

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名

高リサイクル性を有する森林資源の開発

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者 小名 俊博（九州大学 大学院農学研究院 助教授）

3. 研究内容及び成果：

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。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。

1) 高リサイクル性を有する個体（樹木）の選抜

a) クラフトパルプ（K P）

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。実験により、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。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。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。

b) メカニカルパルプ（M P）

（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。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。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。

2) 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。リサイクル性が異なると、スペクトルは特徴的に異なることから、データ処理をし、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。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、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認した。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。

3) 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ることが判明した。また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。

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。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。

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。成熟材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。

4) 高リサイクル性を有する樹木の発生機構の解明

a) *E. globulus* K P

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。

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。

b) 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。

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。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。

c)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。

4．事後評価結果

4 - 1．外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

地球温暖化は進行しつつある。森林の二酸化炭素吸収は、温暖化抑止に最も期待される効果の一つであるが、2000 年現在、世界の森林面積は約 1.9 億 ha とされており、年間約 4、500 万 ha の増加が報告されている。健全な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である。現在、木材からの紙の生産量は 1.46 億トンで、紙のリサイクル率は約 45%とされている。樹木を産業的に育成する場合、優良個体を選抜し利用することが生産性を高める上で重要であるが、成長面からの選抜は外観からの判断で容易でも、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か、どれほどのリサイクル性を有するかというような品質、材質面からの選抜は多くの労力を必要とするため、これまで殆ど研究されてこなかった。リサイクルを繰り返すとパルプ繊維は劣化するため、紙が白くならない、強度が低下するなどの問題があった。リサイクル性の高い森林資源を育成し利用することの重要性は自明である。森林のリサイクルと古紙のリサイクルの一体化の視点でこの研究が行われたことは誠に時宜に適しており、資源循環・エネルギーミニマムを目標とするシステム技術の開発を目的とした本戦略グループの一つとして成果が期待された。

このチームは国内発表論文 2 件、海外 5 1 件、招待・口頭講演は国内 3 8 件、海外 1 件、ポスター発表国内 1 7 件、海外 1 件、プレス発表・新聞報道等国内 3 件、特許出願国内 3

件、海外 0 件、と順調に成果を出してきた。当初の研究計画に対しては、90%以上の達成度と研究代表者は自負しているが、そのとおりであろう。ほぼ全てのテーマが世界で初めての挑戦であり、道なき道を行く状況の連続であったという。研究総括もオーストラリアにおける植林実験場を訪問して実態を見た。5 年という期間が限定されており、有望種の植林までには至っていないが交雑種の有効性まで明らかにできたことは、今後の事業展開が期待されるものである。研究代表者は CREST 申請当時は王子製紙株式会社の社員であった。研究進行途中で九州大学にスカウトされてしまったが、是非、産業界をリードして研究成果を事業化に結びつけてほしい。

4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

森林のリサイクルと紙のリサイクルの一体化という概念は、この研究がスタートした時点では、その概念すらなかったという。FT-ラマン分光法という測定技術の発展のおかげで、微量の木粉からリサイクル性の高い樹種の繊維の特性を容易に計測できる技術を開発したことが成果につながったと言える。収率が高く、コストが安く、成長性がよく、紙のリサイクル性も高い樹種を最初から選んで栽培できることになった。「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術」の開発という当グループの戦略目標によく適合した成果である。事業化され二酸化炭素排出抑制に効果を挙げれば、世界に対して極めて大きな貢献をしたことになる。外国からの評価も高いようだが、逆に日本の製紙会社が何故もっと高い評価を与えないのかが不思議に思えるほどである。産学連携がうまく機能していなかったのか。この成果を、企業向けにもっとアピールする努力を関係の研究者各位に強く期待したい。

4 - 3 . その他の特記事項（受賞歴など）

特になし。