33 数値シミュレーションによる高速流れの新しい可視化法

北九州工業高等専門学校 櫻村秀男^{*}

九州大学総合理工学研究科 松尾一泰

九州大学総合理工学研究科 青木俊之

川崎重工業株式会社 武居陽一

COMPUTER-AIDED VISUALIZATION OF THE HIGH SPEED FLOW

Hideo KASHIMURA^{*}, Kazuyasu MATSUO^{**}, Toshiyuki AOKI^{**}, Youichi TAKESUE^{***}

This paper describes a new method of the visualization of the complex high speed flows contain shock waves, expansion waves, contact surfaces and shear layers. This method is based on the streamwise density gradient, then the authors call "streamwise schlieren method". The algorithms of the visualization are explained, and an example of the visualization of the shock diffraction from a convex corner is showed.

1. まえがき 数値シミュレーションにおける高速流れの可視化法として、圧力や密度などの状態量の等高線図が従来、一般的に用いられてきた。また実際に工学的な応用を考える場合には、そのような状態量の大きさが必要とされるので、大変重要である。しかし流れ場を可視化して解析するには、衝撃波などのように、状態量が大きく変化する場合を除いては、波がぼやけて、はっきりと表すことができず、必ずしも有効であるとは言えない。そこで、著者らは先に、数値シミュレーションによる波動の可視化法として、白黒の疑似連続階調を用いたコンピュータシャドウグラフ法とコンピュータシュリーレン法を提唱した⁽¹⁾。コンピュータシャドウグラフ法では密度の2次勾配を用いており、そこでは衝撃波や接触面は符号が逆転する大きな値の変化として表される。また、中心の値が零となる線をたどることにより、それらの形状が与えられ、しかも符号の変化によってその向もわかる。また、一方向のみの密度の2次勾配の分布を補助的に用いると便利な場合もある。しかし、この方法では膨張波のように密度が連続的に変化する波は明瞭に表せない。このような場合には、コンピュータシュリーレン法による密度の1次勾配を用いるのが便利である。この方法では、衝撃波や接触面のような不連続面は幅のある帯となり、正確な形状は表せにくくなるが、膨張波のような密度が連続的に変化する波は、その波面がよく

* Kitakyusyu College of Technology, Kitakyushu, 803, JAPAN

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

*** Kawasaki Heavy Industry Co. Ltd., Kobe, 650-91, JAPAN

わかる。以上のように、コンピュータシャドウグラフ法とコンピュータシュリーレン法は流れ場を可視化するのに非常に有効な手段であるが、これだけでは波の特性を十分に判別できない場合もありうる。本論文では、カラーの疑似連続階調をもつディスプレイを用いて、衝撃波の他に膨張波、接触面、せん断層を含む複雑な高速流れの新しい可視化法を提唱する。この方法では流線方向の密度勾配を用いて、カラーの濃淡を表示しているので、ここでは流線方向シュリーレン法とよぶことにする。また、密度、圧力、流速の勾配を考慮することによって、波動の識別を色識別できるように工夫している。ついで、コーナで回折する衝撃波背後の流れに着目して、二次元非定常方程式をピースワイズリニア法⁽²⁾を用いて数値計算し、その結果に対して本手法を適用した例を示す。

2. 高速流れの新しい可視化法 気体の圧縮性を考慮した高速流れでは圧縮性に起因する衝撃波や膨張波等の特有の現象が生じる。 ρ を密度、 p を圧力、 u を流速とし、 ξ を流線方向の座標、 η をそれと垂直な方向の座標とすれば、前進衝撃波(FS)、後退衝撃波(BS)、前進膨張波(FE)、後退膨張波(BE)、接触面(CS)、せん断層(SL)は ρ 、 p 、 u の1次勾配の符号の組み合わせによって、表1のように表すことができる。 ξ 、 η は数値計算で求められた格子点 (i, j) での流速成分 u_x, u_y を用いて図1のように求めることができる。本研究で用いたカラーディスプレイは、基本三原色の緑(G)、赤(R)、青(B)の各色の輝度が16

段階に選択でき、それら

の組み合わせによって

4096色が最高可能である。

流線方向シュリーレン法

では密度変動のない部分

を黄(R+G)とし、前進衝

撃波を赤、後退衝撃波を黒(G+R+B)、前進膨張波を緑、後

退膨張波を水色(G+B)、接触面を青、せん断層を紫(R+B)

で示し、その濃淡は衝撃波、膨張波、接触面では流線方向

の密度勾配の絶対値、せん断層では流線と垂直方向の密度

勾配の絶対値に比例するようにしている。また、密度勾配

が0に近ずけば、基調色の黄になるようにしている。中間

色を〔G輝度、R輝度、B輝度〕で表せば、可視化のため

のアルゴリズムは以下ようになる。

	Shock Wave		Expansion Wave		Contact Surface : CS		Shear Layer : SL
	FS ^{*1}	BS ^{*2}	FE	BE			
ρ^ξ	neg.	pos.	pos.	neg.	not 0	ρ^η	not 0
p^ξ	neg.	pos.	pos.	neg.	0	p^η	0
u^ξ	neg.	neg.	pos.	pos.	0	u^η	not 0

Table1 Classification of waves. ^{*1} Forward-running Shock Wave ^{*2} Backward-running Shock Wave

Fig.1 Velocity coordinates.

$$FS : [K_1(1 - |\rho^\xi / \rho_{max}|), R_{16}, B_0] \quad (\rho^\xi < 0, p^\xi < 0, u^\xi < 0) \quad (1)$$

$$BS : [K_1(1 - |\rho^\xi / \rho_{max}|), K_2(1 - |\rho^\xi / \rho_{max}|), B_0] \quad (\rho^\xi > 0, p^\xi > 0, u^\xi < 0) \quad (2)$$

$$FE : [G_{16}, K_2(1 - |\rho^\xi / \rho_{max}|), B_0] \quad (\rho^\xi > 0, p^\xi > 0, u^\xi > 0) \quad (3)$$

$$BE : [G_{16}, K_2(1 - |\rho^\xi / \rho_{max}|), K_3(|\rho^\xi / \rho_{max}|)] \quad (\rho^\xi < 0, p^\xi < 0, u^\xi > 0) \quad (4)$$

$$CS : [K_1(1 - |\rho^\xi / \rho_{max}|), K_2(1 - |\rho^\xi / \rho_{max}|), K_3(|\rho^\xi / \rho_{max}|)] \quad (|p^\xi| < \epsilon_1, |u^\xi| < \epsilon_2) \quad (5)$$

$$SL : [K_1(1 - |\rho^\eta / \rho_{max}|), R_{16}, K_3(|\rho^\eta / \rho_{max}|)] \quad (|p^\eta| < \epsilon_3) \quad (6)$$

上式において、 $\rho \varepsilon$ は ε 方向の密度勾配、 K は感度定数、 ε はしきい値、 R 、 G 、 B の添字は輝度を表しており、16は最も明るい場合0は最も暗い場合である。

3. 可視化装置 本研究で用いた可視化装置を図2に示す。数値計算はソード/M343、または九州大学大型計算機センタFACOM/M382を用いて行われた。それらの結果は(1)～(6)式で画像データに変換されたのち、RS232Cインタフェースを介して、富士通/FM77AVに転送され画像が生成される。得られた画像はカラーイメージレコーダ(日本アビオニクス/CIR-310)によりボラロイド写真、または35mmフィルム上に記録される。

Fig.2 CAFV system.

4. 衝撃波を伴うコーナ流れの可視化 計算は既報と同様に二次元圧縮性非定常保存式をピースワイズリニア法によって解いた。計算格子数はx方向に170、y方向に180であ

Fig.3 Pressure contours.

Fig.4 Density contours.

る。コーナ角90(deg.)、比熱比1.141入射衝撃波マッハ数 $M_s=2.33$ の場合の結果を図3と図4に示す。図3は等圧力線、図4は等密度線である。これらの結果から得られる衝撃波背後の流れを示せば、図5のようになる。これは著者らの実験⁽³⁾、またBazhenovaらの実験結果⁽⁴⁾とも非常によく一致している。

入射衝撃波が頂点Oを通過すると頂点Oから膨張波が発生し、その波

Fig.5 Wave system behind a diffracting shock wave.

Fig.6 Visualization of shock waves.

Fig.7 Visualization of expansion waves.

Fig.8 Visualization of a contact surface and a shear layer.

頭 O R T は流れに相対的に音速で周囲に伝わる。衝撃波の三重点 T より下の部分が頂点 O の影響を受けて回折した部分である。この回折した衝撃波のうち、壁面と干渉している部分を Wall shock とよんでいる。

O A は膨張波の波尾、K A S は二次（後退）衝撃波、S は剥離による渦、O S は剥離によるせん断層を示す。T C O 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の境界を示す接触面である。図に示すように、衝撃波が鋭い角を回折する流れ場には代表長さがなく、流れ場は時間とともに相似拡大する擬定常流れである。

Fig.9 Streamwise schlieren photograph.

図 6 は (1)、(2) 式により衝撃波を、図 7 は (3)、(4) 式により膨張波を、図 8 は (5) (6) 式により接触面とせん断層の可視化をそれぞれ別個に示したものである。なお、これらの図は原稿の印刷の都合上、白黒ディスプレイ上で濃淡をつけて撮影を行った。図 (9) は以上の (1)~(6) 式の操作を一度に行って得られた流線方向シュリーレン写真であり、それぞれの着色された色を図中に記入している。

5. あとがき 流線方向およびそれと垂直方向の密度、圧力、流速の 1 次勾配の符号を組み合わせ、密度勾配の絶対値を用いることによって、流れ場の特徴をあらわす波を明確に表示できることが示された。この考え方をもとにして提唱された流線方向シュリーレン法は高速流れの可視化において非常に有効な手法であると思われる。

参考文献

- (1) 櫻村・西田・松尾；流れの可視化、Vol.5, Suppl. (1985-10), 57
- (2) P. Collella et.al.; LBL-15776, Lawrence Lab. Univ. Calif. (1983)
- (3) 松尾・青木・櫻村・武居・原；衝撃工学シンポジウム (1986-9), 9
- (4) Bazhenova T.V. et.al.; Fluid Dynamics, Vol.11 (1983), 7