PS-28 高速滑走艇の水槽試験と CFD 解析

海洋開発系 *長谷川 賢太、石田 圭、荒木 元輝、佐藤 宏、湯川 和浩 防衛装備庁陸上装備研究所 上村 圭右、齊藤 翔太、佐野 了也

1. はじめに

平成 30 年度に締結した研究協力協定の下に、当所は防衛 装備庁陸上装備研究所(以下,陸装研)が進めている車両用 多種環境シミュレータの研究開発に協力している¹⁾.同シミ ュレータは、従来の陸上だけでなく珊瑚礁等が存在する

水際 や水上といった水陸両用車等の行動範囲における様々な環 境下での、各種車両の操縦性や安全性、機動力の性能予測と 分析を可能にすることを目的としている. 令和2年度は, 同 シミュレータで取り扱う新たな浮体として高速滑走艇を対 象に加え,検討を行った.高速滑走艇は船首尾のフラップと 船体底面に働く揚力を利用して浮上することで没水体積及 び浸水表面積を減らし、高速航走を可能にしている. 速度変 化に伴い船体の姿勢が変わることで抵抗値や推進性能が大 きく変化するため、本研究ではこの特徴に注目し、平水中及 び波浪中での自由曳航試験や拘束曳航試験により直進航走 時における船体の運動特性の把握と流体力データの取得を 行った.また,CFD 解析により平水中における船体周りの流 場や船体に作用する荷重の評価を実施し、水槽試験結果と比 較することで精度検証を行った.

2. 水槽試験

平水中及び波浪中航走時の姿勢や運動,抵抗を計測するために自由曳航試験,そして航走時の姿勢変化に伴う船体に作用する流体力を計測するためにHeave量とPitch角,曳航速度をパラメータとする平水中拘束曳航試験を実施した.試験条件は曳航台車や計測機器の仕様に基づき,曳航速度がフルード数 Fn=V/(gL_{PP})^{0.5}=0.03-1.8,波条件が向かい波の波高Hw=0.05 m,周期 Tw=1.1-2.3 sec の範囲で実施した.なお,V,g,L_{PP} は航走速度,重力加速度および垂線間長を表し,本論文で記載する数値は全て模型スケールとする.

水槽試験用模型の重心位置を原点とし,船首方向と鉛直下 向きをそれぞれ x 軸と z 軸の正方向とする右手系直交座標系 を定義する.船長船幅比 (L_{PP} /B)が2.5の高速滑走艇を想定 し,水槽試験では船体を簡易的な幾何学形状で模擬した模型 を用いた.また,米国の EFV²⁾ (Expeditionary Fighting Vehicle)を参考に,前方には高速航走時に水面を滑走するた めの大型フラップ(ヒンジを介した2枚構造),後方には航 空機の水平尾翼がPitch方向の安定性を与えるように,滑走 時の姿勢を安定させるための小型水平フラップを設置した.

自由/拘束曳航試験では、模型に作用する抵抗及び運動の 計測が可能な曳航試験装置を使用した.本装置は模型の各運動(Heave 及びPitch, Roll)を個別に拘束あるいは解放する 機構を持ち、装置に内蔵の検力計とポテンショメータにより 抵抗及び運動を計測できる.本装置の回転中心と模型の浮心 前後位置を一致させ、曳航点が推進器のインペラシャフト軸 の高さと合うように上下位置を調整し、曳航台車へ設置し た.また、高速度カメラにより定速へ至るまでの船体の姿勢 変化や安定航走時の状態、船体周りの自由表面を記録した.

図-1 に高速度カメラで撮影した平水中航走時の様子を示 す.速度の上昇に伴い浮上量が増し、前方フラップや模型前 方で造られる波が後方にまで及ぶ様子が分かる.図-2には平 水中における無次元抵抗係数 C_R と平衡姿勢(Heave 量及び Pitch角)のフルード数 Fn に対する変化を示す.船体に作用 する抵抗 R は次式を用いて無次元化した.ただし、式中の ρ は流体密度、又は排水容積を表す.

$$C_R = R / \left(0.5\rho \overline{\nabla_3^2} V^2 \right) \tag{2.1}$$

抵抗係数は Fn が 0.8 付近でピークを迎え, その後, 速度 の増加とともに小さくなる. Heave 量は, 低速航走時にはほ ぼゼロであり, Fn が 0.6 を超えると浮上し, 試験を行った最 大の Fn=1.8 における Heave 量は喫水の 71%に達した. 抵抗と Heave 量の推移を比べると, 船体が浮上するに従い抵抗値は 減少している. この主な要因として, 船体の浸水表面積の減 少による摩擦抵抗成分の減少, 没水体積の減少による造波抵 抗成分の減少が考えられる. Pitch 角は前進速度の増加に伴 い大きくなり, Fn が 1.2 付近でピークを迎えた後に減少す る. 平水中においては, Fn が 1.2 より大きい範囲で航走する ことで, 船体は浮上するとともに, Pitch 角と抵抗を同時に 小さく抑えることが可能となる.

平水中及び波浪中の自由曳航試験から得られた平衡姿勢 ならびに,波浪中の自由曳航試験から得られた運動振幅をFn で整理すると図-3の傾向を示す.実施した試験条件において は平水中と波浪中の平衡姿勢に大きな差は生じなかった.ま た,それらを包含するように図中に示す3本の破線を設定し





図-4 抵抗係数の変化(中央縦方向の点線は平衡姿勢を示す)

た. それぞれを平衡姿勢に近い Middle 値, 振幅の上限と下限 に少し余裕を持たせた Upper 値と Lower 値とし, Fn 毎に Heave 量及び Pitch 角の Upper, Middle, Lower 値の組み合わせを 系統的に変化させ,運動を全て拘束した状態で曳航すること により,模型に作用する荷重(Fx, Fz, My の3分力)を計測 した.取得データは、今後陸装研の車両用多種環境シミュレ ータへ反映させるために次式で無次元化し,航走速度毎の Heave 量と Pitch 角の組み合わせに関する荷重データベース として整理した.ただし、式中のd は喫水深さを表す.

 $C_{Fx,Fz} = F_{x,z} / (0.5\rho L_{\rm PP} dV^2)$ $C_{My} = M_y / (0.5\rho L_{\rm PP}^2 dV^2)$ (2.2)

また,得られた荷重データベースから,Fnが1.2及び1.5 の場合における Heave 量及びPitch 角自身と相互の連成荷重 係数を図-4 に示す.実線と破線は計測結果を 2 次関数で Fitting した線である.平衡姿勢から船体の姿勢が変化した 場合でも,姿勢を元に戻す方向に(復原力として)力が作用 しており,高速時でも不安定な振動等が発生せず,安定した 航走が可能であることが分かる.

3. CFD 解析

本所で開発された有限体積法ベースの構造格子用非定常 RANS ソルバーNAGISA を使い,重合格子法にて滑走時の抵抗 と船体周りの自由表面流れの解析を行った.実施した自由曳 航試験の最大速度に相当する Fn=1.8 を対象とし,非常に大 きな Fn において安定して計算を行うため,壁関数³⁾を用い て壁面の最小格子間隔を y⁺=50-200 程度に調節した.重合格 子で作成した計算格子の格子点総数は両舷で約 390 万点であ る.

Heave と Pitch を自由にした非定常直進計算の結果と自由 曳航試験で得られた結果との比較を表-1 に示す. Pitch 角, Heave 量は CFD と水槽試験でよく一致しているが,全抵抗係 数の差が大きくなった. CFD の全抵抗係数の括弧内は,船体 前面の前後流体力を差し引いた場合の値である. CFD 解析で

CFD 水槽試験 誤差 [%] 全抵抗係数×10 ⁻² [] 7.85 6.28 +25.0 (6.97) (+11.0) Pitch角[deg] 6.52 6.13 +6.4 Heave量[m] -0.176 -0.179 -1.7	表一I GFD 解析と水槽試験の比較				
全抵抗係数×10 ⁻² [−] 7.85 6.28 +25.0 (6.97) (+11.0) Pitch角[deg] 6.52 6.13 +6.4 Heave量[m] −0.176 −0.179 −1.7 Fn=1.8, CFD		CFD	水槽試験	誤差 [%]	
(6.97) (+11.0) Pitch角[deg] 6.52 6.13 +6.4 Heave量[m] -0.176 -0.179 -1.7 Fn=1.8, CFD Fn=1.8, 水相試験	全抵抗係数×10 ⁻² [−]	7.85	6. 28	+25.0	
Pitch角[deg] 6.52 6.13 +6.4 Heave量[m] -0.176 -0.179 -1.7 Fn=1.8, CFD Fn=1.8, X指試験 Fn=1.8, X指試験		(6.97)		(+11.0)	
	Pitch角[deg]	6.52	6.13	+6.4	
Fn=1.8, CFD	Heave 量 [m]	-0.176	-0. 179	-1.7	
	Fn=1. 8, CFD		Fn=1. 8,	水槽試験	

図-5 高速滑走時における船体周りの自由表面の比較

は計算格子の製作における都合上,船体と前方フラップの間 に水槽模型には存在しない小さな隙間を設けているため,そ こから流体が流れ込み船体前面に流れが当たることになる. この本来作用しないと考えられる船体前面の流体力を差し 引くと,CFDの全抵抗係数も模型試験の結果に近づく.

図-5 に側面から見た船体周りの自由表面の様子を自由曳 航試験で得られたものと併せて示す. コンターは,全長で無 次元化した自由表面の高さを表す. CFD と水槽試験の双方で, 図-1 (Fn=0.9以上)において見られるような前方フラップに よる船体前方への造波が小さく,更に船体側面の波の巻き上 がりが船体後部で船体上面近くまで達しており, CFD 解析に より水槽試験で得られた船体周りの自由表面をよく再現で きていることが分かる.

4. まとめ

高速滑走艇の縮尺模型を対象にした水槽試験とCFD解析を 実施し,水槽試験により平水中及び特定の波浪条件下での直 進航走時における船体の運動特性の把握と流体力データの 取得を行い,CFD解析では平水中の高速直進時に対する非定 常計算の有効性を示した.得られた結果は陸装研の車両用多 種環境シミュレータへ反映され,新たな対象物として高速滑 走艇を取り扱うことができるようになる.

今後、同シミュレータにおいてより厳しい海象条件下での 運動特性等を評価するために、水槽試験と CFD 解析を併用し てデータを蓄積していくことが必要となる.また、滑走時に 水面上へ車体の露出が増えることで風から受ける影響も大 きくなるため、車体に作用する風荷重の評価なども重要にな ると考えられる.

参考文献

1) 大坪和久,他:水陸両用車に作用する流体力及び波浪外力 に関する研究,令和2年度(第20回)海上技術安全研究所研 究発表会 講演集(2020), pp.121-122.

2) Burrow, J., et al.: Concept Exploration of the Amphibious Combat Vehicle, Proc. of the SNAME Maritime Convention (2014), pp.1-16.

3) Ohashi, K., and Hino, T.: Numerical study on the applicability of wall function models for the flows around an appendage attached to a body, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition (2012), pp. 1-11.