

河川における土砂移動による放射性物質輸送モデル

Computational modeling of the transfer of radioactive contaminant associated with sediment transport in rivers

北海道大学工学部 環境社会工学科国土政策学コース
北海道大学教授 工学研究科環境フィールド工学部門
北海道大学准教授 工学研究科環境フィールド工学部門
北海道大学 工学研究科環境フィールド工学部門

○学生員 鷲巣寛明 (Hiroaki WASHIZU)
正会員 清水康行 (Yasuyuki SHIMIZU)
正会員 木村一郎 (Ichiro KIMURA)
正会員 岩崎理樹 (Toshiki IWASAKI)

1. はじめに

福島第一原発事故によって、大気中に大量の放射性物質が拡散した。拡散した放射性物質の一部は地表へと降り注ぎ、これらは土壌に吸着し特に細かい土砂に多くが吸着した¹⁾。放射性物質を吸着した土壌は降雨や侵食等により河川内に侵入し、様々な形態で海域まで運搬される。これまでのチェルノブイリ原発事故等の経験から放射性物質の移行は粒径の細かい土砂粒子に吸着した形態で移行することが知られており、陸域においては土砂の移動に伴い放射性物質が移動すると考えられている¹⁾²⁾。福島原発事故後に、河川から河口に輸送される放射性セシウムの中にも溶解している放射性セシウムと浮遊砂に含まれる放射性セシウムの放射能濃度を比較したところ、いずれの観測地点でも90%以上が浮遊砂の形で、放射性セシウムが流下していることが確認されている⁴⁾。従って、放射性物質の移行の把握には土砂移動を定量的に計算する必要があるが、放射性物質の長期的な予測や河川全体のデータ等は各々の地点での観測からのみでは把握することが難しいと考える。すなわち、実河川での観測データや実験室スケールにおける実験だけでは、長期間広領域に渡る放射性物質の移行過程を把握するのは困難であると思われる。

そこで本研究では、放射性物質の移動は全て土砂移動によって生じるものと仮定し、現地の実河川における土砂移動に伴う放射性物質の移行過程を明らかにすることを最終目的とし、これを達成するために現地の観測データ等の知見に基づいて放射性物質輸送過程を把握する数値計算モデルを構築し、モデルの再現可能性の検討を行う。また本研究では、放射性物質輸送モデルを単純な水路条件に適用することで本モデルの特徴について考察を行うものとする。放射性物質の移行を把握することによって、実河川における放射性物質の予測や堆積分布特性等を検討することにも繋がると考えられ、今後の除染活動などにおいて基礎的情報を提供できることが期待される。また本研究の数値計算モデルの構築は河川における放射性物質の輸送を把握する目的以外にも、原発事故起源の放射性セシウムの動態を把握することで流域規模における土砂の動態を把握することにも繋がると考えられている。

2. 数値計算モデル

2.1 流体モデル

河川流は浅水流方程式³⁾により計算することとした。平面二次元場における連続式、運動方程式は以下のよ

うな式で表すことができる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} + D^x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} + D^y \quad (3)$$

ここで、 h :水深、 H :水位、 t :時間、 x, y :デカルト座標軸、 u, v : x, y 方向の水深平均流速、 g :重力加速度、 τ_x, τ_y :河床せん断力項、 ρ :水の密度、 D^x, D^y :乱流拡散項である。また、河床せん断力項についてはマニング則による河床抵抗から求める。詳細については文献に譲るものとする³⁾。

2.2 二次元河床変動モデル

今回の計算で用いた二次元河床変動モデル⁴⁾を以下の式で示す。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + q_{sw} - w_f c_b \right) = 0 \quad (4)$$

ここで、 z :河床高、 q_{bx}, q_{by} : x, y 方向の掃流砂量、 λ :河床空隙率、 q_{sw} :浮遊砂浮上量、 c_b :基準点浮遊砂濃度、 w_f :粒子の沈降速度である。河床変動モデルは掃流砂・浮遊砂混合粒径モデルである。全流砂量は芦田・道上式、横断方向流砂量は長谷川の式より求める。浮遊砂浮上量は岸・板倉の式により求め、基準点浮遊砂濃度は浮遊砂濃度分布に指数分布を仮定して求める。浮遊砂の移流拡散方程式により浮遊砂の移動を求める。

2.3 放射性物質輸送モデル

放射性物質の供給源が一つである場合、堆積した土砂が持つ放射性セシウム量は土砂堆積量(m^3)に供給された土砂が持つ放射性セシウム濃度(Bq/m^3)を乗ずることによって求めることができる。しかし、異なる物質濃度が複数点から流入する場合や河床との土砂の混合を考慮した場合、混合した土砂が持つ物質濃度までは判別出来ないという問題が生じる。この問題を解決するためには、土砂移動方程式と個々の土砂粒子が持つ物質濃度の連続関係を表す式が必要となる。

本研究では放射性物質の移行は全て土砂移動によって生じるものと仮定している。放射性物質の移行が土砂移動によって起こるとすると、放射性物質の濃度の

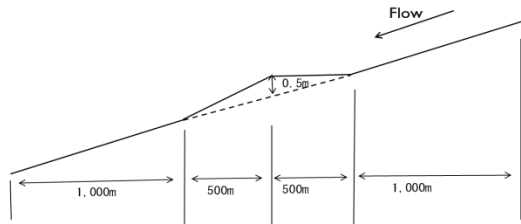


図1 計算に用いる初期河床縦断面図

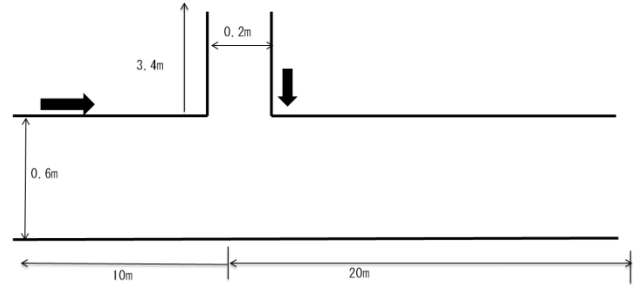


図2 計算に用いる水路形状

表1 計算に用いる水理条件

流量(m ³ /s)	河幅(m)	勾配	粒径(mm)	マニング粗度
1000	100	1/1000	5	0.02

連続関係は土砂の連続関係と連動していると考えることができる。従って、掃流砂、浮遊砂それぞれの土砂移動の方程式に土砂が持つ物質体積濃度を乗じることによって土砂移動に伴う放射性物質の連続関係式を求めることが可能である。河床表層の放射性物質濃度の連続関係は混合粒径モデルに用いられる交換層の概念を用いて、交換層における土砂収支と連動した濃度連続関係を考えることで以下の式で求めることが出来る。また放射性物質の水への脱着、水からの再吸着の考慮はソース項としてモデルに組み込むことで表現可能になると考える。

$$\frac{\partial C_{sm}}{\partial t} + \frac{C_{sb}}{e_m} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{e_m(1-\lambda)} \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + q_{su} C_{sm} - c_b w_f C_{sw} \right) = 0 \quad (5)$$

ここで、 t :時間、 x, y :デカルト座標軸、 z :河床高、 e_m :交換層厚(掃流層厚)、 λ :河床空隙率、 C_{sm} :交換層における放射性物質濃度、 F_x, F_y : x, y 方向の放射性物質フラックスである。

また、 C_{sb} は河床の堆積、侵食によって次のように場合分けされる。

$$C_{sb} = C_{sm} \left(\frac{\partial z}{\partial t} > 0 \right) \quad C_{sb} = C_{st} \left(\frac{\partial z}{\partial t} < 0 \right) \quad (6)$$

ここで、 C_{st} :遷移層における放射性物質濃度である。また、 F_x, F_y :放射性物質フラックスは以下のようにして求めることが出来る。

$$F_x = C_{sm} q_{bx} \quad F_y = C_{sm} q_{by} \quad (7)$$

同様に浮遊砂が持つ放射性物質濃度は、浮遊砂の移流方程式に物質体積濃度を乗じることによって求めることが出来る。

$$\frac{\partial C_{sw} ch}{\partial t} + \frac{\partial C_{sw} cuh}{\partial x} + \frac{\partial C_{sw} cuh}{\partial y} = q_{su} C_{sm} - c_b w_f C_{sw} \quad (8)$$

ここで、 C_{sw} :水中の浮遊砂粒子が持つ放射性物質濃度、 c :浮遊砂濃度、 h :水深、 u : x 方向の水深平均流速、 q_{su} :浮遊砂浮上量、 c_b :基準点浮遊砂濃度、 w_f :粒子の沈降速度である。

表2 計算に用いる水理条件

	流量(m ³ /s)	河幅(m)	勾配	粒径(mm)	マニング粗度
本川	0.003515	0.6	1/150	0.8	0.03
支川	0.0001172	0.2	1/150	0.8	0.03

以上の式に従来の流れの計算式、河床変動方程式を合わせて用いることによって土砂移動に伴う放射性物質の移行を計算することが可能となる。

3. 数値計算

3.1 計算条件

構築した数値計算モデルを仮想的な水路条件⁴⁾に適用させることで、数値計算モデルの特性や実現象との関係性について検討を行う。今回の計算では、2つのケースについて検討を行った。そこで、ケース1として単純な一次元場における河床変動を想定して放射性物質濃度を持つ土砂がどのような堆積を示すかについて検討を行った。またケース2として、仮想的な河川合流部を想定しそれぞれ物質濃度の異なる土砂を本川と支川で土砂を混合させた場合について検討した。また、今回の計算では問題を簡単にするためどちらのケースも均一粒径として計算を行った。

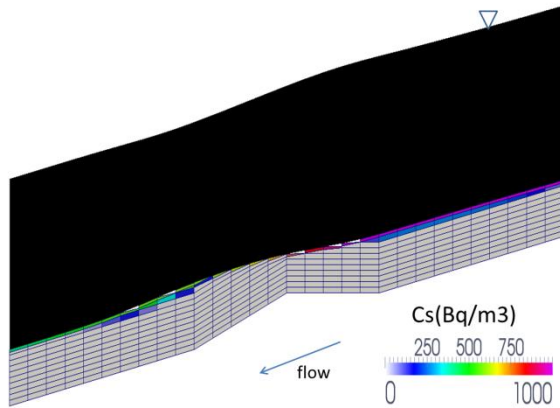
(1)数値計算ケース1

計算対象領域は、図1に示すように河床にマウントを設けた場を考える。その他の水理条件を表1に示す。以上のような水理・水路条件で上流端からある放射性セシウム濃度の土砂を流入させた場合、河床のどの位置に放射性セシウムが堆積しているかを可視化する。ここでは、初期河床の放射性セシウム濃度はゼロで、上流端から流入する土砂が持つ放射性セシウム濃度を1000Bq/m³として計算を行った。また土砂の移動形態は掃流砂のみとした。河床の層は混合粒径モデルに用いられる河床の多層モデルにより上から交換層、遷移層、堆積層と定義した。ここでは交換層厚を0.05m、堆積層厚を0.1mとした。

(2)数値計算ケース2

計算対象領域は図2に示すように仮想的な河川合流部を想定し、本川と支川を直交させた水路である。このような河川合流部を対象とした河床変動計算は過去

a) T=840min



b) T=2160min

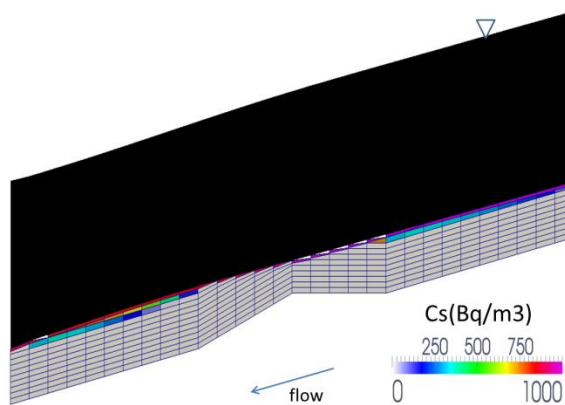


図3 河床の各層におけるセシウム沈着量。
a)840、b)2160 分後の結果である。

の実験や数値計算が少ないため³⁾、今回は以下のような仮想的な水路を考える。計算メッシュは河川合流部で細かくし、合流点から離れるに従って等比級数的に粗くなるように設定している。境界条件としては、下流端で水深に対して勾配ゼロ条件を付加した自由流出条件を与え、上流端で一定の流量を与えた。交換層厚は粒径の二倍として与えた。

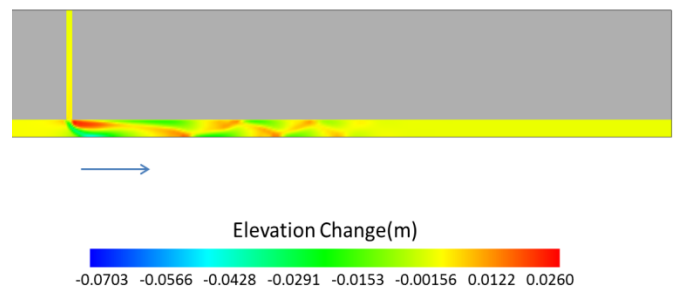
今回の計算では本川から 1000Bq/m^3 の放射性物質濃度を持つ土砂を流下し、支川から 0Bq/m^3 、すなわち放射性物質濃度ゼロの土砂を流下させた。また初期河床において河床土砂が持つ放射性物質濃度はゼロとした。流れ計算は二次元浅水方程式、全流砂量は芦田・道上式、横断方向流砂量は長谷川の式より求める。粗度はマンニングの粗度係数より与える。またその他の水理条件を表2に示す。

4. 計算結果

4.1 数値計算結果ケース1

図3は、それぞれ河床の各層の土砂が持つ放射性セシウム濃度の時間変化を表している。また黒い部分は水面形の変化を示す。上流から一定の放射性セシウム濃度を流下した場合の交換層、遷移層、堆積層における放射性セシウム沈着量の時間変化を示している。図3aのように

a) T=20min



b) T=120min

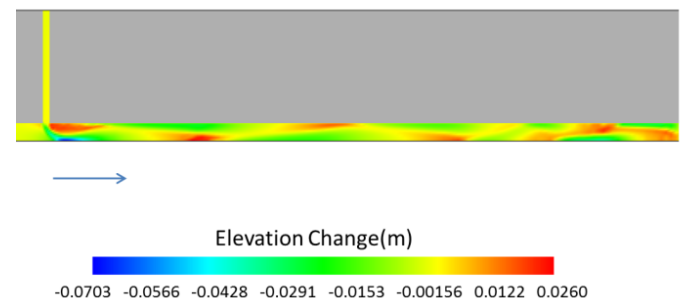


図4 河床変動量の時間変化。
a)20分後、b)120分後の結果である。

初期段階では上流から流下した放射性セシウム濃度を持つ土砂が、マウント部分で河床変動により削られた土砂と混合するため、マウント後方において堆積した土砂のセシウム濃度は供給した土砂が持つ放射性セシウム濃度よりも低くなっていることがわかる。

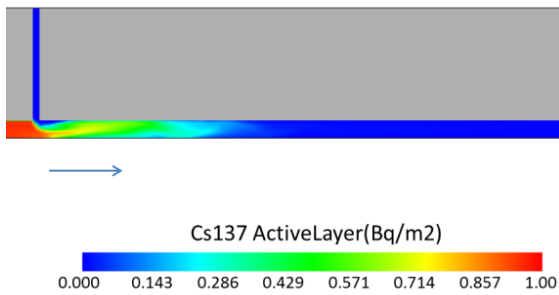
一方で、図3bのようにマウントが低下していきマウントからの土砂供給量が減少すると、上流から供給される土砂との混合が小さくなるため、堆積層上層では下層よりもセシウム濃度が高くなる。これはマウントからの土砂供給がなくなり河床が平衡状態に近づくため、上流からの放射性セシウム濃度はそのまま下流へと伝搬するためであると考えられる。今回の計算では均一粒径であるため粒径の違いによる堆積の違いについては検討できないが、粒径が均一の場合は単純に下流方向にいくにつれて濃度が低くなっていることがわかる。

4.2 数値計算結果ケース2

図4、5はそれぞれ河床変動量と交換層における放射性セシウム沈着量の時間変化を表している。図4の河床変動結果より本川と支川の合流点付近で河床の深掘れが確認できる。

また、合流点左岸側に逆流域が形成され土砂が堆積し

a) T=20min



b) T=120min

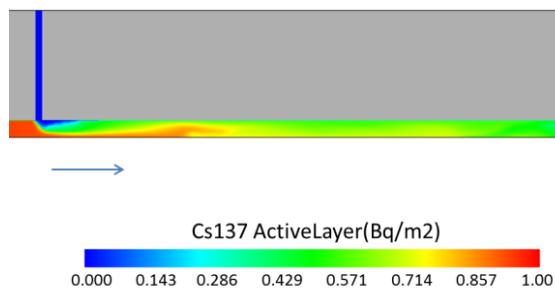


図5 交換層におけるセシウム沈着量の時間変化。
a) 20分後 b) 120分後の結果である。

ていることがわかる。この土砂の堆積を起点に時間経過に伴い下流方向に砂州が形成されていることが確認できる。

また交換層における放射性セシウム沈着量についてみると、支川からの土砂流入のため本川から流れてきた放射性セシウム濃度を持った土砂が合流点で右岸側に押し集められていることがわかる。そのため合流点直下左岸側の逆流域で低い濃度を示している。また、交互砂州の形成によって土砂の移動が生じるため

合流点から十分離れた下流域では本川からの濃度と支川からの濃度が混合しほぼ均一になっていることが確認できる。放射性セシウムは粒径の小さな土粒子ほど多く吸着するため²⁾、現地においては粒径の小さな土粒子が堆積しやすい場所で放射性セシウム沈着量が大きくなることが想定される。今回の計算では粒径を均一としたため砂州形成の影響によるセシウムの沈着は見られなかったが、混合粒径で行った場合は砂州における放射性セシウムの沈着が予想される。したがって、今後は実河川にも適用できるよう混合粒径の場合についても検討を行うことが必須の課題である。

5. まとめ

土砂移動に伴う放射性物質の移行過程を把握するため本研究では新たな数値計算モデルの構築を行った。既存の土砂移動の方程式を基に放射性物質輸送方程式を構築し、河床変動が起こりそうな場や単純な河川合流点に適用させることでモデルの特性や再現性について考察を行った。現段階では、河床材料を均一粒径として計算を行っているが、混合粒径として計算を行い、粒径と放射性物質濃度の関係を見ることによって放射性セシウムの動態や堆積の推定に有益なデータを提供することが可能になると考えられる。将来的には現地における観測データと本モデルによる数値計算結果を比較することによって本モデルの再現可能性を示すことが不可欠である。

参考文献

- 1) 日本原子力機構：第三次報告書全文，福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立 平成25年3月
- 2) 原子力規制委員会：東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の分布状況等に関する調査研究結果について 平成24年3月
- 3) 舩屋繁和，清水康行，舩甚甲介：河川合流点における非定常乱流モデルを用いた河床変動計算応用力学論文集Vol19, pp. 1007-1014 2006.
- 4) 荒井信行，清水康行：現場のための水理学，土木試験所月報No. 411号(1987. 8)～415号(1987. 12)