

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで、 L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 T [] と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 T [] と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数, u, v, w : x, y, z 方向の流速, t : 時間, K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで、 L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで、 L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2 / K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 T [] と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで、 L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数, u, v, w : x, y, z 方向の流速, t : 時間, K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数, u, v, w : x, y, z 方向の流速, t : 時間, K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 T [] と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで、 L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで、 L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2 / K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、H：平均水深 (m)、u：平均流速 (m/sec)

D：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 T[]と飽和溶存酸素濃度[mg/L]

T[]	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	T[]	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで、 L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数, u, v, w : x, y, z 方向の流速, t : 時間, K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 T [] と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数, u, v, w : x, y, z 方向の流速, t : 時間, K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで, L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2/K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 T [] と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	T []	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

6 水質汚濁の機構と形態

地球に存在する水は、水蒸気や氷河を除けば、河川、海域、湖沼、地下水(湧水)などわれわれが直接利用できる水資源として存在しており、これらはさまざまな生物の生活の場にもなっている。これらを総称して水環境と呼ぶ。その水質の汚濁現象は、水の運動や汚濁物質の形態とその負荷量、浄化を担う微生物群集の存在形態によって異なる。水の運動は、それぞれの水環境に特徴的で、水の流れ(移流・対流)と拡散(分子拡散, 乱流拡散, 分散)がある。汚濁物質は、浮遊物質と溶解性物質に、さらにそれぞれ有機物と無機物(粘土鉱物や重金属等)に分類される。また、保存物質と非保存物質という分類方法もある。その水中での物理・化学的挙動が異なるので、汚濁のメカニズムも複雑なものとなる。また、微生物やプランクトンの存在形態は浮遊状態で存在するか、担体(河床の石などの固体表面)に付着して存在するかによって多様であり、したがって、その浄化のメカニズムも多様である。また、水生植物、水生生物などの存在によって大きく影響を受けることがある。

4.2.1 河川

〔1〕水質汚濁 河川に汚濁物質が排出されると、汚濁物質が保存物質の場合(対象としている河川系全体で物質の入出力、蓄積量の収支がとれる場合)、移流、拡散、吸着、沈殿、溶出などの作用によって濃度が変化するが、化学的または生物学的に分解される非保存物質の場合は、濃度的に変化するとともに質的にも異なった物質へと変換され、系外にも放出されることになる。このような作用により、河川に排出された汚濁物質の濃度が減少していく過程を自然浄化作用(自浄作用:Self Purification)といい、河川の水質汚濁解析をする上で重要な作用となっている。汚濁物質が有機物の場合は、分解過程(生物学的)が重要なファクターとなり、特に炭水化物、タンパク質の場合は、酸化分解の結果、炭酸ガス、水、アンモニア、硝酸 etc が最終産物となり無機化されるとともに系外へ放出されることによって水は清浄化される。

汚濁物質が濃度に関し1次反応的に減衰するとし、移流拡散の影響を考慮すると、一般式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (uC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] - KC \quad (4.1)$$

ここで、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 t : 時間、 K : 減衰係数とする。

1次元にして、等流を仮定するとともに拡散係数が場所的に一定とすると式(4.1)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4.2)$$

となる。

汚濁物質が瞬間的に M だけ投入された時、式(4.2)を解くと

$$C = \frac{M}{\sqrt{4pDt}} \exp(-Kt - (x-ut)^2 / 4Dt) \quad (4.3)$$

が得られる。

〔2〕再曝気 河川水中の飽和溶存酸素濃度は、水温、塩分の影響を受け変化する。酸素は、河川水表面の大気と水の境界面より補給され、この現象を再曝気(Re-aeration)という。再曝気による河川水中の溶存酸素の変化速度は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C^* - C) \quad (4.4)$$

ここで、 C ：河川水中の溶存酸素濃度[mg/L]、 C^* ：河川水の飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 K_2 ：再曝気係数とする。 $D=C^* - C$ を酸素不足量とすると式(4.4)は

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (4.5)$$

となる。

O'Conner と Dobbins は、再曝気係数が水深、流速、河床勾配などによって変化するとして、非等方性乱流と等方性乱流の場合に分けて定式化している。

非等方性乱流(水深 H が約 1.5m より小さい場合)

$$K_2 = 2.41 \times 10^5 \frac{D_m^{1/2} S^{1/4}}{H^{5/4}} \quad (4.6)$$

等方性乱流(水深 H が約 1.5m より大きい場合)

$$K_2 = 8.61 \times 10^4 \frac{(D_m U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.7)$$

ここで、 D_m ：酸素の分子拡散係数、 U ：平均流速、 H ：平均水深、 S ：河床勾配とする。

酸素の水中での分子拡散係数は水温に依存し、次式から求められる。

$$D_m = 2.037 \times 10^{-9} (1.037)^{T-20} \quad (4.8)$$

ここで、 T ：水温[] D_m ：水中での分子拡散係数[m²/sec] とする。

このことから、再曝気係数は水温の影響を受けることがわかり、20 を基準として式(4.9)のように与えられている。

$$K_T = K_{20} (q)^{T-20} \quad (4.9)$$

ここで、 K_T ： T における再曝気係数、 q ：温度係数(1.015 ~ 1.047)とする。

〔3〕Streeter - Phelps の式 河川に排出された BOD(有機物)を微生物が酸化分解するとき水中の溶存酸素を消費する。BOD の酸化反応を 1 次反応とすると式(4.10)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (4.10)$$

ここで、 L : BOD(生物化学的酸素要求量)[mg/L] K_1 : 脱酸素係数[1/t]

K_1 は、実際の河川水を用いた BOD 試験により求めることができる。

河川の溶存酸素濃度の変化は、微生物による酸素消費 - K_1L と空気中から河川水への酸素の溶け込み(再曝気)の収支で示すことができ、式(4.5)および式(4.10)より式(4.11)のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1L + K_2(C^* - C) \quad (4.11)$$

$D = C^* - C$ の両辺を t で微分すると $\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt}$ となるので、(4.11)式は、式(4.12)のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (4.12)$$

式(4.10)と式(4.12)をまとめて

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -K_1L \\ \frac{dD}{dt} &= K_1L - K_2D \end{aligned} \quad (4.13)$$

を **Streeter - Phelps** の式という。

この式を $t=0$ で $L=L_0$, $D=D_0$ の初期条件のもとで解くと

$$\begin{aligned} L &= L_0 e^{-K_1 t} \\ D &= \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

が得られる。この D に関する式を溶存酸素垂下曲線という。

酸素不足量が最大になる地点(流下時間)と酸素不足量は

$$\begin{aligned} D_C &= \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c} \\ t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - D_0 \frac{K_2 - K_1}{K_1 L_0} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。

脱酸素係数 K_1 に関しても、再曝気係数と同様に温度の影響を受け、20 を基準として次式で表される。

$$K_{1(T)} = K_{1(20)} (q)^{T-20} \quad (4.16)$$

$K_{1(T)}$: T における脱酸素係数

: 温度係数

式(4.15)において、 K_2 / K_1 の比を f とおいて、Fair はこれを自浄係数と定義した。 f が小さいほど酸素不足による河川の嫌気化が懸念される。(環境衛生工学教科書)に Fair の自浄係数を示す。

演習問題 6

Streeter-Phelps 式は、河川の BOD と DO の関係を定常状態と拡散が無視できることを仮定して誘導されたものである。沈殿や光合成などを無視できるとして、再曝気係数 K_2 と脱酸素係数 K_1 という二つの係数を与えることで、BOD と DO の流下方向変化を求めることができる。下記の条件における河川下流区間における DO と BOD の変化曲線を描きなさい。

【仮定】

区間基点の BOD 濃度を 10mg/L、DO 濃度は 8mg/l とし、水温は 20 とする。

河川断面：幅広矩形断面、川幅 50m で水深 5m、河川勾配：1/3000

脱酸素係数 K_1 は $0.3 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ とする。

再曝気係数 $K_2 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ は、 $294 \cdot (D \cdot u)^{1/2} / H^{3/2}$ で表現できるとする。

ここで、 H ：平均水深 (m)、 u ：平均流速 (m/sec)

D ：酸素の分子拡散係数 = $1.760 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/day)}$

飽和酸素濃度は、下表に記載されている純水中での濃度を用いなさい。

平均流速公式は、Manning 式を用いることとする。

ただし、粗度係数は自然河川で手入れがよいものとして適宜定義しなさい。

表1 水温 $T [^\circ\text{C}]$ と飽和溶存酸素濃度 [mg/L]

$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]	$T [^\circ\text{C}]$	飽和溶存酸素濃度 [mg/L]
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.04	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.39
6	12.06	24	8.25
7	11.75	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.87
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.43
14	9.97	32	7.32
15	9.76	33	7.23
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04