

Remediation by Clay Minerals : From the Study of Cs-133 NMR Spectrum

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2016-10-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 塩澤, 豊志, 田辺, 直行 メールアドレス: 所属:
URL	https://mu.repo.nii.ac.jp/records/277

粘土鉱物による放射能除染

—セシウム 133 NMR スペクトルの検討—

Remediation by Clay Minerals
—From the Study of Cs-133 NMR Spectrum—

塩澤 豊志*
Toyoshi Shiozawa

田辺 直行†
Nao-Yuki Tanabe

1 はじめに

2015年10月現在、朝日新聞朝刊に『プロメテウスの罫—百姓飛行士』が連載されている。そのコンセプトは、「阿武隈山地でシイタケ栽培に取り組んだ宇宙飛行士と、シイタケ産業の今を見つめる」である。

元TBS記者で日本人初の宇宙飛行士となった秋山豊寛氏は、宇宙船ソユーズから帰還後、無農薬有機農業に取り組むべく1996年に福島県田村市に移住した。秋山氏が住み始めた阿武隈山地は、クヌギやナラなどの雑木が多い。かつてはそれを炭にして暮らしていたが、エネルギー源が石炭、石油へ移り、次なる使い道として広まったのがシイタケ栽培の原木用途だった。比較的穏やかな気候のせい、木が軟らかく、キノコが育ちやすい原木となった。戦後、阿武隈山地は全国各地に原木を「輸出」する一大産地になっていた。長さ90cmに切った原木に直径約1cm、深さ約3cmの穴をいくつもあけてシイタケ菌を植えた木片を埋め込んで、林の中の「ホダ場」に並べるのだ。

福島県田村市で有機無農薬農業を目指す人々は、1998年春、「あぶくま農業者大学校」を立ち上げ、元宇宙飛行士の秋山氏が教頭に就任した。その13年後の2011年3月11日に東日本大震災が起き、田村市も激しく揺れた。原木を使うシイタケ栽培は、おがくずを固めた菌床に菌を植える菌床栽培に押され、福島第一原発事故前の2010年には、原木栽培は菌床栽培の4分の1にまで減っていた。秋山氏らは自然木の養分で育つ原木栽培にこだわった。しかし、放射性物質が降った森は除染が進まず、クヌギやナラといった原木を切り出せなかった。除染は住宅から20mの範囲に限られ、山林の放射能汚染を解決できるめどはたっていない。クヌギは15年周期、コナラは22～23年周期、伐採してシイタケの原木にしたら植林、このような里山のサイクルは途切

*工学部客員教授（環境システム学科） †工学部非常勤講師（環境システム学科）

れてしまった。原木シイタケを育ててきた主要産地の阿武隈山地では、農家が再開の道を探し続けている。

その目標は、農林水産省が公表した原木の放射性セシウム指標値であった。福島第一原発事故から半年後の2011年10月に示された値は、1キログラム当たり150ベクレル(150 Bq/kg)以下であった。原木のセシウムがどの程度シイタケに取り込まれるかという移行係数は2と設定された。つまり、シイタケに濃縮されるセシウムは、原木の2倍の300ベクレルまで許容される計算であった。原発事故から1年後の2012年3月に、田村市内の農家が会津地域から仕入れた原木をおがくずにして放射線量を測ったところ、30 Bq/kg 以下であったので、原木1万本で試験栽培を試みた。安心しかけた同月下旬、国は、食品に含まれる放射性セシウムの基準値が4月から100ベクレル以下に設定されたことを受け、原木のセシウム値を50ベクレル以下に引き下げた。会津地域の原木なら問題ないように思われたが、半年後、原木のセシウムを測ると、270 Bq/kg になっていた。この農家は、原木にシイタケ菌を植えた「ホダ木」を自宅裏山で育てる露地栽培を続けてきたが、すべて「放射性廃棄物」となってしまった。露地に置いたホダ木が移行係数以上にセシウムをため込むのはなぜか、そのメカニズムは解明されていない。

筆者らはこれまでの研究において、福島第一原発事故で放出された放射性セシウムは、粘土鉱物に吸着・固定された状態で広く環境中に分布し、いまだに局所的なホットスポットを形成していることを明らかにしてきた。粘土鉱物は、放射性セシウムの移動媒体であるだけでなく、その吸着能を利用すれば、除染の有力な武器となる。阿武隈山地の山林土壌だけでなく、里山や住宅地を汚染している放射性セシウムは、すべて粘土鉱物に吸着・固定されているものと考えられる。これまでの研究で、どのような粘土鉱物にどの位のセシウム吸着能力があるかを明らかにしてきたが、本研究では、粘土鉱物の構造中で、吸着セシウム原子がどのような化学的環境にあるかを、NMR 分光法によって解明しようと試みた。これによって粘土鉱物のセシウム吸着機構を推定し、除染に有効な吸着剤の選定指針を作ることを目標とした。

阿武隈山地は、福島第一原発のある浜通りの西隣に位置する。そのさらに西隣は、東北新幹線が通る福島県の中核都市である福島市と郡山市を擁する中通りである。中通りにおける放射能汚染の現状を知るべく、2015年9月に放射線量測定を行ったので、その結果も報告したい。

2 調査の概要

2.1 セシウム 133 NMR スペクトルの測定

現在わが国最大の環境問題は、セシウム 137 による放射能汚染である。セシウム 137 の半減期は約30年といわれており、東日本各地の土壌・水系の汚染は、福島第一原発事故後4年たった今でも深刻である。

元素の化学的性質は、同位体間では変わらない。セシウム原子(イオン)の環境動態を調べる化学実験は、通常、非放射性のセシウム 133 を用いて行われる。われわれはこれまで、硝酸セシウム $CsNO_3$ あるいは塩化セシウム $CsCl$ の水溶液に各種吸着剤を浸漬し、吸着平衡状態における上澄み液中のセシウムイオン Cs^+ を ICP 発光分析法によって定量してきた。このような、バッチ法と ICP 分析の組み合わせにより、母液中の Cs^+ の吸着剤による除去率を計算した。ICP とは、

Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry（誘導結合プラズマ発光分析）の略で、セシウムの青色炎色反応を定量化したものと考えてよい。分析にはPerkin Elmer 5300 DV ICP発光分析装置を用いた。今回の調査に用いた吸着剤は、ゼオライト、合成ゼオライト、モンモリロナイト製剤、パーミキュライト、カオリン、山口県産堆肥の6種類である。

元来のゼオライトでは、Si, AlおよびOからなる骨格がビルディングの骨組みの役目をなし、ビルディング内の部屋に相当する空隙が規則的に配列している。この空隙に含まれる多量の水が、加熱されると脱離し、結晶粉末が吹き上げられて沸騰しているような振る舞いを示すため、「沸石」といわれてきた。この空隙がゼオライトの吸着性の主因である。近年、AlをGaやFeで、SiをGeで置換したり、また、AlやSiを含まないものまで合成されるようになり、合成ゼオライトとして高性能触媒、分子ふるい、土壌改良材、洗浄促進剤など幅広く工業的利用がなされている。

カオリンは、火山灰土や花崗岩由来の土壌に多くみられる代表的な粘土鉱物の一種である。岩石中の長石などの造岩鉱物が熱水の作用で変質して生成するカオリナイトと、積層構造単位間の結合が弱くなって規則性を失ったハロイサイトを合わせてカオリンと呼んでいる。山口県産堆肥の主成分は、土壌有機物質の腐植物質であるが、セシウム除去効果が確認されている。

NMRスペクトル測定用の固体試料は次の手順で作成した。各吸着剤1gを塩化セシウムCsCl飽和水溶液50mL中に加えたのち、十分に振盪し、1か月間静置して吸着平衡状態とした。沈降固体部分を乳鉢にとって細粉化し、NMR測定用のガラス製試料管に詰めた。

NMRとは、Nuclear Magnetic Resonance（核磁気共鳴）の略である。NMR分光法は、有機化合物分子中に含まれる種々の型の水素の化学的環境の差異（官能基）情報を提供するので、主に有機化合物の化学構造研究の中心をなしている。

ラジオ波は低エネルギーの電磁波で、原子の励起あるいは分子の励起、振動、回転のエネルギー単位間遷移には関与しない。しかし、原子核はラジオ波を吸収して核スピンの方向を変える。つまり、核磁気エネルギー単位の間隔に対応した共鳴周波数を持つラジオ波の吸収が起こるのである。もっとも一般的なプロトンNMRでは、水素原子が化学的に異なる環境にあるときに生じるスペクトル線位置の分離を化学シフトと呼び、記号 δ （デルタ）で表す習慣である。プロトン以外の他核NMRの場合、これと区別するため、化学シフトを記号 σ （シグマ）で表す。

試料と標準物質の共鳴磁場を一定周波数条件で観測すると、

$$2\pi\nu = \gamma H_0 = \gamma(1 - \sigma)H_s$$

となる。ここで、 H_0 , H_s はそれぞれ標準物質、試料の共鳴磁場 [gauss]、 ν はラジオ波の周波数 [Hz]、 γ は核磁気回転比といい、核種によって決まった定数である。上式より次式が得られる。

$$\sigma = \frac{H_s - H_0}{H_s} \times 10^6 \text{ [ppm]}$$

10^6 を掛けるのは、数値の取り扱いを便利にするためであり、化学シフト σ はppm単位で表される。化学シフトは、軌道電子の磁気しゃへいによって生じる共鳴周波数の変化を、磁場の強さの相対シフトとして表したものである。今回の測定では、硝酸セシウムCsNO₃の結晶粉末を標準物質とした。このときの¹³³Csの共鳴周波数は、65.58 MHzであった。測定にはBRUKER MAS NMRスペクトロメーターを使用した。

2.2 福島県中通りにおける放射線量率測定

2015年9月上旬、福島県中通りの放射線量率測定を行った。測定地点は、滝桜で名高い田村郡三春町、郡山市阿武隈川周辺・麓山公園・安積国造神社、福島市阿武隈川周辺・小中学校校庭、さらに、伊達市保原である。

放射線量測定機器は、日立アロカメディカル ポケットサーベイメーター（検出部：Csシンチレーター）であり、地上1mの空間線量率および5cmの地表線量率（毎時マイクロシーベルト $\mu\text{Sv/h}$ ）を測定した。

3 調査結果の検討

3.1 固体 NMR スペクトルの測定結果

標準物質 CsNO_3 （固体）、参照として測定した CaCl （固体）、 CsI （固体）、各種粘土鉱物および堆肥試料のNMRスペクトルを図1～3に示す。また、ピーク位置から読み取った化学シフト σ をまとめて表1に示す。

セシウム 133 固体NMR スペクトルについて、以下のような評価を行ってみた。

核スピン7/2をもつセシウム 133のNMRスペクトルピークの化学シフト（標準物質： CsNO_3 固体）を比較してみる。 CsI は281ppm, CsCl は232ppmという値が得られ、 I^- , Cl^- それぞれの電子雲によるしゃへい効果が電子雲の大きさに対応している。これらに次いでしゃへい効果をもつ原子種は、粘土鉱物の場合O原子である。ゼオライト、バーミキュライト、山口県産堆肥の化学シフト σ の値は、O原子によるしゃへいを表していると考えられる。これらに対して、カオリンとモンモリロナイトは、わずかに負の σ 値を示している。つまり、カオリンとモンモリロナイトの場合、Csイオンに最近接する原子（イオン）がO原子ではないことを示唆している。この測定結果から、次の2点が問題点として浮かび上がる。①2:1型粘土鉱物として比較的類似した層状構造をもつバーミキュライトとモンモリロナイトでセシウムの吸着状態が異なること。②バッチ法→ICP分析から求められたセシウム除去率（吸着剤へのセシウム移行率）は、ゼオライト、モンモリロナイトが高く、カオリンとバーミキュライトは比較的低い。つまり、吸着サイトの原子環境とセシウム除去率は直接には結びつかないといえる。ここに、粘土鉱物によるセシウムイオン吸着の複雑な仕組みが垣間見られる。

バーミキュライトとモンモリロナイトは、造岩鉱物である雲母（イライト）の風化過程で生じる粘土鉱物で、Si四面体シート2枚の間にAl八面体シートがサンドイッチされた2:1型単位層からなり、構造的には類似している。2:1型層状ケイ酸塩は、一般に3つの領域を持っている。層間、外部平坦面、エッジ表面の3つである。雲母では層間が閉じて水分子は完全に排除されているが、土壌中のバーミキュライトは水2分子層に相当する0.4nmの間隔が層間に存在する。一方、モンモリロナイトではAl八面体シート中の Al^{3+} が一部 Mg^{2+} に同形置換しており、層間間隔は共存イオンの種類・組成によって大きく変動すると考えられている。Al八面体シートに負電荷をもつモンモリロナイトでは、生起する膨潤性によって層間が開きやすくなっているのである。

層状ケイ酸塩鉱物の構造単位で重要な点は、 Si^{4+} または Al^{3+} を4つの O^{2-} が囲んだ四面体の3頂点の O^{2-} （底面酸素）を隣の四面体と共有し、残りの1つの頂点（頂点酸素）を同じ方向に向

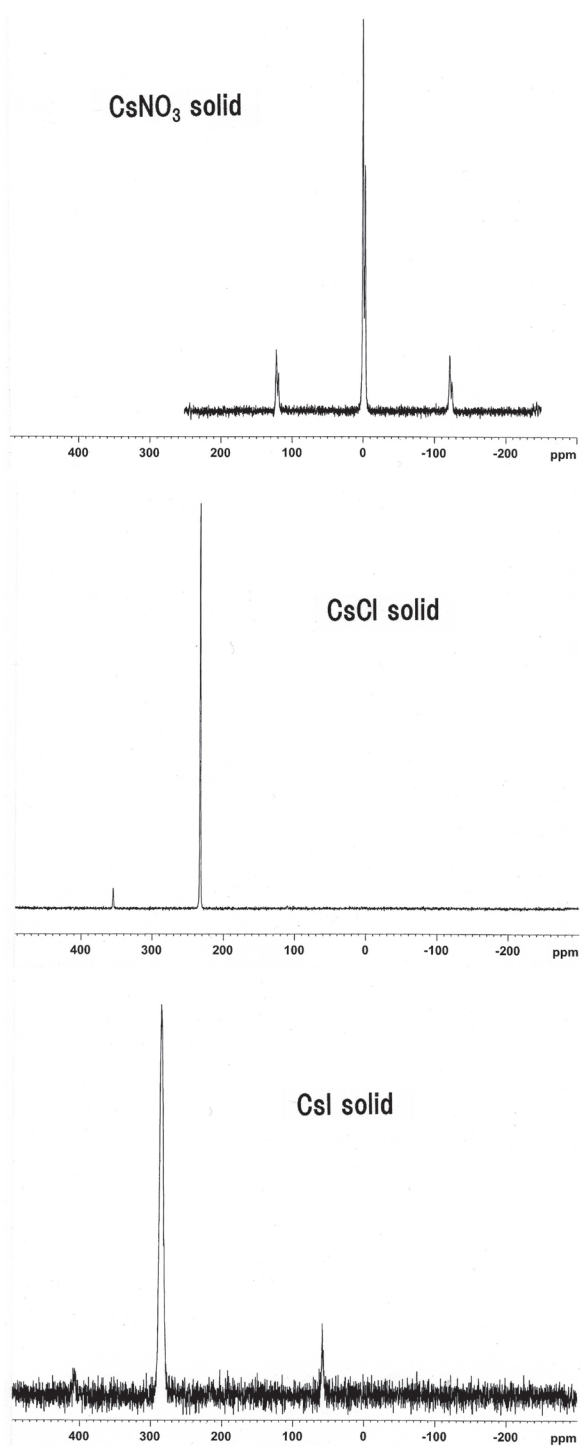


図1 セシウム 133 MAS NMR スペクトル
① CsNO₃ solid ② CsCl solid ③ CsI solid

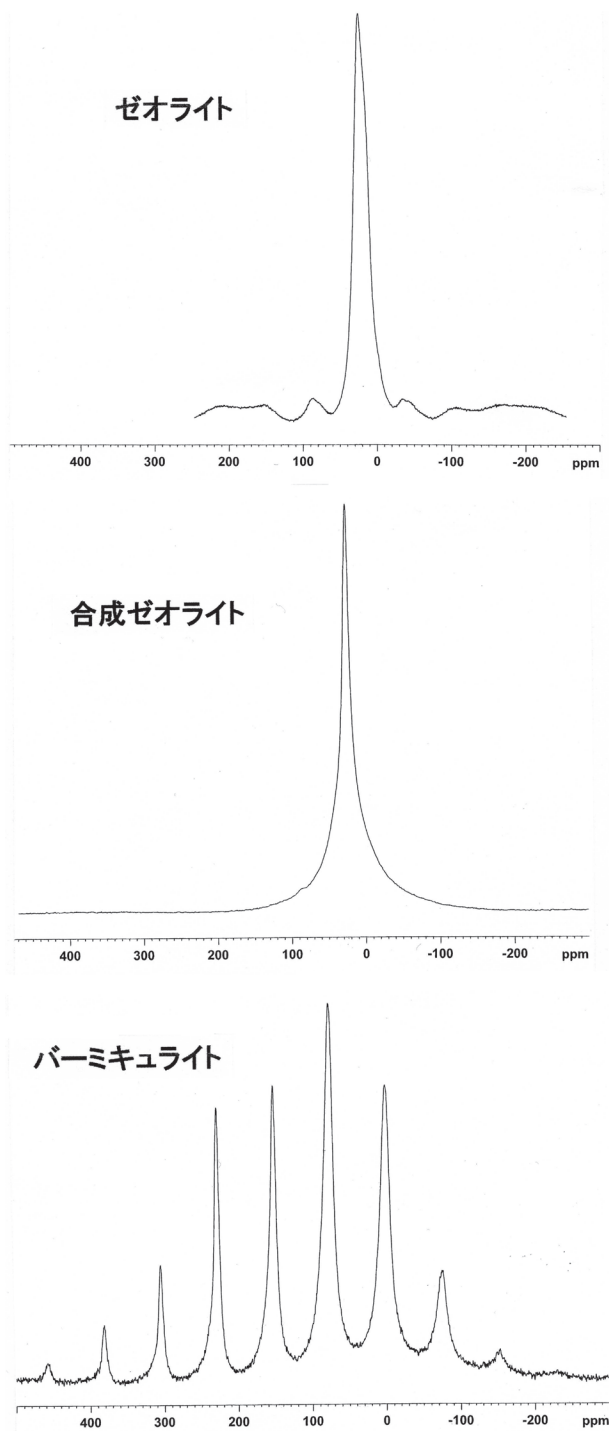


図2 セシウム 133 MAS NMR スペクトル
①ゼオライト ②合成ゼオライト ③バーミキュライト

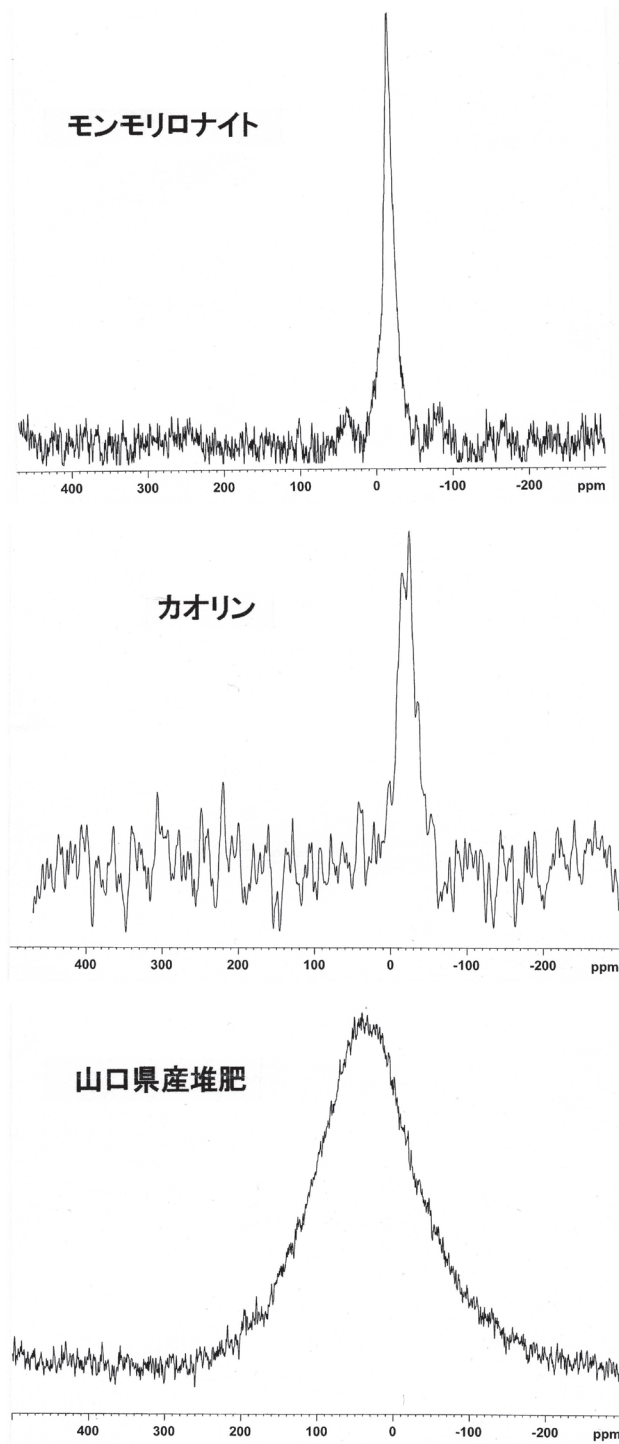


図3 セシウム 133 MAS NMR スペクトル
①モンモリロナイト ②カオリン ③山口県産堆肥

表1 セシウム 133 MAS NMR 化学シフト

試料固体	化学シフト σ [ppm]	備考
CsNO ₃ solid (標準)	0	
ゼオライト	27	
パーミキュライト	78	スピニングサイドバンド
山口県産堆肥	41	ブロードバンド
カオリン	-25	スプリット
モンモリロナイト	-20	
CsCl solid	232	
CsI solid	281	

表2 ICP 分析によるセシウム除去率測定結果

吸着剤	セシウム除去率 [%]
合成ゼオライト	95
モンモリロナイト製剤	84
パーミキュライト	20
カオリン	36
山口県産堆肥	40

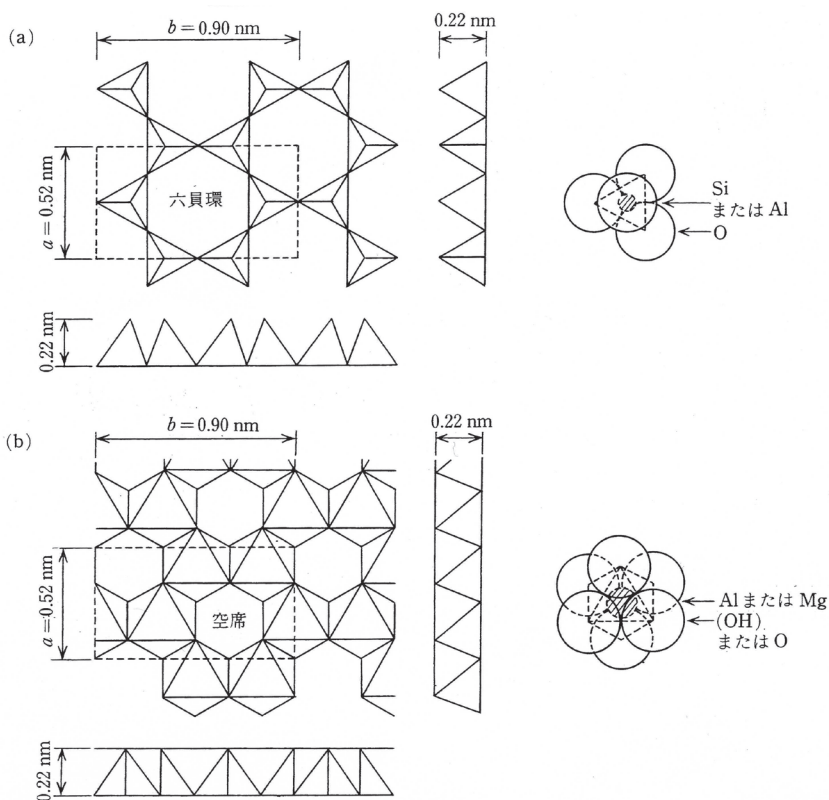


図4 層状ケイ酸塩鉱物の構造単位
(a) 四面体シート (b) 八面体シート

けて六角形（六員環）を形成することである、この六員環が網目状に広がって $(\text{Si,Al})_2\text{O}_5$ の組成をもつ四面体シートが形成される（図4）。

外部平坦面は、基本的にどの鉱物種も変わらない。同形置換によって生じる負電荷の密度が異なるだけであり、この負電荷と外部溶液の陽イオンが対をなして電気双極子を形成する。水和イオンは粘土表面の負電荷のほうに引力を受けながらも自由に熱運動するため、この領域に拡散二重層が形成される。つまり、外部平坦面は、セシウム吸着にはほとんど寄与しないと考えられる。吸着機構とセシウム除去率を支配するのは、層間とエッジ表面である。構造中に存在する六員環の穴にセシウムイオンが取り込まれると、最近接の配位原子がO原子となり、NMRスペクトルに化学シフトとして現れる。パーミキュライトの σ 値はこれを物語っているものと思われる（図5）。

一方、ゼオライトではこの3次元網目構造の隙間に様々な形状のマイクロ細孔が存在しており、その空隙に吸蔵水や陽イオンが取り込まれ、強い吸着力を示すと考えられる。構造中の六員環にセシウムイオンが入り込んで結合するため高いセシウム除去率を示すと考えられる。それではなぜパーミキュライトのセシウム除去率は高くないのであろうか。エッジサイトに Cs^+ イオンが侵入するためには、単位層がめくれてできた膨潤層の内部に入り込む必要がある。さらに、エッジサイトに固定されるためには、乾燥と膨潤の繰り返しが必要とされている。バッチ法では、常に湿潤状態に置かれるため、 Cs^+ イオンが溶脱してしまうためと考えられる。

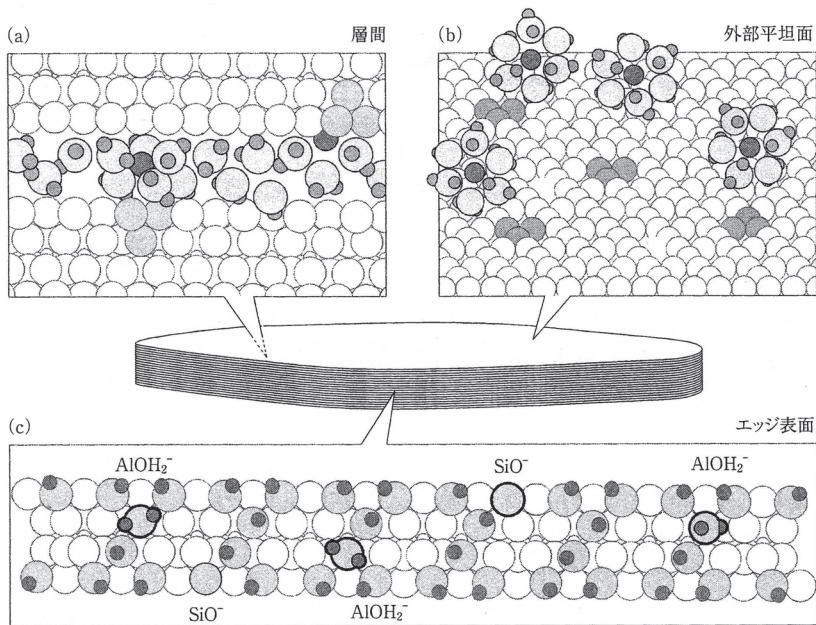


図5 2：1型層状ケイ酸塩の模式図
(a) 層間 (b) 外部平坦面 (c) エッジ表面

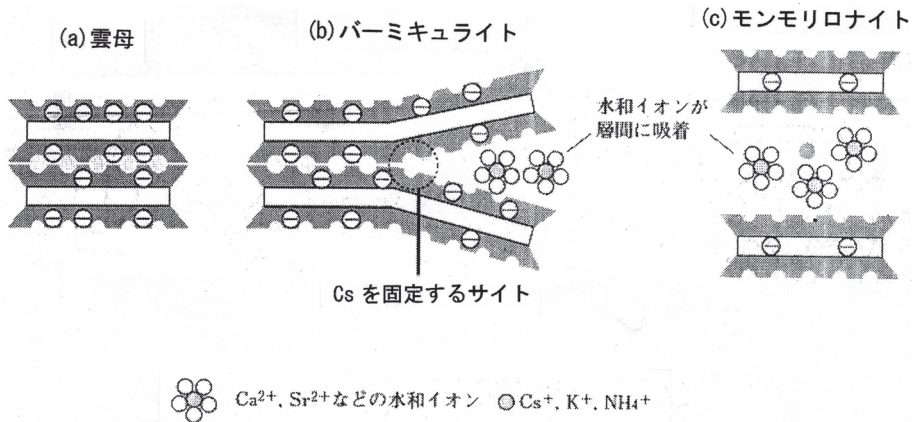


図6 2:1型層状ケイ酸塩鉱物における層間負電荷とCs吸着の模式図
(a) 雲母 (b) パーミキュライト (c) モンモリロナイト

モンモリロナイトとカオリン内でのセシウムイオンの挙動は上述のパーミキュライト、ゼオライトとは大きく異なると考えられる。モンモリロナイトは2:1型、カオリンは1:1型の層状ケイ酸塩粘土鉱物であるが、ともに特徴的な層間構造を有している。単位層間に膨潤性がある層間が開いており、セシウムは水和イオンとして熱運動している。そのために、標準物質である CsNO_3 固体の近傍にNMR吸収ピークを示したものと思われる(図6)。

カオリナイトとハロイサイトを合わせてカオリンという。カオリンは1:1型単位層を主体とするが、実際はかなり複雑で2:1型単位層との混合層である場合が多く、その部分には同形置換による負電荷があり、層間が開いて陽イオンを吸着する。その効果により一定のセシウム除去率を示すものと考えられる。バッチ法では、粘土鉱物と CsCl 飽和水溶液とが平衡状態に置かれ、 Cs^+ イオンは粘土鉱物の層間と上澄み液との間で分配される。セシウムは水和イオンとして静電引力によって層間に吸着しているため、上澄み液中の Cs^+ を定量するICP分析では、とくにモンモリロナイトにおいて有意な濃度減少(セシウム除去率)を示したものと考えられるが、その説明は今後の探求を待たねばならない。このように、モンモリロナイトとカオリンでは、開いた層間で運動する水和セシウムイオンの存在がNMR化学シフトに反映していると推定される。なお、カオリンのNMRスペクトルには特徴的なスピン-スピンカップリングがみられる。

山口県産堆肥の主成分は土壤有機物である腐植物質であるが、その生成過程で環境中の粘土鉱物が混入する。産地から見て、火山灰母材のパーミキュライトかゼオライト系列の粘土鉱物と考えられ、有機化合物とのキレートなどの影響でブロードなNMRスペクトルバンドとなっているが、それでも有意な σ 値を示している。『腐植質中ノ無機成分ノ植物ニ対スル価値』を卒論のテーマとした宮澤賢治がこのNMRスペクトルを見たら何と言っただろうか。

3.2 福島県中通りの放射線量測定結果

今回行った放射能測定の結果を表3にまとめて示す。1.0毎時マイクロシーベルト ($\mu\text{Sv/h}$) 以上の高線量値には強調の装飾を施した。以下に各測定地点の状況を記す。

表3 2015年放射能測定結果
福島県中通りの放射線量測定値($\mu\text{Sv/h}$)

測定日	測定地点	空間線量率(地上1m)	地表線量率(地上5cm)	測定環境
9月5日	三春駅前ロータリー	0.215	0.233	アスファルト
	八島川向作田橋	0.171	0.452	草むら
	八島台河原公園	0.209	0.694	枯れ草
	八島台中央公園	0.162	0.231	枯れ草
	八島川河畔	0.272	0.321	枯れ草
	三春町平沢	0.275	0.356	枯れ草
	郡山駅東口駅前	0.25	0.292	アスファルト
	イオンタウン脇公園	0.455	0.72	植え込み・土
	昭和2丁目児童公園	0.15	0.125	砂
	阿武隈川土手	0.289	0.374	枯れ草
	阿武隈川河畔	0.348	0.471	枯れ草
	阿武隈川行合橋下	0.546	0.786	枯れ草
	阿武隈川行合橋上	0.201	0.227	アスファルト
	郡山駅西口ロータリー	0.117	0.133	アスファルト
	鐘堂公園	0.222	0.846	立ち木下・砂
	麓山公園滑り台下	0.276	0.332	芝生
	麓山公園内の松の木	0.255	0.56	立ち木下・草
	麓山公園中央丘	0.326	2.2	枯れ木の洞
	麓山公園中央丘	0.333	0.71	切り株
	麓山公園弁天池畔	0.438	0.55	草
	安積国造神社	0.301	1.12	大木の洞
	二本松駅前ロータリー	0.233	0.381	石畳
	二本松神社本殿脇	0.412	1.02	切り株
	二本松神社山門	0.82	1.44	草むら
	二本松市本町1丁目	0.552	0.93	土
	二本松市本町遊歩道	0.556	1.21	枯れ草
観音丘陵久保丁橋	0.366	1.32	コンクリート・土	
旧二ノ丁蔵場	0.565	1.95	草むら	
蔵場山忠魂碑	0.645	0.995	草むら	
9月6日	福島駅東口ロータリー	0.204	0.247	土
	阿武隈川大仏橋下	0.298	1.94	枯れ草
	阿武隈川河原	0.138	0.152	コンクリート
	もみじ山公園	0.237	0.634	大木の洞
	第一小学校校庭	0.23	0.605	苔・土
	阿武隈川天神橋下	0.25	2.03	草むら
	宝林寺	0.425	0.732	銀杏の木の洞
	荒川信夫橋下	0.165	0.452	枯れ葉
	清明小学校校庭	0.227	1.7	銀杏の木の下の土
	伊達市保原駅前	0.226	0.324	アスファルト
	保原厳島神社	0.3	0.806	木の下の苔
	保原長谷寺	0.369	0.852	枯れ草
	廣智寺観音堂	0.246	0.778	竹林・土
	廣智寺地藏尊	0.47	0.828	枯れ草・土
	保原体育館前	0.335	0.41	松の木の下の苔
	保原市文化財大櫓	0.513	1.73	草むら・土

田村郡三春町

磐越東線三春駅で下車。JR線は八島川に沿った低地を走っている。三春駅の南側は断崖で、これを登り切ると八島台河原公園にたどり着く。木立の下の枯草の集まり（地表5 cm）に放射線量計（サーベイメーター）をかざすと、0.694 $\mu\text{Sv/h}$ を示した。「法定放射線安全基準」の年間1.0ミリシーベルトは、空間線量率では0.23 $\mu\text{Sv/h}$ とされているので、0.694という値は危険域である。八島台の住宅団地内で、高压洗浄による除染作業が行われている様子を見ることができた。洗液は下水に集まるので、除染ではなく移染か拡散ではないかと疑問を感じた。八島台地区のほか、広沢地区においても基準値を上回る線量値が検出された。

郡山駅東口

福島県内各所に空間放射線量モニターが設置されている。郡山駅東口駅前ロータリーのモニターの表示線量値（0.242 $\mu\text{Sv/h}$ ）と手持ちのサーベイメーターの表示数値（0.250 $\mu\text{Sv/h}$ ）は近い値であった。郡山駅東口側は、開発が遅れているためか閑散としたイメージであるが、工場群と巨大商業施設であるイオンモールが目を引く。イオンタウン脇の児童公園内の植え込みで、地表線量0.72 $\mu\text{Sv/h}$ という値を計測した。また、阿武隈川にかかる行合橋のたもとでも0.786 $\mu\text{Sv/h}$ という値が得られており、吹き溜まりのような地形で、枯れ葉・枯れ草のある場所が局所的なホットスポットになっていることがうかがえる。

郡山駅西口

地上1 mの空間線量率は、軒並み基準値の0.23毎時マイクロシーベルトを超えている。市の官庁街の中心部にある市民の憩いの場「麓山公園」が意外なホットスポットであった。草むらや植え込みの地表線量率が比較的高い数値であるが、特筆すべきは、おそらく文化財なのであろう大きな古木に空いた洞の中で、1.0マイクロシーベルト以上の異常値が計測された点である。土埃の主成分は粘土鉱物であり、周辺から粘土鉱物を付着させた枯れ葉・枯れ草の破片も吹き溜まってくるため、このような局所的ホットスポットが形成されたものと推定される。

二本松市

二本松市は、安達太良山と阿武隈川に挟まれた自然豊かな城下町である。二本松駅から霞ヶ城公園に至る経路は、いくつもの長い坂道である。これらと交わりながら東北本線に並行するように遊歩道やサイクリングロードがつくられている。山間の起伏に富んだ地形の影響か、随所で高い放射線量値が確認された。市街地は、除染活動や物理的減衰によりホットスポットにはなっていないが、標高のやや高い丘陵地の雑木林に放射性物質が局在して分布していると思われる。

福島市

阿武隈川にかかる橋のたもとの草むらや枯れ草が集まったところで放射線量が高い。1.7 $\mu\text{Sv/h}$ を記録した清明小学校は、阿武隈川河畔、土手のすぐそばにある。阿武隈川河畔には随所に放射線量モニターが設置されているが、これらが示す数値は空間線量率であって、異常値は現れない。地表にあって放射性粘土鉱物が蓄積していると推測される枯れ草の集まりなどについて、継続的

に放射能測定を行うことが望まれる。1マイクロシーベルト以上の局所的ホットスポットの除染は急を要するのではないか。

伊達市

福島駅から、阿武隈急行というローカル線が宮城県との県境に沿って走っている。福島駅を離れるとすぐに一面の桃畑が広がる。そこは伊達市というところである。伊達市は福島盆地の中にあり、飯館村に隣接する。飯館村から太平洋に向かって東南方向に進むと、浪江町、双葉町へとつながる。伊達市保原町は、特定避難勧奨地点（ホットスポット）の指定からは解除されたが、局所的に放射能の高い場所はまだ存在する。保原体育館前にある文化財の大櫓の柵内で、1.73 $\mu\text{Sv/h}$ の放射線量が検出された。油断せずに、地表の放射能を継続的に測ることが望まれる。

4. 調査のまとめ

塩化セシウム飽和水溶液に浸漬して吸着平衡に達した粘土鉱物中のセシウム133について、他核固体NMRスペクトルの測定を行った。その結果、セシウム原子のまわりの配位子環境が、（ゼオライト・バーミキュライト、）と（モンモリロナイト・カオリン）とで異なることが判明した。腐植物質を主成分とする山口県産堆肥は、（ゼオライト・バーミキュライト）に近い傾向を示した。これらの知見は、粘土鉱物を用いた化学的除染に物理化学的根拠を与えるものである。

福島県では、懸命な除染活動が展開されているが、阿武隈山地周辺の山林・里山の放射線量値は依然として高い。今回放射能を測定した中通りの各地にも局所的ホットスポットが確認された。

県内の多くの地域では、穏やかな日常を取り戻したかにみえるが、増え続ける放射性廃棄物問題をはじめ、課題は山積している。福島県民を棄民・難民にしてはならない。これは、現在わが国最大の国策的課題ではないだろうか。

謝辞

他核固体NMRスペクトルの測定にあたり、埼玉大学科学分析支援センターの藤原隆司准教授には多大な協力をいただいた。ここに感謝申し上げる。

参考・引用文献

- 山崎昶『核磁気共鳴分析法』共立出版（1992）。
- 日本化学会編『コロイド科学 I. 基礎および分散・吸着』東京化学同人（1995）。
- 足立泰久・岩田信午 編著『土のコロイド現象』学会出版センター（2003）。
- 本間愼・畑明郎 編『福島原発事故の放射能汚染』世界思想社（2012）。
- 中西友子『土壌汚染』NHK ブックス 1208 NHK 出版（2013）。
- 白水晴雄『粘土ハンドブック』日本粘土学会編 技法堂（1987）。
- 中尾淳・山口紀子『最新農業技術 土壌施肥 Vol.4』農文協（2011）。