京都大学防災研究所年報 第 55 号 B 平成 24 年 6 月
Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 55 B, 2012

分布型流出モデルに沿ったマクロスケールでの土砂生産・輸送モデリングの基礎的研究

浜口 俊雄・田中 拓馬(1)・小槻 峻司(1)・田中 賢治・峠　嘉哉(1)・安部 雅宏(2)

(1) 京都大学大学院工学研究科
(2) 国土交通省

要　旨

本研究は，分布型流出モデルに合わせて広域分布で考察できるような土砂生産・輸送モデルを作り上げるための基礎的な考察を行う。そこでは流砂水理学の基礎式に対して，流域分布の検討が可能な流出モデルと同じスケール・同じサイズの数値モデルとして扱えるように考える。放射線物質輸送解析とその影響評価も可能なように，沈降・巻き上げて移動する浮遊砂，ないしは流体力で河床移動する掃流砂に着目し，これらを流出解析の結果と連成して検討できるモデル作成を試みた。はじめに土砂輸送観測値のある流域での計測結果と計算結果を比較して妥当性があることを確認し，次に実流域での計算を行った。その際，流量も土砂輸送量も大雨時に精度が大きく落ちたが，2011 年の HQ 式推定のハイドログラフとも比較した結果，ダムの影響で精度が落ちていることを確認した。少雨時に本モデルは両者の変動特性を表現できており，分布型土砂輸送モデル作成の目的は達せられた。

キーワード：分布型流出モデル，土砂生産，土砂輸送，掃流砂，浮遊砂

1．序論

昨年 3 月 11 日に起きた東日本大震災によって福島原子力発電所事故が発生し，そこから 3 月 15 日に放射性物質が飛散してしまうという非常事態が生じた。その際に飛散した放射性物質は主にテルル 132(半減期 約 3 日)，ヨウ素 131(同 約 8 日)，ヨウ素 132(同 約 2 時間)，キセノン 133(同 約 5 日)，セシウム 134(同 約 2 年)，セシウム 136(同 約 13 日)，セシウム 137(同 約 30 年) の 7 種であることが確認されている。ただし，ヨウ素 132 はテルル 132 が壊変して出来るため，実際のヨウ素 132 の放射能はテルル 132 の半減期に従って減衰する関係にある。事故直後はテルル 132 とヨウ素 132 が線量の約 80% を発生させていたが，約 3 週間後には核種壊変特性でそれらはほぼゼロになり，セシウム 134・137 が線量の約 90% を発生させていた (松村ら，2011) 。現在の放射能発生源となるセシウムは両同位体ともに土粒子や有機物に吸着しやすく，また半減期も年単位で長く，さらには広域に飛散しているため，長期的視野に立って広域でセシウム移動を検討する必要がある。その吸着したセシウムは，表層の土粒子移動または分解された有機物細粒分の移動とともに下流側へ輸送されると予想される。通常，土砂生産・輸送はそれぞれ降水による侵食とその後の表面流によって河川へ運ばれ，河川の流動で輸送されており，その一部にセシウム付着土砂があるものと考えられる。

ところで既往研究ではすでに多数の放射性物質に関する動態解析がなされきており，著名なものとしては，同物質の大気拡散シミュレーションの「緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI)」が挙げられる。しかしながら，これらの多くは上述の例の様に大気拡散解析までであり，同物質飛散後に降雨による表面流で拡散する影響の時空間解析（地表側の影響再分配解析）は極めて少ない。特に，長期的視野に立った影響解析はほとんど見受けない。そこで，飛散後の放射性物質の動態を考察するために，流域単位での土砂輸送とその付着物の輸送をシミュレートする研究はとても有用である。ただし，先述のように，事故から約 3 週間後にはセシウム 134・137 が線量の約 90% を発生させている。流域環境を

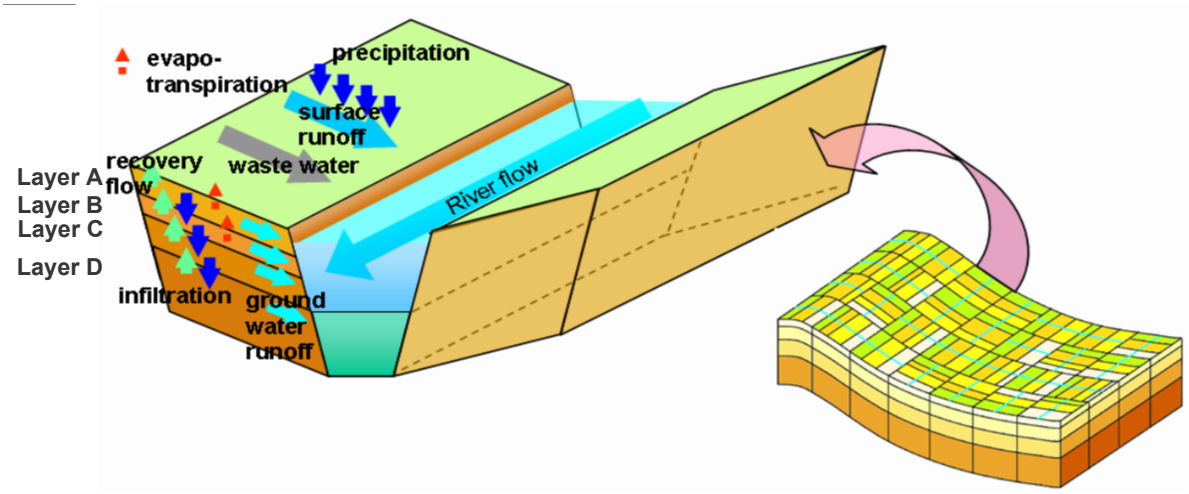

Fig.1 Schematic view of Hydro-BEAM

評価する上で数年のうちに自然に解決されるレベルの短期的な放射性物質からの影響でなく，長期的視野に立った影響を考え，少しでも将来への悪影響を提言できるような対策を検討せねばならないことを鑑みて，その対象物質動態の解析結果を得るために，セシウムについてのみ言及していく。

短期に下流へ輸送される土砂(河床へ一度も沈降せずに流下するウォッシュロード)ならびにその土砂へ付着した放射性物質に関しては，河川の流下時間とほぼ同じになる。例えば阿武隈川であれば上流から流れても８日程度で河口部まで到達してしまい，事故当初物質に付着せず飛散していたヨウ素131が表面流で洗い出されて河口部まで流達していた場合と同じく，流域環境としては自然が解決してくれていることと同じになってしまう。それゆえ流下中の影響は年単位の半減期を想定する長期的視野から見れば瞬間的な影響と見なせることになる。そこで，短期ではなく下流へ輸送される掃流砂(河床に停留しながら流体力で徐々に流下する土砂)と浮遊砂(河床に沈降していたものが流体の乱れから拡散作用で巻き上げられて流下する土砂)に関しての動態検討を進めるものとする。そのため本稿では，まず広域での土砂生産・輸送が検討できるようなマクロスケールでの土砂移動モデリングの基礎理論構築を目指し，少しでも将来への悪影響を提言できるような対策を検討するための足がかりとなることを期待する。

2．解析モデリング

2.1 分布型流出モデル

本稿では，分布型流出モデルにFig.1に示す様なHydro-BEAM(Hydrological River Basin Environment Assessment Model)(小尻ら，1997)を用いた。本モデルに加えて，次節に掲げる土砂輸送モデルを組み込みを行い，水文流出と土砂輸送を両現象モデルで同時に算定できるようにする。なお後述の土砂輸送問題を検討する際，2011年１月１日から９月30日の阿武隈川流域を対象とする。

2.2 分布型土砂輸送モデル概要

本稿の土砂輸送モデルは，流出解析のHydro-BEAMで扱う計算格子メッシュと同じメッシュを用いて算定する分布型モデルである。そのため，上流域の河道断面形状に合わせて河道断面をHydro-BEAMと同じように三角形断面で考え，土砂モデルもそれに適用した式に変形するものとする。土砂輸送形態は先述の通り，ウォッシュロードは考えず，掃流砂と浮遊砂のみに分けて考える。ここでは土砂輸送量は掃流砂量と浮遊砂量の総和と仮定する。

土砂輸送をモデル化するにあたって，Fig.2に示すように，計算セルごとの掃流砂と浮遊砂の輸送量に加え，斜面からの土砂生産量，河床部の堆積土砂量，河床堆積層からの巻き上げ量，河床堆積層への沈降量を考慮してモデル化を行う。解析していく過程で用いる各メッシュの河川流量はHydro-BEAMで算定された値を用いる。Hydro-BEAMでの計算結果を，掃流砂や浮遊砂の動態を考慮した式に用いて計算することにより，土砂輸送の時空間変動が算定できる分布型流出モデルの開発を行う。

土砂輸送モデルを考える際，既往研究での土砂輸送過程では単一粒径の扱いが大半であったため，混合粒径を表現するのは困難であった。そこで本研究では，粒径を５つに分類して，各粒径グループ毎に輸送量を計算し，最後にそれらを総和することで，単一粒径における運動式を用いても混合粒径であることを表現できるようにして精度を高めた。ただし，５つの粒径は同じ割合で均一にあ

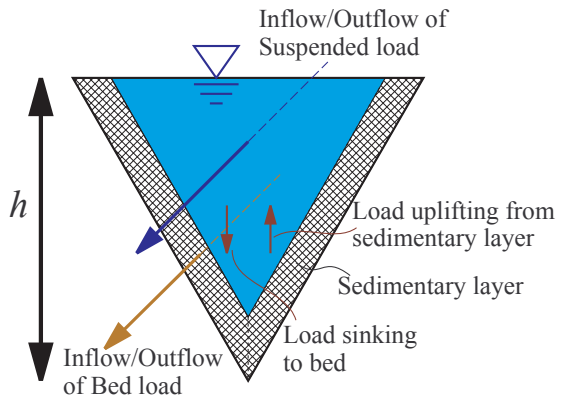

Fig.2 Vertical section of River channel with sediments

るとの仮定を行う。本研究で用いた5つの粒径は，5cm, 2cm, 0.2cm, 0.1cm, 0.0555cmとした。この土砂輸送モデルにより，掃流砂と浮遊砂の輸送量と堆積土砂量の推移を解析する。

2.3 掃流砂輸送モデル

掃流砂は砂礫が流水の流れ方向の抵抗力によって河床付近を移動する流砂である。或る粒子が河床上にあるとき，摩擦速度の値が限界摩擦速度を越えたときに粒子は移動を開始する。従って，次式が成り立つとき土粒子は移動する。

$$U_* > U_{*c} \tag{1}$$

ここに，U_*：摩擦速度(m/s)，U_{*c}：限界摩擦速度(m/s)である。摩擦速度は等流条件のとき

$$U_* = \sqrt{gRI_b} \tag{2}$$

によって求めることができる。ここに，R：径深(m)，I_b：河床勾配である。また限界摩擦速度を算定する式はいくつかあるが，本研究では式(3)に示す岩垣の式(岩垣，1956)を用いて算定する。

$$\left.\begin{array}{lcl} d \geq 0.303cm & : & {U_*}^2 = 80.9d \\ 0.118 \leq d \leq 0.303cm & : & {U_*}^2 = 134.6d^{31/32} \\ 0.0565 \leq d \leq 0.118cm & : & {U_*}^2 = 55.0d \\ 0.0065 \leq d \leq 0.0565cm & : & {U_*}^2 = 8.41d^{11/32} \\ d \leq 0.0065cm & : & {U_*}^2 = 226d \end{array}\right\} \tag{3}$$

岩垣の式は，砂粒の水中比重を1.65，動粘性係数を0.01 cm^2/s として書き表した経験式であり，砂の粒径からそれぞれの摩擦速度が算定できる。以降は，式(1)を満たすときに掃流砂があるとし，満たさないときには掃流砂はないものとして処理する。

掃流砂量の運動式は既往研究にも多数存在するが，本研究では代表的な経験式の芦田・道上の式(芦田・道上，1972)を用いた。同式は

$$q_b = 17\tau_*^{\frac{3}{2}}(1-\tau_{*c}/\tau_*)(1-\sqrt{\tau_{*c}/\tau_*})\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd^3} \tag{4}$$

で与えられる。ここに，q_b：単位幅当たりの掃流砂量(m^2/s)，τ_*：無次元掃流力，τ_{*c}：限界無次元掃流力，ρ：流水の密度($\mathrm{g/cm}^3$)，σ：流砂の密度($\mathrm{g/cm}^3$)，g：重力加速度($\mathrm{m/s}^2$)，d：流砂の粒径(m)である。また摩擦速度と無次元掃流力，ならびに，限界摩擦速度と限界無次元掃流力にはそれぞれ式(5),(6)のような関係式がある。

$$\tau_* = \frac{{U_*}^2}{(\sigma/\rho-1)gd} \tag{5}$$

$$\tau_{*c} = \frac{{U_{*c}}^2}{(\sigma/\rho-1)gd} \tag{6}$$

いま，s：砂粒の水中比重とおくと，

$$s = \frac{\sigma}{\rho} - 1 \tag{7}$$

となり，式(4)に式(5)～(7)を代入すると，

$$q_b = \frac{17(U_*+U_{*c})(U_*-U_{*c})^2}{sg} \quad \text{when} \quad U_* \geq U_{*c} \tag{8}$$

となる。上式に対して，式(2)と式(3)を用いることで河道単位幅当たりの掃流砂量が表現され，さらに河床幅B(m)を乗じることで，河道に対する掃流砂量Q_b(m^3/s)を算定する。

$$Q_b = Bq_b \tag{9}$$

2.4 浮遊砂輸送モデル

浮遊砂は流水の乱れによる拡散作用によって河床上方に巻き上げられ，流路断面内を流水とともに移動する流砂である。浮遊砂輸送モデルを検討するため，浮遊砂の容積濃度cを

$$c = \frac{Q_s}{Q} \tag{10}$$

で定義する。ここに，Q_s：浮遊砂輸送量(m^3/s)，Q：流量(m^3/s)とする。検討するモデルは，流下方向への1次元移動で，鉛直方向で濃度は一様であるとし，濃度の拡散挙動については輸送現象をとらえるサイズが流出時と同じであることから計算セル内で閉じる程度に十分に小さい挙動であるのは明らかであるため，流出解析と同時に計算する際には無視しても構わないと言える。また，浮遊砂の容積濃度は最大で数% と考えられており(松山，2009)，人為的に上限濃度を設定する必要がある。本稿では各粒径群の上限濃度を0.01とした。いま，1つの計算セルでは浮遊砂が均一に分布し，そのセル内で濃度は代表平均値に相当する値で一定であるとする。ここで，セルの代表断面であるFig.2での浮遊砂挙動について考える。Δt秒間における河床からの浮遊砂の浮遊量をS(m^3)，河床

の浮遊砂堆砂量を $P(\mathrm{m}^3)$ とすると下記のように表せる。

$$S = q_{su} A \Delta t \tag{11}$$

$$P = W_f c A \Delta t \tag{12}$$

ここに，W_f：沈降速度(m/s)，q_{su}：巻き上げ速度(m/s)，A：セルの河床面積(m^2) である。W_f はRubeyの実験式(を) 用いて

$$W_f = \sqrt{\frac{2sgd}{3} + \frac{36\nu^2}{d^2}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{d^2}} \tag{13}$$

のように求める。また，q_{su} は近似式(14)(荒井・清水，1987) で求める。

$$q_{su} = 0.008 \left\{ 0.14 \cdot \frac{\rho}{\sigma} \cdot \left(14U_* - \frac{0.9sgd}{U_*} \right) - W_f \right\} \tag{14}$$

ただし，q_{su} が負値となる場合は浮遊砂は生じないものとし，q_{su} はゼロとする。これらの式を用いて，Fig.2に対し，浮遊砂量の収支について検討する。いま，連続式を考えるための微小体内の河道長を $\Delta x(\mathrm{m})$ とする。三角形断面の河道において，河床面積 A は

$$A = 2h\sqrt{1+m^2}\Delta x \tag{15}$$

で与えられる。ここに，h：水深(m)，m：セル斜面の法面勾配を表す。浮遊砂量の収支として，微小体の展開式は

$$(Q_{c1} - Q_{c2})\Delta t + q_{su} 2h\sqrt{1+m^2}\Delta t \Delta x - 2cW_f h\sqrt{1+m^2}\Delta t \Delta x = mh^2 \Delta c \Delta x \tag{16}$$

となる。ここに，Q_{c1}：微小体に流入した浮遊砂量(m^3/s)，Q_{c2}：微小体から流出した浮遊砂量(m^3/s) である。これを Δt と Δx について極限を取り，連続式を導出すると，

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{Q}{mh^2}\frac{\partial c}{\partial x} + \left(\frac{1}{mh^2} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2W_f\sqrt{1+m^2}}{mh} \right) c = \frac{q_{su}}{h} \tag{17}$$

を得る。この連続式をセル単位に差分展開し，Hydro-BEAMで得られるセル単位の流量と連成して濃度 c を求め，式(10) から浮遊砂量を算定すればよい。

2.5 河床土砂堆積モデル

本稿では，各計算セルに河床には土砂堆積層を設けている。いま，降雨や風による浸食によって斜面からもたらされてきた河道への土砂生産量を $\mathrm{L}(\mathrm{m}^3/\mathrm{s})$ とする。その生産された土砂はまず河床土砂堆積層に積もるものと仮定する。本来は降雨や風による浸食量を物理モデル化して与えるのが適切であるが，本稿はそのモデル化よりも土砂輸送量を重点的に検討しているため，土砂生産量評価の処理を平易に済ますべく，同生産量を統計的に求められたLQ式により表現した。

$$L = \alpha Q^{\beta} \tag{18}$$

ここに，α，β は統計モデルパラメータで，集計された計測データから同定される。本研究での採用値として，α=7.0×10^{-5}，$\beta = 1$ とした。

浮遊砂モデル式において，河床からの土砂巻き上げ量と土砂堆積層への沈降量を考えている。この堆積層がなくなった場合は河床から巻上がる土砂もなくなる，つまり浮遊土砂はこの層の堆積量以上は浮遊しないものとした。また掃流砂堆積モデル式においては掃流砂輸送量を求めているが，流入掃流砂は河床土砂堆積層にたまり，流出掃流砂は同層から流出するものとする。よって同層がなくなった場合は同セルからの流出流砂量も無くなる。つまり，流出掃流砂量は同層の堆積量以上は流出しないものとした。微小体の河床土砂堆積層厚を $Z(\mathrm{m})$，同層の空隙率を λ とすると，堆積層体積 V との関係について次式のように書ける。

$$\frac{1}{1-\lambda}\left\{ (Q_{b1} - Q_{b2})\Delta t - 2q_{su}h\sqrt{1+m^2}\Delta t\Delta x + 2cW_f h\sqrt{1+m^2}\Delta t\Delta x + \ell\Delta t\Delta x \right\} = 2h\sqrt{1+m^2}\Delta z\Delta x \tag{19}$$

ここに，Q_{b1}：流入掃流砂量(m^3/s)，Q_{b2}：流出する掃流砂量(m^3/s)，ℓ：斜面単位幅当たりの土砂生産量(m^2/s) である。上式を連続式にすれば，

$$(1-\lambda)\frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{1}{2h\sqrt{1+m^2}}\frac{\partial Q_b}{\partial x} + W_f c - q_{su} + \frac{\ell}{2h\sqrt{1+m^2}} \tag{20}$$

上式のセル単位の差分展開で，Hydro-BEAMで得られるセル単位の流量と連成して Z を求め，セル毎に河床土砂堆積層厚の変動を算定すれば，総じて堆積土砂量の時空間分布を把握することができる。

2.6 時間差分量

土砂輸送モデルでは，基本的に流出解析のメッシュと同一のメッシュを用いている。しかしながら，時間ステップ Δt に関しては流出解析の時間ステップよりも細かくする必要がある。後述の実流域での流出解析では，Δt=600(s) で解析しているが，同じ Δt で土砂輸送を解析すると，浮遊砂濃度変化がなまってしまって遅れたようになり，巻上げや沈降による影響を大きく受けて濃度が一部で濃くなりすぎるため，時間差分量を細かく取る必要に迫られる。土砂輸送解析時には具体的に Δt=60(s) と改め，解析の精度向上を図った。

2.7 土砂に付着した放射性物質

本研究では，土砂輸送モデルを使って放射性物質(セシウム) の動態を解析することを念頭に入れている。ただし，

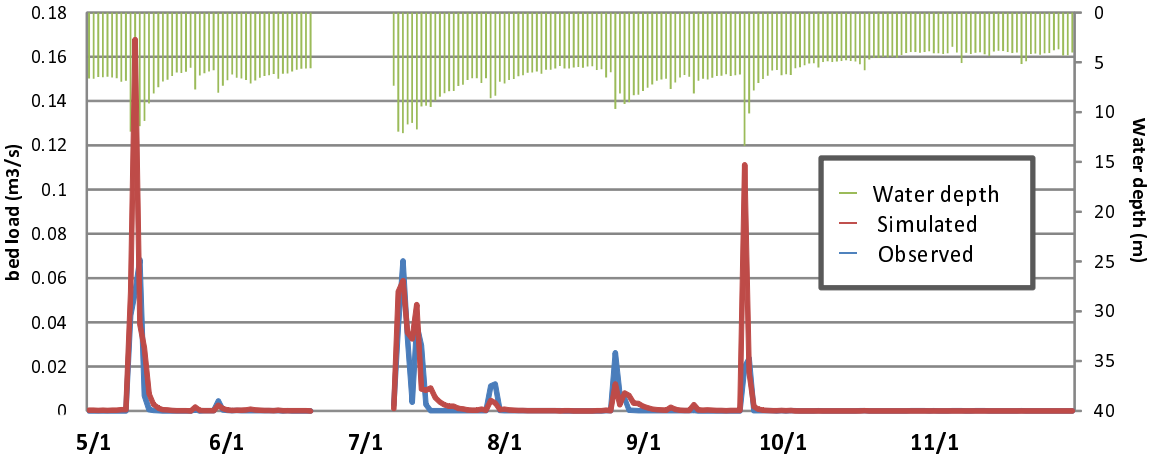

Fig.3 Validation result of the sediment transport model proposed herein

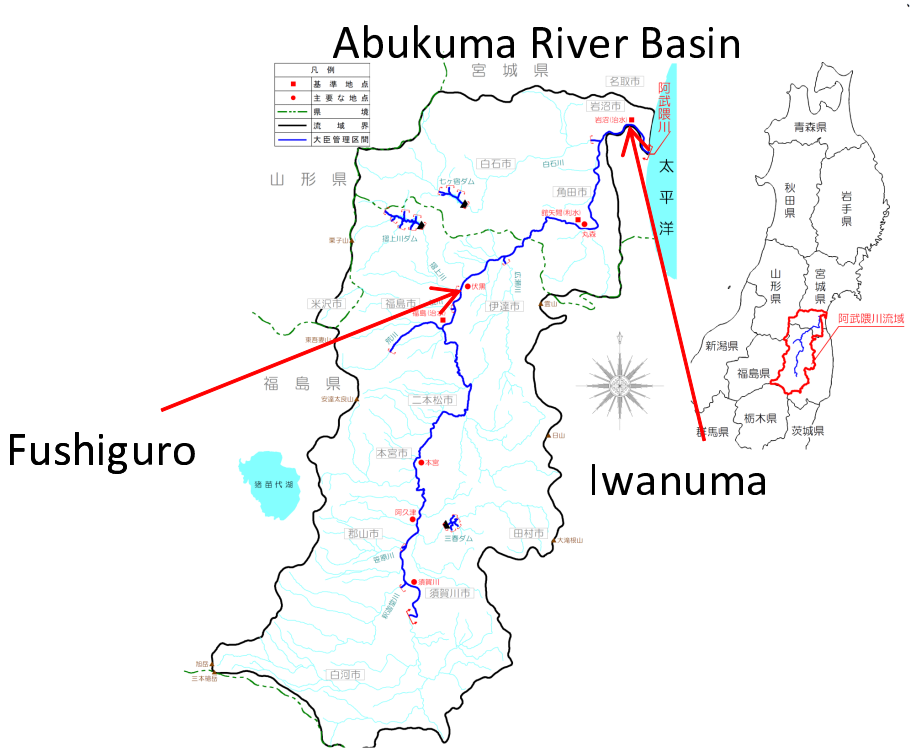

Fig.4 Abukuma River Basin and observed stations

今回は主眼点が流出解析と連成できる分布型土砂輸送モデルの作成であるため，その手法だけを紹介するにとどめる。土砂輸送解析時に，セシウムが付着している土砂と付着していない土砂に分ける。具体的には，東日本大震災による原子力事故が起きる前の，3月10日までに斜面で生産された土砂にはセシウムが付着していないものとし，事故が起きた3月11日以後に生産された土砂にはセシウムが付着しているものとした。この付着量は分布的に与えられるべきであるので，大気拡散解析の結果を用いればよいが，検討時には決定的な飛散推定結果が得られていなかったため，ここで用いる場合は，現時点では一様に飛散したと仮定して算定し，影響解析を行うことが得策と思われる。ただし，本研究では解析期間が短いため，3月11日以降セシウムが付着した土砂が一定に常時生産されていると仮定する。通常の付着のない土砂と，セシウムが付着した土砂を別々に扱い，それぞれを

粒径群毎に追跡することが望ましい。

3．実流域への適用と考察

3.1 土砂輸送モデルの検証

ここでは実測値のある流域で検証する。掃流砂のモデル式の検証を岐阜県高山市に位置するヒル谷で行った。ヒル谷は土砂量が多く，土砂量の観測が活発に行われている流域である。本稿の実測値は京都大学防災研究所流域災害研究センター穂高砂防観測所が観測したデータを使用した。観測期間は2011年5月11日から11月30日で，観測された要素は，水位と掃流砂量である。この流域における水位の実測値を用いて，掃流砂のモデル式で解析した掃流砂量と，実測値の掃流砂量を比較した結果をFig.3に示す。ただし，ヒル谷は流域上流域の谷あい部であることから，流域全体を考察する際とは斜面土砂粒径サイズが大きいことが推察されるため，今回使用した粒径パラメータは4cm, 3cm, 2.5cm, 2cm, 1cmとしている。この観測データの精度は，土砂が移動する際の流下音から土砂量を計測しているため，オーダーが合う程度の精度であるとのことであった。それを踏まえて結果を鑑みると，オーダーの誤差は多少見られるが変動特性はほぼ合致する結果となった。またモデルに用いた運動則は経験式であり，式が提案された際の物理条件が異なることも誤差発生に関わる可能性がある。また全ての粒径が一様に生産されると仮定して行っているが，粒径毎に生産量を得て解析することにより，精度の向上が見込まれる。

3.2 実流域での検証

これまで述べた土砂輸送モデルを阿武隈川流域(Fig.4)に適用した。阿武隈川は福島県および宮城県を流れる一級河川で，全長は約240km，流域面積は5,400km2，水源の標高は約1800mであり，流域内に約140万人が居住する。国土数値情報に基づく土地利用は森林56%，水田16%，畑14%，建物用地・幹線交通用地7%，荒地・内水地・その他7% である。阿武隈川は原子力事故が起きた福島原子力発電所から約70kmという場所に位置しており，同事故により放射性物質飛散量の多い場所が広範囲に含まれると考えられる。セシウムの大半は土砂に付着して運ばれるため，放射性物質が飛散した流域では下流へと輸送されていく付着土砂は最終的に海へ流出することで河口部付近を中心とした沿岸域海底に放射物質が蓄積されていくであろうことも容易に想像がつき，それが問題視されている。そこで，被害を受けた代表的な阿武隈川流域に着目し，土砂輸送モデルの実流域適用に用いた。

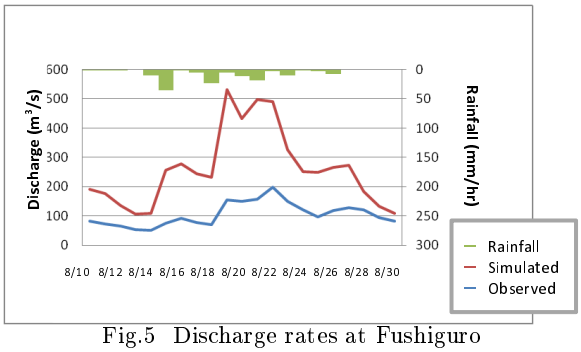

Fig.5 Discharge rates at Fushiguro

Fig.6 Suspended sediment rates at Fushiguro

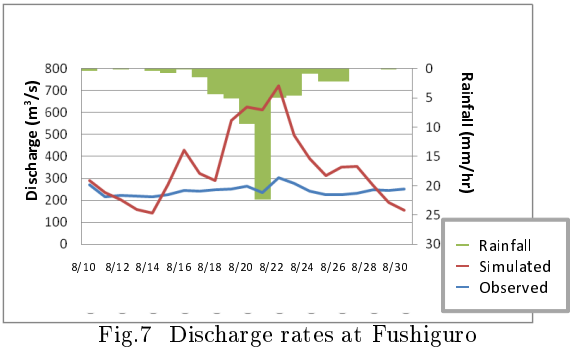

Fig.7 Discharge rates at Fushiguro

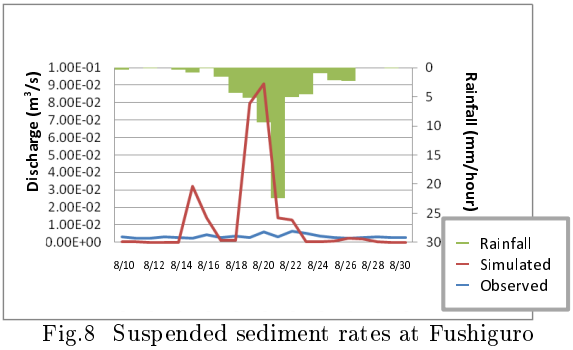

Fig.8 Suspended sediment rates at Fushiguro

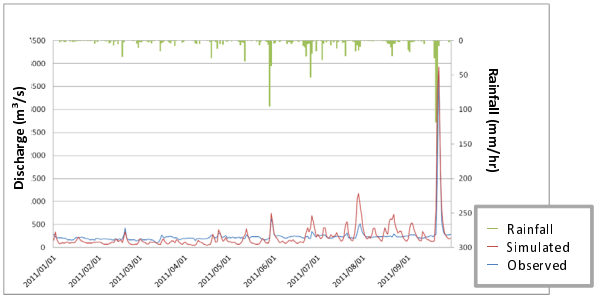

Fig.9 Discharge rates at Iwanuma in 2011

先述のとおり，時間ステップが10倍異なる状態で，流

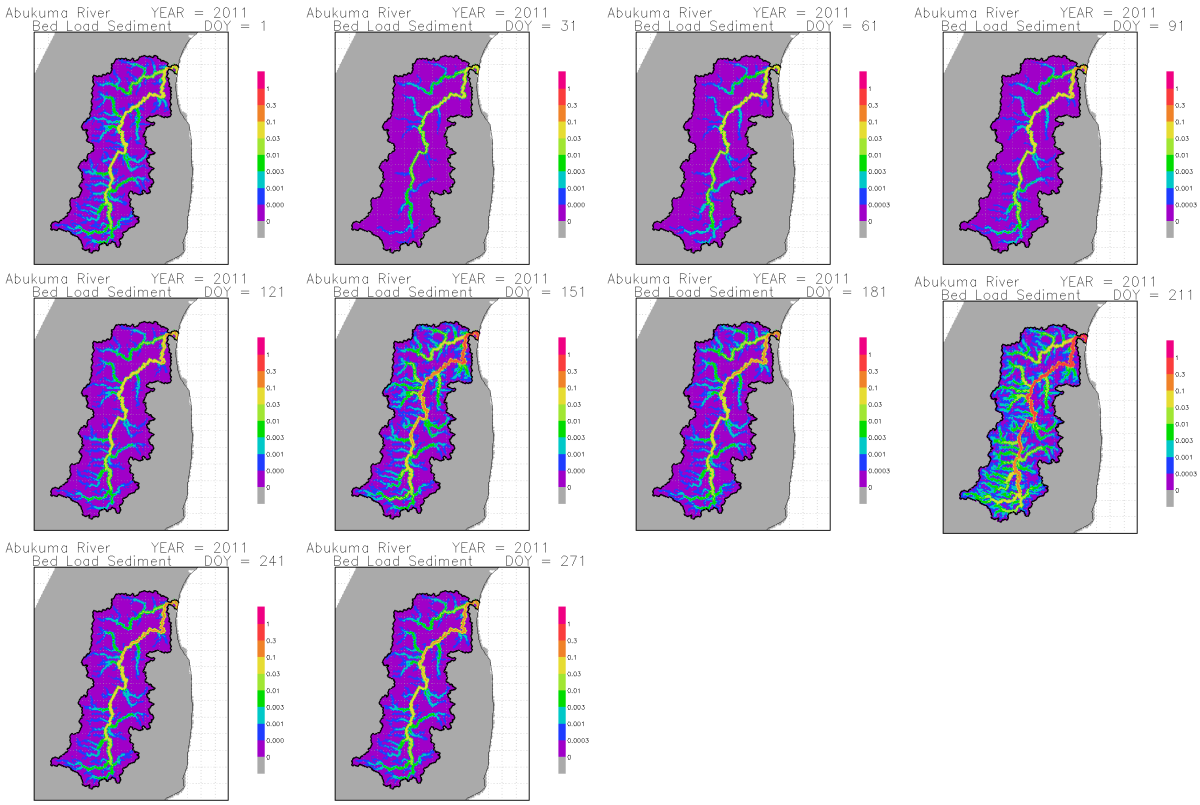

Fig.10 Spatiotemporal distributions of Bedloads (Unit: m^3/s)

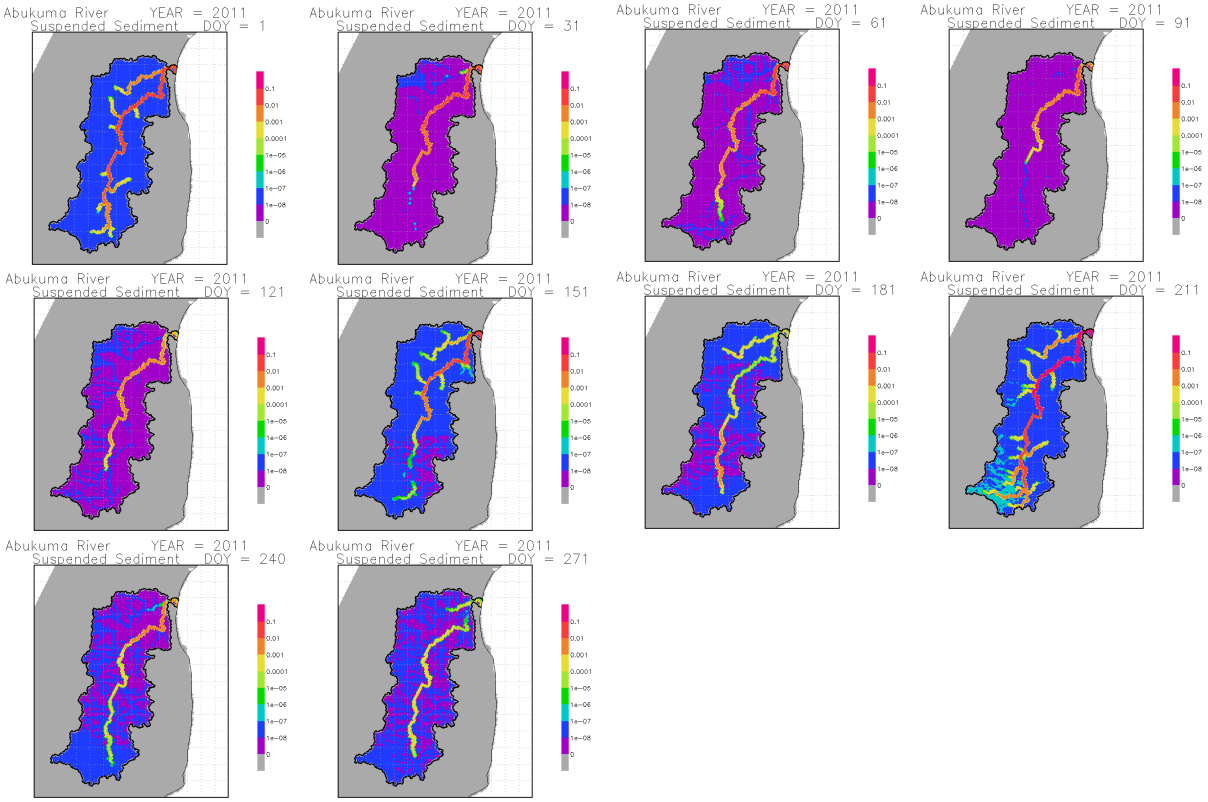

Fig.11 Spatiotemporal distributions of Suspended loads (Unit: m^3/s)

出解析と土砂輸送解析を同じ空間メッシュで離散化して実施した。適用期間も先述のとおり，2011年の1月1日から9月30日までとした。まずはHydro-BEAMによる流出解析を行って流域の流量分布を算定し，そこで得ら

れた流量を用いて，土砂輸送モデルを基にした土砂輸送解析を行った。

土砂輸送量の観測地点は，Fig.4に示すような阿武隈川中流域に位置する伏黒と，同下流域に位置する岩沼とする。雨の多かった8月10日から8月30日までの伏黒の河川流量と浮遊砂量(SS)に関する観測値と解析値の比較結果をそれぞれFig.5とFig.6に，同じく岩沼での比較結果をそれぞれFig.7とFig.8にそれぞれ示す。まず，本稿の流量モデルの再現性を確認する。Fig.5やFig.7を見ると，流量の増減特性は一致しているが，大きな出水時の値は大きな誤差となっている。この流域での本対象期間の実測実施期間が短く，またその時期が大雨の降った期間であったために大出水時に誤差が見られたと思われる。

そこで，阿武隈川のH-Q関係式から推定した流量と，Hydro-BEAMで解析した結果を2011年の岩沼で検証した(Fig.9)。同図より，長期的に見るとHydro-BEAM算定結果は妥当な結果であると言える。また同図の観測値は大出水時に解析結果と一致しているが，小出水時は解析結果を下回っている。これは，中規模の出水時にダムが河川流を堰き止めて流量が平滑化されているのだと考えられる。故に，大雨時の大きな誤差は上流に存在するダム制御を反映させていないシミュレーション結果であることが主要因ではないかと推察される。

続いて浮遊砂量についてモデルの再現性を確認する。Fig.6やFig.8を見ると，雨量の少ない期間では妥当な値が得られていると言えるが，大雨時にはオーダーにかなりの誤差が見られる。この差異も流量と同じで，ダムにより浮遊砂量が平滑化されていると思われる。今後ダムで長期的な解析を行い，堆砂量を用いて検証を行う必要がある。また，斜面からの土砂生産の過程において，統計式であるLQ式を用いているが，大雨時には，斜面からの土砂生産が過剰に計算されている可能性があるものの，今回のデータでは検証できない。LQ式はあくまで統計モデルであるため，物理的な根拠に基づく土砂生産モデルを作成・提案する必要がある。

最後に，掃流砂量・浮遊砂量の土砂輸送動態をそれぞれFig.10とFig.11に示す。これらから，中流域・下流域付近で土砂輸送が最も活発に生じているのが分かる。また輸送量は大雨期や中雨期に増えており，輸送量が流量に依存して増えていくことも分かる。そのため，河道がないような標高の高い領域では流量が常に小さくなり，輸送量もまた同じように常に小さくなることが図から見て取れる。

以上より，流域規模での土砂輸送挙動を流出モデルと同じスケールで表現できたと言える。

4．結論

本研究では，流出モデルと連成して算定できるように流域規模の分布型土砂輸送モデルに関する基礎的検討を行った。そこでは，流出モデルと同一メッシュを用いて同一サイズでの挙動解析ができるように既往モデルを変形し。本稿の土砂輸送モデリングを導出した。そこでは，後日放射性物質の付着した土砂動態が検討可能なようなモデリングの工夫も加えてあり，将来性のあるモデルとなっている。

実流域での解析では，土砂輸送特性を河川流量との関係から確認した。今回は流量算定結果にダムの影響が出ていることを確認したことから，ダム制御をモデルに組み込むことで流出モデルの精度を今後向上させる。また，物理的な根拠を基にした分布型土砂生産モデリングを提案して，同じく土砂生産の面からの精度向上を図る予定である。

謝　辞

本研究を進めるにあたり，本所水資源環境研究センター故 小尻利治教授におかれましては病床にありながら最後まで適切なご指導ご鞭撻を賜りましたこと，衷心より追悼の意を表しますとともに深謝の意を表します。また，本所流域災害研究センター穂高砂防観測所勤務 堤大三准教授におかれましては，3.1章の土砂輸送モデル検証において，本所社会防災研究部門 山敷庸亮准教授の両先生におかれましては，3.2章で用いた実流域での同モデル検証において，それぞれの流域で計測された貴重な土砂輸送量観測データをご提供いただきました。また堤大三准教授におかれましては，同支流域での気象観測データも同時にご提供いただきました。ここに記して，深く感謝の意を表します。

参考文献

芦田和男・道上正規(1972)：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59–69。

荒井信行・清水康行(1987)：現場のための水理学(4)―浮遊砂と河床変動―，北海道開発局土木試験所月報，第414号。pp.55–84。

岩垣雄一(1956)：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp.1–21。

小尻利治・黒田良人・東海明宏(1997)：GISベースでの

水環境シミュレーションと環境評価モデルの開発，第5回地球環境シンポジウム公演集，pp.209–214。
松村宏・斎藤究・石岡純・上蓑義朋(2011)：高速道路上のガンマ線測定により得られた福島第一原子力発電所から飛散した放射性物質の拡散状況，日本原子力学会和文論文誌，第10巻，第3号，pp.152–162。
松山昌史(2009)：津波による地形変化予測数値モデルの適用性ー流砂量式の特性と矩形港湾実験の再現，電力中央研究所報告，2009年7月号，pp.1–21，巻頭 pp.1–3。
Rubey, W. W.(1933): Settling velocity of gravel, sand and silt particles, *Amer. Jour. Sci.*, Vol.25, pp.325–338。

Fundamental Study on Macro-Scaled Sediment Yield/Transport Modeling Based on Distributed Runoff Model

Toshio HAMAGUCHI, Takuma TANAKA(1), Shunji KOTSUKI(1), Kenji TANAKA, Yoshiya Touge(1) and Masahiro ABE(2)

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University
(2) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

Synopsis

This study proposes a fundamental approach of developing the widely-distributed sediment yield/transport model coupling with the runoff model of Hydro-BEAM. On the background, we have the big problem of locating and tracing the scattered radioactivities via water, soil and organic matter movement. We, therefore, need to prepare numerical tools of predicting not only short-time but long-time transporting behavior of such radioactivities. We now focus on a sediment transport model to trace the movement of radioactive materials adherent to soils. We attempt to modify the conventional model of sediment transport into widely-distributed and macro-scaled one to be compatible with any distributed runoff models because a distributed sediment transport system necessitates the distributed runoff one to conduct coupling analysis. The numerical performance is demonstrated through the actual basin. The reasonable behavior can be recognized in these numerical tests.

Keywords : distributed runoff model, sediment yield, sediment transport, bed load, suspended load