

# 計算による 3次元非定常流れの可視化

藤谷 克郎\* 姫野 龍太郎\*\*

## Visualization of the Computed Unsteady Flow in Three Dimensions

by

Katsuro FUJITANI and Ryutaro HIMENO  
*Nissan Motor Co., Ltd.*

### ABSTRACT

Three-dimensional unsteady flow of the viscous incompressible fluid is calculated by using a finite-difference method and visualized by a graphic workstation. A grid system around an automobile has a multi-grid structure and is generated by a trans-finite-interpolation method. The number of grid points is  $112 \times 73 \times 56$  and the Reynolds number based on the length of the automobile is 5,000,000. The calculation of a flow field is done on Fujitsu VP200 and its computational time is about 20 hours. Computed flow fields of 200 time steps are stored in magnetic tapes. Using them, streak-lines are calculated on a mini-supercomputer C-1 and even then visualized on a graphic workstation IRIS 4D. A motion film is taken the screen of IRIS 4D frame by frame using a computer-controlled VTR system. A longitudinal vortex on the side-window is almost steady. However, the other vortices, such as a horse-shoe vortex in front of the front windshield and vortices on the rear-window, show periodical changes and are shed one by one. It is found that a motion film makes the unsteady three-dimensional flow understandable and inevitable. Also, the amount of the data of the three-dimensional unsteady calculation is so huge that adequate shortening of data is necessary.

### 1. ま え が き

スーパーコンピュータと計算手法の進歩により、計算流体力学は大きく発展してきた。現在、航空機の周りの流れの解析を中心に、いろいろな3次元の大規模な解析[1]がおこなわれている。流れの計算では結果の可視化は流れ場の理解に欠かせないものであるが、3次元の非定常の結果を動的に表示した例は少ない。ここでは、自動車を例に、物体周囲の

3次元非定常粘性流の計算とその動画化を試みたので報告する。

### 2. 基礎方程式

自動車周りの流れは非圧縮性である。静止流体中を速度  $v_0$  で移動する自動車に固定した座標系から見た連続の式とナビエ-ストークス方程式は次式のようなになる。

- 連続の式

$$\nabla \cdot v = 0$$

(1)

- ナビエ-ストークス方程式

\* 日産自動車開発システム部

\*\* 日産自動車中央研究所車両研究所

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P + \frac{1}{R_e} \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

また圧力に関するポアソン方程式は次式のようになる。

$$\nabla^2 P = -\nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{\partial D}{\partial t} - \mathbf{v}_0 \cdot (\nabla D) \quad (3)$$

ただし、 $D = \nabla \cdot \mathbf{v}$ である。この式の右辺は連続の式から0であるが連続の式の誤差の修正項として  $-\frac{D}{\Delta t}$  とおく。すると、このポアソン方程式は以下のようになる。

$$\nabla^2 P = -\nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \frac{D}{\Delta t} - \mathbf{v}_0 \cdot (\nabla D) \quad (4)$$

この式とナビエ-ストークス方程式を一般座標系に変換し、差分化する。このとき、時間微分は2次の陰的オイラー、空間微分は対流項には3次精度の風上差分、それ以外は2次精度の中心差分を用いた。

### 3. 計算格子

格子生成には multi-block transformation [2] を

用いた。図1に示すように、自動車とその周りを18個のブロックに区分し、それぞれのブロックで格子を生成する。

このブロックの格子生成ではまず最初に境界面の格子分布をきめる。自動車表面はCADデータで与えている。これらの境界面の格子分布から transfinite 法 [3] を使って、各ブロックの格子を生成する。内挿には次式を用いた。

$$\begin{aligned} f_{0i,j,k} &= (1 - \alpha_{i,j,k}) f_{1,j,k} + \alpha_{i,j,k} f_{imax,j,k} \\ f_{1i,j,k} &= f_{0i,j,k} + (1 - \beta_{i,j,k}) (f_{i,1,k} - f_{0i,1,k}) \\ &\quad + \beta_{i,j,k} (f_{i,jmax,k} - f_{0i,jmax,k}) \\ f_{i,j,k} &= f_{1i,j,k} + (1 - \gamma_{i,j,k}) (f_{i,j,1} - f_{1i,j,1}) \\ &\quad + \gamma_{i,j,k} (f_{i,j,kmax} - f_{1i,j,kmax}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで  $f$  は座標  $(x, y, z)$  を表し、 $\alpha, \beta, \gamma$  は0から1までの値をとる単調な内挿関数である。この内挿関数の値には境界面を取り囲む曲線の弧長を用いた。こうして生成したブロックをつなぎ合わせて全体の格子を作り、最後に平滑化と表面の直交化を行った。図2は物体表面と中心断面の格子のようすである。計算空間は自動車前方及び後方に車体長の2倍及び10倍、幅方向及び高さ方向に全幅及び

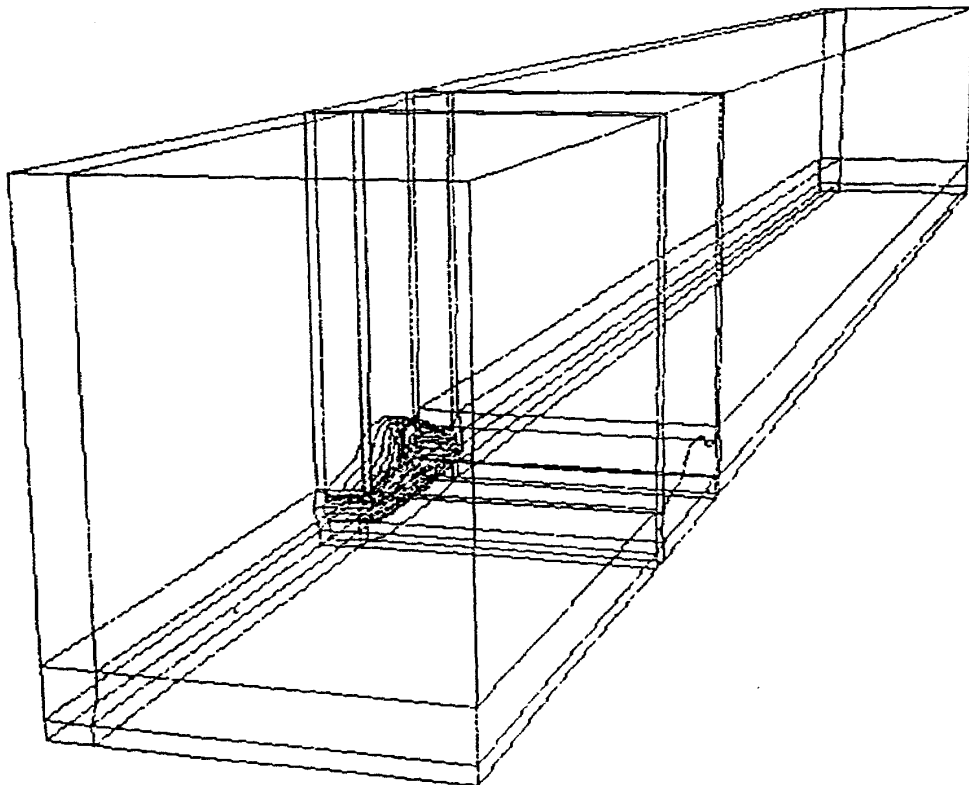


図1 ブロックの構成

全高の5倍にとっている。格子点数は  $112 \times 73 \times 56$  の約45万点、非計算格子は  $70 \times 31 \times 18$  である。また物体表面に垂直な方向の最小格子幅は車体長を1とすると  $1/4000$  で、計算の  $R_e$  数は5,000,000である。

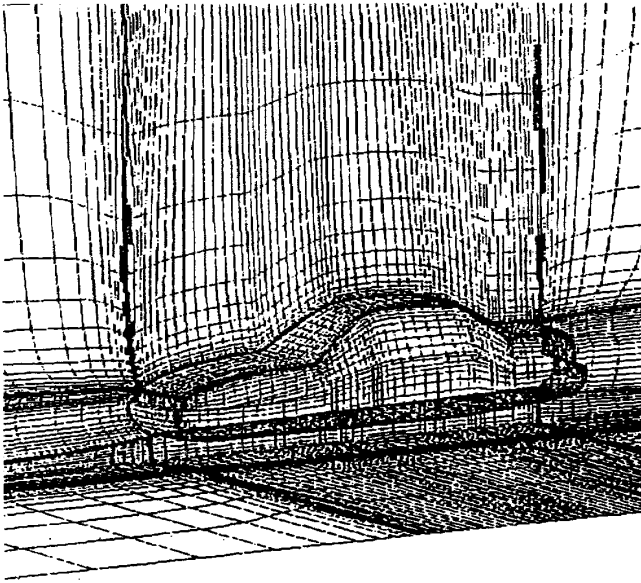


図2 計算格子

#### 4. 計算機システム

計算機ハードウェアとデータの流れを図3に示す。ミニスーパーコンピュータC-1はテスト計算と流跡線などの仮想粒子の軌跡計算に、ワークステーションIRISは格子生成と結果の表示に用いている。このIRISにはコマ撮りコントローラを介してVTRが接続されており、動画の作成が行える。流れの計算には、富士通VP200を用いた。

計算結果の可視化は以下の手順で行っている。

- 1) 全格子点の流速、圧力データを磁気テープにおとす。
- 2) このデータをC-1に読み込む。
- 3) IRISでグラフィックスを用いながら仮想粒子の始点を設定する。
- 4) C-1で2)のデータを用いて、3)の仮想粒子の軌跡を計算する。
- 5) 4)の計算結果をIRIS上で表示する。またVTR等に記録する。

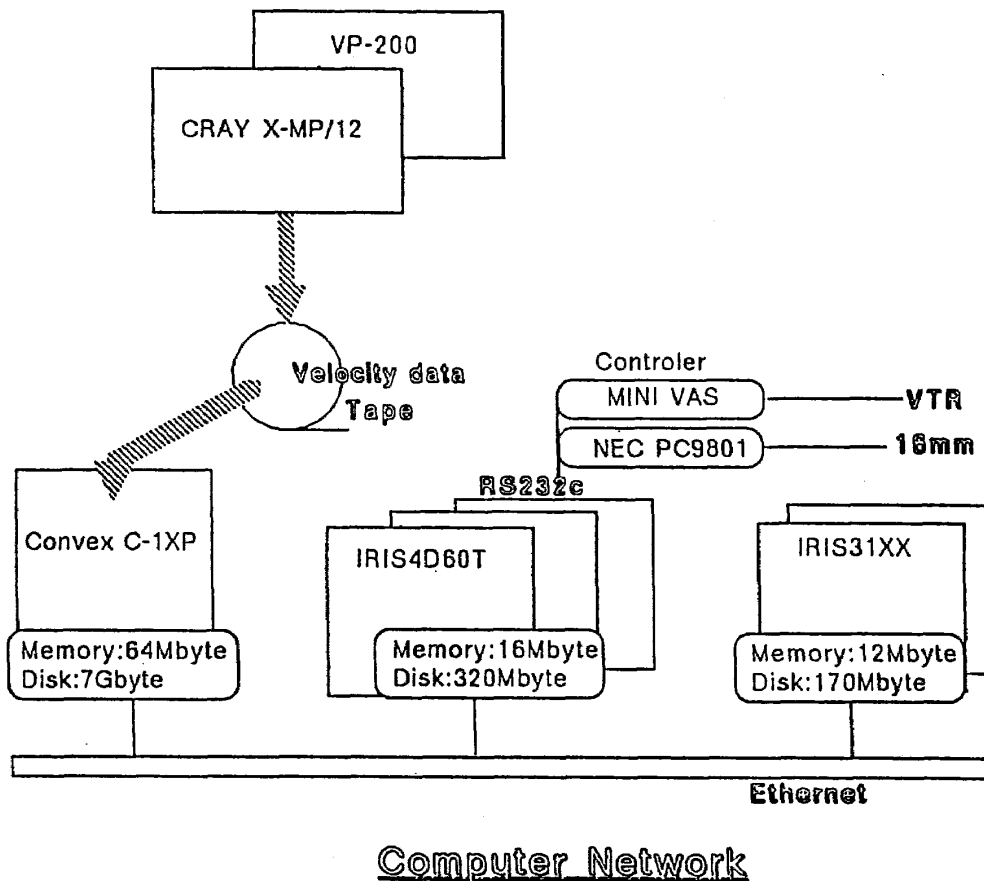


図3 計算機システム

流速と圧力のデータを計算の各ステップ毎に磁気テープに落とすと膨大な量になるので、今回は無次元時刻0.1毎に200ステップ分のデータを使い、仮想粒子の軌跡はそれらを内挿して計算した。この計算には以下に示すような2次精度の積分を用いた。

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{x}^n + \frac{1}{2} \Delta t \mathbf{v}(\mathbf{x}^n)$$

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^n + \Delta t \mathbf{v}(\mathbf{x}^*) \quad (6)$$

これらの可視化のプログラムは全てC言語で記述しており、また仮想粒子の計算プログラムはベクトル化してある。

## 5. 計算結果

車体前面、サイド・ウィンドウの前端、ルーフから仮想粒子を流したときの流跡線を図4～6に示す。

図4ではフロント・ウィンドウとフッドの付け根の部分に馬蹄渦が見られる。この渦は動画では時間とともにウィンドウ上部に押し流されつつ変形し消えてゆき、また発生するという周期的な発生消滅を繰り返している。

図5はサイド・ウィンドウのピラー部分の3角渦を可視化したものである。この渦は厚み(サイド・ウィンドウ表面に垂直方向)の非常に薄い渦となっている。動画で観察するとこの渦の時間的な変化は少ない。

図6は自動車後流の様子である。このリア・ウィンドウ付近の流れを観察すると、図7に模式的に示すような渦糸が発生しているのが分かる。動画ではこの渦糸は時間とともに下方に押し流されて行く。

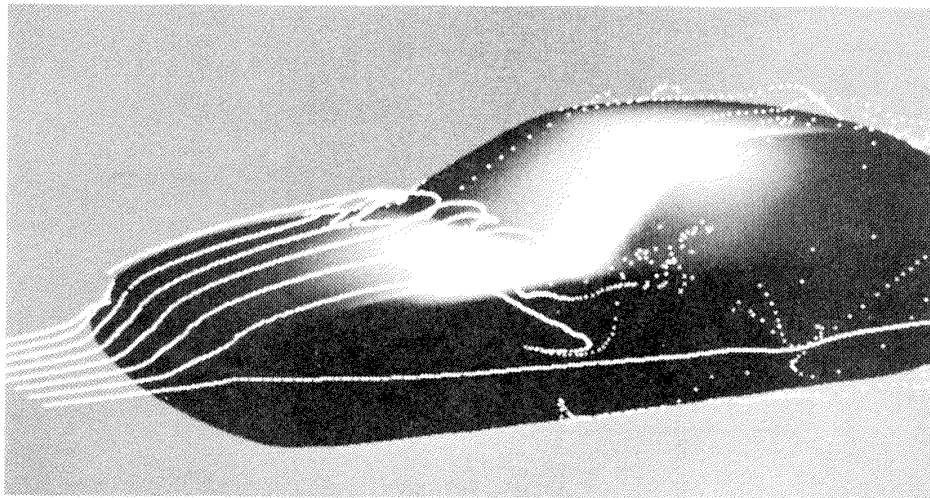


図4 自動車前半部の流れのようす

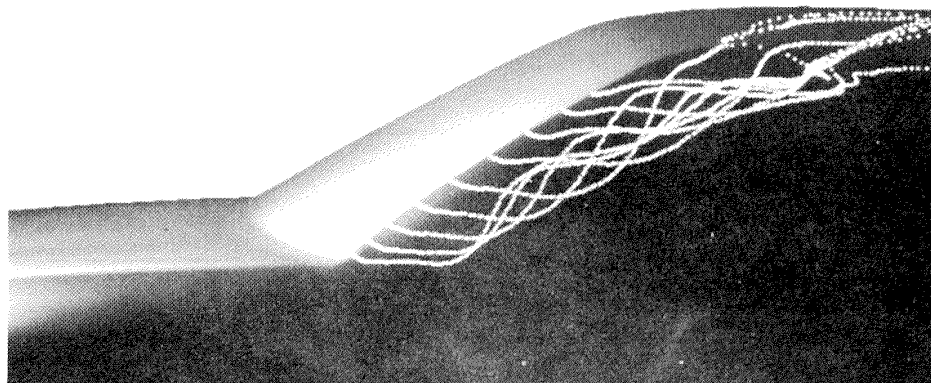


図5 サイド・ウィンドウ付近の流れのようす

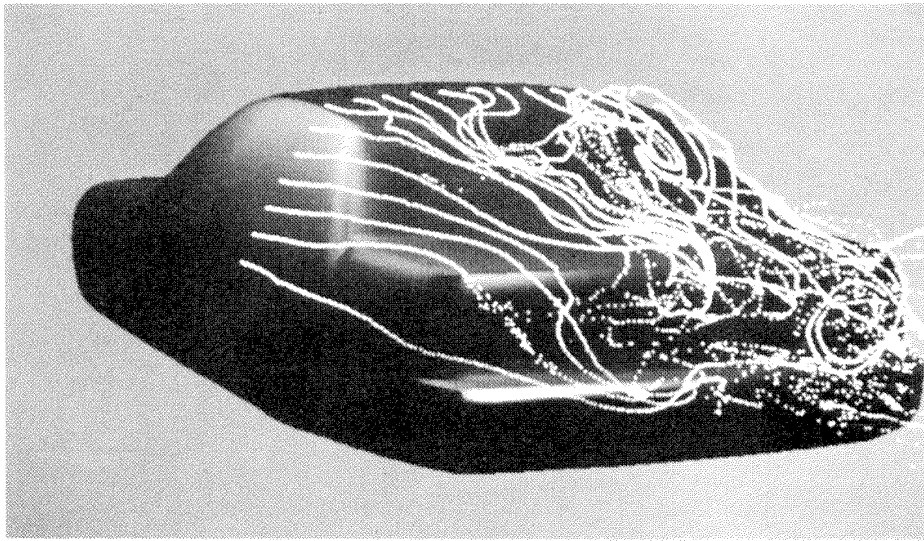


図6 後半部の流れのようす

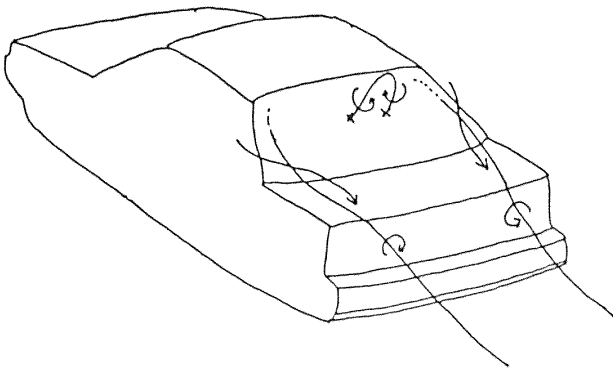


図7 後半部の流れの模式図

## 6. 結 論

自動車の周りの流れを計算し、VTRを用いて動的な可視化を行った結果、時間的に変化する流れの様子が直感的に把握できることがわかった。車体周囲に出来る渦のうち、サイド・ウィンドウにできる三角渦は定常的であるが、他の渦は非定常的な振る

舞いをする。また、ミニ・スーパー・コンピュータとワークステーションを用いることにより比較的短時間に動画が作成できるが、データ量が多いため適当な簡略化が必要ながわかった。

## 参 考 文 献

- 1) Obayashi, S., Fujii, K. and Takanashi, S., "Toward the Navier-Stokes Analysis of Transport Aircraft Configurations", AIAA paper 87-0428, 1987.
- 2) Sawada, K. and Takanashi, S., "A Numerical Investigation on Wing/Nacelle Interfaces of USB Configuration", AIAA paper 87-0455, 1987.
- 3) Tompson, J.F., Warsi, Z.A.U., and Mastin, C.W., "Numerical Grid Generation: Foundations and Applications", North-Holland, 1985.

