



森林

科学

[特集]

雪とたたかう森林

シリーズ

森をたべる

樹木病原菌（菌類）が森林をたべる

森めぐり

カンボジアのコミュニティフォレストリー

：森の恵みと人々の暮らし

林業遺産紀行

進徳の森と中村弥六の関連資料群

No. **88**
February 2020



特集 雪とたたかう森林

白魔に挑む —特集「雪とたたかう森林」によせて—	2
岡本 隆	
森林は流れ下る雪崩の進行を止められるのか	3
竹内 由香里	
木製の構造物で斜面の積雪を安定させて もり 森林をつくる	8
柴 和宏	
冠雪害における着雪現象と樹木力学	12
勝島 隆史	
深い雪の中で形を変えて生きる低木広葉樹	16
松元 高峰	
森林と雪と斜面変動の関係を探る	21
松浦 純生	

森林科学 No.88

2020年2月1日発行

頒 価 1,000円(送料込み)

年間購読割引価格

2,500円(送料込み)

編集人 森林科学編集委員会

発行人 一般社団法人 日本森林学会

102-0085 東京都千代田区六番町7

日本森林技術協会館内

郵便振替口座：00140-5-300443

電話/FAX 03-3261-2766

印刷所 創文印刷工業株式会社

東京都荒川区西尾久 7-12-16

表紙写真：全層雪崩発生直後の斜面の状況。
雪崩が発生して載っていた積雪
がなくなると、埋もれていた低
木はすぐに元の形に戻る。(新
潟県魚沼市大白川、2015年2
月6日撮影)

シリーズ 森をたべる	
樹木病原菌(菌類)が森林を食べる	26
佐橋 憲生	
シリーズ 森めぐり	
カンボジアのコミュニティフォレストリー	
: 森の恵みと人々の暮らし	28
御田 成顕	
シリーズ 林業遺産紀行	
進徳の森と中村弥六の関連資料群	30
小山 泰弘	

シリーズ 現場の要請を受けての研究	
32 荒廃竹林を栽培林へ復元するための 積雪地に適した手法	
古澤 優佳	
シリーズ うごく森	
36 スウェーデン発の究極の水選法「PREVAC + IDS 法」と 近赤外分光法に基づく林業用種子の高品質化技術	
松田 修	
コラム 森の休憩室Ⅱ 樹とともに	
41 大枝おろし	
二階堂 太郎	
42 Information	
北から南から	

白魔に挑む

—特集「雪とたたかう森林」によせて—

岡本 隆 (おかもと たかし、森林総合研究所)

「雪」という言葉にみなさんは何を思い浮かべるだろうか。雪だるま、雪下ろし、スキー、ママさんダンプ（雪国住まいの方にはおなじみの“奥様でも”容易に扱える雪かき道具）。雪の少ない地域の人々にとっては情緒的な季節のイベントかも知れないが、雪国に住む人々にとって雪はやっかいな、そして克服すべき相手でもある。

ご存じの方も多いと思うが、日本は世界有数の豪雪地帯を擁する国である。とりわけ北日本の日本海側や北陸地方の山々は冬季になると深さ数 m にも及ぶ雪に覆われる。この大量の雪は春になると徐々に融け出し、森林土壌のかん養を受けながらゆっくりと平野へ供給されて人々の生活や農業などに欠かせない貴重な水資源になる。ところが、雪はこうした恩恵ばかりをもたらすわけではなく、負の影響も多くはらむ。そのひとつが雪崩や地すべりなどの自然災害である。雪国の人々は雪から恩恵とリスクの両方を受けながら暮らしている。

さて雪を森林の立場から見てみよう。森林にとって雪崩や着雪は専ら、自らを押し潰し破壊する脅威の存在、まさに「白魔」である。しかし森林にも学習能力が備わっているのだろうか、その樹体をしなやかに曲げて雪圧から逃れ、春の芽吹きまで耐え抜く姿をときに目にするところがある。このように雪と森林のあいだには実に多様なせめぎ合いが起きているのである。

本特集ではこうした雪と森林の関わり合いについて、「たたかう」という視点から、雪崩、樹木力学、治山など各分野を代表する 5 人の方々に執筆をお願いした。

はじめは、森林総研の竹内由香里氏による雪崩災害の話題である。竹内氏が撮影した、雪崩になぎ倒された森林の写真をご覧になれば、その巨大なパワーを実感いただけるだろう。富山県木材研究所の柴和宏氏には、雪崩を発生させない森林づくりを目指して開発された予防杭を紹介いただいた。小型の木製杭を並べて雪崩を抑制するこの設計思想には、雪をつぶさに調べられてきた氏の現場経験が詰まっている。森林総合研究所の勝島隆史氏には、樹木が雪の重さによって損壊する冠雪害のメカニズムについて樹木力学を駆使した明快な解説をいただいた。新潟大学の松元高峰氏には、積雪というモンスターに襲われた樹木が、意外なほどの粘り腰を発揮するよう

すを紹介いただいた。最後に京都大学の松浦純生氏からは、地すべりなどの斜面変動が積雪環境と密接なつながりを持つようすを分かりやすく解説いただいた。

本特集で述べられた知見の獲得には、氷点下の寒さと数メートルの雪の中での調査（図-1）が必須であり、そのご苦労は想像に難くない。そうした調査を長年にわたって粘り強く継続される雪氷研究者の皆さまには本当に頭の下がる思いである。

雪をテーマにする特集は、30 年近く続く森林科学の歴史でも恐らく初の試みである。白く染まる雪山の情景に想いを馳せながら、雪と森林の「攻防戦」を見ていくこととしよう。



図-1 新潟県の山間地における積雪調査のようす。深さ約 4 m の積雪断面を切り出し、雪質や密度などの諸性質を細かく調べている。

森林は流れ下る雪崩の進行を止められるのか

竹内 由香里 (たけうち ゆかり、森林総合研究所十日町試験地)

はじめに

雪崩は、斜面に積もった雪が重力によって高速で流れ下る自然現象で、積雪全層が地面を滑って流れ下る「全層雪崩」と積雪の上層部分（表層）が雪面上を流れ下る「表層雪崩」に大きく分類される。また、雪崩が発生したときにその雪が氷点下で乾いているか、0℃で湿っているかにより「乾雪雪崩」と「湿雪雪崩」に分類される（日本雪氷学会 1998）。雪崩の速度は、全層雪崩では $10 \sim 30 \text{ m s}^{-1}$ ($30 \sim 110 \text{ km h}^{-1}$) で自動車くらいの速さであるが、雪煙を上げて流れ下る大規模な乾雪表層雪崩では、 $50 \sim 80 \text{ m s}^{-1}$ ($180 \sim 290 \text{ km h}^{-1}$) と新幹線並の速さに達することもあり、森林や構造物を破壊して大きな災害をもたらすことがある。

山地の森林は雪崩災害を防止あるいは軽減する2つのはたらきをもっている。1つめは雪崩の発生を防ぐはたらきである。森林では樹冠が日射を遮り雪温の上昇を抑える一方、夜間は放射冷却によって雪面温度が低下するのを抑制し、雪温の変化を緩和する。このことは雪粒子に霜がついて結合が弱く表層雪崩の要因になりやすい雪（しもざらめ雪）が形成されるのを抑制する効果がある。樹冠に積もった雪が落下あるいは融雪水が滴下して、一様な積雪層が乱されることも、表層雪崩の発生を抑制する効果があると考えられる。森林では降雪が樹木の枝

葉で遮断されるため、森林外に比べて積雪の量が少なく、森林は風を弱める機能があることから、強い風によって雪崩の発生要因になる雪の吹きだまりや雪庇（ひさし状に延びた吹きだまり）が形成されるのを防ぐ効果もある。また、雪に埋まった樹幹は積雪を支えて移動を妨げることにより全層雪崩の発生を防ぐ効果もある（石川ら 1969）。2つめは雪崩が発生して森林に流れ込んだ場合に、樹木が雪崩の進行を妨げて速度を低下させ、その破壊力を弱めるはたらき（減勢効果）である（図-1）。このような森林のはたらきは、古くから経験的には知られていて、人々は山地の森林を保安林に指定するなどして守ってきた。その一方で森林を伐採したために、雪崩の被害を受ける失敗もあった。

ここでは、上述の2つのはたらきのうち後者の雪崩

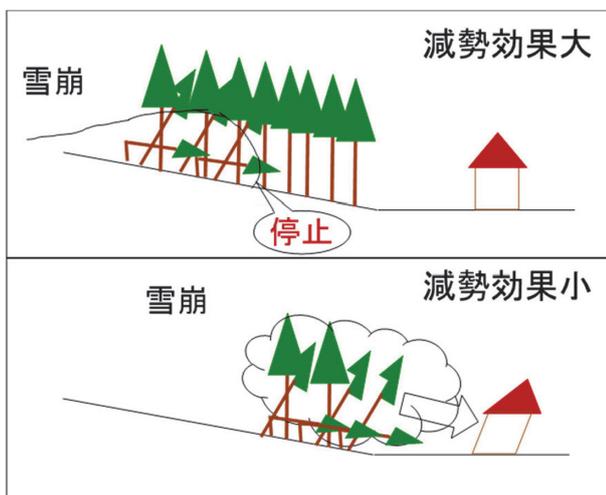


図-1 雪崩に対する森林の減勢効果のイメージ

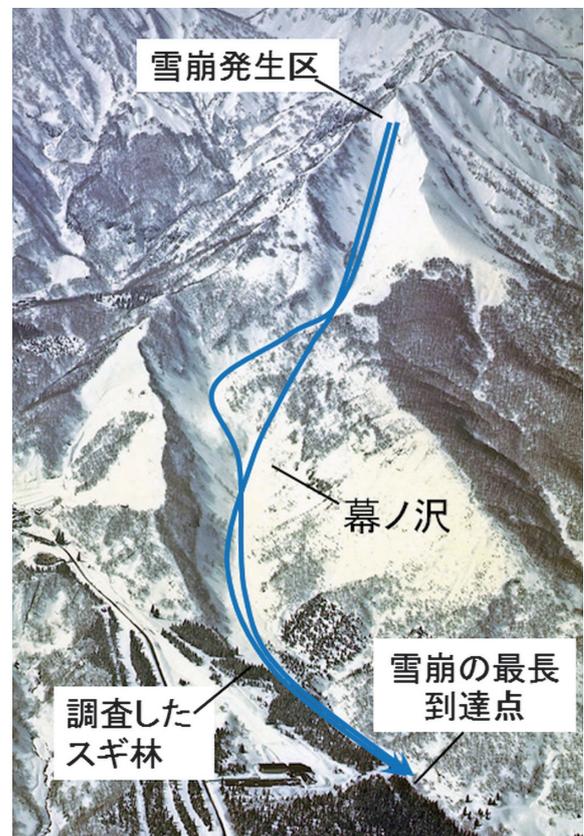


図-2 新潟県妙高山域の幕ノ沢 (Takeuchi et al. 2018 を改変)

の流下を妨げる森林の減勢効果についての研究を紹介する。この効果は、雪崩の種類や規模、森林の面積や単位面積あたりの立木の本数（立木密度）、幹の直径、樹種、さらに地形などの条件によって異なると考えられる。しかし、これらとの関係を示すデータはなかなか得られるものではなく、これまで森林の減勢効果を定量的に示すことができなかった。言い換えると、森林に雪崩の流下を妨げる効果があるとわかってはいても、そのために必要な森林の面積やどのような森林であれば効果が高いかを具体的に示すことができていなかった。そこで、実際に雪崩が森林に流れ込んだ2つの事例について、雪崩の到達範囲や樹木の折損状況などの現地調査を行い、森林が雪崩の流下を妨げる効果があったのかを確かめた。

妙高山域幕ノ沢で発生した雪崩

雪崩災害を軽減するための研究には、実際の雪崩を観測したデータが必要であることはいうまでもないが、雪の多い冬の山中で雪崩が発生しても、通常、雪崩の発生に気づかず、発生時刻を知ることすらできない。そこで著者らは新潟県妙高山に近い幕ノ沢（図-2）において、



図-3 (a) 雪崩にもぎ取られて運ばれ堆積したスギの枝葉 (b) 雪崩で倒壊したスギ林 (2008年5月13日 妙高・幕ノ沢)

雪崩の発生を検知し、発生時刻を知るための観測と気象観測を2000年冬期から続けていて、2019年までの合計20回の冬期に7件の大規模な雪崩を観測することに成功した（竹内 2010；2013）。このうち2008年2月の乾雪表層雪崩は、特に規模が大きかった上に、雪崩の一部が下流のスギ林に流れ込み、多数のスギ立木を倒壊させたので、雪崩に対する森林の減勢効果の研究につながる稀少なデータを得ることができた。

この雪崩は、雪崩検知装置、地震計の記録および雪崩の雪煙の映像から、2008年2月17日13時48分に激しく雪が降っている中で発生したことがわかった。雪崩で流下して堆積した大量の雪（デブリ）や倒れた樹木などの雪崩の跡は、雪崩後に新たに降り積もった雪に覆われてすぐに見えなくなったが、4月になり雪が融け始めると雪に埋まっていた雪崩の痕跡が雪面に現れてきた（図-3）。その状況に合わせて、何度も現地に出かけて調査した結果、この雪崩は、標高約1,700m付近の樹木のない沢の源頭部で発生し、約3,000mの距離を流れ下り、標高約770mの地点まで到達したことがわかった。また約10haの範囲に5～10万トンもの雪が堆積し、国内のみならず海外の事例と比較しても非常に大きな雪崩であることもわかった（竹内ら 2009）。

雪崩が流れ込んだスギ人工林を調査すると、スギの折

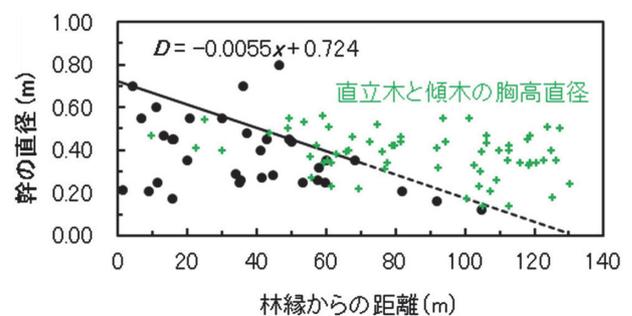


図-4 林縁からの距離と折れたスギ樹幹の直径の関係（+は折れなかった幹の胸高直径）（竹内ら 2010 を改変）

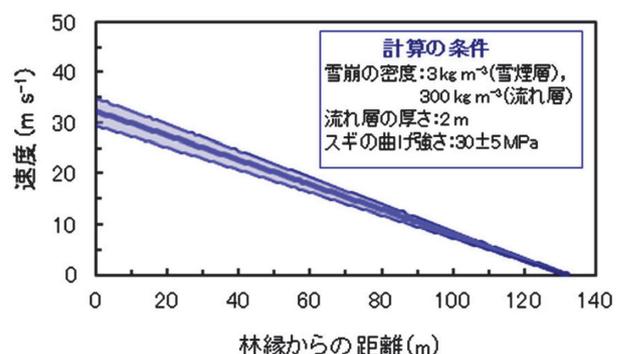


図-5 スギ樹幹の曲げ応力から推定した林内を流下する雪崩の速度変化（竹内ら 2010 を改変）

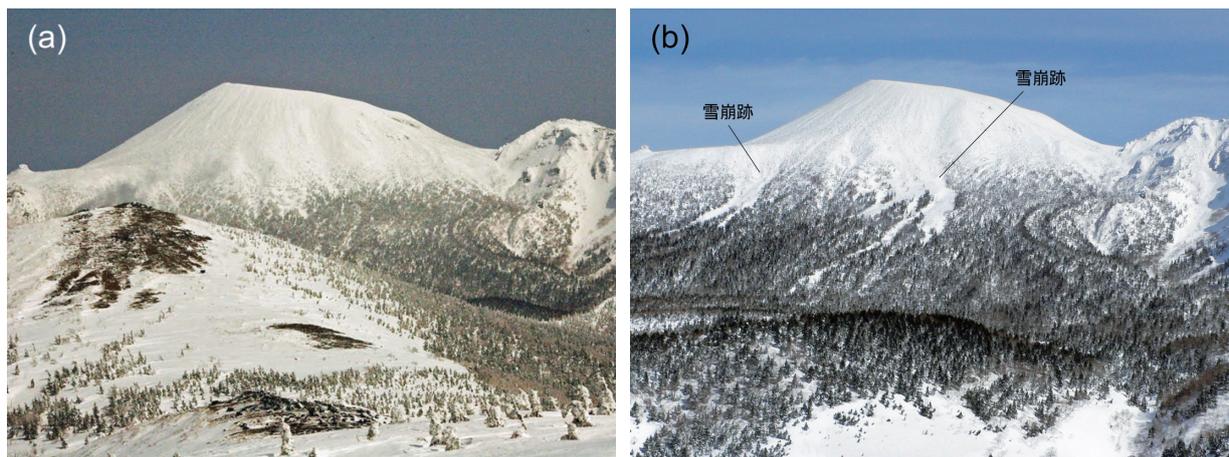


図-6 雪崩の前後の岩手山西斜面 (a) 2006年4月1日 (多賀谷真吾氏撮影) (b) 2013年3月12日雪崩で樹木が倒れたところが白く見える。

損は雪崩が流入した上流の林縁付近で最も甚大で、地上から17mの高さにある枝や、直径70cmの幹が折れるなど、雪崩の高さや破壊力の大きさを示していた。しかし林の奥へ進むにつれて、太い幹は折れず、細い幹や枝だけが折れていて、雪崩の破壊力が弱まったことを示していた(図-4)。そのような雪崩の痕跡も上流の林縁から130mほどの林内で途絶えていて、雪崩が林を抜けて下流にまでは達していないことがわかった。これらの

調査結果から、スギの幹が折れるのに必要な力をもとに、雪崩がスギ林に流入してから停止するまでの速度の変化を計算した。その結果、雪崩は高さが17m以上に達する雪煙を伴って、およそ 30 m s^{-1} (108 km h^{-1})以上の速さでスギ林に流れ込み、林内を進みながら減速して、林縁から130mの付近で止まったと推定された(図-5; 竹内ら 2010)。



図-7 岩手山の雪崩で倒れた樹木 (2012年7月)



図-8 岩手山の雪崩で倒れて堆積したダケカンバ (2011年10月)

岩手山で発生した雪崩

2010～2011年冬期に岩手山の山頂に近い西斜面で雪崩が発生し、約7haの亜高山帯林が倒壊した(図-6)。この雪崩の発生は冬の間は気づかれず、初夏になり雪が消えて大量の倒木が現れてはじめて判明したため、雪崩の発生した場所や発生日はわかっていない。2011年夏に撮影された空中写真を入手して調べた結果、雪崩は樹木を倒しながら林内を500m以上も流下していたことがわかった。このことから、この雪崩は標高約1,730mの森林限界より高所で発生した乾雪表層雪崩で、樹木のない斜面を流下しながら速度を上げ、高速になって森林に流れ込んだと考えられた。また、写真や気象データを収集して解析した結果、雪崩は岩手県北部で記録的な大雪となった2010年12月31日以降2011年1月6日までに発生した可能性が高いと推定された(竹内ら2014)。

この雪崩が針葉樹のアオモリトドマツ(オオシラビソ)や広葉樹のダケカンバの林を流下した状況を知るため、樹木の折損状況を2012年7月に調査した(図-7、図-8)。雪崩の路上において上流から下流の標高の異なる調査エリアを定めて、各エリア内の樹木の折損状況や樹高、胸高直径を調べた。その測定値からアオモリトドマツの幹が折れるのに必要な力を計算し、雪崩の速度を推定すると、最大で33～53m s⁻¹(119～191km h⁻¹)以上であった(竹内ら2014)。

雪崩路上の樹木の9割はアオモリトドマツ、残る1割はダケカンバであった。アオモリトドマツは上流ほど幹破断が多く、根ごと倒れる根返りは少なかったが、ダケカンバはほとんど全て根返りであり、樹種により、また上流と下流とでは倒壊形態に違いがみられた。幹の太さや樹種による幹の強度の差によって倒壊形態の違いが生じたようであった。

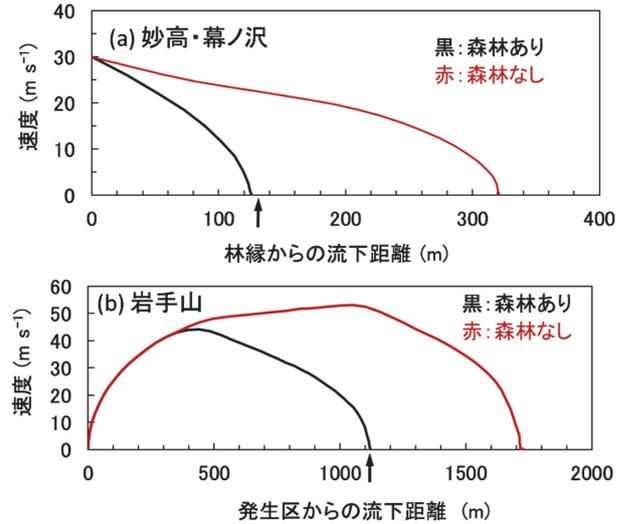


図-9 森林の有無による雪崩の速度変化の比較 (a) 妙高山域幕ノ沢 (b) 岩手山 黒線は森林内を流下した場合、赤線は森林がないと仮定した計算 (Takeuchi *et al.* 2018 を改変)

雪崩の減勢効果を示した数値シミュレーション

妙高山域幕ノ沢および岩手山の雪崩は、どちらも森林のない標高の高いところで発生したのち高速で森林に流れ込み、広範囲で多数の樹木を倒壊させたものの、森林を抜けて下流へ行くことなく森林内で止まった。しかし、これらの状況だけでは森林が雪崩の流下を止めたと言い切ることはできない。雪崩は斜面の傾斜が緩やかになれば、森林がなくても速度が低下し、いずれは停止するからである。雪崩の流下を妨げた森林の効果を確かめるためには、他の条件を等しくして森林がある場合とない場合で雪崩の流下を比較しなければならない。実際にそのような比較観測を行うのは無理なので、雪崩の運動モデルを用いて妙高山域幕ノ沢や岩手山西斜面の地形図上で雪崩を流下させる数値シミュレーションを行ない、森林の有無による雪崩の速度や到達距離を比較した。この運動モデルでは、雪崩が流下する際の抵抗を森林の範囲において高める工夫をしてシミュレーションを行っている。

妙高山域の幕ノ沢において森林がないと仮定してシミュレーションを行ったところ、雪崩はスギ林内を流下した実際の雪崩より約200mも遠くまで流下する結果になった(図-9a)。つまり、幕ノ沢のスギ林は、雪崩を減速させ、流下距離を200m縮める減勢効果があったといえる。同様に岩手山の雪崩についても森林がないと仮定してシミュレーションを行うと、森林内を流下した場合より200m～600mも遠くまで流下した結果になった(図-9b)(Takeuchi *et al.* 2018)。

おわりに

森林のはたらきで雪崩の発生を防ぐことができれば、それに越したことはない。しかし多雪、強風、寒冷などの厳しい気候環境や急峻な地形のために樹木が育たない斜面もある。また、森林内の斜面でも樹木の間をすり抜けて雪崩が発生することがある(松下ら 2018)。これまでは森林の減勢効果が期待できるのは、樹幹が折れることのない小～中規模の雪崩に限られ、多くの樹木が倒壊する大規模な雪崩の場合は、その効果が疑問視されたこともある(Brang *et al.* 2006)。今回の研究ではそれに反して、大規模な雪崩によりたとえ多数の樹木が倒壊しても、森林には流下する雪崩の進行を妨げ、速度を落として流下距離を縮める明瞭な効果があることを示した。雪崩の観測事例と数値モデルのシミュレーションにより、そのような森林の機能の大きさを確かめることができたが、前述のように、森林の減勢効果は雪崩や森林の条件により異なると考えられるので、より普遍性の高い結論を得るためには、今後もさらに様々な条件で雪崩が森林に流れ込んだ事例の解析を積み重ねていくことが必要である。

雪崩で倒壊した森林では、森林が再生するまでは、類似の雪崩に対して同じ減勢効果は期待できず、雪崩がより長い距離を流下する恐れがあると留意することも必要である。

引用文献

- Brang P, Schönenberger W, Frehner M, Schwitter R, Thormann JJ, Wasser B (2006) Management of protection forests in the European Alps: an overview. *Forest Snow and Landscape Research* 80: 23-44
- 石川政幸・佐藤正平・川口利次(1969) なだれ防止林の立木密度. *雪氷* 31: 14-18

- 松下拓樹・高橋 渉・松沢 勝・高橋丞二(2018) 広葉樹林における乾雪表層雪崩の発生条件について. *日本雪氷学会論文集* 34(4): 1-13
- 日本雪氷学会(1998) 日本雪氷学会積雪分類. *雪氷* 60: 419-436
- 竹内由香里(2010) シリーズ「近年の土砂災害」- 妙高山域の幕ノ沢における大規模雪崩-. *水利科学* No.315: 39-57
- 竹内由香里(2013) 観測の現場を訪ねて- 38 妙高山域の幕ノ沢における雪崩の観測. *砂防学会誌* 66(1): 62-66
- 竹内由香里・平島寛行・和泉 薫・上石 勲・河島克久・山口 悟・宮崎伸夫・西村浩一・Evgeniy Podolskiy・鈴木 貴・村上茂樹・遠藤八十一(2009) 妙高山域の幕ノ沢で2008年2月に発生した大規模な乾雪表層雪崩. *雪氷* 71: 167-176
- Takeuchi Y, Nishimura K, Patra A (2018) Observations and numerical simulations of the braking effect of forests on large-scale avalanches. *Annals of Glaciology* 77: 50-58.
- Takeuchi Y, Torita H, Nishimura K, Hirashima H (2011) Study of a large-scale dry slab avalanche and the extent of damage to a cedar forest in the Makunosawa valley, Myoko, Japan. *Annals of Glaciology* 52(58): 119-128
- 竹内由香里・鳥田宏行・西村浩一・坂本知己・萩野裕章・後藤義明・村上茂樹・遠藤八十一(2010) 妙高山域幕ノ沢の大規模表層雪崩によるスギ林の倒壊状況と雪崩速度の推定. *雪氷* 72: 115-125
- 竹内由香里・鳥田宏行・野口正二・伊豫部勉・平島寛行・小杉健二・根本征樹・佐藤研吾・平山順子・阿部修(2014) 岩手山で2010-11年冬期に発生した大規模雪崩による亜高山帯林の倒壊状況と雪崩速度の推定. *雪氷* 76(3): 221-232

木製の構造物で斜面の積雪を安定させて もり 森林をつくる

柴 和宏 (しば かずひろ、富山県農林水産総合技術センター 木材研究所)

はじめに

多雪地域の急傾斜地に積もった雪は、重力によって時間の経過とともに絶えず斜面下方に移動しようとする。そのとき、斜面が樹木のない草地であると、積雪が滑りやすくなりしばしば雪崩が発生する(写真-1)。このように積雪状態が不安定な斜面では、自然に樹林化することは期待できない。また樹木の植栽を試みても、植栽木が積雪の移動にともなって引き抜かれてしまうか、根付いても繰り返し雪害を受けるため、森林の形成まで至らない。このような立地条件の斜面で森林をつくるには、まず積雪を安定させる必要があり、そのために雪崩対策工を設置することが不可欠となる。

ここでは、植栽木への雪害を防ぎながら森林をつくることを主目的とした木製の雪崩対策工について、富山県での実施事例をもとに紹介する。なお、ここで紹介する木製の雪崩対策工の設置目安は、最大積雪深(10年間の平均値)で2m程度までとしている。



写真-1 雪崩が発生しやすい草地化した急傾斜地

従来の雪崩対策工

20年ほど前までの多雪山地における森林づくりでは、施工性や経済性の観点から写真-2に示すような切取階段工が導入されることが多かった。これは、斜面方向に対して一定間隔に設けた階段により、積雪が受け止められ安定化するものである。しかし、この方法に対しては、階段の切り取りに伴う表土の流亡や、階段崩壊の問題点



写真-2 切取階段工(完成検査時の状況)

が指摘されていた¹⁾。また施工後の景観が好ましくなく(切り取り面が露出するとともに、重機で掘削した土砂が流出し斜面を覆うため)、地元や工事の関係者からしだいに採用されなくなっていった。

現場ニーズをもとに木製の雪崩対策工を開発

そうしたなか、切取階段工のように地山を大きく切り取るのではなく、斜面上に構造物を設置することで雪崩を防止し、また人力で容易に施工できる新たな対策工が現場から求められるようになっていった。また他方では、間伐材など未利用小径材の有効活用が重要な課題となっていたため、雪崩対策工での新たな木材利用が期待されていた。

こうした現場のニーズに応じて、筆者らは、スギ小径材を用いた雪崩予防杭(以下、予防杭と略す)を開発した(写真-3)。予防杭の大きさや積雪荷重に対する部材の断面寸法は文献や類似の事例を参考に決定した。そして現場での試験施工をふまえて、施工マニュアルを作成し利用の普及を図ることとした。

ところがその矢先、平成18年の豪雪において、予防杭に損壊を生じる事例がみられたため、予防杭の強化が急務となった。そこで、雪崩防止柵(予防杭よりも大がかりな構造物)を参考に、構造耐力を高める設計をおこなうこととした。予防杭にかかる積雪荷重の大きさを見直すとともに、写真-3に示すような、三角枠(積雪を直接受ける部分)の谷側への引き抜き耐力、支柱基礎の



写真-3 予防杭の形状と構造設計の項目 (赤色の部分)



写真-4 予防杭によって斜面積雪が安定している様子

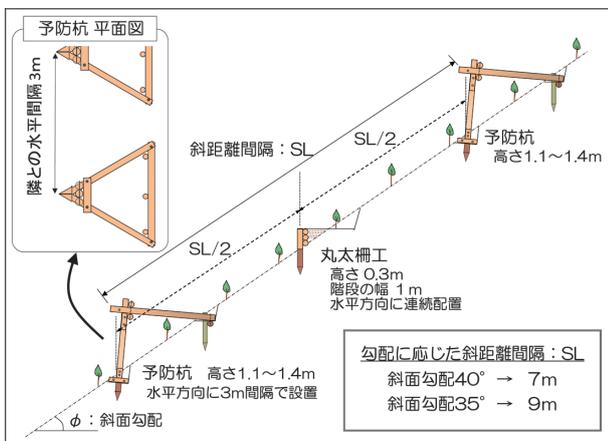


図-1 斜面における予防杭の設置間隔



写真-5 積雪断面で筋状にみえる複数の線が予防杭の位置で褶曲している (青点線はそのイメージ)

地耐力、三角枠地上部材の曲げ耐力、これらに対して安全性を向上させる構造設計をおこなった²⁾。そして改良後に、複数の現場で設置した予防杭を検証したところ、豪雪時でも損壊しない耐力を有していることが確認できた。

予防杭の設置による斜面積雪の安定化

写真-1のような積雪の不安定化を防ぐには、積雪の移動量をどのくらいの範囲に抑えればよいだろうか？既往の研究によれば、1冬期間の積雪移動量が2m以内であれば、積雪は斜面上を急に加速することなく安定した状態を維持するとされている³⁾。さらに、積雪移動量が1m程度まで減少すれば、数mに達する場合(積雪がやや不安定)に比べて、雪圧(予防杭や樹木が受ける積雪荷重)は半分以下になるとされている⁴⁾。したがって、予防杭の設置によって積雪移動量を1m以内に抑えることができれば、積雪が常に安定し続けるとともに雪圧も小さく抑えられて、植栽木が良好に生育することが期待できる。

(1) 予防杭の設置間隔

積雪移動量をこうした範囲にコントロールするには、予防杭の設置間隔を適切に設定することが重要となる。まず斜面方向の設置間隔は、予備実験などを踏まえて、勾配35°では斜距離で9m、勾配40°では同7mとし、その間に補助的な構造物として丸太柵(水平方向に連続配置)を設置した(図-1)。そして、水平方向の設置間隔は、予防杭の間から積雪が漏れ出すのを防ぐため、現場の経験を参考に3mとした。以上の条件による予防杭の設置密度は、勾配35°の斜面で450基/ha、同40°の斜面で620基/haとなる。

(2) 予防杭による積雪移動の抑制効果

このような間隔で予防杭を設置した斜面において、3月の積雪状況の一例を写真-4に示す。積雪が不安定化しやすい融雪期にもかかわらず、斜面全体で安定している様子がわかる。ルールにそりを載せた方式の測定装置⁴⁾により冬期間中、積雪移動量を1時間おきに自動測定したところ、移動量は1m以内に抑えられており、積雪が常に安定していたことを裏付けていた。

(3) 予防杭はどのように積雪を安定させているのか

融雪期にあたる3月に積雪断面を掘り出して観察した状況を写真-5に示す。積雪断面の観察により、氷板(積雪の断面内を斜面に対して平行に走る薄い氷の層)が、予防杭の三角枠のところで大きく^{しゅうきよく}褶曲していることがわかる。このことは、予防杭が抵抗となり積雪の移動を抑えていることを示している。また、隣接する予防杭で支柱にかかる積雪荷重を、あらかじめ取り付けおいた装置で測定したところ1.4トン(普通自動車1台分に匹敵する重量、このときの最大積雪深は2.5m)に達していた。このように、予防杭は大きな積雪荷重を受け止めながら、積雪の移動をコントロールすることで積雪を安定させている。

植栽木がどのくらい成長すれば積雪の安定を担えるか

予防杭の木材部材は野外で風雨に曝されるため、やがて腐朽劣化することを考慮しなければならない。耐久性を向上させるために木材に防腐薬剤を注入処理しておけば10年程度の耐久性が期待できる⁵⁾。このことから、予防杭が、積雪移動をコントロールし、積雪を安定化で

きる期間は10年程度と想定される。

その限られた期間内に予防杭にかわって、植栽木が生育し、斜面積雪の安定を担えるようになるには、以下の2つの条件を満たす必要がある⁶⁾。

(1) 早く成長して雪上直立木になること

施工地では一般にスギが植栽される。スギは、植栽してから数年間は細くやわらかいため、雪の重さで倒れて積雪に埋もれる。しかし、樹高が最大積雪深の2倍を超えるようになると、雪の重さで倒れて埋雪することがなくなり、冬期間中積雪面から突き出て直立した状態に移行する。このような状態を雪上直立木⁷⁾(以下、立木と略す)という。立木になると、幹が折れるといった致命的な雪害を受けにくくなるため、長期にわたって積雪の安定に寄与できる。

(2) 積雪が安定する立木密度になること

そうした立木がどのくらいの数(密度)になれば、積雪は安定するのだろうか? 豪多雪地域のスギやブナ林で積雪移動量を測定した実験では、1,000本/haの立木密度があれば積雪が安定することが明らかになってい

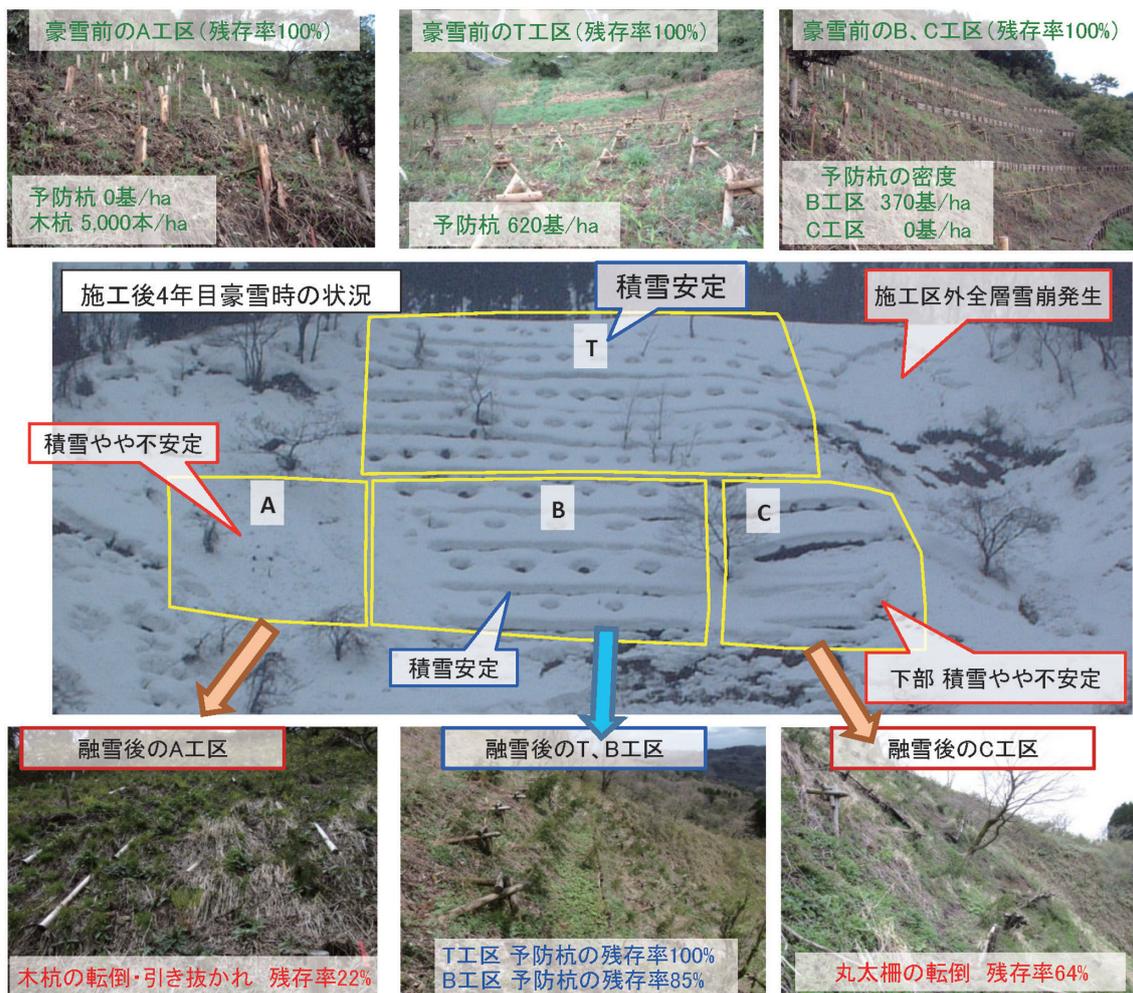


写真-6 予防杭の設置密度などが異なる各工区での積雪状況と融雪後の残存状況の比較

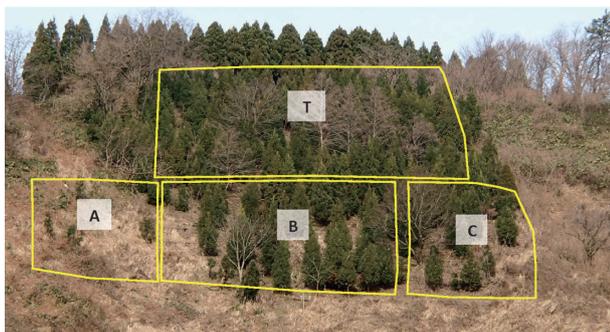


写真-7 各工区の植栽木の生育状況(施工後11年経過時)

る³⁾。このことから、植栽したスギの立木密度が1,000本/ha以上になることが森林づくりにおける目標値となる。

安定した積雪条件のもとで森林がつくられる

予防杭により積雪が安定しているあいだに、前述の森林づくりのための条件を満たせるかどうかを検証するため、予防杭の設置密度などが異なる4つの工区（勾配はいずれも40°）をもつ施工地で積雪や構造物の状況変化を比較した（写真-6上）。4工区の概要は、①予防杭の水平方向の間隔が3mのT工区（620基/ha設置）と、②水平方向の間隔を5mに広げたB工区（370基/ha）、③予防杭を設置せずに丸太柵だけを斜距離間隔7mで設置したC工区（予防杭0基/ha）、④補助的な木杭（長さ1.5m：地上0.5m、打ち込み深さ1m）のみを等間隔に5,000本/ha打ち込んだA工区（予防杭0基/ha）、の以上である。なお、各工区ともスギを2,500本/ha植栽しており、下刈りなどの保育作業を同様に実施している。

豪雪時（4年目）の各施工区の状況と、融雪後の予防杭など構造物の残存状況を写真-6（中、下）に示す。施工区の外では雪崩が発生しているのに対して、予防杭を設置したT工区、B工区では積雪が安定しており、融雪後の予防杭の残存率はそれぞれ100%、85%であった。補助的な木杭を打ち込んだA工区では積雪がやや不安定化し、融雪後は木杭の多くが引き抜かれ残存率はわずか22%となった。また、丸太柵のみを設置したC工区では下部の積雪がやや不安定化し、丸太柵の残存率は64%となった。

その後10年経過時まで、T、B工区では、予防杭の腐朽にともなう損壊は認められず、積雪も安定し続けた。一方、A工区では木杭の大半が4年目で消失したため、全層雪崩の発生が常態化した。

11年経過時の各工区の林況を写真-7に示す。予防

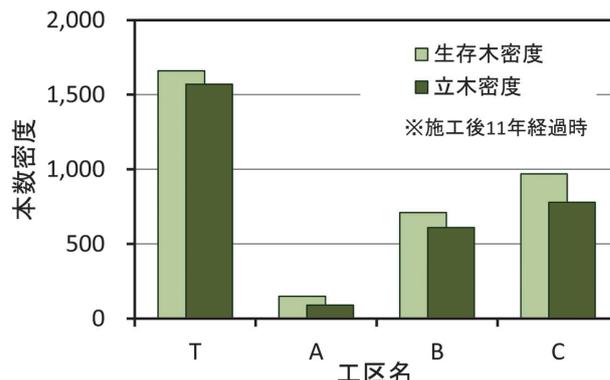


図-2 各工区の生存木とそれに占める立木の密度

杭を設計どおり設置したT工区で立木密度が明らかに高いことがわかる。この時の各工区における植栽したスギの生存木と立木の本数密度を図-2に示す。A、B、C工区のように予防杭の設置がない、あるいは密度が少ない場合は、生存木・立木密度とも目標値に達しない結果となった。その一方で、予防杭を設計どおり設置したT工区のみが目標値を満たしており、立木密度は1,500本/haを超えていた。

以上のように、多雪地域の急傾斜地に予防杭を密に設置して積雪を安定させることで、植栽木の良好な生育をうながし森林づくりが可能になることがわかった。それとともに、用途拡大が求められるスギ小径材を予防杭の部材として十分利用できることが示された。

引用文献

- 1) 豪雪地帯林業技術開発協議会（1984）雪に強い森林の育て方。日本林業調査会
- 2) 柴 和宏（2013）スギ間伐丸棒を利用したガイド防止三角枠工の開発。富山木研研報 5: 7-15
- 3) 相浦英春（2005）斜面積雪の安定に必要な立木密度。日林誌 87: 73-79
- 4) 相浦英春・嘉戸昭夫・長谷川幹夫（1996）多雪山地におけるブナ林皆伐後の伐根の転倒にともなう表層崩壊の発生。日林誌 78: 150-156
- 5) 鈴木健太郎（1995）製材等 JAS 規格の改正について。木材保存 21(3): 35-41
- 6) 柴 和宏・長谷川益夫・相浦英春・松浦崇遠・中田 誠（2018）多雪地帯の雪崩防止林造成における木製杭の効果とスギ植栽密度の影響。日林誌 100: 165-173
- 7) 豪雪地帯林業技術開発協議会（2000）雪国の森林づくり。日本林業調査会

冠雪害における着雪現象と樹木力学

勝島 隆史 (かつしま たかふみ、森林総合研究所十日町試験地)

林木の雪害

国内の多雪地にある造林木では、地面に積もった積雪や、樹木に付着した着雪によって幹や枝、根の機械的な破壊が生じており、これらの雪による林業被害のことを総称して雪害と呼んでいる(四手井ら 1950)。雪害のうち、積雪の沈み込みや急斜面の積雪の移動による被害を「雪圧害」、樹冠に付着した着雪の荷重による被害を「冠雪害」と、それぞれ区別している。雪圧害は樹木全体が積雪に埋没する可能性のある場合に発生し、樹高が冬季間の最大積雪深の2～2.5倍以下の幼齢林で主に発生する(四手井ら 1950)。一方、樹高が高くなり積雪に埋没しなくなる3～4齢級(11～20年生)以降の林分においては、雪害の形態が雪圧害から冠雪害へと移行する(豪雪地帯林業技術開発協議会 1984)。今回は後者の冠雪害に焦点を当てて紹介したい。

冠雪害は、日本海側の多雪地では毎年恒常的に、太平洋側の普段雪の少ない地域では頻度は稀であるものの、大きな林業被害が発生している(石川ら 1987)。また着雪による倒木によって、配電線の切断による停電や、道路の通行止め、鉄道の運休が発生するなど、社会インフラに対しても大きな影響を与えている。昭和55年から56年の冬季に発生した五六豪雪においては、北陸地方や東北地方の太平洋側などの広い範囲において極めて甚大な被害が発生しており、これを契機として冠雪害の実態把握や、冠雪害を防除するための育林技術の開発が実施されてきた。

冠雪害の発生は、雪や風などによって生じる外力と、それに対する樹幹や根系の力学的な耐性とのバランスが大きく関係するものである(澤田 1983)。そこで冠雪害の現象を理解するために、本稿では冠雪害の直接的な原因である降雪に伴う樹冠への着雪現象の特徴や、冠雪害における樹木の力学について説明する。

冠雪害における着雪現象

着雪とは、物体に付着した雪あるいはその現象のことであり、また冠雪とは着雪のうち、物体に帽子状に積もった雪あるいはその現象のことである(公益社団法人日本雪氷学会 2014)。樹木はもとより電線や道路標識、信号機などの地上の物体においても着雪が生じて、様々な社会的影響を及ぼすことから、各分野において着雪の研

究が進められている。着雪は、着雪が発生するときの気温や風速などの気象条件の違いによって2つの着雪型に分けられる(若浜 1988)。1つは弱風時に気温0℃付近で乾いた雪が降るときに発生する着雪である(荘田 1953)。これは主に冠雪と呼ばれるものであり、弱風型着雪、乾雪型着雪とも呼ばれている。もう1つは、強風時に気温0℃以上で湿った雪が降るときに発生する着雪であり(坂本ら 1978)、強風型着雪、湿雪型着雪と呼んでいる。樹木への着雪においては、どちらの着雪型も発生するが、着雪の気象条件は電線着雪などとは少し異なる(図-1)。

樹木の冠雪が生じる気象条件については、スギを対象とした野外での冠雪重量の観測から、その概要が示されている(高橋 1952)。それによると、冠雪は概ね気温1℃以下のときに発生し、特に気温が0℃をわずかに下回るときに冠雪率(単位樹冠面積あたりの降水量に対する冠雪重量の増加量の割合)が最も大きくなることが示されている。一方で気温0℃以上では冠雪は発生するが、気温0℃以上のときの大気から冠雪への熱の輸送である顕熱フラックスや日射による冠雪の融解により短時間で冠雪が落下することが多く、結果として冠雪が大きく成長しないことが示されている。また風速については、冠雪率と風速との間に明瞭な関係性は見られず、風速1m/s以上では樹冠の揺れ(動揺)による冠雪の振り落しが顕著になり、風速3m/s以上では冠雪が成長しなくなることが示されている。現在では、このような冠雪重量の観測に基づいて、気象データから冠雪重量を推定するモデルも開発されている(勝島ら 2017)。

冠雪重量の観測の一般的な方法としては、森林から切り出した木を自立させるための架台に設置して自然の降雪による冠雪を生じさせ、そのときの木と冠雪を合わせ

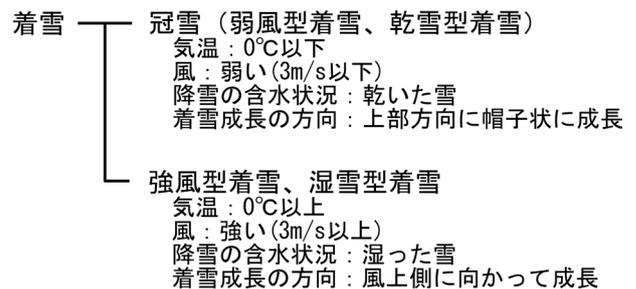


図-1 樹木の着雪現象の種類と気象の特徴



写真-1 冠雪重量の野外観測の様子

ロードセルの上にスギを設置した架台を載せ、全体の重量変化から冠雪重量を計測する。架台の周囲を板で雪囲いすることで、架台への雪の付着による測定値への影響を防ぐ。枝ごとに1つの大きな冠雪の塊を形成し、冠雪の荷重により枝が大きいたわんでいる様子がうかがえる。

た全体の重量の時間変化を測定して、その測定値から冠雪前の木の重量を差し引くことで冠雪重量を測定する手法が用いられる(嘉戸 1991)(写真-1を参照)。これまでの研究において観測された冠雪重量の最大値としては、針葉樹(ダグラスモミ)の単位樹冠面積あたりの冠雪重量は 40 kg/m^2 に達した例が存在する(Storck *et al.* 2002)。

次に、樹木の強風型着雪の発生する気象条件は、過去の発生事例における被害地周辺で観測された気象データから推測されている(高橋・塩田 1952、新田ら 1986)。それによると、気温 0°C 以上で降雪粒子が水を含んだ湿った雪が降る時で、風速は 3 m/s 以上であるとされている。しかし、前述の冠雪重量の観測装置では強風時には木の揺れによって静止した状態を維持することは難しく、重量計に対して安定した荷重が得られないため精度の良い計測値を得ることが出来ない。また場合によっては転倒の恐れもあるため、樹木の強風型着雪における野外での量的な観測事例は、これまでに報告されていない。また、強風型着雪の発生事例そのものが少ないために、この着雪型により発生した着雪体を調査した事例は、長井(1982)の一事例のみである。この貴重な調査結果によると、樹冠の側面に偏って着雪し、着雪体は風上側に向かって大きく成長した形状になることが示されている。また、湿った雪が風により吹き付けられる効果によって着雪が硬くなり、着雪体の密度は約 300 kg/m^3 以上であったことが示されている。そのため強風型着雪では、冠雪では落雪するような高い風速においても、着雪は成長すると考えられている。

野外観測の難しさから、強風型着雪の発達過程の研究では風洞装置を用いた人為的な着雪実験が用いられる。電線を対象とした着雪実験によると、強風時には降雪粒子は垂直には落下せずに、風にあおられて物体に対して斜め方向に流入する。風速が大きいほど流入角度と単位時間当たりの流入量は大きくなるため、風が強くなると物体に供給される実質的な降雪量は増えるといえる(若浜ら 1979)。供給された雪は、物体あるいは物体に付着した着雪体に衝突して、その反動で反発、飛散するとともに、一部は捕捉される(若浜ら 1979)。このときの捕捉率は乾いた雪では小さく着雪は発生しにくい、湿った雪では 0.1 から 0.2 の範囲と高くなり着雪が発生しやすいことが示されている(若浜ら 1978)。そのため強風型着雪が発生しやすい気象条件は、気温 0°C 以上の湿った雪が降る時で、かつ風が強い時に限定される。新田ら(1986)は、過去の湿雪強風による森林被害の発生事例の考察より、このような電線着雪と同様の発達過程が樹木においても起こりうることを指摘している。また、樹木を対象とした風洞装置を用いた着雪実験の事例においても、電線着雪と同様の発達過程が確認されており、その捕捉率についても同程度であると報告されている(勝島ら 2018)(写真-2を参照)。



写真-2 風洞装置により人為的に発生させた湿雪の着雪
風洞装置を風速 9 m/s で稼働した状態で、装置上部から湿雪を供給して、スギ枝に衝突させることで、人為的に着雪を発生させた。着雪体は、手で軽く引っ張る程度の力では破損しないほど、硬く緻密であった。また、一定の方向から雪を供給した結果、着雪体は風上側に突き出た三角形状をしていた。

冠雪害の力学

次に、冠雪害の発生を樹木の力学の視点から考える。冠雪害の発生には、着雪により樹冠に対して鉛直方向に作用する着雪荷重と、風により樹冠に対して横方向に作

用する風圧力を考える必要がある（澤田 1983、中谷ら 1984、Peltola *et al* 1999）。着雪荷重は、樹幹の中心軸からの作用点の偏心（重心のずれ）によって、曲げモーメントとして樹幹や根系に作用する（図-2を参照）。着雪荷重の作用点の偏心は、樹冠の山側と谷側との枝張りの違いや風による非対称な着雪や、元々の樹幹の湾曲によって生じ、着雪荷重や風圧力による樹幹の変形によって偏心が更に大きくなる（中谷ら 1984）。また風圧力は、樹冠の風圧中心を作用点として、風圧中心からの長さによって同じく曲げモーメントとして作用する。着雪荷重と風圧力による曲げモーメントの和と樹幹直径から求めた断面係数をもとに、樹幹に作用する曲げ応力を算出することができる。計算される曲げ応力が曲げ強度を上回るときに幹折れが、曲げ応力が弾性限界を超えて塑性変形が生じるときに幹曲りが発生する。また根元の位置での曲げモーメントが根返り抵抗モーメントを上回るときに木が根ごと倒れる（根返り）。曲げ強度は、乾燥した木材と水分を持った生立木とで異なる値を持つ（小泉 1987）。そのため、冠雪害に対する力学計算においては生立木に対する値を使用する必要があるが、生材の曲げ強度の実測値はいくつかの事例があるのみである（例えば中谷ら 1986、嘉戸 2001）。また根返り抵抗モーメントについては、実測値に基づいた経験式が作成されており、胸高直径のべき乗の式や（例えば玉手 1965、森岡 1984）、幹の体積（材積）の式が用いられる（藤堂ら 2015）。

これらのように、冠雪害の発生は着雪荷重や風圧力による外力と、それに対する木の耐性とのバランスによって決定づけられることから、冠雪害の発生には樹形が大きく関係すると考えることができる。ある単位面積あたりの着雪重量や風速を仮定すると、樹冠全体に生じる着雪荷重は水平面に対する投影面積、風圧力は鉛直面に対する投影面積に比例し、これらによる曲げモーメントは作用点からの長さを代表する樹高に比例する。一方で、断面係数は幹の直径の3乗に比例する。そのため、細長い形状をした樹形ほど曲げ応力は大きくなりやすく、冠雪害に対する力学的な耐性が低いと考えられている。高橋および塩田（1952）では、強風型着雪による冠雪害の被害林分の調査結果より、樹高を胸高直径で割った値である形状比が高い木において被害の発生が集中しており、形状比60以下の比較的太くて低い木では被害が発生しなかったことを示している。また四手井（1954）では、これまでの冠雪害の被害調査結果をまとめ、形状比60以下では安全であるが、形状比90以上の比較的細くて高い木では著しく危険であることを示している。このような形状比と力学的な耐性との関係は、力学計算

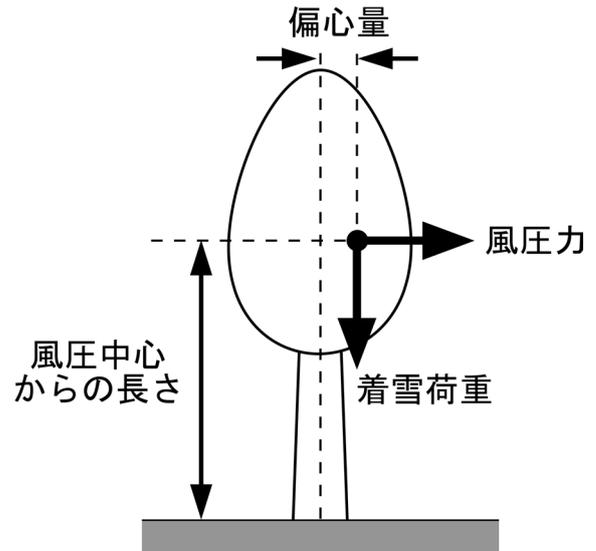


図-2 樹木に作用する着雪と風による力の模式図

を用いた数値実験においても明瞭な関係が得られている（嘉戸 2001、Peltola *et al* 1999）。

おわりに

冠雪害についての既往研究を概要したが、冠雪害の研究は着雪現象の視点と、樹木力学の視点の両面から主に進められてきた。着雪現象の解明においては、着雪の観測に大掛かりな装置が必要になることや、強風時に精度良く計測することが困難であることに起因して観測事例が多くはなく、気象条件と着雪の発達過程との関係が十分に明らかになってはいない。樹種や品種、枝張りや葉の形状は、着雪の形成に対して何らかの影響を持つものと推測されるが、依然として詳細は不明なままである。樹木力学の視点においても、冠雪害に対する樹木の力学的な耐性は樹形に大きく関係することが示されているが、例えば樹形の地域的特徴や、着雪現象に伴う外力環境に対する樹木の適応、生立木の曲げ強度などの力学特性など、不明な点も多い。そのため、このような物理的側面から見たときの冠雪害の発生リスクの地域分布などは、十分な理解に至っていない。

気候変動に伴う降雪状況の変化が予想される中で、将来にわたって冠雪害のリスクに適応していくには、冠雪害の発生過程の解明や、その成果に基づいた被害対策などを、大幅に前進させることが急務であると考えられる。

引用文献

- 豪雪地帯林業技術開発協議会編（1984）雪に強い森林の育て方．日本林業調査会
- 石川政幸・新田隆三・勝田 榎・藤森隆郎（1987）冠雪

- 害一発生のおくみと回避法— 分かりやすい林業研究解説シリーズ. 財団法人林業科学技術振興所
- 嘉戸昭夫 (1991) 9 樹木の冠雪・着雪調査法. (雪氷調査法. 日本雪氷学会北海道支部編, 北海道大学図書刊行会). 121-126
- 嘉戸昭夫 (2001) スギ人工林における冠雪害抵抗性の推定とその応用に関する研究. 富山県林業技術センター研究報告 14: 1-77
- 勝島隆史・安達 聖・竹内由香里 (2018) 風洞装置を用いたスギの湿雪着雪成長の室内実験. 雪氷北信越 38: 27
- 勝島隆史・嘉戸昭夫・相浦英春・南光一樹・鈴木 覚・竹内由香里・村上茂樹 (2017) 気象条件に対する冠雪重量変化の解析とモデル開発. 第 128 回日本森林学会大会学術講演集. 218
- 小泉章夫 (1987) 生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究. 北海道大学農学部演習林研究報告 44(4): 1329-1415
- 公益社団法人日本雪氷学会編 (2014) 新版雪氷辞典. 古今書院
- 森岡 昇 (1984) 集運材用ワイヤーロープの支柱としての立木の強さ (Ⅲ) 横荷重による力のモーメントと幹の傾きの関係 - スギ小径木の場合. 日林誌 66(4): 160-163
- 長井真隆 (1982) 56 豪雪 (1980-1981 年) における屋敷林のスギ異常着雪害と気象条件. 富山市科学文化センター研究報告 4: 5-15
- 中谷 浩・嘉戸昭夫・平 英彰 (1986) 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究. 木材と技術 66: 1-6
- 中谷 浩・嘉戸昭夫・平 英彰・飯島康男・沢田 稔 (1984) スギ造林木の冠雪荷重による樹幹の変形と耐力. 木材学会誌 30(11): 886-893
- 新田隆三・大関義男・庭野昭二・松田正宏 (1986) 雪の物性からみた冠雪発達に及ぼす風速の効果. 97 回日本林学会大会発表論文集. 385-386
- Peltola H, Kellomäki S, Väisänen H and Ikonen V-P (1999) A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. Can. J. For. Res. 29: 647-661
- 坂本雄吉 (1978) 電線への着雪氷とその予測. 雪氷 40(2): 11-17
- 澤田 稔 (1983) 風および冠雪による針葉樹幹の変形— 円断面単テーパ片持ちばりとしての解析—. 林業試験場北海道支場研究資料. 128: 1-18
- 荘田幹夫 (1953) 着雪の研究. 雪氷の研究 1: 50-72
- 四手井綱英・高橋喜平・塩田 勇 (1950) 幼齡林の雪害 (昭和 21 年～ 22 年及昭和 22 年～ 23 年の調査より). 林業試験集報 58: 1-24
- 四手井綱英 (1954) 雪圧による林木の雪害. 林業試験場報告 73: 1-89
- Storck P, Lettenmaier D P and Bolton S M (2002) Measurement of snow interception and canopy effects on snow accumulation and melt in a mountainous maritime climate, Oregon, United States. Water Resour. Res. 38(11): 1223
- 高橋喜平・塩田 勇 (1952) 昭和 24 年 2 月 14 日山口県阿武郡川上村に発生したスギ造林地の風雪害調査報告. 林業試験集報 62: 1-36
- 高橋喜平 (1952) スギの冠雪に就いて. 冠雪の研究 (第 1 報). 林業試験場研究報告 54: 140-148
- 玉手三稜寿・榎山徳治・笹沼たつ・高橋亀久松 (1965) 立木引き倒し試験. 日林誌 47: 210-213
- 藤堂千景・山瀬敬太郎・谷川東子・大橋瑞江・池野英利・壇浦正子・平野恭弘 (2015) 間伐がスギの最大引き倒し抵抗モーメントにもたらす影響. 日緑工誌 41(2): 308-314
- 若浜五郎・小林俊一・対馬勝年・鈴木重尚・矢野勝俊 (1978) 電線着雪の風洞実験: 高風速下での着雪の成長. 低温科学物理編 A36: 169-190
- 若浜五郎・小林俊一・対馬勝年 (1979) 電線着雪実験用風洞. 低温科学物理編 A38: 183-187
- 若浜五郎 (1988) 着雪. (雪と氷の話. 木下誠一編著. 技報堂出版). 207-215

深い雪の中で形を変えて生きる低木広葉樹

松元 高峰 (まつもと たかね、新潟大学災害・復興科学研究所)

1. 雪国の急斜面に生える木々

東北地方日本海側や北陸などの山地では、冬になって急斜面に雪が厚く降り積もると、自らの重みのために積雪層全体が斜面に沿って少しずつ下方へ動こうとする。春が近づいて雪が融けていくにつれて、その動きは次第に速くなり、時には雪崩となって一気に斜面を流れ下る。こうした急斜面に生育する木々は、雪の重さだけでなく、雪の動きによって加わる大きな力にも耐えていかなくてはならない。

図-1に見えているのは、豪雪地帯として知られる新潟県魚沼市の、JR 大白川駅に近い川沿いの急斜面である。稜線上や尾根すじにはブナやミズナラなどの高木が見られるが、斜面上に生えているのは、ほとんどが直径15cm くらいまでのヤマモミジ、マンサク、リョウブ、タニウツギ、アブラチャンといった広葉樹の低木である。夏の間はこれら低木の葉で緑一色に見える(図-1A)この斜面が、冬になると積雪に完全に覆いつくされてしまい、木が生えていることすら分からないくらいになる(図-1B)。このあたりは、集落のあるところとしては日本でも有数の、というより世界でも有数の豪雪地で、平均的な冬ならば3m を超える深さの雪が積もる。しかも傾斜が40° 前後もあるため、この斜面では、「グライド」と呼ばれる積雪層全体の斜面に沿った動きが毎年のように発生し、多くの場合、それが雪崩(地表をすべり面として積雪層全体がすべり落ちる「全層雪崩」と呼ばれるタイプ)の発生につながっている(図-2)。

雪国の森林には、根に近いところで幹が斜面下方へ大きく曲がった「根曲がり」という樹形をもつ木があることはよく知られている。しかし図-1の斜面のように積雪の非常に多い急斜面では、樹高の成長が妨げられるとともに、樹形も「匍匐型」と呼ばれる形態をとるようになる。斜面上の木の状態(図-3)を見てみると、根に近いところでは斜面に沿ってはうように下向きに幹が伸び、途中からだんだんと上向きに曲がっているのが分かる。近くで観察すると、動く雪の圧力によって樹皮がはがされているといった痛々しい状況も目につく。多雪という環境に適応するのは、樹木にとってとてつもない試練だということだろう。とはいえ、これら急斜面上の低木広葉樹は、一方的に雪の圧力に痛めつけられているだけのみじめな存在ではない。雪に埋もれた低木は、その

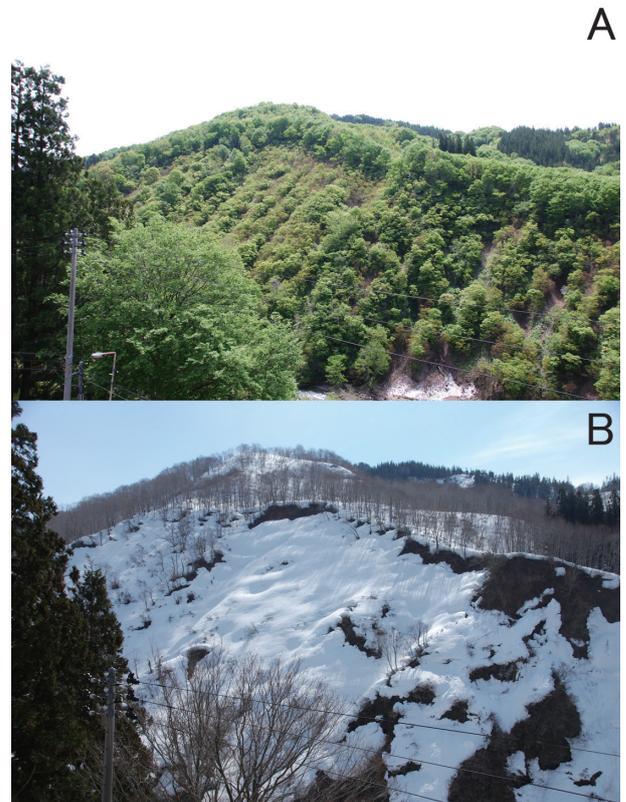


図-1 積雪のグライドや全層雪崩が頻発する、新潟県魚沼市大白川の急斜面。A は無雪期の状況(2017年5月17日)。B は積雪期の状況(2018年3月18日)。

形を変化させることで積雪層のグライドや全層雪崩の発生にも深く関わっているのだ。

積雪層のグライドの過程と、斜面に生えている植物との関係については、北海道大学や森林総合研究所におられた遠藤八十一さんたちが、北海道北部のチシマザサに覆われた斜面における観測や実験をもとに、初めて詳しい研究を行なった。(遠藤・秋田谷 1977)。その後、やはり森林総合研究所におられる山野井克己さんが、新潟県魚沼地方の各地で様々な観測を行ない、図-1と同じような斜面上の低木広葉樹が積雪の安定性に及ぼす効果について研究を進めた(山野井 2005 など)。

筆者は、同じ職場の河島克久さんが10年近く進めてきた、図-1の斜面での積雪グライド観測(Kawashima et al. 2016)や、そこで発生した全層雪崩の調査に参加するうちに、積雪内に埋まった木々の形の変化が、グライドの変化とどう対応しているのか知りたくなった。そこで、この斜面のすぐ近くにお住まいで山の木々にも



図-2 全層雪崩発生直後の斜面の状況(2015年2月6日)。雪崩が発生して載っていた積雪がなくなると、埋もれていた低木はすぐに元の形に戻る。

詳しい浅井隣一さんや、森林総合研究所の宮下彩奈さん、勝島隆史さん、そして日本大学の小田憲一さんたちの協力を得て、いろいろな現地調査を進めているところである。そこで明らかになってきた、低木の幹の傾斜の変化と積雪のグライドとの関係を、遠藤さんや山野井さんたちによって得られた知見を踏まえて、次に示すことにしよう。

2. 木はどのように雪に埋もれていくのか

図-4に示したのは、2017年から2018年にかけての冬における、大白川での積雪深、図-1の斜面上方に生えているヤマモミジ(a)の幹の傾斜(幹が鉛直上向きするときが 0° 、水平だったら 90° とする)、そしてその木よりやや下方における積雪のグライド量である。グライド量は、ワイヤをつけた金属製のソリを積雪の底近くに埋めこみ、雪とともにソリが動いてワイヤが伸びていくのを、稜線上に設置したセンサーで計測して得た値である。

冬を通した幹の傾斜変化をよく見てみると、その傾斜とグライドとの関係から、冬を6つの期間に分けることができそうである。まず冬のはじめのうちは、降雪があるたびに幹や枝に載ったりくっついたりする雪の重みによって幹が少し傾くことはあるが、雪が融けたり落ちたりすれば、また元の形(傾斜)に戻る、ということを繰り返している(図-4の期間A)。続いて、根雪になっ

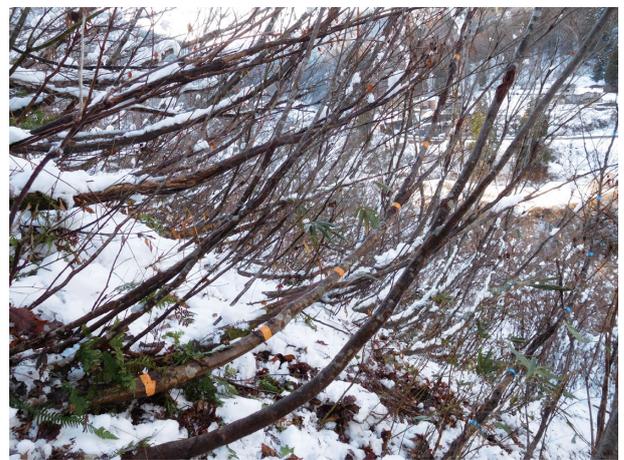


図-3 急斜面上に生育する低木広葉樹の無雪期における形状(2016年12月8日)。オレンジ色のテープでマーキングしてある木は、図-5で形状の変化を示しているヤマモミジ(b)。

て積雪が少しずつ増えていく期間(図-4の期間B)には、地表面に近い根元の方から幹がだんだんと雪に埋まっていく。上から雪の荷重がかかるので、幹は地表の方に押しつけられて、傾きがどんどん増していく(なお、期間Bの途中で傾斜の変化がゆっくりになるのは、傾斜計を取り付けた高さまで雪に埋もれたため、その部分が動きにくくなったからだと考えられる)。

ところで、幹は必ずしも下の方から順々に雪に埋まっていくとは限らない。降雪のあるときには、幹だけでな

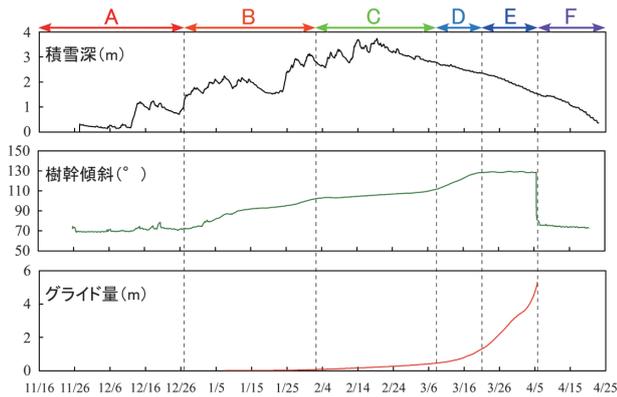


図-4 2017年から2018年にかけての冬における、大白川での積雪深、急斜面上部に生えているヤマモミジ (a) の幹の傾斜、急斜面上部での積雪グライド量の時間変化

く、かなり細い枝先の方にも雪が載ったりくっついたりする。とくに枝分かれしている部分などには雪がまとまって載りやすい。細い枝に雪が載ると、太い幹よりも大きく曲がって、木は途中から頭を下げたような形になる。そこへ雪がさらに降り積もると、幹の中ほどよりも先に、枝の先端部の方が雪に埋まってしまう。こうなるともう元の形には戻れなくなり、(雪のないときの形状とは逆に) 枝先を下にしたやや弓なりの形で、積雪の増加とともに木全体が埋まっていく。

そうして木全体が雪の中に埋もれてしまうと、それまでのように勢いよく幹が下向きに傾いていくことはなくなる。とはいえ、図-4の期間Cを見れば分かるように、わずかずつではあるが幹は傾き続けている。降ったばかりの時にはふわふわの新雪も、その上に次から次へと雪が積もってくると、上に積もった雪の重みを受け、しかも雪粒どうしは互にくっつき合おうとする性質があるため、ぐっと圧縮されて硬くなり、「しまり雪」と呼ばれる状態になる(とくに硬い「しまり雪」は、ちょうど乾燥して固まった白砂糖のような感じである)。積雪層自体が上から押しつぶされて圧縮していくので、その中に挟まっている木も、少しずつではあるが下向きに傾き続けるのだ。

傾斜計を取り付けたのは別のヤマモミジ (b) の幹にいくつかマークをつけて、2016年から2017年にかけての冬の間は何度が雪を掘っては、埋もれて傾いていく幹の形の変化を記録した結果を図-5に示す。このように、冬の半ばまでにかけて、斜面上の木は少しずつ傾いてその形を変えながら地表面に近づいていく。図-6は、全体が雪に埋もれた1月20日の状態を撮影したものであり、実は図-3に見えているテープがいくつも貼られた木が、この同じ木の雪のない時期(12月8日)における状態なのである。

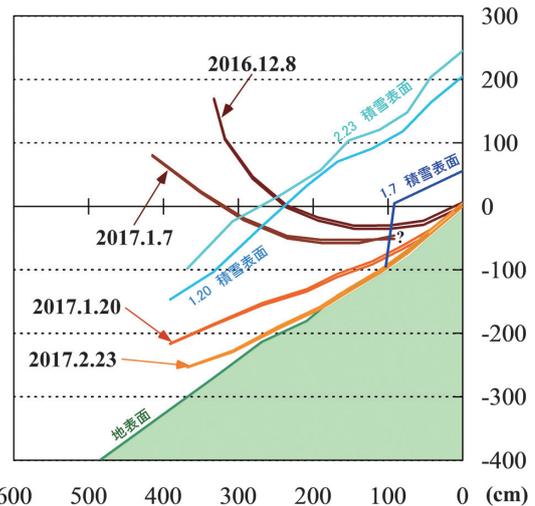


図-5 2016年から2017年にかけての冬における、急斜面上に生えているヤマモミジ (b) の幹の形状の変化

3. 積雪の動きと木の形との関係

冬も後半になると、暖かい日には雪が融けるようになってくる(しばしば誤解されているのだけれども、雪は基本的に地表面に接している底からではなく、大気と接している上から融けていくものである)。積雪の上面で生じた融け水は、スポンジのように雪粒とその隙間の空気とからなる積雪層の中を、ゆっくりと下方へしみ通っていく。「しまり雪」の雪粒は直径0.2~0.5mmと小さく、やや丸みを帯びた形をしているのだが、しみ通ってきた水に触れて雪粒が濡れると、大きめの雪粒がまわりの小さな雪粒を食って太るような形でより大きく丸くなり、直径数mmの(カップに入って売っているかき氷にちょっと似た感じの)「ざらめ雪」と呼ばれる状態になる。

この「ざらめ雪」は、接する雪粒どうしの結合が「しまり雪」の場合と比べると弱く、力が加わったときに変形しやすい。積雪層が地表と接する部分でも、埋まった木の幹や枝と接する部分でも雪はすべりやすくなり、積雪層全体が少しずつ下方に向かって動き始めることになる。図-4の観測を行なった冬の場合、3月上旬に、融け水が積雪の底面(=地表面)にまで達するようになったことが別の観測で分かっている、そのころを境に、グライドがぐっと増加してくるのが図-4から分かる。

ところで、冬の半ばまでに埋もれた木々は、積雪の中で枝を広げた状態になっている。その周りの雪が少しずつ斜面下方へ動いていくとどうなるだろうか。これを考えるには、箱にぎっちり詰まった雪の中に低木を埋めておいて、根の方を持って引き抜くところを想像してみるのがよい。引き抜いていくにつれて、竹ぼうきの先のように広がっていた枝は、束ねられたようにまとまって全

体として細くなることだろう。グライドで雪が動く場合にも同じようなことが起こると考えられている。雪の動きとともに埋もれていた木の枝は次第にまとまり、全体として地表面まで倒れこむのだ。前に挙げた山野井さんの研究によると、枝を広げて雪の中に斜めに埋もれている時に、積雪の動きに対する木の抵抗は最大となり、枝が束ねられて地表面まで倒れてしまうと抵抗はずっと小さくなる（山野井 2005）。すると積雪はさらに動きやすくなるから、グライドがさらに促進される、そういうことが図-4の期間Dにおいて続いていくのである。

3月下旬になると、埋もれた幹の傾斜は約 130° に達して、ついにほとんど変化しなくなる（図-4の期間E）。地表面の傾斜が水平に対して約 40° なので、これはこの木が地表面にまで完全に倒れたことを示している。図-7は同じような時期における積雪底部の様子を見た写真である。急斜面に細い幹や枝を下に向けて何も並べておき、その上に濡れて動きやすくなった積雪が載っているという状態になっている。こうなると幹や枝の上に載っている積雪はとてもすべりやすくなるので、グライドの速度は急激に大きくなる。そして斜面上の積雪が全体として下方へ動いていってしまうと、ほとんど動かない稜線近くの積雪との間に大きな割れ目ができる（図-7はそうした割れ目の中で撮ったものである）。さらにグライドが速くなって、1分間に1cmくらいのスピードで動くころになると（納口ほか 1986）、今度は斜面の下流側の、雪が安定してほとんど動いていない領



図-6 深い積雪に埋もれている図-5に示したヤマモミジ(b)の幹（2017年1月20日）



図-7 地表面まで完全に倒れ込んだ低木広葉樹の幹や枝の状況（2014年2月14日）

域との境目で積雪層の破壊が起こり、その上流側の雪が一気に崩れ落ちる。これが全層雪崩と呼ばれている現象である。図-4の冬の場合は、4月5日の16時ごろに、傾斜を測っていたヤマモミジ(a)やグライド計測のためのソリが埋まっていた部分の積雪が、全層雪崩となって流れ落ちた。それと同時に、いままで厚い積雪の底で地表面に押しつけられていた木々は、一気に立ち上がって元の形状に戻ったことが図-4から分かる。こうして雪の重みから解放された木々（図-2）は、ほどなくやってくる春の訪れを待つことになるのだ。

ところで、全く同じ斜面であっても、年によっては冬を通して木々の抵抗が大きいままでグライドが進まず、もちろん全層雪崩も発生しないということがある。2016年から2017年にかけての冬は、雪の降り方とその後の気象条件の関係で、ふつうならば全層が「ざらめ雪」に変化しているはずの4月になっても、積雪層の一部に「しまり雪」を含んだ部分が残っていた。しかもその部分に挟まっている幹や枝がかなり多かった。変形しにくい雪の層が残っていた上に、そこに斜めに埋もれたままの木がたくさんあったため、グライドはほとんど進まず、何と一冬を通して積雪はたったの数cmしか動かなかったのである。

4. おわりに

このように雪国の急斜面上に生育する樹木は、厚い積雪層と互いに作用し合いながら、冬を通してその形を変化させている。そして春になれば、すっかり元の形に戻って毎年同じように葉を開かせる、ようなのだが、しかし一緒に研究をしている宮下さんや勝島さんの調査によると、冬のはじめのころ、降り積もった雪の重みで幹や枝が大きく曲げられ、積雪内に埋まっていくような時には、大きな圧力によって、本来なら元の形に戻らなくなる程度にまで幹が著しく変形していることが分かってきた。

生きている樹木の力学的な特性については分からないことが多く、冬の間こんなに変形させられても、どうして春になるとすっかり元のとおりに戻っている（ように見える）のか、調べるべきことはまだまだたくさんある。

樹木にその動きを妨げられたり促進させられたりする積雪の方にも、分かっていないことは多い。全層雪崩の発生に至るまでの物理的な過程については、主につるつるの岩盤や土壌からなる地表の上を積雪層が動く状況を想定して、様々な研究が進められてきた。しかし図-7のように、地表に並べられた幹や枝の上に積雪が載っていると、状況はだいぶ複雑になりそうだ。幹や枝が積雪底面に及ぼす抵抗は、地表面の場合とどう違うのだろうか。また、地表に倒れた幹や枝が元の形に戻ろうとする力は雪崩の発生と関わっていないだろうか。

さらに、グライドや全層雪崩によって積雪が地表面上を動くとき、雪と一緒に地表の土壌が引きずられて削られることがよく起こる。そのため、グライドや全層雪崩の頻発する斜面では激しい侵食が起こることが知られている（小野寺 1979 など）。しかし、雪崩が発生した直後に図-1の斜面を見に行っても、地表の土壌が削られているところはほとんど見かけない。低木広葉樹に覆われた斜面では、グライドや全層雪崩の侵食する効果は、実は案外小さいのかもしれない。

雪を「白いパール」に例える表現があるけれども、形

を変えながら雪の動きに抗ったり促したりする低木広葉樹の生態とその意義は、白いパールに覆われてなかなかうかがい知ることができていない。春まだ遠し、といったところである。

引用文献

- 遠藤八十一・秋田谷英次（1977）笹地斜面における積雪のグライド機構 I. 低温科学 物理篇 35A: 91-104
- Kawashima K, Iyobe T, Matsumoto T (2016) Acceleration processes of snow glide prior to full-depth avalanche release on shrub slopes in the temperate heavy-snow region of Japan. International Snow Science Workshop 2016 Proceedings: 525-532
- 納口恭明・山田 稔・五十嵐高志（1986）全層なだれに至るグライドの加速のモデル. 国立防災科学技術センター研究報告 38: 169-180
- 小野寺弘道（1979）積雪地帯の山地浸食防止に関する基礎的研究. 北海道大学農学部演習林研究報告 36: 255-315
- 山野井克己（2005）豪雪山地の低木広葉樹林が斜面積雪の安定性に及ぼす効果. 寒地技術論文・報告集 21: 269-275

森林と雪と斜面変動の関係を探る

松浦 純生 (まつうら すみお、京都大学防災研究所)

はじめに

日本列島は環太平洋造山帯に位置することから、火山活動は活発で地震も多く、断層などの構造線が至る所に分布し、地質も極めて複雑な特徴をもつ。地形的にもみても平地は少なく、国土の約7割が低～中～高山性山地の斜面で構成されている。したがって、日本の山地斜面はぜい弱で侵食や崩壊、地すべりなどの斜面変動が発生しやすい。

これらの山地斜面は、高木が生育できない活火山体や高山地帯を除けば、ほとんどが多様な森林に覆われている。このため森林率も7割近くに達し、先進国の中でも有数の森林国となっている。一方、日本列島は東アジアモンスーン地帯に位置することから季節風の影響を強く受け、降水量が非常に多い。とりわけ、日本海側地方では冬期間に多量の雪が降るため、山間地では数mを越す雪が積もることも珍しくない。

このように、ぜい弱な日本の山地斜面のほとんどは森林に覆われるとともに、積雪地帯では毎年のように季節積雪層が形成される。したがって、森林状態や積雪環境の変化は斜面変動の発生や種類などに大きな影響を及ぼすことになる。例えば、森林状態は森林火災や風倒、さらに伐採などによって大きく変化する。降雪量も降雨量以上に年変動が大きく、寒冬多雪と暖冬少雪年では全く積雪環境が異なる。加えて、森林状態と積雪環境は相互に関係し、それらの結果として、積雪地帯での斜面変動を特徴づける。

本稿では、これまでの研究成果を参考にしながら積雪地帯における森林と雪と斜面変動の特徴的な関係について概説するとともに、将来の山地環境の変化と斜面変動の関係について考えてみたい。

雪の性質と斜面上の挙動

降水は液体である雨と固体である雪に大別できる。したがって、雪が積もると降水が積雪として一時的に地表に貯留されることになる。いわば「貯水タンク」が広く斜面上に置かれたのと同じことになる(図-1)。積雪は日射や気温などによって解け、タイミングと強度を変えながら融雪水として地表面に到達する。例えば、融雪期の3mの雪は約1,500mmの貯水量に相当する。この雪が約1.5ヶ月で解けるとすると毎日30mm以上の雨



図-1 積雪調査によって明らかとなった積雪水量と積雪荷重 (新潟県上越市安塚区)

が降るのと同じ結果となる。

一方、深く積もり堅く締まった雪はとても重い。融雪期に3～4mの雪が積もっていると1m²の面積に大型のミニバンが乗っているのと同じ荷重がかかっていると考えて良い。荷重に加えて積雪はせん断強度や圧縮強度などの力学的性質をもつ。したがって冬期間に深い雪が積もる山地斜面では、積雪がもつ様々な性質(表-1)が斜面地盤の変動に複雑な影響を与える。

積雪層の変形や移動特性も斜面侵食や崩壊に無視できない影響を与える。斜面上に堆積した積雪層は自重や新たに積もった雪によって圧密されるとともに、斜面下方にも変形する。両者を合わせて積雪のクリープという。さらに積雪層は斜面上をゆっくりと移動する性質があり、これをグライドと呼ぶ。つまり、速度の差はあるものの積雪層は変形し移動する特徴をもつ。当然のことながらグライド量は地表面の植生などに大きく依存するとともに、斜面の方位や融雪水の供給状況によっても変化する。

表-1 斜面変動に影響を及ぼす積雪層の諸特性
(◎はとくに強い影響を及ぼすと考えられる特性)

■物理的性質

◎質量(積雪(相当)水量としての)

◎質量(荷重としての)

◎断熱作用

■力学的性質

○せん断強度

○引張および圧縮強度

■熱的性質

○低温の融雪水の供給

○熱伝導率

■変形と移動特性

○クリープ

◎グライド

雪と森林が関係する侵食や崩壊・地すべり

雪食：雪食とは、雪氷圏で発生する侵食の総称を意味するが、このうち、グライドや雪崩によって発生する斜面表土層の侵食や剥離現象を、狭義の雪食と呼ぶ。

多雪地帯でブナなどの広葉樹林が成林している状態ではグライド量は大きくない。しかし、広範囲に樹木を伐採した場合、地表面の摩擦係数が低くなり、積雪層は下方に移動しようとする。一方、残された根系は徐々に腐朽し表土層と基岩をつなぎ止める抵抗力が低くなる。このような状態で伐株きりかぶに大きな斜面雪圧(クリープ+グライド)が作用すると、伐株が転倒・剥離し地表面が攪乱され、荒廃裸地が出現する(相浦ら 1998)(図-2)。

また、グライドなどによって斜面下部で圧縮じわが生じ、積雪層内に褶曲構造しゅうきよくが発達すると、積雪層内に取り込まれた灌木などが地下部ごと剥ぎ取られ、窪地などが形成されることがある。このように、雪食は森林状態の変化と積雪の変形・移動特性が密接に関係して発生する。

土砂雪崩：雪崩は大きく分けて2つのタイプがある。すなわち、積雪層内に存在する弱層で崩壊する表層雪崩と、地表面付近を境界として発生する全層雪崩である。一般に、全層雪崩は地表面での緩慢な積雪層のグライドの結果として発生するが、全層雪崩の崩壊面は融雪水などによって飽和した積雪層底面、積雪層と地表面の境界、あるいは飽和した表土層に形成される3つの形態があると考えられる。このうち、表土層内で崩壊を起こした場合、雪と土砂が混在したいわゆる土砂雪崩となる(図-3)。中越地震の翌年の平成17(2005)年は豪雪年となり、新潟県の中山間地で融雪期に土砂を巻き込んだ土



図-2 積雪層の移動・変形と伐採跡地に出現した雪食
(左：グライドとクリープによって大きく変形した積雪層、右：広葉樹の伐採跡地に出現した雪食)



図-3 表土層を巻き込んだ全層(土砂)雪崩(新潟県上越市伏野桑木平地区)

砂雪崩が多発した(鈴木ら 2007)。

全層雪崩はきわめて破壊力が大きく、時には胸高直径が数10cmの大径木も幹折れする。このため、雪崩の走区(流走域)にある植生を巻き込んで樹木が根返りを起こすと、雪崩の通過によって斜面表層が激しく侵食され、樹木なども巻き込んだ土砂雪崩となることもある。

地すべり：前述のように、積雪層は一時的に降水を貯留するタンクとなる。このため、貯留される量が多くなればなるほど、長期間にわたり融雪水が地表面に流出することになる。これは長雨と同じような条件となり、地表面から浸透した融雪水などが地下深くまで到達し、地下水の圧力を上昇させることになる。その結果、深い箇所には軟弱な粘土層などもつ箇所では、すべり面のせん断抵抗力が低下し、地すべりが発生することになる(図-4)。

風食：冬期間の気温が低く、風が強い地域では風食と呼ばれる侵食現象が発生することがある。発生場は風衝地が多く、多くは森林がない。一般に森林が成立すると林内は気温の変化が小さくなり風も弱まるなど、気候を緩



図-4 融雪期初期に発生した大規模地すべり（新潟県上越市国川地区、新潟県砂防課提供）

和する働きがある。さらに、継続的に強風が吹くような箇所では林内に雪を捕捉するなど、貯雪機能もある（武田 2001）。積雪層は空隙に富んでいることから断熱効果が非常に高く、地表面は寒暖の差を受けにくくなる。

ところが、森林が伐採されると地表面が直接、寒冷な気温にさらされる。しかも風が強いと軽い雪は吹き飛ばされ、剥き出しとなった風衝地では凍上という現象が発生する。これは、土に含まれている水分が凍結すると体積が膨張し、土粒子を上方に持ち上げる現象で、その際、土の構造は破壊される。そこに強い風が吹くとバラバラになった土が吹き飛ばされ、荒廃地が出現してしまう。一旦、荒廃地ができると内部の砂礫などが強風で飛ばされ、縁端部をさらに侵食し、荒廃地が拡大する（図-5）。このように、少雪寒冷地で常に強風が吹く地域では森林と雪と風食に深い関係がある（小疇ら 1988）。

温暖化の影響

気象庁では、大気圏をある大きさの格子に分割し、物理的な法則にしたがって大気の循環を計算し、さまざまな改良を加えながら中・長期の日本の気候を予測している。

最新の予測結果によると、降雪量は北海道を除く地域で減少し、とくに日本海側での減少が大きい（図-6）。この理由として、東北以南では温暖化に伴って雪ではなく雨として降る場合が増えることや、大気循環そのもの



図-5 少雪寒冷地の森林伐採跡地に出現した風食荒廃地（岩手県盛岡市早坂高原地区）

が現在と大きく変化することによる（気象庁 2017）。一方、北海道の内陸およびオホーツク海側では温暖化が進行しても十分に寒冷なため、大気中の水蒸気量の増加とともに降雪量が増加する（Brown and Mote 2009）。

温暖化の進行過程では、降雪量だけでなく降雪強度の変動も大きくなると予想される。つまり、多雪と少雪の差が大きくなるとともに、一冬の間でも最高気温と最低気温の差が拡大するといった、気象現象の振れが大きくなるのが指摘されている（Kawase *et al.* 2016）。

現時点では温暖化とどのような関係があるかは不明なもの、平成 17（2005）年とその翌年の冬は 2 年連続して大雪だったのに対し、平成 19（2007）年は記録

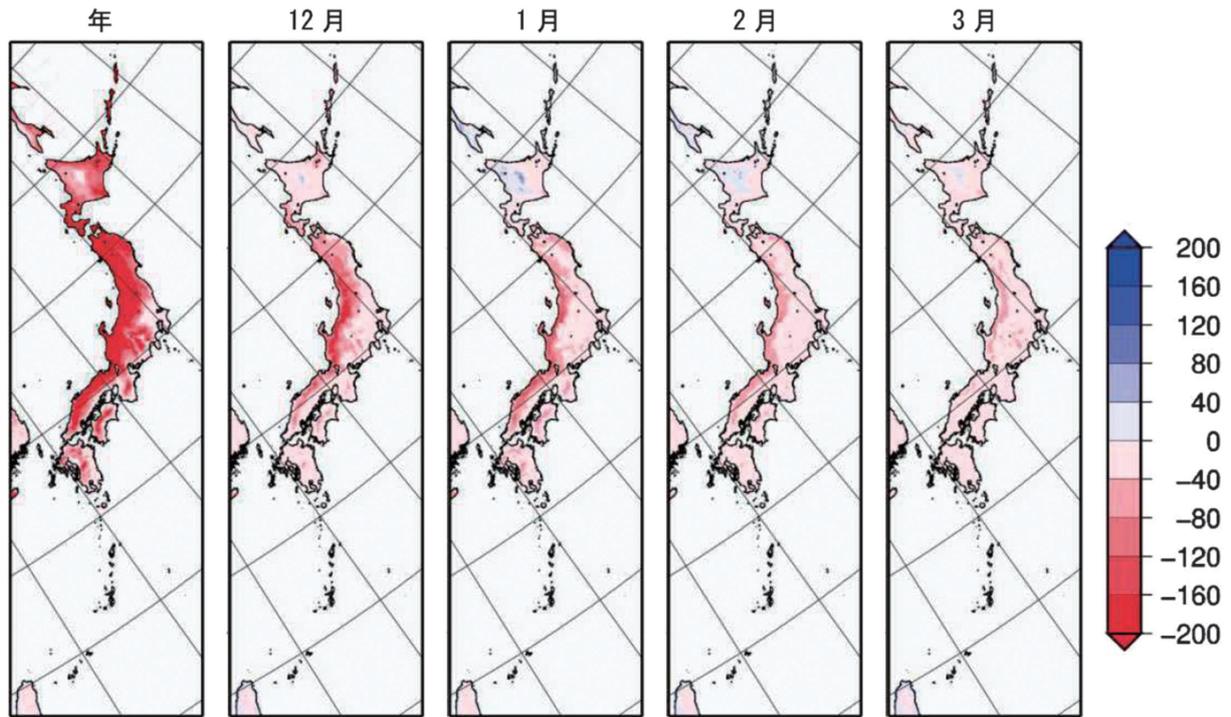


図-6 年および月降雪量の将来気候と現在気候の差 (単位 cm、気象庁 2017)

的な少雪となった。その際、平年並の冬では発生事例がほとんどない最寒期の2月に大規模な地すべりが発生した(図-7)。

斜面変動の形態は地表面に到達する水量の強度特性や総量などに強く依存する。つまり、土石流や表層崩壊などは短時間強度の大きい降雨によって発生しやすく、規模が大きな深層崩壊や地すべりは継続時間が長い降雨や融雪水によってもたらされることが多い。したがって、気候変動によって、降雪や融雪の強度やタイミングが変化すると、地盤災害の種類や形態、さらに発生危険度や発生分布などに大きな影響を与えると推測される。つまり、今まで斜面変動の発生危険度が低かった地域でも崩壊や地すべりの危険度が高まるといったことや、同じ崩壊が発生するにしても表層から深層へと規模が変化することなどが考えられる。

降雨の場合、直接、地表面に到達することから斜面変動に対する予知や予測は比較的容易となる。しかし降雪の場合、降水は地表面に一旦積雪層として貯留され、日射や気温などの要因により、タイミングと強度を変えながら地表面に流出するため、降雨と異なり斜面変動の予測が難しい。日本海側地方は世界でも有数の多雪地帯となっているが、同時に温帯に属していることから温暖化の影響を敏感に受けるとされる。

つまり、微妙な気温の変化によって冬期間の降水が液体の雨になったり固体である雪になることで、積雪環境が大きく変化すると予想される。積雪量や積雪期間など



図-7 暖冬少雪年の最寒期に発生した地すべり (福島県金山町小栗山地区、福島県提供)

の積雪環境が変わると、地表面に到達する水のタイミングと強度も大きく変動する (Matsuura *et al.* 2013)。温暖化によって少雪傾向が続くと、最寒期でも積雪層から活発に融雪水が供給されることに加え、雪に代わって雨が降ることにより、さらに斜面変動発生危険度が高まるとされる (岡本ら 2010)。このように、温暖化は土砂災害の形態のみならず、斜面変動発生危険度の高まる時期も大きく変化させると考えられる。

おわりに

基岩層と薄い表土層からなる日本の山地斜面には森林

が成立し、積雪地帯では冬期間に雪が積もる。森林と雪の性質は全く異なるが、相互に関与し、その状態の変化は斜面変動に密接に関係する。

雪と関係する森林の状態変化は、人為によるところが大きい。長い期間にわたって培ってきた森林と積雪の微妙なバランスは森林伐採などによって崩れ、雪食や風食などの斜面変動となることがある。一方、積雪環境の変化は毎年のように起こり、その振れ幅は降雨環境よりも大きい。さらに温暖化が進行すると、現在よりも積雪環境が大きく変化すると予測される。

雪と森林と侵食や崩壊、地すべりなどの斜面変動に関する研究は、雨と森林と斜面変動の研究ほど多くはない。これは、雨と比較して降雪量の観測が難しく、さらに積雪分布や融雪予測などにさまざまな困難があるためと考えられる。したがって、これらの基礎的な研究を一層進めることはもちろんのこと、既往の研究成果や最新の成果をもとに、将来の気候変動予測データなどを用いた「外挿的」予測研究を進めていく必要がある。

参 考 文 献

相浦英春・嘉戸昭夫・長谷川幹夫（1998）多雪山地におけるブナ林皆伐後の伐根の転倒にともなう表層崩壊の発生. 日林誌 78: 150-156
Brown RD, Mote P (2009) The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing

climate. Journal of Climate 22: 2124-2145

Kawase H, Murata A, Mizuta R, Sasaki H, Nosaka M, Ishii M, Takayabu I (2016) Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations. Climate Change 139: 265-278

気象庁（2017）地球温暖化予測情報 第9巻 - IPCCのRCP8.5シナリオを用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測-. 79p.

小嶋 尚・澤口晋一（1988）人為がまねいた氷期の景観—北上山地の荒廃裸地—. 科学 58: 548-556

Matsuura S, Okamoto T, Asano S, Matsuyama K (2013) Characteristics of meltwater and/or rainfall regime in a snowy region and its effect on sediment-related disasters. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 72(1): 119-129

岡本 隆・松浦純生（2010）2007年福島県金山町で厳冬期に発生した融雪地すべり災害. 水利科学 315: 79-91

鈴木正一・和泉 薫・河島克久・上石 勲（2007）土砂を伴った全層雪崩の発生機構に関する研究（1）. 雪氷北信越 27: 44

武田 宏（2001）針広帯状森林における貯雪・融雪遅延効果の検討新潟県森林研究所研究報告（43）: 17-20



樹木病原菌(菌類)が森林を食べる

佐橋 憲生 (さし のりお、森林総合研究所)



はじめに

森林の中にはその主要な構成者である樹木のほかにも下層植生を構成する様々な植物、ダニや昆虫、哺乳類などの動物、かびやきのこに代表される菌類や細菌等の微生物など様々な生物が生息し、それらが相互に影響を及ぼしながら、生態系という極めて精緻なシステムを構築しています(図-1)。

樹木に様々な病気を引き起こし、木材の生産を阻害する厄介者である病原菌(多くは菌類)も森林生態系の構成者として重要な役割を担っており、それらの働きが無ければ、森林が健全に維持されることは不可能です。

生体分解者としての樹木病原菌

私たちは、普段あまり意識しないで、樹木を見ている場合が大半ですが、注意深く観察すると、葉に茶褐色の斑点ができていたり、枝の一部が枯れて落葉してしまったりしているのに気がつきます。これは樹木が病気にかかっている目印です(図-2)。私たちは知らず知らずのうちに樹木の病気を目にしているのです。樹木病原菌は、場合によっては、多数の樹木を短期間のうちに枯死させることもあります(例えばニレ類立枯病やクリ胴枯病)。葉などに斑点ができたり、枝が枯れたりするのは、樹木病原菌が寄生し、そこから栄養を摂取しながら、組織に

大きなダメージを与えるためです。これらの病原菌は、いわば樹木が生きているうちから、その一部を食べて生活していると言っても過言ではありません(生体分解者)。

木材腐朽菌が樹木を食べる

サルノコシカケと総称される堅いきのこの仲間やシイタケ、ナメコ、ブナシメジなど普通の食卓でおなじみの食用きのこが、枯れ木や倒木などを分解していることは意外と知られていません(図-3、図-4)。この仲間には、枯れ木や倒木だけではなく生きている樹木の材部を腐らせて、分解しているものもあり、木材腐朽菌と総称されています。また、外からはうかがい知れない内部の材を知らず知らずのうちに腐朽させ、物理的強度を低下させるため、台風などで折れたり倒れたりしやすくなっており、非常に危険でもあります。林業の現場では、用材として利用する部分に、変色を起こしたり腐らせたりするので、非常に重要な病原菌として認識されています。

森の中を想像してみてください。多くの人がイメージするように、様々な樹木が生育している一方で、林床に目をやると、沢山の落ち葉や枯れ枝が降り積もっています。また時には、大きな枯れ木が倒れていたりします。森林

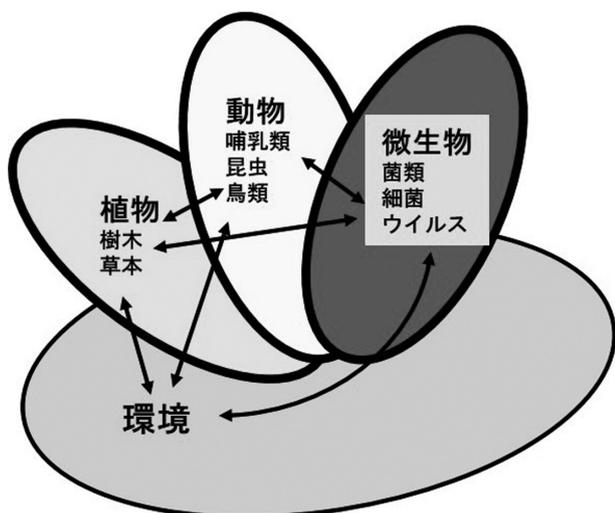


図-1 森林生態系を構成する生物



図-2 樹木病原菌が樹木を食べる
左：アオキ褐斑病による葉の斑点、右：スギ黒点枝枯病による針葉の被害



図-3 木材腐朽菌が樹木を食べる—倒木上に発生したタモギタケ

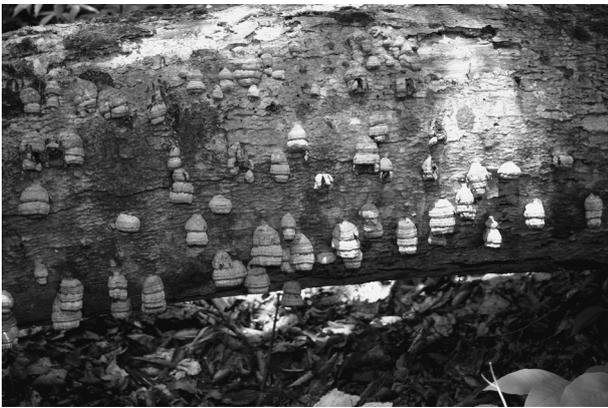


図-4 木材腐朽菌が樹木を食べる—倒木上に発生したツリガネタケ



図-5 幹折れによってできたギャップ—木材腐朽菌の働きにより材の物理的強度が低下し、折れたり倒れたりし易くなる。木材腐朽菌はギャップメーカーとしても機能している。

はいわば木質廃棄物の宝庫と言えます。もし、菌類がいなかったら、なかでも、セルロースやリグニンなどの難分解性である有機物を利用することができる木材腐朽菌がいなかったらどうなるのでしょうか？枯れ枝や落ち葉、

倒木などはいつまでも分解されないまま林床を埋め尽くし、どこもかしこも枯れ木の山、炭素や窒素はこれら木質遺体の中に閉じ込められたまま循環せず、またエネルギーの移動も起こらないことになってしまいます。すなわち、菌類が木質有機物を食べることによって、森林が枯れ木の山になるのを防いでいるといえます。この作用によって炭素や窒素は循環し、エネルギーの移動も起こるというからくりです。

余談ですが、木材腐朽菌によって大きな木が倒れ、林冠に穴(林冠ギャップ)があくと、光環境などが大きく改善され、多くの実生苗や稚樹にとって好適な成育場所になります(図-5)。また、倒れた樹木は様々な生物に生息場所を提供することになります。木材腐朽菌は、このように森林内の木質有機物を食べて、物質循環に大きく寄与しているだけでなく、様々な生き物に間接的に生息場所を提供するなど、生物多様性創出のドライバー(原動力)ともなっているのです。

終わりに

樹木病原菌といえば樹木の葉に斑点を形成したり、枯らしたりするという「悪者」のイメージです。しかし上で説明したように、森林生態系の中では様々な機能的役割を果たしており、大きさに言えば、これらのグループがいないと森林生態系は全体としてうまく機能しません。ここでは、木材腐朽菌を含む樹木病原菌を取り上げ、これらが樹木や森林を食べており、生態系内の物質循環に大きく関わっていることを紹介しました。樹木病原菌は本来、肉眼では見ることはできませんが、興味を持って森林内を見渡してみると、これらの活動の痕跡(例えば病気や倒木上に発生した腐朽菌のきのこ)を見いだすことができます。このような豆知識が少しあるだけで、これまでとは違った森林の楽しみ方が出来るのではないのでしょうか。

もっと知りたい方に薦める本

- 1) 升屋勇人編(2018)森林と菌類. 森林科学シリーズ⑩. 共立出版
- 2) 佐橋憲生(2004)菌類の森. 日本の森林/多様性の生物学シリーズ②. 東海大学出版会
- 3) 二井一禎・肘井直樹編著(2000)森林微生物生態学. 朝倉書店

カンボジアのコミュニティフォレストリー ：森の恵みと人々の暮らし

御田 成顕 (おんだ なりあき、九州大学持続可能な社会のための決断科学センター)

はじめに

博士課程教育リーディングプログラム「九州大学持続可能な社会を拓く決断科学大学院プログラム」では、問題解決型人材の育成を目的とした教育活動の一貫として、カンボジアのコミュニティフォレストで持続的森林管理について学ぶ実習を2014年から毎年実施しています。

インドシナ半島南部に位置するカンボジアは、熱帯モンスーン気候に属し、乾季(11月～4月)と雨季(5月～10月)に分かれます。日本の半分程度の国土面積(約18万km²)に約1,630万人が暮らしています¹⁾。世界文化遺産に登録されたアンコール遺跡群からは、9～15世紀に栄華を誇ったアンコール王朝の繁栄がうかがえます。カンボジアの中央には東南アジア最大の湖であるトンレサップ湖が横たわっています。トンレサップ湖は雨季になると乾季の6倍に広がるといわれ、穀倉地帯に水を供給するとともに、豊富な水産資源は貴重なタンパク源となっています。

オソアム・コミュニティフォレストと人々の暮らし

カンボジアは1970年代には国土の70%が森林に覆われていました²⁾。しかし、農地への転換などに伴い、2015年には54%まで森林が減少しています³⁾。熱帯地域の多くの国々で地域住民の参加によるボトムアップ型の森林管理である住民参加型森林管理の導入が進められるなかで、カンボジアにおいても1994年から地域住民に管理を委ねるコミュニティフォレストリーの導入が始められ、2016年時点で610ヶ所、約50万haが設置されています⁴⁾。

オソアム・コミュニティフォレスト(以下、オソアムCF)は、カンボジア中部のコンポントム州に位置し、首都プノンペンから車で4時間ほど北上して到着します。2004年に設定され、ゴムやカシューナッツ農園、住民の田畑に囲まれた304haの森林がオソアムCFに隣接する村の住民によって管理されています(図-1)。

オソアムCFでは、ローズウッドの近縁種で、床柱や家具に使用できるビルマカリン(*Pterocarpus*

macrocarpus Kurz)のほか、メラワン(*Hopea odorata*)、セプチール(*Sindora cochinchinensis* H. Baill)、ヤシ(*Calamus* sp.)、およびアカシア(*Acacia auriculiformis* Muell)などが、カンボジア林業局や環境NGOの支援を受けて植栽されてきました⁵⁾。住民はビルマカリンが成長し、将来子供たちが家を建てる時に使える日がくることを楽しみにしています。2017年を最後に環境NGOからの支援はなくなり、植林や保育の持続性が心配されることから、私達は定期的に現地を訪問し、植林木の計測といった技術支援を行っています。オソアムCFには苗畑が設置され、住民が苗木を育て、コミュニティフォレストに植栽するとともに近隣に販売もしています(図-2)。また、樹木だけでなく、パイナップルのアグロフォレストリーも試行されていました(図-3)。

オソアムCFは多くの森の恵みを住民に提供していません。販売目的の薪の採取や建材などの木材利用のための伐採は禁止されていますが、日々の生活に必要な薪や豊富な非木材林産物(NTFPs: Non Timber Forest Products)が採取されています。私たちは2018年から2019年にかけて、オソアムCFの周辺に居住する人々に聞き取り調査を行いました。その結果、最も多くの住民が採取していたのはキノコでした。そして果実や山菜、CF内部を流れる川で取れる魚といった食べるためのNTFPsが採取されていました。ラタンもカゴやザル(図-4)を作るためだけではなく、食用としても利用されていました。一方、住民のほとんどは日常の煮炊きに薪を使用していますが、オソアムCFで薪を採取する住民は多くありませんでした。その理由は、住居近くの叢林や、自らが雇用されているゴムプランテーションやカシューナッツ農園で入手しているためでした。

コミュニティフォレストの課題

オソアムCFでは、住民が定期的に森に入り、様々なNTFPsを採取しつつ、何か問題を発見した際は村内に事務所を構えるカンボジア林業局の担当者へ報告するという対応が取られ、森林保全に注意が払われていました。

一方、オソアム CF の東側に隣接するコミュニティフォレストではカシューナッツが植えられ、森林の減少が進んでいました。また、さらに北に位置するコミュニティフォレストでは、住民は農地として利用することを選好し、コミュニティフォレスト内の土地が住民に割り当てられ、畑地やカシューナッツへの転換が進んでいる事例も見られました（図-5）。

このように、コミュニティフォレストリーは森林保全と住民の生計向上との両立が期待されていますが、その状況はさまざまで、コミュニティフォレストリーが成功する条件がどのようなものはまだ明らかにされていません。そのため、今後も研究を進めることが求められています。

引用文献

- 1) 外務省 (2018) カンボジア王国 <https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/cambodia/index.html> (2019年11月27日確認)
- 2) 海外林業コンサルタント協会(2013)カンボジア王国. (2013年版開発途上国の森林・林業). 53-61
- 3) FAO (2017) The global forest resource assessment 2015.
- 4) Forest Administration of Cambodia (2018) Community forestry statistic in Cambodia, 2017. (クメール語)
- 5) Lonn P (2014) Community forestry for sustainable forest management and livelihoods: a case study of Osoam Community Forest users group. Cambodia Dev Rev 18(3): 1-9



図-2 オソアム CF の苗畑



図-3 オソアム CF でのアグロフォレストリー



図-4 住民が作成したラタンのカゴ

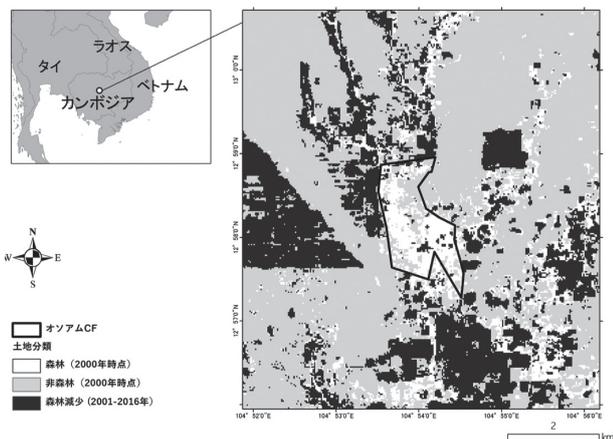


図-1 オソアム CF とその周辺の森林被覆の変化



図-5 カシューナッツに転換された CF

林業遺産紀行 第16回



進徳の森と中村弥六の関連資料群

小山 泰弘 (こやま やすひろ、長野県林業総合センター)

中村弥六とは

中村弥六(写真-1)は、高遠藩の藩校である進徳館師範の四男として、1854(安政元)年に、現在の長野県伊那市高遠に生まれた。16歳で上京しドイツ語を学んだのち、1878(明治11)年に内務省地理局山林課に勤め、ドイツ林学の書籍を翻訳したことがきっかけとなって、林学を学ぶ必要性を感じ、ドイツへの留学を決意した。翌1879年に私費を投じてドイツへ渡り、1882年にミュンヘン大学で学位を取得して帰国した。帰国後は、東京山林学校の教授として、林政や測量、林業経営などの分野を教え、日本の林学教育に先鞭をつけたのち、政界へと進出する。1890(明治23)年から1911(明治44)年まで衆議院議員として活躍し、1897(明治30)年に公布された森林法の制定に携わるなど、林政専門の政治家として活躍した。こうした功績から、1899(明治32)年に本多静六や川瀬善太郎らとともに日本初の林学博士の称号を授与され、近代林学の父とも呼ばれている。

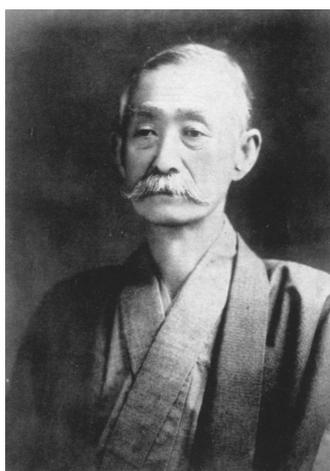


写真-1 中村弥六
(『林業回顧録』より転載)

中村弥六に関しては、政治家時代に外交問題に発展する事件を起こしたことなどから、事件後は多くを語らず、林業関係の史料は少なく、最晩年に聞き書きを整理した『林業回顧録』(中村1930)くらいしか残されていない。

「進徳の森」の歴史

林業遺産に認定された「進徳の森」は、長野県伊那市高遠にある峰山寺の南東斜面に広がる0.4haの森である。峰山寺は中村家の菩提寺であり、「進徳の森」は、中村家代々の墓所を取り囲むように成立している。現在は、伊那市有林となっている進徳の森であるが、そもそ

もは、1911(明治44)年の大雨で崩壊した墓所裏山の復興を目的として、中村弥六が私財を投じて土地を購入したものとされている。土地購入後の大正初期に当時は珍しかった外国産樹種を植栽し、外国産樹種の見本林とした。中村弥六が1929(昭和4)年にこの世を去っ



写真-2 1997年当時の「進徳の森」

た後も遺族が管理を続けていたが、33回忌を迎えた1960(昭和35)年に遺族から高遠町へ寄贈された。この際に、藩校の進徳館にちなんで「進徳の森」と命名され、現在に至っている。

しかしながら、植栽時を含め、この森に関する記録は少なく、1997(平成9)年に部分的な調査が行われただけである(小山1997)。この調査時に、樹高35mに達するユリノキが2本確認されるなど(写真-2)、外国産樹種の森がきちんと残されていることが確認され、現在に至っている。

現在の「進徳の森」

「進徳の森」は、2017年度の林業遺産に認定され、地域での関心が高まった。そこで、認定後の2018年に長野県と伊那市が共同で、全域の調査を実施した(写真-3)。その結果、「進徳の森」として伊那市が管理する0.4haの範囲に樹高2m以上の立木が148本あり、中村弥六が導入したとされる外国産樹種は8種類49本が確認できた(小山2019)。外国産樹種は、全域には認められず、崩壊した痕跡がある斜面を含む区域の下部にまとまって残っており、国内自生種は、斜面下部の崩壊を逃れたとみられる区域、および斜面上部に多かった。

なお、外国産樹種に比べ、国内自生種は樹高も直径も小さな個体が大半で、国内自生種は外国産樹種の造成後に発生したものが大半を占めていた。このことから、中村弥六が外国産樹種の見本林とした区域は、進徳の森の全域ではなく、崩壊痕跡がある斜面を含む区域の下部だったと言える。

なお、今回の調査では1997年の調査で確認されていたヨーロッパヤマナラシが見つからず（小山1997）、枯死したヨーロッパトウヒもあった（小山2019）が、周囲に生育する他の外国樹種との競争に負けたと判断でき、大正初期に整備した姿は、現在も維持されていた。



写真-3 現在の「進徳の森」

「進徳の森」を巡る話題

アカマツやコナラを中心とした二次林が広がる周りの環境に比べて、ヨーロッパトウヒやヒマラヤスギなどの外国産樹種に囲まれた「進徳の森」の空間は非常に異質な感じがする。

中村弥六が、山地崩壊防止を目的にしているにもかかわらず、今から100年も前にわざわざ国立林業試験場から外国産樹種を取り寄せて見本林として植栽した理由は、記録がないので定かではない。しかし、想像するに、この時代の森林は燃料用として需要が高かったため、境界があいまいになれば違法に伐採されるトラブルも多かった。せっかく植えた木が伐採されて、山地崩壊を引き起こす可能性を避けるために、あえて外国産樹種を見本林として植えることで境界を明らかに残したのかもしれない。実際、「進徳の森」では、ヒマラヤスギやヨーロッパトウヒなど見た目が明らかに異なる樹種が境界付近に植えられている。

このような植栽方法は、保安林制度と盗伐などの犯罪行為を取り締まることが中心だった明治30年の森林法制定に中村弥六が携わったことにも無関係ではないと考える。

おわりに

2018（平成30）年5月の林業遺産認定を受け、現地では散策歩道が整備され、古くなっていた案内板も建て替えられ、以前よりも見学しやすくなった。また、高遠城下にある高遠町図書館には、中村弥六がミュンヘン大学に提出した「特に重要な日本産針葉樹材の解剖学的構造について」と訳される学位論文（複写及び和訳）をはじめとする関係資料が保管され、閲覧することも可能である（写真-4）。また、林業遺産の認定を期に、まち歩きイベントや学校の授業で進徳の森を訪れる事例も増えている。さらに、町内に眠っていた、1920（大正9）年に中村弥六が裏書きをした写真が、遺産認定をきっかけに図書館に寄贈されたこともあり、少しずつではあるが地域への波及効果も認められている。

進徳の森も高遠町図書館も、タカトオコヒガンザクラで知られる高遠城址公園からほど近い場所にあり、高遠藩の面影が残る町の一角に位置している。



写真-4 高遠町図書館に展示されている関連資料

高遠の林業遺産めぐりは、まち歩きを楽しみながら中村弥六の足跡をたどる旅も興味深い散策になると思われる。高遠町を歩く際は、無料公開されているスマートフォンアプリ「高遠ぶらり」をダウンロードしておくこと、古地図と現在が比較でき、観光ガイドにもなるのでお勧めする。

引用文献

- 中村弥六（1930）林業回顧録。大日本山林会
- 小山泰弘（1997）大正生まれの外国産樹種の森。長野県林業総合センター技術情報 96: 1-3
- 小山泰弘（2019）中村弥六が整備した「進徳の森」に関する考察。中部森林研究 67: 53-56

荒廃竹林を栽培林へ復元するための 積雪地に適した手法

古澤 優佳 (ふるさわ ゆか、山形県森林研究研修センター)

はじめに

国内のモウソウチクタケノコ（以下、タケノコとする）生産は、関西以南の地域が中心であり、東北地域はわずか2パーセント弱と非常に少ないものの、山形県における平成30年のタケノコ生産量は東北で最も多く（農林水産省2019）、春季の重要な農林業資源、観光資源として利用されています。

県内でも生産の中心となっている庄内地域では、消費者の安全・安心意識の高まりなどを背景に、近年地元産タケノコの需要が増加しており、供給が不足する傾向にある一方、生産者の高齢化などにより管理が行き届かず荒廃する竹林もみられるようになってきました。

このため、地元生産者・団体から、それら荒廃竹林を管理可能な生産者が借りて生産する、あるいは、グループを作って管理を行いグリーンツーリズムに活用するなどを想定し、栽培可能な状態に復元する手法を明らかにしてほしいとの要望があり、実証試験を行い、マニュアルを作成したので紹介します。

3つの手法による伐採試験と復元状況の調査

地元タケノコ生産団体の御協力を得て、山形県鶴岡市内の3箇所の荒廃竹林を試験地として借用し、それぞれ別の手法で伐採の実証試験を行いました。

栽培林として本県で推奨している親竹の密度が150～350本/10aであるのに対し、伐採前の各試験地の親竹密度は、10a当たりそれぞれ(a)840本、(b)2,000本、(c)3,900本と高い状態でした。試験地のうち(a)を単木的に伐採する稈（茎の部分）と残す稈を決めて行う「抜伐り伐採」、(b)を全ての稈を一度に伐採する「皆伐」、(c)を斜面方向に平行に帯状に2列の伐採区域を入れ、後に保残した列を追加で伐採する「列状伐採」としました（図-1）。抜伐り及び皆伐は2011年に実施し、列状間伐は初期の伐採（2列）を2011年、保残列の追加伐採を2013年に実施しました。

伐採翌年の2012年から5年間、毎年5月～6月にかけて復元状況を調査しました。調査項目は、新竹の発生本数および発生した稈の胸高直径としました。

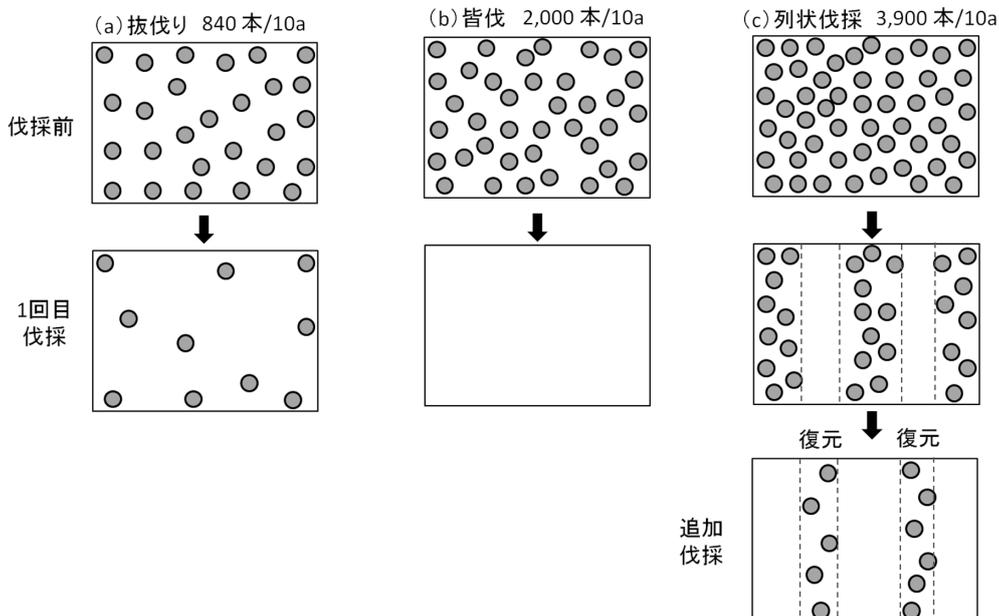


図-1 伐採実証試験の実施方法（イメージ）

新竹の発生本数の経過を図-2に、発生した稈の胸高直径を図-3に示します。

抜伐り試験区では、新竹の発生本数が他の試験区と比較して非常に少なく、毎年10aあたり30本程度となりました(図-2)。平均胸高直径は1年後から6cmと本県の一般的な竹林にみられる程度の太さで、年度を追うごとに増加し5年後には8cmとなりました(図-3)。

皆伐試験区では、新竹の発生本数は5年間を通じて非常に多く、特に伐採後2年目は10aあたり約230本となりました(図-2)。平均胸高直径は、伐採から1、2年目は3~4cmと細い稈が目立ちました(図-3)。これは、一度に全ての稈を伐採したため林分がダメージを受けた可能性が高いと考えられます。3年目以降は太い幹が発生するようになり、5年目には約8cmの稈が発生するようになりました(図-3)。

列状伐採試験区では、1年目は新竹の発生が多かったものの、徐々に増加しました(図-2)。2年目と3年目の間に保残した列の追加伐採を行いました。発生本数には影響がないと示唆される結果が得られました(図-2)。平均胸高直径は伐採翌年から7cm以上と太い稈が発生しました(図-3)。これは、皆伐と異なり保残した列があり、伐採によるダメージが小さかったためと考えられます。一方で、2年目と3年目の間の保残列の追加伐採後の直径は約6cmと若干太さが減少しました(図-3)。これは、追加伐採の時期が早かったためと考えられました。その後は徐々に太さが増加していきました(図-3)。

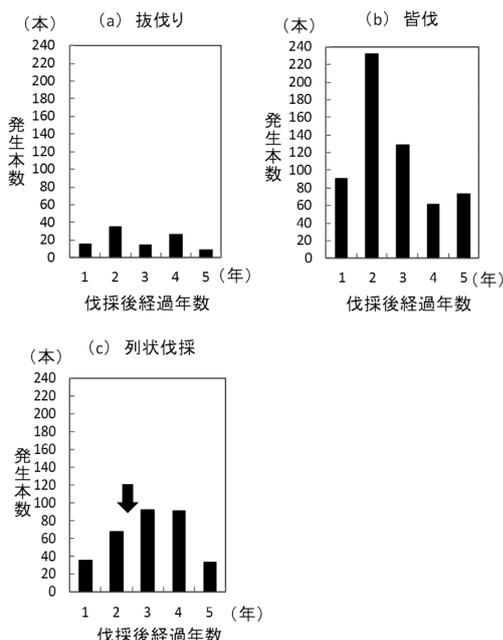


図-2 伐採後の新竹発生本数の経過。矢印は追加伐採を示す。

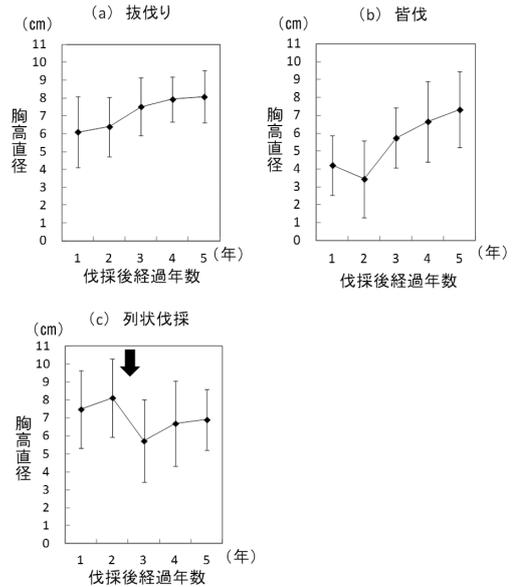


図-3 伐採後発生した稈の胸高直径の経過。矢印は追加伐採を示す。エラーバーは標準偏差。

各手法の作業性

上で述べたように、荒廃竹林の密度は通常の栽培林よりも非常に高く、作業には大きな労力が必要となります。このため、栽培林への復元手法を検討するに当たっては、稈の復元状況だけでなく、作業効率も非常に重要となってきます。そこで、伐採の工期調査を行い、その結果を基に各手法それぞれについて伐採整備にかかる時間を試算し、労働力の比較を行いました。

工期調査は、選木とその後の一連の作業(伐倒竹間の移動・支障木除去等の伐倒準備、チェーンソー伐倒、かかり木処理)に分けて行い、選木は32.6aの抜伐り間伐を実施した際のデータより算出しました。その後の一連の作業については、抜伐りにより一連の作業を10回実施し、その平均値をもとめました。

その結果、どの竹を切るかを1本決定するのに5.18秒の時間が掛かりました。また、伐倒する竹に移動して方向を決め、支障となる灌木等を除去するのに1本あたり平均15.04秒、伐倒には平均22.39秒、かかり木の処理には平均45.56秒かかりました(表-1)。

以上の値を基に、各手法で伐採整備するのに必要な時間を試算した結果を表-2に示します。抜伐りによる手法は、選木、移動・準備、伐倒、かかり木処理が全て必

表-1 工期調査の結果

	最短(秒)	最長(秒)	平均(秒)
移動・伐倒準備	3	37.72	15.04
伐倒	10.68	41.88	22.39
かかり木処理	25.78	68.63	45.56

荒廃竹林を栽培林へ復元するための積雪地に適した手法

表-2 各手法の伐採整備時間の試算

作業内容	作業時間 (秒/本)		
	抜伐り	皆伐	列状伐採
選木	5.18	0	0
移動・伐倒準備	15.04	0	0
伐倒	22.39	22.39	22.39
かかり木処理	185.44	0	0
計	228.05	22.39	22.39

要なのに対し、皆伐と列状伐採の2手法については、稈を選ばず切るため選木が必要なく、密集した隣の稈を切るため移動が必要ありません。また、抜伐りでは、密集した中で稈を選んで倒すと斜面下の竹に枝葉が絡んでかかり木となりますが(図-4)、皆伐・列状伐採では、斜面方向に対して手前から順番に伐採するためかかり木が発生しません(図-4)。このため稈1本あたりの処理にかかる時間は、抜伐りが3分48秒かかるのに対し、皆伐、列状伐採は22.39秒となり、作業性は皆伐、列状伐採がよいという結果となりました(表-2)。

積雪地特有の問題点

伐採の翌春、抜伐り試験区では、伐らずに残した幹の根返り・斜立等の雪害が約30%の親竹に発生し、想定した理想的な親竹本数よりも稈が減少するといった問題点が明らかとなりました(図-5、図-6)。これは、急激に密度を低下させたことにより、伐採前までは稈同士が支え合っていた状態から、伐採後は稈周辺の空間が広くなりお互いを支え合えない状態に変化したこと

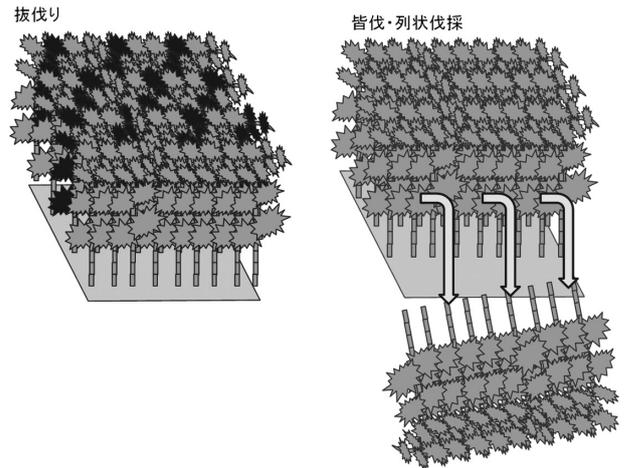


図-4 各手法のかかり木発生状況(イメージ)

が要因の1つと考えられます。

本県では、雪害による親竹の損傷を防ぐための方法として、タケノコが成長して竹になる途中、先端の部分を揺すって落としたり刃物で切断したりして成竹の高さを止める「ウラ止め」の有効性について調査を行ってきましたが(Furusawa et al. 2018)、荒廃竹林ではウラ止めの施業を実施された場所はほとんどないため、抜伐りにより1度に整備を行うと雪害が起こる可能性が非常に高いことが示唆されました。

積雪地域での最適な復元方法の検討

これまで述べてきた伐採後の竹林の復元状況の経過、作業性、雪害の発生状況を総合的に判断すると、積雪の



図-5 雪害(根返り)の発生



図-6 雪害（斜立）の発生

ある山形県において荒廃竹林を伐採整備し栽培林へ復元するのに最も有望な手法は列状伐採であると考えられました（表-3）。また、皆伐は列状伐採より復元完了までの時間を要すると見込まれるものの、手法としては使用可能であると判断されました。一方、抜伐りによる復元は、段階的な実施の見極め等が必要であり作業性も良くないため難しいと考えられました。

おわりに

本県では、今回紹介した試験内容も含めて、「孟宗竹栽培管理マニュアル（山形県版）」を作成・配布し普及に努めるとともに、山形県森林研究研修センターホームページでも紹介しております（山形県 2017）。

引用文献

Furusawa Y, Takahashi K, Ashitani T (2019)

表-3 山形県における復元手法の総合判断

	抜伐り	皆伐	列状伐採
発生した稈の太さ	○	×	○
新竹発生数	×	○	○
作業性	×	○	○
雪害発生	×	○	○

“Uradome” Treatment For Prevention of Snow Damage and Terrain Parameters of Moso Bamboo (*Phyllostachys Pubescens*) Forest in Tsuruoka, Yamagata Prefecture. Journal of Sustainable Forestry 38: 171-182

農林水産省 (2019) 平成 30 年 特用林産基礎資料. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/tokuyo_rinsan/ (2019 年 11 月 20 日確認)

山形県 (2017) 孟宗竹栽培管理マニュアル (山形県版). 山形県森林研究研修センター, 31pp, 山形.

スウェーデン発の究極の水選法「PREVAC + IDS 法」と近赤外分光法に基づく林業用種子の高品質化技術

松田 修 (まつだ おさむ、九州大学大学院理学研究院)

シリーズ
うごく森 38

はじめに

近赤外光の反射特性から樹木種子の胚乳における脂質の蓄積具合を評価し、発芽の可否を判別する手法および、発芽能を備えた充実種子を選別回収するための装置の実用化については、本誌 No. 80 における低コスト再造林に関する特集を含め、各所において報告しており、すでにご留意いただいている方も多いただろう^{1, 2)}。手法の発明者である筆者は、本来的には森林や林業の専門家ではなく、開発に着手した当初は、遺伝学研究における「個体の表現型を見分ける」作業を効率化する手段として、近赤外分光法や画像分光技術の導入に取り組んでいる最中であつた³⁾。近赤外方式の充実種子選別技術は、林業用の種子がどのように精選されてきたかの前知識も持たない研究者が、いわば成り行きまかせに実用化まで導いたものである。幸いにして、九州計測器株式会社が昨春より製造、販売を開始している製品（本誌巻末に広告を掲載）は、本稿の執筆時点において世界で唯一の、林業用種子を対象とした光選別装置という位置を占めている。実験室レベルの雲の上の技術を、希望する誰もが利用できる高さにまで一般化することは容易ではなく、製品開発の成果も、手法の発明と同等以上に貴重なものといえる。一方、実用化という一区切りを迎えたこの機において、日本の主要造林樹種と同類の針葉樹の種子に対

し、どのような品質管理技術が開発、利用されてきたかを国際的な視点から顧みることは、新技術を効果的に運用し、これからの森林産業をうごく指針を得るためにも有益だろう。

本稿では、育苗トレイへの直接一粒播種をはじめ、機械による先進的な樹苗生産体系を確立している、北欧スウェーデンにおける種子の調製技術を紹介するとともに、近赤外光による農林産物の品質管理技術の現況を概観することを通じて、種子選別技術の今後の発展の方向性と、それが林業における種苗の生産や育種にもたらす影響について展望したい。

スウェーデンの林業

表-1 の通り、スウェーデンの国土は、陸地面積が 41 万平方キロと日本の 1.12 倍、森林率、人工林率はそれぞれ 68.9%、48.9% であり、いずれの数字も日本のそれらと近接している。人工林への年間植栽本数は 4 億本であり、うち 2 億本をヨーロッパトウヒ、1 億 6 千万本をヨーロッパアカマツが占める。全体の 9 割以上がマツ科の針葉樹であり、樹種を絞った人工林の造成スタイルも日本と類似していると言えるだろう。気候については、日本よりもはるかに高緯度に位置しているが、国土が南北に長く、寒暖の地域差が大きいことも日本と

表-1 日本とスウェーデンにおける森林および林業の比較

項目	単位	日本	スウェーデン	出典 (適用年)	
国土	陸地面積	千 ha	36,456	40,731	FAO ⁴⁾ (2017)
	森林面積	千 ha	24,958	28,073	FAO ⁴⁾ (2017)
	森林率	%	68.5	68.9	FAO ⁴⁾ (2017)
	人工林面積	千 ha	10,270	13,737	FAO ⁴⁾ (2017)
	人工林率	%	41.1	48.9	FAO ⁴⁾ (2017)
労働力	総人口	千人	126,746	10,120	IMF ⁵⁾ (2017)
	就業者人口	千人	65,311	5,022	IMF ⁵⁾ (2017)
	林業従事者数	千人	45 ^{a)}	23 ^{b)}	脚注参照
所得	国内総生産 (GDP)	億円	5,451,037	606,309	IMF ⁵⁾ (2017)
	(就業者一人当たり)	万円	835	1,207	IMF ⁵⁾ (2017)
	林業分野の粗付加価値	億円	2,055 ^{c)}	4,555 ^{b)}	脚注参照
	(就業者一人当たり)	万円	452 ^{d)}	2,024 ^{b)}	脚注参照

^{a)} 林野庁⁶⁾ (2015)、^{b)} Eurostat⁷⁾ (2016)、^{c)} 内閣府⁸⁾ (2015)、^{d)} 林野庁⁶⁾ および内閣府⁸⁾ の 2015 年のデータを合わせて試算

共通している。主要樹種の標準伐期は、南部で60年、北部で100年ほどである。無論、林業生産の効率性には様々な要因が複雑に影響する。面積等の数字は近くとも、地形の急峻さや雑草木の茂りやすさといった観点では、日本の林地ははるかに多くの困難を抱えているだろう。

一方、最近では日本でも、様々な業種において労働力の不足が叫ばれているが、北欧における労働人口の寡少さは日本の比ではない。スウェーデンの総人口は1,050万人に満たず、日本の10分の1以下である。生産年齢においてもこの比率に大差はない。いわゆる「川上」林業への就業者比率は、日本の6.5倍を超える0.46%、人数にして2万2千人あまりである。業種を問わず、就業者当たりのGDPが日本を大きく上回っていることが特筆されるが、とりわけ林業分野は、全産業平均の倍に近い高水準を記録している。先送りしようのない労働力不足を背景とした、生産の効率化に対する飽くなき努力と創意工夫が、同国の林業をして「儲かる産業」の地位を獲得せしめた原動力となったに違いない。

スウェーデンにおける林業用種子の調製技術

スウェーデン国内での樹苗生産に用いられる種子の大半は、北東部の都市Umeåの近郊、Sävarに所在する森林利用研究所(Skogforsk)に集められ、選別や休眠覚醒処理を施された後に、生産者へと供出される。樹苗生産用の育苗資材や機械を扱う同国の先導的企業であるBCC社(所在地は南西部のLandskrona)によると、種子の調製には6種類の手法と、それぞれを実施するための装置が用いられている。おおよその工程順に挙げると、(1)脱粒・脱翼、(2)洗浄、(3)粒径選別(篩選)、(4)重量選別(風選)、(5)PREVAC(Pressure-Vacuum)、(6)IDS(Incubation Drying Separation)である。明確化のため、本稿では種子の選別過程のうち、球果から種子以外の不要物を取り除くまでの過程を粗選別、発芽率を高めるための過程を精密選別と定義する。筆者らが開発した近赤外光による選別法は、後者にかかわる技術である。6つの手法のうち、もっぱら精密選別を目的とするのは(5)および(6)であり、いずれも液体による比重選別(水選)の変法である。これらの手法は、同国を含む北欧諸国で利用されているほか、カナダではSeedTek社が、両手法による種子の受託選別サービスを展開している⁹⁾。

・PREVAC法

粗選別を終えた種子は、全粒が発芽できるわけではない。一部が発芽能を欠くに至った理由には、種子形成の

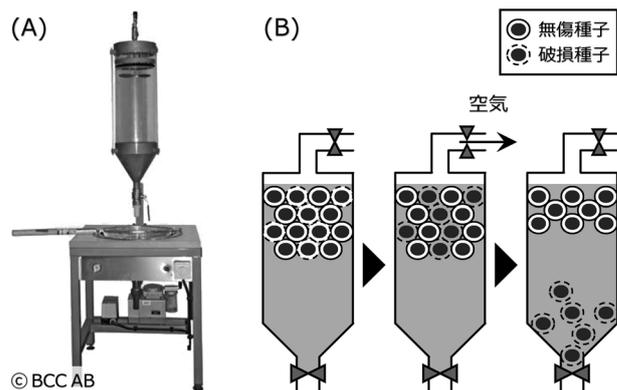


図-1 PREVAC法

過程そのものに異常が生じたか、種子が形成された後にそれを失ったかの2通りが考えられる。後者には採種前に受けた虫害等による損傷ばかりでなく、粗選別の過程で生じ得る、衝撃にともなう外傷が原因となることも少なくないだろう。いずれにせよ、外皮が傷ついた種子は発芽能を欠いており、こうした種子を取り除くために考案されたのがPREVAC法である¹⁰⁾。

図-1Aは、この手法のために用いられる水槽である。手順は至ってシンプルであり、最初に水を満たした槽内に種子を投入する。この時点ではすべての種子は浮いている(図-1B)。続いて水槽を密閉し、真空ポンプにより内圧を低下させる。陰圧の効果により、損傷を受けた種子では、外皮のひびを通じて水が内側へ速やかに浸入する。それにともない、比重が上昇して沈降を開始する。真空圧やポンプの作動時間が適切であれば、無傷の種子は浮いたままとなるため、底部に設けられたコックを開くことにより、傷ついた種子を取り除けるわけである。

・IDS法

PREVAC法では、「外傷はないが発芽能を欠いた種子」は取り除くことができない。これはすなわち、「無傷の死んだ種子」とほぼ同義である。IDS法は種子を生死の別に分けるための手法であり¹¹⁾、スウェーデンにおける種子選別法の中でも、とりわけ重要度の高いものである。

IDS法では、水への浸漬(Incubation)とその後の乾燥(Drying)過程における種子の含水率と、それに応じた比重の変化に着目する。図-2Aは、その「I-D」過程における種子の含水率変化を、生死の別に示したものである。浸漬後の含水率は、種子の生死によらず、重量比で40%ほどに達する。その後、穏やかな乾燥条件に移すと、死んだ種子は速やかに水分を失うのに対し、生きた種子は水分の保持力が高く、含水率が下限に達するまでに、より長い時間を要する。すなわち、「半乾」

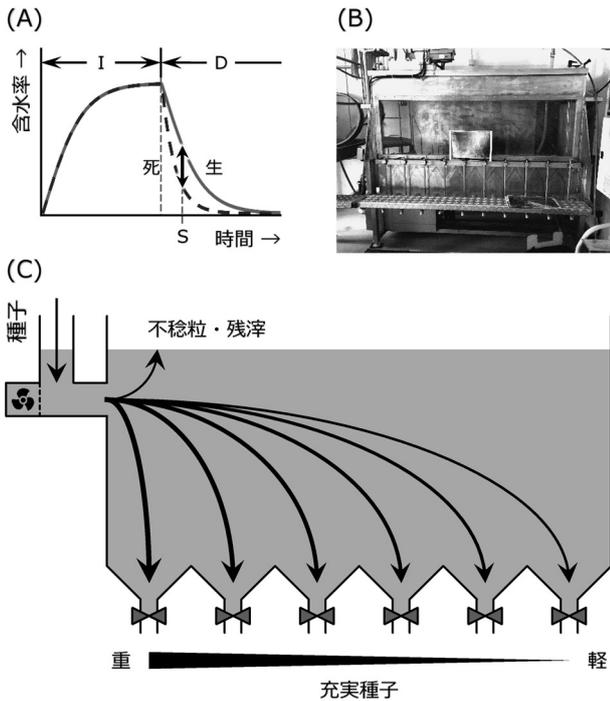


図-2 IDS 法 (Skogforsk)

の時間帯には、生きた種子の含水率が相対的に高くなる。この間に PREVAC 法で用いたのと同様の水槽に種子を投入すれば、比重が大きい生きた種子を選択的に沈降させ、底部から取り出せるわけである。

以上が元来的な IDS 法の概略であるが、生産に有利な高品質な種子を得るため、この手法には幾重にも改良が加えられてきた。特筆すべき改良点の一つは、水槽の構造に見られる。図-2B、C は Skogforsk に設置されている水槽の外観と概略図である (SeekTek 社も同様の設備を導入している)。分離 (Separation) を表す「S」の過程では、種子を生死の別に分けるだけでなく、比重に応じた等級選別が同時に行われる。水槽の左右いずれかの側面から水流を発生させ、水平方向に種子を投入すると、死んだ種子は水面へと浮上するが、生きた種子は比重が大きいものほど投入口に近い側に沈下する。これらを個別に回収できるようにするため、底面には V 字型の溝が波状に刻まれ、それぞれにコックが設けられている。実際に、比重の大きな画分から得られた種子ほど、発芽率が高く、発芽に要する日数も短いとの報告もなされている¹²⁾。

もう一つの特筆すべき改良点は、種子を浸漬する「I」の過程に見られる。乾燥状態では選別ができないことが水選法の難点であるが、これを逆手に取り、この過程に休眠覚醒 (Invigoration) の効果を持たせているのである。スウェーデンにおける主要樹種では、5℃の冷温下で含水率を 30% に保つことが、種子の休眠覚醒に効果的であるらしい¹²⁾。現在では段階的な変温処理も追加



図-3 軟 X 線画像化装置と異常発芽種子 (Skogforsk)

されているようである。選別を終えた種子は、再乾燥の後に保管されるが、「I」の過程で加えられた休眠覚醒の効果は、播種時に至るまで持続する。したがって、この処理は成長の揃った均質な樹苗を生産する上で、きわめて重要な役割を担っていることになる。

・PREVAC + IDS 法の問題点

IDS 法までの選別により、種子の発芽率は 98% 程度にまで安定的に高められる。選別による種子の高品質化は、以上で十二分とも感じられるが、当地ではあくまで 100% の得苗率が目指されているようである。得苗に至らない原因として目立っているのは、異常発芽による成長の休止や枯死である。異常発芽する種子は、種皮と胚乳の間に空隙を生じており、軟 X 線画像化法により、これを事前に検知することは可能である (図-3)。しかし、おそらくは処理速度やコスト面の問題から、同手法が種子選別において実用されるには至っていない。

農林生産用の種子をめぐる問題として、近年盛んに取り上げられるのが、カビの一属であるフザリウム菌 (*Fusarium*) の、種子を通じた拡散である。この属には、植物に病害を引き起こす種や、人畜に有害な毒素を産生する種が含まれる。PREVAC、IDS 法を含む水選法では、水槽内の水を介して、一部の汚染種子から菌が全体に伝播するリスクを完全に抑えることは難しい。このことから、乾燥状態で実施できる種子の精密選別技術は、かねてより求められてきたのである。食品業界では、フザリウム菌が付着した穀粒を検出し、それを取り除く用途にも対応した近赤外分光法の応用機器を、スウェーデンの BoMill 社やスイスの QualySense 社が製品化しており、市場における注目度も高まりつつある^{13, 14)}。

水選による種子選別のもう一つの難点は、操作に熟練を要することである。長年の実践を経てノウハウは蓄積されているものの、選別の最適条件は樹種のみならず、種子の粒径等にも依存するようである。一度に多量の種子を選別できる反面、その成否が後年に全国で生産され

表-2 林業用種子選別法の比較

項目	近赤外方式	PREVAC + IDS 法
選別基準	化学的特性	物理的特性
選別時の様態	乾燥	湿潤
選別単位	1粒ごと	ロットごと
速度/コスト	△ (低/高)	○ (高/低)
菌害拡散リスク	○ (低)	△ (高)
操作の難易度	○ (低)	△ (高)
発展性	○ (高)	△ (低)

る樹苗の品質を左右することになる。選別には大掛かりな準備を要し、再選別も気軽に行えるわけではない。このように、作業者が背負う心理的負担が過大であろうことは想像に難くない。

おわりに

表-2に、筆者らによる近赤外方式の種子選別法と、以上に解説したPREVAC + IDS法の利点および欠点をまとめた。両者の主な違いは、乾燥・湿潤のいずれの状態を選別するか、1粒ごとの計測を行うか否かの2点にあるが、一方の利点は他方の欠点であり、逆もまた然りといった相互補完的な関係にある。しかし、前節でも触れた、種子品質のさらなる向上や作業者の負担軽減、加えて、外来花粉との交配により形成された種子の排除やF1雑種種子の選択的利用といった、より高度なニーズに応えることは、1粒ごとの計測なしには困難だろう。実のところ、近赤外方式は必ずしも低速というわけではなく、先の穀物を対象とした製品は、毎時3トンや秒速50粒といった高速処理をすでに実現している。さらに、スウェーデンは近赤外分光法に基づく計量化学(ケモメトリックス)や、その森林科学への応用においても、世界をリードする先駆的成果を発している¹⁵⁾。先を見据えた基礎的研究が、実に周到に進められているのである。一方で、近赤外分光法においては、実験室レベルを脱して実用に至っている技術がきわめて少ない。基礎科学を専門としながら、筆者が実用化に向けた活動にも注力してきたのは、このことへの問題意識を常に抱いてきたためである。原理的には可能でも利用できない技術(典型的には治療法)は、それに期待せずにはおけない立場にあるほど、知らぬが幸いなのである。

充実種子選別装置の開発により、近赤外分光法における「原理的に可能」な技術を「実用可能」な状態へと導くための敷居は、大幅に引き下げられたと言ってよい。最終的にはコストが普及への鍵となるだろうが、PREVACおよびIDS法による種子選別技術がおおむね「究極」の域に達し、さらなる発展性に難を抱えている以上、スウェーデンにおいても近赤外方式の導入と、高

度化する選別ニーズに応えるための、基礎研究成果の社会実装に向けた取り組みが加速化するだろう。わが国も独自技術の供出により、北方林資源の保持力強化に向けた国際活動に積極的に参画すべきである。その過程における両国間のかかわりの中から、スウェーデン社会に根付いている、人工林を利用可能な状態に保つことを当然とする森林管理に対する意識や、技術を高めるために樹木を根本から理解しようとする学究的姿勢には、わが国も大いに学びたいものである。それらはまさしく、林業の産業的地位の向上を果たした原動力の実体に他ならないと感じられるためである。

謝辞

スウェーデンにおける施設見学にお立ち会いはいただき、また本稿に掲載した写真等コンテンツの使用をご許諾いただいた、Andreas Nilsson氏(BCC社)、Johan Westin博士(Skogforsk)、Per Christer Odén教授(スウェーデン農業科学大学)に心より感謝申し上げます。本稿の内容の一部は、キャノン財団「産業基盤の創生」および、農林水産技術会議「戦略的プロジェクト研究推進事業」からの支援による研究の成果に基づくものである。

引用文献

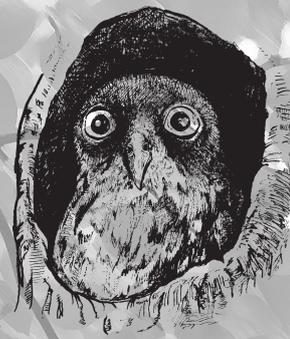
- 1) 原 真司・飛田博順・松田 修(2017) コンテナ苗の効率的生産に向けた技術開発と課題. 森林科学 80: 18-21
- 2) 松田 修・小川健一・飛田博順・岩倉宗弘(2019) 高品質種苗の普及に果たす充実種子選別装置とその役割. 森林遺伝育種 4: 183-187
- 3) 松田 修・末次憲之・内田誠一・和田正三・射場 厚(2014) 近接ハイパースペクトルイメージングに基づく植物遺伝学研究の新展開. 日本生態学会誌 64: 205-213
- 4) FAO (2019) Food and agriculture data. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RL> (2019年12月24日確認)
- 5) IMF (2019) World economic outlook database. <https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2019/02/weodata/weoselgr.aspx> (2019年12月24日確認)
- 6) 林野庁(2019) 平成30年度森林・林業白書. https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/30hakusyo_h/all/chap1_3_1.html (2019年12月24日確認)

- 7) Eurostat (2019) <https://ec.europa.eu/eurostat/data/> (2019年12月24日確認)
- 8) 内閣府 (2018) 2017年度国民経済計算. https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data_list/kakuhou/files/h29/tables/29fcm3n_jp.xls (2019年12月24日確認)
- 9) SeedTek Facilities (2019) <http://www.seedtek.ca/> (2019年12月24日確認)
- 10) Lestander T, Bergsten U (1985) PREVAC - a method for removal of mechanically damaged seeds. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1: 35-42
- 11) Simak M (1981) Removal of filled-dead seeds from a seed bulk. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 5: 31-36
- 12) Bergsten U (1988) Invigoration and IDS-sedimentation of *Pinus sylvestris* seeds from northern Finland. *Silva Fennica* 22: 1926-1997
- 13) Saccon FAM, Parcey D, Paliwal J, Sherif SS (2017) Assessment of *Fusarium* and deoxynivalenol using optical methods. *Food Bioprocess Technol* 10: 34-50
- 14) Silicon Canals (2019) European technology news. <https://siliconcanals.com/news/making-farming-smarter-these-10-european-agtech-startups-use-robots-to-grow-food/> (2019年12月24日確認)
- 15) Farhadi M, Tigabu M, Stener L-G, Per Odén C (2016) Feasibility of visible + near infrared spectroscopy for non-destructive verification of European × Japanese larch hybrid seeds. *New Forests* 47: 271-285

大枝おろし

二階堂 太郎

(にかいどう たろう、国立科学博物館 筑波実験植物園)



樹木は何十年もかけて大きく育ち、幹や枝はいずれ折れたり倒れたりするのが宿命です。そうなるのは木部に入った腐朽が材の強度を下げるから。台風が過ぎた翌日、地面へ落ちている太い枝は、そこら辺の色々を教えてください。まずは、見た目に健全であっても、内部は腐ってフカフカだったり、カブトムシの幼虫が食害した穴だらけな様子など。また、そうであるのにこれまで折れなかった材の強靱さとか。そして枝とは、とても重い物体である事。

樹木の枝を切る作業を「剪定」と言いますが、枝の太さで道具を使い分けており、それぞれの作業音からどんな枝が切られているのかが分かります。まず、「パチパチ」と軽く弾く音は木鋏が小枝を摘む音。「パチン」は剪定バサミが指程度の枝を落とす音。「ギコギコギコギコ」は鋸で枝を切っている音で、それが5秒程度なら直径5cm、20秒も続くと直径10cm程度の枝。「ドッドドッ、プーン！」のエンジン音はチェーンソー、だいたい直径15cm以上。これら切断音と掛かる手間は、枝が太くなると大きくなるのが特徴と言えます。そしてその太さには、枝の重量で加算される切断時の危険が内在しています。それ故に、剪定の中でも太い枝の切断には「大枝おろし」と特別な名が与えられ、作業員へ注意を促すようになっていきます。

枝の重量が生み出す危険は大きく3つあります。1つ目は下へ落ちたときの衝撃。地面に何もないなら良いのですが、大抵は何等かの構造物があるものです。そんな場合、下に落ちて衝撃を生まないサイズで切り落とすか、または、切った枝をロープで丁寧に降ろします。2つ目は、切っている途中で枝自身の重みで枝元が裂け、そこと繋がっている幹の樹皮が剥がれる事。これは枝を切る位置の地面側に切れ目を入れておけば、枝裂けを止められます。しかし、枝と人の位置から切れ目を十分に入れにくい事があり、そんな時は高確率で枝が裂けて樹皮を剥がします。そして3つ目、切った後の枝の動きを読み違えたら、その重量が自分を襲って来る事。

太さ直径20cmくらいの枝だと重さはざっと約50kgあり、高い所に引っかかっているは大変危険です。台風などでそんな事態が起きたら、急いで撤去しなければなりません。しかし強風で折れた枝の大枝おろしは健全な枝の場合と違って、凄くやりにくい。なぜなら、枝が折れるほどの強い力で揺られ続けても地面へ落ちなかった理由が、その場面毎にちゃんとあるからです。例えば、折れた枝のY字部分（枝が分枝している部分の事）と受けた枝のY字部分が深く噛み合っていると、折れた枝を下の枝々が包むように抱いてしまっているとか。

そしてそれらの撤去作業を一層厄介にするのが、折れた部分の一部が樹と繋がっている状態。もし折れた枝が樹と完全に離れてぶら下がっているだけなら、切断最中にあまり動いたりしないので、そこそこ安全です。しかし枝の一部が樹と繋がっている場合は、枝のあちこちが別の枝や隣の樹などから押されており、それに反発する力が折れ残っている部分に集まっています。そんな状態なので見た目に安定が取れているようであっても、ちょっとした切断で枝は回転したり起き上がったりするので。その動きをもし読み切れなかったなら、まずチェーンソーやノコギリの刃が凄いい圧力で噛まれ、外すのにとんでもない苦勞をする羽目になります。そして樹と繋がっていた部分が切れたら切れたで、枝の切断面がこっちに迫ってきたり、蔓で上方と繋がっていたなら宙を舞ったりと大騒ぎ。そんな「折れた枝の大枝おろし」を時に10m以上の樹上でただ一人行うのが、私にとっての台風の翌日。夜中に風が暴れる音を聞きながら、樹の中に広がる腐朽の様子がモヤモヤと頭に浮かび、目が冴えます。

これまで約20年、樹に登って「大枝おろし」をしてきましたが、枝の直径や作業に掛かる労働量を未だに少なく判断しがちです。直径10cm程度の枝だと思っていたのに、登ったら直径20cmを優に超え、持ってきた道具では不十分だったなんて事ばかり。そんな毎日もう嫌だと、今年になりようやく解決方法を見つけました。それは、色んな状況に対処できる様々な道具をいくつかの袋に分け入れ、樹上へ運んでしまうのです。それらを好みの場所へぶら下げれば、道具部屋みたいな作業空間が樹上に完成！無駄が多いとの批判もあるでしょうが、樹上で起きている事について、地面からの外れな作戦を立ててしまうミスが減るのは確実で、特に安全確保ではとても有効。台風の前日、クライミングハーネス、ロープ類、チェーンソー、その他もろもろについて何を樹上へ持っていか吟味します。私の安全を守ってくれるそれらを十分に従えての作業は、以前と比べて心にゆとりを生み、なによりも無理を根性で解決するようなやり方を改める機会となりました。加齢で身体能力が落ちる一方のここ近年ですが、今後もどうにか「大枝おろし」に挑めそうです。

.....
著者プロフィール

二階堂太郎：1970年生まれ。山形大学農学部林学科修了後、新潟市の「らう造景」入社。後藤雄行氏に師事。現在は筑波実験植物園の技能補佐員。屋外と圃場の管理を担う。樹木医、森林インストラクター。著書「植物園で樹に登る」築地書館

北から

北方の樹木の南限を訪ねる

石塚 航 (いしづか わたる、北海道立総合研究機構林業試験場)



北海道は本州と大きく植生が異なり、北方系の樹木が生育しています。代表的な樹種は常緑針葉樹のトドマツ、エゾマツ、アカエゾマツで、北海道内に天然分布の南限があります(ただし、アカエゾマツのみ岩手県早池峰山に隔離個体群が認められています)。分布限界は種の歴史的動態や地理・気候・生物要因等の複合的な作用の中で動的に現れると考えられ、その種の将来の姿を推し量るためにも、貴重な遺伝資源を絶やさないためにも、南限といった分布限界の挙動を知ることが有益です。…いや、本音を話せば、ロマンがあります。いかにここに辿り着いたか、どんな生き様に思いを馳せられる魅力があると思っています。さて、今年、トドマツの見事な南限林を訪ねることができたので紹介します。ちなみに、本種は道内の人工林蓄積トップを誇る北方樹種で、大学・国や道(筆者所属)の研究機関が共同で遺伝・生態の解明と遺伝育種に取り組んでいる種でもあります。

南限探訪のきっかけは、北海道全域での遺伝解析のため、道有林のトドマツ天然林情報にあたっていた時でした。30年以上前に発刊された北海道の林業普及書にて「トドマツ南限保護林」の記載に目が留まりました。文章によれば、『本道の最南端にある天然生トドマツの群生地で、生長および更新状態の推移を観察するという学術研究の観点から保護林に指定し、』とあり、針広混交林でトドマツが蓄積63%を占めるとのことです。場所は北海道の最南端、松前町。まさにこれまでに知られる分布南限(例えば、舘脇 1939)と重なる位置です。保護林ならば、現在でもその姿を残していることが期待でき、長らく日の目を見なかった南限の再発見かと胸が高まりました。さっそく道有林の担当管轄に連絡したところ、件の保護林を知っている現役職員は皆無だったものの、台帳上には、確かに45年前(1975年)に保護林指定された林分の記録があることが判明しました。林分の位置情報をもとに航空写真(Google Map)を眺めるとそれらしき樹冠がありそうです。あとは現地を訪ねてみることにしました。

ところで、この松前の林分から40km北の^{あっさぶ}厚沢部町には南限付近のトドマツ天然林があることが知られています。かつての育種事業ではこの林分で精英樹を選抜した経緯があり、筆者が2018年夏にここを訪れた際には、林冠木の立派さに息を飲みました。一方で、虫害や若木の枯損が著しく、林分の健全性が気になる

現状でもありました。まだ見ぬトドマツ南限の林分にもこの姿を重ねずにはいられず、期待と不安を抱えていました。

南限を訪ねたのは2019年、広葉樹の開葉前で、ササが残雪下にある初春でした。道有林の歩道情報を携えていたものの、古い歩道ゆえ、とっかかりから彷徨ったり、谷筋で道が途切れたり、苦労した往路でした。3時間かかった4.5kmの歩道の終盤、ブナ、カンバが主体の林の中で、急にトドマツ巨木が目の前に現れました。巨木はさらに先にも見えます。目指す保護林へ辿り着いたと実感するとともに、気づかされました。トドマツ南限林はブナ天然林と混交する形で残っているんだ!と。やや進めば、とくにブナの林冠下に豊富にトドマツ稚樹が生育していること、もっと進み保護林中心部まで行けば、尾根筋(最高標高420m)にまとまったトドマツの群落があることが確認でき、森林総研の同行メンバーとともに感激したものでした。林冠を構成する木は大きいもので胸高直径76cm、樹高24mに達し、どれも立派で健全です。ブナと共存する南限ならではの姿に、また何より、分布限界において、蓄積面でも更新面でも申し分のない見事な林分が見られたことに驚くばかりでした。ここの林分動態は今後しっかりと調査をしていく価値があると思いますし、ここで新たに優良な育種素材を発掘できるのでは、と考えています。興味ある方、ロマンを共有したい方はぜひ一緒に次の調査計画立てませんか!



写真 トドマツ南限の様子(2019/3/26霧の中撮影)

左写真: ブナとともに林冠を構成するトドマツ。

右写真: 次の世代を担うトドマツ稚樹。ブナ林冠下に豊富にみられた。

台湾から日本へ、日本から台湾へ

久米 朋宣 (くめ ともり、九州大学農学研究院 (宮崎演習林))



「タピる」という言葉を耳にしたことがあるだろうか？ 2019年ユーキャン新語・流行語大賞のトップ10に選ばれたこの言葉の意味は、タピオカ入りのドリンクを飲む、である。このブームを、筆者は少し冷めつつも、誇らしい気持ちで傍観していた。というのも、タピオカドリンクの発祥である台湾と筆者の間には少なからぬ関係があるからだ。

筆者は、2009年から2018年の間、国立台湾大学森林環境及資源学系（以下、台大）に所属していた。台大に赴任したての頃は、毎日の授業や研究費の申請書の準備が大変で、街中の無数の屋台や飲食店に心癒されていた。タピオカドリンクも飽きるほど飲んでいて（1杯当たりのカロリーを知って以来、すっかり遠ざかっていたが…）。おそらくこの第3次タピオカブームが去っても、この台湾発祥の飲み物は、日本の食文化に定着していくのではないかと考えている。

逆に、台湾に定着した日本食もたくさんある。古くは、味噌スープ（あえて味噌汁とは呼ばない）、刺身（やや厚め）、寿司（カラフルな巻きずし）などがあり、最近では、うどん（烏龍麵）、ラーメン（拉麵は日本食）、牛丼（そのままの漢字）などはすっかり台湾の定番だ。ここ数年の間、日系飲食店の台湾への出店ラッシュ（その逆も然り）も続いており、日台の食の世界での相互交流は、どんどん進んでいるようだ。

アカデミックな世界ではどうだろうか？台湾がかつて日本だったこともあり、古い大学の建築物からは、日本の旧帝国大学の雰囲気を感じることができる。樹木分類や造林・育林などの台湾での創始者をたどると、日本人の偉大な諸先輩に行き着くことがままある。一方、現在の台湾では、アメリカを中心とする欧米の影響をより強く受けているように思うことが多い。教員のおよそ7-8割がアメリカを中心とする欧米で学位を取得しているからかもしれない。

例えば、台大にはテニユア審査や5年に一回の人事評価という厳格な人事システムがある。基本的に、新人教員はまず、Assistant Professor（いわゆるテニユアトラック）から始まり、6年以内に研究、教育、学内外へのその他活動で成果をあげ、かなり厳格かつ定量的な審査を経由して、准教授へ昇進（いわゆるテニユア取得）となる。その後も、一部例外はあるが、5年に一回の業績審査が続くことになる。細かい点に

差異はあるが、厳しいという点において、アメリカの大学のそれと似ていると思う。

研究費の申請において、日台で違うなと思うのは、個人かチームか、という点であろうか。台湾には、日本の科学技術振興機構（JSPS）に対応する組織として、科技部（MOST）があり、台湾在住の多くの研究者が毎年12月末日まで申請書の作成で忙しくなる。台湾では一般的に、助教から独立した研究者（PI）としてみなされ、研究申請を単独するのはもちろん、修士、博士の学生指導も独立して行う。日本の場合、代表者と分担者がチームを作り研究費を申請することが多いようだ。同じくらいのキャリアの研究者が申請する研究費の総額を米ドル換算で比較すると（例えば、基盤研究B（日本）と、スタートアップを終えて数年後の研究者が獲得する専題研究計画（台湾））、ほぼ同額に見えるが、日本では分担者がいるため、一人当たりの研究費が少ないという印象を受ける。日本は台湾に比べて物価が高いので、研究費も多いのだろう、と想像していたので、これには少々驚いた。国際社会における日本の相対的な地位の低下にともなって、一人当たり配分される研究費が少なくなっているのだろうか…（統計を調べた訳ではないので、単なる憶測に過ぎない）。

そのような相対的な日本の競争力の低下に伴い、日本の森林科学は台湾ではもうそれほど魅力的ではない、ということはあるだろうか？答えはNoだ（と私は思う）。日本の森林科学研究の特徴は、明治の近代化以降の知識、経験、データの長年の積み重ねと、各人の興味関心に基づく探究を重視する文化にあると思う。社会的な要請や世界のトレンドを見据えて実施する研究が多めな台湾においては、各人の探究心を尊重することで生まれるきめ細かい研究がとても新鮮に映ることがある。

日本と台湾は、これまでも、これからも、相互により影響を及ぼし合うことができると思う。私の台湾の友人たちはとても優秀で、とても頑張っている。偉大な諸先輩たちが築いてきた土台に胡坐をかくことなく、台湾の人々が日本によせるその期待（幻想かもしれないけれど）に応えられるよう、私ももう少し、いやかなり精進しなくてはいけない（無理のない程度に…）と思う今日この頃である。

特集

バラ科樹木の脅威 クビアカツヤカミキリ(仮)

森林科学 89 は 2020 年 6 月発行予定です。ご期待ください。

本会は、複写権の行使について、下記の一般社団法人学術著作権協会に委託しています。本誌に掲載された論文の複写をご希望の方は、公益社団法人日本複写権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括的許諾契約を締結されている企業等法人の社員による社内利用目的の場合を除き、日本森林学会が複写に関する権利を委託している下記の団体から許諾を受けて下さい（社外領布用の複写は許諾が必要です）。電子的複製についても同様です。

一般社団法人学術著作権協会
107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F
info@jaacc.jp https://www.jaacc.jp/

お知らせ

- ・「森林科学」では読者の皆様からの「森林科学誌に関する」ご意見やご質問をお受けし、双方向情報交換を実践したいと考えております。編集主事まで e-mail でお寄せ下さい。
- ・日本森林学会サイト内の森林科学のページでは、29号以降からの目次および56号以降のオンラインPDFがご覧いただけます。また、紙媒体のバックナンバー（完売の号あり）の購入申し込みもできます。
- ・刊行から一年間は、森林学会会員の方は別途お送りするパスワードでオンライン版をご利用になれます。その後はどなたでも閲覧できます。パスワードに関するお問い合わせは編集主事へどうぞ。

森林科学編集委員会

- 委員長 松本 麻子（森林総研）
委員 岡本 隆*（防災/森林総研）
長倉 淳子*（土壌/森林総研）
岡 輝樹（動物/森林総研）
飯田 真一（防災/森林総研）
江口 則和（保護/愛知県）
佐藤 顕信（経営/日本森林技術協会）
今村 直広（土壌/森林総研）
岩永 青史（林政/森林総研）
磯田 圭哉（育種/森林総研）
田中 恵（土壌・造林/東京農大）
板谷 明美（利用/三重大）
田中 憲蔵（造林/森林総研）
大橋 伸太（木材/森林総研）
竹本 太郎（林業遺産/東京農工大）
宮本 敏澄（北海道支部/北海道大）
林 雅秀（東北支部/山形大）
逢沢 峰昭（関東支部/宇都宮大）
松浦 崇遠（中部支部/富山県森林研）
永松 大（関西支部/鳥取大）
榎木 勉（九州支部/九州大）
（*は主事兼務）

編集後記

この冬の積雪量は全国的に少ない状況にあるようです（執筆時点の情報）。私が所属する研究室では群馬県みなかみ町の森林流域において降水量や河川流出量の長期計測を実施しています。「宝川温泉」や「宝台樹スキー場」からも近い場所として、積雪量は観光客やウィンタースポーツ客の出足にも大きく影響を及ぼす土地柄です。つい先日、現地の方とお話する機会があったのですが、「こんなに雪が少ない年は珍しい」とのことでした。冬季に降った雪は春になると雪解け水となり、稲作等の農業用水として利用され、またダム貯水を通じて下流域にも重要な役割を果たすこととなります。このように“雪”は、雪が多い地域に多大な影響を与えることはもちろん、そこから遠く離れた下流域に生活する人々にとっても大きな影響を与える自然現象であると言えるでしょう。

個人的な話となり恐縮ですが、私は普段、雨や川の水、樹木が葉から出す水蒸気量などに興味があり、これらに関わる研究活動を主に行っています。とはいえ、上述の森林流域では、多い年では2mを超す積雪深となる場合もあり、そのような状況の現場にスノーシューを履いて片道2時間以上かけて歩いていくこともあります。つまり、雪と

無縁の研究活動ではないのですが、雪に関わる現象について深く学んではこなかったため、「雪とたたかう森林」の編集委員を打診頂いたときは、御期待に沿えるのか少し心配でした。しかし、コーディネーターの手厚いハンドリングにも助けて頂きながら、雪と森林の関係に詳しい執筆者の皆様のお原稿を読むうちに内容に引き込まれてゆき、心配は杞憂に過ぎないことが分かりました。普段、何気なく聞いていると、降雪と着雪が指す自然現象の違いには気が付いていませんでしたし、雪崩のスピードの速さに改めて驚かされました。本特集に関わることができ、雪に関するまとまった内容に触れたことは私にとって非常に有意義でした。この場をお借りして御礼申し上げます。

近年、気候変動の影響が懸念されています。わが国では自然現象が極端化することが予測されており、この冬の少雪もその一端なのかもしれません。他方、豪雪になる年も当然、想定されます。このように変わりつつある自然現象に我々はどうか対処してゆくべきか、研究者や行政のみならず、社会全体で考える時期に来ているようにも感じます。本特集がその機会の一助になれば幸いです。

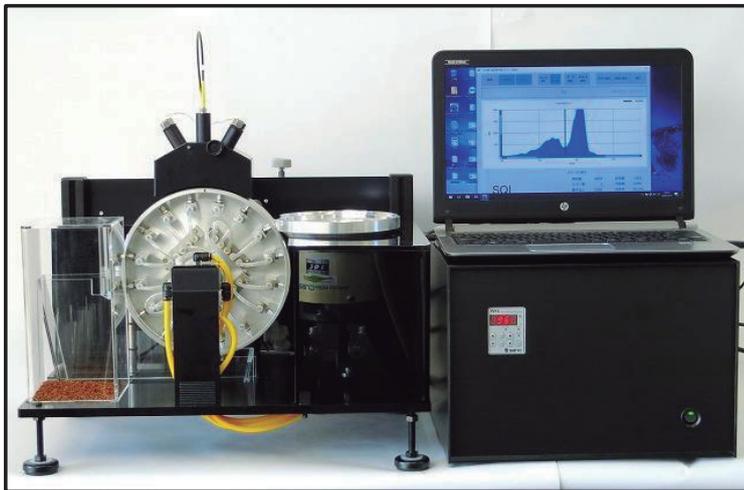
（編集委員 飯田真一）

充実種子選別装置

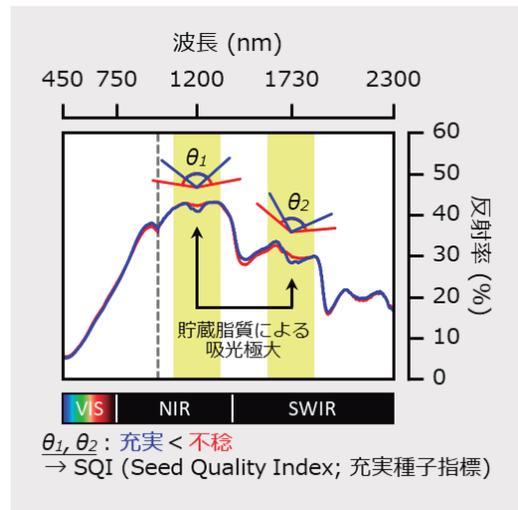
型式 FKSQ-10

ellie

スギ、カラマツ、ヒノキの 充実種子を近赤外光で自動選別

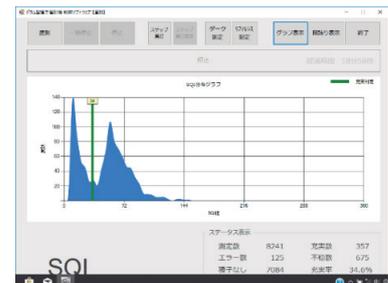


充実種子選別装置 本体



種子へ照射した赤外光の反射スペクトル

項目	仕様	備考
対応種子	スギ、ヒノキ、カラマツ	胚乳の有無を検知することで、充実／不稔を判定。※胚の生死判定は不可
処理速度	10,000～15,000 粒/h	種子前処理、種の状態による
選別精度	85～95 %以上	種子前処理、種の状態による
自動種子供給装置 (オプション)	容量1リットル	ボウルフイーダー内の種子の空きを検知して、連続無人運転が可能



SQIヒストグラム
ヒストグラム波形から充実判定の選別閾値を設定

本装置は国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 生物系特定産業技術研究支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業 (うち地域戦略プロジェクト)」の支援を受けて行い、国立研究開発法人 森林研究・整備機構森林総合研究所、国立大学法人九州大学、住友林業株式会社と共同開発したものです。

すぐれた効果

豊富なデータの裏付けで
薬剤持続期間7年を実現。

高い安全性

人体および水産動植物への
高い安全性。

充実の フォローアップ

薬剤濃度検査
サービスの実施。

培った技術力

蓄積したノウハウで最適な
アドバイスをいたします。

信頼のブランド

1982年の発売以来、
永きにわたり、全国の松を
守っております。



松枯れ防止樹幹注入剤

グリーンガード®・NEO

農林水産省登録 第22028号

マツノマダラカミキリの
後食防止剤

マツグリーン®液剤

農林水産省登録第20330号

普通物
マツグリーン®液剤2

農林水産省登録第20838号

- ① マツノマダラカミキリ成虫に低薬量で長期間優れた効果。
- ② 樹木害虫にも優れた効果を発揮。
- ③ 新枝への浸透性に優れ、効果が安定。
- ④ 車の塗装や、墓石の変色・汚染がほとんどない。
- ⑤ 環境への影響が少ない。
- ⑥ 周辺作物に薬害の心配がほとんどない。

剪定・整枝後の
傷口ゆ合促進用塗布剤

**トップジンM®
ペースト**

農林水産省登録第13411号

作物名	適用病害名・使用目的
樹木類	切り口及び傷口のゆ合促進
きり	腐らん病
さくら	てんぐ巢病
ぶな(伐倒木)	クワイカビ類による木材腐朽



株式会社 ニッソーグリーン

www.ns-green.com

「林業遺産」 選定事業について

日本各地の林業は、地域の森林をめぐる人間の営みの中で編み出され、明治期以降は海外の思想・技術も取り入れつつ、大戦期の混乱を経て今日に至るまで、多様な発展を遂げてきました。

日本森林学会では、学会100周年を契機として、こうした日本各地の林業発展の歴史を、将来にわたって記憶・記録していくための試みとして、「林業遺産」選定事業を2013年度から開始しています。

各年度ごとに、林業発展の歴史を示す景観、施設、跡地等、土地に結びついたものを中心に、体系的な技術、特徴的な道具類、古文書等の資料群を、林業遺産として認定しています。

会員の方々はどなたでも推薦できます。非会員の方も、該当される地区の林業遺産地区推薦委員等を通じて応募することができます。

詳細情報については、学会ウェブサイト「林業遺産」をご参照下さい。

<http://www.forestry.jp/activity/forestrylegacy/>



林業遺産
ロゴマーク



日本森林学会

The Japanese Forest Society Since 1914