

# 水稲への放射性セシウム吸収に対する天然ゼオライトの施用効果

後藤逸男<sup>1</sup>・蛭木朋子<sup>2</sup>

キーワード 福島第一原発, 水稲, 放射性セシウム吸収抑制, 天然ゼオライト, カリウム肥料

## 1. はじめに

天然ゼオライト（沸石化した白色凝灰岩粉砕物、以下ゼオライト）がカリウムやアンモニウムイオンに対して選択的な交換吸着性を持つ（後藤ら, 1980）こと、さらにセシウムはカリウムと同じアルカリ金属に属する元素で、その水和イオン径がカリウムより小さいため、ゼオライトにはカリウム以上に交換吸着されやすい（西村, 1973）ことが知られている。福島第一原発内では、その性質を利用して事故発生初期から放射性セシウムなどで汚染された水の処理にゼオライトが使われてきた。また、チェルノブイリ原発事故では、放射性セシウムで汚染された農地の修復にも利用された。

そのような背景で、福島周辺での汚染農地ではゼオライトをセシウム吸着材として施用し、作物への放射性セシウム吸収抑制を図ろうとする機運が高まった。2012年春には、そのメカニズムが明らかにされない状態で福島県内の水田に低減対策資材として、大量のゼオライトが施用された。その後、2013年1月に農水省と福島県から発表された、「放射性セシウム濃度の高い米が発生する要因とその対策について」では、ゼオライトの吸収抑制効果は、ゼオライトに含まれるカリウムによる効果であり、今後の吸収抑制対策はカリウム肥料による土壌中のカリウム含量の確保を基本とする（福島県・農水省, 2013）とした。そのため、2013年度はゼオライト施用を強く要望した一部の地域を除いて復興予算として計上されなかった。また、東京電力もゼオライトの施用に伴う経費を補償対象から外すことを表明している。

筆者らは、2012年に水稲作付が制限された福島県南相馬市内の水田において、試験作付としてゼオライトとカリウムの施用試験を実施した。また、ゼオライトの施用が作物への放射性セシウム吸収に及ぼす影響を検討するための室内実験やポット栽培試験を行ったので、その概要を報告する。

## 2. 福島県南相馬市での水稲試験作付

南相馬市では2012年3月に市内全域での24年産水稲作付けを全面的に制限し、市内130ヶ所の水田約15haで「平成24年度地域水田再生試験栽培事業」として水稲の試験作付を行うことになった。そこで、筆者らは試験作付を南相馬市に申請し、「ほ場番号126」として認められた。試験水田は福島第一原子力発電所から20.8km地点で、作土の放射性Cs強度は $1,475\text{ Bq kg}^{-1}$ 、交換性 $\text{K}_2\text{O}$ 含有量は $170\text{ mg kg}^{-1}$ 、CECは $14\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$ であった。2012年4月に上記の水田0.3haにモルデナイトを主体とする福島県産天然ゼオライト0, 10, 20 $\text{ t ha}^{-1}$ 施用区とカリウム標準施用区（塩化カリウムを $\text{K}_2\text{O}$ として $50\text{ kg ha}^{-1}$ ）とカリウム多量施用区（塩化カリウムを $\text{K}_2\text{O}$ として $50+250=300\text{ kg ha}^{-1}$ ）を組み合わせた6区の試験区を設けた。なお、供試ゼオライトの陽イオン交換容量は $137\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$ 、交換性塩基量は、 $\text{CaO} : 18.9\text{ g kg}^{-1}$ 、 $\text{MgO} : 0.65\text{ g kg}^{-1}$ 、 $\text{K}_2\text{O} : 11.3\text{ g kg}^{-1}$ 、 $\text{Na}_2\text{O} : 12.2\text{ g kg}^{-1}$ であった。カリウム多量施用区には塩化カリウムを $\text{K}_2\text{O}$ として $250\text{ kg ha}^{-1}$ 施用し、全試験区に窒素 $50\text{ kg ha}^{-1}$ 、リン酸 $40\text{ kg ha}^{-1}$ 、カリ $50\text{ kg ha}^{-1}$ を施用して、5月20日に水稲（ひとめぼれ）を定植した。その後の水稲生育は順調で9月27日に収穫した。稲体中の放射性セシウム吸収がピークとなる幼穂形成期と収穫後に稲体と土壌を、1区画3連で採取し分析を行った。

その結果、幼穂形成期の茎葉と玄米中の放射能強度は表1のように、ゼオライト無施用・カリウム標準施用区で最も高く、玄米で $17\text{ Bq kg}^{-1}$ であったが、カリウム肥料およびゼオライトの施用により $5\sim 6\text{ Bq kg}^{-1}$ に低減された。その低減要因を解析した結果、図1のようにカリウム多量施用区ではゼオライトの効果は認められなかったが、カリウム標準施用区ではゼオライトの施用により放射性セシウム強度が低下する傾向にあった。玄米収量（表2）については、カリウム肥料とゼオライトの施用により増収した。また、玄米収量の増加に伴いタンパク質含有量も増加し、両者間には高い正の相関性が認められた。食味値スコアは低下する傾向にあり、タンパク質含有量の増加と食味値低下要因を統計的に解析した結果、カリウム施用よりゼオライトの施用による影響が強い傾向にあった。このような玄米増収はゼオライトのアンモニウムイオン選択的な交換吸着性により、水稲にアンモニウムイオンが効率よく供給されたためと考えられる。なお、水稲に対するゼオライトの施用

Itsuo GOTO and Tomoko NINAKI: Application effects of Zeolite on uptake of radioactive Cesium in Rice plants

<sup>1</sup> 東京農業大学応用生物科学部 (156-8502 世田谷区桜丘1-1-1)

<sup>2</sup> 東京農業大学大学院 (156-8502 世田谷区桜丘1-1-1)  
日本土壌肥科学雑誌 第85巻 第2号 p.121~124 (2014)

表1 試験作付水田における茎葉（幼穂形成期）と玄米中の放射能強度（乾物当たり Bqkg<sup>-1</sup>）

ゼオライトカリウム肥料	稲茎葉の放射能強度			玄米の放射能強度			
	<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	Cs 合計	<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	Cs 合計	
0 t ha <sup>-1</sup>	50 kg ha <sup>-1</sup>	24.4	37.6	62.0	6.1	10.5	16.6
	300 kg ha <sup>-1</sup>	7.6	12.4	20.0	2.5	3.9	6.4
10 t ha <sup>-1</sup>	50 kg ha <sup>-1</sup>	14.2	20.4	34.6	4.5	7.3	11.8
	300 kg ha <sup>-1</sup>	7.8	12.2	20.0	2.4	3.6	6.0
20 t ha <sup>-1</sup>	50 kg ha <sup>-1</sup>	7.6	12.7	20.3	2.4	3.9	6.3
	300 kg ha <sup>-1</sup>	6.7	9.1	15.8	2.0	3.3	5.3

放射能測定：ゲルマニウム検出器（キャンベラ社）

茎葉：U8 容器による12時間測定 合計検出限界：10 Bq kg<sup>-1</sup>

玄米：2リッターマリネリ容器による80分測定 合計検出限界：5 Bq kg<sup>-1</sup>

表2 試験作付水田における玄米収量、食味値および茎葉のカリウム吸収量

ゼオライト 施用量	カリウム 施用量	玄米収量 kg ha <sup>-1</sup>	食味値測定値* <sup>1</sup>		茎葉の K <sub>2</sub> O 吸収量* <sup>3</sup>
			タンパク質* <sup>2</sup>	スコア	
0 t ha <sup>-1</sup>	50 kg ha <sup>-1</sup>	4490	60	78.7	136
	300 kg ha <sup>-1</sup>	4930	61	76.7	163
10 t ha <sup>-1</sup>	50 kg ha <sup>-1</sup>	5300	64	73.7	198
	300 kg ha <sup>-1</sup>	6090	64	73.0	168
20 t ha <sup>-1</sup>	50 kg ha <sup>-1</sup>	5530	62	76.7	189
	300 kg ha <sup>-1</sup>	6760	65	72.3	185

\*<sup>1</sup>: 静岡精器 PS-500 による測定 \*<sup>2</sup>: g kg<sup>-1</sup> \*<sup>3</sup>: kg ha<sup>-1</sup>

効果は沼倉ら（1966）や坪田ら（1960, 1963）によっても報告されている。

カリウム肥料を施用して、カリウムの植物への吸収を促進すれば競合するセシウムの吸収を抑制できることが明らかになっていて、現状では土壤中に 250 mg kg<sup>-1</sup> 以上の交換性カリウムが存在すれば、水稲へのセシウム吸収が抑えられるとされている（農研機構, 2012）。一方、アンモニウムイオンについてはセシウムイオンとの競合は認められず、天正ら（1961）は水稲の幼植物栽培試験で窒素肥料の施用により放射性セシウム吸収が促進されたとしている。また、塚田ら（2012）や中尾ら（2012）はカリウムイオンより交換浸入力強いアンモニウムイオンが土壤中に施用されると土壤に交換吸着されているセシウムイオンが追い出されるため、植物に吸収されやすくなるとしている。

しかし、本試験ではゼオライトの施用により土壤中での

アンモニウムイオンの水稲への可給性が向上したにもかかわらず、稲体への放射性セシウム吸収促進は認められず、むしろ軽減される傾向にあった。収穫した茎葉中のカリウム含有量を分析し、各試験区の水稲へのカリウム吸収量を比較した結果、表2のようにカリ肥料とゼオライト施用により増加した。すなわち、ゼオライトの施用により窒素の肥効率が高まり水稲の生育が増進した。それに伴いカリウム吸収量が増加して、土壤中のカリウムイオンとセシウムイオンの競合が生じて水稲へのセシウム吸収が抑制されたと考えることができる。

### 3. ゼオライト施用土壤中でのカリウムイオンの挙動

2012年、福島県内では水稲への放射性セシウム吸収抑制対策としてク溶性のケイ酸カリウムか水溶性の塩化カリウムのいずれかが施用されたが、その後福島県などの試験で後者が優ることが明らかにされた。しかし、土壤に塩化カリウムのような水溶性肥料を施用すると陽イオン交換容量の小さな土壤ほど水溶性カリウムの割合が増加し、畑では降雨による溶脱、水田では減水深による溶脱や水田表面からの流出で作土内から減少する可能性がある。

そこで、福島県伊達市の水田から採取した陽イオン交換容量 8, 13, 29 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> の土壤にゼオライトを 0, 2, 10, 100 g kg<sup>-1</sup> と塩化カリウムを K<sub>2</sub>O として 0, 500 mg kg<sup>-1</sup> 添加して、5時間振とうさせ土壤に十分交換吸着させた。その後、過剰の塩化カリウムを 800 ml L<sup>-1</sup> メタノールで除去し、交換性カリウムを分析した。土壤に添加したカリウム量に対する交換性カリウム増加量の割合（%）をカリウム吸着率とすると、図2のようにゼオライト無施用区間の比較では、土壤の陽イオン交換容量が大きいほどカリウムが土壤に交換吸着された。また、同一土壤内での比較では、ゼオライト施用量が多くなるほどカリウム吸着率が増

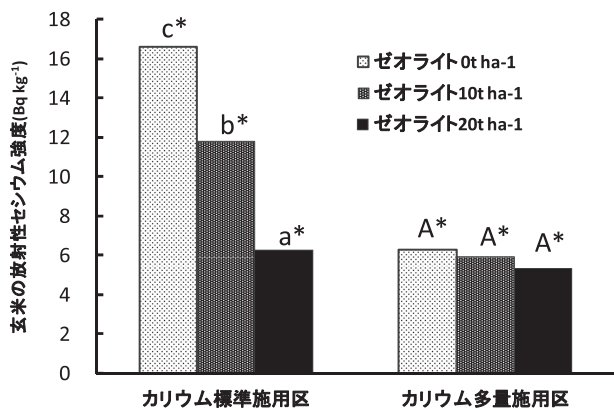


図1 ゼオライトの施用が玄米の放射性セシウム強度に及ぼす影響

\*: Tukey 法同一アルファベット間に有意差なし。α=0.25, n=3

加し、その効果は陽イオン交換容量の小さな土壤ほど大きかった。すなわち、放射性セシウム吸収抑制対策として塩化カリウムを用いる場合にはゼオライトを施用することにより土壤からカリウムイオンの溶脱や流出を抑制することができる。なお、アンモニウムイオンはカリウムイオンよりゼオライトに交換吸着されやすいイオンであるので、カリウムイオン以上に溶脱や流出を抑制すると考えられる。

4. ポット栽培試験

上記の現地栽培試験とゼオライト施用土壤中でのカリウムイオンの挙動に関する実験結果を踏まえて、水稻のポット栽培試験を行った。福島県伊達市の水田から採取した放射性セシウム強度  $3,130 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、陽イオン交換容量  $9.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  の土壤を供試し、図3に示す8試験区を設けて、1/5000a ワグネルポットにより水稻（品種：ひとめぼれ）を栽培した。栽培期間中には24時間当たり1cmの減水深を想定して、ポット下部より200mLの溶脱水を採取した。定植48日後の幼穂形成期に青刈りして放射性セシウ

ム強度を測定した。なお、本試験のカリウム肥料施用区では、ゼオライト中に含まれる約  $10 \text{ g kg}^{-1}$  の  $\text{K}_2\text{O}$  量を合計してポット当たり  $600 \text{ mg}$  とした。

その結果、ゼオライトとカリウム肥料無施用区では  $511 \text{ Bq kg}^{-1}$  と高い値を示したが、カリウム肥料施用区とゼオライト+カリウム肥料施用区では、いずれも  $70 \sim 100 \text{ Bq kg}^{-1}$  にまで低減された。次に、塩化アンモニウムを用いてゼオライト中の交換性カリウムを90%除去した後交換基をカルシウムイオンで交換した脱カリウムゼオライト施用区のカリウム肥料無施用区では  $5 \text{ t ha}^{-1}$  相当量施用区で  $371 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、 $10 \text{ t ha}^{-1}$  相当量施用区では  $319 \text{ Bq kg}^{-1}$  に減少した。ただし、カリウム肥料施用区では無処理ゼオライト施用区あるいはゼオライト無施用区と同等の  $80 \text{ Bq kg}^{-1}$  程度まで下がった。すなわち、 $\text{K}_2\text{O}$  として  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  程度のカリウムを施用すれば、ゼオライト施用の有無にかかわらず水稻への放射性セシウムの吸収移行を防止することができる。しかし、十分なカリウム肥料の補給が行われない場合には、ゼオライトの施用効果が期待できる。青刈りまでの栽培期間中におけるカリウムとアンモニウムイオン溶脱量は図4のようにゼオライトの施用により減少し、特にアンモニウムイオンで顕著であった。

5. ゼオライトの放射性セシウム吸収抑制メカニズム

以上の結果より、ゼオライトの水田への施用は水稻への放射性セシウム吸収抑制に有効で、そのメカニズムは次のように推察される。

土壤に混入したセシウムイオンの多くは固定あるいは交換性イオンとなるが、ごく一部が水溶性イオンとして存在する。そこにゼオライトを施用すると、水溶性セシウムイオンが吸着されるため、ゼオライト無施用区に比べて、土壤溶液中のセシウムイオン濃度が低下する。そこに肥料としてアンモニウムイオンとカリウムイオンを補給すると、両イオンの多くはゼオライトに交換吸着されるが、一部が水溶性アンモニウムイオンとカリウムイオンとなる。そのようなイオン組成を持つ土壤中に水稻根が伸びてくると、

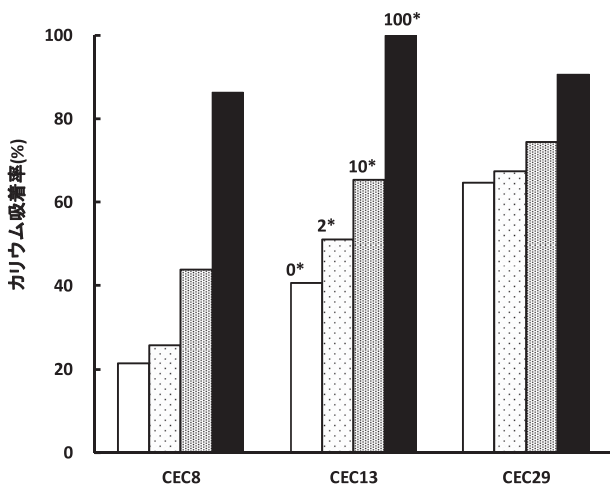


図2 土壤のCECとゼオライトの施用がカリウム吸着率に及ぼす影響  
\*ゼオライト添加量 ( $\text{g kg}^{-1}$ )

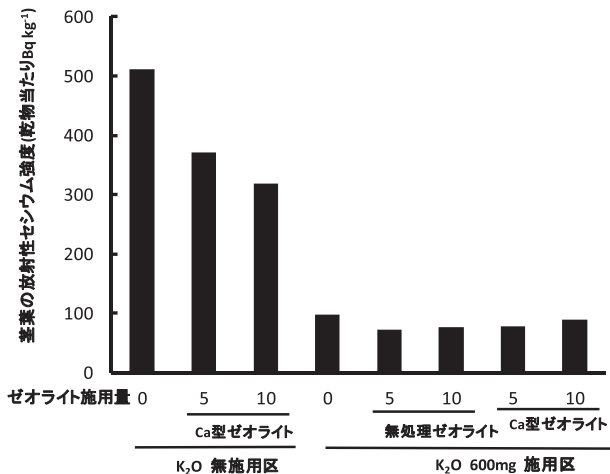


図3 カリウムとゼオライトの施用が水稻茎葉の放射性セシウム強度に及ぼす影響

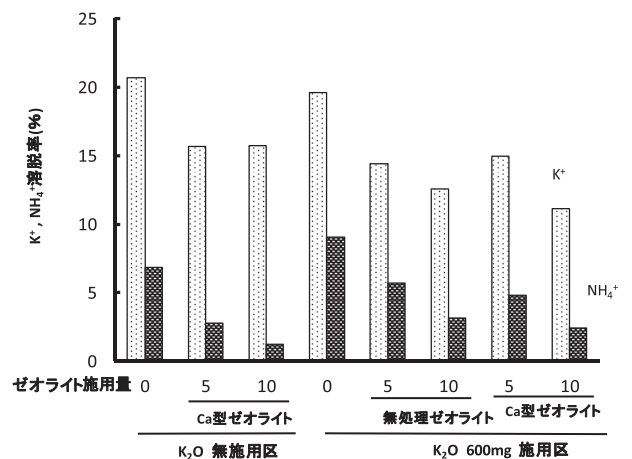


図4 ゼオライトの施用がカリウムイオンとアンモニウムイオンの溶脱率に及ぼす影響

水稻はセシウムイオンよりカリウムイオンやアンモニウムイオンを好んで吸収するので競合的にセシウムの吸収が抑制される。水稻がカリウムイオン・アンモニウムイオンを吸収して土壤溶液中の両イオン濃度が低下すれば、ゼオライトや土壤に吸着されている両イオンが離脱して、一定のイオン濃度比率が保たれるため、ゼオライト施用土壤中に両イオンがなくなるまでセシウムイオンの水稻への吸収が抑制されると推察される。

通常、水田では20 mm前後の減水深を示す。その中には水田表面からの蒸散による減水も含まれるが、一部は下層に浸透するため、肥料として施用したアンモニウムイオンとカリウムイオンの一部が下層に溶脱する。また、多雨時などには田面水を排水するので、それによっても両イオンが流出する。しかし、ゼオライトを施用すれば、室内実験結果が示すように両イオンがゼオライトに交換吸着されるので、窒素とカリウムの肥効率が高まり、玄米中のタンパク質含有量と収量の増加をもたらすと考えられる。

すなわち、放射性セシウムで汚染された水田へのゼオライトの役割は単なるセシウムイオンの吸着ではなく、土壤中からのアンモニウムイオンとカリウムイオンの流出を抑制し、水稻への窒素とカリウムの肥効率を高めることにあると考えられる。従って、水田での放射性セシウム吸収抑制対策としては、カリウム肥料の多量施用ではなく、ゼオライトを施用した上で適正なカリウム施用量を決定すべきである。

天然ゼオライトには $10 \text{ g kg}^{-1}$ 前後の $\text{K}_2\text{O}$ が含有され、当然のことながらそのカリウムもセシウム吸収抑制対策に有効である。カリウム鉱石はリン鉱石と異なり十分な埋蔵量がカナダなどで確認されているため当面枯渇する心配はないが、わが国で使われているカリウム肥料は全て輸入に依存している。一方、福島県、山形県や秋田県などには無

尽蔵とも言われる大量かつきわめて良質の天然ゼオライト鉱床が埋蔵されている。これを農地の放射能対策資材として活用しない手はないであろう。

なお、土壤改良資材として利用可能な国内産天然ゼオライトは本報で供試したモルデナイト主体品の他にクリノプチロライト主体品がある。それらのセシウムイオンとアンモニウムイオンに対する反応性に違いがないことが確認されている(後藤, 2011; 西村, 1973)ので、天然ゼオライトを水稻への放射性セシウム吸収抑制資材として利用する際に、主体鉱物を区別する必要はない。

## 文 献

- 福島県・農水省 2013.放射性セシウム濃度の高い米が発生する要因とその対策について. <http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/kome.pdf>
- 後藤逸男・嶋木 翠 1980.天然ゼオライトの農業利用に関する基礎的研究(第3報). 東京農大農学集報, 25,164-168.
- 後藤逸男・橋本 大・近藤綾子 2011.土壤・天然ゼオライト・植物中におけるセシウムの挙動. 農園, 86,976-979.
- 中尾 淳・山口紀子 2012.放射性物質の土壤中での動き, 最新農業技術土壤施肥編 4, p.49-57. 農文協, 東京.
- 西村陽一 1973.天然ゼオライトの特性と利用. 粘土科学, 13, 23-34.
- 農研機構 2012.玄米の放射性セシウム低減のためのカリ施用, 農研機構 プレスリリース. [http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/narc/027913.html](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/narc/027913.html)
- 沼倉正二・浅野岩夫・若生松部江 1966.水田に対するゼオライトの施用効果に関する研究. 群馬県農試報告, 37,45-58.
- 天正 清・葉 可霖・三井進午 1961.水稻による特異的セシウム吸収の機構. 土肥誌, 32,139-144.
- 坪田五郎・宮脇謙三・三宅 信・小川昭夫 1960.大谷石々粉の農業利用に関する研究(第一報). 4,35-36.
- 坪田五郎・窪見晏伺・小川昭夫 1963.同上(第二報). 7,79-88.
- 塚田祥文・武田 晃 2012.放射性核種の作物への移行, 最新農業技術土壤施肥編 4, p.59-64. 農文協, 東京.