉛直ライダー (VL) およびフローティングライダーシステム (FLS) とする。表 2.1 の項目の評価を行うために、洋上での風況観測は、表 2.2 に示す(a)、(b)のいずれか、もしくはこれらを組み合わせて行う。観測データは、連続して収録し、観測データから得られる 10 分間値に基づいた統計値を発電量の予測及び風車設計に必要な風条件の評価用のデータとする。

表 2.1 発電量予測および風車設計に必要な風条件の評価項目

評価項目	説明	使用可能な観測機器※1
平均風速	方位別及び全方位の年平均風速	(a)、(b)
風速出現頻度分布	方位別及び全方位のワイブルパラメータ	(a)、(b)
風向別出現頻度分布	方位別の出現頻度分布	(a)、(b)
乱流強度	方位別及び全方位の周囲乱流強度 (90%分位値)	(a)
ウィンドシアのべき指数	方位別及び全方位のウィンドシアのべき指数	(a)、(b)
気流傾斜角	方位別及び全方位の気流傾斜角	- ※2

※1：現時点において、技術的に使用可能と判断される機器。

※2：洋上の場合は 0 度として差し支えない。

表 2.2 風況観測項目

(a) 風況観測マスト (MM) およびデュアルスキャニングライダー (DSL)

観測項目	統計値	観測点数
風速	平均値、標準偏差	複数高度 (3 高度以上)
風向	平均値	複数高度 (3 高度以上)

(b) シングルスキャニングライダー (SSL)、鉛直ライダー (VL) およびフローティングライダーシステム (FLS)

観測項目	統計値	観測点数
風速	平均値	複数高度 (3 高度以上)
風向	平均値	複数高度 (3 高度以上)

風車の大型化に伴い、高高度の風況観測が必要となってきたが、風況観測マストで高高度観測を実施するのは高コストなどの理由から、リモートセンシング装置 (以下、RSD という) の利用が進んでいる。特に、小型で低コスト化を実現した、レーザーで風計測をするライダーが主流となってきた。ライダーとは、大気中のエアロゾルにレーザーを照射し、その散乱を計測することにより、

風計測を行う技術である。

本ガイドブックにおける RSD は、デュアルスキャニングライダー（DSL）、シングルスキャニングライダー（SSL）、鉛直ライダー（VL）、浮体プラットフォームに VL を搭載したフローティングライダーシステム（FLS）を対象とする。DSL とは、2 台のスキャニングライダーによる観測、SSL とは、1 台のスキャニングライダーによる観測を意味する。

なお、3 台のスキャニングライダーを用いるトリプルスキャニングライダー（TSL）は、3 成分の観測ができるため、原理的に乱流強度の計測が可能であるが、仰角を閾値以下にすることで、2 台でも精度の高い乱流強度の計測（水平面内の 2 成分）が可能のため、本ガイドブックでは、DSL のみ取り扱い、TSL については参考文献の紹介に留める¹⁾。

図 2.1 に、RSD の計測モードの例を示す。PPI 観測は、仰角を固定して、方位角方向にスキャンするモード、RHI 観測は、方位角を固定して、仰角方向にスキャンするモード、固定観測は、仰角及び方位角の両方を固定するモード、DBS 観測は、北、東、南、西に向けてスキャンする鉛直プロファイルモードを示す。

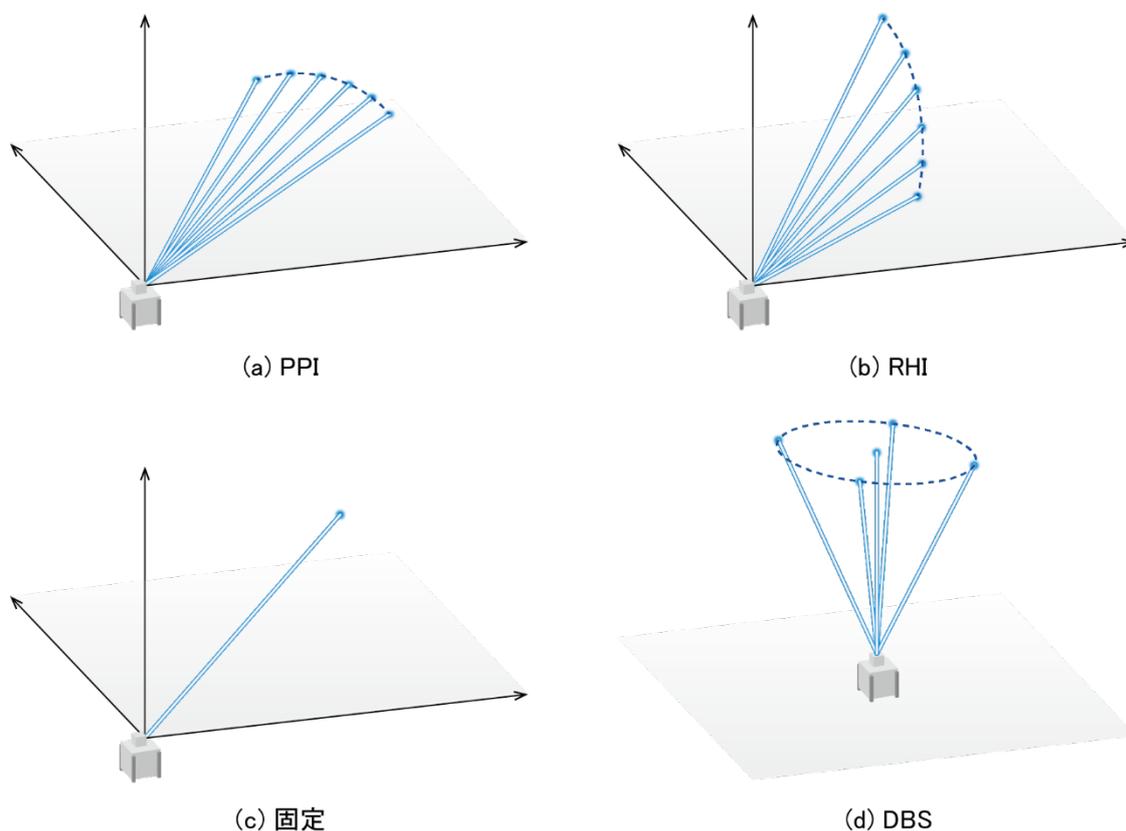


図 2.1 RSD の計測モードの例

現在のところ、風車設計に必要な乱流強度を評価するのに十分な精度の計測をできるのは、風況観測マストに設置されたカップ形風速計及び DSL である。風車設計に必要な乱流強度の評価をする場合、例えば、ハブ高さ 3 分の 2 以上を満足する洋上風況観測マスト、ハブ高さ 3 分の 2 未満の洋上風況観測マスト及びマストのプラットフォームに設置した VL の組合せ、陸上に設置した DSL による洋上観測などが例として挙げられる。

VL による乱流強度の観測については、計測誤差があるため、山口ら²⁾により提案された方法により補正が必要である。

FLS では、鉛直ライダーが持つ乱流強度の誤差に加えて、動揺による影響が加わり、カップ形風速計と比べて計測誤差が大きくなる。この影響を除去するため、動揺補正に関して複数の先行研究が行われている³⁾⁴⁾。しかし、上述の VL と同様の理由で補正が必要である。

SSL による乱流強度の観測も精度に課題がある。

発電量の予測及び風車設計に必要な風条件の評価項目は、表 2.1 に示す通りであるが、併せて、方位別のエネルギー密度分布も含めるのが望ましい。

観測高度は、風車ロータ面におけるウィンドシアを適切に評価するため、3 高度以上とする。

風況観測データの統計量算出の際の不確かさの低減、冗長化（故障時の対策など）、大気安定度の評価などの観点から、観測点数は多い方がよいが、観測機器を増やすことによって消費電力が増加し、観測コストの増加につながるため、ここでは、最低限必要な観測点数を示している。

発電量の予測及び風車設計に必要な風条件の評価では、気温や空気密度も重要となるが、本ガイドブックでは、風況観測のみを対象としている。

表 2.3 に、国内の洋上風況観測マストにおける風況観測項目の事例を示す。すべての観測サイトにおいて風況観測マストに隣接して鉛直ライダーでの観測も実施された。銚子風況観測マストでは、SSL 観測の実証が行われた。本事業では、DSL、SSL 及び FLS による観測の実証が行われている。

表 2.3 国内の洋上風況観測マストでの観測項目の事例

観測項目	NEDO むつ小川原洋上風況観測マスト	NEDO 銚子着床式風況観測マスト	NEDO 北九州着床式風況観測マスト	METI 福島浮体式風況観測マスト
風速	カップ形風速計: - 63m 高 2 方向 - 59m 高 1 方向 - 50m 高 1 方向 - 25m 高 4 方向 超音波風速計: - 61m 高 1 方向	カップ形風速計: - 90m 高 3 方向 - 80m 高 3 方向 - 70m 高 3 方向 - 60m 高 3 方向 - 50m 高 3 方向 - 40m 高 3 方向 - 30m 高 3 方向 - 20m 高 1 方向 超音波風速計: - 80m 高 1 方向 - 60m 高 1 方向 - 40m 高 1 方向	カップ形風速計: - 80m 高 2 方向 - 70m 高 2 方向 - 60m 高 2 方向 - 50m 高 2 方向 - 40m 高 2 方向 - 30m 高 2 方向 超音波風速計: - 80m 高 1 方向 - 60m 高 1 方向 - 40m 高 1 方向 - 20m 高 1 方向	カップ形風速計: - 60m 高 3 方向 - 50m 高 3 方向 - 40m 高 3 方向
風向	矢羽根形風向計: - 61m 高 1 方向 - 50m 高 1 方向 超音波風速計: - 61m 高 1 方向	矢羽根形風向計: - 95m 高 1 方向 - 90m 高 3 方向 - 80m 高 3 方向 - 70m 高 3 方向 - 60m 高 3 方向 - 50m 高 3 方向 - 40m 高 3 方向 - 30m 高 3 方向 - 20m 高 1 方向 超音波風速計: - 80m 高 1 方向 - 60m 高 1 方向 - 40m 高 1 方向	矢羽根形風向計: - 80m 高 1 方向 - 70m 高 2 方向 - 60m 高 1 方向 - 50m 高 2 方向 - 40m 高 1 方向 - 30m 高 2 方向 超音波風速計: - 80m 高 1 方向 - 60m 高 1 方向 - 40m 高 1 方向 - 20m 高 1 方向	矢羽根形風向計: - 頂部 - 60m 高 3 方向 - 50m 高 3 方向 - 40m 高 3 方向

2.2 風況の代表性及び観測地点の選定

洋上風況観測は、計画サイトを代表する一つ以上の洋上地点において、風況観測マストに設置するカップ形風速計及び矢羽根形風向計、または当該地点を観測位置とするリモートセンシング機器（RSD）により行う。観測機器は、事前にその精度検証がされたものを用いる。

洋上風況観測の期間は、年間統計を評価するのに十分な期間であることに加え、季節的な影響を考慮するために1年以上とする。また、発電量の予測及び風車設計に必要な風条件の評価用のデータである10分間値に基づいた統計値を得るための観測高さは、計画する風車のハブ高さの3分の2以上とし、ウィンドシアを適切に評価するため、合計3高度以上での観測を行う。なお、一つの観測地点は当該地点を中心とする10km以内の計画風車を代表することができる。

サイトでの風況観測計画は、風力発電所のすべての風車の発電量及び風条件評価をするのに十分な品質の情報を提供する必要がある。観測機器は、既往の規格（策定中の文書も含む）に準拠して、事前の精度検証が実施されたものを用いる。表2.4に各種観測機器による風況観測のIEC規格を示す。風況観測に関するIEC規格については61400-12シリーズが発行されているが、61400シリーズの文章は再構築された。表2.4において現時点で発行されている文書は、IEC61400-50-3のみである。スキャニングライダーによる事前の精度検証については、既往の該当規格がないため、本ガイドブックに従う。

表 2.4 風況観測に関する IEC 規格

観測機器		固定プラットフォーム	浮体プラットフォーム
風況観測マスト		IEC61400-50-1	—
RSD	鉛直ライダー	IEC61400-50-2 ※2	IEC TS61400-50-4
	ナセル搭載ライダー	IEC61400-50-3	—
	スキャニングライダー	—	—

※2：地上設置のRSDを適用範囲としており、鉛直ライダーに限定はしていない。

風力発電所計画地点の地形的要因、地理的要因、気象要因等の影響因子、すなわち、サイト固有の影響因子の分析に基づいて、風況観測計画（観測機器、高度、位置、センサーの配置等）を行うことを推奨する。

計画風力発電所内の各風車位置の風況を予測する際は風力発電所、風車位置から観測地点までの距離が代表半径以内であれば、許容不確かさの範囲内に収まると仮定する。

RSDを使用する場合には、発電量予測及び風車設計に必要な風条件の評価用のデータである10分間値に基づいた統計値を得るための観測高さを計画風車のハブ高さとするのが望ましい。また、ウィンドシアの評価のために追加する観測高さについては、ハブ高さの上下で計画風車のロータ面内の適切な高さでの観測を行うのが望ましいが、具体的な高さについては、現地観測の状況に応じて設定をする。

代表半径はサイト固有の条件にも大きく依存すると考えられるが、本書では Measnet 等で定められた陸上平坦地形に対する代表半径の値（10km）を洋上にも適用している。ただし、海岸線に近い海域では地表面粗度の変化や沿岸部の地形影響により、風況の空間変化が大きくなるため、代表半径

は 10km よりも小さくなるものと考えられる。従って、計画風力発電所に対して風況観測地点数を検討する際には、これらのことを考慮して決める必要がある。

2.3 観測データの評価

- 1) 発電量の予測及び風車設計に必要な風条件の評価用のデータである 10 分間値に基づいた統計値を得るための風況観測データは、1 年間もしくはその倍数の期間のデータとし、かつその有効データ率は 95%以上とする。
- 2) 観測機器の故障や気象条件等により風況観測データが欠けている期間や異常値となっている期間があり、前 1) の条件を満足できない場合には、観測データを用いて補完を行う。ただし、観測データの補完を実施した場合は、その補完の精度検証をし、補完データの妥当性を示す。

評価項目は、表 2.1 に示した通りである。

補完方法、補完後のデータの精度検証方法、精度検証の Key Performance Indicator（重要性能評価指標。以下、KPI という）及び許容基準の詳細は、8 章に示す。RSD は、風況観測マストに比べて、気象条件の影響を受け、有効データ率が低下する傾向がある。

3. 洋上風況観測マストによる観測

3.1 観測地点の選定

洋上風況観測マストによる観測を行う場合、2.2 項の内容に加えて、以下に示す事項に留意する。

- サイト周辺地域において、地形及び地表面粗度が一様でない場合は、観測地点における計測値は、風車位置とは異なる影響を受ける可能性があることから、観測地点の選定の段階で気流解析を実施するなど、適切な事前検討を行う。
- 運転中の既設風車の近隣で観測を行わなければならない場合、当該風車の後流影響を受けない地点を選択する。

計画サイトの離岸距離が短い場合、沿岸部にある崖や海岸段丘などの地形の影響を受ける可能性がある。このような場合は、代表半径 10km が成立しないことがあるため、気流解析で設置場所の事前検討をするのが望ましい。

JIS C 1400-1:2017 では、隣接する風車の後流影響を検討する際に、風車間の離隔距離が風車のロータ直径の 10 倍以上ある場合は後流影響を考慮しないこととしており、後流影響を考慮する際の離隔距離に関するひとつの指標となっている。ただし、洋上においては、陸上の場合よりも比較的遠い位置においても後流影響を受ける可能性があることから、後流影響を検討する際にはこの点に留意する。

図 3.1 にむつ小川原港の防波堤における洋上風況観測マストの設置地点を参考に示す。

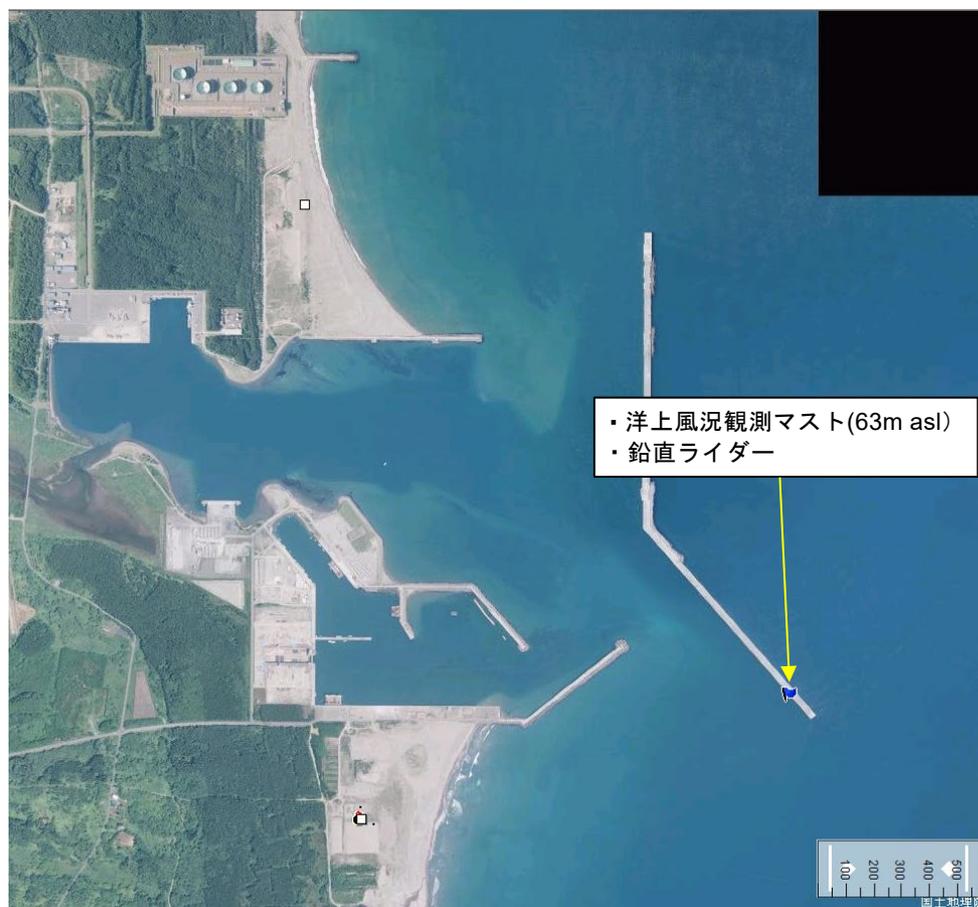


図 3.1 洋上風況観測点の例（むつ小川原港）

3.2 風速及び風向の計測

風速計測は、カップ形風速計もしくはそれと同等の精度が保証された風速計によって行う。カップ形風速計は観測期間の前に校正したものをを用いる。カップ形風速計の校正は、JIS C 1400-12-1:2010 の手順に従って実施されたもの、もしくはそれと同等と認められるものとし、その校正結果をレポートに添付する。

カップ形風速計は、地表面からハブ高さの 2/3 以上の位置に取り付ける。それが難しい場合は、RSD との組み合わせによる計測が必要になるが、その場合であってもカップ形風速計は可能性限り高い位置に取り付ける。サイトの風速鉛直プロファイルを評価するため、最上部風速計からおおよそ 10m の間隔で風速計を 2 個以上追加する。

観測マストへの風速計の取り付けは、風速計が風況観測マスト及びブームからの影響が極力少なくなるように設置する。避雷針は、風速計に影響を及ぼさない位置に設置する。

風速は、10 分間の平均値及び標準偏差を計測する。サンプリング周波数は 1Hz あるいはそれ以上とする。

また、計画サイトが氷点下になる寒冷地においては、風速計の規定の応答特性を維持するように、ヒーターを取り付けるなどの凍結対策を実施する。

風向計測は、矢羽根形風向計によって行う。観測マストへの風向計の取り付けは、風向計が風況観測マスト及びブームからの影響が極力少なくなるように設置する。

風向は、10 分間の平均値を計測する。サンプリング周波数は 1Hz あるいはそれ以上とする。

風速計及び風向計の取り付けは、JIS C 1400-12-1:2010 附属書 G に従って実施するのが望ましい。観測塔頂部の風速計は、校正時と同一外形の鉛直円管に取り付ける。風速計を取り付けるブームの方位は、適切にウィンドシアを評価するため、すべて同方位に設置するのが望ましい。観測塔頂部の風速計のバックアップ用風速計を設置するのが望ましい。バックアップ用風速計は、同じ高度において、別のブームに取り付けるか、4m 以上の離隔距離を確保して、下の高度に設置するとよい。

ブームの取り付けは、円筒マストの場合は主風向から 45°方向、トラス構造の場合には 90°の方向に設置するのが望ましい。観測タワーのウェイク影響が大きい場合は、3 方位以上にブームを設置して観測するのが望ましい。風速計を設置したブームに他の計器を設置するのは避けた方がよい。風向計の設置時は、北マークを正確な方位に向けるため、方位決めが重要である。

寒冷地における風況観測については、IEC61400-12-1:2017 の Annex O Power performance testing in cold climate に従って実施するのが望ましい。

風況観測マストの設置にあたっては、適切に設置場所のサイト外部条件を評価し、風況観測マスト及びその支持構造物、プラットフォーム、架台が、極値風及び極値波高による荷重や風及び波の変動による荷重に対して、構造上安全であることを確認する必要がある。

洋上での風況観測は、陸上と比べて、塩害、波の飛沫、砂の飛散等の影響があり、高い耐候性が求められる。観測センサー、ケーブル類、ロガー、電源システム（燃料電池含む）は十分な防水・防塵・塩害対策（遮蔽、塗装、絶縁強化等）を実施し、障害が発生した際に迅速な対応ができるよう、交換品を用意しておくことが望ましい。

電源システムについては、荒天によるアクセス困難が発生することも想定して、適切な冗長化対策及び非常時対策を適切に行う。

観測期間終了後には、必要に応じて風速計の再校正を実施する。再校正の結果が観測期間開始前

の校正結果と異なっている場合は、マストに設置された他の風速計との比較を行い、違いが出始めた時点の同定を行う。その上で風速計の計測性能が許容不確かさの範囲内に収まっている期間に観測データの評価期間を絞る。再校正を実施しない場合は、代替策として、観測全期間において風速計の性能が劣化していないことを近くに設置した他の風速計と比較することによって確認し、時系列上の顕著な相関変化を評価して検証する。

図 3.1 にむつ小川原港の防波堤における洋上風況観測マストの設置の例を参考に示す。



図 3.2 洋上風況観測マストの例（むつ小川原港）

3.3 データ解析

観測結果の評価は、表 2.2 の項目に従って行う。

解析を行う前に、異常値を除外するフィルタリングを行い、有効データ率を算出する。算出時に適用したデータ除去方法及び基準をレポートに記載する。

風況観測がタワーのウェイク影響を受ける場合は、風向に応じて、解析に使用する風速計及び風向計を適切に選定する。洋上風況観測塔に設置された風速計の選定方法として、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⁵⁾、ドイツの FINO3 の処理例⁶⁾、それらを参考に評価をした銚子沖の処理例などが挙げられる⁷⁾。

4. デュアルスキャニングライダーによる洋上観測

4.1 観測地点の選定

4.1.1 観測地点の選定

観測地点は、風車配置を元に洋上地点において代表半径及びデータ取得率を考慮して決める。
DSL 観測における観測地点は、2 台の SL のレーザー光が交差する点となる。各 SL の設置場所と観測地点との間で構造物や樹木等の障害物が視線に沿って途中にない場所に SL を設置する。

観測高度は、風車ロータ面のウィンドシアを評価するため、合計 3 高度以上での観測を行う。

2 本のレーザーがなす角度は、 30° から 150° の間が望ましく^{8),9)}、 90° が理想的である。

周辺の障害物については、電線、支線、木の枝等の風で揺れて動くものについても、その動作範囲にレーザーが入らないように留意する。図 4.1 に DSL による洋上風況観測点の例（むつ小川原港）を示す。

有効データ率は、計測距離や気象条件に依存するため、機器の性能、現地の過去の気象データ（霧、雨、雪、エアロゾル等）に基づいて、計測距離を決めるのがよい。濃霧、大雪、吹雪、激しい降雨時には、データ取得率が低減する²¹⁾。



図 4.1 DSL による洋上風況観測点の例（むつ小川原港）

4.1.2 装置の設置

設置時に水平度が保持されていることを確認する。また、観測期間中も装置の水平度の保持をする。

僅かなレーザーの仰角のズレが観測高度の大きなズレをもたらすため、装置を設置する架台は、観測期間中、水平が維持されるよう設計を行う必要がある。特に日本においては、地震について現地の状況を考慮する必要がある。

また、装置を架台に設置する際は、装置内部の傾斜計のチルト角とロール角が $\pm 0.02^\circ$ 未満になるよう調整を行い、観測期間中もそれらが保持されていることを確認する。チルト角とロール角の定義は、図 4.2 に示す（機種により、正負が逆の場合がある）。装置が観測期間中にずれないようにしっかりと架台に固定をする。

関係者以外の人及び動物が侵入しないよう、装置及び架台の周辺に柵を設置するのが望ましい。計画サイトが積雪地域の場合は、過去の気象記録を元に、適切な架台高さを設定する。

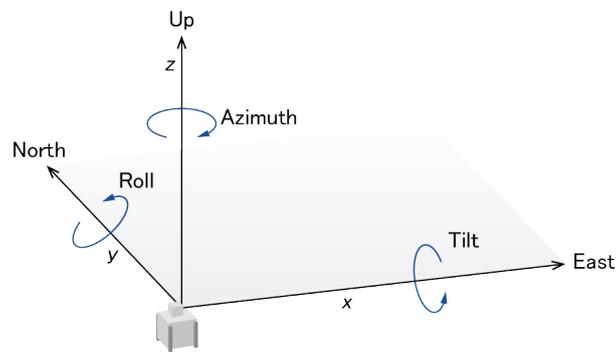


図 4.2 RSD のロール及びチルトの定義

4.1.3 ハードターゲット調整

SL のレーザー照射の方位角及び仰角の設定は、附属書 A の手順に従って実施し、その確認結果をレポートに記載する。

正確な方位角及び仰角設定のため、SL 設置場所及び位置合わせのための固定物（ハードターゲット）の緯度、経度及び高度を GNSS 測量機で計測する。ハードターゲットは、3 地点以上が望ましい。

SL 設置場所からハードターゲットまでの距離は、短すぎると十分な位置精度を保てないため、1km 程度を目安とする。使用する測量機は、十分な計測精度を持つものを選定する。SL のレーザー光が固定物に当たると、そこから強い CNR（キャリア対雑音比）値が観測される。SL で出力しているハードターゲットの方位角及び仰角と実際の SL 設置場所から見たハードターゲットの方位角及び仰角（真値）とのズレを確認することで SL の方位角及び仰角設定値に加えるオフセット値が計算できる。これをハードターゲット調整という。

4.2 風速及び風向の計測

風速及び風向計測は、事前精度検証及びデータ取得率確認したものを用いる。事前精度検証は、附属書 B の手順に従って実施し、その検証結果をレポートに添付する。データ取得率確認は、附属書 C の手順に従って実施し、その確認結果をレポートに添付する。観測期間終了後、その観測精度が維持されたことを確認する。

観測高度は、風車ロータ面のウィンドシアを評価するため、ハブ高さ、ロータ上端高さ及びロータ下端高さの近傍の 3 点で観測を行うよう仰角の設定をする。観測高度（又は仰角）の切り替え時間の間隔は、精度及び有効データ率を考慮して設定する。2 台の SL が同時に同一観測高度を観測するように時刻同期をする。

風速は、10 分間の平均値及び標準偏差を計測する。SL の視線風速のサンプリング周波数は 1Hz 程度あるいはそれ以上とする。

また、計画サイトが氷点下になる寒冷地においては、積雪・凍結対策を実施する。

DSL による観測の仰角は、 5° 以内が望ましい。観測距離、計画風車のハブ高さ、ロータ上端高さ、ロータ下端高さを考慮して、観測高度を設定する。

データ取得率と観測精度は、観測設定に依存するため、計画サイトにおける観測と事前精度検証における観測の設定（レンジゲート、積分時間、観測高度の切り替え時間）は、同じとする。事前精度検証と計画サイトにおける観測距離、2 本のレーザーがなす角度が著しく異なる場合は、検証時の精度が保証されない可能性がある。

現在のところ、SL の標準的な積雪・凍結対策（ワイパー動作設定、ワイパーのウォッシャー液の濃度等）だけでは十分な効果が得られない場合があり、今後の解決策が望まれる。定期的にモニタリングを行い、対処的な処置を実施し、冬季に長期間の欠測が生じないようにする。

4.3 データ解析

4.3.1 データ解析の流れ

観測結果の評価は、表 2.1 における風速及び風向に関連する項目に従って行う。

各 SL の視線風速から、10 分間平均の水平風速、風向及び風速標準偏差を算出する手順を明示する。手順には、フィルタ処理も含める。

データ解析手順の例を図 4.3 に示す。フィルタ処理が複数ある場合は、その順番が分かるように明示する。

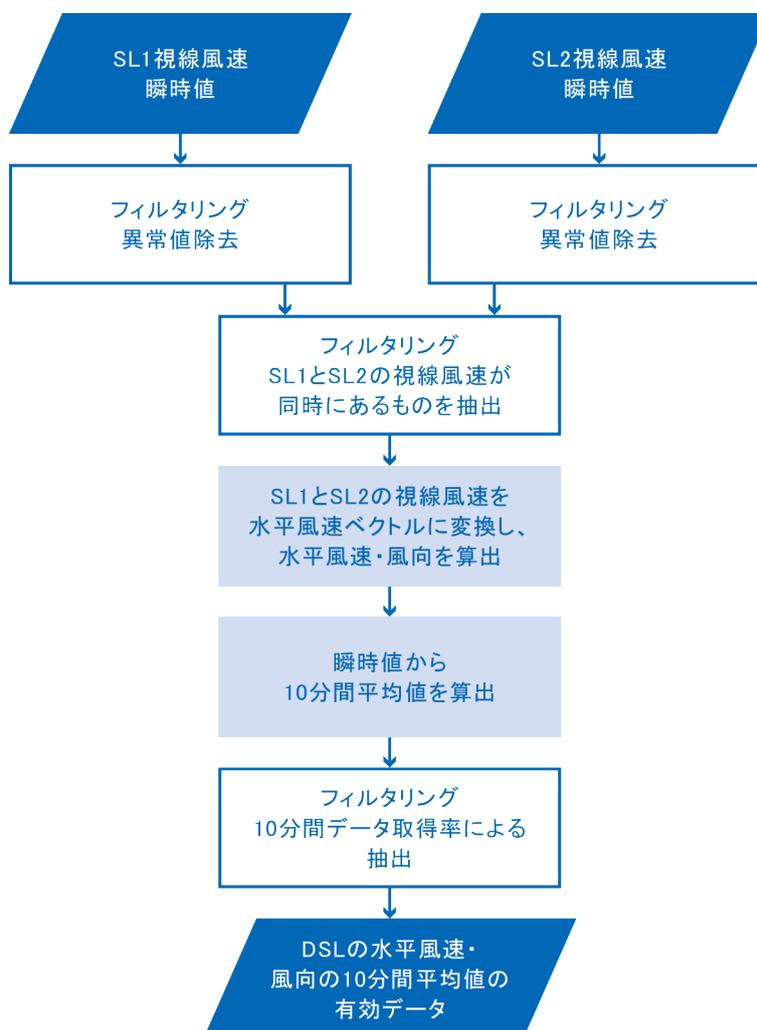


図 4.3 データ解析手順のフローチャートの例

4.3.2 フィルタ処理

10 分間平均の水平風速、風向及び風速の標準偏差を算出するため、異常値を取り除くフィルタ処理を行う。

機器が異常状態の時のデータ、閾値を超える CNR 値の時のデータ、2 台の視線風速が同時にない時のデータ、視線風速の瞬時値が 3σ を超える場合、10 分間データ取得率が閾値に満たない時のデータを観測データセットから除外する。ここで、10 分間データ取得率とは、10 分間中の最大データ数に対する有効なデータ数の比である。10 分間データ取得率は、風速、風向及び風速の標準偏差が十分な精度となるよう、観測高度の切り替え時間の間隔を考慮し、閾値を設定する。

必要に応じて、追加のフィルタ処理を実施してもよい。

フィルタ処理後の有効データ率を算出する。実施したフィルタ処理は、レポートに記載する。

異常値及び信頼性が低いデータを取り除くフィルタには、上記に加えて、視線風速の分位値、10 分間における最大値と平均の差を用いる方法などが挙げられる^{10)・16)}。

3σ フィルタは品質管理における異常値の除去方法として一般的であり、視線風速の瞬時値が 10 分間平均値または中央値から 3σ を超える場合、除外をする¹³⁾。

また、10 分間データ取得率の閾値を 10%以上（1 秒サンプリングの有効データ数が 60 個以上）とし、観測高度の切り替え時間の間隔を 10～20 秒とした場合、高い計測精度が達成されることが報告されている¹³⁾。

4.3.3 水平風速と風速標準偏差の算出

各 SL の視線風速から、水平風速と風速標準偏差を算出する。

視線風速 Vr と風速の水平成分 u, v 及び鉛直成分 w の関係は、方位角 ϕ 及び仰角 θ を用いて式 (4.1) で表現できる。

$$Vr = u \sin \phi \cos \theta + v \cos \phi \cos \theta + w \sin \theta \quad (4.1)$$

ここで、視線風速、方位角及び仰角の定義は図 4.4 に示す。SL2 台の視線風速から風速の水平成分 u, v の算出は、式(4.1)の右辺第 3 項を省略することにより、以下の式(4.2)及び(4.3)を用いて求めてもよい⁹⁾。

$$u = \frac{Vr_1 \cos \phi_2 \cos \theta_2 - Vr_2 \cos \phi_1 \cos \theta_1}{\cos \theta_1 \cos \theta_2 (\sin \phi_1 \cos \phi_2 - \sin \phi_2 \cos \phi_1)} \quad (4.2)$$

$$v = \frac{Vr_2 \sin \phi_1 \cos \theta_1 - Vr_1 \sin \phi_2 \cos \theta_2}{\cos \theta_1 \cos \theta_2 (\sin \phi_1 \cos \phi_2 - \sin \phi_2 \cos \phi_1)} \quad (4.3)$$

ここで、下付きの添え字は、それぞれスキヤングライダ－1 台目及び 2 台目からの出力を意味する。

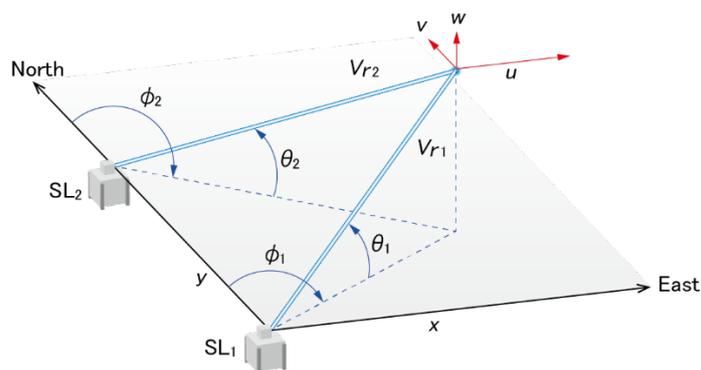


図 4.4 視線風速と風速の水平成分及び鉛直成分の関係

風速の水平成分からスカラー風速 U 及び風向 α の算出は、式 (4.4) 及び式 (4.5) で計算できる。

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.4)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{u}{v}\right) + \alpha_0$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} +180; & \text{for } \arctan\left(\frac{u}{v}\right) < 180 \\ -180; & \text{for } \arctan\left(\frac{u}{v}\right) > 180 \end{cases} \quad (4.5)$$

得られたスカラー風速及び風向の瞬時値から、平均水平風速、平均水平風向、風速標準偏差の 10 分間値を算出する。なお、レンジゲートの長さにより、風速標準偏差が過小評価される可能性^{17),18)}があり、その場合は 8.3.3 に従い、補正を行う。

5. シングルスキヤニングライダーによる洋上観測

5.1 観測地点の選定

5.1.1 観測地点の選定

観測地点は、風車配置を元に洋上地点において代表半径及びデータ取得率を考慮して決める。
 SSL 観測における観測地点は、計測方位セクターの中心となる。
 SL の設置場所と観測地点との間で構造物や樹木等の障害物が視線に沿って途中にない場所に SL を設置する。
 計測方位セクターは、計画サイトの風向出現頻度分布、風速の一様性を考慮して、決定する。

観測高度は、風車ロータ面のウィンドシアを評価するため、合計 3 高度以上での観測を行う。

計測方位セクター（スキヤンする円弧範囲）のサイズは、 30° から 60° が望ましい¹⁰⁾。

レーザー照射方向に直交する方向の風の測定誤差が大きいため、レーザーの照射方向が主風向に直交しない設置場所を選定するのが望ましい。レーザーの照射方向は、主風向直交方向 $\pm 15^{\circ}$ を避けた方が望ましい。

SSL による PPI 観測は、計測方位セクターにおける風速の一様性を仮定するため、地形や地表面粗度変化が極力小さい観測セクターとなるように設置場所を選定する。

その他の推奨事項は、4.1.1 と同様である。

5.1.2 装置の設置

4.1.2 を参照のこと。

5.1.3 ハードターゲット調整

4.1.3 を参照のこと。

計測セクター面のチルト角とロール角を推定するには、2 点以上のハードターゲットが必要となる。

SSL による PPI 観測では、計測セクター面のチルト角とロール角が分かれば、傾斜の小さい方位を計測に利用する又は解析での高度補正を考慮することができる。

5.2 風速及び風向の計測

4.2 を参照のこと。

計測方位セクターのサイズ及びスキヤン速度は、精度及び有効データ率の要件を満たすよう設定する。

SSL による観測は、仰角を固定した状態で方位角を徐々に変化させる PPI モードを用いることにより、風速及び風向の観測をすることができる。

計画サイトにおける観測と精度検証における観測条件（観測距離、計測方位セクターのサイズ、風

速分布) は、なるべく同じであることが望ましい。特に、精度検証条件と計画サイトにおける観測距離や風速分布(風速の一様性)が著しく異なる場合は、検証時の精度が保証されない可能性がある。

現在のところ、SLの標準的な積雪・凍結対策(ワイパー動作設定、ワイパーのウォッシャー液の濃度等)だけでは十分な効果が得られない場合があり、今後の解決策が望まれる。定期的にモニタリングを行い、対処的な処置を実施し、冬季に長期間の欠測が生じないようにする。

5.3 データ解析

5.3.1 データ解析の流れ

観測結果の評価は、表 2.1 における風速及び風向に関連する項目に従って行う。

SLの視線風速から、10分間平均の水平風速、風向を算出する手順を明示する。手順には、フィルタ処理も含める。

データ解析手順の例を図 5.1 に示す。フィルタ処理が複数ある場合は、その順番が分かるように明示する。

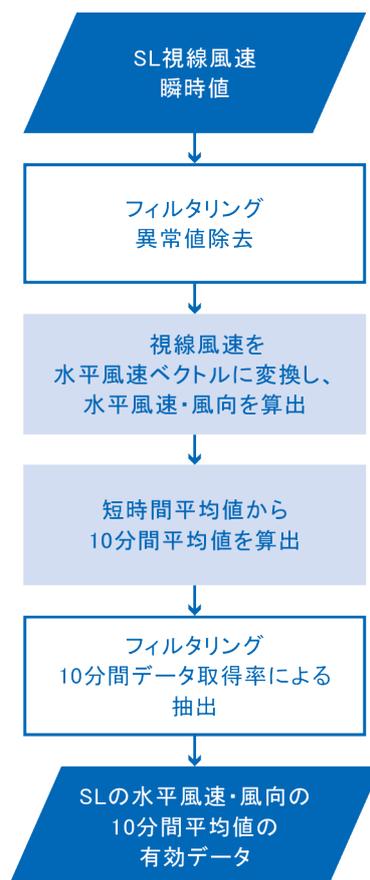


図 5.1 データ解析手順のフローチャートの例

5.3.2 フィルタ処理

4.3.2 を参照のこと。ただし、2 台の視線風速が同時にない時のデータの除外に関する事項は不要である。

10 分間データ取得率の閾値を 10%以上とし、式 (5.5) に入力する視線風速のデータ個数は 4 個以上とした場合、十分な計測精度が達成されることが報告されている²²⁾。

5.3.3 水平風速の算出

SL の視線風速から、水平風速を算出する。

視線風速 Vr から風速の水平成分 u, v の算出は、PPI により求めてもよい²²⁾。DSL 観測の場合と同様に、視線風速と風速の水平成分及び鉛直成分の関係は方位角 ϕ 及び仰角 θ を用いて表すことができる。算出式には、Velocity Volume Processing (VVP) や Velocity Azimuth Processing (VAP) などがある¹⁰⁾。ここでは、VVP の例を示す。

$$Vr = u \sin \phi \cos \theta + v \cos \phi \cos \theta + w \sin \theta \quad (5.1)$$

ここで、右辺第 3 項を省略すると式 (5.1) は、

$$Vr = u \sin \phi \cos \theta + v \cos \phi \cos \theta \quad (5.2)$$

となる。PPI スキャン 1 回分から得られる複数組の視線風速及び方位角の観測値から、最小二乗法により風速の水平成分 u, v を算出することできる。具体的には推定誤差の二乗和を

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \{Vr'_i - (u \sin \phi + v \cos \phi)\}^2 \quad (5.3)$$

として、

$$\frac{\partial J}{\partial u} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial v} = 0 \quad (5.4)$$

の条件を与えると、 u 及び v は

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{\sum \sin^2 \phi \cos^2 \theta - (\sum \cos \phi \cdot \sin \phi)^2} \begin{bmatrix} \sum \cos^2 \phi & -\sum \cos \phi \cdot \sin \phi \\ -\sum \cos \phi \cdot \sin \phi & \sum \sin^2 \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum \sin \phi \cdot Vr' \\ \sum \cos \phi \cdot Vr' \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

となる。ここで Vr' は $Vr/\cos \theta$ である。風速の水平成分からスカラー風速 U 及び風向 α の算出は、前章と同様、式 (4.4) 及び式 (4.5) を用いる。

得られたスカラー風速及び風向の短時間の平均値（例えば、毎秒 3° の 45° 水平方向スキャンの場合は 15 秒平均値）から、平均水平風速、平均水平風向の 10 分間値を算出する。

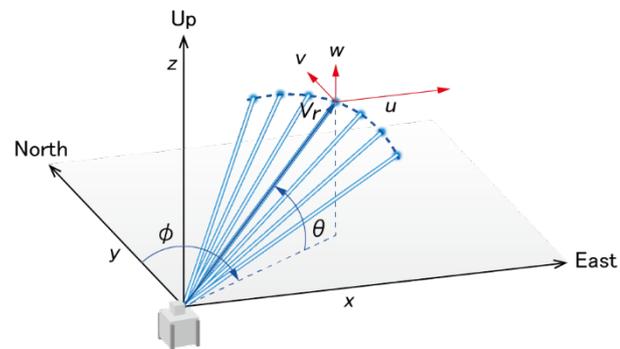


図 5.2 視線風速と風速の水平成分及び鉛直成分の関係

6. 鉛直ライダーによる洋上観測

6.1 観測地点の選定

6.1.1 観測地点の選定

観測地点は、風車配置を元に代表半径を考慮して選定する。風況観測マストと同時観測をする場合、風況観測マストに隣接した場所に設置する。

VLによる観測は、IEC 61400-12-1:2017 Annex L The application of remote sensing technology に従って実施するのが望ましい。レーザーが障害物に当たらないように設置する。

風況観測マストとの距離が離れるほど、両者の風速及び風向の相関性は低下する。

6.1.2 装置の設置

4.1.2 を参照のこと。

VLの設置は、IEC 61400-12-1:2017 Annex L に従って実施するのが望ましい。VLの設置時は、北マークを正確な方位に向けるため、方位決めが重要である。北マークを北以外の方位に合わせて設置する場合は、正確なオフセット値を測定する。また、装置を架台に設置する際は、装置内部の傾斜計のロール角とチルト角が $\pm 0.2^\circ$ 未満になるよう調整を行い、観測期間中もそれらが維持されていることを確認する。チルト角とロール角の定義は、図 4.2 と同様である。装置が観測期間中にずれないようにしっかりと架台に固定をする。

関係者以外の人及び動物が侵入しないよう、装置及び架台の周辺に柵を設置するのが望ましい。

計画サイトが積雪地域の場合は、過去の気象記録を元に、適切な架台高さを設定する。

鉛直ライダーを洋上風況観測マストのプラットフォームに設置するにあたっては、サイト外部条件を評価し、装置や電源システムが高波や砕波の直撃を受けないようにする。洋上での風況観測は、陸上と比べて、塩害、波の飛沫、砂の飛散等の影響があり、高い耐候性が求められる。観測センサー、ケーブル類、ロガー、電源システム（燃料電池含む）は十分な防水・防塵・塩害対策（遮蔽、塗装、絶縁強化等）を実施し、障害が発生した際に迅速な対応ができるようにしておくことが望ましい。

電源システムについては、荒天によるアクセス困難が発生することも想定して、適切な冗長化対策及び非常時対策を適切に行う。

6.2 風速及び風向の計測

風速及び風向計測は、事前精度検証したものをを用いる。VL の事前精度検証は、IEC61400-12-1:2017 の手順に従って実施されたもの、もしくはそれと同等と認められるものとし、その検証結果をレポートに添付する。観測期間終了後、その観測精度が維持されたことを確認する。

観測高度は、風車ロータ面のウィンドシアを評価するため、ハブ高さ、ロータ上端高さ及びロータ下端高さの近傍の3点を含む複数高度で観測を行うよう設定をする。

風速は、10分間の平均値を計測する。

また、計画サイトが氷点下になる寒冷地においては、積雪・凍結対策を実施する。

VL は、風況観測マストの観測高度、計画風車のハブ高さ及びロータ直径を考慮して、観測高度を設定する。

VL と風況観測マストとを組み合わせることにより、ハブ高さでの観測データとして扱い、サイト風条件算定のための気流解析の入力データとする場合は、カップ形風速計及び矢羽根形風向計と同等の補完後の有効データ率の要件を満たす必要がある。

また、計画サイトが氷点下になる寒冷地においては、ヒーターの取り付け、冬季用ワイパーの設置、適切なワイパー動作設定、ワイパーのウォッシャー液の濃度調整などの凍結対策を実施する。

VL による乱流強度の観測については、計測誤差があるため、山口ら²⁾により提案された方法により補正が必要である。

6.3 データ解析

観測結果の評価は、表 2.1 における風速及び風向に関連する項目に従って行う。

解析を行う前に、異常値を除外するフィルタリングを行い、有効データ率を算出する。算出時に適用したデータ除去方法及び基準をレポートに記載する。

VL の視線風速から水平風速を算出する方法は、DBS 法や VAD 法などがある。ここでは、DBS 法による北、南、東、西方向の視線風速から水平風速成分 u, v を算出する式を示す。併せて、鉛直風速成分 w を算出する式も示す。視線風速と仰角の定義は、図 6.1 に示す。

$$u = \frac{u_{rE} - u_{rW}}{2 \sin \theta} \quad (6.1)$$

$$v = \frac{u_{rN} - u_{rS}}{2 \sin \theta} \quad (6.2)$$

$$w = \frac{u_{rN} + u_{rS} + u_{rE} + u_{rW}}{4 \cos \theta} \quad (6.3)$$

または、

$$w = u_{rZ} \quad (6.4)$$

ここで、

u_{rN} : 北方向の視線風速、 u_{rS} : 南方向の視線風速、 u_{rE} : 東方向の視線風速、 u_{rW} : 西方向の視線風速、 u_{rZ} : 鉛直方向の視線風速、 θ : 天頂角である。

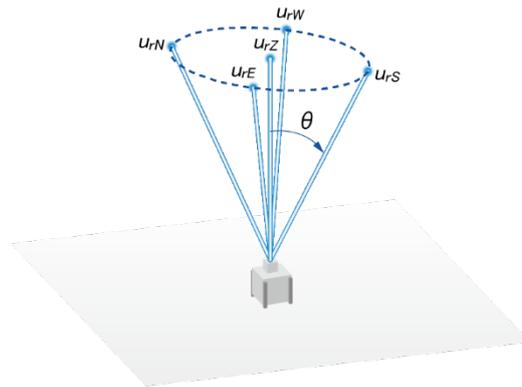


図 6.1 視線風速と天頂角の定義

7. フローティングライダーシステムによる洋上観測

7.1 観測地点の選定

7.1.1 観測地点の選定

観測地点については、風車配置に基づき代表半径を考慮して選定する。洋上風況観測マストと同時観測をする場合、洋上風況観測マストに隣接した場所に設置する。自然環境条件と共に、船舶通航量、漁業区域、海底障害物等の社会環境条件についても十分に考慮する。

FLS の観測地点の選定及び設置は、IEA RP 18. Floating Lidar systems (2017) 及び Carbon Trust OWA Roadmap for the Commercial Acceptance of Floating LiDAR Technology (2018) (以下、Carbon Trust OWA Roadmap for FLS という) に従って実施するのが望ましい。

FLS の選定においては、設置サイトの気象・海象、水深、離岸距離等の自然環境条件を十分に把握した上で、調査の目的や用途に合った機種を選定する。

洋上風況観測マストと同時観測をする場合、FLS と洋上風況観測マストとの距離が離れるほど、両者の風速及び風向の相関性は低下するため、FLS と洋上風況観測マストの距離を可能な限り近づける。FLS の精度検証または校正をする場合、FLS と洋上風況観測マストの距離は 500m 以内が望ましい。また、FLS と洋上風況観測マストとを組み合わせることにより、ハブ高さでの観測データとして扱い、サイト風条件算定のための気流解析の入力データとする場合も、同様に 500m 以内が望ましい。なお、FLS と洋上風況観測マストの距離は上記の推奨距離以内とすることが望ましいが、現地の水深、FLS の係留システムなどの現地観測の状況に応じて設定をする。

FLS 観測では、洋上での計測が始まれば、アクセスの面から、現場でメンテナンス作業を行うことは容易にはできない。そのため、使用する FLS 上の各システムの動作確認や計測精度の検証は、現場海域への設置前に念入りに実施しておく必要がある。

図 7.1 に FLS の配置の例を参考に示す。

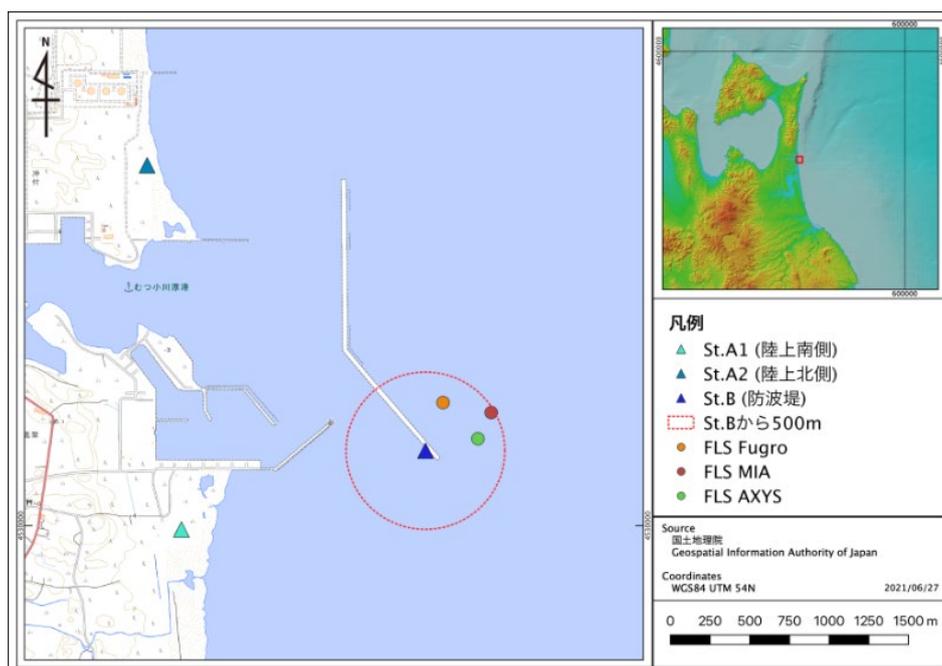


図 7.1 FLS の配置の例

7.1.2 装置の設置

FLS の設置にあたっては、海上保安庁や都道府県の関連部署において所定の許認可手続きを行う必要がある。また、漁業や港湾、海事関係者等の海域利用者に対しては、設置前に十分な調整を行い、観測の仕様やスケジュールについて事前に広く周知する。

設置工事では、依頼主、メーカー、施工業者等の様々な立場の関係者が関与するため、施工計画の立案段階で、作業の分担及び指示系統を明確にした上で、安全管理面も含めてそれらを施工計画書に織り込むことが重要である。

観測期間中は FLS の位置情報を常時監視し、流出等のトラブルが起こった際には即座に対応できるように、緊急時の体制を整えておく。

日本の沿岸海域において、FLS の流出事故は多方面に大きな影響を及ぼし得る。特に、他の海域利用者に被害を及ぼすことや、それに伴って発電事業全体へ影響が出ることは避けなければならない。流出事故を未然に防ぎ、万が一事故が発生した場合にでもその影響を最小限に食い止めるには、以下の点が重要である。

- 設置海域における海象・気象条件の把握
- 詳細な係留解析の実施と入念な設計確認による高い安全率の確保
- 施工時における現場作業の効率化とチェックリストに基づくヒューマンエラーの回避
- FLS 位置の常時モニタリングと流出発生時のアラート伝達システムの構築
- 危機管理マニュアル及び緊急連絡網の作成と流出発生時の迅速な初動
- 流出に伴う影響の調査と関係各所への対応
- 慎重な流出原因究明と再発防止策の検討に基づく観測の再開

図 7.2 に FLS の設置工事の流れの例を参考に示す。

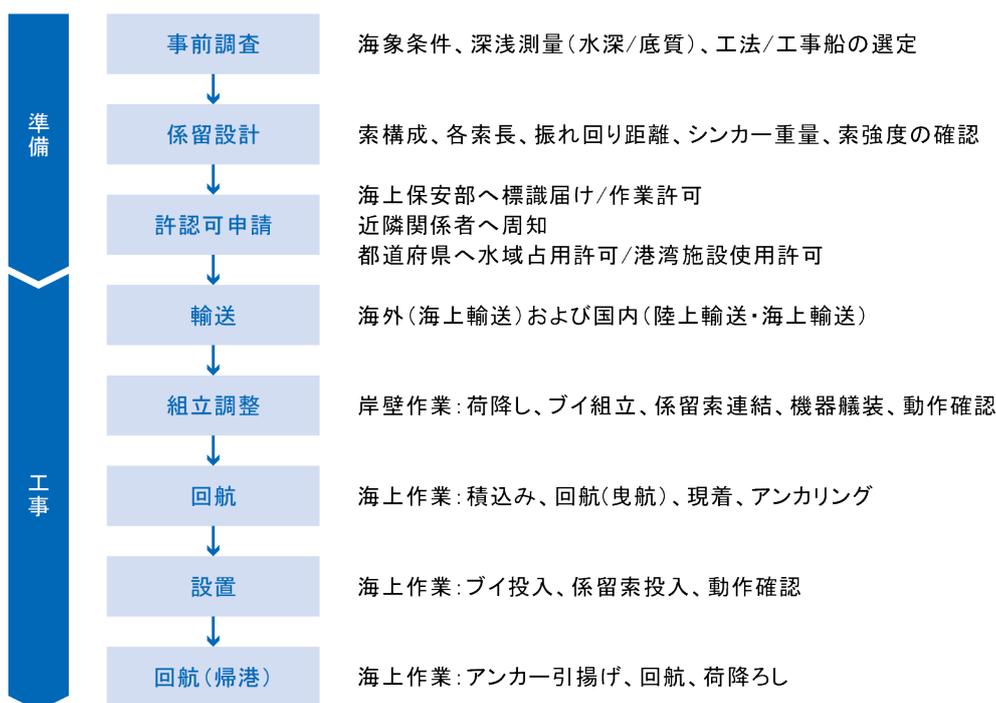


図 7.2 FLS の設置工事の流れの例

設置やメンテナンスでの海上作業は、荒天待機が付きものである。FLS 観測においては、許認可手続き、様々な作業手配など、無理のない安全第一を最優先とした工程管理が望まれる。附属書 D には FLS の設置工事の例を示す。

表 7.1 に FLS に関する許認可手続きの流れの例を参考に示す。現時点では FLS の設置実績が少ないことから、手続きがスムーズに運ばない場合が懸念される。事前相談によって、現地の課題などを把握しておくことが重要である。

表 7.1 FLS 設置に関する許認可手続きの流れの例

No.	項目	相手先	内容	主な関連法規
1	準備	-	FLS 設置計画の作成、Neowins 等による情報調査 ^{※1} 、各ガイドブック内容の把握、設置海域の把握 ^{※2}	
2	事前相談	都道府県 海上保安部 漁業協同組合	FLS 設置計画の説明、利用手続きの確認、 漁業関係者・海域利用者の把握 FLS 設置計画の説明、施設灯火の相談、漁業関係者・海域利用者の把握 漁業協同組合等の漁業者代表への挨拶・説明、地先漁業の状況・漁業権の適用海域の把握	漁業法
3	航路標識設置許可申請等 ^{※3}	海上保安部	許可標識又は簡易標識の設置に関する申請等	航路標識法
4	海域占用許可申請 ^{※4}	都道府県	浮体及び係留索の設置による海域の使用許可及び費用支払い	都道府県条例・管理規則
5	関係者へ周知	漁業関係者 水域利用者	FLS 設置計画に関する周知資料の作成及び配布	
6	工事許可申請等 ^{※5}	海上保安部 (署)	海上工事・作業等の許可申請又は届出	港則法又は海上交通安全法
7	港湾施設利用申請	港湾管理者	岸壁・ヤード等港湾施設の利用	港湾法

※1 Neowins (NEDO 洋上風況マップ) 等によって、対象海域の社会環境情報 (漁業権、港湾区域、漁港区域、航路、国定公園等) を事前に調査しておく。

※2 FLS の設置海域は、主として港湾区域及び一般海域の 2 種類に分けられる。一般海域とは、領海及び内水のうち港湾区域その他個別法の定めのある区域以外の区域を言う。

※3 FLS は海外製品が多いため、灯火に関する海上保安部の手続きに時間を要することがある。余裕のある申請とするのが望ましい。また、通信装置については電波法 (総務省) に適合していることを確認する。

※4 一般海域の占用許可等については、都道府県毎に定められた条例、管理規則等が適用される。担当の窓口は都道府県毎に異なることに注意を要する。

※5 No.3~No.6 までの手続きに要す期間は、およそ 2 か月~3 か月程度である。

水域占用面積の求積法は、係留方式によって異なる。青森県上北地域県民局の事例を以下に示す。

表 7.2 占用面積の求積法の例

係留形式	内容
1点カタナリ係留ブイ	振れ回り半径の2乗×3.14
3点カタナリ係留ブイ	本体：振れ回り半径の2乗×3.14 係留索：幅×長さ×数量 アンカー：長さ×幅×数量

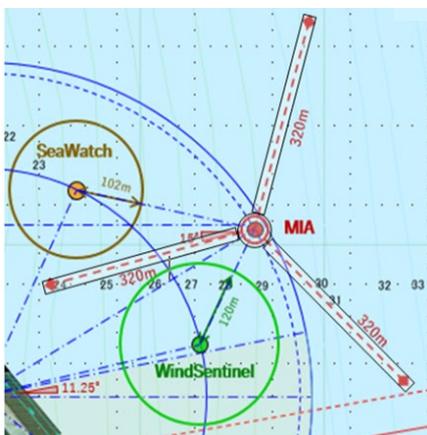


【占用面積の求積の例】

振れ回り半径：102m

占用面積： $102\text{m} \times 102\text{m} \times \pi = 32,669\text{m}^2$

(a) 1点カタナリ係留ブイ



【占用面積の求積の例】

振れ回り半径：20m

占用面積：

(本体) $20\text{m} \times 20\text{m} \times \pi = 1,256\text{m}^2$

(係留索) $0.2\text{m} \times 320\text{m} \times 3 \text{本} = 1,920\text{m}^2$

(アンカー) $5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 3 \text{箇所} = 22.5\text{m}^2$

合計 2,816m²

(b) 3点カタナリ係留ブイ

図 7.3 占用面積の求積の例

7.2 観測方法

6.2 を参照のこと。

FLS は、VL を含む観測部分と浮体プラットフォームが一体となった観測システムである。従って、FLS による風況観測方法は、VL による観測方法と同様である。

FLS は Carbon Trust OWA Roadmap for FLS により、機器の技術成熟度の評価手法が確立されているものの、最高の技術成熟度であるステージ 3 を達成しているシステムは、まだ多くない。

FLS から得られる乱流強度は、浮体の動揺により、過大になる傾向がある。この影響を除去するため、動揺補正機能がある FLS や観測データの後処理により補正する手法がある³⁾⁴⁾。前述の VL と同様に補正が必要である²⁾。

7.3 データ解析方法

観測結果の評価は、表 2.1 における風速及び風向に関連する項目に従って行う。

解析を行う前に、異常値を除外するフィルタリングを行い、有効データ率を算出する。算出時に適用したデータ除去方法及び基準をレポートに記載する。

8. 観測データ欠測時の補完及び精度検証

8.1 システム稼働率及び有効データ率

観測期間中のシステム稼働率 ξ [%] は、システムが稼働していた 10 分間のデータ数を観測期間中の 10 分間の総数で割ったものとし、式 (8.1) で定義する。

$$\xi = \frac{\text{システムが稼働していた 10 分間の数}}{\text{観測期間中の 10 分間の総数}} \times 100 (\%) \quad (8.1)$$

観測期間中のフィルタ処理後の有効データ率 η [%] は、取得データを元に前述の異常値を取り除くフィルタを適用した後の 10 分間のデータ数を観測期間中の 10 分間の総数で割ったものとし、式 (8.2) で定義する。

$$\eta = \frac{\text{データが有効である 10 分間のデータ数}}{\text{観測期間中の 10 分間の総数}} \times 100 (\%) \quad (8.2)$$

観測データは、発電量の予測及び風車設計に必要な風条件として評価する前に、異常値を除去して用いる。2.3 に記載の通り、異常値を除去するフィルタ処理後の有効データ率は、95%以上必要である。有効データ率が 95%を満足しない場合、近隣の観測データを用いて補完を行う。

RSD は、風況観測マストに比べて、気象条件の影響を受け、有効データ率が低下する傾向があるため、補完の必要性が高い。補完用の観測データは、洋上観測地点の近傍の陸上に設置された風況観測マスト及び鉛直ライダーの観測データを使用することを推奨する。風況観測マスト及び VL に関する要件は、それぞれ、3 章及び 6 章を参照のこと。ただし、洋上観測に関する事項は不要である。

8.2 観測データ欠測時の補完

観測機器の故障や気象条件等により風況観測データが欠けている期間や異常値となっている期間があり、有効データ率が 95%に満たない場合、近隣の観測データを用いて補完する。補完後の有効データ率は 95%以上とする。観測データの補完を実施した場合は、その補完の精度検証をし、補完データの妥当性を示す。

風況観測データが欠けている期間や異常値となっている期間は、年間において偏りが無い方が望ましい。

表 8.1 に Carbon Trust OWA Roadmap for FLS におけるフィルタ処理後の有効データ率の Key Performance Indicator (以下、KPI という) 及び許容基準を参考に示す。ここでの KPI とは、RSD のシステム稼働率、有効データ率、精度を評価するための重要性能指標を意味する。

年間風況を評価するにあたり、月間の有効データ率の推奨値は、表 8.1 を参考にするとよい。

表 8.1 FLS のフィルタ処理後の有効データ率の KPI 及び許容基準

KPI	許容基準
フィルタ処理後の 月間有効データ率	ステージ 2: $\geq 80\%$ ステージ 3: $\geq 85\%$
フィルタ処理後の 年間有効データ率	ステージ 2: $\geq 85\%$ ステージ 3: $\geq 90\%$

年間の有効データ率が 95%を満足しない場合、観測地点の近傍に設置された風況観測マスト及び VL の観測データを用いて、補完を実施する。

風速及び風向の補完は、Measure-Correlate-Predict（以下、MCP という）法が一般的である。MCP 法とは、補完元と補完先のデータが同時に揃っているものを用いて線形回帰式を算出し、欠測時に補完元データから補完先データを予測する方法である。

風速の標準偏差の補完に関しては、線形回帰式による乱流強度の 90%分位値の誤差が大きいため、渡邊¹⁴⁾らはダブルバイアス修正（DBC）²⁶⁾を用いた方法を提案している。

8.3 精度の KPI 及び許容基準

8.3.1 風速及び風向

すべての風向における風速および風向の精度の KPI 及び許容基準を表 8.2 に示す。風速は、相関解析による回帰式の傾きと決定係数、風向は、回帰式の傾き、切片及び決定係数を KPI とする。なお、風向における回帰式の切片は、参照となる風向の平均値とライダー風向平均の差とする。

表 8.2 精度の KPI 及び許容基準

KPI		評価対象	精度の許容基準
風速	回帰式の傾き	4m/s 以上 16m/s 未満の風速	ミニマム: 0.97 – 1.03 ベストプラクティス: 0.98 – 1.02
	決定係数	同上	ミニマム: ≥ 0.97 ベストプラクティス: ≥ 0.98
風向	回帰式の傾き	4m/s 以上 16m/s 未満の風速	ミニマム: 0.95 – 1.05 ベストプラクティス: 0.97 – 1.03
	回帰式の切片	同上	ミニマム: $< 10^\circ$ ベストプラクティス: $< 5^\circ$
	決定係数	同上	ミニマム: ≥ 0.95 ベストプラクティス: ≥ 0.97

補完を用いた場合、補完方法が妥当であるかを確認する。補完後の観測データは、精度の KPI 及び許容基準を用いて評価を実施する。

観測データの有効データ率を考慮した精度検証方法については、榎木及び石原の研究²⁵⁾、渡邊らの研究¹⁴⁾が挙げられる。

精度検証をする際の風速範囲は、4m/s 以上 16m/s 未満とする。参考のため、表 8.3 に Carbon Trust OWA Roadmap for FLS における精度検証をする風速範囲を示す。Carbon Trust OWA Roadmap

for FLS では、FLS の機器としての性能評価を目的としているため、2m/s 以上での評価が含まれている。また、IEC61400-50-2 の等級分類試験では、4m/s 以上 16m/s 未満を対象としている。本ガイドブックは、第 2 章で述べた通り、発電量予測及び風車設計に必要な風条件算定を目的とするため、発電量及び荷重への寄与が大きい風速範囲である 4m/s 以上 16m/s 未満を対象とした。

表 8.3 Carbon Trust OWA Roadmap for FLS における精度の KPI 及び許容基準

KPI		評価対象	精度の許容基準
風速	回帰式の傾き	a) 4m/s 以上 16m/s 未満の風速 b) 2m/s 以上	ミニマム: 0.97 – 1.03 ベストプラクティス: 0.98 – 1.02
	決定係数	同上	ミニマム: ≥ 0.97 ベストプラクティス: ≥ 0.98
風向	回帰式の傾き	2m/s 以上	ミニマム: 0.95 – 1.05 ベストプラクティス: 0.97 – 1.03
	回帰式の切片	同上	ミニマム: $< 10^\circ$ ベストプラクティス: $< 5^\circ$
	決定係数	同上	ミニマム: ≥ 0.95 ベストプラクティス: ≥ 0.97

8.3.2 風速の標準偏差

乱流強度の精度検証は、以下の指標により評価を行い、RSD とカップ形風速計の風速階級別の風速の標準偏差（平均値及び 90%分位値）を比較した図及び風速階級別頻度分布を比較した図も併せて示す。

評価対象範囲は、4m/s 以上 16m/s 未満の風速のデータとする。

$$k \text{ 番目のビンの風速の標準偏差の } 90\% \text{ 分位値 } (\sigma_{90_k}) = \bar{\sigma}_k + 1.28 \cdot \text{std}(\sigma_k) \quad (7.3)$$

$$\text{ビン加重平均誤差 (-)} = \sum_{k=1}^N f_k \cdot (\sigma_{90_{RSD,k}} - \sigma_{90_{cup,k}}) \quad (7.4)$$

ここで、

N : 風速ビンの数 ($k = 1, 2, \dots, N$)

$\sigma_{90_{RSD,k}}$: ライダーの k 番目のビンの風速の標準偏差の 90%分位値

$\sigma_{90_{cup,k}}$: カップ形風速計の k 番目のビンの風速の標準偏差の 90%分位値

f_k : カップ形風速計の k 番目のビンの頻度割合

$\bar{\sigma}_k$: k 番目のビンの風速の標準偏差の平均値

$\text{std}(\sigma_k)$: k 番目のビンの風速の標準偏差の標準偏差

である。

風速の標準偏差を比較した図に加えて、乱流強度を比較した図も示すのが望ましい。

8.3.3 風速の標準偏差の補正

乱流強度の精度検証の結果、過小評価となった場合は、補正を実施する。補正を実施した場合は、再度、精度検証を実施し、補正データの妥当性を示す。

DSL による乱流強度が過小評価した場合の補正方法としては、DSL とカップ風速計の風速階級別の風速の標準偏差の差を加算する方法などが考えられる^{17),18)}。なお、精度検証時の観測高度と計画サイトにおける洋上観測点の観測高度が違う時は、誤差が高度によって異なる可能性があることに注意する。

補正をした後、風速の標準偏差を比較した図に加えて、乱流強度を比較した図も示すのが望ましい。

9. レポートの作成

9.1 設置及び観測レポート

現地観測に係るレポート及び観測結果の評価に係るレポートは、IEC61400-12-1 に準拠し、少なくとも以下に示す記載事項を示す。

(1) サイトの状況

- ・ 観測地点の正確な座標（測地系を明示）
- ・ 全観測地点から撮影した周囲 360°方向の写真
- ・ 観測地点を示したサイトの地形図

(2) 計測システムの説明

- ・ 観測機器及びデータ収集システムの仕様（観測機器の校正証明書及び RSD 検証結果を含む）
- ・ 観測機器類（すべてのセンサー及び RSD）の取付け、配置及び設定高度
- ・ スキャニングライダーを使用する場合は、測定の精度を示す文書
- ・ 観測機器の配置図及び主要寸法を含む図面
- ・ 計測期間中の風速計測の精度が維持されたことを示す文書

(3) 計測手順の説明

- ・ 計測手順の説明、サンプリング周波数、平均化時間、計測期間
- ・ 計測期間中のすべての重要事象及び保守の記録（日時）

観測機器類の取付け及び配置に関して、高度の表記は、地上高さ基準又は／及び平均海面高さ基準等の高さ基準が分かるように記載する。RSD を架台に設置する場合は、架台高さも記載し、機器に設定した設定高さ及び地上高さ等を記載する。

ここでの RSD 検証結果は、メーカーによる出荷前の試験結果を示す。メーカーから RSD 検証結果が提供されない場合は、その旨記載する。現地での RSD の検証レポートについては、8.3 に示す。

観測地点と計画風車位置と離隔距離を記載するのが望ましい。

9.2 評価レポート

観測結果の評価に関して、少なくとも以下の項目を含まなければならない。

(1) 有効データ率

- ・ 計測全期間及び各月について、有効データ率を記載する。有効データ率を算出時に適用したデータ除去基準を記載する。

(2) 風向・風速

- ・ 計測全期間及び各月について、風速の平均値、最小値及び最大値を表形式で記載する。
- ・ 方位別のワイブル形状係数及び尺度係数、方位別の出現頻度分布を表形式で記載する（風向セクターは、30°以下とする）。風向分布図を記載する。

(3) 乱流強度

- ・ 方位別の周囲乱流強度（風向セクターは、30°以下とする）を表形式で記載する。
- ・ 全方位を考慮した周囲乱流強度と IEC 乱流カテゴリー（NTM）との比較図を記載する。

評価レポートに含める観測高度の数は、少なくとも、風速は3高度、乱流強度は1高度とする。

9.3 検証レポート

RSD を使用する場合は、7章に示す精度検証に係る要求事項を確認した結果を示す。

(1) 検証サイトの観測機器設置レポート

- ・ 8.1 に従う。

(2) 検証に用いる観測データの評価レポート

- ・ 8.2 に従う。

(3) 検証結果

- ・ 風速及び風向の相関解析の結果（パラメータ及び散布図）及び要求事項を確認した結果を記載する。
- ・ 周囲乱流強度の比較（パラメータ及び図）及び要求事項を確認した結果を記載する。

文献

- 1) T Mikkelsen, J Mann and M Courtney: Wind Scanner: A full-scale Laser Facility for Wind and Turbulence Measurements around large Wind Turbines, EWEC2008.
- 2) 山口敦, 京増顕文, 石原孟: ドップラーライダーを利用した高高度の乱流計測と模擬自然風による精度検証, 第44回風力エネルギー利用シンポジウム, 2022.
- 3) A.Yamaguchi, T.Ishihara: A new motion compensation algorithm of floating lidar system for the assessment of turbulence intensity, Journal of Physics: Conference Series 753 072034, 2016.
- 4) F.Kelberlau, V.Neshaug, L.Lønseth, T.Bracchi, J.Mann: Taking the Motion out of Floating Lidar: Turbulence Intensity Estimates with a Continuous-Wave Wind LiDAR, Remote Sens. 12, 898, 2020.
- 5) J.Eecen, L.A.H.Machielse, A.P.W.M. Curvers: Meteorological Measurements OWEZ Half year report, 01-07-2005-31-12-2005, 2007.
- 6) D. Kindler and A. Gütschow: The FINO3 Wind Energy Research Platform in the North Sea: First Results & Comparison to Concurrent FINO1 Data, Bremen, 2010.
- 7) 林田宏二, 山中徹, 大窪一正, 石原孟, 山口敦, 福本幸成: 洋上風力発電のための風況観測 ― 銚子沖一, 日本風工学会誌, 第43巻, 第3号, 2018.
- 8) M. Steger: Dual Scanning Lidar: Main Uncertainty Contributors, VAISALA webinar "Dual scanning Lidar to increase accuracy and efficiency for offshore wind campaigns", 2021.
- 9) N. Vasiljevic, M. Courtney, A. Tegtmeier Pedersen: Uncertainty model for dual-Doppler retrievals of wind speed and wind direction. Atmos. Meas. Tech. Discuss., 2020.
- 10) E. Simon, M. Courtney: A Comparison of sector-scan and dual Doppler wind measurements at Høvsøre Test Station – one lidar or two? DTU Wind Energy. DTU Wind Energy E, Vol. 0112, 2016.
- 11) 嶋田進, 大澤輝夫, 中里廉, 中村聡志, 竹山優子, 小垣哲也, 古川正樹: 洋上 WF 開発候補海域における風況精査手法の検討その1) デュアルスキャニングライダー観測, 第40回日本風力エネルギー利用シンポジウム, 2018.
- 12) 嶋田進, 小垣哲也, 小長谷瑞木, 水戸俊成, 見崎豪之, 荒木龍蔵, 植田祐子, 大澤輝夫: むつ小川原サイトにおけるスキャニングライダー実験その2 デュアル観測の精度検証, 第43回日本風力エネルギー利用シンポジウム, 2021.
- 13) 渡邊慶一郎, 高桑晋, 邊見力, 石原孟: デュアルスキャニングライダーを用いた洋上風況観測に関する研究, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol. 45, No.2, pp.40-48, 2021.
- 14) 渡邊慶一郎, 高桑晋, 邊見力, 石原孟: デュアルスキャニングライダーを用いた洋上風況観測とMCP法による欠損データの補完, 第43回風力エネルギー利用シンポジウム, 2021.
- 15) 大畑静佳, 荒木龍蔵, 嶋田進, 小長谷瑞木, 大澤輝夫, 小垣哲也, 植田祐子: むつ小川原サイトにおけるスキャニングライダー実験 その4 デュアルスキャン観測パラメータ設定と計測精度評価, 第43回風力エネルギー利用シンポジウム, 2021.
- 16) Gryning S.-E., and Floors R: Carrier-to-Noise-Threshold Filtering on Off-Shore Wind Lidar Measurements. Sensors.19(3):592. DOI: 10.3390/s19030592, 2019.
- 17) 佐々木亘, 福本幸成, 猪俣海斗, 日東寺美知夫, 石原孟: 銚子沖洋上観測タワーを用いたデュアルスキャニングライダーによる風況観測の精度検証, 第44回風力エネルギー利用シンポジウム, 2022.

- 18) 種本純, 林岑蔚、高橋和也、隅田耕二、白枝哲次: デュアルスキャニングライダーによる乱流強度観測値の補正に関する検討, 第 44 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2022.
- 19) ゴイト ジェイ プラカス、山口敦、石原孟: スキャニングドップラーライダーの精度検証と風況計測への応用, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.42, No.1, pp.7-16, 2018.
- 20) 荒木龍蔵: 淡路島西岸におけるスキャニングドップラーライダーと気象マストとの風の比較観測, 日本風力エネルギー、第 43 巻 第 2 号, 2019.
- 21) 間野晶子, 上野晃世, 糸崎俊介, 石原孟: 3D スキャニングライダーの精度検証と洋上風況観測への応用, 第 41 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2019.
- 22) 間野晶子, 上野晃世, 糸崎俊介, 石原孟: 3D スキャニングライダーにおけるデータ取得率とセクターサイズの観測精度への影響に関する研究, 令和 2 年第 42 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2020.
- 23) S. Shimada, J. P. Goit, T. Ohsawa, T. Kogaki, S. Nakamura: Coastal wind measurements using a single scanning LiDAR, Remote Sensing, 12, 1345, pp.1-24, 2020.
- 24) J.P. Goit, A. Yamaguchi, T. Ishihara: Measurement and Prediction of Wind Fields at an Offshore Site by Scanning Doppler LiDAR and WRF, Atmosphere, 11, 442, pp.1-20, 2020.
- 25) 榎木康太, 石原孟: 現地観測の有効データ率を考慮した MCP 法により補完された風速・風向データの決定係数, 傾き, 切片の評価式の提案, 第 43 回日本風力エネルギー利用シンポジウム, 2021.
- 26) Mattias Lange, Ulrich Focken 著, 石原孟, 山口敦, 嶋田健司共訳: 「風力発電出力の短期予測 電力の安定供給に向けて」, オーム社, 2012.
- 27) S. Shimada, T. Kogaki, M. Konagaya, T. Mito, R. Araki, Y. Ueda, T. Ohsawa: Validation of near-shore wind measurements using a dual scanning light detection and ranging system, Wind Energy, Vol25, pp1555-1572, 2022.

附属書 A. ハードターゲット調整

A.1 洋上観測点の近傍にハードターゲットがある場合

洋上観測点の近傍にハードターゲットがある場合のハードターゲット調整の手順を図 A.1 に示す。SL を設置する際は、測量精度を満たすように、装置内部の傾斜計のチルト角とロール角が $\pm 0.02^\circ$ 未満になるよう調整する。

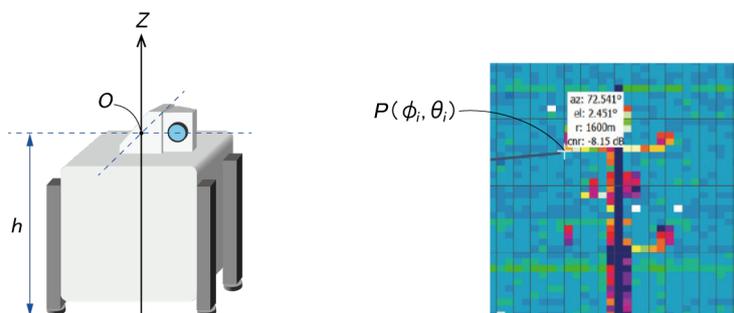
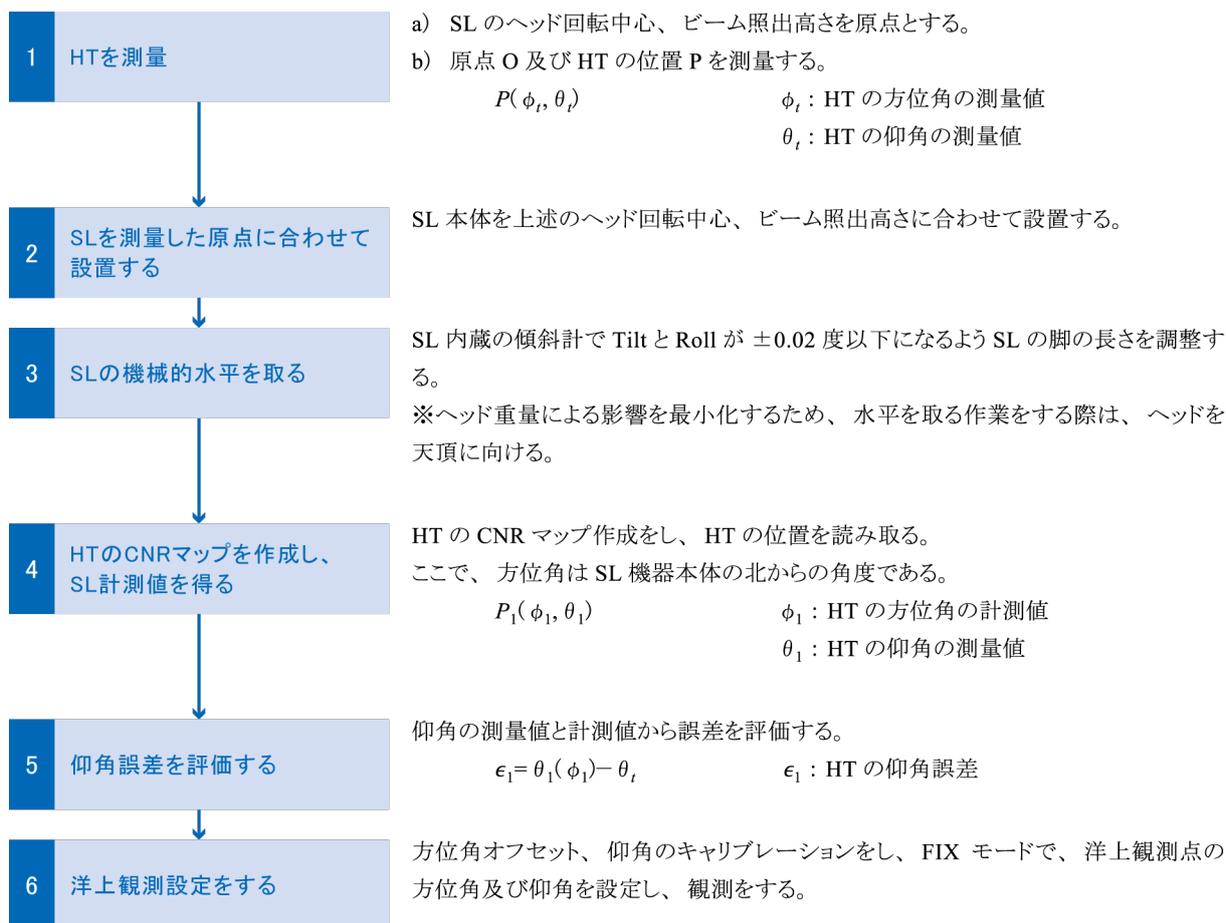


図 A.1 洋上ハードターゲット調整の例

A.2 ハードターゲットが3点ある場合

ハードターゲットが3点ある場合のハードターゲット調整の手順を図 A.2 に示す。各ハードターゲット間のなす角度は約 120 度が望ましい。SL を設置する際は、測量精度を満たすように、装置内部の傾斜計のチルト角とロール角が±0.02°未満になるよう調整する。

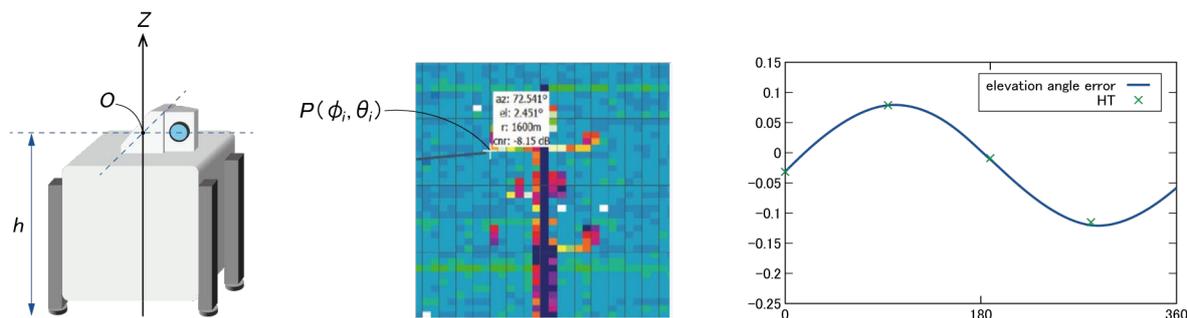
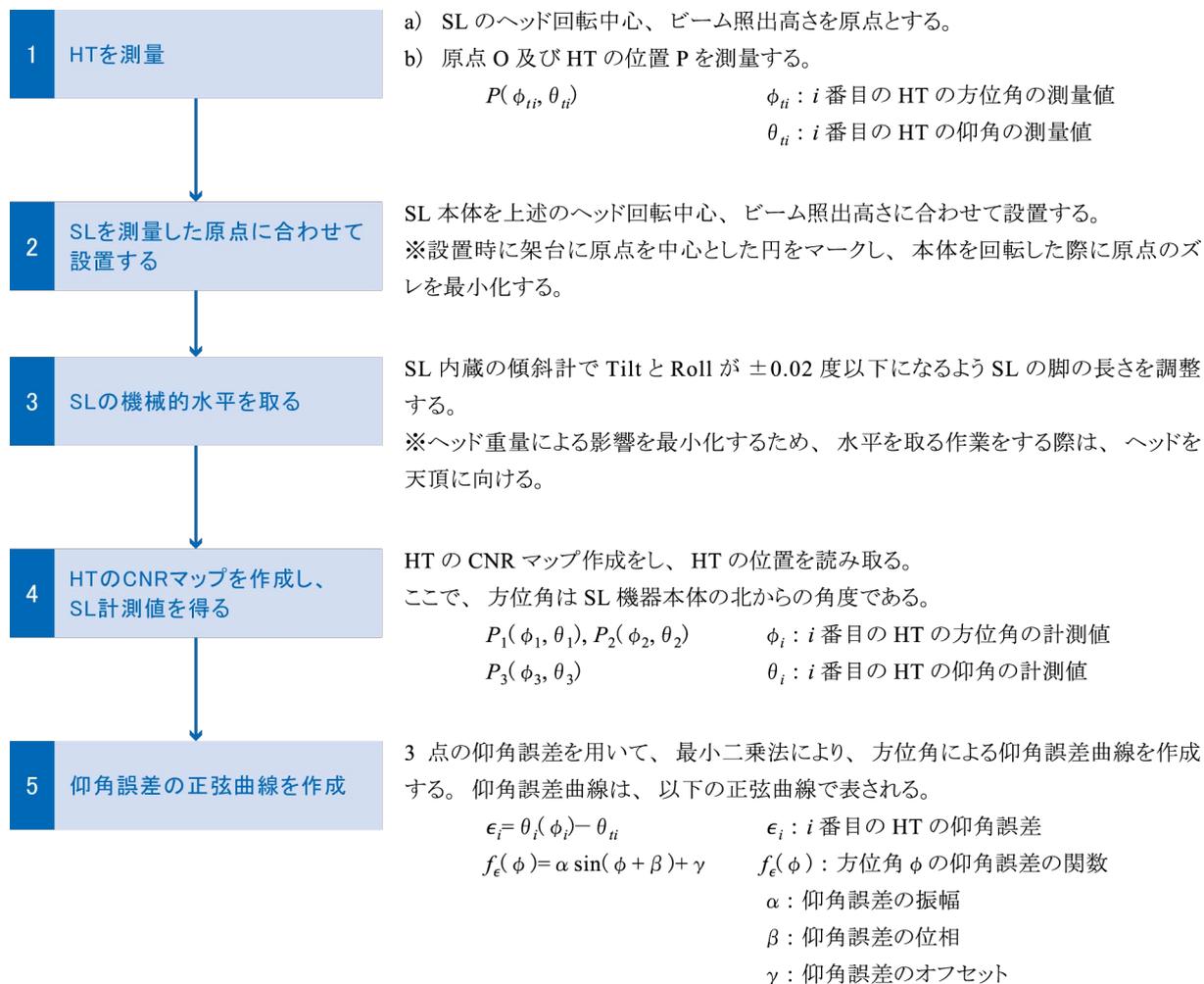


図 A.2 ハードターゲットが3点ある場合の例

6 仰角誤差正弦曲線のピークで位置精度の検証をする

- a) 方位角に対する仰角誤差の変化率が最も小さい、正弦曲線の頂点を洋上観測時の方位角 ϕ_s とする。
- b) 洋上観測時の方位角 ϕ_s を HT に向ける。
※FIX モードで、方位角 ϕ_s 及び仰角 θ_t の設定をし、観測をしながら本体を回転すると、HT に当たった時、CNR 値によりレーザーが HT 方位を照射していることが判定できるため、そこで脚を降ろして固定する。
- c) ②原点合わせ、③水平合わせをした後、④CNR マップを作成し、HT の位置を読み取る。

$$P_s(\phi_s, \theta_s) \quad \begin{array}{l} \phi_s : \text{HT の方位角の計測値} \\ \theta_s : \text{HT の仰角の計測値} \end{array}$$

- d) 方位角 ϕ_s における仰角誤差が、⑥で作成した正弦曲線に一致するかを確認する。

$$\Delta\epsilon(\phi_s) = (\theta_s(\phi_s) - \theta_t) - f_\epsilon(\phi_s)$$

$\Delta\epsilon(\phi_s)$: 方位角 ϕ_s における仰角誤差関数とのバイアス

7 洋上観測点に機器の方位角 ϕ_s を向けて設置する

洋上観測点の方位角と HT の方位角のなす角度を、HT の方位角から引いた角度を方位角とする FIX モードで設定をし、観測をしながら本体を回転すると、HT に当たった時、CNR 値によりレーザーが HT 方位を照射していることが判定できるため、そこで脚を降ろして固定する。

②③の手順と同様、原点合わせ及び水平合わせをする。

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{PQ} &= \phi'_s - \phi_t \\ \phi'_s &= \phi_s + \Delta\phi_{offset} \end{aligned}$$

8 洋上観測設定をする

方位角オフセット、仰角のキャリブレーションをし、FIX モードで、洋上観測点の方位角及び仰角を設定し、観測をする。

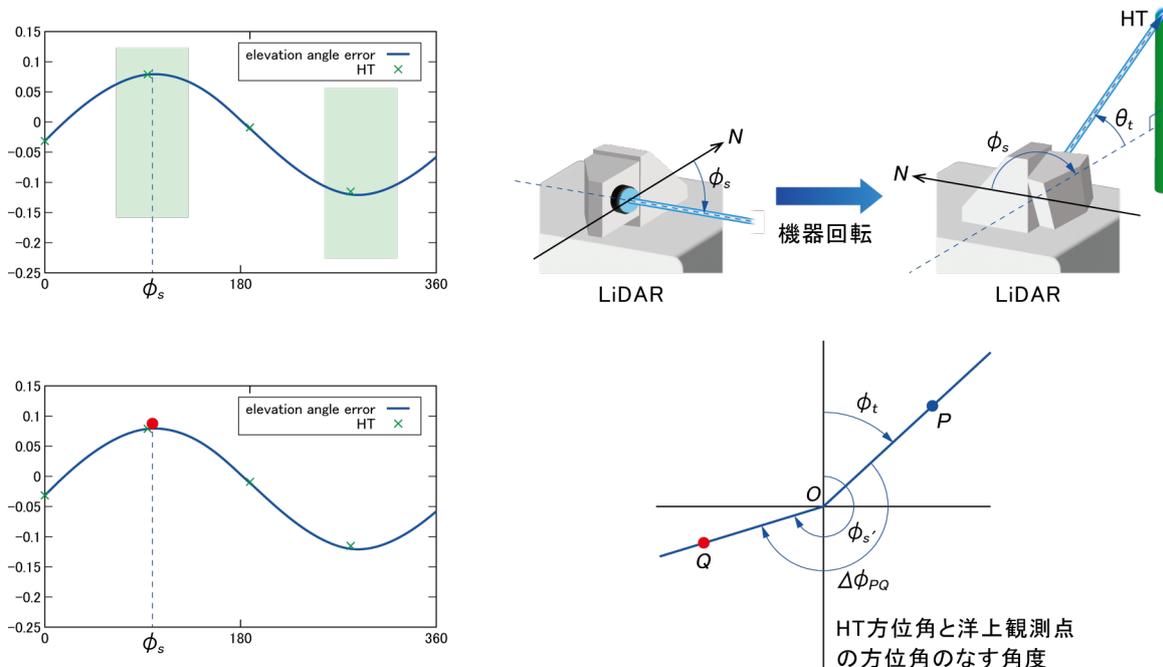


図 A.2 ハードターゲットが3点ある場合の例 (つづき)

6 仰角誤差正弦曲線のピークで位置精度の検証をする

- a) 方位角に対する仰角誤差の変化率が最も小さい、正弦曲線の頂点を洋上観測時の方位角 ϕ_s とする。
- b) 洋上観測時の方位角 ϕ_s を HT に向ける。
※FIX モードで、方位角 ϕ_s 及び仰角 θ_t の設定をし、観測をしながら本体を回転すると、HT に当たった時、CNR 値によりレーザーが HT 方位を照射していることが判定できるため、そこで脚を降ろして固定する。
- c) ②原点合わせ、③水平合わせをした後、④CNR マップを作成し、HT の位置を読み取る。

$$P_s(\phi_s, \theta_s) \quad \begin{array}{l} \phi_s : \text{HT の方位角の計測値} \\ \theta_s : \text{HT の仰角の計測値} \end{array}$$

- d) 方位角 ϕ_s における仰角誤差が、⑥で作成した正弦曲線に一致するかを確認する。

$$\Delta\epsilon(\phi_s) = (\theta_s(\phi_s) - \theta_t) - f_\epsilon(\phi_s)$$

$\Delta\epsilon(\phi_s)$: 方位角 ϕ_s における仰角誤差関数とのバイアス

7 洋上観測点に機器の方位角 ϕ_s を向けて設置する

洋上観測点の方位角と HT の方位角のなす角度を、HT の方位角から引いた角度を方位角とする FIX モードで設定をし、観測をしながら本体を回転すると、HT に当たった時、CNR 値によりレーザーが HT 方位を照射していることが判定できるため、そこで脚を降ろして固定する。

②③の手順と同様、原点合わせ及び水平合わせをする。

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{PQ} &= \phi'_s - \phi_t \\ \phi'_s &= \phi_s + \Delta\phi_{offset} \end{aligned}$$

8 洋上観測設定をする

方位角オフセット、仰角のキャリブレーションをし、FIX モードで、洋上観測点の方位角及び仰角を設定し、観測をする。

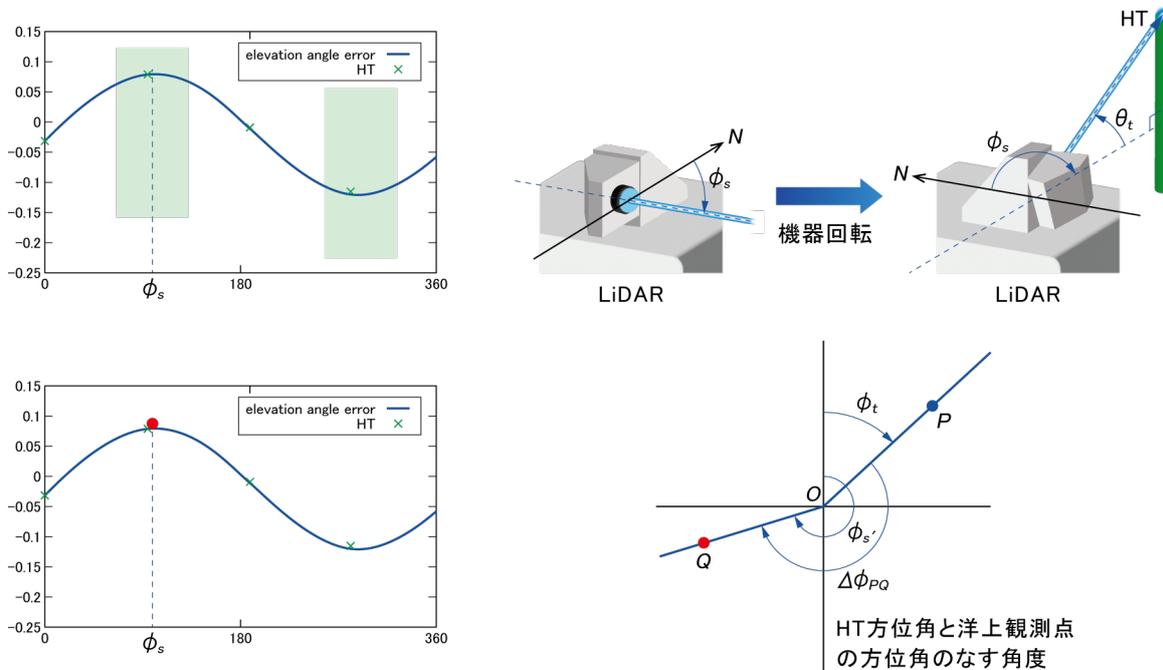


図 A.3 ハードターゲットが2点以下の場合の例 (つづき)

附属書 B. 事前精度検証

B.1 事前精度検証

DSL 及び SSL の事前精度検証は、3 章に記載の要求に従って設置された風況観測マストのカップ形風速計及び矢羽根形風向計の観測データを用いて、回帰分析に基づいて行う。風速及び風向の相関解析の結果を散布図で示す。

検証は、異常値、地形による流れの歪み、構造物の影響を除去し、信頼できるデータを用いて実施する。

事前精度検証に必要なデータ数は、異常値等を除去したフィルタ処理後のデータ数として、表 B.1 に示す許容基準を満たす必要がある。

表 B.1 精度検証に必要なデータ数

評価対象	風速ビン幅	データ数の許容基準
2m/s - 12m/s	1m/s	≥40
12m/s - 16m/s	2m/s	≥40
16m/s < (利用可能な場合)	2m/s	≥40

精度検証期間の気象条件やフィルタ処理によりデータ数が低減することを考慮して、精度検証期間を設定する。

B.2 精度の KPI 及び許容基準

B.2.1 風速及び風向

8.3.1 を参照のこと。

RSD で計測した風速又は風向の誤差が表 8.2 におけるミニマム以下である場合に、その計測値はカップ形風速計又は矢羽根形風向計と同等な精度を有するものとして利用することができる。

B.2.2 風速の標準偏差

8.3.2 を参照のこと。

RSD で計測した風速の標準偏差の誤差が 5%以下である場合に、その計測値はカップ形風速計と同等な精度を有するものとして利用することができる。DSL について、この誤差以下の精度が、既往研究で報告されており¹²⁾、本事業でも確認された。

附属書 C. データ取得率確認

C.3 データ取得率確認

年間観測を実施する前に、洋上観測地点において、事前検証を行い、十分なデータ取得率が得られることを確認する。データ取得率の確認においては、精度検証の際と同じ設定を用いることとする。

観測地点におけるデータ取得率は、SLの機器性能（レーザー出力等）、観測距離、観測の設定（レンジゲート、積分時間、観測高度の切り替え時間、フォーカス）、気象条件（濃霧、大雪、吹雪、激しい降雨等）により、影響を受ける。

年間観測開始後は容易に観測設定を変更できないため、年間を通じて十分なデータ取得率が得られるように、事前のデータ取得率確認を行い、入念な観測計画を立てることが望ましい。

事前の検証期間において、年間観測を実施する洋上観測地点の観測距離におけるデータ取得率は、60%以上であることが望ましい。気象条件は、年間を通して変動するため、ここで確認したデータ取得率が必ずしも計画地点における年間の代表値として保証されないことに注意が必要である。

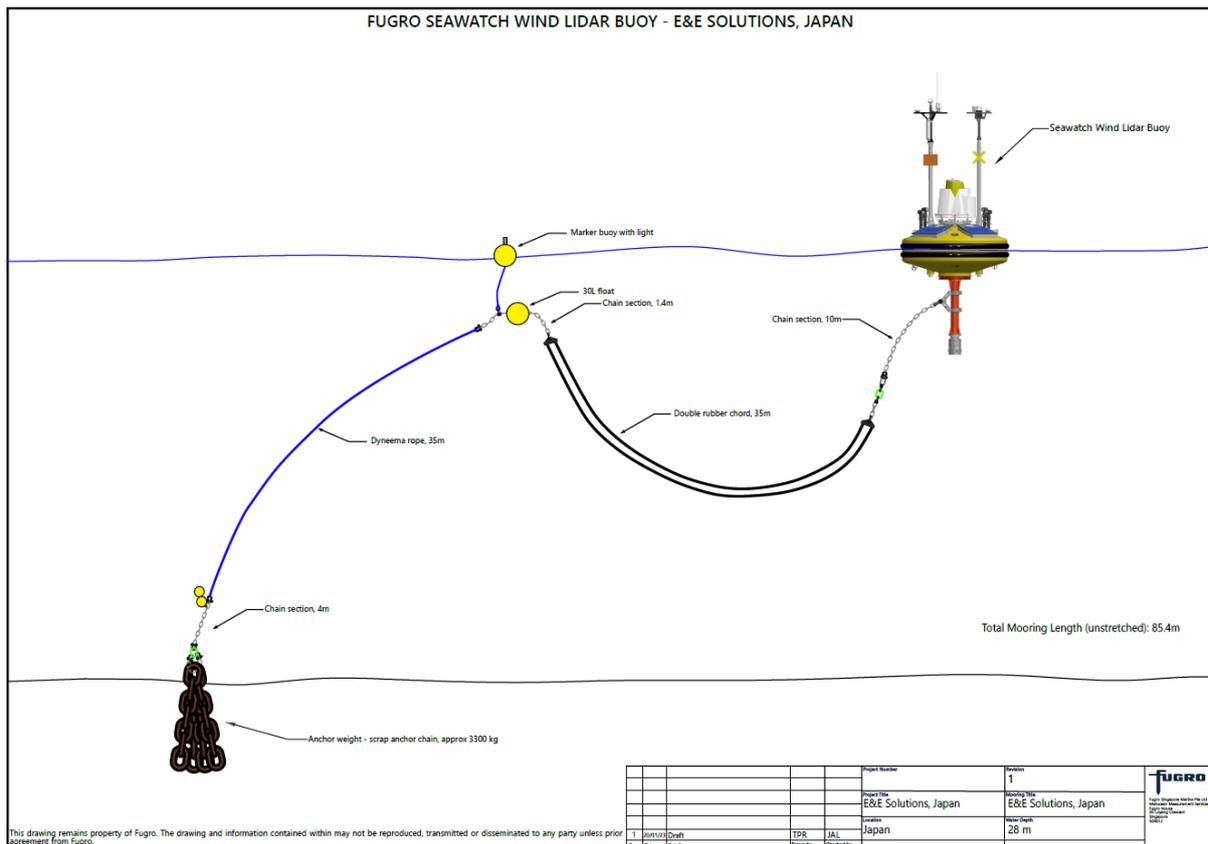
附属書 D. FLS の設置工事の例

各 FLS の設置工事の事例として、図 D.1 から図 D.3 に 3 機種の設置工事の流れ及び係留図を示す。



(a) 設置工事の流れ

図 D.1 SeaWatch の設置事例及び係留図



(b) 係留図

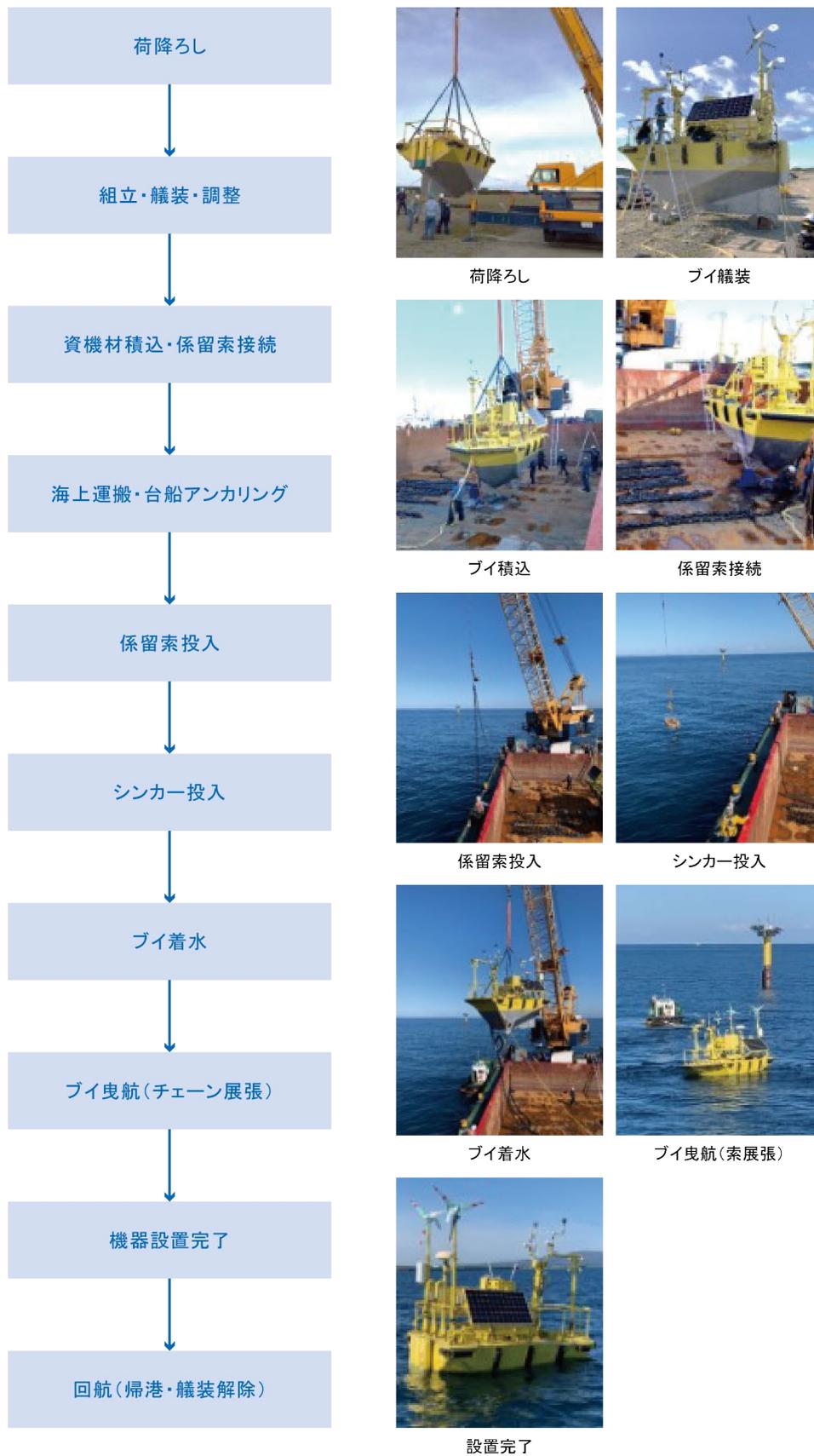
(c) 浮体諸元

項目	内容
形式	円盤形
寸法	直径 2.8m、全高 7.2m
喫水	4m
重量	約 2.2t

(d) 係留諸元

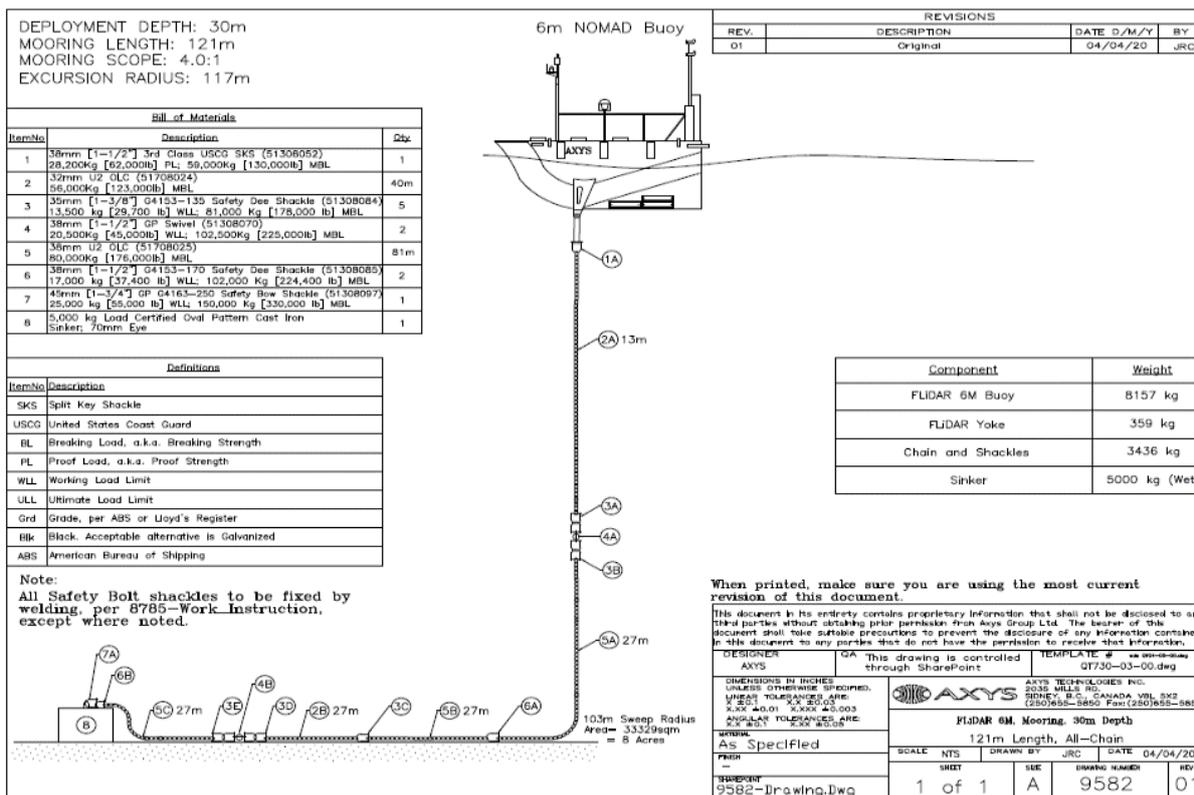
項目	内容
形式	1 点係留
寸法	全長 85.4m (上部チェーン 10m + ゴムコード 35m + 中間フロート + 合繊ロープ 35m + 下部チェーン 4m)
シンカー	3.3t チェーン

図 D.1 SeaWatch の設置事例及び係留図 (つづき)



(a) 設置工事の流れ

図 D.2 WindSentinel の設置事例及び係留図



(b) 係留図

(c) 浮体諸元

項目	内容
形式	船形
寸法	縦 6m × 幅 3.1m × 高さ 9m
喫水	4m
重量	約 9t

(d) 係留諸元

項目	内容
形式	1点係留
寸法	全長 121m (38mm オープンリンクチェーン)
シンカー	5t 鋳鉄製

図 D.2 WindSentinel の設置事例及び係留図 (つづき)



(a) 設置工事の流れ

図 D.3 MIA の設置事例及び係留図



(b) 係留図

(c) 浮体諸元

項目	内容
形式	スパー形
寸法	直径 1.0m / 2.15m × 長さ 25m
喫水	4m
重量	約 46t

(d) 係留諸元

項目	内容
形式	3点係留
寸法	全長 320m × 3本 (チェーン 60m + 合繊ロープ 180m + チェーン 80m)
アンカー	5t ダンフォースアンカー × 3個

図 D.3 MIA の設置事例及び係留図 (つづき)

