

九州大学大学院農学研究院 助教授

小名俊博

「高リサイクル性を有する森林資源の開発」

研究期間：平成10年12月1日～平成15年11月30日

1. 研究実施の概要

京都議定書以降、森林が吸収する大気中の CO₂ を取引することにより、各国の目標を達成するための CO₂ 排出権取引が活発化している。2,000 年現在、世界で持続可能な植林面積は約 1.9 億 ha あり、さらに年間 4.5 百万 ha の増加が報告されている。しかしながら、持続的に植林を行い、また健全に森林を維持するためには、産業的に有用な森林資源を創出することが重要なファクターの一つとなる。これが達成されて初めて、森林のリサイクルが可能となると言える。樹木を産業的に育成する場合、優良個体を選抜し用いることは生産性を向上する上で非常に重要である。成長面からの選抜は外観から判断出来るため容易である。しかしながら、ある個体から紙が何枚作れ、どのような強度を有しているというような品質(材質)面での選抜は、非常に労力を要するためこれまでの課題となっていた。

一方、森林のリサイクルと同様に重要なのが古紙(パルプ繊維)のリサイクルである。最近の環境(省エネルギー、CO₂ の排出削減)への関心の高まりから、古紙(パルプ繊維)の回収、再利用の高度化が社会のニーズとなっている。各社でも古紙配合率の増加等でこれに対応している。しかしながら、リサイクルを繰り返すとパルプ繊維は製紙工程等で劣化するため、紙が白くならない、強度が低下するなどの問題を引き起こし、古紙の配合率を増加させる際の大きな障害となっている。この克服のため、紙力増強剤等を多く添加し工程管理をしているのが実情である。しかしながら、改善にも限界がある上に、合成薬品を添加することは環境に対して好ましい手法とは言えない。このような状況から原料を根本的に見直す、つまりリサイクルに対して耐久性がある森林資源、すなわち樹木を植林して使用することが重要と言える。これにより、森林のリサイクルと古紙のリサイクルの一体化が生まれ、真の原料のリサイクルが可能になり、真の資源循環型社会の構築が可能となる。

この実現には次のような課題があった。第一にリサイクルに耐久性を持った森林資源(パルプ繊維)の同定があげられる。リサイクルに適した繊維の形態や成分は判然としておらず、この検討が必要であった。特に、化学パルプの代表であるクラフトパルプ(KP)においては、リサイクルに伴う強度の低下が一番の課題であり、強度低下をしない、またはしばらく個体の存在有無を検討した。一方、資源の有効利用の観点から、高収率パルプ、特に機械パルプ(MP)の製造は重要である。MP は、一般に強度面でのリサイクル性が高いことが知られているが、リグニンを含めたポリフェノールが多量に残存しているため、白色度が低い、熱や光による色戻りの問題などがある。紙をリサイクルする際、特に色戻りは漂白薬品を多量に消費するため重要な課題である。そこで、この色戻りがしばらく個体の存在有無を検討した。第二に、高リサイクル耐性を有した個体(樹木)の選抜技術の開発である。既存の中からいわゆるエリートを迅速に同定選抜する技術が必要であった。第三に、選抜した個体の交雑育種(植林)である。この際、同樹種間では有り得ないような、両親の成長を遥かに上回るケースが見られる、異種間の交雑種も重要なターゲットとなるため、これを検討した。第四に、高リサイクル性を有するパルプ繊維の発生機構の解明である。これは、その発生原因解明が将来の遺伝子組み換え等に必要である。

以上のように短期的な視野から長期的な視野も含めて、大気中 CO₂ の固定量を増加し、省エネルギーを達成しながらパルプ繊維を通じて、資源循環型社会の実現を検討した。

高リサイクル性を有する個体(樹木)の選抜

(1) KP

西オーストラリア南部と中南部に植林され、近似した気象状況のもと、同様に植林・育成された *Eucalyptus globulus*(9.5 年生)を用いて、高成長、高クラフトパルプ収率を持ち、かつ引張強さにおいて高リサイクル性を有する優良個体の選抜を検討した。合計 31 個体を用い、

それぞれの個体からカップー価17～22のクラフトパルプを調製し、PFIミルにより7,500回叩解、JIS P 8222 に従って、各個体について手すき紙を作製した。湿潤状態の手すき紙を80℃で24時間乾燥し、再び離解する処理を施す工程をリサイクル1回とし、5回までリサイクル処理を繰り返し、引張強さを測定した。さらにカーブフィッティングを行い、引張強さとリサイクル回数に関する非線形回帰式を得た。非線形回帰のパターンは異なり、リサイクルによる引張強さの減少の機構に違いがあることが示唆されている。言い換えると、初めて紙にした引張強度は同じでも、リサイクルことを繰り返すことにより、強度の減少の仕方は同様でないことを意味する。この回帰式から、リサイクル回数を無限大としたときの引張強さの予測値を算出した。この結果、用いた試料全てのリサイクル回数を産業的平均値である3回と仮定すると、リサイクル7.22回(リサイクル寿命2.41倍)可能な個体の選抜が可能であることが判明した(図1、表1)。

成長では平均値の1.85倍、パルプ収量では平均値の1.20倍を有する個体の選抜が可能であることが判明した。これらの特性はお互いに関係がなく、総合的には平均値に対してリサイクル回数で2.37倍、成長で1.85倍、パルプ収量で0.97倍の個体が選抜された。以上のことから、原料である樹木を選抜することにより、製品である紙のリサイクルを促進し、資源循環型社会の構築が可能になることが判明した。

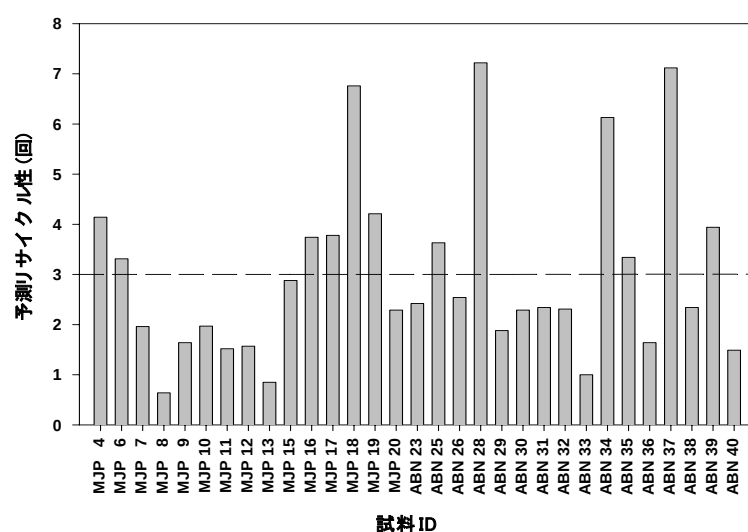


図1 ユーカリ *E. globulus* KPリサイクル性個体間差

表1 高リサイクル性を有する個体の材積(成長)、パルプ収量およびリサイクル性ならびに31個体の最小値、平均値および最大値(KP)

特性	MJP18	ABN28	ABN34	ABN37	最小値	平均値	最大値
材積 (m ³)	0.438	0.090	0.351	0.473	0.082	0.256	0.473
パルプ収量 (kg・m ⁻³)	270	229	264	265	206	273	328
リサイクル性 (回)	6.76	7.22	6.13	7.12	0.64	3.00	7.22

材積は樹皮下の容量を表す。

(2) MP

(1)と同じ *E. globulus* を材料として用い、MP の一種であり新聞紙に多く配合される CTMP (chemithermomechanical pulp) において高収率を持ち、かつ色戻りにおいて高リサイクル性を有する優良個体の選抜を検討した。合計7個体を用い、それぞれの個体を5%Na₂SO₃水溶液(pH9.9)で70℃、1時間、更に20℃で11時間処理した後、135℃で5分間予熱後、3分間デファイブレーターで一次解繊し、PFIミルにより二次解繊することによりCTMPを調製し、JIS P 8222に従って各個体について手すき紙を作製した。これを105℃で24時間加熱する加熱試験ならびに254 nmの紫外線を60分間照射し(野外での直射日光照射2から3年分に相当)色戻りを同定した(光退色試験)。この結果、漂白することなく最大で白色度68.5%が得られ、いわゆる通常のリサイクル用紙の白色度と遜色のない紙が得られた(表2)。比較対照として項目4で取り上げた *Acacia mangium* を表に加えた。*E. globulus* においてはパ

ルプ収量も $405 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ と高く、高白度、高収量の CTMP が製造可能であることが判明した。また、加熱試験、光退色試験においては、大きな個体間差が見られたが、最大でそれぞれ白度 54.6% および 65.1% と非常に良好なものも認められた。総合的には平均値に対して加熱試験後白度で 1.02 倍、光退色後白度で 1.02 倍、成長で 1.19 倍、パルプ収量で 1.04 倍の個体が選抜された。以上のことから、高収量・高白度、かつ低熱・光退色性の優良個体の選抜が可能と考えられ、リサイクル性のみならず、資源の有効利用への道が開かれた。

表2 高リサイクル性を有する個体の材積(成長)、パルプ収量および白度の変化ならびに7個体の最小値、平均値および最大値(MP)

特性	MJP1	MJP4	ABN38	Acacia	最小値	平均値	最大値
材積 (m^3)	0.258	0.312	0.242	-	0.231	0.262	0.312
パルプ収量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	302	372	396	-	302	358	405
未処理白度 (%)	65.2	65.9	67.9	30.2	60.3	65.0	68.5
加熱処理白度 (%)	63.5	64.0	64.9	-	57.8	62.5	65.1
光退色処理白度 (%)	52.1	52.8	54.6	-	48.4	51.6	54.6

材積は樹皮下の容量を表す。

高リサイクル性を有する樹木の迅速・非破壊的な選抜方法ならびに自動選抜装置の開発

高リサイクル性を有する樹木の迅速・非破壊的な選抜方法を確認するため、FT-ラマン分光法による検討を行った。スペクトルは、Nicolet Raman 960 spectrometer を用い 1064 nm の Nd: YAG レーザー、InGaAs 検出器を用いて測定した。試料として 20 mesh pass ($840 \mu\text{m}$ 以下) の木粉を用い、NMR チューブにつめて 180° 後方散乱、レーザーパワー 500 mW 、分解能 4 cm^{-1} で 512 回スキャンを、低温恒温槽を用いて 22°C で行った。リサイクル性が異なると、スペクトルは特徴的に異なり、またその二次微分値はさらに特徴的であることから (図 2 a、b)、 $100\text{--}1800 \text{ cm}^{-1}$ ラマンシフトを多変量解析ソフト Unscrambler 7.5 により Multiplicative Scatter Correction 後二次微分し、PLS 法、さらにジャクナイフ法により不安定な変数 (波数) を除去、図 1 に示したリサイクル性の実測値に対して検量線を作成した後、検定した (図 3 a、b)。この結果、検量線で相関係数 0.996、標準誤差 0.16、検定で相関係数 0.918、標準誤差 0.70 と有意義に高い相関を得た。以上から、木粉を分析することにより、製品としての寿命

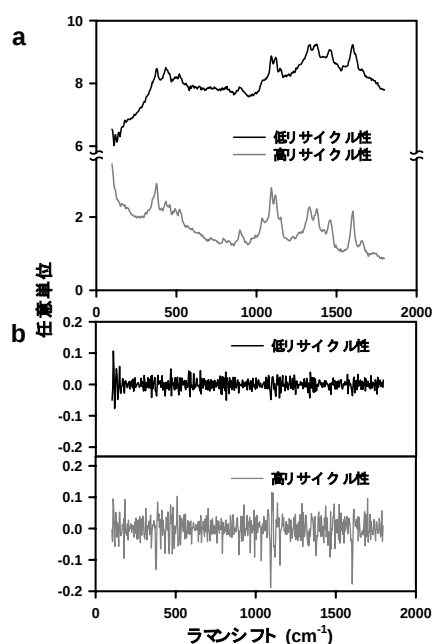


図2 リサイクル性の異なる試料のスペクトル例(a)とその二次微分(b)

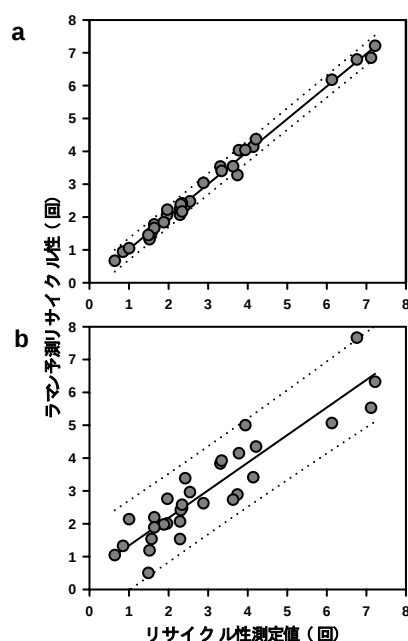


図3 リサイクル性検量線(a)と検定(b)

である紙のリサイクル性について予測可能であることが判明した。さらに、本システムの自動化にも成功したため（図4）、高リサイクル性を有する樹木の迅速・非破壊的な選抜方法ならびに自動選抜装置を確立した。本手法はホロセルロース、 α -セルロース、ヘミセルロース、リグニン、抽出物、アルカリ抽出物および全抽出物の各含有率、リグニンのシリリングル核/グアイアシル核比、ヘミセルロースを構成するグルコース、キシロース、ガラクトース、ラムノース、アラビノースおよびマンノースのモル比、容積密度数、細胞壁率、木繊維長、道管長、木繊維細胞率、放射柔細胞率、軸方向柔細胞率、放射方向・接線方向における道管・木繊維細胞の直径、平均直径、および放射方向における道管・木繊維細胞の細胞壁の厚さ、において同様にまた同時に約8分で非破壊的定量が可能であることが判明した。これらにより、プラントが異なる場合でも紙・パルプの特性と木材の特性の間に相関が一般に見出されるため、本手法の適用範囲の広さが裏付けられた。



図4 自動選抜装置

選抜した個体の交雑育種

交雑育種により、さらにリサイクル性や成長の向上が見込めるかどうかをマレーシアボルネオ島北部に植林され、近似した気象状況のもと、同様に植林・育成した樹齢 11 年生の *Acacia mangium* (AM)、*Acacia auriculiformis* (AA)、さらにこの 2 種を交配し作出したハイブリッド材 (*A. mangium* x *A. auriculiformis*: AH) を用いて検討を行った。

まず、リサイクル処理によるシート物性の変化に及ぼす樹種の影響および各樹種における個体間差について検討を行なった。この結果、リサイクル処理によるシートの物理特性の変化には樹種間、個体間において違いがあり、特に AA のシートの引張強さは低かった。シートの引張強さとリサイクル回数に関して回帰曲線を適用することにより、リサイクル処理を無限に繰り返したときの比引張強さを予想することが可能となった。その結果、個体によって比引張強さの収束値が異なることが判明した（図 5）。AM は AA よりもリサイクル性が高い樹種特性が認められた、AH では AM と AA の傾向両方が認められたと同時に、リサイクル性が両親に比べて高いような個体も認められた。このため、アカシアにおいてもユーカリと同様にリサイクル性の高い個体の選抜が可能であることが判明した。さらにハイブリッドの創出により、両親よりもさらにリサイクル性を向上させる可能性が示唆されたが、今後の検討が必要である。

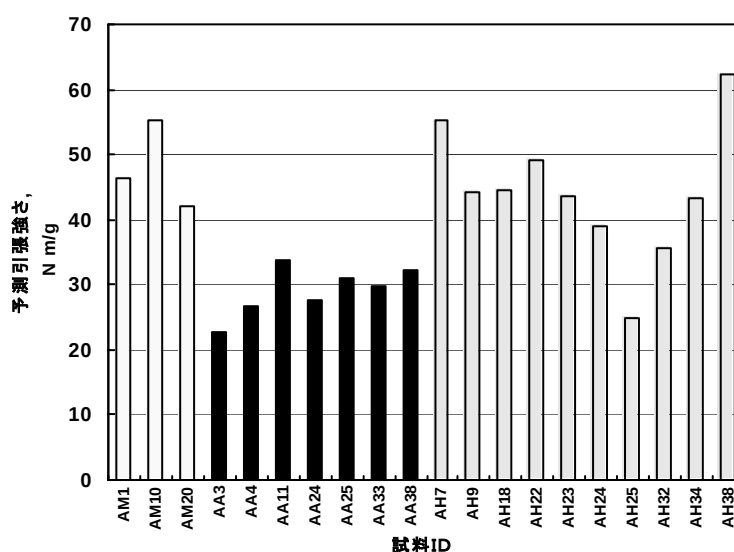


図5 比引張強さの予測収束値

次に、成長速度として各樹種 44 個体の胸高直径および樹高を比較した（表 3）。AHの胸高直

径値は、AM、AAに対して 95%レベルで有意義に高いことから、AHの平均成長速度は両親に比べ高いと言える。樹高に関しても、同様に有意義に高いことが判明した。以上から、交雑種（AH）の成長速度は、両親より有意義に高いと結論され、交雑種を創出することにより、樹木の成長性を改善できることが示唆された。

表3 胸高直径データ

樹種	胸高直径平均値 (cm)	胸高直径分散	樹高平均値 (m)	樹高分散
AM	20.7	22.4	20.3	14.0
AA	19.0	22.0	20.1	11.1
AH	22.5	25.0	23.7	6.3

一方、材の未成熟から成熟材への移行が樹齢(形成層齢)によるものか、あるいは直径(肥大成長)によるものかは、植林木の管理上非常に重要な課題である。つまり、材の性質として利用に好ましい成熟材部が、樹齢によってしか発現しないと、樹木を早く生長させても量的なメリットはあるが、質的なメリットは望めないことになる。そこで、気乾密度、マイクロフィブリル傾角、繊維方向ヤング率および繊維長に着目し、これらの変化を成熟材の指標として肥大成長量との関係を検討した。この結果、マイクロフィブリル傾角でははっきりしないものの、気乾密度、繊維方向ヤング率および繊維長では、成熟材になる、つまり各種の値が放射方向で髄から樹皮に向かって増加し一定になるのは、樹齢ではなく肥大成長に関係していることが判明した。このため早成樹で心配される、成長速度を大きくすることが材質を悪化させる、という予測はあたらないことを明らかにした。

以上から、交雑種を創出し、施肥を十分に行う植林木の育成は、リサイクル性の向上と成長の促進の両方を同時に達成する方法として有効であることが示唆され、資源循環に望ましい方法であることが判明した。

高リサイクル性を有する樹木の発生機構の解明

(1) *E. globulus* KP

リサイクル性と樹木中の細胞の特徴についてラマン分光法、熱分解法などを用い検討した、この結果、各種の繊維の特徴と有意義に高い相関を得た（表4）。

表4 リサイクル性と樹木中の繊維の特徴における有意義に高い相関係数(31 試料)

マン ノース (mol%)	ヘミセル ロース (%)	cis-Coniferyl alcohol (mol%)	繊維ルー メン直径 (μm)	繊維柔 軟係数 (-)	ガラク トース (mol%)	セル ロース (%)	Methyl guaiacol (mol%)	繊維長 (mm)	アラビ ノース (mol%)
0.580***	0.413*	0.367*	0.347*	0.312*	-0.502**	-0.467**	-0.355*	-0.344*	-0.305*

樹木中の繊維の形態はラマン分光法により予測した。*** 99.9%レベルで有意義、** 99%レベルで有意義、* 95%レベルで有意義

材中のマンノースなどのヘミセルロースを構成する中性糖は蒸解性と関係していることから、リグニンとの結合が想像され、これらが蒸解中に溶出し易いかどうかにより、パルプ繊維に与えるダメージが決まることが予想される。また、ヘミセルロースはセルロースに比べ柔軟性が高く、また水に対する親和性も高いことから、繊維に残留または再吸着される場合も想像され、繊維の柔軟度が形態的にも、また成分的にも高いことが、高リサイクル性を発生する機構と考えられるが、更なる検討が必要である。

(2) *E. globulus* MP

リサイクル性と樹木中の細胞の特徴についてラマン分光法、熱分解法などを用い検討した、この結果、各種の繊維の特徴と有意義に高い相関を得た（表5）。

表5 リサイクル性(処理後白色度)と樹木中の繊維の特徴における有意義に高い相関係数(6または7 試料)

加熱処理後白色度 (%)		光退色処理後白色度(%)			
ホロセルロース (%)	抽出物 (%)	リグニン シリン ギル核/グアイア シル核 (-)	繊維直径 (μm)	Methyl guaiacol [#] (mol%)	Vinyl guaiacol [#] (mol%)
0.670**	-0.595*	0.662*	-0.615*	-0.724*	-0.611*

樹木中の繊維の形態はラマン分光法により予測した。*** 99%レベルで有意義、** 95%レベルで有意義、* 90%レベルで有意義、[#]6個体使用

表から、加熱による色戻りは主に糖類に起因しており、光による色戻りは主にリグニンに起因していることが判明し、それぞれの発生機構が異なることが示唆された。特に光による色戻りはその程度が大きく、MP のリサイクルにおいてはキーファクターと言える。これは樹木中のリグニンのシリンギル核が多いと抑制され、グアイアシル核が多いと助長されることが判明した。一方、光による色戻りについて、有機アルカリ試薬としてテトラブチルアンモニウム ヒドロキシドを用いて、高・低光退色性の二個体のオリジナルな木材に対して反応熱分解を行い、詳細な検討を行った。この結果、従来言われてきたようなカルボニル化合物の影響は認められたものの小さかった。これに対し、syringol、methylsyringol、methylguaiacol および vinylsyringol が非常に重要な因子であることが判明した。シリンギル核が色戻りを抑制し、グアイアシル核が助長することは、通常の熱分解の結果と良い一致を見せた。また、これまでの報告で重要性が指摘されたことがあるスチルベン構造は、重要な因子ではないことが判明した。

以上から、加熱および光による色戻りは独立の材特性に起因していると考えられることから、優良個体の選抜が材特性の解析から可能と考えられ、今後の育種並びに抽出された材特性をターゲットとした遺伝子組み換えが期待される。

さらに光退色における照射温度の影響を検討した。光退色において温度効果は認められ(図 6)、温度が高いほど白色度減少は大きくなり、また照射時間とともにその減少率も大きくなった。印刷物が夏季の直射日光で高温になる状況は有り得ることであり、こうした状況下での使用は光退色を促進させるもので、回収された紙の保存にも注意を払う必要があることが示唆された。

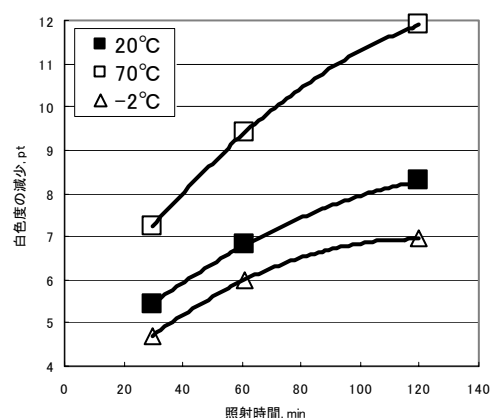


図6 光退色における温度の影響

まとめ

紙という製品の寿命であるリサイクル性を、原料段階において予測することが可能であることを証明した。また、原料から見直し、選抜、交雑、植林を繰り返すことにより、リサイクル量、成長量および収量をさらに向上させる可能性を証明した。KP と MP という異なる二大プロセスにおいてこれらを証明し、それぞれのリサイクル性が異なった因子により発生していることを示唆した。植林においては、施肥がこれらの結果を妨げないことが証明され、森林施業の促進が期待される。

結論として、選抜という短期的な視野から遺伝子組み換えという長期的な視野も含めて、森のリサイクルと紙のリサイクルを一体化することにより、大気中 CO₂ の固定量を増加し、省エネルギーを達成しながらパルプ繊維を通じて、資源循環型社会の実現が可能であることが本プロジェクトから判明した。

2. 研究構想

京都議定書以降、森林が吸収する大気中のCO₂を取引することにより、各国の目標を達成するためのCO₂排出権取引が活発化している。2,000年現在、世界で持続可能な植林面積は約1.9億haあり、さらに年間4.5百万haの増加が報告されている。しかしながら、持続的に植林を行い、また健全に森林を維持するためには、産業的に有用な森林資源を創出することが重要なファクターの一つとなる。これが達成されて初めて、森林のリサイクルが可能となると言える。

樹木を産業的に育成する場合、優良個体を選抜し用いることは生産性を向上する上で非常に重要である。成長面からの選抜は外観から判断出来るため容易である。しかしながら、ある個体から紙が何枚作れ、どのような強度を有しているというような品質（材質）面での選抜は、非常に労力を要するためこれまでの課題となっていた。

世界各国で植林事業が展開されており、この問題を解決すべく本研究代表者を中心に研究を行ってきた。この結果、現在は樹木一個体の幹全体の評価を、木を伐倒することなく、幹から採った直径12mmの棒状試料をラマン分光計で分析することにより予測する方法を開発した。この方法では、樹木の化学成分に着目し、これを分析することにより一試料につき5～10分程度の速さで樹木成分量、成分の構造、更にパルプ（紙）にした場合の収率、強度、色（白色度）等を予測出来る。

一方、森林のリサイクルと同様に重要なのが古紙（パルプ繊維）のリサイクルである。最近の環境（省エネルギー、CO₂の排出削減）への関心の高まりから、古紙（パルプ繊維）の回収、再利用の高度化が社会のニーズとなっている。当社でも古紙配合率の増加等でこれに対応している。しかしながら、リサイクルを繰り返すとパルプ繊維は製紙工程等で劣化するため、紙が白くならない、強度が低下するなどの問題を引き起こし、古紙の配合率を増加させる際の大きな障害となっている。この克服のため、紙力増強剤等を多く添加し工程管理をしているのが実情である。しかしながら、改善にも限界がある上に、合成薬品を添加することは環境に対して好ましい手法とは言えない。このような状況から原料を根本的に見直す、つまり、リサイクルに対して耐久性がある森林資源、すなわち樹木を植林して使用することが重要と言える。これにより、森林のリサイクルと古紙のリサイクルの一体化が生まれ、真の原料のリサイクルが可能になり、真の資源循環型社会の構築が可能となる。

この実現には次のような課題があった。

第一にリサイクルに耐久性を持った森林資源（パルプ繊維）の同定があげられる。リサイクルに適した繊維の形態や成分は判然としておらず、この検討が必要であった。特に、化学パルプの代表であるクラフトパルプ（KP）においては、リサイクルに伴う強度の低下が一番の課題であり、強度低下をしない、またはしづらい個体の存在有無を検討した。一方、資源の有効利用の観点から、高収率パルプ、特に機械パルプ（MP）の製造は重要である。MPは、一般に強度面でのリサイクル性が高いことが知られているが、リグニンを含めたポリフェノールが多量に残存しているため、白色度が低い、熱や光による色戻りの問題などがある。紙をリサイクルする際、特に色戻りは漂白薬品を多量に消費するため重要な課題である。そこで、この色戻りがしづらい個体の存在有無を検討した。

第二に、高リサイクル耐性を有した個体（樹木）の選抜技術の開発である。既存の中からいわゆるエリートを迅速に同定選抜する技術が必要であった。第三に、選抜した個体の交雑育種（植林）である。この際、同樹種間では有り得ないような、両親の成長を遥かに上回るケースが見られる、異種間の交雑種も重要なターゲットとなるため、これを検討した。第四に、高リサイクル性を有するパルプ繊維の発生機構の解明である。こ

れは、その発生原因解明が将来の遺伝子組み換え等に必要なである。

以上のように短期的な視野から長期的な視野も含めて、大気中のCO₂の固定量を増加し、省エネルギーを達成しながらパルプ繊維を通じて、高リサイクル社会を実現しようというのが本研究の構想である。

3. 研究成果

3. 1 パルプ繊維の同定

(1) 研究内容及び成果

高リサイクル性を有する早成樹の特徴 (ユーカリ KP)

西オーストラリア南部と中南部に植林され、近似した気象状況のもと、同様に植林・育成された *Eucalyptus globulus* (9.5 年生) を用いて、高成長、高クラフトパルプ収率を持ち、かつ引張強さにおいて高リサイクル性を有する優良個体の選抜を検討した。合計 31 個体を用い、それぞれの個体からカップー価 17~22 のクラフトパルプを調製し、PFI ミルにより 7,500 回叩解、JIS P 8222 に従って、各個体について手すき紙を作製した。湿潤状態の手すき紙を 80℃ で 24 時間乾燥し、再び離解する処理を施す工程をリサイクル 1 回とし、5 回までリサイクル処理を繰り返し、引張強さを測定した。リサイクル前のシートの比引張強さが約 80 Nm/g のものを 4 個体選び、リサイクル処理によってどのように変化するかを、図 1 に示した。本研究で用いた個体はいずれも同一樹齢で、同様のカップー価に蒸解しているが、シートの引張強さが変化しなくなるまでのリサイクル回数、及びリサイクル 5 回目の引張強さには個体間差が生じていた。

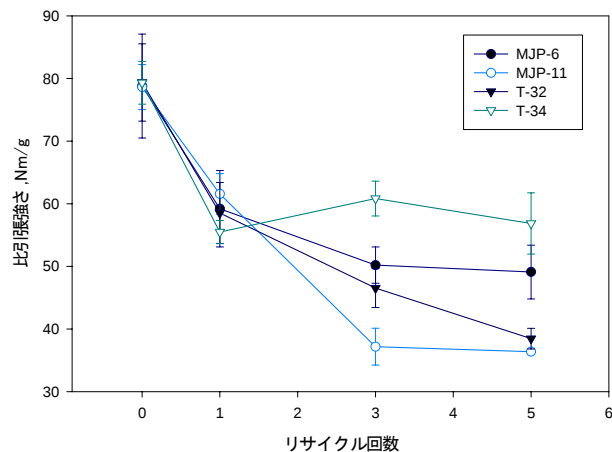


図 1 リサイクル回数とシートの引張強さ

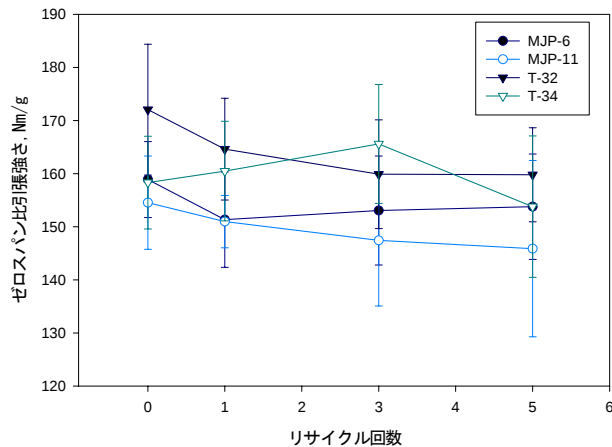


図 2 リサイクル回数とゼロスパン比引張強さ

図 1 に示した試料について、シートのゼロスパン比引張強さの変化を図 2 に示した。リサイクル回数の増加に伴うゼロスパン比引張強さの低下はいずれも小さかった。したがって、リサイクル処理によって単繊維強度自身はほとんどダメージを受けていないことが確認された。

シート密度の変化を図 3 に示した。リサイクル処理によっていずれの個体のシート密度も低下した。特に、シートの比引張強さが最も低下した MJP-11 ではリサイクル 5 回目におけるシート密度が 0.58g/cm^3 と最も低かったのに対して、シートの引張強さの低下が最も少なかった T-34 ではリサイクル 5 回目におけるシート密度が 0.65

g/cm³と最も高くなった。

図4には、シートの比散乱係数の変化について示した。比散乱係数は繊維間結合の指標であり、小さいほど繊維間結合面積が大きいことを示している。いずれの個体もリサイクル処理によって比散乱係数が上昇した。MJP-11の比散乱係数はリサイクルに伴って大きく上昇しており、リサイクル5回目において396cm²/gであったのに対して、T-34では242cm²/g、MJP-6では309cm²/gとそれぞれ低い値を示した。この結果は引張強さ及びシート密度の変化とよく対応している。シート密度及び比散乱係数の結果からパルプのリサイクル性には繊維間結合面積の割合が大きく影響することが示唆された。

Kajaani Fiber Lab を用いて測定した4個体のルンケル比、及び保水度のリサイクル処理による変化について表1に示した。

いずれの個体のルンケル比もリサイクル処理により減少した。ルンケル比は2×細胞壁厚/繊維幅で表される、製紙適性の指標である。MJP-6とT-34はリサイクル5回目におけるルンケル比がそれぞれ1.51と1.40であり、他の2個体よりも低い値を示した。従って、リサイクル5回目において低いルンケル比を有する個体は、シートの引張強さの低下が少ないことが認められた。

いずれの個体においてもリサイクル処理により保水度が低下していた。特にMJP-6およびT-34のリサイクル5回目の保水度はいずれも108%と他の2個体よりも高い値となった。従って、リサ

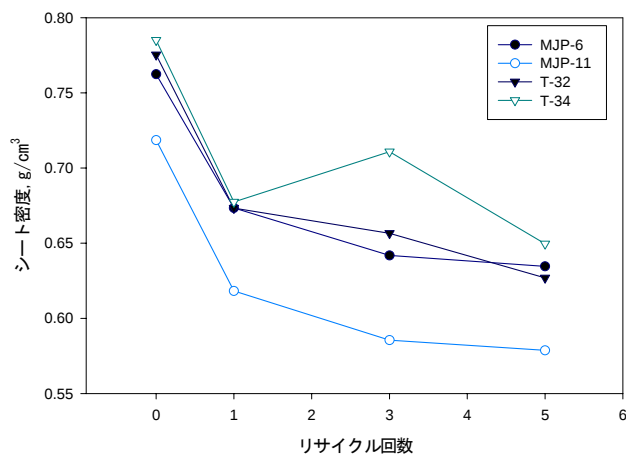


図3 リサイクル回数とシート密度

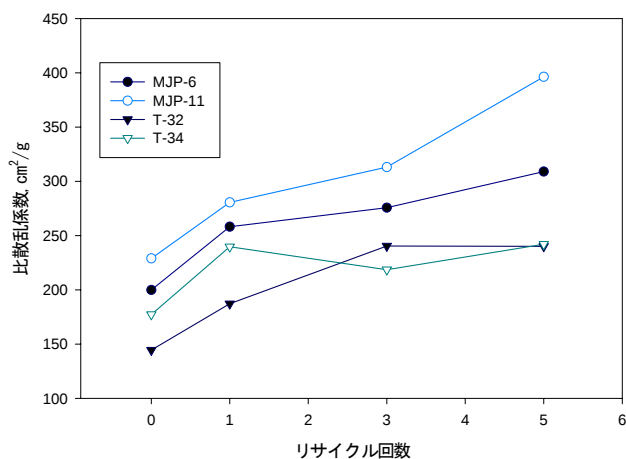


図4 リサイクル回数とシートの比散乱係数

表1 KAJAANI FIBER LAB を用いて測定したユーカリ材パルプの繊維形態

ルンケル比				0 回目に対する 5 回目の比
	リサイクル回数	0	1	5
MJP-6		2.51	1.82	1.51
MJP-11		2.43	2.00	1.90
T-32		3.20	2.04	1.66
T-34		2.34	1.77	1.40

保水度(%)				0 回目に対する 5 回目の比
	リサイクル回数	0	1	5
MJP-6		162	128	108
MJP-11		156	133	100
T-32		160	126	99
T-34		173	134	108

イクル 5 回目における保水度が高い個体は、シートの引張強さの低下が少ない。

全 33 個体に関して、リサイクル回数別にシートの比引張強さと他のシート物性あるいはパルプ形態との相関を調べ、表 2 にまとめた。

古くからゼロスパン引張強さ及び比散乱係数は、引張強さと密接な関係があるとされているが、いずれのリサイクル回数においても、有意な相関は認められなかった。

しかし、シート密度は引張強さと強い相関が示されたパルプ繊維の形態的特性の中では、リサイクル 5 回目において繊維壁厚及びルンケル比に引張強さとの相関が現れた。この結果は 4 個体に関して行った結果と一致する。一方、リサイクル 0 回目における有意な相関は認められなかった。

表 2 リサイクルによるシートの引張強さの変化に及ぼすシート密度とパルプ繊維特性の影響

リサイクル回数	シートの引張強さ		
	0	1	5
ゼロスパン比引張強さ	0.254	0.220	0.169
シートの比散乱係数	0.089	0.136	-0.113
パルプ繊維長	-0.308	-0.33 3	-0.354
パルプ繊維壁厚	-0.293	-0.15 5	-0.598*
パルプ繊維直径	-0.143	0.306	0.442
ルンケル比	-0.231	-0.42 2	-0.818*
パルプ保水度	0.078	0.551	0.451
シート密度	0.578*	0.690*	0.710*

(*:有意水準 5%)

高リサイクル性を有する早成樹の選抜 (ユーカリ KP)

カーブフィッティングを行い (図 5)、引張強さとリサイクル回数に関する非線形回帰式を得た。非線形回帰のパターンは異なり、リサイクルによる引張強さの減少の機構に違いがあることが示唆されている。言い換えると、初めて紙にした引張強度は同じでも、リサイクルことを繰り返すことにより、強度の減少の仕方は同様でないことを意味する。この回帰式から、リサイクル回数を無限大としたときの引張強さの予測値を算出した。この結果、用いた試料全てのリサイクル回数を産業的平均値である 3 回と仮定すると、リサイクル 7.22 回 (リサイクル寿命 2.41 倍) 可能な個体の選抜が可能であることが判明した (表 3、図 6)。

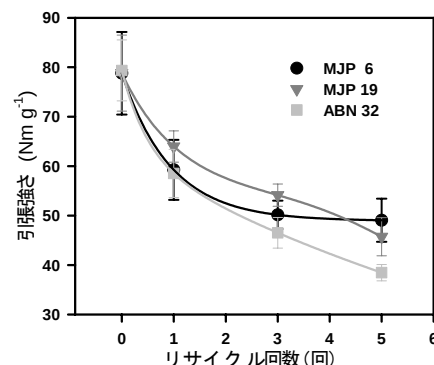


図 5 リサイクル性のカーブフィッティング

表 3 高リサイクル性を有する個体の材積(成長)、パルプ収量およびリサイクル性ならびに 31 個体の最小値、平均値および最大値

特性	MJP18	ABN28	ABN34	ABN37	最小値	平均値	最大値
材積 (m ³)	0.438	0.090	0.351	0.473	0.082	0.256	0.473
パルプ収量 (kg・m ⁻³)	270	229	264	265	206	273	328
リサイクル性 (回)	6.76	7.22	6.13	7.12	0.64	3.00	7.22

材積は樹皮下の容量を表す。

成長では平均値の 1.85 倍、パルプ収量では平均値の 1.20 倍を有する個体の選抜が可能であることが判明した。これらの特性はお互いに関係がなく、総合的には平均値

に対してリサイクル回数で 2.37 倍、成長で 1.85 倍、パルプ収量で 0.97 倍の個体が選抜された。以上のことから、原料である樹木を選抜することにより、製品である紙のリサイクルを促進し、資源循環型社会の構築が可能になることが判明した。

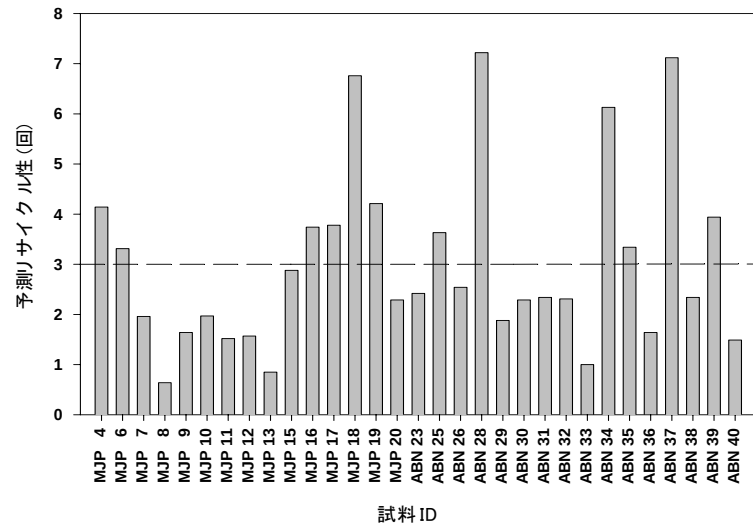


図 6 ユーカリ *E. globulus* KPリサイクル性個体間差

高リサイクル性を有する早成樹の特徴（アカシア KP）

マレーシア ボルネオ島北部に植林され、近似した気象状況のもと、同様に植林・

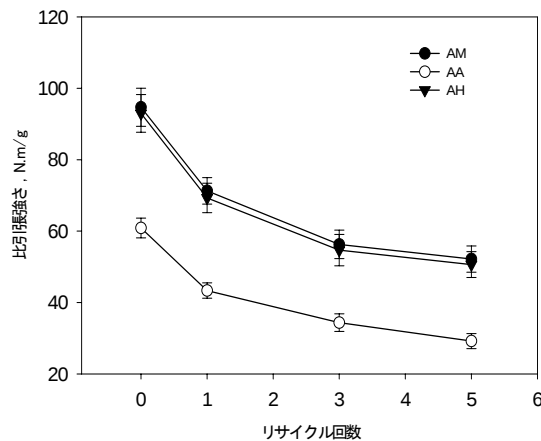


図 7 リサイクル回数とアカシア材パルプ繊維シートの引張強さ

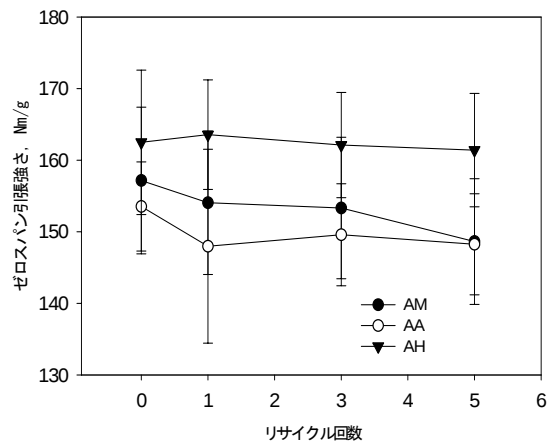


図 8 リサイクル回数とアカシア材パルプ繊維シートのゼロスパン引張強さ

育成した樹齢 11 年生の *Acacia mangium* (AM)、*Acacia auriculiformis* (AA)、さらにこの 2 種を交配し作出したハイブリッド材 (*A. mangium* x *A. auriculiformis*: AH) を用いて検討を行った。図 7 には、乾湿繰り返しのリサイクル処理によるシートの引張強さの変化をアカシア材の樹種ごとに示したものである。3 樹種ともリサイクル処理 1 回で引張強さは大きく低下し、リサイクル処理回数の増加に伴ってさらに低下した。図 8 には、リサイクル処理に伴うシートのゼロスパン引張強さの変化を示した。ゼロスパン引張強さはパルプ繊維の単繊維強度の指標であり、リサイクル処理による低下はほとんどなく、シートの引張強さに比べて樹種間による差異も少なかった。たがって、シートの引張強さが低下した原因は、パルプ繊維の単繊維強度が低下したためではなく、乾湿繰り返しの処理によって膨潤性の低下、角質化など不可逆的な変化が繊維内部に生じ、繊維間結合が減少したことにあると考えられる。

図9には、各樹種のシートの引裂強さの変化を示した。上記のシートの引張強さ、ゼロスパン引張強さの変化と比べると、樹種によってリサイクル処理による挙動がかなり異なることが判明した。樹種による繊維形態や繊維特性の違いなどが各樹種のシート強度、リサイクル処理による変化の違いに影響を与えていることが推測される。

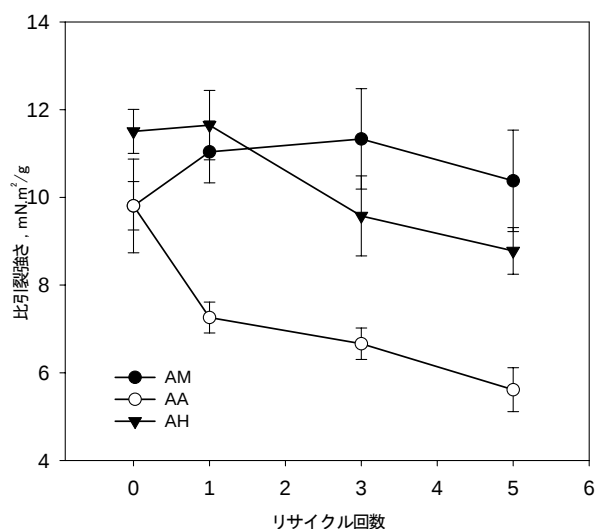


図9 リサイクル回数とアカシア材パルプ繊維シートの引張強さ

高リサイクル性を有する早成樹の選抜と交雑育種の可能性（アカシア KP）

リサイクル処理によるシート物性の変化に及ぼす樹種の影響および各樹種における個体間差について検討を行なった。この結果、リサイクル処理によるシートの物理特性の変化には樹種間、個体間において違いがあり、特に AA のシートの引張強さは低かった。シートの引張強さとリサイクル回数に関して回帰曲線を適用することにより、リサイクル処理を無限に繰り返したときの比引張強さを予想することが可能となった。その結果、個体によって比引張強さの収束値が異なることが判明した(図10)。AMはAAよりもリサイクル性が高い樹種特性が認められた、AHではAMとAAの傾向両方が認められたと同時に、リサイクル性が両親に比べて高いような個体も認められた。このため、アカシアにおいてもユーカリと同様にリサイクル性の高い個体の選抜が可能であることが判明した。さらにハイブリットの創出により、両親よりもさらにリサイクル性を向上させる可能性が示唆された。

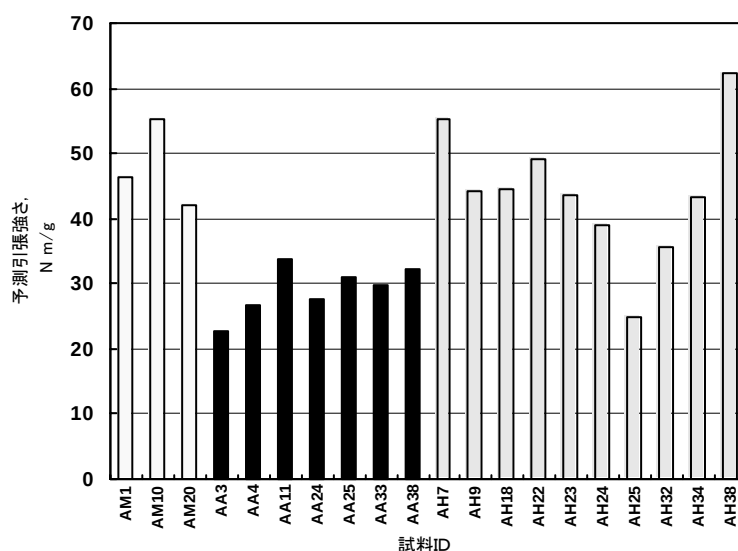


図10 比引張強さの予測収束値

高リサイクル性を有する早成樹の特徴と選抜（ユーカリ MP）

ユーカリ KP と同じ *E. globulus* を材料として用い、MP の一種であり新聞紙に多く配合される CTMP (chemithermomechanical pulp) において高収率を持ち、かつ色戻りにおいて高リサイクル性を有する優良個体の選抜を検討した。合計 7 個体を用い、それぞれの個体を 5%Na₂SO₃ 水溶液 (pH9.9) で 70℃、1 時間、更に 20℃で 11 時間処理した後、135℃で 5 分間予熱後、3 分間デファイブレーターで一次解繊し、PFI ミルにより二次解繊することにより CTMP を調製し、JIS P 8222 に従って各個体について手すき紙を作製した。これを 105℃で 24 時間加熱する加熱試験ならびに 254 nm の紫外線を 60 分間照射し（野外での直射日光照射 2 から 3 年分に相当）色戻りを同定した（光退色試験）。この結果、漂白することなく最大で白色度 68.5%が得られ、いわゆる通常のリサイクル用紙の白色度と遜色のない紙が得られた（表 4）。比較対照として項目 4 で取り上げた *Acacia mangium* を表に加えた。*E. globulus* においてはパルプ収量も 405 kg・m⁻³ と高く、高白色度、高収量の CTMP が製造可能であることが判明した。また、加熱試験、光退色試験においては、大きな個体間差が見られたが、最大でそれぞれ白色度 54.6%および 65.1%と非常に良好なものも認められた。総合的には平均値に対して加熱試験後白色度で 1.02 倍、光退色後白色度で 1.02 倍、成長で 1.19 倍、パルプ収量で 1.04 倍の個体が選抜された。以上のことから、高収量・高白色度、かつ低熱・光退色性の優良個体の選抜が可能と考えられ、リサイクル性のみならず、資源の有効利用への道が開かれた。

表 4 高リサイクル性を有する個体の材積（成長）、パルプ収量および白色度の変化ならびに 7 個体の最小値、平均値および最大値（MP）

特性	MJP1	MJP4	ABN38	Acacia	最小値	平均値	最大値
材積 (m ³)	0.258	0.312	0.242	-	0.231	0.262	0.312
パルプ収量 (kg・m ⁻³)	302	372	396	-	302	358	405
未処理白色度 (%)	65.2	65.9	67.9	30.2	60.3	65.0	68.5
加熱処理白色度 (%)	63.5	64.0	64.9	-	57.8	62.5	65.1
光退色処理白色度 (%)	52.1	52.8	54.6	-	48.4	51.6	54.6

材積は樹皮下の容量を表す。

高リサイクル性を有する早成樹の特徴（ユーカリ細胞形態）

木材の細胞形態とパルプ特性は、密接な関係を持っている。例えば、道管の直径が大きく、長さが長い場合には、ベッセルピッキングと呼ばれる、印刷面の白抜け及び版汚れを起こす原因になる。一方、木繊維は長ければ紙の強度は増加するが、反対に、長すぎる場合には、均一な紙シートを形成することが難しくなる。また、木繊維の壁厚は、パルプ収率に大きな影響を及ぼす。さらに、放射柔細胞及び軸方向柔細胞は、パルプ中に残った場合、しみや斑点の原因となる。このように、木材の細胞形態とパルプ特性は深く関連しており、より高収率、高品質なパルプを得るために木材の細胞形態を把握することは重要である。

本研究では、高リサイクルパルプ用樹木育種のための基礎的知見を得るために、近年パルプ原料として注目を浴びている早成樹種である、2 種のユーカリについて細胞形態の樹幹内変異の観察を光学顕微鏡とイメージアナライザーを組み合わせた定量顕微鏡法により行った。また、繊維形態と容積密度の関係を調査するとともに、パルプ特性に関する材質育種のための成長錐コアの採取位置について検討をした。

[道管要素長の樹幹内変異]

E. camaldulensis、*E. globulus* における道管要素長の樹幹内変異について図 1 1、

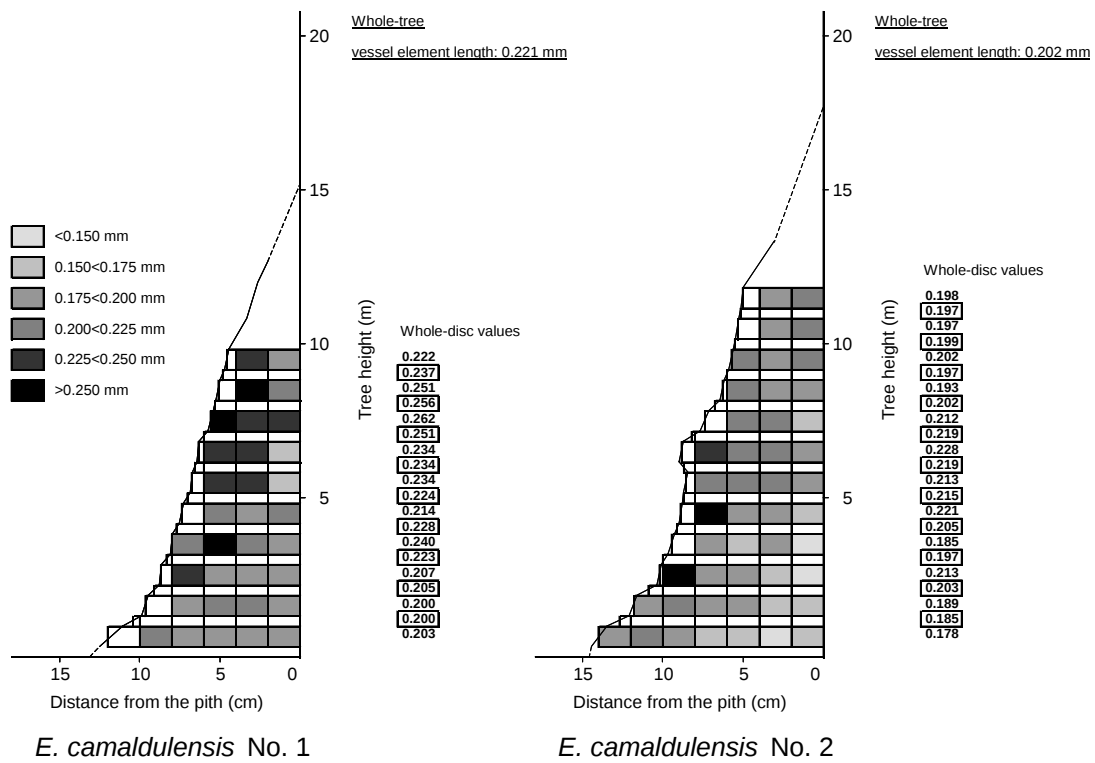


図 11 *E. camaldulensis* における道管要素長の樹幹内変異

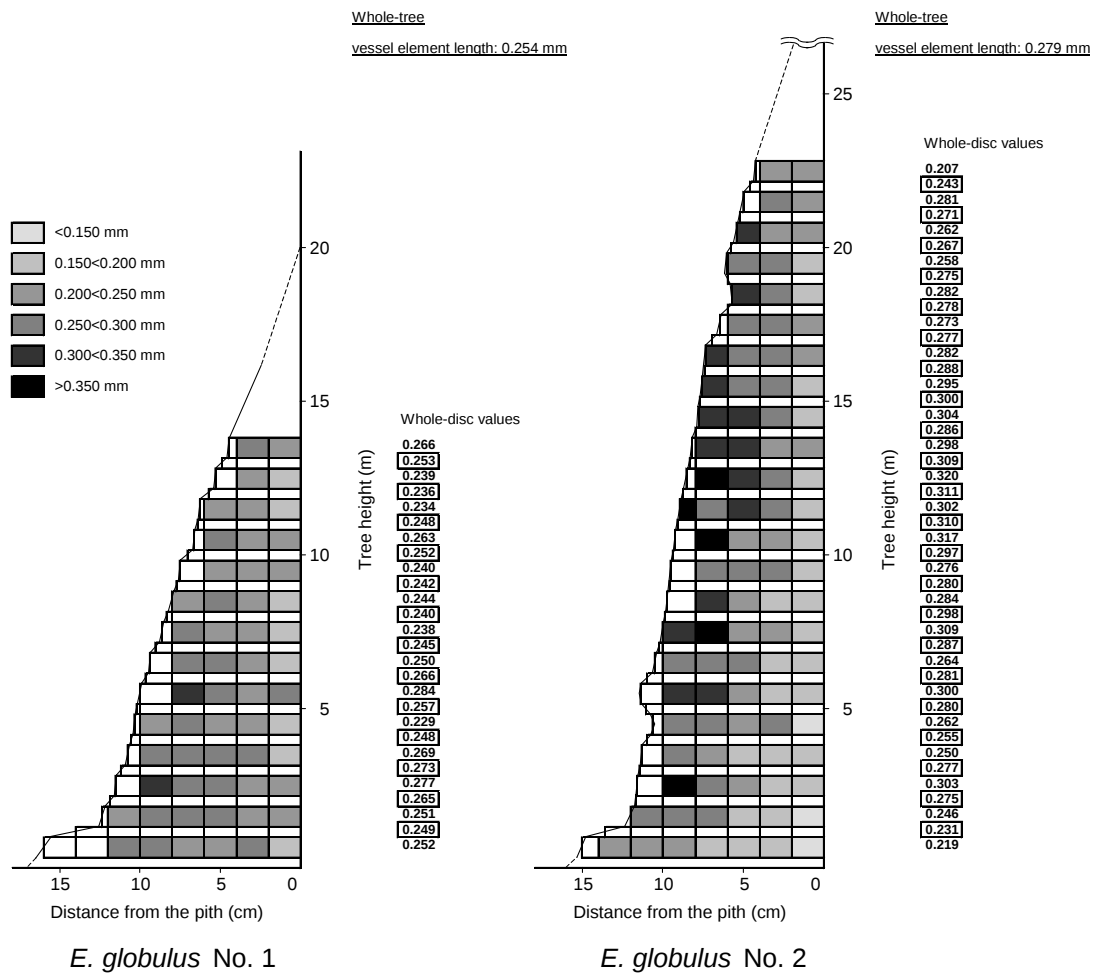


図 12 *E. globulus* における道管要素長の樹幹内変異

図12に示す。*E. camaldulensis*のNo. 1、No. 2の両個体において、道管要素長は、放射方向で、髄側から樹皮側へ向かってわずかに増加する傾向が見られ、また、軸方向では、樹高の増加とともに増加した。No. 1の道管要素長の平均値は0.214 mm、No. 2は0.189 mmで、個体間に有意差(1%レベル)が認められた。また、道管要素長は、印刷特性に関係しており、長さが短ければ高い印刷特性が得られる。No. 2において、短い道管が髄近くに分布していたことは注目すべき点である。

*E. globulus*において、標準的な成長を示したNo. 1の道管要素長は、放射方向で髄側から樹皮側へ向かって徐々に増加する傾向を示したが、軸方向においては比較的均一に分布する傾向が見られた。No. 2は放射方向においては、No. 1とほぼ同様な変異を示した。しかしながら、軸方向において、髄付近では道管要素長が均一に分布する傾向を示したのに対し、樹皮側付近では樹高の増加に伴い道管要素長が増加する傾向を示した。No. 2は、No. 1よりもわずかに長い道管要素長を持つ傾向を示し、この事実は、*E. camaldulensis*と逆である。No. 1の道管要素長の平均値は0.237 mm、No. 2は0.248 mmで、個体間に有意差(1%レベル)が認められなかった。

印刷の際、紙の表面から道管要素が剥離するベッセルピッキングは、広葉樹パルプにおいて生じる問題である。道管の大きさは、主にピッキングの度合いに影響を与え、長い細胞長と大きな直径を持つ道管がベッセルピッキングを頻繁に引き起こすと考えられている。*E. camaldulensis*において、No. 2の方がNo. 1よりも短い道管要素を形成する傾向を示したが、これは、No. 2はNo. 1に比べて高い印刷特性を示すことを示唆している。

[道管直径の樹幹内変異]

E. camaldulensis、*E. globulus*における道管直径の樹幹内変異を図13、14に示す。*E. camaldulensis*では、道管直径の樹幹内変異は、No. 1、No. 2の両個体において類似した傾向を示した。道管直径は、放射方向において髄側から樹皮側へ向かって徐々に増加し、また軸方向では、樹高の増加とともに増加した。標準的な成長を示したNo. 1と良い成長を示したNo. 2の個体間において、道管直径の値に有意差が見られなかった。

*E. camaldulensis*と同様に、*E. globulus*の両個体において、道管直径は放射方向において髄側から樹皮側へ向かって著しく増加した。一方、軸方向において、髄付近では、道管直径が比較的均一に分布する傾向を示したのに対し、樹皮側付近では、樹高の増加に伴って道管要素長が増加する傾向を示した。No. 2は、No. 1よりもわずかに大きい道管直径を持つ傾向を示したが、この事実は、*E. camaldulensis*と異なる。No. 1の道管要素長の平均値は109.3 μm 、No. 2は113.7 μm で、個体間に有意差(1%レベル)が認められなかった。

最近、*E. globulus*において、パルプ収率と未晒し白色度、カップー価のような蒸解性が、道管直径と有意な相関があることが報告されている。今回得られた結果は、*E. globulus*において樹木の樹皮側の部分が、他の部分よりも高いパルプ収率と良い蒸解性を持つことを示唆している。両樹種ともにNo. 1とNo. 2の間でほぼ同じ道管直径を示しており、前述したように道管要素長の違いを考慮すると、*E. camaldulensis* No. 2がNo. 1よりも優れた印刷特性を持つことが示唆される。

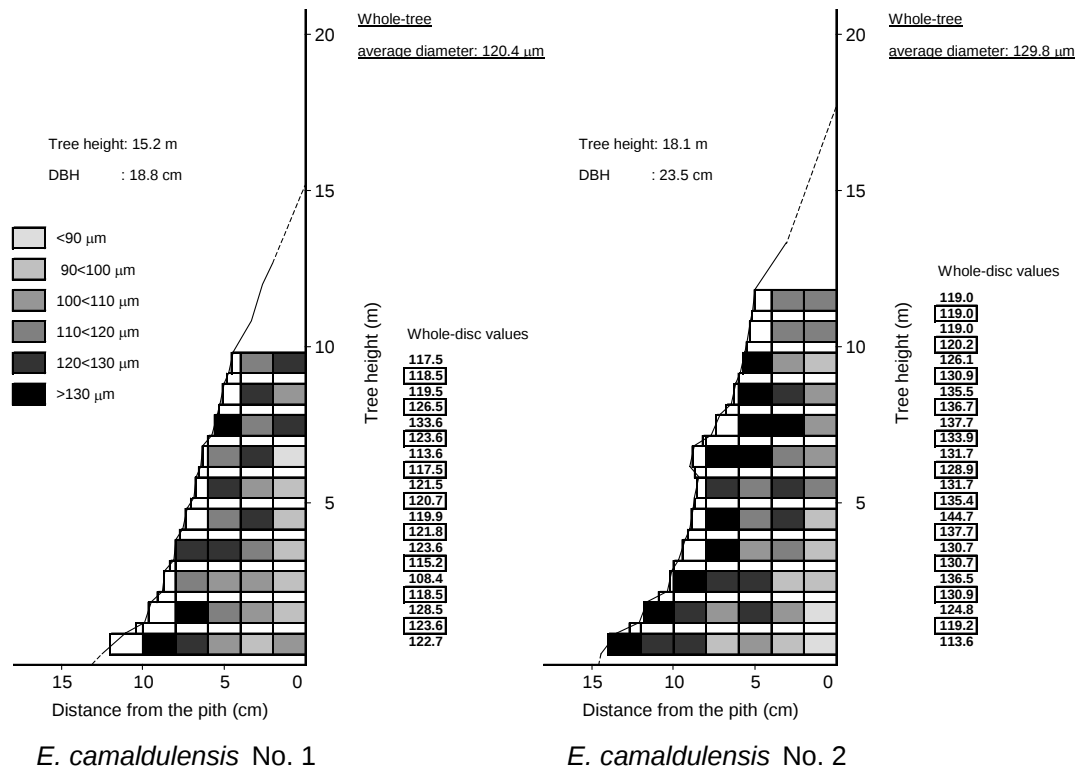


図 13 *E. camaldulensis* における道管直径の樹幹内変異

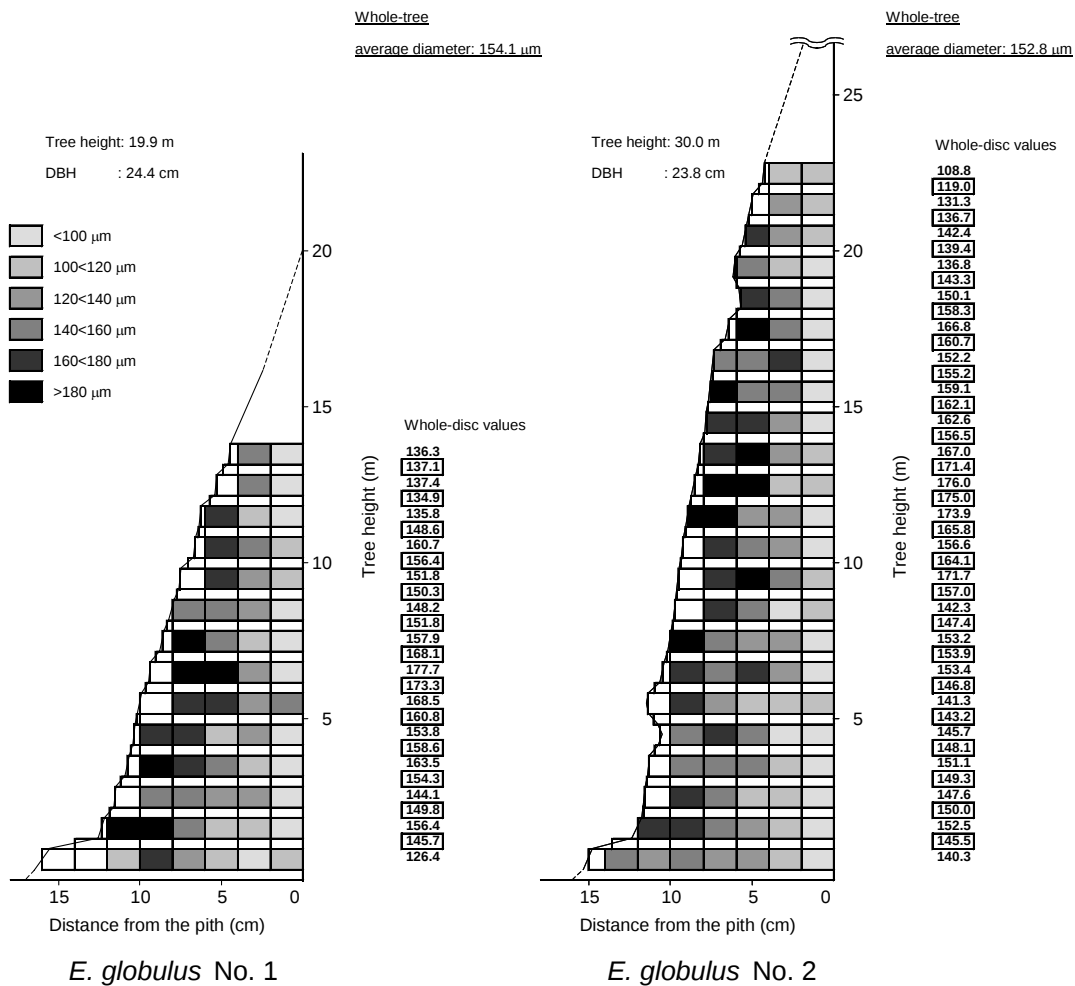


図 14 *E. globulus* における道管直径の樹幹内変異

[道管出現率の樹幹内変異]

E. camaldulensis、*E. globulus*における道管出現率の樹幹内変異を図15、16に示す。*E. camaldulensis*のNo. 1、No. 2の両方において、道管出現率は、放射方向において髄側から樹皮側へ向かって減少した。一方、軸方向において道管出現率の変異は、比較的小さい傾向を示した。道管出現率は、No. 1よりもNo. 2においてかなり低い値を示した。No. 1の道管出現率の平均値は16.1個/mm²、No. 2は11.3個/mm²で、有意差(1%レベル)が見られた。このことは、*E. camaldulensis*において良い成長を示したNo. 2が、標準的な成長を示したNo. 1よりも低い頻度で道管を形成する傾向があることを示している。

*E. camaldulensis*と同様に、*E. globulus*の両個体は、道管出現率において同じような樹幹内変異の傾向を示した。道管出現率は、軸方向においてほぼ同じ分布を示したにもかかわらず、放射方向においては、最初、髄からの距離の増加に伴い急激に減少し、その後樹皮側に向かつて一定になった。成長の良いNo. 2は、標準的な成長を示したNo. 1よりもわずかに高い道管出現率を持つ傾向を示したが、これは、*E. camaldulensis*の場合と逆である。No. 1の平均値は8.3個/mm²、No. 2は9.1個/mm²で、個体間に有意差(1%レベル)は認められなかった。

紙シート当たりの道管数の減少が、結果的にピック数を低下させることは明らかである。このことは、低い道管出現率を持つ材が、高い印刷特性を持つことを示している。従って、少ない道管数を持つ*E. camaldulensis* No. 2が、No. 1よりも高い印刷特性を持つと考えられる。*E. camaldulensis*に対して、*E. globulus*では、両個体間で同様な印刷特性を示した。これらの結果は、前述した道管要素長の結果と一致する。*E. camaldulensis*と*E. globulus*共に成長の良いNo. 2が、ベッセルピッキングを低下させる優れた特性を持つと考えられる。

道管形態と印刷特性の関係を考慮すると、*E. camaldulensis*と*E. globulus*共にNo. 2の方が、優れた印刷特性を持つことが示唆され、道管形態の観点から紙製造でのエリート木であると考えられる。

[繊維長の樹幹内変異]

*E. camaldulensis*において、放射方向では、繊維長は、髄側から樹皮側に向かつて増加する傾向を示し、軸方向では樹高の増加とともにわずかに増加する傾向が見られた(図17)。*E. globulus*においては、放射方向では、髄側から樹皮側に向かつて大きく増加する傾向を示したが、軸方向では樹高の増加に対応した変化がほとんど見られなかった(図18)。一般に、ユーカリ種においては、繊維長は、放射方向では10から20年輪まで著しく増加すると言われており、*E. camaldulensis*、*E. globulus*ともにほぼ同様の傾向を示した。ユーカリ種における木繊維形態、容積密度数の樹幹内変異は、樹種、環境的要因、遺伝的要因、未成熟材の割合などに大きく影響されるので、軸方向での変異の違いは、個体差が原因と考えられる。また、*E. camaldulensis*においてNo. 1に比べて肥大成長の良いNo. 2の方が全体的に繊維長が短く、個体間に有意差が見られたが、*E. globulus*においては有意差は見られなかった。

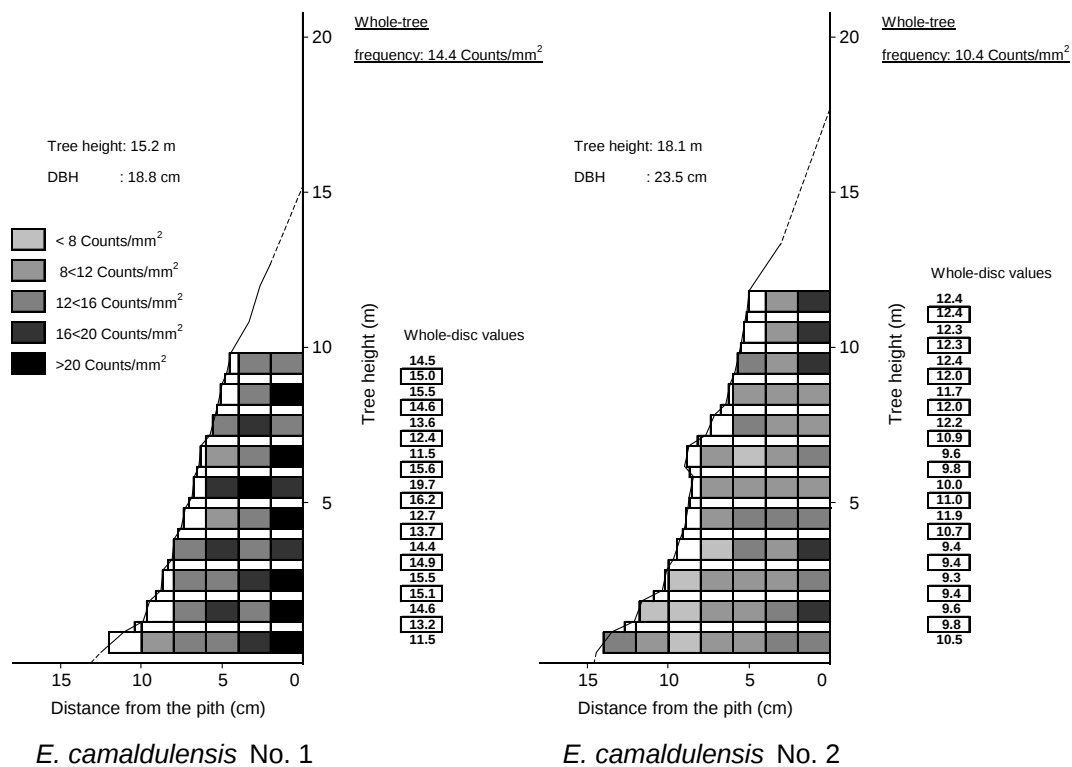


図 15 *E. camaldulensis* における道管出現率の樹幹内変異

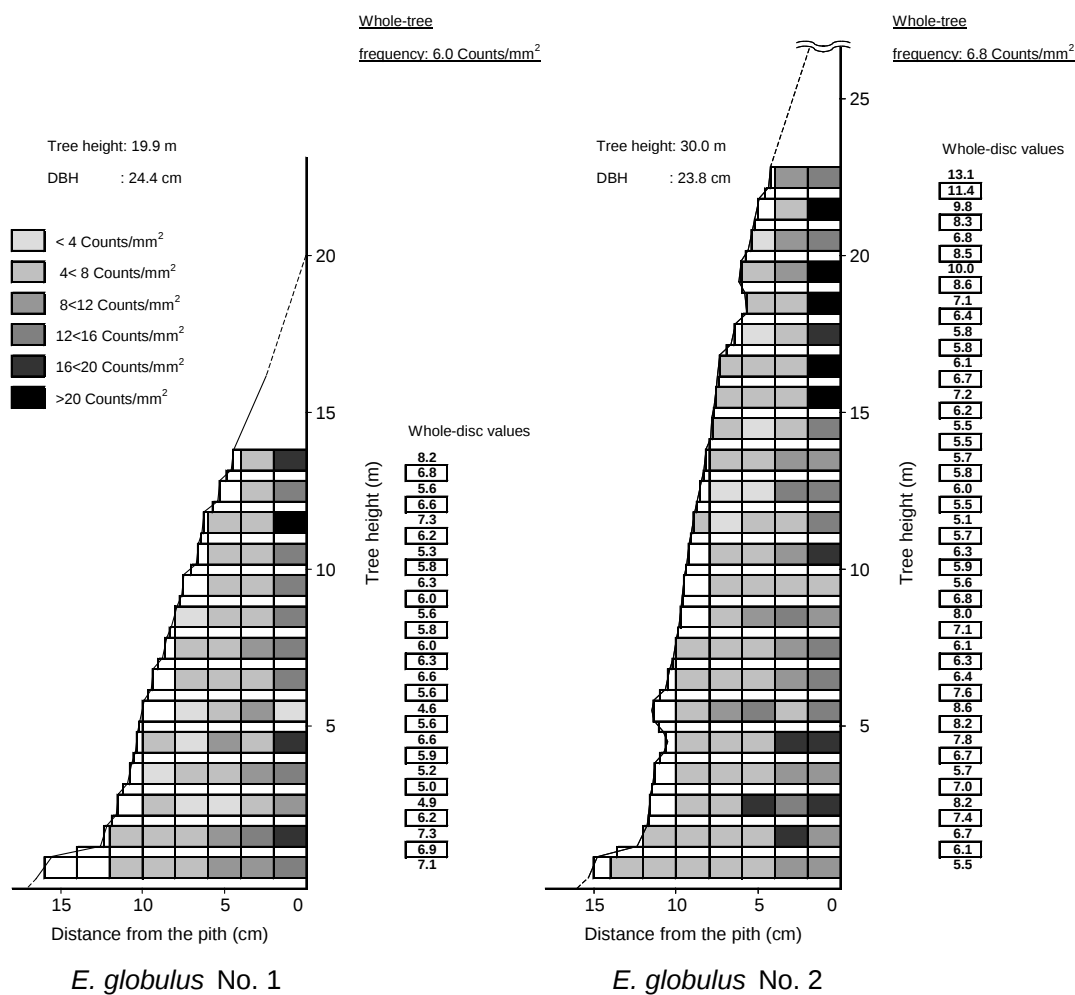


図 16 *E. globulus* における道管出現率の樹幹内変異

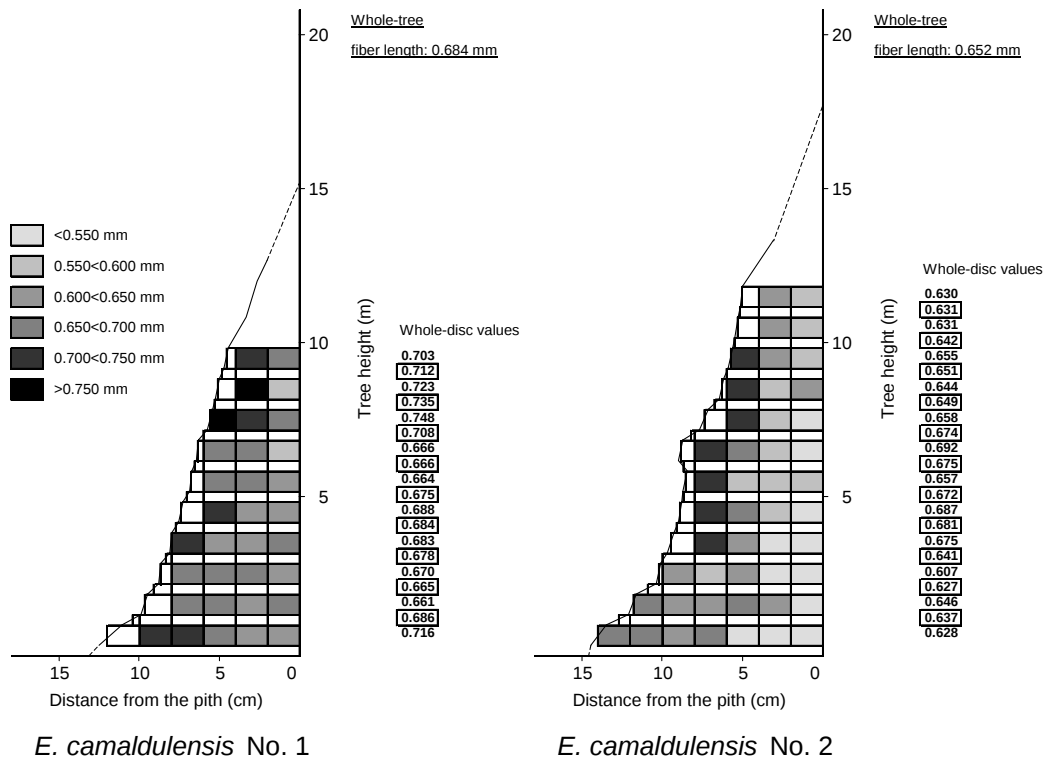


図 17 *E. camaldulensis*における繊維長の樹幹内変異

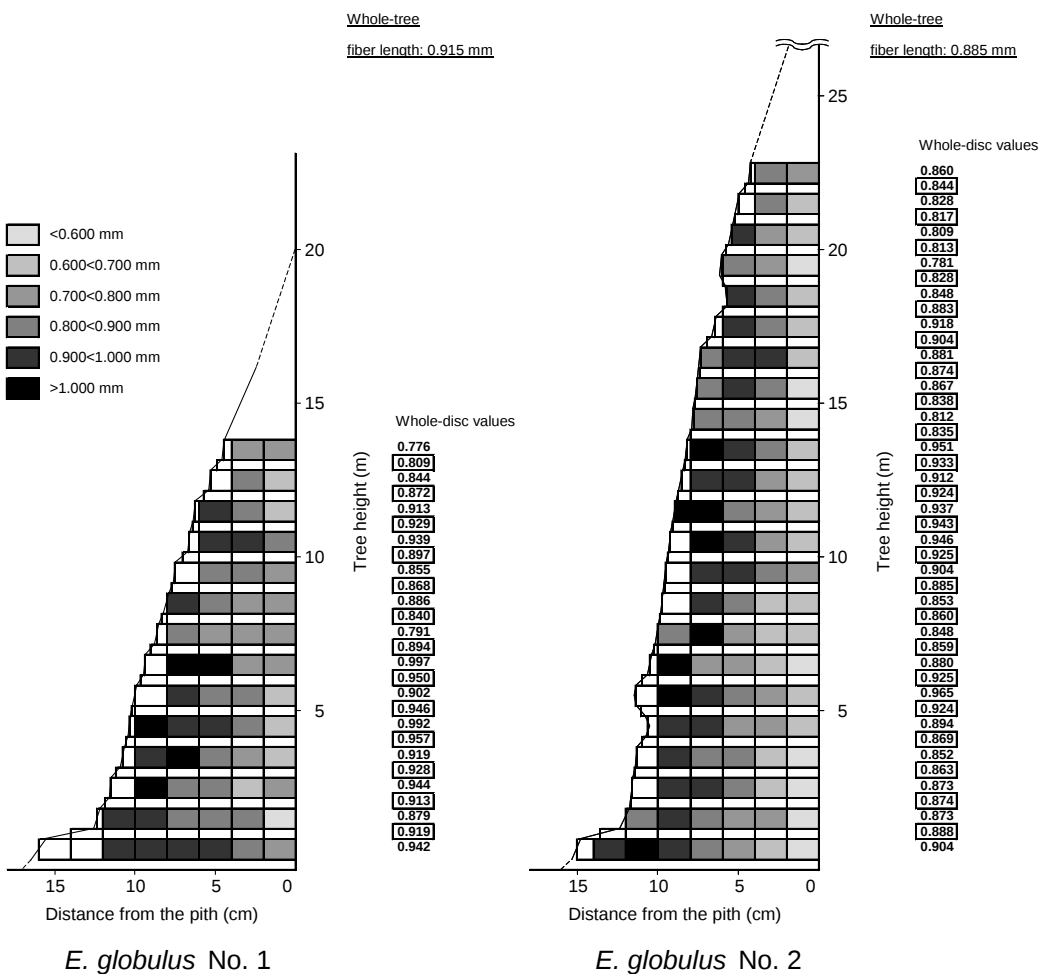


図 18 *E. globulus*における繊維長の樹幹内変異

[繊維壁厚の樹幹内変異]

E. camaldulensis において、木繊維の壁厚は、放射方向では、髄側から樹皮側に向かって増加する傾向が見られ、軸方向では樹高の増加とともに増加する傾向を示した(図19)。同様に、*E. globulus* においても軸方向では樹高の増加とともに増加する傾向を示し、放射方向では、髄側から樹皮側に向かって大きく増加する傾向が見られた(図20)。*E. camaldulensis*、*E. globulus* ともに、木繊維の壁厚は、放射方向の変異において、ユーカリ種の一般的特徴を示していると言える。軸方向の変異では、*E. camaldulensis*、*E. globulus* ともに樹幹上部に向かって増加する傾向を示し、個体差は見られなかった。

[繊維直径の樹幹内変異]

E. camaldulensis において、木繊維の直径は、放射方向では、樹幹下部では髄側から樹皮側に向かって増加する傾向を示したが、樹幹上部ではほぼ一定の傾向が見られた。軸方向では、樹高の増加とともにわずかに減少する傾向を示した(図21)。*E. globulus* においては、放射方向では、各部位において髄側から樹皮側に向かって増加する傾向を示したが、軸方向では大きな変化が見られなかった(図22)。放射方向の変異においては、*E. camaldulensis*、*E. globulus* ともに、ユーカリ種の一般的特徴を示した。軸方向の変異においては *E. camaldulensis* で樹高の増加とともに減少する傾向を示したが、*E. globulus* では大きな変化は見られなかった。

[道管形態の材積加重平均値および標準値を示す位置の推測]

実際に、成長錐コアを用いてエリート木を選抜するために、全体値を推測できるコア採取の適正位置を知る必要がある。そのため、各個体において各地上高における円板としての材積加重平均値を求め、一個体の材積加重平均値 $\pm 5\%$ 偏差となる標準値を示す位置を、実際に、脚立を用いて試料採取が行えるように地上高3.3 m以下の範囲で求めた。

道管要素長の標準値を示す位置は、*E. camaldulensis* で2.8 mであり、*E. globulus* では、1.8 mであった。

道管の接線径の標準値を示す位置は、*E. camaldulensis* で1.3、1.8、2.8、3.3 mとなった。*E. globulus* では、1.3、1.8、2.8 mであった。

道管出現率の標準値を示す位置は、*E. camaldulensis* で1.3 mとなった。*E. globulus* では、1.8 mであった。

これらの結果、4樹木の道管形態の分析に基づいて、*E. camaldulensis* では地上高2.8 m、*E. globulus* では1.8 mが成長錐コアを採取すべき適切な位置であることが示唆された。パルプ材質の改良におけるユーカリ木育種のために、これらの地上高から採取した成長錐コアを用いて、樹幹全体の細胞形態が推測できることが期待される。

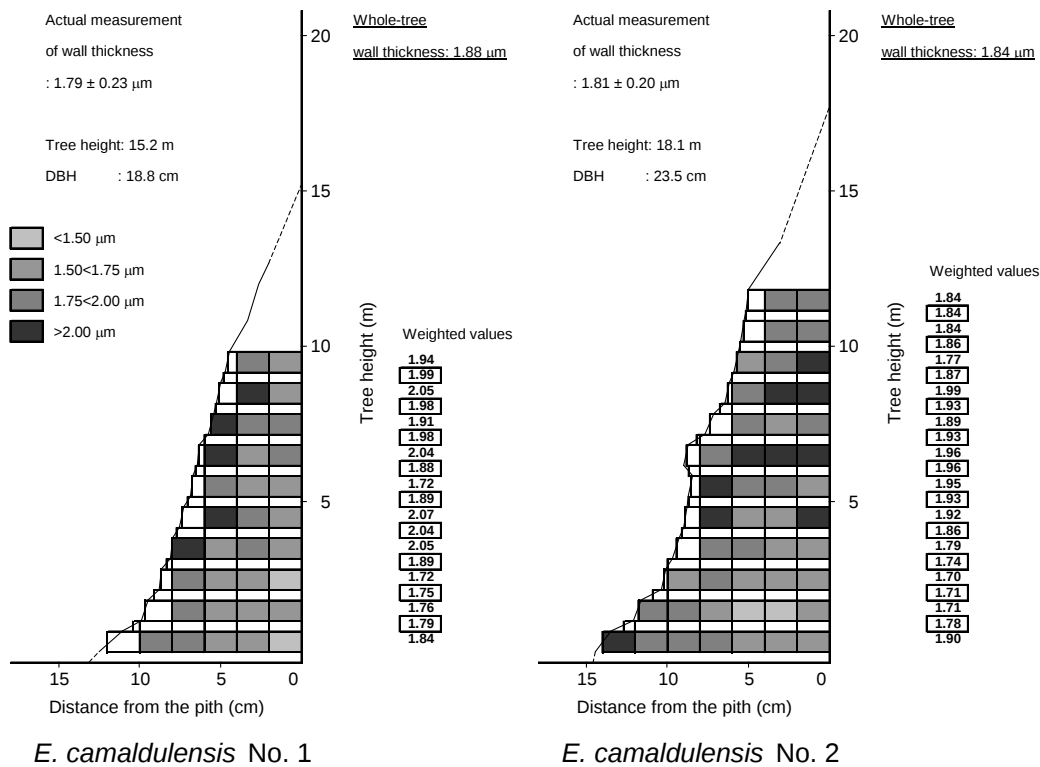


図 19 *E. camaldulensis* における繊維壁厚の樹幹内変異

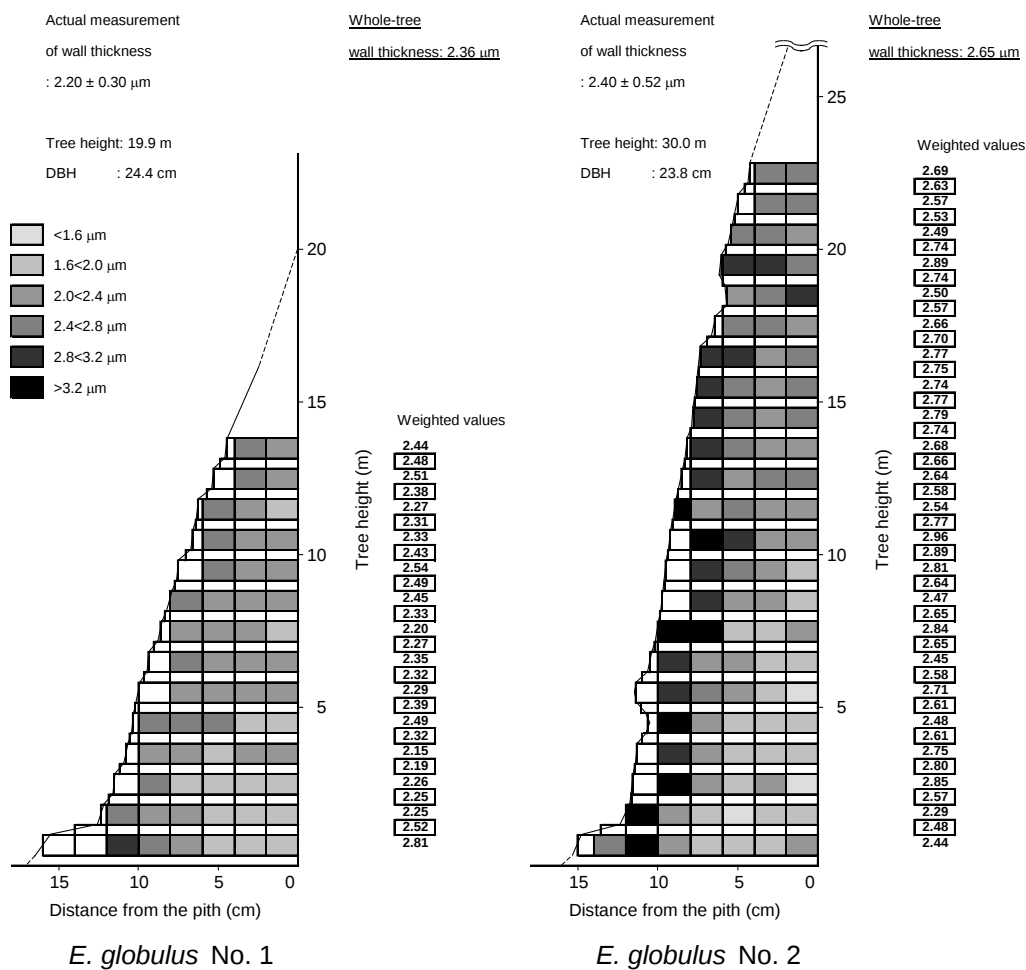


図 20 *E. globulus* における繊維壁厚の樹幹内変異

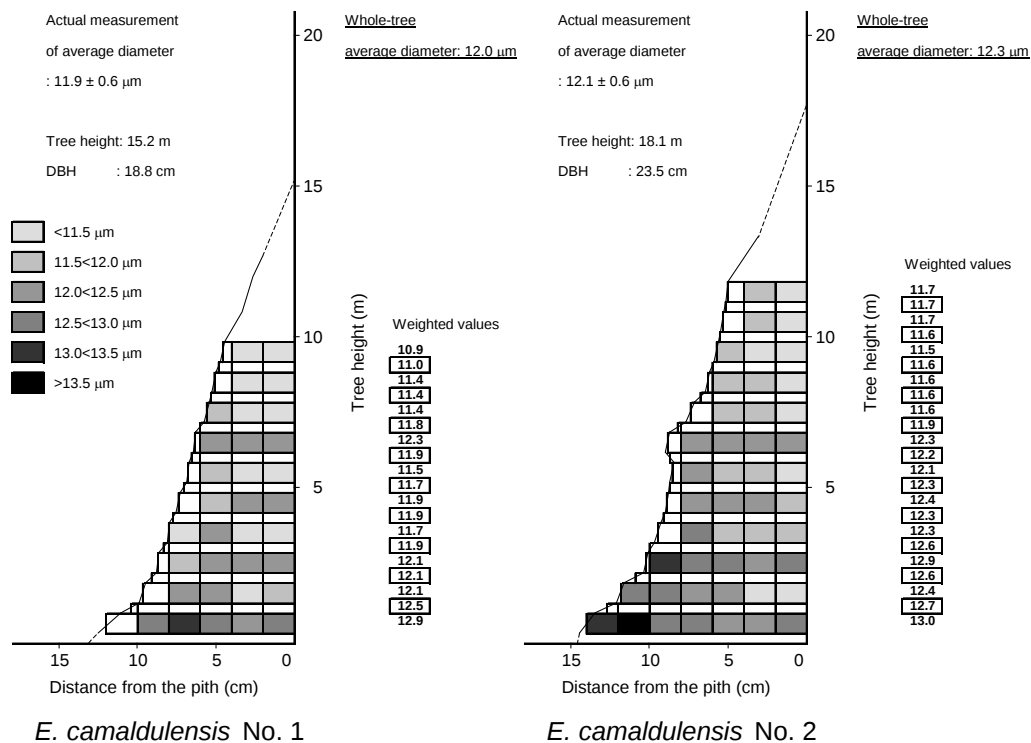


図 21 *E. camaldulensis* における繊維直径の樹幹内変異

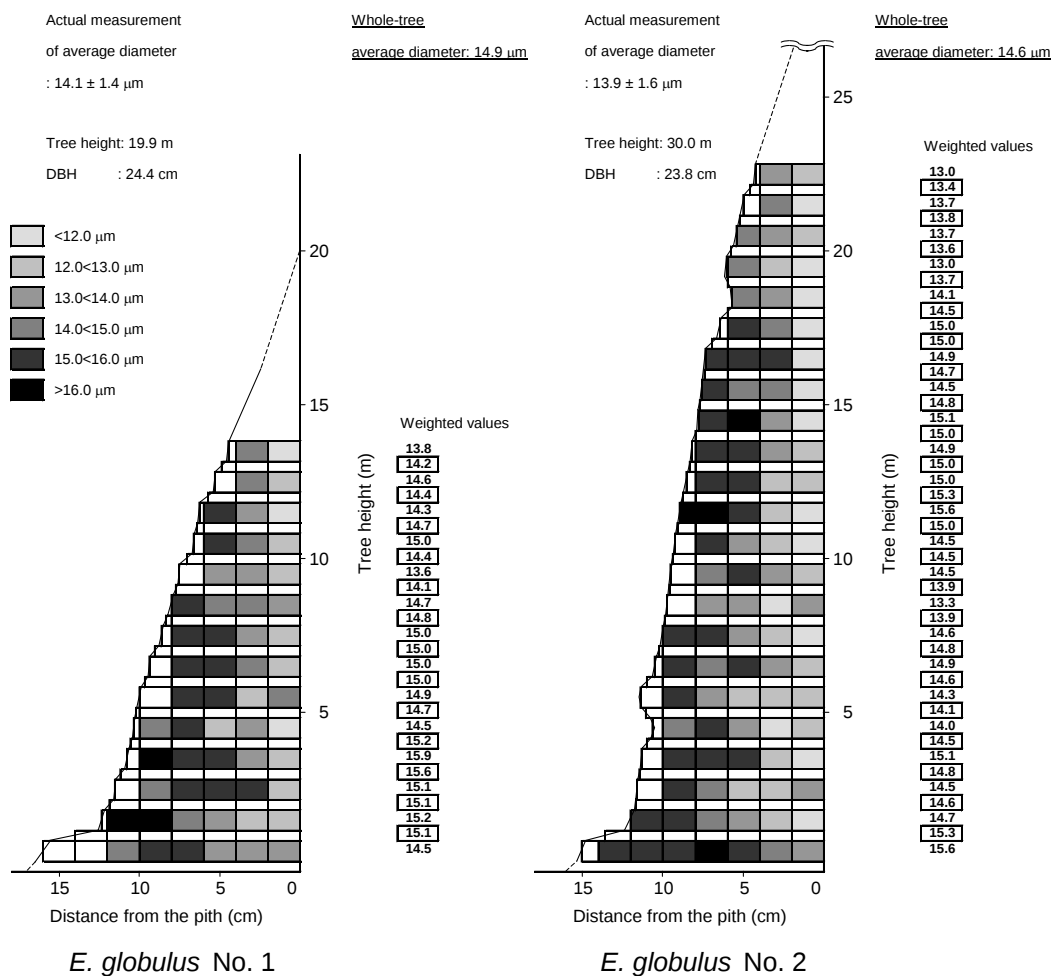


図 22 *E. globulus* における繊維直径の樹幹内変異

[繊維形態と容積密度の関係]

容積密度数と繊維形態の関係を表 5 に示す。容積密度数と繊維長の関係において、*E. camaldulensis* では No. 1、No. 2 とともに負の相関を示し、特に *E. camaldulensis* 全体では、高い負の相関を示した。*E. globulus* では、No. 1 は負の相関を、No. 2 は高い正の相関を示し、個体間に差が見られた。一般に、容積密度数と繊維長は、正の相関を示すことが知られているが、今回使用した *E. camaldulensis* では逆の傾向が見られた。これは、容積密度数が樹幹全体を通じて非常に均一であり、また、今回使用した試料がほぼ未成熟材であったためと考えられる。ユーカリ種において容積密度数と繊維壁厚に正の相関があることが報告されているが、これまでの報告と同様に、*E. camaldulensis* では No. 1、No. 2 とともに正の相関を示した。特に *E. globulus* においては、容積密度数の樹幹内変異に繊維壁厚が大きく関与しているものと考えられる。

容積密度数と繊維直径の関係において、*E. camaldulensis* では No. 1、No. 2 とともに負の相関を示した。*E. globulus* では、No. 1 は負の相関を、No. 2 は正の相関を示し、個体間に差が見られた。*E. grandis* において容積密度数と繊維直径に負の相関があることが報告されており、*E. camaldulensis* においても同様の結果を示した。しかしながら、*E. globulus* においては、繊維直径の軸方向の変異が小さいために低い相関を示し、個体差が認められたものと考えられる。

容積密度数と木繊維内腔直径の関係において、*E. camaldulensis* では、No. 1、No. 2 共に負の相関を示し、特に No. 2 において高い負の相関が得られた。*E. globulus* でも同様に負の相関を示し、特に No. 2 において高い負の相関を示した。*E. nitens* の放射方向の変異において容積密度数と内腔直径に負の相関があることが報告されており、*E. camaldulensis*、*E. globulus* とともに同様の結果を示した。

容積密度数と繊維壁率、Runkel 比、2W/D 比の関係において、*E. camaldulensis* では、No. 1、No. 2 共に正の相関を示した。同様に、*E. globulus* でも、高い正の相関を示した。繊維壁率、Runkel 比、2W/D 比は、各々壁の比率を表わす指数であるために、ほぼ同じ相関係数が得られた。また、一般に、これらの指数は容積密度数と高い正の相関があることが知られており、*E. camaldulensis*、*E. globulus* とともに同様の結果を示した。特に *E. globulus* において繊維壁率、Runkel 比、2W/D 比が容積密度数を示す重要な材質指標となりえることが示唆された。

繊維長において、*E. camaldulensis* では、No. 2 において繊維壁厚で高い正の相関を示したが、その他では有意差は得られなかった。また、内腔直径で低い負の相関を示した。*E. globulus* では、繊維壁厚、繊維直径、内腔直径で高い正の相関を示した。一般に繊維長の増加とともに繊維壁厚、繊維直径、内腔直径が増加することが知られており、*E. globulus* は同様の傾向を示した。*E. camaldulensis* では、内腔直径の変異が小さいために低い負の相関を示したと考えられる。

繊維壁厚において、*E. camaldulensis* では、繊維直径で負の相関、内腔直径で高い負の相関、繊維壁率で高い正の相関を示した。*E. globulus* では、繊維直径で正の相関、内腔直径で高い負の相関、繊維壁率で高い正の相関を示した。これまでユーカリ種において、繊維壁厚と繊維直径の関係において、正の相関を示す樹種、反対に負の相関を示す樹種のあることが知られており、*E. camaldulensis*、*E. globulus* による結果の違いは樹種特性によるものと考えられる。*E. camaldulensis* において、繊維壁厚と内腔直径が高い相関を示すことから繊維形態において内腔直径が繊維壁厚を決定する重要な要因であることが示唆される。

繊維直径において、*E. camaldulensis*、*E. globulus* とともに内腔直径と高い正の相

関を示し、木繊維がほぼ一定の形状で樹幹内変異すると推測される。繊維直径と繊維壁率の関係では、*E. camaldulensis*、*E. globulus* ともに負の相関を示し、特に *E. camaldulensis* において高い相関係数が得られた。

内腔直径と繊維壁率の関係においては、*E. camaldulensis*、*E. globulus* ともに高い正の相関を示し、繊維壁厚と内腔直径の関係と同様に内腔直径が繊維壁率に対して大きく関与していると考えられる。

以上より、容積密度数と繊維形態において *E. camaldulensis* では、No. 1、No. 2 ともに相関が低く、明確な個体差が見られなかった。*E. globulus* では、No. 1、No. 2 ともに相関が高く、個体差が見られ、特に No. 1 よりも成長の良い No. 2 の方が高い相関を示したことは興味深い。

これらの結果は、*E. camaldulensis* よりも *E. globulus* の方が、容積密度数と繊維形態がより密接に関係し、繊維形態の樹幹内変異が大きく、明確であることが示唆された。また、繊維形態及び容積密度数などから、*E. globulus* の方がパルプ特性、種率が高いことも容易に推測される。特に No. 1 よりも No. 2 の方が、材質指標の点から優れており、高収率パルプ木としての材質育種に適していると考えられる。

高リサイクル性を有する早成樹の特徴（アカシア細胞形態）

ユーカリと同様にアカシア 2 種について検討した。

[道管直径の樹幹内変異]

道管直径は、*A. mangium* 及び *A. auriculiformis* ともに、髄側から樹皮側に向かって大きくなる傾向を示した。平均道管直径は、*A. mangium* の No. 1 及び No. 2 でそれぞれ、157.7 μm 、104.7 μm を示し、*A. auriculiformis* では No. 1 及び No. 2 でそれぞれ、139.8 μm 、146.7 μm を示した。道管の直径は、小さいほど印刷特性が良くなることが知られており、*A. mangium* と *A. auriculiformis* の 2 樹種を比較した場合、*A. mangium*、特に No. 2 において印刷特性が良いものと推測される。

[道管出現率の樹幹内変異]

A. mangium においては、No. 1 及び No. 2 共に、髄側から樹皮側に向かってほぼ一定の道管出現率を示した。一方、*A. auriculiformis* においては、No. 1 及び No. 2 共に、道管出現率は、髄側で最も高い値を示し、その後樹皮側に向かって減少する傾向が認められた。これらの結果、平均道管出現率は、*A. mangium* No. 1、No. 2 でそれぞれ、7.3 及び 9.0 個 / mm^2 、*A. auriculiformis* No. 1、No. 2 でそれぞれ、11.6 及び 12.2 個 / mm^2 を示した。前述したとおり、紙シートあたりの道管数の減少が、結果的にピック数を低下させることは明らかであり、これらのことから、*A. mangium* と *A. auriculiformis* を比較した場合、*A. mangium* の方が印刷特性に優れていることが考えられる。

[繊維壁厚の半径方向変異]

繊維壁厚は、*A. mangium* No. 1、No. 2、及び *A. auriculiformis* No. 2 においては、髄側から樹皮側に向かって、ほぼ均一な値を示した。しかしながら、*A. auriculiformis* No. 1 においては、繊維壁厚は、髄側から樹皮側に向かって増加する傾向が認められた。これらの結果、平均繊維壁厚は、*A. mangium* の No. 1、No. 2 でそれぞれ、1.19 及び 1.17 μm を示し、*A. auriculiformis* の No. 1、No. 2 でそれぞれ、1.68 及び 1.22 μm を示した。

[構成要素率]

図 23 に見られるように、構成要素率に、*A. mangium* と *A. auriculiformis* の間で違いが認められた。*A. mangium* と *A. auriculiformis* を比較した場合、*A. mangium* は、道管率が低く、繊維率が高い傾向を示した。また、放射組織率は、両樹種ともにほとんど同じ値を示したが、軸方向柔細胞率については、*A. mangium* の方が低い値を示した。一般に、道管率、放射組織率及び柔細胞率が低く、繊維率が高い材がパルプ適木と考えられていることから、*A. mangium* と *A. auriculiformis* を比較した場合、*A. mangium* の方がパルプ適木であると言える。

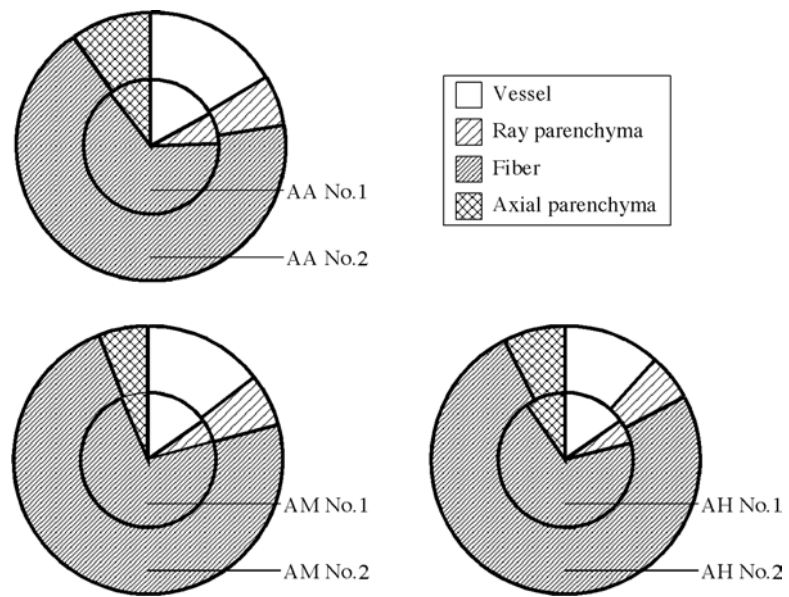


図 23 アカシア 2 種の構成要素率

熱分解ーガスクロマトグラフィー (Py-GC) を用いたリグニンモノマー比の精密定量

図 24 PV-GC システム

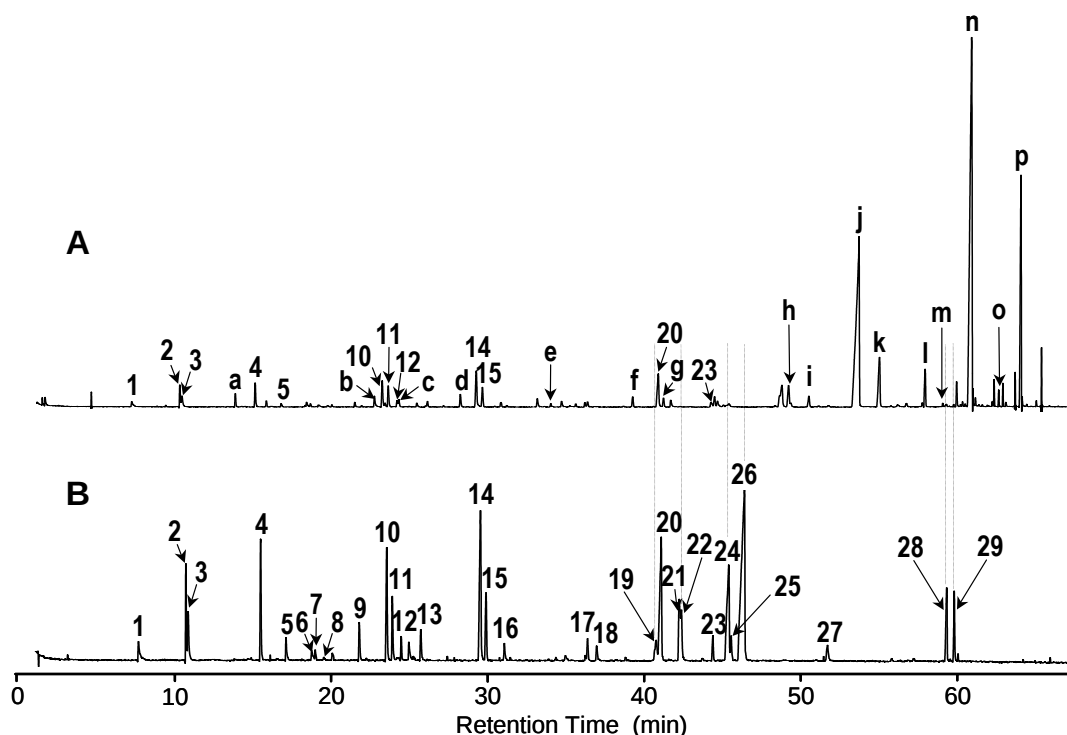


図 25 アセチル化後(A)とアセチル化前(B)のクロマトグラム

表5 ピークの帰属

Peak No.	Name	Original monomer unit ^a
1	Phenol	H-Alc/Ald
2	Methyl phenol	H-Alc/Ald
3	Guaiacol	G-Alc/Ald
4	Methyl guaiacol	G-Alc/Ald
5	Vinyl phenol	H-Alc/Ald
6	Methoxy catechol	G-Alc/Ald
7	<i>cis</i> -Propenyl phenol	H-Alc/Ald
8	Methyl catechol	G-Alc/Ald
9	Vinyl guaiacol	G-Alc/Ald
10	Syringol	S-Alc/Ald
11	<i>trans</i> -Propenyl phenol	H-Alc/Ald
12	<i>cis</i> -Isoeugenol	G-Alc/Ald
13	Vanillin	G-Alc/Ald
14	Methyl syringol	S-Alc/Ald
15	<i>trans</i> -Isoeugenol	G-Alc/Ald
16	Acetoguaiacone	G-Alc/Ald
17	Vinyl syringol	S-Alc/Ald
18	(Oxy-allyl) guaiacol	G-Alc/Ald
19	<i>trans-p</i> -Coumaryl alcohol	H-Alc
20	Syringaldehyde	S-Alc/Ald
21	<i>cis</i> -Coniferyl alcohol	G-Alc
22	<i>trans-p</i> -Coumaraldehyde	H-Alc
23	<i>trans</i> -Propenyl syringol	S-Alc/Ald
24	<i>trans</i> -Coniferaldehyde	G-Alc
25	Acetosyringone	S-Alc/Ald
26	<i>trans</i> -Coniferyl alcohol	G-Alc
27	Propiosyringone	S-Alc/Ald
28	<i>trans</i> -Sinapaldehyde	S-Alc
29	<i>trans</i> -Sinapyl alcohol	S-Alc
a	Acetoxy toluene	H-Alc/Ald
b	Acetoxy benzaldehyde	H-Alc/Ald
c	Acetoxy benzene	H-Alc/Ald
d	<i>trans</i> -Acetoxy-propenyl benzene	H-Alc/Ald
e	<i>cis</i> -Acetoxy-methoxy-propenyl benzene	G-Alc/Ald
f	<i>trans</i> -Acetoxy-methoxy-propenyl benzene	G-Alc/Ald
g	<i>trans</i> -Propenyl phenol acetate	H-Alc
h	<i>cis</i> -Acetoxy-propenyl benzene acetate	H-Alc
i	<i>cis</i> -Propenyl guaiacol acetate	G-Alc
j	<i>trans</i> -Acetoxy-propenyl benzene acetate	H-Alc
k	<i>trans</i> -Propenyl guaiacol acetate	G-Alc
l	<i>cis</i> -Acetoxy-methoxy-propenyl benzene acetate	G-Alc
m	<i>cis</i> -Acetoxy-dimethoxy-propenyl benzene acetate	S-Alc
n	<i>trans</i> -Acetoxy-methoxy-propenyl benzene acetate	G-Alc
o	<i>trans</i> -Propenyl syringol acetate	S-Alc
p	<i>trans</i> -Acetoxy-dimethoxy-propenyl benzene acetate	S-Alc
q	Acetoxy-dimethoxy benzene	S-Alc
r	<i>trans</i> -Acetoxyphenyl propenal*	H-Alc
s	<i>trans</i> -Acetoxy-methoxyphenyl propenal	G-Alc
t	<i>trans</i> -Acetoxy-dimethoxyphenyl propenal	S-Alc

H: ヒドロキシフェニル核、G: グアイアシル核、S: シリギル核、
Ald: シンナムアルデヒド、Alc: シンナミルアルコール

(2) 研究成果の今後期待される効果

本研究より得た高成長、高収率、かつ高リサイクル耐性のパルプ繊維を有する樹木を植林に使用出来る。このため、①単位植林面積当たりのパルプ収量が増加するーコストダウン、②CO₂固定能が増加する、③天然林への依存度を下げる、ことが期待される。リサイクルにより劣化し製紙原料として再利用困難なパルプ繊維は、製造工程から排出され、燃料として使用されているため、本研究により得た高リサイクル耐性を有するパルプ繊維を用いることは、①一度固定された CO₂ を長期間利用出来る、②不良原料を削減出来る、③リサイクル回数が増えることにより蒸解コスト並びに CO₂ 排出削減になる、④同様に古紙の配合率の増加になる、⑤合成薬品の添加量の削減になる、等のメリットがあり今後期待される。また、森林のリサイクルと古紙のリサイクルの一体化による資源循環型社会の構築が可能であることが証明されたため、今後の事業展開が期待される。さらに、本手法が広葉樹から針葉樹へと展開されることが期待される。

3. 2 選抜技術の開発

(1) 研究内容及び成果

近赤外フーリエ変換ラマン (FT-Raman) 分光法を用いた実用的な定量分析における装置温度の影響

近赤外 FT-Raman 分光法を用い定量分析する際、測定温度環境の変化により再現性の問題があることが指摘されている。この問題は、レーザー、検出器、試

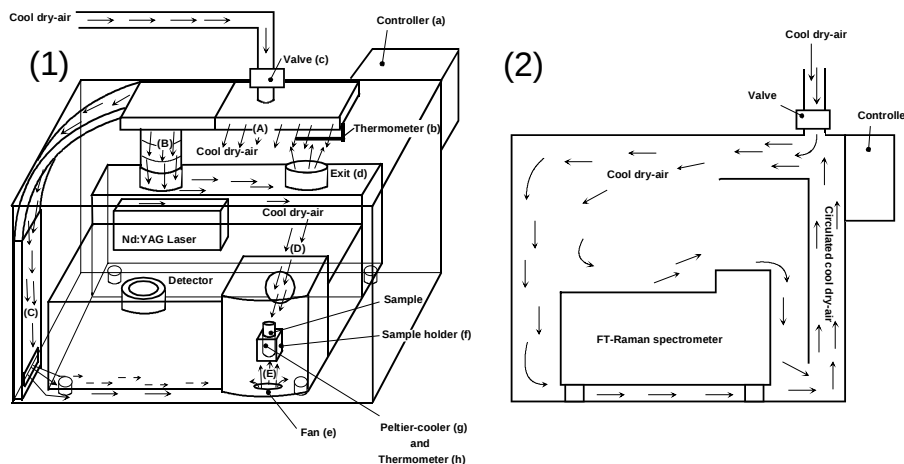


図 26 低温恒温槽正面(1)および側面(2)

料の各温度の影響が考えられる。そこで、市販の FT-Raman 分光光度計を入れられ、実用的な範囲内で温度コントロールが可能な分析機用恒温(低温)器を新規に開発した(図26)。これにより、 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の環境が確保された。また、これに InGaAs 検出器を有した FT-Raman 分光光度計を入れて測定温度環境の影響を検討した。試料として固体(ポリスチレン)と粉末(セルロース)の二種類の試料形態を用いた。この結果、試料温度に関係なく、特定のピーク強度比における再現性が、ポリスチレンで 15.0 から 22.0°C の範囲内で温度が変化すると約 200 倍、セルロースでは 15.0 から 22.5°C の範囲内で、同様に約 40 倍と大きく改善されることが判明した。これにより、InGaAs 検出器を有した FT-Raman 分光光度計の定量再現性が大きく向上することが判明した。

近赤外 FT-Raman 分光法を用いた各種材特性の非破壊的定量

リサイクル性に関与していると考えられる樹木各種化学構成成分の量・構造ならびに樹木各種化学構成成分の量・構造ならびに樹木細胞形態の解析は重要である。一般的に各種の解析を行うには多大な労力と時間がかかるため、有用な分析技術の開発が重要な課題である。そこで、各種材特性の定量についてユーカリを用い、近赤外光 FT-Raman 分光法—多変量解析と木紛により非破壊的な定量を検討した(図27)。材料として西オーストラリア産の *Eucalyptus camaldulensis*(14年生)、*E. globulus*(14年生)各2個体の樹幹からの各部位を用いた。化学構成成分および構成成分の構造として、スモールスケール法、チオアシドリシス法、三弗化酢酸による加水分解などを用い、ホロセルロース、 α -セルロース、ヘミセルロース、リグニン、抽出物、アルカリ抽出物、全抽出物、リグニンのシリリング核/グアイアシル核比、ヘミセルロースを構成するグルコース、キシロース、ガラクトース、ラムノース、アラビノースおよびマンノースのモル比、および容積密度数を検討した。一方、切片を作成しサフラニン染色後、光学顕微鏡と画像計測装置を用い、斜線法により求めた。各構成要素について一試料に対しランダムに細胞面積と内腔面積を測定し、細胞壁率を測定した。道管および木繊維細胞の直径を放射方向並びに接線方向において測定した。平均直径は、これらを平均して求めた。細胞壁の厚さは放射方向においてのみ測定した。細胞長はシュルツ溶液

により解繊した後、光学顕微鏡下でデジタイザーを用い測定した。ラマンスペクトル

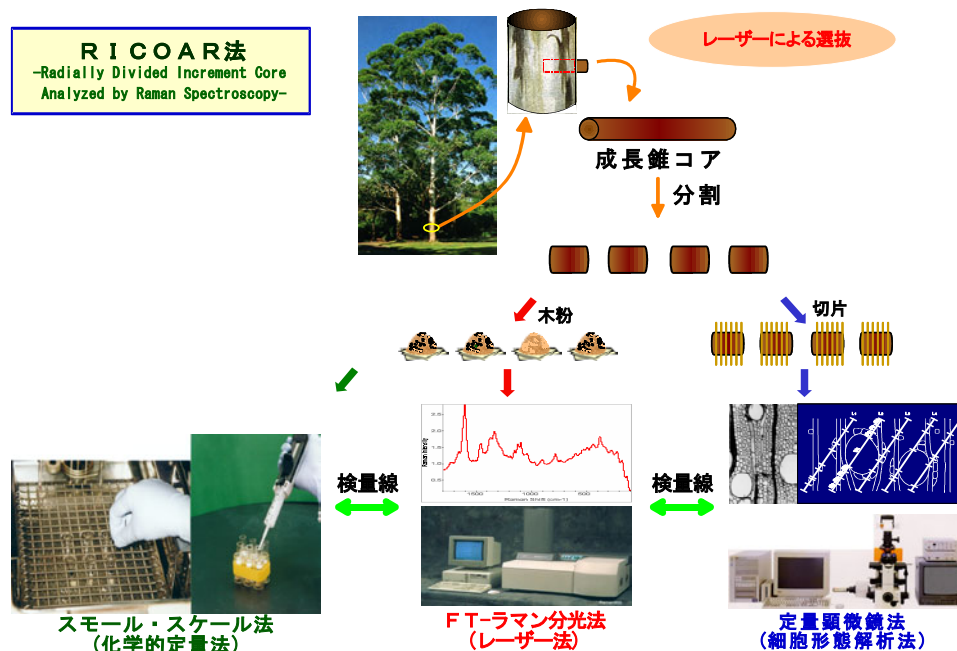


図 27 RICOAR 法

は、1064 nm の Nd: YAG レーザーを用いて測定した。試料として 20 mesh pass (840 μm 以下) の木粉を用い、NMR チューブにつめて 180° 後方散乱で測定した。100–1800 cm^{-1} ラマンシフトを Multiplicative Scatter Correction 後微分し、Partial Least Squares (PLS) 法により、実測値に対して既知試料を用い検量線を作成した後 (n=55)、未知試料を用い検定した (n=25)。従来法で測定したデータを表 6 および 7 に示した。

表 6 検量線 (化学構成成分量および構成成分の構造)

Trait	Data	r	SEC	Derivative	PC
Holocellulose (%)	80.1 $\pm$ 6.7	0.901	2.1	2nd	3
α -cellulose (%)	44.9 $\pm$ 6.4	0.916	2.6	2nd	2
Hemicellulose (%)	35.4 $\pm$ 3.3	0.949	1.0	1st	5
Lignin (%)	18.9 $\pm$ 3.4	0.913	1.4	1st	4
Extractives (%)	6.5 $\pm$ 4.4	0.963	1.2	1st	4
Alkali extractives (%)	12.2 $\pm$ 3.2	0.923	1.2	1st	5
Total extractives (%)	18.9 $\pm$ 4.7	0.932	1.7	1st	5
Glucose (mol%)	11.2 $\pm$ 3.5	0.864	1.7	1st	5
Xylose (mol%)	65.6 $\pm$ 11.0	0.906	4.7	1st	5
Galactose (mol%)	13.6 $\pm$ 8.7	0.938	3.0	1st	6
Rhamnose (mol%)	0.8 $\pm$ 0.3	0.805	0.2	1st	5
Arabinose (mol%)	4.0 $\pm$ 2.1	0.949	0.7	1st	6
Mannose (mol%)	4.2 $\pm$ 2.4	0.831	1.3	1st	5
Lignin S/G ratio (-)	2.76 $\pm$ 0.95	0.942	0.32	2nd	2
Basic density (kg/m^3)	570 $\pm$ 93	0.961	26	2nd	3

表 7 検量線（化学構成成分量および構成成分の構造）

Trait	Data			r	SEC	Derivative	PC
Fiber (%)	58.6	±	10.0	0.921	3.9	2nd	2
Ray parenchyma (%)	18.0	±	3.8	0.924	1.5	2nd	2
Vessel (%)	12.6	±	4.2	0.753	2.7	2nd	2
Axial parenchyma (%)	10.6	±	4.3	0.924	1.7	2nd	2
Fiber length (mm)	0.743	±	0.144	0.913	0.0585	2nd	2
Vessel element length (mm)	0.232	±	0.049	0.837	0.0269	1st	2
Cell wall (%)	30.8	±	5.1	0.813	2.95	2nd	2
Vessel R diameter (μm)	150	±	37	0.820	20.9	2nd	2
Vessel T diameter (μm)	108	±	24	0.817	13.9	2nd	2
Vessel Ave diameter (μm)	129	±	30	0.819	17.2	2nd	2
Vessel wall thickness (μm)	3.07	±	0.63	0.967	0.16	2nd	3
Fiber R diameter (μm)	13.8	±	1.9	0.899	0.85	2nd	2
Fiber T diameter (μm)	11.8	±	1.2	0.891	0.55	2nd	2
Fiber Ave diameter (μm)	12.8	±	1.4	0.905	0.60	2nd	2
Fiber wall thickness (μm)	1.73	±	0.21	0.851	0.11	2nd	4

この結果、検量線作成に用いたデータと検定に用いたデータの間に有意義な差はなかった。に高い自家蛍光を含む試料の例として *E. camaldulensis* を、低い自家蛍光を含む試料の例として *E. globulus* のスペクトルを示した。また、図 28A にこれらを 2 次微分したものを微分処理例として示した。微分することにより、オーバーラップしていたピークがはっきりし、情報量が増えるため、今回はこの微分処理を施したものをラマンのデータとして用いた。なお、微分の次元は検量線作成時の相関係数で決定した。

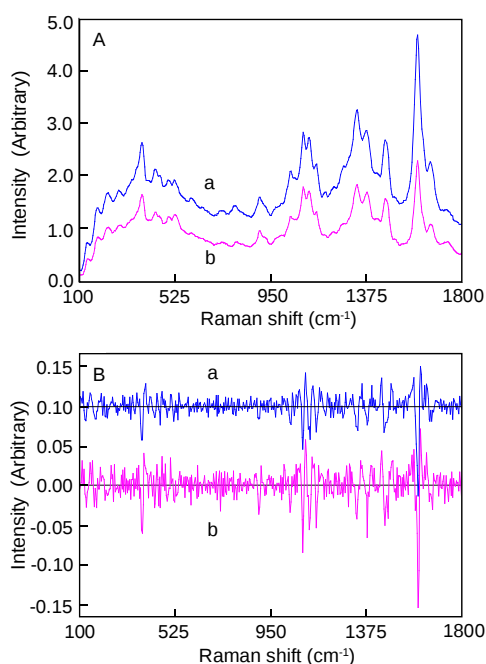


図 28 未処理 FT-Raman スペクトル (A) およびその二次微分スペクトル (B). *E. camaldulensis* 試料 (a; 高蛍光の例). *E. globulus* 試料 (b; 低蛍光の例).

PLS 法を用い、検量線を既知試料に対して作成した統計的結果を表 6 および 7 にまとめた。また、プロットの例を図 28A に示した。結果として、道管率を除き従来法より得た結果との間に相関係数 0.8 以上の有意義に高い相関が得られた。用いた試料は、異なるユーカリ樹種と樹幹内の各所から採取したものであり、適用範囲は広い。また、FT-Raman 分光法において異なる樹種を用いることは、着色物質による自家蛍

光強度が異なるため、図 2 8 A に示したようにベースラインの変化として現れ、難しいとされている。事実、*E. camaldulensis* の試料では、心材形成による着色が認められたが、今回これには影響を受けないような検量線が得られた。以上のことから、得られた各検量線はユーカリ木粉に対して、その樹齢や材色に関らず有効であると考えられる。なお、相関の低かった道管率については、他の細胞比率の相関がすべて高いため、100－他の細胞比率の和、として容易に計算できる。さらに、樹木のような複雑な生物材料の構造は、これまで振動分光法では定量解析された報告はなく、今回の報告は重要である。

未知試料を用いた検量線の検定の結果においても、道管率を除くすべての木材特性で、従来法より得た結果との間に相関係数 0.8 以上の有意義に高い相関が得られた。道管率は前述のように計算から求められる。

以上のことから、FT-Raman 分光法はユーカリ木粉試料を用いた各種の木材組織・細胞形態の迅速・非破壊定量において、樹齢や材色(自家蛍光強度)に関係なく有効であることが示唆された。この結果、統計的に有意義な高い相関が、従来法による定量値との間で、ホロセルロース、 α -セルロース、ヘミセルロース、リグニン、抽出物、アルカリ抽出物および全抽出物の各含有率、リグニンのシリングル核/グアイアシル核比、ヘミセルロースを構成するグルコース、キシロース、ガラクトース、ラムノース、アラビノースおよびマンノースのモル比、容積密度数、細胞壁率、細胞長、木繊維細胞率、放射柔細胞率、軸方向柔細胞率、放射方向・接線方向における道管・木繊維細胞の直径、平均直径、および放射方向における道管・木繊維細胞の細胞壁の厚さ、において得られた。このことから、ラマン分光法による各種材特性の非破壊的定量が可能であることが判明した。特に、細胞形態の分析では、振動分光法を用いた報告はなされておらず非常に有意義である。

高リサイクル性を有する樹木の迅速・非破壊的な選抜方法ならびに自動選抜装置の開発

高リサイクル性を有する樹木の迅速・非破壊的な選抜方法確立するため、FT-Raman 分光法による検討を行った。スペクトルは、1064 nm の Nd: YAG レーザー、InGaAs 検出器を用いて測定した。試料として 20 mesh pass (840 μm 以下)の木粉を用い、NMR チューブにつめて 180° 後方散乱、レーザーパワー 500 mW、分解能 4 cm^{-1} で 512 回スキャンを、低温恒温槽を用いて 22°C で行った。リサイクル性が異なると、スペクトルは特徴的に異なり、またその二次微分値はさらに特徴的であることから(図 2 9 a、b)、100-1800 cm^{-1} ラマンシフトを多変量解析ソフト Unscrambler 7.5 により Multiplicative Scatter Correction 後二次微分し、PLS 法、さらにジャクナイフ法により不安定な変数(波数)を除去、図 1 に示したリサイクル性の実測値に対して検量線を作成した後、検定した(図 3 0 a、b)。

この結果、検量線で相関係数 0.996、標準誤差 0.16、検定で相関係数 0.918、標準誤差 0.70 と有意義に高い相関を得た。以上から、木粉を分析することにより、製品としての寿命である紙のリサイクル性について予測可能であることが判明した。さらに、本システムの自動化にも成功したため(図 3 1)、高リサイクル性を有する樹木の迅速・非破壊的な選抜方法ならびに自動選抜装置を確立した。本手法はホロセルロース、 α -セルロース、ヘミセルロース、リグニン、抽出物、アルカリ抽出物および全抽出物の各含有率、リグニンのシリングル核/グアイアシル核比、ヘミセルロースを構成するグルコース、キシロース、ガラクトース、ラムノース、アラビノースおよびマンノースのモル比、容積密度数、細胞壁率、木繊維長、道管長、木繊維細胞率、放射柔細胞率、軸方向柔細胞率、放射方向・接線方向における道管・木繊維細胞の直径、平均直径、および放射方向における道管・木繊維細胞の細胞壁の厚さ、において

同様にまた同時に約 8 分で非破壊的定量が可能であることが判明した。これらにより、プラントが異なる場合でも紙・パルプの特性と木材の特性の間に相関が一般に見出されるため、本手法の適用範囲の広さが裏付けられた。

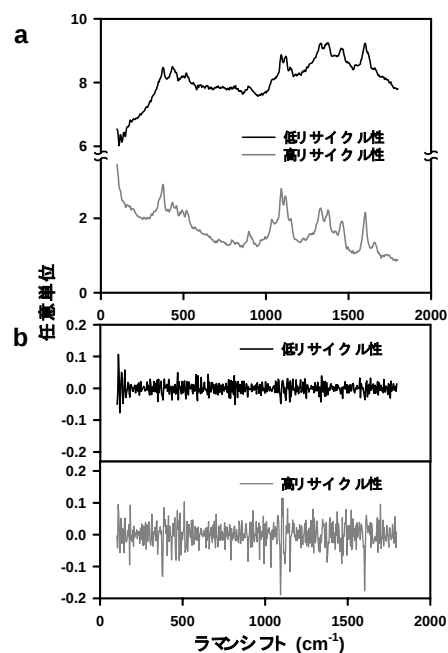


図 29 リサイクル性の異なる試料のスペクトル例(a)とその二次微分(b)

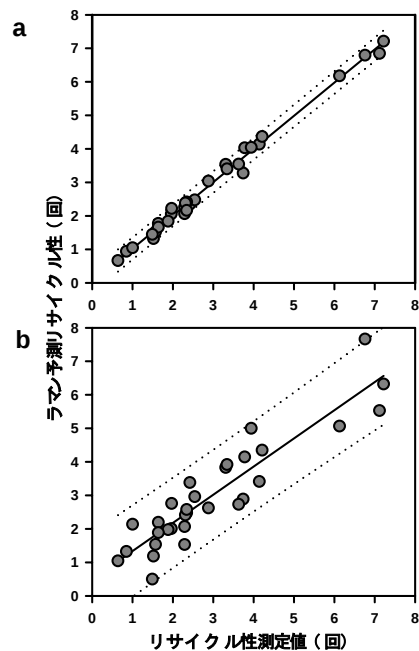


図 30 リサイクル性検量線 (a)と 検定 (b)



図 31 自動選抜装置

(2) 研究成果の今後期待される効果

本手法により、特に発展途上国を中心とする植林事業の支援を本プロジェクトで開発した装置を用いて行えるため、言ってみれば CO₂ ODA のような国際的な協力が可能となる。

一方で、紙のリサイクル性（回数）は選抜技術を用いることにより、同定、更にエリート選抜により向上させられることが判明した。このため、真の資源循環型社会の構築に向けて、リサイクル性（回数）表示の義務化へ向けたベースは完成したといえる。

具体的には、本プロジェクトにおいて、第一にこれまで存在していなかったリサイクル性の試験規格の提案を行った。これにより、リサイクル性の評価そのものが例えば JIS や ISO の規格として成立可能であることを証明した。第二に、現在の工業的なリサイクル回数を遺伝子組み換えなしに、エリート選抜を実施することにより向上可能であることを証明した。特に、樹木の成長やパルプの収率といったいわゆる生産性を全く落とさずに、むしろ向上する形で実現できることはエネルギーミニマムでもあり、工場での CO₂ 排出の削減にも資するため、エリート選抜の有効性を実証した。第三に、原料である樹木個体そのものやチップをレーザーにより計測するという非破壊的方法により、自動で、また工場においてはオンラインでリサイクル性を測定する手法を完成させた。このため、本手法は効率的なエリート木選抜の有効なツールであることを証明した。一方、迅速な測定である点もあり、オンライン化が可能であることから、リアルタイムで製品のリサイクル性が判明するため、今後工場への本手法の適用により、製品のリサイクル性の同定を省コストで実現できることを証明した。

以上から、今後リサイクル性（回数）を付した製品にはエコマークを、また現在のリサイクル性を越えるような回数を付した製品には、例えばスーパーエコマークやエコマックスのような差別化を実施し、真の資源循環型社会の構築に向けた、法制化が期待される。

3. 3 発生機構の解明

(1) 研究内容及び成果

密度と直径成長速度

密度は木材材質指標として基本的な因子であり、一般的に密度が安定した材料ほど各種物性は安定し優良な木材と考えられる。また、パルプ収量は密度が高いほど高いことが知られている。ところが、針葉樹では、成長速度が大きいほど年輪幅が広くなり、密度や強さが低下することから、成長速度を大きくした育林はかならずしも付加価値をあげることはならない。広葉樹についてはこの種のデータ蓄積がなく、いきおい成長速度を上げると材質低下をきたすとの心配が林業サイドには存在する。熱帯早生樹では、短伐期経営による生産サイクルの短縮が課題であるが、その場合、特に密度が低下することが心配されているのが現状である。

図 32 は、アカシア類、*Acacia mangium*、*Acacia auriculiformis*、Hybrid acacia (*A. mangium* x *A. auriculiformis*)、マレーシア・サバ州の SAFODA 研究林に植採された樹齢 11 年生の 3 種から無作為にそれぞれの種類 44 本、都合 132 本、胸高直径 12.9~32.8cm を選木し供試材とした、の密度と直径成長速度との関係である。密度の値は、*A. mangium* と *A. hybrid* では同じ程度であり、*A. auriculiformis* は平均的に他の 2 種より大きな値を示す。しかしながら、直径すなわち平均直径成長速度に対しては一定の値を示すといえる。これは、これまでに本研究グループによって測定された熱帯植林樹木、*Paraserianthes falcata*、*Tectona grandis*、*Agathis borneensis* などと同様な傾向であり、熱帯早生樹では一般的な性質であると考えられる。

図 33 は、ユーカリ類の結果である。*Eucalyptus grandis*、*Eucalyptus globulus* のうち前者はオーストラリア・ブルスベーン近郊、後者は同パース近郊の植林地で、樹齢 11 年、胸高直径 6.5~47.1cm、各 30 個体、合計 60 本とし、また、参考データとして Hybrid eucalpt (*E. grandis* x *E. globulus*) の測定を樹齢は 4 年生で、胸高直径 6.5~12.8cm のもの 30 本を測定した。図から明らかなように *E. grandis* は、アカシア類と同じく密度は平均直径成長速度に対し有意な低下を示さないが、よくみると、もう少し成長速度を広くとることができればわずかながら成長速度とともに密度は低下する傾向があるかも知れない。しかしながら、その低下の程度は非常に少ないと考えられる。一方、*E. globulus* では、成長速度が大きくなるにつれて密度が有意に（直線的に）低下す

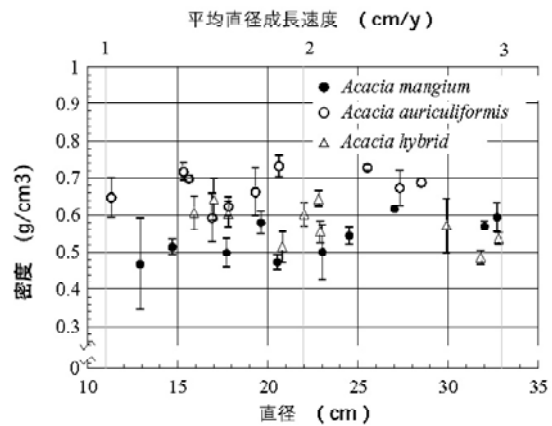


図 32 アカシア類の密度と平均直径成長速度との関係

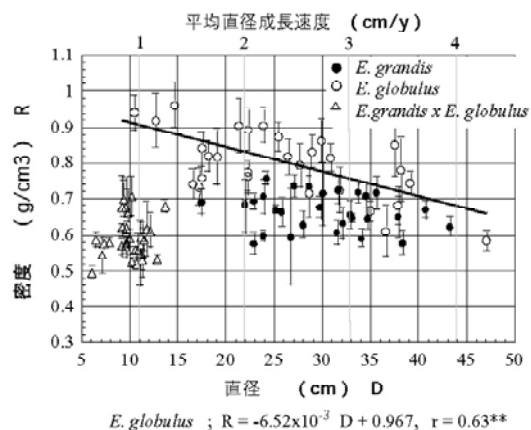


図 33 ユーカリ類の密度と平均直径成長速度との関係

る。この樹種の場合、むやみに成長速度をはやくすることは材質の低下をまねくことに注意しなければならない。

成長応力の成長速度依存性

成長応力が大きくなると、樹幹伐採時に切割れを生じ丸太の価値が低下する。また成長応力が大きいと製材時の曲がりも大きくなるため、通直で長い材料の製品の収量は低下する。正確なデータには欠けるものの、木材産業には「この二つの障害のため伐採後の丸太の利用歩留まりは30%も低下する」との認識がある。

一般には成長応力は成長速度が速い樹種ほど大きくなるとも考えられているが、この点についてのデータを図34、35に示す。

それぞれの樹種は、同一林班に植採されたものであるため同一クローンで同一樹齢のものである。そのなかで、直径が異なるものを無作為に選んで測定している。従って、直径を樹齢で除したものは、その個体の平均直径成長速度と考えてよい。

図32におけるアカシア類の成長応力（繊維方向解放ひずみ）は、個体間のばらつきはあるものの、

直径依存性はなく、従って成長速度によって成長応力の大きさには変化がないことを示す。アカシア類のなかでは、*A. mangium*、*Acacia Hybrid* 間での応力に有意差はなかったが、*A. auriculiformis*のみは、他の2種にくらべて有意に大きい値を示し、また値のばらつきも大きい。*A. auriculiformis*は、樹幹の形態からみてもあて材の形成が多くみられたことから、おおきな成長応力はあて材の形成によるものと判断された。この傾向は、やはり我々が従来から測定してきた熱帯早生樹種では同じ傾向であり。成長応力は成長速度に依存せず、あて材の発現に伴って大きな成長応力が発生すると言える。

平均的には *E. globulus*、*Hybrid eucalypt* は、*E. grandis* およびより大きな値を示す。しかしながら、ユーカリ類の成長応力は成長速度に対して一定値を示し、成長速度を速めても用材利用歩留まりを悪くする因子にはならないことが予測できる。

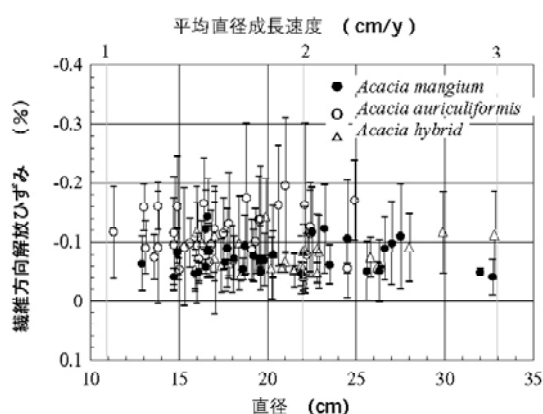


図 34 アカシア類の成長応力解放ひずみと平均直径成長速度の関係

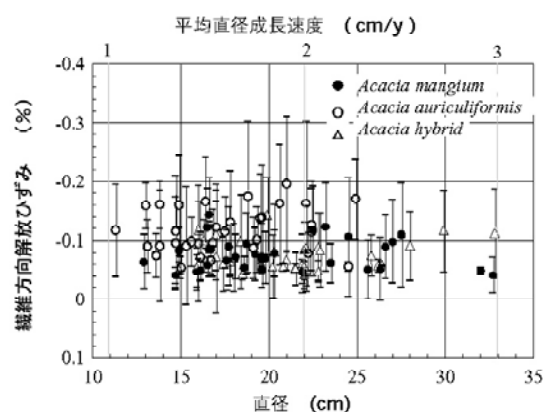


図 35 ユーカリ類のアカシア類の成長応力解放ひずみと平均直径成長速度の関係

樹幹内繊維長分布から見た材成熟

用材としての物性は、その材が成熟材であるか未成熟材であるかに大きく依存する。一般に、針葉樹の未成熟材は密度が小さく半径方向に急激に変化する。仮道管長が短く成熟材に達すると長く一定値になる。また、マイクロフィブリル傾角は未成熟材で大きく、樹幹外側に向かう、すなわち、成熟材になるにつれて小さくなり安定する。

広葉樹では、成熟材、未成熟材をあらわす明確なデータはないが、今回測定した密度、繊維長、マイクロフィブリル傾角は針葉樹のそれと同じような傾向を示した。すなわち、いずれの樹種も、髄近くでは密度、繊維長は小さく、樹幹外側で大きくなる。逆に、マイクロフィブリル傾角は髄で大きく外側ほど小さくなる。

樹齢 11 年のアカシア類、ユーカリ類は、散孔材であり、年輪は見られないため成熟年齢を特定することはできないが、図 3 6 に示すように、アカシア類では、直径の大きいものと、小さいものとがほぼ半径位置の 7 cm 内外（直径 14 cm 内外）から外側でその変化割合が小さくなっていく傾向が見られる。このことから、熱帯早生樹であるアカシア類ではほぼ直径 14 cm 内外から成熟材を形成しはじめると考えられる。

これに並行して、同一測定サイトであるマレーシア・サバ州で発見された 22 年生のハイブリッドアカシア（直径 60 cm）の繊維長、密度、マイクロフィブリル傾角の半径方向分布を測定したところ、やはり、直径 15-20 cm 内外で繊維長、密度が安定し、成熟材形成がみられた。一方、半径 40 cm に至ると、それらは減少する傾向がみられ過熟材が形成されることが予想された。

一方、図 3 7 に示すように、ユーカリ類の繊維長は、直径 20 cm に至ってもひきつづき長さが増大する傾向がみられ、アカシア類とは異なる傾向を示す。マイクロフィブリル傾角については *E. grandis* は、半径 20 cm を超えても直線的に低下し続ける。*E. globulus* は、直径 20 cm をこえると一定値におちつく傾向がみられた。比重に関しては、*E. grandis* では直径 15 cm で一定値になるが、*E. globulus* はその傾向はなく、外側に向かって増大し続ける。針葉樹にみられるような単純な成熟材形成年齢は見られなかった。

このことから、アカシア類は直径 15 cm 内外で成熟材形成がはじまることが推察されたが、ユーカリ類では明確な成熟材形成時期が特定できなかった。早生樹の成熟・未成熟は樹種ごとに決まる遺伝的性質であり、樹種ごとに決定されるべきものであると考えられる。

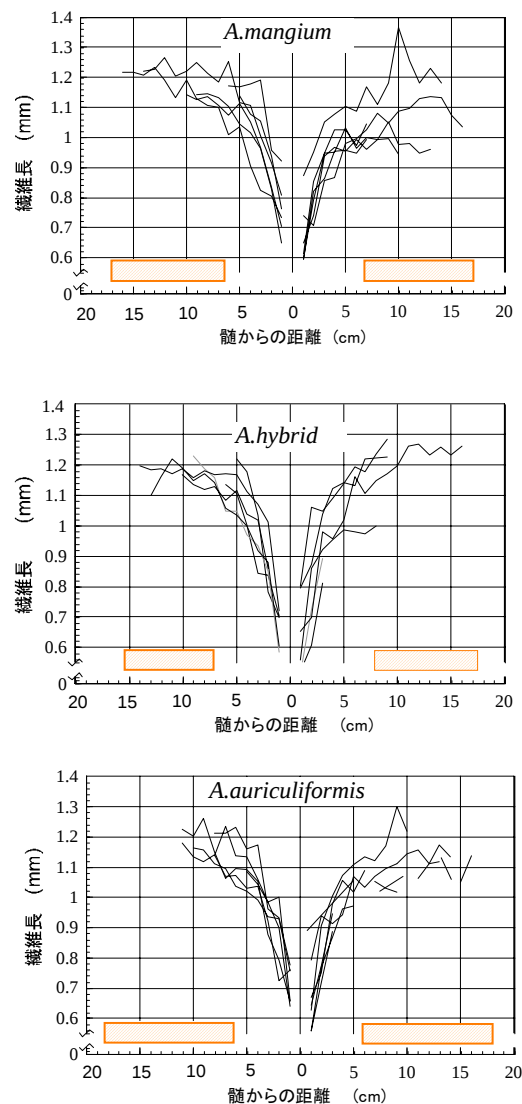


図 36 アカシア類の繊維長の半径方向分布

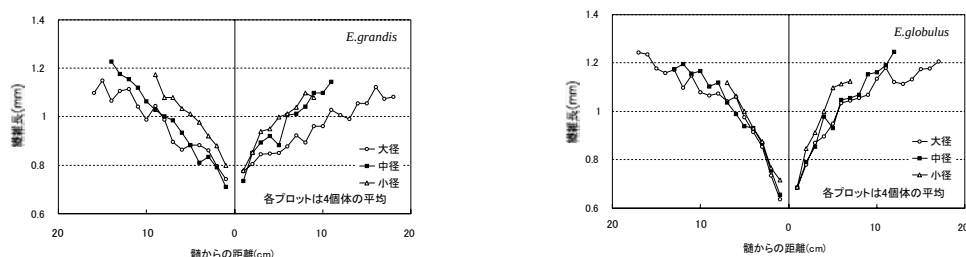


図 37 ユーカリ類の繊維長の半径方向分布

高リサイクル性を有する樹木に含まれるタンニン等ポリフェノール成分の化学特性

木材に含まれるタンニン等ポリフェノール成分は、クラフトパルプ製造時の薬品消費量、リサイクル耐性、樹木の加齢等に関与していると考えられる。本課題では、パルプ材として用いられるユーカリ、アカシアの材及び樹皮中に含まれるタンニン等ポリフェノール成分の化学特性を解明するとともに、材中タンニンの熱分解法による迅速定量法を開発することを目的とする。

〔ポリフェノール及びタンニン含有量〕

ユーカリ 2 年生及び 40 年生試料木粉の抽出物量、ポリフェノール量及びフラバノール量の定量結果を表 8 に示す。抽出物量、ポリフェノール量、フラバノール量とも、40 年生の試料の方が 2 年生よりも高い値を示した。樹齢間差は、ポリフェノール量よりもフラバノール量の方が顕著であった。タンニンは樹木の加齢に関連すると考えられているが、今回の試験のように樹齢以外の要因（遺伝因子、生育環境等）が同じ試料を用いた場合にも、加齢によってタンニン含有量が増大する傾向が認められた。また、抽出溶媒の影響も明瞭であり、抽出物量、ポリフェノール量、フラバノール量とも、70%アセトン水を用いた方が 80%メタノール水よりも高い値を示した。70%アセトン水を用いると比較的分子量の高いポリフェノール成分まで抽出されることから、80%メタノール水では抽出されにくい高分子の縮合型タンニンが抽出された結果と考えられる。*A. mangium* 及び *A. auriculiformis* 材のポリフェノール含有量は共に 1%以下であり、ユーカリ材に比べてかなり低かった。一方、両樹種の樹皮タンニン含有量は 17.7 及び 14.8%であり、タンニン資源として有望であると考えられる。

表 8 樹齢の異なるユーカリ材*中のポリフェノール及びタンニン含有量**

試料	抽出物量 (%)	ポリフェノール量 (%)	フラバノール量 (%)
2 年生			
80%メタノール水	5.48	0.99	2.21
70%アセトン水	6.66	1.30	3.38
40 年生			
80%メタノール水	7.73	2.02	4.02
70%アセトン水	8.56	2.27	4.55

E. camaldulensis*、絶乾木粉に対する重量%

[ユーカリ材のポリフェノール成分]

40年生 *E. camaldulensis* 材の酢酸エチル抽出物から図 3 8 に示す化合物を単離同定した。単離した化合物は catechin(I), epicatechin(II), 3, 4, 3', 4'-tetrahydroxystilbene(III), epicatechin-(4 β -8)-catechin(IV), epicatechin-(4 β -8)-epicatechin-(4 β -8)-catechin(V), gallic acid(VI), ellagic acid L-rhamnoside(VII), dihydrochalcone glucoside(VIII) 及びフェノール酸糖エステル誘導体(IX)であった。そのうち量的に多いものは(I)及び(III)であった。

[アカシア樹皮のポリフェノール成分]

A. mangium 樹皮からは, gallocatechin(X), epigallocatechin(XI), epirobinetinidol-(4 β -8)-epigallocatechin(XII) 及び 7, 3', 4', 5'-tetrahydroxyflavan-(4 β -8)-epigallocatechin(XIII) を単離同定した (図 3 9)。XIII は新規化合物であり、上端単位のフラバン骨格の 3 位に水酸基を有しないことから分子の回転が制限されないため、通常のプロアントシアニジンで認められる回転異性体の存在が認められなかった。

[ポリフェノール化合物の熱分解生成物]

Catechin(I) 及び gallocatechin(X) のパイログラムを図 4 0 に示す。I の主分解生成物は catechol, 4-methylcatechol 及び phloroglucinol であり、X の主熱分解生成物は pyrogallol, 5-methylpyrogallol 及び phloroglucinol であった。Epicatechin(II) のパイログラムは I と同様であり、epicatechin-(4 β -8)-catechin(IV) 及び epirobinetinidol-(4 β -8)-epigallocatechin(XII) の熱分解生成物は、B 環由来の catechol, pyrogallol 及び A 環由来の resorcinol であった。また、gallic acid(VI) からは pyrogallol のみが得られ、フラバノール化合物で検出された 5-methylpyrogallol は検出されなかった。一方、スチルベン化合物(III)の熱分解生成物からは catechol の生成が認められなかった。

[タンニンポリマーの迅速定量法]

E. camaldulensis 材の精製タンニンポリマーの主熱分解生成物は、catechol, 4-methylcatechol, pyrogallol であり、その他に少量の phloroglucinol が検出された (図 4 1)。Catechol 及び 4-methylcatechol と pyrogallol のピーク面積の比較から、*E. camaldulensis* 材タンニンの B 環構成比は、catechol 型 3.40 に対して pyrogallol 型 1.0 の割合と推定された。単量体である catechin 及び gallocatechin の同条件での熱分解で得られる catechol 及び pyrogallol の収量が 10.8 及び 13.0 mol% であることから、今後、熱分解生成物の収量を向上させる方法の開発が必要である。しかし、*E. camaldulensis* 材のように熱分解で catechol を生成する含有成分がタンニン以外にほとんど存在しない材の場合には、材の熱分解による catechol 収量から材中のタンニン含有量を推定できる可能性が示唆された。

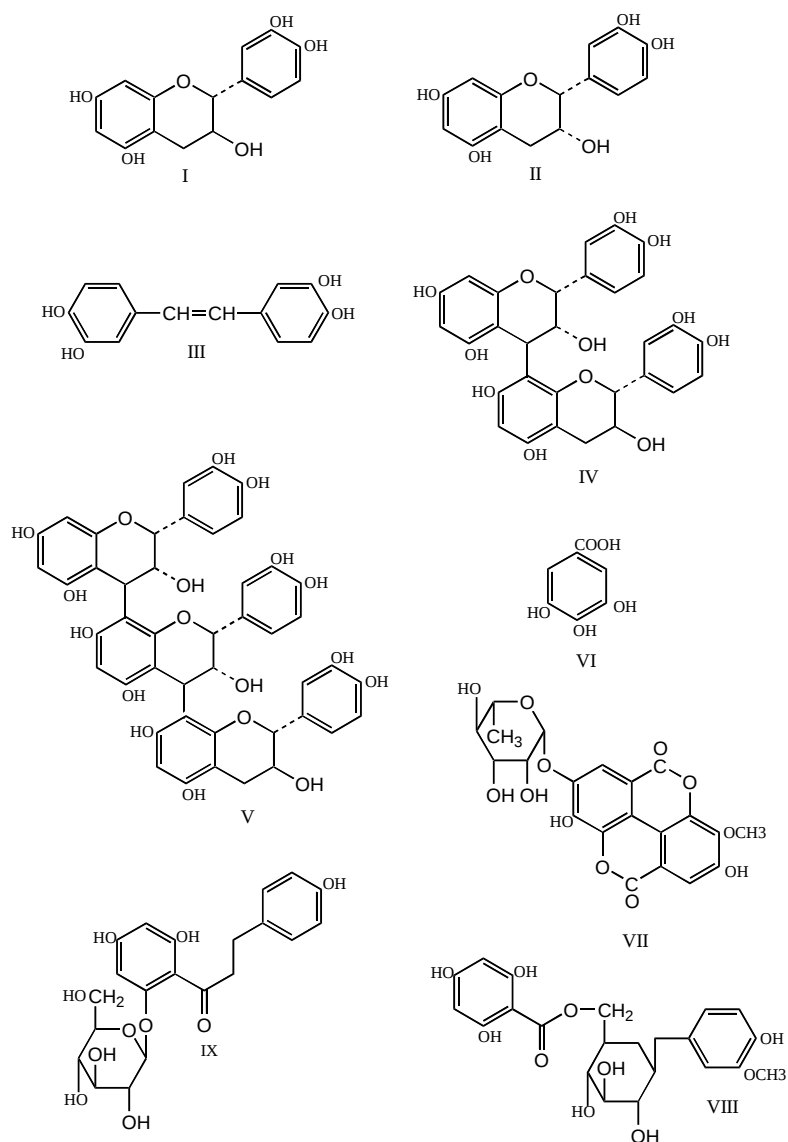


図 38 *E.camaldulensis*材から単離されたポリフェノール成分

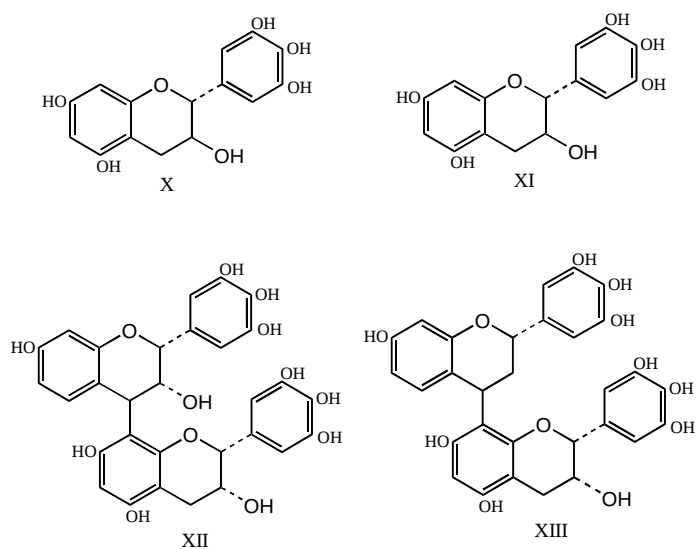


図 39 *A.auriculiformis*樹皮から単離されたポリフェノール成分

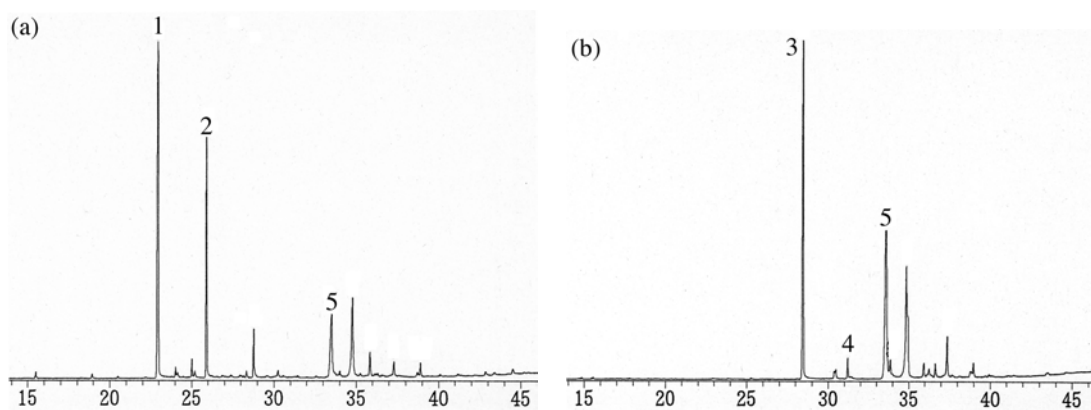


図 40 Catechin (a)及びgallocatechin (b)のパイログラム (1: catechol, 2: 4-methylcatechol, 3: pyrogallol, 4: 5-methylpyrogallol, 5: phloroglucinol)

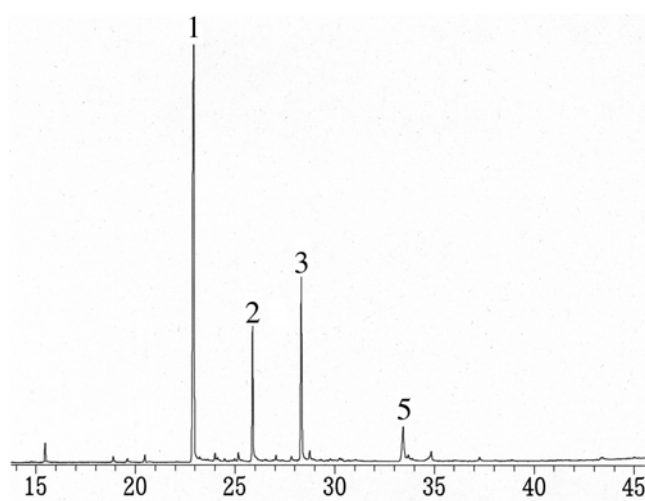


図 41 *E. camaldulensis*材タンニンポリマーのパイログラム (1: catechol, 2: 4-methylcatechol, 3: pyrogallol, 5: phloroglucinol)

植物のイオン輸送系の解析

植物は二酸化炭素、酸素以外の栄養源を土壌より吸収する。植物、細胞が生長、分化していく過程において、情報伝達、物質の移動が行われるが、個々の粗反応は吸収した栄養元素にもとづいている。植物が芽生え、生長し、そして枯れ死んでいく生命の一サイクルを考えた際、栄養元素の移動は細胞活性の指標となる。本研究では、細胞内活性を制御するのに重要な働きをしている K^+ 輸送体と植物の K^+ 吸収と排出を解析することによって、栄養源の流れと分布を掌握し、植物の活性を測定する。 K^+ の分布は森林土壌に要求される構成成分の把握としても重要であり、枯れ木等を含めた森林全体の物質循環系および森林資源リサイクル

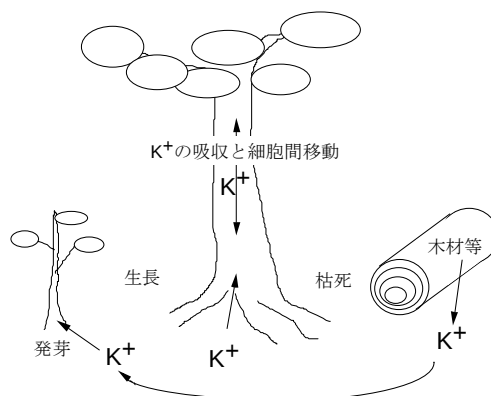


図 42 植物のライフサイクルと K^+ の移動
生体膜の輸送体を介して K^+ が細胞に吸収・排出される。このことから K^+ の移動は森林資源の物質循環系の指標となる。

を考える上での指標となる（図42）。

植物は生来、気象の変化にともない乾燥や湿気の変動を受けるばかりでなく、植生地の土壌の成分と濃度に適応するために、大きな浸透圧の変化、イオン強度の変化にさらされている。植物細胞のこのような外界変化に適応するために細胞内主要イオンである K^+ の細胞内への移動が関与することが分かっている。環境に適した植物の分子育種を目的とする場合、イオン環境に関与する輸送体に着目することは極めて有益と考えられる。高等植物のシロイヌナズナの全ゲノム遺伝子配列が決定され、他の有用植物にこの遺伝子解析情報が利用される時代となっている。モデル植物とその遺伝子を解析進めることにより、木本植物の改良の基礎的知見を得ることが可能である。

〔植物 K^+ 輸送体の解析系の確立〕

K^+ チャネルと K^+ トランスポーターの分子機構を明らかにする目的でアフリカツメガエル卵母細胞活性発現系と測定手段を確立した。 K^+ 輸送体の機能を探るにはバックグラウンドの高い植物細胞の生体膜を用いることは不可能であることから、最適な遺伝子の活性発現系と測定系が必須となる。我々は植物 K^+ チャネルの発現系として大腸菌の変異株と卵母細胞を用いることができることを示した。大腸菌で植物の K^+ 輸送体を活性発現させることは私たちが以前に発見した現象である。本研究で扱う K^+ 輸送体についても活性発現することを確認し機能解析に利用した。アフリカツメガエル卵母細胞活性発現系のセットアップを行い、電気的ノイズの除去、卵母細胞の内在性チャネルの低い条件等について検討し、本研究を進めることが可能になった。両者の遺伝子発現系は種を異にするイオン輸送体の活性発現系として卵母細胞の発現システムを確立し測定に利用できることを示した。

〔植物 K^+ チャネルのイオン選択性〕

植物にとって、 K^+ は必須元素であるが Na^+ は必須元素ではなく、むしろ植物の生長には害となる。植物 K^+ チャネルの KAT1 はこの K^+ 輸送体のモデル輸送体としてもっとも研究が進んでいる。KAT1 は K^+ を輸送するが Na^+ が共存しても影響を受けないことが知られている。一方、塩害の原因物質である Na^+ が植物細胞内へ何らかの輸送経路で入ることも知られている。積極的に Na^+ を取り込む機構がないとすれば、 K^+ 輸送体を通して Na^+ が取り込まれると考えられている。つまり、イオン半径がほぼ同じで一価陽イオンの Na^+ と K^+ は同じ輸送体を通るのか否かが未解決の課題である。この回答が得られれば、次に Na^+ を輸送しないイオン輸送体の構築も可能であり、そのイオン輸送体を導入した植物を構築して植物の耐塩性を高めることが現実のものとなる。

我々は KAT1 の孔の部位のアミノ酸を置換したところ、 Na^+ の存在下では K^+ が通過できなくなった輸送体を部位特異変異体の中から 2 種類 (T256E, T256Q) を見いだした。野生型の KAT1 と 2 種類 (T256E, T256Q) の変異型 KAT1 の cRNA を合成し卵母細胞において発現し、膜電位固定法 (two electrode voltage clamp) にてイオン電流を測定した。 K^+ の溶液に Na^+ が共存すると突然変異体 T256Q は電位依存的に K^+ の透過を阻害すること、T256E のブロックを解析すると二相性に効いていることがわかった。次に Na^+ 低濃度の阻害効果を明らかにすることを目的として高い膜電位まで測定した。その結果、T256Q では低電位から高電位まで Na^+ ブロックは膜電位非依存性であった。このことは入口付近のブロックである。 Na^+ 高濃度かつ高電位（過分極電位）でも Na^+ がポアに入りブロックし、それ以後 Na^+ は比較的簡単に細胞外に戻る方向に抜け出す。一方、T256E において低膜電位の場合、 Na^+ が孔の中に侵入して孔にとどまり通過することはない。ところが、高い過分極した膜電位では KAT1 孔への Na^+ の侵入後、 Na^+ が細胞側へ透過することが明らかとなった。QT256Q では Na^+ が孔の中に侵入してとどまり通過することはない。動物の K^+ チャネルの中にはこのアミノ酸に相当する位置に E であるものが存在する。動物の場合、細胞外に Na^+ が存在して、常に濃度勾配を利用し

て細胞内に流入する Na^+ を排出するイオンポンプが機能している。このため動物の K^+ チャネルの Na^+/K^+ の選択性が低いことと T256E はよく似ている。 Na^+ に弱い植物細胞が K^+ チャネルを通して、 Na^+ が通過するのを防ぐために、植物の K^+ チャネルは Na^+/K^+ の選択性が高くなるようなアミノ酸でイオン選択孔が構成されていると考えられる。この植物を代表的する K^+ チャネルの結果から判断すると、 Na^+ が植物の K^+ チャネル通過する可能性は低い。つまり植物は Na^+ を選択的に透過する輸送系を別に持っている可能性が高い。

〔ユーカリの K^+ チャネル遺伝子の単離〕

植物の K^+ チャネルのイオン選択部位は保存性が高いことが今まで知られている。樹木のユーカリから本遺伝子の単離を試みた。アミノ酸配列の相同性の高い部位であるイオン孔を形成する部分のオリゴ DNA 配列を合成して、*Eucalyptus camaldulensis* の染色体遺伝子から目的の遺伝子を単離した。この遺伝子を DNA プローブとして cDNA を探したが候補の遺伝子を取ることができなかった。そこで、*Eucalyptus grandis* の cDNA ライブラリーを用いて先にクローン化した断片を PCR 法により増幅することができた。このことは本 cDNA ライブラリーに目的の遺伝子が存在することを示しており、目的の K^+ チャネル遺伝子のクローン化が可能であることを示した。

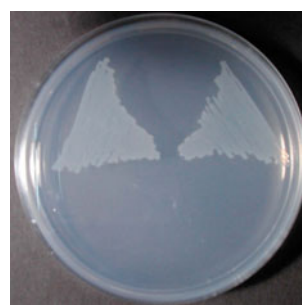
〔新規植物 K^+ チャネルの機能発現〕

植物は気象の変化による乾燥や湿気の変動を受けるばかりでなく、植生地の土壌の成分と濃度に適応するために、大きな浸透圧の変化、イオン強度の変化にさらされている。この環境変化に対して植物細胞は浸透圧調節を行っている。細胞内主要イオンである K^+ は細胞内浸透圧を生み出すイオンであり、この K^+ 濃度の変化が細胞内の全イオン強度を大きく変化させる。さらに、細胞が増殖したり、体積増大が起こる際にも K^+ の細胞内への流入が必要である。環境に適した植物の分子育種を目的とする場合、イオン環境に関与する輸送体に着目することは有益と考えられることから、本研究では重要と考えられながら機能が未知の K^+ チャネルを研究対象にした。本研究では、解析されていない K^+ 輸送体の機能を明らかにして、植物における役割を明らかにすることを目的とした。植物には、HKT 系、KUP 系、 K^+ チャネル系の 3 種類の K^+ 輸送体、約 30 の遺伝子が分かっている。 K^+ チャネル系はさらに、膜電位センサーを持つものと、イオン透過孔のみを有するチャネルの 2 種類に分別される。後者のチャネルは機能解析に関する報告があるもののその K^+ 輸送の機能発現の再現性は報告されていない。

我々は機能が未知である後者のチャネル遺伝子をシロイヌナズナからクローン化し大腸菌 K^+ 変異株に発現させたところ機能発現した(図 4 3)。また K^+ の取り込み活性も検出された。このことは、新規の K^+ チャネルを見出したこととなる。次に菌の K^+ 取り込み輸送活性が低い変異株

に本遺伝子を発現させ、原子吸光度分析を用いて K^+ の蓄積を測定した。ベクターのみの対照とする大腸菌と比較して、KC02 が発現した大腸菌では有意に K^+ の取り込みが

KAT1(ポジティブ
コントロール)



本研究で単離した
 K^+ チャネル

ベクター

図 43 植物 K^+ チャネルの相補テスト
 K^+ 輸送活性のあるチャネルを発現した大腸菌 K^+ 輸送体遺伝子変異株は増殖している。

測定された。さらに、 K^+ チャネル輸送活性を阻害する Cs^+ によって、 K^+ 輸送活性は阻害された。以上のことは、本 K^+ チャネルは K^+ 取り込み系として大腸菌膜では発現していることを示している。本 K^+ チャネルのC末領域には Ca^{2+} が結合する可能性のある EF-hand モチーフが存在している。このモチーフが K^+ 輸送活性と関係するかどうかを、EF-hand を破壊した変異本 K^+ チャネルを作成して K^+ 輸送活性を検討した。しかし、この破壊変異体でも野生型との違いは観察されず、 Ca^{2+} の有無の影響は見出されなかった。

高リサイクル性を有する樹木の発生機構の解明 (*E. globulus* KP)

リサイクル性と樹木中の細胞の特徴についてラマン分光法、熱分解法などを用い検討した、この結果、各種の繊維の特徴と有意義に高い相関を得た（表9）。

表 9 リサイクル性と樹木中の繊維の特徴における有意義に高い相関係数(31 試料)

マンノース (mol%)	ヘミセル ロース (%)	cis-Coniferyl alcohol (mol%)	繊維ルー メン直径 (μm)	繊維柔 軟係数 (-)	ガラクト ース (mol%)	セルロー ス (%)	Methyl guaiacol (mol%)	繊維長 (mm)	アラビノ ース (mol%)
0.580***	0.413*	0.367*	0.347*	0.312*	-0.502**	-0.467**	-0.355*	-0.344*	-0.305*

樹木中の繊維の形態はラマン分光法により予測した。*** 99.9%レベルで有意義、** 99%レベルで有意義、* 95%レベルで有意義

材中のマンノースなどのヘミセルロースを構成する中性糖は蒸解性と関係していることから、リグニンとの結合が想像され、これらが蒸解中に溶出し易いかどうかにより、パルプ繊維に与えるダメージが決まることが予想される。また、ヘミセルロースはセルロースに比べ柔軟性が高く、また水に対する親和性も高いことから、繊維に残留または再吸着される場合も想像され、繊維の柔軟度が形態的にも、また成分的にも高いことが、高リサイクル性を発生する機構と考えられるが、更なる検討が必要である。

高リサイクル性を有する樹木の発生機構の解明 (*E. globulus* MP)

リサイクル性と樹木中の細胞の特徴についてラマン分光法、熱分解法などを用い検討した、この結果、各種の繊維の特徴と有意義に高い相関を得た（表10）。

表 10 リサイクル性(処理後白色度)と樹木中の繊維の特徴における有意義に高い相関係数(6または7 試料)

加熱処理後白色度 (%)		光退色処理後白色度(%)			
ホロセルロース (%)	抽出物 (%)	リグニン シリン ギル核/グアイア シル核 (-)	繊維直径 (μm)	Methyl guaiacol [#] (mol%)	Vinyl guaiacol [#] (mol%)
0.670**	-0.595*	0.662*	-0.615*	-0.724*	-0.611*

樹木中の繊維の形態はラマン分光法により予測した。*** 99%レベルで有意義、** 95%レベルで有意義、* 90%レベルで有意義、[#]6個体使用

表から、加熱による色戻りは主に糖類に起因しており、光による色戻りは主にリグニンに起因していることが判明し、それぞれの発生機構が異なることが示唆された。特に光による色戻りはその程度が大きく、MP のリサイクルにおいてはキーファクターと言える。これは樹木中のリグニンのシリングル核が多いと抑制され、グアイアシル核が多いと助長されることが判明した。一方、光による色戻りについて、有機アル

カリ試薬としてテトラブチルアンモニウム ヒドロキシドを用いて、高・低光退色性の二個体のオリジナルな木材に対して反応熱分解を行い、詳細な検討を行った。この結果、従来言われてきたようなカルボニル化合物の影響は認められたものの小さかった。これに対し、syringol、methylsyringol、methylguaiacol および vinylsyringol が非常に重要な因子であることが判明した。シリングル核が色戻りを抑制し、グアイシアシル核が助長することは、通常の熱分解の結果と良い一致を見せた。また、これまでの報告で重要性が指摘されたことがあるスチルベン構造は、重要な因子ではないことが判明した。

以上から、加熱および光による色戻りは独立の材特性に起因していると考えられることから、優良個体の選抜が材特性の解析から可能と考えられ、今後の育種並びに抽出された材特性をターゲットとした遺伝子組み換えが期待される。

さらに光退色における照射温度の影響を検討した。光退色において温度効果は認められ（図 4-4）、温度が高いほど白色度減少は大きくなり、また照射時間とともにその減少率も大きくなった。印刷物が夏季の直射日光で高温になる状況は有り得ることであり、こうした状況下での使用は光退色を促進させるもので、回収された紙の保存にも注意を払う必要があることが示唆された。

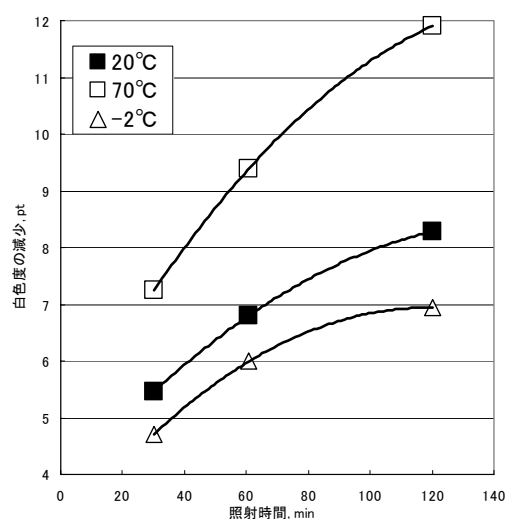


図 4-4 光退色における温度の影響

(2) 研究成果の今後期待される効果

高リサイクル耐性を有するパルプ繊維の樹木内での発生機構を解明することにより、繊維形態における遺伝子組み換え樹木の開発につながる。将来的には、なぜ樹木だけが一個体で数千年にもわたり生き続ける生命力を有しているかといった、樹木生命を本質的に解明することが期待される。またどのような経時的メカニズムを駆使し内部構造を変化させながら遺伝子を存続させているのかという、根本的な問題解決への一助と成りうるであろう。

植物のイオン輸送体の研究は比較的新しく、今後も新しい現象が明らかにされると考えられている。微生物や動物のイオン輸送系とは異なる膜蛋白質構造と機能が見いだされており、これらは植物の分子メカニズムを正確に理解する上で重要である。植物の外界との接触面は細胞膜であることから、イオン吸収や環境変化への適応にイオン輸送系は中心的役割を担っている。実際、植物の塩耐性(感受性)に深く関与するイオン輸送体が我々の研究室や国外の研究室から報告されている。生体膜に組み込まれて機能発現するイオン輸送系は水溶性蛋白質の解析と比べて研究が遅れていたが、今後、イオン環境適応に関与する膜を介する情報伝達の解析が進み、植物の成育域の拡大に繋がる研究の発展に寄与すると期待される。

樹木の材及び樹皮に含まれるタンニン等ポリフェノール成分の化学特性については、近年の機器分析技術の進歩により、多くの化合物が単離同定されてきた。しかし、タンニンポリマーの構造解析法としてはNMR法、化学分解法(トルエン- α -チオール法、フェノール化核交換法)が従来から用いられてきたが、収量が低いこと、操作が煩雑であること、多量の試料が必要であること等の短所があった。本課題で行った熱分解法は、極少量(約200 μ g)の試料があればよく、またガスクロマトグラフィー/質量分析装置との組合せによる短時間の分解物測定が可能である。今後の展開として、最適熱分解温度の解明、誘導体化した試料の熱分解等の検討により、分解物収量を向上させることが必要である。

タンニンは従来から皮なめし剤、接着剤、インキ原料等として用いられてきたが、最近の研究により、抗酸化能、消臭作用、有害ガス吸着、抗蟻性、抗虫菌菌等の様々な生理活性が解明されてきている。これらの有用機能はタンニンの化学構造、特にタンニンのB環の組成と深く関連していると考えられ、これらの有用機能の構造活性相関の解明への熱分解法の適用が見込まれる。

本研究では、ユーカリ、アカシアから多くのポリフェノール成分を単離することができた。現在、これらの抗酸化能、VOC吸着能、抗菌作用等の検討を進めている。特に樹皮は製材工場から発生する主要な残廃材であり、これらの未利用資源を有効に利用することは、廃棄物の低減化や循環型社会の構築への一環としても貢献するものと考えられる。今回の研究において、「アカシア類および現在最も用材利用適性が高く、ブラジル、ウルグアイなどでは用材として輸出産業になりつつある *E. grandis* において、密度、成長応力の材質因子が成長速度に影響されない」と確認できる結論が得られたことは、今後の生産サイクルを、施肥などで短くするうえで大きな展望を与えるものである。すくなくとも、今後熱帯地域では、早生樹をさらに早く成長させ、短伐期経営に拍車がかかることになると期待される。

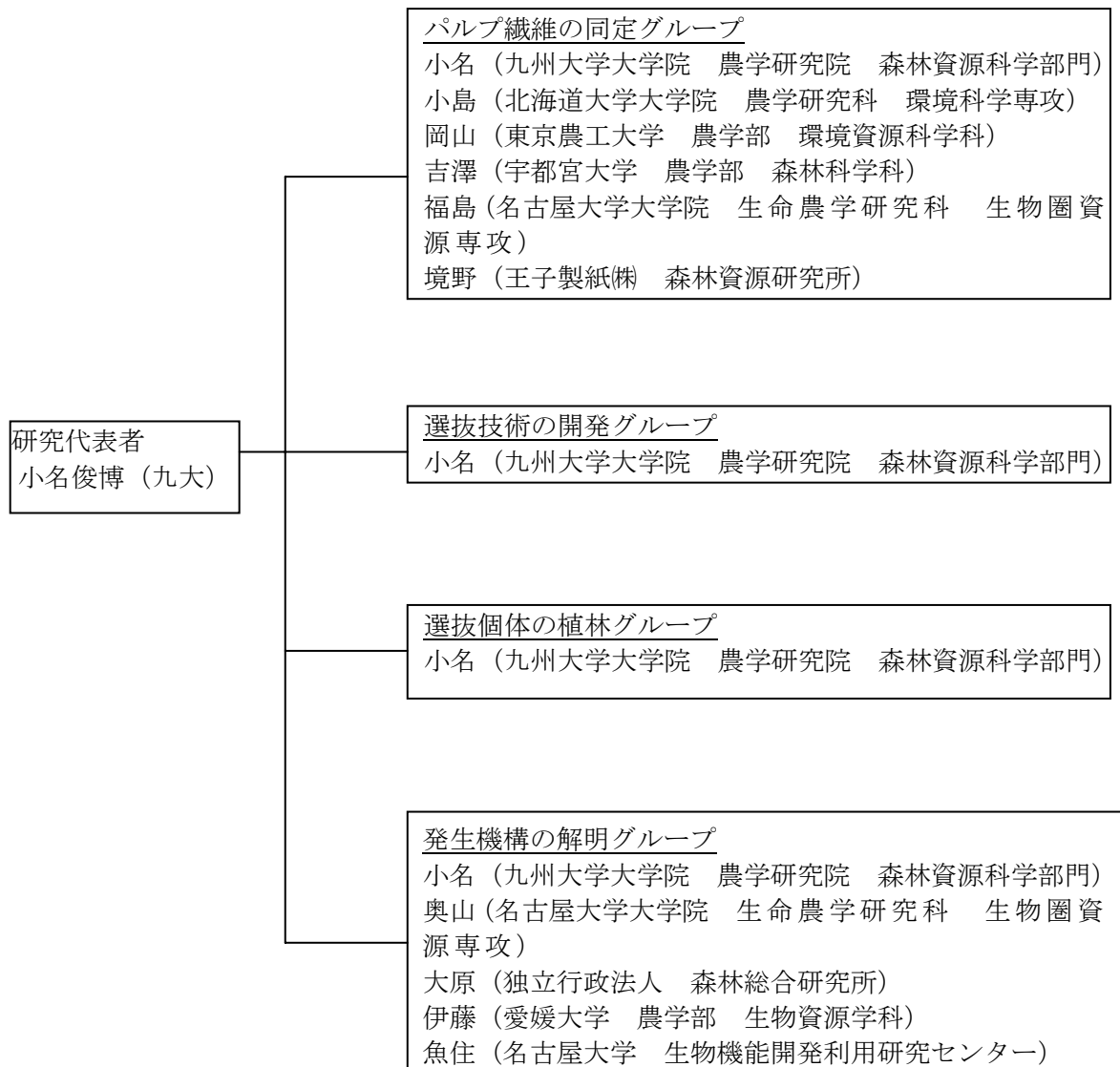
熱帯・亜熱帯の早生樹人工林の拡大は、荒れた土地の有効活用となり、熱帯林の経済価値を上昇させ、現地雇用を拡大し、それによって熱帯二次林の焼失圧力を軽減することから、炭素固定に大きく貢献する森林を拡大できることとなる。また、それらの樹種について付加価値の高い用材利用をめざした育種・育林的改良が進められることとなり、先進工業国が熱帯・亜熱帯の発展途上国

で生産された木材を高度に利用することによって、炭素貯蔵量を増大させることになる。

21 世紀の真の循環型社会は、地球環境維持と人間の経済活動の両立をグローバルに確立することによってのみ実現されるものである。熱帯・亜熱帯の人工林拡大はその実現のための政策のカギを握っていると確信している。

4. 研究実施体制

(1) 体制



(2) メンバー表

① パルプ繊維の同定グループ(小名俊博)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
小名 俊博	九州大学大学院 農学研究院	助教授	パルプ繊維の同定	H10, 12～H15, 11
坂井 克己	同上	教授	同上	H14, 1～H15, 11
藤田 弘毅	同上	助手	同上	H14, 1～H14, 3
清野 晃之	同上	CREST 研究員	同上	H12, 10～H15, 3
藤野 理子	同上	CREST 補助員	同上	H14, 6～H14, 12
朝長みどり	同上	同上	同上	H14, 6～H15, 11
河崎 圭子	同上	同上	同上	H14, 6～H15, 3
横塚 洋子	同上	CREST 補助員	同上 (事務)	H12, 4～H15, 11
立石 麻里	同上	院生	同上	H15, 4～H15, 11
水元 美穂	同上	同上	同上	H15, 4～H15, 11
小島 康夫	北海道大学大学 院農学研究科	助教授	KP、CTMPの製造試験と劣化特性の評価	H11, 4～H15, 11
幸田 圭一	同上	助手	KP、CTMPの製造試験と劣化特性の評価	H12, 4～H15, 11
吉岡 亜希	同上	院生	KP、CTMP の劣化特性の評価	H13, 2～H15, 3
伊佐治信一	同上	同上	CTMP の光劣化の制御	H13, 4～H15, 11
小柳 知子	同上	同上	同上	H13, 4～H15, 11
石倉由紀子	東京農工大学農学部	CREST 技術員	パルプ繊維およびパルプ繊維シートにおける高リサイクル性評価	H15, 4～H15, 11
岡山 隆之	同上	助教授	パルプ繊維およびパルプ繊維シートにおける高リサイクル性評価	H11, 6～H14, 3
山本 諭	同上	院生	パルプ繊維の同定	H11, 4～H15, 11
河名 淳介	同上	同上	パルプ繊維およびパルプ繊維シートにおける高リサイクル性評価	H11, 4～H12, 3
木場谷陽子	同上	同上	パルプ繊維の形態および構造評価	H13, 4～H15, 3
中山 浩平	同上	同上	パルプ繊維の形態および構造評価	H14, 4～H15, 11
吉澤 伸夫	宇都宮大学農学部	教授	木材細胞形態の観察及び画像解析	H11, 4～H15, 11
横田 信三	同上	助教授	発根阻害物質の解析	H11, 4～H15, 11
大島 潤一	同上	院生	パルプ繊維の同定	H11, 3～H12, 3
森 葉子	同上	同上	同上	H12, 4～H13, 3
杉山 香織	同上	同上	同上	H13, 7～H14, 3
為我井淳一	同上	同上	同上	H13, 8～H14, 9
鈴木 将人	同上	同上	顕微鏡観察用試料の作成および顕微鏡観察	H13, 4～H14, 3
石栗 太	同上	研究生	同上	H14, 4～H15, 11
奥山 剛	名古屋大学大学	教授	パルプ繊維の同定 リグニン生合成機構	H11, 4～H15, 11

山本 浩之	院農学研究科	助教授	モノリグノール輸送	
吉田 正人	同上	助手	パルプ繊維の同定	H11, 4～H15, 11
渡辺 拡	同上	助手	同上	H11, 4～H15, 11
能木 雅也	同上	院生	同上	H11, 4～H15, 3
林本 光雄	同上	同上	同上	H11, 4～H14, 3
福島 和彦	名古屋大学大学院農学研究科	助教授	同上	H11, 4～H15, 3
			リグニン生合成機構	H11, 4～H15, 11
			リグニン重合機構	
			モノリグノール輸送	
			リグニンの構造解析	
			樹木成分同位体炭素	
斎藤 香織	同上	院生	リグニン重合機構	H11, 4～H15, 11
			リグニンの構造解析	
山内 一慶	同上	同上	リグニン生合成機構	H11, 4～H15, 3
武田 拓也	同上	同上	パルプ繊維の同定	H11, 4～H12, 3
浅井 俊雅	同上	同上	モノリグノール輸送	H11, 4～H12, 3
上平 雄也	同上	同上	樹木成分同位体炭素	H11, 4～H12, 3
田村 敬史	同上	同上	パルプ繊維の定量	H11, 4～H12, 3
辻 幸子	同上	同上	同上	H13, 4～H15, 3
秋松 綾美	同上	同上	同上	H14, 4～H15, 3
伊藤 昌樹	王子製紙森林資源研究所	参事	同上	H11, 4～H12, 3
境野 信	同上	所長	同上	H14, 1～H15, 11
浅田隆之	同上	上級研究員	同上	H14, 1～H15, 11
園田 哲也	同上	研究員	同上	H11, 4～H15, 11
平井 浩文	同上	CREST 研究員	パルプ繊維の同定	H10, 12～H11, 9
金 允根	同上	同上	同上	H12, 4～H13, 2
上野 幸世	同上	CREST 補助員	同上（事務）	H11, 3～H12, 3
青野 裕子	同上	同上	同上	H11, 1～H11, 2
安孫子創太	同上	学部学生	パルプ繊維の同定	H11, 2～H12, 6
金山 弥生	同上	同上	同上	H11, 2～H11, 3
村上 貴美	同上	CREST 補助員	同上	H12, 4～H13, 3
西川 智子	同上	同上	同上	H11, 6～H14, 3
伊東三重子	同上	雇員	同上	H12, 4～H13, 3
楠井 順子	同上	亀甲通運	同上	H12, 4～H15, 3
三亀真理子	同上	CREST 補助員	同上	H13, 4～H14, 3
島村 友絵		雇員	同上	H13, 4～H15, 3

② 選抜技術の開発グループ(小名俊博)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
小名 俊博	九州大学大学院農学研究院	助教授	選抜技術の開発	H10, 12～H15, 11
村山 美穂	王子製紙森林資源研究所	CREST 技術員	同上	H11, 4～H12, 3
伊藤 和弘	九州大学大学院農学研究院	院生	同上	H11, 5～H14, 3
柴田 純子	同上	CREST 補助員	同上	H14, 8～H15, 11

③選抜個体の植林グループ(小名俊博)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
小名 俊博	九州大学大学院 農学研究院	助教授	選抜個体の植林	H10, 12～H15, 11
鶴見 和恒	王子製紙森林資 源研究所	上級研究員	同上	H11, 4～H12, 3

④ 発生機構の解明グループ(小名俊博)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
小名 俊博	九州大学大学院 農学研究院	助教授	発生機構の解明	H10, 12～H15, 11
小齊平篤	同上	院生	同上	H15, 4～H15, 11
高山 奈緒	同上	同上	同上	H15, 4～H15, 11
魚住 信之	名古屋大学 生物分子応答セ ンター	助教授	イオン輸送体の解析	H11, 4～H15, 11
五島 志伸	同上	研究員	イオン吸収機構の解析 同上	H11, 7～H12, 1
伊吹 竜樹	同上	院生	発生機構の解明	H14, 4～H15, 3
園田 哲也	王子製紙森林資 源研究所	研究員	同上	H11, 4～H15, 11
三原 理恵	同上	院生		H11, 4(一ヶ月)
日尾野 隆	同上	上級研究員	同上	H11, 4～H12, 3
中井 毅尚	同上	CREST 研究員	同上	H10, 12～H11, 5
小原 淳子	同上	CREST 研究員	同上	H11, 4～H12, 3
村山 美穂	同上	CREST 技術員	同上	H11, 4～H12, 3
西村 隆雄	同上、名古屋大学 大学院農学研究 科、名古屋大学 生物分子応答セ ンター	研究生	イオンチャネルの発現 と機能の解析研究	H11, 2～H15, 3
奥山 剛	名古屋大学大学 院農学研究科	教授	関連材質の測定・とりま とめ	H11, 4～H15, 11
山本 浩之	同上	助教授	成長応力現地測定 X 線による細胞壁微細 構造の測定	H11, 4～H15, 11
吉田 正人	同上	助手	密度分布の測定	H11, 4～H15, 11
渡辺 拡	同上	同上	発生機構の解明	H11, 4～H15, 3
能木 雅也	同上	院生	成長応力現地測定・関連 材質の測定	H11, 4～H14, 3
林本 光雄	同上	同上	同上	H11, 4～H15, 3
高山 昇三	同上	同上	同上	H13, 4～H15, 3
細尾 佳宏	同上	同上	同上	H13, 4～H11, 5
小島 陽一	同上	同上	各種材質の樹幹内分布 の測定	H13, 4～H11, 5

鈴木 達也	同上	同上	同上	H14, 4～H15, 3
藤原 大二	同上	同上	同上	H14, 4～H15, 11
奥村 佳代	同上	同上	同上	H14, 4～H15, 11
福田 晶子	同上	同上	同上	H14, 4～H15, 11
阿部賢太郎	同上	同上	同上	H15, 4～H15, 11
荒川 義治	同上	同上	同上	H15, 4～H15, 11
岡田 雅子	同上	同上	同上	H15, 4～H15, 11
伊藤 和貴	愛媛大学農学部	助教授	フェノール性化合物 の抽出・単離・同定	H12, 4～H15, 11
大原 誠資	独立行政法人 森林総合研究所	室長	ポリフェノール成分の 解析	H12, 4～H15, 11
橋田 光	同上	研究員	同上	H12, 4～H15, 11
川村有里子	同上	CREST 補助員	同上	H12, 5～H13, 3
磯崎久美子	同上	同上	同上	H13, 4～H15, 3

(3) 事業団が雇用し派遣する研究員等

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
清野 晃之	九州大学大学院 農学研究院	CREST 研究員	パルプ繊維の同定	H12, 10～H15, 3
藤野 理子	同上	CREST 補助員	同上	H14, 6～H14, 12
朝長みどり	同上	同上	同上	H14, 6～H15, 11
河崎 圭子	同上	同上	同上	H14, 6～H15, 3
横塚 洋子	同上	同上	同上 (事務)	H12, 4～H15, 11
柴田 純子	同上	同上	選抜技術の開発	H14, 8～H15, 11
伊藤 和弘	同上	院生	同上	H11, 5～H14, 3
吉岡 亜希	北海道大学大学 院農学研究科	同上	KP、CTMP の劣化特性の 評価	H13, 2～H15, 3
石倉由紀子	東京農工大学農 学部	CREST 技術員	パルプ繊維およびパ ルプ繊維シートにお ける高リサイクル性 評価	H12, 4～H15, 11
河名 淳介	同上	院生	同上	H13, 4～H14, 3
木場谷陽子	同上	同上	パルプ繊維の形態お よび構造評価	H13, 4～H15, 3
中山 浩平	同上	同上	パルプ繊維の形態お よび構造評価	H14, 4～H15, 11
山本 諭	同上	同上	パルプ繊維の同定	H11, 4～H12, 3
大島 潤一	宇都宮大学農学 部研究生	同上	同上	H11, 3～H12, 3
森 葉子	同上	同上	同上	H12, 4～H13, 3
石栗 太	同上	研究員	顕微鏡観察用試料の 作成および顕微鏡観 察	H14, 4～H15, 11
杉山 香織	同上	院生	パルプ繊維の同定	H13, 7～H14, 3
為我井淳一	同上	同上	同上	H13, 8～H13, 9
五島 志伸	名古屋大学生物 分子応答センター	同上	イオン吸収機構の解 析	H11, 7～H12, 1

山内 一慶	名古屋大学大学院農学研究科大学院生	同上	リグニン生合成機構	H11, 4～H15, 3
斎藤 香織	同上	同上	リグニン重合機構 リグニンの構造解析	H11, 4～H15, 11
武田 拓也	同上	同上	パルプ繊維の同定	H11, 4～H12, 3
浅井 俊雅	同上	同上	同上	H11, 4～H12, 3
上平 雄也	同上	同上	同上	H11, 4～H12, 3
田村 敬史	同上	同上	同上	H11, 4～H12, 3
林本 光雄	同上	同上	成長応力現地測定・関連材質の測定	H11, 4～H15, 3
細尾 佳宏	同上	同上	同上	H13, 4～H11, 5
阿部賢太郎	同上	同上	各種材質の樹幹内分布の測定	H15, 4～H15, 11
奥村 佳代	同上	同上	同上	H14, 4～H15, 11
福田 晶子	同上	同上	同上	H14, 4～H15, 11
三亀真理子	王子製紙森林資源研究所	CREST 補助員	パルプ繊維の同定	H13, 4～H14, 3
西川 智子	同上	同上	同上	H11, 6～H14, 3
平井 浩文	同上	CREST 研究員	同上	H10, 12～H11, 9
金 允根	同上	同上	同上	H12, 4～H13, 2
中井 毅尚	同上	同上	発生機構の解明	H10, 12～H11, 5
小原 淳子	同上	同上	同上	H11, 4～H12, 3
村山 美穂	同上	CREST 技術員	同上	H11, 4～H12, 3
三原 理恵	同上	院生	同上	H11, 4(一ヶ月)
上野 幸世	同上	CREST 補助員	パルプ繊維の同定 (事務)	H11, 3～H12, 3
安孫子創太	同上	同上	パルプ繊維の同定	H11, 2～H12, 6
村上 貴美	同上	同上	同上	H12, 4～H13, 3
青野 裕子	同上	同上	同上 (事務)	H11, 1～H11, 2
金山 弥生	王子製紙森林資源研究所、名古屋大学生物分子応答センター	同上	同上	H11, 2～H11, 3
西村 隆雄	同上	CREST 補助員	イオンチャネルの発現と機能の解析研究	H11, 2～H15, 3
磯崎久美子	森林総合研究所	同上	ポリフェノール成分の解析	H13, 4～H15, 3
川村有里子	同上	同上	同上	H12, 5～H13, 3

5. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H11. 6. 28	研究会議	王子製紙(株) 森林資源研 究所 亀山 研究室	24人	進捗状況並びに研究計画 の発表。
H11. 6. 29 ～30	第一回The Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Productsシン ポジウム	王子製紙(株) 森林資源研 究所 亀山 研究室	50人	古紙の再生工程における 耐久性が高く、リサイクル が多く出来る製紙原料とし ての森林資源の開発を目指 している。講師として、リ サイクル可能な林産物を原 料の改良、例えば品質面、 成長量、交配などの側面か ら開発を行っている研究者 を国内外から招聘し、 1) リサイクル可能な林産 物用森林の経営管理 2) リサイクル可能な林産物 における市場目標 3) リサイクル可能な林産物 の品質目標 4) リサイクル可能な林産物 の定量方法と技術 5) リサイクル可能な林産物 のための樹木の定量方法と 技術 6) リサイクル可能な林産物 を供給できる森林として可 能性のある場所 7) リサイクル可能な林産物 用森林の管理における問題 点 8) リサイクル可能な林産物 用森林の将来性 に関し議論し、資源循環・ エネルギーミニマム型社会 の創生を目指した、森林資 源の開発を目指す。
H12. 8. 11	チーム内打ち合わせ進 捗状況並びに研究計画 の発表	名古屋大 学農学部	24人	進捗状況並びに研究計画 の発表。

H12. 8. 10	第二回The Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Productsシンポジウム	名古屋大学農学部	50人	古紙の再生工程における耐久性が高く、リサイクルが多く出来る製紙原料としての森林資源の開発を目指している。講師として、リサイクル可能な林産物を原料の改良、例えば品質面、成長量、交配などの側面から開発を行っている研究者を国内外から招聘し、 1) リサイクル可能な林産物用森林の経営管理 2) リサイクル可能な林産物における市場目標 3) リサイクル可能な林産物の品質目標 4) リサイクル可能な林産物の定量方法と技術 5) リサイクル可能な林産物のための樹木の定量方法と技術 6) リサイクル可能な林産物を供給できる森林として可能性のある場所 7) リサイクル可能な林産物用森林の管理における問題点 8) リサイクル可能な林産物用森林の将来性 に関し議論し、資源循環・エネルギーミニマム型社会の創生を目指した、森林資源の開発を目指す。
H13. 9. 18	研究打ち合わせ 進捗状況並びに研究計画の発表	「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術」研究事務所	20人	進捗状況並びに研究計画の発表。

H13. 11. 12	第三回The Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Productsシンポジウム	ジャパンミルクネット(株)畜産会館	80人	リサイクル可能な林産物を原料の改良、例えば品質面、成長量、交配などの側面から開発を行なっている研究者を国外から招聘し、資源循環・エネルギーミニマム型社会の創生を目指した森林資源の開発を目指す。
H14. 12. 13～14	2002年度チーム主催研究会議	九州大学大学院農学研究院講義室	28人	高リサイクル性を有する森林資源の開発。
H15. 11. 9～11	第四回The Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Productsシンポジウム	九州大学国際ホール		リサイクル可能な林産物を原料の改良、例えば品質面、成長量、交配などの側面から開発を行なっている研究者を国外から招聘し、資源循環・エネルギーミニマム型社会の創生を目指した森林資源の開発を目指す。

(2) 招聘した研究者等

Tym Duncanson	第2回The Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products シンポジウム 参加・講演	王子製紙森林資源研究所、名古屋大学	H12. 8. 8～ H12. 8. 14
Seung-Lak Yoon	同上	北海道大学大学院農学研究科、名古屋大学	H12. 7. 31～ H12. 8. 19
Paul Kibblewhite	第3回The Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products シンポジウム 参加・講演	東京農工大学農学部	H13. 11. 10～ H13. 11. 15
Ian Parker	同上	同上	H13. 11. 11～ H12. 11. 17

王麗麗	第4回 The Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products シンポジウム 参加・講演	九州大学大学院 農学研究院	H13. 11. 8～ H12. 11. 12
Goran Gellerstedt	同上	同上	H13. 11. ～ H12. 11.
Laurie Schimleck	同上	同上	H13. 11. 6～ H12. 11. 13

6. 主な研究成果物、発表等

(1) 論文発表 (国内 4 件、海外 90 件)

- K. Fukushima, F. Chen and S. Yasuda, The structural conversion of lignin subunit at cinnamyl alcohol stage, In: *Emerging Technologies of Pulp and Papermaking of Fast-Growing Wood*, H. Liu, H. Zhan and Y. Xie (eds), South China University of Technology Press, 1-8 (1998).
- F. Chen, K. Fukushima and S. Yasuda, Heterogeneity of lignin in *Eucalyptus* studied by thioacidolysis dimer analysis. In *Emerging Technologies of Pulp and Papermaking of Fast-Growing Wood*, H. Liu, H. Zhan and Y. Xie (eds), South China University of Technology Press, 59-65 (1998).
- T. Ona, T. Sonoda, K. Ito, M. Shibata, Y. Ootake, J. Ohshima, S. Yokota and N. Yoshizawa, In situ determination of proportion of cell types in woods by FT-Raman spectroscopy. *Analytical Biochemistry*, Vol. 268: 43-48 (1999).
- T. Ona, T. Sonoda, K. Ito, M. Shibata, Y. Ootake, J. Ohshima, S. Yokota and N. Yoshizawa, In situ determination of proportion of cell types in wood by FT-Raman spectroscopy. In: *Spectroscopy of Biological Molecules: New Directions*, J. Greve, G. J. Puppels and C. Otto (eds), Kluwer Academic Publishers, 545-546 (1999).
- T. Ona, T. Sonoda, K. Ito, M. Shibata, Y. Ootake, J. Ohshima, S. Yokota and N. Yoshizawa, Quantitative FT-Raman spectroscopy to measure wood cell dimensions. *Analyst*, Vol. 124: 1477-1480 (1999).
- T. Ona, T. Sonoda, K. Ito, M. Shibata, Y. Ootake, J. Ohshima, S. Yokota and N. Yoshizawa, Rapid determination of cell morphology in *Eucalyptus* wood by Fourier transform Raman spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, Vol. 53: 1078-1082 (1999).
- 小名俊博、樹木構造の解析で新技術を開発、*ワールド パルプ アンド ペーパーFuture*, Vol. 25: 6 (1999).
- T. Ona, Analysis of cell morphology in wood by Fourier transform Raman spectroscopy. *New Technology Japan by JETRO*, Vol. 27: 37 (1999).
- F. Chen, S. Yasuda and K. Fukushima, The structural conversion of lignin subunit at cinnamyl alcohol stage in *Eucalyptus camaldulensis*, *Journal of Wood Science*, Vol. 45: 487-491 (1999).
- F. Chen, S. Yasuda and K. Fukushima, Evidence for a novel biosynthetic residues in lignin in the differentiating xylem of *Magnolia kobus* DC. *Planta*, Vol. 207: 597-603 (1999).
- T. Ona, T. Sonoda, K. Ito, M. Shibata, Y. Ootake, Y. Tamai and J. Kojima, Rapid prediction of pulp properties by Fourier transform Raman spectroscopy of native wood. *Journal of Pulp and Paper Science*, Vol. 26: 43-47 (2000).
- T. Ona, T. Sonoda, K. Ito and M. Shibata, Effect of alkali extraction on the lignin monomeric composition in *Eucalyptus*. *Journal of Wood Science*, Vol. 46: 410-413 (2000).
- T. Sonoda, T. Ona, H. Yokoi, Y. Ishida, H. Ohtani and S. Tsuge, Determination of lignin monomer composition by pyrolysis-gas chromatography/mass spectroscopy. In: *Proceedings of the 14th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis*, 59 (2000).
- H. Yokoi, T. Nakase, Y. Ishida, H. Ohtani, S. Tsuge, T. Sonoda, and T. Ona, Discriminative analysis of *Eucalyptus camaldulensis* grown from seeds of various habitats based on lignin components measured by pyrolysis-gas chromatography. In: *Proceedings of the 14th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis*, 153 (2000).
- K. Ito, T. Kato and T. Ona, Improvement of reproducibility for quantitative analysis of real world samples by NIR FT/Raman spectroscopy using a thermal box. In: *Proceedings of the 27th Annual Conference of the Federation of Analytical Chemistry*

and Spectroscopy Societies, 80-81 (2000).

- T. Ona, T. Sonoda, K. Ito, M. Shibata, Y. Ootake, J. Ohshima, S. Yokota and N. Yoshizawa, Quantitative FT-Raman spectroscopy to measure wood cell dimension. In: *Proceedings of the 27th Annual Conference of the Federation of Analytical Chemistry and Spectroscopy Societies*, 128 (2000).
- 福島和彦 (名大農) : 「リグニンの生合成と構造」、*APAST*, Vol. 35, 10-15 (2000).
- 福島和彦 (名大農) : 「新しいリグニン生合成経路」、*Cellulose Communication*, Vol. 7, 23-26 (2000).
- N. Terashima and K. Fukushima, Lignification of xylem cell walls of *Ginkgo biloba*. In: *Medicinal and Aromatic Plants-Industrial Profiles*, T. A. van Beek (ed), Harwood Academic Publishers, 49-62 (2000).
- N. Matsui, F. Chen, S. Yasuda and K. Fukushima, Conversion of syringyl to guaiacyl moieties on the cinnamyl alcohol pathway during the biosynthesis of lignin in angiosperms. *Planta*, Vol. 210, 831-835 (2000).
- N. Uozumi, K. Yamada, S. Goshima, T. Ona and S. Oiki, Sodium blocking induced by a point mutation at the C-terminal end of the pore helix of KAT1 channel. *Journal of Membrane Biological*, Vol. 181: 163-170 (2001).
- H. Yokoi, T. Nakase, Y. Ishida, H. Ohtani, S. Tsuge, T. Sonoda and T. Ona, Discriminative analysis of *Eucalyptus camaldulensis* grown from seeds of various origins based on lignin components measured by pyrolysis-gas chromatography. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 57: 145-152 (2001).
- T. Ona, T. Sonoda, K. Ito, M. Shibata, Y. Tamai, Y. Kojima, J. Ohshima, S. Yokota and N. Yoshizawa, Investigation of relationships between cell and pulp properties in *Eucalyptus* by examination of within-tree property variations. *Wood Science and Technology*, Vol. 35 229-243 (2001).
- T. Sonoda, T. Ona, H. Yokoi, Y. Ishida, H. Ohtani and S. Tsuge, Quantitative analysis of detailed lignin monomer composition by pyrolysis-gas chromatography combined with preliminary acetylation of the samples. *Analytical Chemistry*, Vol. 73: 5429-5435 (2001).
- T. Seino, T. Ona, A. Yoshioka, M. Takai and M. Tabata, Thermal-induced hemolytic scission of interunitary bonds in the lignin solution. *Analytical Sciences*, Vol. 17 (Supplement): i523-i526 (2001).
- T. Ona, T. Sonoda, K. Ito, M. Shibata, Y. Ootake, J. Ohshima, S. Yokota and N. Yoshizawa, Determination of wood properties by FT-Raman spectroscopy in *Eucalyptus*. In: *Abstracts of the 55th Appita Annual Conference*, 41-45 (2001).
- T. Okayama, J. Kawana, Y. Ishikura, Y. Kojima and T. Ona, Effect of recycling on handsheet properties of *Eucalyptus globulus* kraft pulps. In: *Abstracts of the 55th Appita Annual Conference*, 450-455 (2001).
- K. Saito, S. Yasuda, T. Ona and K. Fukushima, A quite new mechanism for the generation of syringyl units in lignin. In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Wood and Pulping Chemistry*, Vol. 1: 171-174 (2001).
- Y. Kojima, S. Isaji, S.-L. Yoon and T. Ona, Production of high brightness CTMP from *Eucalyptus globulus* and their light-induced color reversion. In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Wood and Pulping Chemistry*, Vol. 2: 215-218 (2001).
- T. Ona, T. Sonoda, Y. Tamai, Y. Kojima, J. Ohshima, S. Yokota and N. Yoshizawa, Investigation of relationships between cell and pulp properties in *Eucalyptus* by examination of within-tree property variation. In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Wood and Pulping Chemistry*, Vol. 3: 559-562 (2001).
- S. Yokota, A. Sagawa, F. Urabe, T. Ona, T. Asada, M. Shibata and N. Yoshizawa, Aging effects on polyphenols in cuttings from *Eucalyptus camaldulensis* clones. In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Wood and Pulping Chemistry*, Vol. 3: 573-576 (2001).

- T. Ona, T. Sonoda, J. Ohshima, S. Yokota and N. Yoshizawa, Novel method for wood property determination in *Eucalyptus* trees by FT-Raman spectroscopy. In: *Proceedings of Grenoble Workshop on Advanced Methods for Lignocellulosics and Paper Products Characterization*, 178-181 (2001).
- T. Seino, T. Ona, A. Yoshioka, M. Takai and M. Tabata, Homolytic scissions of lignin interunitary bonds induced by heat-treatment of hardwood lignin solution. In: *Proceedings of Grenoble Workshop on Advanced Methods for Lignocellulosics and Paper Products Characterization*, 195-198 (2001).
- J. Ohshima, S. Yokota, T. Ona and N. Yoshizawa, Within-tree variations of wood quality indices related to pulp properties in *Eucalyptus camaldulensis* and *E.globulus*. In: *Proceedings of Grenoble Workshop on Advanced Methods for Lignocellulosics and Paper Products Characterization*, 211-213 (2001).
- K. Ito, T. Kato and T. Ona, Non-destructive quantification method of particle diameter of latex as water-based emulsions by FT-Raman spectroscopy. In: *Proceedings of First International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy*, 173 (2001).
- K. Ito, T. Kato and T. Ona, Quantitative characterization of physical properties of aqueous manner. In: *Proceedings of First International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy*, 174 (2001).
- K. Fukushima, Regulation of syringyl to guaiacyl ratio in lignin biosynthesis. *Journal of Plant Research*, Vol. 114, 499-508 (2001).
- B. Monties and K. Fukushima, Occurrence, function and biosynthesis of lignin, In: *Biopolymers 1*, A. Steinbuechel (ed), Wiley-VCH Verlag, 1-64 (2001).
- K. Fukushima, On the mechanism to regulate the ratio of syringyl to guaiacyl moieties in lignin, In: *Molecular Breeding of Woody Plants*, N. Morohoshi, and A. Komamine (eds), Elsevier Science BV, 149-158 (2001).
- T. Sonoda, T. Ona, H. Yokoi, Y. Ishida, H. Ohtani and S. Tsuge, Quantitative analysis of detailed lignin monomer composition by pyrolysis-gas chromatography combined with preliminary acetylation of the samples. In: *Abstracts of International Symposium on Analytical Pyrolysis of Polymers*, 45 (2002).
- A. Yoshioka, M. Takai, Y. Kojima, T. Seino, Y. Ishikura, T. Sonoda, T. Ona, K. Goto, H. Yokoi, Y. Ishida, H. Ohtani and S. Tsuge, Characterization of polyphenols on pulp samples relating to paper recycling by pyrolysis-gas chromatography in the presence of organic alkali. In: *Abstracts of International Symposium on Analytical Pyrolysis of Polymers*, 67 (2002).
- K. Goto, H. Yokoi, T. Nakase, Y. Ishida, H. Otani, S. Tsuge, T. Sonoda and T. Ona, Rapid characterization of wood extractives in pulverized wood samples by thermal desorption-gas chromatography in the presence of organic alkali. In: *Abstracts of International Symposium on Analytical Pyrolysis of Polymers*, 54 (2002).
- K. Ito, T. Kato and T. Ona, Non-destructive method for the quantification of the average particle diameter of latex as water-based emulsions by near-infrared Fourier transform Raman spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*, Vol. 33:466-470 (2002).
- K. Yamauchi, S. Yasuda and K. Fukushima, Evidence for conversion of sinapic to syringyl lignin via a sinapyl alcohol intermediate in *Nerium indicum* Mill and *Pseudocacia* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Vol. 50: 3222-3227 (2002).
- K. Yamauchi, S. Yasuda, K. Hamada, Y. Tsutsumi and K. Fukushima, Multiform biosynthetic pathway of syringyl lignin, *Planta*, Vol. 216: 496-501 (2002).
- K. Yamauchi, S. Yasuda and K. Fukushima, Evidence for conversion of sinapic acid to syringyl lignin via a sinapyl alcohol intermediate in *Nerium indicum* Mill. and *Robinia pseudoacacia* L. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, Vol. 50: 3222-3227 (2002).
- T. Ona, J. Ohshima, K. Adachi, S. Yokota and N. Yoshizawa, A rapid quantitative method to assess *Eucalyptus* wood properties for kraft pulp production by FT-Raman spectroscopy, *Journal of Pulp and Paper Science*, Vol. 29: 6-10 (2003).

- T. Seino, A. Yoshioka, M. Takai, Y. Kojima, Y. Ishikura, T. Ona, Y. Ishida, H. Ohtani and S. Tsuge, Quantitative detection of p-hydroquinone in photo-yellowed paper from chemithermomechanical pulp by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry, *In: Abstracts of the 15th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis*, 73-74 (2002).
- A. Yoshioka, M. Takai, T. Seino, Y. Kojima, Y. Ishikura, T. Ona, K. Gotoh, H. Yokoi, Y. Ishida, H. Ohtani and S. Tsuge, Characterization of polyphenols causing photo yellowing in chemithermomechanical pulp paper by pyrolysis-gas chromatography in the presence of organic alkali, *In: Abstracts of the 15th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis*, 129-130 (2002).
- T. Seino, Y. Kojima, T. Sonoda, K. Goto, H. Yokoi, Y. Ishida, H. Ohtani, S. Tsuge, T. Ona, A. Yoshioka, M. Takai and Y. Ishikura, Py-GC/MS study on the photoyellowing of chemithermomechanical pulp, *In: Preprints of IUPAC Polymer Conference on the mission and challenges of Polymer Science and Technology*, 563 (2002).
- A. Yoshioka, M. Takai, T. Seino, Y. Kojima, Y. Ishikura, T. Sonoda, T. Ona, K. Goto, H. Yokoi, Y. Ishida, H. Ohtani and S. Tsuge, Characterization of polyphenols in pulp samples relating to paper recycling by Py-GC in the presence of organic alkali, *In: Preprints of IUPAC Polymer Conference on the mission and challenges of Polymer Science and Technology*, 562 (2002).
- K. Hashida and S. Ohara, Formation of a novel catechinic acid stereoisomer from base-catalyzed reactions of (+)-catechin, *Journal of Wood Chemistry and Technology*, Vol. 22: 11-23 (2002).
- T. Okuyama, J. Doldan, H. Yamamoto and T. Ona, Heart splits at crosscutting of *Eucalyptus grandis* logs. *In: Abstract of 5th Pacific Region Wood Anatomy Conference*, 17-18 (2002).
- H. Yamamoto, Structure and properties of the cell wall components as postulated from xylem qualities. *In: Abstract of 5th Pacific Region Wood Anatomy Conference*, 29 (2002).
- H. Yamamoto, K. Okumura, T. Okuyama and T. Ona, The effect of the growth rate upon the xylem maturation of fast growing species. *In: Abstract of 5th Pacific Region Wood Anatomy Conference*, 30 (2002).
- N. Yoshizawa, F. Ishiguri, S. Yokota and T. Ona, Formation and structure of low-lignin-content-fibers in reaction wood of some hardwood species. *In: Abstract of 5th Pacific Region Wood Anatomy Conference*, 31 (2002).
- J. Ohshima, S. Yokota, N. Yoshizawa and T. Ona, Within-tree variation of detailed fibre morphology and its position representing the whole-tree value in *Eucalyptus camaldulensis* and *E. globulus*, *Appita Journal*, Vol. 56: 476-482 (2003).
- T. Ona, J. Ohshima, K. Adachi, S. Yokota and N. Yoshizawa, A rapid quantitative method to assess *Eucalyptus* wood properties for kraft pulp production by FT-Raman spectroscopy. *In: Proceedings of the 11th International Symposium on Wood and Pulp Chemistry*, Vol. 2: 87-90 (2003).
- T. Seino, A. Yoshioka, M. Takai, Y. Kojima, Y. Ishikura, T. Ona, Y. Ishida, H. Ohtani and S. Tsuge, Detection of p-hydroquinone in photo-yellowing paper from CTMP of *Eucalyptus globulus* by pyrolysis-GC/MS. *In: Proceedings of the 11th International Symposium on Wood and Pulp Chemistry*, Vol. 2: 223-226 (2003).
- T. Ona, J. Ohshima, K. Adachi, S. Yokota and N. Yoshizawa, In situ determination of vessel element length in tree by Fourier transform Raman spectroscopy. *In: 10th European Conference on the Spectroscopy of Biological Molecules*, S. Balázs and K. Zoltán (eds), JATEPress, 200a (2003).

- A. Kosaihiro, T. Fukumori, K. Sakai and T. Ona, Rapid screen of antiproliferative phenolic compounds with simultaneous analysis of cancer cell reaction by a new combination device of surface plasmon resonance and fluorescence microscopy. *In: 10th European Conference on the Spectroscopy of Biological Molecules*, S. Balázs and K. Zoltán (eds), JATEPress, 71 (2003).
- T. Ona, S-L. Yoon, S. Isaji and Y. Kojima, Tree selection feasibility for high pulp yield brightness and recyclable paper production without bleaching. *In: Abstracts of the 8th IUMRS International Conference on Advanced Materials*, Vol. 2: 72 (2003).
- T. Seino, A. Yoshioka, M. Takai, Y. Kojima, Y. Ishikura, T. Ona, Y. Ishida, H. Ohtani and S. Tsuge, Characterization of photo-yellowing trigger compounds repressing paper recyclability. *In: Abstracts of the 8th IUMRS International Conference on Advanced Materials*, Vol. 2: 15 (2003).
- A. Kosaihiro, T. Fukumori, K. Sakai and T. Ona, A new combination device comprised of Surface plasmon resonance and fluorescence microscopy for rapid screen of anticancer compounds. *In: Abstracts of the 2nd International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy*, 236 (2003).
- K. Ito, T. Kato and T. Ona, Nondestructive viscosity determination of waterborne automotive paint emulsion system by FT-Raman spectroscopy. *In: Abstracts of the 2nd International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy*, 127 (2003).
- Y. Sato, Y. Hosoo, M. Sakaguchi and N. Uozumi, Requirement of negative residues, Asp 95 and Asp105, in S2 on channel function and membrane integration of Vol. tage-dependent K⁺ channel, KAT1. *Bioscience, Biotechnology, Biochemistry*, Vol. 67: 923-926 (2003).
- P. Berthomieu, G. Conejero, A. Nublat, Brackenbury W. L. Lambert C, C. Savio, N.Uozumi, S. Oiki, K. Yamada, F. Cellier, F. Gosti, T. Simonneau, P. A. Essah, M. Tester, A-A. Very, H. Sentenac and F. Casse, Functional analysis of AtHKT1 in *Arabidopsis* shows that Na⁺ recirculation by the phloem is crucial for salt tolerance. *EMBO Journal*, Vol. 22: 2004-2014 (2003).
- Y. Sato, M. Sakaguchi, S. Goshima, T. Nakamura and N. Uozumi, Molecular dissection of the contribution of negatively and positively charged residues in S2, S3, and S4 to the final membrane topology of the Vol. tage sensor in the K⁺ channel, KAT1. *Journal of Biological Chemistry*, Vol. 278: 13227-13234 (2003).
- K. Yamauchi, S. Yasuda, K. Hamada, Y. Tsutsumi and K. Fukushima, Multiform biosynthetic pathway of syringyl lignin. *Planta*, Vol. 216: 496-501 (2003).
- S. Ohara, Y. Yasuta, H. and Ohi, Structure elucidation of condensed tannins from barks by pyrolysis/gas chromatography, *Holzforschung*, Vol. 57: 145-149 (2003).
- J. Ohshima, K. Adachi, S. Yokota, N. Yoshizawa and T. Ona, Within-tree variation of vessel morphology and frequency and representative heights for estimating whole-tree values in *Eucalyptus camaldulensis* and *E. globulus*. *Appita Journal*, in press (2004).
- T. Okuyama, H. Yamamoto, J. Doldan and T. Ona, Heart splitting at crosscutting of Eucalypts logs, *Journal of Wood Science*, in press (2004).
- T. Okuyama, H. Yamamoto, I. Wahyudi and Y. Sudo Hadi, Wood qualities of some tropical plantation species –Does hastening the growth debase the quality?–. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- H. Yamamoto, Y. Kojima, T. Okuyama and T. Ona, An essay on the fine structure of the wood cell wall related to the physical properties of the recycled paper. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- N. Yoshizawa, F. Ishiguri, S. Yokota and T. Ona, Formation and structure of reaction wood fibers forming no G-layer in some hardwood species. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).

- F. Ishiguri, S. Yokota, N. Yoshizawa and T. Ona, Radial variation of cell morphology in three acacia species. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- Y. Ishida, K. Goto, H. Ohtani and T. Sonoda, Direct analysis of condensed tannins in bark by matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry combined with solid sample preparation. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- S. Ohara, K. Hashida, R. Makino and S. Yusuf, Tannin and related polyphenolic components from tropical tree species. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- S. Yokota, K. Nakayama, A. Sagawa, F. Urabe, T. Ona, T. Asada and N. Yoshizawa, Possible effects of properties in polyphenol oxidases on rooting ability of *Eucalyptus camaldulensis* cutting shoots. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- Y. Kojima, S. Isaji and T. Ona, Production of high brightness CTMP from *Eucalyptus globulus* and their light-induced color reversion. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- T. Seino, A. Yoshioka, M. Takai, Y. Kojima, Y. Ishikura, T. Ona, Y. Ishida, H. Ohtani and S. Tsuge, Characterization of photo-yellowing trigger compounds repressing paper recyclability of *Eucalyptus globules* by pyrolysis-GC/MS. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- T. Okayama, Y. Kibatani, K. Nakayama, Y. Kojima and T. Ona, Fiber properties and papermaking potential of recycled *Acacia* Pulp. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- K. Fukushima, Stable isotope tracer experiments give strong evidence supporting a controversial pathway in lignin biosynthesis. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- T. Ibuki, Y. Tokida, N. Matsuda, K. Czempinski, B. Mukker-Roeber, T. Ona and N. Uozumi, Characterization of potassium channel from *Arabidopsis thaliana*. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- J. Ohshima, S. Yokota, N. Yoshizawa and T. Ona, Within-tree variation of detailed fiber morphology and its position representing the whole-tree value in *Eucalyptus camaldulensis* and *E.globulus*. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- J. Ohshima, K. Adachi, S. Yokota, N. Yoshizawa and T. Ona, Within-tree variation of vessel morphology and frequency and representative heights for estimating the whole-tree values in *Eucalyptus camaldulensis* and *E.globulus*. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), in press (2004).
- J. Ohshima, S. Yokota, N. Yoshizawa and T. Ona, Representative heights assessing whole-tree values and the within-tree variations of derived wood properties in *Eucalyptus camaldulensis* and *E. globulus*. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- M. Tateishi, T. Seino, K. Sakai, T. Ona, J. Ohshima, K. Adachi, S. Yokota and N. Yoshizawa, Rapid assessment of vessel morphology by pyrolysis-gas chromatography. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- A. Kosaihira, Takashi. Fukumori, K. Sakai and T. Ona, A new combination device comprised of surface plasmon resonance and fluorescence microscopy for a rapid screening of anticancer phenolic compounds. *In: Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- M. Mizumoto, T. Seino, K. Sakai, T. Ona, Y. Ishida and H. Ohtani, Rapid characterization of total fatty acids in wood by reactive thermal desorption-gas

chromatography with tetrabutylammonium hydroxide. In: *Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).

- T. Ona, M. Tateishi, H. Nozaki, T. Seino, S-L. Yoon and Y. Kojima, Feasibility Study of Tree Selection for High Pulp Yield, Brightness and Recyclable Chemithermomechanical Paper Production using *Eucalyptus globules*. In: *Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- T. Ona, J. Kawana, Y. Kibatani, Y. Ishikura, Y. Ishikura, Y. Kojima and T. Okayama, Toward the construction of efficient link between forest recycling and paper recycling using trees with high performance for paper recycling. In: *Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- H. Haisaki, M. Tateishi, T. Seino, K. Sakai, T. Ona, J. Ohshima, K. Adachi, S. Yokota and N. Yoshizawa, Assessment of vessel anatomical feature in *Eucalyptus camaldulensis* by pyrolysis-gas chromatography. In: *Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).
- S. Murakami, T. Ona, K. Saito and K. Fukushima, Effect of deuterium exchange in lignin on its structural analysis using FT-Raman spectroscopy. In: *Improvement of Forest Resources for Recyclable Forest Products*, T. Ona (ed), Springer-Verlag, in press (2004).

(2) 口頭発表

①招待、口頭講演 (国内 38 件、海外 1 件)

- 小名俊博、園田哲也、柴田勝(王子製紙森林資源研)、大島潤一、横田信三、吉澤信男(宇大農):「FT-Raman分光法を用いた木材細胞比率の非破壊的定量」、第49回日本木材学会大会、東京、4月2-4日 (1999).
- 魚住信之(名古屋大学生物分子応答研究センター)、五島志伸、武藤尚志、山田克幸、老木成稔(王子製紙森林資源研):「植物K⁺チャネルKAT 1のNa⁺による阻害」日本農芸化学会、東京、4月1日(1999).
- 小名俊博、園田哲也、伊藤一弥、柴田勝(王子製紙森林資源研)、大竹良知(愛知農総試)、大島潤一、横田信三、吉澤伸夫(宇大農):「FT-Raman分光法を用いた木材各種組織比率の非破壊的定量」、第3回分析化学のためのケモメトリックス討論会、名古屋、4月23日 (1999).
- 小名俊博(王子製紙森林資源研):「ラマン分光法による木材成分・構造の非破壊的定量」、NIR2001、名古屋、5月22日 (1999).
- T. Ona, T. Sonoda, K. Ito, M. Shibata, Non-destructive determination of wood properties by FT-Raman spectroscopy. 10th International Symposium on Wood and Pulp Chemistry, Main Symposium, Yokohama, June7-10 (1999).
- 小名俊博(王子製紙森林資源研):「FT-Raman分光法による木材特性の定量とその環境貢献」、ニコレー・ジャパン ユーザーズミーティング99、名古屋、5月20日 (1999).
- 小名俊博(王子製紙森林資源研):「ラマン分光法による木材成分・構造の非破壊的定量」、セルロース学会第6回年次大会、札幌、6月16日 (1999).
- T. Ona, T. Sonoda, K. Ito, and M. Shibata, Y. Ootake, J. Ohshima, S. Yokota, and N. Yoshizawa, In situ determination of proportion of cell types in wood by FT-Raman spectroscopy. 8th European Conference on the Spectroscopy of Biological Molecules, Enschede, August 29-September 2 (1999).
- 小名俊博、園田哲也、伊藤一弥、柴田勝(王子製紙森林資源研):「FT-Raman分光法を用いた木材細胞形態の非破壊的定量」、日本分析化学会第48年会、神戸、9月8-10日 (1999).
- 園田哲也、小名俊博(王子製紙森林資源研)、横井裕明、石田康行、大谷肇、柘植新(名

- 大工):「熱分解ガスクロマトグラフィー/質量分析法(Py-GC/MS)によるアセチル化リグニンの定量的解析」、日本分析化学会第48年会、神戸、9月8-10日 (1999).
- 小名俊博、園田哲也、柴田勝(王子製紙森林資源研):「FT-Raman分光法と多変量解析を組み合わせた木材細胞形態の非破壊的定量」、第4回高分子分析討論会、名古屋、11月11-12日 (1999).
 - 小名俊博、園田哲也、柴田勝(王子製紙森林資源研):「FT-Raman分光法を用いた樹木細胞の寸法定量」、第61回分析化学討論会、長岡、5月17-18日 (2000).
 - 小名俊博、園田哲也、柴田勝(王子製紙森林資源研)、玉井裕、小島康夫(北大農)、大島潤一、横田信三、吉澤伸夫(宇大農):「樹幹内変異によるユーカリの細胞形態とパルプ特性との関係」、第67回紙パルプ研究発表会、東京、6月28-29日 (2000).
 - 西村隆雄(科学技術振興事業団)、青木千佳、服部一三、北野英己(名大農)、小名俊博(王子製紙森林資源研)、安井修二(安井器械㈱)、松岡信(名大生物分子)、渡部浩之輔(南イリノイ州立大医):「マルチ-ビーズ ショッカーによる多検体試料の破碎:微生物細胞および動植物組織・器官の粉碎と抽出成分の完全回収」、日本生物工学会大会、北海道、8月3-5日 (2000).
 - 斎藤香織、安田征市(名大農)、小名俊博(王子製紙森林資源研)、福島和彦(名大農):「コニフェリルアルコールの脱水素重合中に存在するシリリング核」、第45回リグニン討論会、愛媛、10月26-27日 (2000).
 - 横井裕明、中瀬敬仁、後藤邦佳、石田康行、大谷肇、柘植新(名大工)、園田哲也、小名俊博(王子製紙森林資源研):「反応熱脱着ガスクロマトグラフィーによる木材中の抽出成分の迅速分析」、第45回リグニン討論会、愛媛、10月26-27日 (2000).
 - 小名俊博、園田哲也(王子製紙森林資源研)、大島潤一、横田信三、吉澤伸夫(宇大農):「近赤外FT-Raman分光法と多変量解析を組み合わせた木材細胞寸法の迅速定量」、第5回高分子分析討論会、名古屋、11月9-10日 (2000).
 - 魚住信之(名古屋大学生物分子応答研究センター):「植物Na⁺/K⁺輸送体と塩感受性」、砂漠CO₂固定化技術講演会、名古屋、11月2日 (2000).
 - 魚住信之(名古屋大学生物分子応答研究センター):「植物のK⁺チャネル・Na⁺/K⁺トランスポーターの構造と機能発現」、第17回資源生物科学シンポジウム、倉敷、12月1日 (2000).
 - 小名俊博(王子製紙森林資源研):「超早生樹木の育成についてーレーザーとバイオテクノロジーの応用ー」、日本農芸化学2001年度大会、京都、3月24-27日 (2001).
 - 伊藤和弘、加藤忠哉(三大工)、小名俊博(王子製紙森林資源研):「FT-Raman分光法によるSBRラテックスの新規な粒径評価について」、第50回高分子学会年次大会、大阪、5月23-25日 (2001).
 - 河名淳介、岡山隆之(東農大)、石倉由紀子(科学技術振興事業団)、小島康夫(北大農)、小名俊博(王子製紙森林資源研):「*Eucalyptus globules*パルプ繊維シートの物性に及ぼすリサイクル処理の影響」、第51回日本木材学会大会、東京、4月2-4日(2001).
 - 石倉由紀子(科学技術振興事業団)、石原正、河名淳介、岡山隆之(東農大)、小島康夫(北大農)、小名俊博(王子製紙森林資源研):「*Acacia mangium*パルプ繊維シートの物性に及ぼすリサイクル処理の影響」、平成13年度繊維学会年次大会、静岡、6月6-8日 (2001).
 - 河名淳介、木場谷陽子、岡山隆之(東農大)、石倉由紀子(科学技術振興事業団)、小島康夫(北大農)、小名俊博(王子製紙森林資源研):「リサイクルによるユーカリパルプ繊維の変質」、第68回紙パルプ研究発表会、東京、6月18-19日 (2001).
 - 小島康夫、小柳知子(北大院農)、小名俊博(九大院農):「*Eucalyptus globulus*から製造したCTMPの光退色(2)、光照射における環境がCTMPの光退色性に及ぼす影響」、日本木材学会第53回大会、福岡、3月22-24日 (2003).
 - 福田晶子、奥山剛、山本浩之、吉田正人(名大院農)、小名俊博(九大院農):「植林ユーカリ2樹種の組織・材質に及ぼす人為的傾斜の影響」、日本木材学会、第53回大会、福岡、3月22-24日 (2003).

- 奥村佳代、奥山剛、山本浩之、吉田正人、林本光雄（名大院農）、小名俊博（九大院農）：「熱帯早生樹の成長と材質及び材成熟に及ぼす肥大成長速度の寄与」、日本木材学会第53回大会、福岡、3月22-24日（2003）.
- 奥山剛、山本浩之、吉田正人（名大院農）、小名俊博（九大院農）：「熱帯早生樹の成長と材質」、日本木材学会第53回大会、福岡、3月22-24日（2003）.
- 伊藤和弘、加藤忠哉（三重大工）、小名俊博（九大院農）：「ナノ粒子直径の近赤外ラマン分光法による非破壊的分析」、高分子分析討論会、名古屋、11月22日（2002）.
- 小名俊博（九大院農）、大島潤一、横田信三、吉澤伸夫（宇大農）：「高リサイクル性を有する森林資源の開発における木材組織・細胞形態の迅速性・非破壊分析」、第13回廃棄物学会研究発表会、京都、11月28-30日（2002）.
- 奥村佳代、山本浩之、奥山剛、吉田正人（名大院農）、小名俊博（九大院農）：「熱帯早生樹種の材成熟に及ぼす肥大成長速度の影響」、日本木材学会中部支部2002年度支部大会、名古屋、10月3日（2002）.
- 福田晶子、山本浩之、奥山剛、吉田正人（名大院農）、小名俊博（九大院農）：「植林ユーカリ2樹種におけるあて材形成と成長応力」、日本木材学会中部支部2002年度支部大会、名古屋、10月3日（2002）.
- 小名俊博（九大院農）、小島康夫（北大院農）、岡山隆之（東農工大農）：「FT-Raman分光法による高リサイクル性を有する樹木の自動選抜装置の開発」、高分子分析討論会2003、東京、11月13-14日（2003）.
- 小名俊博（九大院農）、小島康夫（北大院農）、河名淳介、木場谷陽子、石倉由紀子、岡山隆之（東農工大農）：「高リサイクル性を有する森林資源の開発-ユーカリ E.globulesの選抜と自動選抜装置を開発-」、廃棄物学会2003、つくば、10月22-24日（2003）.
- 小齊平篤、坂井克己、小名俊博（九大院農）福森隆司（九大農）：「SPR（表面プラズモン共鳴）センサーと蛍光顕微鏡からなる新規細胞動態計測デバイスに関する検討」、日本分析化学会第52年回、仙台、9月23-25日（2003）.
- 水元美穂、小名俊博、坂井克己（九大院農）、清野晃之（NEDO）、後藤邦佳、大谷肇（名大院工）、石田康行（名大工エネセ）、柘植新（愛知工大）：「水酸化テトラブチルアンモニウムを用いた反応熱脱着クロマトグラフィーによる木材中の全脂肪酸の分析」、日本分析化学会第52年回、仙台、9月23-25日（2003）.
- 立石麻里、小名俊博、坂井克己（九大院農）、清野晃之（NEDO）：「熱分解ガスクロマトグラフィーを用いた迅速かつ簡便な樹木道管の形状分析手法について」、日本分析化学会第52年回、仙台、9月23-25日（2003）.
- 小名俊博（九大院農）：「研究室紹介」、分析展2003、幕張、9月10-12日（2003）.
- 村上修一（九大農）、小名俊博、坂井克己（九大院農）、斎藤香織、福島和彦（名大院農）：「近赤外FT-Raman分光法による重水素置換したリグニン重合体の構造解析」、平成15年度日本分光学会春季講演会、東京、5月14-15日（2003）.
- 小名俊博（九大院農）、大島潤一、安達広大、横田信三、吉澤伸夫（宇大農）：「近赤外FT-Raman分光法と多変量解析を組み合わせた樹木道管要素長の迅速・非破壊定量」、平成15年度日本分光学会春季講演会、東京、5月14-15日（2003）.
- S. Yusuf, K. Hashida, and S. Ohara, Characterization of polyphenols from tropical tree species, *Acacia auriculiformis* Cunn. EX Benth, Acacia Symposium, 京都、10月（2003）.

- 村山美穂、屋代眞、三城昭義(新大農)、中井毅尚(科学技術振興事業団)、小名俊博、柴田勝(王子製紙森林資源研):「FT-Raman分光法を用いた木材比重の非破壊的定量」、第49回日本木材学会大会、東京、4月2-4日 (1999).
- 村山美穂、屋代眞、三城昭義(新大農)、小名俊博、柴田勝(王子製紙森林資源研):「FT-Raman分光法を用いた木材化学成分の非破壊的定量」、第49回日本木材学会大会、東京、4月2-4日 (1999).
- S-L. Yoon, Y. Kojima, and S-H. Lee, Ultraviolet microscopic study on lignin distribution in the fiber cell wall of BCTMP, 10th International Symposium on Wood and Pulping Chemistry, Pre-symposium, Seoul, June 2-4 (1999).
- 伊藤和弘、加藤忠哉(三大工)、小名俊博、柴田勝(王子製紙森林資源研):「近赤外FT-Raman分光法を用いた実用的な定量分析における装置温度の影響」、第61回分析化学討論会、長岡、5月17-18日 (2000).
- 小島康夫(北大農)、尹承洛(晋州大)、石倉由紀子(科学技術振興事業団)、小名俊博(王子製紙森林資源研):「*Eucalyptus globulus*からの高白色度CTMPの製造とその光退色性」、第67回紙パルプ研究発表会、東京、6月28-29日 (2000).
- 園田哲也、小名俊博(王子製紙森林資源研)、横井裕明、石田康行、大谷肇、柘植新(名大工):「熱分解ガスクロマトグラフィーによるシンナムアルデヒドを含むモノリグノール比の解析」、第45回リグニン討論会、愛媛、10月26-27日 (2000).
- 魚住信之(名古屋大学生物分子応答研究センター)、五島志伸、山田克幸、老木成稔、小名俊博(王子製紙森林資源研):「植物のK⁺チャネルのイオン透過性の制御」、CREST主催シンポジウム、東京、10月 (2000).
- 伊藤和弘、加藤忠哉(三大工)、小名俊博(王子製紙森林資源研):「近赤外FT-Raman分光法を用いた定量分析における実用的な測定温度環境の影響」、第5回高分子分析討論会、名古屋、11月9-10日 (2000).
- 園田哲也、小名俊博(王子製紙森林資源研)、横井裕明、石田康行、大谷肇、柘植新(名大工):「熱分解ガスクロマトグラフィーによるリグニンモノマー比の精密定量法」、第5回高分子分析討論会、名古屋、11月9-10日 (2000).
- 清野晃之(科学技術振興事業団)、小名俊博(王子製紙森林資源研)、吉岡亜希、高井光男、田畑昌祥(北大院工):「リグニン溶液のESR分光」、第50回高分子学会年次大会、大阪、5月23-25日 (2001).
- 伊藤和弘、加藤忠哉(三大工)、小名俊博(王子製紙森林資源研):「近赤外FT-Raman分光法と多変量解析を組み合わせたSBRラテックスの非破壊定量分析」、第6回高分子分析討論会、東京、11月5-6日 (2001).
- 吉岡亜希(北大工)、清野晃之、石倉由紀子(科学技術振興事業団)、小島康夫(北大農)、園田哲也、小名俊博(王子製紙森林資源研)、後藤邦佳、横井裕明、石田康行、大谷肇、柘植新(名大院工):「反応熱脱着GC-MSを用いたパルプ化によるリグニンの化学構造変化の解析」、第6回高分子分析討論会、東京、11月5-6日 (2001).
- 清野晃之(科学技術振興事業団)、小名俊博(王子製紙森林資源研):「各種フェノール物質のHPLC分析」、第6回高分子分析討論会、東京、11月5-6日 (2001).
- 清野晃之(科学技術振興事業団)、吉岡亜希、高井光男、(北大院工)、小島康夫(北大院農) 小名俊博(王子製紙森林資源研)、吉岡亜希、高井光男、田畑昌祥(北大院工):「リグニン溶液のESR分光」、第50回高分子学会年次大会、大阪、5月23-25日(2001).
- 伊吹竜樹(名大院)、小名俊博(九大院農)、魚住信之(名古屋大学生物分子応答研究センター):「植物のK⁺チャネルの機能解析」CREST主催シンポジウム、東京、9月 (2002).
- 清野晃之(科学技術振興事業団)、小島康夫(北大院農)、園田哲也(王子製紙森林資源研)、後藤邦佳、横井裕明、石田康行、大谷肇、柘植新(名大院工)、小名俊博(九大院農) 吉岡亜希、高井光男(北大院工)、石倉由紀子(旭川林試):「Py-GC/MS study on the photoyellowing of chemithermomechanical pulp」、IUPAC-PC2002、京都、12月2-5日 (2002).

- 吉岡亜希、高井光男（北大院工）、清野晃之（科学技術振興事業団）、小島康夫（北大院農）、石倉由紀子（旭川林試）、小名俊博（九大院農）、後藤邦佳、横井裕明、石田康行、大谷肇、柘植新（名大院工）：「Characterization of polyphenols in pulp samples relating to paper recycling by Py-GC in the presence of organic alkali」、IUPAC-PC2002、京都、12月2-5日（2002）.
- 清野晃之（科学技術振興事業団）、吉岡亜希、高井光男（北大院工）、小島康夫（北大院農）、石倉由紀子（旭川林試）、小名俊博（九大院農）、石田康行、大谷肇、柘植新（名大院工）：「ユーカリ木から調製した高収率パルプのリサイクルにおける光黄色化の促進成分の熱分解GC/MSによる解析」、第13回廃棄物学会研究発表会、京都、11月28-30日（2002）.
- 清野晃之（科学技術振興事業団）、吉岡亜希、高井光男（北大院工）、小島康夫（北大院農）、石倉由紀子（旭川林試）、小名俊博（九大院農）、石田康行、大谷肇、柘植新（名大院工）：「ESRとPy-GC/MS/FT-IRを相補的に用いたユーカリ木パルプにおける光劣化促進成分の新規解析評価法の開発」、第7回高分子分析討論会、名古屋、11月21-22日（2002）.
- 清野晃之（科学技術振興事業団）、吉岡亜希、高井光男（北大院工）、小島康夫（北大院農）、石倉由紀子（旭川林試）、小名俊博（九大院農）、石田康行、大谷肇、柘植新（名大院工）：「熱分解GC/MSを用いたユーカリ木パルプにおける内在性光劣化促進物質の解析」、第51回高分子討論会、福岡、10月2-4日（2002）.
- A. Kosaihiro, T. Fukumori, K. Sakai, and T. Ona, A new combination device comprised of surface plasmon resonance and fluorescence microscopy for a rapid screen of anticancer drugs. SEIKAQ75 (8) (2003).
- T. Fukumori, A. Kosaihiro, K. Sakai, and T. Ona, Rapid screening of anticancer compounds by a surface plasmon resonance sensor. SEIKAQ75 (8) (2003).
- T. Seino, A. Yoshioka, M. Takai, Y. Kojima, Y. Ishikura, T. Ona, Y. Ishida, H. Ohtani, and S. Tsuge, Characterization of Photo-Yellowing Trigger Compounds Repressing Paper Recyclability. The 8th IUMRS International Conference on Advanced Materials, 横浜、10月8-13日（2003）.
- T. Ona, S-L. Yoon, S. Isaji, and Y. Kojima, Feasibility of Tree Selection for High Pulp Yield, Brightness and Recyclable Paper Production. The 8th IUMRS International Conference on Advanced Materials, 横浜、10月8-13日（2003）.
- 小名俊博（九大院農）、小島康夫（北大院農）、岡山隆之（東農工大農）：「FT-Raman分光法による高リサイクル性を有する樹木の自動選抜装置の開発」、第8回高分子分析討論会、東京、11月13-14日（2003）.
- 野崎秀夫（九大農）、坂井克己、小名俊博（九大院農）：「リサイクル回数増加による紙中ヘミセルロース変化のHPLCによる測定」、第8回高分子分析討論会、東京、11月13-14日（2003）.
- 灰咲裕規（九大農）、坂井克己、小名俊博（九大院農）：「熱分解ガスクロマトグラフィーを用いた樹木リグニンのキャラクタリゼーションによる樹木道管形態の予測」、第8回高分子分析討論会、東京、11月13-14日（2003）.

③プレス発表

- 小名俊博、有用資源選んで植林も一樹木の構造 5 分以内に解析一、日経産業新聞、第 1 面、平成 11 年 9 月 1 日 (1999).
- 小名俊博、樹木の細胞構造解析ー森林有効利用に道一、日本経済新聞、第33面、平成11年9月14日 (1999).
- 小名俊博、バイオ技術用いて 短期間 高効率 優れた樹木を創出、科学新聞、第 7 面、平成13年3月23日 (2001).

(3)特許出願（国内 3 件、海外 0 件）

① 国内

- 小名俊博、島田俊雄、西尾悦雄、「フーリエ変換ラマン分光測定装置及びその応用」、特開平11-258161 (1999).
- 小名俊博、島田俊雄、西尾悦雄、「樹木の成分等の定量方法、装置及び定量方法のプログラム記録媒体」、特開2000-249654 (2000).
- 小名俊博、小斉平篤、「抗がん作用物質のスクリーニング方法及び装置」、特願 2003-181273 (2003).

(4)新聞報道等

① 新聞報道

- 小名俊博、有用資源選んで植林も一樹木の構造 5 分以内に解析一、日経産業新聞、第 1 面、平成 11 年 9 月 1 日 (1999).
- 小名俊博、樹木の細胞構造解析ー森林有効利用に道一、日本経済新聞、第33面、平成11年9月14日 (1999).
- 小名俊博、バイオ技術用いて 短期間 高効率 優れた樹木を創出、科学新聞、第 7 面、平成 13 年 3 月 23 日 (2001).

7. 結び

(1) 研究について

当初の研究計画に対しては、90%以上の達成度と言えると自負している。ほぼ全てのテーマでこれまでの実績が無く、まさに道なき道を行く状況であったが、道を開くことに成功したと確信している。残念ながら植林までには至らなかったが、交雑種の有効性にまでは言及できたことから、今後の事業展開が切に期待される。非常に若輩者でありながら多額の研究費を使用することを許され、プレッシャーもあり、立ち上がりで多少つまずいたものの、多くの共同研究者に助けられ、世界的にみて非常に有意義な結果を残せたことには満足している。また、多くの若手研究者に海外での発表機会を与えることができ、これからの日本を背負って立つ、研究者や技術者に世界を知り、また今後の日本の産業行く末を見定めることができたことは、研究成果以上のものかもしれない。特に修士の学生を連れて行き、複数のものが口頭発表に選ばれたことや、帰国後に論文の審査が回ってきたことは、特筆すべきかもしれない。

開発した実験装置は本文中に挿入したが、CREST だから完成した装置のひとつであると言えよう。

(2) 実用化に向けての課題

今後のリサイクル性(回数)の高い製品の開発、普及のための道筋について述べる。

1. 紙・パルプは、広葉樹のみならず針葉樹からも製造されている。このため、本技術を針葉樹にも適用し、手法を確立する必要がある。特に、パルプの種類として、化学パルプ、機械パルプがあり、リサイクル性の同定方法としてそれぞれ強度、黄色化を取り上げその有効性を確認したが、同様に行う必要がある。
2. 今回は紙のリサイクル方法として乾湿法または光・熱劣化法をそれぞれ化学パルプ、機械パルプに用いたが、産業的な紙のリサイクルにおいては、これらのみならず、例えば腐敗するなどの複雑な要因から発生する。このため、これら多数の要因について詳細に検討する必要がある。
3. 産業的な紙においては、種々の薬品や資材が混合、塗布されているため、これらを含めた形でリサイクル性の同定法の確立、並びに同定が必要である。最終的にはリサイクル性に悪い影響を及ぼすような薬品や資材についてはその使用が抑制されるような産業的な紙のリサイクル性における規格化、法制化が必要と考えられる。

これらの未解決部分に関しては、本プロジェクト研究から得られた成果をベースにして、企業を中心に研究を進めていくことで、高リサイクル性を有した製品の開発が可能である。このため、今後リサイクル性(回数)を付した製品にはエコマークを、また現在のリサイクル性を越えるような回数を付した製品には、例えばスーパーエコマークやエコマックスのような差別化を実施することにより、真の資源循環型社会の構築に向けた社会システムの実現が期待される。

(3) 今後の技術的展開

- ① これまでの広葉樹を対象とした研究成果から、これを針葉樹に適用可能と判断されるため、これを実施することの重要性を述べた。ここで地球環境や効率的な資源循環を考えた場合、樹木で固定されたCO₂を少しでも長く保つことは有益である。しかし、樹木、特に針葉樹の産業植林においては、建築材向け、紙・パルプ向けといった立場で実施されるケースが多く、それぞれの連携はほとんどとられていないのが現状であり、残念ながらカーボンループはそれぞれ独立に成り立って

いることが多い。このため、この問題を解決するカスケード型システムを構築し、紙・パルプに特化していたこれまでのテーマを発展し、森林資源をまず建築材、それから紙・パルプへというカスケードの効率運用、すなわち高リユース、高リサイクル性を有する森林資源の開発が必要である。

- ② 具体的には、これまでに構築したシステムを用い、立ち木の状態で、例えば材としての強度が高く、光黄色化しづらく、かつ材としてリユースできる率が高く、またできなくなった場合でも紙としてのリサイクル性に優れている優良個体の選抜を実施する必要がある。これまでに高リサイクル性を有した個体の選抜技術を、木材中の繊維形態や成分、並びにリサイクル回数等とのデータとともに多変量解析し、ラマン分光法による迅速な非破壊的測定方法として確立してきた。これを応用し、材としての強度や劣化しづらい、いわゆる高リユース性も含めた建築材としての選抜技術の確立が必要である。
- ③ 一方、これまでの手法では高性能な大型の据え置き型装置を用いたため、現地測定は困難である。そこでポータブル性というコンセプトをこれらのデータに基づき、持ち運びが容易な大きさ、重量、さらに低価格の装置として試作し、新規な選抜手法を確立するとともに、装置の精度や耐久性を確認することが重要である。ポータブル性を重視するため、検出器としてCCDを用いる必要があるが、現在のシリコンタイプでは、これまで取り上げてきたような波長の長い近赤外光を用いることができない。このため、木材から放射される蛍光が測定の妨げとなるため、この除去が重要な研究課題となる。また、解体した際に得られる劣化した材がリユース可能か、また紙・パルプへまわしても高リサイクル性が保持されるかどうかの選別を現場で行う装置が必要である。このため、選別用ポータブルラマン分光光度計も同時に検討する必要があると考えられる。

最後に、今後の戦略的基礎研究推進事業も、真に日本国民にとってメリットのある研究テーマの選択と、オンリーワンとなりえる研究に是非とも、投資してほしい。

