

# スギ立木の生長と根の腐朽を考慮した 斜面の安定解析

## ANALYSING SLOPE STABILITIES IN JAPANESE CEDAR FOREST CONSIDERING BOTH STAND-GROWTH AND ROOT-DECAY

岡田 康彦<sup>1</sup>・黒川 潮<sup>2</sup>

Yasuhiko OKADA, Ushio KUROKAWA

<sup>1</sup> (国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所 (〒305-8687 つくば市松の里 1)

E-mail: okada10@affrc.go.jp

<sup>2</sup> (国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所九州支所 (〒860-0862 熊本市中央区黒髪 4-11-16)

E-mail: ushio@affrc.go.jp

**Key Words:** slope stability analysis, Japanese cedar, stand-growth, root-decay

### 1. はじめに

気候変動の影響も受けてか、毎年のように強い降雨が発生し、そしてその度に山地土砂災害が引き起こされることが常態化しつつある。国土の 2/3 を占める森林に関して、国民はその災害防止機能に対する期待が大きく、安全・安心確保に寄与するためにも、根系による表層崩壊防止／軽減機能を解明し、その機能を高度発揮させるための施業のあり方を検討するための知見の集積が極めて重要である。

極端な豪雨などにより発生する表層近傍の斜面崩壊において根系による表層崩壊防止／軽減機能を検討するには、伐採を伴う森林施業の実施による根系の腐朽、新規植栽後の立木の生長につれた地上部重量の変化および根系の発達など、樹木がたどる経年変動を正確に推定することが課題となる。

腐朽に伴う根の強度低下については、生木および伐採後の異なる経過年数にある根株の周囲にトレンチを切り、断面に表れた根に対して引き抜き抵抗力を実測して分析を進める。植栽後の生長に伴う根の強度増大については、スギ根系の分布モデル<sup>1)</sup>を用いて異なる深度の潜在的な崩壊面における根の本数と太さを算出し、その結果を引き抜き抵抗力に換算した上で分析を進める。50 年生のスギ林を皆伐し、

すぐにスギを植栽した場合の崩壊危険度の変動について、無限長斜面の安定解析を実施して数値化を試みる。伐採から 5 年毎の変化を追跡することとし、立木の地上部重量、植栽木の根系の強度、伐採根株の根による強度の変化を入力して分析を進めたので結果を報告する。

### 2. 現地調査および数値解析方法

スギ根が発揮する崩壊防止機能の評価を目的に、地質の異なる複数の国有林内において根の引抜抵抗力調査を実施した。生木、および伐採から 1, 2, 4, 7, 8 年後の根株の周囲にトレンチを切り、表出した根の直径を計測した。さらに、それらを引き抜く際に発揮された抵抗力を荷重計により計測し、根直径の関数として表した。単位面積当たりで発揮される引き抜き抵抗力の合計値を、根系が発揮する単位面積当たりの補強強度とした<sup>2)</sup>。

スギ立木の生長と根の腐朽を考慮した斜面の安定解析は、DEM データを保有している茨城県内のある森林流域(表層地質は花崗岩)(図-1)を対象に、1m メッシュ単位で無限長斜面を仮定して安全率を算出した<sup>3)</sup>。ここでは Richards 式に基づいた地下水の変動は導入せず、集中豪雨により斜面土壌の全層が飽

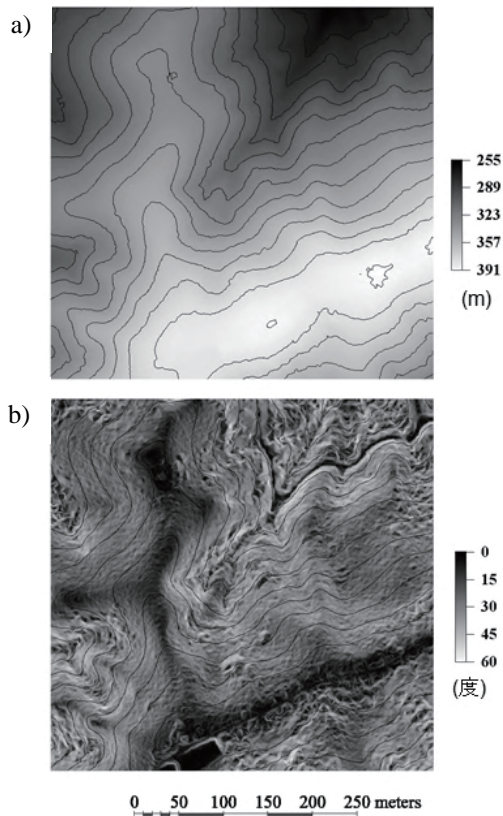


図-1 斜面安定解析の対象とした領域の1mメッシュ地形図。a) DEM, b) 傾斜。

和した条件を与えて計算を行い、参考のため、地下水位を土壤層厚の半分まで与えた条件も加えた。スギの植栽後の生長に伴う地上部重量の増加や根による補強増大、伐採による根の腐朽に伴う補強低下の効果を検討材料にした。無限長斜面における安全率は以下に示す。

$$F_s = (c_s + c_r + A \cos^2 \alpha \cdot \tan \phi') / B \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

$$A = q_0 + (\gamma_{sat} - \gamma_w)H + \gamma_t(D - H) \quad (2)$$

$$B = q_0 + \gamma_{sat} \cdot H + \gamma_t(D - H) \quad (3)$$

ここで、

$F_s$ :安全率,

$\alpha$ :斜面の傾斜角,

$\phi'$ :土の有効内部摩擦角,

$c_s$ :土の粘着力成分,

$c_r$ :根系が発揮する単位面積当たりの補強強度,

$q_0$ :単位面積当たりの立木の地上部重量,

$\gamma_{sat}$ :土の飽和単位体積重量,

$\gamma_t$ :土の湿潤単位体積重量,

$\gamma_w$ :水の単位体積重量(9.8 kN/m<sup>3</sup>),

$H$ :地下水位,

$D$ :土壤層厚

である。風化花崗岩土壌における土質調査結果に

基づいて、 $\phi'=36.0$ 度、 $c_s=0.0$  kN/m<sup>2</sup>、 $\gamma_{sat}=16.2$  kN/m<sup>3</sup>、 $\gamma_t=14.5$  kN/m<sup>3</sup>に設定した。

根系が発揮する単位面積当たりの補強強度( $c_r$ )を求めるために必要な根に関しては、スギの根系分布モデル<sup>1)</sup>を紐解くことにより算出した。このモデルでは、土壤層を深さ0.45~0.95mの範囲で0.1m毎に区分けしてそれぞれの中に生育するスギ根の本数と太さを求めることとなる。斜面安定解析には、潜在的な崩壊面と想定される土壤層底部に位置する厚さ0.1mの土壤層内でカウントされる根の太さと本数を入力した。根系分布モデルへの入力が必要なパラメータは、樹高、胸高直径、土壤層厚であり、樹高、胸高直径については茨城地方すぎ林分収穫表の地位2等(以下、茨城地方地位2等)<sup>4)</sup>のデータを用いて、植栽から10年後、その後は5年毎に50年までの計算を行った。この分布モデルでは、根の直径を5mm毎のクラスに分け、各々のクラスに何本が生育しているかを求める。各クラスに存在する根が発揮する補強強度については、各クラスの中央値、例えば5mm以上10mm未満のクラスにおいては7.5mmの根がカウントされた本数存在するとして、別途求めておいた根直径を独立変数とした引き抜き抵抗力の関数に導入して算出した。

現場の土壤層厚は、簡易貫入試験等を詳細に実施して、例えば $N_c$ 値が10になる深さを実測する必要があるが、現実的には広範囲の実施は難しい。機械学習を用いた推定手法の開発も進められており<sup>5)</sup>今後は推定精度が向上していくと考えられているが、ここでは、斜面傾斜と横断面形を用いて推定する手法を採用した<sup>6)</sup>。横断面形とは、山地災害危険地区調査要領<sup>7)</sup>に定められており、斜面の集水性を表す指標である。

なお、単位面積当たりの立木の地上部重量( $q_0$ )については、樹高、胸高直径と同様に茨城地方地位2等の結果を使用し、主林木となるスギおよび副林木の幹材積に単位体積重量=6.5 kN/m<sup>3</sup>(含水率=100%)を乗じて算出した<sup>8)</sup>。

### 3. 結果と考察

#### (1) 根系による斜面補強強度

スギの根系分布モデルを用いて算出した異なる深度における、新規植栽した立木の根系による斜面補強強度の経年変化を図-2に示す。いずれの深度においても、植栽から10、15、20年と単調に増加していくが、20年を超えるとその変動は小さくなり概ね一

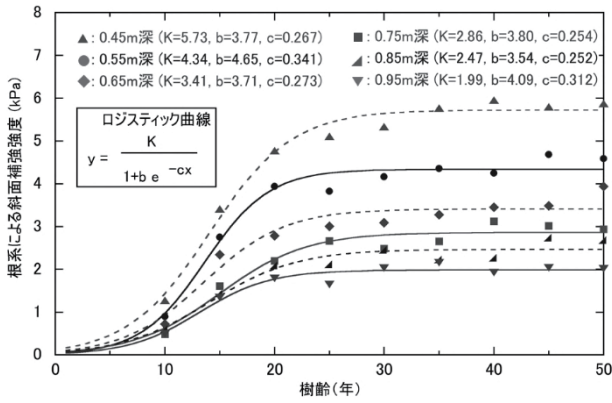


図-2 新規植栽のスギ立木の根系による異なる深さにおける斜面補強強度の経年変化。

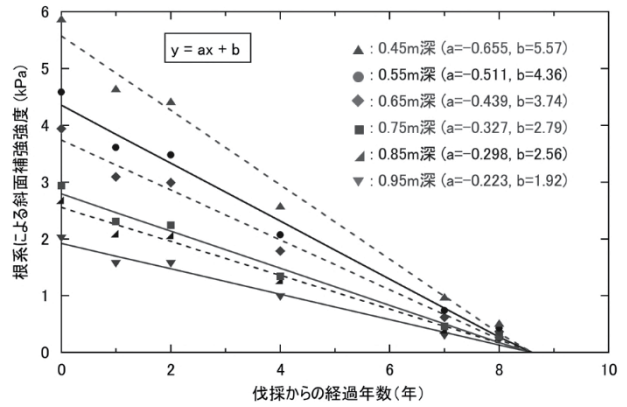


図-4 伐採後の腐朽の進行による根の引き抜き抵抗力の経年劣化。

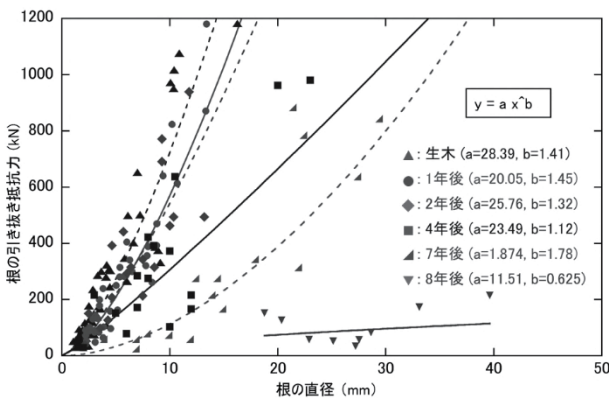


図-3 生木および伐採から1, 2, 4, 7, 8年後の根が発揮する引き抜き抵抗力和直径の関係。

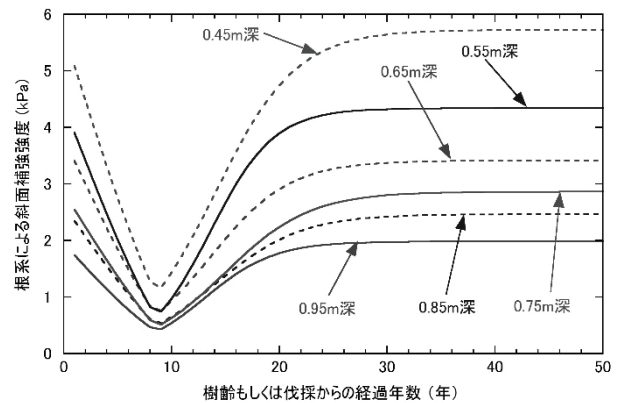


図-5 50年生のスギを皆伐しすぐに植栽をした場合に発揮される根系による斜面補強強度の経年変化。

定値に収束する結果となっており、ここでは各々の深度について樹齢を独立変数にしたロジスティック曲線で近似した。

$$y = K / (1 + b \cdot e^{-cx}) \quad (4)$$

ここで  $K$ ,  $b$ ,  $c$  は、定数。茨城地方地位 2 等に関しては、深さ 0.95m においても 50 年生のスギでは約 2 kPa の根系による斜面補強強度が認められ、土の粘着力成分が期待できない風化花崗岩等の斜面においては大きな役割を果たしていると推定される。

生木、および伐採から 1, 2, 4, 7, 8 年後の根が発揮した引き抜き抵抗力を図-3 に示す。引き抜き抵抗力は、生木の根の試験結果と同様<sup>2)</sup>、伐採から年数が経過した根についてもいずれも根直径の冪乗関数として表現されることがわかった。個々の測定結果は相当のバラツキが認められるが、生木に対して、伐採からの経過年数が大きいほど腐朽が進行することにより、同じ根直径の場合に発揮される抵抗力は小さくなることが示された。また、伐採から 8 年が経過した根のうち、直径 20mm 程度未満の根は著しく腐朽が進行し、治具で根を挟む際に根自体が

崩れてしまい引き抜き抵抗力が計測出来ない状態であった。

生木、伐採から年数が経過した根の引き抜き抵抗力の関数が求められたことから、50 年生のスギを伐採した直後の根を生木の関数に、1, 2, 4, 7, 8 年後についても各々の関数に、スギ根系分布モデルから算出された異なる深さにおける根の太さと本数を入力して、根系による斜面補強強度と伐採からの経過年数の関係を調べた(図-4)。その結果、強度低下は、伐採からの経過年数の一次式で表現出来ること、いずれの深さにおいても伐採から 8.5 年程度で補強強度が消失することが示された。

新規植栽からの補強強度の増大、伐採からの腐朽に伴う強度の低下について関数が求められたことから、ここでは両者を足し合わせることにより、50 年生のスギ林を皆伐し、すぐに新規植栽を行い、その後 50 年が経過するまでの根系による斜面補強強度の変動(茨城地方地位 2 等)を調べた(図-5)。その結果、植栽後 10 年程度までは、植栽された立木の根の生長により強度は増加するものの、根の腐朽に伴



う強度低下の影響がより大きく、9年後に最も小さな値が算出された。伐採後にすぐに新規植栽を実施しても根の補強強度は数分の1程度にまで低下することが示されており、十分に検討した上で施業を実施することが必要と考えられる。

類似の研究として、生木の生長に伴う引き倒し抵抗の増大、および伐採された根株の腐朽の進行による伐根抵抗の低下が検討されている<sup>9)</sup>。そこでは、伐採から10～15年程度で引き倒し抵抗および伐根抵抗の合計値が最小になることと述べられている。引き倒し抵抗や伐根抵抗については、根株全体を回転させるような挙動であり、地際に多く存在する太い根の影響を多大に受ける。そのため、腐朽の進行に関して、本研究の比較的細い根の引き抜き抵抗力の経年低下よりもその速度が小さい結果になったと考えられる。引き倒し抵抗は、たとえば上から流下してきた崩土が立木に衝突した際に重要な指標である。一方、斜面の崩壊防止機能については、崩壊面付近に位置する根の強度が重要であり、伐採後8年～10年までに著しく機能が低下すると理解すべきものと考えられる。

## (2) 斜面安定解析

斜面安定解析は、豪雨を想定して土壌層が完全に飽和している条件、参考のため土壌層厚の半分に地下水が位置している条件、それぞれに対して、立木の地上部重量( $q_0$ )を考慮した条件とゼロとした条件の4つを対象に、50年まで5年間隔で実施した。

土壌は飽和、立木の地上部重量を考慮した場合の解析結果の一部を示す(図-6)。伐採直後で根の腐朽が進んでいない0年後、新規植栽の立木の根の生長が進んだ20年後では、概ね同様の結果が得られ、他方、根株の伐採により腐朽が進行した影響が強い10年後では、安全率が1を下回り危険と判定されたメッシュ数が著しく増大していることが示されている。

実施した4つの条件で算出された危険メッシュの数の経年変化を示す(図-7)。この図からは、立木の地上部重量( $q_0$ )を考慮してもゼロで与えても、その結果に大きな差異が認められないことが示された。立木の地上部重量は、材積を実測するなどして推定することとなる。近年は、超高密度航空レーザ測定の結果を用いて林内の立木材積を計測する手法の開発なども進められているが、1 $m^2$ あたりに相当量のショット数が必要とされており現状ではまだまだ研究段階と言える。現地での材積実測は多大な労力、時間、経費を必要とすることから、無限長斜面の斜面安定解析においてはこれを省略することが可能であ

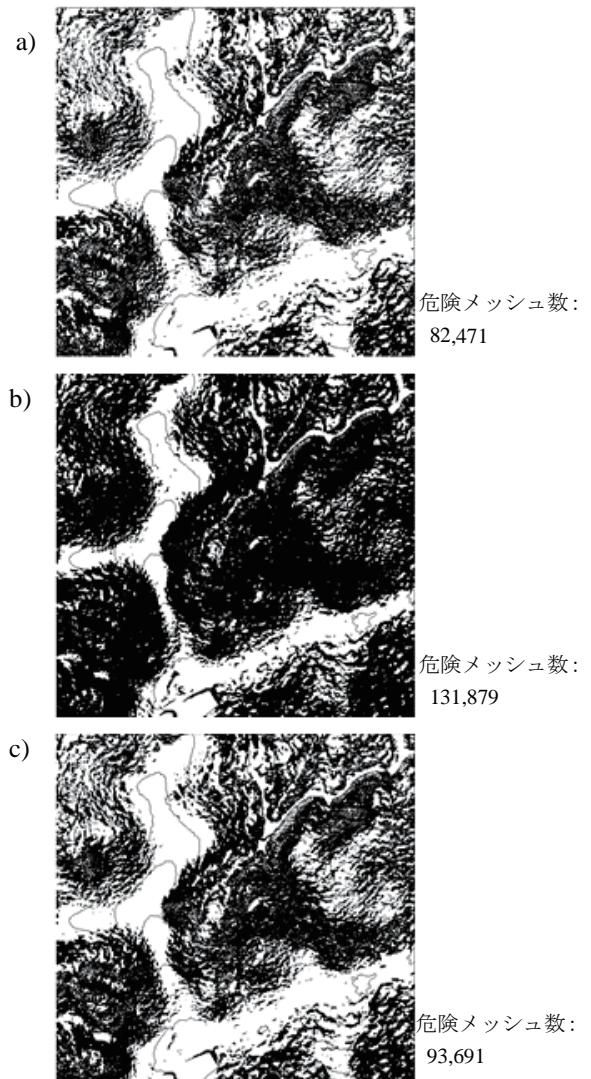


図-6 豪雨を想定した飽和条件かつ立木の地上部重量を考慮した解析結果の一部。a) 伐採直後、b) 伐採から10年後、c) 伐採から20年後(黒メッシュ： $F_s$ が1未満の危険箇所、白メッシュ： $F_s$ が1以上)。

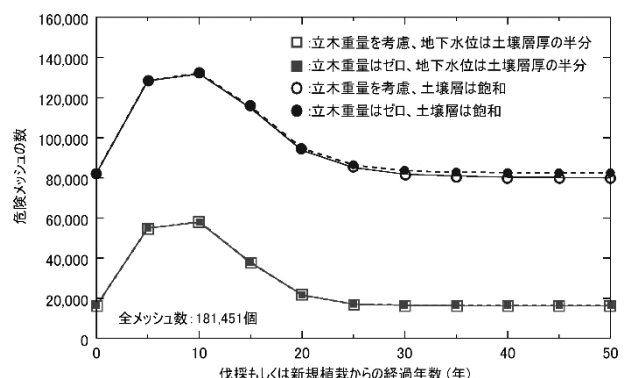


図-7 50年生のスギを皆伐しすぐに植栽をした場合の5年毎の危険メッシュ数の推移。

ることが示されたことにより分析実施の困難性が少し低減する結果が得られた。

地下水位について飽和の場合も、土壌層厚の半分の場合においても、危険メッシュの数は5年後までに急増し、10年後に最大値を示した。その後は20年程度までにはほぼ初期値まで低減して、さらにそこからは概ね一定値に収束した。従って、表層崩壊の防止/軽減を考える場合、伐採後5年~10年の期間の危険度増大を如何に低下させるのかという視点にたち、森林施業の実施を検討する必要があると考えられる。

扱いの簡易性に基づき、無限長斜面を想定した斜面安定解析を実施した。ここでは、根系の斜面補強は底面でのみ発揮されることになり、より危険側の判定結果が得られる。他方、樹木は、鉛直根の他に、水平根、射出根も多く存在しており、斜面が崩壊する場合、土塊の側部近傍ではこれらの根系が崩壊を防止/軽減していることは間違いない。これらの効果を安定解析に導入して斜面の危険度評価を行うことを今後の課題と考える。

#### 4. 終わりに

国内に最も多く生育するスギを対象に、植栽後の生育に伴う斜面補強機能の増大と伐採後の腐朽の進行による補強機能の低下について、根の引き抜き抵抗力調査の結果を基にモデル化し、その結果を無限長斜面の安定解析に導入して危険箇所の経年変化を調べ、以下を示した。

- ・スギの新規植栽後の根系による斜面補強強度は、ロジスティック曲線で近似可能。
- ・スギの伐採後、腐朽の進行に伴う斜面補強強度の低下は、経過年数の一次関数で近似可能であり、また、8.5年程度までには消失する。
- ・生長による強度増大と腐朽による強度低下を足し合わせた時の経年変化を求めたところ、伐採後8年~10年後に最小値をとり、20年後以降は概ね一定値に収束する。
- ・無限長を仮定した斜面安定解析において、単位面積当たりの立木地上部重量の影響はほとんど認められないこと、危険箇所は皆伐後5~10年で急増するため、これらの期間の危険度上昇を抑える森林施業の検討が必要である。

**謝辞**：日本大学の阿部和時名誉教授には、根系分布モデルの解析を行うにあたり、詳細に渡る助言を頂戴した。また、結果の解釈についても、非常に有益なディスカッションをさせて頂いた。国立研究開発法人森林研究・整備機構の村上亘博士には、根の現地調査にご協力を賜った。また調査現場の提供については、関東森林管理局群馬森林管理署、同棚倉森林管理署ほかに多大な協力を頂戴した。本研究は農林水産技術会議・農林水産研究事業委託プロジェクト研究「管理優先度の高い森林の抽出と管理技術の開発」において実施した。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 阿部和時：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号，pp.105-181，1997.
- 2) 北原曜：森林根系の崩壊防止機能，水利科学，53巻，6号，pp.11-37，2010.
- 3) 黒川潮，阿部和時，大丸裕武，松浦純生：物理則モデルによる表層崩壊検度評価，日本地すべり学会誌，43巻，6号，pp.351-355，2007.
- 4) 林野庁・林業試験場：収穫表調整業務研究資料17，p.171，東京営林局，1959.
- 5) 山下尚之，大貫靖浩：日本の山地・丘陵地における土層厚マッピングとその不確実性評価，第131回日本森林学会大会，pp.549-549，2020.
- 6) 阿部和時，黒川潮，渡部悦夫，久保田誉，趙炳薫：高標高産地斜面の表土層厚さの分布に関する研究(II)，日本林学会関東支部大会発表論文集，55巻，pp.267-270，2004.
- 7) 林野庁：山地災害危険地区調査要領，[https://www.rinya.maff.go.jp/j/saigai/saigai/attach/pdf/con\\_1-3.pdf](https://www.rinya.maff.go.jp/j/saigai/saigai/attach/pdf/con_1-3.pdf)，2016.
- 8) 農林水産省林業試験場木材部：世界の有用木材300種：性質とその用途，日本木材加工技術協会，p.126，1975.
- 9) 北村嘉一，難波宣士：伐根試験を通し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号，pp.175-208，1981.

(2022.5.30 受付)

