

東南アジア地域のアカシア・マンギウム人工林の成長解析

Growth Analysis of *Acacia Mangium* Plantation in Southeast Asia

松村 直人

Matsumura, Naoto

キーワード: 成長モデル、収穫表、*Acacia mangium*、早生樹、半島マレーシア

要約: 熱帯林荒廃の修復に早生樹として大面積造林が行われたアカシア・マンギウムについて、成長特性の分析を行った。アカシア類は産業造林の対象樹種として、東南アジア各国において、多数の植林実績があり、造林の成功に必要な条件の解明から、森林施業に関する成長データの解析まで、昨今研究が進められている。また、高能率なパルプ材生産が可能とされ、温暖化対策としてのCDM植林プロジェクトの点からも注目されている。ここでは半島マレーシアの造林データを中心に、他地域との成長比較を行い、施業モデルの作成について検討した。

Abstract: *Acacia* species have been widely planted for the purpose of industrial plantations in Southeast Asia. Among them, *Acacia mangium* was planted as one of promising fast-growing tree species in a large scale area not only for industrial use, but also for remediation of forest degradation in tropics. Recent experiments show basic conditions for successful plantation of *Acacia mangium* in tropics as well as the silvicultural treatments. From a viewpoint of CDM (Clean Development Mechanism) on plantation projects for global warming prevention, *Acacia mangium* plantation is expected to have efficient and profitable results by constructing the pulp-chip and log production system. In this paper, the growth characteristics of *Acacia mangium* in Peninsular Malaysia is discussed. Case studies on *Acacia mangium*

plantations in Peninsular Malaysia are also conducted in order to analyze the growth performance of *Acacia mangium* and construct a growth model and yield table for *Acacia mangium*.

Key Words: growth model, yield table, *Acacia mangium*, fast-growing tree species, Peninsular Malaysia

はじめに

1970年代の始めには農地開発や焼畑移動耕作などによって、既にかんりの森林が熱帯地域で消失していることが問題化している(佐々木 1992)。また、FAOによる森林統計においても世界的規模で森林減少の問題が注目されるようになった(FAO 1981、末田ら1984)。森林面積の減少の問題と森林の内容、つまり質的な劣化も熱帯林の荒廃として問題である。これらの熱帯林を修復させるために、天然林の更新・再生や人工的な造林によって様々な試行が行われている。造林については、種子や苗木の生産という基本的な点についても、熱帯樹種特有の問題がある。これまで様々な研究や現地実証的の事業が行われているが、苗木の生産や植栽樹種の生存などの基本的条件を満足しても、熱帯林造成に關しての成長予測や経営管理手法の課題となると、依然多くの問題を抱えている。

ここでは、成長が早く、条件の悪い土地でも生存率が高い早生樹の一つであるアカシア・マンギウムを対象に、半島マレーシアにおける成長予測と他地域との成長比較を行い、今後の収穫予測のための成長モデルの検討と簡易な収穫表の調製、マンギウム造林に關する各種課題について検討する。

1. 熱帯地域における人工造林について

荒廃した熱帯林の修復のためには、天然林においては択伐跡地の天然更新や補助造林が期待される。人工的に造林するには、天然林の構成樹種かそれ以外に有望な樹種を植栽などによって再生させる方法が取られている。天然林を構成する比較的成長の遅い樹種を植栽する場合には、長い年月をかけて、天然林に近い森林を作ることになる。一方、比較的短期に数年のオーダ

一で森林を回復させるには、成長が早く、条件の悪い土地でも生存率が高い早生樹を植栽する手法が採用されてきた(佐々木 1992)。

一般に、早生樹は大面積の産業造林に採用され、パルプや用材を収穫する目的で植栽される。投資した資本の早期回収を考えると、早く収穫することが必要であり、産業造林には早生樹が適していると判断された。また産業造林では、総収穫材積への期待も込めて適地を選ぶことが重要である。

これまで日本の技術援助などで、熱帯地域の荒廃地や草原地に早生樹造林が行われてきた。また、産業造林としても、各種の早生樹が植栽された。フィリピン、タイ、インドネシア、パプアニューギニア (PNG) など、各地の成果から、早生樹の生理特性や適地、造林情報などについてはかなりの情報が得られた。その結果、早生樹については、種子の管理、苗畑作業手順、苗の養成、水管理、苗木の硬化処理、病虫害の防除、山出し、植栽、下刈りなど初期保育までの一連の手順の多くは既にマニュアル化されている。また、植栽後の成長に関する管理情報も比較的多く集まったと言えるが、用材として利用するための管理情報はいまだ不十分である(桜井 1997)。

つまり、熱帯地域では早生樹も含め、人工林を造成するための造林技術情報は比較的蓄積されてきたが、これらの密度管理指針や収穫予測など、森林施業に必要な情報の収集が遅れているのが現状である。

2. 研究対象地及び対象樹種

本研究では、補植造林事業 (CFPP プログラム : Compensatory Forest Plantation Programme 1981-1995) によって、アカシア・マンギウム林の一斉造林が進んだ半島マレーシアを対象に、マンギウム林の成長データを収集、解析した。データ収集に当たっては、JICAとマレーシア連邦森林局との複層林造成共同プロジェクトにおけるデータを基に、短期専門家としての滞在中に行った。

このプロジェクトは先行して植林されていたアカシア・マンギウム林を部分的に伐採して、その樹間に郷土樹種を造林することと、荒廃した山岳天然林の人工造林による修復を目的として1991年から1996年を第1期、1996年から1999年を第2期として実施された (Iwasaら 1993、坂本1994)。今回はプ

プロジェクト対象地区のうち、マンギウム林のある低地地区（ペラ州チクス）のデータを使用した（図8.1）。ただし、プロジェクト期間中にはチクスの若齢林分のデータしか取得できなかったため（JICA 1995、Sawaguchiら 1997）、文献データの収集（Ahmad 1993、Ahmad and Weinland 1990、Panitz and Adzmi 1992、Paudyal and Nik 1990）及び、ペラ州森林局にも協力していただき、1996年にセラランゴール、ネグリ・センビラン、ジョホール各州の11～12年生の比較的古いマンギウム林を調査した（図8.1）。



図8.1 半島マレーシアにおける成長データ

3. 研究方法

収穫表調製のために、樹高成長を基本に地位を査定し、胸高直径成長、直径分散の推定、利用材積の推定を行う。その際に、プロジェクト地区および半島マレーシア地区のデータを基に成長モデルを作成し、モデルの検証にサバ州およびインドネシア・スマトラ島のデータを用いる（図8.2）。解析手順の概略を図8.3に示す。



図8.2 データ取得地チクスと比較用データの取得地

データ調製		
モデル作成用データ	プロジェクトサイト	Chikus/Perak州 低地造林地、3,5年生
	半島マレーシア	BatuArang/Selangor州 よく管理された造林地、11,12年生
		Kemasul/Pahang州 古い造林地、継続測定データ
		Setul/Negeri Sembilan州 古い造林地、12年生
		Ulu Sedili/Johor州 古い造林地、12年生
モデル検証用データ	マレーシア	Sabah州
	インドネシア・スマトラ島	Benakat
収穫表の調製		
成長モデル作成	樹高成長と地位比較	Mitscherlich式
	直径成長	Mitscherlich式
	直径分散、径級分布	Mitscherlich式
	利用樹高	1次関数式
	本数管理	州の基準と指数関数
	材積式	相対成長式
	利用材積の推定	
収穫表の検証		
成長モデルの検証	マレーシア	Sabah州
	インドネシア・スマトラ島	Benakat

図8.3 解析手順の概要

林分の基本成長因子として、胸高直径 D 、樹高 H 、利用樹高 H_B (merchantable Height)、立木本数 N 、胸高断面積合計 GF 、林分利用材積 V などに注目して、簡易な収穫予測モデルを作成した(図8.4、Matsumura and Ismail 1996、松村 1997)。

樹高成長および胸高直径成長の予測にはMitscherlich式を用いた。樹高分散、直径分散のデータは少なかつたため、プロジェクトの毎木調査から推定し、それぞれ正規分布を仮定し、樹高分布帯、直径の径級表を作成した。ただし、胸高断面積合計の推定には直径分散は利用せず、間伐のシミュレーション時において使用した。さらに、材積式についてはWan Razaliら(1989)の式を利用したが、総樹高ではなく、利用樹高を前提としていたため、分散と同様に、プロジェクトの測定データから推定した。

本数管理については、初期の植栽本数が ha 当たり900本であり、その後の間伐と本数管理の指針が連邦森林局によって示されていたため、それを参考に指数減少式で近似させた。

以上の結果から、平均樹高、樹高帯、平均直径、間伐時の径級分配表、立木本数、利用材積からなる簡易収穫表を作成した。この収穫表について、サバ州の収穫表（猪瀬1991、猪瀬ら1992a、b）、インドネシア・スマトラ島の資料（Sakurai and delaCruz 1993、Sakuraiら1994）と比較し、地域間の成長比較を行った。

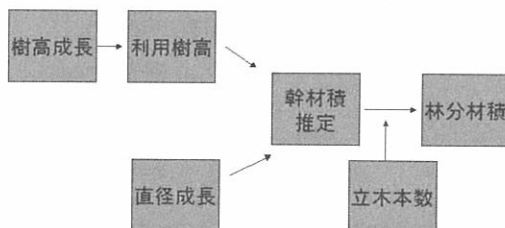


図4. 収穫表の作成フロー図

4. 結果及び考察

4.1 成長モデルの作成と収穫表の調製

林分の基本成長因子として選定した、胸高直径 D 、樹高 H 、利用樹高 HB 、立木本数 N 、胸高断面積合計 GF 、林分利用材積 V 等に注目して、収穫予測モデルを作成した。基本となる胸高直径と樹高の成長式は以下のような Mitscherlich式であり、パラメータは最小2乗法によって推定した。

$$[31] \quad D(t) = 41.10 * (1 - 0.8950 * \exp(-0.0783 * t)) \quad (R^2 = 0.934)$$

$$[32] \quad H(t) = 26.04 * (1 - 1.0747 * \exp(-0.2477 * t)) \quad (R^2 = 0.974)$$

どちらも良好な当てはまりを示した。

また参考値としてインドネシアとサバでの事例と比較したが、チクスでの樹高成長をみると、サバ州の地位上と中のある間にあり、インドネシアの例よりは良好な成長を示した。半島マレーシアでの成長データを見ても、総じてチクスのマンガウムの成長は良好であった。

また、林分の測定樹高から平均値と樹高分散を求め、樹高地位の区分を行った。基本値として、今回の平均値、（平均林齢、樹高標準偏差）＝

(11.6、1.76)を仮定し、その $\pm 1\sigma$ の上下をもって、地位中相当樹高の上限、下限値とした。

即ち、前述の樹高成長式の上限のパラメータ26.04がそれぞれ、 $M12=27.91$ 、 $M23=24.17$ ($M12$ は地位上と中の、また $M23$ は中と下の区分を示す式の上限のパラメータ)となる。

直径分散VDについても同様にMitscherlich式を仮定した。ただし十分なデータもないため、チクスの平均値と今回の調査の平均値から(林齢、直径分散)の2データ(3.0、14.52)、(11.6、23.96)を採用し、この2点を通る2つのパラメータをもつMitscherlich式を仮定した。即ち、

$$[33] \quad VD(t) = 24.78 * (1 - \exp(-0.2939 * t))$$

である。

利用樹高(HB)については、樹高(H)との線形関係を仮定し、

$$[34] \quad HB(H) = 0.3539 * H + 4.9397 \quad (R^2 = 0.075)$$

を使用した。当てはまりはあまり良くなかった(図8.5)。また、初期値($HB(0)$)が4.9397mとなるため、樹高がここまで達しない林齢2年までは、プロジェクトの実測値で補完した。

これらの林分構成因子は相互依存しているものであるが、独立変数として林齢を基礎に、直径、樹高、立木本数から、他の因子を推定する構成となっている。利用樹高の決定は一般に非常に困難である。定義としては10cm径までの樹幹長であるが、測定時に生枝下高として測定されたり、二又など形質不良木の場合は適当な高さで決定するなど数値的に決めるにはかなりバラツキが大きい。しかしながら、この利用樹高と胸高直径で単木の材積を算定するため、非常に重要な因子となる点に注意する必要がある。

立木本数の推移については、今回の調査にもとづき、おおよその予想される本数を算出した。実際には約900本/ha植栽され、その後の本数管理は事例によって変動が大きかった。

なお、本数管理は以下の指数減少式 $N(t)$ を仮定している。

[35]

$$N(t) = 900 * \exp(-b * t)$$

パラメータ**b**は、本数減少の速度を決定するが、測定データより**b**=0.0541とした。以上の仮定から作成した収穫予想表を表8.1に示す。

表8.1 作成したアカシア・マンギウムの林分収穫表

Merchantable volume of *Acacia mangium*

Age (yrs)	H (m)	Range (m)	HB (m)	DBH (cm)	N (/ha)	GF (m ² /ha)	V (m ³ /ha)	Sr (%)	MAI (m ³ /ha/yr)
1	4.2	3.9-4.5	2.3	7.1	853	3	11	81.0	11.0
2	9.0	8.3-9.6	4.9	9.6	808	6	31	38.5	15.5
3	12.7	11.8-13.6	9.4	12.0	765	9	72	27.9	24.0
4	15.6	14.5-16.8	10.5	14.2	725	12	98	23.1	24.5
5	17.9	16.6-19.2	11.3	16.2	687	15	123	20.6	24.6
6	19.7	18.3-21.1	11.9	18.1	651	18	146	19.1	24.3
7	21.1	19.6-22.6	12.4	19.8	616	21	167	18.2	23.9
8	22.2	20.6-23.8	12.8	21.4	584	24	186	17.6	23.3
9	23.0	21.4-24.7	13.1	22.9	553	26	202	17.3	22.4
10	23.7	22.0-25.4	13.3	24.2	524	28	214	17.2	21.4
11	24.2	22.5-25.9	13.5	25.5	496	30	225	17.2	20.5
12	24.6	22.8-26.4	13.6	26.7	470	31	234	17.2	19.5
13	24.9	23.1-26.7	13.8	27.8	445	33	242	17.3	18.6
14	25.2	23.4-27.0	13.9	28.8	422	34	247	17.5	17.6
15	25.3	23.5-27.2	13.9	29.7	400	34	249	17.8	16.6
16	25.5	23.7-27.3	14.0	30.5	379	35	251	18.0	15.7
17	25.6	23.8-27.5	14.0	31.3	359	35	251	18.3	14.8
18	25.7	23.9-27.6	14.0	32.1	340	36	251	18.6	13.9
19	25.8	23.9-27.6	14.1	32.7	322	35	250	18.9	13.2
20	25.8	24.0-27.7	14.1	33.4	305	35	248	19.3	12.4

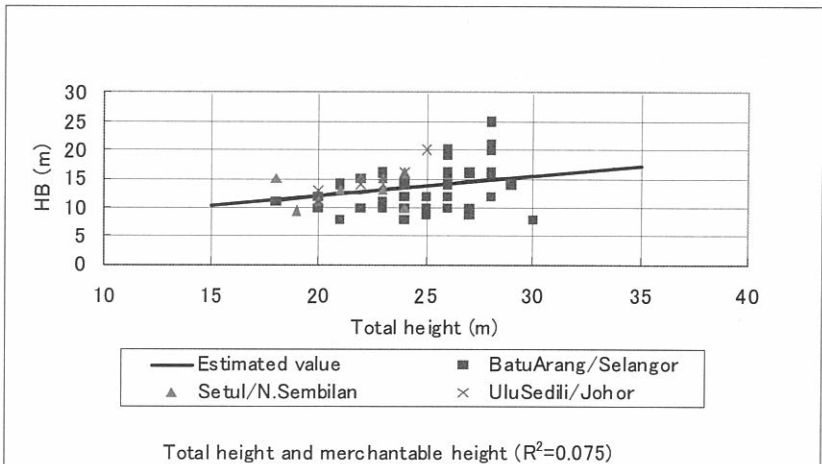


図8.5 利用樹高の推定式

4.2 成長の地域間比較と収穫表の検証

樹高成長については、林齢10年生時の平均樹高を基準に比較すると、前述のようにペラ州チクスではサバ州の地位上と中の間にあり、インドネシアの例よりは良好な成長を示していた(表8.2)。半島マレーシアでの成長データを見ても、総じてチクスのマンギウムの成長は良好であった(図8.6)。

表8.2 チクスの樹高成長と他地域との比較

	Sabah			P.Malaysia	Sumatra
	I	II	III	Chikus	Benakat
H10	25.71	22.18	18.66	23.7	21.4
Range	22.0-25.4				
Ratio	108	94	79	100	90

(H10: 林齢10年の平均樹高 Range: 樹高範囲 Ratio: チクスを100として比較)

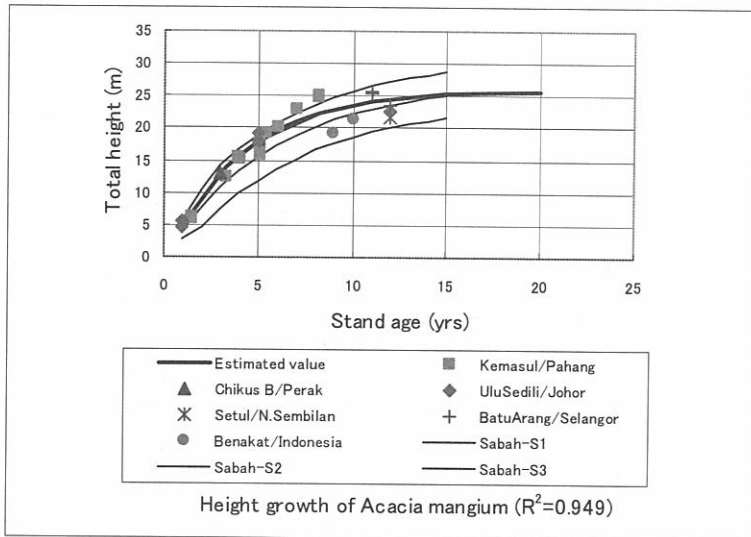


図 8.6 樹高成長の地域間比較

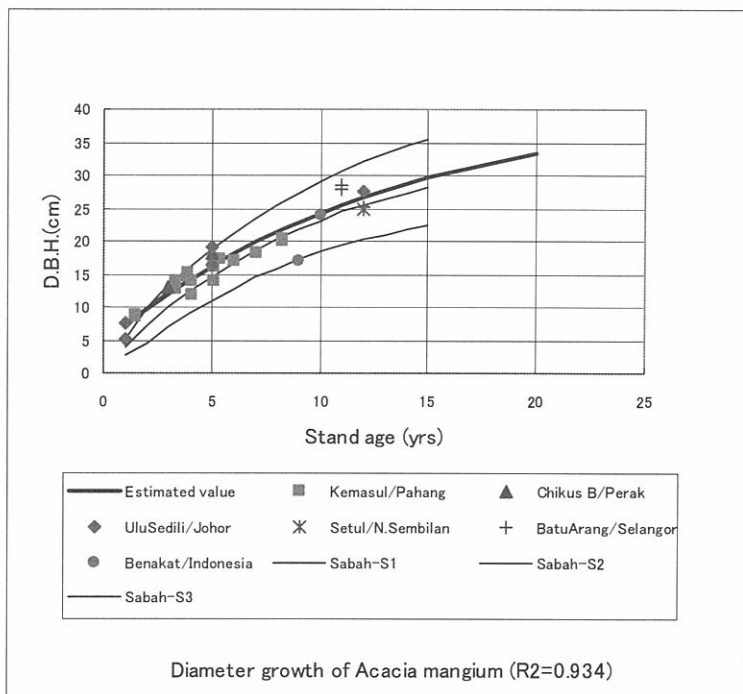


図8.7 直径成長の地域間比較



図8.8 チクスのアカシア・マンギウム林

(中央: 12年生のマンギウム 左右2列: 複層林化下木の *S.leprosula*)

林齢7年生と13年生でチクスの実測データと比較してみると、樹高はやや過大に、胸高直径はうまく推定できていると思われる（表8.3）。

表8.3 直径・樹高成長モデルの検証

Age		Height	H-range	DBH	Vol
7	Data	18.6		19.5	
	Model	21.1	19.6-22.6	19.8	167
13	Data	20.9		26.6	
	Model	24.9	23.1-26.7	27.8	242

また表4には、他地域の収穫表ならびに成長データとの比較を一覧して示した。林齢10年生を基準に、表2と同様にチクスの値を100として、平均樹高、平均胸高直径、立木本数、幹材積、林分材積を利用材積で示し、サバ州とインドネシア・スマトラ島の事例と比較した。直径についてはサバ州の地位中と同程度、材積についても同様であるが、立木本数はスマトラの例では3割ほど多く、このため総材積ではスマトラで7割多い値を示した。

表8.4 他地域の収穫表との比較

	Sabah			P.Malaysia	Sumatra
	I	II	III	Chikus	Benakat
H10	25.71	22.18	18.66	23.7	21.4
Ratio	108	94	79	100	90
D10	29.14	23.18	18.34	24.2	23.9
Ratio	120	96	76	100	99
N10	429	530	641	524	673
Ratio	82	101	122	100	128
vol10	0.646	0.372	0.206	0.408	0.542
Ratio	158	91	50	100	133
V10	277	197	132	214	365
Ratio	129	92	62	100	171

さらに、森林局の指針に従った間伐モデルを検討するため、簡単な成長シミュレーションを行うプログラムを作成した（Matsumura and Ismail 1996、松村 1997）。プログラム全体は森林経営モデルを検討するため、投下費用

列と収益列のキャッシュフローにもとづき林分経営の収支計算を実行し、IRRを算出するプログラム (SimMSF) である。マンガウムの成長予測式に基づき、森林局の指針に従い、植栽後4年と8年の2回の間伐に対応し、15年で皆伐、収穫するものである。

間伐は下層間伐を仮定し、間伐の実行に伴う、見かけの平均直径の上昇を

$$[36] \quad n_0 = n_1 + n_2$$

$$[37] \quad n_0 * D_0 = n_1 * D_1 + n_2 * D_2$$

$$[38] \quad D_2 / D_0 = 0.8$$

を仮定し

$$[39] \quad D_1 = (n_0 * D_0 - n_2 * D_2) / (n_0 - n_2)$$

として求めた。ここで、nは立木本数、Dは平均直径、(0、1、2)はそれぞれ間伐前、残存木、間伐木を示す。

表8.5 間伐成長の試算(上段:収穫材積 下段:直径の径級分布)

Comparison of the expected volume per hectare

Age (yrs)	CFPP (m ³ /ha)	Simulation (m ³ /ha)	notes
4	21	16	2nd Thinning
8	60	41	3rd Thinning
15	180	134	Final felling

Expected diameter distribution (% and example)

Age (yrs)	Diameter class (cm)			Total
	small pole d<14	large pole 14<d<30	log 30<d	
4	80.8	19.2	0.0	100%
	162.0	38.0	0.0	200 stems
8	24.2	75.3	0.5	100%
	48.0	151.0	1.0	200 stems
15	0.0	17.1	82.9	100%
	0.0	34.0	166.0	200 stems

マンギウムの収穫材積については、表5上段に示すように森林局で想定されている材積収穫よりは若干低めの値となっている。間伐年を4、8年と仮定したが森林局では4～5、8～9年と幅を持たせており、5、9年で間伐した場合には当然収穫材積の若干の増加が期待される。また、収穫される材の径級分布も前述の直径分散の式と正規分布を仮定して推定した（表8.5下段）。林齢4年では、200本の間伐木の80%に相当する162本が胸高直径14cm以下のクラス、林齢8年では75%がラージポールクラス、主伐時には83%が直径30cm以上のクラスになると推定された。

おわりに

東南アジア地域において、早生樹としてよく植栽されているアカシア・マンギウムについて、半島マレーシアの測定データを中心に解析し、簡易な収穫表を作成した。また、サバ州、インドネシア・スマトラ島のマンギウム林とも成長比較を行った。半島マレーシアにおいては、樹高成長については、サバ州上から中の地位に相当し、スマトラの事例よりは良い成長を示した。胸高直径についてもほぼ同様であったが、材積収穫については立木本数の相違からスマトラの総収穫が最も多いと思われた。

表8.1の収穫表については、今回の限られた調査にもとづく一応の目安である。よく手入れされている林分では、平均直径はより大きくなるであろうが、林分材積はさらに少なくなるであろう。

基本となる成長モデルに関しては、予測性能としては樹高がやや過大と思われる、現実林分における総収穫量の予測としてはさらに過少になると見込まれる。施業体系モデルにはまだ課題が多いが、多様な間伐に対応できる成長モデルが必要であろう。また、チップ生産か用材生産かという生産目標の検討も必要であろう。既に一斉造林された地域においては、有用郷土樹種による複層林化も進められている。今後地球温暖化対策の一環として、CDM植林プロジェクトにもマンギウムは利用されるが、大規模、短伐期の産業造林には成長予測モデルとしての使用が可能と思われる。

ただし、早生樹特有の芯腐り、病虫被害への低い抵抗性などに注意する必要がある（図8.9）。

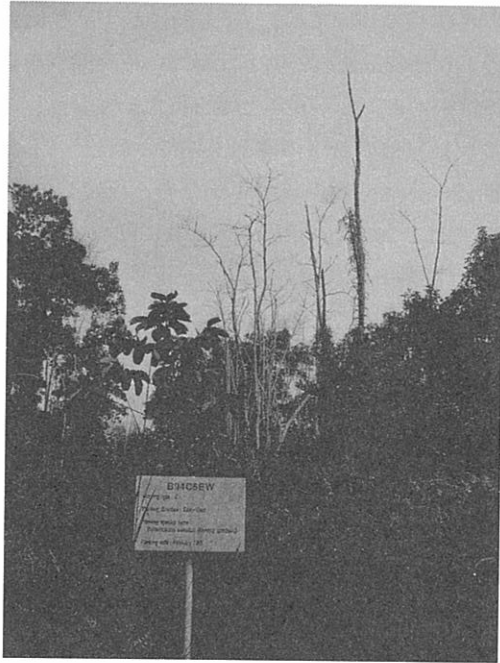


図8.9 枯損したマンギウム林(テクス)

引用文献

- Ahmad Z. Yahya 1993. Growth of *Acacia mangium* during three years following thinning: preliminary results. *Journal of Tropical Forest Science* 6(2) :171-180.
- Ahmad Z. Yahya and Weinland, G. 1990. Diameter increment of *Acacia mangium* Willd. following first thinning. *Journal of Tropical Forest Science* 2(4) : 349-350.
- FAO 1972. Forest resources of tropical Asia. Rome.
- 猪瀬光雄1991. JICA Short term expert report. SAFODA/JICA, Tokyo.
- 猪瀬光雄・Saridi Zainal・中村毅 1992a. アカシア・マンギウムの成長解析(1) -地位指数曲線の作成-. 北方林業518:128-131.

- 猪瀬光雄・Saridi Zainal・中村毅 1992b. アカシア・マンギウムの成長解析(2) — 収穫予想表の作成 —. 北方林業519:157-159.
- Iwasa, M., Ariffin, R.B. and Yusof, M.B.M. 1993. The establishment of multi-storied forest in Peninsular Malaysia. Bio-Refor proceedings of YogYakarta Workshop. 66-68.
- JICA 1995. 1994 Progress Report. FD Perak/JICA, Ipoh.
- Matsumura, N. and Ismail b. Katim 1996. Economics of Multi-storied forest management project (I) — Yield prediction and comparison of working strategies — Proc. of the 2nd Workshop on the Multi-storied forest management project in Malaysia “Towards achieving sustainable forest management”. Forestry Department Headquarters and Japan International Cooperation Agency.
- 松村直人 1996. 半島マレーシアにおける複層林経営の経済性に関する一考察. 平成8年度海外研究業務報告、森林総合研究所、117-122.
- Panitz, E. and Adzmi Yaacob 1992. Growth of Acacia mangium planted on windrow sites. Journal of Tropical Forest Science 4(3): 257-265.
- Paudyal, B.K. and Nik M. Majid 1990. Preliminary thinning guideline for Acacia mangium Willd. Plantations. Journal of Tropical Forest Science 3(1): 25-34.
- 坂本 進 1994. マレーシア複層林施業技術現地実証調査について. 熱帯林業 30 : 12-20.
- 桜井尚武 1997. 造林木の生育に関する試験調査及び造林技術の開発. 熱帯林再生技術研究
成果報告書. 熱帯林再生技術研究組合、249-254.
- Sakurai, S. and delaCruz, L.U. 1993. Growth of trees planted in degraded forest land. JARQ 27: 61-69.
- Sakurai, S., Ragil, R.S.B. and delaCruz 1994. Tree growth and productivity.
JIRCAS International Symposium Series 1: 64-71.
- 佐々木恵彦1992. 序. (小林繁男編「沈黙する熱帯林—現地からの報告」所収、東洋書店395pp.

- Sawaguchi, I., Shimizu, S., Ichihara, K., Toyokawa, K. and Ohkawabata, O. 1997. Growing Situation of afforested trees and damage to lower-story trees caused by felling in Multi-Storied forest management in Peninsular Malaysia. *J.For.Res.* 2: 15-19.
- 末田達彦・松村直人・吉本 敦1984. 東アジア・東南アジアの森林と林業. 林業統計研究会誌9 : 47-60.
- Wan Razali, W. M., Khali A. Hamzah and Chew, T. K. 1989. A volume table for planted *Acacia mangium* in Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science* 2(2) :110-121.