

B-12 地球温暖化による都市環境の影響評価及び対策に関する研究

(3) 都市水利用・循環システムへの影響評価及び対策に関する研究

研究代表者 京都大学 工学部 津野 洋

京都大学

工学部 衛生工学科 津野 洋 ・ 宗宮 功 ・ 西村 文武

平成2～4年度合計予算額 9,256 千円

[要旨]

都市水利用・循環システムへの温暖化の影響の要因・要素の関連図を作成した。すなわち、①水道原水の水質悪化としての湖沼での藻類増殖量の増加、水温躍層の長期化による底層水での溶存酸素濃度の低下のフロー、②生物化学的分解反応の加速による水質への影響などの関連フロー、③水使用量の増加の関連フロー、④気象変化による影響の関連フロー、⑤海面上昇による影響の関連フローなどを提示した。気温上昇と湖沼の表層水温との関係は、琵琶湖南湖および北湖、日本の26湖沼、ならびに世界の117湖沼を対象に相関分析を行い、気温が1℃上昇すると湖沼の表層水温も1℃程度上昇することが示された。この湖沼水温の上昇により富栄養化湖沼の有機物濃度の上昇および水温躍層の長期化をもたらし、平均気温3℃の上昇で底層水の溶存酸素濃度は枯渇する可能性が大きくなることが、データ解析および生態系モデルのシミュレーションにより示された。また、生物化学的反応の加速程度、水使用量の増加程度、海面上昇による下水中硫酸塩濃度の増加の実測例等が提示された。

・ [キーワード] 地球温暖化、上水道、下水道、水質、都市システム

1. 緒論

化石燃料の使用による二酸化炭素の排出量の増加、フロンやハロン等のハロゲン化化学物質の開発と放出、農業活動や廃水・廃棄物処理処分等に伴うメタンや亜酸化窒素の排出、さらには森林破壊による二酸化炭素吸収量の減少によって、これら温室効果ガスの大気中の濃度の上昇およびそれにともなう環境への影響が懸念されている。温室効果ガスの温室効果を二酸化炭素当量濃度で表すと、この濃度は、現状のままではそれほど強い排出抑制を行わない場合は、西暦2,030年頃には産業革命以前の濃度である280ppmの2倍に達し、西暦2,100年には900～1,500ppmとなると予測されている¹⁾。これにともない平均気温は西暦2,030年で1.5℃程度、西暦2,100年では3.5～5℃程度上昇すると見込まれている¹⁾。燃料の天然ガスへの転換、エネルギー使用の高効率化、モントリオール議定書の徹底、植林等の抑制対策を強力に行い、温室効果ガスの排出量の伸びを50～70%程度に抑制しても二酸化炭素当量濃度は西暦2,060年に倍増濃度である560ppmに達すると予測されている¹⁾。

地球温暖化は平均気温の上昇のみでなく、降雨や降雪の量やパターンの変化、気温変動の変化等の気象変動も引き起こす。また、温暖化にともなう海水の熱膨張、山岳氷河の融解、グリーンランドや南極の氷床の変化等により海面が上昇すると予測され、その程度は、それほど強い排出抑制策を行わない場合は、西暦2,030年までには約20cm、21世紀末までには約60cmに達すると予測されている（IPCC第一作業部会）。

これら地球温暖化およびそれに付随する変化によって、都市の水利用・循環システム（上下水道システム）が影響を受けることも考えられる。地球の温暖化が上下水道システムに及ぼす可能性のある影響のうち主なものを図1にまとめて示す。平均気温が上昇すると、水温の上昇、流域の積雪量の減少、および蒸発量の増加が生じ、水道水源の水質や水量に影響を及ぼす。平均気温の上昇および積雪量が減少すると、水温の上昇およびその上昇時期の早期化が生じ、生物の活動が活発に（生物化学的反応速度が速く）なり、公共用水域の水質変換速度が速くなる。河川においては、有機物の分解速度が速くなり、また飽和溶存酸素濃度が低下し、溶存酸素の低下が生ずる。湖沼においては影響が複雑で大きく出ることが考えられる。藻類の増殖が活発になり、藻類の年間平均現存量が上昇するばかりでなく、淡水赤潮の発生時期が早くなったり、アオコや異臭味原因藻類の現存期間が長くなる。また、水温躍層の長期化や躍層位置が深くなり、表水層での藻類増殖量の増加、底水層での溶存酸素の枯渇や長期化、これによる底質からの栄養塩の溶出量の増加等が生ずる。これらはいずれも水道水源の水質の悪化を意味しており、異臭味問題、THM生成量の増加、ろ過閉塞、浄水プロセスでの微生物増殖、水道水の味の低下などの問題が顕在化することが考えられ、浄水処理方式の改善も必要になる。

降雨パターンの変化や蒸発量の増加により河川水量の減少、湖沼水位の低下および地下水位の低下などが生ずる可能性があり、その場合は取水位置の変更や新たな取水源の確保が必要となる。また、流域での降雪が少なくなると、春期の渇水が懸念される。河川水量の低下や湖沼水位の低下は原水水質の悪化を助長することにもなる。

平均温度や水温が上昇すると水処理プロセス内での生物学的反応が速くなり、腐敗の進行や処理時間の短縮化等の可能性が生じ、上下水処理方式への影響が考えられる。上下水処理方式の観点からは、温室効果化ガスの発生が少ない処理方式の選択も重要である。また、気温が上昇すると、水使用量が増加することとなり、場合によっては上下水道システムの容量を変更することも必要となる。

河川水量の減少、湖沼水位の低下および地下水位の低下は、海面水位の上昇とあいまって、河川への海水の遡上や地下水の塩水化・水位の上昇が生ずる。これにより、河川河口近くの取水源や海岸近くの地下水取水源では取水位置の変更や新たな取水源の確保が必要となる。また、下水道管渠への塩水流入が生じ、気温の上昇とあいまって硫黄細菌や硫酸還元菌の活動が活発になり、管渠の腐食が促進されることとなり、合成樹脂のライニングが必要となることも考えられる。海面の上昇によって、河口近くや海域での従来の排水水面が上昇することとなり、排水位置の変更や、場合によってはポンプ場や処理場の位置変更が余儀なくされることもありうる。また、海水面上昇の対応として、道路や建物がかさ上げされる場合には、それに応じて、下水管渠等の下水道システムの見直しが必要となることもある。我国の大都市は海岸近くに存在することが多く、また下水処理場は低いところに建設されていることも少なくないことから、これらの影響は我国においては決して小さくはない。早急に、影響を受ける可能性のある地域や上下水道システムの

マップ化を行う必要がある。

本研究では、図1に示される影響関連図に基づき影響の考察を試みる。

2. 水道水源への影響

1) 湖沼水質への影響

水質への種々の影響は水温の上昇から生ずる。気温上昇にともなう水温への影響、水温躍層の形成やその水深の推定は熱量収支式より行うことができるが、多くの各地点特有の情報が必要となる。ここでは、入力条件や計算の簡略化および概念把握のために、次式のような最も簡単な統計モデルを用いることとする。

$$\text{水温} = f_n (\text{緯度、標高、表面積、水深、}\dots\dots) \times \text{気温} \quad (1)$$

琵琶湖南湖および北湖のデータ²⁾、ならびに日本の26湖沼および世界の117湖沼（アジア10か国43湖沼、オセアニア2か国3湖沼、ヨーロッパ15か国31湖沼、アフリカ16か国13湖沼、北米5か国6湖沼）のデータ³⁾を用いて、式(1)の最も簡単な形の水温（表層）と気温との関係を図2および3に示す。これらより表1に示す関係式が得られる。

表1 湖沼における気温と水温との関係

対象	関係式	相関係数
琵琶湖南湖	$Y = 0.956X + 1.12$	0.965
北湖	$Y = 0.867X + 2.04$	0.956
日本の湖沼	$Y = 0.892X + 3.48$	0.926
世界の湖沼	$Y = 0.906X + 3.03$	0.936

これらより、気温が1℃上昇すると表層水温も1℃程度上昇するとして取り扱えると判断される。

図4には、琵琶湖のデータ²⁾を用いて表層の水温と藻類現存量との関係を示す。富栄養化が進行している地点ほど藻類現存量は水温の影響を直接大きく受けることが示されている。琵琶湖北湖のデータ²⁾を用いて水深方向の水温分布および深水層での溶存酸素飽度の季節変化を図5に示す。表層水温が12～15℃程度を超える時期には水深10～20m程度の位置で水温躍層が存在することが示されている。この傾向は我国の湖沼では一般的である。この例では6月初めから11月終わり頃まで水温躍層ができ成層しているが、この間深水層での溶存酸素濃度は徐々に低下し続けている。表層の平均水温が上昇すると成層期間が長くなり、溶存酸素濃度が低下を続ける期間も長くなり、深水層での溶存酸素の枯渇化の傾向が助長されることが考えられる。

このような状況を数理モデルにより検討を試みた。湖沼を水温躍層ができる水深で上下二層に分け、流れ系は完全混合槽列モデルとした。その生物変換に係わる生態系モデルの構造を図6に示す。また、関連経路の速度式、物質収支式および係数値を表2にまとめて示す。この数理モデルを用いて、一年間の水温を±11℃の振幅を有する正弦関数で表示した場合の、年平均気温が湖沼水質に及ぼす影響を検討した結果の例（水理的滞留時間2ヵ月、水深20m、表層10m、表層水温が15℃を超えると成層、富栄養湖）を図7に示す。平均水温が上昇するにつれて、温度躍層が長期化し底層の溶存酸素が枯渇する傾向にあること、浮遊性の有機炭素（POC）が高くなること、藻類現存量（クロロフィルa、Chl.a）が高くなるとともに上昇時期が早く減少時期が遅くなること

表2-1 反応過程とその変化速度の数式表現

反応過程	反応速度式
植物プランクトンによる 栄養塩摂取過程 mgChl. a/L·day	$R_1 = G_M \cdot M_U = \mu_{MAX} \cdot \frac{P_U}{K_P + P_U} \cdot \frac{N_U}{K_N + N_U} \cdot f(I) \cdot \frac{T_U}{T_{OPT}} \cdot M_U$ <p style="text-align: center;">f(I): 光の影響を表す関数</p> $f(I) = \frac{e}{\epsilon \cdot Z_e} \left[\exp\left\{-\frac{I}{I_{OPT}} \cdot \exp(-\epsilon \cdot Z_e)\right\} - \exp\left(-\frac{I}{I_{OPT}}\right) \right]$ <p style="text-align: center;"> $Z_e = H$ $\epsilon = \alpha \cdot M_U + \epsilon_0$ </p>
動物プランクトンによる 植物プランクトンの捕食過程 mgChl. a/L·day	$R_{2i} = E_Z \cdot M_i = F_{MAX} \cdot \theta_{EZ}^{T-30} \cdot \frac{K_M}{K_M + M_i} \cdot Z_i \cdot M_i$
植物プランクトンの自己分解過程 mgChl. a/L·day	$R_{3i} = k_M \cdot M_i$
動物プランクトンの自己分解過程 mgD. W./L·day	$R_{4i} = k_Z \cdot Z_i$
デトリタスの沈降過程 mgD. W./L·day	$R_{5i} = S_D \cdot D_i$
デトリタスの可溶化過程 mgD. W./L·day	$R_{6i} = k_D \cdot D_i \cdot \theta^{T-20}$
溶解性有機物の無機化過程 mgCOD/L·day	$R_{7i} = k_C \cdot C_i \cdot \theta^{T-20}$
栄養塩の底泥からの溶出過程 mgP/L·day mgN/L·day	$R_{8P} = (A/1000 \cdot V_L) \cdot R_P$ $R_{8N} = (A/1000 \cdot V_L) \cdot R_N$
溶解性有機物の底泥からの 溶出過程 mgCOD/L·day	$R_9 = (A/1000 \cdot V_L) \cdot R_C$
デトリタスの底泥からの 巻き上げ過程 mgD. W./L·day	$R_{10} = (A/1000 \cdot V_L) \cdot R_D$
底泥での溶存酸素消費過程 mgO ₂ /L·day	$R_{11} = (A/1000 \cdot V_L) \cdot R_{D0}$
飽和溶存酸素濃度 mgO ₂ /L 水温 上層部 °C 下層部 °C 日射量 cal/cm ² ·day	$DO^*i = 14.16 - 0.3943Ti + 0.007714Ti^2 - 0.0000646Ti^3$ $T_U = 11 \cdot \cos\{(2\pi/365) \cdot (\text{day} - 203)\} + 19$ $T_L = 15$ $I = 125 \cdot \cos\{(2\pi/365) \cdot (\text{day} - 173)\} + 225$ <p style="text-align: center;">day: 1月1日からの経過日数</p>

i: 上層部 U , 下層部 L

表2-2 各状態変数の物質収支式

	状態変数	物質収支式
上層部	リン P_U (mgP/L)	$V_U \frac{dP_U}{dT} = Q \cdot P_{U0} - Q \cdot P_U + V_U \cdot \{-R_1 \cdot \gamma_{MP} + Y_{MZ}(1 - Y_{YMZ}) \cdot R_{2U} \cdot \gamma_{MP} + (1 - Y_{MD}) \cdot R_{3U} \cdot \gamma_{MP} + (1 - Y_{ZD}) \cdot R_{4U} \cdot \gamma_{ZP} + R_{7U} \cdot \gamma_{CP}\} - K_D(P_U - P_L) \cdot A$
	窒素 N_U (mgN/L)	$V_U \frac{dN_U}{dT} = Q \cdot N_{U0} - Q \cdot N_U + V_U \cdot \{-R_1 \cdot \gamma_{MN} + Y_{MZ}(1 - Y_{YMZ}) \cdot R_{2U} \cdot \gamma_{MN} + (1 - Y_{MD}) \cdot R_{3U} \cdot \gamma_{MN} + (1 - Y_{ZD}) \cdot R_{4U} \cdot \gamma_{ZN} + R_{7U} \cdot \gamma_{CN}\} - K_D(N_U - N_L) \cdot A$
	植物プランクトン M_U (mgChl.a/L)	$V_U \frac{dM_U}{dT} = Q \cdot M_{U0} - Q \cdot M_U + V_U \cdot (R_1 - R_{2U} - R_{3U}) - K_D(M_U - M_L) \cdot A$
	動物プランクトン Z_U (mgD.W./L)	$V_U \frac{dZ_U}{dT} = Q \cdot Z_{U0} - Q \cdot Z_U + V_U \cdot (Y_{MZ} \cdot Y_{YMZ} \cdot R_{2U} \cdot \gamma_{MZ} - R_{4U}) - K_D(Z_U - Z_L) \cdot A$
	デトリタス D_U (mgD.W./L)	$V_U \frac{dD_U}{dT} = Q \cdot D_{U0} - Q \cdot D_U + V_U \cdot \{(1 - Y_{MZ}) \cdot R_{2U} \cdot \gamma_{MD} + Y_{MD} \cdot R_{3U} \cdot \gamma_{MD} + R_{4U} \cdot \gamma_{ZD} - R_{5U} - R_{6U}\} - K_D(D_U - D_L) \cdot A$
	溶解性有機物 C_U (mgCOD/L)	$V_U \frac{dC_U}{dT} = Q \cdot C_{U0} - Q \cdot C_U + V_U \cdot (R_{6U} \cdot \gamma_{DC} - R_{7U}) - K_D(C_U - C_L) \cdot A$
	溶存酸素 DO_U (mgO ₂ /L)	$V_U \frac{dDO_U}{dT} = Q \cdot DO_0 - Q \cdot DO_U + A \cdot K_L a \cdot (DO_0^* - DO_U) + V_U \cdot \{R_1 \cdot \gamma_{MDO} - Y_{MZ} \cdot (1 - Y_{YMZ}) \cdot R_{2U} \cdot \gamma_{MDO} - (1 - Y_{MD}) \cdot R_{3U} \cdot \gamma_{MDO} - (1 - Y_{ZD}) \cdot R_{4U} \cdot \gamma_{ZDO} - R_{7U} \cdot \gamma_{CDO}\} - K_D(DO_U - DO_L) \cdot A$
下層部	リン P_L (mgP/L)	$V_L \frac{dP_L}{dT} = V_L \cdot \{Y_{MZ}(1 - Y_{YMZ}) \cdot R_{2L} \cdot \gamma_{MP} + (1 - Y_{MD}) \cdot R_{3L} \cdot \gamma_{MP} + (1 - Y_{ZD}) \cdot R_{4L} \cdot \gamma_{ZP} + R_7 \cdot \gamma_{CP} + R_{8P}\} + K_D(P_U - P_L) \cdot A$
	窒素 N_L (mgN/L)	$V_L \frac{dN_L}{dT} = V_L \cdot \{Y_{MZ}(1 - Y_{YMZ}) \cdot R_{2L} \cdot \gamma_{MN} + (1 - Y_{MD}) \cdot R_{3L} \cdot \gamma_{MN} + (1 - Y_{ZD}) \cdot R_{4L} \cdot \gamma_{ZN} + R_7 \cdot \gamma_{CN} + R_{8N}\} + K_D(N_U - N_L) \cdot A$
	植物プランクトン M_L (mgChl.a/L)	$V_L \frac{dM_L}{dT} = V_L \cdot (-R_{2L} - R_{3L}) + K_D(M_U - M_L) \cdot A$
	動物プランクトン Z_L (mgD.W./L)	$V_L \frac{dZ_L}{dT} = V_L \cdot (Y_{MZ} \cdot Y_{YMZ} \cdot R_{2L} \cdot \gamma_{MZ} - R_{4L}) + K_D(Z_U - Z_L) \cdot A$
	デトリタス D_L (mgD.W./L)	$V_L \frac{dD_L}{dT} = V_L \cdot \{(1 - Y_{MZ}) \cdot R_{2L} \cdot \gamma_{MD} + Y_{MD} \cdot R_{3L} \cdot \gamma_{MD} + Y_{ZD} \cdot R_{4L} - R_{5L} - R_{6L} + R_{10}\} + V_U \cdot R_{5U} + K_D(D_U - D_L) \cdot A$
	溶解性有機物 C_L (mgCOD/L)	$V_L \frac{dC_L}{dT} = V_L \cdot (R_{6L} \cdot \gamma_{DC} - R_{7L} + R_9) + K_D(C_U - C_L) \cdot A$
	溶存酸素 DO_L (mgO ₂ /L)	$V_L \frac{dDO_L}{dT} = V_L \cdot \{-Y_{MZ} \cdot (1 - Y_{YMZ}) \cdot R_{2L} \cdot \gamma_{MDO} - (1 - Y_{MD}) \cdot R_{3L} \cdot \gamma_{MDO} - (1 - Y_{ZD}) \cdot R_{4L} \cdot \gamma_{ZDO} - R_{7L} \cdot \gamma_{CDO} - R_{11}\} + K_D(DO_U - DO_L) \cdot A$

表 2 - 3 定 数 ・ 係 数 一 覧 表

記号	単位	説明	採用値
化学量論的係数			
Y _{MP}	mgP/mgChl.a	植物プランクトンのリン含有率	1
Y _{MN}	mgN/mgChl.a	植物プランクトンの窒素含有率	10
Y _{ZP}	mgP/mgD.W.	動物プランクトンのリン含有率	0.01
Y _{ZN}	mgN/mgD.W.	動物プランクトンの窒素含有率	0.1
Y _{CP}	mgP/mgCOD	溶解性有機物のリン含有率	0.01
Y _{CN}	mgN/mgCOD	溶解性有機物の窒素含有率	0.1
測定単位間の換算係数			
Y _{MZ}	mgD.W./mgChl.a	植物プランクトン → 動物プランクトン	100
Y _{MD}	mgD.W./mgChl.a	植物プランクトン → デトリタス	100
Y _{DC}	mgCOD/mgD.W.	デトリタス → 溶解性有機物	1
酸素生産・消費の換算係数			
Y _{MDO}	mgO ₂ /mgChl.a	植物プランクトンの光合成・呼吸	73
Y _{ZDO}	mgO ₂ /mgD.W.	動物プランクトンの呼吸	1
Y _{CDO}	mgO ₂ /mgCOD	有機物分解	1
収率			
Y _{MZ}	mgChl.a/mgChl.a	植物プランクトン補食 → デトリタス以外成分	0.3
Y _{MD}	mgChl.a/mgChl.a	植物プランクトン自己分解 → デトリタス成分	0.6
Y _{YMZ}	mgChl.a/mgChl.a	植物プランクトン摂取 → 動物プランクトン	0.5
Y _{ZD}	mgD.W./mgD.W.	植物プランクトン自己分解 → デトリタス成分	0.65
反応速度係数、定数			
μ _{MAX}	1/day	植物プランクトンの比増殖定数	2
K _P	mgP/L	半飽和定数 (植物プランクトン増殖、リン)	0.01
K _N	mgN/L	半飽和定数 (植物プランクトン増殖、窒素)	0.1
F _{MAX}	L/mgD.W.・day	最大ろ水速度	0.2
K _M	mgChl.a/L	半飽和定数 (捕食、植物プランクトン)	0.04
θ _{EZ}	-	温度係数 (捕食、植物プランクトン)	1.05
K _D	L/m ² ・day	混合係数 (上層部の水温が15℃以上)	0.05
		(" 未満)	1
S _D	1/day	沈降係数	0.5
R _P	mgP/m ² ・day	リン溶出速度 (下層部のDOが0.3mg/L以上)	0.06
		(" 未満)	6
R _N	mgN/m ² ・day	窒素溶出速度 (下層部のDOが0.3mg/L以上)	0.34
		(" 未満)	34
R _C	mgCOD/m ² ・day	有機物溶出速度 (下層部のDOが0.3mg/L以上)	0.88
		(" 未満)	88
R _D	mgD.W./m ² ・day	デトリタス巻き上げ速度	0
R _{DO}	mgO ₂ /m ² ・day	酸素消費速度 (下層部のDOが0.3mg/L以上)	500
		(" 未満)	0
k _M	1/day	植物プランクトンの自己分解定数	0.05
k _Z	1/day	動物プランクトンの自己分解定数	0.1
k _D	1/day	デトリタスの可溶化速度定数	0.04
k _C	1/day	溶解性有機物の無機化速度定数	0.04
K _{La}	1/day	総括酸素移動容量係数	0.3
気象条件影響係数			
I _{OPT}	cal/cm ² ・day	最適日射量	250
T _{OPT}	℃	最適温度	20
θ	-	温度係数	1.003
光の水中減衰関連係数			
α	L/m・mgChl.a		1.62
ε ₀	1/m		0.133
V _U	m ³	湖沼上層部容積	6.95・10 ⁹
V _L	m ³	湖沼下層部容積	6.95・10 ⁹
A	m ²	湖沼表面積	6.95・10 ⁸
Q	m ³ /day	流量	2.28・10 ⁸
H	m	上層部水深	10

などが示され、水道水源としての湖沼水質に大きな影響を持つことが分かる。琵琶湖南湖においては表層水温が20℃を超える6月初めから10月初めにかけて臭気成分生成藻類が増殖し、水道水異臭味問題が生じている。仮に、表層水温が年平均で5℃上昇すると異臭味問題は前後1ヵ月長期化する。

2) 河川水質への影響

気温上昇による河川水温への影響を検討するために両者の関係を示した結果を図8および図9に示す。図8は同じ地域の河川で年間の変動のデータ²⁾を用いたもので、また図9は水道水源としている河川表流水の年間平均水温⁴⁾とその都市の年間平均気温⁵⁾のデータを用いたものである。気温変動にともないその0.7~0.9倍程度変動することが示されている。

これにともない河川中での物質変換速度も変化する。その影響程度は温度影響係数 θ を用いて、水温を $T^{\circ}\text{C}$ とし例えば20℃を基準とすると、 θ^{T-20} で一般に示される。この影響の例示として河川のBODとDOについて、以下のStreeter-Phelpsの式を用いて検討した結果の例を図10に示す。

$$dL/dt = -k_1 \cdot L \quad (2)$$

$$dC/dt = k_2(C_s - C) - k_1 \cdot L \quad (3)$$

ここで、 L はBOD濃度 (mg/L)、 t は流下時間 (日)、 C_s は飽和溶存酸素濃度 (mg/L)、 C は溶存酸素濃度 (mg/L)、 k_1 は脱酸素係数 (1/日) および k_2 は再曝気係数 (1/日) である。水温が上昇するほど溶存酸素濃度は低くなり、5℃上昇すると最大枯渇位置での溶存酸素濃度は1 mg/L程度より低下することが示されている。

3. 浄水システムへの影響

気温が上昇すると水道使用量は上昇する。これは、一つの都市で一年の中でも変化するし、また年平均気温が異なる都市間でも変化する。水道使用量は、気温だけでなく、水洗化率、都市化率、経済レベル、水道料金等によっても影響を受ける。これらを加味すると、以下のような形の式が考えられよう。

$$\begin{aligned} \text{家庭用水原単位 (L/人・日)} &= \{A + B \cdot (\text{気温})\} \cdot (\text{経済レベル}) \\ &+ C \cdot (\text{水洗化率}) + D \cdot (\text{都市化率}) \end{aligned} \quad (4)$$

ある都市の下水量 (水道使用量に関連する) の年間変化と気温の年間変化との関係⁶⁾を図11に、また細井⁷⁾がおこなった水道使用量に関する同様の解析結果を図12に示す。そして、山田⁸⁾がおこなった複数都市のデータ解析に基づく気温と水道使用量との関係を図13に示す。これらの図より気温1℃上昇では一人一日当たりの水道使用量が約6L上昇すると考えられる。水源の確保や施設容量の検討が必要である。

気温が上昇すると水道水自体の水温も上昇し、塩素消費速度も上昇する。その程度は5℃上昇で1.3倍程度となるので注意を要する。河川水質への影響と同様に浄水工程での水温上昇による水質変換が生ずることにも注意を要する。

4. 下水システムへの影響

気温が上昇すると水道使用量が増加し下水量も増加する。その程度は上述の通りであり、これに見合った施設容量の検討が必要となる。

また、気温上昇にともない下水水温も上昇する。ある都市における気温と下水水温との関係⁶⁾を図14に示す。気温1℃上昇で下水水温は約0.7℃上昇することが示されている。これにより、処理効率が影響を受ける。有機物分解速度、硝化速度および脱窒速度への影響程度を、温度係数 θ を用いて水温をT℃とし例えば20℃を基準とすると、 θ^{T-20} で示すと、影響程度は表3および図15に示されるとおりである。施設容量は小さくなるが、余裕としてみるべきである。

表3 温度係数 θ の値と水温5℃上昇による影響程度

過程	θ の値	5℃上昇の影響程度
有機物分解	1.05	1.28 倍となる
硝化	1.10	1.61 倍となる
脱窒	1.065	1.37 倍となる

下水は自然流下式であり、数%の地下水の侵入が見込まれる。したがって海水面下で海水侵入のある地下に埋設された下水管渠には海水の侵入が生ずる。地球温暖化により海面が上昇するとこのような下水管渠が増加し、また管渠への海水の侵入程度も上昇する。海水には27,000mg/Lの硫酸イオンが含まれており、これが侵入すると下水中のその濃度が上昇する。そのため、図16に示される機構で下水管渠の腐食が進行する。腐食の原因は有機物の有機酸発酵と下水中の硫酸イオン濃度であり、下水管渠内には十分な有機物が存在していることから硫酸イオン濃度が重要となる。そこで、海水面下に存在する下水管渠内の下水中のイオン濃度および有機物濃度(DOC)等について測定を行った結果を表4に示す。家庭污水が中心である下水中の硫酸イオン濃度は20

表4 下水中イオン等の測定結果

地点	pH	アルカリ度 (-) mgCaCO ₃ /L	Na ⁺ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	F ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Br ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	DOC mg/L	
K市														
海面上	1	7.90	115	29.4	26.9	8.8	18.3	2.45	1.36	38.2	Tr.	1.19	22.8	16.1
	2	7.94	111	47.8	24.8	15.1	16.0	3.91	1.15	54.7	Tr.	2.23	34.0	56.3
海面上 地区R	1	7.94	104	78.3	21.7	14.0	18.1	4.87	0.96	97.3	0.28	3.88	44.4	77.5
	2	8.03	98	65.4	22.5	15.4	17.9	4.40	0.94	77.9	0.36	2.26	36.0	63.0
	3	8.03	172	641	-	34.5	110	53.7	1.25	1287	4.85	1.11	139	59.1
	4	8.94	211	88.3	55.6	36.0	16.4	3.56	1.03	101	0.14	1.92	46.7	92.7
海面上 地区P	1	8.02	89	66.4	18.6	15.5	16.1	2.82	0.87	79.7	Tr.	1.82	46.5	66.0
	2	8.34	135	62.8	37.5	18.3	18.2	3.97	1.04	77.9	Tr.	1.98	48.0	66.4
	3	7.79	84	51.6	16.5	13.3	14.7	3.05	0.85	65.5	Tr.	2.11	31.6	80.0
	4	7.74	84	43.9	14.7	10.8	14.5	2.84	0.85	47.9	Tr.	2.08	31.8	59.0
O市海面上	-	-	-	-	-	-	-	-	1000	-	-	150	50	
M市し尿処理場	-	-	-	-	-	-	-	59.3	1988	49	115	1142	-	

～35mg/L程度であり、海水面下の下水管渠内の下水中のそれは50～150mg/Lとなることが示されている。特に、海水面下地区R3では海水が下水量の5%程度流入するに相当するだけ海水組成の各イオンが上昇している。腐食の進行には関与する細菌の活性が重要となるが、それらの増殖動力学定数の典型値を表5に示す。

表5 動力学定数の値

関与微生物	最大比増殖速度	収率
有機酸発酵細菌	0.5 1/hr	0.05 mgC/mgC
硫酸還元細菌	0.2	0.3
硫黄酸化細菌	0.03	0.02

5. おわりに

以上述べたように、地球温暖化の上下水道システムに及ぼす影響は大きくまた複雑である。地球温暖化の程度や進行状況はなお不確定な要素があることは事実である。しかしながら、地球温暖化の影響が顕著に生じ始めてから上下水道システムの対応を始めたのでは、これらのシステムが市民生活に不可欠な公共施設であることから、手遅れとなり、かつ時には二重投資といった不経済を生ずることにもなる。早急に、本研究で提示した内容と方法で、地球温暖化による影響の程度と影響の生じ得る地域（施設）、その時期（対策の優先順位）を確定し、計画的に施設の建設や施設の耐用年数後の再建設計画とからめて、今の時期から順次対策を講じていくことが極めて重要である。

引用文献

- 1) 環境庁地球温暖化問題研究会編(1990) 地球温暖化を防ぐ NHKブックス
- 2) 滋賀県環境白書－資料編－ 平成元年度、平成2年度
- 3) ILEC (1989) Survey of the State of World Lakes
- 4) 日本水道協会 水道統計 平成元年度
- 5) 丸善 理科年表 平成4年
- 6) K市 下水道データ集
- 7) 細井由彦、村上仁士 (1991) 四国における水使用量と気温との関係 京都大学環境衛生工学研究会 Vol.13 pp229-233
- 8) 山田淳 第II編 上水道工学 衛生工学(末石 他) 鹿島出版会

研究発表

津野洋 上下水道システムへの地球温暖化の影響と対策 土木学会第27回衛生工学研究討論会講演集 pp(8)-(9)

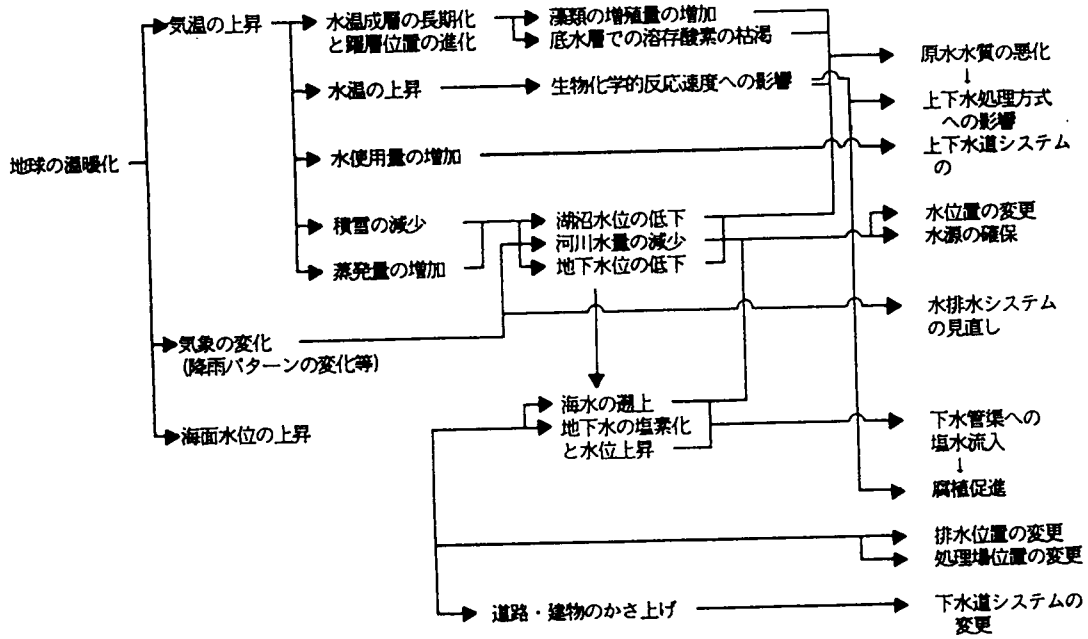


図-1 地球温暖化による上下水道システムへの影響

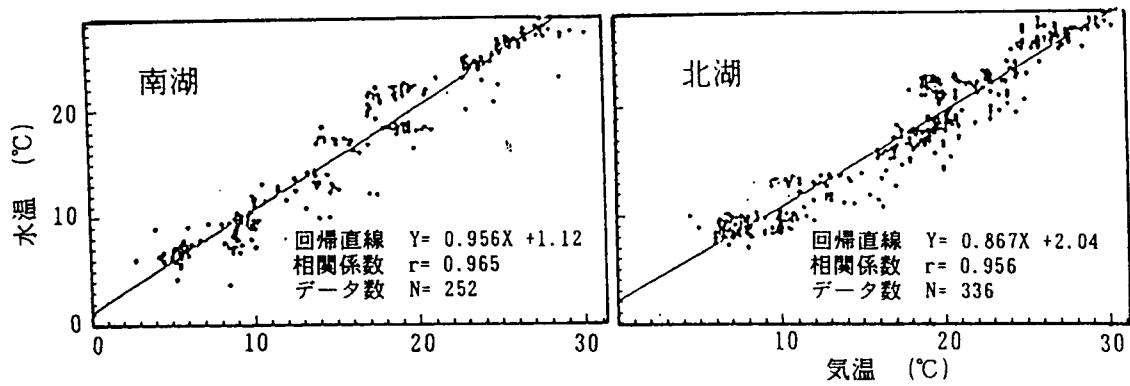


図-2 琵琶湖南湖及び北湖における気温と表水層水温との関係

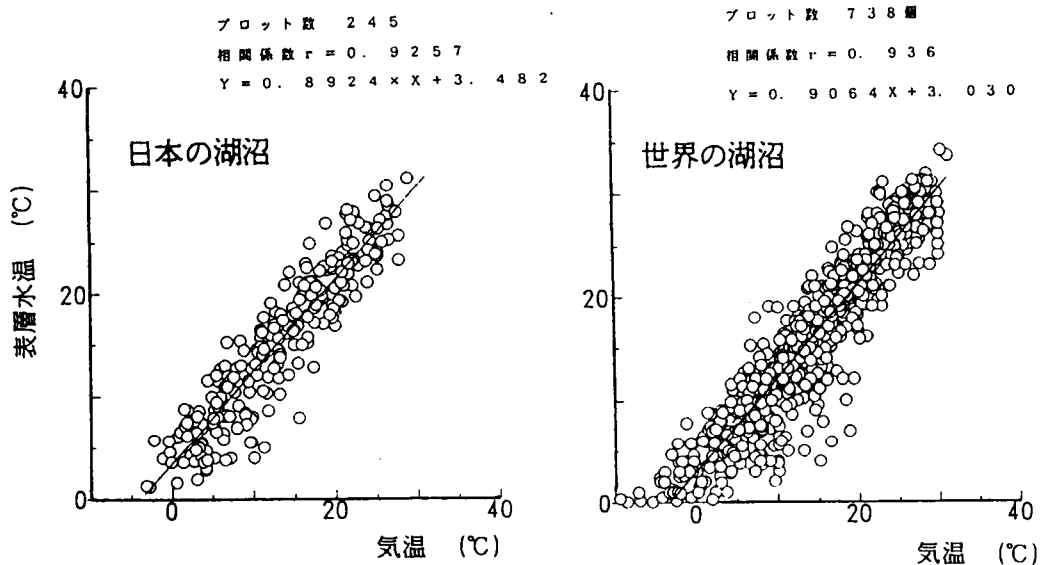


図-3 気温と表層水温の関係

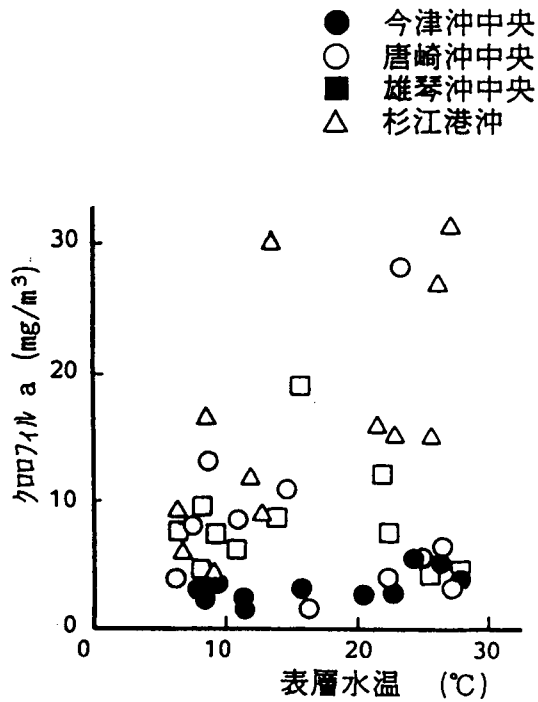


図-4 琵琶湖における表層水温および藻類現存量の関係

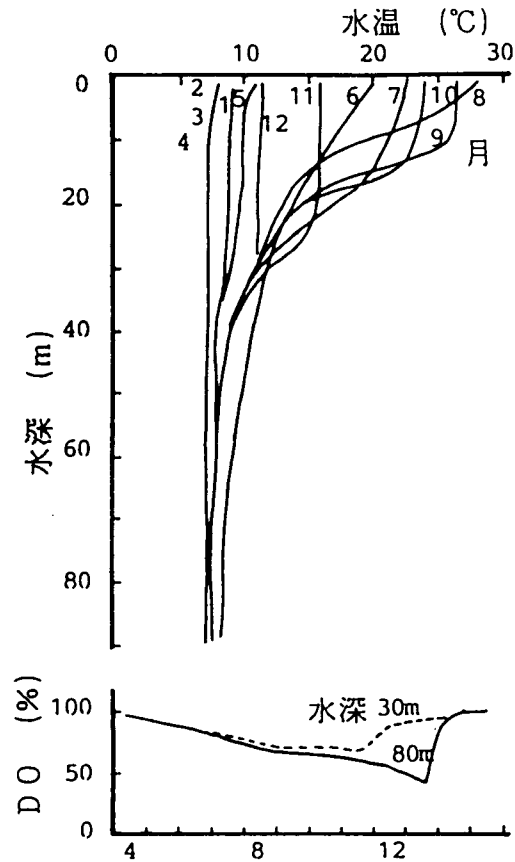


図-5 琵琶湖今津沖中央における水温の水深方向分布と深水層のDO変化

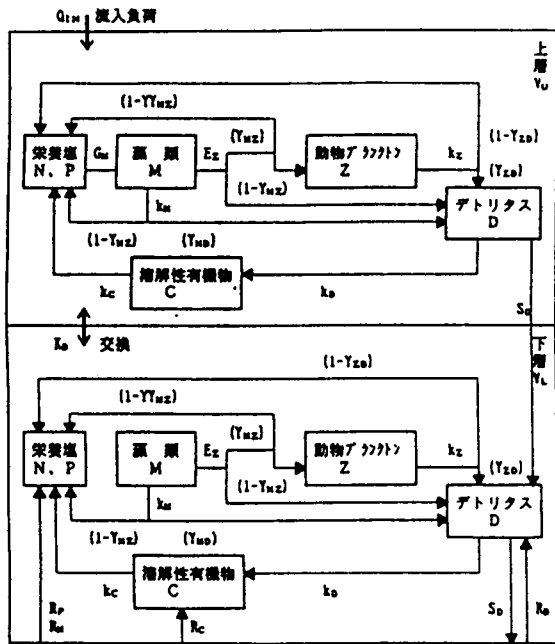


図-6 生態系モデルの構造

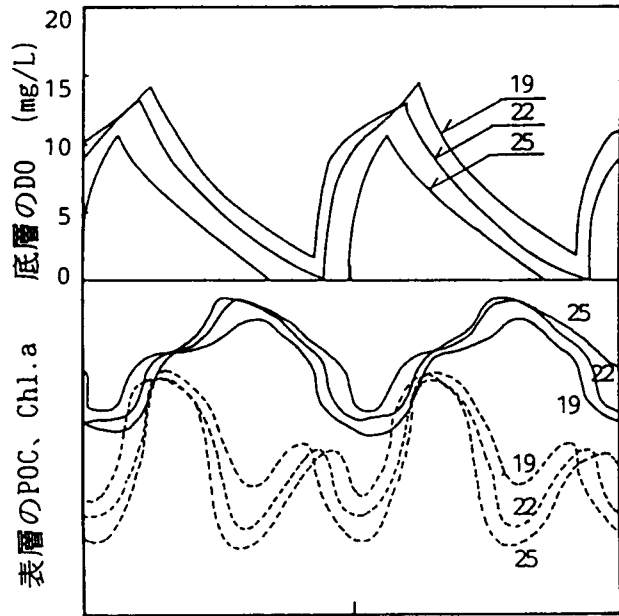


図-7 平均水温の湖沼水質への影響 (図中数字は年平均気温、°C)

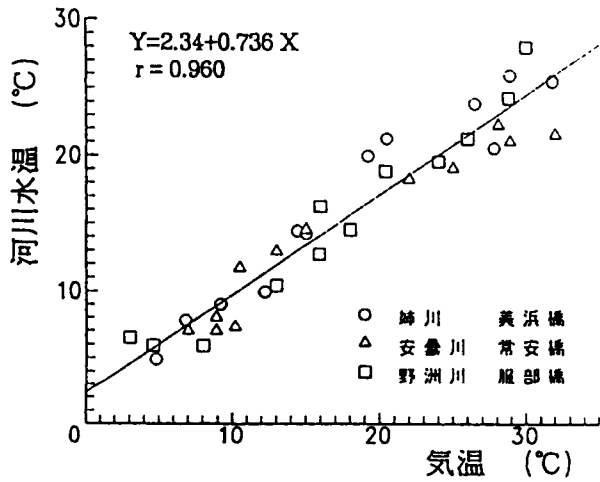


図-8 気温と河川水温の関係

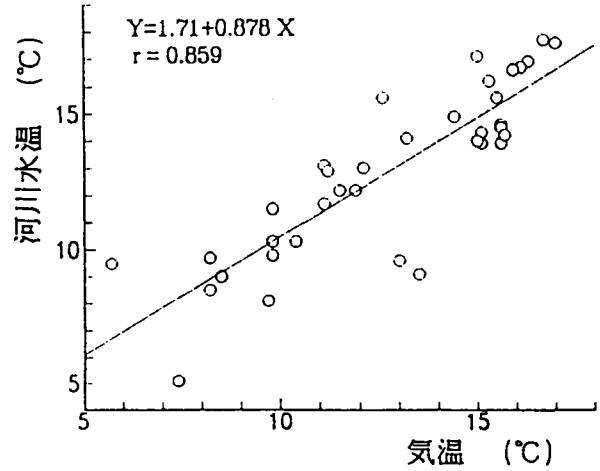


図-9 気温と河川水温の関係

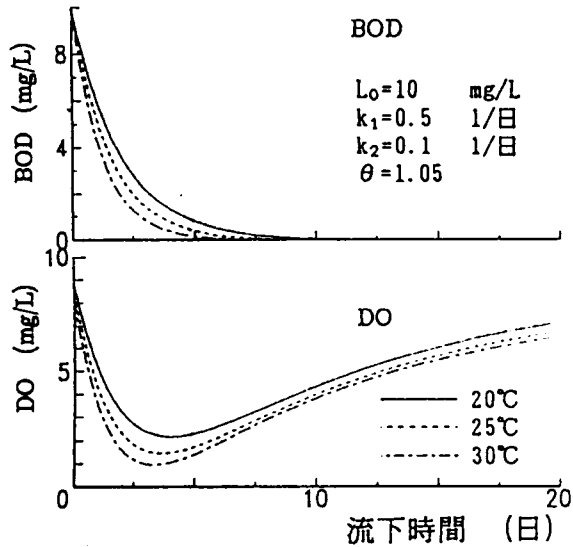


図-10 Streeter-Phelps式による計算結果

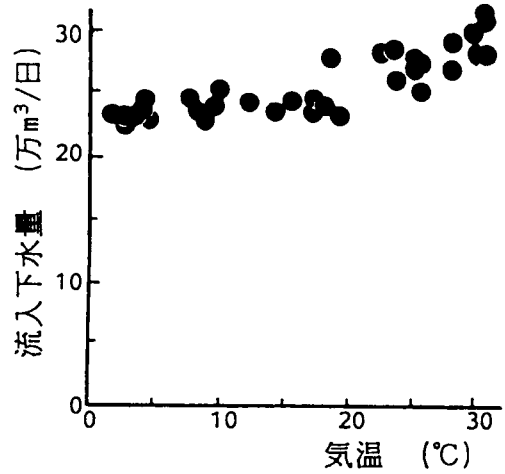


図-11 K市都市下水道処理場における気温と流入下水道量の関係

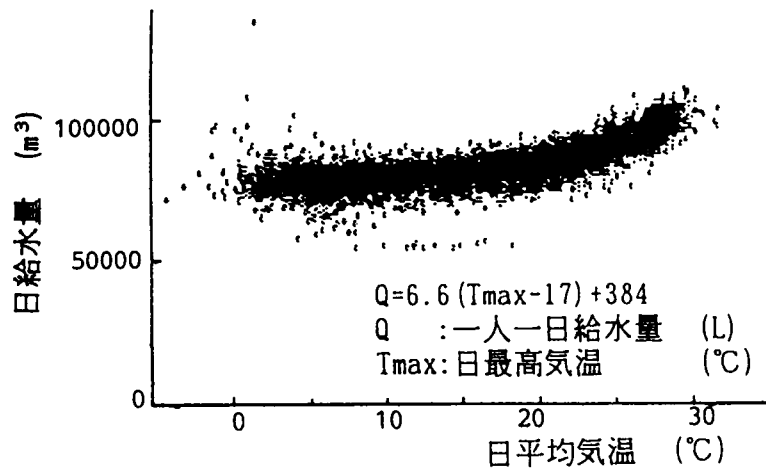


図-12 徳島市における日平均気温と水使用量との関係

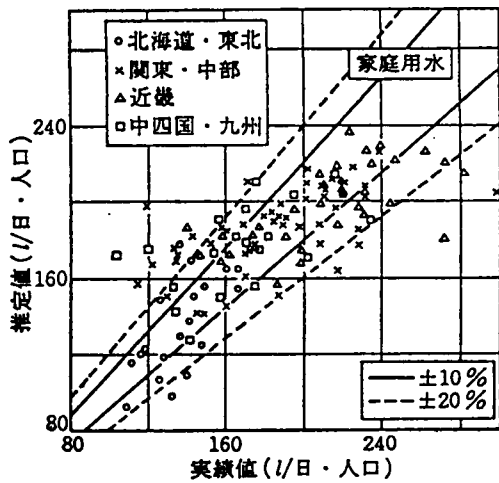


図-13 実績値と推定値の比較(家庭用水)

家庭用水原単位 (l/人・日)
 $= 73.3 + 7.56 \times [\text{年平均気温 (}^\circ\text{C)}] + 0.353 \times [\text{水洗化率 (\%)}]$
 $- 0.442 \times [\text{水道料金 (円/m}^3)] + 0.399 \times [\text{DID 人口比 (\%)}]$

(全国 152 都市の分析結果)

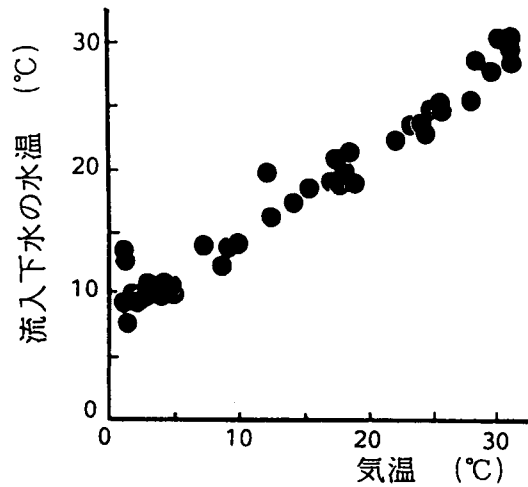


図-14 K市都市下水処理場における気温と流入下水の水温の関係

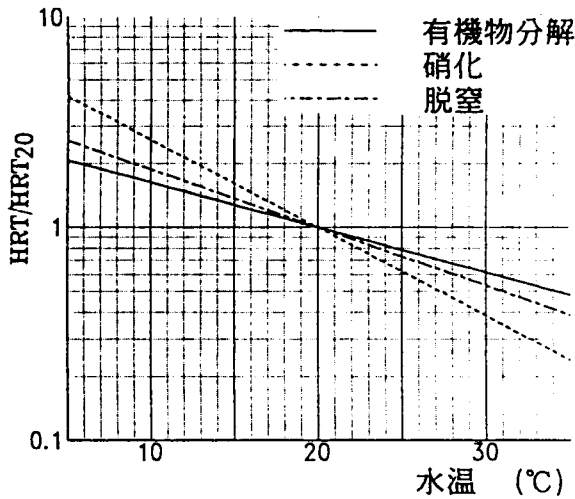


図-15 反応槽の水理学的滞留時間に及ぼす下水の水温の影響

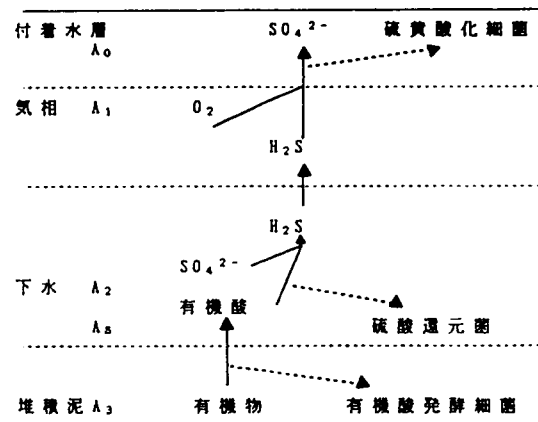


図-16 硫黄化合物による下水管渠の腐蝕の機構

A_i : 断面積、 A_s : 堆積泥の表面積