

# 土壌-植物系における 放射性セシウムの挙動



**(独)農業環境技術研究所 土壌環境研究領域・**

**山口紀子**

# 放射性セシウムの植物への移行経路

空から降ってきた放射性物質が葉などに付着し、吸収される

葉面吸収

土にたまっている放射性物質が根から吸収される

経根吸収

事故直後は葉面吸収が主体

現在は経根吸収が主体

# 土壌中濃度から作物中濃度を 試算する指標



## 移行係数 (Transfer Factor, TF)

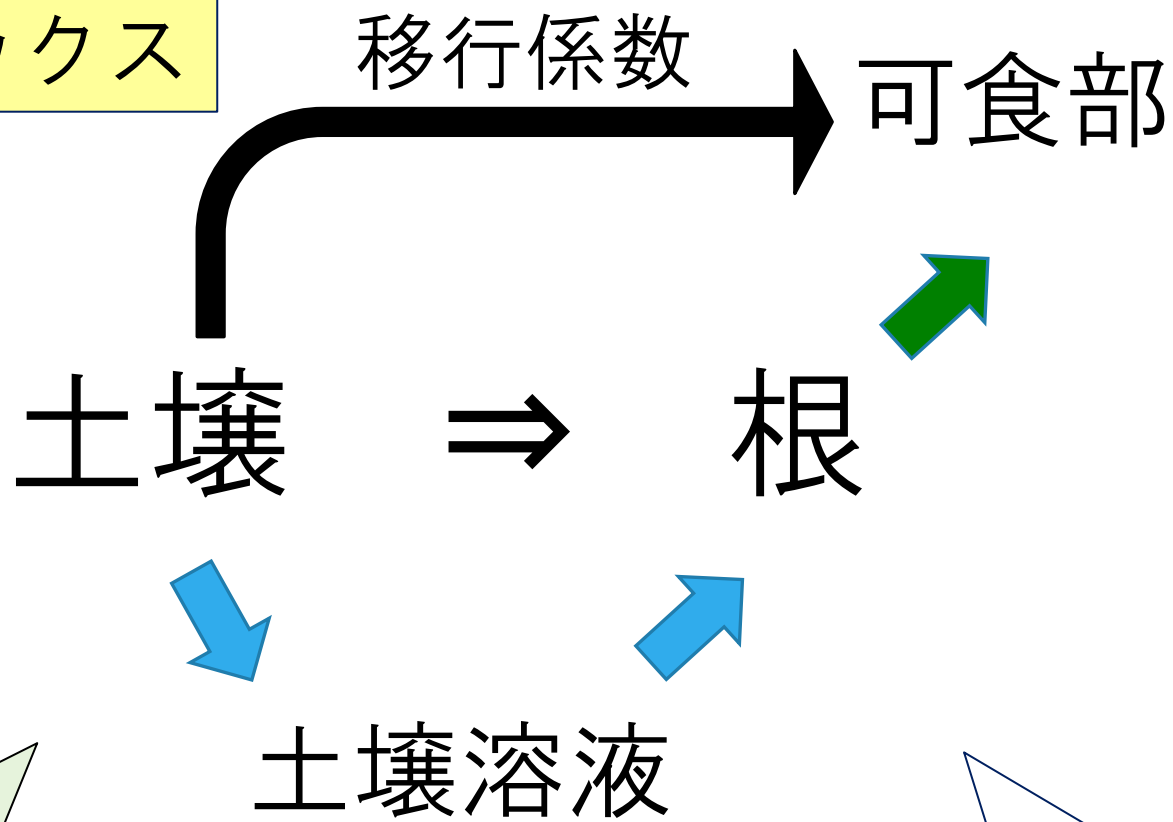
$$TF = \frac{\text{作物中放射性セシウム濃度 (Bq/kg)}}{\text{土壌中放射性セシウム濃度 (Bq/kg)}}$$



根のある領域で均一であることが条件  
農耕地以外では使いにくい

同じ植物であっても2桁程度の分布幅がある

今日のトピックス



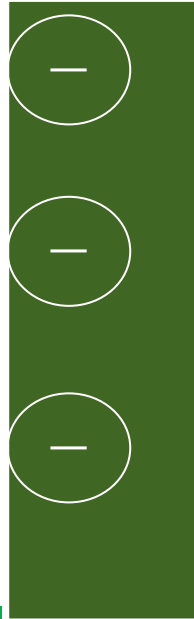
① 土壌－土壌溶液間の放射性Csの分配  
放射性Cs固定力  
共存イオンの影響

② 経根吸収  
共存イオンの影響

# 土壌への陽イオンの吸着

セシウム  
は1価の陽  
イオン

$\text{Cs}^+$



土壌の負電荷に吸着

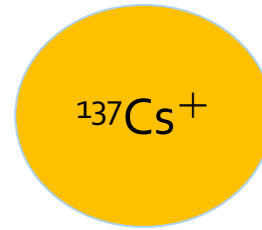
土壌の持つ負電荷の量

陽イオン交換容量

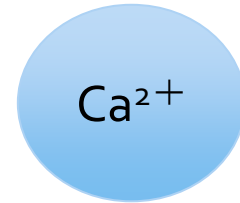
Cation Exchange Capacity

CEC ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )

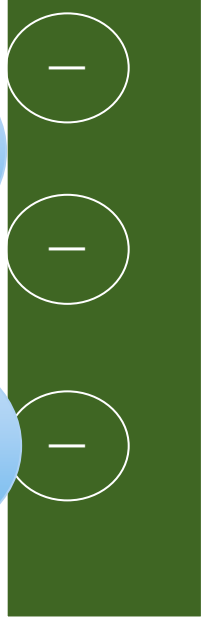
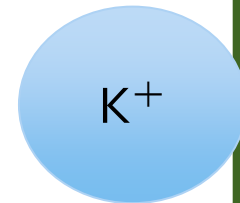
$^{137}\text{Cs}^+$



$\text{Ca}^{2+}$

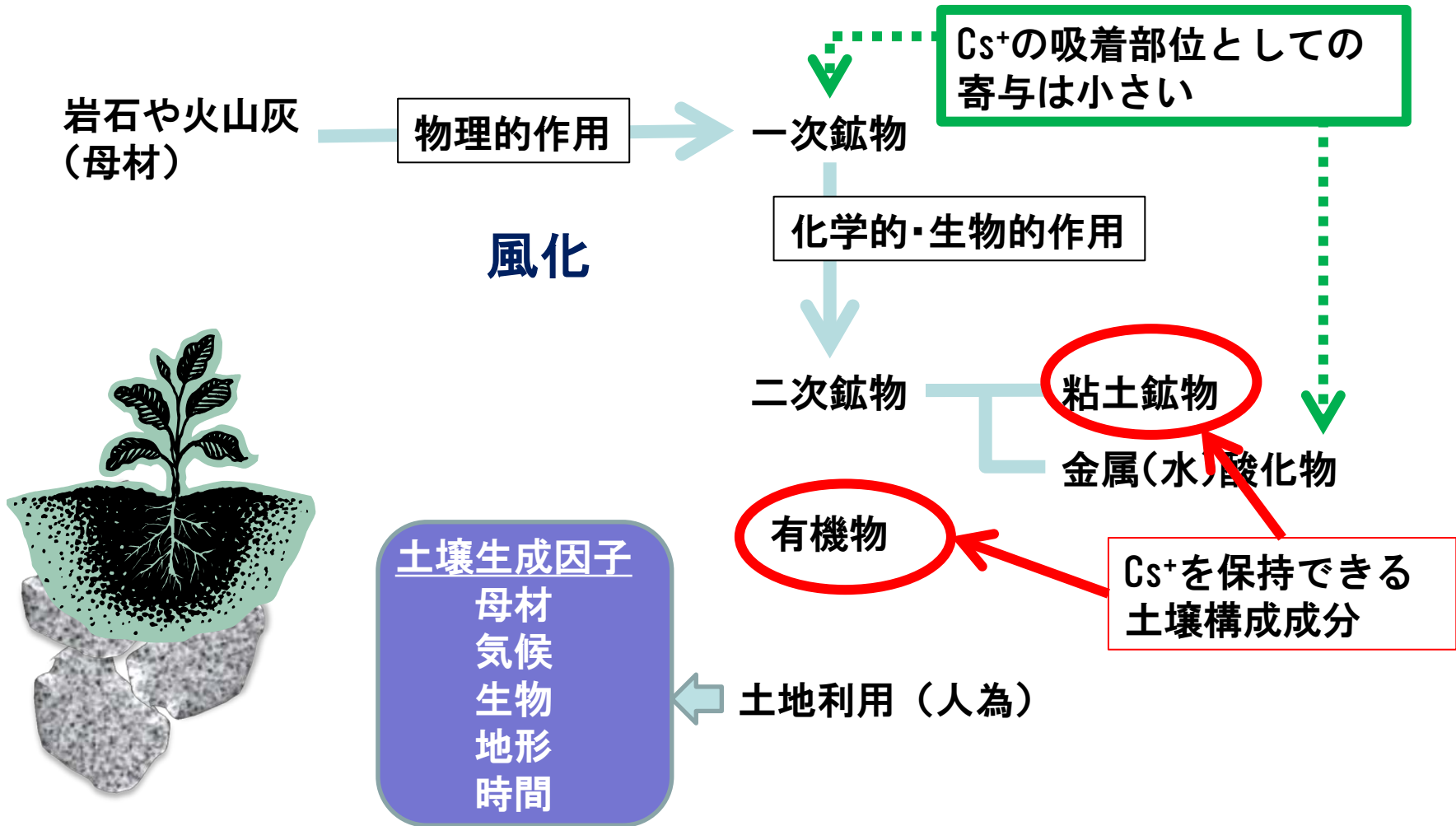


$\text{K}^+$



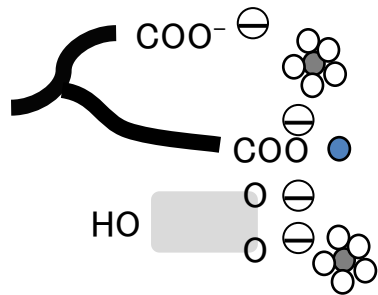
カルシウムなどの  
陽イオンが占有

# Cs吸着に関する負電荷をもつ土壤構成成分



# Cs選択性で土壌中負電荷を分類

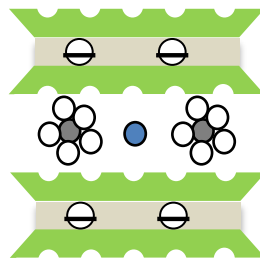
Cs選択性低



土壌有機物の官能基、  
粘土鉱物構造末端等の  
表面水酸基

(pH依存性あり)

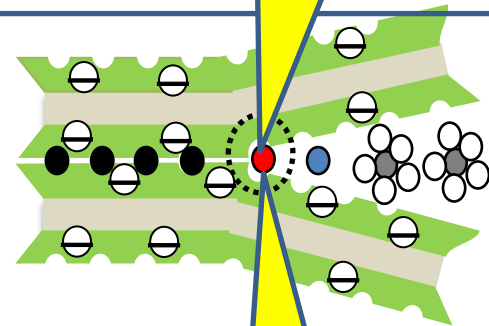
Cs選択性高  
脱離可能



スメクタイト

(pH依存性なし)

Cs選択性  
脱離困難



風化雲母  
バーミキュラ  
ライト

CECの2%以下

陽イオン交換容量 (Cation Exchange Capacity, CEC)

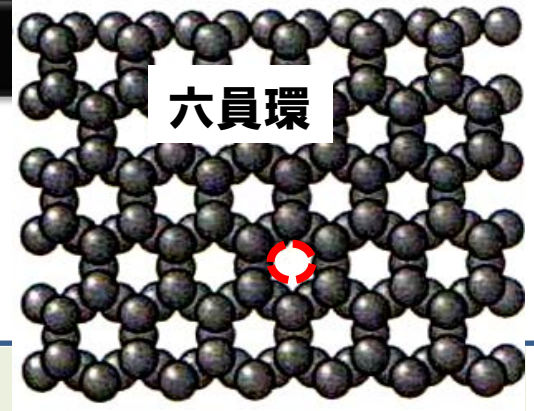
エイジングにより、時間とともにより安定な形態へ推移

セシウム選択性の高い  
負電荷をもつ粘土鉱物

2:1型層状ケイ酸鉱物

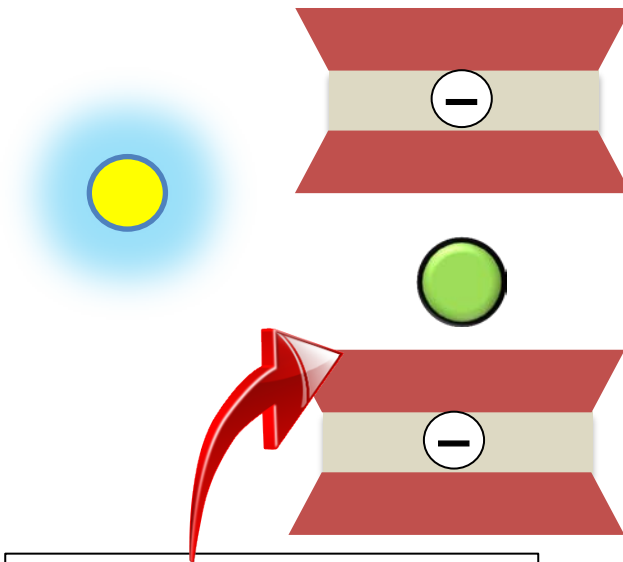


# セシウム固定力⇒電荷の発現位置と立体的要因



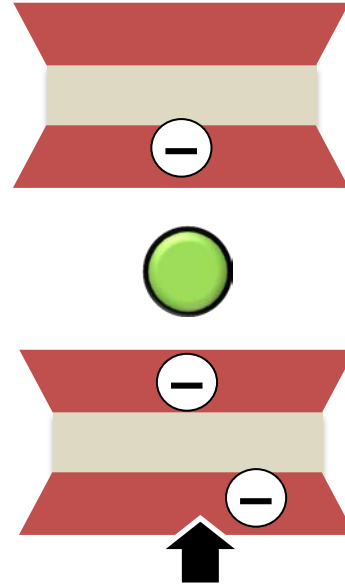
Al八面体に同形置換

Si四面体に同形置換

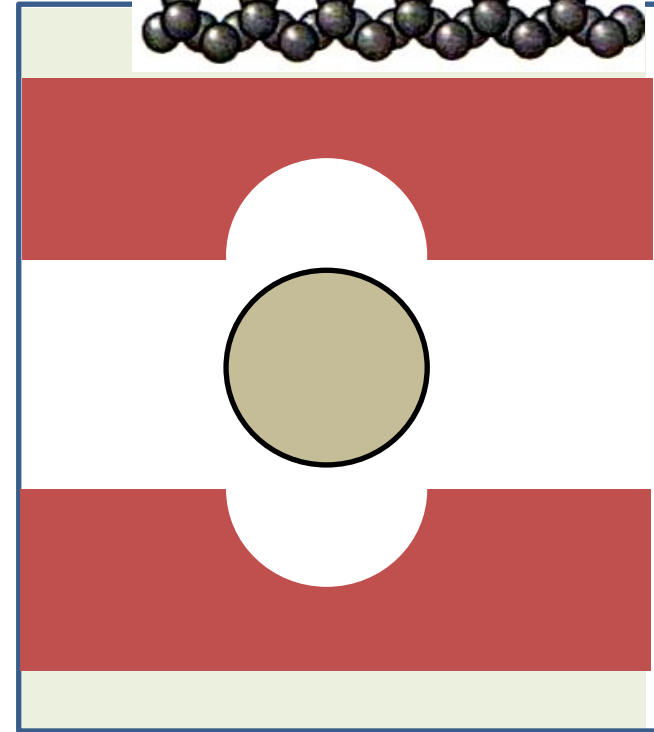


“接着力”が弱いので、  
空洞に放射性セシウムを  
閉じ込めておくことがで  
きない。別の陽イオンに  
交換可能

モンモリロナイト



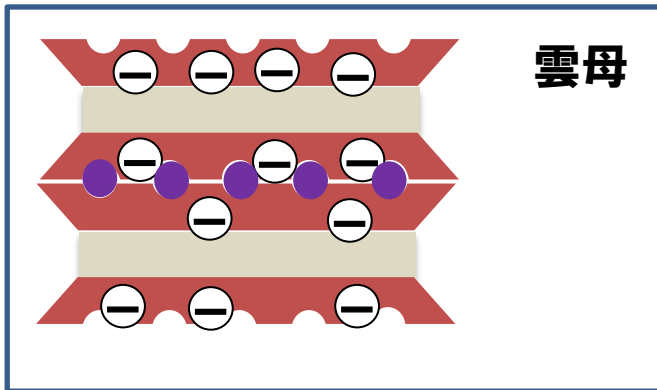
陽イオンを閉じ込めてお  
く力はマイナスの電気を  
帯びた部分が外側にあ  
る方が強い



六員環にフィットする陽イオン

- ◆ カリウムイオン
- ◆ アンモニウムイオン
- ◆ セシウムイオン

水和力弱い



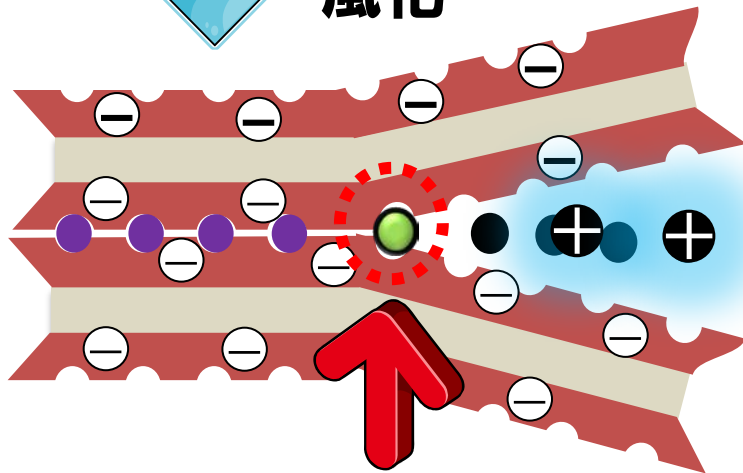
シートの外側にマイナスの電荷をもつ鉱物  
空洞部分はすでにKで満席



あとから土にはいつてきた放射性セCs  
がはいりこむ余地がない

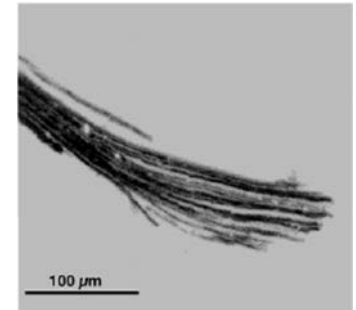


風化



層の末端がめくれて他の陽イオンがはいりこめるようになる

イライト  
バーミキュライト



フレイド・エッジ・サイト

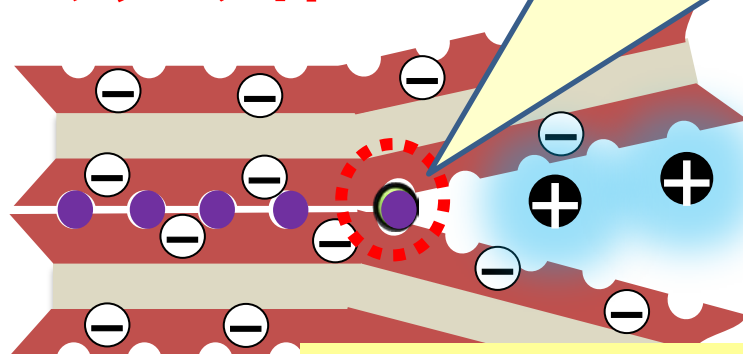
風化の最前線

- Si四面体シートに負電荷があるので、 $Cs^+$ をとどめておく力が強い
- $Cs^+$ がちょうどよくフィットするスペース



放射性セシウムが**固定**される

フレイド・エッジ・サイト



いったん入り込むと、  
出てこないところがポイント！

開きかけた層間を  
Csで“接着”

親和性： $Cs^+ \gg NH_4^+ > K^+$

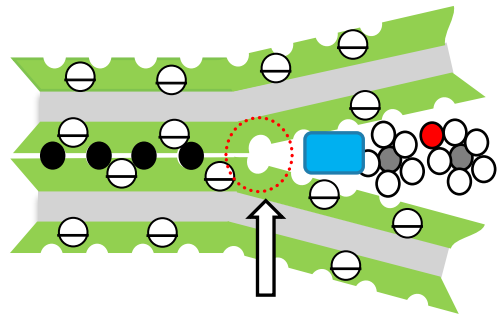
(陽イオン交換容量の0.001～1.4%程度)

土壤中の負電荷に占めるフレイド・エッジサイトの割合は極めてわずか。  
放射性Csの存在量も、ごく微量

(5000Bq/kgのCs-137は陽イオン交換容量の1兆～10億分の1以下)

放射性Csにとっては十分すぎる量が存在。

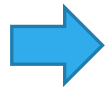
極めてCs選択性が高いことから、**放射性Csを封じ込める支配要因**



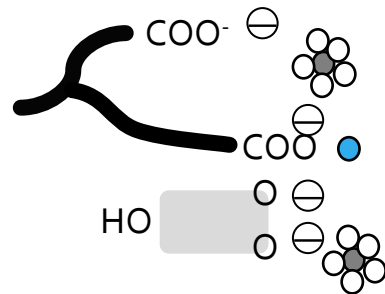
◆放射性Csが固定されるには**時間がかかる**  
 (乾燥・湿潤の繰り返しが必要?)

◆アルミニウム水酸化物や有機分子などが妨害

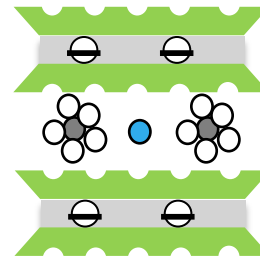
## フレイドエッジサイト



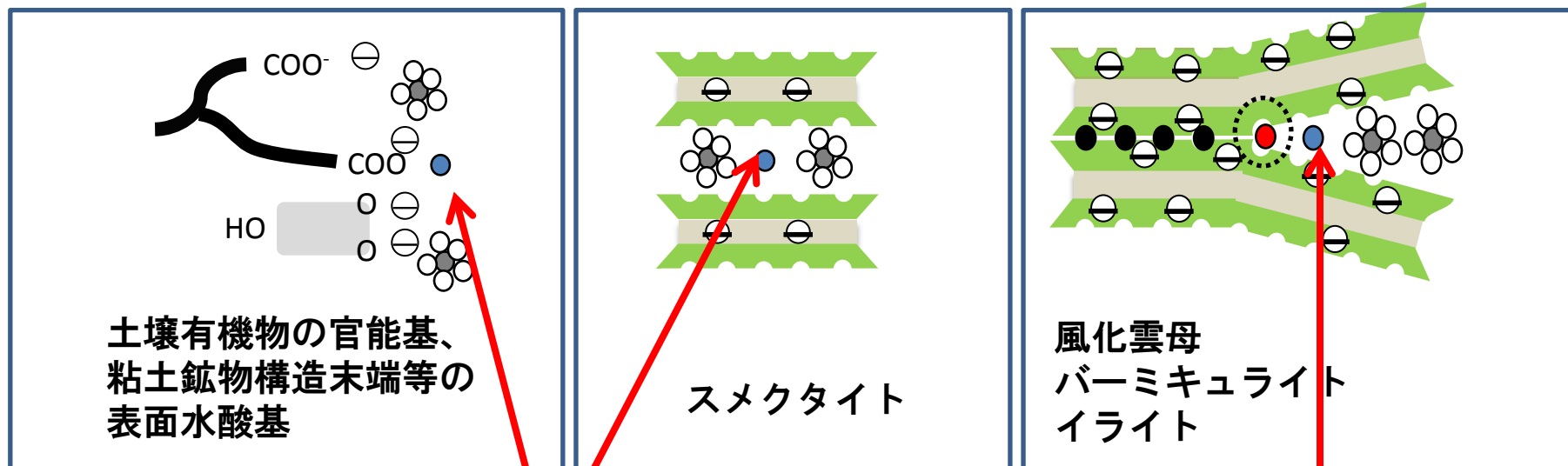
放射性Cs降下からあまり時間がたっていない段階では、フレイドエッジサイト以外の負電荷にも放射性Csが吸着



土壌有機物の官能基、  
 粘土鉱物構造末端等の  
 表面水酸基



スメクタイト



## 交換態

1M酢酸アンモニウム溶液で抽出して評価



固定態も一部抽出している可能性大

Ca<sup>2+</sup>など水和陽イオンによるイオン交換反応では、放射性Csはほとんど抽出されない  
 いったん抽出されてもすぐにフレイド・エッジ・サイトに再分配？

1M酢酸抽出態は、交換態とは完全に一致しないが、大量の土壤サンプルを同じ基準  
 で評価するためには簡便で適切であると考えられる

土壤が放射性セシウムを固定する能力:

## フレイドエッジサイト(FES)の $^{137}\text{Cs}$ 親和性を評価する方法

フレイドエッジサイト以外の負電荷を大量のCaを使ってマスク  
→フレイドエッジサイトにKを投入→Kと放射性Csを競合させる

### 放射性セシウム捕捉ポテンシャル

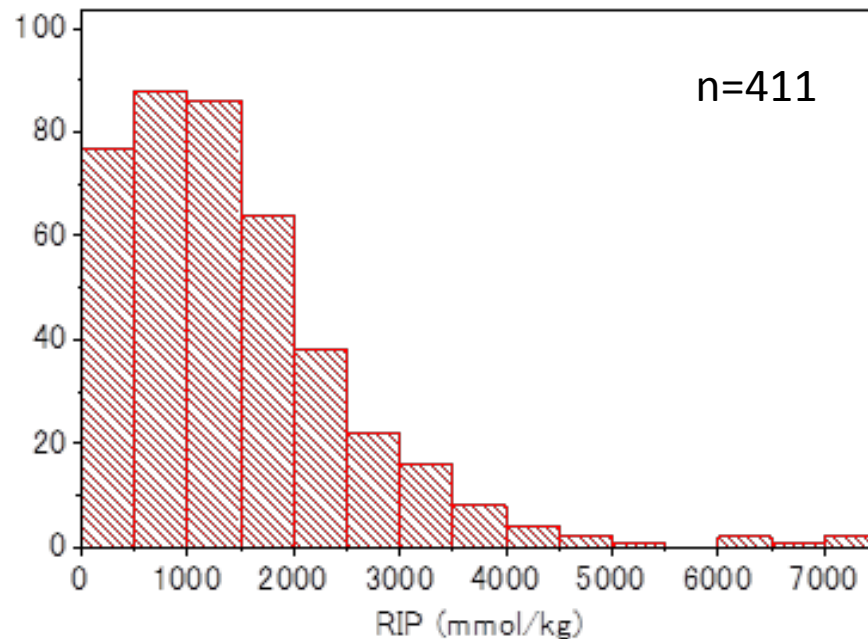
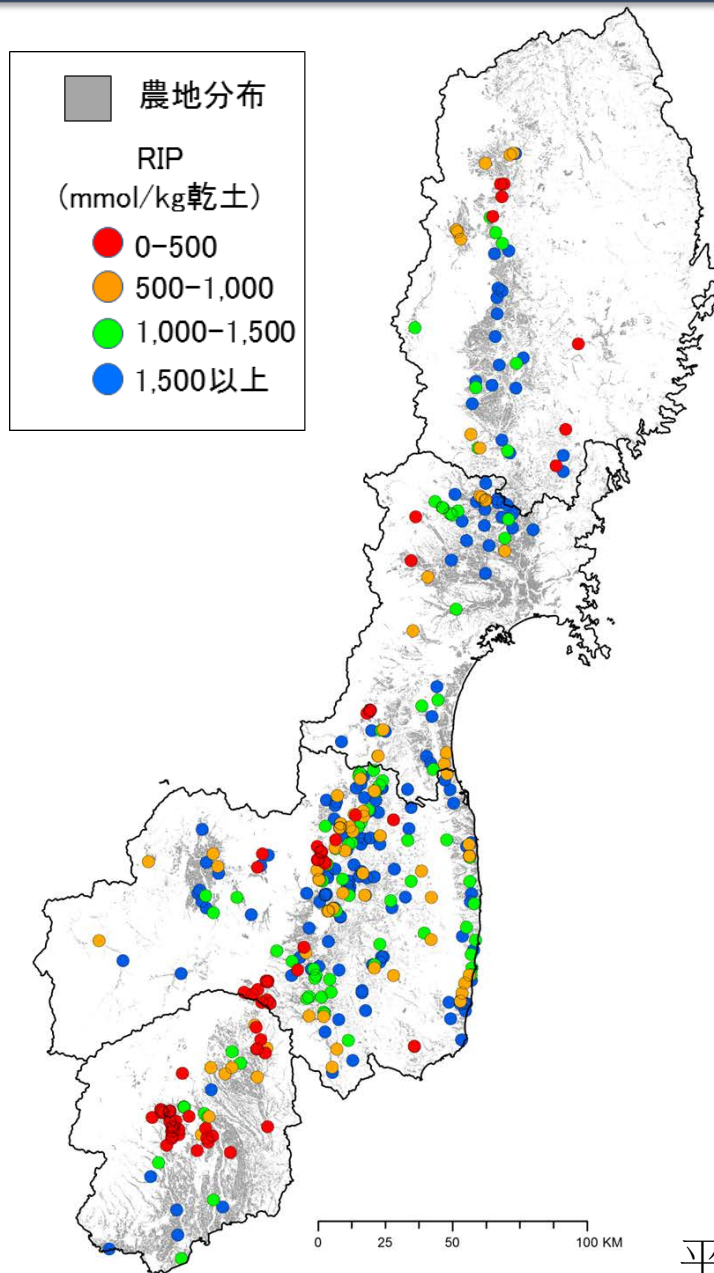
Radiocesium I nterception P otential

$$\text{RIP} = K_c^{\text{FES}}_{(\text{Cs-K})} \times [\text{FES}]$$

フレイド・エッジサイト(FES)におけるCsの  
Kに対する吸着選択係数(≒1000)

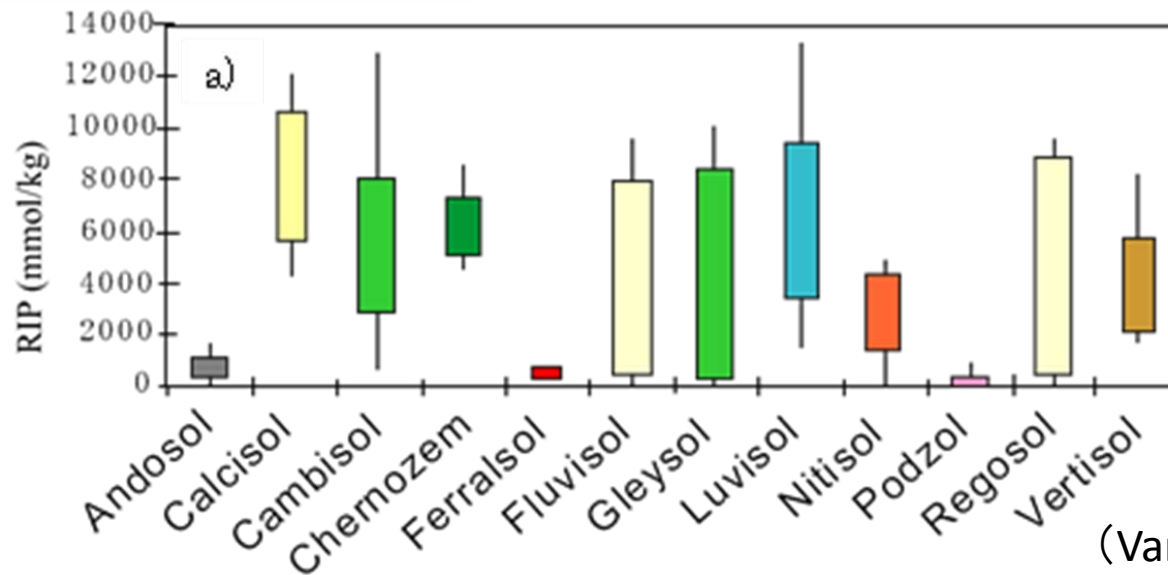
土壤1kgあたりの  
FES量

# 調査結果：農耕地土壌のRIPの分布

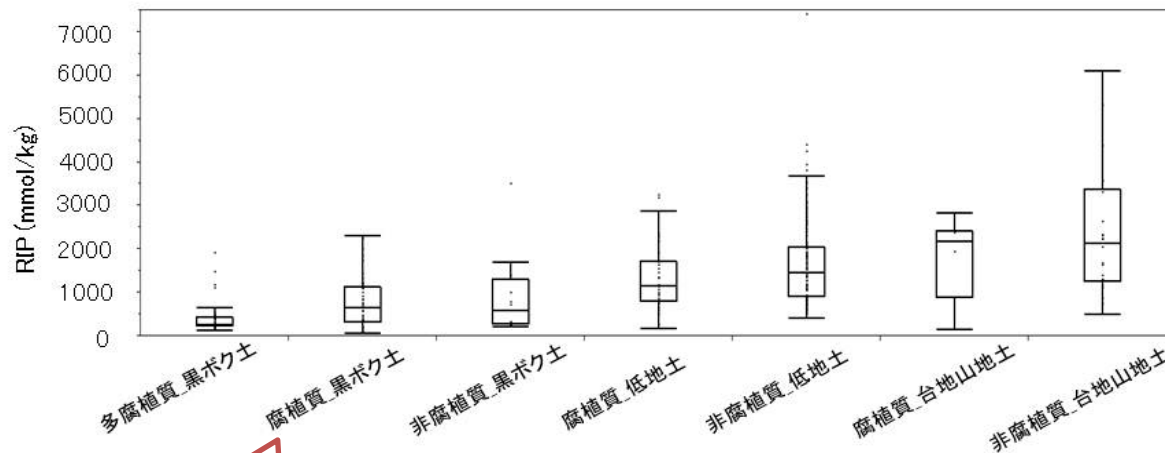


- 73～7400 mmol/kgの範囲にあった。
- RIPが1000 mmol/kg未満の地点が全体の60%。(作物中の放射性セシウム濃度が100Bq/kgを超過した地点の分析点数が多かったことも関連)

# 土壌分類とRIPの関係

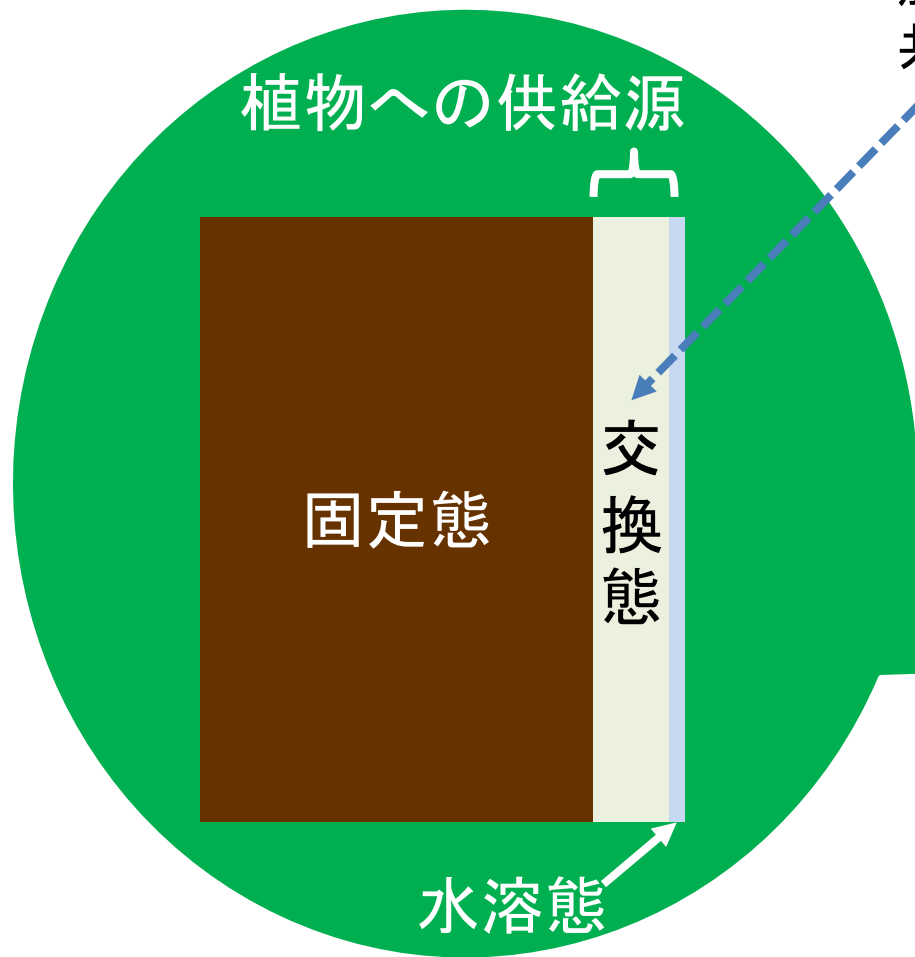


(Vandebroek et al., 2009)



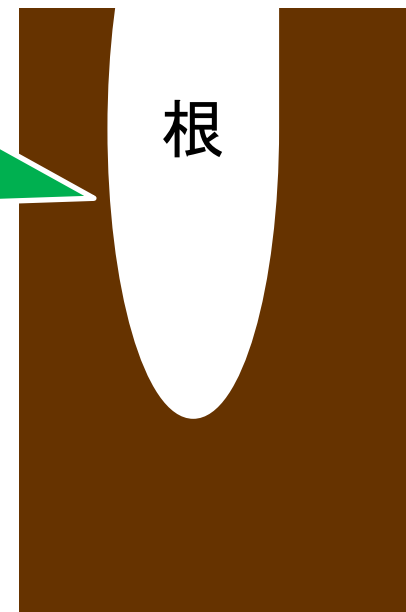
黒ボク土で低い傾向があるが、  
変動幅も大きい





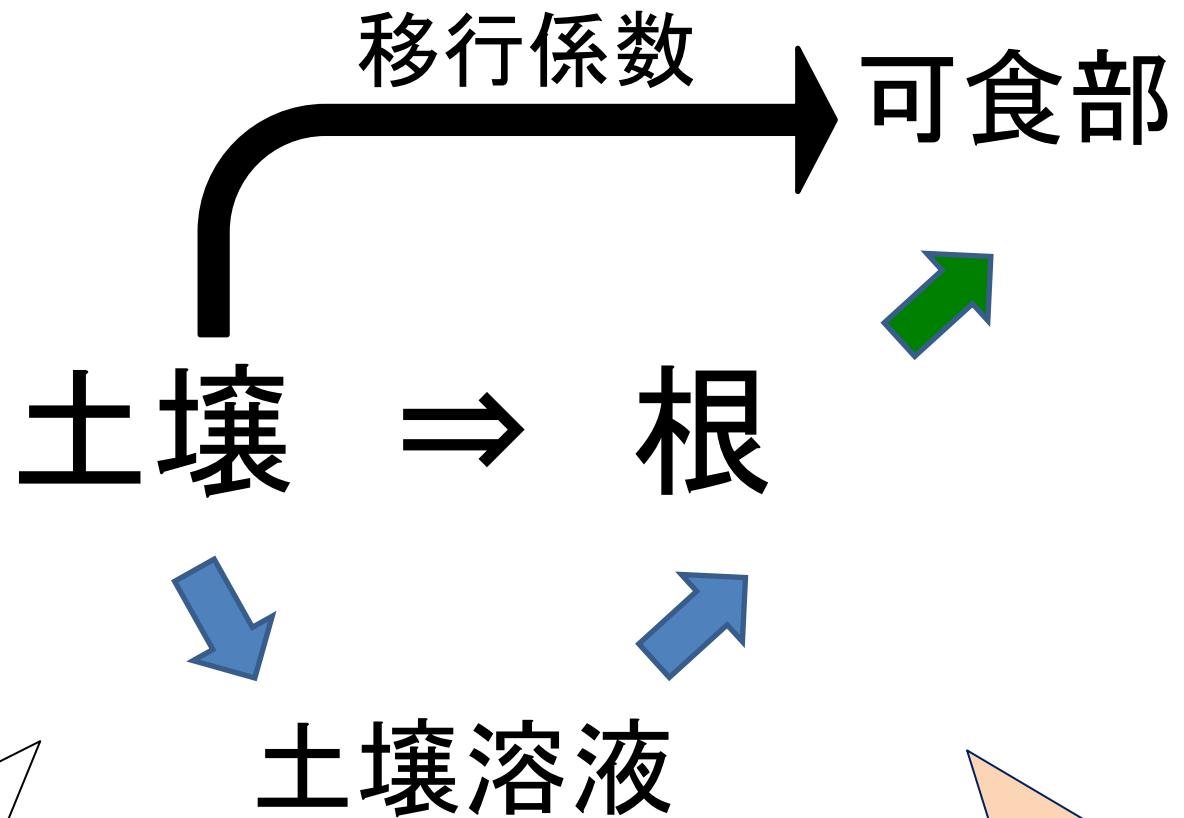
放射性Csとの交換は、共存イオンの種類と量に依存

$\text{NH}_4^+ > \text{K}^+$  ← 肥料成分



同じ植物種であっても移行係数が変動する一因

➡ 土壌の種類により植物が吸収できる画分の放射性Csの割合が異なるため



① 土壤－土壤溶液間の  
放射性Csの分配  
放射性Cs固定力  
共存イオンの影響

② 経根吸収  
共存イオンの影響

# CsはKと同じ輸送システムを經由して 吸収される

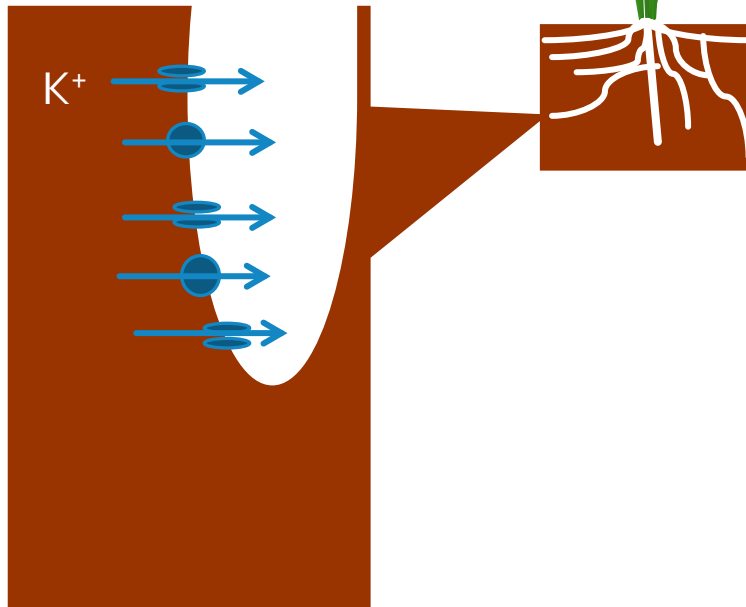
Kが不足



膜輸送タンパク質の発現が増大



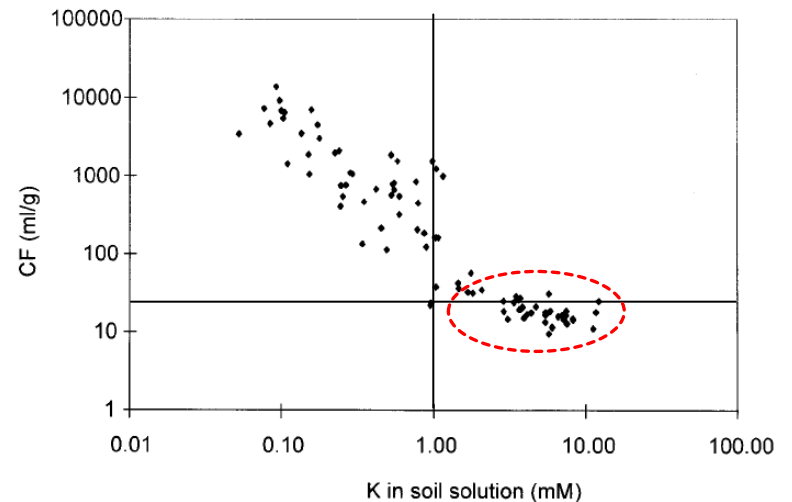
Cs吸収量も増える



Kが増えるとCs吸収量が減る



KとCsの吸収は競合関係にある



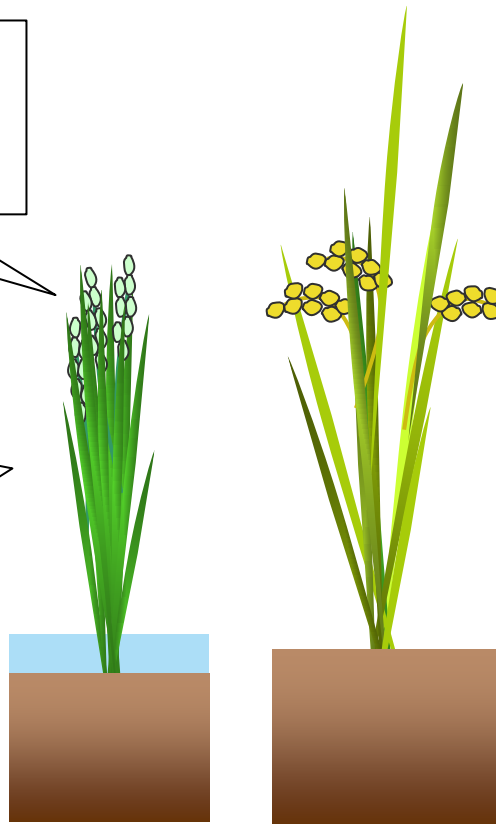
土壤溶液濃度が1mMより高い場合は、  
K濃度と植物のCs吸収量に明確な関  
係があらわれない

# 植物体内でのCsとKの分布・移行は異なる

(Tsukada et al., 2000, 2008, 津村ら、1984によるイネの研究例)

Csは穂ばらみ期～結実初期にかけて、葉面に付着したCsは、玄米へ移行

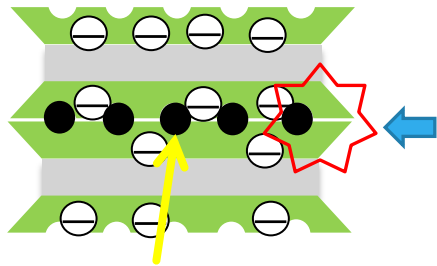
Kは新たな葉身に移動しやすい  
cf.  
Csは古い葉身にとどまりやすい



玄米中濃度/全地上部中濃度  
Cs:11～23%、K:8～11%

↓  
相対的にCsはKよりも玄米に移行しやすい  
(絶対量は少ない)

# 植物種によってはKが不足すると、粘土鉱物に固定されたCsを吸収できる可能性がある？

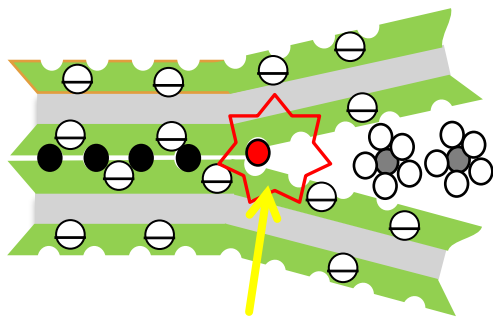


雲母の層間のK

イネ（リクトウ）、トウモロコシ

鉱物の構成成分（ケイ酸）ごと溶かして、Kを獲得

（杉山・阿江 2000 土肥誌）



フレイドエッジサイトに固定された<sup>137</sup>Cs

バーミキュライト、雲母に固定された<sup>137</sup>Csの吸収  
→ 最大2.8%

オオムギ>サツマイモ>トウモロコシ  
>イネ>エンドウ

（小島ら、1979 土肥誌）

# 森林では農地よりも放射性Csが動きやすい形態で存在

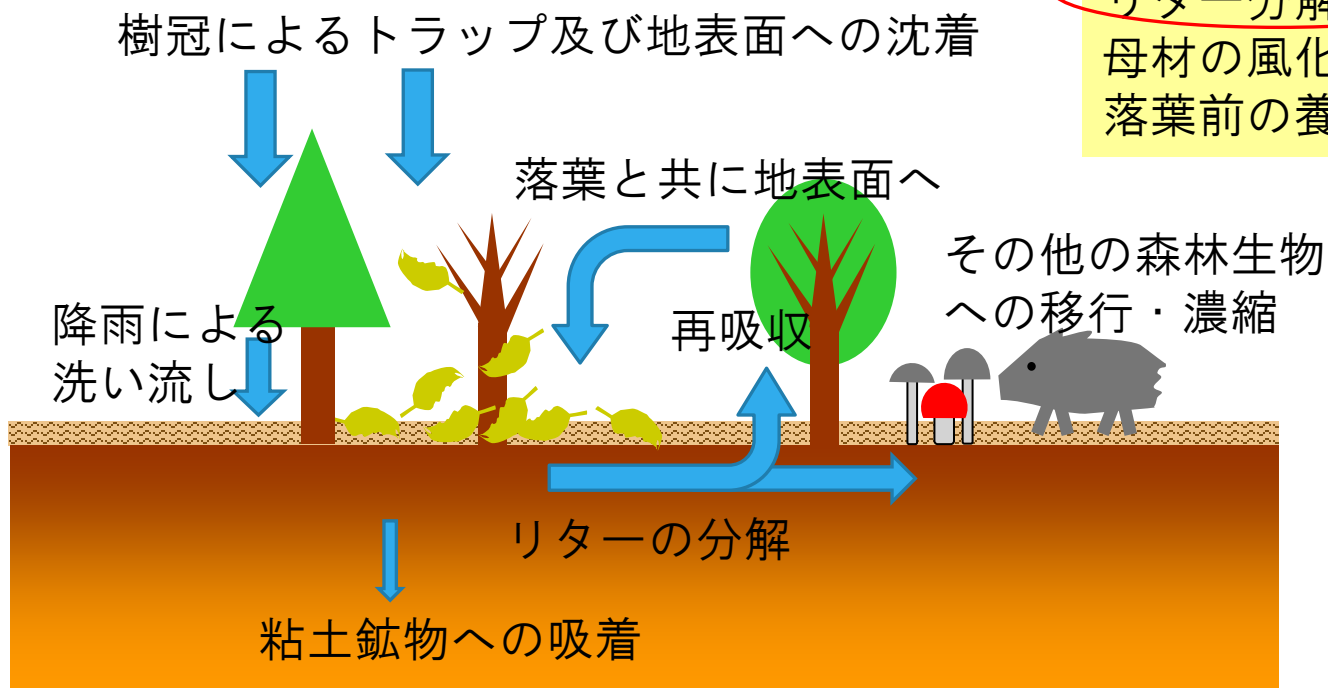
米国北東部の温帯林の例

K要求量

リター分解：87%

母材の風化：11%

落葉前の養分の引き戻し：4%



効率的に養分を再循環させる仕組みにより生態系内部で放射性Csが循環

動きやすい形態で放射性Csが保存される特徴 ➡ 農地への流入減となりうる？

# 作物可食部への移行を抑えるための対策

## 土壌側からはたらきかける方法

### 1. 取り除く(除染)

表土除去、微粒子の除去、  
~~フアイトレメディエーション、~~  
~~リーチング~~

### 2. 薄める

耕起、深耕

### 3. 閉じ込める

天地返し、資材施用

## 植物の特性を利用した方法

### 1. 品種(作目)の選択

### 2. K施肥

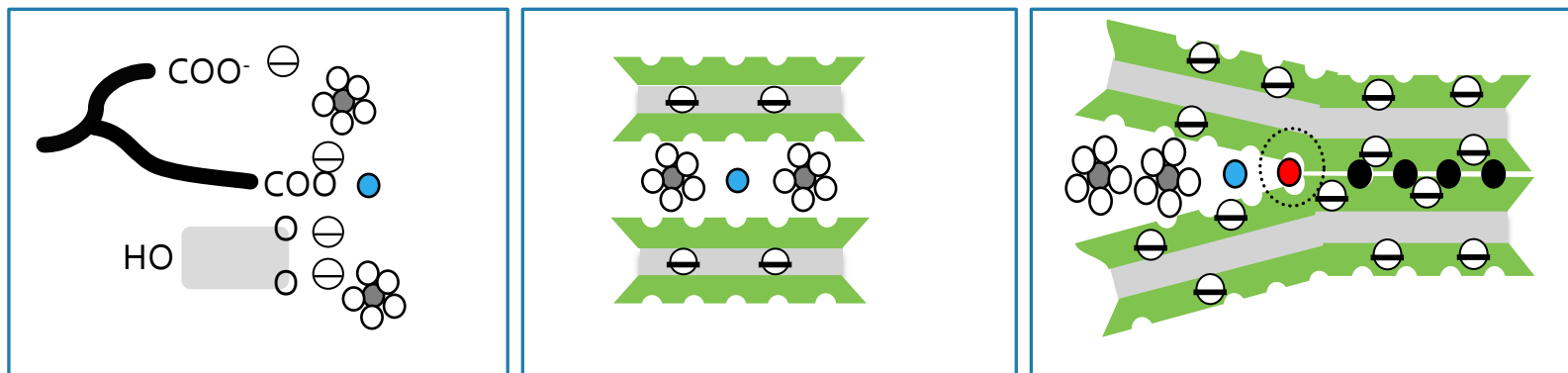
◆土壌にKが十分に存在する場合は効果は小さい。

◆Kによる土壌からの溶出促進とのバランスも考慮する必要

# まとめ

半減期の長いセシウム<sup>137</sup>は、  
長期間土壌にとどまってしまう

土壌中では放射性セシウムの大部分は、粘土の持つ  
フレイド・エッジ・サイトに閉じ込められる。



交換態

←  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ により溶出促進

植物に吸収されるのは  
土壌中放射性Csのごく一部

cf.

K不足により植物吸収増大  
K施肥による吸収抑制



- 本研究の一部は、平成23年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」および平成24年度科学技術戦略推進費「ほ場環境に応じた農作物への放射性物質移行低減対策確立のための緊急調査研究」による成果です。