側壁型 ACV の水上推進性能について (第2報)*
 On the Propulsive Performance of a Sidewall
 ACV Model over Calm Water (Part 2)

佐 藤 義**・村 尾 麟 一***
 Tadashi SATO, Rinichi MURAO,
 井 亀 優**・北 村 文 俊**
 Masaru IKAME and Fumitoshi KITAMURA

Abstract

An explanation of the drag characteristics of a Sidewall Air Cushion Vehicle is proposed based on the towing tank tests of an ACV model.

The simple model with the flat plate sidewalls has been chosen so that the measured drag can be easily broken down into its components.

It is found that the trim of a craft plays a remarkable role in the drag reduction, as well as the cushion pressure which was focused on our first report. The trim depends on the both wave pattern which is formed by the cushion pressure, and also the additional moment which is adjusted by the ballast and the thrust line.

It is shown that the trim exerts primarily skirt drag and indirectly wave pattern drag. Namely, inadequate trim causes the scooping action by the rear skirts which results in increase of skirt drag at the secondary hump speed ($F_n = 0.38$). When the scooping action by rear skirts is observed, wave pattern drag is reduced relatively, because wave is broken down.

The mechanism of drag reduction due to trim adjustment can be explained by the interaction of these factors.

The wetting area of sidewalls and skirt drag depend on FROUD Number, cushion pressure, sidewall depth, cushion air gap and trim. The estimation of the wetting area and skirt drag is reached according to experimental data.

1. ま え が き

側壁型 ACV の水上航行時の特性は影響要素が多く複雑であるため、その内容が十分解明されているとはいえない。本研究はとくに抵抗の1次的要因を解明することを目的として、水槽曳航実験を行ないその結果を考察したものである。

第1報¹⁾においては、抵抗分析を行なうために解決を必要とした水槽実験技術と、抵抗分析によってえら

れたクッション圧力および側壁深さの影響について報告した。

今回は引き続いて、抵抗に及ぼすトリムの影響、とくに最適トリムの存在について検討する。また造波抵抗、スカート抵抗、側壁摩擦抵抗の表現一主としてフルード数とクッション圧力依存性について考察する。

2. 実 験 法

模型は第1報のものと同じである(第1図)。側壁はアルミ製平板、フレキシブルスカートは防水加工したパーバリ布製で、BHC 型のバッグとフィンガースカートより構成されている。クッション空気は前後のバッグにあげられた吹出孔から直接クッション室に吹出される。

曳航天秤は第1報に用いたものと異なり新たに試作されたものを用いた。模型の上下動、トリム、抵抗を計測する。模型の全備重量とトリムは天秤のリンク機構上の重錘および模型自身のバラストによって調整され、推力による付加ピッチングモーメントをシミュレートすることが可能である(第2図)。すなわち曳航装置のリンク機構によって、抵抗に比例する頭上げモーメントが曳航中に模型に与えられる。したがってホバー時に水平になるように重心を調整された模型を標準として、曳航時にモーメント基準点(R. P.)に関して付加されるモーメント(M)は $M = M_0 + D_{tot}(l_L + l_R)$ となる。

ただし M_0 : ホバー状態で付加される初期モーメント, D_{tot} : 全抵抗, l_L : リンク機構のモーメント腕の長さ(調節可能), l_R : 曳航腕着力点とモーメント基準点との距離 0.17 m.

実験は $l_L = 0.3$ m 一定とし M_0 を $-8 \sim +4$ kg·m の範囲で変えて行なった。その他、波高計測による波形造波抵抗、ファイバースコープ等によるクッション室内外の側壁濡れ面積の同時計測を行なった。

Sidewall ACV の抵抗要素の定義に関してやや任意

* 昭和53年7月26日原稿受理

** 船舶技術研究所

*** 青山学院大学理工学部

第1図 側壁型 ACV の水槽模型

第2図 曳航実験装置概要

性が入る余地があり、立場によって多少異なった提案があるが、対象を平板側壁をもつ ACV の静水上特性に限定する限り下記の定義が許容されるものと思われる。

すなわち

$$D_{\text{tot}} = D_0 + D_M + D_W + D_{\text{SW}} + D_{\text{SK}}$$

ただし D_{tot} : 全抵抗, D_0 : 空気形状抵抗, D_M : 浮揚ファン空気吸込による運動量抵抗, D_W : クッションによる造波抵抗, D_{SW} : 側壁摩擦抵抗, D_{SK} : スカート抵抗

造船学的に水力抵抗成分は摩擦抵抗, 造波抵抗と渦抵抗に分類されている。本研究では造波抵抗として波形解析によって求めた値, 側壁摩擦抵抗として側壁内外面の濡れ面積と平板摩擦抵抗係数より求めた値をそれぞれ用いた。スカート抵抗 D_{SK} は D_{tot} と $D_0 + D_M + D_W + D_{\text{SW}}$ の差として定義した。したがって

D_{SK} にはスカートの水面接触に伴って wake の変化をもたらす造渦抵抗の他に波の breaking, スプレイ等による wake の変化, 抵抗要素の線型加算に対する干渉項がすべて含まれている。

しかしながら本実験では平板側壁を用いているためスプレイがきわめて少なく, 空力抵抗自身が小さいのでその干渉項も小さいと予想される。すなわち全抵抗から剰余として求めた D_{SK} の大部分はスカートの水面接触に起因すると考えられるので, これをスカート抵抗とよぶことが許されるであろう。いわゆるスカート抵抗と造波抵抗の関係は本実験の検討対象である。

3. 記 号

b_c : クッション幅, D_0 : 空気形状抵抗, D_M : 運動量抵抗, D_{SK} : スカート抵抗(剰余抵抗), D_{SW} : 側壁摩擦抵抗, D_W : 造波抵抗(実験値は波形記録より

算定), D_{tot} : 全抵抗, F_n : フルード数 $V_\infty/\sqrt{g l_{eq}}$, f_s : 側壁濡れ面積係数 (フルード数に依存), h_{eq} : ホバー時の流量相当ホバー間隙 $Q/l_p\sqrt{(2/\rho)p_c}$, h_c : ホバー時のクッションによる水面の凹み, h_G : ホバー時のスカート下端とクッション下水面との間隙, h_w : 側壁深さ (スカート下端基準), K_{SK} : スカート抵抗係数 $D_{SK}/bchc(\rho w/2)V_\infty^2$, l_{eq} : 相当クッション長さ S_c/bc , l_p : スカート周長, l_w : 側壁長さ, M : 航行時の縦揺付加モーメント (頭上げ正), M_0 : ホバー時の縦揺付加モーメント (初期モーメント) (頭上げ正), n : 揚力ファン回転数, p_c : クッション圧力, Q : クッション空気容積流量, R. P.: 縦揺モーメント基準点, S_c : クッション面積, S_w : 側壁濡れ面積, W : 全備重量, V_∞ : 前進速度 (曳航速度), ρ : 空気密度, ρ_w : 水の密度

4. 実験結果と考察

4.1 トリムと全抵抗 曳航速度とヒープ, トリム, 抵抗の相互関係をあらわす実験結果を第3図に示す. 実験条件は推力軸線を一定とし, ホバー水平状態に対する初期モーメント M_0 を変化させた.

初期モーメント一定の特性を比較すると, トリムに対しては定性的に類似であるが, ヒープ, 抵抗に関し

第3図 姿勢, 抵抗特性と付加モーメントの関係

ては一定ではない. 第4図はトリムに対する抵抗変化をあらわしたものであるが, フルード数ごとに抵抗が最小となるトリム角がある.

航行中の付加モーメント M (初期モーメントと推力に比例する頭上げモーメントの和) とトリムの関係をフルード数ごとに第5図に示す.

抵抗を最小にする付加モーメントの対応点は矢印で示されている. ホロー速度 ($F_n=0.44$) 以下では -2.5 kg·m であるが第1ハンプ速度 ($F_n=0.64$) 以上では 0 kg·m 一定値に対応し $0.44 < F_n < 0.64$ では過渡的な値をとる.

4.2 抵抗分離 抵抗に及ぼすトリムの影響の要因

第4図 抵抗と最適トリム

第5図 付加モーメントとトリムの関係

第6図 抵抗分離とトリム

第7図 造波抵抗とスカート抵抗の関連

を分析するために、抵抗を要素に分離した結果を第6図に示す。空力的抵抗、側壁摩擦抵抗には初期モーメントの影響はほとんどみられない、トリムは主として

第8図 姿勢と側壁内外面の波面(実線外壁, 点線内壁)のトリムによる変化(I) ($F_n=0.38$)

造波抵抗とスカート抵抗に影響を及ぼす。造波抵抗とスカート抵抗の関係に着目して、両者をトリムに対して表現したものを第7図に示す。それぞれのフルード数において抵抗を最小にする条件は主としてスカート抵抗に関連していることが認められる。造波抵抗に対するトリムの影響はあまり大きくないが、 $F_n=0.38$ (第2ハンプ速度)では例外的にトリムに強く依存している。すなわち頭下げモーメントの付加によってトリムが水平に近づくと、造波抵抗がしだいに増加し、反対にスカート抵抗は急速に減少する。

第8図に $F_n=0.38$ における側壁部の波形とスカートの水面接触の状況を示す。トリムが水平に近いときは後部スカートと波の接触はほとんどみられないが、頭上げトリムが増加するこの速度 (第2ハンプ速度) で最大になる船尾付近の波とスカートが接触して、スクープ状態になる。ホロー速度 ($F_n=0.44$) および第1ハンプ速度 ($F_n=0.64$) における波面とスカートの水面接触の状況を第9, 10図に示す。ホロー速度 ($F_n=0.44$) においては山はちょうどスカート下に形成されるため頭下げ姿勢においても後部スカートの水面接触がある。

予想されるように抵抗の最小値は前後部のスカートの水面接触が全体として減少する姿勢でえられている。スカートの水面接触が抵抗増加に及ぼす影響は観測によれば前部スカートよりも後部スカートのスクープに強く依存している。

4.3 造波抵抗 第11図に NEWMAN & POOLE の理論に基づいて計算した本水槽模型の造波抵抗²⁾と、

W=69.4 kg
n=10000 rpm $F_n=0.44$
 $h_w=40$ mm

第9図 姿勢と側壁内外面の波面(実線外壁, 点線内壁)のトリムによる変化(Ⅱ) ($F_n=0.44$)

W=69.4 kg
n=10000 rpm $F_n=0.64$
 $h_w=40$ mm

第10図 姿勢と側壁内外面の波面(実線外壁, 点線内壁)のトリムによる変化(Ⅲ) ($F_n=0.64$)

第11図 造波抵抗 (実測値と計算値の比較)

トリムを変えて行なった実験値の比較を示す。相対的に頭上げトリムが大きく、そのため後部スカートの水面接触が顕著になった実験条件はフラグ付の点で表示されている。後部スカートの接触が少ない場合には理論と実験はよく一致している。

推力軸線一定でホバー水平条件(初期モーメント $M_0=0$)で行なった結果²⁾によれば造波抵抗の第2ハンプは認められなかったが、トリムの変更を含む今回の実験では第2ハンプ抵抗までの対応がえられている。著者はクッション圧力が過大なときには低フルード数で船尾自由波の(波高/波長)比が物理的に存在する値をこえるため理論で予想されるハンプ抵抗が顕在化しないという HOGBEN の指摘について考察した²⁾が、本実験の結果からみると船尾波の(波高/波長)比

の問題以前に後部スカートの干渉がより支配的であるように思われる。船尾自由波の存在限界に関する HOGBEN のコメントの適用範囲についてはさらに詳細な実験的検証を要する。

4.4 スカート抵抗 スカート抵抗係数を定義するために、基準面積としてスカートの水面接触面積を選ぶことはもっともらしく思われる。しかしクッションによって生じる波形はフルード数によって決まるのでスカートと水面の接触面積はフルード数に依存して変化するであろう。またスカートはフレキシブルな材料で構成されているため水面との接触によって変形する可能性がある。したがってスカートの水面接触面積を基準にとることは、問題をさらに分析困難な問題におきかえることになる。

第12図 スカート抵抗係数 (ホバー水平, 推力軸線一定時)

第13図 スカート抵抗係数 (最適トリム時)

本研究においては特性を一次的に表現するためにスカート抵抗係数 K_{SK} を $K_{SK} = D_{SK} / bchc(\rho w/2)V_\infty^2$ で定義した。これはスカート抵抗に及ぼすクッション圧力の影響に着目し、水面接触面積の変化を抵抗係数のフルード数依存性に含ませて表現したものである。

一定推力軸ホバー水平条件における実験値は第12図³⁾に示されているが、スカート抵抗におけるクッション圧力の影響がほぼ表現されているといえよう。一般的にスカート抵抗はトリムにも強く依存しているため、表現はさらに複雑となる。しかしながらスカート抵抗を最小にするトリムを常に選ぶものとして再び F_n だけで表現されるであろう。第13図によれば K_{SK} は $F_n = 0.44$ (ホロー速度) に大きなピークをもつ、この速度では最適トリムにおいても前後スカートの水面同時接触が避けられないという第9図の観測はこの結果を裏づけているといえよう。

第14図 側壁濡れ面積

4.5 側壁摩擦抵抗 本実験模型は厚みの薄い平板状の側壁をもっているため、側壁の摩擦抵抗を知るためには濡れ面積が推定できればよい。航行中の側壁の濡れ面積は ACV の姿勢と波形に関係するのでフルード数の関数と考えられる。

ファン回転数、側壁深さ、初期モーメント、推力軸を一定に保ち全備重量をかえたときの側壁内外の濡れ面積の実測結果を第14図に示す (S_w : 側壁内外総濡れ面積, S_{wo} : 側壁外側濡れ面積, S_{wi} : 側壁内側濡れ面積)。 $F_n = 0.38$ と $F_n = 0.9$ 付近に極大値, $F_n = 0.5$ 付近に極小値がある。これらの結果から側壁濡れ面積のフルード数, およびクッション圧力依存性が明らかである。航行中の濡れ面積 (S_w) を要因の考察と第14図に基づいて下記で表現する。

$$S_w = S_{w-} + (S_{WH} - S_{w-})e^{-F_n} + 4hcl_w fs(F_n)$$

S_{w-} : 十分大きい F_n に対する濡れ面積

S_{WH} : ホバー状態の濡れ面積

hc : クッション深さ (ホバー時)

l_w : 側壁全長

$fs(F_n)$: フルード数に依存する実験係数

右辺第2項はホバー状態と十分早い滑走状態におけるそれぞれの濡れ面積の内挿的表現, 第3項は姿勢変化に基づく第2項の修正項である。幅 b_w の矩形の相当側壁に対して第15図のモデル化を行なえば S_{w-} , S_{WH} について下記の表現がえられる。

第15図 ホバー時および滑走時の側壁の水面接触のモデル化

第16図 スカート下間隙 (h_g) と流量相当ホバー間隙 (h_{eq}) の関係

第17図 側壁濡れ面積係数 f_s のフルード数依存性

$$S_{w-} = [4(h_w - h_{eq}) + 2b_w]l_w$$

$$S_{wH} = [4(h_w - h_g) + 2h_c + 2b_w]l_w$$

クッション深さ h_c と側壁長さ l_w で無次元化することによって下記がえられる。

$$\begin{aligned} S_w/h_c l_c = & 4[(h_w/h_c) - (h_{eq}/h_c)] + 2b_w/h_c \\ & + [2 - 4(h_g/h_c) + 4(h_{eq}/h_c)]e^{-F_n} \\ & + 4f_s(F_n) \end{aligned}$$

ホバー状態のクッション下の水面とスカートとの間隙 h_g はクッション深さ h_c と流量相当ホバー間隙 h_{eq} に関係している。

これらの関係は本実験結果によれば圧力室型エアクッションからの流出部分の水面形状に関する JONES のモデル^(4),5) によってほぼ理論的に推定できることが示された (第16図)。

実測濡れ面積、および h_c/h_c の計算値から求められた $f_s(F_n)$ の実験曲線を第17図に示す。これにはクッション圧力、側壁深さ、ファン回転数を変えた実験結果が含まれている、ややばらつきが認められるがクッション室内のスプレイが濡れ面積の測定精度を劣

化させることにその一因がある。

第2ハンブ速度 ($F_n=0.38$) には実験誤差にしては大きすぎる変化がある。この原因はまだ明確でないが低速では摩擦抵抗の絶対値が大きくないことを考慮して便宜的に1本の曲線で接続した。これはたんに設計資料的な立場にすぎず要因分析としては今後検討の余地が大きい。

5. 結 び

平板側壁をもつ水槽模型実験によって、側壁型ACVの基本的抵抗特性の解明を試みた。航行中のトリム調整が抵抗軽減に果たす役割は大きく、第1報において焦点をあてられたクッション圧力の影響と同様にACVの抵抗に最も特徴的な要因であることが見いだされた。

航行中のトリムはクッション自身が作る波形に強く依存しているが、縦揺モーメントの付加によって抵抗を最小にするように最適化することができる。トリムはスカート抵抗に対して支配的要因の一つであるが、第2ハンブ速度においてはスカートの水面接触を介して間接的に造波抵抗にも影響を及ぼす。トリムによる抵抗減少のメカニズムはこれらの要因の複合作用によって説明することができる。

側壁型ACVの抵抗推定上の難点は側壁摩擦抵抗とスカート抵抗の複雑さにあるが、そのフルード数とクッション圧力に対する依存性が実験的にしらべられた。

側壁が浮力を分担する場合、スカート形式が異なる場合、クッション流量を大幅に変化させた場合の抵抗特性についてはここで検討の対象としていない。これらはきわめて重要な課題であって今後研究される必要があるが、本研究の結果がそれらの基礎としても有用であることを期待している。

参 考 文 献

- 1) 村尾麟一, 佐藤 義: 側壁型 ACV の水上推進性能について (第1報), 日本航空宇宙学会誌, 第24巻, 第268号 (1976), pp. 16-23.
- 2) 村尾麟一, 青木修一: ACV の造波抵抗について, 日本航空宇宙学会誌, 第24巻, 第268号 (1976), pp. 24-29.
- 3) MURAO, R.: On the Drag of a Sidewall ACV over Calm Water, Proc. Intn. Hovering Craft, Hydrofoil & Advanced Transit Systems Conference, Amsterdam (1976.5), pp. 169-179.
- 4) JONES, D. I. G.: Hovering Performance of Plenum Chamber GEMS over Land and Water, J. Aircraft, Vol. 3, No. 4 (1966.7.8), pp. 333-338.
- 5) 村尾麟一: Air-cushion Vehicles (ACV) の展望(下), 造船協会誌, 第455号 (1967), pp. 34-44.