

非粘性モデルによる渦励振の数値解析 : I : 出発 流れ

溝田, 武人

<https://doi.org/10.15017/4743580>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 46, pp.159-166, 1977-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :

非粘性モデルによる渦励振の数値解析 (I)

— 出 発 流 れ —

溝 田 武 人*

概 要

上流半無限の2次元平板後縁から放出される2列の自由剪断層の挙動が計算される。流れは非粘性、非圧縮で与えられ、後縁から放出される2列の自由剪断層は非粘性ポテンシャル渦の要素で近似され、出発流れによる非定常渦の初期の成長過程が計算される。得られた結果は実験値と比較され、渦成長の代表長さが定量的に良く一致していること、および渦の巻き込みのフローパターンも定性的には良く一致していることが示される。

1. ま え が き

地上又は海中構造物およびその部材のような非流線型物体が自然風や潮流の影響下にあるとき周囲の流れのレイノルズ数 R_e は比較的高い。このような流れの取扱いは工学的にも重要な意味を持つが、非流線型物体のまわりの非定常剥離流れを理論的に取扱う方法としては、物体から剥れた自由剪断層を非粘性ポテンシャル渦で置き換える方法が現在のところ最も有効であると云われている¹⁾。

すなわち実用上問題となるような高い R_e 数領域においては粘性の影響は物体の代表長に比較して充分薄い境界層内部に限られ、それが物体から離れた自由剪断層は非粘性ポテンシャル渦で置き換えられ、他の流体部分は非粘性非回転流れが近似的に実現されるであろう、と考える。そこで物体から剥離する境界層を、剥離点付近において順次適当な時間間隔で非粘性ポテンシャル渦を導入することにより表わす。そのようにして流体を回転部分(渦点)と非回転部分に分けて考える。そして渦点間の非線型相互作用を計算して渦の速度を求め、小さな時間ステップで渦点の新しい位置を決定する。これをくり返すことにより、渦の成長や、集中化等の物体後流における流れの様子を調べる方法である。

非粘性ポテンシャル渦による方法で渦の挙動を計算した例は、代表的なものとして物体の存在を意識しない無限流体中に予め2列の渦を導入しておいて、微少攪乱による中立安定性を調べた²⁾もの、又は渦の集中化(concentration)、異符号渦の打ち消し(cancellation)、渦列の拡がり(broadening)を非線型計算で調べた³⁾ものがある。もう一方は、一様流の中に静止させた傾斜平板⁴⁾⁵⁾、円柱⁶⁾⁷⁾、および上流半無限平板⁸⁾を置き、渦の吹き出しや非定常流体力を求めて、実験⁹⁾と比較した研究がある。

本報告は、実際の構造物において問題となっている渦励振現象を理論的に取扱うための1歩として、

* 九州大学助手, 応用力学研究所

このようなポテンシャル渦による近似が物体後方における実際の流れをどの程度正確に表わすことができるか、その妥当性を出発流れによる簡単な計算結果と、実験結果¹⁰⁾を比較することによって、吟味したものである。計算のモデルは文献 8) に従い上流半無限平板後縁付近の流れを取扱う。

2. 計算方法

ここで、上流半無限平板の後縁付近の出発流れを計算するにあたり、Clements の方法⁹⁾を簡単にのべる。

図 1 に示すように Z -平面の平板後縁の外部は、 λ -平面の上半面に、(1) 式の Schwartz-Christoffel 変換によって等角写像される。

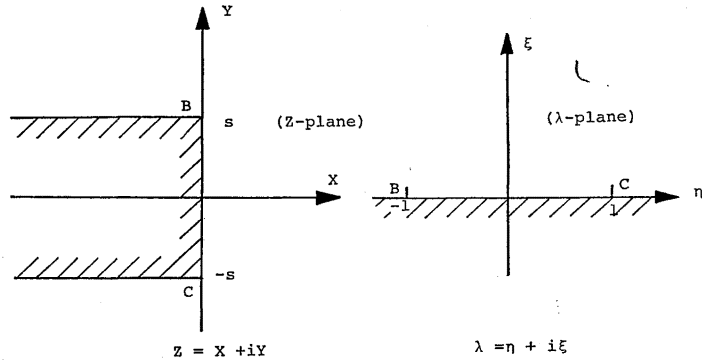


図 1 物理平面 Z , 写像平面 λ

$$z = (2is/\pi) [i \log(i\lambda + (1-\lambda^2)^{1/2}) - \lambda(1-\lambda^2)^{1/2}] \tag{1}$$

各々の平面における複素ポテンシャルは等角写像に対して不変であるから、 w_{z_1}, w_{λ_1} を z_1 にある強さ k の渦を除いた z_1, λ_1 での複素ポテンシャルとすれば (2) 式を得る。

$$w_{z_1}(z) - \frac{ik}{2\pi} \log(z-z_1) = w_{\lambda_1}(\lambda) - \frac{ik}{2\pi} \log(\lambda-\lambda_1) \tag{2}$$

また、(1) 式の逆関数を

$$\lambda = f(z) = f(z_1) + (z-z_1)f'(z_1) + \frac{1}{2}(z-z_1)^2 f''(z_1) + o(z-z_1)^3$$

とすれば、 z_1 点の複素速度は

$$\left. \frac{dw_{z_1}}{dz} \right|_{z_1} = \left. \frac{dw_{\lambda_1}}{d\lambda} \right|_{\lambda_1} \left. \frac{d\lambda}{dz} \right|_{z_1} - \frac{ik}{2\pi} \frac{f''(z_1)}{2f'(z_1)} \tag{3}$$

となる。ただし $z \rightarrow z_1, \lambda \rightarrow \lambda_1$ とした。

従って (3) 式は

$$u_i - iv_i = \frac{dw}{dz} \Big|_{z_i} = \left\{ \sum_{j \neq i} -\frac{ik_j}{2\pi} \cdot \frac{1}{\lambda_i - \lambda_j} + \sum_j \frac{ik_j}{2\pi} \cdot \frac{1}{\lambda_i - \lambda_j} - \frac{4sU_0\lambda_i}{\pi} \right\} \cdot \frac{i\pi}{4s(1-\lambda_i^2)^{1/2}} - \frac{ik_i}{2\pi} \cdot \frac{i\pi\lambda_i}{8s(1-\lambda_i^2)^{3/2}} \quad (4)$$

となる。(4) 式で $-\frac{4sU_0\lambda_i}{\pi}$ は λ -平面上の非回転の一樣流を示す。ここで U_0 は z -平面の一樣流速である。(4) 式を適当に無次元化して $u_i - iv_i$ を求め

$$X_i(t+dt) = X_i(t) + u_i \cdot dt$$

$$Y_i(t+dt) = Y_i(t) + v_i \cdot dt$$

の関係式で dt 時間後における渦の新しい位置を求める。

出発流れの計算においては、後縁付近の剝離点の位置 $z_s = \pm iY_s$ を、 $Y_s = 1.05S, 1.10S, 1.20S$ と仮定して渦導入点として各々計算を行った。また $dt = 0.1$ に設定した。計算において精度を向上させるため通常の 2 倍の精度ですべての計算を実行した。

3. 計算結果

以上のべた方法により、実際に計算した結果を実験結果と比較して以下のべる。はじめに本方法における物体まわりの非回転流れによる流速ベクトルを示す。図 2 には未だ渦点が導入されておらず物体の上下面から境界層が剝離していない出発流れの瞬間である。この流れは、渦点を導入した後の計算でも

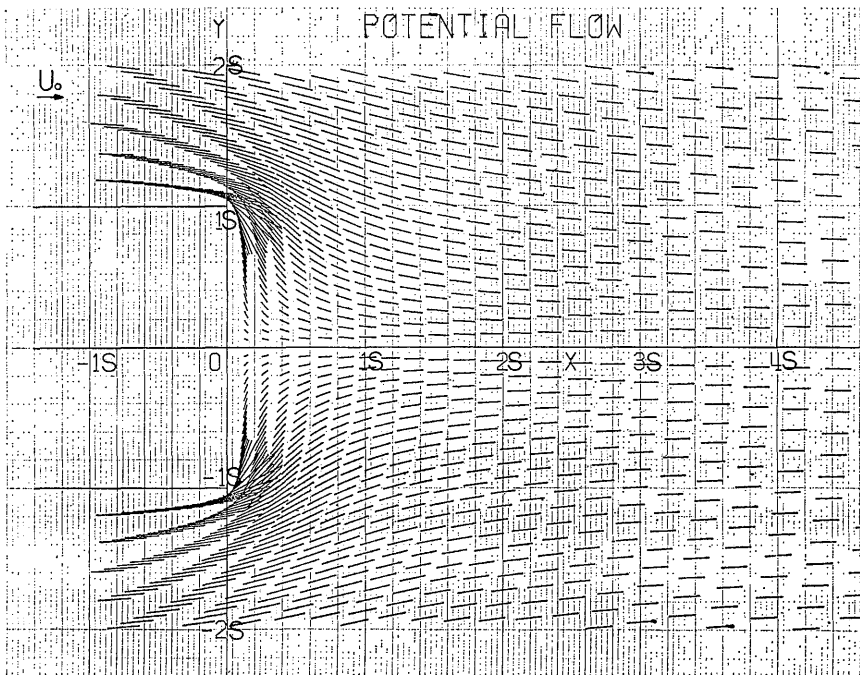


図 2 非回転ポテンシャル流れ

Separation points = $\pm 1.05S$

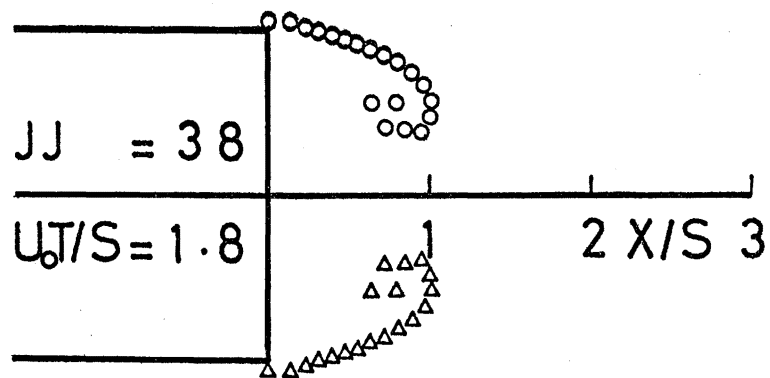
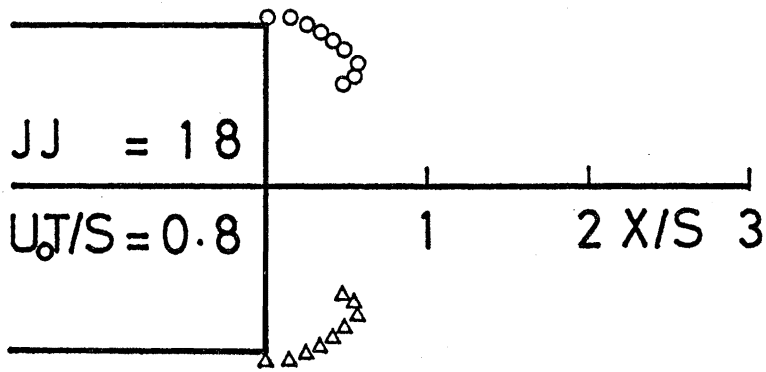
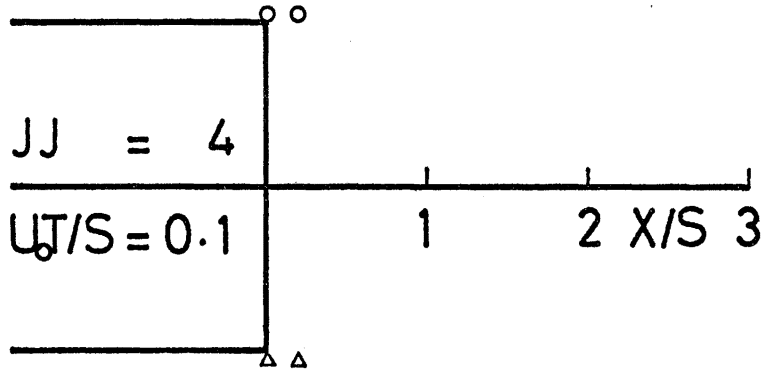


図 3 a 出発渦のフローパターン ($U_0 T / S \leq 1.8$)

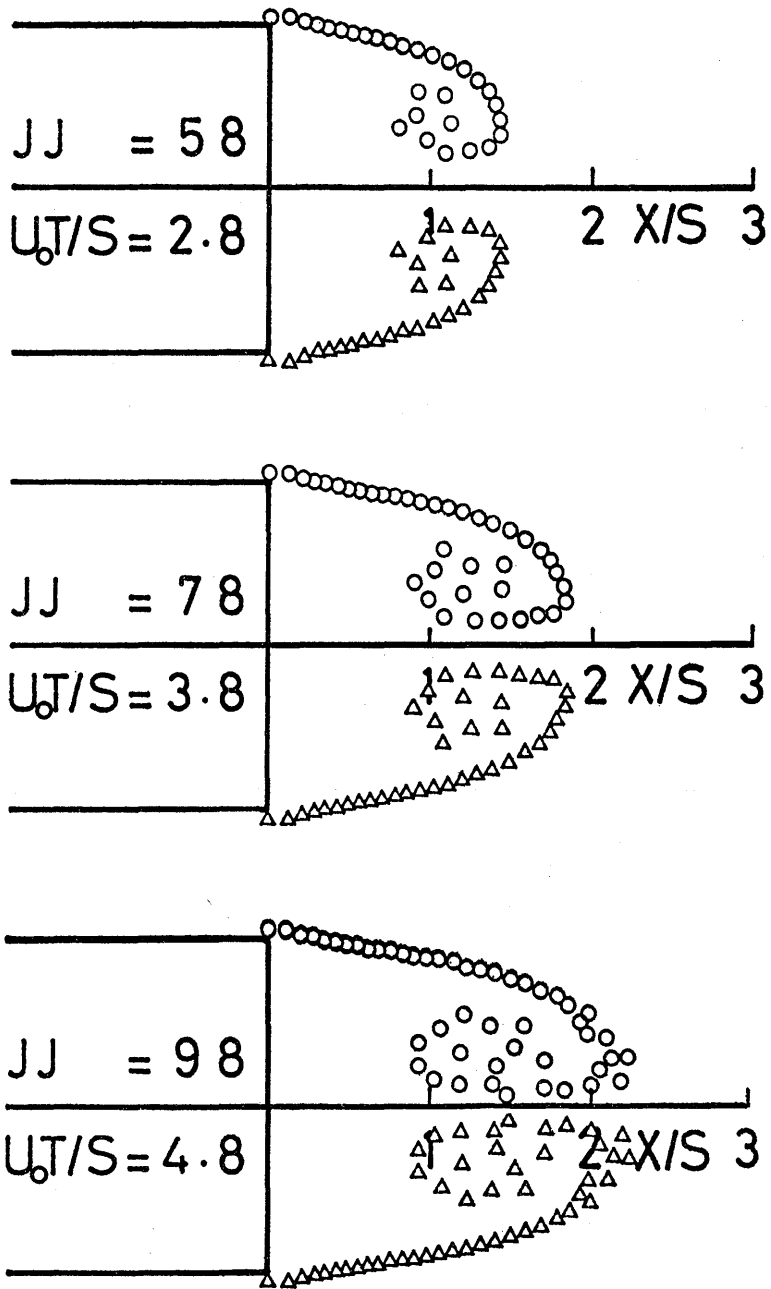


図3 b 出発渦のフローパターン ($U_0T/S \leq 4.8$)

同様に basic flow として存続する。ここで $Y = \pm S$ は流れの特異点であり、その点に近い場所で流速が次第に大きくなっていることがわかる。

次に $Y_s = \pm 1.05S$ に渦点を順次導入した計算結果を図 3 に示す。図中 JJ は導入した渦点の合計数であり、 $U_0 T/S$ は急出発後の時間で、 $U_0 = 1$, $T = \sum dt$ である。時間の経過とともに渦点間の非線型相互作用により、渦列は巻き込みを回始し、成長しながら 1 対の出発渦が形成されている様子が明確にわかる。すなわち、 $U_0 T/S = 0.8$ ですでに巻き込みはじめ、 $U_0 T/S = 1.8 \sim 3.8$ で渦点の集中化が発生し、いわゆる出発渦の内部が形成されてゆく。 $U_0 T/S = 4.8$ では、渦列には部分的にもつれ (kinc) が発生している。この時間におけるフローパターンを実験観察した例¹⁰⁾を写真 1 に示す。写真は模型の上面から電解沈澱法により色素を流出させて、渦度を持つ流体部分を近似的に示すと考えられる流跡線 (streak line) を撮影したものである。計算結果と写真撮影のフローパターンは内部の細かい部分を除くと良く一致していると云えよう。

次に、このような出発渦の長さを平板背面から最も遠方にある渦点までの距離 X_l で表わし、 $U_0 T/S$ に対して整理した結果を図 4 に示す。図は渦導入点 Y_s の位置を 3 種類変えて X_l の変化の様子を調べた計算結果である。剝離点の違いによる渦の成長速度の定性的な差は、 $U_0 T/S < 0.7$ においてあるが、 $U_0 T/S > 0.7$ ではほとんどない。図中 \times 印は実験的に求めた X_l の値でレイノルズ数 $Re = \frac{U_0 S}{\nu} = 472$ の場合である。 ν は動粘性係数とする。この値は、渦導入点を $Y_s = \pm 1.05S$ とした計算結果と良く一致していることがわかる。なお実験は、 $Re = 94.8 \sim 472$ の範囲で行われているが、 X_l の傾向的な差は生じていない。一方 90 度平板が静止から急出発したときの出発渦の成長を実験的に調べた結果¹¹⁾を図中実線で示す。実験値は出発渦の長さを、流跡線で調べたものではなく、アルミ粉で流線を観察し、後流の中心線上に生ずる wake stagnation point を写真撮影によって求めた結果である。したがって

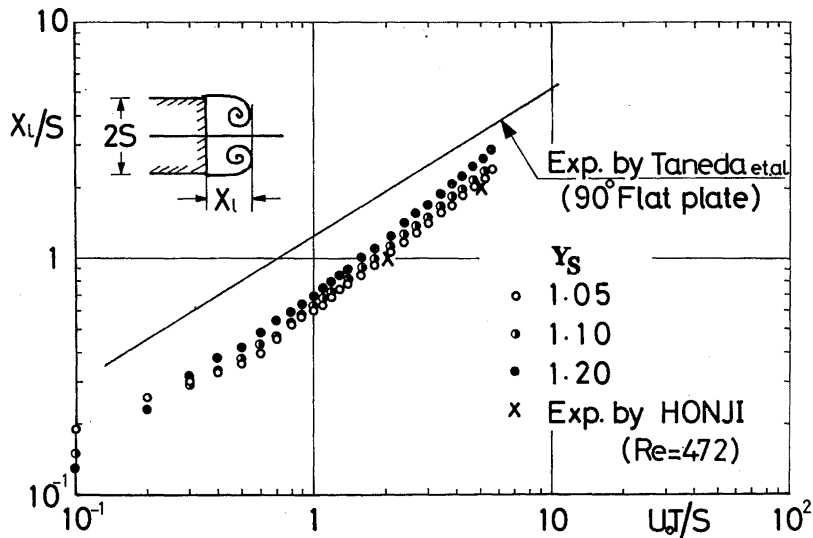


図 4 出発渦の成長

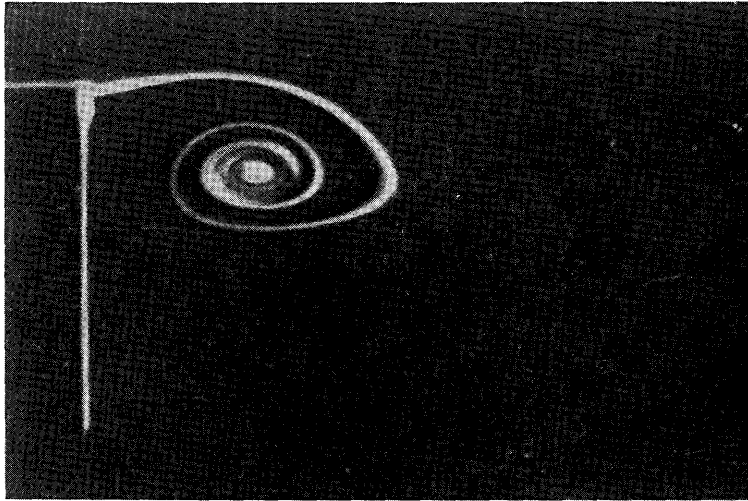


写真1 出発渦の流跡線 (文献10) $R_e=284$, $U_0T/S=4.82$

出発渦の長さ (x_l) は, 実際にはさらに短い. この実験は $R_e=9.05\sim 567.5$ の広い範囲で行われ, その結果出発渦の成長過程は R_e 数に存在しないという実験的結論が得られている. そしてナビエ-ストークス方程式の order estimation によっても同じ結論が得られている. 本計算は R_e 数無限大における数値解析であって, この結果も実験的結論と一致していることがわかった.

4. 結 論

高い R_e 数領域における非流線型物体のまわりの流れを流体力学的, 理論的に取扱う方法として, 物体から剝離した自由剪断層をポテンシャル渦の要素で置きかえて, その渦間の非線型相互作用による挙動を調べる方法がある. 本報告は物体の渦励振現象を理論的に調べるための第1歩として, ポテンシャル渦の近似が剝離流を正しく表現するかどうか, 出発流れの段階で吟味したものである. 計算に用いた物体は上流半無限平板である. その後縁の剝離点と仮定される所に, ポテンシャル渦を順次導入する. そしてそれらの非線型相互作用の結果による出発渦の形成過程を求め, 実験結果と比較して, ポテンシャル渦の近似の妥当性を調べた. 主な結論は以下のとおりである.

- 1) 平板後縁付近における出発渦の成長過程が計算され, 渦の長さは実験値と良く一致した.
- 2) 出発渦の成長過程は, 流れの R_e 数に依存しないことが, 計算と実験の比較によって確認された.
- 3) 計算の結果られた出発流れのフローパターンは, 水槽実験による写真撮影の結果とほぼ一致している.

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 種々激励下さった中村泰治教授に厚くお礼申し上げる. また種子田俊俊教授, 本地弘之助教授, 岡島厚助教授および友成義正助手には有益な討議をしていただいた, 記して深く

感謝する。

なお計算は九州大学応用力学研究所電子計算機 FACOM 230-48 を使用して行った。

文 献

- 1) 木谷勝, 有江幹男, せん断流における傾斜平板からの渦放出, 日本機械学会第 11 回 シンポジウム=フローパターンの予測—数値解析と実験解析—, 講演論文集, No. 760-18, 1976, pp. 31-36.
- 2) Kármán, Th. von, Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt, Göttinger Nachrichten, Math. -Phys. Kl., 1911, pp. 509-517.
- 3) Abernathy, F. H. and Kronauer, R. E., The formation of vortex streets, J. Fluid Mech., Vol. 13, part 1, 1962, pp. 1-20.
- 4) Kuwahara, K., Numerical study of flow past an inclined flat plate by an inviscid model, J. Physical Soc. Japan, Vol. 35, No.5, 1973, pp. 1545-1551.
- 5) Sarpkaya, T., An inviscid model of two-dimensional vortex shedding for transient and asymptotically steady separated flow over an inclined plate, J. Fluid Mech., Vol. 68, part 1, 1975, pp. 109-128.
- 6) Sarpkaya, T., An analytical study of separated flow about circular cylinders, J. Basic Eng. Trans. ASME., D 90, 1968, pp. 511-520.
- 7) Chorin, A. J. Numerical study of slightly viscous flow, J. Fluid Mech., Vol. 57, part 4, 1973, pp. 785-796.
- 8) Clements, R. R., An inviscid model of two-dimensional vortex shedding, J. Fluid Mech., Vol. 57, part 2, 1973, pp. 324-336.
- 9) Simmons, J. E. L., Phase-angle measurements between hot-wire signals in the turbulent wake of a two-dimensional bluff body, J. Fluid Mech., Vol. 64, part 4, 1974, pp. 599-609.
- 10) Honji, H., The starting flow down a step, J. Fluid Mech., Vol. 69, part 4, 1975, pp. 229-240.
- 11) Taneda, S. and Honji, H., Unsteady flow past flat plate normal to the direction of motion, J. physical Soc. Japan, Vol. 30, No. 1, 1971, pp. 262-272.

(昭和 52 年 6 月 15 日 受理)