

固体ロケットにおける逆噴射ジェットの 数値シミュレーション

林 光 一* 松 田 実**

Numerical Simulation on Inverse Jet of Solid Rocket Motor

by

Koichi HAYASHI

Department of Aeronautical Engineering, Nagoya University

Nagoya 464-01, Japan

and Minoru MATSUDA

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

Nagoya 455, Japan

ABSTRACT

Solid particle laden two-phase inverse jet flows are studied numerically. A TVD-Upwind scheme for the gas-phase and a Flux-Vector-Splitting-Upwind scheme for the particle-phase are used to solve the two-phase Euler equations. The Eulerian formulation for the two-phase Euler flow problem is simpler in theoretical structure and more economical in computational time than the Lagrangian formulation.

Numerical simulations on the single-phase and two-phase inverse jets shows the influence of solid particles on a nozzle and the flow field. An instability of the two-phase flow is also observed probably because of a numerical error.

1. はじめに

AOTVの飛行などにおいて空気ブレーキ使用時や地球再突入時には、逆噴射ジェットの使用による宇宙船制御が重要な課題になる。このような時に宇宙船本体および周辺機器への影響さらには今まで実験的に知らされている振動現象などがはっきりした形で理解されていないのが現状である。国内での研究は、辛島と佐藤¹⁾、里深と松野²⁾、保田等³⁾、手島等⁴⁾などがあり、辛島と佐藤の研究は国内では最初の実験であろう。里深と松野は、辛島と佐藤の実験と同じ時期に逆噴射ジェットの

問題を数値解析的に研究しており、辛島と佐藤の実験も数値シミュレーションしている。最近AOTVが現実的な話になり多くの所で逆噴射ジェットの研究がなされているが、保田等は数値シミュレーションで振動現象などについて述べている。

本研究では、固体ロケットを想定した固-気二相逆噴射ジェットと気相一様流の干渉の問題の数値シミュレーションを行ない、流れの振動現象並びに固-気二相ジェットの場合の固体微粒子の挙動とそのジェット流への影響などを調べる。

2. 数値計算法と境界条件

固-気二相流の問題に対して用いられた方程式系は二次元円筒対称オイラー方程式で、差分法と

* 名古屋大学工学部航空学科

** 三菱重工株式会社

しては気相に対して二次精度のTVD-Upwind法を、固相に対しては一次精度のFlux-Vector-Splitting Upwind法を用いた。詳しい計算法並びにそこで用いた仮定などは他の文献⁵⁾を参照されたし。

円柱形の物体より噴出されるジェットが超音速一様流に当たる逆噴射ジェット流の境界条件は、図1に示されるようである。ジェットの出るノズルの半径は平頭物体の半径の1/4とした。後で示される計算結果にあるように、マッハ数 $M=2.0$ の超音速一様流は右から左に流れ、マッハ数 $M=2.01$ の固-気二相ジェットにおける半径方向の物理量の分布は一様とした。上方境界条件は上方に十分な距離を取れなかったが、境界に垂直な方向ではなく左上から右下への対角線上で零次の外挿を行なった。これによりジェットの下流に出来るbow shockと上方境界との交わる部分などの計算が滑らかに行なわれた。ジェットから見た下流の一様空気流流入条件は、圧力 $P=0.01\text{MPa}$ 、温度 $T=296\text{K}$ 、マッハ数 $M=2.0$ で、固体粒子-空気二相ジェット流の流入条件は、圧力 $P=0.1\text{MPa}$ 、温度 $T=296\text{K}$ 、マッハ数 $M=2.01$ であり圧力比は10.0である。平頭円筒物体の外側の境界は流出条件をあてはめ、円筒対称軸は対称条件とした。

気体だけのジェットの場合と固-気二相ジェットの場合について計算を行なったが、固-気二相流の場合の固体粒子のloading ratioは質量比で30%、固体粒子の大きさは半径1ミクロンならびに5ミクロンが用いられた。計算格子は正方形格子で、その数は気体だけの場合 120×180 、固-気二相流の場合には 120×160 とした。尚、気体流だけの計算のための初期条件は、計算領域全体に一様流の値を与えて計算を始め、 $t=0$ でジェットを噴出させる。固-気二相流の場合には、気体だけの流れで得た準定常解を初期値として $t=0$ で固体粒子を噴出させた。

3. 結果および考察

3.1 気体だけの逆噴射ジェットの計算

図2は、一様空気流に逆噴射空気ジェット流が当たった場合の等密度線図である。図2-(a)は本研究で得られた結果であるが、図2-(b)は比較の

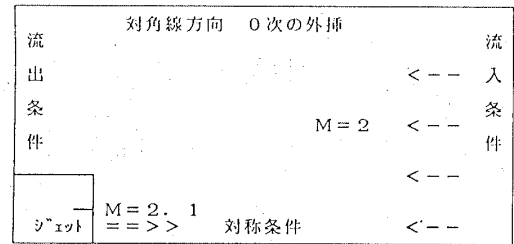


図1 逆噴射ジェット数値シミュレーションの境界条件

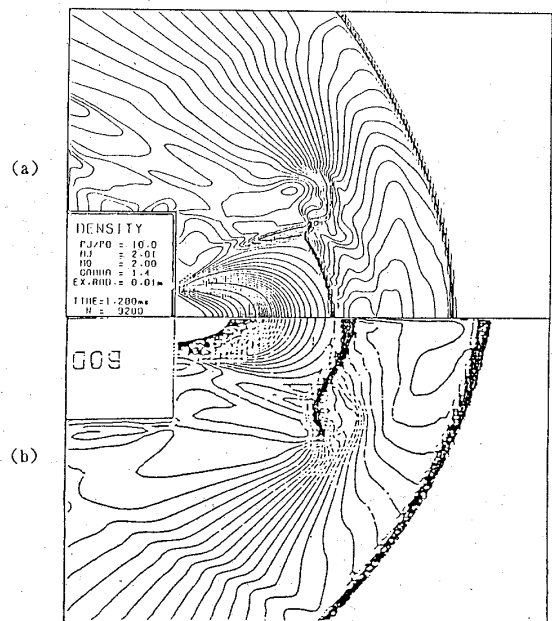


図2 気相のみの逆噴射ジェット数値シミュレーションの等密度線図:(a) TVD法($N=9200$ ステップ), (b) L-W法(里深と松野(2))

ため里深と松野²⁾の計算結果を示した。両方の結果ともに、bow shock, それに影響を受けているMach disc, ジェットの境界とbarrel shockがいっしょになったような流れがbow shockを通過して右からやってきた流れに曲げられて反射衝撃波のようになっている現象がとらえられている。

図2-(b)の今回の結果ではTVD法が用いられたが、人工粘性がきいているにもかかわらず里深と松野のLax-Wendroff法よりも衝撃波は鮮明にとらえられてはいる。これはたぶん格子の大きさなどによるのではないかと考えられる。その他、今回の計算ではbow shockが上方境界とぶつかることでの影響を取り除くような境界条件を使ったが、里深と松野の結果(図2-(b))と比較することによってその成果が分かる。TVD法の方がbow

shock の位置はノズルに近い。

図3は、図2-(a)と同じ計算で違う時間ステップの結果である。図2-(a)との時間差は約0.16 msecである。両者の大きな違いはbarrel shockと反射衝撃波の形や位置などでMach disc NIに関してはそれほど違いはない。つまり、Mach discやbow shockの位置には影響が出ていないが、たぶん数値的な不安定による振動(この場合約0.3 msec)が反射衝撃波に影響をもたらしている。辛島と佐藤¹⁾の実験によれば、圧力比10.0の逆噴射ジェットは安定であるとされている。さらに里深と松野の計算でも安定な解が得られており、この振動は数値的で取り除かれると考える。

3.2 固-気二相逆噴射ジェットの計算

固体粒子を混ぜることによって一般にジェットや衝撃波の形がかなり変わるが、固体粒子の逆噴射ジェットに対する影響とその運動について調べた。

図4は、半径が1ミクロンの固体粒子を質量比で30%混ぜた流れを示している。図4-(a), (b), (c)のそれぞれが時間ステップN=22000, 23300, 24600に対応した等密度線図である。気体だけの場合と違って、Mach disc, bow shock, barrel shock, 反射衝撃波のどれもがかなり振動していることが分かる。ただ、この振動の周期が約0.6 msecで気体だけの場合の倍になっており、物理的にあまり可能ではない値のようである。振幅が大きいのは固体粒子によるものである。図中の黒点の大きさと濃さで固体粒子の濃度を示しているが、一様流の流れによって曲げられた固体粒子の流れが場合によってはノズルの近くまで流されていくことが理解出来る。すでに分かっていることだが³⁾、半径1ミクロンの大きさの粒子はかなり気体の流れに従って動く。固体粒子はノズルから噴射されてMach discを通過してbow shockを通過してきた気体とぶつかり、横方向へ流され反射波に従ってノズル方向で押し戻される。固体粒子の混ざっているジェットの方が、Mach discやbow shockは固体粒子のためにノズルから遠ざけられる。

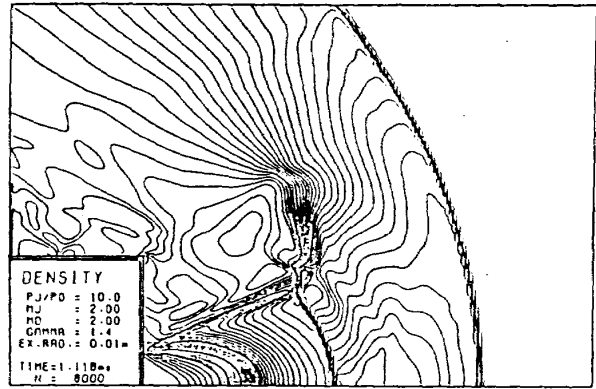


図3 気相のみの逆噴射ジェット数値シミュレーションの等密度線図：TVD法(N=8000ステップ)

図5はこれまでと同じ条件だが固体粒子の半径が5ミクロンの場合で、半径1ミクロンの場合との顕著な違いは、Mach discやbow shockなどがノズルより遠い位置に出来ている事である。とくにこの場合は、2つめのMach discが現われている。図5-(a)と(b)で見られるようにこの場合も振動があり、Mach discや反射波の形が著しく変形している。bow shockは固体粒子の先端とほとんど接触したようになっており、bow shockの形が固体粒子によっても与えられていることが分かる。この大きな粒子の場合は固体粒子がかなり外側まで曲げられるため、ロケット本体又はノズルへの固体粒子の接近が小さい粒子ほどないことが分かった。

4. さいごに

実験によれば低圧力比の逆噴射ジェットにおいて不安定な振動現象があり、今回計算したような高圧力比では安定であることが分かっている。今回の数値シミュレーションで見られた振動は、数値的な振動でReyleigh-TaylorやKelvin-Helmholtzの不安定によるものではないのではという結果である。逆噴射ジェットの場合、小さい固体粒子の方が気体の流れに乗ってノズルや物体に影響を与える。今後は違った圧力比などの場合について調べる必要がある。

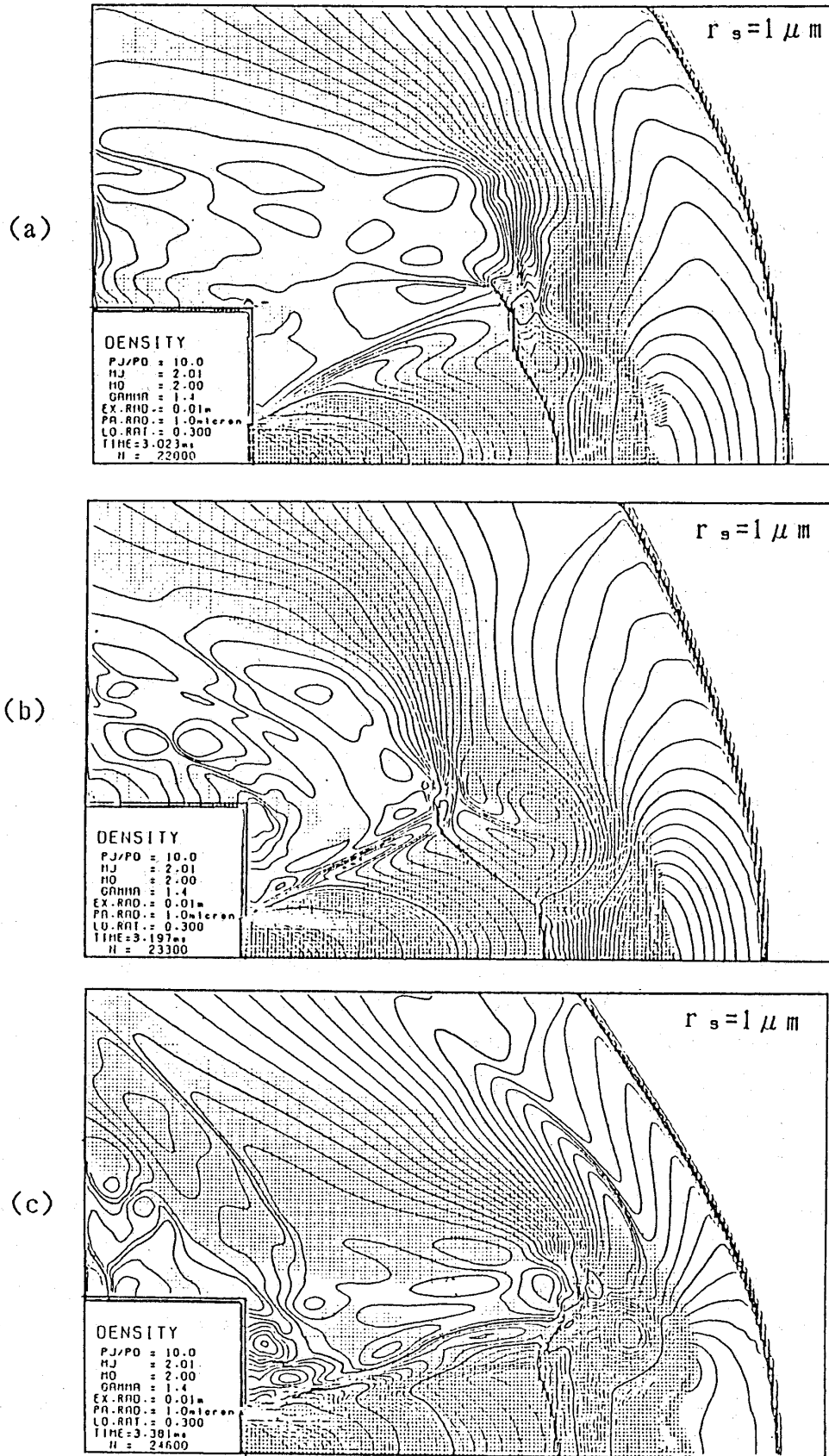


図4 固-気二相逆噴射ジェット数値シミュレーションの気体等密度線図と固体密度図(固体粒子半径=1ミクロン, TVD-FVS法); (a) N=22000ステップ, (b) N=23300ステップ, (c) N=24600ステップ

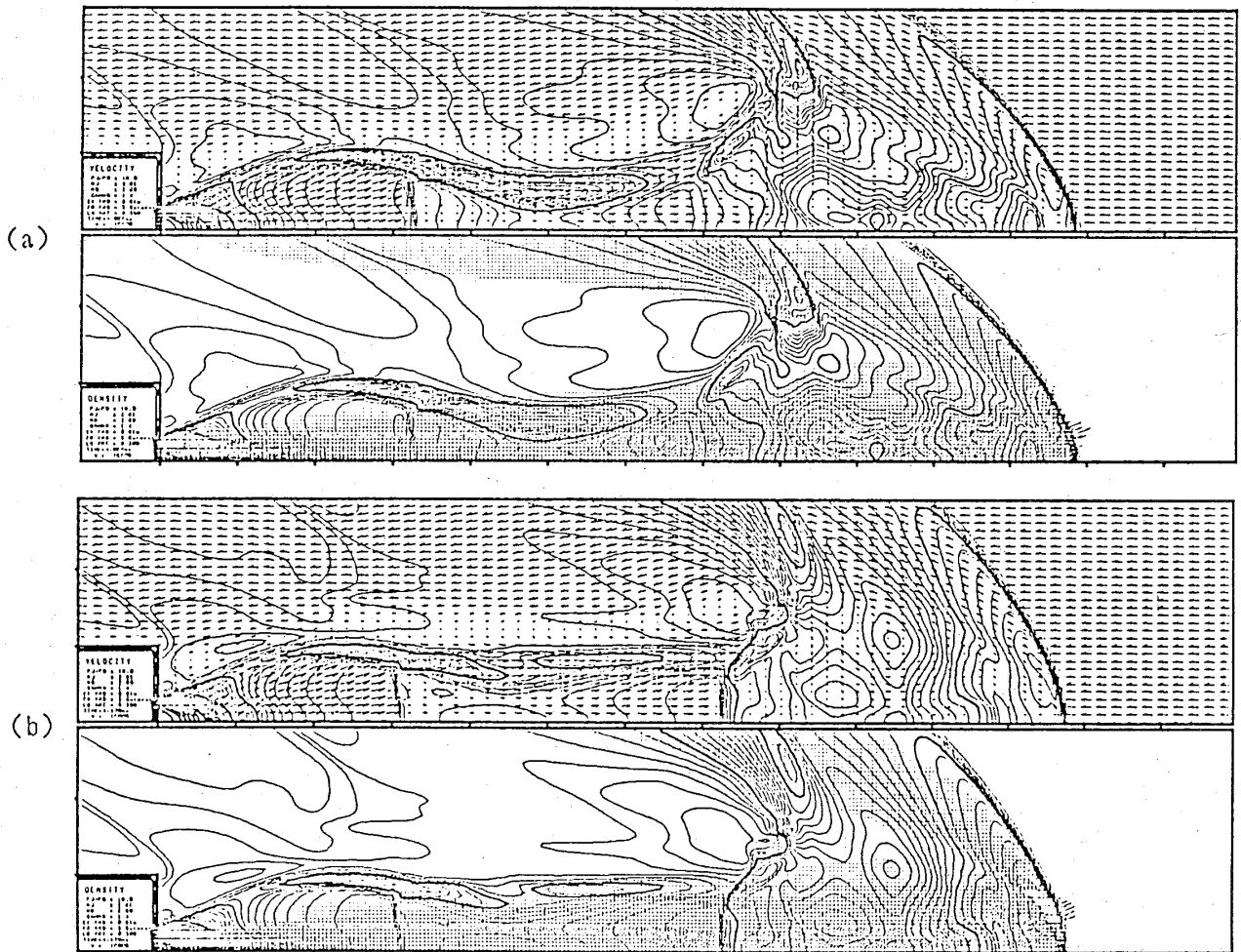


図5 固-気二相逆噴射ジェット数値シミュレーションの気体等密度線図, 固体密度図, 気体速度ベクトル図 (固体粒子半径=5ミクロン, TVD-FVS法); (a) N=15500ステップ, (b) N=18000ステップ)

参考文献

- 1) 辛島桂一, 佐藤清: 「逆噴射ジェットの実験的研究」, 東京大学宇宙航空研究所報告, 第11巻, 第1号(A), 1975年1月, 53-64.
- 2) 里深信行, 松野謙一: 「逆噴射ジェット超音速自由流との干渉の数値計算」, 日本航空宇宙学会誌, 第23巻, 第262号, 1975年11月, 2-11.
- 3) 保田充彦, 松田卓也, 石井隆次, 梅田吉邦, 沢田恵介: 「逆噴射ジェットの数値シミュレーション」, 第2回数値流体力学シンポジウム, 講演論文集, 1988年12月, 291-294.
- 4) 手島光司, 田中茂樹, 上野和之, 西田みち雄: 「逆噴射により生じる衝撃波」, 衝撃波工学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 昭和63年, 134-139.
- 5) Hayashi, A. K., Matsuda, M., Fujiwara, T., and Arashi, K.: "Numerical Simulation of Gas-Solid Two-Phase Nozzle and Jet Flows, AIAA paper No. AIAA-88-2627, June 1988.

