

木づかいセミナー

木の魅力

京都大学 名誉教授
高部 圭司

今日の話題

- 🔍 木って何？
- 🔍 木は地球環境に貢献する
- 🔍 針葉樹・広葉樹
- 🔍 木の表情は唯一無二
- 🔍 木は軽くて強い
- 🔍 木は快適
- 🔍 日本が育んできた木の文化
- 🔍 新たな木質材料の可能性

木って何？

木って？
木って？

1億6千万年前から生き続けてきた

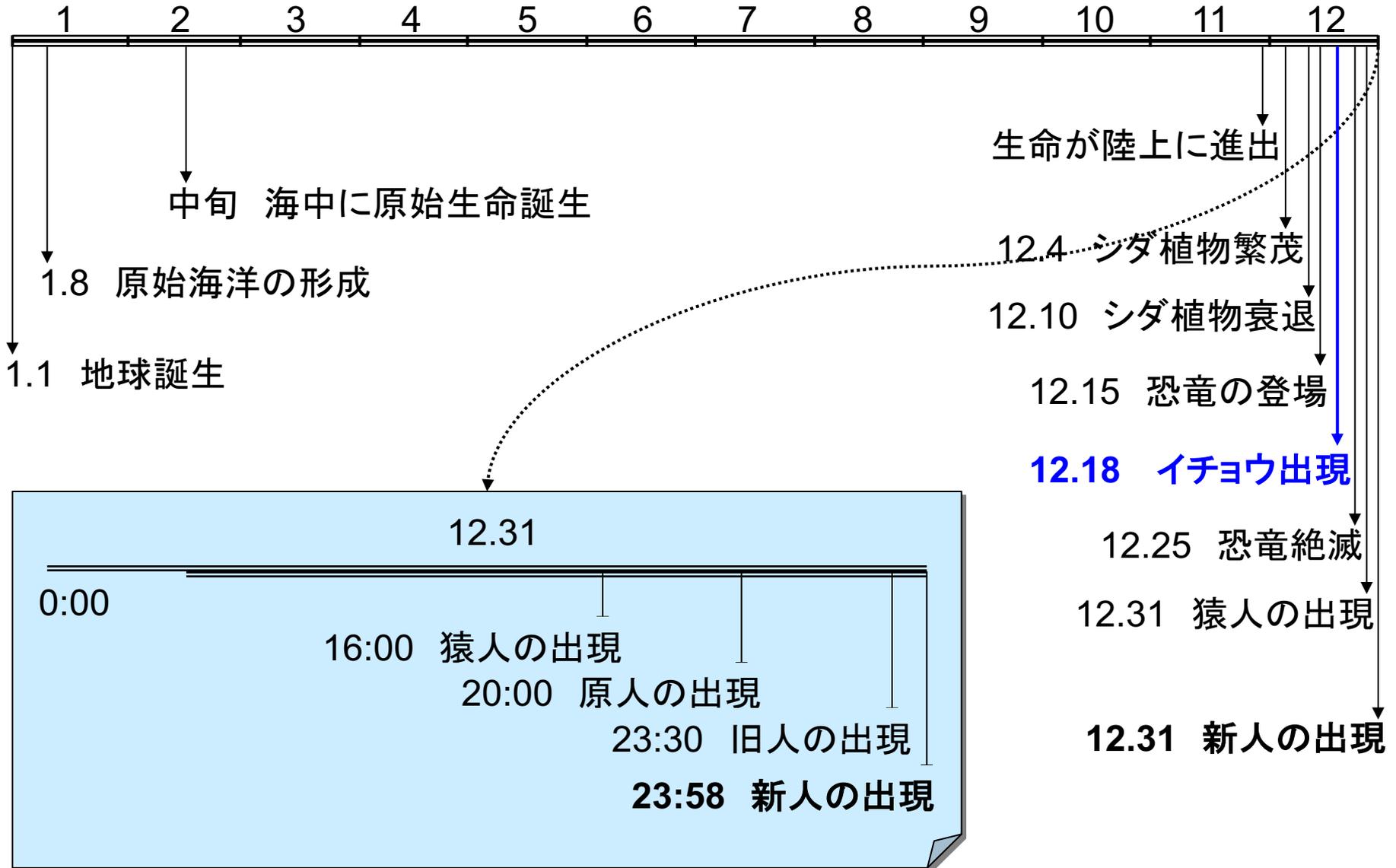


イチョウ

1億6000万年
前(ジュラ紀)
に地球上に出
現した。

地球時計(地球の歴史を1年で表す)

月尾嘉男『縮小文明の展望』東京大学出版会、2003年、12頁をもとに高部作成



木って？ 木って？

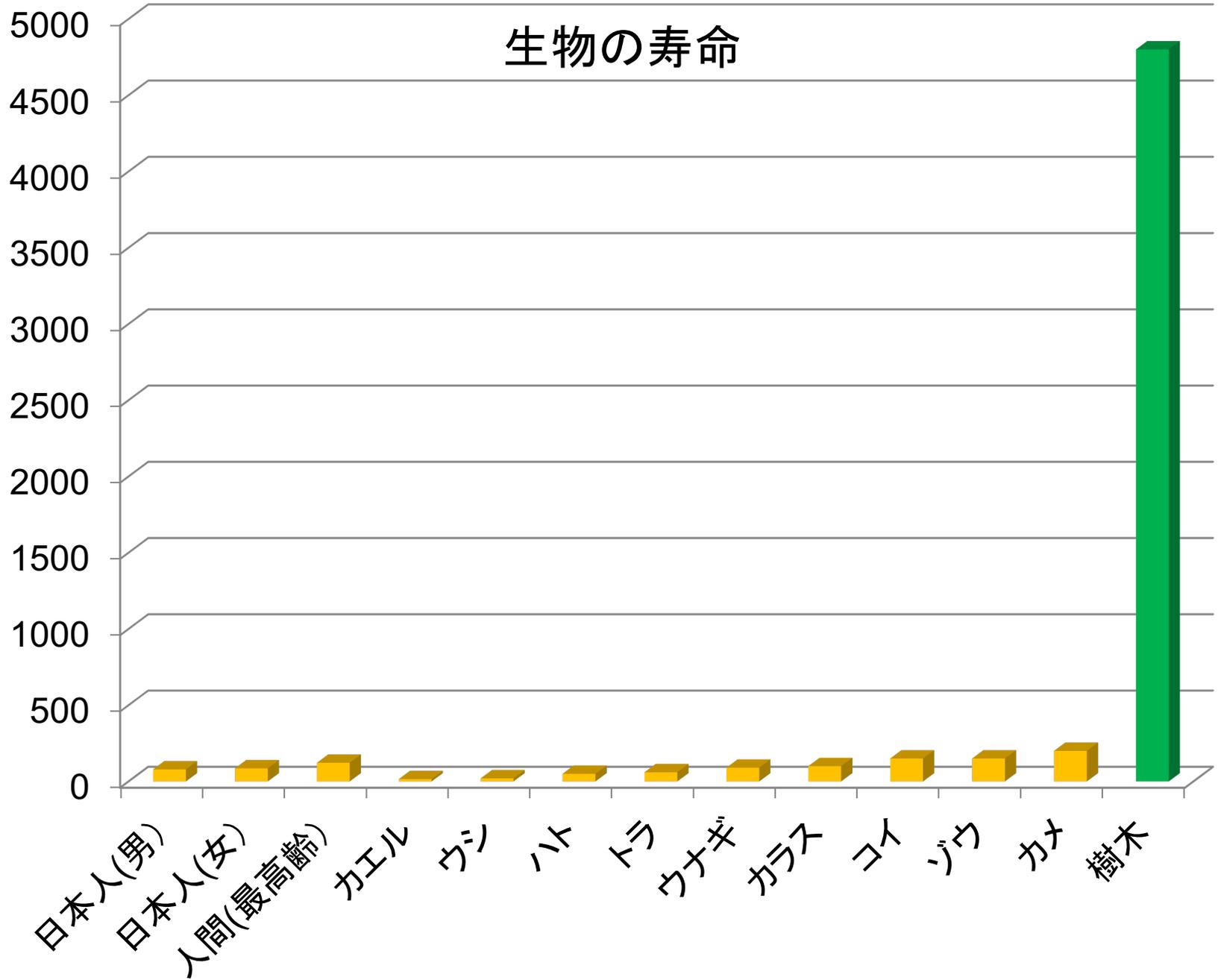
長命

人間	最高齢122歳
ツル	50～80歳
カメ	推定180歳(152年間飼育された記録がある)
樹木	4847年(ブリッスルコーンパイン:現存する樹木)



9550年(放射性炭素による年代測定:クローン樹木)

生物の寿命



木って？ 木って？

地球上最大の 生命体



樹高: 83.82m



推定重量: 1000ton

世界一の巨木(1000t)

現存する世界で最も大きな木は“General Sherman”の愛称を持つジャイアントセコイア (*Sequoiadendron giganteum*)。カリフォルニア州セコイア国立公園に生育。

木って？
木って？

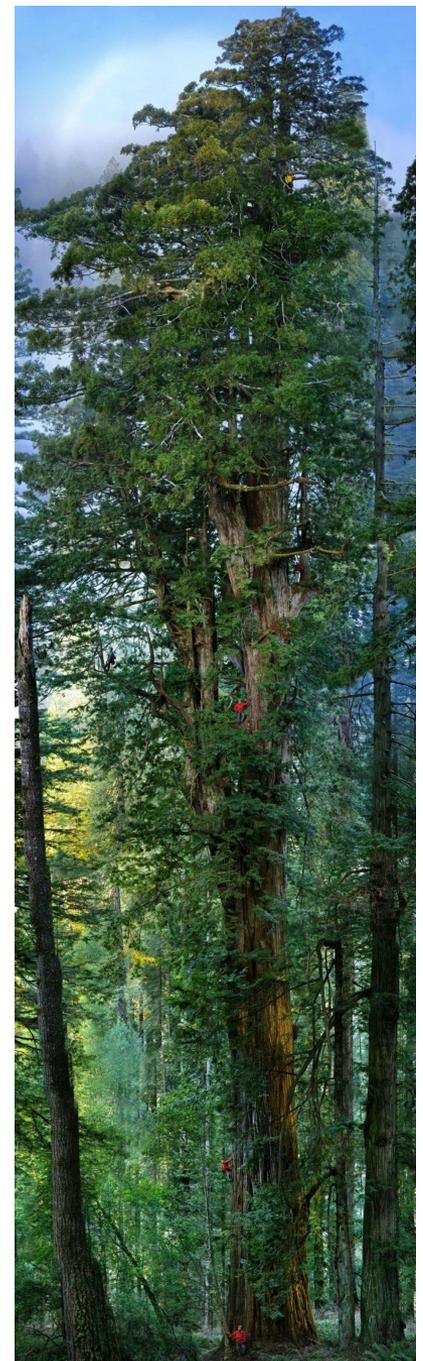
地球上最大
の生命体

高さ世界一の木(115.92m)

Hyperion 約600年生

コーストレッドウッド

(*Sequoia sempervirens*)



(m)
115

45
35

2

人間

シロナガスクジラ

アルゼンチノサウルス

コーストレッドウッド

樹木を巨大な生命体にするのは

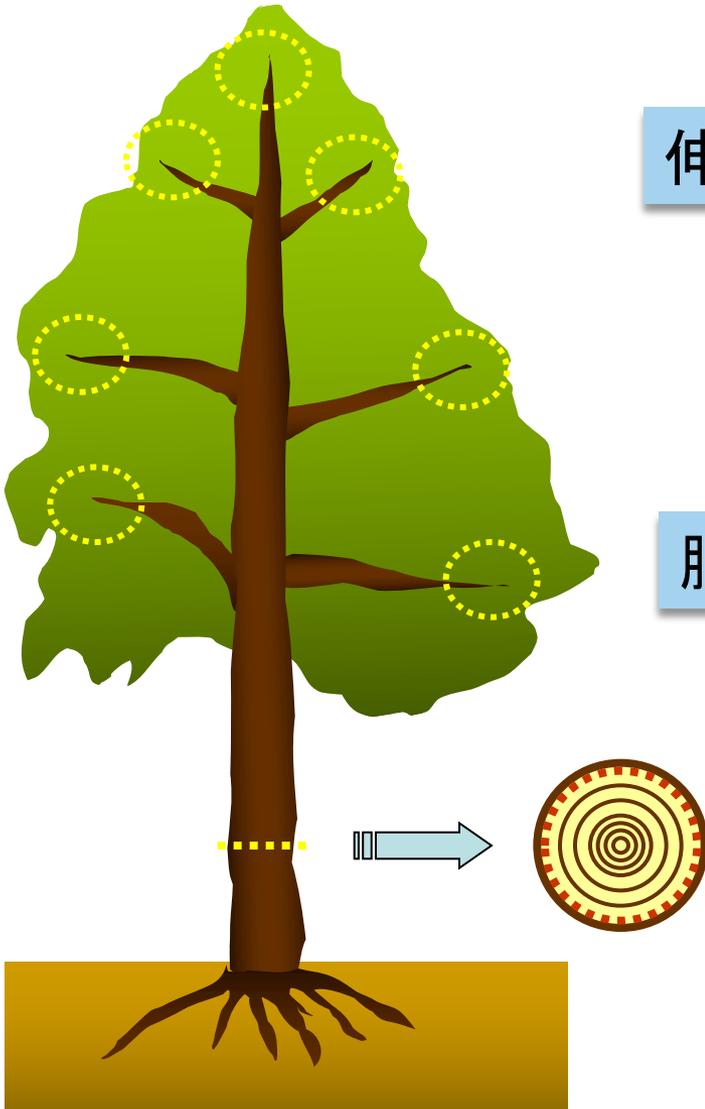
維管束形成層、頂端分裂組織などの分裂組織の働き

伸長成長

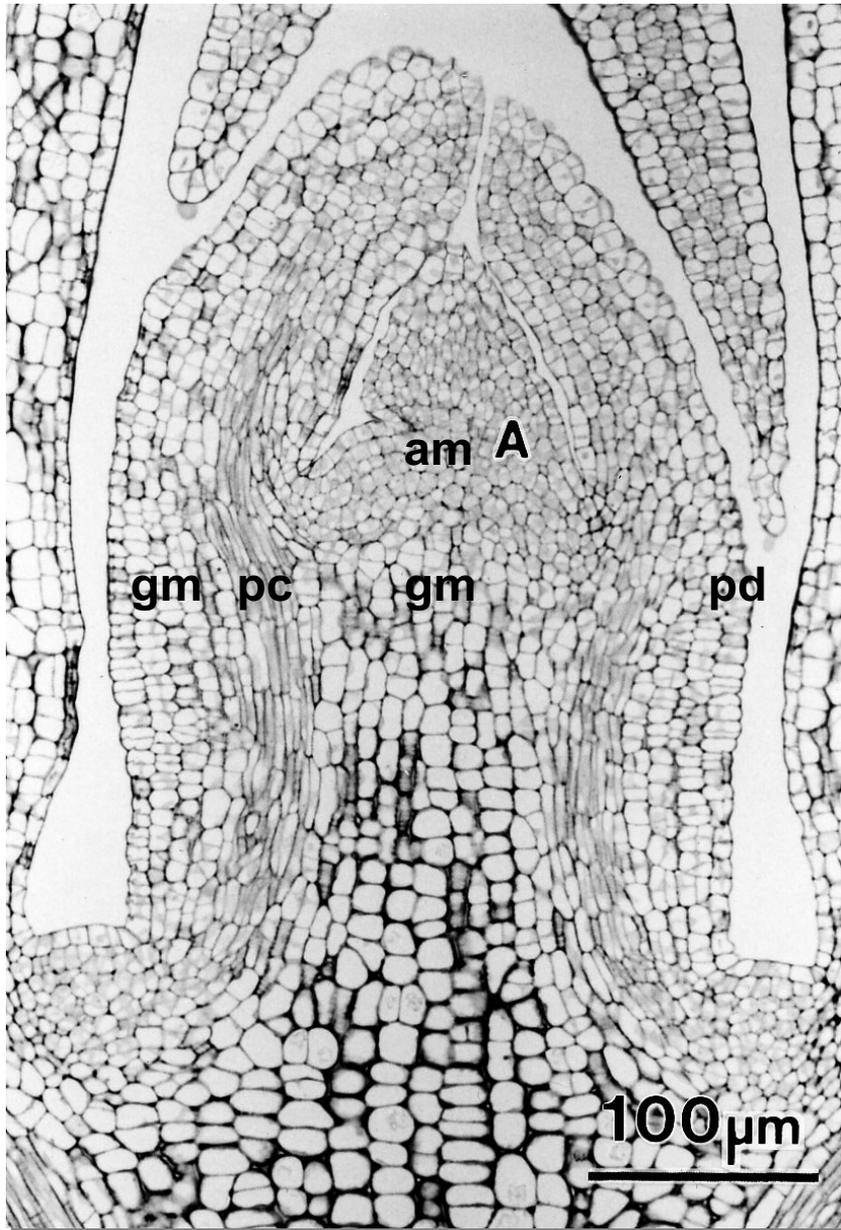
頂端分裂組織に起源を持つ組織の増加によって起こる。

肥大成長

維管束形成層に起源を持つ組織の増加によって起こる。



頂端分裂組織



ユークアリの頂端分裂組織付近の横断面

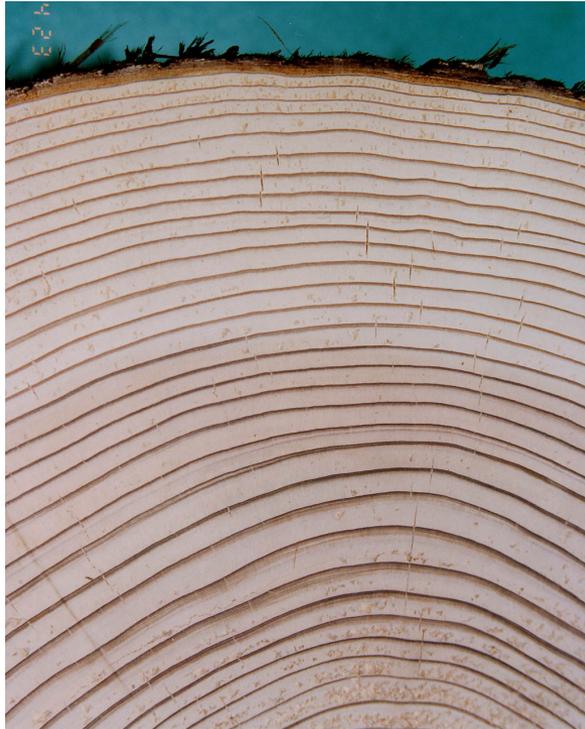
am: 頂端分裂組織

pd: 原表皮

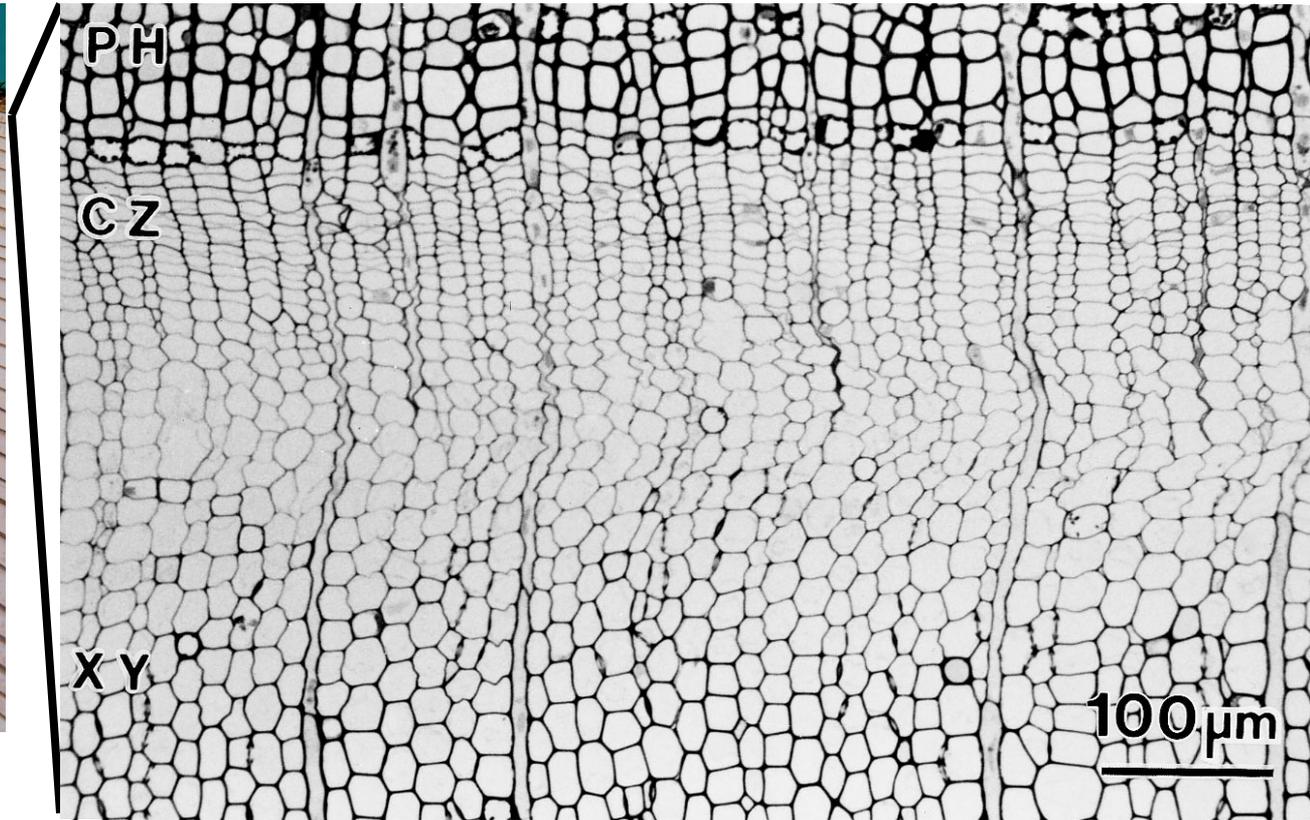
gm: 基本分裂組織

pc: 前形成層

維管束形成層



スギ幹の横断面



スギ形成層帯の顕微鏡写真

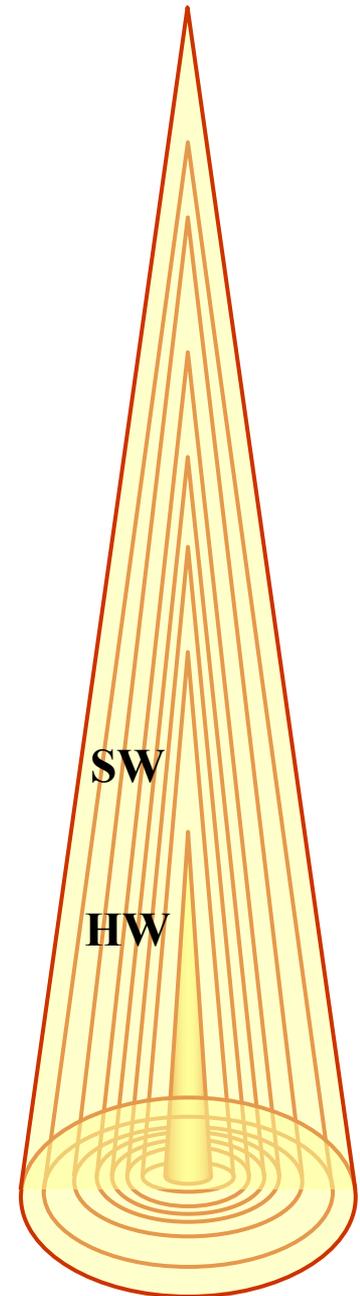
(PH:師部, CZ:形成層帯, XY:木部)

樹幹の成長

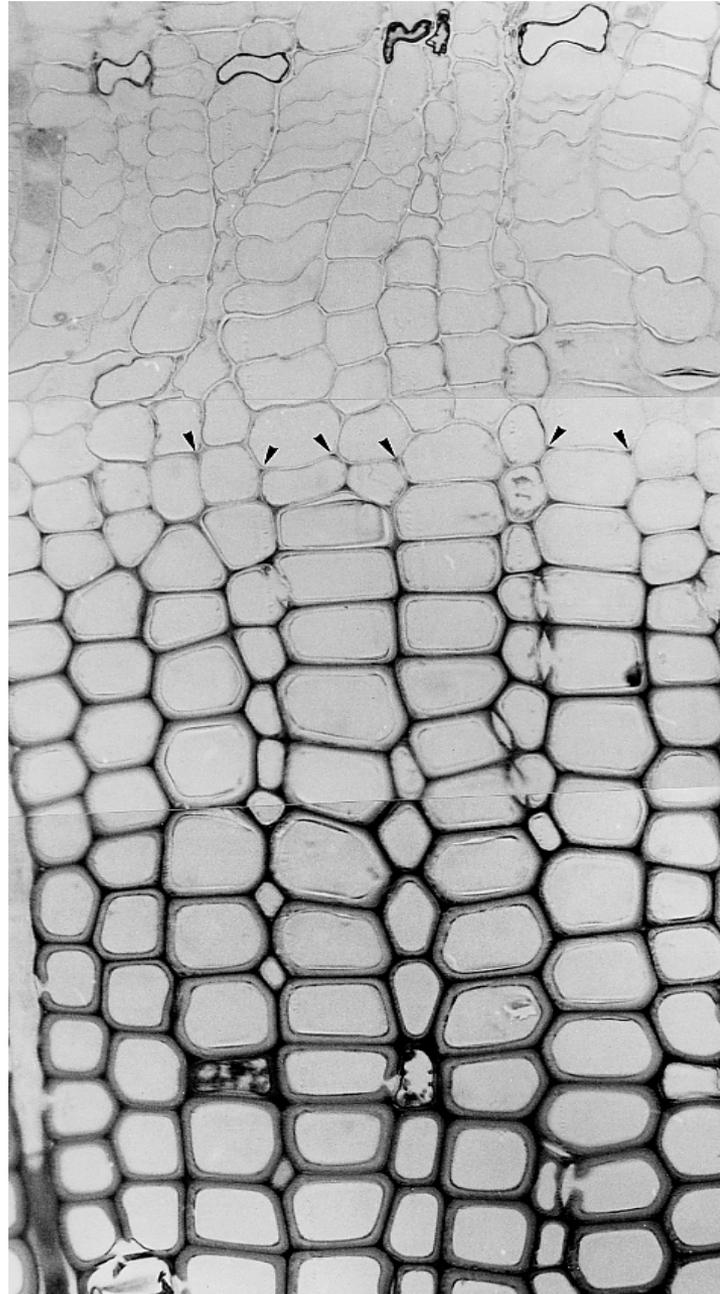
温帯地方の1年を周期とする維管束形成層の活動に対応して作られた二次木部。

幹の横断面では同心円の環として現れる。

立体的には1年ごとの成長層が円錐形のさやとなって重ねられていく。



形成層の働き



細胞を生み出す
(細胞分裂)

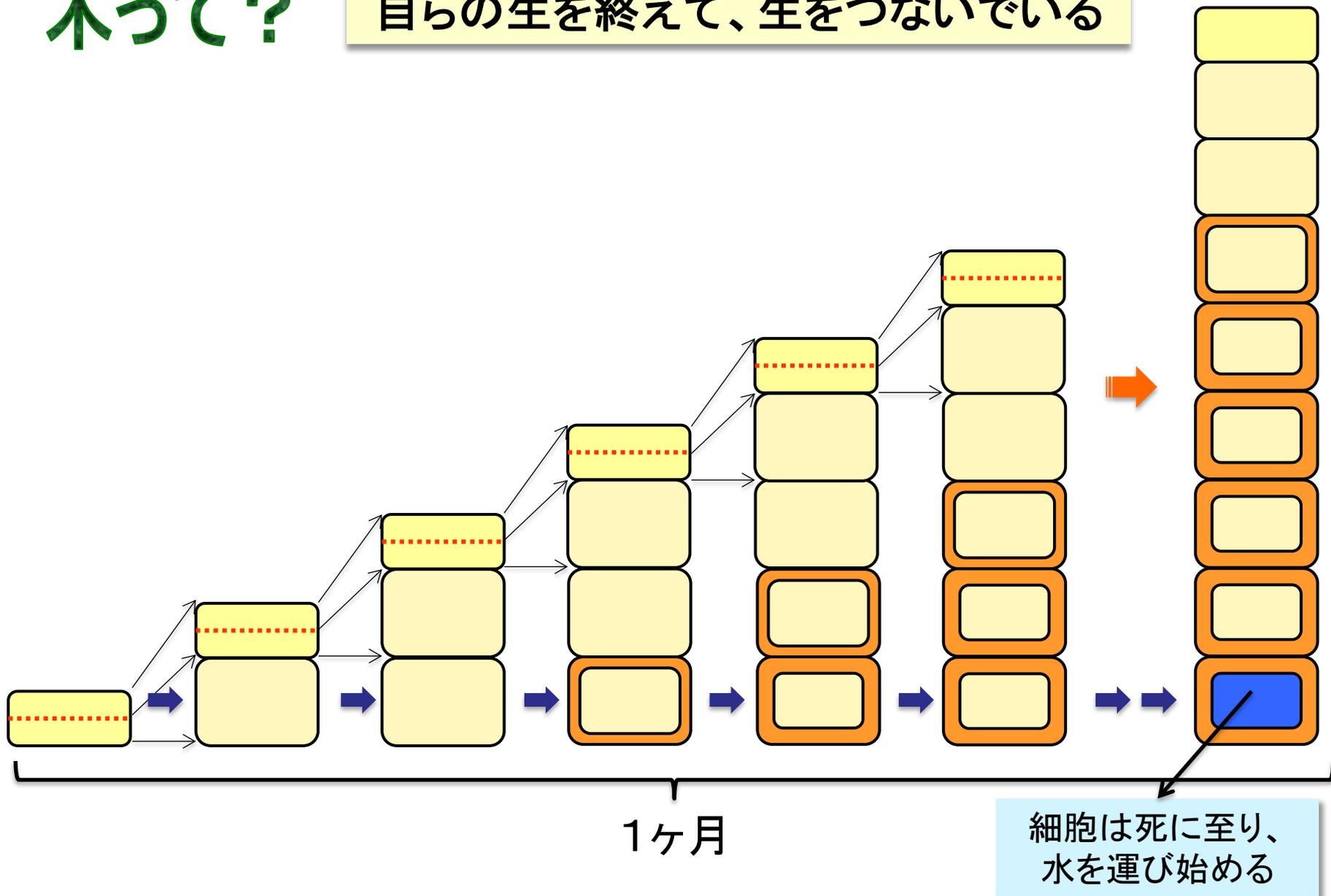
細胞を大きくする
(表面成長)

細胞を丈夫にする
(二次壁形成)

細胞は死に至り、
水を運び始める

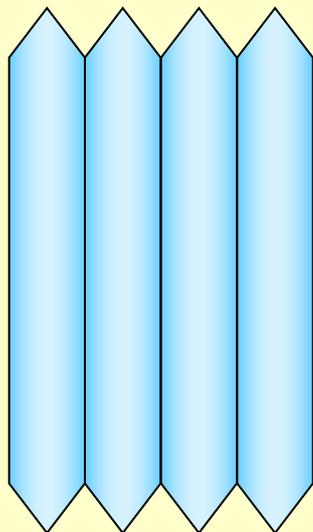
木って？ 木って？

自らの生を終えて、生をつないでいる



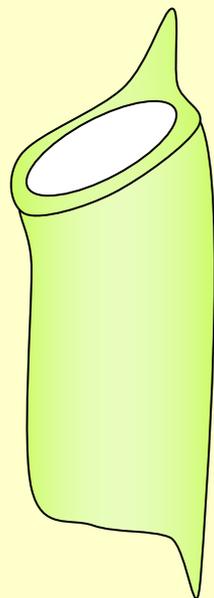
木って？ 木って？

死んで機能する



形成層細胞

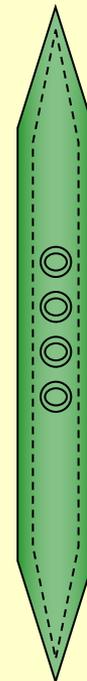
永遠の命



道管要素



木繊維



仮道管

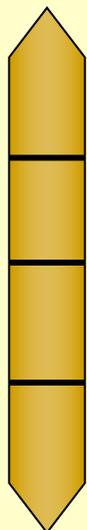
1か月の命

すばやく分化して
細胞死(Pro-
grammed cell
death)を迎える

細胞死すること
によって機能を発揮
する

3~20年の命

多様な機能を持つ
心材成分を合成する



柔細胞

細胞生存率



形成層 100%

細胞分裂し、木の細胞を作っている。

辺材 5~10%

水分通道し、樹体を支えている。

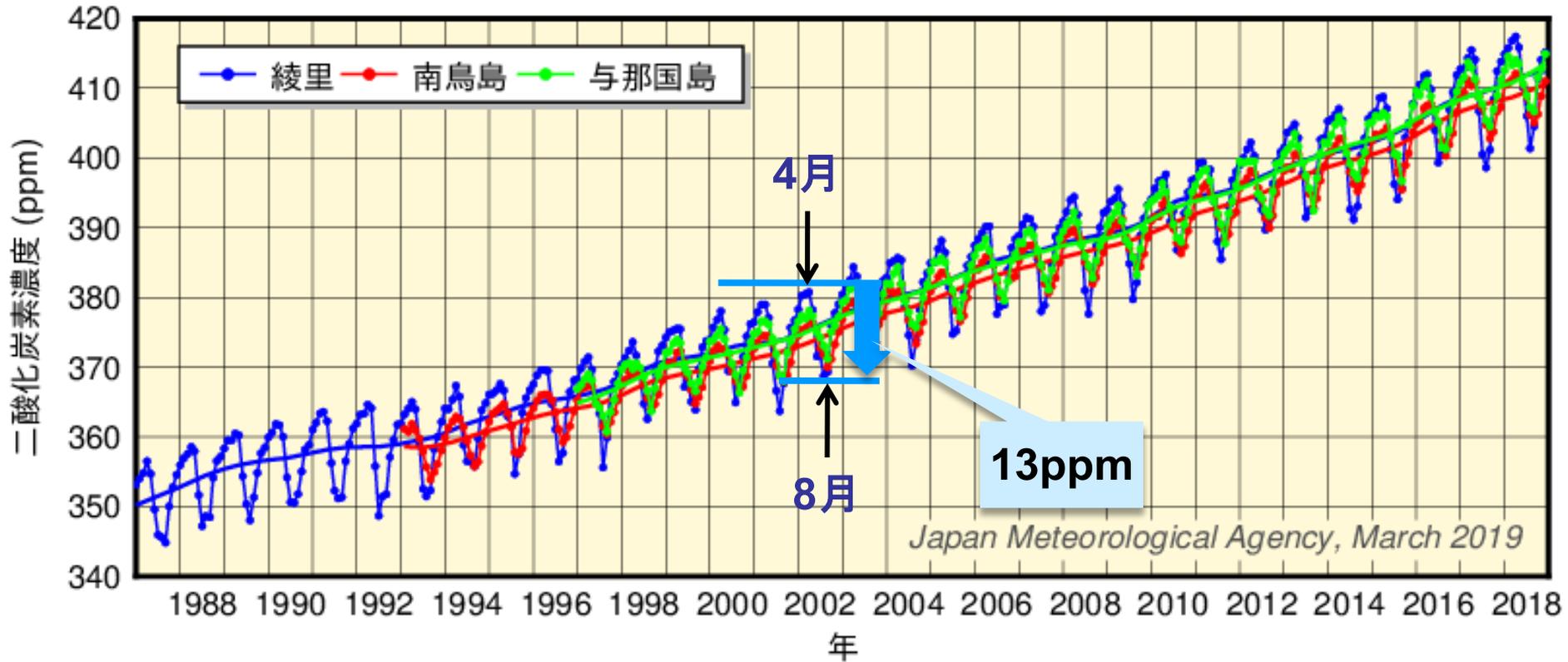
心材 0%

水分の通道はなく、樹体を支えている。

90年生のスギ

木は地球環境に貢献する

日本における二酸化炭素濃度の変動



Japan Meteorological Agency, March 2019

https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html

4~8月に二酸化炭素濃度は減少する



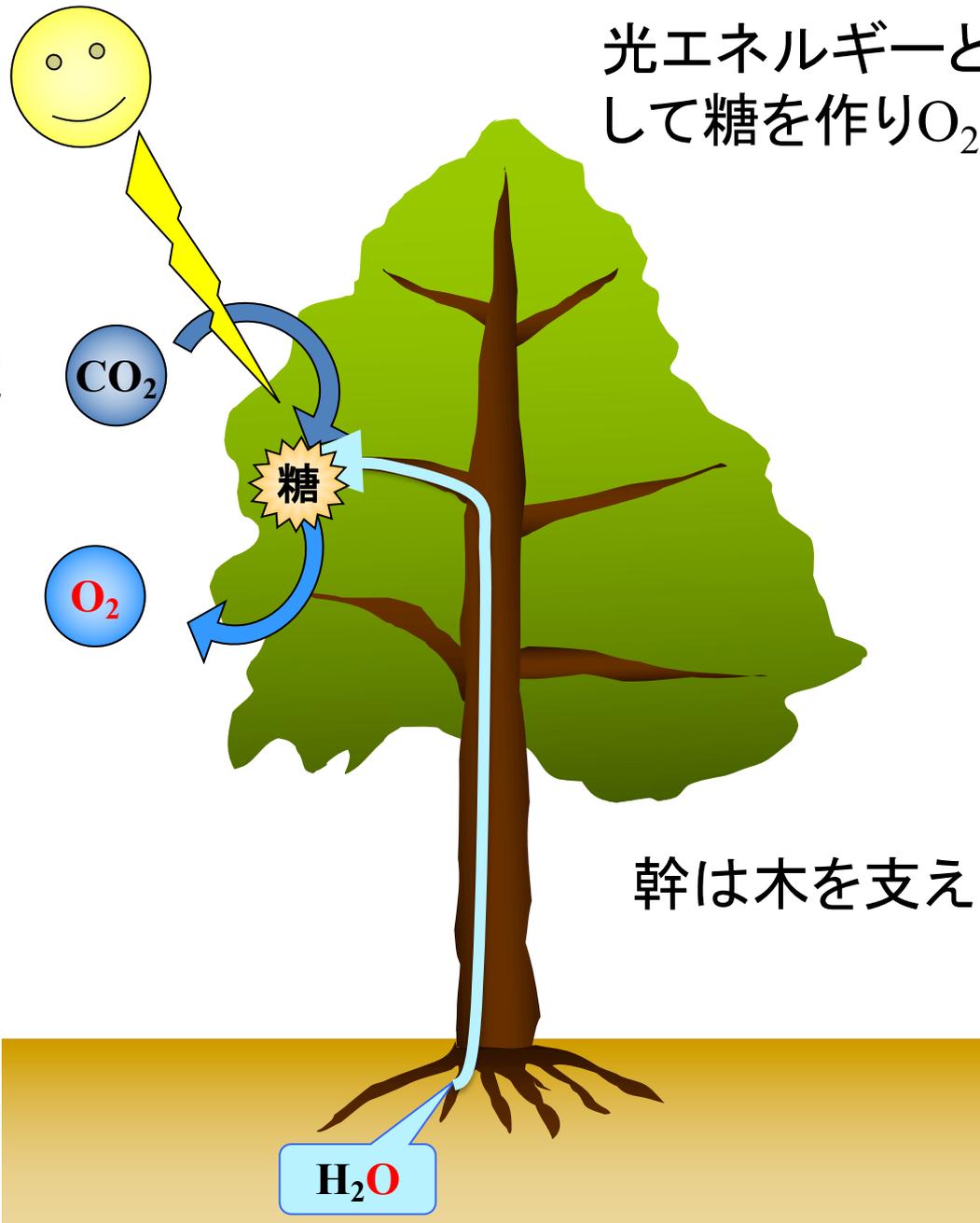
植物活動の影響

光合成

光エネルギーと CO_2 、水を利用して糖を作り O_2 を放出する

CO_2 を固定

O_2 を発生



幹は木を支え、水を通す

材料に求められる条件

持続可能な社会づくりに貢献

環境に負荷をかけない

温室効果ガスを出さない

廃棄が容易

限りある資源を有効に使う

化石資源からの脱却

再生可能な資源の活用

機能性、耐久性に優れる

生体適合性

木の短所は長所に

- 燃えることで容易に廃棄できエネルギーを取り出せる
- 腐ることで環境に負荷なく廃棄できる
- 変形するのは湿度調節の証

針葉樹・広葉樹

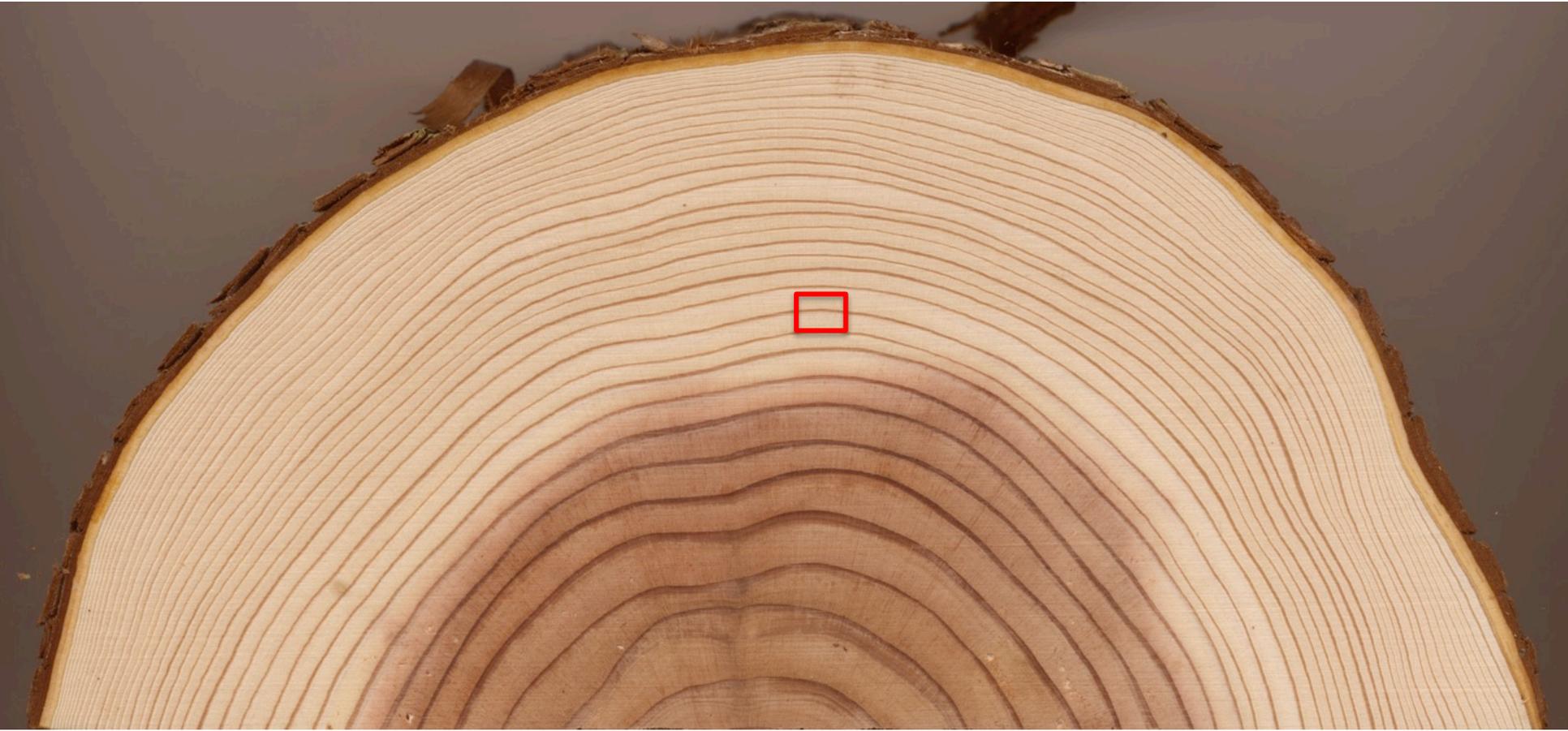
針葉樹と広葉樹の違い

道管の有無

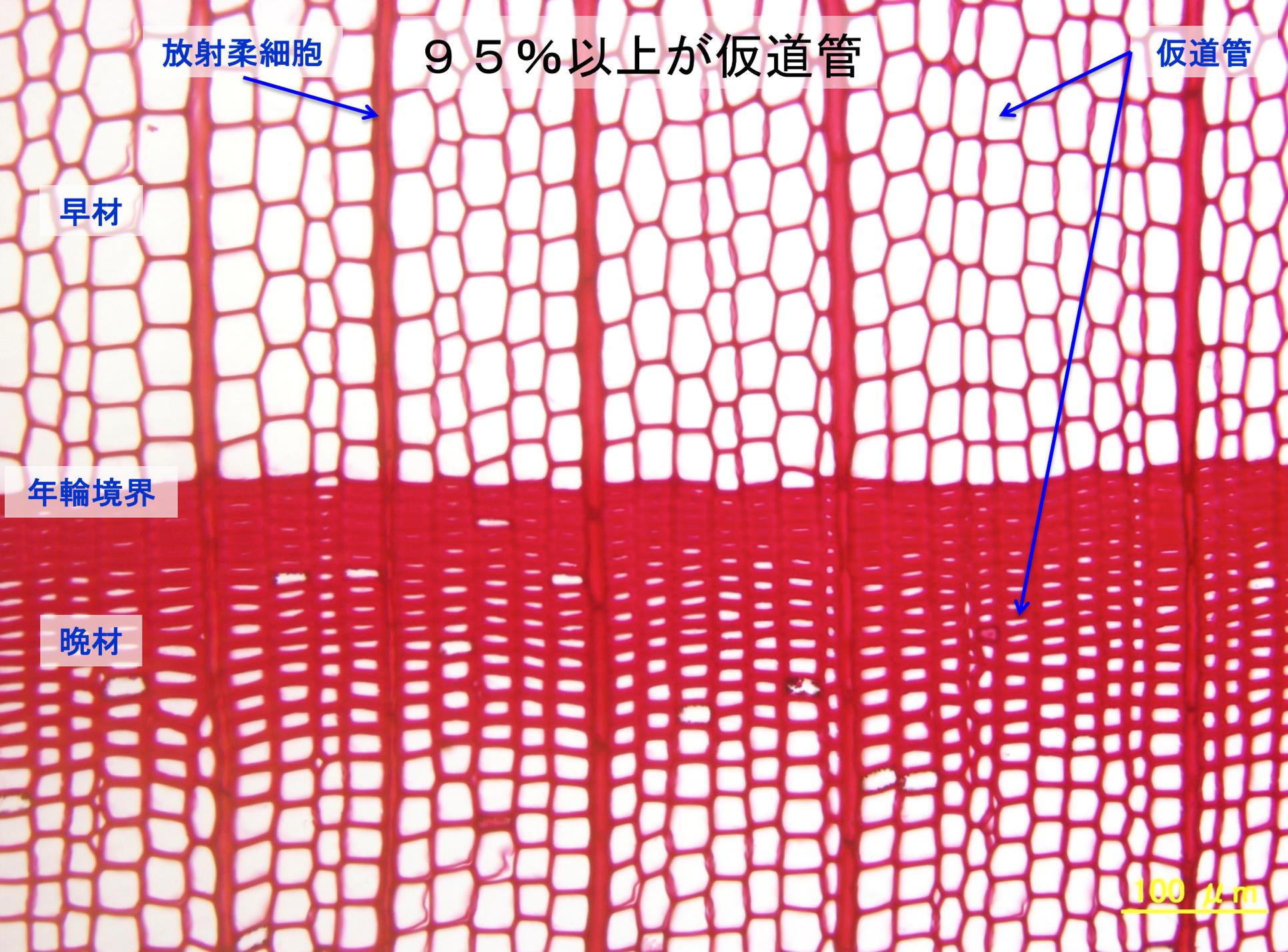
針葉樹材：無

広葉樹材：有

針葉樹



スギの円盤



放射柔細胞

95%以上が仮道管

仮道管

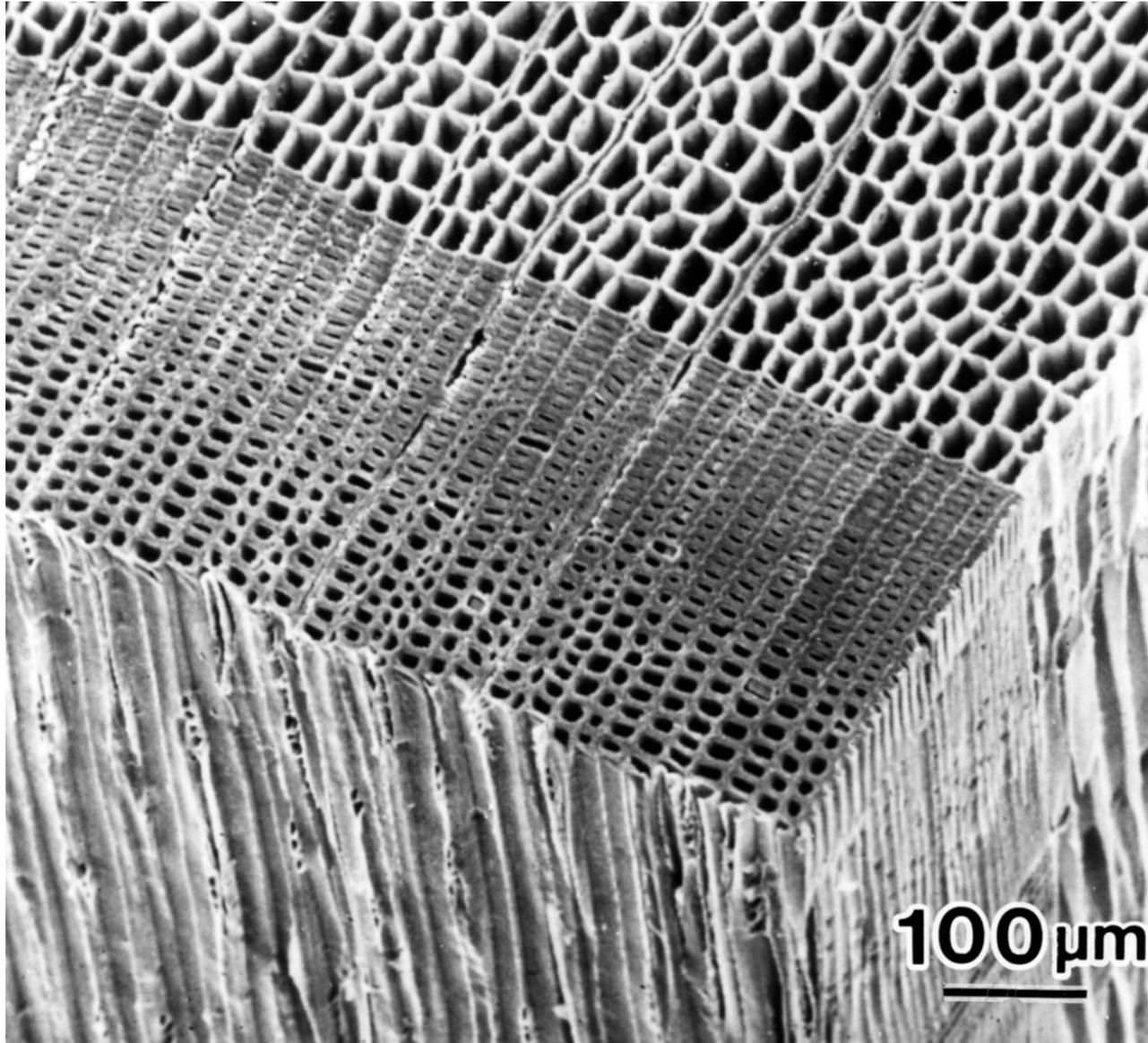
早材

年輪境界

晩材

100 μ m

中空の細胞の集まり



木が乾燥すると

断面はハニカム構造



丈夫さを与える

中空の構造



断熱性に優れた材料
(木はあたたかい)

スギの走査型電子顕微鏡写真(写真提供:佐伯浩氏)

針葉樹木部細胞の構成要素比率

樹種	仮道管	軸方向 柔細胞	放射 柔細胞	樹脂道
モミ	93.9	0.3	5.8	
カラマツ	95.1		4.6	0.3
アカマツ	95.9		3.4	0.7
スギ	97.2	0.8	2.0	
ヒノキ	97.1	0.6	2.3	

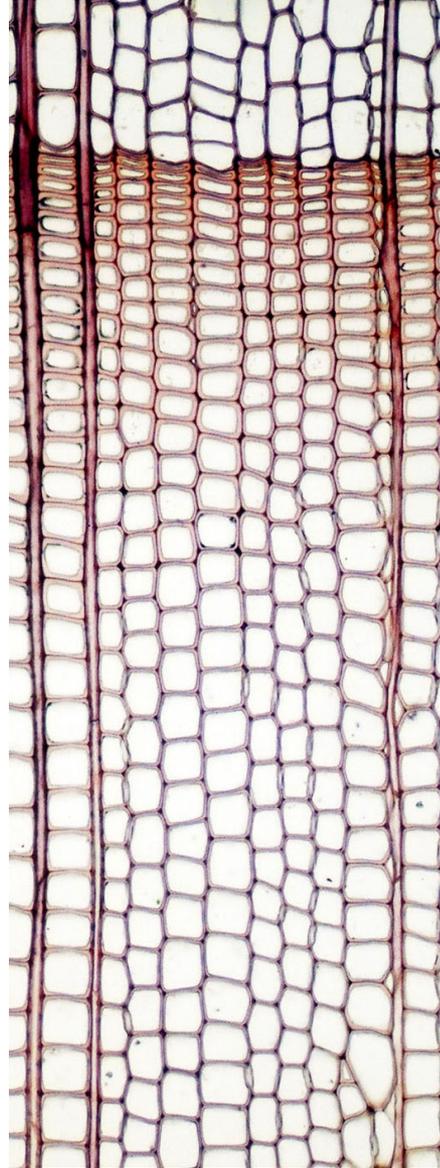
年輪の見え方は晩材の細胞壁厚さによる



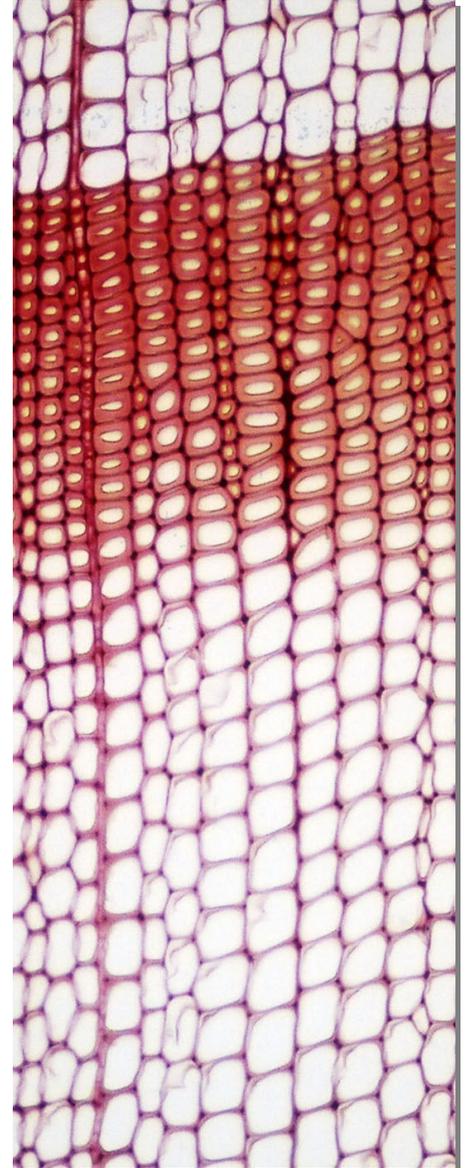
ヒノキの木口面



カラマツの木口面



ヒノキの横断面切片

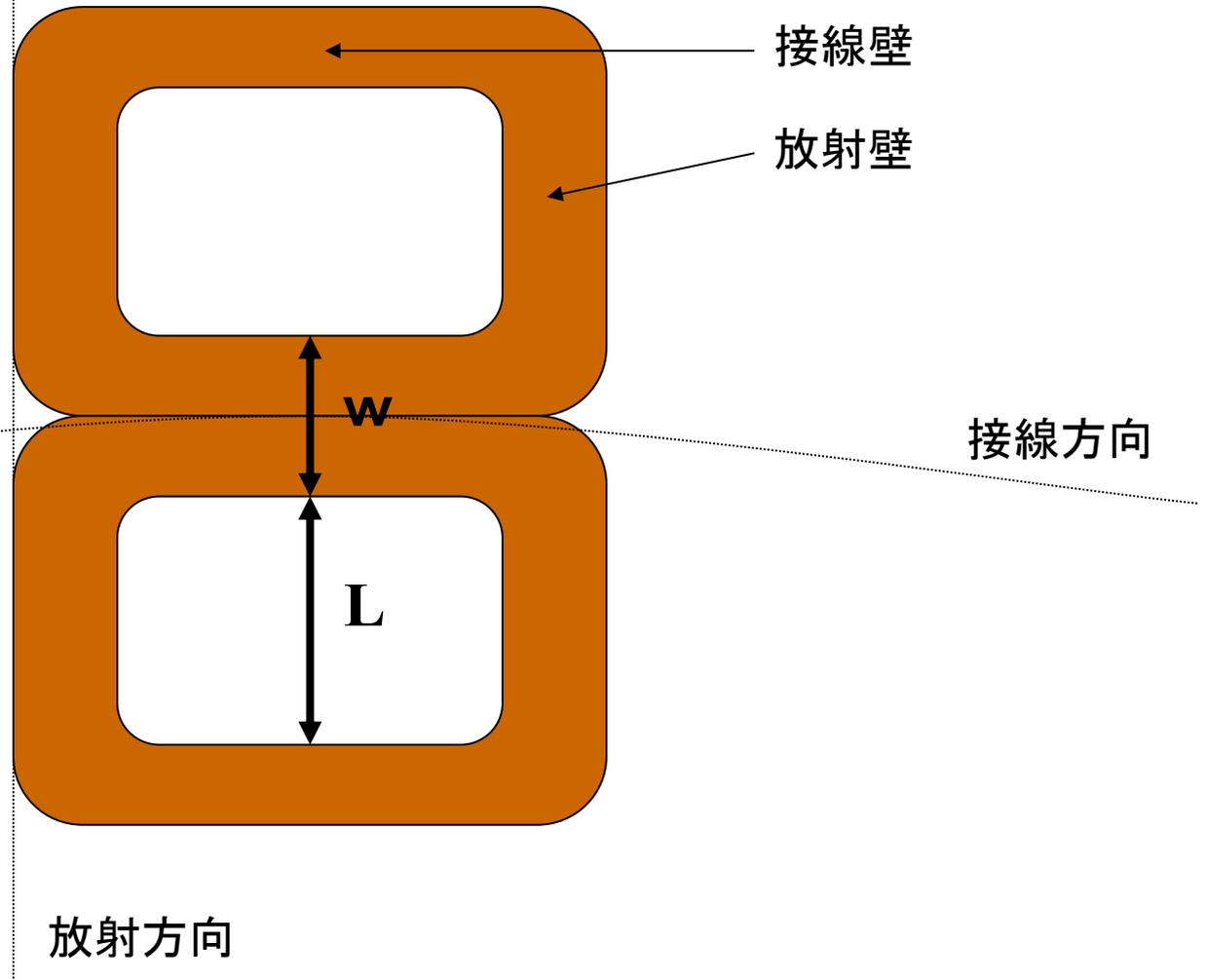


カラマツの横断面切片

木口面写真(森林総研HPより)

早材と晩材の境界は、Morkの定義による

$L/w \leq 2$ L: 仮道管の内腔径、w: 隣接した細胞壁の二重の接線壁厚さ



針葉樹材の特徴

- 細胞の配列が規則的
- 細胞壁が薄い
- 空隙が多い

- 割裂性が良い
- 軽い
- 柔らかい
- あたたかな触感

広葉樹



ミズナラの円盤

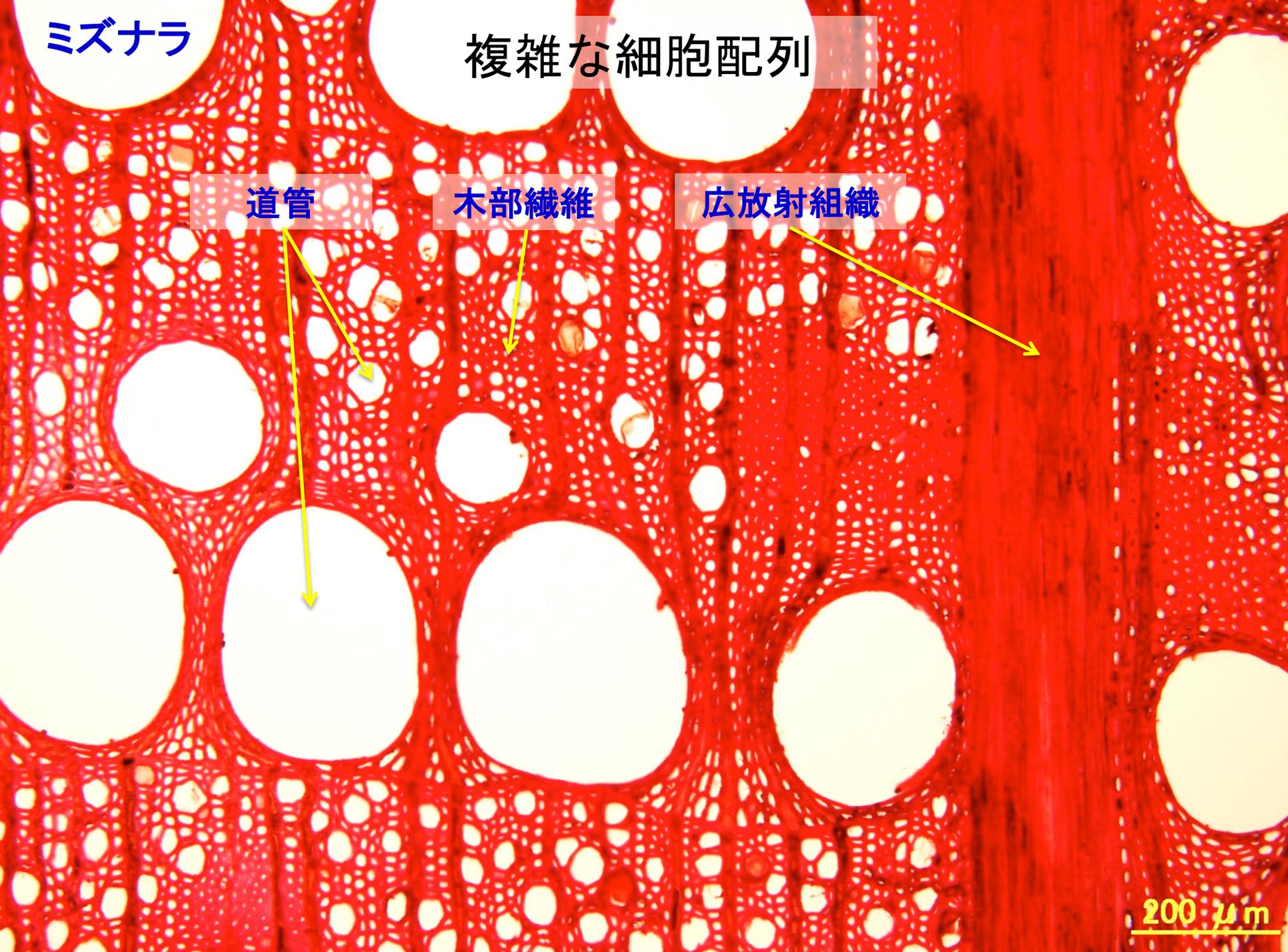
ミズナラ

複雑な細胞配列

道管

木部繊維

広放射組織



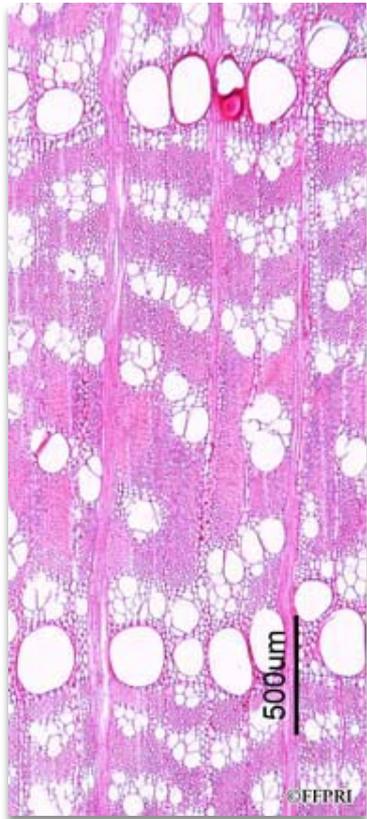
200 μ m

道管の配列

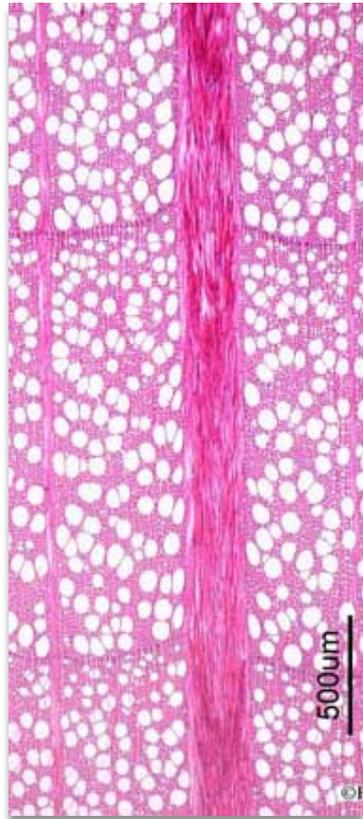
広葉樹を木口面で観察すると樹種により特徴的な管孔配列を示す。

配列によって

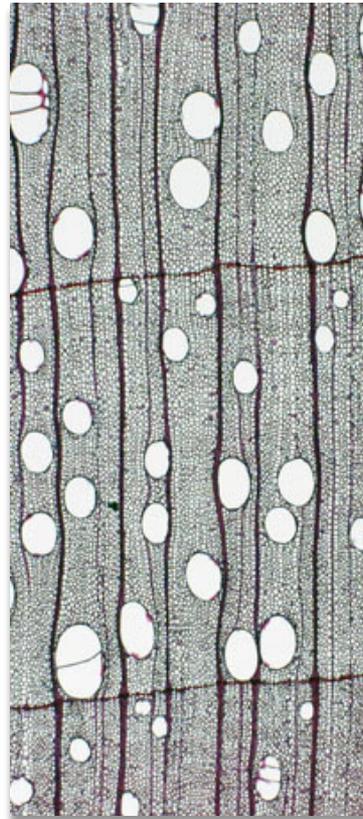
①環孔材、②散孔材、③半環孔材、④放射孔材、⑤紋様孔材 に分けられる。



環孔材
(ケヤキ)



散孔材
(ブナ)



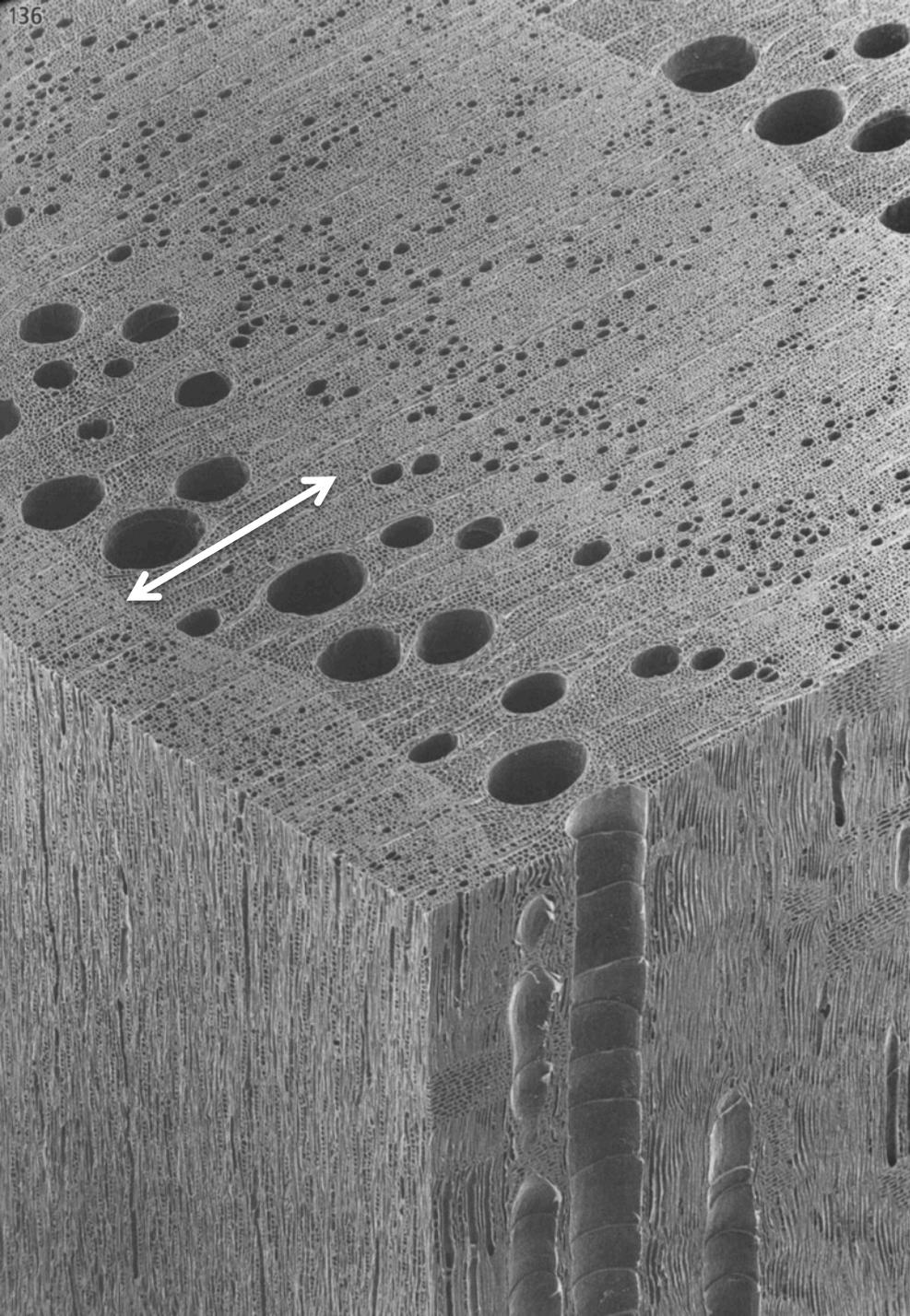
半環孔材
(オニグルミ)



放射孔材
(シラカシ)



紋様孔材
(ヒイラギ)

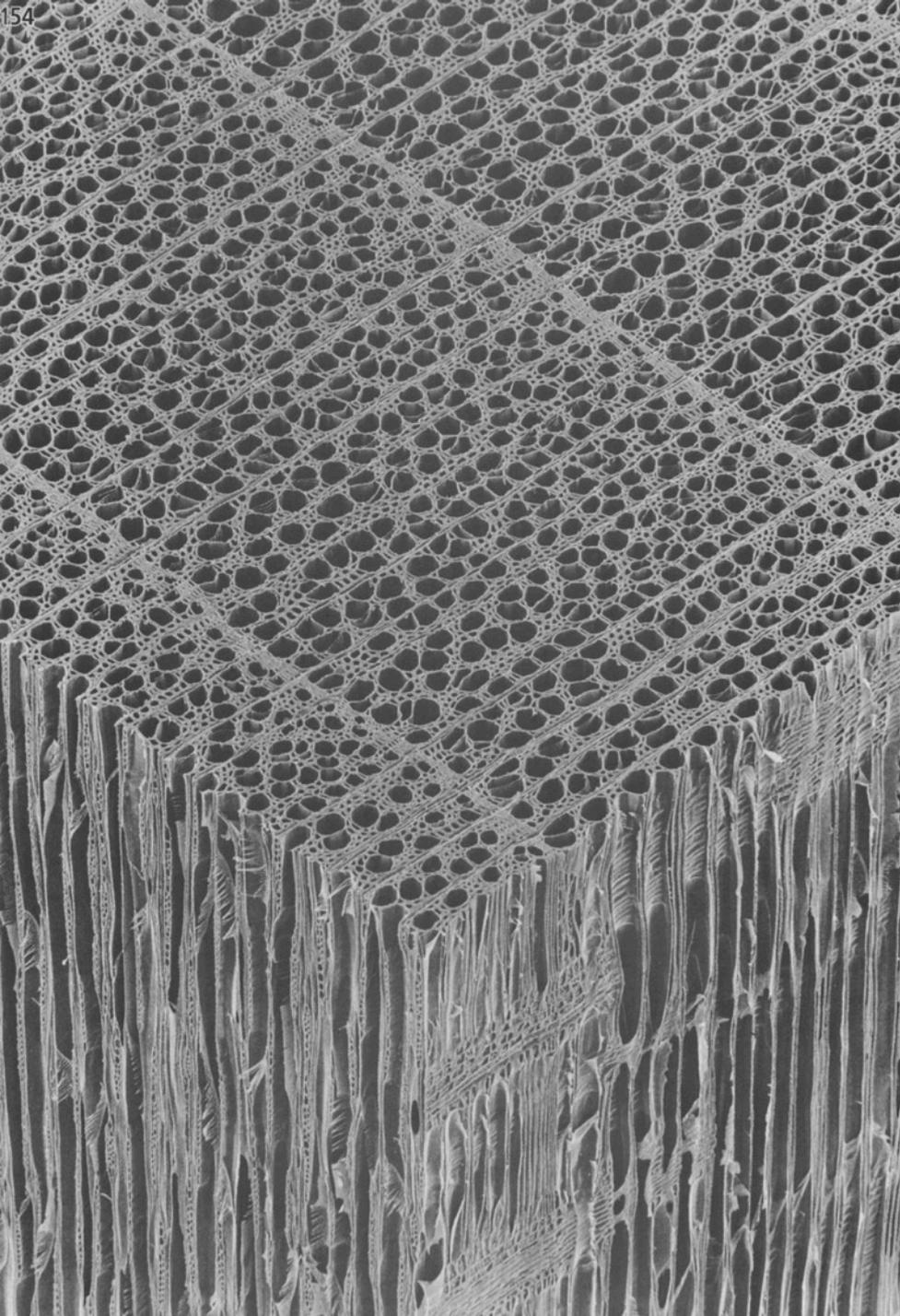


環孔材

年輪の初めに直径が著しく大きな道管が年輪界にそって並んでいる材

温帯に生息する落葉性の樹木に多い

ヤチダモの走査電子顕微鏡写真
(北海道大学 大谷諄博士提供)



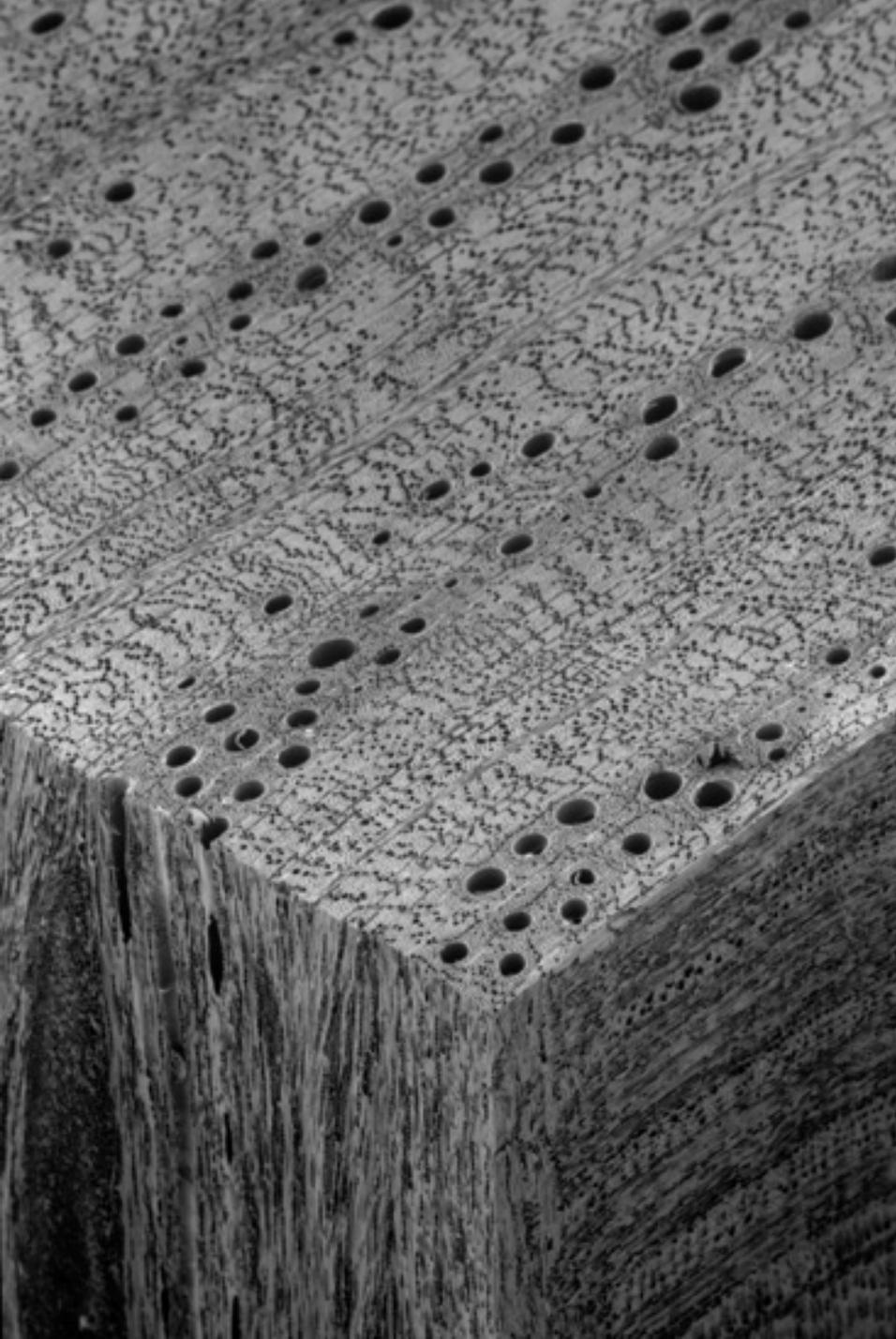
散孔材

年輪全域にわたって大きさが
ほぼ同じ道管が均等に分布す
る材

日本産材に最も多い配列形式

熱帯材は、ほとんどが散孔材

シナノキの走査電子顕微鏡写真
(北海道大学 大谷諄博士提供)



放射孔材

孤立した道管が放射状に配列している材

日本産材ではカシ類に認められる

シラカシの走査電子顕微鏡写真
(森林総研HPより)

広葉樹木部細胞の構成要素比率

樹種	道管要素	木部繊維	軸方向 柔細胞	放射 柔細胞
クリ	21.7	58.7	13.4	6.2
ケヤキ	14.3	58.5	16.7	10.5
ブナ	41.2	32.1	9.2	17.5
ホオノキ	30.9	59.0	0.5	9.6
ミズナラ	12.6	58.5	16.7	10.5

重い木・軽い木

世界一軽い木



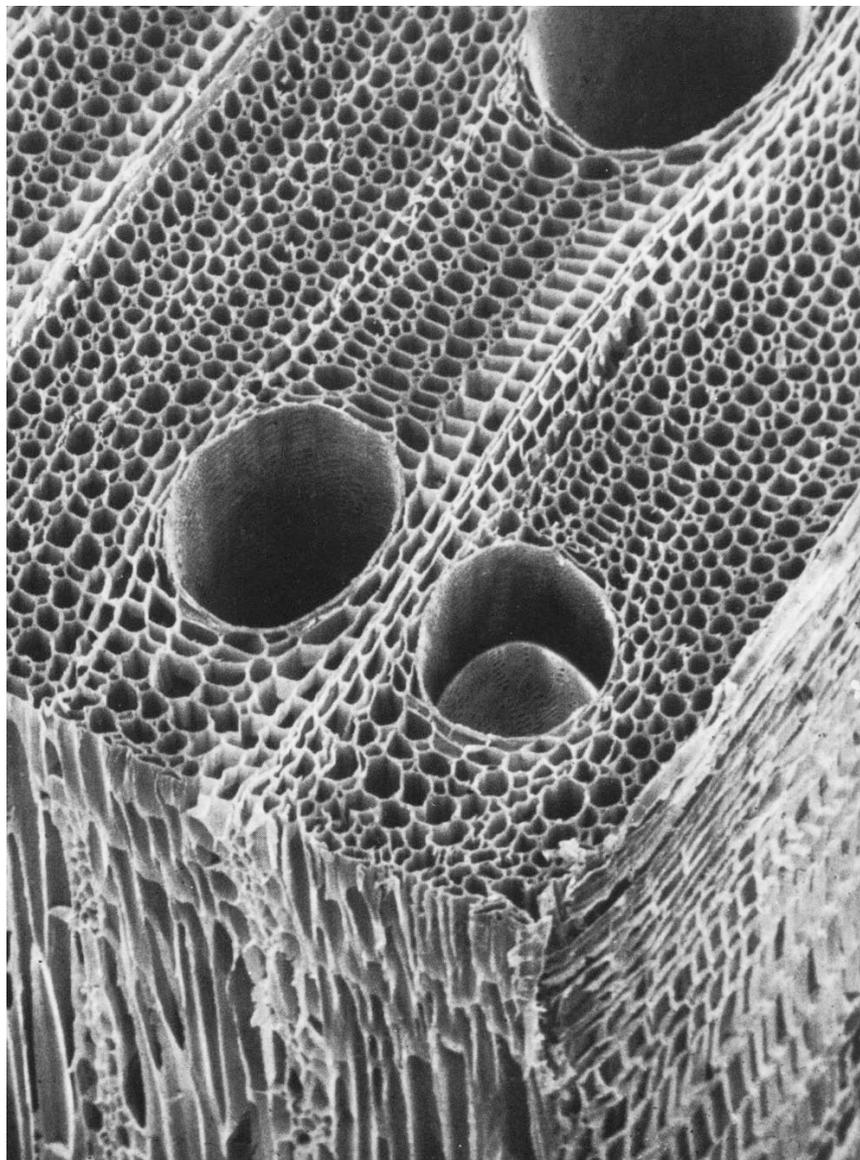
バルサ: 比重 = 0.16

世界一重い木

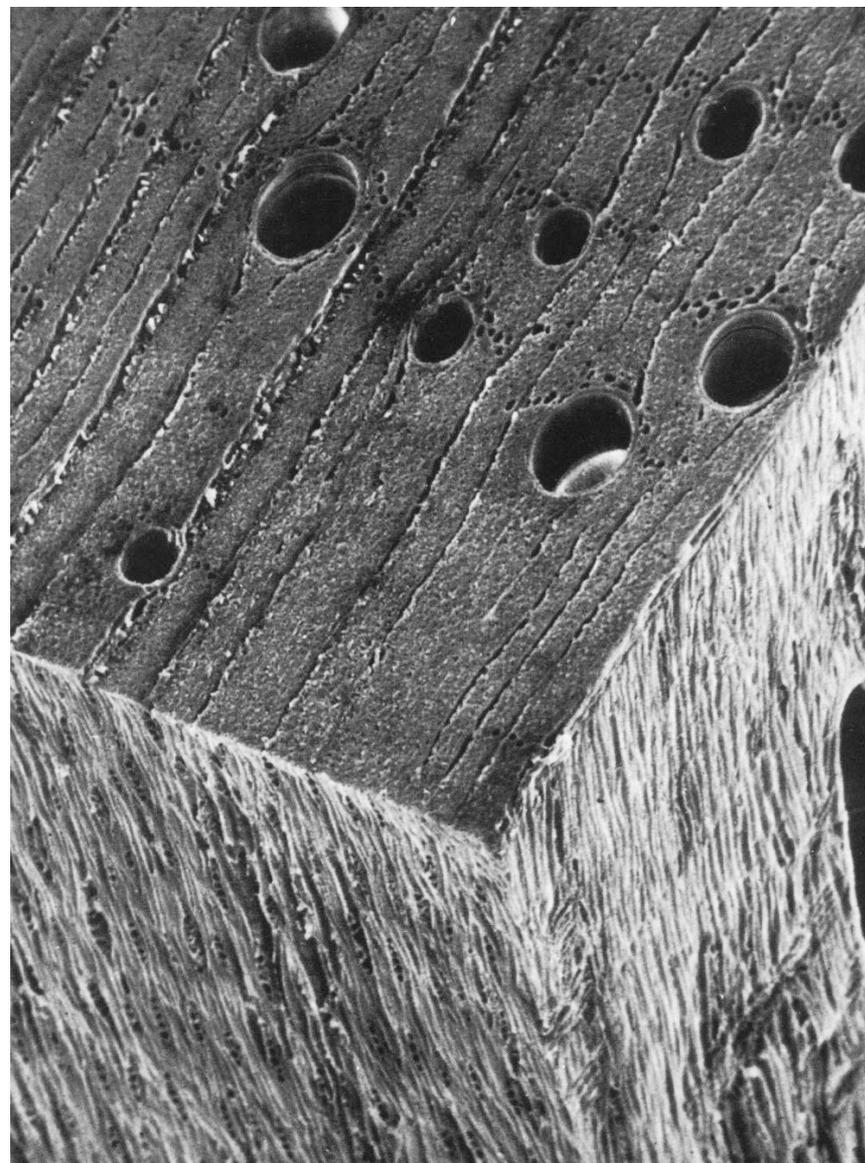


リグナムバイタ: 比重 = 1.24

重い木・軽い木



バルサ: 比重 = 0.16



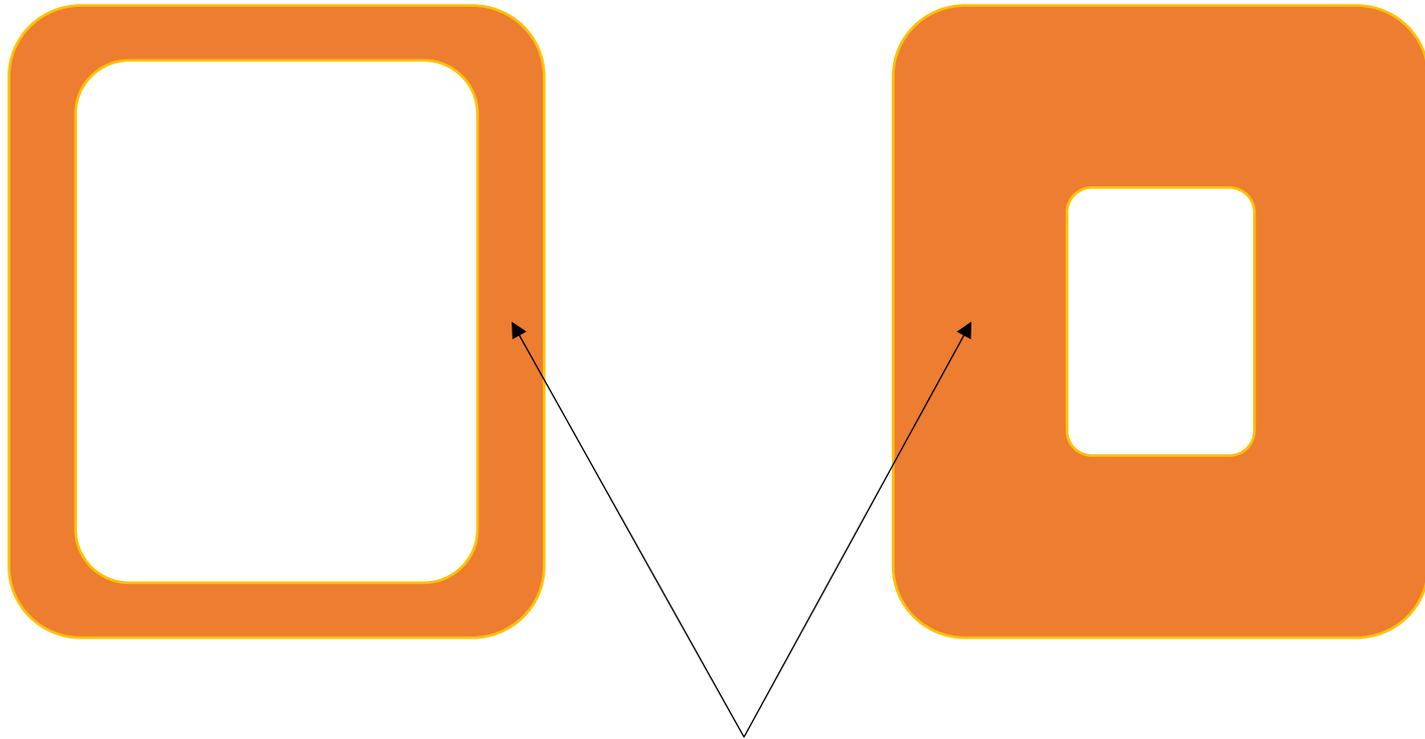
リグナムバイタ: 比重 = 1.24

(写真提供: 佐伯浩氏)

木の重さは細胞壁と空隙の比率で決定される

軽い木

重い木



細胞壁の比重：約 **1.5**

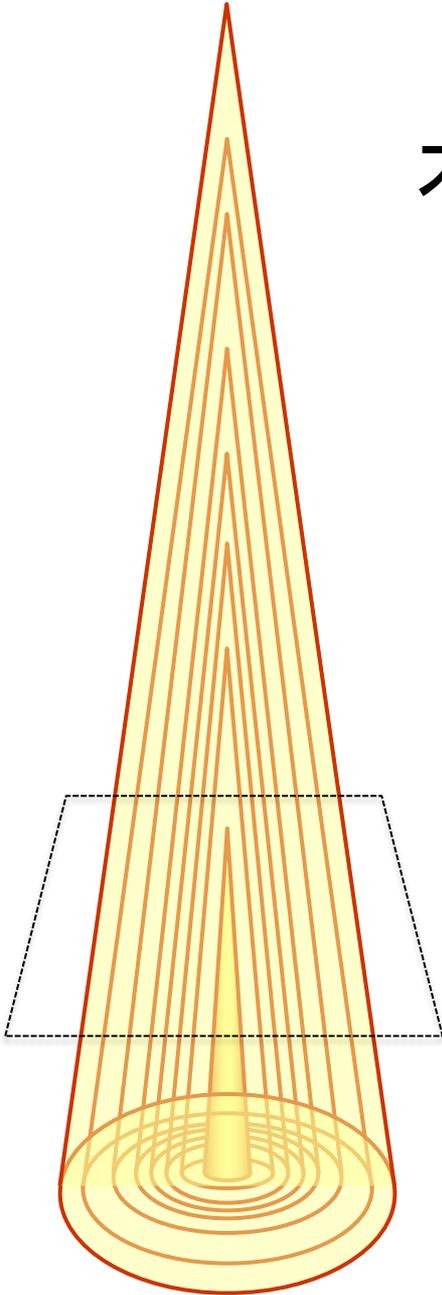
広葉樹材の特徴

- ・ 細胞の種類が多い
 - ・ 細胞の配列はさまざま
 - ・ 細胞の比率はさまざま
 - ・ 細胞壁の厚さはさまざま
-
- ・ 切削面はさまざまな表情
 - ・ 軽い（キリ）～重い（イスノキ）
 - ・ 柔らかい～硬い
 - ・ 適材適所で良さが発揮される

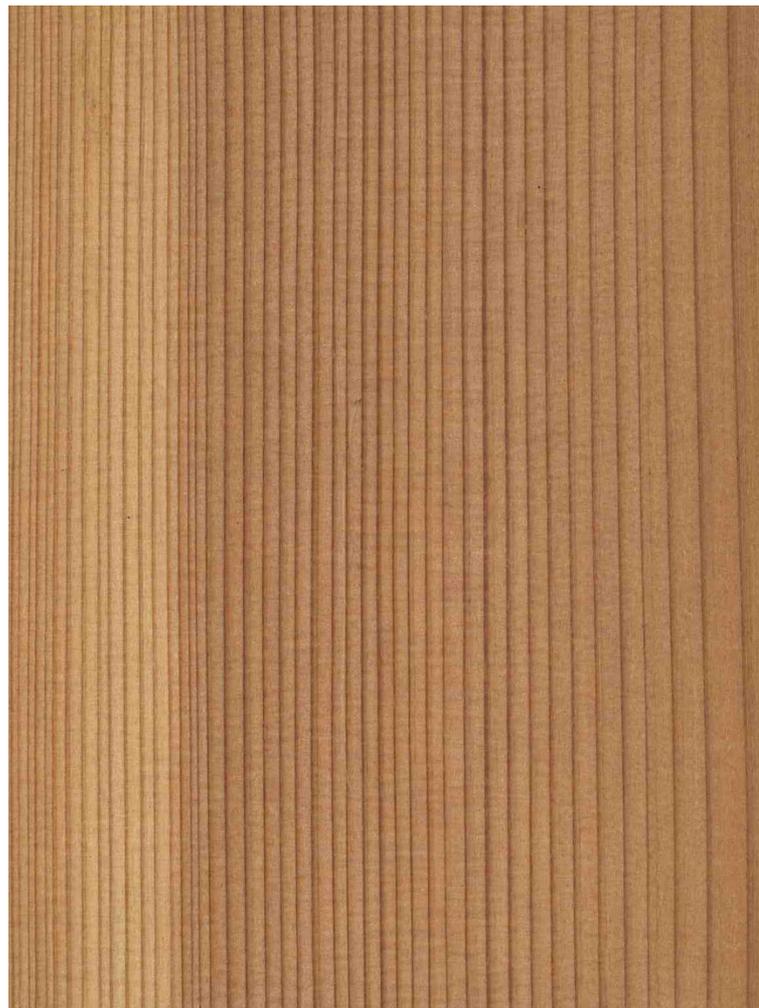
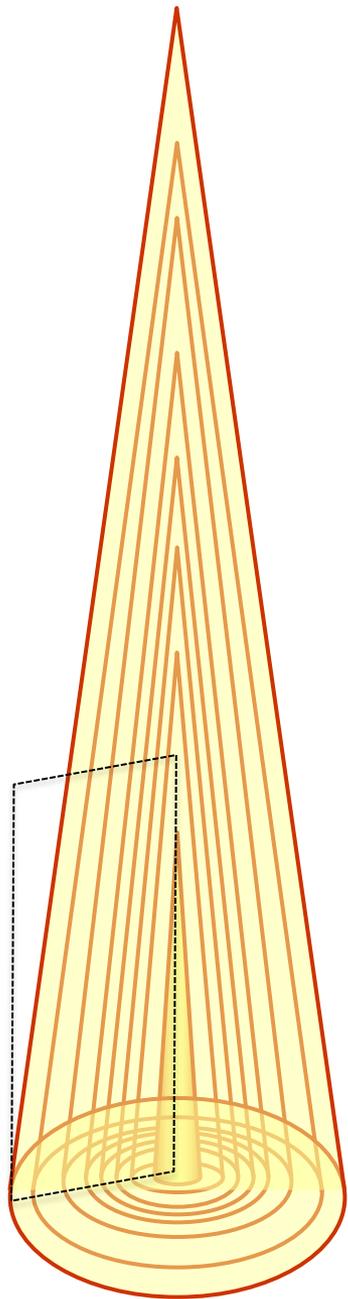
木の表情は唯一無二

木口面

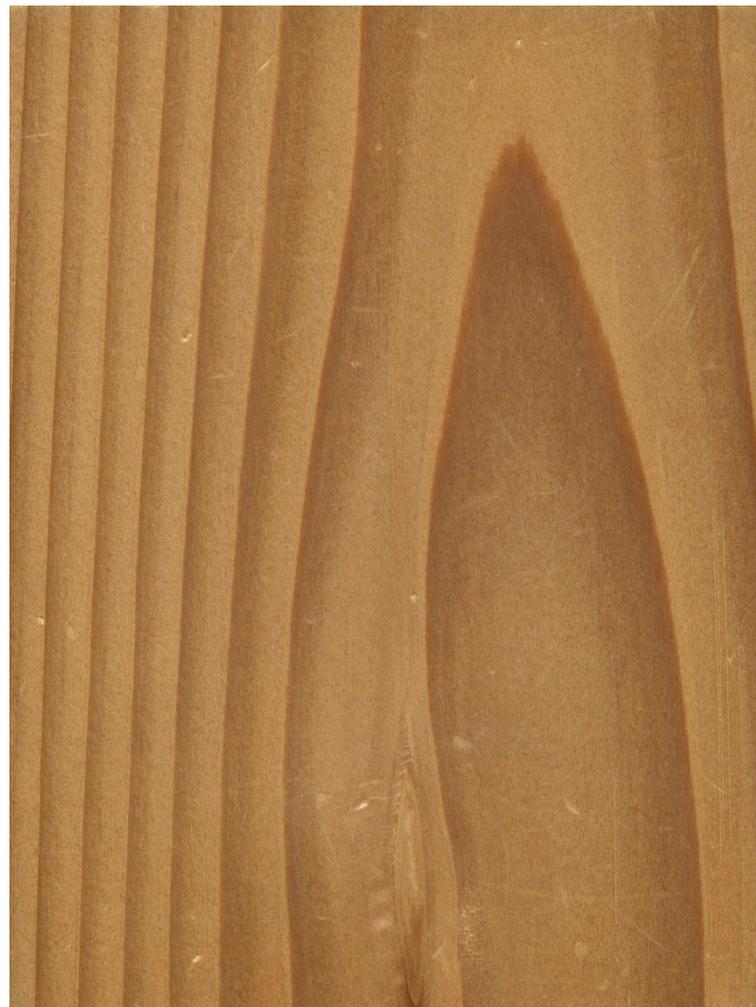
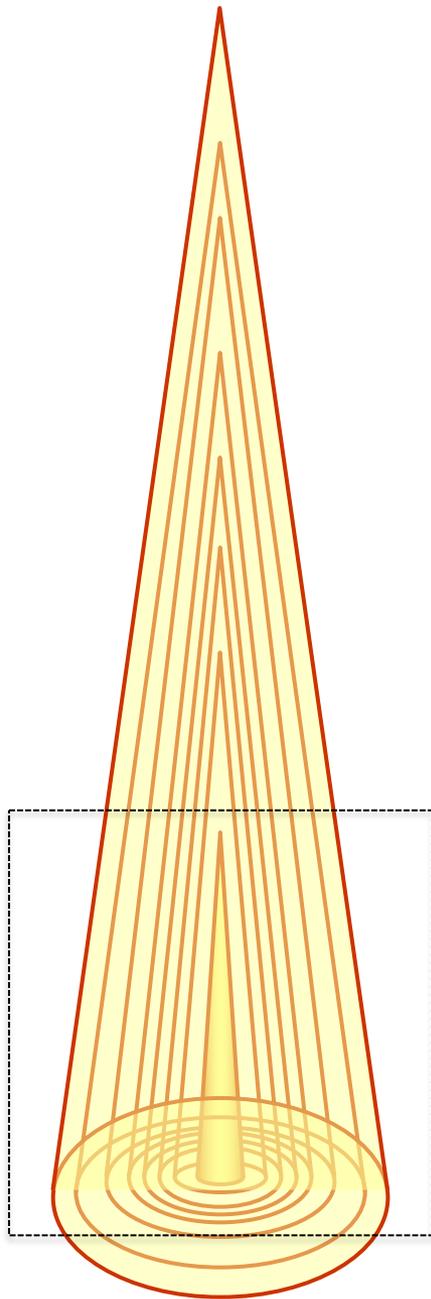
木は円錐を重ねたような構造をしている



まさ目面

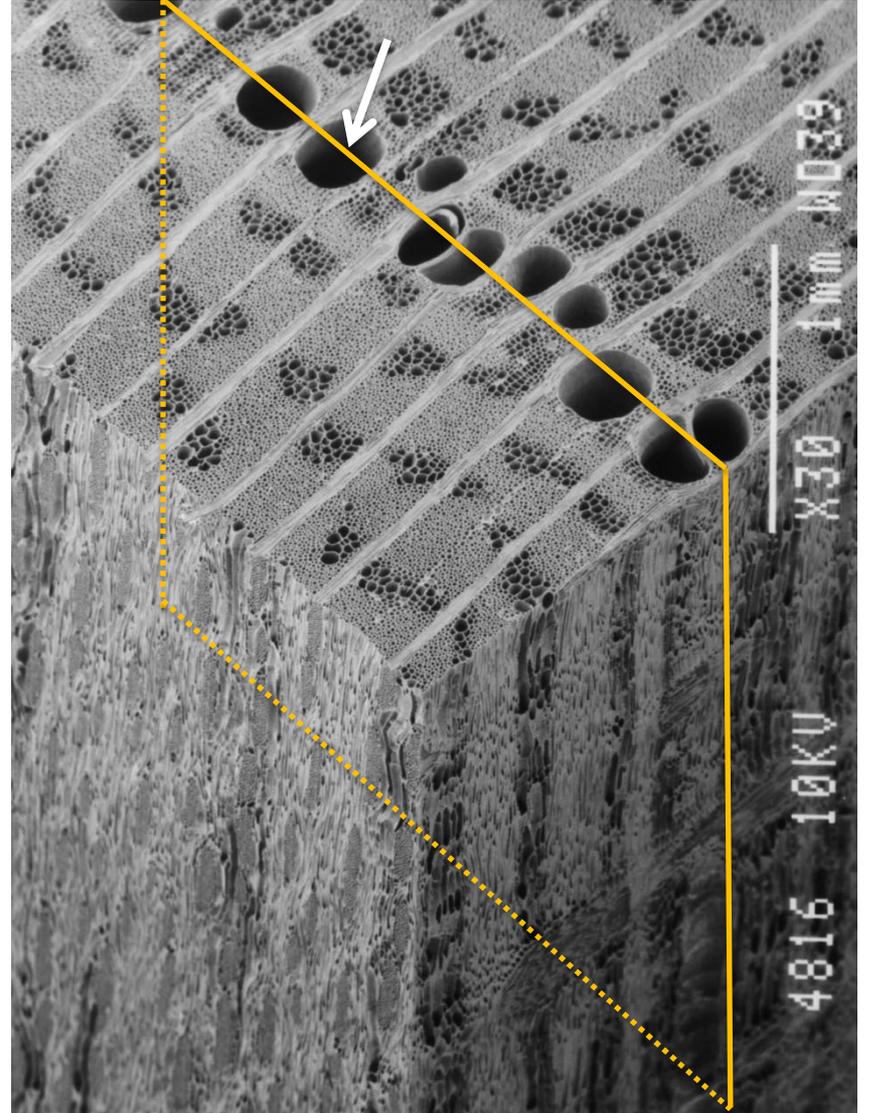
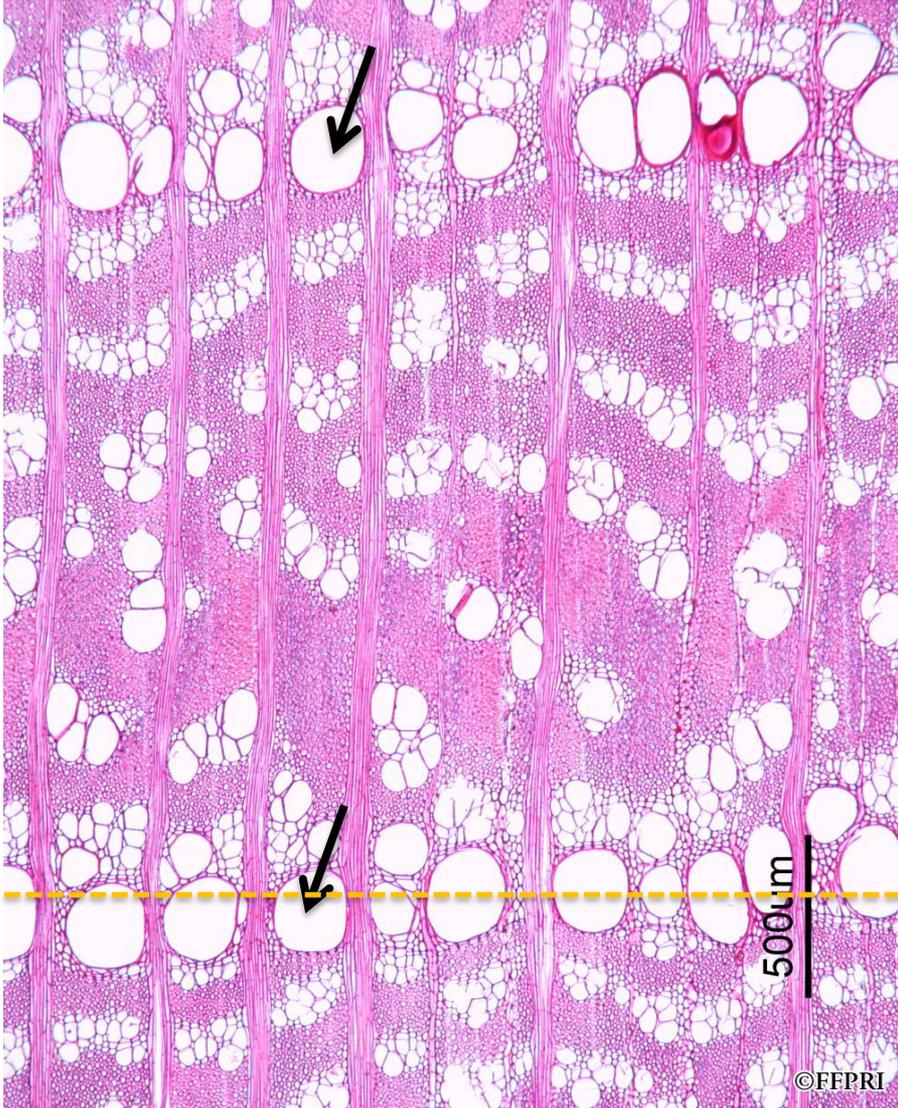


板目面



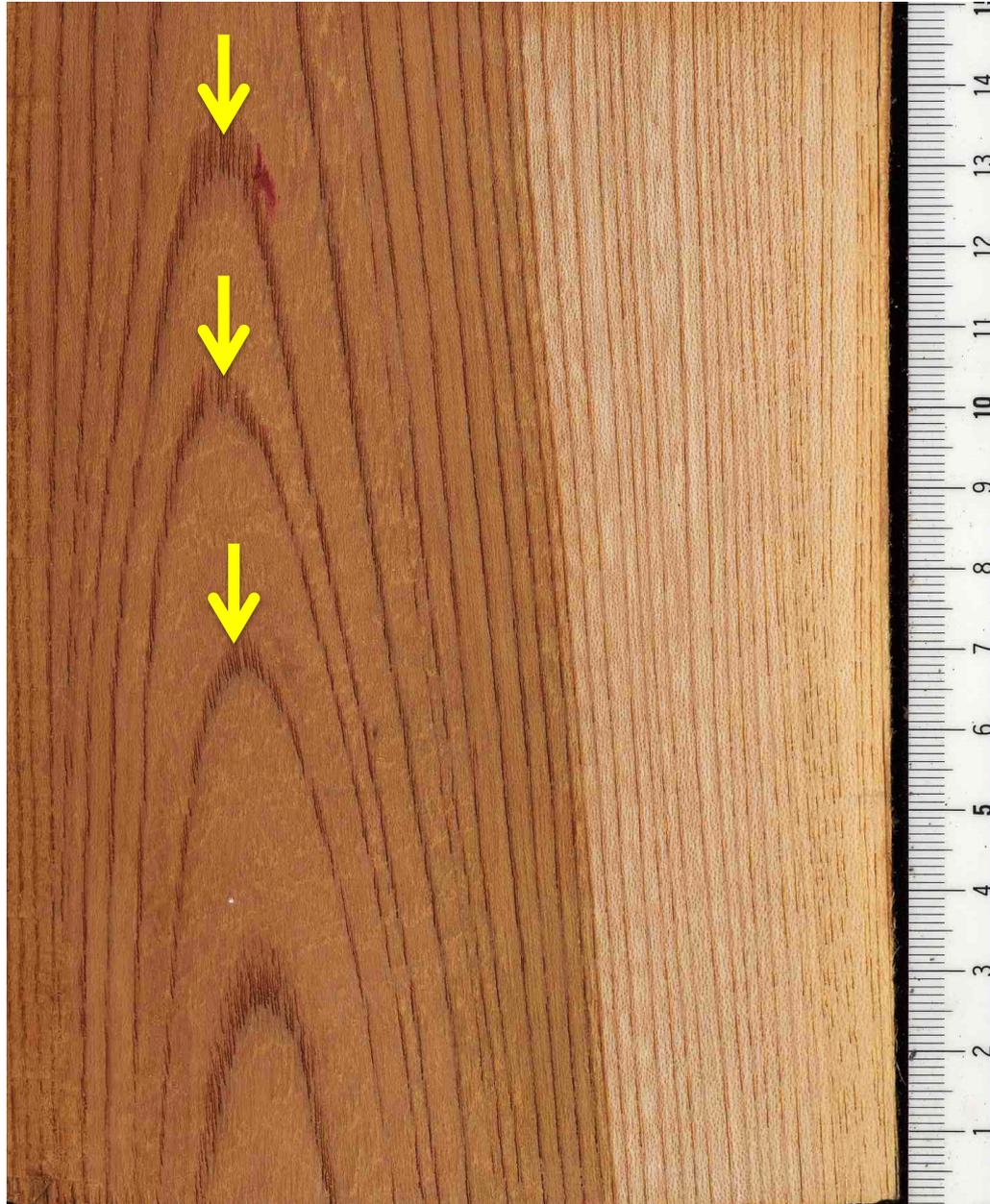
ケヤキ

道管の分布が木の模様を決める

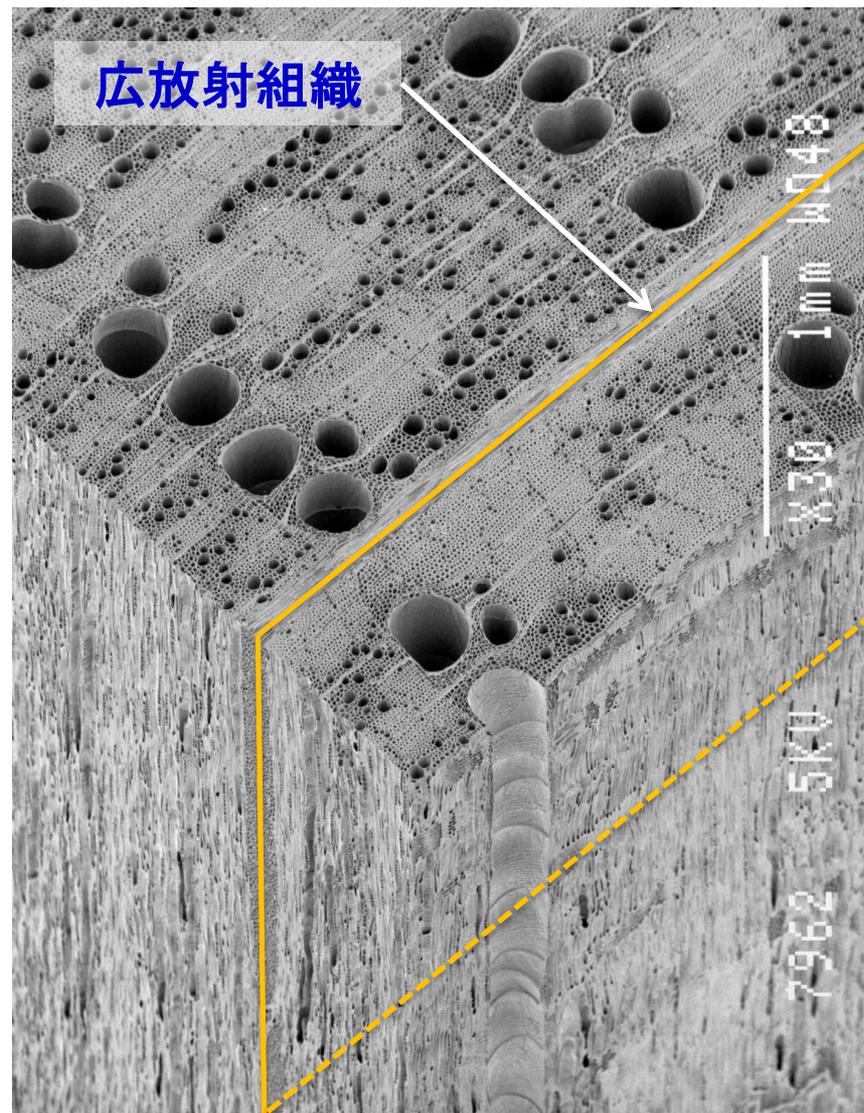
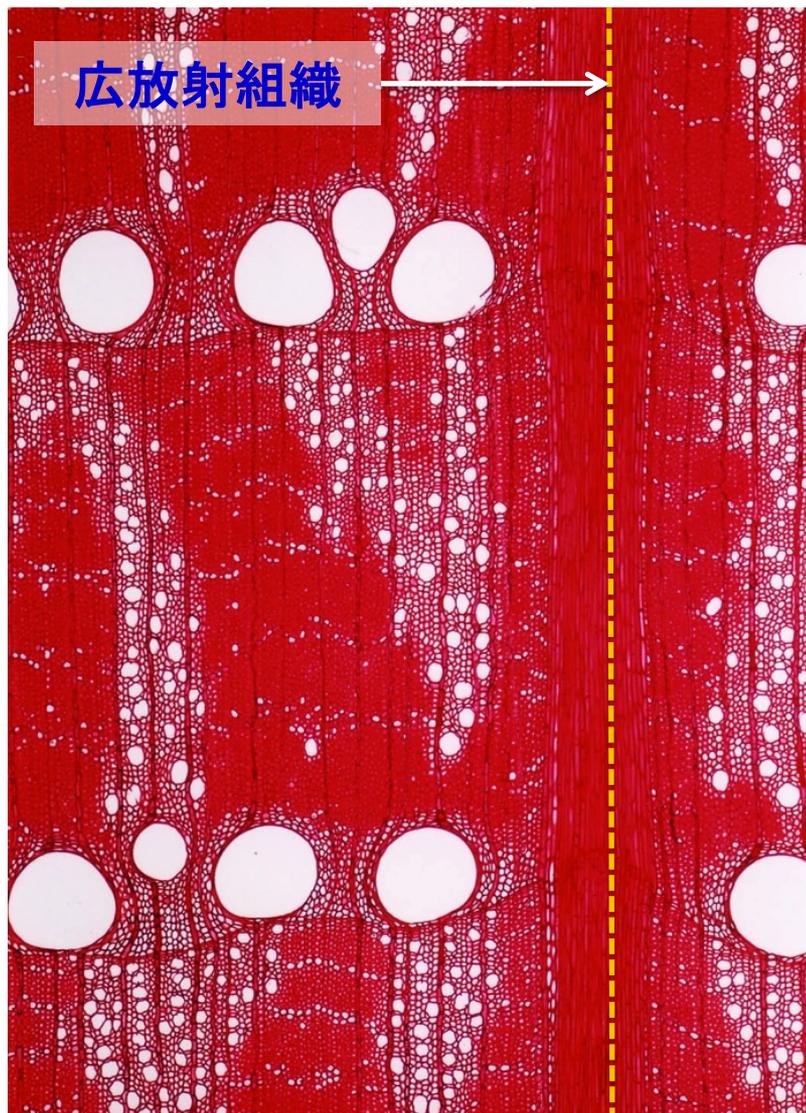


ケヤキ

道管の分布が木の模様を決める



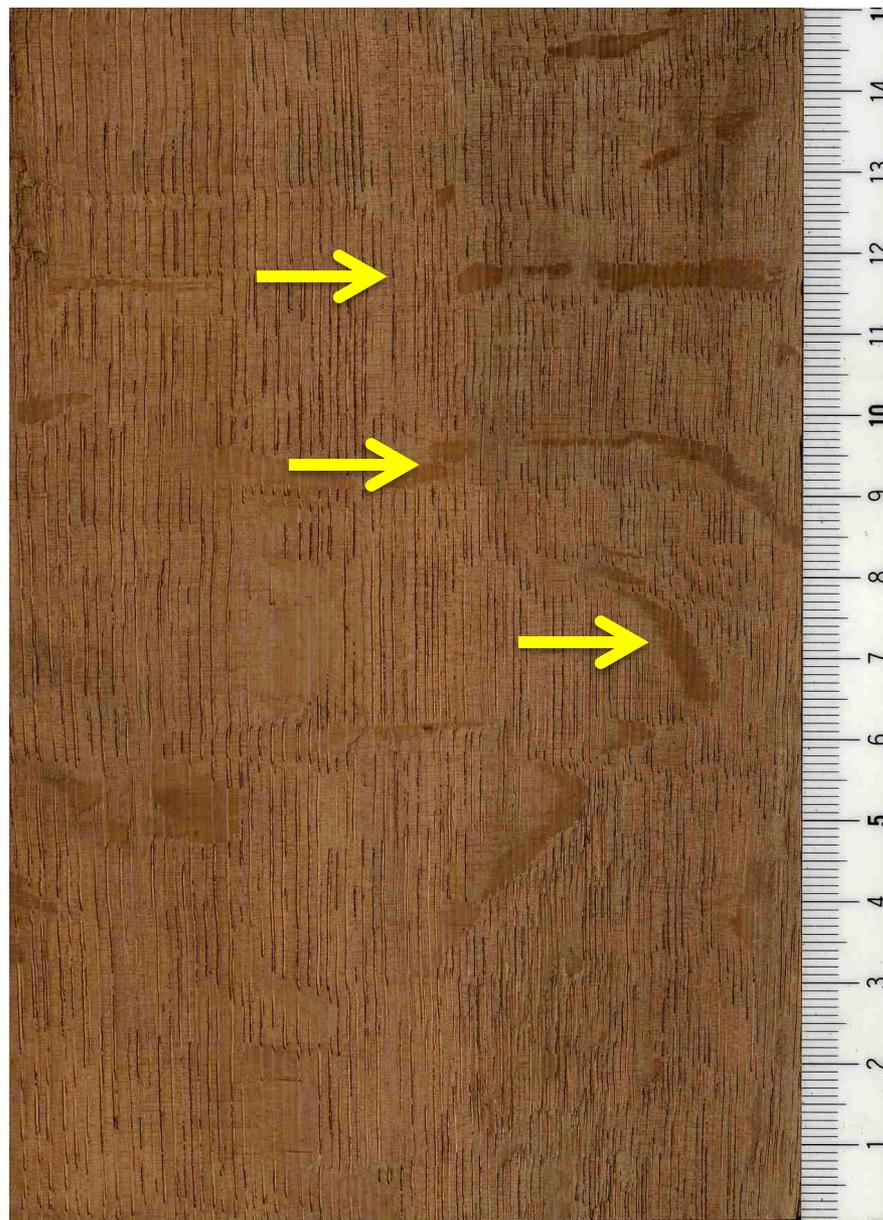
ミズナラ 家具やウィスキー樽の木



ミズナラ

家具やウィスキー樽の木

虎斑は広放射組織



まさ目面

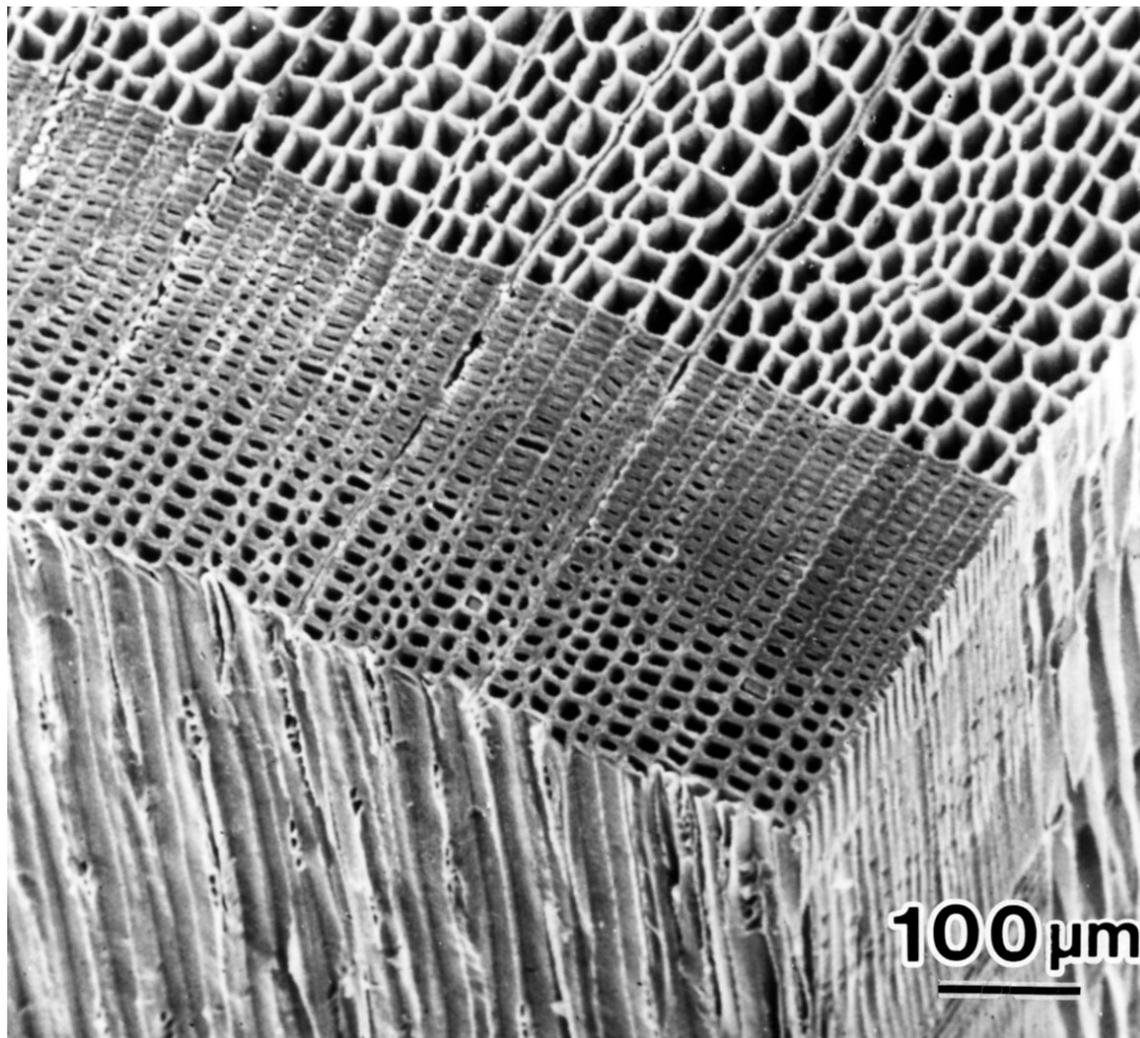
木の表情

木は円錐を重ねたような構造
木の細胞の比率や配列は様々

木は切り方次第で様々な表情を示す
木は唯一無二の材料

木は軽くて強い

木は中空の細胞の集まり



針葉樹材の走査型電子顕微鏡写真

(写真提供:佐伯浩氏)

木が乾燥すると

断面はハニカム構造



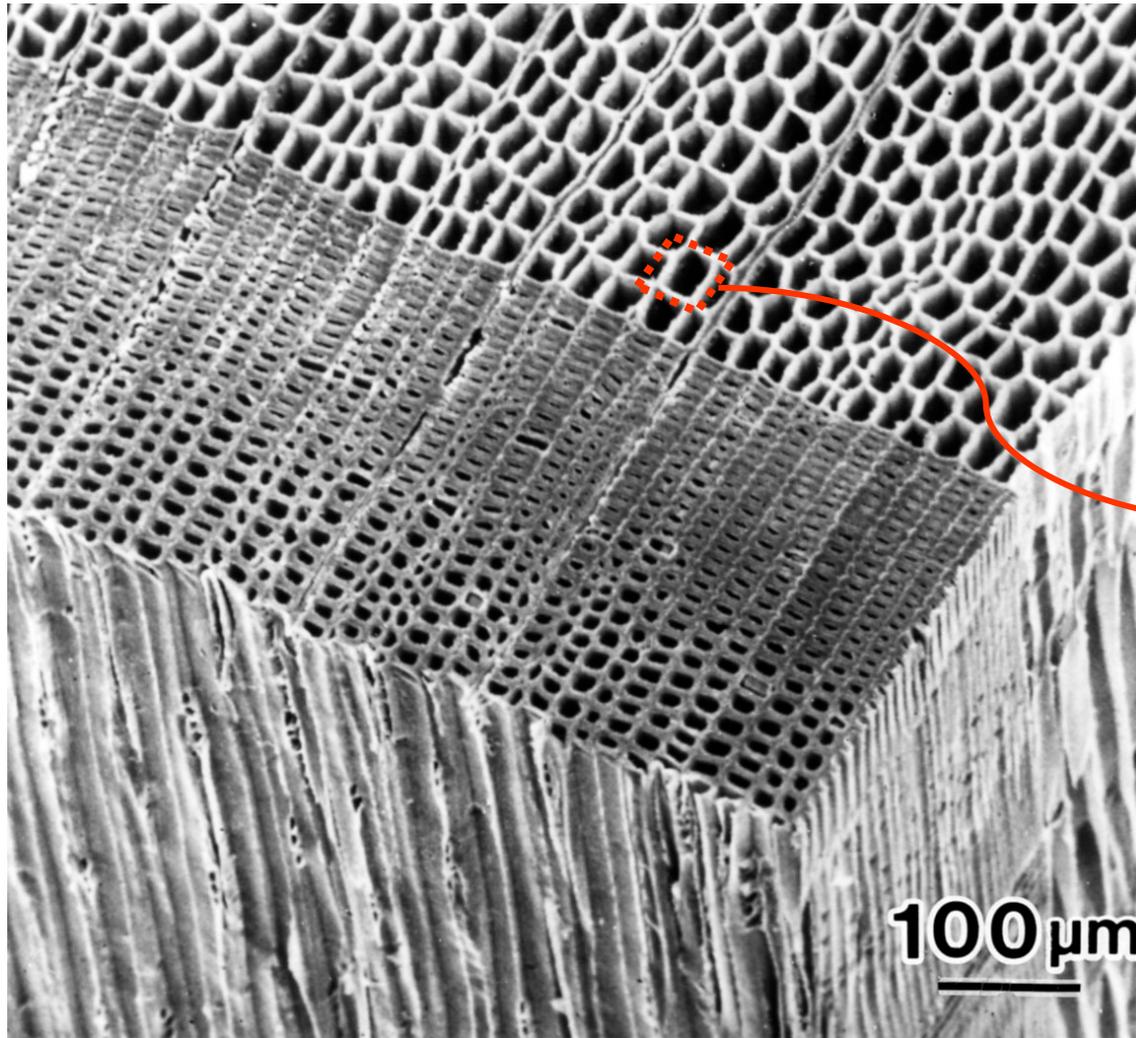
丈夫さを与える

中空の構造



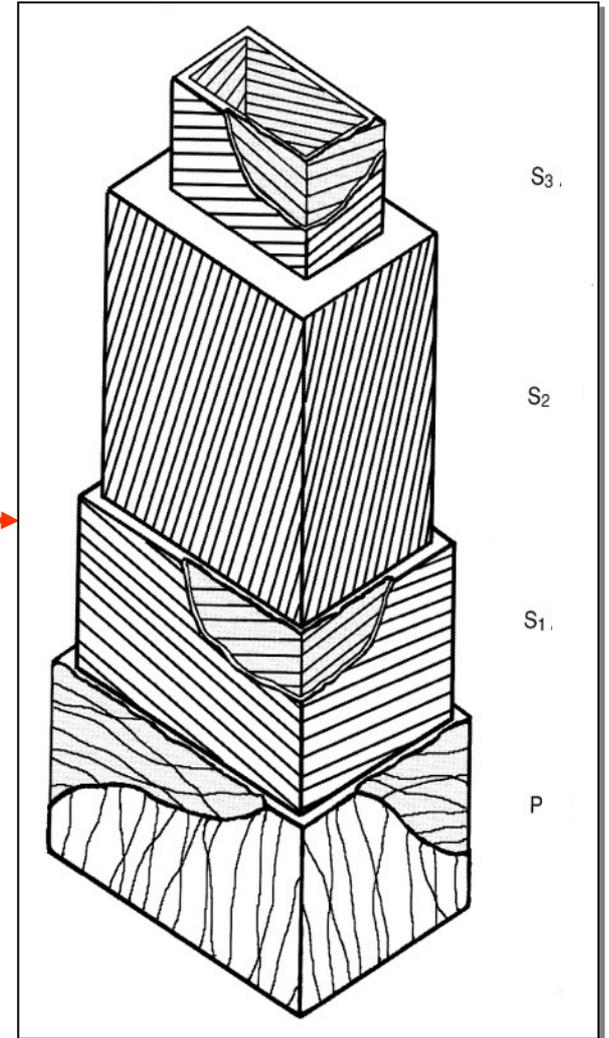
断熱性に優れた材料
(木はあたたかい)

樹木を支える幹の細胞



針葉樹材の走査型電子顕微鏡写真

(写真提供:佐伯浩氏)



細胞壁モデル

(木質の形成より)

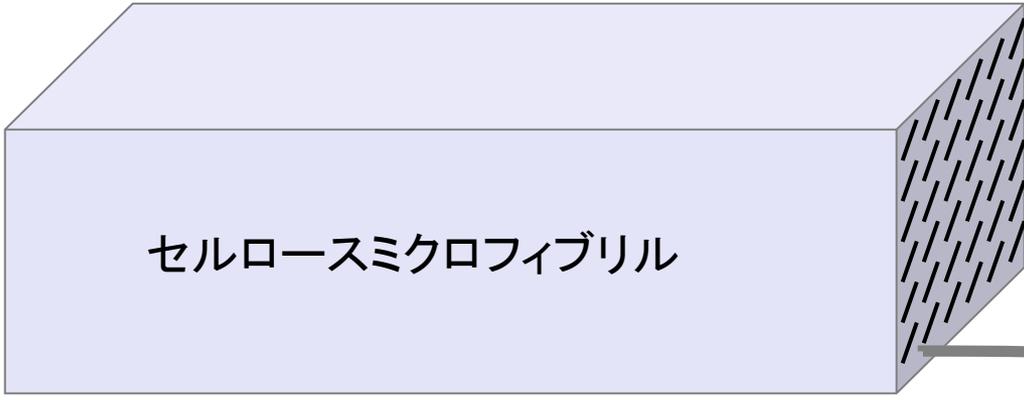
細胞壁の化学成分

針葉樹

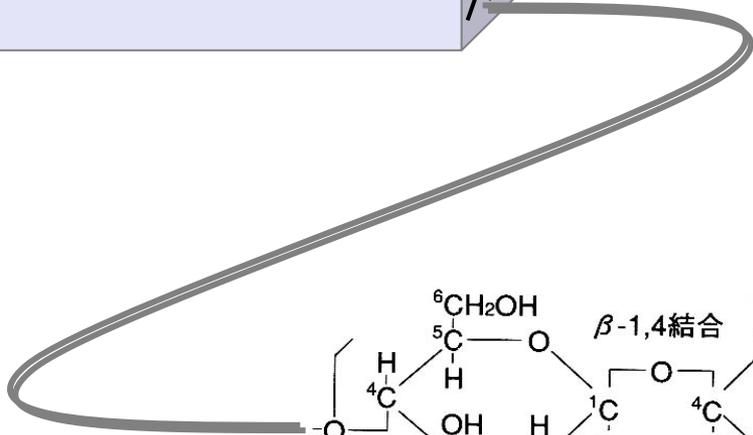
- セルロース
- ヘミセルロース
 - グルコマンナン
 - 4-O-メチルグルクロノアラビノロノキシラン
- リグニン(グアイアシルリグニン)

広葉樹

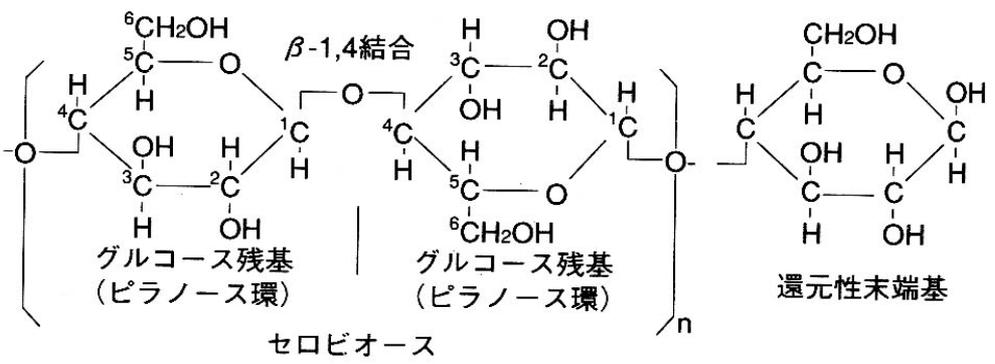
- セルロース
- ヘミセルロース
 - 4-O-メチルグルクロノキシラン
 - グルコマンナン
- リグニン(グアイアシルリグニン、シリングルリグニン)



セルロースマイクロフィブリル: 数十本のセルロース分子が束になったもの。細胞壁の骨格物質である。

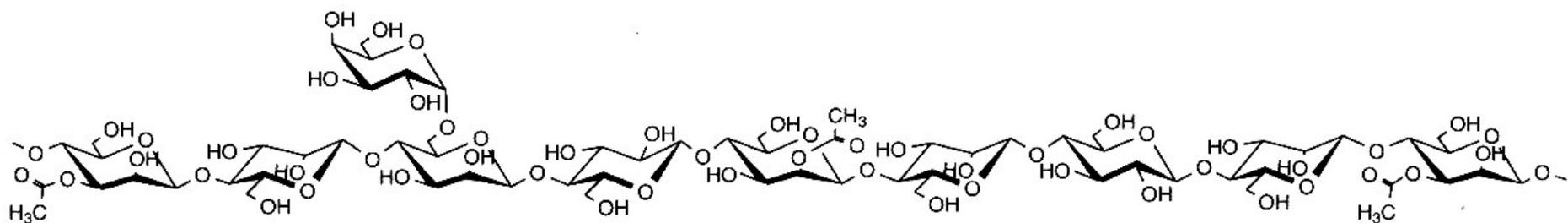


セルロース: グルコースがβ-1,4結合した直鎖状のホモポリマー。

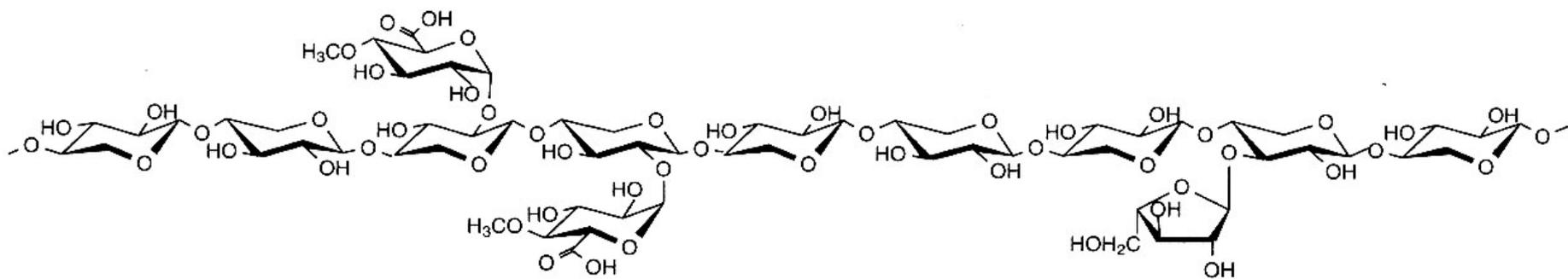


セルロース分子

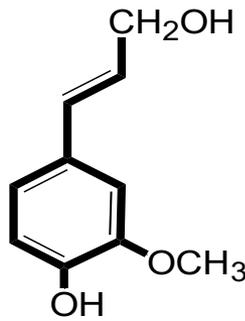
セルロースマイクロフィブリルの引張破断強度:
2~6GPa (20~60ton/cm²)
アラミド繊維と同強度
自然界のあらゆるバイオ系素材の強度を上回る



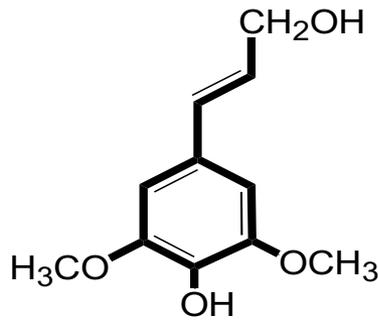
グルコマンナン



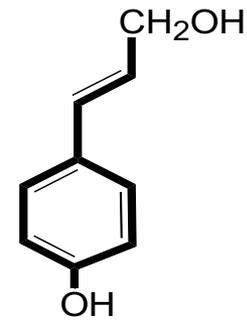
アラビノグルクロノキシラン



コニフェリルアルコール

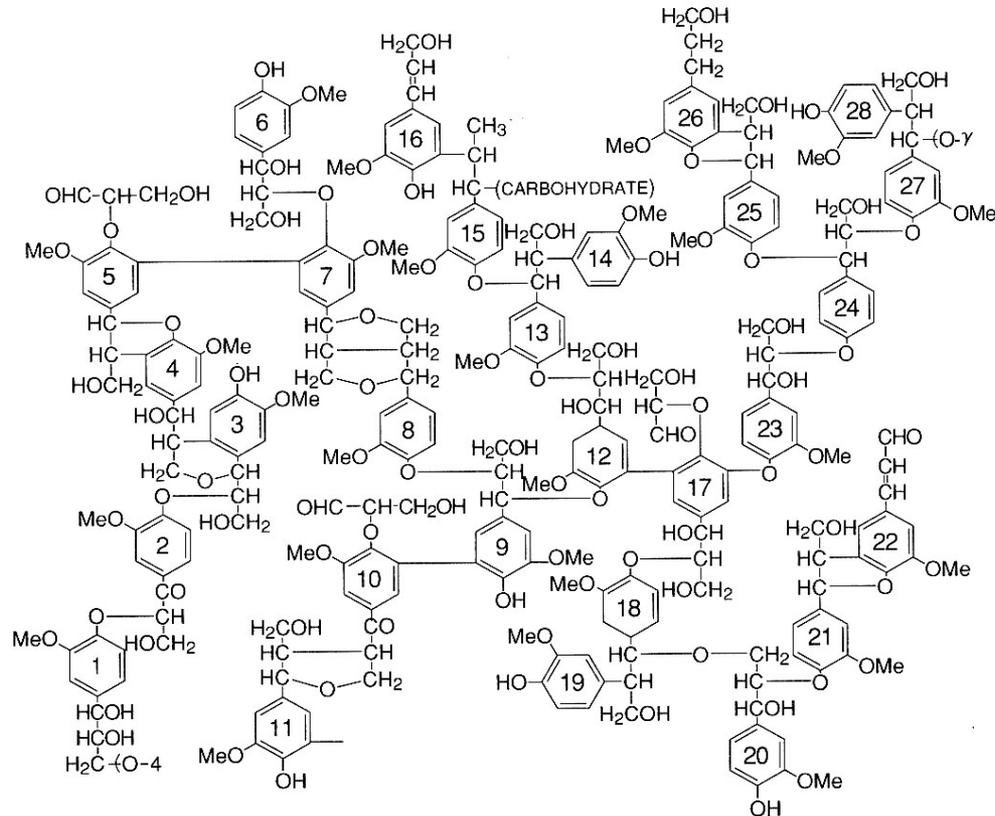


シナピルアルコール



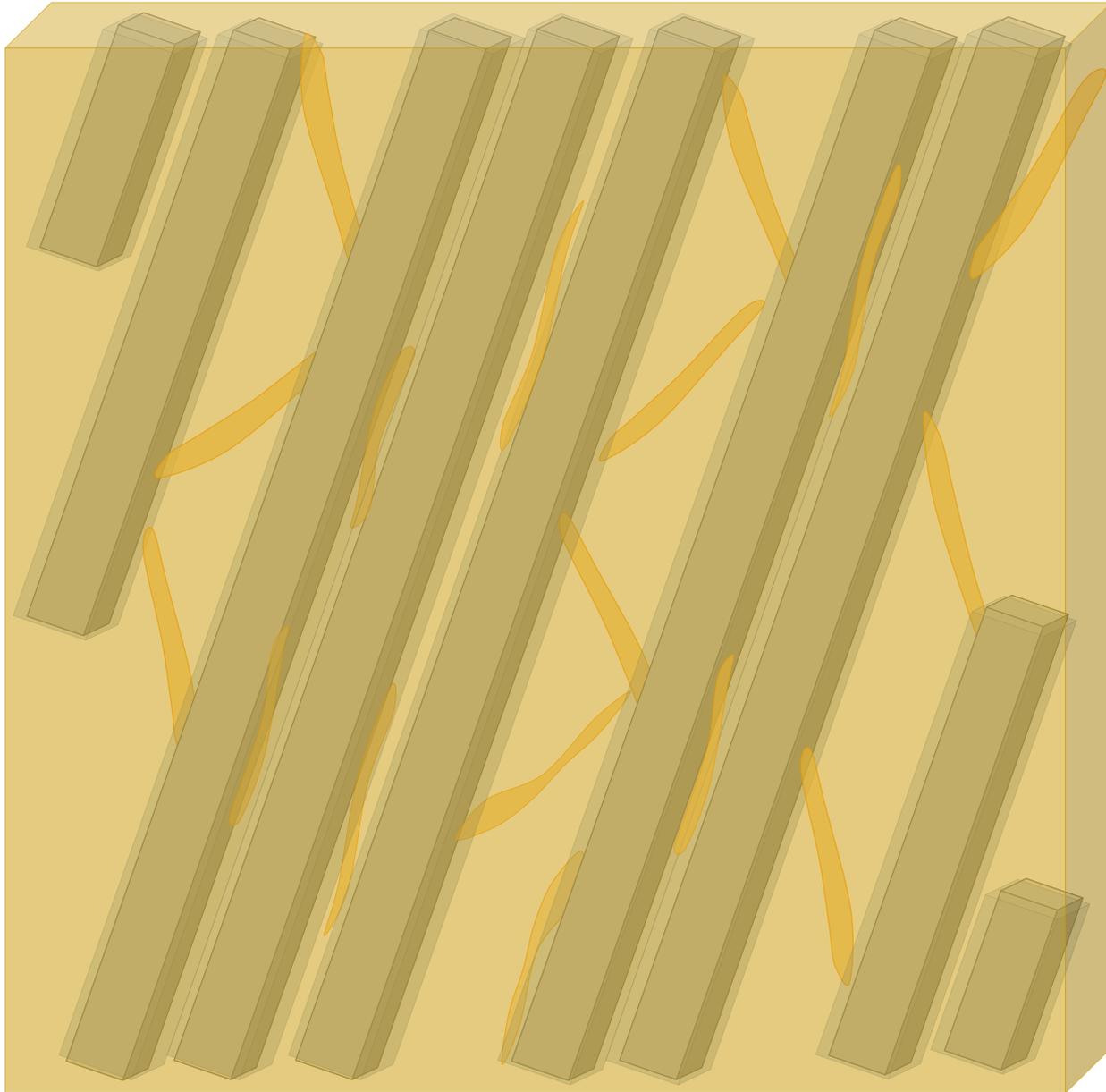
p-クマリルアルコール

重合

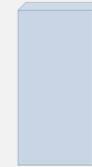


リグニン

細胞壁の分子構造



セルロースマイクロ
フィブリル



ヘミセルロース I

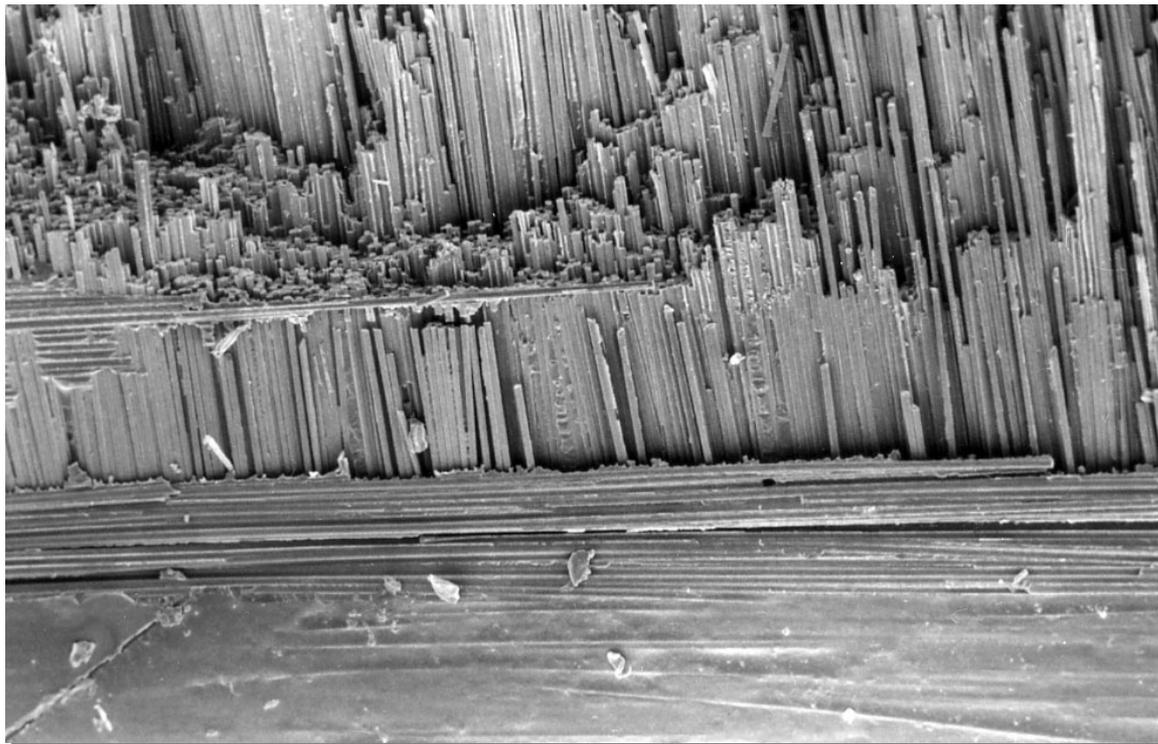


ヘミセルロース II



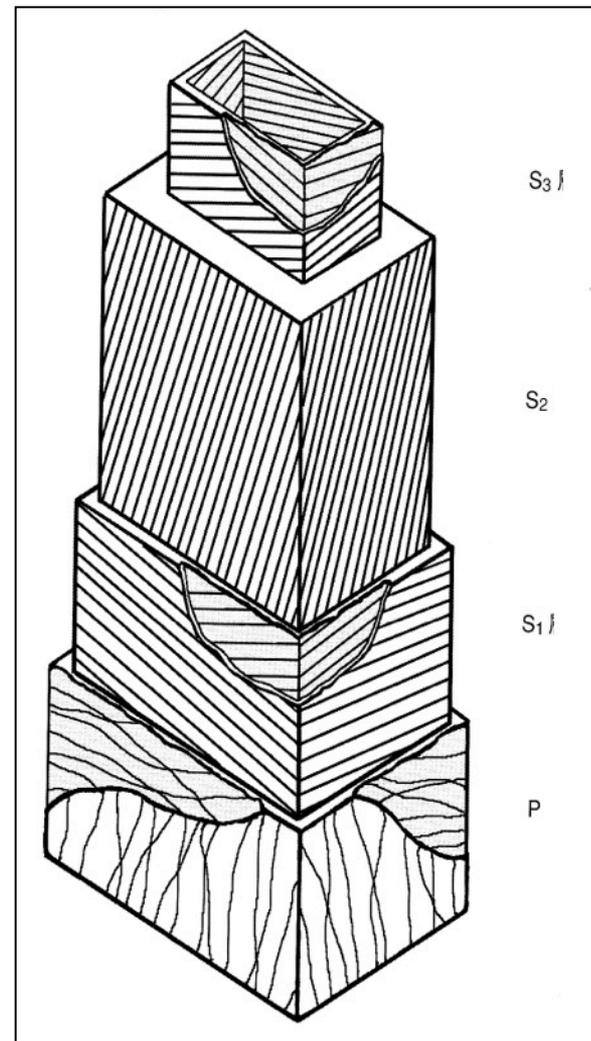
リグニン

釣竿の構造と細胞壁構造の類似性



28万円の釣竿

釣竿は縦方向の繊維は75～80%、横方向の繊維は20～25%という。樹木の細胞壁は、75～80%のセルロース繊維を縦方向に配向させることにより、強さとしなやかさを得た。



細胞壁モデル

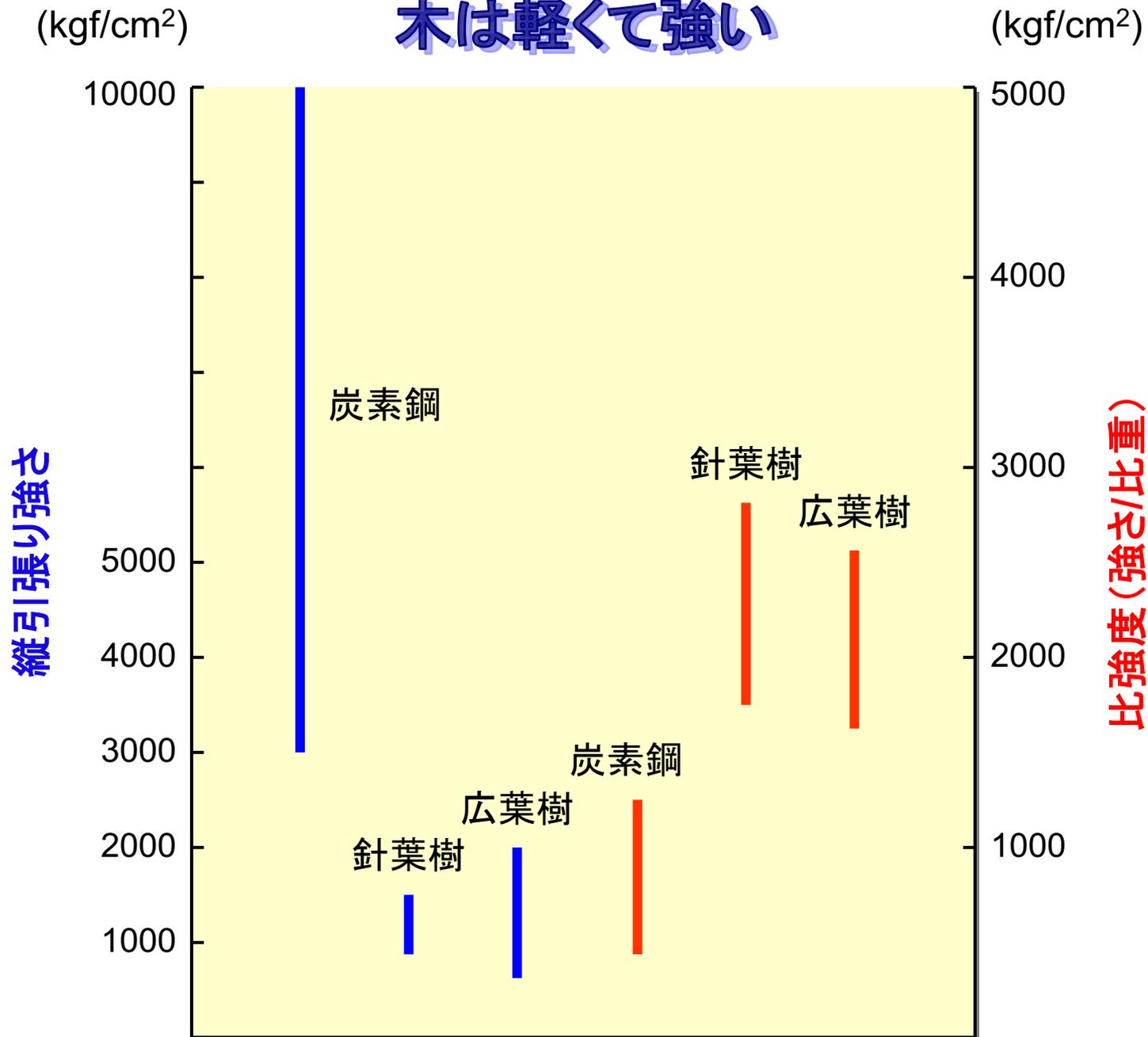
(木質の形成より)

木は軽量で強い材料

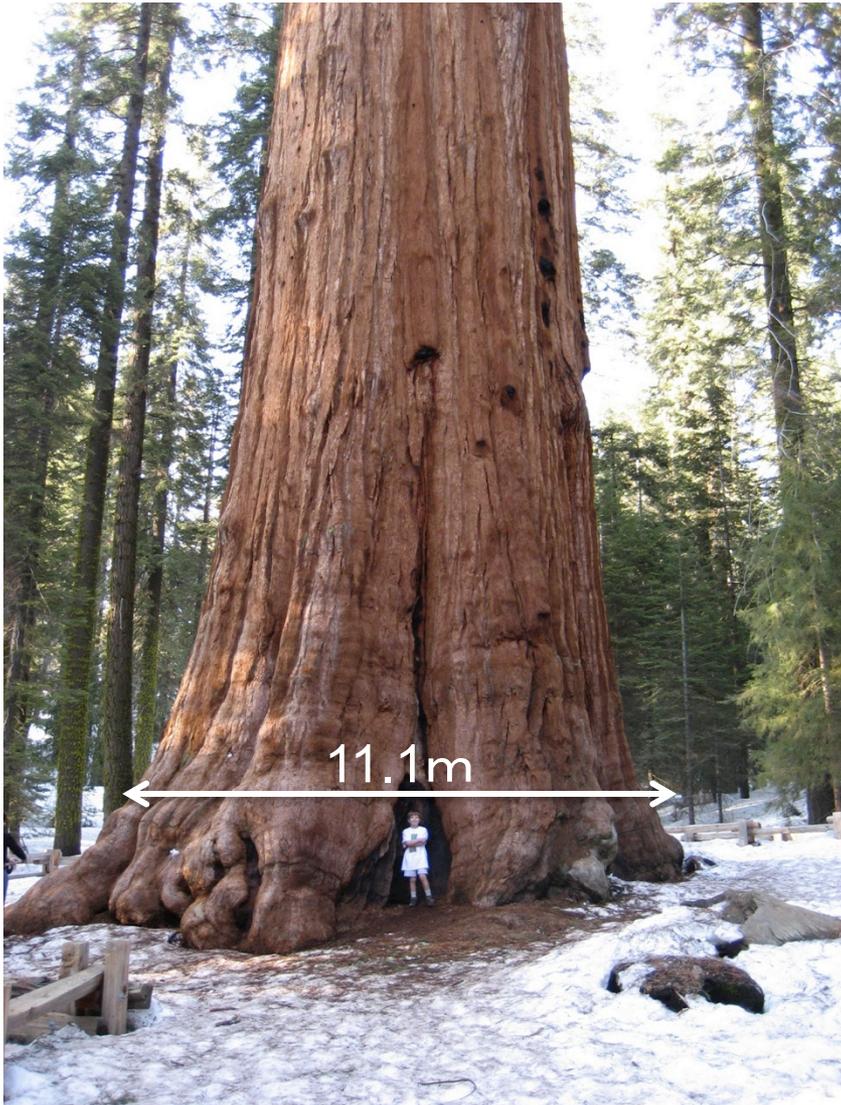
	縦引張り強さ	比強度(強さ/比重)
針葉樹	800-1400kgf/cm ²	1700-2800kgf/cm ²
広葉樹	600-2000kgf/cm ²	1600-2600kgf/cm ²
炭素鋼	3000-10000kgf/cm ²	400-1300kgf/cm ²

	縦圧縮強さ
針葉樹	300-450kgf/cm ²
広葉樹	200-650kgf/cm ²

木は軽くて強い

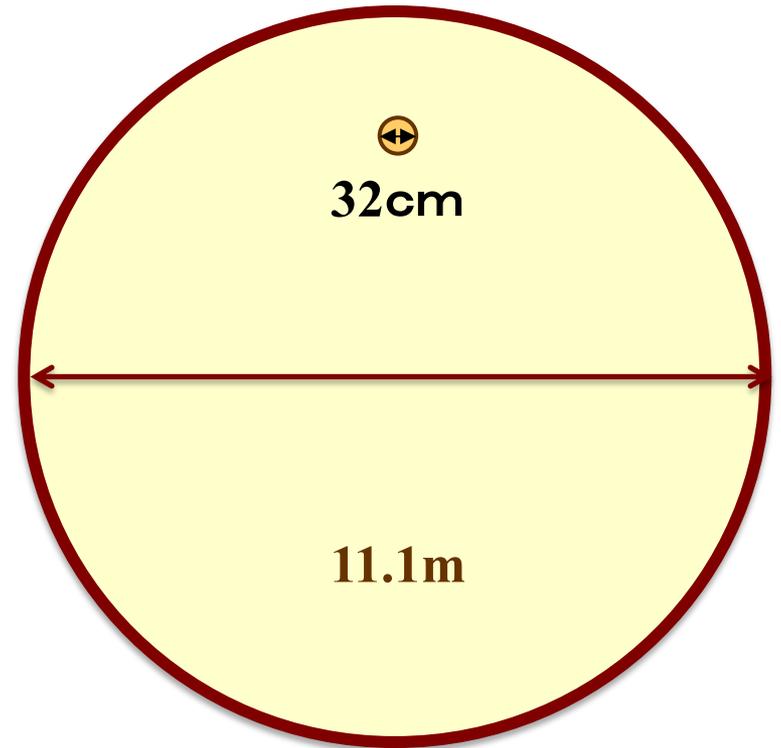


幹は軽々と自重を支えている



ジャイアントセコイア (*Sequoiadendron giganteum*)

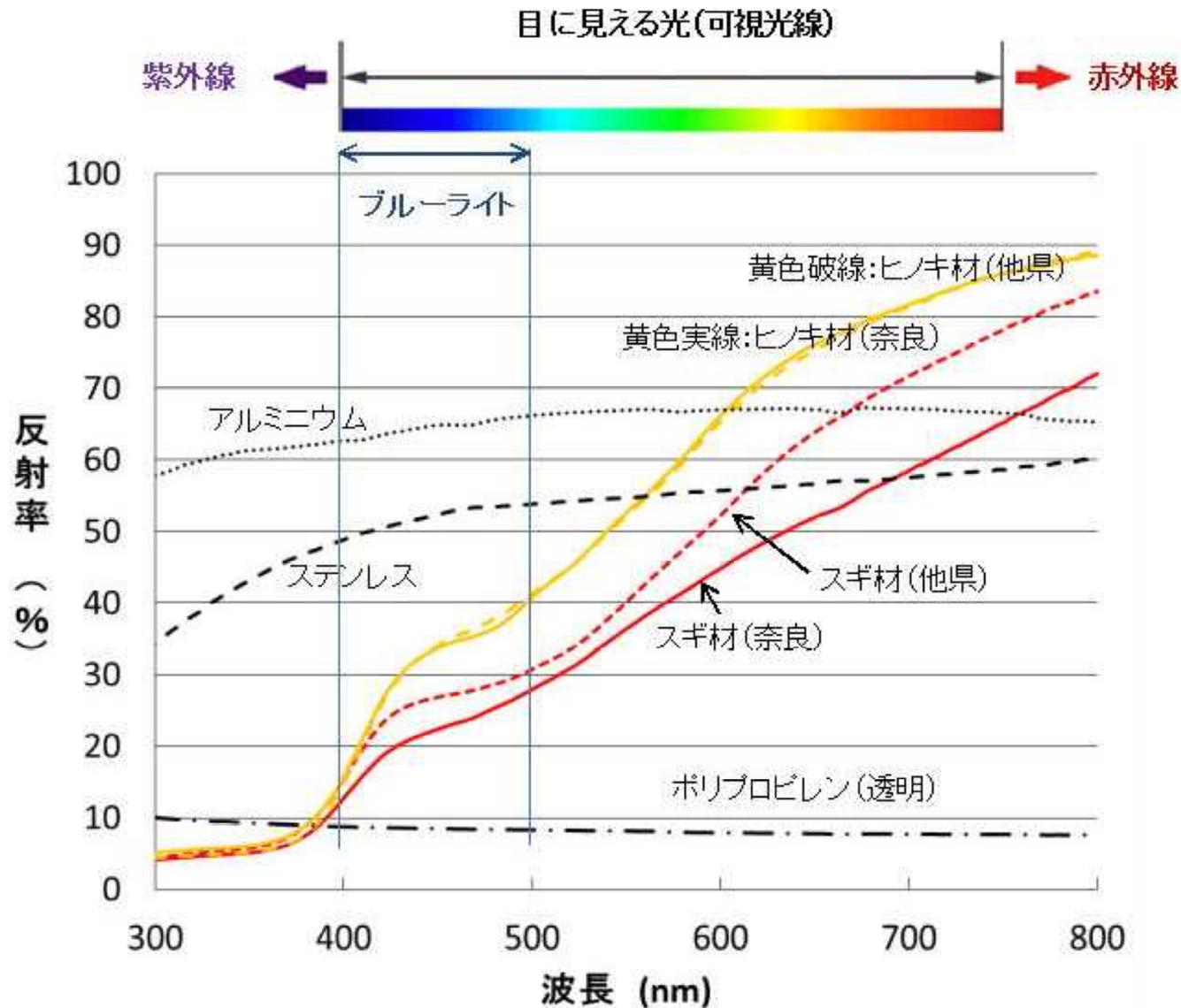
1000 tを支えるのに必要な
幹の直径は？



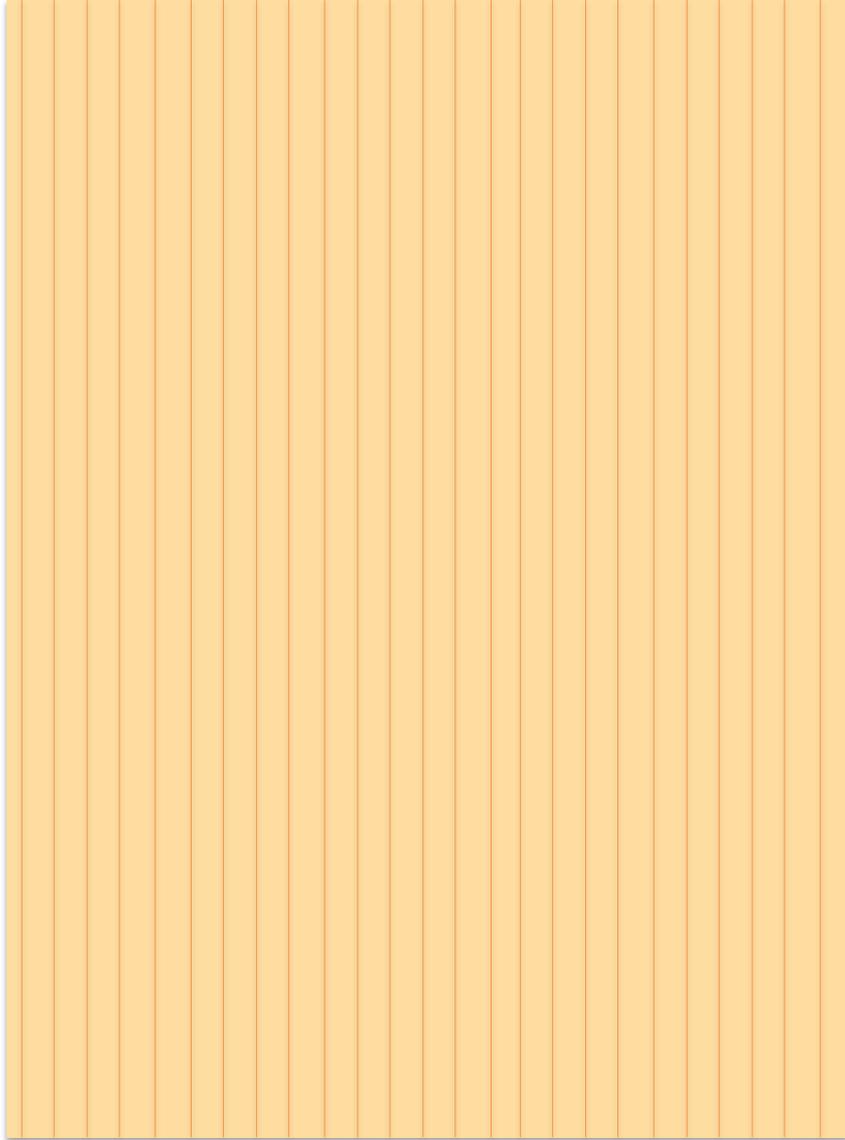
世界一巨大な木: シャーマン将軍
1000 t

木は快適

木材は紫外線を反射しない



木目のきれいな木

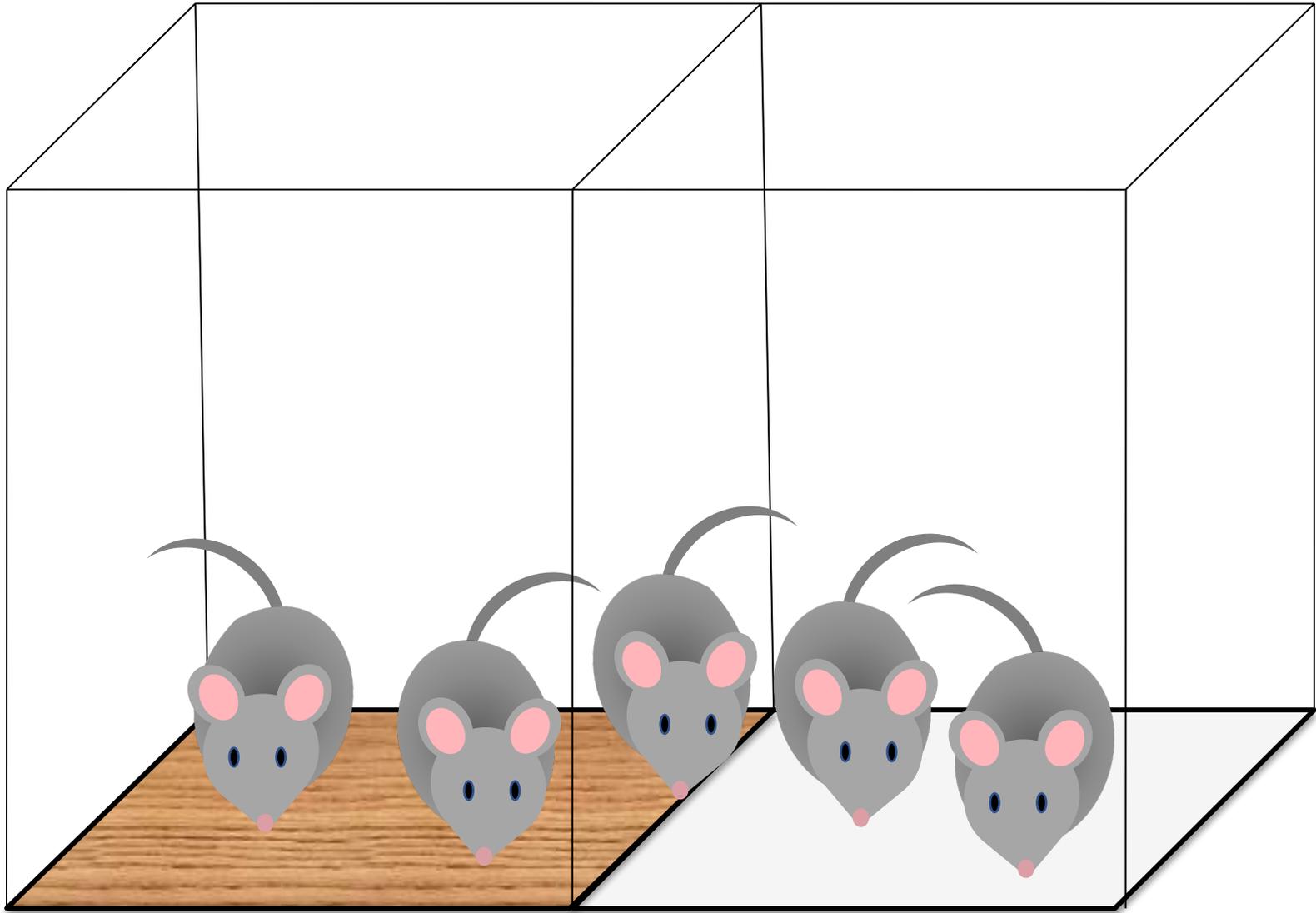


わずかな**ゆらぎ**は心地よさを与える



ヒノキ(まさ目)

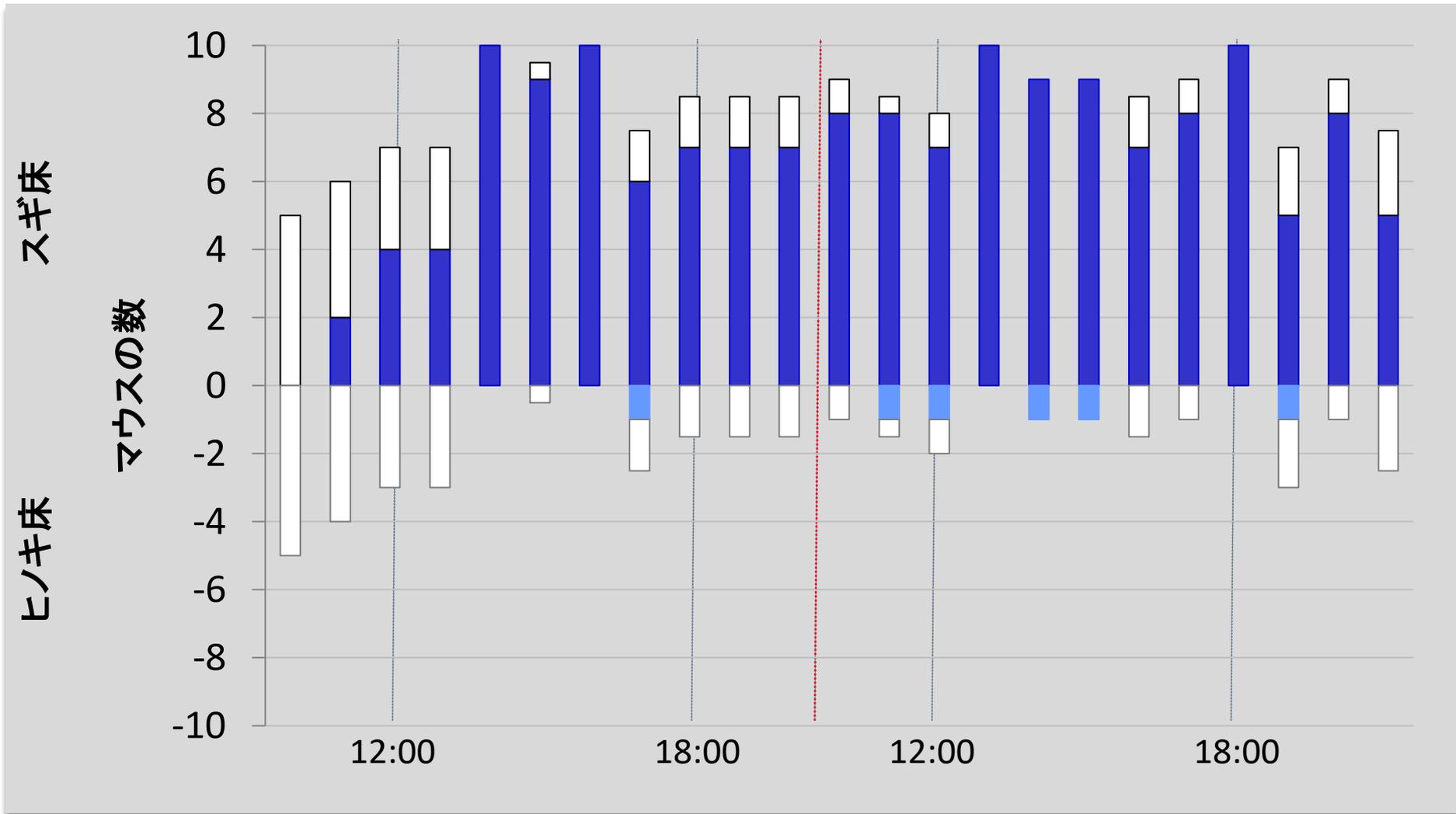
マウスによる床材の嗜好性試験



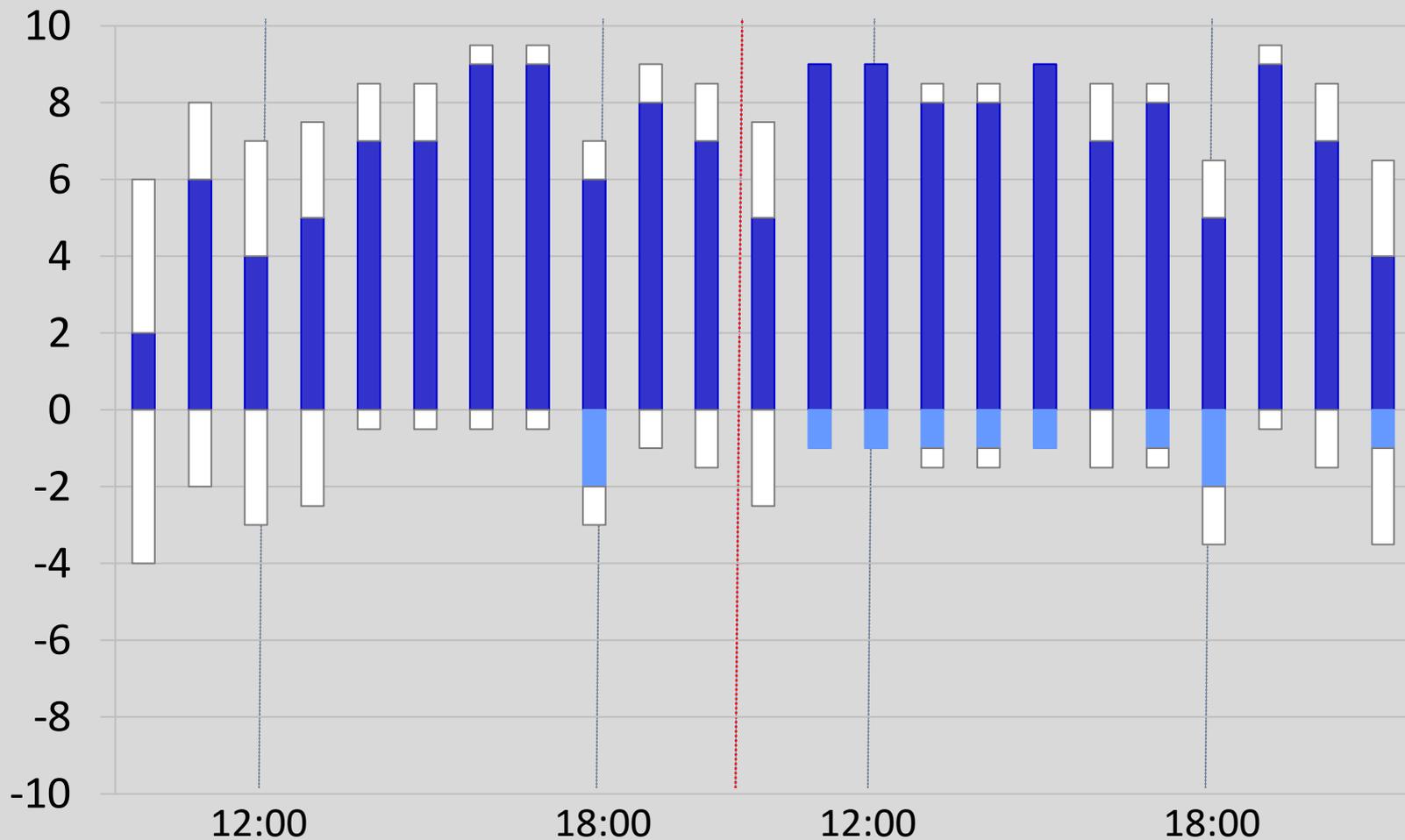
木の床

コンクリートの床

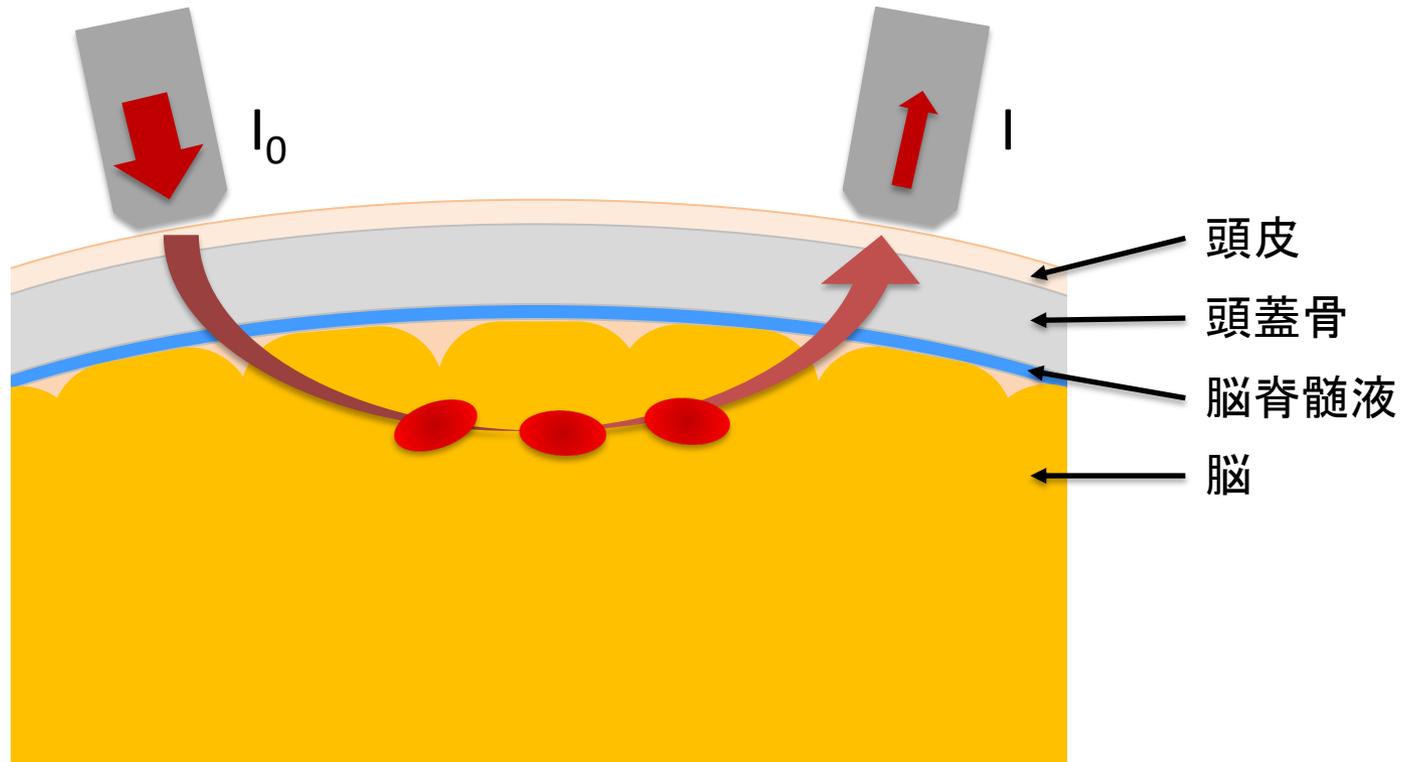
マウスによる床材の嗜好性試験 (I)



マ材は快適な空間を提供するⅡ)



近赤外分光法による前頭前野の酸素化ヘモグロビン濃度測定



近赤外光 (700~900nm) は生体に対して高い透過性を示す
近赤外光を吸収するのはヘモグロビン、ミオグロビンなど
吸光度を測定することでヘモグロビン濃度を測定できる

$$A(\text{吸光度}) = -\log \frac{I}{I_0} = \epsilon CL + S$$

天然乾燥の木の香りはストレスをへらす

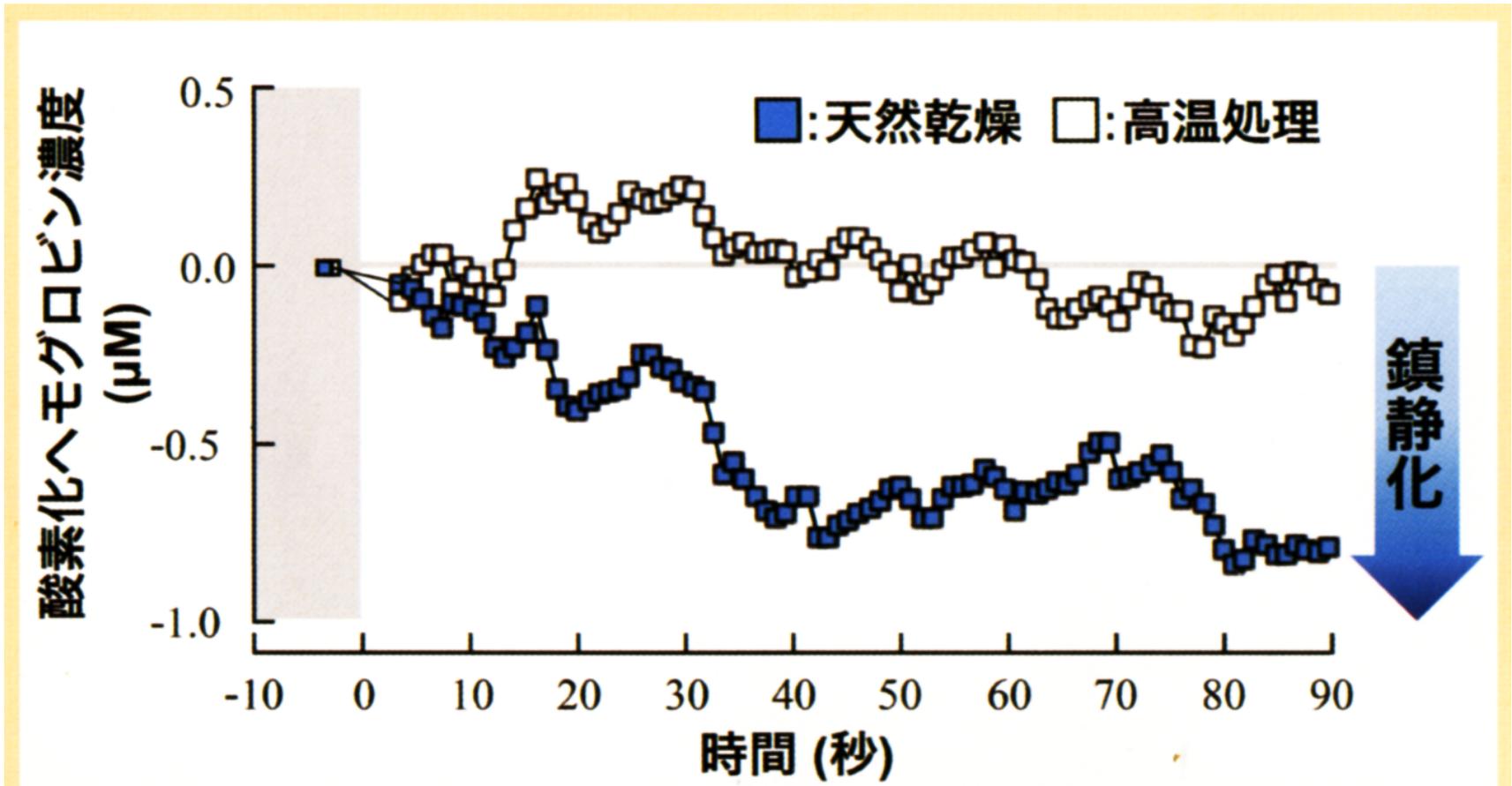


図1 天然乾燥ならびに高温処理チップのにおいを嗅いだ時の左前頭前野における酸化ヘモグロビン濃度の経時的変化 (19名の結果)

(Ikei et al., J. Wood Sci. 61:537-540, 2015を改変)

木の手触りはリラックス効果をもたらす

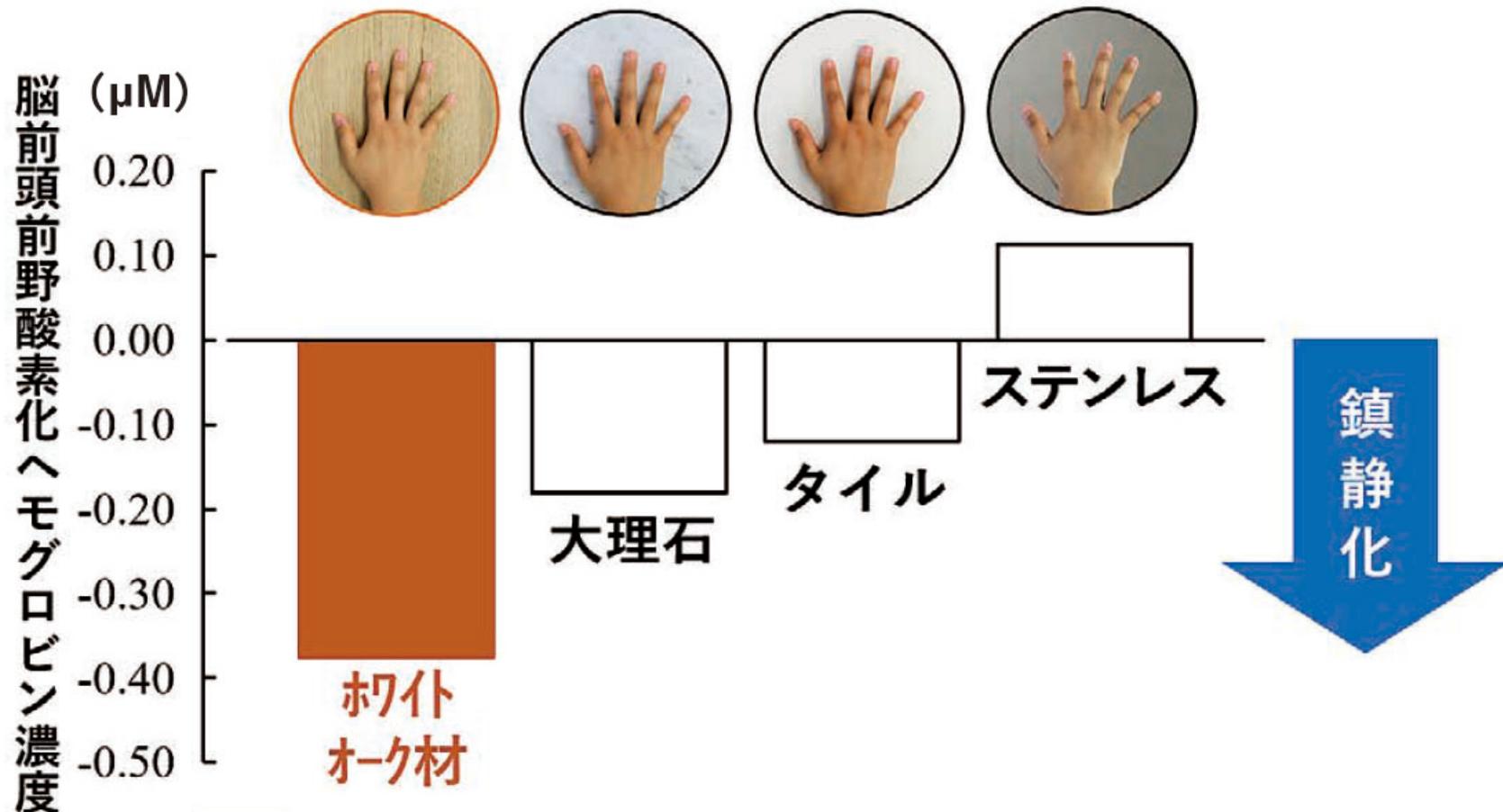


図4 手触りによる脳前頭前野活動のちがい
(18名の平均値)

(Ikei et al., Int. J. Environ. Res. Public Health 14(7):801, 2017を改変)

木の手触りはリラックス効果をもたらす

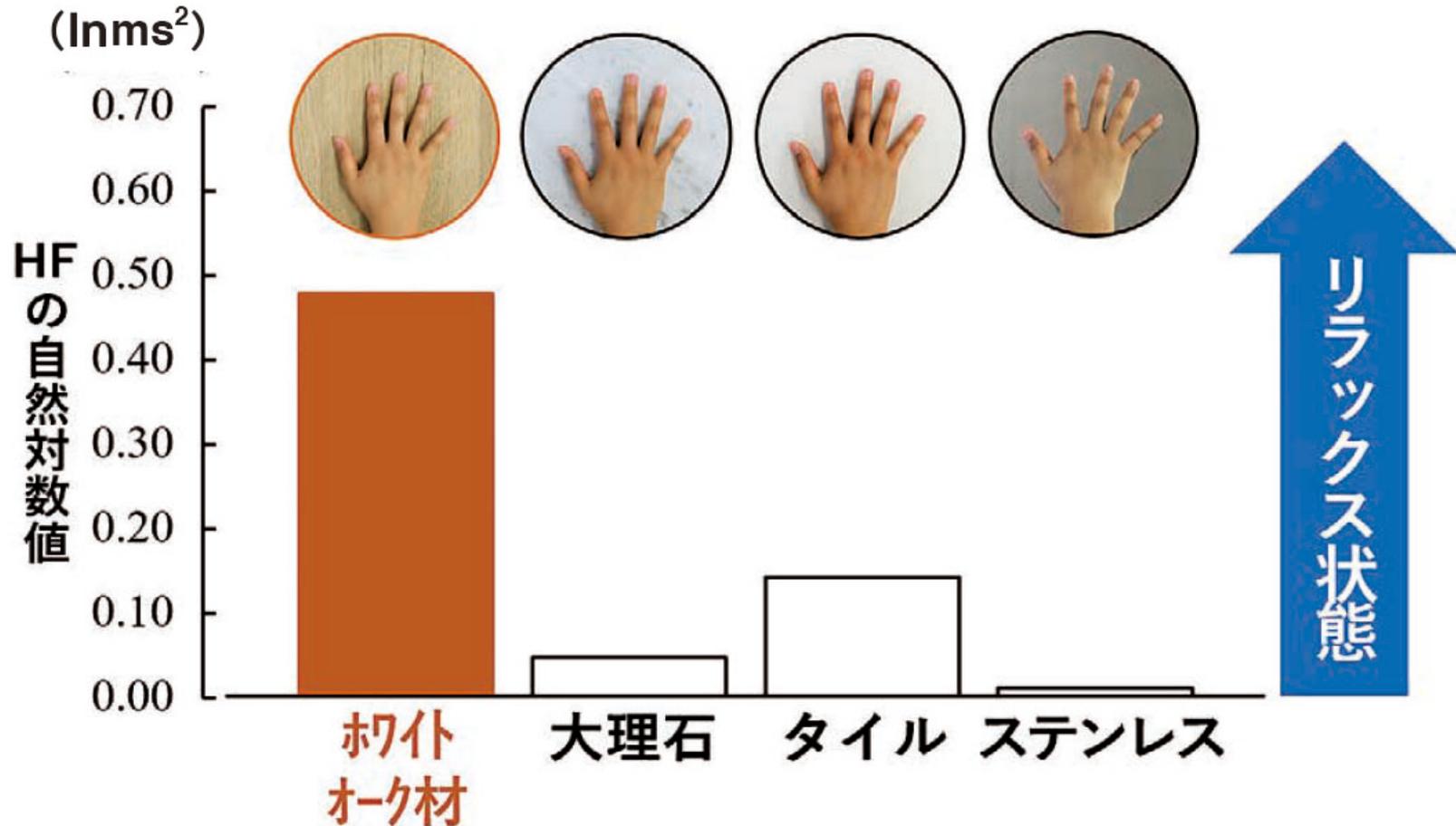


図5 手触りによる副交感神経活動のちがい
(18名の平均値)

(Ikei et al., Int. J. Environ. Res. Public Health 14(7):801, 2017を改変)

木の効果

- ・様々な表情(模様、穏やかな色)
- ・紫外線を吸収
- ・木目にわずかな「ゆらぎ」
- ・様々な香り
- ・様々な重さ
- ・様々な触感

人の五感を
マイルドに刺激
リラックス効果を
発揮

日本が育んできた木の文化

桐箏筥

曲げわっぱ

法隆寺

東大寺大仏殿

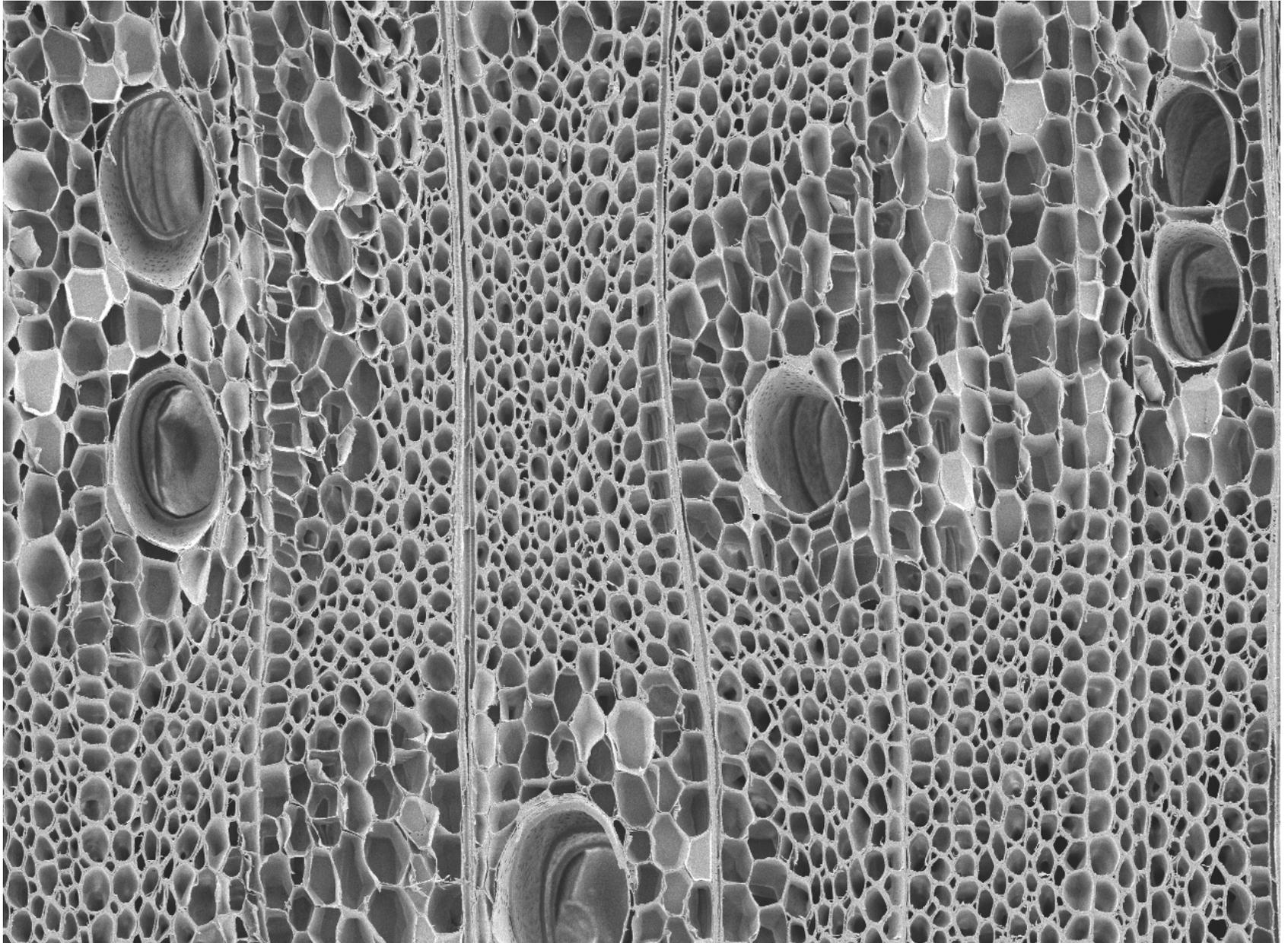
桂離宮

桐箆笥のすばらしさ



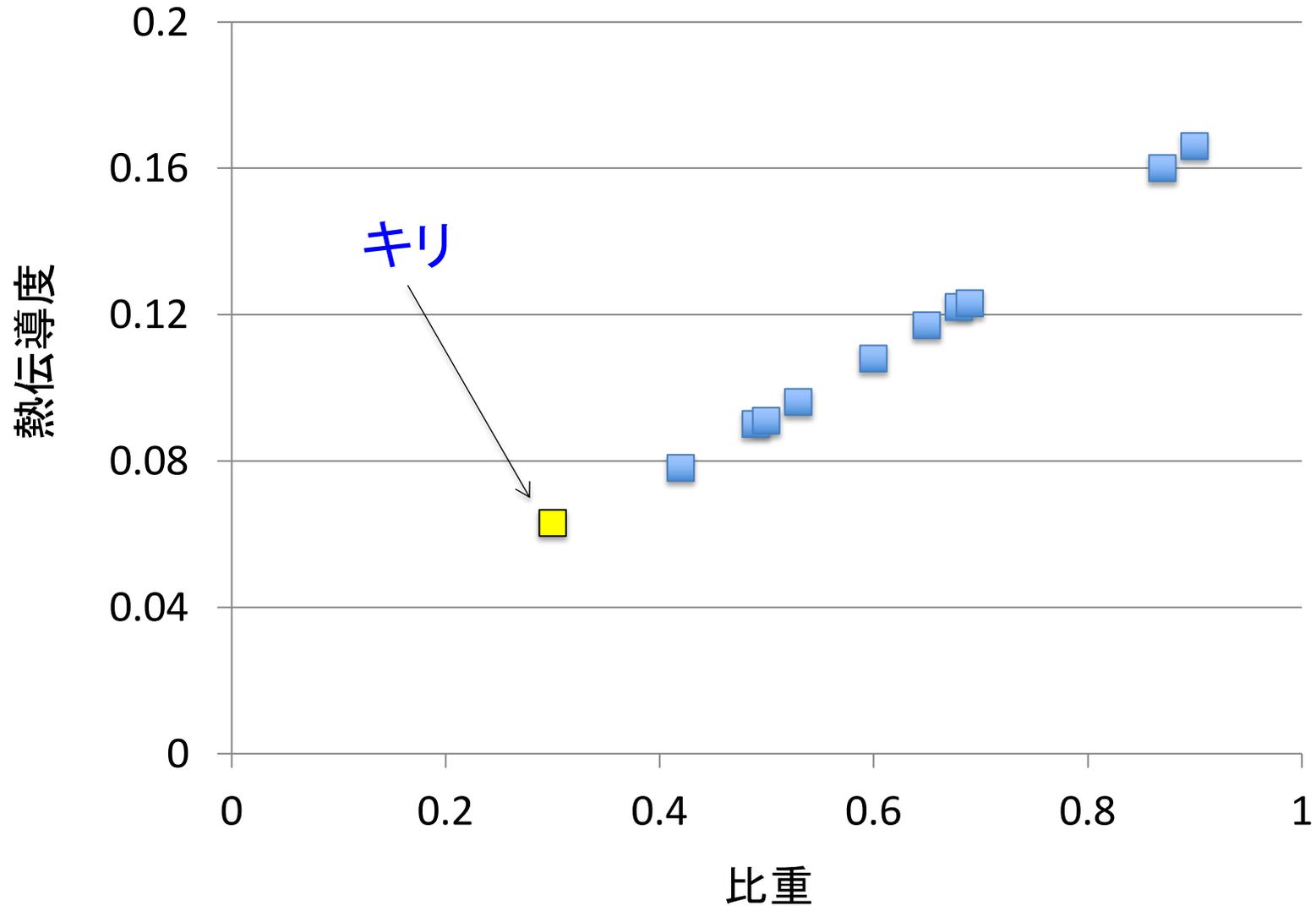
キリの特徴

キリは軽く、空気が多い。



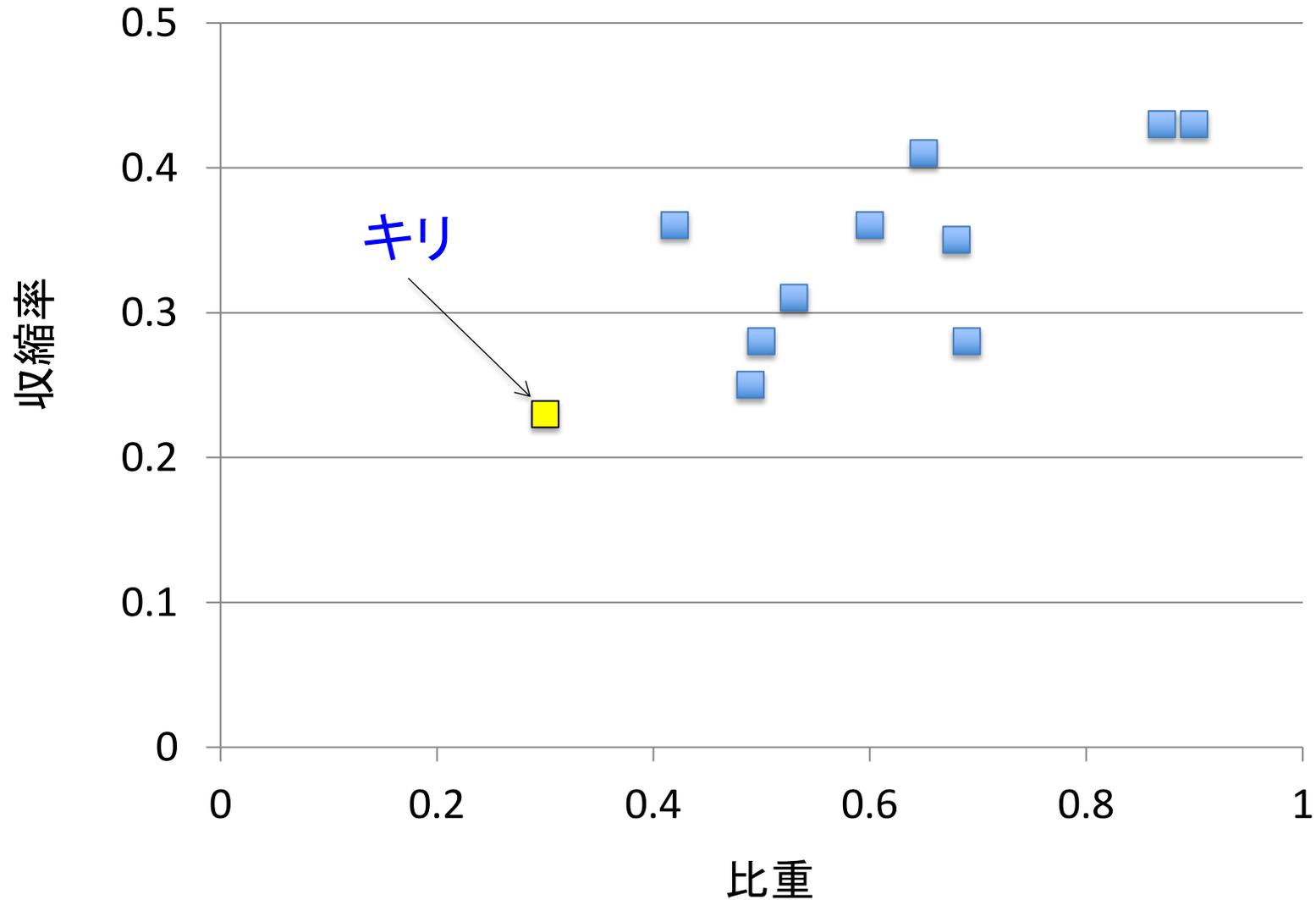
桐箆笥は熱を伝えにくい

比重が高いほど熱伝導度が高い



桐箆笥は狂いが少ない

比重が高いほど収縮率が高い



桐箆笥のすばらしさ

キリの特徴

軽くて、空気が多い。

熱伝導度が極めて低い。

収縮率が低い。

桐箆笥の特徴

熱を伝えにくいいため、内部の衣服を火災から守る。

狂いが少ないため、密閉性がよい。

木は曲げられる



水に浸す



(マイクロ波で)加熱する



曲げる



セットする

曲げわっぱ

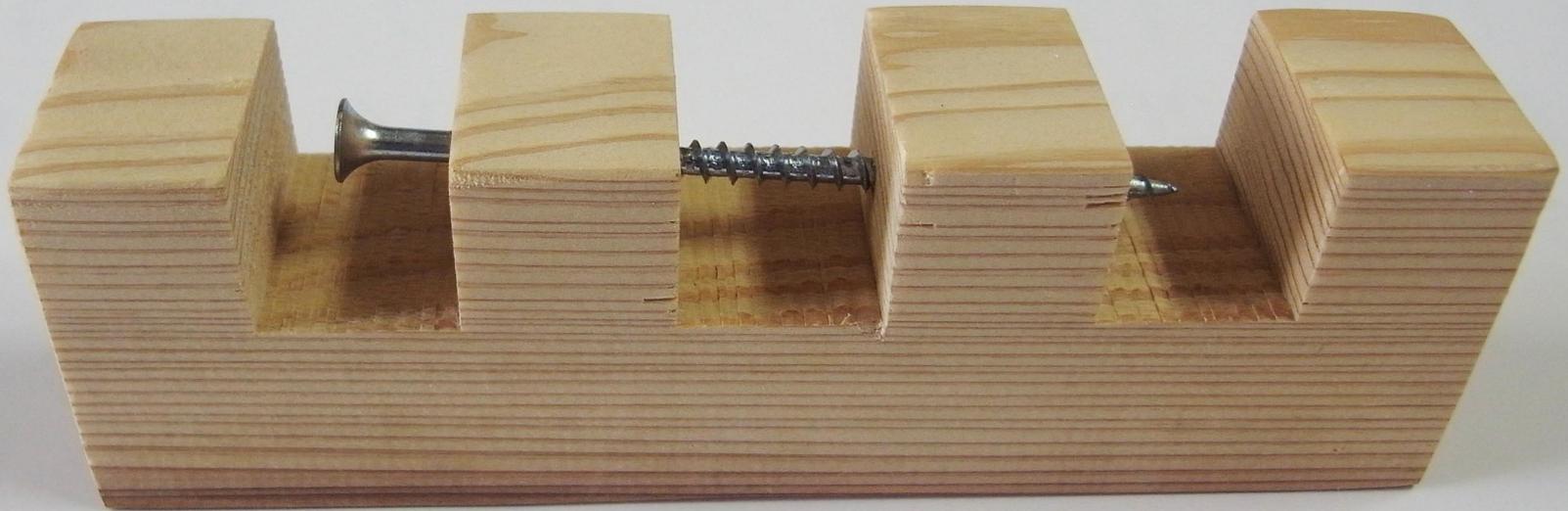


木のおもしろ加工法（１）



木のおもしろ加工法（２）

木ねじをどのようにねじ込んだ？



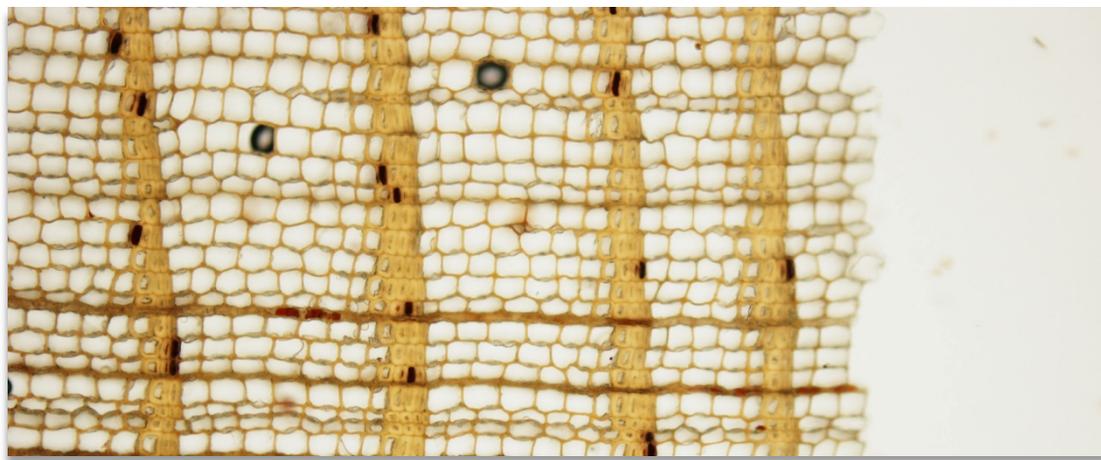
心材成分は防蟻効果を持つ



シロアリの食害を受けたスギ丸太

屋久杉

樹脂分(心材成分)が多いため、腐りにくい特徴を持つ。



辺材部

心材成分が仮道管内腔に充填され始める。



辺・心材移行部



心材部

世界最古の木造建築

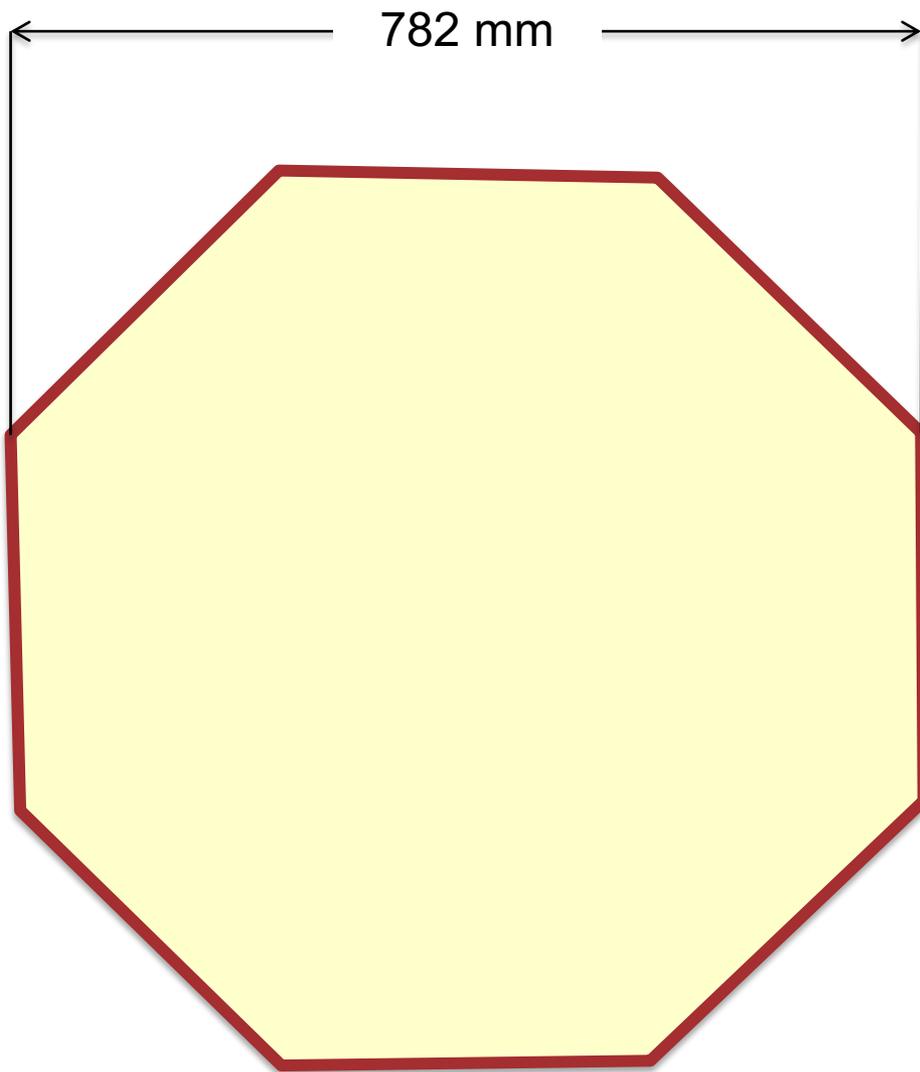
心柱は伐採から1400年以上
が経過しているという



年輪年代学的手法で
は五重塔心柱の伐採
時期は594年という(光
谷拓実)

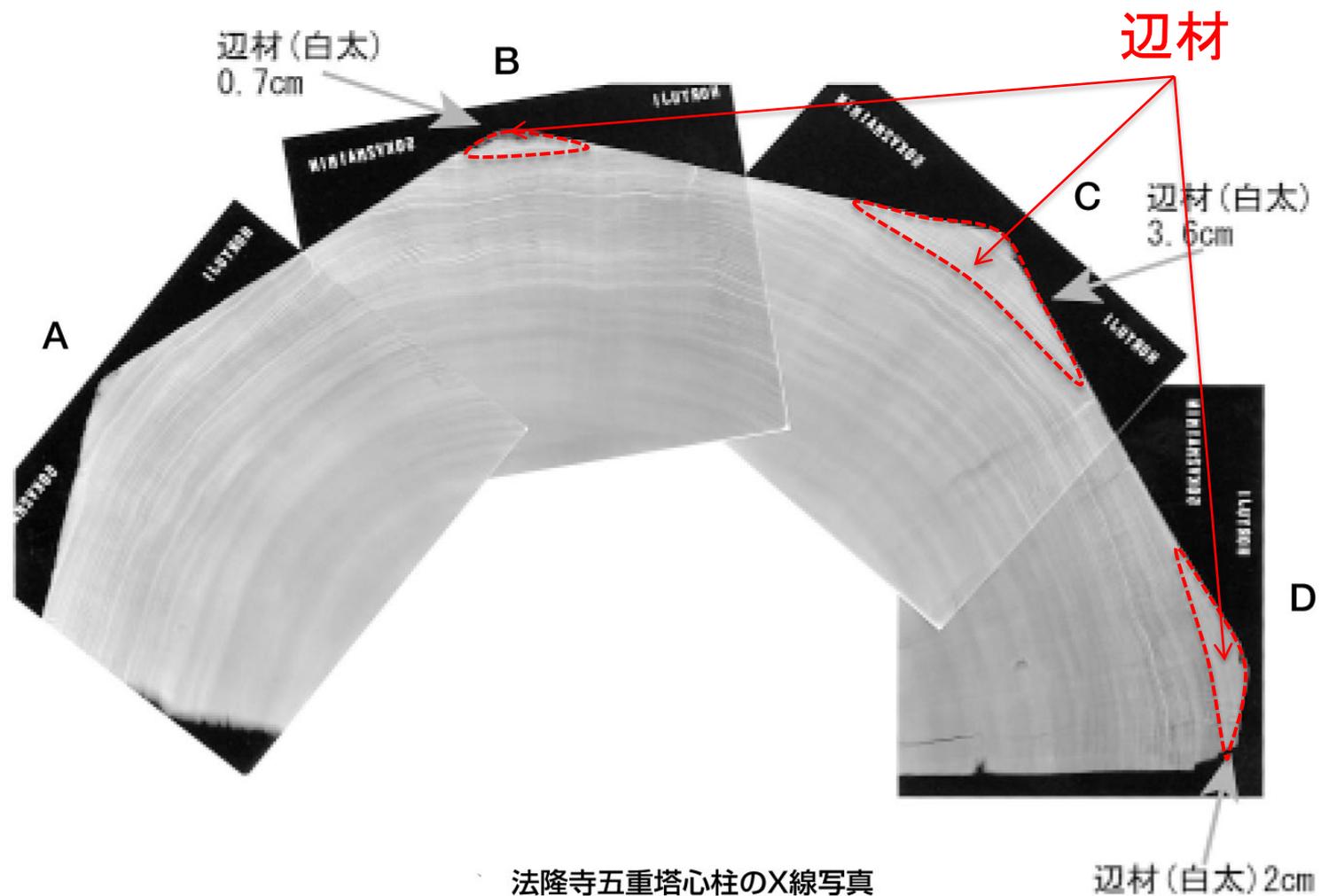
法隆寺・五重塔

世界最古の木造建築



五重塔心柱の形状

法隆寺五重の塔の心柱は心材成分で守られている



法隆寺五重塔心柱のX線写真
(光谷拓実)



東大寺 大仏殿

東大寺 大仏殿

758年 創建

(幅：85.8m、奥行き：50.3m、高さ：37m)

1181年 消失

1190年 再建

(創建時とほぼ同じ)

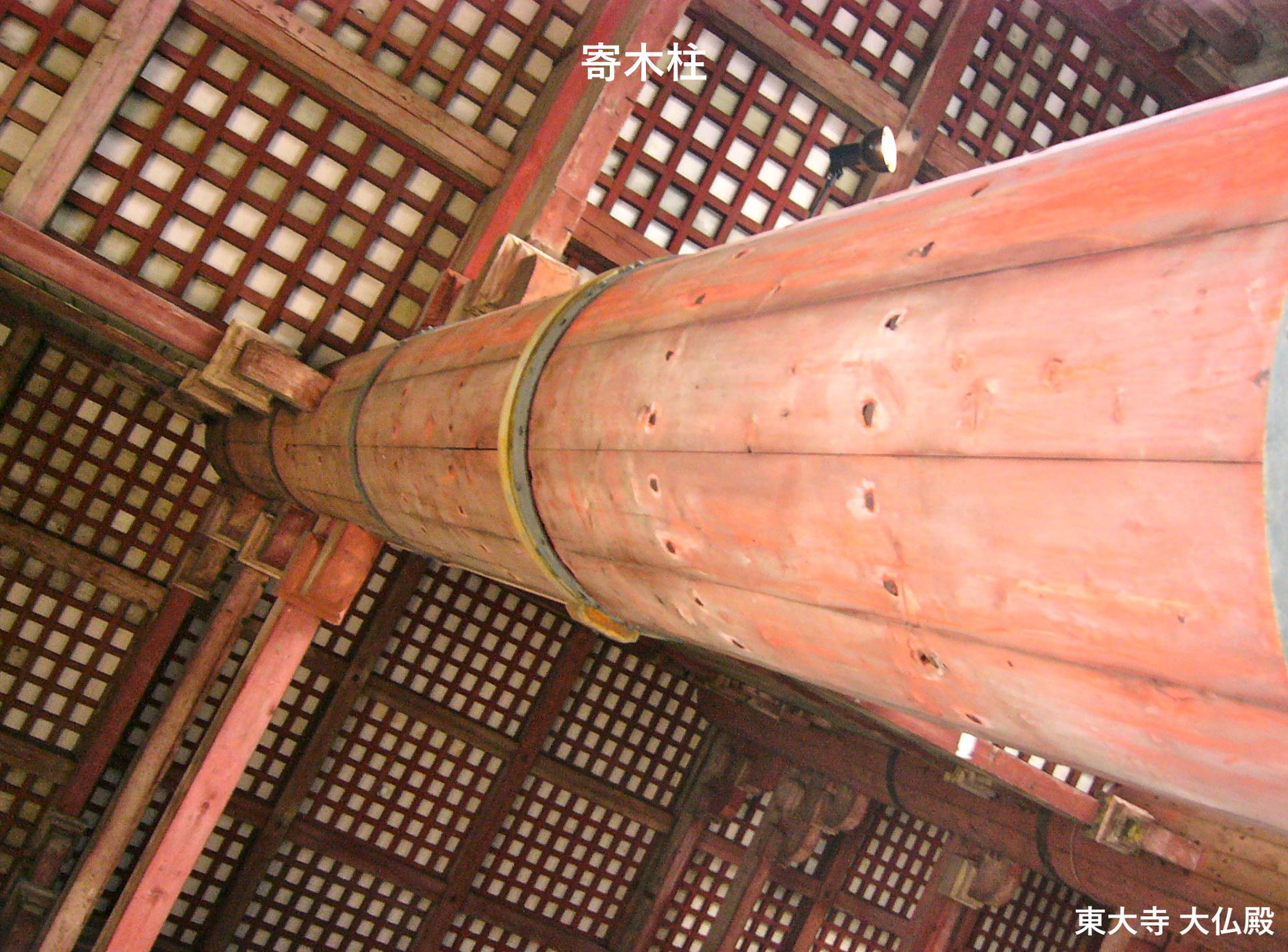
1567年 消失

1709年 再建

(幅：57.5m、奥行き：50.5m、高さ：49.1m)

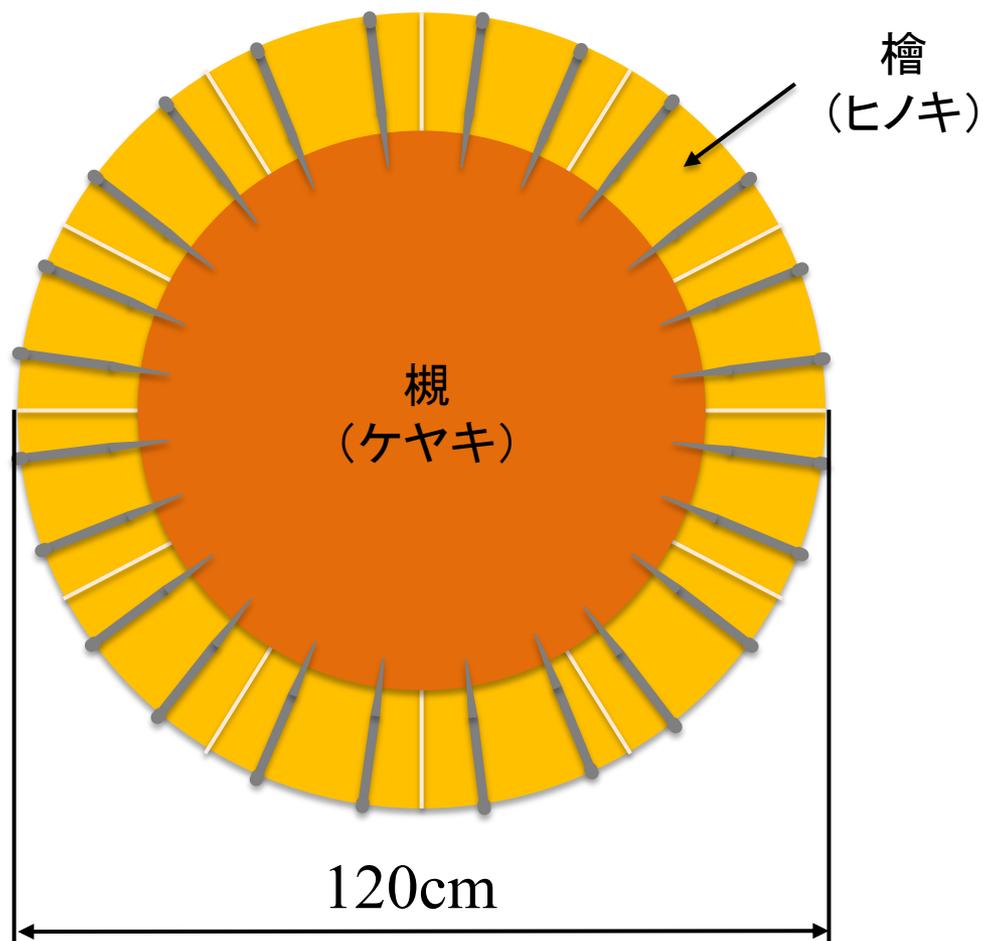
柱材（直径120cm）の調達が困難

寄木柱

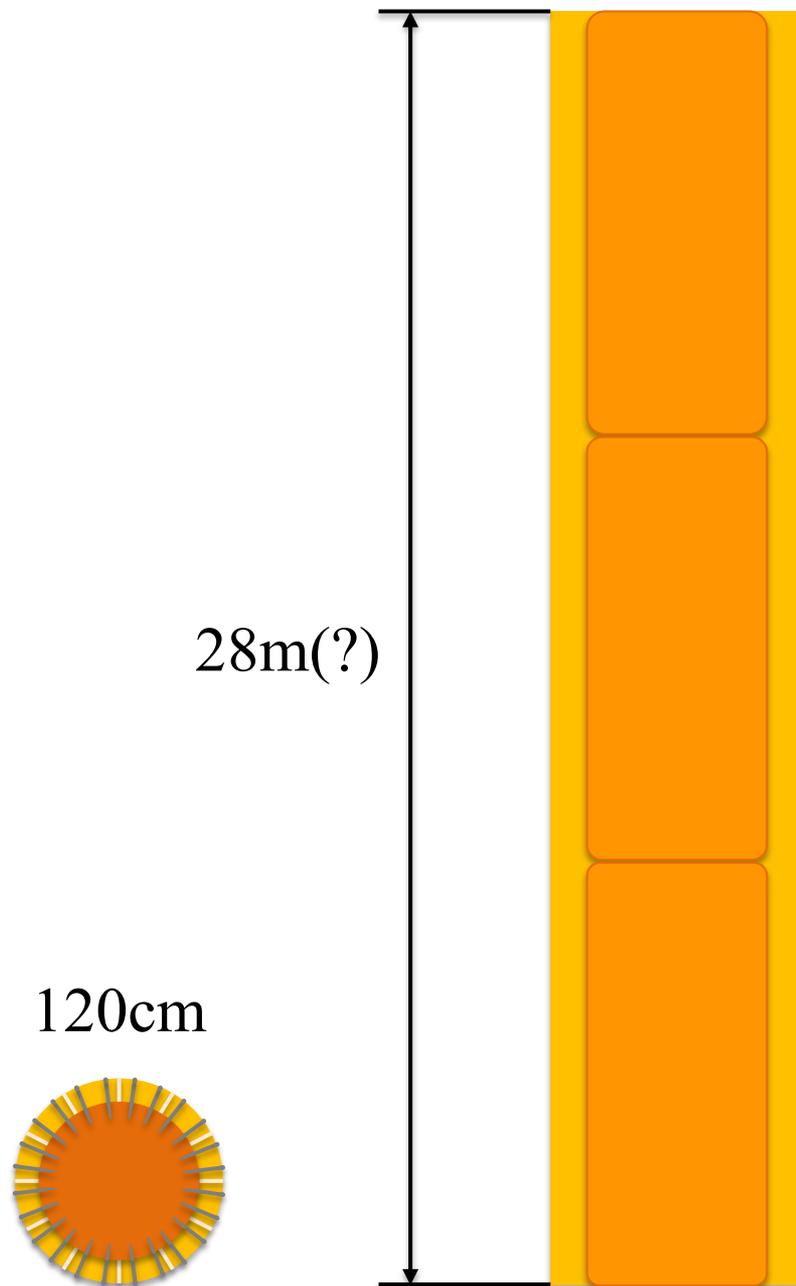


東大寺 大仏殿

江戸期には柱とする材が調達できず、芯となる梶（つき）を檜板で囲い、鉄釘と銅輪で締めて柱とした。（東大寺HP）



1709年にはハイブリッド集成材による大型木造建築が存在していた



28m(?)

120cm

短い柱3~4本をつなぎあわせ、
さらに外側に扇型の板を張り付
けた。

桂離宮：自然と共生するような木使い





桂離宮：自然と共生するような木使い

柱：節のあるスギ

土庇の桁：樹皮付きのアベマキ

桂離宮：自然と共生するような木使い

欄間：サクラをはじめとした様々な木





「西洋人はいまだかつて日本人が理解を持って家屋の構造に木材を使ったように木材を使ったことはない。日本建築では、木はいつも高貴な美しいものとして使われ、表現される。」

フランク・ロイド・ライト

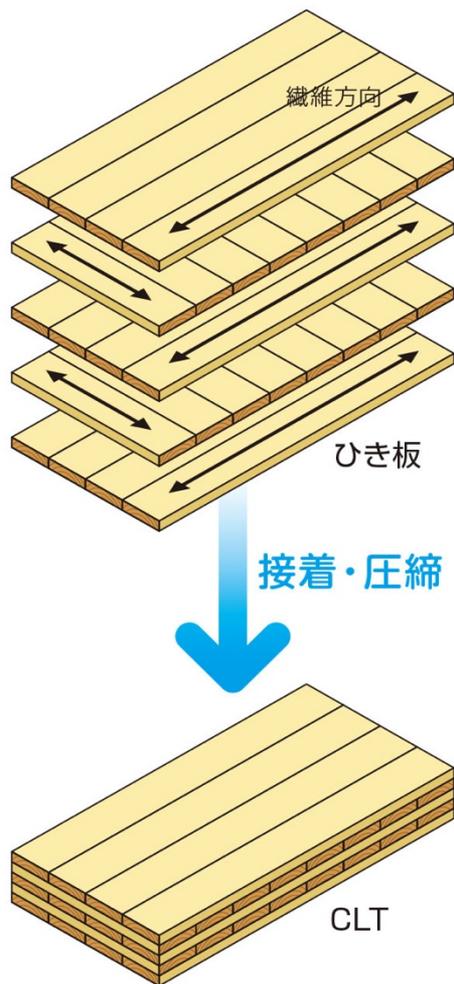
フランク・ロイド・ライト：谷川睦子、谷川正巳 共訳 鹿島出版会 1995

新たな木質材料の可能性

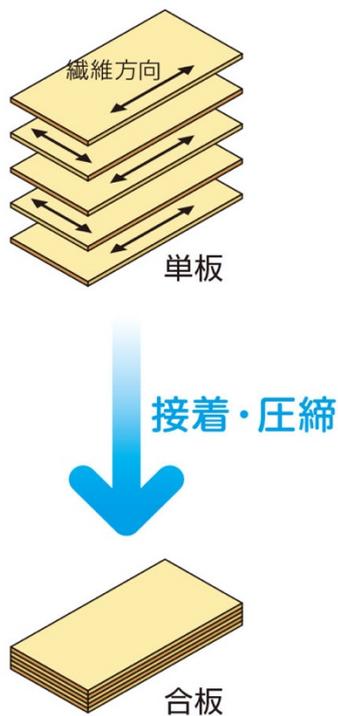
集成材

CLT

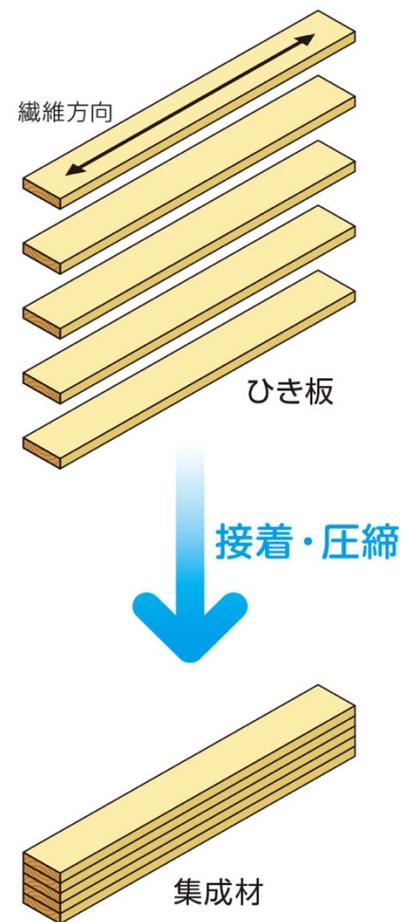
新たな木質材料の可能性



CLTの製造



合板の製造



集成材の製造

集成材

ひき板または小角材等とその繊維方向を互いにほぼ平行にして、厚さ、幅及び長さの方向に集成接着を施した一般材
(日本農林規格 JAS)

乾燥に伴う変形、割れ等の狂いが少ない

無垢材よりも強度のばらつきが少ない

構造強度を算定できる

大断面集成材により大型公共施設の梁などに用いられる

曲線部材の製造が可能となり、木質ドームなどが造られる



ポルトガル・エストリルのConference Hall



ポルトガル・エストリルのConference Hall

CLT (Cross Laminated Timber・直交集成板)

ひき板(ラミナ)を並べた層を、板の方向が層ごとに直交するように重ねて接着した大型のパネル

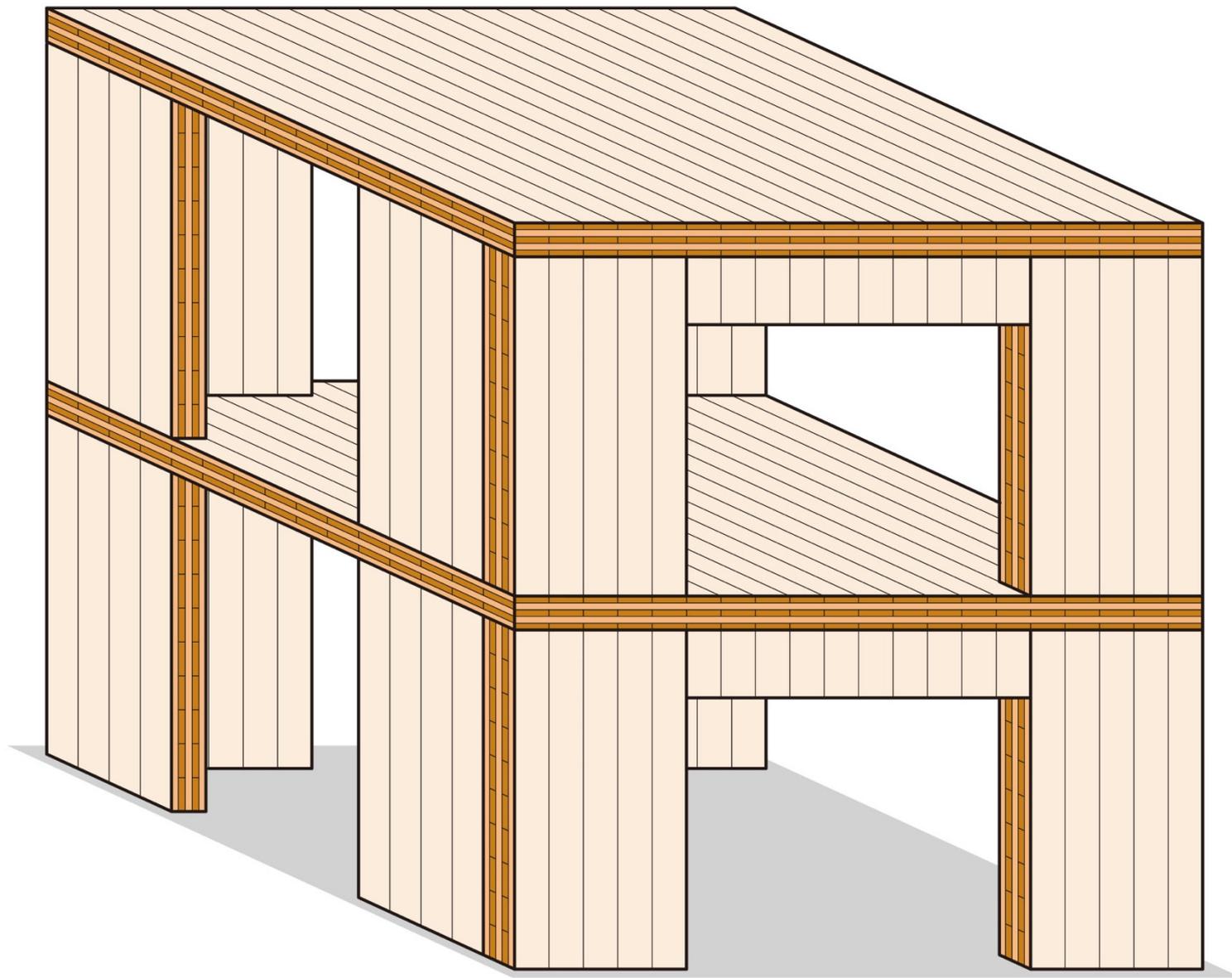
乾燥に伴う変形、割れ等の狂いが少ない

構造強度を算定できる

立てれば柱と壁、寝かせば床と梁の役目を果たし、シンプルに建物を建てることができる

コンクリートに比べ軽量で断熱性が高いため、中層の集合住宅や、網構造の壁材、床材として使われる





CLTを使用した建物のイメージ

平松 靖:CLTとは 季刊 森林総研No.27 4-5 (2014)



CLTで建てられた木造4階建アパート(ウイーン市内)

木の魅力

地球環境に貢献

持続可能な社会づくりに貢献

木は唯一無二の材料

木は軽くて強い

人の五感をマイルドに刺激する

木は快適

日本には今まで育んできた木の文化がある

Wood is wonderful!