環境システム研究　Vol.18　1990年8月

(31) 佐賀クリーク網の水質特性と水質モデルに関する研究

NUMERICAL MODEL OF WATER QUALITY IN HYDRAULIC NETWORK AND WATER QUALITY IN CHANNEL SYSTEMS IN SAGA

古賀憲一*　荒木宏之*　野原昭雄*　渡辺訓甫*
Kenichi KOGA*　Hiroyuki ARAKI*　Akio NOHARA*　Kunitoshi WATANABE*
Nico Booij**

ABSTRACT; There is an important need in lowland such as the Saga Plains to study on integrated water management. Open channel network in Saga is necessary for drainage, irrigation and drinking water etc. Recently, however, water pollution is a serious problem in the channel network. This study is carried out to research on property of water quality in the channel systems in Saga and to develop numerical water quality model for water management in hydraulic network systems. The major transport processes for the modeling are shown to be eutrophication and sedimentation. A numerical model for the simulation of one-dimensional unsteady flow and water quality in channel systems is newly developed. Simple tests are carried out to show the possibility of the presented model.
Keywords; Hydraulic network, Water quality in channel systems, One-dimensional unsteady flow, Water management in lowland

1．はじめに

低平地である佐賀平野には、我国でも独特な網目状の水路網・河川網（佐賀クリーク網）が張り巡らされており、地域住民のシンボルとして親しまれている。近年の生活様式などの変化により、このクリーク網の水質は悪化し、地域住民の清掃活動の努力にもかかわらずクリークの水質汚濁は依然として深刻な問題である。これらの問題を解決するためには、短期的には家庭雑排水対策あるいは水質浄化からみた複雑な河川網での水量配分に重点を置いた水質制御が必要である。長期的には下水道普及後の環境維持用水の見積りとその水量・水質制御が必要である。そのためには、まず水路が複雑に連結されている水系での水量（水位、流量）と水質の定量的な把握並びにそれらの数値モデルが必要である。現在のところ、水量についてのモデルがオランダで開発・実用化されている程度であり[1),2)]、水質については皆無の状態である。

本研究は、低平地に張り巡らされた複雑な河川・水路網の総合的水管理法の確立を最終目的として、まず佐賀クリーク網の水質特性を現地調査結果（低水時）および若干の既存資料から明らかにし、開水路網の水量・水質管理のためのコンピュータモデルの構築を試みたものである。

2．佐賀クリーク網の水質特性

2．1　佐賀クリーク網の概況

佐賀クリーク網の水質特性を知るために、対象地域を図－1に示すように、A)多布施川、大溝下水路及び

*佐賀大学理工学部　Faculty of Science and Engineering, Saga University
**デルフト工科大学　Faculty of Civil Engineering, Delft Technical University

十間堀川に囲まれる地域、B)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。ブロック内の特性（下水道普及率、業種、土地利用など）と水路の状況（河床勾配など）を勘案してA)を5つのブロック、B)を2つのブロックの計7ブロックに分けた。現地調査は、各ブロックの上流部及び下流部の計４２点において、平成元年12月5日（12時～16時）に行った。

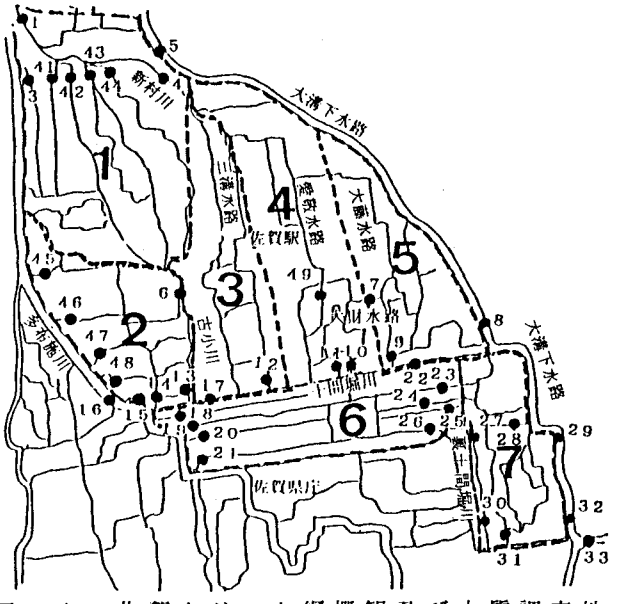
２．２　調査項目

水路の断面形に応じて川幅を分け、その間隔ごとに水深を測定し断面積を求めた。また、流速は流速計または浮子法により測定し断面積を乗じて流量を算出した。水質分析項目は水温、pH、DO、BOD_5、CODcr、SS、T-N、T-Pである。水質試験は下水試験法によった。

２．３　調査結果

表－1に各ブロックの上流及び下流部の代表的な水質、図－2に各ブロックの主要水路の勾配の平均値を示す。

ブロック１（若宮、神野西地区）：多布施川からの流入水はブロック内を北から南へと流れ、調査地点NO.44ではその水量が少なく、流れが停滞し、上流部であるにもかかわらず、雑排水混入の影響が強い。大半の水路には多布施川からの清浄な水が流入するために、調査地点NO.1の水質が示すように上流部ではかなり良好な水質となっている。また、ほとんどの水路の流速は速いため、河床のヘドロ化は認められなかったものの、下流部では雑排水の影響を受け、BOD、COD、SS、T-N、T-Pは高い値を示し、DOは減少している。



図－１　佐賀クリーク網概観及び水質調査地点

ブロック２（多布施地区）：多布施川からの流入水は西から東へ流れ、十間堀川へ通じる。河床のヘドロ化はほとんど認められなかった。特に、ブロック上流部では多布施川の清浄な水が流入するために、調査地点NO.47に代表されるように、藻類の影響が現われているものの比較的良好な水質となっている。しかし多布施川から各水路への平均的な流入量は$0.01m^3/s$～$0.02m^3/s$とかなり少ないために、下流部では調査地点No.14のように雑排水汚染がひどく、悪臭が発生するところもあった。

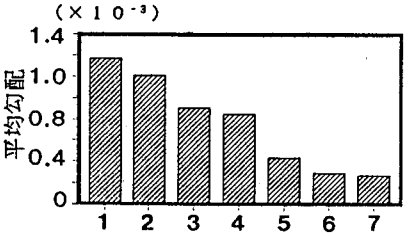
表－１　各ブロックの代表的水質

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)	Q (m3/s)
1	1	7.5	12.5	1.6	2.0	3.8	0.70	0.03	0.31
	44	7.2	7.6	7.7	20	2.0	2.0	0.30	0.004
2	47	7.8	12.5	2.0	2.3	2.0	0.52	0.04	0.02
	14	7.3	7.7	11	32	7.9	6.7	1.2	0.01
3、4	4	7.4	11.5	2.2	4.0	1.6	1.1	0.07	0.11
	10	7.2	1.3	17	44	9.0	6.2	0.88	0.08
	12	7.3	3.8	43	120	41.4	16	1.9	0.004
5	7	7.1	3.7	24	64	42.5	11	1.7	0.0
	9	7.1	2.0	16	16	2.1	4.0	0.36	0.0
6	20	7.2	12.2	3.7	2.1	1.4	0.72	0.04	0.15
	23	7.4	10.8	3.8	13.7	4.5	1.0	0.12	0.02
7	30	7.4	7.0	2.9	19.2	40.2	8.2	0.74	0.94
	32	7.3	2.5	9.2	16.2	13.9	2.9	0.42	1.92

ブロック３、４（神野東、天神、愛敬地区）：多布施川から新村川を経て、三溝水路と愛敬水路に分流し、それぞれブロック３、４を南下して、最終的には十間堀川に合流する。上流部の調査地点No.4は多布施川から分流して間もないために、家庭雑排水の混入もほとんどなく、良好な水質となっている。ブロック３の下流部である調査地点No

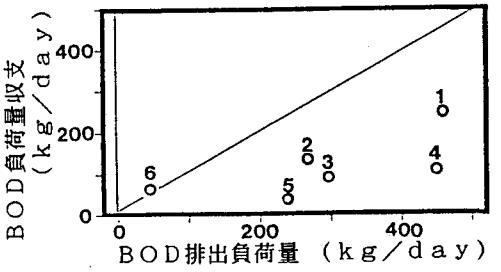
.12の水質は悪く、水量も少なく、停滞気味であるために生活雑排水の影響が顕著に現れている。ブロック４の下流部である調査地点No.10は雑排水の影響を受けているものの、流速は0.55m/sとかなり流れが速く、汚濁物質の沈降は殆ど生じていない。しかし、中流部の調査地点No.49の流速は極めて遅く（0.05m/s）、ヘドロが堆積していた。

ブロック５（大財地区）：このブロックにはブロック４からの水路がブロック内で合流し、十間堀川へ通じている。ブロック全体が平坦な地形をしており、調査時には地点No.7、No.9ともに流速は０であった。したがって、ブロック４からの流入水は認められず、ほとんどの場所で生活排水のみが水路に流入し、かつ、貯留されている地域といえる。特に、調査地点No.7の水質はかなり悪く、No.9では沈降による影響が強いためにSSがきわめて低い値となっている。また、両地点ともに河床にはヘドロが堆積しており、DO濃度も低い。降雨の際は底泥の流出が生じるものと思われる。



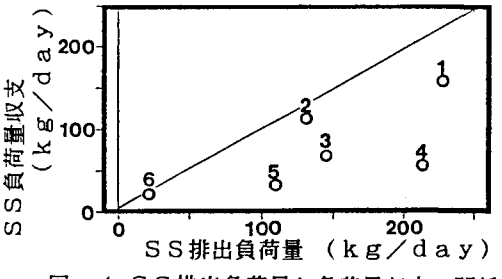
図－２ 各ブロックの平均勾配

ブロック６（白山地区）：このブロックは、昭和56年度から公共下水道が整備され、それ以後、水質が改善された地域である。今回の水質調査においても、下水道未整備地区（ブロック１～５）に比べて全体的に良い水質となっている。調査地点No.20においては、BODの値がやや高いものの、多布施川の流入があるため、水質は比較的良好である。しかし、水路の平均勾配は0.0001～0.0003とかなり緩やかで、ブロック下流部（東部）には停滞気味の所もある。調査地点No.23ではDOが飽和状態、pHがやや高くなっていることから、内部生産（藻類発生）が生じていると考えられる。



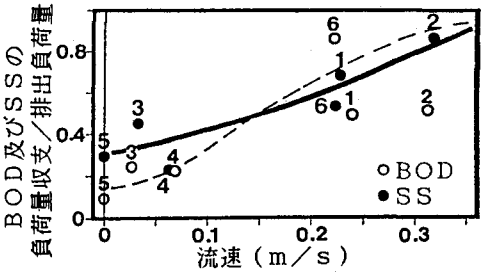
図－３ ＢＯＤ排出負荷量と負荷量収支の関係

ブロック７（東佐賀、田代地区）：十間堀川、大溝下水路及びブロック６の各水路が集中する地域で、調査地点No.30の流量は0.94m³/s、No.32で1.92m³/sであるが、ブロック内水路の平均勾配は、0.00035ときわめて緩やかであるため、流速は0～0.07m/s程度で、流れが殆ど停滞している地域である。このブロックは、昭和56年に公共下水道の整備が行われた地域で、雑排水の混入は殆どないと思われる。しかし、内部生産により、ほとんどの調査地点のDOは飽和状態でpHも高く、ブロック６と同様に藻類の発生が認められるようである。ブロック６あるいは７で代表されるように佐賀クリーク網の水質特性は湖沼型の性質を有しているので、短期あるいは長期的にみたクリーク網全体の維持水量決定の際には、本ブロックの富栄養化防止が基本対策の一つとなるであろう。



図－４ ＳＳ排出負荷量と負荷量収支の関係

図－3、4に各ブロックにおけるBOD及びSSの排出負荷量と、汚濁負荷量の収支（負荷量収支）の関係を示す。排出負荷量はブロック別の人口、浄化槽率、下水道整備率、各種事業場を考慮した汚濁負荷量原単位から求めた。[3)]



図－５ 流速とＢＯＤ及びＳＳ
（負荷量収支／排出負荷量）の関係

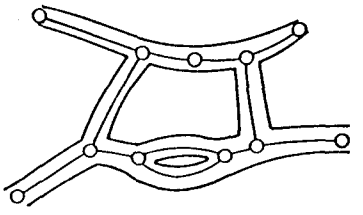
また負荷量収支はブロック内の上流と下流部で水質と流量から負荷量を求めた。但し、流れが停滞しているブロックについては、収支計算の流量として排出水量

（使用水量）を用い、ブロック７では複雑な流出入があり、収支の把握も困難であったので負荷量収支を求めていない。ブロック１はBOD、SSの負荷量収支は排出負荷量に比べて低い値を示している。このブロックの主要水路の流速は大きく沈降による負荷量の減少は考え難いことから、住宅付随水路への雑排水流出（一時貯留）が主な原因と考えられる。ブロック３から５ではBOD、SSともに汚濁負荷量収支はかなり低い。これは前述したように極めて緩勾配の水路内で生じている沈降によるものと考えられる。図－5に各ブロックにおけるBOD、SSの（負荷量収支/排出負荷量）と平均流速との関係を示す。BOD、SSともに流速が大きくなるにしたがって（負荷量収支/排出負荷量）も大きくなる傾向にある。流速0.2～0.3m/sで（負荷量収支/排出負荷量）は0.5～0.8となっている。これから、懸濁性物質の沈降防止に必要な流速は0.2～0.3m/s程度であることが分かる。

3.　複雑な開水路網における水量・水質モデル

3．1　ブランチ・ノードモデル

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で行った。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－６に示す。

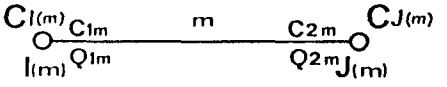


○　ノード ―― ブランチ

図－６　ブランチ・ノードの概念図

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、Ｑ1,m、Ｑ2,m 、ｈ1,m、ｈ2,m、ｃ1,m、ｃ2,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－７参照）。



図－７　ブランチとノードの諸量

3．2　水位・水量モデル

流れに関する基礎式は一次元の非定常流れの運動方程式と連続式である。

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial(Q\cdot v)}{\partial x}+g\cdot A\cdot\frac{\partial h}{\partial x}+J(Q,h)=0 \quad 、 \quad \frac{\partial B}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \qquad (1)$$

ただし、Ｑ：流量、ｖ：平均流速、Ａ：flow cross section、ｇ：重力加速度、Ｊ：摩擦勾配、
Ｂ：濡れ面積、である。

ブランチ両端の水位とそれに接続しているノード水位が等しいこと（ＨＩ(m)＝ｈ1,m、ＨＪ(m)＝ｈ2,m）、また、ノードにおいては流体の貯留は０であることなどから（各ノードに対して　ΣＱ＝０）、最終的には、ノードの未知水位を含む線形代数方程式が得られる。[1),2)]

$$\sum_{j=1}^{jmax(i)} M_{i,j}H_j+M_{i,0}=0 \qquad (2)$$

ただし、　ｉ：ノード番号、ｊ：ダミー番号、jmax(i)：全ブランチ数

上式を解くことによりノードの未知水位を求めることができる。水位からブランチ流量が得られる。水量（水位）モデルについての詳細は既報あるいは別報に譲るが灌漑や排水を目的としたモデルが実用化の段階に達している。[1),4)]

3．3　水質モデル

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。

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

$$S=QC-AD_l\frac{\partial C}{\partial x} \tag{3}$$

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_l:移流拡散係数、A:Flow section

Galerkin criterion法(FEM法)を用いて定式化を行なう。基礎式をブランチ長について積分し、整理すると次式のように表わされる。

$$S_1^+=-S_1^-+\frac{2}{3}l\frac{B_1^+c_1^+-B_1^-c_1^-}{\Delta t}+\frac{1}{3}l\frac{B_2^+c_2^+-B_2^-c_2^-}{\Delta t}$$
$$+\frac{1}{2}(Q_1^+c_1^++Q_2^+c_2^++Q_1^-c_1^-+Q_2^-c_2^-)-AD_l\frac{c_2^++c_2^--c_1^+-c_1^-}{l}-\int_o^l\psi_1Pdx \tag{4}$$

$$S_2^+=-S_2^-+\frac{1}{3}l\frac{B_1^+c_1^--B_1^-c_1^-}{\Delta t}-\frac{2}{3}l\frac{B_2^+c_2^+-B_2^-c_2^-}{\Delta t}$$
$$+\frac{1}{2}(Q_1^+c_1^++Q_2^+c_2^++Q_1^-c_1^-+Q_2^-c_2^-)-AD_l\frac{c_2^++c_2^--c_1^+-c_1^-}{l}-\int_o^l\psi_2Pdx$$

反応項(式(4)の最終項)の定式化において、反応速度Pは一般的に、x、t、水温等に従属する濃度の複雑な関数である。その上、時間ステップごとに積分値を計算する必要がある。従って、この積分は、高速で行われ、積分値はブランチ両端の濃度で表現され、精度もある程度のレベルが要求される。本研究ではcollocation methodを適用した。collocation pointは、ブランチ長で正規化されたブランチ($0\leqq\xi\leqq1$)で$\xi=0.2113$、$1-0.2113$のところで与えられる。反応項は次のようになる。

$$\int_o^l\psi_iPdx\fallingdotseq\frac{l}{2}\{\psi_i(\xi)P(\xi)\mid_{\xi=a}+\psi_i(\xi)P(\xi)\mid_{\xi=1-a}\} \tag{5}$$

ただし、　$\xi=x/l,\ a=0.2113$

ブランチ端の流出入の条件から、ノードとブランチ端との結合条件は以下のように表わされる。

Q1⁺≧0　ならば　c1⁺=CI⁺　、　　Q2⁺<0　ならば　c2⁺=CJ⁺ (6)

Q1⁺<0　ならば　S1⁺=Q1⁺·c1⁺　、　　Q2⁺≧0　ならば　S2⁺=Q2⁺·c2⁺

ここで、CI、CJはノードの濃度、c1、c2はブランチ端の濃度、+は時刻t+Δtの値を示す。

式(4)及び(6)からS1⁺、S2⁺、CI⁺、CJ⁺の関係が明らかになる。式(4)は4つの未知数に関して線形であり、1本のブランチについて解くべき一般的な方程式は次のように表すことができる。

S1⁺=Nm,1·CI⁺+Nm,2·CJ⁺+Nm,3　、　S2⁺=Nm,4·CI⁺+Nm,5·CJ⁺+Nm,6 (7)

また、各ノードでの物質貯留は0なので、各ノードに対して

$$\Sigma S=0 \tag{8}$$

が成り立つ。よって、式(7)、(8)より未知数を含む連立方程式が次のように得られる。

$$\sum_{j=1}^{jmax(i)}M_{i,j}^{*}C_j+M_{i,0}=0 \tag{9}$$

i:ノード番号、j:ダミー番号、jmax(i):全ブランチ数

これを解くことによりノードの未知濃度を求めることができ、ノードの濃度からブランチ端濃度や物質輸送速度（濃度フラックス）を得ることができる。

3．4　モデル開水路網による計算例

図－8の開水路網に上述の数理モデルを適用する。水質はＢＯＤ、流量は定常状態を仮定した。t＞0、ノード1で汚濁物質が定常流入するものとし、数値シュミレーションにより水質濃度の非定常解析を行う。本例では反応速度を一次式で表し、拡散の影響はないものとした。基礎方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial L}{\partial t}+\frac{\partial QL}{\partial x}=-KL \qquad (10)$$

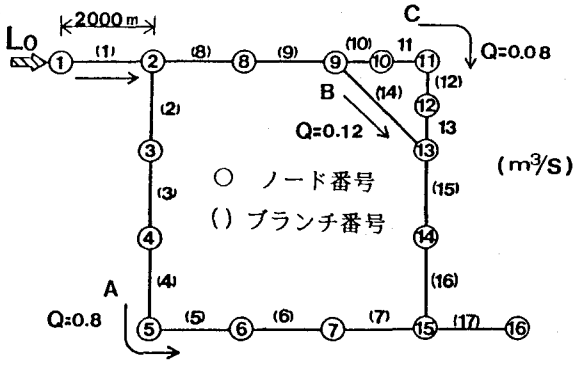
ただし、　L：ＢＯＤ濃度、K：ＢＯＤ酸化速度係数

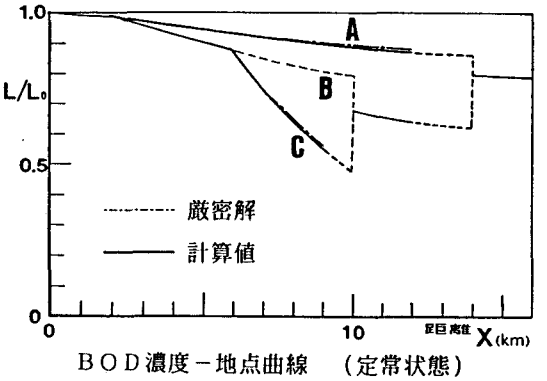
初期条件はL=Lo(Lo：初期濃度)、境界条件はL=Lo、流量条件は図中に示す通りである。定常時の濃度は図－8のように得られる。流れの遅いところでのＢＯＤ分解による濃度減少が現れている。本例の場合は厳密解との比較が可能であり、その一致度は良好である。

4．おわりに

佐賀都市圏のクリーク網の水質特性は、低平地に張り巡らされた河川網が湖沼型の水質変換特性を有していることであろう。従って、長期に亘る佐賀都市圏の適正な水管理を行うには、緩かな水路勾配の水路網における富栄養化防止に重点を置いた維持水量の確保並びにその制御が重要である。また、その際、重要な水質変換・輸送現象は１）懸濁性物質の沈降、２）ＢＯＤ分解、３）藻類あるいは懸濁性CODの発生（内部生産）、４）藻類による窒素、リンの摂取、５）降雨時における堆積物の流出であろう。ノード・ブランチモデルによる開水路網の水量・水質モデルの構築を試み、その有効性を示した。

最後に、有益な助言を頂いた佐賀大学元教授井前勝人先生にお礼申し上げます。本研究の一部は（財）日本生命財団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。





ＢＯＤ濃度－地点曲線　（定常状態）

（L：ＢＯＤ濃度、L0：初期濃度）

図－８　水路網と数値計算結果

参考文献

1) Nico Booij etc.; A micro-computer Package for the simulation of One-dimensional Unsteady Flow in Channel Systems;IHE, TU Delft, Rijkswaterstaat, 1989

2) 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

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)W. Schuurmans; A study of the Applicability of Unsteady Flow Models in Irrigation Systems Design and Management, Rep. of TU Delft, pp.1-118, 1988