

水田の放射能汚染と稲への移行

Radioactive Contamination of Paddy Field and Its Transfer to Rice

塩 沢 昌[†]
(SHIOZAWA Sho)

I. はじめに

福島第一原子力発電所事故で大気へ放出され降下した放射性セシウム (Cs) によって福島県の農地が汚染された。昨年度、ごく一部の水田ではあるが、玄米の放射線量が暫定基準値 (500 Bq/kg) を超える水田および土壌から玄米への移行係数 ([玄米の線量 (Bq/kg)] / [作土の線量 (Bq/kg)]) が従来の最大値とされた 0.1 を超える水田が生じた。農林水産省と福島県の調査¹⁾にもかかわらず、この原因は明確にされておらず、謎となっている。農林水産省の調査報告においても用水経由の Cs 流入の疑いが指摘され、多くの農民と研究者がそう考えているが、著者は、高濃度汚染米が出た水田の調査と栽培実験に基づいて、Cs が降下した時に水田を覆っていた有機物に媒介されて玄米への高濃度の移行が生じたことを主張している²⁾。

II. Cs の土壌中の挙動と根からの吸収

Cs は水に溶けて陽イオンとなるが、土壌や生きた植物などの有機物に固定されやすく水とともに移動しにくいことが大きな特徴である。この土壌などへの固定には、2つの形態を区別する必要がある。ほかの陽イオンと同様に負電荷をもつ土壌や有機物に弱く固定されるとともに、特定の粘土鉱物 (イライト、パーミキュライト、風化雲母など) の層状結晶の風化で開いた端部 (フレイドエッジ) などに特異的に強く固定される³⁾。弱く固定された Cs はほかの陽イオンと交換されて可溶化するが、土に強く固定された Cs はほとんど水に溶けて動くこともなくなり植物の根から吸収されることがなくなる。

昨年 5 月下旬に不耕起水田土壌で測定した Cs 濃度分布 (図-1) は、Cs の 90% が表面 3 cm に止まっているものの、昨年 3 月下旬の Cs 降下からこの時点までの移動量 (1.7 cm) は降雨浸透による水の移動量 (約 20 cm) と比べて 1/10 程度と予想外に速い速度で移動していた⁴⁾。著者らは、土壌サンプリングに

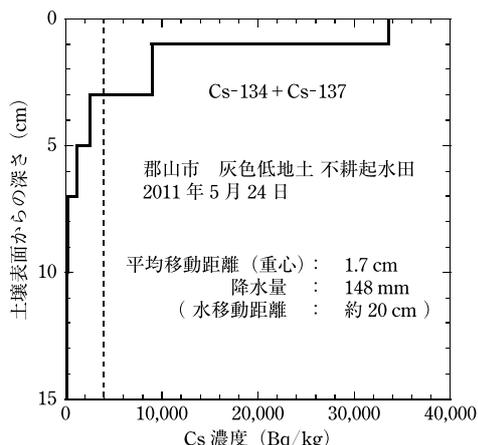


図-1 不耕起水田土壌の放射性セシウム (Cs) の鉛直分布 (破線は作土 (0~15 cm) の平均値)⁴⁾

よって Cs 濃度分布を求めるとともに、土中に打ち込んだパイプ内で、側方のみスリット窓を設けた鉛コリメータで覆って水平方向からのみ γ 線が入射するようにしたシンチレーションプローブで放射線量の鉛直分布を測定し、線量分布の重心位置の 2 時点の差から土中の Cs の移流速度を求める方法を開発し、福島県内の数カ所でモニタリングをしている⁵⁾。その結果、昨年 6 月以降の 3~9 カ月間の Cs 移流速度は水の浸透速度 (約 2 m/year) の約 1/200 に低下していることが明らかになっており、土壌への当初の弱い固定から強い固定が時間をかけて進行していること示している (図-2)。土壌への強い固定が進むことによって、植物の根による Cs 吸収も低下したはずである。実際、野菜のような畑作物への Cs 移行は、今年の夏に

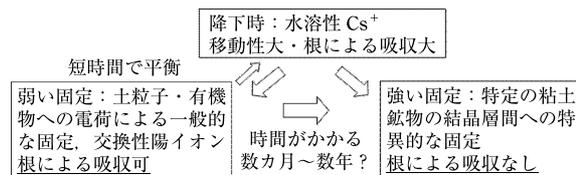


図-2 土壌・有機物による放射性セシウムの固定 (降下時に針葉樹の葉や木肌に多量に付着しており (電荷による固定)、大半がイオン形態で降下したと思われる)

[†] 東京大学農学生命科学研究科



かけて大きく減少した。

III. 高濃度放射能汚染米はなぜ生じたのか

農林水産省と福島県の調査¹⁾によれば、Csの移行係数と明確な相関がみられたのは土壌カリウム(K)のみで、ほかの土壌特性との相関はなく、土壌特性が原因でないことを示している。移行係数は大半の水田は0.01以下であるが、バラツキが大きく、土性が同様の近隣の水田でも数倍も異なる。

稲への大きなCs移行は、葉が展開して蒸散と根の吸水が盛んになった8月にCsが吸収されたことによる⁶⁾。ほとんどの水田で8月にはすでにCsのほとんどが土壌に強く固定されて稲には吸収されなかったにもかかわらず、高濃度汚染米が出た水田では、8月時点でも土壌に強く固定されていないCsが土壌中に多量に存在したのである。高濃度汚染米発生メカニズムは、どのようにして土壌への強い固定を免れたCsが土壌中に存在し得たかということである。

1. 有機物媒介による稲への移行

高濃度汚染米が出た水田の調査によって得た著者の結論は、昨年3月下旬にCsが降下した時に、水田表面を覆っていた有機物(雑草、稲の株、稲わら、落ち葉起源の腐植物質)に大量のCsが付着し固定され、この有機物が浸透量の少ない還元状態の水田において土壌にすき込まれた後も分解されずに8月まで残って、この有機物から根がCsを吸収したというものである²⁾(図-3)。

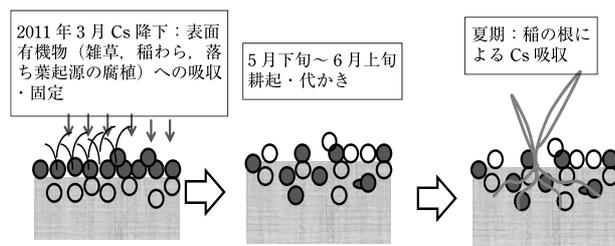


図-3 有機物を媒介とした稲のCs高濃度吸収のメカニズム

調査を行った玄米中のCsが500 Bq/kgを超えた水田および移行係数が0.1以上の水田に共通する特徴は、Cs降下時に水田表面を有機物が覆っていたと考えられるとともに、近接水田と比較しても浸透量の少ない排水不良田である。浸透に伴う酸素の供給が少なくCsを固定した有機物が分解されにくく8月まで残ったと考えられる。また、耕起にもかかわらず土壌中のCs濃度が表層で著しく高く、代かきで浮き上がる軽い有機物に固定されたことを示している。有機物に固定されたCsは、土壌に強く固定されたCsと違って、稲が吸収できる形態である。

2. 雑草による媒介

著者が調べた玄米中のCsが500 Bq/kgを超えた福島市渡利地区や大波地区、伊達市の4つの水田はいずれも粘質土の水田で、この冬~春に共通して見られたのは、水田表面を覆う冬の雑草である(写真-1)。冬の水田雑草は秋の刈取りの後、秋起こしをしない水田で湛水はないが水分が多い水田に生育する。冬~春に雑草が覆う水田は農家の水田管理が同じなので毎年同じであり、2012年の3月に水田雑草に覆われていた水田は、2011年3月にCsが降下した時も同様であったと考えられる。なおこの地域で雑草が覆っている水田は全体の10%以下で多くはない。

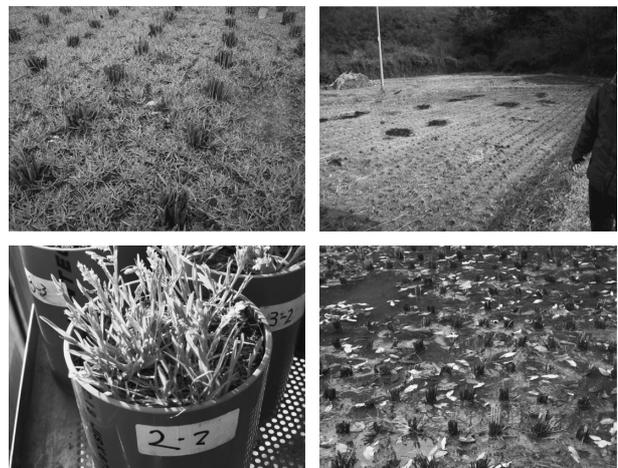


写真-1 左上: 雑草に覆われた水田(玄米580 Bq/kg)、右上: 同(玄米630 Bq/kg)、左下: 不撈乱採取した雑草ポット、右下: 落ち葉の入った砂質土水田(移行係数1.3)(2011年12月撮影)

この雑草にCs-137を撒布して固定量を調べるポット実験と稲を栽培して吸収を調べる実験を行った結果(表-1)、生きた雑草の地上部が撒布したCsの1/5を固定し、これをすき込んで稲を栽培したポットは、土壌にCsを注入したポットの稲の2倍のCsを吸収した。実験でのポットへのCs撒布は1~2分間程度の短時間であるが、原発事故のCsを降下させた雨は、数時間をかけて降った弱い雨で、針葉樹の葉や木肌に着着してその後の雨でも流されにくく昨年夏の時点で降下したCsの1/2が地上部に存在していたことを考えると、雑草水田でも降下したCsの1/2近くが雑草地上部に固定された可能性がある。高濃度にCsを固定した雑草は耕起・代かきで土壌にすき込まれたが、粗大有機物に固定されたCsは、この有機物が分解されない限り容易には土壌に移行しないはずである一方、植物の根は接触すれば吸収できる。

3. 落ち葉および海草が起源の腐植による媒介

原発事故によるCs降下時に水田表面を覆っていて

表-1 雑草ポットへの Cs-137 撒布と稲の栽培実験の結果（実験：伊達市の玄米 580 Bq/kg 水田（粘質土、土壌約 6,000 Bq/kg）から不攪乱採土した雑草ポット（断面積 90 cm²、土の深さ 10 cm、乾土質量約 1 kg）に、4,000 Bq の Cs-137 を撒布（50 ml）の後、散水（3 週に 8 回、200 mm）し、雑草の放射能測定後にポットに戻し、耕起・代かき、稲移植した 2 カ月後に稲の吸収した放射能を測定）

ポット番号	Cs-137の撒布・注入	雑草のCs固定形態	雑草地上部の質量 (g)	雑草地上部の放射能 (Bq)	雑草に固定されたCs-137の割合 (%)	雑草のCs濃度 (Bq/g)	稲が吸収したCs濃度 (Bq/g)
1	地上にスプレー	草の地上部に固定	15.4	868	21.7	56	2.35
2	土壌表面に注入	根からの吸収	6.03	57	1.4	9	1.17
3	Cs撒布なし	原発事故のCsのみを根から吸収	9.62	ND	ND	ND	ND

0.1 を超える移行係数をもたらしたと考えられる別の有機物に、落ち葉起源の腐植物質がある。福島県の予備調査で玄米が 500 Bq/kg となった二本松市の水田は、北斜面の東西南を山に囲まれた日当たりが悪い棚田である。山を崩して谷を埋めて拡張した水田のために、土壌は地山内部の花崗岩風化物で粘土分が非常に少ない（約 5%）。稲わらは残さず有機肥料を投入していないにもかかわらず、有機物含有量が多い（約 5%）のは、日陰で温度が上がらず蒸発散が少なく非灌漑期でも湿っていて有機物の分解が遅いためであろう。稲への Cs 移行が大きかったのは棚田の上から 2 段目である。一番上の田には湧水があって用水源となっており、2 段目には地中の暗渠から水が落ちる。もし山から Cs が田に浸入したことが原因であれば、必ず一段目で稲への移行が大きくなければならぬから、山からの流入が原因でないことが明確である。2 段目だけが湧水のない非灌漑期でもわずかな降雨の後で湛水下にあり、浸透量が著しく小さいのである。

この水田は、代かき時にトラクタによる十分な攪拌・混合が行われているにもかかわらず、表層 2 cm は黒い色の層となっており、土壌の Cs 濃度の鉛直分布は表層の線量が著しく高いことを示している。これは Cs を付着した物質が軽く代かき時に表層に浮き上がることを示しており、落ち葉に由来する腐植物質と考えられる。黒い色は落ち葉に多いフルボ酸鉄とみられ、冬に、田を囲む山林からかなりの落ち葉が水田に入っていることを確かめた（写真-1 右下）。β線を感光するイメージングプレート画像でもこの黒い表面部分が強い放射線源であることが確認された。原発事故で降下した Cs の多くがこの水田表面の腐植に固定され、代かき後も浮き上がって高濃度の表層を形成しここに根が入って Cs を吸収したと考えられる。

同じメカニズムと考えられる稲への著しく高い Cs 移行が、津波を被った水田でみられた。南相馬市は昨年の稲の作付けを行わず、11 カ所の水田で試験的な作付けを行った結果、2 つの水田において移行係数が 0.21 と 0.17（土壌の濃度が低いので玄米の濃度は低い）となり、ほかの 9 つの水田の幾何平均 0.026 に

比べて突出して高かった。この 2 つの水田はいずれも海に近い津波を被った水田であった。津波を被った水田は耕起前には、津波が運んだ砂が元の土壌の上に約 10 cm 堆積し、この表層約 2 cm には黒い海洋性のヘドロが含まれ有機物含有量が多い。海草には落ち葉と同様にフルボ酸鉄が多く含まれるので、黒い色は海草起源の腐植物質とみられる。

4. 用水量（浸透量）の影響

農林水産省と福島県の調査で、土壌 K が少ない水田ほど稲の Cs 吸収が多い傾向が示されている。K は河川水や用水に 1 ppm 程度は含まれており、用水量（浸透量）が多ければ用水経由で必要量が供給される（次節の(1)(2)式を K に適用すればよい）。施肥の K がなければ、K の不足は浸透量の小さいことが原因で、土壌 K 濃度と玄米の Cs 濃度との見かけの相関は、浸透量と玄米の Cs 濃度との相関を含む可能性がある。

5. 用水経路の Cs 流入は原因ではない

用水経路での Cs 流入が「犯人」ではない証拠はいくつも挙げることができる。まず、この地域の作土の濃度は 5,000 Bq/kg（750,000 Bq/m²）を超えるにもかかわらず、用水の Cs 濃度がすべて測定限界以下（1 Bq/kg 以下）の低濃度である。著者が係わった用水や沢水の Cs 濃度調査での最大は南相馬市の上流域が高濃度汚染地域（100 万 Bq/m² 以上）であるが（図-4）、それでもやっと 1 Bq/kg のレベルである（粘土の懸濁態 Cs は稲にほとんど移行しない）。

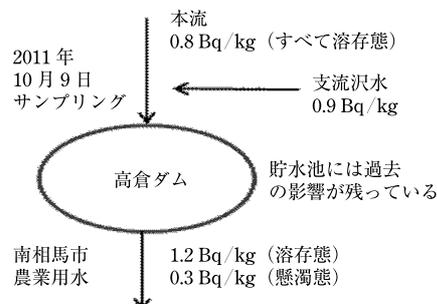


図-4 高濃度汚染山間地域の河川、沢水、ダム放流水の Cs 濃度（東大 RI 総合センターの協力による南相馬市の調査）

ここで、用水のCs濃度を1 Bq/kgと仮定して、用水経由で流入するCsの量と稲への移行の寄与を試算すると、一作の水田用水量と用水経由の物質流入量は、およそ次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{水田用水量} &= \text{浸透量} + (\text{蒸発散量} - \text{降雨量} \\ &\quad + \text{地表排水量}) \approx \text{浸透量} \cdots \cdots (1) \\ \text{物質 (Cs) 流入量} &= \text{用水量} (\approx \text{浸透量}) \\ &\quad \times \text{用水の物質 (Cs) 濃度} \cdots (2) \end{aligned}$$

一般に水田用水量は、大きめの水田で一作2,000 mm (20 mm/d) 程度である。この場合、用水経由のCs流入量は2,000 Bq/m²である。水田作土(0~15 cm)の乾土重を150 kg/m²として、土壤乾土当たりの寄与は約13 Bq/kgである。水耕栽培ではないので水溶性のCsは土壤中を拡散して根に到達する間に土壤に固定されるため、必ずしも根に吸収されやすい添加形態ではないと思われるが、根に吸収されやすいとして移行係数を大きく見積もって0.1とすると、玄米への移行の寄与は1.3 Bq/kgである。大きめの見積りであるがまったく問題にならない移行である。実際に高濃度汚染米が出た水田は浸透が大きい水田ではない。用水量を一作に200 mmとすれば、土壤への寄与は1.3 Bq/kgで玄米への移行の寄与は0.13 Bq/kgに過ぎない。高濃度汚染米が出た地域の水田に降ったCsは、土壤(0~15 cm平均)の線量で5,000 Bq/kg (750,000 Bq/m²)程度がそれ以上のレベルであり、これに対して用水から流入するCsは一作でその1/1,000以下であり問題にならない。

もし用水からの流入が原因であれば、用水量の多い(浸透量の多い)水田ほどCs流入が多く稲への影響が大きいはずであるが、実際に高濃度汚染米がでたのは用水量の少ない水田であり、用水経由の外部からの流入が原因でないことを示している((2)式)。伊達市で高濃度汚染米が出た農家は、用水からのCs流入を心配して中干し以降に用水を入れなかった水田である(降雨だけで豊作になったことは浸透量が少ないことを示している)。いかなる形態でも、用水から多量にCsが流入したのであれば(大量流入がない限り)稲に高濃度で移行しない、用水流入口付近の土壤Cs濃度が高いはずであるが、著者らの調査で直下土壤からの放射線のみを測定できる鉛コリメータ付きサーベーターで測定した4カ所の水田においてそのような兆候はまったく観測されなかった。

Csはほかの陽イオンと異なり、土壤に強く固定されるため、土壤が存在する環境中で水溶性のイオン形態では移動しにくい。森林土壤は透水性が高く土壤を通過して流出するため、土壤にトラップされて流出しにくい。都市下水汚泥や阿武隈川などの泥に高濃度の

Csが含まれ、ホットスポットが形成されていることが報道されているが、これは山からの流出ではなく、Csを固定する土壤や植生の被覆がない道路や家の屋根などの市街地からの排水に含まれて流出したCsが河川の粘土に固定されたものである。

以上のように用水経由のCs流入は、客観的・論理的にみて、汚染米の原因ではあり得ず、「犯人」として疑う根拠はなく憶測である。

IV. おわりに

著者の「有機物媒介説」が正しければ、昨年Csを固定して稲への大きな移行を媒介した有機物の大部分はすでに分解されて(とくに雑草)Csは土壤に移行していると考えられるので、本年(2012年)の稲への移行は大幅に減少すると予測できる。来年以降の長期的な稲への移行については、過去の研究⁷⁾から、緩やかに減少すると予想される。

引用文献

- 1) 福島県, 農林水産省: 暫定規制値を超過した放射性セシウムを含む米が生産された要因の解析(中間報告)(2011), http://www.pref.fukushima.jp/keieishien/kenkyuukaihatu/gijyutsufukuyuu/05gensiryoku/240112_tyukan.pdf
- 2) 塩沢 昌: 水田における土壤から稲への放射性セシウム移行のメカニズムについて, 第二回放射能の農畜水産物等への影響についての研究報告会(2012), <http://www.a.u-tokyo.ac.jp/rpjt/event/20120218.html>
- 3) 山口紀子ほか: 土壤-植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因, 農環研報 31, pp. 75~129 (2012)
- 4) 塩沢 昌ほか: 福島県の水田土壤における放射性セシウムの深度別濃度と移流速度, Radioisotopes 60, pp. 323~328 (2011)
- 5) 塩沢 昌: 土壤中の放射性セシウムの挙動, 放射能の農畜水産物等への影響についての研究報告会(2011), <http://www.a.u-tokyo.ac.jp/rpjt/event/20111119.html>
- 6) 根本圭介: 放射性セシウムのイネへの移行, 放射能の農畜水産物等への影響についての研究報告会(2011), <http://www.a.u-tokyo.ac.jp/rpjt/event/20111119.html>
- 7) 駒村美佐子, 津村昭人, 山口紀子, 藤原英司, 木方展治, 小平 潔: わが国の米, 小麦および土壤におけるSrとCsの長期モニタリング, 農環研報 24, pp. 1~21 (2006)

[2012. 6. 18. 受稿]

塩沢 昌 (正会員)

略 歴



1979年 東京大学大学院修士課程修了
1980年 山形大学農学部助手
1986年 東京大学農学部助手
1995年 筑波大学農林工学系助教授
2001年 東京大学大学院農学生命科学研究科助教授
2004年 同教授
現在に至る