

傾斜地設置型/営農型/水上設置型

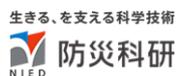
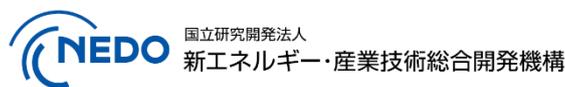
太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2025 年版

技術資料：

係留索に発生する張力の実測調査に関する実証実験結果

この成果物は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の長期安定電源化技術開発」事業の結果として得られたものです。

2025 年 4 月 11 日



更新・修正履歴

・2023/04/28 公開：2023 年版

修正履歴

| 頁 | 該当箇所 | 修正概要 | 備考 |
|----|------|------------------------|---------------|
| 18 | 2 行目 | 文言の修正： 風速・風速の → 風向・風速の | 2023/06/01 修正 |

・2024/05/31 内容更新：2024 年版

・2025/04/11 内容更新：2025 年版

係留索に発生する張力の実測調査に関する実証実験結果

1. 概要

本実測調査は、気象条件、アイランド形状およびフロートタイプがそれぞれ異なる、2箇所の水上設置型太陽光発電設備において、係留索に作用する荷重の実測調査を行った。

そこで得られた計測結果から、風荷重との関係性および衝撃荷重を含むピーク荷重や係留索ごとの荷重の偏りなどについて考察した結果を紹介する。

2. 矩形アイランド形状の水上太陽光発電設備実測調査

2.1 実験条件

2.1.1 対象箇所

香川県木田郡三木町女井間池

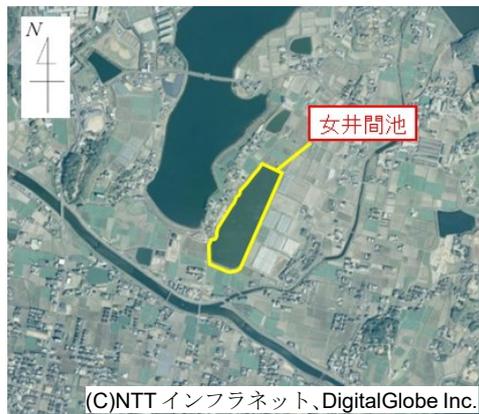


図 2-1 対象箇所

2022年5月と2022年9月の女井間池およびAMeDAS高松のウィンドローズを図2-2、図2-3に示す。このうち、強い西風が吹いた時期として5月を、強い東風が吹いた時期として9月を抽出した。女井間池とAMeDAS高松のどちらも東西方向の風が卓越しており、女井間池は北風の頻度が比較的小さい。これは、女井間池北側に山が存在し、北風が生じにくい地形であるためと考えられる。

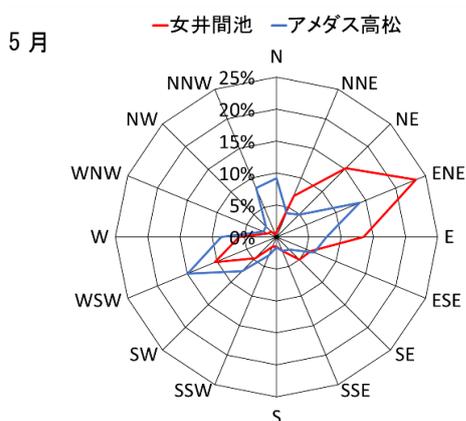


図2-2 5月の女井間池とAMeDAS高松のウィンドローズ比較（10分間平均風向）
（期間：2022/5/6～2022/5/31）

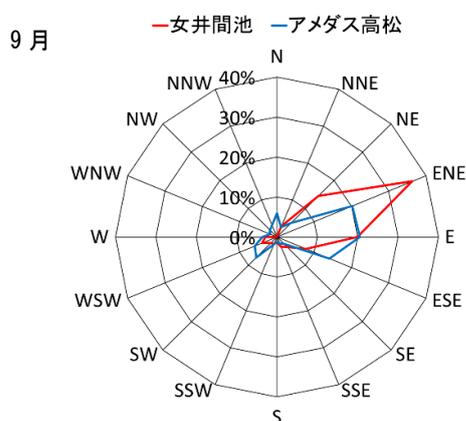


図2-3 9月の女井間池とAMeDAS高松のウィンドローズ比較（10分間平均風向）
（期間：2022/9/13～2022/9/29）

図2-4～図2-9に2022年5月と2022年9月における女井間池およびAMeDAS高松の10分間平均風速および最大瞬間風速の比較を示す。女井間池の風速とAMeDAS高松の風速は概ね一致しているが、女井間池の風速が若干小さい傾向にある。これは、AMeDAS高松では風向風速計が地表面から17.5mの高さに設置されているのに対し、女井間池の風向風速計は水面付近に設置されていることや女井間池の周囲が土堰堤で囲まれていることが要因として考えられる。

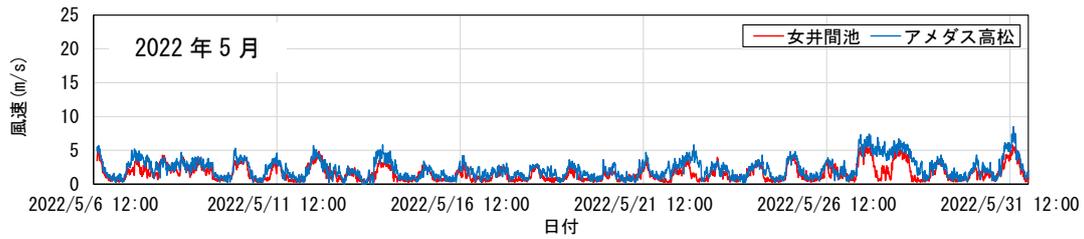


図 2-4 2022 年 5 月の女井間池および AMeDAS 高松の風速（10 分間平均風速）

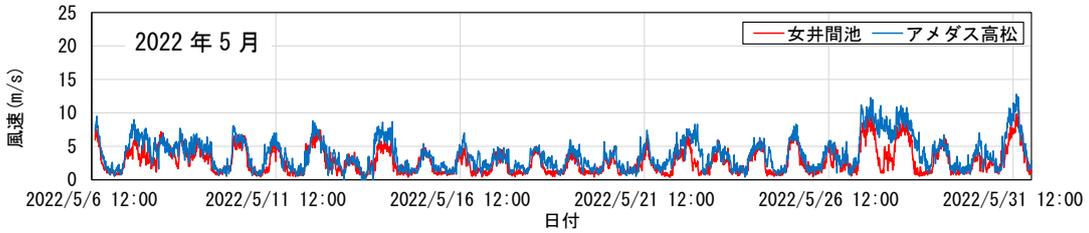


図 2-5 2022 年 5 月の女井間池および AMeDAS 高松の風速（最大瞬間風速）

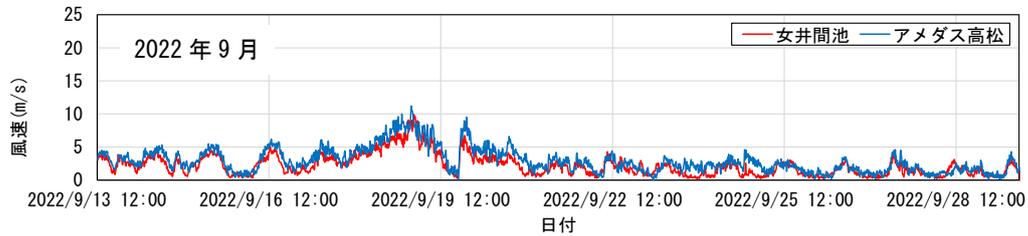


図 2-6 2022 年 9 月の女井間池および AMeDAS 高松の風速（10 分間平均風速）



図 2-7 2022 年 9 月の女井間池および AMeDAS 高松の風速（最大瞬間風速）

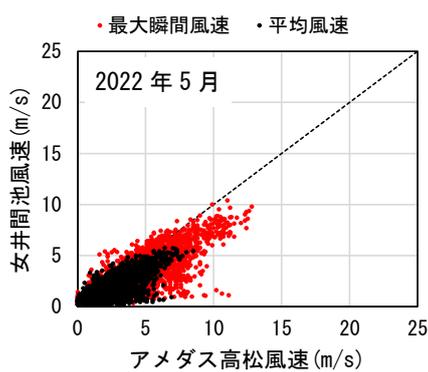


図 2-8 女井間池と AMeDAS 高松の平均風速
および最大瞬間風速の比較(2022 年 5 月)

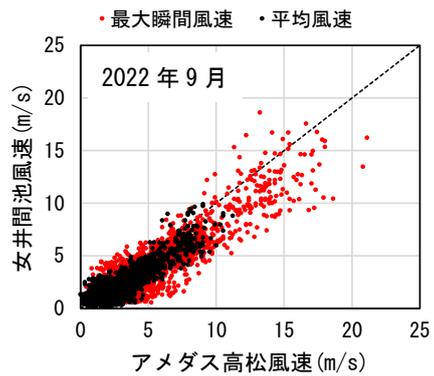


図 2-9 女井間池と AMeDAS 高松の平均風速
および最大瞬間風速の比較(2022 年 9 月)

2.1.3 計測期間

令和 3 年 9 月 ~ 令和 7 年 1 月 約 40 箇月間

2.2 実験方法

2.2.1 計測項目

本実測調査の計測項目は、表 2-1 のとおり。女井間池の鳥観図を図 2-10 に示す。

表 2-1 計測項目一覧

| 計測対象 | 計測項目 | 計測手法 | 備考 |
|-----------|-------------------|----------|------------------------------|
| 外的環境 | 風向・風速 | 風向・風速計 | |
| | 水温 | 温度計 | 東側：1箇所 西側：1箇所 |
| フロート等への作用 | 係留索(繊維ロープ)に作用する張力 | 張力計(鉄筋計) | 北側：10箇所 東側：6箇所 西側：12箇所 |
| | アイランド(フロート群)の移動状況 | タイムラプス撮影 | 4箇所 |

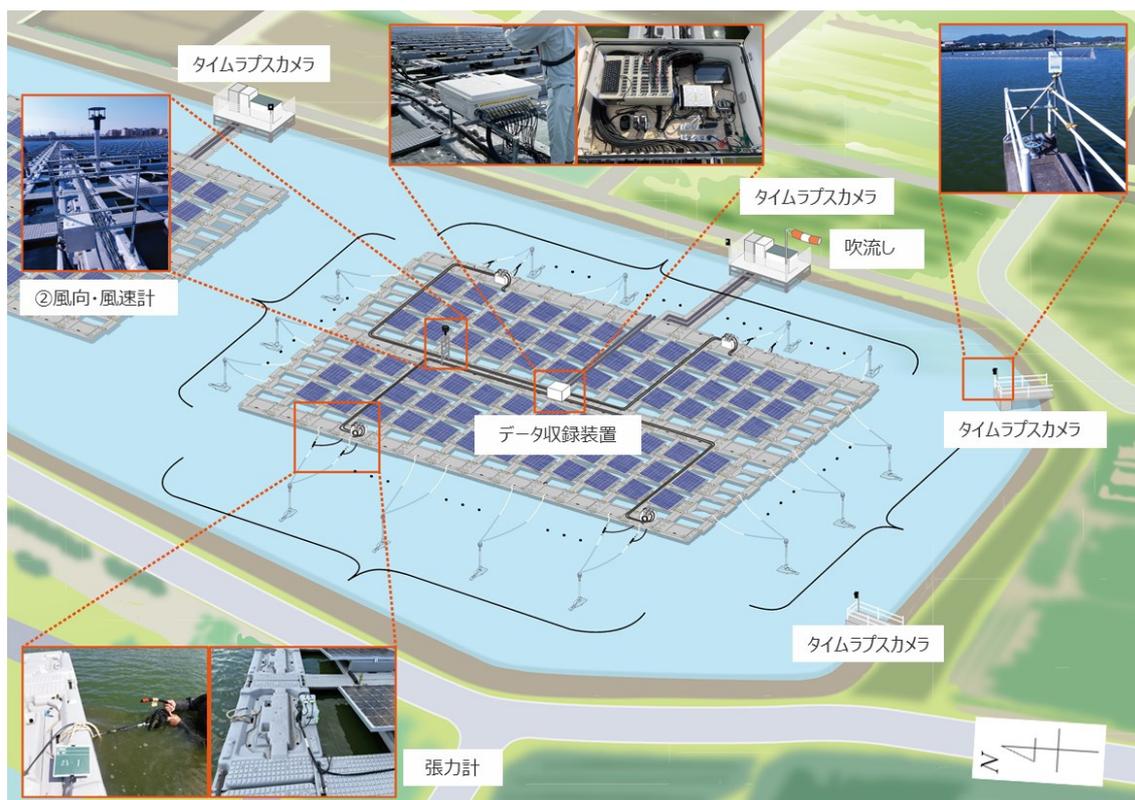


図 2-10 女井間池鳥観図

2.2.2 張力計測

女井間池の水上設置型太陽光発電設備は打込式アンカーによって係留されている。本実験ではアンカーとフロートを繋いでいる係留索に張力計（鉄筋計）を接続し、係留索に作用する軸方向引張荷重を計測した。係留索の材料は繊維ロープが使用されている。使用した張力計の諸元を表 2-2、設置方法を図 2-11、外観図を図 2-12、配置図を図 2-13 に示す。

東西方向の風が卓越していること、太陽電池モジュールが南向きに傾斜しており北風による風力係数が大きくなることから、水上設置型太陽光発電設備の北側、東側、西側の係留索に張力計を設置した（東側：6箇所、西側：12箇所、北側：10箇所）。また、アイランド東側および西側に1箇所ずつ温度計を設置して水温を計測し、張力計観測値の温度補正を行った。張力計のサンプリング周波数は20Hzとし、常時計測した。張力計の設置に当たり、水中アンカーからフロートまでの係留索長が変わらないよう留意した。

表 2-2 張力計諸元

| BF-CT（株式会社 共和電業） | | |
|------------------|---------|------------------------------|
| 性能 (応力測定) | 定格容量 | 0~60 m/s（変更可） / 4~20 mA・0~5V |
| | 精度 | ±2%（12m/s） |
| | 分解能 | 0.01m/s |
| 環境特性 | 許容温度範囲 | -30 ~ 80℃ |
| | 温度補償範囲 | -20 ~ 70℃ |
| | 零点の温度影響 | ±0.05%RO/℃以内 |
| | 出力の温度影響 | ±0.05%/℃以内 |

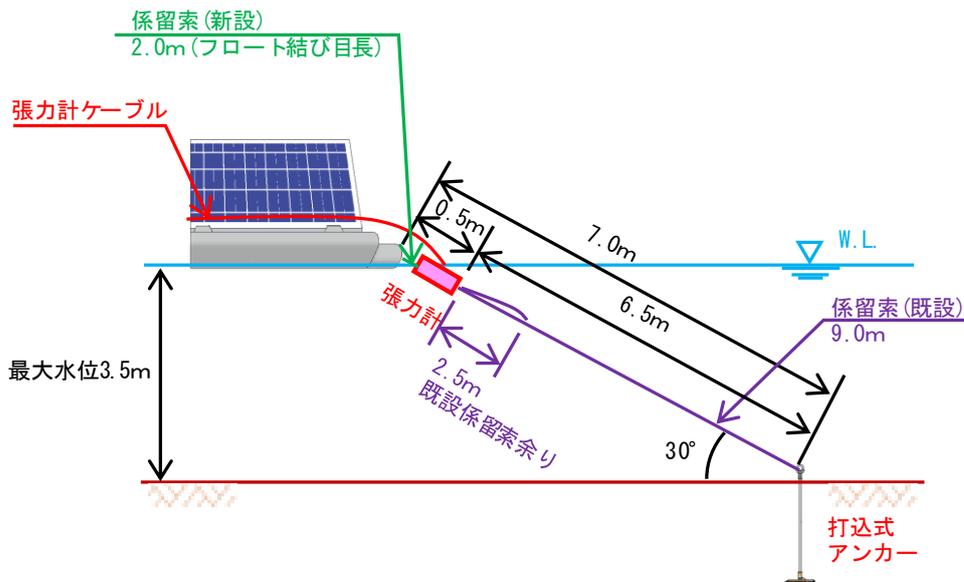
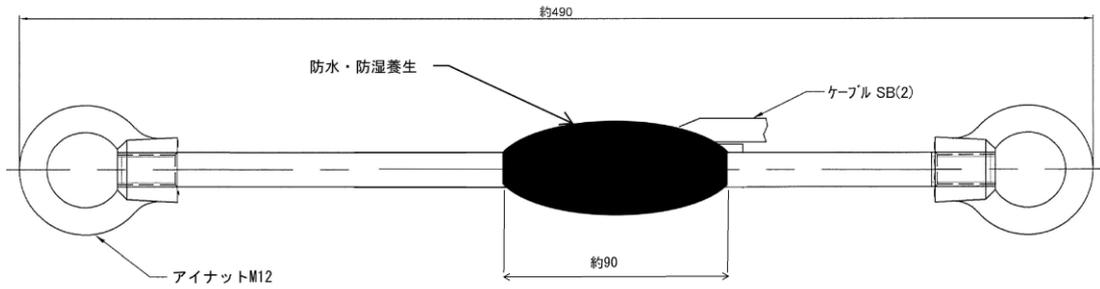


図 2-11 張力計設置方法

鉄筋計外観図 S=1/2



材質：SUS304
 材料：ピーリング材 M12 400mm
 アイナットM12(溶接接続)
 ケーブルSB(2) 10m

図 2-12 張力計外観図

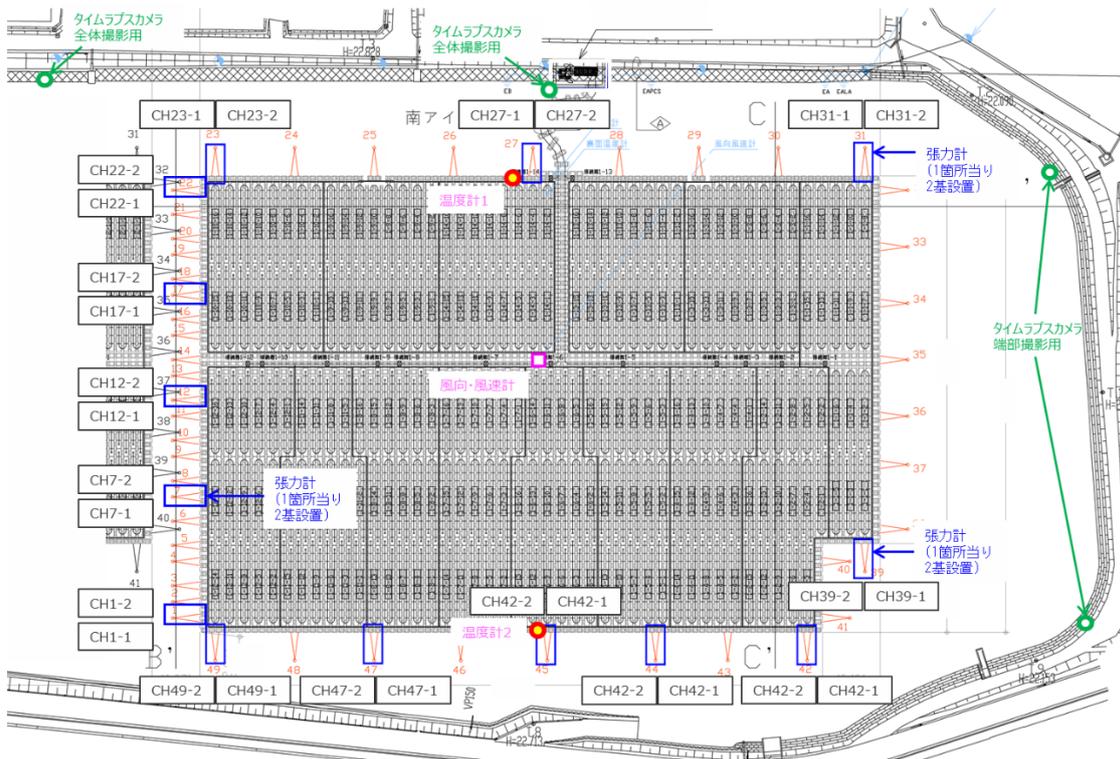


図 2-13 張力計配置図

2.2.3 風況観測

風向および風速は、超音波風向風速計（三井住友建設所有）の観測データをアイソレータにて分岐し、データロガーにて記録した。超音波風向風速計の諸元を表 2-3 に示す。風向風速計の外観図を図 2-14 に示す。

表 2-3 風向風速計諸元

| ウィンド ソニック PGWS-100-3 (株式会社プリード) | | |
|---------------------------------|-----|-------------------------------------|
| パラメーター | | 風速、風向 |
| 計測単位 | | m/s |
| 風速 | 範囲 | 0~60 m/s (変更可) /4~20 mA・0~5V |
| | 精度 | ±2% (12m/s) |
| | 分解能 | 0.01m/s |
| 風向 | 範囲 | 0~360 度・0~540 度/4~20mA・0~5V (不感帯なし) |
| | 精度 | ±2% (12m/s) |
| | 分解能 | 1 度 |
| 形状 | 外寸 | 142×160mm |
| | 重量 | 0.5kg |

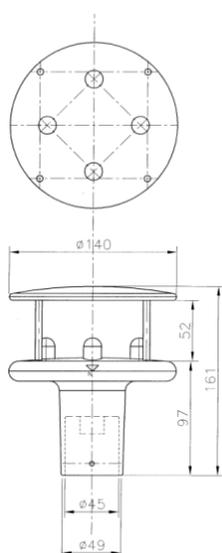


図 2-14 風向風速計外観図

2.2.4 アイランド移動状況確認

水上設置型太陽光発電設備のアイランド全体の動きを確認するため、タイムラプスカメラ撮影（1ショット／30秒）を行った。カメラは次の4箇所に設置した。

- ①女井間池南西側の取水口付近のパイプフェンス（転落防止柵）
- ②女井間池南東側の取水口付近のパイプフェンス（転落防止柵）
- ③南側アイランドの PCS 侵入防止フェンス
- ④北側アイランドの PCS 侵入防止フェンス



(a) タイムラプスカメラ



(b) 女井間池南東側



(c) 女井間池南西側



(d) 北側アイランド PCS 侵入防止フェンス

図 2-15 タイムラプスカメラ設置状況

2.3 計測結果

2.3.1 合計張力への換算

図 2-13 に示したとおり、本実測調査は係留索の全数計測を行っていない。以降の検討では、アイランド 1 辺に設置されている係留索全体の合計張力を把握するため、1 辺の張力計数と 1 辺の全係留索数の比率から、実測張力を合計張力に換算している。

2.3.2 係留索張力の実測値

係留索張力及び風向・風速の実測値を図 2-16～図 2-19 に示す。対象箇所は東風が卓越しているが、その中でも比較的、西風が多く観測された 2022 年 5 月、東風が多く観測された 2022 年 9 月のグラフを示す。縦軸の合計張力はアイランド一辺に作用する荷重である。これは、「2.3.1 合計張力への換算」で示したように、アイランド 1 辺の張力計数とアイランド 1 辺の全係留索数の比率から実測張力を換算して算出した合計値である。

2022 年 9 月 18 日未明には台風 14 号が襲来し、最大瞬間風速は 18.6m/s を観測した。計測された個々での張力の最大値は 3.09kN (CH27-1) であった。

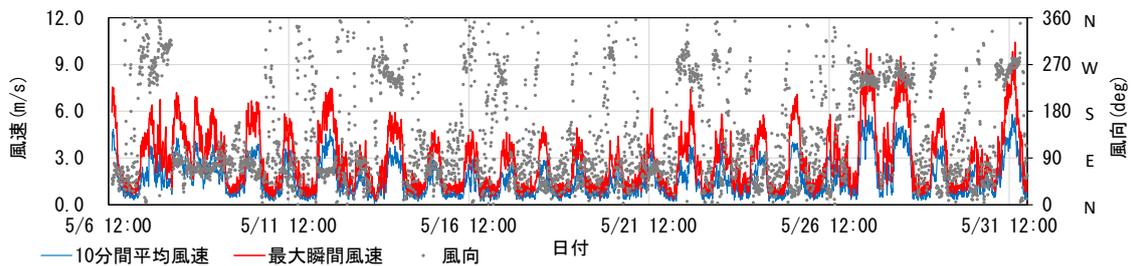


図 2-16 2022 年 5 月の風速および風向

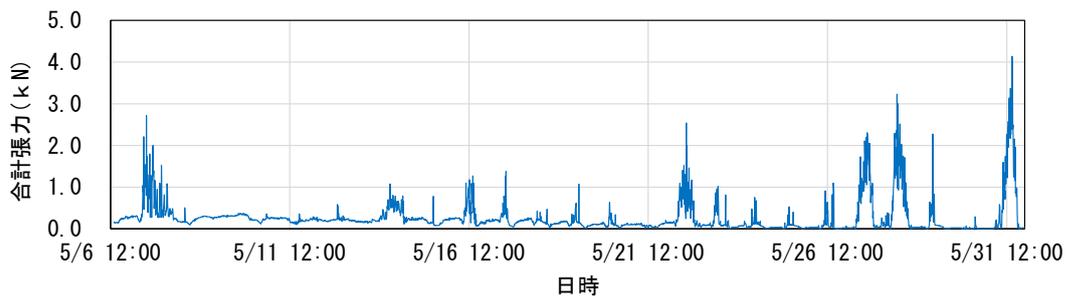


図 2-17 2022 年 5 月の西側合計張力

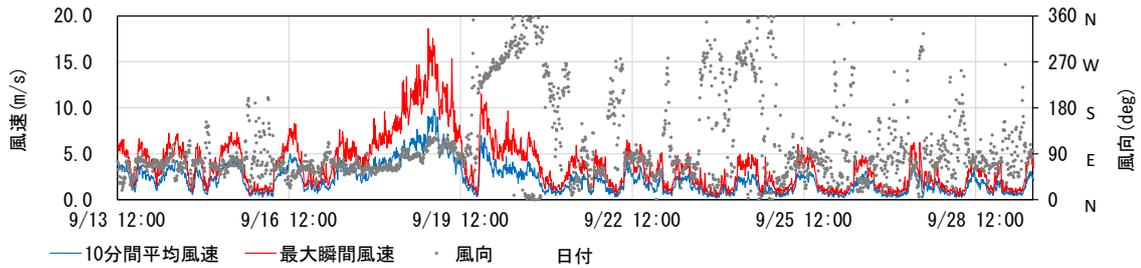


図 2-18 2022 年 9 月の風速および風向



図 2-19 2022 年 9 月の東側合計張力

2.3.3 アイランド全体に作用する風圧荷重の計算値と実測値の比較

(1) 風圧荷重の算出

風圧荷重について実測値と計算値を比較した。実測値は水上設置型太陽光発電設備に設置した張力計から得られた荷重である。風圧荷重（計算値）は風洞実験によって得られた方角毎の風力係数（0度～180度まで5度ピッチ）から算出された荷重とした。風圧荷重（計算値）の算出には以下の式を用いた。

$$F = C_W \cdot q \cdot A_W \quad (2.1)$$

$$q = 0.6 \cdot V_0^2 \cdot E \cdot I \quad (2.2)$$

$$E = E_r^2 \cdot Gf \quad (2.3)$$

$$E_r = 1.7 \cdot (Zb/ZG)^\alpha \quad (2.4)$$

ここで、 F ：風圧荷重（N）、 C_W ：風力係数、 A_W ：受風面積（ m^2 ）、 q ：速度圧（ $N \cdot m^{-2}$ ）、 V_0^2 ：10分間平均風速（m/s）、 E ：環境係数、 I ：用途係数、 E_r ：高さ方向分布係数、 Gf ：ガスト影響係数、 Zb ：地表面近くで風速を一定とする高さ（m）、 ZG ：地表面の影響を受けない高さ（m）、 α ：平均風速の高さ方向の分布を示す係数である。

風圧荷重の算出に当って、風力係数 C_W は風洞実験によって得られた方角毎の風力係数、10分間平均風速 V_0^2 は現地での観測値、用途係数 I は1.0、ガスト影響係数 Gf は2.5、地表面近くで風速を一定とする高さ Zb は5m、地表面の影響を受けない高さ ZG は450m、平均風速の高さ方向の分布を示す係数 α は0.20を用いた。

(2) 風圧荷重の計算値と実測値との比較結果

風圧荷重の計算値と実測値の比較を表 2-4 に示す。北側係留索についてはおおむね計算値と実測値が整合している。東側係留索および西側係留索は実測値が計算値を若干下回っている。これは、東側に設置されている PCS からの配線用フロートが東西方向の風圧荷重を負担していることによると考えられる。また、水上 P V は周囲を堤体に囲まれており、東西方向については、フロートと堤体の距離が約 15m と近接している。そのため、堤体によって風速が計算で想定している値より小さくなり、結果として係留索の張力の計算値が実測値より小さくなったと考える。アイランドの北側側面については、堤体までの距離が約 200m あり、吹送距離が東西方向と比較して長いことから、おおむね計算値と実測値が整合したと考える。

また、台風来襲時や台風接近時のように長時間強風が吹く状況では、北側係留索において実測値が計算値を上回る結果となった。

表 2-4 風圧荷重と実測値の比較

| 項目 | 計測年度 | | |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | 2022 年度 | 2023 年度 | 2024 年度 |
| 北側係留索 | <ul style="list-style-type: none"> 最大張力 (R4. 5月～9月) 平均張力 (R4. 5月～9月) 最大張力 (R4. 9月 台風14号来襲時) | <ul style="list-style-type: none"> 最大張力 (R5. 4月～R6. 3月) 平均張力 (R5. 4月～R6. 3月) 最大張力 (R5. 8月 台風7号接近時) | <ul style="list-style-type: none"> 最大張力 (R6. 4月～R7. 1月) 平均張力 (R6. 4月～R7. 1月) |
| 東側係留索 | <ul style="list-style-type: none"> 最大張力 (R4. 5月～9月) 平均張力 (R4. 5月～9月) 最大張力 (R4. 9月 台風14号来襲時) | <ul style="list-style-type: none"> 最大張力 (R5. 4月～R6. 3月) 平均張力 (R5. 4月～R6. 3月) | <ul style="list-style-type: none"> 最大張力 (R6. 4月～R7. 1月) 平均張力 (R6. 4月～R7. 1月) |
| 西側係留索 | <ul style="list-style-type: none"> 最大張力 (R4. 5月～9月) 平均張力 (R4. 5月～9月) | <ul style="list-style-type: none"> 最大張力 (R5. 4月～R6. 3月) 平均張力 (R5. 4月～R6. 3月) | <ul style="list-style-type: none"> 最大張力 (R6. 4月～R7. 1月) 平均張力 (R6. 4月～R7. 1月) |

2.3.4 係留索張力の分散(偏り)状況

図 2-20、図 2-21 に 2022 年 5 月および 2022 年 9 月の最大張力が計測された際（2022 年 9 月は台風 14 号来襲時）の、張力計計測値および風況（10 分間平均）を示す。2022 年 5 月（図 2-20）の西側係留索においては、荷重が均等に分散せず特定の係留索に荷重が集中している。2022 年 9 月（図 2-21）の東側係留索においても同様の現象が確認される。

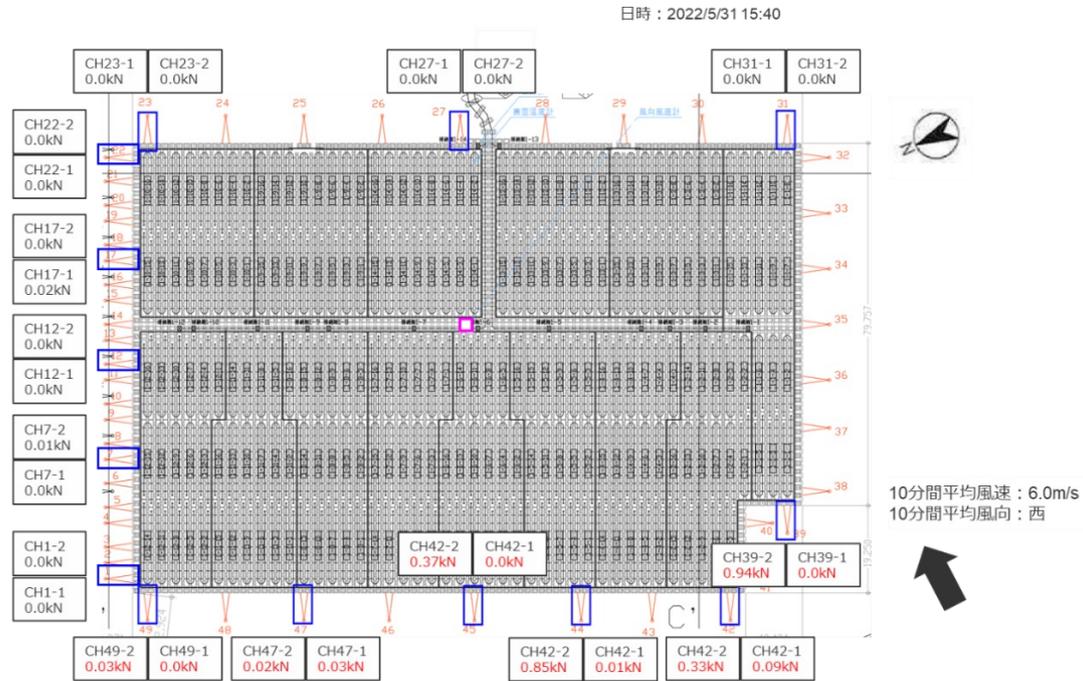


図 2-20 2022 年 5 月の最大張力計測時のアイランド全体張力

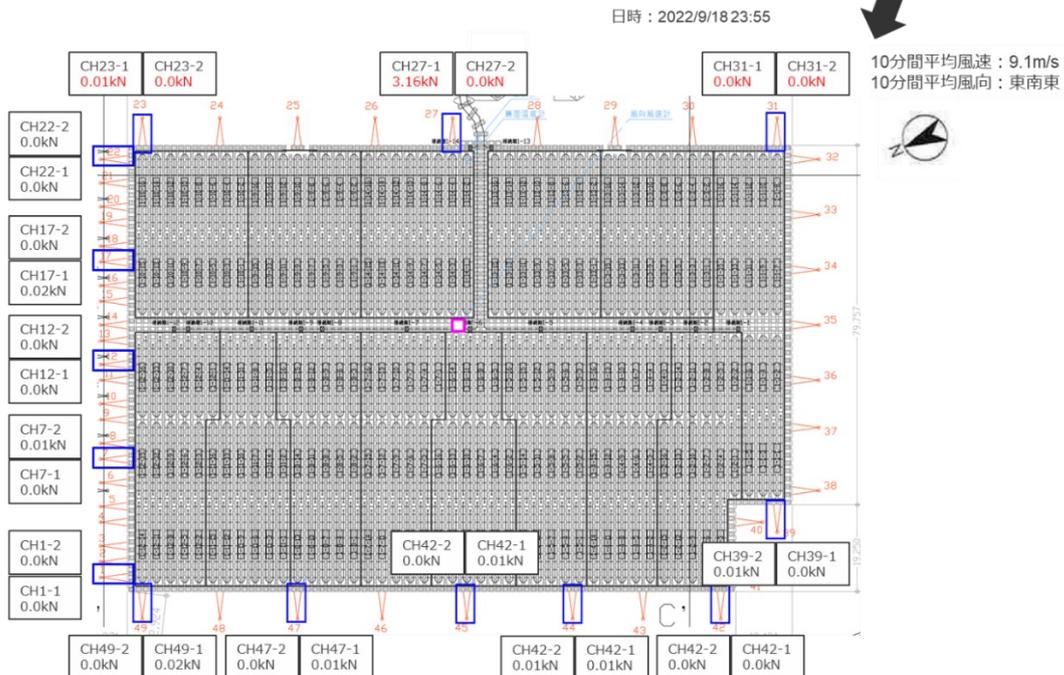


図 2-21 2022 年 9 月の最大張力計測時のアイランド全体張力

2022年5月～2022年9月および2023年4月～2024年2月における係留索の平均張力と最大張力の比較を表2-5に示す。ここでの平均張力とは、係留索に荷重が均等に分散すると仮定した場合の値を示す。本実測調査では、平均張力に対し約3～5倍の最大張力が作用していた。このことから、係留索に荷重が均等に作用すると仮定し、平均張力を設計荷重として設定すると、過小設計となる懸念がある。なお、この現象の原因として、①アイランドの辺に対し斜めから風が作用し、風上側の係留索に張力が集中すること、②係留索の長さが不均一であり短い係留索に張力が集中すること、の2つが考えられる。

表 2-5 係留索の平均張力と最大張力の比較

| 項目 | 対象期間 | | |
|-------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| | 2022年5月～2023年3月 | 2023年4月～2024年3月 | 2024年4月～2024年12月 |
| 北側係留索 | <p>一次近似式： $y = 3.54x$</p> | <p>一次近似式： $y = 3.82x$</p> | <p>一次近似式： $y = 4.12x$</p> |
| 東側係留索 | <p>一次近似式： $y = 4.17x$</p> | <p>一次近似式： $y = 4.11x$</p> | <p>一次近似式： $y = 4.12x$</p> |
| 西側係留索 | <p>一次近似式： $y = 4.37x$</p> | <p>一次近似式： $y = 3.50x$</p> | <p>一次近似式： $y = 3.80x$</p> |

水上設置型太陽光発電設備においては、1つのアンカーに複数の係留索を取り付けている場合があり、本実測調査サイトでは、1つのアンカーに2本の係留索を取り付けている。ここでは、同一のアンカーに設置されている2本の係留索における張力分散を評価する。

図 2-22～図 2-24 に風向別の2本の係留索の張力の比較を示す。2本の係留索のうち、フロートから水面に向かって左側の係留索張力を T_{left} 、右側を T_{right} と定義した。c)、d)は2022年5月および2022年9月における、風向別の2本の係留索張力の分散状況をプロットしたものである。e)、f)は2022年5月～2022年9月における、特定のアンカーに着目した風向別の2本の係留索張力の分散状況をプロットしたものである。

図 2-23、図 2-24 においては、風向 120 度～180 度（青色および桃色）のとき風上側である T_{left} の張力が大きくなるなど、風向に応じた張力の分散が確認された。他方、図 2-22 の e)においては、風向によらず張力が T_{right} に集中しており、 T_{left} には張力がほとんど作用していない。このように、片方の係留索にのみ張力が集中する現象が確認された。

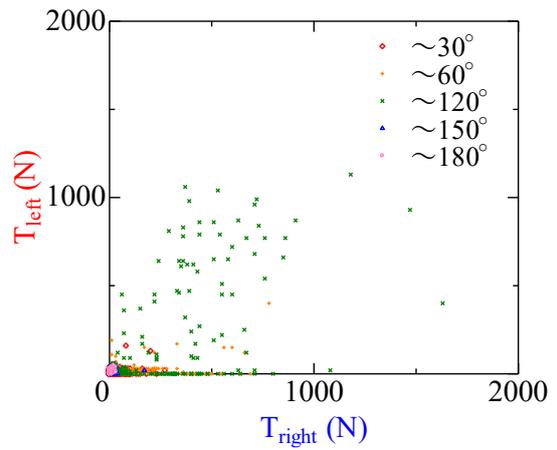
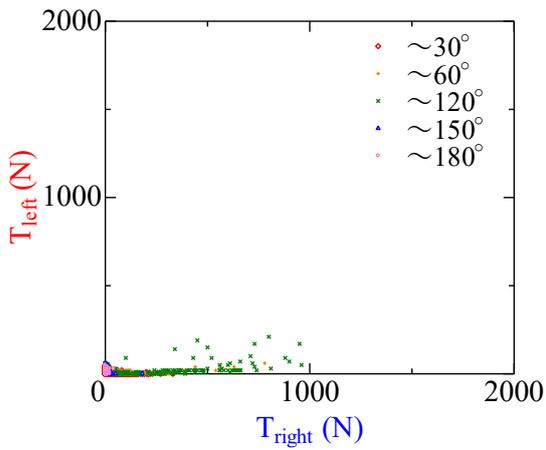
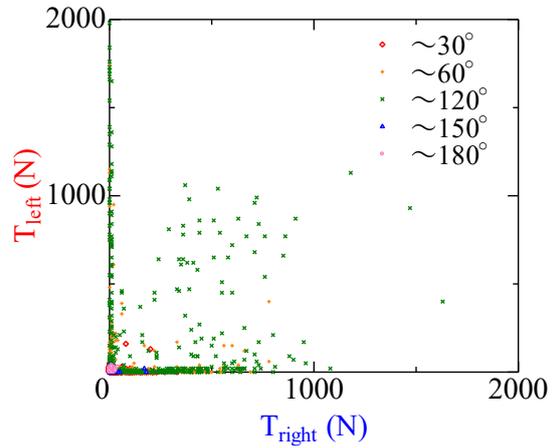
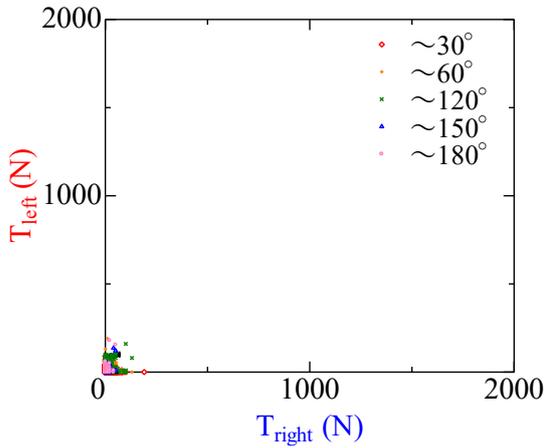
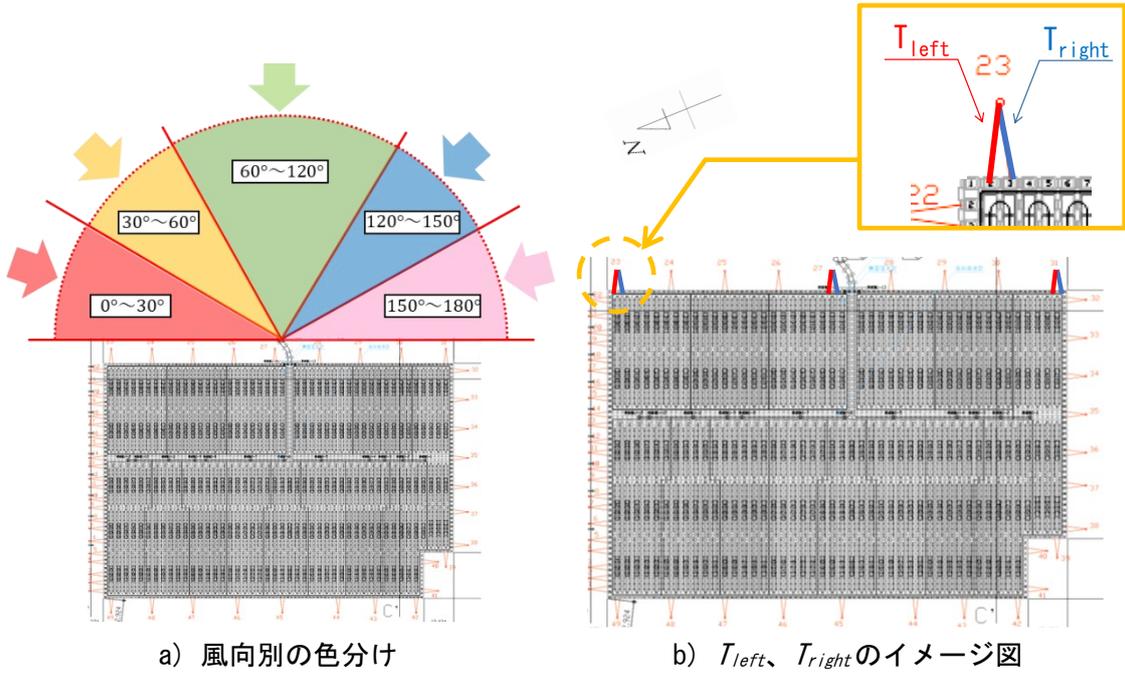
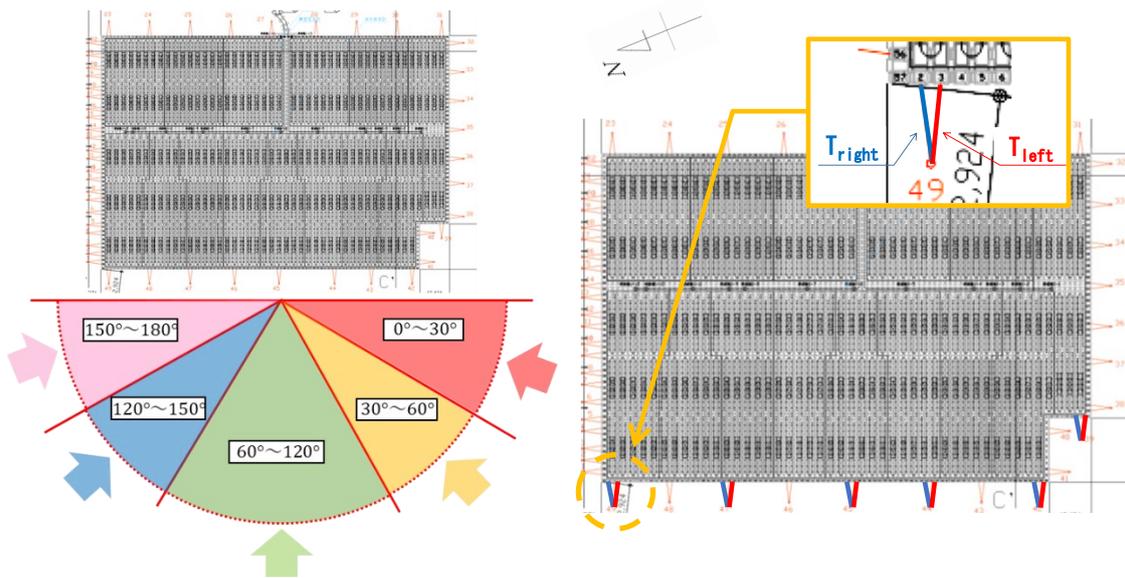
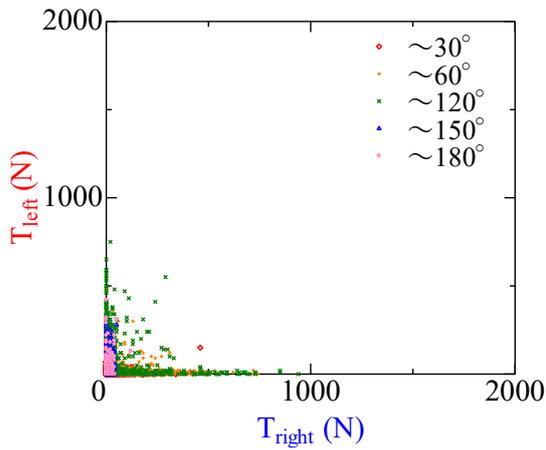


図 2-22 アイランド東側の 2 本の係留索張力の分散状況

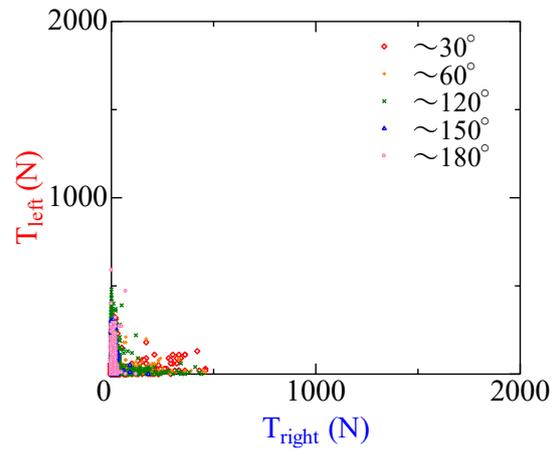


a) 風向別の色分け

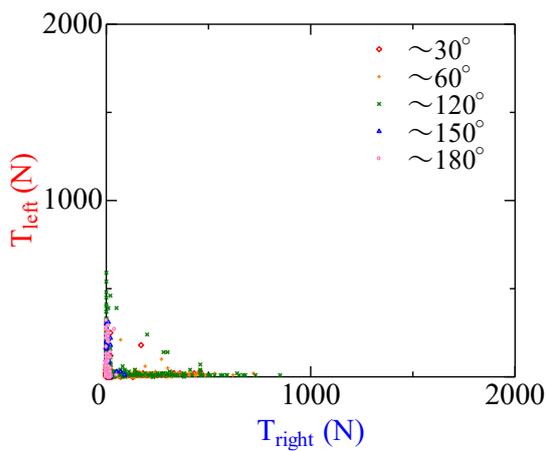
b) T_{left} 、 T_{right} のイメージ図



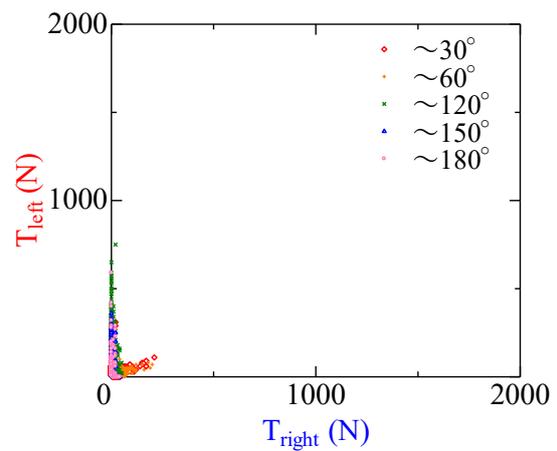
c) 2022年5月の係留索張力の分散状況



d) 2022年9月の係留索張力の分散状況



e) CH44の係留索張力の分散状況



f) CH47の係留索張力の分散状況

図 2-23 アイランド西側の2本の係留索張力の分散状況

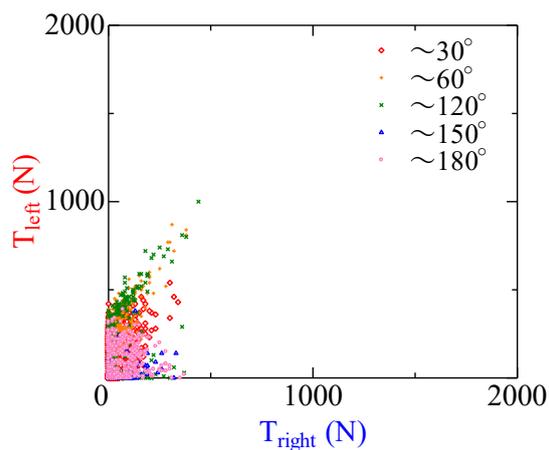
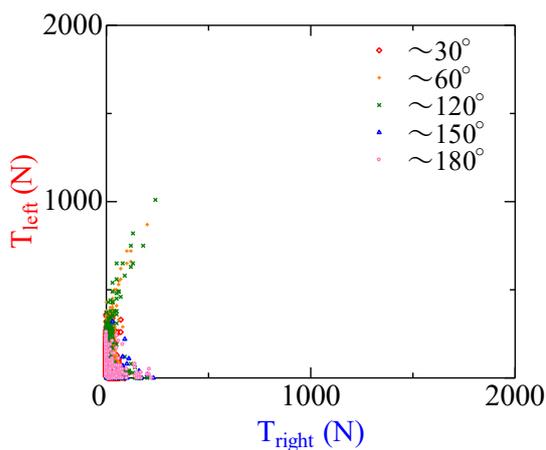
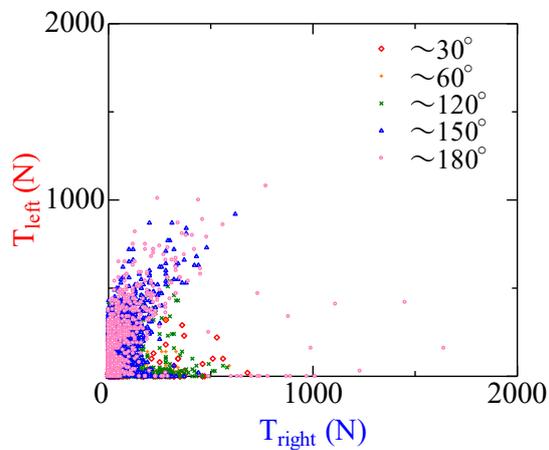
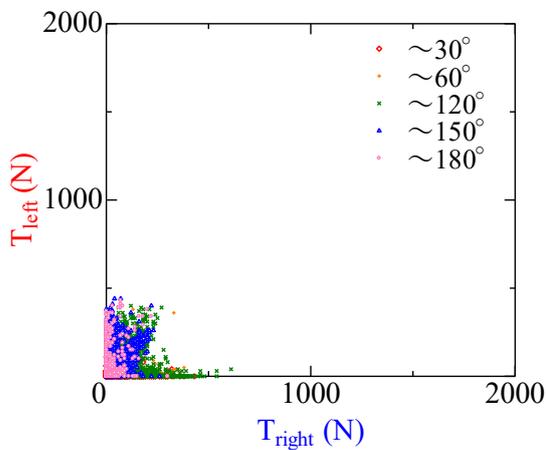
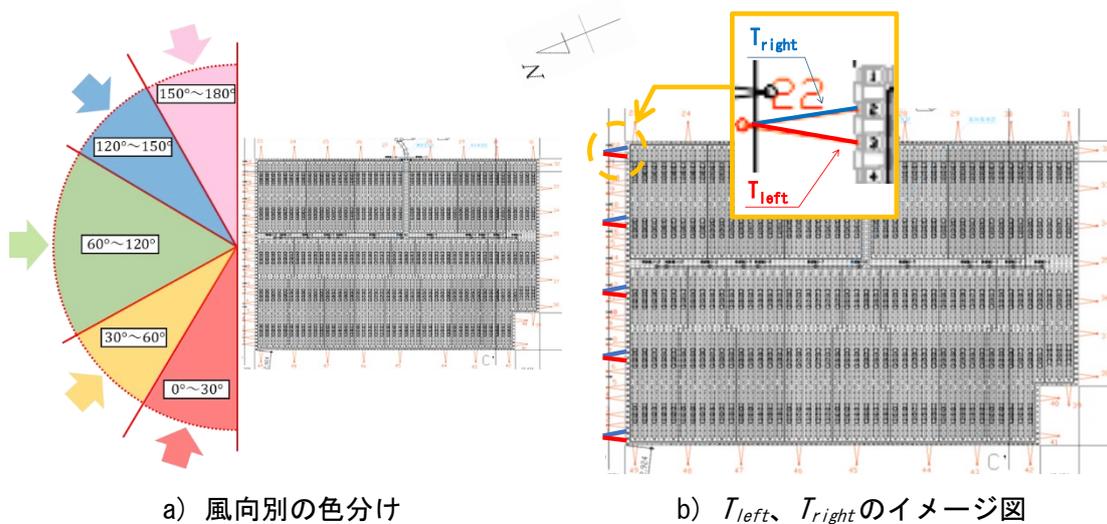


図 2-24 アイランド北側の2本の係留索張力の分散状況

2.4 アイランドの水平移動

2.4.1 アイランドの移動状況

対象箇所周辺に設置したタイムラプスカメラによりアイランド全体の動きを確認した。図 2-25 にタイムラプスカメラの設置箇所を示す。アイランドの移動状況について 2021 年 10 月 4 日の地点①での撮影画像を図 2-26 に示す。この事例では、アイランド全体が弓状にしなることによる形状変化等はなく、水面上を平行移動していることが確認された。

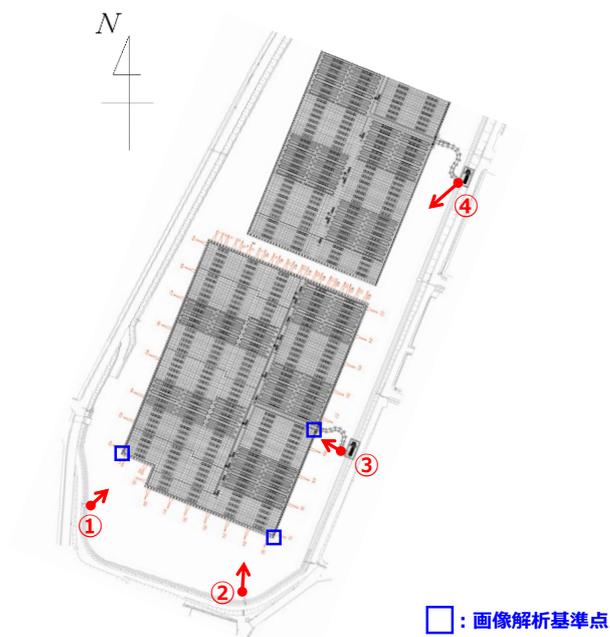


図 2-25 タイムラプスカメラ設置箇所



図 2-26 2021 年 10 月 4 日のアイランド移動状況
(左 : 11 時 36 分時点、右 : 12 時 15 分時点)

2.4.2 画像解析によるアイランド移動量（推定値）の算出

撮影データを画像解析することによりアイランドの移動量（推定値）を算出した。①アイランド南西側の端点（図 2-27 青色枠部）、②アイランド南東側の端点（図 2-28 青色枠部）、③アイランド東側中央部のボックス（図 2-29 青色枠部）の移動量を算出し、3 地点の各移動量からアイランド全体の移動量を算出（推定）した。アイランドの移動量算出に当たっての座標の定義を図 2-30 に示す。東西方向を X 軸、南北方向を Y 軸としている。

解析結果の一例として、X 軸方向（東西方向）と Y 軸方向（南北方向）のアイランド移動量を図 2-31 に示す。



図 2-27 女井間池南西側タイムラプスカメラ解析状況



図 2-28 女井間池南東側タイムラプスカメラ解析状況



図 2-29 南側アイランド PCS 内タイムラプスカメラ解析状況

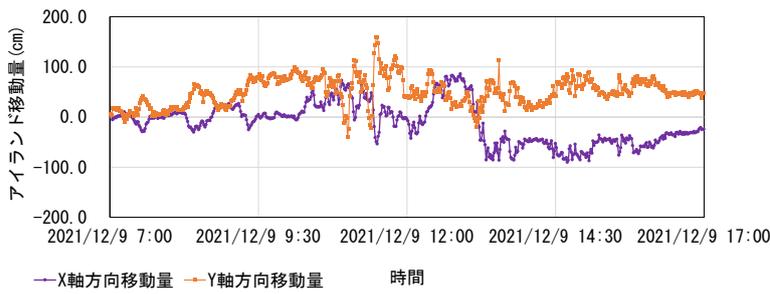


図 2-31 2021 年 12 月 9 日のアイランド移動量 (推定値)

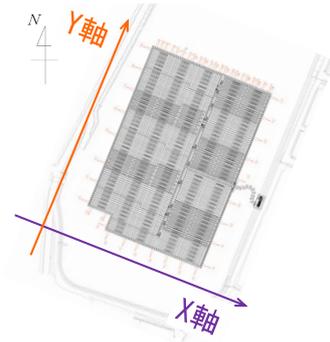


図 2-30 座標の定義

2.4.3 アイランド移動量と係留索張力の関係性

北風、西風、東風が卓越している日のタイムラプスカメラの撮影データを選定し、画像解析を実施した。アイランドの移動量を算出し、風況、係留索張力と比較することで、その関係性について確認した。

(1) 北風卓越時

北風が卓越している期間であった 2024 年 8 月 16 日における時系列の風況データ、アイランド移動量 (推定値) および係留索張力を図 2-32、図 2-33 に示す。風向、平均風速については 1 分間の平均値である。図 2-32 の第 1 軸は最大合計張力を示している。これは、1 分間での $\Delta t = 0.05s$ における方角毎合計張力の最大値である。図 2-33 の第 2 軸は Y 軸方向 (南北方向) のアイランド移動量を示している。風速は 7:00 頃から 15:00 頃にかけて増大している。それに伴い、アイランドも南側に移動することによって、北側係留索に荷重が作用していることが分かる。

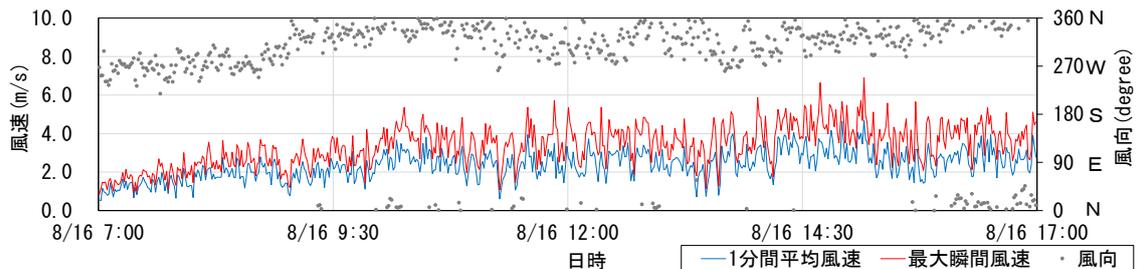


図 2-32 2024 年 8 月 16 日の風速および風向

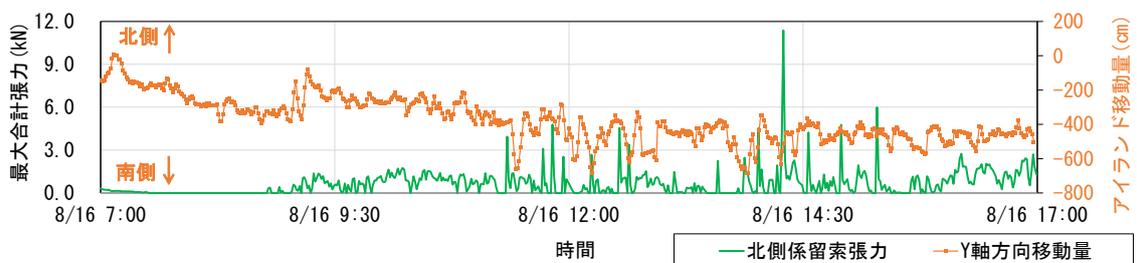


図 2-33 係留索張力と Y 軸方向アイランド移動量

(2) 西風卓越時

西風が卓越している期間であった 2024 年 7 月 8 日における時系列の風況データ、アイランド移動量（推定値）および係留索張力を図 2-35、図 2-36 に示す。風向、平均風速については 1 分間の平均値である。図 2-36 の第 1 軸は最大合計張力を示している。これは、1 分間での $\Delta t = 0.05s$ における方角毎合計張力の最大値である。図 2-36 の第 2 軸は X 軸方向（東西方向）のアイランド移動量を示している。風速は 7:00 頃から 15:00 頃にかけて増大している。それに伴い、アイランドも東側に移動することによって、西側係留索に荷重が作用していることが分かる。他方、東側係留索については、アイランドが東側に移動し係留索が弛むことから、荷重が作用していないことが分かる。

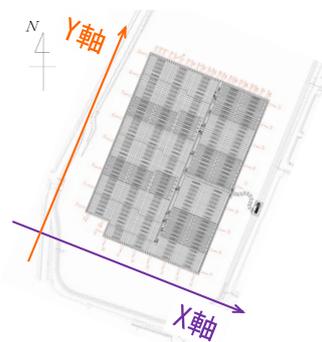


図 2-34 座標の定義

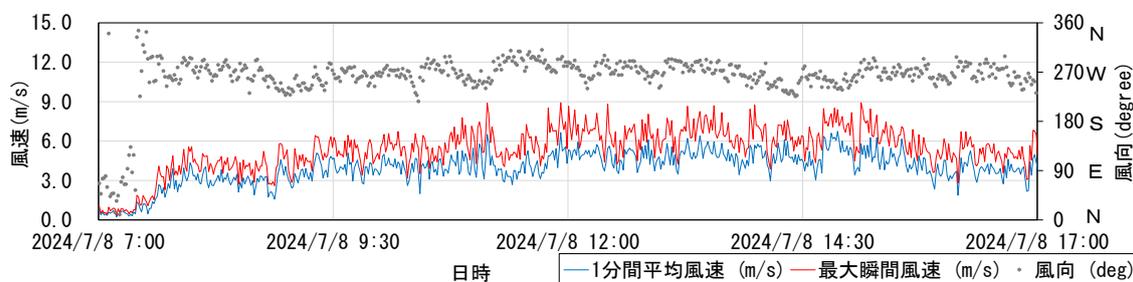


図 2-35 2024 年 8 月 16 日の風速および風向

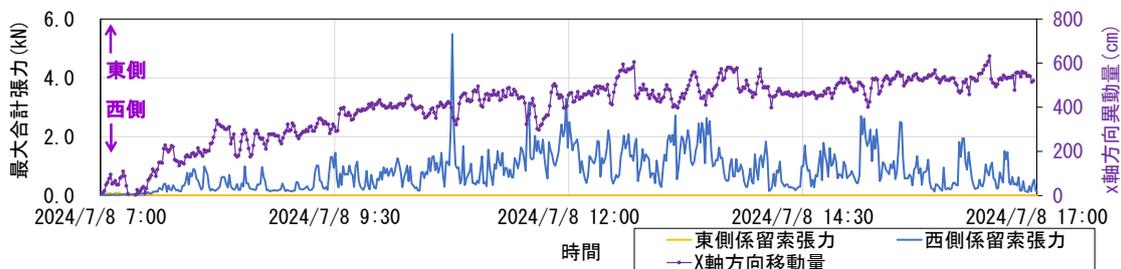


図 2-36 係留索張力と Y 軸方向アイランド移動量

(3) 東風卓越時

東風が卓越している期間であった 2023 年 8 月 10 日における時系列の風況データ、アイランド移動量（推定値）および係留索張力を図 2-38、図 2-39 に示す。風向、平均風速については 1 分間の平均値である。図 2-39 の第 1 軸は最大合計張力を示している。これは、1 分間での $\Delta t = 0.05s$ における方角毎合計張力の最大値である。図 2-39 の第 2 軸は X 軸方向（東西方向）のアイランド移動量を示している。東風が卓越していることから、アイランドが西側に移動し、東側係留索に荷重が作用していることが分かる。他方、東側係留索については、アイランドが東側に移動し係留索が弛むことから、荷重が作用していないことが分かる。

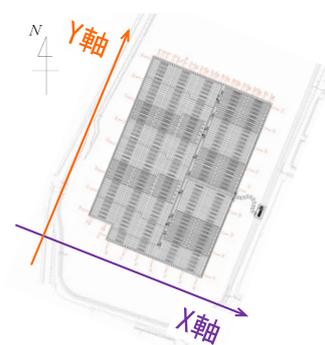


図 2-37 座標の定義

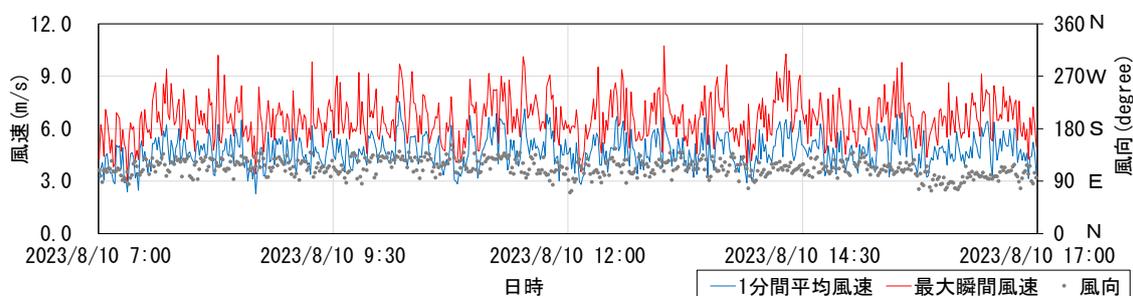


図 2-38 2024 年 8 月 16 日の風速および風向

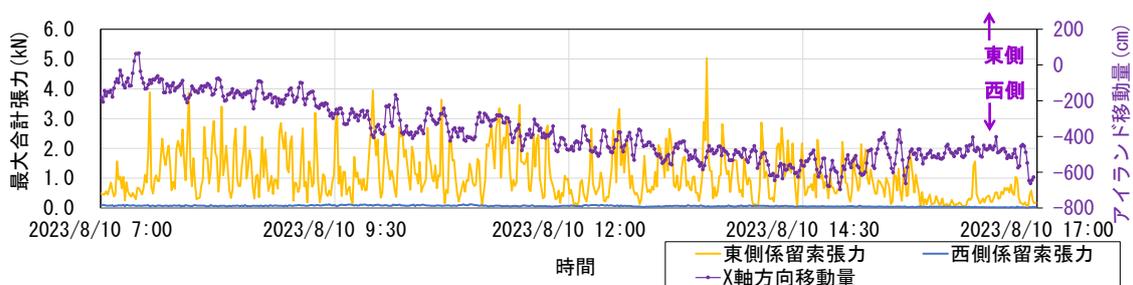


図 2-39 係留索張力と Y 軸方向アイランド移動量

(4) アイランド移動量と係留索張力の関係性

図 2-40、図 2-41 にアイランド移動量に対する係留索張力を示す。先述した北風卓越時の 2024 年 8 月 16 日のデータを図 2-40 に示す。また、東風卓越時の 2023 年 8 月 10 日と西風卓越時の 2024 年 7 月 8 日のデータを図 2-41 に示す。図 2-40 では、アイランドが南側（Y 軸方向）への移動量が多くなるにつれて、北側係留索に作用する荷重が大きくなる傾向にある。図 2-41 では、アイランドの移動量が東側に多くなるにつれて、西側係留索に作用する荷重が大きくなる傾向にあり、東側係留索には荷重が作用していないことが分かる。アイランドの移動量が西側に多い場合は、東側係留索に荷重が作用しているが、西側係留索に荷重が作用していないことが分かる。

図 2-40、図 2-41 とともに、アイランドの移動量が最大値の際に、合計張力の最大値が計測されていない。これは、係留索の全数計測を行っていないことが要因の一つと考えられる。本実測調査は係留索の全数計測は行っていないことから、アイランド一辺の合計張力は計測できていない。「2.3.4 係留索張力の分散（偏り）状況」で張力の偏り現象が確認された中、計測を実施した係留索のみでの合計張力であるため、アイランドの移動量最大値の際に合計張力最大値が計測されていないと考える。

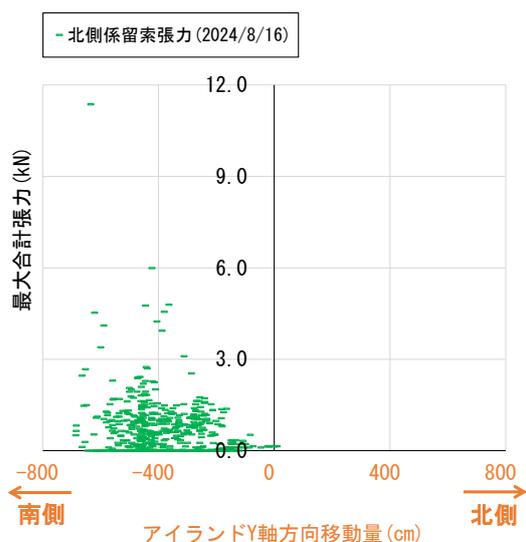


図 2-40 Y 軸方向(南北方向)移動量に対する係留索張力

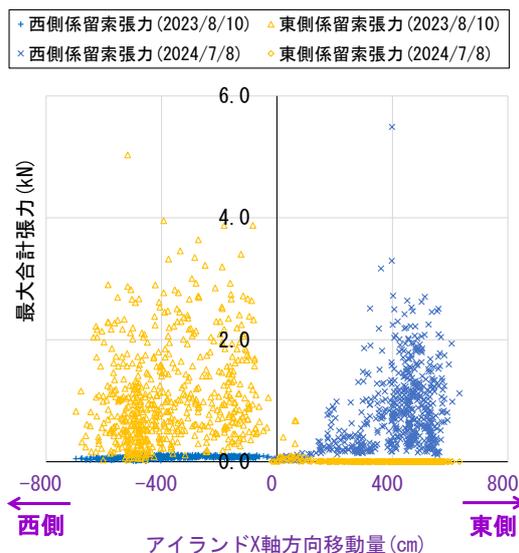


図 2-41 X 軸方向(東西方向)移動量に対する係留索張力

3. L字型アイランド形状の水上太陽光発電設備実測調査

3.1 実験条件

3.1.1 対象箇所

中部地方某所

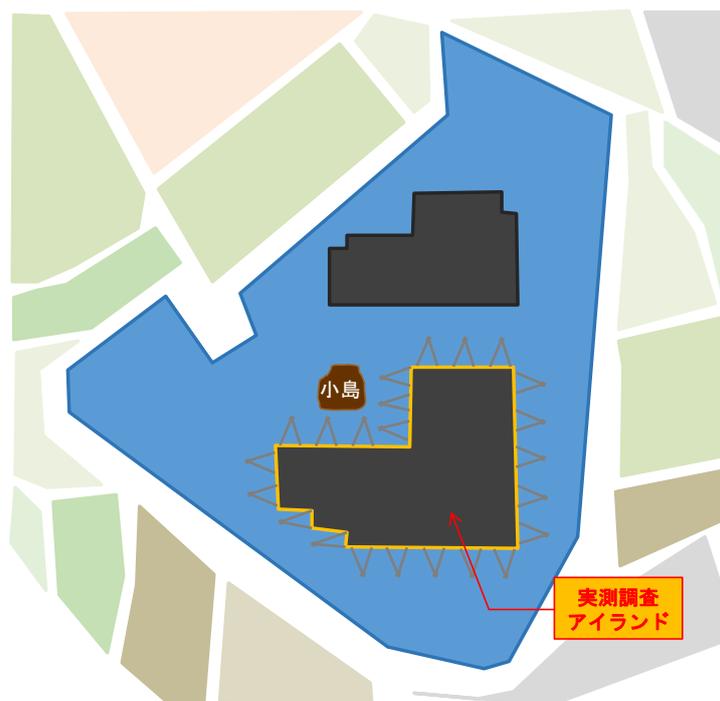


図 3-1 調査対象箇所イメージ図

3.1.2 実測調査箇所の風況

実測調査箇所と近傍 2 箇所での AMeDAS のウィンドローズを図 3-2、図 3-3 に示す。計測期間が長期のため、やや強い風（風速が 10m/s 以上 15m/s 未満）が計測された 2024 年 5 月と 12 月の風況データを代表して示す。2024 年 5 月において、調査箇所と近傍 AMeDAS ①、②では北西方向と南東方向からの風が卓越している。調査箇所は、東側に海洋、西側に山地があることから、海風と山から吹き下ろす方向の風が卓越していると思われる。2024 年 12 月においても、調査箇所と近傍 AMeDAS ①、②では北西方向の風が卓越しているが、これは冬季になり山地からの吹き下ろす風が夏季よりも強くなったことが要因とされる。

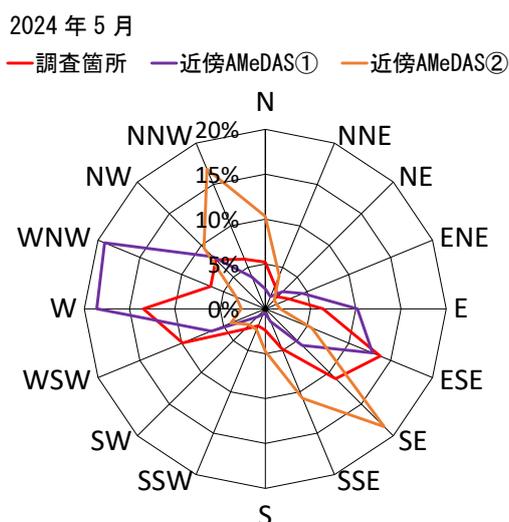


図 3-2 2024 年 5 月の調査箇所と近傍 AMeDAS のウィンドローズ比較
(10 分間平均風向)

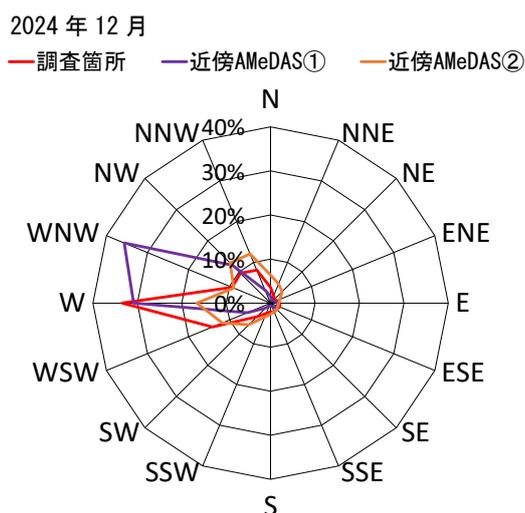


図 3-3 2024 年 12 月の調査箇所と近傍 AMeDAS のウィンドローズ比較
(10 分間平均風向)

図 3-4～図 3-9 に 2024 年 5 月と 2024 年 12 月における調査箇所と近傍 AMeDAS の 10 分間平均風速および最大瞬間風速の比較を示す。調査箇所と近傍 AMeDAS①の風速を比較すると、若干調査箇所の方が風速は小さい傾向にある。これは、近傍 AMeDAS①が山地の麓に位置しており、山からの吹き下ろしの風が調査箇所よりも強いことが要因として考えられる。調査箇所と近傍 AMeDAS②の風速は、概ね一致している傾向にある。

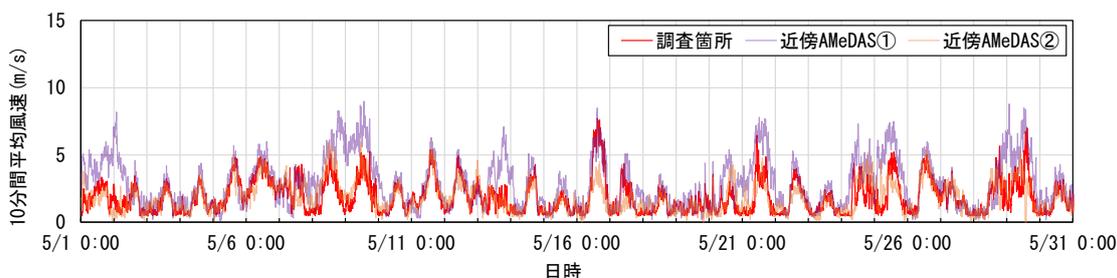


図 3-4 調査箇所および近傍 AMeDAS の 10 分間平均風速 (2024 年 5 月)

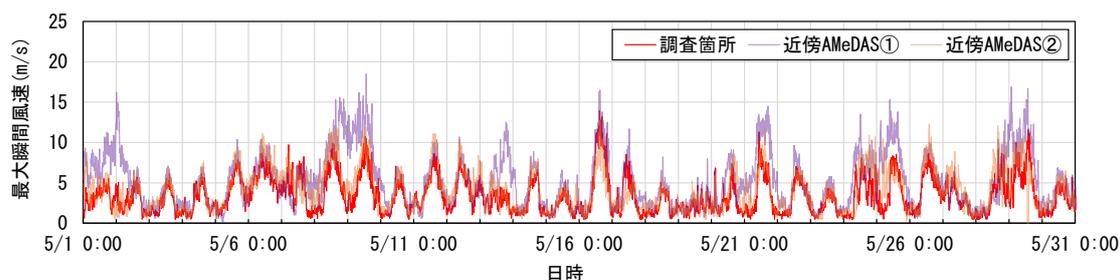


図 3-5 調査箇所および近傍 AMeDAS の最大瞬間風速 (2024 年 5 月)

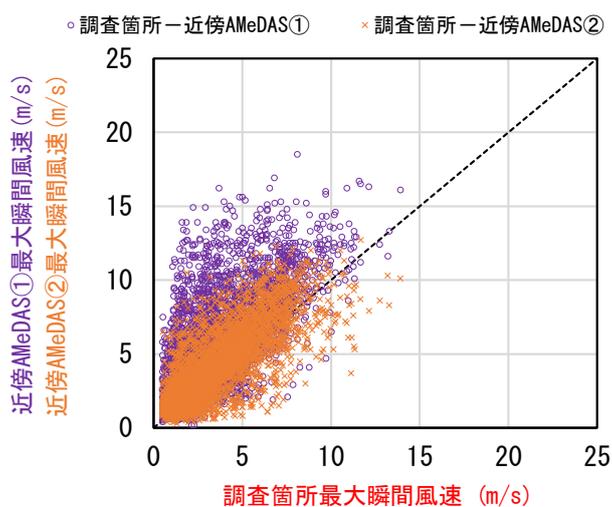


図 3-6 調査箇所と近傍 AMeDAS の最大瞬間風速の相関 (2024 年 5 月)

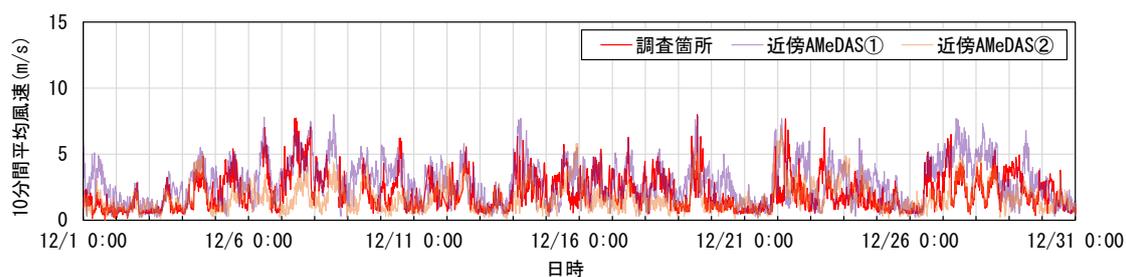


図 3-7 調査箇所および近傍 AMeDAS の 10 分間平均風速 (2024 年 12 月)

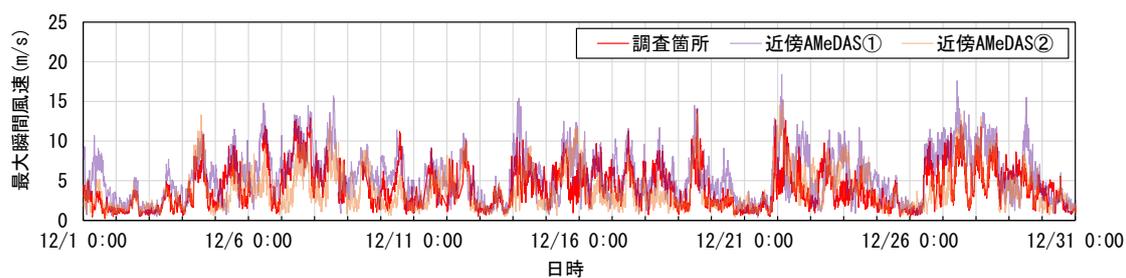


図 3-8 調査箇所および近傍 AMeDAS の最大瞬間風速 (2024 年 12 月)

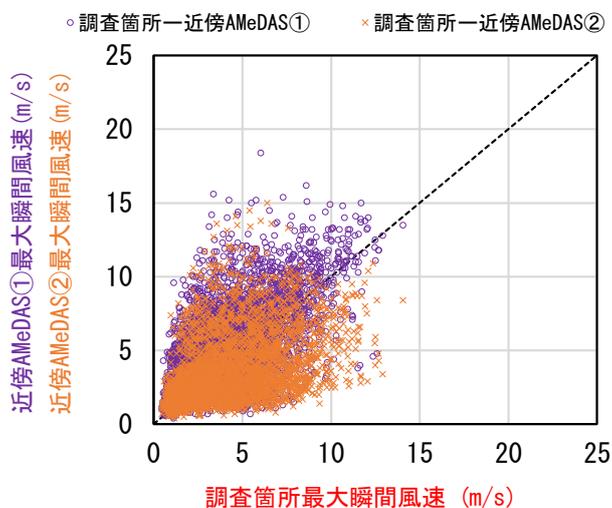


図 3-9 調査箇所と近傍 AMeDAS の最大瞬間風速の相関 (2024 年 12 月)

3.1.3 計測期間

令和 6 年 4 月～令和 7 年 2 月 約 11 箇月間

3.2 実験方法

3.2.1 計測項目

本実測調査の計測項目を表 3-1 に示す。計測システム図を図 3-10 に示す。

表 3-1 計測項目一覧

| 計測対象 | 計測項目 | 計測手法 | 備考 |
|-----------|---------------------|----------|------------------------------|
| 外的環境 | 風向・風速 | 風向・風速計 | |
| | 水温 | 温度計 | 東側：1箇所 西側：1箇所 |
| フロート等への作用 | 係留索(ワイヤーロープ)に作用する張力 | 張力計(鉄筋計) | 北側：12箇所 東側：6箇所 西側：12箇所 |
| | アイランド(フロート群)の移動状況 | タイムラプス撮影 | 2箇所 |

- 注1) 1本の打込み式アンカーから係留索2本を用いて、フロートを係留している。
 注2) アイランドの入隅部付近に小島が存在し、小島により風の流れが変化することもある。計測データについては、小島が存在することを考慮して見る必要がある。

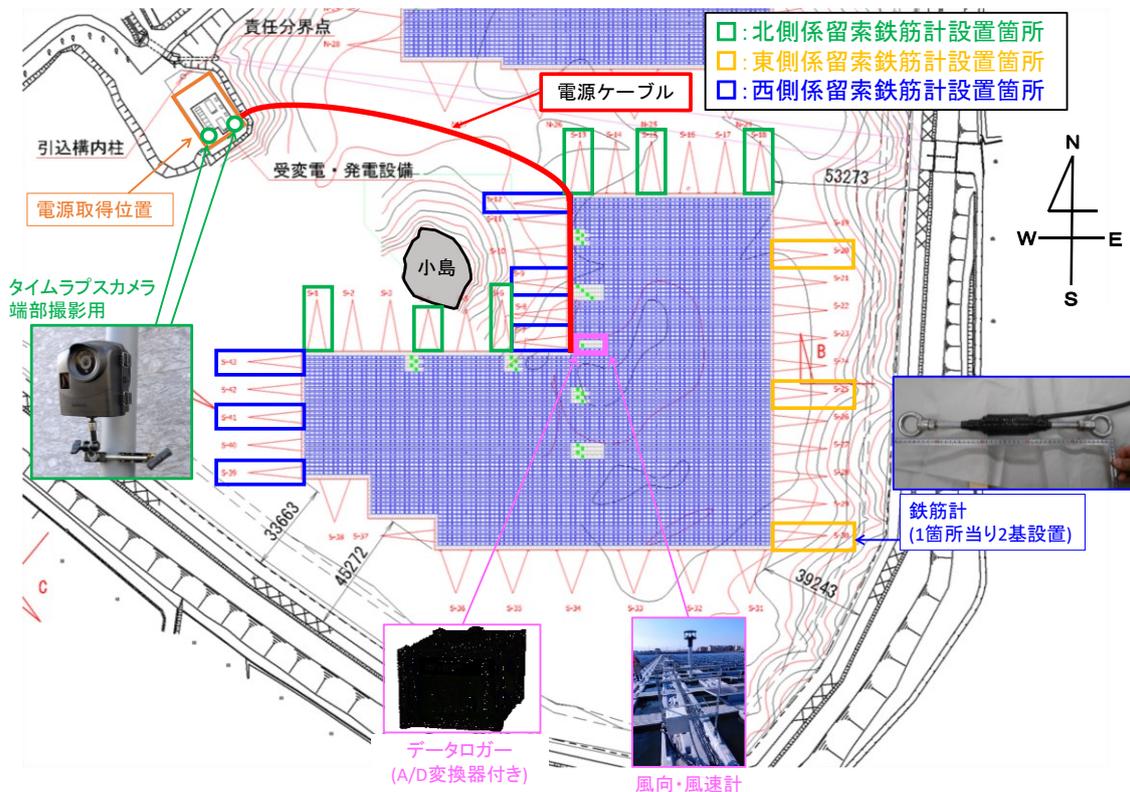


図 3-10 計測システム図

3.2.2 張力計測

実測調査箇所の水上設置型太陽光発電設備は打込式アンカーによって係留されている。

張力計（鉄筋計）の設置は、女井間池での実測調査と同様な手法であり、アンカーとフロートを繋いでいる係留索に張力計を接続し、係留索に作用する軸方向引張荷重を計測した。係留索の材料はワイヤーロープが使用されている。使用した張力計の諸元は、女井間池での実測調査と同様である（表 2-2、図 2-12 参照）。張力計設置方法を図 3-11 に示す。

図 3-9 に実測調査箇所での計測機器の設置箇所を示す。なお、1つのアンカーから2本の係留索を繋いでいるため、それぞれのアンカー番号の後に、1または2と区別して、個々の張力計を判別している。係留索の全数計測は行わず、合計30箇所に張力計を設置しており、北西方向の風が卓越していること、太陽電池モジュールが南向きに傾斜しており北風による風力係数が大きくなることから、水上設置型太陽光発電設備の北側、東側、西側の係留索に張力計を設置した（東側：6箇所、西側：12箇所、北側：12箇所）。アイランド東側および西側には1箇所ずつ温度計を設置して水温を計測し、張力計観測値の温度補正に用いた。張力計のサンプリング周波数は20Hzとし、連続計測した。張力計の設置に当たり、水中アンカーからフロートまでの係留索長が変わらないよう留意した。実測調査箇所では、アイランドの入隅部付近に小島が存在し、小島により風の流れが変化することも考えられる。計測した張力データについては、小島が存在することを考慮して見る必要がある。

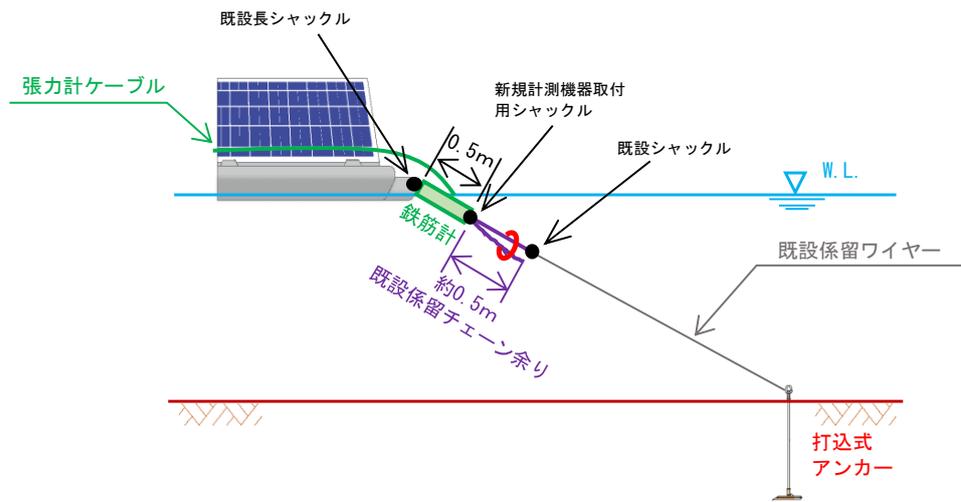


図 3-11 張力計設置方法

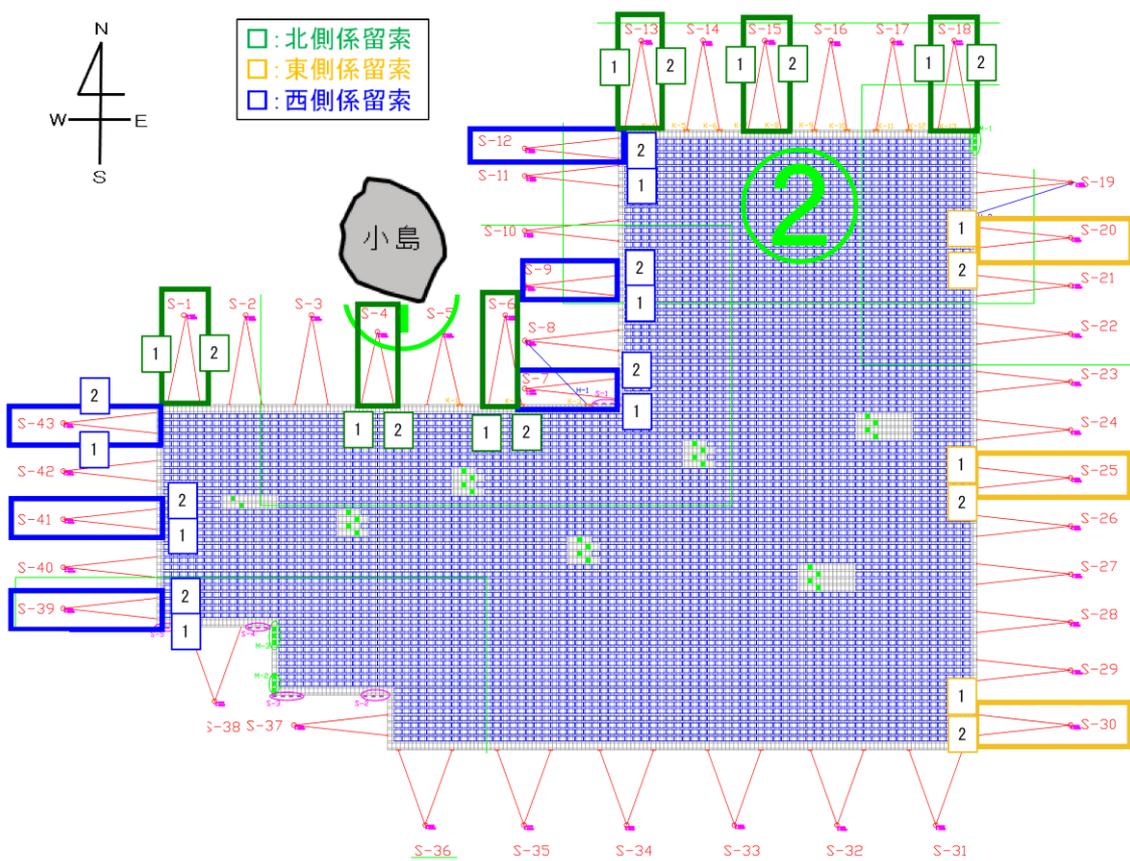


図 3-12 計測機器設置箇所

3.2.3 風況観測

風速および風向は、女井間池での調査で用いているものと同様の計測機器を使用してデータを取得した。（表 2-3、図 2-14 参照）。

3.2.4 アイランド移動状況

水上設置型太陽光発電設備のアイランド全体の動きを確認するため、タイムラプスカメラ撮影（1 ショット／30 秒間隔）を行った。タイムラプスカメラは次の 2 箇所に設置した。

①PCS 侵入防止フェンス南側

②PCS 侵入防止フェンス北側



①PCS 侵入防止フェンス南側



②PCS 侵入防止フェンス北側

図 3-13 タイムラプスカメラ設置状況

3.3 計測結果

3.3.1 方角毎の係留索合計張力

係留索張力及び風向・風速の実測値を図 3-14～図 3-17 に示す。風向については 10 分間平均風向である。方角毎の合計張力は、方角毎の張力計数と方角毎の全係留索数の比率から実測張力を合計張力に換算している。最大張力は風況データと同様に、10 分間で計測された合計張力の最大値である。ここでは、やや強い風（風速が 10m/s 以上 15m/s 未満）が計測された 2024 年 5 月、2024 年 12 月での計測結果の時系列データを代表して示す。月最大瞬間風速は、2024 年 5 月 16 日に 13.9m/s、2024 年 12 月 19 日に 14.0m/s を観測した。図 3-14～図 3-17 より、夜間よりも昼間に風が吹くことから、係留索も昼間に荷重が作用する傾向にある。方角毎の合計張力は、太陽光パネルが南向きに傾斜し、北風による風力係数が大きいことから、東・西側係留索と比較して北側係留索の張力値が大きい傾向にあることが確認された。

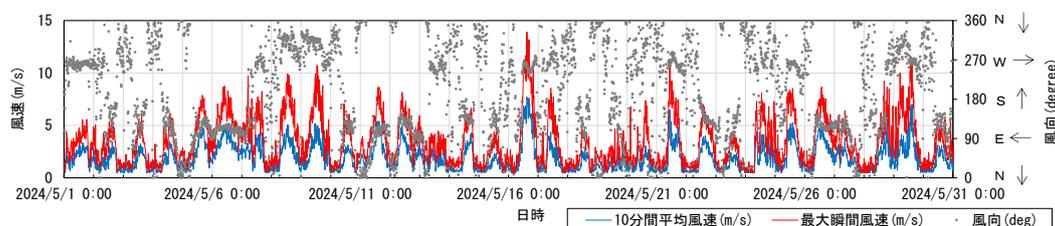


図 3-14 2024 年 5 月の風速および風向

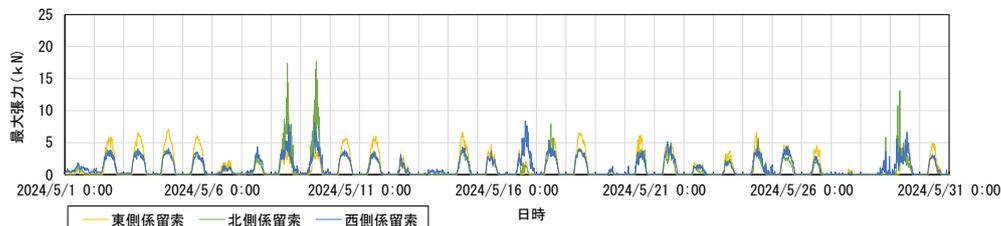


図 3-15 2024 年 5 月の合計張力

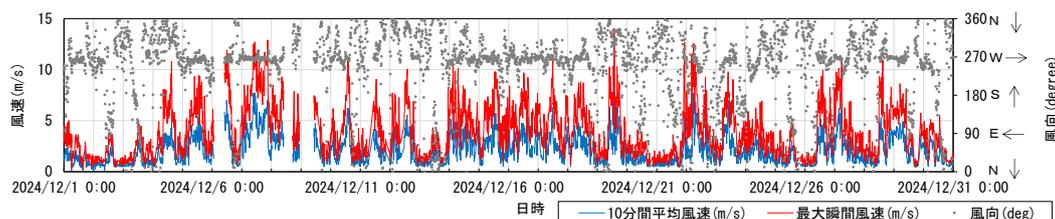


図 3-16 2024 年 12 月の風速および風向

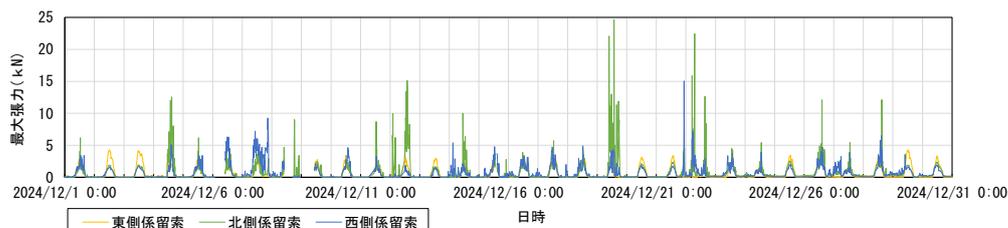


図 3-17 2024 年 12 月の合計張力

3.3.2 係留索毎の実測張力

(1) 北側係留索張力(北西風卓越時)

北西風卓越期間である2024年12月19日(月最大瞬間風速された期間)の、時系列の風況データと北側係留索張力の実測値を図3-19~図3-21に示す。L字型アイランドであるため、一般部と入隅部の係留索を図-18に示すよう区別している。図-20は一般部の時系列張力結果、図-21は入隅部の時系列張力結果を示しており、縦軸は10分間隔での係留索毎の張力最大値を示している。この期間では、S-15-1、S-18-1係留索に荷重が集中している傾向にあり、均等に荷重が分散していないことが分かる。

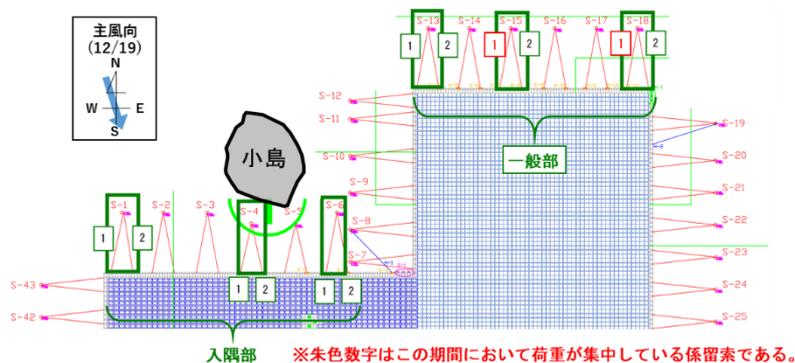


図 3-18 北側係留索の鉄筋計設置箇所

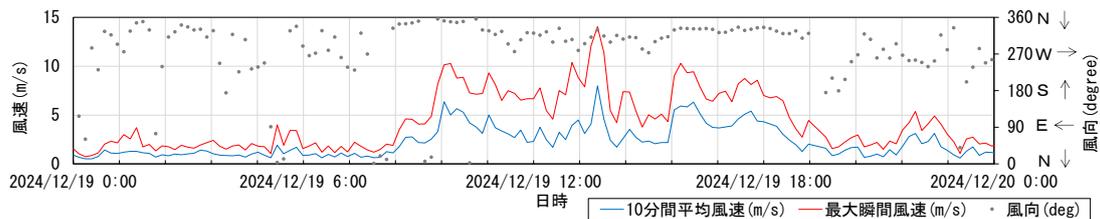


図 3-19 10分間平均風速、最大瞬間風速および風向

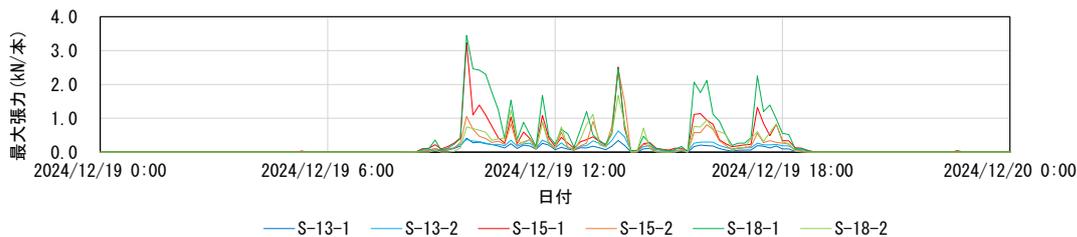


図 3-20 北側係留索一般部での係留索毎の張力 (S-13、S-15、S-18)

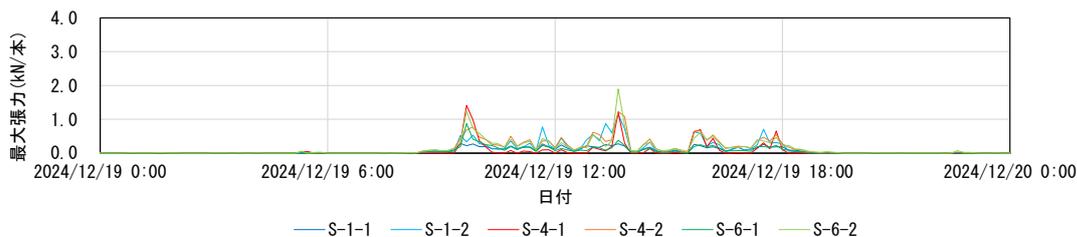


図 3-21 西側係留索入隅部での係留索毎の張力 (S-1、S-4、S-6)

(2) 西側係留索張力(西風卓越時)

西風卓越期間である2024年5月16日～2024年5月17日(月最大瞬間風速が観測された期間)の、時系列の風況データと西側係留索張力の実測値を図3-23～図3-25に示す。L字型アイランドであるため、一般部と入隅部の係留索を図-22に示すよう区別している。図-24は一般部の時系列張力結果、図-25は入隅部の時系列張力結果を示しており、縦軸は10分間隔での係留索毎の張力最大値を示している。この期間では、S-7-2、S-9-1、S-9-2係留索に荷重が集中している傾向にあり、均等に荷重が分散していないことが分かる。

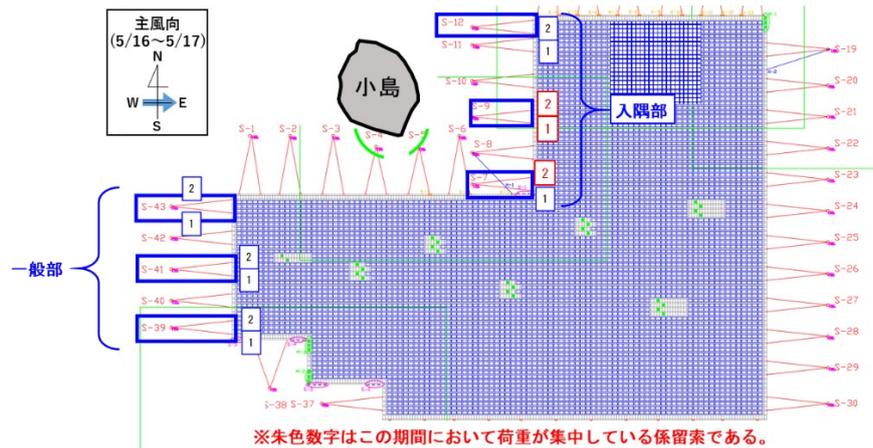


図3-22 西側係留索の鉄筋計設置箇所

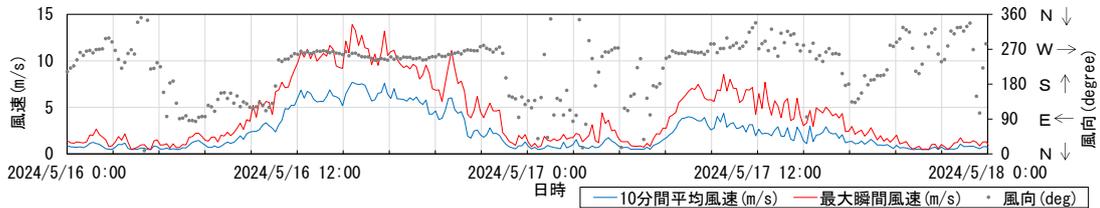


図3-23 10分間平均風速、最大瞬間風速および風向

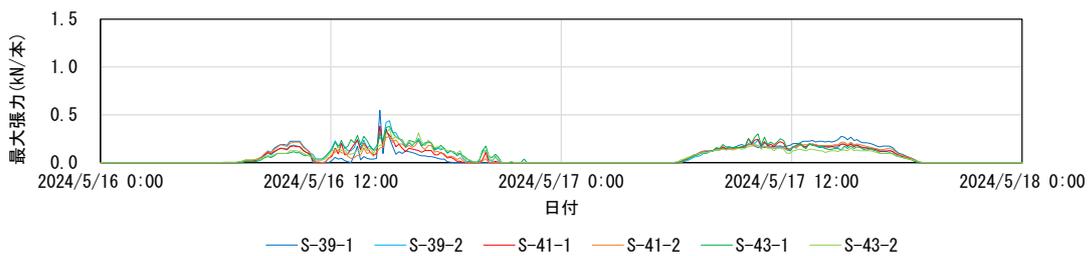


図3-24 西側係留索一般部での係留索毎の張力(S-39、S-41、S-43)

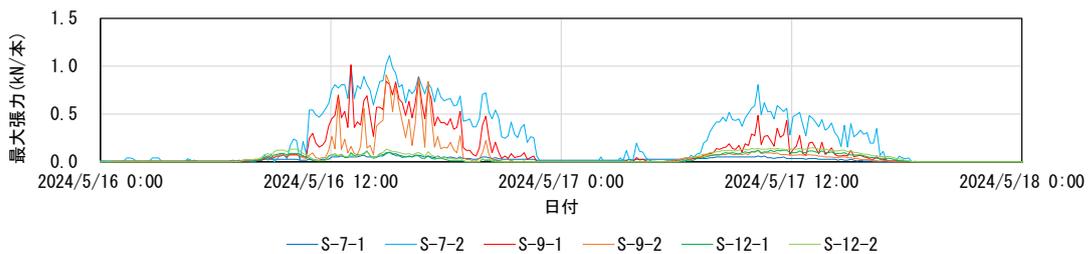


図3-25 西側係留索入隅部での係留索毎の張力(S-7、S-9、S-12)

(3) 東側係留索張力(東風卓越時)

東風卓越期間である2024年5月10日～2024年5月11日の、時系列の風況データと西側係留索張力の実測値を図3-27、図3-28に示す。縦軸は10分間隔での係留索毎の張力最大値を示している。東側係留索では、北側・西側係留索のように特定の係留索に荷重が集中するような傾向はなかった。これは、①調査箇所の風況は西風(山からの吹き下ろしの風)が支配的であり、東風による風圧荷重が係留索に大きく作用しないこと、②東側は係留索数(24箇所)に対して張力計数(6箇所)が少ないことから、張力計設置箇所以外の係留索に荷重が偏って作用している可能性があること、の2つが考えられる。

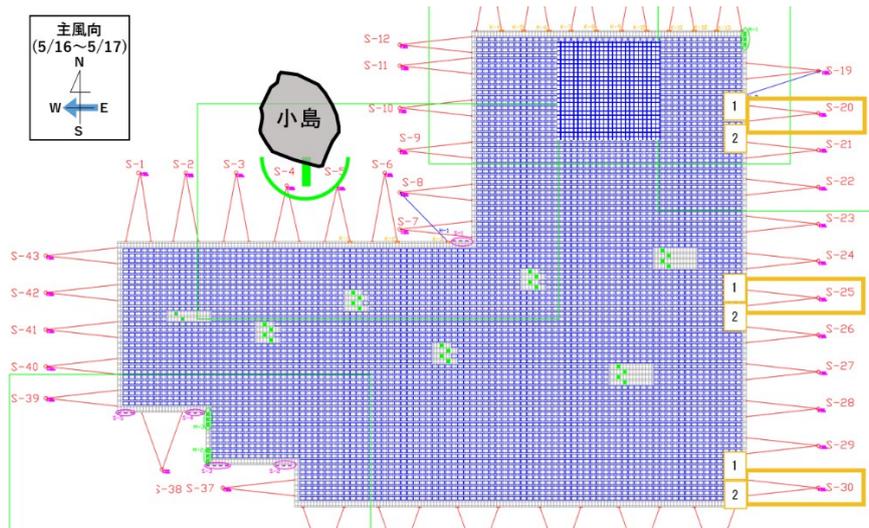


図3-26 東側係留索の鉄筋計設置箇所

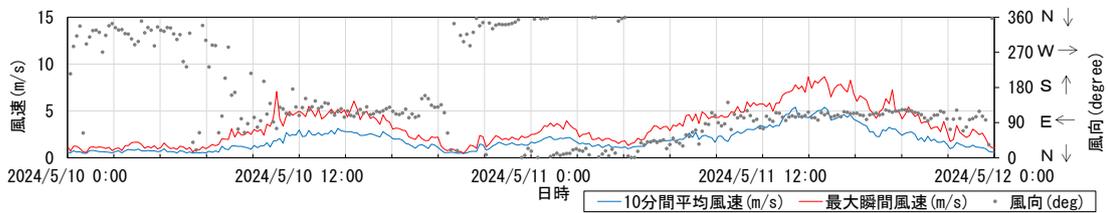


図3-27 10分間平均風速、最大瞬間風速および風向

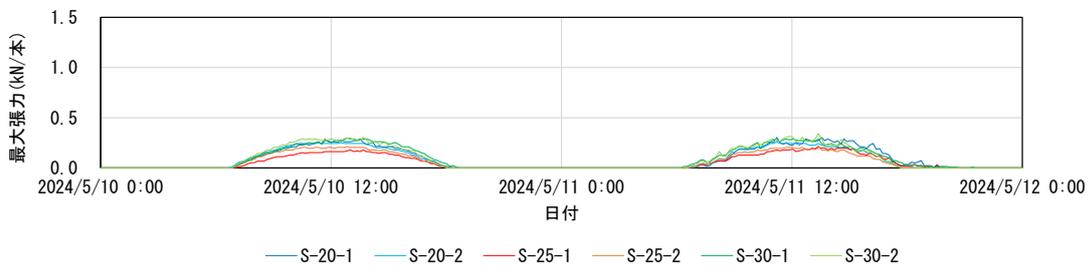


図3-28 東側係留索入隅部での係留索毎の張力 (S-20、S-25、S-30)

3.3.3 係留索張力の分散(偏り)状況

(1) 係留索の最大張力と平均張力の比較

2024年4月～2025年2月における係留索の最大張力と平均張力の比較を図3-30に示す。最大張力は、10分間隔での方角毎における複数の係留索のうち、いずれか1本で計測された張力の最大値である。平均張力は、先述した最大張力が計測された時間において、係留索1本当りに荷重が均等に分散すると仮定した場合の値としている。

平均張力に対して最大張力は、北側係留索、西側係留索において約2～3倍程度、東側係留索では約1～2倍程度の荷重が作用していることが確認された。北側係留索、西側係留索とともに、一般部よりも入隅部の方が平均張力に対する最大張力が大きい値であった。

このことから、矩形アイランド形状の実測調査同様に、係留索に作用する荷重は均等に分散せず、いずれかの係留索に荷重が偏っていることが分かった。また、入隅部は一般部と比較して、係留索に作用する荷重が偏りやすい傾向にあることが分かった。

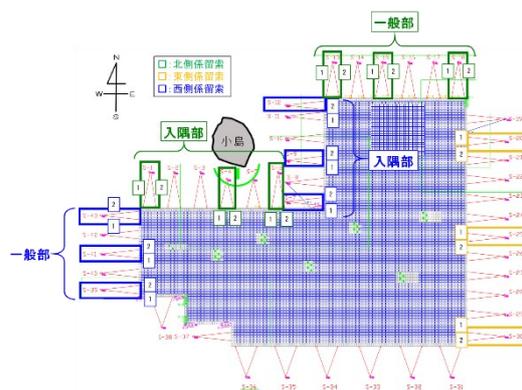


図 3-29 平面

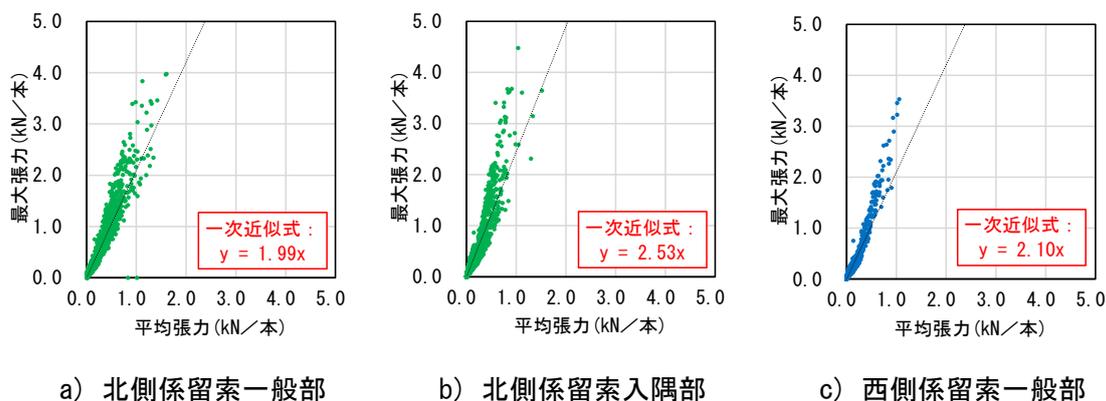


図 3-30 平均張力と最大張力の比較

(2) 係留索長が不均一であることによる張力集中の懸念

前述した内容では、係留索の平均張力に対して約2~4倍程度の最大張力が作用していた。これはアイランドの辺に対し斜めから風が作用し、風上側の係留索に張力が集中することが考えられる。他方、係留索の長さが不均一であることによる特定の係留索への張力集中の可能性も考えられる。

図3-33、図3-34に西風が卓越している期間である、2024年12月15日~2024年12月17日の西側係留索張力の実測値を示す。図3-33、図3-34よりS-7-2に張力が集中している傾向にあり、別期間の図3-25でも張力が集中していた。S-7-2は鉄筋計設置時、点検時においても他の係留索より緊張状態であったことを確認しており、張力が作用しやすい係留索であることが分かった。S-7-2での張力集中の原因については、風向による風上側への張力集中に加えて、係留索長が不均一によることが原因と考える。

繊維ロープの場合は、繰返しの引張荷重が作用した際、初期長さから約3割程度の伸びが生じ、ワイヤーロープの場合は、繰返しの引張荷重が作用しても初期長さから伸びが生じないことが別試験で確認されている。このことから、係留索が繊維ロープの場合は、係留索長の不均一により張力集中が発生したとしても、ロープが伸びることにより荷重が分散される可能性がある。他方、ワイヤーロープの場合は伸びが生じないため、張力集中が緩和されにくい。実測調査箇所は係留索がワイヤーロープであることから、S-7-2のような特定の係留索に張力が集中する現象が続いていると考える。

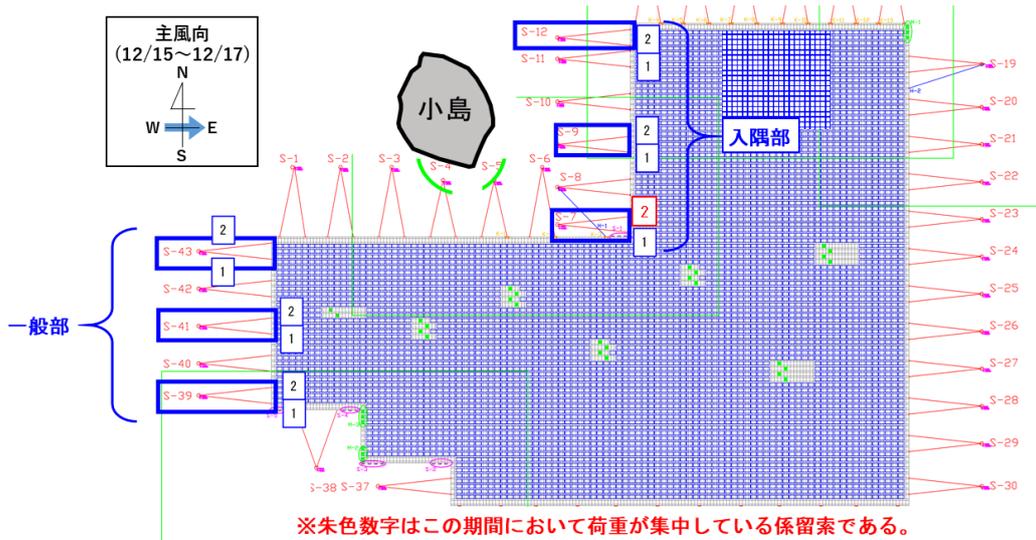


図 3-31 西側係留索の鉄筋計設置箇所

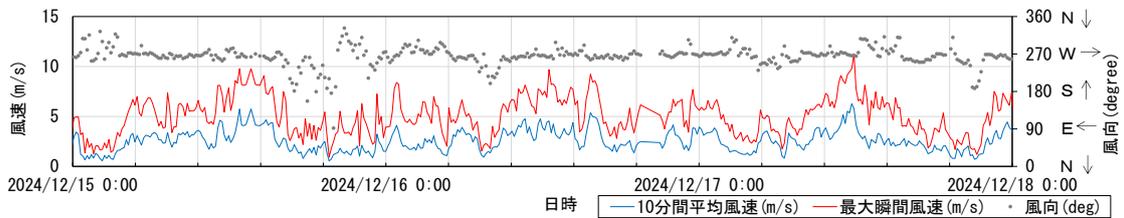


図 3-32 10 分間平均風速、最大瞬間風速および風向

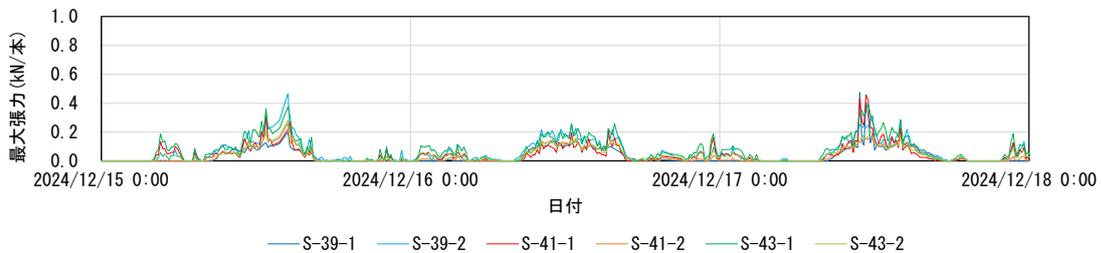


図 3-33 西側係留索一般部での係留索毎の張力 (S-39、S-41、S-43)

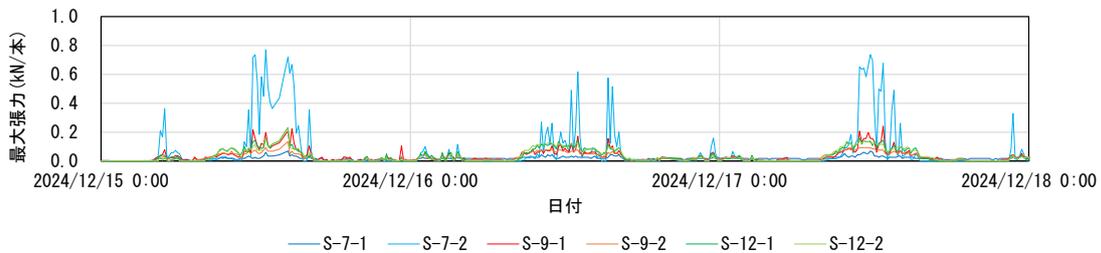


図 3-34 西側係留索入隅部での係留索毎の張力 (S-7、S-9、S-12)

4. 考察

- ・ 矩形アイランド形状の実測調査では、風向・風速の実測値から風圧荷重の試算を行い、係留索の張力について、風圧荷重から算定される結果と実測結果が概ね整合することを確認した。
- ・ ただし、台風時のような強風時は風圧荷重の計算値を超過する張力合計換算値の発生も確認された。
- ・ 矩形アイランド形状の実測調査では、平均張力に対して特定の係留索に約3～5倍の最大張力が作用していた。
- ・ L字型アイランド形状の実測調査では、平均張力に対して特定の係留索に約2～4倍の最大張力が作用していた。
- ・ 上記より、フロート形状やアイランド形状が異なる場合においても特定の係留索に張力が集中する現象が確認された。風向変化や係留索長の不均一等によることが原因と考える。
- ・ 張力の偏り対策として、水底地形の起伏等考慮して適切に係留索長さを設定することが考えられるが、水位変動、施工誤差や水中アンカーの変位等により、係留索長を適切な一定の長さに維持することは現実的ではないため、係留設計において、張力の集中する現象について適切に考慮する必要がある。

謝辞

女井間池水上太陽光発電設備の実測調査の実施に当たり、三井住友建設(株)より実験サイトの提供や資料提供、技術的アドバイスなど、多岐にわたる事柄について全面的なご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

中部地方某所水上太陽光発電設備の実測調査の実施に当たり、京セラ TCL ソーラー合同会社より実験サイトの提供や資料提供、多岐にわたる事柄について全面的なご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

両実験サイトでの実測調査の実施に当たり、O&M 業者には多岐にわたる事柄について全面的なご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

この成果物は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の長期安定電源化技術開発」事業の結果として得られたものです。