

## 11 海技研の模型試験技術と将来展望

羽田 絢\*, 中條 俊樹\*

### **Model Testing Technology and Future Prospects of National Maritime Research Institute**

by

HANEDA Ken and CHUJO Toshiki

#### Abstract

The National Maritime Research Institute (NMRI) has conducted numerous model tests to improve the safety of floating offshore wind turbines (FOWTs). In addition, an offshore wind power project team has been formed to contribute to the development of FOWTs in a wide range of fields to solve technical problems presented in the commercial deployment of FOWT. NMRI has been engaged in many model tests since the early stages and has developed several key techniques such as measurement of floating motion in waves, rotor model technique, and coupled response measurement. In the future, it will be necessary to develop new model test techniques not only for basic response measurement but also for more detailed verification of coupled responses and for the development of technologies required for installation and operation. In this study, we introduce the key techniques and future prospects of the model tests.

---

\* 海洋先端技術系再生エネルギー研究グループ

原稿受付 令和2年5月19日

審査日 令和2年6月11日

## 1. はじめに

海上技術安全研究所では、浮体式洋上風力発電施設 (FOWT: Floating offshore wind turbine) の安全性向上および普及に資するべく、多数の模型試験を実施してきた。また、2020年3月からは、FOWTの商用展開に至る技術的課題の解決に分野横断的に取り組むために、洋上風力発電プロジェクトチームが結成され、より多岐にわたって FOWT 開発に貢献する体制を整えている。

海上技術安全研究所は、比較的早期の段階から多数の模型試験に取り組んでおり、現在では複数の要素技術を保有している。所有する水槽施設を活かした波浪中の浮体動揺計測技術に加え、ロータ荷重の模擬技術、また FOWT 特有の問題となるロータ空力荷重と浮体動揺の連成応答の計測技術がある。FOWTに限らず、模型試験の一般的な目的の一つとして、数値解析技術の検証用データを取得することがある。FOWTの数値解析技術は、空力荷重と浮体動揺の連成応答を含めた解析手法が確立している。他方で、現在は新しい浮体形式が続々と提案されている。例えば、タレットを利用した一点係留方式の浮体のように、特徴的な運動モードを有する浮体や、コンクリートを積極的に利用した浮体などが挙げられ、これらの波浪中応答や作用荷重等については、モデル化手法を含めて検討が不十分なものもある。そのため、これに対応するための数値解析技術開発は継続課題となっている。今後の模型試験では、浮体特有の運動モードの計測や、その運動モードと関連する構造部への作用荷重計測を、連成応答を含めて評価できるデータの取得が必要となる。また、解析対象の拡大も重要であると考えている。FOWTの商用化にあたっては、多角的な観点から設計を合理化することが求められており、FOWTに関連する各種作業船の安全性評価や、要素技術開発と、それに伴う新しい模型試験技術の開発が求められていると考えられる。

海上技術安全研究所では、洋上風力発電プロジェクトチームの事業として、FOWT 構造の詳細な応答把握技術、高度なブレードピッチ制御技術、FOWT 作業船舶の安全かつ効率的な運用技術等の開発に取り組むために、対応した模型試験も実施する予定である。

本講演では、海上技術安全研究所が達成済みの模型試験要素技術の紹介に加えて、今後の模型試験技術について提案する。

## 2. TRL と模型試験

FOWTの開発を進めるうえで、模型試験は非常に重要な立ち位置を占める。模型試験の基本的な目的について、IEC<sup>1)</sup>では1. 数値解析技術の検証データ取得、2. 極値や設計値の計測の2つを代表的なものとして取り上げている。FOWTに必要な数値解析技術としては、波浪中の浮体動揺、弾性応答特性、また風車ロータ部分の荷重変動、そしてそれらの相互影響などがある。これに加えて、係留チェーンを含めた全体系として評価を行う必要がある。模型試験は、この数値解析手法の部分的、あるいは統合的な検証用データ取得のために実施さ

れる。また、近年では多様な新型浮体が提案されており、1点係留方式の採用や、コンクリートを部材として適用するなど、新しい要素技術の特性を検討するためにも模型試験を実施する必要がある。他方、50年再現などの極限状態を模擬することによって、極限状態における設計値を取得することも模型試験の重要な目的である。

FOWTのような新技術開発ではTRL (Technology readiness levels, 技術習熟度レベル) という開発レベルの評価基準が用いられることがある。ITTC (International Towing Tank Conference)の洋上風力発電模型試験に関するガイドライン<sup>2)</sup>では理論検討から商用実証までを9つの段階に分けており、模型試験との対応を次のように設定している。

- TRL1-3: 概念検証段階、基礎的なシステムの検証や、物理特性の調査する。縮尺1/80 から1/150程度の小型模型を適用する。
- TRL4-5: FOWT設計の検証や、性能向上のための制御手法の開発、係留手法の検証する。1/40から1/80程度の中規模模型を適用する。また、小規模模型を用いて極限状態の模擬試験も考慮する。
- TRL6-7: システムの検証段階、1/20から1/40程度のスケールを適用する。
- TRL8-9: プロトタイプ及び実証段階、実海域で実施する。

これより、例えばTRL3から5の間に実施する模型試験例として、以下のような内容が考えられる。

TRL3: FOWTのコンセプト成立性を検討するために、剛体模型を用いて波浪中の応答を計測する試験。

TRL4: FOWT特有の現象である風車浮体の連成応答影響を調査するため、剛体浮体模型とロータ荷重の変動を考慮可能な模型を組み合わせ適用し、FOWT全体挙動、変動するスラスト荷重を計測する試験。

TRL5: 各FOWT浮体の特性に応じて、例えば弾性応答や、回頭など、検討対象に固有な運動モードを考慮可能な模型を用い、適切な応答を計測する試験。

海上技術安全研究所では、様々な用途・目的の模型試験を複数実施してきた。そのとき、各試験に対して必要な情報を取捨選択し、それを効果的に計測するために海上技術安全研究所の保有する模型試験要素技術を組み合わせ、試験を計画・実施してきた。次章では、これらの要素技術の詳細を紹介する。

## 3. 模型試験における要素技術の紹介

海上技術安全研究所で実施してきた FOWT 模型試験技術について、個別の要素技術の紹介を行う。

### 3.1 波浪中応答計測技術

FOWTの波浪中応答の計測は、いずれのTRLでも求められる基礎的かつ重要な試験である。海上技術安全研究所では、これらに適切な浮体、係留系の設計技術に加えて、試験に適切な水槽を保有している。FOWT試験の実績があるものとして、海洋構造物試験水槽や、実海域再現水槽が挙げられる。海洋構造物試験水槽は、最大水深2m、長さ44.5m、幅27.1mの大面积を有する平面水槽で、係留の展開形状を模擬することが可能である。加えて、ピストン型造波装置を用いた造波機能や、回流式潮流発生装置による大面积にわたる均質な潮流の再現が可能となっている。実海域再現水槽は、水深4.5m、長さ80m、幅40mで、全周を382台の制御式分割型造波吸収装置に覆われており、任意方向からの造波や、多方向不規則波といった複雑な造波が可能である。

図-1に示すのは、代表的な試験事例の様子である。図-1左は、海洋構造物試験水槽で実施した剛体模型を用いた試験例<sup>3)</sup>で、縮尺1/30、全高約3mの剛体模型を用いた試験の様子である。特殊な形状を有する浮体の波浪中応答の計測が目的であったため、一般的な剛体模型を用いた試験よりも大縮尺の模型を採用した。また、図-1右は、実海域再現水槽で実施した試験例である。先に紹介したものと同型のFOWTを対象としており、縮尺1/15、全高約6mの大型模型を用いた例である。この浮体コンセプトは、材質にコンクリートを併用しており、その製造手法の確認と、コンクリート浮体の適用可能性検討も試験の目的であった。このような検討は、大縮尺模型ならではの特質である。



図-1 水槽を用いた試験例

(左図：海洋構造物試験水槽、右図：実海域再現水槽)

波浪中の構造の弾性応答も重要な確認事項である。図-1のコンセプト浮体と同型のFOWTを対象とした弾性相似模型を用いた試験を2019年に東京大学との共同研究で実施した<sup>4)</sup>。この浮体は、全体の剛性を確保するためにワイヤーを用いてコラム頂部とナセル直下を接続しており、主要部の弾性応答に応じて張力の変動が発生する。模型試験はこの影響調査のために実施され、数値計算と比較可能なデータを獲得することができた。しかしながら本節で紹介した試験は、模型が比較的大きく、必要な送風面積及び送風機が大型化したため、回転可能な風車ロータ模型は作成せず、ロータ荷重と浮体挙動の連成については考慮されていない。

### 3.2 ロータ模擬技術

FOWTは、風車回転時に発生するロータ荷重によって姿勢が変動する。模型試験ではロータ荷重のうち、主にスラスト荷重を模擬する。ここでは、水平軸風車のロータ荷重を再現する手法として4通りの手法を示す。また関連技術としてブレードピッチ制御技術についても紹介する。

#### 3.2.1 ロータ荷重模擬技術

大別して4通りの手法が用いられる。1つ目は、一定なロータ荷重を、錘とプーリーを用いて模擬する手法である。風車ナセル部からワイヤーを伸ばし、プーリーを介してスラスト相当の錘を接続する。適用が簡易である反面、錘の慣性力が作用する問題がある。類似の手法として、錘の代わりにモータを設置し、モータのトルクでワイヤーを巻き取り、一定のスラスト荷重を模擬する手法もある。2つ目は、模型に対して実際に送風を行い、ロータを開孔円盤等で模擬し、円盤の受ける風抗力をロータ荷重と合わせる手法である。こちらも簡便な手法ではあるものの、送風装置の用意が必要となる他、FOWT動揺時の相対風速の変化や受風面積の変化によって意図しないスラスト力の変動が発生するといった問題がある。3つ目は、電動ファンを用いる手法である。電動ファンをナセルに搭載し、その推力をロータ荷重に見立てる。送風装置を必要としないため、大縮尺の模型試験にも使用できる利便性があるが、定荷重として作用するため、浮体挙動との連成影響についての考慮ができない。図-1に示した試験例ではこの手法を採用した。

4つ目は、実際に小型のロータを作製し、ロータの回転を模擬する手法である。ブレード、ナセル、そしてハブからなる小型の模型を製作し、送風機の発生する風により回転させることで、実際にブレードに揚力、抗力を発生させてロータ荷重を模擬する。海上技術安全研究所で最も多く採用された手法であり、実際の風車と同一のメカニズムで荷重を作用させるため、実現に近い応答を得ることが可能となる。これにより、ブレードピッチ制御に関する検討も可能になるが、その詳細は後述する。なお、スラスト係数と周速比を実機と同程度に模擬するためには模型ブレードの形状は実機と大きく異なるものになる。また、レイノルズ数については合わせる事が不可能であるため、翼の振動等については考慮で



図-2 小型ロータ模型

きないことに注意が必要である。他方で、大縮尺模型試験に4つ目の手法を適用する場合、大型のロータ模型に対応する送風設備の確保が困難となる側面もある。

図-2に示すのは、直径約1.3mの小型ロータ模型である。海上技術安全研究所では、変動風水洞という特殊な風洞施設を備えており、このロータ模型の性能検定に使用された。この風洞は、風路長109mのゲッチングン型風洞で、計測路長15m、幅3m、高さ2mである。また、計測路の下部を水槽として利用することも可能である。水槽部にはフラップ型の造波装置も備えており、均質な送風状態を維持したまま波浪中のFOWT応答計測が可能となる。また、先に紹介した海洋構造物試験水槽や、実海域再現水槽にも別途送風装置を据え付けて試験を実施した実績がある。

### 3. 2. 2 ブレードピッチ制御技術

小型ロータを用いた模型試験では、ブレードピッチ制御を試験に取り入れた実績もある。ブレードピッチ制御は、外乱等に応じてブレードピッチ角を変化させ、発電品質の維持及び動揺低減を目標とする技術である。陸上風車では、発電品質の維持、すなわち一定なロータ回転数の維持を目的とした制御を実行すればよいが、FOWTでは浮体の動揺による相対風速の変動に起因する、ネガティブダンピングといわれる運動の増幅現象が発生する。この現象を再現するために、3枚のブレードを同期して動かすことができる風車模型に、専用の制御装置を組み合わせることで水槽試験を実施した<sup>5)</sup>。この試験は、1/60という小縮尺ながらも、ブレードピッチ制御によるネガティブダンピングの発生と、その抑制効果について把握することができた。

制御技術をさらに発展させ、2019年には、3枚の翼を個別に動作可能な風車模型を作製して試験を実施した<sup>6)</sup>。これは、各翼を独立操作することで、ウィンドシアを考慮した、高度な制御の影響を確認するためのものである。当該試験は風洞試験の実施にとどまっているが、軽量化に成功しており、浮体に搭載しての試験実施も期待できる。

### 3. 3 特殊な状態の模擬

これまで述べてきた水槽試験は想定実機が一般的に遭遇する海象条件下で実施されることが多いが、より特殊な状態を模擬した水槽試験も実施されている。ここで特殊な状態とは、例えば極めて厳しい海象条件、突発的な現象による過渡応答状態である。

造波能力の高い水槽を用いることで、比較的小縮尺の模型と併せ50年再現などの極限状態を模擬することが可能であり、極限状態における設計値を取得することができる。また、係留破断<sup>7)</sup>やダメージスタビリティの検討など、数値解析では困難になりがちな過渡応答のデータ取得を模型試験で実施した実績がある。さらにはFOWTと船舶の衝突挙動を再現する水槽試験も実施<sup>8)</sup>、衝突エネルギーが系全体のエネルギーに占める割合を把握した。

## 4. 今後の模型試験

海上技術安全研究所の模型試験技術は、個別要素して非常に高い技術を有しており、FOWT特有の空力連成応答の計測を実現している。今後は、空力連成が浮体の各部構造に及ぼす影響を詳細に検証するための模型試験や、FOWTに関連する作業船に関する模型試験を実施していく必要がある。

### 4. 1 FOWT 連成応答が浮体固有の挙動に及ぼす影響を検証するための試験

FOWTの動的応答に関する数値解析技術は、比較的高いレベルに到達しており、剛体としての応答に加えて、弾性体としての応答解析も多数実施されている。他方で、空力連成応答が各浮体特有の運動モードに及ぼす影響については、引き続き検証を実施する必要があるといえる。特に、様々な浮体形式が提案されている現状では、浮体毎に個別の数値解析技術が必要になる可能性もある。

ここでは2種類の模型試験から必要なデータを取得する手法を提案する。一つは、浮体固有の運動に加えて、各部構造への作用荷重を計測可能な大型の浮体と、電動ファンを用いたロータ模擬手法の組み合わせを適用する模型試験である。このとき、電動ファンの指令値に時変性を与えることによって、相対風速や、ブレードピッチ制御に起因する、空力荷重が変動する状況を模擬し、これらが波浪中の浮体応答、あるいは構造荷重へ及ぼす影響を計測可能となる。連成応答を正確に模擬したものではないが、発生させたロータ荷重を数値解析の入力とすることで、解析手法の検証データとして成立すると思われる。もう一つは、比較的小型の浮体と、ロータ模擬模型を使用する試験である。こちらはロータを厳密に模擬した模型を採用することによって、空力連成が波浪中応答に与える影響を把握することが可能となる。先ほど紹介した新型の小型ロータ模型を適用することにより3軸独立ブレードピッチ制御のような高度な制御手法によって生じる連成応答について把握することができる。これらの模型試験技術を確立することによって、海上技術安全研究所のFOWTに関する数値解析技術もさらに発展可能であると見込んでいる。

### 4. 2 FOWT 及び作業船の安全な運用技術に関する試験

これまで海上技術安全研究所が実施してきたのは、FOWT単独の応答に着目した試験であったが、今後はFOWT施工時あるいは運用時に関する検討も実施していく必要がある。FOWTの施工や運用においては、SEP船(Self-Elevating Platform)、アンカーハンドリング船、CTV(Crew Transfer Vessel)、タグボート等、多様な船舶が必要となる。これらの作業船の効果的な運用方法に関する検討も重要課題であり、そのための模型試験が考えられる。

1つ目は、SEP船の脚部展開時における位置保持性能の把握を目的とする試験である。異なる脚部展開状態のSEP船模型を用意し、位置保持システムの有無による波浪中応答の計測を実施する試験である。2つ目は、CTVからFOWTへの安全な乗り移り技術の開発のための試験である。CTVからFOWTへ

の乗り移りには、キャットウォークを使用することがあるが、CTVとFOWTの相対挙動を考慮したキャットウォークの位置保持制御技術の性能把握を模型試験によって行う。また、CTVに動揺低減装置機構を搭載する状況も想定され、その性能について調査するための試験も考えられる。また3つめとして、FOWT曳航手法の検討も挙げられる。ロータの大型化が進む現状を考慮すると、設置海域近傍に専用のFOWT建設工場を設置し、そこでFOWTを完成させてから、現場海域まで曳航を行う状況も想定される。その手法について検討するため、模型試験を用いて曳航時の張力や相対運動を計測し、数値解析ツール開発のための基盤データを取得することを目的とする。

## 5. まとめ

海上技術安全研究所は、浮体式洋上風力発電施設の商用化に資するべく、洋上風力発電のプロジェクトチームを発足した。海技研の保有する模型試験技術は非常に高いものがあり、過去の研究で多くの実績を残してきた。また、そのための要素技術としては、保有する施設を活用した波浪中の浮体挙動及び弾性応答計測試験技術や、ロータ荷重を多用な手法で模擬する技術などがある。他方で、これからのFOWT開発には、FOWT特有の連成応答が各浮体に固有の運動モードに及ぼす影響に関するモデル化手法の詳細検討や、作業船に着目した研究も重要になると見込まれる。前者のためには、風車浮体の連成応答を再現可能であり、かつ浮体固有の運動や構造荷重計測が可能な模型が必要となるが、今回はこれを2種類の模型試験より再現することを提案する。一つは、浮体固有な構造荷重の計測が可能な大型の浮体と、電動ファンを用いたロータ模擬手法の組み合わせを適用する模型試験で、もう一つは、比較的小型の浮体と、ロータ模擬模型を使用する試験である。また後者の、作業船舶の模型試験については、SEP船の脚部展開時の応答特性と、位置保持システムの有効性を確認するための模型試験や、CTVでの乗り移り作業時の安全性を向上させるための新技術開発のための模型試験、また、FOWT曳航時挙動の解析ツール開発のための模型試験等が考えられる。これらの模型試験要素技術を獲得することは、海上技術安全研究所がFOWT開発に貢献し続けていくための重要課題である。

## 謝辞

本論文の3.1に示した模型試験は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の事業「次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究」の一環として実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

1) International Electrotechnical Commission: IEC TS 61400-3-2 Edition 1.0 Wind energy generation systems Part3-2: Design requirements for floating offshore wind turbine (2019) .

2) International Towing Tank Conference: ITTC Recommended Procedure and Guidelines 7.5-0.2-07-03.8, Model Tests for Offshore Wind Turbines (2014) .

3) CHUJO T., HANEDA K., INOUE S. : Scale Model Experiment of Weather-Van-Type Floating Platform for Downwind-Type Offshore Wind Turbine, Proceedings of Technoocean 2018 (2018) .

4) Anja S., SHIOHARA H., Rodolfo T.G., HOUTANI H., HIRABAYASHI S., NIHEI Y., HANEDA K., CHUJO T., SUZUKI H. : Combined Wave and Wind Basin Testing of a Very Light Floating Offshore Wind Turbine with Guy Wires, Proceedings of Annual Autumn Meeting 2019 organized by JASNAOE (2019) .

5) CHUJO T., HANEDA K., NIMURA T., INOUE S. : Experimental Study on the Negative Damping in the Dynamic Responses of Blade-pitch-controlled Floating Offshore Wind Turbine, Proceedings of Grand Renewable Energy 2014 (2014).

6) 羽田 絢, 中條 俊樹, 二村 正, 國分 健太郎, 藤原 敏文: 浮体式洋上風力発電施設の加振が後流に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本風力エネルギー学会論文集 Vol.44, No.1, pp.1-11 (2020) .

7) KOKUBUN K., ISHIDA S., NIMURA T., CHUJO T., MODEL EXPERIMENT OF A SPAR TYPE OFFSHORE WIND TURBINE IN STORM CONDITION, Proceedings of the ASME 2012 31<sup>st</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2012-83993 (2012).

8) 中條 俊樹, 羽田 絢, 小森 山祐輔, 山田 安平, 藤原 敏文, 越智 宏, 井上 俊司: 浮体式洋上風力発電施設と船舶の衝突に係る損傷時復原性の検討, 構造的な安全性・信頼性に関する国内シンポジウム JCOSSAR2019 論文集, pp.12-15 (2019).

