

令和 2 年 5 月 12 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07020

研究課題名(和文)きのこ菌糸体の元素選択吸収機構の解明とその利用に関する基礎研究

研究課題名(英文) Study on selective elemental absorption mechanism by mushroom and its application

研究代表者

香西 直文 (Kozai, Naofumi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主席

研究者番号：80354877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：福島で採取したきのこ子実体及び実験室で菌床から栽培したしいたけ子実体では、吸収された放射性セシウム(以下、Cs)濃度は傘の方が柄よりも高かった。一方、しいたけ子実体の安定CsとKの濃度比(安定Cs/K)は子実体中で概ね一定に分布していること、数百種類のきのこ菌糸体によるCs吸収に、きのこの属あるいは種との相関が認められなかったことから、菌糸体以外の傘の構造物(孢子・孢子生産器官)がCsとKを蓄積しやすい可能性が考えられる。これらと全く異なる事例として、野生のコツブタケでは非水溶性の有機物にCsが選択的に高濃度に蓄積されていることを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

きのこは土壌からのCs吸収力が高いと言われているが、その機構はほとんど未解明である。本研究では、従来の概念と一致する知見があった一方で、一部のきのこでは非水溶性の有機物に非常に選択的にCsが結合するという新しい知見を得た。本知見は、森林におけるCs循環機構解明のため重要である。

研究成果の概要(英文)：For fruit bodies of wild mushrooms collected in Fukushima and the ones of Shiitake mushroom cultured in laboratory, concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  stored in pileus were mostly higher than those in stem. On the other hand, since a) concentration ratio of stable Cs to K (Cs/K) was almost constant in fruit bodies of Shiitake and b) no correlation was observed between genus or species of mushrooms and  $^{137}\text{Cs}$  accumulated in mycelia of several hundred types of mushrooms, it is possible that pileus structure other than mycelia (probably spore or spore-producing organ) has capacity to accumulate Cs and K. As a very different case, we discovered that yet-to-be identified water-insoluble organic substances in wild *Pisolithus tinctorius* (Kotsubutake) selectively accumulates Cs at high concentration.

研究分野：放射性核種環境動態

キーワード：きのこ 放射性セシウム カリウム 福島

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ヨーロッパでは 1986 年のチェルノブイリ原子力発電所事故を契機として、日本でも 1990 年代初頭から野生きのこへの放射性物質、特に放射性セシウム(以下、Cs とする)の濃集に関する研究が数多くなされている。福島第一原子力発電所事故においても、様々な野生きのこの子実体が Cs を吸収し高濃度に蓄積することが報告されている。このような報告のほとんどは子実体に蓄積された Cs 量の分析にとどまり、Cs 吸収・蓄積に関する機構及び関係する遺伝子解析などはほとんど進んでいない。福島の野生きのこだけでは種類が限られるので、Cs 吸収・蓄積力が高いきのこを系統的に調べることは難しい。また、きのこ子実体を利用した除染技術は実用化されていない。これは、きのこ子実体の発生条件が限られることが主な理由である。例えば、野生きのこでは、春に発生するもの(アミガサダケ、ハルシメジなど)、主に夏に発生するもの(アマタケ、チチタケなど)など、種類により発生時期が限られ、さらに枯れ木、腐植土壌、生きた植物の根等、種類により発生場所が異なる。

### 2. 研究の目的

研究代表者らは、きのこによる Cs 吸収機構の解明、さらにきのこを利用する除染技術・元素回収技術開発のため、きのこの菌糸体に着目している。この理由は、菌糸体は一年中多様な環境で生育でき、かつ化学的に制御された環境(培地)で生育できるからである。申請者らはこれまでに、未同定株も含め 600 種類以上のきのこ菌糸体を用いた Cs 吸収実験により、1)菌糸体の状態でも Cs を吸収すること、2)子実体と菌糸体の Cs 吸収量には相関があること、及び、3)菌糸体乾燥重量あたりの吸収 Cs 量がきのこの種により大きな差が現れることを見いだした。さらに一部の菌糸体を用いた希土類元素とウランの吸収実験から、菌糸体の種類により吸収選択性があることを見いだしている。例えばヒラタケの菌糸体は、Cs と希土類元素を吸収するが、ウランはほとんど吸収しない。本研究では、本研究では、きのこ菌糸体の持つ元素の吸収と選択性に関する機構解明の基礎研究を行うと共に、元素選択的吸収の活用法を開発するための基礎検討を行う。

### 3. 研究の方法

きのこの持つ元素の吸収と選択性に関する機構解明の基礎研究として以下の検討を行う。

- (1) 数百種類のきのこ菌糸体から Cs 吸収力・選択性が高いきのこの系統の有無を明らかにする。このため、Cs を添加した寒天栄養培地を調製し、培地表面にメンブレンフィルターを置き、その上で菌糸体を培養した。増殖後の菌糸体の乾燥重量と菌糸体の Cs 量を調べた。
- (2) Cs の吸収・選択性に関する機構を解明する。Cs の局所分布を調べるために、福島で採取した野生きのこ子実体の Cs 分布を、オートラジオグラフィあるいは Ge 検出器による放射線測定により調べる。Cs は、化学的性質が近く生体必須元素である K の吸収にともなわれてきのこに吸収されると考えられているが、十分な情報が無い。そこで子実体中の Cs と K の分布と濃度比を調べる。このため、子実体の乾燥粉末を希塩酸に浸漬することにより Cs と K を抽出し定量する、あるいは凍結乾燥した子実体切片試料をレーザーアブレーション-ICPMS により分析することにより Cs と K の比を求める。

### 4. 研究成果

#### (1) きんこの菌糸による Cs 吸収

数百種類のきのこ菌糸体株を外部機関から入手したところ、実験に用いたきのこ株の多くは同定されていなかったため、未同定株の遺伝子解析から属あるいは種の同定を試みた。同定できなかった菌株も多数あった。菌糸体乾燥重量あたりの Cs 量(Cs 濃度)をパラメータとして、同定できた株との関係を調べると、菌糸体中の Cs 濃度は最少  $8 \times 10^2$  ~ 最大  $1.1 \times 10^4$  Bq/g と最大 14 倍近い差があったが、きのこの属あるいは種と菌糸体中の Cs 濃度との間に相関は認められなかった。

#### (2) 野生きのこ子実体の Cs 蓄積

福島で採取したきのこの切片試料を調整し、イメージングプレートを用いてそのオートラジオグラフィ像を測定したところ、柄よりも傘に多くの Cs が集まっていることがわかった。そこで、さらに福島で十数種類の野生きのこ子実体を採取し、傘と柄に分けて Cs を定量したところ、ほぼすべてのきのこで傘の Cs 濃度(乾燥重量あたり)が柄よりも最大数倍高かった。傘と柄の基本構成体は菌糸である。したがって、この差の発生は、柄にはない傘の機能、すなわち孢子及び胞子を形成するための器官が関わっている可能性を示唆する。

#### (3) モデルきのことしてのしいたけ子実体内での Cs と K の分布

ほとんどのきのこは、それらの子実体を形成するところまで人工栽培条件で栽培することはできない。実験室の市販のしいたけ栽培キット用菌床を入手し、それにトレーサー濃度の Cs を添加してしいたけを栽培し、幼菌、成熟菌の各時期において傘と軸の Cs と K を定量した。Cs の濃度は幼菌(傘が開く前の未成熟な子実体)の方が成熟菌(十分成長し傘が開いた子実体)よりも高く、その多く(3/4)が傘に集まっていた。成熟菌では約 2/3 の  $^{137}\text{Cs}$  が傘に集まっていた。本結果は過去の報告例における傾向と一致している。一方、K 濃度については傘の方が多く、Cs

と K の濃度比、Cs/K は傘と軸で類似した値となった。つまり、本研究結果は、生体必須元素である K の吸収と蓄積に比例して Cs が吸収・蓄積されたことを示す。つまり、目的があって Cs が吸収されたのではなく、K と間違っ て Cs が吸収された可能性が高い。

しいたけ子実体における Cs と K の分布をより細かく調べるために、レーザーアブレーション-ICPMS による分析を行った。この方法の空間分解能は数  $\mu\text{m}$  である。しいたけ子実体切片を表面、内部の数カ所を測定したところ(図1)、その Cs/K 比は概ね一定であり大きな差がなかった。前述の結果と合わせ、これらの結果は、しいたけにおいては Cs と K は比例して蓄積されていることを示す。

菌床を用いたしいたけによる Cs 吸収の移行係数は 1~2 であり、しいたけの Cs 吸収能は低い。さらに Cs と K の分布は概ね均一であり、特異性が認められない。Cs 吸収蓄積に関して、しいたけは基準試料として利用できるのではないかと考えている。

#### (4) コツブタケの Cs 蓄積

これまでの実験と分析では、きのこにおける Cs 吸収蓄積は目的があつてのものではなく、生体必須元素である K が吸収される際に K と化学的性質が類似している Cs が誤って吸収されるという、従来の考えを支持する結果となった。

このような従来の考えと一致しない例を探索するため、銲物の溶解能力はきのこの Cs 吸収能力と関係があると仮定し、Cs 吸収能力に着目して野生きのこの採取を行った。欧州で Cs 吸収能力が非常に高いことが明らかとなったニセイロガワリは、子実体内の色素に Cs が結合すると考えられている。日本の黒松林に生育するコツブタケが同じ色素を持つことに着目し、茨城県東海村の海岸地殻の黒松林においてコツブタケ子実体と土壌を採取した。土壌は砂質(海岸砂)であるため  $^{137}\text{Cs}$  の放射能濃度は  $500\text{Bq/kg}$ (リター除去後)と高くはない。むしろ、福島第一原子力発電所事故後 8 年を経過した砂質土壌にまだこれだけの Cs が残っていることは驚異とみるべきである。この砂質土壌中の Cs については、本研究とは別に検討を行っている。

採取したコツブタケ子実体を乾燥粉碎した試料を 1%塩酸水溶液(野菜などの K 含有量を求める方法)に浸漬したあと、塩酸酸性のアセトン(有機物を抽出する方法)に浸漬し、それぞれで抽出される全 K と安定 Cs を定量した。1%塩酸水溶液では全 K として  $21\text{mg/g}$ -子実体及び安定 Cs として  $0.2\text{mg/g}$ -子実体となった。ところが次のアセトンでは、全 K として  $0\text{mg/g}$ -及び安定 Cs として  $35\text{mg/g}$  が抽出された。このアセトンによる抽出結果は、一般的に土壌中の K に比べて Cs が著しく少ないことを考えると異常ともいえる結果であり、子実体からアセトンに抽出された有機物は Cs に対する選択性が著しく高いことを示している。このような結果は、他のきのこ子実体及び植物においてもこれまで類似の例が報告されていない。コツブタケは子実体の構造が非常にユニークで、一般的なきのこ子実体(特に食用の子実体)とは明らかに異なり、子実体の大部分が孢子である。おそらく孢子あるいは孢子形成器官に Cs 高選択性有機物が含まれていると思われる。さらに本実験結果は、きのこに蓄積された Cs のその後の環境移行挙動に関して重要な検討課題を提示する。つまり、コツブタケの有機物に結合した Cs は非水溶性である。コツブタケが枯死しても、有機物が微生物により分解されるまで、Cs は有機物と共に環境中に長く留まることを示唆している。これは、Cs が銲物(特に粘土銲物)に固定されるため環境を移行しにくいという従来の概念だけでは Cs の環境移行を説明できないことを示唆する。

土壌あるいはリターからコツブタケがどのように Cs を溶解しているかを検討するためには、コツブタケを実験室内で栽培することが必要である。今年度は、採取したコツブタケの孢子を固形寒天栄養培地と液体栄養培地で培養することを試みた。固形培地を用いて孢子から菌糸体を増やすことには成功したが、菌糸の大量培養のための液体培地では未だ成功していない。今後は、4.1 で行った方法でコツブタケ菌糸の Cs 吸収能を評価する。さらに、野生コツブタケ子実体から有機物を採取し、分離精製した有機物を同定すると共に有機物と Cs と K の錯形成定数を評価する。これらにより、コツブタケの特異的な Cs 吸収蓄積機構を解明を目指すとともに、他の Cs 高吸収性きのこにおいても類似の機構があるか調査検討する。

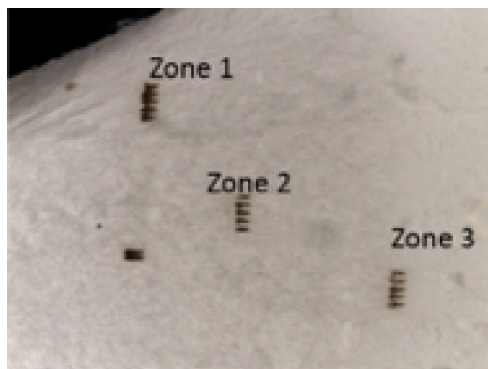


図1 レーザーアブレーション-ICPMS分析に用いたしいたけ子実体の例  
上)子実体切片、下)拡大図 Zone 1~3の黒い線がレーザーを照射した部位

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 F. Guido-Garcia, F. Sakamoto, N. Kozai, B. Grambow
2. 発表標題 Investigating 137Cs uptake by Lentinula edodes (Shiitake) mushroom
3. 学会等名 Migration 19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kimura, F. Guido-Garcia, N. Kozai, S. Zhang, K. Yamaji, Q. Yu, B. Grambow
2. 発表標題 Clay mineral dissolution by activities of siderophore producing bacteria
3. 学会等名 Migration 19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guido Fabiola, 坂本文徳、香西直文、Grambow Bernd
2. 発表標題 Organic acid production as a possible mechanism of uptake of 137Cs by mushroom
3. 学会等名 第91回日本生化学会大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 万也  (Tanaka Kazuya)  (60377992)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究副主幹          (82110)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	坂本 文徳  (Sakamoto FUminori)  (60391273)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹     (82110)	