

極超音速統合制御実験 (HIMICO) 用ラムジェットエンジンの迎角・横滑り角特性の実験的研究

○ 榎原宥希, 藤井愛実, 藤森勇輝, 干谷祐輔, 田中凜太郎, 佐藤哲也 (早稲田大学)
田口秀之, 高橋英美 (JAXA)

1 研究背景

現在、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と大学の共同で、マッハ5クラスの極超音速旅客機の研究が行われており、その第一段階として、小型の試験機を用いた飛行試験が計画されている。これを、極超音速統合制御実験 (High Mach Integrated Control Experiment, 以下 HIMICO 計画) と呼ぶ。本計画は、極超音速下での実験手法の確立および機体とエンジンの統合制御技術の実証を目的とし、2024年度に飛行試験を計画している。HIMICO 計画の概要図を図1に示す。



図1: JAXAの極超音速機開発構想

エアインテークは、試験機に搭載するラムジェットエンジンの性能を決定する重要な構成要素の一つである。先行研究において、インテークの第2ランプと第3ランプのサイドクリアランス (SC) がインテーク性能に与える影響および、迎角や横滑り角の付与がインテーク性能に与える影響の調査が行われている。

迎角を付与した場合においては、すべてのSCを0mmとすると、すべてのSCを0.25mmにしたときに比べて流量捕獲率が高くなることが分かった [1]。また、横滑り角を付与した場合においては、すべ

てのSCを0.25mmとすると、大幅に流量捕獲率が減少する一方、すべてのSCを0mmとすると、バズへの遷移が早くなることが分かった [1]。迎角や横滑り角を付与しない場合においては、第2ランプのSCを0mm、第3ランプのSCを0.25mmとしたときに性能と始動性がともに良好になることが分かった [2]。さらに、迎角と横滑り角を同時付与した際の圧損は、それらを個別に付与した場合の全圧損失の和よりも大きくなることが分かった [2]。サイドクリアランス (SC) および迎角と横滑り角の定義を図2、図3に示す。

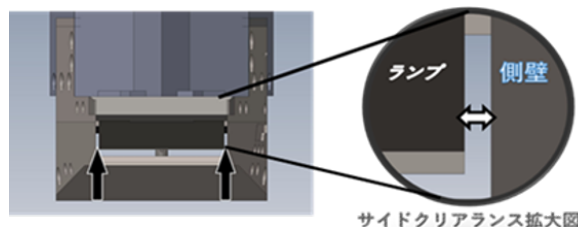


図2: サイドクリアランス (SC) の定義

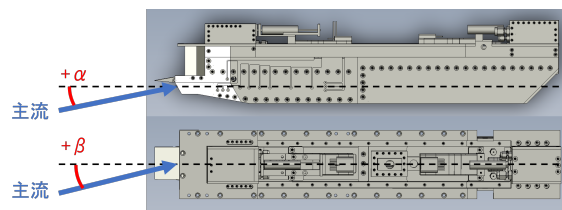


図3: 迎角および横滑り角の定義

これらの先行研究において、インテークに迎角や横滑り角が付与された際の性能低下が示唆されたが、その際にインテーク内流れ場がどのように構成されているかは依然として不明である。そこで本研究においては、横滑り角が付与された際のインテーク内流

れ場に着目し、静圧分布および非定常圧力挙動をもとにその構成を考察することを目的とした。

2 実験手法

超音速風洞試験は、2021年7月5日から7月21日の間に、JAXA 相模原キャンパス高速気流総合実験設備にある、超音速風洞を用いて行った。風洞試験条件を表1に示す。

表 1: 風洞試験条件

主流マッハ数	3.4
風洞全圧 [kPa]	374
風洞全温 [K]	300
通風時間 [s]	5 or 40
迎角 α [degree]	0 or 2.5
横滑り角 β [degree]	0 or 5 or -5

試験供試体には、実際の飛行試験で用いるラムジェットエンジンと同形状のものを用いた。本供試体は入口のインテークスロット高さ HIT と、出口のノズルスロット高さ HNT を、モータを用いて独立して制御することができる。本実験では HIT を全開の 7.8 mm で固定し、HNT を全開の 14.0 mm から全閉の 2.7 mm まで変化させるシーケンスを組んで通風を行った。試験供試体の概要図を図4に示す。

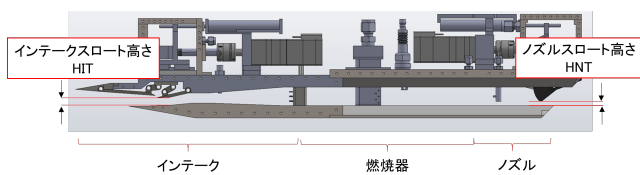


図 4: HIMICO 用ラムジェットエンジン概要図

本供試体にはインテーク部左舷側側壁の内部に静圧孔が9点、インテーク部上側板右舷寄りに非定常圧力センサ1点が設置されている。これらの位置関係を図5に示す。

図5より、 $\beta \leq 0$ のとき、静圧孔は流れの圧縮領域、非定常圧力センサは膨張領域に位置する。逆に $\beta \geq 0$ のとき、静圧孔は膨張領域、非定常圧力センサは圧縮領域に位置する。

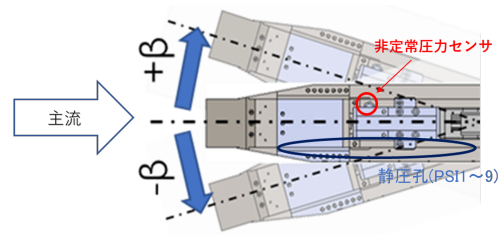


図 5: 静圧孔および非定常圧力センサの位置

3 結果と考察

(1) 静圧分布

初めに、 $\beta = 0^\circ$ の時の静圧分布を図6に示す。図は横軸にインテーク先端から軸方向の距離 [mm]、縦軸にゲージ圧で静圧 [kPa] を示した。さらに、式(1)から求めた HNT 開度により各プロットを色分けした。

$$\text{HNT 開度} [\%] = \frac{\text{計測時のノズルスロット高さ} [\text{mm}] \times 100}{\text{全開時のノズルスロット高さ} (14.0\text{mm})} \quad (1)$$

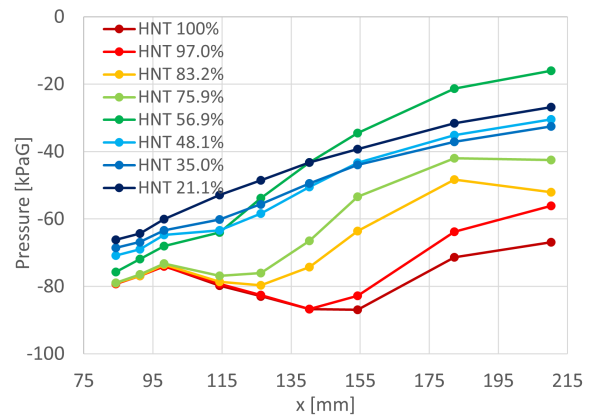


図 6: 静圧分布 ($\alpha = \beta = 0^\circ$)

図6より、HNT が 100% 付近ではディフューザ部 ($x \geq 115$ mm) で 20 kPa 程度の圧力上昇がみられ、これより流れが超音速でスロットを通過、ディフューザ部の終端衝撃波で圧縮・減速されているものと考えられ、始動状態であることがわかる。始動状態で HNT を縮小すると終端衝撃波位置を前進させることができ、これはグラフの圧力上昇部が前進することから読み取れる。HNT 開度が 56.9 % のとき終端衝撃

波はスロートに位置し、約 60 kPa の圧力上昇が得られる臨界状態となる。続けて HNT を縮小すると、終端衝撃波がカウル前方に飛び出し、インテーク内が全域で亜音速となる不始動状態に遷移する。次に、 $\beta = \pm 5^\circ$ のときの静圧分布をそれぞれ図 7、図 8 に示す。これらの図には比較のため、 $\beta = 0^\circ$ の臨界状態のときの静圧分布を灰色の破線で示した。圧縮側については図 7 より、HNT が全開付近の時に、 $\beta = 0$ のときと同様に、ディフューザ部で 20 kPa 程度の圧力上昇が発生する静圧分布がみられることから、流れはスロートを超音速で通過していると考えられる。一方で HNT を縮小してもインテーク背圧は上昇せず、HNT 開度が 55% を下回ると圧力上昇は 10 kPa 程度にとどまった。このとき静圧分布の形状から、インテーク内部は全域で亜音速となっていると考えられる。また、HNT 縮小時に背圧が上昇していない理由としては、横滑り角付与によるエンジン内流量低下および、第一ランプ上に形成される剥離領域の増大による圧力損失の増加が原因と考えられるが、これについては CFD 等を用いた詳細な検討が必要である。

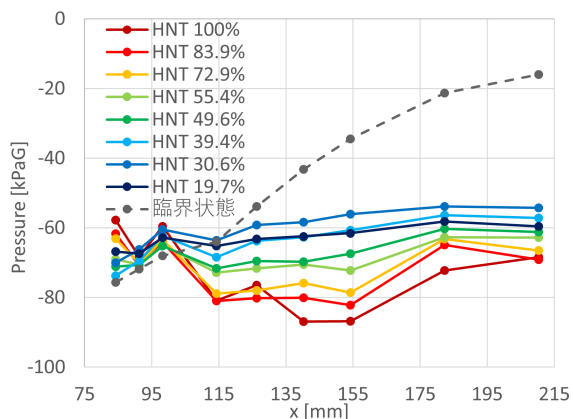


図 7: 静圧分布 ($\beta = -5^\circ$, 圧縮側)

膨張側については図 8 より、10 kPa 程度の圧力上昇となり、圧縮側において HNT 開度を 55% 以下としたときと同程度の圧力上昇となった。HNT100% 付近において、圧縮側では流れが超音速でスロートを通過している一方で、膨張側ではそれよりも圧力上昇が小さい流れ場が生じており、圧縮側と膨張側で流れ場の様子が異なることが分かった。これは、膨張側壁面において剥離が発達していることが原因であ

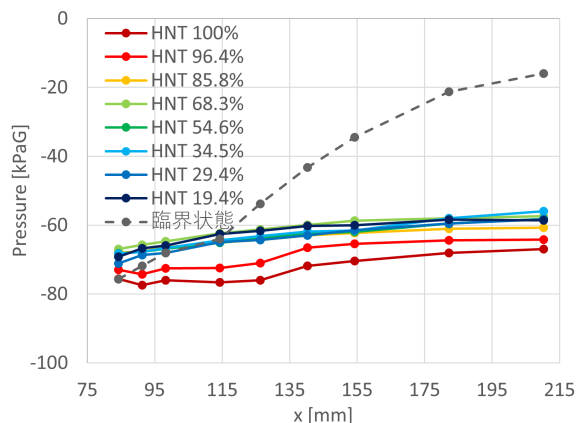


図 8: 静圧分布 ($\beta = 5^\circ$, 膨張側)

ると考えられるが、その詳細な状態については CFD 等による解析が必要である。

(2) 非定常圧力

$\beta = 0^\circ$ の時の非定常圧力を図 9 に示す。図は横軸にシーケンス開始からの時間 [s]、縦軸にゲージ圧で圧力 [kPa] を示した。

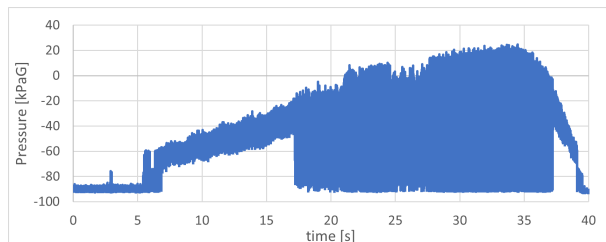


図 9: 非定常圧力 ($\beta = 0^\circ$)

この波形を見ると 17 s 付近まで 20 kPa 程度の圧力振幅のまま圧力は上昇し続け、その後振幅が約 120 kPa まで急激に増大することから、17 s 付近においてバズへ遷移している様子が明確にわかる。

$\beta = -5^\circ$ および $\beta = 5^\circ$ のときの非定常圧力を図 10 および図 11 に示す。これらを図 9 と比較すると、横滑り角付与時には鮮明なバズへの遷移がみられないことがわかる。また、圧力振動の振幅の最大値も、膨張側の $\beta = -5^\circ$ で約 40 kPa、圧縮側の $\beta = 5^\circ$ で約 60 kPa となり、バズ遷移後の $\beta = 0^\circ$ の圧力振幅の最大値 120 kPa に比べて小さくなっている。これは、横滑り角付与にともなう流量低下や第一ランプ上剥離領域の増大によりインテーク背圧が低下し、

バズの発生を引き起こす逆流現象が生じにくくなったことが原因であると考えられる。一方で、図 12 に示す、インテーク外部の衝撃波振動時のシュリーレン画像を参照すると、外部衝撃波には振動がみられるが、これがインテーク出口付近の非定常圧力センサに影響を与えない原因については、CFD 等を用いたより詳細な解析が必要である。また、圧縮側と膨張側を比較すると、圧縮側の圧力振動の振幅のほうに 20 kPa ほど大きくなっている。このことから圧縮側と膨張側で異なる状態の流れ場が生じていると考えられる。圧縮側のほうが圧力振動の振幅が大きくなる原因についてはさらに検討が必要である。

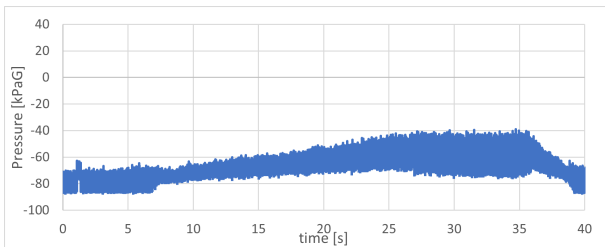


図 10: 非定常圧力 ($\beta = -5^\circ$, 膨張側)

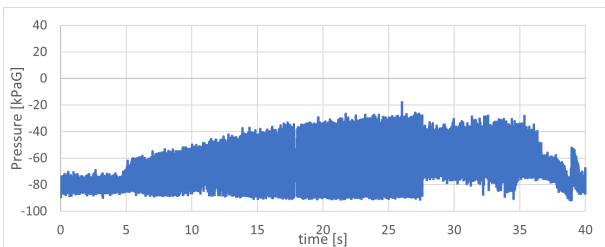


図 11: 非定常圧力 ($\beta = 5^\circ$, 圧縮側)

4 結論

本研究において以下の知見が得られた。

(1)HIMICO 用インテークに横滑り角 $\beta = \pm 5^\circ$ を付与した場合、インテークにおける圧力上昇は約 10 kPa となり、 $\beta = 0^\circ$ の臨界状態時の圧力上昇約 60 kPa と比較して大きく低下していることがわかった。これは、横滑り角付与による流量減少、インテーク入口における剥離領域の増大が原因と考えられる。

(2)HIMICO 用インテークに $\beta = \pm 5^\circ$ を付与した場

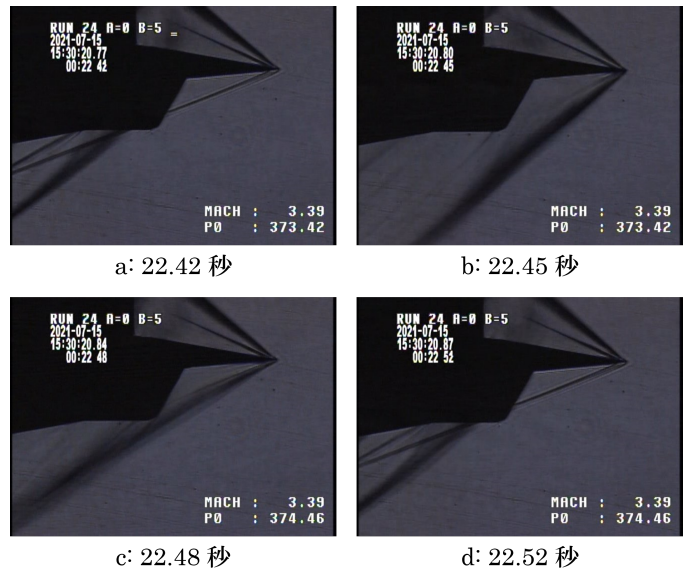


図 12: 外部衝撃波振動の様子 ($\beta = 5^\circ$)

合、非定常圧力の圧力振動の最大値は圧縮側で約 60 kPa、膨張側で約 40 kPa となり、 $\beta = 0^\circ$ のときの約 120 kPa に比べて大きく低下していることがわかった。これはインテーク背圧の低下により、バズの初期段階である流れの逆流が生じにくくなったことが原因であると考えられる。

参考文献

- [1] 小倉彰悟, ”極超音速統合制御実験 (HIMICO) 用インテークのサイドクリアランスおよび主流流入角が性能に及ぼす影響”, 令和 2 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2020.
- [2] 藤森勇輝, ”極超音速統合制御実験 (HIMICO) 用ラムジェットインテークに関する実験的研究”, 令和 2 年度宇宙輸送シンポジウム, 2020.