

土砂生産・流送モデルの開発

DEVELOPMENT OF A DISTRIBUTED MODEL OF SOIL EROSION AND SEDIMENT RUNOFF FOR WATERSHED

石尾 将大*・金 海生*・宇野 哲平*
Shota ISHIO, Haisheng JIN and Teppei UNO

A sediment runoff model can be used for the prediction of the reservoir sedimentation and the comprehensive sediment management. However, most of the models are restricted to limited areas and do not consider the influence of land use. In order to expand the scope of application, it is necessary to construct the new model.

In this study, we developed a model that can be applied to mixed land use areas. By reference to the WEPP model in Ushitsu-River watershed in Saga prefecture, we confirmed good accuracy between observed and predicted flow rate and suspended sediment concentration.

Keywords : soil erosion, sediment transport, sediment runoff, rill erosion, interrill erosion, WEPP model, kinematic wave method, hydrological model, reservoir sedimentation, comprehensive sediment management

1. はじめに

ダム堆砂予測や総合土砂管理を行うため、土砂生産から流出・流出までの土砂動態を評価する解析モデルの必要性が高まってきている。土砂動態の予測手法としては、主に山地流域を対象とした江頭ら¹⁾、山野井ら²⁾、砂田ら³⁾のモデルが挙げられる。しかし、これらのモデルは土地利用ごとの降雨流出・土砂流出過程を考慮しておらず、土地利用が混在した流域への適用事例もないため、田畑や市街地が混在した流域への適用は難しい。一方、土地利用を考慮したモデルとして、主に農地を主体とした小流域を対象とした物質循環モデルの WEPP^{4)~6)} (Water Erosion Prediction Project)、HSPF⁷⁾ (Hydrological Simulation Program - Fortran) 等が提案されている。しかし、これらのモデルは農地を対象とした物質循環モデルとして発展してきたもので、幅広い粒度の土砂動態を扱っているものではないため、適用される粒径区分も山地流域対象の土砂動態モデルに比べ少なく、また土砂流送の部分に関しては山地流域対象のモデルに比べ簡易的なものになっている。そのため、土砂動態を評価するモデルとして使用するには課題がある。

これらのことから、今後土砂動態モデルを発展させていく上で、これらのモデルの長所を組み合わせ、適用範囲を広げた新たなモデルを構築する必要があると考えられる。本研究では、土地利用ごとの降雨流出過程・土砂流出過程を考慮した斜面ベースの分布型土砂生産・流送モデルを開発し、実流域への適用を行った。

2. 解析対象流域

本研究の解析対象流域の佐賀県牛津川流域を図-1に示す。流域面積は 87km²、河道延長は 13km である。気象観測地点は図中○、流量および懸濁物質濃度（以降 SS と呼ぶ）観測地点は図中△で示してある。気象観測地点は流域周辺に 5ヶ所、流量観測地点および SS 観測地点は 1ヶ所存在する。本研究では、対象流域の最下流に位置する妙見橋地点の観測流量と SS を再現対象とした。土地利用は、森林の割合が 50% で最も多く、次いで草地（農地）が 19%、水田が 18%、都市域（建物・道路）が 8%、水域が 3%、裸地が 1% で、それぞれの土地利用に対してパラメータを設定して計算を行った。

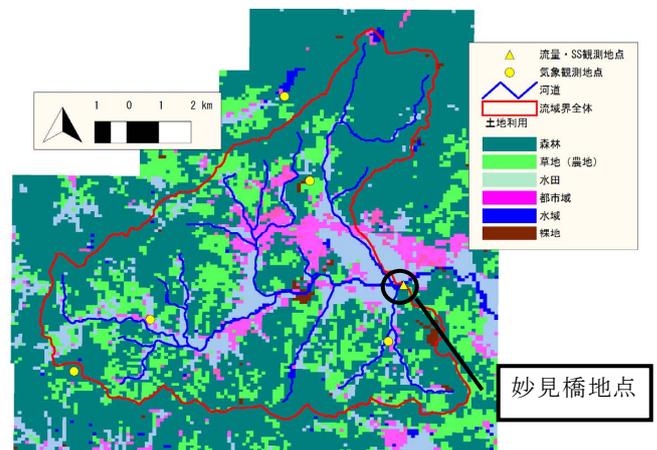


図-1 解析対象流域

* 技術本部 中央研究所 総合技術開発部

3. モデルの概要

流域の再現法としては、江頭ら¹⁾の単位斜面・単位河道モデルを適用した。また、土地利用については、斜面要素ごとに、それぞれの土地利用に与えた粗度係数等のパラメータを用いて降雨流出・土砂生産モデルを解き、最終的に土地利用面積率を乗じた値を合算する方法（以降モザイク法と呼ぶ）で考慮した。また、土砂生産過程については、既往の論文^{2), 8)}において、斜面崩壊や凍結融解などが考慮されているが、本研究では土地利用が混在している流域へも適用可能なWEPPモデルで用いられている土地利用が斜面地表流および雨滴衝撃による侵食（リル・インターリル侵食）を扱った。

本研究で構築したモデルの計算過程の概要を図-2に示す。まず、気象データ・地形データから、降雨流出モデルおよび河道流モデルを用いて斜面流量と河道流量を算出する。降雨流出モデルにおいては、蒸発散および積雪・融雪を考慮する。次に、降雨量および斜面流量を用いて、土砂生産モデルより土砂生産量を算出する。そして、これらのデータを用いて、土砂供給モデル、土砂輸送堆積モデルにより、各地点での流砂量を求める。以降に各モデルについて詳述する。

(1) 降雨流出モデル

1) 斜面流モデル

降雨流出過程のモデル化手法には様々なものがあるが、本モデルでは斜面要素型のモデルで流出寄与域の変動が考慮できるkinematic wave法を適用した。以下に、kinematic wave法の基礎式を示す。

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

$$q = ch^m \quad (2)$$

ここに、 t : 計算ステップ間隔

x : 斜面流が1ステップで進む距離

h : 水深

q : 単位幅流量

r_e : 有効降雨量

α, m : 斜面流定数

式(2)には、表面流の計算にはManning式、地中側方流の計算にはDarcy則が適用される。表面流の計算に用いる等価粗度については、土地利用別に再現性を考慮して値を設定した。

また、斜面流を計算する際、計算ステップの最初に鉛直方向の水のやり取りを計算した。流域の斜面は異なる透水係数を持つ2層を持つものとした。鉛直方向の水のやり取りについては、鉛直浸透、蒸発散および積雪・融雪を扱う。土地利用が都市域（不浸透域）に該当する場合は、地中への浸透はないものとし、表面流のみ計算することとした。

鉛直浸透モデルについては、国総研資料⁹⁾を参考に構築し、各層の体積含水率は、Mualemの式(式(3))を用いて鉛直方向および斜面方向の透水係数を計算した。

$$k_r(\theta) = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_0 - \theta_r} \right)^n \quad (3)$$

$$k = K_0 k_r(\theta) \quad (4)$$

ここに、 k_r : 相対透水係数

k : 不飽和透水係数

K_0 : 水平方向または斜面方向の飽和透水係数

n : Mualemの定数

θ : 体積含水率

θ_0 : 飽和水分量（飽和含水率）

θ_r : 残留水分量（最低含水率）

蒸発散については、ハーモン式(式(5)～式(7))を用いて可能蒸発散量を算出し、斜面流量を上限として実蒸発散量を斜面流量から減じることで考慮した。また、蒸発散は降雨時には生じないものとした。

$$E_p(i) = 0.14 D_0(i)^2 P_i \quad (5)$$

$$P_i = \frac{217 \times e_{sat}}{T_i + 273.15} \quad (6)$$

$$e_{sat} = 6.11 \times 10^{7.5 \frac{T_i}{T_i + 237.3}} \quad (7)$$

ここに、 i : 月

$E_p(i)$: 日平均可能蒸発散量

$D_0(i)$: 12時間/日を単位とする*i*月の月平均可照時間

P_t : 飽和絶対湿度

e_{sat} : 飽和水蒸気圧

T_i : 月平均気温

積雪・融雪量の算出には、Degree hour法を用いた。積雪量は、気温が2℃以下の場合に降雨を雪と判断し、積雪水

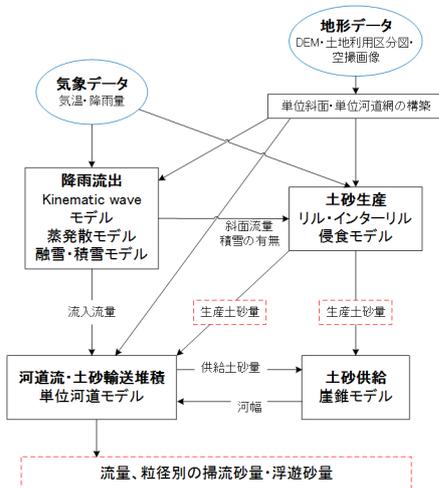


図-2 モデルの計算過程

量を積み上げた。融雪量は積雪水量を上限として、以下の式で計算した。

$$HT = HTI + HR + HG \quad (8)$$

$$HTI = C_1 \times TT \quad (9)$$

$$HR = PR \times \frac{TT}{80} \quad (10)$$

ここに、 HT : 融雪量

HTI : 日射・気温による融雪量

HR : 降雨による融雪量

HG : 地熱による融雪量 (0.02mm/hr)

C_1 : Degree Hour 係数 (0.208mm/°C /hr)

TT : 気温

PR : 降雨量

また、積雪深が 0 を超えている場合は、斜面流による土砂流出は発生しないものとした。

2) 河道流モデル

河道流の計算は、江頭ら¹⁾のモデルと同様に河道を単位河道とみなし以下の式で計算を行った。

$$\frac{\partial B_{ci} h}{\partial t} = \frac{1}{L} \{Q(x_i) + Q(y_i) - Q(x_{i+1})\} + q \quad (11)$$

$$Q(x_{i+1}) = \frac{1}{n} B_{ci} I^{2/3} h^{5/3} \quad (12)$$

ここに、 h : 単位河道 i における水深

B_{ci} : 単位河道 i における河幅

L : 単位河道 i における河道長

I : 単位河道 i における河床勾配

n : 単位河道 i におけるマンニングの粗度係数

$Q(x_{i+1})$: 単位河道 i からの流出流量

$Q(x_i)$ 、 $Q(y_i)$: 単位河道 i への流入流量

q : 左右斜面からの単位長さ当たりの流入流量

単位河道の断面は矩形を仮定し、河床勾配は下流河道との標高差から算出した。また、河幅 B_{ci} の算出にはレジーム則 ($B_{ci} = 3.5 \times Q(x_{i+1})^{0.5}$) を用いた。

(2) 土砂生産モデル

本モデルでは、土砂生産機構として、リル・インターリル侵食を取り扱った。リル侵食（雨裂侵食）とは、降雨に起因した水の流れによって地表面が削られる現象で、インターリル侵食とは、雨滴の衝撃によってリル間（インターリル）の土壌が侵食される現象である。リル・インターリル侵食は、WEPP モデルを参考にモデル化した。以下にリル侵食式およびインターリル侵食式を示す。土地利用が都市域の場合は、斜面流量、降雨強度に関わらず、土砂生産量は 0 とした。

$$D_C = K_r \times (\tau_f - \tau_c) \quad (13)$$

$$Q_{DC} = D_C \times \frac{A_{rill}}{\rho_s} \quad (14)$$

$$D_i = K_i \times I_e \times \sigma_{ir} \times SDRrrr \times \left(\frac{R_s}{w + R_s} \right) \quad (15)$$

$$Q_{Di} = D_i \times \frac{A_{irill}}{\rho_s} \quad (16)$$

ここに、 D_C 、 D_i : 単位面積当たりのリル・インターリル侵食による土砂輸送量

K_r 、 K_i : リル・インターリル侵食性係数

Q_{DC} 、 Q_{Di} : リル・インターリル侵食による土砂生産量

A_{rill} 、 A_{irill} : リル・インターリル侵食面積

τ_f : 流れの掃流力

τ_c : 限界掃流力

ρ_s : 土砂の比重

I_e : 有効降雨強度

σ_{ir} : 表面流量

$SDRrrr$: 土砂輸送割合

R_s : 雨裂間隔（一般的に 1.0m）

w : 雨裂幅

侵食性に関する係数 K_r 、 K_i 、および土砂輸送割合 $SDRrrr$ については、WEPP モデル^{4),6)}で適用されている値を参考に土地利用別に設定した。 K_r 、 K_i は 0 ~ 1 の値をとり、裸地など侵食を受けやすいエリアは 1 に近い値、草地など侵食を受けにくいエリアは 0 に近い値になる。また、侵食面積 A_{rill} 、 A_{irill} については、大澤ら⁵⁾を参考に以下の式で算出した。

$$A_{rill} = w \times N_{rill} \times dx \quad (17)$$

$$A_{irill} = (L - w \times N_{rill}) \times dx \quad (18)$$

$$dx = U_s \times dt \quad (19)$$

ここに、 N_{rill} : リル本数

U_s : リルにおける流速

(3) 土砂供給モデル

土砂供給モデルについては、山野井ら²⁾の崖錐侵食モデルを用いた。崖錐モデルの概念図を図-3に示す。崖錐モデルとは、生産された土砂が河道脇に堆積し、出水による水位上昇・河道幅拡大とともに河道内に取り込まれ流下する現象をモデル化したものである。山野井らのモデルでは、生産された土砂は単位河道の片側に堆積すると仮定していたが、本モデルでは左右斜面それぞれの地形データで生産土砂量を計算しているため、土砂は単位河道の両側に堆積するものとした。崖錐侵食モデルの式を以下に示す。

$$Q_{sup} = L \times H_{si} \times \frac{dB}{dt} \quad (20)$$

$$B = B_{sli} + B_{sri} + B_{ci} - B_{vi} \quad (21)$$

- ここに、 L : 河道長
- Q_{sup} : 土砂供給量
- H_{si} : 崖錐の高さ
- B_{sli}, B_{sri} : 左右斜面の崖錐の幅
- B_{vi} : 谷幅

崖錐の粒度分布については、土砂生産量と土砂供給量の収支から毎ステップ更新した。また、崖錐が形成されないと考えられる地域については、土砂供給モデルは適用せず、生産された土砂が直接河道に流入するものとした。

(4) 土砂輸送・堆積モデル

河道における土砂輸送量については、掃流砂量を芦田・道上の式、浮遊砂量を芦田・道上式を用いて算出した。また、河床粒度分布の計算は、初期河床の下に交換層を設定し、交換層における各粒径の含有率を以下の式で求めることを行った。

$$\frac{\partial p_{bk}}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)E_m} \left[\frac{1}{B_s} \frac{\partial Q_b}{\partial x} + (q_{su} - \omega_f C_b) \right] + \frac{p_{bk}}{E_m B_s} \frac{\partial A_b}{\partial t} = 0 \quad (22)$$

- ここに、 p_{bk} : 交換層（河床低下 ($\delta A_b / \delta t < 0$) の場合、交換層の下の層)における粒径 d_k の含有率
- λ : 河床材料の空隙率（一般に 0.4）
- E_m : 交換層の厚さ（最大粒径程度）
- B_s : 掃流幅（今回の場合は河幅）
- Q_b : 掃流土砂量
- q_{su} : 河床からの浮遊砂浮上速度
- ω_f : 土粒子の沈降速度
- C_b : 河床面での浮遊砂体積濃度
- A_b : 河床変動面積

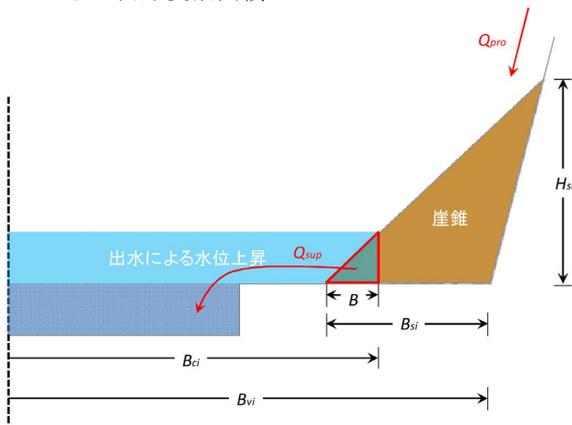


図-3 崖錐モデルの概念図

土粒子の沈降速度の算出には Rubey の式を用いた。また、今回のモデルでは河床変動に伴う河床勾配の変化は考慮せず、常に一定と仮定した。

4. モデルの適用と再現性の確認

構築したモデルを牛津川流域に適用し、モデルの妥当性を検討した。解析対象期間は 2013 年 1 月～12 月の一年間とした。対象流域は、地形データをもとに 33 個の支流域に分割した（図-4）。各斜面要素に与える降雨量および気温は、箇所の気象観測所のデータを用いてティーセン法によって算出した値を用いた。

(1) 各パラメータ設定

各支流域の面積、斜面勾配、河道勾配等の地形データは GIS データより読み取った値を用いた。河道の粗度係数は 0.05 とし、斜面の等価粗度は、河川砂防技術基準¹⁰⁾と WEPP モデル⁶⁾を参考に、再現性を考慮して土地利用別に表-1 に示す値を与えた。斜面の鉛直・水平透水係数および有効間隙率は、パラメータ同定の結果、表-1 に示す値とした。河床および斜面の粒度分布は、既往の粒度調査結果^{11),12)}を参考に図-5 に示す値を設定した。

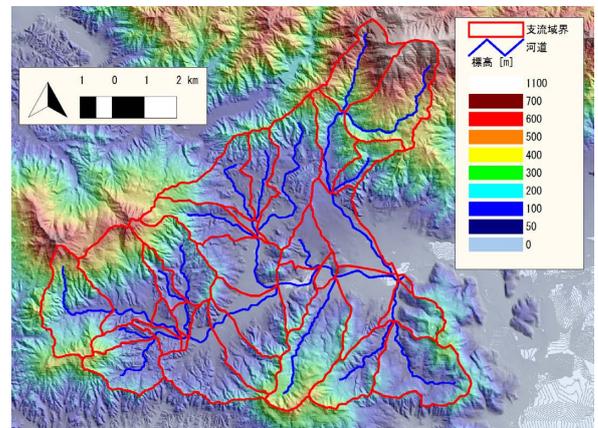


図-4 対象流域の支流境界

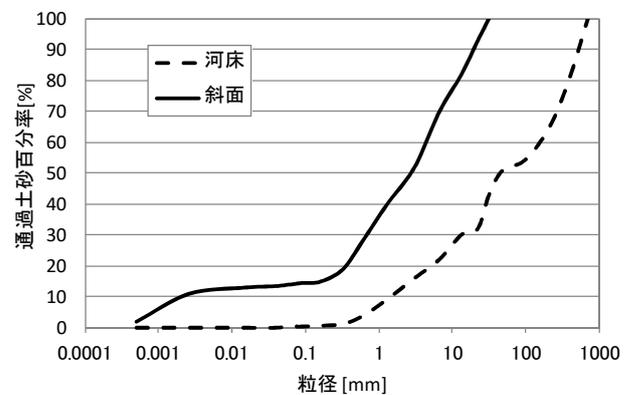


図-5 斜面・河床の粒度分布

表-1 各設定パラメータ

	森林	草地(畑)	裸地	水田	都市域
等価粗度	2.0	1.0	0.65	1.0	0.1

	第1層	第2層
飽和透水係数 [m/s]	0.001	0.0003
有効間隙率	0.5	0.4

(2) 計算結果

1) 流量・SS

流量の計算結果と実測流量との比較を図-6に示す。流量ハイドログラフの適合性を評価する指標として一般的に用いられる Nash-Sutcliffe 係数 (1 に近いほど再現性が良いとされ、0.7 以上で十分な再現性があるとされている) は 0.82 で、降雨流出モデルの良好な再現性が確認された。また、SS の計算結果と実測値との比較を図-7、図-8に示す。平常時の濃度、出水時の立ち上がり等、一定の再現性が確認されたものの、一部結果は実測値に比べ過大な値となった。これは、単位河道モデルが土砂輸送モデルとしては非常に簡易的なものであること、また、SS の精度には流量の影響も大きいこと、出水のピークのタイミングのずれ等が、SS の再現性に影響していると考えられる。そのため、単位河道モデルの検証、流

量ピークの再現性も含め今後の課題とする。また、本解析の計算所要時間は約7分で、解析手法として実用的なレベルにあると判断される。

2) 生産土砂量と輸送土砂量

各支流域における生産土砂量と輸送土砂量を図-9に示す。流域全体の総生産土砂量は年間約 30000m³で、単位面積当たり換算すると約 345m³/km²となった。土砂生産量は流域ごとに異なるため評価が難しいが、ダムへの年間平均比流入土砂量をまとめた芦田ら¹³⁾の論文によると、単位面積当たりの年間土砂生産量はおよそ 10 ~ 10000m³/km²であることから、本結果は妥当な範囲にあると考えられる。また、図に示すように、支流域別の生産土砂量、輸送土砂量を算出することが可能なため、土砂管理において非常に有益な情報を得ることができる。

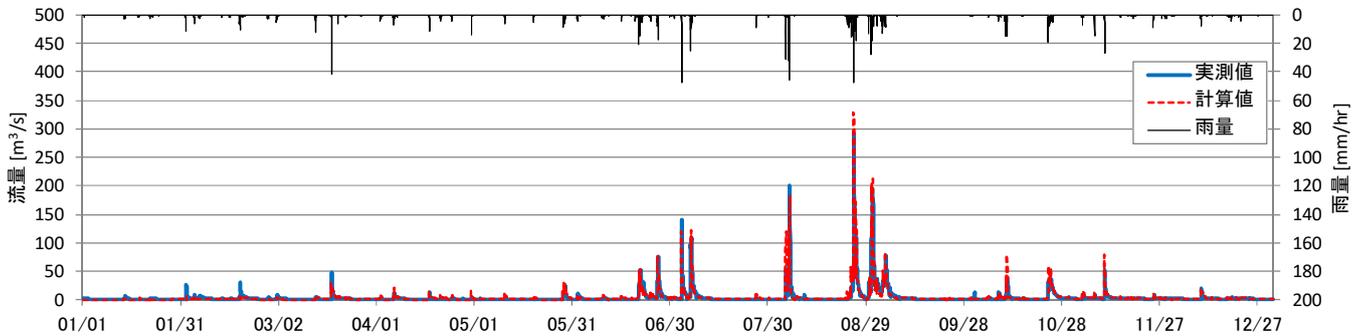


図-6 実測流量と計算値の比較

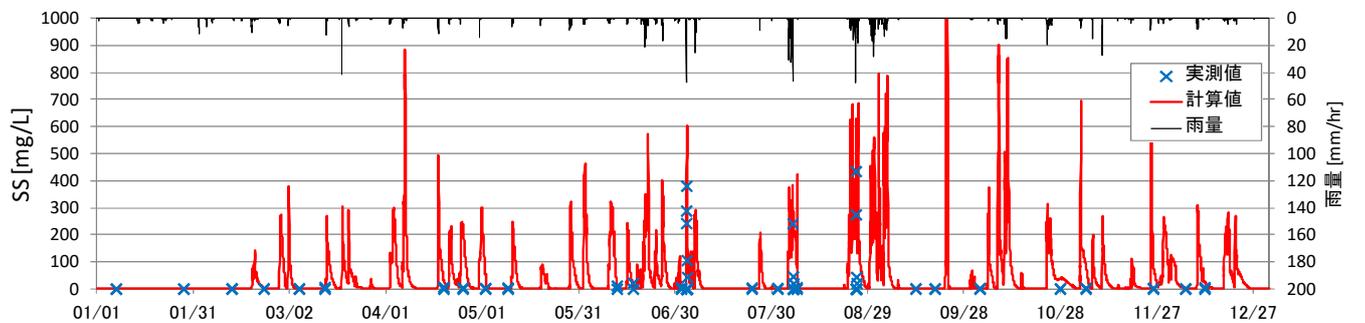


図-7 SSの実測値と計算値の比較(時系列)

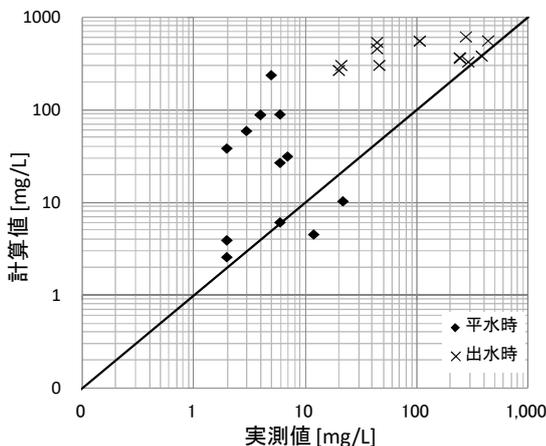


図-8 SSの実測値と計算値の比較

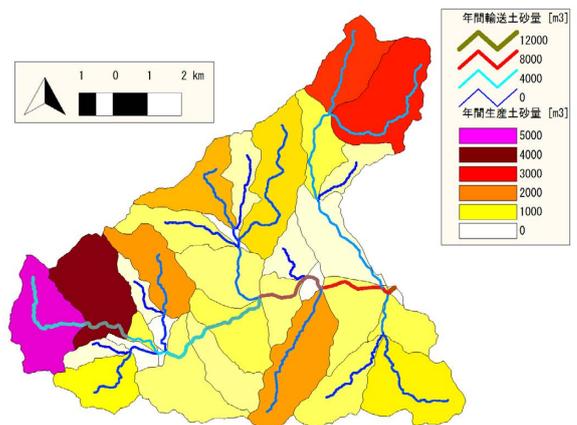


図-9 年間生産土砂量と年間輸送土砂量

5. モデルへの土地利用の反映手法に関する検討

土地利用が混在する場合の計算手法として、本モデルのように、土地利用ごとに各モデルで計算を行い、土地利用別に算出された値に面積占有率を乗じることによって斜面要素単位の値を算出するモザイク法と、解析の前段階で土地利用別のパラメータと土地利用ごとの面積占有率から各パラメータの重み付き平均値を算出し、その値を用いて斜面要素単位で解析を行う方法（以降加重平均パラメータ法と呼ぶ）が考えられる。一般的に、分布型モデルへの土地利用の影響の反映手法にはモザイク法が採用されることが多く、本モデルの構築の上で参照している WEPP モデルにおいてもモザイク法が用いられている。しかし、モザイク法のパラメータと同様のパラメータを用いて、加重平均パラメータ法で計算した際に、仮にモザイク法とほぼ同様の結果が得られるということであれば、パラメータの物理的根拠を失うことなく、短時間で長期間の解析を行うことができる加重平均パラメータ法も有用な方法であると考えられる。ここでは、モザイク法を用いた前章の結果と、加重平均パラメータ法を用いて算出した結果を比較し、土地利用の反映方法について検証した。加重平均パラメータ法で計算する際の各パラメータについては、前述の再現計算と同様の値と各支流の土地利用面積率から算出した。

流量と年間の生産・輸送土砂量の結果を図-10、図-11

に示す。流量は、基底流量にはほとんど差はないものの、ピーク流量は $10 \sim 50 \text{m}^3/\text{s}$ の差が確認された。また、生産・輸送土砂量は、全体的に増加し、また、土地利用が混在している下流部の結果で大きな差が確認された。これは、浸透や土砂流出のない都市部の影響が加重平均パラメータ法ではうまく表現できないためと考えられる。このことから、牛津川流域のような土地利用が混在している地域を対象にした解析には、モザイク法を適用するのが望ましいと考えられる。

6. おわりに

本研究では、ダム堆砂予測や総合土砂管理を行うため、土砂動態モデルの適用範囲の拡大を目的として、既往の土砂動態モデルを参考にしながら、土地利用を考慮した斜面ベースの分布型土砂生産・流送モデルを開発した。そして、土地利用の混在する牛津川流域への適用を行い、流量、SS について一定の再現性を確認した。また、モデルにおける土地利用の反映方法についての検討を行い、土地利用が混在している場合はモザイク法が適していることを確認した。

今後は、凍結融解、斜面崩壊、河岸崩壊、土石流等その他の土砂生産機構の適用、および融雪・積雪モデルを活かした積雪地帯への適用も実施していきたいと考えている。

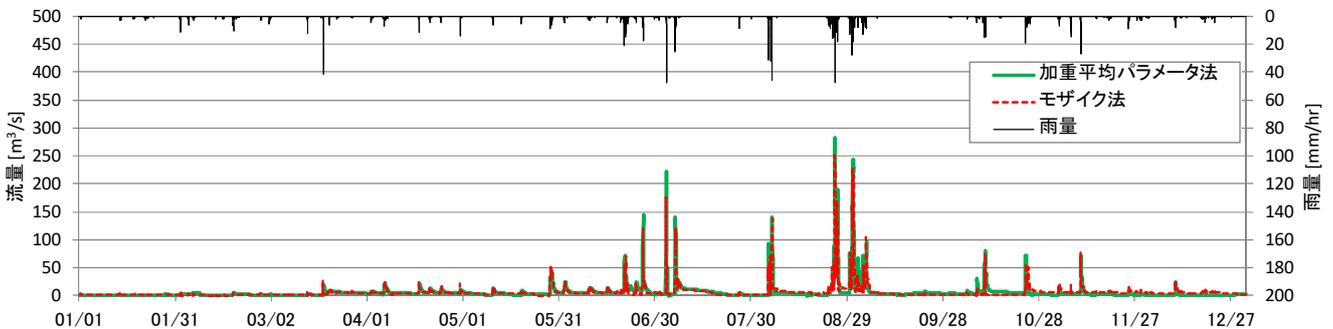


図-10 モザイク法と加重平均パラメータ法での流量の比較

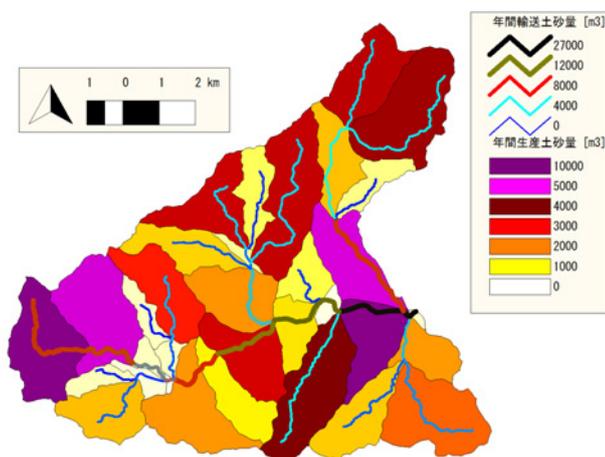


図-11 加重平均パラメータ法での年間生産土砂量と年間輸送土砂量

参考文献

- 1) 江頭進治、松木敬：河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法、水工学論文集、第 44 巻、pp.735-740、2000
- 2) 山野井一輝、藤田正治：土砂生産・土砂供給・土砂輸送堆積統合型モデルの開発と山地流域への適用、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.70、No.4、I_925-I_930、2014
- 3) 砂田憲吾、長谷川登：国土数値情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み、土木学会論文集、No.485、pp.37-44、1994
- 4) D.C.Flanagan, M.A.Nearing : USDA – Water Erosion Prediction Project Hillslope Profile and Watershed Model Documentation, NSERL Report, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, No.10, 1995.7
- 5) 大澤和敏、池田駿介、高椋恵、酒井一人：農地主体の小流域に対応した侵食・土砂流出モデルの構築、水工学論文集、第 50 巻、pp.1027-1032、2006
- 6) 独立行政法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水文チーム：WEP モデル解説書（試用版）（案）、2012.2
- 7) Johanson, R.C., Imhoff, J.C., Davis, H.H. : Users manual for the Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) version No. 5.0, US EPA Environmental Research Laboratory, 1980
- 8) 山野井一輝、藤田正治：豪雨時の水・災害に関わるハザード郡の発生リスク評価、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.72、No.4、I_1291-I_1296、2016
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部：国土技術政策総合研究所資料 地下水モデルに関する研究 報告書、ISSN 1346-7328、国総研資料、第 322 号、2006.3
- 10) 国土交通省水管理・国土保全局：国土交通省河川砂防技術基準調査編、第 3 章、第 2 節、pp.16-19、2014.4
- 11) 国土交通省河川局：六角川水系河川整備基本方針 土砂管理等に関する資料（案）、2008.7
- 12) 金屋敷忠儀、芦田和男、江頭進治：山地流域における濁度物質の生産・流出モデルに関する研究、第 24 回水理講演会論文集、pp.143-151、1980.2
- 13) 芦田和男、奥村武信：ダム堆砂に関する研究、京都大学防災研究所年報、No.17 B、pp.555-570、1974.4

