周辺噴流型 GEM に関する実験*

——馬蹄形渦の観察とその抗力特性に及ぼす影響——

Some Experiments on a peripheral Jet GEM

——Observation of Horseshoe Vortex and Its Influence on Drag Characteristics.——

小田切文治**・安東茂典**

Fumiharu OTAGIRI and Shigenori ANDO

Abstract

Some experimental results are reported in this paper for a simplified peripheral jet GEM. The first phase concerns the flow pattern around the GEM, where the tuft-grid method has been used. Many instructive photographs are obtained which show a single horseshoe vortex around a GEM. The second phase contains measurements of pressure distribution on the GEM upper surface. The external drag is obtained by integrating the pressure distributions. Significant (about one-third) reduction of parasite drag has resulted from the influence of the peripheral jet over a wide speed range; inspection of the pressure distribution shows that the drag reduction occurs both at the front and rear of the GEM.

1. 記号

- C_{pi} : 圧力係数, i-station における
- C_D : 抗力係数 $= D/q_\infty S_c$
- D : 形状抗力
- d : GEM 直径
- d_{eff} : GEM 底面相当円直径
- dS_i : 面積要素, i-station における
- F, R : GEM の前方および後方を示す
- h : GEM の浮上高さ
- i : GEM 表面の圧力測定区分
- m_j : ジェット流量 $= \rho V_j S_c$
- P : 全必要パワー
- p_c : クッション圧力
- $\bar{p}_c$: p_c の平均値
- p_i : GEM 外表面の静圧, i-station における
- q_∞ : 自由流動圧
- S_c : クッション面積
- S_e : 周辺ノズル面積
- t : ノズル幅
- V_j : 周辺ジェット速度 (m/sec)
- $\bar{V}_j$: V_j の平均値 (m/sec)

V_∞ : 自由流速度 (m/sec)

W : GEM の全備重量

α : GEM の迎え角

θ : GEM 表面に立てた法線と水平面とのなす角度

ρ : 空気密度

φ : GEM 平面において, 前端から反時計方向に測った角度

Ψ : GEM 表面に立てた法線と自由流とのなす角度

2. 序 論

安東ら¹⁾はある前進速度領域で周辺噴流型 GEM の周囲に馬蹄形渦が発生することを予想した。そしてその前方渦により前部圧力が低下し, また後部では周辺ジェットが周囲の剝離し停滞しがちの空気を誘引することにより圧力を回復する, この両方の効果によりいわゆる干渉推力が生ずるであろうという推定を行った。この渦の存在については KNOWLTON ら²⁾, 次いで村尾ら³⁾がこれがある程度実証した。しかしわれわれの入手し得た文献²⁾の煙風試の写真是大層悪く, 馬蹄形渦の発生を実証しているかどうかかわからない。また文献³⁾のそれは写真ではなくして流糸観察にもとづいて描かれた絵であり, しかも複数の馬蹄形渦が発生することを示す。かくして, 周辺噴流型 GEM のまわりに馬蹄形渦が存在することを示す入手可能な信頼すべき資料は未だないといえよう。

またこの渦のために干渉推力が生ずるかどうかについては, 村尾ら⁴⁾の実験は, それを暗示しているように見える*。しかし, 干渉推力が存在するかどうか, また存在するとすればそれが通常の海上交通用 GEM の巡航速度に比べてどの程度の速度で起こるか? は依然としてわかっていない。

本研究の目的は大別して次の2つである。まず, 馬蹄形渦の存在を示す“写真”をとる, 次いで干渉推力の存在を調査するため表面の圧力分布を測定する。

* しかし村尾氏は, それが大層低い速度であるため, 実験値の信頼性に乏しく測定誤差かも知れないと, 話しておられる。

* 昭和50年9月23日原稿受理

** 名古屋大学工学部航空学教室

流れの可視化のためには、前方渦が馬蹄形状にカーゼし、GEM の側方渦へつながっていること、すなわち GEM の側方にも明確な渦があることを実証しようと試みた。

次に干渉推力の存在を調査するに当たっては、圧力分布を測定することにした。これは、たとえ干渉推力が存在するとしても、それが GEM 外面のどの部分で生じているかがわからなければ、干渉推力のメカニズムを理解し得ないからである。圧力分布を測定しそれを積分して抵抗を求めることを可能にするためには、極めて簡単な外形“半球形”を選ばざるを得なかった。

さらに、周辺噴流用空気を GEM 底面の穴から外部供給する、いわゆる外部供給型を選んだが、これは

- 1) GEM に内蔵して必要なパワーを出し得る、強力でコンパクトな動力源が入手困難であったこと。
- 2) 現象の理解としては、GEM のまわりの外部空気流に対する周辺噴流の影響を空気取入口からの流入流の影響とを分離した方がよいと考えられ、今回は前者の影響のみに限定する。

という理由にもとづく。

また、本実験全体を通常の海上用 GEM の巡航速度に重点をおいて行ったことを付記する。

Stanton JONES⁵⁾ によれば WV_∞/P を最大ならしめる $(q_\infty/p_\infty)_{opt}$ の値は h/d_{eff} の関数ではあるが、ほぼ 0.22~0.3 である。また SR-N4 の諸元要目に基づく略算もほぼこの程度である。よってわれわれの実験は $q_\infty/p_\infty \approx 0.25 \sim 0.30$ に重点をおいた。

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置 (第1,2,3図)

3.1.1 使用した風洞 名古屋大学工学部自由傾斜風洞 (送風型式、一段軸流動翼可変ピッチ型; 吹込口径=対辺 1,940 mm 八角形; 吹口風速 0.5~40 m/sec; 送風機駆動主電動機出力 220 kW; 風向変更装置傾斜角実用範囲 $-10^\circ \sim +90^\circ$)

3.1.2 模型 厚さ 5 mm の透明アクリル樹脂製半球状 (450 mm ϕ); 周辺ジェットノズル (ノズル幅 10 mm); その内部は外部供給ジェットの損失を少なくするための整流木片をそなえている。

3.1.3 内部流供給装置 風量 140 m³/min, 風圧 80 mmAq, 回転数 3,460 R.P.M, 出力 3.7 kW の軸流ファンおよびダクト; ファン直結モーター, 三相誘導電動機, 60 cycle, 220 volt, 12 Amp.

3.1.4 固定地面板 GEM の吹きつけるジェットによっても十分たわまない厚さ 15 mm のベニヤ板を

第1図 全体図

第2図 GEM 本体

用い、上下可動であり、広さは $2,700 \times 1,800(\text{m/m})^2$ 。
 固定地面板を用いたのは流糸張線の取付けを容易にするためであった。これによって臨界速度の正確な決定は犠牲にされたが、その他の点では本質的な影響はないものと判断された。

3.1.5 模型の設定とフローパターン観測用流糸配置 (第3図参照)

3.1.6 圧力測定装置 (1) GEM 表面の圧力孔: 表面には静圧分布測定孔 ($1\text{ m/m}\phi$) を緯経線交点に 63 個有し、緯線上と経線上において隣り合う 2 つの孔の中点を結ぶ曲線によって出来る静圧分布測定区分領域 (面積要素) が設定してある。(第4図参照)

(2) 周辺ジェットの測定装置, (第5図参照)

(3) 底面圧力測定装置, (第5図参照)

3.2 実験方法 実験全体を通じて $\alpha=0$, $h/t=2$ である ($h=20\text{ m/m}$, $t=10\text{ m/m}$)。

3.2.1 流れ模様観察試験 次の 19 cases を調査した。

$$\left. \begin{array}{l} V_j = 17.5\text{ m/sec}, V_\infty = 7\text{ 値} \\ V_\infty/V_j = 0 \sim 1 \end{array} \right\} 7\text{ cases}$$

$$\left. \begin{array}{l} V_j = 8.0\text{ m/sec}, V_\infty = 10\text{ 値} \\ V_\infty/V_j = 0.89 \sim 1.95 \end{array} \right\} 10\text{ cases}$$

$$V_j = 18.0\text{ m/sec}, V_\infty = 20\text{ m/sec} \cdots 1\text{ case}$$

$$V_j = 0, V_\infty = 20\text{ m/sec} \cdots 1\text{ case}$$

これらの各 case において GEM の前方, 側方, 後方および地面上の流糸の写真をとった。

3.2.2 圧力分布測定試験 次の 32 cases である。

$$\left. \begin{array}{l} V_j = 34 \sim 35\text{ m/sec}, \text{ ほぼ一定} \\ V_\infty = 0 \sim 33.9\text{ m/sec} \\ q_\infty/\bar{P}_e = 0.048 \sim 1.99 \end{array} \right\} 28\text{ cases}$$

$$\left. \begin{array}{l} V_j = 34 \sim 35\text{ m/sec}, \text{ ほぼ一定} \\ V_\infty = 0 \end{array} \right\} 1\text{ case}$$

第3図 流糸配置図

第5図 V_j および P_e 測定点

第4図 GEM 表面圧力測定孔配置

$$\left. \begin{array}{l} V_j=0 \\ V_\infty=8.11, 18.75, 25.63\text{m/sec} \end{array} \right\} 3 \text{ cases}$$

これらの各 case において63個の圧力を測定し、これから、圧力係数 C_{pi} 、さらにこれを積分して抵抗係数 C_D を計算した。なお圧力測定は対称面の片側左半分のみである。

また V_j の測定は

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{流糸観察の場合} \cdots \cdots \cdots 10 \text{ 点 (第5図参照)} \\ \text{圧力分布測定の場合} \cdots \cdots \cdots 7 \text{ 点 (第5図参照)} \end{array} \right.$$

で行い、これらの平均値を用いた。

4. 実験結果

まず、流れ模様試験、圧力分布試験の両方に共通して周辺ジェット流速が平均値まわりに $\pm 20\%$ も変動してしまった。自由流流速が0の場合さえもそうである。これは、外部供給ダクトのGEMの底面に入る前の直線部が短か過ぎたためと思われる。

これに反して底面圧力の測定場所によるばらつきは極めてわずかであった(せいぜい1~2%)。したがってジェット流速の前記の非一様性も、本実験の価値を本質的に損う程ではなかったと思われる。

4.1 流れ模様の観察 第6図(a)~(e)に流糸の写真を示す。各図とも-1が前方渦、-2が側方渦である。後方流糸は有意義な流れ模様を示唆しないので掲載しない。

$q_\infty/\bar{P}_e$ が 0.226 より 6.423 まで増すと、前方渦および側方渦ともに段々小さくなりGEMに近付いている。強調すべきことは側方渦としてはっきりしているものがただ一つしかないことである。かくして前方渦と側方渦が連続して1つの馬蹄形渦を形成していることはほとんど疑いようがない*。なお前方渦の消失する C_μ 値(運動量係数 $= m_j V_j / q_\infty s_c$) に関しては本実験のような固定地面板を用いた場合は定量的調査が無理であるので詳述しない。

地面板上の流糸観察結果は内部流と外部流の間における境界線の存在をはっきりと示した(第7図(a)および(b)参照)。それはGEMの外側にてnoseを前方とする放物線状であり、かつそれは $q_\infty/\bar{P}_e$ が増大するにつれて縮小しGEMに近付いている。

4.2 V_∞ による $\bar{P}_e$ の変化 内部流供給のファン

* このことは、地面板上の流糸パターン(後述)からも確認できた。

a-1 前方フロー・パターンの写真, $q_\infty/\bar{P}_e=0.226$

a-2 側方フロー・パターンの写真, $q_\infty/\bar{P}_e=0.226$

b-1 前方フロー・パターンの写真, $q_\infty/\bar{P}_e=0.478$

b-2 側方フロー・パターンの写真, $q_\infty/\bar{P}_e=0.478$

 c-1 前方フロー・パターンの写真, $q_{\infty}/\bar{p}_c=0.684$

 c-2 側方フロー・パターンの写真, $q_{\infty}/\bar{p}_c=0.684$

 d-1 前方フロー・パターンの写真, $q_{\infty}/\bar{p}_c=1.062$

 d-2 側方フロー・パターンの写真, $q_{\infty}/\bar{p}_c=1.062$

 e-1 前方フロー・パターンの写真, $q_{\infty}/\bar{p}_c=6.423$

 e-2 側方フロー・パターンの写真, $q_{\infty}/\bar{p}_c=6.423$

第 6 図

のパワーを一定にして実験した。その際、 $\bar{p}_c$ の V_{∞} による変化を第 8 図に示す。

4.3 GEM の抗力 抵抗の減少が GEM の前半、後半のどちらから起こるかを知るために、圧力分布の前半部での積分 C_{DF} と後半部での積分 C_{DR} を別々にプロットした。

4.3.1 $q_{\infty}/\bar{p}_c=0\sim\infty$ 領域 (第 9 図) 図が示すよ

うに、右端の周辺噴流なしのそれと比べ、 C_{DF} 、 C_{DR} ともに低下している。結果として全抵抗 C_D は約 2/3 に減少している。

4.3.2 $q_{\infty}/\bar{p}_c \approx 0.2\sim 0.3$ (第 9 図) この領域は海上輸送用 GEM の巡航状態に近い。それ故この領域では特に多数の測定を行った。村尾らの実験で抵抗の著しい凹みを示しているのもこのあたりである。しか

(a) 一例としての写真, $q_\infty/\bar{P}_c=1.062$

(b) 流系境界線の速度比による変化

第7図 地面板上の流系パターン

第8図 レイノルズ数および底面圧力 (圧力分布試験)

第9図 C_D vs. $q_\infty/\bar{P}_c$

し、本実験では特に変わった現象はない。敢えていうならば、“抵抗の弱い落ち込みがあるようである”という程度である。

5. 実験結果の考察

5.1 流れ模様について 第6図の写真が示すように GEM の側方にも、確かに渦が存在する。しかもはっきりしているものはただ1つである。したがってわれわれは“GEM のまわりの馬蹄形渦は少なくとも顕著なものはただ1つである”と主張する。もちろんわれわれの実験条件と村尾らのそれとは著しく異なっているの、われわれの方が正しい、とは云えないが、われわれの提出したものは写真であり、絵ではないということに注意したい。

5.2 周辺ジェットによる外部抵抗減少のメカニズム さきに第9図に関して述べたように周辺ジェットは外部抵抗を著しく(約 1/3) 減少した。そしてこれが前部と後部から略、等量に起こっている。しかしやや細かいことを云えば、 $q_\infty/\bar{p}_c \leq 0.5$ では前部における減少よりも後部における減少の方が大きい。

第10図 対称面内の C_p vs. θ

第10図は GEM 対称面内の静圧分布を示す。対称面内は抵抗への寄与が大きい、そして中でも特に front と rear の寄与が大きい。そういう主要な部分でジェットの存在は圧力分布をかなり著しく変えているのである。前方では正圧が低下しているが、これは明らかに馬蹄形渦の接近によるものであろう。後方では負圧が減少しているが、ジェットのエンタレンメント効果により停滞した空気を引っぱり剥離領域が減少したためであろう。

6. あとがき

本研究は、半球状外形の GEM について、固定地面板外部供給型という極めて単純な方法で行われた。しかし固定地面板なるが故に流糸格子線の取付けが可能となり単一馬蹄形渦の存在を写真により確認することができた。また半球状なるが故に、外表面上の圧力分布の測定およびこれを積分して抗力を求めるということが大層容易となり、“干渉推力”の存在およびその発生メカニズムが解明された。今後に残されているものは、GEM の形状、移動地面板、クッション空気供給法などをもっと現実的なものに近付けてゆくとき、本研究の成果がどのように修正されてゆくか？を調査することである。

なお本研究の遂行に際し、当時学生として参加され御努力を惜しまれなかった永田剛、屋代春樹、楠瀬雄一、谷野幹男の諸氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) S. ANDO and J. MIYASHITA: Aerodynamic Drag of Ground Effect Machines, Aerospace Engineering, Vol. 20, No. 11, Nov. 1961.
- 2) M.P. KOWLTON and A.F. WOJCIECHOWICZ: Model Studies of the Forward Flight Characteristics of the P-GEM, Princeton University Report No. 581, Dec. 1961.
- 3) R. MURAO and H. BAUMAN: Aerodynamic Characteristics of an Air Cushion Vehicle Model, Proceedings of the Thirteenth Japan National Congress for Applied Mechanics, 1963.
- 4) 村尾麟一, 木原洗, 大屋修司: 周辺ジェット ACV の推進性能における遷移特性について, 昭和48年4月, 日本航空宇宙学会第4回年会講演会講演集.
- 5) R. STANTON JONES: Hovercraft-Some Design Problems, Aerospace Engineering, Vol. 20, No. 2, Feb. 1961.