

# 極超音速ターボジェットエンジン用インテークのバズ特性に関する風洞実験

○間中芳美, 宮岡諒, 葛貫泰弘, 角田直樹, 平知記, 佐藤哲也(早稲田大学), 小島孝之, 田口秀之(JAXA)

## 1. はじめに

現在, 宇宙航空研究開発機構(JAXA)では, 極超音速機用小型予冷ターボジェットエンジンの開発が行われている. インテークで圧縮・減速され高温になった空気を予冷器で冷却することで極超音速での航行を可能にするエンジンである.

超音速インテークでは, インテーク下流の圧力が上昇したとき衝撃波がインテーク前方に飛び出し大きく振動するインテークバズと呼ばれる現象が起きることがある. インテークバズには Dailey バズと Ferri バズの 2 つの種類があり, Dailey バズはランプ面での剥離により流路が狭められることで起こり, 振幅が大きく周波数が低い. 一方, Ferri バズは衝撃波の三重点より発生する剪断層がインテークカウルに接触することによる剥離によって起き, 振幅は小さく周波数が高いという特徴がある. バズが発生するとエンジンに流入する流量が減少し, 失速やサージの原因となるほか, 振動によりエンジンの構造破壊へとつながる恐れもあるため, バズの抑制や回避の方法を確立する必要がある.

インテーク後方のダクト部の体積を変えることによりバズの発生を抑制できるのではないかと考えられ, 2011 年度に中山によって CFD を用いた数値計算が行われた. その結果, ダクトの体積を約 $1/20$ にすると  $M=2.0$  においてはバズが起きにくくなるという結果となった. そこで本研究ではダクトのサイズを変えた 2 種類の模型を用い  $M=2.0, 3.4$  において実験を行い, 数値計算の結果を検証することを主な目的とした. また, インテーク性能の向上のために, 抽気穴の径を変え, 性能の指標である全圧回復率, 流量捕獲率の変化を調査した.

## 2. 実験装置及び方法

本実験で用いた実験供試体を図 1 に示す.

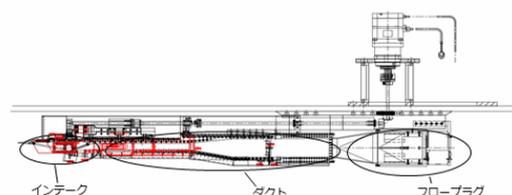


図 1 実験供試体図

インテーク, ダクト, フロープラグの 3 つの部分で構成されている. フロープラグは二重構造で  $80[\text{mm}] \times 35[\text{mm}] \times 4 = 11200[\text{mm}^2]$  の穴が開いており, 外側の筒を回転させることによって出口面積を変化させ流出流量を調整し, S エンジンにおけるコアエンジンでの背圧上昇を模擬することができる. 全面投影面積  $A_\infty$  は  $3525[\text{mm}^2]$  であり, 出口面積比  $A_e/A_\infty$  は  $0 \sim 3.1773$  の間で変化させることができる. 次にインテーク部分の拡大図を図 2 に示す.

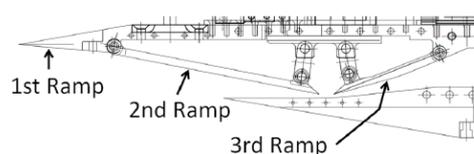


図 2 インテーク部拡大図

第 1 ランプ, 第 2 ランプで発生する斜め衝撃波と垂直衝撃波により流入空気を減速, 圧縮する混合圧縮型の矩形インテークである. 第 2 ランプと第 3 ランプは可動式で, スロート高さを連続的に変化させることができる. 側壁にはシュリーレン窓があり, スロート付近の衝撃波の様子を高速度カメラにより撮影することができる.

第 2 ランプ, 第 3 ランプ, に囲まれた三角形の部屋をプレナム室と呼び, 天井部分に穴の開いた抽気ブレードをセットすることで, ランプの隙間から吸い出した空気をプレナム室上部の抽気穴から外部に抽気す

ることができる。抽気穴の径は 0, 12, 16, 20[mm]の 4 種類がある。

ダクト体積を小さくした実験では、パーティションを挿入し、流路を仕切ることダクト部分の体積を縮小する。

全圧回復率、流量捕獲率を算出し、さらに衝撃波の挙動などを知るため圧力計測を行った。計測点を図 3 に示す。



図 3 センサ計測位置

定常センサにおいてダクト部の全圧を 21 点、サンプリング周波数 10[Hz]で計測した。また、プレナム室、スロート直下、スロート直後、ダクト部の 4 点の静圧をそれぞれ図中に KP1, KP2, KP3, KP4 で示した位置で非定常圧力センサにて 10[kHz]で測定した。

実験は JAXA 相模原キャンパスの超音速風洞の汎用ブロックを用いて 2012 年 7 月 31 日から 8 月 10 日まで行った。Mach2.0, 3.4, 4.0 で通風を行い、抽気穴径を変えた場合の性能の変化、ダクト体積を変えた場合のバズ特性の変化を調査した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 抽気穴径と全圧回復率

Mach 数 3.4, 4.0 において抽気穴径を 0, 12, 16, 20[mm]と変えたときの最高全圧回復率を調査した。

インテーク下流の圧力がある値より高くなると終端衝撃波がスロート部に留まっていられなくなり、インテーク前方へと飛び出してしまふ。この状態を不始動状態と呼ぶが、インテークが最高性能を示すのは不始動となる直前の瞬間である。実験では、スロート面積を固定し、フロープラグを全開から全閉へと動かして行き、不始動となる直前の全圧回復率を調べた。

Mach 数, 抽気穴径を変えたそれぞれの場合について、

全圧回復率の最高値をまとめたものを図 4 に示す。

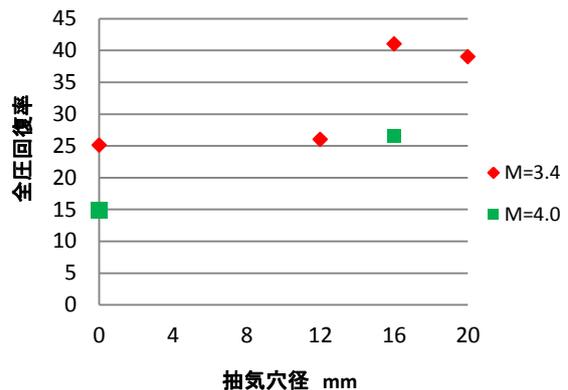


図 4 抽気穴径ごとの性能比較

M=4.0 条件では抽気穴径 0, 16[mm]の 2 つの場合のみ行った。M=3.4, 4.0 どちらの場合も抽気穴径 16[mm]のときが最も全圧回復率の最高値が高いことがわかる。したがって、本実験供試体では抽気穴径 16[mm]が最適値であるということがわかった。このとき、主流に対する抽気量の割合は 8.35[%]であった。インテークが始動している間、ランプで発達した境界層がインテーク内部にも入り込んでいる。抽気をすることで境界層を吸い出し、流路を確保することができるため、抽気穴径が大きい方が性能は良くなる。しかし、抽気量が多すぎると境界層だけではなく主流まで吸ってしまい、主流流速が増加する。それによって圧損が増え、全圧回復率が下がってしまうと推測される。

#### 3.2 ダクト体積を変えた場合のバズ特性の変化

ここからはダクト体積を変化させた場合のバズ発生の様子について述べる。

バズ発生中の KP3 の圧力波形を図 5, 6 に示す。

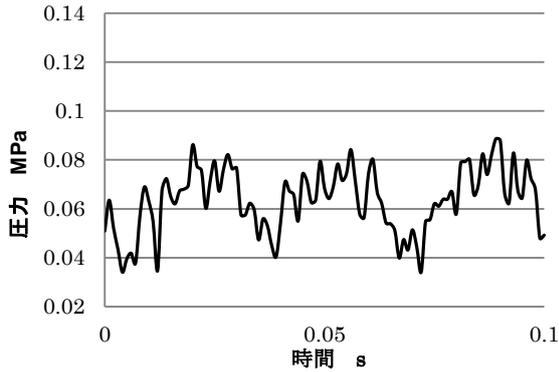


図5 バズ発生中の非定常圧力(ダクト体積大)

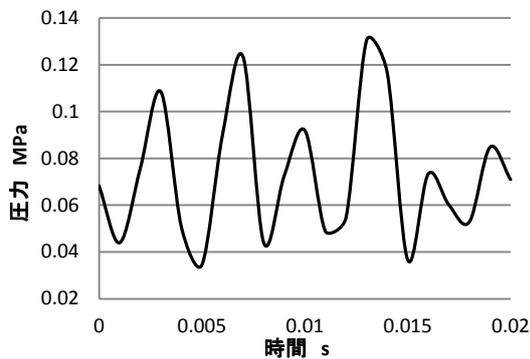


図6 バズ発生中の非定常圧力(ダクト体積小)

インテーク下流の圧力が上昇していくと衝撃波がインテーク前方に飛び出す。衝撃波が飛び出したことにより流れがインテーク上流で曲げられ、流入する流量が減少する。それにより圧力が下がるため衝撃波もインテーク内部へと戻り、再び下流の圧力が上昇する、というサイクルとなっている。

図5, 6を比較すると、ダクト体積が大きい場合は一つ一つの波形が同じ形で振幅も安定しているのに対して、ダクト体積が小さい場合は振幅がばらついている。シュリーレン写真でも、ダクト体積が小さい場合は衝撃波が最も前進した時の位置が一定ではなく、1周期ごとに異なっていた。

また、ダクト体積が大きい場合のバズサイクル中に衝撃波が最も後退しているときの様子を図7に示す。

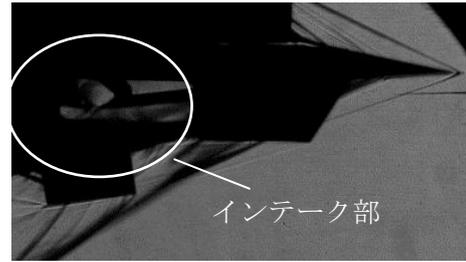


図7 バズ発生中の衝撃波の様子(ダクト体積大)

図7ではインテーク内部に斜め衝撃波が立っているのが確認でき、すなわち終端衝撃波がインテーク内部まで飲み込まれている始動状態であることがわかる。これに対して、ダクト体積が小さい場合の最も衝撃波が後退しているときの様子が図8である。



図8 バズ発生中の衝撃波の様子(ダクト体積小)

図8ではスロート付近には何の影も見られない。これはスロート部が超音速になっていないことを示しダクト体積が小さい場合では終端衝撃波がスロートまで戻らないことがわかる。後述するようにダクト体積が小さい場合では、バズ発生中の圧力が高くなっていることと関係していると考えられる。

また、周波数についてもダクト体積を変えると大きく変化することが判明した。バズの周波数はダクト体積が大きい場合では30[Hz]程度なのに対して、ダクト体積が小さい場合では100~300[Hz]となった。ダクトが小さいことで空気が溜まり排出されるサイクルが短くなるためと考えられる。さらに、ダクト体積によらず、周波数は出口面積が小さくなるほど高くなる傾向があった。

次に、 $M=3.4$ 、抽気穴径16[mm]での実験において、出口面積比を横軸に取ったKP3の圧力データのグラフを図9, 10に示す。

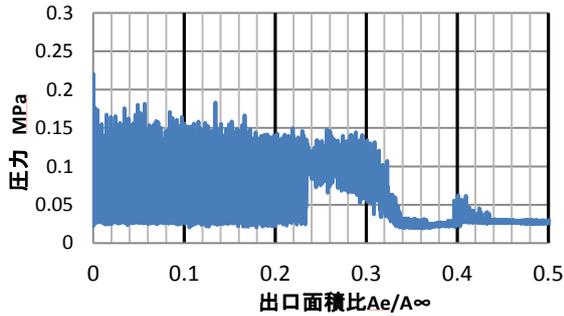


図9 非定常圧力データ(ダクト体積大)

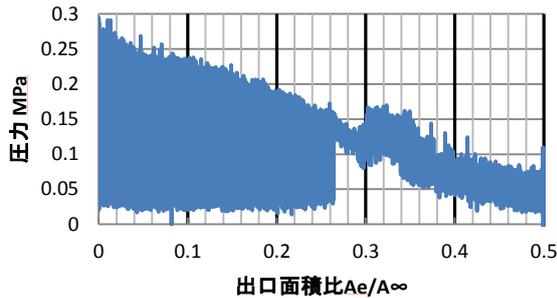


図10 非定常圧力データ(ダクト体積小)

どちらの場合も出口面積を閉じていくにつれ圧力が上昇していき、ある圧力に達したところでバズが発生するという事は同じである。このとき、ダクト体積が小さい場合のほうが出口面積が大きい段階でバズが発生している。また、ダクト体積が小さい場合では出口面積全開の時の圧力振幅の最大値が0.284[MPa]となり、ダクト体積が大きい場合の0.168[MPa]よりかなり大きくなることも分かった。

ダクト体積を変えることによるバズ抑制の効果を検討するために、 $M=2.0$ ,  $3.4$ でのバズが発生した時の出口面積比を抽気穴径ごとにまとめたものをそれぞれ図11, 12に示す。

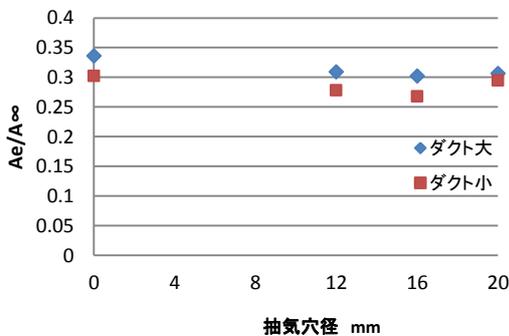


図11  $M=2.0$ においてバズが発生する出口面積比

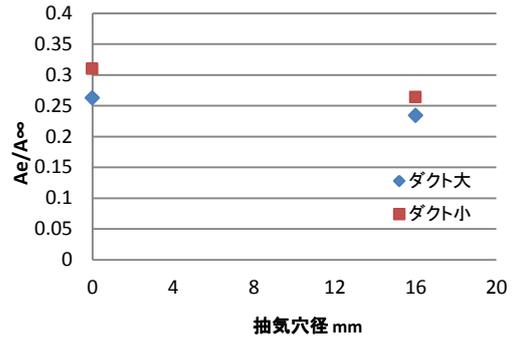


図12  $M=3.4$ においてバズが発生する出口面積比

$M=2.0$ では抽気穴径に関わらずダクト体積が小さい方がバズが発生する出口面積比が小さい。出口面積比が小さいということは圧力が高いということであり、高い圧力になるまでバズが発生せず、つまりバズが発生しにくいと言える。しかし、反対に  $M=3.4$ ではダクト体積が小さい方がバズが発生しやすくなることがわかった。原因については今回の実験では究明できなかったため、今後の研究課題とする。

#### 4. まとめ

超音速風洞にて S エンジン用インテーク模型を用いて抽気量の変化による性能の変化、ダクト体積を小さくした場合のバズ特性について調査をした結果、下のことが判明した。

- ・抽気率には最適値があり、本実験においては 8.35[%]であった。
- ・インテーク後部のダクトが小さい場合、バズの周波数が高くなり、圧力振幅が大きくなった。
- ・ダクト体積を小さくすると  $M=2.0$ ではバズ発生を遅らせることができた。しかし  $M=3.4$ ではバズの発生が早まった。

#### 5. 参考文献

- (1)中山智裕, 超音速インテークにおける衝撃波非定常振動の数値解析研究, 平成 23 年度修士論文, 2012
- (2)松尾一泰, 圧縮性流体力学, 理工学社, 1994
- (3)Charles Lee Dailey, Super Sonic Diffuser Instability, 1954