

3. 水槽試験

浮体式洋上風力発電施設には、風・波・海潮流等の外力による動揺の他、風車の制御に伴う風圧変化による動揺が生起される。浮体式洋上風力発電施設の構造設計には、これらの環境条件と荷重の相互関係、また荷重と浮体式洋上風力発電施設の応答について、評価することが重要である。風車－浮体－係留系連成解析は、次節で取りまとめるが、ここでは連成解析シミュレーション結果等の検証に使用される水槽試験について記述する。

石田ら（2015）²³は、浮体式洋上風力発電施設の水槽実験の目的を表 3-1 に示す 3 つに分類している。

表 3-1 浮体式洋上風力発電施設の水槽実験の目的

No.	目的	内容
1	浮体形状ごとの動揺等の把握試験	<p>浮体形状による応答の違いを確認する試験である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● TLP 型を対象とし、非線形波を用いたタワーの剛性を変えた試験 ● スパー型を対象とし、2 段円筒構造、減揺板付加、ブレード・ピッチ制御等による試験。また、復原力の時間変動に起因するパラメトリック応答の確認試験 ● セミサブ型/ポンツーン型を対象とし、動揺量の許容値確認試験
2	動揺制御を目的とした実験	<p>ブレード・ピッチ制御により回転速度一定制御を実施すると、浮体ピッチ運動が増幅され、ネガティブダンピングが発生する。この発生状況を把握し、浮体動揺への影響を調査する実験である。なお、浮体の動揺に伴いロータ回転面が変化するため、浮体のピッチ運動によりヨー運動が誘起されるジャイロ効果が発生する。ヨー運動により風車に流入する風向が変化するため、発電電力量の低下や風車停止、あるいは係留索の摩耗に至る場合もある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 回転するブレードに取り付けたウェイトの位置を変えて慣性モーメントを変化させることで、ジャイロ効果が浮体の挙動に及ぼす影響の確認試験（実験結果：ジャイロ効果によりピッチ運動が収まる） ● 強制回転円板を用いて慣性モーメントを模擬し、浮体のピッチ運動や波漂流力への影響の確認試験
3	その他の実験	<p>浮体が回転・並進動揺することにより風車が揺れ、発電効率が低下すると考えられる。そのため、風車を強制動揺（回転、並進）させた場合の発電出力の変動を確認する試験である。</p>

3.1 わが国の水槽試験施設

水槽試験とは、送風装置、造波設備、潮流発生装置等を有する実験施設において、浮体構造物の流体力学的な性能を調査するための試験である。

石田ら（2015）²³は、浮体式洋上風力発電に係る実験に供された18箇所の水槽試験施設の概要について、次のように取りまとめている。

- いずれの施設も造波設備を有しており、ほぼ全ての設備が不規則波を起こすことができる。規則波の造波能力は、波周期0.5～5秒、最大波高0.3～0.5mの範囲に入る施設が多い。
- 波の方向性は、一方向のみの設備が多く、斜波・多方向波に対応する施設は少ない。
- 送風装置は、概ね半数の施設で使用可能で、仮設の場合には8～10m/s程度の送風能力がある。一部の施設では送風装置の組み替え・昇降能力等を利用して送風面を変更することが可能である。
- 潮流発生装置は、一部施設のみ利用可能である。

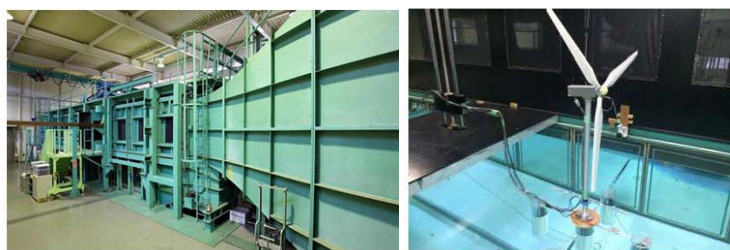
わが国における浮体式洋上風力発電に係る研究で、代表的な水槽試験施設は国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所の変動風水洞がある。本施設の特長として、次の2点を挙げることができる。

- 最大30m/sの定常風の他に、変動風を発生させることが可能。
- 水槽部は、各種の模型を浮かべて、風、波、流れが共存する状態で試験が可能。

風洞部と水槽部の主な仕様を表3.1-1に示すとともに、試験施設の外観等を図3.1-1に掲げる。なお、海外の水槽実験施設は3節の巻末を参照されたい。

表 3.1-1 海上技術安全研究所の変動風水洞の主な仕様²⁴

風洞部	形式	ゲッチンゲン型水平回流方式
	閉鎖型	3m (W) × 2m (H) × 15m (L) 定常風速 1～30m/s 非定常風可能（正弦変動風および不規則変動風）
開放型	形式	3m (W) × 2m (H) × 2.5m (L)
		定常風速 1～30m/s 非定常風可能（正弦変動風および不規則変動風）
水槽部	寸法	3m (W) × 1.8m (H) × 17.65m (L) 標準水深 1.5m
	造波装置	フラップ式、規則波および不規則波 最大波高 0.3m、周期 0.6～4.0s
	回流装置	回流速度 0～0.3m/s



風水洞の外観（左図）²⁵と風洞実験モデル（右図）²⁶

図 3.1-1 海上技術安全研究所の変動風水洞

3.2 浮体式洋上風力発電施設の水槽試験に係る実状と留意点

ここでは、石田ら（2015）²³ を引用して、水槽試験に係る既往事例を踏まえた基本的な事項とともに、実験技術上の留意点を取りまとめる。

模型実験では、各種の物性値を踏まえ目的に応じて、実機と模型の幾何学的な相似則、フルード数 (Fr)、レイノルズ数 (Re)、マッハ数 (Ma)、クーリガン・カーペンター数 (Kc)、ストローハル数 (St)、ウェーバ数 (We) および周速比 (TSR :TipSpeedRatio ; ブレードの円周速度/風速) 等の無次元パラメータを合わせて行う必要がある (図 3.2-1)。

浮体式洋上風力発電施設の実海域と水槽試験における現象の相似性を保つためには、空力、水力両方のフルード数 (U^2/gL) とレイノルズ数 (UL/ν) を合わせるだけでなく、ブレード・ピッチ制御の特性までを相似にすべきであるが、実験施設の制約等もあって、全ての相似性を満たす水槽試験は不可能である (石田ら,2015)²³。

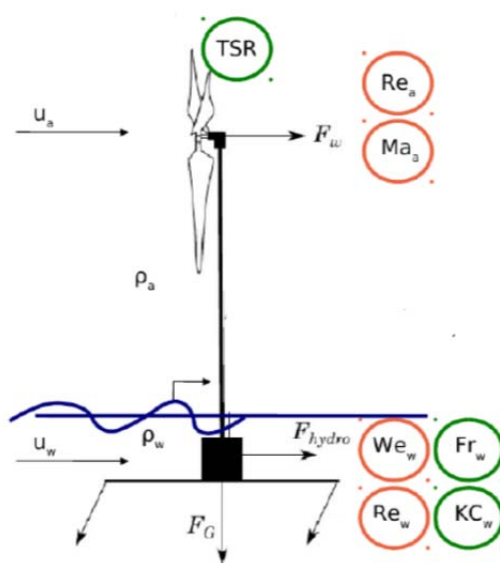


図 3.2-1 無次元パラメータ²³

水槽試験、特に波浪中の運動に焦点をあてる実験では、幾何学的な相似則とフルード則が基本となっている。

風車に作用する風についても、風速をフルード数で合わせている。ブレードの揚力係数等の空力に主眼を置く場合にはレイノルズ数を合わせる事が望ましいものの、そのためにはロータの回転速度や風速が大きくなってしまふ。一般に、大気中のレイノルズ数を合わせるの難しいため、ブレードについては、無回転時には風向とブレードのフェザリング状態を勘案して風荷重、回転時にはスラスト荷重を合わせる事 (可能であれば、トルクの動的変化によって誘起されるロール運動の影響を調べるため、トルク係数も合わせる事が望ましいが、実際には困難)、また、風速については風速に対する翼端周速の比である周速比を合わせるケースが多い。このような試験のレイノルズ数は $10^3 \sim 10^5$ となつて、実機と比較して2桁小さい。これを解消するために、回転速度をあげるか、ブレード幅を大きくすることによりスラストを増加させること等が挙げられる。また、風や水による振動現象等を想定する場合にはストローハル数を合わせる実験が必要となる。

3.2.1 模型

浮体式洋上風力発電施設の縮尺模型は、浮体部分、係留部分、風車部分等に大別される。

1) 浮体部分

浮体部分は、通常、形状、質量、喫水等に加え、復原性に係る指標である KG（縦メタセンタさ）、GM（横メタセンタの高さ）等を可能な限り正確に模擬する実験例が多い。また、浮体に作用する風速や潮流速度の相似則は、フルード則が適用されることが多い。

2) 係留部分

係留部分は、水深、係留展開面積の点で、水槽のサイズが制約条件になることが多く、実機を正確に模擬できないことがある。このような場合の代替案として、水平係留を用いることで水平方向の係留反力のみを模擬した事例や、係留索の水中重量のみを模擬した事例がある。水槽が十分大きく、水深および係留展開面積を模擬できる場合でも、チェーンの水中重量を模擬するのみで、チェーンの破断強度や剛性、流体力等まで模擬している事例はない。また、係留索の非線形性を模擬するために、複数のチェーン、バネ、ワイヤ等を組み合わせた例がある。

3) 風車部分

風車部分は、荒天下待機中における浮体式洋上風力発電施設全体の安全性評価を目的とする場合には、ロータを固定して（フェザリング）風荷重のみを模擬した事例、スラスト荷重のみを模擬して周速比のような他の特性を無視する場合がある。

発電時の風車-浮体の連成を扱う場合には、発電時のスラスト荷重に加え、周速比やジャイロ・モーメントを精度よく再現できる風車模型が望ましい。

ネガティブダンピングを考慮するためには、ブレード・ピッチ制御が可能な風車模型が望ましいが、機構が複雑になり、形状・質量の相似を模擬するには、特に縮尺が小さい場合には難しい。また、ブレード・ピッチ制御信号を発令してからスラストが目標値に変化するまでの時間も慎重に考慮することが重要である。

ブレードのモデル化は、ブレード形状の幾何学的相似を満たす模型では、目的のスラスト荷重や回転速度を再現できない事例がみられるため、弦長を長くする等の工夫が必要である。

以上のことを取りまとめて、表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 水槽実験におけるモデリング項目²³

模型部位		モデル化の範囲	注意点
浮体		形状 重量・重心 フルード則	
係留		索の水中重量 ばね定数 展開形状 カタナリーの非線形性	水槽の面積、水深に影響される
風車	ロータ	形状 揚力係数・抗力係数 スラスト 回転数 周速比	スラスト・回転数の不足 レイノルズ数の相違 重量の増加、形状の相違
	タワー	形状 重量 剛性	
	ナセル	形状 重量 ブレード・ピッチ制御	重量の増加、形状の相違

4) 縮尺

(1) 縮尺比 1/100 以下

- 縮尺比が概ね 1/200 以下の小型模型のケースでは、風荷重は考慮されていない、質量と慣性モーメントを合わせて浮体運動と風車回転によるジャイロ効果の出現に関する実験が行われている。
- 縮尺比が概ね 1/100～1/200 の実験では、波浪中の浮体運動計測は全ての事例で行われているが、係留索や付加物との連成応答等の確認がなされている事例が多い。基本的には剛体とみなした浮体に作用する外力の相似を重視するものが多い。実験では浮体が軽量化されており、計測機器の影響を最小限に抑えるために画像処理による運動計測が主流となっている。

(2) 縮尺比 1/50～1/100

- 縮尺比が概ね 1/50～1/100 の実験では、模型全体の幾何学的な相似条件を合わせることに主眼が置かれ、風の扱いは多くの事例で 1-3m/s の条件下で風荷重を合わせ、定常傾斜角や漂流力を再現させている。なお、風速を 3m/s 以上に設定している場合にはスラストの相似やブレード・ピッチ制御システムの確認実験となっているが、風速やブレードの周速についてフルード則を満たしていない。また、浮体タワー部の弾性応答に係る実験例もみられる。

(3) 縮尺比 1/25～1/50

- 縮尺比が概ね 1/25～1/50 の実験では、模型の最大寸法が 1-5m の例が多く、実験内容は全体的な応答確認に他、タワー部の弾性応答、減揺板効果、係留の非線形性等のような浮体風車の動的応答の一部の再現・検証に焦点を当てた実験もある。また、風を設定している実験ではフルード数に合わせて風速を設定しているケースが多く、1-5m/s の風速は発電時の実験、8m/s 前後の風速は暴風時の想定ケースとなっている。また、ブレードのスラスト力と周速比を合わせた実験や、運動応答の面から無風下における強制回転円盤等を用いてジャイロ・モ

ーメントを合わせた実験もある。

(4) 縮尺比 1/25 以上

- 縮尺比が概ね 1/25 以上のケースでは、縮尺比が大きい割には実験目的も数値計算の検証やコンセプトの成立性の確認に主眼が置かれ、風の取扱いも浮体の傾斜角（縮尺比に合わせた風荷重）あるいは風速をフルード則（縮尺比の 2 乗根）で合わせている。

3.2.2 環境外力

環境外力として、風、波、流れがあり、波と流れは一般的な浮体構造物と同様にフルード則によりスケールダウンする方法が用いられる。ここでは、浮体式洋上風力発電施設にとって重要な外力である風荷重を取りあげる。

1) 送風装置

風速場を模擬する装置として、ほとんどの送風装置は風車のロータ径よりも大きい送風面を有するが、その装置は水槽に常設の設備がある場合と、仮設送風装置を用いる場合があり、以下のように細分化される。

1. 常設送風装置（図 3.2-2）

- a. 送風装置が水槽に台車が取付けられている形式
- b. 水槽外に据え付けた送風装置とフレキシブルダクトから構成される形式

2. 仮設送風装置（市販のファン複数機と整流のためのハニカム樹脂から構成）（図 3.2-3）

- a. 水槽曳航台車に設置する形式
- b. 水槽底を移動可能な架台上に設置する形式



図 3.2-2 常設送風装置の例

（左図：台車据付け形式（施設名；不明）、右図：フレキシブルダクト形式（施設名；Ecole Centrale Nantes（Hydrodynamics and Ocean Eng. Tank））



図 3.2-3 仮設送風装置の例

左図：台車設置形式（施設名；九州大学応用力学研究所－深海機器力学実験水槽）、右図：移動架台形式（施設名；海上技術安全研究所－海洋構造物試験水槽）²³

2) 送風方法

水槽実験を行う前に風速を計測し、風車ロータ面を覆う範囲の風速の一様性を確認する必要がある。しかし、水槽実験はフルード則を相似則に用いるため、模型のレイノルズ数は実機に比較して非常に小さいものとなる。そのため、発電時の風車の空力特性（出力係数、スラスト係数等）は実機と模型で大きく乖離することとなる。そこで、風車に作用するスラストが相似になるように、以下の3つの工夫がなされている。bとcは、フルード則によりスケールダウンした風速を発生させるが、aとbは周速比が異なることになる。

- a. 風速の調整
- b. ブレードの回転周波数を調整
- c. ブレードのピッチ角を調整

【留意事項】

浮体式洋上風力発電施設は、いくつかの係留形式の中で TLP 型を除けば、浮体は自立的に安定して浮く状態に設計され、また係留は漂流を避けるために存在するもので、送電ケーブルを損傷しない程度に水平運動を拘束し、ヨー運動を適当な範囲で抑制できれば、浮体運動を強く拘束する必要はないと言われている²³。

よって、浮体式洋上風力発電施設は風、波、流れ等により様々な力を受けて動揺する一方、風車の稼働に伴うブレードが回転し、ブレード・ピッチ制御が行われるため、ネガティブダンピングやジャイロ・モーメントが生じて、様々な運動が誘起される。

このような浮体式洋上風力発電施設に関する水槽実験の留意点について、石田らは次のように指摘している。

- 浮体洋上風力発電施設に係る水槽実験を概観すれば、可動部や制御系を搭載している多くの実験模型は 1/30～1/70 程度の縮尺で、流体力や波浪の再現性や精度の面から信頼性があると言われている。このように望ましい模型の縮尺がある一方で、実験施設の制約は大きい。例えば、ブレード直径が 120m の実機の 1/20 模型を想定した場合、浮体動揺を加味すれば 10m×10m 程度の送風面積が必要であるが、これを実現できる水槽実験設備は見当たらない。したがって、対象とする現象を明確に位置づけ、それに相応しい相似則を考慮して水槽実験

を行うとともに、目的に応じて、シミュレーションとの補完・組合せを検討することも必要である。

- 風の取扱いについては、風の影響を係留力や漂流力のような定常力として評価する実験では、送風機を設置することで、ある程度の精度が達成されるが、実機の発電量を推定するための実験としては現実的ではない。即ち、レイノルズ数が2桁程度低く十分な出力が得られない他、ネガティブダンピングやジャイロ・モーメントによる現象の複雑さが影響するため直接的な評価が容易でない。
- 風車の空力特性はブレード先端近傍の風速が最も重要であることに留意するとともに、浮体の変位する大きさを定量的に予測し、送風装置の送風面は十分な広さで計画することが望ましい（浮体構造部にも風荷重が作用することに留意）。
- 風車実機が作動する風の状態を再現するためには、乱流格子やスパイヤー・ラフネスブロックを設置して乱流強度や風速の鉛直分布を模擬する必要がある。
- 浮体式洋上風力発電施設に係る計測は、浮体部分の動揺や係留力の把握も必要であるが、表1に掲げているように風車部分の計測が重要である。なお、風速はカットイン風速からカットアウト風速（極値風速）までの幅広い気象・海象条件への対応による計測レンジに応じた計測機器の選定課題や、模型の重量分布を実機と合わせる必要性から計測機器の軽量化が重要である。

表-1 水槽実験の計測項目と計測機器

計測項目	計測機器
浮体の動揺	光学式装置、ジャイロ
構造の歪み	歪みゲージ
係留力	張力計、ロードセル
タワー、ナセル加速度	加速度計
タワーの歪み、曲げモーメント	歪みゲージ、6分力計(基部)
タワー荷重	3分力系あるいは6分力計(基部)
ブレード回転数	回転計
風車のトルク	トルク計
風車のスラスト	スラスト計

3.3 風車発電時を対象とした水槽試験

浮体式洋上風車は、風車の制御によりネガティブダンピングが起こることはよく知られている。ここでは、刈込ら（2014）²⁷より浮体式風車のネガティブダンピングに関する水槽実験の概要を取りまとめた。

3.3.1 水槽試験の概要

風洞試験は、三菱重工業株式会社長崎研究所所有の大型境界層風洞（風路:全長 30m×幅 5m×高さ 6m）で、風路床には幅 4.5m の正方形で深さ 2.2m の水槽が設置されており、造波装置により規則波を造波することができる施設である。

3.3.2 風車と浮体の模型

1) 風車模型

三菱重工業製 7MW 風車を対象風車とし、縮尺 1/64 の風車模型が製作されている（表 3.3-1）。風車は、3 翼がピッチ軸周りに同時に回転可能な機構を有するとともに、模型翼のスラスト特性を実機と同オーダーで設計されている。

表 3.3-1 風車諸元²⁷

項目	実スケール	模型スケール (1/64)
定格出力	7.0MW	3.34MW
ロータ直径	167.0m	2.61m
ハブ高(海面基準)	105.3m	1.65m
翼長	81.6m	1.28m
タワーの高さ	101.5m	1.59m
定格回転数	10.3rpm	82.4rpm

2) 浮体模型

浮体部は、アドバンストスパー浮体（ジャパンマリンユナイテッド社設計）を対象に製作されている。

ネガティブダンピングを確実に発生させる試験として、最初の試験では浮体ではなくロッキングモデルが用いられ、次いで浮体模型による実験が行われている。ロッキングモデルは、風車部分を風路床下に設置した可動部（ピッチ方向に自由度を有し、バネにより支持）に搭載したもので、ロッキングモデルの復原力および固有周期は浮体と一致するように設計・調整されている。

3.3.3 実験結果

1) ロッキングモデル風車試験

ロッキングモデルは、ネガティブダンピングの確実な再現のための試験で、いわば原理確認試験である。風洞風速を 1.8~2.0m/s (実機換算で 14~16m/s) でほぼ一定になるよう調整し、風車の回転速度制御を作動させている。その結果、陸上風車で想定される制御設定値を用いた場合に不安定動揺が発生することが認められている (図 3.3-1)。図示しているように、不安定動揺が発生したケースの動画をキャプチャした静止画を時系列で示す。(1) の初期状態では、風車の姿勢は定常状態であったが、不安定動揺が始まる (2)、(3) では風車は前後に振動を開始し、(4) の時間の経過とともに振動・振幅が増大し風車の揺れが大きくなることが認められる。



(1) 初期状態



(2) 不安定動揺開始, 後傾



(3) 不安定動揺, 前傾



(4) 動揺増大

図 3.3-1 不安定動揺が成長する状況²⁷

図 3.3-2 には、ロッキングモデル風車試験における時刻歴応答波形で、上段から下段にかけて、風洞風速、ロータ回転数、翼ピッチ角、出力および浮体ピッチ角の各種波形を示す。最下段の浮体ピッチ角の波形にみられるように、時刻 0 直後から風車はピッチ方向へ動揺を始め、徐々にその振幅が増大し、ネガティブダンピングが発生している様子が認められる。

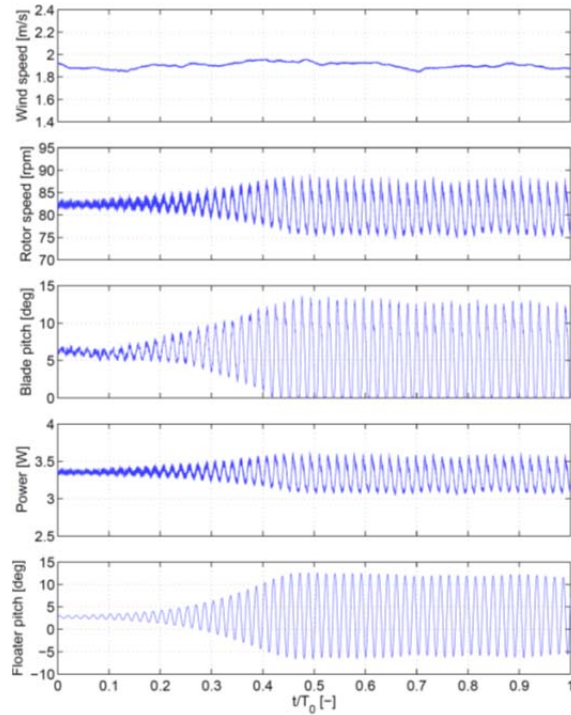


図 3.3-2 ロッキングモデル風車試験での不安定動揺時刻歴波形（時刻は計測時間で無次元化）²⁷

2) 浮体風車試験

ロッキングモデルを浮体模型に変えて、水槽に浮かせた状態で、浮体風車試験が行われている（図 3.3-3）。気流条件は、前節と同様に定常風（1.8～2.0 m/s）で、波条件は静水とされている。



図 3.3-3 浮体風車試験の状況²⁷

浮体風車試験における陸上風車で、想定される制御設定値を当てはめた時刻歴波形を図 3.3-4 に示す。図の上段から下段にかけて風洞風速、ロータ回転速度、翼ピッチ角、ロータトルク、浮体ピッチ角を示している。浮体ピッチ角は、時間の経過とともに浮体ピッチ角の変動振幅が徐々に増大していることから、ネガティブダンピングが発生していることが認められる。

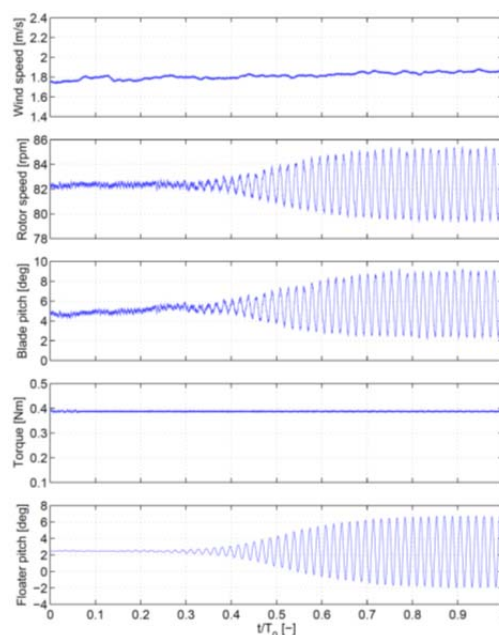


図 3.3-4 浮体風車試験での不安定動揺時刻歴波形（時刻は計測時間で無次元化）²⁷

動揺低減制御は、浮体の動揺に伴う浮体風車の傾斜角速度を検知し、その角速度に応じて発電機のトルク制御を行うことにより浮体風車の動揺を抑制する制御方法である。回転数制御ゲインは、図 3.3-4 と同じ設定とし、動揺低減制御を重畳させた試験ケースの時刻歴応答の結果を図 3.3-5 に示す。図の上段から下段にかけて風洞風速、ロータ回転速度、ブレードのピッチ角、ロータトルク、浮体ピッチ角を示している。本試験では、予め不安定動揺を発生させ、一定時間が経過した後に動揺低減制御が有効になるように設定されている。この結果、時刻 0.12 で動揺低減制御を加えると、発電機トルクが制御され、浮体ピッチ角が減少する状況がみられる。

回転速度制御ゲインの不安定性への影響を調べるため、回転速度制御設定値をパラメトリックに変更した計測が実施されている（図 3.3-6）。横軸は、無次元化された回転速度制御系の制御帯域（回転速度制御系の速応性の指標で、制御ゲイン設定値で変化）を示し、縦軸は浮体ピッチ動揺の応答波形から得られた対数減衰率（浮体応答の安定度の指標で、負の場合は不安定動揺、正の場合は安定）を表している。

実験結果から制御帯域が浮体風車のピッチ動揺固有周波数に近いと安定度が高く、制御ゲイン設定値を大きくすると不安定化する。動揺低減制御を動作させないケースでは、回転速度制御系の制御帯域が高い領域で浮体が不安定となってネガティブダンピングが発生することになる（図 3.3-6 の■）。一方、動揺低減制御を適用すると、回転速度制御の制御帯域が高いケースにおいても浮体風車を安定化することが可能であることが立証されている（図 3.3-6 の◆）。

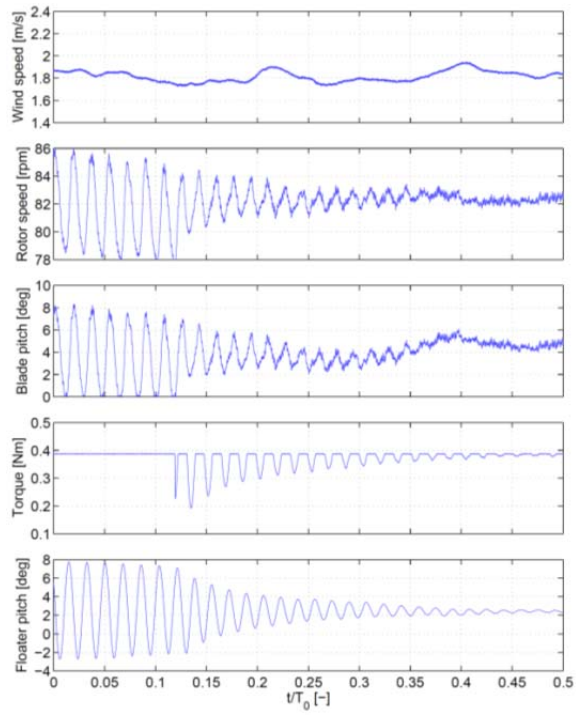


図 3.3-5 浮体風車試験での不安定動揺時刻歴波形（時刻は計測時間で無次元化）²⁷

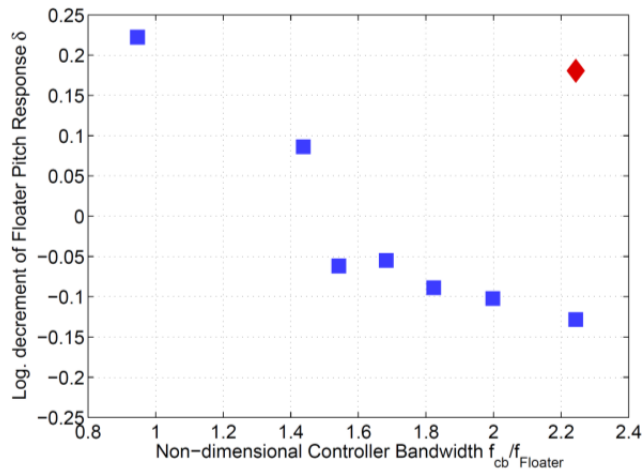


図 3.3-6 回転速度制御系の制御帯域と浮体動揺の減衰の関係
 （回転速度制御系の制御帯域 f_{cb} は浮体風車のピッチ動揺固有周波数 $f_{Floater}$ で無次元化. ■：動揺低減制御なし，◆：動揺低減制御あり）²⁷

【参考】

柴田創・鈴木英之・平林紳一郎（2013）²⁸が「浮体式洋上風車で発生するネガティブダンピングに対する波浪条件の影響」の論文で、水槽実験を行っているので紹介する。

1. 実験目的

本実験結果からネガティブダンピングになるときのピッチ運動の波周波数成分と固有周期成分がどの程度の割合で発生しているかを明らかにする。

2. 実験条件

実験は、独立行政法人 海上技術安全研究所海洋構造物試験水槽で行われ、実験に用いたモデルの諸元は図-1 と表-1 に示すように、2MW セミサブ浮体式風車の 1/50 模型である。搭載風車はブレード・ピッチ制御も可能であるためネガティブダンピングの再現を可能としている。

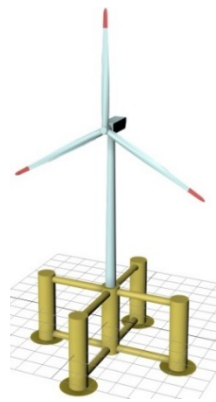


図-1 2MW 浮体式洋上風力発電施設モデル²⁸

表-1 1/50 2MW モデルの諸元²⁸

項目	実物	モデル
排水量	4992t	37kg
ロータ質量	762t	6.96kg
フロータ質量	790t	6.32kg
パラスト質量	3440t	27.52kg
喫水	16.3m	0.32m
基線浮心までの高さ(KB)	6.95m	0.133m
浮心からメタセンターまでの高さ(BM)	13.09t	0.262m
ベースラインから船体重心までの高さ(KG)	8.44m	0.311m
メタセンター高さ(KM-KG)	4.25m	0.085m

注) KM: ベースラインからメタセンターまでの高さ

実験に用いる風波条件はフルード則に従って設定されるとともに、正面から定格一定風速 1.9m/s、波周期 1.0s (6.28rad/s) で波振幅 3cm と 5cm の 2 種類の規則波を当てた場合の各々のピッチの時刻歴変位データにスペクトル解析が行われている。

また、模型のピッチ方向の固有周期は 3.9s (1.58rad/s) で、浮体の係留系は図-2 に示すように、水面上を浮体の 4 方向に伸びる線形バネに接続されたワイヤにより再現されている。

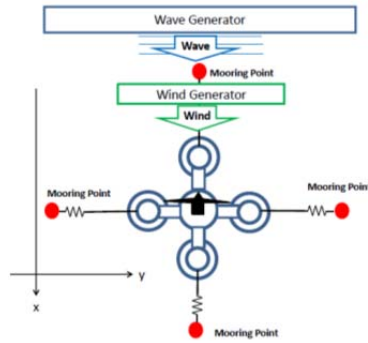


図-2 1/50 2MW モデル施設の配置状況²⁸

3. 実験結果と考察

図-3 に、波振幅が 3cm と 5cm のケースにおけるスペクトル解析結果を示す。なお、スペクトル解析結果は波浪傾斜で割ることで無次元化されている。図中の点線が波振幅 3cm、実線が波振幅 5cm のスペクトル解析結果である。これにより波周期成分である 6.28rad/s におけるピークは無次元化するとほぼ等しくなることが分かった。そのため波周期成分の応答振幅は波振幅に対して線形的であることが示唆されている。また、固有周期成分である 1.58rad/s におけるピークは波振幅 3cm の時は波周波数成分の 1.7 倍程度だが、波振幅 5cm の時は 0.4 倍程度になることが示されている。このことから、波振幅がネガティブダンピングにおける固有周期振動に与える影響として「波振幅が大きくなればネガティブダンピングにおける固有周期振動は発生しなくなる」ことが確認された。

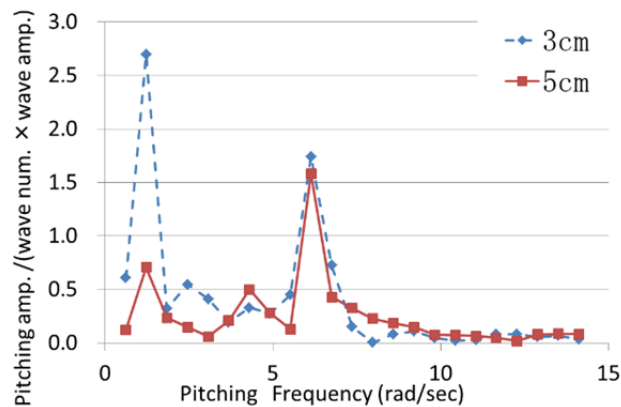


図-3 波振幅 (3cm/5cm) におけるピッチ振幅データのスペクトル解析結果²⁸

3.4 環境省浮体式洋上風力発電の小規模施設に関する水槽試験

環境省は、2013年に長崎県五島市の枕島近傍において、2MW風車を搭載したハイブリッドスパ一型浮体式洋上風力発電施設を設置し（ハイブリッド：タワーがスチールとコンクリートから成る）、本格的な洋上風力発電実証事業を開始している。それに先立つ2010年には100kW風車の小規模試験機を設置し、実証機の安全性を確認するための現地試験が行われている。ここでは、小規模試験機の1/34.5縮尺の模型を用いた水槽試験の報告（國分ら,2013）²⁹を基に、その概要を取りまとめる。

3.4.1 水槽試験設備

水槽試験は、海上技術安全研究所の海洋構造物試験水槽（全長 40m×幅 27.1m×深さ 2m）が用いられ、これにはフラップ式の造波装置（最大波高 0.3m、周期 0.3－3.0 秒；規則波/不規則波）、潮流発生装置（最大流量 824m³/分）および風発生装置（最大風速 7m/s（10 連式）、10m/s（3 連式））が装備されている。

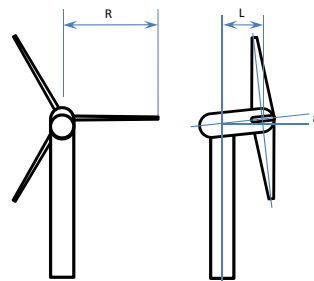
3.4.2 風車と浮体の模型

1) 風車模型

100kW 風車を対象風車とした縮尺 1/34.5 の風車模型が製作されている（表 3.4-1）。ブレードは平板で、翼弦長が 58－13mm、翼厚比が 15%で、フェザリング状態でハブに固定されている。

表 3.4-1 風車模型の諸元²⁹

パラメータ	模型スケール (1/34.5)	備考
R	320mm	ロータ半径 (付図、参照)
L	51mm	付図、参照
α	6度	チルト角：水平方向と 回転翼の主軸との間の 角度(付図、参照)



2) 浮体模型

浮体部は、スパ一型浮体を対象とし、タワー下部にはヨー対策用のフィンが付けられている。浮体模型の外観と仕様をそれぞれ図 3.4-1 と表 3.4-2 に示す。

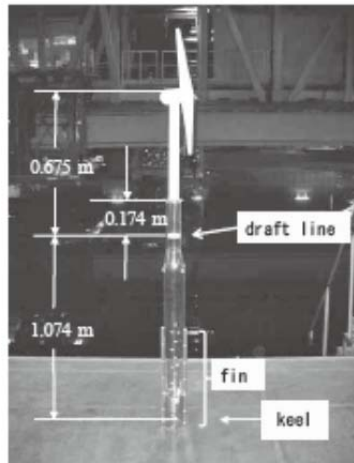


図 3.4-1 浮体模型の外観²⁹

表 3.4-2 浮体仕様²⁹

項目	実機	模型
直径(上部) (m)	2.375	0.069
直径(下部) (m)	3.8	0.11
コニカル部上部深さ (m)	2.85	0.083
コニカル部下部深さ (m)	5.7	0.165
喫水 (m)	37.05	1.074
排水量 (m ³)	389.89	0.00949
乾舷 (m)	6	0.174
ハブ高さ (m)	23.3	0.675
KB(キールと浮心間距離) (m)	17.26	0.5
KG(キールと重心間距離) (m)	13.7	0.397

3) 係留索

設置海域における水深と喫水の比は2.67であるが、模型実験では水槽の水深に制限があるため、その比率を満たすことができない。水槽試験では複数のばねをワイヤでつないで、チェーンの非線形な特性を再現している（係留索1本の模式図を図 3.4-2に示す）。

実験結果は、水平反力特性ではカタナリー理論値、ばね質点系の計算値および実験値ともに良く一致していたものの、鉛直反力特性では、特にカタナリー理論値と実験値に乖離がみられた。しかし、係留は水平運動に復原力を与えるもので、鉛直方向の上下運動への影響は小さいとし、鉛直反力特性の安全性評価に対する誤差の影響は無視されるとしている。

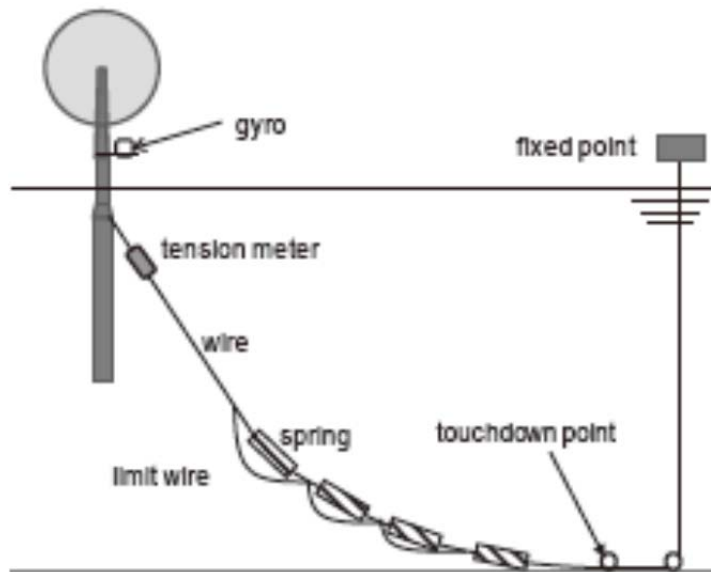


図 3.4-2 実験に供した係留索の模式図²⁹

3.4.3 実験概要

1) 計測項目

模型実験における計測項目を表 3.4-3に示す。浮体の6自由度はジャイロと光学式非接触センサで計測されている。係留索張力は張力計で、波高は波高計で、風は五孔管で、流れは流速計でそれぞれ計測するとともに、全体は動画で記録するため、ビデオ撮影が行われた。

表 3.4-3 計測項目²⁹

項目		計測方法
浮体運動	Roll	ジャイロ加速度、ビデオトラッカー
	Pitch	ジャイロ加速度、ビデオトラッカー
	Yaw	ジャイロ加速度
	Surge	ジャイロ加速度、ビデオトラッカー
	Sway	ジャイロ加速度、ビデオトラッカー
	Heave	ジャイロ加速度、ビデオトラッカー
係留索	張力	張力計
環境	波高	波高計
	風速	5穴速度プローブ
	流速	流速計

2) 実験ケース

図 3.4-3 に示すように、水槽内の模型の配置は、浮体が水槽中央に位置するように 3 本係留とされている（索のスケール：長さ 0.58m/幅 0.014m/厚さ 0.0005m）。なお、計測機器は浮体をまたぐ台車（carrier）に搭載し、データが取得されている。波と流れに対する運動の向きと索番号を図 3.4-4 に示す。

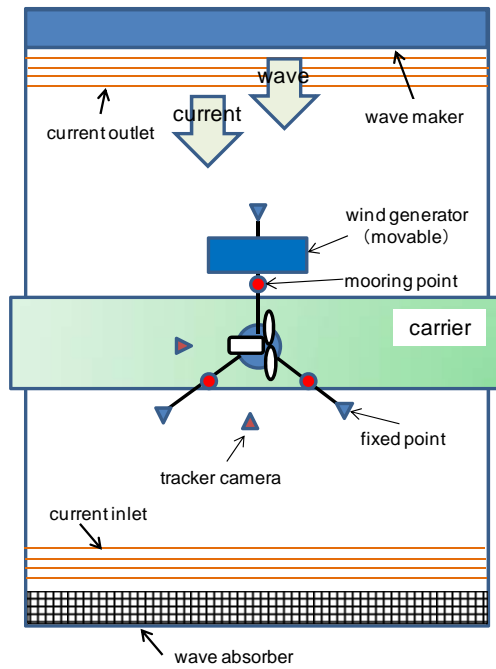


図 3.4-3 水槽内の模型の配置²⁹

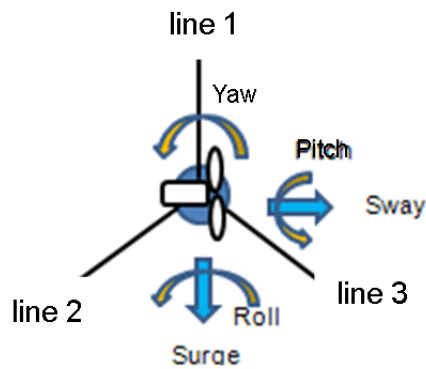


図 3.4-4 波と流れに対する運動の向きと索番号²⁹

実験は、図 3.4-5に示す3ケース（ケース1:風向が波および流れの向きと一致、ケース2:風向が波および流れの向きと直交、ケース3:風向が波および流れの向きと逆向き）。なお、風向とナセルの関係は3ケースともに、ナセルの側面に直交する位置関係となっている。

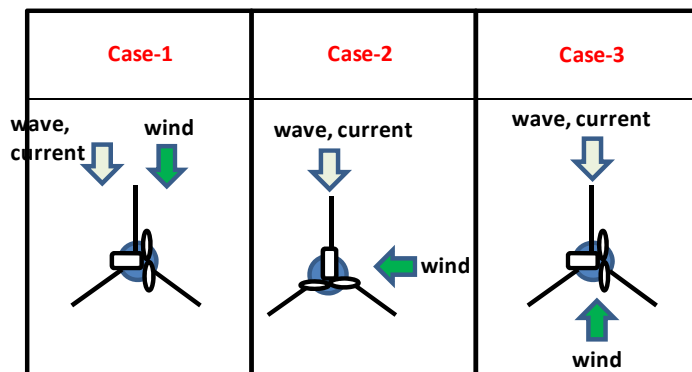


図 3.4-5 計測ケース²⁹

3) 実験条件

実験の環境条件は、50年再現期待値が取り上げられている（表 3.4-4）。3本の係留索の張力と模型の運動を、表 3.4-5に示す風、波、流れの組合せ外力の下で計測している。

ここで、風速は一定で、流速は鉛直方向にほぼ一樣な流れとし、不規則波にはブレットシュナイダー・光易スペクトルを使用し、継続時間は10分としている。表中の縮尺倍の値は、模型の運動に注目して実機の1/34.5の縮尺のフルード則で求められている。しかし、模型実験での値は若干異なっているが、外力を線形としてこの影響を加味しても安全性には十分余裕があるとされている。なお、フルード則では縮尺を λ 、実機の長さ・時間・質量をそれぞれ L 、 T 、 M 、模型の長さ・時間・質量をそれぞれ L_m 、 T_m 、 M_m とすると、 $L_m=\lambda L$ 、 $T_m=\lambda^{1/2}T$ 、 $M_m=\lambda^3M$ となる。

表 3.4-4 実験の環境条件²⁹

項目	実機	縮尺倍率	模型
有義波高(m)	7.73	0.224	0.204
有義波周期(s)	14.0	2.38	2.19
風速(m/s)	48.3	8.22	7.20
流速(m/s)	0.56	0.095	0.095

表 3.4-5 浮体運動と係留索の張力の計測に係る環境条件の組合せのケース²⁹

ケース	風	波	流れ
1	●		
		●	
			●
	●	●	
	●		●
	●	●	●
2	●		
		●	
			●
	●	●	
	●		●
	●	●	●
3	●		
		●	
			●
	●	●	
	●		●
	●	●	●

3.4.4 実験結果

以下に、國分ら（2013）²⁹の取りまとめた主な実験結果を示す。

1) ケース 1

ケース 1（外力を同一方向）において、波・風・流れ単独の場合と複合した場合の結果（実機換算）を表 3.4-6 に示す。なお、Surge と Sway は重心位置（水面下 23.3m）の水平動揺値である。

表 3.4-6 ケース 1 の実験結果-波・風・流れ単独の場合と複合した場合²⁹

風	波	流れ	Roll(度)		Pitch(度)		Yaw(度)		Surge(m)	
			平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
●	—	—	1.6		9.5		-13.9		7.1	
—	—	●	-0.2		-4.7		-0.8		10.7	
—	●	—	-0.1	0.5	0.0	3.2	0.7	4.4	-0.2	2.8
●	●	●	1.0	1.9	4.0	3.1	-10.7	1.9	14.7	1.9
風	波	流れ	Sway(m)		張力1(kN)		張力2(kN)		張力3(kN)	
			平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
●	—	—	-3.9		113.1		24.4		44.2	
—	—	●	0.7		104.1		30.7		35.1	
—	●	—	0.1	0.3	52.3	12.5	43.4	4.8	54.0	4.9
●	●	●	-4.5	2.3	191.4	41.1	22.7	4.1	37.4	7.0

- Surge の大きさは流れ、風、波の順であるが、風の影響が流れの影響より小さいのは、風によって浮体が風下側に傾斜した場合、水面下にある重心が逆方向に移動するためである。
- 風単独では約 10 度傾斜し、約 7m 重心が流される（ハブ高さでは 14.8m 移動する）。
- 最も大きな荷重が掛かる索張力 1 で、漂流力（定常成分）が大きいのは風、流れ、波の順である。
- 索張力 1 の変動成分（標準偏差）に着目すると、波単独（唯一の変動成分）に比べて、波・風・流れが複合した場合は 3 倍以上にもなる。これは、水平反力の非線形性に起因するもので、定常漂流力（定常変位）が存在すると、水平反力（水平ばね特性）が大きくなることによる。従って、疲労評価の観点からは、波変動とともに風と流れの定常成分も考慮する必要がある。
- 波・風・流れが複合した場合の索張力 1 は、各張力の単純和よりも小さく（約 70%）、安全側である。
- 索張力の破断荷重は 2,430kN であり、実験条件が正しく実機の縮尺倍であったとしても安全性には十分な余裕がある。

2) 風向影響

波・風・流れ複合下における風向の影響を把握するため、ケース 1～3 の結果（実機換算）を比較した結果を表 3.4-7 および図 3.4-6 に示す。

表 3.4-7 ケース 1～3 の実験結果の比較²⁹

ケース	Roll(度)		Pitch(度)		Yaw(度)		Surge(m)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
1	1.0	1.9	4.0	3.1	-10.7	1.9	14.7	1.9
2	6.6	2.3	-7.3	3.7	-7.4	2.3	19.0	4.2
3	-1.3	2.3	-11.0	3.5	13.5	3.9	7.3	4.2
ケース	Sway(m)		張力1(kN)		張力2(kN)		張力3(kN)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
1	-4.5	2.3	191.4	41.1	22.7	4.1	37.4	7.0
2	-8.3	1.8	153.6	34.9	16.8	1.6	91.2	9.9
3	-3.5	1.9	66.1	21.4	31.6	7.8	59.5	9.4

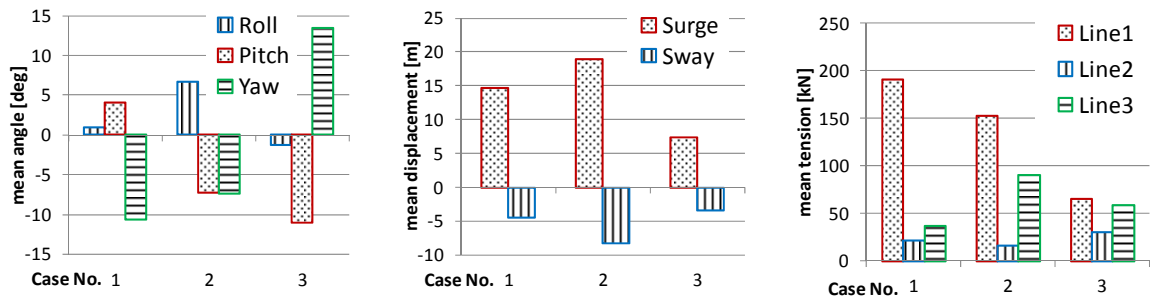


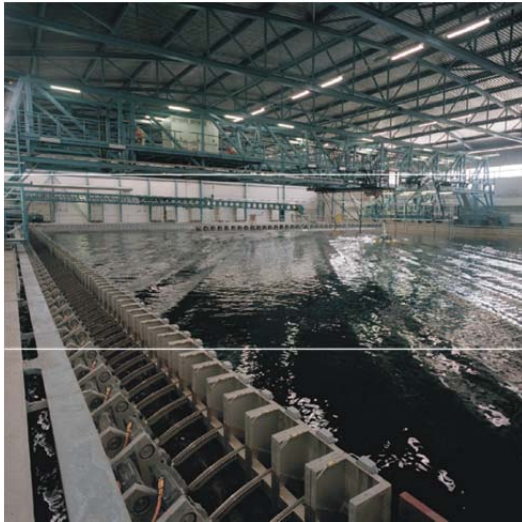
図 3.4-6 計測ケース²⁹

- 平均傾斜角の最大値は、ケース 3 の Pitch で生じる。これは、逆方向の風と流れが浮体にとって同一方向の Pitch モーメントを発生させるためである。しかし、実験条件が正しく実機の縮尺倍であったとしても復原性には十分な余裕がある。
- 平均移動量の最大値は、ケース 2 の Surge で生じる。この時、風による漂流力は Surge 方向に働かないが、Pitch 角は-7.3 度であり、水面下の深い位置にある重心の移動にこの傾斜が寄与したことが大きい。
- 平均索張力の最大値は、ケース 1 の索張力 1 で生じる。これは、同一方向の波、風、流れによる力に反することから当然の結果と言える。ここで、ヨー変化による索張力の変化は十分に小さい。

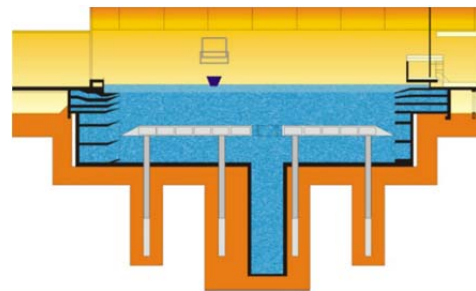
【参考】

公益社団法人 日本船舶海洋工学会 浮体式洋上風力特別委員会水槽実験技術 WG において、国内外の水槽実験施設をカルテ形式で取りまとめているので紹介する。

施設名	Offshore Basin (MARIN)				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	45	36		10.2	20m×直径 5m のピット有
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など) フラップ式 (2面)、40cm 分割式
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
		24m 幅			
	送風機个数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
					10.2m 高さを 6 層分割
その他特記事項	曳引車 3.2m/sec max 船：3～6m、海洋構造物：通常 0.2～4m の間				



水槽外観



水槽断面図

文献番号	OME02、OME03、OME04、OME05、OME10
------	-------------------------------

施設名	Wave Tank (Ecole Centrale de Nantes)				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	50	30		5	5×5×5m のピット有
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	1m		0~45°	多方向波	フラップ式 48 分割
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	15m/sec.	3m×3m			
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
模型サイズ					
その他特記事項					



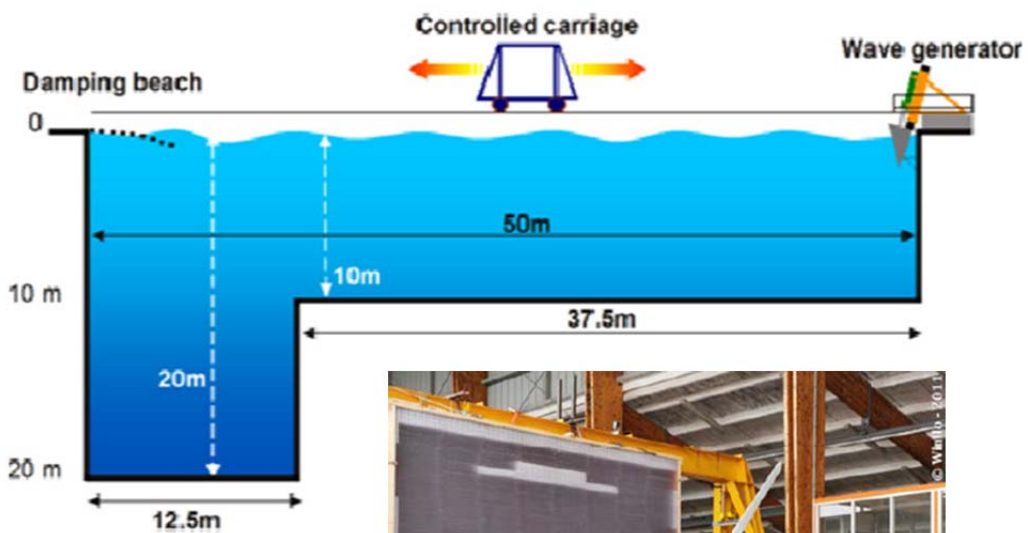
水槽概観



送風装置

文献番号	OME14
------	-------

施設名	Deep Seawater Wave Tank (IFREMER, フランス)				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	50	12.5		10	50m長のうち 12.5m は水深 20m
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	最大 0.5m	0.8-3 秒		一方向	
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	最大 9m/s	4.4 m×3.3 m			ファンをダクトに収めている
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
	4				
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
模型サイズ					
その他特記事項					



送風装置と風車模型

文献番号	OME13
------	-------

施設名	海上技術安全研究所 海洋構造物試験水槽				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	40	27		0~2	
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	0.4m	0.4~3 秒		1 方向波	
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	8m/sec.	5m ²	有		可動：任意場所に設置可
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
	13 個	縦 3 段	仮設	可能	
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
	0.3m/sec.	824m ³ /min			
模型サイズ					
その他特記事項	2014 年に造波機をフラップ型からピストン型に 更新最大波高：0.65m (水深 1.5m、周期約 2s) 造波周期帯：0.43~4.0s 波種類：規則波、不規則波、任意波				



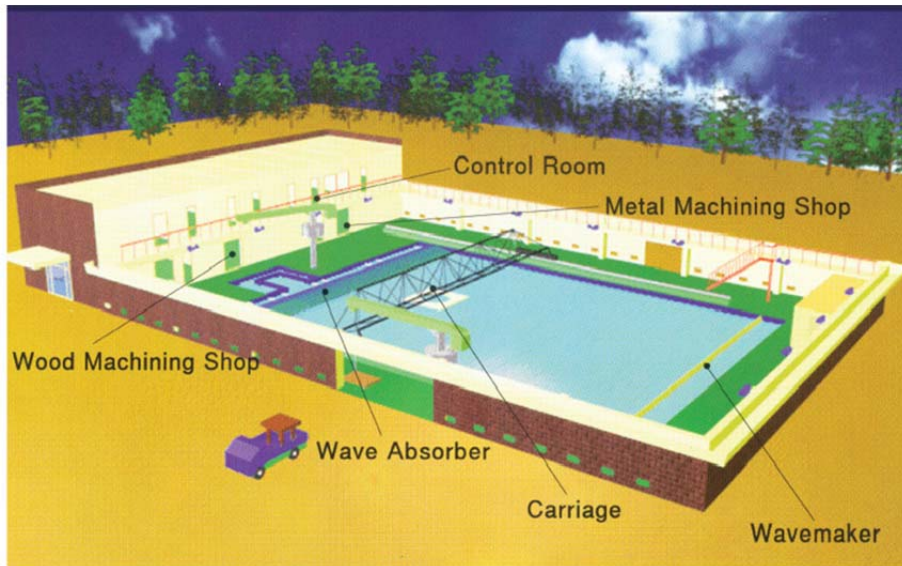
水槽概要



送風装置

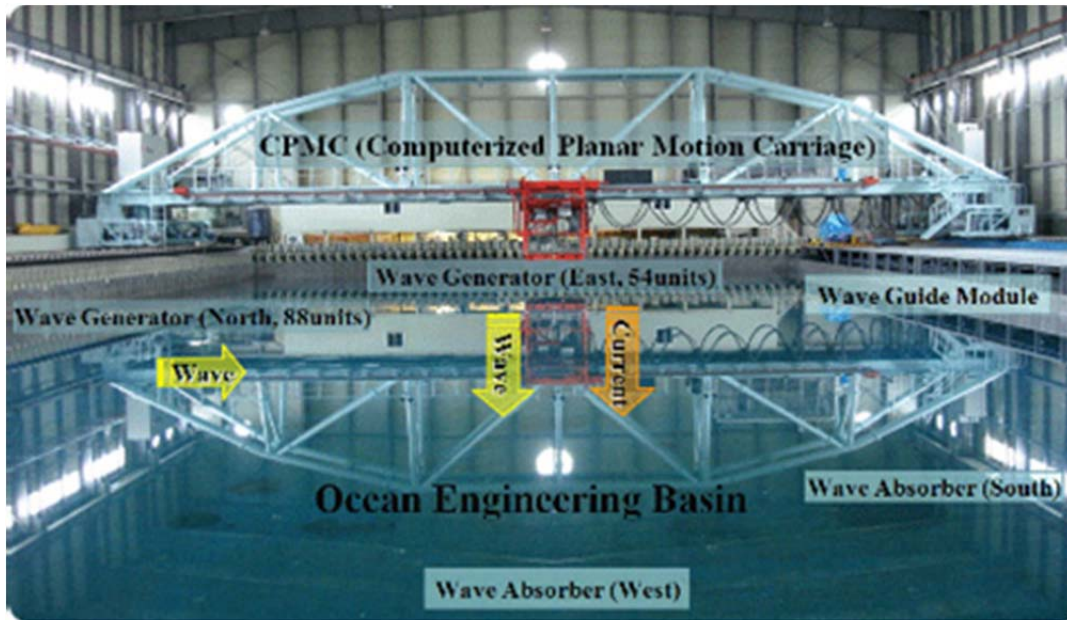
文献番号	OME01、OME06、OME10、風力 01、風力 02、風力 03、風力 04、風力 08
------	---

施設名	Ocean Engineering Wide Tank (University of Ulsan)				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	30	20	3	2.5	
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	0.2m	0.5~5 秒	斜波可	長波頂	0.5m 幅フラップ型×40
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
その他特記事項					



文献番号 | 船海 06、OME15、ISP02、ISP05

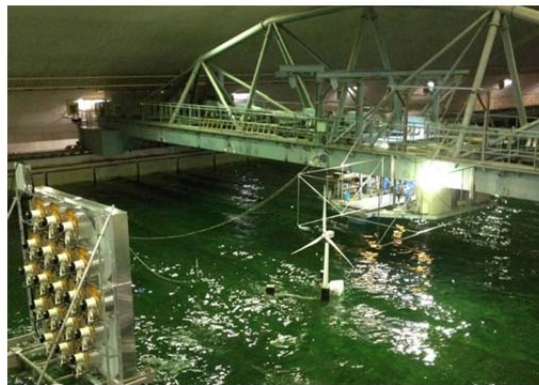
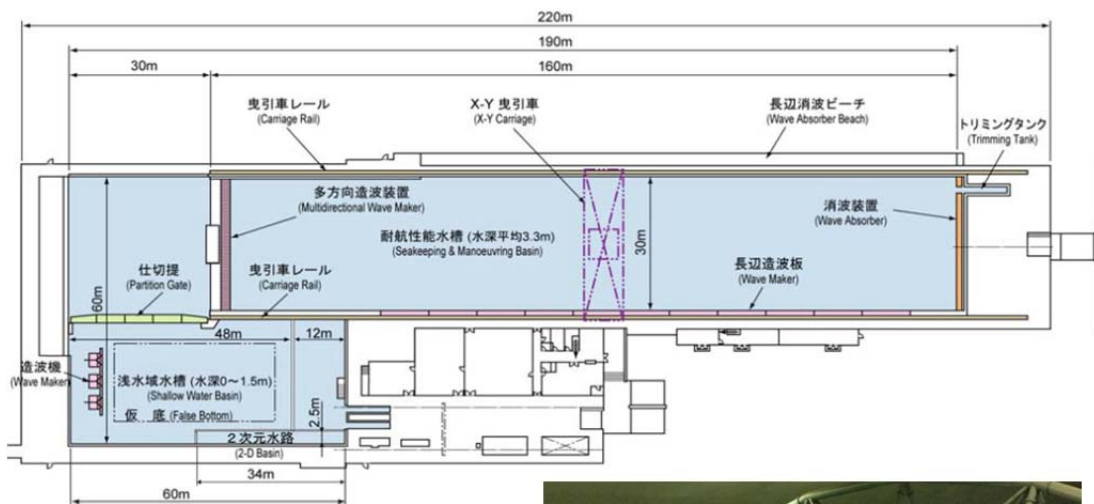
施設名	Ocean Engineering Basin (MOERI)				
施設諸元	幅	高さ	水深	備考	
	56	30	4.5	0.75	Deepit : D=5m×12m
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	最大 0.8m	0.5～5 秒		多方向波	L字型フラップタイプ 142unit
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	10m/sec.	φ0.7m			
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
	8				
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
	0.5m/sec.				Impeller 55kw×6units
その他特記事項					



Ocean Engineering Basin

文献番号	ISP07
------	-------

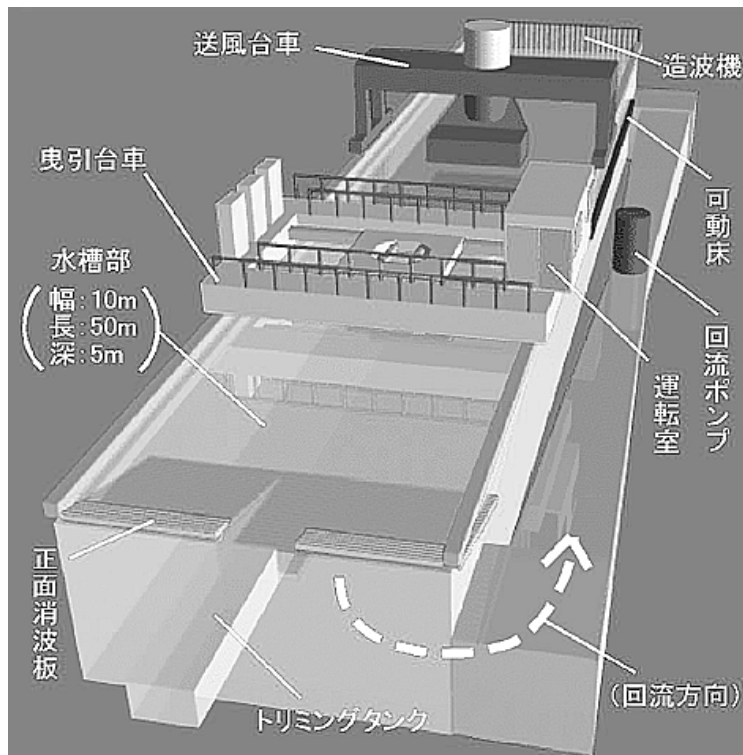
施設名	三菱重工業（株）長崎研究所 耐航性能水槽				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	160	30		3.3	
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考（スペクトル種類など）
	0.5m			短辺は可	長辺は一方向、最大波高 0.4m
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	8m/sec	3.12×3.32m			上から 3, 4, 5, 4, 3 台の計 19 台
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
	19	備考欄参照	仮設		
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
	0.1m/sec				浅水域水槽にて可
その他特記事項					



試験状況

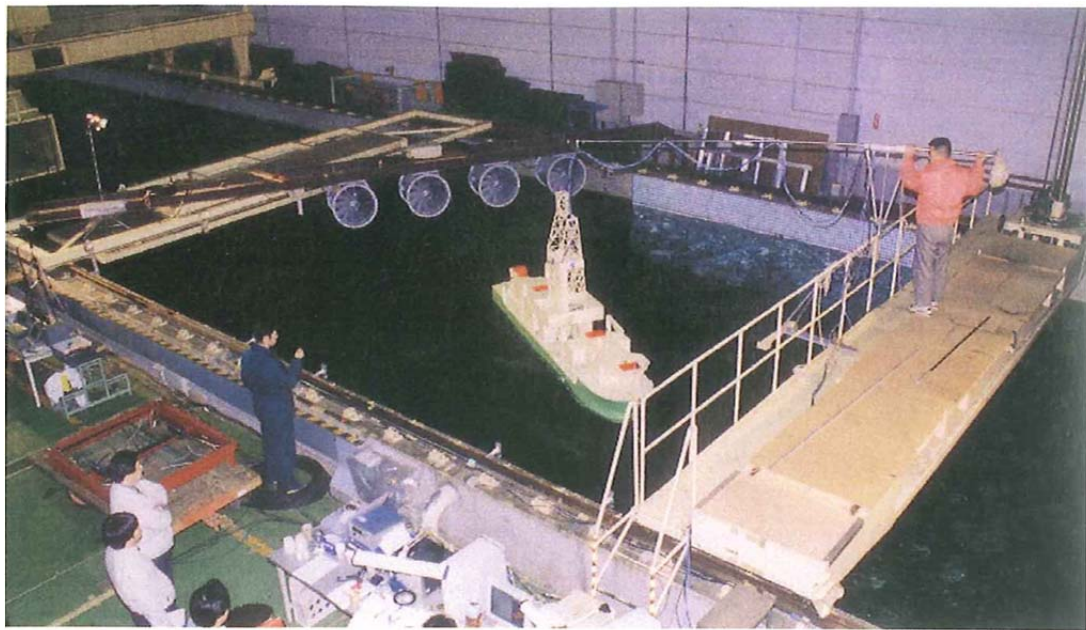
文献番号 風力 05、風力 06

施設名	東京大学生産技術研究所海洋工学水槽				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	50	10	5.5	5	
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	0.3m	0.5~5 秒		多方向可	プランジャー式(31cm×32 台)
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	10m/sec	4×0.8m	0~1m		
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
	0.2m/sec.				
模型サイズ					
その他特記事項	昇降床(20×10m)				



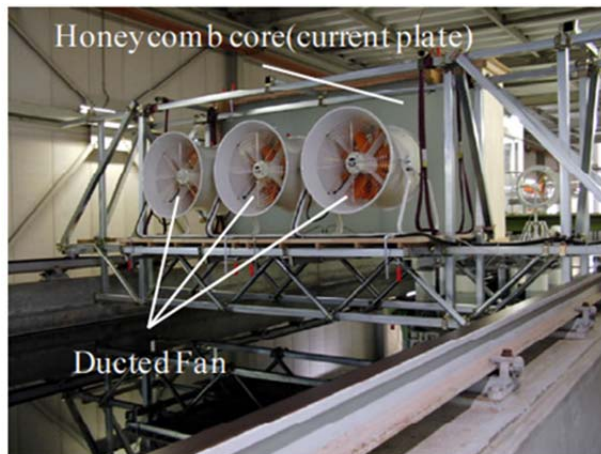
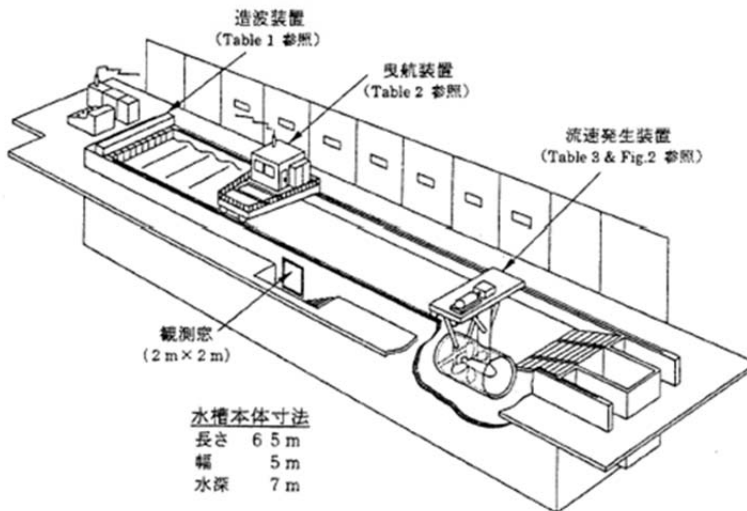
文献番号	海工 01、海工 06、海工 09、船海 03、船海 07、船海 08、船海 09、船海 10、船海 12
------	---

施設名	潮流水槽 (三井造船昭島研究所)				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	55	8		3	
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	0.45m	最大 2.53 秒		多方向波	プランジャー式
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	20m/sec		あり		垂直偏向軸流式
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	上下、左右、回転可能
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
	0.5m/sec				250Kw 軸流ポンプ
模型サイズ					
その他特記事項					



文献番号	海工 05、OME11、風力 04、風力 07
------	-------------------------

施設名	九州大学応用力学研究所 深海機器水槽				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	65	5	7.5	7	
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	0.3m	0.3~5 秒			10 分割ブランジャー式
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
					並列配置
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
	3		仮設		
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
	2m/sec.				プロペラ直径 2.2m
その他特記事項					



送風装置

文献番号	船海 02、船海 11				
------	-------------	--	--	--	--

施設名	Deep Water Wave Basin (University of Aalborg)				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	15.7	8.5	1.5	0.75	Deep section : 4.5×2.1 m
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	最大 0.2m	0.5~5 秒		短波頂可	スネーク前面ピストン型
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
	1				
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
					あるようだが詳細不明
その他特記事項					



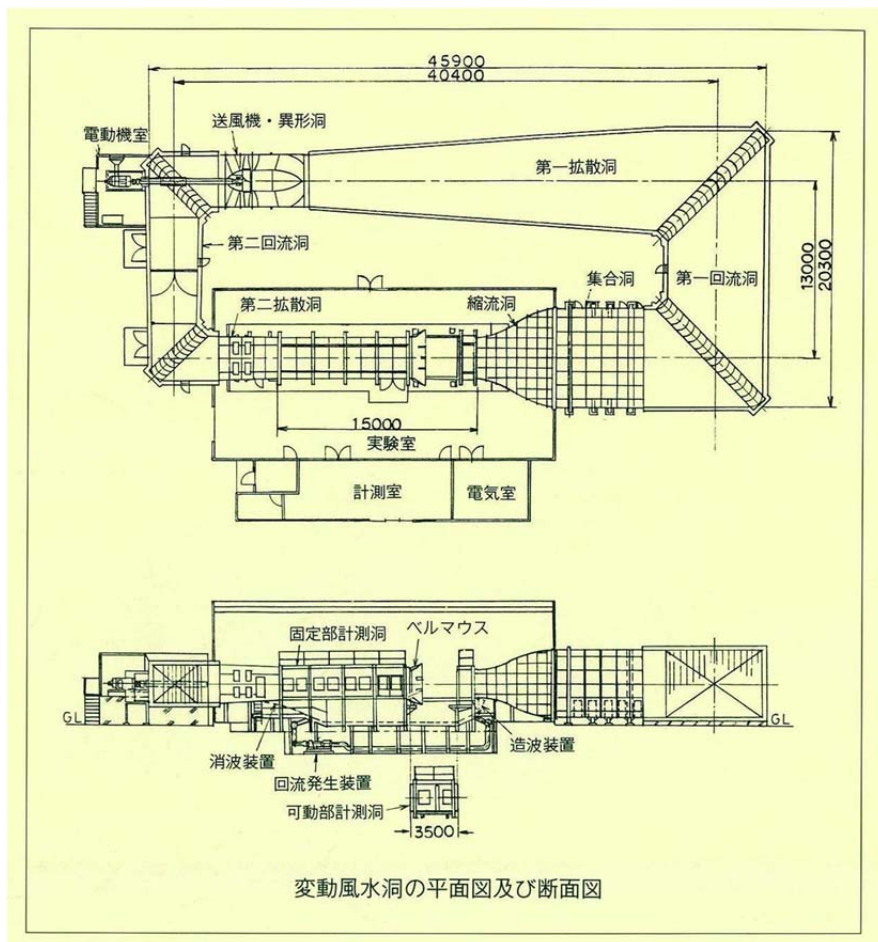
水槽内写真



造波装置

文献番号	ISP06
------	-------

施設名	海上技術安全研究所 変動風水洞				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	15	3	2	1.5	水槽部長さ 17.6m
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	20cm	0.6~4sec.	1 方向	長波頂	フラップ型
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	30m/sec.	6m ² (3×2)			脈動風も可
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	脈動周期 25~50 秒で 13±6.5m/sec.
1		常設	否		
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
	0.3m/sec.				回流式
その他特記事項					



文献番号 海開 01、海開 02

施設名	Advanced wind tunnel & wave flume joint laboratory (The Harbin Institute of Technology)				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	50	5	5	2.5	
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	0.03~0.45m	0.5~5 秒			
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	0~27m/sec.	5m×5m			
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
	1				
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
その他特記事項					



風水洞断面



模型設置状況

文献番号	ISP03
------	-------

施設名	中型造波水槽 (横浜国立大学)				
施設諸元	長さ	幅	高さ	水深	備考
	16	1	2	1.4	
造波装置	造波能力				
	波高	周期	波向	方向性	備考 (スペクトル種類など)
	0.5m	0.5~5 秒		位置方向	プランジャー式 1 基
送風装置	送風能力				
	風速	受風面積	昇降装置		備考
	送風機個数	縦横配置	常設/仮設	組替可否	
潮流装置	能力				
	流速	Flow Rate			備考
その他特記事項					



文献番号 | ISP04

論文一覧

論文 No.	論文 ID	会議名	開催年月	題名	主な著者	Key Words	その他(プロジェクト名等)
ISP01	11TPC-530	ISOPE 2011	2011/6	Gyro Effect of Rotating Blades on the Floating Wind Turbine Platform in Waves	Hideo Fujiwara, Takashi Tsubogo, Yasunori Nihei	Wind turbine; gyroscopic effect; SPAR; offshore platform; wave drift force; BEM.	
ISP02	11TPC-890			Model Test of the OC3-Hywind Floating Offshore Wind Turbine	Hyunkyong Shin	5-MW Floating Offshore Wind Turbine; Model test; Rotating Rotor Effect; RAO; Significant Motion.	
ISP03	2012-TPC-356	ISOPE 2012	2012/6	The Wind-Wave Tunnel Test of a New Offshore Floating Wind Turbine with Combined Tension Leg-Mooring Line System	Nianxin Ren, Yugang Li, Jinping Ou	floating offshore wind turbine (FOWT), combined tension leg-mooring line system, wind-wave tunnel test, numerical simulation.	
ISP04	2012-TPC-401			Experimental Validation for Motion of SPARtype Floating Wind Turbine at Inclination with Effect of Gyro Moment of the Rotating Blade of Windmill	Md. Nur-E-Mostafa, Motohiko Murai, Yasunori Nihei	SPAR; FOWT; response amplitude operator; weight; moment of inertia; gyro moment; inclination.	
ISP05	2012-TPC-972			Model Test of a Floating Offshore Wind Turbine Moored by a Spring-tensioned-leg	Hyunkyong Shin, Pham Thanh Dam	Spring-tensioned-leg (STL); floating offshore wind turbine (FOWT); 5-MW; model test; RAO	
ISP06	13FV-02	ISOPE 2013	2013/6-7	Experimental Study of an Offshore Wind Turbine TLP in ULS Conditions	Christof Wehmeyer, Francesco Ferri, Jesper Skourup	Floating Offshore Wind Turbine, Physical Model Test, Tension Leg Platform.	
ISP07	13SYH-04			The Shape Design and Analysis of Floating Offshore Wind Turbine Structures with Damper Structure and Shallow Draft	Jin Ha Kim, Sa Young Hong, Hyun Joe Kim	Floating Offshore Wind Turbine(FOWT), Spar, Semi-submersible, Damper structure, 9-node HOBEM, Model test, Global performance, Motion & Acceleration at Nacelle	
ISP08	13TPC-432			GICON®-TLP for Wind Turbines – Validation of Calculated Results	Frank Adam, Christian Steinke, Jochen Großmann	Froude scaling; offshore floating wind turbine; model testing; eigenfrequencies; nonlinear rope module; GICON®-TLP	
OME01	OMAE2011-49793	OMAE 2011	2011/6	MODEL EXPERIMENTS ON THE MOTION OF A SPAR TYPE FLOATING WIND TURBINE IN WIND AND WAVES	Toshiki CHUJO, Shigesuke ISHIDA		
OME02	OMAE2012-83645	OMAE 2012	2012/7	EXPERIMENTAL COMPARISON OF THREE FLOATING WIND TURBINE CONCEPTS	Andrew J. Goupee, Bonjun Koo		
OME03	OMAE2012-83642			MODEL TESTS FOR A FLOATING WINDTURBINE ON THREE DIFFERENT FLOATERS	Bonjun Koo, Andrew J. Goupee		
OME04	OMAE2012-83627			METHODOLOGY FOR WIND/WAVE BASIN TESTING OF FLOATING OFFSHORE WIND TURBINES	Heather R. Martin, Richard W. Kimball		

論文 No.	論文 ID	会議名	開催年月	題名	主な著者	Key Words	その他(プロジェクト名等)
OME05	OMAE2012-83389			STUDY OF A FLOATING FOUNDATION FOR WIND TURBINES	Sébastien Gueydon, Sam Weller		
OME06	OMAE2012-83985			DYNAMIC ANALYSIS OF A FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE UNDER EXTREME ENVIRONMENTAL CONDITIONS	Tomoaki Utsunomiya, Shigeo Yoshida		
OME07	OMAE2012-83993			MODEL EXPERIMENT OF A SPAR TYPE OFFSHORE WIND TURBINE IN STORM CONDITION	Kentaroh Kokubun, Shigesuke Ishida		
OME08	OMAE2013-10122	OMAE2013	2013/6	DESIGN AND TESTING OF SCALE MODEL WIND TURBINES FOR USE IN WIND/WAVE BASIN MODEL TESTS OF FLOATING OFFSHORE WIND TURBINES	Matthew J. Fowler, Richard W. Kimball		
OME09	OMAE2013-10817			SUMMARY OF CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS DRAWN FROM THE DEEPCWIND SCALED FLOATING OFFSHORE WIND SYSTEM TEST CAMPAIGN	Amy N. Robertson, Jason M. Jonkman		
OME10	OMAE2013-10308			IMPORTANCE OF SECOND-ORDER DIFFERENCE-FREQUENCY WAVEDIFFRACTION FORCES IN THE VALIDATION OF A FAST SEMI-SUBMERSIBLE FLOATING WIND TURBINE MODEL	Alexander J. Coulling, Andrew J. Goupee		
OME11	OMAE2013-10444			DEVELOPMENT OF AN ANALYSIS CODE OF ROTOR-FLOATER COUPLED RESPONSE OF A FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE	Hideyuki Suzuki, Hajime Shibata		
OME12	OMAE2013-10649			EXPERIMENTAL STUDY FOR SPAR TYPE FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE WITH BLADE-PITCH CONTROL	Toshiki CHUJO, Yoshimasa MINAMI		
OME13	OMAE2013-11577			TANK TESTING OF A NEW CONCEPT OF FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE	Marc Le Boulluec, Jérémy Ohana		
OME14	OMAE2013-11271			COMPARISON OF SIMULATION AND TANK TEST RESULTS OF A SEMI-SUBMERSIBLE FLOATING WIND TURBINE UNDER WIND AND WAVE LOADS	Maxime PHILIPPE, Adrien COURBOIS		
OME15	OMAE2013-10463			MOTION OF OC4 5MW SEMI-SUBMERSIBLE OFFSHORE WIND TURBINE IN IRREGULAR WAVES	Hyunkyoungh Shin, Byungcheol Kim		
OME16	OMAE2013-11259			CONCEPTUAL DESIGN OF A SINGLE-POINT-MOORED FOWT AND TANK TEST FOR ITS MOTION CHARACTERISTICS	K. Iijima, M. Kawai, Y. Nihei, M. Murai, T. Ikoma		

論文 No.	論文 ID	会議名	開催年月	題名	主な著者	Key Words	その他(プロジェクト名等)
船海 01	2011S-OS2-3	日本船舶海洋工学会 平成 23 年 春季講演会	2011/5	TLP 型洋上風力発電の最適形状の検討と運動応答に関する研究	二瓶泰範、松浦みどり	Tension Leg Platform, Offshore Wind Turbine,	
船海 02	2011S-OS2-4			六角形型洋上風力発電プラットフォームの水槽実験	末吉誠、胡長洪	Wind turbine, Platform, Model experiment, TLP	
船海 03	2012S-G4-7	日本船舶海洋工学会 平成 24 年 春季講演会	2012/5	TLP 型洋上風力発電の弾性応答について	二瓶泰範、幸前徳	Offshore Wind Turbines, Elastic Response, Bending Vibration, Rotation of the Blades	
船海 04	2012A-GS15-4	日本船舶海洋工学会 平成 24 年 秋季講演会	2012/11	浮体式洋上風力発電におけるネガティブ・ダンピングに関する実験的研究	南佳成、中條俊樹	Negative damping, Blade pitch control, Offshore Wind Power, Floating Platform	
船海 05	2012A-GS16-1			浮動軸型風車と Savonius 型水流タービンによる複合型浮体式風力発電	秋元博路、中村拓樹	Floating axis turbine, Wind power, Tidal stream, Ocean current, Savonius turbine, FAWT, FAWT2	
船海 06	2013S-OS5-3	日本船舶海洋工学会 平成 25 年 春季講演会	2013/5	A Few Technical Challenges in Floating Offshore Wind Turbines	Hyunkyoungh Shin, Harkjin Eum	Tropical storm, Vortex induced Vibration (VIV), Floating Offshore Wind Turbine, Model	
船海 07	2013S-GS5-13			TLP 型洋上風力発電の設計と水槽試験を通した 6 自由度運動特性に関する研究	二瓶泰範、松浦みどり	Offshore wind Turbine, Renewable energy, Tension Leg Platform, Tank Test, 6 free degree motions	
船海 08	2013S-GS5-14			Spar 型浮体式洋上風車の設計と水槽試験を通した 6 自由度運動特性に関する研究	二瓶泰範、居駒知樹	Spar type substructure, Limiting condition, Floating column, Tank tests, 6 free degree motions	
船海 09	2013S-GS5-15			セミサブ型浮体式洋上風車の 6 自由度運動特性に関する研究	村井基彦、武井美樹	Semi-Submersible type substructure, Limiting condition, Floating column, Tank tests, 6 free degree motions	
船海 10	2013S-GS5-16			Experimental Study on New Design For FOWT With SPM System	Chong Ma, Misako Kawai	Floating Wind Turbine, Single-Point-Mooring, Tank Tests, 6 Free Degree Motion, Nonlinear Tension	
船海 11	2013S-GS5-19			洋上風力発電用セミサブ型三角形浮体の水槽実験	末吉誠、胡長洪	Wind Turbine, Renewable Energy, Floating Body, Tank Experiment	
船海 12	2013A-GS15-4			日本船舶海洋工学会 平成 25 年 秋季講演会	2013/11	Spar 型一点緊張係留方式の浮体式洋上風車の運動特性に関する研究	大高千尋、二瓶泰範
風力 01	風力 37-3-P55	日本風力エネルギー学会誌 Vol.37-No.3	2013/11	浮体式洋上風力発電実証事業における小規模試験機の模型実験	國分健太郎、石田茂資	浮体式洋上風力発電, 模型実験, 荒天時, 安全性, 係留張力	環境省 実証事業
風力 02	風エネ 34-A12	第 34 回 風力エネルギー 利用シンポジウム	2012/11	浮体式洋上風力発電のブレード・ピッチ制御の効果に関する実験的検討	中條俊樹	浮体動揺, 回転速度一定制御, ネガティブ・ダンピング	
風力 03	風エネ 34-A16			環境省 浮体式洋上風力発電実証事業 その 4	國分健太郎、宇都宮智昭	実証研究, スパー型, 小規模試験機	環境省 実証事業

論文 No.	論文 ID	会議名	開催年月	題名	主な著者	Key Words	その他(プロジェクト名等)
風力 04	風エネ 34-A26			浮体式洋上風力発電の風車浮体連成応答解析プログラム"UTWind"の開発状況と検証	柴田創、鈴木英之	風車-浮体連成解析、数値解析、検証、ピッチ制御	
風力 05	風エネ 35-A13	第 35 回 風力エネルギー 利用シンポジウム	2013/11	7MW 風車のための V 字型セミサブ浮体の開発	太田真、小松正夫	実証研究事業、静的安定性、波浪中応答、動的安定性	福島浮体式洋上 ウインドファーム 実証研究事業
風力 06	風エネ 35-A14			7MW V 字型セミサブ浮体式洋上風車の加重計算	中村昭裕、林義之	風車-浮体連成荷重解析、翼ピッチ制御、不安定振動	福島浮体式洋上 ウインドファーム 実証研究事業
風力 07	風エネ 35-B21			複合外力を考慮した浮体式洋上風力発電システムの水槽試験と動揺予測	石原孟、加賀谷健	風車-浮体-係留連成解析、長周期動揺、カタナリー係留、セミサブ浮体	
風力 08	風エネ 35-C55			ロータ回転が洋上風力発電浮体の減衰へ与える影響について	中條俊樹、羽田絢	ブレード・ピッチ制御、ネガティブ・ダンピング、自由動揺試験	
海工 01	0ES22-056	第 22 回 海洋工学 シンポジウム	2011/8	TLP 型洋上風力発電の研究開発 —設計・試験・出力変動試算—	二瓶泰範、松浦みどり、 藤岡弘幸、鈴木英之	TLP、1/100、風・波中、風車回転による振動 影響、風抗力による傾斜	
海工 02	0ES22-094			浮体上の風車のジャイロ効果の波漂流力への影響	藤原英雄、坪郷尚、二瓶 泰範	ジャイロ効果、回転円板、箱型浮体、Pitch 低 減、Sway 漂流力	
海工 03	0ES22-102			風車ブレードの慣性モーメントが SPAR 型洋上風力 発電施設の動揺特性に与える影響について	藤田修、村井基彦、Md.Nur- E-Mostfa、西村龍二	SPAR、ジャイロ効果、1/360、平板翼風車、 強 制回転	
海工 04	0ES23-023	第 23 回 海洋工学 シンポジウム	2012/8	ブレードの回転影響を考慮した TLP 型洋上風車 の連成振動解析手法	二瓶泰範、寺島徳、飯島 一博	TLP、ブレード質量差による強制力 BIV、連 成振動、風車タワー弾性模型、	
海工 05	0ES23-024			浮体式洋上風車の風車-浮体連成応答解析プログラム "UTWind"の開発	藤岡弘幸、鈴木英之、柴田 創、平林紳一郎	風車-浮体連成応答解析 pgm;UTWind、negative damping、検証水槽試験、セミサブ、模擬円盤、	
海工 06	0ES23-058			TLP 型洋上風力発電の転倒現象に関する研究	二瓶泰範、松浦みどり	TLP、小型化、風車回転による Yaw、係留索 の slack、転倒現象、対策、新モデル設計	
海工 07	0ES24-071	第 24 回 海洋工学 シンポジウム	2014/3	ポテンシャル理論による流体力解析と FAST による 空力解析の組み合わせによる浮体式洋上風車の動 揺特性に関する研究	和氣昌弘、村井基彦	風車の動揺解析、FAST、3 次元特異点分布法、	
海工 08	0ES24-075			小復原力水中プラットフォームの水槽実験に関する 研究	村井基彦、羽田絢、宗像 晋作、山野井淳	ウインドファーム、水中プラットフォーム動 揺低減効果、海技研共同、	
海工 09	0ES24-082			Dynamic Stability of Slow Motion of a Semisubmersible Type FOWT Moored to Single-Point Mooring System	Yuiko KURODA、 Chong MA、 Kazuhiko IJIMA、 Masahiko FUJIKUBO	Single-point mooring、FOWT、Slow motion (slewing)、wind load、	
海開 01		第 32 回海洋開発 シンポジウム	2007/7	浮体式風力発電の回転・並進動揺による風荷重と 発電量影響に関する模型実験	関田欣治、大久保寛、 山下篤	Wind power、floating wind units、vessel motion、 drag coefficient、power generation floater	
海開 02				洋上風力発電のための RC 製二段円筒型浮体の 動揺特性	森屋陽一、安野浩一朗、 原基久	Floating body、wind power generation、 wind tunnel with water tank	

※著者は原則として3名までとした。

※OMAE論文にはキーワードがないため空欄とした。