—技術ノート— TECHNICAL NOTE

半球型周辺噴流 GEM の抗力特性に及ぼす

Intake の効果——予備的実験^{*1}

Intake Effect on Drag Characteristics of a Hemispherical Peripheral Jet GEM—A Preliminary Experiment

小田切文治^{*2}・安東茂典^{*2}

Fumiharu OTAGIRI, Shigenori ANDO

浅見海一^{*3}・武市直也^{*3}

Kaiichi ASAMI, Naoya TAKEICHI

小川正之^{*4}

and Masayuki OGAWA

Key Words: Peripheral Jet GEM, Aerodynamic Drag, Cruising Velocity,
Intake Effect

Abstract

The drag coefficient of a peripheral jet GEM depends considerably upon the ratio of free stream dynamic pressure to mean cushion pressure. In particular, the drag is significantly less than that evaluated by Chaplin's assumption (parasite drag + momentum drag). Previously we clarified the existence of a horse-shoe vortex surrounding a GEM model from the bottom of which the air is supplied, and proved the generating mechanism of the "interference thrust". This paper presents a result of preliminary experiments about an intake effect on the GEM external drag. A built-in-fan model ("model 2") is tested in a wind tunnel, and the aerodynamic performance of this model is compared with one for previous model which has no intake ("model 1"). The configuration of model 2 is selected so that the separation of the momentum drag from the external drag may be as reasonable as possible. Both model are hemispherical.

1. 記 号

C_D : 全抗力係数

C_p : 圧力係数 ($= p/q_\infty$)

D : 形状抗力 [N]

D_F, D_R : 前部および後部形状抗力 [N]

h : ホバー高さ [m]

p : 静圧 [Pa], 大気圧からの差

$\bar{p}_c$: 平均クッション圧力 [Pa], 大気圧からの差

p_{ij} : ノズル出口における総圧 [Pa], 大気圧からの差

q_∞ : 自由流動圧 [Pa]

S_c : クッション面積 [m²]

S_i : 周辺ノズル面積 [m²]

dS_i : 第 i 番 station の代表する GEM 表面面積要素 [m²]

t : 周辺ノズル幅 [m]

$V_i, \bar{V}_i$: 周辺ジェット流速 [m/sec] およびその平均値

V_∞ : 自由流流速 [m/sec]

θ_i : GEM 表面に立てた法線と水平面とのなす仰角 [°]

ϕ_i : 平面図において最前端から時計回りに測定した方位角 [°]

$\Delta C_{p_i} \equiv C_{p_i} - (C_{p_i})_{\text{for } q_\infty/\bar{p}_c = \infty}$

() _{i} : 第 i 番模型表面圧力測定 station での量を表す

() _{j} : 出口 jet に関する量を表す

() _{F} , () _{R} : それぞれ前部と後部に関するもの

() _{c} : クッション部の量を表す

なお, " $q_\infty/\bar{p}_c = \infty$ " はファン回転数ゼロの場合を象徴的に表すもので, 必ずしも実際に $\bar{p}_c = 0$ を意味しない。

^{*1} 昭和 57 年 10 月, 流体力学講演会において講演. 昭和 60 年 6 月 3 日原稿受理

^{*2} 名古屋大学工学部航空学教室

^{*3} 川崎重工業株式会社航空機製作所

^{*4} ヤマハ発動機株式会社

2. 序 論

周辺噴流型 GEM の抗力係数 C_D は $q_\infty/\bar{p}_c$ の値によって複雑に変化する¹⁻⁶⁾。とくに $q_\infty/\bar{p}_c=0.3$ 付近においては抗力が形状抗力と運動量抗力の和であるという Chaplin の仮定に比べてかなり小さな値を示し¹⁾、さらには全抗力が運動量抗力のみより小さいという実験結果さえも報告されている²⁾。

安東・宮下³⁾は、この原因を自由流と周辺噴流の干渉により発生する馬蹄形渦の吸引力と周辺ジェットによる後部圧力の回復によるものと推定し、これを干渉推力と名付けた。

その後、著者ら^{4,5)}は一連の実験を行って馬蹄形渦の存在を実証し、また干渉推力発生メカニズムを解明した。最初の実験ではインテイクのない底部供給方式の模型を用いた。まず半球型 GEM についてタフト法により前方渦、側方渦の形成を明確にし、馬蹄形渦の存在を立証した。また GEM 表面の圧力分布測定から吸引力の存在、後部圧力の回復を明確にした。次いで 2 次元模型により類似の実験を行い、その差異を明らかにした。

本研究はインテイク供給型と底部供給型模型による周辺噴流と吸込みの両現象の違いを比較し、干渉推力に対するインテイクの影響を明らかにしようとするものである。

実験法として、a) ファン駆動モーター (またはエンジン) を模型内に収納する方法を用いると、パワー不足のため、 $q_\infty/\bar{p}_c \approx 0.3$ あたりで高精度の実験ができない欠点がある。したがって、b) ここではファン駆動モーター (またはエンジン) を模型外に出すこととした。

本実験のように、モーターを地面板の下に設置し、延長軸でファンを駆動する場合には、シャフトの一部を自在にして力を伝達しないようにしなければ模型に作用する三分力を測定できない。しかし自在接手の採用は実験装置を著しく高価なものにするので、仕方なくわれわれは b) の方式で、しかも外部抵抗のみを外表面の圧力分布の積分で求めるという、以前のインテイクのない模型で用いた方式を今回も採用することにした。この場合、問題は外部抵抗と運動量抵抗の合理的な分離をいかに行うか? という点にある。

“運動量抵抗”とは自由流をとり込み、それをせき止めるために生ずるもののゆえ、インテイク吸入後 GEM の内部で生ずると考えられる。

そこで外部抵抗と運動量抵抗の分離をできるだけ合理的ならしめるために、

イ) インテイクリップを鋭くする。

ロ) インテイクのすぐ外の GEM 外表面のなるべく広い部分を自由流に平行にして、その圧力分布からの抵抗への寄与をできるだけ小さくする (“抗力分離域”。

ことにした (第 2 図参照)。

なお、われわれの実験装置は主としてコスト上の理由から選ばれたが、圧力分布を積分して抵抗を求めることにより、模型表面のどの部分がどの程度抵抗に寄与するかという重要な物理的情報を与えられる利点がある。

3. 実験装置

3.1 使用した風洞 (第 1 図参照) 名古屋大学工学部自由傾斜風洞。吹口口径: 対辺 1940 mm 八角形、吹口風速: 0.5~40 m/sec。

3.2 模型 (1) 模型 1 (底部供給型) 文献 4) 参照。(2) 模型 2 (インテイク供給型) (第 2 図参照)

外形は模型 1 と同じであるが頂部に直径 100 mm のインテイクを有し、内部に遠心式圧縮型鉄製ファン、整流羽根および整流木片を具えている。インテイクリップは丸味をつけなかったが、これは前述のごとく運動量抵抗とその他の外部抵抗を分離するためである。つまり角ばったインテイクリップより下のインテイクダクトには運動量抵抗が作用すると考えた。これは妥当な考え方であると思う。このため生ずるインテイク効率の悪化は辛抱することにした。

ジェット流供給装置 (1) 内蔵ファン: ディスク直径 375 mm, 高さ 65 mm, 流れガイド羽根 15 枚, 公称性能 (風量 150 m³/min, 風圧 981 Pa, 回転数 3,200 R.P.M.), (2) 駆動モータ: 三相誘導 2.2 kW, (3) 回転制御装置

第 1 図 模型 2 のための装置と全体図

第2図 模型 2

第3図 模型2圧力測定孔配置 (模型1も INTAKE 付近以外は同じ)

3.3 圧力測定装置 (第3.4図参照)

(1) GEM 表面圧力測定: 表面に静圧分布測定孔 ($\phi 1.1 \text{ mm}$) 62 個を設け, これにステンレスパイプ (外径 1.1 mm , 内径 0.8 mm) を接続して内部流に影響を及ぼさないように GEM 内壁に沿って配管し, また周辺流れを乱さないようにした。

(2) V_1 および p_c の測定: V_1 の値についてはピトー管 (静圧および総圧) をノズル全周に 8 か所, p_c は圧力管を GEM 底面垂直下方地面上に 8 か所配置して測定した。上記の (1) と (2) はそれぞれスキャニバルブに接続された。

(3) スキャニバルブ圧力変換装置: これは, スキャニバルブ 3 台, 48 チャンネル $\times$ 3 キャリア増幅器, 搬送波除去低域パスフィルター, 制御データ記録器等から成っている。

3.4 フローパターン観測装置 (第5図参照) タフト法によった。

4. 実験方法

(1) 実験全体を通じて $\alpha = 0$, $h/t = 2$ ($h = 20 \text{ mm}$, $t = 10 \text{ mm}$), 実機における巡航速度を考慮して⁵⁾ $q_\infty / \bar{p}_c = 0.2 \sim 0.4$ に重点をおいて計測を行った。

(2) $q_\infty / \bar{p}_c$ の決定法

▶ 模型 1 による実験

第4図 MODEL 底面における V_1 および P_c 圧力測定管配置
模型1, 2とも同じ。

第 6 図 Flow pattern 模型 1

(a) $q_\infty/\bar{p}_c = 0.125$, (b) $q_\infty/\bar{p}_c = 0.253$, (c) $q_\infty/\bar{p}_c = 1.035$, (d) $q_\infty/\bar{p}_c = 2.336$

第7図 抗力係数 模型1

第8図 自由流に平行な垂直断面上の C_p 分布 模型1
(a) $q_\infty / \bar{p}_c = 0.253$, (b) $q_\infty / \bar{p}_c = 2.336$

“ ∞ ”での C_D を用いる, ということにほぼ相当する。よって $C_D(q_\infty / \bar{p}_c = \infty)$ 値を重視し, これからの変化を考えるべきである。

5.2.1 $q_\infty / \bar{p}_c > 0.4$ の場合 (第二段変化) 第7図の横軸を左方へ辿るときの変化について述べる。第二段変化で C_{DF} , C_{DR} , C_D の顕著な低下があり, それから $q_\infty / \bar{p}_c \approx 0.4$ までほとんど一定である。これは第8図(b)をみてわかるように周辺噴流の存在が GEM 後部の圧力に著しい影響を与え負圧を減じているからである。

第9図 ΔC_p 分布 模型1 $q_\infty / \bar{p}_c = 0.253$

5.2.2 $q_\infty / \bar{p}_c < 0.4$ の場合 (第一段変化) 第一段での C_D の変化は $q_\infty / \bar{p}_c < 0.2$ 以下でのみ著しい。そしてこれは主として後部から生じている ($q_\infty / \bar{p}_c < 0.2$ というのは GEM の巡航速度領域以下の可能性がある)。第8図(a)および第9図にみられるように, 主として前部で圧力分布の若干の土の変化がある。しかし抵抗への寄与は全体として相殺してしまっている。

5.3 模型2の実験結果 (第10, 11, 12図参照)

5.3.1 $q_\infty / \bar{p}_c > 0.4$ の場合 (第二段変化) 第10図の横軸を左方へ辿るとき, 第7図と似た変化がある。ただし, 第二段変化はよりいっそう大きく, またそれ以後の $q_\infty / \bar{p}_c \approx 0.4$ までの変化もかなり大きい。これは, 自由流と周辺噴流との干渉効果は定性的に底部供給型と同じであろうが, それに加えてインテイクの効果も著しいことを示している (第11図(b)参照)。

5.3.2 $q_\infty / \bar{p}_c < 0.4$ の場合 (第一段変化) インテイクの吸い込みによりその前方に大きな負圧を生じ, これが主要な推力源となっている (第11, 12図)。この部分は“抵抗分離域”に近く, ほとんど水平な勾配をもつ。しかし圧力の変化が大きいため第10図に示されるような大きい ΔC_{DF} を生じたのであろう。

なおインテイクの下流でやはり“抵抗分離域”の近くの圧力がよりいっそう正圧となっている。しかし

第10図 抗力係数 模型2

第11図 自由流に平行な対称断面上の C_p 分布 模型2
(a) $q_\infty/\bar{p}_c=0.253$, (b) $q_\infty/\bar{p}_c=2.336$ 第12図 ΔC_{Dr} 分布 模型2 $q_\infty/\bar{p}_c=0.253$

ΔC_{DR} への寄与は ΔC_{DF} ほどではない(第10図). これは“抵抗分離”の効果があったと見るべきであろう.

5.4 模型1, 2による実験の比較

▶両実験とも $q_\infty/\bar{p}_c < 0.4$ の領域において抗力係数の低下, すなわち干渉推力の発生が見られる. しかし,

(1) 模型1では干渉推力はおもに後方部で生じているのに対して, 模型2ではおもに前方部で生じている.

(2) 全外部抵抗が負になるのは模型1では $q_\infty/\bar{p}_c < 0.2$, 模型2では $q_\infty/\bar{p}_c < 0.4$ である.

(3) 模型2のほうが干渉推力ははるかに著しい.

▶ $q_\infty/\bar{p}_c > 0.4$ では大きな $q_\infty/\bar{p}_c$ と $q_\infty/\bar{p}_c = \infty$ とのギャップ(第二段変化)は注目すべきものがある.

$q_\infty/\bar{p}_c = \infty$ 時の C_D の値は模型1より模型2の方が著しく大きい. これは後者の場合インテイクを滑らかにしなかったために流れが乱れたからであろう.

以上より, GEMの抗力特性に及ぼすインテイクの影響は非常に大きなものであることが確認された. 馬蹄形渦の形成による吸引力は両者とも認められた. しかし正味(総計)のそれは模型2でのみ存在する.

6. 固定地面板の影響について

これについては文献5)で詳しく記述したが, われわれは固定地面板と移動地面板のもたらすおもな相異は, 地面板の表面近くの(とくに境界層排除厚さ以内

第13図 抵抗に及ぼす前進速度の影響 (底部供給型) (文献6の図18)

の) 自由流動圧に影響するだけであると考えている。

本研究のように、地面板から離れた GEM 外表面の圧力分布を論じている場合には本質的效果はなく、唯たとえば第10図の横軸の $q_\infty/\bar{p}_c$ —あるいは $q_{\text{ext}}/\bar{p}_c$ —を移動させるのみであろう。またわれわれは現用 GEM の巡航速度領域を $q_\infty/\bar{p}_c = 0.1 \sim 0.3$ ぐらいの大きい幅で示しているの、これが仮に数10%ぐらい左右にずれようとも大勢に影響はないであろう。なお、上述の簡単な推論を立証するものではないが、文献6)に引用されている第18図は固定と移動地面板についてインテイクなしの GEM の C_D vs. C_μ を h/d をパラメータとして示す (第13図参照)。GEM 状態は $C_\mu = 1 \sim 3$ と思われるが、このあたりでは固定より移動地面板のほうが低い C_D を示し、しかも負値になっている。これは固定地面板の使用は干渉推力を控えめに実現する可能性を示唆する。

したがって、もしもわれわれのインテイクをもつ模型2を移動地面板で実験していたら、本論のそれよりもいっそう大きい干渉推力が出現していたであろうと推察することも可能である。

7. 結 論

半球型 GEM について次の二つの模型で風洞実験を行った。模型1はインテイクなし底部より空気供給するもの、模型2はインテイクを頂部に有しそこから空気を取り入れるものである。後者が実物に近い。ただし抵抗を模型表面の圧力分布の積分で求めたので、運

動量抵抗と外部抵抗の分離を合理的にするため、半球頂部にインテイクリップの鋭い垂直ダクトをつけ、できるだけ広い抵抗分離域をインテイクのまわりに設ける形態とした。これより次の結果が得られた。

(1) 模型1, 2による実験とも $q_\infty/\bar{p}_c < 0.4$ の領域において抗力係数の低下、即ち干渉推力の発生が見られる。しかし、

- 模型1では干渉推力はおもに後方で生じているのに対し、模型2ではおもに前方で生じている。
- 全外部抵抗が負になるのは模型1では $q_\infty/\bar{p}_c < 0.2$ 、模型2では $q_\infty/\bar{p}_c < 0.4$ である。
- 模型2のほうが干渉推力ははるかに著しい。

(2) 第一段と第二段の間の領域では、模型2の場合には抵抗のかかなりの変化がある。しかし模型1ではほとんどない。

(3) $q_\infty/\bar{p}_c = \infty$ 時の C_D は模型1より模型2のほうが著しく大きい。これは後者のインテイクを滑らかに閉塞しなかったために流れが乱れたからと考えられる。

最後に本研究は種々の点で予備的性格のものである。しかし興味ある問題を提起しえたと信ずる。

本研究の遂行にあたり、風洞の運転および装置組立等にご協力下さった名古屋大学の加藤勇夫技官ならびに佐々木精義元技官に厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) Walker, N. K. : Some Notes on The Lift and Drag of Ground Effect Machines, IAS Paper (1961), pp. 65-80.
- 2) Nixon, W. B. and Sweeney, T. E. : Preliminary Flight Experiments with The Princeton University 20-Ft. Ground Effect Machine, Aerospace Engineering (1960), pp. 32-36.
- 3) Ando, S. and Miyashita, J. : Comments on Aerodynamic Drag of Ground Effect Machine, Aerospace Engineering (1961), pp. 24-25, 79-83.
- 4) 小田切文治, 安東茂典: 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—, 日本航空宇宙学会誌, 24 (1976), pp. 37-43.
- 5) 小田切文治, 安東茂典, 伊藤昌年, 井川勇喜夫: 二次元周辺噴流型 GEM の抗力特性に関する実験 (干渉推力発生メカニズム), 日本機械学会論文集 (B 編), 49 (1983), pp. 367-375.
- 6) 村尾麟一: GEM (Ground-Effect Machine) の流体力学的諸問題, 日本機械学会誌, 69 (1966), pp. 799-808.