

二次元断面をもつ有限長の三次元物体をすぎる 流れの構造

白 山 晋* 太 田 高 志** 桑 原 邦 郎***

Three-Dimensional Flow Past a Two-Dimensional Body

by

Susumu SHIRAYAMA

Department of Engineering, University of Tokyo

Takashi OTA

Department of Engineering, Keio University

Kunio KUWAHARA

Institute of Space and Astronautical Science

ABSTRACT

By solving the three-dimensional incompressible Navier-Stokes equations, the development of three-dimensionality was investigated in a flow around a circular cylinder placed between side walls. Also, the case of a circular cylinder with an infinite spanwise length was treated using a periodic boundary condition. Initial vortex development and the development of spanwise vortical-pattern are intensively visualized to see the three-dimensional structure.

In the initial stage, the flow was almost two-dimensional. The two-dimensionality was kept in the first separation but as the flow developed, the wake became strongly three-dimensional. Also, in the developed stage, a large horse-shoe vortex was observed in front of the cylinder near the wall.

1. 緒 言

従来、二次元断面をもつ有限長の物体を過ぎる流れ場は、流れの二次元性を仮定することにより、二次元ナビエ・ストークス方程式を支配方程式として解析が行なわれてきた。ところが、数値解を実験結果と比較すると、流れ場の三次元性により両者が一

致しない場合がある。いくつかの実験結果は^{1,2)}、流れ場に置かれた物体の長て方向に対しての流れの三次元性を示唆している。この場合、流体の三次元運動の誘起は、物体のアスペクト比は充分大きく端板または風洞壁の影響が小さいときには、長て方向の渦度場の不安定性による三次元運動の発生が、アスペクト比が比較的小さいときには、風洞壁干渉、または、物体の端から発生する渦が原因と考えられている。

本稿では、固定壁で支持されている有限長の円柱

* 東大工 (院)

** 慶応理工 (院)

*** 宇宙研

をすぎる流れ場を、非圧縮性のナビエ・ストークス方程式を数値的に解くことで解析した。初期渦の時間的変化、その後、形成されるカルマン渦列に現われる三次元的な波状の構造（二次不安定性）、円柱前面の首飾り渦、壁がある影響でできる円柱後流側のアーチ状の渦等、流れ場の三次元構造が捉えられた。

2. 計算手法

非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を、差分法を用いて数値的に解く。基本量として、速度と圧力を持ちいる。この場合、連続の方程式と圧力の扱いは、ナビエ・ストークス方程式を直交分解することで導かれる圧力方程式を解くことに帰着される³⁾。ナビエ・ストークス方程式に現われる非線形項は、三次精度の風上差分により近似し、時間発展は、オイラーの陰的差分によって行なう⁴⁾。

3. 結果

物体形状、及び格子図を図 1 に示す。円柱の直径を D 、スパン長を L とし、円柱の両端は、固定壁で支持されている。

計算は、直径 D を 1、スパン長 L を 2、直径を基準としたレイノルズ数を 10000 とし行なった。格子は、 $51 \times 73 \times 33$ 点と、 $50 \times 100 \times 50$ 点のふたつのものを用いたが、定性的な違いは現われなかった。

初期段階では、二次元計算で見られる双子渦の発達が捉えられ、スパン方向に対する三次元性は、発達中の首飾り渦に起因して、円柱前面の固定壁近傍に現われる。図 2 に円柱表面と側壁上の圧力分布を示す。

図 4 に円柱上面と下面の圧力分布を示す。円柱表面の圧力分布から、流れの三次元性が、顕著に現われていることがわかる。また、壁面上において、円柱前面淀み点の上流で高圧部が現われるのは、首飾り渦による吹き下ろしによるものと思われる。図 3 に円柱中心の対称面での圧力分布と速度分布を示す。二次元計算で現われるカルマン渦は、この図では明確には捉えられていない。これは三次元的な拡散によるものと考えられる。図 5 に円柱前面と後面の対

称面における表面流線図を示す。前面での首飾り渦による巻き込み、後面での三次元的な流れの振る舞いが捉えられた。図 6 に円柱に対して垂直な二断面での表面流線を示す。第一の剥離までは流れは二次元である。ところが、流れが剥離し渦度が後流に放出されると、両端が壁についた直線渦が形成され、側壁の境界層のため両端の進行速度と中央部での進行速度が異なり、流れ場は三次元性をもつようになる。図 7 に円柱表面及び側壁の表面流線図を示す。円柱表面後流側の壁近傍で生じている流線の巻き込みは渦点と考えられ、図 5 の後流側の表面流線図を加味すると、円柱表面に端をもつアーチ状の渦が形成されていると思われる。図 8 に円柱風上側から発生させた仮想粒子の軌跡を示す。首飾り渦、第一の剥離点までの二次元性、その後の三次元性が捉えられている。図 9 に後流域における逆流領域の時間発展の様子を、後流側の対称面での表面流線図を用いて示す。図 10 から図 13 は、時間がある程度経過したときの表面流線と粒子の軌跡である。図 14 に抗力係数、揚力係数の時間変化を示す。後流側で大きな逆流領域を形成しているが、カルマン渦列のような周期的な渦構造は顕著には現われない。

次に、スパン方向の両端の境界条件を、粘着境界条件から周期境界条件に変えて計算を行なった。直径 D を 1、スパン長 L を 2、直径を基準としたレイノルズ数を 10000 とし、格子点数は、 $50 \times 100 \times 50$ 点とした。

図 15 に円柱表面及び対称面での圧力分布を示す。

図 16、図 17 に円柱表面及び対称面での表面流線図を示す。対称面での圧力分布、表面流線図から、カルマン渦列が形成されていることが確認されるが、これに三次元性を誘起する二次不安定性が現われていることが物体表面流線及び圧力分布からわかる。図 18 に抗力係数と揚力係数の時間変化を示す。抗力係数の時間平均は、1.07、ストローハル数は、0.2 であった。

4. 結論

二次元断面をもつ両端を壁に支持された三次元物体を過ぎる流れでは、中心付近および物体近傍に於いては二次元的な流れが生じ、壁近傍では、首飾り

渦, アーチ状の渦等, 三次元的な構造をもつ渦が現われる。

本稿の計算のようにスパン長の短いものでは, 二次元計算で現われるようなカルマン渦列は側壁の影響で現われない。これだけでは, 流れ場の三次元性は側壁の影響で現われると結論づけることになる。しかしながら, 一端, 渦度が後流側に放出されると渦上に現われる二次不安定性により三次元性が生じることが, 境界条件を変えた計算で確認された。側壁がある場合にも, 物体表面に現われる流れ場の波状の構造は, この二次不安定性によるものであると思われる。

参 考 文 献

- 1) Freymuth, P., Finaish, F. and Bank, W.: Three-dimensional Vortex Patterns in a Starting Flow, *J. Fluid Mech.* 161, pp. 239-248.
- 2) Taneda, S.: Irregular Flows. *Proceedings of the Third Asian Congress of Fluid Mechanics*, pp. 3-14.
- 3) Takami, H. and Kuwahara, K.: Numerical Study of Three-dimensional Flow within a Cubic Cavity. *J. Phys. Soc. Japan* 37, 1965.
- 4) Kawamura, T. and Kuwahara, K.: Direct Simulation of a Turbulent Inner Flow by Finite Difference Method, AIAA-85-1617.

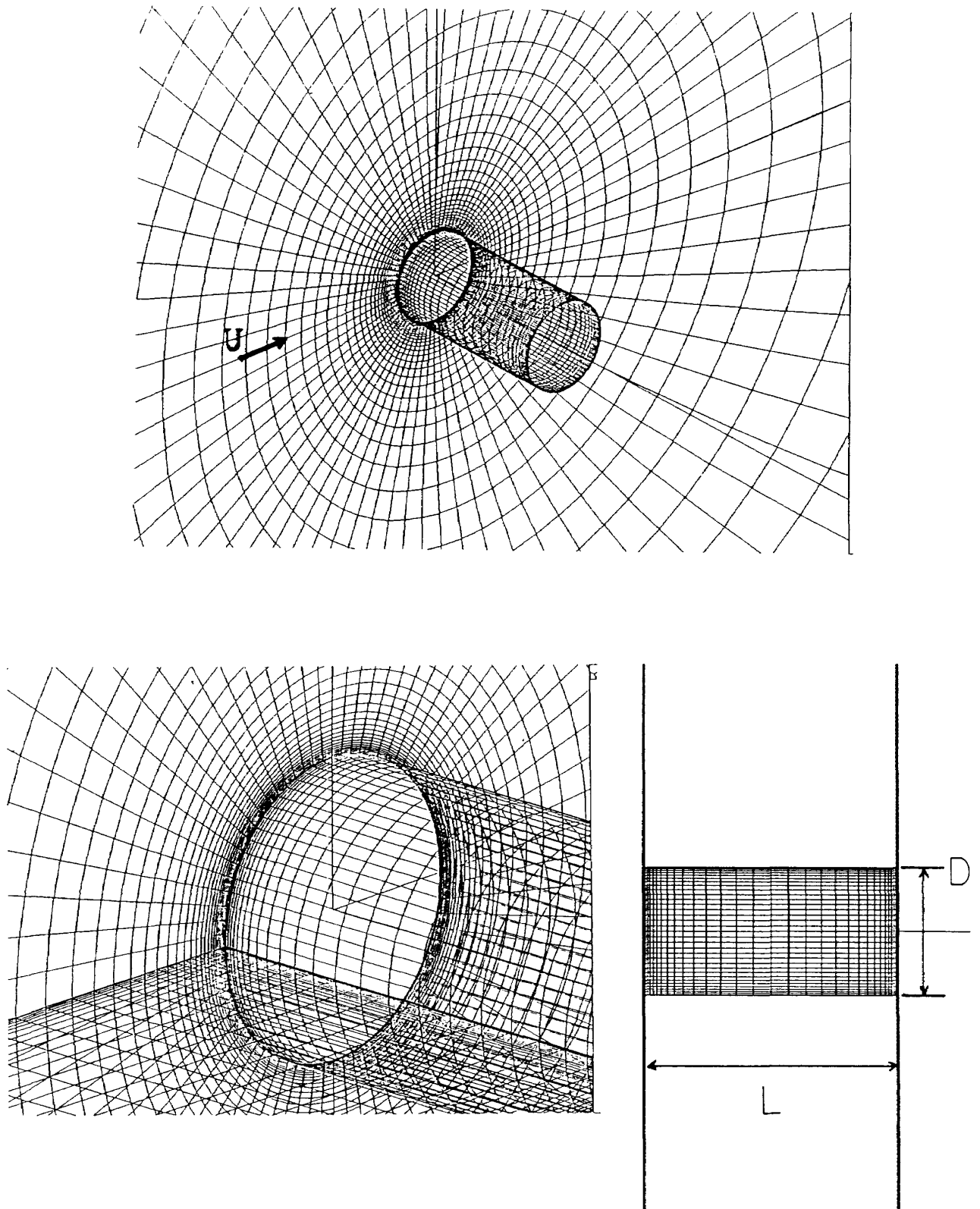


图 1 格子形状

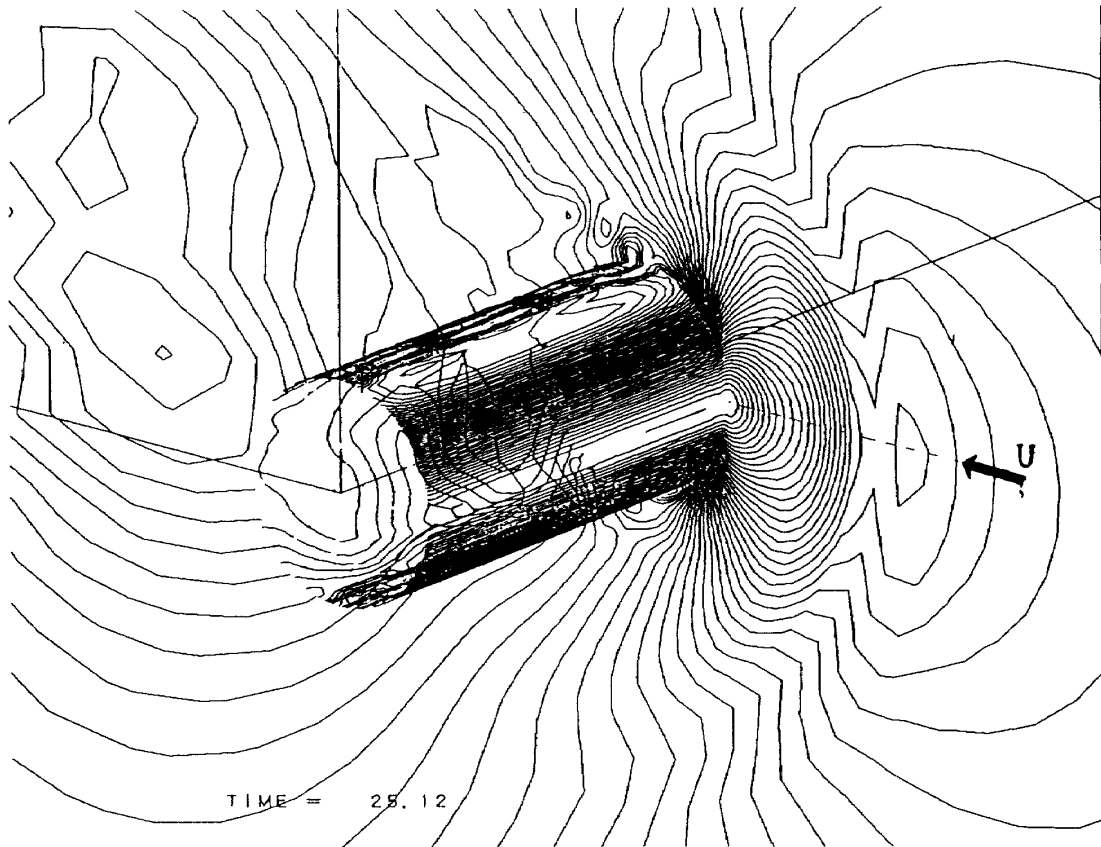


図2 円柱表面及び側壁での圧力分布

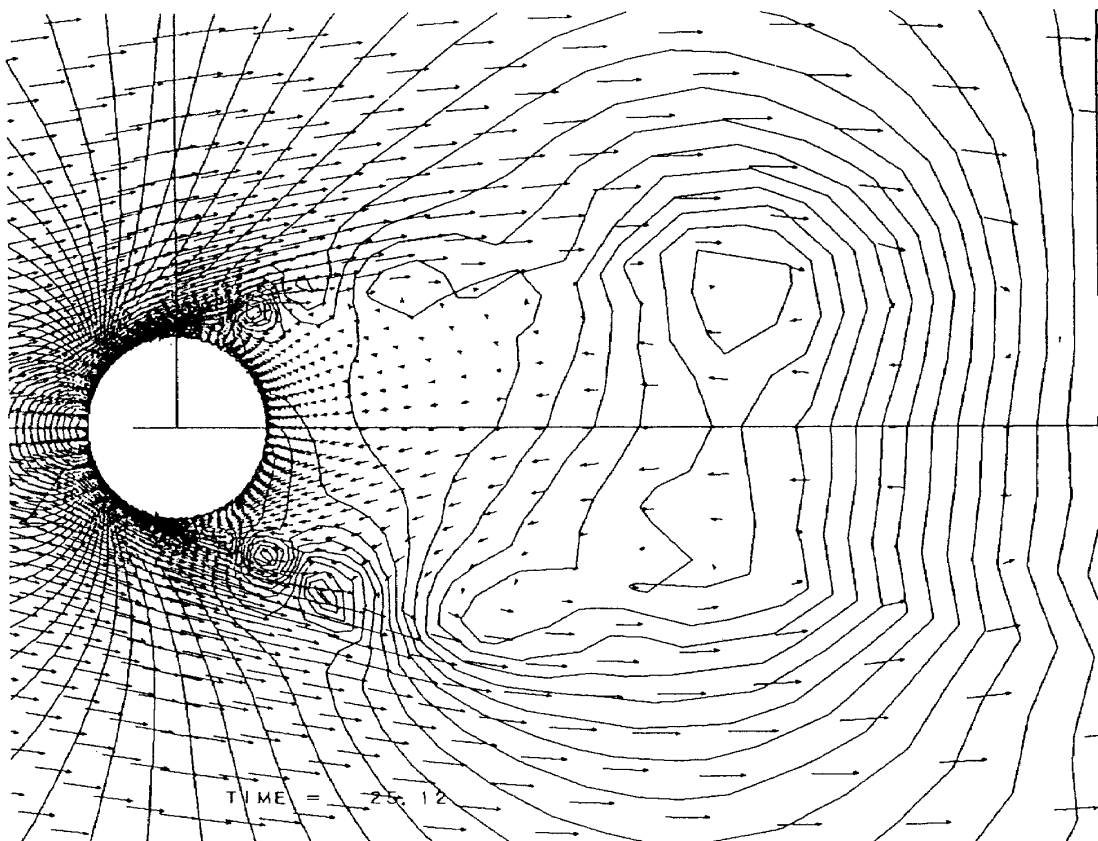
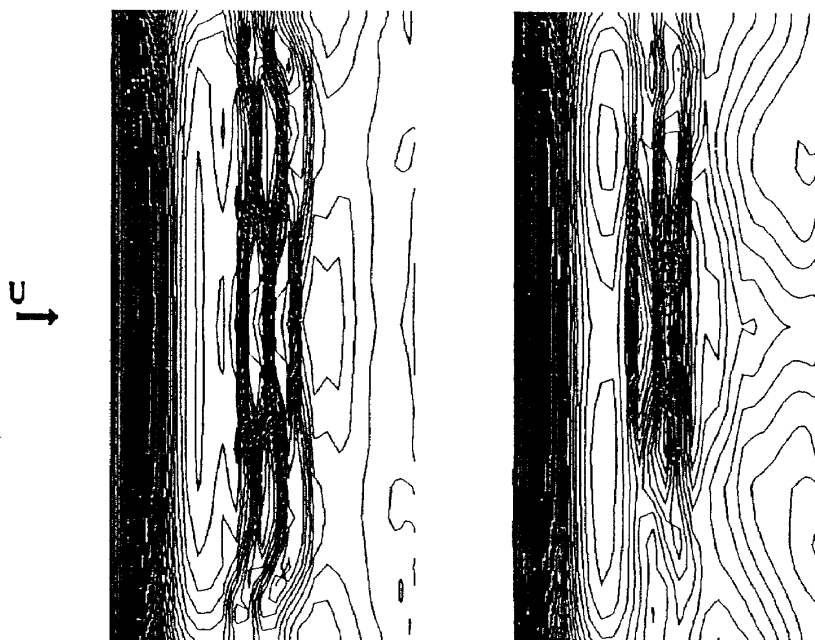


図3 中心断面での速度分布及び圧力分布



TIME = 25.12

図4 円柱上面及び下面での圧力分布

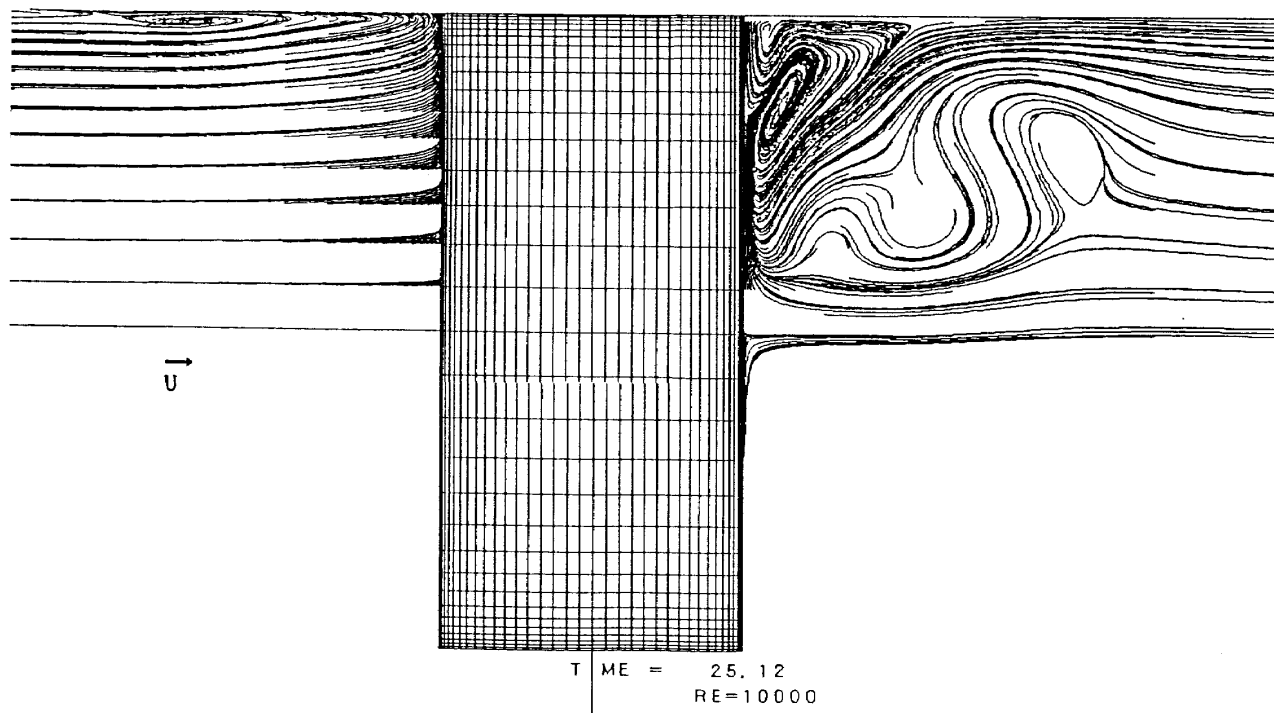


図5 円柱の風上側及び後流側の対称面上の表面流線図

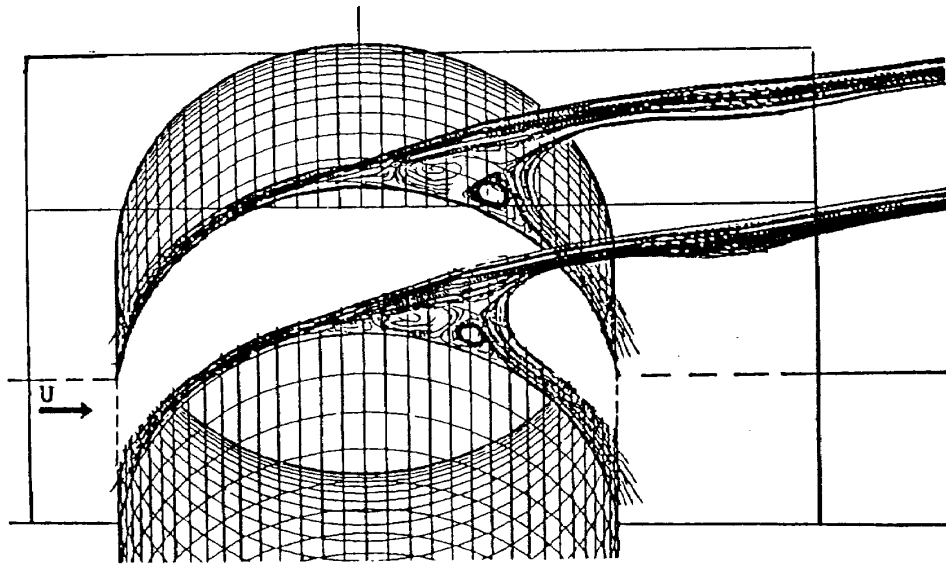


図6 円柱に対して垂直な2断面での表面流線図

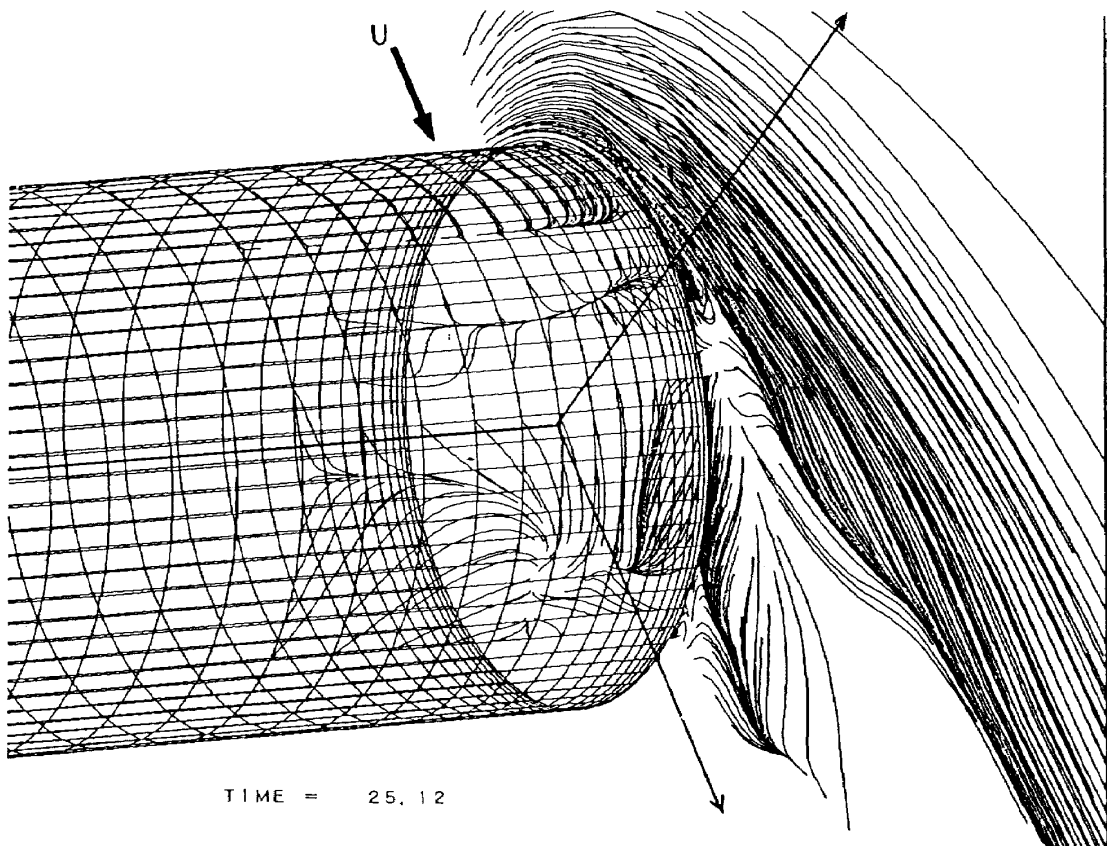


図7 円柱表面及び側壁での表面流線図

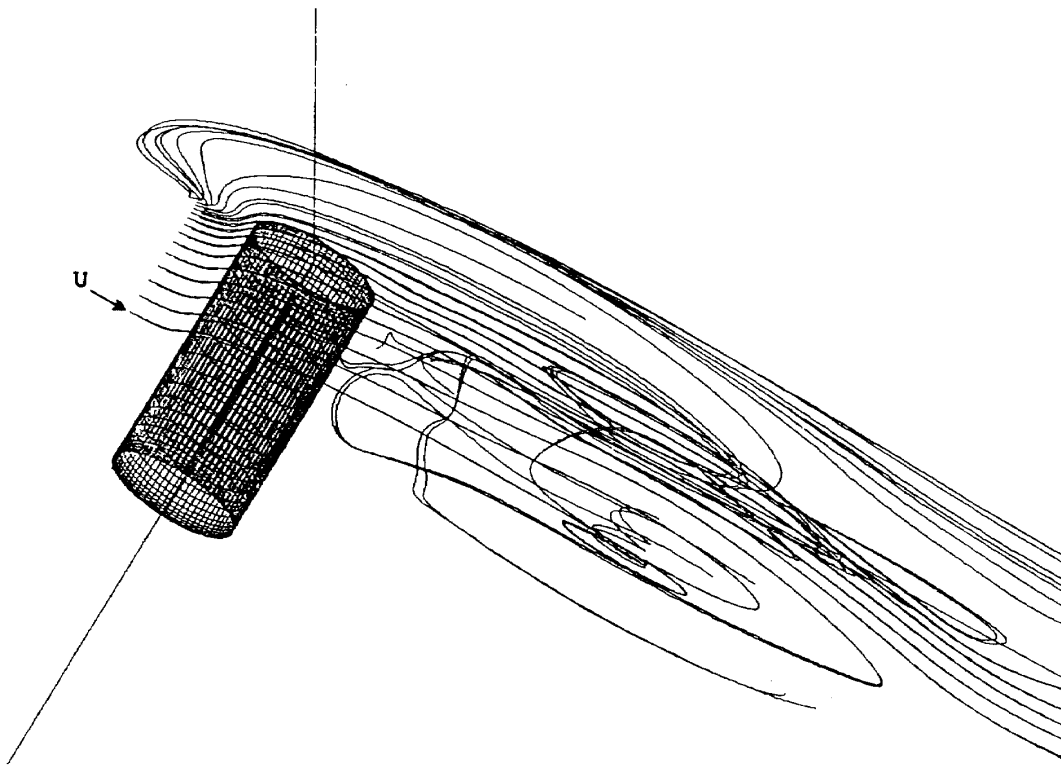


図8 円柱風上側から発生させた粒子の軌跡

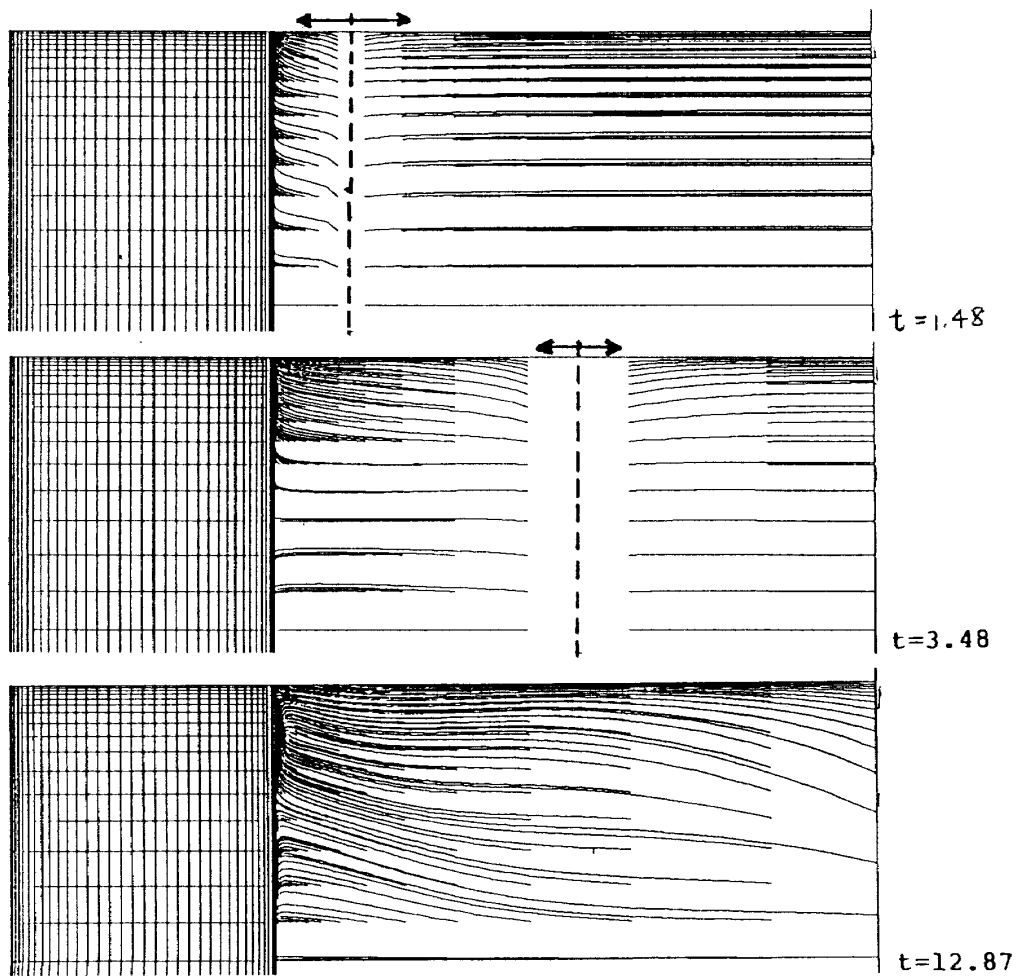


図9 後流における逆流領域の時間発展

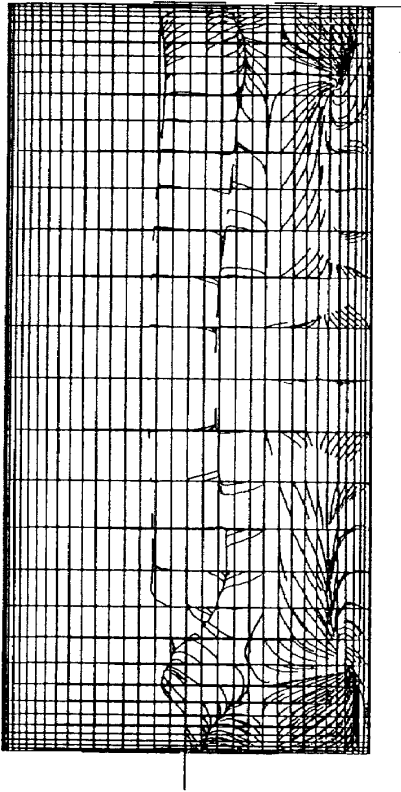


図10 円柱の表面流線図

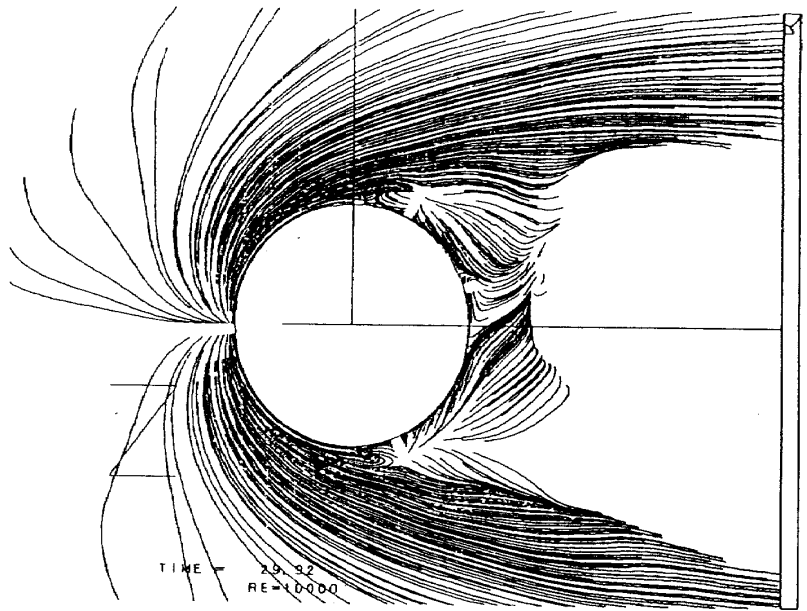


図11 右側壁の表面流線図

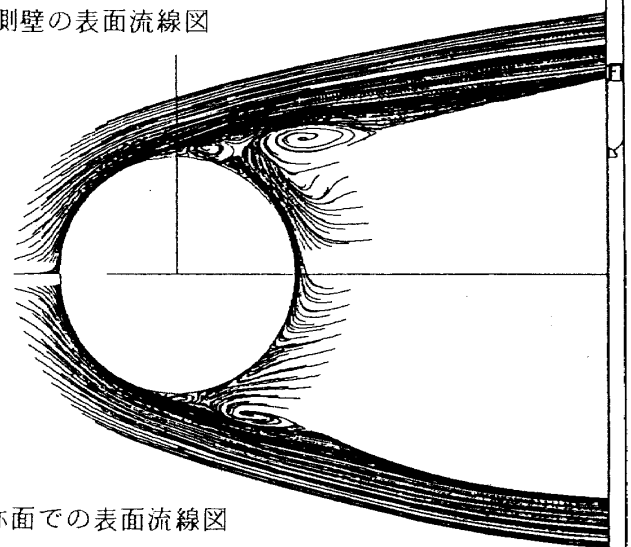


図12 対称面での表面流線図

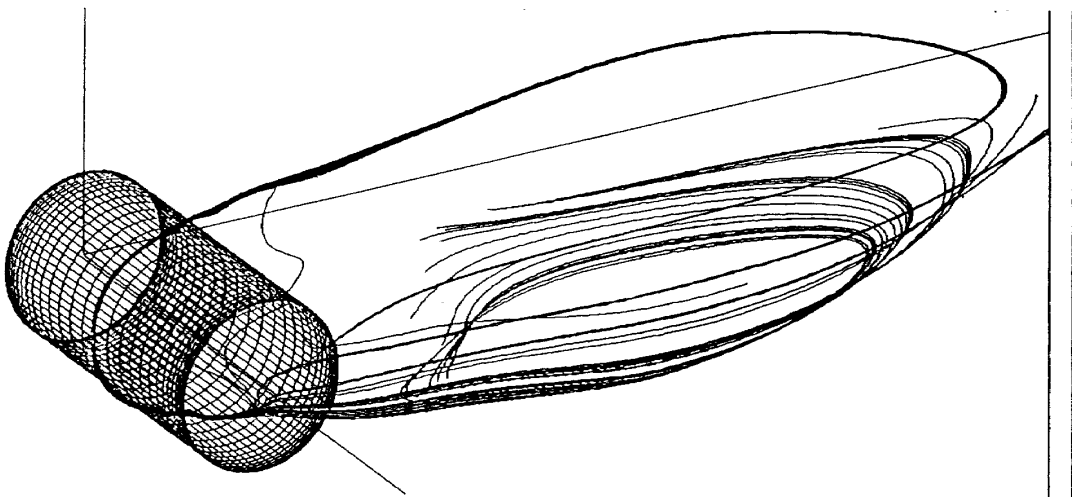


図13 粒子の軌跡

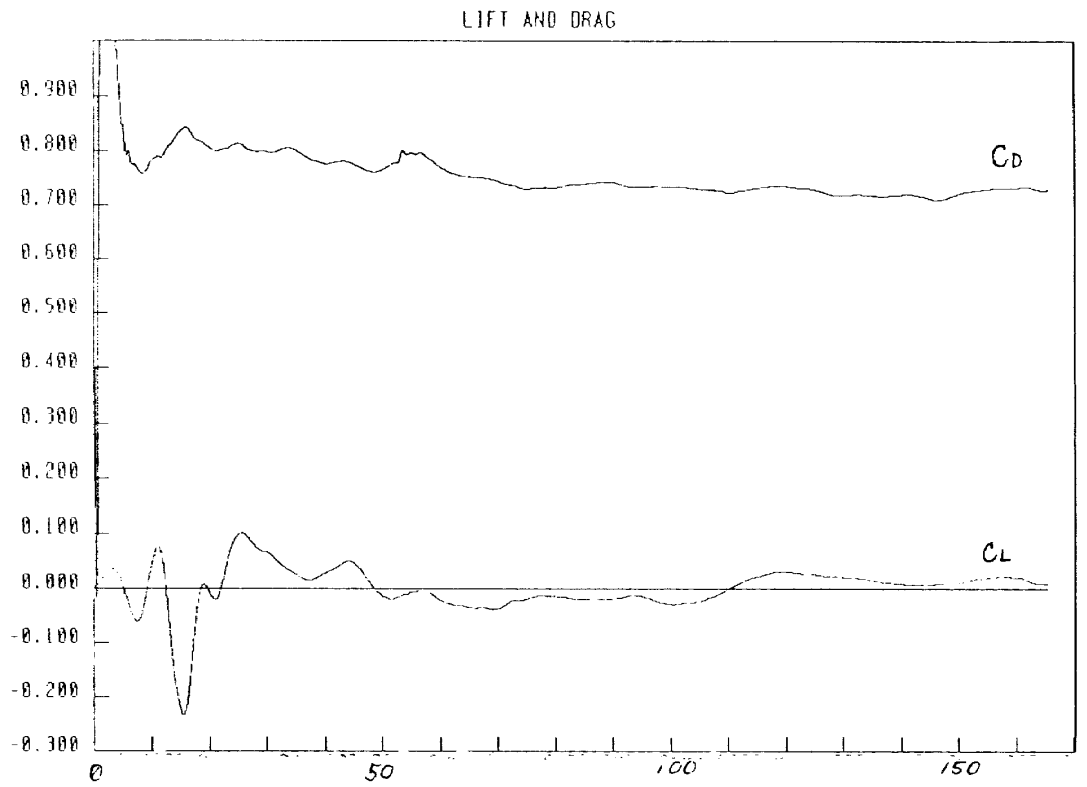


図14 抗力係数の時間変化

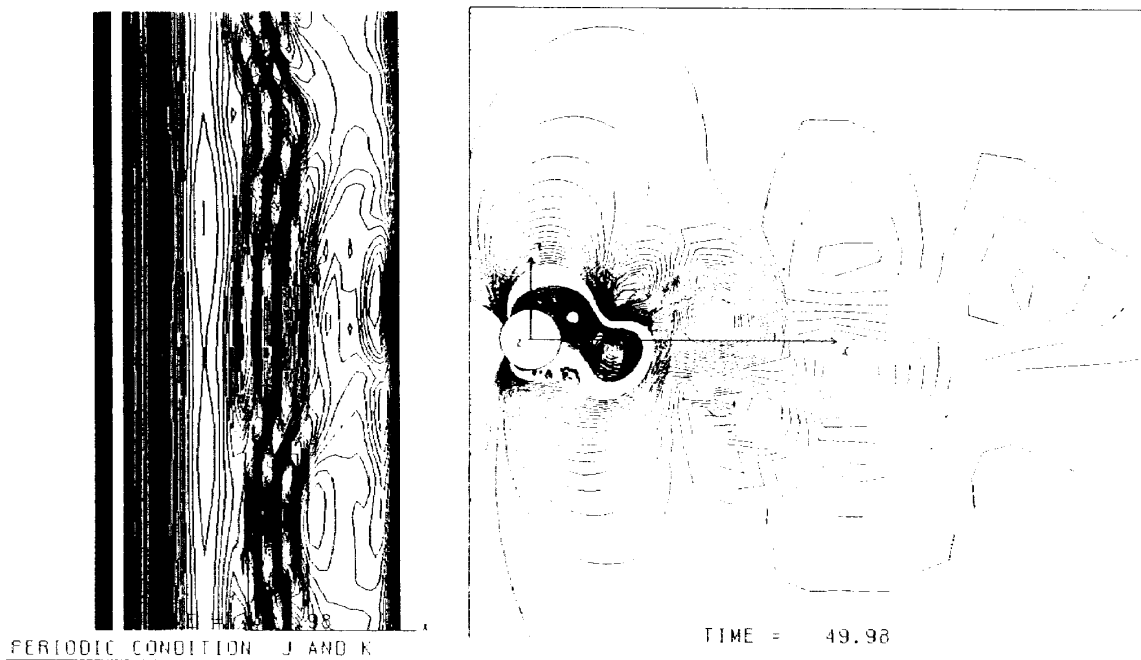


図15 円柱表面及び対称面での圧力分布

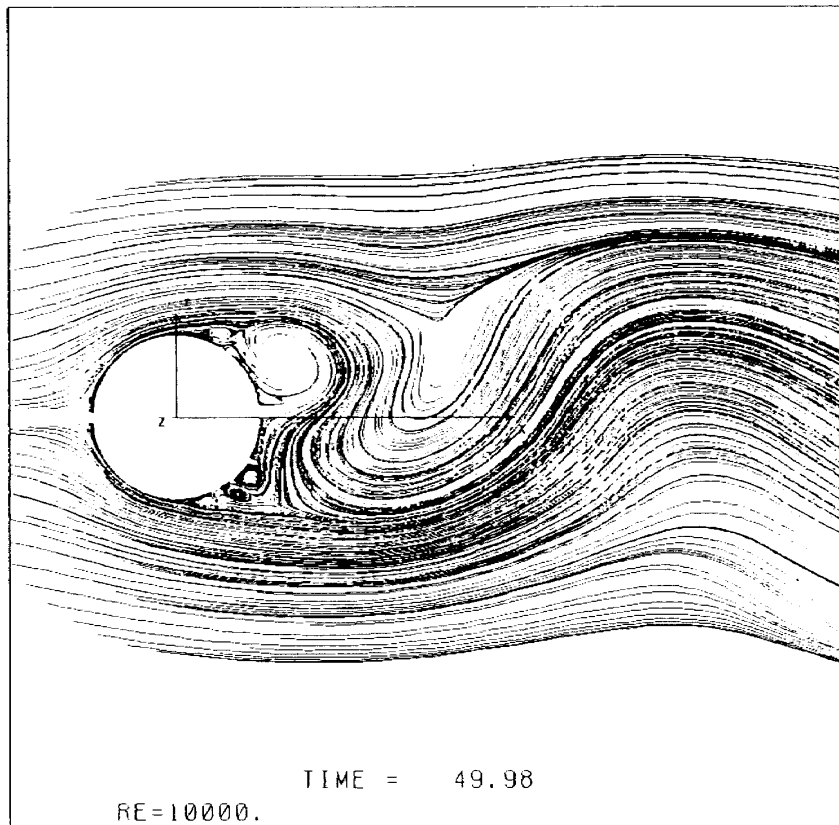
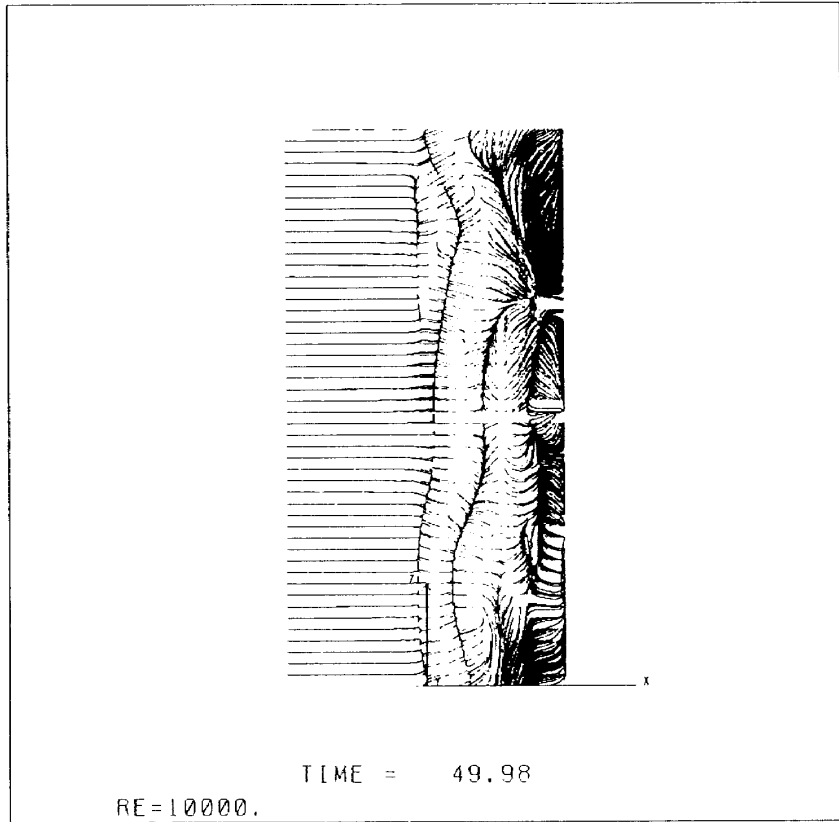


図16 円柱表面及び対称面での表面流線図

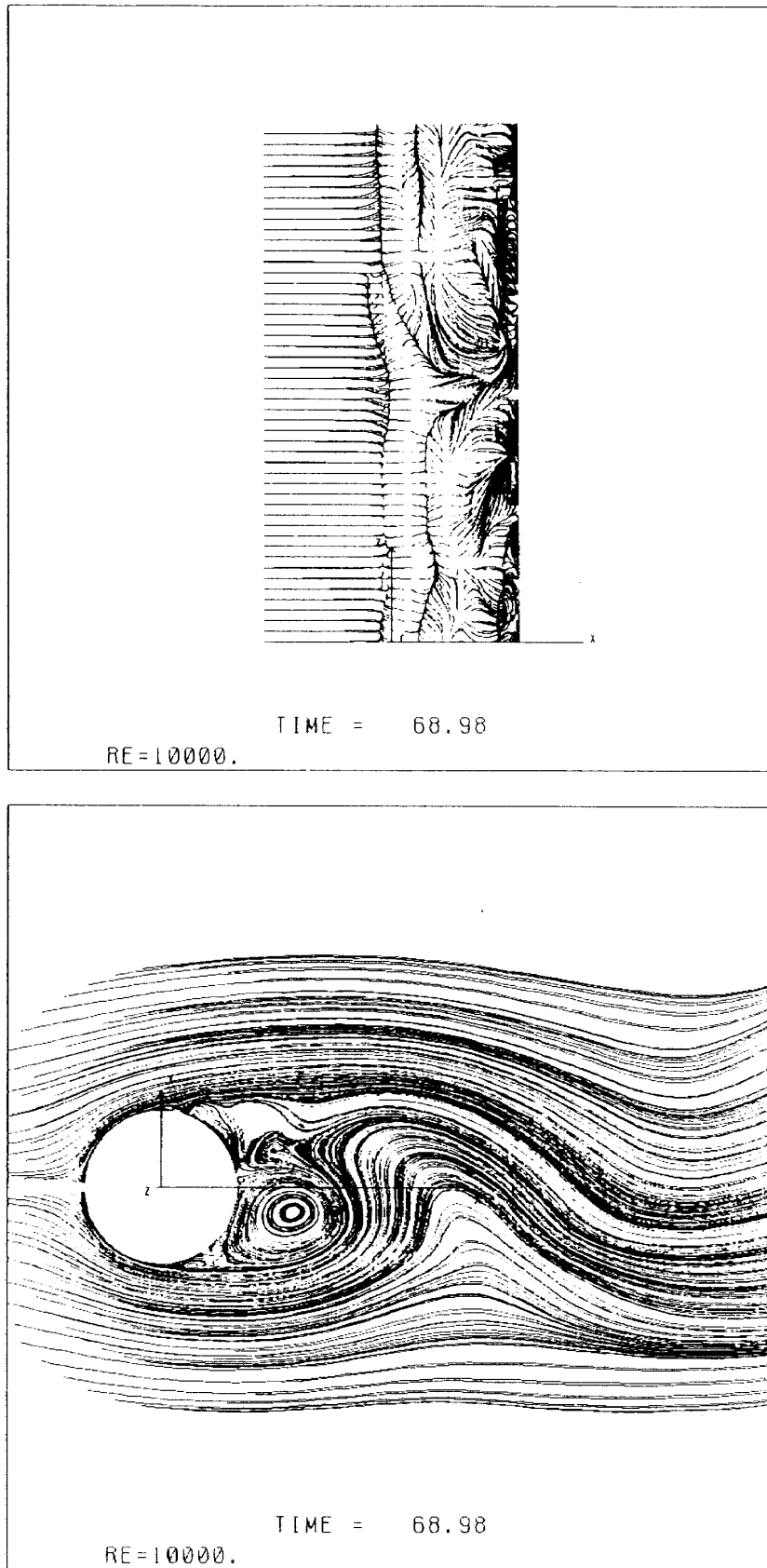


図 17 円柱表面及び対称面での表面流線図

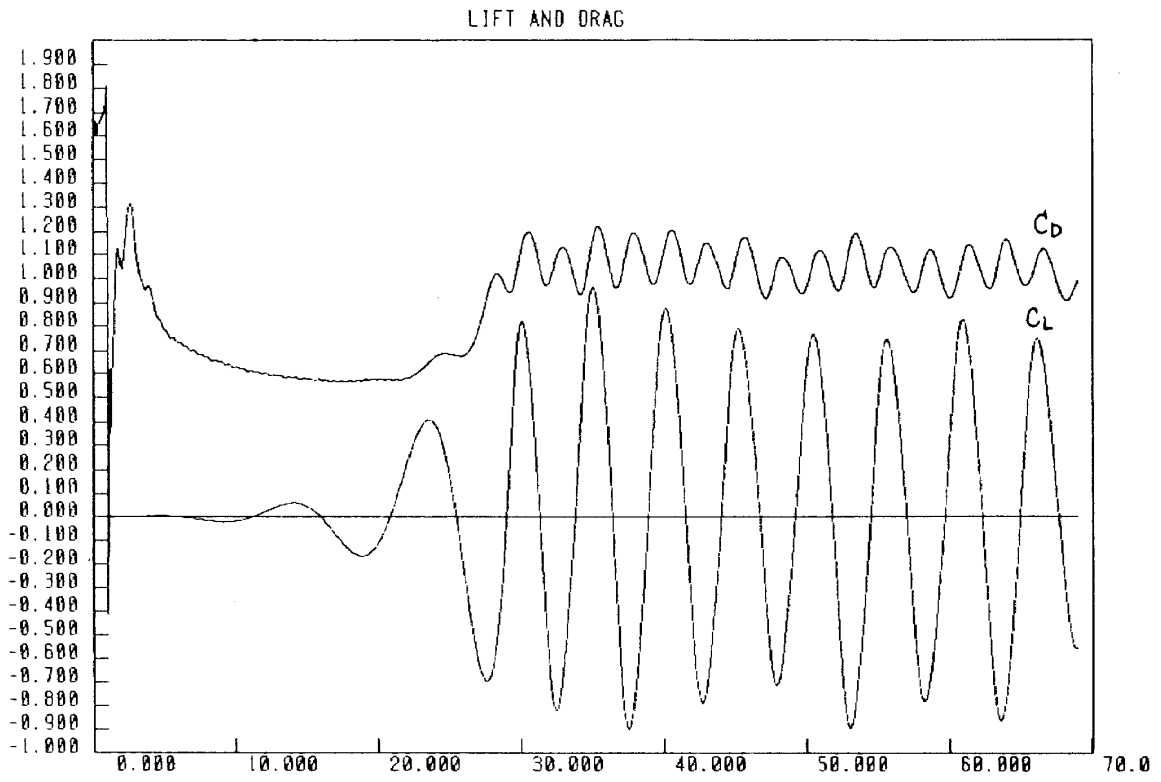


図18 抗力係数の時間変化

