



# ENEP

Expert Program of  
Environmental Management and  
Prognosis of Nuclear Emergencies

原子力災害による環境・生態系影響リスクマネジメントプログラム

環境科学専攻  
春AB 木1

# 原子力災害 環境影響評価論 I

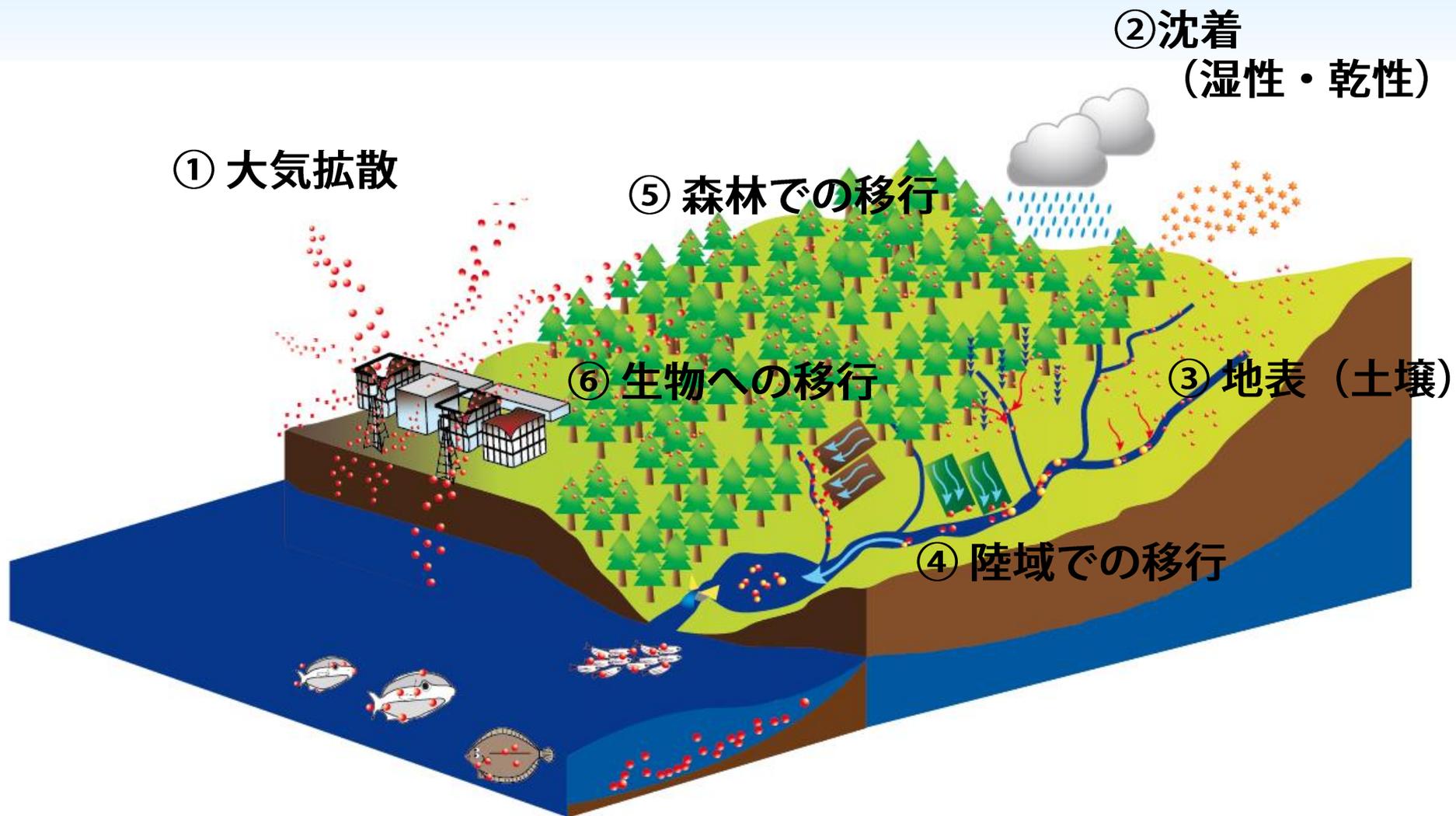
環境中移行・評価手法(1) 土壌中の分布・移行

高橋 純子

takahashi.junko.ka@u.tsukuba.ac.jp

居室:総合研究棟A705

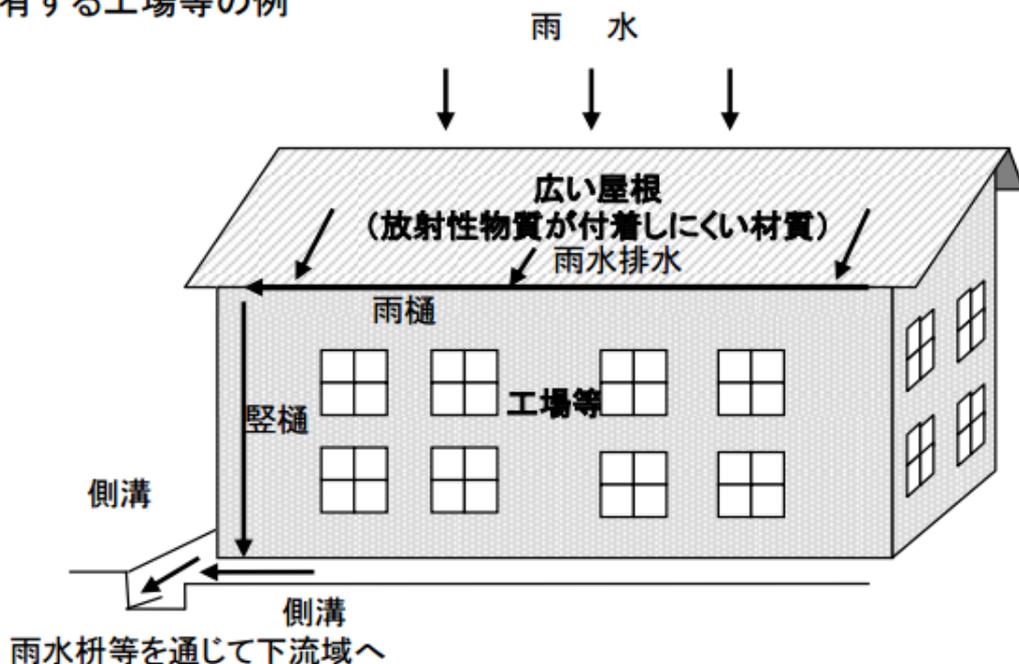
# 放射性物質の環境中移行



# 放射性セシウムは土壤に吸着する

■高い空間線量率が測定されることが予測される箇所  
(環境省『放射性物質による局所的汚染箇所への対処ガイドライン』(2012)より)

●広い屋根を有する工場等の例



土壤が局所的にしか存在しない都市部では、ホットスポットが形成されやすい。

放射性物質が付着しにくい材質の広い面積の屋根を有する工場等においては、放射性物質を含む大量の雨水排水が、側溝から雨水枡等を通じて下流域に流出していく。

図2 放射性物質が大量に流出しやすい集水域の施設の例

# 土壌とは？



## 粒子

粒（固体）だけではなく、  
土壌には空気も水も含まれている。

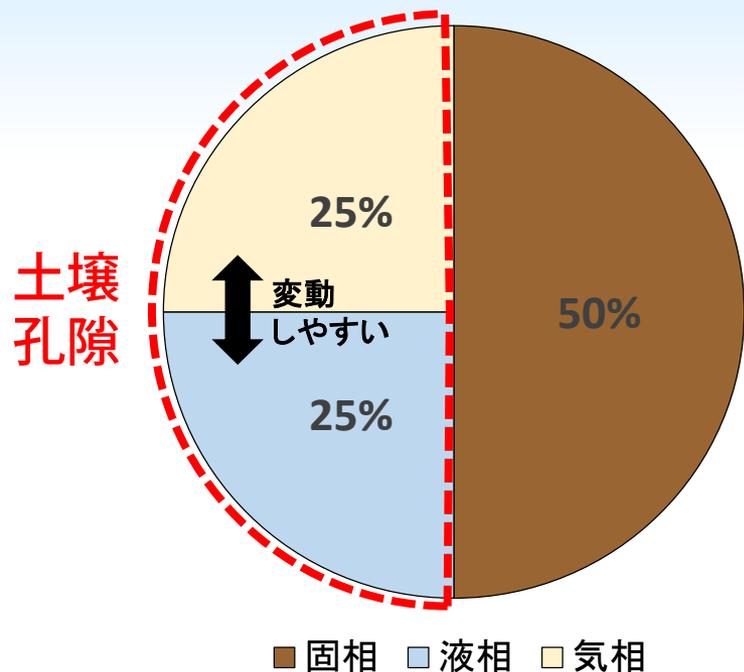
## 層

土壌とは、地表面に薄く広がる空間  
全体（構造体）を指す。

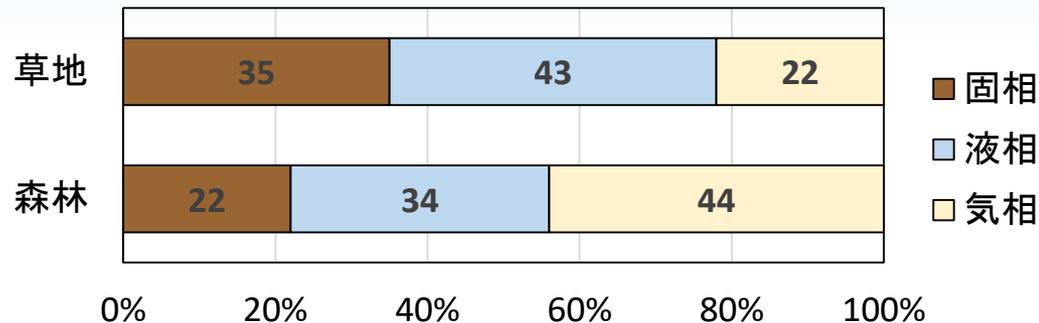
（粒の部分を『土壌物質』といい  
区別する場合がある。）



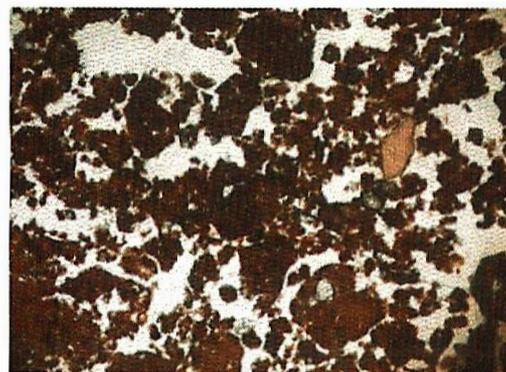
# 固相・液相・気相の割合は？



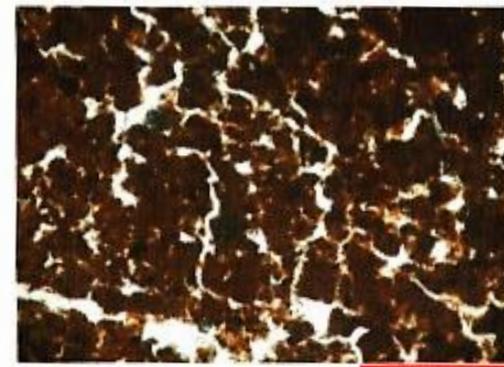
■筑波大学構内の土壤(表層0-5cm)の三相分布



■土壤薄片の顕微鏡写真



1 mm



1mm

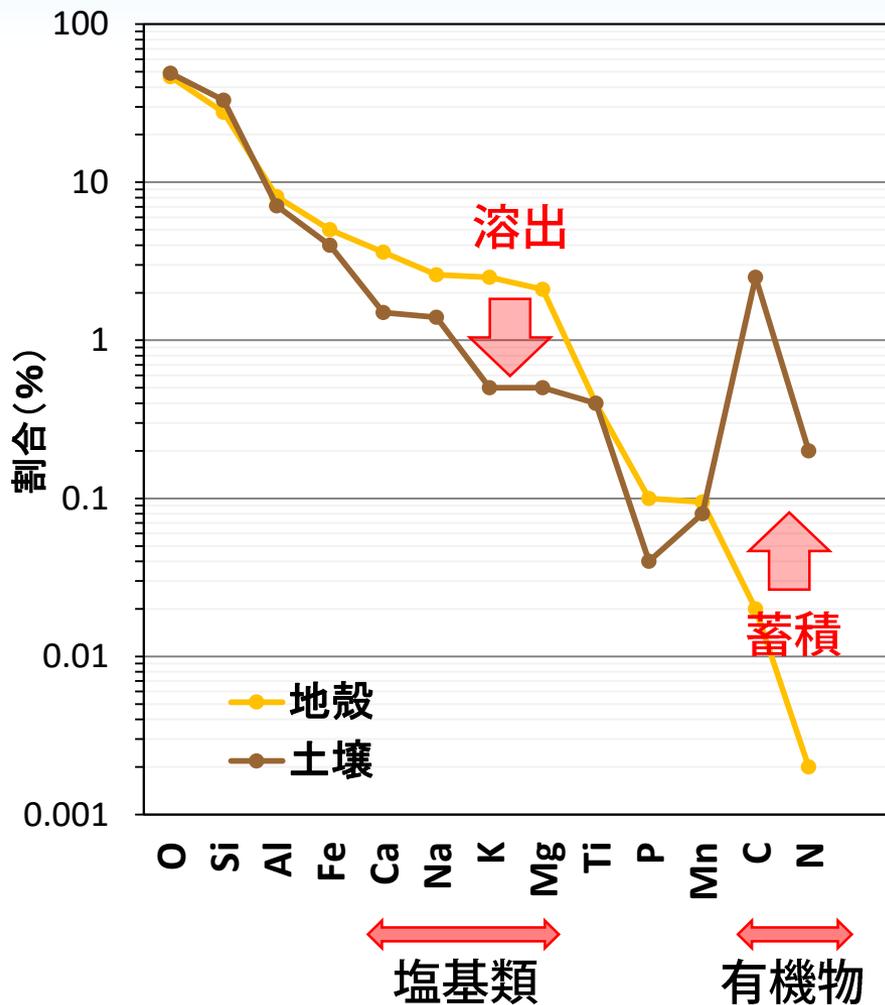
大小様々な孔隙がある。  
→排水性・保水性の両立。  
好氣的・嫌氣的の両立。

極めて多様な環境が存在。

写真：中塚（2016）『高収量自然栽培圃場の土壤微細形態学的特徴と土壤品質評価』より転載

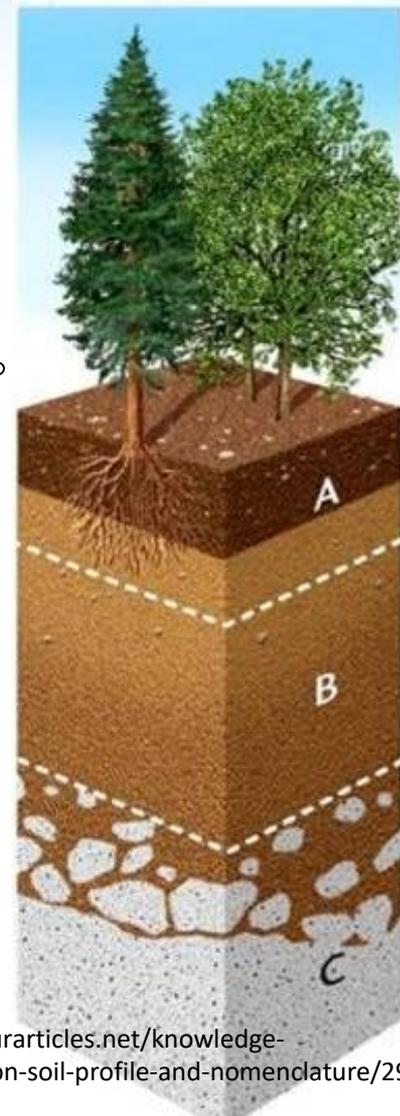
# 土壌の元素組成は？

■地殻と土壌の元素組成の比較  
(浅海, 2001 ほかより作成)



雨や生物の作用による塩基類の溶出と有機物の蓄積により、元の岩石とは異なる性質の層が形成される。

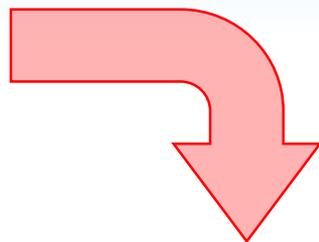
無機物（岩石）と有機物（生物）の間に位置する土壌は、まさに有機物と無機物が混ざりあった複合体を形成している。



# 土壌の無機成分



土壌中の有機物と無機物を物理的に完全に分離することは不可能。



有機物を酸化分解にて除去  
粒子のサイズで分画

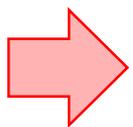


地表で生じる岩石の物理的な風化ではシルトサイズしか破碎されず、粘土が形成されるには、**化学的・生物**的な作用が不可欠。従って、粘土の存在は土壌の大きな特徴であり、もとの岩石（一次鉱物）と性質も大きく異なることから、粘土は**二次鉱物**とも呼ばれる。

# セシウムは粘土鉱物に強く吸着する

Sawhney, B. (1972). Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: a review. *Clays and Clay Minerals*, 20, 93–100.

- $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$ などのある種の1価のイオンは、他の陽イオンの存在下でもはるかに選択的に粘土鉱物に吸着する。(例えば、Krishnamoorthy and Overstreet, 1950)
- 粘土鉱物の中でも、イライトやバーミキュライトでは $Cs^+$ を選択的に吸着するが、カオリナイトやモンモリロナイトではこのような選択的吸着は生じない。(Sawhney, 1964)
- このような $Cs^+$ 選択性は、 $Cs$ 濃度が高くなるほど小さくなる。(Sawhney, 1970)
- 雲母類の風化は外縁部から始まり、内部に向けて進行するため、風化した雲母(イライト)には、中心の非膨潤層と外縁部の膨潤層が存在する。(例えば、Walker, 1956; Mortland 1958)
- 雲母類の層間の $K^+$ を除去し始めた初期には $Rb^+$ 選択性が増加するが、完全に $K^+$ を除去してしまうと、選択性は減少する。(LeRoux and Rich, 1969)



$Cs^+$ は、風化した雲母類に存在すると考えられるフレイド・エッジ・サイト(FES; 非膨潤層と膨潤層の境)に入り込むと、層間の脱水と収縮を促し、結果的に固定と呼べるほど強い力で粘土鉱物に保持される。

# 『粘土』の定義

## ■分野によって区分が異なる

	礫	砂 (粗砂)	砂 (中砂)	砂 (細砂)	シルト	粘土
土壌学	>2mm	>0.2mm		>0.02mm	>0.002mm	<0.002mm
地質学	>2mm	>1/2 (0.5mm)	>1/2 <sup>2</sup> (0.25mm)	>1/2 <sup>4</sup> (0.625mm)	>1/2 <sup>8</sup> (0.0039mm)	<1/2 <sup>8</sup> (0.0039mm)
地盤工学	>2mm	>0.425mm		>0.075mm	>0.005mm	<0.005mm

## ■有機物の有無

粘土

Clay mineral : 粘土鉱物

有機物を除き、一つひとつの粒子を完全にバラバラにした状態

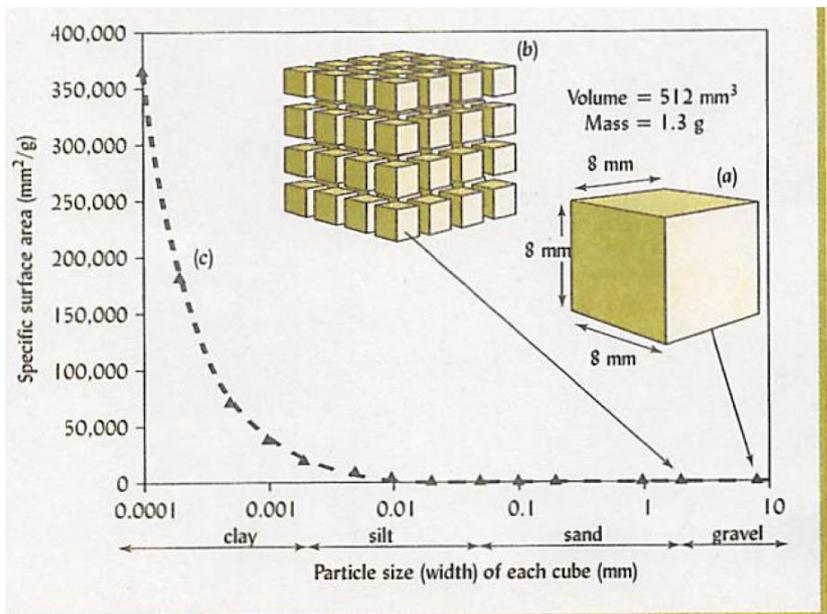
Fine particle : 粒径の細かい粒子

粘土鉱物は通常有機物により高次の団粒を形成しており、大きな粒径を示す。

# 『粘土』の定義

■分野によって区分が異なる

	礫	砂 (粗砂)	砂 (中砂)	砂 (細砂)	シルト	粘土
土壌学	>2mm	>0.2mm		>0.02mm	>0.002mm	<0.002mm
地質学	>2mm	>1/2 (0.5mm)	>1/2 <sup>2</sup> (0.25mm)	>1/2 <sup>4</sup> (0.625mm)	>1/2 <sup>8</sup> (0.0039mm)	<1/2 <sup>8</sup> (0.0039mm)
地盤工学	>2mm	>0.425mm		>0.075mm	>0.005mm	<0.005mm



■粒子の直径が小さくなると、**表面積**は指数的に増加する。

# 粘土鉱物の種類

## 1. 層状ケイ酸塩鉱物

a) 1:1型鉱物

b) 2:1型鉱物

c) 2:1:1型鉱物

d) 非晶質・準晶質鉱物

## 2. 酸化物・和水酸化物鉱物

a) ケイ酸鉱物

b) アルミニウム鉱物

c) 鉄鉱物

## 3. その他の塩鉱物

a) リン酸塩鉱物

b) 硫酸塩鉱物

c) 炭酸塩鉱物

# ケイ酸塩鉱物（一次鉱物）

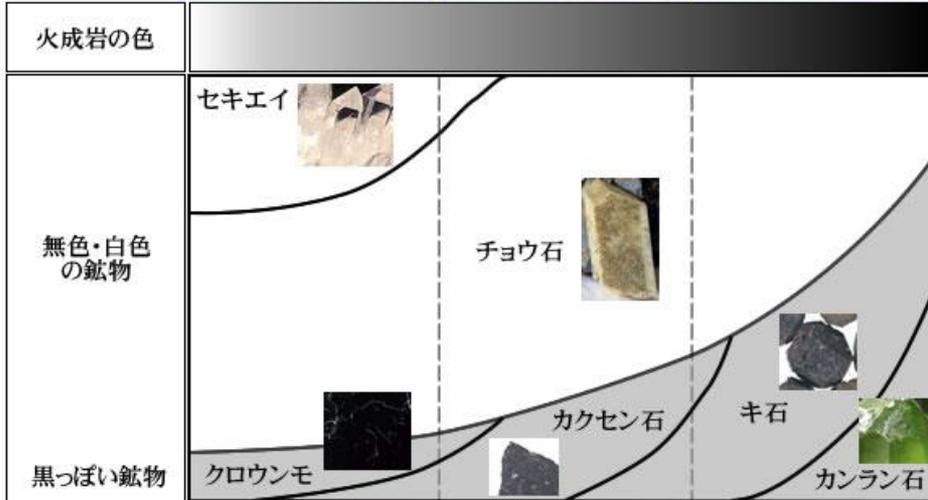


Siに対してOが多いほど、負電荷が大きくなる。  
 (=相方となる塩基を必要とする。)

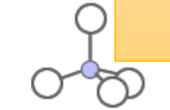
マグマ（ケイ酸塩の溶融物）が冷却する過程で様々なケイ酸塩の結晶（一次鉱物）が晶出し、火成岩を形成する。

【火成岩の分類】

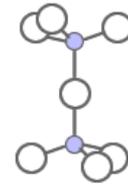
<b>火山岩</b> (斑状組織)	流紋岩 	安山岩 	玄武岩 
<b>深成岩</b> (等粒状組織)	花こう岩 	せん緑岩 	斑れい岩 



## カンラン石



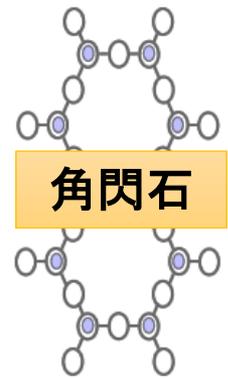
ネソ珪酸塩



ソロ珪酸塩

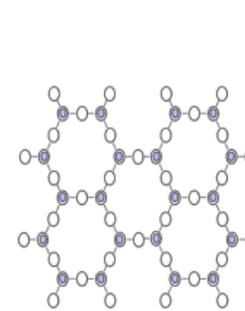


## 輝石

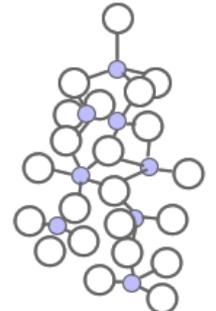


## 角閃石

イノ珪酸塩



フィロ珪酸塩



テクト珪酸塩

○ 酸素

## 雲母

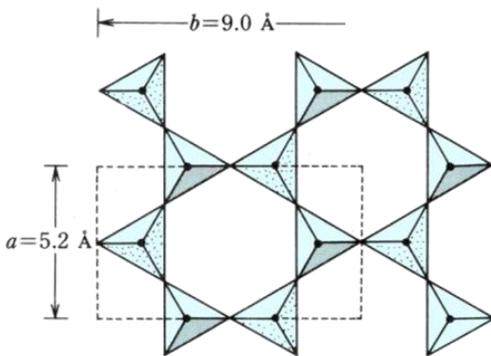
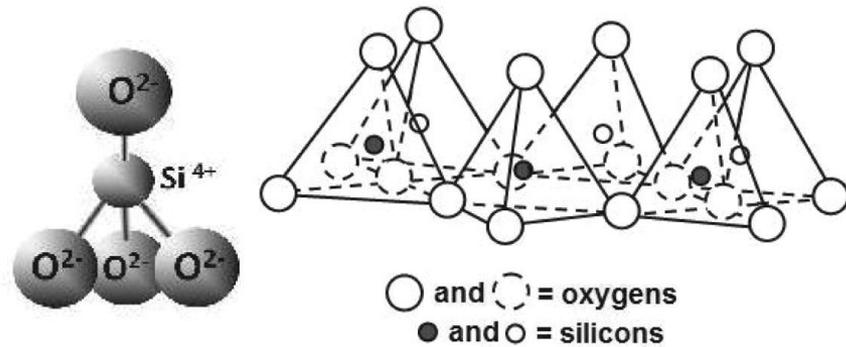
◎ 珪素に

## 石英 長石

# 層状ケイ酸塩鉱物（二次鉱物）

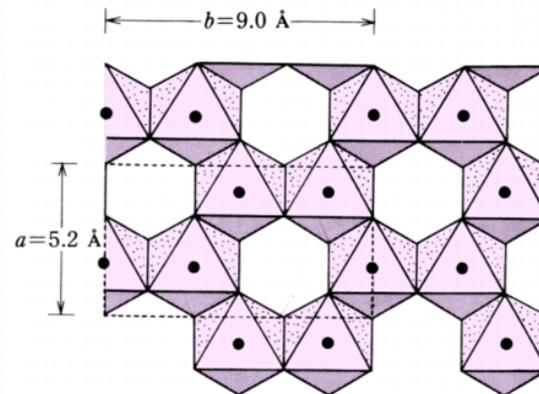
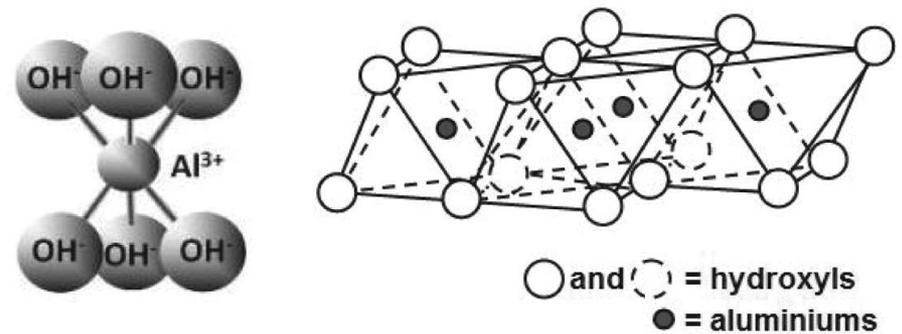
化学的・生物的作用により、一次鉱物中の塩基類やAl, Siは次第に溶解する。  
 溶解・遊離したAl, Siは、再び酸化・重合をくり返し、  
 それぞれケイ酸四面体とアルミニウム八面体の**六員環シート**を形成する。

## ■ケイ酸四面体シート



単位格子の  
 長さがほぼ  
 等しい。

## ■アルミニウム八面体シート(二八面体)



Siシートと  
 Alシートが  
 酸素を介し  
 て結合

# 2:1型層状ケイ酸塩鉱物

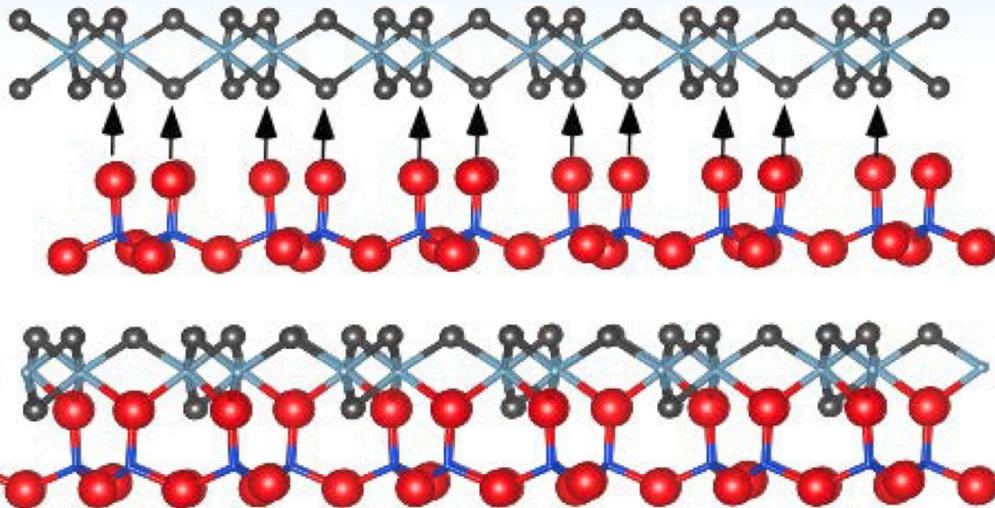


図 6.3 1 : 1 型層状ケイ酸塩における、ポリケイ酸塩層と水酸化アルミニウム層の結合（上）とそれによってできる層状ケイ酸塩鉱物の単位層の構造（下）。

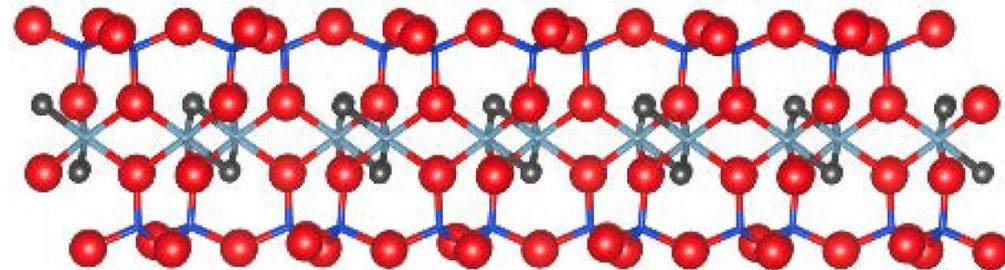


図 6.4 2 : 1 型層状ケイ酸塩鉱物の単位層の構造。赤球は酸素イオン，灰色球は水酸化物イオン。

水酸化Alシートの酸素と  
Siシートの酸素が共有結合。

Alシートは上下対称であるため、  
両側からの結合が可能。  
これを**2:1型ケイ酸塩鉱物**という。

1 : 1 型  
1層 = 0.7nm

2 : 1 型  
1層 = 1.0nm

2:1型ケイ酸塩粘土  
鉱物は、雲母鉱物と  
同じ結晶構造。

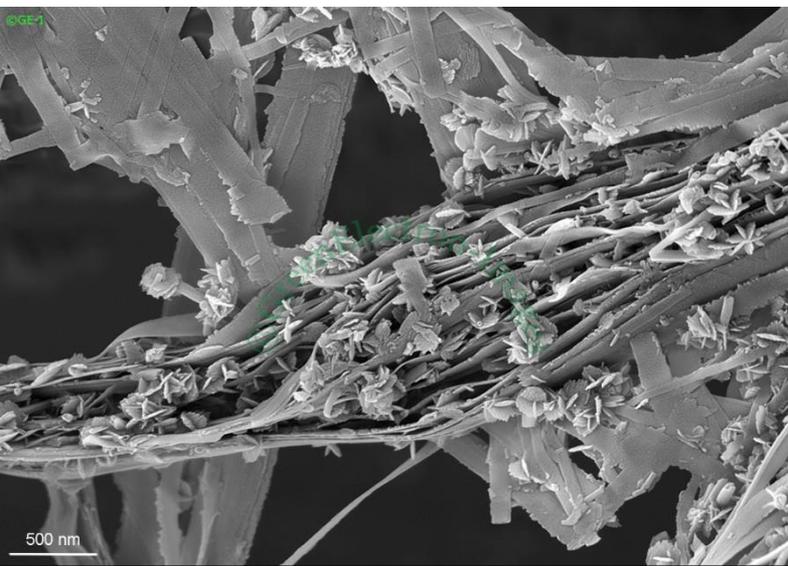
全てが1から重合し  
ているわけではなく、  
もともとの雲母の結  
晶構造片は二次鉱  
物の重要な素材。

# 同型置換と永久荷電

各シート中の $\text{Si}^{4+}$ や $\text{Al}^{3+}$ は、しばしばより価数の低い陽イオン ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Li}^{+}$ など) と置換する (同型置換)。

⇒正電荷が不足し、粘土鉱物は永続的に負電荷を持つ (永久荷電)。

⇒同型置換によって生じた負電荷は、陽イオンを保持することで電気的に中和されており、この陽イオンを層間に挟みながら、10~100層の積層を形成 (=層状ケイ酸塩鉱物)。



イライト：  
同型置換により、層を成したり、湾曲したりする。

画像: <http://www.greenelectron-images.co.uk/index.html>

## ■主なイオンのイオン半径

イオン種	イオン半径 (nm)	
$\text{Si}^{4+}$	0.042	Siシート内で置換可
$\text{Al}^{3+}$	0.051	
$\text{Fe}^{3+}$	0.064	
$\text{Mg}^{2+}$	0.066	Alシート内で置換可 (層間にも存在可)
$\text{Zn}^{2+}$	0.074	
$\text{Fe}^{2+}$	0.076	
$\text{Li}^{+}$	0.060	
$\text{Na}^{+}$	0.095	層間にものみ存在
$\text{Ca}^{2+}$	0.099	
$\text{K}^{+}$	0.133	
$\text{O}^{2-}$	0.140	
$\text{OH}^{-}$	0.155	

# 2:1型層状ケイ酸塩鉱物の分類

同型置換の位置と数で分類（一次鉱物の種類によらない）

⇒層間の距離や保持できる陽イオンの種類が決まり、異なる性質を持つ。

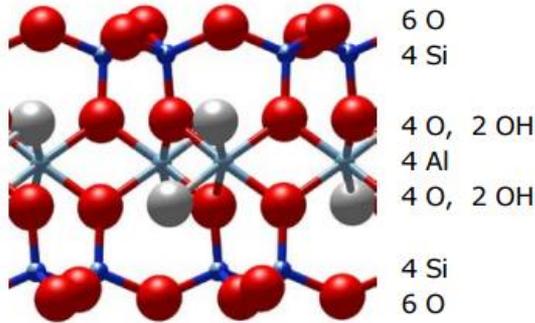
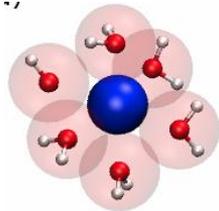


図 6.8 2 : 1 型層状ケイ酸塩鉱物の単位胞.

Na<sup>+</sup>: 0.95nm  
 水和Na<sup>+</sup>: 0.4nm  
 K<sup>+</sup>: 0.133nm



## ■2:1型ケイ酸塩粘土鉱物の分類 （同型置換の数でグルーピングされる）

グループ	主な同型置換の位置	単位胞あたりの同型置換数	層電荷	主な層間のイオン
スメクタイト モンモリロナイト バイデライト	Alシート Siシート	0.5~1.2	0.2~0.6	水和陽イオン
バーミキュライト	Siシート	1.2~1.8	0.6~0.9	水和陽イオン
イライト(雲母)	Siシート	1.4~2.0	0.6~1.0	Kイオン

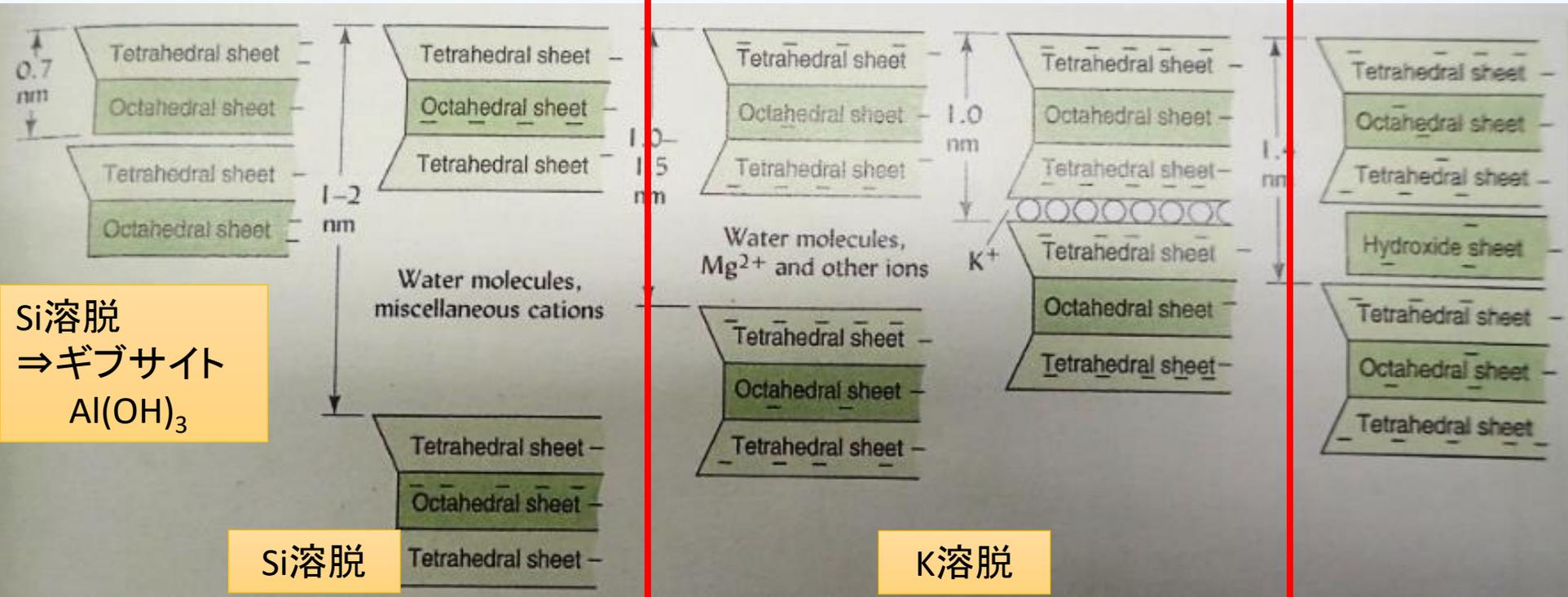
イライトでは、K<sup>+</sup>のサイズがちょうど六員環に収まり、安定に存在できるため、  
 (Na<sup>+</sup>やCa<sup>2+</sup>では小さすぎ、水和陽イオンでは大きすぎる) 選択的に層間に保持される。

# 層状ケイ酸塩鉱物の分類

同型置換：Al  
層電荷：0.2-0.6

同型置換：Si  
層電荷：0.6-0.9

同型置換：Si  
層電荷：0.6-1.0



Si溶脱  
⇒ギブサイト  
Al(OH)<sub>3</sub>

Si溶脱

K溶脱

1:1型  
カオリナイト

2:1型  
スメクタイト  
(モンモリロナイト)

2:1型  
バーミキュライト

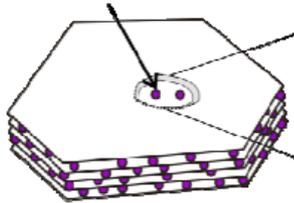
2:1型  
雲母  
イライト

2:1:1型  
クロライト

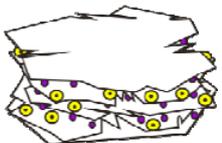
それぞれには、中間型が存在する。

# フレイド・エッジ・サイト

主に $K^+$ が  
固定されている



雲母類  
(2:1型層状ケイ酸塩)



風化した雲母類

●  $K^+$  ● 水和陽イオン

同形置換 ( $Si^{4+} \rightarrow Al^{3+}$ )  
により負電荷が生じる

中尾(2012)より改変

0.133 nm  $K^+$

5倍  $\wedge$

0.143 nm  $NH_4^+$

200倍  $\wedge$

0.169 nm  $Cs^+$

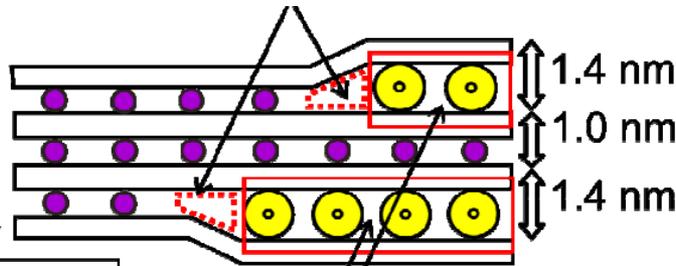
吸着

六員環  $\div$  0.12 nm

ケイ酸四面体シートの六員環が $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Cs^+$   
など非水和陽イオンとほぼ同じ大きさ

**$K^+$ と比べても、 $Cs^+$ は  
1000倍選択性が高い**

フレイド・エッジ・サイト(水和陽イオンは物理的に侵入できない)



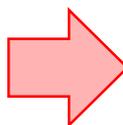
膨潤層 (バーミキュライト)

風化に伴い、端から徐々に $K^+$ が  
溶出し、層間が開いてくる。  
膨潤層と非膨潤層の境に  
非水和陽イオンしか侵入できない  
サイトがあり、 $Cs^+$ はここに固定。

# セシウムは粘土鉱物に強く吸着する

Sawhney, B. (1972). Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: a review. *Clays and Clay Minerals*, 20, 93–100.

- $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$ などのある種の1価のイオンは、他の陽イオンの存在下でもはるかに選択的に粘土鉱物に吸着する。(例えば、Krishnamoorthy and Overstreet, 1950)
- 粘土鉱物の中でも、イライトやバーミキュライトでは $Cs^+$ を選択的に吸着するが、カオリナイトやモンモリロナイトではこのような選択的吸着は生じない。(Sawhney, 1964)
- このような $Cs^+$ 選択性は、 $Cs$ 濃度が高くなるほど小さくなる。(Sawhney, 1970)
- 雲母類の風化は外縁部から始まり、内部に向けて進行するため、風化した雲母(イライト)には、中心の非膨潤層と外縁部の膨潤層が存在する。(例えば、Walker, 1956; Mortland 1958)
- 雲母類の層間の $K^+$ を除去し始めた初期には $Rb^+$ 選択性が増加するが、完全に $K^+$ を除去してしまうと、選択性は減少する。(LeRoux and Rich, 1969)

  $Cs^+$ は、風化した雲母類に存在すると考えられるフレイド・エッジ・サイト(FES; 非膨潤層と膨潤層の境)に入り込むと、層間の脱水と収縮を促し、結果的に固定と呼べるほど強い力で粘土鉱物に保持される。

# Aging効果

■通常、静電的な吸着やイオン交換反応は、瞬間的（ $\mu$ 秒～分）に生じる。  
 ⇒Cs<sup>+</sup>がFESへ固定されるためには、膨潤層内に存在する水和陽イオンとのイオン交換反応を繰り返す必要があり、時間がかかる (Comans et al., 1994)。月～年単位の時間の経過とともに、徐々に固定され、動きにくくなる (Aging効果)。

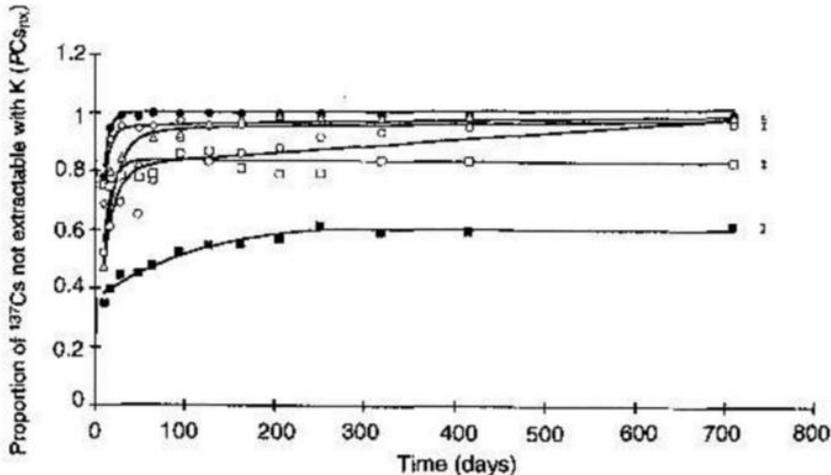


Fig. 5. The variation in  $PC_{s,ex}$  with time for all soils. ○, Wastwater; □, Sellafield; ■, Corney2; ◇, Corney1; ●, Ennerdale; △, Woodend; —, 2<sup>nd</sup> order polynomial.

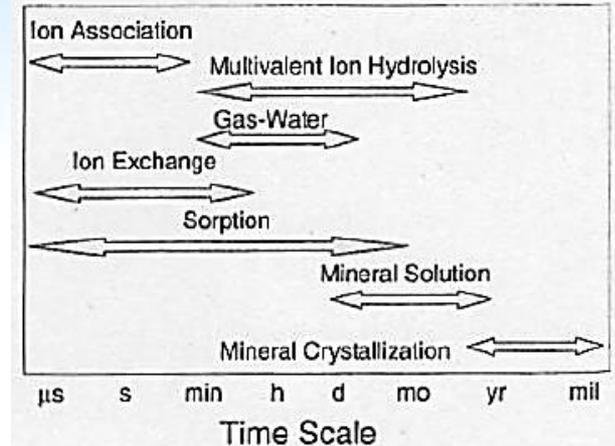


FIGURE 7.2. Time ranges required to attain equilibrium by different types of reactions in soil environments. From Amacher (1991), with permission.

図: Brady, N. C., & Weil, R. R. (1996). The nature and properties of soils (No. Ed. 11). Prentice-Hall Inc. より転載

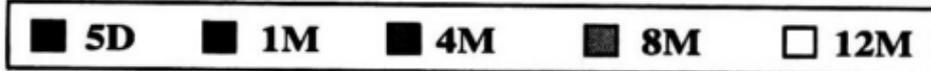
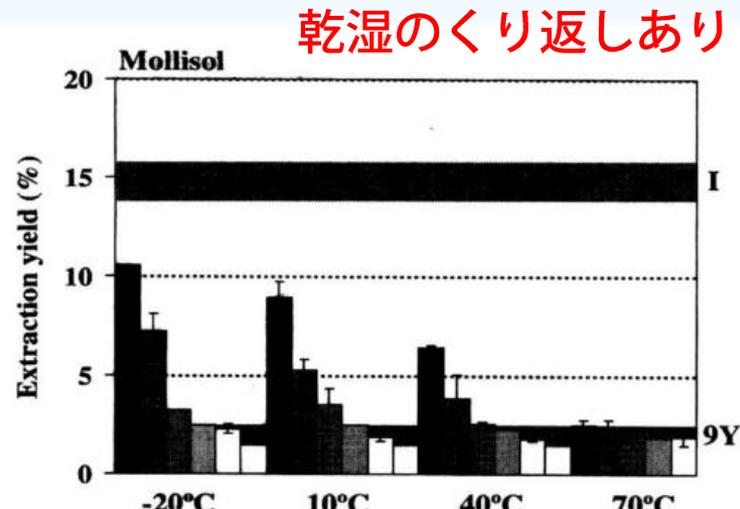
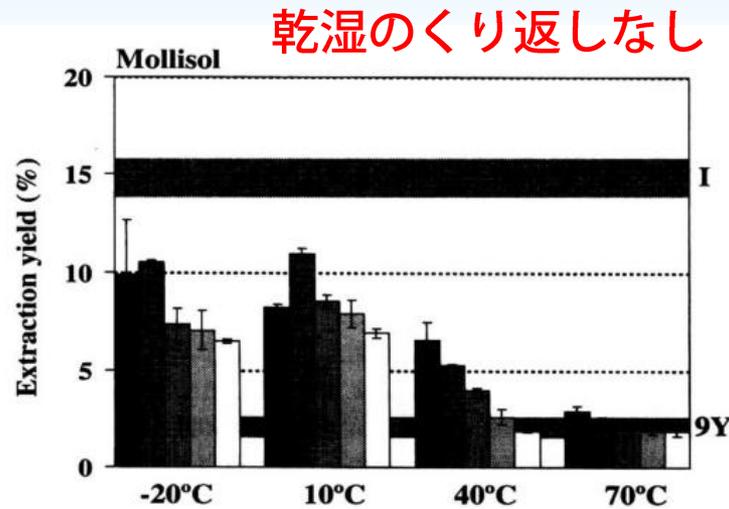
■実験的に土壤にセシウム137を添加したところ、700日を経過してもまだ吸着量が増加する土壤がある。(Absalom et al., 1995)

Absalom, J. P., Young, S. D., & Crout, N. M. J. (1995). Radio-caesium fixation dynamics: measurement in six Cumbrian soils. *European Journal of Soil Science*, 46(3), 461–469.

# Aging効果

■乾燥と湿潤のくり返しが固定化を促進する(Roig et al., 2007).

1M塩化アンモニウム溶液  
で抽出される割合(%)



※ストロンチウムでは、このようなAging効果は認められない。

Roig, M., Vidal, M., Rauret, G., & Rigol, A. (2007). Prediction of radionuclide aging in soils from the Chernobyl and Mediterranean areas. *Journal of Environmental Quality*, 36(4), 943–952.

■528地点の深度分布のモデル解析 (Bossew and Kirchner, 2004)

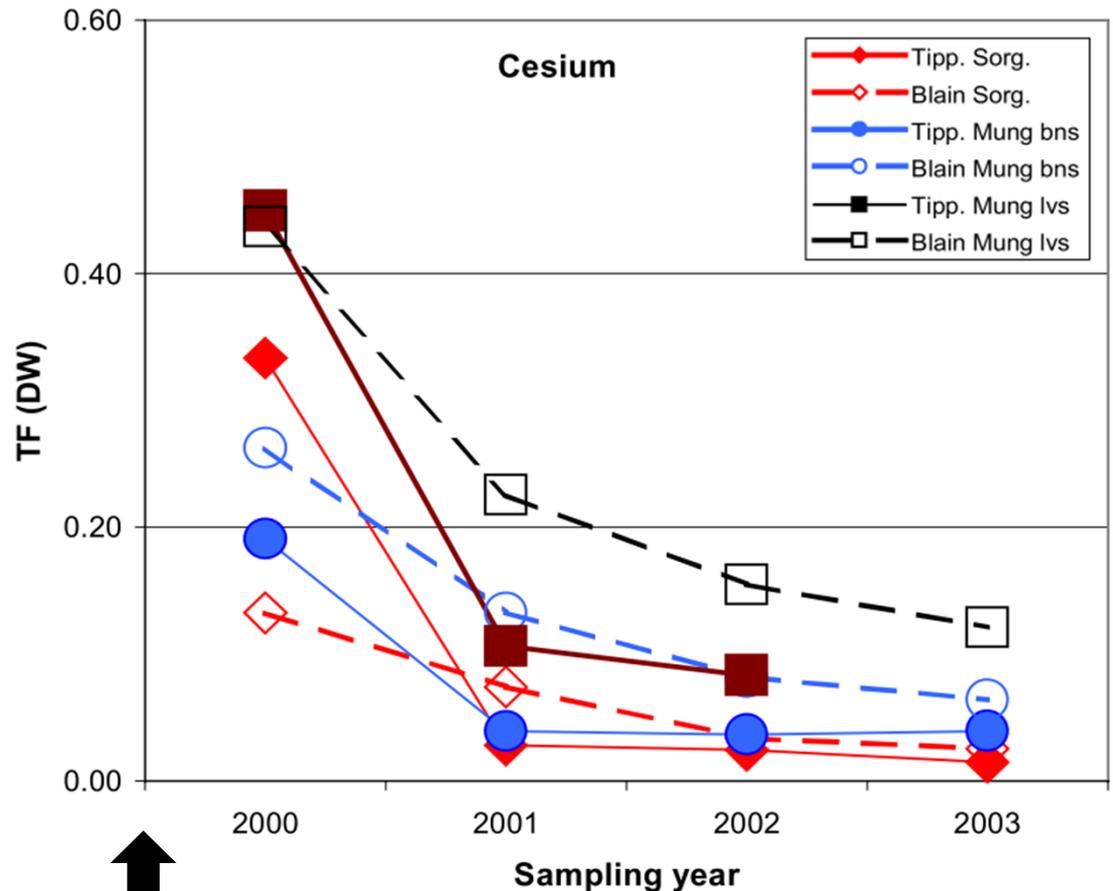
グローバルフォールアウト由来セシウム137：移流速度 平均0.1cm/年

チェルノブイリ事故由来セシウム134：移流速度 平均0.3cm/年

# Aging効果

- 時間の経過とともに  
(固定化の進行とともに)  
作物への移行量は  
減少する。
- ※作物や土壌の種類に  
よってその効果は異なる

$$\text{TF(移行係数)} = \frac{\text{作物中のCs濃度}}{\text{土壌中のCs濃度}}$$



1999年10月に<sup>137</sup>Csを添加

IAEA(2006)

# 土壌中のFESの存在量

## ■主要な土壌グループのRIP(mmol/kg)

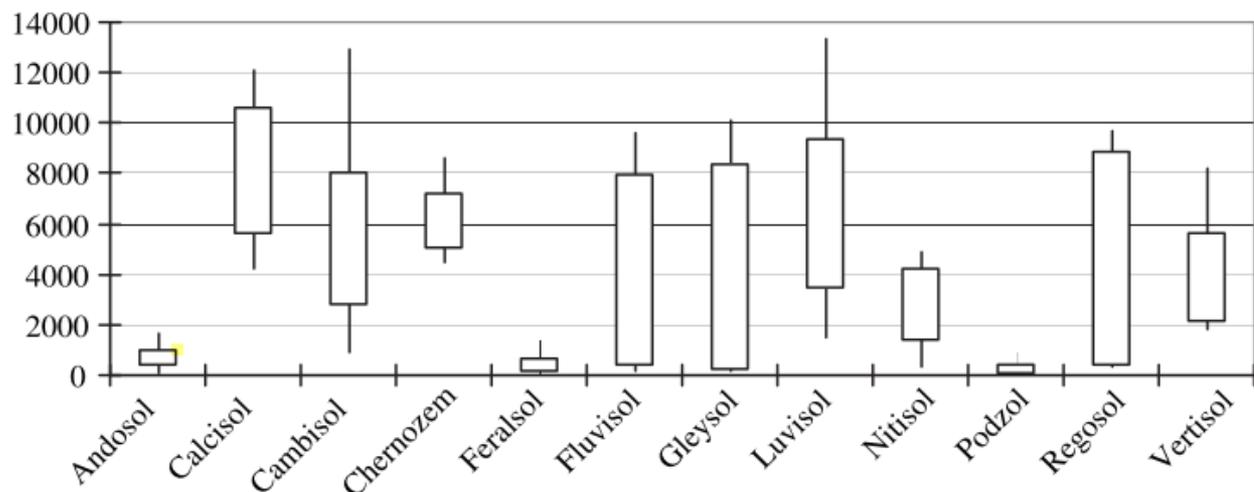


Fig. 1. Confidence interval and maxima and minima of RIP [mmol.kg<sup>-1</sup>] for major reference soil groups. Bars are 95th percentile confidence bounds and lines indicate maxima and minima.

RIP/1000(mmol/kg)  
でFESの量が近似  
できる。

チェルノブイリ  
汚染地域

<sup>137</sup>Cs 37 kBq m<sup>-2</sup>

<sup>137</sup>Cs 37 kBq

≐ 1.1507 × 10<sup>-8</sup> (g)

≐ 8.4 × 10<sup>-8</sup> (mmol)

土壌に沈着した放射性セシウム量は、土壌中のFES量と比較して極めて少ない。  
⇒ほとんどの土壌において、放射性セシウムを吸着する容量は十分足りているため、

沈着初期の放射性セシウムは**ごく表層にそのほとんどが保持される。**

図: Vandebroek, L., Van Hees, M., Delvaux, B., Spaargaren, O., & Thiry, Y. (2012). Relevance of Radiocaesium Interception Potential (RIP) on a worldwide scale to assess soil vulnerability to <sup>137</sup>Cs contamination. Journal of Environmental Radioactivity, 104(null), 87–93.

# 土壌中の放射性Csの深度分布

初期の深度分布は、指数関数式

$$C(x) = C(0) \cdot e^{-\frac{x}{\alpha}}$$

で近似することができる。(Beck, 1966)  
ただし、

$C(x)$  = 深度  $x$  cm のときのCs濃度

$C(0)$  = 深度 0 cm のときのCs濃度

$\alpha$  は分布の形状を示すパラメータで、  
**緩衝深度** と呼ばれる。

$\alpha$  が大きいほど深くまで浸透していることを示し、  
 $x = \alpha$  cm のとき、  
 $C(0)$  が  $1/e$  ( $\doteq 1/2.7$ ) となる。

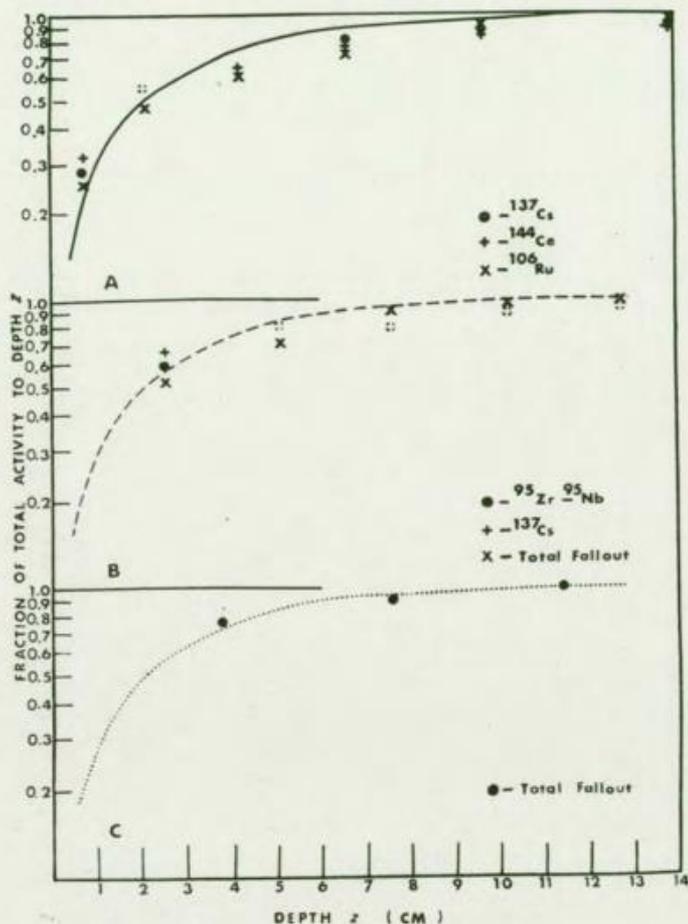
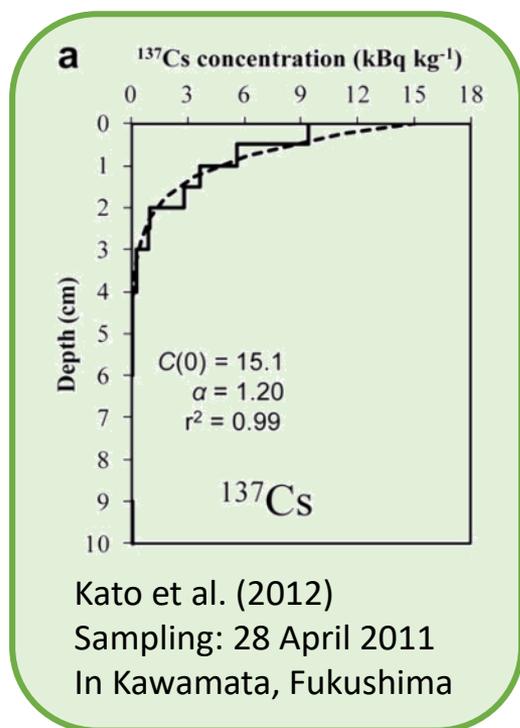


FIG. 1. Distribution of radioisotopes with depth in the ground. The curves give the fraction of the total activity to depth  $z$  ( $F = 1 - e^{-z/\alpha}$ ) assuming an exponential decrease in activity with a 3-cm relaxation length. This assumed exponential distribution is compared with the experimental data of WALTON<sup>(10)</sup> in A, with the data of TELFAIR and LUETZELSCHWAB<sup>(11)</sup> in B and with the measurements of GUSTAFSON<sup>(12)</sup> in C.

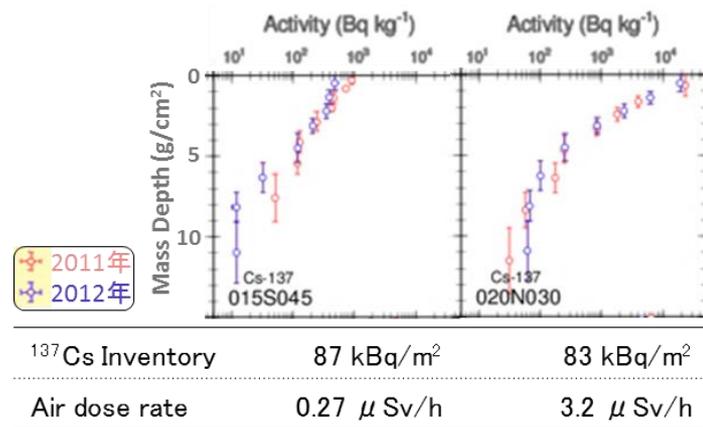
# 土壌中の放射性Csの深度分布

- 放射性セシウムは表層5cmの中にその沈着量の90%以上が存在。  
⇒ 5cmの中の詳細な深度分布が大事！



## - 空間線量率の予測

もし、土壌中の存在量が同じレベルでも、深度分布が異なると空間線量率は大きく変わる



- 様々なモデルパラメータ (USLE式など)
- 植物への移行リスクの評価
- 除染の方策決定のための情報

放射性セシウムの深度分布は深さに伴い指数関数的に減少するため、上の層の土壌がわずかに混入しただけで、濃度が大きく変化する危険性がある。

# 放射性Cs測定時の土壌採取方法

## ■スクレーパープレート(Campbell et al., 1988)

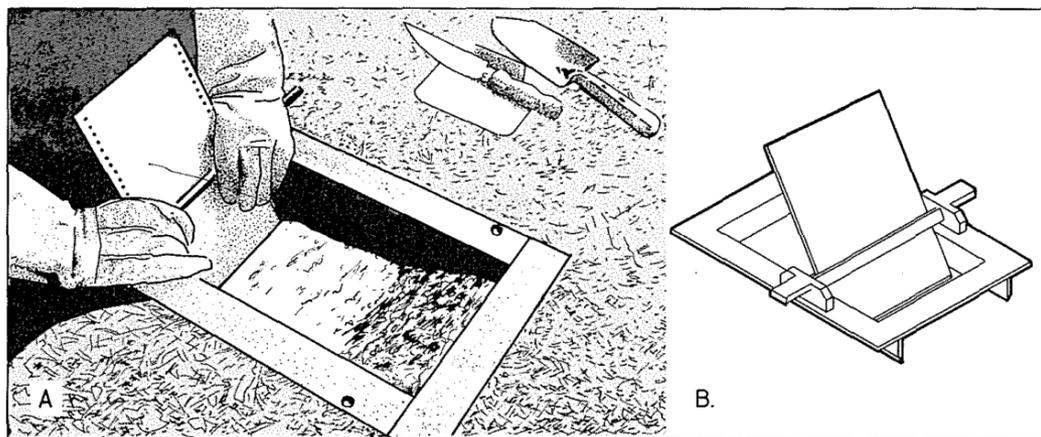
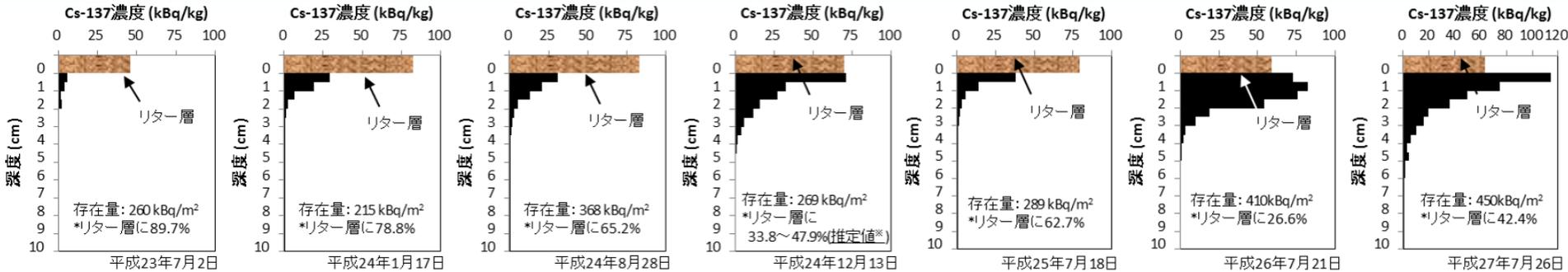


図: Campbell, B.L., Loughran, R.J., Elliott, G.L., (1988) A method for determining sediment budgets using caesium-137. Sed. Bud. 174, 171-179.

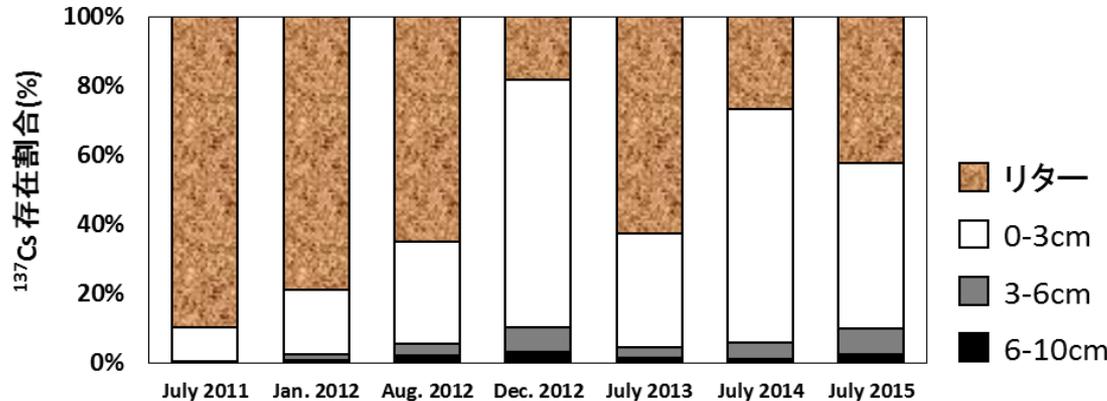
- 15cm×30cm の枠内の土壌について、5mm間隔で表層から順に採取可能
- ものすごく時間がかかるが、コンタミのリスクは低い (Loughran et al., 2003).

# 放射性Cs深度分布の時間変化ー福島の例

## ■スギ若齢林（福島県川俣町）におけるセシウム137濃度の経時変化



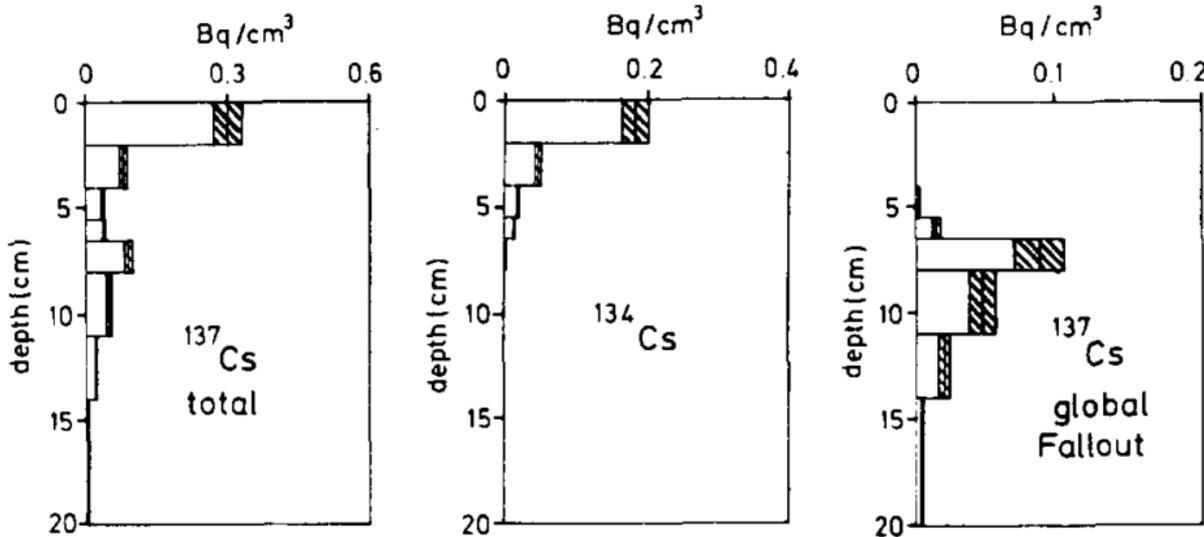
## ■セシウム137存在割合の経時変化



- 土壌表層の濃度は時間とともに増加し、リター中の存在割合は時間とともに減少していることから、リターから土壌への移行が進行していることが確認された。
- インベントリーも増加傾向にあり、樹冠から林床へのセシウム137の移行を反映している可能性がある。
- 一方、土壌表層から次表層への下方移行は顕著ではなく、沈着後4年が経過した時点でも、そのほとんどが表層5-6cm以内に分布していた。

# 放射性Cs深度分布の時間変化ー10日後

チェルノブイリ事故直後の放射性セシウムが存在量 (Bq/cm<sup>3</sup>)



チェルノブイリ+  
グローバルフォールアウト

チェルノブイリ

グローバルフォールアウト

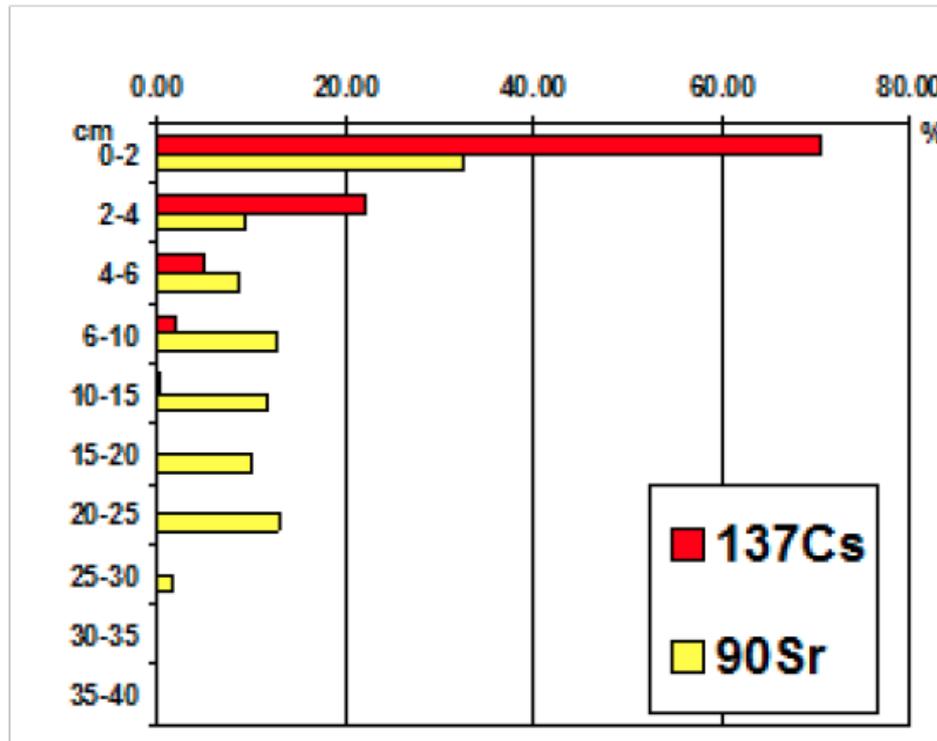
- ドイツAugsburgの森林  
(年降水量約800mm)
- 1986年5月7日採取  
(事故後最初の雨の直後)

- チェルノブイリ由来の放射性セシウムは、深さに対して指数関数的に減少しており、ほとんどが表層4cm以内に存在していたが、すでに20cmの深さにも見られた。
- 4ヶ月後(その間の降水量260mm)に再度採取してもほとんど同じ深度分布を示し、初期の指数関数的な深度分布は、おそらく最初の雨(沈着)で決まる。

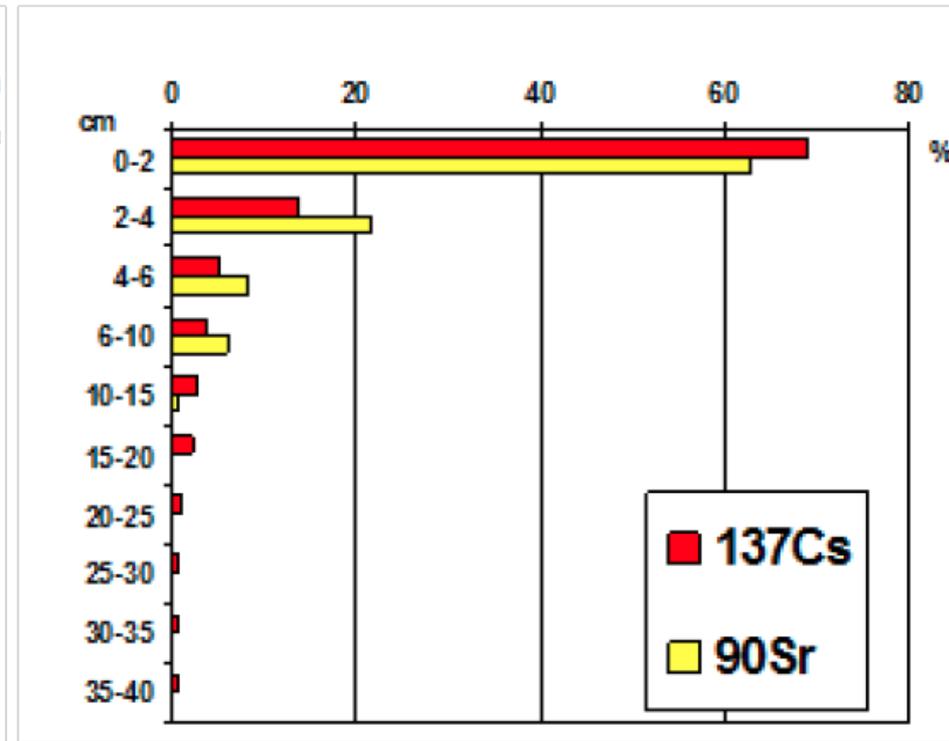
# 放射性Cs深度分布の時間変化ー10年後

チェルノブイリ事故から10年後の深度分布 (Data from Kashparov)

■ポドゾル化砂質土壌



■泥炭土(有機質土壌)

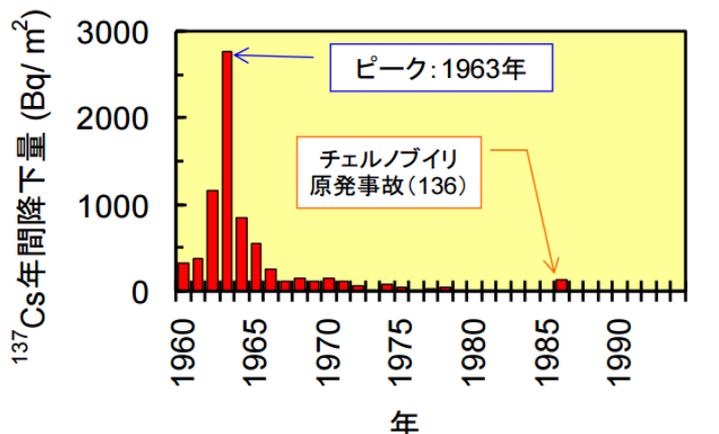


鉱物があれば、Csは強く保持される。

2価のSrイオンは有機物と静電的に強く吸着。

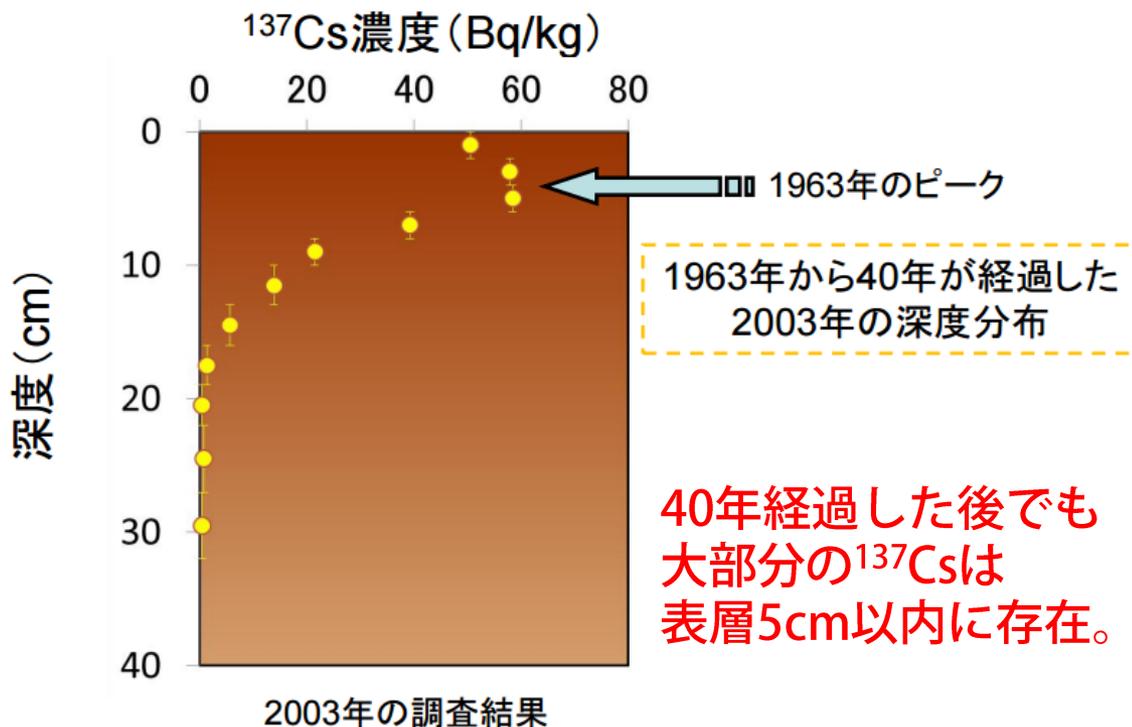
# 放射性Cs深度分布の時間変化ー40年後

## ■青森市におけるセシウム137年間降下量の推移



(Hiroseら、1987; Aoyamaら、1991; NIRS、1979-1997から作成)

## ■六ヶ所村未耕地におけるセシウム137濃度の深度分布



「未だに土壤が汚染されている!？」

図: 塚田 祥文

[http://jssspn.jp/info/file土と肥料の講演会\(塚田\).pdf](http://jssspn.jp/info/file土と肥料の講演会(塚田).pdf)

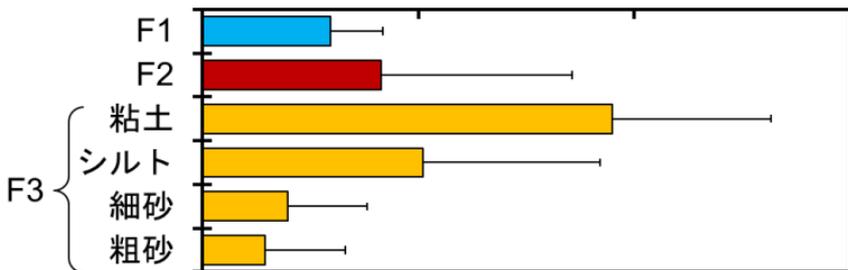
# 放射性Csの存在形態とイネへの吸収

## ■青森県内11地点

分析土壌: 11試料

存在割合 (%)

0 20 40 60



F1(比較的溶けだしやすい部分; 交換態) : 12%  
 F2(有機物と結合している部分; 有機物結合態) : 16%  
 F3(粒子中に存在している部分; 粒子結合態) : 72%

大部分は、鉱物粒子に強く吸着しており、溶出しない。

実際に、イネに吸収される割合はごくわずか。

土壌が放射性物質を吸着しているために、作物や地下水など他の環境への汚染の拡大が抑えられていると捉えることもできる。

## ■土壌表層からイネに吸収される<sup>90</sup>Srおよび<sup>137</sup>Csの割合(除去率)

試料

除去率<sup>a</sup>

<sup>90</sup>Sr

<sup>137</sup>Cs

%

イネ部位別区分

白米	0.00059	0.00031
ヌカ	0.0019	0.00029
モミガラ	0.0035	0.00033
ワラ	0.088	0.0021

地上部

0.094

0.0030

<sup>a</sup> 表層土壌0~20cmから作物に移行する割合。

図: 塚田 祥文

[http://jssspn.jp/info/file土と肥料の講演会\(塚田\).pdf](http://jssspn.jp/info/file土と肥料の講演会(塚田).pdf)

# まとめ—環境中移行 (1) 土壌中の分布・移行—

- 放射性セシウムは土壌中の粘土鉱物（とくに、2:1型層状ケイ酸塩鉱物のなかのイライトやバーミキュライト）に選択的に吸着する。
- 選択的な吸着には時間がかかり、時間の経過とともに溶出されにくくなる。（Aging効果）
- 沈着初期の土壌中の放射性セシウムは、深さに伴い指数関数的に減少し、そのほとんどは表層5cm以内に分布する。
- 放射性セシウムの（鉱質）土壌下層への溶出はほとんど生じず、深度分布は時間が経過しても大きく変化しない。（放射性セシウムの移行の大部分は、機械的な混和や侵食等による側方移動によって生じる。）