

(18) 佐賀クリーク網の水質管理に関する研究

— 浄化用水量の推定 —

WATER QUALITY MANAGEMENT IN OPEN CHANNEL SYSTEMS IN SAGA

- ESTIMATING WATER QUANTITY FOR WATER POLLUTION CONTROL -

古賀憲一*

野原昭雄*

荒木宏之*

渡辺訓甫*

Kenichi KOGA*

Akio NOHARA*

Hiroyuki ARAKI*

Kunitoshi WATANABE*

ABSTRACT; Open channel systems in Saga, developed for drinking water supply and irrigation about 300 years ago, have been polluted by human activities mainly domestic wastewater. The main purpose of this study is to protect against the water pollution and to manage the water quality. The main policy steps should be, 1) construction of public sewage works, 2) development of water distribution systems for the open channel network. In this paper, strategy for the water quality management is examined by estimating how the amount of clean water of main canal will be required. A newly developed computer model is used for the estimation. The result makes a suggestion that water quality of upper canals should be improved with increasing inflow of clean water from main canal.

KEYWORDS; Water quality management, Hydraulic network, Water pollution control,

Water quality modeling in open channel systems, One-dimensional unsteady flow

1. はじめに

佐賀市街部の水路網（佐賀クリーク網）は、江戸時代の初期に佐賀藩の水利秩序の確立を目的として、成富兵庫によって整備されたものである。現在においても、佐賀クリーク網は成富兵庫の名と共に地域住民に親しまれている。佐賀クリーク網が抱えている問題は雑排水による水質汚濁と環境維持用水としての水量不足であり、このことは現在までの水質調査や住民意識調査等からも明らかである。^{1), 2), 3)} 佐賀クリーク網の水質環境を保全するためには、下水道の普及が必要不可欠であるが、長期的にみれば低平地に形成された水路網であるので水量不足による富栄養化を防止することも水質管理上の基本対策となる。短期的には、下水道普及に至るまでの水質汚濁防止が基本課題となる。具体的には、多布施川からの導水量を増し、清流を確保する事が重要であろう。佐賀クリーク網の清掃活動（春、秋の年2回、年間の延べ人数約4万人）は十数年間続けられている。このクリーク清掃の持続的活動を支えるためにも、導水量増加による清流の復活は社会システムの重要な問題と言えよう。以上の観点に基づき、本研究は佐賀クリーク網の総合的水管理を最終目的として、水質管理に必要とされる基礎データの収集および短期的観点から見た維持用水量の見積りを試みたものである。

2. 佐賀クリーク網の水質調査

2. 1 調査区域及び調査項目

本研究対象地域を①多布施川、大溝下水路及び十間堀川に囲まれる地域、②多布施川、十間堀川、及び裏十間堀川によって囲まれる地域とした。水路網の状況などを考慮して、①を5つのブロック、②を2つのブロック、計7つのブロックに分割した。調査地点は、各ブロックの上流部、及び下流部の計63地点とした。

* 佐賀大学理工学部 Faculty of Science and Engineering, Saga University

調査は平成2年7月26日(夏期)、及び平成2年11月5日(冬期)の2回行なった。調査時刻は、夏期、冬期いずれも地点番号 No.1~No.5、No.35~No.44は、9時30分~12時、他の地点は12時30分~17時であった。調査地点、及びブロック分割を図-1に示す。調査項目は、pH、DO、BOD₅、COD_{cr}、SS、T-N、T-P、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N(下水道試験法)であり、流量(浮子法あるいは流速計による流速測定と実測断面の測定)も同時に測定した。

2. 2調査結果

調査結果の概要を表-1に示す。この表から、各ブロックの水質特性は、水路勾配や多布施川からの清流の流入量そして雑排水の流入量(下水道の普及率)の影響を受けていることが分かる。したがって、佐賀市街部の水路網の水質管理を行なう際の基本対策は、緩やかな流れの中での物質沈降の抑制(ヘドロ化防止)と富栄養化防止であることが分かる。雑排水などによる水質汚濁の防止を計るための根本的対策としては当然のことながら公共下水道の普及のみであるが、一方ではその普及には時間を要し、かつ、普及に至るまでの対症的対策を必要とする場合も有り得る。佐賀市街部の河川・水路網は低平地という特殊な地形条件下で形成されてきたので、環境維持用水としての機能・役割は短期・長期的にみて、河床や水路網での懸濁性物質の沈積を防止すること、最終的には、清流の積極的な導水により流水の停滞を防止し、水質の改善を行なうこと、ならびに藻類の発生(内部生産)を抑制することである。

3. 佐賀クリーク網の水質浄化からみた維持流量

図-2、3に各ブロックにおけるBOD、SSの流達率と平均流速との関係を示す。図-3

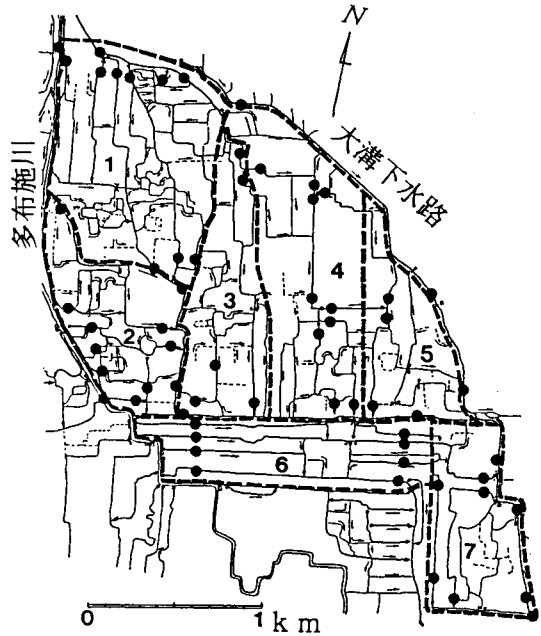


図-1 調査地点及びブロック分割

表-1 佐賀市街部クリークの水質(1990年 上段:7月26日, 下段:11月5日)

調査地点 ブロック NO.	pH	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)	備 考
1	1 7.5 7.5	8.8 7.8	4.6 3.3	3.2 2.9	4.6 0.1	0.5 0.6	0.03 0.05	水路勾配:0.00012 多布施川からの導水量多い 雑排水流入有り 水路のヘドロ無し
	44 6.8 7.5	0.5 0.3	19.4 72.1	28.4 63.9	11.2 32.9	2.2 2.8	0.36 0.05	
2	6 6.9 7.0	4.0 3.1	7.2 29.9	18.4 32.5	11.3 12.6	1.8 3.7	0.21 0.66	水路勾配:0.00010 多布施川からの導水量多い 雑排水流入有り 水路のヘドロ無し
	47 7.9 7.7	8.1 6.7	6.4 9.4	4.4 13.5	8.3 2.4	0.6 1.5	0.11 0.19	
	14 6.9 7.5	1.9 3.9	4.9 46.0	16.7 47.0	1.8 3.1	2.0 2.4	0.29 1.43	
3, 4	4 7.1 7.3	6.8 7.2	9.2 10.6	7.6 8.7	- 0.5	0.9 1.3	0.09 0.16	水路勾配:0.00008~0.00009 多布施川からの流入比較有り 雑排水流入有り 水路のヘドロ、ブロック下流部 で有り、上流部では無い
	12 7.1 7.6	2.6 5.4	26.4 48.4	28.6 52.3	38.4 18.2	3.5 13.1	0.71 1.90	
	10 6.9 6.9	1.7 2.4	26.1 18.3	28.7 20.6	37.4 16.9	2.9 4.0	0.44 0.69	
5	7 8.6 7.0	12.9 3.7	34.6 28.3	60.4 30.9	58.4 4.8	12.0 6.5	0.85 1.00	水路勾配:0.00004 多布施川からの流入無い 雑排水の流入有り 水路のヘドロ有り
	9 9.0 6.7	15.2 0.6	88.3 26.4	75.0 35.7	28.6 7.9	3.0 3.2	0.44 0.56	
6	20 8.6 8.6	8.1 7.3	5.4 12.3	2.1 6.5	12.7 2.0	0.6 0.6	0.05 0.05	水路勾配:0.00003 多布施川からの流入多い 雑排水の流入は少ない 水路のヘドロ無し
	23 7.6 7.2	7.0 4.3	4.3 18.2	14.0 17.6	21.5 16.2	2.0 1.9	0.43 0.28	
7	27 7.0 7.2	5.5 6.2	11.8 7.0	9.5 10.4	65.0 7.6	2.1 1.2	0.50 0.28	水路勾配:0.00003 多布施川からの流入無い 雑排水の流入は少ない 水路のヘドロ無し
	30 7.1 7.1	4.4 4.1	32.4 13.3	21.2 9.3	32.8 40.6	3.1 5.0	0.49 0.40	
	31 7.1 8.9	4.1 7.8	11.5 33.3	18.8 35.8	39.1 39.7	3.7 2.0	0.51 0.42	

において、流速 $0.2\sim0.3(\text{m/s})$ でSSの流達率は $0.5\sim0.8$ となっており、汚濁物質の沈降をある程度抑え、ヘドロ化を防ぐためには $0.2\sim0.3(\text{m/s})$ 以上の流速が必要であることが分かる。図-2において、 $0.1(\text{m/s})$ 以下の流速では、停滞部での沈降と分解によるBOD減少の影響が顕著に現われている。しかし、停滞部では前述したように内部生産（富栄養化）が生じるため、流速 $0.1(\text{m/s})$ 以下でのBOD減少を期待するのはヘドロ化及び富栄養化からみて水質管理上好ましいことではない。短期的な観点からみれば水路のヘドロ化を防止するために、 $0.2\sim0.3(\text{m/s})$ の流速を維持することがまず重要である。各ブロックにおけるBOD減少係数（沈降と分解）とブロック内滞留時間（流下時間）との関係を図-4に示す。この図から、冬季のBOD減少係数は $2.4(1/\text{day})$ 、夏期で $4.9(1/\text{day})$ となっている。室内実験から、分解のみによるBOD減少係数いわゆる脱酸素係数は $0.15(1/\text{day})$ であった。

したがって、水路網におけるBOD減少のほとんどが沈降によって生じていることが分かる。ここで、佐賀クリーク網におけるBOD減少量をオーダー的に把握してみる。まず、水路の代表長さを 2km 、代表的平均流速を $0.2(\text{m/s})$ とすると、平均滞留時間は約3時間と見積られ、図-4から約3時間の滞留時間では、冬季で3割、夏期で5割のBODが沈降及び若干量の分解によって減少するものと推定される。沈降による水路のヘドロ化という二次的な水質悪化を無視して、単に水質基準を満足させることだけを考えても、残りの約5割～7割のBOD減少は下水道の普及が進まない限り期待できず、問題解決にはならないであろう。短期的にそして現在の下水道普及の進捗状況を考慮に入れると、多布施川からの清流の導水量を増して希釈効果を高めることが現時点における効果的な手段の一つであろう。その導水量は、現流量の約2倍にすればBOD濃度は約 $1/3$ になり、3倍の流量を導水すれば約 $1/4$ 程度となるであろう。現在、約 $0.5\sim1(\text{m}^3/\text{sec})$ の合算流量が多布施川から佐賀市街部の水路網に流入しているので、 $1\sim2(\text{m}^3/\text{sec})$ の導水量を新たに加えれば現在のBOD濃度が $1/3\sim1/4$ 程度となり、現在の平均BODを $20(\text{mg/l})$ として、導水量の増加によってBOD濃度を $5(\text{mg/l})$ に維持できる可能性がある。さらには、前述したように流達率と平均流速との関係から、 $0.2(\text{m/sec})$ 以上の流速では滞留部での沈降抑制が期待されるので富栄養化防止にも寄与できる。 $1\sim2(\text{m}^3/\text{sec})$ の導水量の見積りは、あくまで佐賀市街部全体を一つの水域として見たときのマクロな推定値である。この導水量の見積りの精度を上げるには、水路網の流量配分問題まで取り扱うことが必要であり、後述するような数値モデルを用いた水質予測を行わなければならない。

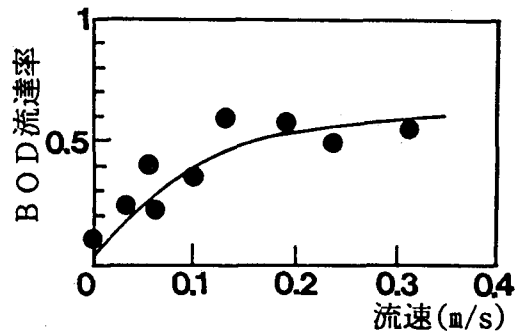


図-2 BOD流達率と平均流速の関係

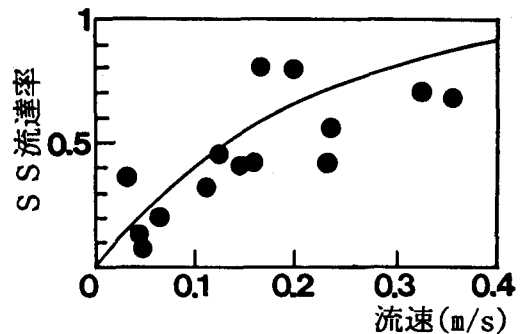


図-3 SS流達率と平均流速の関係

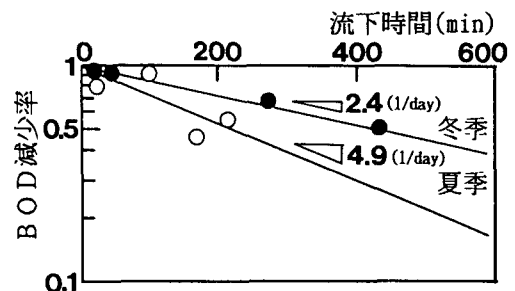


図-4 BODの減少速度（沈降・分解）

4. 水量・水質モデルを用いた浄化用水量の推定

佐賀市街部の水路・河川網の水質を改善するためには、短期的には多布施川からの導水量を増し、BOD濃度を低下させ、同時に沈降を抑制し、ひいては水路のヘドロ化を防止させることが重要であることを示した。長期的には、下水道が普及した後での富栄養化防止が基本的に重要であることを示した。ここでは、短期的観点から、水質項目で最も重要なBODに注目し、その希釈効果をより促進させ、水質改善に必要な用水量について検討を加える。浄化用水量を考える際には、導水量の増加に伴う水質変化を考慮に入れた検討が必要である。しかしながら、佐賀市街部の水路・河川は幾何学的な網目で連結されているために、通常の河川における水質予測モデルでは対応が不可能であり、網目で連結されている水路・河川網における水質予測モデルが必要不可欠である。以下に水路・河川網における水質モデルについて概説し、浄化用水導入量について検討を加える。

開水路網のモデル化は、ブランチ・ノードモデルと呼ばれるグラフ理論を用いて行った。^{4), 5)} 水路部をブランチ、また水路と水路との結合部あるいは水路の末端部をノードとし、その概念図を図-5に示す。ブランチにおける流量、水位、水質濃度及び物質輸送速度はブランチ端の値とする。ブランチ番号がmの場合、これに接続するノードの番号はI(m)、J(m)とする。番号mのブランチについて、 $Q_{1,m}$ 、 $Q_{2,m}$ 、 $h_{1,m}$ 、 $h_{2,m}$ 、 $c_{1,m}$ 、 $c_{2,m}$ を各々ブランチ端の流量、水位、水質濃度とする。また、 $CI(m)$ 、 $HI(m)$ と $CJ(m)$ 、 $HJ(m)$ を各々ノード番号I(m)、ノード番号J(m)の水質濃度、水位とする(図-6参照)。

水質の濃度は横方向及び深さ方向に一様とすると基礎式は次のようになる。

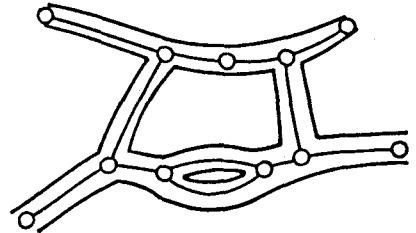


図-5 ブランチ・ノードモデル

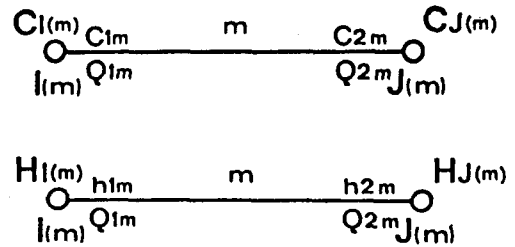


図-6 ブランチ・ノードの諸量

$$\frac{\partial BC}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} - P = 0$$

$$S = QC - AD_t \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

ただし、
 B : 濡れ断面積
 C : 横断面の平均濃度 $C(t, x)$
 S : 物質輸送速度
 P : 水質反応速度
 D_t : 移流拡散係数
 A : Flow section

水路網を構成している単一ブランチを積分要素としてGalerkin criterion法(FEM法)を適用して定式化を行なった。 CI 、 CJ をノードの濃度、 c_1 、 c_2 をブランチ端の濃度(図-6参照)、+は時刻 $t + \Delta t$ の値を示すものとして、 S_{1+} 、 S_{2+} 、 CI_{+} 、 CJ_{+} に関する一般的な関係式は次式の様に表わされる。^{4), 5)}

$$\begin{aligned} S_{1+} &= N_{m,1} \cdot CI_{+} + N_{m,2} \cdot CJ_{+} + N_{m,3} \\ S_{2+} &= N_{m,4} \cdot CI_{+} + N_{m,5} \cdot CJ_{+} + N_{m,6} \end{aligned} \quad (2)$$

各ノードでの物質貯留は0なので、各ノードに対して

$$\sum S = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{j_{\max}(i)} M_{i,j} C_j + M_{i,0} = 0 \quad (4)$$

j : ダミー番号

$j_{\max}(i)$: 全ブランチ数

境界条件は実測値を用いた。反応速度定数は前述した実測値（冬期）を用いた。定常状態における各ノード濃度の計算結果を図－８に示す。横軸には現状流量に対する流量比（導水量の増加比）である。縦軸は各ブロックを巨視的にみた平均濃度であり、現地観測データと直接的に比較することを目的としていないが、現地観測で得られた平均的な傾向を充分表わしている。なお、図示していないが、反応速度定数を夏期のもの、あるいは０（沈降も分解も無い）としても、後述するような導水量増加に伴う水質改善効果はほぼ同じであった。この図から、多布施川の導水量を増したための水質改善の傾向は認められるようである。しかしながら、排出負荷が高く、かつ、大溝下水路からの流入影響の強いブロックでは、良好な水質までは到っていないようである。このことは、大溝下水路の平均BOD濃度が10(mg/l)程度とあまり良くないことから、単に多布施川からの導水量を増加させるのみならず、大溝下水路の水質改善も考慮にいたれた検討が必要であることを示唆している。大溝下水路からの流入水質を改善するためには、まず市街部よりも上流域において下水道を普及させる必要があるが、ここでは、大溝下水路の水質改善が成されたことを前提として、導水量を増したときの水質予測を行なってみた。大溝下水路の平均水質を多布施川のものと同等とみなし、その他の計算条件は同一として計算行なった。大溝下水路の水質改善に伴ない、導水量を増したことによる改善効果がかなり認められる。ブロック番号３（ノード番号６）のようにブロック内の排出負荷の影響によって水質改善が不十分の所がある。これ以上の浄化効果を詳細に評価するためには、これまでの各ブロックをさらに細

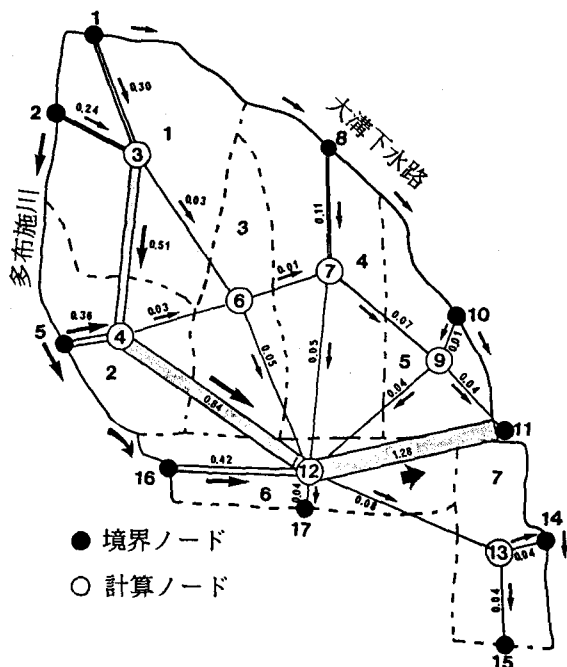


図-7 ブロック間流量

分化した計算を行う必要があるが、本質的には下水道の普及を急ぐ必要があろう。また、ほとんどのブロックの水質は改善されていることから、ブロック間での流量を再配分（流量配分問題）することによっても同様の効果が期待できよう。その際、本研究で用いたブランチ・ノードモデルは極めて有効な水質予測手法である。いずれにしても、現状の下水道普及率程度では、大溝下水路の水質改善を行い、現流量の約3倍程度の総流量が必要と言え、新たな導水量は2~3 (m³/sec) と見積られる。このことは、前述したような、水路・河川網全体に対する希釈効果から見積った導水量が1~2 (m³/sec) であることと概ね一致している。

5. おわりに

佐賀導水計画によれば、新たに1.2 (m³/sec) の流量が多布施川に導水されようとしているが、前述の結果から、水質浄化に必要な導水量は2~3 (m³/sec) と推定されるので、下水道の普及が現状のまま進まないものとする、佐賀導水計画のみによる導水量では未だ1~2 (m³/sec) 程度の流量が不足するものと思われる。現在のところ、新たな水源による導水量の確保は極めて困難な状況にある。したがって、水質改善を根本的に解決するには、早急な公共下水道の普及に期待せざるを得ないが、対症療法的対策としての佐賀導水による浄化用水は必要不可欠のものと言えよう。さらには、佐賀市街部の水路・河川網の水質特性は湖沼型であることを考慮すれば、長期的観点からも佐賀導水による環境維持用水は重要である。また、不足用水の確保が極めて困難な状況に鑑み、将来的には何らかの水高度化利用計画の策定も必要となる。

本研究の一部は、日本生命財団の研究助成並びに科学研究費（重点領域「自然浄化機能の強化と制御」研究代表者 楠田哲也）の補助を受けて行なわれたものであり、関係各位に深謝致します。

また、本研究を遂行するにあたり、建設省武雄工事事務所並びに（財）佐賀経済調査協会には資料提供などで種々の協力、助言を頂いたことを付記すると共にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 古賀、荒木、野原、渡辺、N. Booij; 佐賀クリーク網の水質特性と水質モデルに関する研究、環境システム研究、Vol.18、1990年8月
- 2) 荒木、古賀、二渡、荒牧; 佐賀クリーク網の歴史的変遷と住民意識、環境システム研究、Vol.18、1990年8月
- 3) 佐賀市; 昭和61年度佐賀市街地内排水路水質浄化の検討業務委託報告書、昭和62年
- 4) K.Koga, N. Booij etc.; Numerical Model of Water Quality in Hydraulic Network Systems; Rep. of the Faculty of Science and Eng., Saga Univ., Vol.16, No.2, pp.91-100, 1988
- 5) Nico Booij etc.; A micro-computer Package for the simulation of One-dimensional Unsteady Flow in Channel Systems; IHE, TU Delft, Rijkswaterstaat, 1989

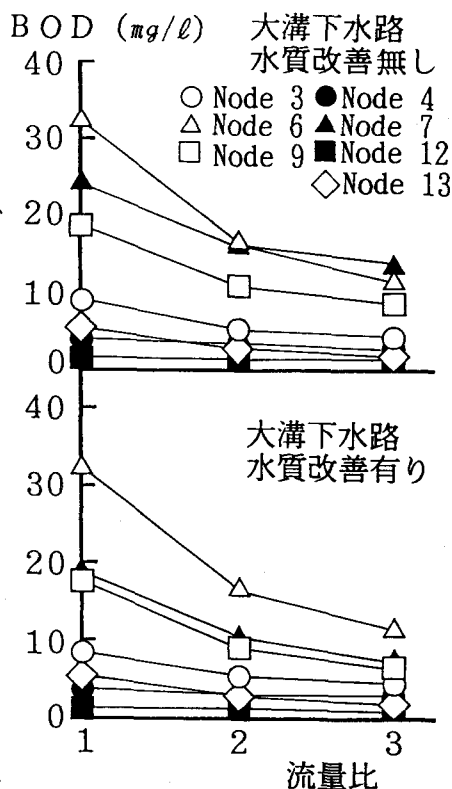


図-8 計算結果