フィンガースカートを装着した小型 ACV の傾斜時の静安定性について^{*1}
Static Pitch Stability of Small ACVs Fitted with Finger-type Skirts

松尾 日出 男^{*2}・松尾 健 輔^{*3}
Hideo MATSUO and Kensuke MATSUO

Key Words: ACV, Pitch Stability, Skirt, Cushion Stiffness

Abstract

The static pitch stability of small ACVs fitted with finger-type skirts is investigated. A simple method which predicts the static stability and the cushion stiffness is proposed. It yields rough approximations of quantities needed for the initial design. Numerical results of the analysis are presented. We consider two different operating conditions. In one case the skirt is in contact with the ground. In another case the contact does not occur. In both cases the pitch stability decreases with increasing distance of the center of gravity from the skirt hem line and with increasing hover height. However variation of the skirt inclination angle affects the pitch stability in opposite way in two different operating conditions.

1. ま え が き

近年、レジャー用の小型 ACV が活発に開発・製造されるに至っている。大型艇と比べてクッション面積が非常に小さな小型の ACV においては、重量的な制約から浮揚系統を大きく取ることができず、したがって、浮揚高も大型艇と比べて非常に小さい。加えて、艇体が小さい小型 ACV の場合、ブラウインおよびタックアンダー時の艇の転倒防止の面からも重心高さが制約されるので、浮揚高を含む有効浮揚高を高くすることはできない訳である。通常、有効浮揚高は 200 mm 前後である。このことは、信頼性が確認されて一般に広く使用され、スカートの代名詞ともなっている bag and finger skirt が、重心高さの面から好ましくないことを意味している。事実、現在国内で製造されている全ての小型 ACV には、bag skirt あるいは finger skirt が単独で使用されている。さらにこれら

の艇は、浮上と推進を一つのエンジンおよびファンで行うシングルエンジンタイプと呼ばれるものと、浮上および推進用に個別のエンジンとファンあるいはプロペラを有するツインエンジンタイプと呼ばれるものに大別されるが、ツインエンジンタイプにおいても浮上機関の出力は最大でも 20 ps 程度である。一方、速力は 40 knot 程度に達しており、十分な cushion stiffness と stability が要求される。一般に、bag skirt は簡単な構造のわりには良好な安定性を有するが、抵抗特性と摩耗の割合が比較的大きく、finger skirt は逆の特性を持つといわれている¹⁾。このように ACV の性能は、スカートの構造様式によって大きく左右される。小型 ACV で用いられているような bag skirt を単独使用した場合の研究としては文献 2) を挙げることができるが、これに対し finger skirt を単独で使用した場合の理論研究は見あたらないようである。しかしながら、SES を対象として bag and finger seal を取り扱ったものに文献 3) がある。さらに、BHC タイプ (bag and finger skirt) および HDL タイプ (open loop segmented skirt) を対象としたものとして文献 4) および文献 5) を挙げることができるが、いずれの研究も finger を単独で使用したものではない。

本報告は、以上述べた状況を踏まえて finger skirt のみを装着した小型 ACV を対象として、傾斜時の静安定性を予測するための解析法を提案するものである。

2. 理 論 解 析 法

解析に際し、以下に示す仮定を設ける。

- (1) 小型艇に採用されるスカート構成材料は主として薄膜と考えられるので、その曲げ剛性は充分小さく、重量および伸びも無視できるものとする。

^{*1} 平成 2 年 7 月 20 日原稿受理

^{*2} 熊本大学工学部

^{*3} 熊本工業大学

(2) スカートは地面と接触後もその釣合状態を保ち、初期形状を保持するものとする。

(3) クッション内はスカート下端部分を除いて貯気槽状態にあるものとする。

以下、傾斜時の ACV について考察する。第 1 図に示すように上昇側および下降側のスカートは、それぞれ

$$y_u = -x \cdot \tan \theta - \{H + (B/2) \cdot \tan \theta\} \quad (1)$$

$$y_d = x \cdot \tan \theta - \{H + (B/2) \cdot \tan \theta\} \quad (2)$$

で表される。ただし、

$$y_u|_{x=-B/2} = -H$$

$$y_d|_{x=B/2} = -H$$

ここで、 θ はスカートの傾斜角、 H は重心より skirt hem line までの距離、 B はクッション幅を表す。

ϕ を艇の傾斜角、 h を第 1 図に示した高さとする、地面は以下に示すように与えられる。

$$y_g = x \cdot \tan \phi - H - h \quad (3)$$

ここで、

$$y_g|_{x=0} = -H - h$$

さらに、skirt hem line に対する艇体中央部分の浮揚高 h_m は、

$$h_m = x_b \cdot \sin \phi = h \cdot \cos \phi \quad (4)$$

したがって、上昇側および下降側の浮揚高 h_u および h_d は、

$$h_u = (x_b + B/2) \cdot \sin \phi = h \cdot \cos \phi + B \cdot \sin \phi / 2 \quad (5)$$

$$h_d = (x_b - B/2) \cdot \sin \phi = h \cdot \cos \phi - B \cdot \sin \phi / 2 \quad (6)$$

ここで、

$$x_b = h \cdot \cot \phi \quad (7)$$

であり、 x_b は地面と skirt hem line との交点の x 座標を表す。

第 1 図に示すようにスカートが地面と接触しない場合、すなわち、

$$x_b > B/2$$

第 1 図 傾斜中の ACV (地面と接触しない場合)

なる場合、上昇部分に対して地面と水平方向の運動量保存則より (第 2 図参照)、

$$\begin{aligned} & \int_{\text{skirt}} p \cdot \sin(\theta + \phi) \cdot ds_s + J_u \\ &= \int_{\text{upper hull}} P_c \cdot \sin \phi \cdot ds_h + P_c(H' + h_u) \end{aligned}$$

ここで、 ds_s および ds_h はそれぞれスカートおよび上昇側の上部艇体に沿う微小距離、 J_u は上昇側のスカート下端より大気に流出する噴流の運動量、 P_c はクッション圧力を表す。さらに、

$$\begin{aligned} & \delta F_u \cdot \sin(\theta + \phi) \\ &= \int_{\text{upper hull}} P_c \cdot \sin \phi \cdot ds_h + P_c \cdot H' \\ & - \int_{\text{skirt}} p \cdot \sin(\theta + \phi) \cdot ds_s \end{aligned}$$

と置くことにより、

$$\delta F_u \cdot \sin(\theta + \phi) = J_u - P_c \cdot h_u$$

すなわち、上昇部分には水平方向に $\delta F_u \cdot \sin(\theta + \phi)$ なる力の差が存在する。同様に下降部分についても、

$$\delta F_d \cdot \sin(\theta - \phi) = J_d - P_c \cdot h_d$$

が得られる。ここで J_d は下降側スカート下端より大気に流出する噴流の運動量を表す。さらに、 J_u および J_d は以下に示すように表される。

$$J_u = 2P_c C_u h_u$$

$$J_d = 2P_c C_d h_d$$

ここで、 C_u および C_d はそれぞれ上昇側および下降側噴流の縮流係数を表す。したがって、

$$\delta F_u \cdot \sin(\theta + \phi) = P_c h_u (2C_u - 1)$$

$$\delta F_d \cdot \sin(\theta - \phi) = P_c h_d (2C_d - 1)$$

さらに C_u および C_d について Chaplin⁹⁾ が示した縮流係数を用いると、

$$\delta F_u \cdot \sin \theta_u = \frac{P_c h_u \sin \theta_u}{\frac{\pi+2}{\pi-2} \{1 + \cos \theta_u\} - \sin \theta_u \cdot \cos \theta_u} \quad (8)$$

第 2 図 傾斜中の ACV (検査面)

$$\delta F_d \cdot \sin \theta_d = \frac{P_c h_d \sin \theta_d}{\frac{\pi+2}{\pi-2} \{1 + \cos \theta_d\} - \sin \theta_d \cdot \cos \theta_d} \quad (9)$$

ただし,

$$C_u = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sin \theta_u}{\frac{\pi+2}{\pi-2} \{1 + \cos \theta_u\} - \sin \theta_u \cdot \cos \theta_u} \right]$$

$$C_d = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sin \theta_d}{\frac{\pi+2}{\pi-2} \{1 + \cos \theta_d\} - \sin \theta_d \cdot \cos \theta_d} \right]$$

および

$$\theta_u = \theta + \phi, \quad \theta_d = \theta - \phi$$

以上示した水平方向力の差は、スカート下端より大気中に流出する噴流の縮流によるものである。すなわち、縮流はスカート下端と地面とから形成されるノズル部において、スカートに沿う速度分布(近寄り速度)が存在するために発生する。このため、スカートに沿う圧力分布も変化して、水平方向力が加わるわけである。文献7)において Chaplin は、艇傾斜にともなうスカート角の変化を考慮せず、水平方向力の差をスカート下端に作用させているが、スカートに加わる圧力の中心は、その圧力分布から決定しなければならない。しかしながら、スカートに沿う圧力の低下は下端部分のごくわずかな領域であり、スカートに一樣なクッション圧力が作用すると考えた場合の圧力中心と大きな違いはないと仮定すると、スカートに加わる力 F_u および F_d は一樣なクッション圧力が作用すると考えた場合よりも上昇側で δF_u 、下降側で δF_d だけ減少することになる。すなわち、

$$F_u = [(P_c H)^2 + P_c^2 \{(x|_{y_d=0}) - B/2\}^2]^{1/2} - \delta F_u$$

$$F_d = [(P_c H)^2 + P_c^2 \{(x|_{y_d=0}) - B/2\}^2]^{1/2} - \delta F_d$$

さらに、(2)式より

$$x|_{y_d=0} = H/\tan \theta + B/2$$

したがって、

$$F_u = P_c [H^2 + \{H/\tan \theta\}^2]^{1/2} - \frac{P_c h_u}{\frac{\pi+2}{\pi-2} \{1 + \cos \theta_u\} - \sin \theta_u \cdot \cos \theta_u} \quad (10)$$

$$F_d = P_c [H^2 + \{H/\tan \theta\}^2]^{1/2} - \frac{P_c h_d}{\frac{\pi+2}{\pi-2} \{1 + \cos \theta_d\} - \sin \theta_d \cdot \cos \theta_d} \quad (11)$$

上昇側スカートに作用する艇体に対する水平および垂直分力 F_{uh} , F_{uv} および下降側スカートに作用する水平および垂直分力 F_{dh} , F_{dv} は、

$$F_{uh} = F_u \cdot \sin \theta, \quad F_{uv} = F_u \cdot \cos \theta$$

$$F_{dh} = F_d \cdot \sin \theta, \quad F_{dv} = F_d \cdot \cos \theta$$

したがって、重心(0)回りの復元モーメント M_1 は

時計回りを正にとり、

$$M_1 = (F_{uh} - F_{dh})H/2 + (F_{dv} - F_{uv})(x|_{y_d=0} + B/2)/2$$

$$= (F_u - F_d) \cdot \sin \theta \cdot H/2 - (F_u - F_d) \cdot \cos \theta \cdot \{H/\tan \theta + B\}/2 \quad (12)$$

ここで、

$$F_u - F_d = P_c \cdot \left[\frac{h_d}{\frac{\pi+2}{\pi-2} \{1 + \cos \theta_d\} - \sin \theta_d \cdot \cos \theta_d} - \frac{h_u}{\frac{\pi+2}{\pi-2} \{1 + \cos \theta_u\} - \sin \theta_u \cdot \cos \theta_u} \right]$$

である。

次に第3図に示すようにスカートが地面と接触する場合、すなわち、

$$x_b \leq B/2$$

なる場合を考察する。

(2)式および(3)式より地面とスカートとの交点(a)の x, y 座標は、

$$x_a = \frac{1}{\tan \theta - \tan \phi} \{B \cdot \tan \theta/2 - h\} \quad (13)$$

$$y_a = \frac{\tan \phi}{\tan \theta - \tan \phi} \{B \cdot \tan \theta/2 - h\} - H - h \quad (14)$$

スカートと地面との接触によってクッション空気の流れはないものとする。下降側のスカートには一樣なクッション圧力が作用する。したがって、上昇側のスカートにおいてのみ圧力分布が存在するので上昇側および下降側のスカートに作用する力は、それぞれ、

$$F_u = [(P_c H)^2 + P_c^2 \{(x|_{y_d=0}) - B/2\}^2]^{1/2} - \delta F_u$$

$$= P_c [H^2 + \{H/\tan \theta\}^2]^{1/2} - \frac{P_c h_u}{\frac{\pi+2}{\pi-2} \{1 + \cos \theta_u\} - \sin \theta_u \cdot \cos \theta_u} \quad (15)$$

$$F_d' = P_c \{(x|_{y_d=0} - x_a)^2 + y_a^2\}^{1/2}$$

$$= P_c \{(H/\tan \theta + B/2 - x_a)^2 + y_a^2\}^{1/2} \quad (16)$$

その艇体に対する水平および垂直分力は、

$$F_{uh} = F_u \cdot \sin \theta, \quad F_{uv} = F_u \cdot \cos \theta$$

$$F_{dh}' = F_d' \cdot \sin \theta, \quad F_{dv}' = F_d' \cdot \cos \theta$$

第3図 傾斜中のACV (地面と接触する場合)

したがって, 復元モーメント M_g は,

$$\begin{aligned} M_g = & F_{uh} \cdot H/2 - F_{dh} \cdot |y_a|/2 + F_{dv} \cdot (x|_{y_d=0} \\ & + x_a)/2 - F_{uv} \cdot x(x|_{y_d=0} + B/2)/2 \\ = & (F_u \cdot H - F_d' \cdot |y_a|) \cdot \sin \theta/2 \\ & + [F_d' \{H/\tan \theta + B/2 + x_a\} \\ & - F_u \{H/\tan \theta + B\}] \cdot \cos \theta/2 \end{aligned} \quad (17)$$

3. 数 値 計 算

以上求めた復元モーメント M_1 および M_g は, 単位

クッション長当りのものであり, 単位クッション長当りの艇重量 W を

$$W = P_c \cdot B$$

とすると, 無次元量 $M^* = M_1/(WB)$ および $M_g^* = M_g/(WB)$ は(12)式および(17)式より,

$$\begin{aligned} M_1^* = & (F_u^* - F_d^*) \cdot \sin \theta \cdot H^*/2 \\ & - (F_u^* - F_d^*) \cdot \cos \theta \cdot \{H^*/\tan \theta + 1\}/2 \\ M_g^* = & (F_u^* \cdot H^* - F_d^* \cdot |y_a^*|) \cdot \sin \theta/2 \\ & + [F_d^* \{H^*/\tan \theta + 1/2 + x_a^*\} \end{aligned}$$

第4図 傾斜角に対する復元モーメント

同図において横軸は傾斜角 (degree) を表している。また各曲線はそれぞれ, 実線は $\theta=30^\circ$, 破線は $\theta=45^\circ$, 一点鎖線は $\theta=60^\circ$, 二点鎖線は $\theta=120^\circ$ の場合を表しており, x 軸を境界として上側が不安定領域, 下側が安定領域である。

$$-F_u^*(H^*/\tan \theta + 1)] \cdot \cos \theta / 2$$

ただし,

$$\begin{aligned} F_u^* - F_d^* &= h_d^* \left\{ \frac{\pi+2}{\pi-2}(1+\cos \theta_d) \right. \\ &\quad \left. - \sin \theta_d \cdot \cos \theta_d \right\} \\ &\quad - h_u^* \left\{ \frac{\pi+2}{\pi-2}(1+\cos \theta_u) \right. \\ &\quad \left. - \sin \theta_u \cdot \cos \theta_u \right\} \\ F_u^* &= \frac{H^*}{\sin \theta} - \frac{h_u^*}{\frac{\pi+2}{\pi-2}(1+\cos \theta_u) - \sin \theta_u \cdot \cos \theta_u} \\ F_d^* &= \left\{ \left(\frac{H^*}{\tan \theta} \right)^2 + \frac{H^*}{\tan \theta} + \frac{1}{4} - \frac{2}{\tan \theta} \cdot x_a^* \cdot H_a^* \right. \\ &\quad \left. - x_a^* - x_a^{*2} + y_a^{*2} \right\}^{1/2} \\ x_a^* &= \frac{1}{\tan \theta - \tan \phi} \left\{ \frac{\tan \theta}{2} - h^* \right\} \\ y_a^* &= \frac{\tan \theta \cdot \tan \phi}{2(\tan \theta - \tan \phi)} - \frac{\tan \theta}{\tan \theta - \tan \phi} h^* - H^* \\ H^* &= H/B \\ h_u^* &= h_u/B = h^* \cdot \cos \phi + \sin \phi / 2 \\ h_d^* &= h_d/B = h^* \cdot \cos \phi - \sin \phi / 2 \\ h^* &= h/B \end{aligned}$$

さらに、艇が傾斜中も空気供給システムの作動状態は一定で変化しないと仮定する。すなわち、空気供給システムの全圧 P_c (クッション内が貯気槽状態であればクッション圧力に等しい) および浮揚流量 Q が一定であると仮定すると以下に示す関係式が成立する。

$$Q = 2C_e h_e (2P_c/\rho)^{1/2} = (C_u h_u + C_d h_d) (2P_c/\rho)^{1/2}$$

すなわち,

$$h_e^* = (C_u h_u^* + C_d h_d^*) / (2C_e)$$

ここで、 h_e , C_e はそれぞれ水平状態における浮揚高および縮流係数を表し、 h_e^* は

$$h_e^* = h_e/B$$

第4図は、艇の傾斜角 ϕ に対する復元モーメント M_i^* および M_g^* の値を各 H^* , h_e^* , θ に対して表したものである。同図において、曲線の傾斜が急激に変化している所はスカートと地面との接触が発生している部分であり、接触前後で安定微係数 $dM^*/d\phi$ が急変している。さらに、完全な浮揚状態 (スカートが地面と接触していない状態) と不完全な浮揚状態 (スカートが地面と接触している状態) とでは、艇の安定性に与えるスカート傾斜角 θ の影響は相反する。すなわち、完全な浮揚状態においては θ を大きく取ることにより、逆に不完全な浮揚状態においては θ を小さく取ることによって艇の安定が保たれる。また、skirt hem line からの重心高さ H^* および浮揚高 h_e^*

第5図 傾斜角に対する浮揚高の変化

同図において横軸は傾斜角 (degree) を表している。また、実線は h_u/h_e (上昇部の浮揚高)、一点鎖線は h_m/h_e (中央部の浮揚高)、二点鎖線は h_d/h_e (下降部の浮揚高) を表し、各曲線のスカート傾斜角は 30° である。

の増加は、完全および不完全な双方の浮揚状態において艇の不安定性を増加させる。特に、浮揚高の増加は傾斜角に対する完全な浮揚状態の領域を増大させ、それにともない不安定領域を増加させている。さらに、重心高さの増加は、スカートが地面と接触した後の艇の安定性に大きく影響を与え、安定微係数を減少させることがわかる。

第5図は艇の傾斜角 ϕ に対する上昇側、中央部、下降側の各浮揚高 h_u/h_e , h_m/h_e , h_d/h_e の変化の一例を示したものである。なお、この場合のスカート傾斜角 θ は 30° である。同図において、各曲線の変曲点以降は下降側スカートと地面との接触が発生している部分である。下降側スカートが地面と接触していない完全な浮揚状態においては、艇は skirt hem line の中点を中心として傾斜している。さらに、下降側スカートが地面と接触した後の不完全な浮揚状態においては、艇はほぼ上昇側スカート下端を中心として傾斜している。この場合、skirt hem line の中央部分 (艇中央部分) は、浮揚高以上に下降し地面と接触している。すなわち、下降側スカートが地面と接触した後の不完全な浮揚状態においては、著しいクッション体積の減少が発生するとともに艇の重心位置が下方に大きく変位する。以上は、傾斜中のクッション面積および空気供給系統の特性を一定として得られた結果であるが、実際には、pitching にともないクッション面積が変化するわけであるから完全および不完全な双方の浮揚状態において、空気供給系統の特性が変化する。加えて、先に述べたように不完全な浮揚状態においては、

クッション体積が大きく変化する。したがって、実際の ACV の運行状況下においては、pitching とより密接に関連して heaving が発生するであろうことが予想される。

4. 結 論

フィンガースカートのみを装着した ACV の静安定性に関する理論解析およびその数値計算を行い、次の結論を得た。

- (1) スカート傾斜角が艇の安定性に与える影響は、完全な浮揚状態と不完全な浮揚状態とは相反する。すなわち、クッション区切りを持たない小型 ACV において通常用いられているスカート傾斜角の範囲 $\theta < 90^\circ$ では、スカートが地面 (または水面) と接触しない限り艇の安定性は保たれない
 - (2) 浮揚高の増加は、完全および不完全な双方の浮揚状態において艇の不安定性を増加させる。特に、完全な浮揚状態においては傾斜角に対する不安定領域を増加させる。
 - (3) 重心高さの増加は、浮揚高の増加と同様に完全および不完全な双方の浮揚状態において艇の不安定性を増加させる。特に、スカートが地面 (または水面) と接触した後の安定性に与える影響は、完全な浮揚状態におけるものよりも顕著である。
 - (4) スカートが地面 (または水面) と接触した後は、重心位置およびクッション体積ともに大きく変位する。
- 以上示したように、クッション区切りを持たない小型

ACV にフィンガースカートを単独で使用した場合には、スカートが地面 (または水面) と接触しない限り艇は本質的に不安定であるといえる。さらに、浮揚高および重心高さの増加は不安定性をより助長させる。なお、通常はスカート内面の傾斜角が 90° 以上であり、外面の傾斜角が 90° 以下であるようなバッグスカートを装着した艇の安定性が、フィンガースカートを装着した場合よりも大きくなるという事実は、本結果からも想像される。

参 考 文 献

- 1) Wheeler, R. L.: Hovercraft Skirts, International Hovering Craft, Hydrofoil and Advanced Transit Systems Conference, Amsterdam, 1976, Conference Papers, pp. 441-454.
- 2) Sullivan, P. A. and Parravano, G. J.: Analysis of a Loop Type Flexible Skirt Air Cushion, Canadian Aeronautics and Space J., 23, 6 (1977), pp. 346-358.
- 3) 小沢宏臣, 小野志郎, 神戸庄二: SES シール構造様式の動的特性について, 日本造船学会論文集, 158 (1985), pp. 105-117.
- 4) Ma, T. and Sullivan, P. A.: Linear Analysis of the Heave Dynamics of a Bag and Finger Air Cushion Vehicle Skirt, AIAA 8th Advanced Marine Systems Conference, San Diego, California, 1986.
- 5) Burgess, A. J.: The Design of Open Loop Segmented Skirts, International Hovering Craft, Hydrofoil and Advanced Transit Systems Conference, Amsterdam, 1976, Conference Papers, pp. 69-78.
- 6) Chaplin, H. R. and Ford, A. G.: Some Design Principles of Ground Effect Machines Section F—Cushion Contributions to Stability, Aerodynamics Laboratory Research and Development Report, Report 2121F, 1967.
- 7) Chaplin, H. R. and Ford, A. G.: Some Design Principles of Ground Effect Machines Section B—Air Cushion Mechanics, Aerodynamics Laboratory Research and Development Report, Report 2121B, 1966.