

スクラムジェットインテークの動的な再始動現象の数値計算

Dynamic and Numerical Simulations of Restart Phenomenon in Scramjet Intake

石川 忠* 若井 洋* 山内 豊誠**

by

Tadashi ISHIKAWA Hiroshi WAKAI

Fuji Heavy Industries Co., Ltd.

Toyosei YAMAUCHI

Subaru Research Center Co., Ltd.

ABSTRACT

The inner flow fields of scramjet intake model are simulated numerically by two dimensional Euler equations using an implicit finite difference scheme. For this simulations, the numerical scheme based on Chakravarthy-Osher's type TVD formulations is improved for both multi-grid and moving-grid application.

To investigate the methods of recovery from unstart conditions in scramjet, at first, the dynamic and numerical simulations were conducted from steady condition to unstart condition using moving-grid.

1. まえがき

スペースプレーン等の宇宙往還機の推進用エンジンとして研究・開発されている、スクラムジェットエンジンは、高速流れの風圧を利用して空気を圧縮（ラム圧縮）し、超音速の状態での燃焼を行うエンジンである。

現在、考えられているスクラムジェットエンジンは、図1に示す様に、スペースプレーン等の胴体下部に埋め込まれるタイプであり、その場合機体との干渉等が問題になるものと思われる。また、スクラムジェットエンジンは容易に不始動（アンスタート）状態に陥りやすく、この不始動状態からの回復方法・機構も問題になるものと思われる。

富士重工業とスバル研究所では、スクラムジェットの基盤技術を確認し、将来のエンジン及びそれを搭載する機体の開発に備えることを目的として、スクラムジェットと機体との一体化に着目し、特に重要となるインテーク（空気取入口）

の研究^{1),2),3)}を行っている。

この数値計算の最終的な目的は、スクラムジェットインテークの不始動状態からの再始動方法の数値計算による確認である。今回は、この計算の第一歩として、MOVING-GRIDを用いた2次元のオイラー方程式により、インテーク内気流確立から不始動状態までの動的な数値計算を実施したので、以下に結果を報告する。

2. 数値解析手法

本計算で用いた解析コードはMOVING-GRID及びMULTI-GRIDに対応する様に改良したものである。以下に、その概要と計算条件等についてまとめる。

(1)基礎方程式は、2次元オイラー方程式を用い、差分法により定常解を求める。差分法はTVD風上差分法を用い、右辺の数値流束は、Chakravarthy-Osherタイプの流束制限関数⁴⁾で2次精度化している。時間方向の積分は陰解法のLU-ADI法を用いている。

(2)乱流モデル及び化学反応モデルは入れていな

*富士重工業株式会社

**株式会社スバル研究所

い。また、衝撃波等が生じるような場所に計算中に格子を移動・集中させ、より解像度の高い解析結果を得ることのできるMOVING-GRIDを使用している。

(3)今回の計算では、MULTI-GRIDによる計算も実施しており、3グリッドのオーバーラップ領域を設けることで、隣接する格子間でよりスムーズなデータのやりとりが可能になり、単一のグリッドではできない複雑な形状のモデルにも対応可能になった。

(4)境界条件は、流入、流出、壁、隣接する格子の4つに場合分けして与えている。流入条件はマッハ4の一様流で、インテーク内初期条件はIMPULSIVE START、流出条件は外挿、全壁面に断熱条件とスリップ条件を課している。

(5)図2に示す本数値計算に用いたスクラムジェットインテークモデルは、ラングレイタイプの側壁圧縮型⁹⁾で、過去に富士重工高速風洞で実施²⁾した風洞試験模型の2次元形で、側壁(頂角 6°)、ストラットから構成されている。しかし、今回の計算では、インテーク内流のみの計算を行なったので、カウル前方からのあふれ(Spillage)は模擬していない。一様流マッハ数は4.0、側壁高さ80mmを基準とした場合のレイノルズ数は 5×10^6 である。

(6)計算格子の概要図(ジェット噴射前)を図3に示す。この計算格子は3つのグリッドの領域に分割しており、それぞれの格子数は $116 \times 281, 191 \times 141, 191 \times 141$ の計86458点である。最小格子幅はジェット噴射口付近で起きる様々な現象を捕えるため、粘性計算で一般に用いられる $0.1/\sqrt{Re}$ 以下に設定している。

(7)燃焼圧上昇を模擬する為に、ストラット後部からインテーク内に空気を垂直噴射し、不始動状態を生じさせる。また、ストラットからの噴射の他に、スロート部を通過する空気量を少なくして、早く不始動状態を起こすように、側壁をスロート幅を狭める方向にMOVINGさせる。

ストラットから噴射されるジェットの一様流に対する条件は、空気を音速で、総圧比1.0倍から20.0倍まで徐々に上げ、垂直に噴射している。

3. 計算手順

以下に、計算用格子のMOVING方法について説明する。図4に示すように、側壁とストラットを

厚さ0の平板の状態から計算を開始し、ストラットをMOVINGさせ、気流確立後、側壁をMOVINGさせ、所定の計算モデルの形状にする。その後定常解を得る。

定常解を得た後に、ストラット後部から、ジェットを垂直に噴射し、徐々にジェットの一様流に対する総圧比を上げ、かつ側壁全体をスロート幅が狭まる方向にMOVINGさせ、強制的に不始動状態を生じさせる。ジェットの総圧比を上げる、ということは燃焼圧上昇の模擬を示し、側壁全体をMOVINGする、ということは縮流比の増加を意味する。どちらも不始動状態を起こす方向に作用する。

以上の過程において、MOVING-GRIDを用いることにより、動的にまた非定常的に数値解を求める。図5に、図4に対応した計算結果の時間変化例を示す。

4. 数値計算結果

数値計算結果を、(1)気流確立から定常解(ジェット噴射直前)までと(2)定常解から不始動状態までの2つに分けて述べる。

(1)気流確立から定常解(ジェット噴射直前)までインテーク全体のCpコンターを図6、7(拡大図)に示す。側壁先端から生じた2つの斜め衝撃波が中心軸上で反射し、スロート頂部へそれぞれ向かっている。スロート頂部から生じる膨張波とストラット先端から生じる衝撃波と側壁先端から生じた斜め衝撃波の3つが互いに干渉し、高圧部を形成している。

この時点で、残差(Residual)は 10^{-4} のオーダーであり、定常解が得られている。この後ジェットを噴射する。

(2)定常解から不始動状態まで

ジェット噴射直後のインテーク全体のCpコンターを図8に、ジェット噴射口付近のCpコンターの拡大図を図9に、速度ベクトル図を図10に示す。

図では分かりにくいですが、ジェットの吹き出し口上流の剥離点とそれに伴う剥離衝撃波、吹き出し口上流の循環領域、吹き出し口下流の循環領域等の吹き出しによって生じる定性的な現象が数値計算により捕えられていた。この後、側壁をスロート幅が狭まる方向にMOVINGさせ、縮流比を上げ、不始動状態にもっていく。

図11、12(拡大図)に側壁移動後のイン

テーク内全体のCpコンターを示す。ジェット噴射圧上昇と側壁のMOVING（縮流比の増加）により、インテーク内が不始動状態に向かっている。この状態での残差は 10^{-2} から 10^{-3} のオーダーであった。

今回の数値計算は、インテーク内流のみの計算なので、インテークからのあふれ(Spillage)の影響が捕えられていないが、インテーク内の不始動状態に向かう現象が動的に捕えられているのがわかる。

5. まとめ

スクラムジェットインテークの不始動状態からの回復方法の検討を目的として、MOVING-GRIDを用い、気流確立から不始動状態までを動的な数値計算を実施した。

今後は、今回の数値計算で整備されたソルバーや境界条件を利用し、エンジン外流を含めた、不始動状態からの再始動方法の数値計算を行ない、スクラムジェットの再始動方法の検討に役立てるつもりである。

参考文献

- (1)若井 洋：スクラムジェット内流の数値シミュレーション、第9回航空機計算力学シンポジウム論文集,SP-16,pp.283-288,(1991)
- (2)石川 忠、若井 洋：スクラムジェットインテークの高速風洞試験、第30回飛行機シンポジウム,pp.160-163,(1992)
- (3)石川 忠、若井 洋、山内 豊誠：スクラムジェットインテークの数値計算と高速風洞試験、第3回ラム/スクラムジェットシンポジウム,(1993)
- (4)S.R.Chakravarthy and S.Osher : A New Class of High Accuracy TVD Schemes for Hyperbolic Conservation Laws,AIAA-85-0363,(1985)
- (5)Carl A. Trexler : Inlet Starting Predictions for Sidewall-Compression Scramjet Inlets,AIAA-88-3257,(1988)

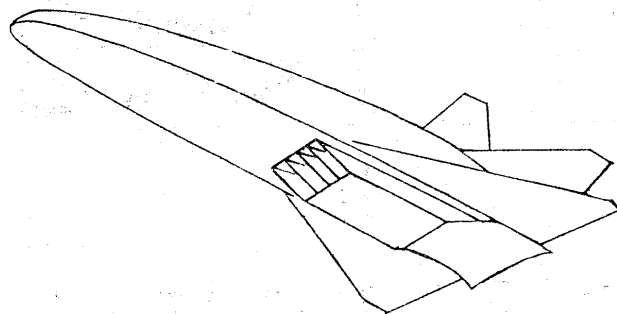


図1 スクラムジェットを搭載するスペースプレーンの例

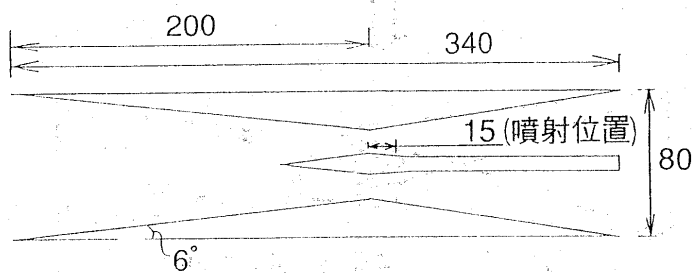


図2 数値計算モデル概要図

unit=mm



図3 ジェット噴射前の計算格子概要図

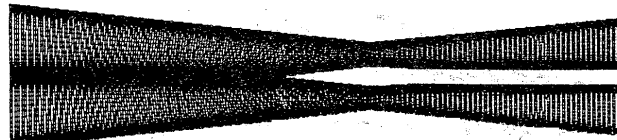
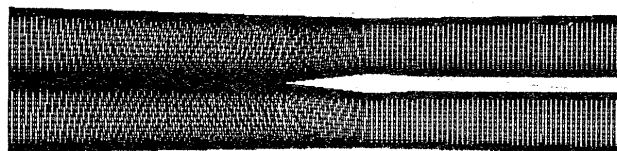
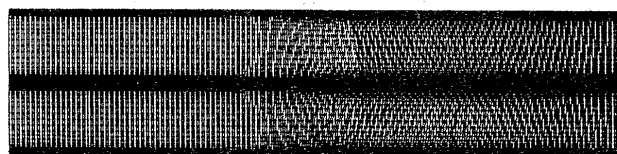


図4 計算格子のMOVING例

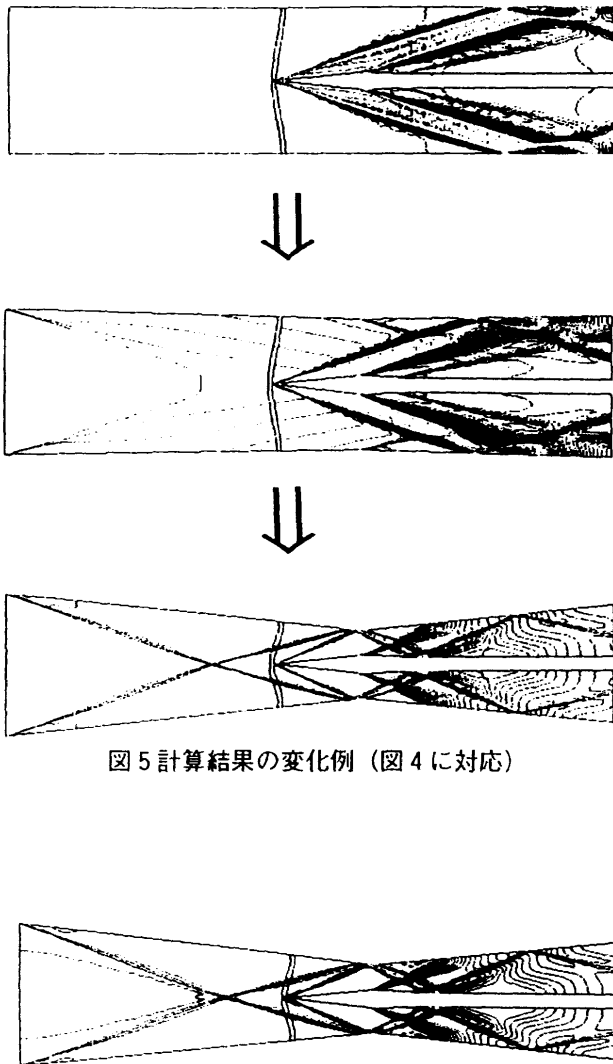


図5 計算結果の変化例 (図4に対応)

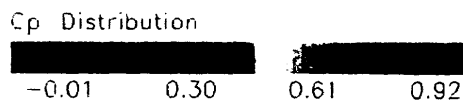


図6 定常解でのインテーク内全体のCpコンター

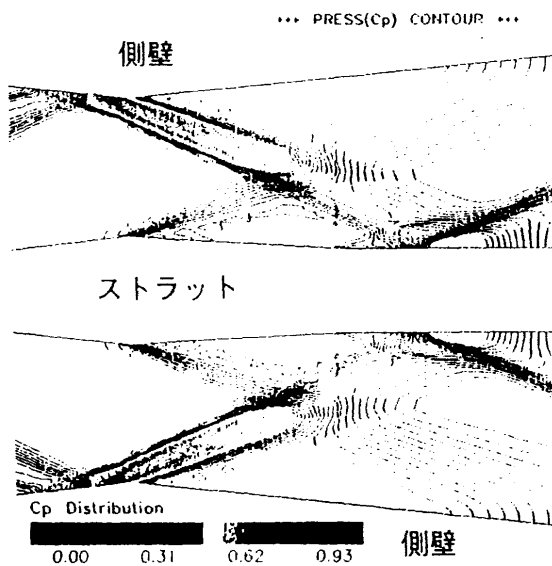


図7 定常解でのジェット噴射口付近のCpコンター (この時点ではまだジェットは噴射していない)

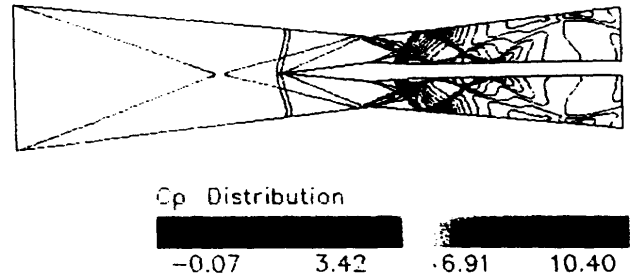


図8 ジェット噴射後のインテーク内全体のCpコンター

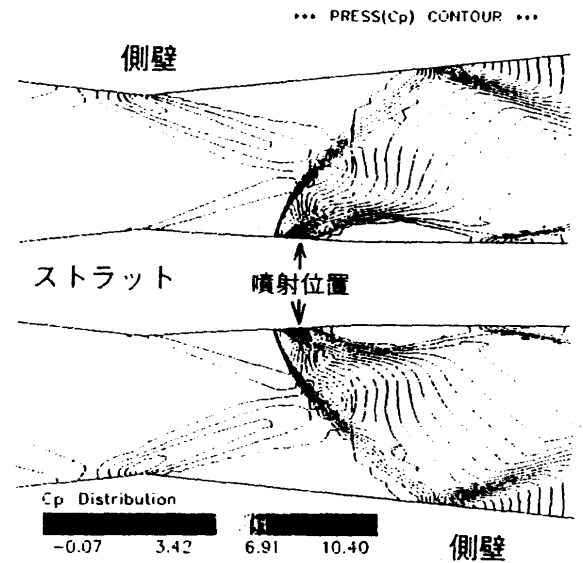


図9 ジェット噴射後のジェット噴射口付近のCpコンター

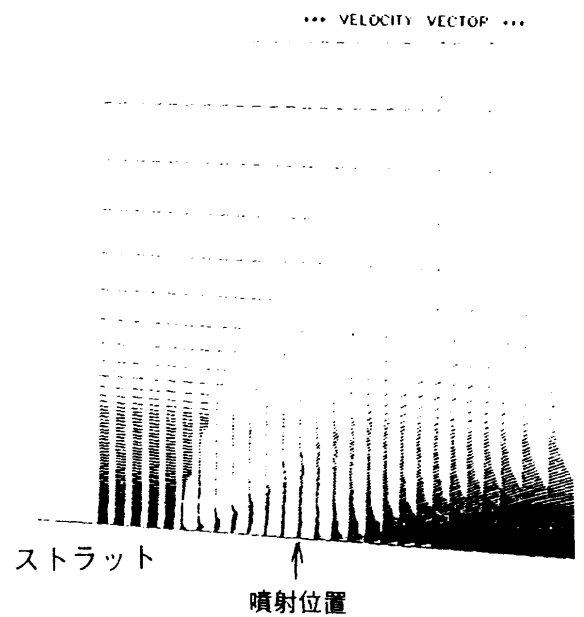


図10 ジェット噴射後のジェット噴射口付近の速度ベクトル

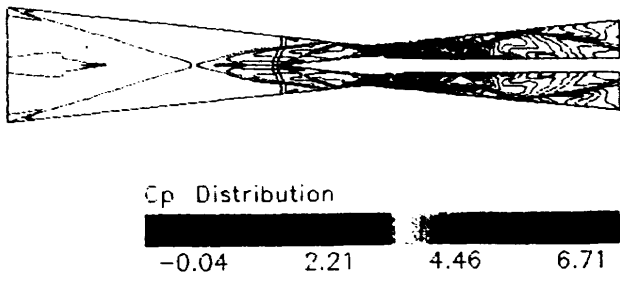


図1 1 側壁移動後のインテーク内全体のCpコンター

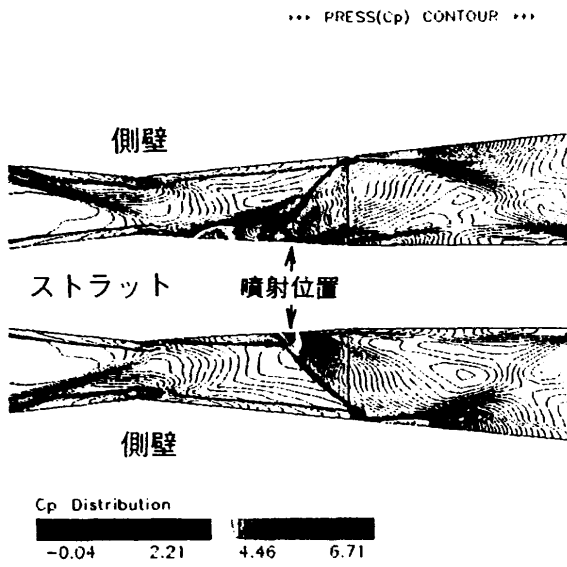


図1 2 側壁移動後のジェット噴射口付近のCpコンター

