

阿武隈川から海洋への浮遊土砂を通じた放射性物質の移行状況調査

Release of Radionuclides from Natural River, Abukuma as Suspended Particulate Matter into Pacific Ocean

山敷庸亮⁽¹⁾・恩田裕一⁽²⁾・五十嵐康人⁽³⁾・若原妙子⁽⁴⁾
立川康人⁽⁵⁾・椎葉充晴⁽⁶⁾・松浦裕樹⁽⁷⁾

Yosuke YAMASHIKI⁽¹⁾, Yuichi ONDA⁽²⁾, Yasuhito IGARASHI⁽³⁾, Taeko WAKAHIRA⁽⁴⁾,
Yasuto TACHIKAWA⁽⁵⁾, Michiharu SHIIBA⁽⁶⁾ and Yuki MATSUURA⁽⁷⁾

- (1) 京都大学大学院総合生存学館
- (2) 筑波大学大学院生命環境科学研究科
- (3) 気象研究所 環境・応用気象研究部
- (4) 東京農工大学
- (5) 京都大学大学院工学研究科
- (6) 京都大学名誉教授
- (7) 八千代エンジニアリング

- (1) Graduate School of Advanced Integrated Study in Human Survivability
- (2) Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba
- (3) Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research Department, MRI-JMA
- (4) Tokyo University of Agriculture and Technology
- (5) Graduate School of Engineering, Kyoto University
- (6) Emeritus professor of Kyoto University
- (7) Yachiyo Engineering Co. Ltd

Synopsis

Most of radioactive material released from Abukuma River Basin, one of the largest stream near the contaminated zone of Fukushima, flowing most of the contaminated plane zone then flow into the Pacific Ocean, are in the suspended particulate form, being estimated more than 90 % in the upper stream and 70 % near the river mouth. Most of radionuclides in particulate form are still trapped bottom sediment in the middle of the basin, however we find that significant amount are released during the heavy precipitation event. We also found that, at hydrological extremes the total loading increase more than 1000 times higher than the normal stream condition. The total flux of radiocesium into the Pacific Ocean estimated at the Iwanuma Station from 10 August 2011 to 10 May 2012 become 9.11 Terabecquerel during 274 days for ¹³⁷Cs, and 6.81 Terabecquerel during 274 days for ¹³⁴Cs.

キーワード: 放射性物質, 河川, 海洋, 懸濁物質, フラックス

Keywords: Radionuclides, River transport, Ocean, Suspended particulate matter, Flux

1. 福島原発事故による放射性物質の放出の概要

福島第一原発事故によって大気中に放出された放射性核種は7-8割が海洋に、2-3割が陸域に降り注いだとされており、また流域においては、様々な推定があるが、阿武隈川流域を含む高線量地域におよそ1 PBqの放射性セシウムが降り注いだと推定される。その陸域から海洋に様々な形態で放射性物質が移動するが、本研究はその定量化を目的としている。はじめにまず、福島第一原発事故により放射性物質の総量について検討を行う（山敷・木村，2012）。

フランスのIRSN(2011)によると、事故発生から2011年3月22日までに放出されたキセノン ^{133}Xe などの放射性希ガスは2,000PBq、放射性ヨウ素は200PBq、放射性セシウムは30PBq、放射性テルル90PBqとされる。また我が国の原子力安全・保安院(2011)はキセノン ^{133}Xe などの放射性希ガスは11,000PBq、放射性ヨウ素($^{131}\text{I}+^{133}\text{I}$)は合計202PBq、放射性セシウム($^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$)33PBq、放射性テルル($^{129\text{m}}\text{Te}+^{132}\text{Te}$)91PBqとしており、希ガスの放出量の見積もりが原子力安全・保安院では著しく大きくなっているが、それ以外はおおよそ等しいオーダーとなっている。放射性セシウム、特にセシウム137を例にとれば、2011年3月11日～4月5日に日本原子力研究開発機構(東京電力,2012)は9PBq、(Chinoら，2011)は12.6 PBqと推定しているが、(Stohlら，2011)は3月10日～4月20日において35.8 PBqという数字を提示している。また原子力安全・保安院によると15PBqとされる。それぞれの推定放出量における推定方法の違いはあるが、およそ4倍強の違いが見受けられる。

福島第一原発事故による放出量のヨウ素換算値が77万テラベクレル、すなわち770 PBqとされており、著者が行った試算では813 PBqとなった。チェルノブイリ事故による放出量(IAEA)のヨウ素換算値は5,990 PBqとなるため、1/7程度となる。しかし総放出量は(原子力安全・保安院,2011)を用いた試算では、11,338 PBqとなり、IAEAによるチェルノブイリの総放出量推定値13,650 PBqに匹敵する。これはヨウ素換算では換算係数が限りなくゼロとされる放射性希ガスの放出量が福島第一原発事故では大気圏核実験を除いて史上最高であることによる。さらに、Stohlら(2012)の放射性希ガスと放射性セシウムの推定値と保安院(2011)の他の項目の推定値を用いると、総排出量15,659 PBqでチェルノブイリを抜いて史上最高(大気圏核実験を除く)となり、ヨウ素換算値でもチェルノブイリ事故の1/3の1,677 PBqとなる。

海洋に放出された放射性核種総量は、(Kawamuraら，2011)によると、4.0PBq、(Tsumuneら，2012)

によると、3.5 PBq、JCOPE2を用いた(Hondaら，2012)によると2011年3月21日～5月6日の間の直接放出量は3.7ペタベクレルとされる。JCOPEによる別の推定(Miyazawa et al., 2013)では5.5～5.7ペタベクレル、また比較的粗い格子を用いたJCOPEによる推定では、同じ期間に14.8ペタベクレル(1.48京ベクレル)と見積もられた(Masumoto et al., 2013)。(IRSN, 2011)によると27ペタベクレルという予測が示されているが、これは放出口付近から外洋への濃度遷移を直線的に見積もったためだと考えられる。

また、海洋への流入は(1)福島第一原発から(2)大気から海洋への沈着 以外に、(3)河川からの流入がある。(1)について、(Kanda, 2013)の試算によれば、2011年6月1日から2012年9月30日の間に0.017PBqの放射性セシウムが漏出したとしているが、標記試算では港湾における汚染水濃度の時間変化から逆推定したものであるので豪雨イベント時の漏出には対応しておらず、最近海への漏出が明らかになったので、より大きな値が試算される可能性もある。(2)については既に上に述べたが、推定により大きな幅がある。河川、とくに阿武隈川を通じて陸域からの放射性物質の海洋への放出量に関して、本編で主に文部科学省により行われた調査結果について報告する。

本調査においては、阿武隈川流域で最も高線量域であった福島県川俣町山木屋地区から流下する口太川流域およびその下流の阿武隈川本川において、複数地点で水位・流量観測、浮遊砂サンプラーおよび濁度計を用いた土砂流出観測、さらにこれらの地点での採水を実施し、 ^{137}Cs および ^{134}Cs の水文流出過程を通じた輸送量を推定することにより、河川と通じた流域から海洋への放射性物質の輸送量(フラックス)を明らかにすることを目標とした。

放射性物質が高濃度かつ広範囲に拡散した福島県中通りから太平洋に流れる一級河川の阿武隈川と、その支流で特に高い線量地域を含む口太川流域を対象河川として選定した。そのため、調査地点としては口太川流域4地点と、阿武隈川本川の中流地点(伏黒)および下流地点(岩沼)を選定した。観測地点をFigure 1に示す。

Figure 1に示した各調査地点において、以下の機器を設置し、水位・流量観測および浮遊砂量の流出観測を行なった。また、河川水位を河川流量に変換するために河川横断面の測量と河川流の流速測定を必要に応じて実施した。



Figure 1 Observation locations

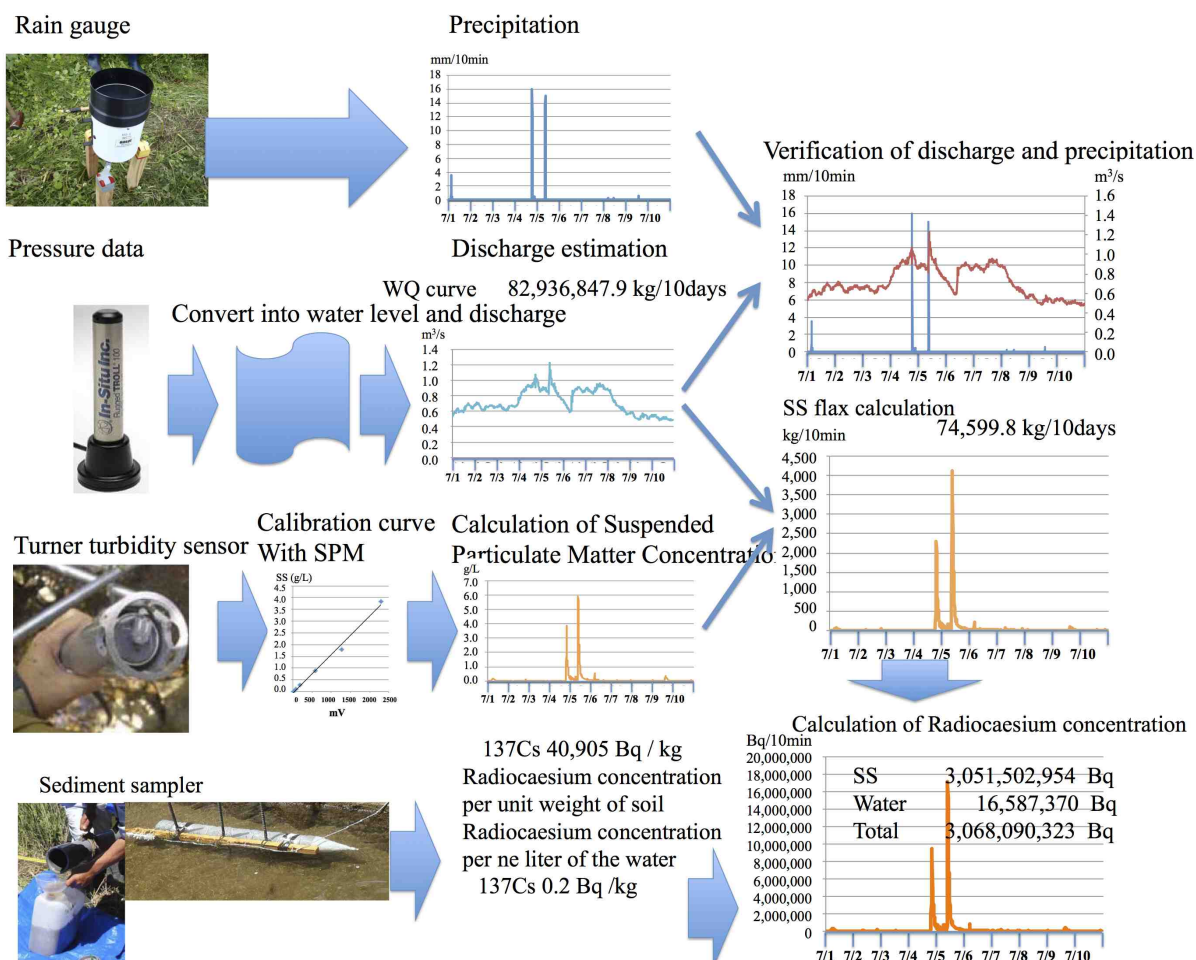


Figure 2 Installed equipment

設置機器はFigure 2に示したとおり(A)圧力式水位計 Rugged TROLL, (B) 濁度計, (C)浮遊砂サンプラー, (D)雨量計, (E) データロガー+大陽光パネルである。濁度計は、オーストラリアのMaVan社 NEP9500 (特注)で、ワイパー付きで3000 NTUまで安定して計測可能である。浮遊砂サンプラーは、内径98 mm, 長さ1 mの塩ビパイプを用い、両端の蓋部に内径4 mmのチューブを取り付けた簡易な装置であり、現地に設置しておくことで、出水中の浮遊砂を採取することが可能である。濁度データおよび雨量計データは10分おきにEME SYSTEM社 (アメリカ) のOWL2eに記録される。また、電源は、ソーラーパネルによりデータロガーに供給されるため、外部電源なしの運転が可能である。

本調査の調査期間は10月1日から5月10日までとしたが、途中台風15号による増水やそれに伴うセンサー回収、その後の動作不良などがあり、中盤での測定値の欠損が多くみられることとなったが、本報告書においてはこれらのデータに対してどのように補間し、その欠損値が出ないようにできる限りの推定を行った。

口太川での4つの観測地点では、圧力式水位センサーでの水深の計測値に大気圧補正を施すとともに、河川流速の観測結果と横断面測量結果を用いて H (水深 $\cdot m$)- Q (河川流量 $\cdot m^3/s$)曲線を作成し、これらを用いて流量を求めた。阿武隈川本川の流量推定には国土交通省東北地方整備局による2010年までの水位流量データを用いて作成された H - Q 曲線を国土交通省より入手し、これを用いて流量を算定した。

濁度計の計測値(mV)と実際の浮遊砂濃度との関係で得られた換算式を用いて浮遊砂濃度への換算を行った。各地点毎にセンサーの感度が異なるため、別々の換算式を利用した。浮遊砂測定地点近傍に、転倒マス式雨量計を用いて雨量計を記録した。ただし、欠損値に関しては他の雨量測定点での値を用いて置き換えた。またノイズなどの異常値を取り除いた。

岩沼地点における、雨量 $\cdot$ 流量浮遊砂濃度換算値のグラフをFigure 4示す。このように、流量のピークにのみ濁度が増加していることがわかる。このため、今回のような濁度計、浮遊砂サンプラーを用いた手法は、放射性物質の輸送量を算定するために有効であると考えられる。

濁度計の計測値(生値,mV)と筑波大学で行なわれた実際の浮遊砂濃度との関係で得られた換算式を用いて浮遊砂濃度への換算を行った。各地点毎にセンサーの感度が異なるため、別々の換算式を利用した。

2. 調査結果および考察

2.1 各地点の期間毎の放射性物質の輸送量の変化

阿武隈川下流岩沼地点の浮遊砂中のセシウム濃度の期間毎の変化についてはTable 1に示した。各地点の濃度においては ^{137}Cs の最高値は66,000 Bq/kg (2011.6.27 水境川)であったが、昨年12月に回収したサンプル中での濃度は7,000(伏黒)-18,000(水境川) (Cs -137)であり、低下がみられた。2012年については分析がまだ終了していない。また ^{134}Cs については60,000 Bq/kg(2011.6.27 口太川上流)の高濃度を示していたが、昨年12月回収サンプルにおいては5,300 Bq/kg(伏黒)-14,000 Bq/kg(水境川)となり、同じく低下がみられた。浮遊砂サンプラーで採取された中央粒径は、それぞれの地点において10 μm - 50 μm 前後となっており、水境川および口太川下流地点においてはおよそ40 μm 、阿武隈川流域ではおよそ15 μm 前後となっていた。浮遊砂サンプラーに捕獲された粒子のセシウム含有量については以下のとおりトラップされた期間毎に異なる値を示す。今回は、フラックス計算においては、それぞれ採取された期間毎のセシウム含有量がそれぞれの浮遊砂サンプラー設置期間中継続したと仮定した。ただし、台風中のデータはとれていないため、9/17日採取と12/8採取のセシウム含有量の平均値を台風通過期間中(-9月末まで)継続したと仮定した。

河川水中の放射性物質濃度については、阿武隈川については、黒岩2回目のデータ (8月1日, 2日採取データ) (^{134}Cs 0.49 Bq/L, ^{137}Cs 0.43Bq/L), 口太川については同日採取の、百木木(^{134}Cs 0.21 Bq/L, ^{137}Cs 0.27Bq/L) および、筑波大学にて後半時期に対して分析されたデータを用いて、最終的に阿武隈川については次の値 (^{134}Cs 0.25 Bq/L, ^{137}Cs 0.22 Bq/L), 口太川については次の値(^{134}Cs 0.21 Bq/L, ^{137}Cs 0.27Bq/L)を用いた。なお、前半のデータは、現地で濾過を行っていないデータなので微量の浮遊物質が含まれる可能性を有している。

河川水中の放射性物質濃度については、20Lの河川水を採水し、0.45 μm のフィルターで濾過した後、高精度ゲルマニウム検出器で測定した。濁質中における懸濁粒子中のセシウム含有量についてはそれぞれサンプリング期間毎の平均値を用いたが、水についてはサンプリング値が瞬間値であること、NDの値がまれにあることなどから、全期間を平均して一つの値を用いた。

Table 1 Suspended Sediment Concentration and associated Radiocaesium Concentration in downstream of Abukuma River Basin

Location	Installed 04JUL2011	Suspended sediment quantity (g)	Cs-137		Cs-134	
	Collection date		kBq/kg	±Deviation	kBq/kg	±Deviation
Abukuma downstream, Iwanuma	H23/7/12	0.40	35	3.2	25	2.7
Abukuma downstream, Iwanuma	H23/7/19	3.00	42	1	38	1.0
Abukuma downstream, Iwanuma	H23/7/26	6.40	35	0.9	31	0.9
Abukuma downstream, Iwanuma	H23/8/10	0.80	25	1.8	18	1.5
Abukuma downstream, Iwanuma	H23/8/17	0.70	50	2.7	40	2.4
Abukuma downstream, Iwanuma	H23/8/25	0.04	18	1.1	22	1.7
Abukuma downstream, Iwanuma	H23/8/31	0.08	22	0.8	19	1
Abukuma downstream, Iwanuma	H23/9/10	1.50	27	0.4	23	0.4
Abukuma downstream, Iwanuma	H23/9/17	0.12	31	1.8	26	2.4
Abukuma downstream, Iwanuma	Long period of continuous deployment					
Abukuma downstream, Iwanuma	H23/12/9	29.00	11	0.2	8.1	0.2
Abukuma downstream, Iwanuma	H23/12/21	0.88	6.4	0.2	3.8	0.2
Abukuma downstream, Iwanuma	H24/1/13	0.2	4.1	0.1	2.5	0.1
Abukuma downstream, Iwanuma	H24/1/27	0.4	7.4	0.2	4.1	0.2
Abukuma downstream, Iwanuma	H24/2/10	0.2	8.5	0.3	5.1	0.3
Abukuma downstream, Iwanuma	H24/2/20	0.32	8.3	0.4	4.6	0.3
Abukuma downstream, Iwanuma	H24/2/27	0.08	3.8	0.2	2.6	0.2
Abukuma downstream, Iwanuma	H24/3/21	0.092	15	0.7	7.6	0.6
Abukuma downstream, Iwanuma	H24/3/30	0.048	25	1.0	12	0.8

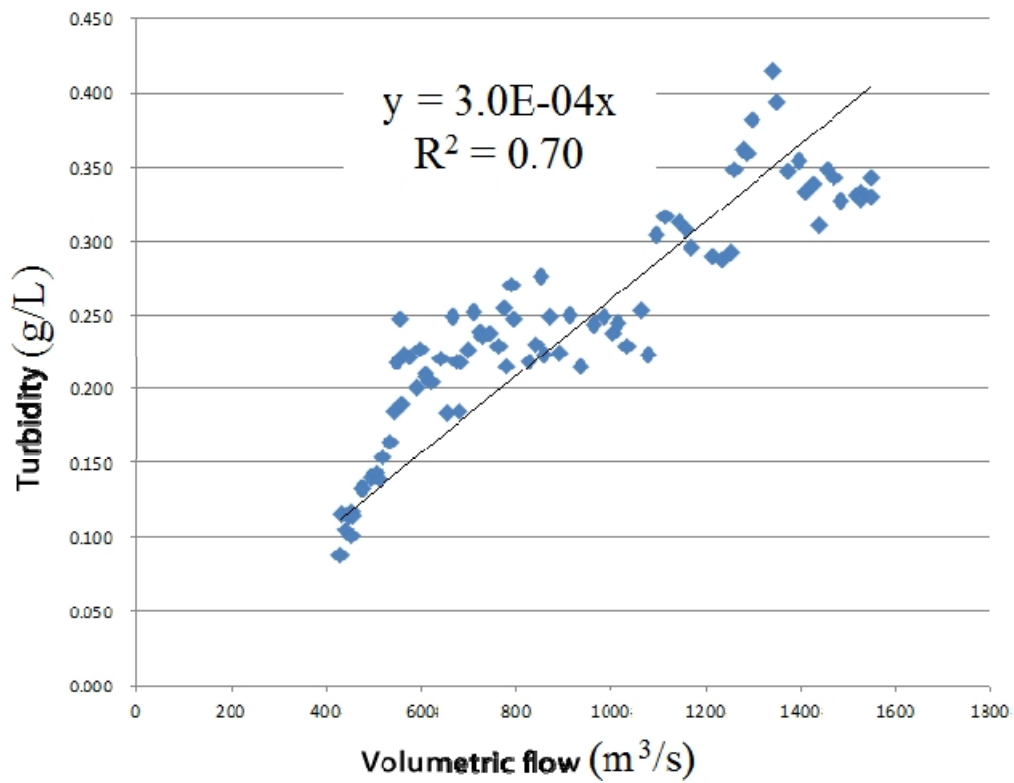


Figure 3 Linear regression equation for turbidity and flow rate at the time of high water in Abukuma River

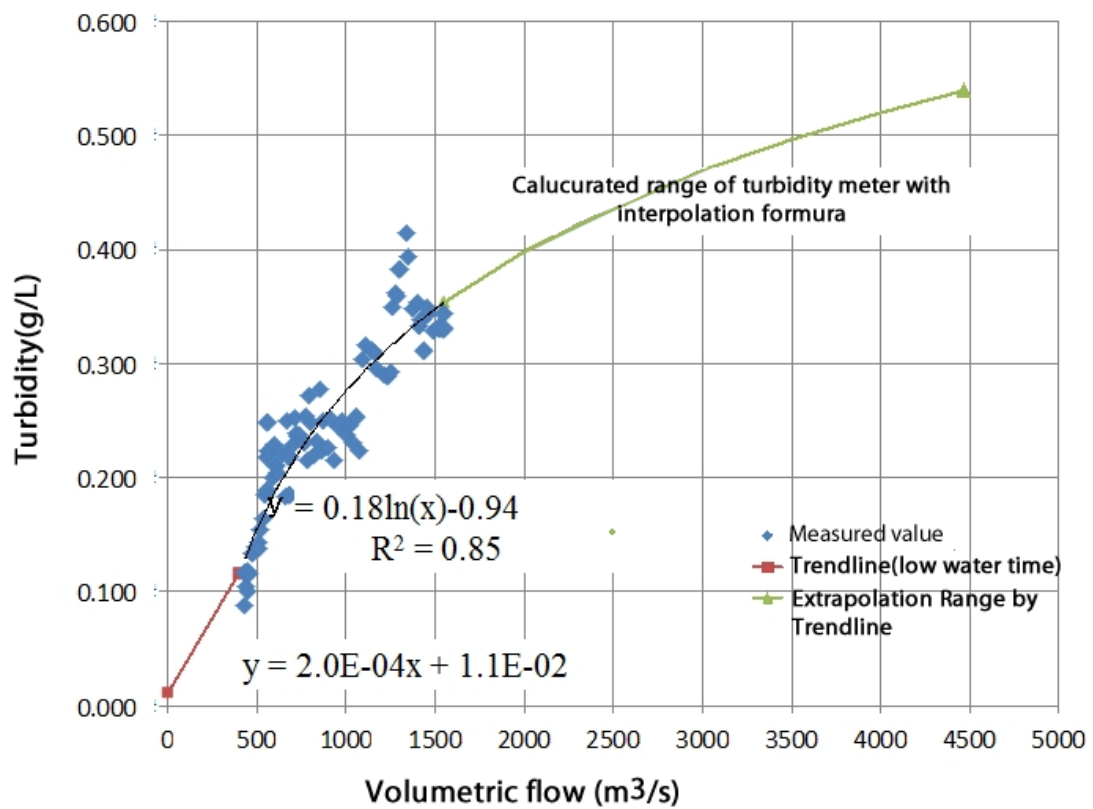


Figure 4 Exponential regression formula for turbidity and flow rate at the time of high water in Abukuma River and extrapolation items

2.2 台風15号通過時の濁度データ損失時の補間手法について

台風15号通過時において、堤内地に設置した濁度計ロガー等の浸水の恐れがあるため、これらの機材を撤収し、最大流量時における濁度の値はとれていない。本研究においては、これをどのように補間するかを検討を行った。

台風15号通過時の増水時(2011年9月19日22:00-9月20日11:40)における濁度と流量は、下記のグラフに示す通り明確な関係がみられる。そのため本報告書においては(1)直線回帰(Figure 3)(2)指数補間(Figure 4)の両者を検討し、相関係数が高く、流量増加に対して濁度増加がやや縮小する(2)の指数回帰式(Figure 4)を用いて欠損値の推計を行った。

2.3 放射性セシウム輸送量の推定

阿武隈川本川、岩沼地点において2011年8月10日12:00～2012年5月10日12:00(274日間)を推定期間とした。放射性セシウム輸送量の計算の元となる懸濁粒子中や水中の ^{137}Cs および ^{134}Cs の測定値は筑波大学および気象研究所により実施された2011年6月～12月の分析結果を用いたTable 2 に調査期間中に積算したそれぞれの地点における浮遊砂量(SS)および河川流量を示す。

また、これらの値を用いて推定した2011年8月10日12:00～2012年5月10日12:00(274日間)と台風15号の通過期間2011年9月19日0:00～2011年9月27日0:00(8日間)の岩沼地点における総放射性セシウム輸送量の推定値と、セシウム輸送量中の浮遊砂(SS)による放射性セシウム輸送量の貢献率を表2(a)-(g)に示す。また、岩沼地点における濁度フラックス変化をFigure 5 に示した。

河川測定点における総放射性セシウム輸送量の推定値と、それぞれの地点における総放射性セシウム輸送量中の浮遊砂(SS)による放射性セシウム輸送量を、以下の通り定義した寄与率により示した。ここで、

寄与率(%)= 浮遊砂による放射性セシウム輸送量 / 総放射性セシウム輸送量 (水+浮遊砂) (%)

これによると、2011年8月10日12:00～2012年5月10日12:00の間の海洋へのフラックス推定量と考えられる岩沼地点における放射性セシウム輸送量は ^{137}Cs で $1.04 \times 10^{13} \text{ Bq/274日}$ 、 ^{134}Cs で $7.96 \times 10^{12} \text{ Bq/274日}$ となった。Figure 5にこの期間におけるフラックスの時系列変化を示したが、2011年9月19日0:00～2011年9月27日0:00の間の海洋へのフラックス推定量と考えられる岩沼地点における放射性セシウム輸送量は ^{137}Cs で $6.32 \times 10^{12} \text{ Bq/8日}$ (全期間の61%)、 ^{134}Cs で $5.18 \times 10^{12} \text{ Bq/8日}$ (全期間の65%)となっており、ほとんどの放射性セシウムフラックスは2011年9月19日-9月27日の間の台風15号通過時による洪水期に発生しているといえる。

Figure 6に岩沼観測地点における全期間の放射性セシウム輸送量の月別積算値の変化図を示した。図に示されているとおり、上記台風15号における放射性物質輸送量は大変大きいことがわかる。

本推定に関して、考えられる誤差は濁度計損失時の濁度の補間と、高水流量の推定であるが、濁度に関しては、Figure 4で用いた指数回帰式を用いており、Figure 4で示した全期間の濁度変化値に比較してやや低めではあるが現実的な値であると考えられる。これにより増水時の濁度の過剰評価を避けることができると考えられるが、同時に濁度がこれ以上あがっている可能性も残されている。また本フラックス計算において洪水期のセシウム含有量は最も間近に測定した9月17日の値を用いた。なお、セシウム含有量をその後の測定値である12月19日の濃度や、平均値を用いると台風時期のフラックスの割合はやや減少する。

またFigure 5,6に示す通り、台風時期を終えてのフラックスについては、雪解け水に関する増水期におけるフラックスが増加しているといえる。

^{137}Cs の輸送における浮遊砂の寄与率は岩沼地点で88.4%であったが、台風期に関しては寄与率が94.0%まで上昇した。 ^{134}Cs では岩沼地点で86.1%であったが、台風期に関しては寄与率が95.3%まで上昇した。

Table 2 (a) Discharge and Suspended Sediment Yield during observation

場所	採取期間	浮遊砂量(kg)	総流出量 (L)
水境川①	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	754,000	11,300,000,000
口太川上流②	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	1,850,000	21,100,000,000
口太川中流③	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	14,300,000	50,000,000,000
口太川下流④	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	10,800,000	83,900,000,000
阿武隈中流伏黒	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	562,000,000	3,380,000,000,000
阿武隈下流岩沼	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	452,000,000	5,030,000,000,000
阿武隈下流岩沼	2011/9/19 0:00 - 2011/9/27 0:00	288,000,000	760,000,000,000

Table 2 (b) Flux of Particulate Radiocaesium via Suspended Sediment

	浮遊砂 (SS) 輸送量	Cs-134	Cs-137
場所	採取期間	($\times 10^9$) Bq	($\times 10^9$) Bq
水境川①	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	26.2	30.5
口太川上流②	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	32.7	40.1
口太川中流③	2011/6/21 12:00 - 2011/8/30 12:00	109	143
口太川下流④	2011/6/21 12:00 - 2011/8/30 12:00	187	214
阿武隈中流伏黒	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	6,250	8,500
阿武隈下流岩沼	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	6,860	9,200
阿武隈下流岩沼	2011/9/19 0:00 - 2011/9/27 0:00	4,850	5,950

Table 2(c) Flux of Dissolved Radiocaesium via Water

	水中の輸送量	Cs-134	Cs-137
場所	採取期間	($\times 10^9$) Bq	($\times 10^9$) Bq
水境川①	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	1.24	1.47
口太川上流②	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	2.33	2.75
口太川中流③	2011/6/21 12:00 - 2011/8/30 12:00	5.47	6.46
口太川下流④	2011/6/21 12:00 - 2011/8/30 12:00	9.23	10.91
阿武隈中流伏黒	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	743	810
阿武隈下流岩沼	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	1,107	1,210
阿武隈下流岩沼	2011/9/19 0:00 - 2011/9/27 0:00	327	372

Table 2(d) Flux of Radiocaesium (Dissolved + Particulate)

	総 (SS+水) 輸送量	Cs-134	Cs-137
場所	採取期間	($\times 10^9$) Bq	($\times 10^9$) Bq
水境川①	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	27.4	32.0
口太川上流②	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	35.0	42.9
口太川中流③	2011/6/21 12:00 - 2011/8/30 12:00	115	149
口太川下流④	2011/6/21 12:00 - 2011/8/30 12:00	196	225
阿武隈中流伏黒	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	7,000	9,300
阿武隈下流岩沼	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	7,960	10,400
阿武隈下流岩沼	2011/9/19 0:00 - 2011/9/27 0:00	5,180	6,320

Table 2 (e) Daily Flux of Particulate Radiocaesium via Suspended Sediment

	浮遊砂 (SS) 輸送量	Cs-134	Cs-137
場所	採取期間	($\times 10^9$) Bq	($\times 10^9$) Bq
水境川①	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.0807	0.0943
口太川上流②	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.101	0.124
口太川中流③	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.338	0.441
口太川下流④	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.578	0.660
阿武隈中流伏黒	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	22.8	31.0
阿武隈下流岩沼 ⑤	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	25.1	33.6
阿武隈下流岩沼	2011/9/19 0:00 - 2011/9/27 0:00(T15)	606	743

Table 2(f) Daily Flux of Dissolved Radiocaesium via River Water

	水中の輸送量	Cs-134	Cs-137
場所	採取期間	($\times 10^9$) Bq	($\times 10^9$) Bq
水境川②①	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.0038	0.0045
口太川上流②②	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.0072	0.0085
口太川中流②③	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.0169	0.0199
口太川下流②④	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.0258	0.0337
阿武隈中流伏黒	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	2.71	2.96
阿武隈下流岩沼 ②⑤	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	4.04	4.41
阿武隈下流岩沼	2011/9/19 0:00 - 2011/9/27 0:00(T15)	40.8	46.5

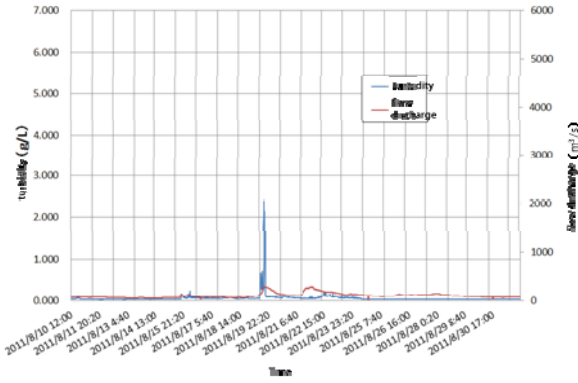
Table 2(g) Daily Flux of Total Radiocaesium

	浮遊砂 (SS) 輸送量	Cs-134	Cs-137
場所	採取期間	($\times 10^9$) Bq	($\times 10^9$) Bq
水境川②①	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.0846	0.10
口太川上流②②	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.108	0.132
口太川中流②③	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.355	0.461
口太川下流②④	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	0.606	0.694
阿武隈中流伏黒	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	25.5	33.9
阿武隈下流岩沼 ②⑤	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	29.1	38.0
阿武隈下流岩沼	2011/9/19 0:00 - 2011/9/27 0:00(T15)	648	790

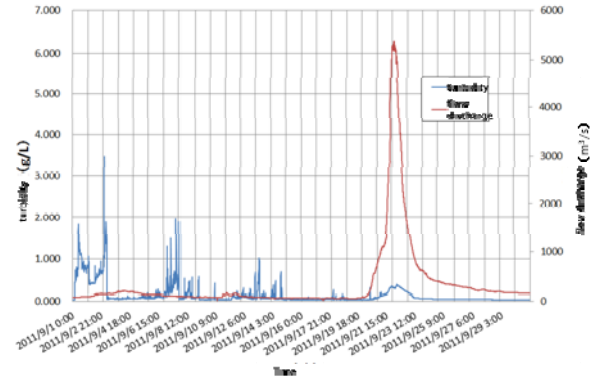
Table 3 Contribution ratio in Each Observation Point

[Contribution ratio (%) = radioactive cesium transport volume from suspended sediment / total radioactive cesium transport volume (water + suspended sediment) (%)]

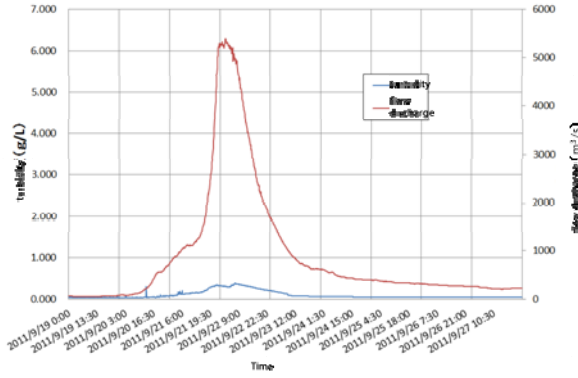
	輸送に対する浮遊砂の貢献率 TFlax Ratio)		
場所	採取期間	Cs-134 (%)	Cs-137 (%)
水境川②①	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	95.5	95.4
口太川上流②②	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	93.4	93.6
口太川中流②③	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	95.3	95.7
口太川下流②④	2011/6/21 12:00 - 2012/5/10 12:00	95.3	95.2
阿武隈中流伏黒②⑤	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	89.4	91.3
阿武隈下流岩沼②⑥	2011/8/10 12:00 - 2012/5/10 12:00	86.1	88.4
阿武隈下流岩沼	2011/9/19 0:00 - 2011/9/27 0:00(T15)	94.0	95.3



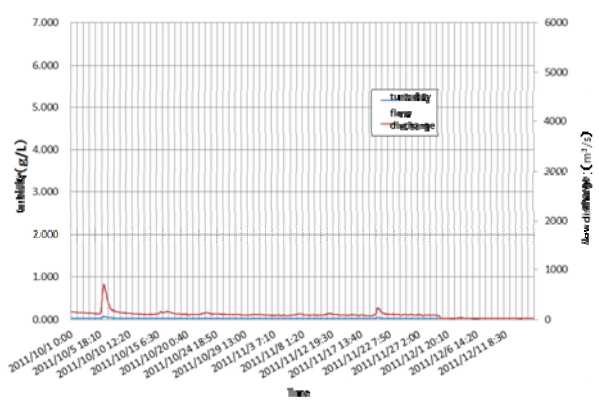
August 10 to August 13, 2011



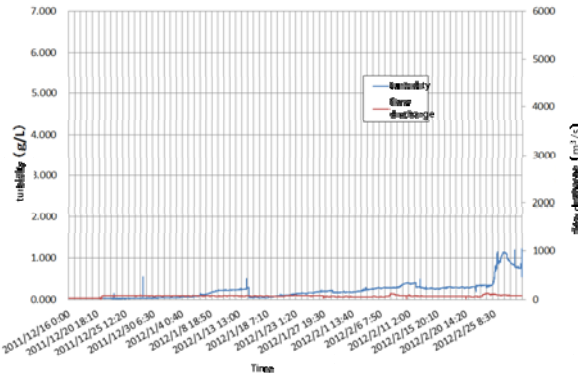
September 1 to September 30, 2011



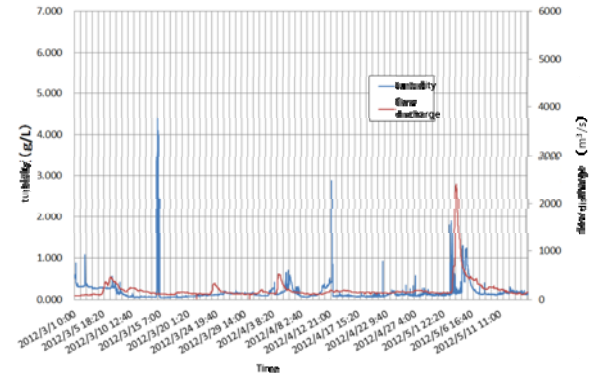
September 19 to September 30, 2011 (during Typhoon (2011-15))



October 1 to December 15, 2011



December 16, 2011 to February 29, 2012



March 1 to May 10, 2012

Figure 5 Chronological variations in turbidity (suspended matter concentration) and flow rate at the Iwanuma site on the Abukuma River(August 10, 2011 to May 10, 2012)

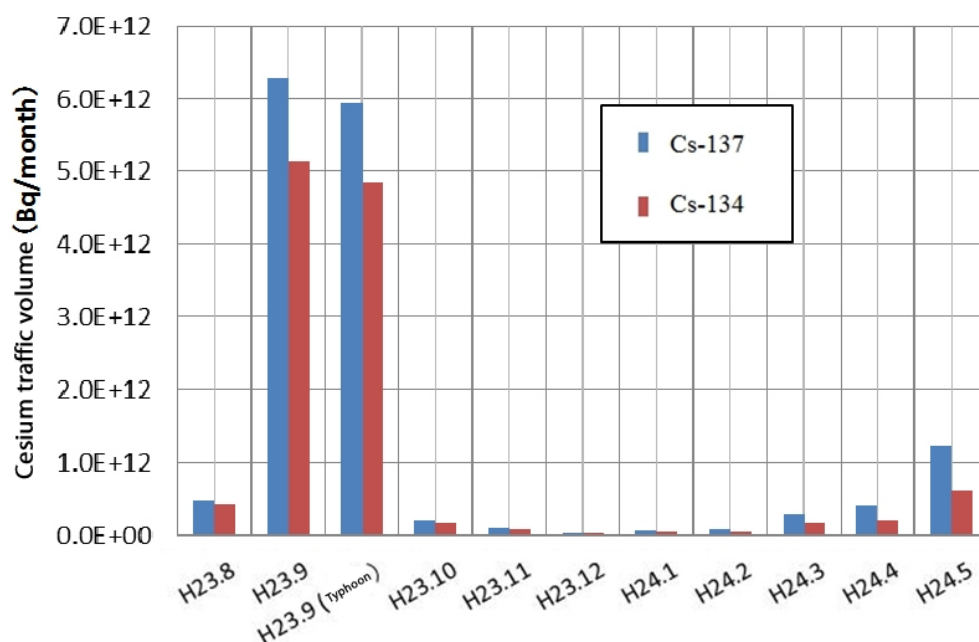


Figure 6 Monthly chronological variations in radioactive cesium transport volume (Iwanuma site)
(Horizontal axis indicates the year.month)

3. まとめと今後の課題

今回の調査で、濾過後の水中に溶存している放射性物質と浮遊砂として流下している放射性物質を比較すると、岩沼地点において80%以上が浮遊砂の形で、流下していることがわかった。また、岩沼地点の総負荷量の6割以上が台風15号時期においてもたらされており、その量は2011/9/19-9/27の8日間で ^{137}Cs で $6.32 \times 10^{12} \text{ Bq/8日}$ (全期間の61%)、 ^{134}Cs で $5.18 \times 10^{12} \text{ Bq/8日}$ (全期間の65%)という非常に大きな値であることが示唆される。

川底を流れる土砂（掃流砂）による放射性セシウムの輸送についての調査は今回は行なっておらず、これらを考慮すると輸送量は今回の推定とより高い値になると考えられる。そのため、底質低質の観測を含めて長期的なモニタリングが必要がある。現在の結果においては、観測された濃度を全期間一定と仮定して輸送量（フラックス）を計算したが、実際は濃度が様々な水文過程により変化すると考えられる。これらを再現する為に分布型流出モデルを用いた流域全体のセシウム輸送の分析を行なったのでそれを次章にて述べる。例えば岩沼地点における推定値は広い河川断面に対して1点での計測結果を元にしているため、将来的には複数地点や断面推定などを元に、フラックス推定精度を向上させるべきであ

ると考えている。岩沼地点より下流においては潮汐の影響が大きいので、これらの浮遊砂が海洋に流入してどのような挙動を示すのか今後観測を継続する必要があると考えられる。

なお、海洋へのフラックスについて、浮遊砂が主たるフラックス原因であることが明らかになったのであるから、これらの浮遊砂を効率的に除去する流域や河口部分での流出制御について検討を行ってゆく必要がある。また海洋モデルとの統合シミュレーションおよび観測活動により、特に浮遊土砂がどの程度沖に輸送されるかについて明らかにすべきである。

謝 辞

本研究は、平成23年度科学技術戦略推進費 福島陸域・水域モニタリング大学連合チーム 放射性物質による環境影響の対策基盤の確立 による成果をまとめたものです。また、データ解析とグラフ作成を手伝っていただいた工学研究科佐々木俊明・澤井宣彦氏と地球環境学堂萩野麻美氏に感謝します。

参考文献

Chino, M., Nakayama, H., Nagai, H., Terada, H., Katata, G., and Yamazawa, H. (2011): Preliminary estimation

- of release amount of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the atmosphere. *Journal of Nuclear Science and Technology*(Tokyo)48:1129–1134.
- Honda, M., Aono, T., Aoyama, M., Hamajima, Y., Kawakami, H., Kitamura, M., Masumoto, Y., Miyazawa, Y., Takigawa, M., and Saino, T.(2012): Dispersion of artificial caesium-134 and -137 in the Western North Pacific one month after the Fukushima accident, *Geochemical Journal*, 46:1–9
- IRSN. (2011): Update: Impact on the marine environment of radioactive releases following the nuclear accident at Fukushima Daiichi. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, May 13, 2011, 16 pp. Available at www.irsn.fr/EN/news/Pages/201103_seism-in-japan.aspx
- Kawamura, H., Kobayashi, T., Furuno, A., In, T., Ishikawa, Y., Nakayama, T., Shima, S., and Awaji, T. (2011): Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion ^{131}I and ^{137}Cs discharged into the ocean because of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant disaster, *Journal of Nuclear Science and Technology* 48: 1349-1356
- Kanda, J. (2013): Continuing ^{137}Cs release to the sea from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant through 2012. *Biogeosciences discussions* 10. 3577-3595.
- Miyazawa, Y., Masumoto, Y., Varlamov, S. M., Miyama, T., Takigawa, M., Honda, M., and Saino, T. (2013): Inverse estimation of source parameters of oceanic radioactivity dispersion models associated with the Fukushima accident, *Biogeosciences*, 10, 2349–2363, doi:10.5194/bg-10-2349-2011.
- Masumoto, Y., Miyazawa, Y., Tsumune, D., Kobayashi, T., Estournel, C., Marsaleix, P., Lanerolle, L., Mehra, A., and Garraffo, Z. D.(2012): Oceanic dispersion simulation of Cesium-137 from Fukushima Dai-ichi nuclear power plant, *Elements*, 8, 207–212.
- Stohl A, P. Seibert, G. Wotawa, D. Arnold, J. F. Burkhart, S. Eckhardt, C. Tapia, A. Vargas, and T. J. Yasunari. (2011): Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* . 11: 28319–28394.
- Stohl, A., Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, D., Burkhart, J. F., Eckhardt, S., Tapia, C., Vargas, A., and Yasunari, T. J. (2012): Xenon- 133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 12, 2313–2343, doi:10.5194/acp-12-2313-2012.
- Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M., and Hirose, K.(2012): Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model, *Journal of Environmental Radioactivity*, 111, 100–108
- 原子力安全・保安院 (2011): 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機、2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価について。
<http://www.meti.go.jp/press/2011/10/20111020001/20111020001.pdf>(アクセス日 2012.7.6)
- 東京電力 (2012): 福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気中への放出量の推定について。
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120524j0105.pdf(アクセス日 2012.7.6)
- 山敷庸亮,木村直子(2012): 東京電力福島第一原子力発電所事故由来の核分裂生成物質の海洋環境影響に対する我が国の法的立場, *日本海洋政策学会誌* 2:133-151.

(論文受理日：2013年8月20日)