

都市集水域をもつ閉鎖性水域の総合的水質解析

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF WATER QUALITY IN AN ENCLOSED WATER BODY RECEIVING DRAINAGE FROM AN URBANIZED BASIN

濱原能成¹・中津川誠²・加藤晃司³

Yoshinari HAMAHARA, Makoto NAKATSUGAWA and Koji KATO

¹正会員 (株) 福田水文センター (〒001-0024 札幌市北区北 24 条西 15 丁目 2-5)

²正会員 工博 (独) 北海道開発土木研究所 環境研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

³正会員 (株) シン技術コンサル 技術企画部 (〒003-0021 札幌市白石区栄通 2 丁目南 8-30)

The Barato River in northern Sapporo was formed from a cutoff meander of the Ishikari River. Since the river is in an urban area, it receives urban wastewater. As a largely enclosed water body with little exchange of water but with inflow load from the surrounding area, the Barato has undergone eutrophication, as evidenced by water bloom. We conducted a comprehensive study on the hydrological and material cycles of the Barato River basin. We clarified some causes of the water quality problem of the Barato River. One cause is rainfall runoff from the sewer system. Another is interaction between water and bottom deposits. The Barato River adjoins a backwater section of the Ishikari River, where flow alternates with backflow. Such a hydrological mechanism is considered to significantly affect the water and heat balances of the Barato River. In an effort to solve the eutrophication problem, we are conducting observations and simulations to identify additional causes, toward suggesting an effective water quality improvement method.

Key Words: Barato River, Urbanized Basin, Eutrophication, Sewer System, Bottom Deposit

1. はじめに

近年, 「自然と共生する流域圏・都市再生」というテーマにみられるように, 都市の水環境を改善しようという動きがたかまっている。これは, 利水や治水といった人間中心の施策によって河道が改変され, 水が枯渇し, しかも都市の発展とともに多くの汚濁負荷が発生した結果に対する揺り返しとも言える。石狩川の旧川である茨戸川は流動性の悪い閉鎖性水域であり, かつ周辺都市域から多量の負荷を受け入れている。下水道整備等でそれらの削減は着実に効果をあげているものの, 富栄養化等の問題はいまだ解決されたとは言えない。

富栄養化した水域の水質改善には, その水質をコントロールしている要因を定量化する必要がある。そのためには水域の実態のみならず, 周辺からの負荷流入の実態を把握しなければならない。

水深の浅い茨戸川の富栄養化については, 橘ら^{1),2)}が懸濁態リンの影響や, 巻上げによる負荷に着目できることを指摘した研究例などがある。ところで茨戸川は, 地

形的な特徴により上部・中部・下部湖盆の3つの水域に分類されており, それぞれが狭い水路で連結されている。加藤ら⁴⁾は, 衛星画像や曳航式クロロフィル計を用いた観測により, 水質が各湖盆で異なった傾向をもつことを示している。本研究では茨戸川の水質形成要因を包括的に評価するため, 以下の解析を行った。

- 1) 水収支, 栄養塩負荷量収支を整理する。特に, 栄養塩の負荷に関しては, 合流式下水道からの雨天時を含む流出や巻上げに注目した。
- 2) 茨戸川は石狩川の背水区間にあるため, 順流と逆流が繰り返す複雑な水理構造をもつ。そこで, 一次元の不定流計算で水域内の流動を計算した。
- 3) 上記より得られた, 水収支・負荷収支・流動解析結果を基に, 熱収支式や生態系モデル⁵⁾を用いて水温やクロロフィル a のシミュレーションを行った。
- 4) さらに, 現地観測で得られたデータを基に, シミュレーション結果の時間的, 空間的再現性の検証した。

以上により, 本研究は, 富栄養化の因果関係を観測やモデルによって総合的に解明・評価することを目指す。

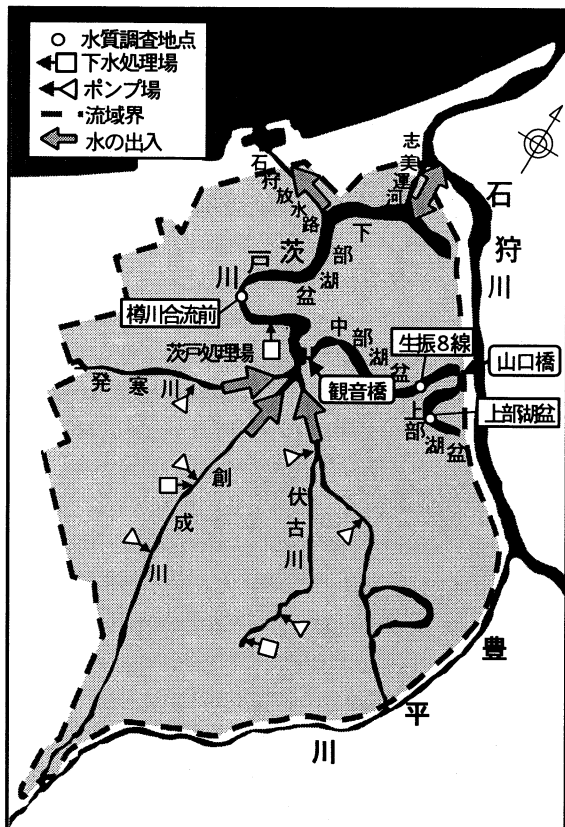


図-1 茨戸川位置図および水の出入

2. 水循環の特徴

茨戸川は図-1に示すように上部湖盆、中部湖盆、下部湖盆に分類され、創成川、伏古川、発寒川（以下3川）が下部湖盆に注いでいる。流出は、平常時に志美運河を通しての石狩川への流出と、洪水時に石狩放水路を通しての海への放流がある。このほかにも、下水処理水の流入や志美運河を通しての逆流などが存在する。

この中で、茨戸川における水循環の大きな特色として以下の3つがあげられる。

- 1) 茨戸川は石狩川の背水区間である。そのため、水域内の流動は潮位に連動した石狩川の水位の影響により、日周期で変動している。
- 2) この水域は、都市近隣に存在するため、下水道を通しての流出が全流入量の中で大きな割合を占める。
- 3) 上部・中部湖盆には大きな流入河川がない。湖盆内への流入は、上記の水位変動に連動した流動によるものが、大半を占める。

(1) 水域内の流動について

茨戸川は石狩川の背水区間にあり、その水位は石狩湾の潮位変動に連動した周期性をもっている。観音橋や山口橋における流動も、この水位の日変動と連動しており、潮汐による流動が各湖盆間の交換を支配している。³⁾

(2) 周辺流域からの流入に関して

茨戸川における外部からの流入量の内訳を図-2に、推

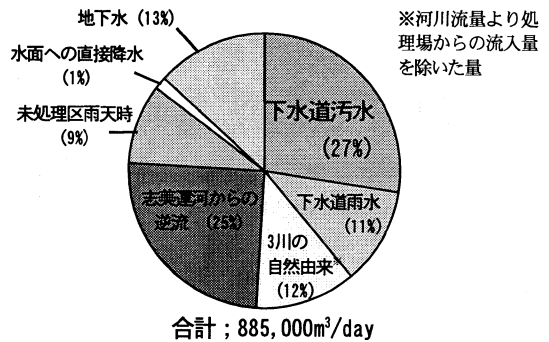


図-2 茨戸川的主要外部流入源
(1997~2001年のデータに基づき作成)

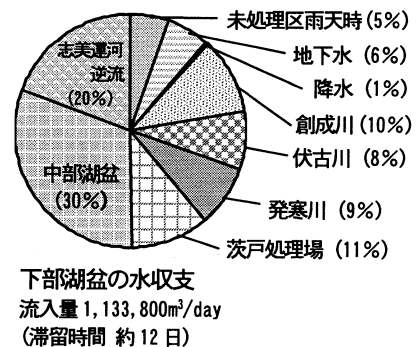
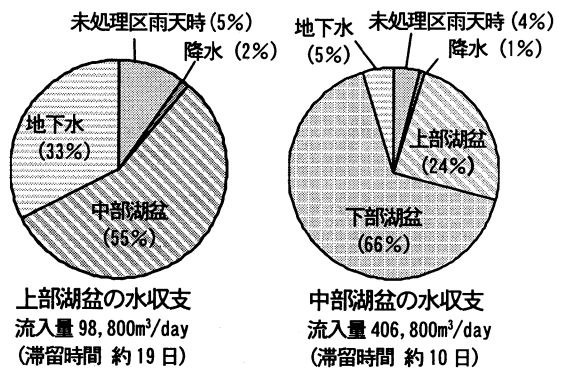


図-3 湖盆別の水収支算出結果
(1997~2001年のデータに基づき作成)

表-1 水収支の推定方法一覧

項目	推定法
創成川・発寒川・伏古川	H-Q式より
晴天時汚水処理水 雨天時下水道放流水 茨戸処理場	札幌市下水道局 維持管理年報より
未処理区雨天時	(伏古川流量-汚水量)を比流量配分
上部湖盆-中部湖盆交換量 中部湖盆-下部湖盆交換量	茨戸観測所の水位変動量より推定 ³⁾
志美運河交換量	下部湖盆での水収支の残差
地下水(上部・中部湖盆)	それぞれの湖盆での水収支の残差
地下水(下部湖盆)	上部・中部湖盆の値を基に推定

定方法の内訳を表-1に示す。これを見ると、外部からの茨戸川への流入は、晴天時の下水処理水由来のものが最も多く27%を占めている。また、これに雨天時の流出をあわせると全体の39%に及ぶ。このことは、水域内の水環境に対して、下水道が大きな影響を与えることを示唆している。

(3) 湖盆ごとの水収支について

湖盆ごとの流入・流出量推定結果を図-3に、推定方法の内訳を表-1に示す。この中で、滞留時間は年間平均貯留量を年間平均流入量で除すことにより算出している。なお、図-3に示す湖盆毎の流入量の総和(1,639千m³/day)は図-2の合計流入量(885千m³/day)より大きくなるが、これは湖盆間の交換量(754千m³/day)を相殺することにより合致する。図-3より、上部・中部湖盆では、湖盆間の交換量が支配的であり、特に上部湖盆では滞留時間が19日と閉鎖的であることがわかる。一方、下部湖盆では3川からの流入や、茨戸下水処理場からの流入など、周辺流域からの多様な流入形態をもっている。また、下流の石狩川からの逆流も全体の20%を占めており、滞留時間も12日となっている。

以上をまとめると、茨戸川の水循環を考える上で、1)本川背水に連動した流動、2)下水道からの流入、の2つがポイントとなる。

3. 湖内の水質的特徴と物質循環

茨戸川における水環境の構造を理解するためには、水質の時間的変化および空間的変化、そして、変化を引き起こす栄養塩の外部負荷や内部負荷の状況を明らかにしなければならない。そこで、富栄養化の指標であるクロロフィルaとリンの挙動について注目し整理した。

(1) 湖内のクロロフィルaと栄養塩について

図-4にクロロフィルaとP₀₄-P(リン酸態リン)の2001年における季節変化を示す。本水域周辺は積雪寒冷地であり、冬季に結氷する。そのため、1月から3月にかけて、クロロフィルaはほぼ0μg/Lに近くまで減少している。また、3月~4月にかけて、積雪寒冷地特有の融雪水の流入がおきる。これと同時に栄養塩の流入が生じ、水域内のP₀₄-P濃度は高くなる。この現象は特に下部湖盆で顕著であり、これは、3川や茨戸下水処理場といった外部からの流入が上部・中部湖盆と比較し多いことが背景として考えられる。また、4月以降は湖内の植物プランクトンの活動によりクロロフィルaが増加するが、P₀₄-Pの枯渇とともに減少に転ずる。このことは、この水域の内部生産がリンによって制限されていることを示すものである。

表-2に湖盆ごとの、全リン(T-P)に含まれる無機態リン(I-P)の割合を示す。上部・中部湖盆では0.1前後に対し、下部では1.7となっており、ほかの年についても同様の傾向が見られる。これは、上部・中部湖盆が下部湖盆に比べ閉鎖性が高いために、無機態リンの消費が効率的になされているためと推察される。

(2) 植物プランクトンの季節変動

図-5は、茨戸川で観測された植物プランクトンの種別個体数と、その際のクロロフィルaの濃度である。これから、春先は適応水温の低い珪藻類が優先し、6月に藍藻によるブルームが一時的に見られる。藍藻の卓越種は

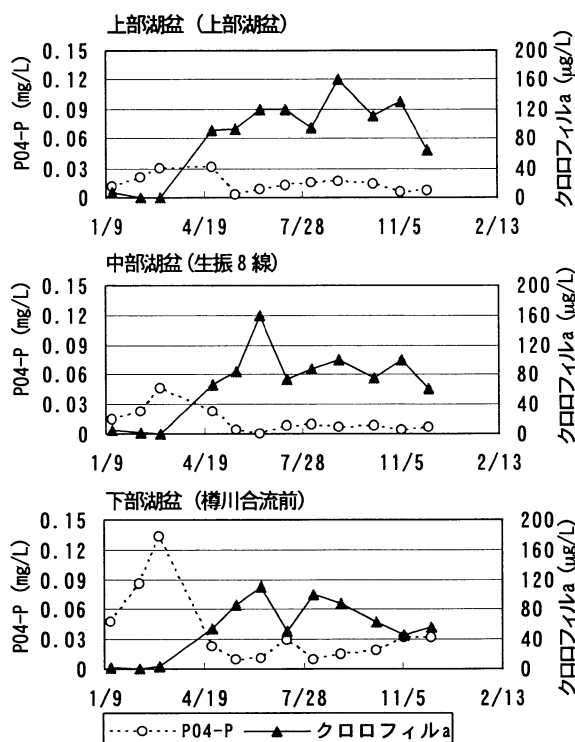


図-4 PO₄-Pとクロロフィルaの経時変化(2001年)

表-2 湖盆別の全リン(T-P)中の無機態リン(I-P)の割合

湖盆 (観測地点)	上部湖盆 (上部湖盆)	中部湖盆 (生振8線)	下部湖盆 (樽川合流前)
I-P/T-P	0.12	0.10	0.17

2001年4月~11月のデータより

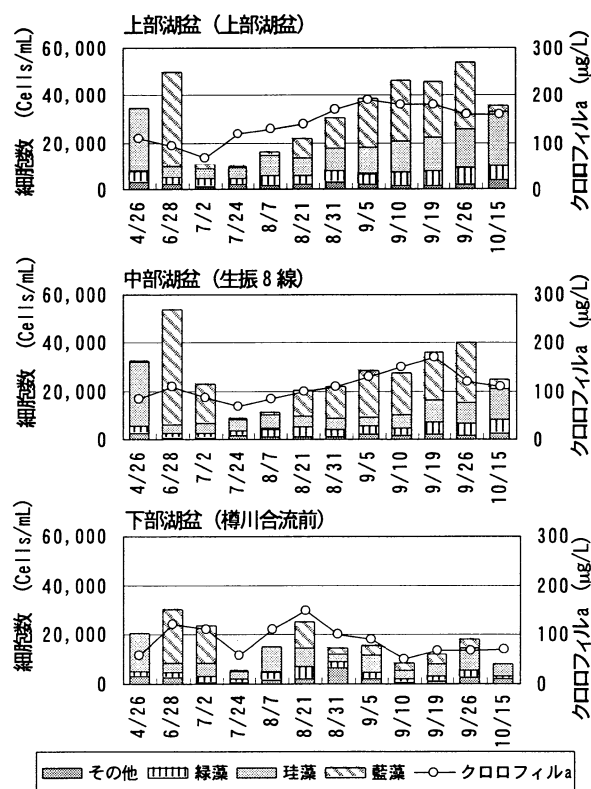


図-5 植物プランクトンの種別季節変化(2001年)

Phormidium属であり、全期間を通じてこの種の出現が目立っていた。7月に栄養塩の一時的な枯渇により、プランクトンが減少するが、その後、緩やかに藍藻類および珪藻類が増加しているのがわかる。一方、下部湖盆では上流域ほど藍藻類の卓越が見られず、珪藻も一定の量で推移している傾向が見られた。また、現存量自体も上部・中部湖盆に比べ全般的に低い。

(3) リンの負荷供給について

外部からのT-Pの流入負荷の内訳を図-6に、湖盆ごとの内訳を図-7に、またこれらの推定法を表-3に示す。巻上げ量については、以下の(1)式を用いて算出した。

$$Q_{re}^p = (1 - \gamma_{chl}) \cdot Q_{all}^{ss} \cdot C_s^p \quad (1)$$

ここで、 Q_{re}^p : T-Pの底泥からの巻上げ量 ($g/m^2/day$)、 Q_{all}^{ss} : 全沈降水量 ($g/m^2/day$)でセジメントトラップの測定結果より与える、 C_s^p : セストン中のT-Pの含有率で水中のSSに対するT-Pの割合、 γ_{chl} : 全沈降物中の自生性沈降物の比である。この中で γ_{chl} は福島ら⁶⁾の方法により推定できる。なお、手法の詳細や結果については加藤ら³⁾の報告を参照されたい。

茨戸川への外部からの流入は前述のように流入水の半分近くが下水道を経由した水で占められる。特に、合流式下水道では、雨天時のポンプ放流による負荷が全体の34%を占めていることに注目できる。これは、単位流出量あたりにすると0.55g/m³で、晴天時の0.21g/m³と比べると負荷としてのウェイトが大きいがわかる。また、図-7の湖盆別の発生量の内訳を見ると、どの湖盆においても巻上げによる負荷が大半を占めていることがわかる。このことは、水域内のリン負荷を減少させる上で、巻上げ負荷の抑制、すなわち底質の改善が重要であり、また長期的には合流式下水道からの負荷抑制が必要であることを示唆している。

(4) クロロフィルaの空間的分布

図-8に曳航式クロロフィル計を用いた水質の縦断観測結果を示す。図は左側が上流で、これからクロロフィルaは上部湖盆・中部湖盆で高く、下部湖盆に入って低下した後、中流域の花畔大橋付近で再び上昇する。このことは、各湖盆間にボトルネックとなる狭窄部が存在することと、大きな流入河川がないことによる上部湖盆や中部湖盆の閉鎖性が原因であると考えられる。

以上から、茨戸川の水質の特徴について整理する。

- 1) 積雪寒冷地特有の融雪出水により、栄養塩が供給され植物プランクトンの増殖が見られる。
- 2) 水域内の植物プランクトンの増殖は、リンの供給によって制限されている。
- 3) リンの供給は、水域内部では主に底泥からの巻上げによるものであり、外部からは、下水道由来の負荷が多くを占める。
- 4) 茨戸川内の各湖盆は、閉鎖性の違いにより異なった水

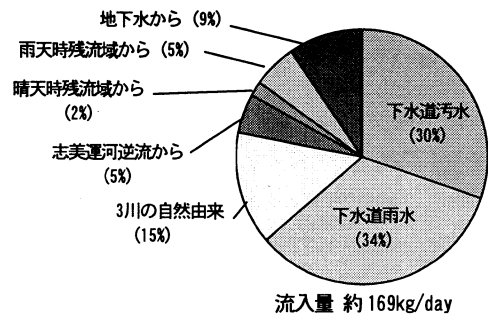


図-6 外部からのT-P流入負荷の内訳 (1997~2000年のデータに基づき作成)

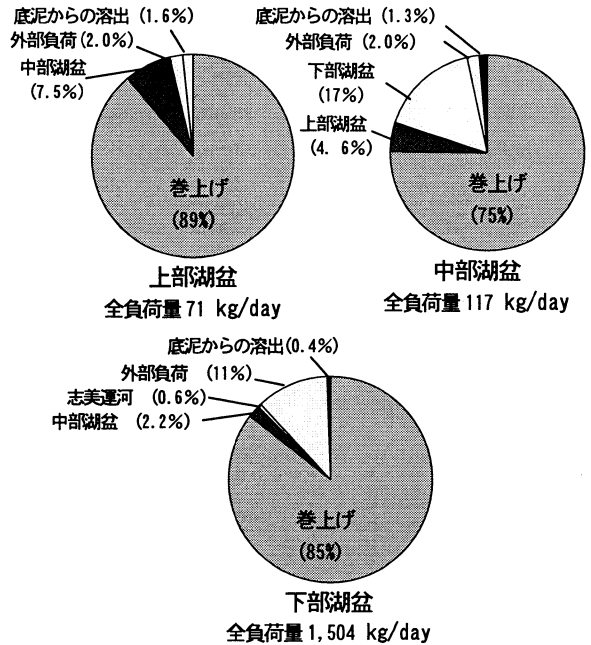


図-7 湖盆別T-P発生量内訳 (1996~2000年の4月から11月までのデータに基づき作成)

表-3 負荷収支の推定方法一覧

項目	推定法
巻上げ	セジメントトラップ法による推定 ⁶⁾
創成川・発寒川・伏古川	L-Q式より
志美運河逆流	L-Q式より
上部湖盆-中部湖盆交換量 中部湖盆-下部湖盆交換量	湖盆毎の水質観測データより
下水道汚水	札幌市下水道局維持管理年報より
下水道雨水	札幌市下水道局維持管理年報および雨天時観測結果
溶出	室内溶出試験に基づく推定 ⁶⁾

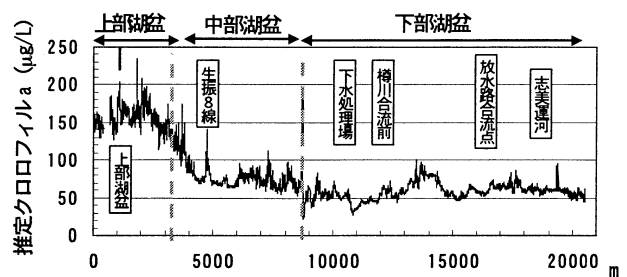


図-8 クロロフィルaの縦断分布 (2001年9月26日の観測結果)

質的特徴を示す。

4. 水質シミュレーション

以上のような、茨戸川の水循環・物資循環を踏まえ、不定流計算による流動シミュレーション、熱収支解析による水温シミュレーション、生態系モデルによる水質シミュレーションを行った。

(1) 流動シミュレーションについて

水温や水質を推定するうえで茨戸川の流動を把握する必要がある。しかし、茨戸川は前述のように、石狩川の背水区間であるため、順流と逆流を繰り返す水理構造をもっている。そこで旧川で低平地にあり、比較的水深の浅い茨戸川の流れを1次元不定流計算によって表わす。この際の基礎式である運動方程式(2)の連続式(3)をLeap Frog法を用いて差分化して計算を行う。なお、図-9に示すように、茨戸川延長20kmを25個に分割し、これに3川、石狩放水路、志美運河を横流入・流出として接続している。

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{Q}{gA^2} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{Q}{gA^2} q - i + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3)$$

ここで、 Q ；流量(m^3/s)、 A ；流水断面積(m^2)、 h ；水深(m)、 R ；径深(m)、 n ；マンニングの粗度係数、 q ；横流入量(m^3/s)、 i ；河床勾配、 t ；時間(sec)、 x ；距離(m)である。

(2) 水温シミュレーションについて

後述する生態系モデルでは、植物プランクトンの種別ごとの再現を試みており、水温はこの推定において重要な要素のひとつである。また、この水域が、潮位の影響や狭窄部の存在など複雑な水理構造を有しているため、時間単位の水温の推定を行う必要がある。流入する熱フラックスには、流出にに応じた熱フラックスと、大気・水面間の熱フラックスが考えられる。水面への熱フラックス ϕ は、下式(5)から求め、得られた結果をもとに、下式(4)より湖盆毎の水温を推算する。

$$\frac{d(TV)}{dt} = T_{in}Q_{in} - TQ_{out} + \phi \quad (4)$$

$$\phi = \frac{A_w}{\rho C_w} \left\{ (1-\alpha)S \downarrow + L \downarrow - \epsilon \sigma T^4 - H - LE \right\} \quad (5)$$

ここで、 T ；水温(K)、 Q ；流量(m^3/s)、 V ；容積(m^3)、 A_w ；水面積(m^2)、 ρ ；水の密度($1,000kg/m^3$)、 C_w ；水の比熱($4,180J/deg/kg$)、 $S \downarrow$ ；日射量(W/m^2)、 $L \downarrow$ ；下向き長波放射量(W/m^2)、 α ；アルベド(0.06)、 ϵ ；射出率(1.00)、 σ ；Stefan-Boltzmann 係数($5.67 \times 10^{-8}W/m^2/K^4$)を表す。この際、 Q 、 V は、不定流計算で得られた結果を与える。

この計算で得られた結果を、図-10に示す。上部・中部・下部湖盆ともに水温の季節変動がほぼ妥当に推定されており、計算からは、閉鎖性の強い上部・中部湖盆で下部湖盆より若干水温が高くなること示されている。

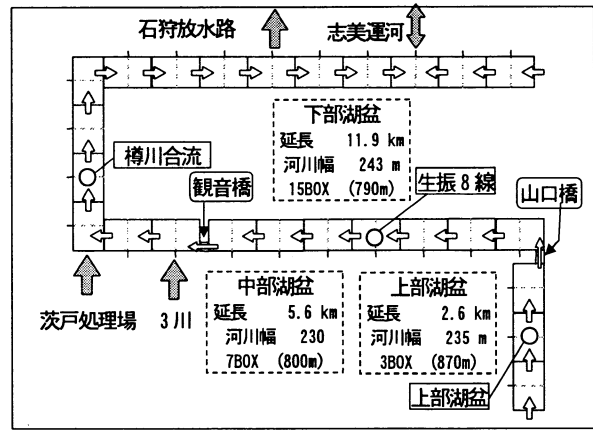


図-9 計算領域の模式図

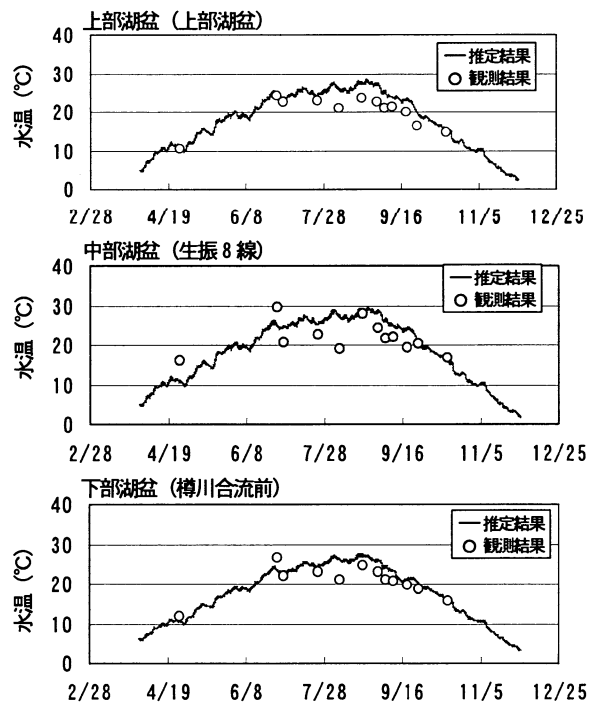


図-10 湖盆別水温推定結果(2001年)

(3) 水質シミュレーションについて

生態系モデルでクロロフィルaを再現するために、珪藻、緑藻、藍藻に分類し植物プランクトンの再現を行う。また、クロロフィルaに関連してDO, SS, 有機物(BOD, COD), 栄養塩(I-N, O-N, I-P, O-P)についても計算対象としている。なお、沈降、巻上げによる底泥との交換量を把握するためにセジメントトップを用いた沈降物量調査を行った³⁾。ここで計測されたクロロフィルaを指標として、底質から巻上げられた物質と自生性物質の分離⁵⁾を行い、それをモデルで考慮する。

$$\frac{d(CV)}{dt} = C_{in}Q_{in} - CQ_{out} + V\psi \quad (6)$$

ここで、 C ；各種水質濃度(mg/L)、 Q ；流量(m^3/s)、 V ；容積(m^3)、 ψ ；生成、消滅項($mg/L/s$)である。なお、下式(6)は、クロロフィルaの生成、消滅項を表す。

$$\psi(C_{PP}) = \sum_{i=1,3} \{ (G_{Pi} - D_{Pi}) P_i - V_{Pi} P_i \} \quad (7)$$

ここで、 C_{PP} ；クロロフィルa濃度($\mu g/L$)、 i ；植生(1；珪藻, 2；緑藻, 3；藍藻)、 G_P ；植物プランクトンの増

殖率 (1/s), D_p ; 植物プランクトンの死滅率 (1/s), V_p ; 植物プランクトンの沈降率 (1/s) である。また Q および V は、不定流計算の結果を与え、各種モデルパラメータは既往の調査試験結果に基づき与えた。

以上、クロロフィル a の再現結果を以下にまとめる。

a) クロロフィル a 推定結果と観測結果の比較(図-11 参照)

図-4 で示したように本水域では融雪出水に伴う負荷流入による増殖→リンの枯渇による減少→夏季の再増殖といった水質形成プロセスを有している。図-11 において、推定結果は融雪出水に伴い 4 月～5 月に増加し、いったん減少した後、7 月以降再び増殖する。これは、この水域における水質変化の傾向と一致しており本モデルが積雪寒冷地の水質形成プロセスを傾向的に妥当に再現できていると考えられる。

b) クロロフィル a 推定結果の空間分布(図-12 参照)

本水域は、狭窄部の存在により、湖盆ごとに停滞性が異なっている。このため、図-8 で示したようにクロロフィル a の空間分布は、上流域で高く下流域では低くなる傾向を持つ。図-12 示した推定結果でも 上部・中部湖盆で高く、下部湖盆で低いといった傾向が見られ、空間的な傾向についても概ね再現できたと考える。

c) 種別に由来するクロロフィル a の再現結果(図-13 参照)

図では、4～5 月にかけて珪藻が卓越し夏季以降は藍藻・緑藻が増加する。これは図-4 の個体数の変化においても同じ傾向が見られる。積雪寒冷地では、融雪後、低水温に適応した珪藻類が卓越、その後、水温の上昇とともにその他の種が出現するといったプロセスが毎年繰り返されている。本モデルでは、種別の推定を行うことにより、このプロセスを再現できたと考える。

5. おわりに

本研究で得られた結果を以下に整理する。

- 1) 低平地で都市集水域とする旧川の水循環を考えるためには、下水道からの流入、本川からの背水影響が重要であり、それらを考慮した。
- 2) 水循環とともに富栄養化の背景にある水質成分の収支を明らかにした。特に、リンの動向から言えば、合流式下水道からの流入、底質からの巻き上げに注目できる。
- 3) 狭窄部や、本川からの背水影響といった複雑な水理条件、融雪や下水道などの負荷形態の存在する水域について、水質シミュレーションを行ない、空間的にも、時間的にもある程度、妥当な推定を行った。

今後は、巻き上げ等の水質コントロール要因の推定精度向上を目指し、モデルを用いた感度分析を行うことにより、茨戸川の水環境改善の一助としたい。

謝辞: 本研究の一部は、北海道開発局受託研究費の補助を受けて実施された。また札幌市下水道局、石狩市生活環境部、石狩川開発建設部からは、資料を提供していただいた。ここに記して謝意を表す。

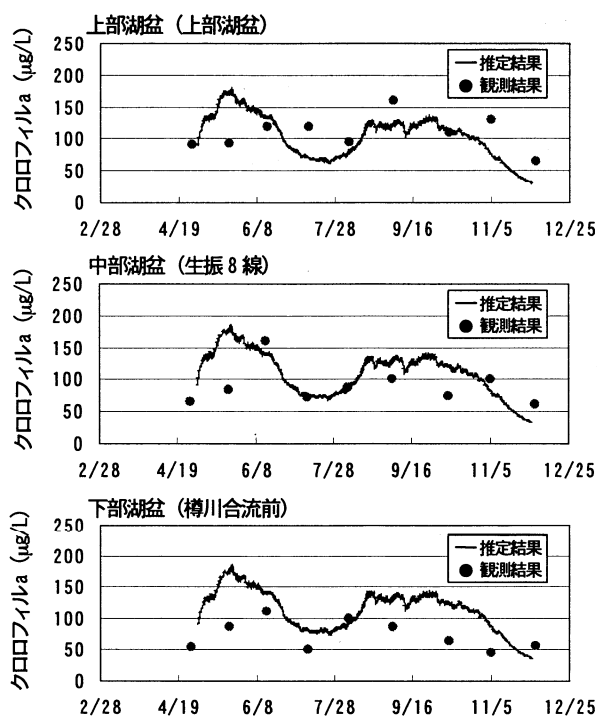


図-11 各湖盆のクロロフィル a の推定結果(2001 年)

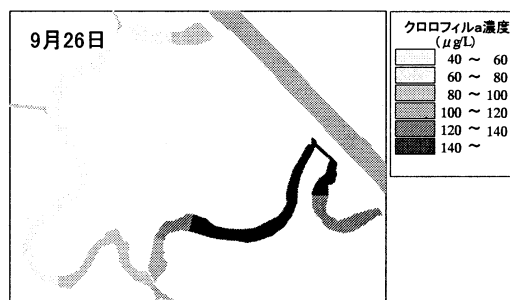


図-12 クロロフィル a の空間分布の推定結果(2001 年)

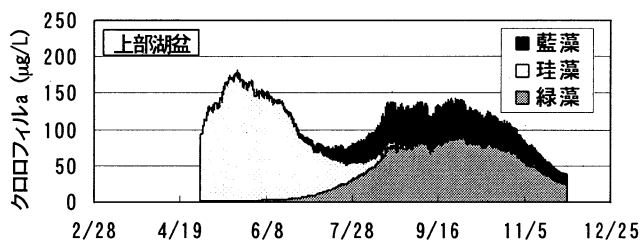


図-13 植物プランクトン種別に由来するクロロフィル a の推定(2001 年)

参考文献

- 1) 橋治国ら; 茨戸湖の富栄養化と栄養塩負荷, 土木学会北海道支部論文報告集, 50, pp.680-683, 1994.
- 2) 橋治国ら; 茨戸湖上部湖盆における栄養塩の循環-懸濁態に着目して-, 土木学会北海道支部論文報告集, 44, pp.373-378, 1988.
- 3) 加藤晃司ら; 都市集水域にある閉鎖性水域の富栄養化について, 水工学論文集, 47, pp.1201-1206, 2003.
- 4) 加藤晃司ら; 富栄養化傾向にある旧川水質の空間分布, 河川技術論文集, 8, pp.477-482, 2002.
- 5) 森北佳昭ら; 貯水池水質の予測・評価モデルに関する研究, 土木研究所報告, 182-1, pp.1-109, 1991
- 6) 福島武彦ら; 浅い湖における沈殿量の測定方法とその起源, 国立公害研究所報告, 51, pp.73-87, 1984.

(2003. 9. 30 受付)