

# フクシマの森林流域河川を移動・流出する放射性セシウムはどこから来たのか

東京大学農学生命科学研究科 生物・環境工学専攻

農地環境工学研究室 塩沢 昌、西田和弘、吉田修一郎

水利環境工学研究室 木村匡臣、飯田俊彰

## これまでの研究

○放射性Csは、土壌に強く固定されて、土壌水とともに移動しにくい  
: 森林のような土壌被覆の土地からは流出しないはず

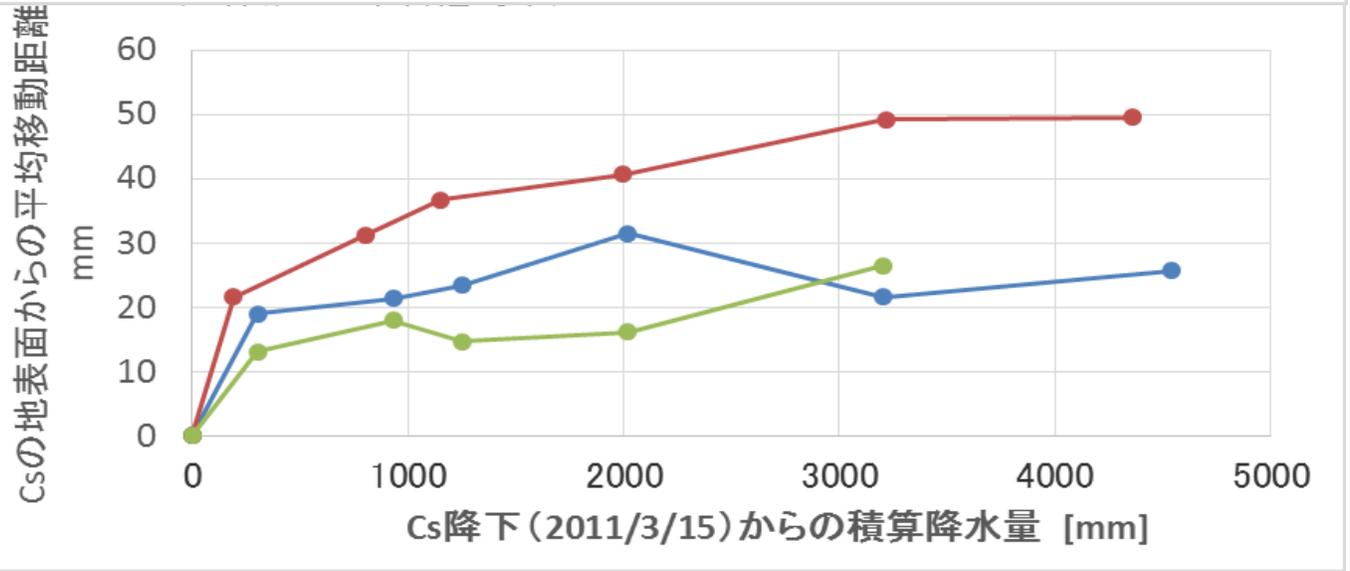
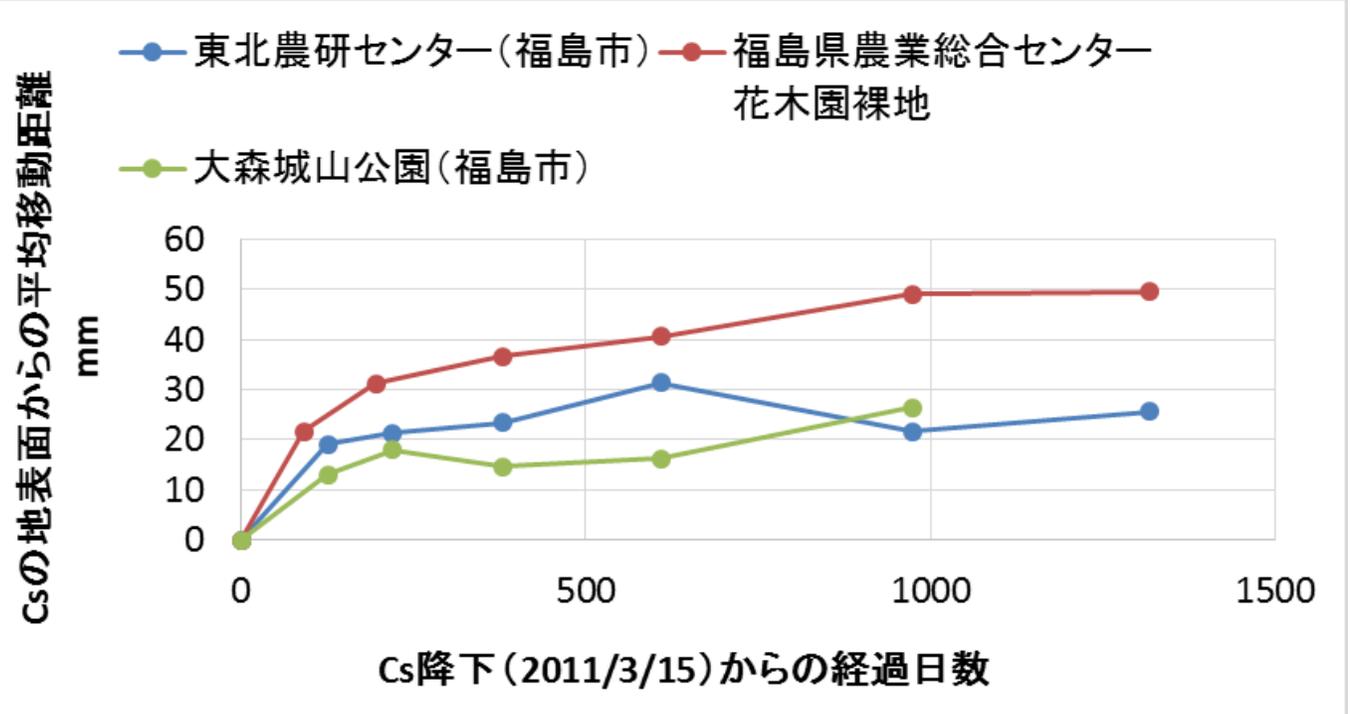
○水系への大きな流出は、森林からではなく、土壌被覆のない市街地のア  
スファルト等から生じた: ため池のCs蓄積調査から

## 今回の研究

○ 森林流域の河川を流出(移動)しているCsはどこから来たのか:

河道(河川敷等)に沈着し土粒子に固定されたCsが豪雨時に河道を移動して  
おり、森林土壌からの流出ではない(仮説)。

# 土中のCs移動量モニタリング結果(3.5年間)



ファールアウトから2-3か月間は、水分子の速度(2m/y)の1/10~1/20であったが、その後は、1/500~1/1000(数mm/y)に低下: 土壌への強い固定が進行

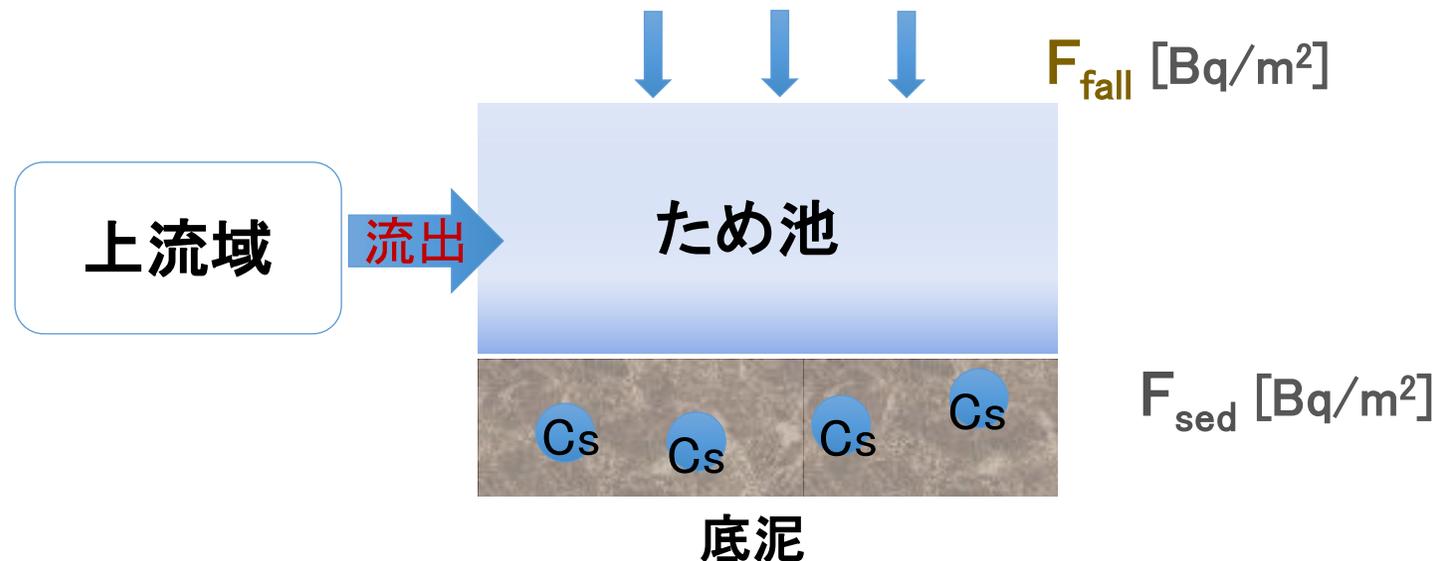


# 水系のホットスポットの流出

- 原発事故で降下した放射性Csが一部の水系に流出し、ホットスポットを形成している。  
山から流出？
- Csは土に強く吸着されるため、森林からはほとんど流出していません。
- 仮説： 土壌のない市街地（アスファルト・屋根）からCsが流出し、水系に蓄積

# 仮説の検証

底泥の平均Cs量 $F_{sed}$ と、ため池水面への降下Cs量 $F_{fall}$ の比を求め、**森林**ため池と**市街地**ため池で比較



**森林**: 流入小

$$\frac{F_{sed}}{F_{fall}} \cong 1$$

**市街地**: 流入大

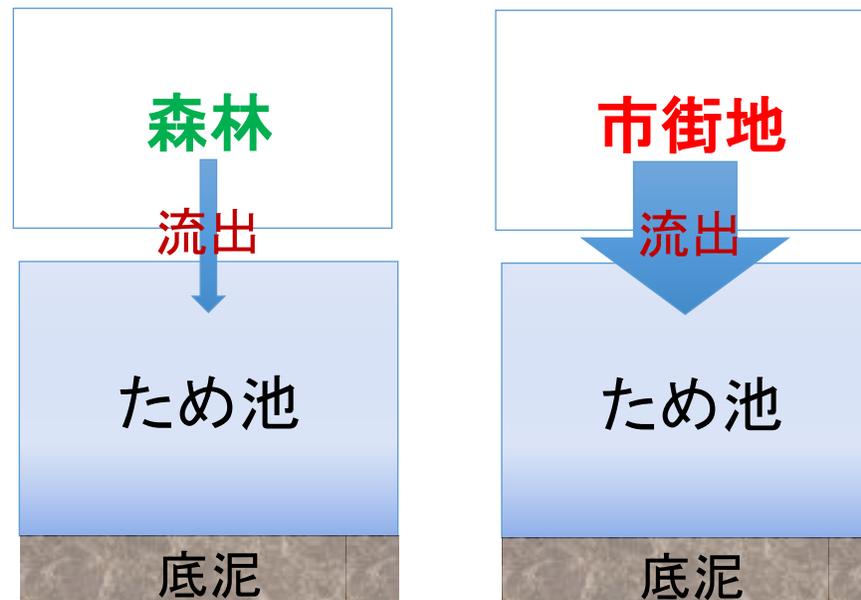
$$\frac{F_{sed}}{F_{fall}} > 1$$

# ため池調査による仮説の検証

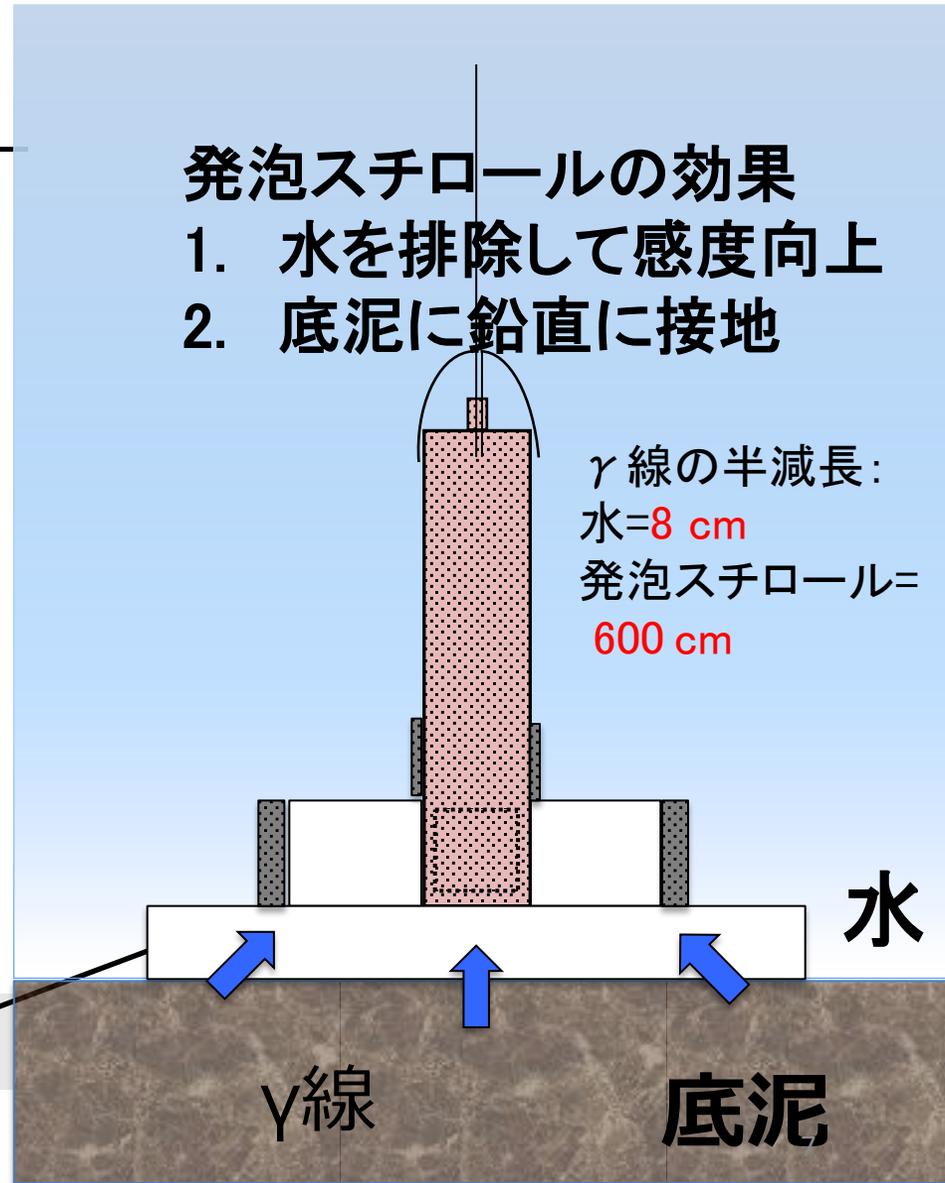
- ため池では、ため池水面に降下したCsとともに、2011年3月以降に上流から流出したCsが沈降し、底泥に蓄積している。

⇒ 上流部が**森林**であるため池と、**市街地**であるため池に蓄積しているCs量を比較する

仮説



# $F_{sed}$ の測定 (水中底泥のCs量測定)



# 結果： ため池の放射性Cs量

	森林ため池		市街地ため池
	大池	ヤボケ池	H池
ため池底泥の平均Cs量 $F_{sed}$ [kBq/m <sup>2</sup> ]	343	505	<u>1680</u>
ため池水面に降下したCs量 $F_{fall}$ [kBq/m <sup>2</sup> ]	399	603	350
$F_{sed}/F_{fall}$	<b>0.86</b>	<b>0.84</b>	<u><b>4.8</b></u>
調査時の水の濃度 [Bq/L] (懸濁態+溶存態)	0.34	0.45	1.59
溶存態	0.12	0.20	0.93

**市街地**が集水域： $F_{sed}/F_{fall}$ が1より大きく、少なくとも $F_{fall}$ の**4倍程度**が**上流から流入**

**森林**が集水域： $F_{sed}/F_{fall}$ が1に近いが、 $F_{fall}$ の**15%程度**がため池から**流出**

**放射性Csの水系への大きな流出は、森林(山)から生じたのではなく、一部の市街地から生じた**

- ・放射性Csの水系への大きな流出は、森林(山)から生じたのではなく、一部の市街地(アスファルト)から生じた。



農業用水路に堆積したCsの多くは、付近のアスファルト道路から、フォールアウト直後に流出したCsであろう。

## これまでの研究

○放射性Csは、土壌に強く固定されて、土壌水とともに移動しにくい。  
: 森林からは流出しないはず

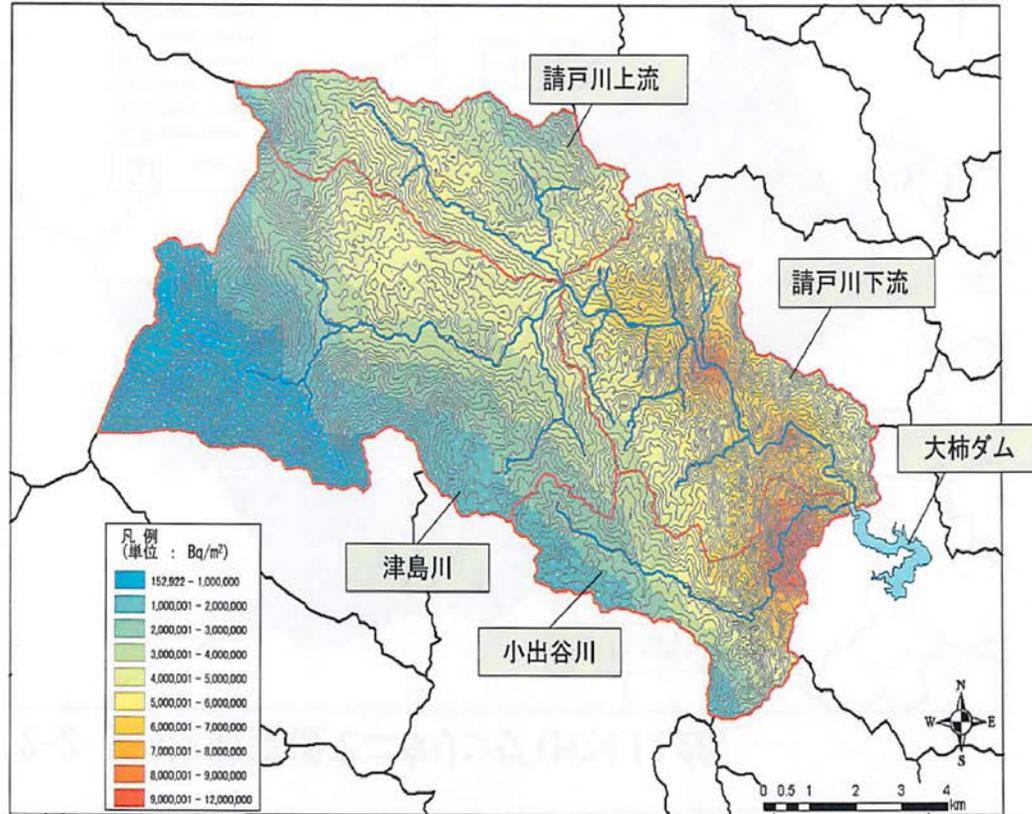
○水系への大きな流出は、森林からではなく、土壌被覆のない市街地のアスファルト等から生じた: ため池のCs蓄積調査から

## 今回の研究

○量的に少ないが、森林流域の河川を流出(移動)しているCsはどこから来たのか、今後の流出はどうなるのか。

## 2. 航空機モニタリングによる大柿ダム流域の<sup>137</sup>Cs沈着量分布

### 2-1 第1次航空機モニタリング(H23.4.29)



「ため池等汚染拡散防止対策技術検討委員会」(農業農村工学会、農林水産省東北農政局)2014年3月4日資料より

81,887/m<sup>2</sup>

## 大柿ダム(浪江町)

第1原発から15km、農業用ダム  
流域面積(A):103.8 km<sup>2</sup>、84%が森林  
ダム湖面積(a):0.9 km<sup>2</sup>、A/a=115

2013年以降、農水省が大がかりに調査

1. ダム湖の底質のCs量を測定
2. ダムへの流入Csを2カ所で連続測定
3. ダム湖内の懸濁態Cs分布、流出量測定

大柿ダム直上流は、1000万Bq/m<sup>2</sup>を超える高濃度汚染地域(第1原発外で最高)

## 一般の認識:

「上流域が森林のダム・ため池において森林から川を伝って流入した放射性セシウムが蓄積している。」

間違いである:

1. 「川を伝わって」?

ダム湖に蓄積しているCsの大部分は、川から流入したのではなく、2011年3月の雨で湖面に降下したものである。

2. 「森林から」?

川から流入しているCsは、森林からの流出ではなく、河川敷・河道に降下して土砂に固定されたCsが豪雨時に移動しつつ、ダムに流入している(塩沢の仮説)。

## 高濃度セシウム

### 福島第1周辺のダム底に堆積

10カ所で8000ベクレル超

東京電力福島第1原発周辺の飲料用や農業用の大規模ダムの底に、森林から川を伝って流入した放射性セシウムが蓄積され、高濃度でたまり続けていることが環境省の調査で分かった。50キロ圏内の10カ所のダムで指定廃棄物となる基準(1キロ当たり8000ベクレル超)を超えている。

.....

10ダムのうち福島県浪江町の農業用「大柿ダム」で、農林水産省東北農政局が13年12月、総量を独自調査。ダム底の110カ所から抜き取った堆積土の数値をもとに10メートル四方ごとの堆積量を試算。セシウム134と137の総量は推定値で約8兆ベクレルになった。.....

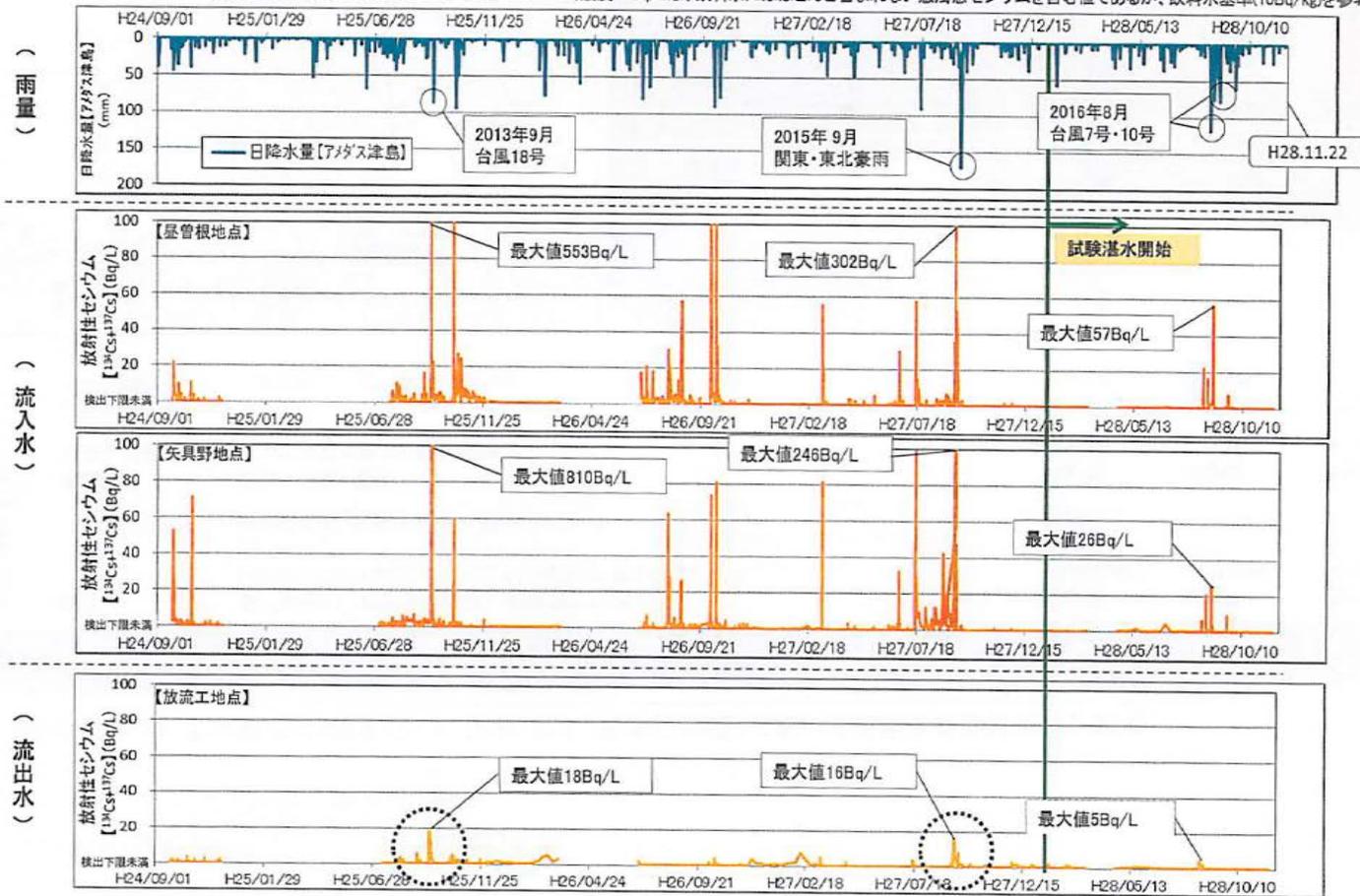
(毎日新聞の記事 2016年9月25日)

## 2. 放射性セシウムのモニタリング調査状況

### 2-2 水質・底質のモニタリング調査結果 ③流入水、流出水の調査結果

- 現在までの調査結果で、流入水については、台風等の増水時に放射性セシウム濃度が高くなるものの、取水される水（流出水）については、出水時においても放射性セシウム濃度は高くなりず、現在まで5ヶ年の調査で、飲料水基準(10Bq/L)を多少超える程度が2回観測。

※取水口（流出水）での放射性セシウム( $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ )濃度10Bq/Lは、飲料水にはほとんど含まれない懸濁態セシウムを含む値であるが、飲料水基準(10Bq/kg)を参考としている



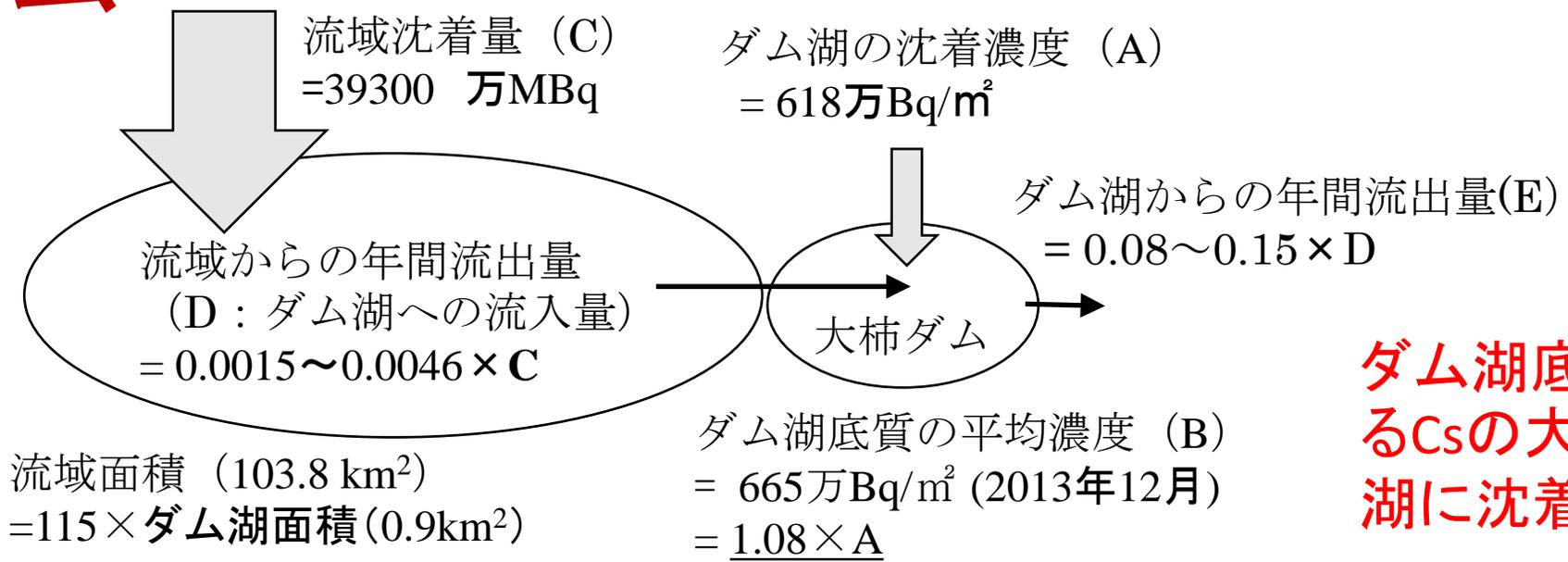
流入水、流出水の $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ の推移

※※放射性セシウム濃度は、懸濁態・溶存態を含む値。  
以下特に断り書きがない場合、同様とする。

2013年以降、農水省がダム流入Csを2カ所で連続測定

1. 大部分が懸濁態として豪雨時の流量が多いときに流入。年に1から2回の豪雨時には200～800Bq/Lにもなる。
2. 流入する懸濁態の90%はダムがトラップ
3. 溶存態は常に検出限界(1Bq/L)以下。(0.2～0.5 Bq/Lでほぼ一定と思われる:他の研究者の研究)

# 大柿ダム



ダム湖底質に存在するCsの大部分はダム湖に沈着したCs

	流域沈着量:C (MBq)		393000000	
年	流入量:D (MBq/y)	流出量:E (MBq/y)	年間流域流出率 :D/C (%/y)	ダム湖流出率:E/D (%)
2013	784000	74300	0.20	9.5
2014	573000	47300	0.15	8.3
2015	1793000	267000	0.46	14.9

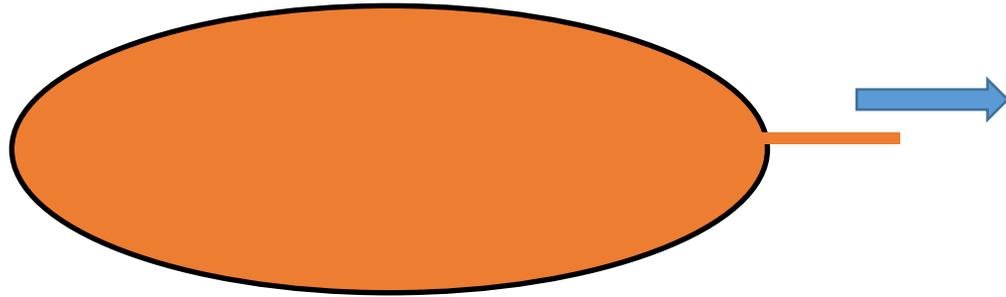


大柿ダムの流域とダム湖のCs-137の動態 (農水省調査資料より作成)。2015年は、9月の記録的豪雨時に過去2か年の年間値のDは2~3倍、Eは1.4~1.7倍であった。

河川流出Cs流出源がどこか(森林内部か河道か)によって、  
今後の流出減衰予測が全く異なる

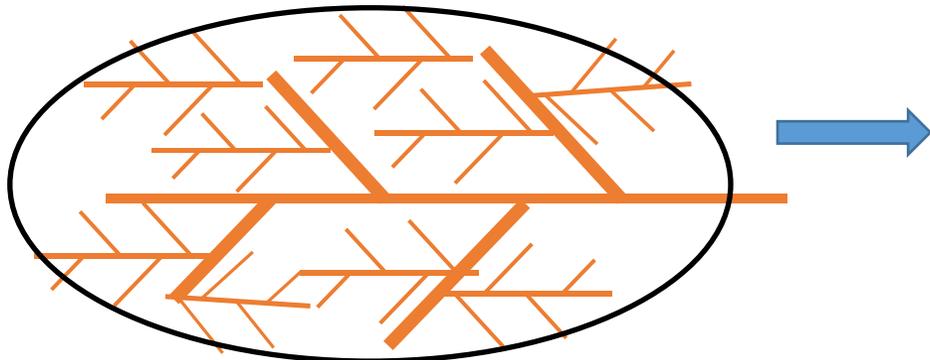
簡単なモデル:「流出源に存在するCs量に比例して一定割合が河川に流出する」とすれば

1. 流域全体(森林)が流出源であれば、年間流出量は存在量の $1/500 \sim 1/200$ なので、



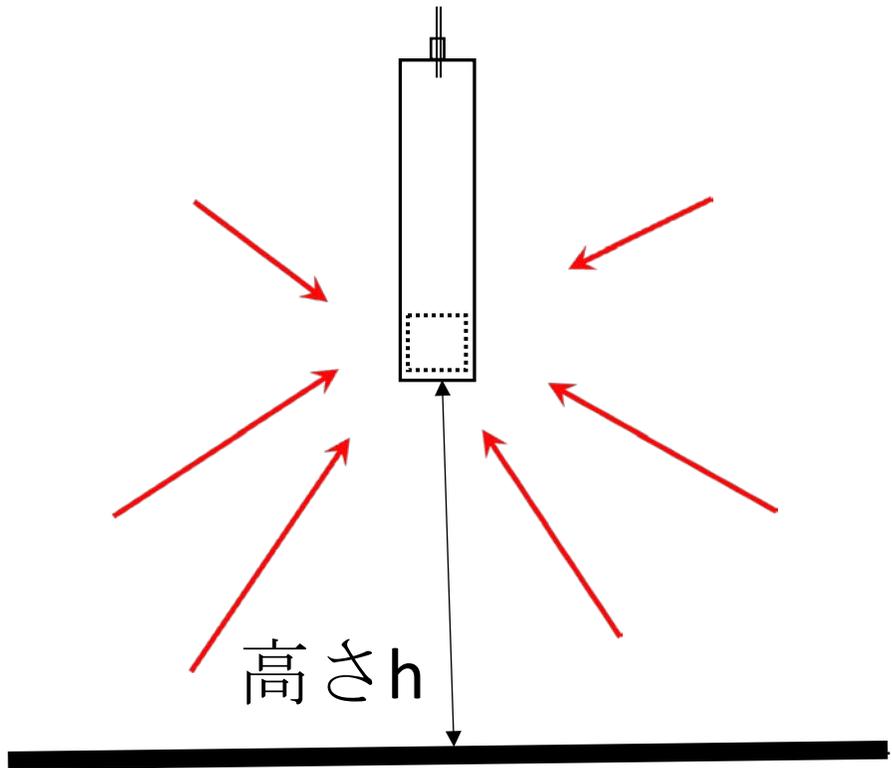
流出量の減衰は極めて遅い  
流出半減期150~300年?

2. 豪雨時の河道のみが流出源であれば、Cs存在量は僅かなので、

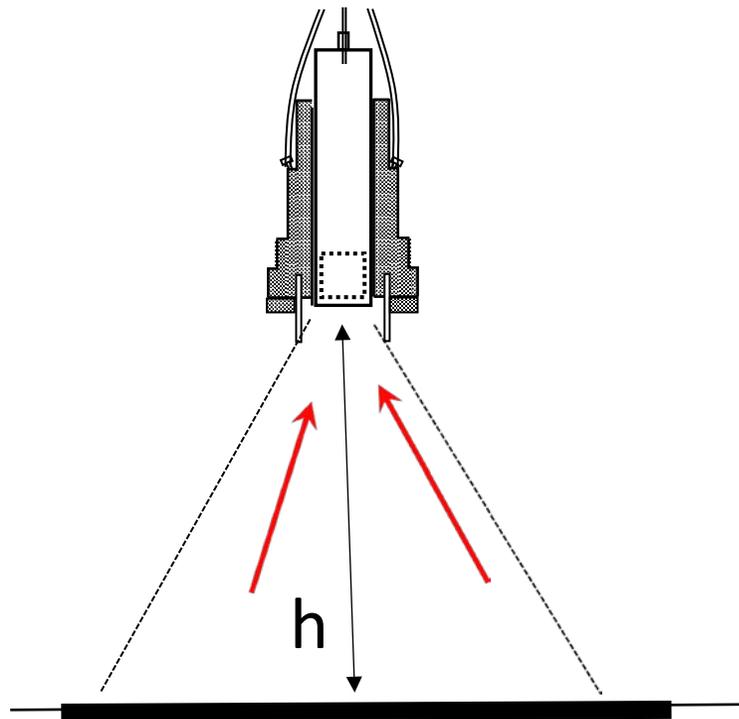


流出量の減衰は速い  
流出半減期数年~10年?

表面濃度の測定原理； サーベーター：  
測定対象外からの $\gamma$ 線を遮蔽する必要がある



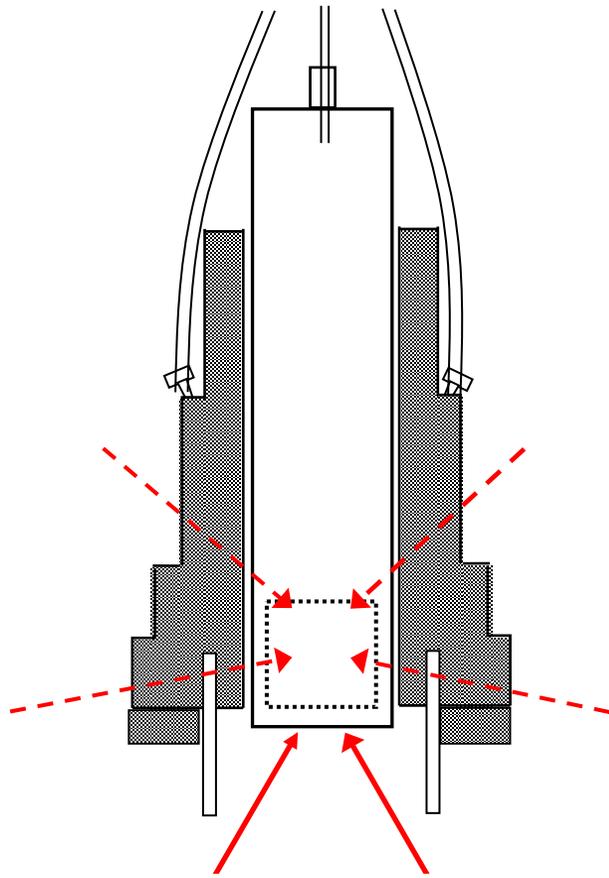
ガンマ線は、測定対象以外の  
様々な方向から入射



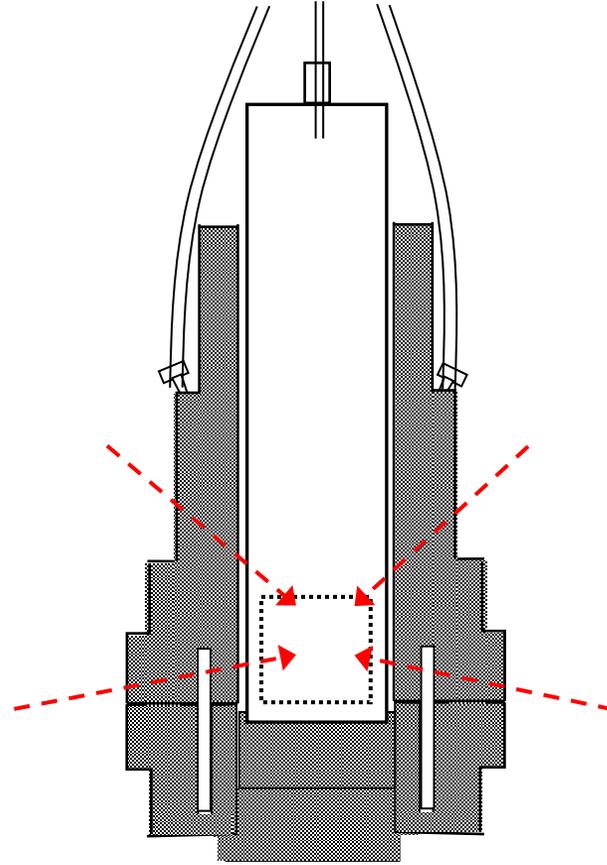
鉛で視野外を遮蔽して、測定対象  
範囲に視野を限定する(コリメー  
タ)



# 測定装置と方法： 不十分な遮蔽での「漏れ」を補正する



open



close

Inflow from window = open - close

NaIシンチレーションサーベイメータを鉛コリメータで覆う。  
1.5~2cmの鉛遮蔽

周囲からの入射を1/10以下にするには、3~4cmの鉛遮蔽が必要；重さが5倍以上になる。

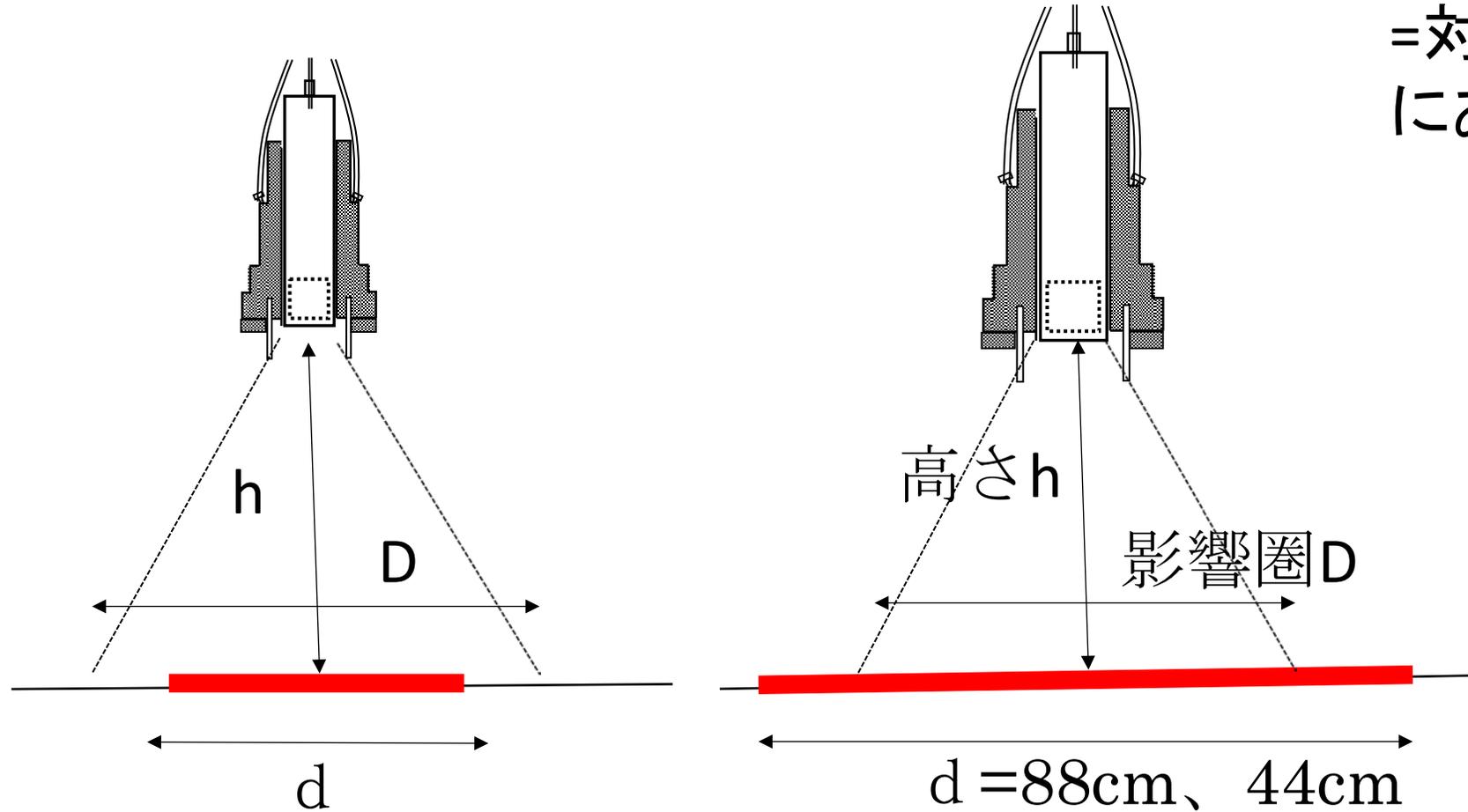
フタは3.5cmの鉛で、フタあり(close)の測定値を漏れとみなして、フタなし(open)から差し引く。

測定時間：

50sec、または100sec

# 測定法と影響圏の確認の室内実験

測定値が高さhによらない  
=対象がコリメータの影響圏内  
にあって、正しく測定できる。



平面図

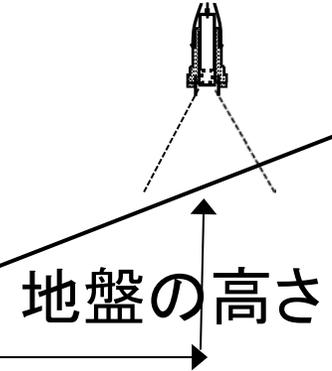


影響圏直径Dは高さhの2.5倍  $D=2.5h$

約3000Bq/kgの汚染土壌を直径 (d)  
が88cmと44cmの円形に厚さ3.5cm

# 河川敷における放射性Cs濃度測定と豪雨時の増減

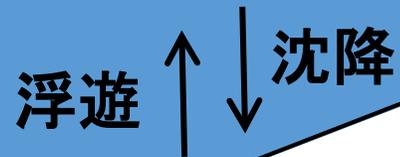
測定時(低水時)



表面Cs濃度(Bq/m<sup>2</sup>)、水際からの距離、地盤高を測定

水際からの距離

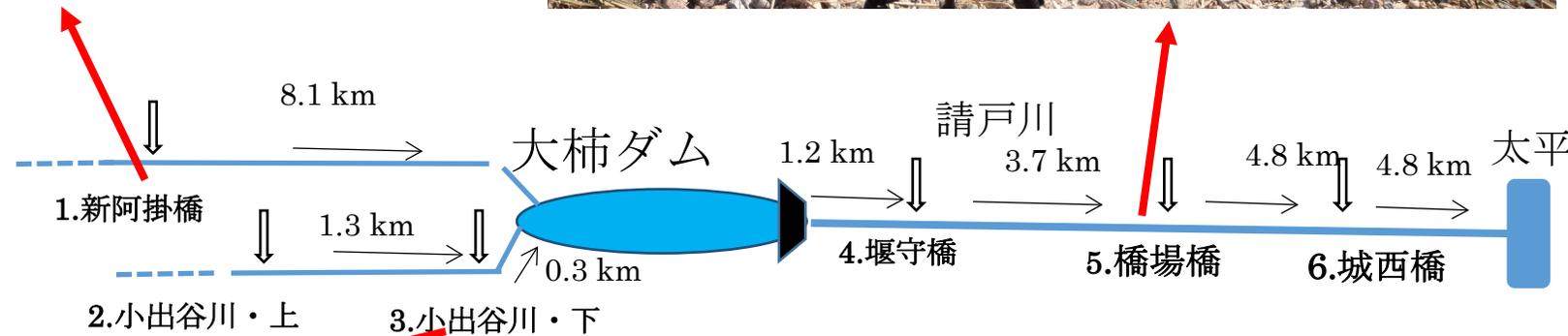
豪雨時



土砂の浮遊・運搬・沈降



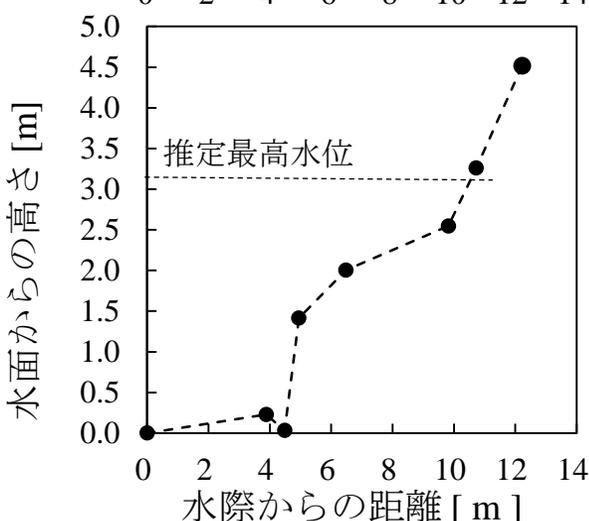
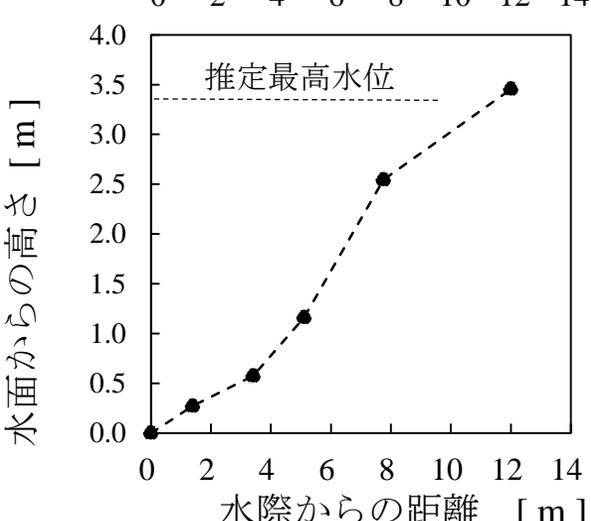
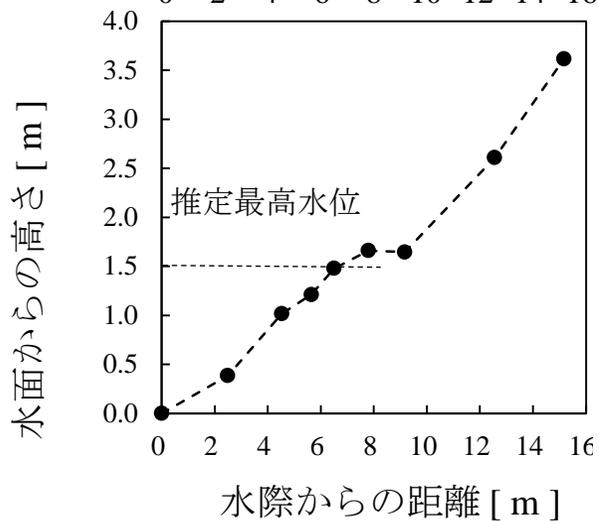
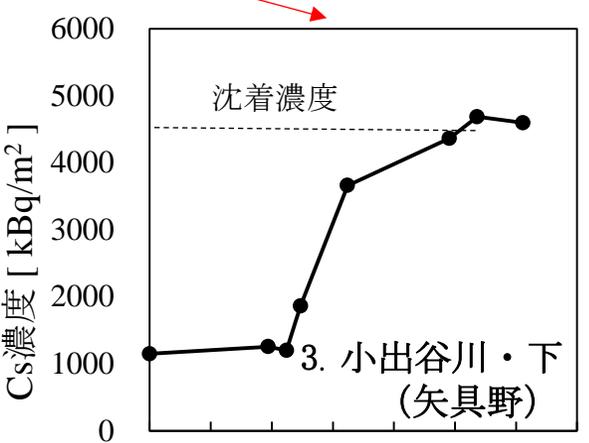
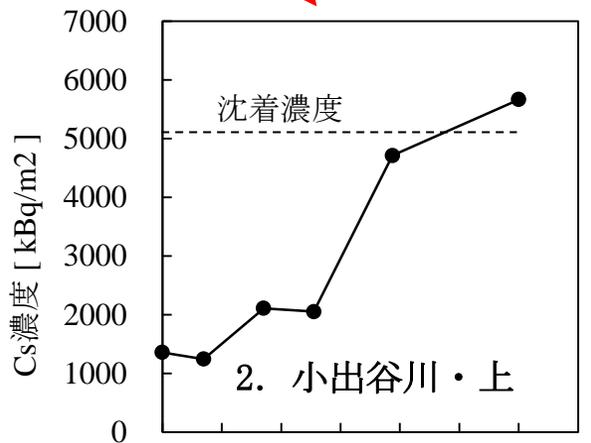
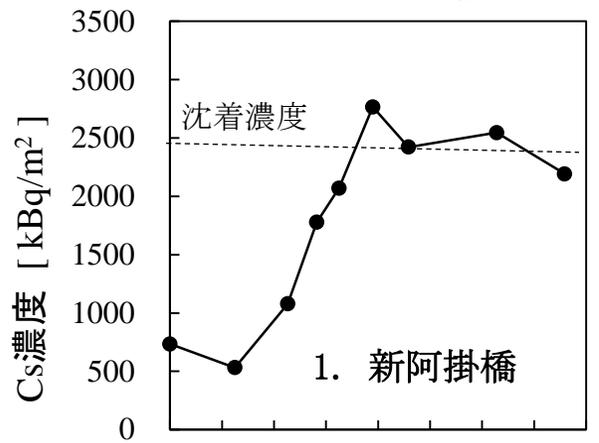
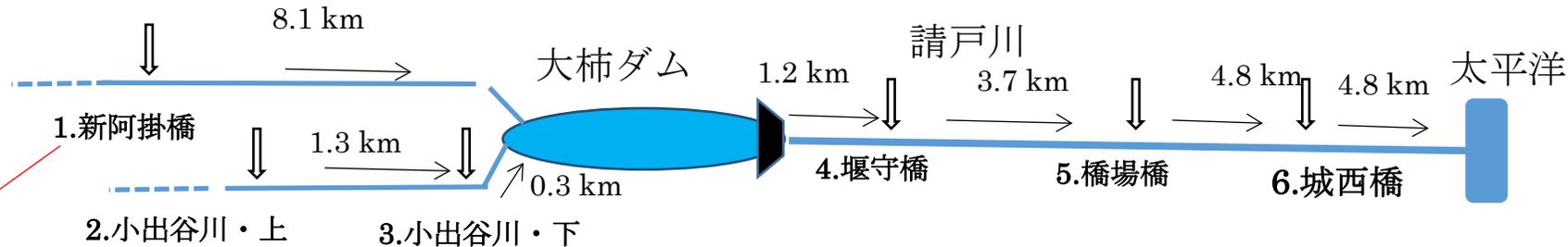
# 2015年 調査



河川敷きCs測定: 2015年10月14日 (9月の記録的豪雨の1か月後)

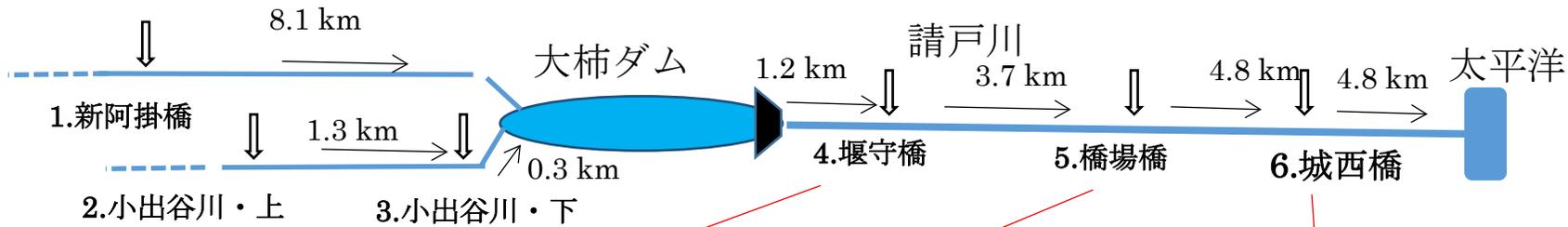
[謝辞] 本調査には農水省東北農政局防災課のご協力を得た。

# 河川敷のCs表面濃度 :ダム上流側

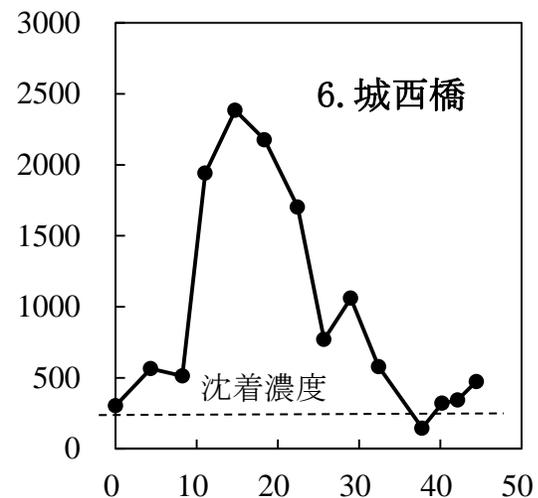
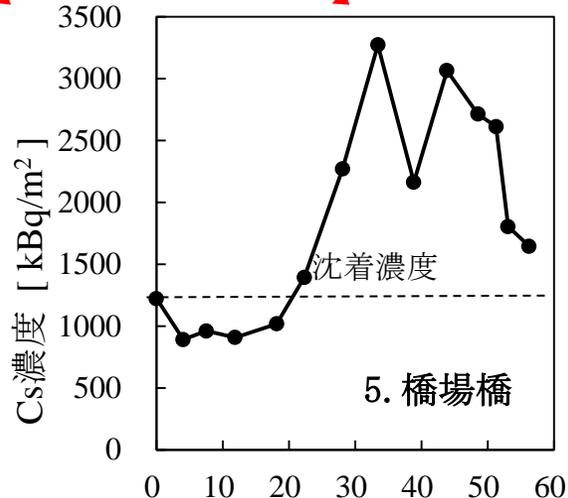
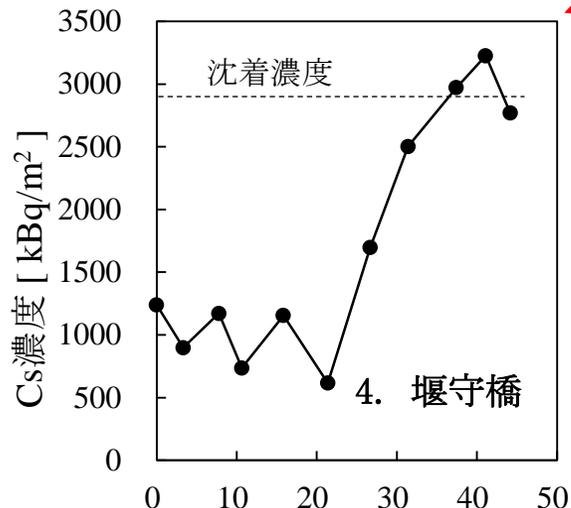


沈着濃度が高いダム上流は、周囲より濃度が低い。  
Cs濃度の高い土砂が流出して、上流からの低濃度のCs土砂が堆積。

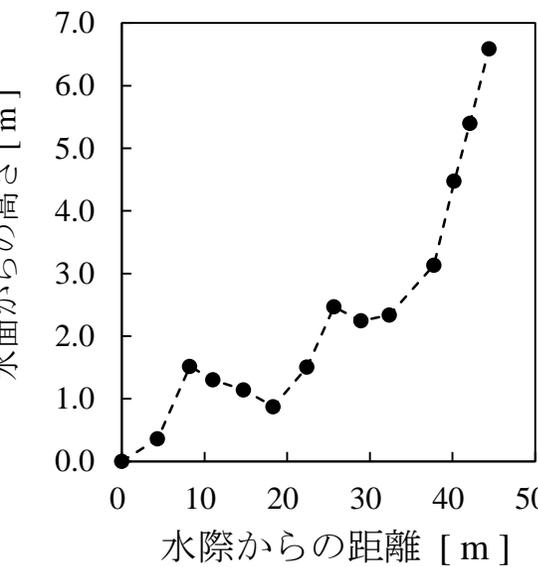
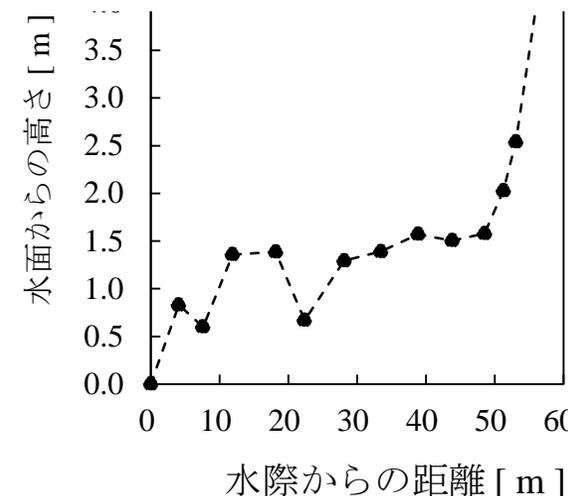
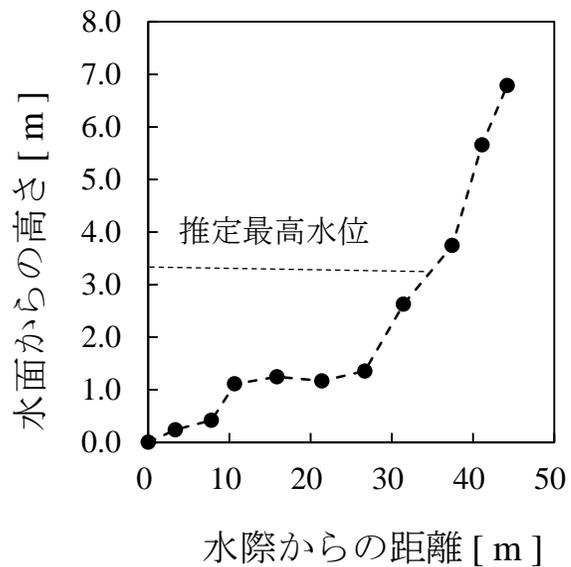
水の流れの底のCs濃度はCs濃度は、著しく低い  
が(周囲の1/10~1/100)、流速が遅い場所では(土砂が多い)比較的高い。



## 河川敷のCs表面濃度： ダム下流側

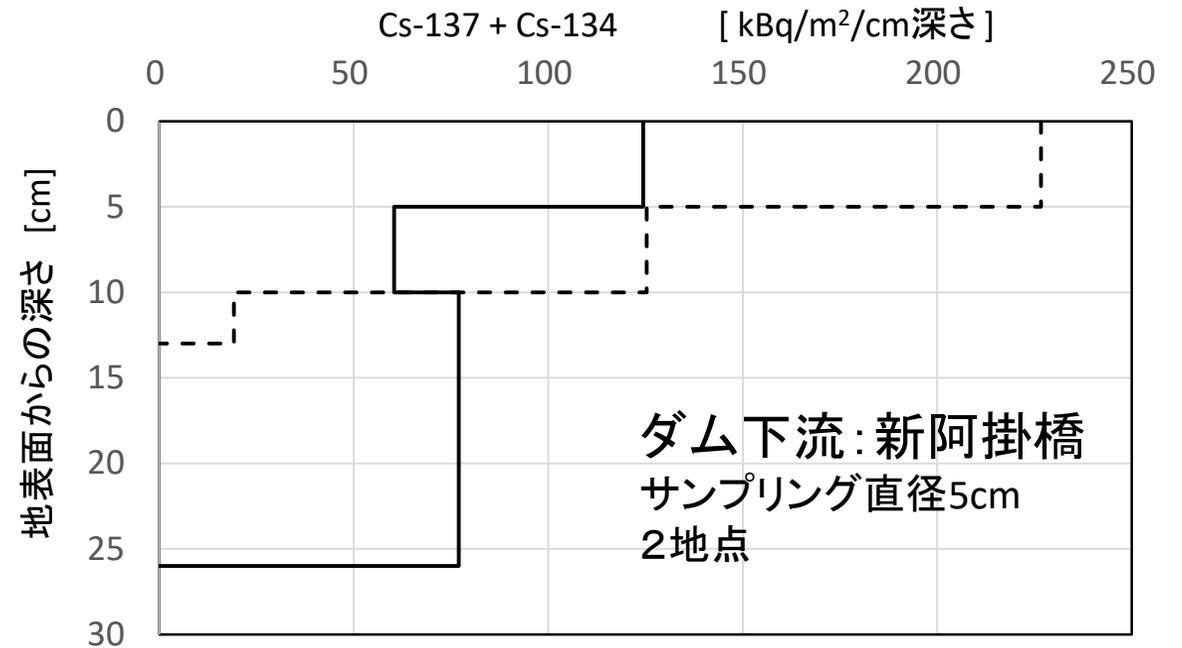
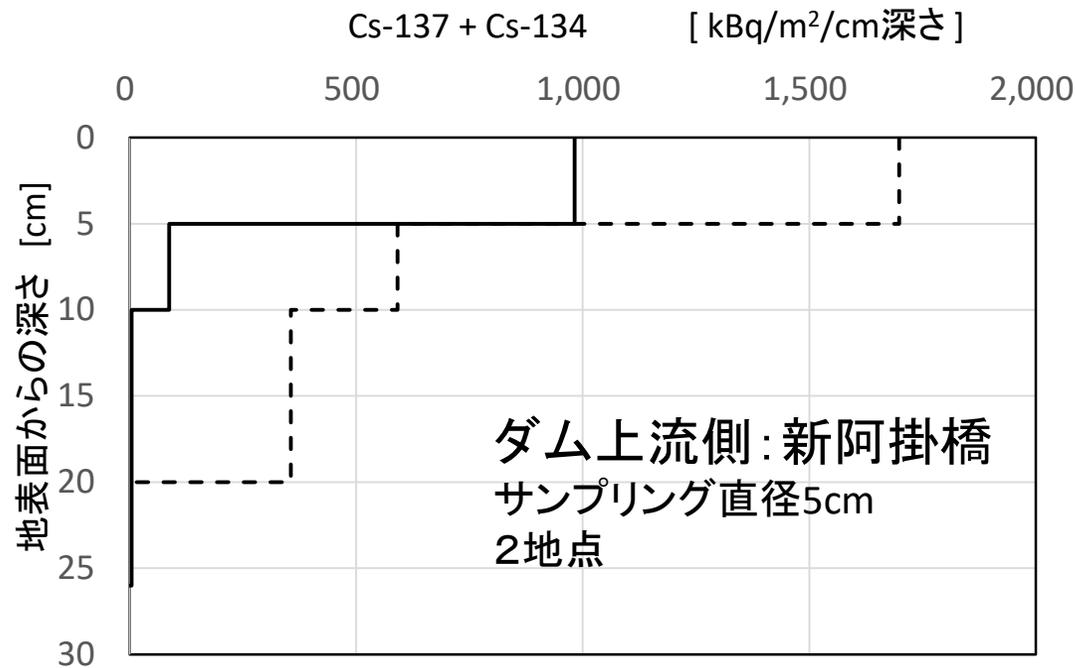


ダム直下(No.4)は、上流からの土砂供給がほとんどなく、Cs濃度が周囲より低い。



沈着濃度の低いNo.5、No.6は、上流からの高濃度Cs土砂が堆積して、周囲より濃度が高い。

# 土性サンプリング測定 (D=5cm) による鉛直濃度分布との比較

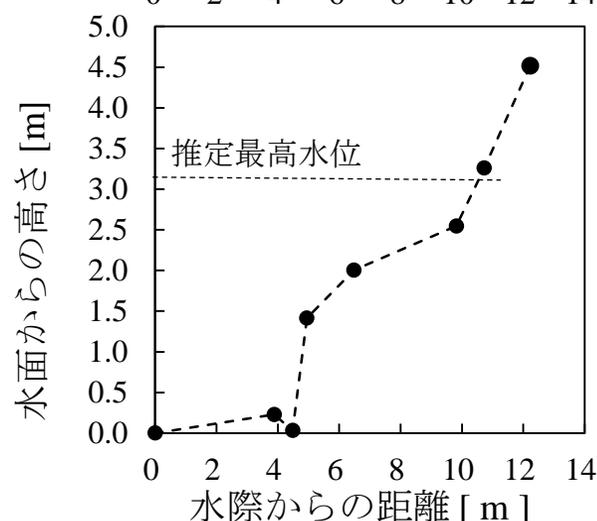
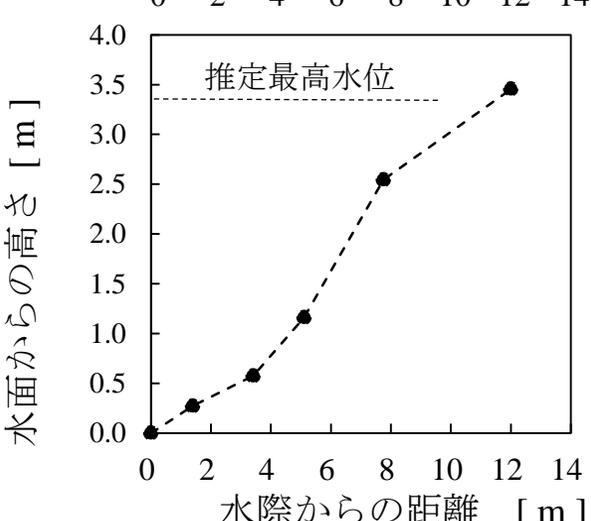
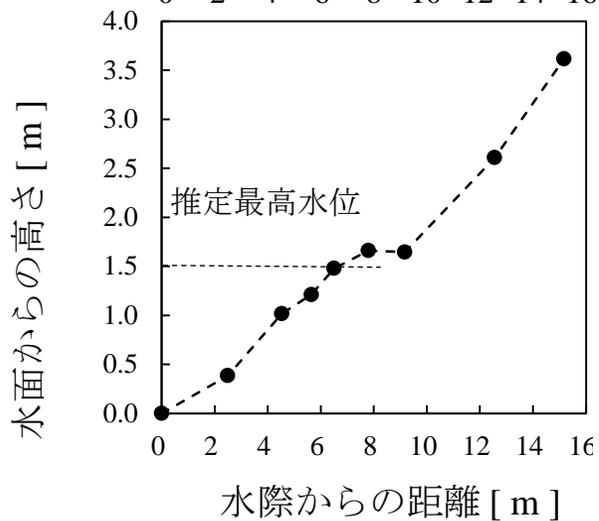
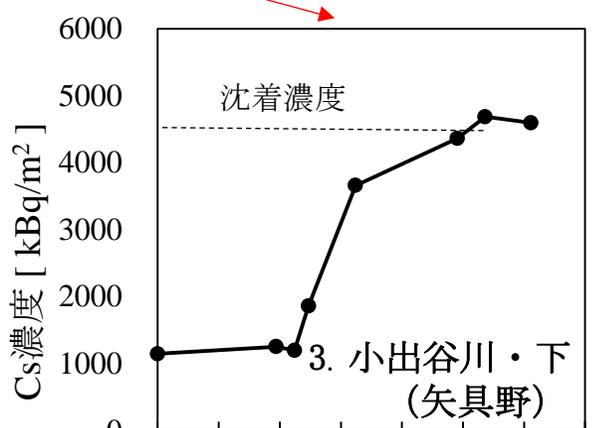
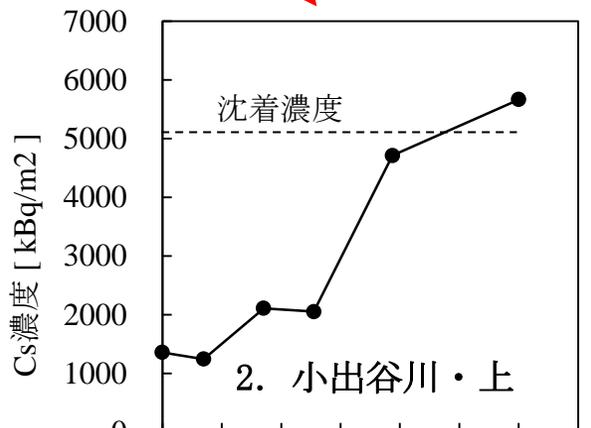
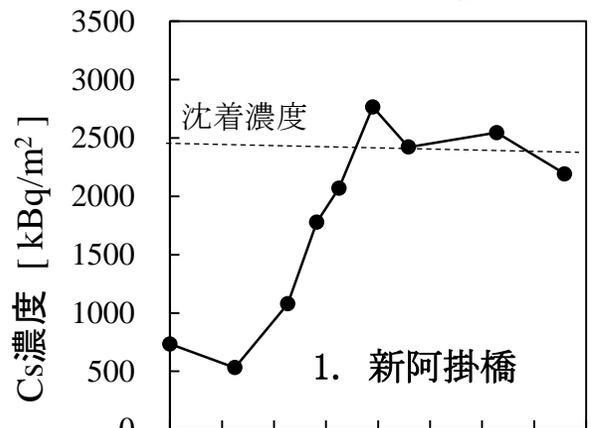
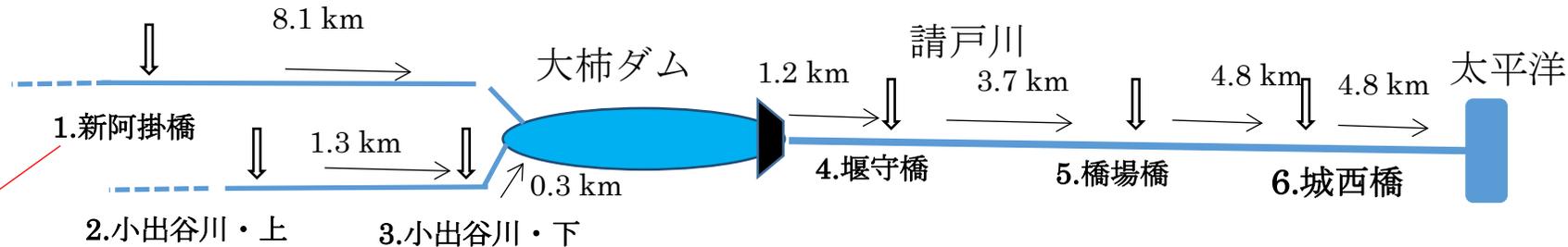


1. 上流側は、表層5~10cmにほとんどのCsが存在。最下流では、深くまで乱れている地点がある。
2. D=5cmでは、kBq/m<sup>2</sup>のばらつきが大きいですが、現場測定 (D=60~100cm) ではばらつきが少ない。

## 流水底質の濃度:

平均的に河川敷より大幅に低い。流速の速い地点では低く、流速が遅く土砂堆積部分で高く、著しく異なる。

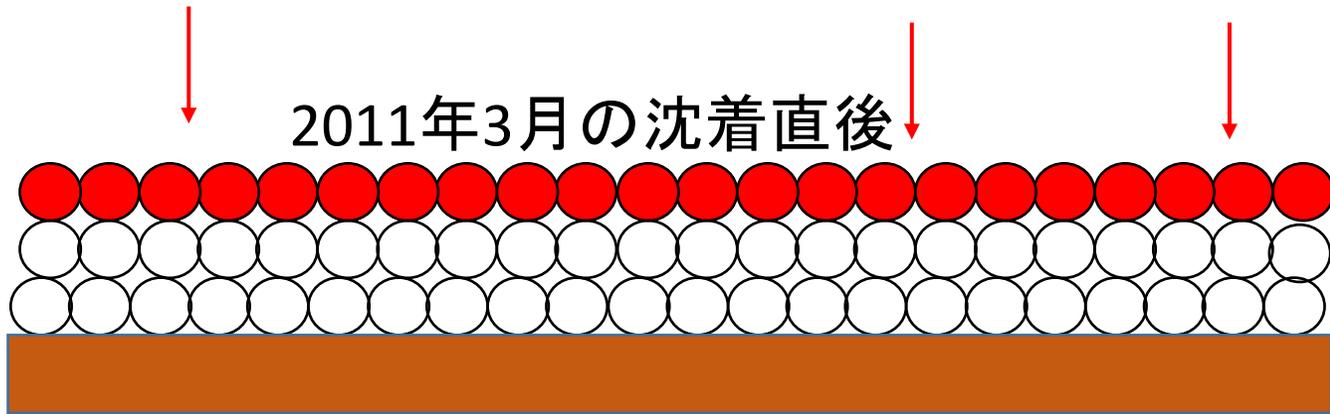
# 河川敷のCs表面濃度 :ダム上流側



沈着濃度が高いダム上流は、上流からの低濃度のCs土砂が堆積して、周囲より濃度が低い。

新たに河川に供給される土砂のCs濃度は、

# 河川敷のCs表面濃度の変化

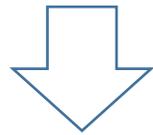


2011年3月の沈着直後

● Csを含む土砂

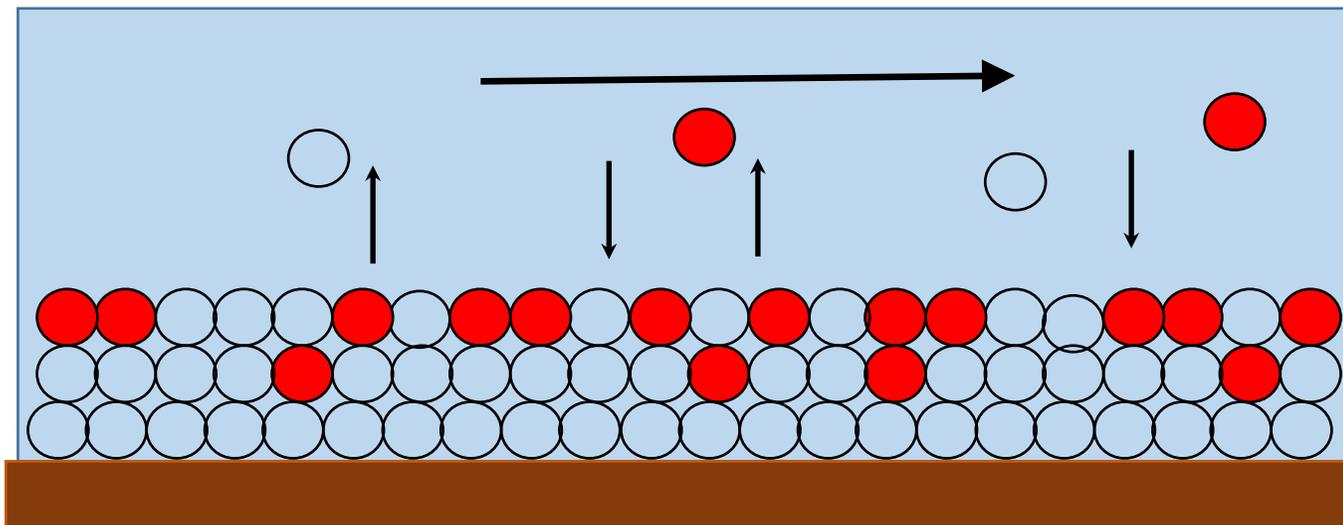
○ Cs含まない土砂

堆積土砂量は定常



豪雨時の土砂の「浮遊・運搬・沈降」

$$\text{Cs表面濃度の変化量} = ([\text{上流から運搬されるCs濃度}] - [\text{下流に運搬されたCs濃度}]) \times [\text{土砂交換量}]$$

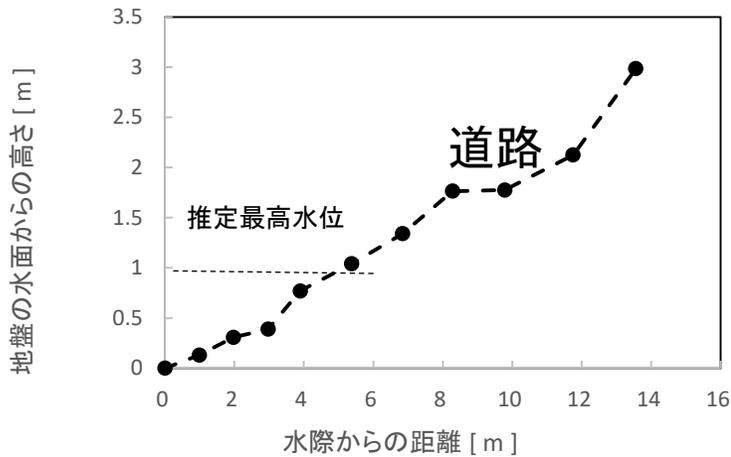
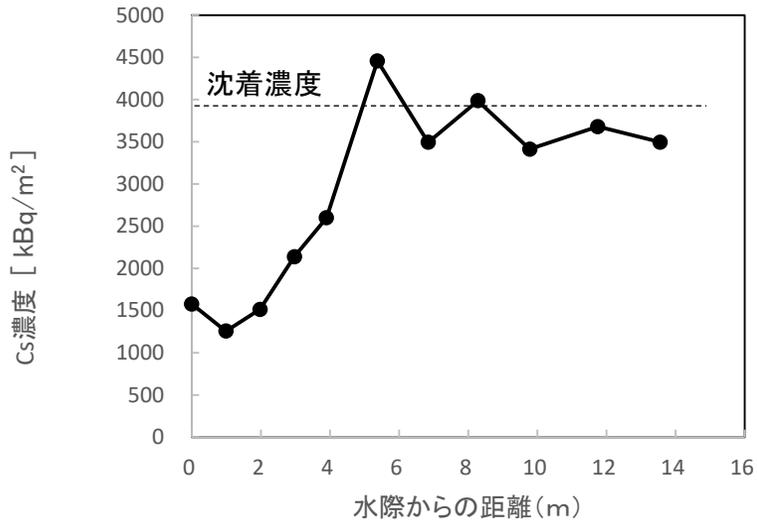


上流からのCs濃度 < 下流へのCs濃度  
: 表面濃度減少(ダム上流)

上流から新たに供給される土砂にCsは含まれるCsは少ない

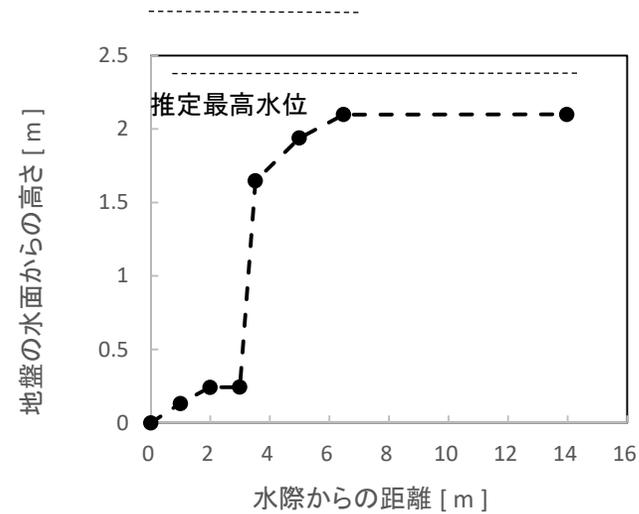
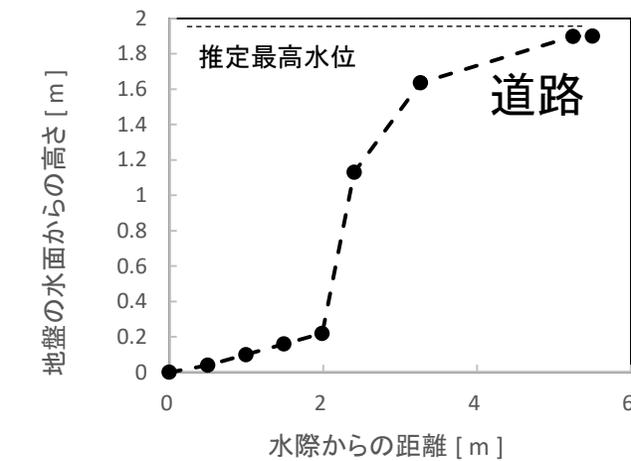
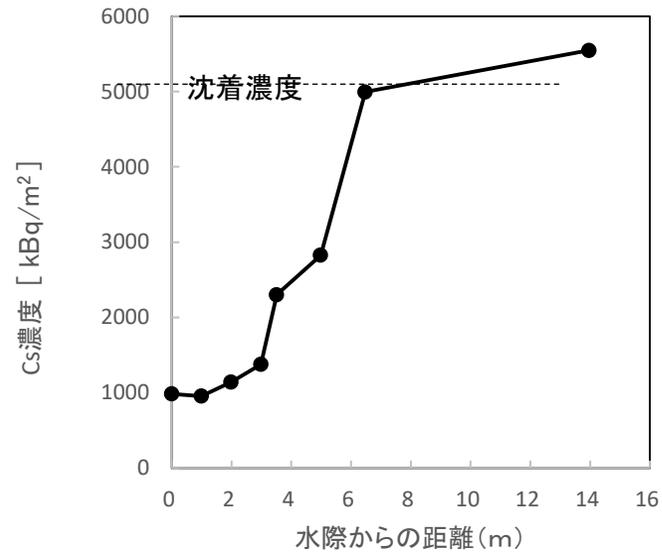
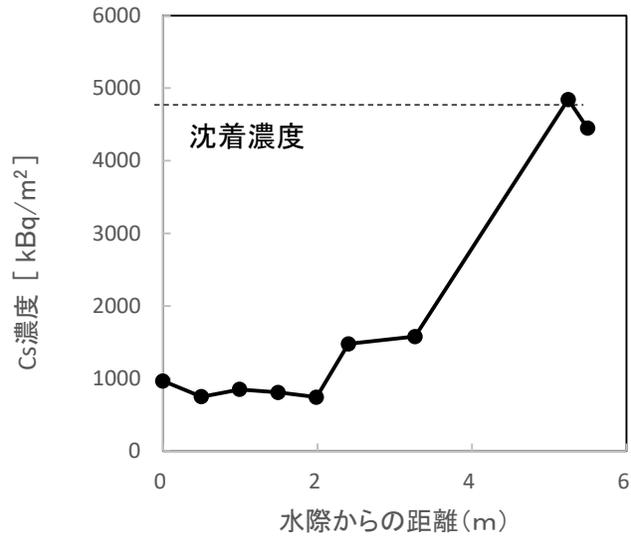
上流からのCs濃度 > 下流へのCs濃度  
: 表面濃度増加(ダム下流)

## 2017年11月13-14日 調査 ダム上流の支流を中心に13地点測定 : 上流域全体での河川敷Cs流出量を推定するため



小さな支流、なだらかな斜面  
(2017年11月14日)

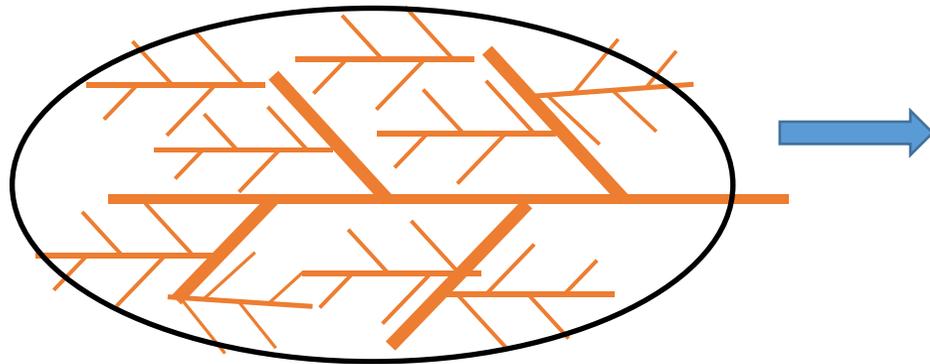
# 洪水(2015年9月)が水位が道路を越え、道路高さに近い斜面までCsが減少している例



(2017年11月14日)

# Csは流域からどのように流出しているのか、今後どのように減衰するか

森林土壌からの流出ではなく、河川敷・豪雨時の河道にフォールアウトして土砂に固定されたCsが、豪雨時に流出している：



河道に存在するCsは流域全体のごく一部なので

流出量の減衰は速い

流出半減期数年~10年？

(塩沢2016年6月「水土の知」農業農村工学会誌)

新たに供給される土砂のCs濃度は小さい：土壌侵食ではなく河川侵食で供給されている  
Cs流出量の減少速度  $\propto$  河床・河川敷表面の土砂の更新速度

## 5. 大柿ダムから供給する農業用水の放射性セシウム対策(案)

### 5-3 濁度監視基準値の検討

- 2015年9月関東・東北豪雨出水と、その翌年の最初の出水である2016年8月台風7号出水について、流入河川(屋曽根・矢具野)における濁度と放射性セシウムとの関係を示した。
- 2015年9月関東・東北豪雨出水に比べると、2016年8月台風7号出水は、濁度と放射性セシウムの回帰直線の「傾き」が小さくなっている。

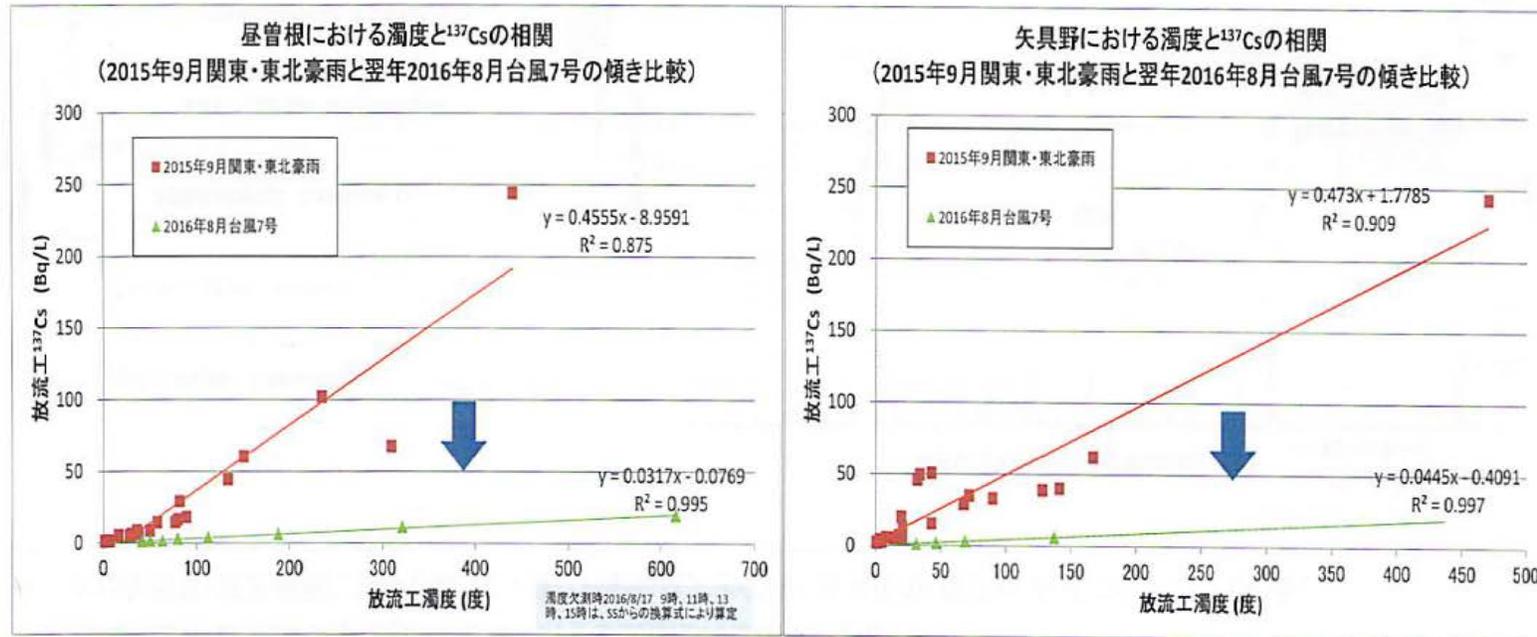
農水省調査

大柿ダムに流入する懸濁物質濃度(SS:濁度)と放射性Cs濃度(Bq/L)との関係:

2015年9月関東東北豪雨(赤)  
2016年8月台風7号(青)  
傾きが約1/10に減少。

懸濁物質中のCs濃度が著しく減少した。

塩沢の予測通り(それ以上)。



## おわりに

1. 川から流入しているCsは、森林内部からの流出ではなく、河川敷・河道に降下して土砂に固定されたCsが豪雨時に移動しつつ、ダムに流入している。  
Csの流出源は、流域のごく一部であり、流出は短期間(数年)で著しく減衰する。
2. 大柿ダムは上流からの懸濁態Csをトラップし、下流への拡散を防いでいる。  
もしダムがなかったなら、人が住む下流の河川敷のCs濃度は著しく高くなっていたであろう。
3. 農水省は、豪雨時に、ダムの用水取水口の懸濁態濃度が高い時には取水しないように取水管理するので、農業用水のCs濃度が高まる心配はない。

### 今後の研究:

流域全体の河川敷からのCs流出量を現場測定データと「地形データ+GIS」で推定し、ダム流入量(農水省観測)と比較する。