

宇宙ジェットの数値シミュレーション

松田 卓也* 石井 隆次* 梅田 吉邦*
保田 充彦* 沢田 恵介** 嶋 英志**

Numerical Simulations of Astrophysical Jets

by

Takuya MATSUDA, Ryuji ISHII,
Yoshikuni UMEDA, Atsuhiko YASUDA
Department of Aeronautical Engineering, Kyoto University

Keisuke SAWADA, Eiji SHIMA
Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

ABSTRACT

Propagation of astrophysical jets was investigated numerically by using the Osher method which has a second-order of accuracy in space and time. The characteristic structures of them, i.e. a beam, a lobe, a working surface and a cocoon, were successfully simulated. It was found that those structures were very sensitive to the density ratio (gas density of the jet at the effective nozzle-exit divided by that of the ambient).

In the present calculations, the ambient gas condition first introduced by the present authors was applied on all the numerical boundaries. The numerical results have clearly shown that the ambient gas condition is better than the pressure condition adopted, for example, by Norman et al. The ambient gas condition can be widely applied to other problems with numerical boundaries.

1. 宇宙ジェットについて

「ジェット」という言葉から普通我々が想像するのは、航空機やロケットのエンジン(モーター)から高温・高圧の状態で放出される気体の流れであろう。しかし、ジェットを「気体の細く絞られた流れ」と定義するならば、宇宙現象においてもそれは存在する。しかもそれらは様々なスケールに及んでおり、活動銀河の中心核やクエーサーから放出される銀河ジェット、星の生成領域に現われる双極分子流やハ

レーすい星の核から放出されるダスティ・ガスジェットなど最近の観測天文学の発達によって様々な宇宙ジェットが発見されている。

これらの宇宙ジェットは、むろん、おのおの異なった状況下で発生、放出、伝播されるのであるが、基本的にはすべてロケットから噴出されるジェットと同じ現象ととらえることができる。例えばロケットノズルから放出されるジェット中に、ある間隔ごとにマッハ・ディスク、あるいは円錐形の衝撃波が存在することはよく知られているが、一方宇宙ジェット中にも「ノット」と呼ばれる電波の強い部分がほぼ一定間隔で観測されているということはこの理

* 京都大学工学部航空工学科

** 川崎重工業株式会社

由の一つである。

さて、宇宙ジェットにおける研究課題としては次の3つが挙げられる。すなわち、

- 1) ジェット放出の中心となるエネルギー源は何か。
- 2) ジェットを形成する、すなわち気体を細く絞るメカニズムは何か。
- 3) 放出されたジェットは外気中(宇宙空間)をどのように伝播していくか。

である。これらはどれも重要な問題であるが、ここでの我々の興味の対象はジェットの伝播にあり、これを気体力学的にシミュレートすることにある。そのような宇宙ジェットの伝播についての気体力学的な数値計算は今までに数多くなされてきたが、その中でも Norman^ら^{1),2)} の行ったものは質、量ともに最も優れたものの一つであろう。彼らはジェットの放出マッハ数とジェットと外気の密度比の2つをパラメータとして、これらの組み合わせの違いによるジェットの形状や内部ショックの挙動の違いを綿密に調べている。われわれの計算も Norman^ら と同じパラメータを用いている。我々は境界条件に我々自身の提案する外気条件³⁾を用いて、Norman^ら の用いた圧力条件との比較も行った。

2. 仮 定

ここでのシミュレーションは以下のような仮定に基づいて行った。

- 1) 宇宙ジェットには磁場が重要な影響を与えるものもあるが、ここでは純粹に気体力学的なジェットを考えることにする。
- 2) また、粘性の影響も無視できるとする。
- 3) ジェット・ノズル(の役割を果たすもの)の開き角はゼロとする。
- 4) 放出される気体とまわりの気体の比熱比は等しく、 $5/3$ とする。
- 5) 外部の気体は静止しているものとする。
- 6) ノズル出口でのジェットの圧力は外部気体のそれに等しい(整合ジェット)とする。

1)~6)の仮定のもとでパラメータとして残るのは外気とジェットの密度比、及びジェットの放出マッハ数の2つだけとなる。ここで密度比とは、外気

の密度に対する、ノズル出口でのジェットの密度の比で、これが1より大きい場合は外気より重いジェットが放出され、1より小さい場合はその逆である。外気とジェットの圧力は等しいから、温度比は密度比の逆数となる。ジェットの放出マッハ数は、ノズル出口における局所的な音速に対して定義される内部マッハ数である。したがって同じマッハ数でも、密度比が異なると放出速度は異なることになる。

3. 数値計算法・境界条件

ここでは、前述の仮定により圧縮性非粘性流を考へることとするので、解くべき方程式は、オイラー方程式である。用いた計算法は、オッシュャー風上差分法に有限体積法を応用したものである。有限体積法ではセル境界の流束の総和とセル内の平均物理量の変化を関係づけるが、流束を風上差分法で決定する。オッシュャー風上差分法では、セルの境界を挟んでの2つの状態をリーマン問題と考へる。衝撃波を圧縮波で近似し、リーマン不変量を用いて、リーマン問題を近似的に解き、流束を構成する。なお、セル内の物理量に線形分布を仮定してやることにより、2次精度を実現している。

用いた座標系は円柱座標であり、軸方向に640、半径方向に120の等間隔メッシュを使用した。円柱底面には我々の提案した外気条件³⁾を課し、円柱側面には外気条件または圧力条件を課した。外気条件とは次のようなものである。計算格子外に仮の格子をおき、そこでの物理量を外気(ここでは静止大気)のそれに固定する。すなわち、境界条件として与える値は、最初にある値に固定されたままであり、計算途中に変えられることはない。この条件をリーマン問題を解く風上差分法に適用してやると、外気条件は自動的に計算コード内に組み込まれる形となり、特に境界条件を与えるルーチンは不要である。ちなみに、圧力条件とは計算領域の外の格子の圧力を静止大気の圧力に固定し、他の物理量(密度、速度)を境界領域内の格子のそれらと等しくおいたものである。

さて、Norman^らは円柱側面に圧力条件、円柱底面に流出条件を課しており、半径方向には不等間隔メッシュを使用している。この中でとくに問題とな

るのは円柱側面に課した圧力条件であり、これと外気条件とを比較するために我々は圧力条件を課したケースも計算した。

すべての計算は京都大学のVP-200で行った。1ケースの計算時間は、3時間～5時間である。

4. 結 果

ノズル出口の流れと外気の密度比は0.1, 1, 10の3種について調べた。この値は、Normanらの計算のパラメータと同じである。また、密度比1の場合に対しては、円柱側面の境界条件に、外気条件と圧力条件とを使用した。

観測されている宇宙ジェットの密度比がいくらであるかは議論の分かれるところであるが、普通は1以下、すなわち外気よりも低い密度のジェットが放出されている場合が多いと考えられている。図1はそれに相当する密度比0.1の場合である。放出されるジェットは外気と圧力が等しいため、ノズル出口で膨張・圧縮されることなく、ほぼ一定断面のままだまノズル半径の50倍以上も伝播している。このことは航空工学の分野で多くみられる過膨張あるいは不足膨張超音速ジェットの場合に比べて銀河ジェット(整合ジェット)の特に著しい特徴となっている。このジェットの主流部分をbeamと呼ぶ。先端まで達したbeamはそこで跳ね返り、拡散した領域を形成する。実際観測されている宇宙ジェットの多くが先端にこのような領域を持つことが分かっており、これをlobeと呼ぶ。beamがその先端で跳ね返される(外気との)接触部分をworking surfaceと呼び、この部分は高度に非定常で一定の形状にとどまることはない。図1ではworking surfaceは中心と周囲が突出した形状をなしているが、他の時刻では、ほぼ平面であったり、あるいは中心がくぼんでいたりする。Normanらはこのworking surfaceの非定常性によって、実際の電波銀河中のふく射分布を説明している⁴⁾

working surfaceで跳ね返った流れがbeamを取り囲む逆流領域を形成することが、密度比0.1のジェットの特徴である。この逆流領域はcocoonと呼ばれ、外気及びbeamとの間でKelvin-Helmholtz不安定を生じ、複雑な境界形状をなす。working sur-

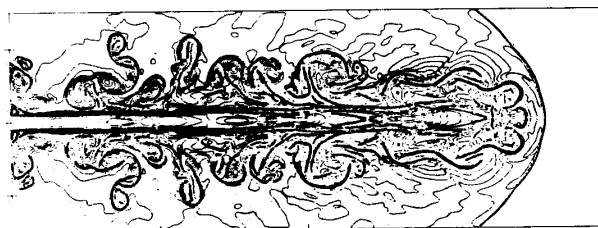


図1 密度比0.1, 外気条件, 密度等高線

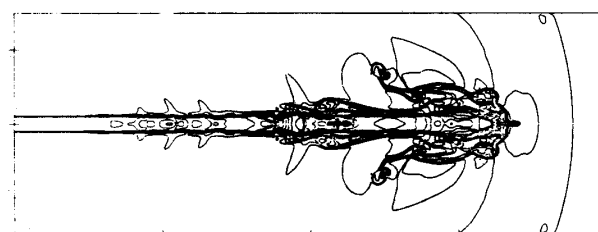


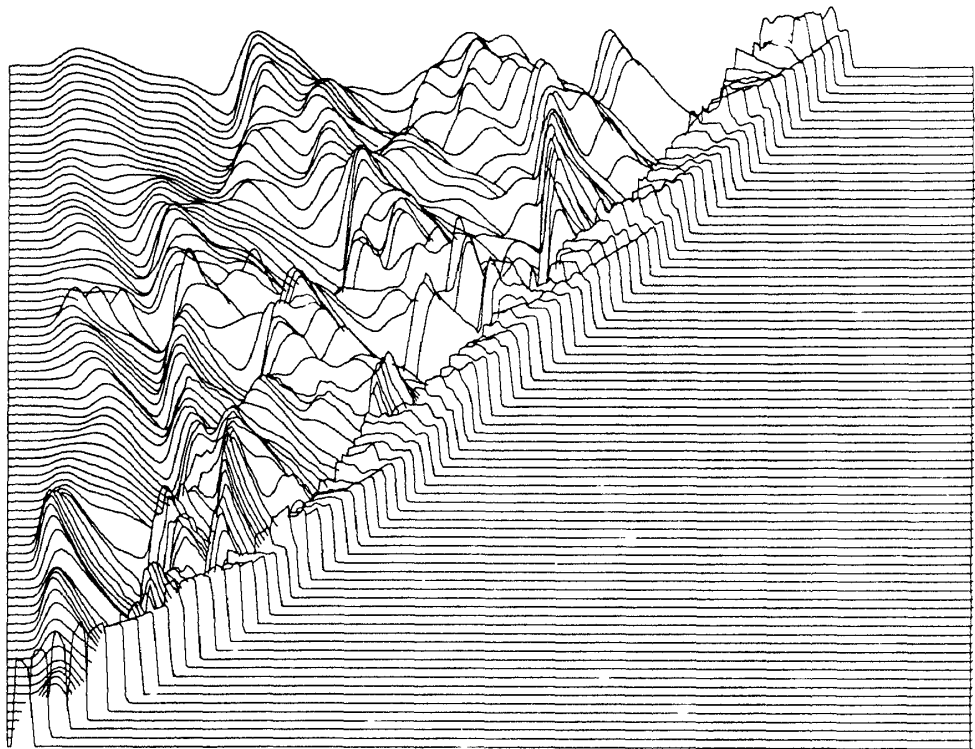
図2 密度比10, 外気条件, 密度等高線

faceとcocoonでの非定常性・不安定性によって生じたじょう乱はbeamにつたえられ、内部ショックが形成される。圧力比が1であるのに内部ショックが生じるのは上のようなメカニズムによるのである。

これに対して、図2の密度比10の場合cocoonは生じておらずbeamは直接外気と接触している。内部ショックはbeamと外気との間のK-H不安定によって生じ、密度比0.1の場合に比べて内部ショックの間隔が狭い。

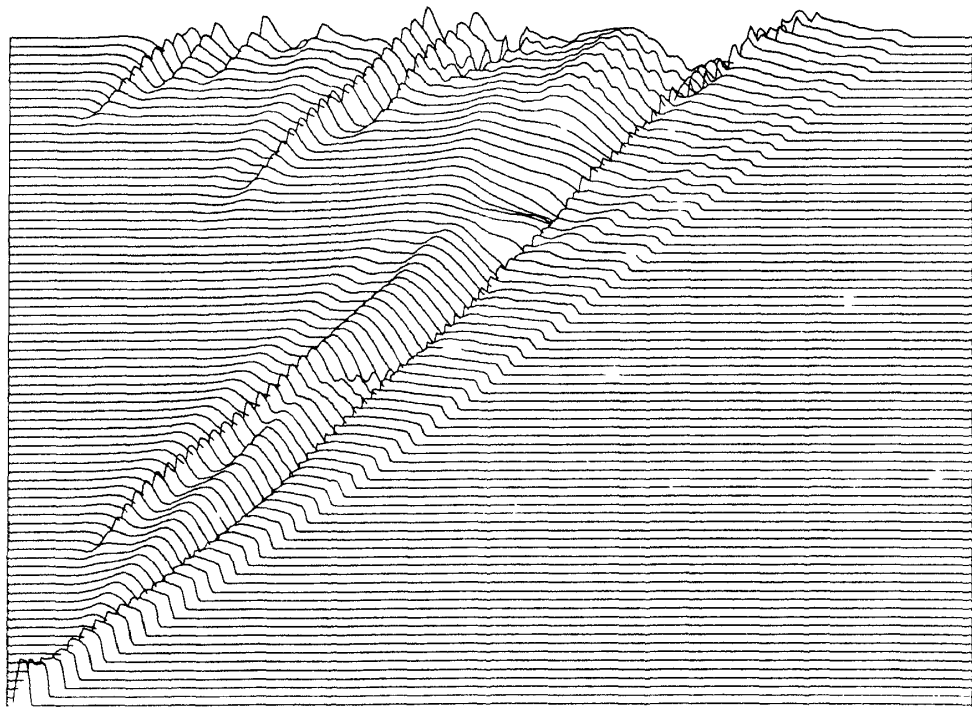
図3, 図4は、両密度比に対するジェットの中心軸上の圧力分布の時間変化を示しているもので、横軸はノズル出口からの距離、縦軸は圧力、奥行き方向はその時間発展をあらわしている。ただし、圧力は対数スケールで表示されている。図3の密度比10の場合は内部ショックはbeamの流れ方向と同じ方向に移動しているが、図4の密度比0.1の場合は逆方向に移動しているのがわかる。これは、前述したように後者の内部ショックが、普通のジェットとは違って、逆流するcocoonによって励起されていることによる。また、Rayleigh-Taylor不安定により、ジェット先端の速度は一定ではなく、振動していることも分かる。

次に、密度比1のジェットに対して境界条件の影響を調べてみた。図5は円柱側面に外気条件を、図6は圧力条件を課したものの密度等高線図である。



$\eta = 0.1$ AMBIENT CONDITION

図 3 密度比 0.1, 外気条件, 中心軸上の圧力の時間変化



$\eta = 10.0$ AMBIENT CONDITION

図 4 密度比 10, 外気条件, 中心軸上の圧力の時間変化

後者の場合、明らかにジェット先端のバウショックが境界上で反射しており、これがcocoonを通してbeamにまで影響していることがわかる。すなわち、反射波によって形成された内部ショックがbeam内にみられる。一方外気条件の場合、境界でのバウ

ショックの反射はみられない。

このことをもう少し詳しく比較するために、ジェットの中心軸上の圧力変化をみてみよう。図7、図8より、ある時刻までは、すなわちバウショックの反射波がbeamに達するまでは、両者はほとんど同じ分布を示しているが、反射波がbeamに影響を及ぼし始めると、そこに内部ショックが生じ、徐々にその影響が上流へ伝わっているのがわかる。

5. 結 論

軸対称オッシャー風上差分法のコードを用いて、宇宙ジェットの伝播の様子、ジェット中に生じる不安定性を提示することができた。また、これらの特性は密度比に大きく依存することも分かった。境界条件については、少なくともこの問題に対しては外気条件のほうがよい結果を与えていることがわかった。実際我々は宇宙ジェット以外の様々な計算にもこの外気条件を適用しているが、どれも良好な結果を得ている。今回の計算では比較的細かいメッシュを使用したにもかかわらず、working surfaceや

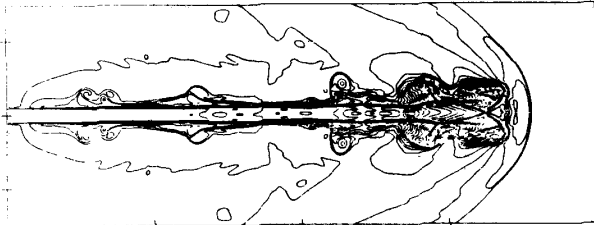


図5 密度比1, 外気条件, 密度等高線

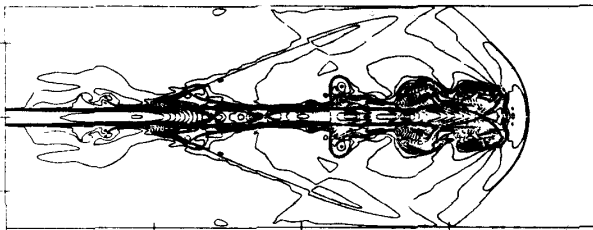
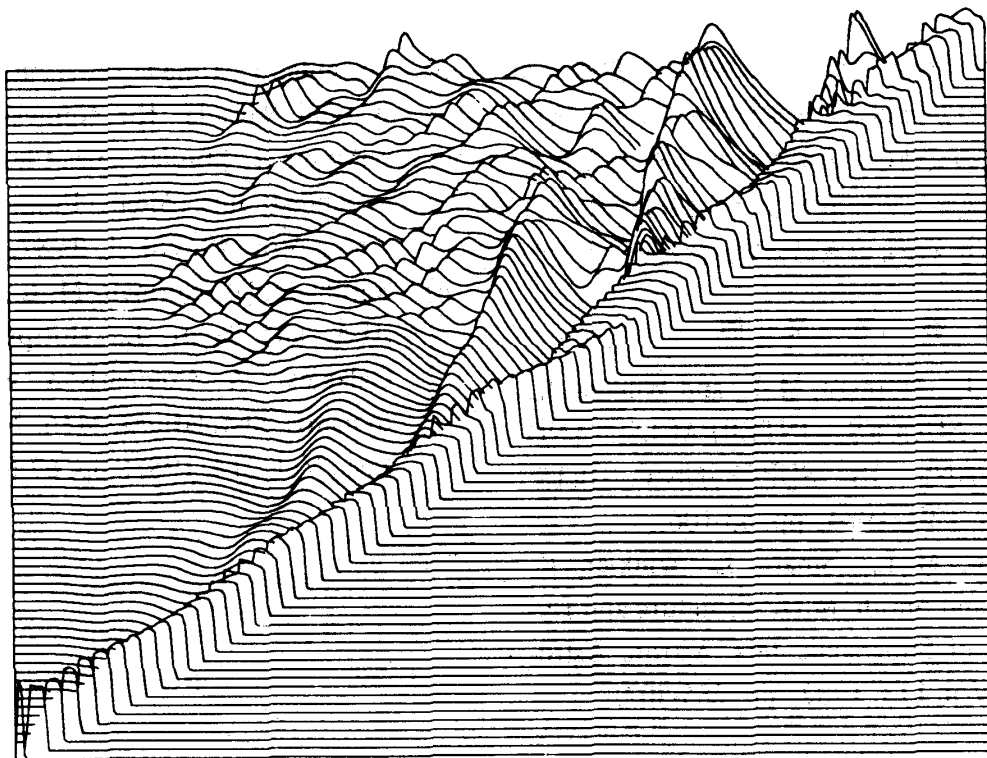
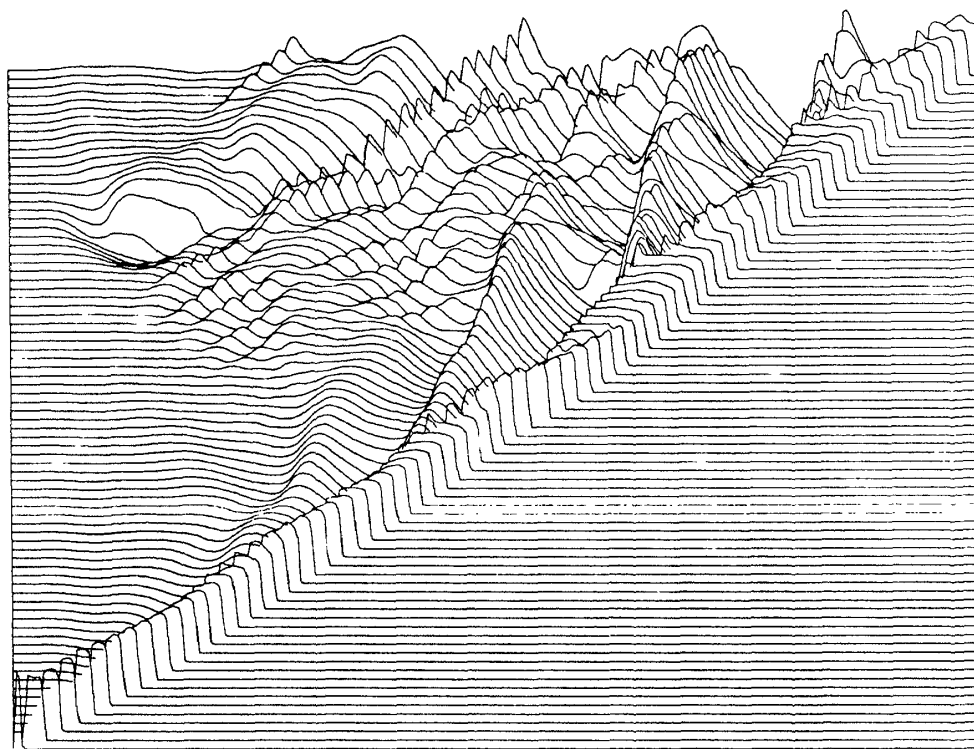


図6 密度比1, 圧力条件, 密度等高線



$\eta = 1.0$ AMBIENT CONDITION

図7 密度比1, 外気条件, 中心軸上の圧力の時間変化



$\eta = 1.0$ PRESSURE CONDITION

図8 密度比1, 圧力条件, 中心軸上の圧力の時間変化

cocoon といった複雑な形状をなす部分は解像しきれているかどうかは問題である。また、ジェットの曲折や螺旋状の振動などの不安定モードは軸対称コードでは捕らえることができない。これについては現在行っている3次元計算の結果が待たれる。

参 考 文 献

- 1) Smarr, L., Norman, M. L. and Winkler, K.-H.A.: SHOCKS, INTERFACES, AND PATTERNS IN SUPERSONIC JETS, *Physica*, 12D, 1984, pp. 83-106.
- 2) Norman, M. L., Smarr, L., Winkler, K.-H.A. and Smith, M.D.: Structure and Dynamics of Supersonic Jets, *Astron. Astrophys.*, Vol. 113, 1982, pp. 285-302.
- 3) Matsuda, T., Umeda, Y., Ishii, R., Yasuda, A. and Sawada, K.: Numerical and Experimental Studies on Choked Under-expanded Jets, *Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ.*, Vol. 49, No. 1, 1987, pp. 84-110.
- 4) Smith, M. D., Norman, M. L., Winkler, K.-H.A. and Smarr, L.: Hotspots in Radio Galaxies: A Comparison with Hydrodynamic Simulations, *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, Vol. 214, 1985, pp. 67-85.