

降雨に伴う河川流域からの浮遊懸濁物質の流出量の評価

重龍樹*・西田渉**・鈴木誠二**・江川英仁*

Estimation for Outflow of Suspended Solids from Watershed during the Rainfall Condition

by

Ryuki SHIGE*, Wataru NISHIDA**, Seiji SUZUKI** and Hideto EGAWA*

In recent years, the grasp of pollutants loads from watershed is needed for water quality improvement of water quality in receiving water area. The main purpose of this study is the estimation of pollutant runoff from watersheds in rain condition. In this study, the distributed type model on rainfall runoff and pollutants runoff was developed and applied to the four watersheds in Nagasaki. It is considered that the developed model could simulate the observed temporal variation of suspended solids and typical runoff phenomena such as the first flush and the two valued relationship between pollutants runoff loads and the discharge.

Key words: *nonpoint source, distributed model, rainfall runoff, pollutant runoff, suspended solids*

1. はじめに

水域の水質保全において流域からの流出水の質的制御は重要な課題である¹⁾。流域には汚濁物質の発生源として、点源と非点源の形態が存在するが、近年の傾向として、点源負荷は排水水質の法的規制や下水道システムの普及、浄化処理技術の向上等によって軽減されつつあるのに対し、非点源負荷については、発生源が広範囲であり、また土地利用状況や降水の状況に応じて現存量と流出率が変化するために、主な発源領域の特定や発生量の評価が容易でなく、総流出負荷量に占める流出負荷量の割合が増える傾向にあるとされる²⁾。

ここでは、上述の背景から、非点源からの汚濁物質の流出を取り上げる。非点源からの物質の流出は雨水の流出時に発生するので、流出負荷量の算定には雨水流出解析手法を併用する必要がある。一般に、この解析手法には、集中型モデルと分布型モデルがあり、分布型モデルを用いた研究には山下ら³⁾、橋本ら⁴⁾、市川ら⁵⁾をはじめとして多くの研究がある。著者らも集

中型モデルを用いた雨水と流出負荷量の解析を行ってきており、現地への適用をとおして、有用性を明らかにしている⁶⁾。一方で、実流域の土地利用状況や地形、植生等は雨水の流出速度と流出過程、降雨遮断による有効降雨量を空間的に変化させる。そのため、これらを雨水と汚濁物質の流出解析に、より適切に反映させるには、分布型モデルによる表現が適切であると考えられる。

以上のことから、本研究では降雨時における汚濁負荷流出量の評価を目的として、分布型の雨水流出モデルと汚濁負荷流出モデルの構築と実流域への適用を行った。本論では、まず、研究対象流域における負荷流出の状況として、浮遊懸濁物質(SS)と他の水質項目との相関関係と流出特性を示す。つぎに、解析に用いたモデルについて述べる。最後に、モデルの現地への適用結果をとおして、対象流域における降雨時の流出負荷量を評価する。

平成 26 年 7 月 8 日受理

* 工学研究科博士前期課程 (Graduate School of Engineering)

** システム科学部門 (Division of System Science)

2. 対象流域の概要並びに SS と水質項目との関係

2.2 流域の概要

Fig. 1 に対象流域の概要図と雨量観測地点を示す. 本研究で用いる水質計測値は過去に観測された結果であり⁷⁾, その連続観測地点も同図に示している. これらの流域は, 長崎県の二級河川の境川, 深海川, 二反田川, 山田川の流域である. 国土数値情報を用いた解析結果から, 各流域の流域面積と土地利用状況は, 境川: 17.4km², 深海川: 6.9km², 二反田川: 4.1km², 山田川: 9.1km², であり, 境川, 深海川, 山田川は全流域面積に対する森林領域の割合が大きく, 二反田川流域は都市域の割合が多い.

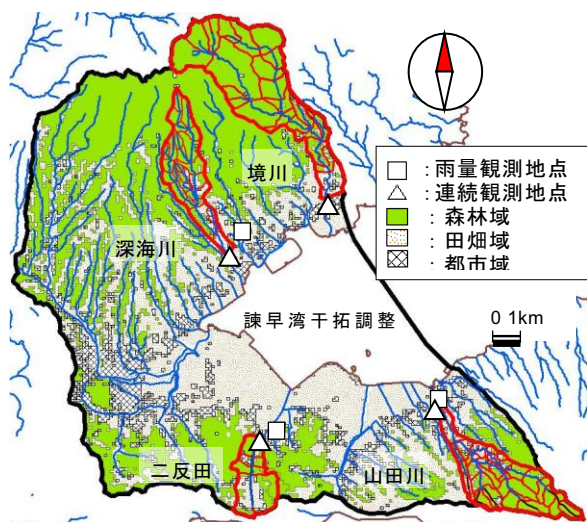


Fig. 1 対象流域と各観測地点の概要図

2.2 SS と他の水質項目との相関関係

Fig. 2 は, SS と有機汚濁と栄養塩に関連する水質項目(化学的酸素要求量(COD), 全リン(T-P), 全窒素(T-N))の相関関係図と, SS に対する各水質項目の回帰式と決定係数(R²)である. SS と COD, T-P の決定係数の平均値は 0.93, 0.92 であり, 相関関係が高いことがわかる. T-P に関しては, SS の計測値に土壌コロイドも含まれていると考えられる. 土壌コロイドは有機物を吸着・保持することが知られており, また, 沈降・堆積効果が弱く, 流水による長期移動が可能である. こうした土壌コロイドの特性から, SS と T-P との間に強い相関関係が現れたものと推察される. SS と T-N の相関は他と比較すると弱いものの, 本研究では相関があると見なし, 解析対象項目として SS を取り上げることにした.

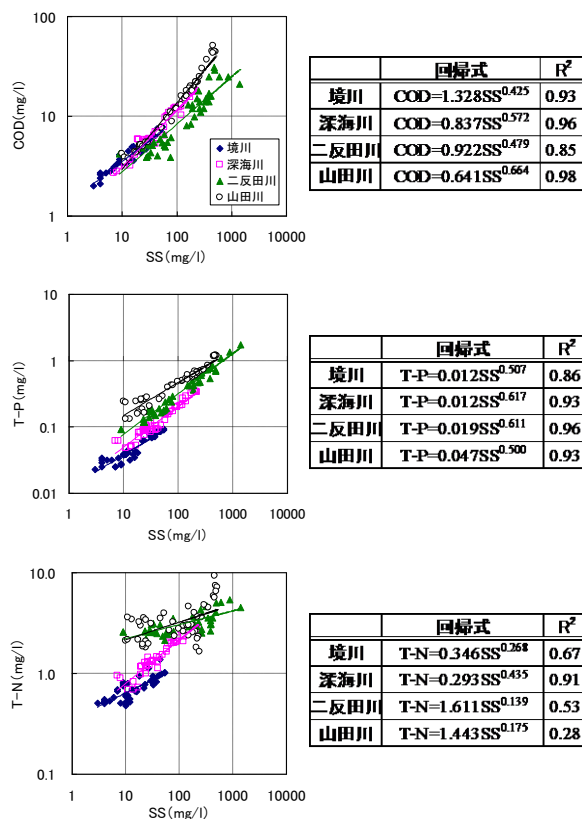


Fig. 2 SS と他の水質項目との相関関係

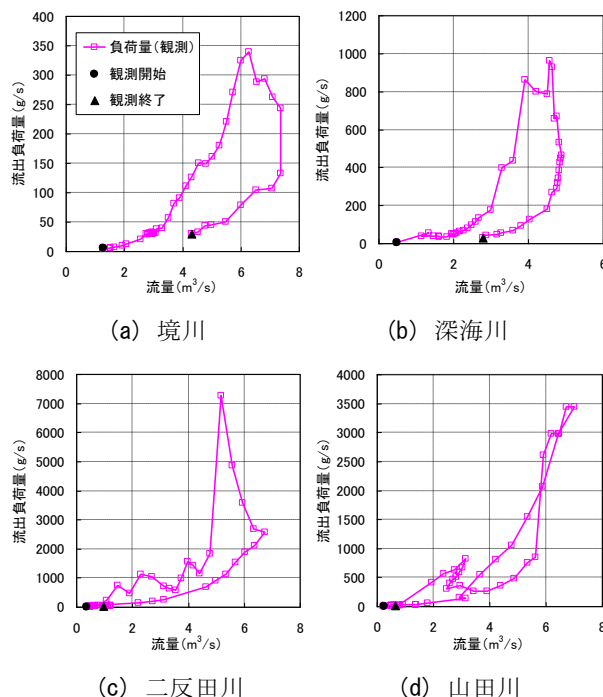


Fig. 3 負荷量と流量の関係

2.3 流出負荷量と流量との関係

流出負荷量と流量の関係を示すと Fig. 3 のとおりである. 観測開始時から終了時までの流量と流出負荷量

降雨に伴う河川流域からの浮遊懸濁物質の流出量の評価

の変化を時系列順に見ると、境川、深海川、二反田川では右回りのループを描いていることがわかる。これは増水期初期における流域からの僅かな雨水流出に伴い、易流出性の物質が流出したためと推察される。山田川においては、洪水到達直後に右回りの挙動を示すが、次第に左回りのループとなる等、複雑な変化を呈している。右回りの期間は上記と同様の現象と考えられ、左回りの期間は流域から流出した負荷が遅れて到達していると考えられる。以上のことから、対象流域では、同一の流量とは言え、流出初期と後期に流出負荷量が流量に対して異なる値を取る二価性が存在することが示唆された。今回の観測期間では上記なループを描くが、降雨量や降雨強度、降雨継続時間などによりループの形状は変化すると考えられるため、今後も観測を継続して上記の因子等との関係を明らかにする必要がある。

3. モデルの概要

3.1 雨水流出モデル

雨水流出モデルとして Kinematic Wave モデルを用いており、基礎方程式は次のとおりである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_{in} \quad (1)$$

$$h = p_1 \cdot q^{p_2} \quad (2)$$

ここに、 h ：流出水の水深、 q ：流出水の単位幅流量、である。 r_{in} は横流入量であり、計算では、流域からの雨水流出の計算で降雨量が、また、河道流の計算では流域からの流入流量が与えられる。アスファルト舗装や家屋の屋根等、不浸透性材で地表面が覆われている都市域では表面流出とし、流水の抵抗則として Manning 則を適用し、 $p_1=(n/i^{0.5})p^2$ 、 $p_2=3/5$ (n ：Manning の粗度係数、 i ：流域の斜面勾配)を与える。河道の流水もこれと同様に扱っている。田畑域や森林域の地表面は浸透能が高いことから、流出流を中間流として取り扱い、流速を Darcy 則で表現し、 $p_1=1/Ki$ 、 $p_2=1$ (K ：透水係数)を与えた。実際の降雨には降水遮断や窪地貯留等による初期損失雨量が存在する。このモデルでは、初期損失雨量を越えた後に雨水の流出が始まり、有効雨量は降雨量に流出率を乗じて評価した。流出率 $f(t)$ は式 (3) で求めている。

$$f_j(t) = \frac{R(t) - R_{0j}}{R_{0j}} \quad (3)$$

ここに、 $R(t)$ ：累積雨量、 $R_{0j}(t)$ ：土地利用種 j における初期損失雨量、である。ここで、Fig. 4 に流出率の概念図を示す。累積雨量が損失雨量を超えるまでの間は $f(t)$ の値は零となり、有効降雨は零とされる。田畑域や森林域など樹冠を有し、降雨遮断量が多い領域では、流出開始になるまでの時間が長く(期間①)、都市域などの不浸透性域が多い領域では短くなる(期間②)。その後、 $f_j(t) > 0$ となった後の流出率については、都市域では値の増加率が高くなるように設定することとし(破線)、田畑域と森林域では緩やかな増加となるように取り扱うこととした(実線)。

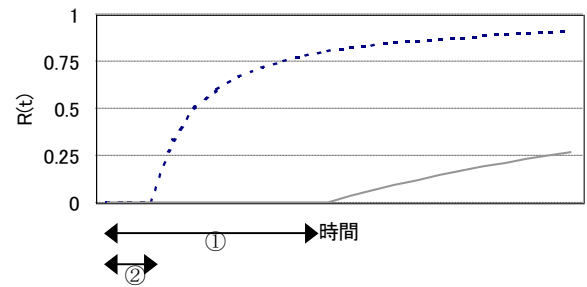


Fig. 4 流出率の概念図

3.2 汚濁負荷流出モデル

汚濁物質は、移流による輸送が卓越するものとして、次の式で評価した。

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Cq}{\partial x} = C_{in}r_{in} + src \quad (4)$$

ここに、 C ：SSの濃度、 C_{in} ：横流入水の濃度、 src ：生成項、である。 src に関しては、河床からの巻き上げ効果は考えないものとしている。流域での発生負荷量は次の式で表現した⁶⁾。

$$src = a_j \cdot Q^{b_j} \cdot g_j(m_j(t)) \quad (5)$$

ここに、 a 、 b ：流出負荷量に関わるモデル係数、である。発生負荷量は基本的に流域で発生する流れの状態に応じて評価する。ただし、雨水流出開始直後に流出した物質が高濃度になるファーストフラッシュ現象が、また流出負荷量の流量に対する二価性現象があることを表現するために、累積流出負荷量に応じて変化する関数 $g(m(t))$ を導入している。関数 $g(m(t))$ の内容は次のとおりである。

$$g_j(m(t)) = \begin{cases} c_{1j} \left(1 - \frac{m_j(t)}{m_{j1}} \right) + 1 & : m_j(t) < m_{j1} \\ 1 & : m_{j1} \leq m_j(t) \leq m_{j2} \\ \left(\frac{m_j(t)}{m_{j2}} \right)^{-c_{2j}} & : m_{j2} \leq m_j(t) \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 $m(t)$: 累積流出負荷量, m_{ij} : ファーストフラッシュの継続期間に関わる負荷量, m_{2j} : 汚濁負荷流出量の減少期に関わる負荷量, c_{1j} : ファーストフラッシュ時の発生負荷量の増加率を表す係数, c_{2j} : 流出負荷量の減少量に関わる係数, である. 計算では, 物質の流出限界流量を課しており, 流れが発生限界流量を越えた後に流出が始まるものとした. 流量が発生限界流量を超えると, 易流出性物質の流出による増分を加味して $g(m(t)) > 1$ とする. その後は, 基本的な評価量での負荷流出があるものとし, この間に $g(m(t)) = 1$ とする. その後, 斜面に存在する物質量が減少し, 物質の流出がされ難くなる期間に $g(m(t)) < 1$ として流出量を評価することにした.

各モデルの基礎方程式の離散化手法として陽形式の有限差分法を採用している.

4. モデルの現地適用と計算結果

4.1 計算条件

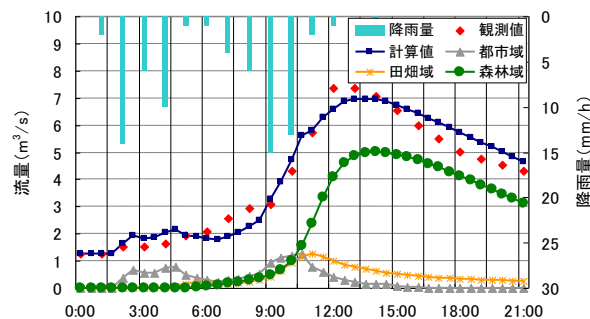
計算対象は境川と深海川, 二反田川, 山田川の 4 つの流域であり, これらの流域を国土数値情報から得られる標高データに基づいて, それぞれ 42 個, 52 個, 8 個, 52 個の小流域に分割した. 計算対象期間は連続観測が行われた 2007(平成 19)年 10 月 31~11 月 1 日である. 降雨に関して, 境川と深海川での計算では高来雨量観測所での観測値を与えた. 二反田川と山田川を対象にした計算では森山雨量観測所, 山田川雨量観測所での観測値をそれぞれ与えている. なお, 雨量は 1 時間雨量である. 時間方向の差分間隔は 1 秒あり, 空間方向の差分間隔は 10m とした.

4.2 雨水流出モデルの計算結果と考察

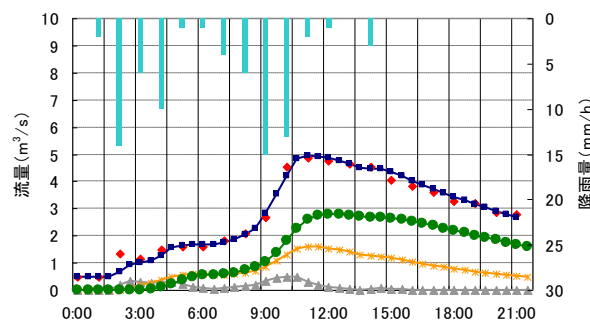
モデルから算定された流量ハイドログラフは Fig. 5 のとおりである. これらの図から, 最大洪水流量や洪水到達時刻を良好に再現できていると考えられる. ここで, 土地利用種毎の流出流量については, 全ての流域において, 洪水到達初期の主な雨水流出源は都市域であり, 都市域から流出した雨水が観測地点に到達した後に田畑域と森林域からの流出成分が到達することがわかる. これは, 田畑域と森林域の初期損失雨量が都市域に比べ多いためである. また, 雨水流出に土地利用種毎の流出特性の違いを都市域で表面流出, 田畑域と森林域で中間・地下水流出としては表現しており, 各流出成分の流出速度を考えると, 雨水の流出が上記の順で始まるのは妥当な結果と考えられる.

ここで, 諫早湾干拓調整池から見て, 境川と深海川

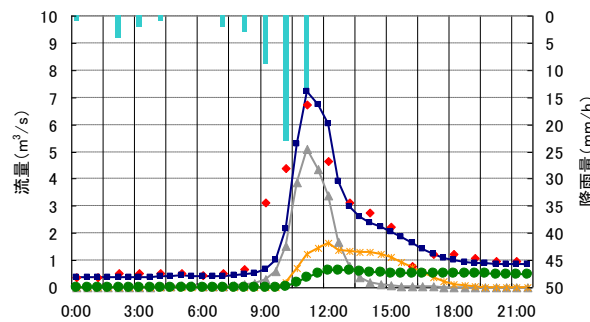
を北側流域, 二反田川と山田川を南側流域すると, 北側流域の主な雨水流出源は森林域であるのに対し, 南側流域では都市域であるのがわかる. 北側は雨水の流出速度の遅い森林域の全流域面積に占める割合が高い



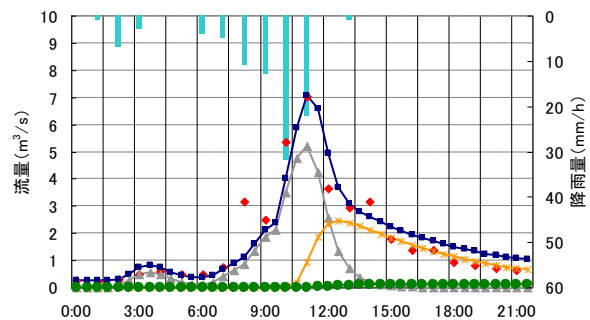
(a) 境川



(b) 深海川



(c) 二反田川



(d) 山田川

Fig. 5 雨水流出モデルの計算結果

降雨に伴う河川流域からの浮遊懸濁物質の流出量の評価

ため、南側流域に比べて、減水時間が長くなると考えられる。一方、南側流域の主な雨水流出源は都市域であるために、短時間に雨水の流出が終わることがわかる。総降雨量や降雨形態に応じて洪水波形は変化すると考えられるため、今後も継続的に調査検討を行う必要がある。

4.3 汚濁負荷流出モデルの計算結果と考察

計算でえられたSSの濃度変化はFig. 6のとおりである。全体的にSSの到達時刻や最大濃度を表現できていると思われる。

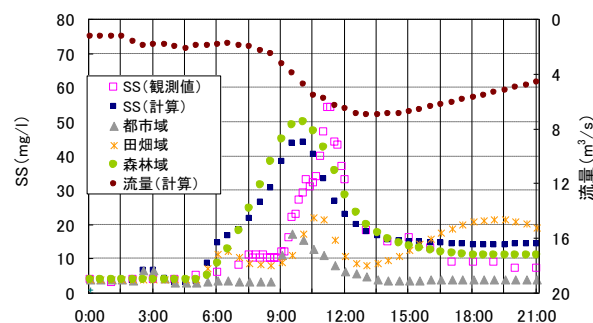
まず、ファーストフラッシュ現象について述べる。深海川ではファーストフラッシュの発生が良好に評価されているが、二反田川と山田川の計算結果においては、その継続期間の濃度低下が十分に表現されたとはいえないものの、ファーストフラッシュの特徴である濃度の急増は再現できていると考える。

つぎに、土地利用種毎の流出について述べる。ファーストフラッシュ期間のSSの発生源は都市域であり、モデルが都市域に存在する易流出性物質の流出を表現できていることがわかる。また、田畑域と森林域にも都市域と同様に、SSの流出直後に高濃度となる様子が確認できる。減水期におけるSSの発生源は、田畑域と森林域が主であり、上流域に位置する田畑域と森林域で発生したSSが遅れて到達した結果と推察される。これらから、当汚濁負荷流出モデルが土地の空間分布を反映できていると判断できる。

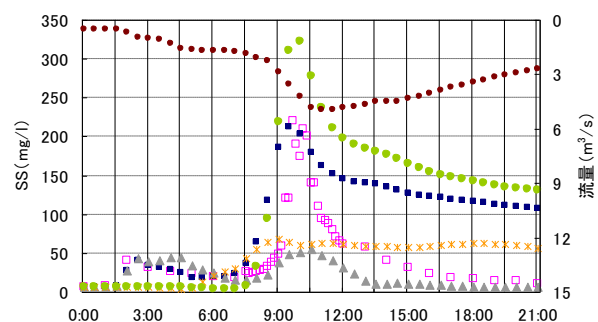
ここでSSの流出量について述べる。Fig. 7は土地利用種毎の流出負荷量の時間変化である。深海川の計算期間の後半では、濃度の計算値が観測値を大きく上回っているために流出負荷量も過大に算定されている。境川と深海川に関しては、森林域からの流出量が他の土地利用域からの流出量に比べ多い。二反田川と山田川では都市域からの流出量が多い。また、最大流出負荷量は境川、深海川、山田川、二反田川の順で多い。これらの結果から、森林域からの流出量が主である流域では最大流出負荷量が比較的少なく、都市域からの流出量が主である流域では最大流出負荷量が多くなる傾向にあることがわかる。雨水流出モデルで算出された流量の時間変化と併せて見ると、全ての河川で土地利用域からの流出流量が最大となる以前に最大流出負荷量が発生していることがわかる。このことから、流量が最大となる以前に、流域に存在するSSの割合が低下し、発生し難くなるものと推察される。

最後に、負荷量の流量に対する二価性について述べる。Fig. 8はモデルから得られた流出負荷量と流量と

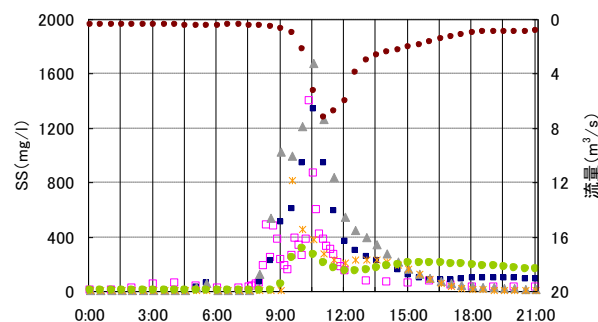
の関係である。山田川で観測された複雑な変化は再現されていないが、境川と深海川、二反田川において、値は異なるが、流出負荷量が流量の増減に応じて観測結果と同様に右回りのループを描くように評価されてい



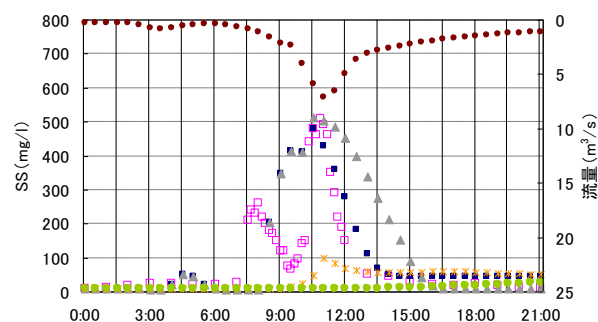
(a) 境川



(b) 深海川

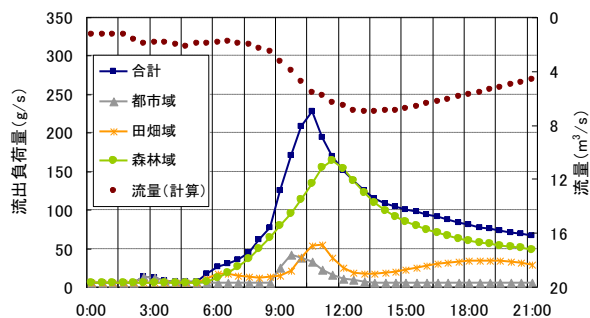


(c) 二反田川

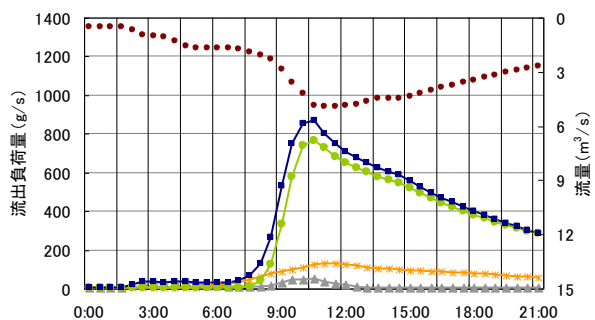


(d) 山田川

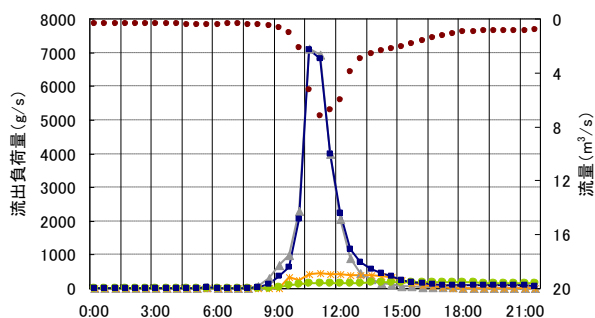
Fig. 6 SSの計算結果



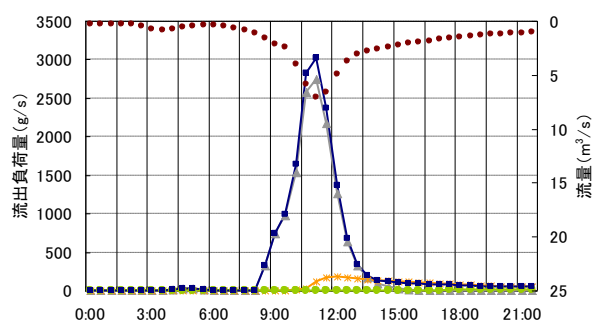
(a) 境川



(b) 深海川



(c) 二反田川

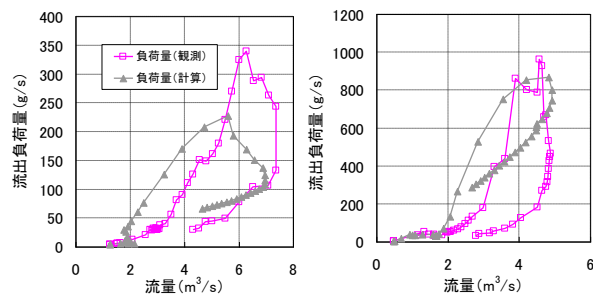


(d) 山田川

Fig. 7 土地利用種毎のSSの流出量

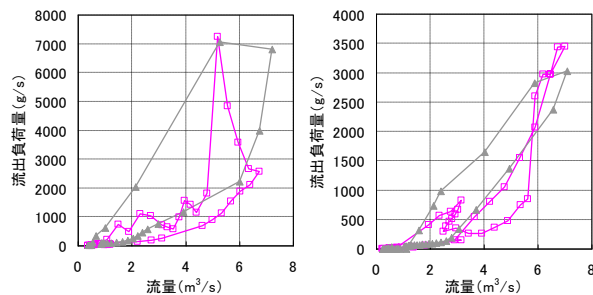
ることがわかる。このことから、二価性現象の表現のために取り入れた関数 $g(m(t))$ が有効に機能していると評価できる。

5. おわりに



(a) 境川

(b) 深海川



(c) 二反田川

(d) 山田川

Fig. 8 汚濁負荷流出モデルによる流量と流出負荷量の計算結果

本研究では、降雨時に河川流域から流出するSSの流出量の把握と評価を目的とし、分布型の雨水流出モデルと汚濁負荷流出モデルの構築を行い、長崎県の4つの二級河川流域に適用し、得られた結果から流出量の評価を行った。

観測結果から、研究対象に取り上げた河川流域においてファーストフラッシュの発生や流出負荷量の流量に対する二価性が確認された。モデルの現地適用から、本研究で用いたモデルは流量と流出負荷量の時間変化を再現できたものと考えている。雨水流出の計算結果から、最大洪水到達直後までは主に都市域からの流出であり、減水期は田畑域や森林域からの流出であることが確認され、本モデルによって土地利用の空間分布と流出成分の違いを表現可能になったものとする。汚濁負荷流出の計算結果からは、都市域だけでなく、田畑域と森林域においても増水初期にSSが高濃度になること、流量が最大となる前に、流域に存在するSSの割合が減少すること等が確認できた。また、境川と深海川では森林域、二反田川と山田川では都市域からの流出が主となることも示された。

今後の課題として、ファーストフラッシュ期間や減水期における計算結果の精度向上のために、関数 $g(m(t))$ の再検討を行う必要がある。また、今回はSSを計算対象に取り上げたが、他の水質項目の流出量の評価を試みることなどが挙げられる。

降雨に伴う河川流域からの浮遊懸濁物質の流出量の評価

参考文献

- 1) 環境省：水質総量削減制度導入指針，p.82，2011.
- 2) 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.
- 3) 山下三男，市川 新：分布型モデルへの適用を目的とした森林小流域における降雨流出モデルの提案，水工学論文集，Vol.50，pp.307-312，2006.
- 4) 橋本晴行，朴 埼璨，高岡広樹，荒渡光貴：山地流域における豪雨時の水と土砂の流出解析，水工学論文集，Vol.47，pp.745-750，2003.
- 5) 市川 温，藤原一樹，中川勝広，椎葉充晴，池淵周一：沖縄地方における赤土流出モデルの開発，水工学論文集，Vol.47，pp.751-756，2003.
- 6) 西田 渉，岩尾良太朗：集中型モデルによる降雨時の浮遊懸濁物質の流出量予測に関する研究，土木学会論文集G(環境)，Vol.68，No.7，pp.III_761-III_767，2012.
- 7) 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(70)，p.38-43，2008.