

1. はじめに

東日本大震災以降、農作物から国が定めた「食品中の放射性物質の新たな基準値」を超える放射線量が全国各地で検出され社会問題となっている。これは、セシウム (Cs) の化学的・物理的性質が、同じアルカリ金属のカリウム (K) と類似していることから、きのこが誤認して Cs 吸収するためと考えられている。きのこの放射性 Cs の吸収・濃縮に関する国内外の研究動向としては、液体培地を用いて菌糸体が Cs を取込むことを確認した研究や、固体培地に Cs を添加し、子実体に Cs が吸収・濃縮されることを明らかにした研究がある¹⁻³⁾。しかし、きのこがどの程度 Cs を濃縮可能か、また、培地中の K 量がきのこ子実体の Cs 吸収・濃縮に与える影響など、きのこ子実体形成時における Cs と K の動態を解明した研究は見られない。また、生活環境中の放射性 Cs を除去し、管理された区域に封じ込める技術として、土壌から放射性 Cs を酸で抽出し吸着剤を用いて取除く検討 (産総研 2011) や、藻類の一種を含んだ薬剤を使用した除染実験等が行われているが、高い濃縮が期待できるきのこ培地を用いた環境修復技術の研究は皆無である。

筆者らはこれまでに未利用バイオマスをきのこ培地として活用する研究を進めている。放射性 Cs の除染を対象として注目すべき「きのこの特性」としては、(1) 菌糸体から子実体を形成する過程で、培地から子実体中に多量の K を取込み濃縮すること、(2) きの子実体無機成分中の K 量は 60~70% と高い割合であることである。また、きのこ子実体を形成させるためには培地中に K が必要不可欠であることが明らかになっている。このため、Cs と K の両物質が互いに拮抗的な関係にあるのであれば、K 含有量の少ない培地を用いて Cs を子実体へ吸収・濃縮させることが可能であり、菌類を用いた環境修復技術を創出できると考えた。

本研究では、K 含量が極めて低いために子実体が殆ど形成されないビール粕培地 (培地基材; 針葉樹おが屑、培地栄養材; ビール粕: 無添加区) で菌糸体を培養後、KCl、CsCl をそれぞれ培地に添加することで子実体を形成させると同時に、K、Cs を濃縮させることが可能か検討した。

2. 試験方法

表-1 に培地の配合条件、瓶詰め重量、水分率、pH 及び菌掻き後、注水時に添加した K、Cs 量を示す。培地は 850mL のポリプロピレン製の培養瓶に充填し、121℃で3時間高圧滅菌処理後、室温まで冷却し、栽培期間が短く、害菌に強い供試菌 (ヒラタケ H67 号: (株) キノックス) を約 10g 接種した。培養は培養室 (温度 22±1℃、湿度 75±5%) で 27 日間行い、その後、菌掻き操作を施

表-1 培地の配合条件、瓶詰め重量、水分率、pH 及び注水時に添加した K、Cs 量

試験 区番 号	試験区	培地基材	培地栄養材	その他	菌掻き後の添加量		培地瓶 詰め量	培地水 分率**	培地 pH***
		針葉樹 おが屑	ビール粕	貝化石	K*	Cs*			
		(乾物%)			(mg乾物/瓶)				
1	無添加区				-	-			
2	無添加区_K250				250				
3	無添加区_K500				500	-			
4	無添加区_K1000	46.0	50.0	4.0	1,000		450.0	64.2	5.4
5	無添加区_Cs250					250			
6	無添加区_Cs500				-	500			
7	無添加区_Cs1000					1,000			

* K, Cs は、それぞれ KCl, CsCl を菌糸の培養終了後、菌掻きを行い、注水時にイオン交換水に溶解させて添加。

** 滅菌後の培地水分率。*** 滅菌後の培地 pH。

し、イオン交換水 30mL に溶かした KCl、CsCl を培地表面から 40mm の深さに針を差込み、注射器で 5ヶ所に 6mL ずつ注入した。2 時間静置した後、発生室 (温度: 14±1℃、湿度 90±5%) にビンを移し、子実体形成を促した。なお培養室内の蛍光灯の点灯は作業時のみ、発生室内の蛍光灯の点灯は 8 時間とした。収穫は子実体の傘の径が 20~30mm 程度で行い、子実体の生重量及び水分率を測定した。収穫した子実体、培養開始前培地及び廃培地は通風乾燥機を用いて 60℃で乾燥させ、ピーズミルで微粉碎し、450℃で 15 時間乾式灰化後、濃硫酸 5mL を加えて乾熱板 (ホットプレート) 上で 30 分間加熱し、ろ紙 No. 5C を用いてろ過を行い、その溶液を分析に供した。分析方法はカリウム (K)、セシウム (Cs) とともに ICP/MS で測定した。その後、培地中の Cs がきのこ子実体に移行する程度の指標として用いられる移行係数 (TF)、同じ計算式で求められる濃縮係数 (CF) を次式で求めた。

$TF(CF) = (\text{子実体 1Kg (乾物) あたりの K, Cs 量}) / (\text{培地 1Kg (乾物) あたりの K, Cs 量})$ 。

3. 実験結果と考察

表-2 に培地の菌掻き後に K、Cs を添加した場合のヒラタケの栽培試験結果を示す。菌掻きから収穫までの日数 (発生処理後の

日数)、総栽培日数は、Kを添加した試験区(2～4)では無添加区(試験区1)と比較して1～2日程度短縮される傾向にあった。Csを添加した試験区(5～7)では、無添加区と同程度であったが、K添加区と比較すると2～3日程度長くなる傾向にあった。収量は、K添加区では全ての試験区において無添加区と比較して2.6～2.9倍に増加した。このことから、培地中のK量が少なく、子実体形成があまり期待できない場合においても、菌糸蔓延後に培地にKを注入することで子実体収量を増加させることが可能であることがわかった。また、子実体形成のためにはKが必要不可欠なことが確認された。また、Cs添加区(試験区5～7)では、無添加区(試験区1)と比較して、収量が2.3～2.6倍増加した。このことから、K量の少ない培地で菌糸を蔓延させた後、Csを培地に注入してもCsはKと同様に子実体形成に利用されることが明らかになった。

表3に各試験区におけるK及びCsの移行係数(TF)(濃縮係数)を示す。試験区1(無添加区)の子実体へのKの移行係数は、20.3であったが、菌掻き後Kを注入した試験区2～4では添加量が増加するに伴い、移行係数は小さくなった。これは培地中のK量が増加したことによる。一方、Csを注入した試験区5～7では、Kの移行係数は無添加区(試験区1)と同程度であった。また、Csの移行係数は試験区5で3.9と最大になった。それ以上のCs添加量では、その量が増加するにつれてCsの移行係数は小さくなる傾向にあった。この傾向は、昨年度検討したビール粕培地に直接Csを混合し菌糸を蔓延させ、子実体形成を試みた試験結果と同様であった⁴⁾。杉山²⁾はヒラタケ培地に¹³⁷Csを混合し、¹³⁷Csの移行係数を調査している。その結果、ヒラタケの¹³⁷Csの移行係数は1.5～5程度であると報告している。また、¹³⁷Csの移行係数は133Csの値より2.4倍程高いことを報告している。このことを考慮すると、本試験におけるCsの子実体への移行係数は9.4～5.8程度になり、既往値より高くなる。これはこれらの報告がKを多く含む培地(17,000mg/kg乾物程度)でのCsの移行を調査した結果であり、低カリウム培地でのCsのきのこの取込みを評価した報告ではないためと考えられる。本試験結果から、ビール粕培地のような低カリウム培地でCs濃度を低くし、子実体形成を試みると、さらに子実体へのCsの移行係数を高くすることが可能と思われる。また、培地に注入するKCl量とCsCl量の配合条件を検討することで、培地中のCsを効率良く子実体へ移行させることが可能と考える。

表3に各試験区におけるK及びCsの移行係数(TF)(濃縮係数)を示す。試験区1(無添加区)の子実体へのKの移行係数は、20.3であったが、菌掻き後Kを注入した試験区2～4では添加量が増加するに伴い、移行係数は小さくなった。これは培地中のK量が増加したことによる。一方、Csを注入した試験区5～7では、Kの移行係数は無添加区(試験区1)と同程度であった。また、Csの移行係数は試験区5で3.9と最大になった。それ以上のCs添加量では、その量が増加するにつれてCsの移行係数は小さくなる傾向にあった。この傾向は、昨年度検討したビール粕培地に直接Csを混合し菌糸を蔓延させ、子実体形成を試みた試験結果と同様であった⁴⁾。杉山²⁾はヒラタケ培地に¹³⁷Csを混合し、¹³⁷Csの移行係数を調査している。その結果、ヒラタケの¹³⁷Csの移行係数は1.5～5程度であると報告している。また、¹³⁷Csの移行係数は133Csの値より2.4倍程高いことを報告している。このことを考慮すると、本試験におけるCsの子実体への移行係数は9.4～5.8程度になり、既往値より高くなる。これはこれらの報告がKを多く含む培地(17,000mg/kg乾物程度)でのCsの移行を調査した結果であり、低カリウム培地でのCsのきのこの取込みを評価した報告ではないためと考えられる。本試験結果から、ビール粕培地のような低カリウム培地でCs濃度を低くし、子実体形成を試みると、さらに子実体へのCsの移行係数を高くすることが可能と思われる。また、培地に注入するKCl量とCsCl量の配合条件を検討することで、培地中のCsを効率良く子実体へ移行させることが可能と考える。

4. おわりに

今回の試験では、低カリウム培地(ビール粕培地)で菌糸を培養後、Csを培地中に注入し、子実体を形成させることが可能であるかを確認することを目的としていたため、Kと同様にCs添加量(Bq換算で4,240GBq/kg乾物～15,200GBq/kg乾物)を極端に高く設定し、チェルノブイリ原発事故後15年あまりを経たウクライナで採取されたきのこ(ヒダハタケ;57,000kBq/kg)の1万倍以上で実験を行った。その結果、超高濃度のCsを菌糸蔓延後の培地に注入しても、Csは子実体にKと同時に吸収され、濃縮されることが明らかになった。また、CsはKと同様、きのこの子実体形成に利用されることが無添加区と比較して子実体収量が増加することから明らかになった。さらに移行係数の結果から、低カリウム培地において、培地中のCs濃度を低くすることで、培地中のCsの回収率およびTFは高まると推察された。

きのこ菌糸は、菌糸が培地に蔓延した後もCsを菌糸中に取込み、子実体を形成させることから、ビール粕培地のように低濃度の培地で菌糸を培養し、その培地を汚染土壌等に埋設、菌糸を生長させれば、培地そのものでCsを回収する技術も開発できると考えられる。

参考文献

- 1) Clint G M *et al.*: Influx of ¹³⁷Cs into hyphae of basidiomycete fungi, *Mycol Res*, 95, pp.1047-1051 (1991).
- 2) 杉山英男:キノコによるセシウムの高濃縮性、*Radioisotopes*, 47, pp. 669-671 (1998).
- 3) 三宅定明 他4名:栽培キノコ及び培地中における放射性セシウム濃度、*Radioisotopes*, 57, pp. 753-757 (2008).
- 4) 上田橋克 他4名:きのこの生理機能を活用したセシウムの回収に関する基礎研究、土木学会全国大会講演集、CD-ROM (2013).

表-2 培地の菌掻き後にK、Csを添加した場合の栽培試験結果

試験 区番 号	条件	菌周 日数	培養 日数	発生処理 後の日数	総栽培日数	収量(生)* 乾物重量**	
	試験区						
						(日)	(g/瓶)
1	無添加区			13.5±1.0	40.5±1.0	20.6	2.16
2	無添加区_K250			11.0±1.0	37.0±1.0	53.0	5.30
3	無添加区_K500			11.5±0.9	37.5±0.9	57.7	5.77
4	無添加区_K1000	17	27	12.3±0.4	38.3±0.4	59.9	5.99
5	無添加区_Cs250			13.8±0.8	39.8±0.8	47.1	4.71
6	無添加区_Cs500			13.0±0.0	39.0±0.0	56.6	5.66
7	無添加区_Cs1000			14.0±1.0	40.0±1.0	50.4	5.04

*n=4の平均収量

*子実体の水分率90%で換算

*n=4の平均収量 **子実体の水分率90%で換算

表-3 各試験区におけるK及びCsの移行係数(TF)

試験区番号	条件 試験区	子実体への移行係数	
		子実体へのK (濃縮係数)	子実体へのCs (濃縮係数)
1	無添加区	20.3	-
2	無添加区_K250	9.8	-
3	無添加区_K500	7.1	-
4	無添加区_K1000	3.7	-
5	無添加区_Cs250	22.0	3.9
6	無添加区_Cs500	18.7	2.4
7	無添加区_Cs1000	20.9	2.7

*n=4の平均収量 **子実体の水分率90%で換算