

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450495

研究課題名(和文)放射性セシウム汚染農用地再生に向けたネピアグラスによるセシウム吸収除去法の確立

研究課題名(英文) Establishment of decontamination technology of radiocesium contaminated agricultural land using napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schum.)

研究代表者

姜 東鎮 (Kang, Dong-Jin)

弘前大学・農学生命科学部・准教授

研究者番号：20409080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は浪江町の警戒区域内の高レベル汚染農地(137Cs：23,000～28,000Bq/kg土壌)で、ネピアグラスを用いて、植物体に最大に放射性Csを吸収させる除染効率向上手法を確立するための実証試験を行った結果、除染率は土壌中の腐植量が多い土壌ほど高いことや、慣行カリ肥料施与量に対し、80%減らした20%カリ肥料施与条件下(低カリ肥料施与区)で単位面積あたりに株数を多く植付けする高密植条件で年2回刈取りが最も有効であることを明らかにした。農地除染を行う際は土壌中のカリ養分減少に伴う地上部乾物収量の減少が除染率の減少につながるため、カリ肥料施与が不可欠であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study examines on the remediation of radiocesium-137 (137Cs) using napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schum.) in highly Cs-contaminated soils in the town of Namie, Fukushima Prefecture. We elucidate that higher humus content was closely related to a higher biomass and Cs removal ratio (CR), and the highest CR could be achieved through a high aboveground biomass under high planting density with biannual cutting and applied a low level K fertilizer, especially 20% K. Therefore, to increase biomass and CR, it is necessary to apply a low level K fertilizer, even though it would somewhat compete with 137Cs uptake from the soil to the plant.

研究分野：環境農学

キーワード：ファイトレメディエーション ネピアグラス 乾物収量 吸収濃度 放射性セシウム カリウム肥料  
除染率

### 1. 研究開始当初の背景

弘前大学は東日本大震災の半年後の平成 23 年 9 月 29 日に福島県浪江町と復興に向けた協定を締結し、復興支援プロジェクトを展開している。その中で申請者は放射性セシウム汚染農用地をファイトエクストラクション（植物による吸収除去）手法を用いて再生をはかる復興支援を行っている。植物による低コストのセシウム吸収除去法は、放射性セシウム汚染農地再生のための新しい土地管理戦略のカギとなる要素だが、そのためには植物体内への吸収量が多く乾物収量が高い植物を使用することが極めて重要である。本研究で使用するネピアグラスは年間乾物生産量がトモロコシに比べて 5 倍以上（慣行栽培の場合）を示すなど、世界記録では 1 ヘクタールあたり年間乾物収量が 80 トン以上、日本の関東地方でも 50 トン以上（羅ら 2010）と極めて高い植物である。これまで安定体セシウムを用いて行った水耕実験ではネピアグラスのセシウム吸収能力が極めて高いことを突き止めた（Kang et al. Ecotoxcol. Environ. Saf. 2012）。一方、除染対象の土壌中の放射性セシウムは土壌中粘土末端の風化部分などに存在する負電荷に強く吸着することが最近の研究でわかっており（塚田, 2012）、イオンの形で存在するセシウムが主な水耕条件とは除染効果が異なるケースがあると指摘されている。さらに、粘土を多く含んでいる土壌では粘土と強く吸着するセシウム量が多く、植物が吸収できるイオン交換態・有機物結合画分が少ないため、土壌性質の差異が吸収除去率に大きく影響していることが最近の研究で明らかになりつつある。したがって、バイオマス生産量が大きくかつ吸収能力が優れている植物で除染を行う際でも 1) 対象となる土壌がどのような性質を持ち、土壌中に含まれている放射性セシウムを植物で吸収できるか、2) いかに根と汚染土壌の接する面積を増やすか、3) 除染に用いる植物体内に吸収できるセシウムを最大にする栽培法の確立、などの考慮しなければならない課題が多く残っている。ネピアグラスの吸収量は同様な生育条件でのセシウム超蓄集積植物のソルガム・ハイブリット（15,000 ppm, Wu et al. 2009）よりも 1.7 倍と高い水準であり、除染植物としてきわめて有望であると考えている。本研究はこれらの課題を解決すべく、土壌性質が放射性セシウムの吸収に及ぼす影響や植物体内への放射性セシウムの吸収量を最大にするための栽培手法や表土を削り取る手法を取り入れ、安定体セシウム吸収能力が極めて高い巨大なバイオマス生産量を持つ  $C_4$  イネ科牧草ネピアグラスによる総合的な除染手法の考案を計画している。

### 2. 研究の目的

本研究は、これまでセシウム汚染土壌浄化に利用されたことのないネピアグラスを用い、

福島県の放射性セシウム汚染土壌で除染効果ならびに除染効率向上のための栽培法を確立し、広範囲の除染に役に立つもので、持続的に放射性セシウムを吸収除去するのが目的である。

### 3. 研究の方法

(1) 実証試験 1 年目 (2013 年) には、これまでに水耕、ポット、低レベル放射性 Cs 汚染圃場レベルにおける除染実験から最も潜在的放射性 Cs 吸収率・除染率が高かったネピアグラス 1 品種（メルケロン）を用い、浪江町内の高レベルの汚染農地（水田跡地と牧草地跡地）に各試験区を  $4m^2$  とし、それぞれ 3 種類の異なる栽植密度試験区と 2 種類の異なる刈取り回数試験区を設けて除染実証試験を行った（写真 1）。ネピアグラス地上部をそれぞれ 3 株ずつ刈取り、地上部乾物収量、部位別吸収率（単位乾物重当たりの放射性 Cs 吸収量）及び除染率（単位面積当たりの放射性 Cs 除去量）を調べた。放射性 Cs 及び放射性カリウム ( $^{40}K$ ) の測定はゲルマニウム半導体検出器で行った。施肥は基肥と追肥ともに窒素とリン肥料のみを使用し、成分量で毎月  $10kg/10a$  ずつ合計 5 回を与えた。



写真 1. 浪江町警戒区域における除染実証試験の様子

(2) 実証試験 2 年目 (2014 年) におけるネピアグラス栽培は実証試験 1 年目 (2013 年) とまったく同様の試験サイト・試験区で行った。2 年目では作付け 1 年目に引き続き、2 年目にもカリ肥料を施与せずにネピアグラスを栽培した際に生じ得る土壌中のカリ養分不足がネピアグラスの地上部乾物収量や吸収濃度、 $^{137}Cs$  の除染率に及ぼす影響について調べた。 $^{137}Cs$  及び  $^{40}K$  の測定はゲルマニウム半導体検出器で行った。施肥は基肥、追肥ともに窒素とリン肥料のみを使用し、成分量で毎月  $10kg/10a$  ずつ合計 5 回を与えた。さらに、他の植物種（ソルガム）で除染効果のあるとされる共生菌根菌接種がネピアグラスにおいても除染効果があるかを圃場レベル（慣行表土接種）で行った。

(3) 実証試験 3 年目 (2015) は 2 ヶ年の実

証試験の結果を踏まえ、慣行カリ施肥量に対し、施肥量を40%、80%減らした低カリ肥料施与区でネピアグラスを栽培し、低カリ肥料施与が除染率に及ぼす影響をカリ無施与区と比較し、吸収濃度と地上部乾物収量の両面から除染率向上の最適条件を調べた。試験区は牧草地跡地と水田跡地にカリ肥料無施与区、20%カリ肥料施与区（慣行カリ肥料に対し、80%減）、60%カリ肥料施与区（慣行カリ肥料に対し、60%減）の3種類の異なるカリ施用区に慣行、密植、高密植の3種類の異なる栽植密度の条件下で行った。刈取り回数は2カ年除染率が高かった年2回刈取りのみで行った。また、原子力発電所事故後にも手を加えていなかった高レベル汚染農地から表土3cmを剥ぎ取り、表土のみをポット（1/2000a、ポットあたり9kg土壌）に詰めてポット条件でネピアグラスの除染効果を調べた。さらに、共生菌根菌接種を慣行接種の表土接種から根元接種に改善し、除染率の効果を圃場レベルとポットレベルで調べた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 実証試験1年目の結果

土壌中の腐植量の多少がネピアグラスの地上部乾物収量に及ぼす影響が大きく、腐植量の多かった水田跡地が比較的腐植量の少なかった牧草地跡地より地上部乾物収量、吸収率、除染率ともに高かった。密植により、1株当たりの地上部乾物収量は減少したが、単位面積当たりの地上部乾物収量は大きく増加した（表1・2013結果）。一方で、乾物重当たりの放射性Cs吸収率に栽植密度の違いによる差はほとんどなく、単位面積当たりの除染率は乾物収量が高かった高密植区で最も大きかった（最大0.721%）。水田跡地と牧草地跡地の両方とも、2回刈取り区の地上部乾物収量は1回刈取り区に比べて低かったが、逆に放射性Cs吸収率は2回刈取り区の方が極めて高かった。

表1. 異なる栽植密度におけるネピアグラス地上部乾物収量（2013年・2014年結果）

栽植密度間			1株当たりの地上部乾物重 (kg plant <sup>-1</sup> )			単位面積当たりの地上部乾物収量 (kg m <sup>-2</sup> )		
土壌	年度	試験区	1.0 m × 1.0 m	0.5 m × 0.5 m	0.3 m × 0.3 m	1.0 m × 1.0 m	0.5 m × 0.5 m	0.3 m × 0.3 m
水田	2013	2回区	1.11 ns	0.83 ns	0.67 ns	1.11 b	3.30 b	7.49 a
		1回区	3.22 ns	2.50 ns	1.52 ns	3.22 b	9.98 ab	16.85 a
		2回区	2.11 a	1.04 ab	0.44 b	2.11 b	4.17 ab	4.86 a
	2014	1回区	3.79 a	2.66 ab	1.03 b	3.79 b	10.64 a	11.40 a
		2回区	1.42 ns	0.73 ns	0.48 ns	1.42 b	2.92 b	5.27 a
		1回区	1.90 a	1.35 ab	0.85 b	1.90 b	5.41 ab	9.39 a
牧草地	2014	2回区	1.19 ns	0.66 ns	0.45 ns	1.19 ns	2.63 ns	4.97 ns
		1回区	3.29 a	1.05 b	0.71 b	3.29 b	4.21 ab	7.85 a

異なるアルファベットは5%水準で有意差あり(P<0.05 Tukey's HSD).nsは有意差なし。

ネピアグラスによる放射性Cs吸収率や除染率は水田・牧草地ともに、2回刈取り区の1番草が2番草に比べて2倍~3倍高く、特に水田では年2回刈取り区の1番草、2番草と

もに年1回刈取り区に比べて高い吸収率を示した（表2・2013）。

表2. 異なる栽植密度における<sup>137</sup>Cs濃度と除染率の差異（2013年・2014年結果）

栽植密度間		<sup>137</sup> Cs濃度 (Bq kg <sup>-1</sup> )		<sup>137</sup> Cs除染率 (% m <sup>-2</sup> )		
年度	土壌	栽植密度	2回区平均	1回区	2回区合計	1回区
2013	水田	1.0 m × 1.0 m	3289 ns	813 ns	0.104 b	0.077 b
		0.5 m × 0.5 m	3174 ns	795 ns	0.321 ab	0.243 ab
		0.3 m × 0.3 m	3065 ns	815 ns	0.721 a	0.408 a
	牧草地	1.0 m × 1.0 m	1994 ns	1910 ns	0.078 c	0.109 b
		0.5 m × 0.5 m	2306 ns	2295 ns	0.197 b	0.361 ab
		0.3 m × 0.3 m	2580 ns	1793 ns	0.406 a	0.517 a
2014	水田	1.0 m × 1.0 m	1613 ns	856 ns	0.120 b	0.203 ns
		0.5 m × 0.5 m	2016 ns	696 ns	0.339 a	0.482 ns
		0.3 m × 0.3 m	1471 ns	620 ns	0.300 ab	0.343 ns
	牧草地	1.0 m × 1.0 m	1434 ns	862 ns	0.086 ns	0.122 ns
		0.5 m × 0.5 m	1726 ns	990 ns	0.173 ns	0.179 ns
		0.3 m × 0.3 m	1718 ns	846 ns	0.347 ns	0.338 ns

異なるアルファベットは5%水準で有意差あり(P<0.05 Tukey's HSD).nsは有意差なし。

放射性Csと競合吸収する<sup>40</sup>Kの除去率は水田で平均22%、牧草地跡地で平均10%程度と極めて高く、施肥としてカリウム肥料を与えなかった土壌条件でもネピアグラスの高い地上部乾物収量が得られた。圃場レベルで慣行表土接種を行ったところ、いずれの共生菌根菌接種区でネピアグラスの根における感染は確認できたものの、ネピアグラス茎葉部乾物収量と除染率に及ぼす効果がなかった。

##### (2) 実証試験2年目の結果

実証試験1年目と同様にネピアグラス乾物収量や除染率は、腐植量が多い土壌で高く、株間を狭くした高密植区、密植区の順で高く、年2回刈取りで高いことが2年目の結果からも明らかになった（表1・2・2014）。従って、今後、ネピアグラスで行う農地除染には腐植量、高密植、年2回刈取りの手法が有効であることを明らかにした。作付け2年目の除染率（最大：水田跡地0.482%、牧草地跡地0.347%）は作付け1年目に比べて全体的に減少傾向にあった。特に、1年目に最も除染率が高かった高密植区（11株/m<sup>2</sup>）における2年目の除染率は有意な差はないものの、水田跡地・牧草地跡地ともに1年目に比べて大きく減少した。除染率を決める2要素の地上部乾物収量と吸収濃度ともに作付け1年目に比べて2年目は減少する傾向が見られた。除染率低下の原因として、腐植などに多く吸着していた<sup>137</sup>Csが作付け1年目に多く吸収され、2年目はその量が減ったこと（吸収濃度の減少）や、作付け2年目もカリ肥料施与なしで行ったため、土壌中にカリ養分が不足したこと（地上部乾物収量の減少）が考えられた。カリ肥料施与なしで植物による除染を続ける場合、地上部乾物収量の減少に伴う<sup>137</sup>Csの除染率の減少が生じることが示唆された。圃場実証試験と同時に表土剥ぎ取りで大量発生する高レベル汚染表土（<sup>137</sup>Cs：平均45890Bq/kg土壌）を、ネピアグラスで除染が可能かをポット条件で調べた結果、茎葉部乾物収量は圃場レベルに比べて少ないが、

吸収率が極めて高く ( $^{137}\text{Cs}$ : 平均 3576Bq/kg 乾物), 高レベル汚染土壌での除染にも適用できると考えられた(データ未提示). 菌根菌接種手法を改善し除染効果を調べるポット条件(異なる接種菌密度)や圃場レベル(根元接種)の菌根菌接種を行ったところ, いずれもネピアグラスの根における感染率は高かったものの, ネピアグラス茎葉部乾物収量と除染率に及ぼす効果がなかった. 2カ年の共生菌根菌試験の結果から, イネ科作物に生育促進効果があるとされる供試共生菌根菌種 (*Gigaspora margarita* 主体) にネピアグラスの生育促進効果(除染効果)は考えにくいと考えられた(データ未提示).

### (3) 実証試験3年目の結果

作付けを重ねるにつれて除染率の低下とともに, 除染率を決める地上部乾物収量と吸収濃度が減少した. その原因として, 交換態の  $^{137}\text{Cs}$  量が減ったことや, 土壌中のカリ養分不足による地上部乾物収量の減少が明らかになった. そこで, 試験3年目(平成27年度)では慣行カリ施肥量に対し, 施肥量を40%, 80%減らした低カリウム肥料施与区でネピアグラスを栽培し, 低カリウム肥料施与が除染率に及ぼす影響をカリウム無施与区と比較し, 吸収濃度と地上部乾物収量の両面から除染率向上の最適条件を調べた(表3). その結果, 地上部乾物収量は3カ年カリ肥料無施与に比べてカリ肥料施与量の増加に伴って増加したが, 吸収濃度は逆にカリ肥料施与量の増加に伴って減少した. 乾物収量と吸収濃度からなる単位面積当たりの除染率(%)は20%カリ肥料施与区がカリ肥料無施与区および60%カリ肥料施与区に比べて高かった.

20%カリ肥料施与区ではカリ肥料無施与区に比べて乾物収量が大きく増加したのに対し, 吸収濃度の減少が小さかったために除染率が最も高かった. 試験3年目の除染率は2カ年の実証試験の結果と同様に, 高密植区が密植区や慣行区に比べて高く, 20%カリ肥料施与区の高密植区の除染率はカリ肥料を施与せずに行った2カ年の牧草地跡地の除染率(1年目: 0.406%, 2年目: 0.347%)を大きく上回る結果(最大0.519%)であり, ネピアグラスによる除染は20%カリ肥料施与の上, 高密植条件, 年2回刈取り手法が最も有効であると考えられた. 一方で, 水田跡地ではイノシシの食害により, 結果が得られなかった.

表3. 異なるカリ肥料施与条件における乾物収量, 吸収濃度および除染率の差異.

2015年度	1.0 m × 1.0 m区			0.5 m × 0.5 m区			0.3 m × 0.3 m区		
	0% K	20% K	60% K	0% K	20% K	60% K	0% K	20% K	60% K
乾物収量 (kg m <sup>-2</sup> )	1.9526ns	1.5003ns	1.6680ns	2.2974ns	3.5162ns	3.4842ns	2.9360b	4.8156ab	6.8292a
$^{137}\text{Cs}$ 濃度 (Bq kg <sup>-1</sup> )*	853.5ns	881.4ns	1034.5ns	1431.6a	960.9b	845.7b	1487.5a	1329.9a	649.1b
$^{137}\text{Cs}$ 除染率(% m <sup>-2</sup> )	0.1256ns	0.1061ns	0.1348ns	0.1606	0.2491ns	0.2163ns	0.2997b	0.5192a	0.3640ab

\* $^{137}\text{Cs}$ 濃度は1番草と2番草の平均濃度を示す. 異なるアルファベットは5%水準で有意差あり. nsは有意差なし.

植物による農地除染を行う際は土壌中のカリ養分減少に伴う地上部乾物収量の減少が除染率の減少につながるため, 作付け2年目以降はカリ肥料施与が不可欠であることを明らかにした. また, 除染率向上のためには吸収濃度の向上も不可欠であり, 土壌粘土鉱物に強く吸着している  $^{137}\text{Cs}$  を植物が吸収できる状態にする等の物理・化学的手法(例えば, 耕耘回数を増やして土壌粒子を摩擦, 有機酸施与)も併せて行う必要があると考えられ, 継続して調べる予定である.

以上のように本研究からはネピアグラスによる除染効果は他の植物に比べて極めて高く, 表土剥ぎ取り後にも残る放射性セシウムの追加除染と, 帰還困難区域内の表土剥ぎ取りが困難な農地の除染にも活用できると考えられた. 一方で, 広範囲除染に欠かせない苗生産の低コスト化を目指したネピアグラス栄養体の冬期間保存技術を開発するため, 3カ年間栄養体長期保存試験を実施したが, 貯蔵期間中のカビの発生を抑えられたものの, 出芽させるまでには至らなかった. 今後, さらなる手法改善を行い, 安定した苗生産のための手法確立を継続して行う予定である.

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

Yasuyuki Ishii, Kotomi Hamano, Dong-Jin Kang, Sachiko Idota, and Nishiwaki. 2015. Cadmium Phytoremediation Potential of Napiergrass Cultivated in Kyushu, Japan. Applied and Environmental Soil Science, 査読有, DOI: 10.1155/2015/756270. <http://www.hindawi.com/journals/aess/2015/756270/>

Dong-Jin Kang, Hirofumi Tazoe, Masatoshi Yamada, Yasuyuki Ishii. Differences in remediation effect of  $^{137}\text{Cs}$  in Napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schum.) under different land-use soil and cutting frequency conditions. Water, Air, and Soil Pollution, 査読有, 2014. DOI 10.1007/s11270-014-2022-x. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11270-014-2022-x>

[学会発表](計 2件)

姜東鎮・石井康之・田副博文・磯部勝孝・肥後昌男・細田正洋・床次真司・山田正俊. 福島県浪江町警戒区域内におけるネピアグラスによる放射性セシウム除染. 第2報 2カ年連続のカリ無施与が放射性セシウム除染率に及ぼす影響. 第241回日本作物学会講演会(茨城県水戸市, 茨城大学水戸キャンパス)2016年3月. p99.

姜東鎮・磯部勝孝・肥後昌男・田副博文.

細田正洋・石井康之・床次眞司・山田正俊・福島県浪江町警戒区域内におけるネピアグラスによる放射性セシウム除染・第1報 異なる栽植密度と刈取り回数による放射性セシウム除染効果・第239回日本作物学会講演会(神奈川県藤沢市,日本大学生物資源科学部)2015年3月・p94.

〔その他〕

弘前大学環境報告書(2015)

[http://www.hirosaki-u.ac.jp/wordpress\\_data/annai/kanko/kankyo/2015.pdf](http://www.hirosaki-u.ac.jp/wordpress_data/annai/kanko/kankyo/2015.pdf)

・ネピアグラスによる放射性セシウムの除染  
・浪江町における広範囲農地除染と除染植物のバイオマスを活用したバイオ燃料生産の取組み

弘前大学環境報告書(2014)

<http://www.hirosaki-u.ac.jp/wordpress2014/wp-content/uploads/2015/01/kankyo2014.pdf>

・除染植物のバイオマスを活用したバイオエタノール生成  
・ネピアグラスによる放射性セシウムの除染  
弘前大学ホームページ(2014)

<http://www.hirosaki-u.ac.jp/11820.html>

【報道発表】福島県浪江町での除染植物「ネピアグラス」実証試験結果と「プラント」計画について

新聞掲載(2014)

東奥日報,陸奥新報など

【日本の研究・Com. 注目記事】熱帯植物「ネピアグラス」除染効果大

<https://research-er.jp/articles/view/10000>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

姜 東鎮(KANG, Dong-Jin)

弘前大学・農学生命科学部・准教授

研究者番号:20409080

### (2)研究分担者

石井 康之(ISHII, Yasuyuki)

宮崎大学・農学部・教授

研究者番号:50211032