総圧回復係数の推定など理論的基礎づけの興味ある分野が残されているといえよう。

再循環の構想を最終的に評価するためには、上下動、縦揺れに対する安定性、実用的にはフレキシブル・スカートとの適合など今後解決すべき問題も大きいと思われる。

文 献

- 1) The COCKERELL Papers, Part V.: Flight (1963-6-25) p. 12.
- 2) HOLCOMBE B.F.: Materials and Fabrication Techniques in Air Cushion Vehicles, Proc. Nat. Meet. Hydrofoils & ACV (1962-9) p. 106.
- 3) COSSAIRT, K. R.: A Recirculation Concept, Proc. Nat. Meet. Hydrofoils & ACV (1962-9) p. 81.
- 4) NISHI A. & SAWADA T. Ground Effect of Recirculating Jet, Bullentin Univ. Osaka Pref. Ser. A. Vol. 12, No. 2 (1964) p. 1.

上下運動を行なう地面効果機の底面圧力に関する研究*

三 ツ 矢 明**・松 岡 健 次**

A Study on Base Pressure of Ground Effect Machine in Heaveing Motion

Akira MITSUYA and Kenji MATSUOKA

Abstract

The theory of the dynamics of a peripheral jet GEM in heave is presented. Flow is assumed inviscid and incompressible, and the flow patterns under the bottom of GEM are classified into such types as balanced, underfed, and overfed regimes. In each regime, momentum balances under the bottom are considered, and Stanton JONES' "exponential theory" is applied. The present theory shows reasonable agreement with the experiments using a two-dimensional quasi-static model.

1. 緒 言

周辺噴流型地面効果機の上下運動については、古くは TULIN¹⁾, EAMES²⁾ の論文があるが、これらで重要な点は、上下運動する GEM のジェットの流れの状態をつぎの三種—平衡状態、アンダフェッド状態、オーバフェッド状態に分類して論じたことと考える。その後発表された文献は、いずれもこれらの仮定を用いている。

DUKES と HARGRAVES³⁾ も同様な仮定のもとに、流れは理想流体とし、GEM 底面下の水平方向の運動量の釣り合いから、GEM の上下運動のパネ定数、減衰係数を求め、実験と比較しているが、ジェット効率や、降下運動時の運動量の釣り合いについて問題点もある。

筆者らは、DUKES らの考え方に多少の修正を行なった理論を導き、さらに準静的な状態での上記の仮定の妥当性を検討するため、これらの状態を静的に模擬できるような装置により実験し、理論と比較した。

* 昭和42年2月20日 GEM シンポジウムにおいて発表、昭和42年10月3日原稿受理

** 大阪府立大学工学部

2. 記 号

- b_j : ノズル幅
- $\bar{h}$: 浮上高
- $\bar{h}$: h/b_j
- $\dot{h}$: 上下運動の速度 (上昇を正にとる)
- $\bar{h}$: $\dot{h}/v_\infty$
- J : ジェット運動量流れ
- $\bar{J} = J/J_\infty$
- l : ノズル周長
- m : 質量流量
- p_B : 底面圧力
- $\bar{p}_B$: p_B/p_{ij}
- p_{ij} : ジェット総圧
- q : ノズル出口の平均動圧
- S_B : 底面積
- S_j : ノズル出口の断面積
- v : 流速
- x : 底面中心より外方向へ測った距離
- β : ノズル傾角 (内向きを正)
- η_J : ジェット効率
- ρ : 空気密度
- ζ : 損失係数

添え字

- B : 底面
- b : 平衡状態
- 0 : オーバフェッド状態
- u : アンダフェッド状態
- 1 : ノズル・ジェット下流
- 2 : 底面下へ流入または流出する流れ
- ∞ : 自由流

3. 理 論

GEM の上下運動を取り扱う場合、一般に行なわれるように平衡状態、アンダフェッド状態、オーバフェッド状態に分けて考える。流れは非粘性、非圧縮とする。各状態は準静的であると考えて、水平方向の運動量流れの釣り合いから関係式を導く。

(1) 平衡状態 GEM が上下運動を行わず、水平に浮上している場合の状態である。ジェット・カーテンは地面に接して外方へ流れ去り、地面から離れて浮き上がって流れたり、底面下へ流入したりはしない。

第1図(1)において、水平方向の運動量流れの釣り合いから次式を得る。ただし η_J はジェットの効率である。

$$h p_{Bb} = \eta_J (J_b \sin \beta + J_{b1}) \quad (1)$$

ノズル出口およびジェット流れの下流においてジェット運動量流れはそれぞれ

$$J_b = m_b v_b \quad (2)$$

$$J_{b1} = m_{b1} v_{b1} \quad (3)$$

平衡状態ではジェット流れは分流を生じないから

$$m_{b1} = m_b \quad (4)$$

またノズル無限下流の v_{b1} は

$$v_{b1} = v_\infty \quad (5)$$

となるから

$$J_{b1} = m_b v_\infty \quad (6)$$

となり(1)式は

$$h p_{Bb} = \eta_J J_b \left(\frac{v_\infty}{v_b} + \sin \beta \right) \quad (7)$$

ここで J_b に指数理論⁴⁾を適用すると J_b は

$$\begin{aligned} J_b &= \rho \int_0^{b_j} v^2 db_j \\ &= \frac{h p_{Bj}}{1 + \sin \beta} \{1 - e^{-2b_j(1 + \sin \beta)/h}\} \end{aligned} \quad (8)$$

(7) 式に代入して $v_\infty/v_b=1$ とおけば、よく知られている指数理論によるつぎの底面圧力の式を得る。

$$p_{Bb} = \eta_J p_{Bj} \{1 - e^{-2b_j(1 + \sin \beta)/h}\} \quad (9)$$

長さの単位に b_j を、圧力のそれに p_{Bj} をとれば、(9) 式は無次元化されて

$$\bar{p}_{Bb} = \eta_J \{1 - e^{-2(1 + \sin \beta)/\bar{h}}\} \quad (10)$$

ジェット効率 η_J は、ジェットの総圧損失によるものと考え、その総圧損失がノズル出口の平均動圧に比例するものと仮定する。指数理論による平均動圧 q は、 $J_b = 2q b_j$ であるから

$$q = \frac{h p_{Bj}}{2b_j(1 + \sin \beta)} \{1 - e^{-2b_j(1 + \sin \beta)/h}\} \quad (11)$$

そこで損失係数 ζ を用いて η_J はつぎのように書ける。

$$\begin{aligned} \eta_J &= 1 - \zeta q / p_{Bj} \\ &= 1 - \left(\frac{\zeta}{2} \frac{\bar{h}}{1 + \sin \beta} \right) \{1 - e^{-2(1 + \sin \beta)/\bar{h}}\} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで ζ は実験的に求めることにする。レイノルズ数、ノズル傾角などによって異なるものと思われるが、本実験においては $\zeta=0.22$ 程度である(第3図参照)。

(2) 降下状態 GEM が降下運動を行なっている場合、ジェット・カーテンにより下面に封じ込められた空気は、GEM の降下に伴い第1図(2)のようにジェット・カーテンの下側を、地面にそって流出するものと考えられる。これがいわゆるアンダフェッド状態である。

第1図(2)において水平方向の運動量流れの釣り合いから

$$h p_{Bu} = \eta_{J1} (J_u \sin \beta + J_{u1}) + \eta_{J2u} J_{u2} \quad (13)$$

η_{J1} はノズル・ジェットの効率、 η_{J2u} はジェット・カーテンの下側を流れ出る流れの効率である。ノズル出口および、ノズル・ジェット下流における運動量流れは、それぞれ

$$J_u = m_u v_u \quad (14)$$

$$J_{u1} = m_{u1} v_{u1} \quad (15)$$

アンダフェッド状態においても、ノズル・ジェットに分流を生じないから

(1) 平衡状態

(2) 降下状態

(3) 上昇状態

第1図 上下運動に伴う流れの型

$$m_{u1}=m_u \quad (16)$$

またノズル無限下流の v_{u1} は

$$v_{u1}=v_\infty \quad (17)$$

したがって

$$J_{u1}=m_u v_\infty \quad (18)$$

一方 GEM の降下により底面下より流出する流れについては、GEM の降下速度を $\dot{h}$ (降下を負) とすると、

$$J_{u1}=-\frac{S_B}{l}\rho\dot{h}v_{u2} \quad (19)$$

この流れについてのベルヌーイの式から、 $\dot{h}^2 \ll v_{u2}^2$ と考えて $\dot{h}^2$ を省略し、 v_{u2} を求めると

$$v_{u2}=\sqrt{2p_{Bu}/\rho} \quad (20)$$

これらの式を(13)式に代入すれば

$$h p_{Bu}=\eta_{J1} J_u \left(\frac{v_u}{v_u} + \sin \beta \right) - \eta_{J2u} \frac{S_B}{l} \dot{h} \sqrt{2\rho p_{Bu}} \quad (21)$$

第1図(2)に見るとおり、アンダフェッド状態は平衡状態がカーテンの下側を流出する空気の流れの上に乗ったような状態と考えられる。そこで高さ h を二つの部分 h_1 と h_2 に分け、すなわち

$$h=h_1+h_2 \quad (22)$$

とし、(21)式の右辺第1項と $h_1 p_{Bu}$ が、また第2項と $h_2 p_{Bu}$ がそれぞれ釣り合うように h_1, h_2 を選べば

$$h_1 p_{Bu}=\eta_{J1} J_u \left(\frac{v_u}{v_u} + \sin \beta \right) \quad (23)$$

$$h_2 p_{Bu}=-\eta_{J2u} \frac{S_B}{l} \dot{h} \sqrt{2\rho p_{Bu}} \quad (24)$$

(23)式の形は、まったく(7)式と同形であって、浮上高 h_1 の場合の平衡状態の式となる。したがって J_u の値も(8)式において $h=h_1$ とおけばよく、さらに無次元化することにより次式を得る。

$$\bar{p}_{Bu}=\eta_{J1}\{1-e^{-2(1+\sin\beta)/\bar{h}_1}\} \quad (25)$$

η_{J1} も(12)式において $h=h_1$ とおき

$$\eta_{J1}=1-\left(\frac{\xi}{2}\frac{\bar{h}_1}{1+\sin\beta}\right)\{1-e^{-2(1+\sin\beta)/\bar{h}_1}\} \quad (26)$$

また、(24)式も無次元化すると

$$\bar{h}_2=-2\eta_{J2u}\frac{S_B}{S_J}\frac{\dot{h}}{\sqrt{\bar{p}_{Bu}}} \quad (27)$$

η_{J2u} は後に示すように、 $\eta_{J2u}=1$ とすれば実験結果とよく一致する。(25)、(26)、(27)式と(22)式から降下中の GEM の $\bar{h}$ 、 $\dot{h}$ と $\bar{p}_{Bu}$ の関係を求めればよく、直接に閉じた形では表わせないが、内挿法または逐次近似法により、比較的簡単に計算できる。

(3) 上昇状態 GEM が上昇する場合、ジェット・カーテン内に封じ込められていた空気容積は次第に増

大するので、これを他から補わなければならない。これにはジェット・カーテンの一部があてられるものと考えられ、その結果第1図(3)のようにジェット・カーテンは二つに分割されて流れることになる。これがオーバーフェッド状態である。

第1図(3)において、検査面を A のようにとれば、水平方向の運動量流れの釣り合いから

$$h p_{B0}=\eta_{J1}(J_0 \sin \beta+J_{01})-\eta_{J20} J_{02} \quad (28)$$

η_{J20} はノズル・ジェットより底面下へ分流されるジェットの効率である。

一方検査面を B のように GEM の中心の対称面まで延長して考えれば、対称面上ではノズルから分流されて流入してきた流れの水平速度は0となる。したがって水平方向の運動量流れの釣り合いは、中心部の P_B を p_{B0c} で表わせば

$$h p_{B0c}=\eta_{J1}(J_0 \sin \beta+J_{01}) \quad (29)$$

これは(28)式において $\eta_{J20}=0$ とおいたのと形式的に同じ式である。

また検査面をノズルに近づけてとれば、底面下へ流入する流れは速度をもつから(28)式の第2項は0とはならず、その点の p_{B0} は p_{B0c} とは違った値をもつものと考えられる。したがって(28)式において、底面の位置に応じた η_{J20} を0から適当な値までの間に変えよう。これ以下は(28)式により展開することにする。

ジェットの運動量流れは、ノズルの出口およびジェット・ノズルの外方下流において、それぞれ

$$J_0=m_0 v_0 \quad (30)$$

$$J_{01}=m_{01} v_{01} \quad (31)$$

ノズル外方無限下流の v_{01} は

$$v_{01}=v_\infty \quad (32)$$

ただしオーバーフェッド状態では、ジェット流れは分流されるため $m_0 \neq m_{01}$ である。

底面下へ分流される流れについては、ノズル・ジェット内の総圧 p_{tj} で圧力 p_{B0} の底面下へ噴出するものと考え、 $\dot{h}$ は v_{02} に比べて小さいとして $\dot{h}^2$ の項を省略すれば

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\rho v_{02}^2 &= p_{tj} - p_{B0} \\ \therefore v_{02} &= \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_{tj} - p_{B0})} \end{aligned} \quad (33)$$

GM 底面に分流される流量 m_{02} は、単位周長について、底面積 S_B とその上昇速度 $\dot{h}$ から $\rho \dot{h} S_B / l$ となり、 J_{02} は $m_{02} v_{02}$ であるから

$$J_{02}=\frac{S_B}{l}\dot{h}\sqrt{2\rho(p_{tj}-p_{B0})} \quad (34)$$

m_0 が m_{01} と m_{02} に分流されるから

第3図 浮上高と底面圧力の関係（平衡状態）

第4図 底面圧力分布の測定例

らも底面の圧力分布は、アンダフェッド時にはほとんど変化がないが、オーバフェッド時には中心よりノズルに近づくにしたがって、大きな圧力低下を示すことがわかる。この低下は $\bar{h}$ が大きい方が相対的に大である。

第5図 上下速度と底面圧力の関係

第5図には理論値も記入した。アンダフェッド側は、 $\eta_{J,u}=1$ で計算したが、 $\bar{h}$ が小さな場合を除いて実験値とかなりよく一致する。一方オーバフェッド側では $\eta_{J,u}=1.0, 0.5, 0$ の三種について計算し記入した。 $\eta_{J,u}=1.0$ のときはノズル付近の傾向に近く、 $\eta_{J,u}=0$ のときは GEM の中心付近の傾向に近づく。これは上昇状態の基礎式についてのべたように、検査面のとり方による底面圧力の違いに、よく対応している。

ただノズル付近ではジェットに誘起される渦があるものと思われ、このための圧力低下もあるので、問題はもっと複雑であることが予想される。しかしながらオーバフェッド時においても、 $\bar{h}$ があまり大きくない範囲では $\eta_{J,u}=0$ として中心部の $\bar{P}_{B,0}$ を求め、ノズルに近い部分の圧力低下は、むしろ主として渦の影響によるものとして、若干の修正を加えた方が実用上はよいのではないかと考える。

6. 結 言

GEM の上下運動時の底面圧力を求める理論式を導き実験と比較した結果、少なくとも準静的には比較的良好一致を見ることができた。上下運動があまり速くない範囲では、この理論により底面圧力の変化につい

で一応の推定ができるものとする。

参考文献

- 1) TULIN, M. P.: On the Vertical Motions of Edge Jet Vehicles, Symposium on Ground Effect Phenomena (Princeton University Press, Princeton, N. J., 1959).
- 2) EAMES, M. C.: Basic Principles of the Stability of Peripheral Jet Ground Effect Machines, IAS 29th Annual

Meeting, Jan. 1961, IAS Paper No. 61-71.

- 3) DUKES, T. A. & HARGRAVES, C. R.: Stability Augmentation of Ground Effect Machine, Princeton University Instrumentation and Control Laboratory Report No. 601 April 1962.
- 4) STANTON JONES, R.: Some Design Problems of Hovercraft, IAS 29th Annual Meeting, Jan. 1961, IAS Paper No. 61-45.

周辺噴流型 GEM の縦安定特性*

前 田 弘**

Pitching Characteristics of Peripheral Jet Ground Effect Machines

Hiroshi MAEDA

Abstract

A theory of the pitching characteristics is presented for three-dimensional peripheral jet ground effect machines which are equipped with a compartment partition along the pitch axis. The analysis is separated into two parts, i. e. the longitudinal static stability and the dynamic pitching motion. In both cases, the behaviors of jet are quantitatively treated as the underfed and overfed operation.

At the static pitch condition, the cushion pressures in the falling downward and rising upward compartments are first discussed, and, applying those results, the simple expression of the static moment about the pitch axis is derived. Furthermore, utilizing the quasi-static principle, a second order nonlinear differential equation is obtained as the equation of pitching motion.

Detailed calculations have been carried out for a circular model GEM, and the comparisons with experimental data are encouraging.

1. ま え が き

周辺噴流型 GEM のピッチおよびロールの安定性の問題は、高速の乗物としての GEM の運動性の重要な基礎特性の1つとして最近しばしば研究課題に取り上げられている^{1)~4)}。しかし、GEM が傾斜すると、艇体下部の噴流はその対称性または2次元性を失ってしまうので、その解析は3次元の GEM について行なう必要があり、その上現象がかなり複雑なため現在のところまだその静安定または運動方程式などの簡単な表示式は得られていない。筆者はさきに3次元 GEM の上下運動について解析を行ない⁵⁾。その結果を実験デ

ータと比較したところよい一致を見たので、ここでは再び同様な流れを仮定してこの縦安定の問題の解析を試みた。

周知のように、周辺噴流型 GEM のピッチまたはロールの静安定特性は一般に不安定または僅かに安定であってそのままでは実用上不満足であるので、適当な安定性を与えるために艇体下部に安定ジェット (stability jet) または仕切り板 (compartment partition) を設けるのが普通である。安定ジェットおよび仕切り板の効果はいずれも艇体が傾斜したとき回転軸に対して下降した領域と上昇した領域の間に生ずるクッション圧力差が混合しないまま一定に保たれる作用を有し、この圧力差によって復元モーメントを得ようとする方法である。最近では構造的に簡単で効果のよい仕切り板が多く採用されているので、ここでも仕切り板のみを取り付けた GEM について取り扱う。

計算に当たっては簡単のために、つぎの仮定を行なう。

- (1) ピッチ角の変化によってホバー高さは変化しない。
- (2) 前進速度は0とする。
- (3) GEM 底面にピッチ軸に沿って仕切り板を取り付け、前後の圧力差は任意の値で一定に保たれるものとする。
- (4) 流れの解析には単純運動量理論 (simple momentum theory) を用いる。
- (5) 噴流の運動量はピッチ角によって変化しない。
- (6) 空気の非圧縮性の条件は常に満足される。
- (7) 空気の粘性による効果は考慮しない。

本解析は2部に分かれていて、第1部ではピッチ軸

* 昭和42年10月3日原稿受理

** 京都大学工学部