

【論文】

富山県を対象とした位置・地形因子による雪起こし作業量の広域推定

図子 光太郎

Spatial estimation of the operational quantity to prevent bending due to snow pressure in Toyama, Japan.

Kotaro ZUSHI

富山県におけるスギ人工林の雪起こしの作業履歴をもとに、雪起こし作業量と位置・地形因子との関係を解析し、雪起こし作業量の県域レベルでの空間推定を試みた。雪起こしの作業履歴として社団法人富山県農林水産公社が分収造林事業により造成した 346 事業地の記録を用いた。各事業地の面積に対する雪起こし延べ実施面積の比を雪起こし面積比作業量とした。市町別に雪起こし面積比作業量の平均値を比較すると、最小は氷見市の 1.32、最大は上市町の 7.22 となり、顕著な地域差が認められた。雪起こし面積比作業量と位置・地形因子との関係を一般化線形混合モデル (GLMM) により解析した結果、最適モデルには説明変数として標高、緯度、経度、谷深度、谷高度および相対斜面位置が採用された。これらの位置・地形因子は積雪深と樹高成長速度の影響をとおして雪起こし作業量の空間分布を説明していると考えられた。さらに、推定モデルをもとに県内スギ人工林の雪起こし作業量分布図を作成し、再造林地としての適性について検討を行った。

キーワード：雪起こし・スギ・地理因子・地形因子・作業量空間分布

1. はじめに

戦後の拡大造林期に植栽された針葉樹人工林の多くが収穫期を迎え、この 10 年ほどをみれば、国内の伐採面積や素材生産量はともに増加傾向を示している (林野庁 2022a)。その一方で、人工林伐採後の再造林率は 3~4 割程度に留まっており (林野庁 2022b)、森林所有者の再造林意欲が依然として低調であることを示している。これは育林に要する経費が山元立木価格を上回っていることが根本的原因であり、この解消には育林経費の 6 割を占めるとされる初期保育経費を縮減することが特に重要とされている (林野庁 2022b)。

一方、富山県をはじめとする日本海側の豪多雪地帯では、雪圧による幹折れ、根返り、根元曲がりなどの発生を防ぎ、植栽木の健全性と成林率の向上、成長の停滞を抑制することを目的に雪起こしが初期保育として広く実施されてきた。雪起こしが根元曲がりの軽減や成林率の

向上に寄与することは確かであるが (山本ら 1979; 佐藤 1980; 平 1982; 矢野 1987; 野表 1989)、この作業に要する労力や経費は他の保育作業に比べても大きく (野表 1984)、一度実施するとその効果を維持するために長期にわたる作業を余儀なくされることも少なくない。こうした豪多雪地特有の保育のための経費を木材販売価格に上乗せすることは困難であるうえに、さらなる初期保育経費の縮減が求められるなか、今後の再造林においては雪起こしを廃した、あるいはその実施を最小限に留めた森林造成を検討せざるを得ない。このためには既存の人工林の中から過度の雪起こしを実施することなく、根元曲がりの少ない健全な林分が成立した箇所を再造林の対象とするのが妥当であろう。しかし、雪起こしの回数や期間などの実施状況を広域的に調べた例は少なく (野表 1973; 矢野 1985)、雪起こし作業量の地域や場

所による違いを広域的かつ定量的に明らかにするような試みはなされていない。

雪起こし期間の終了の目安は、植栽木の樹高が積雪深の2~2.5倍に達するまでとされており(佐藤 1984; 小野寺 1990; 野表 1992), 雪起こしの回数や実施期間は造林地の積雪深と樹高成長速度との相互関係によって概ね決まると考えてよい。これまでに積雪深や降雪量については積雪観測地点の位置・地形因子などを説明変数とする数理モデルを作成し、対象域における分布を空間推定する試みが行われ、良好な結果が得られている(中峠・北川 1975; 佐藤 1987; López-Moreno and Nogués-Bravo 2006; Grünwald et al 2013)。同様に樹高成長速度を規定する地位指数や林地生産力についても位置・地形因子を説明変数とする数理モデルによる空間推定が試みられ、これについても比較的良好な結果が得られている(Mitsuda 2001; Zushi 2006; Zushi 2007; Farrelly et al. 2011)。そこで、本研究では、富山県内のスギ人工林の雪起こしの施業履歴をもとに、雪起こし施業量と位置・地形因子との関係を解析し、雪起こし施業量の県域レベルでの空間推定を試みた。さらに推定された雪起こし施業量に基づき再造林地としての適性について議論を行った。

2. 方法

2.1 対象地と使用データ

本研究は社団法人富山県農林水産公社(以下、公社)が分収造林事業により造成したスギ人工林(以下、公社営林)の雪起こしの履歴を解析対象とした。公社による植栽は1966年から始まり、最盛期の1970年代には年間300~400haに達し、その後徐々に数を減らしながら2004年まで続いた。2023年時点において、公社営林の面積は7406haとなっており、これは富山県の民有林人工林面積の約15%を占める。

公社では公社営林の最大の経営単位を事業地としており、これをさらに林・小班に細分し、管理を行っている。事業地は346箇所あり、富山県内のスギ人工林分布域に大きく偏ることなく分布する(図-1)。事業地面積は平均21.9

haであるが、最小は1.2ha、最大は117.6haとなり、事業地の規模は大きく異なる。植栽に要した期間も事業地の規模などによって異なり、単年度で域内全ての植栽が行われる場合もあるが、20年以上にわたり10数回に分けて植栽が行われる場合もある。

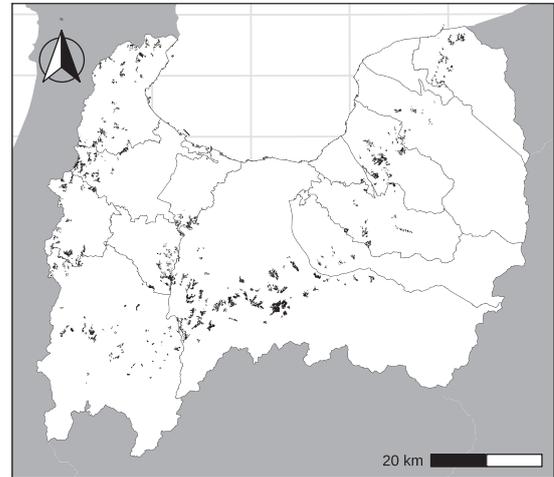


図-1 富山県農林水産公社事業地の分布

使用した雪起こしの履歴に関するデータは、公社の施業台帳(一部、造林台帳)をもとに調整した。施業台帳には、それぞれの事業地において実施された植栽を含めた全ての施業の実施面積が施業種別および年度別に記載されている。なお、雪起こしについては施業対象林分の面積に雪起こし対象立木の本数割合を乗じた値が実施面積として記載されている。また、施業台帳には施業対象となった林・小班名も記載されているが、多くの場合、同一年度を実施された複数林・小班の実施面積の合計値のみが記載されており、林・小班別に施業量を把握することはできない。このため、本研究では事業地毎の雪起こし実施面積の総数を解析の対象とし、事業地の雪起こし施業量を表すために次式で表される面積比施業量を用いた。

$$R_{ope} = \frac{A_{ope}}{A_{prj}}$$

R_{ope} : 面積比施業量

A_{ope} : 雪起こし延べ実施面積 (ha)

A_{prj} : 事業地面積 (ha)

各事業地の位置および地形に関するデータを取得するため、公社造林施業図をもとに各事

業地の境界を表すポリゴンを作成した。公社造林施業図は森林基本図（縮尺：1/5000）に各事業地の林・小班境界を記した紙地図である。この公社造林施業図をスキャンした上で、GIS (Geographic Information System) に取り込み、各事業地の林・小班境界のポリゴンを手作業により作成し、これらを事業地毎に結合して事業地ポリゴンとした。

各事業地の地理的位置を表す因子として緯度、経度および隔海度を用いた。隔海度は海岸線からの陸域任意地点までの最短距離 (km) であり (草薙 2014)、日本海側積雪地域の積雪深分布との間に高い相関が認められている (中峠・北川 1975; 佐藤 1987, 1992)。なお、それぞれの事業地の位置因子は事業地ポリゴンの重心における値とした。

本研究では富山県内民有林域の航空機 LiDAR による計測結果から作成した 0.5×0.5 m セルサイズの DEM (Digital Elevation Model) を 10×10 m セルサイズに再調整した DEM をもとに各種地形因子のラスターデータを作成した。各事業地の地形因子の値は事業地ポリゴンに含まれる地形因子ラスターのセル値の平均とした。地形因子ラスターの作成には GIS ソフト SAGA Ver. 9.1.1 の地形解析機能を用いた。Basic Terrain Analysis モジュールにより斜面傾斜 (slope, radian)、斜面向き (aspect, radian)、横断曲率 (plan curvature)、縦断曲率 (profile curvature)、相対斜面位置 (relative slope position)、地形湿潤指数 (topographic wetness index)、谷深度 (valley depth, m) および谷高度 (channel network distance, m) を算出した。ただし、斜面向きは北からの偏差をとるよう変換し、北方度 (northing, radian) とした (Grünwald et al. 2013)。また、Topographic Openness モジュールにより開度 (positive openness, radian) を算出した。以上の地形因子はいずれも山地における林地生産力や積雪深および積雪水当量の空間変動との関連性について多くの言及がなされている (例えば、Chang and Li 2000; Mitsuda et al. 2001; Zushi 2007; Grünwald et al. 2013; Biagi and Carey 2020)。また、ここで使用し

た地形因子の算出方法や特性など詳細については既往の文献を参考にされたい (Wilson and Gallant 2000; Böhner and McCloy 2006; Hengl and Reuter 2008; 図子 2010)。

2.2 解析方法

図-2に富山地方気象台(北緯36° 42′ 30″, 東経137° 12′ 6″, 標高9 m)における1965～2023年における冬期降雪量(11～4月の間の降雪量)の推移を示した。冬期降雪量が4000 mmを超えるような多雪年となる頻度は1990年以前と以降では明らかに異なる。雪起こし施業量は降雪量や積雪量の空間変動だけではなくこうした年変動の影響も受けることから、位置・地形因子の影響を適正に評価するには降雪量の年変動の影響も考慮する必要がある。そこで、各事業地の植栽年度を基準に「1966～1970年」、「1971～1975年」、「1976～1980年」、「1981～1985年」、「1986～1990年」、「1991～1995年」および「1996年以降」の7つの植栽年度に区分し、解析において影響因子として加えた。なお、多くの場合、各事業地の植栽は複数年度にわたることから、年度毎の植栽面積を重みとした植栽年度の加重平均を求め、これを事業地の植栽年度の代表値とした。

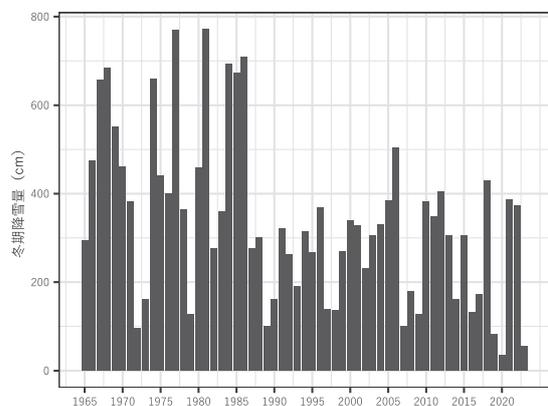


図-2 富山地方気象台における冬期積雪量の年次推移

雪起こし施業量に対する位置・地形因子の関係を一般化線形混合モデル (GLMM) により解析した。雪起こし面積比施業量を応答変数とし、上述の緯度、経度、隔海度、標高、斜面傾斜、北方度、横断曲率、縦断曲率、相対斜面位置、地形湿潤指数、谷深度、谷高度および開度を固定効果の説明変数として投入した。さらに、植

栽年度区分をランダム効果としてモデルに加えた。誤差構造には正規分布を仮定し、リンク関数には恒等関数を使用した。また、フルモデルについて VIF (Variance Inflation Factor) を用いて多重共線性について検証し、VIF が 10 を超える説明変数を除き、さらに AIC (Akaike's Information Criterion) を基準とする変数増減法によるステップワイズにより変数選択を行い、AIC 最小となる変数組み合わせを最適モデルとして採用した。なお、以上の統計処理は統計解析ソフト R Ver. 4.2.2 (R Core Team 2022) により行った。

3. 結果

図-3 に公社営林における雪起こし実施面積の年度別推移を示した。1978~1987年の10年間は他の期間に比べ実施面積が特に多く、ほとんどの年度で実施面積が1000 haを超え、全延べ実施面積(24927 ha)の40%以上をこの10年間で占めた。この期間は降雪量も比較的多く(図-2)、いわゆる昭和56年豪雪(1981年)や昭和59年豪雪(1984年)なども発生しており、昭和59年豪雪の後の1985年の実施面積は2000 haを超えた。

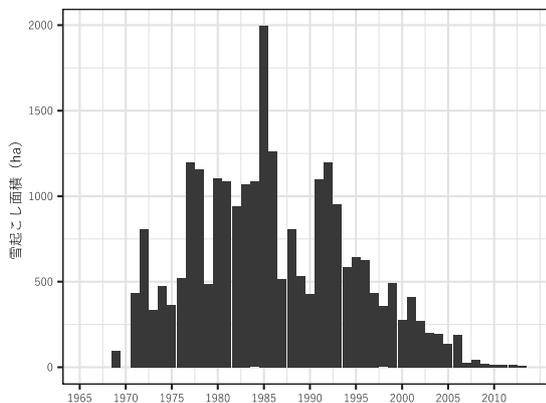


図-3 公社営林における雪起こし実施面積の年次推移

表-1 に市町別の雪起こし延べ実施面積、事業地面積、面積比施業量を示した。全事業地の雪起こし面積比施業量の平均は 3.36 であるが、市町によってかなりの違いが認められた。最も平均面積比施業量が大きかったのは上市町の 7.22 であり、次いで黒部市(4.40)、富山市(3.90)および南砺市(3.85)の順となった。なお、上

市町内の公社営林は標高面積加重平均が 559 m (全体平均 380 m) となっており、他の市町に比べ著しく高かった。一方、平均面積比施業量が最も少なかったのは氷見市の 1.32 であり、次いで小矢部市(1.54)、高岡市(2.51)、射水市(2.68)の順となり、いずれも県北西部にある高岡管内の市町となった。また、雪起こしが全く行われなかったのは氷見市の5事業地と小矢部市の1事業地であった。一方、面積比施業量が10を超えた事業地は上市町の3事業地、富山市の2事業地、南砺市の2事業地であった。雪起こしの面積比施業量を応答変数とし、位

表-1 市町別の雪起こし延べ実施面積、事業地面積、面積比施業量

市町	雪起こし延べ 実施面積(A), ha	事業地 面積(B), ha	面積比 施業量(A/B)
新川管内			
朝日町	853	312	2.73
入善町	19	5	3.59
黒部市	543	124	4.40
魚津市	2,403	668	3.59
滑川市	46	12	3.75
富山管内			
上市町	2,018	280	7.22
立山町	305	102	2.98
富山市	10,819	2,771	3.90
砺波管内			
砺波市	1,516	401	3.78
南砺市	2,776	720	3.85
高岡管内			
射水市	439	164	2.68
高岡市	1,332	530	2.51
氷見市	968	736	1.32
小矢部市	889	579	1.54
合計	24,927	7,406	

置・地形因子を固定効果、植栽年度区分をランダム効果とする一般化線形混合モデルによる解析を行った。フルモデルについて、VIF を用いて多重共線性について検証したところ、海隔度の VIF が 18.2 と著しく高かったことから、説明変数から海隔度を除いて解析を再度行った。ステップワイズ法による変数選択の結果、最適モデルとしてランダム効果である植栽年度区分および固定効果として緯度、経度、標高、相対斜面位置、谷深度および谷高度が採用された(表-2)。作成されたモデルの二乗平方平均

誤差 (RMSE) は 1.635 であり、決定係数は 0.518 となった (表-3)。p 値などから判断した説明変数のモデルに対する影響は、谷深度、標高、緯度、相対斜面位置および経度が特に高かった。説明変数の係数から谷深度が増加するに従って施業量は増加、標高が増加するに従って施業量は増加、緯度が増加するに従って施業量は減少、相対斜面位置が増加する (斜面下部から上部になるに従って) に従って施業量が増加、経度が増加するに従って施業量が増加する傾向がそれぞれ認められた。

表-2 一般化線形混合モデルによる雪起こし面積比施業量と位置・地形因子との関係解析結果

Characteristic	Beta	95% CI [†]	p-value
(Intercept)	3.5	2.4, 4.6	<0.001
谷高度	-0.62	-0.99, -0.24	0.002
標高	0.55	0.28, 0.82	<0.001
緯度	-0.66	-0.89, -0.42	<0.001
経度	0.52	0.31, 0.73	<0.001
相対斜面位置	1.1	0.52, 1.6	<0.001
谷深度	1.0	0.65, 1.4	<0.001

[†] CI = Confidence Interval

表-3 雪起こし施業量推定モデルの精度指標

R ²	RMSE	MAE
0.518	1.635	1.125

3. 考察

作成された雪起こし施業量推定モデルは、雪起こしの施業量が積雪深と樹高成長速度とによって決定されるとする本論の仮定と矛盾しない。作成された最適モデルには、ランダム効果として用いた植栽年度区分のほか、固定効果として緯度、経度、標高、相対斜面位置、谷高度および谷深度が採用された。このうち緯度、経度および標高は比較的大きな地域スケール (regional scale) での積雪深の変化とそれに伴う雪起こし施業量の増減を表していると考えられる。富山県の降雪量や積雪深を概観すると北西部低標高域や海沿いで少なく、南東部高標高域で多くなる傾向があり (初鹿ら 2008)、作成したモデルにおける緯度、経度および標高

の係数はこのことと一致する。また、富山県と同じ日本海側の多雪地帯である山形県における積雪深分布を広域的に予測した事例では (佐藤 1987)、緯度、経度、陸度 (海隔度)、標高、隔度 (主稜線からの最短距離) および 1 月と 2 月の平均気温を説明変数に用いて高精度な積雪深分布推定モデルの作成に成功している。さらに、中峠・北川 (1975) は福井県を対象に標高と日本海岸線からの距離 (海隔度) だけを用いて県内の積雪深分布を概ね予測できている。なお、本論では海隔度は多重共線性の問題からモデルに投入されていないが、今回のデータセットでは海隔度と緯度の相関が極めて高く (R = -0.945)、緯度は海隔度の影響も併せて表している可能性がある。

標高は、対象とする空間スケールにかかわらず、積雪深分布の説明変数として最もよく利用される地形因子である (中峠・北川 1975; 佐藤 1987; 中島ら 1993; 野村ら 1999; López-Moreno and Nogués-Bravo 2006; Grünwald et al 2013)。上述したように標高は積雪分布への影響をとおして雪起こし施業量に作用していると考えられる。一方で富山県西部域のスギ人工林を対象とした林地生産力と地形因子との関係に関する調査において、標高が気温や生育期間への影響をとおしスギ林の林地生産力の分布に支配的に作用することが指摘されている (図子 2010)。したがって、標高と雪起こし施業量との関係には、林地生産力や成長速度に対する標高の影響も含まれていると考えるのが妥当であろう。

作成した雪起こし施業量の分布推定モデルでは標高以外にも相対斜面位置、谷深度および谷高度といった地形因子が採用された。山地での降雪は風や重力などにより地域スケールより小さなランドスケープスケール (landscape scale) で各種地形要因の影響を受けながら再配分され (Grünwald et al 2013)、その結果生じる積雪分布の不均一により雪起こし施業量に増減が生じる可能性がある。谷高度は近傍溪流からの鉛直距離を表し、谷深度は近傍尾根からの鉛直距離を表すが、谷高度が小さい場所あるいは谷深度が大きい場所ほど施業量が増

加する傾向があった。尾根や斜面上部付近の積雪が風や重力の作用によって溪流沿いの相対的に低い場所に集積し、こうした場所での雪起こし作業量が増加したと考えられる。新潟県の山地斜面において航空機LiDARを使用して詳細に積雪深分布を調べた事例においても積雪深は尾根部で減少し、谷部で増加する傾向があったとしている(岡本 2004)。また、笹ら(1989)は森林域における積雪深調査から、尾根部では強風によって積雪が飛ばされるため積雪深は減少し、風速の弱まる山腹斜面から谷部にかけて積雪深が増大することを指摘している。

一方、相対斜面位置については相対斜面位置が高い場所(斜面上部)ほど雪起こし作業量が増加する傾向があった。斜面位置は出現する土壌型や水分環境をとおして林地生産力と密接に関連することがよく知られており(丹下 1987; 河田 1989; 和口ら 2011)、一般的に同一斜面であれば斜面の上部よりも下部において植栽木は良好な生育を示す。今回の解析結果において雪起こし作業量が斜面の上部におい

て多く、下部において少なくなったのは斜面位置による植栽木の樹高成長速度の違いを反映していると考えられる。

雪起こしが雪圧害の防除対策として高い効果を有することは確かであるが(山本ら 1979; 佐藤 1980; 平 1982; 矢野 1987; 野表 1989)、同時に労力や経費の大きさがこの施業の問題点として常に指摘されている(野表 1984)。野表(1989)は、平均最深積雪深が2 mを超える地域では保育期間をとおして雪起こし作業に要する労力は200人/ha前後になると推定している。今回対象とした公社営林においても高標高域では面積比施業量の平均が7を超える場合もあり、こうした地域での雪起こしに要する経費は少なく見積もっても(単位面積当たり単価を25万円/haと仮定、富山県森林政策課 2022)、国内の一般的な造林地における造林・初期保育費用とされる150万/ha(林野庁 2010)を上回ると推定される。このような過度な雪起こしの実施は投下された労力や経費とそれによって改善される根元曲がりや成林率との関係から

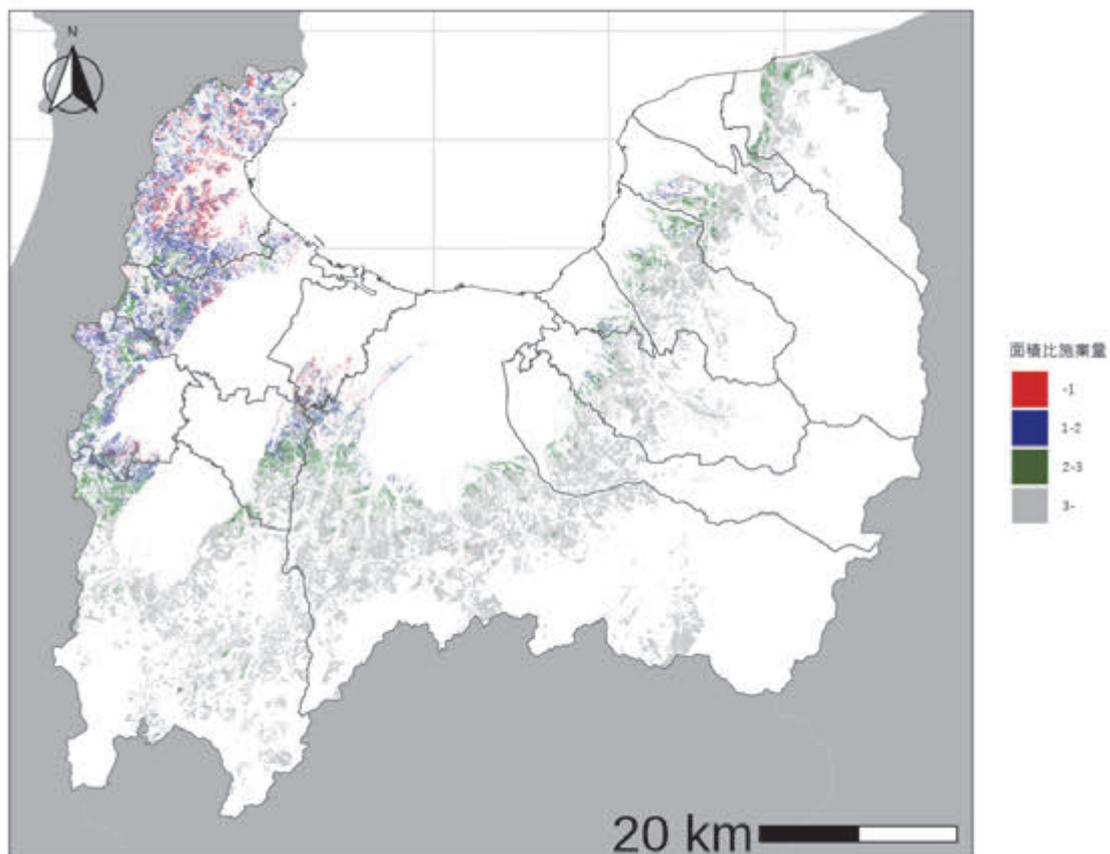


図-4 富山県内スギ民有林における雪起こし施業量区分の分布

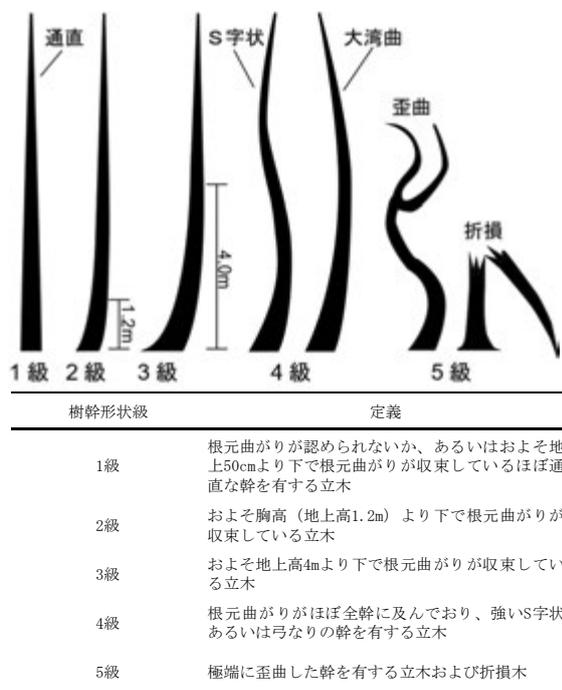


図-5 樹幹形状級基準の模式図と定義

みて合理的な施業とは言いがたい。さらに、今回使用した施業履歴データにおける雪起こし面積比施業量の平均は 3.36 となり、これに要する経費は保育期間全体をとおして必要な下刈経費とほぼ同等と推定される。近年、再造林経費が収穫による素材販売収益を上回るとされる状況を改善するため、初期保育経費の低減に向けた様々な取り組みが行われているが（森林総合研究所東北支所 2016；林野庁 2022c）、雪起こしが保育施業としてこれまで通り行われるということであれば、多雪地域において収益と経費がバランスする林業の実現はほとんど不可能と言ってよい。また、現状においても林業労働力の不足は深刻であり、今後さらなる労働力の減少が予想される中、多くの労力を要

し、かつ労働負荷の高い雪起こし作業を恒常的に必要とする地域に再造林を行うことは保育管理上の大きなリスクとなり得る。

富山県において雪起こしの実施を極力抑えた省力的林業あるいは低コスト林業を実現するためには、雪圧による倒伏や斜立が発生しにくい林地、すなわち雪起こし施業量が少ない林地を再造林対象とすることが合理的である。そこで、本論において作成した統計モデルから富山県スギ民有林全域の雪起こし面積比施業量を推定し、その分布図を作成した（図-4）。なお、ここでは面積比施業量を 1 未満、1~2、2~3、3 以上の 4 段階に区分（雪起こし施業量区分）して示した。また、2015~2017 年に実施した林齢 40 年生以上の公社営林を対象とする資源量調査（623 調査区）の際に実施された樹幹形状級基準（図-5、図子・嘉戸 2015）を用いた幹曲がりの評価結果をもとに（富山県農林水産公社 2017）、雪起こし施業量区分別の樹幹形状級構成比率を比較した（図-6）。そして、これらの情報をもとに雪起こし施業量に応じた再造林適性について検討した。

雪起こし施業量区分1未満に該当する林地では、雪起こしの必要性は総じて小さく、記録的な大雪が発生した年のみ本格的な雪起こしが行われる。多雪年に倒伏や斜立が低い頻度で発生することもあるが、多くの場合、雪起こしを実施せずとも樹幹の自然な立ち直りにより回復し、深刻な根元曲がりや成長低下につながる可能性は小さい。この区分に該当する既存林分の樹幹形状級構成比率は通直木である樹幹形状1級の本数割合中央値が5割を超え、元玉も含め通直性の高い製材用丸太を中心とする

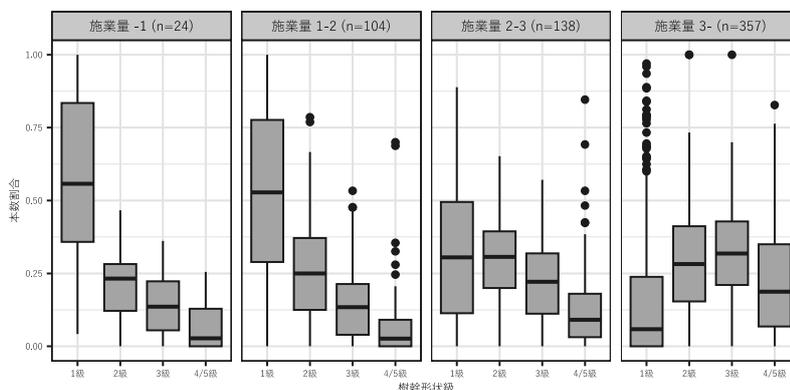


図-6 雪起こし施業量区分別の樹幹形状級構成比率の比較

生産が通常伐期（40～50年）で可能である。本県における再生林の最適地と考えられ、雪起こしを実施することなく、収益性の高い林分を造成することが十分に期待できる。

施業量区分1～2に該当する林地では、長期にわたる恒常的な雪起こしは必要ないものの、多雪年に比較的高い割合で倒伏や斜立が発生することがあり、その際には自然回復も可能であるが、雪起こしを行った方が有利となる場合もある。この区分に該当する既存林分の樹幹形状級構成比率は施業量区分1未満とほぼ同様であり、ここでも製材用丸太を中心とする生産が通常伐期で可能である。再生林適地であるが、雪起こしを行わなかった場合には通直性の高い1級木の割合は減少し、2級木や3級木の割合が増加すると予想される。言い換えれば、雪起こしによる立木の通直性を高める効果が現れやすい林地である。ここでは雪起こしの実施を最小限に留めても、ある程度高い収益性を有する林分を造成することは可能である。

施業量区分2～3に該当する林地では、年間降雪量の多少にかかわらず長期とまらないまでも一定期間の雪起こしが必要となる。また、この施業量区分に該当する既存林分の樹幹形状級構成比率は施業量区分1未満や施業量区分1～2に比べ、1級木の割合が大きく減少し、2級木、3級木、4級木の割合がそれぞれ増加する。このことは、この施業量区分において雪起こしを実施しても通直木を生産することが困難であることを示している。ここも再生林の候補となり得るが、雪起こし開始時期を遅らせることや作業対象木を早期に限定するなどの雪起こし作業の省力手法（野表 1988；小谷 1993）を積極的に取り入れ、雪起こし経費の縮減に務める必要がある。また、通常伐期では全体に占める小曲がり材や曲がり材の割合が高くなり、十分な収益を確保することが困難なことから、長伐期とし（80年以上）、肥大成長による幹曲がりの緩和を図りつつ、収量や形質の向上を目指すといったことを検討すべきである。

施業量区分3以上に該当する林地では長期間にわたる恒常的な雪起こしが必要となる。雪起こしを実施しなかった場合、根元曲がりの悪化

だけではなく、条件によっては生育不良や成林率の大幅な低下を招く恐れがある。この施業区分に該当する既存林分の樹幹形状級構成比率は、1級木が著しく少ないか全くない林分が多く、中央値の比較では3級木の割合が最も高く、全幹に曲がり及んでいる4・5級木の割合も総じて1級木の割合を上回った。ここでは雪起こしに要する労力や経費は非常に大きい、それに見合った形質の優れた林分が成立することはまれである。また、ここでの再生林は推奨されないが、何らかの理由により再生林を検討する場合には、収穫前の林況を確認したうえで、生育状況や立木形質が十分に優れ、その他の保育や生産に関わる諸条件が良好である場合のみ実施するべきであろう。

4. 謝辞

本研究の実施に当たり、富山県森林政策課の松井伸彦課長および滝口明信班長、富山県農林水産公社の洲崎吉昭部長および渡部智仁課長には事業地位置図、施業台帳、造林台帳の提供に当たり便宜を図っていただいた。富山県森林研究所の浜田和子氏には小班ポリゴンの作成や施業台帳データの調整に尽力いただいた。ここに記して感謝の意を示します。

引用文献

- Biagi KM, Carey SK (2020) The role of snow processes and hillslopes on runoff generation in present and future climates in a recently constructed watershed in the Athabasca oil sands region. *Hydrological Processes* 34 : 3635-3655
- Böhner J, McCloy KR (2006) SAGA-analysis and modelling applications. *Collection Göttinger Geographische Abhandlungen* 115 : 130pp
- Chang K, Li Z (2000) Modelling snow accumulation with a geographic information system. *Int J Geogr Inf Sci* 14 : 693-707
- Farrelly N, Ní Dhubbáin Á, Nieuwenhuis M (2011) Site index of Sitka spruce (*Picea*

- sitchensis) in relation to different measures of site quality in Ireland. *Can J For Res* 41 : 265-278
- Grünewald T, Stötter J, Pomeroy JW, Dadić R, Moreno Baños I, Marturià J, Spross M, Hopkinson C, Burlando P, Lehning M (2013) Statistical modelling of the snow depth distribution in open alpine terrain. *Hydrol Earth Syst Sci* 17 : 3005-3021
- 初鹿宏壮・川崎清人・折谷禎一・近藤隆之・溝口俊明・土原義弘・木戸瑞佳・中村篤博(2008) 富山県における地球温暖化に関する調査研究 - 県内の降雪に関する調査 - . 富山県環境科学センター年報 2008 : 75-80
- Hengl T, Reuter HI (2008) *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Newnes : 765pp
- 河田弘(1989) 森林土壌学概論. 博友社: 399pp
- 小谷二郎(1993) 植栽初期におけるスギの雪起こし省略試験の一事例. 石川県林試研報 24 : 11-17
- 草薙浩(2014) 日平均気温グラフの主成分分析による季節進行指標の導出の試みと近畿・北海道地方への応用. *天気* 61 : 671-675
- López-Moreno JI, Nogués-Bravo D (2006) Interpolating local snow depth data: an evaluation of methods. *Hydrol Process* 20 : 2217-2232
- Mitsuda Y, Yoshida S, Morio I (2001) Use of GIS-derived environmental factors in predicting site indices in Japanese larch plantations in Hokkaido. *J For Res* 6 : 87-93
- 中島皇・福嶋義宏・小橋澄治(1993) 暖候性積雪地域の山地流域における気象要素の空間的分布. *京大演報* 65 : 113-124
- 中峠哲朗・北川茂(1975) 福井県における積雪深分布の一次近似. *雪氷* 37 : 174-181
- 野村睦・佐藤冬樹・芦谷大太郎・榎本浩志(1999) 気温と降雪深による山地の積雪深と積雪量の推定. *北大演報* 56 : 11-19
- 野表昌夫(1973) 豪多雪地帯の造林技術 (I) - 新潟県の積雪環境と施業の実態 - . 新潟県林試研報 16 : 47-69
- 野表昌夫(1984) 豪多雪地帯の造林技術 (VII) - 雪起こしの作業方法と効果について - . 新潟県林試研報 26 : 31-41
- 野表昌夫(1988) 多雪地帯の育林技術と雪害軽減効果. *森林立地* 30 : 20-23
- 野表昌夫(1989) 湿性豪多雪地帯におけるスギ人工林の雪害と育林技術. 新潟県林業試験場 56pp
- 野表昌夫(1992) 豪多雪地帯におけるスギ人工林成林率と埋雪回数. *雪氷* 54 : 159-164
- 岡本隆・黒川潮・松浦純生・浅野志穂・松山康治(2004) 山地の積雪深分布計測における航空レーザスキャナの適用性に関する検討. *水文・水資源学会誌* 17 : 529-535
- 小野寺弘道(1990) 雪と造林 (わかりやすい林業研究解説シリーズ No. 96) . 林業科学技術振興所 81pp
- R Core Team (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (参照: 2024年2月17日)
- 林野庁(2010) 平成 21 年度森林・林業白書 https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/22hakusho/190411_6.html (参照: 2024年2月17日)
- 林野庁(2022a) 森林・林業統計要覧 https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/toukei/youran_mokuzi2022.html (参照: 2024年2月17日)
- 林野庁(2022b) 平成 4 年度森林・林業白書 <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r4hakusyo/zenbun.html> (参照: 2024年2月17日)
- 林野庁(2022c) 省力・低コスト造林ガイドライン及び造林未済地の再造林・荒廃農地の林地化 検討事例 . <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kanbatu/houkokusho/attach/pdf/syokusai-4.pdf> (参照: 2024年2月17日)
- 笹賀一郎・藤原滉一郎・佐藤冬樹(1989) 森林の強風地における堆雪効果. *北大演報* 46 :

- 801-828
- 佐藤啓祐 (1980) 造林木の雪害防止法の再検討 (II) -多雪地帯におけるスギ造林木の雪起こしの効果-. 山形県林試研報 11 : 29-35
- 佐藤啓祐 (1984) 保育作業. (雪に強い森林の育て方 豪雪遺体林業技術開発協議会編 日本林業調査会) 99-138
- 佐藤啓祐 (1987) 山形県の積雪環境に関する研究 (I) -一年最深積雪と年根雪日数の推定法-. 山形県林試研報 17 : 1-22
- 佐藤啓祐 (1992) 山形県の積雪環境に関する研究 (II) -山形県における積雪環境の類別-. 山形県林試研報 22 : 93-123
- 森林総合研究所東北支所 (2016) 東北地方の多雪環境に適した低コスト再造林システムの実用化に向けた研究成果集「ここまでやれる再造林の低コスト化—東北地域の挑戦—. <https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/3rd-chuukiseika33.html> (参照 : 2024年2月17日)
- 平英彰 (1982) 降雪初期の埋幹の違いがスギ幼齢木の根元曲りと生長に及ぼす影響. 日林誌 64 : 453-460
- 和口美明・齋藤愛・田中和博 (2011) スコア表と GIS を用いた林地生産力分布図の作成. 日林誌 93 : 235-238
- Wilson JP, Gallant JC (2000) Terrain analysis: principles and applications. John Wiley & Sons 479pp
- 丹下健 (1987) 19 年生スギ人工林の斜面上部, 中部, 下部における年蒸散量の推定. 東大演報 76 : 177-196
- 富山県農林水産公社 (2017) 富山県農林水産公社営林資源調査 (未発表)
- 富山県森林政策課 (2022) 令和 4 年度造林事業標準単価表 (未発表)
- 山本俊明・酒井徹朗・吉村健次郎・和田茂彦 (1979) 芦生演習林スギ造林地における雪起こしの効果について. 京大演報 51 : 96-109
- 矢野進治 (1985) 兵庫県下における人工林の雪害防除に関する研究 (I) 降積雪地帯における育林作業についてのアンケート調査結果. 兵庫県林試研報 33 : 1-14
- 矢野進治 (1987) 兵庫県下における人工林の雪害防除に関する研究 (II) 人工林の健全性の調査. 兵庫県林試研報 33 : 1-14
- Zushi K (2006) Spatial distribution of soil carbon and nitrogen storage and forest productivity in a watershed planted to Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don). J For Res 11 : 351-358
- Zushi K (2007) Regional estimation of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) productivity by use of digital terrain analysis. J For Res 12 : 289-297
- 関子光太郎 (2010) 富山県におけるスギ生育適地の空間分布推定のための数値地形解析に関する研究. 富山県農林水産総合技術センター 62pp
- 関子光太郎・嘉戸昭夫 (2015) 樹幹形状分類を用いたスギ根元曲がり木の利用材積および品質等級別材積率の推定. 日林誌 97 : 269-275

Summary

Based on historical records of practices aimed at preventing bending due to snow in sugi (*Cryptomeria japonica*) forests in Toyama Prefecture, an analysis was conducted to examine the relationship between the operational quantity required for prevention and various positional and topographical factors. The objective was to estimate the spatial distribution of the operational quantity needed to prevent bending at the prefectural level. The historical records were derived from 346 sites established through reforestation projects by the Toyama Prefectural Agriculture, Forestry, and Fisheries Public Corporation. The ratio of the area under practices to

prevent bending to the total area of each site was defined as the area ratio operational quantity required for prevention. When comparing the area ratio operational quantity required for prevention across municipalities, the minimum was found to be 1.32 in Himi City, while the maximum was 7.22 in Kamiichi Town, indicating significant regional disparities. The relationship between the area ratio operational quantity required for prevention and various positional and topographical factors was analyzed using a generalized linear mixed model (GLMM). The optimal model incorporated explanatory variables such as elevation, latitude, longitude, valley depth, valley height, and relative slope position. It was hypothesized that these positional and topographical factors could elucidate the spatial distribution of the operational quantity required for prevention by influencing factors such as snow depth and tree height growth rate. Furthermore, based on the estimated model, a distribution map of the operational quantity required for prevention in sugi forests across the prefecture was generated, and the suitability of these areas for reforestation was assessed.

Keywords: preventing bending due to snow, sugi, positional factors, topographical factors, spatial distribution of operational quantity