

(16) 流水中にたてた円柱表面に生育する着生藻類と流れの関係について

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE ATTACHED ALGAE GROWTH
ON THE SURFACE OF A CIRCULAR CYLINDER AND THE WATER
FLOW CHARACTERISTICS AROUND IT

細井由彦*, 村上仁士*, 住山真**

Yoshihiko HOSOI, Hitoshi MURAKAMI, Makoto SUMIYAMA

ABSTRACT; Shallow urban rivers, receiving nutrient-enriched effluent, have thick growths of algae on their beds. Such algae deteriorate the water quality of those rivers by their respiration and detachment from the beds. Therefore it is significant to study the characteristics of the behavior of the attached algae for understanding the water pollution mechanism of the rivers.

In this study, to investigate the effects of the flow on the growth of the attached algae, the algal growth on the surface of a circular cylinder is studied. The cylinder is stood on the bed of an experimental flume perpendicular to the uniform flow and is thought to produce different hydraulic conditions around it.

In the first place the variations of the shear stress and the nutrient flux on the surface of the cylinder are theoretically considered, respectively. Then the way is shown to control those conditions by choosing appropriate values of the velocity of the uniform flow and the cylinder diameter, and the availability of using the cylinder is described.

Next, the experiments are performed following the method described above and it is examined how the shear stress and the nutrient flux at the substratum affect the growth of the attached algae.

KEYWORDS; attached algae, shear stress, nutrient flux, circular cylinder, boundary layer

1. はじめに

生活排水や工場排水,あるいは無機栄養塩に富んだ二次処理水等が流入する河川では,富栄養化が進行し,河床に多くの付着性藻類が増殖している。これら付着性藻類は,河川的美観を損なうだけではなく,呼吸により水中の溶存酸素に影響を及ぼしたり,はく離流出することにより下流に対する新たな有機物汚濁供給源にもなりうる。このような点から,付着藻類の増殖特性を把握しておくことは,河川の水質汚濁機構を解明していく上で重要な課題であると言える。

河床付着藻類の増殖に関する研究は,実際の河川あるいは人工水路を利用して,従来から種々行われてきている。その着眼点も,栄養塩濃度の影響に関するもの,増殖種に関するもの,DO収支に関するもの等雑多である。筆者らは付着藻類の増殖と流れ特性との関係に重点をおいて検討を進めている。このような研究も,古くからOdum¹⁾, Whitford²⁾, McIntire³⁾らにより着手されており,また国内においても,人工水路を使った沖野の研究⁴⁾や,多摩川を対象にした相崎の研究⁵⁾他,いくつか行われている。これら従来の研究にみられる,付着藻類におよぼす流れの効果に関するある程度共通した結論を簡単に述べると,流れが藻類細胞表面付近の水を交換することにより,栄養塩の拡散濃度勾配を大きくし,代謝生産物を除去することによって,生産性を増進するといえることができる。

* 徳島大学工業短期大学部 Technical college, University of Tokushima

** 徳島大学大学院 Graduate school, University of Tokushima

ところでこれらの研究成果を増殖と流れという観点から見ていくとき、いく分かの不十分さやあいまいさを感じざるを得ないのは、流れの条件がほとんどの場合平均流速のみで評価されており、上記流れの効果に関しても定性的な指摘にとどまっているという点である。

そこで筆者らは、付着藻類の増殖に関与すると考えられる種々の要因の中で、流れの影響をとりあげて、室内開水路や実際の河川において検討を行ってみた。^{6), 7), 8)} 流れのおよぼす影響としては、付着増殖過程におけるせん断摩擦力によるはく離や、付着した藻類に対する栄養塩輸送が考えられる。これらは開水路の流れにおいてはつぎのように扱うことができる。

平均流速 U に対してマニング式を適用することになると、摩擦速度 u_* との関係は

$$u_* = \sqrt{g h I} \quad (1) \quad \text{より}$$

$$U = \frac{1}{n} h^{2/3} I^{1/2} = \frac{1}{n} u_* h^{1/6} g^{-1/2} \quad (2) \quad \text{となる。}$$

河床面への物質移動フラックスは拡散層厚さ δ_d を用いるとつぎのように与えられる。

$$j = D_M (C_b - C_s) / \delta_d \quad (3)$$

δ_d は粘性底層厚さに比例すると考えるとおつぎのようになる。

$$\delta_d \sim \nu / u_* \quad (4)$$

したがって式(3)は次式のように変形される。

$$j \sim u_* D_M (C_b - C_s) / \nu \quad (5)$$

河床面に対するせん断摩擦力は $\tau_0 = \rho u_*^2$ で表されるから、 τ_0 と j との関係はつぎのようになる。

$$\tau_0 \sim \rho \left(\frac{\nu}{D_M (C_b - C_s)} \right)^2 j^2 \quad (6)$$

これにより開水路においては路床における τ_0 と j^2 は比例関係にあることがわかる。すなわち平均流速を増加（減少）させて、 τ_0 を大きく（小さく）した実験を行おうとしても、 j^2 も同様に増加（減少）するため、いずれかの効果のみを独立に検討することは容易ではない。

さらに開水路流れで等流状態を得るにはある程度の水路長が必要であり、かつ一本の水路では一種類の水理条件しか与えることができず、藻類の成長を扱うような実験においては、場所的・時間的に大きな制約をうけることになる。

このような理由で、既報^{6), 7), 8)} においては水理条件を種々コントロールした実験による十分な比較検討を行うまでにはいたらなかった。

以上の点から、本研究においては、付着藻類の増殖と流水特性との関係を調べる一方法として、流水中に立てられた円柱を使った実験を行った。円柱周辺においては場所的に流れの様子が変化しているため、各部において τ_0 , j が変化している。さらに流速や円柱径を変化させることによって、 τ_0 や j を変化させることが可能になる。

そこで本論文ではまず円柱周辺の流れおよび物質輸送の場について検討を行い、円柱周辺のせん断応力と栄養塩輸送フラックスのそれぞれの分布特性を示す。その結果を用いて、実験を行い、一定期間増殖後の藻類の付着現存量と、せん断応力および栄養塩フラックスとの関係を考察する。当然これらを議論するうえで、初期の藻類の円柱への付着状態と流れとの関係を検討しておくことが必要である。この点についても現在研究を進行中であるが⁹⁾、本論文では上述の手法によって、河川におけるある程度増殖した後の藻類現存量と流れとの関係を考えることを念頭においており、この点に関してはふれられていない。また水理条件に焦点をしばっており、流水水質や藻類の種類等に関する詳しい検討は行われていない。

2. 円柱周辺流のつくりだす場

流れが付着藻類におよぼす影響要因として、付着物表面にかかる摩擦応力と、栄養塩輸送が考えられる。ここでは円柱周辺におけるこれら2要因について検討する。

2.1 円柱をすぎる流れ

一様流中にたてられた円柱周辺の流れは、 $Re > 20$ 程度になると実質的にはポテンシャル流と考えることができる。その流速場は次式で表すことができる。

$$u_\theta = U_0 (1 + a^2/r^2) \sin \theta \quad (7)$$

$$u_r = -U_0 (1 - a^2/r^2) \cos \theta \quad (8)$$

円柱壁面付近においては、前面部よどみ点 ($\theta = 0$) から境界層が発達し、 $80 \sim 110^\circ$ 付近ではく離する。よどみ点からはく離点までの部分に層流境界層理論を適用する。この部分の境界層が層流となるか乱流が支配的になるかは、主流流速 U_0 の大きさに依存するが、 $Re \leq 5000 \sim 10^5$ においては層流が保たれている¹⁰⁾。

Tifford は境界層外の流速が $U_\infty = u_1 x + u_2 x^3 + u_3 x^5 + \dots$ (x は境界層前縁を原点として境界層に沿って平行にとっている) のように級数展開表示される場合の境界層内の流速の分布を、 x^{11} 項までについて計算を行っている。 $\theta = 0^\circ$ から円柱周辺に沿って発達する境界層において、その外縁流速は式(7)に $r = a$ を代入して次式で与えられる。

$$U_\infty = 2 U_0 \sin \theta \quad (9)$$

式(9)はつぎのように級数展開される。

$$U_\infty = 2 U_0 \left(\theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots \right) \quad (10)$$

式(10)を Tifford の解析結果に適用すると、円柱周辺の摩擦応力は次式で与えられる¹¹⁾。

$$\frac{\tau_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 \sqrt{\frac{U_0 a}{\nu}}} = 6.973 \theta - 2.732 \theta^3 + 0.292 \theta^5 - 0.0183 \theta^7 + 0.000043 \theta^9 - 0.000115 \theta^{11} \quad (11)$$

すなわち Fig. 2 に示されるように、円柱面に加わる摩擦応力はよどみ点で 0 で、後方に行くにしたがって増加し、 $\theta = 58^\circ$ 付近で最大となった後減少し、はく離点で 0 となる。

τ_0 の測定はむずかしく、また実用的な面からも円柱周辺の物理量としては圧力がよく測定されている。その結果によれば、はく離点の位置が U_0 により若干ずれることも重なって、円柱周辺の圧力分布の実測値と式(9)で与えられるポテンシャル流から出発する理論値との一致は、よどみ点付近では非常によいが、はく離点に近づくにつれて悪くなっている。本研究においては、よどみ点からはく離点にいたるまでの τ_0 を式(11)で計算するが、以上のことを念頭におき、はく離点付近のデータ（とくに θ が 60° 以上の部分）を扱う際にはこの点に十分留意し、定量的な議論の場合には精度の点で考慮することが必要と考えられる。

2.2 円柱前面部における物質移動

円柱前面のよどみ点からはく離点にいたる領域における固体表面への物質移動について検討を加える。よどみ点から発達する境界層とともに、物質についても分子拡散が支配的な濃度境界層が形成される。

濃度境界層方程式は次式で与えられる。

$$u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} = D_M \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (12)$$

ここで原点はよどみ点に、 x 軸は円周に沿い、 y 軸は法線方向に外向きにとっている。曲面に沿って $x \cdot y$ 座標をとるときには、境界層の厚さが曲面の曲率半径に比較して十分小さく、かつ曲率半径の x に関する変化が十分小さいという条件が必要である。一般に円柱の場合にはこの条件がみたされており、上式のような表示が可能となる。

式(12)を $y = 0$ (円柱面) から $y = \delta_c$ (濃度境界層外縁) まで積分して整理するとつぎのようになる。

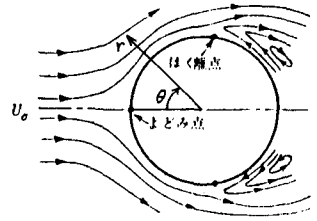


Fig.1 Flow pattern around a circular cylinder

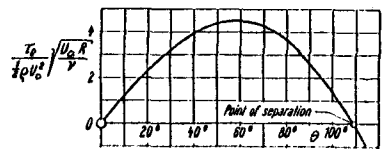


Fig.2 Variation of shearing stress at the wall over the circumstance of a cylinder

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\delta_c} u_x (C - C_\infty) dy = -D_M \left[\frac{\partial C}{\partial y} \right]_{y=0} \quad (13)$$

Squire が温度境界層に対して行った方法に準じて、境界層内の流速および濃度分布を Pohlhausen の近似式でつぎのように与える。

$$\text{速度分布} \quad \lambda \leq 1 \quad u_x = U_x (2\lambda - 2\lambda^3 + \lambda^4) = U_x F(\lambda) \quad (14)$$

$$\lambda > 1 \quad u_x = U_x \quad (15)$$

$$\text{ただし} \quad \lambda = y/\delta \quad (16)$$

$$\text{濃度分布} \quad \lambda_c \leq 1 \quad \frac{C - C_\infty}{C_w - C_\infty} = 1 - 2\lambda_c + 2\lambda_c^3 - \lambda_c^4 = L(\lambda_c) \quad (17)$$

$$\lambda_c > 1 \quad C = C_\infty \quad (18)$$

$$\text{ただし} \quad \lambda_c = y/\delta_c \quad (19)$$

式(17)より固定境界における濃度勾配は、

$$\left[\frac{\partial C}{\partial y} \right]_{y=0} = \frac{1}{\delta_c} \left[\frac{\partial C}{\partial \lambda_c} \right]_{\lambda_c=0} = -\frac{2}{\delta_c} (C_w - C_\infty) \quad (20)$$

で表され、物質移動フラックスはつぎようになる。

$$j = -D_M \left[\frac{\partial C}{\partial y} \right]_{y=0} = \frac{2D_M}{\delta_c} (C_w - C_\infty) \quad (21)$$

式(13)に、式(14)、(17)で与えられる速度および濃度分布を代入し、式(20)を使って整理すると次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial x} [U_x \delta_c H(\triangle)]^2 = 4D_M U(x) H(\triangle) \quad (22)$$

$$H(\triangle) = \int_0^1 F(\lambda) L(\lambda_c) d\lambda_c \quad (23)$$

$$\triangle = \delta_c / \delta = \lambda / \lambda_c \quad (24)$$

δ は運動量厚さとの関係より

$$\delta^2 = \frac{34\nu}{U_x} \int_0^x U_x^5 dx \quad (25)$$

と与えられ、式(22)、(25)より次式を得る。

$$\triangle^2 H = \frac{2U_x^4 \int_0^x U_x H dx}{17S_c H \int_0^x U_x^5 dx} \quad (26)$$

式(23)、(26)より所定の U_x に対する δ 、 $\triangle$ が計算されると、式(24)より δ_c が求められ、式(21)より物質移動フラックスを求めることができる。

円柱の場合、 U_x は次式で与えられる。

$$U_x = 2U_0 \sin \theta = 2U_0 \sin(x/a) \quad (27)$$

これを式(25)、(26)に代入するとそれぞれつぎのようになる。

$$\delta^2 = \frac{17\nu a}{U_0 \sin^6 \theta} \int_0^\theta \sin^5 \theta d\theta \quad (28)$$

$$\triangle^2 H = \frac{2 \sin^4 \theta \int_0^\theta H \sin \theta d\theta}{17 S_c H \int_0^\theta \sin^5 \theta d\theta} \quad (29)$$

円柱径 d を使った局所 Sherwood 数 Sh_d は次式となる。

$$Sh_d = \frac{2d}{\delta_c} = \frac{2d}{\Delta \delta} = \frac{2}{\Delta} \sin^3 \theta \sqrt{\frac{2}{17} Re} \frac{1}{\int_0^{\theta} \sin^5 \theta d\theta} \quad (30)$$

式29より Δ は S_c と θ との関数である。式29, 30より Sh_d はつぎのように表される。

$$Sh_d = Sh_d(Re, S_c, \theta) \quad (31)$$

上式中, Reynolds 数に関しては Sh_d と $Re^{1/2}$ の形で関係づけられることがわかる。

以上の結果より物質移動フラックスはつぎのような式で表される。

$$j = \frac{Sh_d D_M}{d} (C_\infty - C_w) = f_1(\sqrt{U_0/\nu d}, S_c, \theta) \cdot D_M (C_\infty - C_w) \quad (32)$$

上式は式20と符号が逆になっている。式20は円柱中心より外向きを正としているが, 現実的には流れから円柱面に向かって栄養塩が輸送されるので, ここより以後におけるフラックス j のとり扱いは, 外から円柱面へ向かうものを正とすることとする。

式28, 29, 30より局所 Sherwood 数の分布を数値計算によって求めた例を Fig. 3 に示す。

2.3 円柱後面部における物質移動

以下で実験を行う Reynolds 数が 10^3 のオーダーの値をとる場合においては, はく離点より Kármán の渦列が発生する。円柱後面部における流れの理論的解析は行われていないが, $Re=2800$ における圧力分布の計測例¹²⁾を Fig. 4 に示す。本図より後面部における圧力はほぼ一定であり, したがって円柱に沿う流れはほとんどなく, 流れによる円柱面へのせん断摩擦応力は無視できるものと考えてよいであろう。

定常的な流れがなく, 停滞域であることから, 円柱面への栄養塩の輸送は, 周期的に発生する Kármán 渦によって行われると考えることができよう。そこで, 固定壁面付近の静止水塊が渦によって周期的に更新されるモデルを考える。

静水中におかれた円柱に対する非定常拡散方程式はつぎのようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_M}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (33)$$

初期および境界条件は以下のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} t=0, \quad r>a: C=C_\infty \\ t \geq 0, \quad r=a: C=C_w \\ t \geq 0, \quad r \rightarrow \infty: C=C_\infty \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

上式の解はつぎのように与えられる。

$$\frac{C-C_\infty}{C_w-C_\infty} = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{-D_M z^2 t} \frac{J_0(zr)Y_0(za) - Y_0(zr)J_0(za)}{J_0^2(za) + Y_0^2(za)} \frac{dz}{z} \quad (35)$$

円柱表面への物質移動フラックス j は上式より

$$\begin{aligned} j &= D_M \left[\frac{\partial C}{\partial r} \right]_{r=a} \\ &= \frac{4 D_M}{a \pi^2} (C_\infty - C_w) \int_0^\infty \frac{e^{-D_M t z^2/a^2}}{J_0^2(z) + Y_0^2(z)} \frac{dz}{z} \end{aligned} \quad (36)$$

$D_M t/a^2$ が小さいときは上式はつぎのようになる。

$$j = \frac{D_M}{a} (C_\infty - C_w) \left\{ \frac{a}{\sqrt{\pi D_M t}} + \frac{1}{2} - \frac{1}{4a} \sqrt{\frac{D_M t}{\pi}} + \frac{D_M t}{8a^2} \dots \right\} \quad (37)$$

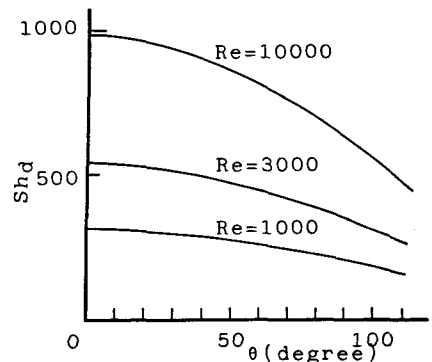


Fig.3 Example of local Sherwood number

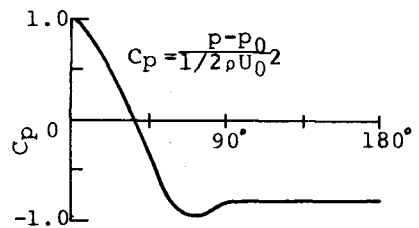


Fig.4 Variation of pressure around a cylinder (Re=2800, Morkovin, M.V. 12)

$$\theta_s \leq \theta \leq \pi$$

$$\tau_0 \approx 0$$

$$j = 2 \sqrt{\frac{D_M U_0 \eta}{\pi d}} (C_\infty - C_w) \quad (49)$$

式(11)より $0 \leq \theta \leq \theta_s$ の部分では局所的に τ_0 が異なるため、 τ_0 と付着藻類との関係を見ることが出来る。たとえば $0 \leq \theta \leq \pi/6$, $\pi/6 \leq \theta \leq \pi/3$, $\pi/3 \leq \theta \leq \pi/2$ の各部に区切って考えた場合、それぞれの部分の平均的な τ_0 はつぎのようになる。

$$\frac{\bar{\tau}_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 \sqrt{\frac{U_0 a}{\nu}}} = \begin{cases} 1.73 & 0 \leq \theta \leq \pi/6 \\ 4.12 & \pi/6 \leq \theta \leq \pi/3 \\ 3.87 & \pi/3 \leq \theta \leq \pi/2 \end{cases} \quad (50)$$

また一樣流の流速や円柱径を変化させることによって τ_0 を変化させることができる。

これらのパラメータを動かすと、当然それにもなって物質移動フラックスも変化するが、一樣流流速と円柱径のみに限って、 τ_0 と j への関係のしかたをみると、式(41), (32), (49)より $\tau_0 \sim U_0 \sqrt{U_0/d}$, $j \sim \sqrt{U_0/d}$ となるので、 U_0 と d を適当に調節することによって、一方を一定の条件のもとに、一方を変化させることも可能である。

例として2本の水路を使用して一方の U_0 を他方の2倍にして実験を行う場合、水路床では式(2), (5)より j は2倍、 τ_0 は4倍となることが考えられ、付着増殖がいずれの量が増加した影響を受けたのかを調べることはできない。これに対して、 U_0 が2倍の水路で、径が他方の水路中の円柱の8倍の円柱を使用すれば、 τ_0 が等しく j が $1/2$ になり、径が2倍の円柱を使うと、 j が等しく τ_0 を2倍にすることができる。

$\theta_s \leq \theta \leq \pi$ の部分では、せん断摩擦応力が無視できるような状態における、乱流渦による固定壁面への物質輸送のみの効果を検討することができる。したがって乱流特性とそれにもなる栄養塩輸送と付着藻類の増殖について研究するモデル場として利用することができるであろう。このようなモデルを円柱全体的に適用して、平均的な伝熱係数を考察したものとして、佐野・西川¹⁵⁾の研究がある。

また円柱壁面は鉛直に立っているので、河床におけるような沈殿による付着の影響を排除することができる。

以上のように円柱を利用することにより、第1章で述べた開水路による方法の種々の問題点を解消し、流れ条件をコントロールした実験が行いやすくなると考えられる。

3. 円柱を用いた付着性藻類の増殖に関する実験

実験は長さ360 cm、幅20 cm、深さ13 cmの矩形断面水路を3本平行に並べて行った。水は共通のヘッドタンクより各水路へ流入し、流下後共通の受水タンクに入り、ポンプで再びヘッドタンクに戻されて循環する。したがって1ケースの実験の間各水路には同一水質の水が循環しており、流速が異なっている。

円柱は各水路の中央部に配置した。1実験で4回のデータをとるときには、一つの水路内に140 cm間隔で2本の円柱を設置し、それぞれに対して左半分、右半分ずつ順次4回の付着物採取を行った。サンプリング回数が2回以下の場合には1本の円柱を使用した。

循環水はくみおきた水道水に Table 1 になるように薬品を添加した後、藻類の繁殖した池の水を若干加えたものを使用した。各実験開始時における流水中のクロロフィル a 濃度はほぼ一定になるように調整した。実験中も適宜採水を行い、クロロフィル a を測定したが、その値は $4 \sim 8 \mu\text{g}/\ell$ の間におさまっていた。実験進行にともなって河床や水路側面に多くの藻類が付着するようになったが、それにもかかわらず流水中のクロロフィル a 濃度が安定していた理由として、それらのはく離がほとんどおこらず、また水路上流端に整流のために設置した碎石群による浮遊藻類の捕捉が行われたと考えられる。

照明は水面上約40 cmのところから、植物栽培用蛍光灯(東芝FL40S-BRF)を4本用いて連続的に行った。実験室の窓にはブラインドをおろし、外からの光をほとんど遮断した。その結果、各水路の水面上の

照度は、ほぼ一定となり、昼間1150～1250ルクス、夜間1000～1100ルクスであった。

付着物はブラシではぎとって蒸留水中に浮遊させた。円柱下部付近の流れは水路底面の影響を受けることが考えられたので、はぎとりに際しては下から5mmの高さまでの部分は削除した。

はぎとられた付着物の浮遊した蒸留水は、半分に分けてそれぞれ乾燥重量とクロロフィルaの測定に供した。円柱径が小さい場合や付着物採取面の分割を細かくした場合には、浮遊物量が少なくなり測定誤差が大きくなることが危惧されたため、全量を乾燥重量の測定にあてた。これは両者を測定した結果によるとクロロフィルa量と乾燥重量との間に相関があり、かつ経験的にクロロフィルaよりも乾燥重量の方に定量精度に自信を持ちうると判断したためである。

4. 実験結果および考察

4.1 流速測定結果

実験に先立ち、円柱周辺の流れをホットフィルム流速計を使用して測定した。結果の一例として、直径8.5cmの円柱を対象として水深4cmのもとで水面下0.5, 1.5, 2.5cmにおいて測定した主流方向の流速の平均値をFig.5に示す。円柱周辺流はほぼポテンシャル流にしたがっていると考えられる。

Fig.6は円柱後方部の円柱表面から2mm離れた点における流速のパワースペクトルの例を示したものである。両側面から発生する渦のために fd/U_0 が0.4付近においてピークが存在している。このことから後面部に対する式(41), (42)の仮定が妥当なものであるといえる。

4.2 円柱周辺の藻類の付着増殖

各実験における一様流速と円柱径をTable2に示す。CASE番号が同じ実験は同時に行ったものであり、流水水質は等しい。

円柱周辺を60度ずつ3領域に区分して付着現存量の変化をみた実験の結果を2例Fig.7に示す。領域I ($0 \leq \theta \leq \pi/3$)は層流境界層の中にあり、II ($\pi/3 \leq \theta \leq 2\pi/3$)は、はく離点を含んだその前後の領域、III ($2\pi/3 \leq \theta \leq \pi$)は後流域である。これらの実験は、円柱周辺の付着現存量のおおまかな傾向と、同一径の円柱を用いて一様部流速の影響をみることを目的として行った。

Table 1 Water quality

KNO ₃	2.5 mg/l
K ₂ HPO ₄	6.0 mg/l
MgSO ₄ ·7H ₂ O	30.0 mg/l
FeCl ₃	4.0 mg/l
CaCl ₂	40.0 mg/l
Na ₂ SiO ₃	19.0 mg/l

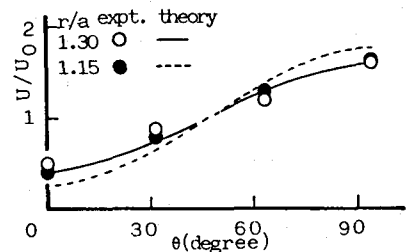


Fig.5 Example of observed velocity

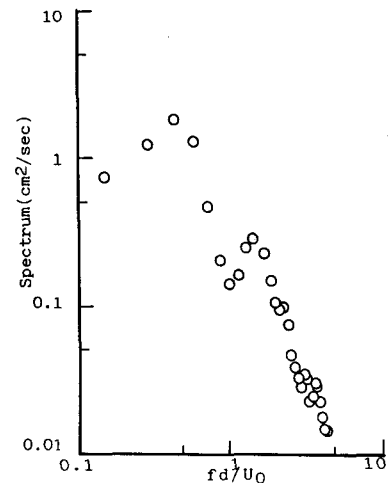


Fig.6 Spectrum of velocity behind a circular cylinder

Table 2 Experimental conditions

		U_0 (cm/s)	d (cm)
CASE-1	A	2.7	8.5
	B	9.7	8.5
	C	0.3	8.5
CASE-2	A	4.5	8.5
	B	6.5	8.5
	C	1.0	8.5
CASE-3	A	4.4	8.5
	B	5.3	8.5
	C	0.3	8.5
CASE-4	A	4.3	8.5
	B	4.0	6.6
	C	3.2	3.5
CASE-5	A	5.2	8.5
	B	4.0	6.6
	C	3.1	5.3
CASE-6	A	5.6	8.5
	B	4.4	6.6
	C	3.6	5.3

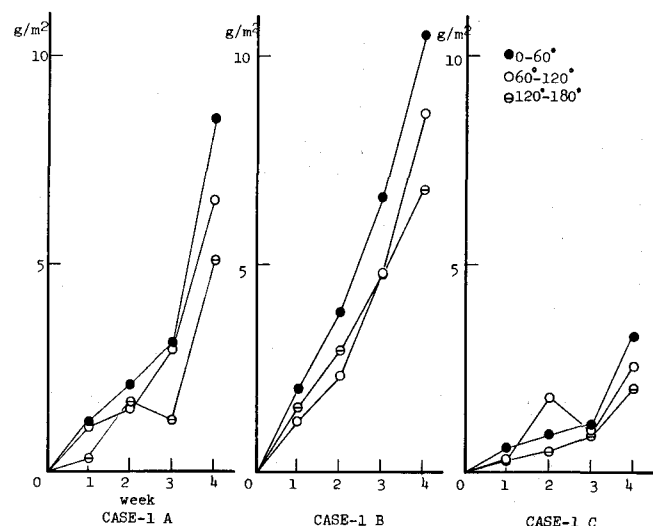


Fig.7 Changes of dry weight of periphyton (CASE-1,2)

一般的な傾向として、現存量は領域Ⅰで最も大きく、つづいてⅡ、Ⅲの順になっている。また一様流部の流速が早いほど現存量は多くなる傾向にある。本図には示していないがCASE-3のA、Bにおいては、3～4週目の間に領域Ⅰにおいて、付着物のはく離がみられ、この部分の摩擦応力の大きいことを示している。

このような方法で行った実験は3ケースあり、それらの4週目現存量を一枚の図に整理したものがFig.8である。各ケースの実験開始時には流水中のクロロフィルaの濃度がほぼ等しくなるように調整しており、実験条件はおおまかには等しいものと考えられる。前述のようにCASE-3のA、Bでははく離が起こったので、3週目の現存量もともに示した。物質移動フラックスと直接的に関係している U_0/d による整理では、領域Ⅰにおいては摩擦応力の影響も含まれるため散らばりが大きい、領域Ⅲでは一応のまとまりをみせているようである。

円柱周辺全体の平均的な伝熱に対しては、McAdams¹⁶⁾が次式のような整理を与えている。

$$N_u = k Re^n Pr^{1/3}$$

$$k = 0.683, n = 0.466$$

$$40 < Re \leq 4,000$$

$$k = 0.193, n = 0.618$$

$$4,000 < Re \leq 40,000$$

本論文の主旨とは若干ずれるが、円柱周辺の平均的な物質移動もまた式(51)と相似した関係にあると仮定して、4週目の円柱周辺の平均付着量とReynolds数との関係を求めてみたものがFig.9である。本結果は

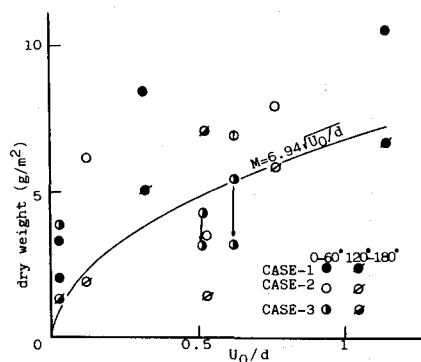


Fig.8 Dry weight of periphyton after 4 weeks (CASE-1,2,3)

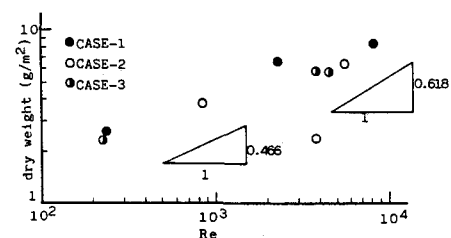
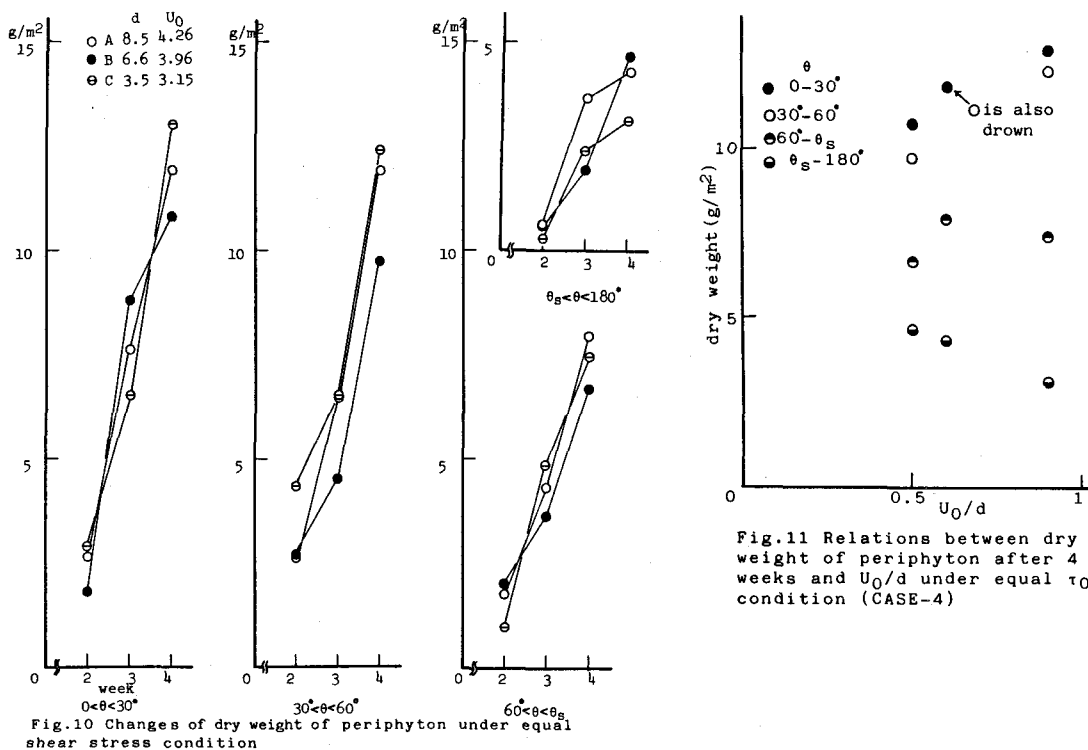


Fig.9 Relations between mean dry weight of periphyton after 4 weeks and Reynolds number (CASE-1,2,3)



同一径の円柱を使って流速を変化させたのみのものであり、異なった径の円柱を用いた実験も必要であるが、円柱全体を平均的に扱う場合、伝熱における成果と同様に Reynolds 数が有効なパラメータとなりうる可能性を示していると考えられる。

異なった直径の円柱を用いて摩擦応力を等しくした実験を行った。式(11)より (θ の等しい部分における) τ_0 を等しくするには $U_0\sqrt{U_{0d}}$ を合わせればよい。そこで ($d = 8.5$ cm, $U_0 = 4.3$ cm/s), (6.6 cm, 4.0 cm/s), (3.5 cm, 3.2 cm/s) のくみ合わせとした。付着物の採取区分は、I ($0 \leq \theta \leq \pi/6$), II ($\pi/6 \leq \theta \leq \pi/3$), III ($\pi/3 \leq \theta \leq \theta_s$, θ_s : はく離点), IV ($\theta_s \leq \theta \leq \pi$) とした。

得られた増殖曲線を各領域別に Fig.10 に示す。A, B, C で一様流速は異なるが、 $\theta_s \leq \theta \leq \pi$ を除く各領域において摩擦応力は等しい。本図によると $0 \leq \theta \leq \theta_s$ の範囲においては、増殖曲線は非常によく似た傾向にあり、 τ_0 を等しくすることにより増殖曲線の傾向はたいへんよく似ることがわかる。ただし式(11), (32) からわかるように、一様流速と円柱径のみをパラメータとしたとき、 $\tau_0 \sim U_0$ の関係があり、本図に見られる相似性は、 U_0 の範囲が小さい ($3.2 \sim 4.3$ cm/s) ために j の値も近いことによるとも考えられ、今後 U_0 の範囲を広くとった実験が必要である。

τ_0 が等しい場合の、物質移動フラックスの影響を調べるために、Fig.10 における 4 週目の付着現存量と、 U_0/d の関係を示したものが Fig.11 である。領域 I, II においては U_0/d の増加にともなって現存量が増加する傾向が顕著にみられる。領域 III ではその傾向は必ずしも明白ではないが、これははく離点付近の影響によるものと思われる。同一の円柱における (4 週目の) 付着量は、領域 I の方が領域 II よりも多く、その比は 1.11 ($d = 8.5$ cm の円柱), 1.00 ($d = 6.6$ cm), 1.05 ($d = 3.5$ cm) となっているが、これは Schmidt 数を 530 として計算した、これら二つの領域における平均 Sherwood 数の比 1.08 に近い値になっている。

以上、Fig.10, 11 より τ_0 を合わせることで、付着増殖が物質移動フラックスと直接的に関係していることをみることができた。しかし、はく離点付近および後流部の結果に対しては十分に説得力のある説明を

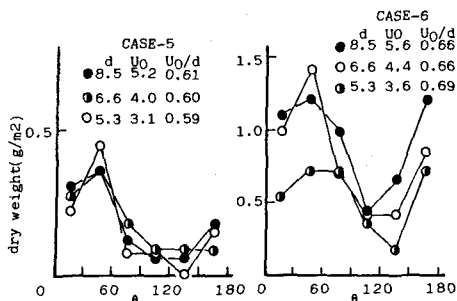


Fig.12 Variation of dry weight of periphyton around cylinders under equal U_0/d condition

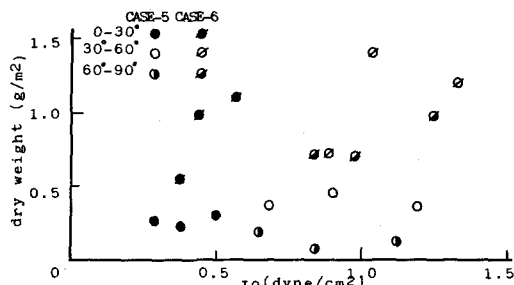


Fig.13 Effect of τ_0 on periphyton under equal nutrient condition (CASE-5,6)

行うまでにはいらず、さらに実験を行ってみる必要がある。

つづいて U_0/d を一致させた実験を 2 回行った。すでに述べたように U_0/d を一致させることにより、各水路中に立てられた円柱各部への物質移動フラックスを等しくし、 τ_0 を異なったものにすることができ。付着物の採取は実験開始から 6 日後とし、 $\theta = 0$ から 30° ごとに採取領域を分割した。

30° ごとに分割した各領域の付着量を Fig.12 に示す。いずれの円柱においても $30 \sim 60^\circ$ の領域で付着物量が最大となり、はく離点付近で最小となり、後部になるにしたがって再び増加するという似た傾向を示している。

物質移動フラックスが等しい部分別に、各部の平均摩擦応力 τ_0 と付着量との関係をみたものが Fig.13 である。CASE-5 においては τ_0 にかかわらず付着量はほぼ一定値を示しているが、CASE-6 においては、どちらかと言えば τ_0 の増加にともなって付着量も増加する傾向にあるとみることができる。現段階では両者の関係を断定的に述べるまでにはいたっていない。

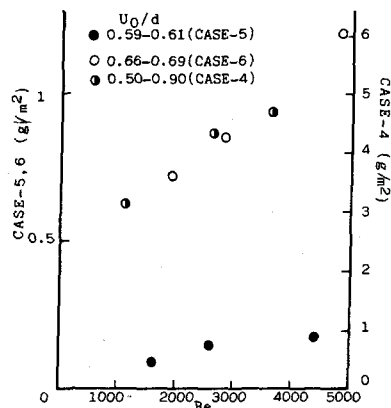


Fig.14 Relation between dry weight of periphyton on the down-stream part of cylinders and Reynolds number

第 2 章における検討では、後流部においては U_0/d が等しいときには付着量も等しくなるものと考えられるが、Fig.12 をみるかぎりでは、そのような傾向は認められない。そこで $\theta = 150 \sim 180^\circ$ の部分における付着物量を、 U_0/d が等しい場合別に Reynolds 数でまとめた。その結果が Fig.14 である。いずれの場合にも Reynolds 数の増加にともない付着量は増加している。さらに先に検討した CASE-4 における $\theta = \theta_s \sim 180^\circ$ の部分についても Fig.14 中に示した。 U_0/d の値が異なるにもかかわらず Reynolds 数でよく整理されている。以上の結果より、Fig.8 中の後面部の結果とはやや矛盾するが、後面部の付着量は Reynolds 数と密接に関係していると考えられる。

5. おわりに

本研究は付着藻類の増殖と水理条件との関係を流水中に立てられた円柱を用いて行おうとしたものである。まず円柱周辺の摩擦応力と栄養塩輸送フラックスについて詳しく検討し、そのモデル的意義を示した。

続いていくつかの実験を行って、円柱周辺部の付着増殖特性を調べた。よどみ点からはく離点までの領域では τ_0 を一致させた場合、付着現存量と栄養塩フラックスとの間に密接な関係を見ることができた。はく離点より後面部では、付着現存量は Reynolds 数とよい相関があることがわかったが、その理論的根拠については十分明らかではない。

実験上の制約から、乾燥重量による考察に終始したが、藻類を対象としているため、クロロフィル a を指標とした検討も進めていくことが必要であると考えている。

また円柱表面に対する藻類の付着の境界層に与える影響も考えられる。本研究では藻類の付着による円柱面の凹凸に対する詳細な計測は行っていないが、目視によるかぎりではなめらかな状態を維持しながら増殖が進んでいるようであった。流水条件が増殖に与える影響が明らかにされるにつれ、より詳しい機構解明の段階に入り、これら凹凸の効果についても考慮することが必要になるだろう。

当面は、初期付着の影響や後面部の付着増殖特性の解明を進めるとともに、本方法によって種々の水理条件を与えて付着増殖特性を詳しく調べ、開水路場への適用を進めていきたいと考えている。

最後に本研究を進める上で激励をいただいた京都大学住友恒教授と実験補助を受けた元本学工学部学生富山亨氏（蜂谷工業）に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Odum, H.T. (1956) Limnol. & Oceanogr, 1
- 2) たとえば Whitford, L.A. (1960) Trans. Ame. Micr. Soc., 79.
- 3) たとえば McIntire, C.D. (1966) Hydrobiologia, 27.
- 4) 沖野外輝夫 (1970) 資源科学研究所集報, 74号.
- 5) 相崎守弘 (1980) 陸水学雑誌 41-4.
- 6) 細井由彦他 (1983) 土木学会第 38 回年次講演会.
- 7) 住山真他 (1984) 土木学会第 39 回年次講演会.
- 8) 細井由彦他 (1984) 第 18 回水質汚濁学会.
- 9) 細井由彦他 (1984) 京都大学環境衛生工学研究会第 6 回シンポジウム講演論文集.
- 10) 乙竹直 (1968) 化学工学 32-1.
- 11) Schlichting (1968) Boundary layer theory, McGraw-Hill.
- 12) Morkovin, M.V. (1964) ASME symposium on fully separated flows.
- 13) Taylor, E. (1931) Phil. Mag., 11-72.
- 14) 藤本武助 (1965) 流体力学, 養賢堂.
- 15) 佐野雄二他 (1964) 化学工学 28-11.
- 16) McAdams, W.H. (1954) Heat Transmission, McGraw-Hill.

記 号 表

a : 円柱の半径	N_u : ヌッセルト数	Y_0 : 第 2 種 0 次ベッセル関数
C_b : 主流部における栄養塩濃度	n : マニング粗度係数	δ : 境界層厚
C_s : 河床面における栄養塩濃度	P_r : プラントル数	δ_c : 濃度境界層厚
C_w : 円柱表面における栄養塩濃度	Re : レイノルズ数	δ_d : 拡散層厚
C_{∞} : 濃度境界層外縁濃度	r : 直径方向の座標	η : カルマン渦発生周波数に関するパラメータ
D_M : 分子拡散係数	Sc : シュミット数	θ : 角 度
d : 円柱の直径	Sh_d : 円柱径を用いたシャーウッド数	θ_s : はく離点の角度
g : 重力加速度	t : 時 間	ν : 動粘性係数
h : 水 深	U : 平均流速	ρ : 水の密度
I : エネルギー勾配	U_0 : 円柱をたてる一様流の流速	τ : 更新周期
J_0 : 第 1 種 0 次ベッセル関数	u_r : r 方向の流速	τ_0 : せん断まきつ力
j : 栄養塩フラックス	u_θ : θ 方向の流速	