13 三次元流れのCG画像

千葉大学工学部 西川進栄、鈴木 章

Computer Graphic Images of 3-D Flows
by Nobuhide NISHIKAWA* and Akira SUZUKI*

In the present paper the three dimensional boundary layer structures are shown in graphic images with shading processing and so on, as the results of finite difference numerical computation. New features of boundary layer structure are visualized by the graphic images, which are not realized in the line-drawing graphics. The limiting streamlines obtained with finite difference calculations are given for paraboloid, and for the front half region of wing-ellipsoid combination. After comparison with experimental visualization photographs, it is confirmed that the obtained three dimensional images are satisfactorily realistic to understand behaviors of solutions in simulated conditions.

1. はじめに

昨今コンピュータグラフィックスの普及は進展し学会発表にもかなり登場するようになってきている。この状況はまた現今のハードウェアの発達と関連機器の普及に伴い加速されるものとおもわれる。

グラフィック表示は、計算途中での理解（格子配置と解の関連の予測）を、物理的予備知識を援用して大きくはかどらせてプログラムの完成を早めるものであり、また、解の物理的吟味、現象の理解を深める。又カラー表示や三次元の表現を考えると比較的三次元での適用例あるいは成功例は少ない[1,2,3,4]。

ここで、グラフィック表示が試みられるのは、三次元細長物体まわりのポテンシャル流れ、またそれらを境界条件としての三次元境界層方程式の数値解、および翼胴結合での同様の流れ場、剝離域などである。

さて三次元形状のグラフィック表示のうちで、ワイヤ・フレーム型は稜線で立体を表現するため曲面などの実在感に弱さもあり、陰線消去にユーザの努力を必要とするソフト・パッケージが多い。ソリッド・モデル型にはこれらの欠点はない、サーフェス・モデル型は断面図などに関する他はシェイディングなどにより実在感が得られる。

したがっては後の二方法は複雑になりがちな三次元形状を実在感をもって描写し、シミュレーションという言葉の原義にこだわるなら、あたかも可視化実験を見るような映像を生み出し得る点で強力なものといえよう。

2. 画像処理装置

ここでは、グラフィカ社のグラフィカM-1008での画像例を示し考察をプログラム開発と成果の理解のため行う。

M-1008は、DMAで(300KB/sec以上)直接 HITAC-M 260 (千葉大計算センタ)につながっている。M-1008では、MOVIE.BYU というライブラリセットで三次元物体形状の合成、分割、クリッピング、キャッピング(クリップされた断面のぬりつぶし)、自動的にスムーズ・シェイディングや陰線消去が可能である。

本報告では、グラフィック表示機能のうちで主としてサーフェス・モデルやシェイディングを数値結果の表示に使い、三次元性の理解を助けようとするものである。この

Fig.1 Graphic System

* Faculty of Engineering, Chiba University, Yayoi 1-33, Chiba 260 Japan

得られたモデルは、複雑になりがちな三次元形状を実在感を持って描写し、データ群を多様な目的に使いやすくすると思われる。特にシミュレーションという言葉を使う限り、あたかも実験を見るように数値結果が映像化されることがプログラム開発と現象の理解に役立つと思われる。このような意味で、わが国でも三次元流の数値結果の先端的なグラフィック表示例が既に知られている [2, 3]。いずれも画像表示法としては、ワイヤーフレーム型といえる。

3. 1. 主流条件

さて、ここでは、実在感を示すのに優れたソリッドモデルグラフィックスを用いて、境界層解析の主流条件（ポテンシャル流れ）や数値結果をできる限り実験での可視化に近いものとして表示しようとするものである。

たとえばタフト法のような像として Fig. 2, 3 に放物体まわりの非粘性速度を示す。この非粘性速度（ポテンシャル解）は下のような式で表される

$$u_e = \cos\alpha \cos\theta - 2\sin\alpha \sin\beta \cos\theta$$

$$w_e = 2\sin\alpha \sin\theta$$

ただし、 α は迎え角、 β は表面への接線が物体軸に対してなす角度、 θ は風上側を 0 とした子午角である。Fig. 4 に非粘性流線を示す。

翼胴結合については、柳沢らのパネル境界要素法による非粘性速度をもちいる。表面分割とスムージングを用いたサーフェスモデル表示例を Fig. 5, 6 に示す。

Potential
Flow

Fig.2 External Stream Line
Taft 法

Fig.3 External Stream; View from Bottom

Fig.4 External Stream Line

Fig.5 Wire Frame Model

Fig.6 Solid Model with smoothing

3. 2. 基礎方程式

以下の三次元境界層方程式を主流条件と壁面条件のもとで、Box-Schemeで差分解を得た。

$$\frac{\partial}{\partial x}(h_2 u) + \frac{\partial}{\partial \theta}(h_1 w) + \frac{\partial}{\partial y}(h_1 h_2 v) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{u}{h_1} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{w}{h_2} \frac{\partial u}{\partial \theta} + v \frac{\partial u}{\partial y} + K_2 w^2 = -\frac{1}{\rho h_1} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2)$$

$$\frac{u}{h_1} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{w}{h_2} \frac{\partial w}{\partial \theta} + v \frac{\partial w}{\partial y} - K_2 u w = -\frac{1}{\rho h_2} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (3)$$

ここで、 u , w は物体表面に平行な速度成分で、それぞれ母線方向、周方向である。また、メトリック係数は以下のように表される。

$$h_2 = 2R (x/R)^{1/2} : \text{放物体} \quad h_2 = b (1 - (x/a)^2)^{1/2} : \text{楕円体}$$

$$h_1 = (1 + (\partial h_2 / \partial x)^2)^{1/2}$$

先端付近での特異性をNose-Coordinateで除き去り、 $X > 2X_{stag.}$ については通常の曲線直交座標を用いた。

3. 3. グラフィックスのためのデータ処理

数値結果を千葉大計算センタのグラフィックス装置 (GRAPHICA M-1008) とグラフィックス・ソフトウェアを用いてグラフィック表示する場合、まず数値結果をソリッドモデル・ソフト (MOVIE. BYU, GRASP) の入力データ形式に適合するよう再構成し、次にそのデータを入力データとして、ソフトを会話型で起動することになる。

このソフトでは物体形状を多角形要素の集合体として入力することとなり、このときのデータ形式は、表示する物体をいくつかの部品に分割する場合、その部品数、そして全節点数、各節点のデカルト座標の並び、それぞれの節点座標に入力順に通し番号がつくものとし、各多角形要素の各頂点に対応する節番号の並びなどである。

その他、各節点に対するスカラーデータ、ベクトルデータを入力し、カラーフリンジ表示も可能であるが (自動的にベクトル表示する機能はない)、実際の可視化との比較が容易であるような像を形成するため、ここでは上述の形状データをうまく用いて速度ベクトル、流線などを表示させている。例えば、限界流線の表示などでは節点数約4000、760KBほどのデータをソリッドモデルでは必要とする。

このソフトでは、あくまでも多角形要素の集合体として表示するため、むしろ単純な"線"の表示は他のソフトとの併用などが必要となり簡単ではない。ここでは、オールドットパターンやタフト法的表示、すなわちベクトル表示は三角形により、また流線は微小な四角形の連続によって表示している。

また、隠線消去 (隠面消去) が自動的に行なわれるため、面と面の交差線では、視点から遠い側の面は消去され隠れた形になるため、これをうまく利用すれば、例えば、あるパネルを途中から埋没させれば、没した部分はみえず、それを繰り返せば破線表示も可能である。

ここまでは、入力データに対する操作であり、ホストコンピュータM-280 において通常のプログラムで作成する。次にソフトを起動し、作成したデータを読み込み、ここでM-1008にアクセスされ画面表示を行うが、この会話型ソフトには約20のコマンドがある。色の指定は三原色のレベルと混合比により、部品毎に指定できる。また、光源の位置、輝度、反射率、視点からの距離、物体の角度、シェイディングの有無などを画面表示の際指定する。

NUMERICAL SOL.

Fig.7 Limiting Stream Line; Oil Dot

4. 考察

Boxスキームによる差分法は境界層内速度場を与え、壁面せん断力が算出できる。そのせん断力ベクトルを、実験のようにオイルドットパターンでFig. 7に示す。このせん断力ベクトルをつなげて、Fig. 9のような限界(limiting)流線が得られる。ある位置から周方向逆流が起こり、Zig-Zag Boxが用いられるが、各Xで風上対称線からの周方向マーチングが発散した点を<剝離点>とみなし、それより背後は本解法では扱うのに問題があるので、破線で示すように限界流線を予測した。このパターンはFig. 8の電解法による我々の水槽実験での限界流線パターンと定性的によく合っている。矩形翼(NACA 0012)と楕円体との組合せ模型から成る翼胴結合での数値解によるオイルドットパターンはFig. 10に、限界流線はFig. 11に示される。それぞれ翼近くでの終端が境界層差分の発散点で、剝離点を予測していると思われる。Fig. 10で顕著のように翼前縁近くでは剝離線は翼形状と相似なカーブを持っている。この模型では、翼のやや下前方 $X = -0.584$, $\theta = 21.6^\circ$ (翼中央弦から 24° 風上)で剝離域の前端が現れる。

5. 結言

1. 物体上の非粘性速度および、境界層方程式の差分法から得られる限界流線がコンピュータ・グラフィックスにより可視化実験の再現に近い像の状態であられた。

2. 結果の表示にあたっては三次元グラフィックスは多量の情報を一画面で伝え得るが、精細な検討は断面のXYプロッタ図で行うのが良策とおもわれる。

参考文献

- [1] Hung, C.M. & Buning, P.C., J. Fluid Mech. Vol. 154, pp163-185 (1985).
- [2] Fujii, Ko., & Ohbayashi, S. AIAA-Paper 86-0513 or Himeno, R. et al. AIAA-Paper 85-1617.
- [3] Murakami, S. et al. Proc. Intn. Sympo. on Computational Fluid Dynamics Tokyo pp728-739 (1985)
- [4] 広瀬直喜, 日機誌, 1985年6月号
- [5] Nishikawa, N., Transactions of Jpn Soc. Aer. & Space sciences, Vol. 28, No. 79, p27 (1985).
- [6] 柳沢三憲, 主として航技研TR-724 (1982).
- [7] Nishikawa, N., 2nd Sympo. Numerical and Physical Aspects of Aerodynamic Flows, Long Beach, p10-35 (Jan, 1985).
- [8] 西川進栄ら, 航空宇宙学会年會講演集 (1986, 4)

Fig. 8 Experiment

NUMERICAL SOL.

Fig. 9 Limiting Stream Line and Separation Lines

Fig. 10 Limiting Stream Line; Oil Dot

NUMERICAL SOL.

Fig. 11 Limiting Stream Line