■地すべり活動を表す樹木の傾き－白神山地を例として－

Tree lean indicating landslide activity in Shirakami Mountains, Northeast Japan

岡本有生* Yuki OKAMOTO／前弘前大学大学院農学生命科学研究科

Former : Graduate School of Agriculture and Life Science, Hirosaki University

檜垣大助 Daisuke HIGAKI／弘前大学 Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki University

キーワード：地すべり，地すべりの活動性，樹木の傾倒

Key words : Landslide, Landslide activity, Tree lean

1. はじめに

地すべりのような土砂移動が頻繁に起こる場所に生育する木は，その土砂移動により形態の影響を受けることがある。東ほか（1971）は，地すべり地では，地すべり活動が原因で木が傾斜していることを指摘し，また，東（1979）は，傾いた木のアテ材の形成時期から地すべりの発生期や活動性を把握できることを示した。また，北半球高緯度地域では，永久凍土中の活動層における氷の発達と融解が地表の変動をもたらす，木の傾きを生じさせている（例えばKokelj and Burn, 2003）。佐藤ほか（2010）は，ヤナギの地上形態が流水・土砂流出の影響で変化していることを示し，ヤナギの形状を流水・土砂流出の規模の指標にした。一方，申（1989）は，地すべり対策のための調査・解析の面で，地すべり移動体上の木の傾きからすべり面形の推定が行えることを示唆している。

青森県から秋田県にまたがる白神山地では，地すべり地で本来直立性であるブナが複数山側に大きく傾いていることがある。白神山地は日本で最も地すべり地形の分布密度が高い場所であり（八木ほか，1998），活動形態・発生時代の異なる地すべり地で樹木の傾きの特徴を比較することができる。そこで，白神山地において地すべりの影響によって傾いた木の抽出を試み，さらに「傾いた木」の樹齢と分布や傾き方を調べ，木の傾きが地すべり運動の活動形態・地すべり発生時期をどう反映しているのかを考察した。これまで，ブナはスギ・トドマツなどの針葉樹ほど直立性は高くないため，地すべり活動と樹木の傾きとの関係は注目されてこなかった。しかし，ブナ群落は新第三紀層の地すべり地が多い東北日本の日本海側気候の地域に広く分布している（例えば沼田・岩瀬，1975）ことから，ブナ樹幹の傾きが地すべり活動を示しているとすれば，日本海側山間地で地すべり発生危険性の高い箇所の把握に役立つと考えられる。

2. 樹木の傾きが示す地すべり活動

ここで，樹木の形態異常に注目して地すべり現象の検出を試みた最近の研究について触れておきたい。

東ほか（1971）は，傾いた樹木のアテ材形成期と斜面上の分布による斜面変動の検出法を確立した。さらに，菊池ほか（1992）は，地すべり地内に植栽されたトドマツのアテ材形成の時期およびその形成方向と形成強度の経時的変化を解析することによって，地すべり変動履歴を推定した。また，中村ほか（2004）は，アテ形成履歴とその分布把握により地すべり変動の活発域・不活発域を区分した。そして，前者に対して地塊の風化状態と降雨・地下水位変動の解析から地すべり動態予測を行い，2つの方法を組み合わせることで地すべり現象把握と災害予防に繋がることを示した。これらの研究は，主に北海道における直立性の針葉樹を対象になされた。また，Braam（1987）は樹木の傾きとその方向を考慮したコアサンプリングにより年輪の偏心状況を解析することで複数回の斜面変動を検出できることを示唆した。

一方，横山ほか（2004）は，高知県で広葉樹も含めた樹幹の傾動・引っ張りによる根の緊張・樹幹の絡み合った樹木が，地すべりによる開口クラックやそれに起因した凹地の検出と地すべり変動履歴を把握するのに有効であると示した。塚原ほか（2006）は，同様の樹木の異常現象把握が，地すべりの活動性調査において有効であるとしている。そして，幹割れ・傾倒などの立木の異常は地すべり防止対策のための現地調査項目にもなっている（例えば林野庁，2003）。

3. 調査地概要

3.1 白神山地の概要

白神山地は，青森県と秋田県北西部の県境にまたがる約1,000km²に及ぶ山岳地帯である（青森県，2001）。

地質は，主に新第三紀中新世の大童子層・藤倉川層・大戸瀬層の溶岩・凝灰岩からなる（青森県，2001）。これらはグリーンタフと称され新第三紀中新世（2,300～500万年前）に活動した海底火山の噴出物が変質して，淡緑色になっている凝灰岩である。変質作用が原因で強度が低く，地すべりを生ずる例が多い（社砂防学会，2004）。

白神山地を覆う森林植生については，そのほとんどが落葉広葉樹林であり，その代表がブナ群落である（青森

* 連絡著者／corresponding author
〒073-0046 北海道滝川市扇町3-3-34
ougimati 3-3-34, Takikawa, Hokkaido

県, 2001)。また, サワグルミ群落も白神山地に広く分布している (青森県, 2004)。

3.2 調査地

本研究では, 白神山地内の, 青森県西目屋村にある岩木川水系大川中流, サンスケ沢地すべり地 (図-1) を

図-1 サンスケ沢地すべり地のブロックと調査対象地の位置 (2000年 林野庁撮影空中写真)

Fig. 1 Location of the study area and landslide blocks (Aerial photo taken by the Forestry Agency in 2000)

対象とした。ここでは地すべりブロックA~Dが複数直列に並び, その中の長さ約150m, 幅約120mのBブロックを調査対象とした (図-2)。この調査範囲は地形的に地すべりブロックⅡ・Ⅲ-1・Ⅲ-2・Ⅴ-1・Ⅴ-2・Ⅴ-3・Ⅵの6つに分けられる。なおブロックⅠはブロックAに存在し, 今回の調査対象とはしていない。

4. 調査内容

4.1 調査内容と対象木

①全体の微地形と, 調査地の木の分布, 微地形の位置を簡易平面測量で調べ, 調査地の地形図を作成した (図-2)。測量にはレーザー距離計トウルパルス360 (Laser Technology社製) を用いた。②木の傾きに関する調査として胸高直径 (DBH), 幹の傾きの大きさ・方向, 分布を調べた。

調査対象としたのは, 直立性であり白神山地内に数多く存在するブナ137本である。補助としてブナ同様, 直立性の木であるサワグルミ (5本)・ホオノキ (5本) も対象とした。これら3種類の木の中で, 雪圧で曲がりにくいとされるDBHが10cm以上 (田中, 1987) の個体を対象とし, 幹の傾きを測った。また, 2008年のBブロックにおける全高木種調査 (斎藤, 2008, 未発表) により, ブナのDBHは樹齢と明確な正の相関があることが判っているため, その結果を用いてDBHから樹齢を推測した (図-3)。なおサワグルミ・ホオノキではDBHと樹齢に相関が確認できていないので, 樹齢は推測できない。

この調査では, 胸高での年輪を樹齢としている。この

図-2 調査地の地形と地すべりブロック区分

Fig. 2 Topography of the study area and classification of landslide blocks

ため、木が発芽してから胸高に達するまでの時間は含まれていない。調査地に近い秋田県森吉山のブナでは12年かかることが確認されている（中静, 1983）。この値を用いると、胸高での年輪は実際の樹齢より10年程度若い樹齢を示すことになる。よって本研究で扱う樹齢は、各地すべりブロック・木同士の新旧を比較するのには使えるが、具体的に今から何年前に発生したのかを正確に表すものではない。

4.2 傾きの計測

木の傾きの方向は、斜面傾斜方向に直交する方向を境に、谷側と山側に分けた。また、調査地の多くの木には、地上から約2mの高さまで根曲がりが見られた。近傍の青森県目屋ダム観測所での1990～2009年の平均年最大積雪深は1.7mである（岡本, 2010）ことからこの根曲がりは雪圧によるものと思われる。

そのため今回は幹の高さ2m以上の部分の傾きをクリノメーター・箱尺を用いて計測した（図-4）。

4.3 樹齢と地すべり発生

ブナの樹齢を時系列で表した図-5で、傾いた木がどのように地すべりの活動期を示すのかについて述べる。地すべりが発生すると、それ以前から存在するブナAは

図-3 年輪と胸高直径 (DBH) の関係 (斎藤2008による)
Fig.3 Relationship between number of tree rings and DBH (Saito, 2008)

直立性の樹木 (DBH10cm 以上)

図-4 傾きの計測方法
Fig.4 Measurement methods of tree lean

傾き、地すべり後に発芽・成長したブナBは鉛直に育つ。ブナA・Bの樹齢をそれぞれX・Yとすると、地すべりはX～Y年前の間に発生したという仮説を立てられる。このように傾いた木の樹齢で、地すべりが活動した時期を推測し、地すべり発生の頻度を知ることができる。

5. 地すべり活動を示す「傾き」の基準

風・雪等、地すべり以外の原因でも木の傾きは生じるので、どの程度の傾きが地すべりによるものなのかの判断基準を設ける必要がある。そこで、地すべり地外の地すべりの影響を受けていない斜面（約1haの範囲：図-1の①）で、ブナを主として胸高直径10cm以上の木の傾きを調べた。地すべり地の平均傾斜が26°であるのに対し、この場所の平均傾斜は約22°とほとんど差はない。

調査結果を図-6に示す。地すべり地外には49本の高木のうちで谷側へ傾く木は36本、山側傾きが4本、鉛直が9本であった。傾きの大きさは谷側傾きの約9割が10度未満であった。そこで「谷側への傾きが10度以上、ま

図-5 樹齢と地すべり発生年代

Fig.5 Relation between the age of a tree and that of landslide occurrence

(1) 傾きの方向別樹木数

Number of trees fractionated in each direction

(2) 傾き(a)の頻度

Number of trees fractionated in each tilting angle

図-6 地すべり地外における樹木の傾きの調査結果
Fig.6 Direction and angle of tree lean at the outside of the landslide area

たは山側へ傾いた木」を, 地すべりの活動指標として扱うこととした。この条件に該当しない木は「傾き無し」として扱った。この基準で, 調査地の木・微地形の分布, 木の傾き, 樹齢を表したものが図-7である。

6. 調査地で確認される地すべり現象

調査地の地すべりブロックでは, 以下のような地すべり現象が見られる。これらのことから白神山地の地すべりは調査期間中のここ数年目立った動きはないが, 過去に動いてきたことが考えられる。

(1) 根の引っ張り

滑落崖の冠頭部から移動体に10m以上伸びた根が見られる。これは地すべりが繰り返し発生するのに追従して根が成長した結果と推定される。本調査地ではブロックⅢ-1及びⅡにおいて見られる。

(2) 亀裂

根が引っ張られた開口亀裂が, ブロックⅢ-1及びⅡにおいて見られる。この地すべり地が近年活動したことの現れである。

(3) 樹幹の裂けた木

まれにはあるが, 樹幹が裂けた木が見られる。これは地すべりによる亀裂が, 木の真下に発生したことを示す。

7. 結果・考察

4.3で述べたが, 「傾いた木」は地すべり発生前に発芽成長し, 「傾きが無い木」は地すべり発生後に発芽成長

している。仮に本調査地の地すべりが一回性だった場合, 樹齢の分布も「傾き有」と「傾き無し」で二分されるはずである。しかし調査の結果, 全てのブロックにおいて「傾いた木」の中に「傾きが無い木」よりも若い個体が存在していた(表-1)。

したがって, この地すべり地では, 一回性の地すべりではなく, 何回かの活動があったと思われる。そこで, 各ブロックでどのような活動が起きているのか検討した。なお, ブロックⅢ-2, V-2, VIについては適当な木が無いので対象としない。

7.1 ブロックV-3

図-8に推定樹齢別の木の傾きを示す。ブロックV-3では大きな傾きがあるが, 傾いた木と同年代の傾きの無い木が複数確認できる。

表-1 各ブロックの木の数・傾き・樹齢
Table 1 Number, tilt and age of trees in each block

ブロック番号	木の傾きの有無	本数	樹齢(年)	平均樹齢
V-1	有	9	47~142	92
	無	1	55	55
V-3	有	10	41~131	91
	無	6	23~122	63
Ⅲ-1	有	30	29~180	83
	無	9	43~152	71
Ⅱ	有	36	42~174	92
	無	37	25~151	72

図-7 木の位置・樹齢・傾きの方向と程度

Fig. 7 Position, age, direction and tilt angle of the leaning trees

図-9は、ブロックV-3の縦断図である。移動体上部では山側、下部では谷側へ木が傾く傾向が見られる。

渡・小橋(1987)は、地すべり地の頭部では、しばしば斜面上方に建物が傾くとした。申(1989)は、すべり面の形状と地表物の傾きについて示す中で(図-10)、すべり面が円弧状の場合は、移動体上方の地物は回転運動により、主に山側へ傾くとした。その場合、末端部ではすべり面が旧地表に出る部分で地表物は山側・谷側両方に傾くことがある。ブロックV-3は、滑落崖の平面形が半円形であることからすべり面は円弧状と推定される。そのため、上部の木は、地すべり発生時に移動体のすべり面に沿う回転運動で山側へ傾いたと推定される。下部の木は、地すべり停止時に慣性力で前方へ傾く力が作用し谷側へ傾いたのではないかと推測される。

図-8 ブロックV-3の樹木の樹齢と傾き
Fig. 8 Age and tilt of trees in Block V-3

7.2 ブロックV-1

ブロックV-1では、ほとんどの木が大きく傾いており、地すべり後に侵入してきたと思われる直立した木が見られない(図-11)。そのため、この移動体は不安定であり、活動を繰り返していたと思われる。

また、ブロックV-1では樹齢に関係なく大きな傾きを有していた。傾きが大きく、その方向も地すべり移動方向に近い(図-7)、このブロックの木は地すべり発生時にまとまって傾いたと考えられる。

谷側へ大きく傾いた木が移動体上方に分布していた(図-7)。しかし、すべり面の形状が原因で移動体上方の木が谷側へ傾くことは考えにくい(図-10)。ブロックV-1は傾斜が急(約40度)であることから地すべり移動の速度は大きかったと思われ、移動停止時の慣性力が移動体上方にも働き、谷側へ傾いた可能性がある。また、移動体末端の木が谷側へ傾いているが、この原因として上述した慣性力に加え、図-10(ロ)のように移動体末端の盛り上がりが原因で傾いた可能性もある。

以上のことから、すべり面の形状は木の傾き方を決める要因ではあるが、地すべり移動が速い場合は、地すべりの移動停止時に木に働く慣性力も、木の傾きに関係していると推測される。

7.3 ブロックIII-1

図-12より、ブロックIII-1では傾いた木が多く、その樹齢層も広いことが分かる。とくに、ブロックIII-1頭部に当たる図-7のaの範囲では山側へ傾いた木が多く、直立の若い木が存在しない。

ブロックIII-1頭部では、地表に亀裂が確認されている。また、ブロックIII-1北側の側方崖から移動体に根を伸ばした木が見られる。根は先端が側方崖の傾斜方向から東に5mずれて伸びていた。胸高直径から樹齢が50~60年と推定されるので、ブロックIII-1は50~60年間に5m動いたと考えられ、ブロックIII-1が活動的なこ

図-9 ブロックV-3の縦断図
Fig. 9 Longitudinal profile of Block V

とを表している。これらの現象が示すブロックⅢ-1の活動性は、若齢・老齢木共に傾いていることと対応している。すなわち、さまざまな樹齢層の木が傾いて存在することが、そのブロックで長い間地すべりが活動を繰り返していたことを表すと言える。

7.4 ブロックⅡとⅢ-1の境界

ブロックⅡとⅢ-1の境界沿いに、山側へ傾いた木、大きく傾いた木が複数見られ、境界には溝状凹地が形成されている(図-7)。溝状凹地は引張応力場に形成されること、前述の活動的なブロックⅢ-1と後述するように活動性の低いブロックⅡの境界では根に引っ張りが働きやすかったことから、これらブロックの境界で木の傾きが大きくなったと考えられる。

7.5 ブロックⅡ

図-7から移動体北端にある側方崖下の木が、主に山側へ傾く傾向が見てとれる。側方崖下に見られる傾きは、

図-10 すべり面形と地表物件の傾き(申(1989)一部改変)
Fig. 10 Feature of slip surface and tree lean (Shin, 1989)

図-11 ブロックⅤ-1の樹木の樹齢と傾き
Fig. 11 Age and tilt of trees in Block V-1

ブロックⅡの進行方向(南東)と直交するので、側方崖の一部でブロックⅡとは独立した地すべりが起きたと考えられる。

図-13は、ブロックⅡの地すべりとは異なる動きである側方崖下とブロックⅡ・Ⅲ-1境界の木を除いて、傾きと樹齢の関係を見たものである。ブロックⅡは、ブロックⅢ-1同様に傾きのある木・無い木、共に樹齢の層が広いことがわかる。しかし、傾いた木以上に傾いていない木が多く、ブロックⅢ-1・Ⅴ-1のように活動を続けてきたとは考えにくい。

傾いた木はブロック全体に分布する傾きの無い木と混在する形で分布しており(図-7)、図-10に示された

図-12 ブロックⅢ-1の樹木の樹齢と傾き
Fig. 12 Age and tilt of trees in Block Ⅲ-1

図-13 ブロックⅡの樹木の樹齢と傾き
Fig. 13 Age and tilt of trees in Block Ⅱ

地すべりブロック上部・末端部での山側・谷側傾きという特徴はみられない。このブロックでは凹凸をなす微地形と傾いた木の位置は対応しないので、微地形がつくる局所的に急傾斜で不安定な斜面の存在が原因とは言えない。また、傾いていない木の樹齢は周辺の傾いた木の樹齢に近い又は上回ることから、面的な広がりを持つ地すべりでは混在を説明できない。

これらのことから、ブロックⅡでは、地すべり活動だけでこれら木の傾きが説明できるとは言えない。ブロックⅡの木は、台風や冠雪害といった地すべり以外の原因で傾いた可能性もある。

8. まとめ

ブナを主とする落葉広葉樹林に覆われる白神山地サンスケ沢地すべり地の4つのブロック(V-1, V-3, Ⅲ-1, Ⅱ)で、雪圧の影響の無い高さでの樹幹の傾きとその分布・樹齢を調査し、樹木の傾きが地すべり運動の活動形態・地すべり発生時期をどう反映しているのかを考察した。

まず、地すべり地外で樹木の傾きを計測し、谷側に10°または山側への傾きを地すべりによる樹木の傾きとみなし、各ブロック内での分布・傾き度合を計測した。

ブロックV-3・V-1末端では、円弧状のすべり面形に対応して、移動体上部では木が山側に、移動体末端部では木が谷側に傾いていた。これらのことから、これまで研究の多かった直立性針葉樹だけでなくブナにおいてもすべり面形は木の傾き方を決める主な要因になっていると言える。

ブロックV-1では、谷側へ大きく傾いた木が、移動体末端部のみならず、移動体上方にも分布していた。傾斜が急で地すべり移動が速かったと思われるブロックV-1では、滑動停止時に慣性力で木が谷側へ傾いたと推測される。

ブロックⅡとⅢ-1の境界に傾いた木が集中することから、下部のブロックが上部より活動的な場合、境界で開口キレットが生じ、根に引っ張る力が働き、ブロック境界に沿って傾いた木が現れると考えられる。

一方、ブロックⅢ-1北東部、V-1には、①若齢・老齢な木が共に傾く、②直立した木が無い、という傾向があった。これは活動を繰り返す移動体では、若木の成長が妨げられるためと考えられる。

活動性の小さいブロックⅡでは、傾いた木と傾いていない木が混在し分布することから、地すべり活動だけでは木の傾き方を説明できない。傾き方向は、微地形の凹凸にも対応していないので局所的な地表の不安定さが原因ではない。風や雪といった地すべり活動以外の要因により木が傾くことも推定される。

以上のように、地すべり斜面上のまとまった範囲に現れるブナの樹幹の傾きには、すべり面の形状やブロック境界という地すべりの活動形態、及び地すべり活動性が

反映されている。ここでは、DBHより推測した樹齢・傾きの大きさや方向とその分布など、現地調査で比較的簡単に確認できる項目を用いた。これらのことは、ブナ林に覆われるような東北日本山間奥地の地すべりで、地表変状だけでなくブナの傾きについての現地調査も、活動的地すべり地やその範囲の推定に有効であることを示している。

今後は、地すべりとそれ以外の要因による樹木の傾きの現れ方の違いや、複数回の地すべり移動がどう傾きに反映しているかなどブナ林における地すべり履歴解析の可能性についても検討し、樹木形態に着目した地すべり対策調査手法を確立していくことも必要である。

参考文献

- 青森県史編さん自然部会 (2001): 青森県史自然編地学, 青森県, pp. 23-28.
- 東三郎 (1979): 地表変動論, 北海道大学図書刊行会, pp. 73-88.
- 東三郎・藤原滉一郎・新谷融・村井延雄 (1971): 樹木年代学からみた地すべり地の推移, 北海道大学農学部演習林研究報告, Vol. 28, No. 2, pp. 340-344.
- Braam, R. R., Weiss, E. E. and Burrough, P. A. (1987): Dendrogeomorphological analysis of mass movement, A technical note on the research method, Catena, Vol. 14, pp. 585-589.
- 菊池俊一・新谷融・清水収・中村太士 (1992): 造林木におけるアテ材形成と地すべり変動履歴, 地すべり, Vol. 29, No. 3, pp. 1-9.
- Kokelj S. V. and C. R. Burn (2003): 'Drunken forest' and near-surface ground ice in Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada, Phillips, Springman and Anderson (eds), Permafrost, Swets and Zeitlinger, Lissar, pp. 569-571.
- 中村友輔・菊池俊一・北口勇作・藏田昭美 (2004): アテ形成履歴からみた薄別川地すべりの変動履歴と水文・地質構造, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 3, pp. 236-244.
- 中静透 (1983): ブナ極相林の再生過程Ⅲ, 齢の異なるギャップに形成された稚樹個体群の構造と発達過程, 日本生態学会誌, Vol. 33, No. 4, pp. 409-418.
- 沼田真・岩瀬徹 (1975): 日本の植生, 朝倉書店, 178p.
- 岡本有生 (2009): 地すべり活動指標としての樹木の傾き, 平成21年度弘前大学農学生命科学部卒業論文, 51p.
- 林野庁監修 (2003): 治山技術基準解説 地すべり防止編, 日本治山治水協会, 346p.
- 社団法人砂防学会 (2004): 砂防用語集, 山海堂, p. 65, p. 187.
- 佐藤重貴夫・中島勇喜 (2010): 流水・土砂流出に対する植物指標の可能性, 雨水資源化システム学会誌, Vol. 15, No. 2, pp. 47-52.
- 申潤植 (1989): 地すべり工学理論と実践, 山海堂, pp. 139-141.
- 田中信行 (1987): ブナ・アオモリトドマツ混交林の更新に関する環境要因, 東京大学農学部演習林報告, Vol. 76, pp. 197-212.
- 塚原俊一・上野雄一・上野将司・新屋浩明 (2006) 講座「現場に役立つ地すべり工学」(第4回) 3. 地すべり発生時の対応, 日本地すべり学会誌, Vol. 42, No. 5, pp. 64-69.
- 渡正亮・小橋澄治 (1987) 地すべり・斜面崩壊の実態と対策, 山海堂, 260p.
- 八木浩司・斎藤宗勝・牧田肇 (1998): 白神の意味, 自湧社, pp. 10-11.
- 横山賢治・横山俊治 (2004): 異常現象を示す樹木をセンサーとする地すべり性開口ククラクの検出と解析, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 3, pp. 217-224.
- (原稿受付2012年9月20日, 原稿受理2013年1月5日)