

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05768

研究課題名(和文)天然スギはなぜ良く曲がるのか～曲げわっぱに適したスギの材質特性の解明～

研究課題名(英文) Why natural Japanese cedar has high flexibility: Understanding material properties of Japanese cedar suitable for magewappa bentwood product.

研究代表者

足立 幸司 (Adachi, Koji)

秋田県立大学・木材高度加工研究所・准教授

研究者番号：70451838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：人工林において、形状比が小さいスギ立木ほど比曲げ弾性率が小さく、曲げたわみ量が大きかった。これは、晩生な成長傾向を示す天然スギの材質と一致した。成熟材の平均年輪幅と比弾性率に関連性が認められず、同一林分内より異なる林分間の材質の差が大きかった。人工林スギと天然スギの比弾性率の年輪方向変動を測定した結果、未成熟材から成熟材の移行時の比弾性率は、造林スギ材は健全木および被圧木に因らず約1.6倍増大するのに対し、天然スギ材は約1.2倍に留まることが明らかになった。未成熟期間の成長挙動が、成熟材の材質に大きな影響を及ぼすことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天然スギは人工林スギよりも曲げ木に適しているが、天然と人工の意味する材質指標や生育特性が不明で、人工林主体の今後の森林経営において、曲げ木用の高年齢級スギ材の育林方針の設定が困難な状況であった。本研究において、天然スギは未成熟期から成熟期での比弾性率の増加幅が抑制される成長状態であること、現状の人工林でも形状比の小さい林分は曲げやすい立木が多いことが明らかとなり、植栽時にはスギ苗の初期成長の制御、成林の人工林に対しては樹形による選別の有用性を導き出すことが出来た。

研究成果の概要(英文)：Planted sugi trees (*Cryptomeria japonica*) with a small DBH (Diameter at Breast Height) - H (Height) ratio tended to have a low specific MOE (modulus of elasticity in bending) and a large amount of bending deflection. This trend was consistent with the material properties of natural sugi, which shows late growth pattern. There was no clear relation between the annual ring width and specific MOE in mature wood. As a result of measuring the material variation of the specific MOE of planted sugi and natural sugi in the radial direction, the increase rate of the specific MOE at the time of transition from juvenile wood to mature wood was about 1.6 times for planted sugi, while about 1.2 times for natural sugi. It was suggested that the growth behavior during the juvenile wood period has a great influence on the material of the mature wood.

研究分野：木材加工

キーワード：曲げ木 秋田スギ 天然スギ 比弾性率 過熟材

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

木材の曲げ加工製品で“曲物(まげもの)”として知られる“大館曲げわっぱ”の原料である樹齢150年を超える天然秋田スギは、資源枯渇を理由に国有林の計画伐採が終了した。産地では高齢級造林スギによる供給持続性確保を目指し、樹齢150年生材を目標とした「大館曲げわっぱの森」を設定し、森づくりとものづくりの連携に力を入れている。しかし、樹齢100年生を超える人工林スギで曲げ加工時に破壊が頻発し、加工歩留まりが大幅に悪化する問題が生じ、人工林スギの代替可能性が疑問視されている。

天然スギの材質形成を明らかにするために、樹幹内半径方向の材質変動の把握が重要となる。既往の研究で、天然スギに関する研究は、林分内の直径/樹高および年輪幅、密度の分布は示されている^{1,2)}。また、樹心部分が欠損した天然スギにおいて、樹皮側の年輪部位ほど弾性率および強度の低下する傾向が確認されており、要因として老齢化に伴う過熟による早材仮道管のマイクロフィブリル傾角(MFA)の増加とセルロース量の相対的な低下との関連性が指摘されている³⁾。また、人工林スギに関しては、人工林の被圧木での年輪幅1mm以下での仮道管長の減少と二次壁肥厚の抑制が報告されている⁴⁾。以上のように、生育環境とスギの材質の関係を直接関連づける研究事例が乏しいため、「天然」と「人工林」の相違を説明することは難しい。

本研究では、天然スギと造林スギの年輪構造と細胞壁構造の経年変化を組織観察し、比弾性率との関係性を検討することで、材質の相違とそれを引き起こした生長要因を明らかにする。また、スギ天然林とスギ人工林における立木の比弾性率に、林分の生育環境が及ぼす影響を明らかにし、曲げやすいスギの供給持続性の確保に向けた森林施業計画の確立を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、天然スギと人工林スギの樹幹内半径方向の曲げ性能を測定し、樹幹成長に伴う曲げ破壊たわみと材質の関連を把握する。また、天然スギと人工林スギの複数の林分を対象に、生育状況と材質を調査し、天然スギの成長挙動の理解を通じ、なぜ天然スギは曲げやすいのかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 樹幹内半径方向の材質変動の解析

秋田県産の161, 162, 213年生の天然スギおよび秋田県産の65, 77, 90年生の人工林スギの元玉を各3個体用いた。根張りの影響を避けるために、天然スギでは樹幹が通直となった元玉の中央部から末口側、人工林スギでは通直な末口側から厚さ120mmの木口円盤を造材した。その後、髓から放射方向に向けて、髓を通る幅70mmの板材を製材した。各年輪の幅を測定後、髓を起点に、3mm(接線方向, T)×20mm(放射方向, R)×80mm(繊維方向, L)の試験体を樹皮側に向けて連続に作製した。気乾状態に調製後に密度を求め、曲げ試験に供した。また、一部の試験体に関して、木口面から、マイクロトームを用いて厚さ16 μ mの切片を作製し、サフランインで染色後にデジタルマイクロスコープで組織観察し、髓からの年輪数が5, 10, 15と5年輪ごとに仮道管の放射方向の内腔径Lrと隣接する二重の接線壁厚Mtを測定し、 $Lr/Mt \leq 2$ に達したところで早・晩材境界が与えられるとしたMorkの定義により早材と晩材を区分し、晩材率を求めた。

(2) 応力波伝播法による比弾性率の解析

スギ林分における立木状態での曲げやすさの選別指標として、非破壊的手法で求められる比弾性率に着目した。秋田県内の65~165年生のスギの林小班12箇所を対象に、応力波速度測定器FAKOPPで胸高直径を中央とする樹幹方向1mの区間の音速を測定し、比弾性率を求めた。斜面林においては立木の測定位置を斜面横方向とし、傾斜の影響を排除した。各林分で20m×25mのプロットを設定し、胸高直径と樹高を測定した。

(3) 曲げやすい立木の非破壊選別と検証

林分の形状比が異なる林分を選出し、胸高直径/樹高から算出される形状比と応力波速度測定器から求められる比弾性率を判断指標として、曲げやすい立木を選別して伐採し、元玉の胸高直径付近の木口円盤から3mm(T)×20mm(R)×80mm(L)の試験体を採取し、気乾状態の曲げ試験に供した。

4. 研究成果

(1) 樹幹内半径方向の材質変動の解析

天然スギと人工林スギの各個体の平均年輪幅、気乾密度、曲げ弾性率、曲げ強度および最大曲げたわみを表1に示す。平均含水率は天然スギで12.3%、人工林スギで11.1%であった。一般に針葉樹の未成熟材は成熟材と比較して仮道管が短く、平均マイクロフィブリル傾角が大きいことが知られており、天然スギと人工林スギの材質比較に影響を及ぼすことが懸念されたため、髓から30年輪までを未成熟材を多く含む部位A、31年輪から樹皮までを成熟材が占める部位Bとして天然スギと人工林スギの平均値を求めた。平均年輪幅は、天然スギで部位Aおよび部位Bともに狭かった。林地において、天然スギは天然更新であるため、若齢期から暗い林床で被圧されて成

長が抑制されたのに対して、人工林スギは苗畑で育てられた個体が一斉に植栽されて明るい林床で生育したため初期成長が早いことが両者の相違と考えられる。気乾密度に関して、部位 A では天然スギが人工林スギよりも高い傾向にあったが、部位 B は明確な差は認められなかった。最大曲げたわみに関して、部位 A と部位 B の双方で天然スギは人工林スギより約 1.5 倍高い値を示し、曲げ加工に適したたわみの大きい材質であることが確認された。曲げ弾性率および曲げ強度に関して、人工林スギは部位 A < 部位 B であった。これは、スギの未成熟材のヤング率は地上高に因らず成熟材に小さい⁵⁾とした既往の結果と同様の傾向であった。一方で、天然スギでは部位 A > 部位 B となった。樹齢 500 年を超える春日杉を材質調査した今村らの研究^{3,4)}では、樹皮側の年輪部位ほど引張弾性率、引張強度、曲げ弾性率および曲げ強度の低下が確認されており、要因として老齢化に伴う過熟による早材仮道管のマイクロフィブリル傾角 (MFA) の増加とセルロース量の相対的な低下との関連性が指摘されている。本研究の個体は 161, 163 および 213 年生と春日杉の調査事例よりも若年であるが同様の傾向を示し、経年に伴い過熟材に変化する材質の可能性が示唆された。

表 1. 天然スギと人工林スギの髓から30年輪目および31年輪から樹皮までの材質

	No.	年輪数	平均年輪幅 (mm/year)		気乾密度 (g/cm ³)		$\delta_{\max}^c)$ (mm)		曲げ弾性率 (GPa)		曲げ強度 (MPa)	
			部位 A ^{a)}	部位 B ^{b)}	部位 A ^{a)}	部位 B ^{b)}	部位 A ^{a)}	部位 B ^{b)}	部位 A ^{a)}	部位 B ^{b)}	部位 A ^{a)}	部位 B ^{b)}
天然スギ	1	161	3.9	1.6	0.41	0.39	2.9	3.3	6.0	4.4	47.0	40.8
	2	162	2.2	1.6	0.49	0.41	3.0	3.0	5.6	4.8	58.0	47.5
	3	213	3.8	2.2	0.37	0.33	3.0	3.1	4.0	3.0	39.6	32.6
人工林スギ	1	90	4.8	2.6	0.35	0.39	2.1	1.9	6.9	8.9	56.9	67.8
	2	77	4.6	2.3	0.40	0.43	2.2	2.1	7.5	8.2	69.0	73.8
	3	65	6.8	3.3	0.37	0.39	2.3	1.9	6.8	8.5	63.1	67.9

注: ^{a)} 部位 A: 髓から30年輪目までの平均値, ^{b)} 部位 B: 31年輪目から樹皮までの平均値, ^{c)} δ_{\max} : 最大曲げたわみ

天然スギと人工林スギの比弾性率の樹幹内半径方向変動に関して、未成熟材から成熟材に移行時の比弾性率の増加倍率を求めたところ、人工林スギは 1.6 倍の増加であったのに対し、天然スギのそれは 1.2 倍に留まった。組織観察において、人工林スギの晩材率と平均年輪幅の間に成長期によらず負の相関が示され、これは一般的に知られている傾向と同様であった。一方、天然スギでは未成熟期は人工林スギと同様の傾向を示したが、成熟期では平均年輪幅と晩材率に正の相関が示された。また、髓からの年輪数が大きいほど晩材率が低くなる傾向であり、二次壁の肥厚が進展しにくい老齢過熟の状態と類似した。今村らの研究^{3,4)}では、天然スギの繊維方向弾性率の顕著な低下は 200 年輪より外側で生じていたが、秋田県産の個体を用いた本研究では 60 年輪で同様の傾向が確認された。これは、東北日本海側の豪雪等の気象要因の相違が考えられるが、今後の検証が必要である。

(2) 応力波伝播法による比弾性率の解析

65~165 年生のスギの林小班において、比弾性率と森林調査簿で得られる情報 (林齢, 立木の植栽密度, 間伐回数, 胸高直径, 樹高) の関係を検討した結果、胸高直径/樹高で表される形状比が比弾性率と最も高い相関が見出された。スギ人工林 (造林スギ) の被圧木は、健全木と比較して狭い平均年輪幅, 大きい形状比, 高い比弾性率の個体が多かった。曲げ木加工業の製造現場において、成長が遅く、平均年輪幅の狭いスギは曲げやすいとされた定説を覆す結果となった。人工林スギの被圧木と天然スギの過熟材は細胞壁の材質が異なっており、単に年輪幅の狭さだけでは判別が困難であることと理解された。

(3) 曲げやすい立木の非破壊選別と検証

平均樹高がほぼ等しい人工林スギの林小班を対象に、形状比から曲げやすさの選別を行い、曲げ試験によって検証した。調査した 12 林小班のうち、69 年生で平均樹高 23m、平均形状比が 78 の林分と、同じ 69 年生で平均樹高 24m、平均形状比 61 の林小班を比較対象に選定した。それぞれの林分のプロットの供試木 (28 本と 22 本) の比弾性率の平均はそれぞれ 16.2GPa と 10.5GPa であった。また、伐採した立木の曲げ試験の結果、厚さ 3mm のスギ板で、曲げわっぱの弁当箱の側板の形状に相当する曲率半径 75mm まで曲げられる個体の該当率は、前者の林小班で 4%、後者で 88%であった。また、曲げ加工が容易な立木の選別には、応力波速度測定器を用いた比弾性率が有用であった。

天然スギが曲げやすい特性は、晩材率と比弾性率が人工林スギよりも低いという結果から、飢餓状態が未成熟から成熟期という生育早期から生じていることが推察された。人工林の施業では、個体の枯死と生存の極限のバランスで成される過熟状態への誘導は困難であるため、形状比の小さい林分を超長伐期施業林としてゾーニングし、最終的に応力伝播法等の非破壊的手法で丸太や製材を選別する手法が最も実用的であると判断された。

<引用文献>

1. 今村祐嗣, 小野広治, 山口和道, 村田武彦: 春日杉について. 奈良県林業試験場研究報告, 6-2, 73-80 (1975).
2. 加治里佳子, 小田一幸, 松村順司: スギ被圧木の年輪構造. 九州森林研究, 57, 177-181 (2004).
3. 西園朋広, 澤田智志, 栗屋善雄: 秋田地方における高齢天然スギ林の林分構造と成長の推移, 日本森林学会誌, 88 (1), 8-14 (2006)
4. 澤田智志, 西園朋広, 栗屋善雄, 野堀嘉裕: 秋田スギ天然林を構成する個体の成長解析, 日本森林学会誌, 89 (3), 200-207 (2007)
5. 太田貞明: “木材の科学と利用技術 II 5. スギ”. 日本木材学会スギ分科会編, 1991. p.24.
- 6.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 足立幸司, 山内秀文
2. 発表標題 予曲げ加工による木材の変形能向上
3. 学会等名 日本木材学会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 沢田信哉, 高木拓哉, 阿部眞理, 白石照美, 足立幸司
2. 発表標題 スギ圧縮木材の弾性を利用した座面部材の開発
3. 学会等名 日本デザイン学会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 足立幸司, 西條裕美, 工藤佳世, 高田克彦
2. 発表標題 曲げ加工性に優れた木材の材質と選別技術の開発
3. 学会等名 第36回日本木材加工技術協会年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	工藤 佳世 (Kudo Kayo) (10757983)	秋田県立大学・木材高度加工研究所・助教 (21401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------