

## 7. 高リサイクル性を有する森林資源の開発

研究代表者 王子製紙 小名 俊博

### 1. はじめに

現在、大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇が大きな問題となっている。これを克服する最良の方法の一つとして、植林が注目を集めている(図1参照)。

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。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、多く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、大気中のCO<sub>2</sub>の固定量を増加し、省エネルギーを達成しながら真の資源循環型社会の構築を実現しようというのが本研究の構想である。

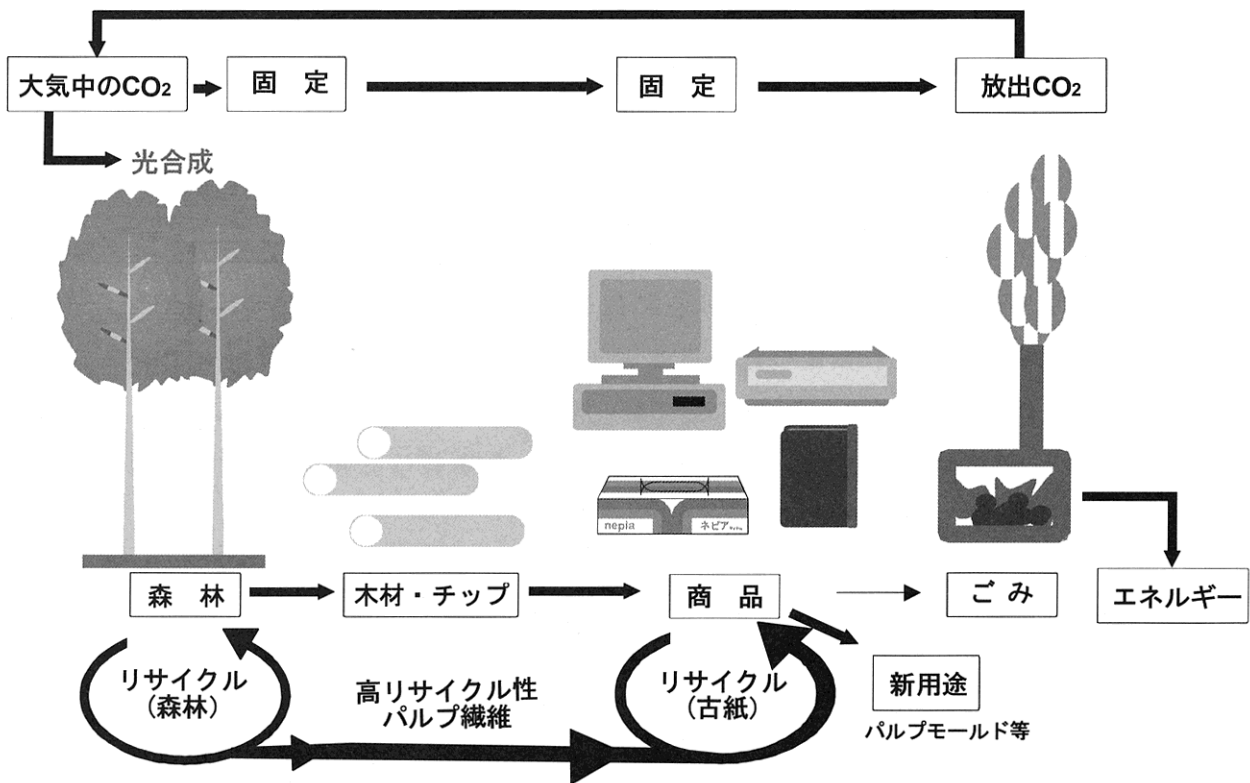


図1 背景

## 2. 方法

リサイクルに適している樹木や、優良個体の繊維形態や成分等に関してはあまり研究は進んでおらず、長い繊維が好ましいといった程度であった。植林を念頭に置き、同一樹種内での検討や、成長性、収率、強度等の生産性、品質も加味した研究は皆無であった。このため以下の4項目をメインテーマとして設定し研究を行なっている(図2参照)。

(1) **パルプ繊維の同定**: 高リサイクル性を有する森林資源(パルプ繊維)を同定する。材料としては、世界中で植林に使用しているユーカリ、アカシア各数樹種、更にこれらの交雑種を用いている。方法としては、これらの材料を用い、クラフトパルプを調製した後手すき紙を作製、プレス、乾燥処理を施した後、収率・強度等を測定する。これを繰り返し、品質の低下程度を定量する。このデータをリサイクル性のデータとして用いる。これとは別に、各原料(木材)の繊維形態や成分の分析を行う。これらの樹種間差、同一樹種における個体間差、また同一個体内における樹幹内差を用いて得られたデータを相互に検討することにより、高リサイクル性を有するパルプ繊維の特徴をそれぞれにつき決定する。また異種間交雑種とその両親樹種との差を検討して、異種間交雑種を用いることによる品質改善の可能性についても検討する。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の製造は重要である。機械パルプは、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、一方では、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する。

(2) **選抜技術の開発**: 高リサイクル性を有した個体の選抜技術の開発をラマン分光法を用い確立する。(1)で用いた原料を使い、ラマンスペクトルを測定し(1)で定量された木材中の繊維形態や成分、並びに一定回数リサイクルされた後の紙の強度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を確立する。これと同時に多変量解析等を自動で行う装置の開発を行う。一方、一個体から木を伐倒せず少試料を採取し全樹幹の品質を予測するため、試料の採取位置の決定を行う。

(3) **優良個体の選抜**: (2)で構築したシステムを用い、高成長、高収率を持ち、且つ、高リサイクル性を持つ個体を選抜する。この際、樹種が異なる同士を用いた交雑種の選抜も実施し、それぞれの特長を有するような新しい品種の開発の可能性も模索する。

(4) **発生機構の解明**: (1)の結果から *Eucalyptus globulus* においては、細胞壁が厚いものほどリサイクル性が高いことが判明した。樹木が加齢し、未成熟から成熟段階へ移行すると一般に繊維は長くなる、細胞壁が厚くなるなどの変化が生ずる。このため、同一個体内でも変化が見られ、未成熟段階と成熟段階における特徴的な物質(細胞形態)の解析と、その発生原因の解明が将来の遺伝子

組み換え等に必要である。このため、樹齢の違いを化学的、物理的また生化学的に解析する。これとは別に、色戻りがしづらい個体について、その機構を解明する。

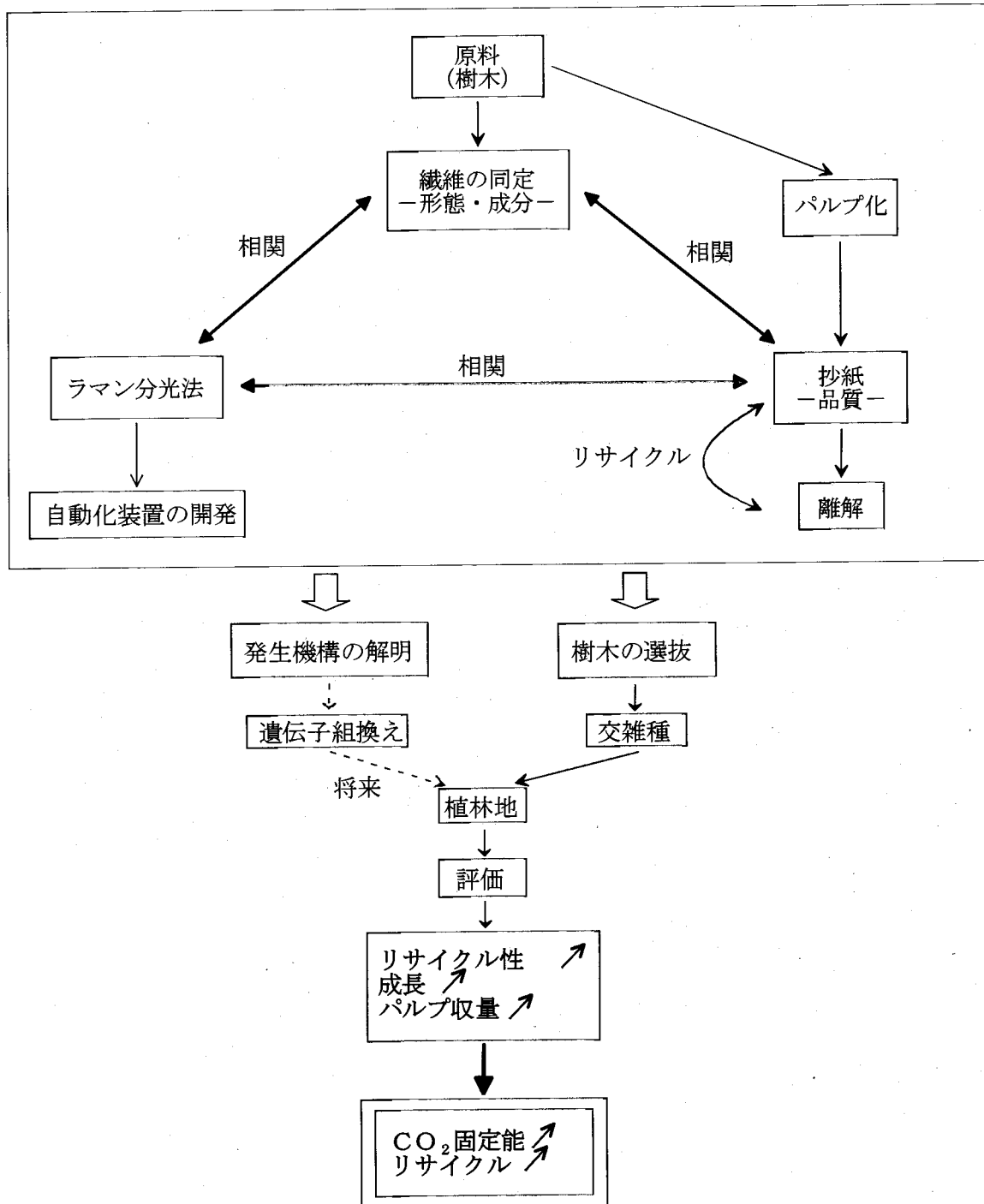


図2 研究構想概略

### 3. 成果

#### (1) パルプ繊維の同定:

- リサイクルによる紙の物理特性変化の同定:「高リサイクル性を有するパルプ繊維の特性」の稿を参照。
- Py-GC を用いたリグニンモノマー比の精密定量:リサイクル性に関与していると考えられる樹木成分の解析は重要である。一般的にリグニンの構造を解析する手法は化学的分解法または分光法であるが、分解が均一に行なわれぬ、また定量性が乏しいなどの課題があった。そこで、均一的な分解方法である Py(熱分解)と GC(ガスクロマトグラフィー)を組み合わせ用い、ユーカリにおけるリグニンモノマー比の定量を検討した。この結果、リグニンモノマーとしてメジャー成分であるシナミルアルコール類とともに、これまで定量解析されていなかったマイナー成分であるシナムアルデヒド類についても、精密な定量が可能となった。
- ユーカリにおける細胞形態とパルプ特性の関係:リサイクル性に関与していると考えられる樹木構造の解剖学的な解析は重要である。放射柔細胞並びに軸方向柔細胞については、その薄い細胞壁および短い細胞長のため紙強度に対する影響が一般に非常に小さいと考えられていたが、ユーカリを用い、放射柔細胞および軸方向柔細胞の細胞比率、細胞壁厚並びに細胞壁率も含め、細胞特性とクラフトパルプ特性の関係を検討した。この結果これらの細胞特性の重要性が判明した。
- 高白色度 CTMP の製造とその熱・光退色性:ユーカリ *E. globulus* を用い高収率パルプである CTMP(chemithermomechanical pulp)の製造を検討した。さらに、熱や光による色戻りについても検討した。この結果、高収率・高白色度の CTMP が製造可能であることが判明した。また、加熱試験においても安定した白色度が維持された。光退色試験においては、個体間差が見られたが、非常に良好なものも認められた。以上のことから、高収率・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。

#### (2) 選抜技術の開発:

- 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: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。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  $22.0^{\circ}\text{C}$ 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  $22.5^{\circ}\text{C}$ 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。

● 近赤外光フーリエ変換ラマン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、近赤外光フーリエ変換ラマン分光法—多変量解析と木紛により非破壊的な定量を検討した。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、 $\alpha$ -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、放射方向および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。

(3) 優良個体の選抜:「高リサイクル性を有するパルプ繊維の特性」の稿を参照。

(4) 発生機構の解明:

● 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。一方、樹齢によって  $Na^+/K^+$ の細胞内への輸送比が異なることが報告されている。植物  $K^+$ チャネルの KAT1 は、 $K^+$ 輸送体のモデル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。また、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、 $K^+$ 輸送体を介して  $Na^+$ が取り込まれると考えられている。つまり、一価陽イオンの  $Na^+$ と  $K^+$ はイオン半径がほぼ同じで、この輸送体を通るという仮説があるが未だ証明されていなかった。そこで KAT1 の孔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。部位特異変異体 2 種類(T256E, T256Q)が見出された。野生型の KAT1 と 2 種類の変異型 KAT1 の cRNA を合成し卵母細胞において発現した後、膜電位固定法(two electrode voltage clamp)にてイオン電流を測定した。この結果、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り、孔入口付近のブロックがされていた。 $Na^+$ 高濃度かつ高電位(過分極電位)の場合でも  $Na^+$ 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ことが判明した。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かった。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。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<sup>+</sup>に弱い植物細胞が K<sup>+</sup>チャンネルを通して Na<sup>+</sup>が通過するのを防ぐために、植物の K<sup>+</sup>チャンネルは Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>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ことが示唆された。

● アカシア属の各種力学的性質の発現と肥大成長量：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、マレーシア産のアカシア3樹種（*A. mangium*、*A. auriculiformis*、両者のハイブリッド）について、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。このため早生樹で心配される、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。

#### 4. おわりに

本プロジェクトの結果から、まだ限られた樹種ではあるが、高成長、高収率、かつ高リサイクル性のパルプ繊維を有する樹木が見出され、植林に使用出来ることが判明した。これにより、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、②CO<sub>2</sub>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。さらには、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、資源循環型社会の構築が可能であることが証明された。