

## 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<sub>2</sub>シンク強化

(2) 早生樹による森林育成技術の高度化

3) 最適育林法の開発とCO<sub>2</sub>吸収評価

住友林業(株) 筑波研究所資源グループ

松根 健二

〈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

平成15～19年度合計予算額	11,617千円
(うち、平成19年度予算額	2,379千円)
上記の合計予算額には、間接経費	2,682千円を含む。

[要旨] 本研究では森林のCO<sub>2</sub>シンク強化を目的とした早生樹による最適育林法を開発する。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ジュンブル県の農園公社PTPNX IIのカカオ農園跡地にて施肥及び密度試験区を設定した。2003年度にパプアニューギニア産の*Paraserianthes falcataria* (L.) Nielsen (ファルカタ) の苗42,118本を育苗し、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。密度試験では、更なるデータの蓄積によって他のサブサブテーマ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。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。また「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」において植林木の成長速度は材質や加工性に影響を与えないことを明らかにしており、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。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・伐採のパター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、CO<sub>2</sub>固定機能を高める施業計画の立案する手法を示した。2005年度には*Gmelina arborea* Roxb. (メリナ) を対象とした施肥試験、密度管理試験を開始した。コスタリカの4つのクローン実生採種林より入手した種子を用い、22,308本を育苗し、農園公社PTPN XIIのBANJARSARI、MUMBUL、KALISEPANJANGの3つの事業区で、それぞれ約5haに植栽した。BANJARSARI事業区、MUMBUL事業区における成長データから、立地条件の違いによると思われる成長差が認められている。植栽後1.5年の時点で密度が林分成長に与える影響を解析するには至っていない。施肥試験では両試験区とも肥料の投与量に応じた成長差が認められた。

[キーワード] 密度管理、肥培管理、*Paraserianthes falcataria* (ファルカタ)、*Gmelina arborea* (メリナ)、CO<sub>2</sub>シンク

## 1. はじめに

本研究では、森林造成技術の高度化により熱帯地域での早生樹植林においてそのCO<sub>2</sub>固定機能を強化することを目的とする。具体的には、植栽時から伐期までの立木密度および施肥管理（肥料の種類、施肥の量や頻度）が、植栽木の成長に及ぼす影響を解明することにより、CO<sub>2</sub>吸収能と経済性に優れた育林技術を開発することを目的としている。

本研究では、熱帯早生樹を主対象として研究を進めており、*Paraserianthes falcataria* (L.) Nielsen（以下ファルカタ）を対象としてデータを蓄積しつつある。ファルカタはマメ科の樹木で、インドネシアのモルッカ諸島、ニューギニア、特にソロモン諸島、オーストラリアに天然分布していたといわれるが、1870年代に東南アジアをはじめとした世界の熱帯各地で植栽が行われた際に帰化していったため、その天然分布域は不明確になっている<sup>1)</sup>。2005年度は*Gmelina arborea* (L.) Roxb.（以下メリナ）を対象とし、ファルカタと同様に密度や肥培の管理と植栽木の成長を検討した試験を開始した。メリナはクマツヅラ科の樹木で、パキスタンから南へスリランカ、東へはビルマまで分布し、東南アジア、熱帯アフリカ及びブラジルにて積極的に植栽されてきた造林樹種である<sup>2)</sup>。

## 2. 研究目的

本研究では、早生樹を主対象とした立木密度および施肥と成長および材質の関係を明らかにし、CO<sub>2</sub>吸収能と経済性に優れた育林技術の開発を行う。2003年度より、ファルカタを対象とした試験を実施しており、2005年度より新たにメリナを対象とした試験を実施した。

### （1）立木密度管理技術の開発（密度管理試験）

植栽木の成長は植栽密度によって大きな影響を受ける。林業では抜き切り（間伐）を行うことにより、植栽木の各生育段階に合わせて林分の密度をコントロールすることが行われる。日本ではスギ、ヒノキ、マツなどの主要な造林樹種について、地域や地位ごとに整備された密度管理図や収穫表を用いることにより立木密度から

その後の林分の成長をある程度予測できるが、ファルカタに関してそうしたデータは存在しない。本研究では、立木密度と成長および材質との関係を明らかにし、熱帯早生樹を主対象とした密度管理技術の開発を行う。ファルカタを対象樹種とし試験を開始し、2005年度からはメリナも対象樹種として加えた。

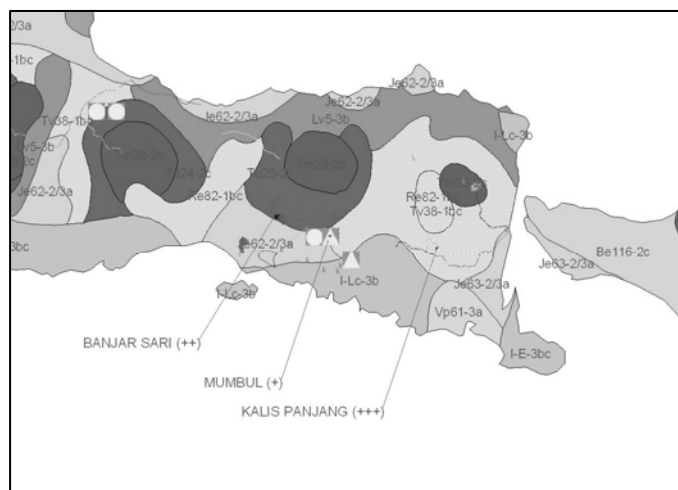


図1 各試験地の位置。全ての試験地はPTPNXIIの事業区内に設定した。BANJARSARI事業区には、現行のファルカタ用試験地があり、それと隣接する形で、メリナ用試験地約5haを設定した（地図の区分はFAO/UNESCOの土壌区分図<sup>3)</sup>より抜粋）。

## (2) 肥培管理技術の開発（施肥試験）

本研究では、施肥が成長及び材質に及ぼす影響を明らかにし、肥培管理技術を開発することを目的とする。具体的には、肥料の種類及び施肥の頻度と成長量及び材質との関係を解明し、最適肥培管理技術を開発する。密度試験と同様、ファルカタを対象樹種とし試験を開始し、2005年度からはメリナも対象樹種として加えた。

## 3. 研究方法

対象樹種は、パプアニューギニア産の *Paraserianthes falcataria* (L.) Nielsen (以下ファルカタ) とした。また2005年度よりコスタリカ産の *Gmelina arborea* Roxb. (以下メリナ) を新たに加えた。

ファルカタの試験地は東ジャワ州ジュンブル県の、PTP. Nusantara XII (インドネシア農園公社、以下PTPN XII) のBANJARSARI事業区内の約100haである。メリナの試験地はファルカタ試験地に隣接する約5ha、同じジュンブル県内のPTPN XIIのMUMBUL事業区内の約5haおよびバニュワング島のPTPN XIIのKALISEPANJANG事業区の5haとした (図1)。

### (1) ファルカタ

#### 1) 密度管理試験

試験プロットの植栽密度は、1x1m、2x2m、3x3m、4x4m、6x6m及び8x8mとし、1.5haに区切った試験区内にランダムに配置した(1.5ha: 0.25ha $\times$ 6処理)。反復は6回である。2004年6月に全立木の樹高を、2005年1月に全立木の樹高及び胸高直径を、2005年9月に約1/10の個体について樹高と胸高直径を測定した。2006年2月及び2006年6月に全立木の胸高直径と1/10の個体について樹高を測定し、2007年1月に全個体の胸高直径と1/3の個体について樹高を測定し、2007年7月、2008年1月に全個体の樹高及び胸高直径を測定した。

尚、間伐は2005年9月に1x1m区の無間伐を除く区において、2006年4月に1x1mの定性間伐区において、2007年2月に1x1m、2x2m、3x3m、4x4mの無間伐を除く処理区において、各処理区の成長状態を勘案し、定性間伐と本数比30%、50%を基本とした下層間伐を実施した。

#### 2) 施肥試験

本試験における植栽間隔は2x2mとした。本試験で用いた肥料は、N(尿素)及びP(過リン酸石灰)とし、施肥量、頻度及び散布位置の組み合わせから、無処理を入れて13処理とした。各処理の試験面積は0.1ha(10x100m)とし、無処理区のみ0.2haとし、1.4ha(100x140m)の試験区を5反復設定した。2006年と2007年の1月に、10倍量の施肥を実施した(表1)。また、これとは別に除地に植栽された2003年度の植栽木と2005年度の植栽木を用い、施肥の量と頻度を変えた試験を設計実施した。

2004年6月に全立木の樹高を、2005年1月に全立木の樹高及び胸高直径を、2005年6月及び2006年2月に胸高直径を測定した。2005年9月に約1/10の個体について樹高と胸高直径を測定した。2007年1月に全個体の胸高直径と1/3の個体について樹高を測定し、2007年7月、2008年1月に全個体の樹高及び胸高直径を測定した。

表1 肥培試験における各処理と肥料の種類、位置、頻度及び量

処 理 番 号	施肥 位置**	頻度 (回/ 年)	実施時期											
			2004年1月				2004年12月				2006年1月、2007年1月 2007年12月、2008年1月			
			N	P	Urea (g)	SP-36 (g)	N	P	Urea (g)	SP-36 (g)	N	P	Urea (g)	SP-36 (g)
1		-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2		-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	CW/2	2	4.5	3.5	10	10	4.5	3.5	10	10	45	35	98	97
4	CW/2	1					9.5	7.0	20	19	90	70	196	194
5	CW	2	4.5	3.5	10	10	4.5	3.5	10	10	45	35	98	97
6	CW	1					9.0	7.0	20	19	90	70	196	194
7	CW/2	2	9.0	7.0	20	19	9.0	7.0	20	19	90	70	196	194
8	CW/2	1					18.0	14.0	39	39	180	140	391	389
9	CW	2	9.0	7.0	20	19	9.0	7.0	20	19	90	70	196	194
10	CW	1					18.0	14.0	39	39	180	140	391	389
11	CW/2	2	18.0	14.0	39	39	18.0	14.0	39	39	180	140	391	389
12	CW/2	1					36.0	28.0	78	78	360	280	783	778
13	CW	2	18.0	14.0	39	39	18.0	14.0	39	39	180	140	391	389
14	CW	1					36.0	28.0	78	78	360	280	783	778

\*2006年1月以降10倍量を施肥した。

\*\*施肥は4方向とし、幹からの位置はCWが樹冠幅、CW/2が樹冠幅の約半分の位置を示す。

### 3) 土壌モニタリング

施用した肥料の動態及び植林木の生長に伴う土壌養分の変化の把握を目的として、地拵え前の2003年12月、2005年1月、2006年1月、2007年2月及び2008年1月に分析用土壌のサンプリングを行った。試験地内の50カ所から、10cm毎に約300g深さ50cmまで、計250の土壌をサンプリングした。分析項目は、pH、EC、CEC、有効態リン酸、リン酸吸収係数、全炭素、全窒素、C/N比、置換性塩基(Ca、Mg、K、Na)である。

2006年1月(植栽後2年目)、2005年1月(植栽後1年目)と昨年度の2003年12月(植栽直前)の化学分析の結果を、各試験区(PPT/PST:産地家系別実生採種林;ST:産地密度試験区;FE:施肥試験区)と採取部位(深さ)別に集計し、平均値の分散分析から経年変化項目の抽出を試みた。

## (2) メリナ

### 1) 密度管理試験

試験プロットの初期密度は、3x3m及び6x6mとし、それぞれ0.88ha(84x105m)及び0.71ha(84x84m)の試験区内に約0.04ha(21x21m)の方形区を設け、苗を系統別に配置した。3x3m及び6x6mの系統毎に5プロット及び4プロットとし(但し、MUMBUL事業区内の試験地においては、微地形の影響に

より6x6mの処理区は3回の反復のみ)、以下の間伐を行う予定である。

- ① 50%の定量間伐（1列伐採、1例残：3年目の実施を予定）
- ② 定性間伐（樹幹幅を基準に、劣勢木の除伐を実施）

尚、初期密度6x6m区においてもその植栽間隔は3x3mとし、植栽木の成長に合わせて早い時期に75%の除伐を行い、256本/haの密度（6x6m相当の植栽密度）にする予定である。

## 2) 施肥試験

植栽間隔は2x2mとした。用いた肥料は、Urea 40g、SP36 45g、KCL 35gの混合肥料とし、施肥量3水準、頻度2水準の計6処理とした（表2）。各家系の苗を2mの植栽間隔で49本、植栽列の幅を2mとした。この試験区を24x24mの方形区に分け、方形区毎に施肥処理を行った。

表2 メリナの施肥試験における1本当たりの施肥量

処理	1年目：植栽後 15 日目			1年目：植栽後 30 日目			1年目：植栽後 60 日目			Total (g/本/年)		
	2年目：2006年 12月			2年目：2007年 1月			2年目：2007年 2月					
	3年目：2008年 1月			3年目：2008年 2月			3年目：2008年 3月					
	UREA (g)	SP36 (g)	KCL (g)	UREA (g)	SP36 (g)	KCL (g)	UREA (g)	SP36 (g)	KCL (g)	UREA (g)	SP36 (g)	KCL (g)
T2Q1	10	5	5	10	20	15	20	20	15	40	45	35
T1Q2	120	135	105	0	0	0	0	0	0	120	135	105
T2Q2	30	15	15	30	60	45	60	60	45	120	135	105
T1Q3	360	405	315	0	0	0	0	0	0	360	405	315
T2Q3	90	45	45	90	180	135	180	180	135	360	405	315

## 3) 毎木調査

2006年8月、2007年3月、2007年9月及び2008年3月に全立木の樹高、胸高直径を測定した。

### (3) 最適育林法の開発とCO<sub>2</sub>吸収評価

本研究では本サブサブテーマで実施した密度管理試験及び施肥試験の結果並びに他のサブサブテーマの成果を統合することにより、CO<sub>2</sub>固定量を勘案した最適育林手法の開発手法の提示を行う。サブサブテーマ「(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」において開発されたファルカタの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「①新たな産地の導入を伴う実生採種林の造成・評価」、その際、施肥試験の結果から肥培効果は望めないことを明らかにしたため、施肥は実施しないこと、また「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」において施業による成長促進による材質の劣化は生じないことが明らかにされたことにより、CO<sub>2</sub>及び経済評価は単純に施業の結果として生じた材積のみで評価可能であることを明らかにした。本研究では、以上の成果を踏まえ、収益性を維持しつつ、CO<sub>2</sub>固定機能を高める施業計画立案の手法を示す。

評価に用いた施業例として、1,100本/haと1,650本/haの2つの初期植栽密度において植栽後3年目から本数比14~24%の間伐を5年間実施するものとした（平均で約16%）。地位指数として5年目の主林木の平均樹高を20mとし、林分成長モデル<sup>5)</sup>により各林齢の平均樹高と平均胸高直径を推定した。また幹曲線式<sup>6)</sup>により、林分および利用材積を計算した。事業期間は20年間、最大伐期齢は12年とし、伐採の翌期には必ず植栽することとした。事業コストはインドネシアの産業造林費用<sup>7)</sup>を参考とし、材の価格はパルプ・ファイバー用が15US\$ m<sup>3</sup>、建材用材を50US\$ m<sup>3</sup>とした。

以上の条件の下、あらゆる植伐パターンでの収支と炭素固定量をシミュレートした。炭素固定量は伐採量を排出とし、20年間事業で林分に蓄積された炭素量の平均とした。

#### 4. 結果・考察

##### (1) ファルカタ

##### 1) 密度管理試験

植栽後の年数と2007年7月までの無処理区の植栽密度別の樹高および胸高直径の平均値を図2に示す。図中にインドネシアにおけるファルカタの地位別の樹高及び胸高直径の変化の事例データ<sup>4)</sup>を示した。植栽後1.5年目までの成長は資料<sup>4)</sup>の地位指数IあるいはIIに匹敵する良好な成長を示すものと期待されたが、3.5年目まで経過から、本試験に導入したPNG産ファルカタは当該地域において地位指数III~IV程度の低い成長を示すことが明らかになった。直径成長には1.5年目~植栽密度間の差が現われ、最も密度の影響が低い8x8mの植栽区で、地位のI~IIに相当する成長を示した。但し、資料における地位データは主林木における平均値であるのに対して、ここで示すデータは林分全体の平均値である。

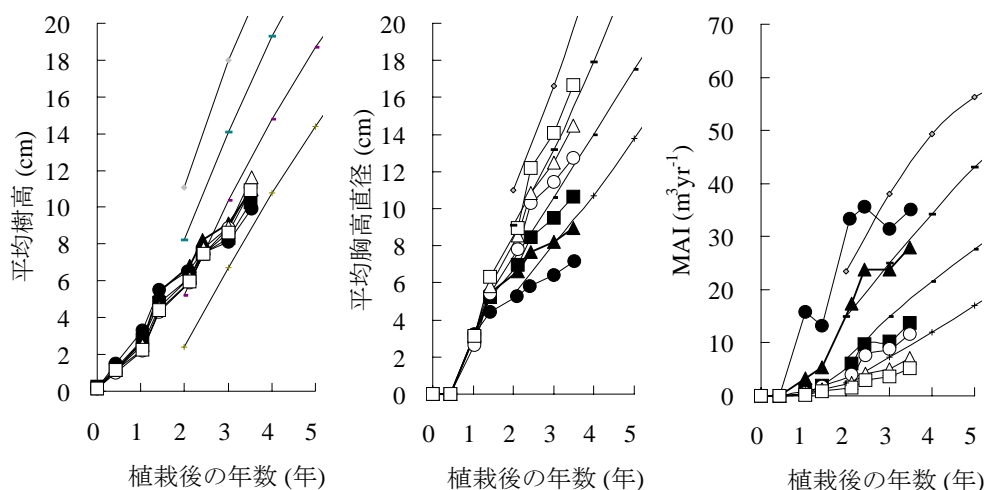


図2. 密度管理試験の無間伐区における平均樹高及び平均胸高直径並びに平均材積成長量 (MAI: Mean Annual Increment) の推移

●: 1x1m; ▲: 2x2m; ■: 3x3m; ○: 4x4m; △: 6x6m; □: 8x8m

無間伐区における立木本数と断面積平均直径の関係を図3に示す。図には本プロジェクトの別サ

ブサブテーマにおいて開発された現地のファルカタの林分成長モデル<sup>5)</sup>における最多密度曲線を破線で、また解析に用いられた林分の立木本数—平均断面積の範囲を示した。

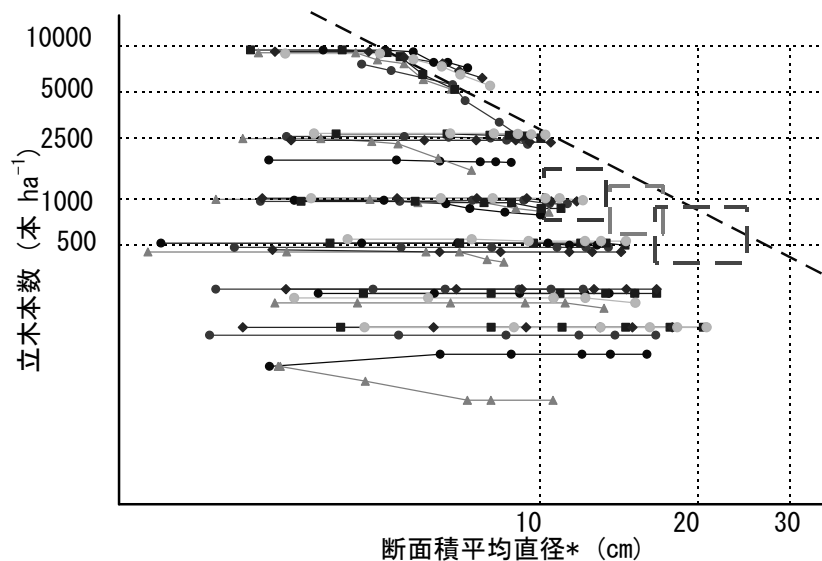


図3. 無間伐区の平均断面積 (cm) と立木本数 (本 $ha^{-1}$ ) との関係  
破線及び破線で囲まれた範囲はKurino *et al.* (2005)におけるファルカタの最多密度曲線と解析に用いられ調査林分の立木本数及び平均断面積の範囲を示す。

\*断面積平均直径: 胸高直径合計を立木本数で割った値。

全ての処理区における立木密度と平均断面積との関係は、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。植栽後3.5年目で植栽間隔 $3 \times 3m$  (1,100本 $ha^{-1}$ )の試験区において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た。1x1mの処理区(10,000本 $ha^{-1}$ )ではそのほとんどがモデルで暫定された最多密度区曲線を超え、2x2mの処理区(2,500本 $ha^{-1}$ )では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それぞれ現われた。これらの区の立木本数と平均断面積合計の推移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。

## 2) 施肥試験

2004年6月(林齢0.4年)から2007年7月(林齢3.5年)までの施肥量別平均樹高の推移を図4に示す。また調査時点毎の分散分析の結果を表3に示す。施肥位置の違い(施肥時の植林木の樹冠の外縁直下もしくは外縁の1/2の位置)は調査期間を通し差が認められず、ブロック間の成長差が非常に大きかった。施肥量との関係を見ると2004年6月(林齢0.4年)から2005年6月(林齢1.4年)までの調査時における平均樹高は処理区間で有意な差が認められたが、2006年1月(林齢1.9年)以降見られなかった。

以上の結果より、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。

本研究では非常にブロック間差が大きいことが示唆された。一つのブロックは1.4haで、5つのブロックは隣接している。地形が平坦で均質な立地条件と思われた当該試験区で認められた数百m

の比較的狭い範囲で現われた成長差は、密度試験区、実生採種林等他の試験区でも認められている。

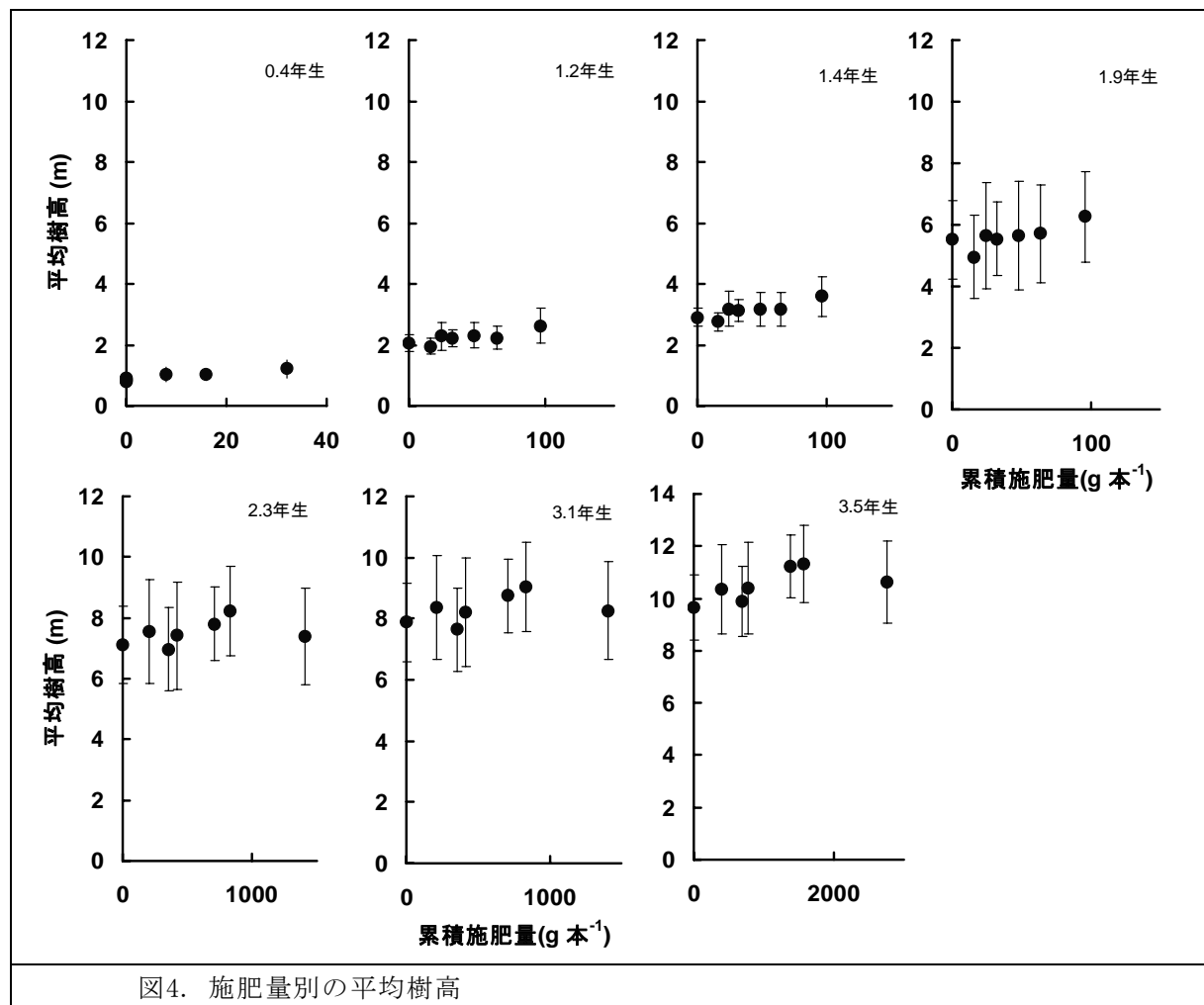


表3. 平均樹高の分散分析表

変動因	0.4年		1.2年		1.4年		1.9年		2.3年		
	df	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS			
施肥位置(CW)	1	0.0001	0.0240	0.0476	0.0136	0.0622					
施肥の量(F)	6	0.2197	***	0.4571	*	0.6874	*	1.8369	2.7846		
ブロック(L)	4	0.2187	***	0.9906	***	1.5520	***	12.1622	**	18.8200	***
CW x F	6	0.0317		0.1160		0.2045		0.6695		0.8382	
CW x L	4	0.0196		0.0675		0.1207		2.2722		2.8958	
F x L	24	0.0187		0.0578		0.0915		0.8893		1.2434	
CW x F x L	24	0.0250		0.1282		0.1991		2.0903		2.7102	

\*\*\*, \*\*及び\*はそれぞれ, 0.1%, 1%, 5%水準で有意差があることを示す。



表3. (続き)

変動因	df	3.1年		3.5年	
		MS		MS	
施肥位置(CW)	1	0.5357		0.2101	
施肥の量(F)	6	2.2750		3.8847	
ブロック(L)	4	23.6565	***	43.8591	***
CW x F	6	0.8513		1.0221	
CW x L	4	0.9464		1.2783	
F x L	24	0.7502		1.0624	
CW x F x L	24	1.1427		1.5993	

\*\*\*, \*\*及び\*はそれぞれ, 0.1%, 1%, 5%水準で有意差があることを示す。

### 3) 土壌モニタリング

2003年12月、2005年1月及び2006年1月に収集した土壌サンプルについて、全ての化学分析を終了した。2007年2月に収集した土壌サンプルはインドネシアにて調整を終了し、日本に輸入、現在化学分析を行っている。また2008年1月にサンプリングを行い現在インドネシアにおいて、粉碎、風乾等分析前の試料調整を行っている。

2006年1月（植栽後2年目）、2005年1月（植栽後1年目）と2003年12月（植栽直前）の各試験区（PPT/PST:産地家系別実生採種林；ST:産地密度試験区；FE:施肥試験区）の平均値を分析項目毎に図5に示す。また、年度別、試験区別、採取部位（深さ）別の各分析項目の平均値の分散分析の結果を表4に示す。また、各測定項目（pH、EC、CEC、有効態リン酸、リン酸吸収係数、カリウム、全窒素、全炭素、C/N比、カルシウム、マグネシウム、ナトリウム）の試験地内の地区別平均値の経年変化を図5に示す。

全ての分析項目で試験区間に有意差が見られた。地形は平坦で、カカオ農園として運営されてきた当該試験地は均質で肥沃な立地条件と思われたが、場所によって大きく異なることが明らかになった。

また年度間の比較においては、リン酸吸収係数、全窒素を除く測定項目で有意差が認められたが、ECを除き、いずれも単調な増加もしくは減少といった変化ではなく、土壌劣化を示すものではなかった（図5）。

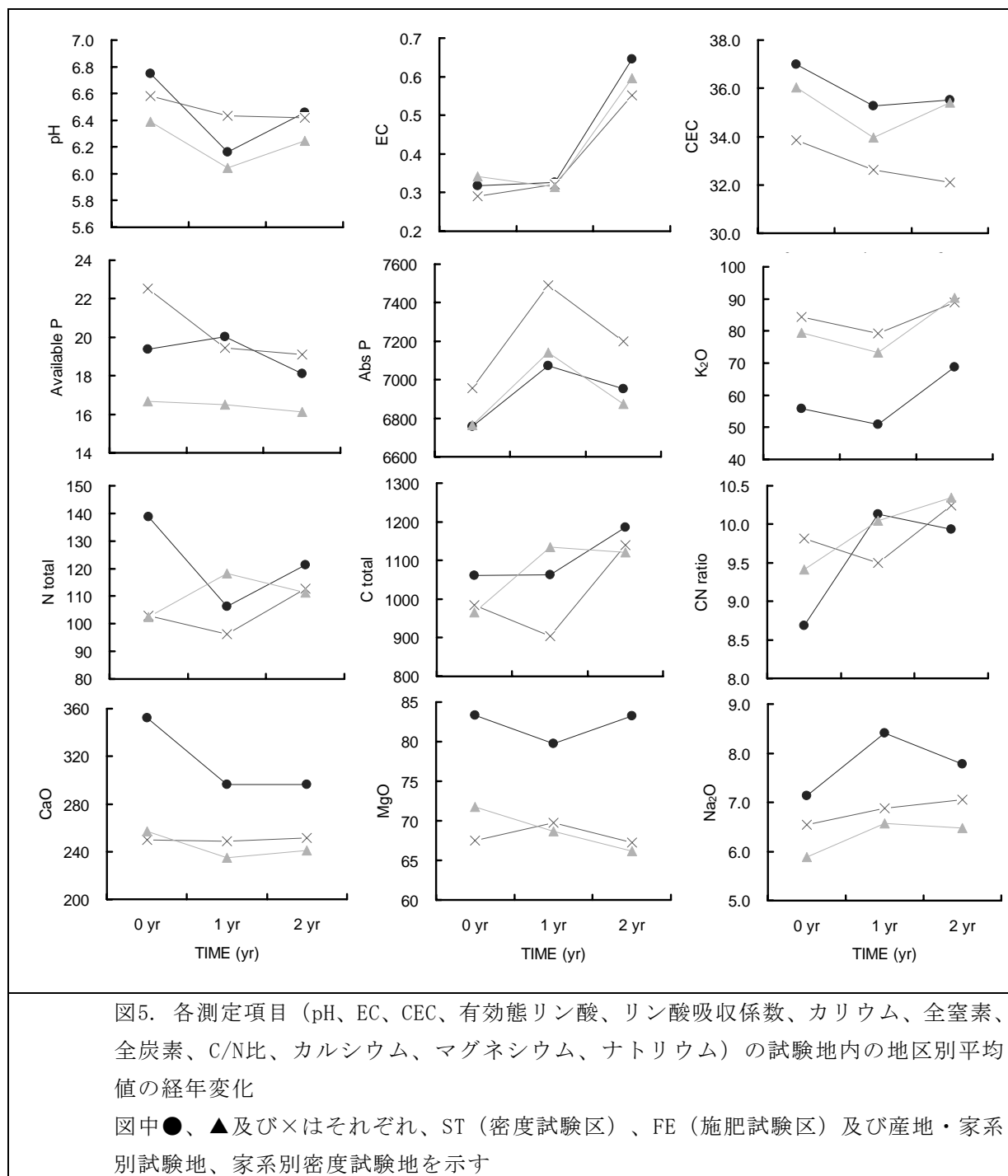


表4. 2003年12月、2005年1月、2006年1月の試験区別、深さ別土壌サンプルの分散分析の結果

要因	df	Ph		EC		CEC		有効態リン酸		全リン酸	
		MS		MS		MS		MS		MS	
A (年変動)	2	0.58	***	0.6986	***	14.55	***	18.89		759,887.53	***
B (場所)	2	0.35	***	0.2414	***	46.43	***	77.63	**	497,055.51	***
C (深さ)	5	0.00		0.1483	**	5.07	***	363.69	***	9,528.41	
交互作用 (A x B)	4	0.08	***	0.1210	**	1.79	**	9.41		27,385.34	**
交互作用 (A x C)	10	0.00		0.0515		0.43		15.28		6,319.23	
交互作用 (B x C)	10	0.00		0.0478		0.88	*	14.77		5,150.59	
交互作用 (A x B x C)	20	0.00		0.0242		0.33		10.21		4,037.06	

\*\*\*, \*\*及び\*はそれぞれ, 0.1%, 1%, 5%水準で有意が差あることを示す。

表4. (続き)

要因	df	全窒素		全炭素		K <sub>2</sub> O		CaO	
		MS		MS		MS		MS	
A (年変動)	2	426.50		156,976.33	***	1,455.67	***	4,115.05	***
B (場所)	2	1,566.34	**	92,341.66	**	3,992.64	***	28,040.48	***
C (深さ)	5	16,891.30	***	1,434,291.98	***	885.73	***	6,344.05	***
交互作用 (A x B)	4	1,022.75	**	56,996.65	**	262.76	**	1,791.88	***
交互作用 (A x C)	10	121.62		16,696.93		117.31		171.00	
交互作用 (B x C)	10	543.24	*	33,780.59	*	138.93	*	323.07	
交互作用 (A x B x C)	20	167.73		11,517.93		58.07		169.37	

\*\*\*, \*\*及び\*はそれぞれ, 0.1%, 1%, 5%水準で有意が差あることを示す。

表4. (続き)

要因	df	MgO		Na <sub>2</sub> O	
		MS		MS	
A (年変動)	2	23.86	*	3.03	***
B (場所)	2	1,115.10	***	10.09	***
C (深さ)	5	762.09	***	32.12	***
交互作用 (A x B)	4	34.49	***	0.46	*
交互作用 (A x C)	10	6.28		0.50	**
交互作用 (B x C)	10	37.81	***	0.74	***
交互作用 (A x B x C)	20	4.56		0.13	

\*\*\*, \*\*及び\*はそれぞれ, 0.1%, 1%, 5%水準で有意差があることを示す。

## (2) メリナ

農園公社KALISEPANJANG事業区に設定した試験区は根切り虫による食害が発生し、多くの苗が死亡したため、解析は不可能である。MUMBUL事業区に設定した試験区の一部でも被食のため、枯死や著しい成長阻害が発生した。BANJARSARI事業区に設定された試験区は活着率も良く、成長も良い。

#### 1) 密度管理試験

表5にBANJARSARI事業区とMUMBUL事業区に設定した密度試験(3x3m)における平均樹高及び平均胸高直径とその範囲を示す。KALISEPANJANG事業区に設定した試験地では根切り虫の食害を被り、同じ系統を用いた補植ができなかったため解析から外した。

BANJARSARI事業区におけるメリナの樹高及び胸高直径の平均値とその範囲はそれぞれ、7.1(7.0 - 7.3)と10.8(10.5 - 11.1)であった(表5)。1.4年生のファルカタの密度管理試験(3x3m)における平均樹高及び平均胸高直径はそれぞれ4.8m(3.7 - 6.7m)、5.2cm(4.5 - 6.3cm)であり、隣接するPNG産のファルカタよりも良い成長を示した。MUMBUL事業区に設定した試験区における植栽木のサイズはBANJARSARI事業区に設定した試験区の植栽木に比べて著しく低い。これは立地環境(土地の肥沃度)の違いに加え、一部根切り虫の食害を被ったことが影響していると思われる。いずれの試験区でもサイズの系統間の差は認められなかった。

いずれの試験地においても間伐は実施していない。BANJARSARI事業区に設定した試験区では林冠が閉鎖し始めているので、1~2年以内に半数のブロックで間伐を行い、4.2x4.2mの密度水準にする予定である。別のサブテーマで実施している系統別密度試験では2x2mの植栽密度であり、2007年12月にBANJARSARI事業区に設定した試験区は半数のブロックで50%の間伐を実施した。今後2x2m、2.8x2.8m、3x3m、4.2x4.2mの4つの密度水準とし、林分成長モデルのパラメタ構築に資するデータの蓄積を行う予定である。

表 5. 試験地別平均値とその範囲

林齢	試験地	平均樹高 (m)	平均胸高直径 (cm)
1.5	BANJARSARI 事業区	7.1(7.0 - 7.3)	10.8(10.5 - 11.1)
1.5	MUMBUL 事業区	3.6(3.4 - 3.9)	4.4( 4.1 - 4.6)

注：括弧書きは範囲

#### 2) 施肥試験

BANJARSARI事業区及びMUMBUL事業区に設定した施肥試験のブロック毎投与水準別平均樹高を表6に、平均樹高の分散分析の結果を表7に示す。またBANJARSARI、MUMBUL事業区に設定した試験区の投与肥料量別の平均樹高の推移を図6に示す。BANJARSARI事業区に設定した試験区及びMUMBUL事業区に設定した試験区ともに施肥回数{1度に全量投与する場合(T1)と2度に分けて投与した場合(T2)}及び系統別平均樹高に有意差は認められず、肥料の投与量別平均樹高に有意差が認められた。MUMBUL事業区に設定した試験区の肥料の投与量別平均樹高は植栽後0.4年から継続して0.1%水準で有意差が認められ、BANJARSARI事業区に設定した試験区では植栽後0.4年、1年、1.5年にそれぞれ、0.1%、5%、1%の水準の有意差であった。BANJARSARIでは2006年12月に強風による梢

端折れが多数発生した。このことが結果に反映している可能性がある。

表6. BANJARSARI事業区及びMUMBUL事業区に設定した施肥試験区におけるブロック毎投与肥料量水準別平均樹高とその範囲

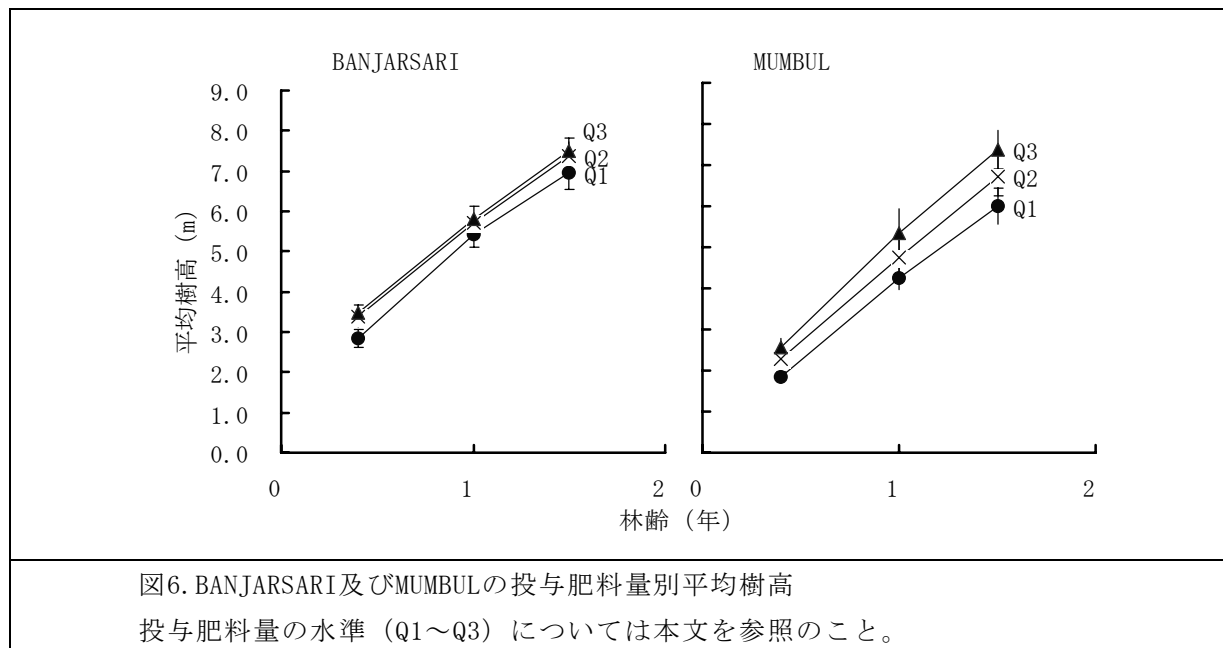
林齢	ブロック	BANJARSARI						MUMBUL					
		Q1		Q2		Q3		Q1		Q2		Q3	
0.4	Block 1	2.99	(2.96 - 3.03)	3.51	(3.50 - 3.52)	3.47	(3.38 - 3.58)	1.72	(1.58 - 1.78)	2.32	(2.18 - 2.47)	2.43	(2.36 - 2.59)
	Block 2	3.00	(2.96 - 3.03)	3.57	(3.50 - 3.52)	3.64	(3.38 - 3.58)	1.89	(1.58 - 1.78)	2.53	(2.18 - 2.47)	2.55	(2.36 - 2.59)
	Block 3	2.68	(2.63 - 2.73)	3.15	(3.09 - 3.21)	3.45	(3.42 - 3.47)	1.78	(1.69 - 1.84)	2.03	(1.98 - 2.09)	2.54	(2.49 - 2.66)
	Block 4	2.64	(2.96 - 3.03)	3.35	(3.50 - 3.52)	3.37	(3.38 - 3.58)	1.94	(1.58 - 1.78)	2.35	(2.18 - 2.47)	2.77	(2.36 - 2.59)
1.0	Block 1	5.83	(5.72 - 5.89)	5.61	(5.57 - 5.64)	5.83	(5.66 - 5.96)	4.09	(4.01 - 4.19)	4.61	(4.35 - 4.80)	4.86	(4.73 - 5.11)
	Block 2	5.52	(5.72 - 5.89)	5.85	(5.57 - 5.64)	6.21	(5.66 - 5.96)	4.36	(4.01 - 4.19)	5.40	(4.35 - 4.80)	5.40	(4.73 - 5.11)
	Block 3	5.20	(5.11 - 5.29)	5.79	(5.74 - 5.81)	5.42	(5.33 - 5.51)	4.05	(3.77 - 4.23)	4.23	(4.12 - 4.28)	4.97	(4.85 - 5.15)
	Block 4	5.17	(5.72 - 5.89)	5.69	(5.57 - 5.64)	5.74	(5.66 - 5.96)	4.51	(4.01 - 4.19)	4.91	(4.35 - 4.80)	6.11	(4.73 - 5.11)
1.5	Block 1	7.13	(7.07 - 7.20)	7.74	(7.72 - 7.77)	7.66	(7.54 - 7.82)	5.92	(5.71 - 6.28)	6.91	(6.69 - 7.07)	6.91	(6.73 - 7.22)
	Block 2	7.47	(7.07 - 7.20)	7.43	(7.72 - 7.77)	7.72	(7.54 - 7.82)	6.45	(5.71 - 6.28)	6.86	(6.69 - 7.07)	7.22	(6.73 - 7.22)
	Block 3	6.76	(6.70 - 6.90)	6.91	(6.83 - 7.04)	7.30	(7.10 - 7.53)	5.67	(5.49 - 6.08)	6.15	(5.79 - 6.45)	7.44	(7.36 - 7.53)
	Block 4	6.50	(7.07 - 7.20)	7.43	(7.72 - 7.77)	7.37	(7.54 - 7.82)	5.94	(5.71 - 6.28)	7.16	(6.69 - 7.07)	7.91	(6.73 - 7.22)

括弧内は最大値及び最小値を示す。  
Q1、Q2、Q3の施肥量については本文を参照のこと。

表7. 平均樹高の分散分析表

変動因	林齢 df	BANJARSARI			MUMBUL		
		0.4 MS	1.0 MS	1.5 MS	0.4 MS	1.0 MS	1.5 MS
施肥の回数：T	1	0.18 <sup>ns</sup>	0.08 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>	0.00 <sup>ns</sup>
投与量：Q	2	4.01 <sup>***</sup>	1.21 <sup>*</sup>	2.54 <sup>**</sup>	4.48 <sup>***</sup>	9.42 <sup>***</sup>	15.15 <sup>***</sup>
系統：S	3	0.01 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	0.24 <sup>ns</sup>	0.66 <sup>ns</sup>
ブロック：B	3	0.52 <sup>*</sup>	0.86 <sup>*</sup>	1.84 <sup>*</sup>	0.33 <sup>*</sup>	3.34 <sup>*</sup>	1.59 <sup>ns</sup>
T x Q	2	0.12 <sup>ns</sup>	0.23 <sup>ns</sup>	0.13 <sup>ns</sup>	0.18 <sup>ns</sup>	0.09 <sup>ns</sup>	0.08 <sup>ns</sup>
T x S	3	0.00 <sup>ns</sup>	0.09 <sup>ns</sup>	0.03 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>	0.04 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>
Q x S	6	0.00 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>	0.08 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>
T x Q x S	6	0.00 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>	0.04 <sup>ns</sup>
誤差	69	0.14	0.29	0.49	0.10	0.84	0.64
計	95						

\*\*\*, \*\*及び\*はそれぞれ, 0.1%, 1%, 5%水準で有意差があることを示す。



### (3) 最適育林法の開発とCO<sub>2</sub>吸収評価

炭素固定量 (MgC/ha/20年) 及び収益 (US\$/ha/20年) を図7に示す。最大収益は植栽密度1,650本/haの9,514であり、そのときの炭素固定量は58.4であった (図中の黒塗りの丸)。一方、最大炭素固定量は、初期植栽密度1,100本/haの88.0であり、そのときの収益は4,523であった (図中の白抜きの三角)。最大収益を実現する事業計画から最大炭素固定量を実現する計画にシフトした場合の減益は4,991 (9,514 - 4,523) となり、炭素固定量は29.6 (88.0 - 58.4) 増えると期待でき、増加した炭素固定量を減収益で除した値は168.3 (4,991/29.6) となった。この最大収益を実現する計画から他の計画にした場合に生ずる増加炭素固定量を減収益で除した値は炭素固定のためのコストとして考えることができる。

図7に最大収益を実現し、日本における炭素の固定限界コスト (330.5 US\$ MgC<sup>-1</sup>)<sup>8)</sup> を傾きとする直線を示した。CDMの吸収源プロジェクトなどの枠組みで、この傾きに示される炭素固定に応じた収入が担保されるとすると、この直線より上に位置する結果をもたらす事業計画が、収益性を損なうことなく、炭素をより固定できる森林経営であることが分かる。

本研究では、計算コストのために植栽密度と間伐スケジュール、最大伐期齢、事業期間や、植伐計画に制限を設けたが、想定される全てのパタンについての予測が可能である。本研究で用いた事業コストや材価、利用材積は、生産される材の用途や場所 (国や地域) によって様々であり、結果もそれに応じて変わるものであるため、これらの条件は事業毎に定める必要があるが、本研究で示したアプローチは (林分成長や幹形状が変わらないという仮定の下に)、ファルカタの植林事業が可能な全ての地域において利用可能と思われる。なお、現在の試験林の成育状況は、図8の通りとなっており、順調に成育した。

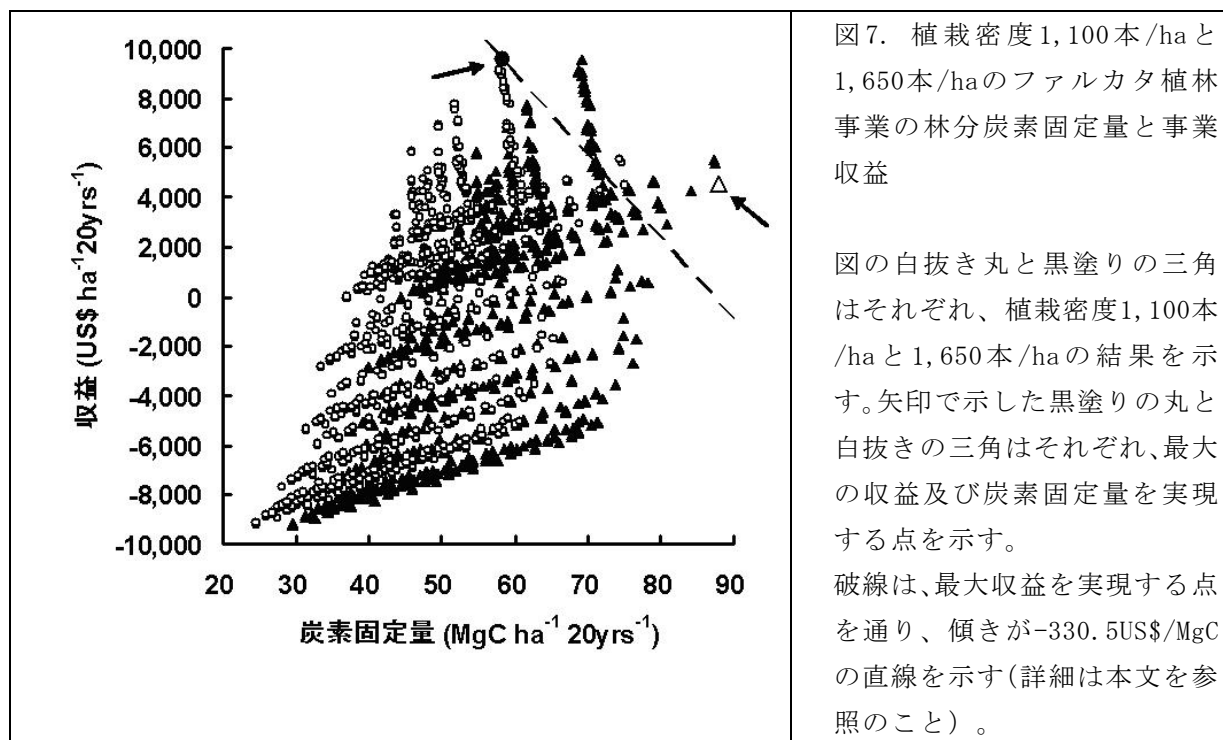


図8. 試験林現況. 左: 4年生ファルカタ. 既に1回目の間伐は終わっており、2回目の間伐が行えるまでに成長している. 右: 2年生メリナ. 既に優良木を選抜できるまで成長している.

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

密度試験の結果から、既存林分の成長データから得られたファルカタ人工林の暫定的な林分

成長モデル<sup>5)</sup>における最多密度曲線を修正し、モデルの精度向上に寄与するデータを蓄積しつつあることが示された。

施肥試験では、幹からの施肥位置には差が認められなかった。また投与量についての効果が認められたのは1.4年目までである。さらなるデータの蓄積と解析は必要だが、以上の結果からはファルカタ人工林の施業において施肥は必要ないという結論を得た。

ファルカタの一斉林における土壌の化学性の変化においては、植栽前と植栽後1年目、2年目のデータを解析した結果、全窒素を除く全ての分析項目で年度別の有意差が認められたが、いずれも単純な増加や減少といったものではなく、サンプリング箇所によってもその変化は異なり、土壌劣化等の兆候は認められないことを示した。

他のサブサブテーマでの成果と統合することにより、植栽密度、間伐スケジュール、最大伐期齢、事業期間や、植伐計画等、植林事業経営において想定される全てのパターンについての収益性と炭素固定量の予測を可能とし、様々な経営パターンの事業収益性と炭素固定量を図示することにより、両者を勘案した経営を選択するためのツールを開発した。コストや材価、利用材積といった生産材の用途や場所（国や地域）によって異なるパラメータを設定することにより、本研究で示したアプローチは、ファルカタの植林事業が可能な全ての地域において利用可能と思われる。

## (2) 地球環境政策への貢献

別のサブテーマでは、林分成長モデルが開発され、林分データの蓄積により精度を高めつつある<sup>5)</sup>。また樹高と胸高直径から幹の形状を精度高く予測することもできるようになったことにより、利用材積の推定も可能になりつつある。これらの成果はパラメータの調整や幹形状モデルの統合により、シミュレーションの結果そのものの精度を高めることに貢献している。

ファルカタ人工林の造成・育林における施業とその結果を予測し、森林経営の事業期間や施業コスト、材価などを決めることにより、選択し得るあらゆる施業の事業性（収益性）と炭素固定量を計算することを可能とした。間伐方法などに制約は残るものの、ファルカタ人工林経営において、持続的経営の必須条件である収益性を確保しつつ、事業の炭素固定能力を高めた経営の提案を可能とした。

## 6. 引用文献

- (1) 川原輝彦(1997)ファルカタリア(*Falcataria*)熱帯樹木の造林特性 第2巻 テキストNo.9、(財)国際緑化推進センター、東京：143-148.
- (2) Soerianegara and R. H. M. J. Lemmens eds. (1994) *Plant Resources of South-East Asia* No. 5(1) *Timber trees: Major commercial timbers*. Prosea, Bogor, Indonesia.
- (3) FAO/UNESCO (2003) *Digital soil map of the world and derived soil properties*, Land and Water Digital Media Series 1.
- (4) Suharian, A., Sumerna, K. and Sudiono, Y. (1975) *Yield table of ten industrial wood species*. Lembaga Penelitian Hutan.
- (5) Kurinobu S., P. Daryono, M. Naiem, Matsune K., Chigira O. (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. JFR 12-3: 231-237.
- (6) Kurinobu S., P. Daryono, M. Naiem, Matsune K. (2007) A stem taper equation compatible to volume equation for *Paraserianthes falcataria* in Pare, East Java, Indonesia: its implication for the plantation management. JFR 12-6: 473-478
- (7) 住友林業株式会社 (2004) 平成15年度環境省請負業務 地球温暖化対策クリーン開発メカニズム事業調査 インドネシア共和国3州における植林及びバイオマスエネルギー利用プロジェクト調査 報告書
- (8) IPCC (2001) Climate change 2001

## 7. 国際共同研究等の状況

特になし。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

特になし。

<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)

特になし。

<その他誌上発表 (査読なし)>

- 1) 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,
- 2) MATSUNE K. (2007) Approach for optimal management of *Paraserianthes falcataria* forest plantation. Proceeding "Improvement of Tropical Forest for Global Environment 2007", Jogjakarta, Indonesia

### (2) 口頭発表 (学会)

- 1) 松根、栗延、井出 (2008) インドネシアにおけるファルカタの植林事業経営 第119回森林学会

### (3) 出願特許

特になし。

### (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「CO<sub>2</sub>シンク強化と木材生産を両立させる熱帯早生樹育

(Enhancement of CO<sub>2</sub> 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  
特になし。

(6) その他  
特になし。