

揚力体におけるジェットによる循環制御の シミュレーション

計算流体力学研究所 桑原 邦郎 (Kunio Kuwahara)
計算流体力学研究所 山本 恵理子 (Eriko Yamamoto)
Institute of Computational Fluid Dynamics
日本大学・理工学部 小紫 誠子 (Satoko Komurasaki)
College of Science and Technology, Nihon University

1 緒言

翼に代表されるような揚力体は、その周りに循環を発生させることによって揚力を生ずる。したがって、循環を制御することで揚力を効果的に増加させることができる。循環を制御する方法のひとつとして、物体表面からジェットを噴射させることが考えられる。循環が大きくなる方向にジェットを噴射させれば良いのだが、物理的には境界層中や剥離点付近に噴射流が混入し現象が複雑化する。したがって、数値計算でこれを捉えるためには、計算コードの計算精度が高いことはもちろんのこと、非定常流れの計算がある程度安定に進められるという確証がなければ、信頼性の高い計算は不可能である。ここでは、安定的に計算を進めるために、乱流モデルや LES モデルを用いずに、陽的にモデルが入らない 3 次精度上流差分によって複雑な流れを扱う。また数値計算において、物体に働く揚力を正確に捉えるためには、計算領域が有限であることから、遠方境界において循環を補正すべきであり、そのような条件を考慮した。

2 数値計算法

基礎方程式は、2 次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式と連続の式を用いる。

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \operatorname{grad} \mathbf{u} = -\operatorname{grad} p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u}. \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}, p, t, Re$ はそれぞれ速度ベクトル、圧力、時間、レイノルズ数を表す。高レイノルズ数流れにおいては、強い非定常性をもつので、方程式を時間発展的に解く必要がある。

これらの方程式を解くために、projection法を用いる。この方法により、圧力に関するポアソン方程式が導かれる。

$$\Delta p = -\text{div}(\mathbf{u} \cdot \text{grad} \mathbf{u}) + \frac{D^n}{\delta t} \quad (3)$$

$$D = \text{div} \mathbf{u},$$

ここで n は時間ステップで、 δt は時間増分である。本来 D は 0 であるが、実際には時間 n における D^n は 0 とは限らない。従って $\frac{\partial D}{\partial t}$ においては次の時間における値 D^{n+1} は 0 となることを期待し、 $\frac{D^n}{\delta t}$ は補正項として残しておく。

本計算では、計算精度の向上のために、方程式の離散化においては全ての空間微分項に多方向差分法を適用する。多方向差分法概念図を fig.1 に示す。2 次元においては、一般的な差分法では黒点の値を用いて中心の格子点における微分項を差分化するが (fig.1(a))、多方向差分法では、黒点のみならず、fig.1(b) のように斜めに位置する白点の情報も取り込んで計算するというものである。これは、例えば、流れが格子線に対して平行でない場合に精度が減少してしまう一般的な手法よりも、精度の維持が期待できる。

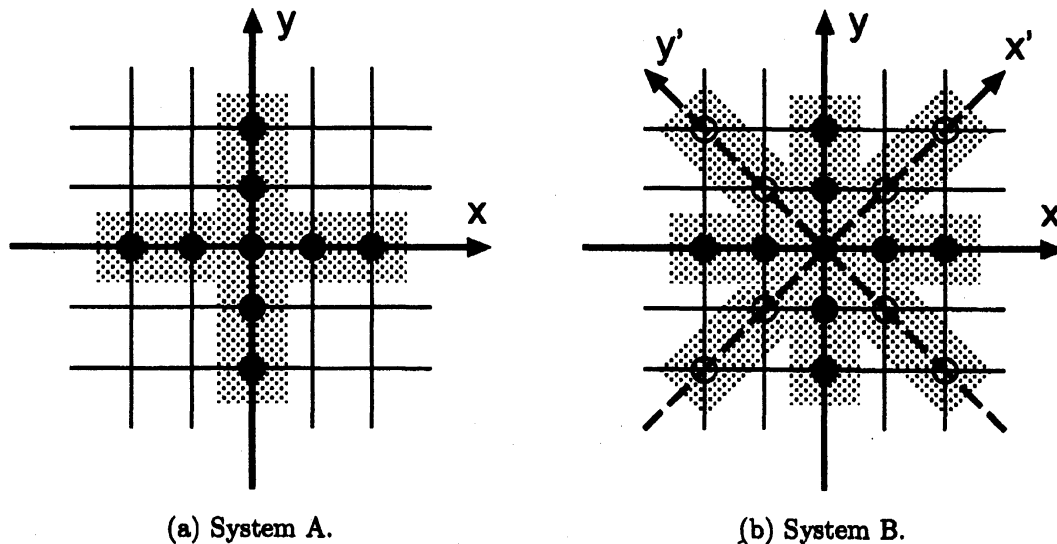


Fig.1 Multidirectional finite difference method.

また、高レイノルズ数流れを精度良く安定に扱うために、移流項に 3 次精度上流差分を適用する。時間積分においては、Crank-Nicolson 2 次精度陰解法を用いて時間発展的に解く。

ポアソン方程式を解く際には、Multi-grid 法により高速高精度化をはかる。また、反復計算においては SOR 法を用いる。

計算格子には、O 型格子を用いる。格子分割数は、周方向に 128、径方向に 64 とする (fig.2)。

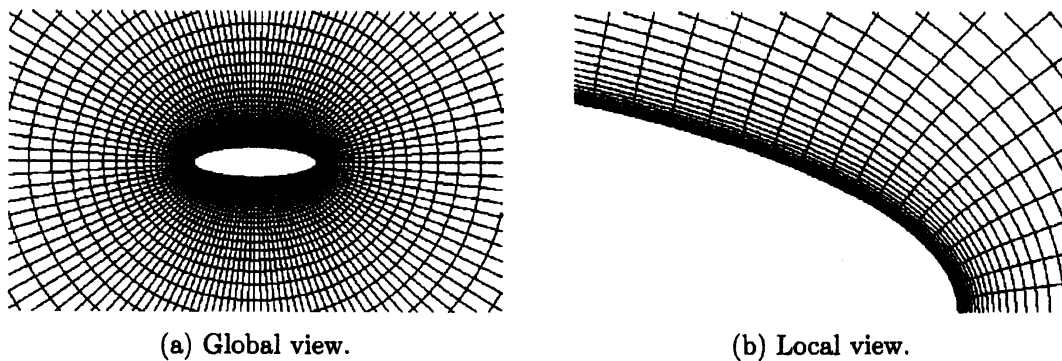


Fig.2 Computational grid.

揚力体として楕円柱を用い、fig.3のように左からの一様流に対して物体表面上の $j = 1/4, 1/8, 1/16, 1/32$ ($\times jmax$) (ただし $jmax$ は周方向における格子分割数) の各位置にジェット吹き出し口を設置した場合の計算を行う。また、楕円柱の形状は、fig.3のように長軸を x 、短軸を y として $x:y = 2:1, 4:1$ の2パターンを用意する。一様流の大きさを U として、物体表面に沿って大きさ $1.1U$ の速度でジェットは吹き出すものとする。楕円長軸を基にしたレイノルズ数は 2.0×10^5 とする。

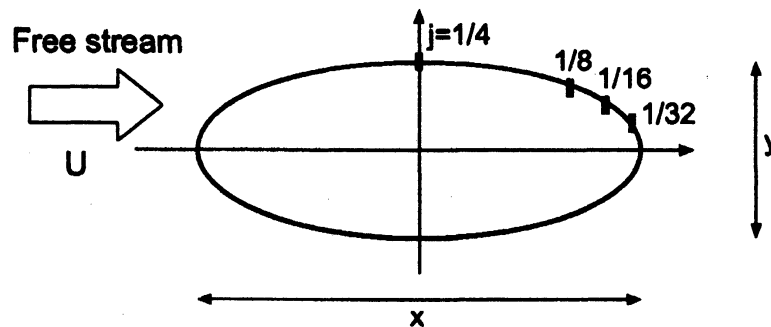


Fig.3 Starting point of the jet on the surface.

3 計算結果

ジェット吹き出し口付近の圧力場と速度ベクトルを fig.4 に示す。Fig.4(b) は (a) の拡大図であり、ジェットが物体表面から表面に沿って噴出している様子を表現している。

次に、 $x:y = 2:1$ の場合と $x:y = 4:1$ の場合の楕円柱周りの流れについて、各位置からジェットを吹き出した場合、及びジェット無しの場合についてそれぞれ瞬間の流れ場を圧力のシェーディングによって fig.5, fig.6 に示す。

また、同様にして、それぞれの楕円柱周りの流れについて、揚力係数 C_l と抵抗係数 C_d の時系列グラフを fig.7, fig.8 に示す。横軸を時間、縦軸を C_l もしくは C_d ととっている。

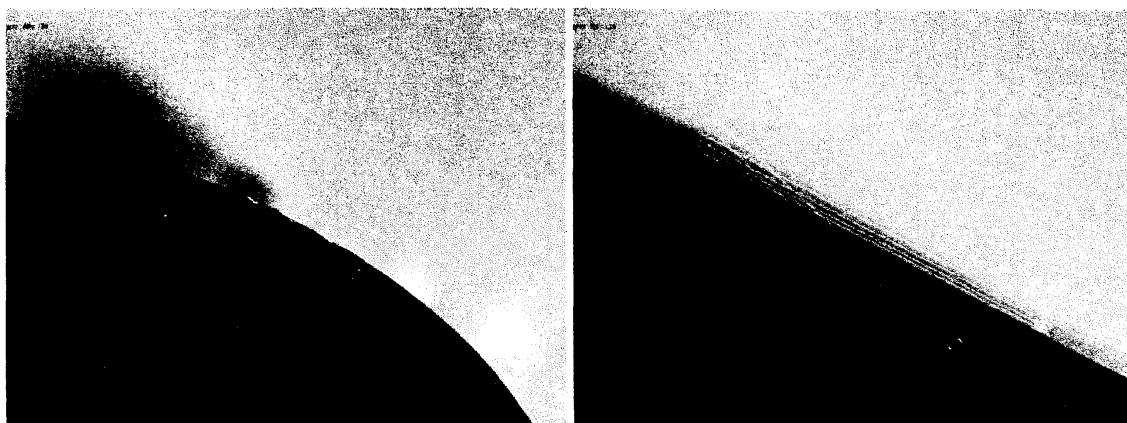
4 まとめ

本計算では、2次元楕円柱周りの流れにおいて、物体表面からジェットを噴射させることによって循環を制御するという問題を扱った。通常、このような高レイノルズ数流れの計算においては、物体における流れの剥離を正しく捉えることが非常に重要であり、そのためにより多くの格子点を配置するが、計算の安定性は悪くなり、数値計算においては困難を極める。本計算ではさらにジェットを噴射させて剥離を抑えるという計算上困難な問題に取り組んだ。

本計算の結果、 $x:y = 2:1$ の楕円柱では $j = 1/8 \times j_{max}$ 、 $x:y = 4:1$ の楕円柱では $j = 1/16 \times j_{max}$ の位置においてジェットを噴射した場合に、 C_d はほとんど0であるにもかかわらず、 C_l が顕著に増加するという現象を捉えることができた。ジェットは一様流の1.1倍という大きさに過ぎないにもかかわらず、ジェット噴射無しの場合における剥離位置近傍でジェットを噴射させることで、剥離点が後方へ下がっている様子が本計算結果より示されている。

参考文献

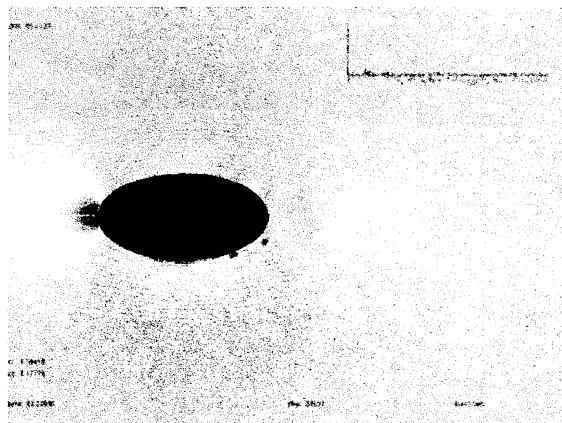
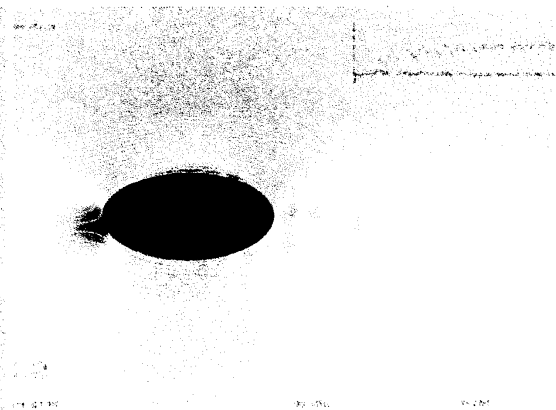
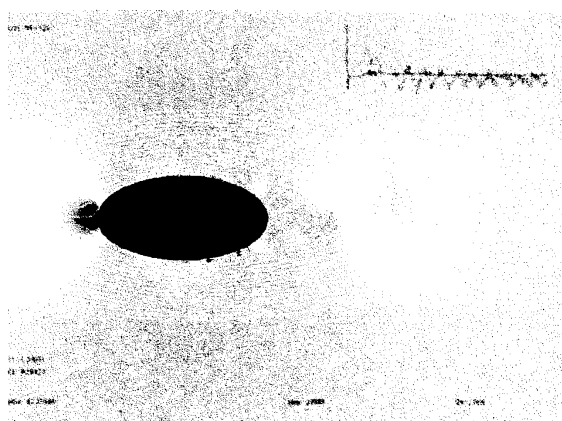
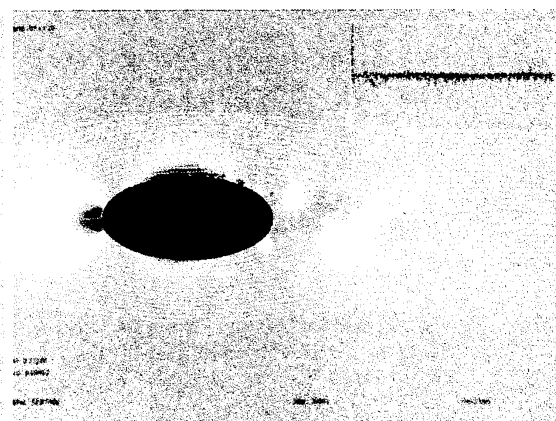
- 1 Boris, J.P., Grinstein, F.F., Oran, E.S. and Kolbe, R.L., 1992, "New insights into large eddy simulation", Fluid Dynamics Research 10, pp 199-228.
- 2 Kawamura, T. and Kuwahara, K., 1984, "Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness", AIAA Paper 84-0340.
- 3 Suito, H., Ishii, K. and Kuwahara, K., 1995, "Simulation of Dynamic Stall by Multi-Directional Finite-Difference Method", AIAA paper 95-2264.
- 4 Kuwahara, K., 1999, "Unsteady Flow Simulation and Its Visualization", AIAA Paper 99-3405.



(a) Local view around the jet.

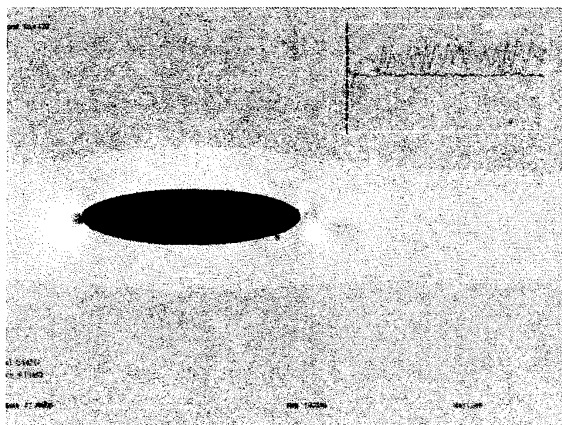
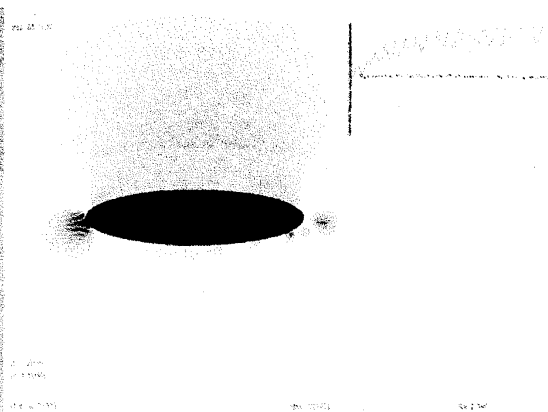
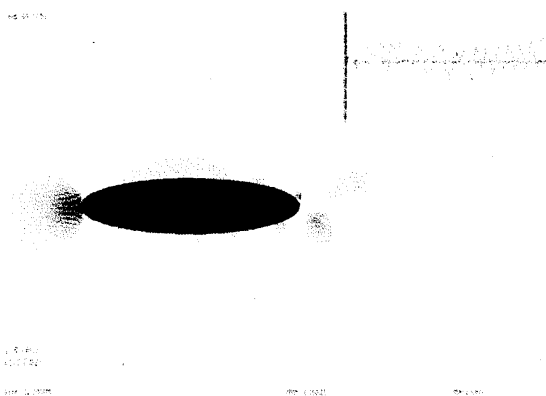
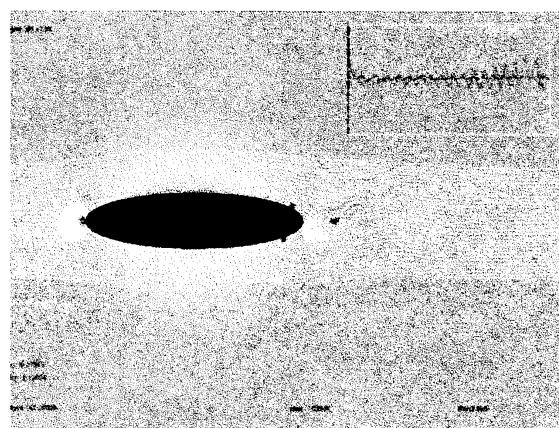
(b) Enlarged view.

Fig.4 Velocity vector near the starting point of the jet on the surface.

(a) $j = 1/4$ (b) $j = 1/8$ (c) $j = 1/16$ 

(d) No jet

Fig.5 Pressure field at each j in case of $x : y = 2 : 1$.

(a) $j = 1/8$ (b) $j = 1/16$ (c) $j = 1/32$ 

(d) No jet

Fig.6 Pressure field at each j in case of $x : y = 4 : 1$.

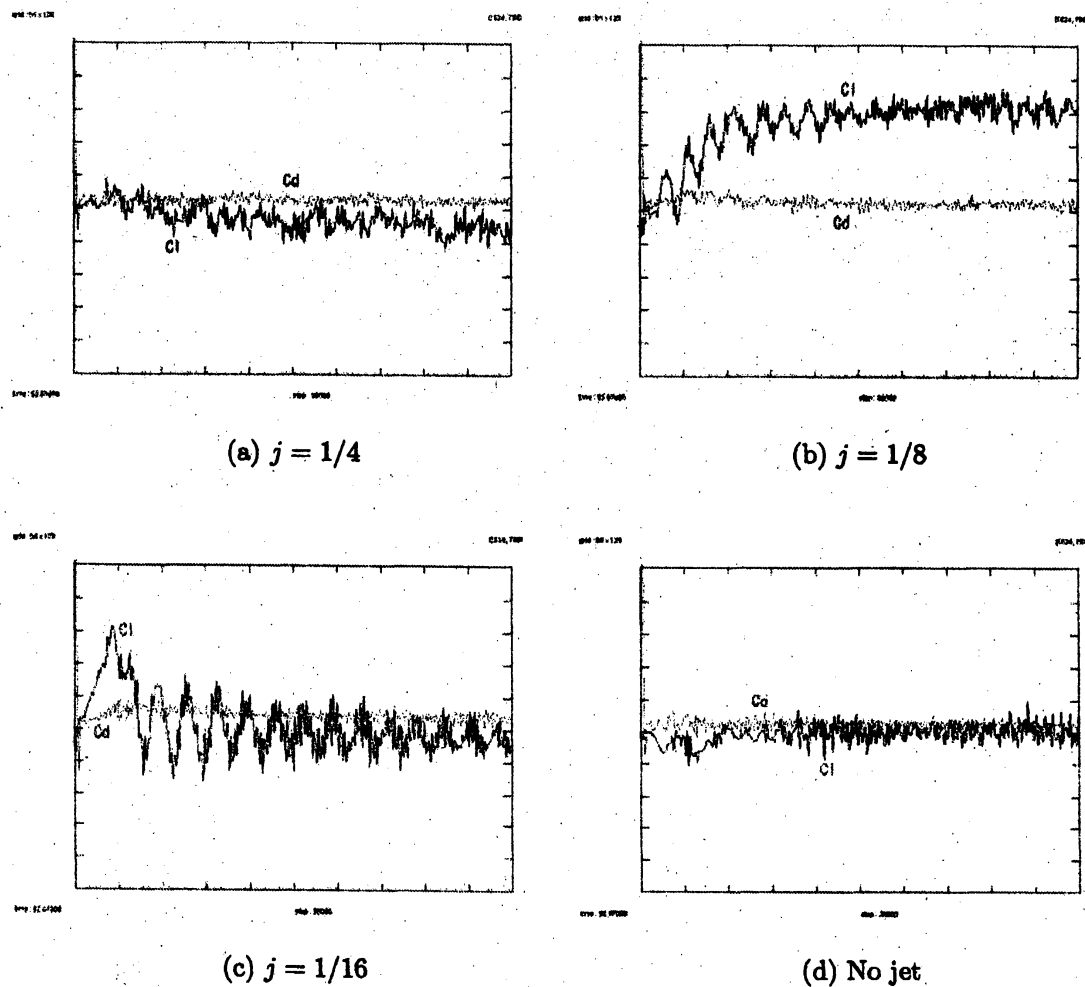
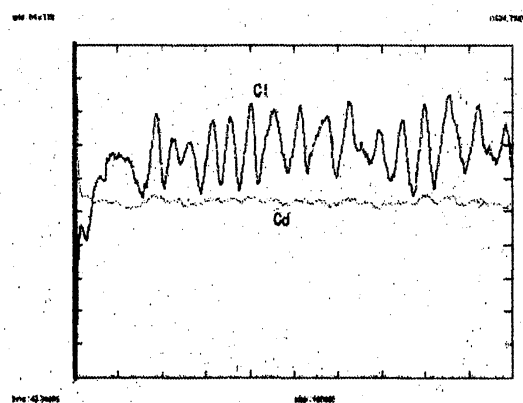
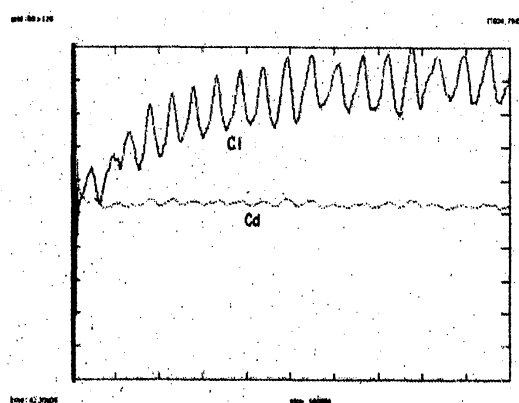
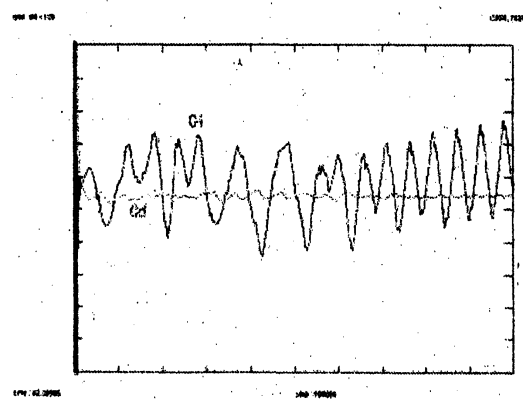
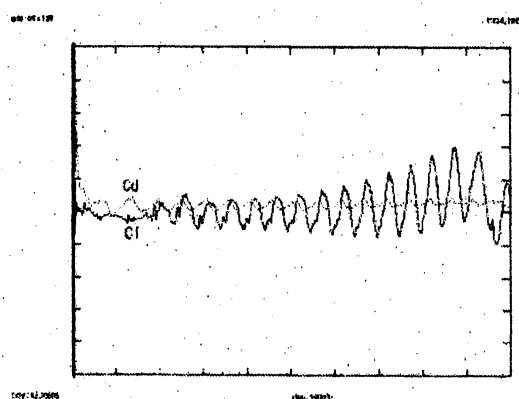


Fig.7 Time history of C_d and C_l at each j in case of $x : y = 2 : 1$.

(a) $j = 1/8$ (b) $j = 1/16$ (c) $j = 1/32$ 

(d) No jet

Fig.8 Time history of C_d and C_l at each j in case of $x : y = 4 : 1$.