

海洋構造物試験水槽における水槽試験

湯川 和浩*

Model Tests in the Ocean Engineering Basin

by

Kazuhiro YUKAWA

1. まえがき

海上技術安全研究所では、平成18年度から22年度までの5年間における第2期中期計画において、重点研究の一つとして「海洋資源・空間の利活用を推進し、我が国の海洋権益の確保を図るとともに、経済社会の発展に寄与するものであって、社会的要請の高まっている技術の開発のための研究」の実施を掲げている。具体的には、浮体技術を利用した石油・天然ガス生産システム及び再生可能エネルギー生産システムの開発に不可欠な基盤技術である安全評価手法の構築を喫緊の課題としている。

安全性を評価する過程において必要となる海洋構造物や船舶の運動性能、環境外力の大きさ、浮体周りの流場を把握するためには、縮尺模型を用いた水槽試験の実施が有効な手段の一つとなる。

当所が所有する海洋構造物試験水槽は昭和53年に建造された。海洋構造物試験水槽がこれまで担ってきた水槽試験では、その対象がセミサブ等の海洋構造物やFPSO（Floating Production Storage and Offloading：浮体式洋上生産施設）、一般商船からメ

ガフロートのような構造物まで多岐に亘り、対象に応じてそれぞれ試験手法が異なる。

本論文では、その中から実施頻度の高い水槽試験を幾つかピックアップして、当所の海洋構造物試験水槽でどのような試験が行われ、活用されているのかを紹介する。

2. 海洋構造物試験水槽の概要

海洋構造物試験水槽は長さ40m、幅27.1m、深さ2mの角水槽である。水槽底面がフラットなため、水深を浅くすることで、浅水域を対象にした試験も容易に実施することが出来る。海洋構造物試験水槽の外観と仕様を写真-1及び表-1に示す。

海洋構造物試験水槽は、長さ方向に稼働する主台車（最大速度2.0m/s）と幅方向に稼働する走行副台車（最大速度1.5m/s）及び固定副台車を備えている。また、走行副台車及び固定副台車にはターンテーブルが装備されている。

模型の時々刻々の位置や姿勢に関する制御信号

* 海洋部門
原稿受付 平成21年 6月22日
審査済 平成21年 7月29日



写真-1 海洋構造物試験水槽

表-1 海洋構造物試験水槽の仕様

長さ	40.0m
幅	27.1m
深さ	0～2.0m
造波装置	フラップ式 最大波高：0.3m 周期：0.3～3.0 秒
潮流発生装置	最大流量：824m ³ /分
風発生装置	固定副台車に設置 最大風速：7.0m/s（10 連式） 10.0m/s（3 連式）

を外部から入力することで、主台車、走行副台車及びターンテーブルを組み合わせて、模型に任意の水平面運動を与えることが出来る。内部の制御モードとしては、操縦性能試験で用いる PMM (Planar Motion Mechanism) 試験や OTT (Oblique Towing Test)、CMT (Circular Motion Test) 用のプログラムが組み込まれており、操縦運動時の船舶に働く力を計測する場合などに使用される。更に、写真-2 に示すように、自動追尾モードも装備されており、船舶の自由航走試験を行う際に、模型上のターゲットを追尾用カメラで捉えて、台車を模型に追尾させながら位置計測を行うことが可能である。

海洋構造物試験水槽にはフラップ式の造波装置が装備されており、周期 0.4～3.0 秒、最大波高 0.3m の規則波及び不規則波を造波することが出来る。また、潮流発生装置も装備されており、最大流量 824m³/分の潮流（順流及び逆流）を発生させることが出来る。風発生装置は、写真-3 に示す 2 種類を所有しており、いずれも固定副台車に設置し、ターンテーブルと風発生装置の首振り用ヒンジを組み合わせることで、任意の角度から模型に風を当てることが可能となる。10 連式風発生装置の幅は 4.8m であり、広い範囲に風を当てたい場合に使用する。最大風速（風発生装置から 2m 離れた点で計測）は 7m/s

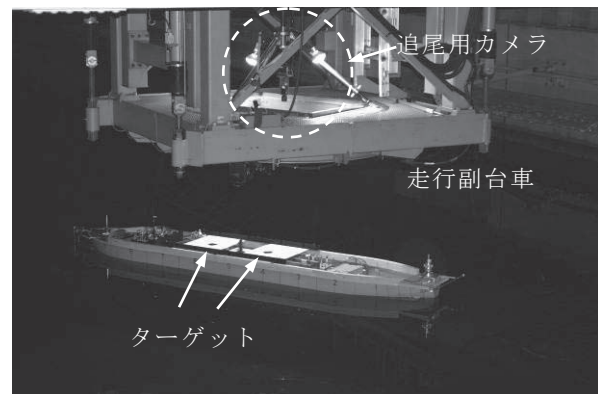
写真-2 自動追尾による位置計測¹⁾

写真-3 風発生装置

である。一方、3 連式風発生装置は、送風帯は狭いが噴出し口に縮流洞が備わっているため、発生可能な風速が大きく、最大 10m/s（10 連式と同様に風発生装置から 2m 離れた点で計測）まで送風させることが可能であり、台風等による荒れた条件を模擬することが出来る。

3. 海洋構造物試験水槽における要素試験

海洋構造物、船舶等の浮体に働く波や潮流による力及び波の中での運動を調べたい場合、浮体周りの流場を観測したい場合など、ある特定の現象について個別に計測を行う場合には要素試験を実施する。この章では、海洋構造物試験水槽で行われる要素試験をいくつか紹介する。

3.1 波強制力・潮流力計測試験

海洋構造物あるいは船舶の模型を検力計(3分力計や6分力計)を介して固定副台車や走行副台車に治具で固定する。波強制力計測の場合は造波装置で規則波や不規則波を造波させ、模型に働く波の力を計測する。潮流力計測の場合は、模型を拘束したまま潮流の流速に相当する速度で主台車を使って曳航し、模型に働く力を計測する。波や潮流の入射角を変化させたい場合は、模型を拘束している走行副台車あるいは固定副台車のターンテーブルを所定の角度に回転させて計測を行う。

写真-4は潮流力計測の様子である。通常1隻の模型を対象とすることが多いが、写真に示す試験の場合、対象としているのは2隻の模型船で、それぞれ模型中央部に3分力計を設置して走行副台車に固定している。写真に示す状態のまま主台車で曳航し、各模型に働く前後力、横力、回頭モーメントを計測するが、後方の模型の場合、前方にある模型の後流中に位置するため、計測した力には、前方にある模型の遮蔽影響が含まれる。一般に、遮蔽影響の有無により船体に働く力が大きく異なることが知られており、このような試験を通して外力データベースの拡充を行い、外力推定法の開発に活用している。

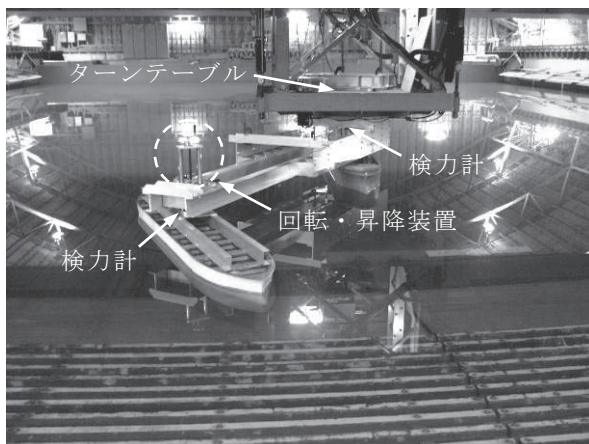


写真-4 潮流力試験 (2浮体の場合)

3.2 波漂流力計測試験

波強制力計測試験と同様に模型を拘束して検力計で計測する方法と、弱いばねなどで模型の運動(surge、sway、yaw)に復原力を与え、ウェイト

を用いて波漂流力と釣り合う位置で模型が運動するようにウェイトの重さを調整することで波漂流力の大きさを計測する方法とがある。その他に、線形ばねで模型を係留し、波浪中で模型を実際に漂流させることで、線形ばねの伸び(模型の定常漂流量)から波漂流力の大きさに換算する方法もある。模型の運動を拘束しない場合には、模型内部にジャイロ等を設置することで、波浪中における動揺を計測することが出来る。

3.3 操縦流体力計測試験

操縦運動時の船体に働く流体力を求める方法として、理論的に推定する方法や模型試験を実施して計測する方法、データベースから推定する方法が挙げられる。模型試験を実施する場合には、検力計を介して模型船を台車に拘束する。主台車と走行副台車、ターンテーブルを組み合わせることで(例えば、内部制御プログラムのOTT、CMTモードを使用することで)、模型船に斜航や旋回運動を与えながら曳航させ、操縦運動中に船体に働く力を計測することが出来る。

写真-5に計測試験の様子を示す。通常、3分力計を用いて水平面の3分力(前後力、横力、回頭モーメント)を計測し、旋回運動時は模型船と検力計の遠心力成分を補正することで、流体力成分のみを求める。写真に示す試験では、船体のpitch、heave、roll運動を自由にし、船体に働く力に加えて舵に働く直圧力と抵抗、プロペラ推力も同時に計測している。

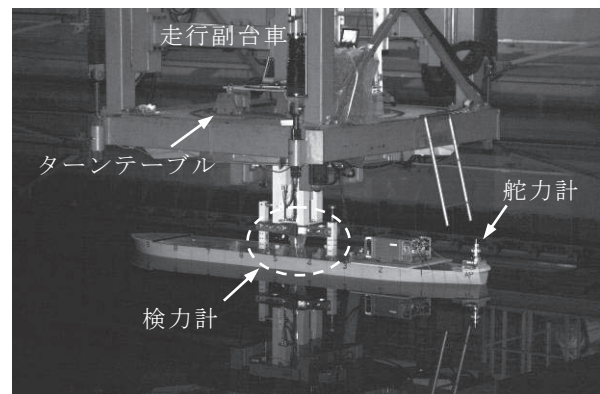


写真-5 操縦流体力計測試験 2)

3.4 後流場計測試験

船舶の操縦性能を評価する場合、船体に働く操縦流体力を精度良く推定する必要がある。3.3節で紹介した模型試験を実施して、直接計測する方法もあるが、理論的に推定を行う場合には、数学モデル構築の前段階で船体周りの流場の様子を正確に把握しておくことが重要となる。特に船尾付

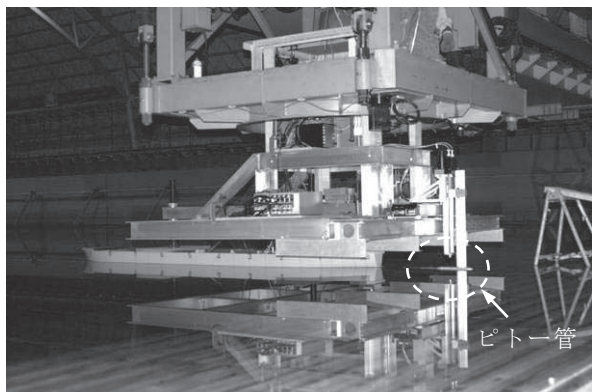


写真-6 ピトー管による船尾流場計測 3)

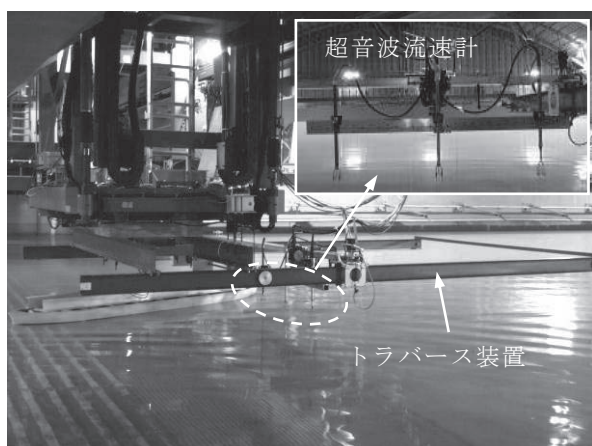


写真-7 超音波流速計による後流場計測

近に発生する剥離渦が流体力の傾向に大きな影響を及ぼすため、模型船を拘束した状態で斜航あるいは旋回運動させ、写真-6 に示すようにピトー管を用いて船尾断面の流速を計測する。その結果を用いて船尾断面における伴流分布や渦度分布を求める。

また、海洋構造物や船体の後流場を広く計測したい場合には、流速計を用いてメッシュ状に後流場の流速計測を行い、代表深さにおける流速分布を得ることが出来る。写真-7 は、平水中で模型船を拘束状態で斜航曳航し、船体後方の流場を 3 本の超音波流速計を用いて計測した様子である。計測深さは模型船の浮心位置とし、船体後方に設置したトラバース装置を用いて超音波流速計を一定間隔で稼働させながら流速計測を行い、船体後方の流速分布を求めた。

4. 海洋構造物試験水槽における総合試験

前章では、海洋構造物試験水槽で実施している要素試験をいくつか紹介したが、風、波、潮流の複合環境条件を作り出し、実際の海のような環境の下で総合試験を実施することも出来る。

この章では、過去に著者らが実施した総合試験⁴⁾を一例紹介する。

4. 1 背景

東南アジアやオセアニアに多い比較的小規模なガス田では、天然ガスをハイドレート (Natural Gas Hydrate; NGH) に変換して輸送するシステムが優位性を発揮する可能性が高い。NGH 輸送では、FPSO を設置し、天然ガスを洋上で直接ハイドレート化して輸送船 (以下、シャトルタンカー) に出荷する方法が有力な開発概念と考えられている。

著者らは、平成 15 年度から 3 ヶ年計画で東南アジア・オセアニア海域の中小規模ガス田開発を対象とした NGH-FPSO 用タンデムオフローディング装置の研究開発を行った^{4), 5)}。この研究開発では、三井造船 (株) 等において考案された NGH をペレット化して払い出すシステムを対象として、安全性と稼働性能、経済性を評価した。本論文では、海洋構造物試験水槽で実施した模型実験を含むオフローディング装置の稼働性能評価に係る部分を紹介する。

4. 2 オフローディング装置の概要

開発したオフローディング装置の全体図を図-1 に示す。オフローディング装置は、水平及び垂直コンベヤシステム、NGH をシャトルタンカーへ受け渡すための蛇腹式のシューター及び NGH-FPSO に対するシャトルタンカーの長周期振れ回り運動によるシューターの変形を吸収するための旋回装置から構成される⁵⁾。

オフローディング装置の稼働性能を評価する際に影響を及ぼすと考えられる相対上下変位並びに相対水平変位に対して、それぞれ許容値を設定した。相対上下変位の許容値 (シューターの伸縮幅) は、当所で実施した本オフローディング装置の機構模型試験⁶⁾及び NGH-FPSO とシャトルタンカーの動揺試験結果⁷⁾を基に 24.5[m]とした。また、相対水平変位の許容値は、旋回装置の最大旋回角が $\pm 45[\text{deg}]$ であることと、オフローディング装置に対するシューター接合部の首振り角を考慮して $\pm 7\text{m}$ とした。

4. 3 総合試験

当所の海洋構造物試験水槽において、風、波、潮流の複合環境条件下における総合試験を行い、シューターの相対上下変位並びに 2 浮体の長周期振れ回り運動等の計測を行った。

総合試験の様子を写真-8 に、NGH-FPSO 及びシャトルタンカーの主要目を表-2 に示す。水槽試

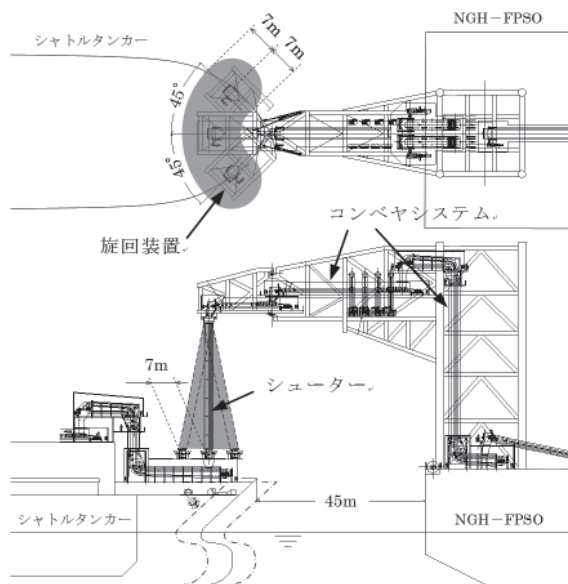


図-1 タンデムオフローディング装置

表-2 主要目

	NGH-FPSO	シャトルタンカー
LPP	300.0m	285.0m
B	60.0m	46.0m
D	33.0m	24.5m
d	16.0m	14.5m

表-3 試験条件

水深	225m
風	風速：15m/s (オフローディング条件) 風向：0～90deg. 30deg.刻み
波	不規則波 スペクトル形：JONSWAP 有義波高：4m (オフローディング条件) 平均波周期：7～15秒 1秒刻み 入射角：0deg.
潮流	流速：1.2m/s (オフローディング条件) 流向：0deg.

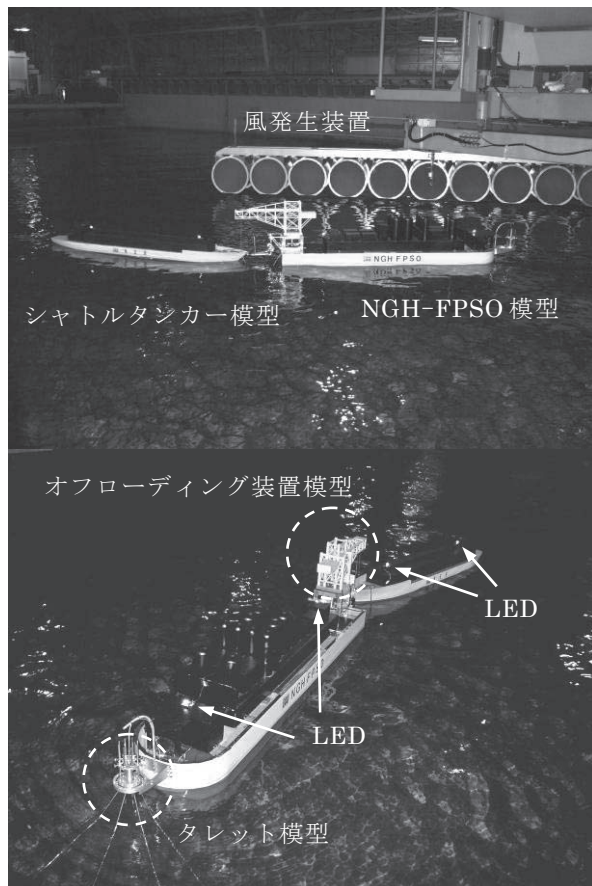


写真-8 複合環境条件下による総合試験

験では、1/150 スケールの模型を用いた。浮体の重心位置やメタセンタ高さ、慣動半径は、それぞれ実機に対し2.6%以下の誤差に抑えた。また、試験条件を表-3に示す。但し、表中の値は全て実機スケール

である。

本試験では、計測用ケーブルが模型の運動に及ぼす影響を極力排除するために、当所で開発した船体内臓型のコードレス計測システムを採用しており、写真-8に示すとおり模型上部に模型の運動を拘束するケーブルは一切出していない。計測項目及び計測システムの詳細については参考文献⁸⁾を参照して頂きたい。

NGH-FPSO 模型は、写真-8に示すように水槽底からステンレスのチェーンで係留したタレット模型に係船されており、自船が受ける力が最小となるように、タレット周りに自由に回転できるようになっている。また、オフローディング装置模型を写真-9に示す。ポテンショメーターによりNGH-FPSO 模型とシャトルタンカー模型の相対上下変位（シューターの伸縮幅に相当）を計測した。また、NGH-FPSO 模型のデッキ上に設置したレーザー変位計で船体に対する係船装置の前後方向変位を計測した。

NGH-FPSO 模型とシャトルタンカー模型を結合する係船装置は、ヨーク式係船装置と緊張ワイヤー式係船装置の2種類を用いた。ヨーク式係船装置は写真-9に示すように、船尾に吊り下げられた重錘とその先に三角形の係留用部材で構成されており、重錘の重量により復原力を生み出す。緊張ワイヤー式係船装置は当所等で新たに提案した係船装置で、図-2に示すようにウインチ機構で課せられる適切な初期張力とワイヤーロープ自身の張力特性により大きな復原力を生み出すことを特徴としている。緊張ワイヤー式係船装置は現在特許申請中であり、原理と特性の詳細については、

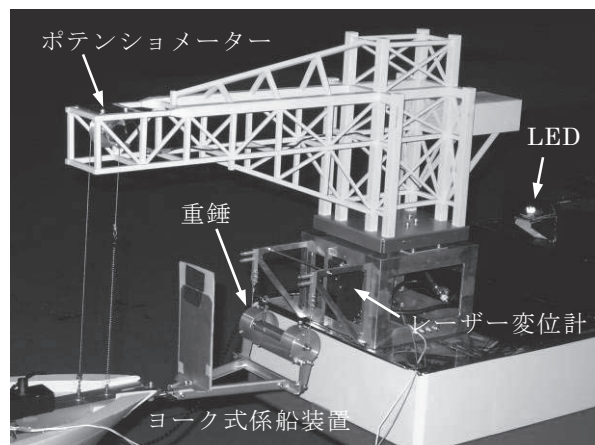


写真-9 オフローディング装置模型

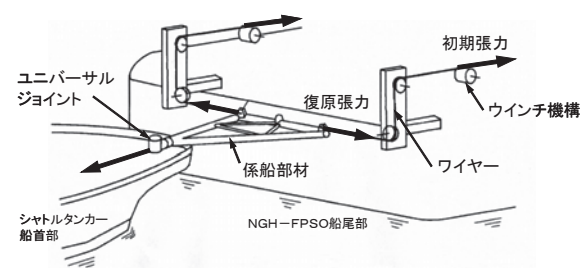


図-2 緊張ワイヤー式係船装置の概要

参考文献 4)を参照して頂きたい。

NGH-FPSO 模型とシャトルタンカー模型の水平面運動は、浜松ホトニクス株式会社製の計測ユニットを使用した。水面から高さ 7.7m の位置に焦点距離 f が 8mm の広角レンズを付けた CCD カメラを設置し、6m 四方の画角を確保した。画面内を白黒に 2 値化し、2 隻の模型のデッキ上 2 箇所（船首部と船尾部）に設置した白色 LED の面積中心を自動追尾して X、Y 座標をリアルタイムで計測した。また、光ファイバージャイロを模型船内に設置して船体の動揺を計測した。

4.4 オフローディング装置の稼働性能評価

波、風、潮流の相対的な向きの変化など、水槽試験で実施できない海象条件も含めてオフローディング装置の稼働性能を評価するため、当所で開発した計算プログラム^{9),10)}を使用した。いずれも 4.3 節で述べた水槽試験の結果と比較し、その精度を確認したものである。計算で使用する環境外力については、当所で実施した風洞・水槽試験¹¹⁾の結果をデータベース化¹²⁾して用いた。図-3 に長周期振れ回り運動の航跡を比較した一例を示す。上図が総合模型試験における計測結果、下図が数値計算で求めた航跡であり、両者の一致度は比較的良好であることが分かる。他の条件についても同様の精度であった。

24 時間同じ平均波周期、有義波高の波浪が継続し

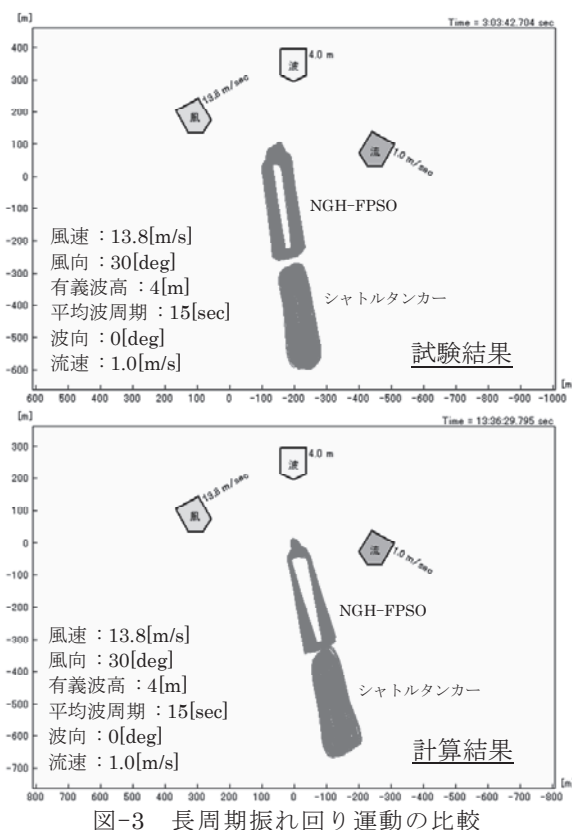


図-3 長周期振れ回り運動の比較

ているという仮定のもと、シューターの相対水平変位の 24 時間中最大値の期待値を計算した結果、風向 0[deg]、波向 60[deg]、流向 0[deg]の条件が最も厳しかった。この環境外力の組み合わせに対して長期波浪頻度表を用いて許容値を超える確率を求め、稼働率を算定した。算定結果の一例を図-4 に示す。図はヨーク式係船装置と緊張ワイヤー式係船装置を用いた場合の相対水平変位に対する稼働率算定結果である。稼働率の算定条件として、有義波高は 1~11m、平均波周期は 4~15 秒までの範囲を対象とした。図中の細い白線は想定設置海域における長期波浪頻度を表し、太い白線は許容値 (7m) を表す。また、相対水平変位の 24 時間中最大値の期待値を色分けして示している。

オフローディング条件である有義波高 4m 以下では、ヨーク式係船装置を用いた場合の平均稼働率は 74.6%、緊張ワイヤー式係船装置を用いた場合は 100%であった。ここで、オフローディング計画に基づき出荷の頻度を 10 日に 1 回とし、予備日は 2 日という運航条件を考慮すると、最終的にヨーク式係船装置を用いた場合の平均稼働率は 93.6%となる。なお、相対上下変位については、いずれのケースにおいても許容値を超えることは無く (平均稼働率 100%)、オフローディング装置の稼働率に及ぼす影響としては、相対水平変位の

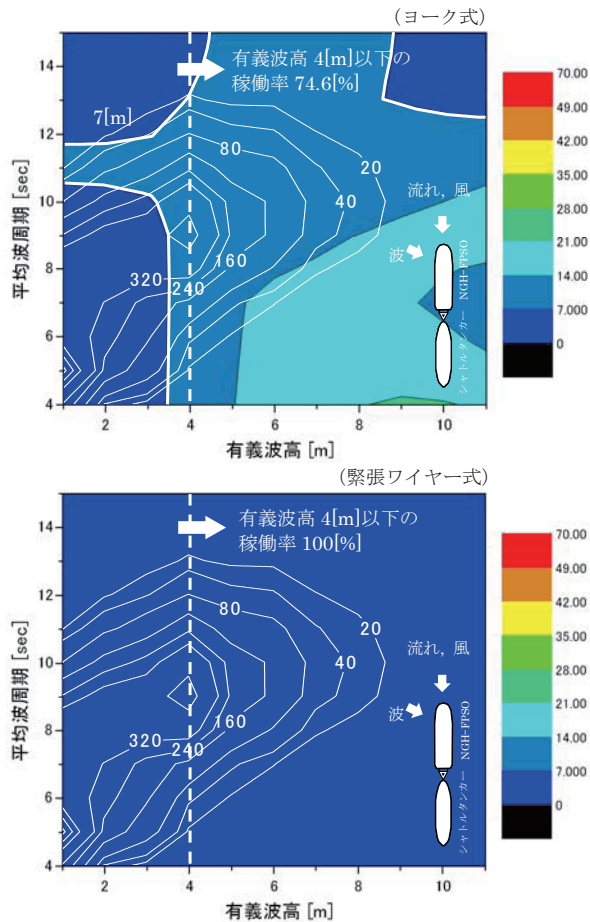


図-4 相対水平変位に対する稼働率算定結果

方が厳しいことが分かった。

その後、HAZID (Hazard Identification) による安全性評価を実施し、基本設計において安全上の重大な問題が無く、開発の継続が妥当であることが確認されたため、NK (日本海事協会) より基本承認 (AIP: Approval in Principle) を取得した。

5. 計測精度の向上を目指して

前述した総合試験で使用した CCD カメラと LED ターゲットの組み合わせで位置計測を行う場合、広い画角を得るためには広角レンズを使用することになり、歪みの修正や画角に対する分解能の問題など、苦勞する点が多い。そこで当所では、位置計測精度の向上を図るため、平成 18 年度に Metris 社製の室内 GPS を導入した (写真-10)。人工衛星の代わりとなる送信機から赤外線がパルス状に発信され、受信機側で送信機に対する相対方位と相対高さを計算し、位置座標に変換する。受信機から最低 2 基以上の送信機が見える場合に、3 次元座標の計測が可能となる。



写真-10 室内 GPS

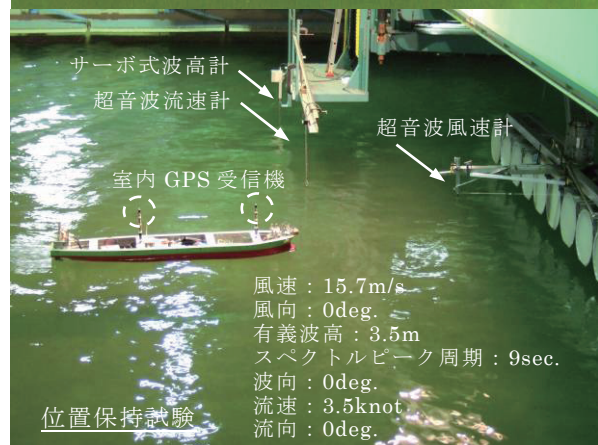


写真-11 自由航走試験と位置保持試験

このシステムを使用する主なメリットは、

- (1) 送信機は可搬式であり、様々な場所で使用できる。
- (2) 送信機から受信機までの距離が 40m まで離れていても位置計測が可能。
- (3) 赤外線を使用するため、カメラの画角やピクセル数に制限されることなく、高精度な位置計測が可能。

ということである。デメリットは GPS と同様に

障害物により送信機が隠れる（センサー側から送信機が見えない）とデータが欠損することであり、実験を行う場合には、送信機の設置位置と曳航台車等の位置に注意を要する。

室内 GPS は、これまで海外を中心に静止体の位置計測に使用されるケースが多く、例えば航空機等の製造過程において、ボディー形状やジグの変形、部品の位置を正確に把握するために使われてきた。当所では、国内で始めて海洋構造物や船舶などの浮体の運動計測に適用した。導入前に送信機 2 台（必要最低台数）を用いて評価試験（センサーの強制動揺試験）を実施したところ、計測誤差は最大 2.5mm であった。平成 20 年度には、船首部に 3 基のトンネル型スラスタと船尾部に 2 基の POD 推進器を有するタンカー模型を対象とした自由航走試験（旋回試験及び Zigzag 試験）や風、波、潮流の複合環境条件下における位置保持試験で使用し、水槽試験に適用可能であることを確認した（写真-11）。

6. おわりに

本論文では、当所が所有する海洋構造物試験水槽の概要とそこで行われる水槽試験をいくつか紹介した。各種要素試験に加えて、風、波、潮流の複合環境条件下における総合試験を実施出来ることは、海洋構造物試験水槽の売りであり、また、2～3m 程度の比較的小さな模型を用いて精度の良い計算結果を取得する実験技術は当所の強みである。今後も行政要望や海事業界からのニーズに幅広く対応し、質の高い結果を提供出来るよう取り組んで行きたい。

謝辞

NGH-FPSO のオフローディング装置開発に関する研究は、競艇交付金により日本財団の援助を受けて海洋政策研究財団が行う技術開発基金の補助金により実施されたものであり、関係各位に謝意を表する。

また、自由航走試験及び位置保持試験は、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) とブラジル国営石油公社 (PETROBRAS) との共同研究に係る JOGMEC からの委託研究として実施させて頂いた。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 上野道雄他：台車自動追尾による自由航走模型船の波浪中 6 自由度船体運動計測手法の研究、海上技術安全研究所報告 海上技術安全研究所 8 巻 1 号 (2008)、pp.23-49
- 2) 宮崎英樹他：CFD による操縦運動する船体・舵・プロペラ周りの流場と流体力の実用的推定法の開発、第 5 回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集 (2005)、pp.149-152
- 3) 宮崎英樹他：操縦性能推定のための定常旋回流場の CFD 計算、第 6 回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集 (2006)、pp.23-26
- 4) 湯川和浩他：NGH-FPSO 用タンデムオフローディング装置の開発、日本船舶海洋工学会 論文集 (2007)、pp.99-106
- 5) 三井造船 (株)：NGH-FPSO (天然ガスハイドレート洋上生産設備) の開発 - オフローディング装置の開発 -、平成 15,16,17 年度研究開発報告書 (2004, 2005, 2006)
- 6) 難波康広他：NGH-FPSO 用オフローディング装置の開発 - 浮体動揺を再現した搬送模型試験 -、第 4 回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集 (2004)、pp.93-98
- 7) 正信聡太郎他：複合環境条件下でのオフローディング装置の稼働性評価、第 5 回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集 (2005)、pp.43-46
- 8) 浅沼貴之他：2 浮体間を結ぶ係船装置の性能評価 - コードレス計測システムの開発 -、第 6 回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集 (2006)、pp.279-282
- 9) 加藤俊司他：高次元境界要素法による FPSO 波力、流体力、動揺計算プログラム (著作権登録番号 P 第 7704 号-1) (2003)
- 10) 浅沼貴之：複合環境外力下における 2 浮体挙動シミュレーションプログラム (2006)
- 11) 佐藤 宏他：NGH-FPSO に関する風洞・水槽実験、第 5 回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集 (2005)、pp.285-288
- 12) 浅沼貴之他：FPSO とシャトルタンカーに作用する複合環境外力推定法に関する研究、第 5 回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集 (2005)、pp.47-52