# 水槽試験技術のスマート化

下田 春人\*,川島 英幹\*,一ノ瀬 康雄\*,辻本 勝\*

## **Advanced Tank Testing Technology**

by

## SHIMODA Haruhito, KAWASHIMA Hideki, ICHINOSE Yasuo and TSUJIMOTO Masaru

## Abstract

This paper reports on our endeavors to make the tank testing technology smarter. The following two topics are examples of improvement of the measurement accuracy and tank testing efficiency. One is the implementation of automatic operation and measurement system in the Mitaka No.3 Ship Model Experiment Tank. Another is the improvement of the measurement accuracy by introducing the synchronous control system in the Mitaka No.2 Ship Model Experiment Tank. In order to respond to the more complicated technical research issues, we have begun studying the enhancement of functions to the Super 400m Ship Model Experiment Tank, and the outline of the plan is reported.

## 目 次

1.	はじめに ・・・・・18
2.	三鷹第三船舶試験水槽における自動運転・自動計測試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・18
3.	三鷹第二船舶試験水槽同期制御システムによる水槽試験の高精度化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
4.	スーパー400m 水槽構想・・・・・22
5.	まとめ・・・・・・23
謝	辞
参	考文献 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••

#### 1. はじめに

数値計算技術の進展,実船からのモニタリングデータの利用や,人工知能等の発展により船舶性能の推定にデ ジタル技術が導入されてきている.一方,水槽試験は,物理計測を行う手段であることから,結果への信頼性は 高いものの,水槽試験に係る費用や工数は非常に大きなものとなっている.このため,水槽試験技術に対しても スマート化への取り組みは非常に重要である.

水槽試験技術のスマート化への取り組みとして、当所ではレーザー技術を用いた流場計測,波浪計測やライン CCDを用いた3次元計測等の試験法開発に取り組んできた<sup>1)</sup>.物体と流体との屈折率を同じにして物体の内部流 場を観測する屈折率整合技術<sup>例えば2),3)</sup>の研究開発の他,水槽試験の品質管理のために重要となる水槽環境の調査<sup>4)</sup> や非定常流中の不確かさ解析<sup>5)</sup>などの検討も行っている.試験の繰り返し精度向上のために当所の動揺試験水槽 (水槽長 50m,幅 8m、深さ4.5m)で曳引車-造波機-計測機を同期させた自動計測システムを構築し<sup>6)</sup>,非常

に高い繰り返し精度を確認している.

本稿では三鷹第三船舶試験水槽での自動運転・自動計測の実施,三鷹第二船舶試験水槽での曳引車ー造波機ー 計測機の同期制御システムの導入による計測の高精度化について報告する.なお,自動計測システムはこの他に も実海域再現水槽(水槽長 80m,幅 40m、深さ 4.5m)にも導入し<sup>7</sup>,運用している.そして,一層高度となる技 術課題に対応していくため,スーパー400m水槽への機能強化の検討を開始しており,その概要を紹介する.

#### 2. 三鷹第三船舶試験水槽における自動運転・自動計測試験

曳引車を使用した水槽試験では自動運転・自動計測システムを適用することにより、曳引車の加減速のタイミング、試験装置の駆動時間、計測区間および時間を厳密に管理した試験が可能となる.そこで、三鷹第三船舶試験水槽(以下中水槽:水槽長150m,幅7.5m、深さ3.5m)において、塗膜などの摩擦抵抗を評価する手法である 平行平板曳航試験(平行平板曳航装置の写真を図2.1に示す.)<sup>8</sup>を対象に、自動運転・自動計測試験を実施し、 過去に行った手動運転・手動計測による計測結果<sup>9</sup>との比較することにより、計測精度を評価した.



図 2.1 平行平板曳航装置

#### 2.1 自動計測システム

中水槽の自動運転システムは、曳引車の走行を、産業用機器やロボットとコンピュータ等を相互接続して、FA システムを構築するためのネットワークプロトコルであるFL-netを介して曳引車駆動コントローラと相互に通信 を行うことで制御している.一方、自動計測システムには、アナログ入出力(AI/O)、デジタル入出力(DI/O)を備え ており、デジタル出力を用いて、平行平板曳航装置に内蔵されているクランプ装置の開閉の制御を行っている. そのため、曳引車の走行、クランプ開閉、データ収録の一連の動作を自動計測システムからの指令のみで実施で きる.

本自動運転を用いて実施した平行平板曳航試験では、アナログ入力を用いて左平板抵抗、右平板抵抗、左上水 温、左下水温、右上水温、右下水温の計測を行った.一例として、平行平板曳航試験での自動運転・自動計測シ ステムの概要図を図 2.2 に示す.



図 2.2 中水槽自動運転・自動計測システムの概要(平行平板試験)

#### 2.2 計測シーケンス

計測シーケンスを事前に構成し、自動運転・自動計測システムに入力することにより自動運転・自動計測シス テムによる試験が可能となる.一例として、平行平板曳航試験に必要な曳引車の走行、クランプ開閉、データ収 録の計測シーケンスを図 2.3 に示す.なお、図中、\*印部分で繰り返しとなり、900 秒後に、0 秒時点に戻り運転・ 計測が繰り返される.時間間隔の記載が無いところは、台車の加減速などを決めれば、自動的に決まる時間や、 試験者が設定する時間である.



図 2.3 中水槽自動計測システムの計測シーケンス(平行平板試験)

# 2.3 平行平板曳航試験による自動運転・自動計測試験の結果

計測精度を評価するために、平行平板曳航装置の左右両方に同一仕様の無塗装平板を設置し摩擦抵抗を計測し、 左右平板の摩擦抵抗の差を複数回計測し、計測毎の変化によるばらつきを評価した.平板の摩擦抵抗係数につい て、10回分の計測値における全抵抗値を基準にした左右平板の全抵抗値の差のばらつき幅(ばらつきの最大値と 最小値の差)、左右差のばらつきの標準偏差を図2.4に示す. Test number 1~8が、手動運転・手動計測の結果で あり、Test number 9 が自動運転・自動計測の結果である.自動運転・自動計測による結果は、ばらつきの幅、標 準偏差供に、全ての手動運転・手動計測の結果より小さくなっており、計測精度が向上していることが分かる. これは、自動運転・自動計測システムの導入により、曳引車の出発位置加減速の状態、定速運転時間、クランプ 開閉のタイミング、計測区間が厳密に一定となり、計測毎の条件の変化が小さくなったためである.



図2.4 左右平板の摩擦抵抗係数のばらつきと標準偏差

#### 3. 三鷹第二船舶試験水槽同期制御システムによる水槽試験の高精度化

水槽試験の再現性の向上による高精度化を目的として,三鷹第二船舶試験水槽(以下 400m 水槽:水槽長 400m, 幅 18m、深さ 8m)の曳引車,造波機,計測機器の3つ全ての同期制御を実施した.構築したのは図 3.1 に示すシ ステムであり,制御 PC 上に構築されたプログラムから曳引車,造波機,計測機器に対して制御信号を送ること で,3つの機器を完全に同期させることが出来る.



図 3.1 400m 水槽同期システム(左:制御 PC,右:システム構成)

同期制御システムの有効性を確認するため、従来の計測員による手動計測では再現性の確保が比較的困難で あった波浪中抵抗増加試験に対して本システムを適用してシステムの有効性を調査した.

入射波及び抵抗値の時系列をそれぞれ図 3.2 及び図 3.3 に示す. 波形が一致しており,同期制御システムの効果は非常に高く,入射波および波浪中抵抗値は時系列のレベルにおいても高い再現性が確認された.

次に,波浪中抵抗値の複数周期を時間平均して得られる(1)式で定義される波浪中抵抗増加係数(K<sub>AW</sub>)を図 3.4 に示す.

$$K_{AW} = \frac{R_{AW}}{4\rho g \zeta_a^2 \left. B^2 \right/_L} \tag{1}$$

ここで、 $R_{AW}$ :規則波中抵抗増加量、 $\rho$ :密度、g:重力加速度、 $\zeta_a$ :入射波振幅、L:船幅、B:船幅である. 図 3.4 に示す通り 4 回の波浪中抵抗増加係数 ( $K_{AW}$ )の計測値が重なっていることからも、本同期制御システムによる高い再現性が分かる.

以上により、同期制御システムによる 400m 水槽試験の再現性の向上による水槽試験の高精度化を確認した.



図 3.2 400m 水槽同期システムを用いて計測した入射波の時系列の比較(4 航走)



図 3.3 400m 水槽同期システムを用いて計測した波浪中抵抗値の時系列の比較(4 航走)





# 4. スーパー400m 水槽構想

水槽試験の自動化により品質管理の下での高精度計測,試験効率の向上が実現される.一方,近年の計測技術の進展により,従来の点計測から面計測に移行してきており,曳航水槽でも PIV (Particle Image Velocimetry:粒子画像流速測定法)による流場計測<sup>例えば10,11)</sup>や FBG (Fiber Bragg Grating:ファイバブラッググレーティング) センサによる同時多点での船体表面圧力計測が進められている<sup>例えば12,13</sup>.

研究所に求められる技術課題も一層高度なものとなりつつあり、従来の技術では計測困難であった低速状態の 船舶性能の推定、実海域実船性能の推定等に対し、曳航水槽でも面計測による流場情報量の活用を図り、CFD

(Computational Fluid Dynamics:数値計算力学)等の数値計算や実船計測データとの融合,同化技術を構築していく必要がある.

このため、当所で定めた長期ビジョン<sup>14</sup>でも実海域性能の水槽技術・計算技術による推定、水槽試験の世界一の技術拠点を目標に掲げ、新たな計測手法により計測データによる船舶の運航診断や設計への反映が可能となるよう取り組みを進めている.

この中で,400m水槽を高機能化し,世界最先端の計測・評価技術を提供できるよう,スーパー400m水槽への 機能強化を検討している.

スーパー400m 水槽では、自動運転・自動計測システムに自動解析システム及び状態監視システムを追加する ことにより、状態異常による計測エラーや安全性を判断する.これにより自律運転を伴った無人化試験を可能と する. 模型船をトリミングタンクに入れた後は、ロボットを導入したトリミングタンクにて喫水・センター合わ せの他、喫水・トリム変更、プロペラ脱着を自動で行い、連続運転により試験効率を向上させる.

また,病院でのCT (Computed Tomography:コンピュータ断層撮影)検査のように,曳引車に設置された PIV 装置が曳航中の模型船に対して前後方向に移動することにより,曳航中の模型船まわりの流場を自動計測する. 水中から上方にレーザーをシート状に照射し,シートを通過するトレーサを装置左右の水中カメラで撮影するイ メージを図 4.1 に示す.本装置は平水中だけで無く非定常流場での計測も可能であり,波浪中抵抗増加,自航要 素変化の分析,評価も可能である.

PIV により計測された流場は CFD による流場計算と同化させることで,CFD 評価の高精度化が可能となり, この水槽試験と組み合わせた高精度 CFD により船舶の性能悪化の評価や船型改良方針の策定が可能となる.船型 情報は3D プリンターと組合せることで改良船型製作の時間が短縮でき,速やかな意思決定が行える.

さらに,実船モニタリングデータのフィードバックを受けることにより高精度 CFD の実船スケールでの推定精 度が向上し,最終的には実海域性能を向上させる船型開発が可能となる.



図 4.1 スーパー400m 水槽での PIV 計測イメージ (左:曳引車上から模型船船尾を見る、右:水中から模型船船首部を見る)

#### 5. まとめ

水槽試験技術のスマート化への取り組みとして、2つの事例を紹介した.

三鷹第三船舶試験水槽での平行平板曳航試験を対象に,自動運転・自動計測を実施した結果から,手動で計測 した場合に対してばらつきが小さくなり計測精度が向上していることを示した.これは自動運転・自動計測シス テムの導入により,曳引車の出発位置加減速の状態,定速運転時間,クランプ開閉のタイミング,計測区間が厳 密に一定となり,計測毎の条件の変化が小さくなったためである.

三鷹第二船舶試験水槽に同期制御システムを導入し、従来の計測員による手動計測では再現性の確保が比較的 困難であった波浪中抵抗増加試験に対して本システムを適用し、高いレベルで計測値が一致することを示し、シ ステムの有効性を確認した.

ー層高度となる技術課題に対応していくため検討を開始している,スーパー400m水槽への機能強化について, その概要を紹介した.

#### 謝 辞

2.3 節の内容は、中国塗料株式会社との共同研究「船舶用塗料に起因する船底摩擦抵抗に関する研究開発」の 一部として実施しました.

## 参考文献

- 1) 星野邦弘: <u>第1部: 水槽試験および実船の計測技術について</u>, 第75回実海域推進性能研究会 (2017), pp.1-10.
- 2) 濱田達也,星野邦弘,川並康剛:<u>屈折率整合技術の水槽試験への応用-水槽の中で模型を見えなくする-</u>, 平成 27 年度(第15回)海上技術安全研究所研究発表会講演集(2015), pp. 190-191.
- 3) 濱田達也,大場弘樹,辻本勝:<u>屈折率整合技術の水槽試験への応用-省エネダクト内部の詳細流場計測法の</u> 開発-,平成 30 年度(第18回)海上技術安全研究所研究発表会講演集(2018), pp.208-209
- 4) 後藤英信,深澤良平,牧野雅彦,若生大輔,辻本勝:船舶試験水槽における曳航試験のための水温均一化と 評価,実験力学, Vol.19, No.3 (2019), pp. 215-220.
- N. Sogihara, M. Tsujimoto, Y. Kasahara, R. Fukasawa and T. Hamada: Application of Uncertainty Analysis for Measurement of Added Resistance in Regular Short Waves, Proc. of 18th International Conference on Ships and Shipping Research (2015), pp. 92-102.
- 6) 辻本勝,沢田博史,谷澤克治,星野邦弘:<u>動揺試験水槽同期制御システムによる計測の再現性</u>,平成17年度 (第5回)海上技術安全研究所研究発表会講演集(2002),pp.293-294.
- 7) 黒田麻利子, 辻本勝, 星野邦弘: <u>実海域再現水槽の計測自動化について</u>, 第 75 回実海域推進性能研究会 (2017), pp.1-10.
- 8) 川島英幹, 堀利文, 牧野雅彦, 竹子春弥: 平行平板曳航法による塗装面の乱流摩擦抵抗計測, 日本マリンエ ンジニアリング学会誌, 第47巻第5号 (2012), pp. 7-12.
- 9) 川島英幹, 濱田達也, 拾井隆道, 牧野雅彦: 平行平板曳航法による摩擦抵抗評価の精度, 日本船舶海洋工学 会講演会論文集, 第21号 (2015), pp. 323-326.
- L. Gui, J. Longo and F. Stern: Towing tank PIV measurement system, data and uncertainty assessment for DTMB Model 5512, Experiments in Fluids, Volume 31(2001), pp. 336-346.
- 大場弘樹,星野邦弘,辻本勝:マイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測法の開発-船舶試験水槽での適用と検証-,海上技術安全研究所報告,第19巻第1号(2019), pp.91-100.
- 12) 若原正人,谷上明彦,新郷将司,中島円,深沢塔一,金井健:FBGを用いた表面貼付型多点圧力センサの開発-第1報 圧力測定法とセンサ性能-,日本船舶海洋工学会論文集,第7号(2008), pp.1-7.
- 13) 福島寛司,若原正人,金井健:改良型 FBG 圧力センサの性能確認とその活用,日本船舶海洋工学会講演会 論文集,第25号 (2017), pp. 143-148.
- 14) 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:<u>海上技術安全研究所の長期ビジョン-</u> 2030年に海技研が目指す姿-,海上技術安全研究所ホームページ(2019), pp. 15-24.