

傾斜地設置型/営農型/水上設置型

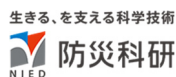
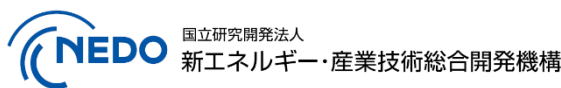
太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2023 年版

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。

2023 年 4 月 28 日



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

修正内容の詳細については別添「正誤表：水上設置型ガイドライン 2023」参照

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

本実測調査では実際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、風荷重との関係性及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. 実験条件

(1) 対象箇所

香川県木田郡三木町女井間池

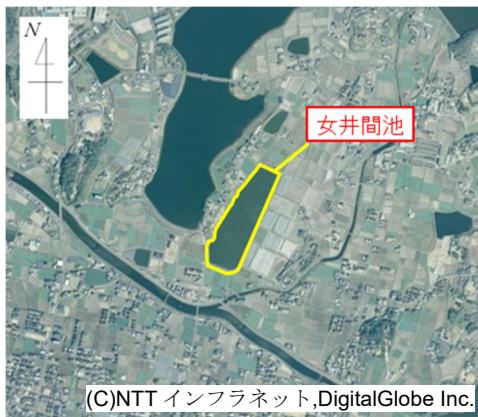


図 2-1 対象箇所

(2) 女井間池の風況

5月及び9月の女井間池及び AMeDAS 高松のウィンドローズを図 2-2、図 2-3 に示す。なお、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。

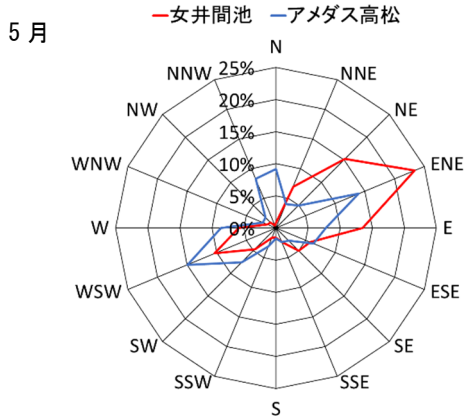


図 2-2 5月の女井間池と AMeDAS 高松のウィンドローズ比較 (10 分間平均風速)
(期間：2022/5/6～2022/5/31)

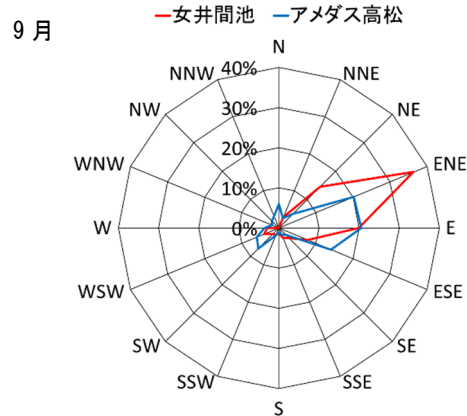


図 2-3 9月の女井間池と AMeDAS 高松のウィンドローズ比較 (10 分間平均風速)
(期間：2022/9/13～2022/9/29)

図 2-4～図 2-9 に5月及び9月における女井間池及び AMeDAS 高松の10分間平均風速及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、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。

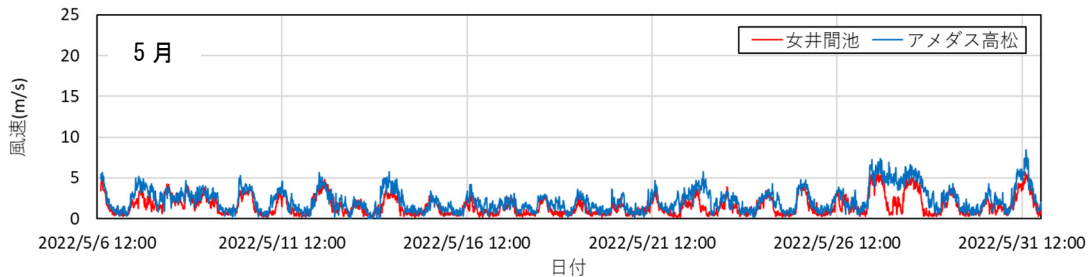


図 2-4 5月の女井間池及び AMeDAS 高松の風速 (10 分間平均風速)

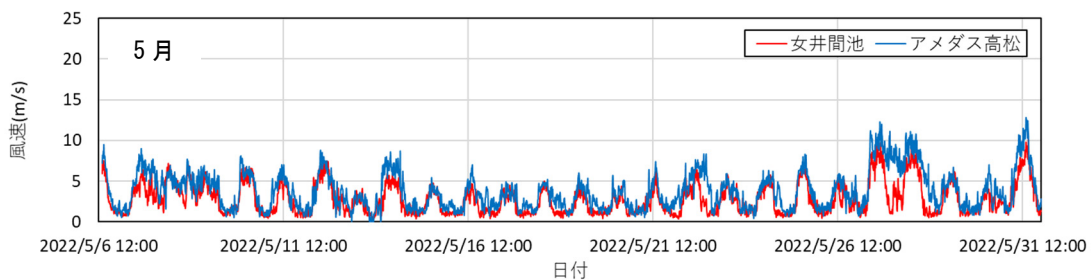


図 2-5 5月の女井間池及び AMeDAS 高松の風速 (最大瞬間風速)

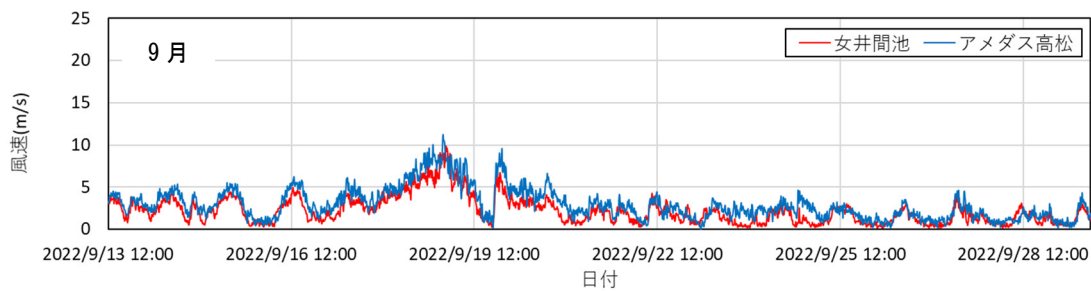


図 2-6 9月の女井間池及び AMeDAS 高松の風速（10 分間平均風速）

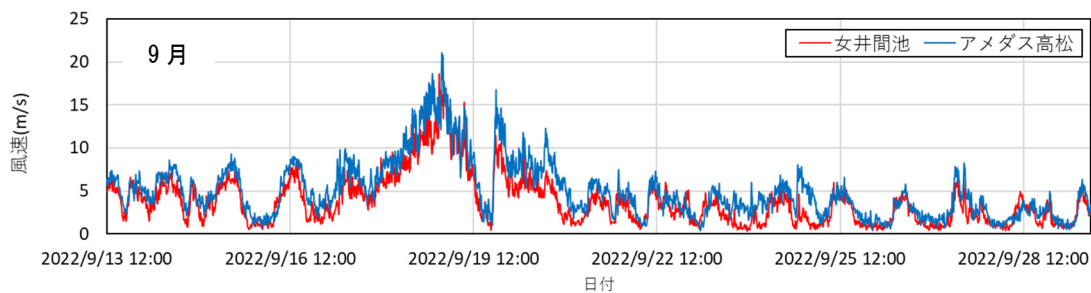


図 2-7 9月の女井間池及び AMeDAS 高松の風速（最大瞬間風速）

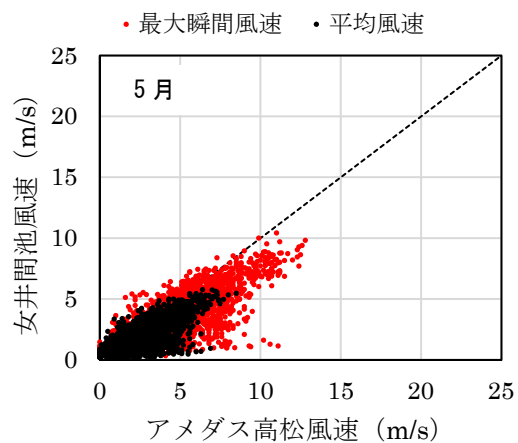


図 2-8 女井間池と AMeDAS 高松の平均風速及び最大瞬間風速の比較（5月）

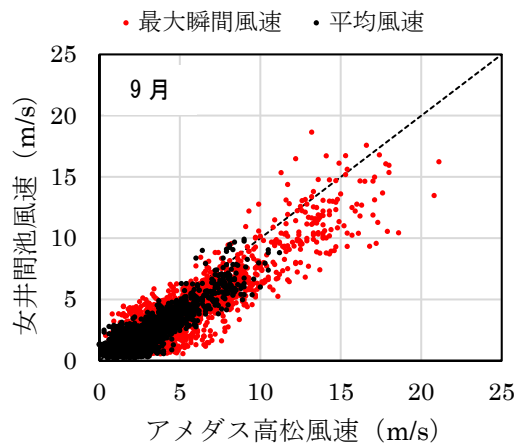


図 2-9 女井間池と AMeDAS 高松の平均風速及び最大瞬間風速の比較（9月）

(3) 計測期間

令和 3 年 9 月 25 日（土） ～ 令和 5 年 1 月 31 日（火） 16 箇月間

3. 実験方法

(1) 計測項目

本実測調査の計測項目は、表 3-1 のとおり。女井間池の鳥観図を図 3-1 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

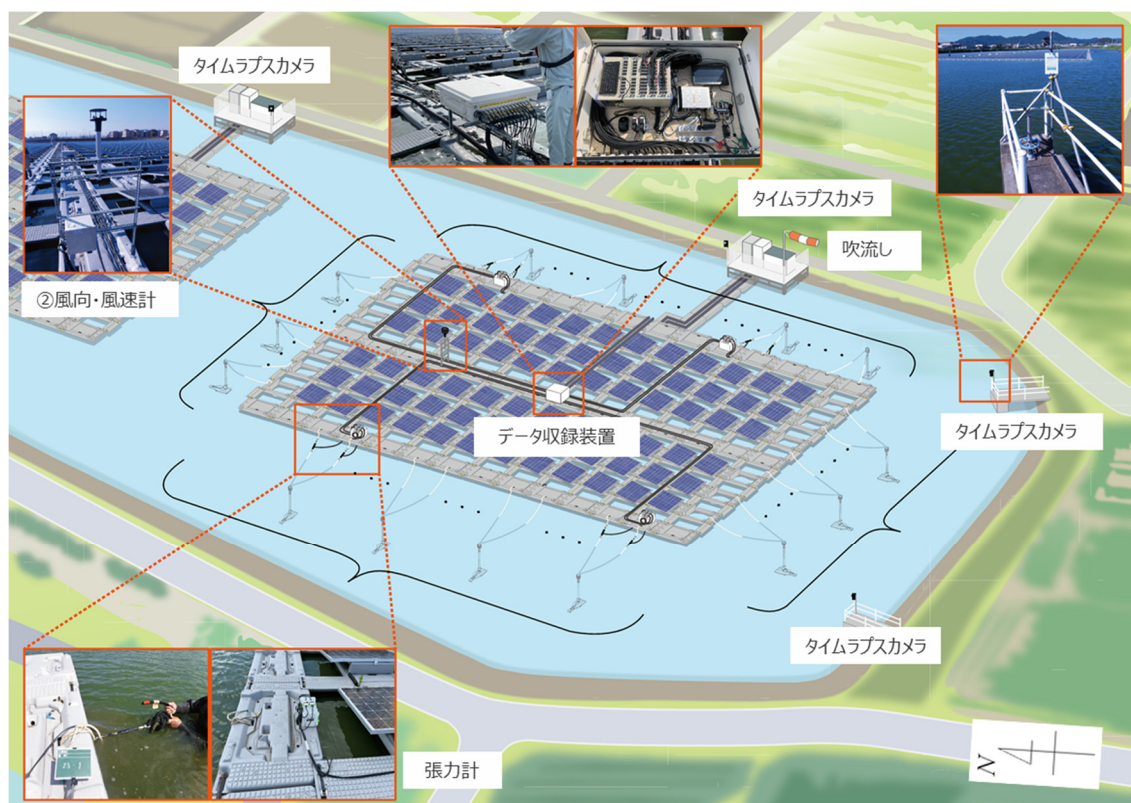


図 3-1 女井間池鳥観図

(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している。本実証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。使用した張力計の諸元を表 3-2、設置方法を図 3-2、外觀図を図 3-3、配置図を図 3-4 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、アイランド東側及び西側に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 3-2 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°C
	温度補償範囲	-20 ~ 70°C
	零点の温度影響	±0.05%RO/°C以内
	出力の温度影響	±0.05%/°C以内

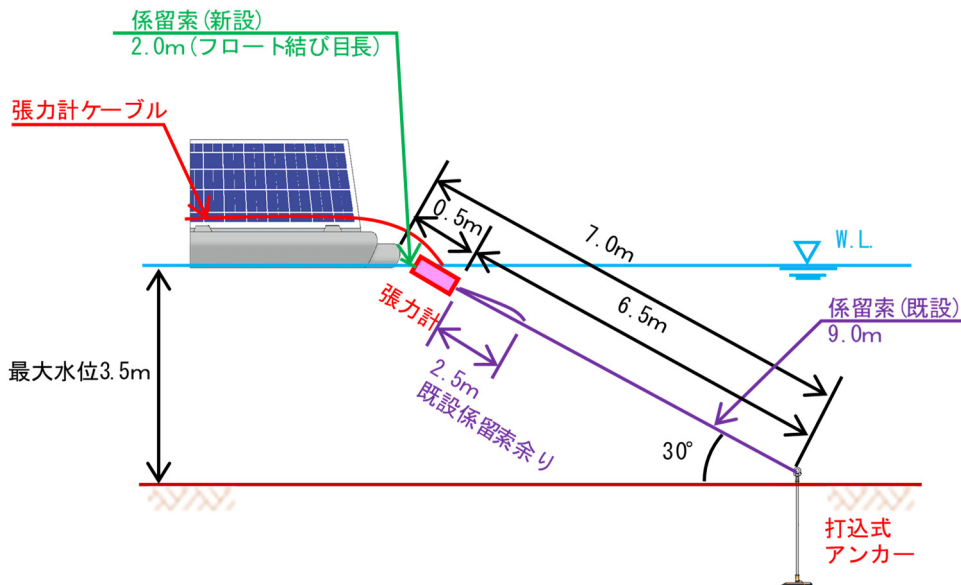
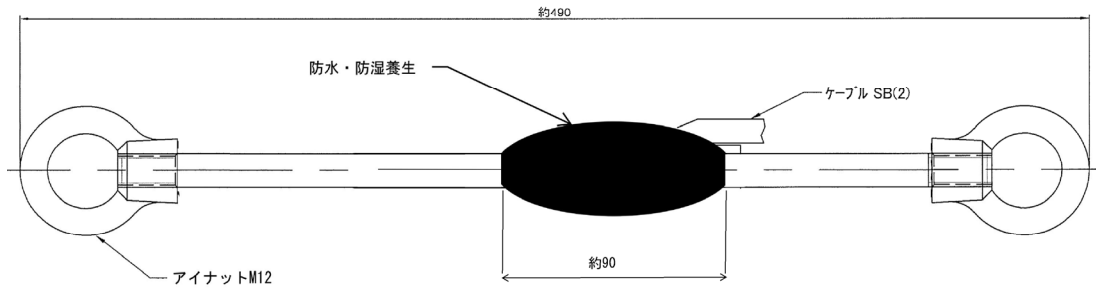


図 3-2 張力計設置方法

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 3-3 張力計外観図

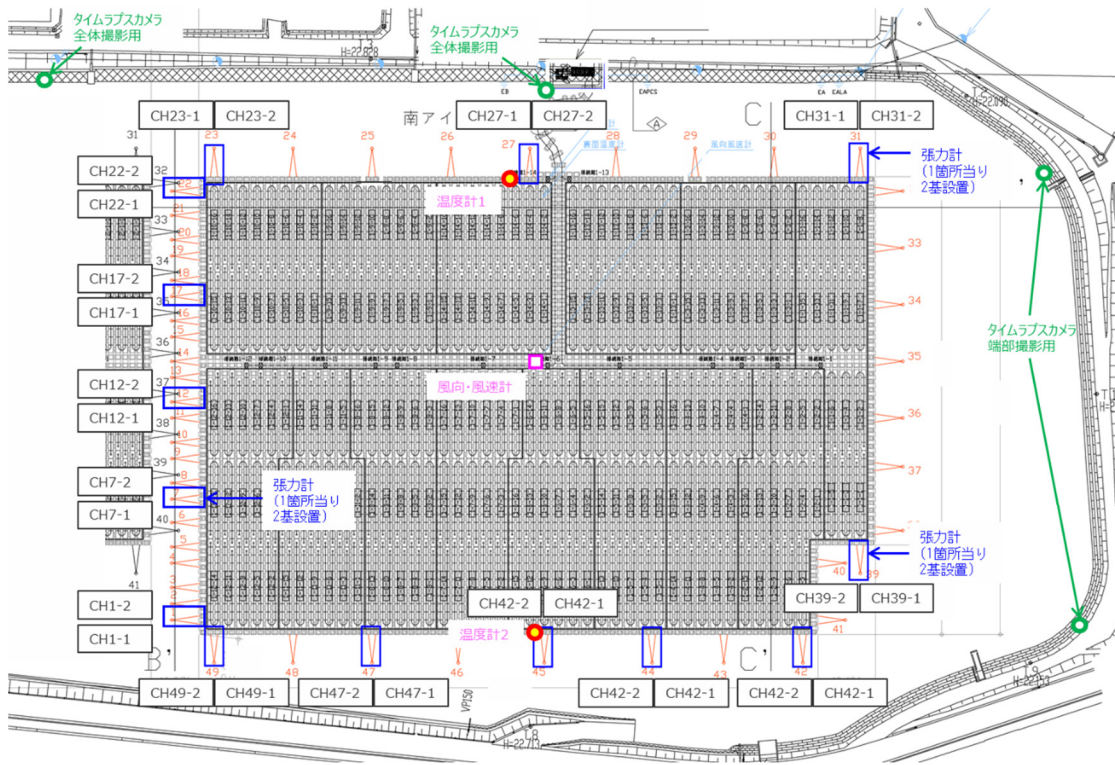


図 3-4 張力計配置図

(3) 風況観測

風向及び風速は、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 3-3 に示す。風向風速計の外観図を図 3-5 に示す。

表 3-3 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

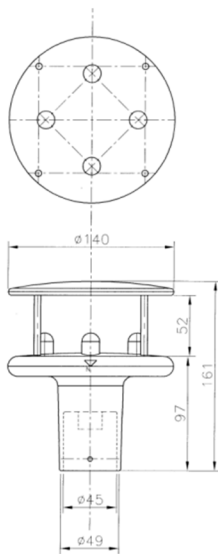
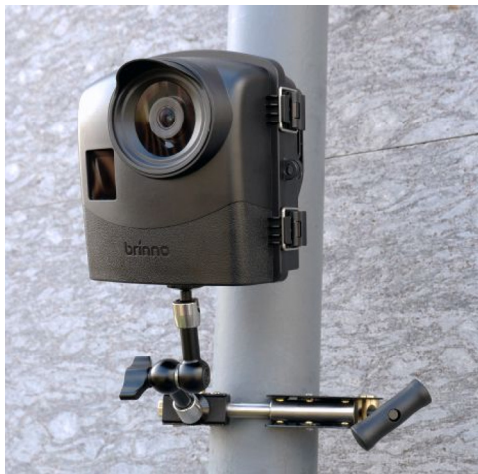


図 3-5 風向風速計外観図

(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 3-6 タイムラプスカメラ設置状況

4. 計測結果

(1) 合計張力への換算

図 3-4 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) 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 4-1～図 4-4 に示す。ここでは、西風卓越時として 2022 年 5 月、東風卓越時として 2022 年 9 月のグラフを示す。

2022 年 9 月 18 日未明に台風 14 号が襲来し、10 分間最大風速 10m/s を観測した。同時刻において、瞬間最大張力 3.09kN (CH27-1) を観測した。

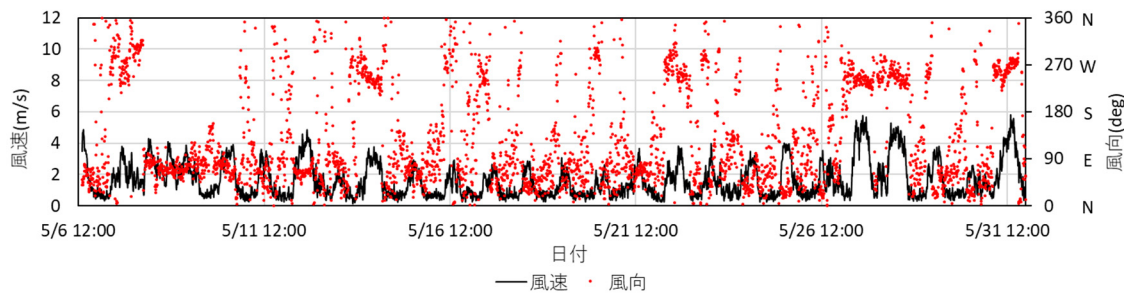


図 4-1 5 月の風速及び風向 (10 分間平均)

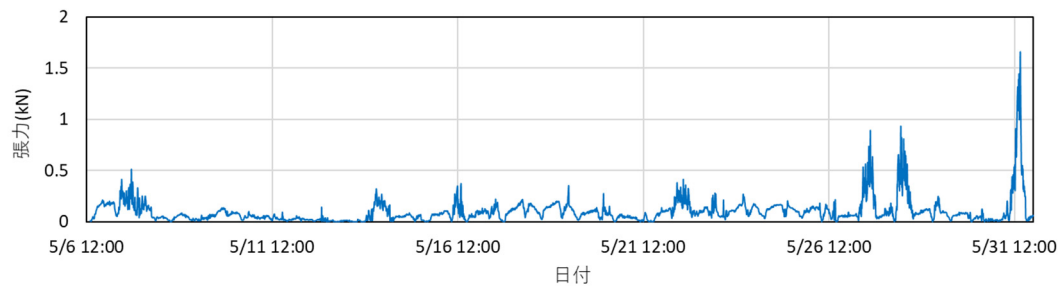


図 4-2 5 月の西側合計張力 (10 分間平均)

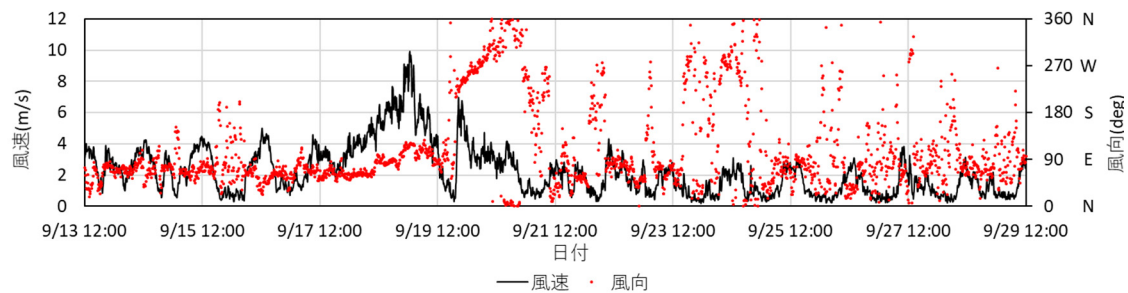


図 4-3 9 月の風速及び風向 (10 分間平均)

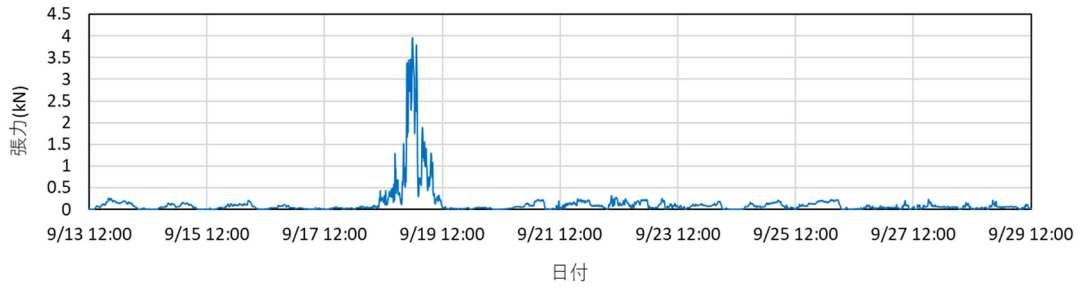


図 4-4 9 月の東側合計張力（10 分間平均）

(3) アイランド全体に作用する風圧荷重の計算値と実測張力との比較

1) 風圧荷重の算出

実測値と風圧荷重（計算値）の比較を行った。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する。風圧荷重（計算値）の算出には以下の式を用いた。

$$F = C_W \cdot q \cdot A_W$$

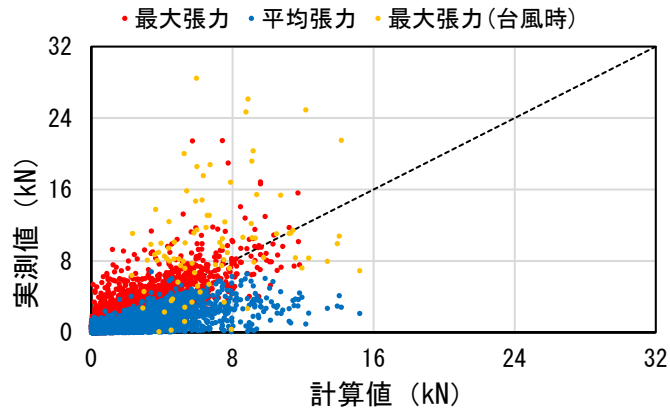
$$q = 0.6 \cdot V_0^2 \cdot E \cdot I$$

$$E = E_r^2 \cdot Gf$$

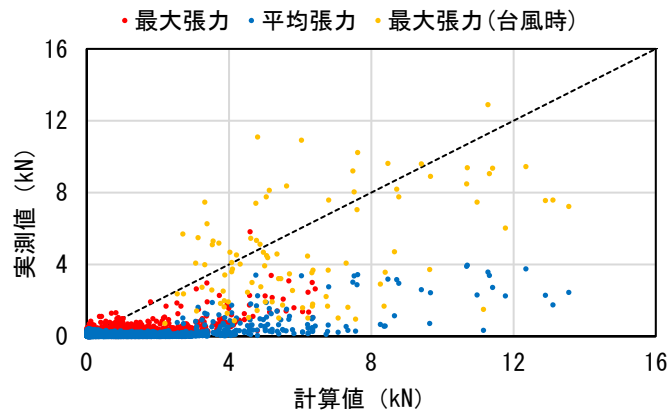
ここで、 F ：風圧荷重（N）、 C_W ：風力係数、 A_W ：受風面積（ m^2 ）、 q ：速度圧（ $N \cdot m^{-2}$ ）、 V_0^2 ：10 分間平均風速（m/s）、 E ：環境係数、 E_r ：高さ方向分布係数、 Gf ：ガスト影響係数、 I ：用途係数

2) 風圧荷重（計算値）と実測張力の比較結果

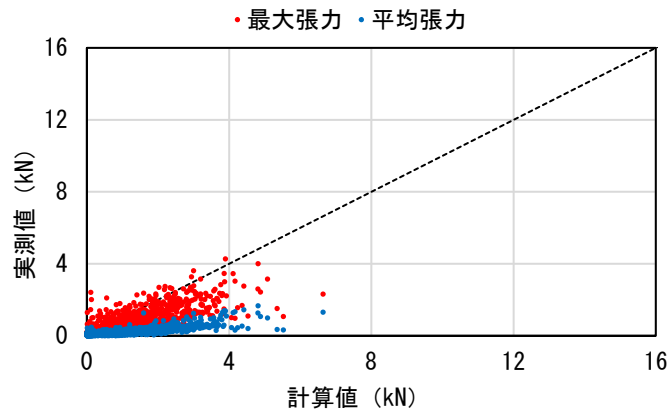
風圧荷重（計算値）と実測値の比較を図 4-5 に示す。北側係留索はおおむね計算値と実測値が整合している。東側係留索及び西側係留索は実測値が計算値を若干下回っている。これは、東側に設置されている PCS からの配線用フロートが東西方向の風圧荷重を負担していることが要因として考えられる。また、台風時においては、北側係留索において実測値が計算値を上回った。



a) 北側係留索



b) 東側係留索



c) 西側係留索

図 4-5 風圧荷重(計算値)と実測値の比較

(4) 係留索張力の分散状況

図 4-6、4-7 に 5 月及び 9 月の最大張力が計測された際（9 月は台風時）の、張力計計測値および風況（10 分間平均）を示す。5 月（図 4-6）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。9 月（図 4-7）の東側係留索においても同様の現象が確認されている。

5 月～9 月における係留索の平均張力と最大張力の比較を図 4-8 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。

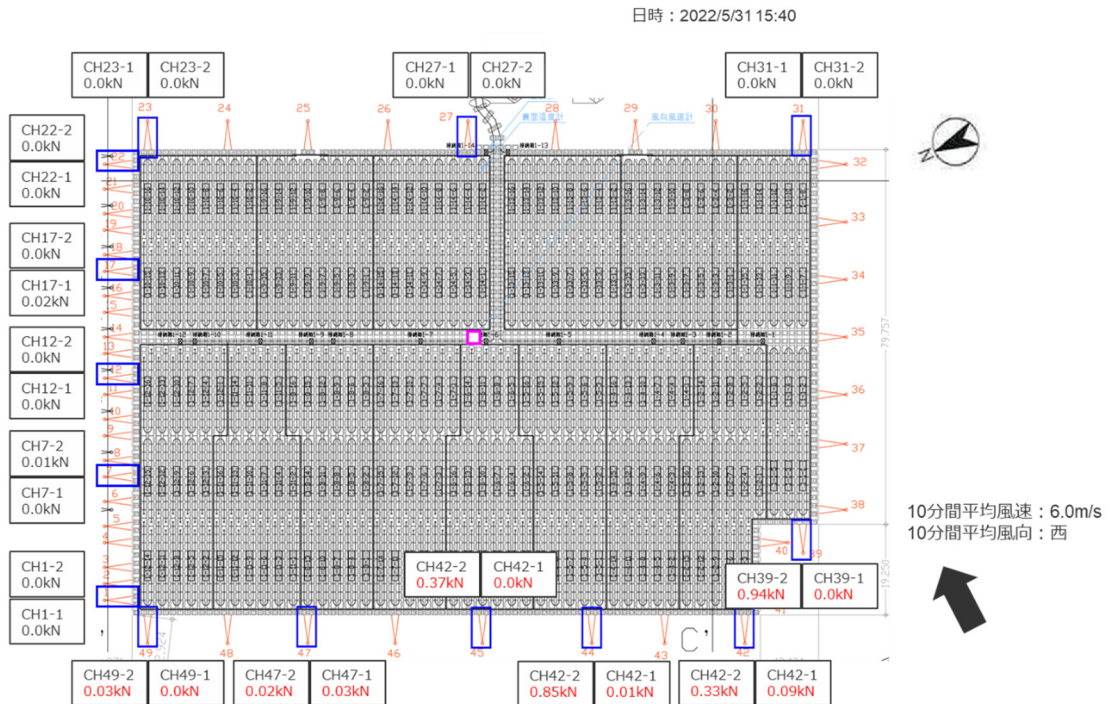


図 4-6 5 月の最大張力計測時のアイランド全体張力

日時：2022/9/18 23:55



10分間平均風速：9.1m/s
10分間平均風向：東南東

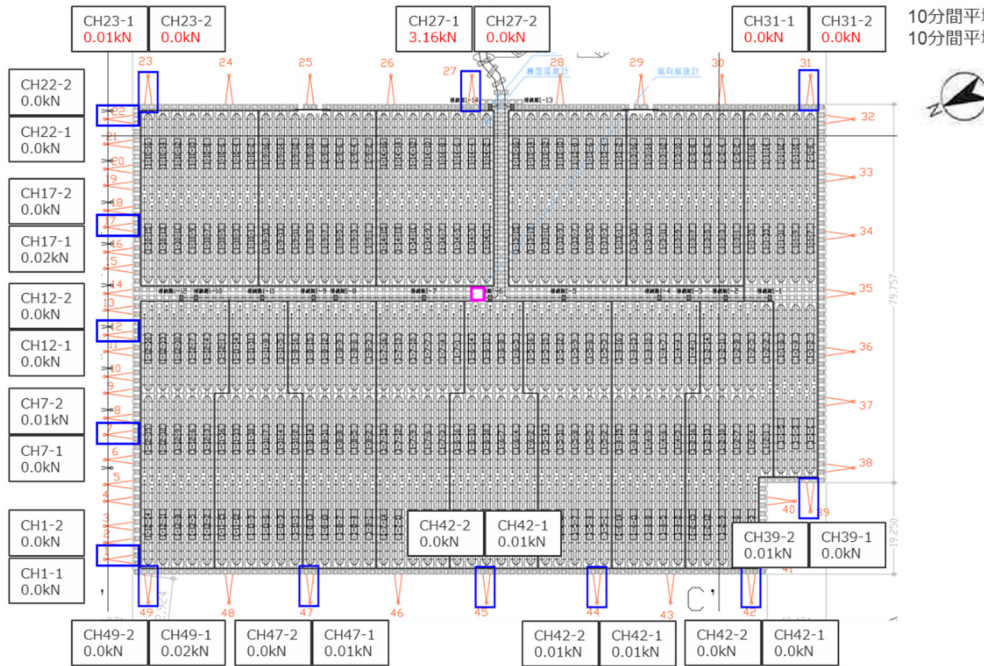
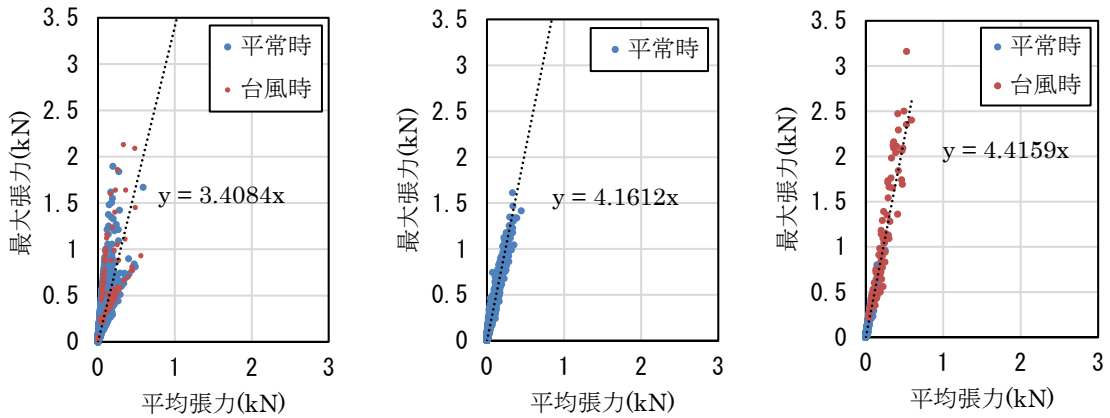


図 4-7 9月の最大張力計測時のアイランド全体張力



a) 北側係留索

b) 東側係留索

c) 西側係留索

図 4-8 5~9月における係留索の平均張力と最大張力の比較

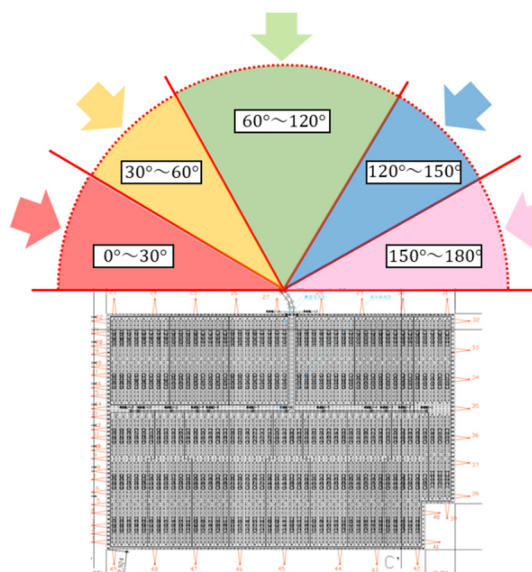
水上設置型太陽光発電設備においては、1つのアンカーに複数の係留索を取り付けている場合があり、本実測調査サイトでは、1つのアンカーに2本の係留索を取り付けている。ここでは、同一のアンカーに設置されている2本の係留索における張力分散を評価する。

図4-9～図4-11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。

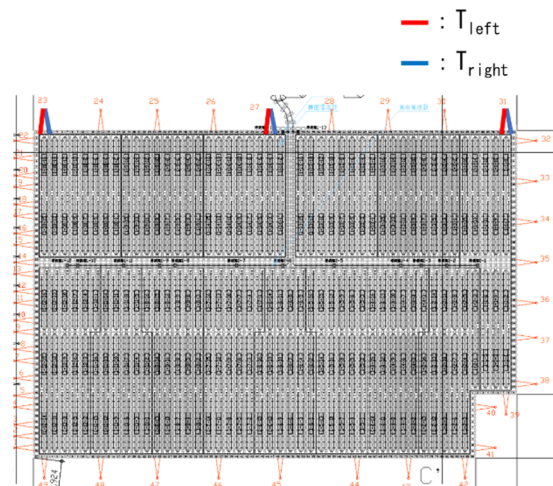
c)、d)は5及び9月における、風向別の2本の係留索張力の分散状況をプロットしたものである。e)、f)は5～9月における、特定のアンカーに着目した風向別の2本の係留索張力の分散状況をプロットしたものである。

図4-10、図4-11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。

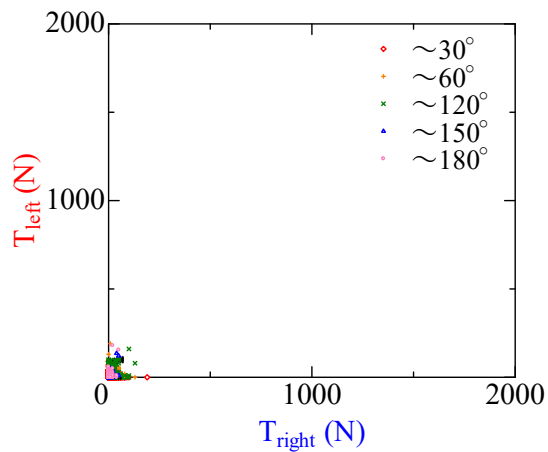
他方、図4-9のe)においては、風向によらず張力が T_{right} に集中しており、 T_{left} には張力がほとんど作用していない。このように、片方の係留索にのみ張力が集中する現象が確認された。



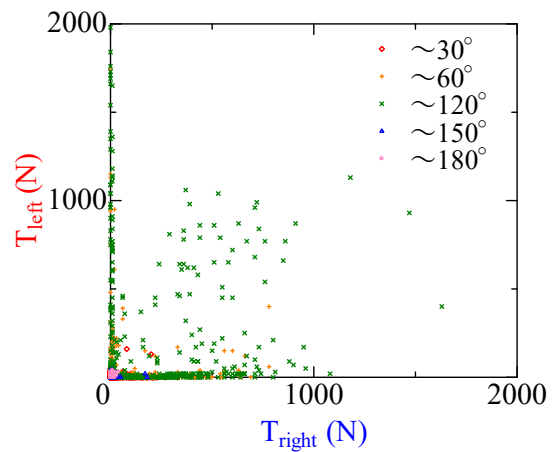
a) 風向別の色分け



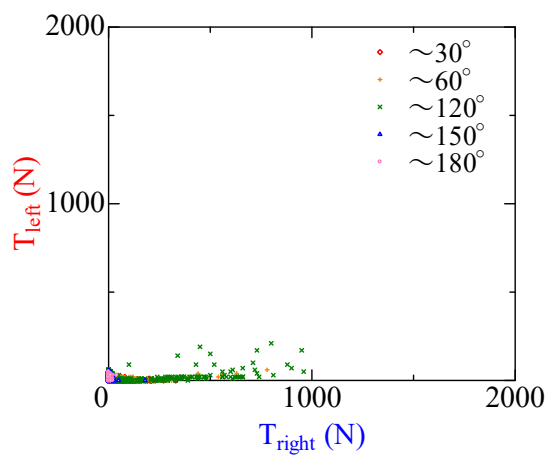
b) T_{left} 、 T_{right} のイメージ図



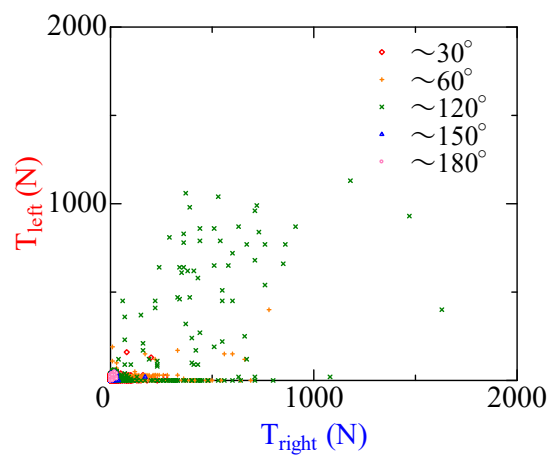
c) 5月の係留索張力の分散状況



d) 9月の係留索張力の分散状況

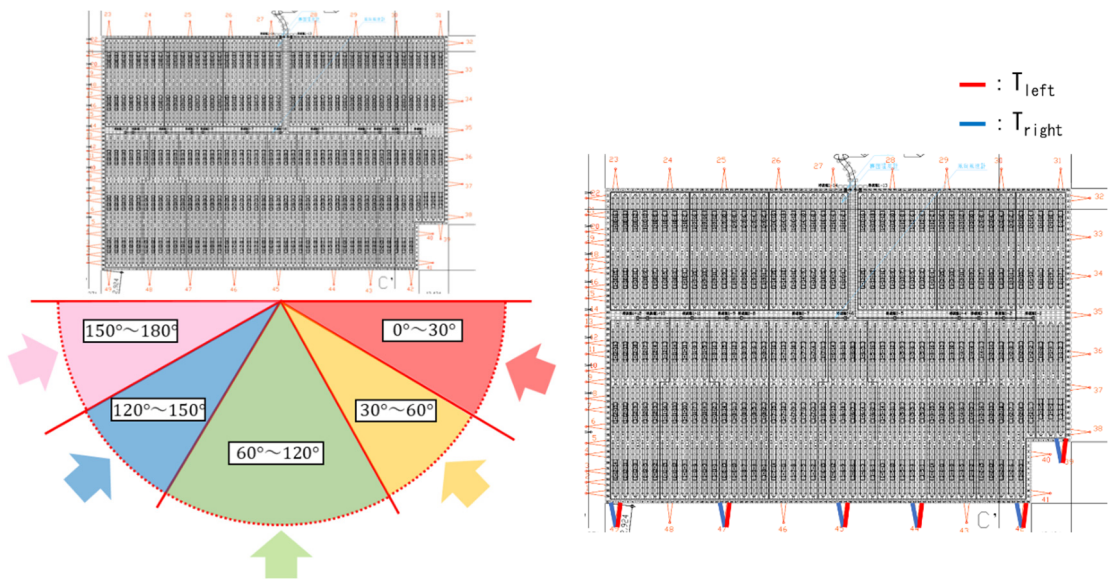


e) CH23の係留索張力の分散状況



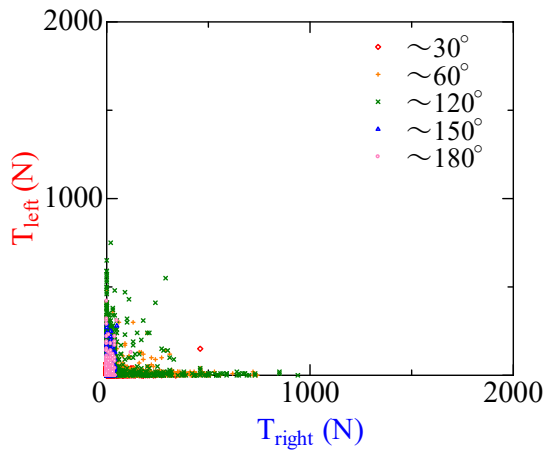
f) CH31の係留索張力の分散状況

図 4-9 アイランド東側の2本の係留索張力の分散状況

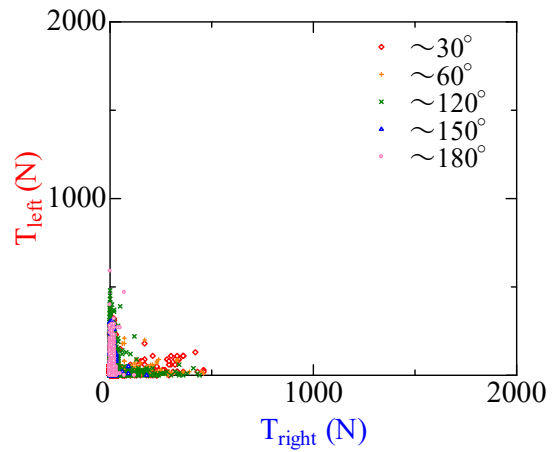


a) 風向別の色分け

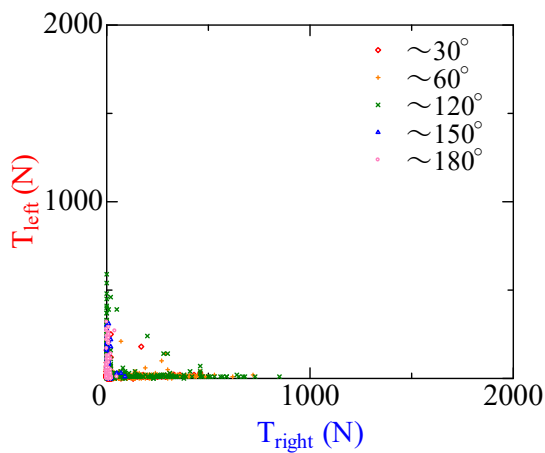
b) T_{left} 、 T_{right} のイメージ図



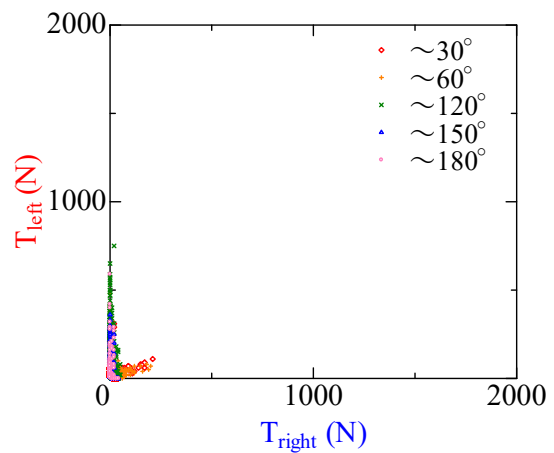
c) 5月の係留索張力の分散状況



d) 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 4-10 アイランド西側の2本の係留索張力の分散状況

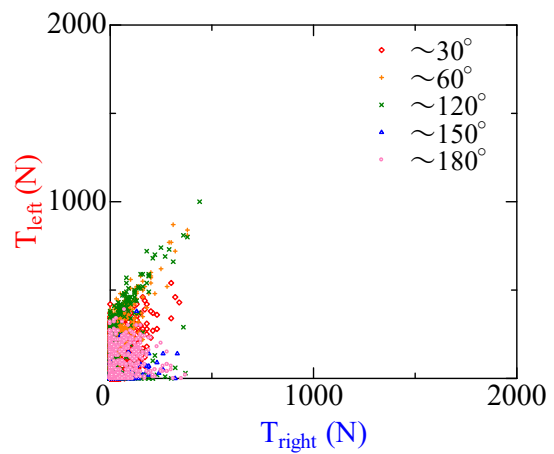
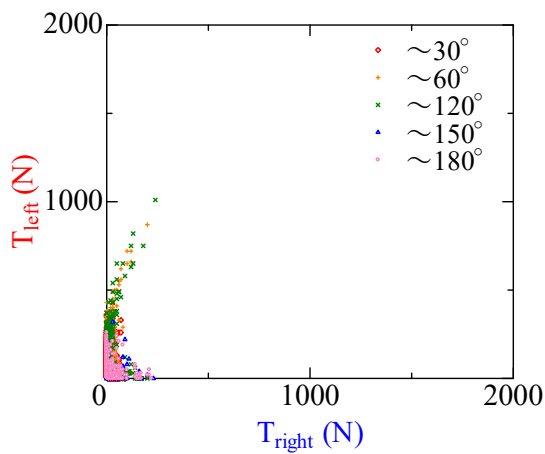
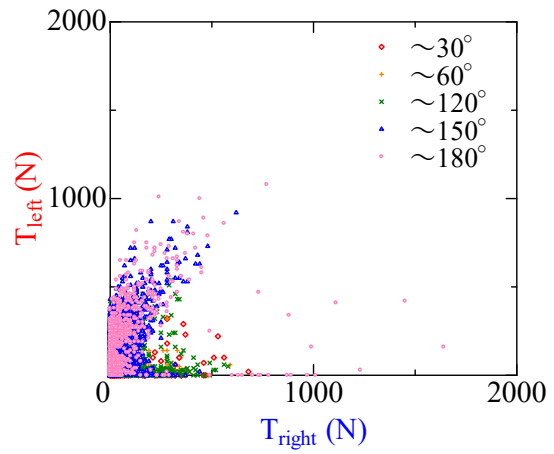
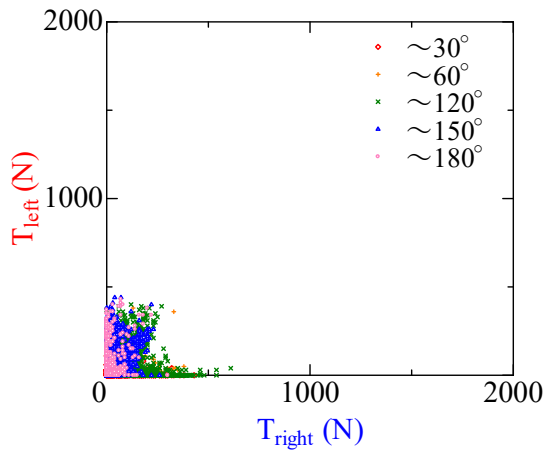
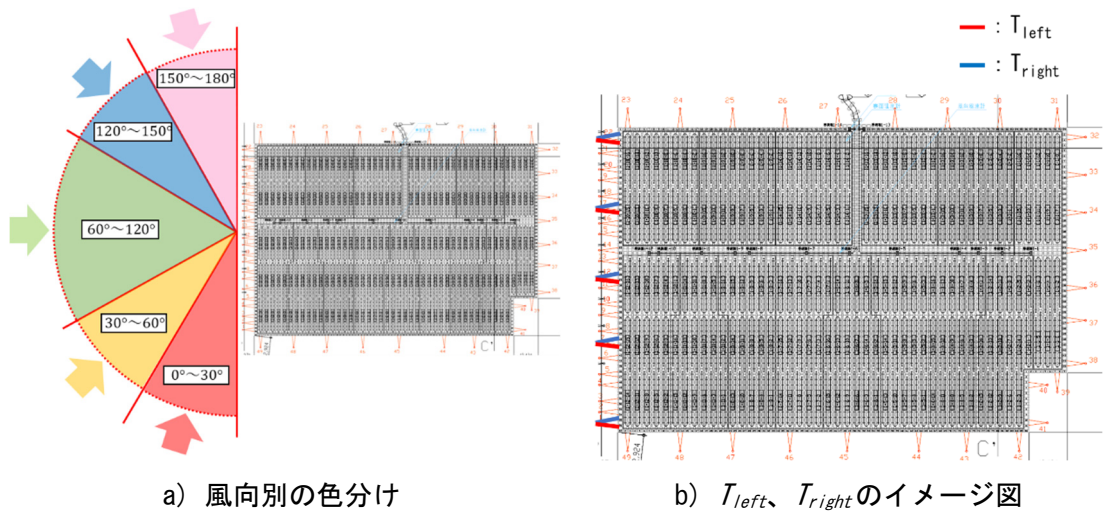


図 4-11 アイランド北側の2本の係留索張力の分散状況

5. 考察

本実測調査では、風向・風速の実測値から風圧荷重の試算を行い、風圧荷重と張力の実測値がおおむね整合することを確認した。ただし、台風時には、風圧荷重の計算値を超過する張力の発生が確認された。

係留索に作用する張力の分散状況については、風向変化や係留索長の不均一等により特定の係留索に張力が集中する現象が確認された。

この現象に対する対策として、係留索長さを均等にすることが考えられるが、施工誤差や水中アンカーの変位等により、係留索長を所定の長さに維持することは難しい。このことから、係留設計においては、張力の集中について適切に考慮する必要がある。

謝辞

本実測調査の実施に当り、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三井住友建設株式会社より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。