

ある非定常剥離を伴う流れの数学的モデル

慶大 物理 松信 八十男

§1. はじめに

よく知られているように、流体運動を支配する Navier-Stokes 方程式は微分階数が高いことと非線形項をもつことのために、解析が困難であり、具体的に流れに適用できる例はきわめて少ない。とくに非定常流の解析は定常流に比べてはるかに困難である。

この報告では、無限に広い平板に対し、有限の距離にある点源または点渦による流れが当たるときの2次元の流れの場を解析することを試みる。この場合、平板上に流線の付着または剥離が生じるが、その付近の非定常流の構造を調べておくことは、流体力学的に見て意義のあることである。

解析の方法は慣性効果を表わす非線形項が無視できるものとして、定常および非定常の Stokes 解をおめ、ついで、定常の場合に慣性の効果を考慮することにする。非定常流に対する慣性の効果はまだ得られていない。

§2. 問題設定と Stokes 解

平板の上面に沿って (x 軸をとり、y 軸上の点 (0, a) に流量 $2\pi c$ の点湧き出しがあるとしよう (図1).

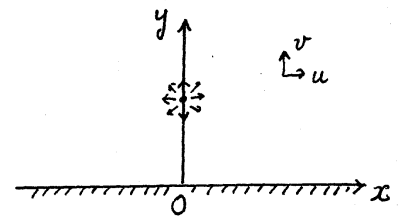


図1. 配置図

このとき、平板上 ($y=0$) で滑りなしの条件を満たし、無限遠方で静止する二次元の流れの場を決定する。湧き出しの強さ c が時間とともに変動することによって流れは非定常になるものとする。

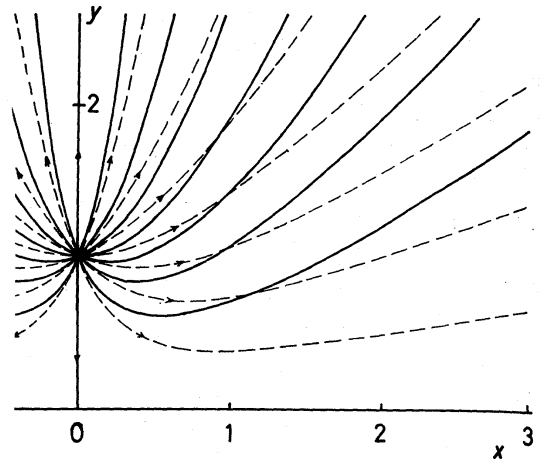


図2. 図1に対する定常 Stokes 流, および定常渦を流 (破線) の流線. (ψ は等間隔)

まず、慣性効果を無視して非定常 Stokes 解を導くことから始めよう。図1に対応する渦なしの流れは、流れの関数 ψ_{irr}

$$\psi_{irr} = c \left(\tan^{-1} \frac{y-1}{x} + \tan^{-1} \frac{y+1}{x} \right) \quad (2.1)$$

によって記述される¹⁾。ただし、 x, y は a で規格化されている。滑りなしの条件を満たす Stokes 解は、非定常 Stokes 方程式

$$\left(\nu \nabla^2 - \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla^2 \psi = 0, \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (2.2)$$

に満足する別の解 (ψ_v と書く) をこれに加えたものになる。ただし、 ν は運動粘性率、 t は時間を表わす。

$$c = c_0 \cos \Omega t \quad (2.3)$$

(Ω は角振動数) とすると, ψ は

$$\psi = \Re \Psi(x, y) e^{i\Omega t} \quad (2.4)$$

(\Re は実数部分) のように表わされるであろう。これを

(2.2) に入れ, 無次元数 (Womersley 数)

$$\alpha = a \sqrt{\Omega/\nu}$$

を定義すると,

$$(\nabla^2 - \beta^2) \nabla^2 \Psi = 0 \quad \beta^2 = i\alpha^2 \quad (2.5)$$

が得られる。これと境界条件

$$y=0 \text{ で } \Psi = \partial \Psi / \partial y = 0 \quad (2.6)$$

の下で解ける問題は解決される。

そのために Fourier 変換 ($\Psi \rightarrow \tilde{\Psi}$):

$$\tilde{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi e^{isx} dx, \quad \Psi = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\Psi} e^{-isx} ds \quad (2.7)$$

を利用するのが便利である。²⁾ (2.5), (2.6) の F 変換は

$$\left(\frac{d^2}{dy^2} - \beta^2 - s^2\right) \left(\frac{d^2}{dy^2} - s^2\right) \tilde{\Psi} = 0 \quad (2.8)$$

$$y=0 \text{ で } \tilde{\Psi} = \partial \tilde{\Psi} / \partial y = 0 \quad (2.9)$$

となる。 $y \rightarrow \infty$ で減衰する (2.8) の解は, A, B を任意定数と

$$\tilde{\Psi}_v = A e^{-|s|y} + B e^{-\sqrt{s^2 + \beta^2} y} \quad (\beta \neq 0) \quad (2.10)$$

となる。一方, 渦なしの解 ψ_{irr} の振幅 Ψ_{irr} の F 変換は

$$\begin{aligned}\tilde{\Psi}_{irr} &= c_0 \int_{-\infty}^{\infty} \left(\tan^{-1} \frac{x}{1-y} - \tan^{-1} \frac{x}{1+y} \right) e^{isx} dx \\ &= \frac{\pi i}{s} c_0 \left(e^{-(1-y)|s|} - e^{-(1+y)|s|} \right) \quad (y < 1) \quad (2.11)\end{aligned}$$

と仮定して, $0 \leq y < 1$ に対して

$$\tilde{\Psi} = A e^{-|s|y} + B e^{-\sqrt{s^2+\beta^2}y} + \frac{\pi i}{s} c_0 \left(e^{-(1-y)|s|} - e^{-(1+y)|s|} \right) \quad (2.12)$$

と仮定する。これに境界条件 (2.9) を適用すれば, A, B を定めることができる:

$$A = -B = -\frac{2\pi i c_0}{\beta^2} (\sqrt{s^2+\beta^2} + |s|) e^{-|s|} \operatorname{sgn} s \quad (2.13)$$

これを (2.12) に入れ, 逆F変換を施せば, はじめの2項から

$$\begin{aligned}\Psi_v &= -\frac{i c_0}{\beta^2} \int_{-\infty}^{\infty} (\sqrt{s^2+\beta^2} + |s|) e^{-|s|} \operatorname{sgn} s \left(e^{-|s|y} - e^{-\sqrt{s^2+\beta^2}y} \right) e^{-isx} ds \\ &= -\frac{2c_0}{\beta^2} \int_0^{\infty} (\sqrt{s^2+\beta^2} + s) e^{-s} \left(e^{-sy} - e^{-\sqrt{s^2+\beta^2}y} \right) \sin sx \, ds \quad (2.14)\end{aligned}$$

この定積分を実行することは困難であるが, $y < 1$ として y について Taylor 展開すると,

$$\begin{aligned}\Psi_v &= -2c_0 \frac{xy}{1+x^2} + \frac{1}{2} c_0 y^2 \left(\frac{4x}{(1+x^2)^2} + I_s(\beta, x) \right) + O(y^3) \\ I_s(\beta, x) &= 2 \int_0^{\infty} \sqrt{s^2+\beta^2} e^{-s} \sin sx \, ds \quad (2.15)\end{aligned}$$

一方, Ψ_{irr} の展開は

$$\Psi_{irr} = 2c_0 \frac{xy}{1+x^2} + O(y^3)$$

ゆえに
$$\Psi = \Psi_{irr} + \Psi_v = \frac{1}{2} c_0 y^2 \left(\frac{4x}{(1+x^2)^2} + I_s(\beta, x) \right) + O(y^3) \quad (2.16)$$

となって、境界条件は満たされていることがわかる。積分 I_s は既知関数で表わすことができるが、それについては後で述べることにする。

上の結果を使って、平板上でのずり応力 τ_w を求めることができる: (μ は粘性係数)

$$\tau_w = \mu (\nabla^2 \psi)_{y=0} = \mu c_0 \Re \left(\frac{4x}{(1+x^2)^2} + I_s(\beta, x) \right) e^{i\Omega t} \quad (2.17)$$

また、平板上での圧力勾配を求めるには、

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_w = -\mu \left(\frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 \psi\right)_{y=0} \quad (2.18)$$

を利用すればよい。しかし、 ψ の展開で $O(y^3)$ の項が必要となる。結果は

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_w = \mu c_0 \Re \left\{ \frac{4x(3-x^2)}{(1+x^2)^3} + 2\beta^2 \frac{x}{1+x^2} - \frac{\partial}{\partial x} I_c(\beta, x) \right\} e^{i\Omega t} \quad (2.19)$$

ここで

$$I_c(\beta, x) = 2 \int_0^\infty \sqrt{s^2 + \beta^2} e^{-s} \cos sx \, ds \quad (2.20)$$

§3 積分 I_s と I_c の評価

(2.15), (2.20) に与えられる定積分 $I_s(\beta, x)$, $I_c(\beta, x)$ について考えよう。 $I_c + i I_s = I$ と書くと

$$I(\beta, x) = 2 \int_0^\infty \sqrt{s^2 + \beta^2} e^{-s(1-ix)} \, ds \quad (3.1)$$

となり, Laplace 変換の公式が使える.³⁾ すなわち,

$$I(\beta, x) = \frac{\pi\beta}{\sigma} [H_1(\beta\sigma) - Y_1(\beta\sigma)], \quad \sigma = 1 - ix \quad (3.2)$$

となる。ここで H_1 は Struve 関数, Y_1 は 2 種の Bessel 関数である。 I_c, I_s は (3.2) の β を実数と見なし, それぞれ実数部分, 虚数部分をとればよい。 $|\beta\sigma|$ が小, $|\beta\sigma| \gg 1$ のときの展開式を示すと,⁴⁾

$$\begin{aligned} I_s &= 2 \cos^2 \varphi \sin 2\varphi - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} \beta^{2n+1}}{(2n-1)!! (2n+1)!!} \frac{\sin(2n-1)\varphi}{\cos^{2n-1}\varphi} \\ &+ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \beta^{2n+2}}{n! (n+1)! (2 \cos \varphi)^{2n}} \left[\sin 2n\varphi \left\{ \log \frac{\beta}{2 \cos \varphi} \right. \right. \\ &\left. \left. - \frac{1}{2} (k_n + k_{n+1}) + \gamma \right\} + \varphi \cos 2n\varphi \right], \quad (3.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_c &= 2 \cos^2 \varphi \cos 2\varphi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} \beta^{2n+1}}{(2n-1)!! (2n+1)!!} \frac{\cos(2n-1)\varphi}{\cos^{2n-1}\varphi} \\ &- \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \beta^{2n+2}}{n! (n+1)! (2 \cos \varphi)^{2n}} \left[\cos 2n\varphi \left\{ \log \frac{\beta}{2 \cos \varphi} \right. \right. \\ &\left. \left. - \frac{1}{2} (k_n + k_{n+1}) + \gamma \right\} - \varphi \sin 2n\varphi \right], \quad (3.4) \end{aligned}$$

漸近式:

$$\begin{aligned} I_s &\cong 2 \left[\beta \cos \varphi \sin \varphi + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} (2n-1)!! (2n-3)!!}{\beta^{2n-1}} \times \right. \\ &\left. \times (\cos \varphi)^{2n+1} \sin(2n+1)\varphi \right], \quad (3.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_c &\cong 2 \left[\beta \cos^2 \varphi + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} (2n-1)!! (2n-3)!!}{\beta^{2n-1}} \times \right. \\ &\left. \times (\cos \varphi)^{2n+1} \cos(2n+1)\varphi \right]. \quad (3.6) \end{aligned}$$

ここで $\varphi = \tan^{-1} x$ (3.7)

$$k_n = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n}, \quad k_0 = 0$$

$$\gamma = 0.57721566 \dots \quad (\text{Euler 定数})$$

である。

これらの展開式を利用すれば、任意の振動数の場合の壁面
おり応力、壁面圧力勾配を精度よく計算することが出来る。
図3は、壁面おり応力 τ_w を x 軸に対してプロットしたもの
である。 α の増加とともに $|\tau_w|$ は増加し、 $\arg \tau_w$ は全体
として 45° に近づく。また、 τ_w が最大になる点は α の増加

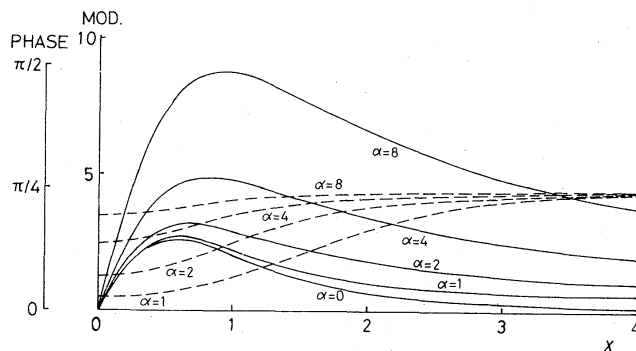


図3. 正弦的に強さの変化する点湧き出しから無限平
板に流れが当たる時の壁面おり応力。実線はその絶
対値、破線は位相角を表わす。 $\alpha=0$ 、すなわち定
常流に対しては位相角は0である。

にしたがってよどみ点(原点)から遠ざかることがわかる。

§4 定常流に対する慣性効果

§2の結果で $\alpha \rightarrow 0$ ($\beta \rightarrow 0$) とすると定常 Stokes 解が得られる:

$$\psi_{st.} = c \left(\tan^{-1} \frac{y-1}{x} + \tan^{-1} \frac{y+1}{x} - \frac{2xy}{x^2+(y+1)^2} \right) \quad (4.1)$$

$$\omega_{st} = -\nabla^2 \psi_{st} = -8c \frac{x(y+1)}{\{x^2+(y+1)^2\}^2} \quad (4.2)$$

(ω は渦度で, 添字 st は Stokes 解を意味する。図2参照) この解と式(4.1)を比較し, 慣性効果を Reynolds 数の1次の項まで見積ることとを考えよう。Reynolds 数 R は

$$R = c/\nu \quad (4.3)$$

で定義される。そのために, (x, y) 座標の代りに双極座標 (ξ, η) と使う方が解析に便利である⁵⁾:

$$\xi = \frac{1}{2} \log \frac{x^2+(y+1)^2}{x^2+(y-1)^2} \quad (4.4)$$

$$\eta = \tan^{-1} \frac{y+1}{x} - \tan^{-1} \frac{y-1}{x}$$

$$x = \frac{\sin \eta}{\cosh \xi - \cos \eta}, \quad y = \frac{\sinh \xi}{\cosh \xi - \cos \eta} \quad (4.5)$$

この場合, 流れを支配する方程式は

$$\nabla_s^2 \omega = \frac{1}{\nu} \frac{\partial(\omega, \psi)}{\partial(\xi, \eta)}, \quad \nabla_s^2 \psi = -\frac{1}{J} \omega \quad (4.6)$$

$$\nabla_s^2 = \partial^2/\partial \xi^2 + \partial^2/\partial \eta^2, \quad J = \cosh \xi - \cos \eta \quad (4.7)$$

となる。さて、

$$\psi = c(\psi^{(0)} + R\psi^{(1)} + \dots) \quad (4.8)$$

$$\omega = c(\omega^{(0)} + R\omega^{(1)} + \dots) \quad (4.9)$$

の展開を仮定すれば、 $\psi^{(0)}$, $\omega^{(0)}$ は Stokes の解 (4.1), (4.2) によって与えられている。すなわち、 (ξ, η) によって書きかえると、

$$\psi^{(0)} = \tan^{-1} \frac{\cos \eta - e^{-\xi}}{\sin \eta} + \tan^{-1} \frac{e^{\xi} - \cos \eta}{\sin \eta} - \frac{e^{-\xi} \sinh \xi \sin \eta}{J} \quad (4.10)$$

$$\omega^{(0)} = -2e^{-\xi} \sin \eta + e^{-2\xi} \sin 2\eta \quad (4.11)$$

したがって () 問題は $\psi^{(0)}$, $\omega^{(0)}$ を出発の解として $\psi^{(1)}$, $\omega^{(1)}$ を求めることに帰着する。(4.6) に (4.8), (4.9) を入れ、 R の 1 次の項を集めると、 $\psi^{(1)}$, $\omega^{(1)}$ の方程式は

$$\nabla_S^2 \omega^{(1)} = \frac{\partial(\omega^{(0)}, \psi^{(0)})}{\partial(\xi, \eta)}, \quad \nabla_S^2 \psi^{(1)} = -\frac{1}{J^2} \omega^{(1)} \quad (4.12)$$

となり、境界条件は

$$\eta = 0, \pi, 2\pi \quad \psi^{(1)} = 0 \quad (4.13a)$$

$$\xi = 0 \quad \psi^{(1)} = \partial \psi^{(1)} / \partial \xi = 0 \quad (4.13b)$$

となる。

これらの条件の下で (4.12) の解を求めることはなかなか容易ではない。とくに変換の Jacobian J が (4.7) で見ると、変数分離型でないため、計算は複雑となる。以下、試行錯誤を重ねて到達した解法のあらましを述べるにとどめる。

さて, (4.10), (4.11) を使って (4.12) の右辺を書

$$\begin{aligned} \text{と, } \frac{\partial(\omega^{(1)}, \psi^{(1)})}{\partial(\xi, \eta)} &= \frac{1}{2J^2} \left[-(e^\xi - 2e^{-\xi} + e^{-5\xi}) \sin \eta \right. \\ &+ (3 - 4e^{-2\xi} + e^{-4\xi}) \sin 2\eta - 3(e^{-\xi} - e^{-3\xi}) \sin 3\eta \\ &\left. + (e^{-2\xi} - e^{-4\xi}) \sin 4\eta \right]. \end{aligned} \quad (4.14)$$

この形から

$$\omega^{(1)} = \frac{1}{2J} \sum_{n=1}^{\infty} \{ g_n(\xi) + a_n e^{-(n-1)\xi} - a_{n+1} e^{-(n+1)\xi} \} \sin n\eta \quad (4.15)$$

の無限級数の形の解を推定することが出来る。右辺の g_n 部分は非齊次方程式の特解であり, 残りの a_n を係数とする級数は齊次方程式の解, すなわち調和関数である。

(4.14) に合致するように g_n を定めると,

$$\begin{aligned} g_1(\xi) &= \xi + \frac{3}{2} \xi e^{-2\xi} + \frac{1}{4} e^{-4\xi} - \frac{1}{24} e^{-6\xi}, \\ g_2(\xi) &= \left(\frac{7}{4} - \frac{3}{2} \xi \right) e^{-\xi} - \frac{1}{2} \xi e^{-3\xi} + \frac{1}{8} e^{-5\xi} - \frac{1}{40} e^{-7\xi}, \\ g_3(\xi) &= \left(-\frac{13}{12} + \frac{1}{2} \xi \right) e^{-2\xi} + \frac{3}{40} e^{-6\xi} - \frac{1}{60} e^{-8\xi}, \\ g_4(\xi) &= \frac{1}{12} e^{-3\xi} + \frac{1}{20} e^{-7\xi} - \frac{1}{84} e^{-9\xi}, \end{aligned} \quad (4.16)$$

以下 $n \geq 5$ については

$$g_n(\xi) = -\frac{e^{-(n-1)\xi}}{n(n-1)} + \frac{3 e^{-(n+3)\xi}}{2(n+1)(n+2)} - \frac{e^{-(n+5)\xi}}{2(n+2)(n+3)}.$$

つまり, (4.12) の右辺から $\psi^{(1)}$ を求める。 (4.15) のときと同じように,

$$\psi^{(1)} = -\frac{1}{2J^2} \sum_{n=1}^{\infty} \{ 4G_n(\xi) + c_{n-1} e^{-(n-2)\xi} + d_n e^{-n\xi} + e_{n+1} e^{-(n+2)\xi} \} \sin n\eta \quad (4.17)$$

の展開形がその目的に適していることがわかる。ここでも、 $G_n(\xi)$ の部分ははじめの非線形項から由来するもので、残りの部分は (4.15) の a_n の部分および調和関数の部分を含めたものである。正確に a_n の部分に対処させるためには

$$d_n = -(c_n + e_n) \quad n \geq 2 \quad (4.17)$$

の条件が必要であることがわかる。 $G_n(\xi)$ の具体的な形を書くと、

$$\left. \begin{aligned} G_1(\xi) &= \left(\frac{3}{16} + \frac{1}{4}\xi\right)e^{-\xi} + \left(\frac{1}{12} + \frac{1}{4}\xi\right)e^{-3\xi} + \frac{1}{48}e^{-5\xi}, \\ G_2(\xi) &= \left(\frac{1}{12} - \frac{1}{4}\xi\right)e^{-2\xi} + \frac{1}{96}e^{-4\xi} + \frac{1}{80}e^{-6\xi}, \\ G_3(\xi) &= -\frac{5}{96}e^{-3\xi} + \frac{1}{120}e^{-7\xi}, \end{aligned} \right\} (4.18)$$

$n \geq 4$ については

$$G_n(\xi) = -\frac{(2n-5)e^{-n\xi}}{4(n-1)n(n+1)} + \frac{(n-3)e^{-(n+2)\xi}}{4n(n+1)(n+2)} + \frac{e^{-(n+4)\xi}}{4(n+2)(n+3)}.$$

境界条件 (4.13b) を用いると、(4.17) に加えて 2 つの条件が得られるので、 c_n, d_n, e_n 、したがって a_n を決定することができる。 a_n の値についての結果を示す。

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= -1, \quad a_2 = -\frac{3^3}{40}, \quad a_3 = \frac{3^3}{40}, \quad a_4 = -\frac{3}{70}, \\ a_n &= \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n} - \frac{9/2}{n+1} + \frac{7/2}{n+2} - \frac{1}{n+3} \quad (n \geq 5). \end{aligned} \right\} (4.19)$$

これまでの結果をまとめると、

$$\omega^{(1)} = \frac{1}{2J} \sum_{n=1}^{\infty} K_n(\xi) \sin n\eta, \quad (4.20)$$

$$\psi^{(1)} = -\frac{1}{8J^2} \sum_{n=1}^{\infty} H_n(\xi) \sin n\eta, \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} K_1 &= -1 + \xi + \left(\frac{33}{40} + \frac{3}{2}\xi\right) e^{-2\xi} + \frac{1}{4} e^{-4\xi} - \frac{1}{24} e^{-6\xi}, \\ K_2 &= \left(\frac{37}{40} - \frac{3}{2}\xi\right) e^{-\xi} - \left(\frac{33}{40} + \frac{1}{2}\xi\right) e^{-3\xi} + \frac{1}{8} e^{-5\xi} - \frac{1}{40} e^{-7\xi}, \\ K_3 &= \left(-\frac{31}{120} + \frac{1}{2}\xi\right) e^{-2\xi} + \frac{3}{70} e^{-4\xi} + \frac{3}{40} e^{-6\xi} - \frac{1}{60} e^{-8\xi}, \\ K_n &= \left(\frac{2}{n} - \frac{9/2}{n+1} + \frac{7/2}{n+2} - \frac{1}{n+3}\right) e^{-(n-1)\xi} \\ &\quad - \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n+1} - \frac{9/2}{n+2} + \frac{7/2}{n+3} - \frac{1}{n+4}\right) e^{-(n+1)\xi} \\ &\quad + \frac{3}{2} \left(\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2}\right) e^{-(n+3)\xi} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{n+2} - \frac{1}{n+3}\right) e^{-(n+5)\xi}, \quad (n \geq 4) \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} H_1 &= \left(-\frac{11}{12} + \xi\right) e^{-\xi} + \left(-\frac{5}{6} + \xi\right) e^{-3\xi} + \frac{1}{12} e^{-5\xi}, \\ H_2 &= \frac{1}{3} - \left(\frac{7}{60} + \xi\right) e^{-2\xi} - \frac{4}{15} e^{-4\xi} + \frac{1}{20} e^{-6\xi}, \\ H_n &= \left(-\frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2}\right) e^{-(n-2)\xi} + \left(\frac{2}{n+1} - \frac{1}{n+2} - \frac{1}{n+3}\right) e^{-n\xi} \\ &\quad + \left(-\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2} + \frac{2}{n+3}\right) e^{-(n+2)\xi} + \left(\frac{1}{n+2} - \frac{1}{n+3}\right) e^{-(n+4)\xi}, \quad (n \geq 3) \end{aligned} \quad (4.23)$$

§5 壁面ボリ応力と壁面圧力分布

前節の結果は無限級数の形になっているが、いずれも $\sum_n e^{-n\xi} \sin n\eta / (n+m)$ の形の集合である。このような無限級数は有限項の和に書きかえることが可能である。以下、壁面上の値についてのみ、その表式を求めるとする。

複素数 $\zeta = \xi + i\eta$ ($\xi \geq 0$) に対して成立するべき級数展開

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-n\zeta} = -\log(1-e^{-\zeta}) \quad (5.1)$$

の両辺に $1-e^{\zeta}$ とかけて変形すると,

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-n\zeta}}{n(n+1)} = 1 - (1-e^{\zeta}) \log(1-e^{-\zeta})$$

が得られる。両辺に $1-e^{\zeta}$ とかけ同じように変形する。これを繰返せば

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{m! e^{-n\zeta}}{n(n+1)(n+2)\cdots(n+m)} = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{m-k} (1-e^{\zeta})^k - (1-e^{\zeta})^m \log(1-e^{-\zeta}) \quad (5.2)$$

が得られる。

ここで $\xi \rightarrow 0$ とすると

$$\log(1-e^{-\zeta}) = \log(2\sin\frac{\eta}{2}) + \frac{i}{2}(\pi-\eta) \quad (5.3)$$

となることに注意して (5.2) の虚数部をとり $\xi \rightarrow 0$ とすると

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m! \sin n\eta}{n(n+1)(n+2)\cdots(n+m)} &= -\sum_{k=0}^{m-1} \frac{(2\sin\frac{\eta}{2})^k}{m-k} \sin k\phi \\ &+ (2\sin\frac{\eta}{2})^m \{-\sin m\phi \log(2\sin\frac{\eta}{2}) + \phi \cos m\phi\}, \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\text{ただし } \phi = \frac{1}{2}(\pi-\eta). \quad (5.5)$$

この関係を利用すれば, (4.20) より

$$\begin{aligned} \omega^{(1)}(0, \eta) &= \frac{\xi}{6} (2\sin\eta - \sin 2\eta) - \frac{1}{2}(\pi-\eta)(\cos\eta - 2\cos 2\eta + \cos 3\eta) \\ &- (\sin\eta - 2\sin 2\eta + \sin 3\eta) \log(2\sin\frac{\eta}{2}) \end{aligned} \quad (5.6)$$

と等しくなる。壁面上で

$$x = \cot \frac{\eta}{2} \quad (5.7)$$

となることに注意すると, (5.6) は書きかえられて

$$\begin{aligned} \tau_w^{(1)} = -\omega_{y=0}^{(1)} = & -\frac{20x}{3(x^2+1)^2} - \frac{4(x^2+2x-1)(x^2-2x-1)}{(x^2+1)^3} \tan^{-1}x \\ & - \frac{8x(x^2-1)}{(x^2+1)^3} \log \frac{4}{x^2+1} \end{aligned} \quad (5.8)$$

となる。次の近似は (4.11) から (もっと直接には (4.2) から)

$$\tau_w^{(0)} = -\omega_{y=0}^{(0)} = \frac{8x}{(x^2+1)^2} \quad (5.9)$$

となることは容易にわかる ($\tau_w = \frac{\mu c}{a^2} (\tau_w^{(0)} + R\tau_w^{(1)} + \dots)$ に注意)。

他方、圧力 p は

$$p = \frac{\mu c}{a^2} (p^{(0)} + R p^{(1)} + \dots) \quad (5.10)$$

の形に展開されるとすると、(2.18) と同じ関係を利用して

$$p_w^{(0)} = -4 \frac{x^2-1}{(x^2+1)^2}, \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} p_w^{(1)} = & -5 \frac{(x^2-1)}{(x^2+1)^2} + \frac{8x(x^2-3)}{(x^2+1)^3} \tan^{-1}x \\ & + \frac{4(3x^2-1)}{(x^2+1)^3} \log \frac{4}{x^2+1} \end{aligned} \quad (5.12)$$

と導くことができる (無限遠で $p=0$ となるようにした)。

図4, 図5はこれらの結果を図示したものである。壁面から遠くでは $O(R)$ の補正により、よどみ点付近の τ_w の分布はその勾配を強調し、かつ最大値を増す傾向がある。また十分遠方では $\tau_w^{(0)} = O(x^{-2})$ のため、 $\tau_w^{(1)} = O(x^{-2})$ となるので、逆流が生ずる可能性のあることがわかる。他方圧力の方は $O(R)$ の補正はつねに負であり、 τ_w と逆によどみ点付近では減少することがわかる。

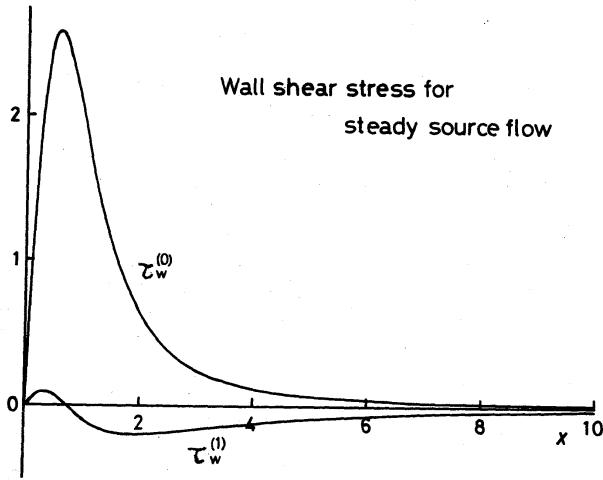


図4. 定常流に対する壁面剪り応力分布.

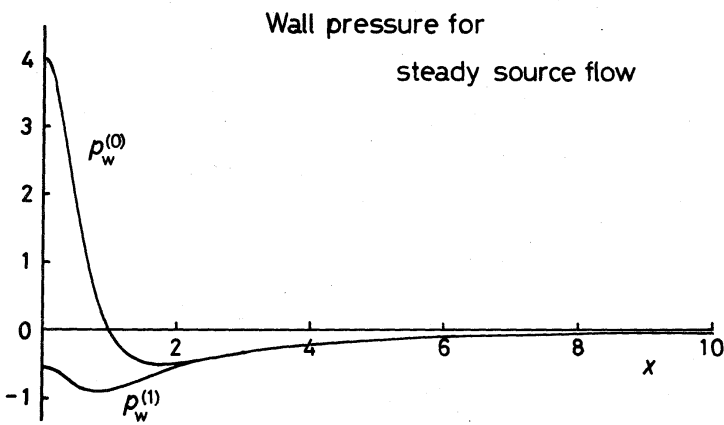


図5. 定常流に対する壁面圧力分布.

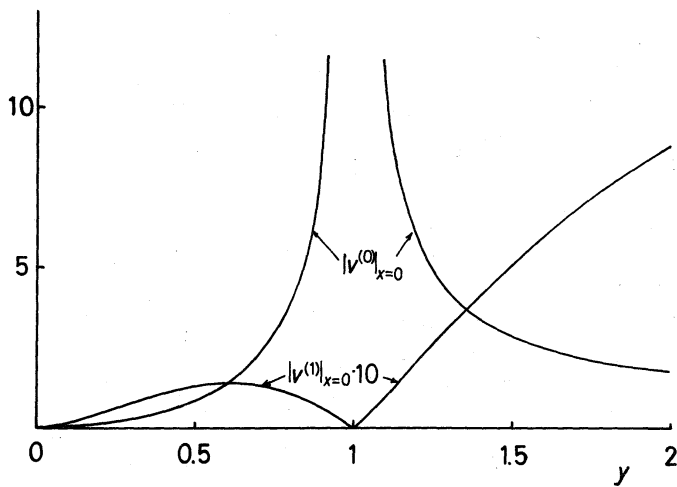


図6. 定常流に対する中心軸上の速度分布. $O(R)$ の補正項は縦に10倍してある.

壁面上の値ではないが、参考のため軸上の速度 v を求め

$$v = \frac{c}{a} (v^{(0)} + R v^{(1)} + \dots), \quad (5.13)$$

$$v_{x=0}^{(0)} = \frac{4y^2}{(y-1)(y+1)^2}, \quad (5.14)$$

$$v_{x=0}^{(1)} = \frac{8y^2}{(y-1)^3(y+1)} \log \frac{2}{1+y} + \frac{1}{4} \left(\frac{y-1}{y+1} \right)^2 \log \left| \frac{y+1}{y-1} \right| \\ + \frac{y(11y^3 + 47y^2 + 41y - 3)}{6(y-1)^2(y+1)^3} \quad (5.15)$$

となる。とくに $y \rightarrow 1$ で $v_{x=0}^{(0)}$ は $O(1/(y-1))$ である
のに対し、 $v_{x=0}^{(1)} \rightarrow \frac{1}{12}(y-1) + O((y-1)^2 \log|y-1|)$
となることに注意を要する。これらの変化は図6に示されて
いる。

§ 6. 巨渦による利維流のモデル

点湧き出しの代わりに、循環 $2\pi C$ の渦糸を y 軸上の点 $(0, a)$
においたときの解については、点湧き出しのときと同じやり
方で結果を導くことができる。ここでは結果のみを記すこと
にする。

$$(2.1) \rightarrow \psi_{irr} = \frac{C}{2} \log \frac{x^2 + (y+1)^2}{x^2 + (y-1)^2}, \quad (6.1)$$

$$(2.17) \rightarrow \tau_w = \mu C_0 \mathcal{R} \left[\frac{2(1-x^2)}{(1+x^2)^2} + I_c(\beta, x) \right] e^{i\alpha t}, \quad (6.2)$$

$$(4.1) \rightarrow \psi_{st.} = C \left[\frac{1}{2} \log \frac{x^2 + (y+1)^2}{x^2 + (y-1)^2} - \frac{2y(y+1)}{x^2 + (y+1)^2} \right], \quad (6.3)$$

$$(4.2) \rightarrow \omega_{st.} = 4c \frac{x^2 - (y+1)^2}{[x^2 + (y+1)^2]^2}, \quad (6.4)$$

$$(5.6) \rightarrow \omega^{(1)}(0, \eta) = -\frac{7}{6}(2 \sin \eta - \sin 2\eta) - \frac{1}{2}(\pi - \eta)(1 - 3 \cos \eta + 3 \cos 2\eta - \cos 3\eta) + (3 \sin \eta - 3 \sin 2\eta + \sin 3\eta) \log(2 \sin \frac{\eta}{2}), \quad (6.5)$$

$$(5.9) \rightarrow \tau_w^{(0)} = -\frac{4(x^2 - 1)}{(x^2 + 1)^2}, \quad (6.6)$$

$$(5.8) \rightarrow \tau_w^{(1)} = \frac{28}{3} \frac{x}{(x^2 + 1)^2} - \frac{8(3x^2 - 1)}{(x^2 + 1)^3} \tan^{-1} x + \frac{4x(x^2 - 3)}{(x^2 + 1)^3} \log \frac{4}{x^2 + 1}, \quad (6.7)$$

$$(5.11) \rightarrow p_w^{(0)} = -\frac{8x}{(x^2 + 1)^2}, \quad (6.8)$$

$$(5.12) \rightarrow p_w^{(1)} = \frac{x^2 - 5}{(x^2 + 1)^2} - \frac{8x(x^2 - 3)}{(x^2 + 1)^3} \tan^{-1} x - \frac{4(3x^2 - 1)}{(x^2 + 1)^3} \log \frac{4}{x^2 + 1}, \quad (6.9)$$

$$u_{x=0}^{(0)} = \frac{4y}{(1-y)(1+y)^2}, \quad (6.10)^*$$

$$(5.15) \rightarrow v_{x=0}^{(1)} = -\frac{4y^2(y+3)}{(y-1)^3(y+1)^2} \log \frac{2}{1+y} + \frac{1}{4} \left(\frac{y-1}{y+1} \right)^2 \log \left| \frac{y+1}{y-1} \right| - \frac{y(y^3 + 49y^2 + 43y + 3)}{6(y-1)^2(y+1)^3}, \quad (6.11)^*$$

$$y \rightarrow 1 \quad v_{x=0}^{(1)} \rightarrow \frac{-1}{24} + O(y-1).$$

点渦による流れの諸量を以下グラフに示す。次ページの図 7~11 は 前の結果図 2~6 にそれぞれ対応している。

* $v_{x=0}^{(0)}$, $u_{x=0}^{(1)}$ は恒等的に 0 である。

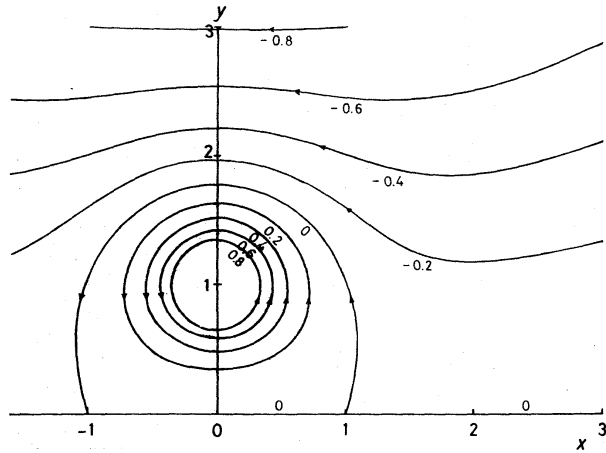


図7. 点(0, 1)に点渦をおいたときの定常 Stokes 流の流線。流線に付した値は ψ_{st}/c の値 [式(6.3)参照]。

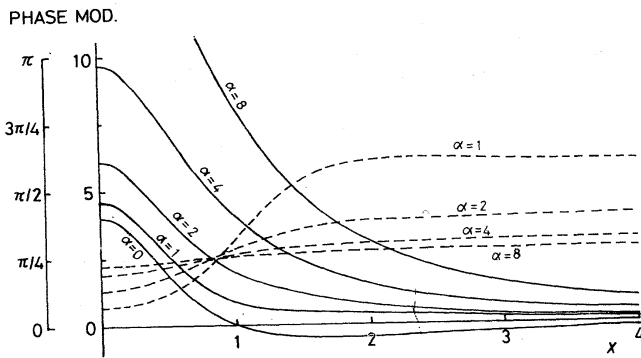


図8. 正弦的に強さの变化する点渦による壁面おり忘力。実線はその絶対値、破線は位相角を表わす。 $\alpha=0$ は定常解そのものを示す [式(6.2)参照]。

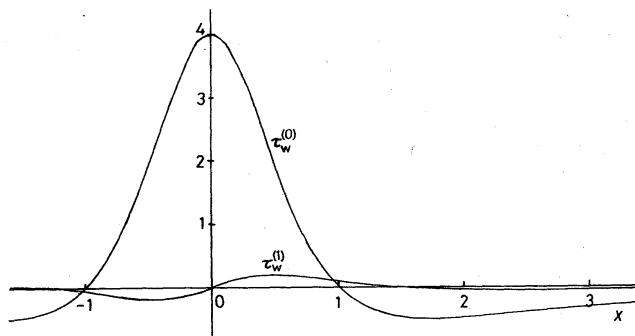


図9 定常流に対する壁面おり忘力分布 [式(6.6), (6.7)参照]。

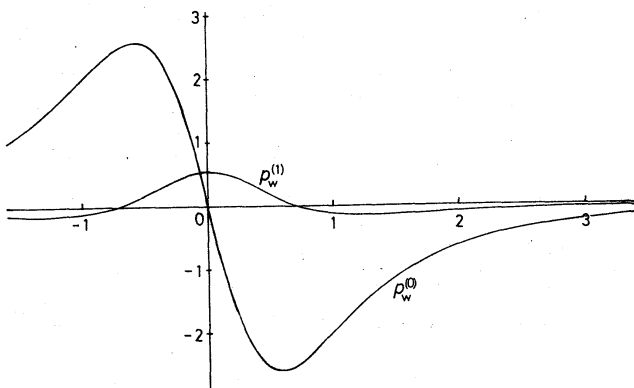


図10 定常流に対する
壁面圧力分布 [式(6.8),
(6.9)参照].

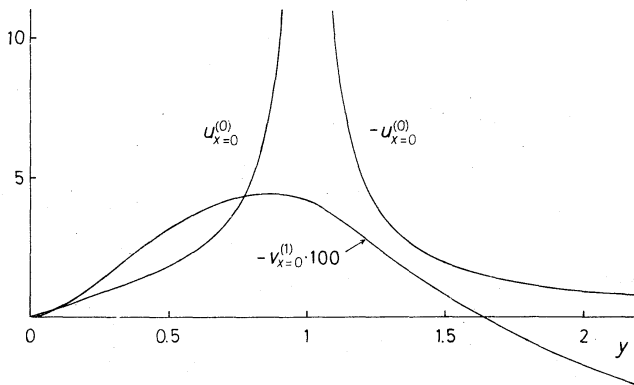


図11. 中心軸上の速度
分布. $O(R)$ の補正項
は系統に100倍 [である
[式(6.10), (6.11)参照].

図7は壁面上の点 $(1, 0)$ で剥離が, $(-1, 0)$ で再付着が起こることと示しているが, 図9から $O(R)$ の補正によって剥離点と中心から遠ざかり, 再付着点は近づくことがわかる。また非定常 Stokes 流の場合, 振動数の増加とともに壁面すり忘れは中心付近で強い値をとり, 位相のずれは全体的に $\pi/4$ に近づくことが示されている (図8)。

§7 むすび

この報告では、非定常とくに拍動的な流れと固定壁との相互作用を Navier-Stokes 方程式を用いて解析し、剥離点または再付着点付近の非定常流れの構造について一般的知見を得ることを目的とする。そのため、無限平板で境された半無限領域を占める二次元の流れという、極端に単純化されたモデルを採用した。そして平板から有限の距離におかれた点湧き出しまたは点渦によって誘起される粘性流を想定したのである。

非線形効果を表わす対流項が無視できる場合についてその目的は一応達せられ、壁面すり応力に関していえば一般的傾向があることが示された。すなわち、主流の振動数の高い極限では、壁面すり応力は、絶対値においては主流の振動数の平方根に比例し、位相においては主流よりも $\pi/4$ だけ全体的に進むことが確認された。この傾向は、流れの特異点が平板から無限の遠方にあり、かつその強さが無限大である非定常 Hiemenz 流⁶⁾の示す傾向と同じである。見方によっては、Hiemenz 流は無限大の Reynolds 数の流れと考えることができるので、この傾向は非線形効果を考慮したとしても一般的な意味をもつものと思像される。

残念ながら、きわめて単純なモデルを採用したにもかかわらず、非線形効果を含めた拍動流について結果を導くことは

できず、したがってこの想像が正当であるかどうかを確認することは不可能であった。しかし、定常流を仮定すれば非線形効果は摂動近似により1次の項まで評価することができ、その結果、 $O(1)$ の Reynolds 数に対しては、非線形効果はそれほど強くはないことが示された。

最後に、式(3.1)の定積分 $I(\beta, \alpha)$ の評価に関して、超関数の立場から今井功教授の有益なご助言を頂いた。ここに御礼を申し上げます。また、この研究は文部省科学研究の支持による。

参考文献

- 1) 今井 功: 流体力学(前), 裳華房, 東京, 1974.
- 2) Sneddon, I. N., *Fourier Transform*, McGraw Hill, N.Y. 1951.
- 3) Erdélyi, A., et al. (eds.), *Table of Integral Transformation I*, McGraw-Hill, N.Y., 1954, p136.
- 4) Abramowitz, M. and Stegun, I. A. (eds.), *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*, Dover Publ., Inc., N.Y., 1972.
- 5) Happel, J. H. and Brenner, H. B., *Low Reynolds Number Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Inc., N.J., 1965, p497.
- 6) Matunobu, Y., *J. Phys. Soc. Japan*, 42, 2041-49; 43, 326-329(1977).