技 術 論 文

一つの GEM 模型の風洞実験*

飯田 周助**・藤原 直史**・藤井 貞広***

Wind Tunnel Investigations of a Ground Effect Machine Model

Shūsuke IIDA, Naofumi FUJIWARA and Sadahiro FUJII

Abstract

Wind tunnel investigations of a GEM model are reported. From the results it is considered that the shape of model has influence upon aerodynamic characteristics. The main results are as follows. Lift due to interference appears in addition to profile lift and lift due to peripheral jet. Also, drag due to interference appears in addition to profile drag and momentum drag. Non-dimensional base pressure increases as non-dimensional free stream dynamic pressure.

1. 序 言

周辺噴流型の Ground Effect Machine (GEM) の一つの模型についての風洞実験結果を示す。同様なことがさきに村尾¹⁾により発表されているが、それと模型の形が異なるため、結果の解釈には多少の相違のある点がある。

2. 記 号

$C_{DI} = \Delta D_I / q_\infty S$: 干渉抵抗係数
 C_{DO} : 形状抵抗係数 (揚力ファンを作動させないときの模型の抵抗係数)
 $C_{LI} = \Delta L_I / q_\infty S$: 干渉揚力係数
 C_{LO} : 形状揚力係数 (揚力ファンを作動させないときの模型の揚力係数)
 C_{mo} : 形状縦揺れモーメント係数 (揚力ファン不作動時の模型のモーメント係数)
 ΔD : 模型の全抵抗より形状抵抗を差し引いたもの
 ΔD_I : 干渉抵抗
 h : 浮上高 (周辺ジェット出口外縁と地面板との間隔)
 K : 底面圧力の自由流速に対する変化を表わすある関数

ΔL : 模型の全揚力より形状揚力を差し引いたものの
 ΔL_I : 干渉揚力
 l : 模型の全長
 l_j : 周辺ジェットの周長 (中心線に沿う)
 M : 模型の縦揺れモーメント; 中心は模型中心軸上で、下面より 75 mm 上の点 (頭上げ正)
 m : 揚力ファンを通る空気の質量流量
 p_B : 底面圧力 (' は局部値)
 p_j : 周辺ジェットの出口における静圧
 q_j : 周辺ジェットの出口における平均動圧
 q_{j0} : 周辺ジェットの出口全圧から自由流静圧を引いた値の、全周にわたる平均値
 q_∞ : 自由流動圧
 S : 模型の底面積 (周辺ジェットの出口外縁に囲まれた面積)
 S_B : 周辺ジェット出口内縁に囲まれた底面積
 $S_j = l_j t_j$: 周辺ジェットの出口面積
 t_j : 周辺ジェットの出口の厚さ
 U_∞ : 自由流 (風洞気流) の速さ
 v_j : 周辺ジェットの出口における平均流速 (' は局部値)
 $v_{j0} = \sqrt{2q_{j0}/\rho}$
 $x = (t_j/h)(1 + \sin \beta)$
 y : 周辺ジェットの厚さ方向の距離 ($y=0$ は外側, $y=t_j$ は内側)
 β : 周辺ジェットの鉛直線よりの傾向 (内向き正)
 η_A : 底面圧力効率 (実底面圧力と指数理論による底面圧力との比).
 ρ : 空気密度

3. 実験装置

風洞はゲッチングン型式で、吹き出し口直径 900 mm、風速は 10~45 m/s の範囲に変えられる。空気力は三分力測定方式により、揚力、抵抗、縦揺れモーメントを U ゲージを用いて測定する。

* 昭和 41 年 4 月 25 日原稿受理

** 大阪府立大学工学部

*** 伊藤忠商事株式会社航空機部

第1図 GEM 模型

模型は木製、第1図に示すような形で、小型のモータ（400 ワット、15,000 rpm）を内蔵せしめ、これにより木製の揚力ファンを回転させる。周辺ジェットのための空気は模型上面より吸い込む。ファンのパワを変化させて周辺ジェットの全圧を変える。

地面に相当する広い板を模型の下側におく。模型はピアノ線にて一定位置に吊るし、地面板を上下可動にし、模型と地面板との間隙を変える。

4. 実験内容

実験は下記の諸量を変化させて行なった。

1. 自由流（風洞気流）の風速、12~30 m/s
2. 浮上高、10~80 mm
3. 揚力ファンのパワ、100~400 ワット、すなわち周辺ジェットの全圧

模型の迎え角は 0° である。これらに対し、つぎの諸量を測定した。

1. 周辺ジェットの吹き出し口における全圧と静圧
周辺ジェットの出口の前端と後端、およびその間の4カ所（ただし片側の溝に沿ってのみ）、計6カ所でジェット厚さ方向に2.5 mm 間隔に6点、総計36点においてピトー静圧管により測定する。これより周辺ジェットの厚さ方向、周辺方向の風速分布を知る。
2. 地面板圧力
地面板の模型前後方向中心線直下の位置に、圧力測定孔5点をあけ、地面板圧力を測定する。模型底面圧力は地面板圧力とほぼ等しいものとして、この値を模型底面圧力に代用した。結果的には、浮上高が高いときは多少の誤差が現われているものと思われる。

3. 三分力天秤による模型全体の揚力、抵抗、縦揺れモーメント

以下結果を簡単に示すため第1表のような実験番号を図中に用いてある。

第1表

実験番号	浮上高 h (mm)	$hl_j/2S$	マ ー ク
No. 1	10	0.0488	○
No. 3	30	0.1464	△
No. 5	50	0.2440	□
No. 6	60	0.2929	◆
No. 8	80	0.3905	×

5. 実験結果

5-1 揚力ファン不作動時の模型の特性 周辺ジェットを吹き出していないときの模型の特性をまず求める。周辺ジェットを吹き出しているときは、自由流は模型と地面板との間隙には流入しない。したがって不作動時の特性を求める場合にも、この間隙を埋め、すなわち地面板上に模型底面と同じ平面形の突起物を出し、底面が自由流にさらされないようにし、自由流は模型上面と側面のみを洗って流れる。また模型上面のファン入り口もふたをして、空気は流入しないようにしてある。

このようにして求めた模型の揚力係数、抵抗係数、縦揺れモーメント係数を第2図に示す。揚力係数、抵抗係数は浮上高に関係なくほぼ一定値をとる。すなわち $C_{Lo}=0.22$, $C_{Do}=0.10$ という値である。モーメント係数はごく小さい値である。

5-2 揚力ファン作動時の特性 実験結果の表示は村尾の方法により、圧力については周辺ジェット平均全圧（ゲージ圧） q_{j0} で割り、速度については q_{j0} な

第2図 揚力ファン不作動時の模型特性

る大きさの動圧に相当する速度 v_{j0} で割り、力については $q_{j0}S$ で割って無次元形にして表す。

5-2-1 周辺ジェットの流れ分布、流量 ジェット厚さ方向の速度分布より、その断面の局部平均速度 v_j' を求め、これの周辺に沿う方向の分布を求める。第3図はその一例、 $h=10$ mm、ファン・パワー=400 ワットの場合である。自由流速 $U_\infty=0$ の場合は、ほ

($h=10$ mm, ファン・パワー=400 ワット)
第3図 周辺ジェットの周辺方向速度分布

ぼ一様な分布であるが、 U_∞ の増大とともに前のほうのジェット流速は減速され、後のほうは増速される。これは自由流のラム圧効果によるものと考えられる。

この速度分布よりジェット流量を求めることができる。第4図はファン・パワー400 ワット一定のときの流量 m と自由流速 U_∞ との関係を示す。

第4図 周辺ジェット流量の自由流速に対する変化 (ファン・パワー一定)

また一定ファン・パワー (400 ワット) における周辺ジェット平均全圧 q_{j0} の自由流速 U_∞ に対する関係の一例を第5図に示す。

これらファン・パワーの一定な状態では、ジェット平均流速 v_j 、したがって流量は浮上高が大なるほど大きく、ジェット平均全圧は浮上高が小なるほど大きい。そして自由流速が0の場合よりも、10 m/s ぐらいで流量、全圧が多少増大する傾向があり、それ以上では自由流速とともに減少する。

しかし無次元形で表すと第6図のようになる。すなわち無次元ジェット流速の実験値 (各マークの点) は、無次元自由流動圧に関係なく一定値をとる。実線は指数理論²⁾ から得られる、

$$\frac{v_j}{v_{j0}} = \frac{1}{x}(1 - e^{-x}), \quad x = \frac{t_j}{h}(1 + \sin \beta)$$

なる関係による値を表すもので、実験値と理論値とはよく一致している。

5-2-2 底面圧力 模型下方の地面板局部圧力 p_B' の分布の一例を、浮上高 10 mm、ファン・パワー 400 ワットの場合について無次元形にして第7図に示す。前部のほうは自由流動圧により、ごく僅か低下する

第5図 周辺ジェットの出口における平均全圧の自由流速に対する変化 (ファン・パワー一定)

第7図 局部地面板圧力の前後方向の分布

が、後部のほうは著しく増大する。

この圧力と模型底面圧力とが同じ大きさであると見なし、この圧力を底面全体にわたり積分すると、底面圧力による揚力を求めることができる。これを無次元形で表わし、無次元自由流動圧に対して示すと第8図のようになる。すなわち底面圧力による揚力は、浮上高の小なるほど大きく、また自由流動圧の増加につれて増大する傾向にある。

第6図 周辺ジェットの出口平均流速と自由流動圧の関係

第8図 底面圧力による揚力と自由流動圧の関係

第9図 ホバリング状態における底面圧力と
浮上高の関係

自由流速 0 の場合の平均底面圧力の浮上高に対する関係は第9図のようになる。各マークは実験値*を示し、実線は指数理論による関係式

$$\frac{p_B}{q_{j0}} = \eta_A(1 - e^{-2z}), \text{ただし } \eta_A = 1$$

を示している。これより実験値は指数理論とよく一致した結果を得ている。

なおここで地面板上に生ずる自由流による境界層の影響については、これを無視してある。

5-2-3 三分力天秤による空気力 三分力天秤により測定された模型全体についての揚力、抵抗、縦揺れモーメントから、5-1 の揚力ファン不作動時のそれぞれの値を差し引くと、周辺ジェットによる影響を表わした値を得る。これをそれぞれ ΔL , ΔD , ΔM と表わし、これらを自由流動圧に対して無次元形にして表わすと第 10, 11, 12 図のようになる。

揚力については、浮上高の小なるほど揚力は大きく、自由流動圧に対して直線的に増大する傾向にある。抵抗については、浮上高小なるほど抵抗は小さく、自由流動圧に対してやはり増大する傾向にある。縦揺れモーメントについては、自由流動圧の増加につれて、初めは頭上げモーメントが増大し、最大値をとったのち減少する傾向となり、ある点よりは頭下げモーメントが作用することになる。この点は浮上高が小なるほど小さい速度で現われる。頭上げモーメントの増大は、模型上面に作用する風圧分布によるもの、頭下げモーメントを生ずるのは底面圧力に作用するラム圧効果によるものと考えられる。

抗揚比 $\Delta D/\Delta L$ の q_∞/q_{j0} に対する変化を第 13 図

第 10 図 増加揚力と自由流動圧の関係

第 11 図 増加抵抗と自由流動圧の関係

* このマークは第 1 表と関係ない

第12図 縦れ揺モーメントの増加と自由流動圧の関係

第13図 増加抗揚比と自由流動圧の関係

に示す。この値は浮上高小なるほど小さく、 $q_{\infty}/q_{j0}=2.0$ ぐらいまでは漸増の傾向にあり、それ以上ではほぼ一定値を保つ。

6. 実験結果についての考察

6-1 揚力 GEM の前進時の揚力は、揚力ファンを作動させないときの揚力（形状揚力） $C_{L0}q_{\infty}S$ と、揚力ファンを作動させたため生ずる揚力 ΔL の和より成り、さらに ΔL はつぎのような各項の和であると考える。

$$\Delta L = p_B S_B + \int_0^{l_j} (\rho l_j v_j^2 \cos \beta + p_j l_j \cos \beta) dy + \Delta L_I$$

第1項は底面圧力による揚力、第2項はジェット反力および出口静圧による揚力成分（吹き出し口部揚力）、第3項はファンにより空気を吸い込んだため、模型上面の風圧分布に変化を来して生ずる揚力（干渉揚力）である。実験で得られた結果の一例 $h=10\text{mm}$ の場合を、無次元形で示したものが第14図である。 $\Delta L/q_{j0}S$ の線は第10図 No. 1 の線に当たり、 $p_B S_B/q_{j0}S$ の線は第8図 No. 1 の線（これを直線に近似す

第14図 揚力成分の分析

る)にあたる。吹き出し口部揚力は自由流動圧に対して変化がないので、 $p_B S_B / q_{j0} S$ の線と平行に吹き出し口部揚力の値をとると、残りの部分が干渉揚力ということになる。これより干渉揚力係数を求めると $C_{LI} \div 0.10$ という値を得、他の浮上高に対しても、ほぼ同じ値を示した。この値は本実験に用いたような形の模型の場合であって、形が変わればまた異なるであろう。しかし、このような上に凸の形では、干渉揚力が生ずるものと考えてよからう。

指数理論を用いれば、上式はつぎのように表わされる。

$$\frac{\Delta L}{q_{j0} S} = \eta_A (1 - e^{-2x}) (S_B / S) K + \frac{l_j t_j}{S} \cos \beta \left\{ 1 + \frac{1}{2x} (1 - e^{-2x}) \right\} + \frac{C_{LI} q_{\infty}}{q_{j0}}$$

右辺第1項は底面圧力による揚力 $p_B S_B$ の項で、自由流速0のときの底面圧力は効率を考えに入れて $\eta_A \times (1 - e^{-2x})$ と表わされるが、第8図に示すように自由流速の増大とともに底面圧力は増大するので、自由流速による増大率を示す関数 K をかけて表わすことにする。この K については、なお研究を要するが、 q_{∞} / q_{j0} 、 h / t_j などの関数であり、底面の平面形によ

ても左右されるものと考えられる。第2項は吹き出し口部揚力であり、実験値はこの理論値とほぼ等しい。残る第3項が干渉揚力の項である。

6-2 抵抗 抵抗についても揚力の場合と同様に、揚力ファンを作動させないときの抵抗(形状抵抗) $C_{D0} q_{\infty} S$ と、揚力ファンを作動させたために生ずる抵抗 ΔD の和より成ると考える。 ΔD は

$$\Delta D = m U_{\infty} + \Delta D_I$$

すなわち第1項の運動量抵抗と、第2項干渉抵抗の和より成ると考える。指数理論を用いると

$$\frac{m U_{\infty}}{q_{j0} S} = \frac{\int_0^{t_j} \rho l_j v_j dy}{q_{j0} S} = 2 \frac{l_j t_j}{S} \frac{1}{x} (1 - e^{-x}) \sqrt{\frac{q_{\infty}}{q_{j0}}}$$

と表わされる。第15図は運動量抵抗と自由流動圧の関係は無次元で示したもので、各マークは測定された流量より求めた運動量抵抗の実験値、実線は上式に示される理論曲線を表わしている。実験結果と指数理論とはよく一致している。三分力天秤より求めた第11図の抵抗 ΔD より、この運動量抵抗を差し引くと、干渉抵抗を求めることができる。これを第16図に示す。これより干渉抵抗係数を求めると、この値は浮上高に比例した値をとり、第17図に示すようになる。

第15図 運動量抵抗と自由流動圧の関係

第16図 干渉抵抗と自由流動圧の関係

第17図 干渉抵抗係数と浮上高の関係

いまの模型では干渉推力²⁾ではなく干渉抵抗を生ずるという結果を得た。

7. 結 論

GEMの走行特性を求めるため、第1図に示すような模型を風洞気流中におき実験したところ、つぎのような結論を得た。

- (1) 無次元底面圧力 p_B/q_{j0} は、無次元自由流動圧 q_∞/q_{j0} の増大につれて増大する。(第8図)
- (2) 周辺ジェットの出流速 v_j/v_{j0} (無次元値) は q_∞/q_{j0} に対して変化しない。(第6図)
- (3) 模型全体に作用する揚力は、形状揚力、周辺ジェットによる直接的な揚力(底面圧力、ジェット反力など)と干渉揚力の和と考えられる。干渉揚力係数は浮上高に関係なく0.10ぐらいの値であった。(第14図)
- (4) 模型全体に作用する抵抗は、形状抵抗、運動量抵抗、干渉抵抗の和と考えられる。運動量抵抗は指数理論による計算値とよく一致しており(第15図)、干渉抵抗係数は浮上高に比例した値(第17図)をとる。これは干渉推力が現われるとい

う他の結果とは特に異なるところである。

- (5) 縦揺れモーメントは、無次元自由流動圧 q_∞/q_{j0} の小さい値に対しては頭上げモーメント、大きい値に対しては頭下げモーメントを生じ、浮上高が小なるほど小さい q_∞/q_{j0} で頭下げとなる(第12図)。これは底面後部の底面圧力の増大(第7図)が大きく影響している。
- (6) 周辺ジェットによる増加抵抗と増加揚力の比 $\Delta D/\Delta L$ の値は、 $q_\infty/q_{j0}=0\sim 2$ の範囲では増大する。(第13図)
- (7) 自由流速0の場合の底面圧力は、指数理論による値とほぼ一致した。すなわち底面圧力効率 $\eta_A=1$ とみなしてよい。(第9図)

本研究は文部省科学研究費の補助を受け、また松岡健次教授より有益な助言を頂いたことをしるし、深甚なる謝意を表する。

文 献

- 1) 村尾麟一, BAUMANN: 周辺噴流型 GEM の風洞実験, 日本航空学会誌, Vol. 12, No. 125 (1964/6) p. 210
- 2) 安東茂典: 周辺噴流型 GEM について, 日本航空学会誌, Vol. 10, No. 106 (1962/11) p. 355

付 言

指数理論では周辺ジェットの厚さ方向の静圧分布は

$$p_j/q_{j0} = 1 - e^{-2(\psi/h)(1+\sin\beta)}$$

と表わされる。ベルヌーイの式より

$$\rho v_j'^2 = 2q_{j0} \{1 - (p_j/q_{j0})\} = 2q_{j0} e^{-2(\psi/h)(1+\sin\beta)}$$

となり、また

$$v_j' = \sqrt{2q_{j0}/\rho} e^{-(\psi/h)(1+\sin\beta)}$$

となる。これらの関係を上記諸式の積分計算に用いて、したがって底面圧力は

$$p_B/q_{j0} = 1 - e^{-2(\psi_j/h)(1+\sin\beta)}$$

と表わされる。

会 員 ニ ュ ー ス

人工衛星技術調査団米国において調査

東大玉木教授を団長とする人工衛星技術調査団の一員8名は5月29日より約1カ月にわたり米国のNASAの諸機関および民間諸会社を視察調査した。同団のメンバーはつぎのとおりである(敬称略)。玉本章夫(東京大学教授)、野村民也(東京大学教授)、黒田泰弘(航空宇宙技術研究所)、興石肇(航空宇宙技術研究所)、内山正一(日本電気)、川島隆一(プリンス自動車)、浜本一郎(石川島播磨)、榎谷利男(三菱重工)。

表紙写真説明

ヘリコプタ・ロータのボルテックス・リング状態については本学会誌第14巻第147号、95頁—101頁(昭和41年4月号)に報告したが、この写真はこのような状態を観察するために煙を流してロータまわりの気流を撮影したものである。写真の状態の諸元はつぎのとおりである。ロータ直径720mm、ブレード・ピッチ角8°、回転数1,000rpm、降下角75°、風速1.8~2.1m/s、ホバー時のロータ面における平均誘導速度1.8m/s。ロータ背後の渦は生長・放出という現象をくりかえし、流れに垂直におかれた円板や平板の背後に生ずるカルマン渦に似た挙動を示す。本実験は東京大学航空学科自由飛行風洞において行ない、煙の発生には発煙筒を用いた。(東京大学飛行力学研究グループ)