

No.2

高温衝撃風洞における 07HOPE 空力試験

伊藤勝宏、小室智幸、高橋政浩、佐藤和雄、植田修一（航空宇宙技術研究所）
 棚橋美治、荒川正夫（三菱重工）

Aerodynamic Tests of 07HOPE in High Enthalpy Shock Tunnel

Katsuhiro Itoh, Tomoyuki Komuro, Masahiro Takahashi, Kazuo Sato and Shuichi Ueda (NAL)
 Yoshiharu Tanahashi and Masao Arakawa (MHI)

概要

HOPE 再突入空力特性を解明するため、大型高温衝撃風洞の整備が進められている。本研究ではその試験精度確保のためパイロット高温衝撃風洞による 07HOPE 空力試験を実施し、短時間空力計測法の評価とともに空力特性に強く影響する実在気体効果の基礎的な解明を試みた。

1. はじめに

実在気体効果が顕著な高エンタルピ域の空力技術確立がHOPE研究開発における重要課題の1つとなっている。そのため航空宇宙技術研究所は、宇宙開発事業団と共同で50cmモデルの試験が可能な世界最大の自由ピストン型高温衝撃風洞 Hiest⁽¹⁾を建設し、平成9年度秋より運用を開始する。この Hiest での試験精度を確保するため、1/3スケールのパイロット風洞 HEK⁽²⁾を用いて試験時間が数ミリ秒ほどしかない高温衝撃風洞のための空力計測法の開発^(3,4)、およびその評価のための基礎的空力試験を行ってきた。供試模型/空力天秤/支持系の周波数応答関数に基づく空力計測法を 1.25%HOPE 模型に適用し、翼等により複雑化する振動特性についても有効であることを確認した。また、実在気体効果を支配するエンタルピとバイナリスケーリングパラメータに対する縦三分力特性およびその機体形状との関連性について解明を試みた。

2. 空力計測

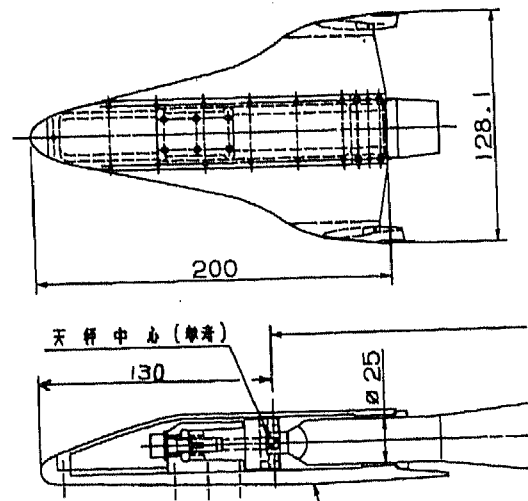


図1 1.25%07HOPE 模型

高温衝撃風洞の試験気流は衝撃波の入射により瞬間的に始動するため、供試模型/空力天秤/支持系の複雑な連成振動が励起され、この衝撃応答がほとんど減衰しないまま試験が終了する。この問題を解決するため、時間応答性と動特性の単純さを重視した十字一列型高剛性空力天秤⁽⁵⁾を用い、系の周波数応答関数で衝撃応答特性を補正し

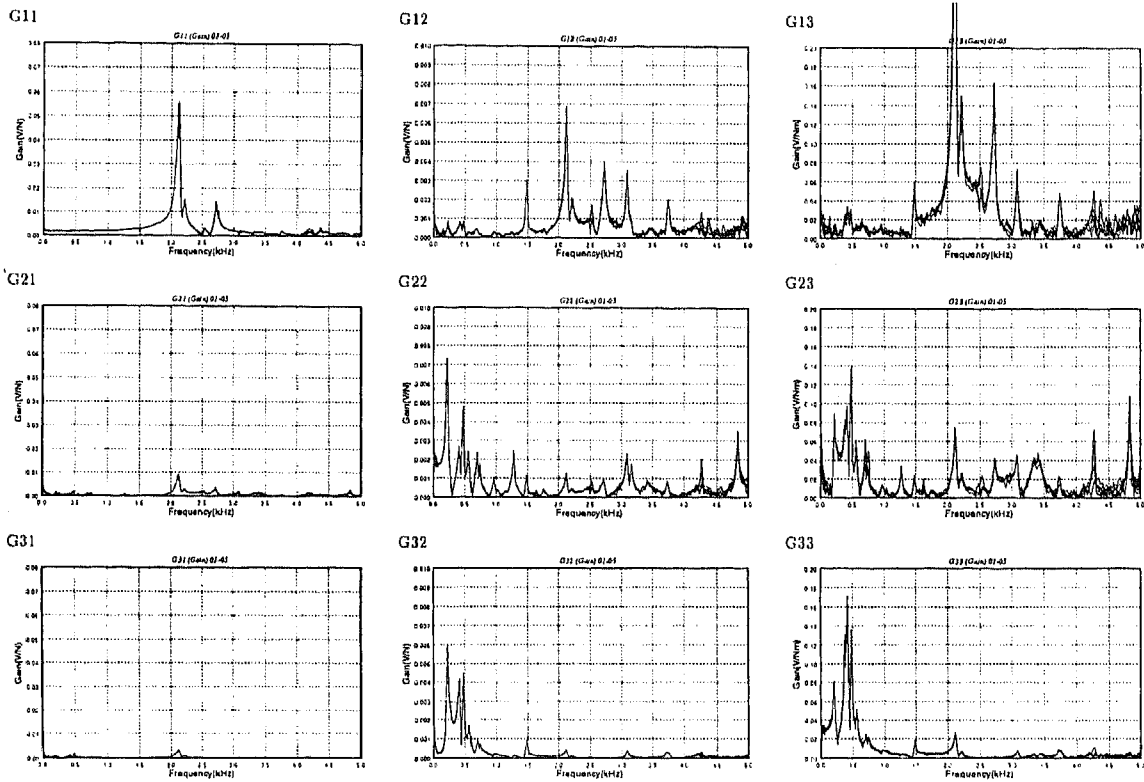


図2 周波数応答関数 (ゲイン)

空力特性を再構築する方法を開発した。図1に十字一列型天秤を取り付けた全長20cmの1.25%07HOPEモデルを、又図2にはハンマリング検定で求めたモデル/天秤/支持系の周波数応答関数を示す。このよう

に主翼、胴体、スティング等の連成振動モードが5kHzまでに17個ほど存在している。

3. 試験条件

表1 07HOPE 空力試験条件

| | エンタルピー (MJ/kg) | 総圧 (MPa) | ピトー圧 (kPa) | $\rho L \times 10^4$ (kg/m ²) | マッハ数 | 粘性干渉パラメータ |
|-------|----------------|----------|------------|---|------|-----------|
| I-A | 8 | 23 | 104 | 20 | 7 | 0.015 |
| II-A | 12 | 35 | 162 | | | |
| III-A | 16 | 33 | 143 | | | |
| I-B | 8 | 24 | 34 | 5 | 9 | 0.025 |
| II-B | 13 | 37 | 53 | | | |
| III-B | 18 | 33 | 46 | | | |

表1に示す6つの条件についてそれぞれ3回ないし4回、トータルで20回の試験をパイロット高温衝撃風洞 HEK を用いて行った。6つの条件は、バイナリスケーリングパラメータが大きいAと小さいBに分かれ、それぞれよどみ点エンタルピを3通りずつ設定した。なお、HEK ではコンカルノズルを使用しており、ノズルスロート径の調節によりバイナリスケーリングパラメータを変化させた。また、迎角はすべて30度である。

4. 結果と考察

4. 1 ピトー圧

図3にピトー圧履歴を示す。高温衝撃風洞では高エンタルピ条件ほど始動過程における変動が大きくなる傾向がある。0.3 ~ 0.4ms ほど要する始動過程後、0.5 ~ 0.8ms を試験時間とする。

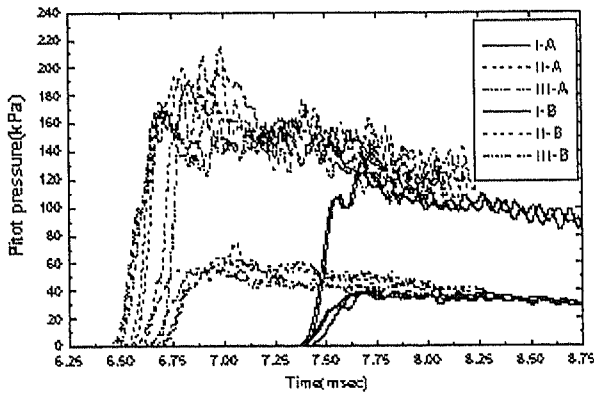


図3 ピトー圧履歴

4. 2 天秤出力

図4 (a) ~ (c) に軸力 (Fx)、垂直力 (Fz) およびピッチングモーメント (My) の天秤出力を示す。軸力についてはIII-Aを例としてプロットした。軸力の主振動である 2.1kHz の振動が最も顕著に現れており、振動が減衰するはるか以前に試験時間が終了することがわかる。図4 (b) の Fz

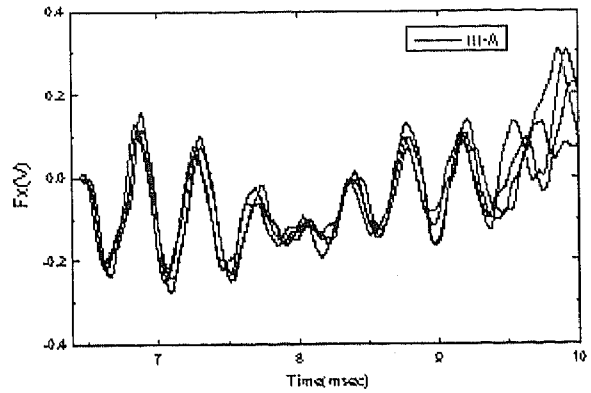


図4 (a) Fx 天秤出力

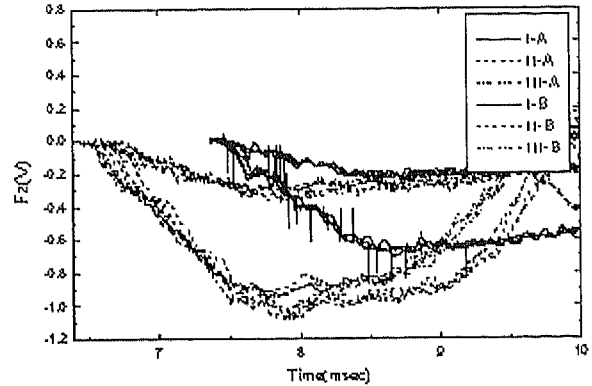


図4 (b) Fz 天秤出力

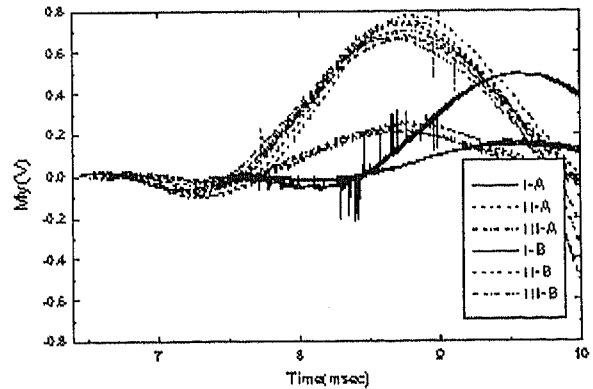


図4 (c) My 天秤出力

出力では、低周波のスティング曲げ一次モードが強く現れ、また図2に示すように高次の振動モードやピッチングモーメントと

の干渉出力も含む。主振動数が比較的ステイニング振動数に近いピッチングモーメントの出力では、両者の連成が最も支配的である。

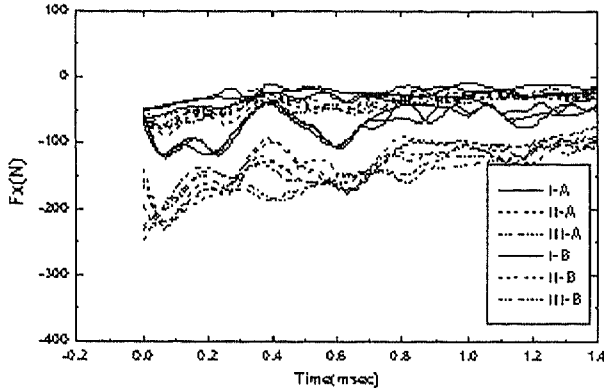


図5(a) Fx再構築

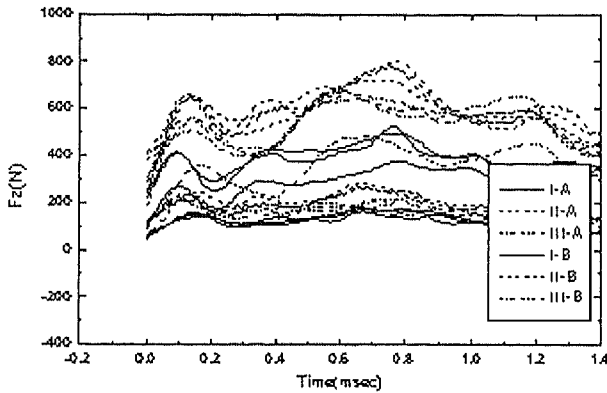


図5(b) Fz再構築

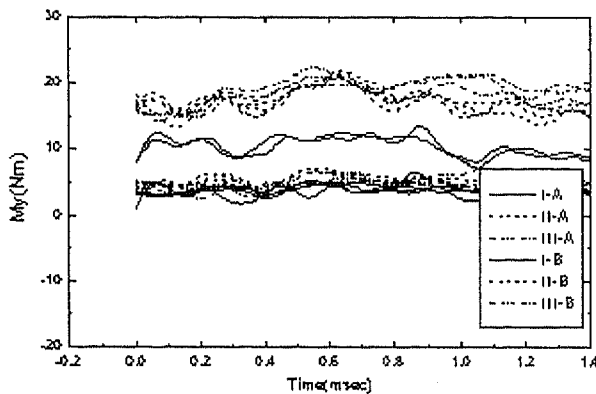


図5(c) My再構築

4. 3 補正結果

図2に示した周波数応答関数を用いて天秤出力に含まれる動特性を補正し、力・モーメントの再構築を試みた結果を図5(a)～(c)に示す。検定と風洞試験の動特性を一致させるため、検定装置の模型設置部構造を風洞測定部と類似にし、また全体の剛性をできるだけ高くしてあるが、特に高周波域においてどうしても動特性のずれを生じてしまう。そのため主要な振動モードが比較的高周波域にあるFxやFzでは再構築結果にまだ振動が残っているが、試験時間内での平均化が可能な程度までは補正されている。一方、Myでは高周波域のスペクトルが小さいため比較的良好に再構築されている。ただし、Myの値そのものは実在気体効果を考慮しても過大である。これは、20cmの模型に対し出口径40cmのコニカルノズルを使用し、ノーズでアップウォッシュ、翼でダウンウォッシュとなっていることが最大の要因と考えられる。よって、Myについては定性的傾向のみの考察とする。

4. 4 空力係数

力・モーメント再構築結果の試験時間内平均化により空力係数を算出した結果を図6(a)～(c)に示す。図中、白ヌキはバイナリスケーリングパラメータが大、黒は小の結果である。分子の解離による実在気体効果は、垂直に近い衝撃波背後のノーズ周辺では圧力を上げ、斜め衝撃波背後のaftbodyや翼では圧力を下げる方向に作用し、それが空力特性に強く影響する。そのため、図6(a)の軸力係数はエンタルピとともに増加し、またバイナリスケーリングパラメータが大きいほどその増加率は大きい。この結果を低エンタルピへ直線的に外挿すれば、実在気体効果がほとんど消滅

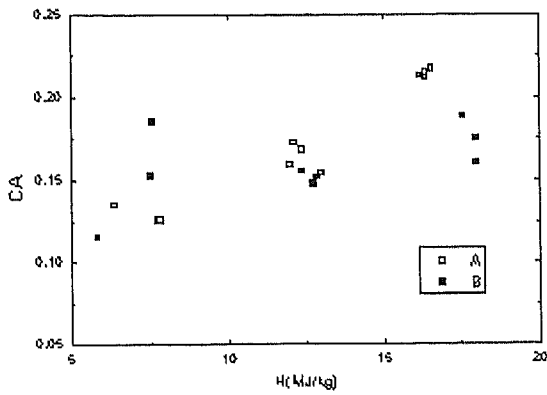


図 6 (a) 軸力係数

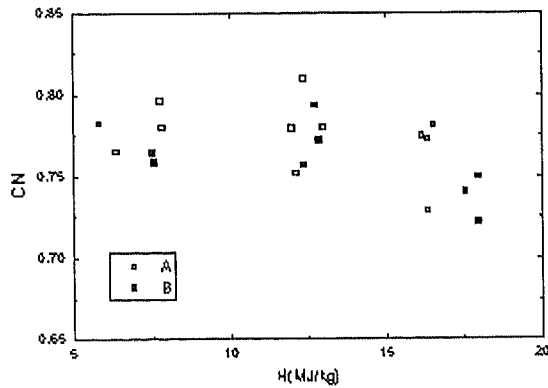


図 6 (b) 垂直力係数

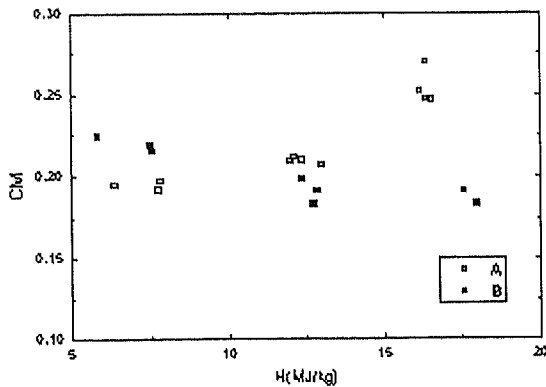


図 6 (c) ピッチングモーメント係数

する 1.5MJ/kg 以下で他の極超音速風洞試験結果と一致する。(b)の垂直力係数については、12MJ/kg まではあまり変化はな

く、それを越えると減少傾向が見られ、実在気体効果による翼面圧力低下の影響は十分エンタルピが高くなってから明確になるという結果となった。12MJ/kg までは翼面圧力の低下と forebody の圧力上昇が相殺し、12MJ/kg を越えると翼面圧力低下が垂直力に対し優勢になってくると考えられる。バイナリスケーリングパラメータの効果はあまり見られないが、これはバイナリスケーリングパラメータ小でも翼面では解離が進行すること、forebody の圧力上昇が小さいことによるのではないかとと思われる。なお、12MJ/kg 以下ではエンタルピ効果が小さいので、他の極超音速風洞試験結果と一致している。(c)のピッチングモーメントについては、先述したようにコニカル流の影響と思われる過大な機首上げとなっており定性的傾向を見るにとどめる。しかし、その傾向もバイナリスケーリングパラメータにより大きく異なるものとなった。バイナリスケーリングパラメータが大の場合は 12MJ/kg までは微増、それを越えて急増し、軸力や垂直力に現れる実在気体効果と矛盾がないが、バイナリスケーリングパラメータが小の場合はその逆といってもいいほどの傾向となった。その理由については、バイナリスケーリングパラメータを下げるために用いた小口径スロート時のノズル流れの詳細な観測も含めて現在究明中である。

5. おわりに

今年度秋に運用を開始する HIEST での HOPE 空力試験精度を確保するため、1/3スケールのパイロット風洞HEKを用いてこれまでに開発してきた短時間空力計測法の評価、および実在気体効果と空力特性の関連性について基礎的な解明を試みた。その結果、本計測法は翼・胴体・ステイングの連成により複雑化する振動特性につい

ても有効であることを確認した。また、エンタルピとバイナリスケーリングパラメータを変化させた試験を行い、実在気体効果による機体周りの圧力分布変化が縦三分力の傾向に直接反映され、軸力は単調増加、さらに HOPE 形状の特徴として垂直力およびピッチングモーメントが 12MJ/kg を境にしてそれぞれ減少および増加（機首上げ）した。なおピッチングモーメントについては、コニカル流れの影響、さらにバイナリスケーリングを下げるために用いた小口径スロート時の試験気流の非一様性について詳細に調べているところである。

参考文献

- 1) K.Itoh et al, Design and Construction of Hiest (High Enthalpy Shock Tunnel) , ICFE'97, 1997
- 2) K.Itoh, Tuned Operation of Free Piston Shock Tunnel, 20th ISSW, 1995
- 3) 丹野他、高温衝撃風洞における短時間空力計測、平成7年度応用力学連合講演会、1995
- 4) K.Itoh, Force Measurements in the HEK Shock Tunnel, 5th IWSTT, 1996
- 5) 伊藤他、有翼模型の高エンタルピ空力特性、平成8年度衝撃波シンポジウム、1997
- 6) C.Jessen, Six Component Strain Gauge Balance Measurement on a Cone in a Shock Tunnel, Shock Wave Journal, 1990