

都市河川の水質改善に及ぼす負荷量削減の効果

The effect of wastewater BOD removal on water quality in the receiving river

長岡技術科学大学工学部	中 村 由 行	Yoshiyuki NAKAMURA
長岡技術科学大学工学部	早 川 典 生	Norio HAYAKAWA
長岡技術科学大学工学部	伊 藤 剛	Takeshi ITO

A simulation model is presented to describe water quality in a river flowing through an urban area. The model is composed of a submodel calculating the non-uniform flow and a diffusion submodel. The diffusion submodel can describe a variation of particulate and dissolved BOD, SS and dissolved oxygen. The application of this model to the Kaki River at Nagaoka showed a successful representation of water quality in the river at the present state. Furthermore, the effect of wastewater BOD removal in the future was examined. The results showed a remarkable improvement of water quality by arranging the sewage treatment system.

Keywords: urban stream, water quality, BOD, simulation, wastewater loading

1. 序 論

市街地やその周辺を流れる中小河川は、比較的小さな流域面積に対して高い汚濁負荷を受けるため、流量や水質の時間変動は大きく、水害や水質の悪化に悩まされてきた。このうち、水害の対策に比べて水質を改善しようとする試みは遅れている。近年、ウォーターフロントの開発や、水辺の空間に親水機能をもたせようとする機運が高まっているが、そのためには、河川水質を良好に保つことが前提となろう。

水質改善策として全国の都市河川において試みられている方法には、河道外の対策として下水道整備に代表される汚濁負荷の削減、及び河道内の対策として水質のよい水の導水・希釈等がある¹⁾²⁾。最も根本的な対策は汚濁負荷を河道に流出させないことであるが、そのためには、下水道の整備が効果的であるとされている。では、下水道の整備によって、実際にどの程度水質の改善が期待できるのであろうか。その問いに答え得る手法は未だ確立されていないように思われる。

水質の予測においては、河道内の水質の分布を記述できる水質シミュレーションモデルによる予測が有効である。さらに、下水道を整備する場合において、一般に流量は変化することに注意する必要がある。従って、将来の水質予測を可能にするためには、水質モデルにあわせて、力学モデルが必要である。古典的な Streeter-Phelps モデル³⁾をはじめとして、多くの水質モデルが提案されているが⁴⁾⁵⁾、以上の点は強調されていない。この事を考慮して、本研究では一次元拡散モデルに力学モデル（不等流計算モデル）を組み合わせた水質モデルを開発した。不等流計算を組み合わせた例には多摩川の水質モデル⁶⁾があるが、一般に都市河川への適用例は少なく、モデルの汎用性についての議論はほとんどなされていないのが現状である⁷⁾。

長岡市内を流れる柿川流域においても第四期下水道整備計画が進行中で、柿川の水質は改善されるものと期待されている。本研究は、長岡市柿川を例に、下水道整備が水質の改善に及ぼす効果を予測する。そのために、まず、長岡市により公表されている統計資料を原単位法によって解析することにより、柿川流域内における現況及び将来の発生負荷量及び排水量を推定する。更に、以上の推定値を著者らの開発した水質予測モデルに適用して、将来水質の予測計算を行い、下水道整備のもたらす効果を定量的に検討する。

2. 柿川の水質・流量の現況

柿川流域の概要を図-1に示す。柿川は長岡市の東部山地を水源とし、Stn.1 付近で流量の大部分を新柿

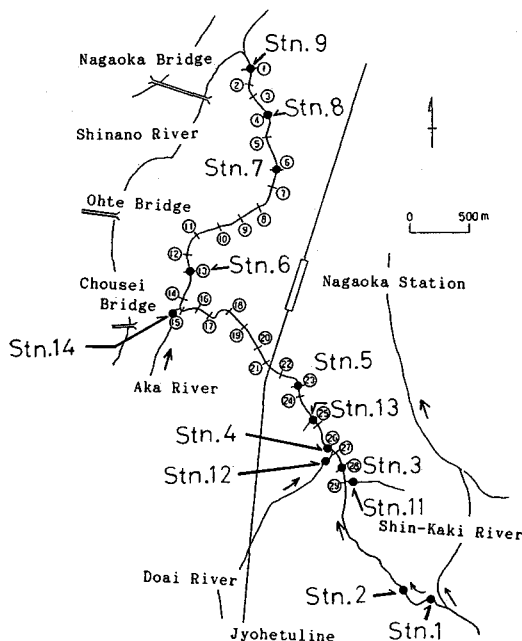


図1 水質汚濁調査測点（数字は61年度に実施した断面
測量における測点，他は定点観測点）

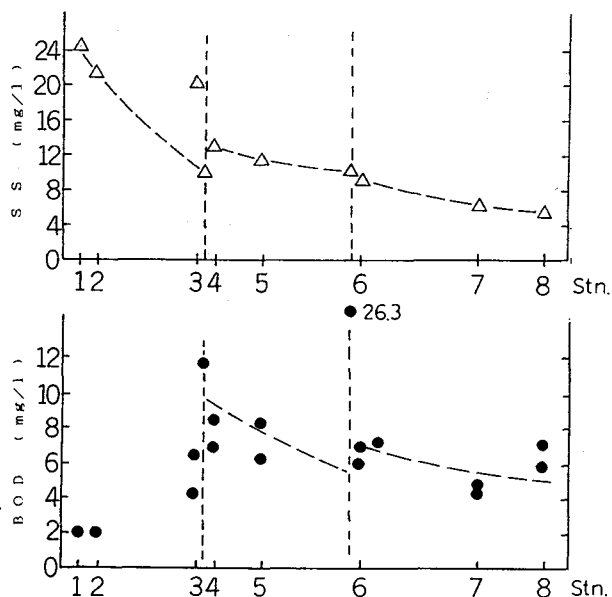


図2 1984年の調査におけるSS及びBODの分布

川に分流した後、市街地の中心部を流れて信濃川に合流する小河川である。流域面積は約14.3 km²、流路延長は（新柿川との分流点から）約6.5 kmである。流量及び汚濁負荷の観点からは、土合川及び赤川の二つの支流の影響を無視できない。特に、土合川流域が、柿川の主要な汚濁負荷源となっている。Stn. 5より北部の市街地では合流式下水道が整備されているが、土合川流域では下水道の整備がなされていない為である。又、Stn. 6（丹波橋）より下流には、支流や下水道管等による流入はない。

著者らは、柿川での水質汚濁機構を把握するために、昭和59年度以降、主として水質の悪化する低水時を対象とした水質環境調査を行ってきた。その結果の一部は既に発表済みであるので⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾、ここではモデルの作成に直接関係する結果の一例のみを示す。図-2は59年度の調査におけるBOD及びSSの測定値を流下距離に対してプロットしたものである。BOD及びSSの分布を見て気が付くことは、両者が似通った減衰傾向を示している点である。この傾向は他年度の調査においても同様にみられる。従って、流下方向における水質の変化には、粒子態有機物の挙動が大きく関わっているものと推定できる。つまり、粒子態物質の沈降あるいは微生物分解によって、この川の自浄作用が支配されているものと考えられる。

3. 原単位法による汚濁発生負荷量の推定

柿川の水質予測に関しては、建設省北陸地方建設局信濃川工事事務局が新日本気象海洋（株）に委託した“柿川浄化汚濁解析業務委託報告書”¹¹⁾がある。本章は、当報告書において用いられている原単位法の考え方に大筋に沿ったものであるが、データはできる限り最新のものをを用い、原単位の値や浄化残率の考え方について見直しを行った。

3-1. ブロック分割と基本フレーム

柿川流域における用排水系統及び下水道整備の有無を考え、流域を図-3に示す4つのブロックに分割し、S-2およびS-3ブロックについては更に二つに分割した。但し、灌がい期については、S-3の流域は、柿川流域に含まれないものとした。これらの内、S-1及びS-2-1は既に下水道整備が完了している流域であり、S-2-2は、その大部分が下水道整備計画区域に含まれ、将来、負荷量の大幅な削減が期待さ

れている流域である。S-3 及び S-4 の流域は人口密度も少なく、下水道の計画は現在のところない。

上述の各流域において、人口、工業出荷額、家畜頭数および耕地面積の四つを基本フレームとして長岡市の統計資料から最新の値を調べ、汚濁原単位を乗ずることにより、BOD 発生負荷量及び排水量を推定した。本研究において使用する原単位は、
"長岡市公共下水道基本計画書"¹²⁾

および"信濃川流域別下水道整備総合指針"¹³⁾によるものを用いた。但し、BOD の自然汚濁負荷量については、"柿川浄化汚濁解析業務委託報告書"¹¹⁾によるものを用いた。

3-2. 現状の汚濁発生負荷量及び排水量

現状(昭和60年)のBOD発生負荷量をブロック別にまとめたものが、表1及び2である。表2に示されている様に、発生負荷量のうち生活排水が47.5%，工場排水38.1%，家畜排水4.8%，自然排水9.5%という割合になっている。また、各ブロック別ではs-2-2が81.5%であり、主要負荷源であることが示された。

3-3. 将来の汚濁発生負荷量及び排水量

将来の汚濁発生負荷量及び排水量を、現状の場合の計算と同様の方法で推定した。ただし、下水道計画の完成年度は現在のところ不明であるので、ここでは昭和70年度に完成するものと仮定した。原単位の変化については、"信濃川流域別下水道整備総合指針"¹³⁾を参考にした。

昭和61年度から昭和70年度までの推定値のうち、70年度の結果を表3と表4に示した。発生負荷量の合計は、昭和70年度には2372.0 kg/dayと60年度の約1/2に減少している。特に、ブロックs-2-2の割合の減少が大きく、45.4%に減少している。逆に、s-3の割合は昭和70年度には35.8%になり、将来この流域での負荷が無視できない。

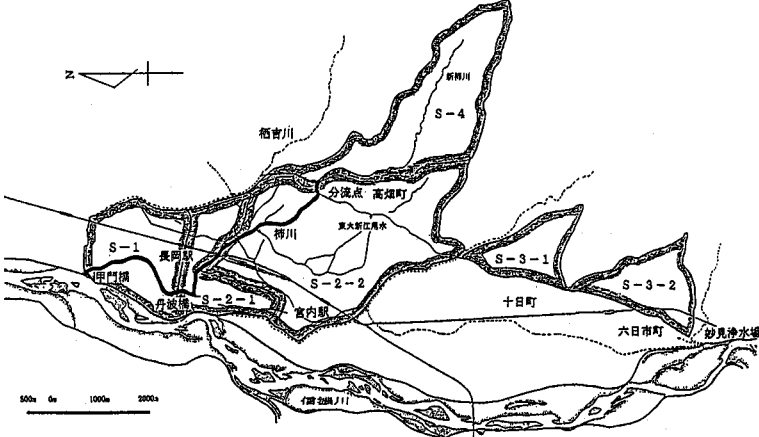


図3 柿川流域ブロック断面図

表1 原単位法により推定した汚濁排水量(昭和60年)

排水源	S-1	S-2-1	S-2-2	S-3	S-4	合計
生活排水	0.0	0.0	10763.7	1289.1	749.3	12802.1
工場排水	0.0	0.0	7613.4	971.4	59.7	8644.5
家畜排水	0.0	0.0	25.6	1.0	0.0	26.6
合計	0.0	0.0	18402.7	2261.5	809.0	21473.2

表2 原単位法により推定したBOD発生負荷量(昭和60年)

排水源	S-1	S-2-1	S-2-2	S-3	S-4	合計
生活排水	0.0	0.0	1590.3	243.3	141.4	1975.0
工場排水	0.0	0.0	1405.3	179.3	1.4	1586.0
家畜排水	0.0	0.0	190.9	10.6	0.0	201.5
自然排水	0.0	0.0	199.6	80.3	113.3	393.2
合計	0.0	0.0	3386.1	513.5	256.1	4155.7

表3 将来の汚濁排水量推定値(昭和70年)

排水源	S-1	S-2-1	S-2-2	S-3	S-4	合計
生活排水	0.0	0.0	3094.4	1699.7	1865.1	6659.2
工場排水	0.0	0.0	0.0	2519.8	80.3	2600.1
家畜排水	0.0	0.0	60.7	0.5	0.0	61.2
合計	0.0	0.0	3155.1	4220.0	1945.4	9320.5

表4 将来のBOD発生負荷量推定値(昭和70年)

排水源	S-1	S-2-1	S-2-2	S-3	S-4	合計
生活排水	0.0	0.0	444.7	299.8	329.0	1073.5
工場排水	0.0	0.0	0.0	465.0	1.9	466.9
家畜排水	0.0	0.0	434.2	4.2	0.0	438.4
自然排水	0.0	0.0	199.6	80.3	113.3	393.2
合計	0.0	0.0	1078.5	849.3	444.2	2372.0

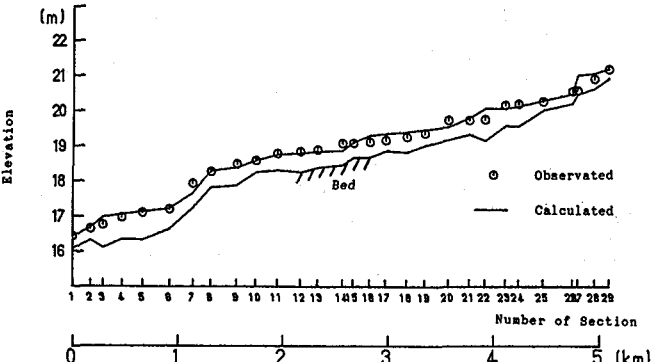


図4 不等流計算の結果

4. 水質汚濁予測モデル (BOD-DO-SSモデル)

4-1. モデルの概要

モデルは、不等流計算モデル及び水質拡散計算モデルからなる。まず、不等流計算モデルにおいて、流軸方向の運動方程式を横断面内で積分することにより、基礎式が次のように書ける。

$$-i + \frac{dh}{dx} + \frac{1}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 + \frac{n^2}{R^{4/3}} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 = 0 \quad (1)$$

ここで、 i は河床勾配、 g は重力加速度、 Q は流量、 n はマンニングの粗度係数、 R は径深である。上式から、標準逐次計算法により、水面形を求めた。但し、河床勾配や径深は、図-1に示した各地点での実地測量によって求めた値を用い、測量時に測定した水深が本モデルによって再現されることを確かめた(図-4)。

次に、2章の結果より粒子態有機物の挙動が重要であると示唆されたので、水質シミュレーションモデルにおいては、汚濁指標であるBODを粒子態BOD及び溶存態BODに分けた。モデルにおける変数は、図-5に示したように粒子態BOD (P-BOD)、溶存態BOD (D-BOD)、SS (S) 及び溶存酸素濃度DO (D) の四つを考えた。

素過程として、まず、それぞれの形態のBODについて酸素消費を伴って直接無機化されるプロセスを考えた。また、粒子態BODから溶存態BODへ、酸素の消費を伴わない低分子化のプロセスを考えた。さらに、粒子態BODについては、底質に沈降するプロセスを考えた。

底質からは、BODの溶出、付着性物質のはがれ及び物理的な巻き上げなどの可能性があり、また底質への移行には吸着などのプロセスも考えられる。しかしながら、低水時を中心とした現場観測の範囲内では正味としては底質から水中に移行する量に比較して水中から底質に移行する量の方が多いこと、摩擦速度から推定したところ限界掃流力以下の範囲にあることなどから、底質との相互作用としては沈降のみを考えた。

SSについては、その一部が CH_2O の化学組成を持つ易分解性有機物であると仮定し、酸素分子と以下の反応を行うと考えた。



また、SSのうち易分解性有機物以外の成分は、分解作用を受けないものと考えた。

溶存酸素に関するプロセスについては、BODの無機化に伴う酸素消費と共に、水面を通してのばっきによる酸素の移動を考えた。富栄養化した中小河川では、光合成及び呼吸によるDOの日周変動がしばしば観測される。しかしながら、柿川における植物プランクトン及び付着光合成生物の現存量は小さく、DOの日周変動も少ないので、光合成及び呼吸のプロセスは考えていない。

以上述べた素過程を図-5に示す。これらより、粒子態及び溶存態BOD、SS及び溶存酸素濃度DOについての保存式は次のようになる。

$$u \frac{dL_P}{dx} = \frac{1}{A} \frac{d}{dx} \left(A D_x \frac{dL_P}{dx} \right) - \frac{\gamma w_0 L_P}{h} - (k_1 + k_2) L_P \quad (3)$$

$$u \frac{dL_D}{dx} = \frac{1}{A} \frac{d}{dx} \left(A D_x \frac{dL_D}{dx} \right) - k_3 L_D + k_2 L_P \quad (4)$$

$$u \frac{dD}{dx} = \frac{1}{A} \frac{d}{dx} \left(A D_x \frac{dD}{dx} \right) - k_1 L_P - k_3 L_D + k_r (O_s - D) \quad (5)$$

$$u \frac{dS}{dx} = \frac{1}{A} \frac{d}{dx} \left(A D_x \frac{dS}{dx} \right) - \frac{\gamma w_0 S}{h} - (k_1 + k_2) \beta L_P \quad (6)$$

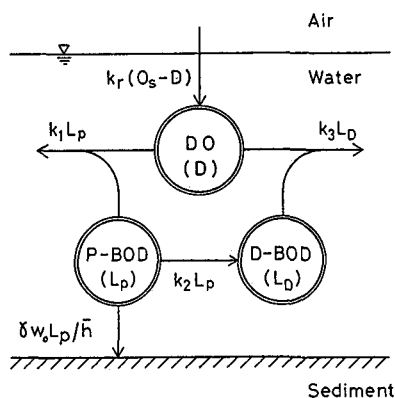


図5 モデルの変数と素過程

ここで、 L_p 及び L_D はそれぞれ粒子態及び溶存態BOD濃度、 S はSS濃度、 D は溶存酸素濃度、 u は流速、 D_x は縦方向分散係数、 w_0 は沈降速度、 O_s は飽和溶存酸素濃度、 k_r は再ばっき係数、 k_1 、 k_2 、 k_3 は分解速度定数、 β は式(2)における化学量論比($\beta=30/32$)、 γ は底面直上の粒子態BODと断面平均粒子態BODの比である。ここで、SSについても底面直上の値と断面平均値の比が γ であると考えた。また u 、 h 、 L_p 、 L_D 、 D はすべて断面平均量である。

4-2. モデルの検証計算

パラメータの値はすべて柿川における実測値を用いてモデルの検証計算を行った。用いたパラメータの値を表5に示す。計算の境界条件は、計算区間の上流端及び各支流の合流点近傍における実測値を与えた。昭和59年度以来各年度毎に行った実測値と計算結果を比較した。一例として62年の実測の分布を再現したものを図-6に示す。計算値は、実測のDO、SS及びBODの分布を良く説明している。このことは、本モデルの妥当性が示されているものと考えられる。

5. 下水道整備にともなう将来水質の予測

現在長岡市では第四期公共下水道計画が進行中である。本計画が完成すれば、主要な汚濁源である土合川流域に下水道が整備されることになるため、柿川の水質改善に大きく貢献するものと期待されている。3章において、我々は下水道の完成年度が昭和70年度であると仮定して、将来のBOD発生負荷量及び排水負荷量を推定した。さらに、発生負荷量に流達率を乗じて流達負荷量とした。

計算結果を図-7に示す。図には、浄化残率の考え方をを用いて推定した濃度も示してある。下水道整備の効果は大きく、計画の完了が予定される70年度において、丹波橋より下流域では、BODが2ppm以下という信濃川の水質環境基準が達成できることが示されている。但し、土合川合流点より上流側及び同合流点より下流側においてもしばらくは、2ppm以上であることに注意が必要である。また、70年度では、土合川よりも柿川本流の上流域での水質の悪化が予想される。従って、柿川全域で2ppm以下を達成するためには、今後は柿川上流域の水質改善策が望まれる。

表5 モデルに用いたパラメーター一覧

Parameters			Octo. 1987
mean water depth	h	m	0.457
mean velocity	u	m/s	0.184
water temp.	T	°C	13.5
dispersion coefficient	D_x	m ² /s	0.17
decomposition rate const.	k_1	1/day	2.09
decomposition rate const.	k_2	1/day	1.05
decomposition rate const.	k_3	1/day	1.64
molecular diffusivity	D_M	m ² /s	2E-09
reaeration rate	k_r	1/day	1.99
concentration ratio	γ		1.5
settling velocity	w_0	m/s	1.304E-05
saturation DO	O_s	mg/l	10.09

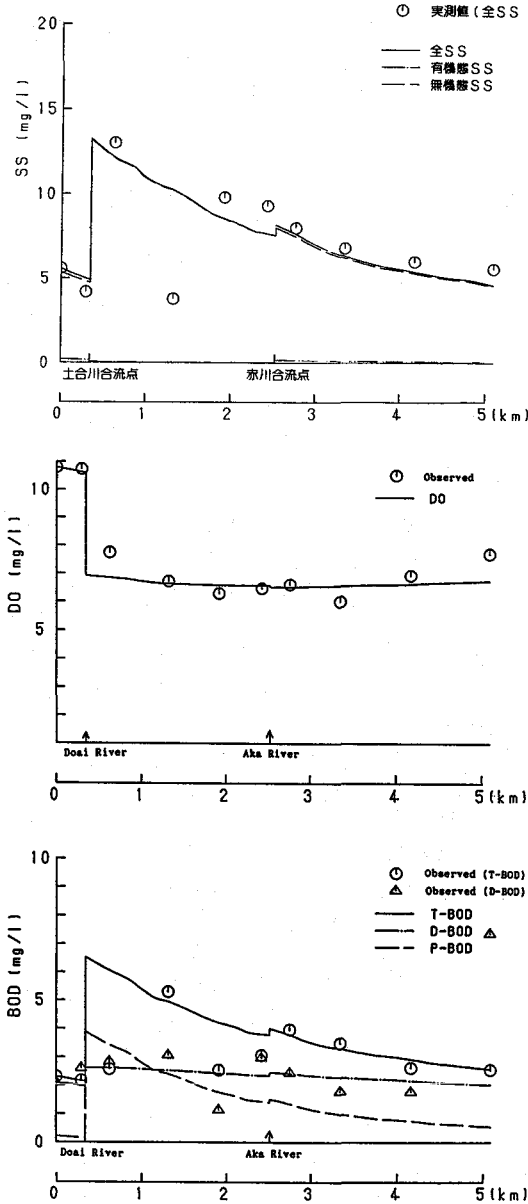


図6 BOD、SS、DOの計算結果(62年10月)

6. 結 論

本研究により、以下に示すような結論を得た。

(1) 長岡市の統計資料を原単位法によって解析し、汚濁負荷量の集計を行った。その結果、土合川流域が現在の主要な負荷源であることが確認された。さらに、現在進行中である下水道整備計画が昭和70年度に完成すると仮定して、将来の発生負荷量及び排水量を推定した。その結果、土合川流域のBOD発生負荷量は、現在の値の約三分の一に減少することが推定され、下水道整備の有効性が認められた。

(2) 不等流計算モデル及び一次元拡散モデルからなる都市河川水質シミュレーションモデルを開発した。拡散モデルはStreeter-Phelpsのモデルに分散及び粒子の沈降を考慮にいたったものであり、粒子態及び溶存態BOD、SS、DOの挙動を説明することができる。本モデルを長岡市柿川に適用したところ、現況の水質の分布をよく再現できることがわかった。

(3) 将来の発生負荷量の予測値をシミュレーションモデルに適用することにより、将来水質の予測計算を行った。その結果、下水道計画が昭和70年度に完成すると仮定すると、同年度において、下流域では、環境基準BOD 2 ppm以下が達成されると推定された。

参考文献

- 1) 虫明功臣他：「水環境の保全と再生」，山海堂
- 2) 土木学会編：「水理公式集」，技報堂出版，1985.
- 3) Streeter, H.W. and E.B. Phelps : A study on the pollution and natural purification of the Ohio River, Public Health Bulletin, No. 146, U.S. Public Health Service, 1925.
- 4) 合葉修一，岡田光正，大竹久夫，須藤隆一，森忠洋：浅い汚濁河川におけるBOD，DOのシミュレーション（第一報），下水道協会誌，vol. 12, pp.33-38, 1975.
- 5) 川島博之，岡田光正：河川，湖沼の水質モデル，水質汚濁研究，vol. 9, pp.13-18, 1986.
- 6) 市川新：多摩川における汚濁物質の収支と流下過程，(財)とうきゅう環境浄化財団研究助成報告書，No. 74, 1984.
- 7) 川島博之，鈴木基之：負荷解析のための河川水質シミュレーションモデル，水質汚濁研究，vol. 9, pp. 707-715, 1986.
- 8) 早川典生，桃井清至，原田秀樹，中村由行，福島祐介：中小都市河川としての長岡市柿川の水質環境の実態について，第三回土木学会新潟会研究調査発表会論文集，pp.24-29, 1985.
- 9) 伊藤剛，早川典生，中村由行：中小都市河川の水質予測に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.55-56, 1986.
- 10) 岩田浩一，中村由行，早川典生：都市河川水質予測モデルの開発に関する研究，長岡技術科学大学研究報告，vol.10, pp.101-110, 1988.
- 11) 建設省北陸地方建設局信濃川工事事務所：「柿川浄化対策検討業務委託報告書」，1982.
- 12) 長岡市：「長岡市公共下水道基本計画書」，1979.
- 13) 建設省編：「流域別下水道整備総合計画調査，指針と解説」，日本下水道協会，1980.

