

II-54

水深の浅い水路の水質特性について

北海道開発局 開発土木研究所 正員 佐藤 徳人
北海道開発局 開発土木研究所 正員 西村 豊
北海道開発局 開発土木研究所 正員 中津川 誠

まえがき

ダム貯水池や比較的水深の深い湖沼を対象とした富栄養化現象については、比較的多くの調査・検討がなされているが、浅い湖沼、特に積雪寒冷地の停滞性水路については検討された事例は少ない。しかしながら、水深の浅い停滞性水路では、水深の深い湖沼とは水理・水質特性が異なるものと推測されることから、それを踏まえた調査・解析が新たに必要となる。以上の観点から、水深の浅い停滞性水路のモデル水域として、千歳川流域の農業排水路を設定し、平成2年度より現地調査を実施している。対象とした水路は、水深が1.0~1.5m程度と浅く風の影響を受けて混合しやすく土壌は火山灰、シルト質などの細粒成分が主体である。また、周辺には畑地が多く、施肥を介して栄養塩類の流入が考えられる。このような状況下にあるモデル水域について現地調査結果を整理し、流動および水質モデルの検討を行った。前年度の成果¹⁾ではモデル水路内の水理特性を現地調査およびシミュレーションで明らかにした。今回はその成果を踏まえ、主として水質特性の調査・解析を実施している。この中では、シミュレーションによる再現計算を通し、将来の水質変化について示唆を与えている。

1. モデル水域の概要と調査内容

1-1 モデル水域の概要

調査対象としたモデル水域(図-1)は、千歳川流域の農業排水路(14号幹線排水路)として掘削されたものである。この地域は石狩川が野幌丘陵東部から太平洋に注いでいた時代の流路にあたり、周辺域には低湿地帯泥炭層が広く発達している。モデル水域は昭和63年3月から掘削が開始され、平成元年12月に終了しており、排水路を通じ千歳川に合流している。形状は流下方向に約1,800m、横断方向に約130mの水路で、水深は1.0~1.5m程度、1/5,000程度の緩い勾配をもつ水路で、水深に対して流下方向の距離が大きいいため、流動に関しては、風の影響を強く受けると考えられる。モデル水域周辺の気温は、夏期には比較的高く、8月の最高で30℃を越えるときがあるが、冬期はかなり低く月最低で-20℃以下となる。風については、夏は南よりの風、冬は北よりの風が卓越し、春に比較強い南風が吹く傾向がある。大きさは、月最大風速で10.0m/s程度月最大風速平均で5.0m/s程度であり、周辺環境にも影響を与えている。また、降水量は、7~10月に多く、年降水量は、1,000mmを越えており、全道の平均的な値より大きい値を示している。モデル水域は、14号幹線排水路と暗渠排水を集水したものが周辺から流入している。近傍の定期調査を見ると全般的に河川水に比較して、T-N、T-P、SSがやや

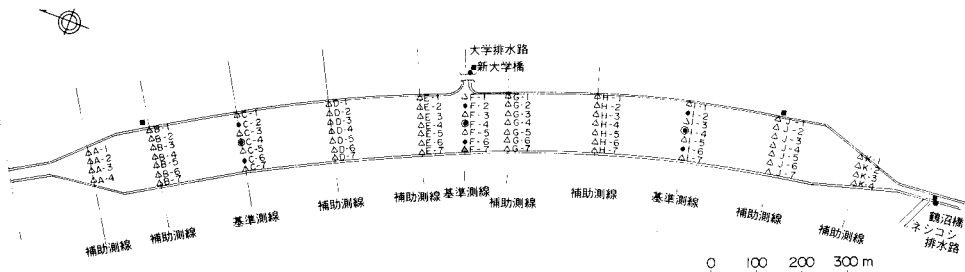


図-1 停滞性水路モデル水域図

Field Observation and simulation of Water Quality in the Shallow Channel

by Norito SATOH, Yutaka NISHIMURA and Makoto NAKATSUGAWA

高い値を示しており、流入水は、栄養塩類を多く含む水質にあると言える。

昨年までの調査結果は「①対象としたモデル水域における流動特性は、風と河床形状に大きく影響され、河岸付近で浅く中央部で深い断面では水平循環流が現れることが、現地調査結果及びシミュレーションで確認された。②モデル水域内は、風によって水域全体が混合されることが確認された。③温度躍層はできず、水質も鉛直方向でほぼ一様になることが確認された。

ただし、平面的にはプランクトンの数において水路内での内部生産による影響と見られる分布が現れていた。③風に伴う流動によって起こる底質の巻き上がりによりモデル水域内に栄養塩類の供給がなされていることが推察された。④モデル水域は、シルト質以下の極めて細かい粒度成分が卓越することで、濁水化のおきやすい条件にあることが確認された。」等に要約される。

1-2 調査内容

現地調査は、平成2年度より3か年にわたり、植物プランクトンの影響で水質に変化が起こればと考えられる夏で、出水等の流出が少ない期間に行なった。本年度の流動調査は、図-1のようなモデル水域に一測線（H測線）設置し、図-2のように水路中央深部に上層・下層の2点、水路両側の浅い部分の左右岸の上層各1点ずつ、計4点の設置とした。

調査期間は、平成4年7月24日 15:30～29日 16:30の連続5日間とした。また、水域内の負荷量収支を明らかにするため、現地において採水・採泥したものをを用い、生産速度・分解速度・溶出速度を求める各種試験を行い、水質予測モデルのパラメータを得るための室内実験を実施した。

2. モデル水域の気象条件

昨年までの調査検討結果から、水路内の水の流動は水深が 1.0～1.5m程度と浅く、勾配が緩やかで停滞しているため、風の影響を強く受ける事がわかっている。また、河床形状に大きく影響され、河岸付近で浅く中央部で深い断面では水平循環流が現れることが確認されている。まず、風について詳細に検討してみる。モデル水域の近傍で観測されている風向・風速、特に平成元～3年夏期（7～9月・図-3）のデータを整理すると、風向の主軸は南・南南東から北北西の向きにあり、風向は南あるいは南南東のものが、頻度は7月に80％・8月に50％・9月に40％と高く水路の縦断方向に卓越している事がわかる。この期間の風速は、2.0～5.0m/sの場合が多く、卓越風向のときは、5.0m/s前後の強い風が多くなっている。また、風向別に平均風速をまとめると、南よりの場合7月に5m/s、9月には3m/s、北よりのときは7月に3.5m/s、9月に3m/sで表-1のように4つのパターンにモデル化することができる。次に、流動調査の結果

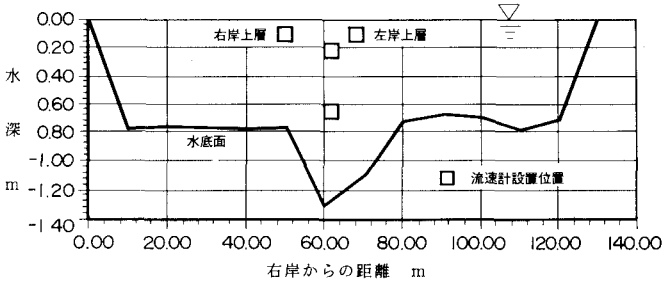


図-2 流速計設置断面図

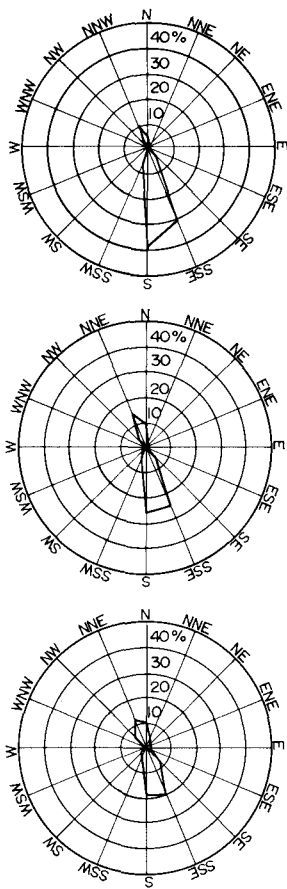


図-3 風の頻度
(上:7月 中:8月 下:9月)

表-1 モデル水域の夏期代表風

ケース	平均風向 (度)	平均風速 (m/s)	パターン
1	170.0	5.0	南より、風速大
2	170.0	3.0	南より、風速小
3	344.0	3.5	北より、風速大
4	344.0	3.0	北より、風速小

表-2 富栄養化モデルの基本式

水温: $\frac{dT}{dt} = F(T) + \frac{1}{\rho c} \cdot A \cdot (\phi_0 - \phi_1)$ 流入, 流出 水面における熱収支	
濁質: $\frac{d(CV)}{dt} = F(C) - C V_{oc} A$ 流入, 流出 沈降	
植物プランクトン (クロロフィル a): $\frac{d(C_{ca}V)}{dt} = F(C_{ca}) - C_{ca} V_{oc} A + (G_p - D_{ca} - \frac{G_z}{C_{ca}}) C_{ca} V$ 流入, 流出 沈降 増殖 呼吸(死滅) 捕食	
DO (溶存酸素): $\frac{d(C_{oo}V)}{dt} = F(C_{oo}) + (K_1(C_{oo} - C_{oo})) + \frac{G_{oo} C_{ca}}{C_{ca}} - K_2 C_{oo} - \gamma \frac{A}{V} \} V$ 流入, 流出 再曝気 光合成によるDO生産 COD物質によるDO消費 底泥によるDO消費	
COD (化学的酸素要求量): $\frac{d(C_{cod}V)}{dt} = F(C_{cod}) - C_{cod} V_{oc} A + (K_p G_p C_{ca} - B_{p, C_{cod}}) V + \frac{W_{cod} A}{C_{ca}}$ 流入, 流出 沈降 内部生産 分解 底泥からの溶質	
無機態リン: $\frac{d(P_i V)}{dt} = F(P_i) + \{ - \beta_p G_p + \beta_p (1 - a_{p, i}) G_z \} C_{ca} + B_p (P_o - \beta_p C_{ca} - \gamma_p C_z) \} V + \frac{W_{p, i} A}{C_{ca}}$ 流入, 流出 植物プランクトンの摂取 植物プランクトンの排泄 有機態から無機態への交換(分解) 底泥からの溶質	
有機態リン: $\frac{d(P_o V)}{dt} = F(P_o) - (P_o - \beta_p C_{ca} - \gamma_p C_z) V_{oc} A - \beta_p (C_{ca} V_{oc} A) + \{ \frac{\beta_p G_p}{C_{ca}} - \beta_p (1 - a_{p, o}) G_z \} C_{ca} - B_p (P_o - \beta_p C_{ca} - \gamma_p C_z) \} V$ 流入, 流出 沈降 植物プランクトンの摂取 植物プランクトンの排泄 有機態から無機態への交換(分解)	
無機態窒素: $\frac{d(N_i V)}{dt} = F(N_i) + \{ - \beta_p G_p + \beta_p (1 - a_{p, i}) G_z \} C_{ca} + B_p (N_o - \beta_p C_{ca} - \gamma_p C_z) \} V + \frac{W_{p, i} A}{C_{ca}}$ 流入, 流出 植物プランクトンの摂取 植物プランクトンの排泄 有機態から無機態への交換(分解) 底泥からの溶質	
有機態窒素: $\frac{d(N_o V)}{dt} = F(N_o) - \{ (N_o - \beta_p C_{ca} - \gamma_p C_z) V_{oc} A \} - \beta_p (C_{ca} V_{oc} A) + \{ \frac{\beta_p G_p}{C_{ca}} - \beta_p (1 - a_{p, o}) G_z \} C_{ca} - B_p (N_o - \beta_p C_{ca} - \gamma_p C_z) \} V$ 流入, 流出 沈降 植物プランクトンの摂取 動物プランクトンの排泄 有機態から無機態への交換(分解)	

を風のデータと共に解析して見ると、水路中央部で風と逆方向、右岸の水深の浅い部分で風と順方向の流れと、水平循環の特徴が見られるが、水路中央の上下層の結果からは、上層が安定した流向であるのに対し下層では不安定で一定の傾向はみられなかった。流れの数値シミュレーションは、水質成分の収支をあらわすモデルと合わせて水路水質の将来予測を行う上で必要なものである。水路の水深が浅いことや水平方向の流動に主に着目する意味から、2次元1層モデルを選択し現地観測で得られた結果を数値シミュレーションで検証した。計算観測結果をよく再現していたことは前年度の成果¹⁾に示したとおりである。

3. 富栄養化モデルによる再現計算

3-1 モデルの概要

使用したモデルは、水温・濁度予測モデルと水質予測モデルの2つで構成された富栄養化モデルであり、建設省土木研究所ダム部水資源開発研究室で開発されたモデルを、本報告のモデル水域である

停滞性の浅い水路用に修正したものである。予測の対象とした水質項目は、水温・濁度(濁質)・植物プランクトン(クロロフィルa)・DO・COD・無機態リン・無機態窒素・有機態リン・有機態窒素の9項目である。

表-3 富栄養化モデルの基本構造

要素	基本構造	内容
モデルの種類	生態系モデル	植物プランクトン、動物プランクトンを表現できる。生物体に取り込まれた窒素、リンを分割して表現できる。
水域分割	1層、1ブロック~多ブロック	・水深が浅く、1層で代表できると考えられる。 ・拡大時には湛水域が広く、縦断方向に分割する必要がある。
対象期間	日単位の季節、年間	・水質の季節変化を把握する必要がある。
予測項目	1)植物プランクトン (知74/a) 2)動物プランクトン 3)有機および無機態リン 4)有機および無機態窒素 5)COD 6)DO 7)濁度 (SS) 8)水温	・生態系モデルに必要な項目を含む(1~4) ・湖沼および河川の環境基準と比較できる (5~7) ・生産、分解、溶出速度に必要な項目を含む(8)
窒素、リンの循環	1)移流 2)沈降 3)溶出 4)生産 5)分解 6)捕食、死滅 7)その他	・窒素、リンの循環と、生物体による形態変化過程のうち、植物プランクトン、動物プランクトンに関するものを含む

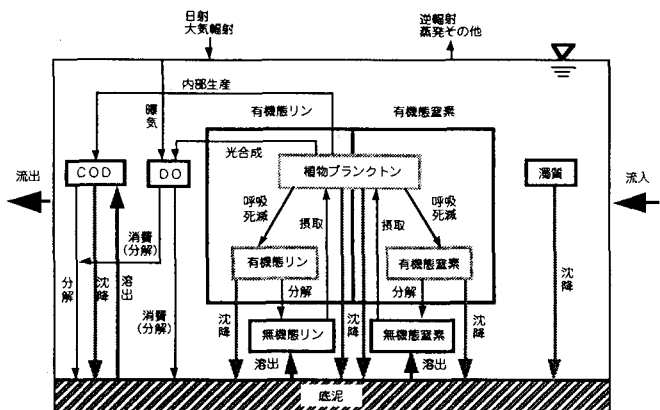


図-4 富栄養化モデルの模式図

モデルの基本式を表-2に示す。対象とするモデル水域の水質予測では「①湛水域は延長 2km 程度で地形はそれほど複雑ではない。②水深が湖沼に比べ浅い。③植物プランクトンの増殖による富栄養化現象の程度を把握したい。④溶出・分解・生産の内部汚濁要因を考慮したい。」等の条件を考慮する必要がある。この条件を満たすモデル水域に適した富栄養化モデルの基本構造を表-3、模式図を図-4に示す。またモデル水域は、水深が浅く滞留時間が1～2日と比較的短いこと、これまで確認された流動特性から循環混合が十分行われていることから、1層1ボックスとして取り扱った。図-5には水路内のクロロフィルa濃度の経時変化を示すが、調査を行った平成2年および3年の両年とも6月が最大となっており、変化の状況の再現を考慮すると計算の対象期間は5～9月が妥当と考えた。流入流量および流入水質負荷は、定期水質調査と平成2～3年本調査の観測値より決定した。流入流出流量は、図-1に示したように3箇所で水路につながっており、基本的な流動は鶴沼橋および・新大学橋から流入、大学橋から流出となっている。計算の初期条件となる水質は、定期水質調査をもとに表-4のように与えた。

3-2 パラメータの決定
水質予測計算に関わるパラメータは、生産速度・分解速度・溶出速度を求める各種試験結果より得られた実験値および既往の文献値に基づき決定した。まず、植物プランクトンの増殖に関わるパラメータについて述べる。植物プランクトンの増殖G_pは、水温、日射量・無機態の窒素・リン濃度の関数としてあらわされる。特に最適温度T_sは、モデル水域内のクロロフィルaの濃度が最大となった6月の平均的な水温15℃を設定した。最大増殖速度μ_{max}は、生産速度の実験結果より1.2とした。また、μ_{max}=K_s・T_sに相当するので、水温比例定数K_sを0.08と設定した。その他のパラメータについては、分解速度・溶出速度を求めた室内試験、モデル水域近傍の気象データ等を用いたほか、既往の文献値によった。本報告で設定したパラメータについては表-5に詳細を示す。

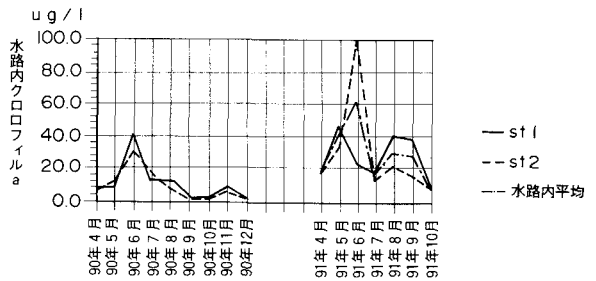


図-5 モデル水域内のクロロフィルaの変化

表-4 水質予測計算初期値

項目	水温 ℃	濁度	クロロフィルa μg/l	DO mg/l	COD mg/l	I-P mg/l	O-P mg/l	I-N mg/l	O-N mg/l
ヶ-1	6.9	9.0	8.2	12.0	4.0	0.017	0.027	1.808	0.294
ヶ-2	8.5	19.9	23.6	10.4	5.5	0.026	0.041	1.749	0.241

表-5 水質予測計算パラメータ (その1)

条件又はパラメータ名			記号	単位	設定値	摘要あるいは文献による設定範囲
植物プランクトンの増殖	最適日射量		I _s	cal/cm ² 日	400	200～400
	水温比例定数		K _s	1/℃日	0.08※1	μ _{max} =K _s ・T _s =1.2
	基準水温		T _s	℃	15.0	珪藻：10～20
	ミカエリス定数 (窒素)		K _N	mg/l	0.005	0.005～0.4
	ミカエリス定数 (リン)		K _P	mg/l	0.0005	0.005～0.04
	スペース効果係数		β _s	—	0.01	0.01～0.0385
植物プランクトンの死滅	呼吸率 (死滅率) D _{ca} =R _{ca} θ _{ca} ^{T-20}		R _{ca}	1/日	0.2	0.05～0.2
			θ _{ca}	—	1.05	1.05～1.07
分解速度 B=R θ ^{T-20}	分解速度	窒素	R _N	1/日	0.040※2	0.015～0.095
			θ _N	—	1.05	1.05～1.08
		リン	R _P	1/日	0.083※3	0.015～0.095
			θ _P	—	1.05	1.05～1.08
		COD	R _c	1/日	0.028※4	0.02～0.09
			θ _c	—	1.05	1.05
溶出速度 W=R θ ^{T-20}	溶出速度	窒素	R _{wn}	g/m ² 日	0.12※5	0.0～0.147
			θ _{wn}	—	1.05	1.05～1.122
		リン	R _{wp}	g/m ² 日	5.0※6 (0.0013)	(0.0～0.03)
			θ _{wp}	—	1.05	1.05～1.20
		COD	R _{wc}	g/m ² 日	0.09※7	0.0155～0.8
			θ _{wc}	—	1.05	1.05

る。特に最適温度T_sは、モデル水域内のクロロフィルaの濃度が最大となった6月の平均的な水温15℃を設定した。最大増殖速度μ_{max}は、生産速度の実験結果より1.2とした。また、μ_{max}=K_s・T_sに相当するので、水温比例定数K_sを0.08と設定した。その他のパラメータについては、分解速度・溶出速度を求めた室内試験、モデル水域近傍の気象データ等を用いたほか、既往の文献値によった。本報告で設定したパラメータについては表-5に詳細を示す。

3-3 計算結果

①ケース1 (平成25年5月～6月)

濁度は、流入流出と沈降によって決まる。図が示すように6～7月にやや観測値が大きくなっているが、全体としてその傾向を再現しているものとする。クロロフィルaは6月に濃度が高くなる傾向は再現されているが、ピーク付近で若干の差が見られる。また、リンは、T-Pで見ると6月には、流入水質に対して水路内の観測値が高く、7月には逆の観測結果になっている。図には示さないが6月の現象はO-Pに起因する差で水路内水質が優先しており、7月の現象はI-Pに起因する差で流入水質が優先していることが理解された。有機物質(COD)、T-Nについては、傾向が再現されている。

②ケース2 (平成25年5月～7月)

濁度は、図が示すように5月にやや観測値が大きくなっているが全体としてその傾向を再現しているものとする。クロロフィルaは、5～6月に濃度が高くなり、7月にいったん低くなり、さらに8～9月にかけ再び高くなる傾向がよく再現されているが、ケース1同様ピーク付近で若干の差が見られた。T-P、T-N、CODについては、傾向がよく再現されている。このように、今回行った2ケースの結果を見ると、クロロフィルa等の細かい点で計算値と観測値の差が生じているが、全体的な傾向として、計算値はモデル水域の水質を再現しているものと考えられ、ここで用いた水質予測計算のパラメータはほぼ妥当な値と言える。

あとがき

調査及び検討は、比較的事例の少ない水深の浅い水路について行った。本報告の要旨は、「①モデル水域においては気象条件、特に風の影響が大きく、現地の水理・水質特性等を解析するには十分な考慮が必要である。②モデル水域において富栄養化モデルの適用を検討すると、水深が浅く循環混合が充分で滞留時間が比較的短いことから、1層1ボックスの完全混合モデルが最適と考えられた。③モデル水域において水質の再現計算を行ったが、全体的傾向としては実測値をほぼ再現している。このことから、今回提案した水質モデルおよびそこで用いたパラメータの妥当性が検証された。」と要約される。

昨年までの検討結果からも明かなように、対象水路の水理・水質特性などの現地の現象は、強い風による大きな影響をうけている。また、モデル水域の水質状況を見ると、植物プランクトンの異常発生の可能性は否定できないものの、現地はそのような事態には至っていない。これは、この地域の気象特性等によるものと考えられる。さらに、現地においては栄養塩類のカット等の対策工が予定されており、それによる水質改善効果について

表-5 水質予測計算パラメータ (その2)

条件又はパラメータ名		記号	単位	設定値	摘要あるいは文献による設定範囲
沈降速度	有機態窒素	V _{ONO}	m/日	0.1	0.01～0.3
	有機態リン	V _{OPO}		0.1	0.01～0.3
	植物プランクトン	V _{OCA}		0.07	0.0～0.3
	COD	V _{OCOD}		0.1	0.07～0.5
	濁質	V _{OC}		0.0※8	0.3～0.7
変換率	植プラ 炭素/クロロフィルa比	α	mg-C/ μ g-chl	0.05	0.05
	植プラ 窒素/クロロフィルa比	β_N	mg-N/ μ g-chl	0.0075	0.0075～0.01
	植プラ リン/クロロフィルa比	β_P	mg-P/ μ g-chl	0.0007	0.005～0.00194
	植プラ COD/クロロフィルa比	K _P	mg-COD/ μ g-chl	0.10	0.04～0.148
最低濃度	クロロフィルa	—	μ g/l	0.15	0.1～0.15
DO生産	DO生産速度	K ₂	1/日	0.063	0.063
	$G_{DO} = K_2 \theta_{DO}^{T-20}$	θ_{DO}	—	1.072	1.07～1.072
DO消費	COD物質によるDO消費	K ₃	1/日	0.05	0.05～0.07
	底泥でのDO消費	γ	g/m ² 日	0.1	0.1～1.2

注)

- ※1: AGP試験の平均値から $\mu_{max} = K_2 T_1 = 1.2$ と設定、ここで $T_1 = 15^\circ\text{C}$ とした。
- ※2: 窒素(O-N)の分解速度試験の最小値0.04/日から設定。
- ※3: リン(O-P)の分解速度試験の平均値0.083/日から設定。
- ※4: CODの分解速度試験の平均値0.028/日から設定。
- ※5: 窒素(I-N)の溶出速度試験の平均値0.12g/m²日から設定。
- ※6: R_{wp}: 底泥中のリン含有量(乾泥, P-mg/g)。
設定値は溶出速度試験の最大値0.0013g/m²日から求めた。
- ※7: CODの溶出速度試験の平均値0.09g/m²日から設定。
- ※8: 濁質の沈降速度を0.0とした。
- ※1～※7: 今回の室内試験による。

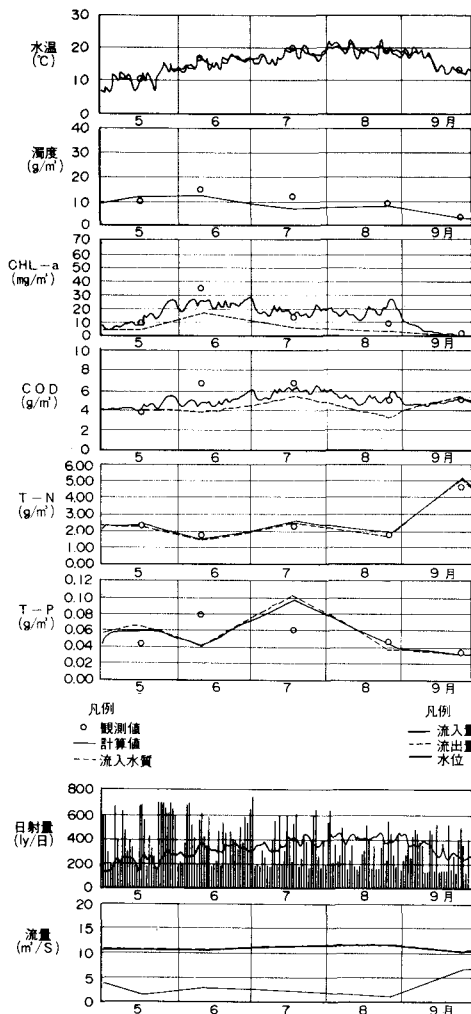


図-6 モデル水理の水質予測計算(ケース1)

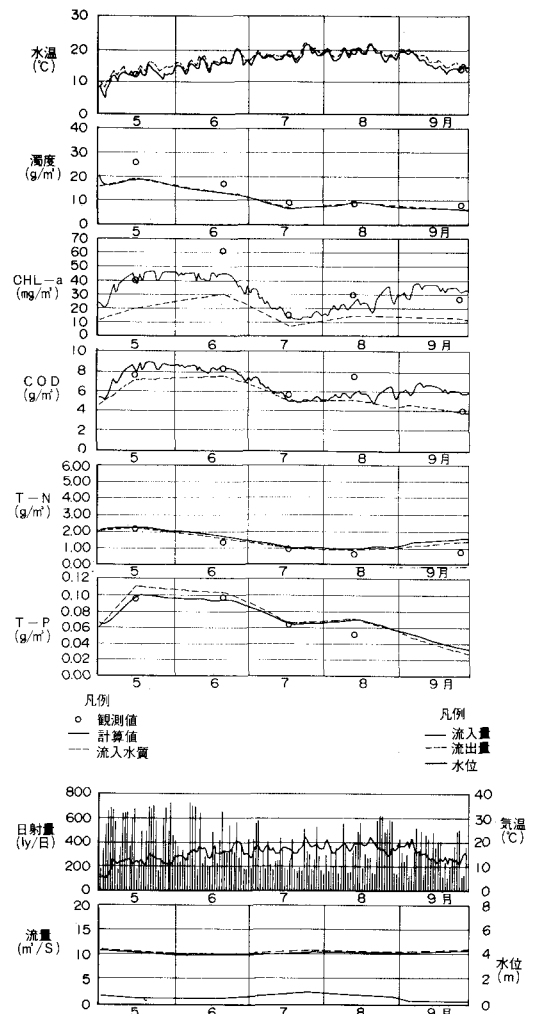


図-7 モデル水理の水質予測計算(ケース2)

今後の追跡調査が必要である。また、富栄養化モデルによる水質の再現計算が可能となり、今後のモデル水域の水質管理を考える上で、一つの方角性を提案できるものとする。

このような状況を踏まえ、今後は現地調査を継続して水質の状況の推移を調べていくとともに、今回再現性が確認できた水質モデルを対象とした水域の水質予測に適用していく。また、この結果を用いて、モデル水域の拡大を図っていくとともに他水域への応用を検討する予定である。

参考文献

- 1) 佐藤 他；水深の浅い水路の水理・水質特性について：土木学会北海道支部年次学術発表会論文集 1992.2
- 2) 建設省土木研究所ダム部水資源開発研究室；貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析モデル：1987.3
- 3) (財) 国土開発技術研究センター；渡良瀬貯水池水質保全調査報告書：1987
- 4) 松井 他；河口堰貯水池の富栄養化シミュレーション：第25回下水道研究会発表講演要旨集 1988