諫早湾干拓調整池流域における 雨天時の汚濁負荷流出量の予測

PREDICTION OF POLLUTANT RUNOFF LOAD FROM BASINS OF ISAHAYA FLOOD REGULATION POND UNDER THE RAIN CONDITION

西田 渉¹・岩尾良太郎²
Wataru NISHIDA, Ryotaro IWAOKI

¹正会員 博士(工) 長崎大学准教授 大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

²学生会員 長崎大学大学院工学研究科 総合工学専攻 (同上)

Recently, the reduction of pollutant load from watershed becomes significant issue for the water quality management at a closed water area. Countermeasure for the nonpoint pollution load is urgently needed. In this study, to predict and estimate the amount of pollutant runoff from watershed under the rain condition, a numerical model was developed. The rainfall-runoff relation was calculated by the runoff function method, and the amount of pollutant-runoff was represented as the function of specific discharge. This model was applied to the prediction of the temporal variation of suspended solids (SS) at four rivers which are flowing into Isahaya flood regulation pond, Nagasaki. Computed results of the flood discharge and the runoff load of SS have good agreements with observed results, and the usefulness of this model was shown.

Key Words : rainfall runoff, pollutant load, lumped model, numerical simulation, suspended solids
Isahaya flood regulation pond

1. はじめに

閉鎖性水域の水質を良好な状態に改善するためには、水域内で発生する内部負荷の削減と共に、流入河川等とおして流域からもたらされる外部負荷の抑制が必要である。ここで、流域からの汚濁負荷量については、近年、生活排水や事業所排水といった点源からの負荷量が減少傾向にあるのに対して、市街地や農用地等を発生源とする非点源からの負荷削減は十分な状況に至っておらず、全負荷量に占める割合が増す傾向にあるとされる¹⁾。そのため、非点源からの汚濁原因物質の流出量の把握と制御方策の構築は益々重要になってきている。

本研究で取り上げる諫早湾干拓調整池は閉鎖性の強い水域である。当調整池では、貯留水の水質の保全と改善を目的とした各種の対策が実施されてきたものの、現在までに設定された環境保全目標値を充足するには至っていない²⁾。水質が改善されない理由は慎重に検討されなければならないが、流域から流出する汚濁負荷量の把握は、汚濁物質の流入による調整池の水質の応答を適切に評価し、より効果的な汚濁負荷削減方策を選定、実行し

ていく上で不可欠である。ここでは、非点源負荷への対応が大切になってきている状況を考慮し、雨天時における汚濁負荷流出量の評価を目的とした予測手法の構築を試みることにした。雨天時の負荷流出量の評価については、これまでに様々な手法が提案されており、目的に応じて形式を選ばなければならないが、流域を空間的に一括して取り扱う集中型モデルとして構成された。これは、分布型モデルに比べてパラメータ数が少なく十分な検定によって実用的なモデルとさせやすいためである。また、モデルによる評価結果を調整池内の物質輸送を数値解析する際の境界条件へ利用しようと考えており、そうした場合については、汚濁物質の流域上での物理的流出過程を重視しなくて良いと判断したことによっている。本論では計算対象の水質指標として浮遊懸濁物質(SS)を取り上げている。

以下では、まず、諫早湾干拓調整池への流入河川で行われた観測結果に基づいてSSと他の水質項目との関連性を述べる。続いて、本研究で用いた雨水流出モデルと汚濁負荷流出モデルについて説明する。最後に、構築したモデルの現地への適用を行い、実測値との比較をととしてその適用性について検討する。

2. 雨天時における河川水の水質

(1) 対象河川

諫早湾干拓調整池の流域と河川の概要を図-1に示す。全流域面積は249km²であり、大小10以上の河川がある。ここでは、以前に行われた連続観測の結果を文献³⁾等で参照可能な一級河川本明川と3本の二級河川(境川、深海川、二反田川)を対象河川に取り上げた。観測地点は図-1のとおりであり、調整池の貯留水が河道流に影響しない位置に取られている。各観測地点における流域面積は、国土数値情報と地形図の読み取りから判別した結果から、本明川: 38.3km²、境川: 17.4km²、深海川: 6.9km²、二反田川: 4.1km²である。次節で示す結果は、2002(平成14)年以降の観測によって得られており、各地点での全観測回数は、雨天時と晴天時を含めて、本明川: 5回、境川: 6回、深海川: 7回、二反田川: 6回となっている。

図-1 対象河川の流域と観測地点の位置図

(2) SSと他の水質指標との関係

各河川で観測されたSSについて、まず、化学的酸素要求量(COD)並びに栄養塩(全窒素(TN)、全リン(TP))との相関図と、各水質指標に対する回帰曲線を図-2に示す。図に示された結果によると、各指標の濃度とSSには正の相関関係があり、SSに由来する成分の評価が水質変化の解明に必要であるといえる。相関の程度は河川や水質指標毎に異なるが、SSとの相関はCODとTPで高く、TNでは低くなる傾向が見られる。雨天時のSSの時間変化については後で示すが、対象河川のSSの濃度は出水時に高くなる。このことを考慮して、SSが高濃度となっているデータを取り上げてTPとSSの比率(TP/SS)を計算すると約1~2mgP/gであり、土壌中のリンの含有量に関する報

図-2 SSとの相関関係図

図-3 SSとNP比との関係図

告値(1.7~2.3mgP/g)^{4,5)}と同程度の値となっている。本来的には、現地試料を測定し比較しなければならないが、雨水の出水に伴って流域から流出した懸濁成分が影響を与えたものと推察される。

つぎに、流出水中のTNとTPの構成比(NP比)とSSとの関係を図-3に示す。この図には、調整池において2002

(平成14)年以降に環境モニタリングとして計測された報告値⁶⁾を用いて算定した値を併記している。計測地点は図-1に記したとおりであり、各地点の表層での結果である。対象河川のNP比は、SSの濃度が低い場合に、あるSS値に対する分布幅が広いが、SSの濃度が高くなるにつれて、その幅は狭まり、また、NP比は小さくなるようである。この傾向を植物プランクトンの細胞組成比を表すRedfield比(NP比=7.2)に基づいて見ると、SSの上昇につれて、リン制限の程度が緩和される傾向にあるといえる。調整池のNP比についてもSSの濃度に応じた同様の变化傾向が見られる。とくに、調整池のSSが200mg/l程度を超える期間は洪水時に相当していることから、河川からの洪水の流入は、調整池内のSSの増加をとおして水中の栄養塩の構成に少なからず影響を及ぼしているものと推察される。流出水のSSと水質との関連性については検討を深めねばならないが、対象河川のCODや栄養塩の濃度は図-2に併記された回帰曲線を用いて評価され得るものとして、ここでは、SSを計算対象に取り上げることにした。

3. 予測モデルの概要

(1) 雨水流出モデル

諫早湾干拓調整池へ流入する河川に対しては、集中型と分布型のモデルによる流出解析事例があるが^{7,9)}、本研究では、著者らが当調整池の流動予測の際に河川の洪水流量の評価に利用している流出関数法を採用した。モデルの構成は既報¹⁰⁾で述べているので、ここでは概要を記しておく。

雨水の流出解析にあたって、国土数値情報を参考に流域の土地利用種別を都市領域、田畑領域、森林領域の3種に大別し、各領域からの流出量进行评估している。なお、森林領域からの流出量については、早い流出成分と遅い流出成分の2成分を想定した。今回の計算は短期流出とみなされる期間を対象としており、地下水流出成分は取り上げていない。ここで、モデルで用いた流域内の土地利用種別領域からの流出流量($Q_j(t)$)の評価式は、次のとおりである¹¹⁾。

$$Q_j(t) = A_j \int_0^t f_j(t) r(t) H_j(t-\tau) d\tau \quad (1)$$

ここに、 t :時刻、 τ :流出の遅れ時間、 A_j :土地利用種別 j の流域面積、 $f_j(t)$:降雨の流出への寄与率、 $r(t)$:実測降雨量、 $H_j(t) : (= \alpha^2 t e^{-\alpha t})$ 流出関数(α は流出に関わる係数)、である。また、降雨の流出については、初期損失量を課し、降雨期間の累積雨量が一定量を超えた後に始まるものとし、その後の降雨の流出への寄与率を累積雨量に応じて増加するものとしている。

流域からの総流量($Q(t)$)は、基底流量(Q_b)を一定値とし

て与え、 Q_b と先記の3種類の領域からの流出量の和($Q(t)=Q_b+\sum Q_j(t)$)として評価している。算定流量は各河川の観測地点における量とみなしたので河道での洪水追跡計算は行っていない。

(2) 汚濁負荷流出モデル

濁質の流出量は流域で発生している流れの状態に依存するものとして取り扱い、雨水流出モデルで算定される比流量の関数として表すことにした。すなわち、流域からの比負荷流出量は比流量のべき乗に比例するものとして基本評価量とおき、この量に基底流出量を加えて総負荷流出量($L(t)$)を次式のとおりに評価した。

$$L(t) = L_b + a q_u(t)^b \cdot g(m(t)) \cdot A \quad (2)$$

ここに、 $L_b : (=C_b Q_b)$ 基底負荷流出量、 C_b :基底流中の濃度、 $q_u(t) : (=Q(t)/A)$ 流域全体の比流量、 A :全流域の面積、 a, b :係数、である。なお、係数 a が負荷量の絶対量を決め、係数 b が流出のされやすさに関わるとされる¹²⁾。関数 g は、対象にする水質項目によっては、流出初期に高濃度となるファーストフラッシュ現象が観測されること、また、洪水期間の負荷流出量と流量との関係が増水時と減水時に異なるといった流量に対する負荷流出量の二価性に対応させるために導入された項である。

関数 g の内容は式(3)のとおりである。この式において、ファーストフラッシュ現象に関しては、他の解析例^{13,14)}と同様に物質の流出限界を課した上で、比流量が流出限界を超えた場合に基本評価量を上回る流出が生じる(関数 $g>1$)ものと仮定した。一方、負荷流出量の二価性については、継続的な流出によって流域面上の物質の存在割合が減少することで汚濁発生源からの流出がなされ難くなるものとし、累積比負荷流出量がある量を超えると負荷流出量が基本評価量を下回る(関数 $g<1$)ものとした。

$$g(m(t)) = \begin{cases} c_1 \left(1 - \frac{m(t)}{m_1} \right) + 1 & : m(t) < m_1 \\ 1 & : m_1 \leq m(t) \leq m_2 \\ \left(\frac{m(t)}{m_2} \right)^{-c_2} & : m_2 \leq m(t) \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $m(t)$:累積比負荷流出量、 m_1 :ファーストフラッシュの継続限界に関わる比負荷量、 m_2 :負荷流出量の低減に関わる比負荷量、である。また、係数 c_1, c_2 は、前者がファーストフラッシュの基本評価量に対する濃度の増加率を表し、後者は負荷流出量の低減の程度を表すパラメータである。なお、既存のモデルでは堆積負荷量の収支式が別途立てられることがあるが、今回の計算対象流域の堆積負荷量に関して十分な観測結果を持ち合わせていないこと、また、計算から直接得られる量を用いることで評価式系を閉じるように構成することを意図したことから、本モデルでは上記のように累積比負荷流出量の関数として取り扱うことにしている。

4. モデルの現地適用と考察

(1) 計算条件

対象河川は第2章で示した本明川と3本の二級河川である。計算期間は、本明川については、洪水の流出初期の水質観測結果が得られている2002(平成14)年10月31日～11月1日とした。他の河川に関しては、時間的に密な計測がなされている2007(平成19)年7月4日を対象にした。降雨量は、本明川を対象にした計算では国土交通省による小野、富川、本野の各観測所における報告値の平均値を与えた。境川と深海川の場合は高木観測所での報告値を、二反田川に対しては森山観測所での報告値を与えた。各雨量観測地点は図-1に示すとおりである。基底流量と基底濃度には、観測開始時の流量と濃度を一定値として与えた。

(2) 雨水流出の計算結果

各計算で雨水流出モデルに入力された α の値を表-1にまとめる。また、計算条件として与えたハイドログラフとモデルで算定された流量ハイドログラフを図-4に示す。

表-1 流出に関わる係数(α)の値

領域種別	本明川	境川	深海川	二反田川
都市	0.20	0.125	0.3	0.3
田畑	0.15	0.08	0.08	0.09
森林	早い流出成分	0.05	0.03	0.028
	遅い流出成分	0.025	0.007	

まず、 α の値は、森林領域、田畑領域、都市領域の順で大きく評価された。この係数は、洪水到達時間と流出高に関連しており、一般に、都市化の進展に伴って雨水排水施設等の整備が進み、雨水が流出しやすくなることを考えると、妥当な関係にあると思われる。なお、二反田川に関しては、最大流量発生後の減水が境川や深海川に比べて速かったため、二反田川を対象にした計算では森林からの流出量は一成分のみで表現されている。

つぎに、流量の計算結果について述べる。観測結果によると、最大流量は、本明川と二反田川では最大時間雨量が測定された後に、また、境川と深海川においては5mm/hの降雨が二度目に測定された後に、それぞれ現れているが、これらの洪水の増水から減水までの変化過程が本モデルによって計算されている。また、精度は河川ごとに若干異なるが、実測された最大洪水流量と洪水到達時間を許容できる誤差の範囲で予測できていると言える。領域種別毎の流出流量については、流出初期の流量は、いずれの結果も都市領域や田畑領域からの成分を主とするが、最大流量の発生時刻付近以降には、森林からの流出成分も加わった流出流が生じるものとして評価さ

れた。こうした流出成分の時間的遷移は各土地利用領域からの流出のしやすさを考えると概ね妥当と思われるが、計算精度の向上のためには、土地利用種毎に計測されたより詳細な実測結果との比較を行う必要があると考えている。

(a) 本明川(2002(平成14)年10月31日～11月1日)

(b) 境川、深海川、二反田川(2007(平成19)年7月4日)

図-4 流量ハイドログラフ

(3) 浮遊懸濁粒子の計算結果

汚濁負荷流出モデルによって算定されたSSの濃度と比流量の時間変化を図-5に、流量と負荷流出量の関係を図-6に示す。また、モデル係数に設定された値を表-2にまとめる。

図-5に示された計算結果と観測結果を比較すると、計

(a) 本明川(2002(平成14)年10月31日~11月1日)

(b) 境川, 深海川, 二反田川(2007(平成19)年7月4日)

図-5 SSの時間変化

(a) 本明川

(b) 境川

(c) 深海川

(d) 二反田川

図-6 流量と負荷流出量の関係

表-2 負荷流出モデルのパラメータ値

	本明川	境川	深海川	二反田川
a	782	318	793	1148
b	2.1	2.4	3.1	3.5
m_1	0	24	22	101
c_1	0	1.4	6.7	163
m_2	18	75	416	2066
c_2	1.7	1.2	2.3	2.3

算結果は、負荷流出の末期における濃度を低く評価していること、また、本明川に関しては出水時間中の実測値が欠測となっており最高濃度の算定精度の検証ができないといった問題点があるが、本モデルは、観測結果に見られる濃度の時間変化の全体的な傾向を表現しており、比流量が急増する時間に発生した濃度の最高値と発生時刻を精度良く予測できていると思われる。二反田川については、最高濃度が現れる約2時間前に生じたファーストフラッシュによると考えられる濃度の上昇が計算結果に明瞭に表現されている。これらの結果を、図-4に示した流量の時間変化と併せて見ると、SSの最高濃度は、森林からの流出流量が最大となる以前に現れていることが分かり、都市領域並びに田畑領域からの流出成分が主になっているものと推察される。図-6に示された流量と負荷流出量との関係に関しては、濃度並びに流量の算定誤差に起因した違いがあり、また、本明川の結果については先記の理由のために計算された最大負荷流出量の妥当性を判断し難いが、流量と負荷流出量の関係は、観測結果と同様に、全て右回りのループとして評価されており、本モデルによって負荷流出量の流量に対する二価性が良好に表現されていると思われる。

モデル係数の値については、係数 b は2を超えていることから、比流量の増加に応じて負荷流出量が急増する状態にあり、 b の値からは、SSの発生要因に洗い出し型($b>1$)¹⁵⁾の流出特性があるものと判断される。なお、係数 a, b は、森林域において、 a =数百～十数万、 $b=3\sim6$ との報告がある¹²⁾。当計算領域には都市域と田畑域を含むので、値の比較には注意が必要であるが、報告値程度となっている。一方、 m_1 と m_2 は、二反田川の m_2 の値が大きいが、これは、負荷流出量が当河川において最も多く、負荷流出量が基本評価量を下回り始めるまでに相応量の累積的負荷流出がなされねばならないためである。なお、本明川については、顕著なファーストフラッシュはなかったものとみなし、 m_1 は零とされた。

以上から、本研究で構築されたモデルの現地への適用性がある程度示されたものと考えている。モデル係数に関しては、観測された流量やSS濃度の時間変化を再現し得る値として評価されているが、それらの妥当性を高めるためには、多くのデータに基づいた検証が必要である。また、SSとの相関が低かったTNについては、現地観測をとおして、その動態把握に努め、適切なモデル化に取り組む必要がある。

5. おわりに

本研究では、雨天時における流域からの短期的汚濁負荷流出量の評価を目的として、雨水流出モデルと汚濁負荷流出モデルで構成される予測モデルの構築を試みた。また、諫早湾干拓調整池への流入河川を対象に取り上げて、本モデルの適用性を検討した。計算対象の汚濁物質としては、CODやTPとの間に強い相関が見られたSSを取り上げている。

計算結果と観測結果との比較から、雨水流出モデルと汚濁負荷流出モデルは簡便な形式で構成されているものの、流量の時間変化を始めとして、ファーストフラッシュ現象や負荷流出量の二価性現象が表現されており、今回のSSの時間変化を概ね再現可能であることが示されたと考えている。ただし、算定されたSSの流出負荷量は、二つのモデルの計算結果に起因した誤差を生じるため、予測精度の向上にあたっては、検証を十分に行う必要がある。また、閉鎖性水域の水質予測にあたっては、長期的な負荷流出量の把握と窒素系汚濁物質の流出量評価が重要であり、今後、これらの課題についても検討していきたいと考えている。

謝辞：本研究の遂行にあたり参照した実測値は、長崎大学名誉教授 野口正人先生をはじめとして、当時研究室所属の学生諸氏、関係各位のご努力によって得られている。ここに記して深謝申し上げます。また、流域界の現地調査と計算用データの作成に協力頂いた平成23年度の

河川環境研究室の4年生 松本崇寛氏、美馬由佳氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省、農林水産省、環境省：湖沼水質のための流域対策の基本的考え方～非特定汚染源からの負荷対策～、p.36, 2006.
- 2) 長崎県：第2期諫早湾干拓調整池水辺環境の保全と創造のための行動計画、p.21, 2008.
- 3) 北島雄太、田中晃司、松永 学、野口正人、西田 渉、鈴木誠二：諫早湾調整池における降雨時の非点源汚濁負荷流出量の予測と評価に関する研究、長崎大学工学部研究報告、Vol.38, No.70, pp.38-43, 2008.
- 4) 佐藤敦久編著：水環境工学 浮遊物質からみた環境保全、技法堂出版、pp.39-43, 2008.
- 5) 西村文武、菅谷真美、赤瀬孝也、増田理子、渡邊政広、津野 洋：柑橘類果樹園地からの流出水水質特性に関する調査研究、水工学論文集、Vol.52, pp.1135-1140, 2008.
- 6) 農林水産省九州農政局ホームページ資料：諫早湾干拓事業、(<http://www.maff.go.jp/kyusyu/nn/isahayaindex.html>).
- 7) Tahat H.M.M., Noguchi M., Nishida W. and Hanada H.: The sensitivity of a physically-based rainfall-runoff model to the physiographic factors of real basin, *Ann. J. of Hyd. Eng.*, JSCE, Vol.39, pp.37-42, 1995.
- 8) 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、Vol.45, pp.61-66, 2001.
- 9) 野村佐和美、野口正人、西田 渉、水野良宣：GISデータを用いた非点源汚濁負荷流出量の予測と評価、水工学論文集、Vol.47, pp.1021-1026, 2003.
- 10) 西田 渉、鈴木誠二、岩尾良太郎、池永雄太：諫早湾干拓調整池における降雨時の流れの予測に関する研究、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.68, No.4, pp.I_793-I_798, 2012.
- 11) 呉 修一、山田 正、吉川秀夫：有効降雨の推定に関する研究、土木学会論文集B、Vol.65, No.3, pp.231-245, 2009.
- 12) 山田俊郎、清水達雄、井上隆信、橘 治国：降雨時における森林集水域からの水質成分負荷流出特性、環境工学研究論文集、Vol.36, pp.217-224, 1999.
- 13) 和田安彦、三浦浩之：分流式下水道の雨水流出に伴う汚濁負荷流出モデルとその適用、土木学会論文集、No.369/II-5, pp.287-293, 1986.
- 14) 脇岡靖明、古米弘明：都市ノンポイント汚染源負荷流出調査に基づく不浸透面堆積負荷流出モデルの検討、土木学会論文集、No.685/VII-20, pp.123-133, 2001.
- 15) 山田俊郎、大江史恵、清水達雄、橘 治国：森林集水域からの栄養塩負荷流出とその特性に関する比較研究、環境工学研究論文集、Vol.35, pp.85-93, 1998.

(2012. 9. 30受付)