

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14262

研究課題名(和文) 災害支援への対応が可能となる水陸両用バスの研究

研究課題名(英文) Studies on amphibious bus with high performance on water to assist disaster recovery

研究代表者

鈴木 和夫 (Kazuo, Suzuki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80111699

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：災害支援への対応が可能となる水陸両用バスを目標として、その船体部形状の流体力学的性能に関する基礎的な検討を行う。バス形状は直方体に近いため水陸両用バスの水上性能は通常の船舶に比べて著しく低い。その船体部について船型学的な検討を行うことにより、水上性能の向上を期待することができる。本研究では、(1) 船首形状に関する研究、(2) 車輪の抵抗影響に関する研究、という2つの研究を実施する。そのため、船首形状が変更できる船体部全体模型と車輪まわり部分模型を製作して回流水槽試験を実施したが、(1)についてはCFDに基づく数値計算による評価も行い、いずれも水中抵抗低減に関する知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of the development of an amphibious bus to assist disaster recovery, fundamental studies on its performance of water resistance are carried out in the present report. As a conventional bus has an almost rectangular shape, its propulsive performance on water is much less than those of general ships. In order to improve the performance on water, (1) investigations on water resistance for 3 types of bow shape and (2) investigations on flow around wheels and their effects on water resistance are carried out by means of model experiments in a circulating water channel and CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations. Through both investigations, valuable information has been obtained for the hull form design of amphibious bus.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：災害支援 水陸両用バス 水上性能 水槽試験 CFD

1. 研究開始当初の背景

本研究では、災害支援への対応が可能となる水陸両用バスを目標として、その船体部形状と流体力学的性能に関する基礎的な検討を行う。日本では、観光用水陸両用バスが数か所で運行されているが、いずれも水上性能は低く、水域も河岸や湖岸の近くに限定されており、海上航行をしているケースは稀である。従って、水上性能の向上が達成できれば、観光用水陸両用バスを災害時の脱出や輸送の手段として利用することが可能になると考えられる。例えば、海上や河川を迂回ルートとして、道路が寸断されている地域との往復ができれば、人や物を積み替えることなくスムーズな支援が可能になる、また、水深が浅い場所での座礁の危険性が通常の船よりも低く安全な輸送が可能になる、など従来とは異なったメリットを持つ災害支援ができると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、バスの水面上部(運転席・客室)については従来のバスとほぼ同じ形状を踏襲するものとし、水面下の形状について下記のような検討を行い、水上性能の向上を目指したい。具体的には、現在国内で運用されている水陸両用バスの最高速度は5 knot 程度の場合が多いので、目標速力を7 knot とする。検討内容は、・船体部全体概要模型(主船体模型)による流れおよび抵抗特性の把握、および・車輪まわり部分模型による流れおよび抵抗特性の把握、とする。いずれも回流水槽における模型実験を実施するが、全体模型については計算流体力学(CFD)による数値計算による検討も行う。

3. 研究の方法

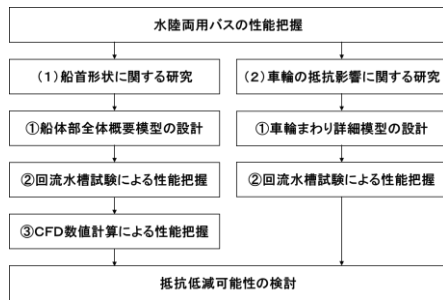


Fig. 1 研究フロー概要

水陸両用バスの場合には、直方体の形状を大きく変化させて浸水面積を小さくするという方法をとることは困難である。また、バス周りの流れは乱流域に達しているため、摩擦抵抗を大きく低減させる手法も適用できない。一方、造波抵抗と粘性圧力抵抗に関しては改善の余地が大きいと考えられる。バスは船舶と比較して幅広であり、肥大船に近い形状をしているからである。従って、本研究では大別して、(1) 船首形状に関する研究、(2) 車輪の抵抗影響に関する研究、という2

つの研究を実施する。各研究のフローを Fig. 1 に示す。なお、車輪の抵抗影響に関する研究においても、CFD に基づく数値計算による評価を行うことが望ましいが、車輪周りの格子生成は難易度が高いため、本研究では回流水槽試験のみにより評価を行う。

4. 研究成果

4.1 船首形状に関する研究

4.1.1 船体部全体模型の設計

水陸両用バスを国内で運用するためには自動車と船舶の両方の安全基準を満たす必要がある。従って、船舶安全法をはじめとする通則に留意しながら船首形状の異なる3種類のバスの基本設計を行った。設計のモデルとしてトラック車両 ISUZU SKG - FSS90S2 をベースとして水陸両用バスに改良することを見込み、船首形状が異なる3種類のバス形状を設計した。船底が平滑な Basic 型、船底が丸みを帯びた Round 型、船底は平滑であるが三角形状の Triangle 型の3種類である。各主要目を Table.1 に示す。水面下のみの形状を変化させているため、全長、幅、型深さは全て等しいが、浸水面積や排水量は異なっている。模型は1/9スケールの1m模型としており、主要目を Table 2 に示す。

Table 1 水陸両用バス主要目

要目	実車	実車		
		Basic	Round	Triangle
全長	L_{pp} [m]	9.00		
幅	B_{wl} [m]	2.48		
型深さ	D [m]	3.73		
喫水	d [m]	1.10		
浸水面積	S [m ²]	36.30	35.62	34.98
排水量	∇ [m ³]	15.27	14.78	14.61
方形係数	C_b	0.622	0.602	0.595

Table 2 模型主要目

要目	模型	模型		
		Basic	Round	Triangle
全長	L_{pp} [m]	1.00		
幅	B_{wl} [m]	0.28		
型深さ	D [m]	0.41		
喫水	d [m]	0.12		
浸水面積	S [m ²]	0.448	0.440	0.432
方形係数	C_b	0.622	0.602	0.595

模型は船首側と船尾側の分割模型となっており、船首側は Basic 型、Round 型、Triangle

型の 3 種類の形状が交換可能となっている。模型の全体形状を Photo. 1 および Photo. 2 に、3 種類の船首形状を Photo. 3 に示す。船首側は Photo. 3 に示したように、左から Basic 型、Round 型、Triangle 型の 3 種類の形状があり、それぞれ交換可能となっている。全形状に乱流促進のためのスタッドが取り付けられている。



Photo. 1 模型側面



Photo. 2 模型上面



Photo. 3 船首模型底面

4.1.2 回流水槽試験による性能把握

上記の模型について回流水槽を用いた水槽実験を実施する。実験に使用した回流水槽「V2-15AD」の概要は、・形式：2 インペラ方式垂直循環型、・最大流速：1.0m/s、・観測部：長さ 2.50m×幅 1.20m×水深 0.60m である。模型は中央部の曳航ロッドおよび船首と船尾の曳航ガイドを用いて回流水槽に設置され、トリムフリーとして曳航ロッドに接続されているロードセルを用いて全抵抗を計測する。模型を回流水槽に固定した時の様子を Photo. 4 に示す。

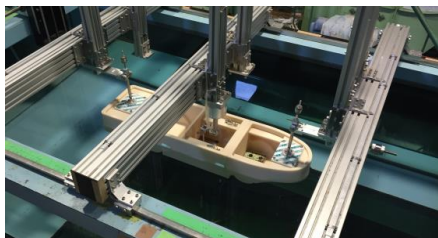


Photo. 4 回流水槽に設置した全体模型

試験流速は $U_m = 0.3 \sim 1.0$ [m/s] で 0.05 [m/s] 間隔の 15 速度であり、フルード数は $F_n = 0.096 \sim 0.319$ である。バスの水上での目標速度は 7 [knot] でありフルード数 $F_n = 0.383$ に相当するが、回流水槽の性能を考慮してこの速度範囲としている。なお、フルード数およびレイノルズ数はそれぞれ以下の式で定義される。

$$F_n = \frac{U}{\sqrt{gL}}, \quad R_n = \frac{UL}{\nu}$$

ただし、 U は一様流速(船速)、 L は船長、 g は重力加速度、 ν は動粘性係数である。

解析に用いる記号は、各記号に模型スケールには m を、実車スケールには s を添え字とすることで区別する。実験で得られた全抵抗 R_m を浸水面積 S ベースで無次元化するため全抵抗係数 C_m は次式で定義される。

$$C_m = \frac{R_m}{\frac{1}{2} \rho U_m^2 S}$$

実験に基づく全抵抗係数を、フルード数に対して示すと Fig. 2 のようになる。

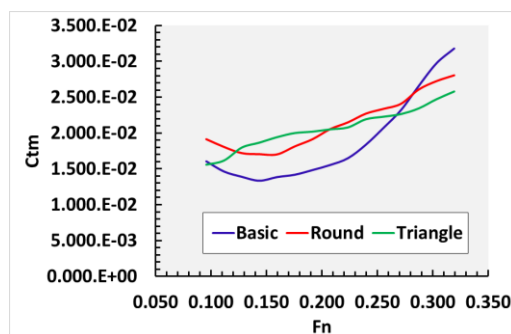


Fig. 2 模型全抵抗係数

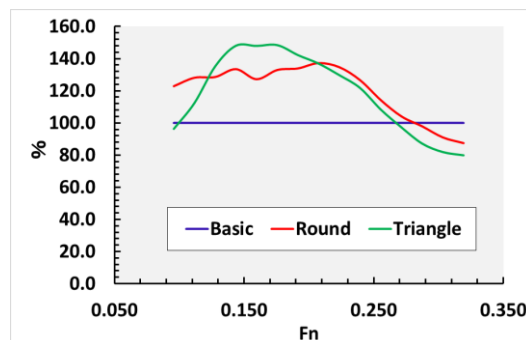


Fig. 3 実車全抵抗低減率

次に実車スケールの全抵抗係数 C_{ts} をフルードの方法(2次元外挿法)により求める。剰余抵抗係数 C_r は次式により求められる。

$$C_r = C_m - C_{f0m}$$

平板摩擦抵抗係数 C_{f0} は以下の Schoenherr の式を用いて求める。

$$\frac{0.242}{\sqrt{C_{f0}}} = \log_{10}(R_n C_{f0})$$

実車の場合には、水温 15°C の海水の動粘性係数および密度を用いてレイノルズ数を求め、平板摩擦抵抗係数 C_{f0s} を求める。さらに実車の全抵抗係数 C_{ts} は表面粗度による摩擦抵抗は考慮せず粗度修正 $\Delta C_f = 0$ として、次式より算出する。

$$C_{ts} = C_r + C_{f0s}$$

得られた実車スケールの全抵抗係数を Basic 型に対する比として Fig. 3 に示す。

以下に、これらの実験結果に基づく考察を示す。まず、Fig. 2 の全抵抗係数の図より、フルード数の増加に伴い全抵抗係数は形状ごとに異なる挙動を示すことが確認される。Basic 型と Round 型はフルード数 $F_n = 0.150$ 付近で最小となり、Triangle 型は単調増加をしている。なお、低フルード数では Round 型がやや大きい値を示すが、低フルード数の範囲ではこの形状のみ実験値にバラつきが見られた。フルード数 $F_n = 0.300$ 付近までは Basic 型の値が最も小さいが、フルード数 $F_n = 0.300$ を超えると大小関係は Triangle 型 < Round 型 < Basic 型となっている。Fig. 3 から、高速域において Round 型と Triangle 型の有用性が示されているが、 $F_n = 0.250$ 以下では Basic 型の方が抵抗性能は優れているという結果になっている。

4.1.3 CFD 数値計算による性能把握

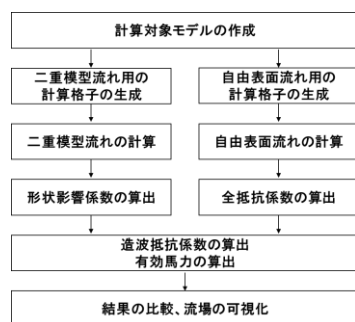


Fig. 4 CFD 計算手順

次に各形状について Fig. 4 の手順により CFD 数値計算を行う。二重模型流れ解析用および自由表面流れ解析用の格子を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。また自由表面と車輪近傍の格子細分化の様子を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。それぞれの計算格子の格子数と計算領域は二重模型流れで 140 万前後、自由表面流れの場合には 250 万~280 万程度である。

CFD 計算には海上技術安全研究所で開発された非構造格子対応の粘性流体解析ソフト SURF (Solution algorithm for Unstructured RaNS with FVM) を使用する。支配方程式は疑似圧縮性を導入した 3 次元非圧縮性レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式と非圧縮性流体の連続の方程式である。この二つの支配方程式を時間的・空間的に離散化して数値解を求める。

CFD 計算では、実験結果と比較するため実験時相当のフルード数 F_n および模型スケールのレイノルズ数 R_n を用いて計算を実施する。計算流速は模型スケールの $U_m = 0.3 \sim 1.0$ [m/s] で 0.1 [m/s] 間隔の 8 速度であり、フルード数は $F_n = 0.096 \sim 0.319$ である。流体は清水とし、水温 15°C の密度と動粘性係数を用いて計算を行う。姿勢変化については回流水槽試験の際にはトリムフリーであるが、数値計算ではトリム固定(even keel)の条件で計算を実施している。また、乱流モデル

には k- ω SST を用いる。計算条件をまとめた表を Table 3 に示す。

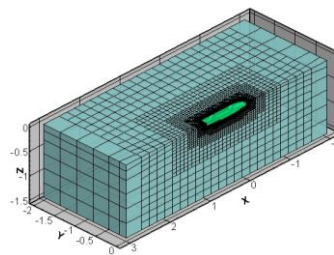


Fig. 5 二重模型流れ解析用格子

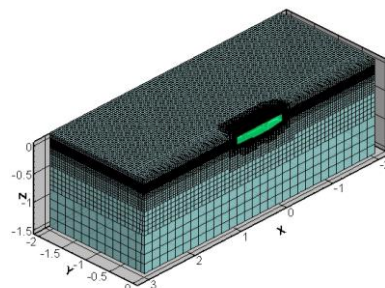


Fig. 6 自由表面流れ解析用格子

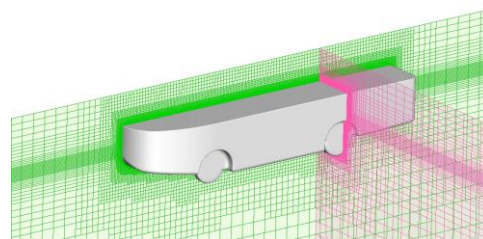


Fig. 7 自由表面の格子細分化

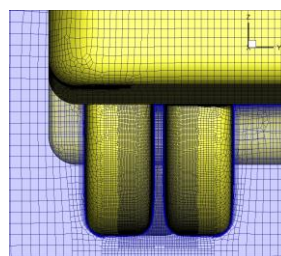


Fig. 8 車輪近傍の格子細分化

Table 3 計算条件

解析対象流	二重模型流	自由表面流
計算ソルバー	SURF 6.43	
水温 [°C]	15	
フルード数 F_n	0	0.096~0.316
乱流モデル	k- ω SST	
格子	非構造格子	
自由表面モデル	-	レベルセット法
トリム	固定	

次に計算結果を示す。横軸をフルード数 F_n 、縦軸を CFD 計算により得られた全抵抗係数 C_m とした図を Fig. 9 に示す。

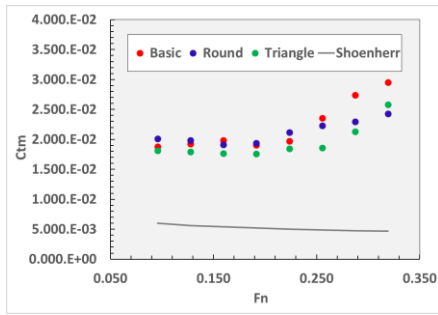


Fig. 9 全抵抗係数 (CFD)

次に実車スケールの全抵抗係数を算出する。添え字 DM は二重模型流れの結果、FS は自由表面流れの結果とすると、形状影響係数 K および造波抵抗係数 C_w は以下のように求められる。

$$1 + K = \frac{C_{t-DM}}{C_{f0m-DM}} \quad C_w = C_{t-FS} - (1 + K)C_{f0m-FS}$$

平板摩擦抵抗係数 C_{f0} の算出には実験時と同様に Schoenherr の式を用いる。さらに粘性圧力抵抗係数 C_{vp} を次式により求める。ただし、 C_p は圧力抵抗係数である。

$$C_{vp} = C_{p-FS} - C_w$$

これにより全抵抗係数 C_t を摩擦抵抗係数 C_f 、造波抵抗係数 C_w 、粘性圧力抵抗係数 C_{vp} に分離することができる。以上のような抵抗成分分離手法により求めた、フルード数 0.319 における抵抗成分の比較例を Fig. 10 に示す。

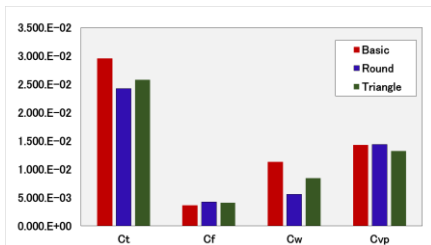


Fig. 10 抵抗成分の比較 ($F_n = 0.319$)

最終的に、実車スケールの全抵抗係数 C_{ts} はヒューズの方法(3次元外挿法)を用いて次式のように求められる。

$$C_{ts} = (1 + K)C_{f0s} + C_w$$

得られた実車スケールの全抵抗係数を、水槽実験と同様に、Basic 型に対する比として表した図を Fig. 11 に示す。

Fig. 9 より、低フルード数の場合には全ての形状で全抵抗係数にほとんど変化はないが、フルード数 $F_n = 0.20$ を超えたあたりから増加に転じている。大小関係についてはフルード数 $F_n = 0.319$ の場合を除くと Triangle 型が最も小さく、 $F_n = 0.319$ の場合のみ Round 型が小さい。この全抵抗係数の増加は Fig. 10 の例のように造波抵抗係数の増加によるものと考えられ、摩擦抵抗係数と粘性圧力抵抗係数については、フルード数の増加に伴う大きな変化は見られない。さらに、Fig. 11 より

Triangle 型はフルード数によらず Basic 型よりも全抵抗係数は小さいが、Round 型はフルード数によって Basic 型と比較した時の大小関係が異なっている。なお、実験と CFD では低減率の傾向に差があるが、これは実験時の模型の船長が 1 m と短いこと、バス形状に対する CFD 格子生成が難しいこと、によるものと考えている。ただし、いずれにしても実験時と同様に高フルード数では、Round 型と Triangle 型の方が抵抗性能は良いと結論づけることができる。

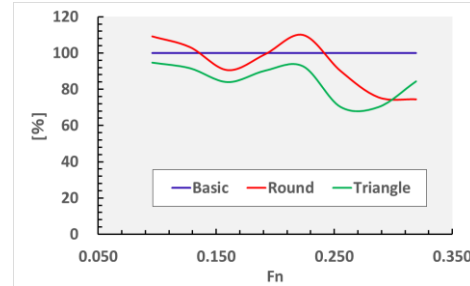


Fig. 11 実車全抵抗低減率 (CFD)

4.2 車輪の抵抗影響に関する研究

水陸両用バスの船底の部品の中でも特に抵抗の原因になると考えられる車輪まわりの流れに着目し、抵抗への影響を評価する。

4.2.1 車輪まわりの詳細模型の設計

車輪をのぞく車両の一番低い部品から地上までの距離を Fig. 12 のように地上高さ H と定義し、これを小さくし車輪の前後の空間を埋めて渦の発生を防ぐことで粘性圧力抵抗の低減効果があるか抵抗試験を行うことで検証する。

地上高さは小さくなるにつれ走行安定性が失われるため、陸自法により最低地上高さ H は 90 [mm] 以上と定められている。これを考慮した上で、 H が異なる車輪まわりの詳細模型を用いた回流水槽実験を行う。

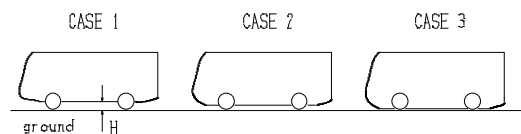


Fig. 12 最小地上高さ



Photo. 5 模型全体

本研究では車輪まわりの抵抗特性の把握等を目的とした模型を製作している。1 軸の片側に 2 個のタイヤを装着したダブルタイヤ構造の部分模型となっており、模型は水面の

影響を小さくする目的で、横向きのバスの模型をストラットで吊るして固定する。さらに実験精度を高めるために、トラック天井部分を対象面とする対称模型とした。模型の写真を Photo. 5 に示す。さらに、厚みの異なる2種類の付属カバーを組み付けることにより、3 ケースの地上高さ H で実験を行うことができる。また、車輪部模型とストラットは取り外しが可能になっており、ストラットのみ抵抗を計測することにより、車輪部の抵抗を算定することができるようになっている。実験ケースは、カバーをつけない状態を BARE として、COVER1 と COVER2 を取り付け状態の実験をそれぞれ実施する。各ケースにおける実車相当の最小地上高さは BARE で 485 mm、COVER1 で 295mm、COVER2 で 105 mm となる。例として VCOVER1 の模型形状を Photo. 6 に、各模型の要目を Table 4 に示す。



Photo. 6 COVER1

Table 4 部分模型要目

CASE	BARE	COVER1	COVER2
全長 L [mm]	726		
幅 B [mm]	360	398	436
型深さ D [mm]	480		
浸水面積 S [mm ²]	6.66x10 ⁵	7.07x10 ⁵	7.50x10 ⁵
外径 [mm]	97		
断面幅 w [mm]	23		
複輪間隔 t [mm]	29		

4.2.2 回流水槽試験による性能把握

実験に用いた回流水槽は 4.1 船首形状に関する研究で用いたものと同じ水槽である。模型を回流水槽に固定した時の様子を Photo. 7 に示す。

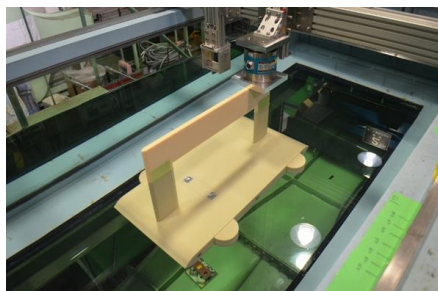


Photo. 7 模型を水槽に設置した様子

回流水槽の設定流速 U_m は 0.3~0.9 [m/s] であり 0.1 [m/s] 間隔の計 7 速度とする。実験手順としては、最初にストラットのみ抵抗を

測定し、その後模型を組み付け Table. 4 に示した全 3 ケースの抵抗試験を実施する。

実験により得られた各ケースの全抵抗 R_{tm} からストラットのみ抵抗 R_{strut} を差し引いた抵抗を無次元化することで全抵抗係数 C_t を算出する。本実験では各ケースにおいて全長 L は変わらないが浸水面積 S が異なるため、全長 L ベースで無次元化した $C_t(L)$ と浸水面積 S で無次元化した $C_t(S)$ の 2 通りで全抵抗係数を算出した。

$$C_t(L) = \frac{R_{tm} - R_{strut}}{\frac{1}{2} \rho U_m^2 L^2} \quad C_t(S) = \frac{R_{tm} - R_{strut}}{\frac{1}{2} \rho U_m^2 S}$$

ただし、ここでは縦軸を全抵抗係数 $C_t(S)$ 、横軸をレイノルズ数として各ケースの比較をした結果を Fig. 31 に示す。

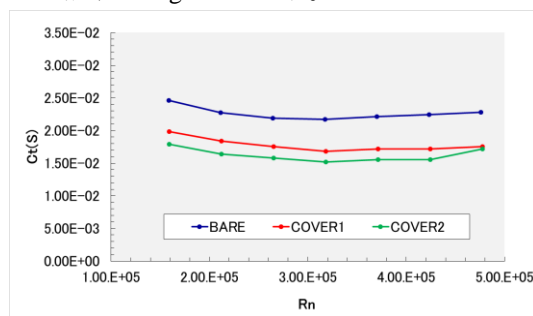


Fig. 13 全抵抗係数 (浸水面積ベース)

Fig. 13 より、カバーをつけた場合の方が抵抗係数は小さくなり、カバーの厚みが大きい (相当地上高さが低い) ほど、低減効果大きいことが確かめられる。レイノルズ数に関わらず、おおよそ 10~15% の低減効果がある。ストラットの抵抗の除いているため造波抵抗が働いていないとすると、実際には模型に摩擦抵抗と粘性圧力抵抗が働いている。浸水面積が BARE < COVER1 < COVER2 の大小関係であるため、摩擦抵抗も BARE < COVER1 < COVER2 となっていると考えられる。しかし、全抵抗係数の大小関係は逆であるため、カバーをつけることで粘性圧力抵抗が大きく低減されているものと考えられる。CFD 計算結果の可視化から、後方には剥離渦が発生しているため、この渦の発生を抑制したことによる低減効果であると推定できる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① 平野夏実(研究当時研究室院生)、水陸両用バスの車輪まわりの抵抗低減に関する実験、第 150 回(2015) 回流水槽研究会、防衛大学校
- ② 平野夏実(研究当時研究室院生)、回流水槽実験による水陸両用バスの船首形状の検討、第 151 回(2016) 回流水槽研究会、横浜国立大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 和夫 (SUZUKI KAZUO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80111699