

日本木材学会 組織と材質研究会 2021 年春の研究会

# 成長と環境から考える 今後の材質研究

## 講演要旨集

2021 年 6 月 3 日 (木) 13:00-18:00

オンライン開催

「成長と環境から考える今後の材質研究」

プログラム

- 13:00-13:05 開会挨拶  
一般社団法人日本木材学会 会長 船田 良
- 13:05-13:15 趣旨説明  
日本木材学会 組織と材質研究会 企画担当 武津 英太郎
- 13:15-14:25 特別講演  
「利用現場から見た丸太素材について」  
山佐木材株式会社 代表取締役会長 佐々木 幸久 氏
- 14:25-15:00 講演 1  
「スギ心材含水率の遺伝と環境変異」  
森林総合研究所林木育種センター九州育種場 倉原 雄二 氏
- 15:00-15:15 休憩
- 15:15-15:50 講演 2  
「スギの成長や材質の QTL 解析と環境による変動」  
森林総合研究所 樹木分子遺伝研究領域 森 英樹 氏
- 15:50-16:25 講演 3  
「生育環境、樹形および木部形成の視点からスギの材質を考える」  
宮崎大学 農学部 雉子谷 佳男 氏
- 16:25-17:00 講演 4  
「材質研究はどこに向かうのか」  
秋田県立大学 木材高度加工研究所 高田 克彦 氏
- 17:00-17:15 総合討論
- 17:15-17:20 閉会挨拶  
日本木材学会 組織と材質研究会 代表幹事 雉子谷 佳男
- 17:20-18:00 個別討論

## 特別講演

### 利用現場から見た丸太素材について

山佐木材株式会社 代表取締役会長  
佐々木 幸久

#### 1. ある大規模林業会社のスギ林の丸太について

当社が取引関係にあるH社は、創業百余年、8000haの森林を所有、経営しており、うち3000haが優良なスギ林である。50年～55年での皆伐と、70年～100年の長伐期とを志向している。苗木は実生苗の自社生産。伐採が遅れ気味で、皆伐を暫く止めて、間伐を強力に進めることを勧めている。

#### 2. 儲かる林業(山元)のために 伐採コストを考える

周知のとおり山元所得は国際的にみても非常に低い。とって山元所得を上げるために材価を上げるのは適切でない。丸太だけでなく国産材製品は輸入材料、製品と厳しい競争下にあるためである。伐採コストは、単木材積の大きさに大きく関わりを持つ。単木材積をある程度まで肥大させ伐採コストを低減すべきことを提示する。

#### 3. 海外の林業と製材の事例

ドイツのフライブルグ林業試験場、何代か前から受け継いでいる約100haの森林を営ある自伐林家、中堅製材工場を視察して林業国ドイツの報告をする。また同じく長伐期のフィンランドの林業。そして短伐期林業の北米、ニュージーランドの林業、加工を紹介する。

#### 4. 長伐期林業と短伐期林業

長伐期林業と短伐期林業は違う林業形態であり、基本的に途中転換は出来ない。長伐期林業の特徴と、その成立要件、短伐期林業の特徴と、その成立要件をのべる。今後の再造林に当たり、どちらを選ぶか。

#### 5. 持続可能性から見た九州の伐採量の適否を考える

現在の伐採量は果たして適正かという議論がある。その論議において看過されている問題がある。多くの人工林、その森林は果たして持続可能な森林なのかどうかを検討する。なんと九州ではすでに過伐状態であることがわかってくる。

#### 6. 木材の材質、加工のあれこれ

木材加工の第一戦で様々な取り組みをしてきた中から、木材の性質や加工について経験したことを紹介する。葉枯らし、板材の天然乾燥、芯持ち柱角の乾燥と未成熟材の関係、ヤング係数の低いスギをどう使うか。保存処理の課題、南九州にある木材加工場として、シロアリ試験を設置して取り組んでいる。またある初めて使う樹種で起こった接着不良。

#### 7. 木材特にスギの構造上の課題 たわみ易さを克服する

スギ特に若齢材のスギはたわみ易い(ヤング率が低い)。壊れることは無いが、建物の変形などで、構造上不利になることが多い。鹿児島大学塩屋教授はこの欠点解消のために、十数来主にスギを用いて、木材+鉄筋での鉄筋集成材の研究を続けてきた。鉄筋の量を増やすことで鉄筋木材のヤング係数を調整できる。例えばヤング係数8倍で、梁成を半分にできる(E65×8=E520)。なお現段階では法制上の制約がある。私たちは現在共同でこの解決に取り組んでいる。

## スギ心材含水率の遺伝と環境変異

森林総合研究所林木育種センター九州育種場  
倉原雄二

### はじめに

林木の材質は遺伝と環境の両方の影響を受けるが、材質形質の測定は試料の採取が必要であるため成長形質よりも手間がかかることが多く、環境の影響は詳細にはわかっていないことも多い。スギの生立木の心材含水率は個体によるばらつきが大きく、高い含水率を示す個体の中には飽水状態の個体も存在する。含水率は乾燥により下げることが可能で最終的な木材製品の性能に直接関係するわけではないが、高い含水率は乾燥コストおよび輸送コストに影響を及ぼすことから低いことが好ましい。スギの心材含水率は他の材質形質と同様に遺伝形質であることから育種による改良が可能である。育種のためには遺伝と環境の交互作用を把握することが重要である。これまで筆者らが九州育種場でスギ心材含水率について行った研究を中心に紹介する。

### スギの心材含水率と環境

スギの心材含水率と環境の関係についての研究事例は少ない。藤澤ら（1995）は九州内の3カ所の試験地の試験により、心材含水率は成長形質よりも高い広義の遺伝率を示すことを明らかにしている。筆者らは林分内の微小環境および林分間の環境の影響を調査した。2019年に斜面上部から3ブロックが配置された検定林において調査を行った結果、心材容積密度の平均値はブロック間で統計的に有意ではなかった。一方で心材乾量基準含水率および相対含水率は統計的に有意に異なった。このことから心材含水率は密度とは独立に林分内の微小環境の影響を受けていることが示唆された。しかし、土壌水分の指標である TWI との関係は明確にはならなかった。

2020年に2カ所の検定林（大分県、鹿児島県）の調査を行い、2019年に調査を行った前述の検定林（福岡県）と合わせて3カ所の検定林で林分間の影響を検討した。心材含水率の各クロンの平均値は福岡と大分の検定林では近く、鹿児島は福岡および大分と異なる傾向があった。気候メッシュデータによる気温の平年値は鹿児島が2試験地と大きく異なり、マクロな環境の違いの影響が示唆された。

### 若齢個体の心材含水率

林木育種の観点からは育種目標とする形質を早期に検定することが望まれる。直接測定できない壮齢時の形質については若齢時の形質との幼老相関から推定することで早期検定が行われる。たとえば樹幹の剛性の指標として用いられる立木の応力波伝播速度は壮齢時の丸太のヤング係数の代替指標とされている。しかし、心材含水率の測定は心材が形成されている樹齢に達する必要があるため、若齢時での測定事例が少ない（宮下ら）。筆者らがおこなった15年生のスギの測定事例を紹介する。

### 引用文献

- 藤澤義武, 太田貞明, 西村慶二, 戸田忠雄, 田島正啓:スギ心材含水率のクローンと林分による変異. 木材学会誌 41(3), 249-255, (1995).  
宮下久哉, 織田春紀, 半田孝俊:若齢時におけるスギクローンの材質評価. 木材学会誌 55(3), 136-145 (2009) .

## スギの成長や材質の QTL 解析と環境による変動

森林総合研究所 樹木分子遺伝研究領域  
森 英樹

### はじめに

林業における樹木の重要な形質の多くは、成長や材質といった連続的に変化する形質（量的形質）である。量的形質は多数の遺伝子座から様々な影響を受けることから複雑な形質とも言われる。膨大な遺伝情報のどこに、どれくらい形質に影響する遺伝子が存在し、それらがどのような影響力をもつのかについて明らかにすることは、遺伝情報を用いた試み（育種や保全など）において重要になる。このような量的形質に影響する遺伝領域を量的形質遺伝子座（Quantitative Trait Locus：QTL）という。本研究は、日本の重要な造林樹種であるスギを対象とし、異なる複数の環境に設置した産地試験地を用いて、成長や材質などの量的形質に影響する遺伝領域（QTL）を明らかにすることを目的とした。

### 成長と材質の QTL 解析

気象条件の異なる試験地に反復を持って植栽された九州地方の在来品種を用いた交配家系由来の 139 個体について得られた形質データおよび遺伝子型データを用いて、スギの形質（成長率や材質）に影響する QTL の推定を行った（Mori et al. 2019）。具体的には、胸高直径、樹高、心材および辺材の材密度および含水率、ヤング率の計七種類の形質を測定した。QTL 解析の結果、各試験地で平均 53 の QTL が成長や材質で特定された。これらの多くは試験地によって異なっていたが、複数の試験地で同じ遺伝領域が形質に関係している場合もあり、それらの多くは材質に影響を及ぼす QTL であった。実際に、材質の分散の 31–65% は遺伝子型で説明された結果となった。このように、材質は環境の影響を受けにくく遺伝的な影響を受けやすいという傾向を反映していると考えられた。

### 年輪を用いた QTL 解析

成長形質における QTL 解析は、主に最終的に測定した大きさ（胸高直径や樹高）に対して行われる。しかしながら、樹木の大きさは年次変動する環境の影響を受けた最終的な結果を反映しているため、樹木の成長の遺伝的基盤を明らかにするためには、環境変動に対する成長のプロセスを考慮することが重要となる。そこで本研究は上記の材料の年輪幅を測定し、気候変動に対する成長形質の鋭敏性とそれを制御する QTL の探索を行った（Mori et al. 2020）。その結果、春先の短期的な乾燥と成長量に有意な負の相関があることが明らかになった。その QTL 解析を行ったところ、全体の 12.9% を説明する比較的效果の大きな QTL が特定された。また、今回特定された全ての QTL では全体の 35.6% を説明する結果となった。本研究は成長形質に着目したが、同様に材質への遺伝的な影響の解明も可能と考えられた。

### 引用文献

- Mori, H., et al. (2019) Mapping quantitative trait loci for growth and wood property traits in *Cryptomeria japonica* across multiple environments. *Tree Genetics & Genomes*, 15(3), 43.  
Mori, H., et al. (2020) Climate sensitivity of *Cryptomeria japonica* in two contrasting environments: Perspectives from QTL mapping. *PLOS ONE*, 15(1), e0228278.

## 生育環境、樹形および木部形成の視点からスギの材質を考える

宮崎大学農学部  
雫子谷佳男

### はじめに

筆者は、これまでスギの材質変動の研究に関わってきた。根底となる考えは、「生育環境によって樹形が変化し、形成層へ輸送される植物ホルモン量が影響を受け、輸送された植物ホルモンの働きで木部形成が制御され、形成された木部細胞壁の特徴で材質が決まる」である。生育環境、樹形、植物ホルモン、木部形成および木材材質を関連づけることで、材質のばらつきをより深く理解できると考えた。本講演では、まず、スギの木部形成の特徴を説明し、スギ材質のばらつきに關与する要因について研究事例を紹介する。

### スギの木部形成

スギ（密度小）、ヒノキ（密度中）およびスラッシュマツ（密度大）について、木部形成と内生植物ホルモン量の季節変動を調べたところ、これらの季節変動に樹種特性が認められた<sup>1)</sup>。ヒノキとスラッシュマツでは、年輪形成の後期でオーキシンの量が多いほどより多くの仮道管を形成した。オーキシンの季節比（晩期/早期）と木材密度との間に、極めて密接な関係があり、晩期のオーキシンの量が早期に比べて多い樹種ほど、木材密度が大きくなるのかもしれない<sup>1)</sup>。植栽密度試験地のスギ品種（トサアカ）で木部形成と内生植物ホルモン量の季節変動を調べたところ、疎植区分ほど、形状比が小さく、オーキシンの量が多かった<sup>2)</sup>。疎植区分で早期においてオーキシンの量が多く、多数の仮道管を形成した<sup>2)</sup>。スギでは、生育環境（植栽密度）の違いによって、樹形が変化し、オーキシンの量が変化し、木部形成が影響を受けたと推測され、スギの特性として、生育環境・成長の影響が早期に顕著となった。

### スギ材質のばらつきに關与する要因

オビスギ品種について形状比と樹幹剛性を調べたところ、生育環境によって樹形が変化し、樹幹剛性も変化した<sup>3)</sup>。植栽密度試験地トサアカでは、植栽密度によって樹形を変えると樹幹剛性が最大2倍近く変化した<sup>3)</sup>。つぎに材質指標を調べたところ、木材密度（X-ray densitometry 測定）に植栽密度の顕著な影響が認められたものの、マイクロフィブリル傾角（MFA）は、早材・晩材・年輪内推移で影響は小さかった（未発表）。スギ若齢・成熟木を調べたところ、オーキシンの減少に伴い MFA が小さくなった<sup>4)</sup>。林地植栽のスギ苗木で、風による力学的ストレスが樹形および MFA に影響する可能性が示された（口頭発表）。

### 今後の研究

既往の成果に加えて、スギのストレス応答を理解することで、材質制御により貢献できるかもしれない。また、材質特性を活かした用途開発<sup>5)</sup>も重要と考える。

### 引用文献

- 1) Y. Kijidani et al. (2021) J Wood Sci 投稿中.
- 2) Y. Kijidani et al. (2017) J Wood Sci 63:315–321.
- 3) Y. Kijidani et al. (2010) J Wood Sci 56:1–6.
- 4) Y. Kijidani et al. (2014) J Wood Sci 60:235–242
- 5) Y. Kijidani et al. (2019) J Wood Sci 65:16

## 材質研究はどこに向かうのか

秋田県立大学・木材高度加工研究所  
高田克彦

### はじめに

材質分野の研究では、特定の樹種を対象に成長と材質の関係を論じるようなオーソドックスな研究においても対象個体（群）の遺伝子型情報や生育環境情報（メタデータ）は必須と考えられている。また、近年の木材学会大会の発表では、成長と材質の関係や複数の材質形質間の関係を扱った研究の他に、GWAS による材質に関連する遺伝子の同定といった旧林産学の範疇に収まらない研究も散見される。

本講演では、著者のこれまでの研究を参照にしつつ、材質研究における上記のような状況が生まれる背景と今後の材質研究の方向性について論じてみたい。

### 表現型 (phenotype) の中身

材質研究における対象個体（群）のメタデータの必要性は、表現型に関する以下のシンプルな公式で理解できる<sup>1)</sup>。

$$\text{表現型 (P : phenotype)} = \text{遺伝子型 (G : genotype)} + \text{生育環境 (E : environment)}$$

材質研究の測定対象である樹木（木材）の表現型は、染色体上の遺伝子によって制御される遺伝的なポテンシャル<sup>2-8)</sup>と生育環境の効果<sup>9-15)</sup>の影響下にあり、メタデータを欠いた表現型データはその変異を正しく解析・理解することができない。なお、厳密な意味で表現型の変異を理解するためには、遺伝子型と生育環境の交互作用 (GE) を調べなくてはならない。交互作用を推定する唯一の方法は、複数の環境下に同一の遺伝子型個体（群）を植栽した遺伝試験林を利用することである<sup>16-19)</sup>。

### 遺伝子 (gene) から強度 (strength) に連なる関係

材質の研究者に「未成熟材」の説明を求めたら、多くの場合、形成層細胞の成熟から論じ始めるのではないだろうか。一方、MFA の変動から語り始める研究者や剛性や強度といった観点から説明する研究者もいるかもしれない。このような差異は、以下に示す木材材質 (wood property) の発現から利用材質 (wood quality) の評価の流れの中で、専門性の多様化とそれぞれの研究分野の深化にその原因を求めることができる。

遺伝子(群)<sup>20-21)</sup>→形成層活動(細胞成熟)<sup>22)</sup>→組織構造<sup>23-26)</sup>→木質材料<sup>27-29)</sup>→利用部材<sup>30)</sup>

### おわりに

このような状況の中、今後の材質研究の進む方向として以下の3点を指摘できる。

- 専門分野を深く掘り下げる研究と関連する専門分野との接点を広げていく研究の二極化
- 材質研究を通して生物体としての樹木の根本的な理解に寄与する研究
- 材質に関連する形質（遺伝子情報も含む）に関するビッグデータ解析

特にビッグデータ解析は材質研究の最終到達点の一つと考えられることから、今後の研究動向を注視したい。

### 引用文献

1. Bruce Zobel and John Talbert, Applied Forest Tree Improvement, John Wiley & Sons, Inc., 1984
2. Takata, K. and Teraoka, Y. (2002) Genotypic effects on the variation of wood quality and growth traits in the plantation forest made by cutting cultivars of *Cryptomeria japonica* D. Don, *Journal of Wood Science*, 48(2), 106-113
3. 平尾知士、他4名 (2006) SSR マーカーを利用したスギ精英樹のクローン識別、*日本森林学会誌*, 88(3), 202-205
4. 樋口有未、他9名 (2012) マイクロサテライトマーカーを使用したヒバ天然林および育種集団における遺伝的多様性と集団間の遺伝構造の評価、*日本森林学会誌*, 94 (5), 247-251

5. 佐藤博文、他 2 名 (2016) 希少な秋田スギ“アオヤジロ”の材質特性、木材学会誌、62(5)、153-162
6. Ikeda, T., *et al.* (2019) The origin and genetic variability of vegetatively propagated clones detected from old planted trees and plantations of *Thujopsis dolabrata* var. *hondae* in Ishikawa Prefecture, Japan, *Tree Genetics & Genomes*, 15(6), DOI: 10.1007/s11295-019-1391-0
7. Inanaga, M., *et al.* (2020) Genetic Diversity and Structure of Japanese Endemic Genus *Thujopsis* (Cupressaceae) Using EST-SSR Markers, *Forests*, 11(9), 935; <https://doi.org/10.3390/f11090935> (registering DOI) - 27 Aug 2020
8. 小泉章夫、他 2 名 (1990) カラマツ精英樹の肥大生長と材質 (第 2 報) 18 年生の子供家系の胸高直径と樹幹ヤング係数、木材学会誌、36 (9)、704-708
9. 朱 建軍、他 3 名 (2003) 秋田県産スギ造林木の成長と材質 (第 1 報) 材質指標の樹幹内変動、木材学会誌、49(2)、138-145
10. Koizumi, A., *et al.* (2003) Anatomical characteristics and mechanical properties of *Larix sibirica* Ledeb. grown in southern-central Siberia, *IAWA Journal*, 24(4), 355-370
11. Zhu, JJ, *et al.* (2005) Growth and wood quality of Sugi (*Cryptomeria japonica*) planted in Akita Prefecture (II) The mechanical properties as well as the relation with microfibril angle within aged individual, *Journal of Wood Science*, 51(2), 95-101
12. 雉子谷佳男、他 6 名 (2011) 南九州で生育した slash pine の木材材質と年輪形成、木材学会誌、57(6)、340-349
13. 正木 隆、他 5 名 (2013) スギ林における壮齢時の間伐は樹高の長期的な成長にどのように影響するか?、日本森林学会誌、95 (4)、227-233
14. Matsushita, M., *et al.* (2015) A novel growth model evaluating Age-Size effect on the long-term trends in tree growth, *Functional Ecology*, DOI: 10.1111/1365-2435.12416
15. 宮下智弘、他 3 名 (2021) 幼齢期に形成された年輪のマイクロフィブリル傾角とスギの雪圧害による根元曲がりの関係、日本森林学会誌 (in press)
16. 高田克彦、他 2 名 (1992) カラマツにおける肥大生長と材質の種子産地間差、木材学会誌、38 (12)、1082-1088
17. 高田克彦、他 2 名 (1992) カラマツ産地試験林における樹幹ヤング係数の地理的変異、木材学会誌、38 (3)、222-227
18. 小泉章夫、他 3 名 (1990) 「カラマツ精英樹の肥大生長と材質 (第 1 報) つぎ木クローンの肥大生長、容積密度数および樹幹ヤング係数」木材学会誌、36 (2)、98-102
19. Shibutani, S., *et al.* (2007) Quantitative comparisons of anti-termite extractives in heartwood from the same clones of *Cryptomeria japonica* planted at two different sites, *Journal of Wood Science*, 53(4), 285-290
20. Hirao, T., *et al.* (2008) Complete nucleotide sequence of the *Cryptomeria japonica* D. Don. chloroplast genome and comparative chloroplast genomics: diversified genomic structure of coniferous species, *BMC Plant Biology*, 8 (70)
21. Hirao, T., *et al.* (2009) A frameshift mutation of the chloroplast *matK* coding regions is associated with chlorophyll-deficiency in the *Cryptomeria japonica* virescent mutant Wogon-Sugi, *Current Genetics*, doi:10.1007/s00294-009-0247-9
22. Kijidani, Y., *et al.* (2021) Seasonal variations of auxin (IAA) and gibberellin A4 (GA4) amounts in cambial-region tissues of three conifers (*Pinus eliottii*, *Camaecyparis obtusa* and *Cryptomeria japonica*) with inherently different wood density from each other, *Journal of Wood Science* (in review)
23. Csoka, L., *et al.* (2005) Application of the Fourier analysis to determine the demarcation between juvenile/mature wood, *Journal of Wood Science*, 51(3), 309-311
24. Csoka, L., *et al.* (2007) Utilization of Fourier transform of the absolute amplitude spectrum in wood anatomy, *Applied Mathematics and Computation*, 193, 385-388
25. Kitin, P., *et al.* (2009) Anatomical features that facilitate radial flow across growth rings and from xylem to cambium in *Cryptomeria japonica*, *Annals of Botany*, 103: 1145-1157
26. Kudo, K., *et al.* (2018) Formation of new networks of earlywood vessels in seedlings of the deciduous ring-porous hardwood *Quercus serrata* in springtime, *Trees*, <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1667-2>
27. Kusumoto, N., *et al.* (2016) Mechanical properties and dimensional stabilities of Wood-Polypropylene Composites using mechanochemically acetylated *Cryptomeria japonica* wood meal, *BioResources*, 11 (2), 3825-3839
28. 寺岡行雄、他 2 名 (2001) 林業経営情報としてのスギ樹幹ヤング係数利用について、森林計画学会誌、35(1)、21-29
29. Kobayashi, *et al.* (2014) Analysis of standing trees using a motion capture system: a three-dimensional stem model for basal sweep of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don.), *FORMATH*, 13:78-96
30. 高田克彦、平川泰彦 (2000) 剥皮によるニホンカラマツ丸太材の動的ヤング係数の変動、木材工業、55 (8)、352-356