

極超音速統合制御実験(HIMICO)用インテークにおけるサイドクリアランスの影響

Influence of the side clearance on the inlet for Hi-Mach Integrated Control Experiment (HIMICO)

○佐野 正和^{※1}, 吉田 秀和^{※2}, 長尾 志^{※2}, 佐藤 哲也^{※1}, 橋本 敦^{※3}, 小島 孝之^{※3}

※1 早稲田大学基幹理工学部, ※2 早稲田大学基幹理工学研究科, ※3 宇宙航空研究開発機構

記号

M_∞		主流マッハ数	
P_t	kPa	全圧	
$P_{t\infty}$	kPa	主流全圧	
MCR		流量捕獲率	
TPR		全圧回復率	
h_∞	mm	インテーク入り口高さ	17.8 mm
h_{th}	mm	インテークスロート高さ	
h_{noz}	mm	ノズルスロート高さ	
W	mm	インテーク入り口幅	43 mm
W_{side}	mm	サイドクリアランス幅	

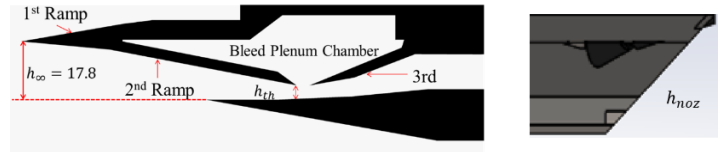


図3 可変矩形インテーク、ノズル

2.性能取得と課題

前述の通りこれまで、HIMICO用エンジンを対象とした風洞実験⁽²⁾が進められてきた。実験から得られた流量捕獲率(Mass Capture Ratio: MCR)および全圧回復率(Total Pressure Recovery: TPR)が理論値・解析値に対して大きく下回っていることが問題となっていた。先行研究^{(3),(4)}からこの原因が、側壁と可変ランプの間にある1mmの隙間にあることがわかった。この隙間をサイドクリアランスと呼び、この幅を W_{side} と表す。サイドクリアランスは飛行試験において熱膨張が生じたときに、第2, 3ランプが側壁に干渉しないように設けられている。図4はサイドクリアランスの位置を示している。右側の図が軸方向の幅方向中心断面(センターライン)であり、実線におけるA-A断面を矢印の方向から見たものが左側の図である。

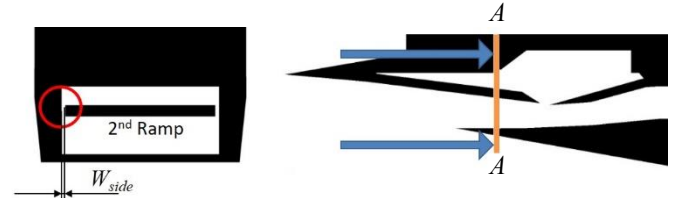


図4 サイドクリアランスの位置

3.研究目的

本研究では、このサイドクリアランスがインテーク性能へおよびず影響を数値解析により定量的に評価すること、適切なサイドクリアランス幅 W_{side} を調査することを目的とする。

4.数値解析条件

数値解析はJAXAの所有するスーパーコンピュータ「JSS2」で実行し、解析ソルバにはJAXAで開発された高速非構造格子流体解析ソルバ「FaSTAR(Fast Aerodynamic Routines)⁽⁵⁾」を用いている。詳しい解析条件を表1に記す。

表1 解析条件

次元	3次元計算
乱流モデル	SST-2003
流束評価	SLAU
空間精度	2次精度(MUSCL法)
時間積分	LU-SGS

また主流条件は風洞実験に合わせて以下のようにした(表2)。

表2 主流条件

主流マッハ数 M_∞		3.4
主流全温 $T_{t\infty}$	K	300
主流全圧 $P_{t\infty}$	kPa	610

計算はノズル高さ h_{noz} とサイドクリアランス幅 W_{side} を変化させて行った。サイドクリアランス幅は実機と同じ1mmから0mm(サイドクリアランスなし)まで0.25mm刻みで比較した。

性能は流量捕獲率 MCR 、全圧回復率 TPR の二つの指標を用いて評価した。それぞれの値の定義式は式(1)、式(2)である。

1.はじめに

現在、宇宙航空研究開発機構(以下JAXA)では極超音速空気吸い込み式エンジンの開発、およびこれを搭載する極超音速機の研究開発が進められている。この極超音速機が実現することで、太平洋を2時間で横断できるようになるほか、スペースプレーンとして宇宙輸送に展開することも可能となる。開発計画は大きく3つの段階に分かれており、本研究では第一段階である極超音速統合制御実験(High Mach Integrated Control Experiment: HIMICO)⁽¹⁾を対象としている(図1)。このHIMICO実験の目的は機体・エンジンの相互干渉を含む統合制御技術の確立である。これまで、風洞実験、燃焼実験を通して、それぞれの性能取得が進められてきた。

Research object



図1 極超音速旅客機開発計画

HIMICO用エンジン(図2)は混合圧縮型の矩形インテークを採用しており、一つの垂直衝撃波と複数の斜め衝撃波を通して空気の圧縮、減速を行っている。また、本エンジンのインテークは可変ランプ機構を有しており、スロート高さ h_{th} を調節できるようになっている。これにより第2ランプで衝撃波の転角を変え、流入マッハ数に応じてインテーク性能を調節することが出来る。同様にノズル部も可変機構を有しており、ノズル高さ h_{noz} を調節することにより背圧を調節することができる(図3)。インテーク入り口幅は $W=43$ mmである。

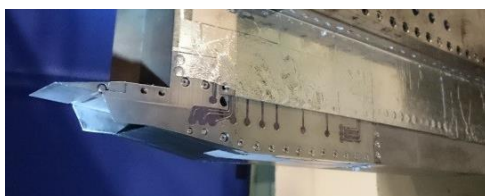


図2 HIMICO用エンジン

$$MCR = \frac{\text{インテーク捕獲流量}}{\text{インテーク前面投影面を通過する流量}} \quad (1)$$

$$TPR = \frac{\text{インテーク出口全圧 } P_t}{\text{主流全圧 } P_{t\infty}} \quad (2)$$

5. 解析結果と考察

図5に性能曲線を示す。横軸にMCR、縦軸にTPRを示す。 $W_{side}=1\text{ mm}$ のとき、実験値に5%未満の誤差で一致しており、 $W_{side}=0\text{ mm}$ のとき、理論値に2%未満の誤差で一致している。ここで理論値とは2次元の衝撃波角度から算出された値である。この結果から実験値と理論値の違いの原因がサイドクリアランスにあることが本研究でも確認された。また性能マップからサイドクリアランスの幅を狭めることで性能が上昇することが確認できる。性能への影響の仕方に注目してみると、ノズル高さが高いとき、低いときで影響の仕方が異なることが分かる。 $h_{noz}=9\text{ mm}$ のとき（低流量域）では W_{side} の減少に対しどの範囲でもMCRが増加している。 $h_{noz}=13\text{ mm}$ のとき（高流量域）では $W_{side}=0.75\text{ mm}$ から 0 mm の範囲で、 $W_{side}=1\text{ mm}$ から 0.75 mm での影響に比べMCRの増加分が少ない。また本研究の解析範囲では $W_{side}=0.25\text{ mm}$ 以下において低流量域でも大幅なインテーク性能の改善が見込めることがわかった。

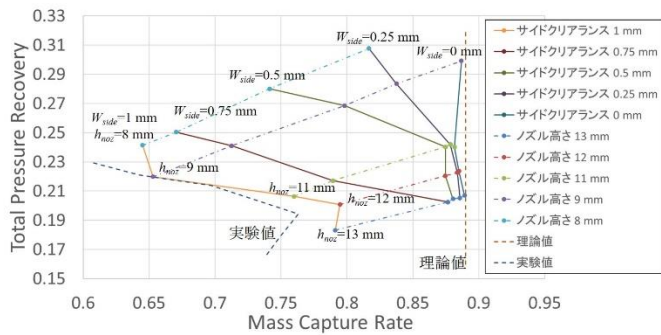


図5 性能曲線

まず高流量域として $h_{noz}=13\text{ mm}$ について考察する。図6に $h_{noz}=13\text{ mm}$ のときのセンターラインにおけるマッハ数分布を示す。なお本研究に用いるマッハ数コンターは全て図6中に示すものである。これを見ると $W_{side}=1\text{ mm}$ のときのみ第二ランプ面上に剥離が生じ、流れが大きく転向していることが分かる。

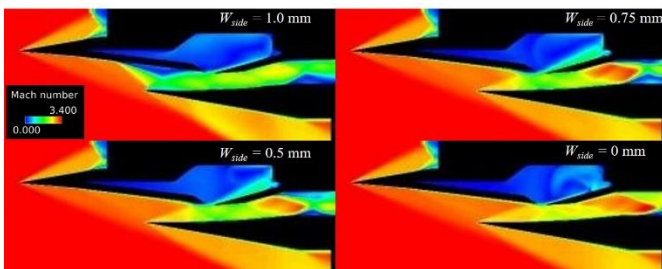


図6 センターライン断面におけるマッハ数分布($h_{noz}=13\text{ mm}$)

センターラインから側壁方向に 16.5 mm （壁面から 5 mm ）平行移動した断面におけるマッハ数分布を図7に示す。 $W_{side}=1\text{ mm}$ のときを見ると、第2ランプ上の剥離が前述の剥離よりも上流に位置している。これにより斜め衝撃波が下部カウルより上流に位置し、インテーク流路外に漏れ出していることが分かる。この漏れ出しがインテーク捕獲流量の低下の原因であると考えられる。 $W_{side}=0.75\text{ mm}$, 0.5 mm のときを見ると $W_{side}=1\text{ mm}$ のときより第2ランプ上の剥離が小規模である。

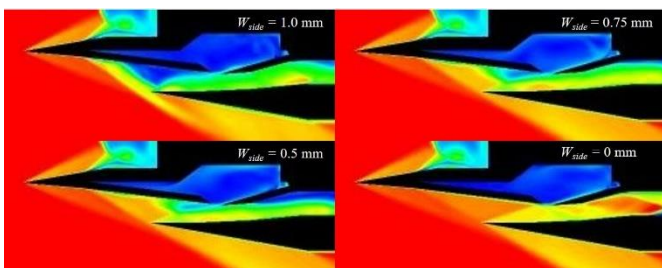


図7 側壁付近のマッハ数分布($h_{noz}=13\text{ mm}$)

剥離により衝撃波が転向し漏れ出し量に変化していることを確かめるために、流路に垂直で下部カウル先端を含む断面でのマッハ数分布を図8に示す（断面位置は図8上部に併記）。これを見ると $W_{side}=1\text{ mm}$ のときには第2ランプ中央付近で大規模な剥離が発生しており、側壁付近でもサイドクリアランスからの漏れ出しによる剥離が発生しているのに対し、 $W_{side}=0.75\text{ mm}$, 0.5 mm のときには第2ランプ中央付近では剥離が発生しておらず、側壁付近のサイドクリアランスによる剥離も規模が小さいことが分かる。これが $h_{noz}=13\text{ mm}$ のときにおける $W_{side}=1\text{ mm}$ と 0.75 mm の間の性能の大きな違いの原因であると考えられる。またサイドクリアランスを介してプレナム室から主流側に空気が漏れ出していることもわかる。

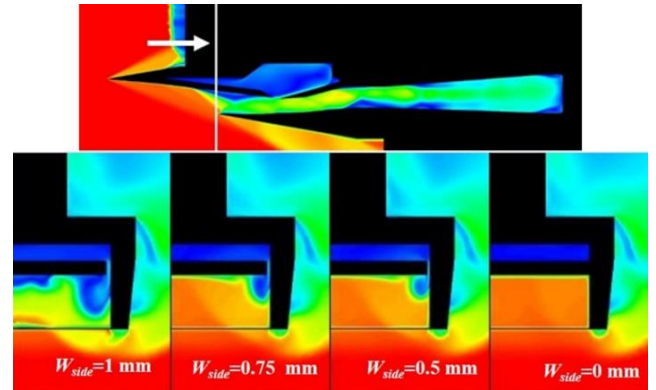


図8 流路垂直方向断面のマッハ数分布($h_{noz}=13\text{ mm}$)

次に低流量域の例として $h_{noz}=9\text{ mm}$ について考察する。図9に $h_{noz}=9\text{ mm}$ のときのセンターラインにおけるマッハ数分布を示す。 $W_{side}=1\text{ mm}$ のとき、図6と比較すると $h_{noz}=13\text{ mm}$ のときよりも剥離による斜め衝撃波の転向角度が大きくなっており、第2ランプから生じる衝撃波が流路外部に漏れ出ていることが分かる。 $W_{side}=0.75\text{ mm}$, 0.5 mm のときでは $h_{noz}=13\text{ mm}$ では見えなかった剥離が発生し、流れの転向が生じている。

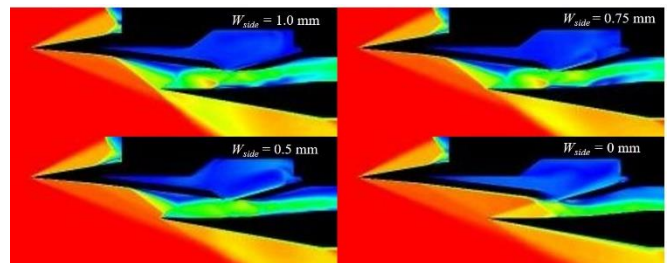


図9 センターライン断面におけるマッハ数分布($h_{noz}=9\text{ mm}$)

先ほどと同様に側壁方向に平行移動した側壁付近でのマッハ数分布を図10に示す。図7の $h_{noz}=13\text{ mm}$ のときと比べると、 $W_{side}=1\text{ mm}$ のときでは、剥離による斜め衝撃波が上流側に移動しており、 $h_{noz}=13\text{ mm}$ のときよりも大きく空気が漏れ出ている。 $W_{side}=0.75\text{ mm}$ から 0.5 mm では $h_{noz}=13\text{ mm}$ のときより剥離の規模が大きくなっており、流れの転向による空気の漏れ出しが発生している。

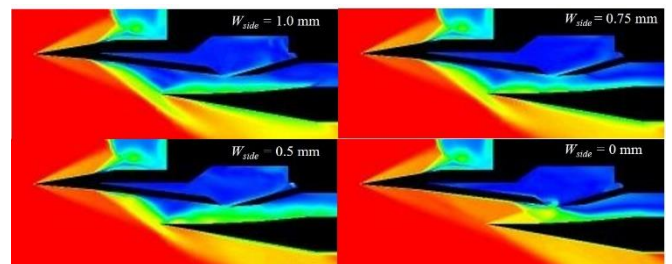


図10 側壁付近のマッハ数分布($h_{noz}=9\text{ mm}$)

図11に図8と同様の断面におけるマッハ数分布を示す。 $h_{noz}=13\text{ mm}$ のときでは $W_{side}=1\text{ mm}$ のときのみ見られた第2ランプ中心での剥離が、 $h_{noz}=9\text{ mm}$ では $W_{side}=1\text{ mm}$ から 0.5 mm で見られており、衝撃波が流路外に漏れ出ていることが分かる。この漏れ出しの量は W_{side} が大きいほど大きくなっており、これが流量低下の原因であると考えられる。

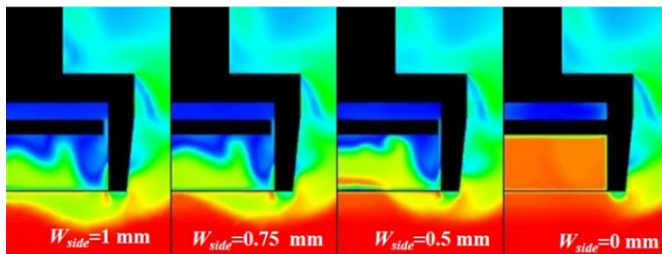


図 11 流路垂直方向断面のマッハ数分布($h_{noz}=9$ mm)

以上のことから、流量低下が以下のようなメカニズムで生じていると考えた。

- (1) サイドクリアランスから漏れ出す空気により側面付近において剥離が発生する。
- (2) サイドクリアランス幅が大きくなることにより、剥離の規模が大きくなり、第2ランプ中央付近にも大規模な剥離が発生する。
- (3) (1),(2)の剥離により流れの転向、斜め衝撃波が発生し、外部に漏れ出しが生じる。

(1)と(2)では剥離の規模が大きく異なっている。高流領域では $W_{side}=1$ mmでのみ(2)が発生するが、低流量域では $W_{side}=1$ mmから $W_{side}=0.25$ mmまで(2)が発生する。これが高流量域と低流量域でのサイドクリアランスの影響の違いの原因だと考えられる。

6. 結論

本研究からわかったことを以下に列挙する。

- i. サイドクリアランスにより流路上に剥離が発生し、これによる斜め衝撃波が流路外に漏れ出ることによって流量が減少する。
- ii. サイドクリアランス幅に応じて剥離の規模が変わり、斜め衝撃波の転向角が変化することで流量捕獲率が変化する。
- iii. 本研究の解析範囲ではサイドクリアランス幅を狭めることで性能向上が見込まれる。特に 0.25 mm 以下にすることで理論値に近い性能を得ることができる。

7. 参考文献

- (1). 佐藤他, “観測ロケットを利用した極超音速統合実験(HIMICO) その1～実験概要”, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム STCP-2013-023 (2013)
- (2). 天野他, “ロケットを利用した極超音速推進・統合制御実験(HIMICO)におけるインテークの風洞試験”, 平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム, 2015
- (3). Yoshida, H., et al., “Numerical Study of Hypersonic Air Intake Aerodynamics Performance for High Mach Integrated Control Experiment “HIMICO” 53rd AIAA Propulsion and Energy Forum, AIAA-2017-4652, 2017.
- (4). 吉田他, “極超音速統合制御実験(HIMICO)用インテークでの剥離とその対策”, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 2016
- (5). 橋本他, “高速流体ソルバ FaSTAR の開発”, 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2010 論文集, pp.79-84