

里山林伐採後の樹木根による土壌補強強度の変化

誌名	水利科学
ISSN	00394858
著者名	山瀬,敬太郎 藤堂,千景 鳥居,宣之 谷川,東子 山本,智究 池野,英利 大橋,瑞江 壇浦,正子 平野,恭弘
発行元	水利科学研究所
巻/号	66巻4号
巻号補足	
掲載ページ	p. 1-17
発行年月	2022年10月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



里山林伐採後の樹木根による土壌補強強度の変化

山	瀬	敬太郎	藤	堂	千	景
鳥	居	宣之	谷	川	東	子
山	本	智究	池	野	英	利
大	橋	瑞江	檀	浦	正	子
平	野	恭弘				

目 次

- I. 高齢木化と萌芽更新
- II. 大径木化と斜面安定
- III. 伐採に伴う樹木根による土壌補強強度
 - 1. 樹木間の中央位置地点下の根分布を調べる
 - 2. 樹木根の物理的強さを調べる
 - 3. 樹木根による土壌補強強度を計算する
 - 4. 斜面の安定性を評価する
 - 5. 地上部と地下部の不均衡
 - 6. 樹木根の直径階別にみた土壌補強強度の変化
 - 7. 萌芽更新過程での安全率の低下
- IV. 低木種の樹木根を生かした土壌補強強度

山瀬・藤堂：兵庫県立農林水産技術総合センター
鳥居：神戸市立工業高等専門学校
谷川：名古屋大学大学院生命農学研究科
山本：名古屋大学理学部
池野：福知山公立大学情報学部
大橋：兵庫県立大学環境人間学部
檀浦：京都大学大学院農学研究科
平野：名古屋大学大学院環境学研究科

要旨

燃料革命によって里山林は放置され、高齡木化かつ大径木化が進んでいる。高齡木化した里山林構成種の萌芽更新能力を調べたところ、里山林で普通にみられるコナラで特に低下しており、樹齡60年の萌芽更新の可能性は3割程度であった。次に、大径木化したコナラ伐採後の萌芽更新過程において、伐採前から伐採3年後までの樹木根の本数と物理的強さの変化を調べ、樹木根による土壌補強強度を計算し、斜面の安定性（安全率）を評価した。伐採直後から、伐り株からの萌芽枝は順調に成長する一方で、樹木根の本数の減少と引き抜き抵抗力の低下がみられ、地上部と地下部で異なる動態を示した。安全率は徐々に低下する傾向を示し、伐採前の安全率が1.24に対して伐採3年後には1.14と有意に低下した。萌芽更新しない枯死個体ではさらに安全率が低下し、伐採3年後には1前後となり、降雨により地下水位が上昇すると、森林斜面は不安定となり表層崩壊が発生する可能性が示された。大径木化したコナラの伐採は、倒木による危険を回避出来る一方で、安全率を低下させる。この伐採更新時の安全率低下を防ぐため、本研究では、引き抜き抵抗力の大きい低木種を活用した森林管理を新たに提案した。

キーワード：里山林，萌芽更新，コナラ，樹木根，土壌，補強強度，斜面安定，低木種

I. 高齡木化と萌芽更新

萌芽再生力を利用した更新（萌芽更新）は、世界中で古くから行われている伝統的な管理技術である。以前の里山林では、薪炭利用のために30年よりも短い周期で伐採され、萌芽更新が繰り返されてきた結果（Fujimori, 2001）、樹木の若返りによる里山林の健全化が図られてきた。しかしながら、1950年代からの燃料革命によって里山林は利用されずに放置され（里山放置林）、里山林の景観や生物相は急激に変化し、生物多様性が低下している（服部ら, 1995）。

それでは、現在の里山放置林で、かつての萌芽更新による管理を再開するとどうなるのだろうか？ 里山放置林を構成する広葉樹種の萌芽更新能力を知るため、暖温帯域の里山林に普通にみられる落葉広葉樹のコナラ、アベマキ、エノキと、常緑広葉樹のアラカシ、シラカシ、スダジイ、ヤブツバキの7樹種を

対象に、伐採後の萌芽枝再生の有無と、再生した萌芽枝の残存状況を調べた。調査地は兵庫県内で、年降水量が1,242～2,246mm、暖かさの指数が104.6～130.8℃・月であり、極相林として照葉樹林が推定される地域である。萌芽率（伐採個体数に対し、萌芽枝が再生した個体数）は、アラカシ100.0%（調査数は91個体、樹齢は最小30～最大64年）、ヤブツバキ100.0%（31個体、32～86年）、スダジイ95.5%（88個体、31～98年）、シラカシ94.9%（78個体、28～93年）、アベマキ91.8%（98個体、31～73年）と、これらの樹種では萌芽率9割以上であったが、エノキ68.8%（32個体、27～127年）、コナラ55.9%（179個体、31～84年）であり、エノキとコナラでは7割以下と低かった。また、伐採3年後の残存率（当初の伐採個体数に対し、萌芽枝が全て枯死した個体を除く残存個体数）は、アラカシ100.0%、ヤブツバキ100.0%、スダジイ95.5%、シラカシ94.9%、アベマキ90.0%、エノキ62.5%、コナラ36.4%であり、特にコナラの残存率の低下が著しく、伐採後に萌芽枝が再生してもその後

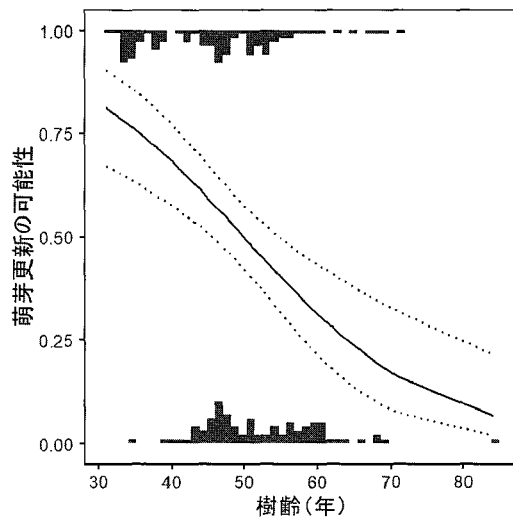


図1 コナラの樹齢と萌芽更新の可能性。実線は、一般化線形モデル回帰より推定した各樹齢における萌芽更新の可能性を示し、破線は、95%信頼区間を示す。下向きのヒストグラムは、樹齢階ごとの萌芽有り(1)、上向きは萌芽なし(0)のそれぞれ個体数を示す(山瀬, 2012を改変)

に枯死してしまう個体が多かった（山瀬，2012）。

コナラの萌芽率には樹齢が大きく影響しており，樹齢30年の萌芽更新の可能性は8割以上であったが，40～80年の間で低下し，60年では3割程度であった（図1）（山瀬，2012）。コナラは，暖温帯域の里山林で最も普通にみられる樹種であり，燃料革命以降放置された結果，樹齢は60～70年前後に達しているが，高齢木化するほど萌芽更新は難しくなっている。

Ⅱ．大径木化と斜面安定

里山放置林の高木層に位置する樹種は，胸高直径20～30cm以上に大径木化している。大径木化すると，地上部と地下部バイオマスの不均衡を引き起こし，強風や豪雨による倒木，森林斜面の不安定化や表層崩壊の危険性が高まることが指摘されている（Vogt et al., 2006; Pividori, 2009）。そこで近年では，道路や民家等の保全対象に隣接する急傾斜面の里山放置林では大径木の伐採を行い，直接的な危険を回避することが求められている（写真1）。

樹木根による斜面の安定性は，直根や垂下根によるすべり面の杭効果と，水平根による隣接根系との相互作用効果がある（Vergani et al., 2017a）。これらの効果は，樹木が枯死すると，樹木根の本数と物理的強さの両方で減少する（Schmidt et al., 2001）。伐採後枯死せずに萌芽更新するコナラなどの広葉樹種



写真1 倒木による危険回避のための里山放置林の伐採
（兵庫県豊岡市）

についても、樹木根による土壌補強強度（Soil reinforcement by roots）は一時的に低下すると言われているが（北村・難波, 1981）、どのぐらいの期間で、どの程度低下するのか、その低下は斜面の安定性に影響するのかは、明らかになっていない。もし萌芽更新の過程において、樹木根による土壌補強強度の低下を定量化出来れば、その低下を補う管理手法の提案が可能になる。また、里山放置林において、いかにして斜面の安定性を低下させないようにするか、伐採時に生じる、樹木根による土壌補強強度の弱点部分を作り出さない森林管理に言及することも出来るかもしれない。

そこで次章では、コナラについて、伐採後の樹木根による土壌補強強度が、斜面安定に与える影響を定量的に示した研究である“Dynamics of soil reinforcement by roots in a regenerating coppice stand of *Quercus serrata* and effects on slope stability”（Yamase et al., 2021）を中心に解説する。

Ⅲ. 伐採に伴う樹木根による土壌補強強度

1. 樹木間の中央位置地点下の根分布を調べる

樹木間の中央位置の地点下（樹木間中央）は、森林斜面における隣接根系との相互作用効果の最弱部である（Bischetti et al., 2016）。そこで、兵庫県宝塚市のコナラが優占する里山放置林で、2015年12月に伐採を行い、伐採後の萌芽更新過程において、樹木間中央の根分布を知るために、樹木根系と周辺土壌を円柱状に掘り出す調査を行った。掘り出しにより作成した円柱状の土壌断面の底面は、根元半径に、隣接木との距離（高木層および亜高木層に位置する樹高8 m 以上のコナラおよび他樹種を対象とし、これら隣接木との距離）の2分の

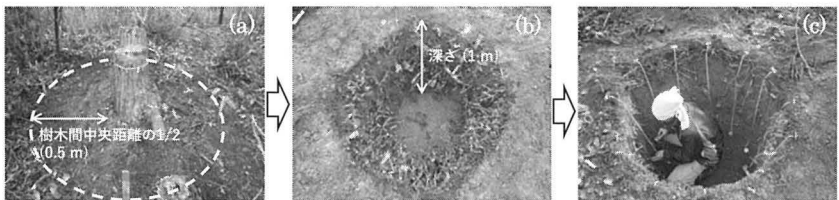


写真2 (a) 根系掘り取り前と、(b) 掘り取り後（根にラベリング）、(c) 根直径の測定（Yamase et al., 2021を改変）

1（ここでは0.5mに設定）を加算した値を半径とする円形とし（写真2（a））、土壌断面の深さは、1mとした（写真2（b））。樹木根の分布は、円柱状の土壌断面（側面、底面とも）に出現した直径1mm以上の根を対象に、その位置を記録することで求めた（写真2（c））。掘り出しは、萌芽更新個体で伐採前から伐採1～3年後まで毎年6個体ずつ、枯死個体で伐採3年後のみ3個体で実施した。

2. 樹木根の物理的強さを調べる

樹木根の物理的強さは、土壌の剪断面下の個々の根を引き抜いた時の引き抜き抵抗力によって推定可能である。引き抜き抵抗力は根直径から推定出来ることから、両者の関係式を予め構築しておけば、樹木根の分布（サイズと本数）を知ることにより、樹木根による土壌補強強度を算出することが可能である。そこで、土壌断面の側面及び底面に出現する根について、1個体50本以上の根を選定し、引き抜き抵抗力を測定した。ここでは、土壌断面上に出現した根の先端部の直径をデジタルノギスで測定し、その大きさが1～143mmの樹木根を測定対象とした。幹より遠心方向に伸長する樹木根の根元部を特殊な鋏でつかみ、樹木根の伸長方向とは反対方向に引き抜くこととし、人力あるいは手動ウィンチを使用して、樹木根1本を引き抜くのに要する引っ張り力（引き抜き抵抗力）を測定した。

3. 樹木根による土壌補強強度を計算する

樹木根による土壌補強強度は、従来、Wuモデル（Wu et al., 1979）を用いて推定されてきた。このモデルは、全ての樹木根が同時に切断されるという仮定に基づいており、樹木根の強度を過大に評価してしまうことが指摘されている（Schwarz et al., 2010）。同様の指摘として、掛谷ら（2018）は、過去の多くのモデルは、最大引き抜き抵抗力が生じるまでの樹木根の変位を考慮していないとしている。こうした中、Root Bundle モデル（以下、RB モデル）（Schwarz et al., 2010）の適用事例が国際的に増加している。RB モデルは弱い根から順に切断されていくことを仮定しており、樹木根による土壌補強強度が極端に大きく見積もられる傾向はない。またRB モデルでは、引き抜きに影響を与える樹木根の蛇行性（根端から根元の最短距離に対する根の全長）を考慮している。樹木根による土壌補強強度をRB モデルとWu モデルで推定した

値を比較したところ、RB モデルではスギ林で Wu モデルの 4～5 割程度、コナラ林で 3～4 割程度の値であった。この RB モデルを用いて、最近では、森林火災後の再生 (Vergani et al., 2017b) や間伐の有無による樹木根の土壌補強強度の比較 (Yamase et al., 2019)、スギ、ヒノキ人工林の土壌補強強度の推定 (島田, 2021) が行われている。

4. 斜面の安定性を評価する

Okimura and Ichikawa (1985) によって提示された表層崩壊モデルは、森林斜面の不安定化を評価する手法の一つである。表層崩壊の発生に影響を及ぼす傾斜、集水域、表層土深分布の 3 要因を同時に考慮しており、広域を対象とした表層崩壊の発生危険度を評価することが出来る手法である。このモデルでは、無限長斜面安定解析によって崩壊発生の有無を判断しており、森林斜面の安全率 (Factor of Safety, FoS) が 1 を下回る場合を計算上の崩壊斜面として定義している。本研究では、安全率を算出する既往式 (Okimura and Ichikawa, 1985; Hammond et al., 1992) を改良し、樹木根による土壌補強強度を垂直方向と水平方向の効果に分けて計算した。

$$\text{FoS} = \frac{C_s + C_{rv} + \{q_0 + \gamma_t \cdot (H - h) + (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot h\} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \phi}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \{q_0 + \gamma_t \cdot (H - h) + \gamma_{sat} \cdot h\}} + \frac{C_{rH}}{\sin \alpha \cdot \{q_0 + \gamma_t \cdot (H - h) + \gamma_{sat} \cdot h\}} \cdot \frac{H_s}{D_w}$$

ここで、 C_s は土の粘着力、 C_{rv} は主に直根や垂下根による垂直方向の土壌補強強度、 C_{rH} は主に水平根による水平方向の土壌補強強度、 ϕ は土の内部摩擦角、 γ_{sat} は土の飽和単位体積重量、 γ_t は土の湿潤単位体積重量、 γ_w は水の単位体積重量、 H は基岩からの崩壊土層厚さ、 H_s は根系の侵入深さ、 h は雨量強度の影響を受ける基岩面からの地下水位、 α は斜面勾配、 q_0 は樹体による上載荷重、 D_w はすべり面の崩壊幅を示している。 C_s 、 ϕ 、 γ_{sat} 、 γ_t は、沖村ら (2016) を参考に、それぞれ調査地が位置する佐曽利凝灰角礫岩の 5.0 kN/m^2 、 32° 、 19.0 kN/m^3 、 16.0 kN/m^3 とし、 C_{rH} は RB モデルにより計算した。 C_{rv} と H 、 α 、 D_w は、本研究の急傾斜地で 2018 年 7 月に発生した小規模崩壊 (写真 3) での実測結果に基づき、直根や垂下根は基岩を貫通していなかったことから $C_{rv} = 0 \text{ kN/m}^2$ とし、 $H = 1.4 \text{ m}$ 、 $\alpha = 39.7^\circ$ 、 $D_w = 10.7 \text{ m}$ とした。すべり面は基盤と一致すると仮定して $H = H_s = 1.4 \text{ m}$ とした。 q_0 は、伐採前は久保田ら (2004) を参考に 0.206 kN/m^2 とし、伐採後はいずれも 0 kN/m^2 とした。



写真3 2018年7月に伐採エリアで発生した表層崩壊（兵庫県宝塚市）

5. 地上部と地下部の不均衡

伐採後の萌芽再生の程度を把握するため、伐り株から再生した萌芽枝を1～3年後に根元部で採取し、おおよその萌芽枝量を示すため、個体ごとに、萌芽枝の（根元直径）²×高さの合計体積を算出した。里山放置林の伐採後3年間の萌芽更新の過程において、コナラ地上部の萌芽枝量は順調に成長しているのに対し、樹木根による土壌補強強度は徐々に低下した（図2）。我々は通常、地上部の成長をみて地下部の回復状況を判断することが多いが、地上部だけを観察していても、樹木根による土壌補強強度や安全率、すなわち表層崩壊防止力を適時に把握出来ないことを示している。したがって、表層崩壊を軽減する森林斜面の管理を行う際には、地上部の動態だけで判断するのではなく、地下部の樹木根動態についても経時的にモニタリングする必要がある。本研究では、掘削による破壊的な調査を実施したが、近年は比抵抗二次元探査や地中レ

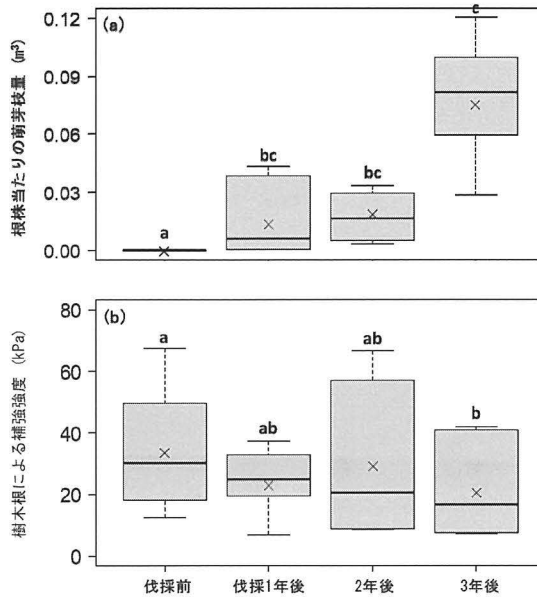


図2 萌芽枝量 (a) と樹木根による補強強度 (b) の経年変化 (Yamase et al., 2021を改変)。同じアルファベット間には有意差がないことを示す

一ダ探査など、非破壊で地下部の樹木根を把握する手法も開発されている（特に後者の手法については、水利科学374号（谷川ら，2020）に詳しく説明しているので、参考にしてほしい）。これらの手法を用いることで、同一個体や同一林分、あるいは同一斜面で経時的に樹木根動態を把握することにより、高精度かつ広域的な表層崩壊防止力の推定が可能になるであろう。

6. 樹木根の直径階別にみた土壌補強強度の変化

コナラ樹木根の直径階は、Vergani et al. (2016) に基づき区分した。伐採前と伐採1年後の萌芽個体の比較では、細根（1 mm 以上 2 mm 未満）、小径根（2 mm 以上 5 mm 未満）の本数は減少し（図3）、個々の樹木根の引き抜き抵抗は低下するものの（図4）、樹木根による土壌補強強度は有意に変化しなかった。伐採前と2年後の萌芽個体の比較では、細根、小径根、中径根（5 mm 以上 10 mm 未満）の本数は減少するものの（図3）、樹木根の引き抜き抵

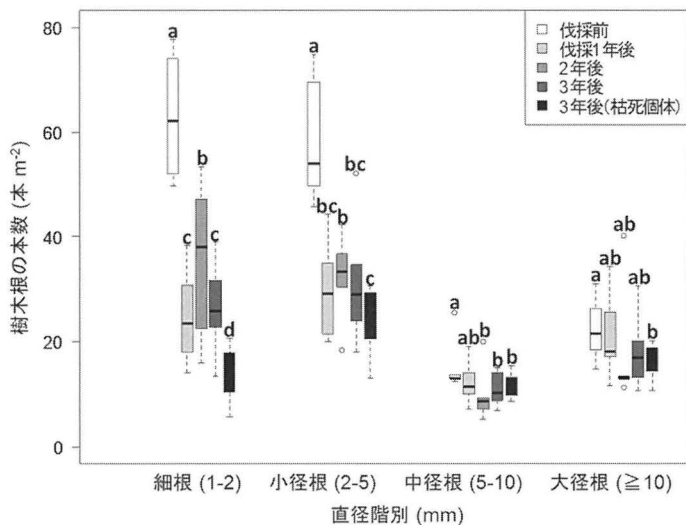


図3 直径階別樹木根の本数変化 (Yamase et al., 2021を改変)。
同じアルファベット間は有意差がないことを示す

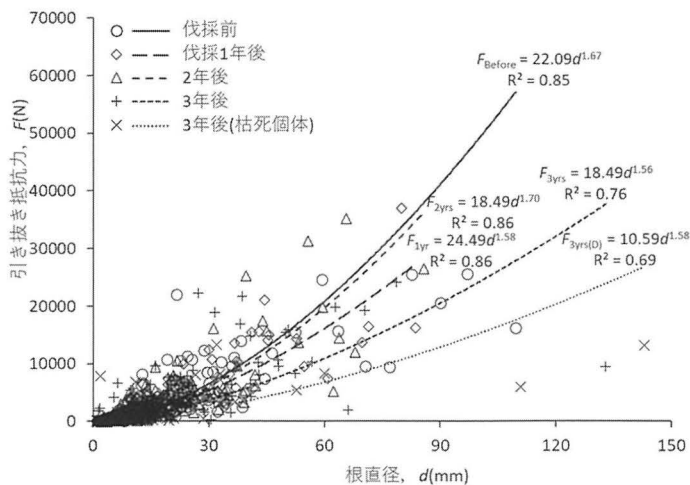


図4 伐採前後の樹木根の引き抜き抵抗の変化
(Yamase et al., 2021を改変)

抗力は伐採 1 年後から回復することで（図 4）、伐採前と有意差はみられず、樹木根による土壌補強強度も有意に変化しなかった。伐採前と 3 年後の萌芽個体の比較では、細根、小径根、中径根の本数は減少し（図 3）、個々の樹木根の引き抜き抵抗力の低下によって（図 4）、樹木根による土壌補強強度は有意に減少した。また伐採前と 3 年間で萌芽再生しなかった枯死個体の比較では、大径根（10mm 以上）を含むすべての直径階の本数は減少し（図 3）、個々の樹木根の引き抜き抵抗力の低下に伴い（図 4）、樹木根による土壌補強強度は有意に減少した。

樹木根の直径については、粗根（小径根と中径根、大径根の総称）が土壌補強強度に大きく影響することが明らかにされてきた（Giadrossich et al., 2019）。一方で、細根の寄与はこれまであまり焦点を当てられていなかった。一般的に細根の本数は伐採後低下する。細根の更新は数か月から数年と短い、粗根は数年以上の長期にわたる（Vergani et al., 2016）。細根における単位体積当たりの物理的強さは、その成長組織の違いのため、粗根よりも大きい（Genet et al., 2005; Zhang et al., 2014）。本研究では、伐採後 3 年目の個体で伐採前と比べ樹木根による土壌補強強度が有意に低下した。細根と粗根両方とも伐採後 1 年目から 3 年目にかけて本数の低下がみられたが、伐採 3 年後には細根を含めた引き抜き抵抗力が低下し、個体全体の樹木根の土壌補強強度について有意な低下を導いた。このことは、粗根だけでなく細根が樹木根の土壌補強強度を評価する際に重要であることを示している。

7. 萌芽更新過程での安全率の低下

土壌の湿潤条件下で、樹木根による土壌補強強度は低下し、安全率は 1 を下回る可能性が高くなる（Bassanelli et al., 2013; Zhang et al., 2019）。本研究においても、基岩面からの地下水位が高くなるにつれて、萌芽更新個体が枯死個体かを問わず、同じような傾向で安全率の低下がみられた（図 5）。基岩面からの地下水位を 0.7m（言い換えれば、崩壊土層の厚さの半分まで地下水位が上昇した）と仮定して計算した安全率の値は、伐採前 1.24 から伐採 3 年後 1.14 へと有意な低下がみられ、伐採前と比べ 7～8% 減少し、表層崩壊の危険度は高まった。伐採 3 年後までに萌芽再生しなかった枯死個体では、安全率の値が約 20% 減少して 1 近くまで低下した。実際に、高木層を構成するコナラの密度が低く、周辺部の高木層のコナラも枯死していた区域では、2018 年 7 月 5 日か

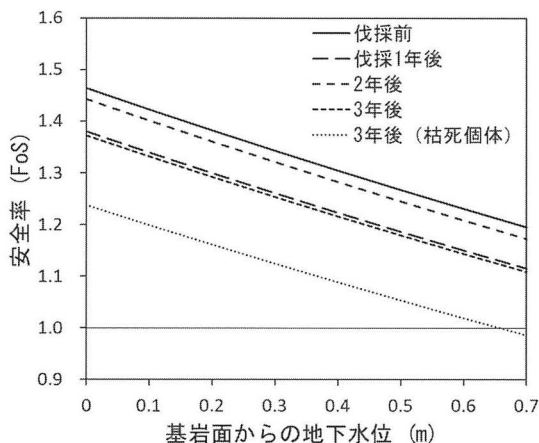


図5 安全率の経年変化 (Yamase et al., 2021を改変)

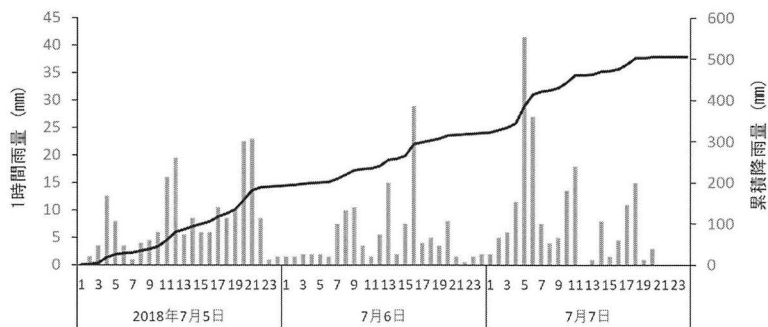


図6 累積降雨量と最大1時間雨量 (後川アメダスデータ, 35°02'N, 135°18'E)

ら7日に累積降雨量506mm, 最大1時間雨量41.5mmの豪雨のため(図6), 小規模な崩壊が発生している(写真3)。以前から, 伐採後の里山林では, 萌芽更新する広葉樹種であっても, 生きた根の本数は減少し, 個々の樹木根の引き抜き抵抗力も低下することで, 5~10年程度で斜面崩壊の危険性は最も高まることが指摘されている(Burroughs and Thomas, 1977; 北村・難波, 1981; Schmidt et al., 2001)。

例えば, 亜高山帯のトウヒ林では, 根の80%は伐採10年後までに腐朽する(Vergani et al., 2016)。また, トウヒ林の伐採15年後(Vergani et al., 2016)

やヨーロッパアカマツ林の山火事 4 年後 (Vergani et al., 2017b) においては、伐採や山火事などの攪乱を受けていない森林の表層崩壊防止力と比較して十分でないことが示されている。さらに、里山林の萌芽更新過程においても、樹木根の腐朽と再生が表層崩壊防止力に影響を与え、表層崩壊防止力は里山林の構成種や更新間隔によって影響を受けることが定性的に示されてきた (Vergani et al., 2017a)。本研究 (Yamase et al., 2021) では、里山林の代表的な構成種コナラについて、伐採 3 年後に萌芽更新している個体であっても、森林斜面の崩壊につながる危険性があることを世界で初めて定量的に明らかにした点で意義深い。

IV. 低木種の樹木根を生かした土壌補強強度

伐採 3 年後までの萌芽更新過程では、安全率 1 は下回らないにせよその低下がみられ、降雨が続いた場合に、斜面崩壊の危険性が高まっており (図 5)、実際に斜面の一部が崩壊したケースがみられた (写真 3)。大径木化する樹木個体の伐採は、里山林を健全に維持し、あるいは倒木による直接的な危険を回避するためにも重要であるが、その際、伐採更新時も安全率を低下させない森林管理が必要である。

そこで、表層崩壊防止力を低下させない森林管理の観点から、低木種のミツマタとアセビに着目し、これらの低木種 2 種と高木種のスギについて、樹木根の引き抜き抵抗力を比較した (図 7) (山瀬ら, 2015)。高木種の根系は、大きな地上部の重さと成長を支えるために、主根の発達した樹種が多いのに対し、低木種の根系は、叢生する地上部のように根株付近から不定根を多数伸ばすものが多い (荻住, 2010)。地上部サイズが小さい低木種の根の肥大成長は、高木種と比較して小さい傾向にあると考えられるため、高木種と同様の表層崩壊防止力を要求するには自ずと限界がある。しかし、低木種を下層に育成させることで、低木種の土壌補強強度を加えることが可能で、高木種の樹木根による土壌補強強度の低下を補う形で、斜面補強を図ることができると考えられる。また、斜面下部に民家等の保全対象が隣接するなど大径木化が望ましくない斜面では、低木種のみが生育する森林植生へと誘導する方法も、表層崩壊防止力を高める森林管理の選択肢となる。

ところで、アセビの根の引き抜き抵抗力は、同じ低木種のミツマタと比較し

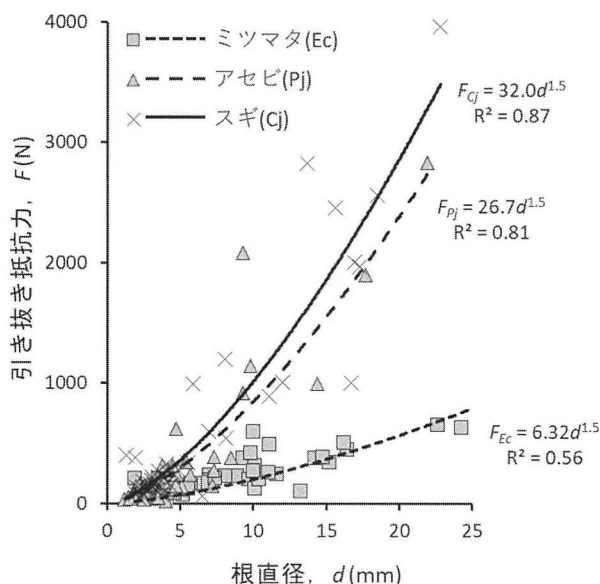


図7 スギ及び低木種2種の引き抜き抵抗力の比較（山瀬ら，2015を改変）

て、4倍程度の差がみられた（図7）。このことは、表層崩壊防止力の向上を森林管理の目的とした場合、樹種の選定が重要であることを示している。樹種ごとに樹木根の引き抜き抵抗力を評価し、引き抜き抵抗力のより大きい低木種を選択することで、表層崩壊防止力がより高い森林植生に誘導することが可能かも知れない。

なお、根分布の様式が異なる樹種間では、土壤中の空間を有効に利用することができるため地下部根系の競争は緩和され、混交林の細根量は単純林よりも大きい傾向にある（Ma and Chen, 2017）。一方で、同種間や根分布の似た樹種では根系の競争が激しいと言われている（佐藤，1995）。このように地下部の樹木根は、樹種の組み合わせによって住み分けている一方で、競争があることも予想される。森林斜面の表層崩壊防止力を高めるためには、樹木根の種間競争を考慮した森林管理が必要であり、管理のために選択する樹種根系について本研究のような知見の集積が喫緊の課題と言える。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費助成事業科研費（JP25252027, JP20H03040）および兵庫県農政環境部の支援を受けて実施しました。また、現地調査では、ひょうご環境創造協会、株式会社一成の皆様の協力をいただきました。ここに深謝いたします。

引用文献

- Bassanelli, C., Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Rossi, L., Vergani, C. (2013) The contribution of chestnut coppice forests on slope stability in abandoned territory: A case study. *J. Agric. Eng. Res.* 44:68-73, e13.
- Berhony, G., Verlinden, M. S., Broeckx, L. S., Ceulemans, R. (2015) Changes in belowground biomass after coppice in two *Populus* genotypes. *For. Ecol. Manag.* 337, 1-10.
- Bischetti, G. B., Bassanelli, C., Chiaradia, E. A., Minotta, G., Vergani, C. (2016) The effect of gap openings on soil reinforcement in two conifer stands in northern Italy. *For. Ecol. Manag.* 359, 286-299.
- Burroughs, E. R. J., Thomas, B. R. (1977) Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability. USDA Forest Service Department of Agriculture, Research Paper, INT-190, 27.
- Fujimori, T. (2001) Ecological and silvicultural strategies for suitable forest management. Amsterdam, Elsevier.
- Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S. B., Fourcaud, T., Dumail, J., van Beek, R. (2005) The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant Soil* 278, 1-9.
- Giadrossich, F., Cohen, D., Schwarz, M., Ganga, A., Marrosu, R., Pirastru, M., Capra, G. F. (2019) Large roots dominate the contribution of trees to slope stability. *Earth Surf. Process. Landforms* 44, 1602-1609.
- Hammomd, C., Hall, D., Miller, S., Swetik, P. (1992) Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0. United States Department of Agriculture, Intermountain Research Station, General Technical Report INT-285.
- 服部保・赤松弘治・武田義明・小館誓治・上甫木昭春・山崎寛（1995）里山の現状と里山管理. 人と自然 6, 1-32.
- 掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣逸朗・阿部和時（2018）樹木の根の引き抜き抵抗力による表層崩壊防止機能の評価方法に関する研究. 砂防学会誌71, 3-11.
- 刈住昇（2010）根系の特性, (1) 地上部と地下部の対応性, ①高木と低木の根系. 最新

樹木根系図説（総論），pp. 741-742，誠文堂新光社。

- 北村嘉一・難波宣士（1981）抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能. 林試研報313, 175-208.
- 久保田哲也・大村寛・奥村武信・多田泰之・プレムブラサドパウデル（2004）異なる林相及び森林伐採状況における樹木地上荷重の斜面安定に及ぼす影響. 日本地すべり学会誌41, 273-281.
- Ma, Z., Chen, H. Y. H. (2017) Effects of species diversity on fine root productivity increase with stand development and associated mechanisms in a boreal forest. *J. Ecol.* 105, 237-245.
- Okimura, T., Ichikawa, R. (1985) A prediction method for surface failures by movements of infiltrated water in a surface soil layer. *Natural Disaster Sci.* 11, 41-51.
- 沖村孝・中川渉・北田憲嗣・伊藤正美・嵯峨根朋子（2016）兵庫県下酸性火山岩類分布地域における表層崩壊機構と崩壊予測モデル化. 建設工学研究所論文報告集58, 73-92.
- Pividori, M. (2009) Chestnut silviculture in Mediterranean countries: problems and prospects. *Acta Hort.* 815, 143-145.
- 佐藤孝夫（1995）樹木の根系の成長に関する基礎的研究. 北海道林業試験場研究報告32, 1-54.
- Schmidt, K. M., Roering, J. J., Stock, J. D., Dietrich, W. E., Montgomery, D. R., Schaub, T. (2001) The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Can. Geotech. J.* 38, 995-1024.
- Schwarz, M., Preti, F., Giadrossich, F., Lehmann, P., Or, D. (2010) Quantifying the role of vegetation in slope stability: a case study in Tuscany (Italy). *Ecol. Eng.* 36, 285-291.
- 島田博匡（2021）RBM_wを用いたスギ・ヒノキ人工林の水平根による補強強度の推定. 日緑工誌47, 15-20.
- 谷川東子・山瀬敬太郎・藤堂千景・池野英利・大橋瑞江・檀浦正子・金澤洋一・平野恭弘（2020）地中レーダがもつ樹木の根系可視性を減災に生かす試み. 水利科学374, 87-112.
- Vergani, C., Schwarz, M., Soldati, M., Corda, A., Giadrossich, F., Chiaradia, E. A., Morando, P., Bassanelli, C. (2016) Root reinforcement dynamics in subalpine spruce forests following timber harvest: a case study in Canton Schwyz, Switzerland. *Catena*, 275-288.
- Vergani, C., Giadrossich, F., Buckley, P., Conedera, M., Pividori, M., Salbitano, F., Rauch, H. S., Lovreglio, R., Schwarz, M. (2017a) Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: a review. *Earth*

- Rev. 167, 88-102.
- Vergani, C., Werlen, M., Conedera, M., Cohen, D., Schwarz, M. (2017b) Investigation of root reinforcement decay after a forest fire in a Scots pine (*Pinus sylvestris*) protection forest. *For. Ecol. Manag.* 400, 339-352.
- Vogt, J., Fonti, P., Conedera, M., Schroder, B. (2006) Temporal and spatial dynamics of stool uprooting in abandoned chestnut coppice forests. *For. Ecol. Manag.* 235, 88-95.
- Wu, T. H., McKinnell, W. P., Swanston, D. N. (1979) Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Can. Geotech. J.* 16, 19-33.
- 山瀬敬太郎 (2012) 暖温帯域での高齢化した里山構成種7種の萌芽能力. 日緑工誌38, 109-114.
- 山瀬敬太郎・藤堂千景・平野恭弘 (2015) 低木樹種2種の根系による崩壊防止力の検討. 日緑工誌41, 15-20.
- Yamase, K., Tanikawa, T., Dannoura, M., Todo, C., Yamamoto, T., Ikeno, H., Ohashi, M., Aono, K., Doi, R., Hirano, Y. (2019) Estimating slope stability by lateral root reinforcement in thinned and unthinned stands of *Cryptomeria japonica* using ground-penetrating radar. *Catena* 183, 104227.
- Yamase, K., Todo, C., Torii, N., Tanikawa, T., Yamamoto, T., Ikeno, H., Ohashi, M., Dannoura, M., Hirano, Y. (2021) Dynamics of soil reinforcement by roots in a regenerating coppice stand of *Quercus serrata* and effects on slope stability. *Ecol. Eng.* 162, 106169.
- Zhang, C. B., Chen, L. H., Jiang, J. (2014) Why fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability. *Geomorphology* 206, 196-202.
- Zhang, C., Zhou, X., Jiang, J., Wei, Y., Ma, J., Hallett, P. D. (2019) Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants. *Catena* 172, 140-147.

(原稿受付2021年10月31日, 原稿受理2021年12月27日)