

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

鹿児島工業高等専門学校 学○上田橋克 正 山田真義 正 山内正仁
長岡技術科学大学 正 山口隆司 鹿児島県環境技術協会 山口善敬

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」(2012/4/1:一般食品の放射性セシウム(Cs):100Bq/Kg)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、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(Clinton *et al.*, 1991, Dighton *et al.*, 1991、杉山ら1998、三宅ら2008)。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の栄養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)きのこ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)及びビール粕培地にKCl、CsClをそれぞれ添加した培地で菌糸体の培養および子実体形成を試み、汚染土壌等に含まれるCsの子実体への吸収・濃縮特性の解明及び除去・回収技術を開発することを最終目的に研究を進め、ここでは若干の知見が得られたので報告する。

2. 試験方法

表-1に各培地の配合条件、瓶詰め重量、水分率及びpHを示す。各培地は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、発生処理(菌掻き、注水)を施し、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。また、菌糸の伸長を確認するために培養17日目、21日目、27日目に菌周り状況を確認した。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。収穫した子実体および培養

試験区 番号	試験区	培地基材	培地栄養材	その他		培地 詰め量	培地 水分率 ^{**}	培地pH ^{***}	備考 ^{****}	
		針葉樹 おが屑	ビール粕	貝化石	KCl [*]	CsCl [*]				
		(乾物%)			(mg乾物/瓶)		(g/瓶)			(%)
1	無添加区	46	50	4	-	-	450	64.2	5.4	Kとして153.2mg/瓶
2					477	-		64.5	5.4	Kとして334.7mg/瓶
3	KCl添加区	46	50	4	954	-	450	63.9	5.4	Kとして537.1mg/瓶
4					1,908	-		64.0	5.3	Kとして955.7mg/瓶
5					3,817	-		64.3	5.3	Kとして1881.6mg/瓶
6					-	314		63.8	5.6	Kとして153.2mg/瓶 Csとして205.0mg/瓶
7	CsCl添加区	46	50	4	-	628	450	64.0	5.4	Kとして153.2mg/瓶 Csとして408.2mg/瓶
8					-	1,256		63.5	5.4	Kとして153.2mg/瓶 Csとして857.0mg/瓶
9					-	2,513		64.4	5.4	Kとして153.2mg/瓶 Csとして1706.0mg/瓶

*KCl, CsClは、培地の水分調整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(%)

***菌掻き後の培地pH

****菌掻き後の瓶あたりのK量、Cs量(mg乾物)

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、ビ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)ともにICP/MSで測定した。その後、各培地からの子実体によるK及びCs回収率(%)、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。 $TF(CF) = (\text{子実体1g(乾物)あたりのK, Cs量}) / (\text{培地1g(乾物)あたりのK, Cs量})$ (1)

3. 実験結果と考察

表-2にビール粕培地(無添加区)及びビール粕培地にKClを添加した試験区(KCl添加区)の栽培試験結果を示す。培地への菌周りは全ての試験区において17日間で終了していた。菌掻きから収穫までの日数(発生処理後の日数)は、培地中のK量が増加すると短縮される傾向にあり、試験区3~5(培地中のK量537.1~1881.6mg)で、8日間であった。また、収穫までの総栽培日数は、無添加区(試験区1)と比較して、試験区3~5で5日程度短縮された。収量は、無添加区で38.3gであったが、培地中のK量が増加するにつれて多くなり、試験区3(培地中のK量537.1mg)で74.9gと最大になった。それ以上のKCl添加区では収量は減少傾向にあった。関谷は、ビール粕培地できのこを栽培し、ビール粕培地では子実体が全く形成されなかったと報告している。しかし、本試験では、子実体が発生した。これは、本試験で用いたビール粕に含まれるK量が880mg/kg(乾物)(表-3参照)と関谷が用いたビール粕と比較して約1.5倍量(593mg/kg乾物)含まれていたことが影響していると考えられる。また関谷はビール粕培地にKClを1,163mg/瓶(Kとして609.6mg乾物)

表-2 ビール粕培地(無添加区)及びKCl添加区の栽培試験結果

試験区番号	試験区	条件	菌周回数	培養日数	発生処理後の日数	総栽培日数	収量(生)*	乾物重量**
		培地中のK量 (mg乾物/瓶)						
1	無添加区	153.2	17	27	13.5±1.0	40.5±1.0	38.3	3.82
2		334.7			9.5±1.0	36.5±1.0	66.7	6.67
3	KCl添加区	537.1	17	27	8.0±0.0	35.0±0.0	74.9	7.48
4		955.7			8.0±0.0	35.0±0.0	64.9	6.49
5		1881.6			8.0±0.0	35.0±0.0	62.6	6.26

*n=4の平均収量 **子実体の水分率90%で換算

表-3 培地材料に含まれるK量

培地材料	各培地材料に含まれるK量 (mg/kg乾物)
針葉樹おが屑	1,100
ビール粕	880
貝化石	550

添加した試験区におい

て、最大収量 (89.7±5.8g) を得たと報告している(関谷, 1999)。この関谷の実験と本実験における培養・発生条件及び菌菌等に違いはあるが、きのこ菌糸体が子実体を形成させるためにはカリウムが必要であり、また最大収量を得るためにはKCl の場合、培地中のKとして500~700mg/瓶程度必要であると考えられる。

表-4 にビール粕培地(無添加培地)及びビール粕培地にCsCl を添加した試験区(CsCl 添加区)の栽培試験結果を示す。本試験では、培地中のCs量をKと同容量程度培地に添加し、きのこの子実体形成を検討した。菌周日数はKCl 添加区と比較してCsCl 区ではその量が増加するにつれて遅くなる傾向にあった。発生処理後の日数、総栽培日数についても同様な傾向を示した。また、試験区9(培地中のCsCl 量1,706.0mg)においては、培地に菌糸は蔓延したが、子実体は形成されなかった。収量は、試験区6~8については試験区1(無添加区)と比較して多く、試験区7(培地中のCs 量408.2mg)で70.0gと最大になった。

図-1 にビール粕培地(試験区1)及びKCl 添加区(試験区2~5)の子実体によるK回収率(%)を示す。また、図-2 にビール粕培地(試験区1)及びCsCl 添加区(試験区6~9)のK及びCsの回収率を示す。図-1において、K回収率が培地中のK量が少ない程高くなる傾向にあった。試験区1での子実体におけるK回収率は50.0%であった。一方、CsCl を添加した試験区(6~8)では子実体におけるK回収率は試験区6、7で試験区1より高くなった。特に試験区6では、試験区1より回収率が17.5%上昇した。Csの回収率は試験区6で15.9%、試験区7で10.6%、試験区8で9.1%とKの回収率と比較して低かった。しかし、この結果から、CsはKと同様、子実体に吸収されることがわかった。表-5 に各試験区における子実体によるK及びCsの回収量を示す。試験区1のK回収量は76.4mgであり、KCl を添加した試験区3で194.5mgと最大になった。一方、CsCl を添加した試験区ではK回収量は全ての試験区において試験区1より高くなったが、CsCl の添加量が増加すると減少した。一方、CsについてはCsCl の添加量が増加するとその分、回収量は増加した。表-6 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)及びKCl 添加区における子実体へのKのTFは、試験区1で20と最も高く、KCl 添加量が増加するにつれて減少した。試験区1にCsCl を添加した試験区では、Csを添加したことで、Kの子実体へのTFが0.85~0.61程度に抑制された。一方、Csの子実体へのTFは、試験区6で4と最大になった。それ以上のCsCl 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った。杉山等はヒラタケ菌床栽培では¹³⁷CsのTF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倍程度高いことを報告している。このことを仮に考慮すると、本試験におけるCsの子実体へのTFは9.6~5.8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のきのこへ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TFを高くすることが可能と思われる。また、培地に添加する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、Kの代替としてCsが子実体に同様に取込まれるか否かを確認することを目的としていたため、Cs濃度(Bq換算で4,170GBq/kg~35,100GBq)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、超高濃度の培地中からもきのこ子実体へCsは吸収され、濃縮されることが明らかになった。また、ビール粕培地のように低カリウム培地にCsを添加することで、Kは子実体に吸収されにくくなり、Csが吸収されることがわかった。さらに子実体による培地中のCs回収率、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る。

きのこ子実体にCsが取込まれることから、きのこ菌糸を培養する過程においてもCsの一部は菌糸に取込まれると考えられる。したがって、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し、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。

表-4 ビール粕培地(無添加区)及びCsCl 添加区の栽培試験結果

試験区 番号	試験区	条件		菌周日日数	培養日数	発生処理後 の日数	総栽培日数	収量(生)*	乾物重量**
		培地中のK量	培地中のCs量						
		(mg乾物/瓶)							
1	無添加区	153.2	—	17	27	13.5±1.0	40.5±1.0	38.3	3.82
6	CsCl 添加区		205.0	21	27	13.0±0.0	40.0±0.0	62.5	6.25
7			408.2	21		13.0±0.0	40.0±0.0	70	7.02
8		153.2	857.0	27		16.0±0.8	43.0±0.8	55.8	5.58
9			1706.0	27		—	—	—	—

*n=4の平均収量

**子実体の水分率90%で換算

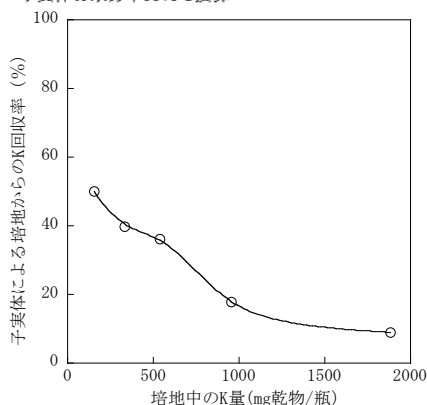


図-1 ビール粕培地及びKCl 添加区(試験区2~5)のK回収率(%)

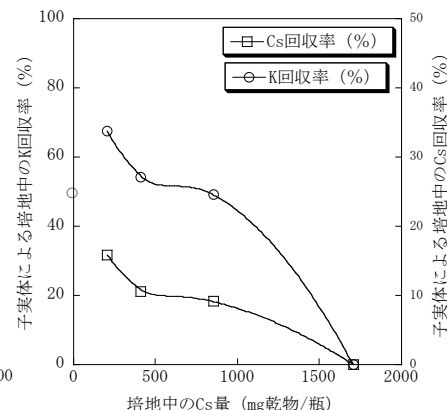


図-2 ビール粕培地及びCsCl 添加区(試験区6~9)のK、Cs回収率(%)

表-5 子実体によるK及びCs回収量

試験区 番号	試験区	子実体によるK及びCsの回収量 (mg乾物)	
		子実体によるKの回収量	子実体によるCsの回収量
1	無添加区	76.4	—
2	KCl 添加区	133.4	—
3		194.5	—
4		168.7	—
5		169.0	—
6	CsCl 添加区	100.0	32.5
7		84.0	43.4
8		78.1	78.1
9		—	—

表-6 各試験区におけるK及びCsの移行係数(TF)

試験区 番号	試験区	培地中のK濃度	培地中のCs濃度	子実体へのKの移行係数	子実体へのCsの移行係数
		mg/g(乾物)	mg/g(乾物)	(濃縮係数)	(濃縮係数)
1	無添加区	1.0	—	20.0	—
2	KCl 添加区	2.3	—	8.7	—
3		3.6	—	7.2	—
4		6.3	—	4.1	—
5		12.0	—	2.3	—
6	CsCl 添加区	0.9	1.3	17.0	4.0
7		1.0	2.6	12.1	2.4
8		1.0	5.4	14.0	2.6
9		1.0	11.0	—	—