

II. 分担研究報告

厚生労働行政推進調査事業費補助金 (食品の安全確保推進研究事業)

農作物中 Cs と長半減期核種の濃度測定に関する研究 分担研究報告

分担研究者 塚田 祥文 (福島大学 環境放射能研究所)

研究要旨

東京電力福島第一原子力発電所(FDNPS)事故直後に設定された暫定規制値に代わり、2012 年4月以降の長期的な状況に対応するために新しい食品中の放射性物質の基準値が設けられた。その基準値は、放射性セシウム(Cs)について「一般食品」では 100 Bq/kg、「乳児用食品」及び「牛乳」では、より安全側に 50 Bq/kg とすることが妥当であると示された。この基準値の導出には、食品への移行経路毎に放射性核種移行評価を実施して食品中の放射性核種濃度比を推定することにより、対象となる放射性セシウム(Cs)以外の核種(ストロンチウム-90 (^{90}Sr)、ルテニウム-106 (^{106}Ru)及びプルトニウム(Pu)同位体)の寄与も考慮されているが、ガンマ線測定によるモニタリングでは測定が困難なストロンチウム-90 (^{90}Sr)について FDNPS 周辺地域では不安の声が大きい。また、ヨウ素-131 (^{131}I)については放出量も多く、暫定基準値として設定されたが、半減期 8 日と短半減期であるため、現行基準値において規制対象核種となっていない。一方、2011 年の事故時に放出が認められているヨウ素-129 (^{129}I)については、放出量がきわめて限定されていたため、規制対象外の放射性物質ではあるが、「食品の基準値の導出について」にもあるように、今後の測定によって確認する必要があるとされている。本研究では、2020 年度に福島県で採取した作物(玄米)中の放射性 Cs 濃度及びストロンチウム-90 (^{90}Sr)濃度、並びに基準値の設定において影響が小さいとして規制対象核種に含まれなかった ^{129}I 濃度を測定し、周辺地域や 2011 年の事故による影響が限定的と考えられる対象地域においても作物を採取し、それぞれの濃度を求めた。低減化対策により福島県内で採取された作物中放射性 Cs 濃度は基準値を大幅に下回る値まで減少していた。また、福島県内で採取した作物中 ^{90}Sr 濃度についても、0.1 Bq/kg 以下と極めて低い水準にあった。福島県内で採取した作物中 ^{129}I 濃度は、0.01 mBq/kg 以下と放射性 Cs 濃度より 6 桁低い値にあった。

A. 研究目的

2011 年 3 月に発生した東日本大震災に起因する東京電力福島第一原子力発電所(FDNPS)事故により、大量の放射性物質が大気及び海洋に放出された。この事故により放出された放射性核種による食品の摂取による内部被ばくが懸念され、厚生労働省は平成 24 年 4 月以降、食品からの内部被ばくを年間線

量 1 mSv として導出された基準値を適用している。この基準値は、対象となる放射性 Cs 以外の核種(ストロンチウム-90 (^{90}Sr)、ルテニウム-106 (^{106}Ru)及びプルトニウム(Pu)同位体)については、 ^{137}Cs との放射能濃度比から、これらの核種の濃度を推定し、設定された。また、基準値の設定の際、規制対象核種以外の核種の影響に関しては、いずれも影響は小さいと結論

づけられているが、このうちヨウ素-129 (^{129}I 、半減期 1570 万年)、テクネチウム-99 (^{99}Tc 、半減期 21 万年) 等の長半減期核種については、「長期的には、今後の測定によって確認することが必要であるが、寄与は十分小さいと考えられる」としている。

これまでに、営農再開を予定している地域を含め福島県内で栽培された作物の放射性 Cs や ^{90}Sr 濃度を測定してきた。その結果、放射性 Cs 濃度は、避難指示解除準備区域、居住制限区域等での試験栽培によって得られた作物も含め福島県内の流通作物は全て基準値以下であった¹⁾。また、これまでに実施した本課題や全国モニタリング調査²⁾によっても作物中 ^{90}Sr 濃度は、福島県以外で生産されている作物中濃度の範囲にあり、大気圏核実験由来と考えられ、作物から放射性 Cs 以外には事故の影響は見られなかった。また、測定結果を用いて内部被ばくに対する寄与率の状況を確認し、食品摂取に伴う内部被ばくを計算したところ、保守的な条件であっても十分に 1 mSv/年を下回る結果が得られた。福島県内では徐々に営農再開する地域は拡大している。しかしながら、帰還した地域であってもすべての地域で営農再開を果たしたわけではなく、試験作付けによる作物中放射性核種濃度の検査を継続している地域も多く、食品摂取による内部被ばくに対する不安は未だに大きい¹⁾。

現在環境中に存在する ^{129}I の起源は、主に大気圏核実験、核燃料再処理施設、チェルノブイリ原子力発電所事故などであるが、自然界でも大気中で宇宙線とキセノンの反応、ウランの自発核分裂などでも生成されている³⁾。2011 年の事故でも FDNPS から放出されたことが明らかになっている⁴⁻⁶⁾。そこで、食品中の放射性物質の基準値に対して、国民が安心・安全を得ることができること、そして国内の食品の安全に関する根拠を示すため、食品中の放射性物質の基準値の妥当性について検証を行うことを目的とし、福

島県内と周辺地域、並びに比較対象地域から作物を採取し、放射性 Cs、 ^{90}Sr 及び ^{129}I 濃度を測定し、2011 年の事故由来による作物中濃度への寄与を明らかにした。

B. 研究方法

1. 土壌及び作物採取

土壌及び作物(玄米)は、表 1 及び表 2 に示す福島県の浜通り、中通り(2 地点)、会津の 4 地点、周辺地域として宮城県と栃木県、並びに FDNPS 事故の影響が限定されている愛知県の計 7 地点で採取した。玄米の収穫は、9 月以降となり年度内の分析が困難となることなら 2019 年度産試料を採取した。

土壌は、5 点法によって ϕ 50 mm のコアサンプラーで表層 0~20cm を採取した。作物中 ^{90}Sr の分析結果を得るには、作物を灰化・減容し、大量の試料を用いる必要から、作物は土壌を採取した圃場から非可食部の歩留まりが 5 kg となるように考慮して採取した。土壌及び作物の採取重量は、それぞれ表 1 及び表 2 に示した。

2. 試料の前処理

土壌は、50°C で約 1 週間乾燥後、2 mm のふるいを通し、5 地点から採取した土壌を混合し試料とした。

籾は、含水率が約 15% 程度となるまで乾燥した後、脱穀し玄米とした。玄米試料の一部(500 g)は、1 週間凍結乾燥した後、ステンレススチール製カッターブレンダーで粉碎混合し、 ^{129}I 分析用玄米試料とした。その他の試料は、70°C で 3 日間以上乾燥した後、放射性 Cs の測定試料とした。放射性 Cs を測定した後、450°C で灰化し、粉碎混合して ^{90}Sr 分析試料とした。新鮮重量に対する乾燥重量の割合と新鮮重量に対する灰重量を表 2 に示した。

3. 放射性 Cs 濃度の測定

土壌試料をプラスチック容器(U-8)に、乾燥した玄米試料を 2L マリネリ容器に詰め、Canberra 社製の Ge 半導体検出器(GC2020、GC3020 及び GC4020)で、放射性 Cs 濃度を測定した。セシウム-134 (^{134}Cs) 及びセシウム-137 (^{137}Cs) の定量には、それぞれ 604.7 keV 及び 661.7 keV の γ 線を用い、土壌は 10,000~259,000 秒、作物は 186,413~1,122,317 秒測定した。また、同時にカリウム-40 (^{40}K) (1,460 keV) も定量した。日本アイソトープ協会製の 5 種類(5~50 mm、9.5~95.0 g)の標準試料を用いて効率曲線を作成した。なお、作物試料の一部は、7 日間以上測定したが、放射性 Cs を検出できなかった。

4. ^{90}Sr 濃度の測定

福島県内で採取し灰化した作物試料 58~60 g (4,730~5,370 g 生重量相当)に安定 Sr キャリアを添加し、硝酸、過酸化水素水で溶液に分解後、水酸化ナトリウム溶液で pH 10 以上とし、炭酸 Sr 沈殿を作製し、分離した。炭酸 Sr 沈殿を塩酸で溶解し、シュウ酸塩沈殿を生成させた。沈殿を灰化後、塩酸に溶解し、陽イオン交換樹脂でカルシウム(Ca)を除去した。更に、ラジウム(Ra)を除去するためイットリウム-90 (^{90}Y)をミルクィングし、低バックグラウンドガスフローカウンターで100分間の計測をした。Fe-Y 共沈法で検出下限値を下回った試料(2020P-7)は、炭酸塩の形態で低バックグラウンド 2π ガスフローカウンタにより長時間の β 線計測を行った。 ^{90}Sr 濃度の測定方法は、原則文部科学省放射能測定シリーズ2「放射性ストロンチウム分析法」(平成 15 年改定)⁷⁾等に拠った。

5. ^{129}I 濃度の測定

5.1 土壌試料

土壌試料 5 g と五酸化バナジウムを同量秤量後に混合した。この混合試料を乗せた石膏ボートを石英管内に設置し、石英管内に水蒸気を含んだ酸素気

流下にて 1000°C で加熱し試料からヨウ素を揮発させた。揮発したヨウ素は、アルカリ吸収溶液(TMAH 25% (TAMAPURE-AA, 多摩化学) 0.4 mL、5000 ppm の亜硫酸ナトリウム 0.2 mL 及び超純水 7 mL) 30 mL を使用した。 ^{129}I 測定試料と ^{127}I 測定試料にそれぞれ分取し、 ^{129}I 測定試料にはキャリア 2 mg を添加した。

トルエン 20 mL とアルカリ吸収溶液試料を分液ロート内で混合し、濃硝酸を滴下し pH を 1 に調整、10%亜硝酸ナトリウム水溶液 1 mL を入れ 2 分間振とう、ヨウ素イオンをヨウ素としてトルエンに抽出した。分離した水相をトルエン 10 mL が入った別の分液ロートに分取し再度 2 分間振とうした。2 つの有機相を分液ロート内で混合、超純水 10 mL を加え 2 分間振とうし、有機相の洗浄を行った。洗浄した水相を除き、超純水 20 mL、5000 ppm 亜硫酸ナトリウム 0.8 mL を添加し 2 分間振とう、ヨウ素をヨウ素イオンとして水相側に逆抽出した。水相を回収、残った有機相に超純水 10 mL を加え 2 分間振とうし、先に回収した水相と混合しヨウ素イオン水溶液 30 mL を得た。

抽出を行ったヨウ素イオン水溶液 30 mL に濃アンモニア水 1.5 mL と 1M 硝酸銀水溶液 1 mL を添加し、ヨウ化銀の沈殿を生成した。この沈殿を暗所にて一晩放置後、上澄みを除去し回収した沈殿に対して 3000rpm で 5 分間の遠心分離を行った。遠心分離後の上澄みを除いた試料に超純水を加え、良く攪拌した試料を再び遠心分離した。上澄みを除去し、60°C に設定した乾燥機に 3 時間入れヨウ化銀試料を乾燥させた。乾燥したヨウ化銀試料の重量を測定し、回収量を求めた。

ヨウ化銀試料 (^{129}I 照射試料であるヨウ化銀ターゲット) を米国パデュー大学プライムラボ (Purdue university Purdue Rare Isotope Measurement Laboratory) に送り加速器質量分析装置 (AMS) で ^{129}I と ^{127}I の原子数比の測定を行った。 ^{127}I の定量は、

ICP-MS (Agilent7500cx) で行い、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比と ^{127}I 濃度から試料の ^{129}I 濃度を求めた。

5.2 作物試料

農作物試料 2 g を秤量し石膏ボードに載せ石英管内に設置した。燃焼によって発生するタール等を完全燃焼させるための酸化銅 10 g を試料よりも下流側の石英管内に設置した。石英管内に酸素を流し 800°C で加熱、試料からヨウ素を揮発した。揮発したヨウ素は、アルカリ吸収溶液 (TMAH 25% (TAMAPUREAA, 多摩化学) 30 mL、5000 ppm の亜硫酸ナトリウム 1.0 mL で調整したアルカリ吸収溶液 31 mL) で回収した。アルカリ吸収溶液は、 ^{129}I 測定試料と ^{127}I 測定試料にそれぞれ分取し、 ^{129}I 測定試料にはキャリア 2 mg を添加した。化学分離以降の工程は、土壌試料と同様である。

C. 研究結果

1. 土壌

土壌中放射性核種濃度の測定結果を表 3 に示す。2011 年の事故からの経過時間に伴い、 ^{134}Cs 濃度は、2011 年の事故当初は ^{137}Cs と同程度存在したが、測定時には ^{137}Cs 濃度の 10% 以下まで減少した。福島県浜通り、中通りの圃場土壌中 ^{137}Cs 濃度は、除染により大きく減少したが、数百 Bq/kg 存在した。また、福島県会津の圃場では表土剥ぎ取り除染はされていないものの土壌中 ^{137}Cs 濃度は、中通りや中通りに比べ低い濃度であった。宮城県及び栃木県で採取した土壌からは ^{134}Cs が検出され FDNPS 由来の放射性 Cs の存在を確認した。一方、愛知県の土壌では 2018 年及び 2019 年に採取した試料と同様に ^{134}Cs が検出されなかったことから、FDNPS からの由来は限定的で、大気圏核実験由来による ^{137}Cs であることが明らかになった。南相馬市の圃場土壌中 ^{129}I 濃度は、 ^{137}Cs 濃度に比べ十万分の一以下の 1.1

mBq/kg であったが、他の地点より明らかに高く、2011 年の事故由来であると考えられる。また、中通りの伊達市から採取した土壌も、FDNPS 事故の影響を受けていないと考えられる愛知県の土壌中濃度に比べ 1 桁以上高く、事故由来であることが推測された。それ以外の地域から採取した土壌中 ^{129}I 濃度は、愛知県土壌中濃度レベルと同程度であった。

2. 作物

玄米中放射性核種濃度を表 4 に示す。福島県産の作物中 ^{137}Cs 濃度は浜通りの南相馬市で採取した試料で 1.8 Bq/kg-生重量であったが、それ以外は 1 Bq/kg 生重量を下回り、基準値を大きく下回る値であった。また、愛知県の玄米では、1 週間の測定でも検出されなかった。これらの値は、通常の食品検査などでの測定では検出が難しい状況であることが確認された。2019 年～2020 年の全国調査による ^{137}Cs 濃度範囲は、検出限界値～1.1 Bq/kg-生重量にあった²⁾。また、半減期が 2.06 年の ^{134}Cs 濃度については、物理的半減期によって減衰が進み限定的であった。福島県内で採取した全ての作物中 ^{90}Sr 濃度は、0.1 Bq/kg-生重量を大きく下回る 0.004～0.014 Bq/kg-生重量であり、福島県以外での測定範囲(検出限界値～0.31 Bq/kg-生重量)にあった。これまで同様に大気圏核実験由来と考えられる。作物中 ^{129}I 濃度は、南相馬市で採取した玄米で最も高い 0.005 mBq/kg-生重量であり、他の地域より明らかに高い値を示し FDNPS 事故由来であると考えられた。

D. 考察

土壌中 ^{137}Cs 濃度と玄米中 ^{137}Cs 濃度の相関を図 1 に示す。両者は正の相関を示し、FDNPS から放出された放射性セシウムは作物への移行は、作物種が同様であれば、土壌中濃度に対する作物中濃度の比で示される「移行係数」で類推できることを示唆し

ている。また、本課題で得られた ^{137}Cs 移行係数の幾何平均値は、青森県で採取した試料から求めた文献値^{8, 9)}と同様であった(表 5)。

福島県内で採取した作物中 ^{90}Sr 濃度の平均値は 0.008 ± 0.005 Bq/kg-生重量 (n=4) であり、また、日本の他地域の値との差が見られず、大気圏核実験由来と考えられ、十分に低い値であることを確認できた。

FDNPS 事故によって環境中に放出された ^{129}I は、8.1 GBq であると評価されている¹⁰⁾。 ^{129}I の半減期は 1570 万年ときわめて長く、環境中ではやがて安定 ^{127}I と類似した移行を示すと考えられる。そのため、 ^{129}I 濃度のみならず、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比を使って示される^{3, 10)}。令和元年に報告した大気圏核実験後の土壤中 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比の値と比較すると、愛知県を除き若干高い値にあり、その中でも南相馬市で高い値であったが、チェルノブイリや核燃料再処理工場周辺土壌 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$)¹¹⁾ に比べると低い値であった。土壌における ^{129}I の下方浸透は、 ^{137}Cs より早ことが報告¹²⁾されているが、除染前の福島県における圃場土壌中 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比 ($10^{-10} \sim 10^{-8}$)^{4, 13)} と比較しても同程度にあった。

土壌中 ^{129}I 濃度と玄米中 ^{129}I 濃度の相関を図 2 に示す。両者は正の相関を示し、作物中 ^{129}I 濃度の推定に移行係数が有効であることが確認できた。一方で、 ^{129}I の移行係数は、これまでに得られた文献値による ^{127}I の移行係数^{9, 14)}と同程度にあった(表 5)。

E. 結論

本研究では、福島県内、周辺地域と比較対象地域における作物中放射性 Cs、 ^{90}Sr 及び ^{129}I 濃度を調査した。採取した玄米中放射性 Cs 濃度は全て基準値を大きく下回り、福島県内であっても一般的なモニタリングでは検出が困難なレベル (0.1 Bq/kg-生重量) にまで低下している。玄米中 ^{90}Sr 濃度は、福島県を

除く全国調査の範囲内にあり、事故由来による ^{90}Sr 濃度の増加は認められなかった。浜通りの土壌中 ^{129}I 濃度が中通りよりも高く、作物中 ^{129}I 濃度も浜通りで他の地点より高い値にあった。作物中 ^{129}I 濃度は、土壌中 ^{129}I 濃度と正の相関を示し、土壌濃度から類推が可能であることが示された。福島県産作物の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比は、 $4.3 \times 10^{-7} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ にあり、チェルノブイリ (10^{-6}) や核燃料再処理施設周辺 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$) に比べ、低い値であることが確認された。

引用文献

- 1) 福島県農産物等の放射性物質モニタリング Q&A, <http://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/nousan-qa.html>
- 2) 環境放射線データベース, <http://search.kankyo-hoshano.go.jp/>
- 3) H. Tsukada, J. Ishida and O. Narita: Particle-size distributions of atmospheric ^{129}I and ^{127}I aerosols. *Atmospheric Environment* 25A 905-908, 1990.
- 4) Y. Miyake, H. Matsuzaki, T. Fujiwara, T. Saito, T. Yamagata, M. Honda and Y. Muramatsu: Isotopic ratio of radioactive iodine ($^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$) released from Fukushima Daiichi NPP accident, *Geochemical Journal* 46, 327-333, 2012.
- 5) T. Ohno, Y. Muramatsu, Y. Shikamori, C. Toyama, K. Nakano and H. Matsuzaki: Determination of ^{129}I in Fukushima soil samples by ICP-MS with an Octopole reaction system, *Analytical Sciences* 29, 271-274, 2013.
- 6) Y. Muramatsu, H. Matsuzaki, C. Toyama and T. Ohno: Analysis of ^{129}I in the soils of Fukushima Prefecture: preliminary reconstruction of ^{131}I deposition related to the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP). *Journal of Environmental Radioactivity* 139, 344-350, 2015.

- 7) 文部科学省放射能測定シリーズ2「放射性ストロンチウム分析法」(平成15年改定)
- 8) H. Tsukada, H. Hasegawa, S. Hisamatsu and S. Yamasaki: Transfer of ^{137}Cs and stable Cs from paddy soil to polished rice in Aomori, Japan. *J. Environ. Radioactivity* 59, 351-363, 2002.
- 9) H. Tsukada, A. Takeda and H. Hasegawa: Uptake and distributions of ^{90}Sr and ^{137}Cs in rice plants, 16th Pacific Basin Nuclear Conference, Aomori, Japan, P16 P1121, 2008.
- 10) X. Hou, P.P. Provinec, L. Zhang, K. Shi, D. Biddulph, C. Chang, Y. Fan, R. Golser, Y. Hou, M. Jeřkovský, A.J.T. Jull, Q. Liu, M. Luo, P. Steier and W. Zhou: Iodine-129 in seawater offshore Fukushima: distribution, inorganic speciation. *Environmental Science and Technology* 47, 3091-3098, 2013.
- 11) G. Shaw, E. Bailey, N. Crout, L. Field, S. Freeman, S. Gaschek, X. Hou, M. Izquierdo, C. Wells, S. Xu, and S. Young: Analysis of ^{129}I and ^{127}I in soils of the Chernobyl Exclusion Zone, 29 years after the deposition of ^{129}I , *Science of the Total Environment* 966-974, 2019.
- 12) G. Yang, J. Hu, H. Tsukada, H. Tazoe, Y. Shao and M. Yamada: Vertical distribution of ^{129}I and radiocesium in forest soil collected near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant boundary. *Environmental Pollution* 250, 578-585, 2019.
- 13) M. Honda, H. Matsuzaki, H. Nagai and K. Sueki: Depth profiles and mobility of ^{129}I originating from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant disaster under different land uses, *Applied Geochemistry* 85, 169-179, 2017.
- 14) H. Tsukada, H. Hasegawa, A. Takeda and S. Hisamatsu: Concentrations of major and trace elements in polished rice and paddy soils collected in Aomori, Japan. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 273, 199-203, 2007.
- F. 健康危険情報
なし
- G. 研究業績
(論文)
1. R. Saito, Y. Nemoto and H. Tsukada (2020) Relationship between radiocaesium in muscle and physicochemical fractions of radiocaesium in the stomach of wild boar, *Scientific Reports* 10, 6796.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-63507-5>
 2. A. Takeda, H. Tsukada, Y. Unno, Y. Takaku and S. Hisamatsu (2020) Effects of organic amendments on the natural attenuation of radiocesium transferability in grassland soils with high potassium fertility, *Journal of Environmental Radioactivity* 217, 106207.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020>.
 3. M. P. Johansen, D. Anderson, D. Child, M. Hotchkis, H. Tsukada, K. Okuda and T. G. Hinton (2021) Differentiating Fukushima and Nagasaki plutonium from global fallout using $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ atom ratios: Pu vs. Cs uptake and dose to biota, *Science of the Total Environment* 754, 141890.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141890>.
 4. N. P. Thoa, S. Kaneko, S. Koya, H. Ohira, H. Tsukada (2021) Radiation dose rate to Japanese cedar and plants collected from Okuma, Fukushima Prefecture, *Science of the Total Environment*, 779 (2021) 146350.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146350>.
5. IAEA (2020) 4. Agricultural System in Environmental Transfer of Radionuclides in Japan following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Report of Working Group 4, Transfer Processes and Data for Radiological Impact Assessment, Subgroup 2 on Fukushima Data, IAEA Programme on Modelling and Data for Radiological Impact Assessments (MODARIA II), IAEA-TECDOC-1927, pp31-127. (学会発表)
 6. 塚田祥文、高橋純子、Mark Zheleznyak、Igor Chizhevskyy、Serhii Kerieiev、Valery Kashparov (2020) チェルノブイリ原子力発電所から 30-km 圏内の試験圃場における土壌からバレイシヨへの ^{137}Cs および ^{90}Sr の移行 (日本原子力学会, 福岡, オンライン)
 7. 沖澤悠輔、塚田祥文 (2020) 2011 年の東京電力福島第一原子力発電所事故による ^{60}Co 飛散の検証 (日本原子力学会, 福岡, オンライン)
 8. 遠藤佑哉、山口克彦、高瀬つぎ子、植頭康裕、塚田祥文 (2020) 2011 年東電福島第一原発事故後の土壌中放射性セシウムによる空間線量率と実効線量の関係 (日本原子力学会, 福岡, オンライン)
 9. 菊池美保子、塚田祥文 (2020) 避難指示解除地域における自家消費作物の放射性セシウム濃度 (日本原子力学会, 福岡, オンライン)
 10. 大槻知恵子、塚田祥文 (2020) 蘚苔類への放射性セシウムの蓄積 (日本原子力学会, 福岡, オンライン)
 11. 塚田祥文 (2020) 大柿ダム底質から溶出する ^{137}Cs の灌漑水への寄与について (日本土壤肥料学会 2020 年度岡山大会, 倉敷, オンライン)
 12. 武田晃、塚田祥文、海野佑介、高久雄一、久松俊一 (2020) 黒ボク土草地土壌に添加した放射性セシウム及びヨウ素の牧草への移行性に及ぼす有機物施用の影響 (日本土壤肥料学会 2020 年度岡山大会, 倉敷, オンライン)
 13. 塚田祥文、○山口紀子、山田大吾 (2020) 草地土壌の有機物による放射性セシウム固定阻害 (日本地球化学会, リモート)
 14. 遠藤佑哉、植頭康裕、高瀬つぎ子、山口克彦、塚田祥文 (2020) 空間線量率を用いた実効線量推定手法の高精度化 (ICRP-JAEA International Conference, リモート)
 15. 沖澤悠輔、塚田祥文 (2020) 2011 年の東京電力福島第一原子力発電所事故による ^{60}Co 飛散の検証 (第一回 環境研研究交流セミナー 六ヶ所村)
 16. 遠藤佑哉、高瀬つぎ子、山口克彦、塚田祥文 (2020) 2011 年東電福島第一原発事故後の土壌中放射性セシウムによる空間線量率と実効線量の関係 (第一回 環境研研究交流セミナー 六ヶ所村)
 17. 菊池 美保子、塚田祥文 (2020) 避難指示解除地域における自家消費作物の放射性セシウム濃度 (第一回 環境研研究交流セミナー 六ヶ所村)
 18. 大槻知恵子、塚田祥文 (2020) 蘚苔類への放射性セシウムの蓄積 (第一回 環境研研究交流セミナー 六ヶ所村)
 19. Nguyen Phuong Thoa, Shigeo Kaneko, Shishido Koya, Hajime Ohira and Hirofumi

- Tsukada (2020) Radiation dose rate of Japanese cedar and plants collected in Okuma, Fukushima (第一回 環境研研究交流セミナー 六ヶ所村)
20. 辰野宇大、塚田祥文 (2021) 土壌アーカイブ試料および土壌アーカイブデータベースシステムの紹介 (第 7 回福島大学環境放射能研究所成果報告会、Online)
 21. 塚田祥文、齋藤隆 (2021) 大熊町試験水田における灌漑水・間隙水中 ^{137}Cs 濃度と変動要因 (第 7 回福島大学環境放射能研究所成果報告会、Online)
 22. Nguyen Phuong Thoa and Hirofumi Tsukada (2021) Uptake of radiocaesium by brown rice from soils and irrigation water (第 7 回福島大学環境放射能研究所成果報告会、Online)
 23. 沖澤悠輔、塚田祥文 (2021) 2011 年東京電力福島第一原子力発電所事故による ^{60}Co の放出 (第 7 回福島大学環境放射能研究所成果報告会)
 24. 遠藤佑哉、植頭康裕、高瀬つぎ子、山口克彦、塚田祥文 (2021) 東京電力福島第一原子力発電所事故後の土壌中放射性セシウムによる空間線量率と実効線量の関係(第 7 回福島大学環境放射能研究所成果報告会)
 25. 菊池美保子、塚田祥文 (2021) 避難指示解除区域における自家消費作物の放射性セシウム濃度と内部被ばく線量 (第 7 回福島大学環境放射能研究所成果報告会)
 26. 大槻知恵子、塚田祥文 (2021) 蘚苔類への放射性セシウムの移行と蓄積 (第 7 回福島大学環境放射能研究所成果報告会)
 27. 遠藤佑哉、植頭康裕、高瀬つぎ子、山口克彦、塚田祥文 (2021) 東京電力福島第一原子力発電所事故後の土壌中放射性セシウムによる空間線量率と実効線量の関係(第 6 回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス(NDEC-6)JAEA)
 28. 杉浦広幸、塚田祥文 (2021) 福島の高層湿原の植物における放射性セシウム汚染 (放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同研究拠点報告会)
 29. 塚田祥文 (2020) 福島大学食農学類放射線等学習会「農業環境における放射性セシウムと作物摂取による被ばく線量」(福島)
 30. 塚田祥文 (2020) 令和 2 年度福島県原子力防災研修講師「放射線と放射能の基礎知識」(福島)
 31. 塚田祥文 (2020) 安積高校「福島の農業環境と作物は“いま”ー農業環境における放射性セシウムと作物摂取による内部被ばくー」(福島)
 32. H. Tsukada (2020) Internal and external radiation dose rates in organisms collected from a forest observatory site in Yamakiya, Kawamata, Fukushima (日本放射線影響学会第 63 回大会 ワークショップ「福島原発事故による環境への影響」リモート)
 33. N. P. Thoa, S. Koya, H. Ohira, S. Kaneko, and H. Tsukada (2020) Radiation dose rate of Japanese cedar and plants collected from Okuma applying ERICA tool(日本放射線影響学会第 63 回大会 ワークショップ「福島原発事故による環境への影響」リモート)
 34. 塚田祥文(2020)2011 年の事故後の環境放射能(檜葉町立檜葉中学校 放射線教育)(福島)
 35. H. Tsukada (2020) Radiocaesium in the environment (ICRP International Conference、リモート)

36. 塚田祥文(2020)福島大学環境放射能研究所と福島における環境中 ^{137}Cs の変遷(第一回 環境研研究交流セミナー 六ヶ所村)
37. I.M.M. Rahman, Z.A. Begum, H. Tsukada and H. Hasegawa (2020) Chelator-assisted washing remediation of radionuclide-contaminated soils, In: 2nd International Conference on Research & Innovation in Civil Engineering (Chittagong, Bangladesh)

H. 知的財産権の出願・登録状況
なし

表 1 土壌の採取日及び処理重量

試料番号	採取地点	土壌分類	試料採取日	採取試料重量	乾燥後重量
				g	g
2020S-1	宮城県大崎市	グライ低地土	2019年10月5日	2397	1656
2020S-2	栃木県宇都宮市	灰色低地土	2019年10月9日	1431	973
2020S-3	愛知県知多郡武豊町	グライ低地土	2019年9月13日	2857	2047
2020S-4	福島県南相馬市	グライ低地土	2019年11月10日	2508	1808
2020S-5	福島県伊達市	褐色低地土	2019年11月12日	2825	1957
2020S-6	福島県郡山市	灰色低地土	2019年11月12日	2760	1939
2020S-7	福島県猪苗代町	多湿黒ボク土	2019年11月12日	2426	1473

表 2 玄米の採取日及び処理重量

試料番号	採取地点	試料採取日	採取試料重量	非可食部	可食部	乾燥割合	灰化割合
			g	g	g		
2020P-1	宮城県大崎市	2019年9月28日	5938	7	5932	0.860	0.0158
2020P-2	栃木県宇都宮市	2019年9月4日	5549	28	5520	0.868	0.0148
2020P-3	愛知県知多郡武豊町	2019年9月2日	5490	3	5487	0.863	0.0143
2020P-4	福島県南相馬市	2019年10月13日	6203	4	6199	0.866	0.0146
2020P-5	福島県伊達市	2019年10月16日	5666	27	5639	0.866	0.0142
2020P-6	福島県郡山市	2019年10月17日	5576	16	5559	0.862	0.0146
2020P-7	福島県猪苗代町	2019年11月5日	5656	30	5626	0.861	0.0139

表 3 土壤中¹³⁴Cs、¹³⁷Cs、⁴⁰K、¹²⁹I濃度及び¹²⁹I/¹²⁷I原子数比

試料番号	採取地点	放射性核種濃度(乾燥重量)							¹²⁹ I/ ¹²⁷ I原子数比	Ge測定時間 s
		¹³⁴ Cs* Bq/kg 乾燥	¹³⁷ Cs Bq/kg 乾燥	⁴⁰ K Bq/kg 乾燥	¹²⁹ I mBq/kg 乾燥					
2020S-1	宮城県大崎市	0.5 ± 0.1	6.7 ± 0.2	388 ± 4	0.013 ± 0.0006			9.1E-10	259,000	
2020S-2	栃木県宇都宮市	3.7 ± 0.2	50.9 ± 0.5	430 ± 6	0.033 ± 0.001			1.1E-09	174,292	
2020S-3	愛知県知多郡武豊町	< 0.6	1.9 ± 0.1	484 ± 6	0.012 ± 0.0005			4.3E-10	173,754	
2020S-4	福島県南相馬市	53.3 ± 1.5	876.9 ± 5.3	370 ± 15	1.13 ± 0.04			7.9E-08	30,000	
2020S-5	福島県伊達市	52.1 ± 1.4	825.8 ± 4.9	316 ± 14	0.30 ± 0.009			1.5E-08	30,000	
2020S-6	福島県郡山市	40.7 ± 1.0	614.6 ± 3.6	409 ± 12	0.054 ± 0.002			1.8E-09	50,000	
2020S-7	福島県猪苗代町	8.2 ± 1.2	108.1 ± 3.9	245 ± 23	0.044 ± 0.001			3.8E-10	10,000	
	* 604.7 keVの定量結果									

表 4 玄米中 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{40}K 、 ^{129}I 濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比

試料番号	採取地点	^{134}Cs *		^{137}Cs		放射性核種濃度		^{40}K	^{129}I	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比	Ge測定時間 s
		Bq/kg 生	Bq/kg 生	^{90}Sr	^{137}Cs	mBq/kg 生					
2020P-1	宮城県大崎市	< 0.01	0.08 ± 0.003	0.003	0.2	65.8 ±	0.00028 ±	0.00003	1.4E-09	776,509	
2020P-2	栃木県宇都宮市	0.01 ±	0.22 ± 0.004	0.004	0.2	64.4 ±	0.00022 ±	0.00002	1.0E-09	1,122,317	
2020P-3	愛知県知多郡武豊町	< 0.02	< 0.02	0.02	0.3	58.5 ±	0.00009 ±	0.00002	1.7E-10	600,861	
2020P-4	福島県南相馬市	0.12 ±	1.84 ± 0.009	0.02	0.4	60.5 ±	0.0050 ±	0.00003	1.9E-08	186,413	
2020P-5	福島県伊達市	0.04 ±	0.74 ± 0.01	0.01	0.4	56.3 ±	0.00056 ±	0.00004	1.2E-09	258,890	
2020P-6	福島県郡山市	0.03 ±	0.43 ± 0.004	0.004	0.2	62.1 ±	0.00019 ±	0.00002	6.2E-10	1,208,997	
2020P-7	福島県猪苗代町	0.02 ±	0.28 ± 0.008	0.008	0.4	58.9 ±	0.00012 ±	0.00002	2.3E-10	271,465	

* 604.7 keVの定量結果

表 6 土壌から作物への ^{137}Cs 、 ^{129}I 及び ^{127}I の移行係数

	幾何平均値	最小値	最大値	試料数
^{137}Cs	0.0024	0.00070	— 0.012	n=6
^{129}I	0.0050	0.0019	— 0.021	n=7
^{127}I	0.012	0.0047	— 0.023	n=7
文献値				
^{137}Cs	0.0038	0.00020	— 0.013	n=20
^{127}I	0.0048	0.00046	— 0.022	n=20

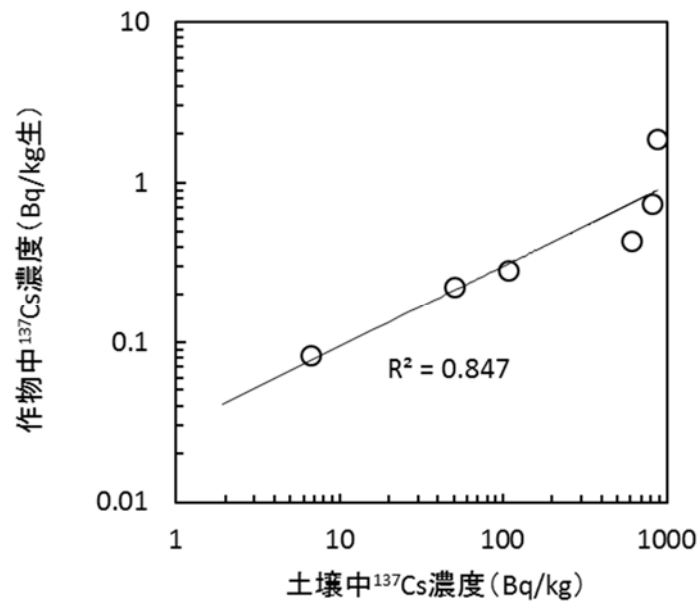


図 1 土壌中 ^{137}Cs 濃度と作物中 ^{137}Cs 濃度の関係

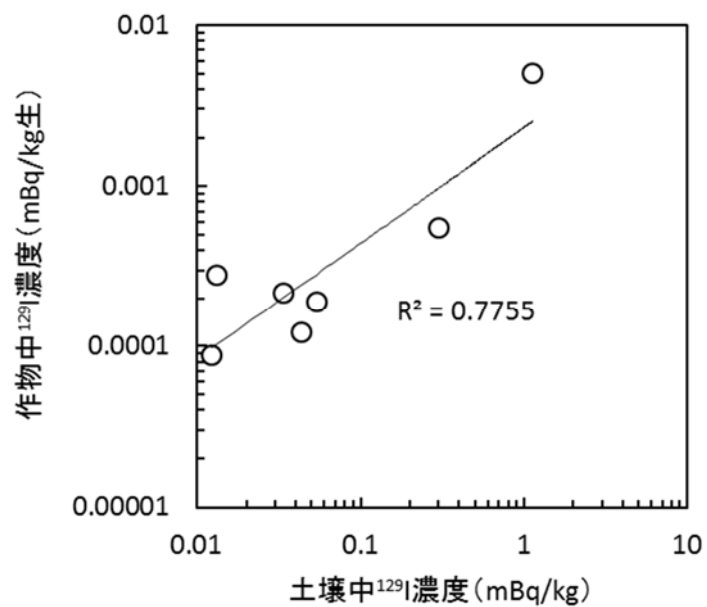


図 2 土壌中 ^{129}I 濃度と作物中 ^{129}I 濃度の関係

