

アカシア材の組織構造*

Yahya Ridwan**, 高瀬 克彦**, 今井 友也**, D. Silsia***,

Joseph Gril****, 杉山 淳司**

Anatomical Structure of *Acacia* Trees*

Yahya Ridwan**, Katsuhiko Koze**, Tomoya Imai**, D. Silsia***,
Joseph Gril**** and Junji Sugiyama**

概要

アカシアは、近年、東南アジア諸国で大規模造林が行われている熱帯早生樹である。早生樹ゆえに10年以下で伐採されることもあり、特にその場合、材が未熟なうちに利用されることになる。そこで、特にパルプ用材として使用されることが多い。パルプ材としての質（パルプ収量や紙とした時の強度）を評価するためには、密度の評価やいくつか方法があるが、本稿では材の解剖学的特徴に基づいてパルプ材としての評価と、熱帯材の組織構造の三次元での解析について概説する。

1. はじめに

樹木を木材の供給源として見た時、短期間で生産量を多くすることが、産業的側面から非常に重要である。この観点から、ユーカリ、ポプラ、ラジアータマツなどの早生樹の植林が広く行われ、実際に産業として成り立っている。以上は温帯域に生育する樹種であるが、熱帯においても、早生樹としてアカシア、ファルカータなどの植林が近年盛んに行われている。インドネシアにおいては、アカシアの植林が近年盛んに行われている。アカシアは非常に成長が早く、多くの場合、10年以下で伐採されてパルプ材として使用される。早生樹ではあるが、材積が相当量あっても、木材としては未成熟の状態で行採している。従って、強度や寸法安定性などの物理的性質が不安定となり、用材としてよりもパルプとしての利用に適しているからだと考えられる。

パルプ用材として木材を利用するとき、当然マスが大きければ大きいほど生産量が高くなるので、材の重量は原料取引時の値付けの大きな根拠となる。したがって輸送コストを考えると、かさ



図1：ハイブリッド・アカシアの植林地

*2011年9月12日受理(本稿は、参考文献1と2で発表した学術記事の内容を要約したものである。)

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄京都大学生存圏研究所バイオマス形態情報分野

E-mail: ridwany@rish.kyoto-u.ac.jp; timai@rish.kyoto-u.ac.jp; sugiyama@rish.kyoto-u.ac.jp

*** Faculty of Agriculture, University of Bengkulu, Kota Bengkulu 38371 A, Indonesia

**** Laboratoire de Mecanique et Genie Civil, Universite Montpellier 2, CNRS, Place E Bataillon, cc 048, 34095 Montpellier cedex5, France

の低い木材が好まれる。アカシアとして当初植林されたのは、マンギウム (*Acacia mangium*) という種であったが、近年、別の種のアカシア (*A. auriculiformis*) との自然交配種 (以降、ハイブリッド・アカシアと呼ぶ) が、幹の通直性、枝打ち作業の簡便さ (枝が少なく、勝手に枯れ落ちてくれる)、そして親の両種よりも成長が早いという特徴を持つために、パルプ用材として注目を浴びている。このハイブリッド・アカシアは、自然に交雑種ができるのを待つしかなかったが、最近では、その人工的繁殖維持も可能となり、重要な熱帯早生樹として注目されている。

しかし、パルプ用材として優れた木材かどうかは、重量だけでは分からない。また、木材の密度とパルプ化、あるいはそれから抄く紙の性質に相関があるという報告もあるが、その関係は直接的ではないと思われる。そこで、パルプ用材としての木材の性質を調べる一つの方法に、化学成分の定量や解剖学的特徴を調べるという方法がある。例えば、パルプ用材として、あるいはそれから抄く紙がより優れた性質を持つためには、リグニンや抽出成分が少ない (=セルロースが多い)、繊維細胞長が適当な長さであり、道管が短い・小さい、などの特徴を持つ木材が好ましいとされる³⁾。本稿では、パルプ材としての評価を念頭に、解剖学的特徴の調査を、ハイブリッド・アカシアについて行った。また、熱帯材の解剖学的研究を行うに当たり、三次元構造データの有用性について議論する。

2. 試料・方法

2.1 試料

ハイブリッド・アカシアと、その親であるマンギウム (*Acacia mangium*) と、アウリキュリフォルミス (*A. auriculiformis*) を、インドネシア MHP 社の試験地より伐採して得た。いずれも 7 年生のものを選んだ。幹の直径が 8 cm になる箇所と、地際から 10 cm の箇所の間時点で円盤を採集し、実験に供した。

2.2 定法による解剖学的記述

円盤より 2.5 cm 角の立方体を切り出し、TAPPI⁴⁾ の規格に従い各化学成分量を求めた。また 2 cm 角の立方体を切り出し、氷酢酸と過酸化水素水混液処理による細胞解離を行い、各細胞 (繊維細胞、道管、放射方向柔細胞など) を顕微鏡観察に供した。またブロックからスライディングマイクロトームを使って切片を切り出し、サフラニンで染色の上、顕微鏡観察に供した。観察から得られた繊維細胞の直径 (D)、壁厚 (T_{CW})、内孔径 (D_L)、長さ (L) を使い、次の値を算出した。

- RR (Runkel Ratio) : $\frac{2 \cdot T_{CW}}{D_L}$
- MR (Muhlsteff's Ratio) : $\frac{D^2 - D_L^2}{D^2}$; 断面積ベースでの、細胞に対する細胞壁部分の比
- SR (Slender Ratio) : $\frac{L}{D}$

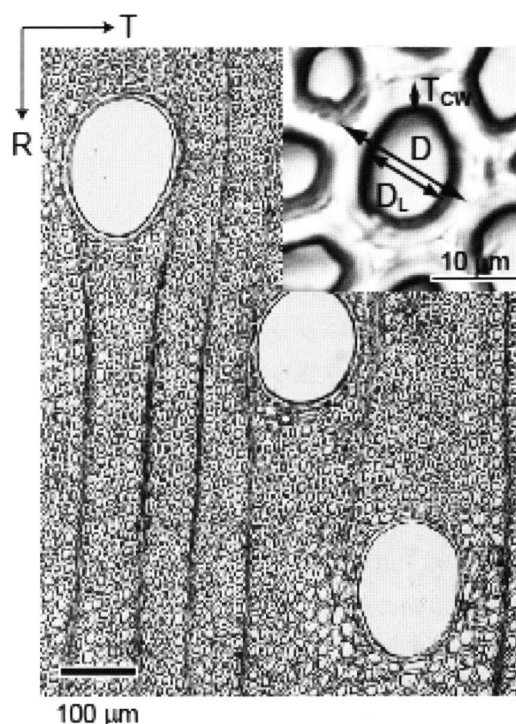


図 2 : アカシアの横断面切片 (上が樹皮側)
Inset: 繊維細胞の拡大像と、各計測パラメーター

- CR (Coefficient of Rigidity) : $\frac{T_{CW}}{D}$
- CF (Coefficient of Flexibility) : $\frac{D_L}{D}$

2.3 三次元再構成データによる解析

10×5×20 mm (T×R×L) のブロックから、長さ方向に 200 枚の連続切片を 25 μm 厚で作製し、無染色でスライドガラスに封入した。これを、共焦点レーザー顕微鏡を使って観察し、切片の厚み方向中央付近の一焦点面からのリグニンの自家蛍光を使って結像させた。得られた画像データ群は、お互いに xy- 方向で微妙にずれているため、Reconstruct パッケージ⁵⁾を使いそのずれを補正 (アライメント) し、その上で積み重ねを行い、三次元構造データを再構成した。200 枚の連続切片を使用した。そのデータセットを使って Image J により三次元構造の解釈を行った。図 3 にその概要を示す。なお、一スライスを切片厚の 25 μm として解釈を行った。

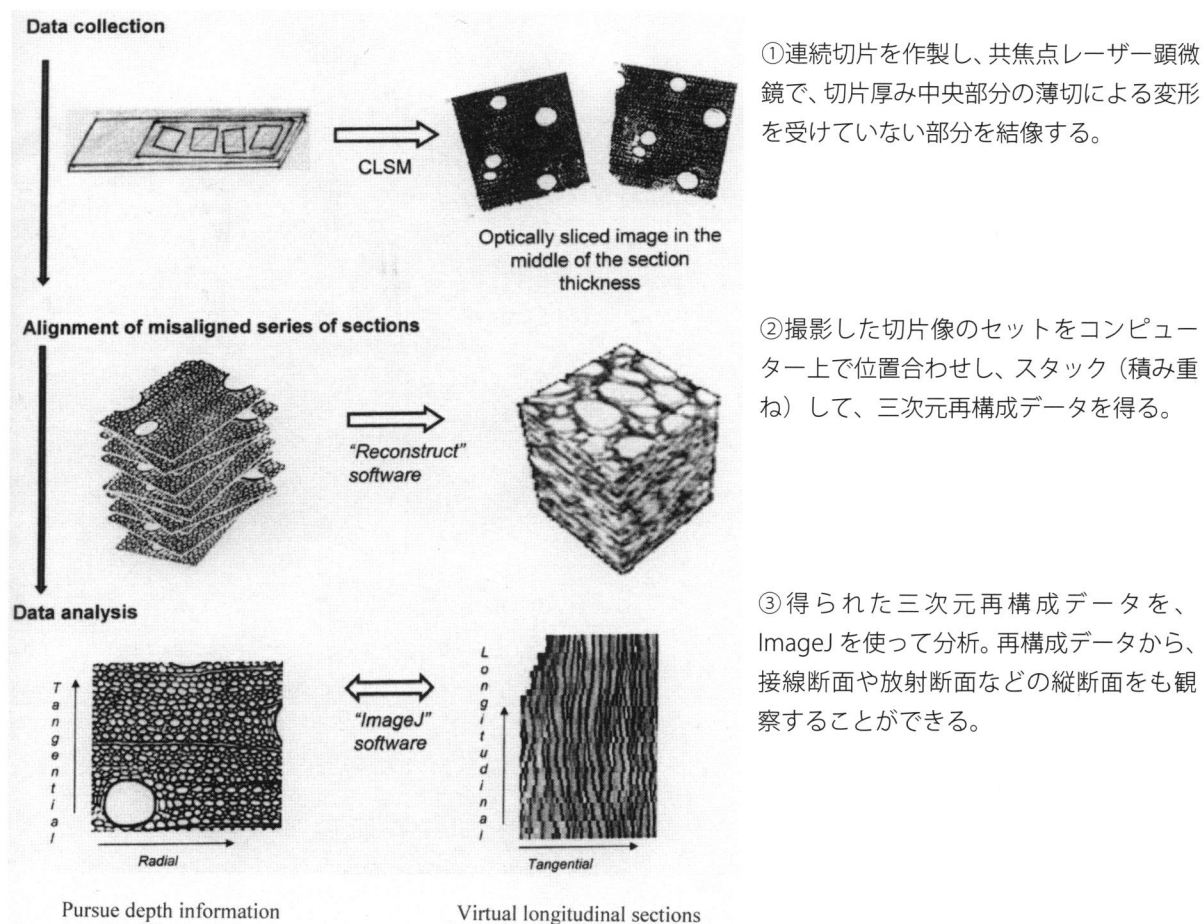


図 3 : 三次元像再構成の流れ (参考文献 2 より引用)

3. 結果・考察

3.1 化学成分分析

まず、化学成分をハイブリッド・アカシア、マンギウム、アウリキュリフォルミスの 3 樹種で同

定したところ(表1)、リグニン量と密度では有意差は認められなかったが、抽出成分量(アルコール・ベンゼン抽出画分)は、ハイブリッドが他の二種よりも有意に低く、パルプ化工程でハイブリッドが有利であることが推測された。またパルプの実質成分である多糖成分については、ホロセルロース量では、ハイブリッドは他の二種よりも有意に高かった。 α -セルロース量では、ハイブリッドはアウリキュリフォルミスより有意に高かったが、マンガウムとは有意な差は認められない。またこれらの違いも大きいものではないことから、パルプ化工程が理想的に進めば、これらのアカシア間でパルプ収率に大きな違いはないと思われる。

表1：アカシア 3 樹種の化学成分値(参考文献 1 より引用)

Species	Alcohol-benzene extraction (%)	Holocellulose (%)	α -cellulose (%)	Lignin (%)	Density (g cm ⁻³)
<i>Acacia hybrid</i>	2.9	82.9	45.4	30.9	0.49
<i>Acacia mangium</i>	5.4**	80.4**	45.7	31.3	0.46
<i>Acacia auriculiformis</i>	6.0**	71.3**	40.6*	34.1	0.52

*95% 信頼区間によるハイブリッドとの有意差; **99% 信頼区間によるハイブリッドとの有意差 (Student の *t*-検定による)

3.2 解剖学的特徴

次に、解離した細胞試料および切片の顕微鏡観察から得られたデータを表2に示す。いずれもルンケル比は1以下で、製紙に適したものである。しかし、ハイブリッドは他の二種よりも繊維細胞が若干長く、またハイブリッドのスレンダー比は有意に高い。紙力やしなやかさの点で親の二種と異なる紙質を持つことが推測される。また、道管の割合は低いことから、ハイブリッドから作った紙の印刷インク顔料によるピックアップの可能性は低いと推測される。要約すると、ハイブリッドは、親の二種と比較して異なる性質を持つ紙を与え、それはより強くしなやかな性質であると推測される。

表2：アカシア 3 樹種の解剖学的特徴(参考文献 1 より引用)

Species	Characters of fiber cells				Morphological parameters of fiber cells					Proportion (%)			
	Length (μ m)	Diameter (μ m)	Lumen	Cell Wall	RR	MR	SR	CR	FC	Fiber	Ray cells	Paren-chyma	Vessels
			Diameter (μ m)	Thickness (μ m)									
<i>Acacia hybrid</i>	1068	18.76	13.74	2.51	0.37	46.2	57.4	0.13	0.73	73	8.5	9.4	9.5
<i>Acacia mangium</i>	982**	19.39	14.29	2.55	0.37	45.9	51.3*	0.13	0.73	62**	9.8	16*	12**
<i>Acacia auriculiformis</i>	879**	16.74*	11.13*	2.81	0.55	55	52.7**	0.17	0.67	68*	9.1	11	12**

*95% 信頼区間によるハイブリッドとの有意差; **99% 信頼区間によるハイブリッドとの有意差 (Student の *t*-検定による)

3.3 三次元特徴

以上のような通常の光学顕微鏡観察では、物体の投影像を情報とする。したがって、ある平面で物体を切り取ったときに見られる特徴をもとに分析を行う。したがって、どうしても情報は二次元のものに限られてしまう。本庄らは、軸方向柔細胞の長さが、紡錘形始原細胞とほぼ同じであることを根拠に、一枚の横断面切片から繊維細胞の長さを推定する方法を提案している⁶⁾。この方法は、横断

面像という二次元データから、データ平面と直交方向の情報である細胞の長さを、簡便に測定できる点で優れている。一方で、三次元構造を再構成する本法ならば、連続切片を作製する手間は必要だが、解剖学上の特徴を三次元で設定することができると考えられる。事実、図2からは、一つの繊維細胞の上端と下端が *xy*- 方向に並進していることが見られる。このような特徴は、解繊した繊維細胞では観察できず、材組織中における真の形状を表していると考えられる(図4)。よって、例えば、繊維細胞の頂端部の分布などから繊維細胞の伸長成長の様子(挿入成長の様子)に関する情報や、成長応力に関する考察など、基礎的研究においても重要なデータを提供してくれるものと期待される。応用面においても、繊維細胞の先細りの程度を定量することで、パルプ特性のより細かな評価が可能となるなど、従前にはなかった観点から解剖学的特徴の評価が可能になると考えられる。

また、もう一つの長所として、三次元構造の中で一つ一つの細胞の特徴を調査することができる点が挙げられる。この点を生かし、道管からの距離と繊維細胞の長さをプロットしたのが図5である。道管から離れた繊維細胞ほど長い傾向が明らかに見られた。また、接線方向と放射方向両者において、道管からある一定距離(細胞数)離れると繊維長が一定になることが分かる。道管に近い繊維細胞は、どうしても短い道管要素細胞と合わせる形で短くなってしまいうために、道管からの距離は繊維細胞長に影響する大きな因子となることは容易に想像できる。しかし興味深いことに、放射方向の方が、より遠くの繊維細胞まで影響を与えることが判明した。道管の断面形状(図2)から、道管分化時の道管要素細胞は放射方向により拡大すると考えられる。このために、繊維細胞がその長さを決定する際に道管から受ける影響は、接線方向よりも放射方向でより強いという解釈が、一つの可能性として考えられる。放射方向に長く伸びた道管の形状は、樹木一般にしばしば見られる特徴であり、様々な樹種でも同様な傾向を示すのか、大変興味深い。

以上のように、木材の解剖学的特徴を三次元で捉えることで、今までにない、様々な解剖学研究が進むものと期待される。特に年輪構造がはっきりしないなど、解剖学的特徴が乏しいと考えられてきた熱帯材の研究にとって、有用なツールとなることが期待される。

参考文献

- 1) Yahya, R., Sugiyama, J., Silsia, D., Gril, J., Some anatomical features of an *Acacia* hybrid, *A. mangium* and *A. auriculiformis* grown in indonesia with regard to pulp yield and paper strength, *J. Tropical Forest Sci.*, **22**, 343-351, 2010

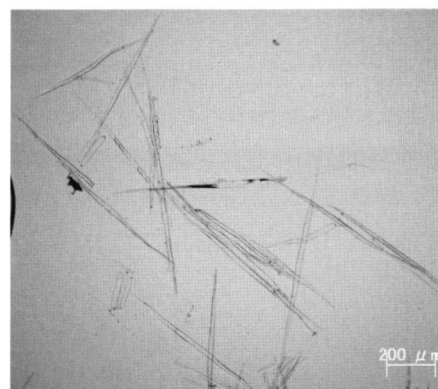


図4：解繊した繊維細胞。図2の三次元再構成データの縦断面で見られるような波打ちは見られない

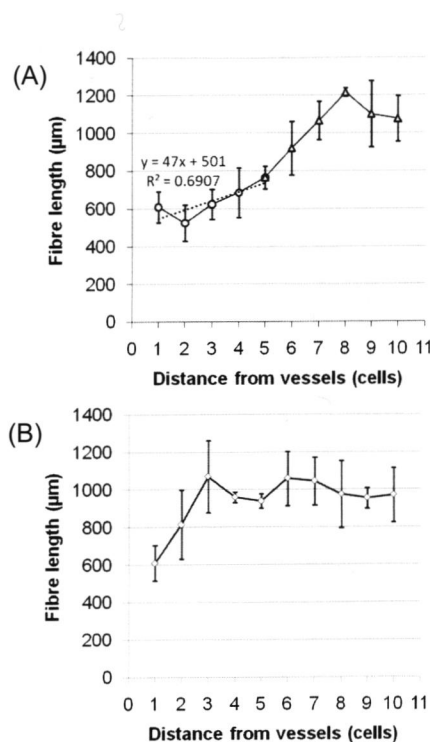


図5：繊維細胞における、道管からの距離(細胞数)と細胞長との関係(参考文献2より引用)

A: 放射方向; B: 接線方向

- 2) Yahya, R., Koze, K., Sugiyama, J., Fibre length in relation to the distance from vessels and contact with rays in *Acacia mangium*, *IWA J.*, **32**, 341-350, 2011.
- 3) 日本木材学会編「パルプおよび紙」，文永堂出版，12pp., 1991.
- 4) TAPPI, *Tappi Test Methods*, T204, T222, T9 and T203, Tappi Press, 1994
- 5) Fiala J. C., *Reconstruct*: a free editor for serial section microscopy, *J. Microscopy* **218**, 52-61 2005.
- 6) Honjo, K., Ogata, Y., Fujita, M., Introduction and verification of a novel method for measuring wood fiber length using a single cross section in *Acacia mangium*, *Trees*, **20**, 356-362, 2006.