

# 最新の研究からみた 干ばつ、山火事、強風、大雪と 森林の被害



国立研究開発法人森林研究・整備機構



森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute



森林保険センター

Forestry Insurance Center





# はじめに

森林の持つ価値は、木材の生産にとどまりません。国土保全、気候変動への対応、生物多様性の保全、さらには近年注目されているウェルビーイング（人々の心身の健康の充実）にも、大きく貢献しています。こうした森林の多面的機能を十分に発揮させることは、私たちが安全で身体的・精神的に健康な生活を送るために、大変重要なものです。

しかし、近年、ヨーロッパ諸国、オセアニア、北米など世界各地で大規模な山火事が発生しているように、気候変動の影響により、世界の森林被害は激甚化の傾向にあります。湿潤な気候に恵まれた日本においても、今年の春先には岩手県でこれまでに例のない大規模な山火事が発生しました。また、線状降水帯に伴って豪雨災害が毎年のように発生するなど、極端な気象現象にともなって発生する森林気象害のリスク増大が、私たちの日常生活に実感として迫るものとなっています。さらに、温暖化に伴う台風の強大化も予測されており、今後、森林におけるリスクは一層高まっていくことが懸念されます。

森林気象害を確実に回避する方法は、残念ながら、ありません。そして、ひとたび被害に見舞われれば、その復旧には多大な労力と費用が必要となります。そうした中で重要な役割を果たすのが、「森林保険」です。森林保険は、88年前に国の制度として創設され、10年前には森林総合研究所に業務が引き継がれました。現在は、森林整備センターや林木育種センターなどとともに、国立研究開発法人 森林研究・整備機構を構成する形で事業が継承されております。森林保険は、森林所有者が自ら災害に備えることができる唯一のセーフティネットですが、単なる経済的な補償手段にとどまらず、健全な森林の整備を支え、森林が有する多面的機能を発揮させるための重要な制度です。つまり、保険によってリスクに備えることそのものが、「気候変動への適応策」となり、将来に向けた備えとなるのです。

森林総合研究所と森林保険センターは、気象害リスクの評価を目的として連携し、森林保険センターからの委託による研究プロジェクトを、5年を1期として10年間にわたり実施してきました。このプロジェクトでは、風害・雪害・林野火災・干害といった森林気象害のリスク評価に取り組んできました。このような森林気象害のリスクに関する情報は、防災・減災の基礎資料となるのみならず、保険業務だけでなく森林管理の現場においても、極めて有用なものです。本冊子は、第2期プロジェクト「気象害の発生プロセス解明に基づく気象害リスク評価手法の高度化」の研究成果を取りまとめたものです。第1期の研究成果をまとめた「森林気象害を探る」が、森林保険センターのホームページにて公開されていますので、あわせてご覧いただければ幸いです。

森林というかけがえのない資源を守り、持続的に活用していくためにも、森林保険の意義と役割について改めて理解を深めていただけますとともに、研究プロジェクトの成果を今後の施策や取り組みにご活用いただければと願っております。

国立研究開発法人 森林研究・整備機構  
理事長 浅野（中静） 透





# 目次

## Chapter 1 干ばつと森林 ————— p01

01 どこまで乾燥に耐えられる？干害の仕組みを探る

02 全国の干害リスクを知る

**Focus on** 木の“見えないダメージ”を測る簡易な方法

## Chapter 2 山火事と森林 ————— p11

01 林野火災の発生リスク：落ち葉の乾き具合から推定する

02 林床の延焼しやすさを調べる：室内燃焼実験

## Chapter 3 強風と森林 ————— p15

間伐によって風害リスクがどれだけ変わるか

**Focus on** あたらしい風荷重計測方法

## Chapter 4 大雪と森林 ————— p19

着雪は風の影響を大きくする

## Chapter 5 効率的な森林被害調査 ————— p20

リモートセンシングで効率的に森林被害調査

**Focus on** デジタルデバイスで効率的に被害調査

## Chapter 6 リスクの変遷 ————— p25

01 これまでのリスクの変遷：森林保険の損害填補データから読み解く

02 地球温暖化によってリスクはどのように変化するのか？

## 最新リスクマップ ————— p28

## 01 どこまで乾燥に耐えられる？ 干害の仕組みを探る

植物生態研究領域

才木真太郎

原山尚徳

飛田博順



### 干害とは

樹木は、光合成で葉の「気孔（きこう）」という小さな穴から二酸化炭素を取り込むと同時に、「蒸散（じょうさん）」という現象によって水分を放出します。これによって、通常の気象条件では、土壌から根が水を吸い上げ、その水は「道管」や「仮道管」といった幹の中の水が通る組織を通過して葉まで運ばれます。

しかし、雨が降らない日が続くと土壌が乾燥し、根からの吸水が難しくなります。さらに乾燥が進むと、植物体内の水分が失われて「脱水」が進行し、生理的機能に障害が生じます。最終的には、葉や枝が褐色に変色し、木全体が枯れてしまう「干害（かんがい）」が発生します（図1）。

近年、気候変動の影響により、異常に暑く雨が降らない日が増えています。こうした乾燥した日が続くと、全国に植えられているスギなどの樹木がダメージを受ける可能性があります。特に若い木は影響を受けやすく、水分不足により枯れてしまうことがあります。今後も気候変動が進むことで、干害の発生頻度や被害規模が増加することが懸念されています。

### 若い木ほど高い干害リスク

林野庁による民有林の干害実損面積のデータによると、植栽後の初期（1～5年生）に干害が多く発生しており、全体の約95%を占めています（吉藤ら 2019）。雨が降らない日が続くと、土壌の表層から乾くため、根の浅い若い木ほど、乾燥ストレ

スを受けやすくなります。これが、若い林分で干害被害が多い主な理由です。

近年普及が進んでいる「コンテナ苗」は、根が土に包まれている「根鉢（ねばち）」を持っているため、従来の裸苗（根がむき出しの苗木）に比べて、乾燥に強いとされています。しかし、コンテナ苗でも干害被害を受ける植栽事例が報告されており、完全に安全という訳ではありません。

スギは、全国各地で広く植栽されている日本の主要な造林樹種です。「尾根はアカマツ、中腹はヒノキ、谷はスギ」と言われるように、林業の現場では古くから、スギは湿っ

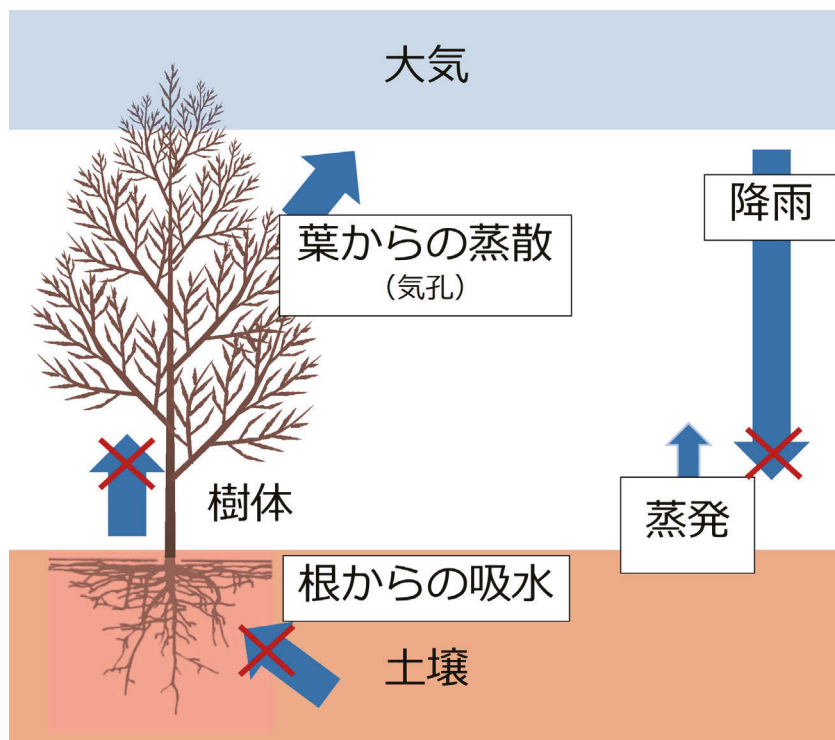


図1 土壌—樹木—大気間の水分移動の模式図  
雨が降らず、土壌が乾燥して、根からの吸水ができず、樹体からの脱水が進み干害が発生します。



た谷筋に適した樹種として知られてきました。実際、スギはヒノキに比べて水分の消費が多く、針葉と枝を含む部分である「シュート」がしおれやすく、乾燥に対して敏感であることが報告されています (Osone et al. 2021)。現在のところ、全国的にスギの干害が増加しているという傾向は見られていません。しかし、気候変動の影響により、今後は高温・少雨といった乾燥傾向が強まることが予測されており、水の消費が多く、しおれやすい性質を持つスギの若い林分では、干害被害が増加する可能性があります。

## 干害の生理メカニズムは未解明

「雨が降らないと樹木が枯れる」という現象は、一見すると単純に思えます。しかし、実際に樹木が枯死に至るまでの生理的なメカニズムについては、世界的にもまだ十分に解明されておらず、現在も研究が進められている分野です。

雨が降らず土壌が乾燥すると、樹木は通常、葉の気孔を閉じて蒸散による水分の損失を抑えようとします。これは、樹体から水分を抜けにくくするための防御反応です。しかし、気孔を閉じて水分の損失を完全に防ぐことはできず、徐々に脱水が進行していきます。

脱水が進むにつれて、樹木内部のさまざまな機能に障害が生じますが、どの機能がどの程度失われると枯死に至るのかについては、諸説あり、明確な答えはまだ得られていません。

また、生理的な機能障害は目に見えにくく、一見健全そうに見える苗木でも、内部では深刻なダメージが進行している場合があります。一例を見てみましょう (図2)。

スギの苗木の水やりを数日間止める乾燥処理を行いました。その後、水やりを再開しましたが6週間後には個体全体が茶色く変色しました (図2右)。この結果から、乾燥

処理が終わった時点で回復不能な生理状態に陥っていたと判断することができます。一方、乾燥処理直後 (1週間後) はまだ個体全体が緑色をしていました (図2左)。つまり、回復不能になっていても外見的には見分けることが難しいことがわかります。

そこで、本研究では、日本の主要造林樹種であるスギの苗木を対象に、二つの実験を通じて干害発生のメカニズムの解明に取り組みました。まず土壌乾燥に伴って枯死に至る生理メカニズムを明らかにし、外見で判断できない、「枯れの生理的閾値」を探ることを目的としました。さらに、その枯死リスクが高まる土壌の乾燥がどの程度か、「土壌乾燥の閾値」についても明らかにすることを目指しました。

## 室内実験で探る土壌乾燥で枯れる生理的閾値

スギの苗木を育てている土壌を人工的に乾燥させた後に再び水を与える実験を行い、どのくらい乾燥すると回復できずに枯れてしまうのかを調べました。苗木を鉢に植えて育て、一部には定期的に水を与え、別の苗木には数日～数週間にわたって水やりを止めました。その後、すべての苗木にまた水を与え、35日後に枯死の有無を観察しました。水やり再開の直前と35日後に、様々な生理機能を測定しました。

水を止めると、苗木のシュート (葉と枝を含む部分) の水分は徐々に減っていきました。初期段階では、気孔が閉じて水分の蒸発を抑えるという、他の樹種でも認められている水を節約する反応が見られました。しかし、乾燥期間が長くなると、ある段階を境に水を再び与えても回復せず、枯れてしまう苗木が現れました (図3)。

水やり再開直前の生理的な機能を、生存個体と枯死個体と比較してみると、脱水の程度を示す「シュートの水ポテンシャル」、針葉の細胞の損傷度を示す「針葉の電解質漏出率」、光合成機能の健全性を示す「光合成の最大光量子収率」などの項目が、枯死前後で大きく変化していました。このことから、これらの指標が、枯死の生理的閾値を示す有力な候補となることがわかりました。つまり、苗木がどの程度乾燥すると回復不能な状態に陥るのかを、外見ではなく内部の生理的变化から判断できる可能性があるということです。

さらに、枯死の生理的閾値をわずかに超えた苗木の幹内部を特殊な顕微鏡で観察したところ、本来水で満たされているはずの仮道管の中が空になっていたり、細胞の形が変わったりしている様子が確認されました (図4)。これらの結果は、幹内部の構造的な損傷が枯死の決定要因となる可能性を示す、新たな知見となりました。

この研究によって、スギの苗木が乾燥によって枯れてし

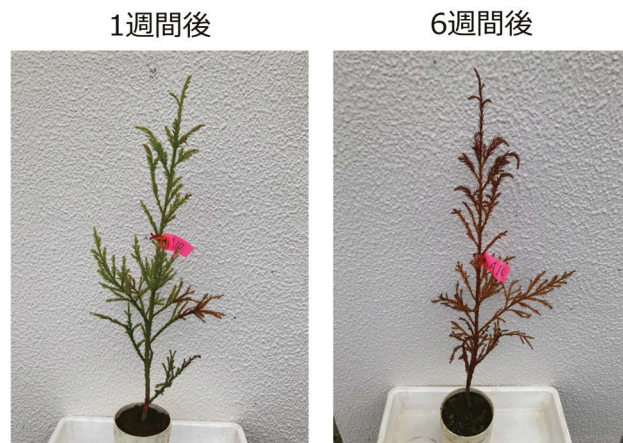


図2 乾燥処理後に毎日水やりを行ったスギ苗木  
水やり再開から1週間後 (左) と6週間後 (右) の状態です。

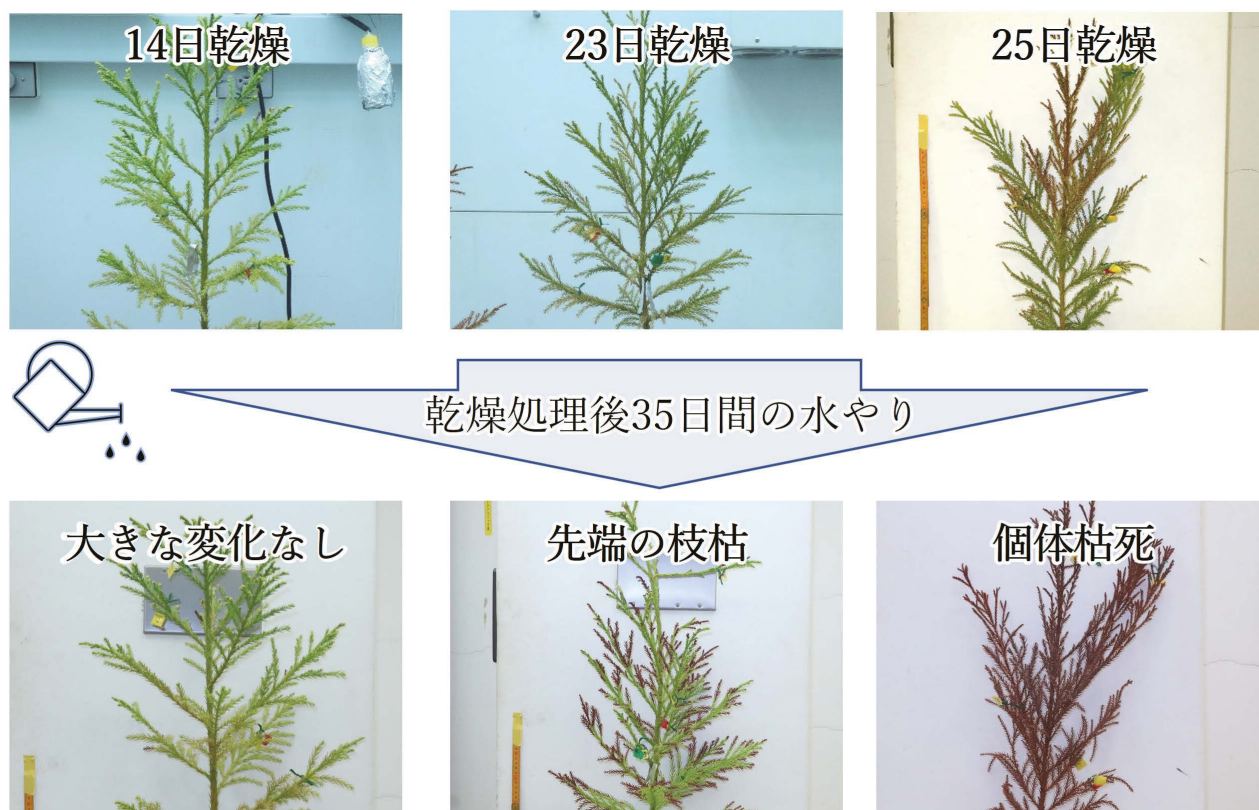


図3 乾燥処理後（上）と35日間の十分な水やり後（下）のスギ苗木の様子  
下段右端は、個体全体が褐色に変色して枯死した個体です。

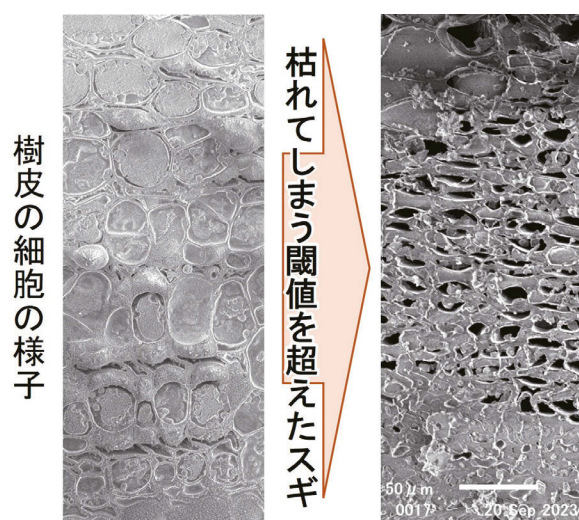


図4 枯れる生理的閾値を超えたスギ苗木の幹内部の細胞が変形している様子  
健全な細胞（左）に比べ、乾燥が進み変形したり水が抜けたり（黒色の部分）しています（右）。

もう生理的な閾値が明らかになりました。水分が減少すると、内部では回復不能なダメージが進行していることがあるのです。

### 屋外実験で探る土壌乾燥の閾値

次に、屋外の苗畑で、コンテナ苗を用いた乾燥実験を行いました(図5)。土壌の乾燥程度は、「土壌の水ポテンシ



図5 屋外で降雨遮断実験を行ったビニールハウス（上）とハウス内に植栽したスギ苗木（下）

ル」という指標で示され、以下の3つの代表的な閾値があります(図6)。

- ・成長量が低下する「成長阻害水分点」(-0.1 MPa)
  - ・葉がしおれ始める「初期しおれ点」(-0.6 MPa)
  - ・根が吸水できなくなる「永久しおれ点」(-1.5 MPa)
- 水分の消費が多いスギ苗木は、この3段階の土壌乾燥閾値のどこまで乾くと枯死リスクが高まるのかを調べました。



## ➤ 土壌水の乾燥程度を示す指標

土壌水ポテンシャル (MPa)

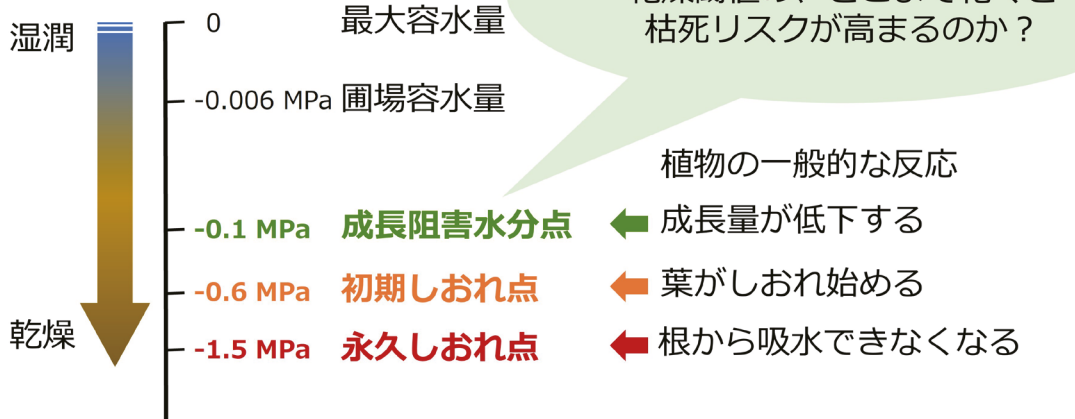


図6 土壌の乾燥程度を示す指標の土壌水ポテンシャルの3つの閾値

この実験では、植栽直後の土壌乾燥を想定した実験を行いました。予め乾燥度合いの異なる土壌を準備し、スギコンテナ苗を植栽しました。降雨遮断を5日から38日間続けて土壌乾燥処理を行い、スギ苗木の生理機能の測定を行いました。前述の室内実験と同じように、水やりを再開した後、枯死の有無を観察しました。その結果、土壌の永久しおれ点よりも乾燥した、強度の土壌乾燥では、スギ苗木のシュートの脱水が徐々に進行し、日数が経つと、室内実験で明らかにした生理的閾値を超えて枯れる個体が現れました (図7右)。一方、初期しおれ点から永久しおれ点の範囲の、軽度～中程度の土壌乾燥では、シュートの脱水が進まず、38日間の乾燥処理でも枯れる個体はありませんでした (図7左)。この実験結果から、水分の消費が多くしおれやすいスギ苗木でも、枯死リスクが高まるのは、永

久しおれ点以下まで土壌の乾燥が進んだ場合であるということがわかりました。

### 根の状態と干害リスク

この屋外実験で、水やり再開時に根を観察しました。土壌が永久しおれ点以下まで乾燥していて、枯れた個体では、新しい根がほとんど出ていませんでした (図8)。一方、永久しおれ点まで乾燥していない土壌で生き残った個体では、新しい根が多く伸びていました。このことから、土壌が永久しおれ点以下まで乾燥すると、新しい根を伸ばすことができずに、シュートの脱水が進むことが示唆されました。強い乾燥土壌への植栽は避けること、また、苗木が乾燥しにくい土壌深部へ速やかに根を伸ばせるかどうか、干害リスクを軽減する上で重要であるといえます。

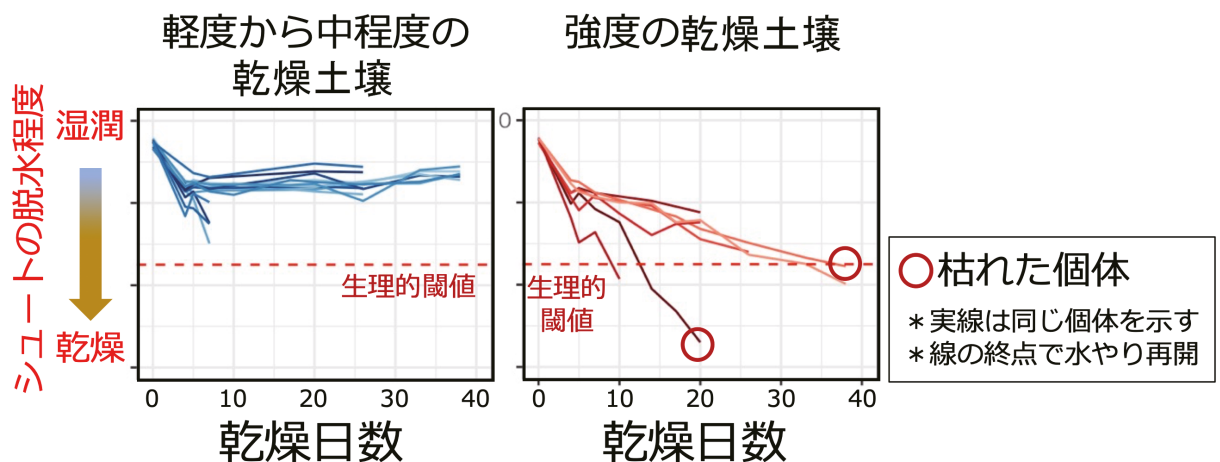


図7 土壌の乾燥に伴うスギ苗木のシュートの脱水程度の変化  
初期しおれ点から永久しおれ点の範囲の軽度から中程度の乾燥土壌 (左) と永久しおれ点以下の強度の乾燥土壌 (右) の結果を示しました。

・ **枯れた個体**：土壌が永久しおれ点以下に乾燥



**新たな根がほとんど出ていない**

・ **生き残った個体**：土壌が永久しおれ点まで乾燥していない



**枯れた個体と比べて新たな根がよく出ている**

図8 降雨遮断実験における水やり再開時の根の状態と水やり再開から約40日後の苗木の外観  
枯れた個体（上段）と生き残った個体（下段）を示しました。

## 条件を変えて実験し、研究を深めます

一つ目の室内実験では、土壌乾燥に伴ってスギ苗木が枯死に至る生理メカニズムを調べました。水分の消費の多いスギでも、気孔を閉じて蒸散による水分の損失を防ぎ、乾燥に対処していることがわかりました。見た目ではない、枯れの生理的指標としては、シュートの脱水程度、針葉の細胞の損傷度、光合成機能の健全性を示す指標が利用できることがわかりました。

二つ目の屋外実験では、どの程度まで土壌が乾いたら枯死リスクが高まるか？を調べました。土壌が永久しおれ点以下まで乾燥するかが重要な要因になることがわかりました。これは、Chapter1-02において、干害のリスク

マップ作成の指標の一つとして活用されます。

今回の結果は、スギの一つの系統の挿し木苗を用いた、特定の季節（シュートが伸長して成熟した時期）における実験に基づいています。今後は、スギの系統間での耐乾性の違いや、季節による応答の変化を考慮し、干害リスク評価の精度を高める必要があります。

### 引用文献

Osone Y, Hashimoto S, Kenzo T (2021) PLOS

One 16(11): e0254599.

吉藤奈津子・鈴木覚・玉井幸治（2019）森林  
総合研究所研究報告，18(3), 289-299.



02 全国の干害リスクを知る

森林災害・被害研究拠点  
岩崎健太  
森林防災研究領域  
勝島隆史  
植物生態研究領域  
飛田博順  
森林災害・被害研究拠点  
鈴木 覚



プロセスに基づいて干害リスクマップを作る

本研究では干害の発生プロセスの解明に基づいた全国リスクマップ作成を目指してきました。これは、実際に起こっている現象を理解し、現象の因果関係（プロセス）を反映したリスクマップを作成したいという考えに基づきます。

土壌水分が少ない状態が続くと干害が発生するのですが、プロセスに基づく、土壌水分量は雨・蒸発・蒸散・浸透の影響を受け、蒸発と蒸散は大気の状態にも影響を受けます。このような土壌水分量を決定づける項目同士の因果関係を数式にしてモデル化します（図1①）。プロセスを踏まえると気候変動のような過去データのない条件でも

予測ができます。また、干害が発生するかといった最終的な結果だけでなく、土壌水分や蒸散量など途中経過の値を出すことができ、モデルを検証・改良しやすくなります。さらに、途中経過を順にたどって問題点を特定し、被害防止策を見出すこともできます。ただ、デメリットもあります。一本の苗木で起こる生理プロセスは Chapter 1-01 の通り明らかになってきましたが、全国マップ作成に必要な様々な立地条件（地形・地質・土壌など）の影響はよくわかっておらず、プロセスとしてモデルに組み込みません。

干害と立地条件の関係は複雑です。先行研究で挙げられた干害が起こりやすい立地条件を表1に示します。干害

発生は本州や九州本島では急斜面で多かったものの、北海道や対馬では緩傾斜で多かったと報告されています。また、尾根の場合と谷の場合、風当たりの強い方位と日当りの良い方位、高標高と低標高など、

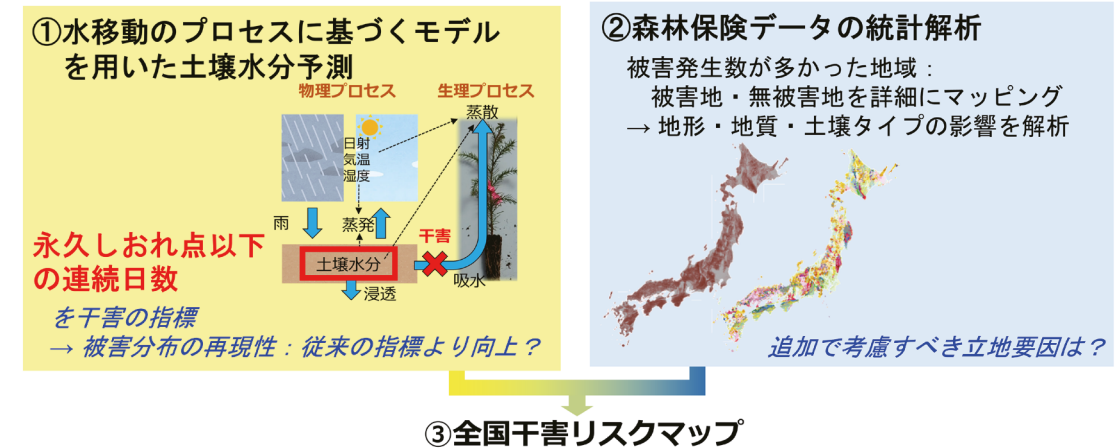


図 1. 本研究のアプローチ

表 1. 日本における干害発生と立地の関係の報告

地域	傾斜	斜面形状	斜面方位	標高	土壌	地質	文献
北海道宗谷地方	6~15°	尾根	主風向	山腹上中部	薄いA層 保水力が低い (礫質、岩屑土)		青柳・東原(1977)
栃木県塩谷町	>30°	尾根					大島ら(2021)
長崎県対馬	低起伏丘陵	谷	主風向		薄い土層	宮崎層群	西村(1974)
長崎県全域			南~西	低標高			久林ら(1995)
宮崎県南部	急斜面	尾根	南~南西				西村・讃井(1999)

土壌が薄い・保水力が低い

赤枠は共通していますが、それ以外は研究による結果の違いが大きいです。

ど、相反する様々な条件が報告されてきました。唯一、共通していたのは、土壌が薄く保水力が低い場合でした。これは、永久しおれ点以下の土壌水分が続くと枯死するという Chapter1-01 で解明された生理プロセスとも整合性があります。そのた

め、土層厚と土壌水分特性に着目して土壌水分のシミュレーションを行った上で、他に干害に影響する要因がないか実際の被害データを用いて調べることで、干害の全国リスクマップを作成することにしました（図 1）。

## 全国の干害被害分布

実態と合ったリスクマップを作るために、まず必要なのは、被害分布のデータです。高木の樹冠が大規模に枯れ上がる海外では、リモートセンシングを用いて干害被害地を特定する研究が行われてきました。しかし、日本の干害は、大半が幼齢林で小規模に生じるため、リモートセンシングの活用は困難です（図 2）。そこで、本研究では森林保険データを用いて、干害の被害分布を明らかにしました。2012～21 年における



森林保険の契約地と被害地の大きな位置を、森林所在地から特定しました。日本の干害のほとんどは 1 齢級（1～5 年生）で起こる（吉藤ら 2019）ため、実損面積の合計を 5 年生以下の契約面積の合計で割って、被害率を算出しました。全国を 20km グリッドに区切って算出した被害率が図 3(a) です。被害率は、道北、中央高地、紀伊山地、中国地方、高知西部で高くなっていました。図 3(a) は全ての樹種のデータ

図 2. 干害被害地の様子  
枯損木が下草に紛れて点在するので、上空からの撮影では見分けるのが困難です。

です。道北、中央高地、紀伊山地、中国地方、高知西部で高くなっていました。図 3(a) は全ての樹種のデータ

ですが、樹種ごとに分けても、全国規模での分布傾向は大きくは変わりませんでした（図 3(b)）。そのため、今回は樹種を分けずに被害分布とリスクマップを比較しました。なお、ヒノキでスギより被害率が全体的に高かったのは、吉藤ら (2019) による過去の傾向と同じでした。

## 降水量ではなく永久しおれ点を基準に干害リスクを評価する

従来の干害指標で被害分布を再現できるか検討します。森林で干害が起こる基準として、これまで国内で提案された指標には、無効降水（一定量以下の降水）の連続期間があります。小河 (1996) では、半旬（5 日間）の降水量が 10mm 以下の期間が 6 月から 10 月には 6 半旬（30 日間）、10 月から 3 月には 8 半旬（40 日間）以上続いた場合に干害が起こるとされました。2012～21 年において、この指標を超えた年の割合を求めました。すると、干害リスクが高い地域は道東、東北の太平洋側、関東、瀬戸内となり、実際の被害分布と全然合いませんでした（図 4(a)）。そこで、永久しおれ点に基づくリスク評価を試みました。FAO(国連食糧農業機関)のモデル (Allen et al., 1998) を用いて、降水量と蒸発・蒸散・浸透の差（図 1 ①を参照）として表層の土壌水分を計算しました。蒸散の特性は針葉樹の幼木を想定しました。また、土壌の特性として A 層（表層の有機質土壌）の水分特性と土層厚を用いました (Yamashita et al. 2021, 2024)。これによって A 層の土壌水分を計算し、連続して永久しおれ点以下になる最長日数を年ごとに算出しました。2012～21 年の最長連続

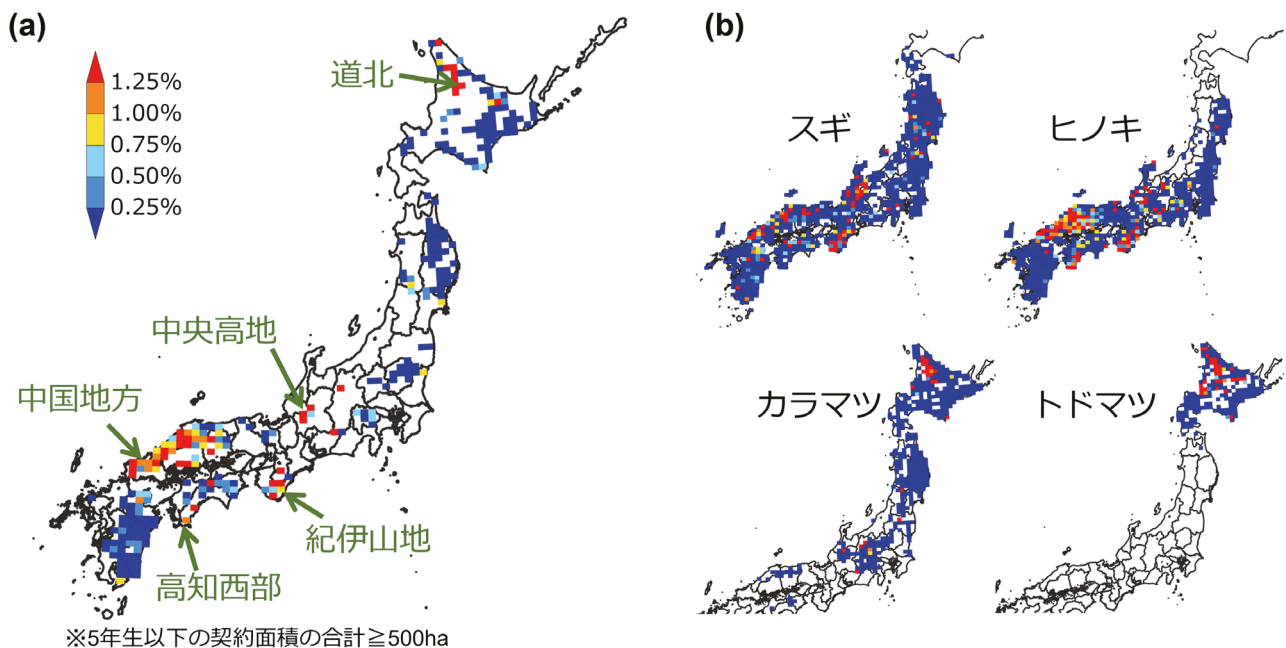


図 3. (a) 全樹種および (b) 樹種ごとの干害被害率の全国分布  
被害率は、道北、中央高地、紀伊山地、中国地方、高知西部で被害率が高くなっていました。契約面積が狭すぎるとデータのばらつきが大きいので、(a) では 5 年生以下の契約面積の合計が 500ha 以上のグリッドのみを示しています。



(a) 従来の指標（無効降水日数）

(b) 新たな指標（永久しおれ点日数）

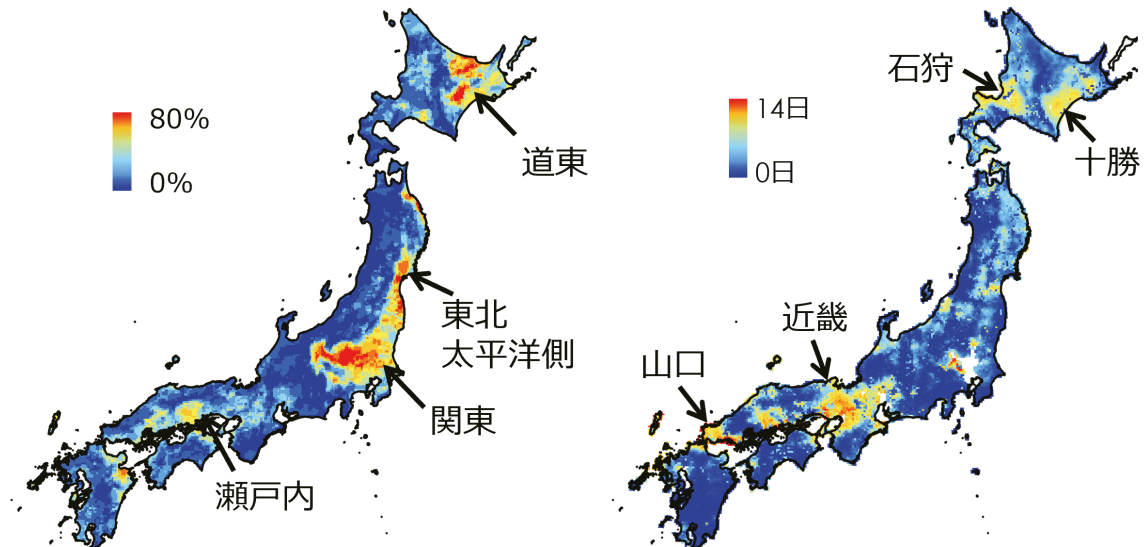


図4. (a) 従来の干害発生年の割合と (b) 永久しおれ点以下になる年最長連続日数の全国分布  
永久しおれ点を基準としたリスク計算により、関東から東北にかけての過大評価と山口県の過小評価が改善しました。

日数を平均した結果が、図4(b)です。解析結果には土層厚が関係していました。土壌が薄い山口県や近畿では乾燥する期間が長く、土壌が厚い関東では乾燥期間が短いと推定されました。この解析の結果、従来の指標と比べ、関東から東北の過大評価および山口県の過小評価が改善しました。しかし、北海道・中部・近畿・四国は、まだ実際の被害分布と合っていないので、もう一工夫が必要です。

### 干害の発生要因を知ってさらに改善

さらなる改善のため、2017～21年度に都道府県（北海道は広いので振興局）ごとの被害報告数が、最も多かった山口県と北海道上川総合振興局を対象として、被害地と無被害地を小班単位でマッピングし、干害発生に影響する立地要因をさらに細かく検討しました。この解析の詳細は、Iwasaki et al. (2025) をご参照ください。

概要として、山口では急傾斜地で被害率が高い傾向があったに対し、上川では特にカラマツについて、台地（河岸段丘）で被害率が高くなっていました。北海道では、非

火山性土壌（火山灰が積もってできたものではない土壌）の台地や丘陵に、重粘土と呼ばれる粘性が強く、排水不良で、硬い土が分布していることが知られてきました。粘土



図5. 上川地域の干害発生林分の土壌重粘土とよばれる、きわめて硬い特殊土壌です。

含有量が多いと、植物が吸い上げられる水を保持できる適度な大きさの土の間の隙間が少ないため、乾燥が続いたときに干害を受けやすくなります。道北でも牧草地では、重粘土地での干害が報告されてきました(三木ら, 1986; 中辻, 2008)。実

際、現地調査を行うと、干害被害地の土は乾燥時には穴を掘って土壌の断面にスコップを突き刺そうとしても刺さらないくらい、ガチガチに硬くなっていました(図5)。以上のことから、北海道では、重粘土という特殊土壌が干害発生

の主要因になっていると考えられ、山口など他の地域と干害発生立地の特徴が大きく異なることがわかりました。

(a) 重粘土の分布

(b) 干害被害率

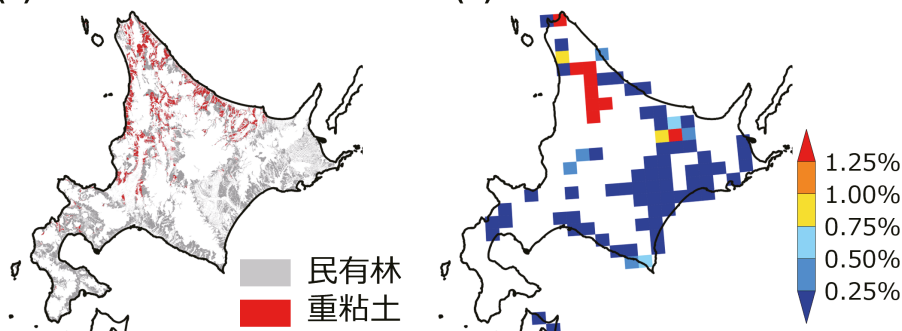


図6. 北海道における (a) 民有林および民有林内の重粘土の分布と (b) 干害被害率の分布  
重粘土が多く分布する道北内陸の台地で、被害率が高くなっていました。

干害リスクマップを作る  
以上の結果を踏まえて、全国を20kmグリッドに区切り、干害リスクマップを作成しました。北海道以外では、永久しおれ点以下になる連続日

数（図 4(b)）、山口で影響が認められた斜面傾斜、そしてスギとヒノキでは被害率が異なった（図 3(b)）ため主要樹種、の三つの要因から、図 3(a) の被害率を再現できる統計的なモデルを作りました。北海道では、現時点では重粘土以外の影響がわからなかったため、民有林に占める重粘土の割合のみを用いて、リスクを計算しました。北海道における重粘土分布は、台地段丘かつ非火山性土壌の場所として、地形分類図と土壌図から作成しましたが、干害被害率の分布ともよく対応していました（図 6）。

このようにして作成したリスクマップを図 7 に示します。道北・中央高地・紀伊山地・中国地方・高知西部でリスクが高いという実際の被害分布と合ったリスクマップができました。

### 工夫を重ねて、リスクマップを改良していきます

これまで、日本の森林の干害リスクは、降水量のみから評価されてきました。それに対し、Chapter1-01 の苗木試験から土壌水分が永久しおれ点以下になることが干害発生に重要であることが示されたため、永久しおれ点以下の連続日数を新たな干害発生指標として提案しました。さらに、森林保険データの解析から粘土質な土壌や斜面傾斜が影響することがわかったため、この影響も組み入れることで、被害実態に合ったリスクマップを作成できました。

北海道において重粘土が干害発生に影響するプロセス、本州における斜面微地形の影響などに関して、今後、調査・データ蓄積・解析を継続することにより、リスクマップの更なる改良を進めていきます。

#### 引用文献

- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al (1998) Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. FAO.
- 青柳正英・東原義晴 (1977) 北方林業 29(5), 128-132.
- Iwasaki K, Suzuki S, Tobita H. et al. (2025) Ecological Indicators 172, 113290. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113290>
- 久林高市 (1995) 長崎県総合農林試研報 (林) 26, 1-20.
- 三木直倫・高尾欽弥・西宗昭 (1986) 北海道立農試集報 54, 21-30.
- 中辻敏朗 (2008) 北海道立農業試験場報告 119, 1-53.
- 西村五月 (1974) 長崎農林試研報 (林) 5, 1-23.
- 西村五月・讃井孝義 (1999) 森林立地 41(2), 93-102.
- 小河誠司 (1996) 森林防疫ニュース 45, 62-69.
- 大島潤一・加藤大河・飯塚和也 (2021) 日本緑化工学会誌 47(1), 27-32. <https://doi.org/10.7211/jjsrt.47.27>
- Yamashita N, Ohnuki Y, Iwahashi J, et al. (2024) Geoderma 446, 116896. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116896>
- Yamashita N, Tsurita T, Toriyama J, et al. (2021) A spatial dataset of soil physical properties in Japanese forest [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4505671>
- 吉藤奈津子・鈴木寛・玉井幸治 (2019) 森林総合研究所研究報告 18(3), 289-299. [https://doi.org/10.20756/ffpri.18.3\\_289](https://doi.org/10.20756/ffpri.18.3_289)

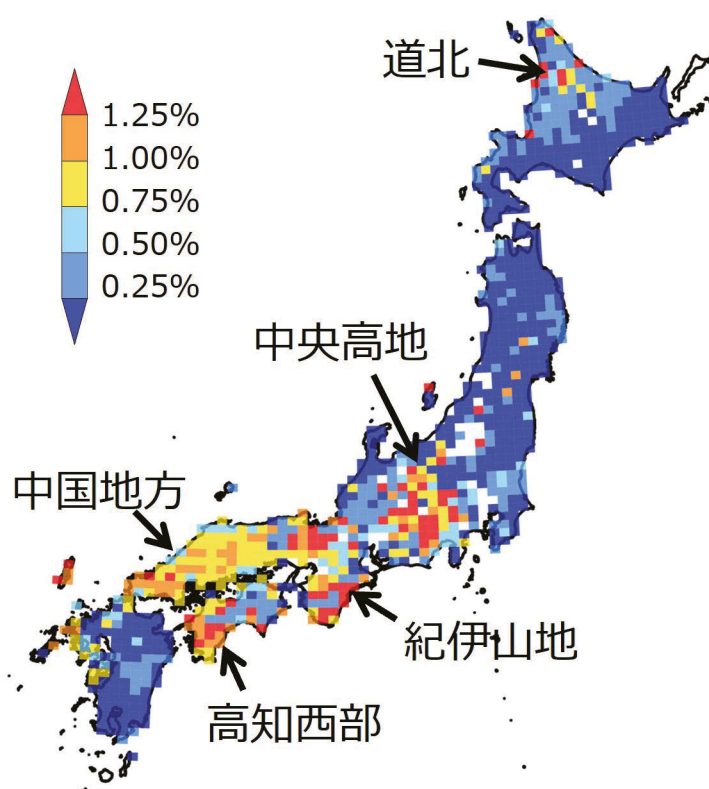


図 7. 本研究で作成したリスクマップ  
干害被害率と大きな齟齬のないリスクマップが作れました。

## Focus on

## 木の“見えないダメージ”を測る簡易な方法

植物生態研究領域 才木真太郎

## 見た目ではわからないスギ苗の枯死

私たちの乾燥実験から（Chapter1-01 参照）、スギ苗木は見た目にはわからなくても内部のダメージによって枯死することが明らかになりました。こうした見えないダメージが、木の内部でどのくらい進んでいるのかを早く知ることができれば、木を守るための手立てを打つことができます。そこで今回紹介するのが、「電解質漏出率」という値を使った、木が枯れそうかどうかを判断する方法です。

## 見えないダメージを数値化

木の生きた細胞の中には、私たちと同様に、水や栄養がたくさん含まれています。元気な細胞ならその中の成分は外に出ませんが、細胞が傷んでくると、中の成分がしみ出します。このとき、水の中にどれだけ電気が通るか（電気伝導率）を測ることで、電解質漏出率＝細胞の壊れ具合がわかるのです。つまり、見た目ではわからないダメージも、数値でとらえることができます。

## 誰でもできる！簡単な道具と手順

幸いにも、この方法には、難しい機械や専門的な知識は必要ありません。必要な道具は、お店やインターネット通販で手に入るものばかりです。操作もシンプルで、高校の理科室や林業の現場など、いろいろな場所で活用できます。使用する主な道具は、電気の流れを測る「電気伝導率計」熱に強い小さなビン（バイアル瓶）、圧力鍋（調理用でもOK）、とてもきれいな水（超純水や脱イオン水）です（図1）。



図1 スギの葉の電解質漏出率測定  
のイメージ  
超純水の入ったバイアル瓶にサンプルを投入します。奥に置かれているのが電気伝導率計です。

測定の手順もシンプルです。現場で、枯れそうな苗木の枝（シュート）を切って採取し、すぐに湿らせた脱脂綿と一緒に袋へ入れ、冷やしながらか持ち帰ります。その後、水道水と超純水で葉を洗い、針葉10枚ほどをバイアル瓶に入れます。最初に電気伝導率を測定し（1回目）、一晩おいて再

び測定し（2回目）、最後に圧力鍋で瓶ごと煮沸し、冷めたらもう一度測定します（3回目）。3つの数値をもとに電解質漏出率を計算し、決められた基準（閾値）を超えていれば「枯れる可能性が高い」と判断することができます（図2）。この方法のいいところは、葉が緑のうちから、枯れそうかどうかを見つけられること、数日で結果がわかるので、すばやく対応できること、だれでも扱える道具と手順で、特別な技術はいらないことです。

## 今後の課題と注意点

とても便利なこの方法ですが、まだいくつか検討事項があります。この測定では「どれくらい細胞が壊れているか」はわかりますが、「なぜ枯れたのか（乾燥？病気？）」までは判断できません。そのため、枯死の原因を知るには、他の調査と組み合わせることが大切です。また、木の種類や地域によって「枯れる閾値」が違う可能性があるため、それぞれに合った基準を調べる必要があります。

この簡易な枯死判定の方法は、木の内部で起きている見えない変化をとらえるための、大きな手がかりになります。森や木を守るために、「今、何が起きているのか」を早く正確に知ることはとても大切です。

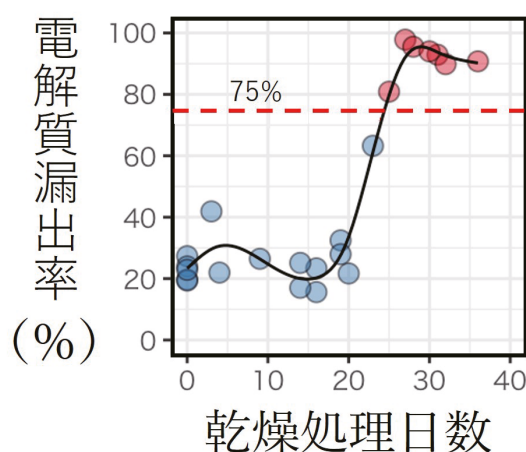


図2 乾燥処理日数と電解質漏出率の関係  
赤い点が枯死個体を意味し、電解質漏出率が75%を超えた個体はすべて枯死しました。電解質漏出率75%を基準に枯死する個体が判別できます。



# 01 林野火災の発生リスク： 落ち葉の乾き具合から推定する

森林防災研究領域

吉藤奈津子

玉井幸治



## 林野火災の発生リスク

世界では温暖化に伴う林野火災の増大が懸念されています。日本では、林野火災発生件数は1950年代から1970年代前半にかけて増加しましたが、その後減少傾向をたどり、1970年代は年間平均6437件発生したのに対し2014-2023年は平均1267件と報告されています（総務省消防庁、2024）。林野火災リスクを評価するには、発生リスクと発生後の延焼拡大リスクの両方を考える必要があります。林野火災は一般に林床（森林内の地表）の落葉落枝が燃えることから始まるので、発生リスクにおいては火種があるかどうかと、火種さえあれば着火できるほど落葉落枝が十分乾燥しているかどうかが重要です。そこで林床の落葉層の含水比（＝水分の重量／落葉の乾燥重量、含水比が小さいほど乾燥している）を推定することで、林野火災の発生危険日数の推定を試みました。

## 林床の枝葉の乾き具合を推定する

含水比の推定には玉井のモデル（Tamai 2001; 玉井ら2019）を用いました。降水量と日射量から落葉層の含水比変化を推定するモデルです。林床の落葉層をバケツに見立て、バケツの中にたまった水量が含水比に相当します（図1）。降水によって含水比は増加しますが、最大含水比

を超える降水はバケツからあふれて土壤中に浸透するとしています。降水が無い時は蒸発によってバケツの水量は減少します。蒸発量の計算式は広葉樹の葉を用いた実験に基づく経験式で、林床の日射量とその時の含水比から求めます。林床に届く日射量の割合、すなわち、相対日射率（＝林床の日射量／樹冠上の日射量）は樹冠の枝葉の疎密具合によって異なりますが、今回は日本全国が一様な森林で覆われていると仮定し、新植地など林床に届く日射量の割合が多い森林、若齢林など中程度の森林、壮齢林など樹冠が密で林床に届く日射量の割合が少ない森林を想定して、それぞれ林床の相対日射率を60%、20%、7%で一定とした3つの条件で計算しました。樹冠遮断率（林床まで届かない降水の比率）や落葉の量、最大含水比など、それ以外の計算条件は全て同一で一定と仮定しました。降水量と樹冠上での日射量は気象庁が提供する1958-2010年のデータ（DSJRA-55、空間解像度5km）を用いました。計算間隔は1時間で、日最小含水比が0.2 g/g未満となった日を林野火災発生危険日とし、その年間総日数を算出しました。同じDSJRA-55データを用いて別途推定された積雪深データを用い（Katsuyama et al., 2025）、積雪のあった期間は発生危険日から除外しました。

## 林野火災発生危険日数マップ

図2は林野火災発生危険日の年間総日数（1958-2010年の平均）の推定結果です。3つのマップを比較すると、同じ地域でも林床の相対日射率の異なる森林があることで発生危険日の日数がどう変わることが分かります。全国的に、相対日射率が60%、20%、7%の順に発生危険日が多いと推定されました。つまり、同じ地域でも林床まで届く日射の割合が多い樹冠が疎な森林ほど発生危険日が多くなるこ

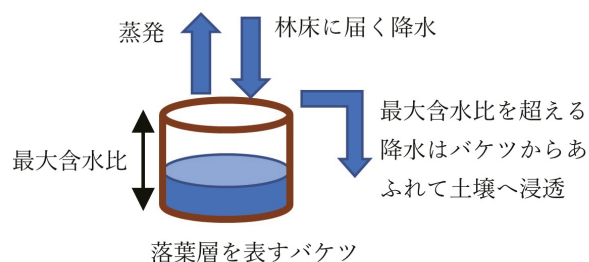


図1 林床の落葉の含水比を推定するモデルの概要

とを示しています。また、個々のマップをそれぞれ個別に見てみると、同じ条件の森林でも地域によって発生危険日の日数がどう異なるかが分かります。3つのマップはいずれも地域分布の傾向はおおむね同様で、関東から東海の太平洋側、中国地方の瀬戸内海沿岸部、九州沿岸部で発生危険日が多いと推定されました。これらの地域は降水量が少なく日射量の多い地域におおむね該当しました。また、林床の相対日射率が60%と20%の場合は、特に北海道、東北の日本海側、北陸で発生危険日が少ないと推定されました(図2(a)、(b))。これらの地域は積雪期間が長く日射量の少ない地域でした。

では、相対日射率が60%、20%、7%の森林とは具体的にどのような森林でしょうか。図3に示すように、スギ・ヒノキ林の林床の相対日射率は胸高断面積合計(立木の胸の高さの幹の断面積を森林1haについて全て合計したもの)と相関があることがわかりました(玉井ら、2025)。若い幼齢林など胸高断面積合計が小さい森林は林床に届く日射量の割合が多く、落葉が乾きやすいため林野火災の発生危険日が多くなると考えられます。成長にともない胸高断面積合計が大きくなると林床に届く日射量の割合が小さくなり、林床の落葉が比較的乾燥しにくいために発生危険日は少なくなると考えられます。相対日射率を測定している森林は研究のための一部の試験地などごく限られた場所しかありませんが、スギ・ヒノキ林については収穫表などから胸高断面積合計が分かれば図3に基づいて相対日射率を推定することができるので、それに対応する発生危険日の推定もできるようになりました。

今回使用したモデルには、様々な仮定も含まれています。今後も精度の検証やモデルの改善を進めていきます。

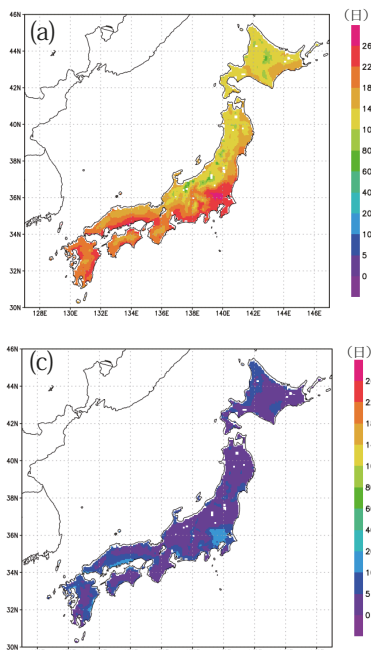


図2 林野火災発生危険日の年間総日数(1958-2010年の平均)  
林床の相対日射率が(a)60%、(b)20%、(c)7%の場合。林床の相対日射率が高いほど危険日が多いです。相対日射率と同じでも地域によって危険日数に差があることがわかります。

## 発生危険日には火の取り扱いに注意

今回のモデルによる推定結果は、火種があれば林野火災が発生する危険性があるほど林床の落葉が乾燥しているかどうかを示すものです。落葉層がどんなに乾燥していても、火種がなければ林野火災は発生しないはずですが、日本の林野火災の出火原因の2/3はたき火や火入れなどの人為的なもので、残りの1/3には不明・調査中が含まれ(総務省消防庁、2024)、落雷などの自然現象が原因と報告されているものは稀です。ですから、林野火災の発生を防ぐには、乾燥時に人為的な出火原因を作らないことが重要です。図2で発生危険日が多いと推定された地域や森林タイプでは、特に注意が必要です。

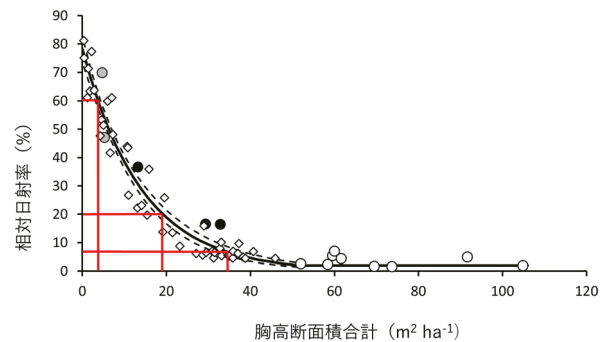


図3 スギ・ヒノキ林における林床の相対日射率と胸高断面積合計の関係  
赤線は図2(a)、(b)、(c)に相当する値を示しています(玉井ら2025より一部改変)。胸高断面積合計が大きいほど林床の相対日射率が小さいことがわかります。

## 引用文献

- 総務省消防庁(2024) 令和6年版消防白書.  
Katsuyama Y, Katsushima T, Takeuchi Y (2025) Cold Regions Science and Technology 235:104480. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2025.104480>.  
Tamai K (2001) In Dolman AJ et al. (ed.) Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Large-Scale Hydrological Models (Proceedings of a symposium). IAHS Publ.270: 53-55.  
玉井幸治, 吉藤奈津子, 後藤義明 (2025) 森林総合研究所研究報告, 24:23-27.  
玉井幸治, 吉藤奈津子, 高橋正義ら (2019) 水利科学 365:84-98.



## 02 林床の延焼しやすさを調べる： 室内燃焼実験

森林防災研究領域  
吉藤奈津子



### 延焼拡大リスクとは

林野火災が発生した場合、その後の燃え広がり方が急激になると被害は拡大しやすく消火活動も困難になります。林野火災は一般に林床可燃物（リターと呼ばれる地表に堆積した落葉落枝など）が燃えて炎が林床を這うように燃え進む「地表火」から始まることが多いと考えられますが、その勢いが増すと樹上の枝葉に燃え移って「樹冠火」となり被害が急激に拡大するようになります（図1）。林野火災発生後の延焼拡大リスクを考えるためには、地表火の燃え広がり速さ、つまり延焼速度を知ることが重要です。

地表火の延焼速度には、風速、斜面の傾斜、林床可燃物の量・質・含水比（湿り具合）が影響します。風速や林床可燃物の含水比は気象条件によって時々刻々変化する要素です（含水比の変化は林相にも影響されます（前の記事参照））。斜面傾斜は地形で決まる要素です。一方、林床可燃物の量や質に関する要素は樹種や林相によって異なると考えられます。質に関する要素には、表面積・体積比といった個々の可燃物の形状に関する要素や、パッキング率と呼ばれる可燃物層として堆積したときの状態に関する要素、

発熱量など、複数の要素があります。そこで、樹種の違いが地表火の延焼速度の違いに及ぼす影響を調べるため、日本の主要樹種であるスギとアカマツの葉を用いた室内燃焼実験を行い延焼速度を比較しました。

### 燃焼試験

風速と傾斜の影響を排除するため、室内に水平に設置した実験台を用いて無風、傾斜無しの条件で実験を行いました。不燃素材の板で作成した1.5 m×1.0mの実験台の中に一種類の可燃物のみを敷き詰めて、一様で単純な条件の模擬的な林床可燃物層を作りました。可燃物は風乾させたスギ穂先大（長さ45cm程度）、スギ穂先小（長さ25cm程度）、アカマツ葉を用いました。スギ穂先には枝部分も一部含まれます（図2）。スギは数mmから1cm程度の小さな葉が枝に密生していて枯れると枝全体が落ちるので、枝部分も含めた大小2種類の穂先を用意しました。敷き詰める可燃物の乾燥重量は0.5から2.0 kg/m<sup>2</sup>まで約0.5 kg/m<sup>2</sup>間隔で変化させて複数回実験を行いました。エタノールを浸み込ませた不燃素材のテープを実験台の片方の端に横幅

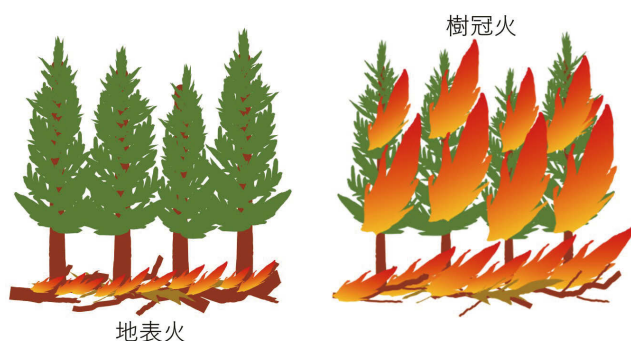


図1 森林における火災の形態の例  
地表火から始まることが多く、勢いが増すと樹冠火となり、被害が急激に拡大します。



スギ穂先（小）      スギ穂先（大）      アカマツ葉

図2 燃焼実験台に敷き詰めた模擬的な林床可燃物層の様子  
スギには枝部分も含まれ、穂先大は45cm、穂先小は25cm程度の大きさです。



いっぱいに設置し、ライターでライン状に着火しました(図3)。火炎が前進する様子を動画撮影し、火炎前線の進行距離と経過時間を実験台の両側板に記した目盛りを基準に10cm間隔で読み取りました。着火ラインからの距離が0.6-1.2mの範囲を火炎が通過する時に比較的延焼速度が安定していたためその範囲のデータを抽出し、経過時間と進行距離を直線回帰してその傾きを延焼速度として算出しました。実験ごとに着火前に格子状に設定した45点で可燃物層の厚さを測定し、パッキング率(=可燃物乾燥重量/(可燃物密度×可燃物層の厚さ))を算出しました。パッキング率は可燃物層の疎密具合を表します。パッキング率が小さいとき、可燃物層の中に隙間が多いことを表します。なお、パッキング率の計算に必要な可燃物密度は、後藤ら(2005)のスギ葉とアカマツ葉の値を用いました。可燃物の含水比(=水分の重量/可燃物の乾燥重量)も別途測定しました。

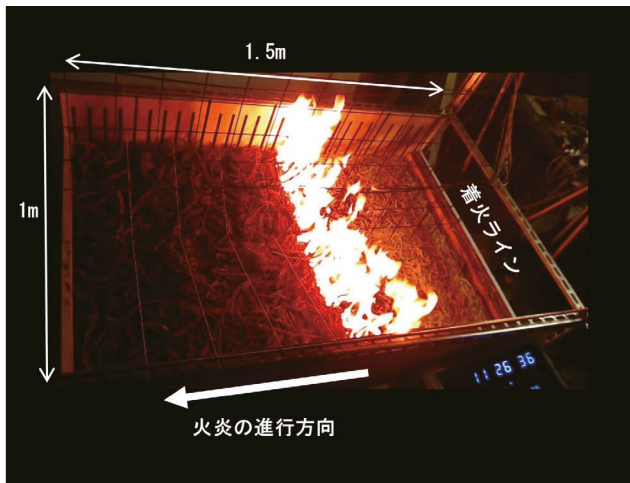


図3 燃焼実験の様子  
写真右端の着火ラインから線状の火炎が写真の左端まで伝播していきます。その速度を計測しました。

### 可燃物の樹種によって延焼速度が違う

図4は延焼速度の測定結果です。敷き詰めた可燃物量(乾燥重量)が多いほど延焼速度は速くなりましたが、同じ可燃物量でも種類によって延焼速度に違いがありました。スギ穂先大はスギ穂先小やアカマツ葉よりも延焼速度が速いことが分かりました。スギ穂先小とアカマツ葉の延焼速度は可燃物量が $1.5 \text{ kg/m}^2$ 以下では明瞭な差がみられませんでした。 $2.0 \text{ kg/m}^2$ の時はアカマツ葉の方がスギ穂先小より延焼速度が遅く見えますが、データ数が少ないのでさらに検証が必要です。

同じ可燃物量でも種類によって延焼速度が異なる理由の一つとして、パッキング率の違いが考えられます。パッキング率が小さいほど可燃物層の中に隙間が多い状態を表します。燃烧には酸素が必要ですが、パッキング率が大きいと可燃物層に十分な酸素を取り込みにくくなるため延焼速

度が遅くなると考えられます。スギ穂先は先端が枝分かれした嵩張りやすい形をしています(図2)、個々のサイズが大きいスギ穂先大はより嵩張りやすく、同じ乾燥重量のスギ穂先小やアカマツ葉より可燃物層が厚くパッキング率は小さくなりました。このことがスギ穂先大の延焼速度が速かった理由の一つと考えられます。

延焼速度の違いには他の要素も影響している可能性もあります。例えば、葉の形状に関する要素である表面積・体積比の違いは延焼速度に与える影響が大きいと考えられる要素の一つですが、アカマツ葉とスギ穂先、また、同じスギ穂先でも大と小では表面積・体積比が異なるかもしれません。今後もさらなる検討が必要です。

実際の森林の林床可燃物は複数の樹種の葉や枝、実などが混在し、下層植生もあって複雑です。今回の実験は一種類の可燃物だけを敷き詰めた一様で単純な条件で行ったもので、その結果を直接実際の森林に当てはめることはできませんが、こうした基礎的な知見の蓄積は日本の林野火災の延焼リスクの評価に役立てられると考えています。

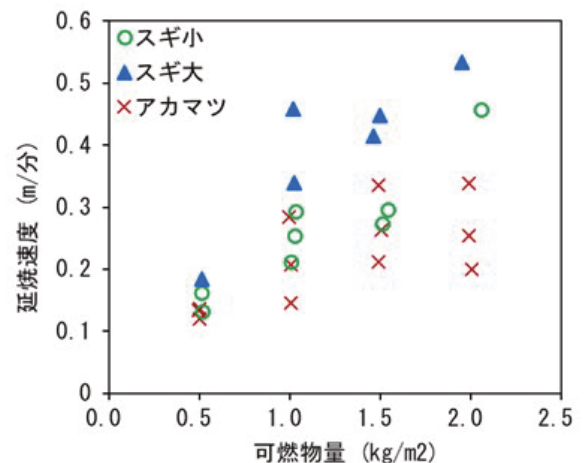


図4 延焼速度の測定結果  
可燃物量が多いほど延焼速度は速く、同じ可燃物量でもスギ穂先大は他よりも延焼速度が速いことが分かりました。

#### 引用文献

後藤義明, 玉井幸治, 深山貴文ら (2005) 日林誌, 87(3), 193-201.

## Chapter 3 強風と森林

# 間伐によって風害リスクが どれだけ変わるか

森林災害・被害研究拠点

宮下彩奈

森林防災研究領域（現 東京農工大学）

南光一樹

森林防災研究領域

勝島隆史

森林災害・被害研究拠点

鈴木 寛



## 間伐は不可欠だが風害リスクが大きい

気候変動による台風の強度増大に加え、森林の保育が十分できずに過密化が進んで幹が細くなりがちであることから、将来的に森林が強風による倒木などの被害（風害）を受けるリスクが高まると見込まれます。そのため、間伐を行って樹木の成長を促し、風害を受けにくい強靱な林にする必要があります。ところが、間伐した直後の数年間は特に風害を受けやすいことが知られています。したがって、間伐直後のリスク増加を抑えながら、間伐を積極的に実施して健全な林を造成しなければなりません。しかし、どのような間伐を行えばどれだけ風害リスクが上昇するのかは明らかになっていません。そこで、ひずみゲージを利用した風荷重計測手法（Chapter3 FocusOn）を利用し、林木の間伐や伐採の前後で、残された木に作用する風荷重（樹木に作用する風の力）がどのように変化するのかを明らかにしました。また、これらの結果を反映した間伐直後の風害リスクマップを作製しました。

## 間伐で風荷重はどれだけ変化するか

人工林において間伐を実施すると、林の中に空間が開けて風が吹き込むことにより、残された林木に作用する風荷重が大きくなります。では実際に、間伐によって風荷重はどれだけ変化するのでしょうか。間伐方法が異なる2つの林分で試験を行いました。茨城県石岡市（40年生スギ・ヒノキ林、図1）と群馬県桐生市（37年生ヒノキ）の林分内に計測用のプロットを設定し、それぞれ本数20%の下層間伐と、本数30%の下層間伐を行いました。各プロットでは7個体の風荷重測定対象木を選び（図2）、間伐の前後にわたって風荷重の計測を行いました。結果は、サイズ等が異なる測定個体どうしても比較できるように、各測

定木の測定値を間伐を行わなかったプロットの個体の測定値で割って標準化しています。

石岡市のプロットでは間伐（本数間伐率30%）後に林木に作用する風荷重が平均して約1.4倍になっていました。一方、桐生市のプロットでは平均すると間伐前後での風荷重に変化はありませんでした（図3）。

この結果を見ると、間伐率20%と30%の間に大きな差があるように見えます。しかし、桐生市のプロットは樹木ごとの優劣差が大きかったので、下層間伐したときに間伐前後で林冠上層部の空間の開き具合に大きな変化がなかったと考えられます。そのため、単に間伐率だけでなく、間

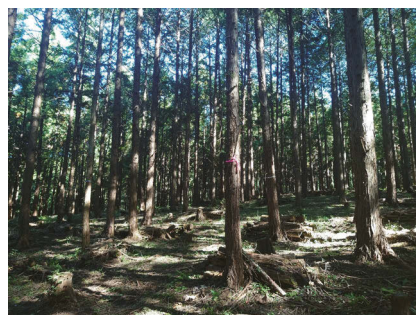


図1 茨城県石岡市のプロット  
間伐前の様子です。

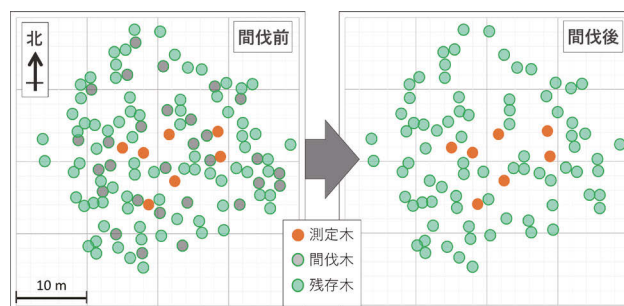


図2 間伐プロット（石岡市）内の林木の配置  
図中の丸い図形が樹木1個体を表します。橙色で示した測定木7本で風荷重の計測を行いました。



伐がもたらす空間の空き具合が結果に影響している可能性があります。様々な施業方法の影響を定量的に評価するためには、このような測定例を積み上げる必要があります。

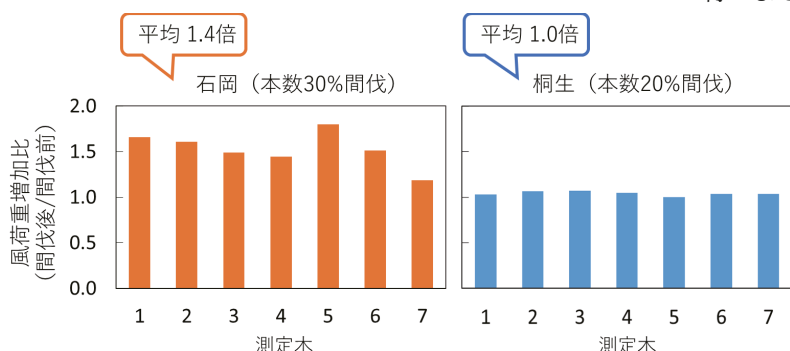


図3 ヒノキ人工林において間伐後に風荷重がどれだけ増加したかを示した図。データは30分平均値を使用し、各測定木(1～7)の値を掲載。石岡プロットでは平均して1.4倍に増加しており、樹木が受ける風の力が大きくなっていましたが、桐生プロットでは平均1.0倍であり、間伐の影響がみられませんでした。

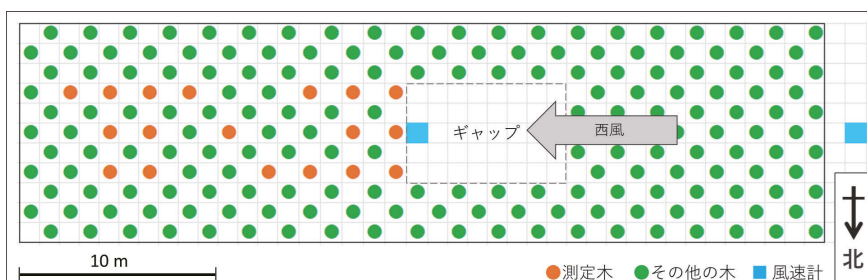


図4 スギ幼齢林を利用した伐採試験プロットの樹木配置図。ギャップ(図中のまとまった空白部分)を数段階で徐々に西側に拡大しながら観測を行いました。林内ギャップを40m<sup>2</sup>まで伐採を進めたときの模式図。プロットは、西風を主な測定対象とするため東西方向に長く造成し、測定木(橙色)はギャップの東側(風下側)に配置しました。



図5 伐採試験プロット内の写真。林内ギャップ西端から東方向に見た様子。中央に写っているポール先端に風速計を取り付け、ギャップ内の風速を測定しました。

## 林の中の空間は風荷重をどのように変化させるか

では、間伐によって林の中にできた空間(ギャップ)は、周辺の木に作用する風荷重をどのように変化させるのでしょうか。それを明らかにするため、より実験的な計測を行いました。森林総合研究所(茨城県つくば市)に設けた

樹高6mのスギ幼齢林を利用して、段階的な伐採により林内のギャップを拡大させながら18個体で風荷重の計測を行いました(図4、5)。風荷重と同時に林外とギャップ内で風速を記録し、各測定木の風荷重およびギャップに面した場所での風速が、ギャップの影響をほとんど受けない林外の風速に対してどのように変化するかを調べました。

ギャップが40m<sup>2</sup>(奥行が風上側に樹高の1.3倍程度)まで伐り開いた場合、伐り開く前に比べてギャップに面した測定木の風荷重が最大約2倍、ギャップ内の風速は約1.5倍に増加しました(図6)。得られたデータから、風向、ギャップサイズ、ギャップからの距離の関係を試験木ごとに分析し、これらの条件による林内木の風荷重の変化を推定しました。その結果、ギャップから離れた木でも風荷重が最大約1.2倍に増加することや(図7)、風向が西よりになって、風

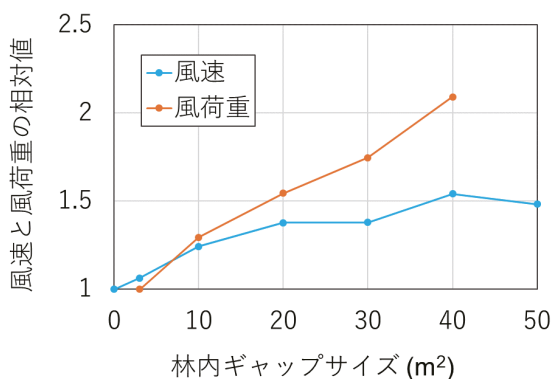


図6 ギャップが拡大したときの風荷重と風速の相対変化。ギャップに面した測定木の、風速は伐採前を、風荷重はギャップサイズ3m<sup>2</sup>時の値を1として示したものです。

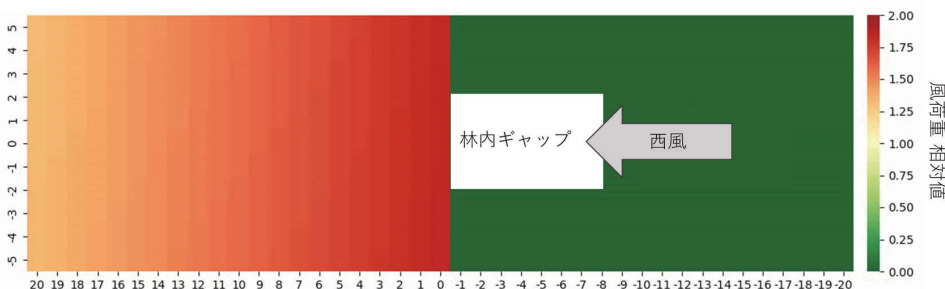


図7 風向、ギャップサイズ、ギャップからの距離の関係から推定した風荷重変化分布の一例。ギャップサイズ40m<sup>2</sup>で西風が吹いた場合の風下側の風荷重の増加率(伐採前に対する値)を示しました。

がギャップ内に入りこみやすくなるほど風荷重が増加することが分かりました。

このようにギャップの出現による林内木の風荷重の変化を明らかにすることは、森林内に生育する樹木の風害リスクや生育環境を樹木ごとに理解することにつながります。

### 間伐直後の風害リスクマップ

風荷重の計測結果を参考に、既存の風害リスクマップに対して間伐直後の風荷重および風速の増加がもたらす影響を示したマップを作成しました。

一例として、人工林での間伐 30% の結果を参考に、風荷重が 1.5 倍になった場合の安全率の変化を示したのが図 8 です。「安全率」とは、想定される力の何倍に耐えられるかを示した指標で、1 を下回ると風害が発生することを

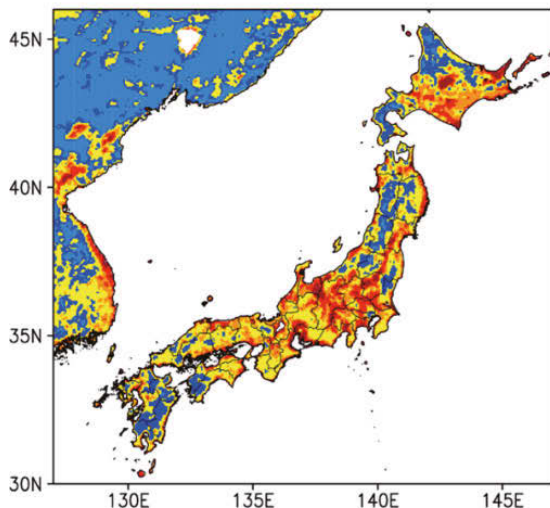
意味します。図 8 から、もともと安全率が小さめだった地域では、間伐によって安全率 1 を下回る場所がみられます。間伐は健全な森林を造るために欠かせない作業ですが気候変動の影響など将来的な風速の変化を考えた場合、風害リスクは全国的により高くなる可能性があります。

### 間伐による風害リスクの評価に向けて

立木を「風荷重センサー」とする手法を利用し、実際に間伐等による林内木の風荷重の増加を観測できたことは、他に例のない成果です。また、その成果をリスクマップに反映させるまで一連の手法を確立することができました。今後も風害リスク評価の定量化をすすめていきたいと思えます。

## 形状比80の林分の安全率（再現期間50年）

### 間伐前



### 間伐後

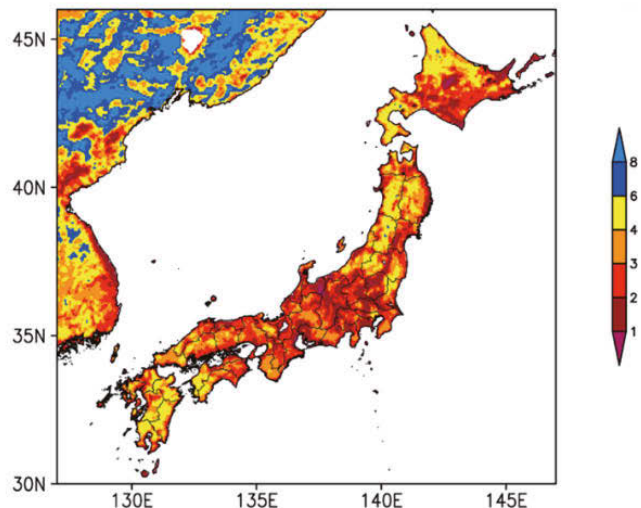


図 8 風荷重の増加を考慮した全国風害リスクマップの一例  
間伐前の安全率（左）に対し、間伐直後に風荷重が 1.5 倍になった場合の安全率（右）を示しています。形状比（樹高 / 胸高直径）が 80 の、比較的に太さのわりに樹高が高い樹木で構成された森林に 50 年に 1 度レベルのまれな風（再現期間が 50 年の風）が吹いた場合が想定されています。

### 謝辞

人工林における間伐試験の調査地を設定するにあたり、森林保険センター、森林整備センター、茨城県森連、ならびにつくばね森林組合のご協力を賜りました。



## Focus on

# あたらしい風荷重計測方法

森林災害・被害研究拠点 宮下彩奈・鈴木 寛

## 樹木の成長や生存に影響を及ぼす「風荷重」

野外で生育する樹木にとって、吹いてきた風は「力」として働き、一種のストレスとして樹木に大きな影響を及ぼします。例えば、樹木は風にさらされることで幹や根の成長をより強度が高まるように変化させることが知られています。一方、強すぎる風は倒木などの被害をおこし、個体の生死にかかわります。これは、人が手を加えていない自然林においては生態系を攪乱して新陳代謝をもたらす要素として重要ですが、林業生産を行う人工林では、経済的損失をもたらし、ときには人命をも脅かしかねない「風害」となります。しかし、風によって樹木に作用する力（風荷重）がどのように樹木の形態形成や風害を引き起こすのか、そのメカニズムには未解明な部分が多いのが現状です。

## 樹木に作用する風荷重を知ることが重要

立木に風が当たると、幹は曲がり、根元に最大の曲げモーメント（曲げようとする回転力）が働きます（図1）。風



図1 立木に働く風荷重と幹に生じる変形

荷重の大きさは風速のおよそ2乗に比例し、風速は樹木の高さ方向の位置によって異なり、さらに時間的にも変化します。これは、樹木の幹にかかる力の合計、力の重心位置、および方向が常に変化していることを意味します。そのため、樹木ごとにこれらの数値を計測することが、風が樹木におよぼす力学的な影響を理解するためにはとても重要です。しかし、これまで風荷重を野外の立木で測定する実用的な方法はありませんでした。

## 風荷重の計測方法を開発

そこで、私たちは野外で樹木の幹に作用する風荷重を精度よく計測できる手法の開発に取り組んできました。計測には「ひずみゲージ」（図2）と呼ばれる、測定対象物の変形を高頻度・高精度で計測できる小型のセンサーを利用し



図2 木の幹に貼られたひずみゲージ  
樹皮を剥いで材に接着します。

ます。樹木の幹に複数のひずみゲージを貼ることで、荷重に対するそれぞれの位置の変形を計測し、これらの数値を利用して樹木が受けた風荷重の大きさ、重心位置、方向を計算します（図3）。この手法は、1秒間に数回以上の高頻度で測定できるので、風速や風向が常に変化している野外環境にあっても、良好な計測精度で測定できることが分かりました。この方法を利用すれば森林内の樹木を伐る必要はなく、立木のままで測定することができます。また、樹木を「風荷重センサー」とみなせば、風害発生リスクの評価や森林周辺の大気の動きを解明することにも役立ちます。

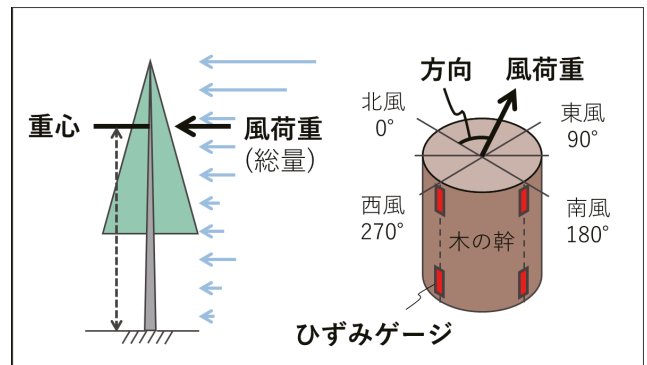


図3 ひずみゲージによる風荷重計測の模式図  
幹に貼った4枚のひずみゲージの出力差を利用して荷重の大きさ・重心・方向をもとめます。

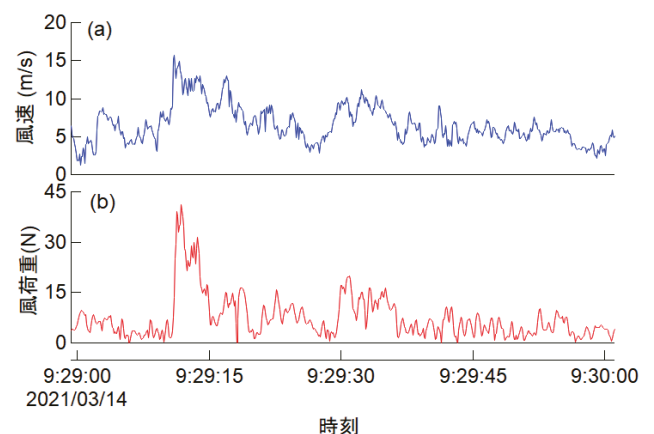


図4 風速と風荷重の変化  
1秒間に10回の計測頻度で測定しました。風速(a)と風荷重(b)の変化の傾向が似ており、風が強いほど風荷重が大きくなる関係が見て取れます。

### 引用文献

- Miyashita A, Suzuki S(2021)PLOS One, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245631>  
Suzuki S, Miyashita A(2025) PLOS One, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323532>

## Chapter 4 大雪と森林

## 着雪は風の影響を大きくする

森林防災研究領域

勝島隆史

勝山祐太

竹内由香里

## 大雪と強風が複合的に作用する

樹木への着雪により林木に生じる幹折れや根返りなどの被害を、冠雪害と呼んでいます。強風を伴った大雪では、大規模な冠雪害が生じやすいことが知られています。これは、着雪の荷重のみならず、風による荷重（風荷重）が複合的に樹木に作用するためです。このような樹木に作用する外力を把握することは、冠雪害の発生予測や、リスク評価の高精度化に繋がります。

## 着雪の影響を測る

それでは、着雪した樹木に作用する風荷重は、どのようにして推定したら良いのでしょうか？風荷重は、受風面積に比例し、風速の2乗に比例します。この時の比例定数を抗力係数と呼んでいます。抗力係数は、人工的に強風を発生させて物体周囲の空気の流れを実験する風洞試験により計測することができます。以前の森林保険センターとの研究プロジェクトでは、風洞装置を用いてスギの抗力係数に及ぼす着雪の影響を調査しました。着雪量や風速を変えながら多数の実験を行うことで、詳細なデータを得ることができました。ただし、風洞装置内に設置できる試験体の大きさには限界があることから、スギの枝葉を用いて実験を行いました。このような実験は樹木のごく一部の振る舞いを見ているのにすぎません。そのため、実験により得られた抗力係数は、実際の大きさの樹木が持つ抗力係数と異なる可能性があります。

今回、実際のスギの木の抗力係数を、実際の降雪と風を用いて明らかにする野外観測を行いました。野外観測では、着雪量や風速の条件を一定に保つことはできません。そこで、その時々を生じる樹木の風荷重や、風速、着雪量を同時に計測し、着雪したスギの抗力係数を求めました



図1 スギ樹冠に生じる風荷重と着雪量の測定装置

(図1)。風荷重は、風害の研究でも使用されるひずみゲージを用いて、幹に生じるひずみ量を計測することで求めました。着雪量は、ロードセルと呼ばれる重さを測るセンサーの上にスギの木を載せて、降雪時のスギの木の全体の重さの変化から求めました。

## 着雪は風の影響を大きくする

野外観測の結果、スギの木の抗力係数は、風速によって変化することが分かりました(図2)。着雪時の抗力係数は、着雪がないときの抗力係数と似たような変化を示しましたが、着雪が生じることで抗力係数は大きくなっていました。図3は、10分間最大瞬間風速が3～7m/sの範囲での、着雪量に対する抗力係数の関係を示したものです。得られた抗力係数は、ばらつきが大きかったのですが、着雪量が大きいほど抗力係数が高いといった傾向が見られました。着雪が生じると、木の受風面積が着雪の分だけ増加しますが、今回は受風面積を一定として取り扱って抗力係数を求めました。そのため、着雪時の受風面積の増加が、抗力係数の見かけ上の増加をもたらしたと考えています。

今回の結果は、着雪は樹木に作用する風荷重を増加させる効果があることを示しています。大雪時には、着雪による大きな荷重が樹木に作用します。これに加えて、風が吹いている状況では風荷重が作用します。着雪した状態では、同じ風速でも、より大きな風荷重が樹木に作用するようです。大雪と強風の複合的な気象状況では、冠雪害が生じやすくなることから、十分な警戒が必要です。

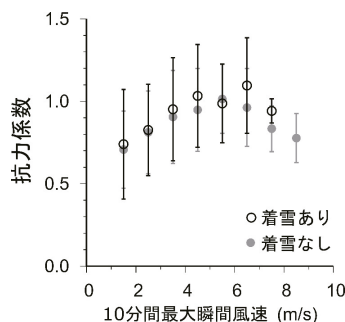


図2 風速と抗力係数の関係  
風速が大きいほど抗力係数が高いです。風速は10分間最大瞬間風速です。

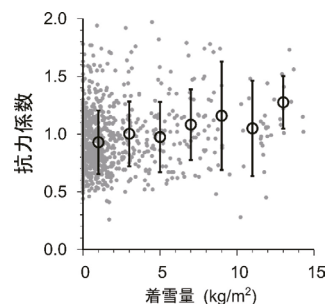


図3 着雪量と抗力係数の関係  
着雪量が大きいほど抗力係数が高い傾向がみられます。最大瞬間風速3～7m/sの範囲での解析です。



## Chapter 5 効率的な森林被害調査 リモートセンシングで効率的に 森林被害調査

森林災害・被害研究拠点

高橋正義

森林管理研究領域

齋藤英樹

林業工学研究領域

瀧 誠志郎

北海道支所北方林管理研究グループ

小幡進午

森林管理研究領域

西園朋広



### 被害調査とリモートセンシング技術

森林保険に加入した林分が気象害等による被害を受けた場合、どの程度被害を受けたのかを調べ、損害額を査定する必要があります。被害木が散乱する林分に分け入って被害林分を調べる現地調査は調査自体が大変危険です。また大規模な被害が発生した場合は、被害を受けた林分に至るまでの道路も同様に被害を受けることが多いため道路復旧まで現地にアクセスできず、損害額の査定に長い時間が必要であるのが実態です。衛星画像を用いたリモートセンシング技術は、被害を受けた林分に分け入ることなく、大規模に広がる被害を把握することができるため、安全かつ効率的な被害林分の調査に有効です。

### 画像解析プラットフォームの活用

図1に衛星画像を使って台風による風倒被害を受けた森

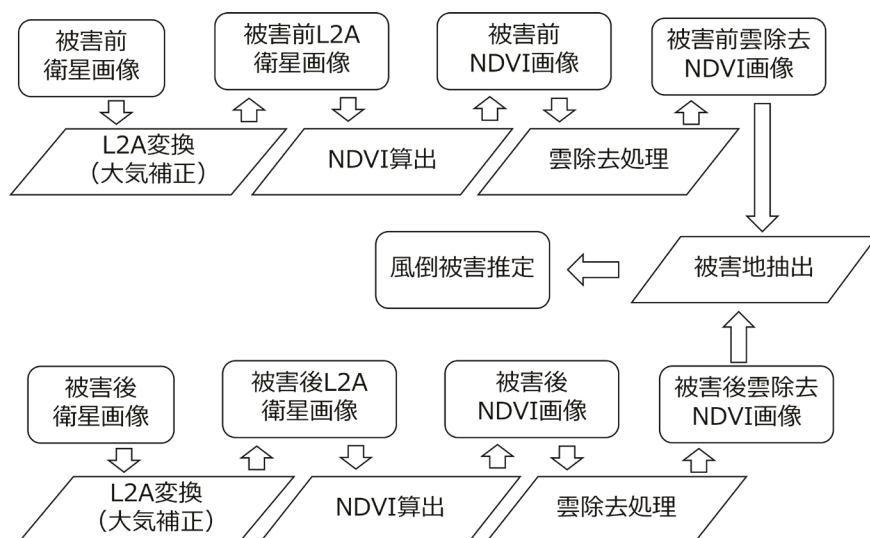


図1 衛星画像を用いた被害調査解析手順

林を推定する手順を示しました。衛星画像を用いた森林被害の把握技術を利用するには、このような解析作業を手順に従って的確に実行することが必要です。まず、対象地域を撮影した被害前の衛星画像から、対象の森林が映り込み、解析に使用可能な画像を検索して複数入手し、それぞれについて大気補正を施すなどの前処理を行う必要があります。次に、前処理を施した画像それぞれについて被害抽出に用いる画像指標である正規化植生指数（NDVI）を計算し、複数画像のNDVI情報を利用して雲などの解析を妨げる要素を取り除く処理を施した、被害前のNDVI画像を合成します。被害後の衛星画像についても同様に、解析に用いる複数の画像を検索、入手し、大気補正等の前処理とNDVIの計算、雲を除去したNDVI画像の合成を行います。このようにして準備した被害前と被害後の雲が除去されたNDVI画像を使って、被害前後のNDVIの変化量を算出し、変化量をもとに被害地を推定します。

こうした衛星画像解析の実行には解析技術に長けた技術者が衛星画像解析に必要な専用ソフトウェアを用いる必要があり、社会実装の大きな壁になっていました。

2010年にGoogle社がGoogle Earth Engine（GEE）というサービスを始めました。GEEは、巨大な衛星画像のデータベースを持ち、衛星画像解析をクラウド上で行うことのできる画像解析プラットフォームです。衛星画像のデータベースには大気補正など前処理がなされた衛星画像が登録されています。データ解析はWebブラウ

から解析手順を記載したスクリプトで実行可能であるため、解析用ソフトウェアを手元に用意する必要はありません。2020年代からは大気補正などを施した Sentinel-2 衛星の画像の高次プロダクトが GEE で利用できるようになりました。

そこで、図 1 に示した解析手順を GEE 上で実行できるスクリプトを作成しました。GEE とスクリプトを利用すれば、リモートセンシング技術に熟知しなくても、また解析用のソフトウェアが利用できなくても、任意の場所・時期の森林被害を容易に解析することが可能です。

## 人工衛星画像を活用した風倒被害調査

2019 年 9 月 5 日に房総半島に上陸した台風 15 号（令和元年房総半島台風）、10 月 12 日に上陸した台風 19 号（令和元年東日本台風）、そして 2019 年 10 月 25 日に発生した大雨によって、房総半島は大きな気象被害を受けました。多くの人的被害や家屋の被害に加えて、送電線の鉄塔が倒壊し、長期間停電が続きました。このとき房総半島の森林も強風による風倒被害が多く発生しました。そこで、森林総合研究所と森林保険センターは千葉県君津市内民有林で、Sentinel-2 衛星画像を活用した被害調査を実施しました。

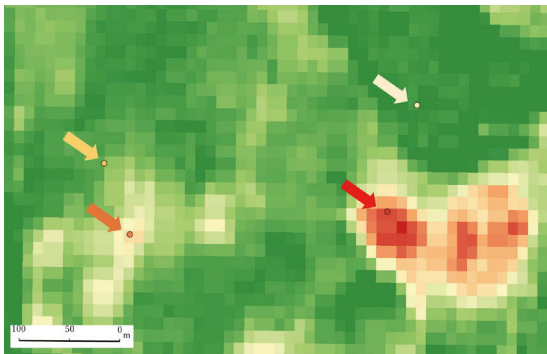


図 2 Sentinel-2 画像を用いた千葉県君津市有林周辺の被害推定図  
被害前後の衛星画像から算出した NDVI の差分で、差分がなく被害なし（緑）から大きな差があり、被害度大と推定したところを赤とするグラデーションで色づけています。

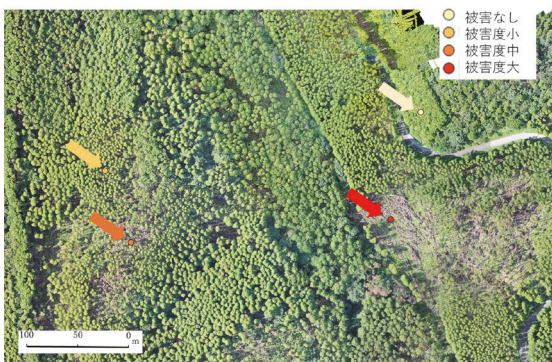


図 3 UAV 画像を用いた千葉県君津市有林周辺のオルソ画像  
図 2 で被害大（赤）と判定された領域は強風でほとんどすべての立木が幹折れ、根返りし壊滅的な被害を受けていた。被害度中は半数程度が被害木の林分で、被害度小は、所々に被害木が見られる状態であったことがわかります。

まず、対象地周辺の気象被害について Sentinel-2 画像を用いた解析で推定（図 2）し、被害なし（緑）から大きな被害（赤）まで段階的に色づけたマップを作成し、これを持って現地調査に向かいました。図 3 は現地調査の際に UAV から撮影した画像を用いて作成した調査地周辺のオルソ画像です。図 2 および図 3 上に設定した 4 色の点は被害程度の異なる検証点です。衛星画像で被害なしとされた検証点を見ると、一様な樹冠が揃った人工林であることがわかります。一方で大きな被害（赤）とされた検証点をオルソ画像で見ると、幹折れや寝返りによってほとんどの立木が倒壊し、木の幹や地面が見えていることがわかります。

図 4 に検証点における衛星画像で検出された NDVI の差を示しました。被害前の合成画像を 2019 年の 3 月から 8 月までの 6 ヶ月間に撮影された画像から作成し、被害後の合成画像を 2020 年の 3 月から 8 月までの 6 ヶ月間に撮影された画像から作成した場合では、被害大で 0.30 程度、被害中で 0.15 程度、被害小で 0.05 程度の差が見られ、被害なしではほとんど差が見られませんでした。同様に撮影期間を 4 月から 7 月までの 4 ヶ月とした場合、被害大では 0.35 程度、被害中は 0.2 を上回る程度、被害小の場合は 0.05 程度の差があり、被害なしではほとんど差が見られませんでした。一方で検出期間を 5 月から 6 月までの 2 ヶ月とした場合、被害小でも被害なしでも 0.05 程度の差が見られました。被害程度が大きい場所は検出期間が短くても概ね正確に捉えることができそうですが、被害程度の小さい場所では検出期間の長さによって検出精度に影響が生じることがわかりました。

図 5 はこれらの検証を踏まえて作成した、2019 年の気象害による房総半島南部（富津市、鋸南町、南房総市、君津市）の森林被害マップです。衛星画像は広域の被害把握

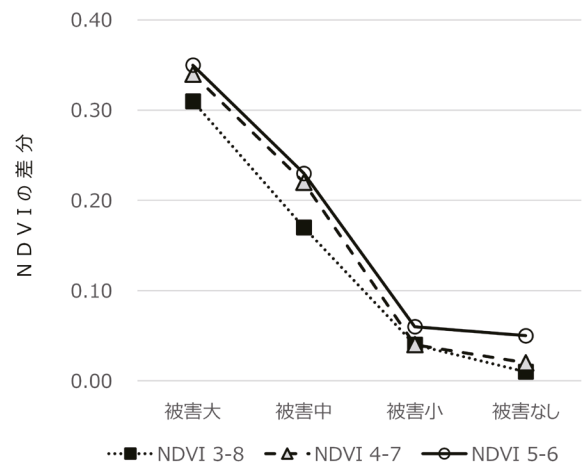


図 4 被害程度と NDVI の差分の関係  
森林の活性度と関係の深い衛星画像指標である NDVI の被害前と被害後の差は、大きな被害を受けた場所ほど差が大きいことがわかります。



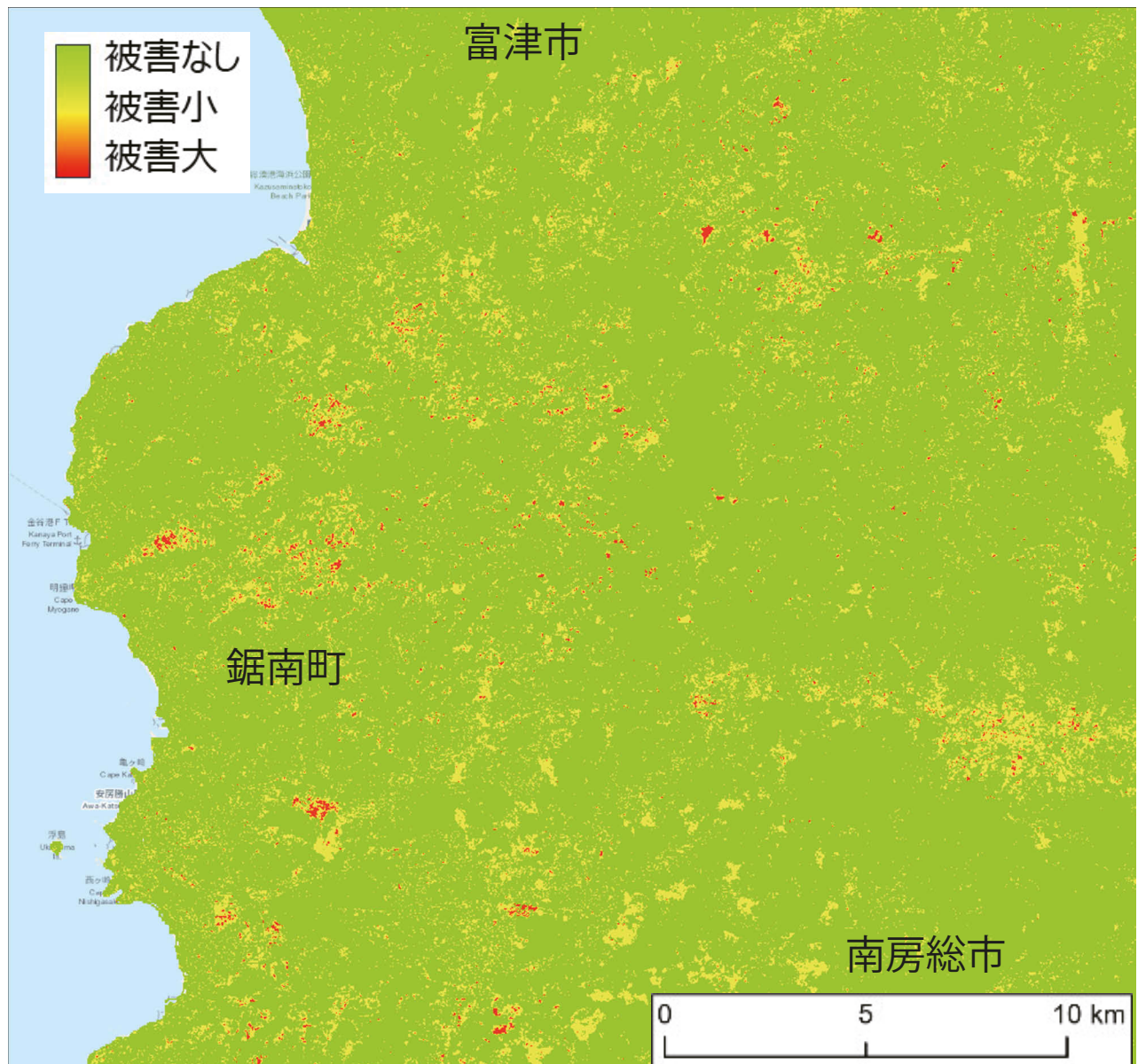


図5 2019年の気象害による房総半島南部（富津市、鋸南町、南房総市、君津市）の森林被害マップ  
大きな被害を受けた場所は赤く色づけされています。被害を受けた林分（黄色）を含め、広い範囲で被害を受けたことがわかります。

に適していることが改めて確認できました。

### 固定翼無人航空機の活用

森林保険では2019年から一部の被害種について、UAVやドローンと呼ばれる無人航空機を使って撮影した画像を被害調査に用いることが可能になりました。森林保険の調査に活用されている無人航空機の多くは回転翼機で、一度に撮影できる範囲は数十haと狭い範囲に限られます。飛行機のような固定翼の無人航空機は、一度のフライトで数百haの範囲を撮影することができます。そこで、固定翼の無人航空機でも気象害の調査に活用可能か、検証しました。

図6は2022年に新潟県村上市、関川町で発生した水害被害地を固定翼の無人航空機で撮影した画像から作成し

たオルソ画像を示しています。固定翼の無人航空機を用いた撮影方法は、面的に撮影するエリア法と、回廊状に飛行・撮影するコリドー法の2種類があります。エリア法では数百haの範囲を撮影することが可能で、コリドー法では、流下する河川沿いに発生した水害被害地を効率よく調査する際に役立ちます。撮影法によらず、地上での被害地の判読が十分可能な、地上解像度が5～10cm程度のオルソ画像を得られることがわかりました。一方で、固定翼の無人航空機は回転翼機と比べて高額であることや、事前の調整、飛行実施に必要な様々な許認可手続き、適切な飛行計画の立案や実行、さらには飛行の安全性を確保する飛行管理体制が必要です。そのため、森林保険の被害調査に適用する場合は、固定翼の無人航空機を運用する専門の業者に依頼するのが現実的です。

リモートセンシング技術の効果的な活用をさらに進めます

困難を極める被害林分の現地調査にリモートセンシング技術を活用するため、技術活用のための知識や解析ソフトウェア等がなくても GEE とスクリプトによって衛星画像解析ができること、そして広域の撮影に適した固定翼の無人航空機による被害調査を試行し、被害調査に向けた運用

法を提示しました。

表 1 は衛星画像から無人航空機まで、森林被害の把握に用いられるリモートセンシング技術の特徴をプラットフォームやセンサーなどで分類し、まとめました。安全かつ効率的な被害調査に向けて、さらにリモートセンシング技術の効果的な活用を進めていきます。

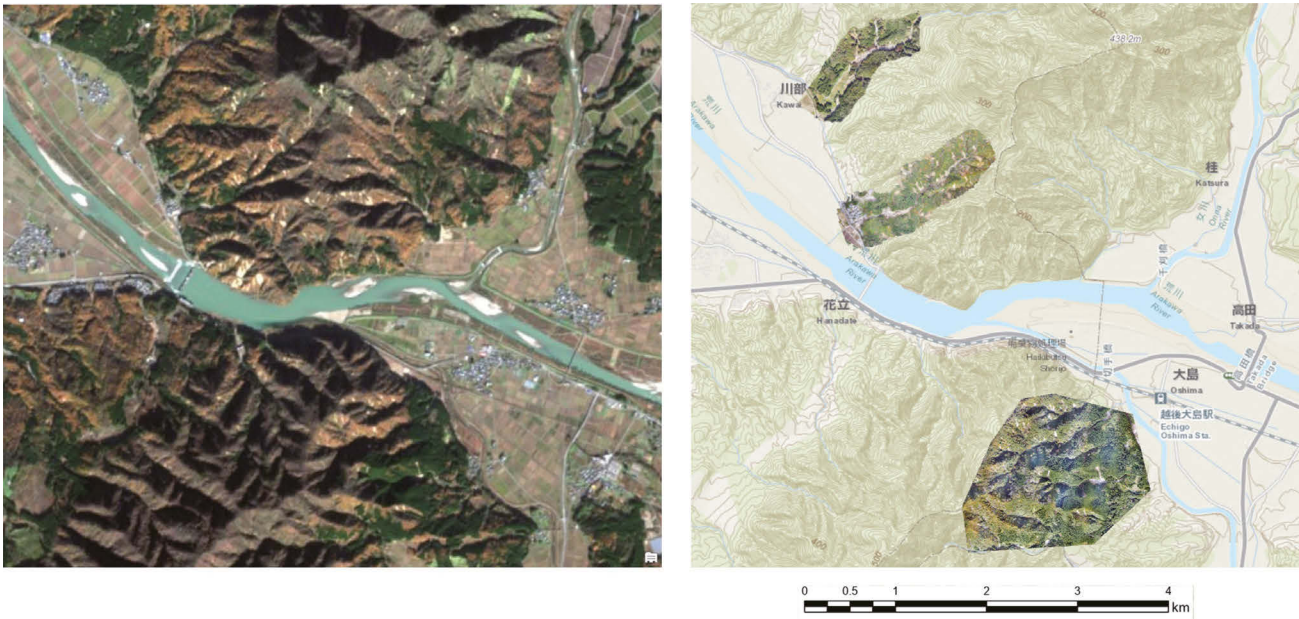


図 6 新潟県村上市、関川町周辺の 2022 年水害被害後の衛星画像（左）と固定翼無人航空機によるオルソ画像（右）

表 1 森林被害に用いられるリモートセンシング技術の特徴

プラットフォーム	センサー	解像度	観測範囲 (観測幅)	入手方法	利用法	特徴・注意点
人工衛星	中分解能マルチスペクトル	10-30 m	185-290 km	無料	被害の広域把握 時系列比較	1-2週間に1度観測 天候に大きく左右 可視・赤外
	高分解能マルチスペクトル	0.6-1 m	10-15 km	有料	被害面積把握 被害形態判読	可視・赤外 天候に左右 高コスト
航空機	空中写真	数10 cm	1-5 km <sup>2</sup>	有料／ 無料	被害面積把握 被害形態判読 時系列比較	任意撮影可 即時性高
	LIDAR	1-数点 /m <sup>2</sup>	～数100 ha	有料／ 無料	被害形態把握 3次元情報	任意撮影可 高コスト
(ドローン)	固定翼 空中写真	～10cm	～数百 ha	有料	被害形態判読 被害面積把握 3次元情報	任意撮影可 比較的低コスト 即時性高
	回転翼 空中写真	～数cm	～数十 ha	有料／ 自己撮影	被害形態判読 被害面積把握 3次元情報	任意撮影容易 比較的低コスト 即時性高
	写真	～数cm	多様	自己撮影	被害形態記録	アクセスに左右

高橋 (2019) 一部改変

参考文献  
高橋正義 (2019) 山林 1616:22-27



## Focus on

## デジタルデバイスで効率的に被害調査

森林災害・被害研究拠点 鈴木 寛・後藤義明

## 小型デジタルデバイスが急速に発達

近年は小型簡易なデジタルデバイスにライダーなどの先端技術が搭載されています。気象害の被害調査に、そうした機器を活用すれば調査が省力化できると考えられます。そこで、小型簡易なデジタルデバイスで被害調査を実施して、省力化、効率化の観点で、従来の方法と比較しました。

## 面積測量で人数・時間の省力化が可能

群馬県前橋市で発生した干害被害地で被害調査を実施しました。1. コンパスを使った現行方法 (TruPulse360R+TrimbleT41(PDA))、2. iPhone14Pro+マプリー林業、3. iPhone14Pro+Geographica (無料アプリ)+Trimble DA2 (RTK-GNSS 受信機) の3種のシステムで比較しました (図1)。



図1 比較した3つの測定方法

方法2、3の測定時間は方法1の1/3であり、時間効率の良さが際立ちました (表1)。面積はすべての方法が同値でしたが、閉合比は現行方法が最も優れていました。方法2は初めて機材を操作した者でも短時間に測定できており、難易度の低さが伺われました。ただし、熟練者と閉合比に差があったことから、精度を上げるにはある程度の習熟が必要そうです。方法3は端末を持って被害地外周を歩くだけで測定でき、測定時間が最短でした。

表1 手法ごとの計測結果 (単位: 時間は分秒、面積は ha)

方法	計測人数	計測時間	面積 (ha)	閉合後面積 (ha)	閉合比	備考
1	2-3	13:35	-	0.27	1/809	熟練者
2	1	4:30	0.28	0.27	1/52	初体験者
2	1	4:55	0.28	0.27	1/154	熟練者
3	1	3:54	0.27	-	-	初心者

表2 方法ごとの相対評価 (◎: 非常に優れる、○: 優れる、△: 比較的劣る、×: 劣る)

方法	計測時間	計測人数	精度
1	△	△	◎
2	○	○	○
3	◎	○	○

方法1は精度の高さに利点があり、方法2、3は測定時間、作業人数の削減効果が大きく、精度要件を満たせば有効な手法と考えられます (表2)。

## 標準地調査では条件不利ほどメリット大

群馬県前橋市、藤岡市で発生した干害被害地で標準地法による被害率調査を実施しました。1. 現行方法 (ポケットコンパス+巻尺)、2. 円形調査法、3. iPhone14Pro+マプリー林業の3方法を比較しました。方法2は、竿を水平に360度回転させ、竿にかかった健全苗数、枯死苗数を数えました。方法3では、拡張現実で画面上に標準地境界が表示され、その境界線内を調査しました。

調査地Aでは、現行方法が標準地の設定に時間を要したのに対し、方法2、3は区画設定が不要もしくは瞬時にできることが計測時間の短縮に貢献していました。調査地B~Fは傾斜地であることや防鹿目的の単木保護資材が使用されていたため計測時間がAよりも長くなっていました。単木保護資材があると苗木の生死確認が難しく、方法2では作業員1人の追加が必要でした。方法3は個体に接近して記録するため、単木保護資材が使用されていても時間、作業人数に変化はありませんでした。

手法ごとの評価をまとめると、方法1は人数、計測時間が劣っていました (表4)。方法2は計測時間が短いことに優れていましたが、それ以外の利点が少なく、単木保護資材が使用されている場合は1人での測定ができませんでした。方法3は苗木に接近する必要があるため、計測時間で方法2に劣りましたが、傾斜や単木保護資材の使用に左右されずに精度よく本数を数えられました。また、苗木の

表3 標準地ごとの計測時間 (分) 位置情報が得られるので、情報活用の観点で有用であることも利点です。

		調査地					
		A	B	C	D	E	F
方法	1	5.4	-	-	-	-	-
	2	1.2	5.0	4.0	3.2	5.3	5.8
	3	3.0	7.0	12.0	-	5.0	7.0
備考	地形	平坦	傾斜	傾斜	傾斜	傾斜	傾斜
	防鹿		有	有	有		

表4 方法ごとの相対評価。表内の括弧は主観的評価 (◎: 非常に優れる、○: 優れる、△: 比較的劣る、×: 劣る)

	方法		
	1	2	3
計測人数	△: 2-3人	○: 1-2人	◎: 1人
計測時間	△	◎	△
生死判定	△	×	◎
精度 (区画設定)	(◎)	(△)	(○)
精度 (本数)	(○)	(△)	(◎)

森林総研、群馬県森連、株式会社マプリーの3社で共同研究「地上ライダーを気象害被害地の調査で活用する手法の開発」を締結して実施しました。

## Chapter 6 リスクの変遷

01 これまでのリスクの変遷：  
森林保険の損害填補データから  
読み解く森林防災研究領域  
勝島隆史

## 損害填補データからリスク変遷を知る

リスクとは、危険が生じる可能性を表す用語です。リスクの大きさは、被害が発生する確率や、被害の大きさ、またはそれらの組み合わせにより表されます。1つ1つの被害は偶発的に生じるもので予測することは困難ですが、大量の被害データを用いて統計をとることで、リスクを予測することができます。この原理を大数の法則と呼んでおり、保険は大数の法則を基礎として、将来に生じる損害を予測しています。森林保険は、森林の火災、気象災、噴火災による損害を総合的に補償する保険であり、国内の長期間にわたる損害填補データが蓄積されています。そこで、森林気象害のこれまでのリスクの変遷を理解するために、森林保険の損害填補データを分析しました。

## 幼齢林に多い被害種の発生確率が減少

図1の上段は、過去約60年間における森林気象害の1年間の平均発生確率の推移を、被害種毎に示したものです。年度毎の全国の損害面積の総和を、その年度の保険の加入面積の総和で割ったものを、ここでは平均発生確率として取り扱いました。この分析では、1961年度から2014年度までは森林国営保険事業統計書、2015年度から2023年度までは森林保険に関する統計資料に記載されたデータを使用しています。

対象とした観察期間では、森林気象害の平均発生確率は、全体としては減少傾向となっていました。被害の種別ごとに見ると、火災や水害、干害、凍害などの被害種では減少傾向にありました。過去には凍害や干害では、高い確率となっていました。1990年以降は低い水準となっています。火災や干害、凍害は幼齢林に多い被害種であると言われます。そのため、これらの被害は、気候変動の影響

よりも、この期間の保険対象の林の高齢級化の影響を強く受けている可能性があります。風害や雪害、潮害や噴火災では、有意な変化は見られませんでした。また、確率が増加した被害種はありませんでした。

## 風害や雪害の平均損害額が増加

次に、1年間の1haあたりの平均損害額の推移を、図1の下段に示しました。年度毎の全国の保険金支払額の総和を、その年度の保険の加入面積の総和で割ったものを、ここでは平均損害額として取り扱いました。

平均損害額は、全体の傾向としては有意な変化は見られませんでした。被害種ごとでは、風害や水害、雪害は増加傾向でした。一方で、火災や凍害については減少の傾向があり、干害、潮害、噴火災については有意な変化は見られませんでした。前述のように、風害や雪害では平均発生確率に変化がなかったことから、平均損害額の増加の要因としては、保険対象の林の高齢級化による保険金額の増加や、被害発生時の損害の程度の大規模化が考えられます。また、風害では大きな台風被害が発生した時期に一時的に大きくなっていますが、それ以外の年度では小さく、年度によるばらつきが非常に大きいといった特徴が見られます。このことは、リスクの正確な算定を難しくする要因となります。

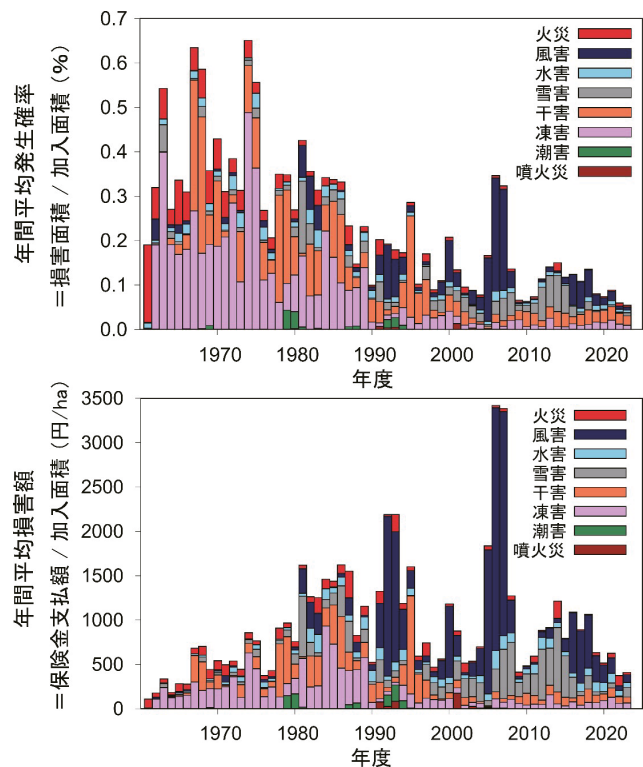


図1 被害種毎の森林保険の損害填補の推移  
上段) 1年間の平均発生確率、下段) 1年間の1haあたりの平均損害額。損害額は2020年の国内企業物価指数を基準として物価を調整しています。発生確率は火災や水害、干害、凍害などの幼齢林に多い被害種で減少、損害額は風害、水害、雪害で増加しています。

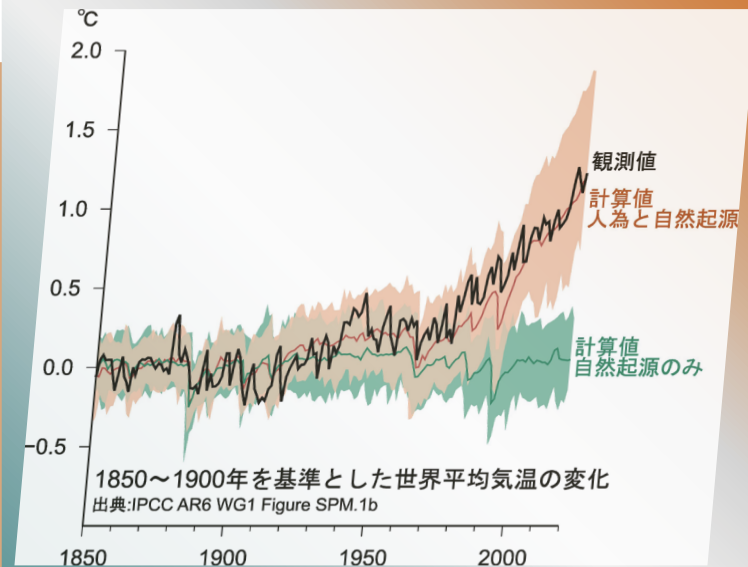


## Chapter 6 リスクの変遷

### 02 地球温暖化によってリスクはどのように変化するか？

森林防災研究領域

勝島隆史  
勝山祐太  
竹内由香里



#### 地球温暖化と森林気象害

現在の地球の気候は、前例のない速度で温暖化しています。気候変動に関する政府間パネルの報告書では、2011～2020年時点での世界平均気温は、工業化以前の水準より1.09℃上昇していることを示しています。このような気候変動は、私たちの社会や生態系に大きな影響を及ぼすと指摘されています。例えば干ばつや火災などを生じさせる乾燥や、台風などの熱帯低気圧による強風などの影響は将来増加することが予想されています。一方で、寒波や霜、雪などの寒冷な気候により生じる気象現象は、減少することが予想されています。森林保険制度が対象とする森林気象害は、気象現象に起因する森林の被害です。そのため、このような気候変動の影響を受けて、森林気象害のリスクも変化すると危惧されます。ここでは、将来の森林気象害のリスクが、どのように変化するか考えました。

#### 将来予測データでリスク変化を推定する

リスクには、ハザード、曝露、脆弱性の3つの要因が関係します。森林気象害のリスクでは、ハザードは被害をもたらす気象現象が関係し、曝露は森林の立地や森林そのものの資産価値が関係します。また、脆弱性は被害の受けやすさに影響を及ぼす樹種や品種、施業が関係します。このうち、曝露と脆弱性については人為的な要因が関係するものなので、これらの将来変化を算定することは困難です。そのため、森林気象害のリスクの将来変化の推定にあたり、その変化をもたらす気象現象、つまりハザードの変化を推定することにしました。

今回は現在の森林保険の被害金額の多くを占める風害と雪害を対象としました。解析では、将来の気候予測データであるd4PDFを使用しました(Mizuta et al. 2017)。こ

のデータは、過去から現在にかけての気候で起きる気象現象や、温暖化した気候での気象現象を予測しています。アンサンブル実験と呼ばれる手法を用いて、非常に多くの気象現象の事例のシミュレーションを行うことで、ごく稀にしか発生しない極端気象現象の特徴を正確に捉えることが可能です。風害は風速を、雪害は樹木の着雪量を指標として、30年に1度の頻度で発生するような極端現象が、現在と将来とで、どの程度変化するかを算定しました。将来変化では、工業化以前の気候状態より地球全体の平均気温が4℃上昇した気候状態を想定したデータを使用しました。着雪量の推定では、以前の森林保険センターとの研究プロジェクトで開発した着雪モデルを使用しました。このモデルは、新潟県十日町市での4冬季のスギの着雪観測の結果に基づいて開発したもので、着雪や落雪に対する気温依存性を考慮することができます。

#### ほとんどで極端風速と頻度が増加する

図1の上段は、現在気候における30年に1度の発生頻度に相当する極端風速の分布と、その強度と頻度の将来変化を示したものです。強度の将来変化の図では、30年に1度の発生頻度の風速の変化の比を示しています。また、頻度の将来変化の図では、現在気候における30年に1度の発生頻度の風速が、将来気候で同じ30年間の出現回数が何倍となるかを示しています。現在気候における極端風速は、太平洋側の海岸に近い地域で風速が高く、内陸部で風速が低くなっています。将来気候では、国内のほとんどの地域で現在気候と比べて極端風速の増加が算定されました。特に西日本や関東地方の多い所で1.1倍程度の増加が算定されました。また頻度の変化は、同じように特に西日本や関東地方で頻度の増加が見られており、多い所で2

～ 2.5 倍増加することが分かりました。

## 極端着雪量は一部で増加する

図 1 の下段は、同じように現在気候での極端着雪量の分布と、その強度と頻度の将来変化を示したものです。現在気候における極端着雪量の分布は、新潟県を中心とした本州の日本海側や、北海道、岩手県で着雪量が多くなっています。強度の変化は、本州の広い範囲で将来の極端着雪量が大幅に減少していました。これらの地域では、頻度も大幅に減少していました。これは、温暖化により冬期の気温が上昇することで、雪ではなく雨として降ることが多くなるためです。本州以南の海岸に近い地域では、30 年間に 1 度も雪が降らない状態が予想されています。ただし、国内全ての地域で減るわけではなく、現在気候で寒冷な本州の標高の高い内陸部や北海道の道北地方などの一部の地域では、将来の極端着雪量が 1.05 ～ 1.15 倍増加することが推定されました。これらの地域では、頻度も 1.5 ～ 2.5 倍増加することが分かりました。着雪に適した気温 -3 ～ 0℃の範囲で降雪があった場合には、一度の降雪で大量の着雪が生じやすいことが分かっています。将来の極端着雪量が増加する地域では、冬期の気温上昇により着雪に適した気温帯で降雪が生じやすくなることが、増加の要因として考えています。また地球温暖化は、多くの地域で冬期の積算降雪量の減少をもたらしますが、寒冷な地域を中心に

一晩で一気に降るような短期間の極端降雪量は、むしろ増加すると指摘されています。このような降雪現象の変化も、極端着雪量の増加をもたらす要因の 1 つとして考えています。

## 気候変動に備えたりスク管理

このように、地球温暖化により地球全体の平均気温が 4℃上昇した気候状態では、極端風速はほとんどの地域で増加し、特に西日本や関東地方では強度は 1.11 倍、頻度は 2 ～ 2.5 倍増加することが分かりました。また、極端着雪量は本州の広い範囲で大幅に減少しますが、本州の高標高地や道北地方の一部の地域では、強度は 1.05 ～ 1.15 倍、頻度は 1.5 ～ 2.5 倍増加することが分かりました。自然災害による損害の発生を、人の力により抑止することはできませんが、事前対策を講じることで将来の損害を低減させることは可能です。森林保険は損害を填補するものですが、将来のリスクを保険のみで対処することは難しく、また非効率であるとも考えられます。風害や雪害に強い森林施業と森林保険を併用したりスク管理が、気候変動への備えに繋がります。

### 引用文献

Mizuta R, Murata A, Ishii M. et al.(2017) Bulletin of the American Meteorological Society 98: 1383-1398

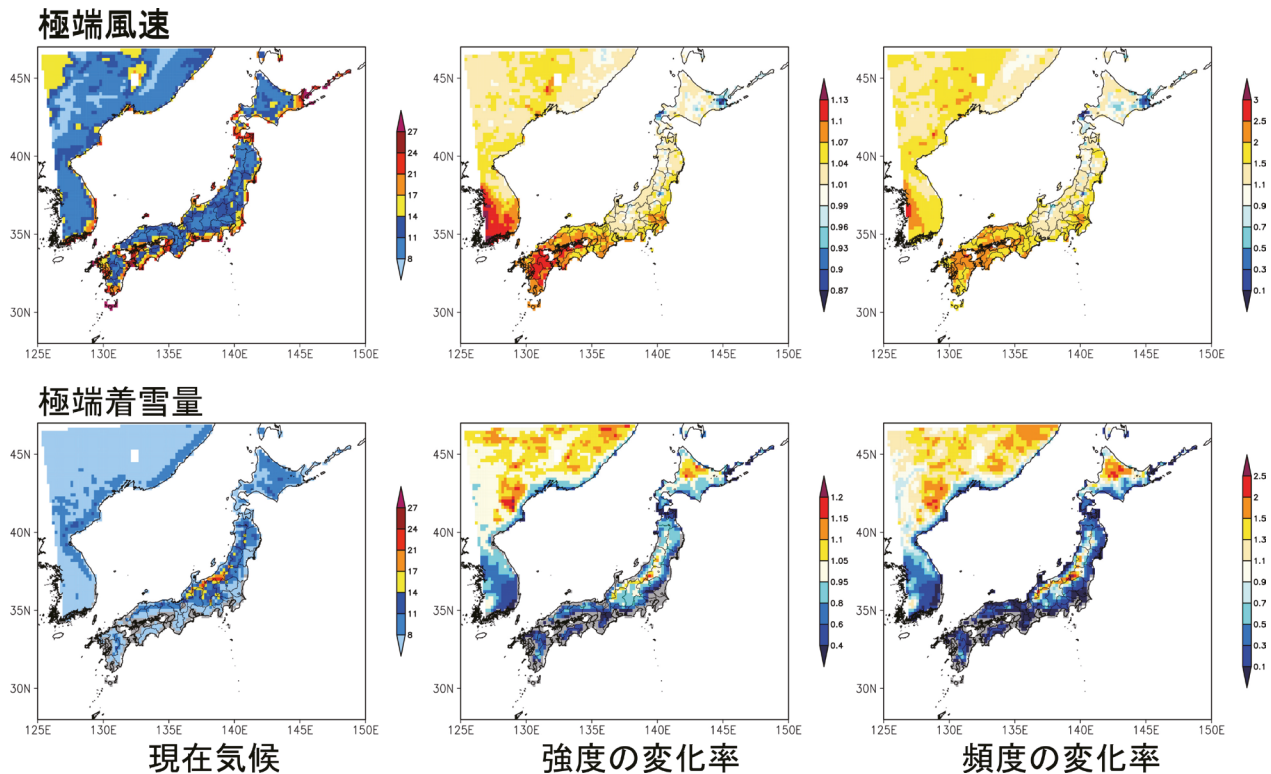


図1 30年に1度の現象に相当する極端現象の分布と、その強度と頻度の将来変化 (上段) 極端風速 (m/s1)、(下段) 極端着雪量 (kg/m2) 左) 現在気候における極端風速および極端着雪量、中) 現在気候に対する将来気候での強度の変化率、右) 頻度の変化率 着雪量の図の灰色は、現在または将来の着雪量が 0kg/m2 の範囲を示しています。極端風速は西日本や関東地方を中心に国内のほとんどの地域で増加、極端着雪量は国内のほとんどの地域で減少するが、本州の標高の高い内陸部や北海道の道北地方で増加が予想されました。



# 最新リスクマップ

これまでに作成した気象害リスクマップの最新版です。

森林防災研究領域 勝島隆史・吉藤奈津子・玉井幸治  
森林災害・被害研究拠点 岩崎健太

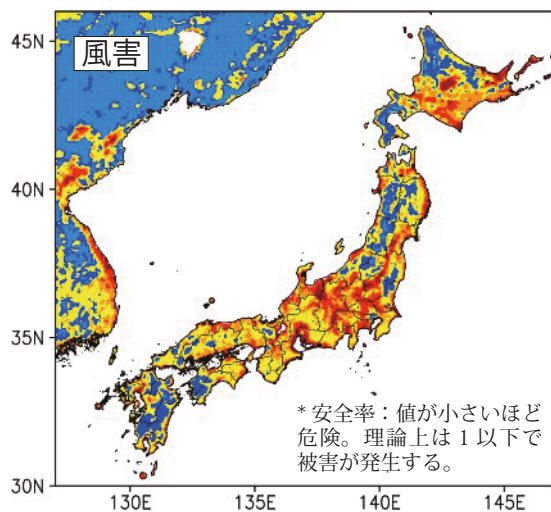


図1 風害リスク：再現期間50年の確率安全率\*  
(形状比80 樹高17m DBH22cm 立木密度1700本/ha)

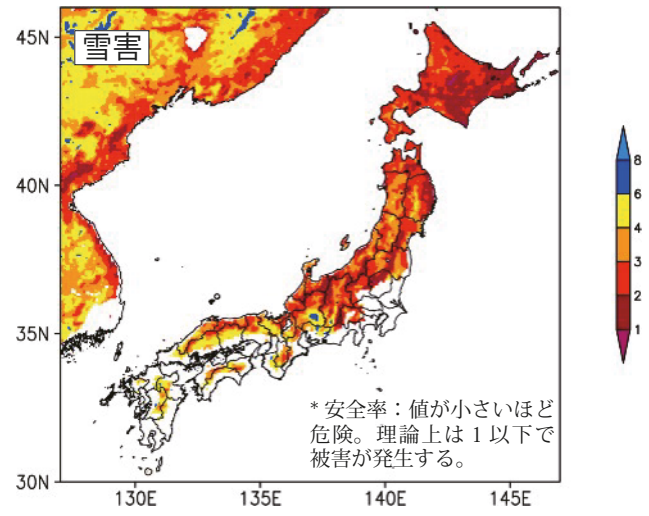


図2 冠雪害リスク：再現期間50年の確率安全率\*  
(形状比80 樹高17m DBH22cm 立木密度1700本/ha)

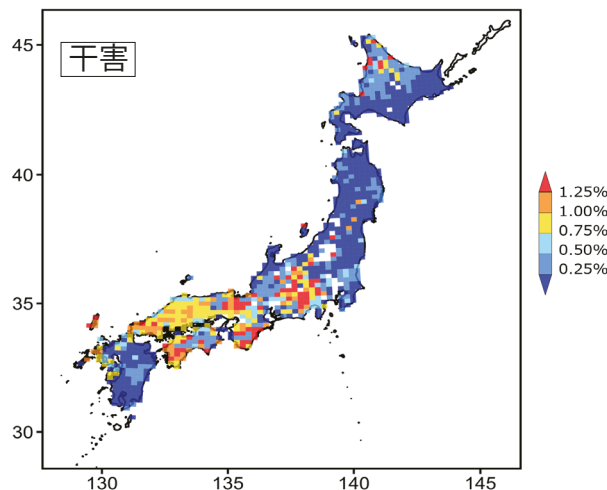


図3 干害リスク：1齢級（5年生以下）の林分における年間被害面積割合の推定値 Chapter1-02 図7 再掲

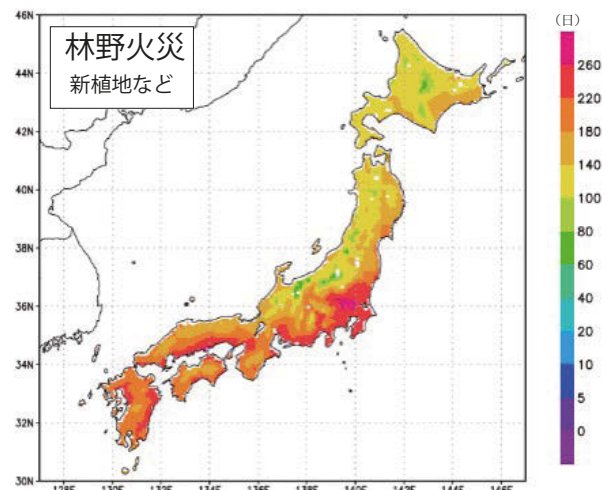


図4 林野火災リスク：年間火災発生危険日数  
(林床相対日射率60%：新植地など) Chapter2-01 図2(a) 再掲

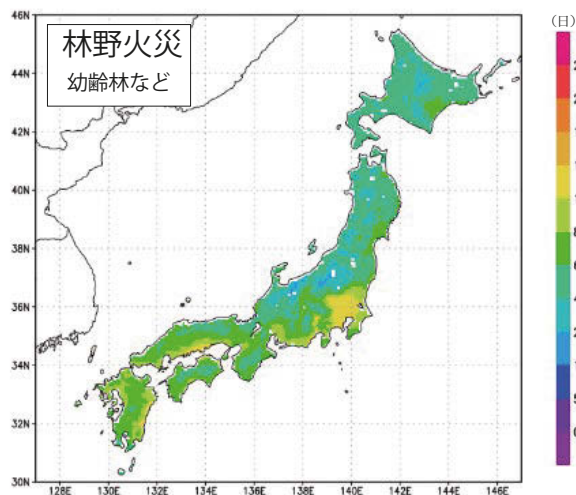


図5 林野火災リスク：年間火災発生危険日数  
(林床相対日射率20%：幼齢林など) Chapter2-01 図2(b) 再掲

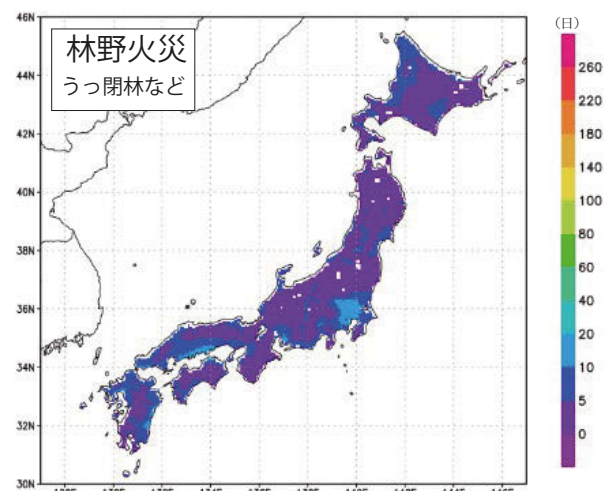


図6 林野火災リスク：年間火災発生危険日数  
(林床相対日射率7%：うっ閉林など) Chapter2-01 図2(c) 再掲





この冊子は、森林保険センターの委託プロジェクト「気象害の発生プロセス解明に基づく気象害リスク評価手法の高度化」により実施された研究の成果をまとめたものです。このプロジェクトは森林保険センターが保有しているデータを研究に活用して気象害のリスク評価などを行い、得られた研究成果を保険業務に活かすことを目的としています。

最新の研究からみた

## 干ばつ、山火事、強風、大雪と森林の被害

---

発行	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 〒 305-8687 茨城県つくば市松の里 1 番地
発行日	2025（令和 7）年 1 1 月 2 8 日
問合せ先	広報普及科編集刊行係
電話	029-829-8373
e-mail	kanko@ffpri.go.jp

