上下動中の ACV バッグスカートの変形特性について*1

Deformation of the Bag Skirt of ACV in Heave Motion

千馬 浩 充*2・松尾 日出男*3・石川 裕 之*4・吉本 慎太郎*5

Hiromitsu SENBA, Hideo MATSUO, Hiroyuki ISHIKAWA, Shintarou YOSHIMOTO,

廣江 哲 幸*6・藤原 和 人*6

Tetsuyuki HIROE and Kazuhito FUJIWARA

Key Words: ACV, GEM, Aircushion, Bag Skirt

Abstract: A method to predict the change of the cushion pressure and the bag skirt configuration of ACV in heave is proposed. It is a quasistatic analysis based on the analysis of the skirt configuration in static operation that was proposed by the present authors. The cushion pressure depends on the velocity of motion as well as the hoverheight. It is higher in the downward motion than in the upward motion with the same hoverheight. As the model approaches the ground surface, the bag skirt is pushed outwards and also upwards but the hoverheight still decreases. This produces the increase of the cushion pressure that also flattened the configuration of the bag. The outward displacement of the bag produces the additional increase of the cushion base area and increases the restoring force. The stability is then increased.

1. ま え が き

ACV に装着されるバッグスカートがその安定性、凌波性を著しく改良し実用化に対して大きな寄与をしたことはいまさら述べるまでもないことであるが、スカートの運動中における形状推定法、とくに動揺中における形状変化についての研究は少ない。筆者らは前報¹⁻³⁾において静止状態にある ACV のスカート形状の解析法を提案し、スカート形状が、モデルの幾何学特性、空気の供給状況等によってどう変化するかに関して理論および実験の両面での研究を行いほぼ満足すべき結果を得ている。

本報では前報の方法を拡張してモデルが上下動を行っているときのスカート形状の変化を静止状態でのスカートの変形特性を用いて準静的に調べた。その結果、上下動中のクッション圧はモデルの上下位置のみならず、上下方向の変位速度にも依存すること、モデルが地面に近づくにつれてスカートは扁平化し、上方に押し上げられるがスカート下端と地面との間隙距離（浮揚高）は反対に減少すること、スカートを装着することによって上下方向復元性が増加すること等の興味深い結果が得られた。

2. 理 論 解 析

2.1 基礎式 第1図は動揺中のプリナムチャンバー型

ACV の模式図を示している。理想的な場合として長方形モデルでその両端が閉鎖された奥行き $(1/2)C$ のモデルを考える。図において、 B はスカート下端で測ったクッション幅、 $\dot{H}$ はモデルの上下動速度である。

モデルの各断面内流れには2次元性が成り立つものと仮定する。図において、 P_c はクッション圧力、 P_b はスカートのバッグ内圧力である。クッションへの空気供給系統とバッグへの空気供給系統の相互関係によって、 P_c と P_b との関係は異なる。実際には空気供給方式は多岐にわたり、一般的に論ずることは困難である。また、両者の相互干渉を考慮することはそれ自体一つの課題であり、別途考える必要がある。ここでは、この不確定要素を除去するためにクッション空気とバッグ内の空気とは独立に供給されているものとする。すなわち、クッション部には送風機によって流量 Q_f が供給されており、バッグ内は別途供給される空気によって一定圧力に保たれるものとする。第2図にスカートの幾何学的特性量を図示する。図に示すように、スカートの内側取り付け位置を原点とし、水平方向に X 軸、鉛直方向に Y 軸をとる。図で L_h 、 L_v はスカートの外側および内側取り付け位置の相対距離、 H はスカート内側取り付け位置から地面までの鉛直方向距離で時刻 t の関数である。また、 B_0 はスカート内側取り付け位置で測ったクッション幅、 B は第1図に示した通り、スカート膨張時のスカート下端で測ったクッション幅である。他の記号については以下必要に応じて説明する。

クッション圧力 P_c は

$$P_c = P_f - \zeta \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_f}{S_f} \right)^2 \quad (1)$$

*1 © 2004 日本航空宇宙学会

平成 15 年 8 月 29 日原稿受理

*2 熊本大学大学院自然科学研究科

*3 熊本大学名誉教授

*4 日産自動車(株)

*5 (株) 椿本チエイン

*6 熊本大学工学部

また

$$B = B_0 + 2X_s \quad (7)$$

したがって

$$\frac{dB}{dt} = 2 \frac{dX_s}{dt} = 2 \frac{dX_s}{d(P_c/P_b)} \cdot \frac{d(P_c/P_b)}{dt} \quad (12)$$

(7), (12) 式を (11) 式に代入すると

$$\begin{aligned} \frac{d(BH)}{dt} = & 2 \frac{dX_s}{d(P_c/P_b)} \cdot \frac{d(P_c/P_b)}{dt} H \\ & + (B_0 + 2X_s) \frac{dH}{dt} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで, 送風機の流量係数 ξ , 圧力係数 ψ を定義する.

$$\xi = 4Q_f / (\pi^2 D^3 n_f) \quad (14)$$

$$\psi = 2P_f / (\rho \pi^2 D^2 n_f^2) \quad (15)$$

ここで, D は送風機の代表寸法 (直径), また ψ は ξ の関数である.

$P_c = P_f$ であるから (15) 式より

$$\frac{d(P_c/P_b)}{dt} = \frac{\rho \pi^2 D^2 n_f^2}{2P_b} \psi'(\xi) \dot{\xi} \quad (16)$$

ただし,

$$\psi'(\xi) = \frac{d\psi}{d\xi} \quad (17)$$

を表す.

(16) 式を (13) 式に代入すると

$$\begin{aligned} \frac{d(BH)}{dt} = & \frac{\rho \pi^2 D^2 n_f^2}{P_b} \cdot \frac{dX_s}{d(P_c/P_b)} \psi'(\xi) \dot{\xi} H \\ & + (B_0 + 2X_s) \frac{dH}{dt} \end{aligned} \quad (18)$$

(4) 式の右辺に (9), (14), (15) 式を代入し, $P_c = P_f$ の関係を用いると

$$\begin{aligned} Q_f - CC_d h \sqrt{\frac{2P_c}{\rho}} \\ = \frac{\pi^2 D^3 n_f \xi}{4} - CC_d (H - Y_s) \pi D n_f \sqrt{\psi(\xi)} \end{aligned} \quad (19)$$

モデルの上下動が周期 T の周期運動であるとし, 無次元時刻

$$\tau = \frac{t}{T} \quad (20)$$

を定義する. また,

$$\psi_b = \frac{2P_b}{\rho \pi^2 D^2 n_f^2} \quad (21)$$

とおく.

(18), (19) 式を (4) 式に代入し, (20), (21) 式を用いて

変形すると

$$\begin{aligned} & 2 \frac{d(X_s/L_h)}{d(P_c/P_b)} \frac{H}{L_h} \frac{\psi'(\xi)}{\psi_b} \frac{d\xi}{d\tau} + \left(\frac{B_0}{L_h} + 2 \frac{X_s}{L_h} \right) \frac{d}{d\tau} \left(\frac{H}{L_h} \right) \\ & = \frac{\pi^2 L_h}{4 C} \left(\frac{D}{L_h} \right)^3 T n_f \xi \\ & \quad - \pi C_d \left(\frac{H}{L_h} - \frac{Y_s}{L_h} \right) \frac{D}{L_h} T n_f \sqrt{\psi(\xi)} \end{aligned} \quad (22)$$

また, (5), (15), (21) 式より

$$\frac{P_c}{P_b} = \frac{\psi(\xi)}{\psi_b} \quad (23)$$

ただし, X_s/L_h , Y_s/L_h は P_c/P_b の多項式で表される.

結局, (22), (23) 式は未知関数 $\xi(\tau)$ と P_c/P_b に関する連立微分方程式となる.

3. 解 析

3.1 解析条件 上下動を周期 T の単振動と考える.

$$H = H_0 + \Delta H \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \quad (24)$$

計算において想定した各種無次元係数は下の通りである.

$$\begin{aligned} \frac{H_0}{L_h} &= 0.867 \\ \frac{\Delta H}{L_h} &= 0.033, 0.067, 0.100, 0.133 \\ \left(\frac{\Delta H}{H_0} \right) &= 0.038, 0.077, 0.115, 0.154 \\ \frac{D}{L_h} &= 1.97, \quad \frac{C}{L_h} = 5.33, \quad \frac{B_0}{L_h} = 5.33 \\ C_d &= 1.0, \quad T n_f = 30.0 \end{aligned}$$

また, 前に述べたように

$$\frac{X_s}{L_h} = \sum_{i=0}^4 a_i (P_c/P_b)^i, \quad \frac{Y_s}{L_h} = \sum_{i=0}^4 b_i (P_c/P_b)^i$$

と近似する. 係数 a_i , b_i は, すでに述べたように, 前報の方法^{2,3)}を用いて求めたものである. なお, 係数 a_i , b_i を求める段階で必要なパラメータとして次の値を設定している.

$$\frac{L_s}{L_h} = 2.2, \quad \frac{L_v}{L_h} = 0.5, \quad \frac{w}{P_b} = 0.037$$

ここで, L_s はスカート周長, w はスカートの単位表面積あたりの重量である. 振動中のスカートの形状を求める際にもこれらの値が必要である.

想定した送風機特性 $\psi(\xi)$ - ξ 曲線を第 3 図に示す.

3.2 解析結果

3.2.1 クッション圧力の時間的变化 第 4 図にクッション圧力の時間的变化を示す. 図には 4 つの異なった振動振幅 $\Delta H/H_0$ に対する変化を示している. ただし, H_0 は動揺

第3図 送風機特性

第5図 モデル高さの変化に伴うクッション圧力の変化履歴

第4図 クッション圧力の時間変化

第6図 動揺振幅と最大クッション圧力との関係

を行う前（振動変位の中心点）の H の初期値である．図にはまたモデルの振動変位も示している．当然ながらモデルが地面に近い位置（ H が小さい）にあるときほどクッション圧は大きい．しかし、同じ H の場合でもモデルが上昇しているか下降しているかによって、クッション圧は異なる．これはモデルの上下方向速度の最大時と最小時に顕著に現れる．上昇速度が最小（下向きに最大）の $t/T = 0.5$ における圧力は上昇速度が最大時（上向き）の $t/T = 1$ のときの1.6倍に近い．これは H は同じでも圧力はクッション体積が減少しつつあるか増加しつつあるかに依存するからである．事実(4)式より分かるように、クッション圧は dH/dt にも依存している．これに起因して、 H/H_0 を横軸にとったクッション圧力変化の履歴は第5図に示すようにループを描いている．ふたたび第4図を見ると、振幅の増加に伴い非線形性が表れ、振幅増加の影響が圧力の上昇側（モデルの上下位置が平均位置より下方にあるとき）で大きく、モデルが最高位置に近い状態では小さい．第6図に振幅と最高圧力との関係を示しているが、解析範囲ではクッション圧は振幅に対してほぼ直線的に増加している．

第7図に $Tn_f = 30$ の場合と静的状態（ $T = \infty$ ）における圧力変化を示している．両者はほぼ一致しており、比較的遅い振動範囲では、クッション圧はほぼ静的状態を維持しながら変化していることが分かる．

3.2.2 スカート形状の変化 モデルの上下動中のスカート形状の変化を第8図に示す．これは振動中の各瞬間において得られた P_c/P_b に対して前報^{2,3)}の方法を用いて求めたものである．当然ながらスカート変形の状態はクッショ

第7図 クッション圧力の変化に対する周期の影響（ $\Delta H/H_0 = 0.038$ ）

ン圧力の変化に対応している．クッション圧が増えるとスカートは外側に膨らむと同時に扁平になる．扁平になるのはバッグ内圧力に比べてクッション圧が大きくなるためである．スカート形状の変化はモデルが地面に一番近い位置で最も大きい．モデルが地面に近づいたところでは、スカート下端と地面との間隙（浮揚高）が小さくなりクッション圧が上昇するが、それと同時にスカートが外側に移動するためクッション幅（クッション面積）が増加する．この二つが相まってそこでは、揚力の増加が促進される．したがって、スカートを有しない場合に比べるとスカートを装着することによって安定性（復元性）が増加することが期待される．なお、図には振動時の各時刻のモデルの位置と同じ位置にモデルを保って行った静的状態に対応するスカート形状も示している．ここでも周期の影響は小さいがモデルが地面に近づいたところでは若干差異が認められる．

第8図 スカートの形状変化 ($\Delta H/H_0 = 0.038$)

第9図 モデル高さの変化に伴うスカート下端位置の水平方向変化履歴

第9図にモデルの上下動に伴うスカート下端の水平位置 X_s/X_{s0} の変化をモデルの上下位置 H/H_0 を横軸にして示している。ただし、 X_{s0} は静止状態にあるときの X_s の初期値である。上に述べたようにスカートが外側に押し出され、クッション幅が増加している様子が分かる。また、第10図にスカート高さ Y_s/Y_{s0} を、第11図にスカート下端と地面との間隙距離 h をそれぞれ H/H_0 を横軸にして示している。ただし、 Y_{s0} は静止状態にあるときの Y_s の初期値である。これを見ると、モデルが地面に近づきクッション圧が上昇するとスカートは外側に押し出されると同時に上方に押し上げられることが分かる。にもかかわらず、間隙距離 h は小さくなっている。これはクッション圧の増加によってスカートが上方に押し上げられる効果がモデルの下降による間隙の減少を打ち消すほどには大きくないことを示している。

以上の解析は実用上現れる頻度の高い比較的ゆるやかな動揺状態を解析の対象としたが、高速域を解析するためには動的影響とくにスカート慣性の影響を考える必要がある。

第10図 モデル高さの変化に伴うスカート下端位置の垂直方向変化履歴

第11図 モデル高さの変化に伴う浮揚高の変化履歴

4. あとがき

前報において静止浮揚状態にある ACV バッグスカートの变形特性の解析法を提案し、良好な結果が得られることを示した。本報ではこの方法を拡張してモデルの上下動に伴うスカート变形特性を準静的に解析した。得られた結果は次の通りである。

(1) 当然ではあるが、モデルが最下点にある付近で圧力は最も大きい。しかし、圧力の変化はモデルの位置だけでは依存せずモデルの上下運動速度にも依存し、上下位置は同じでもモデルが下降しているときの方が上昇しているときより圧力は大きい。

(2) クッション圧の変化量は、モデル上下動の振幅が大きいほど当然大きい。その影響は非線形効果により圧力の上昇側(モデルの上下位置が平均位置より下方にあるとき)で大きく現れる。

(3) 実用上現れる上下動が緩やかな範囲では、圧力の変化およびスカート形状の変化に及ぼす周期の影響は非常に小さい。

(4) スカート形状の変化はモデルが地面に近いほど大きく現れる。そこではクッション圧が増加するためスカートは外側に押し出されると同時に、上方に押し上げられる。しかし、モデルの下降によるスカート下端と地面との間隙(浮揚高)の減少効果の方がスカート下端の上昇量より大きくその結果クッション圧は上昇する。

(5) モデルが地面に近づくほどクッション圧が増加して、スカートのバッグ内圧力との差圧が大きくなるためスカー

ト形状は扁平化する．

(6) モデルが地面に近づいたとき，スカートは変形して外側へ押し出される．これによって，クッション幅（面積）が増加し揚力の増加がもたらされる．すなわち安定性が増加する．

参 考 文 献

- 1) 松尾日出男，松尾健輔，藤原和人，廣江哲幸：ACV におけるバッ

グスカートの形状推定法，日本航空宇宙学会誌，42 (1994)，pp. 381-388.

- 2) 増永雄一，宗 葉子，濱崎左由里：SES のバッグスカートの変形特性に関する研究，熊本大学工学部材料開発工学科卒業論文，1995.
- 3) 松尾日出男，松尾健輔，吉本慎太郎，千馬浩充：ACV のバッグスカートの形状変化に関する実験研究，日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集，2001，pp. 139-142.