

渦度場の幾何学構造の数値計算

計算流体研 橋口 真宜 (Masanori Hashiguchi)
宇宙研 桑原 邦郎 (Kunio Kuwahara)

1. はじめに

流体現象を理解するには、流体とはどのような動きをするのか、その動きがどのような流速場、圧力場あるいは渦度場を形成するのか、また異なる状況下で観察された流体運動における類似点と相違点は何かという事柄について、まずデータを蓄積し、それらを分析することで、一般的な理論を構築することが重要である。数理科学としての流体研究としては、流体運動がなぜそのような運動の仕方をするのかという点について時空間非線形システムの必然として説明できるところまで理解を深めたい。

そのような流体運動に関するデータの蓄積や非線形偏微分方程式との関係を調べるには、数値計算が適していると考えられるが、従来の計算機環境は研究者にとってあまり恵まれたものではなかった。しかし、最近になって、275MFLOPSなどの計算能力を有するパソコンが出現したことで、従来、スーパーコンピュータでしか計算できなかったような規模の計算を非常に身近で実行できるようになってきた。パソコンのグラフィック環境も良くなってきており、流体現象を理解する上で重要な流れの可視化があたかも実験をするように実行できるようになってきている(1)。

本論文では、パソコンの計算能力およびグラフィック機能を活用した数値計算によって、円柱、角柱および円錐のまわりに発達する流れ場の数値的可視化を行った。

2. 数値解析の方法

2. 1 基礎式

流速ベクトル u^i および圧力 p を未知数とし、基礎方程式は、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式と連続の式である。連続の式は、圧力 Poisson 方程式を解くことで間接的に満足させる。

Navier-Stokes 方程式

$$\partial u^i / \partial t + u^j \partial u^i / \partial x^j = -\partial p / \partial x^i + Re^{-1} \partial^2 u^i / \partial x^j \partial x^j \quad (1)$$

連続の式

$$\partial u^i / \partial x^i = 0 \quad (2)$$

圧力 Poisson 方程式

$$\partial^2 p / \partial x^i \partial x^i = -(\partial u^i / \partial x^j)(\partial u^j / \partial x^i) - \partial(\partial u^i / \partial x^i) / \partial t \quad (3)$$

2. 2 差分法

円柱の計算の場合には、基礎方程式を一般座標系に変換した。角柱および円錐の計算においては、デカルト座標系を使用した。

差分法としては、時間方向に二次精度Crank-Nicolson法を使用した。空間微分については、非線形対流項以外には二次精度中心差分法を適用した。非線形対流項には、三次精度風上差分法(2)を適用した。さらに、計算格子に対してある角度をもつ流速成分を取り扱う際に生じる計算誤差を排除する目的で、多方向風上差分法(3)を適用した。三次精度風上差分法によって陰的に導入した格子間隔以下の高波数成分に関する散逸機構以外には、陽的な乱流モデルは使用していない。

2. 3 可視化法

本研究で使用した計算機はDECチップ(21064A)で275MFLOPSの性能を有する。OSはWindows NTである。このOSは、グラフィックス環境としてはOpen GLを標準でサポートしており、これを利用することで計算結果の可視化がパソコン上で容易に実現できるようになった。さらに、Windows NTがプリエンティブ方式のマルチタスク機能を装備していることで、流体計算と流れの可視化の並行処理を可能とすることができた(1)。並行処理方式をFig. 1に模式的に示す。

3. 計算結果

3. 1 円柱まわりの流れ

円柱まわりの流れは、はく離点がア・プリオリに決まらないタイプのブラフ・ボディまわりの流れを理解する上で重要である。この流れにおいては、レイノルズ数というパラメータに対して抵抗値が急減するという臨界現象を生じる。

Fig.2は、円柱の直径を基準にしたときの、レイノルズ数 Re と抵抗係数 Cd の関係を本数値計算で予測した結果を示す。計算は一般座標系で実行され、O型計算格子を使用した。 Re 数に応じて計算格子を変化させた。本計算結果は、64(周方向)×32(半径方向)というかなり粗い格子数でも、全般的に実験に匹敵する結果を与えている。

注目すべきは、Kamiyaら(4)が実験で見いだした偏り流れが数値計算で初めて再現できた点にある。Fig.3に本計算で得られた定常的な偏り流れ(Fig.2中、C)とその前後(Fig.2中、A,B,Dに対応)での時間平均された流線を示す。

3. 2 角柱まわりの流れ

角柱を過ぎる流れは、はく離点がア・プリオリに決まるブラフ・ボディまわりの流れの代表的なものである。角柱に生じる抵抗値は、角柱断面形状のアスペクト比に大きく影響される。

計算は直交等間隔格子で行われた。レイノルズ数は角柱の高さを基準にして22000とした。Fig.4は、アスペクト比を0.4, 0.6, 1.0および2.0と変化させた場合に対応するパーティ

クルパスの計算結果を示す。計算格子は 128×128 である。計算結果は、アスペクト比が変化することによる全体の流れ場の変化をよく再現しているように見える。Fig.5は、アスペクト比の渦度場への影響を可視化した結果である。

Fig.6は、本計算によってアスペクト比と抵抗値およびベース圧の関係を予測した結果であり、実験値と比較的良好一致する。

3. 3 円錐まわりの流れ

地面上に設置された円錐まわりの流れは、三次元的な渦構造を伴う流れであり、この流れが円錐の頂角の大きさによってどのような影響を受けるかを可視化する。

計算は三次元直交等間隔格子を用いて実行された。計算格子数は $160 \times 96 \times 64$ である。円錐底面の直径を基準にしたレイノルズ数は50000とした。60度と90度という二種類の円錐頂角について計算した結果をFig.7、8、9、10に示す。円錐のまわりに発達する低圧部を等圧面で可視化した。60度頂角の円錐に比べて、90度頂角の円錐の方が、時間がある程度経過しても明瞭な大規模渦構造を円錐下流に依然保持することが見いだされた。

4. おわりに

以上見てきたように、最近のパソコンの計算能力とグラフィック機能を活用することで、流体現象の理解を深める上で最も重要な流れの可視化を、日常的に実行できる時代になっている。これらの機能を活用することで、流体研究からもっと多くの新しい発見がなされ、この分野が大いに活性化されることを期待したい。

参考文献

- (1) 葛生、橋口、桑原：Open GLを使った流れ場のリアルタイムビジュアライゼーション、第9回数値流体力学シンポジウム(1995),129.
- (2) Kawamura, T. and Kuwahara, K.: Computation of High Reynolds Number Flow around a Circular Cylinder with Surface Roughness, AIAA paper 840340(1984).
- (3) 橋口、桑原：多方向風上差分法による高レイノルズ数流れの数値計算、第6回数値流体力学シンポジウム(1992),567.
- (4) Kamiya, N. et al.: On the Aerodynamic Force Acting on a Circular Cylinder in the Critical Range of the Reynolds Number, AIAA paper 791475(1979).

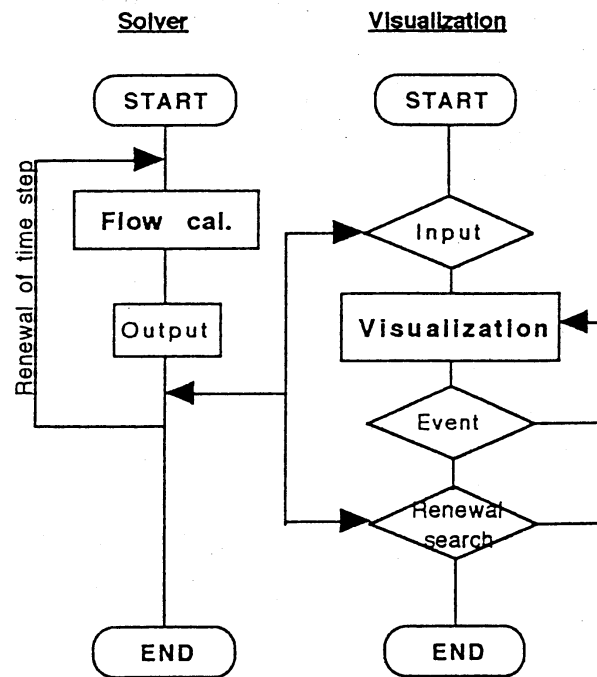
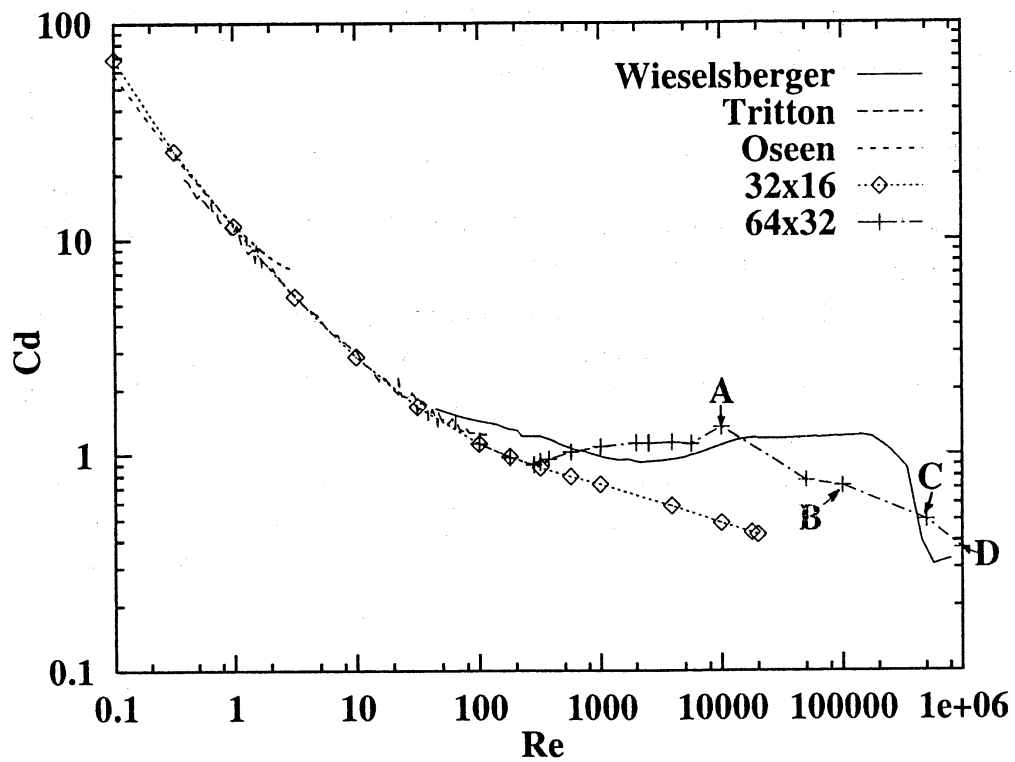


Fig.1: Real time flow visualization system

Fig.2: C_d

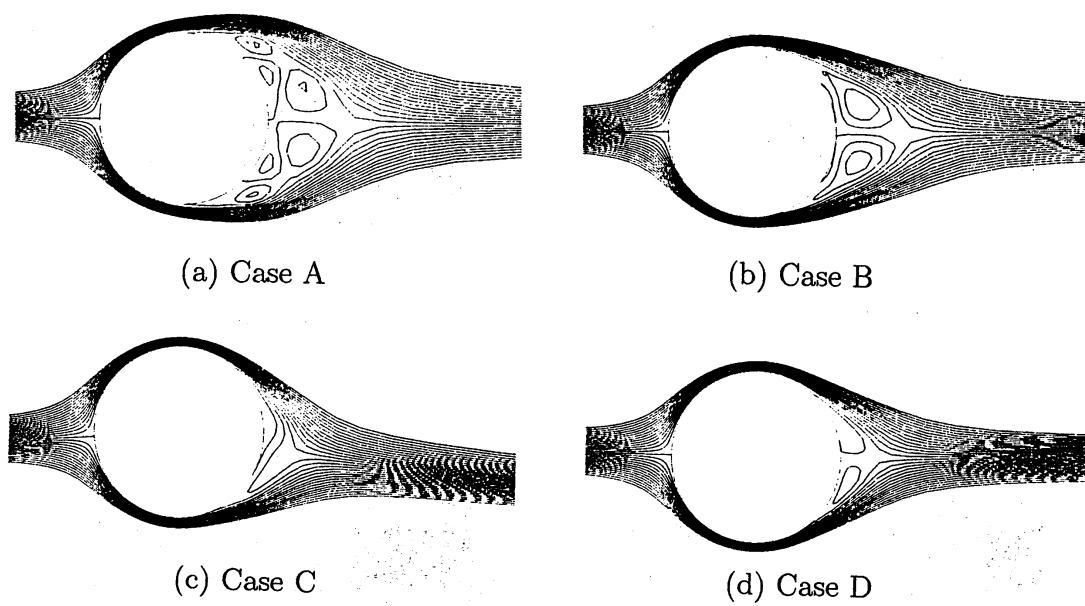


Fig.3: Time-averaged streamlines

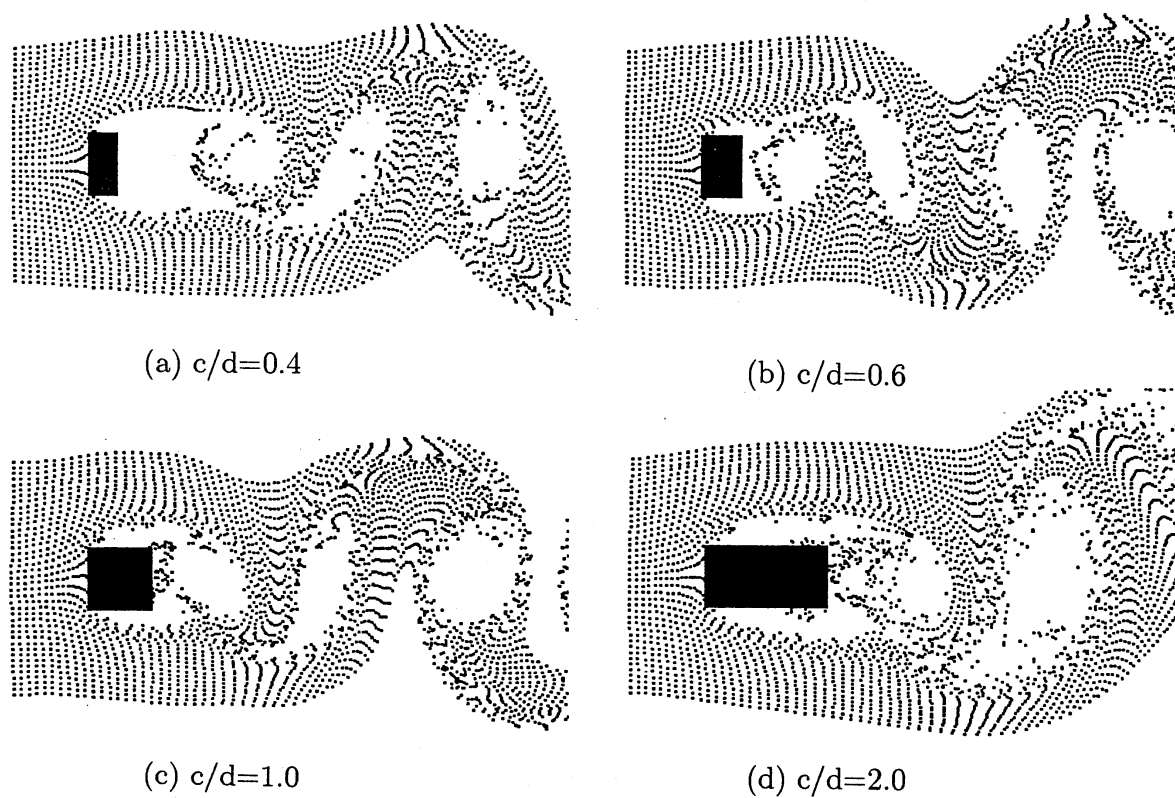


Fig.4: particle path

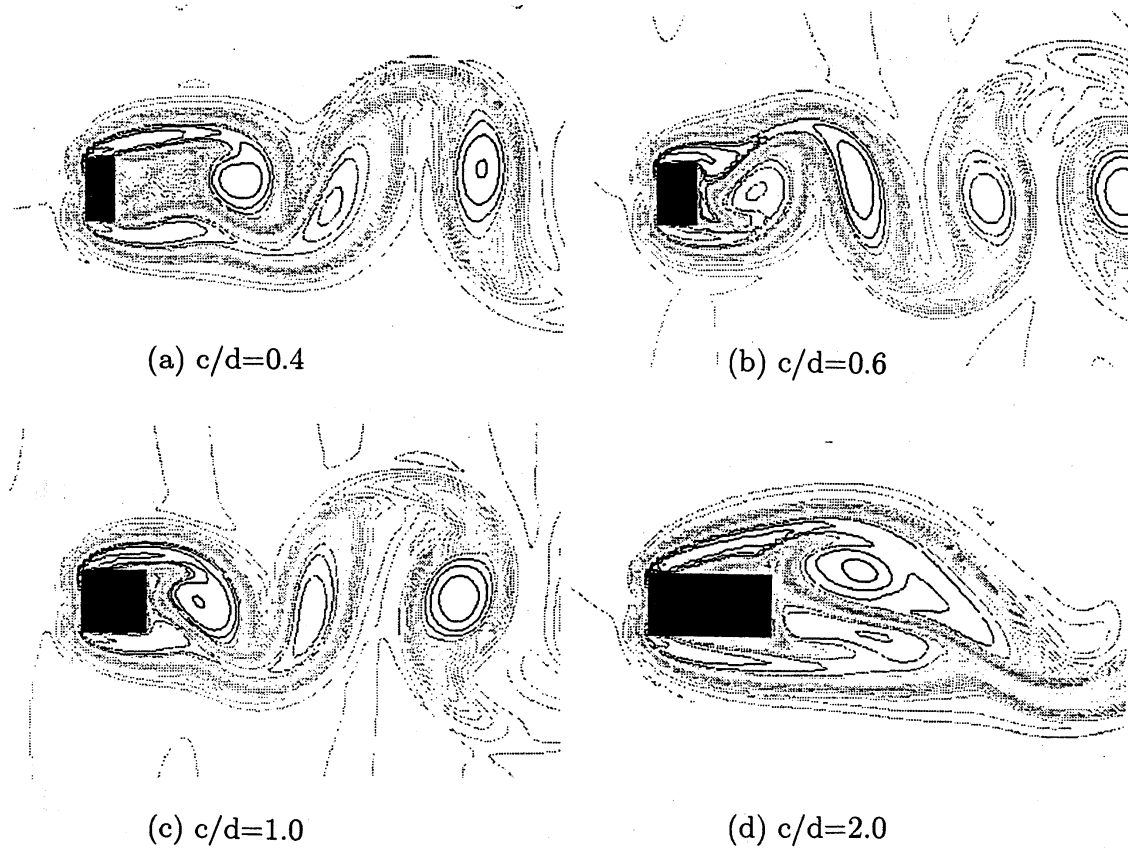
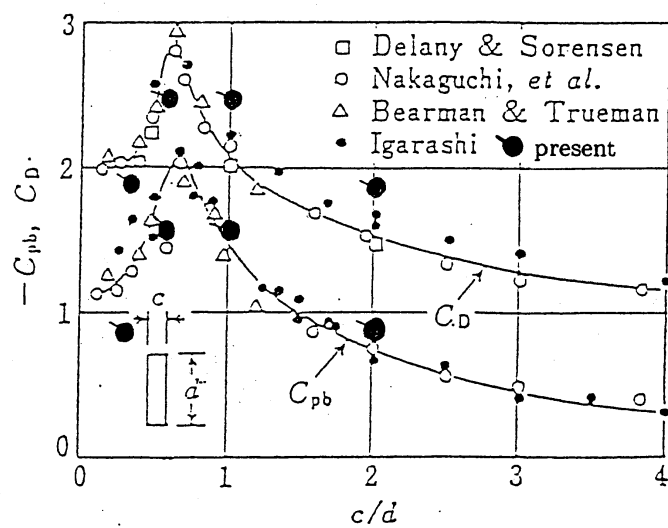


Fig.5: Vorticity fields

Fig.6: C_d and base pressure

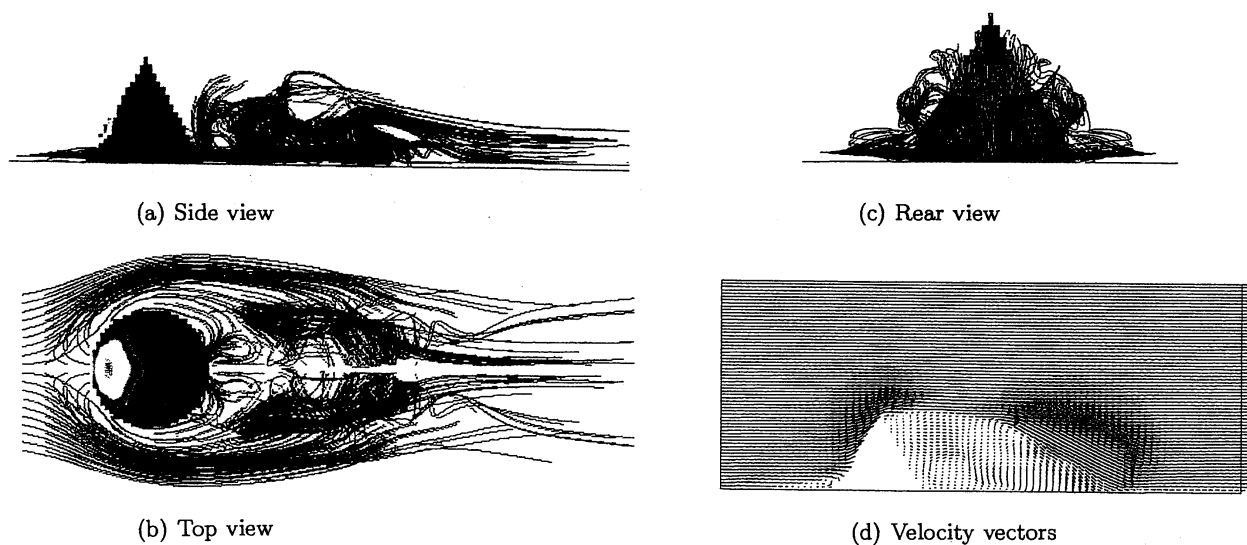


Fig.7: Instantaneous streamlines(60 degrees)



Fig.8: Pressure distribution(60 degrees)

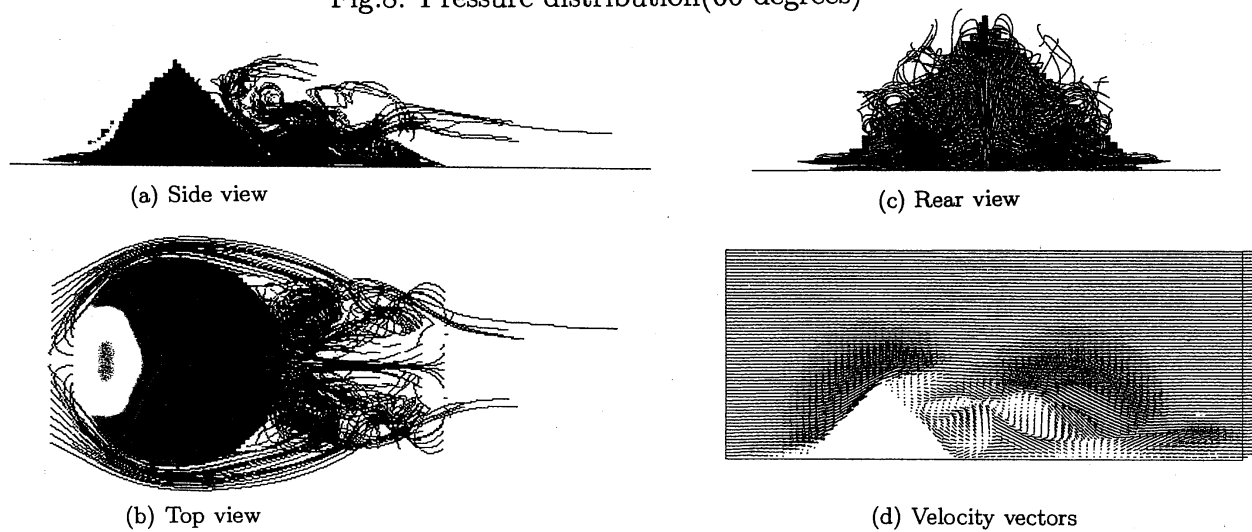


Fig.9: Instantaneous streamlines(90 degrees)

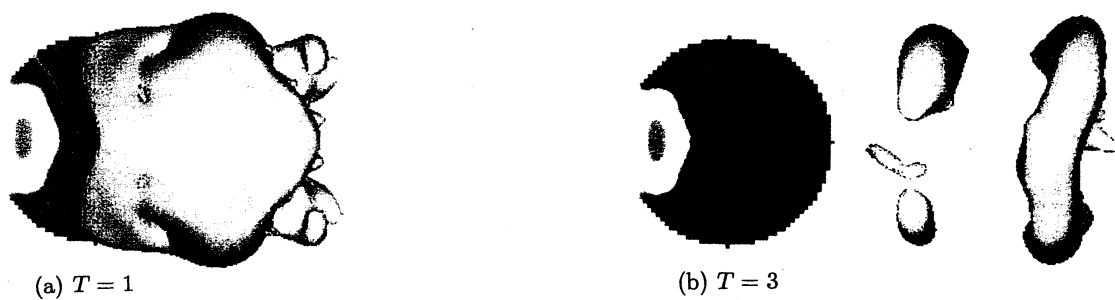


Fig.10: Pressure distribution(90 degrees)