

小角散乱によるサガンスギのマイクロフィブリル配向評価 (II) Microfibril Angle Orientations of “SAGAN-SUGI” (Japanese Cedar) Characterized by SAXS

廣沢 一郎^a, 鈴木 直幸^a, 馬込 栄輔^a, 瀬戸山 寛^a, 江島 淳^b
Ichiro Hirosawa^a, Naoyuki Suzuki^a, Eisuke Magome^a, Hiroyuki Setoyama^a, Atsushi Ejima^b

^a(公財)佐賀県産業振興機構九州シンクロトン光研究センター, ^b 佐賀県林業試験場
^aSAGA Light Source, ^b Saga Prefectural Forest Experimental Station

木材強度の指標のひとつである曲げヤング率と強い相関があるセルロース繊維(cellulose microfibril:CMF)の仮道管に対する配向角度(microfibril angle :MFA)の測定が、早期の優良品種選抜手法としてラジアータマツ、ベイマツ、実生のスギで検討されている。2022B 期に行った小角散乱測定で得られたサガンスギ (佐賀県林業試験場が開発した成長が早く軽くて高強度な新品種のスギ) の MFA は成熟材、未成熟材ともに従来品種のスギより小さく、人工交配によるスギ新品種開発においても MFA が早期の優良品種選抜法として活用できる可能性が示された。本課題では MFA 測定の早期優良品種選抜法としての確立を目指して、更に多くの品種の MFA 測定を行った。

キーワード： 小角散乱、マイクロフィブリル、スギ

背景と研究目的：

佐賀県林業試験場が開発した新品種のスギ (サガンスギ) は、成長が早い上に従来品種よりも高い強度を有する有望な品種である[1,2]。曲げヤング率等で評価される木材強度は年輪間隔に応じて単調に低下するが、成長が早いサガンスギは年輪間隔が広いにもかかわらず従来品種よりも高いヤング率を有している。その理由を明らかにすることを目的として 2022B1 期に BL19B2 で実施した SAXS 測定(2022B1587)により、1) ”マイクロフィブリル(microfibril)と呼ばれる木材の細胞壁の基本骨格を構成するセルロース繊維束の仮道管の軸方向に対する配向方位角度 (microfibril angle : MFA) はサガンスギの方が従来品種よりも小さい”、2) ”サガンスギの方が細胞壁を構成するマイクロフィブリルの密度が従来品種よりも 20-30%高い”、3) “MFA の年次推移で見積もった樹木の成熟 (MFA がほぼ一定になった状態) に要する期間は従来品種が 12 年程度であるのに対してサガンスギは約 10 年と短い “ことが明らかになった[3]。以上のようにサガンスギが高密度なマイクロフィブリルで構成される細胞壁を有し成熟が早いことは、サガンスギから製材した木材が高強度であることの裏付けとなる。更に、MFA (マイクロフィブリルの配向方位角) が小さいほどヤング率が高くなることが多数報告されているため[4-11],前回の実験で明らかになったサガンスギの MFA が従来品種より小さいこともサガンスギが高強度であることの有力な根拠である。

前回の測定では、サガンスギ、従来種ともに MFA は樹木の成長に伴って減少したが、成熟材、未成熟材のいずれにおいてもサガンスギの方が従来種よりも小さな MFA を有していた。この結果はラジアータマツ、ベイマツ、実生のスギの検討から提案されている MFA に注目した早期選抜手法と同様に[11-13]、未成熟な時期の樹木の MFA 測定が新品種開発における早期優良品種選抜法として利用できる可能性を示すものであるが、MFA は植栽間隔など生育環境にも影響するため[10]、早期選抜法としての有用性の検討には多数の試料の測定が必要である。本課題は早期選抜方法としての MFA 測定の有用性検討を目的として他の複数品種の MFA を測定した。なお、MFA が遺伝形質であることを強く示唆する先行研究があることから[12]、親子関係を有する品種の測定を行った。

実験：

測定試料は前回測定した成長が早く高曲げヤング率を有する品種 A の両親 (母方品種 F、父方品種 G)、及び曲げヤング率が低い品種 H とその両親 (母方品種 I、父方品種 K) とした。これらの試料は前回と同様に、地上からの高さ 2 m の箇所から切り出した円盤から、中心 (芯) を含ん

だ厚さ 5.5 mm 柎目板状に調製した。

測定条件も前回 (2022B1587) と同様に BL19B2 の第 3 ハッチに設置された小角散乱装置で、検出器の感度特性も考慮して X 線エネルギー 18 keV、カメラ長 3 m で行った。ベヘン酸銀による校正によりカメラ長は 3045 mm と決定され、 0.007 \AA^{-1} から 0.34 \AA^{-1} の範囲で小角散乱プロファイルを得ることができた。放射壁の散乱パターンから MFA を導出するため試料位置走査測定は X 線が試料面に対して垂直に入射する状態で行った。測定位置間隔は 0.25 mm、各測定点での露光時間は 10 秒とした。なお、試料ステージの座標と年輪位置との対応関係を明らかにするため、試料を透過する X 線強度の走査測定により試料に 5 年間隔で貼り付けた鉛片の座標位置決定を小角散乱測定に先立って行った。

結果および考察：

図 1(a) は検出器の不感域処理を施した小角散乱パターンの測定例 (品種 F、髓中心からの距離 21.75 mm) である (検出器の不感域処理済み)。S2 層接線壁 (年輪に平行な細胞壁) と放射壁 (年輪と垂直で樹木の成長方向に平行な細胞壁) に由来する散乱が明瞭に観測され、S2 接線壁とほぼ垂直な方向に S1 層由来の弱い散乱も観測されている。なお、接線壁の CMF の傾斜方向は散乱ベクトルに対してほぼ垂直なため小角散乱プロファイルからは MFA に関する知見を得られないが、その両側に観測される接線壁 CMF 由来の散乱の方位角に MFA が反映される。図 2 は波数が 0.17 \AA^{-1} となる散乱強度の方位角依存のプロファイルである。この図において中央の最も強いピークが接線壁由来の散乱、その両側のピークが放射壁由来の散乱である。放射壁は散乱ベクトルとほぼ垂直とかがえられるため、放射壁由来の散乱の 2 つのピークの方位角の差が MFA の 2 倍に対応する。

これら S2 由来の 3 つのピークと接線壁と垂直な S1 由来の 2 つのピークの 3 種 5 個のガウス関数 (2 個の接線壁に対応するピークの積分強度とピーク幅は共通とする。S1 も同様) と等方的なバックグラウンドの和で測定されたプロファイルで近似した。測定値を再現するようこの近似式の最適化で得られた計算値を図中の赤曲線で示す。この図が示すように計算値は測定値によく一致し、適切な近似であることを示している。この例では MFA は 24° と決定された。同様な処理を全測定について行い、MFA を導出した。

図 3 は品種 F の各測定位置での波数 0.17 \AA^{-1} における散乱強度の方位角依存性の測定値 (左) と fitting で得られた計算値 (右) である。両者はよく一致し、全測定位置で MFA が適切に導出できていることを示している。図 4 は測定より得られた MFA の髓中心からの距離による変化の測定例である。図 4(a) は、サガンスギ(2022B 期の測定データから方位依存性を評価する波数を 0.17 \AA^{-1} に改めて導出)、(b)、(c)、(d) はそれぞれ品種 F (サガンスギの母)、品種 H、品種 K (品種 H の父) である。親子関係にある品種間の比較では MFA 変化のパターンに類似性が見られ、MFA も遺伝形質のひとつであることが示唆される。

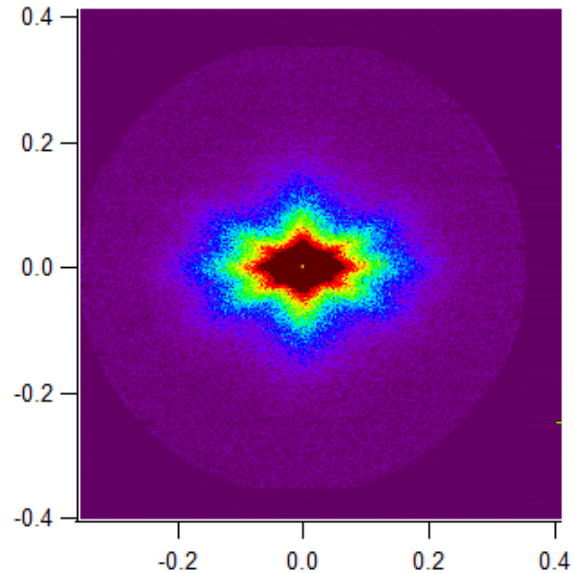


図 1 小角散乱の観測例 (品種 F、髓中心からの距離が 21.75 mm の位置)。

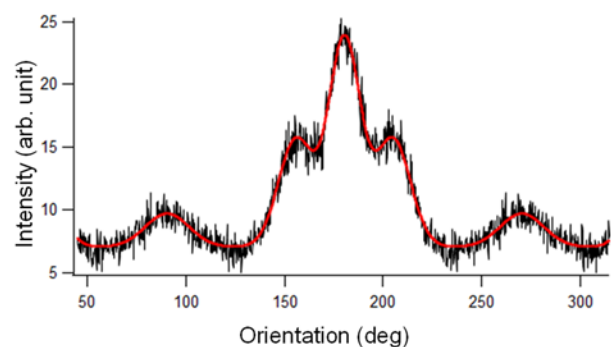


図 2 波数 0.17 \AA^{-1} での散乱強度の方位角分布の例 (品種 F、髓中心からの距離 21.75 mm)。黒線が測定値、赤曲線が fitting で得られた計算値。

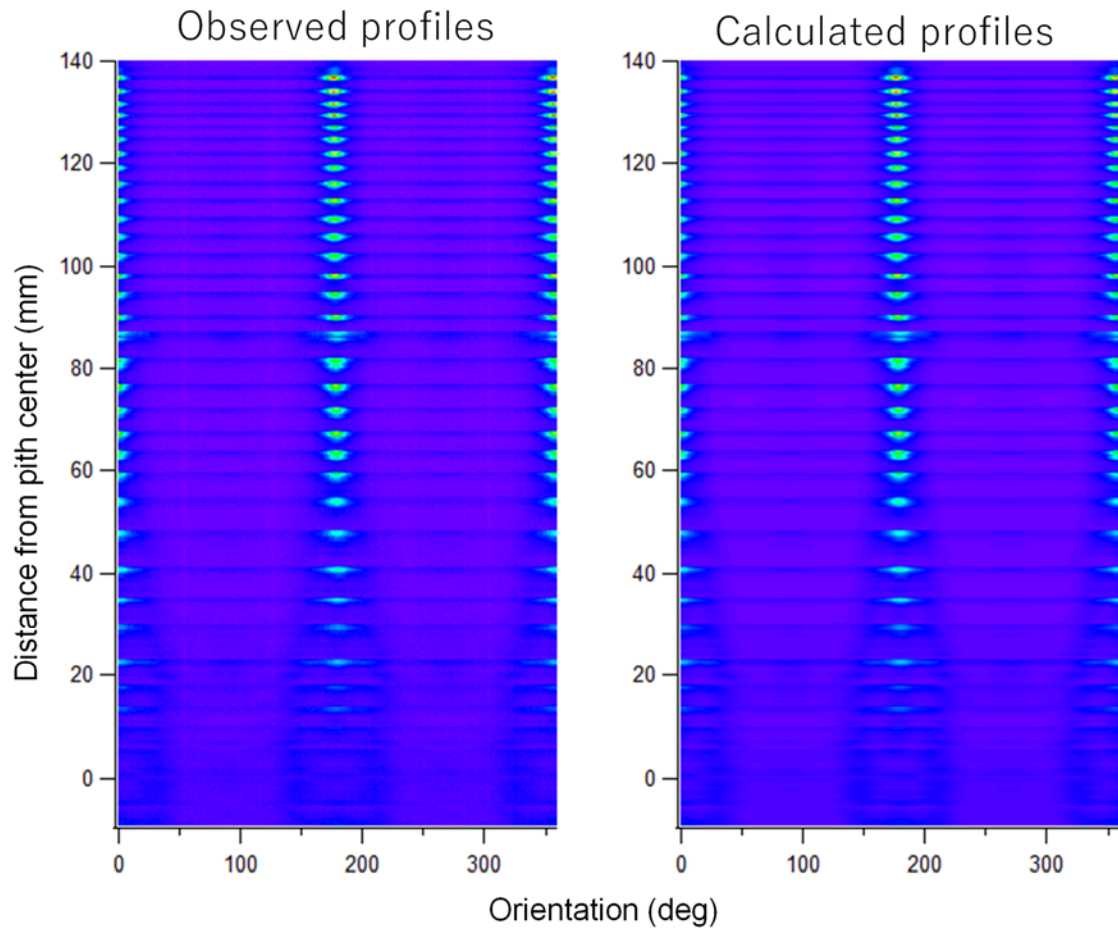


図3 品種 F の各測定位置での波数 0.17 \AA^{-1} における散乱強度の方位角依存性の測定値 (左) と fitting で得られた計算値 (右)。色の明るさで散乱強度を表現している (明るい程強い)。

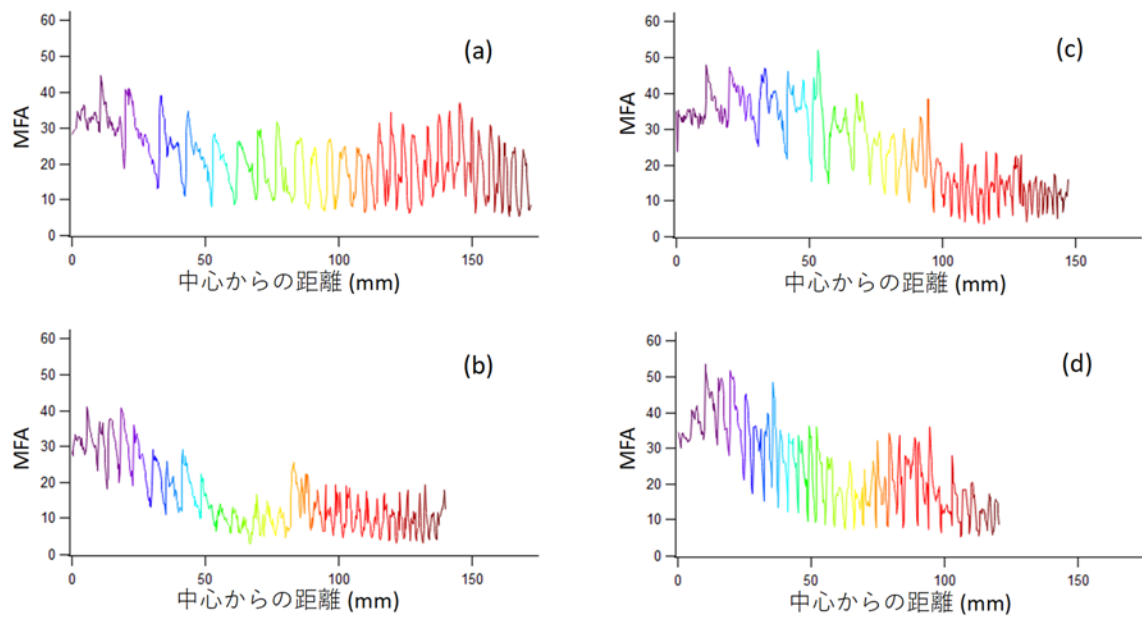


図4 髓中心からの距離と MFA。(a)サガンズギ (2022B1587)、(b)品種 F、(c)品種 H、(d)品種 K

以上の方法で得られた MFA の品種ごとの平均値、最大値、最小値を以下の表 1 に示す。それぞれの MFA 平均値は親子関係がある品種間で互いに近い値となっていることから、MFA が遺伝形質である可能性が示唆されている。

表 1

| 実施期 | 品種 | データ点数 | MFA平均 | MFA標準偏差 | MFA最大値 | MFA最小値 |
|-------|--------------|-------|-------|---------|--------|--------|
| 2022B | サガンスギ | 631 | 18.23 | 9.42 | 46.90 | 3.54 |
| | 従来種 | 379 | 33.62 | 11.64 | 60.00 | 4.32 |
| 2023A | 品種F (サガンスギ母) | 503 | 12.83 | 9.97 | 55.33 | 1.13 |
| | 品種G (サガンスギ父) | 510 | 17.87 | 8.52 | 41.23 | 3.24 |
| | 品種H | 532 | 22.65 | 13.19 | 52.64 | 0.86 |
| | 品種I (品種H母) | 482 | 19.25 | 10.00 | 60.00 | 2.97 |
| | 品種K (品種H父) | 425 | 21.77 | 11.67 | 55.31 | 3.03 |

今後の課題：

放射壁の MFA が遺伝形質であることを強く示唆する結果となったが、木材の機械的強度は生育環境にも影響されると考えられるため、MFA 測定が優良品種の早期選抜手法としての有効性検証には更に多くの系統的な測定が必要と考えている。

参考文献：

- [1] 江島、林崎 佐賀県林業試験場業務報告書 令和元年 pp. 5-22.
https://www.pref.saga.lg.jp/kiji00367239/3_67239_189232_up_tlayr0qj.pdf
https://www.pref.saga.lg.jp/kiji00367239/3_67239_226424_up_2sujy87o.pdf
- [2] 江島、多良 佐賀県林業試験場業務報告書 令和 2 年 pp. 5-30.
https://www.pref.saga.lg.jp/kiji00367239/3_67239_226424_up_2sujy87o.pdf
- [3] 廣沢、他 令和 4 年度 SPring-8 一般課題(産業分野) 実施報告書 (2022B) 2022B1587.
http://support.spring8.or.jp/report/Report_JSР/PDF_JSР_2022B/2022B1587.pdf
- [4] 山下 他, 木材学会誌 **46**, 510 (2000).
- [5] R. Hori et al., *J. Mater. Sci.* **37**, 4279 (2002).
- [6] S. Anderson et al., *J. Wood Sci.* **49**, 531 (2003).
- [7] W. Gindl et al., *Appl. Phys. A* **79**, 2069 (2004).
- [8] Y. Kojima & H. Yamamoto et al., *J. Wood. Sci.* **50**, 301(2004)
- [9] L. Donaldson, *IWA Journal* **29**, 345 (2008).
- [10] J.-P. Lasserre et al. *Forest Ecology and Management* **258**, 1924 (2009).
- [11] B. Lauchenbuch et al., *Can. J. For. Res.* **40**, 55 (2010).
- [12] H. X. Wu et al., *Ann. For. Sci.* **64**, 1 (2007).
- [13] 石堂 他, 木材学会誌 **55**, 10 (2009).