

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CO₂シンク強化

(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) 材質及び成長量を指標とした優良木の評価手法の開発

名古屋大学大学院生命農学研究科

山本浩之・(故)奥山 剛

住友林業(株)

井上嘉彦・中村健太郎・市川裕司

<研究協力者> インドネシア共和国

クタイ ティンバー インドネシア社

安田敏男

ガジャ・マダ大学 林学部

Professor Sri Nugroho Marsoem

平成15～19年度合計予算額 33,599千円

(うち、平成19年度予算額 5,939千円)

上記の合計予算額には、間接経費 7,754千円を含む

[要旨] 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、高CO₂吸収能(成長量が大い)を有し且つ経済性の高い(材質が良い)優良木を育種するためには、材質育種法の確立が必要となる。その材質育種法を確立するためには、成長と材質および加工性の関係を明らかにすることが重要である。そこで、本研究では、以前より東南アジアの主要早生樹でありながら、材質育種が未着手であった*Paraserianthes falcataria*(ファルカタ)と*Gmelina arborea*(メリナ)に関する成長、材質及び加工性の相関性を解明し、材質育種法の確立を目指した。ファルカタについては、産地も考慮し、インドネシアに植栽されているソロモン産とジャワ産ファルカタについて調査を行った。また、メリナについては、南スラウェシに植栽された樹齢7年生あるいは3.5年生のメリナを材料とし、調査を行った。その結果、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。

[キーワード] 材質パラメータ、加工性パラメータ、成長、早生樹、材質育種

1. はじめに

地球温暖化防止のための生物的緩和の増大は危急の課題である。生物的緩和の方策として熱帯・亜熱帯の植林を拡大することが最も有望である。その理由として、1. IPPC報告で見積もられているように、熱帯林の再植林・新規植林可能用地は7億haある。仮に、現在の熱帯植林樹木の年間平均成長量を16m³/haとすれば、年間炭酸ガス固定能は、炭素換算で28億トンと

推定され、世界の炭素排出量の45%近くを固定することとなる。2. 熱帯・亜熱帯での生物的緩和施策に要するコストは、先進工業国のそれにくらべ格段と低く、1/20～1/5と安価ですむ。3. 開発途上国の雇用を拡大するため、特に山村地域での貧困の軽減に効果的で、貧困からくる熱帯天然林消失圧力の低減につながる。

しかし、この推進には問題点がある。植林面積の拡大のためには大きな投資が必要である。現状では、投資効率向上のため、熱帯・亜熱帯の植林木は7～8年の収穫サイクルによる早生樹植林が主体である。すなわち、パルプ・薪炭材のための樹種植林がほとんどである。パルプ・薪炭材としての製品価格は、建築・家具材用の木材の約1/100の価格にすぎない。また、パルプの需要拡大は世界的に望めない状況にあり、早生樹植林へのモチベーション高揚は期待できない。早生樹の付加価値を増大し、もって熱帯・亜熱帯植林を世界経済に組み入れてこそ地球温暖化の生物的緩和機能が現実的に稼働することとなる。

2. 研究目的

- (1) 上記の解決策として、現在のパルプ・薪炭材用に植林された早生樹の主要な材質の樹種依存性、育林条件依存性を明らかにし、1. 建築・家具用材への振り向け率を高くすることによって、林分そのものの付加価値を向上させること、2. 材質の遺伝的因子と育林的因子の明確化により、用材適性の材質をもつ個体への育種及び育林的改良を可能にすることを目的とした研究を展開する。
- (2) 材質に起因すると思われる、加工上重要となるポイント（加工性パラメータ）を聞き取り調査から抽出し、成長との関係を明らかにするとともに、名古屋大学の研究チームが分析する材質パラメータと加工性パラメータとの相関の解明を名古屋大学と共同で行っていく。さらには、成長、材質パラメータ及び加工性パラメータの関係を明らかにすることで、他のサブサブテーマで統括的に構築する予定である材質育種法へフィードバックする。

3. 研究方法

(1) 材質パラメータの解明

ファルカタについては、東ジャワ州に植栽されている同樹齢のソロモン産（7年生）及びジャワ産ファルカタ（8年生）について、径級で大、中、小の3グループに分け、各グループから16～18本の個体を無作為に選び、立木の状態のままひずみゲージを用いた成長応力解放ひずみを測定し、その後対象木を伐倒した。伐倒後、解放ひずみ測定位置になるべく近い位置から、材質測定用の成長錐コアサンプル及び東西方向の径方向長方形試験材を切り出した。成長錐コアサンプルについてはSilviscanを用いて、密度、MFA、MOEの樹幹内分布計測を行った。さらに、Silviscanによる測定結果をキャラクター化するため、径方向長方形試験材について材質因子の測定を行った。また、5本の樹木からは、2mおきに樹幹解析用の円板（厚さ5cm）を採取した。グメリナ（3.5年生、7年生および12年生）

についても同様の測定を行った。なお、最終年度（19年度）においては、アカシアマンギウムについて、肥大成長速度が残留応力分布に及ぼす影響について、予備的な調査を行った。これについては、ジョグジャカルタ近郊のアカシアマンギウム18年生の植林地より、大小5個体を選び、胸高部位に相当する位置から長さ2mの丸太を採取、髄を通る柾目面を露出させ、ひずみゲージ法により（髄から木部表面にいたる）残留応力分布を測定した。

（2）加工性パラメータの解明

材質試験で用いた材料と同じ個体を研究対象とした。材質パラメータの一つである成長応力を測定後、伐倒した対象木から丸太（元玉及び二番玉）を採取し、加工性試験の材料として供試した。合板材料としての利用を目的とし、合板材料として加工上重要なポイントを合板工場にて聞き取り調査を行い、その結果抽出された4つの加工性パラメータに対応する試験項目（表1）について試験を実施した。なお、各試験の方法は下記の通りとした。

表 1. 加工性パラメータと対応試験

加工性パラメータ	対応試験
剥き肌・切削性	単板表面粗さ
乾燥性	初期含水率、乾燥速度
寸法・形状安定性	乾燥単板アバレ度、乾燥幅収縮率
歩留まり	剥芯径、丸太直径の測定

1) 単板表面粗さ

乾燥後の単板から50mm×50mm角の試験片を切り出し、20℃・65RHの恒温恒湿室にて養生後試験を実施した。測定時のレベルを安定させる為、試験片の両端をクリップで台座にしっかりと固定した。㈱小坂製作所表面粗さ測定器SE-40D(サーフコーダー)を用い、縦倍率=100、カットオフ値=0.5mm、基準長さ=25mmにて測定した。

2) 乾燥試験（初期含水率、乾燥速度、乾燥幅収縮率）

60℃に設定した乾燥機に尺角単板を入れ、1時間毎に重量及び幅長さを測定した。1時間毎の質量減少率が1%以下に達した時点で、105℃に設定変更し絶乾に達するまで乾燥した。これにより、原木毎の含水率、乾燥速度、乾燥幅収縮率及び単板の絶乾比重を求めた。

3) 乾燥単板アバレ度

乾燥・調板した単板(2.7×1270×960mm)を、供試原木毎に繊維方向が直交するように5枚重ね、その上に5mm厚の合板を乗せ、単板の4方の堆積高さを測定した。

4) 剥芯径

供試原木をロータリーレースの最大能力まで剥いた残りを剥芯とし、その直径を測定した。

5) 丸太直径

剥皮後に各丸太の末口、元口の長径及び短径を測定し、丸太の直径平均値を求め、材積値を算出した。

4. 結果・考察

(1) 材質パラメータの解明

1) 解放ひずみの直径（肥大成長速度）依存性

図1に、ソロモン産ファルカタ繊維方向の成長応力解放ひずみ（Longitudinal released strain）の個体ごとの分布を他の早生樹と比較して示す。それぞれの樹種における成長応力解放ひずみの大きさが概観できる。この値は、樹木が成長に伴って樹幹内部に蓄積する成長応力に比例する値であり、この絶対値が大きいと、樹木伐採時に木口が大きく割れたり、製材時に材が曲がり利用歩留まりが低下し、用材としての付加価値が低下する。従って、用材として用いる場合には、この値が小さい方がよい材と言える。正確なデータには欠けるが、植林ユーカリの製材の場合、この応力が大きいと、30%内外の製材ロスが生じると言われている。特に、図1において、値が-0.1%より絶対値の大きなものは製材用として用いるのは困難である。今回のSengonは、50本のうち、6本が製材不適としてパルプ・薪炭用材にまわされるべき材と言えよう。

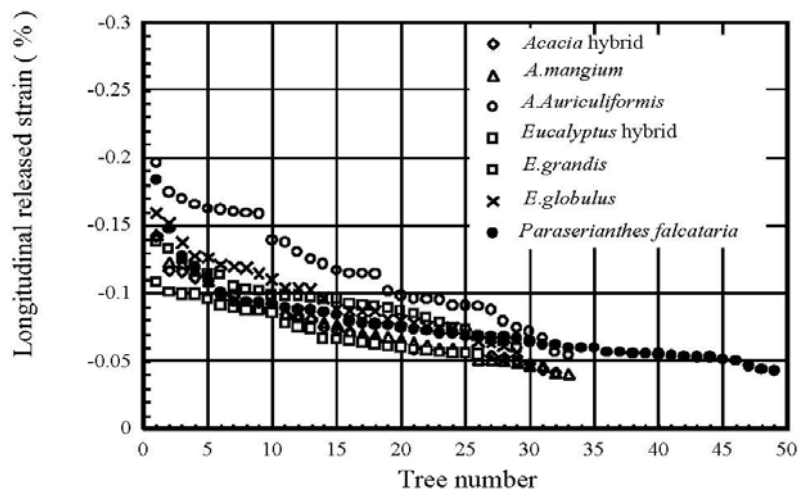


図1. 早生樹7種類の繊維方向解放ひずみの個体分布。

さらに、個体毎に4カ所の解放ひずみを測定したが、その測定値の分布を図2に示すが、同様な結果がジャワ産ファルカタにおいても得られた。

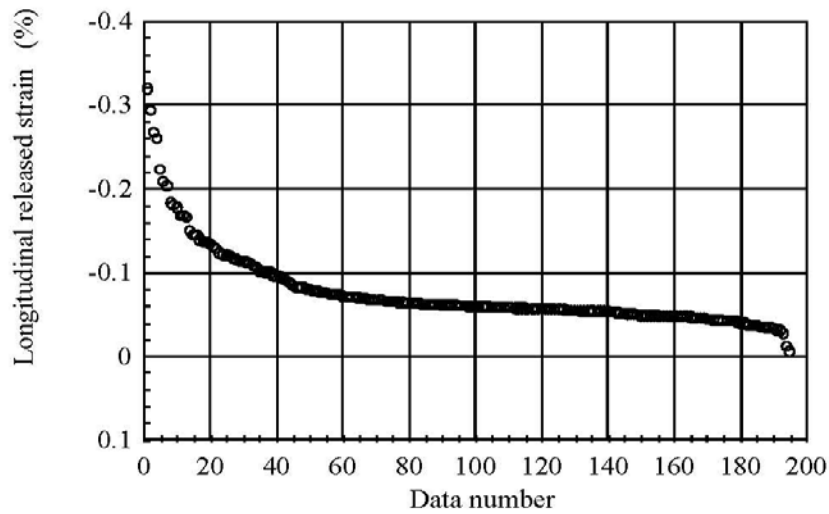


図2. *Paraserianthes falcataria*の繊維方向解放ひずみの測定値の分布.

3. 5及び7年生メリナについても、解放ひずみと樹幹直径（各樹齢が同じであるため、直径成長速度と考えることができる）との間には相関関係は見られなかった。また、樹齢（3. 5年生、7年生、12年生）の違いにかかわらず、解放ひずみの値（平均値）はほぼ一致（-0. 75%）していた。

以上の結果から、ファルカタ及びメリナは、肥大成長速度を大きくしても成長応力は変わらないということが結論される。

2) 密度 (m)、繊維長 (FL)、マイクロフィブリル傾角 (MFA) の直径 (肥大成長速度) 依存性

mおよびMFAについては、樹種及び樹齢の違いにかかわらず、樹幹直径との間には相関関係はなかった。これらのことから、肥大成長速度を大きくしても材質パラメータは変わらないということが結論される。

3) 残留応力分布の直径 (肥大成長速度) 依存性

18年生アカシアマンギウム5個体について、予備試験を行った。直径が14cmから41cmまでの5個体について、髄から木部表面までに至る残留応力解放ひずみ（繊維方向）を測定した。ひずみの値は、どの直径の個体についてもほぼ同様であり、木部表面付近では-0. 1%というかなり大きな縮みとなった。この値は、アカシアマンギウムの平均的な表面解放ひずみに関する従来の報告に一致した（図1参照）。一方、髄付近では繊維方向解放ひずみは伸びであり、その大きさには個体差が見られたが、直径との相関性は認められなかった。いずれにせよ、木部表面に発生している大きな引張応力と、髄付近での圧縮応力との差が、伐採・玉切によって、しばしば横断面に深刻な心割れを引き起こすものと判断される。なお、分布パターンは、形成層齢が支配的であり、肥大成長速度には依存しないと判断された。このことは、早生樹の育種を行う際に成長の早い個体を選抜しても材

質や材成熟特性には問題がないことを示唆している。

4) 繊維長を材質パラメータに用いた場合の材成熟機構

ファルカタおよびグメリナについて、いずれの樹種についても、FLは髓から外側に向かって初めは急激に伸び、徐々に安定してゆき、同一の値に収束していく傾向を示した。FLの半径方向分布の様子（分布曲線）を、これを評価する指数関数式

$$FL=FL_2 \cdot (FL_2 \cdot FL_1) \exp(-bx) \quad (1)$$

で近似し（ただし FL_1 、 FL_2 はそれぞれ髓付近、成熟材部での値、 x は髓からの距離、 b は定数）、「 b 値」と胸高直径 D （肥大成長速度）とを比較した。 b 値と D との場合に有意な相関関係が認められる場合、その程度（有意性の程度）が高いほど、“材成熟は形成層齢に依存する傾向が強い”ものと判断される。一方、 b 値と D との場合に有意な相関関係が認められない場合、“材成熟は形成層齢に依存せず、むしろ直径に依存する”ものと判断される。式中の「 b 値」を算出し、供試個体の胸高直径 D （肥大成長速度）とを比較したところ、いずれの樹種についても、 b 値と D とは無相関であり、このことからファルカタおよびグメリナの材成熟は形成層齢ではなく直径成長量に依存する傾向を持つものと推察された。

材の気乾密度（ m ）についても放射方向変動パターンを調べたが、 m は木部半径が6cmに達した時点で、一方、FLは10~12cmに達した時点で最大となり、その後は安定するということがわかった。このことは、育林技術の上では大きな意味を持ち、早生樹の肥大成長速度を高くしても、少なくとも成長応力に起因する材質の低下は起こらないこと、また成熟材の産出という視点からも問題は生じないものと考えられる。なお、本プロジェクト以外の実験ではあるが、ユーカリ2種（温帯~亜熱帯オーストラリア産、グランディス種およびグロブルス種）についても同様な調査を行ったところ、 b 値と D との場合に有意な相関関係が認められた。すなわちユーカリ2種では“材成熟は直径ではなく形成層齢に依存する”可能性がある。本プロジェクトにおける熱帯産早生樹から得られた結果とは対照的であり、材成熟が形成層齢あるいは直径のどちらに依存するかについては今後広範囲な調査が必要である。

(2) 加工性パラメータの解明

剥芯径、丸太直径の測定から得られたデータを材積数値とし、その他の試験データを物性値とし、解析を行った。

1) 材積値

ソロモン産ファルカタの結果を表1-1に、ジャワ産ファルカタを表1-2に、3.5年生メリナの結果を表2に示した。剥芯の平均径は丸太の平均径に関係なく、調板単板歩留まりについては、径級間に有意な差が認められ、径級が大きいほど歩留まりがよくなる傾向が確認された。

表 1-1. 径級と材積値の関係.

径級範囲 (cm)	原木			剥芯		調板単板 歩留まり (%)
	本数	平均径 (cm)	投入材積 (m3)	平均径 (cm)	総材積 (m3)	
~24.9	16	22.5	0.830	5.4	0.059	49.3
25.0 ~29.9	18	27.1	1.352	5.5	0.064	54.0
30.0~	16	33.8	1.878	5.2	0.047	56.9

表 1-2. 径級と材積値の関係.

径級範囲 (cm)	原木			剥芯		調板単板 歩留まり (%)
	本数	平均径 (cm)	投入材積 (m3)	平均径 (cm)	総材積 (m3)	
16.6 ~23.9	17	19.9	1.404	4.3	0.071	42.3
24.0 ~33.9	16	28.8	2.762	4.2	0.064	52.1
34.0 ~44.6	16	36.9	4.501	4.2	0.059	55.9

表 2. 径級と材積値の関係

径級範囲 (cm)	原木			剥芯		調板単板 歩留まり (%)
	本数	平均径 (cm)	投入材積 (m3)	平均径 (cm)	材積 (m3)	
9.6 ~15.9	19	12.9	0.658	3.4	0.020	30.6
16.0 ~20.9	17	19.2	1.301	4.3	0.066	48.8
21.0 ~26.1	14	22.8	1.499	4.0	0.046	54.3

2) 物性値

ソロモン産ファルカタ、ジャワ産ファルカタ及び3.5年生メリナの結果を、それぞれ表3-1、2及び表4に示した。初期含水率、乾燥速度（MC80%から10%までの所要時間）は、径級が大きくなるほど高い値を示した。一方、乾燥幅収縮率、乾燥単板アバレ度は、径級が大きくなるほど低い値を示した。しかしどの物性値においても、径級間での有意差は認められなかった。表面粗さについては、径級間の大きな違いは見られなかった。

表 3-1. 径級と物性値の関係.

径級 範囲 (cm)	原木		初期 含水率 (%)	アバレ度 (mm/100 枚)	2hr 後 含水率 (%)	乾燥幅 収縮 (%)	乾燥厚み 収縮 (%)	表面粗さ Rmax (μ m)
	本数	平均径 (cm)						
~ 24.9 25.0	16	22.5	86	504	2.0	4.2	2.9	226
~ 29.9 30.0	18	27.1	108	500	13.0	4.0	2.6	224
~	16	33.8	98	453	5.9	4.1	3.1	225

表 3-2. 径級と物性値の関係.

径級範 囲 (cm)	原木		初期 含水率 (%)	MC 80%→10% 乾燥時間 (hr)	乾燥幅 収縮 (%)	乾燥 アバレ度 (mm/100 枚)	表面 粗さ Rmax (μ m)
	本数	平均径 (cm)					
16.6 ~23.9	17	19.9	129	6.0	3.4	-	-
24.0 ~33.9	16	28.8	131	5.6	3.4	-	-
34.0 ~44.6	16	36.9	123	5.6	3.5	-	-

表 4. 径級と物性値の関係.

径級範	原木		初期 含水率	MC 80%→10%	乾燥幅 収縮率	乾燥単板 アバレ度	表面 粗さ
	本数	平均径					

围 (cm)	(cm)	(%)	乾燥時間 (min.)	(%)	(mm/100 枚)	Rmax (μ m)		
9.6 ~15.9	19	12.9	Ave.	131.1	399	6.3	538	230
			STD	19.1	84	1.3	178.6	43.9
			C. V.	14.5	21.0	20.0	33.2	19.1
16.0 ~20.9	17	19.2	Ave.	140.9	451	6.0	499	258
			STD	15.8	84	1.1	50.9	43.4
			C. V.	11.3	18.5	17.7	10.2	16.8
21.0 ~26.1	14	22.8	Ave.	143.8	472	5.4	473	235
			STD	19.9	75	0.7	62.2	27.4
			C. V.	13.8	15.8	13.4	13.2	11.6

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

熱帯産早生樹では、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つつある。これまでのところ、冷温帯の定説とは若干異なる知見も認められていることから、今後の結果次第では熱帯地域における材質育種に一石を投じる結論を出すことができる。

(2) 地球環境政策への貢献

今後、ワークショップ等を通じ、成果の広報・普及に努める

6. 引用文献

なし

7. 国際共同研究等の状況

ガジャ・マダ大学と共同研究契約を締結（平成16年5月）

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

なし

<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）

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

なし

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 奥山 剛：第34回林木育種懇話会 (2004)
「熱帯・亜熱帯植林樹木の用材利用化のための材質研究」
- 2) 奥山剛、山本浩之、吉田正人 (名古屋大学)、松根健二、井上嘉彦、中村健太郎 (住友林業)：第54回日本木材学会大会 (2004)
「熱帯早生樹ファルカータの成長応力と加工性」
- 3) Y. Ojio, H. Yamamoto, T. Okuyama, M. Yoshida, S. N. Marsoem, M. Tsuchiya, K. Matsune, K. Nakamura, Y. Inoue：The 6th Pacific Regional Wood Anatomy Conference, Kyoto. Japan, 2005
“Influence of growth rate on xylem properties of some fast-growing species”
- 4) Y. Ojio, H. Yamamoto, T. Okuyama, M. Yoshida, S. N. Marsoem, M. Tsuchiya, K. Matsune, K. Nakamura, Y. Inoue: International Symposium on Wood Science and Technology, Yokohama. Japan, 2005
“Influence of growth rate on xylem properties and growth stresses of *Paraserianthes falcataria*”
- 5) 小塩泰久, 山本浩之, 吉田正人, 奥山剛, 土屋守雄, 松根健二, 中村健太郎, 井上嘉彦：日本木材学会年次大会 (2005)
「ジャワ島産ファルカータ植林木の成長速度が各種材質に及ぼす寄与」
- 6) Y. Ojio, H. Yamamoto, T. Okuyama, M. Yoshida, S. N. Marsoem, M. Tsuchiya, K. Matsune, K. Nakamura, Y. Inoue: 環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクトワークショップ-CO₂シンク強化と木材生産を両立させる熱帯早生樹育種, 東京大学弥生講堂一条ホール, 東京, 2005
“Effect of high growth rate of *Sengon Solomon (Paraserianthes falcataria)* upon various xylem properties”
- 7) 児嶋美穂, 山本浩之, 吉田正人, 土屋守雄, 松根健二, 中村健太郎, 井上嘉彦：日本木材学会年次大会 (2006)
「熱帯早生樹種の肥大成長速度が各種材質に及ぼす影響」
- 8) H. Yamamoto: International Workshop on the quality and utilization of young plantation trees, Christchurch. New Zealand, 2007
“Growth stress and its related problems in man-made forest resources,”
- 9) 児嶋美穂, 三枝晃一郎, 山下彩織, 吉田正人, 山本浩之, 奥山剛, 松根健二, 中村健太郎, 井上嘉彦：日本木材学会年次大会 (2008)
「樹齢および成長速度が *Gmelina arborea* の材質に及ぼす影響」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 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)」(2005年5月、東京大学弥生講堂、参加者130
名、インドネシア大使館等が参加)
- 2) 第2回国際ワークショップ「Improvement of Tropical Forest for Global Environment」
(2007年7月をガジャ・マダ大学と共催、ガジャ・マダ大学、参加者100名、インドネシア林
業省官房等が参加)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) KOMPAS (インドネシアの新聞, 2007年7月14日)
- 2) PADAR SOLO (インドネシアの新聞, 2007年7月14日)

(6) その他

なし