

日本木材学会 組織と材質研究会 2015 秋季シンポジウム

# スギの材質

## - 利用と育種の現状とこれから -

### 講演要旨集



2015 年 10 月 23 日 (金)

九州大学国際ホール (箱崎キャンパス)

主催：日本木材学会 組織と材質研究会

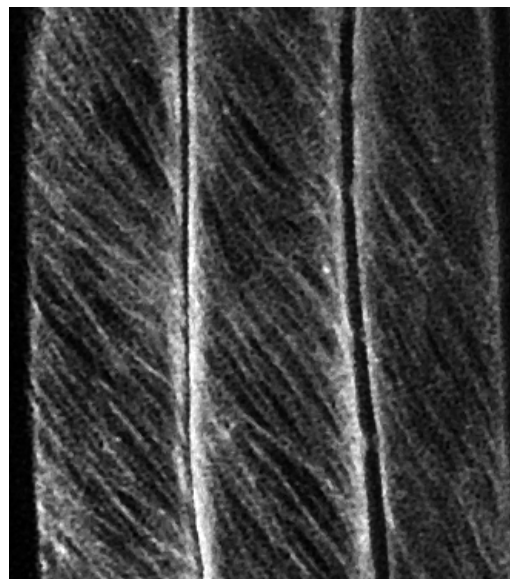
共催：日本木材学会九州支部, 日本木材加工技術協会九州支部



津島俊治氏提供



永井 智氏提供



高田直樹氏提供

## 「スギの材質－育種と利用の現状とこれから－」

### プログラム

- 12:10～13:00 受付
- 13:00～13:05 開会挨拶 組織と材質研究会代表幹事 九州大学 松村順司  
主旨説明 森林総合研究所木材特性研究領域 山下香菜
- 13:05～13:45 「スギ材利用における九州産スギ在来品種の材質」 .....1  
大分県農林水産研究指導センター 津島 俊治
- 13:45～14:25 「スギの材質を知り利用に活かす  
－高強度梁仕口 Tajima TAPOS<sup>®</sup>の開発－」 .....7  
兵庫県立農林水産技術総合センター 永井 智
- 14:25～14:35 休憩
- 14:35～15:15 「スギの材質変動と植物ホルモンの役割」 .....14  
宮崎大学農学部 雉子谷 佳男
- 15:15～15:55 「分子育種に向けた材質形質選抜マーカー開発の試み」 .....21  
森林総合研究所林木育種センター 三嶋 賢太郎
- 15:55～16:35 「モデル植物の情報から樹木の木部細胞の分化メカニズムを探る」 .....26  
森林総合研究所森林バイオ研究センター 高田 直樹
- 16:35～16:55 総合討論
- 16:55～17:00 閉会挨拶
- 17:30～19:30 懇親会（九大文系食堂）

### 主旨

戦後植林したスギ等の国内資源が成熟し、大いに利用する時代が来しました。この半世紀余りの間に、木造の建築物が量、質ともに変化し、それに伴い新しい加工・利用方法が開発されてきました。これまでの木材利用研究で蓄えられた知識や技術をもとに、今後の利用を念頭に置いた木材に求められる特性とはどういうものか、伐採・利用後の造林において求められる育種技術とはどういうものか、について方向性を見いだすことは、木材の組織・材質研究に社会から求められている課題と考えられます。本シンポジウムでは、スギ等造林木の利用、材質、育種、形成の第一線の研究者に、研究成果を紹介していただきます。利用や材質にかかわる研究の現状を共有するとともに、今後の方向性について考えていきます。

## スギ材利用における九州産スギ在来品種の材質

大分県農林水産研究指導センター  
津島 俊治

## 1. はじめに

国内の森林資源は年々充実しており、主な人工林樹種であるスギ、ヒノキ、カラマツの平成 24 年次蓄積は昭和 51 年次の約 3.8 倍に当たる 26.4 億 $m^3$ に達しており、今後も 5,400 万 $m^3$ /年を超える増加が予測されている。中でもスギの蓄積は 17.5 億 $m^3$ と多い。そして、全国的にそれら国産材の需要拡大が林業の重要課題となっており、国や地方において色々な取組みが進められている。

一方、国産材利用においては、古くから製材品としての利用が主体であるものの、近年では集成材、LVL、合板、CLT など新たな利用割合が急速に高くなっている。

また、無節材・役物などの美的評価が薄れ、強度や含水率など EW として性能評価する傾向が顕著に濃くなっている。

さて、九州地方には古くから多数のスギ在来品種が成立しているが、それらの中には異名同品種や同名異品種が存在し、また成育環境や樹齢の違いにより針葉や樹幹の形態が変化することから、形態的特徴からだけでは正確な品種同定が困難とされてきた<sup>1-3)</sup>。近年になり染色体の核型分析やアイソザイムによる品種識別の研究が進み、最近では DNA 分子マーカーを用いた識別法が開発され<sup>4)</sup>、比較的簡便に正確な品種同定が可能となった。

一方、林業現場で植栽されるスギ品種は時代とともに変化してきた。例えば、大分県では昭和 50 年頃まではヤブクグリとアヤスギが主体で、その後は多品種趣向へと変わり、近年はシャカイン、ヤマグチ、オビスギおよびアヤスギの 4 品種でスギ造林面積の約 70% を占めている。このように特定の品種が選択されるようになった理由は、構造用製材や集成材など製品としての加工・利用に適した品種が川下から川上へ必然的に伝わり、特定の品種が選択されてきたからであろう。

しかしながら、木材利用の多様化・高度化が進む中、今でもスギ材は用途への適合性という点で多くの課題を抱えている<sup>5,6)</sup>。すなわち、スギには多数の栽培品種や地域品種が存在し、それらの材質が品種・クローンや地域等によって大きく異なることである<sup>7)</sup>。

本発表では、九州産スギ在来品種固有の材質特性や森林施業の材質への影響を報告するとともに、大分県の林業現場におけるスギ品質管理型林業の取組みを紹介する。

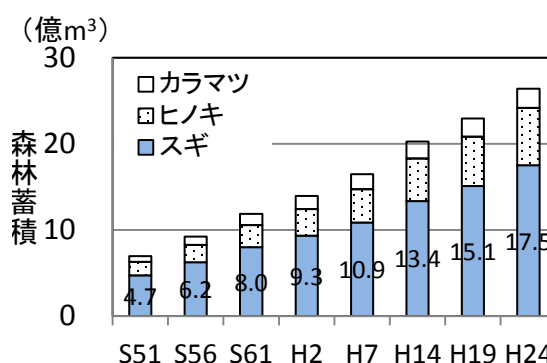


図 1 主な人工林蓄積の推移

出典：林野庁「森林資源の現況」

## 2. 九州産スギ在来品種の材質試験

### (1) 品種の識別と材質特性

大分県湯布院町の西日本主要スギ品種展示林に植栽されている 27 品種の内、予め MuPS 型データベース<sup>4)</sup>と照合し同定した九州産スギ 16 品種（イワオ、ナカムラ、ヒノデ、タケノサコ、ヤマグチ、クモトオシ、ヤイチ、ガリン、エダナガ、オオノ、アカバ、オビアカ、ヤブクグリ、メアサ、アヤスギ、ホンスギ）のそれぞれ平均木 3 個体を対象として、成長量ならびに丸太の動的ヤング率、生材含水率、材色、容積密度および力学的性質を測定し、材質の品種間差および樹幹内変動について検討した<sup>8)</sup>。

その結果、スギ在来品種 16 品種は、それぞれ品種特有の成長型を示した。心材の生材含水率と心材色の  $L^*$  値、 $a^*$  値の品種内変動は小さく、品種間に統計的な差が認められ、品種固有の性質と考えられた。容積密度と丸太の動的ヤング率も品種間で異なり、早生型品種に比べ中生型および晩生型品種は容積密度が高く、動的ヤング率が低かった。動的ヤング率の樹高方向変動は、地上高が高くなるにつれ増加するパターンと 1 番丸太が最も低く上部ではやや高い値で比較的安定するパターンが認められ、前者が中生型あるいは晩生型品種、後者が早生型品種であった。曲げ試験の荷重-たわみ線図は、品種あるいは成長型ごとに異なった。

以上のように、成長量および材質指標の多くに品種特性が認められた。したがって、建築用構造材として強度性能が優れ、加工・乾燥性の良い心材含水率が低い品種を選択することにより、加工や利用に有利な木材供給が可能となることが示唆された。

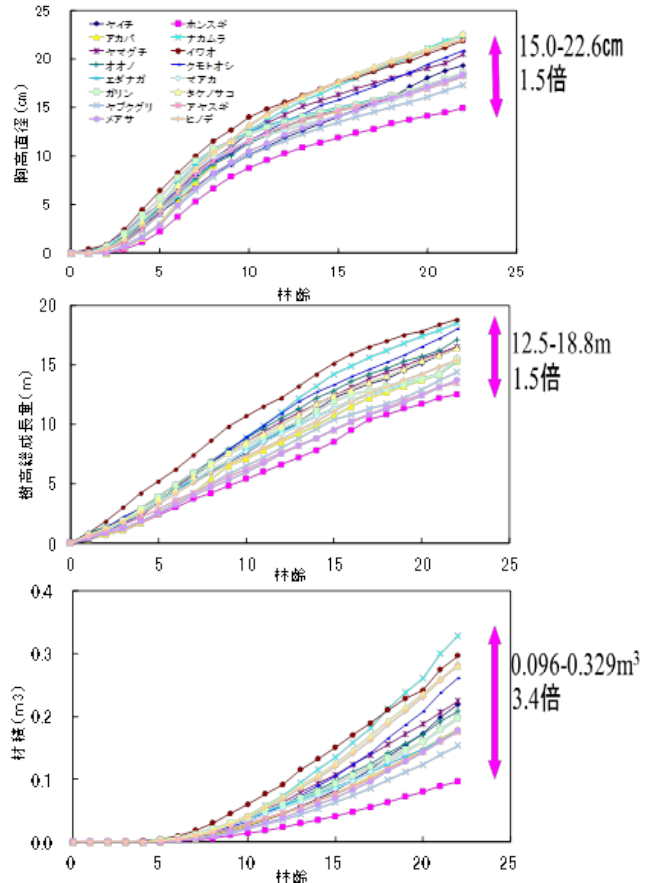


図 2. スギ品種の胸高直径，樹高，材積

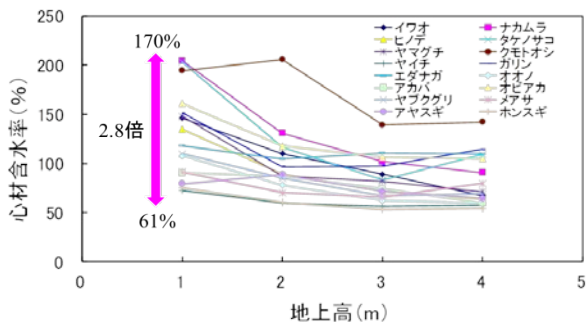


図 3. 各品種の心材含水率

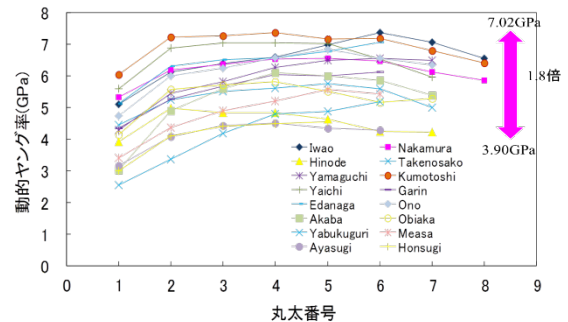


図 4. 各品種の丸太の動的ヤング率

## (2) 植栽密度の影響

林木の成長や材質のコントロールを目的に林業技術として適用される森林施業,すなわち植栽方法や保育方法等が材質に影響を及ぼす可能性は十分予測される。国外では,種々の造林樹種を対象に研究され,材質指標,樹種,植栽密度,間伐や枝打ちの実施林齢・回数・強度等によって成長や材質への影響が異なることが報告されている。

しかし,国内のスギについては,植栽密度,間伐,枝打ち等の森林施業が材質へ及ぼす影響に関して十分に知見が得られていない<sup>9)</sup>。

藤澤らは,植栽密度を高くすることで年輪幅の減少と平均密度の増大を報告している<sup>10)</sup>。

そこで,大分県九重町の地蔵原スギ品種別・植栽密度別試験林に1500本/ha,3000本/ha,5000本/haの3段階の異なる密度で植栽された10品種の内,MuPS型データベースと照合し同定された6品種(イワオ,ヒノデ,ヤマグチ,ヤイチ,シャカイン,ヤブクグリ)のそれぞれ平均木3個体を対象として,成長量ならびに生材含水率,材色,容積密度,丸太の動的ヤング率および力学的性質を測定し,品種間差,植栽密度間差および樹幹内変動を検討した<sup>11)</sup>。

その結果,スギ6品種は,品種および植栽密度によって肥大成長と材積成長に顕著な差が認められた。また,測定した材質指標の全てに顕著な品種間差が認められた。生材含水率は心材,辺材ともに植栽密度が高いほど低くなり,心材含水率の樹幹高さ方向の変動パターンには影響は認められなかった。容積密度は植栽密度の高い試験区ほどわずかに高かった。心材色のL\*値は植栽密度の高い試験区ほど大きく,逆にa\*値は小さかった。ヤブクグリを除く5品種の丸太の動的ヤング率,縦圧縮強さ,曲げヤング率は,植栽密度の高い試験区ほど僅かに大きな値を示したが,丸太の動的ヤング率の樹高方向の変動パターンに及ぼす植栽密度の影響は認められなかった。

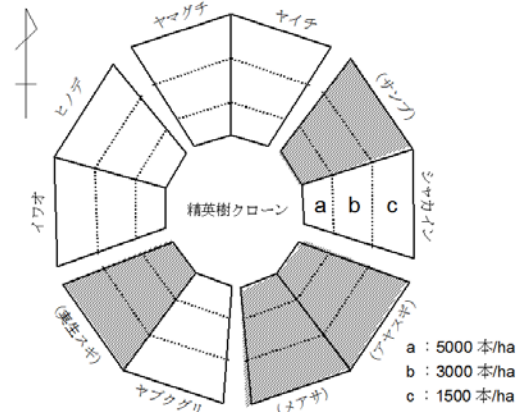


図5. スギ品種・植栽密度試験林の配置

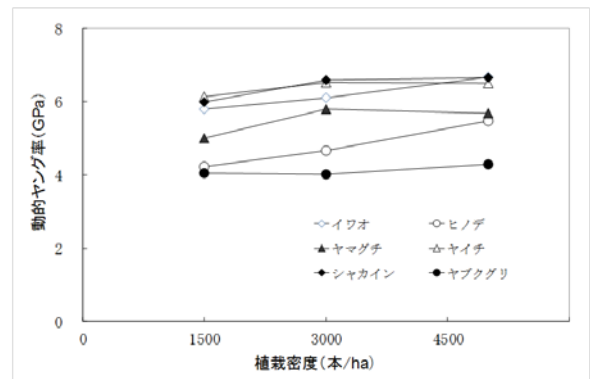


図6. 各品種・植栽密度の動的ヤング率

表1. 品種と植栽密度の分散寄与率(%)の比較

	成長指標			材質指標						
	胸高直径	樹高	材積	心材含水率	成熟材の容積密度	丸太の動的ヤング率	縦圧縮強さ	曲げヤング率	曲げ強さ	曲げ仕事量
品種	64	94	77	23	42	56	52	69	45	86
植栽密度	23	0	12	10	4	6	8	8	5	0
その他	13	6	11	67	54	38	40	23	50	14

このように、スギ品種の材質は、植栽密度に比べ品種に顕著に影響されることやその影響の大きさや仕方が品種ごとに異なることが判った。

### (3) 林齢の影響

林業現場においては、若齢の間伐材から高齢の主伐材まで様々な樹齢や径級の丸太が木材利用のために出材される。これらの丸太の材質に及ぼす森林施業や成長経過に関して、特に材質の品種特性が顕著とされるスギの成長経過に関連づけた研究は少ない。

そこで、大分県下の間伐期と主伐期にあたるヤブクグリ、アヤスギおよびオビアカの3品種5林分を対象とし、丸太の動的ヤング率の林齢間変動について検討した<sup>12)</sup>。

その結果、ヤブクグリ、アヤスギおよびオビアカの丸太の動的ヤング率は、品種内の個体間差が小さく、その値と樹高方向変動パターンが品種ごとに異なった。22年生と50年生以上の丸太の動的ヤング率の比は、いずれの地上高においてもヤブクグリ(1.6-1.9倍)とアヤスギ(1.9-2.2倍)が顕著に大きく、オビアカ(1.1-1.2倍)が小さかった。すなわち、丸太の動的ヤング率は、その値と樹高方向変動パターンに品種特性が認められ、ヤブクグリやアヤスギでは林齢が高くなるほど値は大きくなり、オビアカでは林齢間に大差なく、林齢の影響が品種間で異なることが判明した。したがって、同一品種で同一径級であっても、丸太の動的ヤング率は間伐材と主伐材でも大きく異なることが示唆された。

### (4) 実生とさし木のヒノキの材質

これまでのヒノキの材質に関する研究は、主に実生ヒノキを対象としたものであり、その中でも林分内変動に関するものは僅かである。古賀らは、20年生および25年生のヒノキ実生林の林分内変動について容積密度の変動係数が約7%、仮道管長の変動係数が約6-8%、縦圧縮強さが9%、縦圧縮ヤング率が約26%であると報告している<sup>13)</sup>。一方、ヒノキのクローン林の材質およびその林分内変動を対象とした研究事例は少なく、ほとんど知見が得られていない。

そこで、大分県下の実生ヒノキ3林分60個体とさし木のナンゴウヒ2林分40個体を対象として、予め実生林であるかクローン林であるかを確認するためRAPD分析を行い、その後、成長量ならびに丸太の動的ヤング率、胸高部位の生材含水率、容積密度、心材色、仮道管長、曲げヤング係数および曲げ強さを測定し、実生林とさし木林における材質の林

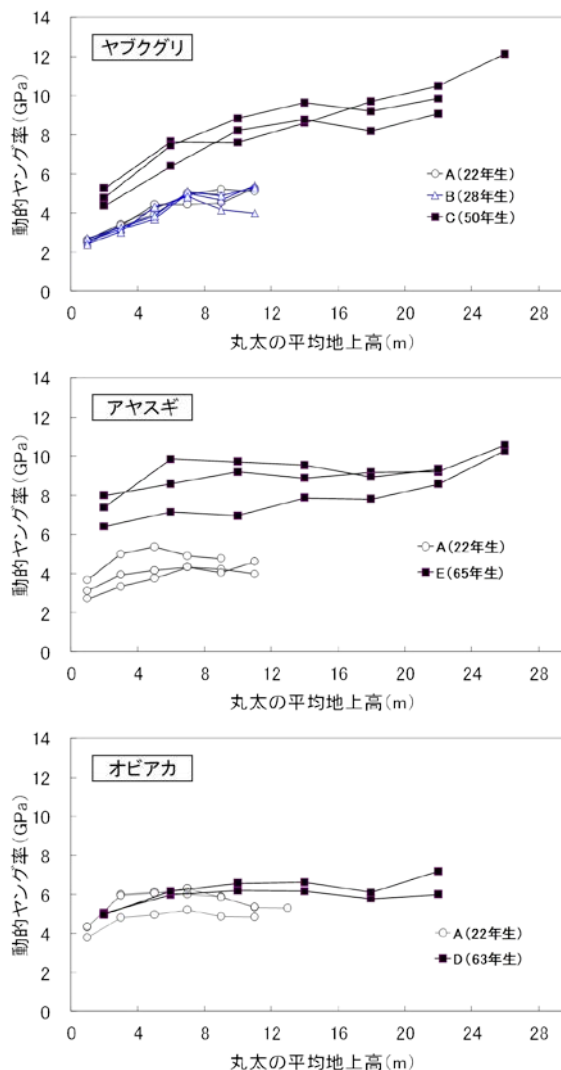


図7. 動的ヤング率の樹高方向変動

分内変動について検討した<sup>14)</sup>。

その結果、さし木のナンゴウヒ林は、実生林に比べ、胸高直径のバラツキが小さかった。また、ナンゴウヒ林における材質の林分内変動は、実生林に比べ、心材の生材含水率および心材色が小さい傾向にあり、辺材の生材含水率、容積密度、仮道管長および力学的性質が著しく小さかった。また、ナンゴウヒ林は、実生林に比べ晩材仮道管が長く、その変動係数が約3%と小さかった。丸太の動的ヤング率は、樹高方向の変動パターンが実生ヒノキとナンゴウヒで異なり、ナンゴウヒの個体内変動が小さかった。これらのことから、さし木のナンゴウヒ林は、実生林に比べ、材質のバラツキが小さいことが判明した。

したがって、用途に適した材質を持つ個体を選抜・増殖・供給できるという点で、クローン林業は有益であると考えられた。

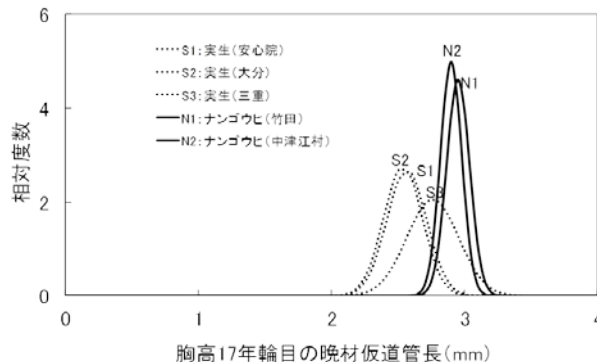


図8. ヒノキ仮道管長の正規分布図

### 3. スギ材利用を考えるポイント—大分方式乾燥材の開発・実用化を例に—

大分方式乾燥材は、KD材や天然乾燥材に比べて表面割れ・内部割れが極めて少ないこと、材色と匂いが天然乾燥材に近いこと、乾燥コストが安く環境負荷（化石燃料消費）が小さい特徴をもっている。平成12年から生産販売体制の整備を始め、現在24社が認証工場となっている。

この生産プロセスの改良に当たって、まず最適な前処理条件を決定するため、蒸煮時間（98℃, 0~24h）と高温低湿時間（120-90℃, 0~24h）によるスギ心持柱材の品質（含水率、表面割れ、内部割れ、寸法変化、曲がり）を検討した。

その結果、表面割れが蒸煮時間の長短に関係なく全て縮小すること、高温低湿6時間以上では表面割れが乾燥後に全て閉鎖すること、同様に18時間以上では大きな内部割れが発生すること、さらに24時間を超す高温処理では材色L\*（明度）が急激に低下することが判明した。

このように、木材乾燥工程においても、初期含水率や水分移動性に起因する仕上含水率のバラツキ、成長応力と乾燥応力に起因する材変形、引張セットと割れの関係など材質面からのアプローチが要求される。

### 4. スギ推奨品種による優良資源造成を目指して

これまで述べたとおり、スギ材の加工や利用に有利とされる材質が森林施業など立地・環境要因よりも品種・クローンの遺伝的要因に強く影響されることから、成長特性と材質特性の両者とも優れた品種・クローンを選択して林業現場に適用する品質管理型林業を大分県では目指している。

まず、平成18年に篤林家、樹苗生産者、森林組合等による検討会を開催し、成長特性や雄花着生の既往文献と九州産スギ在来品種の材質試験結果を参考に作成したスギ品種特性評価表に基づき評価点の高いシャカイン、タノアカ、ヤマグチを推奨品種に選定した。



その後、森林組合や林家、苗木生産者などへスギ推奨品種を普及啓発するとともに、苗木生産者の採穂園の DNA 分析など支援してきた。現在、原種見本園から採穂した苗木の提供や県営採穂園の改植を順次進めている。また、推奨品種のコンテナ苗生産に向けた育苗技術の開発にも鋭意取り組んでいる。

おわりに、多様なスギ林から産出される丸太が原木市場等で込椋されており、木材乾燥の非効率化や製材品の不均質化が生じている。プロダクトアウトで十分であった林業を続ければ、将来は成長産業に成り得ない。そのためには、マーケットインの視点に立ち、高品質な木材生産林造成に取り組むことが林業の重要課題である。

## 引用文献

- 1) 宮島寛(1989)“九州のスギとヒノキ”，九州大学出版会，福岡，275pp
- 2) 白石進(1991)木材の科学と利用技術Ⅱ，5.スギ，日本木材学会研究分科会報告書，1-9
- 3) 小田一幸(2000)スギの品種と材質，木材工業，55(2)，50-54
- 4) 久枝和彦，白石進，藤澤義武，宮原文彦，石松誠，家入龍二，佐々木義則，三樹陽一郎，川内博文(2003)九州産スギ在来品種および精英樹の MuPS(multiplex-PCR of SCAR markers)型，九州大学農学部演習林報告，84，59-71
- 5) 堤壽一(1992)木材利用に適合させる材質の視点，林木の育種，164，8-11
- 6) 小田一幸(1995)木材利用からみた林木育種への期待，林木の育種，95，38-41
- 7) 山下香菜，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ミクロフィブリル傾角と密度の影響，木材学会誌，46(6)，510-522
- 8) 津島俊治，古賀信也，小田一幸，白石進(2005)九州産スギ在来品種の成長と木材性質，木材学会誌，51(6)，394-401
- 9) 永井智，山田範彦，村上浩二(1997)無手入れスギ林の間伐木の材質，第 47 回日本木材学会大会研究発表要旨集，519
- 10) 藤澤義武，太田貞明，明石孝輝(1995b)スギの材質と遺伝(第 4 報)年輪構造のクローンと植栽密度による変異，木材学会誌，41(7)，631-639
- 11) 津島俊治，古賀信也，小田一幸，白石進(2006)スギ在来品種の成長と木材性質へ及ぼす植栽密度の影響，木材学会誌，52(4)，196-205
- 12) 津島俊治，小田一幸，松村順司，白石進(2006)スギ在来品種の動的ヤング率に及ぼす林齢の影響，九州森林研究，59，101-103
- 13) 古賀信也，小田一幸，堤壽一，古賀英明(1992)ヒノキおよびカラマツ人工造林木の木材性質のバラツキ—林分内のバラツキ—，九州大学農学部演習林報告，66，55-68
- 14) 津島俊治，藤岡良江，小田一幸，松村順司，白石進(2006)実生ヒノキとナンゴウヒの木材性質，木材学会誌，52(5)，277-284

(連絡先：tsushima-shunji@pref.oita.lg.jp)

## スギの材質を知り利用に活かす

### -高強度梁仕口<sup>但馬テイポス</sup>Tajima TAPOS<sup>®</sup>の開発-

兵庫県立農林水産技術総合センター・森林林業技術センター  
永井 智

#### 梁仕口の試験研究に取り組んだ背景

木造軸組工法住宅（以下、住宅と略記）において梁や桁等の横架材（おうかざい）に使用される木材の量は、一棟あたりの木材平均使用量の約 30% を占める<sup>1)</sup>。そして現状は、それら横架材の 90% 以上に外国産材が使用されている<sup>1)</sup>。しかし一方で、戦後の拡大造林開始から半世紀以上が経過した現在、スギの多くは断面の大きな横架材への利用が可能な径級へと成長しつつある。資源循環型林業の構築が国をあげて強力に推進されている中、横架材にスギ材を多用できる技術の開発が進めば、持続可能な循環型社会の実現に向けての大きな貢献になるものと考えられる。

しかしながら、兵庫県をはじめとする関西地区では、マツ類が横架材に好まれ用いられてきた。したがって、工務店や建築士等の間では、スギ材を横架材に使用することを不安視する傾向が見受けられた。とくに、本県北部には積雪が 2m にも達する多雪地域が存在するため、比較的密度が低く柔らかいスギ材では接合部が雪の重みに耐えられないのでは、という懸念があり、仕口耐力の検証、ひいては強度的に信頼性の高い仕口の開発が求められた。

#### 仕口耐力の評価方法

一連の仕口耐力評価は、「木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2008 年版）」<sup>2)</sup>に記載の「横架材端接合部のせん断試験（梁-梁型）」（以下、せん断試験と略記）に準じて行った。せん断試験の状況を写真 1 に示す。試験機は当センター所有の 1,000kN 実大強度試験機（(株)東京衡機製造所製）である。せん断試験体は 3 部材からなり、受け梁 2 部材に加圧梁を上から架けている。加圧梁両端部には凸型の、受け梁には対応する凹型の仕口加工が施されている。受け梁の端部 4 カ所を H 型鋼で支持するように試験体を設置し、受け梁外面をストッパーで固定し、加圧梁に上面から加力する。接合部の両脇（計 4 カ所）に設置した変位計（TCL-100A、



写真 1 横架材端接合部のせん断試験（梁-梁型）

(株)昭和測器製)により、受け梁に対する加圧梁の相対変位を測定する。荷重点の下降速度を約 3mm/min として、最大荷重 (2×Pmax) に達した後にその 80% に荷重が低下するまで、またはどちらか一方の接合部の両脇に設置した変位計 2 点の平均値が 30mm に達するまで加力を行う。データロガー (UCAM-60B, (株)共和電業製) により収録した片側接合部あたりの荷重 (Pmax) -相対変位 (2 点平均) 曲線をもとに、仕口の耐力や剛性を評価する<sup>2), 3)</sup>。

### 市場流通材による在来仕口の耐力検証

まず、横架材に多用されている外材平角製品、および比較としてスギ材平角製品に、施工実績の豊富な仕口加工を施し、耐力を検証することとした<sup>4)</sup>。県内のプレカット工場に幅 120mm×高さ 240mm のベイマツ JAS 人工乾燥構造用製材 (機械等級 E110 以上), スプルー ス JAS 対称異等級構成集成材 (強度等級 E105-F300), スギ JAS 人工乾燥構造用製材 (目視等級甲種 2 級), スギ JAS 対称異等級構成集成材 (強度等級 E65-F225) の調達, 並びに同工場で日常的に採用している在来「大入れ蟻掛けプレカット」仕口 (写真 2, 以下, 在来仕口と略記) の加工を依頼し, 上述のせん断試験を実施した。その結果, 次の二つのことがわかった。一つ目は, ベイマツ材やスプルー ス材と比較してスギ材の仕口耐力は明らかに小さく, 通常の住宅用梁材に要求される許容耐力を十分にはクリアしていないケースが認められることである (表 1)。図 1 の (在来プレカット仕口) に示すとおり, せん断試験体の密度と降伏耐力 (荷重を取り除くと形状が元に戻り得る最大耐力) は正の相関関係にあり, 低密度のスギ材の耐力はスプルー ス材やベイマツ材と比べて低位であった。二つ目は, 試験後の破壊状況について, 材種を



写真 2 在来「大入れ蟻掛けプレカット」仕口  
左: 加圧梁凸部, 右: 受け梁凹部.

表 1 在来仕口の耐力測定結果

種類	試験体数	短期基準せん断耐力(kN)
スギ無垢材	6	7.5
スギ集成材	6	8.8
床梁	(試算値)*1	8.9
小屋梁	(試算値)*2	11.3
スプルー ス集成材	6	13.6
ベイマツ無垢材	6	13.7

断面寸法: 幅 120mm×高さ 240mm.

\*1 対象部材の住居・床梁材としての短期換算梁端せん断力レベル (単純梁, 等分布荷重, 積載 1,800N/m<sup>2</sup>, たわみ制限 ≤ L/500, 許容スパン L 3.9m)

\*2 対象部材の多雪地域・小屋梁材としての短期換算梁端せん断力レベル (単純梁, 等分布荷重, 積雪 100cm 3,000N/m<sup>2</sup>, たわみ制限 ≤ L/200, 許容スパン L 4.5m)

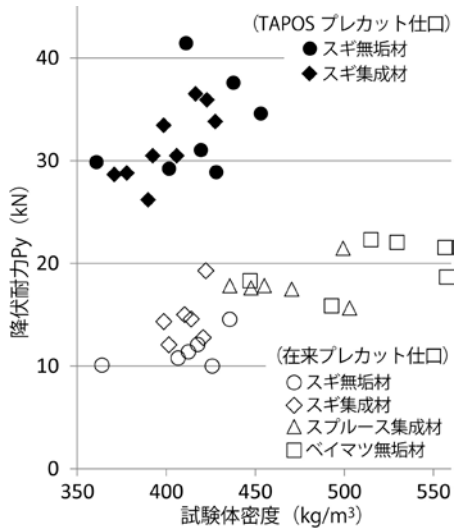


図 1 セン断試験体の密度と仕口耐力の関係  
断面寸法:TAPOS スギ集成材(◆, 105×240mm)  
を除き, 120×240mm.



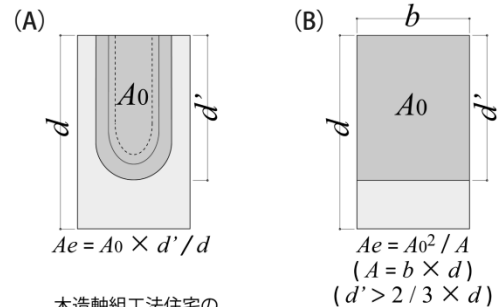
写真 3 在来仕口のせん断試験後の状況例

問わず, 受け梁の支圧面から底面に至る部位のめり込みあるいは割裂破壊によって仕口耐力が決定する傾向にあったことである(写真 3)。在来仕口の耐力検証の結果, スギ材の密度自体を高くすることは容易でないため, 受け梁凹部の支圧耐力を向上させることが仕口耐力の向上につながるであろうことを確認した。

ここで, 住宅における現行の仕口耐力評価方法について見る。「横架材端接合部のせん断に対する検定式」<sup>2)</sup>や「単一曲げ材のせん断応力度の算定」<sup>5)</sup>では(図 2, 式①・

$$f_s \geq \alpha \times Q / Ae \cdots \textcircled{1} \quad 1 \geq \alpha \times Q / Ae / f_s \cdots \textcircled{2}$$

$f_s$ : 許容せん断応力度  
 $\alpha$ : 断面形状によって決まる係数(長方形の場合は3/2)  
 $Q$ : 設計用せん断力  
 $Ae$ : 有効断面積



木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2008年版)<sup>2)</sup> 木質構造設計規準・同解説<sup>5)</sup>

図 2 セン断力の検定・算定法

②), 大入れ凸部の有効断面積 ( $Ae$ ) と設計用せん断力 ( $Q$ ) が正比例関係にあり, 蟻(写真 2)の有無や形状, 受け梁の寸法や仕様は考慮されていない。しかし実際の梁-梁仕口の耐力は, 上述したように受け梁側の耐力で決まる傾向にあった。加えて  $Ae$  と  $Q$  は必ずしも正比例関係にはなく<sup>6,7)</sup>, 蟻の有無や形状によっても仕口耐力は大きく変化した<sup>8,9,10)</sup>。つまり, 大入れ凸部のみを対象とした式①・②では, 梁-梁仕口のせん断耐力を適切には検定・算定できないことが明らかになった。

### 強度的に合理的な仕口形状の開発

木材は強度異方性を備えた材料である。例えばスギ材のめり込み基準強度<sup>11)</sup>は  $6.0\text{N/mm}^2$ , 縦圧縮基準強度<sup>12)</sup>は  $17.7\text{N/mm}^2$  であり, 前者は後者の約 3 分の 1 しかない。一方, 在来仕口(写真 2)を見ると, 加圧梁凸部から受け梁凹部に伝達される荷重の大半は, 大入れ凹部と蟻凹部の底面, すなわち受け梁にとっての繊維直交方

向で負担されている。めり込み強度は密度と正の相関関係にある<sup>13)</sup>ことから、比較的低密度のスギ材では、比較的高密度のスプルス材やベイマツ材よりもめり込み耐力、ひいては仕口耐力(図1, 在来プレカット仕口)が劣る結果につながったものと考えられた。そこでスギ材の密度およびめり込み強度に関する弱点を克服するために、受け梁の繊維方向にできるだけ多くの耐力を担わせ、大入れ凹部と蟻凹部における底面の耐力負担を低減させる形状として、大入れと蟻の側面にテーパを施し、底面の幅を最小限(切削刃の直径)に留めた形状を考案した(写真4)。これにより、低密度のスギ材であっても仕口耐力を飛躍的に向上させることができた(図1, 図3)。県内プレカット工場の協力を得ることにより、施工性、降伏耐力、割裂しにくさ、受け梁の断面欠損低減を追求したプレカットタイプの基本形状(写真4)を決定するとともに、多様な断面寸法ごとに強度的に合理的なテーパ角度、大入れ・蟻形状を確定させた。今後、せん断<sup>12)</sup>・縦圧縮・めり込み基準強度並びに Hankinson 式<sup>5)</sup>(木材の繊維方向と角度をなす面の許容応力度を求める式)を組み合わせ、在来仕口と開発仕口の双方で活用可能な、加圧梁凸部-受け梁凹部相互の耐力を反映させる新たな仕口耐力算定式を提案したいと考えている。



写真4 高強度梁仕口 Tajima TAPOS<sup>®</sup>

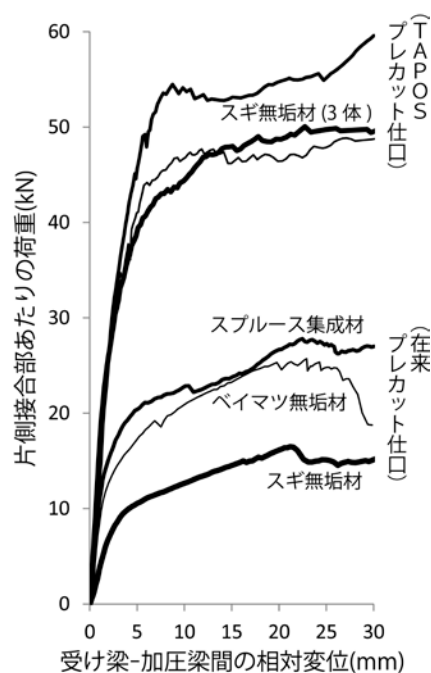


図3 横架材端接合部のせん断耐力比較例

断面寸法:幅120mm×高さ240mm.

## Tajima TAPOS<sup>®</sup>とは

梁-梁接合部にダイナミックにテーパを施した開発仕口に「Tajima TAPOS<sup>®</sup> (但馬テイポス)」と名付けた。Tajima は本研究に多大な協力をいただいた「但馬木造住宅振興協議会」に敬意を表したものである。一方 TAPOS<sup>®</sup> は、日本語なら「テーパ大入れ仕口」、アルファベットなら「TAPer Oh-ire Shiguchi」の頭文字をイレギュラーに集めた造語である。本成果は、(公社)日本木材加工技術協会から「高信頼性梁-梁仕口「Tajima TAPOS (但馬テイポス)」の開発」と題して、「第12回市川賞」(我が国の木材産業の発展に寄与する新しい研究・技術開発の業績に対して授与)を受賞した(平成25年5月)。一連の開発技術は特許出願済<sup>14)</sup>であり、「TAPOS<sup>®</sup>」

は商標登録<sup>15)</sup>されている。

TAPOS<sup>®</sup>プレカット材は、平成 27 年 10 月現在、兵庫県内にある二つのプレカット工場（豊岡市 高柴林業（株）、宍粟市 久我木材工業（株）山崎工場）の加工ラインにおいて量産できる（写真 5）。また、プレカット機械メーカー 2 社（三重県伊勢市 キクカワエンタープライズ（株）、愛知県豊橋市 宮川工機（株））では TAPOS<sup>®</sup>加工制御機構の整備を完了あるいは進行させている。上記 4 社それぞれと兵庫県との間で Tajima TAPOS<sup>®</sup>加工実施・商標使用許諾契約が締結されており、平成 26 年 10 月以降、公共施設、民間事業施設、個人住宅において建築実績を徐々に積み重ねるとともに、兵庫県から大阪府、さらに京都府へと拡がりを見せている。横架材での国産材シェア拡大という方向性に賛同し、本技術の導入を検討いただけるプレカット工場や機械メーカーは、当センターまでお問い合わせ頂きたい。



写真 5 Tajima TAPOS<sup>®</sup>量産加工状況

## Tajima TAPOS<sup>®</sup>の特長

成熟する資源、スギの横架材利用促進に本開発技術を活かすべく、以下に Tajima TAPOS<sup>®</sup>の特長をまとめる。

### (1) 施工性が高い

即日の上棟が常識化しつつある建築現場において、TAPOS<sup>®</sup>加工仕口は在来仕口よりも迅速な施工とスタッフの労力低減が期待できる。在来仕口の場合、受け梁凹部の直上に正確に加圧梁凸部を載せ、複数回の叩き込み（いわゆる掛矢で三発）によりかん合させることが一般的である。これに対し、TAPOS<sup>®</sup>加工仕口は加圧梁凸部を受け梁凹部の上方付近から容易に落とし込むことができ、掛矢で一発程度でかん合が完了する。大入れ・蟻テーパー部の上方に設けた鉛直面（写真 4）は、加圧梁を鉛直に落とし込む際の導線となる。なお、TAPOS<sup>®</sup>加工仕口でも在来仕口の場合と同様、羽子板ボルト等による接合部の緊結は必要である。

### (2) 割裂しにくい

TAPOS<sup>®</sup>加工仕口では大部分の支圧を大入れ・蟻テーパー部が担っており、大入れ・蟻底面部の支圧負担が少ないため、在来仕口で認められるような受け梁の割裂破壊（写真 3）がほとんど起こらない。

### (3) 梁高さに応じて仕口耐力が向上する

在来仕口（写真 2）の場合、梁高さに比例して大入れ凸部のせん断面積を大きく（大入れ高さを高く）しても、受け梁の支圧面（大入れ凹部と蟻凹部の底面）の形状や面積が一定である限り、仕口耐力はさほど大きくならない。これに対

して、TAPOS<sup>®</sup>加工仕口では、梁高さの増大に合わせて大入れ・蟻テーパー部の斜長並びに支圧面積を増大させ、仕口耐力を大きくすることができる<sup>10)</sup> (写真 6)。たとえば間取りの広い空間を設計する時、梁スパンを長くとり、梁高さを高くするにつれて、在来仕口に対する TAPOS<sup>®</sup>加工仕口の耐力優位性は顕著となる。



写真 6 梁高さに応じ調整された TAPOS<sup>®</sup>加工形状

#### (4) 効果的な設計の例を挙げると

仕口耐力を大幅に向上させたことにより、それを効果的に活かす設計の可能性も見えてきた。本開発ではスギ横架材の仕口耐力の改良を進めてきたが、スギ材には曲げヤング係数が小さい（他の針葉樹構造用製材と比較してたわみやすい）という、横架材利用を進める上で克服されるべきもう一つの課題がある。とはいえ、現状の住宅における横架材の国産材シェアは 8.3%に過ぎない<sup>1)</sup>。したがって、スギ横架材のシェア拡大を具現化するためには、スギ材と市場流通外材との併用を提案することも有意義なことだと考えている。例えば、たわみにくさを重要視する二階の床梁には従来どおり外材を活用し、管柱により比較的短間隔で支持される胴差や桁にはスギ材を用いる、といった方法である。この時、凸側が外材、凹側がスギ材という、在来仕口では心許ない組み合わせが発生するが、TAPOS<sup>®</sup>加工仕口の活用により、適材適所の併用が可能になるであろう。

さらに小屋梁の場合、床梁ほどのたわみにくさは要求されないため、大径化するスギ材を活用するターゲットとして有力であると考えている。例えば 4m(梁方向) × 6m(桁方向)の間取りに幅 120mm × 高さ 210mm × 長さ 4m の外材を梁間隔 1m で配置した場合、必要本数は 7 本、必要材積は 0.7056m<sup>3</sup>となる。ここに幅 120mm × 高さ 240mm × 長さ 4m のスギ材を梁間隔 1.5m で配置した場合、必要本数は 5 本、必要材積は 0.5760m<sup>3</sup>となり、さらに幅 120mm × 高さ 270mm × 長さ 4m のスギ材を梁間隔 2m で配置した場合は必要本数が 4 本で材積を 0.5184m<sup>3</sup>まで削減させることができる。梁高さを外材の 1 寸ないし 2 寸増しとすることで、たわみ制限、曲げ許容応力度ともにクリアできる設計が可能になる中で、小屋梁の本数を 7 本から 5 本、4 本へと削減することは、仕口数も 14 カ所から 10 カ所、8 カ所へと減ることになるため、1 仕口あたりの必要耐力は必然的に大きくなる。このようなケースに TAPOS<sup>®</sup>加工仕口を活用することにより、スギ材を利用しながらも材積ひいては材料経費を節減することが試算上は可能である。

以上のような特長を活かしつつ、開発技術の定着と拡がりを目指し、今後も許諾契約プレカット工場、建築設計士や工務店、そして地域の製材工場との連携により、具体的実践を進めていきたいと考えている。

## 引用文献

- 1) 浦江真人(2013)木造軸組工法住宅における国産材利用の実態調査, 木材工業, 68 (9) , 401-404
- 2) (財)日本住宅・木材技術センター (2008) 木造軸組工法住宅の許容応力度設計 (2008年版), 107-110, 579-587
- 3) 軽部正彦, 荷重変形曲線の特徴点抽出自動化ツール PickPoint, <http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/etj/karube/PickPoint/index-j.html>
- 4) 永井智, 山田直也, 上村公浩 (2010) 横架材端接合部 (梁-梁型) のせん断性能-プレカット加工 (大入れ蟻掛け継ぎ) による製品間比較-, 第 60 回日本木材学会大会研究発表要旨集, PH008 (CD-ROM)
- 5) 日本建築学会 (2006) 木質構造設計規準・同解説, 19-20, 27-28, 162
- 6) 永井智, 上村公浩, 松本智啓, 玉田豊 (2011) 横架材端接合部の強度性能評価-スギ大入れ仕口 3 種の接合強度-, 日本木材加工技術協会第 29 回年次大会 (岡山) 講演要旨集, 65-66
- 7) 永井智, 玉田豊 (2012) 木造在来大入れ仕口のせん断耐力に関する実験的考察その 1 小梁大入れ部のせん断耐力, 日本建築学会 2012 年度大会 (東海) 学術講演梗概集, 22250 (DVD-ROM)
- 8) 永井智, 尾崎真也, 松本智啓, 玉田豊 (2012) 横架材端接合部の強度性能評価-在来仕口の形状とせん断耐力の関係-, 第 62 回日本木材学会大会研究発表要旨集, H16-01-0930 (CD-ROM)
- 9) 永井智, 尾崎真也, 松本智啓, 玉田豊 (2012) 木造軸組工法住宅における高信頼性梁-梁仕口 “Tajima TAPOS” の開発, 日本木材加工技術協会第 30 回記念年次大会 (東京) 講演・研究発表要旨集, 69-70
- 10) 永井智, 戸田政宏, 岡本一仁, 玉田豊 (2014) スギ横架材の利用拡大を目指した梁-梁仕口 Tajima TAPOS の耐力評価 (1), 第 64 回日本木材学会大会研究発表要旨集, Y15-03-1100 (CD-ROM)
- 11) 国土交通省 (2001) 告示第 1024 号, 製材のめり込みの基準強度, 平成 13 年 6 月 12 日
- 12) 建設省 (2000) 告示第 1452 号, 無等級材の基準強度, 平成 12 年 5 月 31 日
- 13) 永井智, 上村公浩, 松本智啓, 玉田豊 (2011) 横架材端接合部の強度性能評価-部分圧縮 (めりこみ) 強度性能-, 第 61 回日本木材学会大会研究発表要旨集, D18-06-1600 (CD-ROM)
- 14) 兵庫県 (2014) 特許公開 2014-066129, テーパー加工された仕口を備えた横架材並びにそのプレカット方法並びにその横架材を加工するための加工機およびプログラム, 特許庁, 平成 26 年 4 月 17 日
- 15) 兵庫県 (2015) 商標登録第 5742816 号, TAPOS, 特許庁, 平成 27 年 2 月 20 日

(連絡先 : satoshi\_nagai@pref.hyogo.lg.jp)



## スギの材質変動と植物ホルモンの役割

宮崎大学・農学部  
雉子谷 佳男

### はじめに

シンポジウムテーマに関連して、筆者の研究はスギの材質変動に焦点をあてたものである。スギ林業の再生には、木材工業での技術革新による国産材の需要拡大に加えて、山元での木材そのものの価値を高めて、国際的な競争力を増大する必要があると考えた。NZ 林業は、伐期 25 年、枝打ち丸太が特徴で、補助金なしで成り立つ林業をおこない、土地利用の競争相手である畜産業よりも高収入になることを目指している。NZ 林業の将来の方向は、林木育種で成長を速めることよりも、材質（外観の美しさ含む）を向上させ家具材などより価格の高い市場への参入を目指している。カナダは天然更新の広大な針葉樹林での長伐期林業であり、日本林業での長伐期林業は価格競争の点で厳しいと考える。スギ材の価値を高めるためには、スギ材の特徴を理解しその変動のしくみを解明することが基礎となると考えた。スギ材の価値に関わる指標は、力学性能、寸法安定性、耐久性および心材色が考えられる。これらの指標は、生物材料であるため変動が大きく、主に遺伝的な要因や環境要因に影響される。これらの変動のしくみが明らかになれば、木材の価値に関わる指標の変動を小さくするだけではなく、市場でより高く評価される方向に改善することも可能である。成長速さは林業再生において重要なキーワードであり、筆者はとくに成長速さや樹形の違いによる材質変動およびそのしくみの解明を目指した。オーキシンを含む内生植物ホルモンは木部形成に影響をおよぼす重要な内的調節物質と考えられてきた。しかし、スギの内生植物ホルモンについてのデータは極めて少なく、材質変動を議論するためには膨大なデータが必要である。シロイヌナズナで明らかにされているように<sup>1)</sup>、植物ホルモンは情報伝達物質であり、遺伝子発現およびタンパク質合成を経て木部形成に影響をおよぼす。筆者は遺伝子発現およびタンパク質合成との関係ではなく、まず樹木の成長および木部形成との関係についてのデータ蓄積を目指した。この発表ではこれまでの研究内容を紹介するとともに、今後取り組んでみたい研究について述べてみたい。

### スギの材質指標とその特徴

スギ材の力学的性質が品種によって大きく異なることは数多くの研究で報告されており、筆者らもオビスギ品種材<sup>2)</sup>について報告した。林木間の変動に加えて、樹幹内での材質変動も明らかにされており、未成熟材・成熟材に加えて、高さ方向での変動<sup>3)</sup>も報告されている。このように、力学的性質の変動は大変複雑であるように見える。しかし、力学的性質の変動は MFA(二次壁中層のセルロースマイクロフィ

ブリル傾角)と密度によってほぼ説明できることが、主要な造林樹種で示された<sup>4)</sup>。筆者らの研究<sup>5)</sup>においても、オビスギ15品種材の胸高部と地上高5m部の木材材質を髓から木部最外層にかけて調べ比較したところ、品種、未成熟材・成熟材および高さ方向の変動の原因は、おもにMFAの変動によると考えられた(図1)。もちろん、密度の変動も重要であるが(図2)、スギ材の場合、MFAの影響がより大きいようであった。そこで、スギの材質指標で密度とMFAに焦点をあて、材質変動のしくみの解明を試みた。

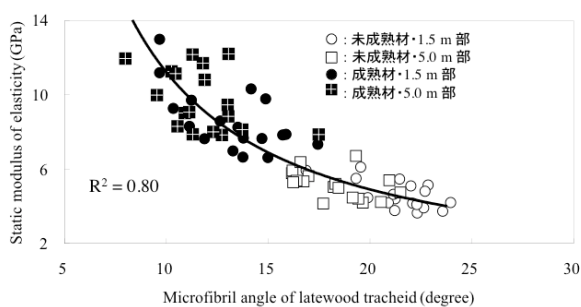


図1 スギ17品種でのMFAが縦圧縮ヤング率におよぼす影響

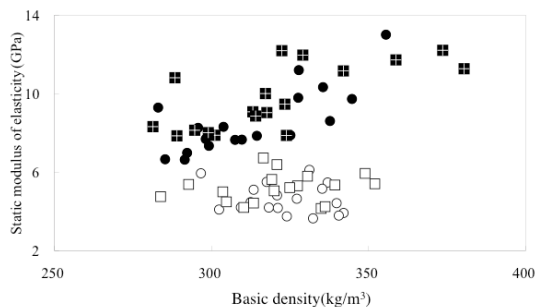


図2 スギ17品種における容積密度数が縦圧縮ヤング率におよぼす影響

(図1, 図2: 木材学会誌 56, p. 198-206 (2009)<sup>5)</sup>から引用)

### スギ品種の形成層に含まれるオーキシシン量

IAAは樹冠で合成され、形成層を樹幹上方から下方へ移動しながら、針葉樹の木部形成を制御する重要な内的調節物質であると考えられてきた。しかし、スギ形成層に含まれる内生IAA量を調べた研究は少ない。そこで、筆者らはスギ品種(クモトオシ, ヤイチ, オビアカ)の樹幹上部(地上高7m)と下部(地上高1.2m)の形成層に含まれるIAA量と樹冠長との関係について調べた<sup>6)</sup>。樹幹上部および樹幹下部の形成層に含まれるIAA量は、それぞれ9~47 ng/cm<sup>2</sup>および3~42 ng/cm<sup>2</sup>であった。IAA量におよぼす影響は、品種(クモトオシ, ヤイチ, オビアカ)よりも、樹幹の部位(上部, 下部)のほうが大きく、両者の相互作用は認められなかった(二

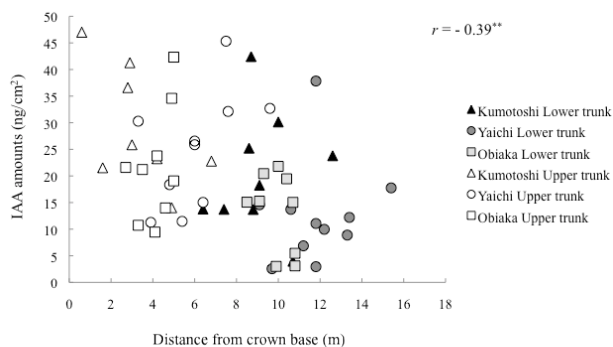


図3 スギ3品種での枝下からの距離と樹幹IAA量

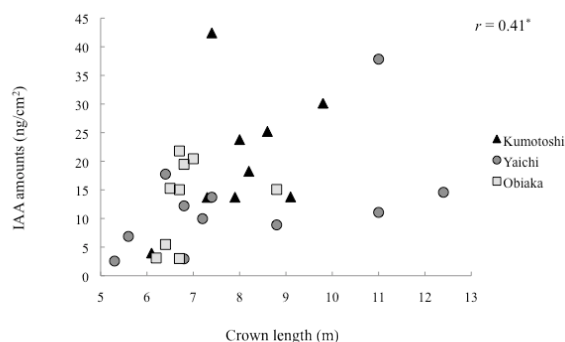


図4 スギ3品種での樹冠長とIAA量

(図3, 図4: Journal of Wood Science 60, 235-242 (2014)<sup>6)</sup>から引用)

元配置分散分析)。樹形に関わる指標のなかで樹冠長の IAA 量への影響が最も大きかった。樹冠長 (CL (m)) および枝下からの距離 (DCB (m)) と形成層に含まれる IAA 量 (ng/cm<sup>2</sup>) との間には、それぞれ正および負の有意な関係が認められた (IAA 量 = 13.2 + 2.12×CL - 1.23×DCB) (図 3, 図 4)。IAA 量におよぼす影響は、枝下からの距離の方が樹冠長よりも大きかった。スギの生育環境や品種特性によって、樹冠長と枝下高は大きく変動することが予想され、その結果、樹幹形成層に供給される IAA 量が増加すると考えられる。

### スギ未成熟・成熟材のオーキシシン量

針葉樹での最も大きな材質変動は、未成熟材と成熟材との間で生じる。また、林木育種による成長早さ増大を目指した場合、NZ 林業のような短伐期林業での未成熟材率増大が懸念される。したがって、構造用材を主用途とした場合、未成熟材の材質を改善できれば、その恩恵は極めて大きい。そこで、筆者らは未成熟材形成のしくみを解明することを目的に、若齢期のスギ林木 (7 年生) および成熟期のスギ林木 (24 年生) の形成層に含まれるオーキシシン (インドール酢酸, IAA) 量を比較した<sup>7)</sup>。その結果、若齢スギ胸高部 IAA 量は、成熟スギに比べて有意に大きく、樹高が大きくなるにつれて減少した。すべての林分 (若齢 1 林分, 成熟 2 林分) を一緒にすると、IAA 量が 200 ng/cm<sup>2</sup> より少ない試料では IAA 量の増加とともに晩材幅と MFA (図 5) が増大した。表 1 に示すように、若齢スギ胸高部では、成熟スギにくらべて、有意に大きな IAA 量, MFA および晩材幅であった。若齢スギで見られた極めて多量の IAA が未成熟材の材質に何らかの影響をおよぼしているのかもしれない。興味深いことに、若齢木の地上高 2.5 m 部では、胸高部ほど多量の IAA は存在しておらず、スギを含む針葉樹で認められる地上高が増大すると、未成熟材領域が小さくなることと因果関係があるのかもしれない。

表 1 スギ若齢・成熟木の IAA 量, MFA および晩材幅

林分	樹幹部位 (地上高)	IAA 量 (ng/cm <sup>2</sup> )	MFA (度)	晩材幅 (mm)
A	下部 (1.2 m)	1157 (900) <sup>a</sup>	25.0 (3.4) <sup>a</sup>	0.80 (0.32) <sup>a</sup>
	7 年生 上部 (2.5 m)	386 (598) <sup>ab,c</sup>	23.9 (5.0) <sup>a</sup>	0.73 (0.38) <sup>a</sup>
B	上部 (約 4 m)	69 (10) <sup>b</sup>	19.4 (1.8) <sup>ab</sup>	0.31 (0.12) <sup>ab</sup>
	24 年生 下部 (1.2 m)	34 (7) <sup>c</sup>	19.6 (1.9) <sup>ab</sup>	0.39 (0.15) <sup>ab,c</sup>
C	下部 (1.2 m)	29 (6) <sup>c</sup>	17.7 (2.3) <sup>b</sup>	0.27 (0.12) <sup>c</sup>
	24 年生 上部 (約 6 m)	26 (19) <sup>b,c</sup>	16.6 (1.2) <sup>b</sup>	0.28 (0.11) <sup>c</sup>

表中の値は平均値で括弧の中は標準偏差。平均値のあとの小文字の違いは有意差 (p < 0.05) があることを示す。

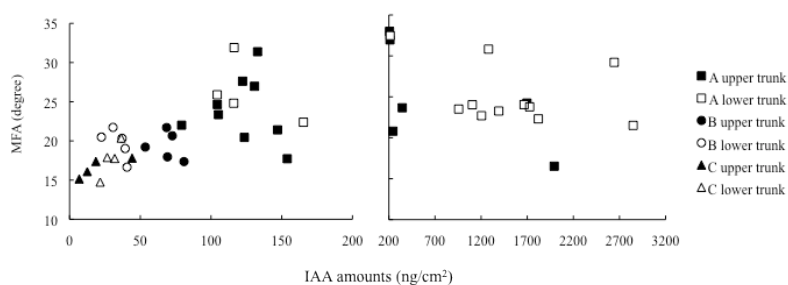


図 5 スギ (品種不明) での晩材形成中の IAA 量と晩材部 MFA

(表 1, 図 5: Journal of Wood Science 60, 177-185 (2014)<sup>7)</sup> から引用)

### 植栽密度の異なるスギ品種の木部形成と植物ホルモン

遺伝的要因 (品種や家系) に加えて、環境要因 (結果として成長の違い) がスギ材の材質変動を引き起こすと考えられる。そこで、筆者らはスギ品種ごとに成長の違いが力学的性質におよぼす影響を調べた<sup>8)</sup>。その結果、成長の指標のうちで、とくに形状比 (樹高 / 胸高直径) が樹幹の力学的性質に大きな影響をおよぼすことが

わかった。図 6 に示すように、形状比と樹幹曲げヤング率との間に密接な関係がある品種(トサアカ)では、植栽密度で形状比を制御すれば、生産される丸太の力学性能をある程度予測できる。植栽密度が木材材質におよぼす影響は、これまでも数多くの研究がおこなわれ報告されてきた<sup>9)</sup>。しかし、植栽密度の影響について、木部形成から材質変動までを扱った研究は少ない。そこで、オビスギ品種群のうちトサアカの密度試験地を用いて、植栽密度の異なるトサアカでの木部形成の季節変動および形成層に含まれる IAA 量および GA4 量について調べ、木部形成への植栽密度の影響を総合的に調べた<sup>10)</sup>。木部形成開始から 6 月にかけて最も活発に細胞分裂がおこなわれ、6 月～8 月で分裂頻度が低下し、8 月～10 月で再度高まり、それ以後また低下するものがほとんどであった。植栽密度の影響は木部形成開始から 6 月にかけての細胞分裂で顕著に認められた。6 月の IAA 量は密度区分間で有意差が認められ、密度区分 541 本/ha で多く、密度区分 4823 本/ha で少なかった。図 7 に示すように、木部形成開始から 6 月までに形成された木部細胞数と 6 月の IAA 量との間に正の相関関係が認められた ( $r = 0.75, p = 0.01$ )。8 月で弱い相関 ( $r = 0.55, p < 0.05$ )、10 月および 12 月では相関関係は認められず、季節が経過するに従って、相関係数が小さくなる傾向が認められた。前述の結果と同様に、樹冠長と 6 月 IAA 量との間に密接な関係が認められた。植栽密度は樹形に影響し、低植栽密度では枝下高が小さくなり、樹冠長率が大きくなり、その結果、多量の IAA が形成層へ供給され細胞分裂が促進されたと推測される。

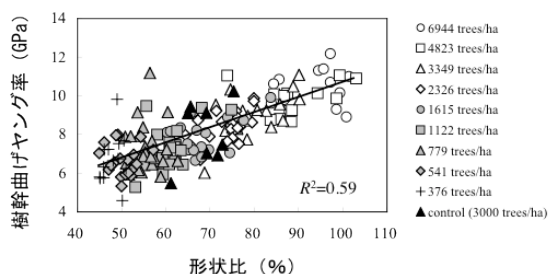


図6 異なる植栽密度で生育したトサアカの樹幹曲げヤング率と形状比との関係

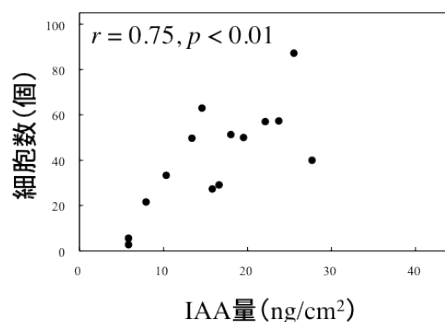


図7 異なる植栽密度で生育したトサアカの6月のIAA量とそれまでに形成された細胞数との関係

( $r$ :相関係数, $p$ :有意確率)

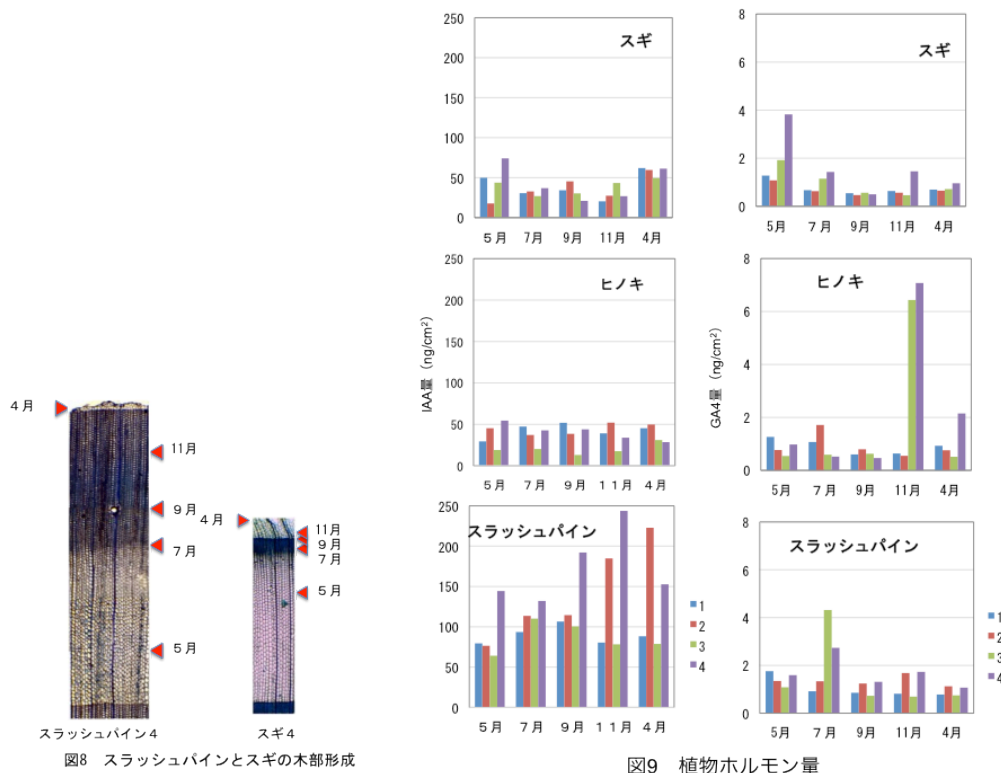
(図 6:Journal of Wood Science 56, 1-6(2010)<sup>8)</sup>から引用)

GA4 量と晩材形成中の細胞分裂頻度との関係は認められなかった。仮道管の断面形状および細胞壁率と IAA 量および GA4 量との関係を調べた。IAA 量および GA4 量と細胞壁率および仮道管断面形状との有意な関係は認められなかった。IAA が細胞分裂を促進することは、これまでも報告されているものの、IAA 投与実験によるものがほとんどであり、内生 IAA 量と細胞分裂頻度との正の相関関係が示されたことは、興味深い。一般的に、年輪番号が大きくなるにつれて、晩材仮道管の MFA は小さくなり安定する。しかし、疎植試験木 (541 本/ha) の地上高 1.2m 部における MFA の推移は一旦髓から離れると小さくなるものの、その後

大きくなり、12年輪以降で密植の試験木に比べて有意に大きかった<sup>11)</sup>。地上高3.2m、5.2m部においても大きなMFAが確認された。現在、試験木本数を増やして信頼性のあるデータになるように測定を進めているところである。この結果は、前節で述べた樹冠長・枝下高、IAA量およびMFAの関係と矛盾しない。

### スラッシュパインとスギの木部形成と植物ホルモン

スラッシュパインは晩材形成が旺盛な樹種であり、スギやヒノキに比べて夏以降（晩材形成時期）に細胞分裂のピークがあることを既に報告している<sup>12)</sup>。スギおよびヒノキでは7月以降の細胞分裂頻度が著しくて以下するものの、スラッシュパインでは9月から11月で活発な細胞分裂が認められ、11月以降でも活発に

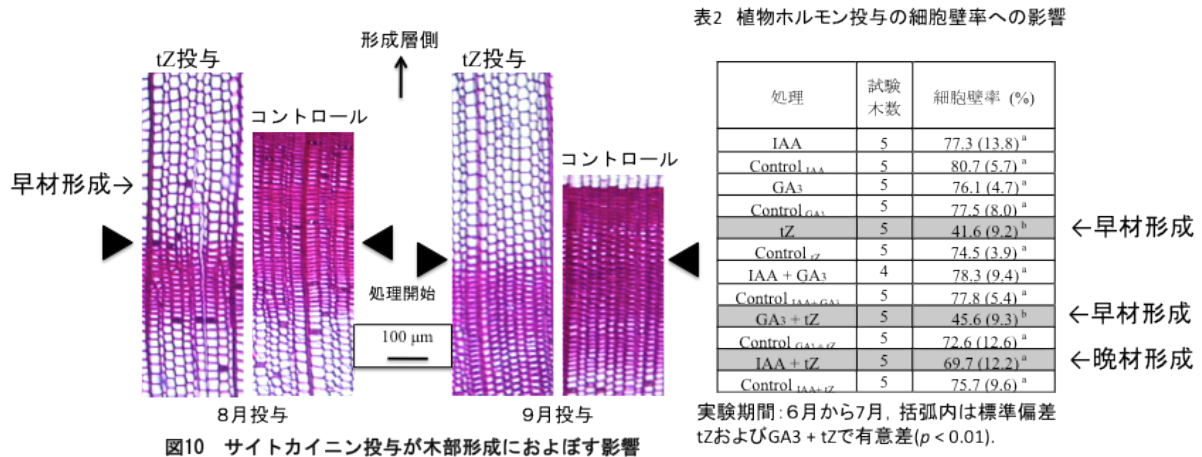


細胞分裂していた（図8）。樹種特性として晩材率が大きなスラッシュパインと晩材率が小さなスギおよびヒノキについて、IAA量およびGA4量の季節変動を明らかにした<sup>13)</sup>。その結果、IAA量のピークはスギとスラッシュパインで同じ（4月）であったものの、GA4量のピークはスギで5月、スラッシュパインで7月であり、大きな違いが認められた（図9）。スラッシュパインのIAA量はスギおよびヒノキに比べて有意に大きく、旺盛な晩材形成がおこなわれた9月および11月のIAA量は、顕著に増大した。スラッシュパインの旺盛な晩材形成を説明できるGA4量の変動は認められず、IAA量で認められた。

### 早・晩材形成とサイトカイニン

早・晩材形成は晩材率と密接な関係にあり、木材密度に大きな影響をおよぼす。近年、シロイヌナズナにおいて、土壌中無機栄養と根でのサイトカイニン

合成との間には密接な関係があり，ゼアチン型サイトカイニンが根からシュートへの情報伝達物質である可能性が示された<sup>14)</sup>。スギの仮道管分化におよぼす水不足の影響が明らかにされ<sup>15)</sup>，多くの針葉樹で土壌水分の不足と偽年輪形成との関係が報告されている<sup>16)</sup>。シロイヌナズナで得られた結果がスギで認められるならば，サイトカイニンは早・晩材形成と密接な関係があると考え投与実験をおこなった。晩材形成中のスギ林木の樹幹にゼアチンを6月，8月および9月に投与すると早材形成が引き起こされた。しかし，10月および11月の投与では顕著な影響は認められなかった。オーキシンおよびジベレリンの投与では早材形成の誘導は認められなかった。サイトカイニンとジベレリンの混合物を投与すると早材形成の誘導は認められたものの，サイトカイニンとオーキシンの混合物を投与すると早材形成の誘導は認められなかった。オーキシンはサイトカイニンの働きを阻害すると考えた。



そこで，スギ形成層に含まれる IAA 量およびサイトカイニン (tZ,tZR,iP) 量の季節変動を明らかにしたところ，晩材形成が始まる 6月下旬に IAA 量は減少しないものの，tZR は激減する季節変動を示した。

### 今後の材質研究の方向性

今後の材質研究の方向性を示すことは難しいので，筆者が今後取り組んでみたい研究を挙げる。①植物ホルモンの組織・細胞レベルでの局在の解明。②植物ホルモン作用に関連して合成されるタンパク質の網羅的解析。③樹木における植物ペプチドホルモンの研究。④木材の接合性能に関連した材質研究 (MFA の影響)。

### 引用文献

- 1) 小柴恭一，神谷勇治 (2010) 新しい植物ホルモンの科学 第 2 版，29-30，47-50，66-69
- 2) 雉子谷佳男，北原龍士 (2003) 南九州産スギ材の材質 II : オビスギ品種の材質特性，材料，52 (4)，336-340
- 3) 山下香菜，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
- 4) J. Mclean, R. Evans, J. Moore (2010) Predicting the longitudinal modulus of elasticity of Sitka spruce from cellulose orientation and abundance, *Holzforschung*, **64**, 495-500
  - 5) 雉子谷佳男, 北原龍士(2009)オビスギ品種における木材材質の高さ方向の変動, 木材学会誌, **55**, 198-206
  - 6) Y. Kijidani, N. Ooshiro, J. Matsumura, S. Koga (2014) Effects of crown length on indole acetic acid (IAA) amounts in cambial region tissues in lower and upper trunks of sugi cultivars (*Cryptomeria japonica*) in September, *J Wood Sci*, **60**, 235-242
  - 7) Y. Kijidani, N. Ohshiro, D. Iwata, M. Nagamine, T. Nishiyama, J. Matsumura, S. Koga (2014) Variation of indole acetic acid(IAA) amounts in cambial-region tissues in 7- and 24-year-old sugi(*Cryptomeria japonica*) trees, *J Wood Sci*, **60**, 177-185
  - 8) Y. Kijidani, T. Hamazuna, S. Ito, R. Kitahara S. Fukuchi, N. Mizoue, S. Yoshida (2010) Effect of height-to-diameter ratio on stem stiffness of sugi (*Cryptomeria japonica*) cultivars, *J Wood Sci*, **56**, 1-6
  - 9) たとえば, 藤澤義武, 太田貞明, 明石孝輝(1995)スギの材質と遺伝(第4報): 年輪構造のクローンと植栽密度による変異, 木材学会誌, **41**, 631-639
  - 10) 永井堯大, 雉子谷佳男(2014)植栽密度が異なるスギ品種の木部形成と植物ホルモン量について: IAA量の季節変動, 第64回日本木材学会大会研究発表要旨集, 9
  - 11) ケイシスザン, 雉子谷佳男, 北原龍士(2010)植栽密度の異なるオビスギ(トサアカ)の成長と材質について, 第60回日本木材学会大会研究発表要旨集, 11
  - 12) 雉子谷佳男, 高田克彦, 伊藤哲, 小川雅子, 永峰正教, 久保田 要, 坪村美代子, 北原龍士(2011)南九州で生育した slash pine の年輪形成と木材材質, 木材学会誌, **57**(6), 340-349
  - 13) 武田幸大, 永井堯大, 雉子谷佳男(2015)針葉樹3樹種の形成層に含まれるジベレリン量の季節変化, 第65回日本木材学会大会研究発表要旨集, 131
  - 14) N. Hirose, K. Takei, T. Kuroha, T. Kamada-Nobusada, H. Hayashi, H. Sakakibara (2008) Regulation of cytokinin biosynthesis, compartmentalization and translocation, *J Exp Bot* **59**, 75-83
  - 15) H. Abe, T. Nakai (1999) Effect of the water status within a tree on tracheid morphogenesis in *Cryptomeria japonica* D. Don., *Trees*, **14**, 124-129
  - 16) O. Bouriaud, J.-M. Leban, D. Bert, C. Deleuze (2005) Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce, *Tree Physiology*, **25**, 651-660

(連絡先: [kijiyo@cc.miyazaki-u.ac.jp](mailto:kijiyo@cc.miyazaki-u.ac.jp))

## モデル植物の情報から樹木の木部細胞の分化メカニズムを探る

森林総合研究所・森林バイオ研究センター

高田 直樹

### はじめに

木材は様々な細胞の集合体であり、針葉樹材においては仮道管、軸方向柔細胞、放射仮道管、放射柔細胞から構成され、広葉樹材においては道管要素、木部繊維、軸方向柔細胞、放射柔細胞などから構成される。これらの細胞の発生は形成層始原細胞の細胞分裂に由来し、分化・発達の過程を経て最終的に死細胞に変化する。木部細胞の分化・発達の過程では発達ステージに合わせて多様な細胞内メカニズムが働いている。例えば、細胞分裂により生じた娘細胞が特定の細胞に分化する機構、細胞の伸長・拡大の方向性を決定する機構、二次壁の形成機構と細胞壁修飾構造の形成機構、隣り合った細胞間で生じるシグナルのやりとりなど多くのメカニズムにより細胞の分化・発達が決められている。これらメカニズムのうち、二次壁の形成機構はモデル植物であるシロイヌナズナを中心に飛躍的に理解が進んできた。本発表では、シロイヌナズナの二次壁形成の転写制御ネットワークについて紹介し、その情報をもとに明らかになってきた針葉樹 (*Picea* spp.) の二次壁形成の制御ネットワークについてレビューを行う。さらに、近年我々が取り組んでいるマイクロフィブリル配向を制御する新規転写因子の探索について紹介したい。

### モデル植物（シロイヌナズナ）での二次壁形成の転写制御ネットワーク

二次壁形成の過程でキーとなるのは、NAC [NAM (no apical meristem)、ATAF (Arabidopsis transcription activation factor) and CUC (cup-shaped cotyledon)] 遺伝子ファミリーに属する VNS (VND-, NST/SND- and SMB-) 遺伝子群である。このうち、VND6 (Vascular-related NAC-domain6) と VND7 は道管要素の発達を制御するマスター転写因子であることが知られている (図1)<sup>1)</sup>。シロイヌナズナにおいて、VND6 は後生木部道管 (網目状に二次壁が堆積した道管) の発達を制御し、VND7 は原生木部道管 (らせん状に二次壁が堆積した道管) の発達を制御している。両転写因子は細胞壁形成やプログラム細胞死に関わる遺伝子の発現を直接的に、または下流の転写因子を介して間接的に制御することが示されている。また、VNS 遺伝子群に属する NST1 (NAC secondary wall thickening promoting factor1) と SND1 (Secondary wall-associated NAC-domain protein1)/NST3 は木部繊維細胞の二次壁形成のマスター転写因子である<sup>2,3)</sup>。NST1 と SND1/NST3 は機能が重複しており、2つの遺伝子を同時に破壊することで木部繊維細胞の細胞壁肥厚が著しく阻害される。NST1 と SND1/NST3 は二次壁形成に関わる遺伝子の発現を直接的または間接的に正に制御している。



VND6、VND7、NST1、SND1/NST3 の下流では、MYB 転写因子 (MYB46、MYB83、MYB4 など) や NAC 転写因子 (SND2、SND3)、ホメオボックス転写因子 (KNAT7) がシグナル伝達機能を担っている<sup>4)</sup>。このうち、VND6、VND7、NST1、SND1/NST3 の直接のターゲットである MYB46 と MYB83 は、二次壁形成の過程で重要な制御因子である (図1)。MYB46 と MYB83 は道管と木部繊維細胞の両方で発現し、両遺伝子を破壊した二重変異体では道管の二次壁形成が抑制され道管の水分通道機能が著しく阻害される<sup>5)</sup>。また、MYB46 と MYB83 の下流にはさらに二次壁形成を制御する転写因子群が存在しており、ある転写因子は二次壁形成を正に制御し、ある転写因子は負に制御している<sup>4)</sup>。シロイヌナズナを用いた多数の研究から、マスター転写因子である VNS 転写因子が MYB46/MYB86 を介してさらに下流の転写因子を制御し、最終的に二次壁合成に関連する酵素遺伝子を制御するモデルが考えられている。

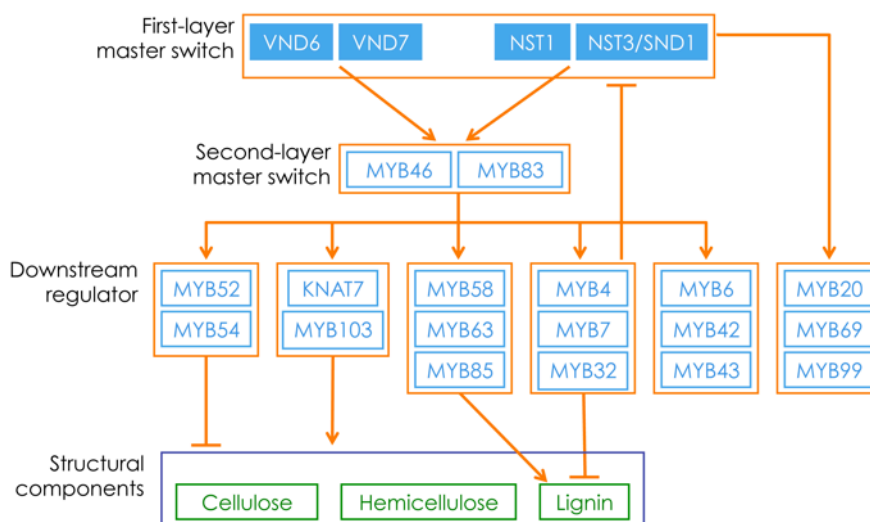


図1. シロイヌナズナでの二次壁形成の転写制御ネットワーク

### 針葉樹における二次壁形成の転写制御ネットワーク

針葉樹の二次壁形成の転写制御ネットワークは、*Picea* spp. で理解が進んでいる。*Picea abies* では VNS 遺伝子群に属する遺伝子が 2 遺伝子保存されており、これら 2 遺伝子は被子植物の NST/SND 遺伝子の配列よりも VND 遺伝子の配列に類似している<sup>6)</sup>。このことは、被子植物が裸子植物との分岐以降に NST/SND 遺伝子を獲得した可能性、もしくは *Picea* spp. において NST/SND オルソログを欠失した可能性を示している。*Picea* spp. に保存されている 2 つの VNS 遺伝子のうち、NAC7 は木部組織で発現量が高く二次壁合成のマスター遺伝子として機能すると考えられている<sup>7)</sup>。NAC7 の下流では MYB 転写因子 (MYB1、MYB2、MYB3、MYB8、MYB32、MYB33) が機能している<sup>7, 8)</sup>。これらの遺伝子のうち、MYB2 と MYB8 は MYB1、MYB3、MYB32、MYB33 の上流で機能すると考えられており、セルロース合成、ヘミセルロース合成、リグニン合成に関連する酵素遺伝子を正に制御している<sup>9)</sup>。また、MYB1 はリグニン合成に関連する酵素遺伝子のみを正に制御している。これらのことから、

*Picea* spp.においても VNS 転写因子が下流の MYB 転写因子を介して二次壁合成に関連する酵素遺伝子を制御すると考えられる。

### ポプラにおいて二次壁のミクロフィブリル配向を制御する転写因子の探索

二次壁は外層 (S<sub>1</sub> 層)、中層 (S<sub>2</sub> 層)、内層 (S<sub>3</sub> 層) に区別される。S<sub>1</sub> 層、S<sub>2</sub> 層、S<sub>3</sub> 層では細胞長軸に対するセルロースミクロフィブリルの配向角度が異なっており、S<sub>1</sub> 層では緩傾斜の S もしくは Z らせん、S<sub>2</sub> 層では急傾斜の Z らせん、S<sub>3</sub> 層では緩傾斜の S もしくは Z らせんとして配向している<sup>10)</sup>。セルロースミクロフィブリルの連続的な配向変化は、細胞膜直下に局在する繊維状の表層微小管により制御されることが知られている。しかし、二次壁形成中に生じるセルロースミクロフィブリル及び表層微小管の配向変化が、どのような細胞内分子機構により制御されているのか未だ詳細な理解には至っていない。

我々は、ポプラを用いて表層微小管の空間構造 (平行性と密度) を制御する新規転写因子の探索を行ってきた。まず初めに、微小管を生体内で可視化するために、微小管を構成する  $\alpha$ -チューブリン (TUA) 及び  $\beta$ -チューブリン (TUB) に GFP を融合した遺伝子コンストラクトをポプラに導入した。得られたポプラ形質転換体にさらに木部形成中の細胞で発現する 34 個の転写因子 (TF) 遺伝子をそれぞれ導入した。作成した TF 過剰発現体について表層微小管を共焦点レーザー顕微鏡で観察し、取得した画像を用い微小管の平行性及び密度を ImageJ により定量化した。その結果、#26 遺伝子の過剰発現体では表層微小管の平行性と密度が増加すること、#34 遺伝子の過剰発現体では平行性が増加することを明らかにした。両遺伝子は木部で高発現し転写因子をコードすることから、下流のターゲット因子を介して表層微小管の配向や密度を制御していると推察される。また、両遺伝子がポプラの VNS 転写因子群に制御されるか調べたところ、両遺伝子は VND オルソログには制御されず NST/SND オルソログにより正に制御された。さらに、#34 遺伝子は#26 遺伝子により転写活性化されることが明らかになった。このことから、ポプラにおいては NST/SND オルソログが#26 遺伝子を転写制御し、#26 遺伝子がさらに#34 遺伝子を制御していると考えられる。現在、#26 遺伝子及び#34 遺伝子が木部細胞のセルロースミクロフィブリルの配向を制御するかどうかを調べている。

### 引用文献

- 1) Kubo M, Udagawa M, Nishikubo N, Horiguchi G, Yamaguchi M, Ito J, Mimura T, Fukuda H, Demura T. (2005) Transcription switches for protoxylem and metaxylem vessel formation. *Genes Dev* 19:1855-1860.
- 2) Zhong R, Demura T, Ye ZH. (2006) SND1, a NAC domain transcription factor, is a key regulator of secondary wall synthesis in fibers of *Arabidopsis*. *Plant Cell* 18:3158-3170.
- 3) Mitsuda N, Iwase A, Yamamoto H, Yoshida M, Seki M, Shinozaki K, Ohme-Takagi M. (2007) NAC transcription factors, NST1 and NST3, are key

- regulators of the formation of secondary walls in woody tissues of *Arabidopsis*. *Plant Cell* 19:270-280.
- 4) Hussey SG, Mizrahi E, Creux NM, Myburg AA. (2013) Navigating the transcriptional roadmap regulating plant secondary cell wall deposition. *Front Plant Sci* 4:325.
  - 5) Ko JH, Jeon HW, Kim WC, Kim JY, Han KH. (2014) The MYB46/MYB83-mediated transcriptional regulatory programme is a gatekeeper of secondary wall biosynthesis. *Ann Bot* 114:1099-1107.
  - 6) Nakano Y, Yamaguchi M, Endo H, Rejab NA, Ohtani M. (2015) NAC-MYB-based transcriptional regulation of secondary cell wall biosynthesis in land plants. *Front Plant Sci* 6:288.
  - 7) Raheison ES, Giguère I, Caron S, Lamara M, MacKay JJ. (2015) Modular organization of the white spruce (*Picea glauca*) transcriptome reveals functional organization and evolutionary signatures. *New Phytol* 207:172-187.
  - 8) Duval I, Lachance D, Giguère I, Bomal C, Morency MJ, Pelletier G, Boyle B, MacKay JJ, Séguin A. (2014) Large-scale screening of transcription factor-promoter interactions in spruce reveals a transcriptional network involved in vascular development. *J Exp Bot* 65:2319-2333.
  - 9) Bomal C, Bedon F, Caron S, Mansfield SD, Levasseur C, Cooke JE, Blais S, Tremblay L, Morency MJ, Pavy N, Grima-Pettenati J, Séguin A, Mackay J. (2008) Involvement of *Pinus taeda* MYB1 and MYB8 in phenylpropanoid metabolism and secondary cell wall biogenesis: a comparative *in planta* analysis. *J Exp Bot* 59:3925-3939.
  - 10) Funada R (2008) Microtubules and the control of wood formation. In: Nick, P. (ed.) *Plant Microtubules: Development and Flexibility*, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 83-119.

(連絡先 : naokitakata@affrc.go.jp)

日本木材学会 組織と材質研究会 2015 秋季シンポジウム  
「スギの材質 ー利用と育種の現状とこれからー」  
講演要旨集

企画・編集:山下香菜、安部久、阪上宏樹、松村順司

発行:2015 年 10 月 23 日  
一般社団法人 日本木材学会  
組織と材質研究会(代表幹事:松村順司)