

茨戸川における富栄養化の解析

Analysis of Eutrophication in Barato River

株式会社 福田水文センター ○正員 濱原 能成 (Yoshinari Hamahara)
 独立行政法人 北海道開発土木研究所 正員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
 株式会社 シン技術コンサル 正員 加藤 晃司 (Kouji Kato)

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。

本研究の対象である茨戸川は昭和初期の石狩川のショートカットにより形成された三日月湖である。茨戸川は閉鎖的な水域であることに加え、周辺からの汚濁物質負荷を受け入れたため、アオコの発生など水質悪化が問題となった。国や地方自治体による下水システムの改善や、底泥の浚渫により、以前に比べ水環境は改善されてきてはいるが、富栄養化などの問題が十分に解決されたとはいえない。

橋ら¹⁾はこの比較的水深の浅い茨戸川の富栄養化について巻上げや懸濁態リンの影響について指摘している。また、加藤ら³⁾は、衛星画像や現地調査を基に、水域内の空間的な水質構造について検討した。これによると、狭窄部により上部・中部・下部湖盆の3つの水域に分類される茨戸川では、停滞性の違いにより、各湖盆で異なった水質の傾向を持つことが示された。

本研究では、これら、茨戸川の水質形成要因を評価するために、以下の解析を行った。

- 1) 水収支、栄養塩負荷量収支を推定し、停滞性の違いや、負荷源についてなど、この水域の特徴を整理した。
- 2) 茨戸川は、潮位の影響を受け、順流と逆流を日周期で繰り返す複雑な水理構造を有している。そこで、1次元の不定流計算により、水域内の流動を推定した。
- 3) 上記の流動解析結果を基に、茨戸川の複雑な流動を考慮し、時間単位の水温シミュレーションを行った。
- 4) 以上の水収支・負荷収支・流動解析結果・水温推定結果を基に、水質シミュレーションを行った。また、この水域が積雪寒冷地にあり、出現植物プランクトン種が季節により変化することから、植物プランクトンの種別の増殖を考慮した生態系モデル⁴⁾を使用した。

以上より、本研究は、富栄養化の因果関係を、観測やモデルによって解明・評価することを目指す。

2. 茨戸川の水収支と流動について

2.1 茨戸川の流動の特徴について

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、それぞれが狭い水路で接続され

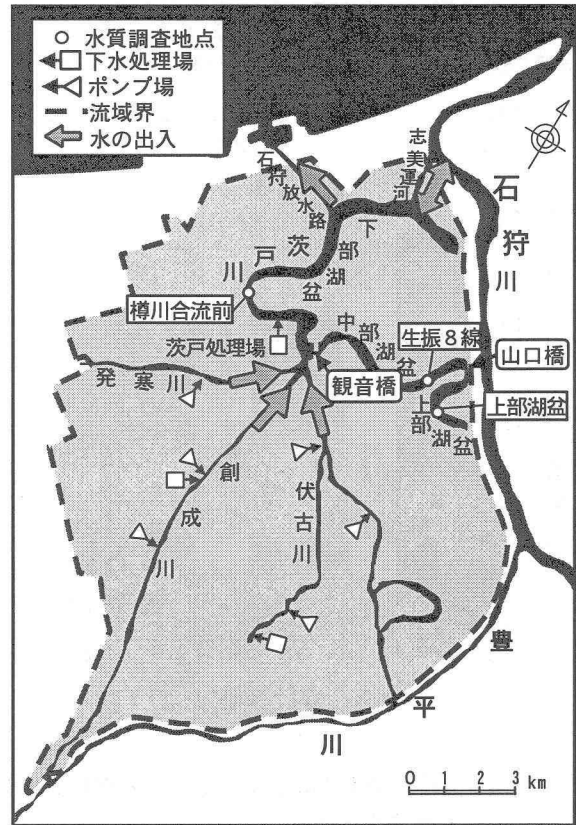


図-1 茨戸川位置図および水の出入

ている。主な流入としては、1) 3川からの流入(創成川・伏古川・発寒川)、2) 志美運河からの逆流、3) 茨戸処理場からの放流、4) 下水未処理区から雨水の流入、5) 地下水の流入がある。流出は平水時には志美運河を通して石狩川へ、洪水時には志美運河を閉じ、石狩放水路より放流する。また、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。このことは、水域内の流動に大きな影響を与える。特に湖盆間の接続部である観音橋や山口橋における流動は、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。

2.2 水収支について

湖盆ごとの流入量推定結果を図-2に、推定方法の内訳を表-1に示す。この中で、湖盆間の交換量は実測データを基に、茨戸川の水位変動より推定した³⁾。また、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。図-2より、上部・中部湖盆で

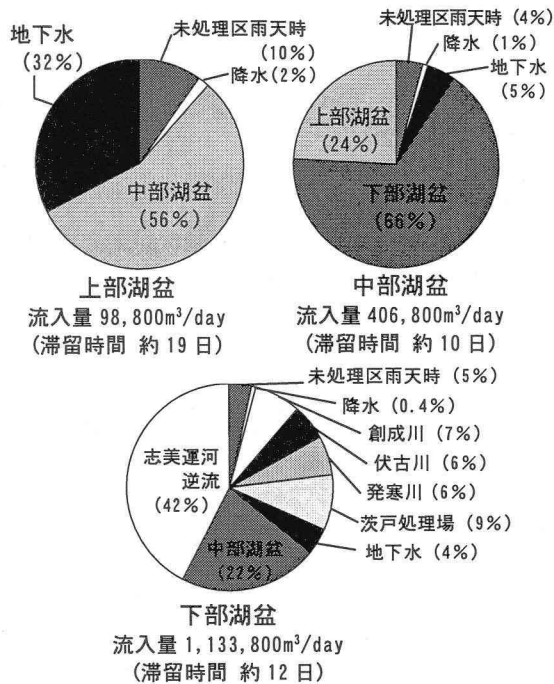


図-2 湖盆別の水収支算出結果
(1997~2001年のデータに基づき作成)

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
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 ⁵⁾
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・中部湖盆の平均値を流路長あたりに換算し推定

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もっている。また、下流の石狩川からの逆流も全体の42%を占めており、滞留時間も12日となっている。つまり、このような湖盆ごとの停滞性の相違が、水域内の水質、特にクロロフィルaの空間分布に大きな影響を与えらる。

3. 栄養塩の負荷供給について

次に、水域内における栄養塩の負荷について整理を行った。特に、この水域はリン制限であり、その挙動が水質形成に大きな影響を及ぼす。このことから、湖盆別にリン負荷供給について整理したものを図-3に、推定法の内訳を表-2に示す。

この中で沈降、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。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⁶⁾を行い、巻上げ量を推定した。これら、詳細な手法や結果については加藤ら⁵⁾の報告を参照されたい。

図-3の湖盆別の発生量の内訳を見ると、どの湖盆に

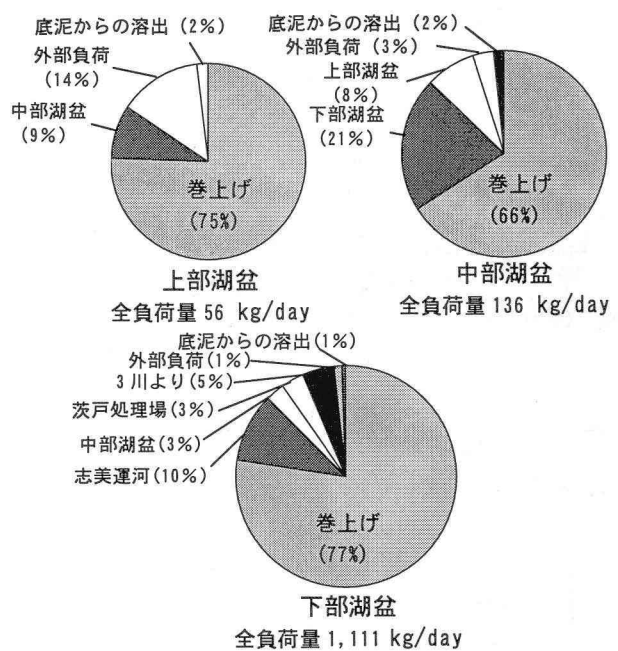


図-3 湖盆別全リン(T-P)負荷供給量内訳
(1997~2001年の4月から11月までのデータに基づき作成)

表-2 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
茨戸処理場放流	札幌市下水道局維持管理年報より
溶出	室内溶出試験に基づく推定 ⁵⁾

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。特に上部・中部湖盆では、外部からの負荷も少なく、この巻上げ量の推定が、この水域の水質形成要因を把握する上で重要であることがわかる。またこのことは、巻上げによる負荷を、正確に把握することが、水質シミュレーションにおける再現性の精度向上において重要であることを示唆する。

4. 水質シミュレーション

以上、茨戸川の水循環・物質循環を踏まえ、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。なお、解析の対象期間は2001年4月1日~11月30日とした。

4.1 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(1)、連続式(2)をLeap Frog法を用いて差分化して計算を行う。なお、図-4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・

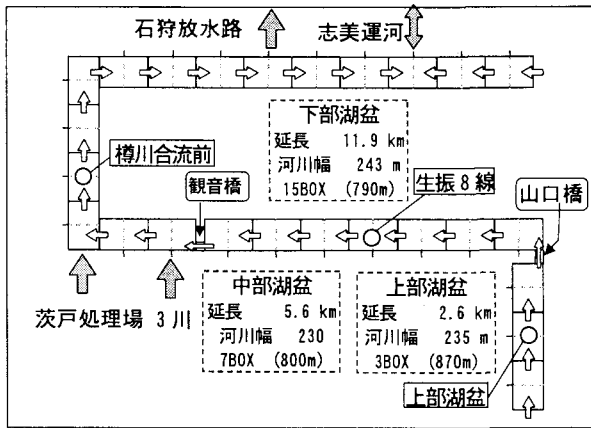


図-4 計算領域の模式図

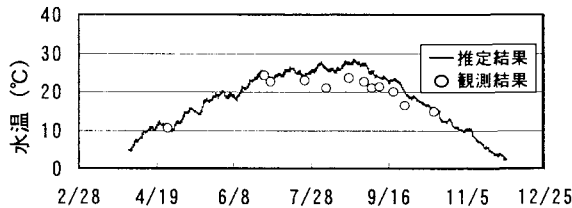


図-5 上部湖盆における水温推定結果(2001)

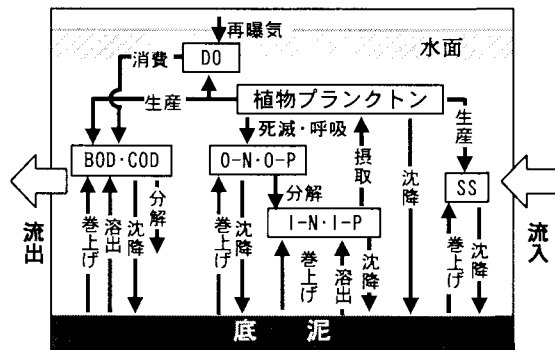


図-6 生態系モデルの概念図

流出として接続している。

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

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2)$$

ここで、 Q ；流量 (m^3/s)、 A ；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。

4.2 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(4)から求め、得られた結果をもとに、下式(3)より湖盆毎の水温を推算する。

$$\frac{d(TV)}{dt} = T_{in}Q_{in} - TQ_{out} + \phi \quad (3)$$

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

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

以上より、上部湖盆の水温を推算した結果を図-5に示す。図より、停滞性の高い上部湖盆においても、水温が妥当に再現されていることがわかる。

4.3 水質シミュレーションについて

茨戸川は積雪寒冷地に位置するため、春季の融雪出水に伴う植物プランクトンの増殖と夏季におけるそれとは、植物プランクトンの種構成が異なる。そこで、本研究で使用した生態系モデルでは、珪藻、緑藻、藍藻に分類しクロロフィル a 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おり、この生態系モデルの概略図を図-6に示す。なお、沈降、巻き上げによる底泥との交換量については、負荷量と同様の手法をもちいて推定し、モデル内で考慮している。

$$\frac{d(CV)}{dt} = C_{in}Q_{in} - CQ_{out} + V\psi \quad (5)$$

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 ($\text{mg}/\text{L}/\text{s}$)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。

$$\psi(C_{PP}) = \sum_{i=1,3} \{ (G_{Pi} - D_{Pi})P_i - v_{Pi}P_i \} \quad (6)$$

ここで、 C_{PP} ；クロロフィル a 濃度 ($\mu\text{g}/\text{L}$)、 i ；植生 (1；珪藻、2；緑藻、3；藍藻)、 G_{Pi} ；植物プランクトンの増殖率 ($1/\text{s}$)、 D_{Pi} ；植物プランクトンの死滅率 ($1/\text{s}$)、 v_{Pi} ；植物プランクトンの沈降率 ($1/\text{s}$)であり、また Q 、 V は、不定流計算の結果を与えた。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。

5. シミュレーション結果および考察

クロロフィル a の再現結果を以下にまとめる。

5.1 推定結果と観測結果の比較(図-7 参照)

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-7において、クロロフィル a の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月以降再び再増殖する。これは、同図におけるクロロフィル a の観測結果とも傾向が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妥当に再現できていると考えられる。

5.2 推定結果の空間分布について(図-8 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。加藤ら³⁾は、このことにより水域内のクロロフィル a の分布は上流域で高く下流域では低くなる傾向を持つことを示した。図-8で示した推定結

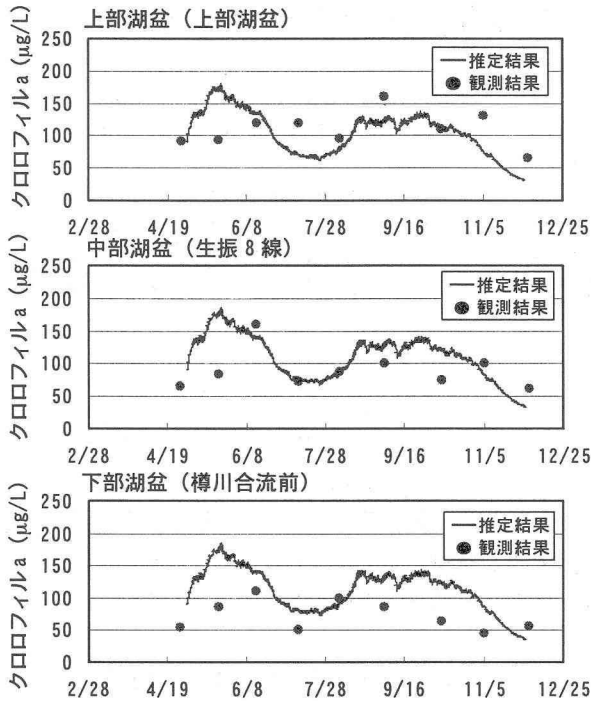


図-7 各湖盆のクロロフィル a の推定結果(2001)

果においても上部・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。また、季節変動に注目し図-8を見ると、下部湖盆に比べ上部・中部湖盆でクロロフィル a の季節変動が大きい。これは、下部湖盆に比べ、上部、中部湖盆では停滞性が高く、外部流入による希釈効果が低いと考えられる。

5.3 種別に由来するクロロフィル a の再現結果(図-8)

図-9の推定結果では、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-10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、低水温に適應した珪藻類が卓越、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。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に整理する。

- 1) 水収支・物質収支を定量化し、停滞性の違いや、負荷源についてなど、この水域の特徴を明らかにした。
- 2) 狭窄部や本川からの背水影響といった複雑な水理条件、融雪出水に由来する植物プランクトンの増殖といった積雪寒冷地の生態系など、この水域の特徴を踏まえたうえでの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、妥当な推定ができた。

謝辞:本研究の一部は、北海道開発局受託研究費の補助をうけて実施された。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。

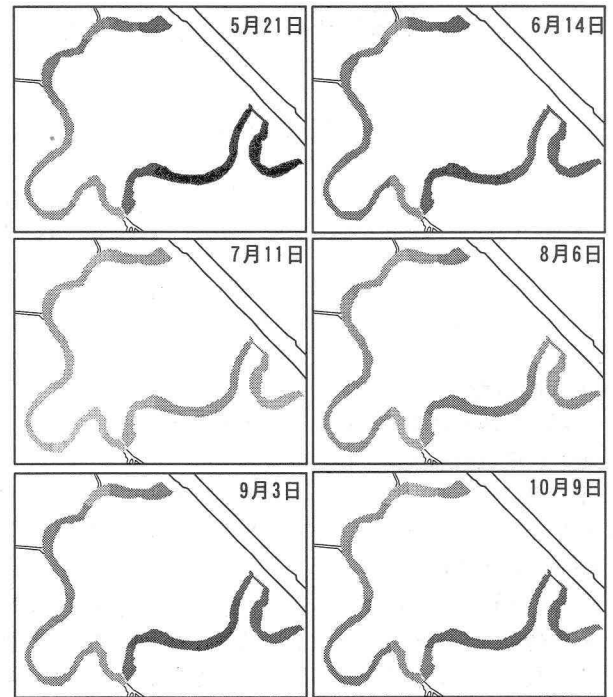


図-8 クロロフィル a の空間分布の推定結果(2001)

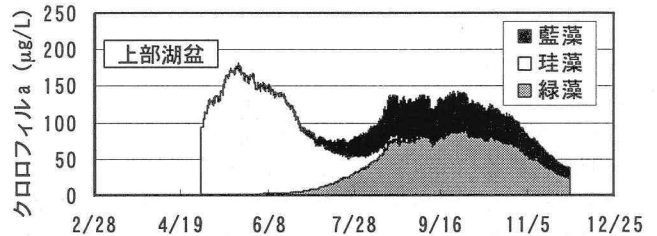


図-9 植物プランクトン種別由来するクロロフィル a の推定(2001)

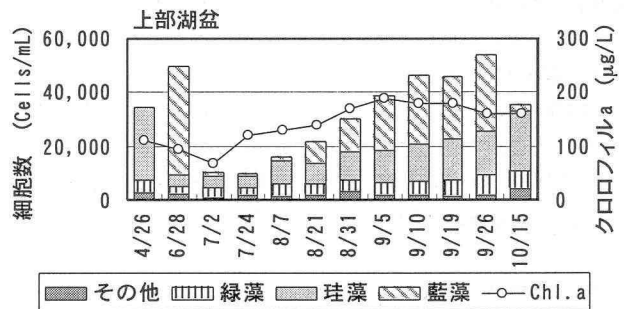


図-10 植物プランクトンの種別季節変化(2001)

参考文献

- 1) 橘治国ら；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) 橘治国ら；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；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。
- 4) 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
- 5) 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。
- 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。