

落水線図を用いた流域からの汚濁負荷流出量の 予測と流域水管理に関する研究

POLLUTANT RUNOFF ANALYSIS USING THE DIGITAL ELEVATION MODEL
AND WATER ENVIRONMENTAL MANAGEMENT ON A WATERSHED

樋渡智則¹・野口正人²・朴 元培³・大石真伸⁴

Toshinori HIWATASHI, Masato NOGUCHI, Won Bae PARK, and Masanobu OHISHI

¹学生会員 長崎大学大学院 工学研究科修士課程(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

²フェロー会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

³工博 済州道発展研究院主任研究員 (済州道済州市2徒2洞390, 大韓民国)

⁴吾妻町上下水道課 (〒859-0011 長崎県南高来郡吾妻町牛口名)

Sea-dyke is sometimes constructed, so one part of bay has been enclosed. This kind of situation is also observed at Isahaya of Nagasaki, that is a big project of construction of sea-dyke and reclamation. In order to make clean the enclosed water bodies, integrated management based on rivers and watershed should also be emphasized. On this viewpoint, pollutant runoff analysis by means of the Digital Elevation Model (DEM) has been carried out, and how to make available the water environmental management has been discussed, considering the environmental changes around at the enclosed sea area.

Following to the purpose described above, in this paper, runoff rate of nitrogen from the watershed has been estimated, using the two-dimensional model of pollutant runoff by DEM. Even though parameter included in the model should be identified based on a lot of field data, it has been shown that proposed model might be useful for the prediction and control of non-point pollutant sources distributed over the watershed.

Key Words : Pollutant runoff, GIS, DEM, mathematical model, nitrogen, environmental management, enclosed water body

1. はじめに

好ましい水環境を達成するためには、様々な対策が必要とされる。長崎県の諫早湾では、締切り干拓事業が水環境に及ぼす影響について大いに関心が持たれており、調整池やその周辺では、主として夏季に、富栄養化現象を始めとした水質悪化が懸念されている。このような閉鎖性水域での水質を清澄に保つためには、「流域水質管理」を十分に行い、流域からの栄養塩類の流入を極力抑制しなければならない。近年、都市化に伴い、汚濁負荷流出量に対する非点源汚濁負荷流出量の占める割合が増大してきている。したがって、流域水質管理を行う上で、流域内に分布する非点源汚濁負荷発生源の空間的・時間的な分布を評価するとともに、流域から水域に流出する汚濁負荷量を量的・質的な両側面から明らかにすることが重要となっている。その目的達成のためには、現在の流域や水域の水環境を正しく評価し、将来の環境変化を適

切に予測することができ流域管理のためのモデルを構築しておく必要がある。

上述されたことから、本論では、流域情報としてGISデータを活用するとともに、落水線図を用いて、流域から水域へ流入する雨水ならびに汚濁負荷の流出量をできる限り正確に予測することができ流出解析モデルの構築を試みた。以下では、流域水管理を進展させるための流域情報としてGIS (Geographic Information System) データを活用することを考え、標高データを基にして落水線図を作成した。ただし、通常の落水線図の作成法では、どうしても考慮する平均地盤高と局所的な河床高との差で得られる流域界に誤差が入ることが避けられない。流域からの汚濁負荷流出量の評価を精度良く行っていく上でこの種の問題は大きな影響を有している。したがって、この問題について検討した後、雨水ならびに汚濁負荷の流出量を“physically based”に算定し得るモデルの開発を試みた。併せて、実流域への適用例として、干

拓締切り堤防の建設により今後の水環境問題が大きな関心事になっている調整池の水質変化を取り上げた。なお、流域からの汚濁負荷流出と調整池の水質変化の関係について簡単に検討するため、1999年のデータを用いて考察がなされた。

2. 本明川と諫早湾の締切りの概要

諫早湾干拓事業は、諫早市及び周辺の4町(高来町、森山町、愛野町、吾妻町)を中心とする諫早湾の湾奥部を延長が7,050mの潮受堤防で締切り、締切面積35.5km²の湾奥部の一部をさらに内部堤防で締切ることにより、新しく18.4 km²の土地と17.1 km²の調整池を造成しようとするものである。本事業の本来の目的は、潮受堤防の建設により周辺地域を高潮の自然災害から守り、同時に、調整池内部の水を北部と南部の両排水門で標高-1mの水位に制御し、同地域の排水不良や洪水被害を防ごうとするものである。

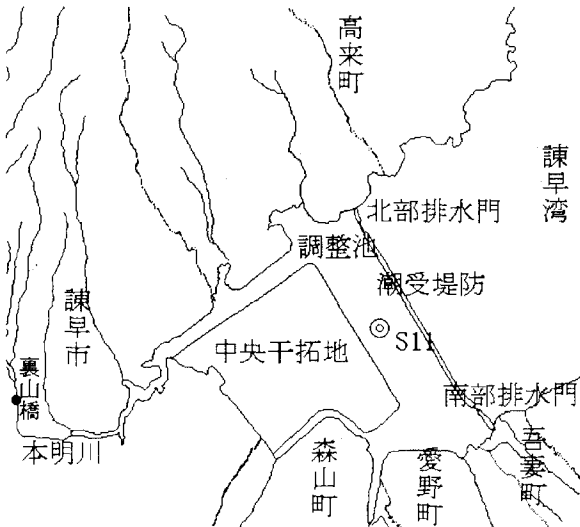


図-1 諫早湾調整池流域の概要図。

しかし、一方では大規模構造物の建造により、種々の面で諫早湾地域の環境変化が避けられない。いずれにしても、潮受堤防の建設前は締め切られていなかった諫早湾の湾奥部が現在では、閉鎖性水域となり、水質悪化が不可避的であると思われる。そのため、望ましい水環境を少しでも維持し、新しい形で創造していくためには、背後に広がる流域での水管理が益々重要性を帯びてくることになる。

ところで、本地域には長崎県唯一の一級河川である本明川と数本の二級河川が流入している。しかし本事業が完成し諫早湾調整池が機能するようになれば、これらの河川は本明川水系として総合的に管理されることになり、益々、水域と流域とが一体的に環境面でも管理される必要性が増大する。そのため、本論で取り上げられるような流域からの汚濁負荷流出予測を精度良く行い、そ

の種の情報を有効に生かした十全な流域管理が望まれている。本論で取り上げられた検討は、多少とも、図-1に示された諫早湾調整池の水質を良好なものにしようとの意図の下で行われた。

3. 流域情報の収集と整理

(1) GISデータを用いた点源・非点源汚濁負荷の評価

非点源汚濁負荷は流域の様々な社会的・自然的な活動の影響を受けて発生し、水域に流出することにより水質汚濁を引き起こす。このような複雑な形態のもと、実流域での水量・水質予測を行う場合、対象地域の地形、地質・土質、植生や、降雨時系列といった流域情報をいかに評価するかが重要な問題になってくる。こ

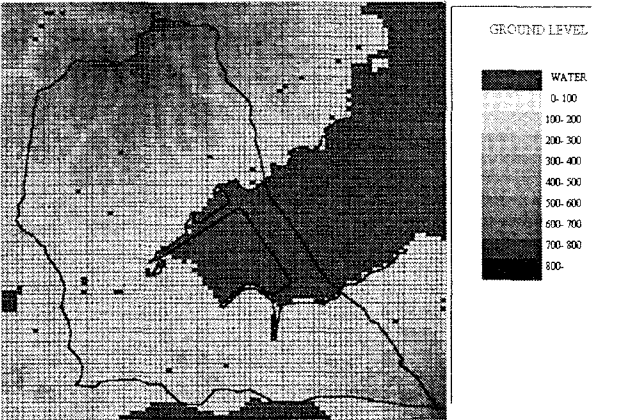


図-2 諫早湾流域の標高。

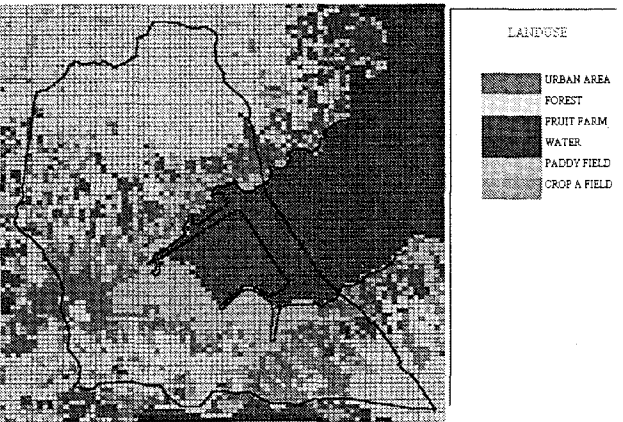


図-3 諫早湾流域の土地利用分類。

表-1 土地利用分類別面積。

土地利用分類	面積(km ²)
都市域	21.2
山林	111.2
果樹園	14.3
水域	40.7
水田	45.4
畑地	23.7
合計	256.5

これらの流域情報を適切に把握し、流域水質管理に不可欠な信頼性の高い情報を得るため、流域のデータを共通の基盤で利用できるように標準メッシュを基にしたデータの蓄積が望まれる。近年、流域情報を取得する手段の一つとしてGIS(Geographic Information System)データの有効性が広く認識されるようになった。本論では国土数値情報の標高データにより流域の幾何形状を表現し、後述の落水線図を作成することにより流出解析を進める。なお、データの整備は、国土地理院刊行の地形図(1/25,000)により土地利用状況を分類し、それぞれ3次メッシュのサイズ(緯度方向:231m, 経度方向:292m)で行われた。

本論で取り上げられたように、降雨に伴う水域への汚濁流送を考慮する際、流域に分布している点源・非点源汚濁負荷の状況を把握することが重要となってくる。点源汚濁負荷としては各家庭や工場からの排水等、非点源汚濁負荷としては降下粉塵、あるいは水田や田畑からの余分な肥料等が考えられる。このような流域情報を把握することは当然重要であるが、非点源汚濁負荷はその性質により正確に把握することは困難である。図-2、図-3は、得られたデータをもとに諫早湾調整池流域の標高と土地利用の状況を図化したものであるが、本論では、これらの情報を用いた汚濁負荷流出の算定が試みられた。因みに、図の太線は調整池に対して描かれた流域界である。また、表-1は図-3に示された土地利用分類に対して、それぞれの面積をメッシュ面積の合計として計算されたものである。

(2) 対象流域における落水線の作成

落水線図は流出現象を物理的に扱うために流域を細分化し、雨水は各格子点の周囲8方向のうち、最急勾配に流れると考えることで、流域全体の雨水流出経路を決定しようとしたものである。本方法では、流域がメッシュで覆われることにより、GIS等で得られた流域データの取り扱いが容易になる。数値標高データにより落水線図を作成すれば、広範囲にわたる水系網が自動的に作成される利点がある。

落水線図は数値標高データを用いることにより、雨水を以下の規則により流下させることで作成される。¹⁾

- 1) 当該メッシュの標高と周辺8メッシュの標高とを比較し、最も低いメッシュに流下させる。
- 2) 最も低いメッシュが複数ある場合には、その各々のメッシュで周辺8メッシュの平均地盤高が最も低い方のメッシュへ流下させる。
- 3) 当該メッシュの標高と最も低いメッシュの標高とが等しい場合は、各々の周辺8メッシュの平均地盤高を求め、最も低い方へ流下させる。
- 4) 当該メッシュが周辺8メッシュの標高より低い場合(窪地になっている場合)、水の流出が表現できなくなる。それを避けるために、周辺8メッシュの最

も低い地盤高より5cm高い地盤高に修正し、強制流出させる(窪地処理)。

図-4は、諫早湾調整池流域に対して作成された落水線図を表している。図中の黒の細い実線は地形図を元に描かれた調整池の流域界を、灰色の太い実線は落水線から求められた分水界を示している。求められた落水線図を参照すれば、地形図と比較しても一部の下流域を除いてほぼ正確な地形の表現がされていることが確認できる。ただし、本明川河口付近(A点)では河道網が実際のものとは異なっており、また流域界と落水線の分水界とが一致していない箇所(B,C,D点)が見られる。この主な原因

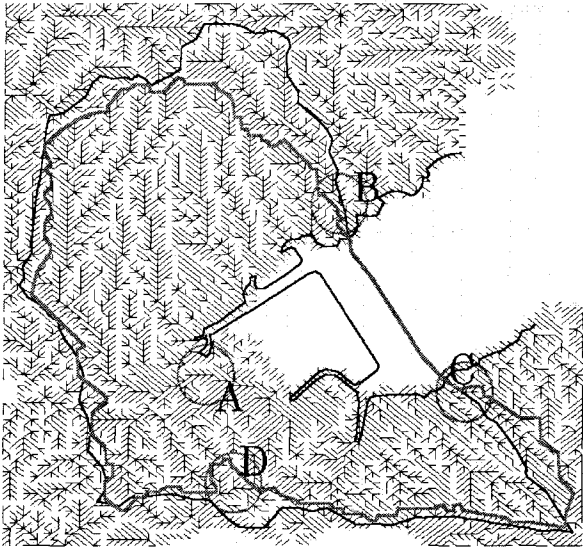


図-4 諫早湾流域の落水線図(修正前)。

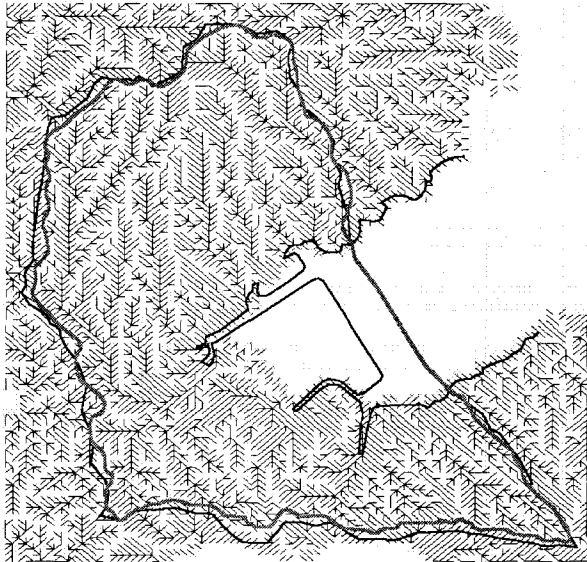


図-5 諫早湾流域の落水線図(修正後)。

表-2 調整池に対する各流域面積の比較。

	流域面積 (km ²)	誤差 (km ²), (%)
地形図による流域界	213.58	
落水線の分水界(修正前)	183.11	30.47 (14.26%)
落水線の分水界(修正後)	201.14	12.44 (5.82%)

としては、落水線が平均地盤高を基にして描かれるのに対し、河川は河床の高低に沿って流れるため、低平地ではこれらの両者が必ずしも一致していないことが上げられる。これらは雨水の流出方向を求める際に、基準の違いにより結果が異なることを示しており、前述された方法で求められた落水線が“正確でない”とは言えない。しかし実際には、雨水が河道に沿って流下するのであり、「流域」の概念がそのような観点から導入されていることは言うまでもない。したがって、基準点に流出する雨水を解析するにあたって、低平地においては河道の方向を考慮しながら落水線の方角を決める必要がある。

もちろん、この種の方法は、とすれば客観性を欠くことにもなりかねない。しかし、本節で検討している問題を完全に解決するためには、考慮すべきメッシュの大きさを際限なく小さなものとする必要があり、計算時間などを考えれば実用的ではない。このようなことから本論では、図-4に示された落水線図を求めた後、その結果を1/25,000の地形図を用いて求められた流域図と比較し、落水線の方角と河道の流下方向とが大きく異なるメッシュを調べ、落水線の方角を河道の流下方向に修正することとした。このようにして求められた結果を示せば、図-5のようになる。

図から明らかなように、一部の修正によって落水線図を用いた流域表現がより適切なものとなり、以下の計算に係る計算精度を飛躍的に向上させることができる。定量的な評価を行うために、修正前後において調整池に対する流域面積の比較を行った。その結果が表-2に示されている。表からも明らかなように、修正後の落水線で決められる流域面積は実際のもものと近似した値になっていることがわかる。

以下では、ここで作成された落水線図を用いて雨水流出量や、汚濁負荷流出量を算定することを試みた。

4. 流れの基礎方程式とその解法

(1) 流れの基礎方程式²⁾

図-6のような2次元平面流として流れを解析する場合、以下の(1)～(3)に示すような質量と運動量の両方を保存させる基礎方程式を解かなければならない。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uh) + \frac{\partial}{\partial y}(Vh) = r - i \quad (1)$$

$$\frac{\partial Uh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\xi_1 U^2 h) + \frac{\partial}{\partial y}(\xi_2 UVh) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{xb}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial Vh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\xi_2 UVh) + \frac{\partial}{\partial y}(\xi_3 V^2 h) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{yb}}{\rho} \quad (3)$$

ここに、 U , V はそれぞれ x , y 軸方向への平均流速、 h は水深、 r は降雨強度、 i は浸透強度、 H は水位、 τ_{xb} , τ_{yb} は

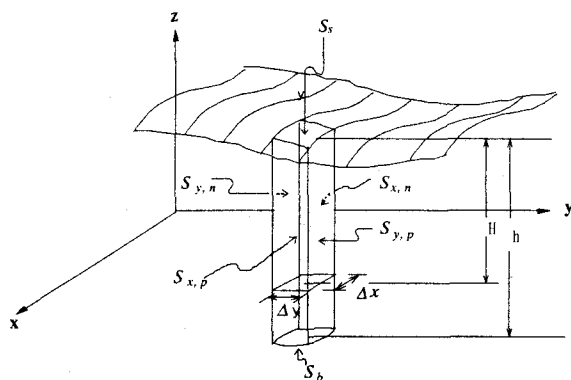


図-6 2次元平面流の概要図。

それぞれ x , y 軸方向へのせん断応力、 ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 は運動量に対する補正係数である。この種の関係式は流れの中に溶け込んでいる汚濁物質の質量においても満足されなければならない。

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\xi_1 CUh) + \frac{\partial}{\partial y}(\xi_2 CVh) = q^{(s)} + q^{(b)} \quad (4)$$

ここで、 C は汚濁濃度、 $q^{(s)}$, $q^{(b)}$ は表面と底面を通して流入する単位面積、単位時間あたりの汚濁量、 ξ_1 , ξ_2 は汚濁の移流量に対する補正係数である。

2次元平面流を解く場合、一般的に(1)～(4)式の基礎方程式が取り上げられる。もちろん、2次元以外で解析する場合には、基礎方程式の形も変わってくる。以下では、落水線を用いることにより、2次元平面流の運動方程式を簡略的に解析する方法を採用した。すなわち、基礎方程式を落水線の方角に1次元的に解こうとするものであり、その方法は次項で示される。

(2) 落水線を用いた数値解析

前述された落水線図を用いて、流域からの汚濁負荷流出の解析を試みた。流れの基礎方程式は前項で示されたとおりであり、(1)～(4)式を2次元平面流として数値解析する手法として数種の方法がよく知られている。いずれにしてもこれらの式は、雨水や汚濁物質の質量保存式であり、流れに対する運動量保存式である。

ところで落水線は各メッシュ毎の雨水が流下していく方向を示しており、落水線図そのものは図-5に示されたような2次元平面上で表されているが、流れは1次元的に表示されている。このようなことから、落水線を用いた流れの解析をするためには、(1)～(4)式を以下のように変形し、統一的表示をしておくことが便利である。

$$\Delta(\theta \cdot h \cdot \delta S) = \left\{ -\theta \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot h \cdot \delta l + Source \cdot \delta S \right\} \Delta t \quad (5)$$

ここに θ は質量や運動量に相当する物理量、 $\vec{v} = (U, V)$,

$\vec{n}$: 外向き単位法線ベクトル、 δl は各メッシュの境界長

さ、 δS は水平面面積で図-6のような場合は $\Delta x \cdot \Delta y$ ，そしてSourceは考えている物理量の生成量であり、 Δt は計算時間間隔である。容易に明らかなように、雨水量に対しては $\theta = 1$ ，汚濁物質に対しては $\theta = C$ ，運動量に対しては $\theta = \vec{v} \cdot \vec{n}$ である。また、生成量はそれぞれの物理量に対して、 $r - i, q^{(s)} + q^{(b)}, -gh\partial H / \partial n - \tau_{nb} / \rho$ (τ_{nb} :法線方向に作用するせん断応力)と表される。

実際に、(5)式を用いて陽形式で差分計算を進めていくにあたっては、CFL条件を満たして計算を安定的に進めることと共に、生成項(Source)の適切な評価が重要になる。すなわち、生成項の評価は雨水流に対してはとりあえず表面流のみを対象に降雨強度のみを考慮した。一方、運動量式の解析には、落水線方向に卓越した流れに対して、マンニングの抵抗則を適用した。ここにマンニングの粗度係数 ($m/s^{1/3}$) は、0.04(都市域)，0.025(水域)，0.025(水田)，0.03(畑地)，0.035(果樹園)，0.06(山林)とした。また、汚濁物質の流域からの剥離量($q^{(b)}$)の算定は、平均的なせん断応力に比例させる形で行った。

すなわち、剥離量を求める際の剥離係数を $\vec{v} \cdot \vec{n} / h^2$ の乗数として定義し、その値を0.8(都市域)，0(水域)，0.5(水田)，0.6(畑地)，0.4(果樹園)，0.2(山林)とした。なお、式中の $q^{(b)}$ の計算は上述された剥離量と沈降量と

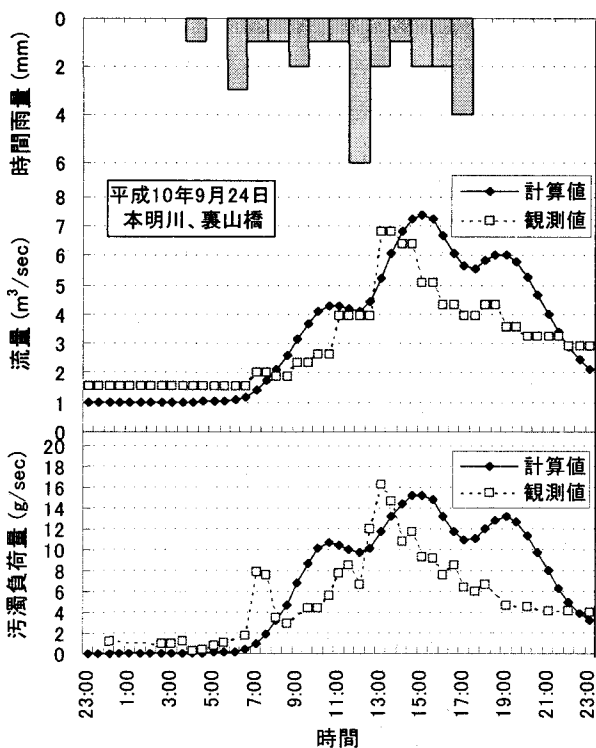


図-7 観測値と落水線図を用いた計算値との比較。

の総和として評価するものとし、対象としている汚濁物質である全窒素の実態にも拘らず沈降量は、一定の沈降速度(0.035m/d)をもつものとして計算した。

前述された方法の有効性について調べるために、図-1に示された本明川の基準地点である裏山橋(河口から6km)での全窒素に対する観測³⁾を取り上げ、計算値と観測値との比較を行ったものが図-7である。図中には上から、平成10年9月24日のハイトグラフ、ハイドログラフ、汚濁負荷量(全窒素)のポリュートグラフが記されている。上で説明された諸式に含まれたパラメータの同定が目下のところ十分には行われていないために、必ずしも観測値と計算値との一致は良好とは言えないが、本方法の有用性は十分に窺える。

上述された方法を用いて長期間に渡る汚濁負荷流出量の解析を行った結果が図-8に示されている。すなわち、図中には上から、日雨量と調整池に流入する流量、日汚濁負荷量の時間的变化が示されている。調整池には本明川を初めとして多数の河川が流入するため、これらの結果の妥当性を直接判定することが難しい。そのため、次節では、結果の妥当性を調整池の水質変化との比較で検討することとした。

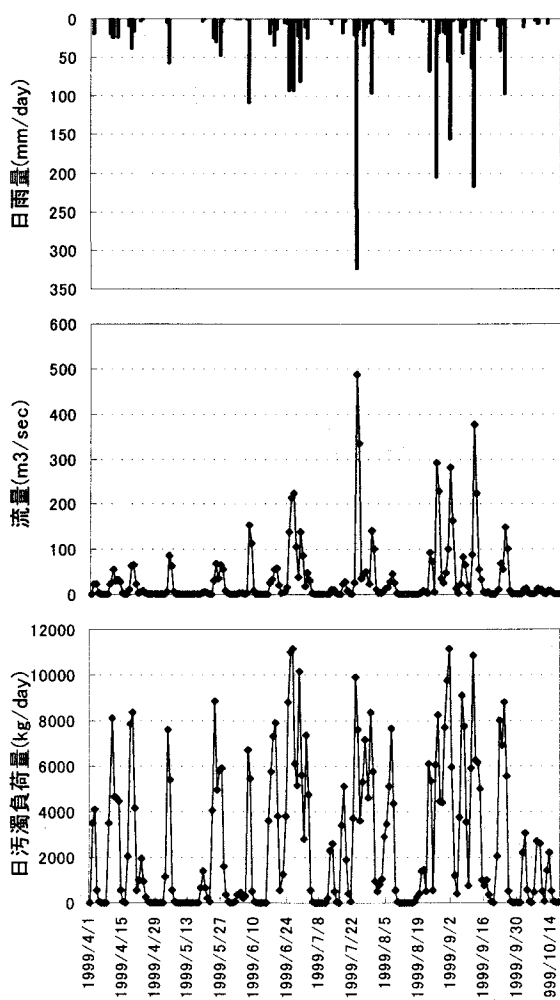


図-8 流量と日汚濁負荷量の計算結果。

5. 調整池の水質変化の予測

上述された目的から、まず、平成11年度(1999年度)に図-1の調整池のS11地点において計測された水質指標(T-N, T-P, COD, SS, DO)⁴⁾の日変化が図-9に示され、併せて本論で示された方法により得られたT-Nの日変化の計算結果が示された。本計算では、流域からの外部負荷として、非点源汚濁負荷に対しては前述された方法で、また、点源汚濁負荷に対しては諫早市により集計されている資料を参考に一定値とする方法でそれぞれ算定し、調整池が完全混合システムであるとされた。

図-9を参照すれば、各水質指標の観測値より6月下旬から7月上旬の期間と10月上旬の期間に、高濃度の濁質が観察されたことがわかる。明らかに前者は、梅雨期の多雨による流域からの雨水流出の影響によるものであり、後者は、秋季の強風による底質の巻き上がりの影響によるものと考えられる。図中のT-Nの観測値と計算値とを対比すれば、両者は必ずしもよく一致しているとは言えない。その主たる原因は、調整池の水質を評価するにあたって本論では、流域からの汚濁負荷流出による外部負荷のみを取り上げているためである。前節でも述べられたように、適切に汚濁負荷流出量を評価するためには、モデルに含まれたパラメータをさらに詳しく同定していく必要がある。この種のパラメータの同定より、調整池の水質に及ぼす外部負荷の影響を評価しうることは明らかである。

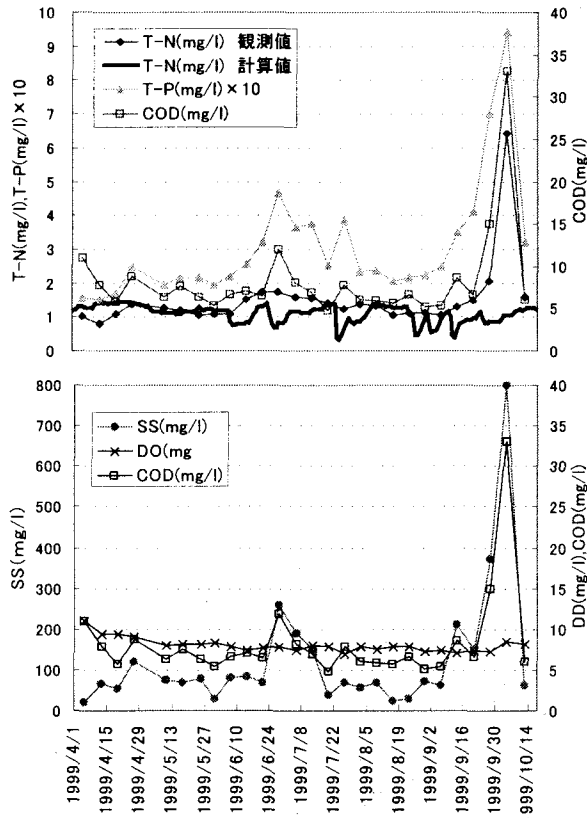


図-9 諫早湾調整池のS11地点におけるT-N, T-P, COD, SSの観測値とT-Nの計算値

6. あとがき

本論で取り上げられたような閉鎖性水域を有する流域では、「流域水質管理」が良好な水環境を実現していく上で非常に重要になる。そのため、流域の状態を定量的に監視し、水域の水質変化に及ぼす影響を定量的に評価することが欠かせない。これらの目的を果たす手段の一つとして、流域からの汚濁負荷流出量の予測手法について検討した。得られた結果を箇条書きで示せば以下のようである。

- 1) 流域水質管理を効果的に進める上で、標高データより求められる落水線図は、その特徴を十分に把握して利用すれば、流域情報をまとめるにあたって有効であることが示された。
- 2) 流域水質管理を進めるにあたって、流域を覆う2次元のメッシュを基本にして整理されたGISデータは、流域からの汚濁負荷流出量予測を”physically based”な観点で行う際に活用されることが再確認された。
- 3) 前項で述べられた作業を行っていく上で、流域の土地利用に応じて非点源汚濁の剥離の程度を評価することが重要になる。本論では、地表面に作用する流れのせん断応力に比例させた形で剥離量の算定を行ったが、今後、降雨時の水質観測を実施し、パラメータの同定を行う必要性が示された。
- 4) 提案されたモデルは、GISデータを活用した流域水質管理に適しており、流域の都市化が水域の水質変化に及ぼす影響を定量的に評価することができる特徴を有している。

謝辞：本研究を行うにあたって、農水省諫早湾干拓事務所の水質調査結果を参考にさせて戴いたことを記して、深甚の謝意を表します。また、西田渉講師(現在、IHE Delft に滞在中)、姜相赫助手や、脇坂辰也氏(卒研究生)、吉田光氏(長崎大学大学院)らの河川工学研究室の学生諸氏にはデータ処理等で日頃から種々ご支援を戴いた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 加藤敏治, 鈴木知, 山下祥弘, 小牧健二: 流域水循環モデル化に関する一考察, 水利科学, p. 22, 1999.
- 2) M.Noguchi, W.Nishida, and Y.Mizuno: Prediction of Nitrogenous Pollutant Runoff due to Stormwater, Int. Sym. Integrated Environmental Management, Nagasaki Univ. & Kangwon Nat. Univ., 2000.
- 3) 野口正人, 西田渉, 姜相赫, 水野良宣, 矢代まゆみ: 降雨時における流域からの非点源汚濁負荷流出機構の解明とそのモデル化に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, 投稿中
- 4) 長崎県生活環境部: 第15回諫早湾干拓地域環境調査委員会資料, 締切後の調整池水質, 2000

(2000. 10. 2受付)