

福島県の水田土壌に自生するカヤツリグサ科マツバイの放射性Cs濃度

榊原 正幸^{1*}、佐野 栄²、久保田 有紀³、佐藤 康¹

¹愛媛大学大学院理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町2-5)

²愛媛大学教育学部 (〒790-8577 松山市文京町3)

³(株) エヌ・イー サポート (〒132-0031 江戸川区松島一丁目43番15号)

Radioactive Concentration of Radioactive Cesium of Native *Eleocharis Acicularis* in Paddy Fields of Fukushima Prefecture, Northeastern Japan

Masayuki SAKAKIBARA^{1*}, Sakae SANO², Yuki KUBOTA³, Yasushi SATO¹

¹Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

(2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime 790-8577 Japan)

²Faculty of Education, Ehime University (3 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime 790-8577 Japan)

³Nature Environment Support Co., LTD. (1-43-15 Matsushima, Edogawa-ku, Tokyo 132-0031)

Summary

Soil contamination with radiogenic Cs has a long term radiological impact because it is commonly transferred through food chains to human beings. Remediation of soil contaminated with radiogenic Cs remains one of the most important problems after the Fukushima Daiichi nuclear disaster. The objectives of this research were to study the applicability of phytoextraction by aquatic plant *Eleocharis acicularis* of soil contaminated with ¹³⁷Cs in paddy field, Fukushima Prefecture, northeastern Japan.

In this study, we have investigated the distribution of native *E. acicularis* in Fukushima Prefecture and its ability of absorption of radiogenic Cs in the paddy soils. As a result, the native *E. acicularis* has absorbed 2,400 Bq/kg in wet weight in maximum. *Eleocharis acicularis* shows great potential for use in the phytoremediation of soil and water contaminated by radiogenic Cs at the nuclear disaster area such as Chernobyl and Fukushima.

Key Words: Fukushima Daiichi nuclear disaster, Radioactive cesium pollution, *Eleocharis acicularis*, Phytoextraction, Paddy field

1. はじめに

(1) 福島第一原子力発電所の事故による放射能汚染

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震に起因して、東京電力の福島第一原子力発電所において未曾有の世界における最大規模の原子力事故が発生した。この事故によって大量の放射性元素が放出され、福島県を中心に広範囲にわたる土壌が放射能汚染された。放射性元素の中でも¹³⁷Csは半減期が30.2年であり、長期間土壌に残存するため、その対処が必要である。農林水産省によって作成された福島、宮城、栃木、群馬、茨城および千葉県の農地土壌における放射性Csの濃度データ¹⁾によると、伊達市、本宮市、川俣町、大玉村、相

馬市、南相馬市、檜葉町、富岡町、大熊町、双葉町、浪江町、飯館村およびいわき市などの福島県内の13市町村の水田および畑で、放射性Cs濃度が制限の目安とされる5,000 Bq/kgを超えたことが明らかになった。一方、浪江町、飯館村、富岡町および大熊町などで、水田を中心に20,000 Bq/kgを超える放射性Csが検出された。

(2) 放射性セシウムで汚染された農地の除染対策の現状と課題

農林水産省は、これらの実証試験で得られた対策技術や知見を踏まえ、今後の除染作業における施工方法、施工管理

*Corresponding author: E-mail: sakakiba@sci.ehime-u.ac.jp

方法及び安全衛生管理方法の確立と作業歩掛の策定等に資する基礎データを収集するため、一定規模のほ場において実用化に向けた実証を行うこととし、平成 24 年 2 月に、福島県飯舘村（長泥地区、小宮地区、草野向押地区）および川俣町（山木屋細田地区、山木屋日向地区）の約 40 ha の農地を対象とした農地除染対策実証工事（以下、「農地除染実証工事」）を開始した。その結果に基づいて、具体的な除染対策技術の工法・作業内容・実施上の留意点などの技術的基準を「農地除染対策の技術書（第 1 編 調査・設計編）」として取りまとめている。

(3) ファイトレメディエーションによる環境修復

さて、植物を用いた環境修復技術であるファイトレメディエーション（phytoremediation）は、重金属汚染された環境の修復技術として極めて有効であることが知られている²⁻⁵。この技術は、他の環境修復技術と比較して、①低コスト、②エネルギー消費 0 および ③環境への二次的負荷が少ない、と

いう特長を有する。現在まで、植物を用いたファイトレメディエーションは、500 種類以上の既存種が検討されている。重金属汚染の場合、植物が媒体から重金属を吸収・蓄積するファイトエクストラクションと呼ばれる機能が用いられる。ファイトレメディエーションに用いる植物の中でも重金属毒性に対する耐性を有し、重金属を高濃度に集積することが可能な植物は超集積植物（hyperaccumulator）と呼ばれている。

(4) 重金属超集積植物としてのマツバイ

カヤツリグサ科ハリイ属マツバイ（*Eleocharis acicularis*）は、北海道から沖縄まで全国各地の湖沼、ため池、水路や水田などに群生する抽水性の単子葉植物である。マツバイは多年草であり、その繁殖力は極めて旺盛である。マツバイに関する重金属吸収能力に関しては、榊原ほか（2006）⁵）によって初めて報告され、その後、多数の水耕栽培実験およびフィールド栽培実験が実施され、Cu、As、Zn および Cd 等の超集積植物であることが明らかになっている⁵⁻¹³。



Fig. 1 Route map of field work for finding native *Eleocharis acicularis* of paddy fields in Fukushima Prefecture.

Broken lines show the investigated routes. ★ is the localities of native *Eleocharis acicularis*. The figure is modified from a digital map by "Digital Japan Web System" (<http://portal.cyberjapan.jp/index.html>).

(5) 本研究の目的

筆者のうち、榊原および佐野は、2011 年度に予察的調査として福島県郡山市に自生するマツバイ 1 試料の放射性 Cs の放射能濃度を測定かつ簡便な栽培実験を試み、マツバイが放射性 Cs を高濃度に吸収する可能性を指摘した¹⁴⁾。本研究では、福島第一原子力発電所事故によって放射性 Cs 汚染された水田土壌を除染するため、カヤツリグサ科ハライ属マツバイを用いたファイトレメディエーション技術を確立する基礎的データとして、福島県内の放射性 Cs に汚染された水田土壌に自生するマツバイを探索し、それらの放射性 Cs の放射能濃度を測定した。

2. 調査・実験方法

福島県内における自生マツバイの探索は、2012 年 5 月に実施した。探索地域は、福島県中通りおよび会津若松市周辺の耕作されている水田もしくは休耕田である。のべ 8 日間に亘る調査で、福島県内の 300 か所の水田に自生するマツバイを探索した。調査ルートを Fig. 1 に示す。また、発見した自生マツバイのうち、3 試料に関して土壌試料とともに放射性セシウム

の放射能濃度を測定した。マツバイは根および地上部を併せて採取し、超音波洗浄機を用いてマツバイ表面に付着した土壌を完全に除去したものを分析試料とした。土壌試料はマツバイの根圏域である地表から 5 cm まで採取した。本研究では、マツバイおよび土壌試料は湿重ベースで測定した。なお、

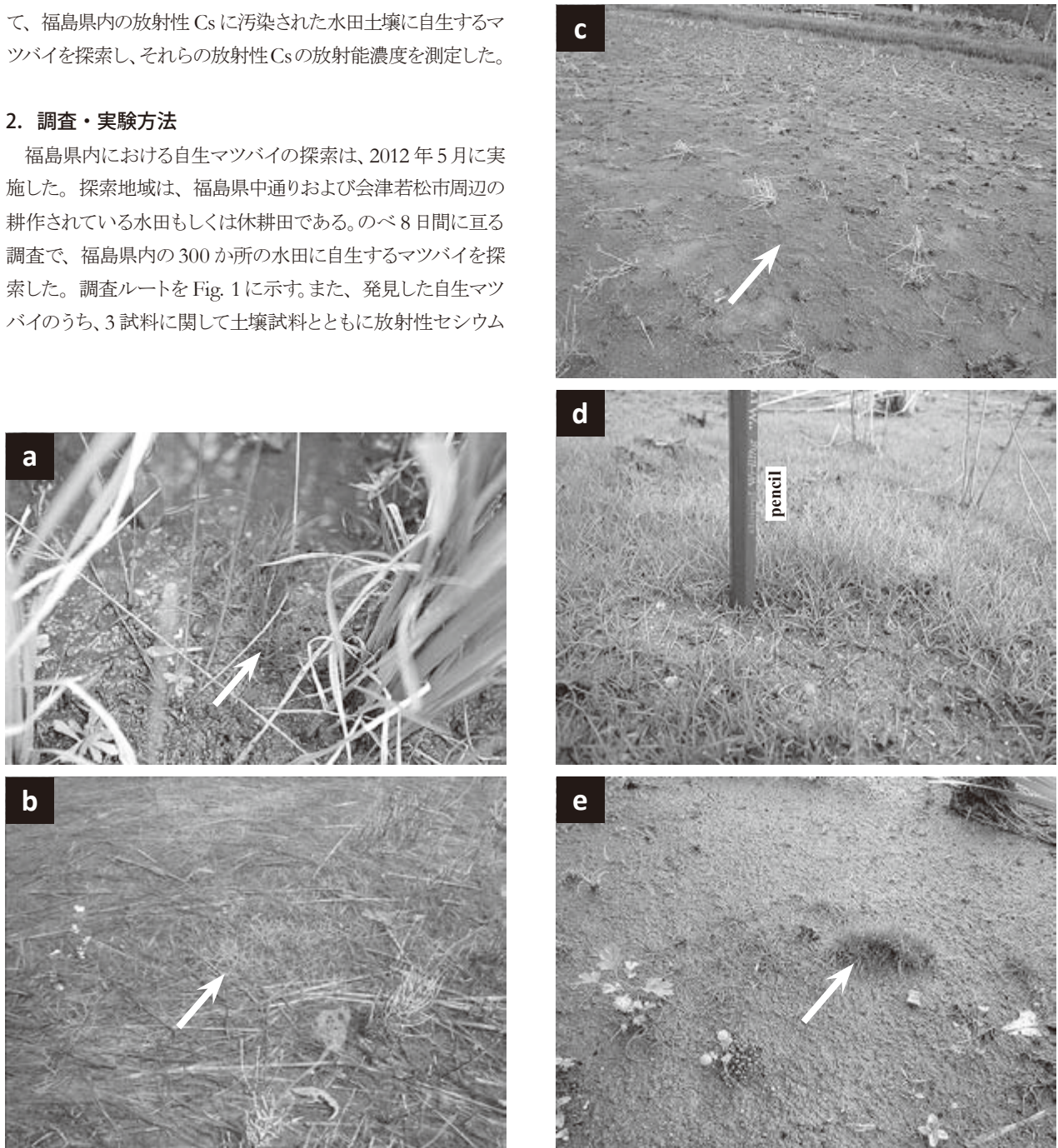


Fig. 2 Mode of occurrences of native *E. acicularis* in paddy fields of Fukushima Prefecture.

a: *E. acicularis* in a paddy field of Fukushima Agricultural Technology Center in Koriyama City by Sakakibara and Sano (2012), b: *E. acicularis* in a paddy field of Tadano in Ouse Town of Koriyama City, c, d: *E. acicularis* in a paddy field of Kuzuohigashidaira in Kuzuo Village, and e: *E. acicularis* in a paddy field of Yamagoya of Kawamata Village. White arrows show the communities of *E. acicularis* in the paddy fields.

福島県では、マツバイの地上部は冬季に枯れるため、測定されたマツバイの放射性 Cs 濃度は 2012 年の春に吸収・蓄積されたものであると判断される。

マツバイおよび土壌の放射性 Cs の放射能濃度測定は、財団法人九州環境管理協会においてゲルマニウム半導体検出器を用いた γ 線測定によって行われた。測定は、「食品中の放射性セシウム検査法」(食安発 0315 第 4 号) および「緊急時における食品の放射能測定マニュアル」(平成 14 年 3 月 厚生労働省) に従って行われた。なお、測定結果は試料採取日の濃度に補正した値を示している。

3. 結果

自生マツバイは、今回の調査によって、福島県内の約 300 か所の水田のうち 13 か所から発見された (Fig. 1)。自生マツバイはすべて農薬を散布していない休耕田から見出された (Fig. 2)。自生マツバイは、休耕田において島状に群落を形成し、それが水田に散在する。今回、測定した 4 か所のマツバイおよびその土壌の放射性 Cs の放射能濃度は Table 1 の通りである。各土壌の放射性 Cs の放射能濃度は湿重ベースで総放射性 Cs が 2,700 ~ 9,600 Bq/kg の範囲であった。また、今回、測定したマツバイの放射性 Cs の放射能濃度は、湿重ベースで ^{134}Cs が 230 ~ 1,000 Bq/kg、 ^{137}Cs が 350 ~ 1,400 Bq/kg、総放射性 Cs が 580 ~ 2,400 Bq/kg で、総放射性 Cs の平均は 1,303 Bq/kg であった。これらの値は、榊原・佐野 (2012)¹⁴⁾ で報告された福島県農業総合センター内の水田の 6,170 Bq/kg には及ばないものの、マツバイは明らかに放射性 Cs を吸収・蓄積している。しかしながら、マツバイの放射性 Cs 濃度は、土壌のそれとの相関を示さなかった (Table 1)。な

お、本論文における移行係数は [農作物中の ^{137}Cs 濃度 (生鮮, Bq/kg)] / [土壌中の ^{137}Cs 濃度 (乾土, Bq/kg)] で求めた。ただし、本研究の土壌データはすべて湿重ベースデータであるが、その値を用いた参考値として移行係数を示した。

4. 考察

(1) ファイトレメディエーションによる放射性セシウム汚染の除染に関する現状と課題

セシウムは植物にとって必須元素ではなく、かつ一般に土壌中の存在量も極めて低い。ただし、Cs の化学的性質は K に類似しているため、植物は一般に K と同様に吸収する性質があることが知られている。この性質を利用して、土壌中の放射性 Cs を除去するファイトレメディエーション技術が検討されてきた。例えば、Dushenkov et al. (1997)¹⁵⁾ は 4 週間齢のヒマワリ (*Helianthus annuus* L.) を水耕液 (^{137}Cs = 200 $\mu\text{g/L}$, 750 mL) で栽培し、24 時間後には水耕液中の Cs がほぼすべて吸収されることを明らかにした。また、Soudek et al. (2006)¹⁶⁾ は、 ^{90}Sr および ^{137}Cs を添加した水溶液中でヒマワリを栽培し、成長後の各部位における放射能の吸収量を測定した。そして、栽培後 32 日目に水溶液中の ^{137}Cs の約 12 % がヒマワリに蓄積されたことを明らかにした。

一方、ウクライナのチェルノブイリ原子力発電所の事故で広範囲に放射能汚染された地域では、放射性 Cs 汚染された土壌を用いて、ヒマワリやアオゲイトウ等の植物による同元素の吸収実験が行われている。その結果によれば、アマランサス属では移行係数が 2 (dry/dry)、あるいはそれ以上であったという報告がある (Dushenkov et al., 1999¹⁷⁾; Fuhrmann et al., 2002¹⁸⁾)。

Table 1 Radioactivity concentration of radiogenic cesium of *E. acicularis* and soil in paddy fields in the Fukushima Prefecture

<i>E. acicularis</i> growing naturally in the paddy field			radioactivity concentration of radiogenic Cs (Bq/kg) of soil	BCF(Bio-concentration factor)	Sample locality (No. in Fig. 1)	Sampling date	Reference
radioactivity concentration of radiogenic Cs (Bq/kg)	^{134}Cs (Bq/kg) (wet)	^{137}Cs (Bq/kg) (wet)					
6,170	3,080	3,090	3,800 (dry)	1.623 (wet/dry)	Fukushima Agricultural Technology Center, Koriyama City	2011.8.11	Sakakibara & Sano (2012)
580	230	350	2,700 (wet)	0.215 (wet/wet)	Tadano, Koriyama City (①)	2012.5.20	this study
2,400	1,000	1,400	5,600 (wet)	0.429 (wet/wet)	Kuzuo Village (④)	2012.5.20	this study
930	350	580	9,600 (wet)	0.097 (wet/wet)	Namie Town (⑤)	2012.5.20	this study

以上のように、ヒマワリやアマランサス等の植物は水や土壌中の放射性 Cs を除去するファイトレメディエーション技術における有力な植物であると考えられている。

一方、高橋ほか (2012)¹⁹⁾ および小林・高橋 (2012)²⁰⁾ は、植物による放射性 Cs 除去の可能性について、福島県の東北農業研究センター福島研究拠点での実験結果を用いて詳細に検討している。彼らの検討結果に基づくと、各植物種の移行係数は乾物ベースで、ヒマワリの品種が最大で 0.074 (dry/dry)、ケナフが 0.02 (dry/dry)、アマランサスの品種が最大で 0.048 (dry/dry)、キノアが 0.022 (dry/dry)、栽培ヒエが 0.029 (dry/dry)、キビが 0.035 (dry/dry)、ソルガムが 0.022 (dry/dry) と極めて低い値しか得られていない。また、福島県飯館村や福島県農業総合センターの圃場内で試験的に栽培が実施されたが、農林水産省の発表によると、青刈りヒマワリの湿重量当り放射性 Cs 濃度は 52 Bq/kg であり、かつ単位面積あたりの吸収量は作付け時に含まれていた土壌の放射性 Cs の約 1/2,000 とほとんど浄化効果がないことが明らかになった。福島県農業総合センターでの実験結果も同様であり、ヒマワリ茎葉への移行係数は最大で 0.27 (dry/dry)、子実へのそれは 0.052 (dry/dry) とかなり低い値であった²¹⁾。

(2) マツバイによる放射性セシウムファイトレメディエーション

榊原・佐野 (2012)¹⁴⁾ および今回の実験結果は、カヤツリグサ科ハライ属マツバイによるファイトレメディエーションによって放射性 Cs 汚染された水田土壌の除染が可能であることを示唆している。2011 年のマツバイの測定値¹⁴⁾ は総放射性 Cs 量は湿重ベースで 6,170 Bq/kg、本研究の 2012 年のそれは湿重ベースで 580、930 および 2,400 Bq/kg であった (Table 1)。これらの測定したマツバイの生育期間は明らかではないが、その移行係数は 2011 年のそれが 1.623 (wet/dry)、2012 年は土壌データが湿重ベースではあるが 0.097~0.429 (wet/wet) と、これまで福島で実施された上述の他の植物と比較して非常に高い値を示した (Table 1)。特に、本研究のデータは、事故後 1 年以上経過して土壌中の遊離 Cs が土壌中の粘土鉱物にトラップされ、徐々に難溶性の形態に変化していると予想される²²⁾ にもかかわらず、初年度の他の植物のデータよりも高い値を示している。

また、マツバイは春から秋にかけて 6 回植え替えることが可能であり、1 回あたりのマツバイの放射性 Cs 濃度は湿重ベースで約 1,000 Bq/kg であることを報告している。また、マツバイは草高が低いが高密度に繁殖するため、根および地上部を併せると湿重ベースで最大 6 kg/m² 程度の生産量が得られることが明らかになっている。ここで、土壌の仮比重を 1、浄化深度を 5 cm、土壌の放射性 Cs 濃度を 3,800 Bq/kg と仮定し、湿重収量 6 kg/m²、年 6 回植え替えするとして単純計算すると、マツバイは一年間で土壌から最大で約 19 % の放射性 Cs

を除去できることになる。以上のことから、マツバイによる放射性 Cs 汚染土壌のファイトレメディエーションは、他の除染手法と比較して費用が安価であることおよび除染実施者が特殊技術を必要としない点で、極めて現実的であると判断される。

今後、マツバイを使用して実際の除染試験を行う際、マツバイの R/S 比 (根部/地上部の量比) が他の水田雑草と比較して大きいことおよび根系の深さが最大で 5 cm と浅いことを考慮すると、事故後未耕作の農地が除染対象として有効であり、除染後マツバイを根ごと刈り取ることが重要である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、日本地質学会東日本大震災対応作業部会報告書に係る研究・調査・事業プラン (2011 年、研究代表者: 榊原正幸) および日本科学技術振興機構 (研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム A-STEP フィージビリティスタディステージ探索タイプ 課題番号: AS232Z00553E、研究代表者: 榊原正幸) の事業費を使用した。また、福島県農業総合センターおよび同センター生産環境部の佐藤睦氏に福島県内の自生マツバイに関する情報をいただいた。

参 考 文 献

- 1) 農林水産省ホームページ: <http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/pdf/110830-24.pdf>
- 2) I. Raskin, R. D. Smith, D. E. Salt: Phytoremediation of Metals: Using Plants to Remove Pollutants from the environment. *Curr. Opin. Biotech.* **8**, 221-226 (1997)
- 3) D. E. Salt, R. D. Smith, I. Raskin: Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Biol.* **49**, 643-668 (1998)
- 4) 吉原利一、後藤文之、増田太郎: 植物による環境修復 (1) 一現状と遺伝子工学の適用に関する調査一。電力中央研究所報告 調査報告、U00022、1-36 (2000)
- 5) 榊原正幸、原田亜紀、佐野 栄、堀利 栄、井上雅裕: マツバイを用いたファイトレメディエーションによる重金属に汚染された水環境の浄化。第 12 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、545-548 (2006)
- 6) 榊原正幸、大森優子、佐野 栄、世良耕一郎、濱田 崇、堀 利栄: マツバイによる廃止鉱山残土堆積場の重金属汚染された水・底質環境の浄化。第 14 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、130-133 (2008)
- 7) N. T. H. Ha, M. Sakakibara, D. Takehana, S. Sano, K. Sera: Accumulation of heavy metals by *Eleocharis acicularis* in an abandoned mining site of Hokkaido, Japan. The 14 th Symposium on Soil and Groundwater Contamination and Remediation, 550-553 (2008)

- 8) N. T. H. Ha, M. Sakakibara, S. Sano, R. S. Hori, K. Sera: The potential of *Eleocharis acicularis* for phytoremediation: case study at an abandoned mine site. *CLEAN-Soil, Air, Water* **37**, 203-208 (2009a)
- 9) N. T. H. Ha, M. Sakakibara, S. Sano: Phytoremediation of Sb, As, Cu and Zn from Contaminated Water by the Aquatic Macrophyte *Eleocharis acicularis*. *CLEAN-Soil, Air, Water* **37**, 720-725 (2009b)
- 10) M. Sakakibara, A. Harada, S. Sano, R. S. Hori: Heavy metal tolerance and accumulation in *Eleocharis acicularis*, a heavy metal hyperaccumulating aquatic plant species. *Geo-pollution Science, Medical Geology and Urban Geology* **5**, 1-8 (2009)
- 11) M. Sakakibara, M. Hikoda, S. Sano, K. Sera: Study on cultivation method of *Eleocharis acicularis* on phytoremediation. *Proceedings of the 20 th Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics*, 235-238 (2010)
- 12) N. T. H. Ha, M. Sakakibara, S. Sano: Accumulation of Indium and other heavy metals by *Eleocharis acicularis*: An option for phytoremediation and phytomining. *Bioresource Technol.* **102**, 2228-2234 (2011)
- 13) M. Sakakibara, Y. Ohmori, N. T. H. Ha, S. Sano, K. Sera: Phytoremediation of heavy metal-contaminated water and sediment by *Eleocharis acicularis*. *CLEAN-Soil, Air, Water* **39**, 735-741 (2011)
- 14) 榎原正幸、佐野 栄: 放射性セシウムに汚染された水田土壌のカヤツリグサ科マツバイによるファイトレメディエーション。日本地質学会 News、**15**, 3, 12-14 (2012)
- 15) S. Dushenkov, D. Vasudev, Y. Kapulnik, D. Gleba, D. Fleisher, K.C. Ting, B. Enslley: Removal of uranium from water using terrestrial plants. *Environ. Sci. Technol.* **31**, 3468-3474 (1997)
- 16) P. Soudek, R. Tykva, R. Vankova, T. Vanek: Accumulation of radioiodine from aqueous solution by hydroponically cultivated sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Environ. Exp. Botany* **57**, 220-225 (2006)
- 17) S. Dushenkov, A. Mikheev, A. Prokhnevsky, M. Ruchko, B. Sorochinsky: Phytoremediation of radiocesium-contaminated soil in the vicinity of Chernobyl, Ukraine. *Environ. Sci. Technol.* **33**, 469-475 (1999)
- 18) M. Fuhrmann, M. M. Lasat, S. D. Ebbs, L. V. Kochian, J. Cornish: Uptake of cesium-137 and strontium-90 from contaminated soil by three plant species; application to phytoremediation. *J. Environ. Qua.*, **31**, 904-909 (2002)
- 19) 高橋義彦、飛奈宏幸、小林浩幸、木方展治: 植物による土壌からの放射性セシウム回収の可能性。農業及び土壌の放射能汚染対策技術 国際研究シンポジウム 要旨集、153 (2012)
- 20) 小林浩之、高橋義彦: 高吸収植物による放射性セシウム除去の可能性。土壌の物理性、**121**, 49-53 (2012)
- 21) 平山 孝、鈴木安和、齋藤 隆、佐藤睦人、小林浩幸、高橋義彦、加藤 仁、薬師堂謙: ヒマワリ栽培による土壌の放射性セシウムに対するファイトレメディエーション効果の検証。日本作物学会紀事別号(講演会要旨・資料集)、**234**, 18-19 (2012)
- 22) R. N. J. Comans, D. E. Hockley: Kinetics of cesium sorption on illite. *Geochim. Cosmochim. Acta* **56**, 3, 1157-1164 (1992)

2013年10月23日 受付
2014年2月7日 受理

和 文 要 約

放射性 Cs に汚染された土壌は、食物連鎖などによって、人間に放射性物質の影響を長期的に及ぼす。福島第一原子力発電所での事故後、放射性 Cs に汚染された土壌の浄化は、最も重要な課題の一つである。本研究の目的は、福島県で放射性 Cs 汚染された水田における、水生植物カヤツリグサ科ハライ属のマツバイを用いたファイトレメディエーション技術による除染の実用性を検討することである。そのため、この研究では、福島県内の放射性 Cs 汚染された水田土壌に自生するマツバイを探索し、放射性 Cs 濃度を調査した。その結果、本研究で測定した自生マツバイは、湿重ベースで最大 2,400 Bq/kg の放射性 Cs を吸収・蓄積していることが明らかになった。本研究の結果に基づくと、マツバイはウクライナのチェルノブイリや福島県などの原子力発電所の事故で放射性 Cs により汚染された土壌や水の除染に活用できる可能性が大きい。