ベル型ノズルの流動特性 Flow Properties of Bell-Type Nozzle

麻生 茂,九州大学工学部,福岡市東区箱崎 6-10-1, <u>aso@aero.kyushu-u.ac.jp</u>

杉本浩一,九州大学大学院,福岡市東区箱崎 6-10-1, sugimoto@aero.kyushu-u.ac.jp Shigeru ASO, Dept. of Aero. & Astro., Kyushu Univ., 6-10-1,Hakozaki,Higashi-ku,Fukuoka,Japan

Koichi SUGIMOTO, Dept. of Aero. & Astro., Kyushu Univ., 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, Japan

Abstract: Unsteady flow phenomena of conventional bell-type nozzle under over expansion condition is one of the important problems for rocket nozzles. However, the flow mechanics of nozzle flow is not sufficiently revealed. Then we have conducted numerical simulations of bell-type nozzle flow in order to understand the detailed flow physics. In the present study, complex flow properties of bell-type nozzle flow have been revealed.

1. 序論

ベル型ノズルに関する研究では、起動時の不安定流動の問題が長年指摘されている。しかしながら、流れ場の詳細な構造は今だ十分には明らかになっていない。著者らは通常のベル型ノズル流れを例にとってこのノズル内の流動解析を試み、不安定な流動特性が起こりうる事を明らかにしたので以下に報告する。

2. 解析法

数値解析では、支配方程式には軸対称ナビエストークス方 程式を用い、乱流モデルには Baldwin-Lomax モデルを使用し ている。対流項には 2 次精度の風上差分 TVD スキーム、時 間積分には LU-ADI 法⁽¹⁾を用い、計算領域を 3 つの領域に分 割して計算を行った。接続部分では格子を数点重ねる事によ り精度が落ちるのを防いでいる⁽²⁾。格子数はおよそ 32,000 点である。

支配方程式である軸対称完全ナビエストークス方程式は 次のように書かれる。

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial y} + H = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial \hat{E}_{v}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{F}_{v}}{\partial y} + W \right)$$

ここで、 \hat{Q} は保存量の変数、 \hat{E}, \hat{F} はそれぞれx方向と y方向の物理流束ベクトル、Hは軸対称性による生成項で Re はレイノルズ数、 $\hat{E}_{y}, \hat{F}_{y}, W$ は粘性消散項でそれぞれ次 のように書かれる。

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{pmatrix}$$
$$\hat{E} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (E+p)u \end{pmatrix}$$

$$\hat{F} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (E + p)v \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} \rho u / y \\ \rho u / y \\ \rho uv / y \\ \rho v^2 / y \\ (E + p)v / y \end{pmatrix}$$

$$\hat{E}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xx}u + \tau_{xy}v + \kappa T_x \end{pmatrix}$$

$$\hat{F}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yx}u + \tau_{yy}v + \kappa T_y \end{pmatrix}$$

$$W = \frac{1}{y} \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{yy} \\ 2\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{v}{y}\right) \\ \tau_{yx}u + \tau_{yy}v + \kappa T_y \end{pmatrix}$$

各応力テンソルの成分は以下のようになる。

$$\tau_{xx} = \frac{1}{3}\mu \left(4\frac{\partial u}{\partial x} - 2\frac{\partial v}{\partial y} \right)$$
$$\tau_{yy} = \frac{1}{3}\mu \left(-2\frac{\partial u}{\partial x} + 4\frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

また、状態方程式は次のように書かれる。 $p = (\gamma - 1)E - \rho(u^2 + v^2)/2$

全体の格子が Fig.1 に示されている。左下部分がベル型ノズル部分で、ノズル外部領域は周方向にノズル出口半径の3倍、主流方向に6倍の広さを取ってある。

初期条件は、全体が 1atm・273K の一様な静止状態とし、 その状態からチャンバー部入り口を全温 3517K・全圧 122.5atm から求まる条件に設定した。外部流出境界は0次外 挿としている。壁面は非滑り等温壁で、壁面垂直方向の圧力 勾配は0を仮定した。壁面方向の最小格子幅はおよそ 50µm である。





3.結果と考察

Fig.2(a)~(f)に流れ場の変化の様子を示す。上から順に (a),(b),(c),(d),(e),(f)である。



Fig. 2 (a)



Fig. 2 (b)



Fig. 2 (c)



Fig. 2 (d)



Fig. 2 (e)



Fig. 2 (f)

(a)ではまだ流れ場は起動したばかりの状態で剥離点も移動中であり、マッハディスクもノズル内部にある。さらに時間が経つと(b)のような状態になる。このように、マッハディスク外側から排気が流れていく現象は他の数値解析例でも良く見られる現象である⁽³⁾。

(c)では、マッハディスクが極端に傾いているのが確認できるが、剥離点は(b)の状態からほとんど動いていない。さらに計算を進め、(d),(e)のようになっても剥離点は動いていない。

Copyright © 2000 by JSCFD

ただ、剥離点の移動は確認できなかったが、マッハディス クは不規則に振動し、形状を変化させているのが確認された。 それは、Fig.2(f)のように、一見安定した流れ場のように見え る状態になってからも同じであった。

Fig.3(a)(b)にそれぞれ、ある時間のノズル出口付近の等マッハ線図を示す。



Fig. 3 (a)



Fig. 3 (b) Mach contour close up at a time.

このように、剥離点の移動は確認できないがマッハディス クの振動や不規則な形状変化は確認する事ができる。

このマッハディスクの振動特性を確認するため、機体軸中 央付近のマッハディスクの位置を、横軸に無次元時間を・縦 軸にマッハディスクの位置をとってプロットしていった物 が Fig.4 である。ある適当な時間から無次元時間 0.01 ごとに ディスクの位置を取っている。X=2424(mm)がノズル出口の 座標である。

この図からは、マッハディスクが細かく振動しながら大き く前後に振動している様子が見て取れる。

また、同じ時間にノズル壁面の圧力分布の推移を表示した 物が Fig.5(a),(b)である。ノズル出口付近とわずかに内部に入 った表面での圧力の変化はこのようになっていて、マッハデ ィスクと同様に細かく振動しながら変動していることが確

認できる。



Fig. 4 Time history of Mach disk place.



Fig. 5(a) Time history of pressure on the nozzle wall at x=2200



Fig. 5(b) Time history of pressure on the nozzle wall at x=2420

また、マッハディスクの振動とノズル壁面の圧力分布に何か関係があるか明らかにする事も重要であるが、これだけのデータでは議論には不充分であろう。

4. 結論

今回の軸対象の計算では流れ場の基本構造やマッハディ スクの振動する様子・その形状の複雑な変化の様子を捕らえ る事ができた。これらの事から、実際には3次元的な流れ場 の剥離やマッハディスクの振動等が発生していることは容 易に考えられる。

5.今後の課題

今後、チャンバーでの不均一性等を考慮した非定常な流入 条件をこの解析に当てはめてみる事や、3次元への拡張など を行う事がさらなる現象の詳細な把握に欠かせないと考え られる。また、実際の起動時や停止時の条件を正確に模擬す るにはチャンバーの条件を時間と共に変化させる事も必要 であろう。

参考文献

- K. Fujii and S. Obayashi : Practical Application of Improved LU-ADI Scheme for the Three-Dimensional Navier-Stokes Computations of Transonic Viscous Flows, AIAA Paper 86-0513(1986)
- (2) S. Kuroda and S. Obayashi : Supersonic Inlet Flow Computations with Cavity, 第8回航空機計算空気力学シン ポジウム
- (3) C. L. Chen and S. R. Chakravarthy : Numerical Investigation of Separated Nozzle Flows, AIAA J., Vol.32, No.9, Sep., 1994
- (4) M. Onofri and F. Nasuti : The Physical Origins of Side Loads In Rocket Nozzles, AIAA Paper 99-2587(1999)
- (5) M. Frey and G. Hagemann : Status of Flow Separation Prediction on Rocket Nozzles, AIAA Paper 98-3619(1998)