

專 論

黏滯性層流通過不同幾何形狀障礙物 尾流區之數值模擬

Numerical Simulation of Viscous Laminar Wake Flow Pass Different Geometric Shapes of Structures

淡江大學水資源及
環境工程研究所教授

曾 振 遠

Cheng-Yuan Tseng

淡江大學航空工程學系
講 師

李 世 鳴

Shi-Min Lee

淡江大學水資源及
環境工程研究所碩士

許 敏 能

Miin-Neng Sheu

摘 要

本文利用 FAVOR 以數值方法模擬不可壓縮黏滯層流通過不同幾何形狀障礙物，主要探討尾流形成區中漩渦形成及運動狀況。對流項採用高精確度 QUICK 方法。模擬障礙物幾何形狀包括圓柱、正方形柱、橢圓柱、與菱形柱，模擬流況雷諾數皆為 100。研究物理量分別為速度、壓力、渦度值、漩渦中心速度、同側漩渦之中心距、漩渦脫離擺動週期及史脫荷數 (Strouhal Number)。以流場流線圖、速度圖、等壓圖、等渦流線圖及煙線圖等，說明其尾流區中運動的情形。結果顯示對圓柱之史脫荷數與試驗分析結果完全吻合，而漩渦形成與運動過程中，於障礙物後尾流中形成上下交替之漩渦，並產生週期性的卡門漩渦羣 (Karman Vortex Street)。本文貢獻乃是應用 FAVOR 方法對不同幾何形狀障礙物複雜邊界問題可方便處理，並利用渦度圖、壓力圖及煙線圖來表達漩渦位置及運動情形，也是應用來求漩渦中心速度與同側漩渦中心距之依據。

關鍵詞：史脫荷數、尾流、渦度值、障礙物形狀

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the flow field by expressing the streamline, velocity profile, equipressure, equivorticity, streakline, and to compare with the character of the wakes in different geometric shapes by Strouhal number, velocity of vortex centers, and two vortex centers at the same row. Numerical method adopted the FAVOR method, which was induced from solving the complex boundary conditions for two-phase flow successfully applied to this simulation. The convection term was used highly accurate QUICK method. The simulation results include circular, elliptic, square, and rhombic cylinders. The flow conditions were accounted by Reynolds number. Basically, the simulation in

circular cylinder took Reynolds number 100.

Results have been shown that the shedding frequency, or the Strouhal number of vortices in the wake of circular cylinder by simulation is almost the same as the experimental data. Wake of square cylinder has the least Strouhal number and elliptic cylinder has the largest Strouhal number. The contribution of this study has shown the equivorticity lines, and equipressures. And streaklines have appeared the distinguished vortex street, which can not be expressed by the streamlines in other papers. The velocity of vortex centers and the distance of two vortex centers at the same row, can be calculated.

一、前 言

當流體通過障礙物時，由於邊界層產生分離效應 (Separation)，使流體在障礙物四周形成旋性流 (Rotational Flow)，於障礙物後方之旋性流維持這種性質往下游區傳輸，此旋性流場即謂之尾流 (Wakes)。因黏滯性尾流流況尚無理論解析，故其研究方法經常藉助試驗及數值模擬來觀察流體通過障礙物後流況發生變化之各種物理現象。由於數值模擬比較方便、不昂貴且技巧趨向成熟，故經常被使用。常用的數值方法有兩種，第一種動量方程式及連續方程式以速度及壓力為因變數，直接求解速度——壓力。第二種將黏滯性運動方程式轉換成漩渦擴散方程式 (Vorticity Transport Equation) 求解的變數為流函數 (Stream Function) 及渦度值 (Vorticity)，並由流函數與速度之關係求得速度。Davis 及 Moore 於 1982 與 1983^(6,7) 應用第一種方法模擬方塊後尾流流況，因採用高次內差函數，故對邊界問題上的處理變得很複雜；Baba 和 Miyata 1987⁽⁸⁾ 應用邊界協調座標系統處理圓柱邊界。應用第二種方法者有 Emmons 及 Formm 等人^(7,8,9,16)，其缺點是無法直接了解計算流場內壓力分佈情形，必須藉助修改動量方程式變成壓力項之波以松方程式 (Poisson's Equation) 來求出壓力分佈，同時在界定邊界條件上之渦度值較為困難，也不容易擴展為三維流場的計算方法。綜合上述兩種方法，在處理複雜障礙物邊界上仍是相當麻煩的問題，有限差分方法來處理複雜邊界問題經常藉助於協調邊界轉換 (Boundary-Fit Coordinate) 達成，所以

大部份只對一種形狀之障礙物進行模擬。本文主要探討不同幾何形狀障礙物之尾流差異情形，其目的在探討漩渦形成、漩渦運動狀況、漩渦脫離擺動週期、兩漩渦中心距及漩渦中心移動的速度等，提供一個簡易、有效且精確的處理方法。採用 FAVOR⁽⁹⁾ (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 方法，不僅可以避免做邊界附合座標轉換，並可簡易的解決障礙物邊界問題。動量方程式中對流項 (Convective term) 仍採用 Leonard 1979⁽¹⁴⁾ 所提出 QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) 有限差分法，這個方法是一次曲線內插上風法，其精確度為三階 (Third-Order)，可以增加動量方程式解出新時刻的速度值之精確度。

模擬之流場為一個無限大的二維平面區域。上游區以均勻流速通過障礙物，下游區以無流速梯度變化流出計算區域，障礙物兩側均假設為無窮遠處。探究流況以雷諾數 (Reynolds Number) 來區分，障礙物包括圓柱、橢圓柱、正方形柱、菱形柱等不同幾何形狀，相同雷諾數時比較各種不同幾何形狀障礙物對尾流區之影響。因每一雷諾數所需要之計算時間於 Prime 9955 電腦約為 40 小時，故僅比較雷諾 100。結果顯示圓柱之史戴荷數與試驗分析結果相當吻合，障礙物後尾流形成上下交替漩渦，向下游運動過程中並產生週期性的卡門漩渦羣 (Karman Vortex Street)。

二、理論基礎

動量方程式及連續方程式求解不可壓縮黏滯層

流場中速度與壓力等各種物理現象變化。其假設條件如下：

- (1)障礙物在垂流方向——即Y軸，以特徵長度B表之。亦即為圓柱直徑、橢圓柱長軸、正方形柱寬及菱形柱對角線。
- (2)流體為不可壓縮黏滯性流體。
- (3)運動黏滯係數為定值的連續體，並且滿足牛頓型流體之特性。
- (4)整個計算為二維流場，即在Z軸方向取一單位長度。
- (5)流動方向垂直重力場方向故略重力作用。

1. 統御方程式

在卡氏座標系 (Cartesian Coordinate) 中，連續方程式與動量方程式之張量形式表示如下：

連續方程式 (Continuity Equation)

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial V_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1)$$

動量方程式 (Momentum Equation)

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + \frac{\partial (V_i V_j)}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_i} + \nu \frac{\partial^2 V_i}{\partial X_j \partial X_j} \quad (2)$$

其中 自變數： X_1, X_2, t 因變數： V_1, V_2, P
 $i, j=1, 2$

X_1 : X軸方向 V_1 : 水平速度
 X_2 : Y軸方向 V_2 : 垂直速度
 t : 時間 P : 壓力

應用(1)及(2)二式解流體通過障礙物後尾流場，其邊界條件及初始條件如下：

(1) 上游邊界條件

上游區為一均勻流速與X軸平行，且不隨時間改變。

$$V_1 = U_0, V_2 = 0, t = 0 \quad (3)$$

(2) 下游邊界條件

下游區邊界條件經常對流況影響很大，而改變了真實的流況。因時間凍結 (Freeze) 時，動量方程式是橢圓型偏微分方程式處理，其邊界條件為平衡問題，必為一封閉區域內，故下游邊界以速度梯度為零，

$$\frac{\partial V_i}{\partial X_i} = 0 \quad (4)$$

當時間改變時，則是拋物線型偏微分方程式即發展型式處理，故下游區視為連續流況不再設定邊界。

(3) 依據流體的黏滯性可分成：

A. 可滑動性 (Free-Slip) 條件。

$$\frac{\partial V_i}{\partial X_j} \Big|_{T(B)} = 0 \quad (5)$$

$$V_j \Big|_{T(B)} = 0$$

B. 不可滑動性 (no slip) 條件。

$$V_i \Big|_{T(B)} = 0 \quad (6)$$

$$V_j \Big|_{T(B)} = 0$$

(4) 障礙物邊界

障礙物周界為不可滑動性邊界條件，其障礙物邊界處切線方向之速度皆為零。

(5) 初始狀況：假設當時間為零，流場中除了障礙物以外皆是均勻流況。

為了克服不同形狀障礙物之邊界狀況，採用 FAVOR 方法來解決，其方法是將整個流場以網格劃分成許多矩形控制體後，逐一分析並記憶每個控制體中流體的佔有率，藉着流體的佔有率可以判斷控制體位於流體中或障礙物內。因流場中部分控制體位於流體內，部份則位於障礙物內，所以計算流場物理量時，可能會有從流體內控制體跨越至障礙物內之控制體產生不連續現象，故須定義一特徵函數 $H(X_1)$ 以克服此種現象。 $H(X_1)$ 之定義如下：

$$H(X_1) = \begin{cases} 1.0, & \text{若 } X_1 \text{ 在流體內。} \\ 0.0, & \text{若 } X_1 \text{ 在障礙物內。} \end{cases} \quad (7)$$

對於複雜障礙物邊界(1)及(2)已經無法適用，必須藉助(7)式來加以修正，整個推演過程 Hirt 在 1985年⁽¹¹⁾ 已完善的推導，最後再經過無因次化後，統御方程式如下所示：

$$\frac{\partial (H(X_1) V_i)}{\partial X_i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial (V_i)}{\partial X_j} = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 V_i}{\partial X_j \partial X_j} \quad (9)$$

其中 $Re = \frac{\rho U_0 B}{\mu}$

(8)、(9)與(1)、(2)比較很明顯的連續方程式經過化簡後必須考慮控制體內的流體佔有率，而動量方程式之變化不大只有對流項由原來的保守項改變成非保守項。(8)及(9)式為本文中的統御方程式，求解流場內之速度及壓力。

2. 渦度值計算

由於(8)及(9)二式速度值與壓力為因變數，無法直接獲得渦度值，必須利用已經適合連續與動量方程式的速度值。根據渦度定義

$$\omega = \frac{\partial V_j}{\partial X_i} - \frac{\partial V_i}{\partial X_j} \quad (10)$$

以求渦度值。

三、數值分析方法

1. 網格建立

利用控制體積觀念構建整個計算流場晶格，控制晶格配置與障礙物位置如圖1，為能獲得較準確的數值模擬結果，採用非均勻交錯晶格來計算流場。設定壓力(P)在控制晶格中心點，控制晶格四面為速度的流進與流出，其中X軸方向速度以U表示，Y軸方向速度以V表示，每一晶格示如圖2。

2. 差分方程式建立

(1) 動量方程式

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial V_i}{\partial X_j} = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 V_i}{\partial X_j \partial X_j}$$

(a) (b) (c) (d)

依據無因次之動量方程式構建下列差分式

(a) 時間項：採前時間差分法。

(b) 對流項：採用 QUICK 方法。

a. FUXⁿ：U 控制體積晶格在 X 軸之對流項。

b. FUYⁿ：U 控制體積晶格在 Y 軸之對流項。

(c) 壓力項 (DPXⁿ)：採用中央差分法。

(d) 黏滯阻力項 (VISXⁿ)：採用中央差分法。

可得 U 控制晶格的動量差分方程式

$$U_{ij}^{n+1} = U_{ij}^n + \Delta t \cdot (-DPX^n - FUX^n - FUY^n + VISX^n) \quad (11.1)$$

同理可得 V 控制晶格的動量差分方程式

$$V_{ij}^{n+1} = V_{ij}^n + \Delta t \cdot (-DPY^n - FVX^n - FVY^n + VISY^n) \quad (11.2)$$

(2) 連續差分方程式

$$\frac{\partial (H(X_i) V_i)}{\partial X_i} = 0$$

改寫成差分方程式為 (如下圖所示)

$$\frac{1}{AC_{ij}} * \left[\frac{U_{ij} AR_{ij} - U_{i-1,j} AR_{i-1,j}}{\Delta X_i} + \frac{V_{ij} AT_{ij} - V_{i,j-1} AT_{i,j-1}}{\Delta Y_j} \right] = 0 \quad (12)$$

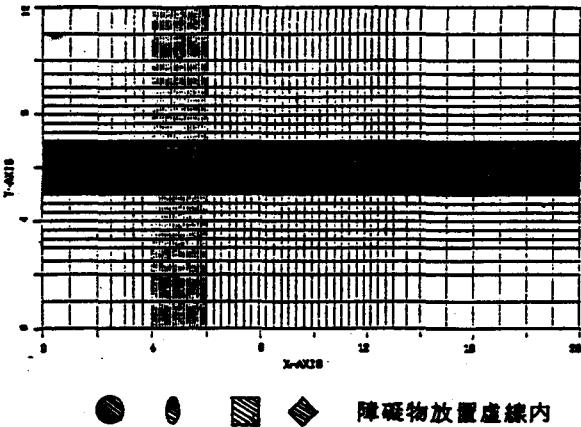


圖1 計算流場中控制晶格示意圖

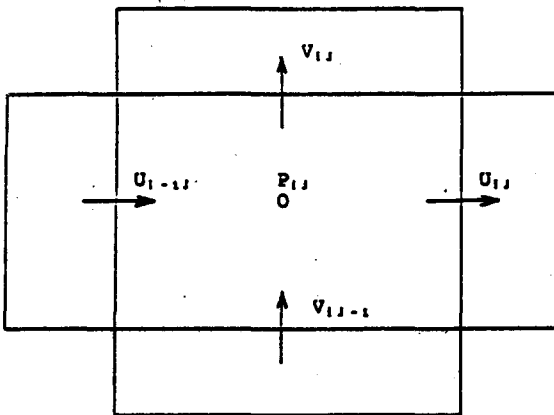


圖2 控制晶格中壓力及速度配置圖

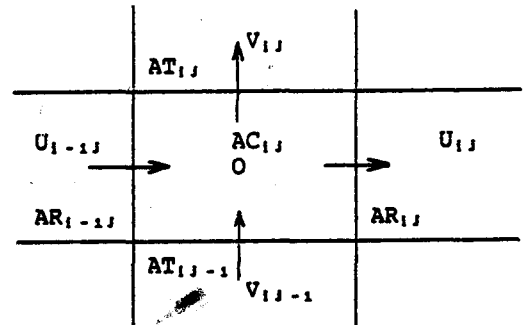


圖3 控制晶格中AC, AR, AT 之位置

其中AC_{ij}：每一個晶格中流體所佔有體積。

AR_{ij}：每一個晶格中能通過流體的右面面積。

AT_{ij}：每一個晶格中能通過流體的上方面積。

3. 疊代法則

MAC (Marker and Cells) [18] 法來求解，其基本概念為由動量差分式解出新時刻速度值，同時也必須滿足連續差分式才是真正的新時刻速度值。若無法滿足連續差分式時，表示流場中的速度值處於不平衡狀態，必須用壓力差加以修正直到滿足為止。而修正連續方程式是採用 MAC 法中以兩個相鄰晶格間之壓力差做為修正的依據。疊代過程必須使所有的格點皆要滿足允許的容忍誤差值內，即視為滿足連續方程式，本文所採用的絕對容忍誤差值為 $\epsilon < 0.005$ 。

4. 求解步驟

- (1) 輸入流場的各種參數，如 Re、設定圓心、半徑……等。
- (2) 由輸入的值將整個計算流場劃分成格網。
- (3) 計算出阻礙物所佔有的格點，及 AR、AT、AC。
- (4) 設定流場中的邊界條件及起始條件。
- (5) 以動量差分方程式，獲得下一個時刻之 U、V 預測值。
- (6) 判定是否滿足連續方程式，若未符合，則利用壓力差與速度相互修正直到滿足連續方程式為止。
- (7) 增加一個新時間之前先判斷是否要產生圖形檔。
- (8) 重複 4 ~ 8 步驟，直到最後設定終止時間。

5. 時間間距的選取與穩定分析

(1) 時間間距的選取

時間間距的選取有兩個限制 [12, 15]:

A.

$$\Delta t < \min \left\{ \frac{\Delta X_i}{|U_{i,j}|}, \frac{\Delta Y_j}{|V_{i,j}|} \right\} \quad (13)$$

(13) 式必須考慮整個計算流場內每一個控制晶格。為了增加安全性可以選取最小值，然後再以它的三分之一或四分之一為真正使用的時間間距。

B.

$$\nu \Delta t < \frac{1}{2} \frac{(\Delta X_i)^2 (\Delta Y_j)^2}{(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_j)^2} \quad (14)$$

最後(13)及(14)式必須同時考慮，並取兩者間較小者為時間間距。因(13)式中較(14)式為嚴格，故直接以(13)式考慮。本文中所取 $\Delta t = 0.03$ 。

6. 穩定分析

在分析動量方程式的穩定性之前，先忽略壓力項，只考慮 X 軸分量，如下：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \frac{\lambda}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (15)$$

將(15)中對流項，以 QUICK 方法改寫成差分方程式，並以顯性法形式

$$\begin{aligned} U_{i,j}^n &= U_{i,j}^n \\ &- \frac{C_x}{8} (U_{i-2,j}^n - 7 U_{i-1,j}^n - 3 U_{i,j}^n - 3 U_{i+1,j}^n) \\ &- \frac{C_y}{8} (U_{i,j-2}^n - 7 U_{i,j-1}^n - 3 U_{i,j}^n - 3 U_{i,j+1}^n) \\ &+ S_x (U_{i-1,j}^n - 2 U_{i,j}^n + U_{i+1,j}^n) \\ &+ S_y (U_{i,j-1}^n - 2 U_{i,j}^n + U_{i,j+1}^n) \end{aligned} \quad (16)$$

$$C_x = \frac{U \Delta t}{\Delta X}, \quad C_y = \frac{V \Delta t}{\Delta Y}$$

$$S_x = \frac{\Delta t}{R_x \cdot (\Delta X)^2}, \quad S_y = \frac{\Delta t}{Re \cdot (\Delta Y)^2}$$

利用 Von-Neuman Stability 分析代入(16)整理

$$\begin{aligned} G(\theta) &= \frac{A(t+\Delta t)}{A(t)} \\ &= 1 - \left[\frac{C_x}{4} (1 + \cos \theta_x) + 2 \cdot S_x \right] \cdot (1 - \cos \theta_x) \\ &\quad - \left[\frac{C_y}{4} (1 + \cos \theta_y) + 2 \cdot S_y \right] \cdot (1 - \cos \theta_y) \\ &\quad - i \left\{ C_x \sin \theta_x \left[1 + \frac{(1 - \cos \theta_x)}{4} \right] \right. \\ &\quad \left. + C_y \sin \theta_y \left[1 + \frac{(1 - \cos \theta_y)}{4} \right] \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

令 $C_x = C_y, S_x = S_y$

又差分式穩定條件為 $-1 \leq G(\theta) \leq 1$ ，(17) 式中 $\cos \theta$ 恒小 1，故 $G(\theta) \leq 1$ 恒成立。

$-1 \leq G(\theta)$ 之限制條件下，當 $\theta = \pi$ 時，

$$\Delta t \leq \frac{1}{\left(\frac{2}{Re \cdot (\Delta X)^2} + \frac{2}{Re \cdot (\Delta Y)^2} \right) + \frac{|U|}{2\Delta X} + \frac{|V|}{2\Delta Y}} \quad (18)$$

四、結果與討論

1. 結果

模擬結果以流線圖、等渦度值圖、速度圖及煙線圖來表示尾流中各種現象。當 $T = 72$ [圖 4, 5, 6, 7, 8] 時在圓柱上緣產生漩渦； $T = 73$ ，上緣漩渦已發生分離現象，下緣則有小漩渦形成；當 $T = 74$

上緣漩渦已完全脫離，往下游區移動，下緣之小漩渦已逐漸擴大；當 $T=75$ ，下緣漩渦已形成完畢，並有往下游區移動的現象；當 $T=77.6$ 上緣已往下游區移動，上緣有小漩渦產生；當 $T=77.84$ ，上緣的漩渦已形成，其形狀與 $T=72$ 秒所形成漩渦相當接近，可知此時流場之運動具有週期性而重複出現，上列現象自 $T=75$ 至 $T=77.84$ 未於圖中表示。

分析漩渦分離頻率採用史戴荷數 (Strouhal Number)。史戴荷數之定義為：

$$f = \frac{1}{\tau} \quad (19)$$

$$S = \frac{f B}{U_0} \quad (20)$$

其中 τ 分離週期。

f 頻率。

B 特徵長度。

U_0 特徵流速。

利用尾流之現象重現時間計算出分離的週期 τ ，由 (19) 及 (20) 式計算出表 5-1、表 5-2 中分別列出圓柱、橢圓柱、正方形柱及菱形柱等障礙物的卡門漩渦羣之擺動週期及史戴荷數。

$Re=100$

障礙物	卡門漩渦之擺動週期
圓形柱	5.84
橢圓柱	4.95
正方形柱	6.30
菱形柱	5.40

表 5-1 卡門漩渦擺動週期與障礙物比較表

$Re=100$

障礙物	史戴荷數
圓形柱	0.170
橢圓柱	0.202
正方形柱	0.158
菱形柱	0.185

表 5-2 史戴荷數與障礙物比較表

雷諾數	卡門漩渦擺動週期	史戴荷數	同側漩渦中心距
100	5.84	0.170	4.8(B)
200	4.8	0.208	4.2(B)
500	4.2	0.238	3.8(B)

表 5-2-1 圓柱體於不同雷諾數之比較

在表 5-2 中顯示圓柱於雷諾數 100 時史戴荷數為 0.170 與 Roshko[4] 所得值 0.168 相當接近。印證本文採用方法非常精確，可提高對橢圓柱及菱形柱所模擬結果顯示，不同幾何形狀障礙物其漩渦擺動週期也不相同，其中以橢圓柱所擺動週期為最短，而正方形柱為最長。另模擬圓柱雷諾數 200 與 500 之結果如表 5-2-1，由表中顯示隨著雷諾數升高漩渦擺動週期反而縮短；而其史戴荷數隨著增加。

目前多數文獻中探究尾流區流況皆用速度圖及流線圖來表達，却始終無法充分的表現出漩渦的位置與形狀，僅能表現出尾流區中漩渦形成與產生上下擺動的現象，而本文中則利用五種圖形來表達尾流區內漩渦位置及其各種現象，其中渦度圖、壓力圖及煙線圖可完全的顯示出漩渦形成、脫離、位置、形狀及卡門漩渦羣。量測漩渦中心距與漩渦中心速度皆利用渦度圖及壓力圖相互配合求得。

2. 討論

(1) 漩渦形成區

流體通過障礙物受到邊界層效應的影響會發生分離現象，隨著時間增加在障礙物的後方形成交替擺動漩渦。由結果顯示橢圓柱及菱形柱其後方的速度變大，故其漩渦擺動週期較短，依據理論觀念漩渦中心是漩渦值最大所在，由計算結果顯示渦度確實在中心的位置為絕對值最大。在等壓圖中表現出，當流體通過障礙物時於障礙物前緣為流場中壓力值最大所在，與物理觀念吻合。

(2) 史戴荷數

史戴荷數表現尾流區內渦流產生的頻率。此頻率若與構造物振動頻率相同，將會引起共振現象，對構造物的影響很大，甚至會破壞構造物。不同幾何障礙物與史戴荷數之關係列於表 5-2 中，由表中圓柱與正方形柱之史戴荷數較接近試驗結果。

(3) 同側漩渦的中心距離與中心速度

漩渦的形成是在障礙物後緣上、下交互產生，

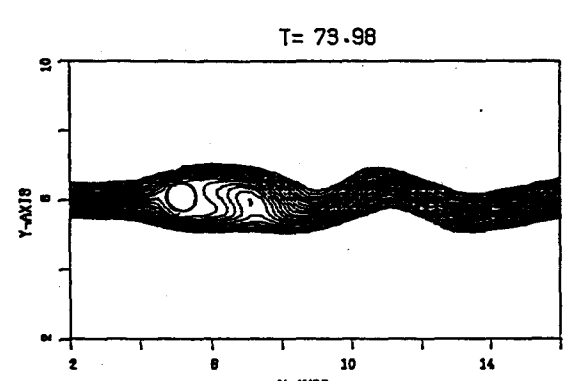
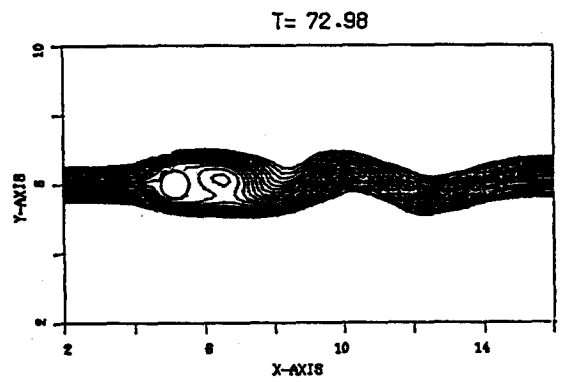
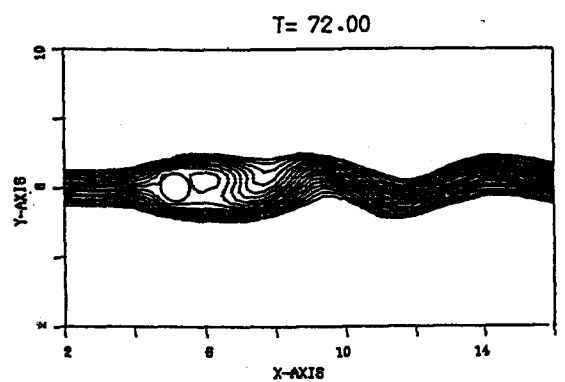
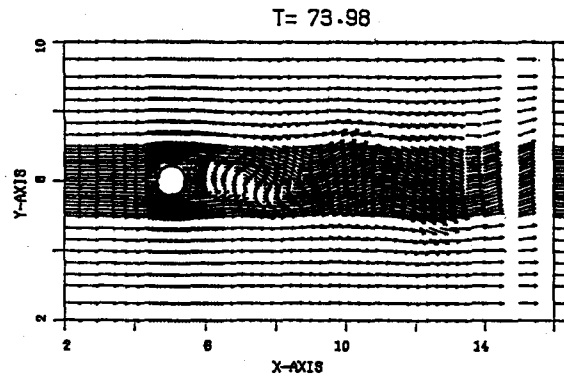
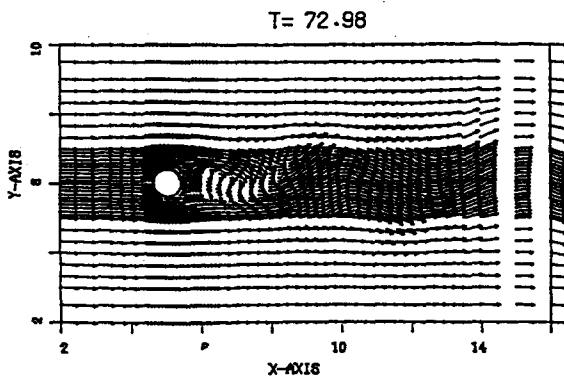
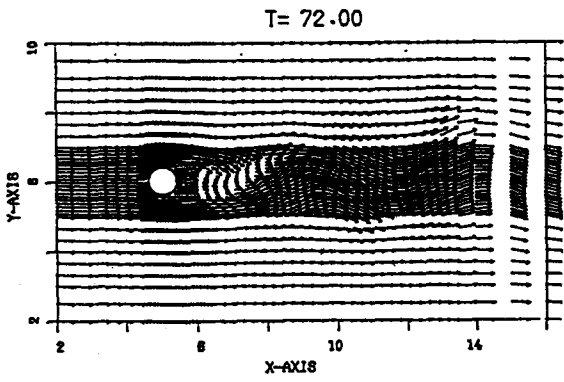


圖 4 圓柱體於雷諾數 100, $T=72-73.98$ 之速度圖

圖 5 圓柱體於雷諾數 100, $T=72-73.98$ 之流線圖

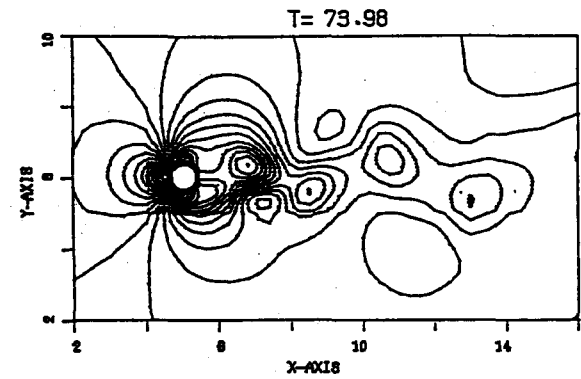
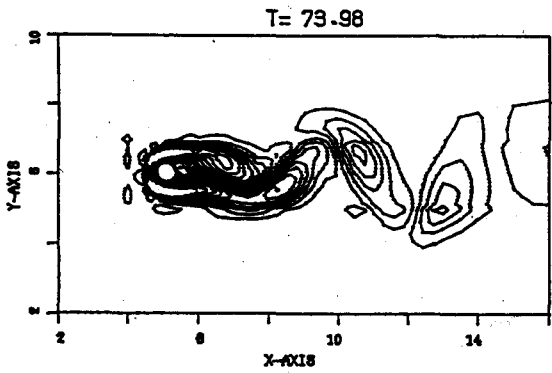
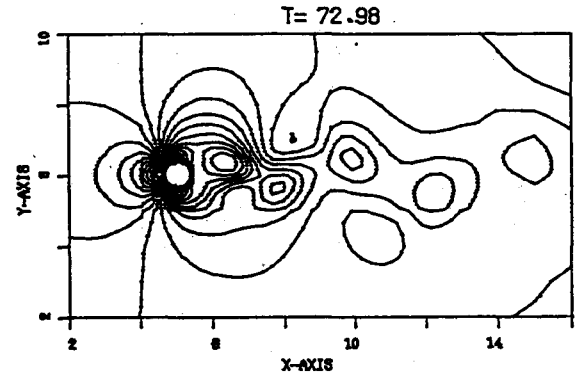
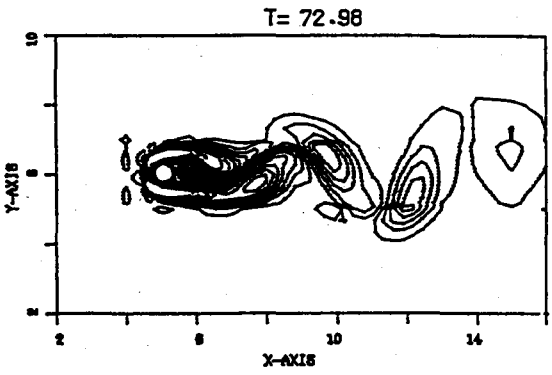
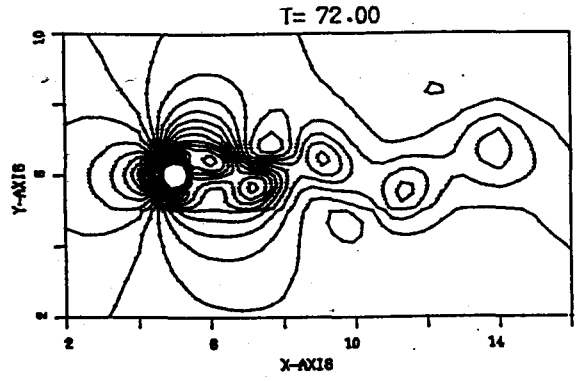
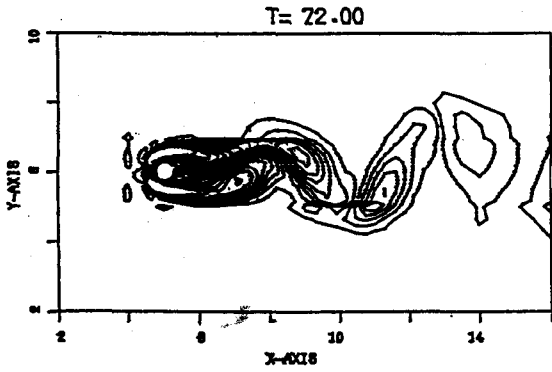


圖6 圓柱體於雷諾數100, $T=72-73.98$ 之渦度圖

圖7 圓柱體於雷諾數 100, $T=72-73.98$ 之壓力圖

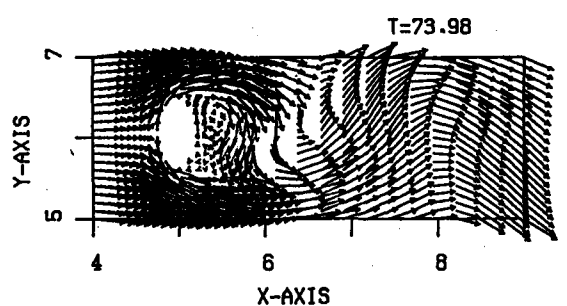
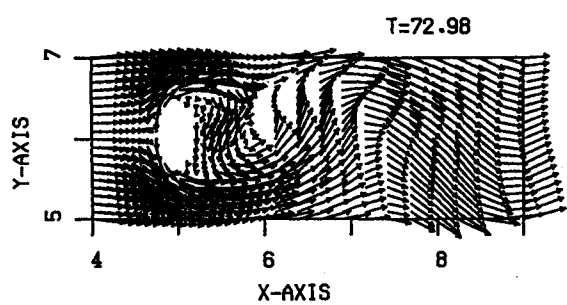
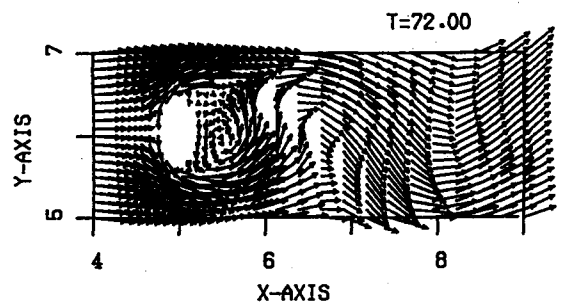
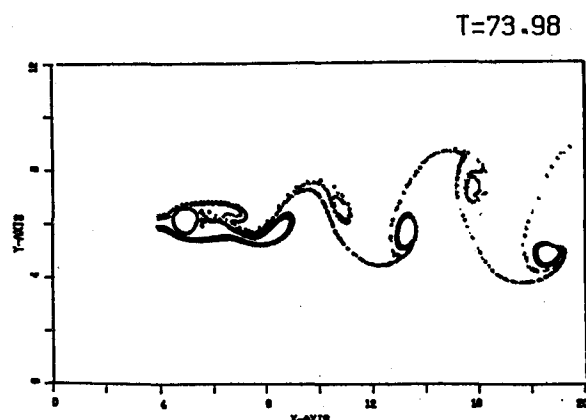
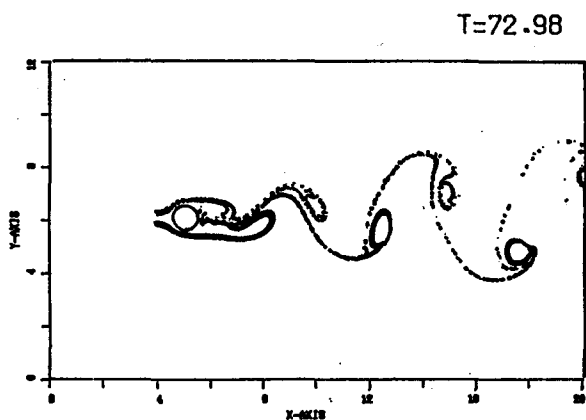
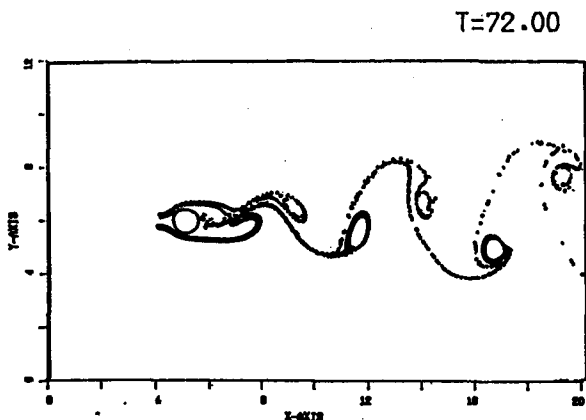


圖 8 圓柱體於雷諾數100, T72-73.98 之煙線圖

圖 9 圓柱體於雷諾數100, T72-73.98之速度放大圖

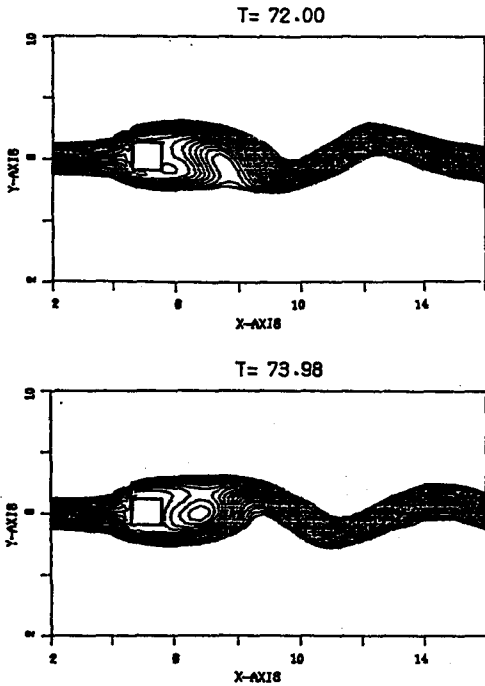


圖10正方形柱於雷諾數100, $T=72-73.98$ 之流線圖

形成後漩渦中心會向下游區移動，應用等壓力圖與等渦度圖即可確定每一個時刻漩渦所在的位置，如此不僅可以量測同側毗鄰的中心距離，更可以進一步得到漩渦的中心速度。漩渦中心距如表 5-3所示，結果顯示若漩渦恰脫離障礙物時，其同側毗鄰的中心距離會較小，但開始移動以後其距離趨向定值，而不同的幾何形狀其中心距不同。由表5-3與5-1比較顯而易見，同一雷諾數，漩渦的中心距隨卡門擺動週期升高而加大，而隨着史戴荷數增加而縮短。

$Re=100$

障 礙 物	漩 渦 中 心 距
圓 形 柱	4.8(B)
橢 圓 柱	4.0(B)
正 方 形 柱	5.5(B)
菱 形 柱	4.6(B)

表 5-3 漩渦中心距與障礙物比較表

(5)不同障礙物漩渦中心移動速度

計算漩渦中心的移動速度是固定一個漩渦每個時刻的位置，結果顯示如表 5-4。當漩渦剛脫離時

，其移動速度較小，愈往下游區移動其速度愈快，但直到穩定區後，其漩渦中心速度趨向定值。量測漩渦中心速度方法仍是漩渦剛從障礙物表面脫離為第一個量測位置，追蹤此漩渦經過1.78秒後所在之位置，即可求出表 5-4中第一欄之速度，同理再經過1.97秒求出第二欄。由於漩渦從障礙物表面脫離至漩渦穩定區其速度皆會隨時改變，故量測之位置不同其速度也不一樣，惟一可確定是其速度是逐漸增快趨定值。

障 礙 物	72.00-73.98	73.98-75.95
圓 形 柱(100)	0.66	0.81
橢 圓 柱(100)	0.72	0.07(76,94)
正 方 形 柱(100)	0.61	0.76
菱 形 柱(100)	0.67	0.84

表 5-4 不同障礙物漩渦中心速度比較

五、結論與建議

本文應用數值方法模擬流體通過不同幾何障礙物之尾流區流場的情形綜合各項結果做以下的結論：

- 1.引用 FAVOR 方法來處理流體通過不同幾何形狀障礙物之複雜邊界問題，由模擬結果顯示 FAVOR 可以方便處理複雜邊界問題。
- 2.採用高精確度方法，可以由模擬出圓柱之史戴荷數與試驗結果比較得知。
- 3.目前文獻中對尾流區流況探討皆應用流線圖與速度圖來表達，却無法充分表現出尾流區運動狀況。本文中多增加以煙線圖、渦度及壓力圖來表達尾流區中漩渦運動狀況、〔圖11,12,13,14〕。
- 4.在相同的雷諾數之下，不同形狀障礙物有不同的史戴荷數，以橢圓柱最大，正方形柱最小。
- 5.同側的漩渦中心距隨卡門漩渦之擺動週期升高而加長。
- 6.漩渦的中心移動速度愈往下游區速度愈快，當此速度與均勻流速相同時漩渦完全消失。
- 7.本文中已經完成了將障礙物轉換一個角度，進行數值模擬，如菱形柱即是正方形柱轉了45度角。

本數值模擬為二維平面流域，為能更確實探討不同障礙物尾流情形，建議擴展到三維流場與實際較符合。

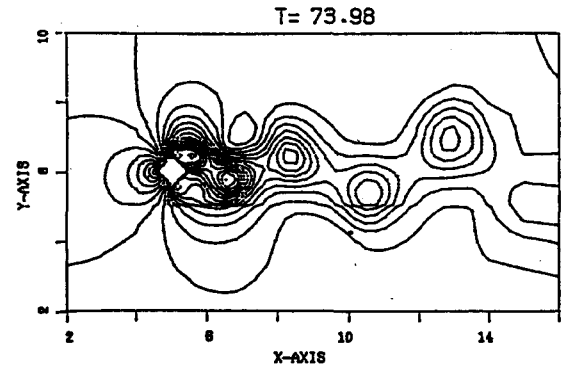
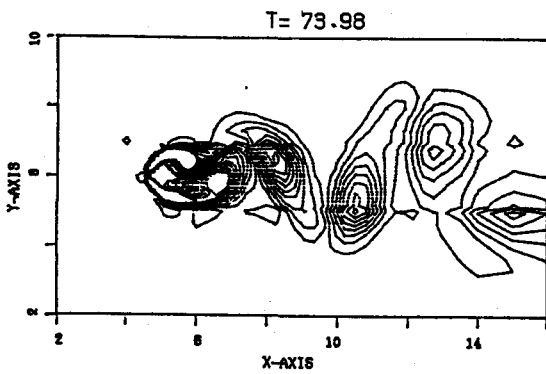
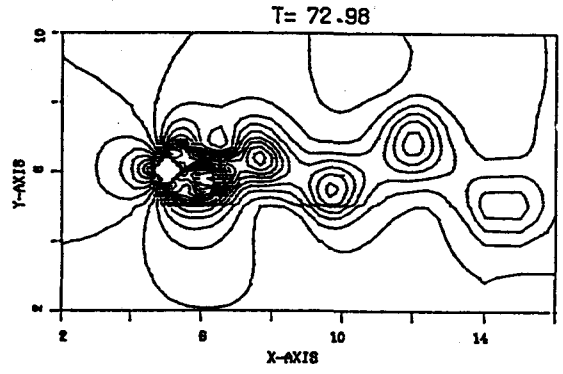
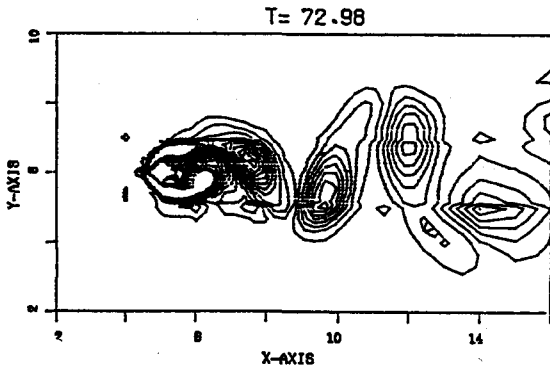
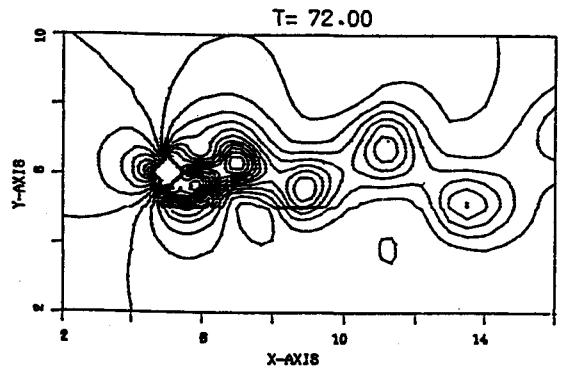
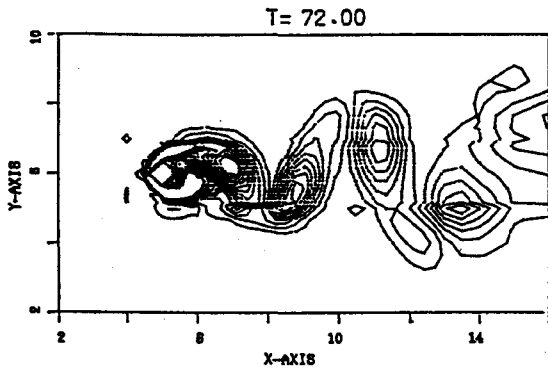


圖11菱形柱於雷諾數100, $T=72-73.98$ 之渦度圖

圖12菱形柱於雷諾數100, $T=72-73.98$ 之壓力圖

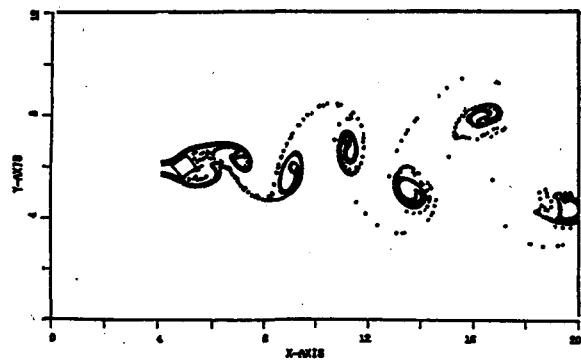
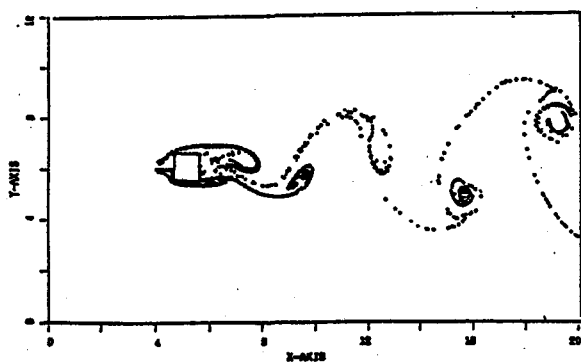
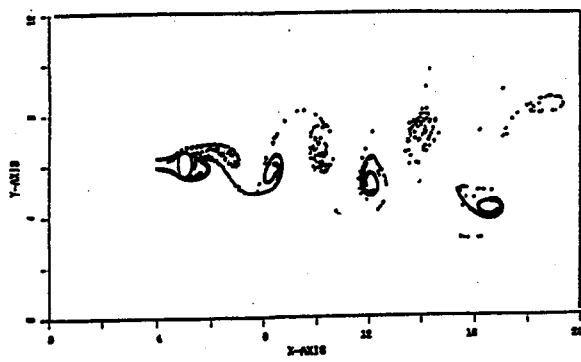
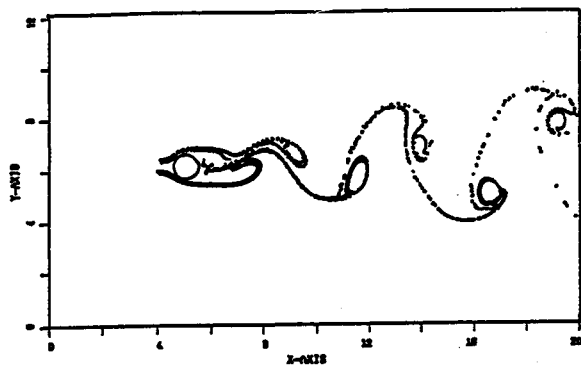
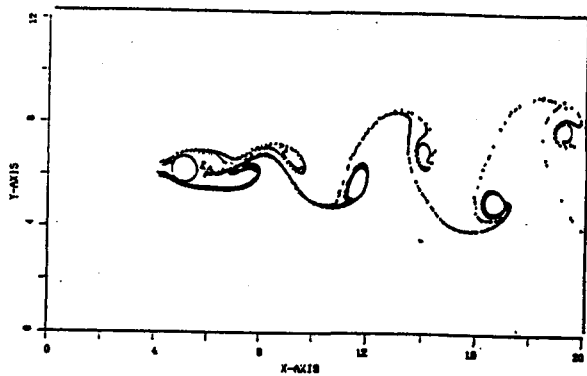
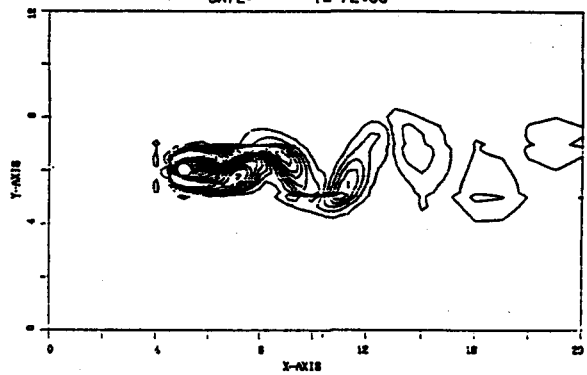


圖13不同障礙物於雷諾數100, $T=72$ 之煙線比較圖



CH72- $T=72.00$



CP72 $T=72.00$

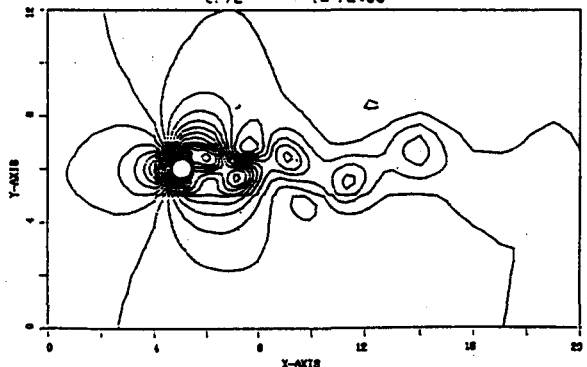


圖14圓柱體同雷諾數在 $T=72$ 秒之三種圖比較

參 考 文 獻

1. 曾振遠「黏性尾流之渦流運動預測模式」，農業工程學報第34期，民國77年9月。PP18~31
2. 曾振遠、劉佳興，「黏滯流通過方形障礙物之流場模擬」，農業工程學報第35卷第3期，民國78年9月。PP1~15
3. Baba, N. and H. Miyata, "Higher Accurate Solution of Vortex Geration from a Circular Cylinder in a Oscillatory Flow," J. of Computational Physics, Vol. 69, PP. 362-369, 1987.
4. Daily, J. W., and Donald R. F. Harleman *Fluid Dynamics*, Addison-Wesley Publishing Company, INC., 1966.
5. Davis, R. W., and E. F. Moore, "A Numerical Study of Vortex Shedding from Rectangles," J. Fluid Mech., Vol. 116, PP. 475-506, 1982.
6. Davis, R. W., E. F. Moore, and L. P. Purtell, "A Numerical-Experimental Study of Confined Flow around Rectangular Cylinders," Phys. Fluid, Vol. 27, PP46-59, 1983.
7. Emmons, H. W., "The Numerical Solution of Turbulence Problem," in Proc. First Symp. Applied Mathematics. Am. Math. Soc., Providence, R. I., 67, 1949.
8. Fornberg, B., "A Numerical Study of Viscous Flow Past a Circular cylinder," J. Fluid Mech., Vol. 98, Part4, PP. 189-855, 1980.
9. Formm, J. E. and F. H. Harlow. "Numerical Solution of the Problem of Vortex Street Development," Los Scientific Laboratory, New Mexico, Alamos 1963.
10. Harlow, F. H., and J. E. Welch, (1965), "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface," Physics of Fluid, Vol. 8, No. 12, PP. 2189, 1965.
11. Hirt, C. W. and J. M. and J. M. Sicilian, "A Porosity Tech-nique fhe Deffinition Obstacles in Rectanqu-lar Cell Meshes," Flow Science, INC. Los Alamos, New Mexico, August, 1985.
12. Hirt, C. M., B. D. Nichohls, and N. C. Romero, "SOLA-A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Fluid Flows," Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-5852 and "Addendum," LA-5852, Add. (1975).
13. Jordan, S. K., and J. Eromm, "Oscillatory Drag, Lift, and Torque on a Circular Cylinder in a Uniform Flow," The physics of Fluids Fluids Vol. 15, No. 3, 1972.
14. Leonard, B. P., "A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 19 (1979) 59~98.
15. Nichols, B. D., C. W. Hirt, and R. S. Hotchkiss, "A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries," LA-8355, UC-32 and Uc-34, 1980.
16. Payne, R. B., "Calculation of Unsteady Viscous Flow Past a Circular," J. Fluid Mech., Vol. 4, May, PP. 81-88, 1958.
17. Roshko, A., "On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets," NACA TR 1191, (1954).
18. Welch, J. E., F. H. Harlow, J. P. Shannon, and B. j. Daly, "The MAC Method," LASL Report No. LA-3465, Los Alamos Scientific Labirtory. Los Alamos, New Kexico 1966.

收稿日期：民國81年 5月29日

修正日期：民國81年 7月22日

接受日期：民國81年 7月28日