スギにおける幼齢期に形成された年輪のミクロフィブリル傾角と
雪圧害による根元曲がりの関係宮下 智弘^{*1}・渡部 公一¹・工藤 佳世²・高田 克彦²

雪圧害によるスギの根元曲がりは積雪地帯において幼齢期に発生する気象害である。本研究ではこの根元曲がりに対する晩材仮道管 S_2 層のミクロフィブリル傾角 (MFA) の影響を明らかにした。研究材料には抵抗性グループと対照グループを用いた。前者はこれまでの育種事業で抵抗性が高いと評価された6系統を用いた。後者は、同事業において抵抗性が低いと評価された3系統、精英樹、天然スギ、地スギを各1系統とする計6系統を用いた。これら12系統の胸高部からコアを採取し、髄からの年輪数を年輪番号と定義して測定対象とした年輪番号のMFAを測定した。抵抗性グループのMFAの値は全ての年輪において対照グループよりも小さく、3, 5年輪ではグループ間に有意差が認められた。また、幼齢期に形成された年輪のMFAと根元曲がりの大きさには高い相関関係が認められた。一般的に、MFAが小さいと樹幹の曲げヤング率が高いため、抵抗性グループは対照グループよりも幼齢期の樹幹ヤング率が高かったと推測された。樹幹ヤング率が高いと樹冠への着雪による幹の傾く量は軽減されるため、この結果として根元曲がりの形成量も小さくなると考えられた。

キーワード：雪圧害、根元曲がり、抵抗性育種、ヤング率、ミクロフィブリル傾角

Tomohiro Miyashita,^{*1} Koichi Watanabe,¹ Kayo Kudo,² Katsuhiko Takata² (2021) The Relation between the Microfibril Angle of Annual Rings Formed in the Juvenile Stage and Basal Bending due to Snow Pressure Damage in Sugi (*Cryptomeria japonica*). J Jpn For Soc 103: 71-77 Basal bending of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) due to snow pressure is a type of damage that occurs in the juvenile stage. The purpose of this study is to clarify the effect of the microfibril angle (MFA) in the S_2 layer of the latewood tracheid of annual rings on the basal bending. We selected six highly resistant varieties from candidate trees for snow pressure damage as the resistance group. A total of six varieties were used as the control group: three candidate trees and one plus tree with low resistance, and one local tree and one tree from the natural population with unknown resistance. Increment cores were collected at breast height from these 12 varieties and counted the number of annual rings from the pith as the annual ring number. The MFA of the resistance group was smaller than that of the control group in all annual rings investigated. There were significant differences between the groups in the 3rd and 5th rings. We examined the relationship between the size of basal bending and MFA in each variety, and found a high correlation in the annual rings formed in the juvenile stage. Generally, wood with small MFA exhibits a high modulus of elasticity. Thus, the resistance group had a high modulus of elasticity in the juvenile stage. Therefore, we concluded that small MFA in the juvenile stage can contribute decreasing stem leaning from loading of the crown with snow, so the trees in the resistant group would maintain the small basal bending.

Key words: snow pressure damage, basal bending, resistance breeding, modulus of elasticity, microfibril angle

I. は じ め に

スギ (*Cryptomeria japonica*) に対する雪圧害の一つとして根元曲がりが挙げられる (豪雪地帯林業技術開発協議会 2000)。一番玉となる根元部分の木材は経済的価値が高いが、根元曲がり被害によってこれらの木材は利用されず、あるいは曲がり材として安価に取引される。このため、根元曲がりは林業経営者に多大な経済的損失を与えている。

平 (1987) によると、根元曲がりの発生メカニズムは以下のように説明されている。スギ植栽木の樹幹は降雪初期の樹冠に付着した雪の重みによって谷側に傾き、その後の降雪によって埋雪する。融雪後の成長期間においてスギの樹幹は立ち直るが、樹幹上部と比べて樹幹下部の回復量は小さく、樹幹下部が完全に立ち直る前に再び埋雪する。このような樹幹倒伏と不完全な起立は植栽木が埋雪しなくなるまで連年繰り返され、結果として根元曲がりは形成されていく。スギが埋雪しないためには積雪深の2~2.5倍以上の樹高が必要とされている (四手井 1954; 豪雪地帯林業技術開発協議会 2000)。すなわち、スギの根元曲がりの

原因である樹幹倒伏をとまなう埋雪は、樹高の小さな個体や幼齢木に発生する。

根元曲がりはスギ系統により被害の程度が異なることが知られている。複数の在来系統を同一の林地に植栽して系統間で根元曲がりの大きさを調査した事例によると、ボカスギやアヤスギ、メアサ、ヤブクグリなどは根元曲がりが大きい系統、リュウノヒゲ、トサアカ、キジン、クモトオシなどは根元曲がりが小さい系統と報告されている (林野庁 1969)。また、気象害抵抗性育種事業 (那須・向田 1998) により雪害激害地から選抜された根元曲がりが小さい個体である雪害抵抗性候補木の実生苗や挿木苗では、根元曲がりの大きさに系統間差が認められている (向田・宮浦 2000)。雪害抵抗性候補木の中には複数の試験地において根元曲がりが特に小さい系統が見出されており (宮下 2009; 向田 2000)、中でも出羽の雪1号、2号は著しく根元曲がりが小さい系統として種苗法により登録された (向田 1995)。

このように根元曲がりの大きさは、系統によりある程度の再現性が観察されている。また、交配試験の結果からも、

*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: miyashitato@pref.yamagata.jp <https://orcid.org/0000-0002-1390-2818>

¹ 山形県森林研究研修センター 〒991-0041 山形県寒河江市大字寒河江丙 2707 (Yamagata Prefectural Forest Research and Instruction Center, 2707 Sagachei, Sagae, Yamagata 991-0041, Japan)

² 秋田県立大学木材高度加工研究所 〒016-0876 秋田県能代市字海詠坂 11-1 (Institute of Wood Technology, Akita Prefectural University, 11-1 Kaizakazaka, Noshiro, Akita 016-0876, Japan)

(2020年8月28日受付; 2020年12月7日受理)

根元曲がりの大きさを表わす傾幹幅には高い遺伝性が認められており、遺伝率や一般組合せ能力も高いことから遺伝的な影響を強く受けている形質であると考えられている(宮下ら 2006; 宮下・中田 2008, 2010)。幼齢期の雪圧によって形成される根元曲がりにこのような高い遺伝性が観察できる要因の一つとして、根元曲がり抵抗性は環境の影響を受けにくい形質が関与していることが考えられる。なお、本論文においては、根元曲がりが小さい系統または個体の特性のことを抵抗性と呼ぶことにする。

抵抗性に関与する形質として古くから着目されていたものは根の形状である(林野庁 1969; 向田 1995)。これは、積雪の多い地域のスギ林分に成育している根元曲がりの小さい個体には、支持根と呼ばれる太い根が発生していることが観察できるためである。しかしながら平ら(1990)は、タテヤマスギ等の4系統を調査した結果、系統間で根の形態に多少の違いがみられても、根の回転係数(中谷ら 1984)は系統間で差が生じにくいことを見出した。このことから平ら(1990)は、根の樹体支持力よりも地上部の形質が重要であると考え、重回帰分析等によって枝の長さ、枝の着生角度、樹幹の曲げヤング率が抵抗性を説明する形質であると考察している。

これらの形質のうち、ヤング率あるいはこれと関係する応力波伝播速度は、遺伝子型と環境の交互作用が小さく、異なる林地に植栽された同一系統の挿し木苗において系統間で高い同調性を示す事例が報告されている(藤澤 1998; 三嶋ら 2011)。すなわち、抵抗性に関与すると考えられている形質の中で、遺伝的特性を反映しやすいヤング率の影響は大きい可能性が考えられる。

ヤング率は様々な要因が複合的に関与している形質である。その中でも、ヤング率に対する容積密度と晩材仮道管 S_2 層のミクロフィブリル傾角(Microfibril Angle: MFA)の影響は大きい(平川ら 1997)。しかしながら、抵抗性に対する容積密度やMFAの影響はこれまでにほとんど調べられていない。このうち、根元曲がりとMFAの関係を研究したものにTakata *et al.* (2014)の報告がある。彼らは出羽の雪1号、2号と精英樹2系統の4系統について木材試料を採取してMFAを調べた結果、出羽の雪1号、2号は精英樹よりも根元曲がりが有意に小さく、それらのMFAも髓付近において精英樹より有意に小さいことを示した。MFAとヤング率は負の相関関係にあり(平川・藤澤 1995; 平川ら 1997; 山下ら 2000)、この結果は平ら(1990)の研究を支持している。また、在来18系統の地上高1.5 m部における幼齢期のMFA(2, 5, 10年輪のMFA平均値)を報告した事例(山下ら 2000)によると、MFAが大きい系統としてボカスギ、ヤブクグリ、アヤスギ、イトシロスギなどが、小さい系統としてクモトオシ、オキノヤマスギ、マキノサキシギ、トウドウスギなどが読み取れる。ボカスギについては平川ら(1997)の報告でも幼齢期のMFAが大きい。これら系統の積雪地帯における植栽事例をみると、ボカスギ(松浦 1998; 林野庁 1969; 平 1987)、ヤブクグリ(栗田ら 1989; 林野庁 1969)、アヤスギ(栗田ら 1989; 林野庁 1969)、イトシロスギ(戸田・山口 1980)は根元曲がりが大きい系統として、クモトオシ(栗田 1979, 1983; 林野

庁 1969)、オキノヤマスギ(植田 1998)、マキノサキシギ(原 1973)、トウドウスギ(栗田 1979, 1983)は根元曲がりが小さい系統として報告されている。これらの報告はMFAが大きい系統は抵抗性が低く、MFAが小さい系統は抵抗性が高いことを示唆している。

根元曲がりの大きさは積雪や傾斜等の環境要因によって変動するため(豪雪地帯林業技術開発協議会 2000)、根元曲がりの生じにくい環境へ植栽すれば、抵抗性が低くても根元曲がりは小さくなる。したがって、このような環境に偶然植栽された抵抗性の低い系統は、抵抗性の高い系統として誤選抜されるおそれがある。一方、ヤング率は遺伝子型と環境の交互作用が小さい形質であるため(藤澤 1998; 三嶋ら 2011)、ヤング率に影響を与えているMFAについても交互作用が小さい可能性がある。すなわち、MFAと抵抗性との間に関係性が存在すれば、環境の影響を受けにくいと考えられるMFAを選抜形質に加えることにより、抵抗性に対する選抜精度の向上が期待できる。さらに、MFAは樹齢によって値が変動する性質がある(平川・藤澤 1995; 平川ら 1997; 石堂ら 2009; 山下ら 2000)。したがって、樹齢ごとに形成された晩材仮道管を調べることによって、抵抗性と成長ステージごとのMFAの関係を調べることができ、MFAによる抵抗性系統の選抜に対して最適な樹齢を明らかにできる可能性がある。しかしながら、これまでに両者の関係性を研究した事例はTakata *et al.* (2014)を除いてなく、研究対象とした系統数も4と少ない。このため、MFAによって各系統の抵抗性をどの程度説明できるか不明であり、抵抗性の優れた系統の選抜への応用が妥当であるか判断は難しい。両者の関係を明らかにするためには、様々な抵抗性を有する複数の系統について、抵抗性とMFAの関係を検討する研究事例を積み重ねていく必要がある。そこで本研究では、抵抗性が大きく異なるスギ12系統を研究材料に用いて、MFAと抵抗性の関係を明らかにすることを目的とした。

II. 材料と方法

1. 材料

本研究における実験材料の詳細を表-1に示す。本研究では抵抗性が高い系統と対照となる系統の2グループを研究対象として選定した。これらの系統の選定に際して用いた根元曲がり抵抗性は鈴木・佐藤(1991)と宮下(2009)を引用した。鈴木・佐藤(1991)は、後述する山形県森林研究研修センター林木育種園(山形県鶴岡市)内の耐雪試験林において林齢14から18年生時に雪害抵抗性候補木(以下、候補木と呼ぶ)の傾幹幅を測定した。宮下(2009)は秋田県、山形県、新潟県内に造成された44カ所の実生検定林において10年次の候補木と精英樹の傾幹幅指数を測定した。傾幹幅とは胸高部における植栽点と幹との間の水平距離であり、傾幹幅指数とは傾幹幅を5段階指数で表した値(0~25 cm, 5; 26~50 cm, 4; 51~75 cm, 3; 76~100 cm, 2; 101 cm以上, 1)である(宮下・中田 2008)。これらの報告では、表-2に示した方法によって系統ごとに根元曲がりの大きさを5段階指数で表現している(以下、

表-1. 試験に供試した系統

集団名	系統名	植栽時の 苗木の形態	胸高直径 (cm)	年輪コア本数			傾幹幅 評価値* (系統平均値)**	傾幹幅指数 評価値* (最小二乗推定値)***	
				計	耐雪 試験林	採種園			
抵抗性 グループ	出羽の雪 1 号	挿し木	29.5	3	2	1	4 (22.2)	4 (3.66)	
	出羽の雪 2 号	挿し木	24.0	3	2	1	4 (23.4)	4 (3.66)	
	山形県 30 号	挿し木	31.6	3	2	1	4 (33.6)	3 (3.26)	
	山形県 35 号	挿し木	27.9	3	1	2	4 (37.2)	4 (3.60)	
	山形県 43 号	挿し木	24.3	3	2	1	3 (52.8)	4 (3.49)	
	山形県 53 号	挿し木	22.6	3	1	2	4 (37.2)	3 (3.24)	
対照 グループ	対照サブ グループ 1	山形県 5 号	挿し木	21.3	3	0	3	1 (75.8)	2 (3.19)
		山形県 19 号	挿し木	22.8	3	2	1	1 (73.8)	1 (2.96)
		山形県 62 号	挿し木	29.9	3	2	1	2 (60.0)	2 (3.03)
	対照サブ グループ 2	中頸城 6 号	挿し木	33.1	3	3	0	—	1 (2.79)
		山内スギ	挿し木	32.5	3	3	0	—	—
		地スギ	実生	26.5	5	5	0	—	—

*評価値とは表-2 の基準によって得られる 1 から 5 までの整数である。傾幹幅の系統平均値または傾幹幅指数の最小二乗推定値から得られる値であり、評価値が大きいほど根元曲がり小さい。**系統平均値とは、耐雪試験林における各系統の傾幹幅に対する 95%信頼区間の上限値と下限値の中間値である（鈴木・佐藤 1991）。***最小二乗推定値とは、44 カ所の検定林における各系統の傾幹幅指数に対する最小二乗推定値である（宮下 2009）。

表-2. 傾幹幅または傾幹幅指数に対する評価値の算出方法

評価値*	傾幹幅**	傾幹幅指数***
5	$X_1 < \mu_1 - 1.5\sigma_1$	$\mu_2 + 1.5\sigma_2 \leq X_2$
4	$\mu_1 - 1.5\sigma_1 \leq X_1 < \mu_1 - 0.5\sigma_1$	$\mu_2 + 0.5\sigma_2 \leq X_2 < \mu_2 + 1.5\sigma_2$
3	$\mu_1 - 0.5\sigma_1 \leq X_1 < \mu_1 + 0.5\sigma_1$	$\mu_2 - 0.5\sigma_2 \leq X_2 < \mu_2 + 0.5\sigma_2$
2	$\mu_1 + 0.5\sigma_1 \leq X_1 < \mu_1 + 1.5\sigma_1$	$\mu_2 - 1.5\sigma_2 \leq X_2 < \mu_2 - 0.5\sigma_2$
1	$\mu_1 + 1.5\sigma_1 \leq X_1$	$X_2 < \mu_2 - 1.5\sigma_2$

*傾幹幅と傾幹幅指数の評価値はともに、数字が大きいほど根元曲がり小さいことを示している。**鈴木・佐藤 (1991) を引用した。 μ_1 と σ_1 は耐雪試験林における全調査対象個体の傾幹幅の全平均と標準偏差をそれぞれ示しており、 X_1 は系統平均値を示している。***宮下 (2009) を引用した。 μ_2 と σ_2 は 44 カ所の実生検定林における全系統の傾幹幅指数に対する最小二乗推定値の全平均と標準偏差をそれぞれ示しており、 X_2 は系統ごとの最小二乗推定値を示している。また、傾幹幅指数とは傾幹幅を 5 段階指数で表した値 (0~25 cm, 5; 26~50 cm, 4; 51~75 cm, 3; 76~100 cm, 2; 101 cm 以上, 1) である。

評価値と呼ぶ)。両報告とも、評価値が大きいほど根元曲がり小さい系統であったことを示している。

本研究では、上記の報告とともに評価値 3 以上と評価された候補木 6 系統を抵抗性グループとして選定した。また、対照グループは下位区分として二つのサブグループにより構成される。対照サブグループ 1 は候補木の集団であり、原木の選抜時に強度な根元曲がりに対する選抜を受けているが、後に行われた検定によって評価値 2 以下となった候補木 3 系統で構成される。対照サブグループ 2 は根元曲がりに対する強度な選抜を受けていない 3 系統、すなわち、精英樹である中頸城 6 号と、山形県内の天然スギである山内スギおよび山形県羽黒町内（現在の山形県鶴岡市）産の地スギで構成される。このうち中頸城 6 号の根元曲がり後の検定によって大きいことが明らかにされた（宮下 2009；林木育種推進東北地区協議会 2003）。一方、山内スギと地スギの根元曲がり抵抗性は不明である。

2. MFA の測定

MFA を測定するための木材試料は林木育種園内の耐雪試験林と抵抗性 1 号採種園からサンプリングした。耐雪試験林は傾斜約 25 度の東向き平衡斜面の中腹にあり、雪害抵抗性候補木や精英樹の挿木苗あるいは実生苗が 1973 年

から 1977 年にかけて植栽された（鈴木・佐藤 1991）。耐雪試験林には反復が設けられておらず、系統ごとに 10 から 40 本が列状植栽されている。抵抗性 1 号採種園は平坦地にあり、候補木の挿木苗が 1978 年に植栽された。抵抗性 1 号採種園では下刈りや雪起こし等の保育作業が実施されたが、耐雪試験林については下刈りのみ行い雪害を防止するための保育作業は実施されていない。これら二つの試験地を対象に、上述した 12 系統のうち挿し木苗である 11 系統では、植栽木の中から系統内の胸高直径が平均的で、根元曲がり小さく幹に欠点が見られない個体を系統当たり 3 個体選定した（表-1）。これと同様に、実生苗である地スギについては 5 個体を選定した（表-1）。挿木苗である 11 系統は遺伝子型を調べ、系統内で各個体の遺伝子型が同一であることを確認した。これら 12 系統 38 個体から径 10 mm の成長錐によって胸高部からコアを 2016 年に採取した。なお、あて材の影響を少なくするためにコアは等高線方向から採取した。

採取したコアは実験室に持ち帰り、髄からの年輪の数を年輪番号と定義して各コアにつき 2 年輪と 3 年輪、これ以降は 2 年輪ごとに 17 年輪まで、そして 26 年輪と 31 年輪の計 11 個の年輪を対象に晩材部をトリミングした。これらの晩材小ブロックをサンプル瓶に入れ、そこに 30%過酸化水素水と酢酸を等量ずつ混合して作製した解繊液を注入し、60℃で 20 時間加温して解繊した。解繊した試料はデジタル顕微鏡カメラ（アズワン、MIC-140）により 400 倍に拡大し、仮道管の壁孔孔口の仮道管長軸に対する角度を測定し、これを MFA とした（平川・藤澤 1995）。1 本の仮道管から測定する壁孔孔口は 1 個とし、年輪ごとに 50 本の仮道管を測定して年輪ごとの平均値を算出した。なお、顕微鏡で観察すると、仮道管の先端部が異常な形態を有するなど、あて材の特徴を有する仮道管（林 2016）も認められたが、そのような仮道管は測定の対象から除いた。

3. 解析方法

年輪番号ごとに以下の構造モデル式を用いてグループ間で MFA に差が認められるかを検討した。

$$MFA_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_{j(i)} + \gamma_k + \varepsilon_{ijkl}$$

ここで MFA_{ijkl} は、グループ i 内の j 番目の系統のうち、場所 k から採取した l 番目の個体の年輪番号における MFA の平均値である。 α_i は抵抗性グループまたは対照グループの効果であり、 $\beta_{j(i)}$ はグループ i 内に入れ子となっている系統 j の効果である。 γ_k は植栽地である耐雪試験地または採種園の効果である。 μ は全平均であり、 ε_{ijkl} は誤差である。この構造モデル式をもとに nested-ANOVA を行った。

分散分析の結果、グループ間で有意差が認められた年輪番号を対象に、MFA の個体平均値を用いて下位区分したグループ間の比較、すなわち、抵抗性グループと対照サブグループ 1、対照サブグループ 2 に対して Tukey-HSD 法による多重比較を行った。以下の構造モデル式によって、下位区分した三つのグループ間に差が認められるかを検討した。

$$MFA_{ijk} = \mu + \delta_i + \gamma_j + \varepsilon_{ijk}$$

ここで、 δ_i は抵抗性グループまたは対照サブグループ 1、2 の効果である。

次に、MFA と根元曲がりの大きさの関係を検討した。今回用いたコアは胸部部からのサンプルであり、個体ごとの植栽年も不明なものが多かった。そこで、主成分分析によって年輪番号を大まかな成長ステージごとに分けて MFA の平均値を求めた。主成分分析には年輪番号ごとに MFA の個体平均値を用いた。各ステージに分類された全年輪番号の MFA の平均値と、既存の報告による根元曲がりの大きさとの相関関係を検討した。根元曲がりの大きさは耐雪試験林（鈴木・佐藤 1991）と実生検定林（宮下 2009）それぞれで得られた値（表-1）を用いて積率相関係数を算出した。なお、鈴木・佐藤（1991）では各系統の傾幹幅を 95% の信頼区間により報告しているため、本研究ではこれらの上限値と下限値の中間値を傾幹幅として用いた（表-1）。また、宮下（2009）では開発プログラム（宮浦 1998）によって系統ごとに推定された傾幹幅指数の最小二乗推定値が傾幹幅指数として報告されており、本研究においてもこの値を各系統の根元曲がりの大きさとして用いた（表-1）。なお、宮下（2009）による系統ごとの傾幹幅指数は根元曲がりの小さいものを 5 とする 5 段階の指数であるため、傾幹幅と傾幹幅指数は負の相関関係になる。

最後に、各年輪の MFA の系統平均値を用いて 31 年輪とそれ以外の年輪との間に相関が認められるかを検討するため、積率相関係数を算出した。

これら全ての統計解析は R ver. 3.4.3（R core Team 2019）を用いた。

III. 結 果

解析対象とした年輪における抵抗性グループと対照グループの MFA を図-1 に示す。解析対象とした全ての年輪において抵抗性グループの MFA は対照グループよりも小さい傾向が認められた。特に幼齢期に形成された 3、5 年輪においてグループ間で有意差が認められた（nested-ANOVA, $p < 0.05$ ）。なお、各個体の年輪番号ごとの MFA

については（J-Stage 電子付録付表 -1）に示した。

有意差が認められた 3、5 年輪の MFA について、抵抗性グループと対照サブグループ 1、対照サブグループ 2 の下位区分によるグループ間の差を検討した（図-2）。その結果、両年輪とも、抵抗性に対する選抜を受けていない系統で構成されている対照サブグループ 2 と抵抗性グループとの間に有意差が認められた（Tukey-HSD 法, $p < 0.05$ ）。

次に、系統ごとの MFA と根元曲がりの大きさの関係を検討した。MFA が形成された樹齢のステージを分類するため、主成分分析によって年輪番号をグルーピングした。主成分分析の結果、第一主成分と第二主成分の累積寄与率は 76.1% となった。第一主成分と第二主成分の因子負荷量を求めると、2～5 年輪と 17～31 年輪は両主成分ともに正の値であり、7～15 年輪は第一主成分が正の値であるが第二主成分では負の値となった（図-3）。このため、本研究では年輪番号を 2～5 年輪、7～15 年輪、17～31 年輪の 3 ステージに分類した。各ステージ内の全年輪番号について系統ごとに MFA を平均した値と、既存の報告（鈴木・佐藤 1991；宮下 2009）による傾幹幅の系統平均値または傾

図-1. 抵抗性グループと対照グループの MFA の放射方向変動

矢印で示した年輪番号では、抵抗性グループと対照グループとの間に有意差が認められたことを示す（nested-ANOVA, $p < 0.05$ ）。年輪番号とは髓からの年輪の数である。エラーバーは系統平均値から算出した標準偏差である。

図-2. 下位区分した 3 グループにおける 3 年輪と 5 年輪の MFA

抵抗性グループと対照グループとの間に有意差が認められた年輪番号のみを示している。年輪番号ごとに多重比較を行い、異なるアルファベットはそれらの間に有意差が認められることを示している（Tukey-HSD 法, $p < 0.05$ ）。

図-3. 年輪番号の MFA に対する因子負荷量
各データのそばに示した数字は年輪番号を表す。

幹幅指数の最小二乗推定値（表-1）の関係を検討した。その結果、傾幹幅および傾幹幅指数の最小二乗推定値と、年輪番号 2～5 年輪の MFA 平均値との間には有意な相関を示したが（図-4(A), (D)）、それ以外の樹齢において相関は認められなかった（図-4(B), (C), (E), (F)）。

31 年輪とそれ以外の年輪の MFA について積率相関係数を算出した（図-5）。2 年輪と 3 年輪では相関係数がそれぞれ 0.65 と 0.66 と有意な値を示した。その後、5 から 13 年輪までは有意な相関が認められなかったが、15 年輪以降では 26 年輪まで有意な正の相関係数が得られた。

IV. 考 察

本研究では抵抗性グループ 6 系統、対照グループ 6 系統の計 12 系統を供試した結果、抵抗性グループの MFA は対照グループと比べ全ての年輪で小さい値を示し、3 年輪と 5 年輪ではグループ間に有意差が認められた（図-1）。根元曲がり抵抗性品種である出羽の雪 1 号、2 号でも、本研究の結果と同様に、特に髓付近における MFA が精英樹

図-4. 耐雪試験林および検定林での傾幹幅と年輪ごとの MFA の相関係数

(A), (B), (C) は検定林における傾幹幅指数であり ($n=10$)、(D), (E), (F) は耐雪試験林における傾幹幅である ($n=9$)。また、(A), (D) は 2 から 5 年輪、(B), (E) は 7 から 15 年輪、(C), (F) は 17 から 31 年輪の MFA の平均値を用いている。 r は積率相関係数を示し、* は 5% 水準で有意であることを、n.s. は有意でないことを示している。また、傾幹幅が大きいほど、あるいは傾幹幅指数が小さいほど、根元曲がりは大きいことを示す。

図-5. 31年輪とそれ以外の年輪番号におけるMFAの積率相関係数

●は5%水準の有意な相関係数であり、○は有意な相関係数ではないことを示している。

よりも有意に小さいことが報告されている (Takata *et al.* 2014)。さらに、対照グループを対照サブグループ1, 2に分けた図-2をみると、3年輪と5年輪のMFAは各系統の選抜履歴との関連性が観察できた。抵抗性グループと対照サブグループ1は、原木の選抜時において根元曲がりの特化した選抜を受けているが、MFAの大きかった対照サブグループ2はそのような選抜を受けていない系統で構成されている。これと同様に、抵抗性グループと対照サブグループ1の3年輪と5年輪のMFAは、統計上では両グループ間に有意差が認められなかったが、平均値のみで比較すれば前者の値が小さく、抵抗性との関連が示唆された。これらの結果を考慮すると、スギの根元曲がり抵抗性は、幼齢期に形成された晩材仮道管のMFAが関与している可能性が高く、幼齢期のMFAが小さいと根元曲がりも小さいという関係が存在していると考えられる。

そこで本研究では、傾幹幅の系統平均値または傾幹幅指数の最小二乗推定値とMFAとの相関関係を成長ステージごとに検討した。本研究で引用した傾幹幅の系統平均値と傾幹幅指数の最小二乗推定値は互いに異なる独立した試験地から推定したものであったが、両者の間には有意な相関関係が認められた ($r = -0.77$, $n = 9$, $p < 0.05$)。さらに、傾幹幅の系統平均値と傾幹幅指数の最小二乗推定値は、それぞれ2~5年輪のMFAと相関係数が高かった (図-3)。したがって、幼齢期に形成された晩材仮道管のMFAの値は根元曲がりの大きさを説明する重要な要因であると考えられる。

MFAは樹幹ヤング率を説明する大きな要因であり、スギにおいてMFAと樹幹ヤング率は負の相関関係にある (平川・藤澤 1995; 平川ら 1997; 山下ら 2000)。したがって、本研究における抵抗性グループは対照グループに比べ、特に幼齢期において高い樹幹ヤング率を持っていたと考えられた。根元曲がりは植栽木が樹幹倒伏をともなって埋雪する幼齢期に多く形成されるものである (豪雪地帯林業技術開発協議会 2000)。また、平 (1982) は、人為的に樹幹の傾きを軽減して埋雪させると根元曲がり形成量が少なくなることを報告した。これらのことから、根元曲がりが形

成される幼齢期においてMFAが小さく、樹幹ヤング率が高い系統は、樹冠に着雪しても樹幹がしなにくく、樹幹があまり倒伏しない状態のまま埋雪すると考えられる。この結果として、幼齢期に樹幹ヤング率が高い系統は根元曲がり形成量も小さくなると考えられた。

根元曲がり抵抗性が優れる系統の選抜には、これまでの主たる選抜形質である根元曲がりの大きさ (例えば、傾幹幅) に加えて、幼齢期のMFAも選抜形質とすることが望ましいと考えられる。MFAは遺伝子型と環境の交互作用が小さいヤング率 (藤澤 1998; 三嶋ら 2011) と関係性が強い (平川ら 1997)、MFAは環境の影響を受けにくい形質と考えられる。このことは、抵抗性系統の選抜に対して大きな長所になると期待できる。なぜなら、根元曲がりは積雪等による環境の影響を受けやすい形質であり (豪雪地帯林業技術開発協議会 2000)、根元曲がりしにくい環境に植栽された系統は、抵抗性が低くても根元曲がりが小さくなってしまうためである。これまでの選抜では偶然に被害を免れた根元曲がりの小さい個体を誤って選抜していた可能性も考えられる。これに対して、環境の影響を受けにくいMFAの情報を抵抗性系統の選抜に用いれば、このような誤選抜を防止できると考えられるため、抵抗性系統の選抜精度は向上すると期待できる。

次に、幼齢期のMFAの選抜により成熟材のMFAの改良が期待できるか検討した。2~5年輪のMFAと根元曲がりの大きさの間に有意な相関関係がみられたことから (図-4)、ここでは幼齢期として2~5年輪に注目する。これまでの研究では、2~6年輪 (平川・藤澤 1995) や3年輪 (石堂ら 2009; 西村ら 2003) のMFAから成熟材部のMFAが推定できる可能性が指摘されている。本研究においても、成熟材の形成期と考えられる31年輪のMFAと2および3年輪のMFAとの間には、低い値ではあるが有意な相関係数が得られた (図-5)。しかし、5~7年輪にかけて相関係数は減少し、13年輪まで有意な相関係数は得られなかった (図-5)。これらのことから、胸高部におけるサンプルの場合、5年輪よりも2および3年輪のMFAにもとづく選抜の方が、31年輪のMFAを改良できることが示唆された。しかしながら、2および3年輪のMFAであってもそれらの相関係数は低く、幼齢期のMFAが小さい系統は31年輪のMFAも小さいとは限らないことを示している。したがって、幼齢期のMFAによって31年輪のMFAの優れた系統を選抜したい場合、単一あるいは少数の系統のみの選抜では、31年輪のMFAが大きい系統を誤選抜したときの影響を強く受ける可能性がある。これに対して、抵抗性グループのMFAが全体的に小さい傾向であったことに注目すると (図-1)、選抜系統数を増やすことにより、このような誤選抜のリスクは軽減でき、成熟材のMFAを改良できると考えられる。したがって、根元曲がり抵抗性の選抜形質として幼齢期のMFAを加えることにより、選抜集団の成熟材のヤング率は向上できる可能性がある。

謝 辞

(国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センターの織

部雄一朗博士と井城泰一博士からは本研究の遂行にあたり様々な便宜を図って頂いた。秋田県立大学木材高度加工研究所の瀧誠志郎博士（現 森林総合研究所）と秋山里美氏からは本研究の調査に対して全面的なご支援を頂いた。元山形県森林研究研修センターの中川優梨花氏および益田明佳氏は晩材部のトリミングと MFA 測定にご尽力頂いた。これらの方々に感謝申し上げる。本研究は JPS 科研費 17K07850 の助成を受け実施した。

引用文献

- 藤澤義武（1998）高度木材利用に適合する品質管理型木材生産への林木育種の対応に関する研究。林木育種セ研報 15: 31-107
- 豪雪地帯林業技術開発協議会（2000）雪国の森林づくり—スギ造林の現状と広葉樹の活用—。日本林業調査会
- 原 雅継（1973）スギの耐寒、耐雪性早期検定法に関する試験。福井県林試研報 11: 1-20
- 林 徳子（2016）一般的な圧縮あて材。（あて材の科学。日本木材学会組織と材質研究会編、海青社）。50-53
- 平川泰彦・藤澤義武（1995）精英樹スギクロンにおける晩材仮道管 S₂ 層のマイクロフィブリル傾角と仮道管長との関係。木材学会誌 41: 123-131
- 平川泰彦・山下香葉・中田了五・藤澤義武（1997）スギ丸太ヤング率へのマイクロフィブリル傾角と密度の影響。木材学会誌 43: 717-724
- 石堂 恵・石栗 太・飯塚和也・横田信三・大野英克・吉澤伸夫（2009）晩材仮道管 S₂ 層マイクロフィブリル傾角を材質指標としたスギ材におけるヤング率の早期評価。木材学会誌 55: 10-17
- 栗田稔美（1979）スギ地方品種の耐雪性について。日林東北支誌 31: 62-64
- 栗田稔美（1983）スギ地方品種の耐雪性について（第 2 報）—植栽後 10 年までの経過—。日林東北支誌 35: 69-71
- 栗田稔美・小野寺弘道・大原偉樹（1989）多雪地帯に植栽されたスギ地方品種の生育実態。日林東北支誌 41: 85-86
- 松浦崇遠（1998）富山県における主要なスギ挿し木品種の成長特性と耐雪性。富山県林業技術セ研報 11: 7-19
- 三嶋賢太郎・井城泰一・平岡裕一郎・宮本尚子・渡辺敦史（2011）関東育種基本区におけるスギ精英樹クロンの立木材質の評価。木材学会誌 57: 256-264
- 宮下智弘・向田 稔・河崎久男（2006）スギの雪圧害抵抗性の遺伝特性。日林誌 88: 114-119
- 宮下智弘・中田了五（2008）10 年生スギの雪圧害により生じた根元曲がりに対する遺伝パラメータの推定。日林誌 90: 91-96
- 宮下智弘（2009）東北育種基本区西部育種区における根元曲がりが少ないスギ雪害抵抗性品種の開発。平成 21 年度林木育種センター年報: 58-61
- 宮下智弘・中田了五（2010）10 年生スギのフルダイアレル交配家系から推定した雪圧による根元曲がり抵抗性の組合せ能力と正逆交配間差。日林誌 92: 151-156
- 宮浦富保（1998）検定林データの分散分析プログラム。林木育種セ研報 15: 251-258
- 向田 稔（1995）根元曲がりの少ないスギ 出羽の雪 1 号および出羽の雪 2 号の特性と経済的メリット。林業技術 635: 15-18
- 向田 稔（2000）雪害抵抗性の検定評価。林木育種セ東北年報 30: 227-237
- 向田 稔・宮浦富保（2000）東北育種基本区におけるスギ雪害抵抗性の検定と遺伝様式に関する研究—雪害抵抗性検定林 10 年次データを用いたスギ雪害抵抗性候補木の抵抗性形質の解析—。林木育種セ東北年報 30: 133-141
- 中谷 浩・嘉戸昭夫・平 英彰・飯島泰男・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: 886-893
- 那須仁弥・向田 稔（1998）東北育種基本区における気象害抵抗性育種事業の実施経過。林木育種セ研報 15: 131-144
- 西村正徳・小田一幸・松村順司・松永浩史（2003）林木育種にむけての材質指標としてのスギ仮道管口角。九大農演報 84: 51-58
- 林木育種推進東北地区協議会（2003）東北育種基本区スギ精英樹特性表。東北育種場
- 林野庁（1969）スギの根曲りに関する調査。林野庁
- R Core Team（2019）R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- 四手井綱英（1954）雪圧による林木の雪害。林試研報 73: 1-89
- 鈴木基修・佐藤啓祐（1991）若齢期におけるスギの雪害抵抗性クロンと精英樹クロンの材質特性。山形県林試研報 21: 27-38
- 平 英彰（1982）降雪初期の埋幹の違いがスギ幼齢木の根元曲がりと生長に及ぼす影響。日林誌 64: 453-460
- 平 英彰（1987）スギ根元曲がりの形成機構と制御方法に関する研究。富山県林試研報 12: 1-80
- 平 英彰・嘉戸昭夫・中谷 浩（1990）スギの根元曲がり抵抗性。日林誌 72: 27-33
- Takata K, Kobayashi K, Hasegawa Y, Taki S, Oribe Y, Furumoto R, Hirao T（2014）Evaluation of characteristics of the cultivars with resistance to snow-damage of Japanese cedar. Proc 2014 IUFRO Forest Tree Breed Conf: 28
- 戸田清佐・山口 清（1980）スギ在来品種の耐雪性に関する調査（Ⅰ）—樹高成長と根曲り量の品種間差異について—。第 28 回日林中支大会講演集: 81-83
- 植田幸秀（1998）雪でも曲がらない新しいスギ—新品種「とっとり沖の山」の特性—。林経協月報 445: 38-42
- 山下香葉・平川泰彦・藤澤義武・中田了五（2000）スギ 18 品種の丸太ヤング率の品種間差に及ぼすマイクロフィブリル傾角と密度の影響。木材学会誌 46: 510-522