

傾斜地設置型/営農型/水上設置型

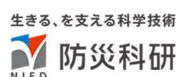
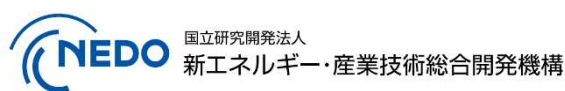
太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2023 年版

技術資料：

水上設置型太陽光発電設備の水理実験結果の概要

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。

2024 年 5 月 31 日



## 更新・修正履歴

- ・ 2023/4/28 公開
- ・ 2024/5/31 内容更新

## 水上設置型太陽光発電設備の水理実験結果の概要

### 1. 概要

水上設置型太陽光発電設備（以下、水上PVと呼称）では、個々のフロートを多行列に複数連結して構成されたフロート群（アイランド）を、複数の係留索を用いて係留している。水位変動や波浪による上下・回転等の動揺に追従させるため、係留索には余裕長があり、強風等荒天時においてアイランド全体が変形・移動すると、係留索が弛んだ状態から緊張状態になる時点で衝撃的な張力が発生するとともに、特定の係留索に張力が集中することが予想される。

本実験では、この現象を水理実験により再現し、以下について確認を行った。

- ①フロートに作用する波力式の妥当性および補正（浮体長／波長） 要否確認
- ②係留索張力の分散状況
- ③アイランドに作用する波力と風圧荷重の比較
- ④フロート端部の動揺（傾斜）状況

### 2. 試験内容

水理実験は、水上設置型太陽光発電模型（縮尺率  $S=1/4$ ）を日本大学理工学部海洋建築工学科の造波水槽に設置し、係留索に作用する張力やフロートの動揺状況などを計測した。計測項目を表 2-1 に、造波水槽の概要を表 2-2 に示す。

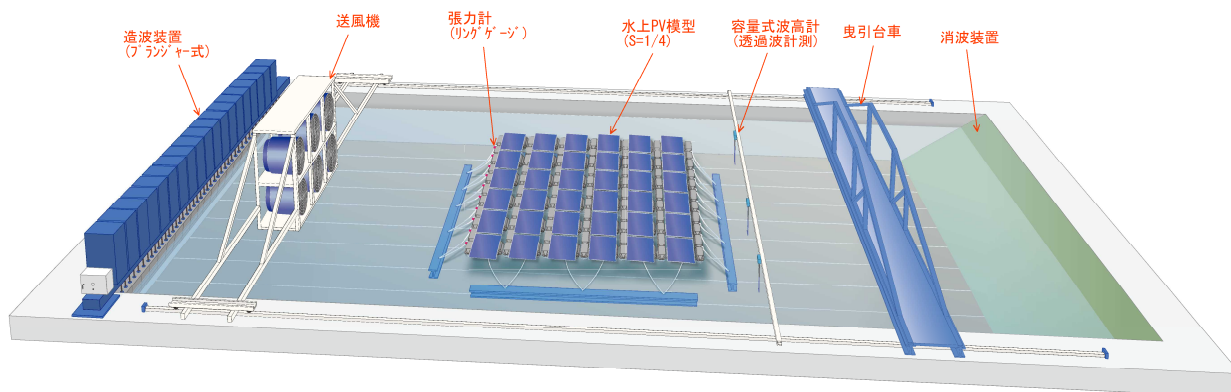


図 2-1 実験状況図

表 2-1 計測項目一覧

No.	計測項目	計測方法	備考
①	係留索張力	張力計 (リングゲージ)	・ サンプル周波数：200Hz
②	フロートの動揺	モーションキャプチャ	
③	波高	容量式波高計	・ 入射波 ・ 透過波

表 2-2 造波水槽の概要

項目	概要	備考
水槽寸法	内寸 L23.4m×B6.9m×H1.5m	本実験は水深 1.0m で実施
装 備	造波装置 (プランジャー式)	一方向/多方向不規則波対応 ※本実験は一方向規則波で実施
	送風機	
	曳引台車	
水槽能力	波高 : 1~10cm	
	周期 : 0.6~2.0s	
	風速 : 1~10m/s	本実験は風速 10m/s で実施

### 3. 実験条件

#### 3.1 実験スケール

実験スケールは  $S=1/4$  (フルードの相似則) とした。フロート諸元および波浪諸元について、実機スケールとの対応表を表 3-1 に示す。

表 3-1 実機スケールと実験スケールの対応表

項目	実機スケール $S=1/1$	実験スケール $S=1/4$	備考
フロート諸元(メインフロート)			
長さ L(m)	1.100	0.275	
幅 B(m)	1.000	0.250	
高さ D(m)	0.250	0.063	
波浪諸元			
波高 H(m)	0.400	0.100	
周期 T(sec)	1.500	0.750	某被災事例の被災時波浪
波長 $\lambda$ (m)	3.510	0.878	※弊社試算結果より設定
$L/\lambda$	0.313	0.313	
※1: 実験スケールは、フルードの相似則に基づき設定。			

## 3.2 実験条件

### 3.2.1 外力条件

#### (1) 波浪条件

本実験の波浪条件を表 3-2 に示す。実験時の水深は 1.0m とした。波浪条件は造波装置の能力（波高：1～10cm、周期：0.6～2.0s）に基づき設定し、入射波は規則波および不規則波とした。規則波において、波高 10cm については、造波装置が造波し得る最短周期 0.85s と最長周期 1.2s を設定した。入射角は  $\beta=0$  度（アイランドに対して垂直に波が入射）とし、波高 10cm について  $\beta=30$  度のケースを追加した。なお、某被災事例においては、弊社試算で波高 40cm、周期 1.5s の波浪が発生していたと想定されている。本実験においては、波高 10cm、周期 0.85s のケースが当該被災波相当の波浪条件である。

不規則波においては、JONSWAP スペクトルモデルを用いて、造波装置が造波し得る中で、被災波相当に近い波浪条件を設定した。

表 3-2(1/2) 波浪条件(規則波)

波ケース名	波の種類	入射角	実験スケール (S=1/4)				実機スケール	
			波高 H (cm)	周期 T (sec)	波長 L (m)	波形勾配 H/L	波高 H (cm)	周期 T (sec)
W_02-06	規則波	$\beta=0$ 度	2	0.6	0.56	0.036	8	1.2
W_02-07				0.7	0.76	0.026		1.4
W_02-10				1.0	1.56	0.013		2.0
W_02-13				1.3	2.64	0.008		2.6
W_02-16				1.6	3.99	0.005		3.2
W_02-19				1.9	5.63	0.004		3.8
W_05-06	規則波	$\beta=0$ 度	5	0.6	0.56	0.089	20	1.2
W_05-07				0.7	0.76	0.065		1.4
W_05-10				1.0	1.56	0.032		2.0
W_05-13				1.3	2.64	0.019		2.6
W_05-16				1.6	3.99	0.013		3.2
W_05-19				1.9	5.63	0.009		3.8
W_10-085	規則波	$\beta=0$ 度	10	0.85	1.13	0.089	40	1.7
W_10-10				1.0	1.56	0.064		2.0
W_10-12				1.2	2.25	0.045		2.4
W_10-085b	規則波	$\beta=30$ 度	10	0.85	1.13	0.089	40	1.7
W_10-10b				1.0	1.56	0.064		2.0

被災波相当→  
(弊社試算)

表 3-2(1/2) 波浪条件(不規則波)

波ケース名	波の種類	入射角	実験スケール (S=1/4)				実機スケール	
			有義波高 H (cm)	有義波周期 T (sec)	波長 L (m)	波形勾配 H/L	有義波高 H (cm)	有義波周期 T (sec)
IW_08-10	不規則波	$\beta=0$ 度	8	1.0	1.56	0.013	32	2
IW_08-10b		$\beta=30$ 度	8	1.0	1.56	0.013	32	2



図 3-1 造波装置（プランジャー式）（水槽から水を抜いた状態で撮影）

## (2) 風条件

本実験では送風機を使用して風速約 10m/s の風を作用させた。風速は波上側フロート端部にて簡易風速計で計測した。

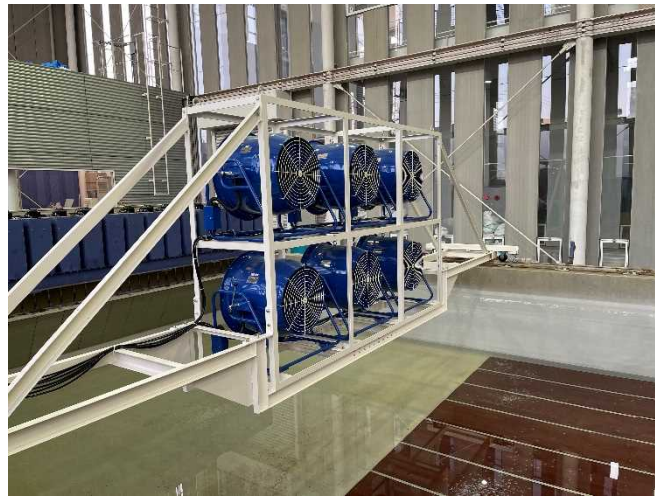


図 3-2 送風機

### 3.2.2 模型条件

#### (1) フロート

アイランド構成および部材諸元を図 3-3、表 3-3 に示す。フロート模型は国内で導入事例の多い 1 パネル/1 フロートタイプとした。フロート諸元は、国内で流通しているフロートから一般的な形状を設定した。別途、風荷重 WG で実施されている風洞実験と同一の諸元としている。

表 3-3 アイランド部材諸元

No.	部材名	諸元	備考
①	メインフロート	L275mm×B250mm×H62.5mm	
②	サブフロート	L250mm× B75mm×H62.5mm	
③	通路フロート	L275mm× B75mm×H62.5mm	
④	接合部	L40mm× B20mm×H2.0mm	・硬接合部タイプ (Hard Type) ・柔接合部タイプ (Flexible Type)
⑤	パネル	L500mm×B250mm	・パネル角度：10°



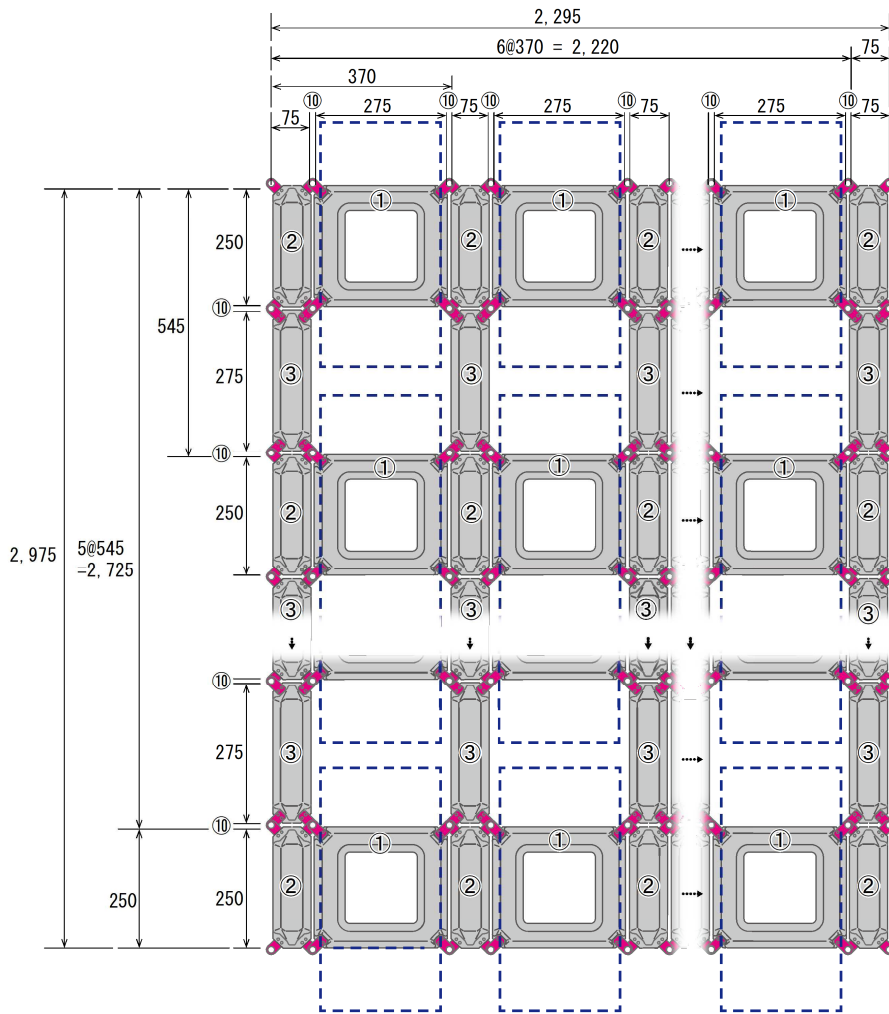


図 3-3 アイランド構成



図 3-4 メインフロート、サブフロート、通路フロート

## (2) フロート間接合部

フロート間接合部は硬接合部タイプ（Hard Type）と柔接合部タイプ（Flexible Type）の2タイプとした。

接合部材料の選定に当たり、接合部の曲げ試験を実施し荷重-変位特性を確認した（図 3-5 参照）。曲げ試験結果より、実機フロートと同程度の荷重-変位特性を有するPVC（硬接合部タイプ）とフロートと同素材であるHDPEを接合部材料として選定した。

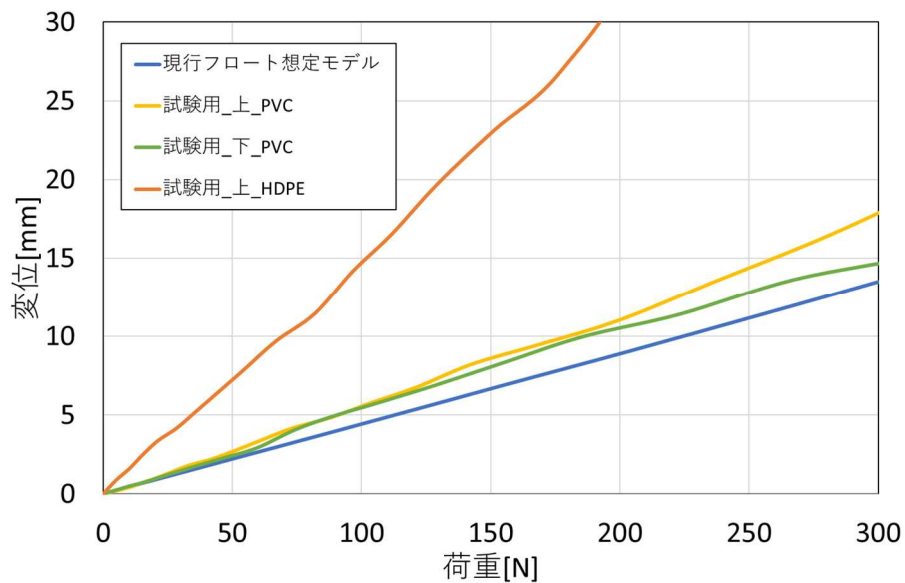


図 3-5 フロート間接合部の荷重-変位特性



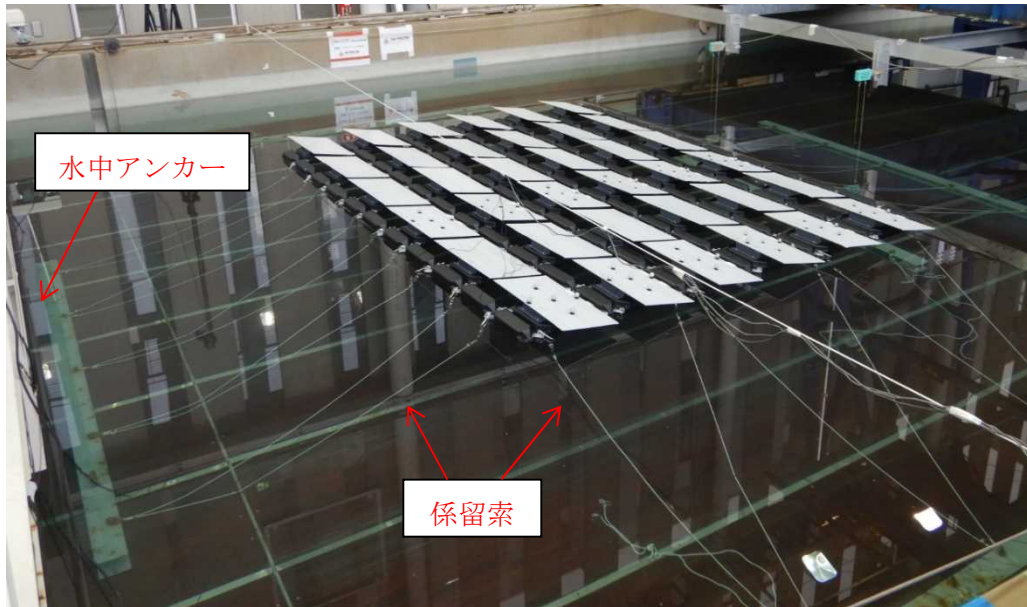
図 3-6 フロート間接合部



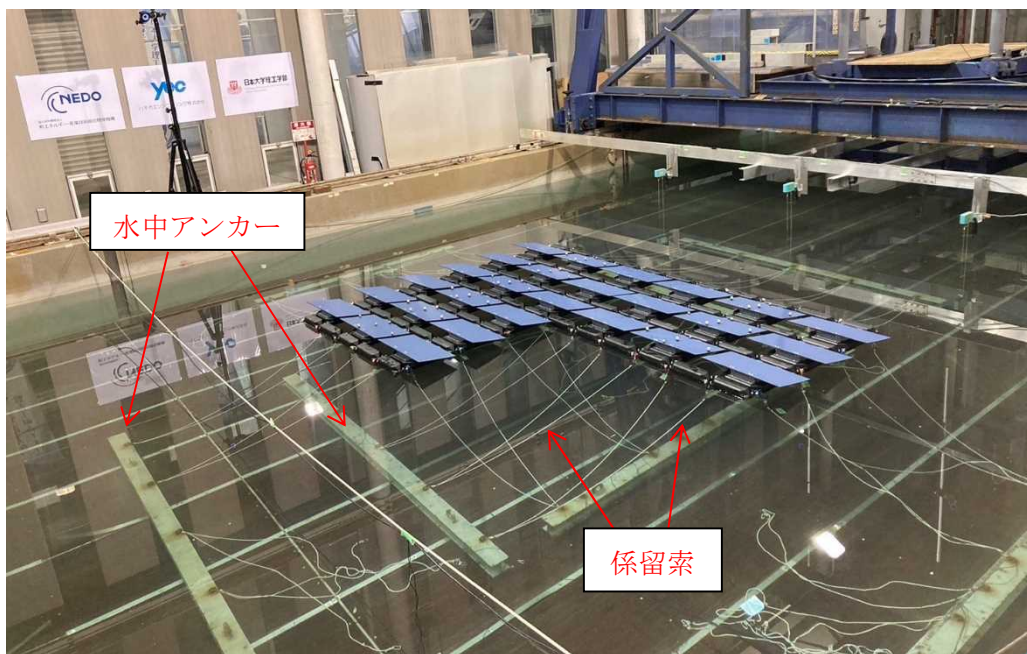
### (3) 係留システム

係留システムは、水底にアンカーを設置する方式とした。

本実験ではアンカー1箇所に対し2本の係留索を設置した。矩形アイランドについては、アイランドの四方を係留し、L字型アイランドについては四方および隅角部に係留索を設置した。係留索長は全て同一とした。



(a) アイランドの係留状況(矩形アイランド)



(b) アイランドの係留状況(L字型アイランド)

図 3-7 係留状況(L字型アイランド)

### 3.2.3 実験ケース

表 3-2 に示した波浪条件と表 3-4 に示す模型条件をもとに、実験ケースを表 3-5 のとおり設定した (計 114 ケース)。なお、規則波での「波高 5cm、周期 10s」および「波高 10cm、周期 0.85s」の波浪条件下においては、波浪に加えて風を作用させ、波浪・風同時作用時の実験を行った。

表 3-4 接合部タイプおよびフロート列数による命名

模型ケース名	タイプ	フロート行数	フロート列数	備考
H3	硬接合タイプ (Hard Type) PVC 製	6	6	矩形アイランド
H6		6	3	矩形アイランド
HL		6	6, 3	L 字型アイランド
F3	柔接合タイプ (Flexible Type) HDPE 製	6	6	矩形アイランド
F6		6	3	矩形アイランド
FL		6	6, 3	L 字型アイランド

表 3-5(1/2) 実験ケース一覧(規則波)

波浪条件	模型タイプ	H3	H6	HL	F3	F6	FL	備考
02-06		—	H6_02-06	HL_02-06	—	F6_02-06	FL_02-06	
02-07		—	H6_02-07	HL_02-07	—	F6_02-07	FL_02-07	
02-10		—	H6_02-10	HL_02-10	—	F6_02-10	FL_02-10	
02-13		—	H6_02-13	HL_02-13	—	F6_02-13	FL_02-13	
02-16		—	H6_02-16	HL_02-16	—	F6_02-16	FL_02-16	
02-19		—	H6_02-19	HL_02-19	—	F6_02-19	FL_02-19	
05-06		H3_05-06	H6_05-06	HL_05-06	F3_05-06	F6_05-06	FL_05-06	
05-07		H3_05-07	H6_05-07	HL_05-07	F3_05-07	F6_05-07	FL_05-07	
05-10		H3_05-10	H6_05-10	HL_05-10	F3_05-10	F6_05-10	FL_05-10	
05-13		H3_05-13	H6_05-13	HL_05-13	F3_05-13	F6_05-13	FL_05-13	
05-16		H3_05-16	H6_05-16	HL_05-16	F3_05-16	F6_05-16	FL_05-16	
05-19		H3_05-19	H6_05-19	HL_05-19	F3_05-19	F6_05-19	FL_05-19	
10-085		—	H6_10-085	HL_10-085	—	F6_10-085	FL_10-085	
10-10		—	H6_10-10	HL_10-10	—	F6_10-10	FL_10-10	
10-12		—	H6_10-12	HL_10-12	—	F6_10-12	FL_10-12	
10-16		—	H6_1016		—	F6_1016		
10-20		—	H6_1020		—	F6_1020		
10-085b		—	H6_10-085b	HL_10-085b	—	F6_10-085b	FL_10-085b	斜め入射
10-10b		—	H6_10-10b	HL_10-10b	—	F6_10-10b	FL_10-10b	斜め入射
05-10W		H3_05-10W	H6_05-10W	HL_05-10W	F3_05-10W	F6_05-10W	FL_05-10W	+風
10-085W		H3_10-085W	H6_10-085W	HL_10-085W	F3_10-085W	F6_10-085W	FL_10-085W	+風
		—	H6_10-085W_6M	HL_10-085W_6M	—	F6_10-085W_6M	FL_10-085W_6M	+風 波上側係留索6本
		—	H6_10-085W_4M	HL_10-085W_4M	—	F6_10-085W_4M	FL_10-085W_4M	+風 波上側係留索4本
—		H3W	H6W	HLW	F3W	F6W	FLW	風のみ

表 3-5(2/2) 実験ケース一覧(不規則波)

波浪条件	模型タイプ	H3	H6	HL	F3	F6	FL	備考
IW_08-10		—	H6_IW08-10	HL_IW08-10	—	F6_IW08-10	FL_IW08-10	
IW_08-10b		—	H6_IW08-10b	HL_IW08-10b	—	F6_IW08-10b	FL_IW08-10b	斜め入射

## 4. 実験方法

### 4.1 波高検定

実験に先立ち、フロートがない状態で波を入射させ入射波の検定を行った。入射波の計測位置は波上側フロート端部の位置とした。

- ・計測項目：波高・周期（サンプリング周波数：200Hz）、風速
- ・使用機器：容量式波高計、熱式風速計

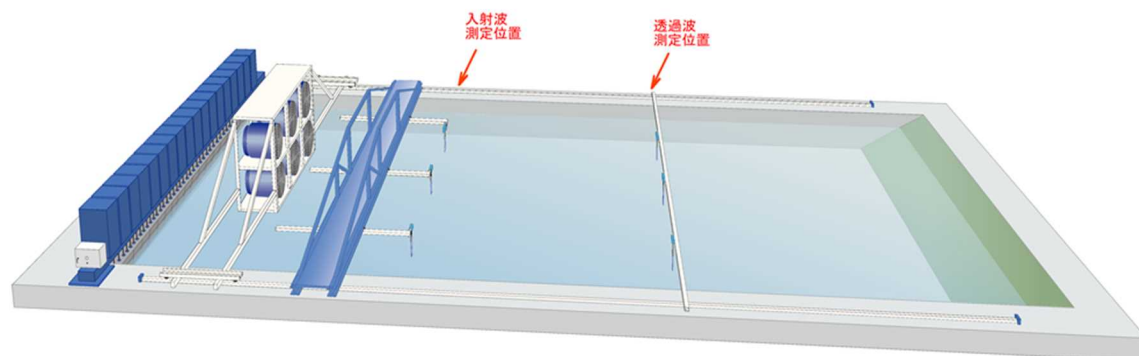


図 4-1 波高検定イメージ

### 4.2 水理模型実験

#### 4.2.1 波高計測

本実験では容量式波高計を用いて波高を計測した。容量式波高計のキャリブレーションについては、水を入れた筒状の容器内で容量式波高計の設置高さを変化させ（基準高さから $\pm 2\text{cm}$ 、 $\pm 4\text{cm}$ 、 $\pm 6\text{cm}$ ）、キャリブレーション値の算定を行った。

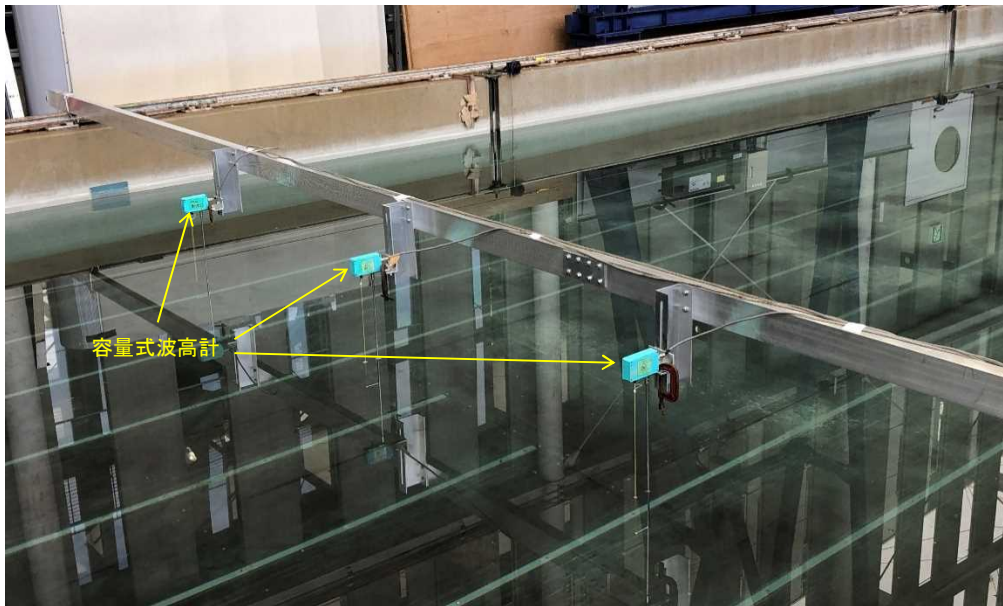


図 4-2 容量式波高計の設置状況（透過波計測位置）

#### 4.2.2 張力計測

係留索に作用する張力を張力計（リングゲージ）にて計測した。  
 矩形アイランドでの計測点数は次のとおり。

- ・フロート 6 列 : 16 点（波上側 10 点＋側面 6 点）
- ・フロート 3 列 : 14 点（波上側 10 点＋側面 4 点）
- ・L字型アイランド : 18 点（波上側 10 点＋側面 8 点）

張力計（リングゲージ）は係留索とフロートの接合部に設置した。

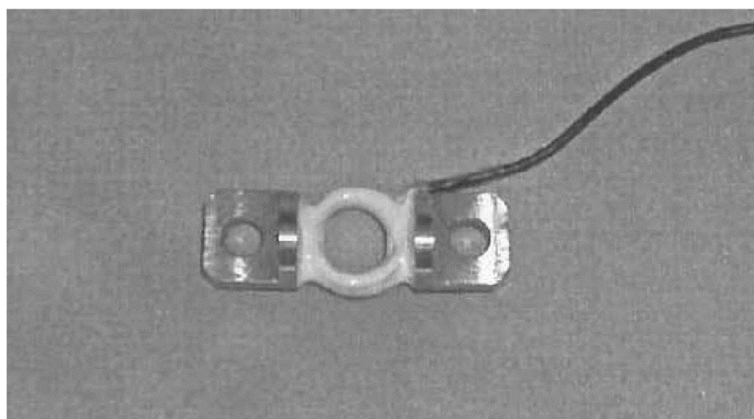
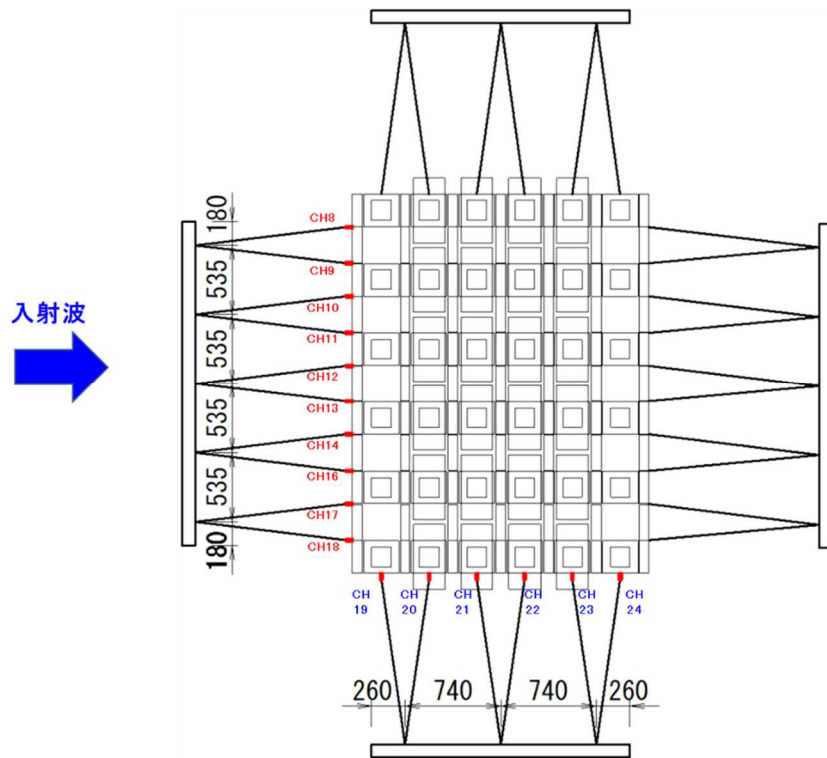
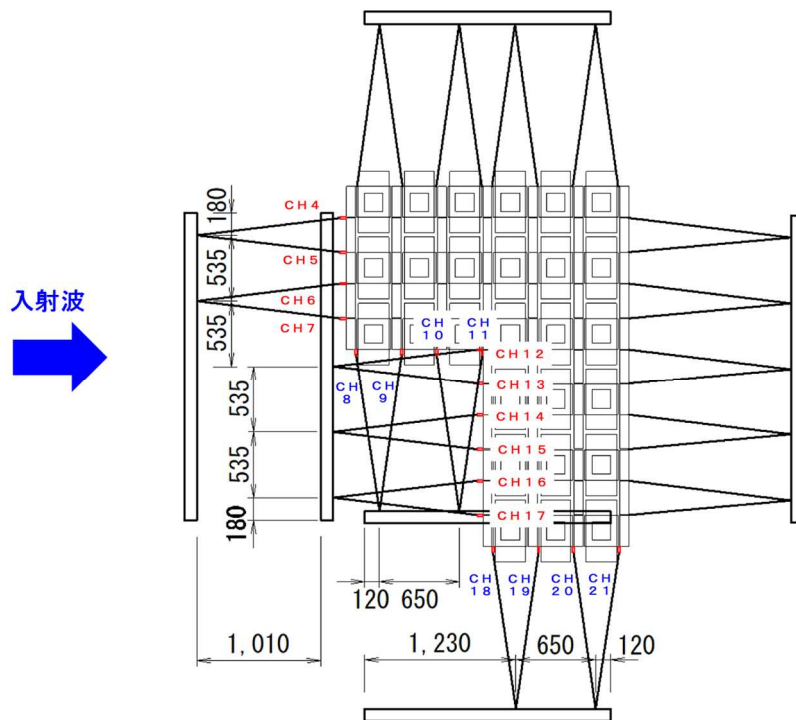


図 4-4 張力計（リングゲージ）



(a) 矩形アイランドでの張力計（リングゲージ）設置箇所



(b) L字型アイランドでの張力計（リングゲージ）設置箇所

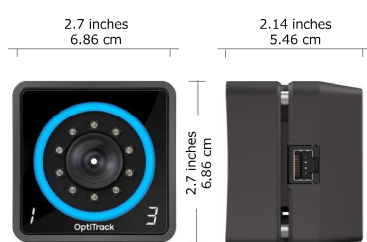
図 4-3 張力計（リングゲージ）設置箇所



### 4.2.3 フロートの動揺状況の計測

フロートの動揺状況はモーションキャプチャを用いて計測した。パネルにトラッカーを設置し、次に示すモーションキャプチャを用いてフロート（パネル）の動揺状況（傾斜角度）を計測した。

- ・製品名：Optitrack
- ・カメラ名称：PrimeX13
- ・解析ソフト：SkycoM



#### サイズ・重量

幅：68.6 mm  
高さ：68.6 mm  
奥行き：54.6 mm  
重量：320 g  
固定用マウント：1/4"インチ (x2)  
LED表示：カメラID表示 (2桁)、フルカラーのステータスインジケータ

#### LED光源

10個  
850 nm IR  
明るさ調節可能  
14mm反射マーカ使用時最大到達距離：16 m  
自発光マーカ使用時最大到達距離：25 m

#### レンズ・フィルタ

標準レンズ：5.5 mm F#1.8  
水平視野角:56°  
垂直視野角:46°  
焦点の調整可能  
オプションレンズ：8 mm F#1.8  
水平視野角:42°  
垂直視野角:34°  
焦点の調整可能  
標準フィルタ：850nm IR バンドパス / 700nm 可視光  
オプションフィルタ：  
850nm IR バンドパス  
800nm IR ハイパス / 700nm 可視光

#### 画像センサー

解像度：1,280 × 1,024 pixel (フルフレーム)  
フレームレート：30-240 fps (2.X)  
20-1,000 fps (3.X)  
シャッター方式：グローバル  
シャッタースピード：  
デフォルト：0.25 ms  
最短：0.01 ms  
最長：3.9 ms (240 fps時)

#### データ入出力および電源

データ：GigE / PoE (1000BASE-T)  
カメラ間同期：Ethernet  
電源：PoE

図 4-5 モーションキャプチャ諸元

## 5. 実験結果

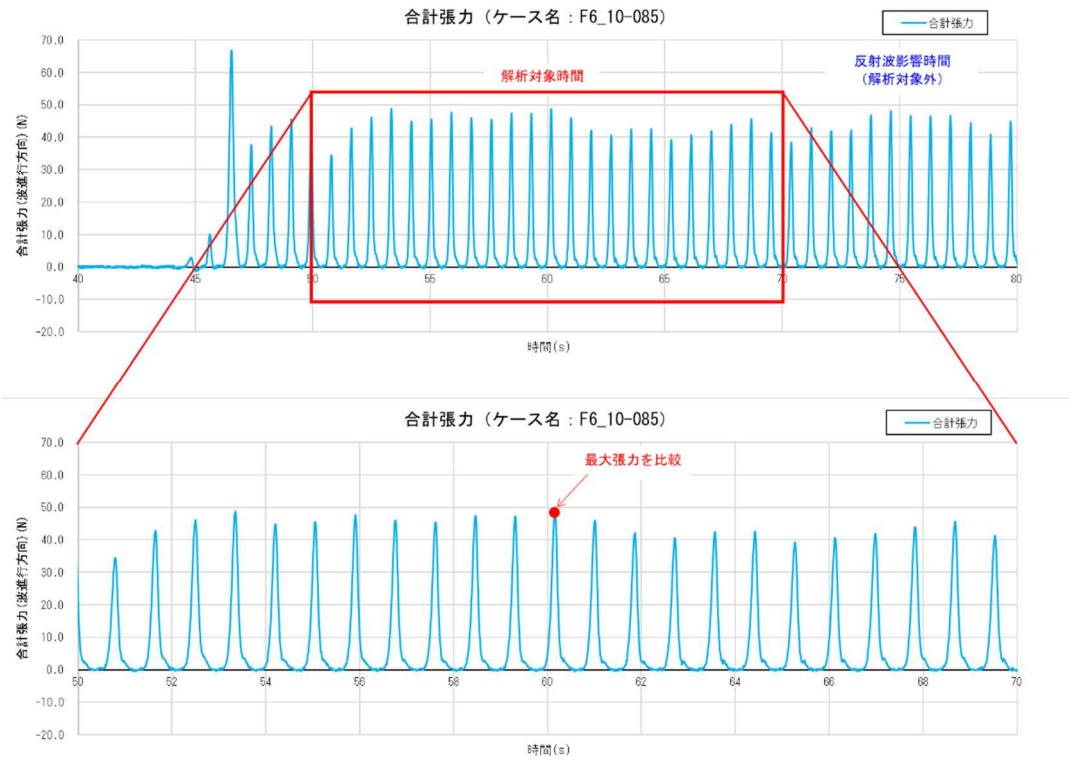
### 5.1 係留索に作用する張力と波力算定式の比較

#### (1) 概要

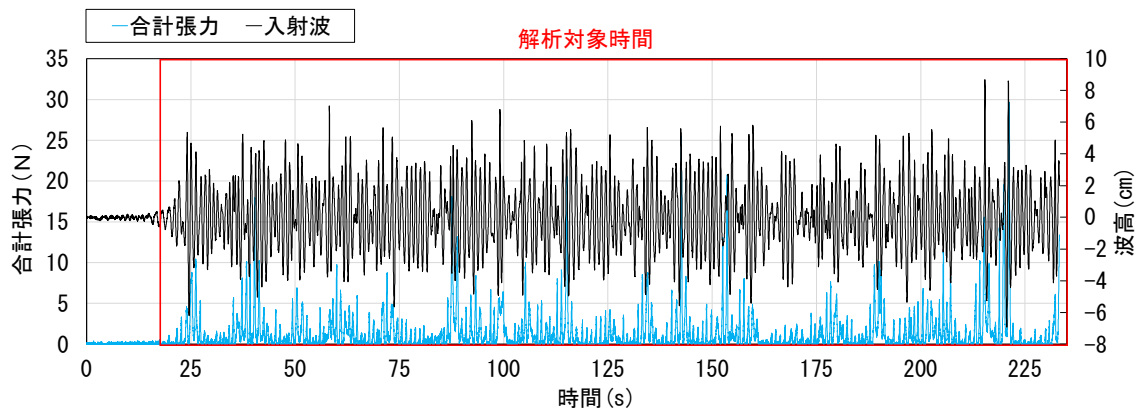
波力算定式の妥当性を確認するため、係留索に作用する張力（合計値）と波力算定式より算出した計算値を比較した。

規則波実験において、張力は定常状態を比較対象とし、解析対象時間内における最大値を計算値と比較した。

不規則波実験においては、入射波がフロート模型へ入射してから、有義波周期に対して約210波分を解析対象としている。



(a) 規則波実験における張力の解析対象時間 (ケース名 : F6\_10-085)



(b) 不規則波実験における張力の解析対象時間 (ケース名 : F6\_10-085)

図 5-1 実験における張力の解析対象時間



## (2) 波力算定

水上設置型太陽光発電のような多行列の浅喫水フロートに作用する波力の算出方法はこれまで明確でなく、ガイドライン本編では、水理実験や数値解析により算出することを原則としている。ただし、簡易的に算出する方法として次式に示される比較的浅喫水の小型浮体に対する波力算出方法が紹介されている。これは波力を波高の差(波の山部と谷部の水位差)による静水圧の値として算出するもので、波長と浮体幅による補正がなされている(図5-2参照)。

波力算定に当り、水上設置型太陽光発電のような多連結浮体に対して次式を適用する方法として、最も波上側のフロートに作用する波力を計算することとし、浮体長さLおよび浮体幅Bを図5-3のとおり仮定した。

$d > 1/2 \cdot H_{1/3}$  の場合

$$F_S = \omega_0 \cdot H_{1/3} \cdot L \cdot d \quad : B > L_A/2$$

$$F_S = 2 \cdot \omega_0 \cdot H_{1/3} \cdot L \cdot d \cdot B/L_A \quad : B \leq L_A/2$$

$d \leq 1/2 \cdot H_{1/3}$  の場合

$$F_S = 1/2 \cdot \omega_0 \cdot (H_{1/3} + d)^2 \cdot L \quad : B > L_A/2$$

$$F_S = \omega_0 \cdot (H_{1/3}/2 + d)^2 \cdot L \cdot B/L_A \quad : B \leq L_A/2$$

ここで、 $d$  : 浮体の喫水 (m)

$F_S$  : 浮体に作用する波力 (kN)

$H_{1/3}$  : 設計波高(有義波高) (m)

$\omega_0$  : 水の単位体積重量 $\rho_0 g$  (kN/m<sup>3</sup>) (淡水の場合 10.0kN/m<sup>3</sup>)

$L$  : 浮体の長さ(波の進行方向に直角な長さ) (m)

$B$  : 浮体幅(波の進行方向に対する長さ) (m)

$L_A$  : 波長 (m) (深海波長とし、 $L_A = 1.56 \cdot T^2$ )

$T$  : 周期 (s)

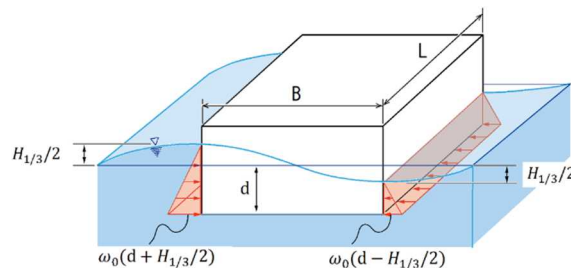
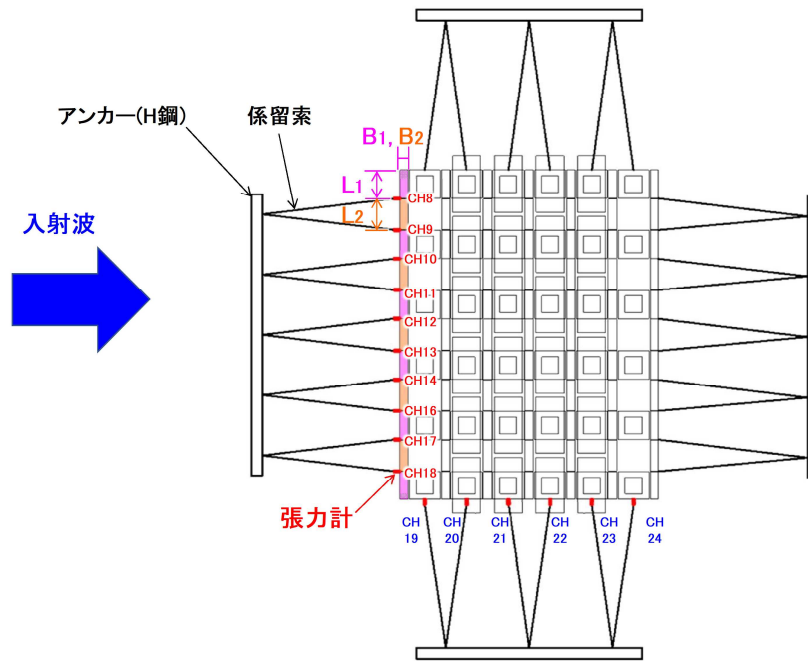
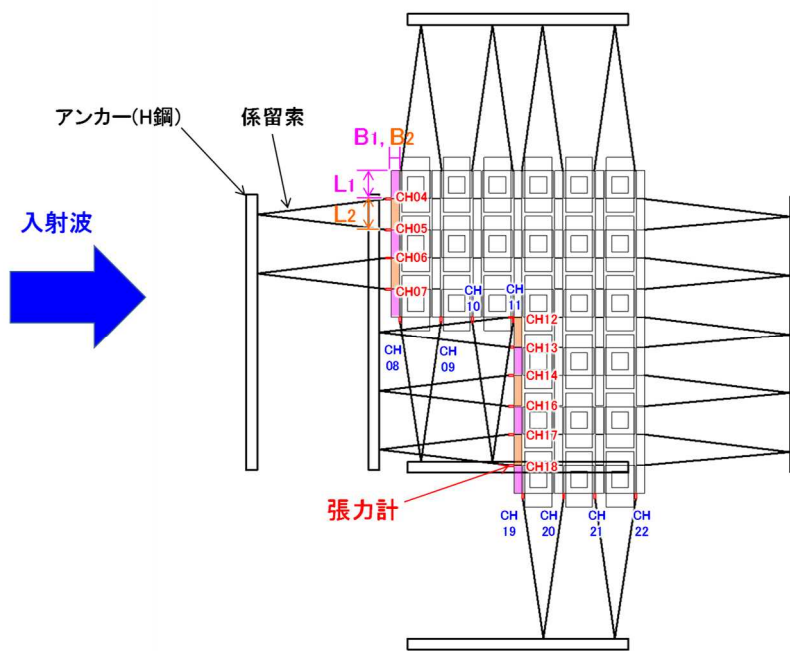


図5-2 浅喫水の小型浮体に対する波力算定式および模式図



(a) 矩形アイランドでの波力算定方式の模式図 (平面図)



(b) L字型アイランドでの波力算定方式の模式図 (平面図)

図 5-3 アイランドの波力算定方式の模式図

### (3) 規則波浪場での張力と波力算定式の比較結果

上記で算出した波力算定結果と波浪単独作用時の合計張力（最大値）の比較を図 5-4～図 5-6 に示す。比較結果から以下のことが明らかになった。

- ・ 矩形アイランドと L 字型アイランドでは、合計張力（最大値）に大きな差異はみられなかった。
- ・ 波高 H=2.0cm および波高 H=5.0cm においては合計張力と計算値がおおむね一致した。
- ・ 波高 H=10.0cm のケースでは、合計張力と計算値の乖離が大きかった。
- ・ フロートが大きく動揺するような高波浪条件下においては、当該波力算定式の精度が低下することが確認された。

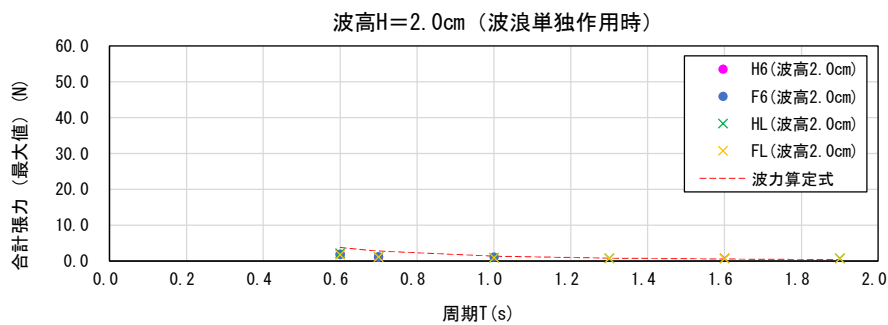


図 5-4 計測値と計算値の比較結果（波高 H=2.0cm）

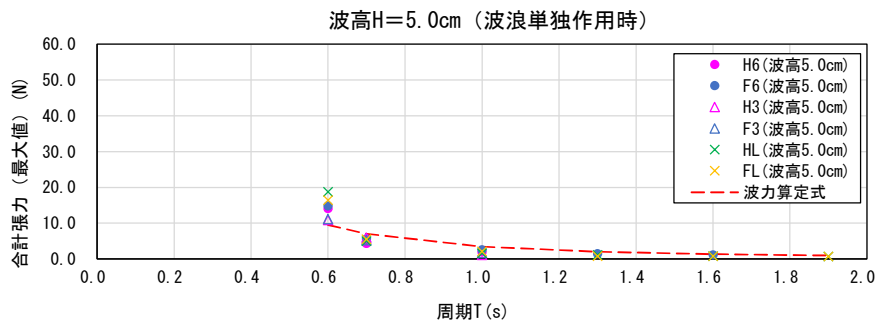


図 5-5 計測値と計算値の比較結果（波高 H=5.0cm）

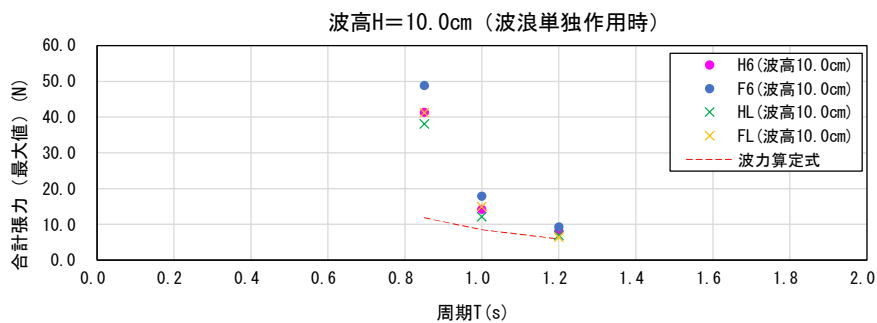
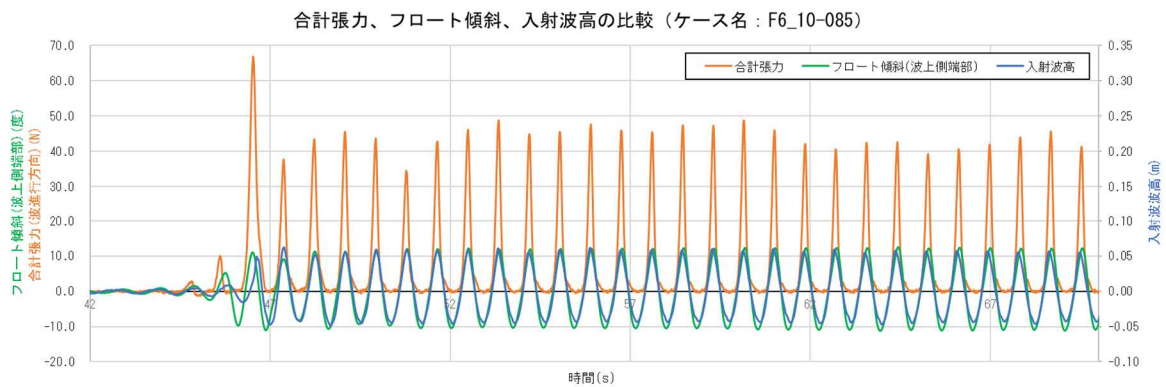


図 5-6 計測値と計算値の比較結果（波高 H=10.0cm）

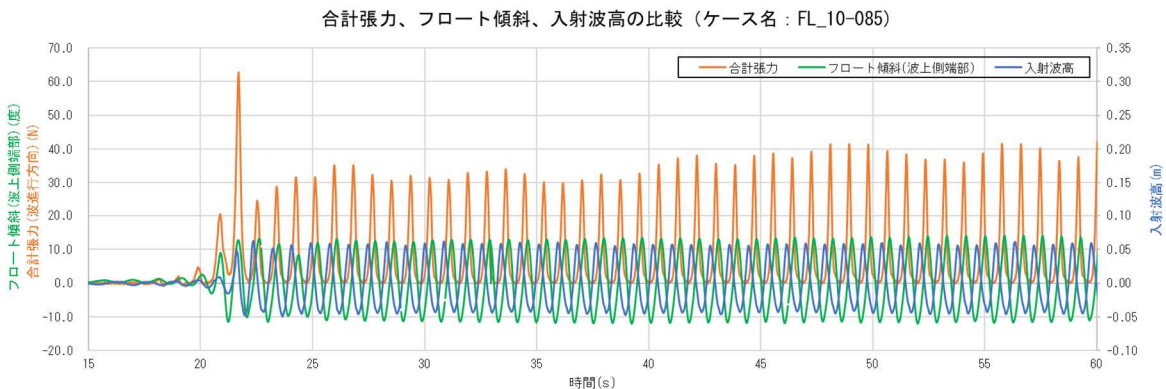
矩形アイランドとL字型アイランドでの、被災波相当波浪（F6\_10-085）における合計張力、フロート傾斜角、入射波高の比較結果を図 5-7 に示す。また、被災波相当波浪における波浪単独作用時（F6\_10-085、FL\_10-085）および波浪・風同時作用時（F6\_10-085W、FL\_10-085W）の波浪作用状況を図 5-8～図 5-11 に示す。

波浪単独作用時（図 5-8、図 5-9）においては、波浪がアイランド端部のフロートを乗り越えている様子が確認できる。

波浪・風同時作用時（図 5-10、図 5-11）においては、波浪がパネルに到達し飛沫が生じている様子が確認できる。



(a) 被災波相当波浪（F6\_10-085）における合計張力、フロート傾斜、入射波高の比較結果（矩形アイランド）



(b) 被災波相当波浪（FL\_10-085）における合計張力、フロート傾斜、入射波高の比較結果（L字アイランド）

図 5-7 合計張力、フロート傾斜、入射波高の比較結果



図 5-8 (1/5) 波浪作用状況 (ケース名 : F6\_10-085) 動画内時間 : 30.8s



図 5-8 (2/5) 波浪作用状況 (ケース名 : F6\_10-085) 動画内時間 : 31.0s



図 5-8 (3/5) 波浪作用状況 (ケース名 : F6\_10-085) 動画内時間 : 31.2s



図 5-8 (4/5) 波浪作用状況 (ケース名 : F6\_10-085) 動画内時間 : 31.4s



図 5-8 (5/5) 波浪作用状況 (ケース名 : F6\_10-085) 動画内時間 : 31.6s





図 5-9 (1/5) 波浪作用状況 (ケース名 : FL\_10-085) 動画内時間 : 46. 2s



図 5-9 (2/5) 波浪作用状況 (ケース名 : FL\_10-085) 動画内時間 : 46. 4s



図 5-9 (3/5) 波浪作用状況 (ケース名 : FL\_10-085) 動画内時間 : 46. 6s



図 5-9 (4/5) 波浪作用状況 (ケース名 : FL\_10-085) 動画内時間 : 46. 8s



図 5-9 (5/5) 波浪作用状況 (ケース名 : FL\_10-085) 動画内時間 : 47. 0s



図 5-10 (1/5) 波浪作用状況 (ケース名 : F6\_10-085W) 動画内時間 : 44. 6s



図 5-10 (2/5) 波浪作用状況 (ケース名 : F6\_10-085W) 動画内時間 : 44. 8s



図 5-10 (3/5) 波浪作用状況 (ケース名 : F6\_10-085W) 動画内時間 : 45. 0s



図 5-10 (4/5) 波浪作用状況 (ケース名 : F6\_10-085W) 動画内時間 : 45. 2s



図 5-10 (5/5) 波浪作用状況 (ケース名 : F6\_10-085W) 動画内時間 : 45. 4s





図 5-11 (1/5) 波浪作用状況 (ケース名 : FL\_10-085W) 動画内時間 : 44. 2s



図 5-11 (2/5) 波浪作用状況 (ケース名 : FL\_10-085W) 動画内時間 : 44. 4s



図 5-11 (3/5) 波浪作用状況 (ケース名 : FL\_10-085W) 動画内時間 : 44. 6s



図 5-11 (4/5) 波浪作用状況 (ケース名 : FL\_10-085W) 動画内時間 : 44. 8s



図 5-11 (5/5) 波浪作用状況 (ケース名 : FL\_10-085W) 動画内時間 : 45. 0s

#### (4) 不規則波浪場での張力と波力算定式の比較結果

表 5-1 にゼロアップクロス法により求めた入射波データを示す。図 5-12 に不規則波浪場での時系列の合計張力を示す。最高波が入射した際に最大張力が計測された。

図 5-13 に波力算定結果と不規則波浪場での合計張力（最大値）比較を示す。なお、波力算定式を算出する際の設計波高は、ゼロアップクロス法により計測した入射波から求めた有義波高を設計波高とした。比較結果から以下のことが明らかになった。

- ・合計張力と計算値の剥離が大きい結果となった。
- ・フロートが大きく動揺するような高波浪条件下であったため、規則波実験と同様に当該波力算定式の精度が低下することが確認された。

表 5-1 入射波データ

最高波高	$H_{max}$	13.9cm
最高波周期	$T_{max}$	1.03s
有義波高	$H_{1/3}$	8.5cm
有義波周期	$T_{1/3}$	1.05s
最大波高	$H_{1/10}$	10.3cm
最大波周期	$T_{1/10}$	1.03s
平均波高	$H_{mean}$	5.6cm
平均周期	$T_{mean}$	0.99s

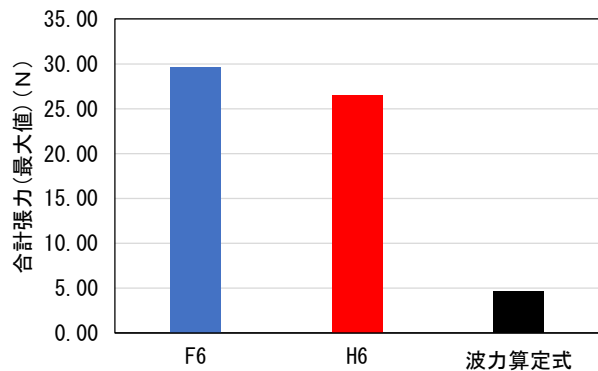
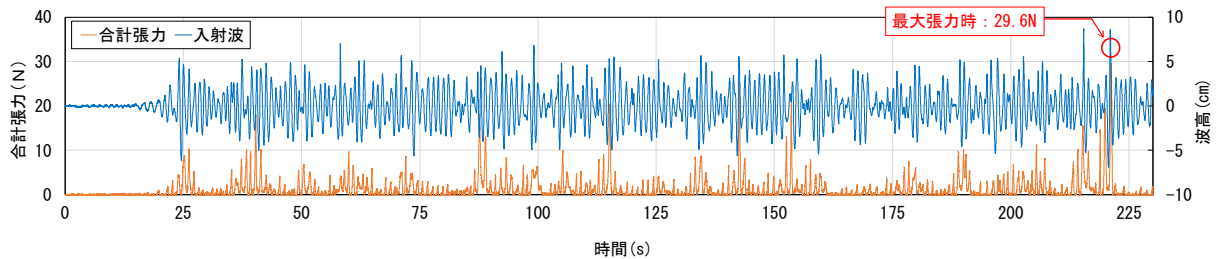
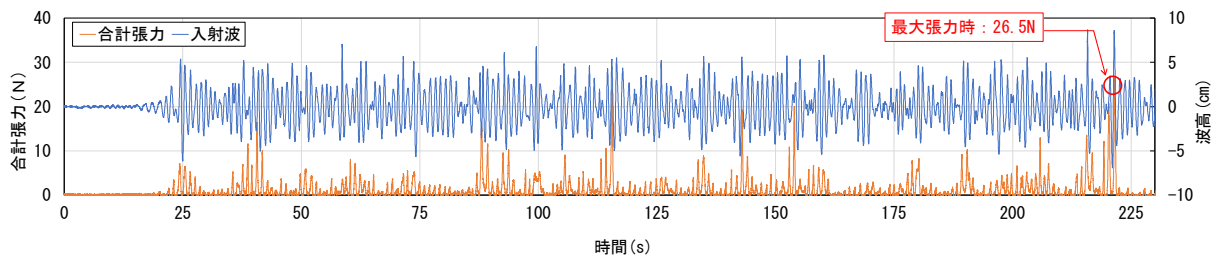


図 5-13 計測値と計算値の比較結果



(a) 時系列の合計張力と入射波（ケース名：F6\_IW08-10）



(b) 時系列の合計張力と入射波（ケース名：H6\_IW08-10）

図 5-12 時系列の合計張力と入射波

また波浪作用状況を図 5-14 に示す。最高波がパネルに到達すると、波がアイランド端部のフロートを乗り越え、飛沫が生じている様子が確認できる。



図 5-14 (1/5) 最高波作用状況 (ケース名 : FL\_IW08-10) 動画内時間 : 235. 2s



図 5-14 (2/5) 最高波作用状況 (ケース名 : FL\_IW08-10) 動画内時間 : 235. 4s



図 5-14 (3/5) 最高波作用状況 (ケース名 : FL\_IW08-10) 動画内時間 : 235. 6s



図 5-14 (4/5) 最高波作用状況 (ケース名 : FL\_IW08-10) 動画内時間 : 235. 8s



図 5-14 (5/5) 最高波作用状況 (ケース名 : FL\_IW08-10) 動画内時間 : 2360. 0s



## 5.2 張力の分散特性

### (1) 波入射角 $\beta = 0^\circ$ の場合

図 5-10 に被災波相当波浪 (H6\_10-085) における波上側 (CH8~CH18) 合計張力最大時の張力の分散状況を示す。波上側係留索 (CH8~CH18) の平均張力が 4.13N であったのに対し、CH13 で最大張力 8.10N が計測されており、平均張力に対して 1.96 倍の張力集中が確認された。

波入射角  $\beta = 0^\circ$  における係留索の平均張力と最大張力の比較を図 5-11 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を示す。本実験では、波入射角  $\beta = 0^\circ$  の場合、平均張力に対し 2 倍程度の最大張力が作用した。

### ケース名 : H6\_10-085

波上側(CH8~CH18)合計張力最大時

※CH1~CH7は波高計のチャンネル

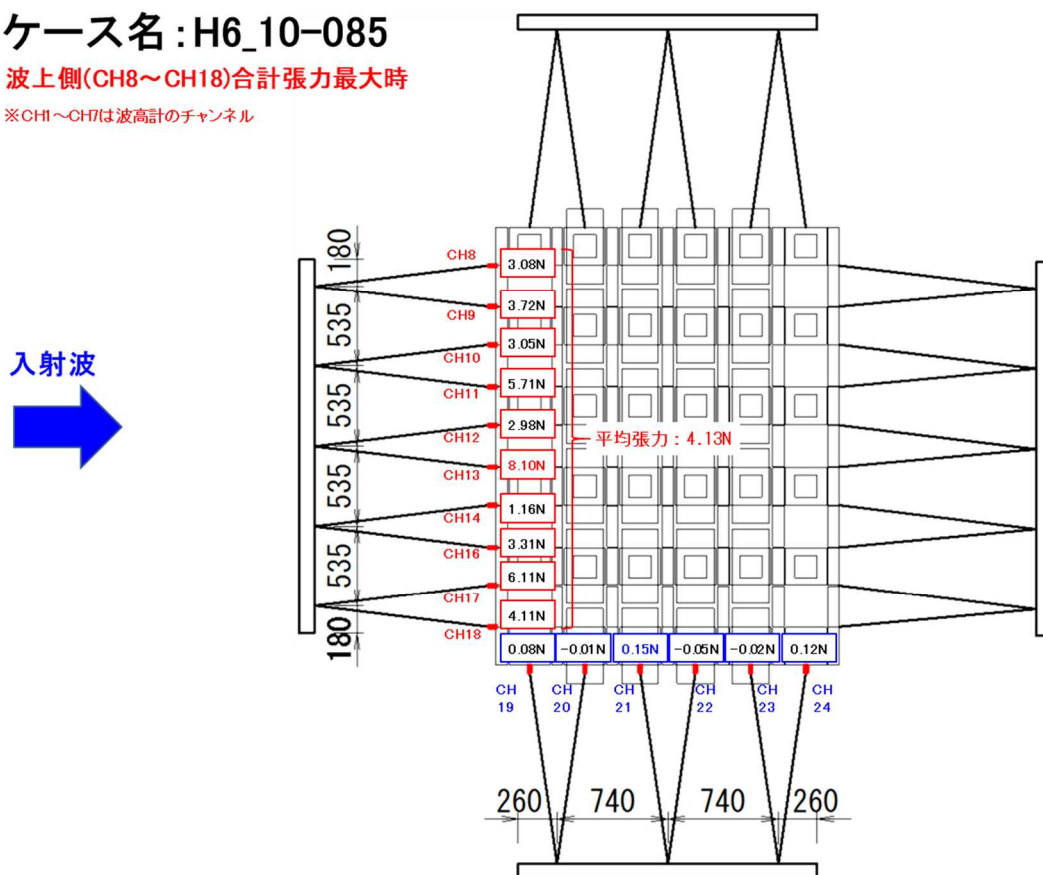


図 5-10 被災波相当波浪 (H6\_10-085) における張力の分散状況

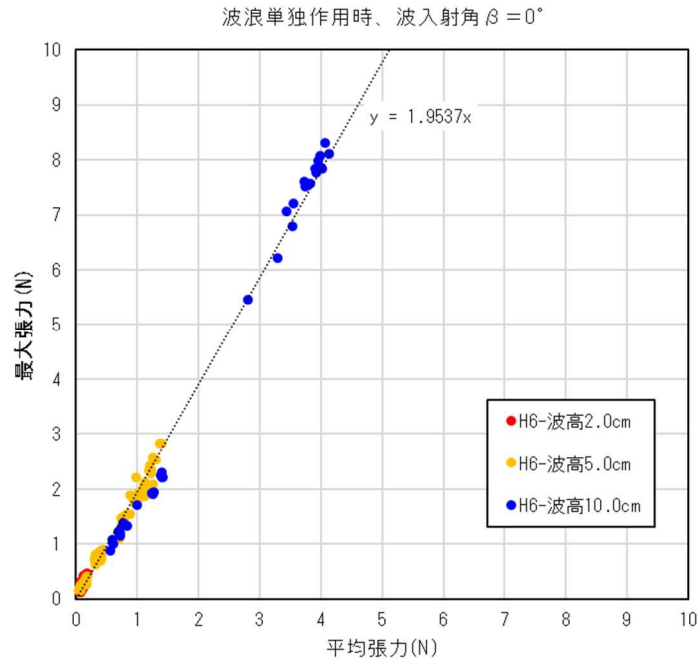


図 5-11 波浪単独作用時の最大張力と平均張力の比較

(2) 波入射角  $\beta = 30^\circ$  (斜め入射) の場合

図 5-12 に被災波相当波浪の斜め入射ケース (H6\_10-085b) における波上側 (CH8~CH18) 合計張力最大時の張力の分散状況を示す。波上側係留索の平均張力が 1.52N であったのに対し、CH12 で最大張力 14.24N が計測されており、8.13 倍の張力集中が確認された。

波入射角  $\beta = 30^\circ$  における係留索の平均張力と最大張力の比較を図 5-13 に示す。本実験では、波入射角  $\beta = 30^\circ$  の場合、平均張力に対し CH8~18 では 7 倍程度、CH19~24 では 3.5 倍程度の最大張力が作用した。

### ケース名 : H6\_10-085b

波上側(CH8~CH18)合計張力最大時

※CH11~CH17は波高計のチャンネル

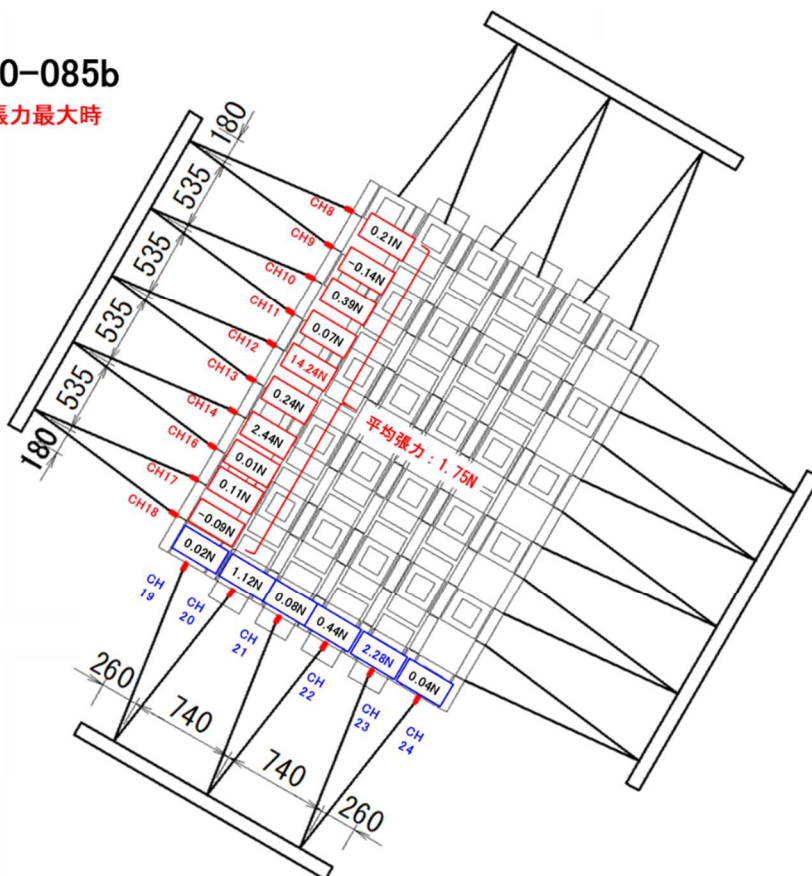


図 5-12 被災波相当波浪の波入射角  $\beta = 30^\circ$  (H6\_10-085b) における張力の分散状況

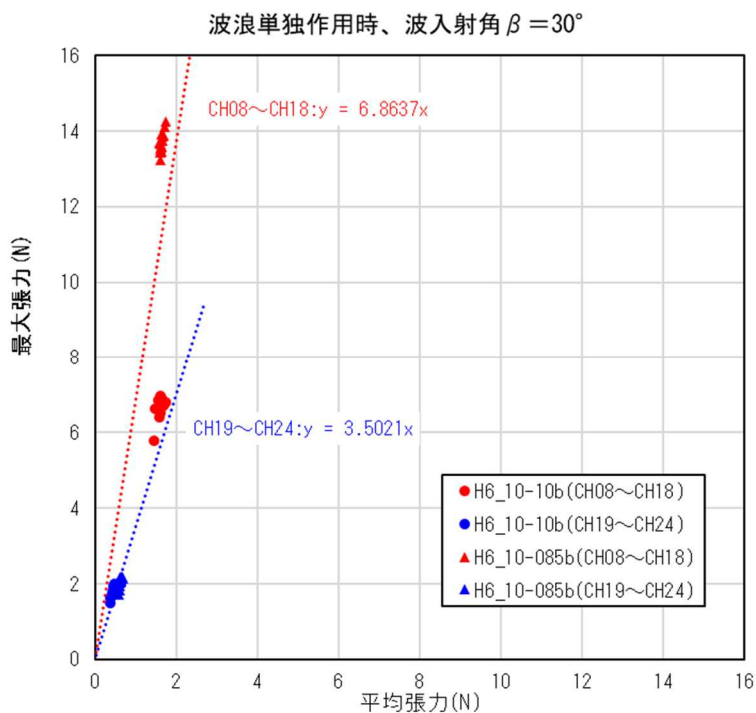


図 5-13 波浪単独作用時 (波入射角  $\beta = 30^\circ$ ) の最大張力と平均張力の比較

### 5.3 波力と風圧荷重の比較

アイランドに作用する波力と風圧荷重の比較を行うため、波浪単独作用時と風単独作用時、波浪・風同時作用のケースについて合計張力を比較した。

それぞれのケースについて、合計張力の最大値を比較した結果を図 5-14 に示す。被災波相当の波浪条件 (F6\_10-085、H6\_10-085) において、波力と風圧荷重はおおむね同等の値となった。ただし、水上設置型太陽光発電の設計風速は 35m/s~40m/s 程度であるのに対し、本実験は風速 10m/s (実スケールで風速 20m/s) で実施している。このことから、設計風速発生時の風圧荷重は波力に比べ 4 倍程度大きいと考えられる。また、全てのケースにおいて、波浪・風同時作用時の張力は波浪単独作用時の張力と風単独作用時の張力の合計値より大きくなった。これは、波浪・風同時作用時は波浪によりフロートが動揺し、風や波浪に対する受圧面積が大きくなることが要因と考えられる (図 5-9 ではフロートだけでなくパネルにも波浪が作用している様子が確認できる)。

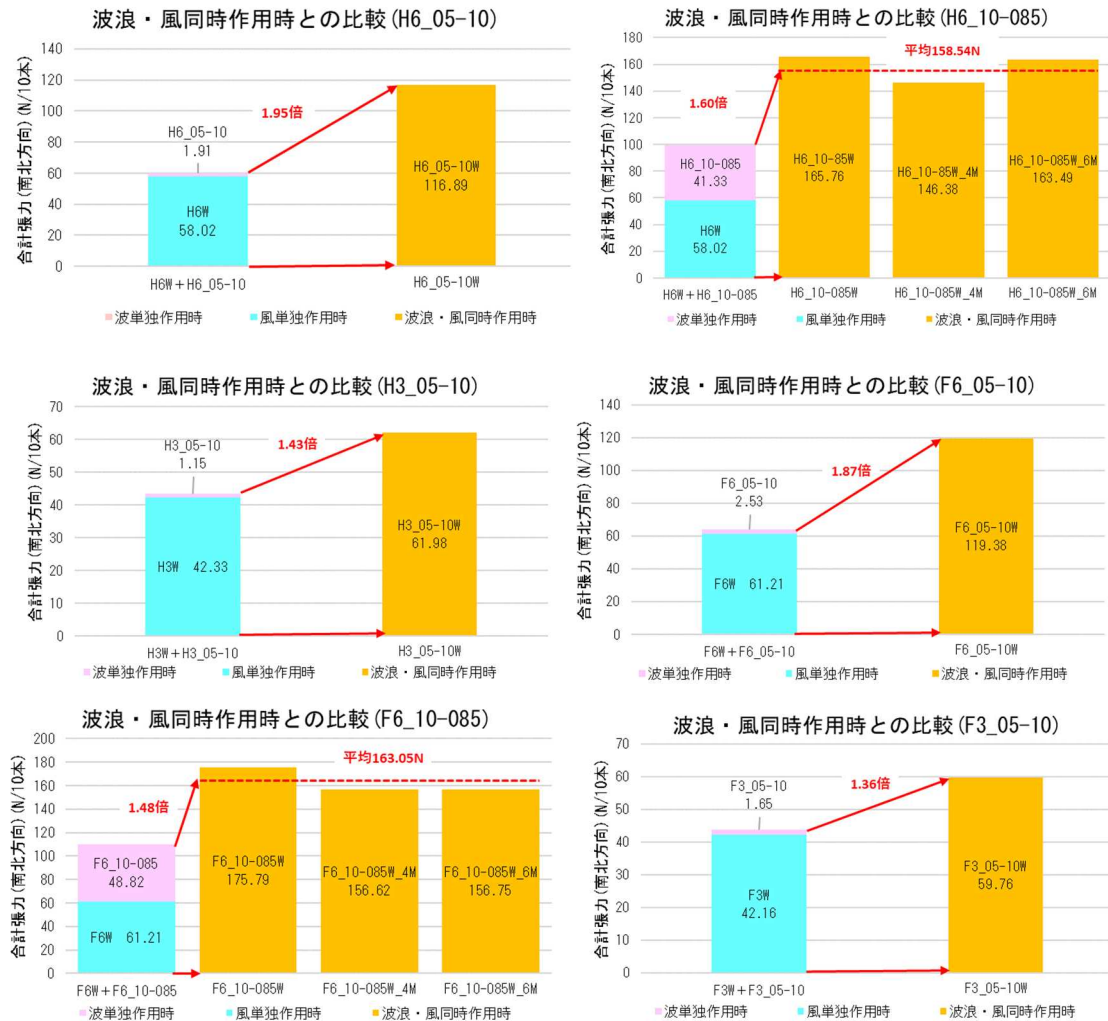


図 5-14 波力と風圧荷重の比較



## 5.4 フロートの動揺特性

### (1) 概要

フロートの動揺特性を把握するため、モーションキャプチャを用いてフロート（パネル）の傾斜角を計測し、入射波の波形勾配と比較した。

以降に示すフロート（パネル）の傾斜角は、図 5-15 のようにパネルの初期角度（約  $10^\circ$ ）からの変化量を示している。計測に当り、モーションキャプチャのトラッカーをフロート端部列（A 列）および中央列（B 列）のパネルに設置した（図 5-16 参照）。

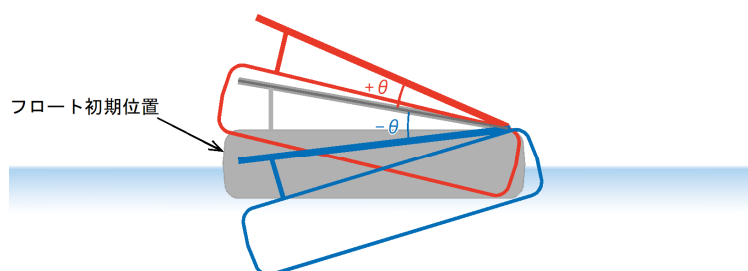


図 5-15 フロート（パネル）の傾斜角

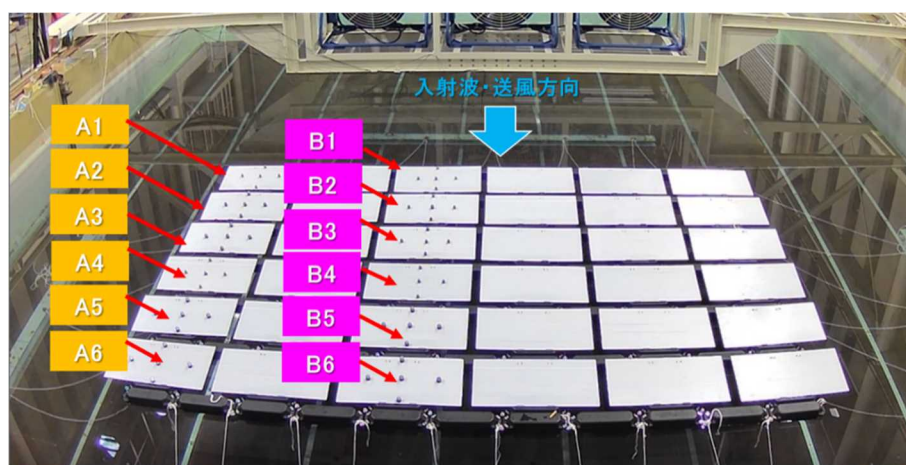


図 5-16 (1/2) トラッカーの設置箇所(フロート 6 列)

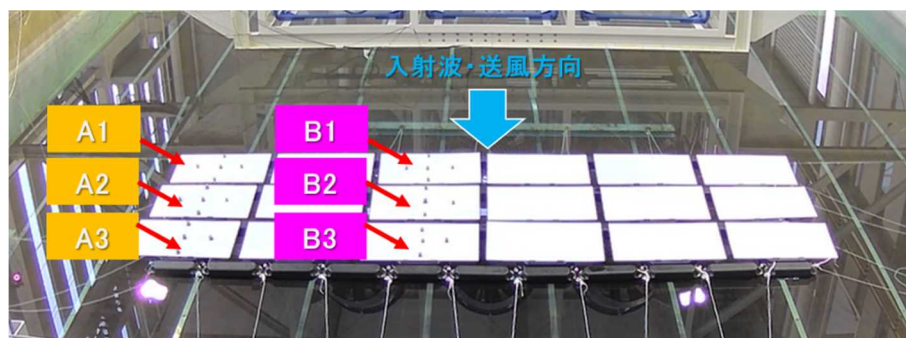


図 5-16 (2/2) トラッカーの設置箇所(フロート 3 列)

## (2) 波形勾配

入射波の波形勾配は次式にて算出した。

$$\text{波形勾配} = \frac{H}{L/2} = 2H/L$$

ここで、 $H$ ：入射波高（m）、 $T$ ：入射波周期（s）、 $L$ ：波長（m）（深海波長とし、 $L = 1.56 \cdot T^2$ ）

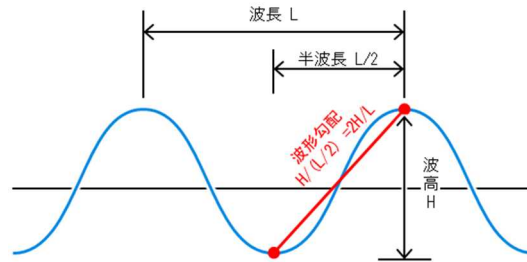


図 5-17 波形勾配

## (3) フロート（パネル）の傾斜角と波形勾配の関係

### 1) 波浪単独作用時

図 5-18～図 5-20 に各波高の短周期のケースにおけるフロート（パネル）の傾斜角と波形勾配の比較を示す。また、長周期のケースの代表として波高 5.0cm、周期 1.0s のケースを図 5-21 に示す。波高 2.0cm および波高 5.0cm の短周期のケース（図 5-18、図 5-19）においては、波上側 1 列目のフロートが最も大きく傾斜し、波下側へ行くにつれて傾斜角が小さくなった。波高 10.0cm、周期 0.85s のケース（図 5-20）は、波高 10.0cm のなかで最も周期が短い波浪条件であるが、上記のような波上側のフロートが大きく傾斜する現象は確認できず、全てのフロートで同程度の傾斜角が確認された。図 5-21 に示した波高 5.0cm、周期 1.0s のケースにおいては、波高 10.0cm、周期 0.85s（図 5-20）のケースと同様に、全てのフロートで同程度の傾斜角が確認された。周期 1.0s 以上の全てのケースにおいて同様の傾向が確認された。

波上側 1 列目のフロートに着目し、フロート（パネル）の傾斜角と波形勾配を比較したグラフを図 5-22 に示す。全てのケースにおいて、フロート（パネル）の傾斜角は波形勾配と正の相関を持つことが確認された。周期 0.85s 以上の硬接合部タイプ（Hard Type、実機フロートと同程度の荷重-変位特性を有する）においては、フロート（パネル）の傾斜角は波形勾配に対して 1.3 倍程度となりおおむね一致した。周期 0.6s、0.7s のケースについては、波形勾配と比べてフロート（パネル）の傾斜角が小さくなった。また、全てのケースにおいて柔接合部タイプ（Flexible Type）の方が硬接合部タイプ（Hard Type）と比べて傾斜角が大きくなった。

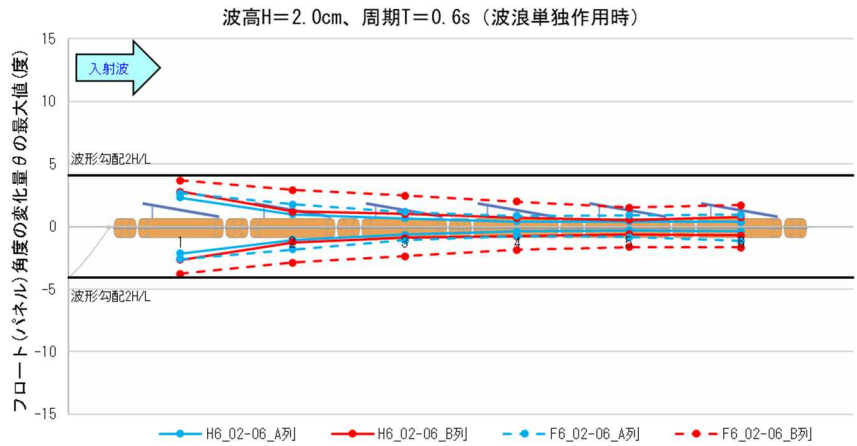


図 5-18 短周期のケースにおけるフロート(パネル)の傾斜角と波形勾配の比較(波高 2.0cm)

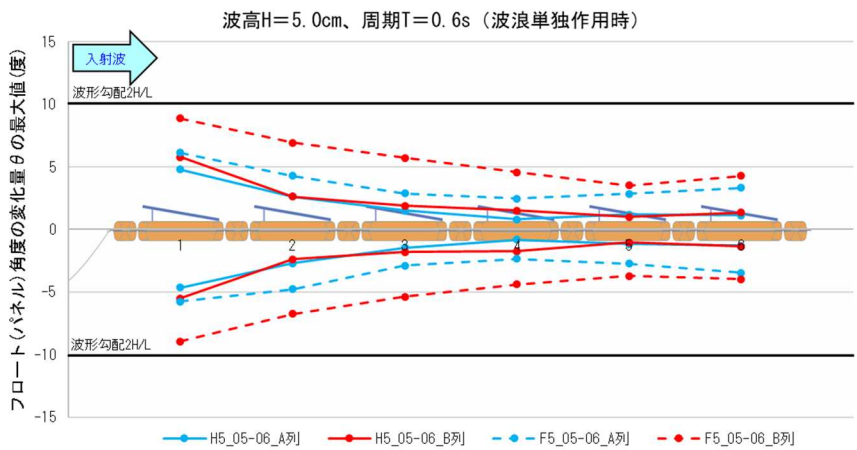


図 5-19 短周期のケースにおけるフロート(パネル)の傾斜角と波形勾配の比較(波高 5.0cm)

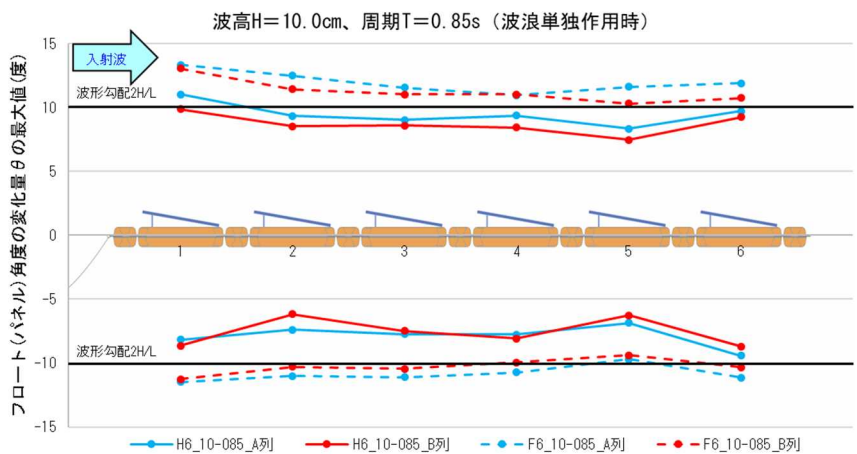


図 5-20 短周期のケースにおけるフロート(パネル)の傾斜角と波形勾配の比較(波高 10.0cm)

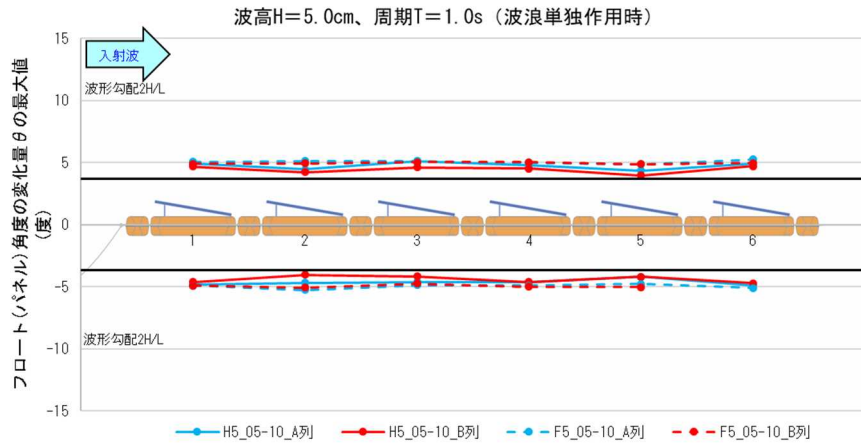


図 5-21 長周期のケースにおけるフロート（パネル）の傾斜角と波形勾配の比較（代表として波高 5.0cm、周期 1.0s を示す）

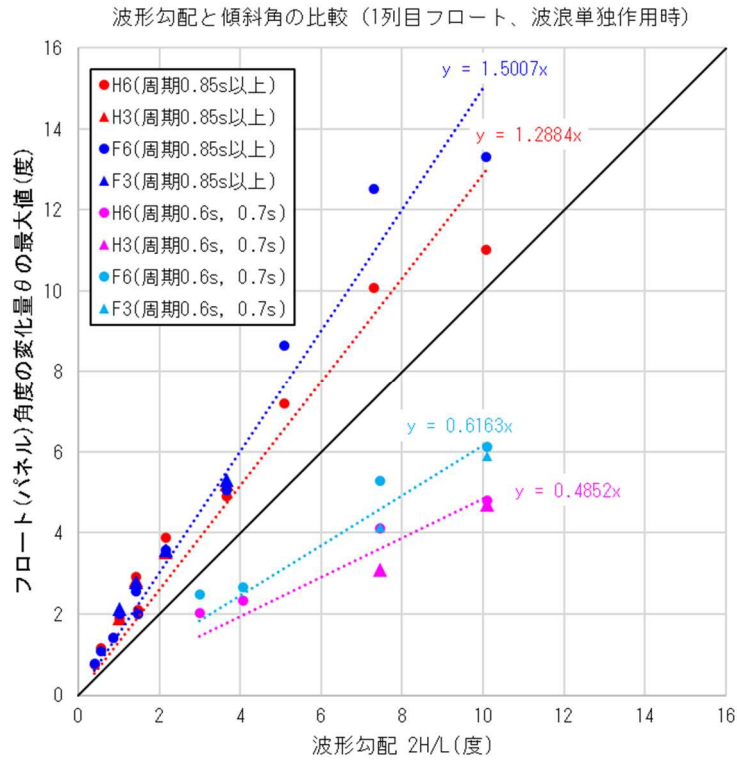


図 5-22 波上側 1 列目におけるフロート（パネル）の傾斜角と波形勾配の比較

## 2) 波浪・風同時作用時

図 5-23 に被災波相当波浪における波浪・風同時作用時のフロート（パネル）の傾斜角と波形勾配の比較を示す。また、波上側 1 列目のフロートに着目し、フロート（パネル）の傾斜角と波形勾配を比較したグラフを図 5-24 に示す。波上側 1 列目フロートの傾斜角の変化量が波浪単独作用時と比べ小さくなった（図 5-23 参照）。また、波形勾配に対してフロートの傾斜角の変化量が小さくなった（図 5-24 参照）。これは、波浪単独作用時と比べ、波上側の係留索に大きな張力が発生し、波上側 1 列目のフロートが係留索に引っ張られることにより、傾斜角の変化が抑えられたと考えられる。波浪・風同時作用時の全てのケースにおいて同様の傾向が確認された。

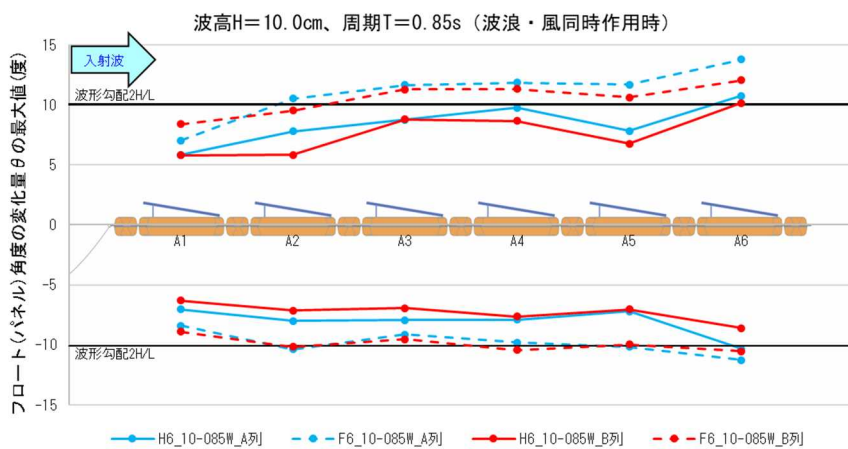


図 5-23 被災波相当波浪における波浪・風同時作用時におけるフロート（パネル）の傾斜角と波形勾配の比較

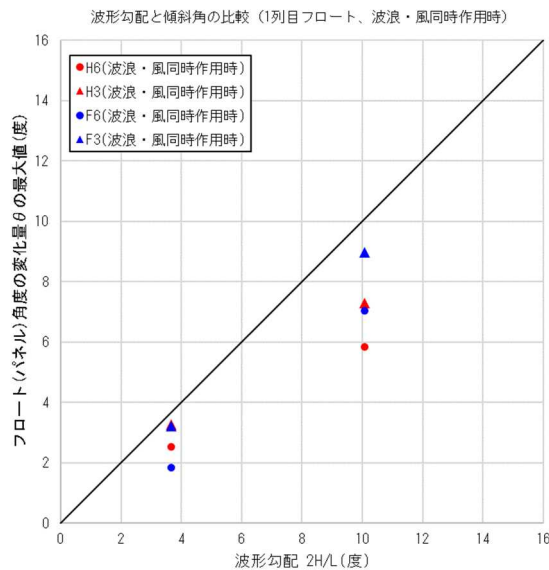


図 5-24 波上側 1 列目におけるフロート（パネル）の傾斜角と波形勾配の比較

## 6. 考察

- 係留索に作用する張力と波力算定式の比較結果より、当該波力算定式は、波高が比較的小さくフロートがあまり動揺しない条件においては適用することができる。
- ただし、高波浪条件においては精度が低下することが確認されたことから、高波浪条件においては、水理実験により波力を適切に評価する必要がある。
- 本実験では、係留索に張力を出来得る限り均等に作用させるため、係留索長を均一とし、アイランドに対して正面から外力を作用させた。このような条件下においても、特定の係留索に張力が集中する現象が確認され、波入射角  $\beta=0^\circ$  のとき、平均値に対して 2 倍程度の最大張力が確認された。
- 斜め入射（波入射角  $\beta=30^\circ$ ）の場合は張力の集中現象が更に顕著となり、平均値に対して 7 倍程度の最大張力が確認された。
- 係留設計に当たっては、こうした張力の集中現象を踏まえて張力を適切に評価し、設計に反映する必要がある。
- 波浪・風同時作用時の張力と、波浪単独作用時と風単独作用時の張力合計を比べた場合、波浪・風同時作用時の張力が大きくなった。これは、波浪・風同時作用時は波浪によりフロートが動揺し、風や波浪に対する受圧面積が大きくなったことが要因と考えられる。
- アイランドに作用する荷重を算定するに当たっては、水理実験を実施し、波力と風圧荷重を適切に評価する必要がある。
- フロート（パネル）の傾斜角と波形勾配を比較し、両者が正の相関を持つことを確認した。実機フロートと同程度の荷重-変位特性を有する硬接合部タイプ（Hard Type）においては、フロート（パネル）の傾斜角が波形勾配とおおむね一致することを確認した。

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。