

3次元後流の構造 II

姫野 龍太郎* 加茂 圭介** 坪井 一洋***
 白山 晋**** 桑原 邦郎*****

Computational Study of Three-Dimensional Wake Structures

Second Report

by

Ryutaro HIMENO

Nissan Auto Co., Ltd.

Keisuke KAMO

Fuji Heavy Industries Ltd.

Kazuhiro TUBOI

Japan Information Service

Susumu SHIRAYAMA

University of Tokyo

Kunio KUWAHARA

Institute of Space and Astronautical Science

ABSTRACT

Three-dimensional wake structures past bluff bodies were investigated by solving incompressible Navier-Stokes equations numerically. The effect of the Reynolds number on the flow around a slender body and of the base slant on the flow past a circular cylinder with a base are discussed in this second report. The flow around an automobile is also computed.

In the high-Reynolds-number flow, a pair of vortex tubes observed in the low-Reynolds-number flow is split into several pairs. A pair of vortex tubes parallel to the free stream, which is observed in the flow past a circular cylinder with a slanted base, becomes stable and influences the drag coefficient. It is found that the third-order upwind differencing scheme in the generalized coordinate system used in this paper is also effective in calculating the flow around a bluff body with a rather complicated geometry, such as an automobile.

1. ま え が き

3次元の鈍い物体を過ぎる流れは、可視化も困難なため、その後流構造はあまり明らかにされていない。前報¹⁾では、円錐や球などの単純形状の物体周

* 日産自動車

** 富士重工

*** 日本情報サービス

**** 東大・工(院)

***** 宇宙研

囲の流れを差分法による数値計算で求め、一對の渦が後流で共通に見られ、重要な働きをしていることを報告した。

本報では、細長物体の後流のレイノルズ数による変化や切断面を持つ円柱の切断角による流れの変化、より複雑な形状である車体周囲の流れを解析した結果について報告する。計算手法は前報同様3次の風上差分を用いた。

2. 計算手法

非圧縮性粘性流の基礎方程式は以下に示す連続の式とナビエ・ストークス方程式である。

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta u \tag{2}$$

この2式から次に示す圧力のポアソン方程式を導くことができる。

$$\Delta p = -\nabla \cdot (u \cdot \nabla)u + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{3}$$

ここで、 $D = \nabla \cdot u$ である。連続の式から $D = 0$ であるが、誤差のために一般には0にはならない。そこで、差分化したときの n 番目の時間ステップでの誤差を修正項として残し、次式を得る。

$$\Delta p = -\nabla \cdot (u \cdot \nabla)u + \frac{D^n}{\Delta t} \tag{4}$$

こうして得られた(4)式と(2)式を一般曲線座標系で表現し、差分化して解く。差分化するにあたって、(2)式の対流項以外の空間微分は2次の中心差分を用い、対流項には3次の風上差分を用いる。また、時間方向の積分には1次の陰的オイラー法を用いる。

3. 計算結果

(1) 細長物体を過ぎる流れ

ロケットを模した細長物体の回転軸に垂直に流れ

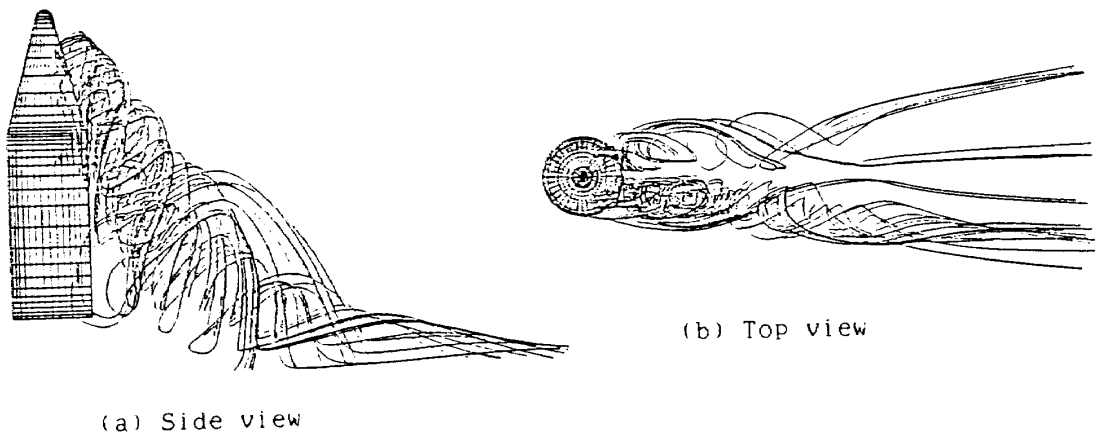


図1 レイノルズ数1,000での流線
($t=60$, 格子点数 $51 \times 37 \times 31$)

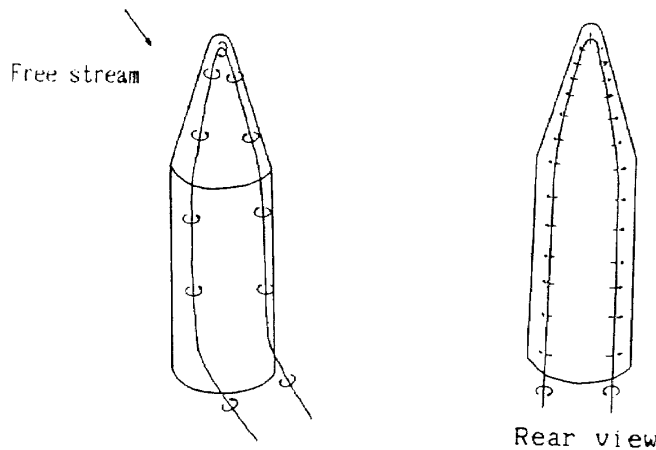
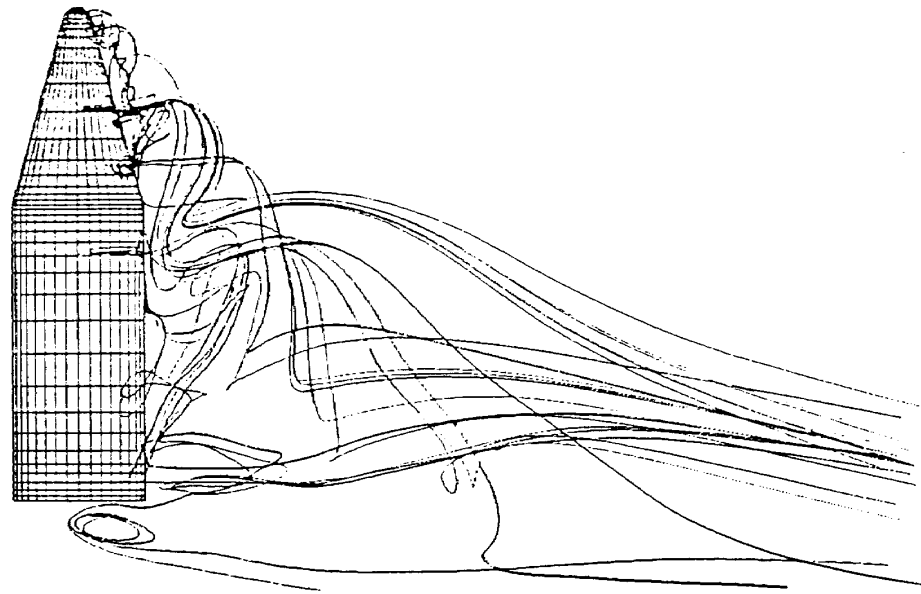
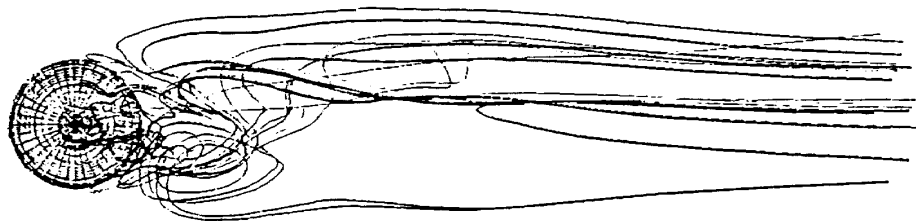


図2 レイノルズ数1,000で後流に見られるU字型の渦管の模式図



(a) Side view

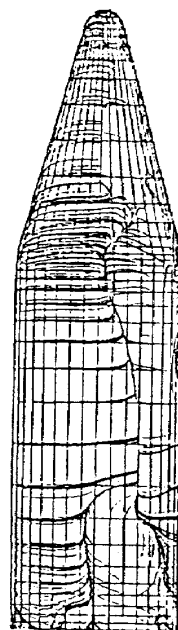


(b) Top view

図3 流線 ($Re = 250,000$, $t = 26$, 格子点数 $51 \times 37 \times 31$)



(a) Rear view



(b) Side view

図4 表面の流線 ($Re = 250,000$, $t = 26$, 格子点数 $51 \times 37 \times 31$)

があたった場合の流れを解析した。計算は 1,000, 250,000, 300,000 の3種類のレイノルズ数で行い、図1から8に計算結果を示す。計算時間はS810-20でそれぞれ6, 6, 27時間であった。

レイノルズ数が1,000の場合には図2の模式図のよ

うに左右対称なU字形の渦管が形成され、後流域は広がっている。レイノルズ数250,000の場合には、対称性は失われ、複数の渦管の対が観察される。また、後流域は1,000の場合よりも狭くなっている。300,000の場合には、さらに流れは複雑になり、観察

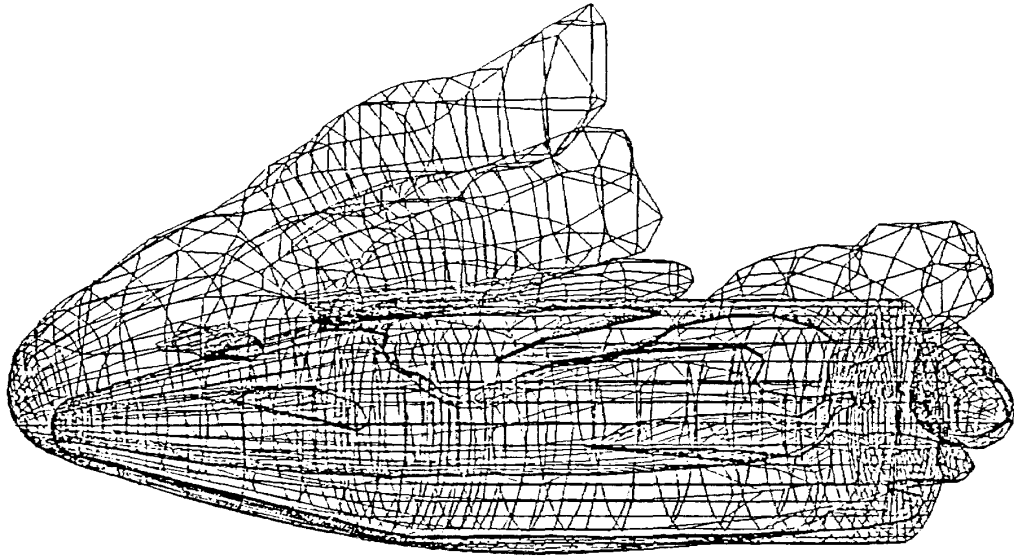
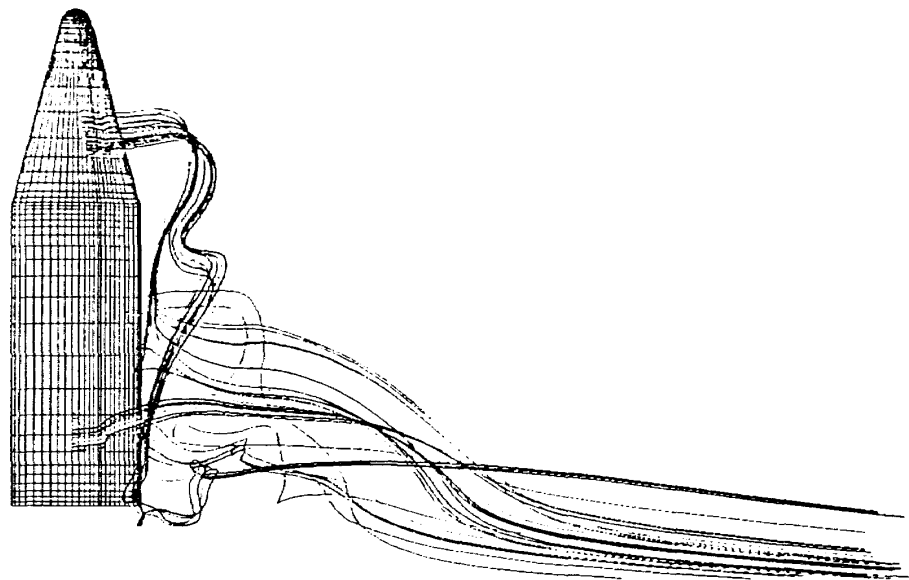


図5 等圧面 ($Re = 250,000$, $t = 26$, 格子点数 $51 \times 37 \times 31$)

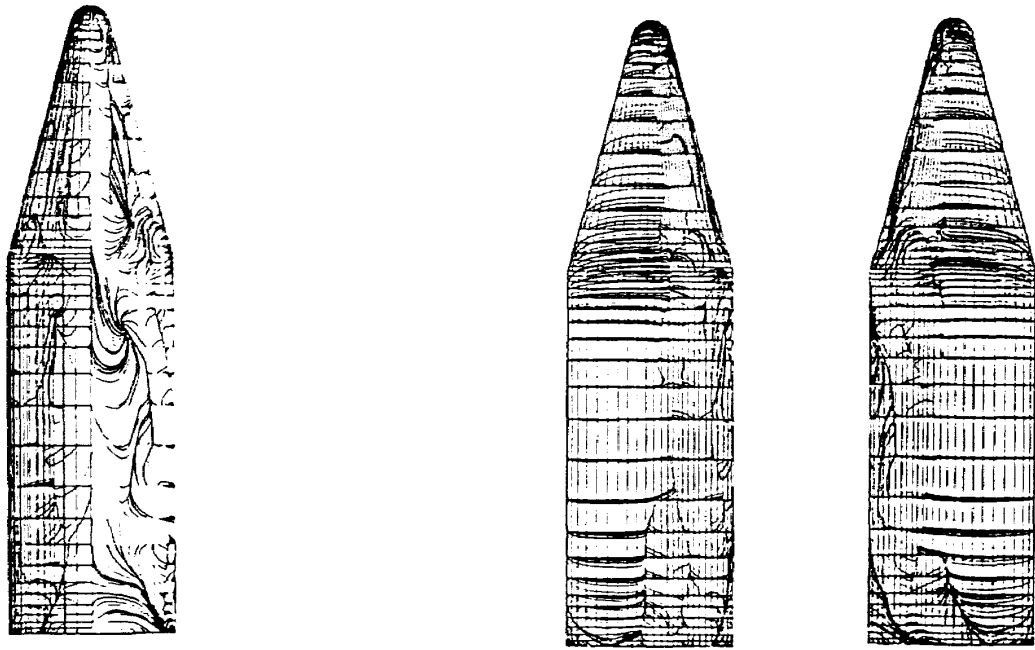


(a) Side view



(b) Top view

図6 流線 ($Re = 300,000$, $t = 13$, 格子点数 $61 \times 53 \times 37$)



(a) Rear view

(b) Side view

図7 表面の流線 ($Re = 300,000$, $t = 13$, 格子点数 $61 \times 53 \times 37$)

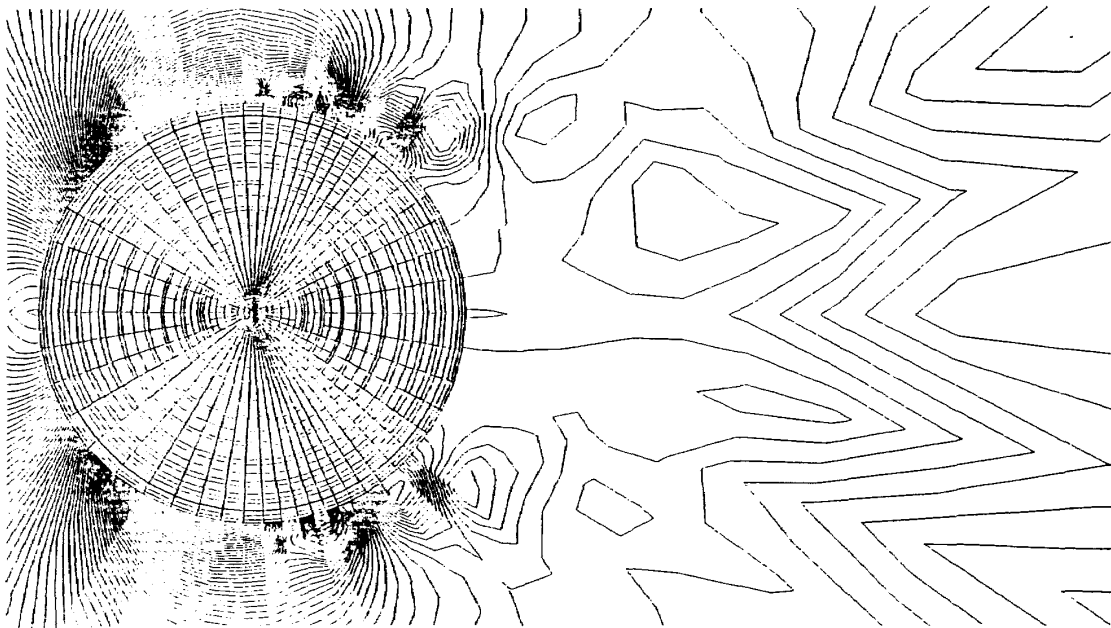


図8 円柱部分に垂直な格子面における等圧線
($Re = 300,000$, $t = 13$, 格子点数 $61 \times 53 \times 37$)

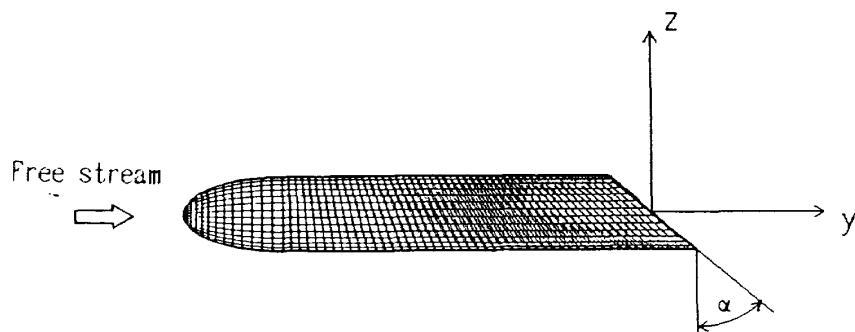


図9 切断面を持つ円柱 (格子点数 $80 \times 32 \times 40$)

される渦管の対の数が多くなっている。円柱部分の垂直断面での圧力分布からは、臨界レイノルズ数を越えた2次元の円柱周囲の流れに見られるような、小さな渦の放出と狭まった後流域が観察される。

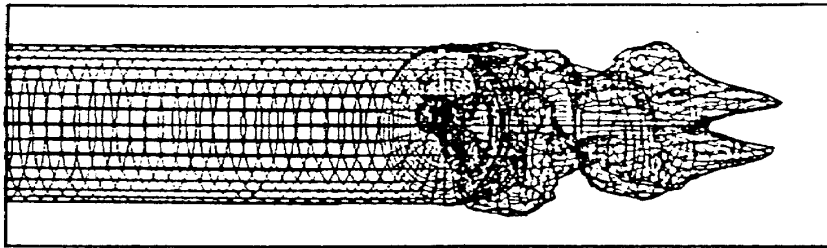
(2) 切断面を持つ円柱を過ぎる流れ

図9に示すような切断面を持つ円柱に平行に流れがあたった場合、切断面の角 α により流れの状態が変化し、 C_d が急変することが知られている²⁾。0から60までの8種類の角度でレイノルズ数100,000の場合の流れを計算し、このようすを調べた。計算はVP200で行い、計算時間はそれぞれ約3時間であった。図10は40度の場合の計算結果で、縦渦は非常に弱く、流れ場は非対称である。これに対し、

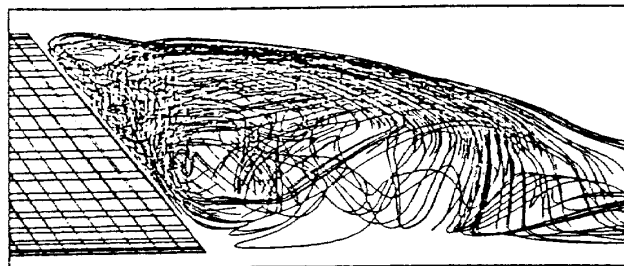
図12の50度の場合には縦渦も強く、対称性も良い。切断角によって図13に示すように C_d は変化するが、これはこの縦渦によって切断面の負圧が変化することによるようである。

(3) 車体周囲の流れ

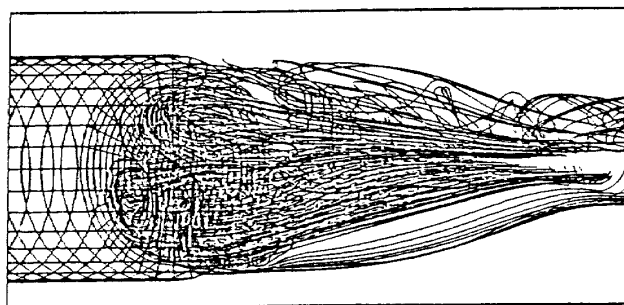
図13に示すように簡略化した車体を地面に接して置いた場合の流れを車体の幅を基準としたレイノルズ数10,000で計算した。計算はVP200を用い、計算時間は約1時間であった。図14で車体前方に見られる馬蹄渦は走行している車両では観察されないが、平板上に物体が接して置かれた場合に特徴的に見られる現象である。図14と図15のフロントウィンドからサイドウィンドにかけての角部では剥離



Top view of contour surface of the pressure

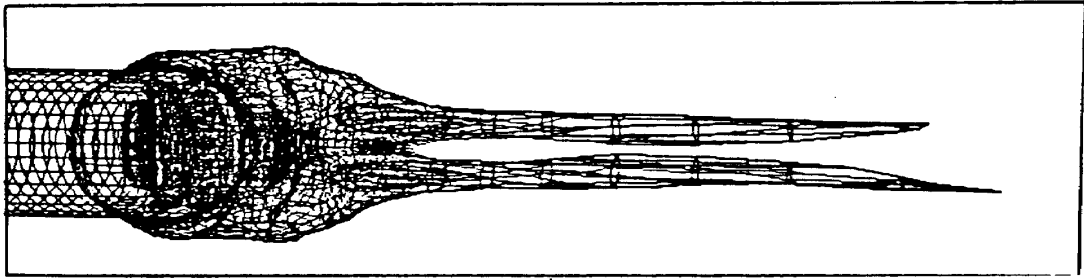


Side view of streamlines

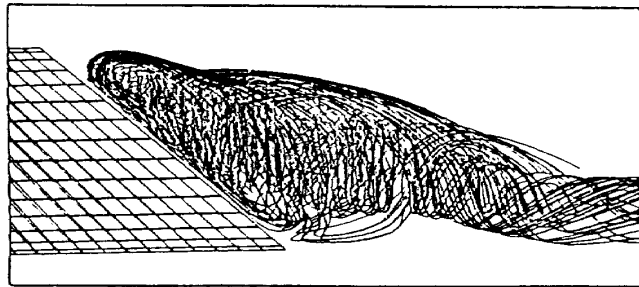


Top view of streamlines

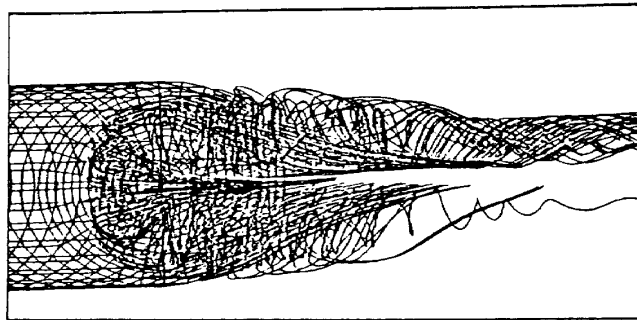
図10 切断角40度の場合の等圧面と流線 ($t=50$)



Top view of contour surface of the pressure



Side view of streamlines



Top view of streamlines

図11 切断角50度の場合の等圧面と流線 ($t=50$)

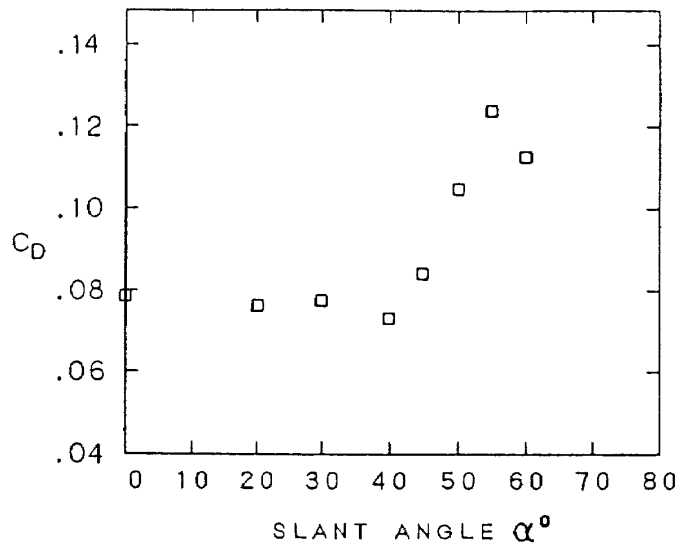


図12 切断角による C_d の変化

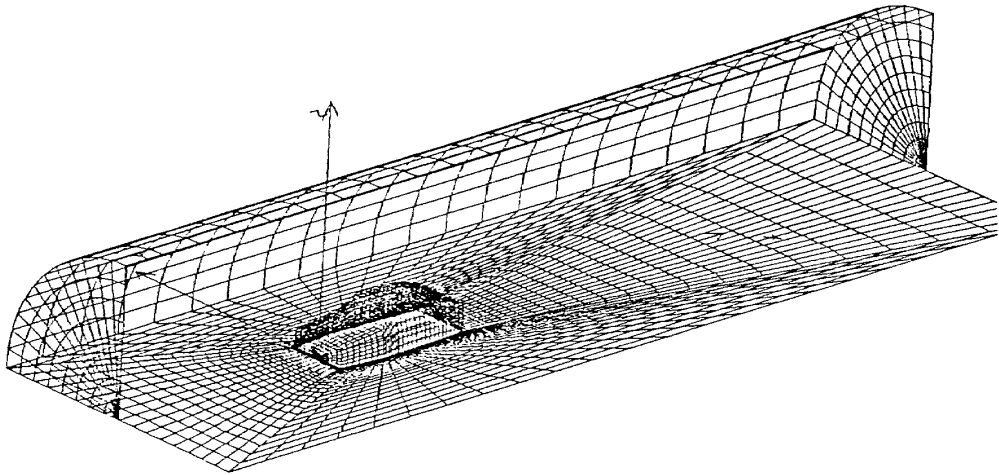


図13 車体表面と地面，外側境界の格子分布
(格子点数 $32 \times 24 \times 30$)

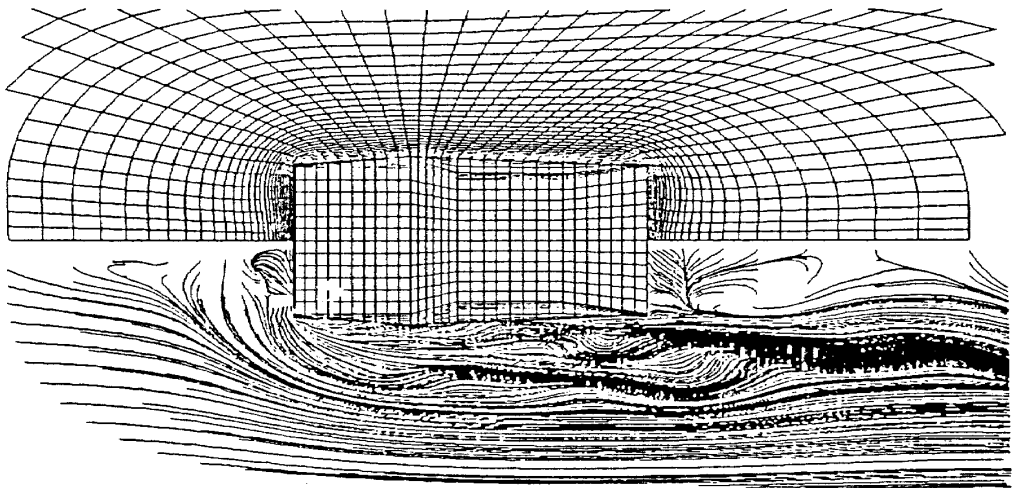
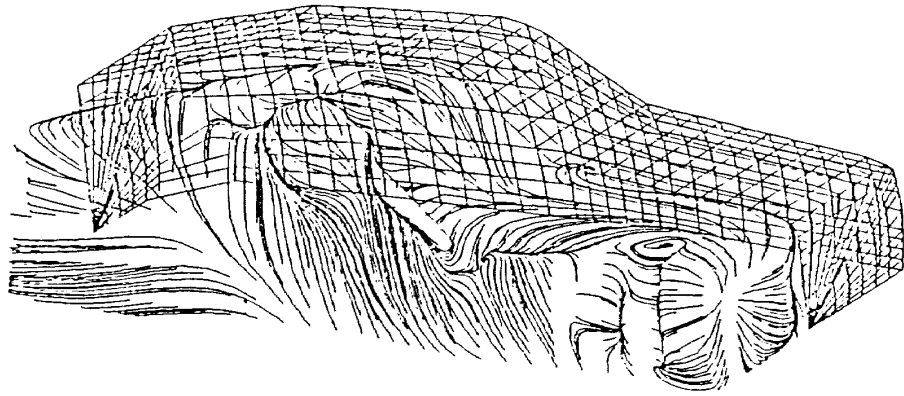
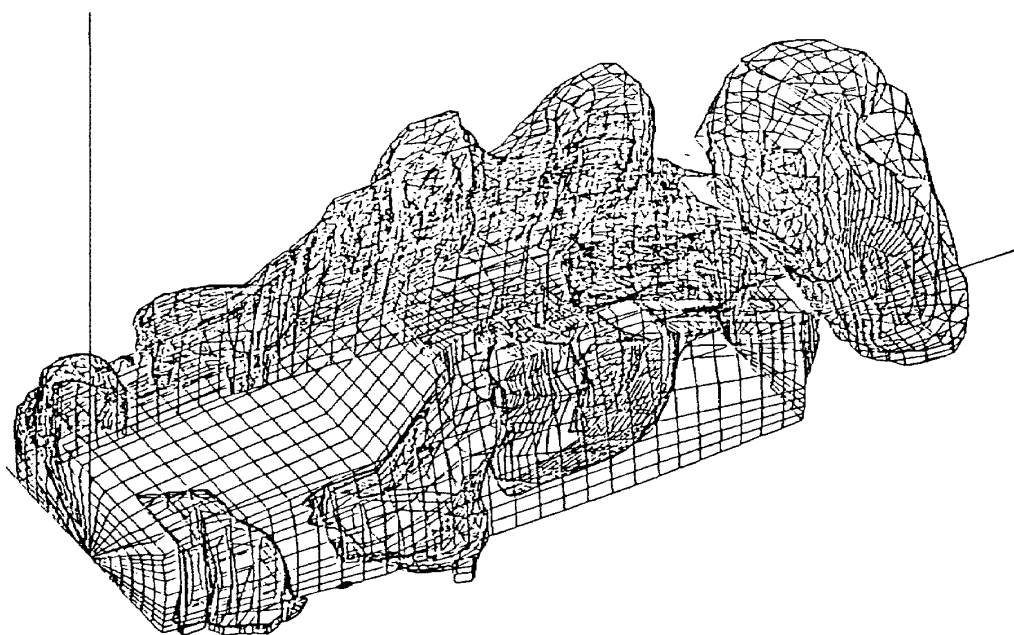


図14 車体と地面表面での流線 ($t=10.0$)

図15 等圧面 ($t=10.0$)

が見られ、この部分での圧力は低くなっており、実験で観察される現象³⁾と一致する。

4. 結 論

鈍い3次元物体の後流で、レイノルズ数が低い場合に顕著に現れていた一対の渦管は、レイノルズ数が高くなるといくつにも分かれ、複雑な流れ場を形成する。一様流と平行に後流に延びる渦管は安定で、この存否、強弱は C_d に大きな影響を与える。また、本報で使用した一般座標を使う3次の風上差分法は、比較的複雑な形状でも容易に計算でき、有効な方法である。

参 考 文 献

- 1) 姫野他：“三次元後流の構造”，航空機計算空気力学シンポジウム講演論文集，1985.
- 2) T. Morel: The Effect of Base Slant on the Flow Pattern and Drag of Three-Dimensional Bodies with Blunt Ends, Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles, Plenum Press, 1978.
- 3) 流れの可視化学会編，“流れのファンタジー”，ブルーバックス，講談社.

