根系引抜抵抗力による林野火災跡地植栽樹種の土壌緊縛作用の評価

山場淳史¹⁾・佐野俊和¹⁾

1) 広島県立総合技術研究所 林業技術センター Forestry Research Center,
Hiroshima Pref. Tech. Res. Inst. ayamaba86250@pref.hiroshima.lg.jp

摘要: 林野火災跡地復旧のため治山事業により植栽された樹種を対象に、土壌緊縛作用に関する指標として根の引抜抵抗力を評価した。その結果、全樹種において、引抜抵抗力は時間の経過により変動を伴いながら増加しピーク後を迎えた後、急激または徐々に減少しゼロとなるような傾向がみられたが、樹種による明確な差異は確認できなかった。また、全樹種で根直径と最大引抜抵抗力には正の相関があり累乗関数で近似できたが、一定の直径を超えると樹種による差が生じる傾向にあった。さらに、斜面方向別の根系量分布比および立木ごとの全体引抜抵抗力推計では、樹種による特徴が確認された。このような樹種による差異をもとに、目標林型と植生遷移を考慮したうえで、樹種の組み合わせや植栽方法が採用されるべきである。

キーワード: 広島県、治山事業、森林再生、斜面安定

YAMABA, Atsushi and SANO, Toshikazu : **Evaluation of Soil Binding Power of Major Planted Species in Post-fire Stands by Pull-out Resistance of Root System.**

Abstract : Pull-out resistance of root system, as a total force concerning to slope stability and tight binding power of soil, among major planted species in post-fire stands for erosion control projects by Hiroshima prefectural government, were evaluated. The species differences of relationships between root diameters and maximum pull-out resistance loads were confirmed especially in larger diameter degrees and could be approximated by exponential curves. The differences were also assessed by distribution of estimated pull-out resistance of sample trees. From basis for these comparative differences among species, planting methods should be adopted in the projects, in consideration of the future target of forest types and succession process.

Key words : Hiroshima prefecture, erosion control project, forest reproduction, slope stability

1. はじめに

瀬戸内海沿岸の広島県は、全国でも有数の林野火災多発県である¹⁴⁾。例えば、広島県の林野火災発生件数および被害面積⁷⁾は、平成9年から平成18年までの10年間平均で毎年131件139haであり、全体として減少する傾向にはない。

このような林野火災跡地では、上層木や下層植生が衰退または消失することが多く、さらにこの地域の土壌が概して耐蝕性の低い風化花崗岩により成立するため、しばしば土壌浸食等の荒廃が進む¹⁷⁾。特に、上層木がほとんど枯死した場合には、森林再生が進まない中で既存の樹木根系の腐朽が進み、表層崩壊の危険率が著しく増加する¹⁸⁾といわれている。

このため、荒廃林地の早期復旧・再生および斜面安定を目的として、治山事業による植栽工（積苗工も含む）が行われてきており、着実に成果を挙げている¹²⁾。しかしながら、施工後における山腹斜面の安定性は、導入された植生の生育に委ねられているのが実情であり⁸⁾、近年の国および県の財政事情が厳しい中、今後は費用対効果についてより積極的に

説明できる必要にも迫られている。特に、植栽樹種の選定や植栽方法（数量および組み合わせ）については、客観的な樹種評価に基づいた指針づくりが必要になるものと考えられる。

一方、治山事業植栽樹種を対象とした斜面安定機能の評価に資するような樹種別の根系分布や発達の特徴についての実測データは少ない⁶⁾。また、現実の森林斜面で樹木根系が果たしている機能を正確に評価するためには、自然斜面における崩壊実験¹⁵⁾や、原位置一面せん断試験により測定する方法が望ましいが、実際の現場に多い急傾斜地での試験実施は難しく¹⁾、まして林野災害跡地における治山事業施行地の現場では不可能と言わざるをえない。

そこで、本研究では、根の引抜抵抗力を指標に斜面安定機能の観点から植栽樹種の評価を行うこととした。この引抜抵抗力とは、原位置において地中から根を一本ずつ引き抜く際の抵抗力である。

この手法は、斜面表層崩壊を防止する根の力学的機能の評価の際にすべり面での根による土のせん断抵抗力補強力の推定⁵⁾に用いられることで知られているが、本研究では、分

岐しながら複雑に分布する根と土との摩擦力や、根の材質に由来する引張強度（応力）さらには弾性的な特徴¹³⁾など、実際の樹木根系のもつ複雑さを反映した総合力²⁾としての指標、すなわち土壌緊縛作用¹⁰⁾に近い指標とみなして樹種の比較および評価に用いることとする。

2. 方法

2.1 調査地および対象樹種

現地調査は、広島県の瀬戸内海沿岸に位置する竹原市高崎町（スタンド名：T1；写真-1）、福田町（T2）、および福山市赤坂町（F）からそれぞれ1箇所、計3箇所において2006年3月から2007年6月にかけて行われた。

調査地の選定は、最も崩壊が発生しやすい時期とされる地上部が消失し施工されてから10年⁴⁾程度経過した箇所の中から、樹種構成、地質・土壌条件、植栽木の生育状況などを考慮して行った。

全調査地とも風化花崗岩を母材とした典型的な未熟土の立地であり、A層およびB層はほとんど発達していない。斜面方位はT1がSW、T2およびFがWである。また、全調査地とも平均30度程度の急傾斜地である。尾根部のように特に土層が薄く植栽後の定着が困難な箇所については積苗工、それ以外には植栽工が施工されている。

評価対象樹種は、高木としてクヌギ（*Quercus acutissima* Carruth.）・ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa* (Siebold et Zucc.) Endl.）(T1, T2) およびクロマツ（*Pinus thunbergii* Parl.）(F)、肥料木としてヤマモモ（*Myrica rubra* Siebold et Zucc.）・オオバヤシャブシ（*Alnus sieboldiana* Matsum.）(T1, T2) とした。

実際の現地での植栽樹種と工種の組み合わせについては、クヌギ・ヒノキ・ヤマモモ（植栽工；T1, T2）、クヌギ・ヒノキ・オオシマザクラ（*Cerasus speciosa* (Koidz.) H. Ohba）

（植栽工；T1）およびクヌギ・ヒノキ・オオバヤシャブシ（積苗工；T1, T2）であった。スタンドFでは、クロマツ以外にオオバヤシャブシが植栽（積苗工）され、またアカマツ（*Pinus densiflora* Siebold et Zucc.）およびアベマキ（*Quercus variabilis* Blume）が自生する。

2.2 測定方法測定は次の手順により行った。

①樹高、胸高直径および樹形などから樹種別にサンプル木を選定する。

②地上部を地際にて伐倒し、根株の中心から概ね30 cmの範囲の根系を手堀により露出させる。併せて地上0.2 mの箇所年輪数を測定する。

③なるべく根株に近い場所ですべての根を切断する。

④すべての根にナンバリングしながら切断箇所の直径（長短）および伸長方向（図-3を参照）を記載する。

⑤露出した範囲内で分岐していない根を対象として試験根を直径階により5本以上選出する。その際、なるべく方向が偏らないように工夫する。（根の分布域が重複しないようにするため）

⑥選出した試験根とワイヤーまたは根系保持金具¹²⁾を固結したうえで、チルホール（チルコーポレーション製 T-7）により根の直径階に応じた速度により手動で牽引し、ロードセル（エー・アンド・デイ製 LC-1205-T002）およびロガー（インジケーターとモバイルノートパソコンを組み合わせたもの）により試験根全体が引き抜かれるまでの約4分間を基準として荷重を測定・記録する。ただし、途中で破断（1 cm程度の径で破断したデータは評価に含めた）あるいは荷重限界を超えた根については、その時点で評価対象から除外した。

なお、調査時の天候は晴れまたは曇りであり、調査前日から調査時まで降雨のない自然含水状態であった。

最終的に、サンプル木は各樹種2本ずつ選定した。それらの調査箇所、樹齢および立木サイズ（胸高直径および樹高）は表-1のとおりとなった。樹齢は9年生から11年生、胸高直径は4.9 cmから12.7 cm、樹高は3.7 mから10.6 cmであった。オオバヤシャブシについては他樹種と比較して成長が良かったため、やや劣勢ではあるが他樹種と同サイズから1サンプル、平均的サイズから1サンプル選定した。

写真-1 調査地全景（竹原市高崎町：T1）

Photo 1 Landscape of the study area (T1)

表-1 樹種別サンプル木の属性

Table 1 Attributions of sample trees

Species	no.	Stand	Age(yr)	DBH(cm)	Hight(m)
<i>Q. acutissima</i>	1	T1	10	5.2	5.4
	2	T2	10	7.4	6.3
<i>C. obtusa</i>	1	T1	11	5.6	4.0
	2	T2	10	6.1	4.0
<i>P. thunbergii</i>	1	F	10	9.4	4.7
	2	F	10	7.0	4.6
<i>M. rubra</i>	1	T1	9	5.3	4.0
	2	T2	9	4.9	3.7
<i>A. sieboldiana</i>	1	T2	9	5.6	6.2
	2	T2	9	12.7	10.6

3. 結果

3.1 樹種別の根の引抜抵抗力の変動

図-1 のとおり、すべての樹種別サンプル木の各試験根にお

いて、引抜抵抗力は時間の経過により小さな変動を伴いながら、また何度か大きな変動も生じながら、徐々に増加しピークを迎えた。この後、大きく分けて急激に減少するかあるいは徐々に減少するかの2パターンの過程を経て、最終的には

図-1 根の引抜抵抗力の時間変動

Fig. 1 Time fluctuation of pull-out resistance of roots

ゼロとなった。

樹種によるこのような変動に明確な差異は確認できなかった。しかしながら、ヤマモモではピークの出現と急減が比較的早く生じる傾向にあった。また、オオバヤシャブシでは、他樹種と若干異なり、典型的には、先端がトゲ状の微細な変動が出現するような傾向もみられた。

3.2 樹種別の試験根の直径と引抜抵抗力の関係

すべての樹種において、試験根の切断個所の直径 D と最大引抜抵抗力 P_0 とには正の相関が認められた (図-2)。その関係性は累乗曲線によって近似される研究例が多いことから、樹種別に次のように関係式に表現され、またそれぞれ次のような R^2 値となった。

クスギ (n=13)	$P_0=0.94D^{1.66}$	$R^2=0.92$ (1)
ヒノキ (n=12)	$P_0=2.07D^{1.19}$	$R^2=0.67$ (2)
クロマツ (n=10)	$P_0=2.08D^{1.41}$	$R^2=0.96$ (3)
ヤマモモ (n=13)	$P_0=0.64D^{1.62}$	$R^2=0.86$ (4)
オオバヤシャブシ (n=14)	$P_0=0.73D^{1.86}$	$R^2=0.80$ (5)

ここに、 P_0 : 最大引抜抵抗力 (kgf)

D : 引抜根の直径 (mm)

3.3 樹種別の根系の斜面方向別断面積合計分布比と立木全体の引抜抵抗力推計

樹種別の立木における根系の分布傾向を簡易に比較するために、斜面方向区分 (根株の中心を基準とし、斜面上部を 1, 以下時計回りに水平方向を 8 等分しそれぞれ 2 から 8 の数字を割り振り、さらに垂直方向を 9 とする) 別の根の断面積合計の全体に対する割合を表示した (図-3)。

図-3 根系の斜面方向区分別断面積合計分布比

Fig. 3 Distribution ratio of total cross-section area of root system in each direction of drip

図-2 根の直径と最大引抜抵抗力との関係

Fig. 2 Relationships between diameter of roots and maximum pull-out resistance

クスギは 2 本ともに根株から直下に伸びる根 (ここでは垂直根とする) が多く、斜面に対して水平方向に伸びる根 (ここでは水平根とする。実際には側根と斜出根の両方を含む) が比較的バランスよく分布する個体もあった。

ヒノキは 2 本とも垂直根に乏しく、水平根がほとんどであったが、斜面下部に分布する水平根はみられなかった。

クロマツは 2 本とも垂直根が大部分を占めていたが、水平根も偏りがあるものの発達していた。

ヤマモモは水平根が斜面下部や横方向の一部で発達していたが、垂直根も両サンプルともにみられた。

オオバヤシャブシはヤマモモ同様、水平根が多いが、特に一方向だけ目立って太く長い根 (No. 2 の場合、切断径の長

短平均 $D=8.7$ cm, 最大 $L=4.03$ m) を伸ばしている個体も確認された(写真-2)。垂直根は発達している個体と全く発達していない個体の両方あった。

さらに、上述 3.2 の(1)から(5)の直径と引抜抵抗力の樹種別関係式を用いて、すべての根の切断部直径をもとに引抜抵抗力を推計し、水平根と垂直根に区分してサンプル木ごとに集計した(図-4)。これにより、立木全体の引抜抵抗力の樹種による相対的な位置づけと、立木における水平根と垂直根のバランスの差異が視覚的に示された。

4. 考察

根系の引抜抵抗力の時間変動について、抵抗力のピーク前の大小の変動は、根の先端部(5 mm~10 mm 程度)が一本ずつ破断している過程を示しているものと考えられる。実際の測定中でも、ピークまでの間は先端部が破断した際に発生したと思われる軽い炸裂音が断続的に聞かれた。

ピーク後に急減しゼロになるような現象は、根の分岐が少ない場合に最も太い根の破断によって生じ、逆に分岐が多い根の場合は、破断や引抜の時間差により徐々に減少するような傾向になることが指摘されている¹⁾。

ここで、本稿の対象樹種における根の分岐の特性区分⁹⁾を参照すると、粗放型はヤマモモだけで、その他の樹種はすべて中間型とされている。ヤマモモでピーク出現および急減が比較的早い段階にみられたのは、既存研究例⁹⁾のとおりで、樹種に依存する分岐の特性に由来する可能性がある。

ただし実際には、そのような最も太い根が特に荷重限界付近で抵抗している場合は、根の分岐が多くても既に多くが先端部で破断しており、ピーク後一気に引き抜かれてしまうことも多かった。また、実際に太い箇所破断したケースは全試験根の1割以下であり、今回の測定ではそのような破断状態となったものは評価から除外している。一方、細い根の場合はより慎重に荷重をかけるために、分岐の効果がより出や

すい傾向にあるとも考えられる。

以上のような変動傾向を樹種別に正確に評価するためには、現実的にはかなり困難であると言わざるをえないが、現地条件の共通化と引抜の際の荷重過程(例えば牽引速度・強度など)の自動化が必要である。

また、根の直径と引抜抵抗力との関係については、既存の研究例では樹種による明確な差異が認められなかったとされている^{3,16)}。本研究では、直径が30 mmを超えるような根については、同一直径に対する引抜抵抗力がオオバヤシャブシで最も大きく、次いでクヌギおよびクロマツで同程度に大きく、ヤマモモ、ヒノキの順に小さくなるなど相対的な位置づけられた。

このような傾向は、地上部の成長にともない地下部においても太く長く成長した根ほど分岐の数や形状など樹種の特徴が表れやすいことに起因するものと考えられる。しかしながら、ヒノキに関してはバラツキもやや多く、因果関係を直接説明できるようなデータを増やしていく必要がある。

立木全体および斜面方位別の根系分布と引抜抵抗力の推計については、根系量とその分布の差異を評価できるため、樹種の相対的な位置づけを把握しやすいと考える。

例えば、水平根と垂直根のバランスを重視すれば、高木性樹種として導入されたクヌギやクロマツは他樹種より優れていることが推定される。特に、垂直根の杭効果を期待する場合には、クロマツを優先的に選択することとなる。

一方、ヤマモモやオオバヤシャブシは、元来肥料木として導入され、その根系の機能についてはあまり期待されていなかったと思われるが、実際には、10年生程度ではむしろ高木性の樹種と同等程度の水平根が発達していることが認められ、立木全体でみると引抜抵抗力は相対的に変わらない場合もあると推定される。

特にオオバヤシャブシについては、成長がよい個体の根系は高木性樹種をしのぐ引抜抵抗力を有することが推定される。このことは、荒廃林地でよく定着するとして伝統的に植栽さ

写真-2 オオバヤシャブシの特徴的な根の伸長

Photo 2 The characteristic root of *A. sieboldiana*

図-4 サンプル立木の引抜抵抗力の推計

Fig. 4 Estimated pull-out resistance of sample trees

れてきたこれらの樹種選定が結果的に支持されることにつながる。

逆に、高木性樹種として導入されているヒノキについては、根系の機能はそれほど高くないと評価せざるを得ない。この点については、苗木の入手の簡易性や利害関係者の意向など諸々の問題が潜在していることも想像される。

以上のような考察を総括すると、現時点で提案できる植栽樹種とその方法についての基本指針としては、従来から言われているとおり、対象となる立地条件で地上部を最も大きく成長させることのできる樹種³⁾を優先すべきとされていることと共通することが多い。これは、林野火災跡地のように、地上部が一度に消失してしまった後の回復初期段階においては特に重要であると考えられる。

ただし、肥料木として植栽された樹種や高木性でもクロマツのような先駆樹種については、10年程度の初期定着・成長以降どのように根系の機能を発揮するのかわからない。実際に、表層崩壊跡地での自然回復過程の検討では、クロマツやオオバヤシャブシが先駆植生として発達し上層を形成していても樹齢30年を超えると成長が鈍化し、また下層に後継樹をもたないことから衰退することが報告¹⁴⁾されている。

このように、実際の樹種の選定およびその組み合わせを含めた新たな工法の提示には、将来的な目標林型とその過程の植生遷移を考慮する必要があり、そのためには過去の事業地の再評価と今後のモニタリングが不可欠である。

また、本稿では先行研究成果との比較による幅広い樹種評価や、植栽による斜面安定効果そのものの評価には至らなかった。今後これらの諸課題を論ずるためには、測定手法・条件や成果のとりまとめかたの共有化により評価の精度と再現性を高めるとともに、林野火災跡地で発生する崩壊の特徴をふまえた上で、その発生を抑止すべき植栽樹種の根系分布の定量化などにより説明因子を増やしていく必要がある。

しかしながら、これらを実現するためには相当な労力と時間を要し、単独の機関では極めて困難であるため、大学や調査研究機関などとの共同研究や情報交換を進めていくことが必須になると思われる。

本研究を進めるにあたって、広島県立林業技術センター森林環境部長（当時）の池田作太郎氏には研究計画策定に際しご助言をいただいた。広島県立総合技術研究所西部工業技術センター生産技術アカデミーの弓場憲生氏には測定装置加工にご助力いただいた。信州大学農学部北原曜教授には根系調査法に関して、広島大学総合科学部の海堀正博准教授には風化花崗岩地域の緑化及び斜面崩壊に関してそれぞれご指導をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 阿部和時（1996）原位置一面せん断試験によるスギ根系の斜面崩壊防止機能の研究，日本緑化工学会誌，22：95-108.
- 2) 阿部和時（1997）樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究，森林総合研究所研究報告，373：105-181.
- 3) 阿部和時（1998）樹木根系の斜面崩壊防止機能，森林科学，22：23-29.
- 4) 阿部和時・黒川 潮・竹内美次（2004）間伐が森林の持つ表層崩壊防止機能に及ぼす評価手法の開発，日本地すべり学会誌，41：225-235.
- 5) 阿部和時（2006）森林の持つ斜面崩壊防止機能，日本緑化工学会誌，31：330-337.
- 6) 福永健司（2006）斜面における樹木の根系分布，日本緑化工学会誌，31：338-345.
- 7) 広島県農林水産部（2007）広島県農林水産業の動き，広島県，111 pp.
- 8) 金子智紀・田村浩喜（2006）山腹崩壊地等における斜面樹林化技術に関する研究，秋田県森林技術センター研究報告，16：1-20.
- 9) 荻住 昇（1979）樹木根系図説，誠文堂新光社，1121 pp.
- 10) 北村嘉一・難波宣士（1981）抜根試験を通じて推定した林木根系の崩壊防止機能，林業試験場研究報告，313：175-208.
- 11) 松本舞恵・下川悦郎・地頭蘭隆（1999）表層崩壊跡地における植生の自然的回復過程，日本林学会誌，81：65-73.
- 12) Nakagoshi, N. (2001) Forest fire and management in pine forest ecosystems in Japan, *Hikobia* 13：301-311.
- 13) 野々田稔郎・林 拙郎・川邊 洋（1994）根系の引張強度と曲げ強度から推定した樹木根系の斜面安定効果，日本林学会誌，76：456-461.
- 14) 佐野俊和・佐藤晃由（2004）広島県における人口密度、植生、気象要因を用いた林野火災発生危険度の予測，森林応用研究，13：129-137.
- 15) 佐藤 創（2006）表層崩壊と森林，森林科学，47：22-27.
- 16) 鳥田宏行・佐藤 創・明石信廣・大谷健一・神原孝義（2003）根系の山腹崩壊防止効果の評価，日本林学会北海道支部論文集，51：102-104.
- 17) 頭山昌郁・中越信和（1992）山火跡地へのクロマツとエニシダの混植が植生及び地表棲息性節足動物相の回復に及ぼす影響，日本緑化工学会誌，17：139-150.
- 18) 塚本良則（1998）森林・水・土の保全－湿润変動帯の水文地形学，朝倉書店，138 pp.

(2008. 7.19 受理)