

曲がり管内の流れ

白山 晋* 河村 哲也** 桑原 邦郎***

Computational Study of Flow in Curved Pipes with Circular-Section

by

Susumu SHIRAYAMA, Tetsuya KAWAMURA and Kunio KUWAHARA

ABSTRACT

By solving the incompressible Navier-Stokes equations the flow field is calculated in a circular-sectioned pipe with a straight inlet or gradually enlarged inlet in the higher Dean number. With the straight inlet, a secondary flow of cross-stream planes was obtained and with the higher Dean number some different flow patterns were obtained. With the gradually enlarged inlet, the difference of flow patterns corresponding to Reynolds number could be simulated.

1. まえがき

管内流れの解析は、物理的、工学的興味を含んでいる。従来、この流れの解析は、乱流の研究と相俟って、理論的な研究が数多くなされてきた。^{1)~5)} また、数値計算を含めても、拡大、縮小管を含め、直管を対象としたものが多く、管内乱流をはじめ、流れ場の性質が解明されつつある。それに対し、曲がり管内流は、この流れに対して定義できる相似パラメータ、ディーン数 $K (= Re \cdot (a/R)^{\frac{1}{2}})$; Re はレイノルズ数、 a は管断面の内径、 R は曲がり管の曲率半径)のある範囲での定常層流以外の解析例は少ない。

本稿では、数値計算が有力な解析法とされる中位のディーン数に対して、円形断面を持つ曲がり管内の非定常、非圧縮性の三次元流れを差分法を用いて解析する。また、流入部に拡大管を付けた時の流れ場をいくつかのレイノルズ数のもとで計算する。

2. 計算手法

一般座標系で表わされた非圧縮性の三次元 Navier-Stokes 方程式を、流速、圧力を変数にとった差分法で解く。この際、対流項は三次精度の差分で近似し、線形化して陰解法を用いる。圧力は、Navier-Stokes 方程式から導かれた Poisson 方程式を SOR で求める。

計算格子は、いずれの計算でも 2 次元の断面で作成し、回転させて 3 次元の格子を得ている。

3. 計算結果及び考察

図 1 に格子を示す。流入部に直管(後の計算では、拡大管を使う。)を用い、入り口に一樣速度分布を与える。計算条件は、レイノルズ数が 1000、ディーン数が 316、 Δt を 0.025 とし、無次元時間で 90.0 まで計算した。図 2 に X-Y 断面の速度分布を示す。縦軸、横軸を変えて、いくつかの時間に対する X-Y 断面の速度分布を示す。(図 3) 図 4 に円管断面の速度分布を示す。断面に 2 個の渦を持った解が得られた。

これは曲がり管に特有な 2 次流れであり、流出部

* 東京大学 工学部大学院

** 東京大学 工学部

*** 宇宙科学研究所

に近い部分では、圧力勾配と遠心力の釣り合いで説明がつくが、流入部における流れは、直管部から大きな運動量をもった流体が、外側壁にあたり境界層を介して内部に回り込んでいるものと思われ、境界層の構造を含め、複雑な流れになっているものと思われる。そこで、速度成分のY成分を強調したものを図5に示す。

但し、流出部に近い部分でもディーン数が高くなった場合、この2次流れに不安定性が生じ、別の流れのパターンに移行することが報告されている。図6にディーン数を高くし、格子数を $161 \times 35 \times 41$ としたときの断面における速度分布及び圧力の等高線を示す。図7に断面に投影された速度場を用いて計算した粒子の軌跡と周方向の速度成分を示す。流出部で4個の渦をもつ解が得られた。この計算は、富士通VP-200で行なったもので、計算時間は約90分であり、ベクトル化によりM380の約30倍の計算速度を得ることができた。

流入部に拡大管を付けたときの速度分布及び圧力の等高面を図8、図9に示す。拡大管によって生成された一つの渦輪が進行するが、レイノルズ数の低い場合は流入部に安定な死水領域ができ、流れはほぼ定常状態となる。レイノルズ数の高い場合は、流れは安定せず、乱れたものとなる。

4. 結 論

a. 三次精度の風上差分による非線形項の近似により、高レイノルズ数の流れを安定に計算することができた。

b. この方法を一般座標を用いた三次元の曲がり管に適用した結果、ディーン数が数百の比較的、流れの安定な領域で曲がり管特有の二次流れを捉える

ことができた。

c. 更に流入部に拡大管をつけることで、渦をつくとレイノルズ数が千くらいでは、曲がり管内側の入り口付近で安定な死水領域を生じ、レイノルズ数を高くすると渦が下流へながされ、流れは乱れる。

d. この方法は、広いレイノルズ数の範囲で、様々な管路要素について、適用できるものと思われる。

5. 謝 意

格子数が22万点ともなると、スカラ計算機により計算を続けることは、もはや数少ない超人のなせる技であり、スーパーコンピュータの使用が必要不可欠となる。ここにVP-200による計算時間を提供していただいた富士通システムラボラトリーの方々に感謝します。

6. 参考文献

- 1) 伊藤英覚；曲がり管内の流れ；日本機械学会論文集（B編）50巻458号（昭59-10）
- 2) D. Greenspan; Secondary flow in a curved pipe, *J. Fluid Mech.* (1973), vol. 57, part 1, pp. 167-176.
- 3) S.V. Patankar et al; Prediction of laminar flow and heat transfer in helically coiled pipe, *J. Fluid Mech.* (1974), vol. 62, part 3, pp. 539-551.
- 4) S.V. Patankar et al.; Prediction of turbulent flow in curved pipes; *J. Fluid Mech.* (1975), vol. 67, part 3, pp. 583-595.
- 5) J.A.C. Humphrey et al.; Some numerical experiments on developing laminar flow in circular-sectioned bends, *J. Fluid Mech.* (1985), vol. 154, pp. 357-375.

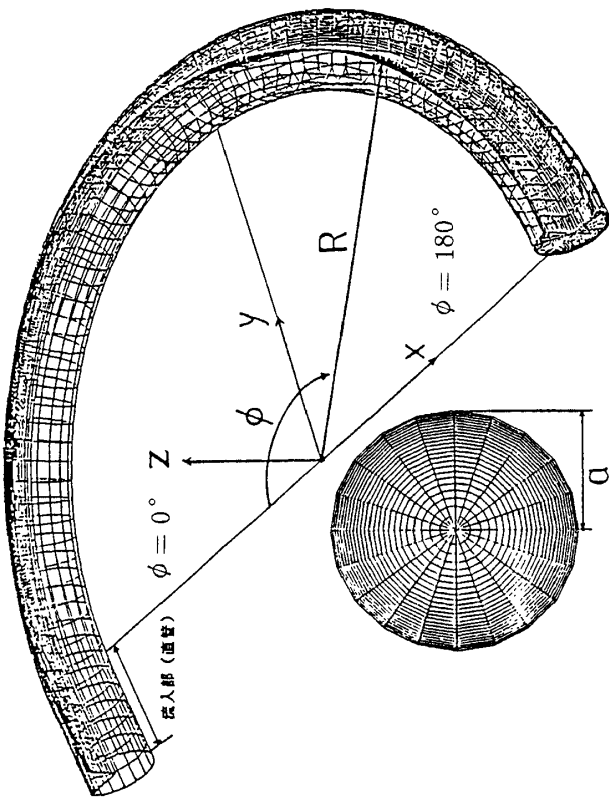
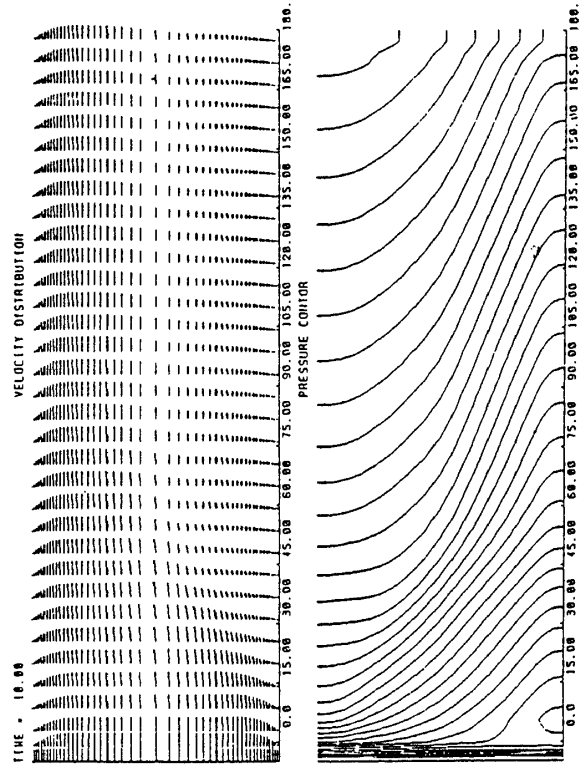
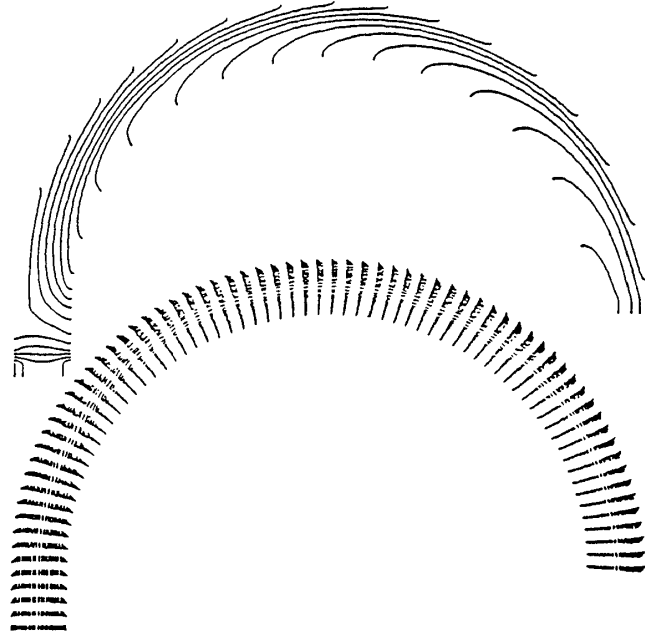


図1 計算格子

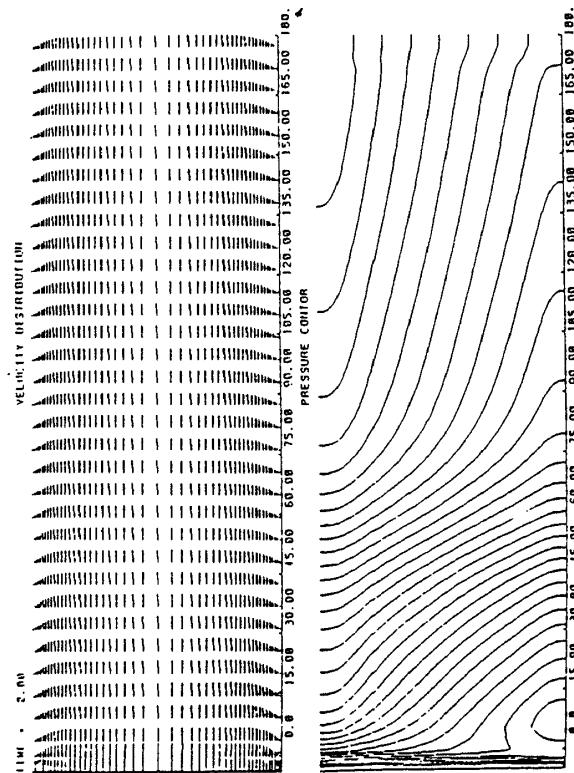


図2 速度分布と等圧力線

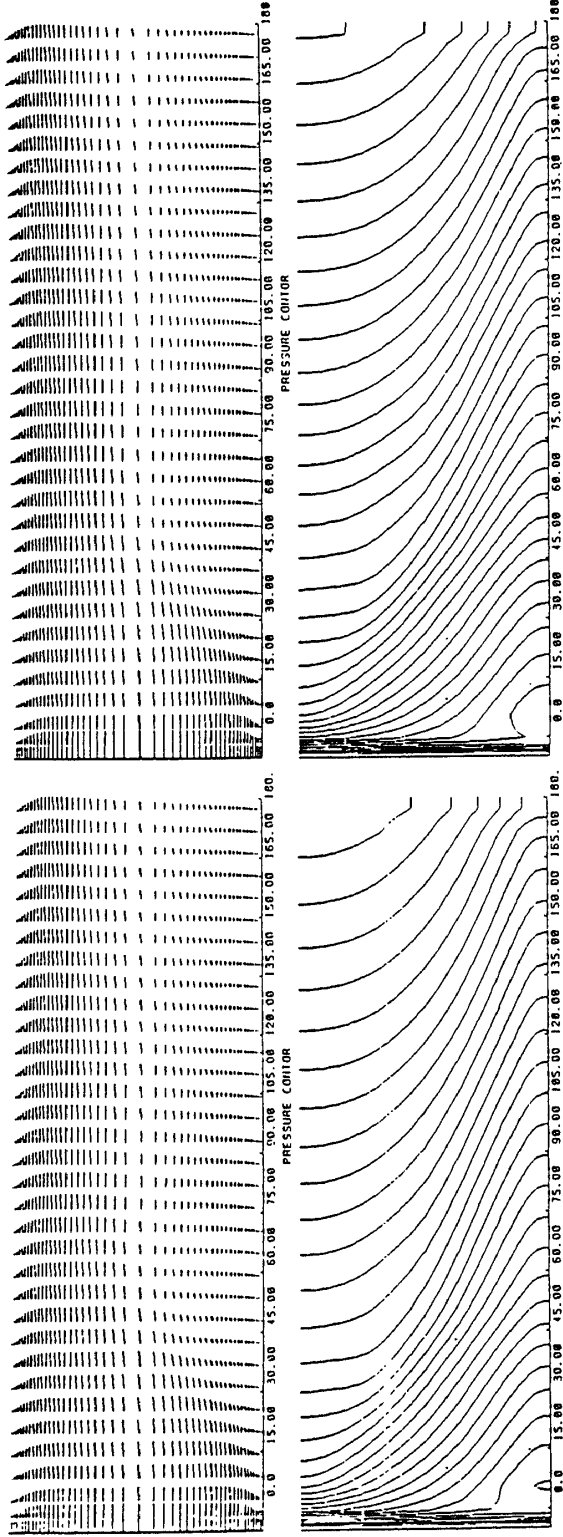


図 3 速度分布と等圧力線 ($\phi - y$ 断面, $T = 2.0, T = 10.0, T = 60.0$)

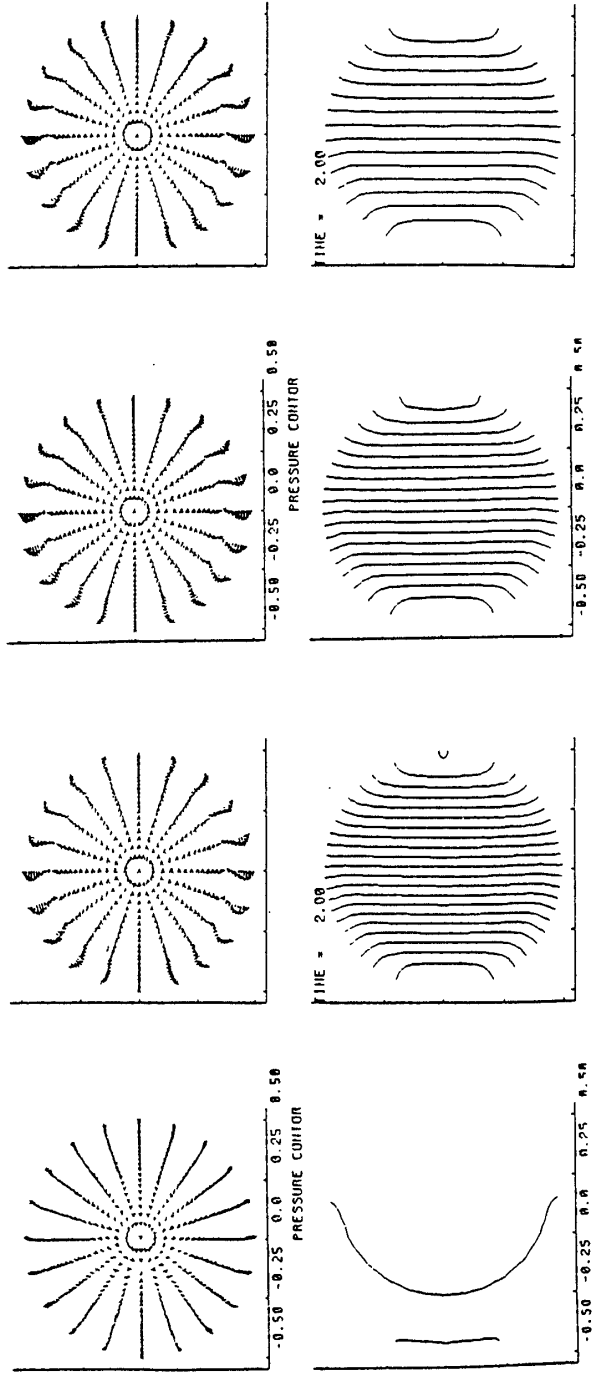


図 4(a) 速度分布と等圧力線 ($T = 2.0, \phi : 0, 60, 120, 180$)

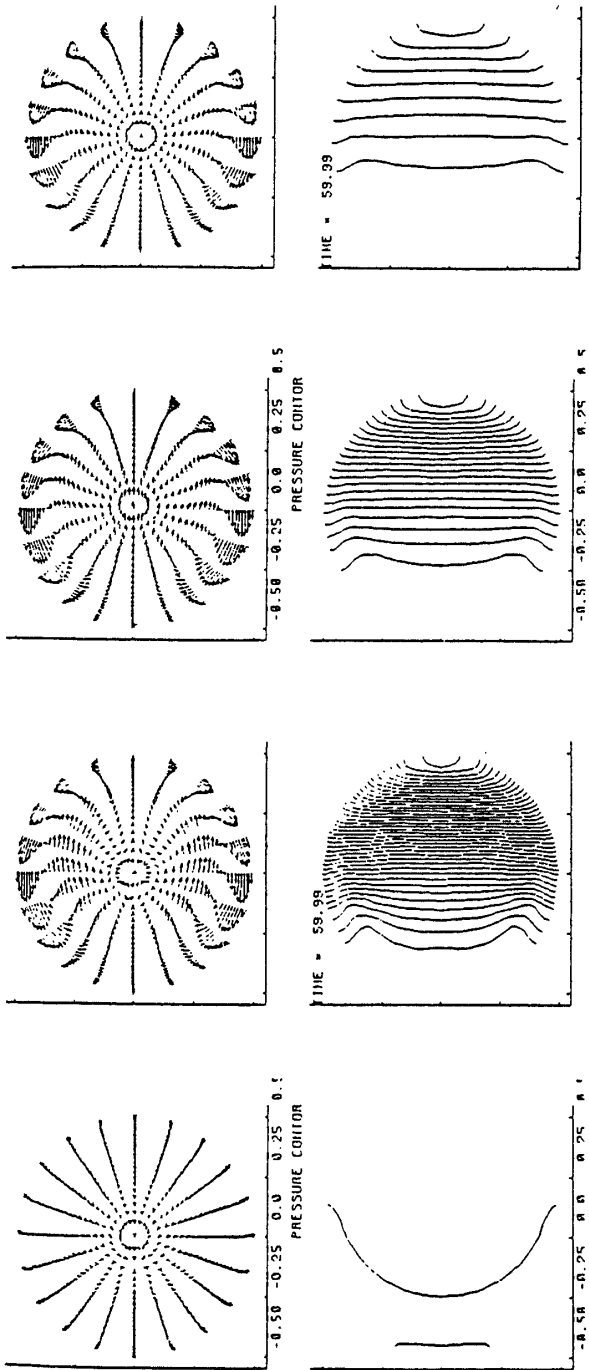


図4(b) 速度分布と等圧力線 ($T = 60^\circ$, $\phi : 0, 60, 120, 180$)

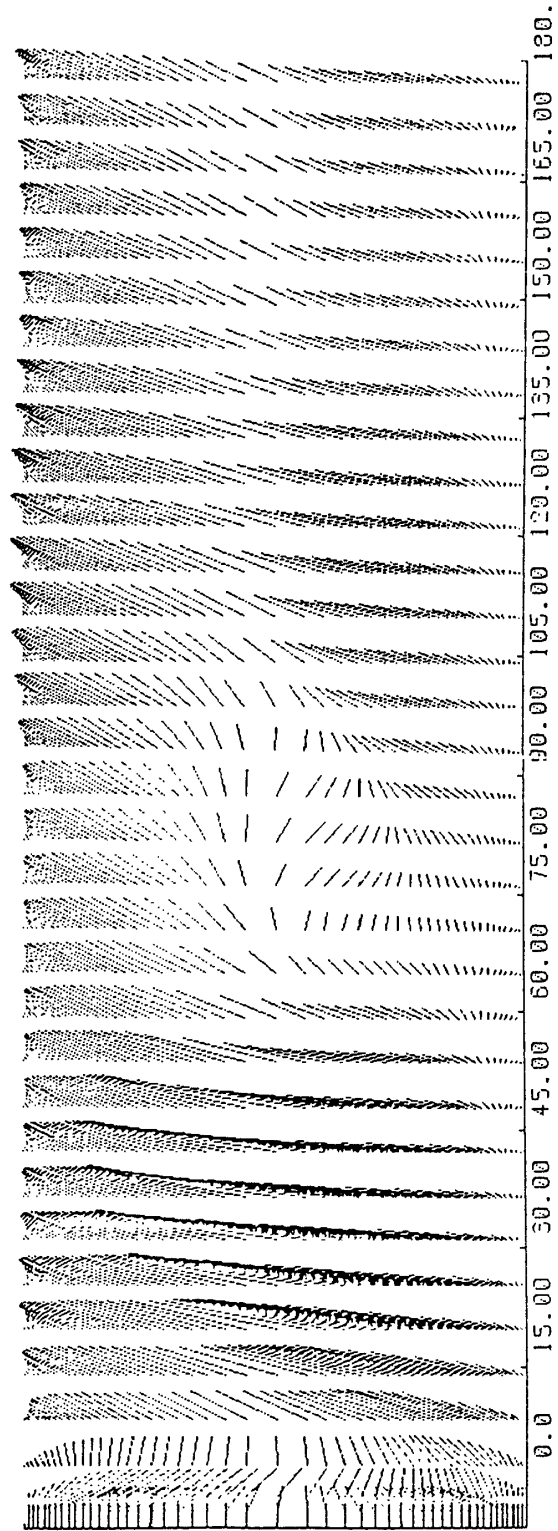


図5 速度分布 ($T = 80^\circ$)

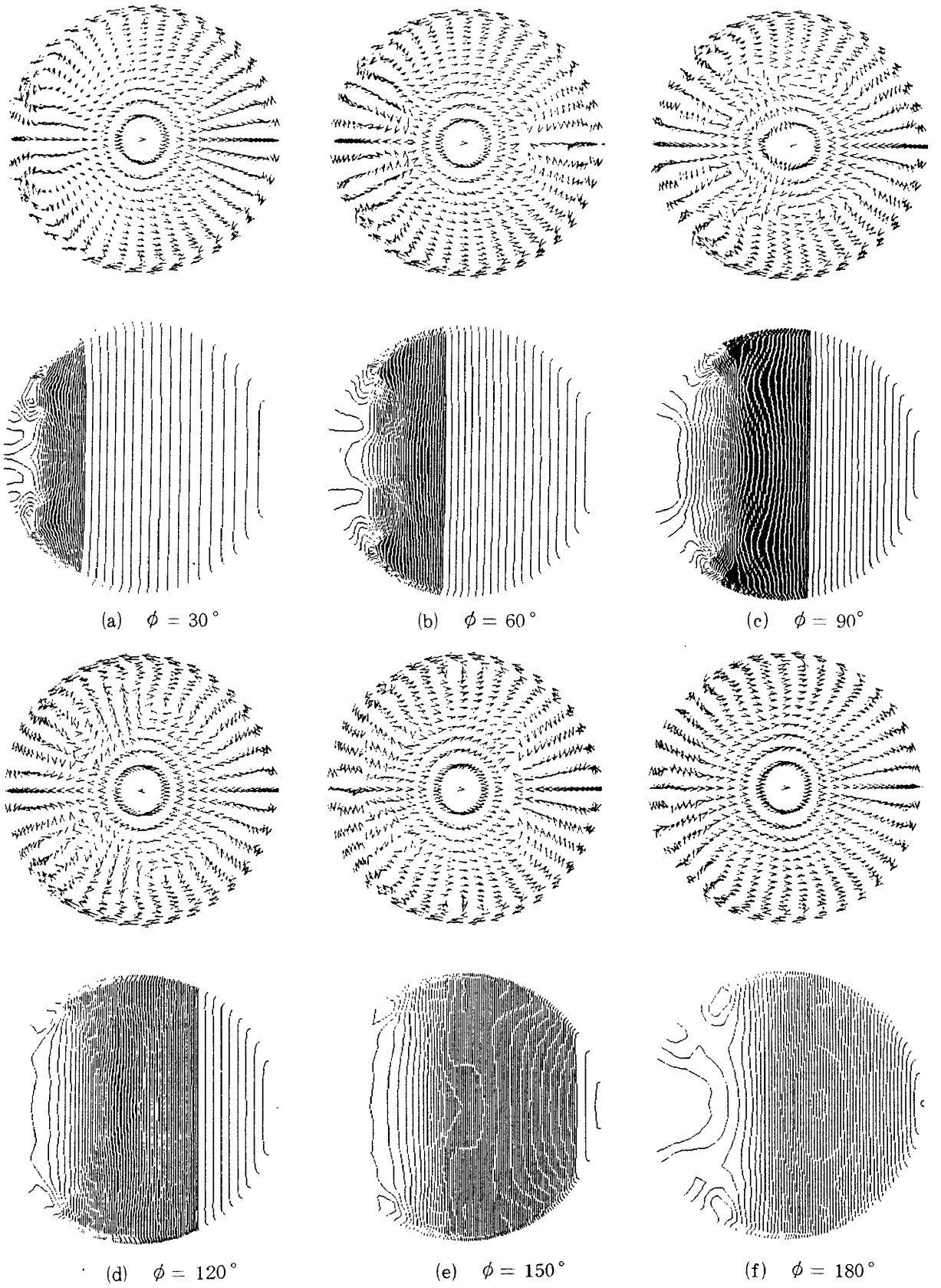


図6 速度分布と等圧力線

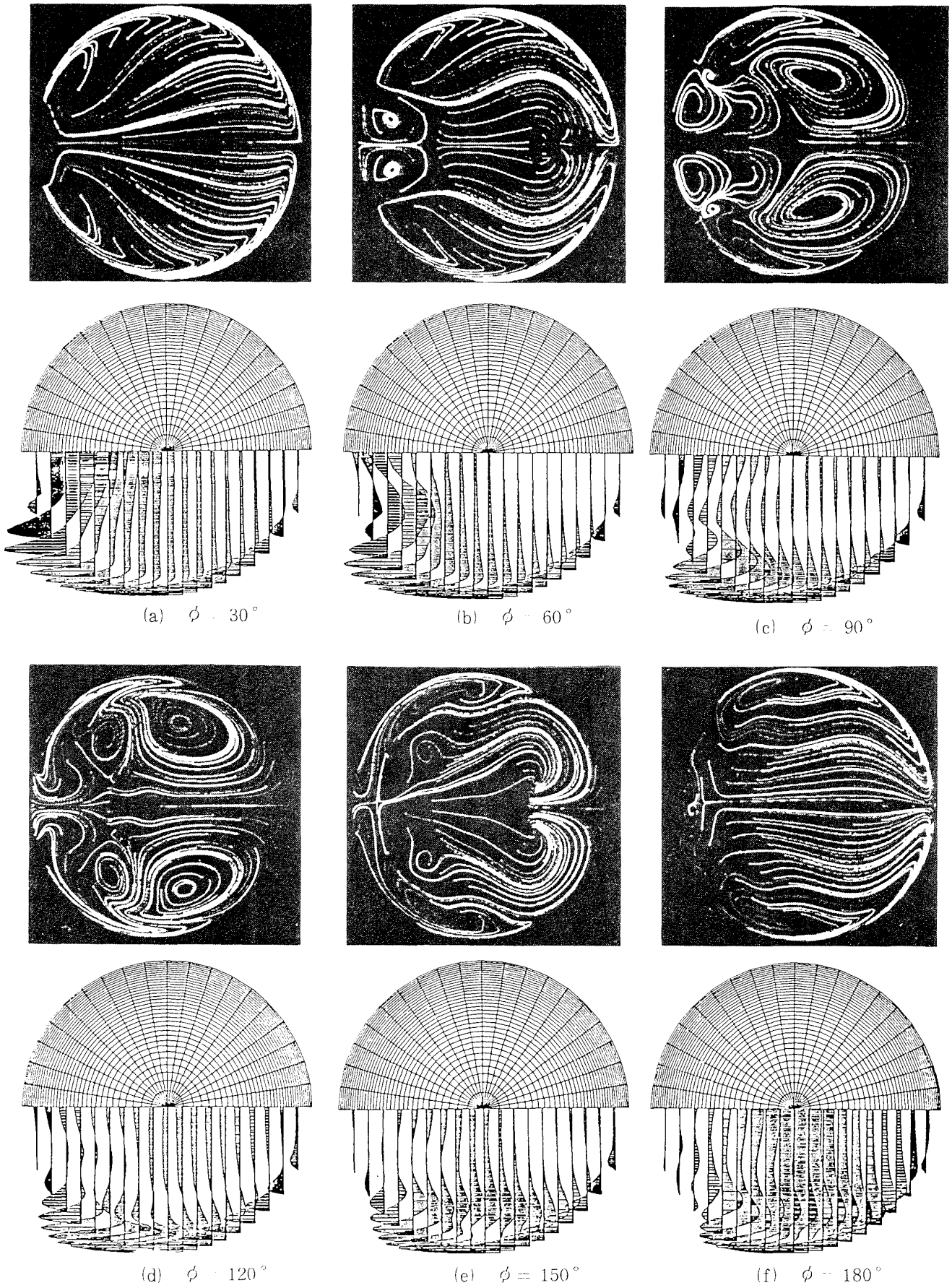


図7 粒子の軌跡と周方向の速度分布

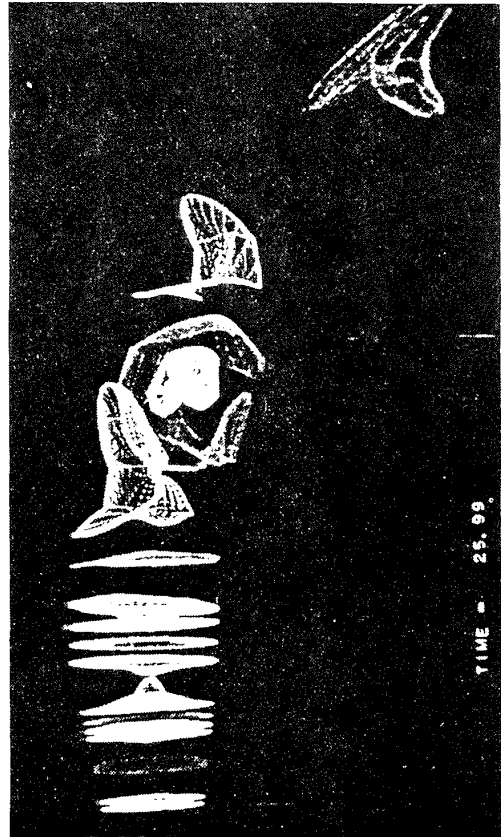
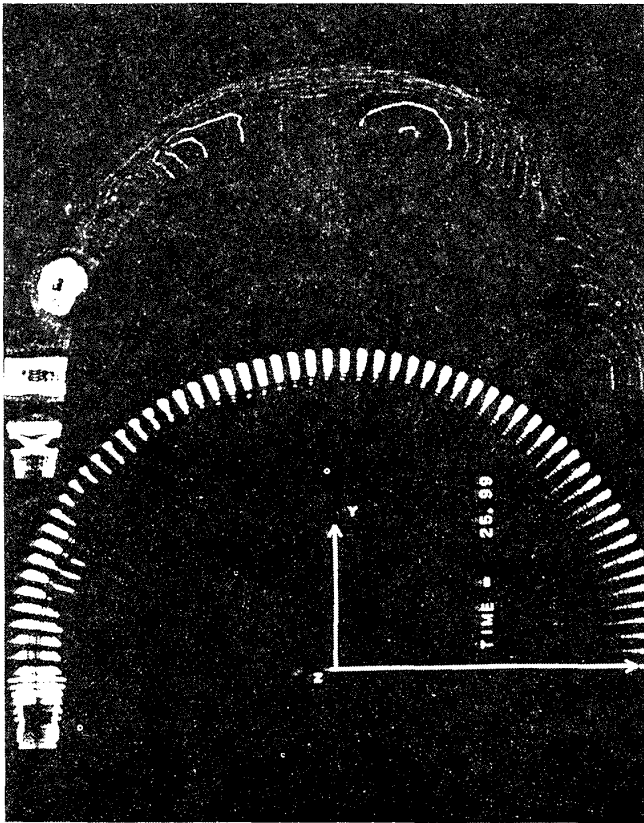


図9 速度分布と圧力の等高面

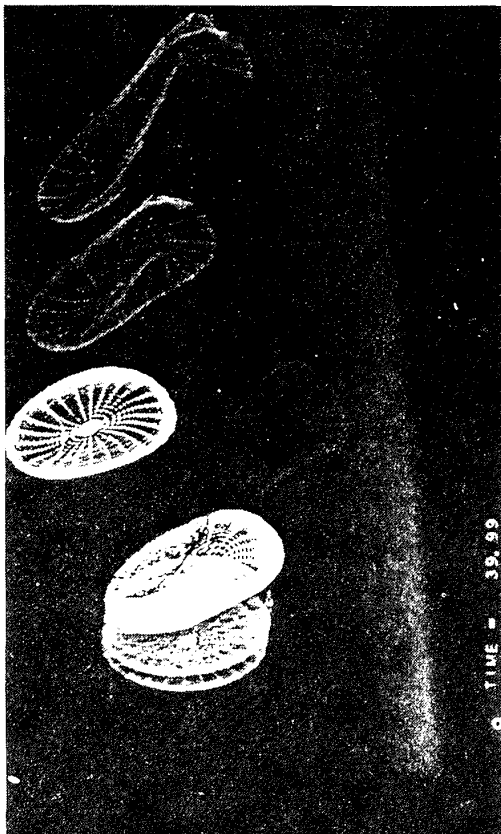
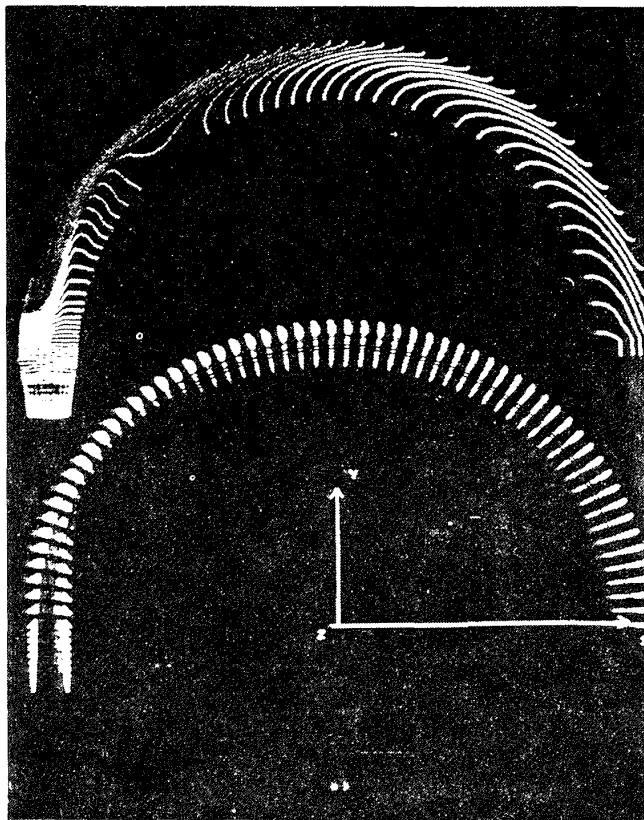


図8 速度分布と圧力の等高面