圧力室型エアクッションに関する二三の実験*

宮井 善 弘**・安富 善 三 郎**・木 田 輝 彦**

Some Experiments on Open Plenum Chamber Air Cushion

Yoshihiro MIYAI, Zensaburo YASUTOMI and Teruhiko KIDA

Abstract

Some experimental investigations were carried out for axially symmetric open plenum chamber air cushion models.

As to the influence of geometric configurations of a plenum chamber (i. e., chamber height, nozzle diameter and hovering height), the hovering lift performance can be conveniently expressed by using Figure of Merit.

The experiments were also carried out for the effect of the peripheral edge shapes of plenum chamber on the lift performance.

The effect of forward speed on the cushion lift was also tested in a wind tunnel with a moving belt rig.

1. ま え が き

本研究においては、軸対称の圧力室型 ACV 模型を用いて実験を行ない、最初に浮上高、圧力室高、ノズル径などの変化による浮上用空気パワーと揚力との関係をしらべた。

つぎに、圧力室下端におけるエッジ部の断面形状と揚力性能との関係について実験を行なった。

さらに、前進速度によるクッション圧力や揚力性能などへの影響をしらべるため、走行ベルトを用いて風洞実験を行なった。

2. 圧力室型 ACV^{1), 2)} の性能表示方法

圧力室内面および地面上の圧力分布は ACV に働く力を知る上には重要である。これを $p/p_{t\max}$ で示す。ここに p は測定点の静圧、 $p_{t\max}$ はノズル部にお

る空氣の全圧の最大値 (ノズル中央部の全圧) である。なお、この報告ではすべて大気圧を零としている。

ACV の底面積に対する平均のクッション圧力係数を

$$\eta_p = \{(L-T)/S_b\}/p_t \quad (1)$$

であらわす。ここに $L-T$ はクッション揚力 (L は全揚力、 T はノズルより下向きに流出する空氣の運動量推力)、 S_b は ACV の底面積、 p_t はノズル全圧の平均値である。

つぎに、ある浮上高 h における ACV の浮上用空気パワー P は、ノズル部における空氣の平均流速を v_n 、断面積を S_n とすると $P = p_t S_n v_n$ で与えられる。いまこの P を一定に保ちながら、第1図のように地面が無遠慮方にはなれ、同時に流れが圧力室内壁より剝離してノズルと同一断面積の噴流になるものと仮定すると、ノズル部の静圧は零 (大気圧) となるからその流速は $v_n \rightarrow v_{h=\infty}$ となる。ゆえに、 $P = (\rho/2) S_n v_{h=\infty}^3$ である。またこのときの揚力は噴流の運動量推力 $T_{h=\infty} = \rho S_n v_{h=\infty}^2$ だけであるから $v_{h=\infty}$ を消去するとつぎのようになる。

$$T_{h=\infty} = (4\rho S_n)^{1/3} P^{2/3} \quad (2)$$

ACV の揚力 L と上の $T_{h=\infty}$ との比を浮揚 “パワー P を一定に保ちながら $h \rightarrow \infty$ にしたときの推力を基準とした揚力増大率” $A_{h=\infty}$ (at const power, 以下表示を略す) と定義する^{*1}。

$$A_{h=\infty} = \frac{L}{T_{h=\infty}} = \frac{L}{(4\rho S_n)^{1/3} P^{2/3}} \quad (3)$$

第1図 浮上高 $h = \infty$ のときの流れ (仮定)

* 昭和44年8月8日原稿受理

** 大阪府立大学工学部

*1 浮揚中の ACV (揚力 L 、浮上高 h 、浮揚パワー P の状態) は一般に用いられている揚力増大率 $A (= L/T)$ 、または本文のような一定パワーにおける $A_{h=\infty} (= L/T_{h=\infty})$ を用いて性能をあらわすことができる。

パワー一定のときは浮上高 h が大きくなるにつれて流量 v_n も大となりノズル全圧 p_t が減少する。そこで、 $P = p_t S_n v_n = \rho S_n v_{h=\infty}^3 / 2$ (ただし $v_n \approx v_{h=\infty}$ のとき $p_t \approx \rho v_{h=\infty}^2 / 2$) と $p_d = \rho v_n^2 / 2$ (ノズル動圧) との二式より

$$\frac{A}{A_{h=\infty}} = \frac{T_{h=\infty}}{T} = \frac{\rho S_n v_{h=\infty}^2}{\rho S_n v_n^2} = \frac{(8 p_d)^{1/3} p_t^{2/3}}{2 p_d} = \left(\frac{p_t}{p_d} \right)^{2/3}$$

となる。

ACV のホバリング状態の動力性能は, Figure of Merit $M_F (=P_c/P)$ [ACV の揚力 L と同じ揚力を基準断面積 S の無損失ダクト・ファンにより発生させるときに要するパワー $P_c (= \sqrt{L^3/(4\rho S)}$ 特性パワー) を実際の ACV の浮揚パワー P で割った値] を用いて表示する. いま基準面積 S として, ACV の底面積 S_b あるいはノズル断面積 S_n をとったときの M_F をそれぞれ M_{Fb} , M_{Fn} とすると

$$M_{Fb} = \sqrt{L^3/(4\rho S_b)}/P \quad (4)$$

$$M_{Fn} = \sqrt{L^3/(4\rho S_n)}/P = \sqrt{S_b/S_n} M_{Fb} \quad (5)$$

となる. この式より逆に無次元量 M_{Fb} を含む式として揚力を表示できる,

$$L = (2M_{Fb})^{2/3} (\rho S_b)^{1/3} P^{2/3} \quad (6)$$

式 (3) の P は (5) の P と等しいから

$$A_{h\infty} = M_{Fn}^{2/3} = (S_b/S_n)^{1/3} M_{Fb}^{2/3} \quad (7)$$

の関係がある. そこで揚力は $A_{h\infty}$ を含んだ式

$$L = (4S_n/S_b)^{1/3} A_{h\infty} (\rho S_b)^{1/3} P^{2/3} \quad (8)$$

で表わすことができる.

圧力室の幾何学形状および種々の浮上高に対する M_{Fb} または $A_{h\infty}$ の値を模型実験により式 (6) または (8) を用いて求めておけば, 実際の ACV の揚力を, その底面積および流体密度とパワーの関数として容易に求めることができる. そのため設計が便利となり, また ACV (周辺噴流型を含めて) を同じ定義下で取り扱えるため揚力性能の比較が容易である.

3. 実験装置および方法

ホバリング状態における, ACV に作用する空気力の測定は第2図に示す装置を用いて行なった. 供試圧力室型エア・クッションの模型は第3図に示されるように軸対称で, 形状の単純化のため圧力室およびノズル部はすべて円筒形を採用した. なお圧力室内径 D は 200 mm ϕ , 圧力室高さ h_b は 0~100 mm の範囲で可変となっている. また, ノズル内径 d は 39.7 mm ϕ , 81.0 mm ϕ および 200 mm ϕ (ノズルだけ) の三種を用いた.

つぎに, 圧力室下端のエッジ部断面形状の影響をし

*2 流体は非粘性, 非圧縮性であるとし, 圧力室内に流れる損失, うずはないものとする. また, 圧力室高 h_b は十分高いと考えノズル断面内の静圧 p は一定とし, ノズル静圧とクッション圧力 p_c とは等しいものとする. この仮定のもとで揚力を計算すると (文献 5),

$$L = p_c S_b + \rho v_n^2 S_n \\ = \left[\left(\frac{4S_n}{S_b} \right)^{1/3} \left(\frac{S_n}{C_e S_e} \right)^{2/3} \left\{ \left(\frac{C_e S_e}{S_n} \right)^2 + \frac{S_b}{2S_n} \eta_p \right\} \right] (\rho S_b)^{1/2} P^{2/3}$$

のように表わすことができる. ここに C_e はエッジ部の流量係数, S_e はエッジ部流出面積, η_p は式 (9) 参照. 上式の [] は ACV の幾何学形状の影響を表わす無次元量であり, $(4S_n/S_b)^{1/3} A_{h\infty}$ または $(2M_{Fb})^{2/3}$ と一致する.

第2図 実験装置

第3図 圧力室の断面形状

第4図 エッジ形状 (断面図)

らべるため, 第4図に示す7種のエッジを用いた. このうち, A~D は流出角度を変化させており, 他はエッジ部に肉厚を持たせたりラピンスの形状などを取り入れて空気の流出阻害作用を期待している.

ACV に作用する全揚力 L は第2図の地面板の下におかれたバネ秤で直接求めた. なお ACV の浮上高は圧力室の外周に 120° 間隔で取り付けられた三個のダイヤル・ゲージで測定した.

ノズル部における流れについては, 管の中心軸に設けられたピトー全圧管と管壁の静圧孔とにより求めた. すなわち静圧の半径方向の変化は無視し, 流れの軸方向速度は乱流と見なして管壁よりの距離の 1/n に比例するものと仮定し, n を管内の平均 R_e 数より NIKURADSE³⁾ の実験を用いて定めた.

第5図 走行実験のセット図

このような速度分布の仮定を用い、ノズル全圧については管の全断面積の平均値を p_t とし、また運動量推力および流入空気パワーについても、管の全断面積に関する積分値をそれぞれ T および P とし、前節の式(1)、(6)および(8)により η_p , M_{Fb} , $A_{h=0}$ など求めた。

前進速度によるクッション圧力や揚力性能などへの影響をしらべるための実験装置を第5図に示す。風洞はNPL型低速風洞で、測定室の断面は 1×1.5 m の変形八角形である。この下面中央部に幅 650 mm のベルトを長さ 1,200 mm にわたって設置し、風洞の気流速度と同期させた⁴⁾。ベルトの材質はナイロン芯入りネオプレン製で、外側の表面は平滑に作られている。なお、ローラー直径は中央部で 296 mm ϕ であり、ベルト面の走行速度の範囲は 0~30 m/s である。

模型は風洞に固定し、外部よりパイプを通してノズル部に空気を導入した(模型は静止状態の実験に用いたものと同一で $D=200$ mm ϕ 、圧力室の断面形は第4図F)。

走行実験は前進速度係数 k [$k=(\rho/2)U^2/p_{t,max}$ ここで U は風洞気流の速度] の値を 0~1.0 の範囲で変化させた。なおこの実験においては、圧力室内の上面部に作用する静圧分布を積分したものに、ノズル部の静圧による力および運動量推力 T によるものを加えて、全揚力 L を計算した。

ベルト面の走行による上下振動の測定には抵抗線歪み計による変位計を用い電磁オシログラフで記録した。

4. 実験結果

4.1 圧力室の形状による影響 第6図は第3図のような圧力室型エア・クッション(ただし、エッジの断面形は第4図C)の圧力分布を示す。上の曲線群は圧力室上部内面、下の曲線群は地面板上の圧力分布である。圧力室上部内面の圧力は、浮上高 h が非常に小

第6図 静圧分布(エッジ第4図C)

さいとき ($h/D=0.35\%$) は $p/p_{t,max} \approx 1.0$ であるが、 h が大きくなると圧力は降下する。 h/D が 3.5% 以上になると圧力室内径の 85% 付近において圧力の極小値があらわれている。これは圧力室内に渦輪が発生するためである。また h/D が約 6% ぐらいのとき上部内面の圧力は強い負圧にまで低下している。

第7図は第6図の圧力室 ($d/D=0.405$) のほかに

第7図 クッション圧力係数とノズル径との関係

 第8図 種々の圧力室高に対する浮上高とクッション圧力係数との関係 ($d/D=0.199$)

$d/D=0.199$ および 1.0 の場合に対して、式(1)を用いて求めたクッション圧力係数 η_p と浮上高との関係を示す。図中の実線は揚力が正の範囲の理論値⁵⁾

$$\eta_p = 1 - C_e^2 (2D/d)^4 (h/D)^2, \quad (C_e = 0.6) \quad (9)$$

を示し、 $\circ \nabla \Delta$ はそれぞれ実験値を示す。

第8図は圧力室高を変化させた場合の各種浮上高に対する η_p の様子を示す。浮上高が非常に低い場合 ($h/D=0.1\%$) の $h_b/D \geq 0.05$ のとき、と比較的大きい浮上高 ($h/D=1.5\%$) の場合の $h_b/D \geq 0.1$ のときに、 η_p の値はおおの $\eta_p \approx 0.99$ と $\eta_p \approx 0.31$ 位に収束している。しかし、おおのそれ以下の h_b/D の場合には急速に η_p の値は低下している。

第9図は動力性能 M_{Fb} と浮上高との関係を示している。実線は理論値⁵⁾ で流量係数 C_e を 0.6 にとって次式から求められた。

$$M_{Fb} = \frac{1}{4C_e} \frac{D}{h} \left[\frac{\eta_p}{2} + \left(\frac{4C_e h}{d} \right)^{2/3} \right] \quad (10)$$

h/D の全域にわたって M_{Fb} の最大値を与えるのは $d/D=1.0$ のときである。浮上高が小さいときは d/D の値が相当小さくなくても M_{Fb} の値はほとんど減少

 第9図 M_{Fb} と浮上高との関係

 第10図 $A_h = h_b/D$ におよぼす圧力室高の影響 ($d/D=0.199$)

しないが、浮上高が大きくなるとノズル直径の減少につれて M_{Fb} の値は顕著に減少する傾向がある³⁾。

第10図は文献6) にならって $A_h = h_b/D$ の形で揚力性能をあらわし、圧力室高 h_b の効果をしらべている。つまり $A_h = h_b/D$ の大きい値を得る浮上高 $h/D \leq 0.01$ において、 h_b/D が 0.05 以上であると h_b の影響はほとんどみられないが、 $h_b/D \leq 0.05$ において h_b が小さくなるにしたがって $A_h = h_b/D$ は低下する⁴⁾。そして、一般に知られているように $h_b=0$ で最も低い値になっている。なお $d/D=0.058$ と 0.405 の場合も同様な結果が得られた。

4.2 エッジ形状と揚力性能との関係 圧力室下端に第4図に示す各種エッジを取り付けた場合、圧力室から出る空気の流れ量が減少し、揚力性能が向上することを目的として実験を行なった。第11図に圧力室上面部と地面板上の圧力分布の代表例を示す (第4図

³⁾ ノズル径の影響として、文献1) の計算では $S_n/S_b=0.5$ のときに ($A=L/T$ 脚註*) の値が最高値になっている。そして実験では最適ノズル径を見出していない。

⁴⁾ 文献1) では、圧力室高は揚力増大率にあまり影響をおよぼさないとしているが、これは h_b の大きな領域の実験が主となっているために h_b の小さなところの評価が入っていないものと思われる。また小さな浮上高 ($A \approx 1$) のときには圧力室高 (side depth) が小さいほど A は大きくなるとしているが、図から判断し難く、図中で $h_b=0$ のところで A が大幅に下がっていること、および圧力室高の小さいところでの実験値が少ないことなどから信頼性に乏しい表現と思われる。

第11図 静圧分布 (エッジ第4図E)

Eのエッジ)。

これらの実験は、上面部につながる側筒をそのままにしておいて、エッジ部だけを取りかえてその揚力性能におよぼす効果をしらべようとしたものであり、実験はすべて $d/D=0.405$, $h_b/D=0.10$ の圧力室について、浮上高 $h/D=0.5\% \sim 3.5\%$ の範囲に対して行なわれた。

第6図 (エッジ第4図C) と比較すると、第11図の地面上の圧力分布には $h/D=1\% \sim 2.5\%$ にかけてエッジの下部に強い負圧があらわれている。この負圧は圧力室外周部の環状面積に作用するので、揚力を減少させる効果が比較的大きい。また同様の現象が第4図FおよびGのようにエッジ下端に厚みのある断面形状に対してあらわれている。

第12図には各種エッジの揚力性能を比較するため Figure of Merit の値が示されている。なお図の下部にはエッジの断面形を示している。一般に M_{Fb} の値は底面積のとり方により変化するの、エッジに肉厚を持つものはその外径あるいは内径、またエッジ角度をもつものは最下部直径あるいは圧力室最大内径などを基準として求められた。これらの値はそれぞれ各種エッジ断面の上方に対応させて示してある。

エッジを含めた圧力室の占有する最大面積が一定に

端12図 各種断面形に対する M_{Fb} (各基準径における) の値 ($h_b/D=0.1$, $d/D=0.405$)

制限されているときの M_{Fb} の値は各断面形の左側の実線に示されている (ただし B, C は他より d/D が 6% 大きい)。それらの値を比較すると、C の値が一番大きく、A, B の順に小さくなり、さらに D およびエッジ下端に肉厚をもつ E, F, G が小さくなっている。圧力室の平面形が一定のときに、基本的な C に対し、他は形状が複雑になるにもかかわらず性能の改善を得ていないことがわかった。

つぎに、内径が 200 mmφ の側筒に各種のエッジを取り付けた場合 (d/D はいずれも一定で M_{Fb} の値は各断面形の右側の点線に示されている) の性能を比較すると、A が C より少し上まわっているほかはいずれも C より性能が悪くなっている。特にエッジ部に肉厚のある F, G は最も低い値を示している。この結果より、圧力室型 ACV のエッジ (スカート) の断面形状は基本形状 C 以外のものを取り付けても M_{Fb} はほとんど改善されていない。

4.3 前進速度とクッション揚力との関係 ノズル直径 $d/D=0.405$, 圧力室高 $h_b/D=0.10$ の圧力室模型を用いて風洞実験を行なった。すなわち、前進速度係数 $k [=(\rho/2)U^2/p_{t \max}]$ の値を 0 より 1.0 まで変化させ種々の浮上高におけるクッション圧力分布を風洞気流を含む対称面の前、後半部およびこれに直角な面内の左右の部分について測定した。このうち対称面内における圧力室上部内面の圧力分布の二、三の例を第13図に示す ($k=0$ の場合は第11図とほぼ同じ)

$k=0 \rightarrow 0.11$ の範囲では前進速度の増加にともなって圧力は全般的に少し減少するが、 $k=0.2$ (第13-2図) になると特に浮上高が小さい場合 ($h/D < 1.5\%$) に圧力降下が見られる。これ以上の速度になると、圧力分布の前半部、後半部の形状がたがいに異なってくる。特に k の値が 0.5 以上になると、浮上高 h/D が 5% 付近で存在していた前半部の負圧は正圧にかわ

 13-1 前進速度係数 $k=0.11$

 13-2 $k=0.20$

 13-3 $k=1.00$

 第13図 走行状態における圧力室上面部の静圧分布
(エッジ第4図F, $h_0/D=0.1$, $d/D=0.405$)

り, また後半部の圧力も不規則になって圧力室内径の60%付近で正圧のピークを形成する。この傾向は $k=1.0$ (第13-3図) になってもほぼ同じで, 圧力室内の後半部に複雑な渦が発生していることを示す。

第13図の圧力分布に対応するクッション圧力係数 η_p を第14図に示す。第13図における圧力分布の前半部と後半部およびその分割線上(左右)の圧力分布はそれぞれ圧力室平面形の四半円の各部の圧力分布を

 第14図 クッション圧力係数と前進速度係数との関係
($h_0/D=0.1$, $d/D=0.405$)

代表するものと仮定し, これら圧力分布から圧力室上面部に作用するクッション揚力を求め, これにノズル部の静圧による揚力を加えて η_p を求めた。(第14図に示された実験点の範囲において, 左右の圧力分布は前後部の圧力分布値のほぼ中間値となった)

このようにして得られたクッション揚力にノズルにおける運動量推力を加えて全揚力を計算し, 前進速度係数 k に対する“一定動力のもとにおける揚力増大率” $A_{k=\infty}$ を求めると第15図のようになる。この前進速度の影響をしらべる実験では一つの圧力室模型だけを用いたので, 式(7)よりわかるように Figure of Merit の代りに $A_{k=\infty}$ で前進速度係数 k に対する揚力性能を評価することができる。

η_p および $A_{k=\infty}$ はともに前進速度によりはじめは

 第15図 $A_{k=\infty}$ と前進速度係数との関係
($h_0/D=0.1$, $d/D=0.405$)

第16図 ベルト表面の振動形状

減少して $k=0.2$ 付近で極小値となり、これより前進速度が大きくなると再び増加する傾向がある。

これらの風洞実験における走行ベルト表面の上下振動の最大振幅は、走行速度によっても異なるが、 ± 0.4 mm 以下であった。これは自由振動数の高い変位計を用いて風洞実験と同時に第16図のように電磁オシログラフに記録された。

なお、ベルト面の振動が気流および圧力室内の流れにおよぼす影響は測定していない。しかし、ベルト面の振幅が非常に小さいため、ほとんど流れの擾乱を誘起していないものと考えられる。

5. 結 論

ノズル部ではく離を起して圧力室に流入するような型式の圧力室型 ACV の実験において、つぎの結論を得た。

(1) 最適ノズル直径 d は $d/D=1$ のときである。しかし浮上高 h が小さい場合は性能の低下をおこさずにノズル径をかなり小さくすることが出来る。

また、圧力室高 h_0 は通常 $h_0/D \geq 0.1$ の範囲であればよい。そして、 $h_0/D \leq 0.05$ になると急速に性能

は低下する。

(2) 圧力室の周辺エッジの断面形を、基本形（先端が鋭角で内面が地面と垂直な形）の代わりにラビリンス・シール型など数種類のものを取り付けて実験を行なったが、揚力性能の改善はほとんど見られず、むしろ悪化する場合の方が多いようである（特にエッジ部に肉厚のあるものは性能が悪くなっている）。

(3) 前進速度がクッション揚力におよぼす影響は、最初、前進速度とともに揚力が低下し、前進速度係数 k が 0.2 くらいのときに最低値になる。それ以上 k が大きくなるとクッション揚力は増加しはじめ、 $k=0.5 \sim 1.0$ にかけてほとんど静止状態の揚力に近いところまで回復している。

(4) ACV の全揚力は、 $L = (\text{無次元量}) \times (\text{ACV の底面積 } S_b \times \text{空気密度 } \rho)^{1/3} \times (\text{空気パワー } P)^{2/3}$ のように表示され、この無次元量は ACV の幾何学形状の影響を表わす。さらに、これを用いると他種の ACV とも共通して揚力性能が比較でき、また ACV の設計も容易になる。この無次元量は一般に知られた係数を用いて表わすと、 $(4S_w/S_b)^{1/3} A_k = \infty$ (at const. power) または $(2M_{Fb})^{2/3}$ となる。

文 献

- 1) D. E. WRIGHT: The Effect of Configuration on the Lift Augmentation Ratio of a Two Dimensional Open Plenum Ground Effect Machine, Dep't Aero. Eng. Princeton Univ. Report, No. 516, May, 1960.
- 2) D. I. G. JONES: Hovering Performance of Plenum Chamber GEMs over Land and Water, J. Aircraft, Vol. 3, July-Aug., 1966, p. 333.
- 3) J. NIKURADSE: Forshungsheft, 356, 1932; 藤本武助, 流体力学, 養賢堂, 1960, p. 303
- 4) S. F. J. BUTLER et al.: A Moving-belt Rig for Ground Simulation in Low-Speed Wind Tunnels, R & M, No. 3451, Dec., 1963.
- 5) 安富他, 日本機械学会関西支部第 44 期定時総会講演会講演論文集, 1969年3月, p. 32.
- 6) A. JAUMOTTE et al.: Theory and Experiments on Air Cushion Vehicles at Zero Speed, Hovering Craft and Hydrofoil, Vol. 4, No. 11, August, 1965.