

福島環境動態 将来予測システムの 開発と解析評価の現状

日本原子力研究開発機構(JAEA)

福島長期環境動態研究(F-TRACE)

北村哲浩・町田昌彦・飯島和毅・佐藤治夫

201308

- 森林や農地等の地表に降下した放射性Csの主要移行経路は、
土壌流亡と表流水と考えられる。
- 地表に沈着した放射性Csが、土砂の流亡・移動に伴って、
 - ◆ いつ、どこに、どのように移行していくかを把握し、
将来の被ばく評価に役立て、また、
 - ◆ 河川、ダム・ため池、河口域での移行抑制対策等に役立てる。



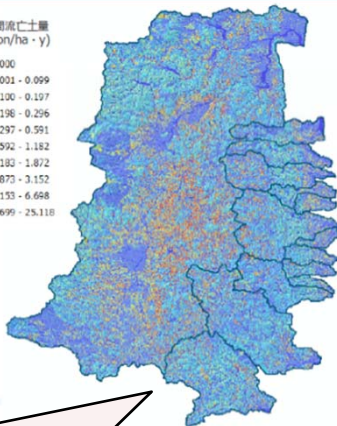
移行形態・スケール毎の解析モデルの配備

森林等

単位面積あたりの年間流出土量の分布

年間流出土量
(ton/ha・y)

0.000
0.001 - 0.099
0.100 - 0.197
0.198 - 0.296
0.297 - 0.591
0.592 - 1.182
1.183 - 1.872
1.873 - 3.152
3.153 - 6.668
6.669 - 25.118



河川

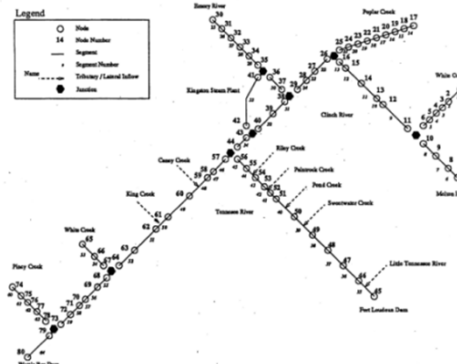
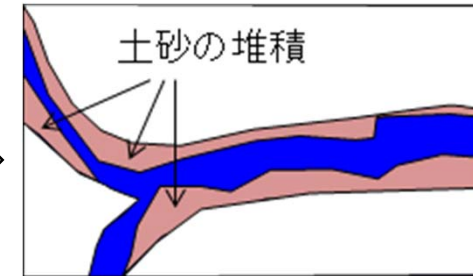


Figure 6.20. Schematic of TODAM finite element mesh for Watts Bar Reservoir, Tennessee.

河川・海 (河口付近)



森林流出モデル (USLE, Watershed)

表層水の化学特性(溶存イオン、有機物等)と流出形態の関係、地形・地質と流出形態の関係、汚染レベルと流出量の関係等に注目

- ・Csイオンの状態での流出
- ・土粒子・コロイド粒子に吸着された状態での流出(侵食)
- ・風等による移動(侵食、巻き上げ)

河川輸送モデル (TODAMベース)

主にマクロな輸送・堆積・再浮遊のメカニズムに注目 SCs

- ・土粒子へのCsイオンの吸着
- ・土粒子(浮遊物質)の移動
- ・堆積・再浮遊(河床変化)
- ・1次元

河川・河口付近流動・輸送モデル (iRIC、ROMS、SWAN)

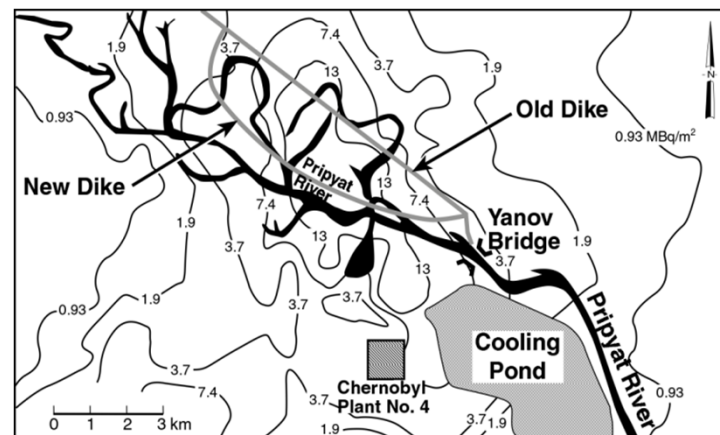
河口付近の詳細な移動に注目

- ・2・3次元
- ・潮汐、風を考慮
- ・塩水・淡水混合

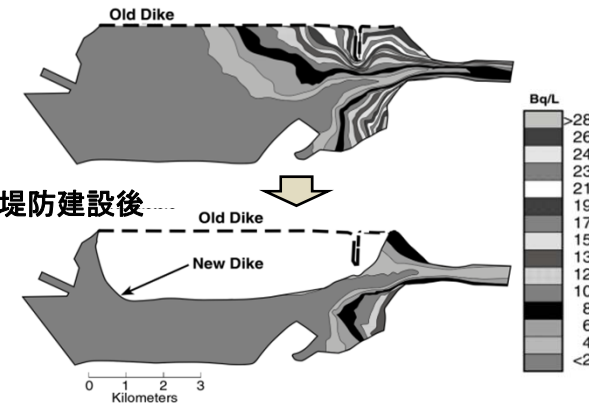
(チェルノブイリの解析事例)

汚染された土地からの放射性物質の河川への流入を防ぐために堤防が建設

↓
TODAMを含む複数のモデルにより、対策の有効性を評価
(Onishi et al., *J. Environ. Eng.*, pp.1015-1023, 2007.)



堤防建設前



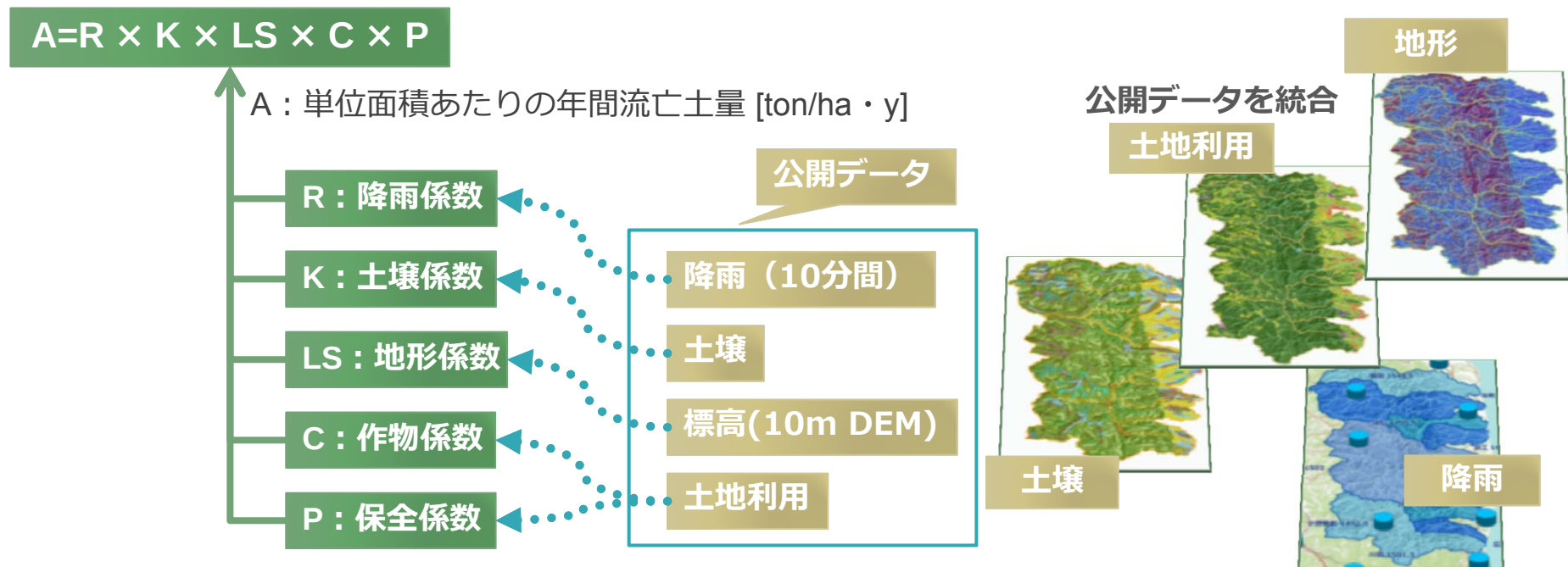
土壌流亡予測式 (USLE) に準拠したモデル

Csの移動を、迅速に把握・予測し、調査や対策に役立てるために、

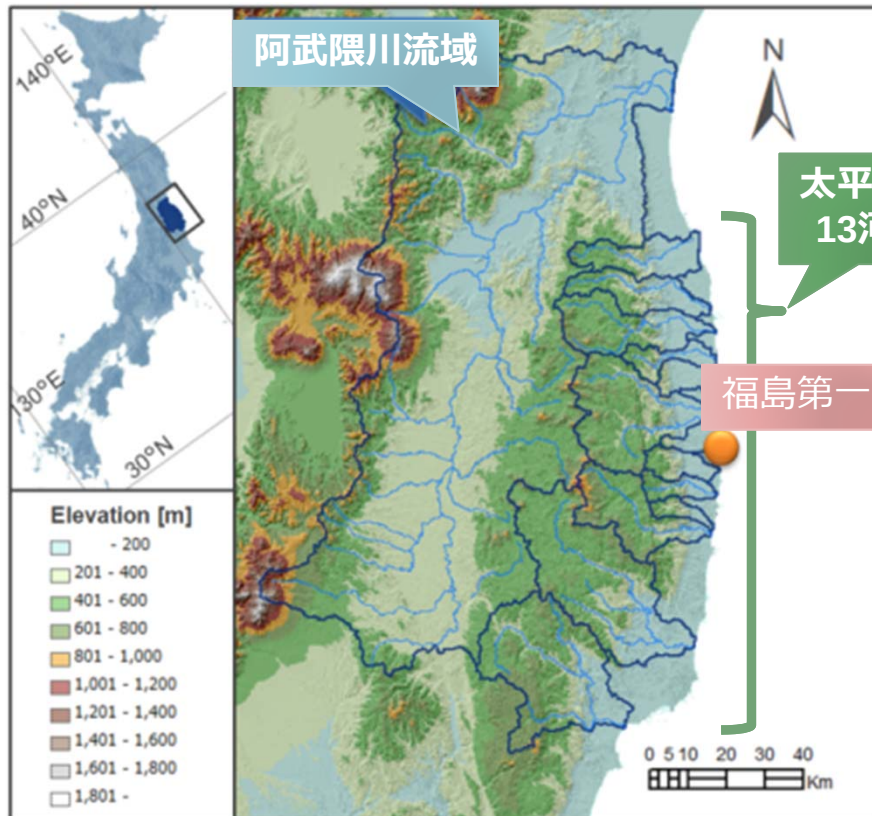
- ◆ 現場のデータが少ないので、公開データが代わりに適用できる手法、
- ◆ 迅速な状況の把握・予測のために、短時間で計算できる手法（少パラメータ）、
- ◆ 現場データの迅速なフィードバックが容易な手法（少パラメータ）が望ましい。

土壌流亡予測式(USLE)は、

- ◆ 米国農務省を中心に開発、土壌侵食の要因を定量評価、農地の保全方法の検討に利用、
- ◆ 農業分野を中心に日本でも多数の適用事例がある。



解析領域



■ 高線量地域を包含する14流域を選択

解析手順

ステップ1
各セルの流亡土量

- 表流水による土壌侵食
(シート侵食およびリル侵食)

ステップ2
各セルの運搬・堆積土砂量

- 表流水による運搬・堆積土砂量
(砂、シルト、粘土)

ステップ3
セル間の土砂移動

- 流域全体の土砂移動
(砂、シルト、粘土)

ステップ4
セル間の ^{137}Cs の移動

- 流域全体の ^{137}Cs の移動

解析手順

ステップ1: USLE
各セルの流亡土量

- 表流水による土壌侵食
(シート侵食およびリル侵食)

ステップ2
各セルの運搬・堆積土砂量

- 表流水による運搬・堆積土砂量
(砂、シルト、粘土)

ステップ3
セル間の土砂移動

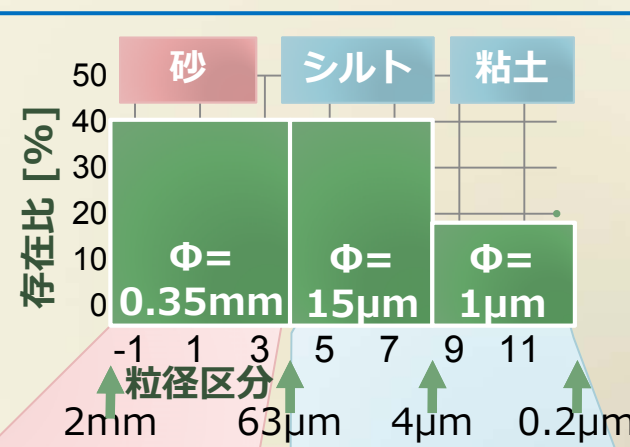
- 流域全体の土砂移動
(砂、シルト、粘土)

ステップ4
セル間の ^{137}Cs の移動

- 流域全体の ^{137}Cs の移動

各セルの流砂量を計算

粒度組成を仮定



Φ : 代表粒径

セルあたりの流砂量 [ton/y]

砂

シルトおよび粘土

Du Boys 式

Partheniades-Krone 式

単位幅・単位時間
あたりの流砂量
[kg/m・s]

単位底面積・単位時間
あたりの再浮遊・
堆積フラックス
[kg/m²・s]

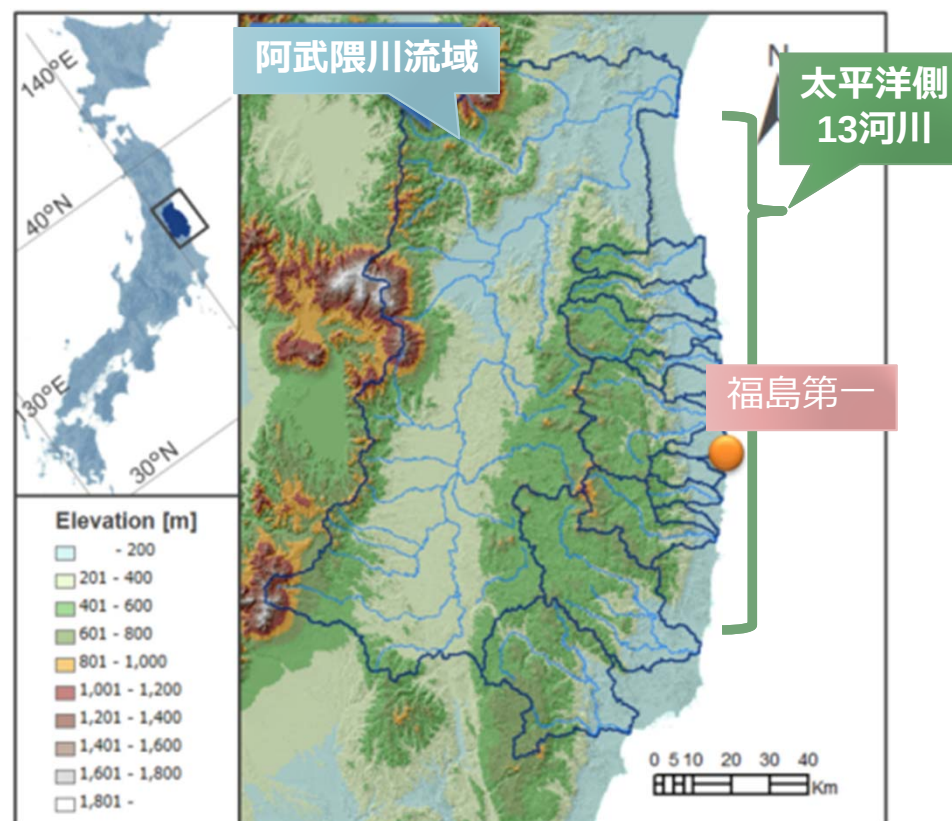
- モデルの構成

- 公開データや既存研究に基づき入力データを設定(土地利用図や土壤図, 地形, 降水量等)
- 河川を明示的に考慮せず, 河川や斜面を含む対象領域全体に100m × 100mのメッシュを設定した。河川については下流方向に, それ以外は地形の最大傾斜方向に土砂が移動することとした。

- 解析の条件

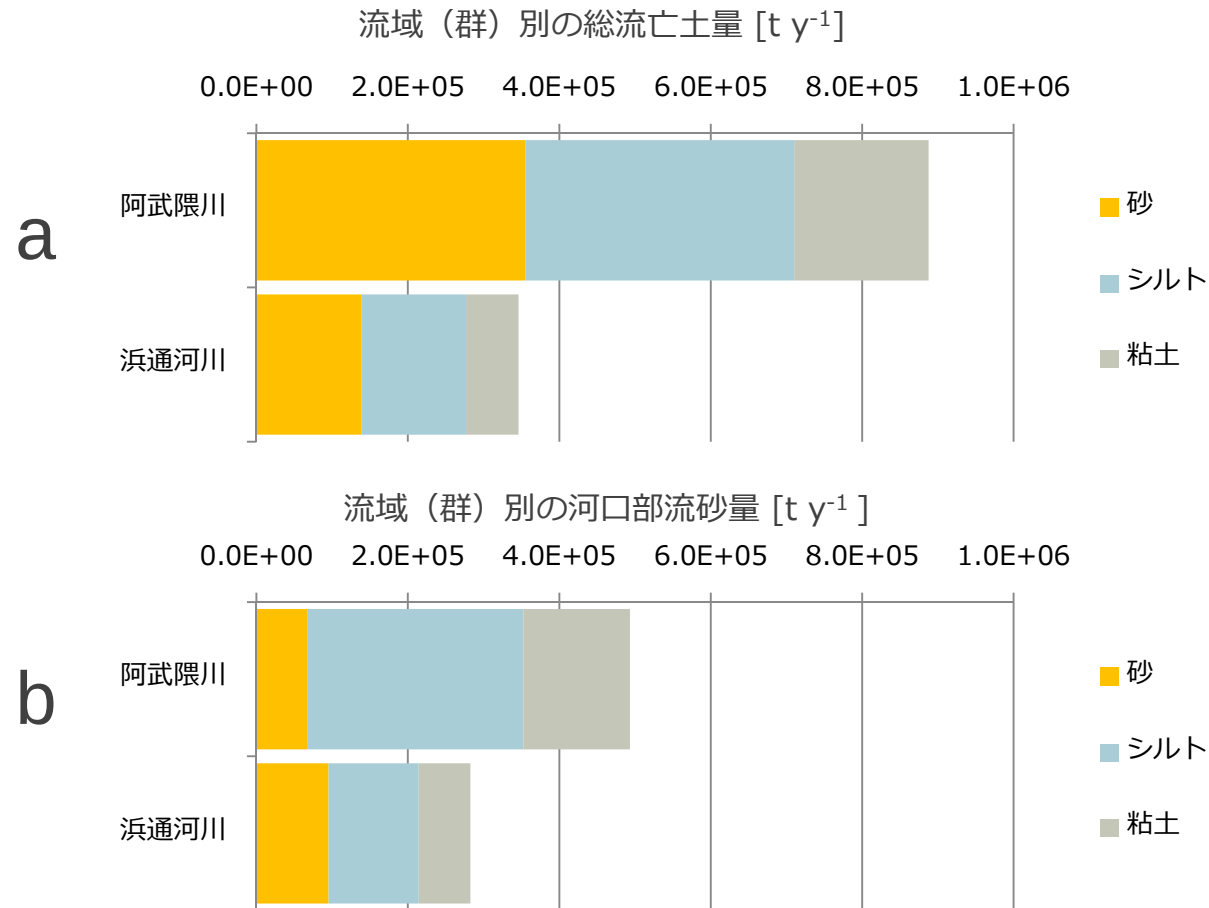
- 土砂移動は洪水時に起こるものとし、流砂量や再浮遊フラックス, 堆積フラックス等の計算には、比較的シンプルな式を用いた。
- Csは最初から土壤に吸着しているものとし、その依存性は土壤粒子の比表面積に依存するものとした。
- 土壤係数は文献に基づき仮定(実際の侵食量に基づくものではない)。
- 土地利用や土壤の分布については公開データの空間解像度が低いものもあるが、そのまま利用した。
- 侵食係数、限界せん断応力など設定が困難なパラメータについては国内外の文献値をもとに設定。

■ 高線量地域を包含する14流域を選択



河川名	集水域 [km ²]	太田川 (南相馬市) :	79	富岡川 (富岡町) :	63
阿武隈川:	5,423	小高川 (南相馬市) :	67	井出川 (楡葉町) :	40
宇多川 (相馬市) :	173	請戸川 (浪江町) :	420	木戸川 (楡葉町) :	260
真野川 (南相馬市) :	167	前田川 (双葉町) :	48	夏井川 (いわき市) :	685
新田川 (南相馬市) :	261	熊川 (大熊町) :	74	鮫川 (いわき市) :	592
				(13河川合計) :	2,928

広域の計算結果(土砂動態)



佐藤ほか, 阿武隈川河口の流送土砂, 海岸工学論文集 **43**, 621(1996) より阿武隈川河口に供給される土砂の量は, 年ごとに異なるが, 平均すると概ね $1.9 \times 10^5 (\text{m}^3 \text{y}^{-1})$ 程度と考えられる.

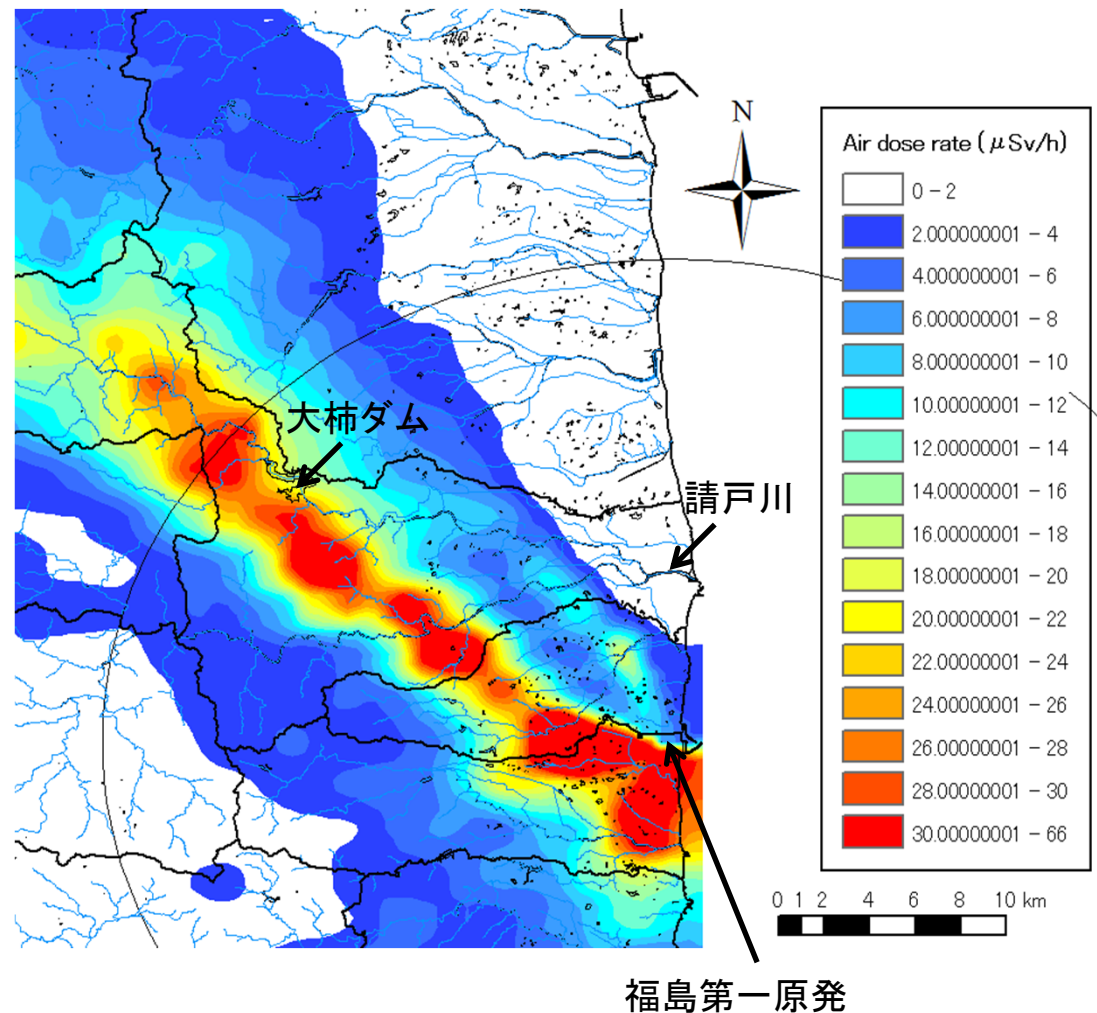
これに対して, 本検討で計算した阿武隈川河口の流砂量は砂, シルト, 粘土を合わせた合計値で $4.9 \times 10^5 (\text{t y}^{-1})$ となった.

- Time-dependent One-dimensional Degradation And Migrational model/パシフィックノースウェスト国立研究所 (PNNL)が開発
- 有限要素法(他次元モデルとの接合が容易)
- 浮遊砂、溶解放射性物質、浮遊砂に付着した放射性物質の河川における移行をシミュレートするもの
- 浮遊物として3つの典型的な浮遊砂、すなわち砂、シルト、クレイを区別し、それらの吸着係数 K_d をパラメータとし、異なる吸着挙動を扱えるようにしている
- 流れの方向と高さの方向について支配方程式を考え、高さ方向に積分したうえで、計算を行う(1次元モデル)
- これまでにオークリッジ国立研究所からテネシー川に属するクリンチ川に流出した汚染拡散やチェルノブイリ近郊のプリピャチ川のSr濃度の変動などを解析

1次元河川解析コードTODAMによる解析

- 放射性セシウムの沈着量としては2番目に汚染された流域
- 上流・中流が特に汚染
- 河川の勾配は上流で約0.01、中流・下流で約0.002
- 約50kmの長さ
- 中腹に大柿ダム

河川	流域面積 (km ²)	Cs-137沈着量 (Bq)
阿武隈川	5,282	4.4×10^{14}
請戸川(浪江町)	418	4.1×10^{14}
新田川(飯舘村～南相馬市)	261	1.6×10^{14}
前田川(双葉町)	49	1.2×10^{14}
:	:	:
全量		1.5×10^{15}



請戸川の計算点及び調査点

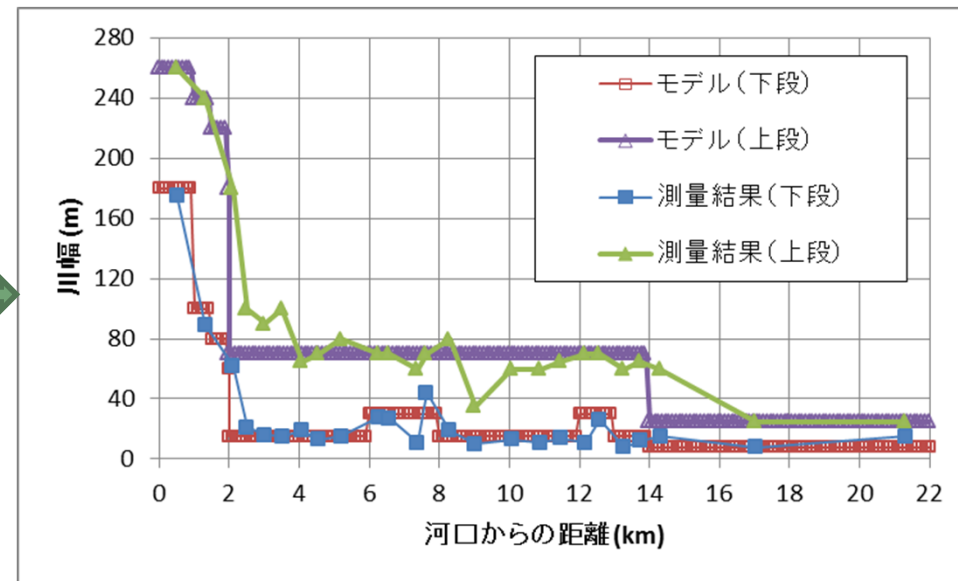
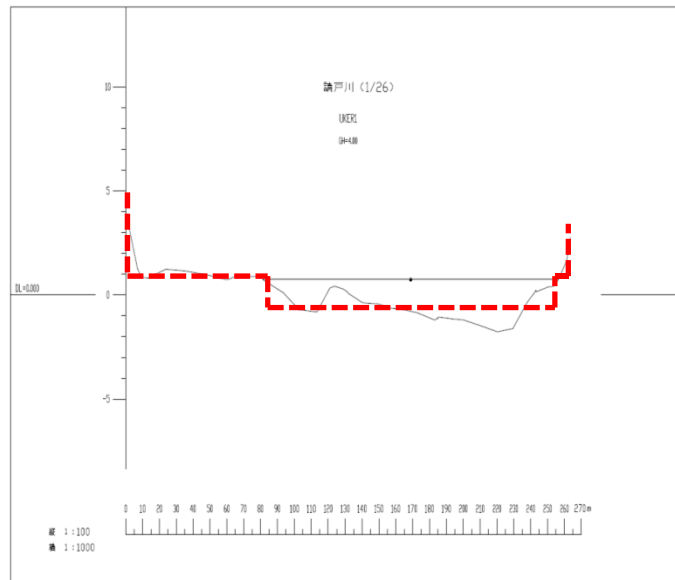
- 河口～ダムまでの距離: 22,000m
- 解析のための点の間隔: 100m



赤点: 調査地点

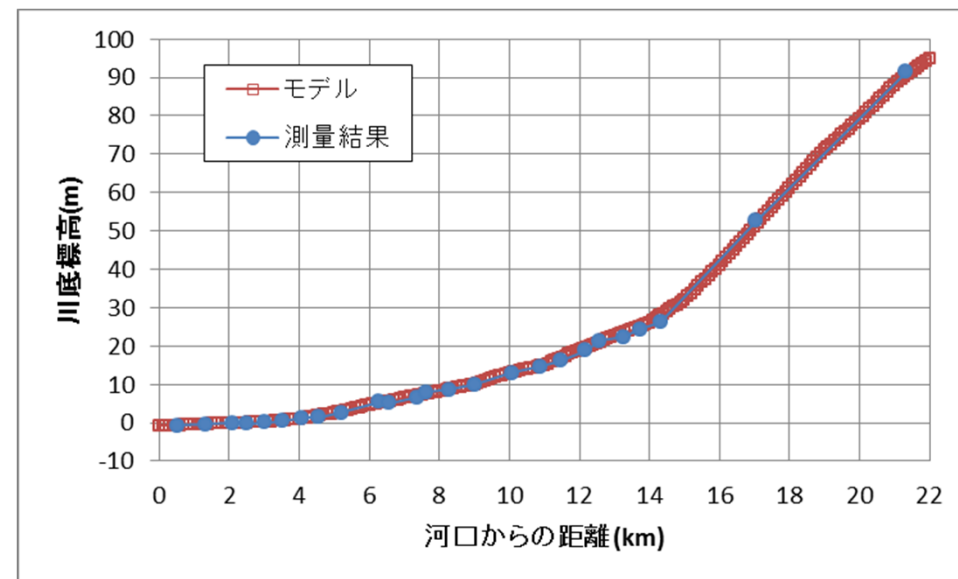
青点: 解析のための点(100mごと)

- 解析コードTODAM
 - 河川中での溶存セシウムおよび土砂に付着したセシウムの輸送を解析
 - 原子力機構とコードを開発した米国パシフィックノースウェスト国立研究所の共同研究で実施
- 請戸川(主に浪江町を流下)のダムより下流を対象とした試解析
 - 低流量時および大雨時を想定
- 解析の条件
 - 境界条件: 低流量時に対してはダムから溶存セシウムを与える。大雨時を想定した解析に対してはUSLEの解析結果を適用
 - 河川の形状: 調査(測量)結果に基づく
 - 河川流量: 低流量時は測定値、大雨時を想定した解析では推定値
 - 土壌の粒度分布: 文献値(福島の土壌)に基づく
 - 限界せん断応力: 既存の実験結果を参考に現地の川底の写真を元に設定

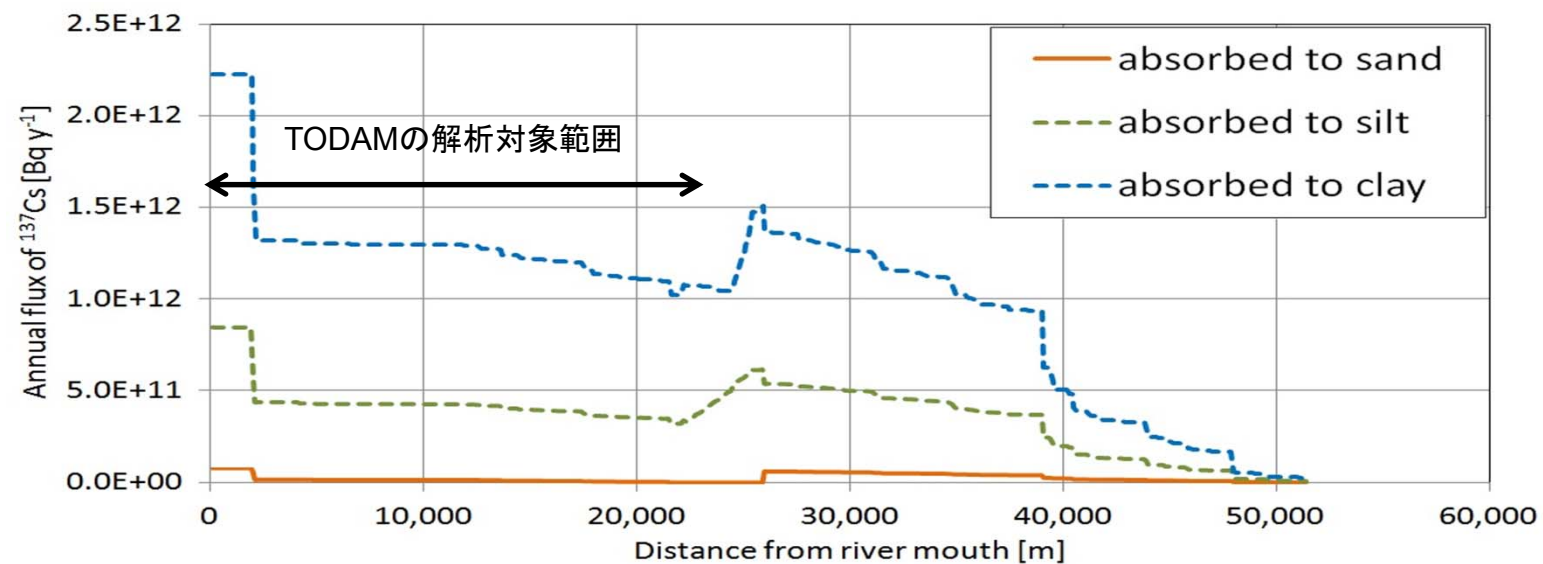
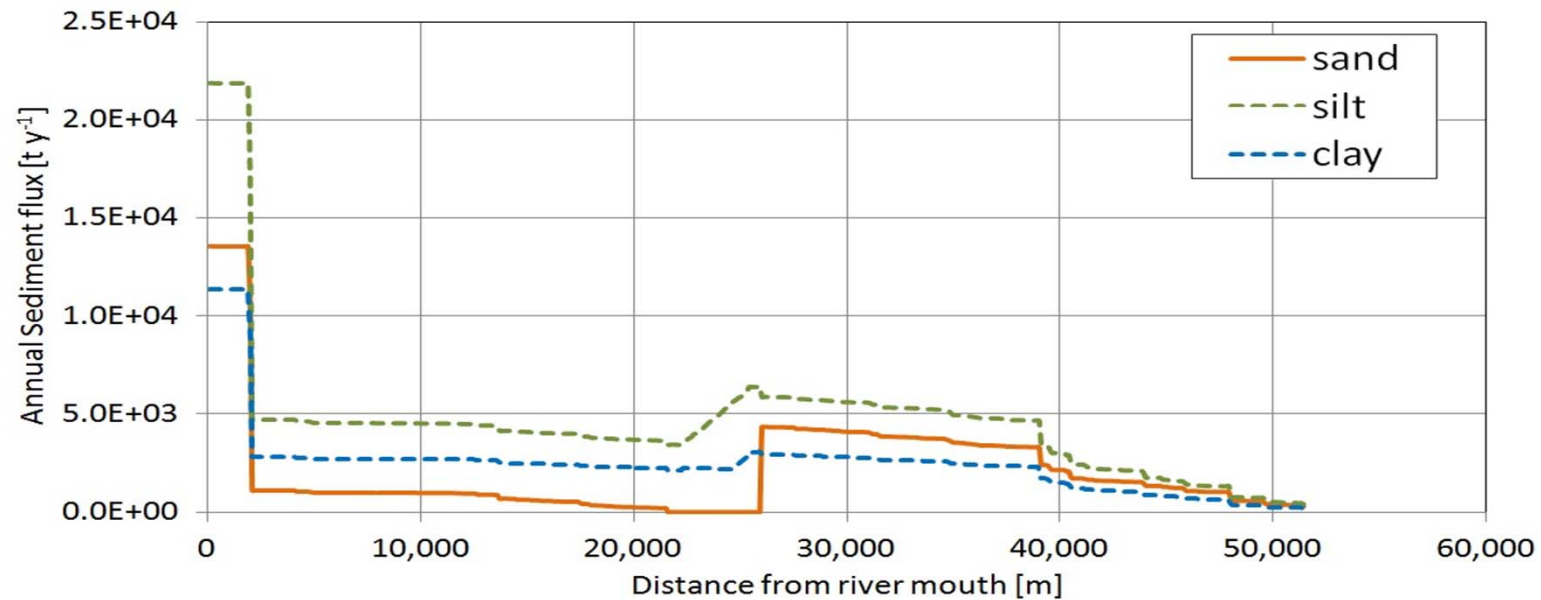


河川形状(川底の平均標高、川幅)のモデル化

- 調査(測量)で得られた断面図を簡素化し、水深の違いにより2段階の川幅になるように設定。
- また、川底の標高をインプットデータとして入力

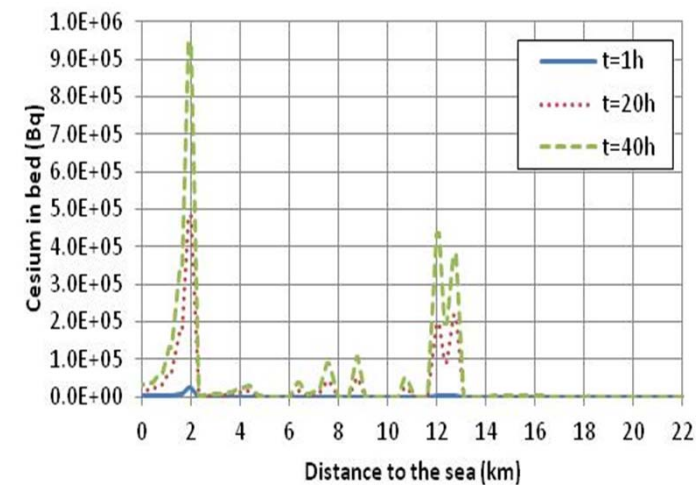
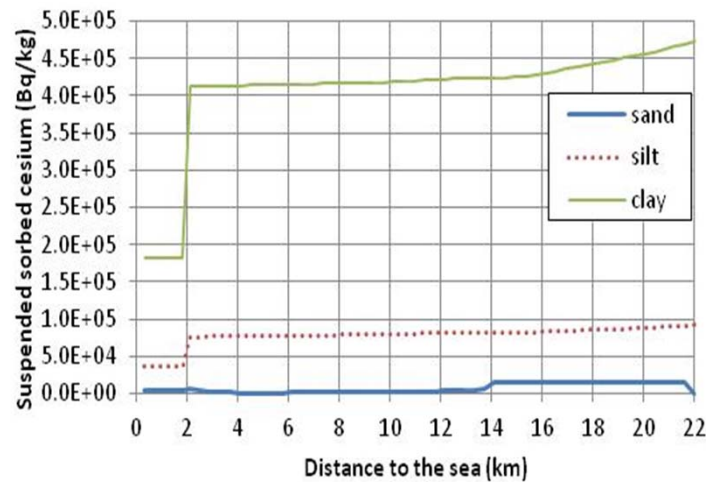
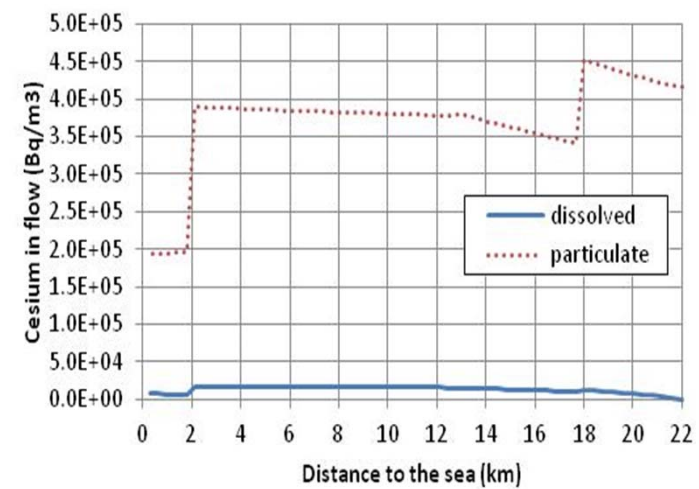
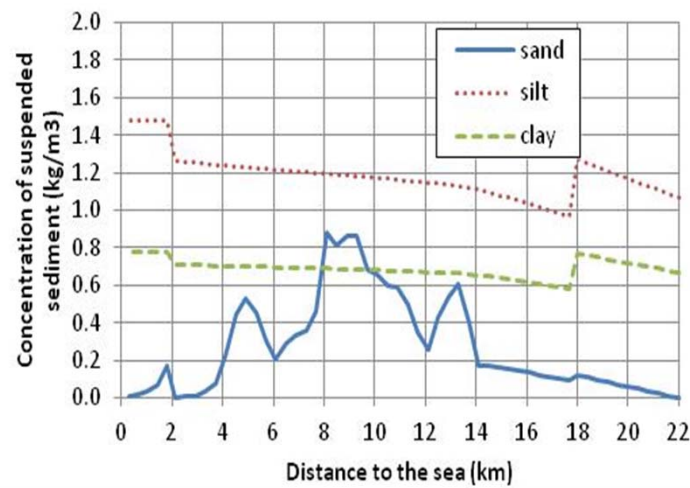


土壌流亡予測値による境界条件設定

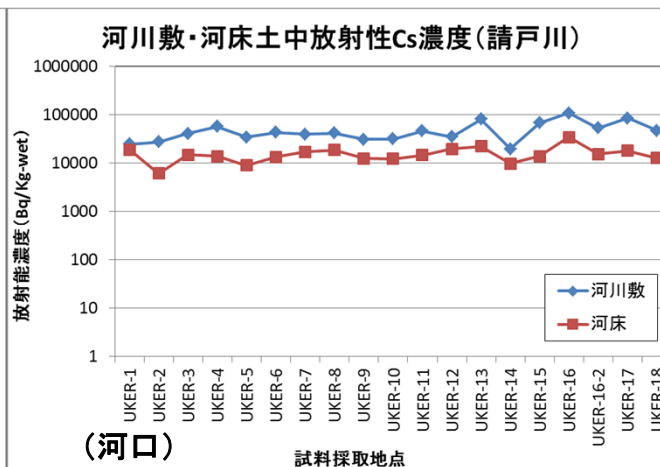
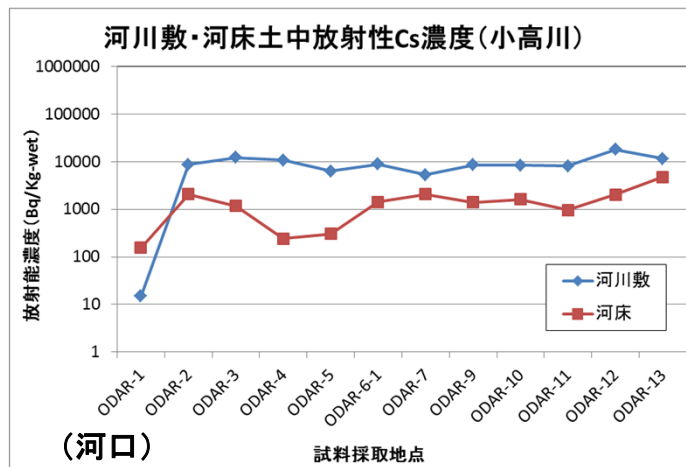


→ダムおよび側方からの土壌、セシウムの流入をTODAMの境界条件、側方条件として与える

大雨時を想定した解析結果

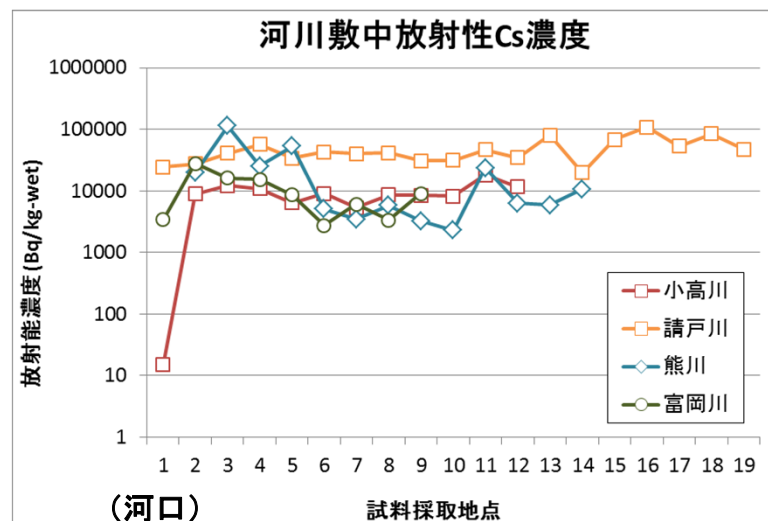
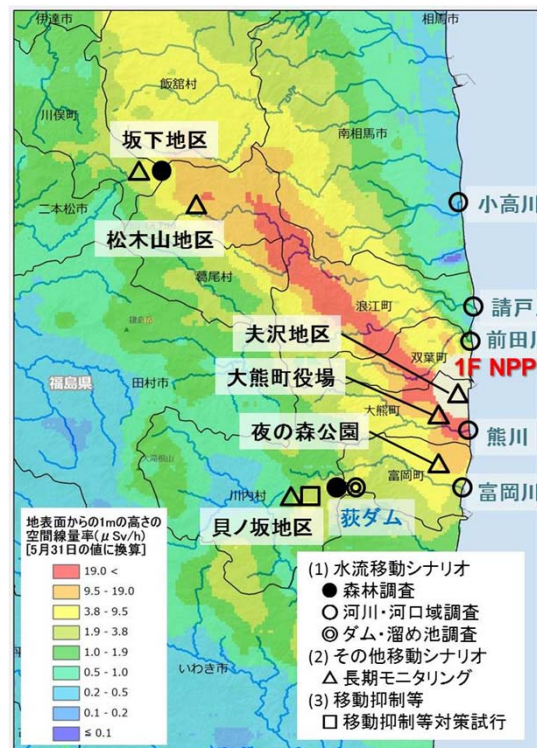


河川敷・河川土中の放射性セシウム濃度



- ・河床土に比べて河川敷土の方が、放射性セシウム濃度が高い。
- ・河口に最も近い地点: 放射性セシウム濃度は河床土の方が高いか同程度。

小高川(左図)および請戸川(右図)の河川敷・河床土中の放射性Cs濃度



各河川の河川敷土中の放射性Cs濃度の比較

- ・上流域が高線量率(小高川・請戸川): 放射性セシウム濃度はほぼ一定。
- ・中・下流域が高線量率(熊川・富岡川): 下流域で放射性セシウム濃度がわずかに増加。

2次元河川解析の目的:

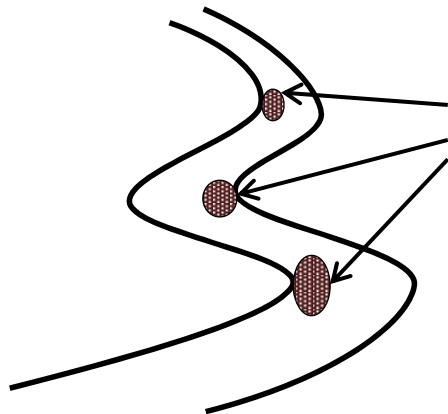
放射性セシウムの多くは土壌表層の粘土画分の粒子に吸着



土壌表層の粘土粒子は降雨により流出土砂となり河川に集まる

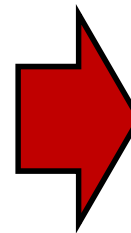


河川の流動様態に従い河川内のどこに、どれくらいの放射性セシウムが堆積するかを予測する



計算機シミュレーションにより粘土粒子の堆積を予測

2次元河川解析により
初めて分かる堆積分布



放射性セシウムの
河川内動態予測へ

2次元河川解析の計画:

24・25年度研究項目

25・26年度研究項目

①粘土画分粒子への不可逆的吸着を仮定した場合の解析



既存の2次元河川流動及び河床変動コードを用いて粒径が粘土画分である粒子の挙動を解析する

iRIC(河川解析プラットフォーム)中のRIC-NAYS2D(北大・清水先生開発)を使用

②固液分配平衡条件を考慮した詳細モデル(PNNL開発)による解析



既存の2次元河川流動及び河床変動コードにPNNL開発のモデルを組み込みセシウムの河川での挙動を解析する

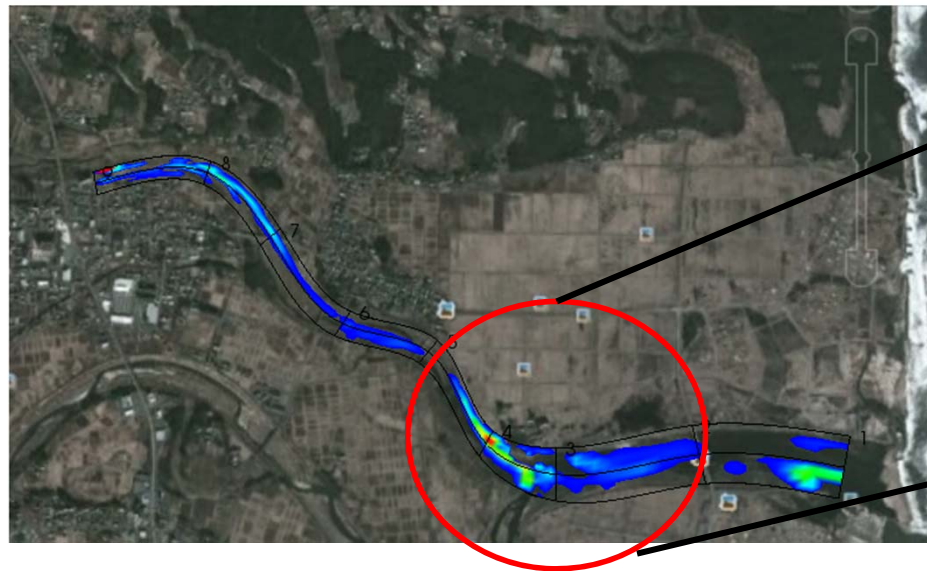
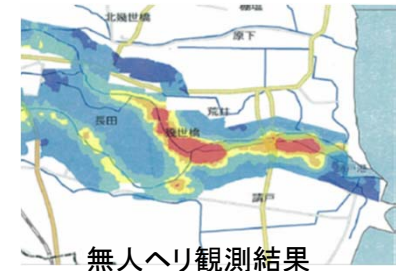
粘土画分粒子への不可逆的吸着を仮定し解析した結果

iRIC(河川解析プラットフォーム)中のRIC-NAYS2D(北大・清水先生開発)を使用

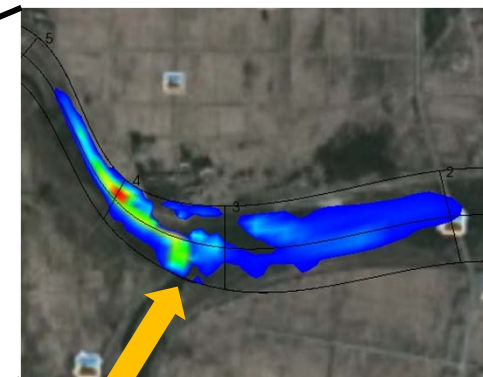
最重要河川: 請戸川 + 高瀬川

インプット: 調査班による河川横断面測量結果や流量等

アウトプット: 高瀬川との合流を考慮した請戸川の河床変動分布



高瀬川との合流付近



高瀬川

注目ポイント⇒高瀬川の合流により請戸川の輸送土砂が閉塞するような状況が見られる。
高い放射線量が合流地点付近で観測されることと符合

3次元沿岸解析の目的:

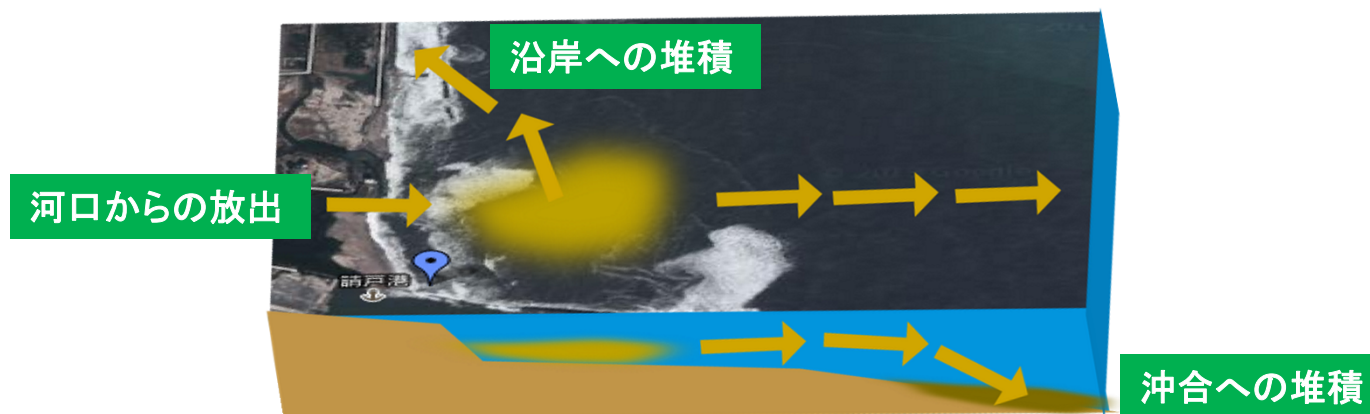
放射性セシウムの多くは土壌表層の粘土画分の粒子に吸着



土壌表層の粘土粒子は降雨により流出土砂となり河川を下る



河口に至ったセシウムを含む粘土粒子が沿岸にどのように堆積し移動するか(沿岸及び外洋への移動等)を予測する



3次元沿岸解析の計画:

24・25年度研究項目

25・26年度研究項目

①粘土画分粒子への不可逆的吸着を仮定した場合の解析



既存の3次元海洋(土砂輸送含)コードを用いて粒径が粘土画分である粒子の挙動を解析する

世界中で用いられているオープンコードROMSを使用し、福島沿岸での海底土輸送に寄与する主要な力を分析

②固液分配平衡条件を考慮した詳細モデル(PNNL開発)による解析

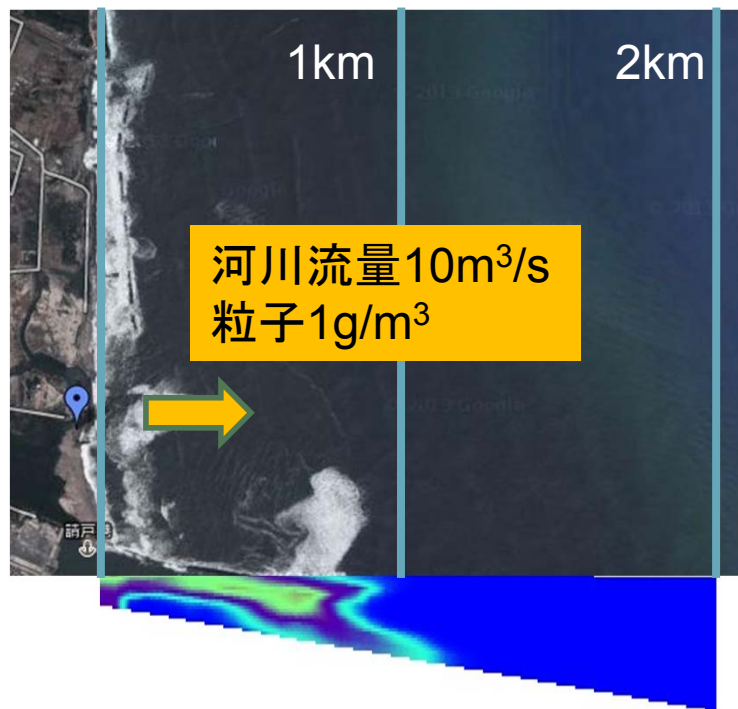


既存の3次元海洋及び土砂輸送コードにPNNL開発のモデルを組み込みセシウムの沿岸での挙動を解析する

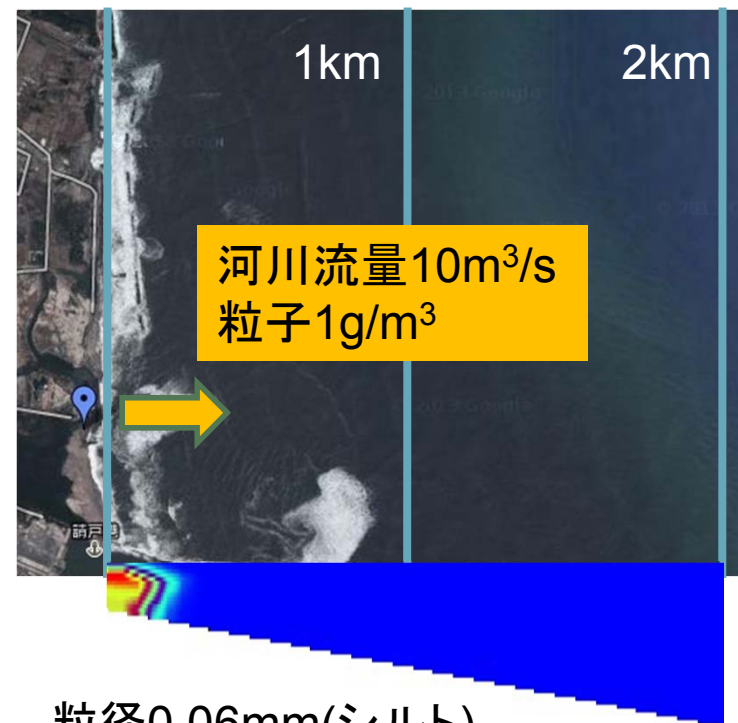
24年度・25年度(前半のみ)の成果:

①粘土画分粒子への不可逆的吸着を仮定し解析した結果

ROMSを使用し得られた結果 (波浪なし、河口からの粒子放出と沈降の解析結果)



粒径0.02mm(粘土),
沈降速度 3.5×10^{-4} m/s
→ 沿岸約1km以内に沈降



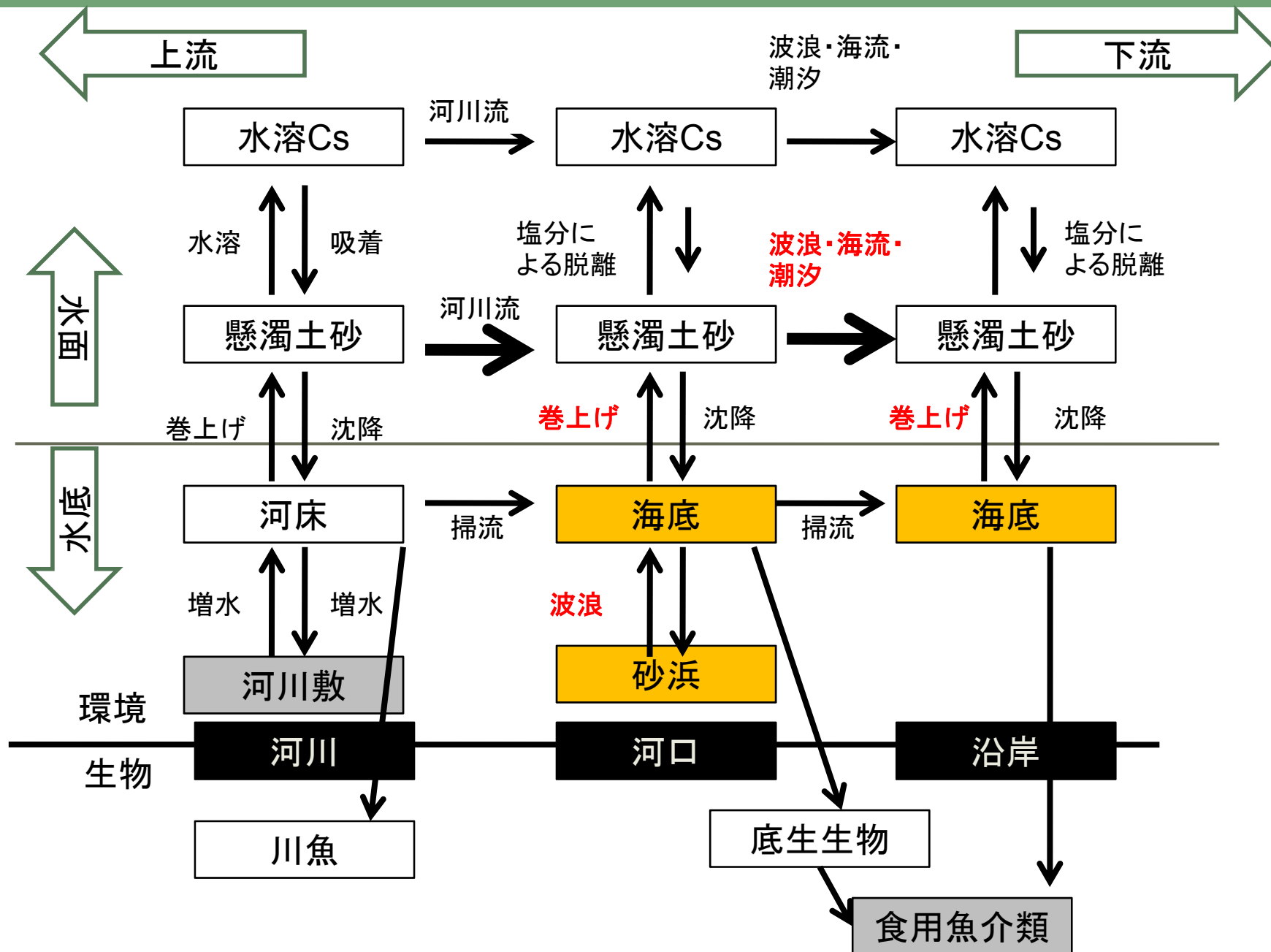
粒径0.06mm(シルト),
沈降速度 3.2×10^{-3} m/s
→ 沿岸約300m以内に沈降

波浪がない場合、粘土粒子は海表面を流れる河川流により1km程度沖合まで輸送される

河口域3次元解析(主なプロセス)

F - T R A C E
P R O J E C T

24



ROMSを用いた河口域解析事例(3次元)

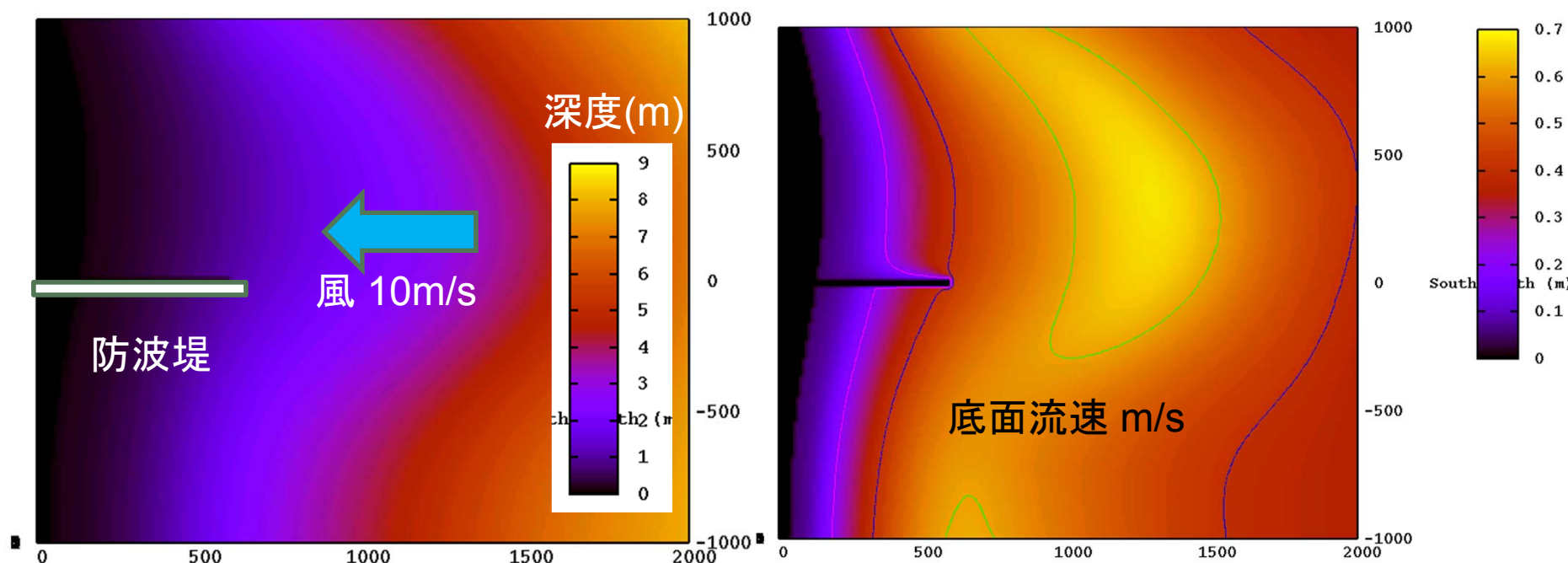
河口・沿岸域での土砂輸送の駆動力となる各種海洋現象を比較評価

ROMS+波浪計算コードSWANを用いて影響を福島太平洋沿岸で評価

Input: 深度、風向き、風速



Output: 底面流速、応力、波高



計算結果より請戸川河口2km域では、波浪による海底付近の流速成分の寄与が最も重要であり、堆積土の移動は主に波浪により生じていることが判明

波浪 >> 潮汐、海流 (~1/10x波浪)

- ⇒ 海浜形成にも大きく寄与する波浪(海浜変形による河川閉塞が起こる)
- ⇒ 沿岸全域に渡る土砂収支を波浪影響下で解析する必要がある

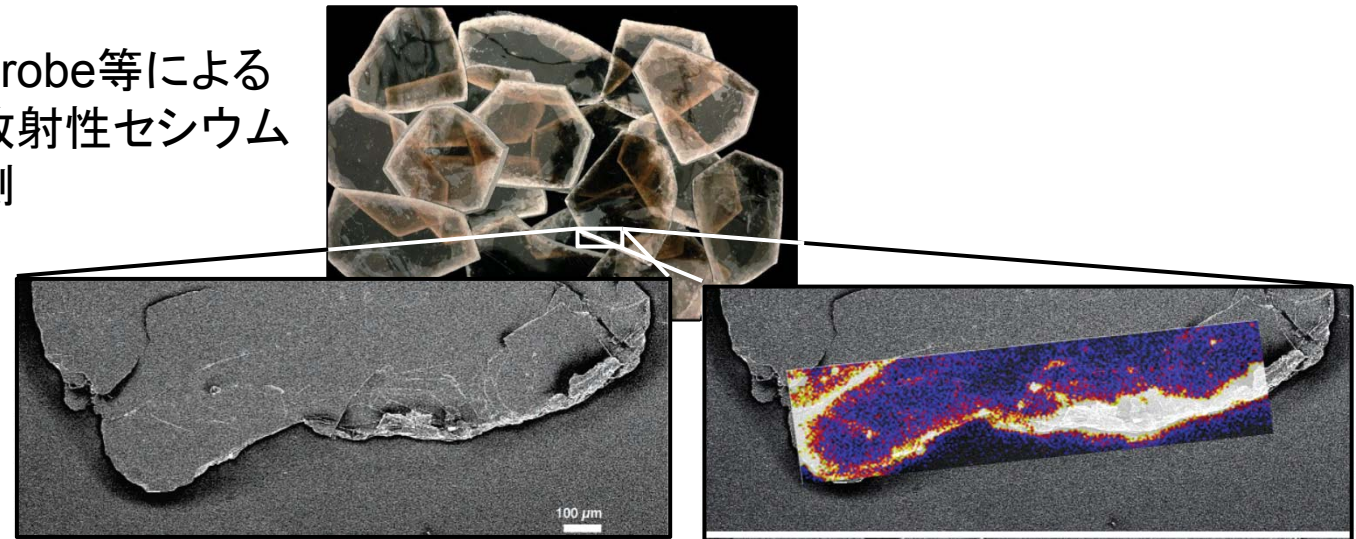
- 目的

環境中の放射性セシウム動態シミュレーションのための基礎的知見の取得

- 利点

実験では観測が難しい原子レベルの構造などを調べる事ができる

X-ray microprobe等による
白雲母への放射性セシウム
吸着様態観測

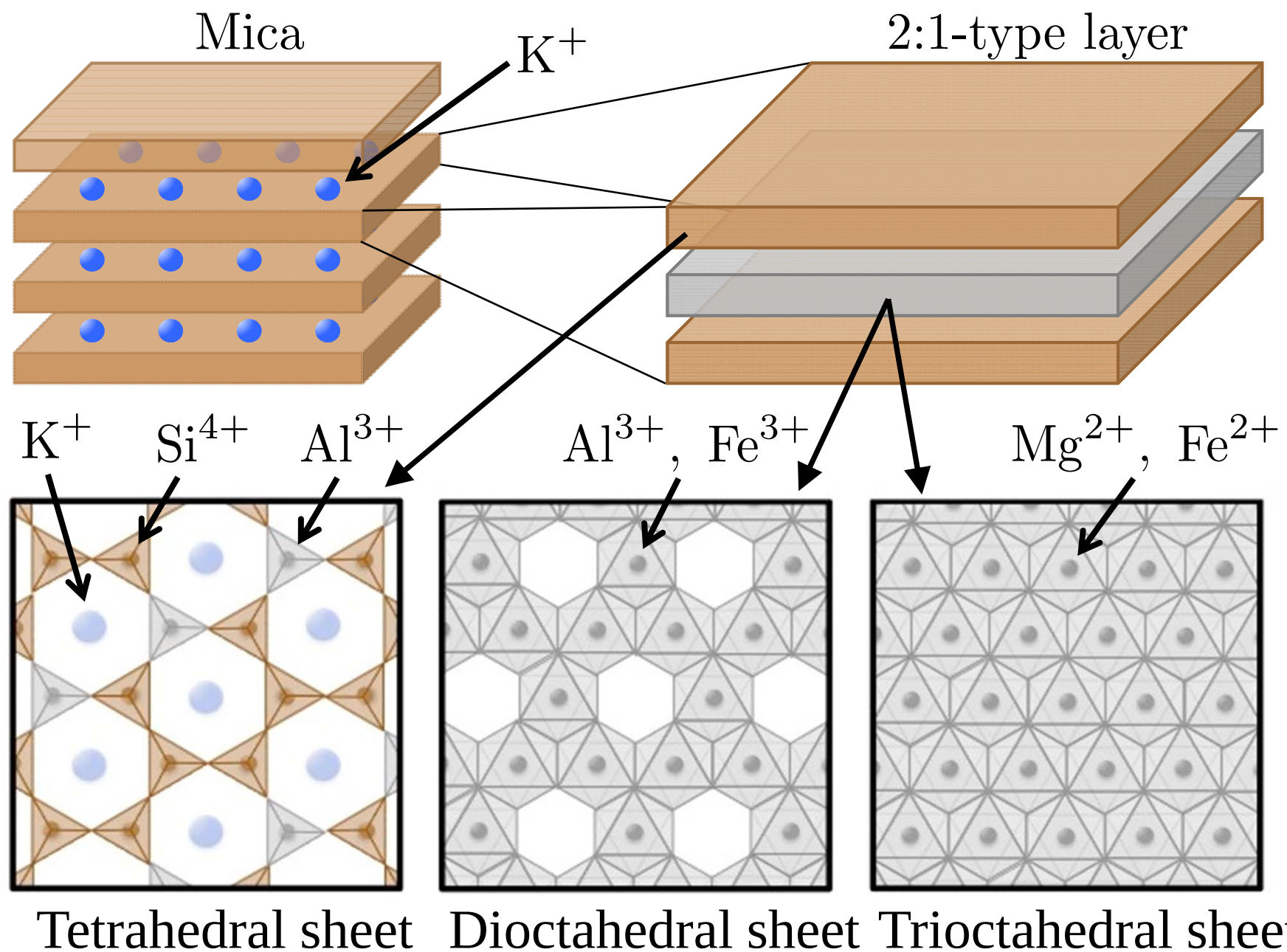


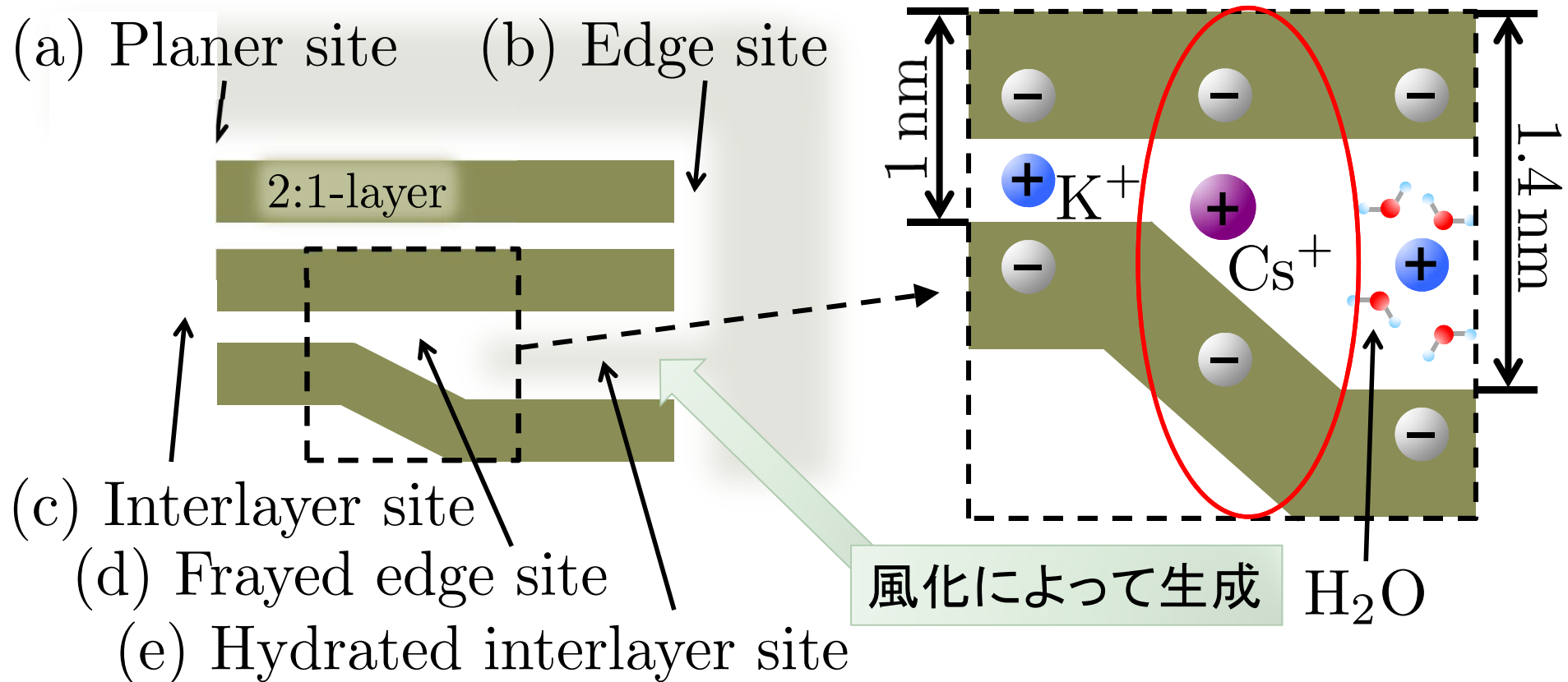
実験では数100μmぐらいまでが限界

J.P. McKinley *et al.*, Environ. Sci. Technol. **38**, 1017 (2004)

- 現状

1. 放射性セシウム吸着に関する数値シミュレーションはあまりない
2. 特に、吸脱着反応に関するシミュレーションは皆無





- 選択的・不可逆的吸着: (d) Frayed edge site (FES)が原因と予想
 - くさび形構造にセシウムが入り込み、層間を閉じる → 不可逆

未解明問題(FES自体の観測は困難)

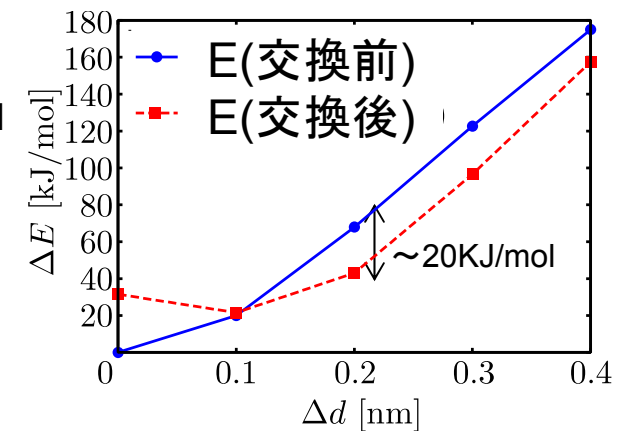
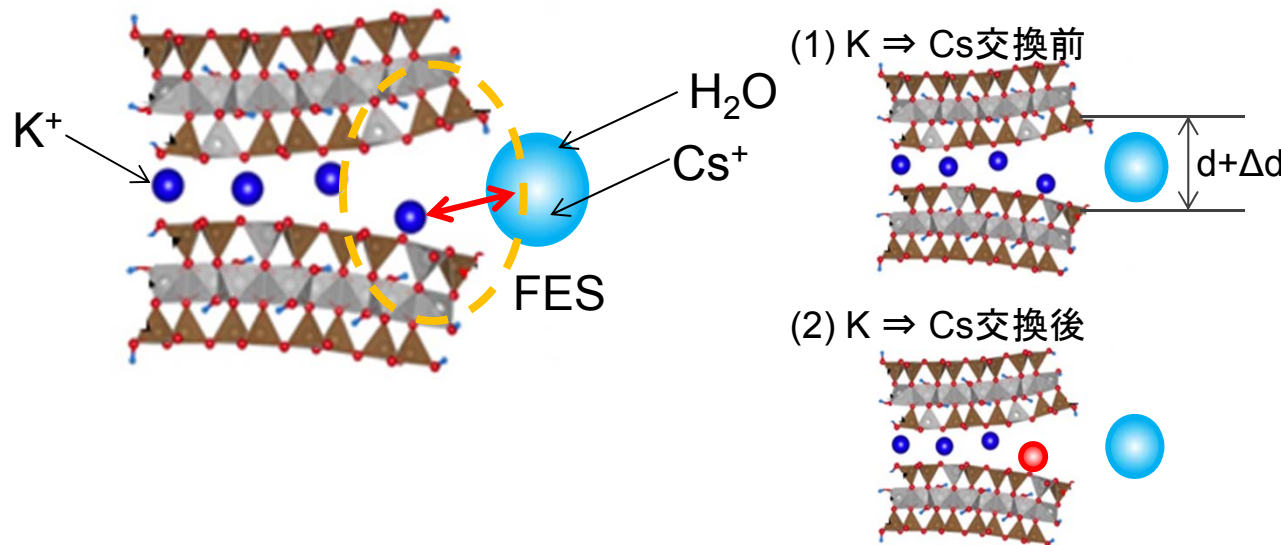
- 問題1: 本当にFESがCsを吸着するか否か
- 問題2: なぜFESがCsを吸着するのか

➡ 計算科学で解明

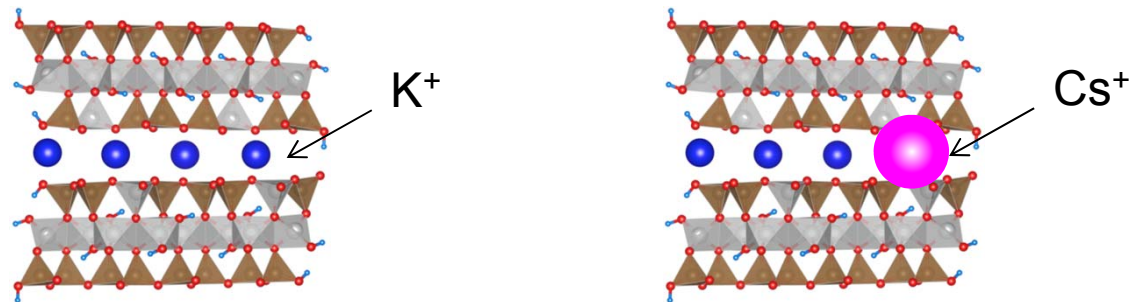
- 問題点：全体をシミュレーションするのは難しい
- 我々の解決方法：FESのモデルを構築



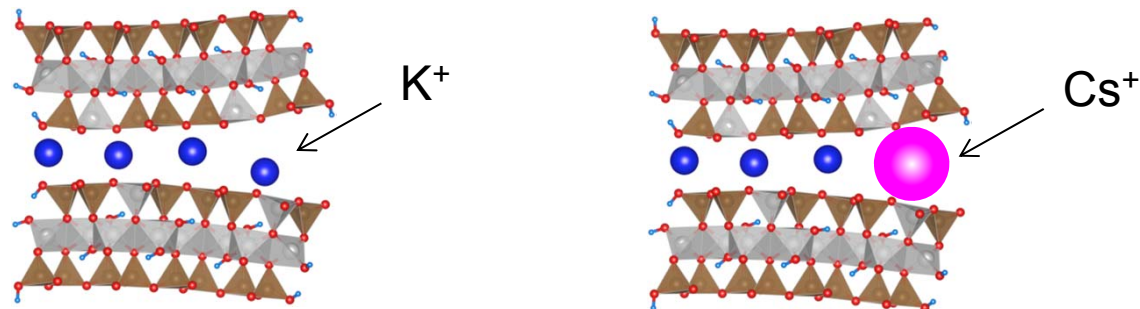
- 計算：イオン交換のエネルギーを評価 ⇒ FESはCsを吸着する



- 吸着機構：イオン半径と層間距離の関係
 - K^+ ：イオン半径小 $\Leftrightarrow$ Cs^+ ：イオン半径大
 - 元々の雲母：層間距離が K^+ にとってちょうど良い



- FES：層間距離が大きくなり、 Cs^+ にとってちょうど良くなる



まとめ

1. Frayed Edge SiteはCsを吸着する事
2. 吸着機構

を世界で初めて示した

M. Okumura, H. Nakamura, M. Machida, Journal of the Physical Society of Japan **82**, 033802 (2013).

全体的なまとめ

- 各種モデルで試解析を行った結果、定性的な物理現象をとらえていることが示された。
- また、数値についてもオーダーとしては等しい結果となっていた。
- しかし、詳細な評価としては実測データが不足しており、今後実測値のフィードバックが望まれる。

課題

- 土砂流亡の解析では、土壌中における ^{137}Cs の収脱着のプロセスを実験等で適切に把握してモデル中に取り込むとともに ^{137}Cs 濃度の粒度依存性を調査する必要がある。
- 河川の解析では侵食量やダムからの浮遊物質量などの境界条件が重要であるが、十分なデータが反映できていないので、それらを整備する必要がある。
- 河口においても精度の高い予測を行うためには、現地調査が必要である。