429 垂直着陸する宇宙機の噴流と地面の干渉に関する 感圧塗料計測

塚原 猛, 鈴木 宏二郎[○], 秋田大輔, 木内 真史, 山田 和彦 (東京大学)

Pressure Sensitive Paint Measurement on Ground Effect of Jet from Vertical Landing Space Vehicle

Takeshi TSUKAHARA, Kojiro SUZUKI, Daisuke AKITA,
Masafumi KIUCHI and Kazuhiko YAMADA

ABSTRACT

The ground effect of the impinging jet is experimentally investigated by using the pressure sensitive paint (PSP). Two cases, that is, a vertical landing rocket with a plug nozzle and a spacecraft landing on a planet without atmosphere are considered. These experiments are conducted in the atmosphere and in the vacuum chamber, respectively. The pressure distribution on the ground and the base of the model is successfully measured through the ground plate made from transparent material. In the former case, the PSP images reveal the characteristics of the ground effect of the impinging jet on the pressure distribution over the vehicle surface, for example, the cell structure in the pressure distribution on the nozzle surface and the pressure drop near the nozzle exit on the vehicle base. In the latter case, the results show that the PSP method is also promising in the research of low pressure rarefied flows.

Keywords: Pressure Sensitive Paint, Jet Impingement, Vertical Landing, Space Vehicle

1. 緒 言

再使用型垂直離着陸ロケットや小惑星等の天体表面に着陸する探査衛星など、宇宙機においてはロケットエンジンを地面に向かって噴射しつつ軟着陸、あるいはホバーする能力が求められる場合がある。このとき、着陸減速用のスラスターによる噴流が地面と衝突、干渉することによってエンジン推力以外に思わぬ空気力が機体に発生する可能性がある。着陸時における宇宙機および着陸地点近傍における安全性を確保するためには、噴流が機体底面と地面との間にどのような流れを作るかを解明する必要がある。ここでは、1) プラグノズルを有する垂直着陸ロケットおよび、2) 大気のない天体に着陸する人工衛星、の2ケースを想定し、感圧塗料を用いて機体底面や地面上の圧力分布測定を行った結果について紹介する。後者では、低圧の希薄流れ実験における感圧塗料の適用性についても検討する。

2. プラグノズルを持つ垂直着陸ロケット¹⁾

2.1 実験の目的

近年の宇宙開発において、打ち上げコスト削減は、信頼性や効率の向上とともに重要な項目となっている。打ち上げコストの削減のために方法として、単段式の再使用型宇宙ロケットの利用が考えられる。単段式の打ち上げでは一つの推進システムで常に高効率を保つ必要があるが、従来のベル型ノズルでは飛行高度によって圧力比

が変化し、設計点からのずれが生じ、これを満たすことは難しい。この問題の解決策としてプラグノズルの利用が考えられる。プラグノズルの排気は常に外気とつりあいながら膨張するため、過膨張、不足膨張などを起こさず常に高い効率を保つことが期待される (Fig. 1)。

Fig. 1 Concept of Vertical Takeoff and Landing Rocket
using Plug Nozzle²⁾

垂直着陸するタイプの単段式再使用型宇宙ロケットでは、ベル型ノズルを持つ場合、地面近傍で噴流と地面との干渉 (地面効果) により機体底面に負圧が生じ正味の推力が低下し、墜落の危険性が生じる問題が指摘されている³⁾。ここでは、垂直着陸ロケットがプラグノズルを有する場合における地面効果を明らかにする。

2.2 実験の概要

実際の機体では Fig. 1 に示すような軸対象型のプラグノズルが用いられると思われるが、ここでは現象の解析の容易さから以下に示す 2 次元形状プラグノズルを対象とした。ノズルは圧力比 100 で設計し、プラグは 40%

の位置で切り落とされている。実験では、スパン 30mm のプラグノズルを有する機体底面を模擬した模型(直径 200mm の円筒形)にコンプレッサーで圧縮した空気を送り、ノズルを通して大気中へ噴射する。実験時の圧力比は、着陸時の推力を絞った状態を想定し、3-5 程度と設計点より大幅に小さくなっている。なお、機体模型は上下逆転して設置されており、衝突噴流実験の際は上方に地面板(アクリル板)を設置している。ここでは、Fig. 2 に示すように、プラグスロープ上と機体底面の圧力分布を感圧塗料により計測した。地面板のない自由噴流の場合は、気流に曝された際の耐久力を重視し、感圧物質に PtOEP、バインダにポリスチレン、溶媒にトルエンを用いた。地面板のある場合、励起光を透明アクリル板を通して行わなければならないため、可視光が使える感圧塗料として、感圧物質に Bath-Phen、バインダに RTV-118、溶媒にジクロロメタンを用いた。なお、噴流の 2 次元性を高めるため、ノズル端面にはサイドプレートが装着できる。このとき、機体底面空間はサイドプレートと機体底面と地面に挟まれた状態となっている。

Fig.2 Schematic View of Experimental Setup

PtOEP を用いた感圧塗料の較正曲線を Fig. 3 に示す。感圧塗料に対する温度補正を行うため、模型には 4 ケ所熱電対が埋め込まれているが、実験中のノズル(真ちゅう製)温度は空間的にほぼ一様であった。

2.3 実験結果

Fig.4 は、サイドプレートなしのケースについて感圧塗料によりプラグスロープ上の圧力分布を可視化したものである。圧力比はそれぞれ 3.8、4.6 である。プラグ上には壁面圧力増減の縞模様が観察され、縞の数は圧力比の増加とともに減少する。Fig. 5 は、サイドプレートありのケースについて圧力分布を可視化したものである。Fig. 4 と同様に縞構造が見られるが、圧力の変動は小さい。これから、サイドプレートの装着により流れの 2 次

元性が強化され、かつ変動も押さえられることがわかる。これらの縞構造は Fig. 6 に示す Navier-Stokes 方程式の数値解析およびシュリーレン法による実験写真からわかるように流れがプラグ上で膨張と圧縮をくり返していることを示している。

Fig. 3 Calibration Curve for PtOEP
(I_{ref} at 293K, 1 atm, $P_{ref}=1$ atm)

Fig.4 Pressure Distribution on Plug Slope (No Plates)

Fig. 5 Pressure Distribution on Plug Slope (with Plates)

Fig. 6 Schlieren Picture (Left) and CFD Results (Right)

Fig.7 は感圧塗料で取得したプラグ中央付近平均圧力

分布について地面板がある場合と自由噴流とで比較したものである（横軸0はプラグ上流端、1はプラグ後端を示す）。これから、プラグ上の圧力分布について、1）衝突噴流は自由噴流より圧力が高い、2）サイドプレートの装着により圧力変動が小さくなる、3）衝突噴流ではプラグ下流端部の圧力が上昇する、ことがわかる。Fig. 8はサイドプレートありの時の機体底面圧力分布を圧力比別に示したものである。底面中心から半径の0.5-0.7の距離を境として機体中心側では大気圧の0.75-0.84位まで圧力が低下している。このことは、プラグノズルを持つ垂直着陸ロケットでも、噴流の地面効果による下向き底面空気力発生が起こりうることを示唆している。

Fig. 7 Pressure Distribution along Plug Center Line

Fig. 8 Pressure Distribution on Base of Model

3. 宇宙機スラスタ希薄噴流の地面効果⁴⁾

3.1 実験の目的

小惑星探査衛星など大気のない天体に離着陸やホバーする宇宙機では、スラスタによる希薄噴流が地面に衝突、干渉することで予想外の空気力や加熱が発生する恐れがある。ここでは、感圧塗料を希薄流れに適用し、真空チャンバー内でジェットを噴射する宇宙機模型の底面

および地面板上の圧力分布計測を試みた。希薄流領域では、配管のロスや時間応答性の悪さが問題となり、従来の圧力孔による手法では高精度な測定は難しい。また、測定点も離散的なものとなる。そこで、それらの問題を解決する方法として、感圧塗料^{5,6)}を低圧域で適用しその有効性を検討する。

3.2 実験概要

Fig. 9に実験装置の模式図を示す。暗室内に置かれた真空チャンバー内に、地面に相当するアクリル板(地面板; 厚さ: 3mm)を設置する。電磁バルブを開放すると貯気槽 A の内のガスが貯気槽 B で一旦淀み点状状態となり模型底面のオリフィスから地面に向けて噴出される。模型は、人工衛星を模擬するために直方体とした。底辺は1辺60mmの正方形であり、中央に直径3mmのオリフィスを有している。地面上の圧力分布測定ではアクリル板上面に感圧塗料を塗り、模型壁面の圧力分布測定については模型底面に塗布する。励起光を含む青色光は、窓1 (Fig. 9)を通して照射する。感圧塗料の放射光は、水平面に対して45度に傾けられた鏡(150×300mm)を介して窓2から14bit冷却CCDカメラにより画像取得する。撮影レンズ前方には、入射光を遮断するためショートカットフィルター(480nm)が取り付けられている。

感圧塗料の発光物質はバソフェンであり、バインダーはRTVゴムを用い、ジクロロメタンに溶解してエアブラシにより各壁面に塗布した。塗料の感度を上げるため、噴射気体として純酸素を用い、カメラの露光時間は500msに設定した。較正実験は、基準圧力を1000Paとして、実験と同じ設定で行われた。Fig.10にその結果を示す。1000Pa以下の低圧域では約20%の輝度変化があり、十分に圧力測定が可能であると言える。図には測定領域内を5分割したそれぞれの領域での結果も示されているが、これらに差はほとんどなく、輝度分布には偏りがないことが確認された。ただし、50Pa以下の圧力では輝度のばらつきが大きくなり、本実験における測定可能域は50Pa以上であることがわかる。

Fig. 9 Schematic View of Experimental Setup in Vacuum Chamber

Fig. 10 Calibration Curve at Pressure less than 500 Pa

3.2 実験概要

Fig. 11 に単一ノズル模型について、地面から模型底面までの距離を 5mm、15mm、30mm と変化させた時の地面上圧力分布の可視化結果を示す。噴流の貯気槽は 16.5kPa である。模型が地面に近づくとき最大圧力が増加する一方、圧力上昇が起こる領域は狭くなる。なお高さ 30mm の場合の圧力分布においてジェット境界付近で周方向に規則的な圧力ピーク点の分布が観察されている。これは、噴流界面が凹面となった際のテイラー・ゲルトラー型不安定による渦の発生⁷⁾と類似の現象であると考えられるが、その解釈には光学系の干渉による誤信号も含めて慎重な検討が必要である。

4. まとめ

地面に垂直着陸する宇宙機における噴流の地面効果について感圧塗料を用いた実験結果を紹介した。透明な地面板を通して励起光を与えたり、発光を観察することで、感圧塗料を機体底面や地面上の圧力分布測定にも適用でき、この種の衝突噴流問題に有用な実験ツールとなることがわかった。また、本実験では 50Pa が限度であったが、より低圧まで感度を持たせることができれば、低圧の希薄流の実験方法としても有望であると言える。

参考文献

- 1) 塚原 猛：プラグノズルを有する垂直着陸型 SSTO の地面効果に関する実験的数値的研究，東京大学修士論文（航空宇宙工学専攻）(2002)。
- 2) 宇宙科学研究所 将来型宇宙輸送システムワーキンググループ：完全再使用ロケットの開発研究提案書 (1998)。
- 3) 山田和彦 他：垂直着陸するロケットの底面空気力に関する実験的研究，日本航空宇宙学会論文集，Vol. 50, No. 577 (2002) pp. 41-47。
- 4) 木内真史 他：宇宙機スラスター希薄噴流の地面効果に関する感圧塗料計測，日本航空宇宙学会第 33 期年会講演会講演集 (2002) pp. 93-96。
- 5) 浅井圭介：感圧塗料による圧力分布の計測技術，可視化情報，Vol. 18, No. 69 (1998) pp. 97-103。
- 6) 新美智秀 他：希薄機体中に置かれた固体表面の感圧塗料による圧力分布計測，可視化情報，Vol. 21 Suppl. No. 1 (2001) pp. 333-336。
- 7) 手島光司：流れ方向渦による軸対称不足膨張ジェットの断面変形，第 29 回流体力学講演会講演集 (1997) pp.297-300。

(a) Height = 5 mm

(b) Height = 15 mm

(c) Height = 30 mm

Fig. 11 Pressure Distribution on Ground Plate (Single Nozzle Model)