A101 丸みのあるコーナーを回折する衝撃波の可視化

九大総理工 松尾一泰
九大総理工 青木俊之
北九州高専 櫻村秀男*
日産自動車 尾崎康隆

VISUALIZATION OF DIFFRACTING SHOCK WAVE ON A ROUND CORNER

Kazuyasu MATSUO*, Toshiyuki AOKI*, Hideo KASHIMURA**
and Yasutaka OZAKI***

The new methods of the computer aided visualization of a shock wave which called computer-schlieren and computer-shadowgraph were showed in the previous report. The visualization technique of a propagating shock wave on a round corner using these methods is described. Furthermore, by the pressure distribution on the wall, the time history of the second shock behind the diffracted shock wave is indicated.

1. まえがき 著者らは、既報において衝撃波の可視化法としてコンピュータシュリーレン法とコンピュータシャドウグラフ法を提唱し、この二つの方法が衝撃波を含む流れのCAFVに有効であることを示した⁽¹⁾。このとき数値計算と流れの可視化には直交座標系が用いられている。本報ではこの手法を一般座標系に適用し、丸みのあるコーナーで回折した衝撃波の背後の流れを可視化し、一般座標系に対してもこの方法が有効であることを示す。

2. 回折衝撃波背後の流れ コーナーで回折する衝撃波に関する研究は Bazhenova⁽²⁾、Lagtov⁽³⁾により実験的になされている。丸みのあるコーナーでの流れの様子を図1に示す。入射衝撃波が点Aを通過するとそこから膨張波が発生し、その波頭は流れに相対的に音速で周囲に伝わる。三重点Tよ

Fig.1 Flow behind the diffracting shock wave

* Graduate School of Engineering Science, Kyushu University, Fukuoka, 816, JAPAN

** Kitakyushu National College of Technology, Kitakyushu, 803, JAPAN

*** Nissan Motor Co., Ltd., Atugi, 243-01, JAPAN

り下の部分が丸みの影響を受けて回折した部分である。回折衝撃波背後にある接触面は入射衝撃波が回折する前に加速された流れと回折後に加速された流れとの境界で、この面を通して圧力は等しいものの密度は不連続に変化する。第二衝撃波はコーナーで加速された流れと衝撃波の回折で減速された流れを調節する後退衝撃波である。

3. 数値計算法 図1に示すように壁面に沿う一般座標系 $(\xi-\eta)$ について、完全気体の非定常非粘性圧縮流れを考える。基礎方程式は

$$U_t + F_\xi + G_\eta = 0 \quad \dots \quad (1)$$

である。数値計算ではPiecewise-linear-method (PLM)⁽⁴⁾を用いた。二次元一般座標系に拡張できるようにPLMに改良を加え、これに時間分割法⁽⁵⁾を併用した。図2はその一つの計算グリッドを示しており、 ξ η それぞれの方向のグリッド番号を i, j で表すことにする。格子形成はThompsonら⁽⁶⁾の方法によった。その一例を図3に示す。

Fig.2 Grid element

Fig.3 Example of computed grid

Fig.4 Comparison with interferometric photograph⁽³⁾
($Ms=4.7$, $\kappa=1.4$, $x_s/R_0=3.05$)

PLMによる数値計算結果と光学観察による結果の比較を図4に示す。左の図は文献(3)より引用したもの、右の図は計算結果の等密度線図である。入射衝撃波マッハ数 $M_s=4.7$ 、 $\alpha_0=90^\circ$ で、図1の点Aからの衝撃波の位置は曲率半径 R_0 の3.05倍である。

4. 流れの可視化 図4の結果をもとにコンピュータディスプレイ上で流れを可視化する。既報においては直交座標系(x-y)を用いていたので、矩形グリッド上の格子点 i, j において密度の一次勾配 $(d\rho/dx)_{ij}$ または $(d\rho/dy)_{ij}$ 、二次勾配の和 $(d^2\rho/dx^2 + d^2\rho/dy^2)_{ij}$ を求め、この値に応じた明暗により画像を形成して流れを可視化した。これらの値は、シュリーレン法とシャドウグラフ法で求まるものに対応しているので、それぞれコンピュータシュリーレン法とコンピュータシャドウグラフ法とよんだ。本報では、一般座標系を用いているために矩形グリッドではないから、この方法を適用するためには、内点の値を別の方法で求める必要がある。そこで、シュリーレン法とシャドウグラフ法とは定量的には一致はしないものの、簡便に流れを可視化する方法として、コンピュータシュリーレン法とコンピュータシャドウグラフ法を変形した次の方法を考える。

$$I_1 = K (d\rho/d\xi)_{ij} = K(\rho_{i+1,j} - \rho_{i-1,j})/\Delta\xi \quad \dots \quad (2)$$

$$I_2 = K (d\rho/d\eta)_{ij} = K(\rho_{i,j+1} - \rho_{i,j-1})/\Delta\eta \quad \dots \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I_3 &= K(d^2\rho/d\xi^2 + d^2\rho/d\eta^2)_{ij} \\ &= K\{(\rho_{i+1,j} + \rho_{i-1,j} - 2\rho_{ij})/\Delta\xi^2 + (\rho_{i,j+1} + \rho_{i,j-1} - 2\rho_{ij})/\Delta\eta^2\} \\ &= K(\rho_{i+1,j} + \rho_{i-1,j} + \rho_{i,j+1} + \rho_{i,j-1} - 4\rho_{ij})/\Delta\lambda^2 \quad \dots \quad (4) \end{aligned}$$

Fig.5 Flow visualization using computer graphics

Fig.6 Pressure distribution along the wall

や二次衝撃波のように密度が増加する方向では赤で示される。(c)は密度勾配 $d\rho/d\eta$ を式(3)で計算して、(b)と同様の方法で流れを可視化している。 $d\rho/dy$ では表すことのできなかった入射衝撃波も $d\rho/d\eta$ では、 η 軸が入射衝撃波の伝ばする方向と垂直の向きからそれているために可視化できている。(d)は密度の二次勾配を式(4)で計算している。正の最大値を赤(R)、負の最大値を黄(Y)とし、変化のない領域を黒(BK)としている。既報と同様に、衝撃波や接触面などの不連続面は赤と黄の一對の線で表される。式(4)と、このカラーコードの組み合わせでは回折衝撃波でわかるように、衝撃波の波面前方の密度の低い側が赤、高い側が黄となるようになっている。このことから、二次衝撃波は密度の高い側に伝ばする後退衝撃波であることがわかる。

図6は入射衝撃波が回折する過程における二次衝撃波(*で図中に記入)の形成を、壁面圧力の時間変化を示すことによって明らかにしたものである。これらの図から二次衝撃波の形成時間とその位置、回折衝撃波の伝ばする速度との関係が明らかにされる。

参考文献

- (1) 樫村ら：流れの可視化，Vol.5, Suppl., (1985), 57.
- (2) Bazhenova, T. V., ら：Acta Astronautica, Vol.6, (1979), 401.
- (3) Lagtov, Y. P., ら：IUTAM Symposium Liblice, (1984), 51.
- (4) Collela, P., ら：LBL-15776, Lawrence Lab. Univ. Calif., (1983).
- (5) Strang, G., : J. of Numer. Ana., Vol.5, No.3, (1968), 506.
- (6) Thompson, J. F., ら：J. of Comp. Phys., Vol.15, (1975), 299.