II-253　　河川の自浄作用の理論的検討 ―（河床付着微生物の作用）

○ 東京工業大学　日野 幹雄
東工大・院(現・新日鉄) 歌原 英明
東工大・院　川端 規之

1. 目的 ： 著者の一人はこゝ数年，水理学の新らたな分野の一つとして，水理学の人間化として‘Ecohydraulics’を提唱して来た。これは，環境および生態系への水理学的接近を目指すものであるが，単に水理学の方程式の中に生態項を導入するに止まらず，こうした問題へ水理学的思考法を持ち込むことを目的としている。

さて，水環境の汚染には生命体および非生命体の有機物が関与していることは早くから認識されており，河川の汚濁と自浄作用はその主要課題である。本論文は，これまで多くの研究者により取扱われて来たこの問題を，水理学者の目から見直し，新たな理論を提出するものである。

2. 河床微生物による自浄作用 ： 河川の自浄作用が微生物（主として細菌）による汚濁有機物の酸化分解作用によるものであることに異議を称える者はいない。しかし，その微生物が河水中に浮遊流下するのか，河床に付着しているのかに関して，これまであまり問題とされなかった。しかし，最近 Wuhrman et al.（1966），手塚ら（1966），手塚ら（1974）の実験により河床付着する微生物膜が主役であるとの主張がなされている。著者らも気泡駆動式循環管路により室内実験を行い，このことを確めた。こうした実験結果を根拠に，河川自浄作用は主に河床付着微生物によるとして理論を導く。以下の理論のもう一つの柱となっているのは，微生物の増殖率 $\mu = \frac{1}{Y}\frac{dY}{dt}$（Y：微生物量）は，従来からの Monod式のように基質（こゝではBOD）濃度の関数ではなく，‘単位微生物量あたりの微生物栄養分の比 L/Y の関数である’としたことである。　この式は，実験的に（Contois 1959）また理論的に（日野 1975）に導かれている。

(i) 基礎方程式：

$$\left\{\begin{aligned} &\frac{dY_b}{dt} = (\mu - \beta)Y_b = 0 && (1) \\ &u\frac{dL}{dx} = -\frac{1}{h}(\mu' - \beta')Y_b && (2) \\ &u\frac{dO}{dx} = -\frac{\mu'}{h}Y_b + K_2(O_s - O) && (3) \end{aligned}\right.$$

こゝに，Y_b：河床単位面積あたりの微生物量，L：BOD，O：溶存酸素濃度，O_s：飽和溶存酸素濃度，u：流速，h：水深，$\mu \cdot \mu'$：増殖率，$\beta \cdot \beta'$：微生物の死滅除去率とそのBOD再負荷率，K_2：再曝気係数。

また，微生物の増殖率関数 μは L/Y_b，O/Y_b の関数である。

$$\mu = f_n(L/Y_b, O/Y_b) \qquad (4)$$

例えば，

$$\mu = \mu_{max}\left[L/Y_b / (a + L/Y_b) \cdot O/Y_b / (b + O/Y_b) \right] \qquad (4a)$$

(ii) 第I種領域―BODが制約因子の場合―：有機質の酸化分解作用をする微生物の活動を制約する因子は，式(4)に示されるように，微生物の栄養素(L)と微生物の呼吸のための酸素(O)（その他，温度，微生物自体の出す毒素，外部からの毒物，食物連鎖上位者（原生動物等）による捕捉など）である。

このうち，BODが制約因子の場合には，式(1)(4)から　$\mu_1(L/Y_b) - \beta = 0$　の根として　$L/Y_b = 1/C_1$（一定）

$$Y_b(x) = C_1 L(x) \qquad (5)$$

が決まる。

このとき，$\mu \cdot \mu'$ は $x \cdot L \cdot Y_b \cdot O$ に無関係に一定となる。上の関係を式(2)に代入してLおよび Y_b が次のように求まる。

$$L(x)=L_0 e^{-K_1 x/u} \tag{6}$$

$$Y_b(x)=c_1 L_0 e^{-K_1 x/u} \tag{7}$$

こゝに，自浄係数 K_1 は次式のように求まり，一定値である。

$$K_1 \quad =(\mu'-\beta')c_1/h \tag{8}$$

これらの関係を式(3)に代入すれば，

$$O(x)=O_s-(O_s-O_0)e^{-K_2 x/u}+(\mu' c_1 L_0)/(K_1-K_2)\cdot\{e^{-K_2 x/u}-e^{-K_1 x/u}\} \tag{9}$$

上式から明らかなように，溶存酸素は始め減少し，最小値に達したのち，やがて徐々に回復し，いわゆるOxygen sag を画く。

(iii) 第II種領域——溶存酸素が制約因子の場合—— ： この場合には，Y_b は $\mu_2(O/Y_b)-\beta=0$ の根 $1/c_2$（＝一定）より

$$Y_b(x)=c_2\,O(x) \tag{10}$$

となる。式(3)より

$$O(x)=\{O_0-K_2/K_2'\cdot O_s\}e^{-K_2' x/u}+K_2/K_2'\cdot O_s \tag{11}$$

こゝに，

$$K_2' \quad =\mu'(1/c_2)+K_2 \tag{12}$$

また，これらの関係を式(3)に代入して

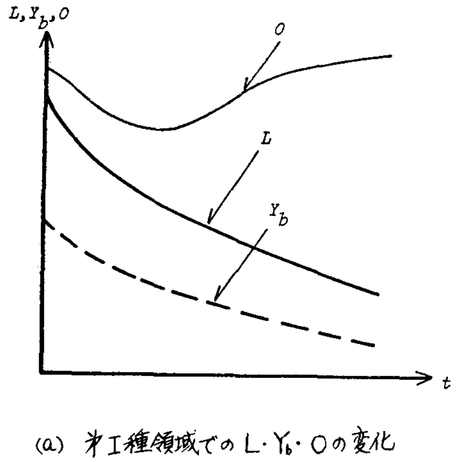
$$L(x)=L_0-\mathcal{L}_1+\mathcal{L}_1 e^{-K_2' x/u}-\mathcal{L}_2\,x/u \tag{13}$$

こゝに，

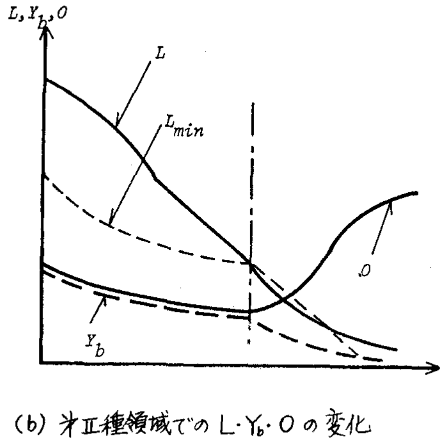
$$\mathcal{L}_1 \quad =c_2(\mu'-\beta')(O_0-K_2/K_2'\cdot O_s)/K_2' \tag{14}$$

$$\mathcal{L}_2 \quad =c_2(\mu'-\beta')K_2/K_2'\cdot O_s \tag{15}$$

3. 検討： 式(13)が示すことは，Oが少くこれが制約因子の場合には，BODは直線的に減少し，そのまゝではLが負になってしまう。もちろん，これはあり得ず，実際には制約条件 $O/Y_b \ll b$ が満されなくなり，短かい遷移区間を経て $L/Y_b \ll a$ の第I種領域になる。一たび，第I種領域に入ると新たなBOD負荷がなければ，そのまゝBODが制約因子となることは式(6)(7)からわかる。 なお，Oが極度に小さい場合は本論文で考慮されていない嫌気性微生物の働きが重要となる。 付着微生物膜内のミクロな取扱いや浮遊している微生物による自浄作用については，別の論文で述べた。



(a) 第I種領域でのL・Y_b・Oの変化



(b) 第II種領域でのL・Y_b・Oの変化