

異なる土壌で生育させたコナラ苗のセシウム吸収に及ぼす菌根菌の影響

Influence of ectomycorrhizal formation on Cs accumulation of *Quercus serrata* seedlings under different soil condition

小河澄香*¹・山中高史*²・赤間慶子*²・平井敬三*²・長倉淳子*²・山路恵子*¹
 Sumika OGO*¹, Takashi YAMANAKA*², Keiko AKAMA*², Keizo HIRAI*²,
 Junko NAGAKURA*² and Keiko YAMAJI*¹

* 1 筑波大学大学院生命環境科学研究科

Coll. Agrobiological Resource Sci., Tsukuba Univ., Tsukuba 305-8572

* 2 森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 308-8687

要旨: 土壌中から樹木へのセシウム吸収に及ぼす菌根菌の影響を明らかにするため、コナラ実生苗へ菌根菌のツチグリを接種した後、安定体セシウムを添加する試験を行った。コナラ種子は発芽させ火山灰土壌または花崗岩土壌にて育てた。また、セシウム吸収に及ぼすカリウムの影響を評価するため、肥料として通常のホーグランド氏養液のほか、カリウムを除いたものも用いた。菌を接種した6ヶ月後に安定セシウム（ポット一本あたり 564 μg Cs）を添加して、その1ヶ月後と11ヶ月後に苗を掘り取り、成長量、菌根形成量および ICP-MS によりセシウム量を測定した。火山灰土壌で育てた場合の方が花崗岩土壌で育てた場合に比べて、植物体のセシウム吸収量と成長量は有意に上昇しており、土壌の性質が影響していることが考えられた。また、通常のホーグランド氏養液を与えた場合の方がカリウムを除いたものを与えた場合に比べて、植物体のセシウム吸収量が有意に減少し、カリウムの添加が植物体中のセシウム吸収量に影響を及ぼしていることが判った。今回、ツチグリ菌の接種によりコナラの根系に菌根は形成されたが、コナラの成長量やセシウム含量への明瞭な影響は認められなかった。

キーワード: ツチグリ菌・安定セシウム・カリウム施肥・接種試験

Abstract: In order to investigate the effect of mycorrhizal colonization on accumulation of cesium in plant, we examined the uptake of stable Cs by seedlings of *Quercus serrata* cultivated in volcanic ash soil or granite soil after inoculation with *Astraeus hygrometricus*. The seedlings were fertilized by Hoagland nutrient solution or modified Hoagland nutrient solution without potassium. We harvested plant one and 11 months after the inoculation for measurement of plant growth, infection of mycorrhizal fungi, and Cs content of plant. The plant growth and Cs content were affected by soil type and fertilization, but there was no statistically significant difference between inoculated plants and non-inoculated plants.

Keywords: *Astraeus*, stable Cs, potassium fertilization, laboratory experiment.

I はじめに

2011年3月に起きた福島第一原発事故によって、多量の放射性物質が拡散した(山口ら(12))。事故後3年目には、放射性物質の多くは土壌表層部に分布している(Hashimoto *et al.*(3))。菌根菌は、土壌から養分を効率的に集めて樹木に供給しているために(Smith and Read(10))、土壌から樹木への放射性物質の吸収には、菌根菌の関与が考えられる。これまで、菌類によるセシウム(Cs)の吸収様式を、安定体Csを用いて調べると、菌根菌は腐生菌と比較して、より多くのCsを菌体内に

蓄積することがわかった(小河ら(7))。さらに、培養試験で特に高いCs吸収能が見られたツチグリ菌を接種したアカマツの菌根菌感染苗のCs含量を調べた結果、土壌鉱物からのCsの溶出に、菌根菌が関与している可能性が示唆された(小河ら(8))。そこで、本研究では、放射性物質吸収に及ぼす菌根菌の影響を、コナラを用いて調べた。コナラは、アカマツと同じく、外生菌根を形成する樹種であり、また今回の原発事故が発生した福島県においては、広く分布し、またキノコの本木栽培に利用されている樹種である。また、生育させる土壌の違い

や、カリウム (K) 添加がコナラの Cs 吸収に与える影響についても調査した。

II 方法

1. コナラ無菌苗の作成 コナラの種子 (森林総合研究所構内にて採取) は皮をむき、500 ml ビーカーに入れてガーゼで蓋をし、流水下に一晚置いた。その後、コナラの種子を 30% 過酸化水素液に 15 分浸漬して表面殺菌した後、滅菌土 (パーライト : 赤玉土 = 1 : 1) に置き、23°C の照明付き育苗棚にて発芽させた。初生葉が展開した地上高約 10 cm の実生をピンセットで一本ずつ掘り取り、上述の滅菌土の入ったプラスチック製ポット (164 ml, SC-10, Stuewe & Sons, Corvallis, OR, USA) に植えた。ポットは屋外の温室に置いた。

2. 菌の接種方法 菌根菌の接種には、ツチグリ (森林総合研究所保存 : 菌株番号 960033) を用い、コナラの実生を滅菌土壌に移植してから 3 ヶ月後に接種した。川合・小川寒天培地 (川合・小川 (6)) (1.5% 寒天濃度) で培養して広がった菌叢の周縁部の寒天片 (縦 1.5 mm × 横 1.5 mm × 厚さ 3 mm) を、太田液体培地 (Ohta (9)) に入れ、約 23 度で 28 日間、暗黒条件で培養した。接種方法としては、2 mL (乾燥菌体重量 : 0.0104 g) のツチグリ菌糸懸濁液を根系に直接接するように与えた。なお、菌の接種は 2 回行い、2 回目の接種は 1 回目の接種から 5 ヶ月後に実施した。各処理区の半分は菌を接種し、残り半分の非接種区を対照区とした。

3. 土壌 Cs 吸収に及ぼす土壌の影響を調べるため、1 回目の菌の接種 4 ヶ月後に、コナラ菌根形成苗を、プラスチック製大型ポット (400 ml, D25L, Stuewe & Sons, Corvallis, OR, USA) に入れた火山灰土壌 (森林総合研究所苗畑 B 層から採取) と花崗岩土壌 (茨城県日立市にて採取) に植え替えた。なお、ポット 1 本あたりコナラ 1 本を植栽した。

4. 施肥 1 年目の施肥—施肥にはホーグランド氏液 (Hoagland and Arnon (4)) を用いた。施肥は、苗を大型ポットに植え替えた 1 ヶ月後に行った。各処理区の半分はホーグランド氏液の 4 倍希釈液 (以下、4 倍希釈液) を加え、残り半分は無カリのホーグランド氏液の 4 倍希釈液 (以下、無カリ 4 倍希釈液) を 20 mL ずつ加えた。4 倍希釈液を加えた方を、K 添加区とし、無カリ 4 倍希釈液を加えた方を、K 無添加区とした。

2 年目の施肥—2 年目はホーグランド氏液を希釈しないで用い、5 回行った。施肥は 5 月末から 10 日ごとに各処理区について 20 mL ずつ加えた。

5. Cs の添加 2 回目の菌の接種 2 週間後にすべての

ポットに Cs を添加した。このとき Cs 源として、ポットあたり 85 μ M の塩化セシウム水溶液を 50 ml 添加した (ポット一本あたり 564 μ g Cs)。このとき、加える溶液が植物体に付着しないように注意した。

6. 分析 2 回目の菌接種 (以下、菌接種とする) の 1 ヶ月後と 11 ヶ月後に、コナラ苗を掘り取り、部位 (葉、茎、根) 別の乾燥重量 (凍結乾燥)、菌根形成数 (実体顕微鏡下での菌根チップ計数)、Cs 含量 (湿式灰化後、ICP-MS (Agilent 7700, アジレント) を用いた Cs 定量) を測定した。Cs 含量は、菌接種 1 ヶ月後に掘り取ったコナラ苗の地下部については、根が細すぎたために表面に付着した土壌を完全に除去できない可能性があった。このため、分析は地上部のみについて行った。それぞれにおける反復数を表—1 に示した。

7. 統計解析 得られたデータは、分散分析によって、土壌の種類、K 添加や菌根菌接種がコナラ苗のセシウム吸収に及ぼす影響を解析した。処理区間で有意差が認められた場合は Tukey-Kramer の方法を用いて検定した。

III 結果と考察

1. コナラ苗の成長量 コナラ苗の成長量について菌根菌接種と K 添加による有意な差は認められなかった。土壌の違いについては、コナラ苗の全体量と地下部量は、火山灰由来土壌で生育させた場合、花崗岩土壌で生育させた場合と比べて有意に高かった ($P < 0.05$) (図—1)。菌接種 11 ヶ月後において、葉重量は花崗岩土壌で生育させた場合の方が、火山灰土壌で生育させた場合よりも有意に高かった ($P < 0.001$) (図—1)。地上高は、花崗岩土壌で生育させた場合の方が、火山灰土壌で生育させた場合と比べて有意に高かった ($P < 0.05$)。また、菌接種 11 ヶ月後において、コナラ苗の葉の数と重量は、花崗岩土壌で生育させた場合の方が、火山灰由来土壌で生育させた場合と比べて増加していた ($P < 0.001$)。

火山灰土壌は塩基の溶脱が激しくリン酸固定力が大きい (久馬ら (5))、植物の成長が不良になることが多い。火山灰土壌で生育させた場合に根の成長量が増加したのは、樹木の根は貧栄養であると伸長する傾向があるためと考えられる。植物体全体の成長量における根の成長量の割合は大きい (図—1) ため、火山灰土壌で生育させた場合に植物体全体の成長量が増加したと考えられた。

2. 菌根感染数 土壌や K 添加による菌根形成数の違いは認められなかった (図—3)。

3. Cs 吸収量 菌接種 1 ヶ月後では、コナラ地上部の Cs 含量は、火山灰土壌で生育させた場合、花崗岩土壌で生育させた場合よりも、多かった ($P < 0.01$) (図—2、

上)。

菌接種 11 ヶ月後では、コナラ地上部の Cs 量は、土壌や K 添加による有意差が認められた ($P < 0.001$) (図—2, 下)。菌接種 1 ヶ月後も同様に、コナラ苗は火山灰土壌で生育させた場合、花崗岩土壌で生育させた場合より Cs 量が多かった。また K を添加した場合、K を添加しない場合より Cs 量は有意に少なかった ($P < 0.05$) (図—2)。菌接種 1 ヶ月後では、K の有無による Cs 量への違いが認められなかったため、菌接種 11 ヶ月後では、K の添加量を増加させたために有意差が認められたようであった。また、菌接種 1 ヶ月後と菌接種 11 ヶ月後の両方において、コナラの Cs 吸収量に菌根菌の接種の有無による有意差は認められなかった。

今回の接種試験では、菌根菌の接種の有無よりも、生育させる土壌の違いや K 添加がコナラの Cs 吸収に影響するようであった。土壌分析の結果、火山灰土壌中の交換性 Cs イオン濃度は、21.4~13.5 Cs($\mu\text{mol}(+)/\text{kg}$)であり、花崗岩土壌中の交換性 Cs 濃度は、2.6~1.6 Cs($\mu\text{mol}(+)/\text{kg}$)であった。このように土壌中の交換性 Cs イオン濃度は、火山灰土壌の方が花崗岩土壌よりも高く、それに応じて植物体の Cs 含量が高かった (図—2) と考えられた。

植物体の Cs 吸収に及ぼす菌根菌接種の影響については、Berreck and Haselwandter (1) や Brunner *et al.*

(2) は、菌根菌の接種によって植物体の Cs 含量が減少することを示し、菌根菌は菌糸中に Cs を高濃度に蓄積するが、菌根を介して植物体への Cs の移動はないと述べている。今回の接種試験においても、菌根菌の接種によってコナラの Cs 吸収量に有意差は認められず、菌根菌の影響よりも生育させる土壌の違いや K 添加によって有意に変化することが示された。菌根菌は不動態の Cs を溶出し、菌体内に Cs を吸収する可能性があるが、この点については、今後さらに詳細に調査する必要がある。

引用文献

- (1) BERRECK, M. and HASELWANDTER, K. (2001) Effect of the arbuscular mycorrhizal symbiosis upon uptake of cesium and other cations by plants. *Mycorrhiza* **10** : 275-280
- (2) BRUNNER, I., FREY, B. and RIESEN, T. K.

(1996) Influence of ectomycorrhization and cesium/potassium ratio on uptake and localization of cesium in Norway spruce seedlings. *Tree Physiol.* **16** : 705-711

(3) HASHIMOTO, S., MATSUURA, T., NANKO, K., LINKOV, I., SHAW, G. and KANEKO, S. (2013) *Sci. Rep.* 2564 doi: 10.1038/srep02564

(4) HOAGLAND, D. R. and ARNON, D. I. (1938) The water-culture method for growing plants without soil. *Univ. Calif Agr Exp Stat Circ* **347** : 1-39

(5) 久馬一剛・庄子貞雄・鍬塚昭三・服部勉・和田光史・加藤芳朗・和田秀徳・大羽裕・岡島秀夫・高井康雄 (1984) 新土壌学. 朝倉書店, 東京 : 191pp

(6) 川合正允・小川眞 (1976) まつたけの培養に関する研究. 第 4 報 種菌培養の検討と菌床栽培の試み, 日本菌学会会報 **17** : 499-505

(7) 小河澄香・山中高史・赤間慶子・田原恒・山路恵子 (2015) 異なる窒素源を加えて培養した時の菌根菌および腐生菌のセシウム吸収量. 関東森林研究 **66**(2) : 155-158

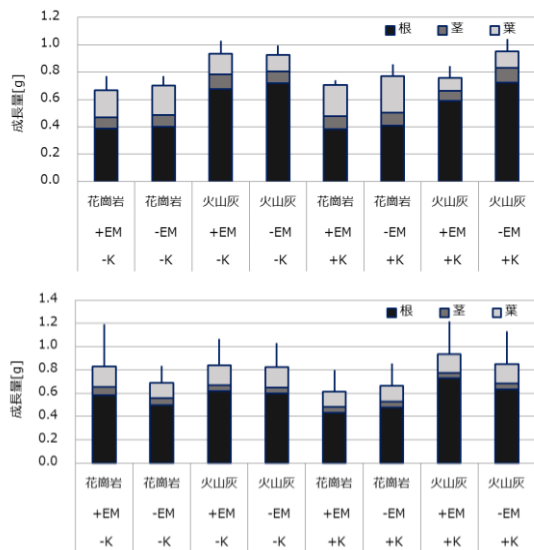
(8) 小河澄香・山中高史・赤間慶子・田原恒・長倉淳子・山路恵子 (2016) アカマツ実生苗のセシウム吸収に及ぼす菌根菌の影響. 関東森林研究 **67** : 155-158

(9) OHTA, A. (1990) A new medium for mycelial growth of mycorrhizal fungi. *Trans. Mycol. Soc. Japan* **31** : 323-334

(10) SMITH, S. E. and READ, D. (2008) *Mycorrhizal Symbiosis*, 3rd ed. Academic Press, New York : 787pp

(11) 高島幸司 (2015) 我が国におけるきのこ生産の動向と今後の展望. 木材学会誌 **61**(3) : 243-249

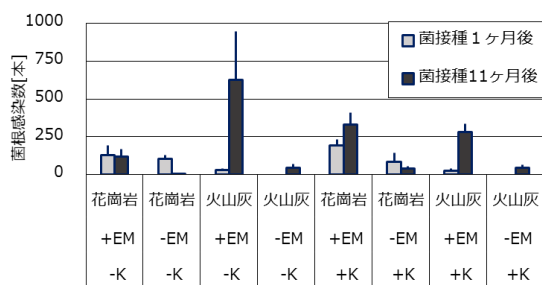
(12) 山口紀子・高田裕介・林健太郎・石川覚・倉俣正人・江口定夫・吉川省子・坂口敦・朝田景・和頼朗太・牧野知之・赤羽幾子・平舘俊太郎 (2012) 土壌 - 植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因. 農業環境研究所会報 **31** : 75-129



図一1. コナラ苗の成長量に及ぼす土壌、菌根菌接種およびカリウム添加の影響

上：菌接種1ヶ月後のコナラ苗成長量. 下：菌接種11ヶ月後のコナラ苗成長量. 値は各区の反復についての平均値と標準誤差である. +EM, 菌根菌接種区; -EM, 菌根菌非接種区. +K, カリウム添加区; -K, カリウム非添加区.

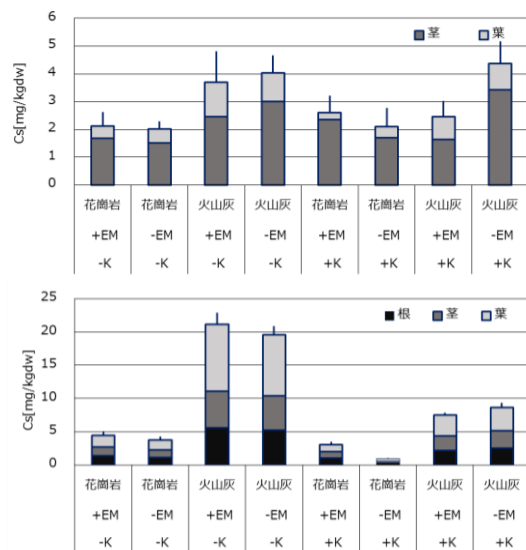
Fig. 1 Effect of soil, K addition and the inoculation of mycorrhizal fungus on the growth of plants. Upper, 1 month after inoculation; lower, 11 months after inoculation. Values are means with standard errors calculated from each replicates.



図一3. コナラ苗の菌根感染数

■：菌接種1ヶ月後. ■：菌接種11ヶ月後. 値は各区の反復についての平均値と標準誤差である. +EM, 菌根菌接種区; -EM, 菌根菌非接種区. +K, カリウム添加区; -K, カリウム非添加区.

Fig. 3 Effect of soil, K addition and the inoculation of mycorrhizal fungus on the mycorrhizal fungal infection of the plant. Grey bar, 1 month after inoculation; black bar, 11 months after inoculation. Values are means with standard errors calculated from 6-8 replicates.



図一2. 植物体のセシウム吸収に及ぼす土壌、菌根菌接種およびカリウム添加の影響

上：菌接種1ヶ月後の植物体のセシウム吸収量. 下：菌接種11ヶ月後の植物体のセシウム吸収量. 値は各区の反復についての平均値と標準誤差である. 値は植物体あたりのセシウム量である. +EM, 菌根菌接種区; -EM, 菌根菌非接種区. +K, カリウム添加区; -K, カリウム非添加区.

Fig. 2 Effect of soil, K addition and the inoculation of mycorrhizal fungus on the uptake of Cs by plants. Data were Cs content per a plant. Upper, 1 month after inoculation; lower, 11 months after inoculation. Values are means with standard errors calculated from each replicates.

表一1. 各区における反復の数

Table. 1 The numbers of replicates

土壌	菌根菌	カリ 施肥	接種後の月数	
			1	11
花崗岩	+	+	7	7
	+	-	6	6
	-	+	8	8
	-	-	8	7
火山灰	+	+	7	8
	+	-	7	7
	-	+	8	7
	-	-	8	7

菌根菌：+, 菌根菌接種区; -, 菌根菌非接種区. カリ施肥：+, カリウム添加区; -, カリウム非添加区.