

〔醸酵工学 第58巻 第1号 22-28. 1980〕

都市河川の自浄作用に及ぼす水温の影響

福永 勲・小田 国雄・飯田 才一
宇野 源太*・永井 廸夫**大阪市立環境科学研究所, *大阪工業大学,
**大阪府公衆衛生専門学校

The influence of water temperature on the self-purification of rivers in the city. FUKUNAGA, I., K. ODA, S. IIDA, G. UNO*, and M. NAGAI** (*Osaka City Institute of Public Health and Environmental Sciences, Tohocho 21, Tennojiku, Osaka 543; *Osaka Institute of Technology, **Osaka College of Public Health*) *Hakkokogaku* 58: 22-28. 1980.

The influence of water temperature on the self-purification of rivers has already been investigated in the laboratory.

In this study, we investigated the self-purification by taking into consideration the relationships between the BOD₅ of river water and its temperature in the field. The temperature coefficient θ was obtained from the equation:

$$L = L_{(20)} \left(\frac{1}{\theta} \right)^{(T-20)}$$

where, L and $L_{(20)}$ are the BOD₅ load (ton/day) or BOD₅ concentration (ppm) at observation points where the water temperature is $T^{\circ}\text{C}$ and 20°C , respectively.

The average temperature coefficient θ of the rivers in Osaka City and the River Yodo was found to be 1.023 and 1.028 respectively, which was a little smaller than the average values obtained in the laboratory.

By substituting into the above equation the annual variation characteristics of river water temperature which we reported previously, the BOD₅ annual variation of river water was estimated. Examples are given.

著者らは、今日まで代表的な都市河川である大阪市内河川を対象として、都市河川の自浄作用に及ぼす種々の要因について検討してきた。¹⁻⁵⁾ この要因の1つに水温も含まれる。水温の河川自浄作用に及ぼす影響には、大気中から河川水へ酸素が溶入する再ばっ気の面と、種々の生物化学的作用あるいは物理化学的作用に対する面の両方がある。今日まで、実験室的な研究成果として、両者の点で水温の及ぼす影響について数多くの研究が発表されている。⁶⁻²⁴⁾ しかし、実河川で自浄作用に及ぼす水温の影響を考察した例は、見当たらない。また、著者ら²⁵⁾ は、すでに大阪市内河川水温の年間変動特性について報告している。

そこで、著者らは、今回、大阪市内河川および淀川の実測結果を用い、水温の温度係数を求め、その応用例について考察を行ったので、ここに報告する。

理 論

河川水の汚濁は、Streeter-Phelps⁶⁾ の式(1)式または(1)'式に従って減少すると仮定する。

$$L = L_0 e^{-K_r t} \dots\dots\dots (1)$$

$$L' = L_0' e^{-K_r t} \dots\dots\dots (1)'$$

ここで、 K_r : BOD₅ 分解速度係数 (1/day)

L_0, L_0' : BOD₅ 負荷量初期値 (ton/day) および BOD₅ 初期濃度 (ppm)

L, L' : 各測定点における BOD₅ 負荷量 (ton/day) および BOD₅ 濃度 (ppm)

BOD₅ 負荷量とは、水量 (m^3/day) と BOD₅ 濃度 (ppm) の積をいう。

この BOD₅ 分解速度係数 K_r は、温度係数 θ で(2)式のとおり、水温の影響をうけると仮定する。

$$K_r(T) = K_r(20) \theta^{(T-20)} \dots\dots\dots(2)$$

ここで, $K_r(T)$, $K_r(20)$: 水温 $T^\circ\text{C}$ および 20°C における BOD_5 分解速度係数

θ : 温度係数

次に, 汚濁源での BOD_5 発生負荷量が四季を通じて一定であり, それぞれ測定地点まで一定時間の自浄作用を受けて測定点に達すると仮定する. すなわち, L_0 , t が一定であるならば, (1), (2)式より(3)式が成立する.

$$L = L_{(20)} \left(\frac{1}{\theta}\right)^{(T-20)} \dots\dots\dots(3)$$

さらに, 河川水量が一定であるならば, (3)'式も成立する.

$$L' = L'_{(20)} \left(\frac{1}{\theta}\right)^{(T-20)} \dots\dots\dots(3)'$$

ここで, $L_{(20)}$, $L'_{(20)}$: 各測定点における 20°C での BOD_5 負荷量 (ton/day) および BOD_5 濃度 (ppm)

調査方法

大阪市内河川の各測定点における日間平均 BOD_5 は, 一日4回(6時間間隔), Fig. 1に示す地点で採水し, その混合水について JIS K0102²⁶⁾ に準拠して測定し

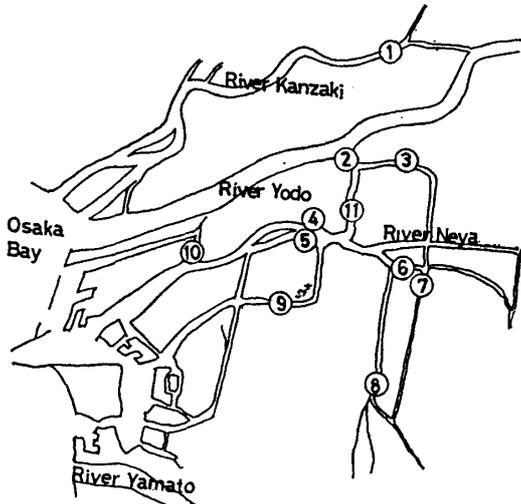


Fig. 1. Sampling points of the rivers in Osaka City.

- | | |
|----------------------|---------------------|
| 1. Suita Bridge | 7. Tennoden Bridge |
| 2. Kema Bridge | 8. Mutsumi Bridge |
| 3. Akagawa Bridge | 9. Daikoku Bridge |
| 4. Tenjin Bridge (R) | 10. Kasugade Bridge |
| 5. Tenjin Bridge (L) | 11. Sakuranomiya |
| 6. Shiromi Bridge | Bridge |

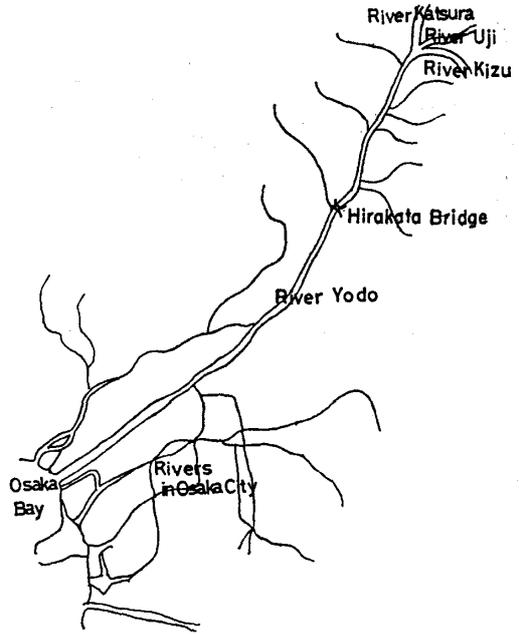


Fig. 2. Location of Hirakata Bridge observation point on River Yodo.

た. 水温は, 4回の採水時にそれぞれ測定し, それらを平均した. こうして, 毎月1回求めた1972~1976年の調査成績を用いた. 流量観測は, 常時行っていないので, 長期的には日間平均流量は等しいと仮定して, BOD_5 濃度を用いた(3)'式により解析した. そして, 各水温における BOD_5 を片対数にプロットし, 最小自乗法によりその回帰係数から温度数 θ , および 20°C における BOD_5 濃度 $L_{(20)}$ を求めた.

淀川については, 各関係機関が毎月1日1回 Fig. 2に示す地点で採水し, 測定した結果(1975年度²⁹⁾)を用い, 温度係数 θ および 20°C での BOD_5 負荷量 $L_{(20)}$ を求めた.

結果および考察

大阪市内河川の温度係数 大阪市内河川では, 常時流量観測が行われていないので, 長期的には流量を一定と仮定して, BOD_5 濃度について(3)'式を検証した. まず, 一例として道頓堀川大黒橋では, Fig. 3に示すように 20°C の BOD_5 が 9.51 ppm で, 温度係数 θ は 1.026 となっている. そして, 標本数 $n=60$ で相関係数 r は 0.33 で, 危険率 1% で有意に相関が成立している. 同じく, 汚濁の集中している寝屋川水系城見橋では, 20°C BOD_5 32.0 ppm で, $\theta=1.027$

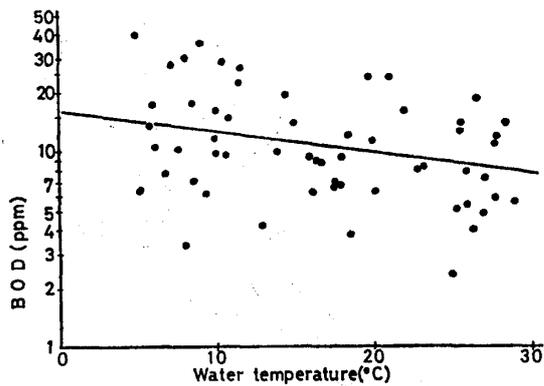


Fig. 3. Correlation between BOD₅ and water temperature of river water in Osaka City. Sampling station: Daikoku Bridge

$$L' = 9.51 \left(\frac{1}{1.026} \right)^{T-20} \quad n=60, r=0.31^{**}$$

where, n is number of samples and r is a coefficient of correlation.

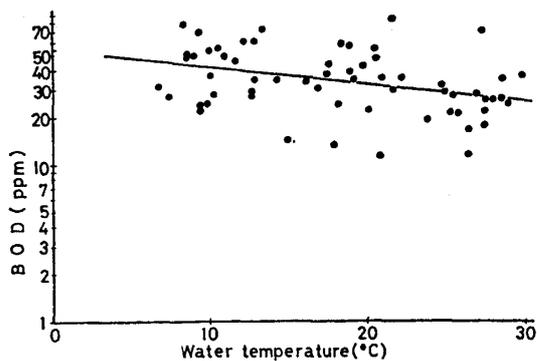


Fig. 4. Correlation between BOD₅ and water temperature of river water in Osaka City. Sampling station: Shiromi Bridge

$$L' = 32.0 \left(\frac{1}{1.027} \right)^{T-20} \quad n=60, r=0.47^{**}$$

となっており, Fig. 4 に示すとおりである. 市内河川のうち最も清浄な地点の1つである旧淀川桜宮橋では, 20°C, BOD₅ 2.78 ppm で, $\theta=1.021$ となっており, Fig. 5 に示すようにいずれも有意に相関が成立している.

このようにして, 大阪市内河川の温度係数を算定した結果の数例を, Table 1 に示す. 全体として, 温度係数 θ は, 1.012~1.032 で平均 1.023 となっており, 比較的清浄な毛馬橋, 赤川橋, 天神橋(右)で小さい温度係数を示している. これらの温度係数は, 後に示す実験室的な脱酸素係数 1.026~1.056 と比較的よく一致しているが, 若干低い値を示している. また, 春日出橋は, 発電所冷却水の影響で, 全体として水温は高

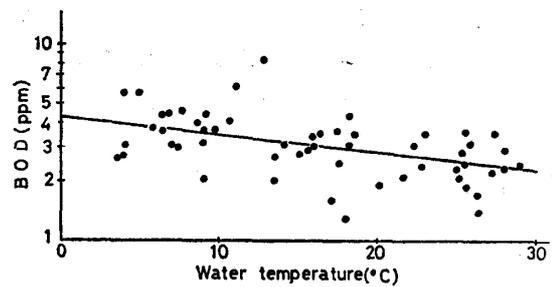


Fig. 5. Correlation between BOD₅ and water temperature of river water in Osaka City. Sampling station: Bridge Sakuranomiya

$$L' = 2.78 \left(\frac{1}{1.021} \right)^{T-20} \quad n=60, r=0.47^{**}$$

Table 1. Temperature coefficient of BOD₅ of river water in Osaka City.

Sampling point	n	θ	L_{20} (ppm)	r
Kema Bridge	60	1.012	2.71	0.27*
Suita Bridge	60	1.032	7.41	0.49**
Sakuranomiya Bridge	60	1.021	2.78	0.47**
Akagawa Bridge	60	1.015	2.12	0.30*
Tenjin Bridge (R)	60	1.014	4.18	0.18
Tenjin Bridge (L)	60	1.022	9.46	0.30*
Kasugade Bridge	60	1.032	5.06	0.44**
Daikoku Bridge	60	1.026	9.51	0.33**
Mutsumi Bridge	50	1.020	49.6	0.29*
Shiromi Bridge	60	1.027	32.0	0.39**

い. 天神橋(右), 天神橋(左), 睡橋の BOD₅ は, 温度以外の変動要因に大きく影響され, 相関係数は小さい.

淀川の温度係数 すでに述べた方法で, 淀川の代表地点である枚方大橋(右), 枚方大橋(左)についての温度係数を求めた. その結果を, Fig. 6, Fig. 7 に示す. この結果, 淀川枚方大橋における温度係数の平均は 1.028 で, 大阪市内河川と比較的よく一致した値を示した.

実験室データとの比較 次に, 実験室的に求められている各種検水の脱酸素係数についての温度係数を整理したのが, Table 2 である. Moore¹⁶⁾ の 1.026 が最も小さい値であり, Streeter-Phelps の 1.047^{6,17)} が最もよく知られている. 実河川データから求めた温度係数との相違の要因として, 次の3点が考えられる. (1)河川への汚濁発生量が, 四季を通じて一定と仮定しているが, 冬期の汚濁量が減少している可能性がある. (2)温度係数が比較的小さいといわれている¹⁶⁾ 下水処理場の処理能力をも含めた温度係数になっている. (3)夏

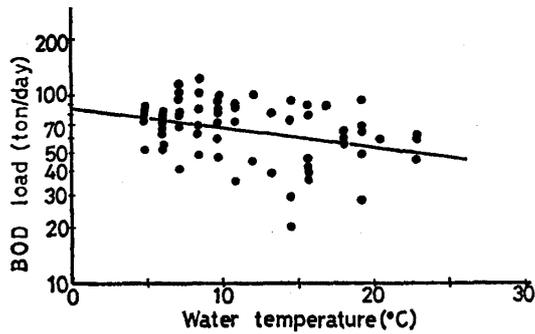


Fig. 6. Correlation between BOD₅ and water temperature in River Yodo.

Sampling station: Hirakata Bridge (right)

$$L = 53 \left(\frac{1}{1.027} \right)^{T-20} \quad n=75, \quad r=0.31^{**}$$

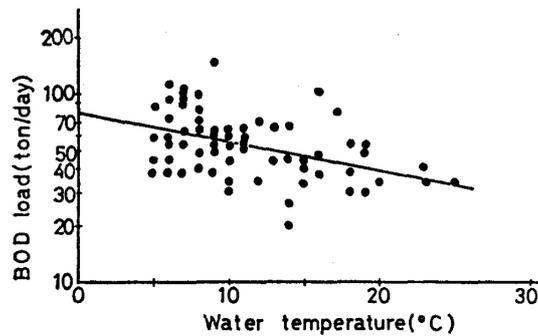


Fig. 7. Correlation between BOD₅ and water temperature in River Yodo.

Sampling station: Hirakata Bridge (left)

$$L = 39 \left(\frac{1}{1.029} \right)^{T-20} \quad n=74, \quad r=0.45^{**}$$

期の BOD₅ 測定値に硝化作用の影響が現れ、真値よりやや高い BOD₅ 値が得られ、結果として温度係数 θ を小さくしている可能性がある。

温度係数の年間 BOD₅ 変化予測への応用 すでに、著者ら²⁰⁾は、都市河川の水温年間変化が、sine 曲線で表されることを証明した。その一例として、吹田橋の例を Fig. 8 に示す。 $r=0.982$ と高度に有意な相関係数をもって回帰された。このようにして求めた水温の予測式を、すでに求めた水温-BOD 関係式(3)'式に代入すれば、水温による河川 BOD 年間変化を予測できる。その結果を Fig. 9 に示す。平均水温 16.4°C で、平均 BOD₅ は 8.30 ppm を示し、1月下旬から2月上旬にかけて 11.7 ppm の最高値を示し、7月下旬から8月上旬に 5.9 ppm の最低値を示す。水温の因子だけで、吹田橋における河川 BOD の最高値は、最低値の2倍近くまで、変動するものと推定される。

温度係数の BOD₅ 分解速度係数 K_r への応用による水質予測 本項では、BOD₅ 分解速度係数 K_r の水温による変化をすでに求めた方法によって予測し、淀川3川合流点以後流下時にその K_r をもって自浄作用を受けると仮定して、枚方地点の水質を予測し、実測値と比較した。

まず、3川合流点から枚方大橋地点までの BOD₅ 分解速度係数 K_r は、水温 11.2°C (1977年11月29~30日) で 1.57 1/day であることを実測している。この K_r を用いて、冬期厳寒期の温水期における水質を予測し

Table 2. Temperature coefficient of the deoxygenation constant of various wastewaters.

Temperature coefficient	Water investigated	Temperature experimented (°C)	Author
1.047	Domestic wastewater & river water	8, 10, 20, 30, 37.5	Streeter & Phelps ⁶⁾
1.053 } 1.049 }	River water	9, 20, 30	Theriault ¹⁸⁾
1.065 } 1.145 }	Domestic wastewater	5, 7.5, 10, 20, 0.5, 1, 2.5, 5	Moore ¹⁹⁾
1.026 } 1.065 }	River water	0.5, 2.5, 5, 7.5, 10, 20	Moore ¹⁹⁾ Phelps ¹¹⁾
1.109 } 1.042 } 0.967 }	Domestic wastewater	5-15 15-30 30-40	Gotaas ²⁰⁾
1.032			Wuhrman ²¹⁾
1.136 } 1.056 }	Activated sludge effluent & river water	4-20 20-30	Schroepfer ²²⁾
1.129 } 1.047 } 0.985 }	Domestic wastewater	2-15 15-32 32-40	Zanoni ¹⁷⁾
1.077 } 1.048 }	Domestic wastewater & river water	10-20 20-30	Zanoni ²³⁾

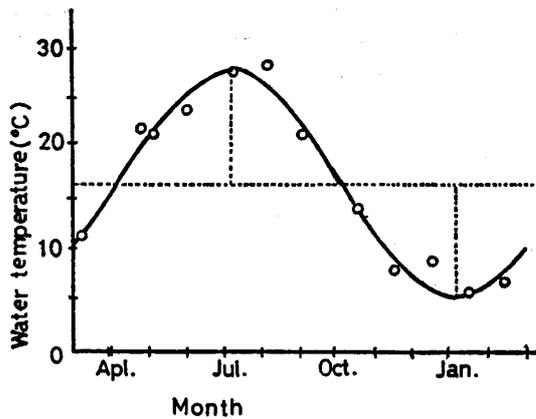


Fig. 8. Annual variation of the temperature of river water at Suita Bridge.

○ Observed, — Regression curve.

Regression curve was calculated by the following equation.

$$T = 10.79 \sin \left\{ \frac{2\pi}{365} (t - 35.0) \right\} + 16.37$$

$n=12, r=0.982$

t : annual day (on April 1st, $t=1$)

T : water temperature (°C)

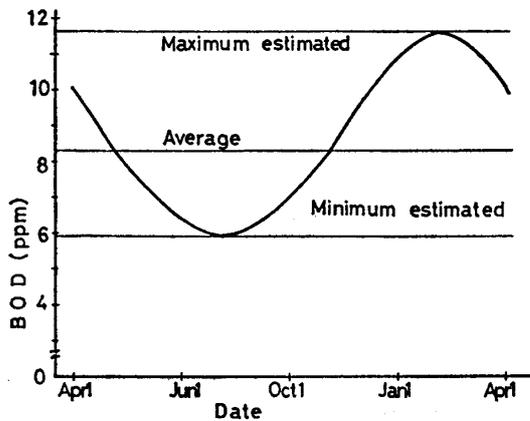


Fig. 9. Annual BOD₅ variation of river water at Suita Bridge estimated from the relationship of the water temperature and BOD₅.

$$L' = 7.41 \left(\frac{1}{1.032} \right) \left\{ 10.8 \sin \frac{2\pi}{365} (t - 35.0) - 8.6 \right\}$$

Table 3. Estimation of the water temperature and BOD₅ degradation constant in winter.

Date	Water temperature	BOD ₅ degradation constant
Jan. 10	5.39 °C	1.337 l/day
Jan. 30	4.80 °C	1.316 l/day
Feb. 10	5.01 °C	1.324 l/day

た.

年間水温変化は、すでに述べたように sine 曲線で予測すると、3川合流点から枚方地点までの平均水温は(4)式の通りとなる。

$$T = 10.66 \sin \frac{2\pi}{365} (t - 30.7) + 15.46 \quad \dots (4)$$

ここで、 T : 3川合流点から枚方地点までの任意の月・日の水温 (°C)

t : 4月1日を1とする年・日 (1年を365日とする)

次に、冬期厳寒期の予測日を、1月10日、1月30日、2月10日の3回とすれば、(4)式に従って水温は5.39 °C、4.80 °C、5.01 °C と推定される。すでに示した枚方地点の θ を、3川合流点から枚方地点までの温度係数とすると、右左の平均をとって θ は1.028となる。これと、さきに示した 11.2 °C における $K_r=1.57$ l/day を(2)式に代入すれば、Table 3 に示すように、BOD₅ 分解速度係数 K_r は、それぞれ 1.337、1.316、1.324 l/day となる。この K_r を用いて、3川合流点から枚方地点までの自浄作用による BOD₅ 減少を予測した。合流点における BOD₅ 負荷量 L は、Table 4 に示すように定期調査³⁹⁾ から、1月10日、1月30日、2月10日において、それぞれ 72.04、74.14、73.34 ton/day とする。これらの L を(1)式における L_0 とし、Table 5 に示すように濁水流量 70 m³/sec、110 m³/sec における流速時間 6.17、4.11 時間を t とし、Table 3 に示す K_r を(1)式に代入すると、枚方地点における BOD₅ 負荷量が算出される。そこで、それぞれの流量から BOD₅ 濃度が予測される。2月1~2日において実測したところ、流量は 108 m³/sec であったので、110 m³/sec の予測値と比較した。その結果、予測水温 4.80 °C、予測 BOD₅ 値 6.23 ppm に対し、実測水温 4.20 °C、実測 BOD₅ 値 5.3 ppm で比較的良好一致していたといえる。BOD₅ 値の若干の相違は、合流点における BOD₅ 負荷量の誤差、右岸左岸の水質拡散を無視した均一化、中小流入河川の誤差などによるものと思われる。

河川水中溶存酸素に及ぼす水温の影響に関する考察
河川の溶存酸素変化は、これまで Streeter-Phelps⁶⁾、Thomas²⁷⁾ や Velz²⁸⁾ らが解析し発展させてきたが、脱酸素と再ばっ気の組み合わせたものとして(5)式で示される。

$$-\frac{dC}{dt} = K_1 L - K_2 (C_s - C) \quad \dots (5)$$

Table 4. Estimated BOD₅ load of the River Yodo including River Katsura, River Uji and River Kizu.

Date	River Katsura at Yamazaki (ton/day)	River Uji at Goko Bridge (ton/day)	River Kizu at Goko Bridge (ton/day)	Others ^a (ton/day)	Total (ton/day)
Jan. 10	32.9	33.9	4.2	1.04	72.04
Jan. 30	34.2	34.7	4.3	1.04	74.14
Feb. 10	33.7	34.4	4.2	1.04	73.34

^a This means total BOD₅ load caused by other small rivers including inflowing and drawing river water.

Table 5. Estimated BOD₅ of river water at Hirakata Bridge on River Yodo in winter.

Flowing water volume (m ³ /sec)	Elapsed time (hr) ^a	Date	BOD ₅ load (ton/day)	BOD ₅ (ppm)	Data observed
70	6.17	Jan. 10	51.37	8.49	
		Jan. 30	52.87	8.74	
		Feb. 10	52.19	8.63	
110	4.11	Jan. 10	57.32	6.03	
		Jan. 30	59.20	6.23	BOD ₅ 5.3 ppm ^b
		Feb. 10	58.46	6.15	

^a Flow time from the confluence of the three rivers to Hirakata Bridge.

^b Observed on Feb. 1~2. Flow volume, 108 m³/sec. Water temperature, 4.2°C.

ここで, t : 時間 (day), K_1 : 脱酸素係数 (1/day),
 K_2 : 再ばっ気係数 (1/day), L : 残存有機物
濃度 (ppm), C : 溶存酸素濃度 (ppm), C_s :
飽和溶存酸素濃度 (ppm)

(5)式において, 再ばっ気係数 K_2 , 脱酸素係数 K_1 , 飽和溶存酸素濃度 C_s の3つの定数が含まれる. 特に, 再ばっ気の項について, 水温の影響を見ると, 溶存酸素濃度 C が0の時, 酸素溶入力 ($-dC/dt$) は最大になる. これを, 最大再ばっ気速度とし, $[-dC/dt]_{\max}$ で表すと, (6)式のとおりとなる.

$$[-dC/dt]_{\max} = K_2 C_s \dots\dots\dots (6)$$

(6)式において, 温度の影響をそれぞれ, K_2 , C_s について考察すると, Fig. 10 に示すとおりとなる. 20°C における値を1としてそれぞれその比率で示すと, K_2 は温度とともに増大し, C_s は温度とともに減少する. その結果, その積である最大再ばっ気速度 $[-dC/dt]_{\max}$ は, ほとんど変化しないことが分かる.

したがって, (5)式において河川における溶存酸素の変化に及ぼす水温の影響は, 脱酸素係数 K_1 に大きく依存することが分かる. 今日までこの温度係数は実験室的には求められているが, 実河川から求めた値は未だになく, すでに求めた温度係数は重要であろうと考えられる.

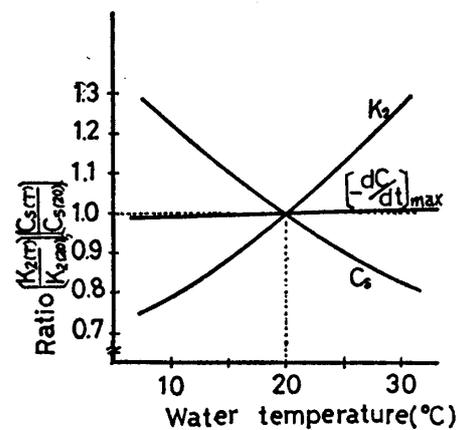


Fig. 10. Relationships of the reaeration coefficient K_2 saturated dissolved oxygen concentration C_s and maximum oxygen transfer rate to the water temperature.

要 約

1. 自浄作用に及ぼす水温の影響は, 従来実験室的に検討されてきたが, 本研究では実河川の BOD₅ 値を用いて温度係数 θ を求めた. 大阪市内河川および淀川について, それぞれ平均 1.023, 1.028 とよく似た値となった.

2. これらの値を用いた BOD₅ の温度式と、年間水温変化の予測式を組み合わせ、年間 BOD₅ 変化の予測に応用することもでき、その実例を示した。

本研究に当たり、ご指導ご鞭撻をいただいた大阪大学工学部市川邦介教授に感謝いたします。なお本研究の要旨は、昭和53年日本醸酵工学会大会において発表した。

文 献

- 1) 福永, 石井, 宇野: 水処理技術, **12**, (9) 25 (1971).
- 2) 福永, 宇野, 小田, 石井: 醸工, **52**, 343 (1974).
- 3) 福永, 小田, 宇野: 醸工, **53**, 678 (1975).
- 4) 福永, 小田, 宇野: 醸酵工学, **57**, 38 (1979).
- 5) 福永, 小田, 宇野: 醸酵工学, **57**, 46 (1979).
- 6) Streeter, N. W., Phelps, E. B.: *Pub. Health Bull.*, no. 146 (1925).
- 7) O'Connor, D. J., Dobbins, W. E.: *Proc. ASCE.*, **82** (SA6) 1115 (1956).
- 8) Metzger, I.: *Proc. ASCE.*, **94**, (SA6) 1153 (1968).
- 9) Committee on San. Eng. Research: *Proc. ASCE.*, **87**, (SA6) 59 (1961).
- 10) Streeter, H. W., Wright, C. T., Kehr, R. W.: *Sewage Works J.*, **8**, 282 (1936).
- 11) Phelps, E. B.: *Stream Sanitation*, John Wiley & Sons (1944).
- 12) Downing, A. L., Truesdale, G. A.: *J. Appl. Chem.*, **5**, 570 (1955).
- 13) Streeter, H. W.: *Proc. ASCE.*, **89**, 1351 (1926).
- 14) Truesdale, G. A.: *Water and Waste Treatment J.*, **7**, 9 (1958).
- 15) Bewtra, J. K.: *Water Research*, **4**, 115 (1970).
- 16) Eckenfelder, W. W., O'Connor, D. J. (岩井 訳): 廃水の生物学的処理, コロナ社 (1965).
- 17) Zanoni, A. E.: *Water Research*, **1**, 543 (1967).
- 18) Theriault, E. J.: *Pub. Health Bull.*, no. 173 (1967).
- 19) Moore, E. W.: *Sewage Works J.*, **13**, 56 (1941).
- 20) Gotaas, H. B.: *Sewage Works J.*, **20**, 441 (1948).
- 21) Wuhrman, K.: *Sewage & Ind. Wastes*, **26**, 1 (1954).
- 22) Schroeffer, G. T., Robins, M. L., Susag, R. H.: *J. WPCF.*, **32**, 1212 (1960).
- 23) Zanoni, A. E.: *J. WPCF.*, **41**, 640 (1969).
- 24) Alonso, C. V., McHenry, J. R., Hong, J. C. S.: *Water Research*, **9**, 695 (1975).
- 25) 石井, 福永, 宇野, 小田: 昭和46年度日本醸酵工学会大会要旨集, p. 278 (1971).
- 26) 日本規格協会: 工場排水試験方法 (JIS K 0102), (1974).
- 27) Thomas, H. A.: *Water and Sewage Works*, **95**, 409 (1948).
- 28) Velz, C. J.: *Trans. Amer. Soc. Civil Engrs.*, **104**, 560 (1939).
- 29) 淀川水質汚濁防止連絡協議会: 昭和50年度淀川水質汚濁調査報告 (1976).

(昭54. 11. 9 受付)