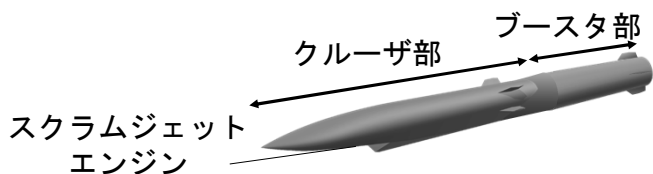
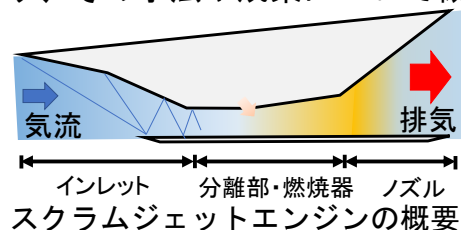


## 1 概要

スクラムジェットエンジンを搭載した誘導弾は高速飛しょう（音速の5倍以上・1分間に100km以上の飛しょう）と変速的な軌道を両立する誘導弾として着目されている。このエンジンの研究開発において基盤的技術となるのは、誘導弾外部やエンジン内部に存在する極超音速流れや超音速燃焼流れといった高エネルギー流れ現象を的確に予測・分析する技術である。当研究室では数値シミュレーション（CFD、数値流体力学）を駆使してこの技術に取り組んでおり、その手法や成果について概説する。



スクラムジェットエンジン搭載誘導弾のイメージ図



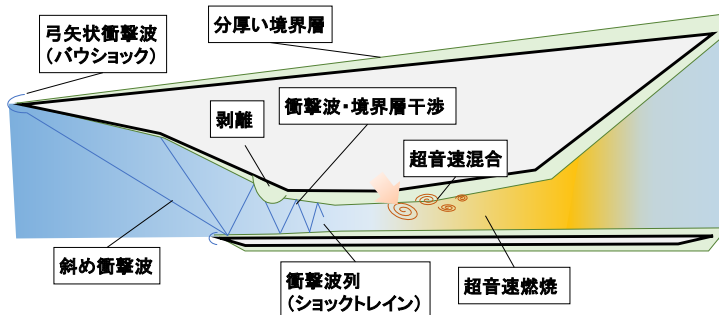
スクラムジェットエンジンの概要

## 2 検討手法と結果

### スクラムジェットエンジン内部流れ場の様相とCFDの活用について

スクラムジェットエンジンの内外では高エネルギー空気流の衝撃波による圧縮、境界層による減速、燃焼による昇温、境界層剥離に伴う大規模乱流構造などの複雑な現象が生じている。

当研究室は圧縮性/粘性/乱流/化学反応などの効果を含めたナビエ・ストークス方程式を汎用熱流体ソルバを用いて解析し、高エネルギー流れ場の予測や分析を行っている。



スクラムジェットエンジン内外の流れ場の特徴

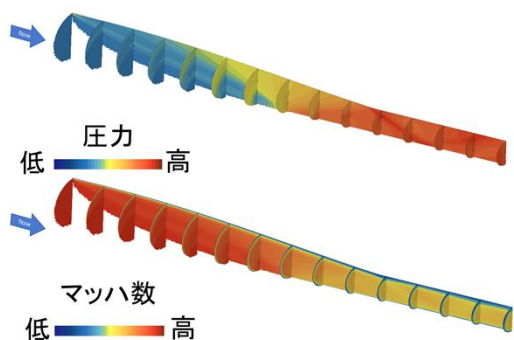
### 事例1：極超音速インレット

#### 目 的

スクラムジェットエンジンのインレット部分について、CFD解析によって効率的な圧縮や良好な始動特性（衝撃波の吸い込み特性）を示す形状設計方法の確立を目指す。

#### 3次元インレットの設計

従来の主流であった2次元ランプ型のインレットと比較してより効率がよい形状として着目されている3次元インレットについて、文献等を参考に設計手法や解析手法を確立。

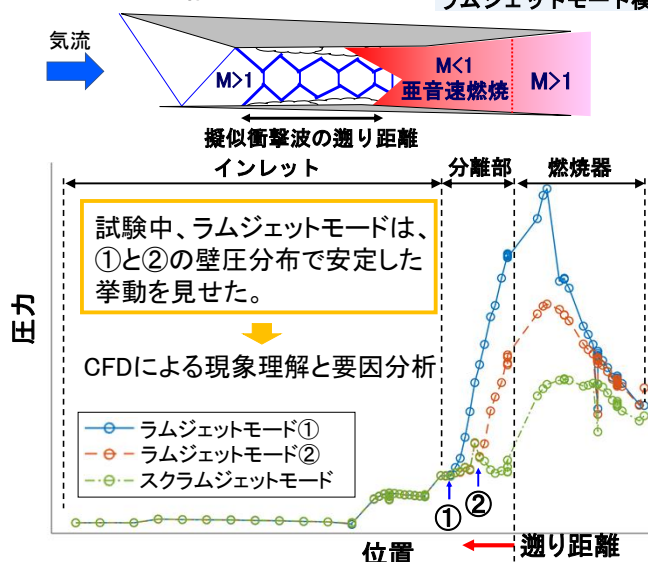


### 事例2：超音速燃焼器

#### 目 的

令和5年度の地上燃焼試験で確認されたラムジェットモードの2つの壁圧パターンについて、CFD解析による現象理解と要因分析を実施し、擬似衝撃波の廻り位置を推算する新たな数式モデルを構築する。

ラムジェットモード模式図



## 事例1：極超音速インレット

### 実気流と理論の一致

任意のマッハ数や高度に対して効率の高いインレットを自動生成するツールを開発。

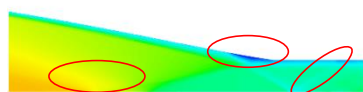
特徴として、粘性影響を考慮していない理論から得られた形状を補正し、粘性を持つ実気流を理論的な流れ場と一致させている。

比較対象（理論）  
CFD手法：非粘性  
形状：解析解



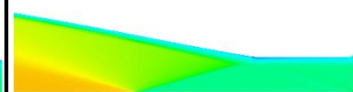
Before  
CFD手法：粘性  
形状：解析解

設計流れ場と差異



After  
CFD手法：粘性  
形状：解析解+境界層補正

設計流れ場と一致



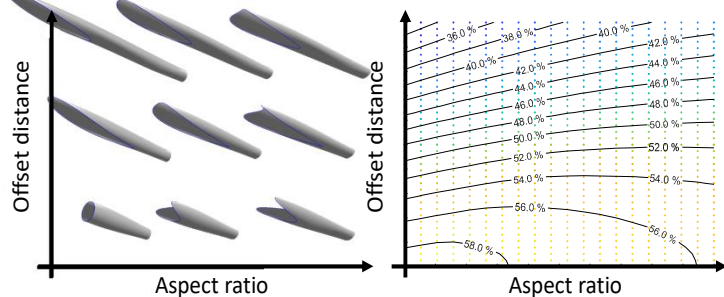
### 高速な性能推定

生成した様々な形状のインレットに対して高速に性能を推定するアルゴリズムを開発。

下記に示す例はインレットの縦横比や幾何中心一流れ場中心の距離を変数に800点ほどのインレット形状を生成・性能推定したものであり、生成・計算に要した時間はラップトップPCで5分以下である。

インレットの形状

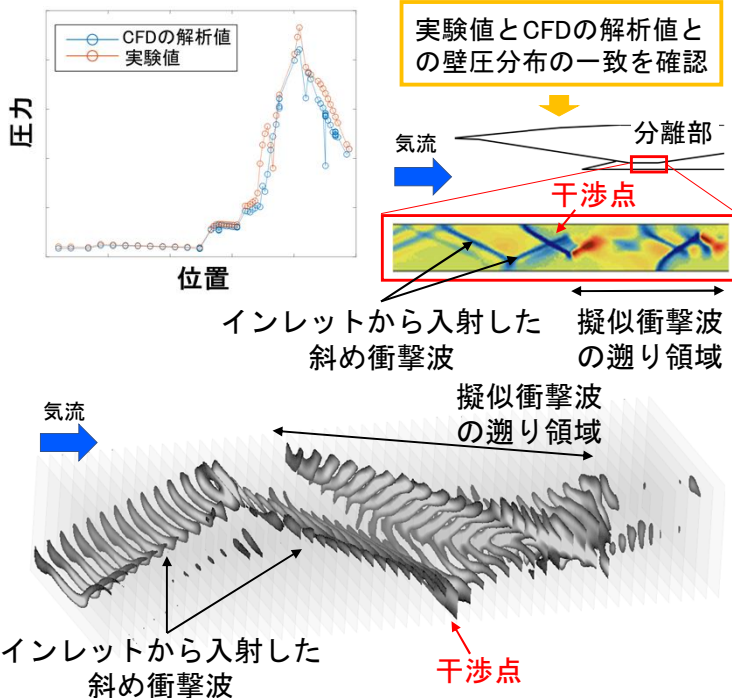
インレットの性能  
（総圧回復率）



## 事例2：超音速燃焼器

### CFDによる現象理解

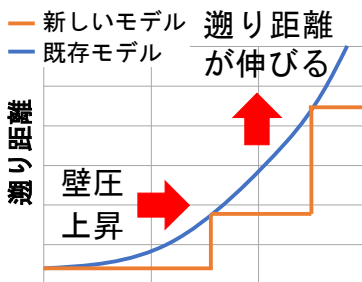
実験値とCFDの解析値との壁圧分布の一致を確認し、現象理解のため様々な物理量で解析結果を考察。衝撃波の3次元の構造を確認し、衝撃波間の干渉点や正確な擬似衝撃波の遡上位置等を確認し、現象の理解を深める。



### 3次元的に見たCFDの解析結果

### 新たな数式モデルを検討

既存の数式モデルには衝撃波の影響が含まれておらず、CFDの解析結果から新たな数式モデルを検討中。



Waltrup、Billingの式

$$L_{ST} = \left( \frac{\theta_m^2}{Re_{\theta_m}^{1/4}} \right) \frac{\sqrt{D_h}}{M_2^2 - 1} * \left[ 50 \left( \frac{p_{2.5}}{p_2} - 1 \right) + 170 \left( \frac{p_{2.5}}{p_2} - 1 \right)^2 \right]$$

燃焼器圧力/一様流圧力

遡り距離vs燃焼器圧力の模式図

遡りがインレット部まで到達するとエンジン不始動（失速状態）となる。つまり、遡り位置を正確に予測することで不始動予測につなげる。

## 3 まとめ

スクラムジェットエンジンの流れ場は複雑な物理現象が生じており、推力・空気抵抗などの性能指標の予測や不始動・失火・失速の回避のためにはこれらの予測・分析が更なる性能向上に必要である。ロケットエンジン研究室は数値シミュレーションを用いてこの基盤的技術の育成に励んでおり、今回はそのうちインレット高性能化と燃焼器圧力遡上予測の2事例を紹介した。