

# 放射性セシウムを含む真菌類の大型胞子の放出が 森林環境での雨により増加することを発見 —降水によるバイオエアロゾル大気放出の新証拠—

京都大学複合原子力科学研究所の五十嵐 康人 教授（茨城大学理学部特命研究員）、茨城大学大学院理工学研究科の北 和之 教授、気象研究所の木名瀬 健 リサーチ・アソシエイト、足立光司 主任研究官、関山 剛 主任研究官、茨城大学大学院理工学研究科の林菜穂さん、香川大学創造工学部の石塚 正秀 教授、筑波大学生命環境系の恩田 裕一 教授（アイソトープ環境動態研究センター長）ほかによって構成された研究グループは、森林環境での降水が、原発事故由来の放射性セシウムを含む真菌類の大型胞子の放出を強めることを新たに発見しました。

研究グループでは、福島第一原発事故によって大気へ放出され、地表面を広く汚染した放射性セシウム (Cs) の大気への再浮遊の影響と主な要因を明らかにするため、福島県の避難区域内の典型的な山村地域において観測を行い、真菌類が Cs を濃縮、その胞子が大気へ放出されることで、夏季に大気中 Cs 濃度が高くなることをこれまで明らかにしてきました。今回、汚染された森林での Cs 再浮遊の発生源や放出メカニズムを明らかにするため、天候に応じたエアロゾルの捕集を実施したところ、降水時には落葉広葉樹林内、針葉樹林内の大気中の Cs 濃度がそれぞれ非降水時の平均より約 2.4 倍、約 1.4 倍増加したことを確認しました。

光学顕微鏡観察などで原因を探った結果、Cs 再浮遊の担体である真菌類胞子の発生源が、降水時と非降水時で異なることがわかりました。降水時には、粗大な真菌類胞子の大気中の個数濃度が非降水時より相対的に多く（約 1.8 倍）、これは、雨滴の水はねがカビのような真菌類の胞子 (Cs を含んでいる) を大気へ浮遊させていることを示唆するものであり、植物病原菌の分生子による伝播メカニズムと一致することがわかりました。

この成果は、降雨はエアロゾルを大気から取り除くだけでなく、反対にエアロゾルを大気に放出する役割を果たすという近年提起されている問題に、新たな証拠をもたらすものです。大気中に浮遊する生物系粒子であるバイオエアロゾルのうち、真菌と細菌は、ヒト健康や生態系に影響を及ぼすだけでなく、水蒸気氷結の核となって雲形成にも関わる可能性があるため学術的な関心が高く、関連する森林生態学、気象学、気候学、農学（植物病害）など、真菌類胞子が重要性を有する研究分野への波及効果が大きいと考えられます。

本研究成果は、2020 年 9 月 18 日に、国際学術誌「Scientific Reports」に掲載されました。



- 真菌類や植物は、放射性セシウム(Cs)をカリウムと誤り吸収・濃縮、Csは森林で循環
- 高湿度・高温はキノコやカビなどの真菌類の活動を活発化させる
- 真菌類胞子はCsを高濃度に含み、大気中に放出され、夏季の主なCs再浮遊源
- 葉やリターなどの表面で生存する真菌類の粗大胞子が、降水の水はねで大気へ放出
- 真菌類胞子は上空へ輸送されると、降水のもとになる氷晶核になる可能性がある

## ■概要

降水の後で空気の透明度が上がることから、降水はエアロゾルを大気から取り除く役割をしていると一般的に理解されています。しかし最近になって、降水はそれだけではなく、エアロゾルを大気へ放出する役割も果たすのではないかと、という問題提起がなされています。本研究は、この問題に対して、森林環境での降水がバイオエアロゾル<sup>\*</sup>放出に関与するという証拠を新たに追加しました。すなわち、日本の森林環境で降水時に放射性セシウム (Cs) の大気中濃度が非降水時に比べ高くなる現象を見出し、さらに Cs を含有する真菌類の大型の胞子 (典型的なバイオエアロゾルであり、体積も大きい) の放出が降水時に増加することが原因であることを解明しました。

## ■背景

2011年3月の福島第一原発事故によって大気へ放出され地表を広く汚染したCsは、大部分は粘土鉱物に吸着するなどして、未だに森林環境で存在しています。しかし、そのごく一部は水溶性となって森林環境で循環して生物にも取り込まれ、暖かい季節には、花粉や孢子などのバイオエアロゾルによっても大気へ放出されています。夏季は特に真菌類胞子 (Csを濃縮して含む) が $10^5 \sim 10^6$  個/ $m^3$  ほど大気に浮遊していることがわかっています。真菌類胞子中のCs濃度はこれまでの研究で一個あたり $10^8$  Bq程度と推定されることから、大気中のCs濃度は $10^{-3} \sim 10^{-2}$  Bq/ $m^3$ の濃度になって、実際のCs濃度とおおよそ一致します。この濃度は事故直後の大気中Cs濃度の10万分の一～100万分の一程度で取るに足りませんが、安全・安心のため、Csの再浮遊現象の実態解明が進められてきました。

## ■研究方法

研究グループでは、福島県の避難区域内の典型的な山村地域において、大気中の放射性物質の観測を続けてきました（**図1**）。また、放出源やメカニズムを明らかにするために、天候に応じた（降水の有無による）エアロゾルのサンプリングを実施しました。



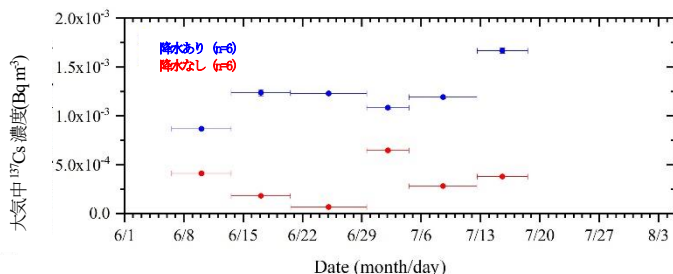
**図1**

福島県の帰還困難区域での大気サンプリングの様子の例。多数並ぶのはエアロゾル捕集用のハイボリューム（HV）サンプラー。一日当たりおよそ1000立方メートルの大気を吸引する。（2016年11月撮影）

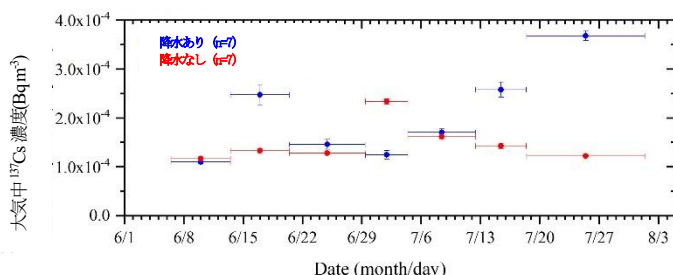
## ■結果と考察

そうしたところ、降水時には森林内での大気中放射性セシウム濃度が非降水時よりも上昇している傾向がみられ（**図2**）、針葉樹林では平均約1.4倍（統計的有意度75%/**図2**下）、落葉広葉樹林ではこの傾向は特に顕著でした（平均約2.4倍（統計的有意度99%以上）/**図2**上）。

a) 2014年広葉樹林での観測

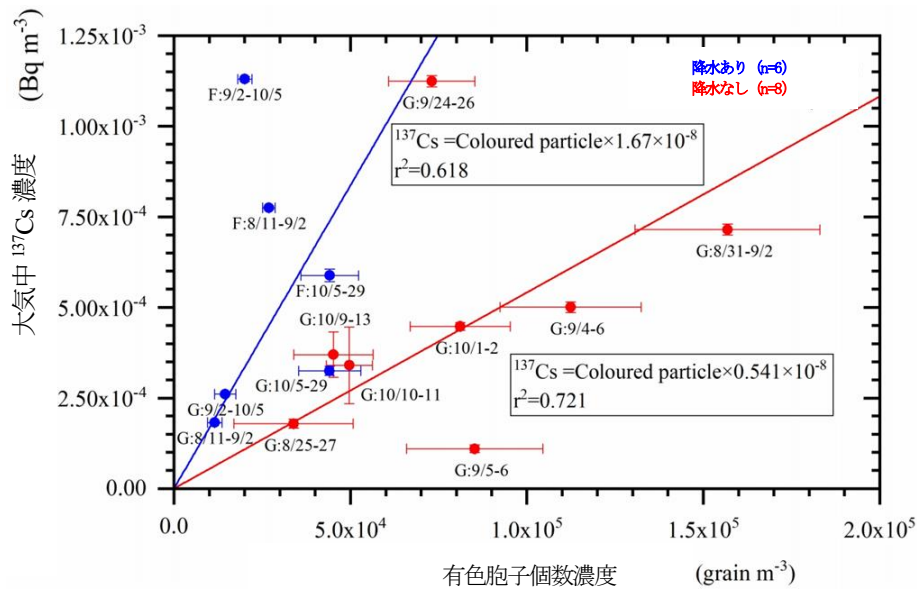


b) 2014年針葉樹林での観測

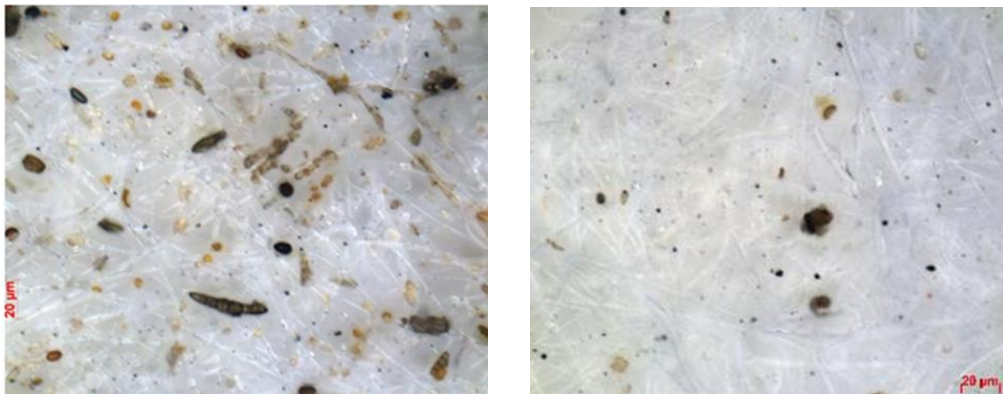


**図2** 降水の有無による放射性セシウムの大気中濃度の違い一時系列。2014年暖候期の落葉広葉樹林での観測（上）と針葉樹林での観測結果（下）。青色が降水時、赤色が非降水時のデータを示す。

詳細な調査（特に光学顕微鏡観察）により、真菌類胞子はCsを含んでいるため、真菌類胞子個数濃度と大気中Cs濃度とは相関があり（**図3**）、Cs再浮遊の担体である真菌胞子の発生源が、降水時と非降水時で異なることを見つけました（**図4**および**図5**）。非降水時に比べて降水時に胞子個数濃度は1/3程度に減るものの（**図5**上）、粗大な（投影面積 $15\ \mu\text{m}^2$ 以上）真菌類胞子（大きさや形態から判断すると分生子と呼ばれる胞子/**図6**）が相対的に多く放出され（約1.8倍/**図5**下）、これは、雨滴の水はねがカビのような真菌類胞子の大气への浮遊を活発化させることを示唆し、旧知の水はねがもたらす植物病原菌の分生子による伝播メカニズムと一致します。降水時には体積が大きい胞子が同程度のCs濃度で飛散するため、大気に放出されるCsの量が増え、濃度上昇が生ずると考えられます。なお、こうした胞子を吸入することによる被ばく影響の懸念はありません。



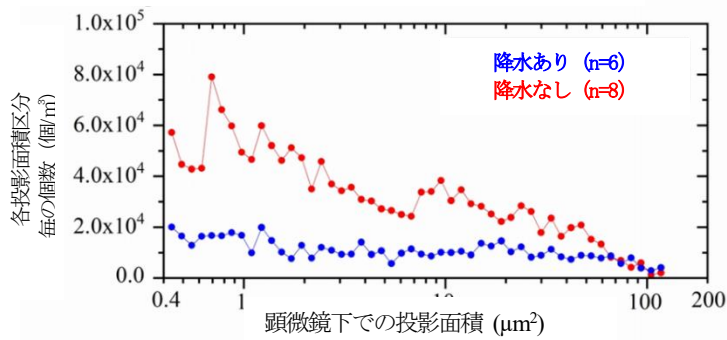
**図3** 降水の有無別にプロットしたCsの大気中濃度と有色胞子の個数濃度とのxyプロット—2016年暖候季に捕集された試料による。胞子のみがCsを含むと仮定。降水時、非降水時ともに相関性が認められ、直線回帰が可能となっている。降水時の方が非降水時に比べて回帰直線の傾きが大きく、より少数の胞子によってより多くのCsが大気へ浮遊する結果となっている。



**図4** 光学顕微鏡による降水の有無によるCsを含有する真菌類胞子の大きさ、形状の違い。降水時に捕集されたフィルター試料（左：2016年9月2日～10月5日、全流量9094 m<sup>3</sup>）と非降水時に捕集されたフィルター試料（右：2016年9月5日～9月6日、全流量1296 m<sup>3</sup>）との比較。バーの長さは20 μmに相当。降水時・非降水時をくらべると、降水時の試料には、こん棒状または長球状の胞子の割合が増大している。



a) 有色孢子の大きさの分布 2016年広葉樹林での結果



b) 相対化した有色孢子の大きさの分布 2016年広葉樹林での結果

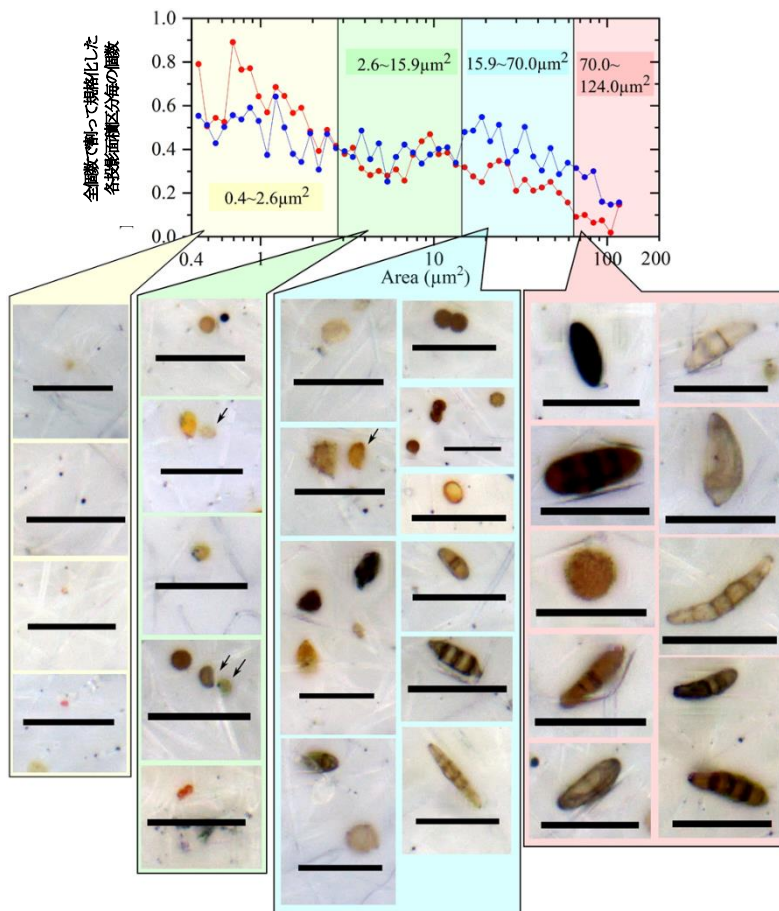
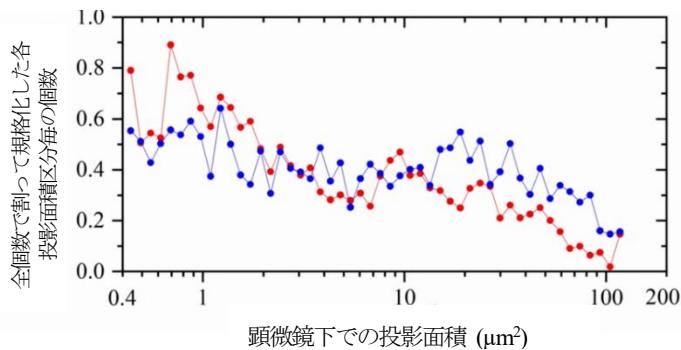


図5

降水の有無による孢子（バイオエアロゾル）の粒径分布（投影面積を横軸にして作図）の違い—2016年暖候期の観測結果。個数濃度分布（上）と全個数で割り算して得た相対的な個数濃度分布（下）。

図6

光学顕微鏡によるCsを含有する真菌類孢子の大きさ、形状の違い。4つの領域に区分して典型的事例を表示。バーの長さは20 μmに相当。降水時(青)・非降水時(赤)をくらべると、降水時の試料には、こん棒状または長球状の粒子の個数が増大していることがわかる。このような粗大な孢子は多くが分生子と呼ばれる無性孢子で、多くは子嚢菌に属するとDNA分析で判断された。

## ■展望

上記の結果は、Cs の再浮遊メカニズムの一つが解明されたと同時に、Cs が森林生態学、気象学、気候学、農業（植物病害）さらに公衆衛生学（呼吸器疾患）などの真菌類胞子が重要性を有する研究分野において、理解が不十分な過程の解明やその量的な評価に活用可能で、トレーサーとして有用なことを示しています。

## ■用語解説

※バイオエアロゾル……大気中に浮遊し、生物に由来する有機物粒子の総称。真菌および細菌、ウィルス、花粉、動植物の細胞断片などを含む。特に、真菌と細菌は、ヒト健康や生態系に影響を及ぼすだけでなく、雲形成にも関わる可能性があるため、学術的な関心が高い。（エアロゾルペディアより）

## ■論文情報

タイトル： Rain-induced bioecological resuspension of radiocaesium in a polluted forest in Japan

著者： Kazuyuki Kita, Yasuhito Igarashi, Takeshi Kinase, Naho Hayashi, Masahide Ishizuka, Kouji Adachi, Motoo Koitabashi, Tsuyoshi Thomas Sekiyama and Yuichi Onda

掲載誌：Scientific Reports

掲載日：2020年9月18日

DOI 番号：10.1038/s41598-020-72029-z