

水田における土壌から稲へのセシウム移行のメカニズムについて

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

03-5841-5343

asho@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

セシウムの土壌への固定

1. 弱い固定:

土粒子の電荷による一般的な陽イオン固定。

負電荷をもつ土粒子や有機物は陽イオンを引きつけている

: 交換性陽イオン (Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 NH_4^{+} 、 K^{+} 、 Cs^{+})

2. 強い固定

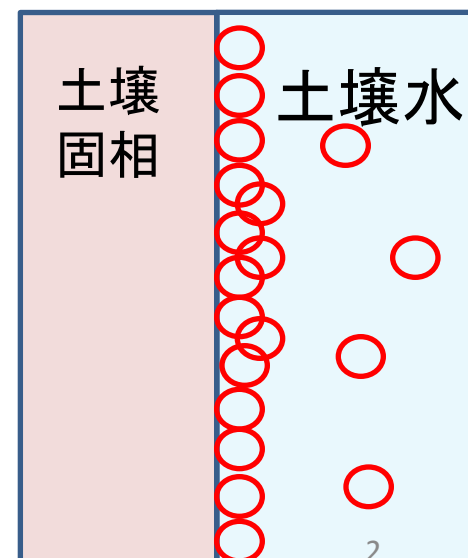
特定の粘土鉱物(2:1型層状珪酸ケイ酸塩)の表面へのCsの特異的な固定

$$\text{分配係数 } (K_d) = \frac{\text{土壌に固定されたCs量 (mg/kg 土)}}{\text{土壌水中のCs量 (mg/kg 水)}}$$

実験室での測定によれば、日本の水田土壌では、

$$K_d = 200 \sim 20000 \quad (\text{数千})$$

(石川、内田、田上, Radioisotopes, 56, (2007))



放射性セシウムは、当初2-3ヶ月は水分子の1/10～1/20の速度で速く動いたが、6月以降、移動速度が一桁低下している(水の1/200)

放射性セシウムの土壌への強い固定は時間がかかるプロセス

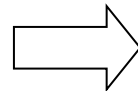
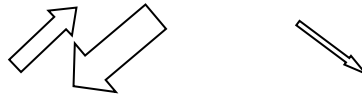
移動性・植物が吸収

水溶性 Cs^+

短時間で平衡

弱い固定

土粒子（粘土）、有機物
電荷による一般的な
陽イオン固定

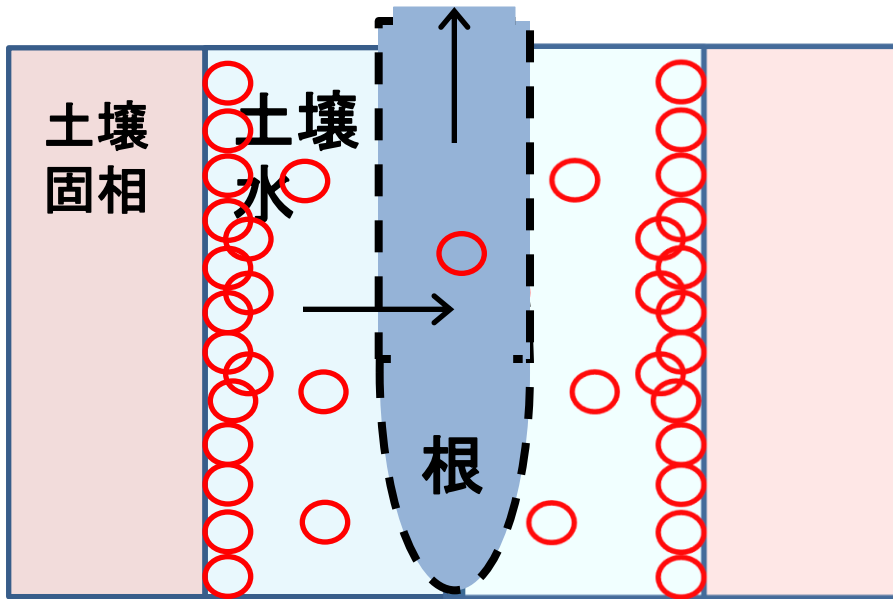


時間がかかる
数ヶ月～数年？

強い固定

特定の粘土鉱物
(2:1型層状珪酸ケイ酸塩)
Csに対する特異的な固定
移動せず、植物吸収なし

根のイオン吸収



葉の蒸散に伴い根は水分を吸収する。

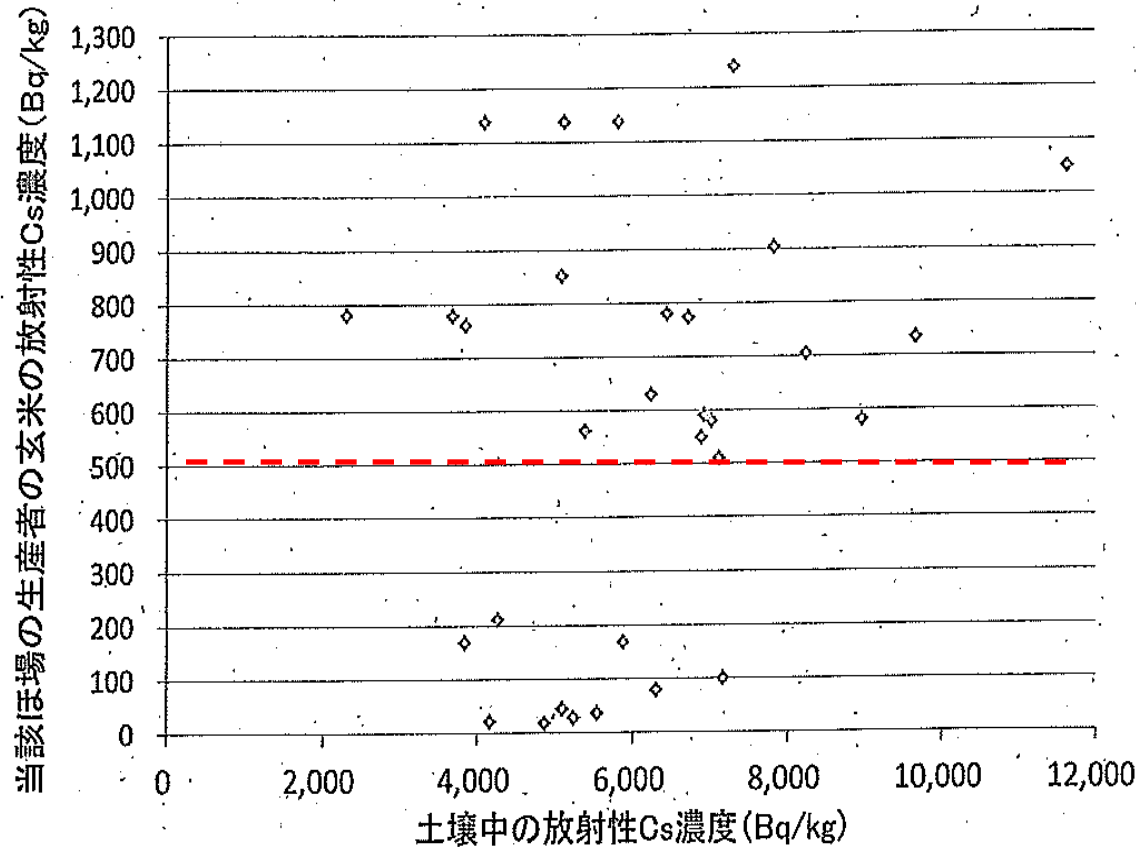
根は水に溶解したCsイオンを土壌水とともに(選択的に)吸収する。

可溶性のCsが存在しなければ吸収できない。

土壌には、Csを固定するのに十分な量の粘土が存在する
どのようにして土壌への固定を免れたCsが夏まで(4・5ヶ月)存在できたのか
: 稲へのCs移行のメカニズム

玄米Cs濃度のバラツキ

(伊達市、福島市大波地区、渡利地区)



移行係数 =

$$\frac{\text{玄米のCs濃度 (Bq/kg)}}{\text{土壌のCs濃度 (Bq/kg)}}$$

多くの水田で0.01
以下であるが、0.1を
超える水田がある

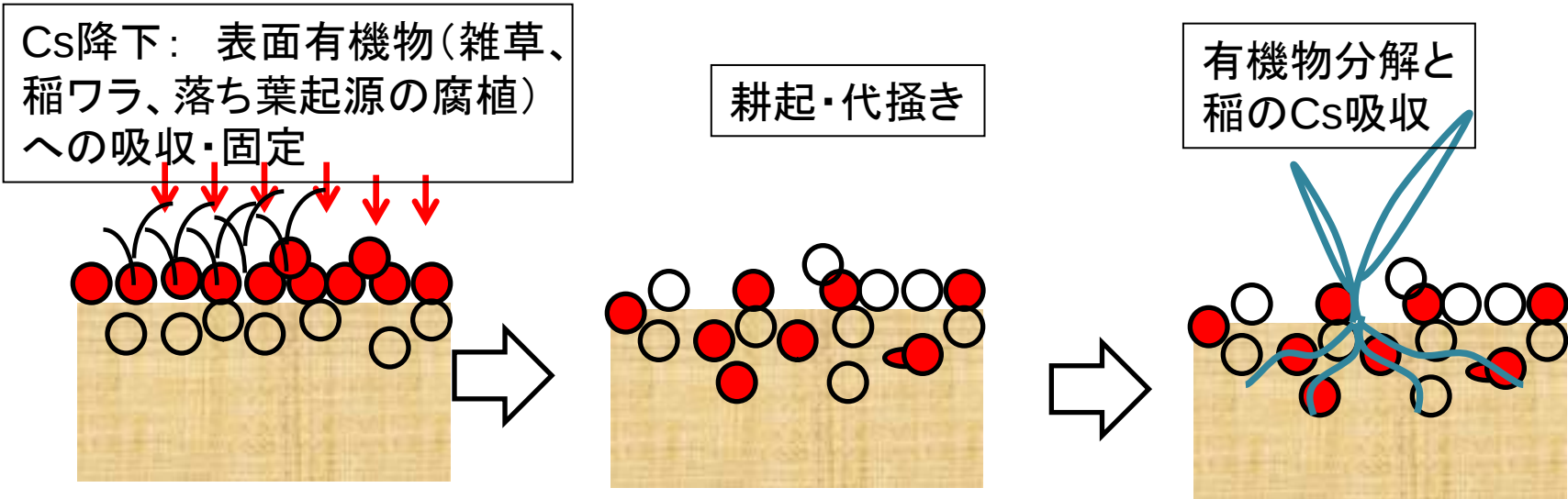
図2 土壌及び米の放射性セシウム濃度の関係

農林水産省 中間検討会資料 (2011年12月25日)より

結論：有機物媒介説（仮説）

放射性Cs降下時に、水田表面を覆っていた有機物（落ち葉起源、雑草、稲ワラ：土粒子と結合していないフレッシュな分解しやすい有機物）が覆っていた。

これにCsが付着・吸収され、耕起・代掻きで土壌中にすき込まれ、気温が上昇する夏に分解され水溶性Csを放出し、根に吸収された。
有機物に固定されたことで、放射性Csの土壌への固定を免れた。

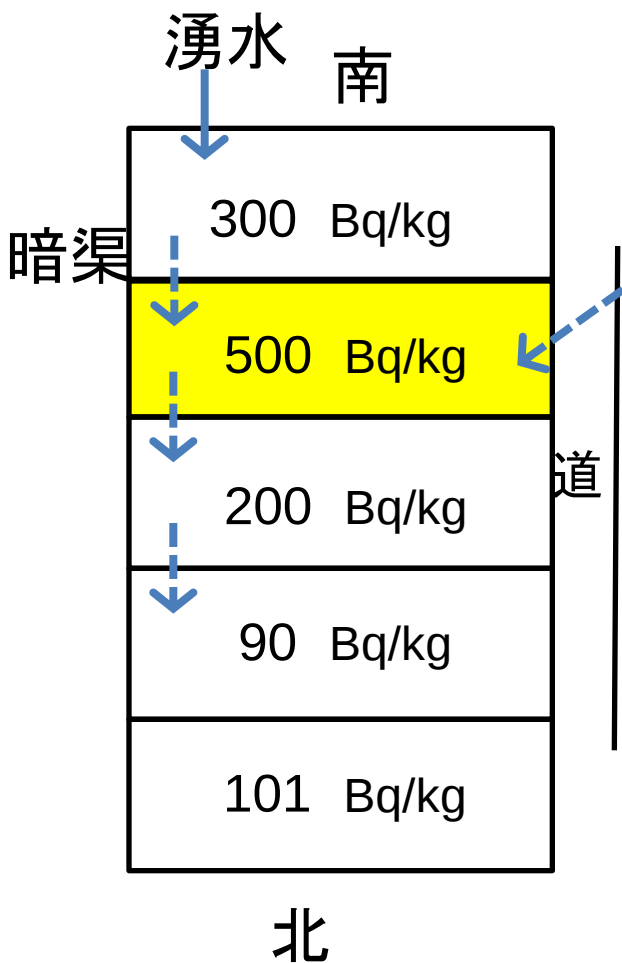


大きなCs移行の水田の特徴： 浸透量が小さい

1. 還元状態で有機物の分解が遅い。
2. 土中で水が動かず、有機物から発生した水溶性Csが土壌に固定されにくい。

二本松の水田

3方を山に囲まれた北斜面の棚田、
日当たりが悪い、砂質土

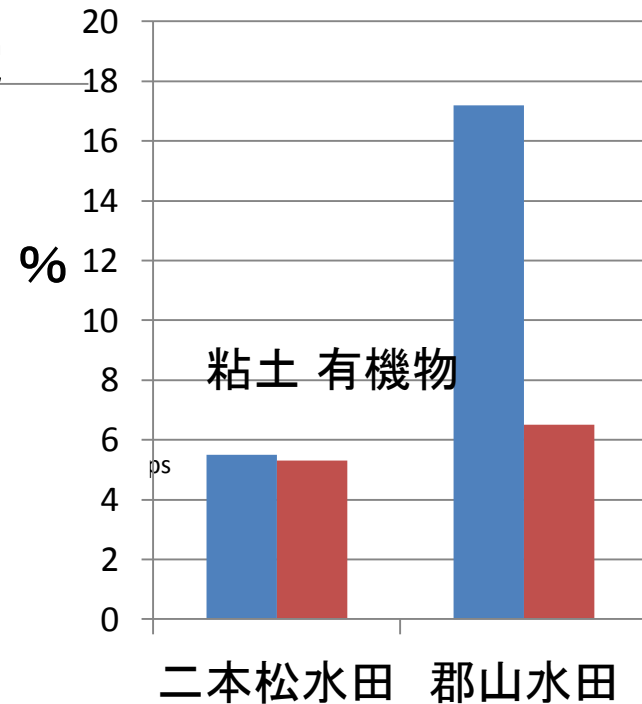
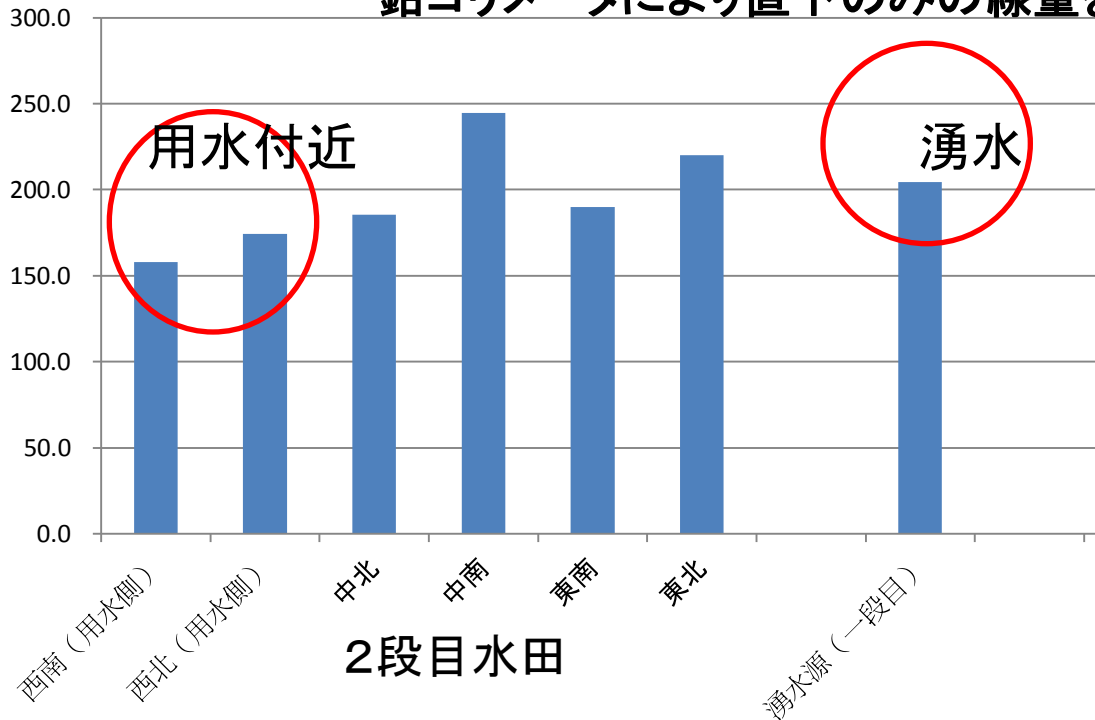


なぜ2枚目水田のCs移行が大きいのか？

二本松水田調査

地表線量(CPS)

鉛コリメータにより直下のみの線量を測定

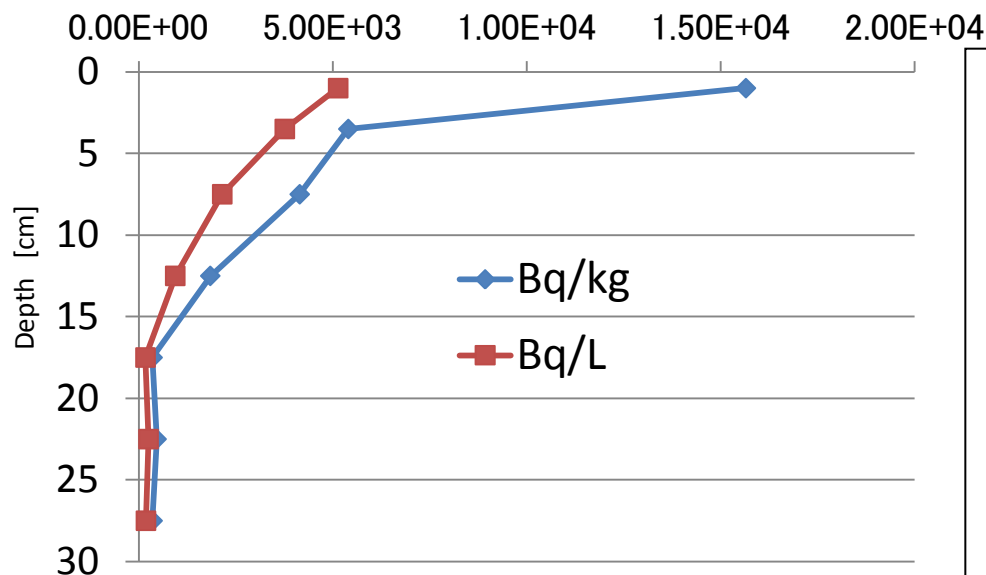


- 1) 2段目水田の水が流れる部分の線量が低い(洗い流されている)
- 2) 湧水源(一段目)の線量も高くない

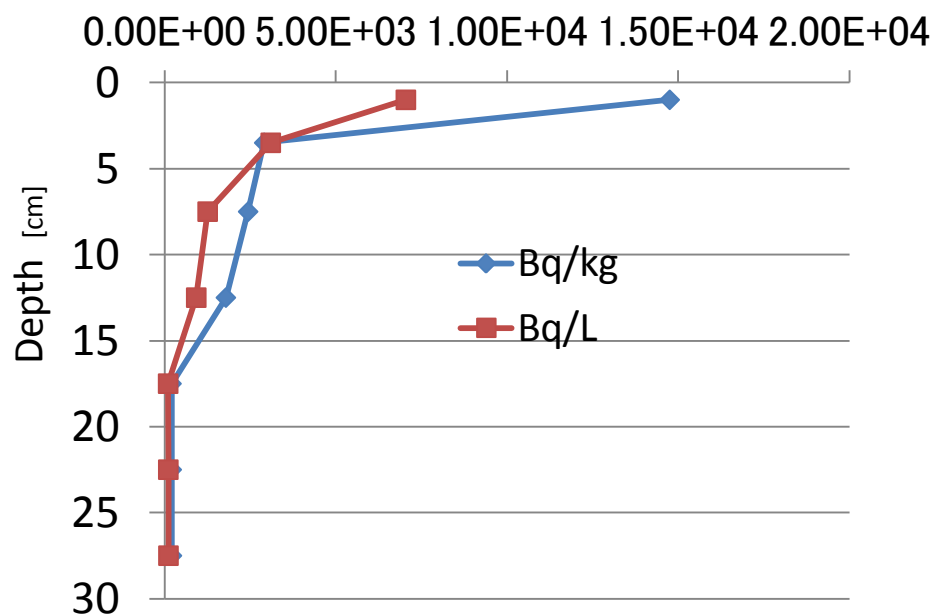
粘土分が少ない割に
有機物が多い:還元状態

土壌から土壌水を抽出したが水溶性Csは検出限界以下であった。

放射性Csの土中鉛直分布(二本松)



トラクターによる耕起・代掻きにもかかわらず、Csが作土に混合されておらず、表層(0-2cm)に高濃度：
Csが付着した軽い有機物が、代掻き時に、浮き上がった。



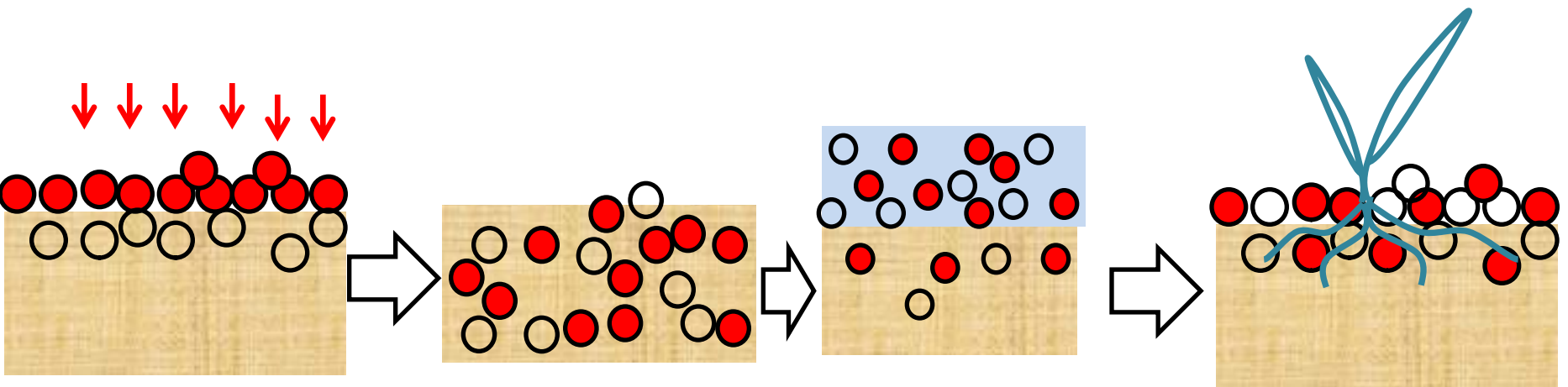
作土Cs量に比べ地上線測定線量(コリメータ付)が高い：郡山耕起水田の2倍もある：
放射性Csが表面付近に存在している。

Cs吸収のメカニズム：砂質土（二本松）

土壌表面を覆っていた微細な有機物（落ち葉に由来）に降下した放射性Csが固定された。

（耕起されたが、代掻き時も水に浮いて内部に混合されなかった。）

- 夏に温度が上昇して有機物の分解によってCs水に溶けて稲に吸収された。



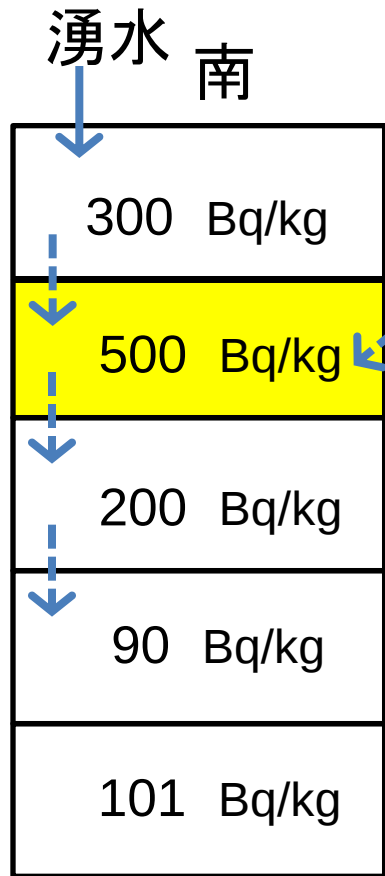
表面の膜状有機物
へのCsの付着

耕起における混合

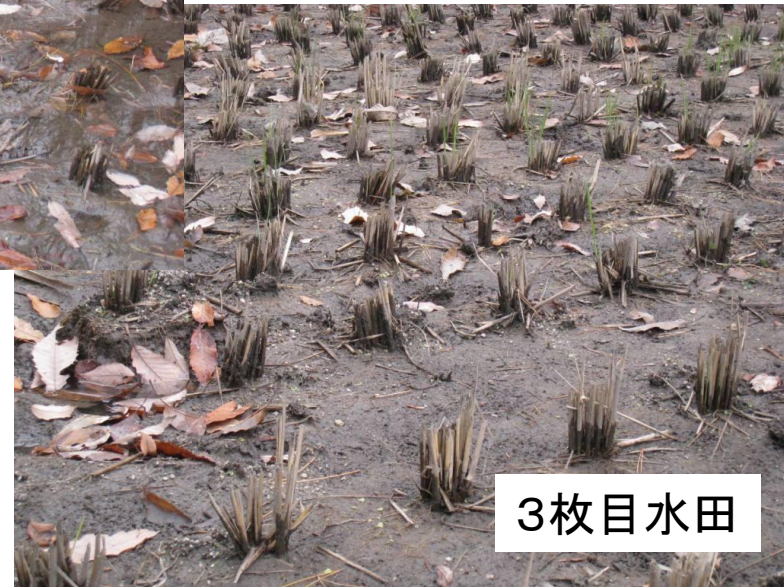
代掻きで浮き上がり
表面に寄って表面に
寄る

夏に分解して水溶性
Csが生じ稲が吸収

二本松の水田、12月の調査

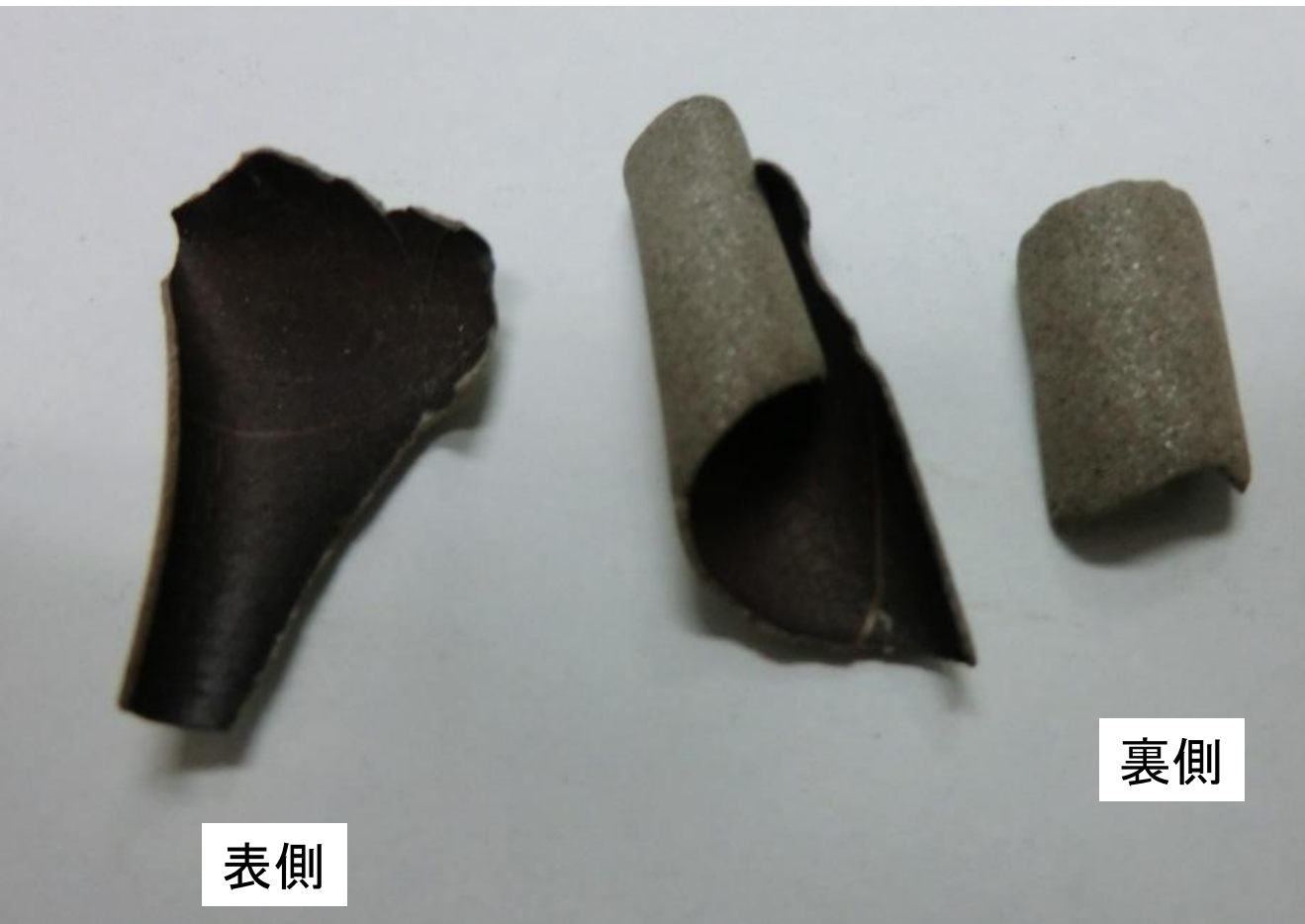


落ち葉が入っている



2枚目水田は冬に常時湛水 : 浸透量が最も小さい
1枚目は部分的に湛水 : 浸透量がやや小さい
3・4・5枚目は湛水なし : 浸透量が大きい。

二本松： Csを固定した有機物の実体



土壌を攪拌後に数分沈降させた上澄みをトレイに入れて乾燥させた。

黒はフルボ酸鉄の色で、鉄を多く含む落ち葉起源の有機物(腐植)であろう。

灰色は粘土とシルト

黒い側(表)がセシウムを固定している(IP画像で確認)。

南相馬市による作付試験： 移行係数が著しく大きい水田がある

11の水田で試験的作付：

高精度で線量測定、用水の濃度も測定（東大アイソトープ総合センターの協力）

土壌平均1340 Bq/kg乾土

例外的に移行係数が大きい水田

1. 移行係数 0.17 （玄米 100 Bq/kg）

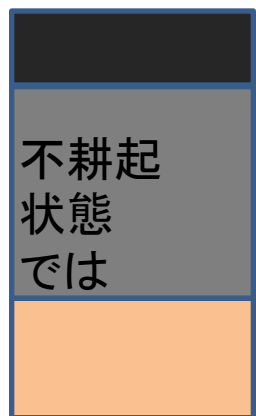
2. 移行係数 0.26 （玄米 104 Bq/kg）

どちらも、津波をかぶった水田

2水田を除く9カ所平均 34 Bq/kg玄米、移行係数平均 0.026

用水の濃度 1.5 Bq/kg（高い）

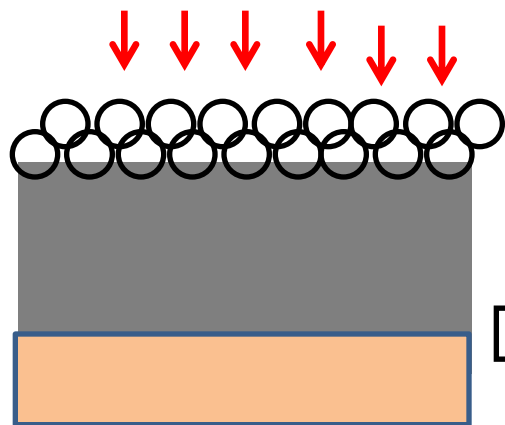
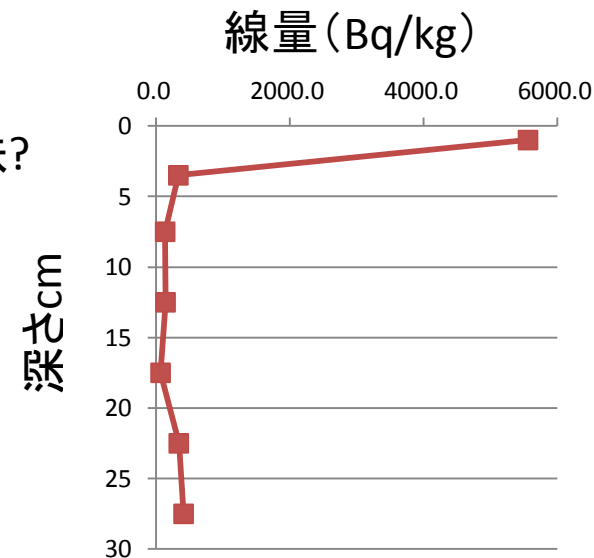
津波をかぶった水田： 海洋性有機物にCsが付着



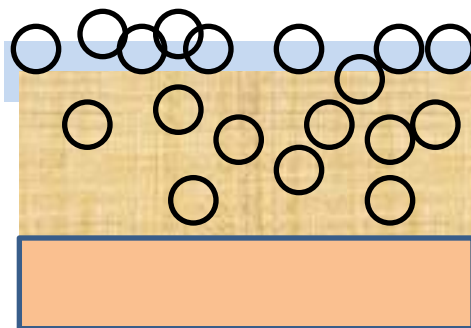
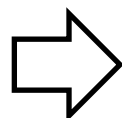
海の有機物(2cm)
海藻起源?フルボ酸鉄?

海の砂
(約10cm)

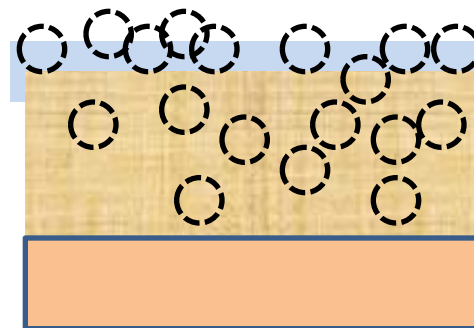
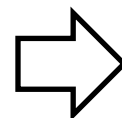
元の土(粘土を含む)



表面の有機物層へのCsの付着



耕起・代掻きにおいて有機物が浮き上がり下層の元の土と混合されない

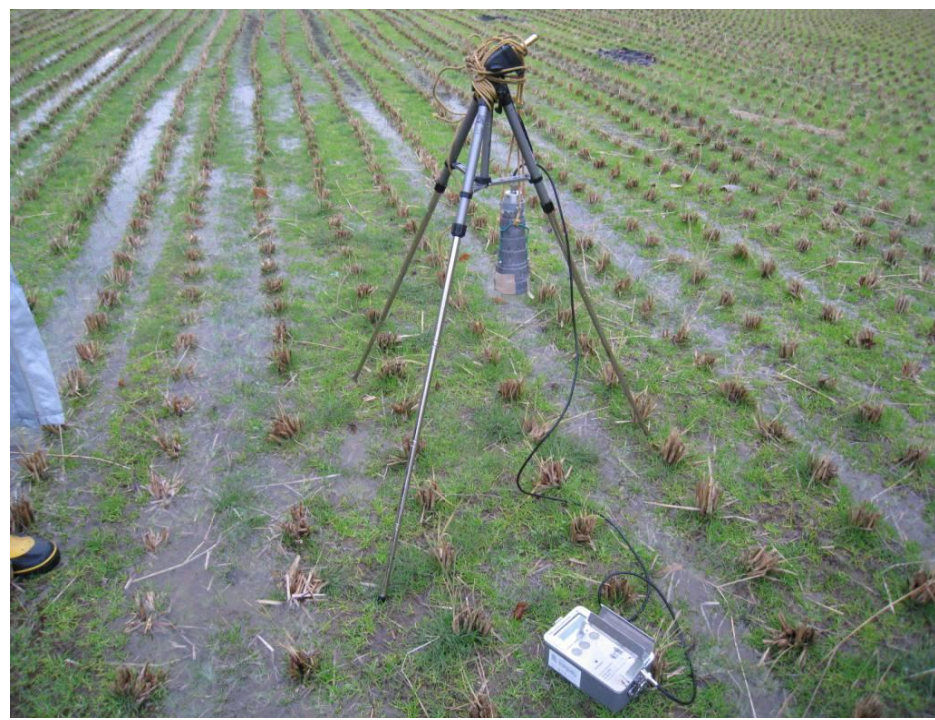


気温の上昇する夏に分解され、水溶性Csを放出し根に吸収

伊達市・福島市大波(粘質土)



大波 (玄米630Bq/kg)
表面に雑草、山側は落ち葉

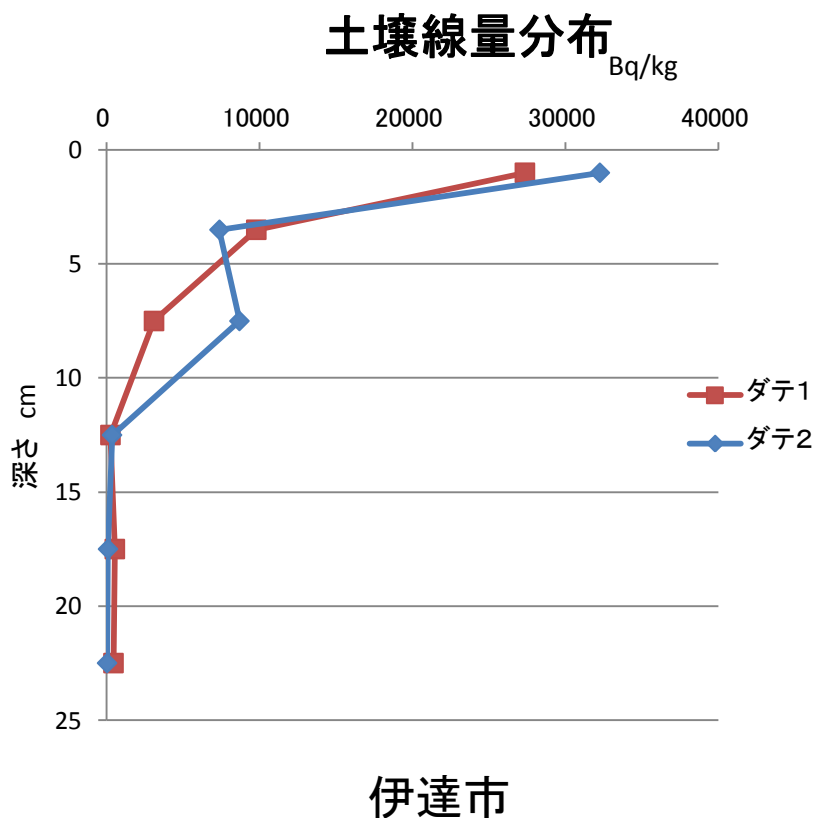
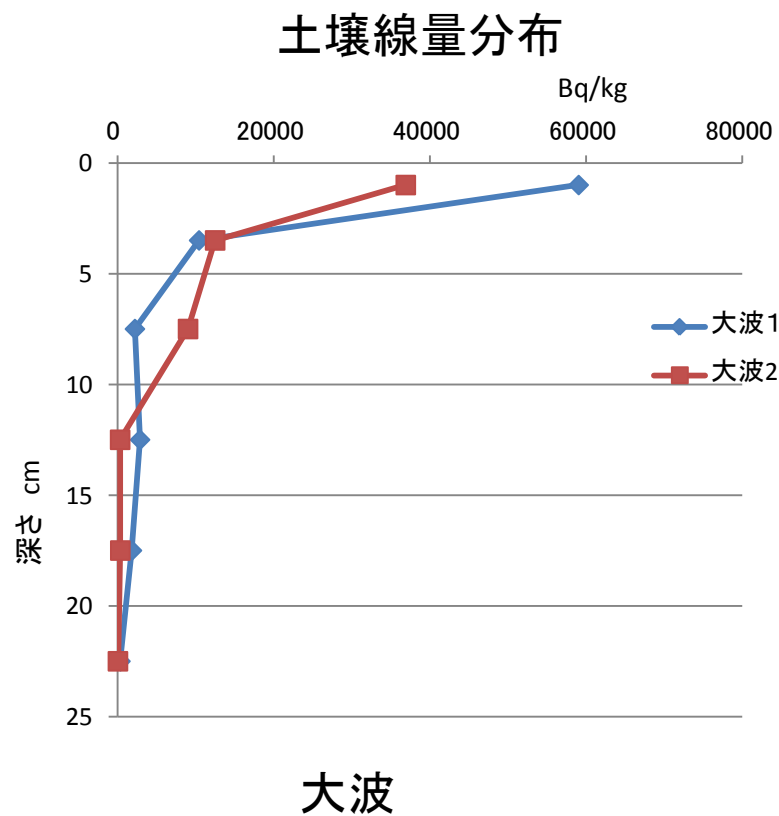


伊達 (玄米580Bq/kg)
表面に雑草と稲ワラ

20mm程度の降雨で湛水する: 浸透量が小さい(排水不良田)

伊達市・福島市大波（粘質土）

土壌の放射性Csが表面に寄っている：代掻き時の浮き上がり



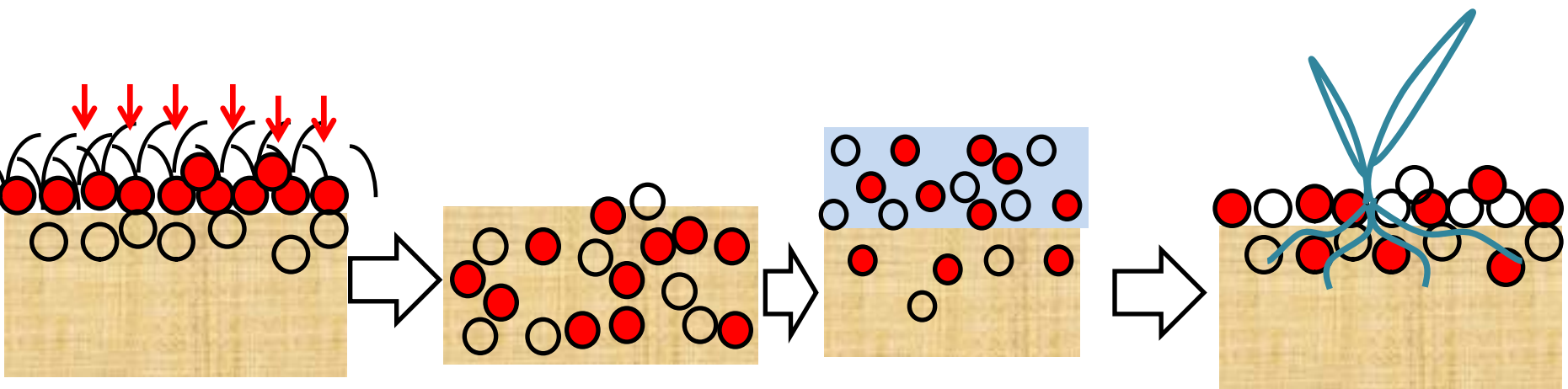
Cs吸収のメカニズム：

粘質土（福島市大波地区、渡利地区、伊達市）

放射性Csが降下時に、土壌表面を覆っていた雑草と稲ワラ（一部落ち葉）にCsが固定された。

耕起後、内部に混入

- 夏に温度が上昇して有機物の分解によって水に溶けて稲に吸収された。



表面の雑草とワラ
に付着

耕起における混合

代掻きで浮き上がり
表面に寄って表面に
寄る

夏に分解して水溶性
Csが生じ稲が吸収

秋起こしをした水田は移行係数が小さい

伊達市の近接した秋起こしをした水田

(Cs降下時に雑草がなく表面が土で一部稲ワラ):
玄米220Bq/kg





伊達市12月3日
雑草(すずめの鉄砲)が
全面を覆っている
その下に稲ワラもある



渡利12月6日
一部雑草が覆っている
(多数の水田の米が混合)

雑草やワラのCsを固定実験 土壌+雑草サンプリング



雑草ポットへのセシウム試薬の撒布実験

Cs-137の8000Bqを100cc水溶液として数日において2回撒布(3月下旬の降雨を想定)

		試料質量g	線量Bq	撒布量の%	Bq/g
地表スプレー	草地上部	1.28	892	11.2	697
	ワラ	1.63	1150	14.4	705
	有機物 計	2.91	2042	25.5	
	土壌 0-1cm	33.9	505		15
ポットの縁に入れる	草地上部	1.1	47	0.6	42

撒布Csの25%がわずか3g(作土の0.3%)の有機物に固定された。
この有機物の質量当たりCs濃度は土壌の濃度に比べて桁違いに大きい。
根からも吸収する。



セシウムを撒布した雑草の イメージングプレート(IP)画像



セシウムを新たに撒布していない雑草 : 全く吸収していない



地上に撒布した雑草
: 水滴状に付着

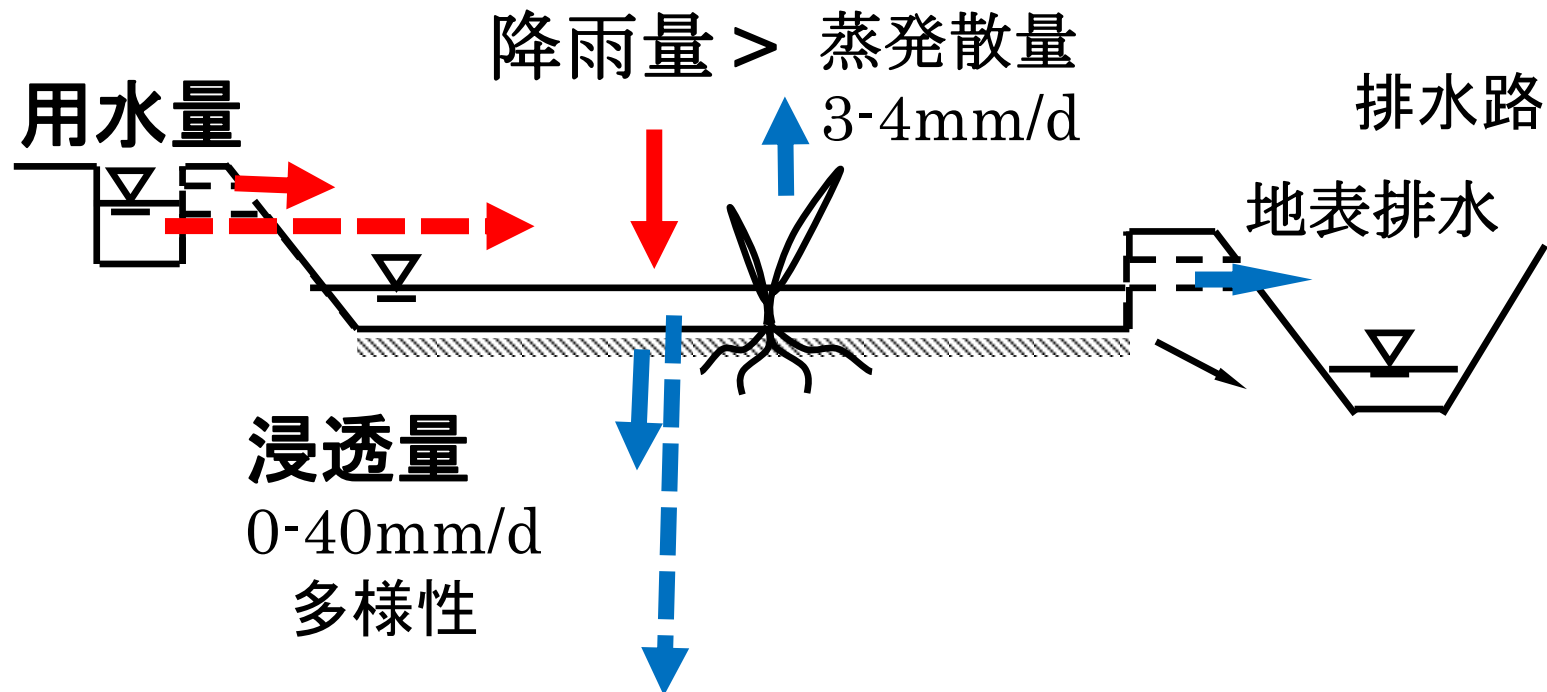


ポットの縁のみに撒布
: 根からも吸収

用水經由のCs流入：
浸透量が多いほど、用水量は多い
外部からの物質流入も多い

$$\text{用水量} = \text{浸透量} + (\text{蒸発散量} - \text{降雨量} + \text{地表排水量})$$

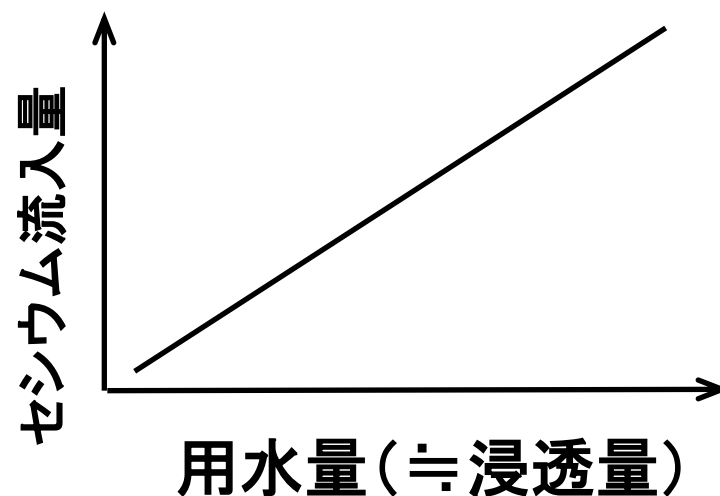
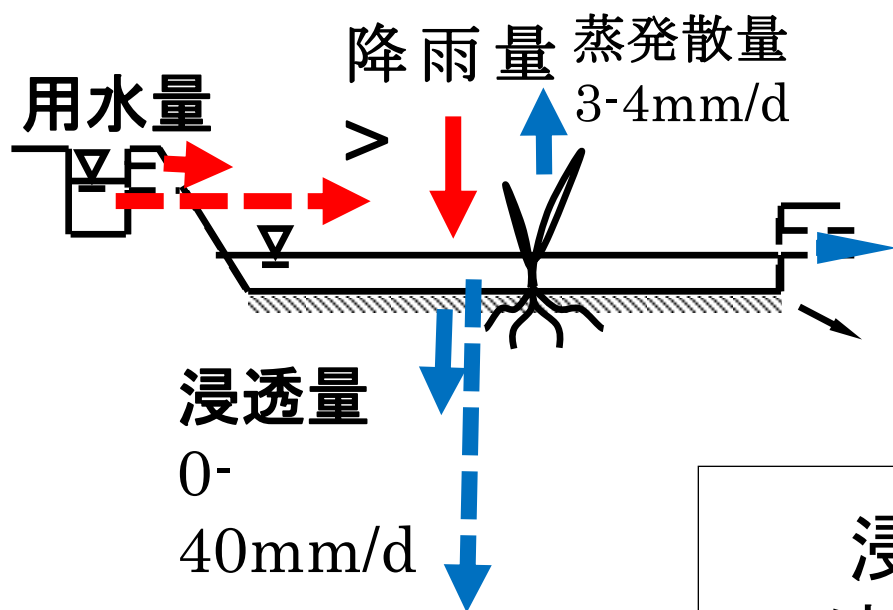
÷ 浸透量



浸透量が多いほど、用水経由の物質流入が多い

物質流入量 = 用水量 (≡ 浸透量) × 用水の物質濃度

田面の物質濃度： 用水量が少ないほど降雨により希釈



田面のCs濃度： 用水量が少ないほど降雨により希釈

浸透量が小さい水田では、
外からのCs流入量は少ない：
用水が大きなCs吸収の原因ではない
用水を入れていない水田もある

用水経由のCs流入の影響

$$\text{Cs流入量} = \text{用水量} (\div \text{浸透量}) \times \text{用水のCs濃度}$$

用水のCs濃度を1Bq/kg水 として、

用水量(浸透量)が大きい水田:

用水量20mm/d(一作で2000mm)の場合、一作のCs流入量は2000 Bq/m² (作土平均で約13 Bq/kg)、移行係数を0. 2として玄米に2.6 Bq/kg玄米 の寄与

用水量(浸透量)が小さい水田:

用水量2mm/d(一作で200mm)の場合、玄米に 0.26 Bq/kg玄米 の寄与(無視できる)

土壌カリウムの影響

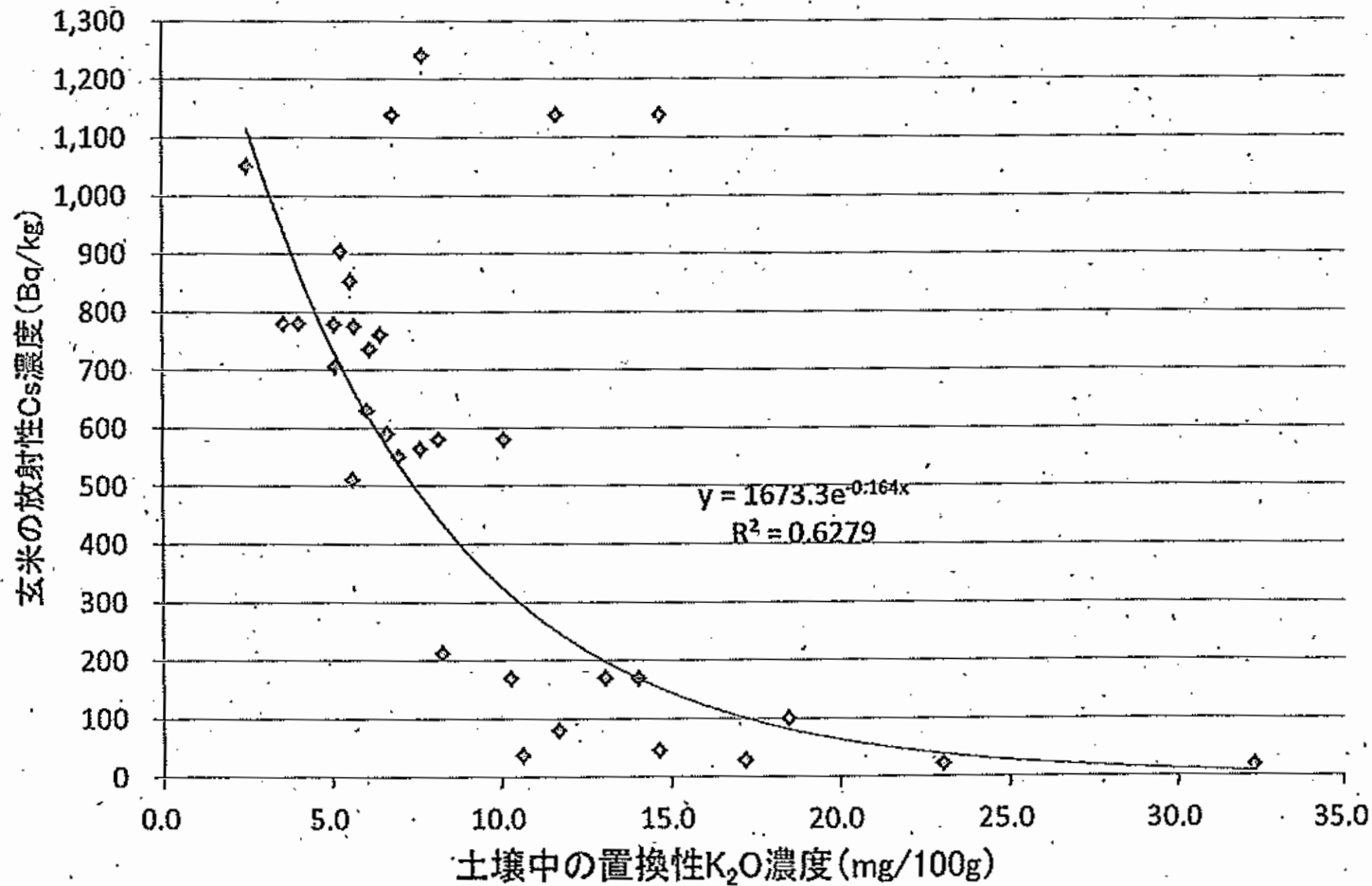


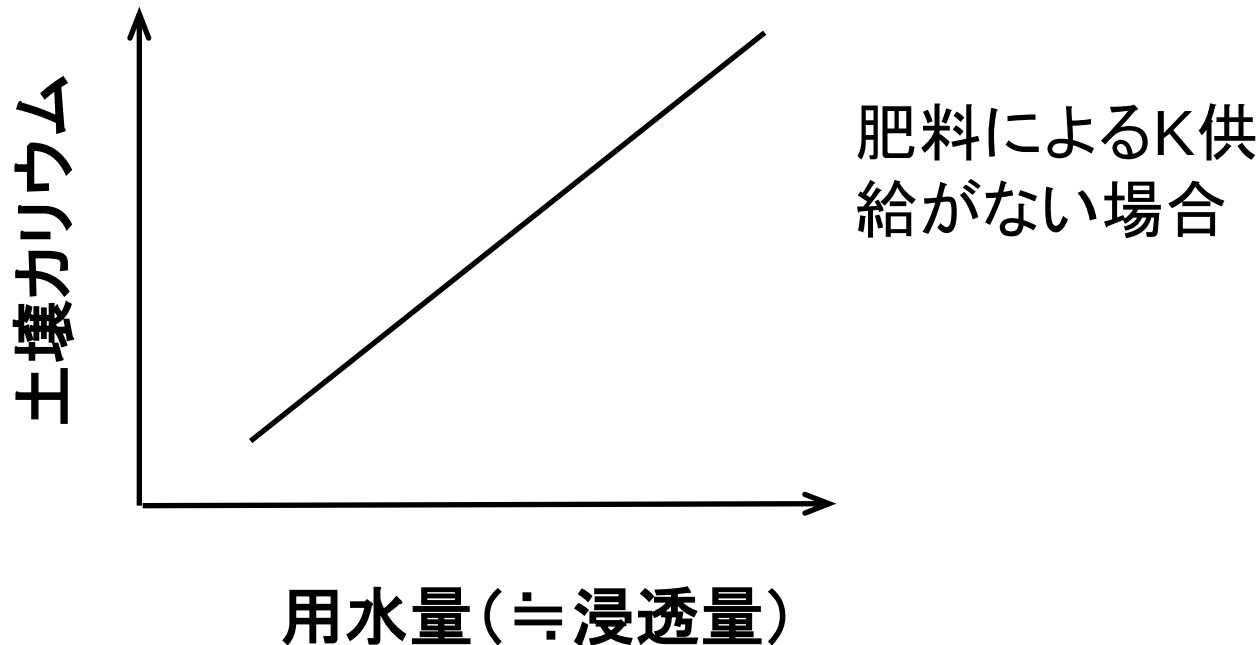
図4 土壌の置換性カリウム濃度と玄米の放射性セシウム濃度との関係

農林水産省 中間検討会資料 (2011年12月25日)より

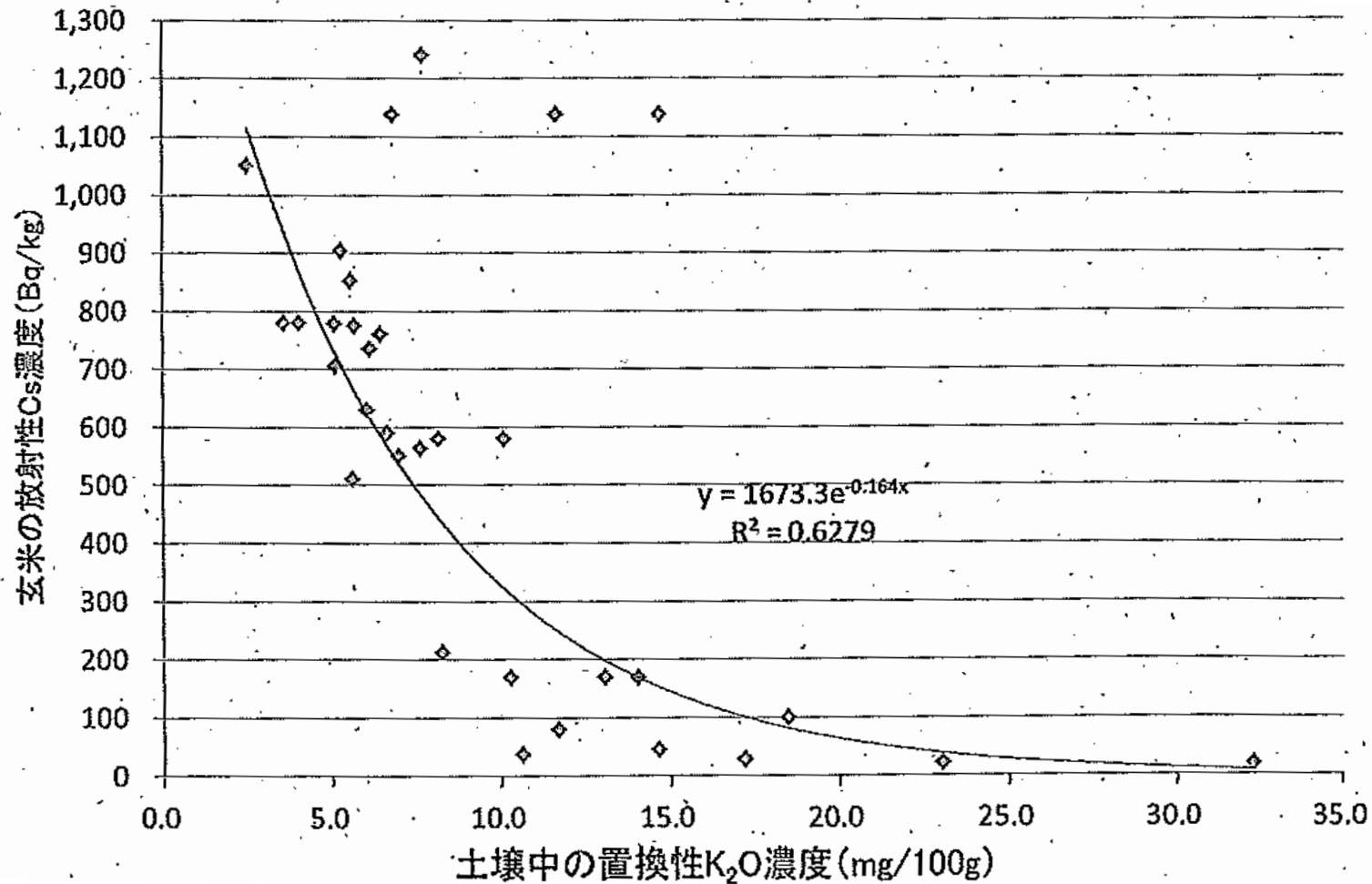
用水経由のカリウム(K)の流入

K流入量＝用水量(≡浸透量)×用水のK濃度

河川水(用水)のカリウム含有量は約1mg/L (福島市大波)
平均的な用水量であれば、用水経由の供給で稲には十分

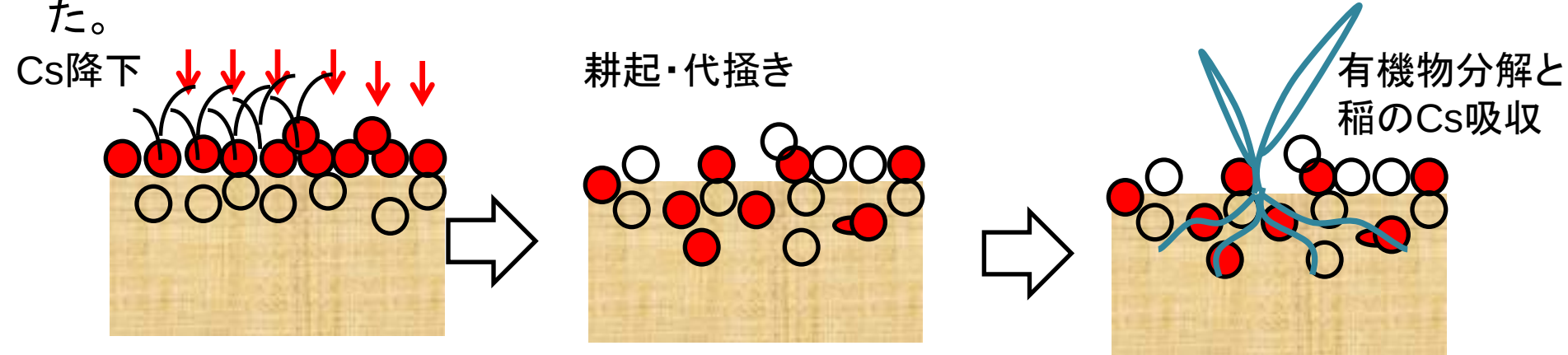


土壌カリウムの影響： 浸透量の影響が重ね合わされているのではないか



結論：有機物媒介説（仮説）

放射性Cs降下時に、水田表面を覆っていた有機物（落ち葉起源、雑草、稲ワラ：土粒子と結合していないフレッシュな分解しやすい有機物）にCsが付着・吸収され、耕起・代掻きで土壌中にすき込まれ、気温が上昇する夏に分解され水溶性Csを放出し、根に吸収された。有機物に固定されたことで、土壌への固定を免れた。



大きなCs移行の水田の特徴： 浸透量が小さい

1. 還元状態で有機物の分解が遅い。
2. 土中で水が動かず、有機物から発生した水溶性Csが土壌に固定されにくい。

稲への放射性セシウムの移行を防ぐ対策

セシウムが付着していた表面の有機物の分解が進み、セシウムの粘土への移行が進行しており、来年の米への移行は大きく減ると予想される(有機物の分解速度による)。

すでに耕起した水田： 田植え前に田面をなるべく乾かし、土壌をよく混ぜて、放射性Csを付着した有機物の分解を促し、粘土への固定を進める。

まだ不耕起の水田： Csを付着した有機物が表面に残っている場合は取り除く(津波をかぶった水田など)。

カリウム肥料の適度な撒布

今後の予測

- 放射性Csを固定した有機物の分解とCsの土壌への固定が進み、稲への移行は大きく減少するであろう。その程度は有機物の分解しやすさによる。
- 次年度のモニタリングが必要。

大気圏核実験以降の放射性Cs降下量

1963年から3年間で1/10
その後
1990までに1/10000

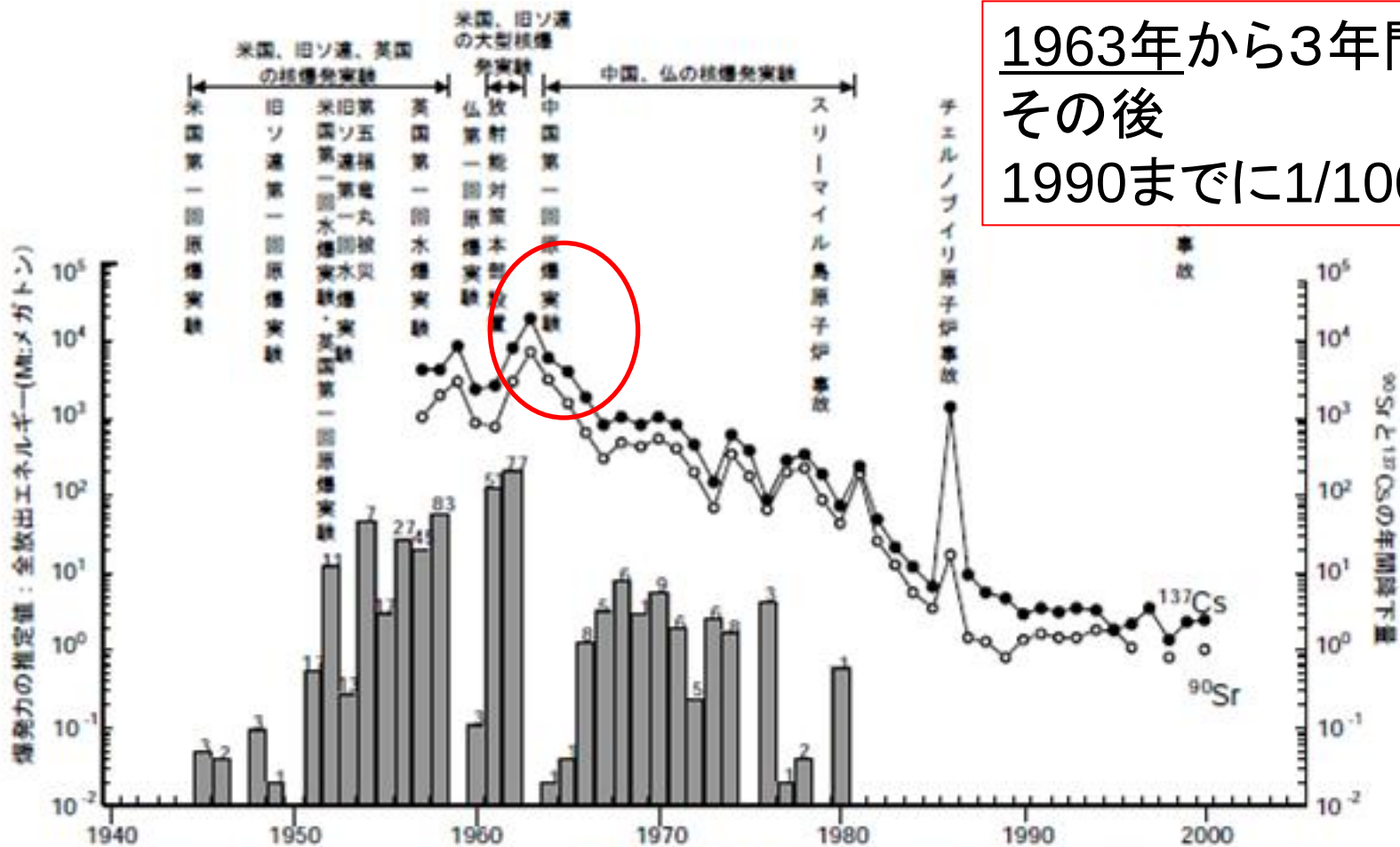
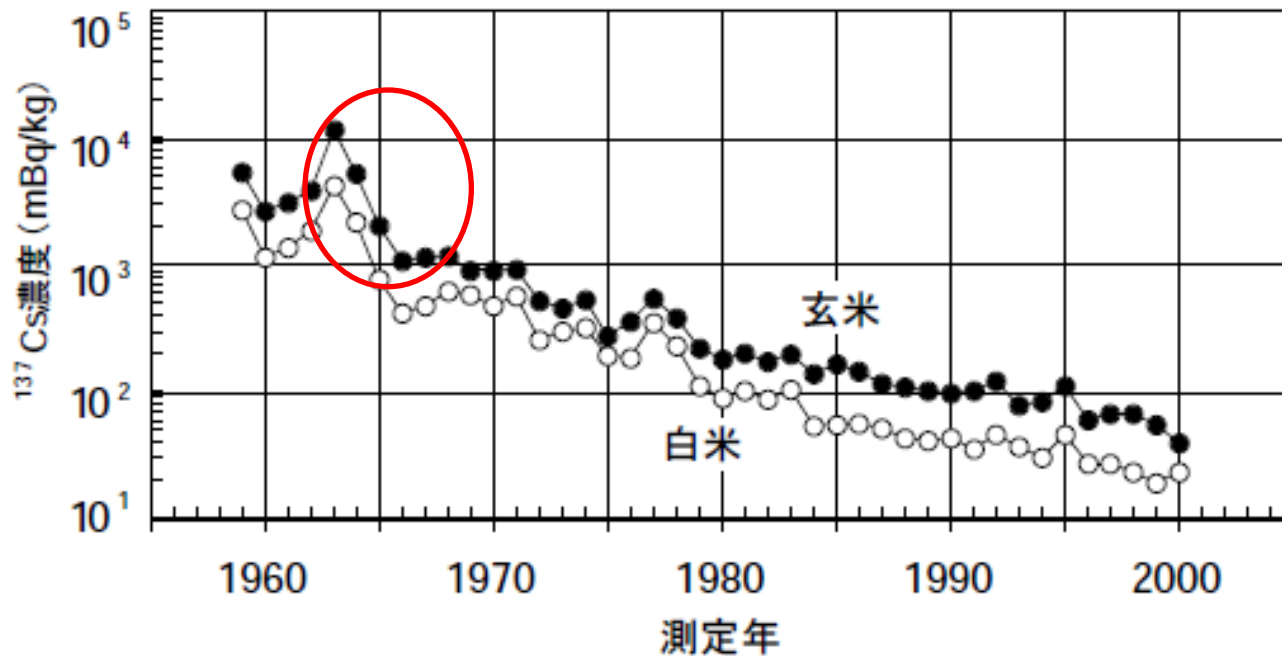


図1 大気圏内核爆発実験の年次ごとの回数と爆発力の推定値およびわが国における⁹⁰Srと¹³⁷Csの降下量
(原子力安全委員会(1983)、青山ら(1996)および気象庁：放射能観測報告(2003)を参考に作図)

注) 棒線は爆発力の推定値。その上の数字は核爆発実験回数を示す。折れ線は⁹⁰Srと¹³⁷Csの年間降下量である。

(駒村美佐子ら：農技研報 24 (2007) より)

玄米と白米のCs濃度の経年推移



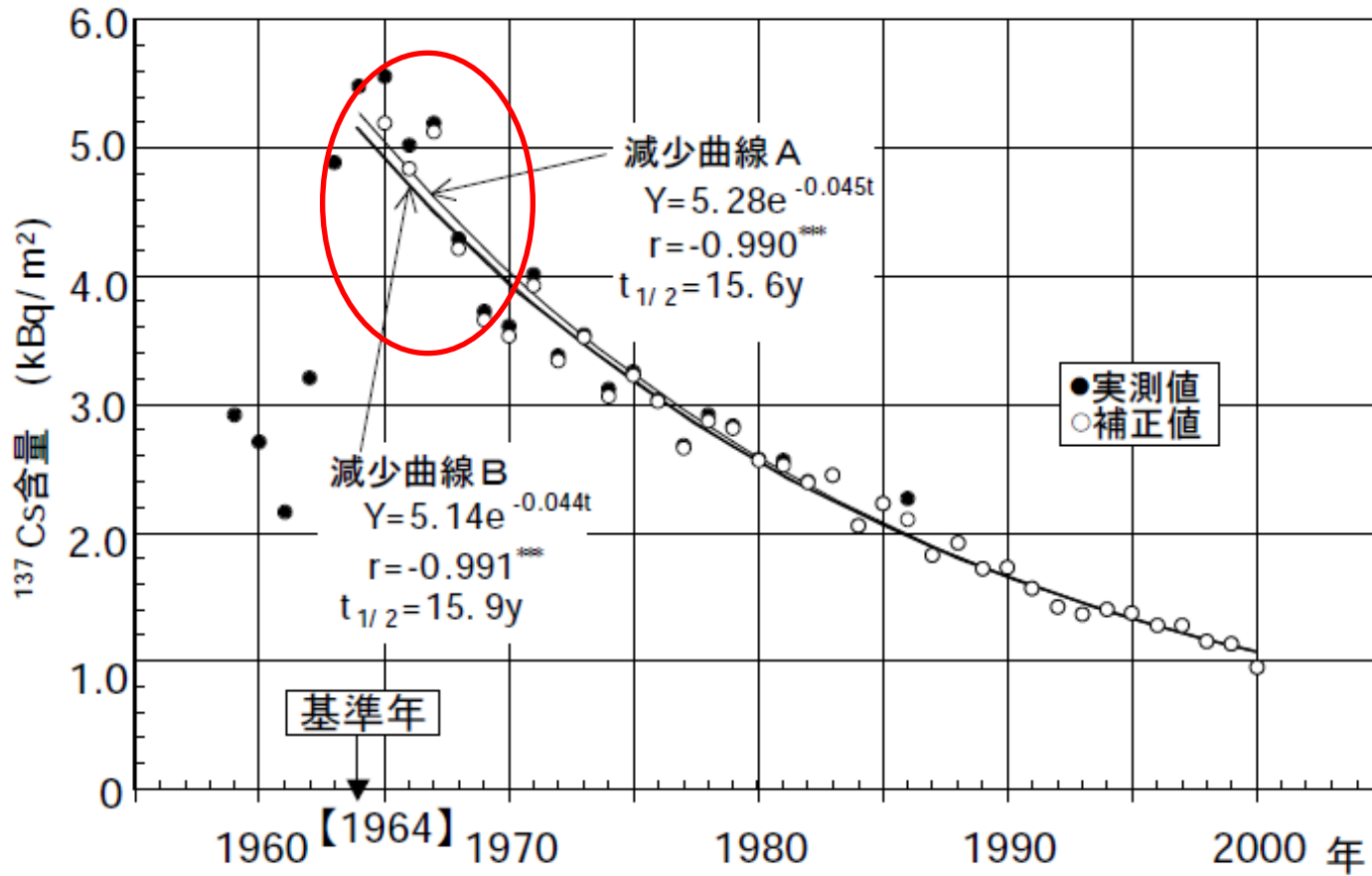
1963年から3年で
1/10
その後、1990年
までに1/100

今回は？

図3 玄米と白米における ^{90}Sr と ^{137}Cs 濃度の
経年推移 (全国平均)

(駒村美佐子ら：農技研報 24 (2006)).

水田作土からのCs-137の減衰



半減時間:
17年

自然崩壊の半減
時間: 30年

滞留半減時
間: 約40年

初期の低下
が大きい

図16 水田作土からの ^{90}Sr と ^{137}Cs 含量の減衰

(駒村美佐子ら: Radioisotopes, 48 (1999)、農技研報 24 (2006).)

謝辞

ご協力いただいた方々

- 南相馬市
- 福島県農業総合センター

東大:

- 農地環境工学研究室: 吉田修一郎、西田和弘、深澤健太郎、小谷駿太郎、他
- 先端科学技術研究センター: 三原誠
- アイソトープ総合センター: 野川憲夫
- 本研究科放射性同位元素施設: 田野井慶太郎、中西友子、小林奈通子
- 本研究科: 根本圭介