

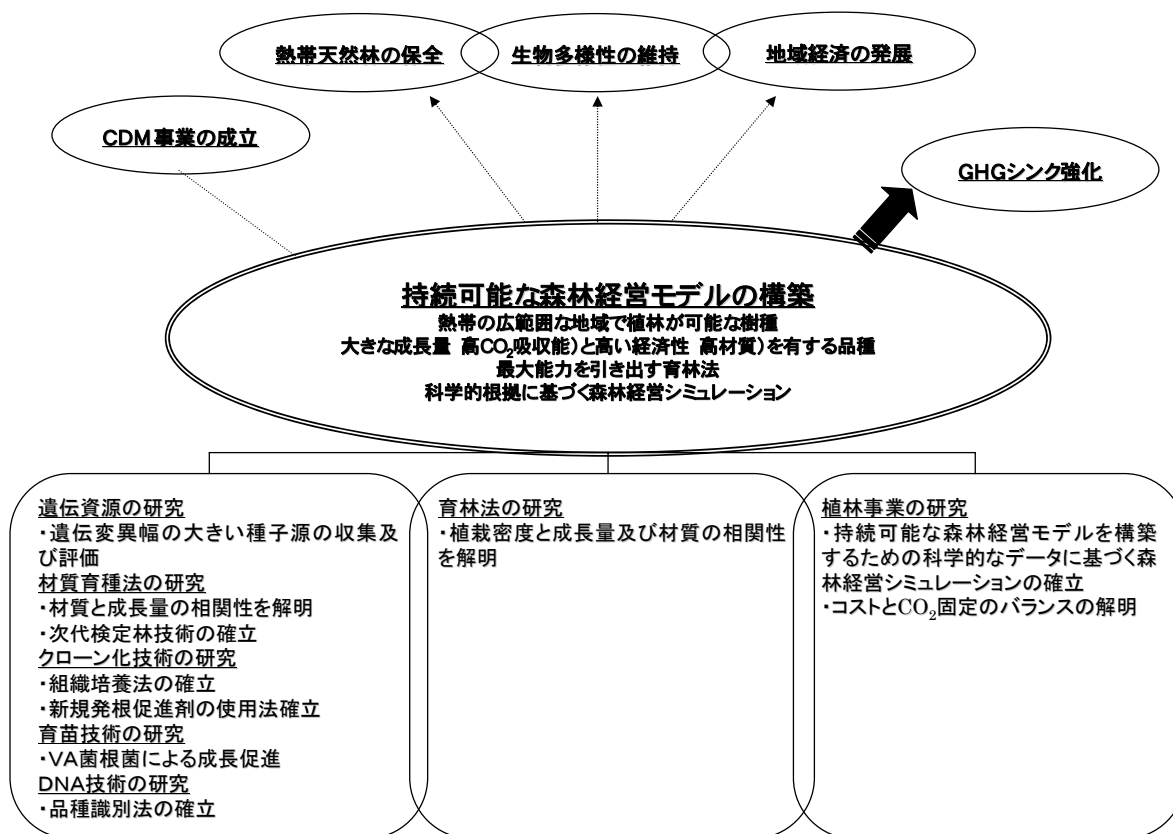
課題名	S-2 陸域生態系の活用・保全による温室効果ガスシンク・ソース制御技術の開発 発一大気中温室効果ガス濃度の安定化に向けた中長期的方策— 1：森林生態系を対象とした温室効果ガス吸収固定化技術の開発と評価 1 b. 森林造成技術の高度化による熱帯林のCO ₂ シンク強化		
課題代表者名	井出雄二（東京大学大学院 農学生命科学科森圏管理学研究室）		
研究期間	平成15-19年度	合計予算額	143,410千円（うち19年度 27,200千円） 「上記の合計予算額には、間接経費33,096千円を含む」

研究体制

- (1) 産地選択および個体選抜による早生樹種苗の遺伝的強化
 1) 新たな産地の導入を伴う実生採種林の造成・評価（独立行政法人林木育種センター、住友林業㈱）
 2) 材質及び成長量を指標とした優良木の評価手法の開発（名古屋大学、住友林業㈱）
 (2) 早生樹による森林育成技術の高度化
 1) 育苗技術の高度化（㈱資生堂、住友林業㈱）
 2) DNAマーカーによる個体識別法の開発（東京大学、住友林業㈱）
 3) 最適育林法の開発とCO₂吸収評価（住友林業㈱）

I. テーマ1 b の全体構成

1 b では、下図の通り持続可能な森林経営モデルを構築することにより、GHGシンクの強化が図れると考えている。森林経営モデルを構築するために必要な技術は、図の下部にある大きく3つ技術グループであり、本サブテーマではこれらの技術を研究開発するため、5つのサブサブテーマを設定している。これら5つのサブサブテーマ間では、各テーマで得られた知見をフィードバックし、他のテーマの更なる発展に寄与できる仕組みとなっている。



II. 本研究により得られた科学的成果

- 熱帯産早生樹について、育種的な改良に伴う成長量の増加を時系列的に予測することが可能となり、育種や施業による同樹種のCO₂シンク機能強化を実態に即して評価することができるようになった。
- 熱帯早生樹では、これまでほとんど知られていなかった成長速度と材質及び加工性の相関性が明らかになり、熱帯早生樹についても冷温帯の定説とほぼ同じ傾向が認められることを解明した。
- これまで成木からの増殖が不可能と言われてきた熱帯早生樹について、バイオテクノロジーを

用いた増殖技術を開発するとともに、挿し木の発根に有効な新規植物成長調節剤の使用方法を開発した。

4. DNAマーカーを用いて、木材製品の原料となった樹木の個体識別技術を開発した。このことにより持続的管理下にあるクローン林から生産された木材製品を差別化する実用的な手法を確立することができたといえる。また、これまであまりなされてこなかった熱帯早生樹の採種林の遺伝的背景およびその課題を、ファルカタ、メリナについて詳細に検討することができ、今後、同様な研究を促すと期待される。

5. これまで粗放的な管理技術しかなく、計画的な施業が行えなかった熱帯地域での植林に関して、林分成長モデルを構築するとともに、森林経営シミュレーションにより最適な計画を数理的に説明することを可能にした。

III. 成果の地球環境政策への貢献

2005年には、東京において第1回国際ワークショップ「CO₂シンク強化と木材生産を両立させる熱帯早生樹育種 (Enhancement of CO₂ Sink and Wood Production through Genetic Improvement of Tropical Fast Growing Tree Species)」を開催し、インドネシア大使館担当官、産学官の専門家、シンクタンクや環境団体等から約130名の参加があり、本プロジェクトの成果普及とともに、活発な討論が行われた。2007年には、ジョグジャカルタ (インドネシア) において、ガジャ・マダ大学と共催で、第2回国際ワークショップ「Improvement of Tropical Forest for Global Environment」を開催し、インドネシア林業省官房を始めとしたインドネシアの専門家100名以上の参加があり、本プロジェクトの成果を最も利用されるであろう地域において報告するとともに、当該成果が将来どのように生かせるのかについて、様々な意見が交わされた。さらには、農林水産大臣を始めとした各国の代表が参集した「違法伐採対策セミナー2007 II in横浜」において、「天然林依存からの脱却 —植林木の利用拡大に向けた技術開発—」という題目で発表を行い、欧米を始めとした様々な国から注目を集めた。これらの国際ワークショップを通じ、日本国が考える植林によるCO₂シンク強化が温暖化防止に有効であることを国内外に示すことができたと思われる。

IV. 研究概要

1. 序 (研究背景等)

陸域生態系の中で、CO₂濃度の低減・安定化に最も寄与しているシステムの一つとして森林が挙げられる。その中でも、その面積および成長量から、最も大きなポテンシャルを有していると考えられるのが熱帯林である。しかしながら、近年の乱伐や無秩序な焼き畑等により熱帯天然林は減少の一途を辿っており、また熱帯林の減少に伴った生物多様性の損失及び地域社会経済の崩壊が問題となっている。熱帯天然林をCO₂の吸収源として考え、その減少傾向を止めること、即ち熱帯林に直接的に関与し、過度の商業伐採や違法伐採、無秩序な焼き畑を抑制し、且つ地域住民のために安定的経済を確立することが、生物多様性や地域社会の安定的維持にも繋がると考えられる。しかし、森林資源は熱帯の発展途上国にあって極めて重要な経済基盤であることから、天然林の伐採を阻止するためには代替となる人工林の育成が不可欠である。即ち、人工林の持続的経営を確立し、天然林と人工林との住み分けを行うことが天然林保全への実際的手段であると考えられる。

そこで、本研究では、熱帯林における持続的な森林の維持と利用を進めるために、一定の生産性を有する地域において、さらにその生産性と木材産業の収益性を向上させ、人工林経営の安定化を図る。また、そのことが直接CO₂シンク強化に資するか否かを検証することを目的として、早生樹種苗の遺伝的強化と森林育成技術の高度化を図る。このような取り組みを通じて、熱帯地域の森林資源およびCO₂シンクの強化が図られれば、植林事業における投資リスクの軽減化によるCDMの拡大も期待できる。

2. 研究目的

広範囲な熱帯地域において植林可能であり、かつ、一定の生産性が期待できる樹種を対象に、より高度なCO₂の吸収を可能とする経済林を実現するため、産地選択や個体選抜により成長量が大きく且つ材質の優れた種苗を獲得するとともに、両者の経済的バランスが最大となるような森林育成技術を開発する。また、これらを用いた森林育成体系がCO₂の吸収にどのような貢献をするかについて評価を行なう。対象樹種は、熱帯マメ科早生樹の *Paraserianthes falcataria* (L.) Nielsen (ファルカタ) とメリナ (*Gmelina arborea* Roxb.) とした。ファルカタについては、これまでの研究開発により基礎知見がほぼ得られてきているので、最適条件の解明やモデルの改良を進める。メリナについては、ファルカタで得られた知見を基に、基礎技術の開発を行う。

3. 研究の方法及び結果

ファルカタで研究開発中の技術を、昨年度から新たに対象としたメリナに応用しながら研究開発を進めている。研究成果は(1)産地選択および個体選抜による早生樹種苗の遺伝的強化、(2)早生樹による森林育成技術の高度化、の順にまとめる。

(1) 産地選択および個体選抜による早生樹種苗の遺伝的強化

① 新たな産地の導入を伴う実生採種林の造成・評価

熱帯地域の早生樹を用いた森林造成において、産地選択および個体選抜によるCO₂シンク強化を評価するために、東ジャワ州ジュンブルに設定した*Paraserianthes falcataria*（ファルカタ）を用いた産地密度試験地等3箇所と実生採種林2箇所です半年間隔の成長調査を実施した。実生採種林では植栽後30ヶ月目にプラス木の選抜と間伐を実施し、86個体をプラス木として選抜した。また、昨年度の調査では実生採種林の比重の遺伝的改良が可能であることを明らかにしたピロディンを用いて、産地密度試験地の樹幹の比重を測定し、植栽密度間差と産地間差および植栽密度と産地の交互作用を認めた。実生採種林、産地密度試験地の成長・形態の継続的な定期調査および比重の調査とそれらの解析結果から、成長・樹幹の形態および比重についても遺伝的な改良が可能であることを確認した。さらに、植栽密度の違いが成長、形態および比重に与える影響が明らかになった。東部ジャワに3箇所設定したコスタリカ産の*Gmelina arborea*（メリナ）種子を用いた産地試験地では年に2回の成長調査を実施した。強風による被害の影響が少ない1箇所の試験地を解析し植栽後半年から1年半後まで継続して遺伝的な違いに基づく産地間差を認めた。

② 材質及び成長量を指標とした優良木の評価手法の開発

熱帯（亜熱帯）の広範囲な地域において造成が可能な早生樹について、その高いCO₂吸収能（成長量）に着目し、人工林造成による大気中炭酸ガス濃度の緩和を目指すと同時に、早生樹人工林から得られる林産物の工業資源化を模索し、その永続供給システムを確立することにより、化石資源への依存圧の低減を図ることを目的としている。植林事業を成功させるためには、経済的価値を有する（材質が良い）優良木の生産を目的とする“材質育種法”の確立と、それによる資源利用のインセンティブ増加が不可欠である。そこで本研究では、材質育種法を確立するため、成長と材質との関係、さらには加工性への影響を明らかにすることを目指す。インドネシア国内に植栽されている7年生ソロモン産ファルカタ林と8年生ジャワ産ファルカタ林及び3.5年生メリナ林と7年生メリナ林において、直径別に小、中、大のグループに個体を分け、成長応力の測定を行うとともに（図1）、調査木を伐採し、材質パラメータを調査するための試料（円板）を採取した。また、丸太は実際の合板工場に運び込み、単板を作製し、加工性パラメータの測定を行った。その結果、ファルカタ、メリナともに、材質試験の結果、解放ひずみと直径成長との間に相関は認められなかった（図2）。さらに、繊維長やマイクロフィブリル傾角といった材質パラメータについても直径成長と相関はなかった。加工性パラメータについては、剥き肌、乾燥性、歩留まり等について調査を行ったが、こちらも直径成長と相関は認められなかった。



図1. 成長応力の測定風景.

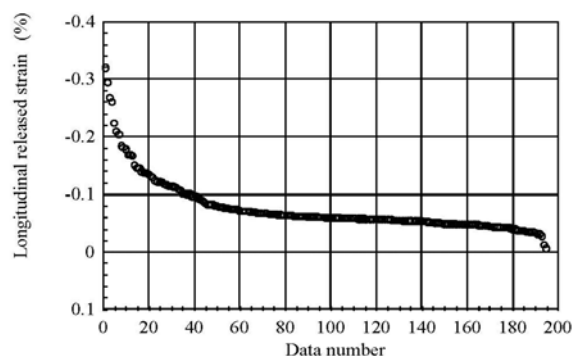


図2. ファルカタの繊維方向解放ひずみの測定値の分布.

(2) 早生樹による森林育成技術の高度化

① 育苗技術の高度化

熱帯の広範囲な地域において植栽が可能な早生樹種について、他のテーマにおいて高CO₂吸収能（成長量が多い）を有し且つ経済性の高い（材質が良い）優良木が育種された場合、これをクローン増殖する必要がある。また、クローン増殖した苗を育苗する期間を短縮化することにより経営に係る負担を軽減することができる。本テーマでは、ファルカタを対象に、組織培養によるクローン増殖法、新規発根促進剤を用いた挿し木によるクローン増殖法の開発およびVA菌根菌を用いた育苗法の開発を行った。組織培養では、材料の内部殺菌を行うことにより、高い生存率が得られることが判明し、優良成木からのクローン増殖が可能となった（図3）。挿し木法では、IBLとKODAを組み合わせることにより発根に対して相乗効果が認められ、特許を出願した。昨年度までにIBLの与え方として噴霧法よりも挿し木をIBL溶液に浸漬する方法が効果的であることがわかったので、今年はさらに詳しく検討した。その結果、IBL 0.5mM溶液に3～6時間水浸するのがよく（図4）、それよりも短かったり、長くしたりする（一晚）と効果が落ちることがわかった。また、IBLとKODAの組み合わせ試験を実施したところ、相乗効果が観察された。更に、KODAとIBLについて、効果の一般化試験としてソメイヨシノの挿し木試験も平行して続けているが、ソメイヨシノの場合は二者の相乗効果は認められるものの、KODAが決定的な効果を示した。発根した苗木のその後の成長を観察するとKODA散布区の苗木は、きわめて特徴ある性質を示した。つまり、最初の年には、葉の面積が拡大し、節間が長くなるなど、低照度下での成長に模した形態を示した。翌年にはそのような成長の特徴は消失したが、三年目（本年）には対照区の苗木ではほとんど花をつけないのにKODA噴霧区では多くの花をつけるという劇的な作用の違いが観察された。このように、KODAは挿し木促進作用があるだけでなく、幼若性を部分的に打破する作用も認められ、育種期間の短縮作用なども期待される。育苗法では、VA菌根菌の場合と同様に、養分が乏しく、通気性及び通水性の良い土壌を用いることにより、窒素固定菌の感染が促されることが解明できた。



図3. 組織培養により増殖したファルカタの多芽体。



図4. ファルカタの挿し木におけるIBLとIBAの効果。

左から、無処理区、IBL0.5mM区、IBA0.5mM区。

② DNAマーカーによる個体識別法の開発

ファルカタおよびメリナについてDual-suppression PCR法によりゲノムDNA上のマイクロサテライト部位を特異的に増幅するプライマーセットを設計した。これらのプライマーセットは、特許として登録済みである。開発したマーカーについて、増幅の安定性などの使いやすさから、これらのDNAマーカーは多型性が十分高く、個体識別に利用可能であった。DNAマ

カーをファルカタおよびメリナ合板から抽出したDNAに適用したところ、それぞれプライマー特異的なDNA増幅が起こり、遺伝子型の特定が可能であった。メリナについては製造時の熱の影響を検討したところ、230℃まで加熱しても識別が可能であった。通常の製造においてこれ以上に加熱されることはない。従って、製造時の熱の影響は考慮しなくてもよいといえる。以上の結果より、木材製品の原料となった樹木の個体識別が可能であるといえる(図5)。さらに、育種素材の遺伝的背景を明らかにするため、ファルカタについては、インドネシアジャワ島にすでに導入されている既存人工林8集団および本プロジェクトで使用する島内で収集した集団および島外から新たに導入する6産地由来の計11集団、合計19集団について、DNA分析を行い各集団の遺伝的多様性、集団間の遺伝的分化などを算出し比較した。その結果、遺伝的多様性の観点からは、特にパプアニューギニア産の集団が、他の産地集団よりも遺伝的多様性の高い育種材料であることが明らかとなった(図6)。

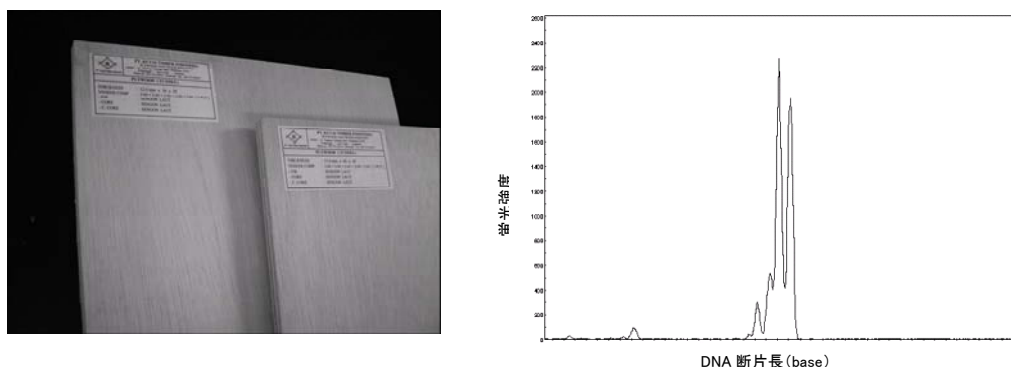


図5. ファルカタ合板のマイクロサテライト解析。
左(写真)：材料の合板。右：解析像。

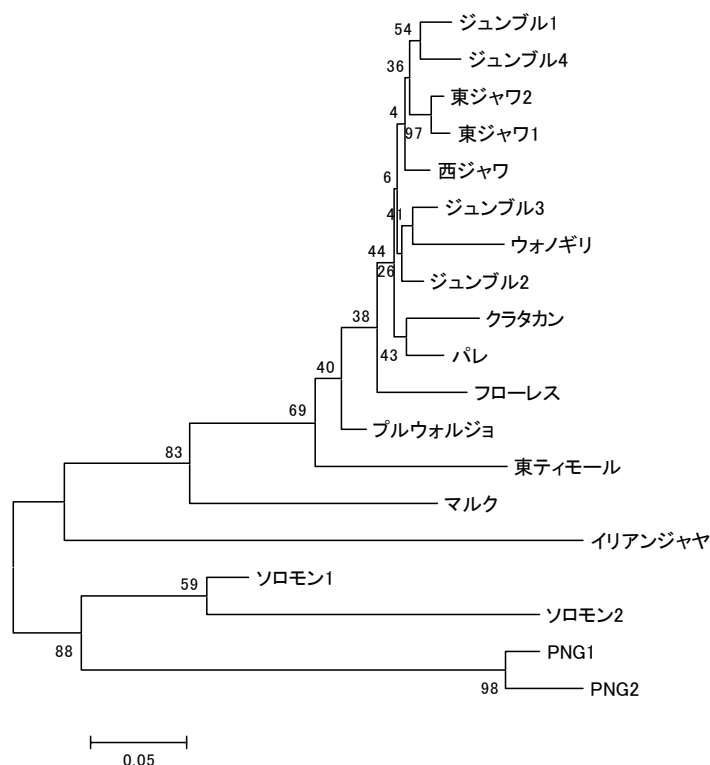


図6. 遺伝距離に D_A に基づくファルカタ19集団の系統樹。

③最適育林法の開発とCO₂吸収評価

本研究では森林のCO₂シンク強化を目的とし、早生樹による最適育林法を開発した。密度及び肥培管理による植栽木の成長制御技術を開発するため、インドネシア共和国東ジャワ州に、パプアニューギニア産のファルカタを14haに植栽した。施肥と間伐を行い、年2回の頻度で樹高と胸高直径を測定した結果、サブサブテーマ(1)-①で開発された林分成長の暫定モデルのパラメタの修正と予測精度の可能性が示唆された。施肥試験では、植栽後2年目以降

の施肥量別平均樹高に有意差が認められず、植林木の成長を制御する要因は密度のみでよいことを明らかにした。さらに、林分成長モデル及び幹曲線式を用いて密度管理に対応した林分成長と出材丸太の歩留を予測した。その際、サブサブテーマ(1)-②の結果から、炭素固定量及び利益は、立木及び生産材積から直接計算した。その結果、事業期間を20年とし、2種類の密度管理を例に、あらゆる植栽・伐採のパタンに対して炭素固定量と収益をそれぞれシミュレートすることにより、事業の収益性を維持しつつ、CO₂固定機能を高める施業計画の立案する手法を示した(図7)。ファルカタで得られた結果を基に、メリナを対象とした施肥試験、密度管理試験を開始し、3地域に約15haの試験地を設定した。その結果、各地域間で立地条件の違いによると思われる成長差が認められた。

なお、現在の試験林の様子を図8に示す。

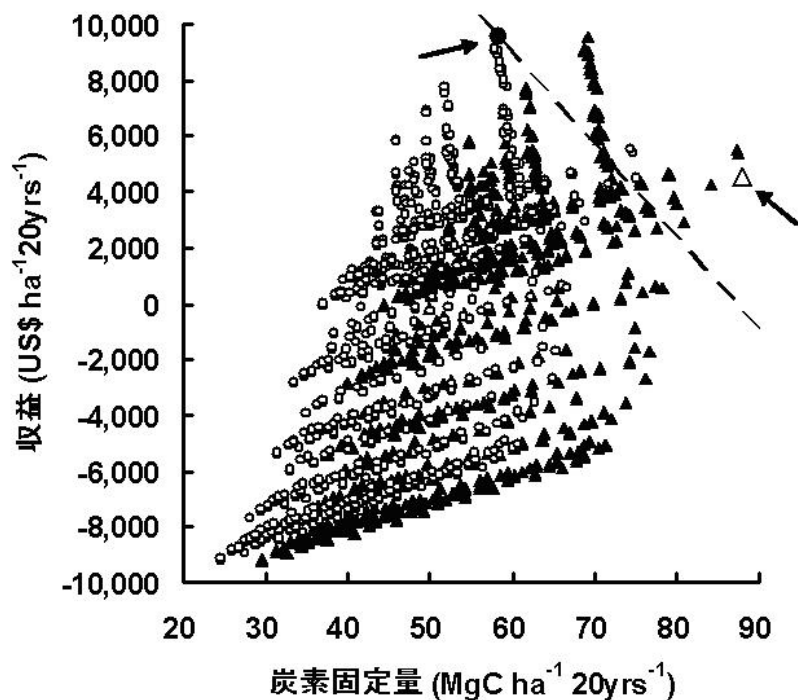


図7. 植栽密度1100本/haと1650本/haのファルカタ植林事業の林分炭素固定量と事業収益。
○ : 1100本/ha. ▲ : 1650本/ha.



図8. 試験林現況. 左: 4年生ファルカタ. 密度試験林では、既に1回目の間伐は終わっており、2回目の間伐が行えるまでに成長している。また、産地別試験林では、優良木の選抜も実施した。右: 2年生メリナ. 既に密度試験や優良木が選抜できる大きさに達した。

4. 考察

(1) 産地選択および個体選抜による早生樹種苗の遺伝的強化

① 新たな産地の導入を伴う実生採種林の造成・評価

プルフタニ林業公社 (Perum Perhutani) 所有のパレ地区のファルカタ人工林に設定した固定プロットの成長調査を継続して、そのデータを用いて林分成長モデルを更新した結果、選抜育種による平均樹高の改良効果を10%、伐期を8年とした場合に林分材積は12%、平均林分蓄積量は18%程度高まると予測された。さらに、幹曲線と生産材の径級別予測にもとづく利用材積予測モデルからは、利用材積が22%高まると推定された。

② 材質及び成長量を指標とした優良木の評価手法の開発

本研究の結果から、ファルカタ、メリナともに、成長と材質、そして成長と加工性の間に相関は認められなかったことから、成長速度が材質や加工性に有為な影響を及ぼさないものと考えられた。このことは、育種を行う際に成長の早い個体を選抜しても材質や加工性には問題がないことを示唆している。

(2) 早生樹による森林育成技術の高度化

① 育苗技術の高度化

組織培養に関しては、殺菌剤に浸漬することにより生存率が高まることが判明し、材料内部の殺菌が表面殺菌とともに重要であることが示唆された。挿し木においては、KODA単体では幼若性の打破が認められたことから、植物の基本的な生理機能に作用していることが示唆された。育苗技術に関しては、これまで得られた結果から、育苗培土には養分が少なく、通気性及び通水性に優れた土壌を用い、施肥を抑えることにより健全な苗生産が可能となることが示唆された。

② DNAマーカーによる個体識別法の開発

両種の採種林の遺伝的評価を行い、ファルカタについては、本プロジェクトで導入した産地がジャワ島の既存林とは遺伝的に異なり有望であること、および母樹数を増やしたほうがよい産地がひとつあることが示唆された。一方、メリナについてはシードロット間に遺伝的な違いがあり多様性があることが示された。また、近親交配の結果生産された種子を多く含む可能性が示唆され、この種子から作った採種林は、近交弱勢の影響がないか注視が必要であるといえる。

③ 最適育林法の開発とCO₂吸収評価

密度管理については、全ての処理区における立木密度と平均断面積との関係が、林分の成長に伴い最多密度曲線に漸近し、最終的にはこの曲線の上を推移すると予想される。また、植栽後3.5年目において、実測値がモデルの開発に用いられた立木密度と平均断面積の範囲に到達し区、モデルで暫定された最多密度区曲線を越えた区及びこの曲線に到達してもまだ個体数の減少がみられない処理区が現われた。これらの結果から、より正確な最多密度曲線を調整できるものと期待された。また、肥培管理については、ファルカタの施業において施肥の効果は期待できないことが明らかであり、施肥は行わない方が経済的に有利であることが示唆された。

5. 研究者略歴

テーマ代表者：井出雄二

1952年生まれ、東京大学農学部卒業、農学博士、現在東京大学大学院農学生命科学科生圏システム学専攻森圏管理学研究室

主要参画研究者

(1) 栗延 晋

1952年生まれ、九州大学農学部卒業、(独)森林総合研究所林木育種センター関西育種場、育種課長(2008年4月より、同林木育種センター遺伝資源部、部長)

(2) 井出雄二 (同上)

6. 成果発表状況 (本研究課題に係る論文発表状況。)

(1) 査読付き論文

- 1) S. Kurinobu, H. Arisman, E. Hardiyanto and T. Miyaura: Forest Ecology and Management, 228, 91-97 (2006) "Growth model for predicting stand development of *Acacia mangium* in South Sumatra, Indonesia, using the reciprocal equation of size-density effect"

- 2) 千吉良治, 松根健二, 小川靖, 栗延晋: 九州森林研究、60、106-108 (2007) 「インドネシアジャワ島東部に植栽した*Paraserianthes falcataria* の植栽後2年目までの家系変異」
- 3) 小川靖, 松根健二, 千吉良治, 栗延晋: 九州森林研究、60、109-111 (2007) 「*Paraserianthes falcataria* (L.) Nielsen の植栽密度別産地試験における植栽15ヶ月時の樹高, 胸高直径, 枝下高および幹の通直性」
- 4) S. Kurinobu, P. Daryono, M. Naiem, K. Matsune and O. Chigira: Journal of the Japanese Forest Research、12-3、231-237 (2007) “A provisional growth model with a size-density relationship for a plantation of *Paraserianthes falcataria* derived from measurements taken over two years in Pare, Indonesia”
- 5) S. Kurinobu, P. Daryono, M. Naiem and K. Matsune: Journal of the Japanese Forest Research、12-6、473-478 (2007) “A stem taper equation compatible to volume equation for *Paraserianthes falcataria* in Pare, East Java, Indonesia: its implications for the plantation management”
- 6) 栗延, ダルヨノ, ナイム: 森林応用研究 (2008受理) 「インドネシア東部ジャワのファルカタ人工林の樹高・直径関係について」
- 7) 横山峰幸、中村健太郎: 資生堂、住友林業; 「挿し木の発根法」, 特開2007-167055, 平成18年4月24日
- 8) 横山峰幸、中村健太郎: 資生堂、住友林業; 「挿し木の発根法」, 特開2007-167055, 平成18年4月24日
- 9) 井出雄二、齊藤陽子: 東京大学; 「モルッカネムの個体識別用プライマーセットおよびそれを用いた個体識別方法」, 特願2004-339726, 平成16年11月25日
- 10) 石尾将吾、中村健太郎: 住友林業; 「木材製品の管理方法およびプライマーセット」, 特願2006-343720, 平成18年12月21日

(2) 査読付論文に準ずる成果発表 (社会科学系の課題のみ記載可)

- 1) 栗延晋: 林木育種センターだより、34、7 (2004) 「外部資金を活用した業務の紹介」
- 2) 千吉良治: 海外林木育種技術情報、13-1、1-3、(2004) 「環境省地球環境推進費を用いた研究テーマ「熱帯林造成技術の高度化による熱帯林のCO₂シンク強化」の紹介」
- 3) 千吉良治、高垣和士、松根健二、栗延晋: 林木の育種特別号2005、1-3 (2005) 「植栽7ヶ月目の*Paraserianthes Falcataria*の諸形質の家系間差」
- 4) O. Chigira, K. Matsune and S. Kurinobu: Proceeding of Enhancement of CO₂ sink and wood production through genetic improvement of tropical fast growing tree species 2005、Tokyo、47-50 (2005) “Family variation in one year old seedling seed orchard of *Paraserianthes falcataria* in East Java, Indonesia”
- 5) S. Kurinobu, O. Chigira, K. Matsune, K. Nakamura and M. Naiem: Proceedings of the Enhancement of CO₂ sink and wood production through genetic improvement of tropical fast growing tree species 2005、Tokyo、39-45 (2005) ” Current progress of study to evaluate the enhancement in CO₂ sinks potential of Segon plantation (*Paraserianthes falcataria*) through genetic improvement”
- 6) 栗延 晋: 関西育種場だより、51、3 (2006) 「環境省地球環境研究プロジェクトの最近の進捗状況について」
- 7) S. Kurinobu, P. Daryono, M. Naiem, O. Chigira, K. Matsune, K. Nakamura and Y. Ide: Proceedings of the Improvement of Tropical Forest for Global Environment, Yogyakarta (2007) “Predicting a contribution of genetic improvement to increase carbon sink potential of plantation of *P. falcataria* with stand growth model developed in East Java - Two stages of prediction on volume productivity and log production for merchantable size”
- 8) O. Chigira, Y. Ogawa, K. Matsune and S. Kurinobu: Proceedings of the Improvement of Tropical Forest for Global Environment, Yogyakarta (2007) “Three years result of genetic trials of *Paraserianthes falcataria* in Jember East-Java Indonesia”
- 9) 栗延 晋: 海外林木育種技術情報、17-1、19-21 (2008) 「環境省地球環境研究プロジェクト5ヵ年の成果 —CO₂シンク強化に向けたファルカタの育種の中長期的な貢献度—」
- 10) 千吉良 治: 海外林木育種技術情報、17-1、22-24 (2008) 「環境省地球環境プロジェクト5年間の成果 (インドネシアでの*Paraserianthes falcataria*の育種・施業試験地の調査結果)」
- 11) MATSUNE K., NAKAMURA K. (2005) Development optimal regimes of density control and fertilization. Proceeding “Enhancement of CO₂ sink and wood production through genetic improvement of tropical fast growing tree species 2005”, Tokyo,

- 12) MATSUNE K. (2007) Approach for optimal management of *Paraserianthes falcataria* forest plantation. Proceeding "Improvement of Tropical Forest for Global Environment 2007", Jogjakarta, Indonesia