

汽水域の三次元物質移動モデルの開発とセシウム動態の予測

Development of three dimensional hydrodynamic model for suspended matter in an estuary and prediction of cesium movement

首都大学東京 都市環境学部 准教授 横山 勝英

(研究計画ないし研究手法の概略)

本研究は、汽水域の物質動態に関するシミュレーションモデルを開発し、放射性セシウムの動態を予測する技術を構築することを目的としている。

2011年3月11日に東日本大震災が発生し、福島第一原子力発電所から放射性物質が大気中に放出されたが、このうちセシウムは微細土砂に吸着しやすい。流域で発生した土砂・栄養塩・微量元素は河川を通じて海域に到達し、生物に利用されるため、セシウムも土砂と同じ経路をたどって、停滞水域に沈積して生態系に何らかの影響を及ぼす可能性がある。そこで本研究では、以下の要領で汽水域の三次元物質移動モデルを開発することとした。

(1) 河口汽水域の流動特性に関する調査

筑後川河口域を対象として、特に、分岐合流部における複雑な塩水遡上の様子を調査した。多項目水質計による塩分・水温・浮遊土砂濃度(SS)の鉛直分布の計測、および、超音波流速計を用いた断面内の流速分布調査を大潮時に1時間おきに実施した。これらのデータから、分岐合流部の水およびSSの移動特性を定量的に解析した。

(2) 河口域水域の三次元流動シミュレーションの開発

筑後川河口域を対象として、現地観測と同じ領域における三次元流動シミュレーションを構築した。感潮河道の上流端から有明海・東シナ海までを計算対象領域として、水および塩分の移動状況を再現した。さらに、トレーサー粒子を投入して、分岐合流部での流動特性を可視化した。

(3) 流域圏におけるセシウム動態の調査

宮城県大川を対象として、洪水時の採水観測を実施した。洪水の初期、上昇期、ピーク期、下降期の4回について、本支川の5地点で表層濁水をバケツ採取し、20L×20個=400Lのサンプルを実験室に輸送した。その濁水を3種類の目合いのフィルターでろ過して、粒径別のセシウム濃度を計測した。また、気仙沼湾において洪水後に表層泥を採取し、海底におけるセシウムの分布状況を明らかにした。

(4) 河口汽水域におけるセシウム動態のシミュレーション予測

筑後川河口域で構築した三次元流動シミュレーションを気仙沼湾に適用し、湾内の流動特性を明らかにした。

(実験調査によって得られた新しい知見)

(1) 河口汽水域の流動特性に関する調査

観測領域は筑後川河口から6.0~7.0 kmの分岐合流部であり、ここでは上流側と下流側がそれぞれ二又に分かれており、X字の形状をしている。つまり、上流から見ると、二つの河川が6.8 km地点で合流して、6.1 km地点では再び分岐して、その先は別々に海に接続している(図1-1)。本研究では上流側の分岐水路を6.8-L、6.8-Rと呼び、下流側の分岐水路を6.1-L、6.1-C、6.1-Rと呼ぶ。

研究領域では、平均流速の最大値は上げ潮で1.0 m/s、下げ潮では0.9 m/sとなり、塩分は表層から底層まで均一で、強混合形態で塩水が往復していた。また、SSは塩水フロント(0.5 psu)が到達したときに、1,000 mg/l程度まで上昇した。一方で、流れが弱い場所・時間にはR側の底層付近に3,000 mg/l近い高濃度層が発生することが確認された。

また、各断面における主流速と横断方向流速、SS濃度分布を調べたところ、主流と直交する宝庫にも流れが発生しており、その二次流の影響でSS濃度が局所的に堆積している様子が確認できた。

流量特性として、上流側水路では6.8-Lを全流量の約4割、6.8-Rを約6割が流れ、下流側水路では6.1-Lを全流量の7~8割が流れ、6.1-Rを2~3割が流れていた(図1-2)。このことから、上流では右側水路が主流になっているが、下流ではそれが左側水路に切り替わっており、X字型の水路をまたぐように主流が形成されていることが明らかになった。また、下げ潮では6.1-Rに水が入りにくいことが分かった。

流速とSSを乗じて断面通過SS量を求めたところ、上流側水路では、上げ潮時に6.8-Lを全量の約3割、6.8-Rを約7割が流れ、下げ潮時も同じ傾向であった(図1-3)。下流側水路では、上げ潮時に6.1-Lを全量の約6割、6.1-Rを約4割が流れ、下げ潮時には6.1-Lを約7割、6.1-Rを約3割が流れていた。上げ潮と下げ潮ではSS比が左右同程度になる時間があり、6.1-Rは流量比以上にSS輸送が活発であることが分かった。

以上より、感潮河道の分岐合流部では、流量の配分とSSの配分が異なることがあり、高濁度水塊の発生・発達を支川と本川で異なることで、SS輸送に空間的な偏りがでることを明らかにできた。

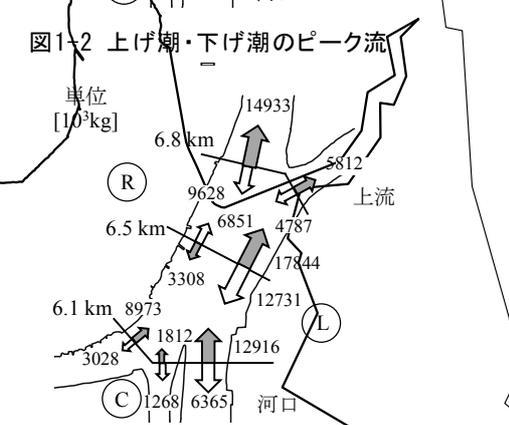
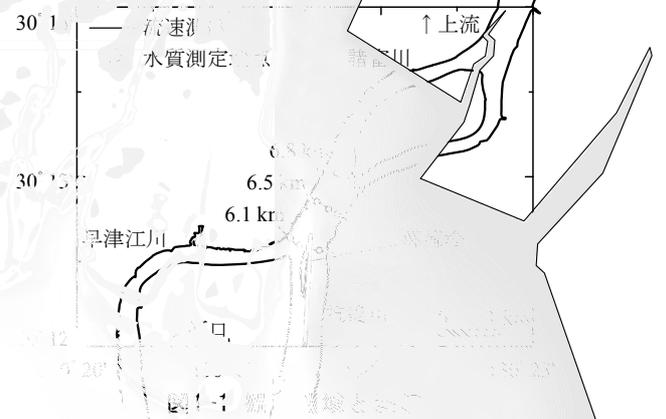
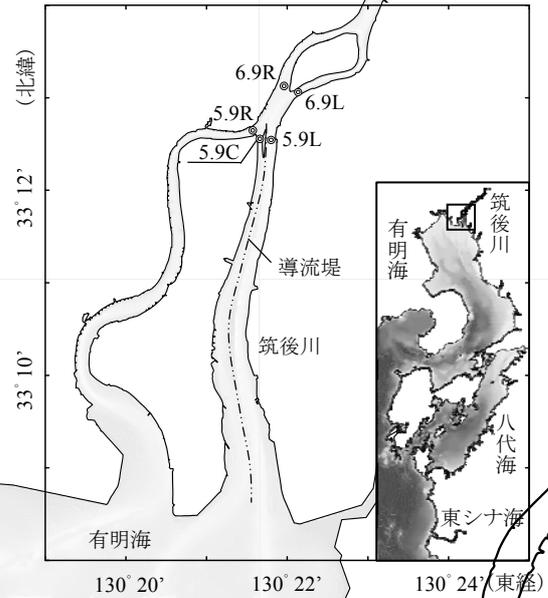


図1-3 累積断面通過SS量 (上げ潮, 下げ潮)

(2) 河口域水域の三次元流動シミュレーションの開発

本研究では、感潮河道の 23 km および有明海、八代海、東シナ海までを含む三次元流動シミュレーションを実行した。

基礎式は、連続式と 3 次元 Navier-stokes 方程式であり、乱流モデルは LES, また静水圧近似とした。離散化においてはスタッガード格子と Ultimate Quickest 法を用いた。計算格子は河道内で水平方向に 20 m~40 m, 海域で 40 m~960 m とした。鉛直グリッドは 0.25 m~40 m, 時間ステップ Δt は 5 s~40 s である。上流端は筑後大堰 (23 km) であり、淡水流量を与えた。下流端は東シナ海であり、近傍の実測潮位と一定の塩分濃度を与えた。

図 2-1 は流速の計算結果を水深平均表示したものであり、上げ潮の流速は、下流において 5.9R や 5.9C よりも 5.9L の方が、2~3 倍大きく、上流では 6.9R の方が 6.9L よりも流速が約 1.5 倍大きかった。下げ潮でも、6.9R から 5.9L にかけて強い流速が見られ、主流と滞筋が一致していない。

水位、流量、断面積比・流量比 (全流量に対する支川流量の占める割合) の計算結果を検討したところ、上流では、上げ潮時に 6.9R のピーク流量が約 1200 m³/s であるのに対し、6.9L では約 700 m³/s であり、6.9L の流量比は約 40 %となった。下げ潮は継続時間が長いため流量は小さくなるが、流量比は約 40 %で上げ潮と同様であった。一方、下流では、上げ潮時に 5.9C+5.9L と 5.9R を比較すると、5.9R には水が入りにくいことが分かった。この理由として、当該領域の地形だけでなく、下流の地形も影響していると考えられる (図 1-1)。5.9L の下流は川幅が広く直線的であるのに対し、5.9R の下流は川幅が狭く、閉塞気味になっていると推測される。これらの計算結果は、(1) の観測結果と概ね整合していた。

上げ潮時の流線を本川と支川で別々に表示すると (図 2-2), 5.9L の流線は左岸の滞筋に沿って 6.9L に流入する成分と、滞筋を乗り越えて 6.9L に流入する成分に分かれていた。5.9R の流線はらせん状に旋回し、右岸から離れずにほとんどが 6.9R に流入していた。これにより、6.9R の流量が 6.9L の流量を上回っており、6.9L の流量は 5.9L に大きく依存していると推測される。

以上より、河口汽水域を対象とした水・塩分の三次元流動シミュレーションが構築され、

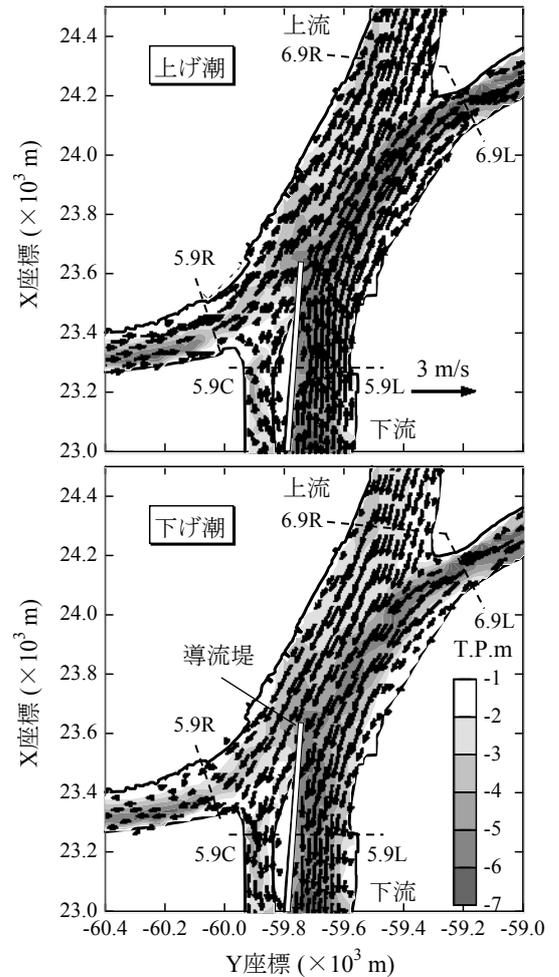


図2-1 河床標高と水深平均流速

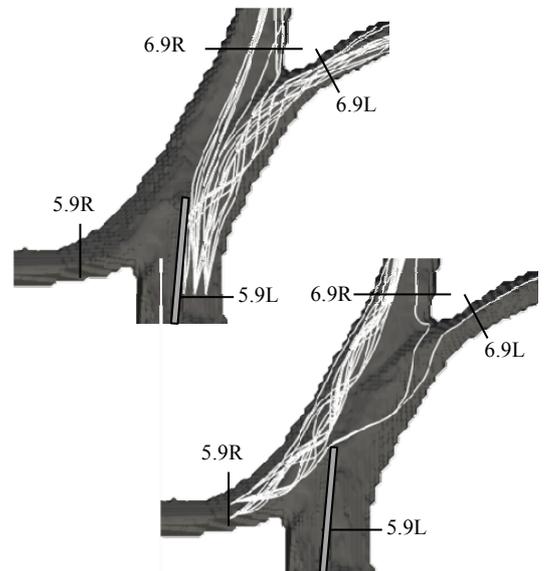


図2-2 上げ潮ピーク時の流線

これを用いることで、分岐合流部では澇筋や湾曲の地形、断面積比などが影響して、複雑な流況になっていることを明らかにした。

(3) 流域圏におけるセシウム動態の調査

観測時の降雨は最大雨量が 10 mm/h、累積雨量が 78 mm であり、観測対象洪水は年に 2~3 回生起する規模であった。浮遊土砂 (SS) の中央粒径 (d50) は 11~23 μm であり、最大粒径はどの地点でも約 300 μm であったことから、粘土~細砂を含む濁水が流れていたと言える。Cs 分析では、すべてのサンプルは検出限界を超えており、全サンプルの 9 割について 1σ の相対誤差が 7% 未満であった。また、Cs 比 ($^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$) から、今回分析した SS サンプルには主に 1F 事故に由来する Cs が吸着していることが分かった。

SS の粒度分析と 3 種類のフィルターろ過の結果、フィルター上の残留土砂量と粒度分布から推定される各分画の土砂量が一致しなかった。これは、目合いよりも細かい土砂が捕捉されたためと考えられる。そこで、目詰まりした粒径領域を対数正規分布で推定し、20 μm 未満、20~40 μm 、40 μm 以上の 3 分画の粒度分布を作成し、さらに d50 を求めた。

d50 と Cs 濃度の関係 (図 3-2) について、洪水開始時には負の関係性が見られ、ピークには傾きが小さくなる。下降期は Cs 濃度が粒径にかかわらず一定の値を取った。この原因として、上昇期はファーストフラッシュが発生して、森林表土や水路などから Cs を多く含む土砂が流出して Cs 濃度が高くなり、かつ、粒径と理想的な負の関係性が現れたと考えられる。ピーク付近では強い浸食力で Cs をあまり含まない深層の土砂も流され、粒径に関わらず一定の濃度になったと考えられる。

Cs 輸送量と流量の関係を調べ、既往の文献と比較した (図 3-3)。1980 年代後半の久慈川の L-Q 関係と大川の L-Q 関係は勾配 (べき指数) が概ね等しく、絶対値が 100 倍異なるこ



図 3-1 研究領域 (気仙沼大川)

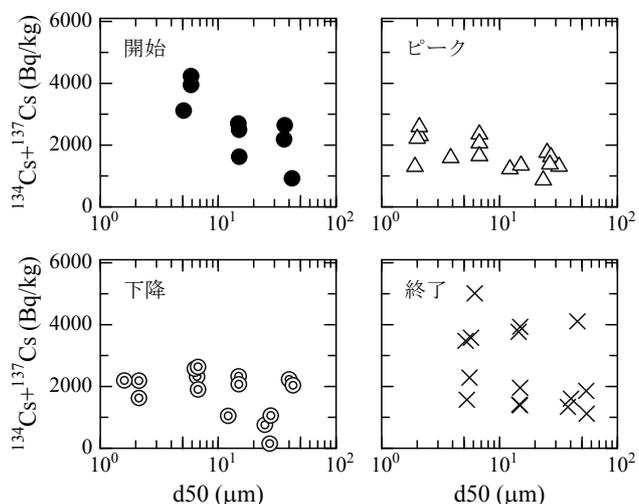


図 3-2 中央粒径と Cs 濃度の関係 (採水タイミング)

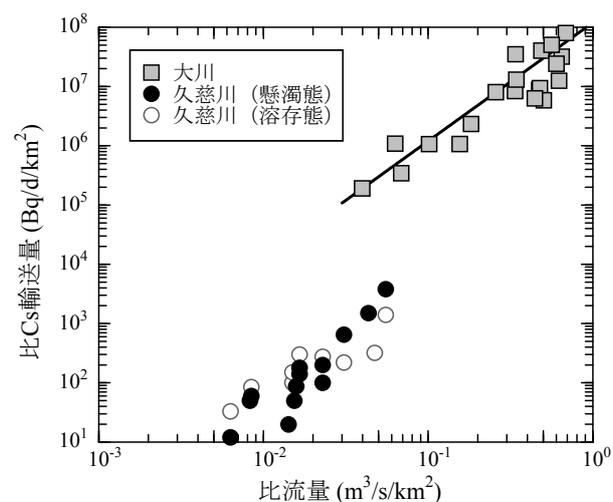


図 3-3 比流量と比 Cs 濃度の関係

(松永武: 河川における放射性核種の移行と存在形態に関する研究, 日本原子力研究所, 2001-018, 2001. より引用・再作成)

とが分かった。久慈川流域の土地利用は山林が 87%、農地が 12%であり、大川と類似していることから Cs 輸送特性も類似したものになったと考えられる。絶対値が異なるのは Cs のフォールアウト量の違いによる。

洪水の 2 ヶ月後に気仙沼湾の表層泥を採取し、0~1cm 層の Cs 濃度を測定したところ（図 3-4）、大川河口域では 800(Bq/kg-dry)の値を示したが、周辺域では 100(Bq/kg-dry)以下に低減していた。これより、洪水時の SS と共に輸送される Cs は比較的河口に近い領域で堆積していることが分かった。また、河道内（砂質）では濃度が低いことから、ウォッシュロードの輸送特性と同様に、淡水が塩分と接触する領域で急速に沈降したものと推測される。

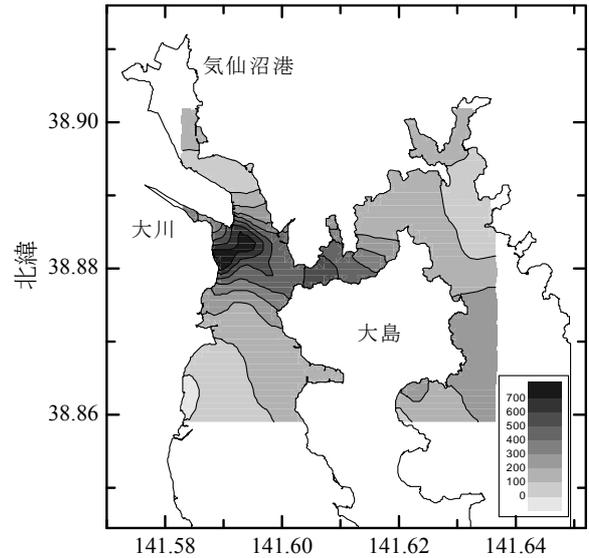


図3-4 海底表層1cmのセシウム濃度， $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg-dry)

（４）河口汽水域におけるセシウム動態のシミュレーション予測

筑後川河口域で構築したモデルを気仙沼湾に適用して、三次元流動解析を行った。計算格子は太平洋から 320, 80, 40 m とし、気仙沼湾は 20 m とした。鉛直グリッドは 0.25~30 m，時間ステップ Δt は 2.5 s である。また、計算期間は 2014 年 7 月 25 日~30 日（大潮）である。

大潮での上げ潮の流速分布（水深 5 m）を図 4-1 に示す。太平洋から入ってきた水は、東湾、大島瀬戸を通り、気仙沼湾奥、西湾の 2 つに分かれていた。また、西湾の沖から流入した海水は、東湾からの流れと衝突していた。下げ潮では、湾奥からの水が大島瀬戸を通り、東湾から太平洋に流れていた。西湾の中心部からは、北上して大島瀬戸を経由するルートと、南下して太平洋に流れるルートに分かれていた。

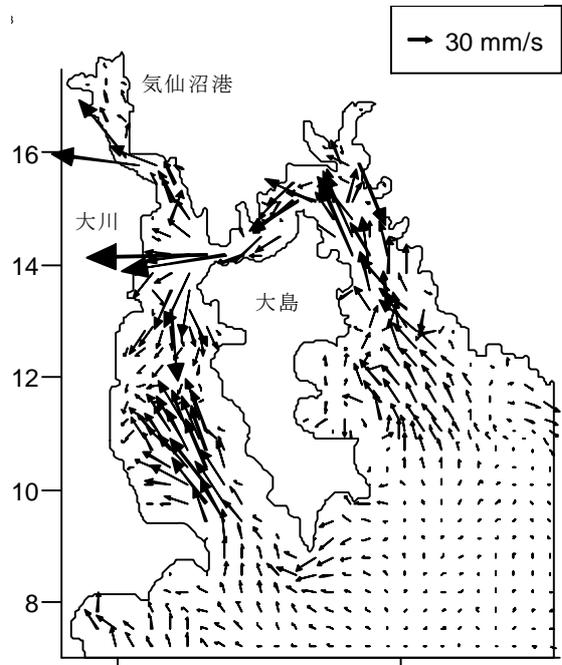


図4-1 流速分布(大潮の上げ潮, 水深5m)

この計算より、大川河口域では 3 方向からの水がぶつかり合うため、渦が発生しやすく、大川河口から流出した土砂・セシウムが図 3-4 のように堆積しやすいことが分かった。以上より、汽水域（河口・内湾）を対象とした三次元流動シミュレーションを構築できた。

（発表論文）

松村健史・新谷哲也・横山勝英:三次元流動シミュレーションを用いた感潮河道の分岐合流部における流況解析, 土木学会年次学術講演会, 第70回, 2015.9(発表予定)

橋本達範・横山勝英・河野益近・大野敦生:放射性セシウムの洪水時の粒径別輸送特性, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 71, No. 4, pp. I_1195-I_1200, 2015.2