

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：31603

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24780321

研究課題名(和文)ラン藻イシクラゲを用いた放射性物質汚染土壌の浄化に関する研究

研究課題名(英文) Removal of radioactive material from polluted soil by the cyanobacterium *Nostoc commune*

研究代表者

佐々木 秀明 (Sasaki, Hideaki)

いわき明星大学・科学技術学部・准教授

研究者番号：30405998

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：福島第一原発事故により、多量の放射性物質が環境中に流出した。種子植物とラン藻における放射性物質の蓄積能力に関する調査を行った結果、種子植物に高いレベルでの放射性物質蓄積は観察されなかったが、陸生ラン藻イシクラゲにおいて高い蓄積が観察された。福島県二本松市において、イシクラゲはセシウム137を607,000 Bq/kg蓄積していた。イシクラゲの放射性セシウムの蓄積量は、土壌の放射能濃度が高いところに生育するものにおいて、高い傾向があった。また、栽培実験の結果、イシクラゲは汚染土壌から放射性セシウムを吸収した。これらの結果は、イシクラゲによる放射性物質蓄積は、汚染土壌の浄化に役立つ事を示している。

研究成果の概要(英文)：The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident released large amounts of radioactive substances into the environment. Removal of radioactive material from the environment is an urgent problem, and soil purification using plants is being considered. In this study, we investigated the ability of seed plant species and a cyanobacterium to accumulate radioactive material. The plants did not accumulate radioactive material at high levels, but high accumulation was observed in the terrestrial cyanobacterium *Nostoc commune*. In Nihonmatsu City, Fukushima Prefecture, *N. commune* accumulated 415,000 Bq/kg dry weight Cs-134 and 607,000 Bq/kg dry weight Cs-137. The concentration of cesium in *N. commune* tended to be high in areas where soil radioactivity was high. A cultivation experiment confirmed that *N. commune* absorbed radioactive cesium from polluted soil. These data demonstrated that radiological absorption using *N. commune* might be suitable for decontaminating polluted soil.

研究分野：藻類学

キーワード：イシクラゲ ラン藻 放射性セシウム 除去

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日発生の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により、多量の放射性物質の流出が報告されている。環境中に流出した放射性物質の量は1万5000テラ・ベクレル(Bq)と言われており、健康被害や生態系への影響等が懸念されている。現在、環境中に飛散した放射性物質の影響調査、および放射性物質の隔離および除去が緊急課題として実施されている。

土壌環境に関しては、福島県下および周辺地域で、暫定基準値500Bq/kgを超える野菜や米が他数見つかっており、多くの農産物への放射性物質による汚染が懸念されている。放射性物質は、環境中への流出直後は土壌表面に大部分が分布していることから、表面土壌の除去が緊急的に実施されている。また、雨水の浸透等によって土壌中に拡散する放射性物質の除去には、植物の根からの物質吸収を利用したファイトレメディエーションが試みられている。

植物によるファイトレメディエーションに関しては、原子力発電所の事故直後からヒマワリの栽培が福島県各地で試みられた。しかし、放射性物質の顕著な吸収は確認されず、期待されたほどの成果を得る事はできなかった。そのため、現在は放射性物質を効率よく吸収する他の植物の探索がなされている。

2. 研究の目的

福島第一原子力発電所から40kmに位置する福島県いわき市をフィールドとして探索した結果、陸上植物は根に比較的高い濃度の放射性物質を蓄積するが、地上部には僅かしか移行しないとの結果が得られた。放射性物質の除染を目的として考えると、植物体の地上部の刈り取りは有効とは言えず、根の掘り出しも多くの労力を必要とする。一方、陸生藻類であるラン藻イシクラゲ(*Nostoc commune*)では、高濃度の放射性物質の蓄積が観察された。イシクラゲは土壌表面に匍匐するように生育しているため、土壌表面に蓄積する放射性物質を効率的に吸収している可能性がある。本研究では、全国各地で広く生育するラン藻イシクラゲを利用したファイトレメディエーションによる放射性物質汚染土壌の浄化の可能性を検討した。また、福島県およびその周辺地域に及ぶ汚染地域でのイシクラゲにおける放射性物質蓄積状況の調査を行った。

3. 研究の方法

(1) 陸上植物と陸生ラン藻の採集と放射能濃度測定

2012年4月~10月に福島県いわき市に位置するいわき明星大学構内の実験圃場付近において、被子植物単子葉類、双子葉類、シダ植物およびラン藻イシクラゲの採集を行った。また、イシクラゲは福島県いわき市、田村市、三春町、郡山市、二本松市、福島市

および伊達市においても採集を行った。植物サンプルは採集後に水洗を行い、風乾後に60°Cで48時間乾燥、粉碎後にU8容器に充填後、ゲルマニウム半導体検出器(セイコーEG&G)でヨウ素<sup>131</sup>I、セシウム<sup>134</sup>Cs、セシウム<sup>137</sup>Csの放射能濃度の測定を行った。土壌サンプルは、表層土を採取後に60°Cで48時間乾燥、ふるい(目開き2.8mm)にかけ、V-11容器に充填後、NaI検出器を用いた食品放射能測定システムCAN-OSP-NAI(日立アロカメディカル)で放射能濃度の測定を行った。

(2) 人工環境下におけるイシクラゲの放射性セシウム蓄積の解析

イシクラゲ乾燥体30gを化学合成培地に浸した後、福島県いわき市内で採取した砂質土1kg(<sup>134</sup>Cs:4970Bq/kg, <sup>137</sup>Cs:6540Bq/kg)およびローム層土(<sup>134</sup>Cs:405Bq/kg, <sup>137</sup>Cs:719Bq/kg)が1kg入ったバットに散布し、30日間の栽培を実施した。栽培は屋外(6月)および人工環境装置(10~30°C)で行った。

(3) イシクラゲの放射性セシウム蓄積におけるカリウムの影響

イシクラゲ乾燥体30gを化学合成培地に浸した後、0~0.4mol/kg KNO<sub>3</sub>あるいはKH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>を添加した砂質土壌またはローム質土壌が1kg入ったバットに散布し、20°Cの人工環境下で20日間栽培を行った。

(4) イシクラゲを用いた放射性セシウム汚染土壌の除染試験

2013年4月~10月に南相馬市の6地点において除染試験を実施した。土壌表面(約1m<sup>2</sup>)に市販一般園芸用防虫ネット(ポリエチレン製,1mm網目)を敷き、汚染されていないイシクラゲ250gを水道水に浸してから播種した。週に1~2回ほど散水してイシクラゲを栽培し、1か月後にイシクラゲを回収後、新しいイシクラゲ250gを播種,1か月間栽培することを6回繰り返した。

4. 研究成果

(1) 陸上植物と陸生ラン藻との放射性セシウム蓄積の比較

2012年10月におけるいわき明星大学実験圃場付近の放射能濃度を測定した所、放射性セシウムは深度10cm以内の地表面に分布している事が明らかになった(表1)。一方、放射性ヨウ素<sup>131</sup>Iは短い半減期のためと思われるが、いずれの土壌からも検出されなかった。

表1: いわき明星大学圃場における<sup>137</sup>Csの土壌深度分布

深度	放射能濃度
0~5cm	2530
5~10cm	424
10~15cm	31

15~20cm	5
20~25cm	6
25~30cm	ND

単位は Bq/kg d.w.

単子葉類, 双子葉類およびシダ植物を含む陸上植物では, 地上部へのセシウムの移行は僅かであり, 多くは検出限界値以下であったが, いくつかの種で  $^{134}\text{Cs}$  は 29~1020Bq/kg DW,  $^{137}\text{Cs}$  は 43~1450Bq/kg DW であった。根茎で比較的高い濃度のセシウムが検出され,  $^{134}\text{Cs}$  は ND~2320Bq/kg FW,  $^{137}\text{Cs}$  は 39~3300Bq/kg DW であった。一方, 土壌表面に生育するラン藻イシクラゲは,  $^{134}\text{Cs}$  は 32300Bq/kg DW,  $^{137}\text{Cs}$  は 46200Bq/kg DW と高い値を示した(表 2)。

表 2: いわき明星大学園場付近の陸上植物およびラン藻における  $^{137}\text{Cs}$  の放射能濃度

種名	茎葉部	根系部
フキ	174 ± 25	171 ± 13
ヨモギ	184 ± 15	76 ± 9
セイヨウタボコ	755 ± 25	39 ± 11
カントウタンポコ	1450 ± 35	263 ± 18
ヒメオドリコソウ	719 ± 27	3300 ± 78
オオイヌフグリ	136 ± 12	244 ± 64
ヤハズエンドウ	557 ± 24	1520 ± 53
スイバ	141 ± 13	314 ± 12
オランダミミナグサ	59 ± 11	125 ± 28
スズメノカタビラ	219 ± 20	691 ± 43
カモガヤ	43 ± 7	182 ± 22
チガヤ	129 ± 12	214 ± 21
スギナ	304 ± 25	191 ± 17
イシクラゲ	46200 ± 125	

単位は Bq/kg d.w.

### (2) 福島県に生育する陸生ラン藻の放射性セシウム蓄積

福島県のイシクラゲ 11 産地の放射能濃度を測定した結果,  $^{134}\text{Cs}$  は 1830~415000Bq/kg DW,  $^{137}\text{Cs}$  は 2770~607000Bq/kg DW の値が得られた(表 3)。生育土壌における放射性セシウム濃度は,  $^{134}\text{Cs}$  は 121~26500Bq/kg FW,  $^{137}\text{Cs}$  は 194~332000Bq/kg DW であった。イシクラゲと生育土壌の関係をみると, 生育土壌の放射能濃度が高い場所では, イシクラゲの放射能濃度も高い傾向があった。測定サンプルの中で, 二本松市のサンプルにおいて  $^{134}\text{Cs}$  は 415000Bq/kg DW,  $^{137}\text{Cs}$  は 607000Bq/kg FW と高い値が観察されたが, 生育土壌の放射能濃度は  $^{134}\text{Cs}$  が 5460Bq/kg DW,  $^{137}\text{Cs}$  は 6330Bq/kg DW であり, 環境中への放射性物質放出直後の降雨時に暴露した藻体と推測される。

表 3: イシクラゲおよび生育土壌における  $^{137}\text{Cs}$  の放射性セシウムの放射能濃度

産地	イシクラゲ	土壌
----	-------	----

いわき市 A	16600 ± 74	1530 ± 278
いわき市 B	8020 ± 62	844 ± 154
いわき市 C	2770 ± 39	409 ± 78
田村市	45100 ± 243	6540 ± 1180
三春町	5300 ± 74	5150 ± 931
郡山市 A	10600 ± 87	303 ± 57
郡山市 B	39800 ± 297	33200 ± 2000
郡山市 C	110000 ± 542	9910 ± 1790
二本松市	607000 ± 489	6330 ± 381
福島市	7580 ± 141	1870 ± 339
伊達市	3280 ± 192	194 ± 37

単位は Bq/kg d.w.

### (3) 人工環境下におけるイシクラゲの放射性セシウム蓄積

砂質土においてイシクラゲが蓄積した  $^{137}\text{Cs}$  の放射能濃度は, 10 の環境下で 9540 Bq/kg, 20 において 9230 Bq/kg, 30 において 10100 Bq/kg であった。移行係数は 10 で 1.46, 20 で 1.41, 30 で 1.54 であった(図 1)。一方, ローム層土では,  $^{137}\text{Cs}$  の放射能濃度は 10 の環境下で 228 Bq/kg, 20 において 281 Bq/kg, 30 において 286 Bq/kg であった。移行係数は 10 で 0.33, 20 で 0.40, 30 で 0.44 であり, 砂質土での移行係数と比べて低い値であった(図 2)。イシクラゲは 10 ~30 の温度で放射性セシウムを同様に蓄積した。一方, 土質の違いで移行係数は大きく変化することが明らかになった。

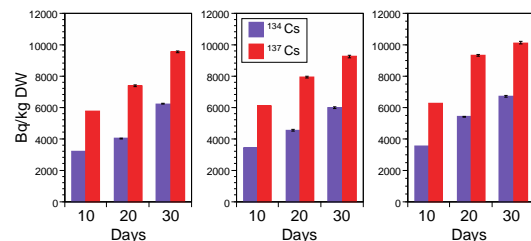


図 1: 砂質土におけるイシクラゲの放射性セシウム吸収 (10 (左), 20 (中央), 30 (右))

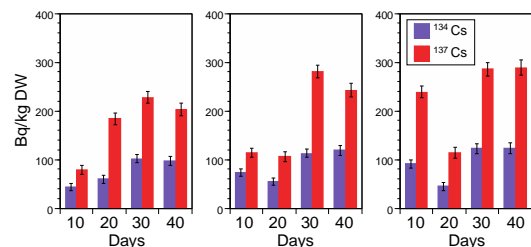


図 2: ローム層土におけるイシクラゲの放射性セシウム吸収 (10 (左), 20 (中央), 30 (右))

人工環境下における栽培実験の結果, イシクラゲが放射性セシウムを吸収・蓄積していることが確認できた。自然環境下におけるイ

シクラゲの放射性セシウム高濃度蓄積が確認されているが、蓄積された放射性セシウムが土壌由来なのか、あるいは降雨等による降下物由来なのかは区別がつかない状況であった。本研究結果から、土壌から直接放射性セシウムを吸収・蓄積していることが確認でき、除染への応用が可能であることが示唆された。

#### (4) イシクラゲの放射性セシウム蓄積におけるカリウムの影響

砂質土では、散布される  $\text{KNO}_3$  添加量が増加するほどイシクラゲの放射能セシウムの移行係数は下がる傾向をみられた。 $\text{KNO}_3$  なしの環境下では  $^{137}\text{Cs}$  の移行係数が 2.11 であったのに対し、 $0.2\text{mol/kg}$   $\text{KNO}_3$  添加時には 1.66、 $0.4\text{mol/kg}$   $\text{KNO}_3$  添加時には 1.32 と低下した。一方、ローム層土では、 $\text{KNO}_3$  添加量の増加に伴う明確な変化は観察されなかった。 $\text{KNO}_3$  なしの環境下では移行係数が 0.35 であったのに対し、 $0.05\text{mol/kg}$   $\text{KNO}_3$  添加時には 0.25、 $0.4\text{mol/kg}$   $\text{KNO}_3$  添加時には 0.22 であった。以上の結果から、イシクラゲのカリウムの添加により放射能セシウムの蓄積が阻害されることが示唆された。また、カリウムの阻害効果は土質によって大きく異なることが明らかとなった。

#### (5) イシクラゲを用いた放射性セシウム汚染土壌の除染試験

南相馬市で行った実証試験では、試験地 1 を除く 5 か所の地点で実施後の表面土壌での放射能濃度の減少が認められた(図 3)。効果があつた試験地 5 では、 $^{137}\text{Cs}$  が  $21700\text{ Bq/kg}$  であつた土壌が 6 回のイシクラゲ設置後、 $3940\text{ Bq/kg}$  まで減少した。設置したイシクラゲは  $^{137}\text{Cs}$  が  $684 \sim 1760\text{ Bq/kg}$  と設置の度に放射性セシウムを吸収していた。6 か所とも 7 月から 8 月にかけて 1 か月間栽培したイシクラゲの放射能濃度が他の月に栽培したイシクラゲよりも高い値を示した。これは、気温などの環境条件がイシクラゲの生育に影響を与えたことが考えられる。この時のイシクラゲへの移行係数は  $0.08 \sim 0.31$  であつた。

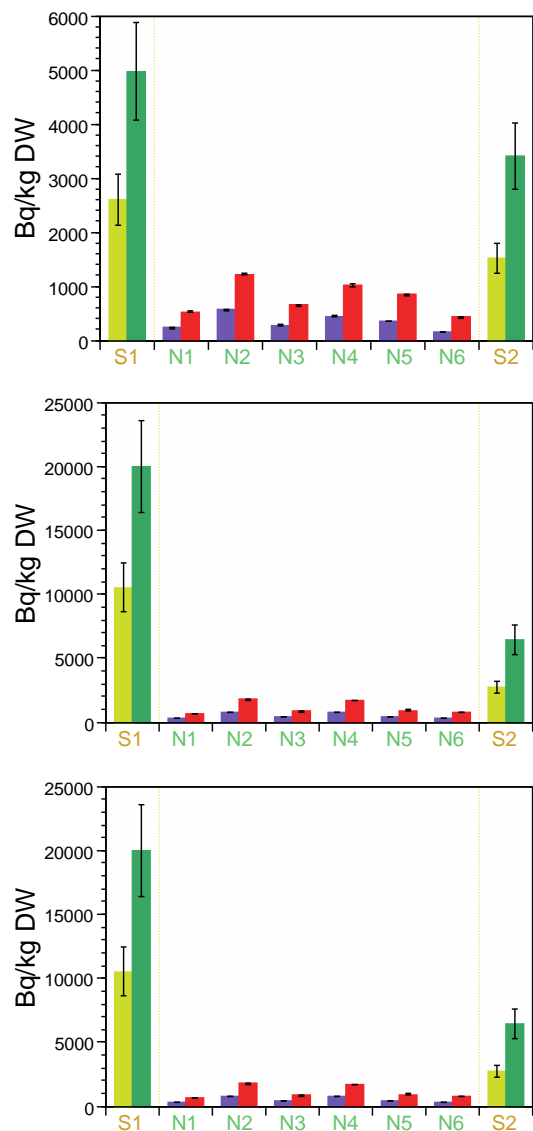
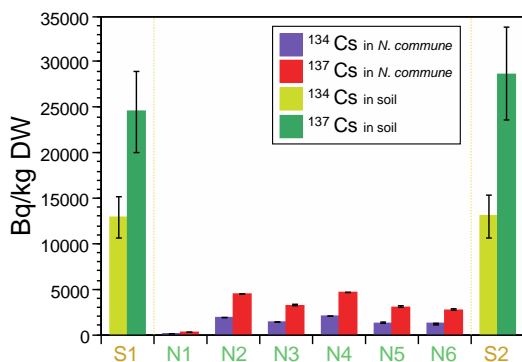


図 3：南相馬市の試験地 1 (1 段目)、試験地 3 (2 段目)、試験地 4 (3 段目) 及び試験地 5 (4 段目) における除染試験結果。S1 は試験前の土壌、S2 は試験後の土壌の  $^{137}\text{Cs}$  放射能濃度を示す。N1~N6 はイシクラゲの  $^{137}\text{Cs}$  放射能濃度を示す。

以上の結果から、ラン藻イシクラゲを利用したファイトレメディエーションによる放射性物質汚染土壌の浄化は可能であることが示唆された。イシクラゲは全国各地で広く生育する普通種である。荒地でも旺盛な生育が観察され、生育環境を選ばない特徴がある。イシクラゲの利用は、地域が広範囲に及び放射性物質による汚染土壌の浄化には極めて有効と言える。また、イシクラゲは乾燥させると体積が 20 分の 1 以下に減少する事から、汚染物質の保管という観点からも除染に有効であると言える。

#### 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 11 件)

- 1) Sasaki H., Kuriki K, Oshima A, Ishida A, Nagata S. Effect of overexpression of proline transporter ProP on high saline adaptation in *Escherichia coli*. *Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan* 66: 30-35 (2012).
- 2) Gion K, Inui H, Sasaki H., Utani Y, Kodama S and Ohkawa H. Assays of PCB congeners and organochlorine insecticides with the transgenic Arabidopsis and tobacco plants carrying recombinant guinea pig AhR and GUS reporter genes. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes* 47: 599-607 (2012).
- 3) Iwata E, Mikami K, Manbo J, Moriya-Ito K, Sasaki H. Social interaction influences blood cortisol values and brain aromatase genes in the protandrous false clown anemonefish *Amphiprion ocellaris*. *Zoological Science* 29: 849-855 (2012).
- 4) Sasaki H., Oshima A, Ishida A, Nagata S. Effect of overexpression of proline dehydrogenase on high saline adaptation through proline utilization in *Escherichia coli*. *African Journal of Microbiology Research* 7: 245-251 (2013).
- 5) Sasaki H., Shirato S, Tahara T, Sato K, Takenaka H. Accumulation of radioactive cesium released from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial cyanobacteria *Nostoc commune*. *Microbes and Environments* 28: 466-469 (2013).
- 6) 竹中裕行, 山口裕司, 榊節子, 佐藤健二, 佐々木秀明: 陸生藍藻イシクラゲ (*Nostoc commune*) による生物除染の可能性: *Algal Resources* 5: 53-60 (2013).
- 7) 佐藤健二, 瀧内 伸, 角田美里, 鈴木龍馬, 佐々木秀明, 坂本直道: 福島第 1 原発事故による汚染土壌からの放射性セシウムの除去と吸着: *分析化学* 62: 535-540 (2013).
- 8) Kawai H, Kitamura A, Mimura M, Mimura T, Tahara T, Aida D, Sato K, Sasaki H. Radioactive cesium accumulation in seaweeds by the Fukushima 1 Nuclear Power Plant accident – Two years' monitoring at Iwaki and its vicinity. *Journal of Plant Research* 127: 23-42 (2014).
- 9) Iwata E, Sasaki H., Sato K. Impact of the Great East Japan Earthquake on reproductive biology of freshwater teleost bluegill *Lepomis macrochirus*. *The Open Environmental Sciences Journal* 8: 18-23 (2014).
- 10) Sasaki H., Kubota Y, Sato H, Iwata E. Bluegill *Lepomis macrochirus* vitellogenin gene transcription as a biomarker for xenoestrogenic contamination of water environments. *The Natural Environmental*

*Sciences Research* 27: 1-7 (2014).

- 11) Sasaki H., Iwata E. Vital staining of acidic compartments in brown alga *Desmarestia viridis* cells. *Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan* 69: 118-119 (2015).

〔学会発表〕(計 5 件)

- (1) 佐々木秀明, 白土侑, 中田芳幸, 佐藤健二, 竹中裕行: 陸生ラン藻イシクラゲによる放射性物質汚染土壌浄化の可能性: 日本藻類学会 36 回大会 (2012 年 7 月, 札幌)
- (2) 佐々木秀明: 福島第一原子力発電所事故と藻類-藻類における放射性物質蓄積の現状-: 2012 年度藻類談話会 (2012 年 11 月, 神戸)
- (3) 佐々木秀明: 陸生ラン藻イシクラゲによる放射性セシウムの蓄積と除染の検討: 日本農芸化学会東北支部平成 24 年度市民フォーラム (2013 年 2 月, いわき)
- (4) 好野奈美子, 坂本祥太, 佐々木秀明: 福島県いわき市に発生している雑草の放射性セシウム含量: 日本雑草学会第 52 回大会 (2013 年 4 月, 京都)
- (5) 佐々木秀明, 尾形剛宜, 玉置久志, 佐藤健二, 竹中裕行: 陸生ラン藻イシクラゲによる放射性セシウム汚染土壌の除染: 日本防菌防黴学会第 41 回大会 (2014 年 9 月, 品川)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 秀明 (SASAKI HIDEAKI)

いわき明星大学・科学技術学部・准教授

研究者番号: 30405998