

アカシア・マンギウム の 林分成長モデル インドネシア南スマトラ人工林の事例

栗延 晋*¹・ハルジョノ アリスマン*²

はじめに

アカシア・マンギウム (*Acacia mangium*) は、東南アジアの湿潤熱帯地域において旺盛な成長と良好な適応性を示すことから、パルプ材供給を目的とする人工林の造成に広く用いられてきた。近年は、それらの人工林の一部を付加価値の高い床材や屋外材等の用材生産に切り替える動きもある。こうした用途の拡大に伴い、生産目的に応じた最適の施業を明らかにするためには、林分密度管理の概念を組み入れた林分成長モデルを必要とする。

筆者らはインドネシア南スマトラの MHP 社 (PT. Musi Hutan Persada) の初代人工林の固定プロットから得たデータを用いて林分成長モデルを作成した。このモデルは、樹高成長を表す地位指数曲線、林分密度と断面積平均直径との最多密度線、それに基づく密度効果の逆数式と自己間引き曲線から成る。そして、これらの曲線式を数式的に一体化させたことによって、林分の成長段階に応じた樹高、林分密度と断面積平均直径を予測することができる。ここでは、このモデル作成に係る一連の手順を解説するとともに、異なる植栽間隔や間伐の有無が林分成長にどのように影響を及ぼすのかを予測した事例を紹介する。この事例は、筆者らがこれまでに公表した論文^{1~3)}をもとにしている。

成長モデルの作成に用いたデータ

この成長モデルの作成に用いたデータは、インド

ネシア南スマトラの MHP 社のアカシア・マンギウム人工林に設定した 51 箇所の固定プロットから得た。固定プロットは 0.1 ha の大きさで、1991~1993 年に植栽された人工林が 3 年生に達した時点で設定した。この人工林の植栽間隔は 4 m × 2 m であるが、根元から 2 又状に分岐した個体が多数あった。このため、プロット設定時の幹の本数は平均 120 本であるが、200 本以上のプロットもかなり存在した。これらのプロットは、3 年次以降 8~9 年生まで無間伐の状態で推移させて、ほぼ毎年、胸高直径の毎木調査と樹高の標本調査を実施した。

地位指数曲線

林齢 (t) 年の時の地位指数 (SI) の樹高 (H_t) を表す地位指数曲線は、樹高成長曲線 ($h_1(t)$) と変動幅曲線 ($h_2(t)$) を組み合わせた以下の式で作成した¹⁾。

$$H_t = h_1(t) + [SI - h_1(8)] \frac{h_2(t)}{h_2(8)} \quad (1)$$

ここに、 $h_1(t)$ と $h_2(t)$ は、それぞれ林齢 : t 年次の平均樹高と標準偏差を表し、 $h_1(8)$ と $h_2(8)$ は、基準林齢 8 年の平均樹高と標準偏差である。樹高成長曲線と変動幅曲線は、固定プロットの 285 個の測定値を用いて推定した (表 1a, b)。

最多密度線

この成長モデルでは、対数で表した林分密度 (N) と断面積平均直径 (D) との最多密度線を用いた

Susumu Kurinobu, Hardjono Arisman : Stand Growth Model for *Acacia mangium* in South Sumatra, Indonesia

*¹ (財)森林総合研究所林木育種センター, *² 元 PT. Musi Hutan Persada, Indonesia

表 1 アカシア・マンギウム の林分成長予測モデルを構成する 5 つの曲線式

式の名称・機能	パラメータ推定値付き関数式
a. 樹高成長曲線	$h_1(t) = 33.946 * (1 - \exp(-0.1165 * t))^{1.0272}$ t : 林齢
b. 樹高成長の変動幅曲線	$h_2(t) = 3.859 * (1 - \exp(-0.1552 * t))$
c. 最多密度線	$N = -1.670 * D + 5.204$ N : 対数密度, D : 対数断面積平均直径
d. 密度効果逆数式	$dg = [0.000001876 * h^{0.8108} * n + 1.3322 * h^{0.8108/(k+1)}]^{-1}$ dg : 断面積平均直径, h : 樹高, n : 本数密度, k : 最多密度線の傾き
e. 自己間引き曲線	$r = -0.004 * [1.0 - 1.0057 * \exp(-13.850 * x)]$ r : 本数減少/直径成長, x : 最多密度線からの距離

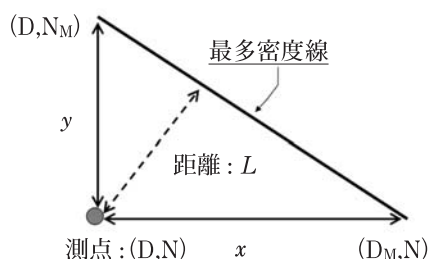


図 1 最多密度線と測点との関係²⁾

(Leineke 1933)。この最多密度線の傾きは測定値との距離が最小になるように定めた。以下にその考え方と手順を説明する²⁾。

最多密度線と測点との関係は、測点と最多密度線との水平方向の距離を x 、垂直方向の距離を y とする直角三角形として表せる (図 1)。したがって、この三角形の面積は、 $xy/2$ となる。一方、三角形の斜辺は $(x^2 + y^2)^{1/2}$ とも表せるので、測点と最多密度線との距離を L とすれば、三角形の面積は $L(x^2 + y^2)^{1/2}/2$ になる。2通りの方法で求めた三角形の面積を等号で表すと、 $xy/2 = L(x^2 + y^2)^{1/2}/2$ となる。この式の両辺を整理して距離 (L) について解けば、 $L = xy/(x^2 + y^2)^{1/2}$ を得る。

最多密度線を $N = k * D + m$ とすると、上述の x は、測点の林分密度 (N) に対応する最多密度線上の D_M と測点の D との差になるので、 $x = D_M - D = (N - m)/k - D$ で表せる (図 1)。同様に y は、 $y = N_M - N = kD + m - N$ となる。したがって、最多密度線の傾き (k) と定数 (m) を定めれば、上に示した関係式を用いて任意の測点との距離が算出できる。実

際の測定値から最多密度線を決定する際には、密度線の傾き (k) を小刻みに変化させながら、密度線の傾き毎に全ての測点が線の下に位置する定数 (m) を定めた。そして、その線に近い 50 個前後の測点との距離 (L) を計算して、平均距離が最も小さくなる傾きを持つ線を最多密度線とした。

この方法によって得た最多密度線は $N = -1.670 * D + 5.204$ となった (表 1c)。この最多密度線を対数軸上で全ての測点の変化とともに描くと図 2a のようになる。この線の傾き -1.67 は、Leineke (1933) が殆どの樹種で共通とした -1.605 をやや上回る。MHP 社の 2×3 m の間隔で植栽された人工林地区のデータから得た傾きは -1.63 であった。以上のことから、アカシア・マンギウムの最多密度線の傾きは、通常の樹種よりはやや大きいと思われる²⁾。

密度効果の逆数式

この成長モデルの密度効果式には、樹高 (H_t)、林分密度 (ρ) と断面積平均直径 (d) を変数とする以下の逆数式を用いた³⁾。

$$\frac{1}{d} = a_1 H_t^{a_2} \rho + a_3 H_t^{a_4} \quad (2)$$

この (2) 式の右辺第 2 項の H_t に係るべき指数 (a_4) は、最多密度線の傾き k を用いると $a_2/(k+1)$ になる。したがって、(2) 式のパラメータは 3 つとなる。これらのパラメータは、ガウス・ニュートン法により固定プロットの 285 個の測定値を用いて推定した (表 1d)。

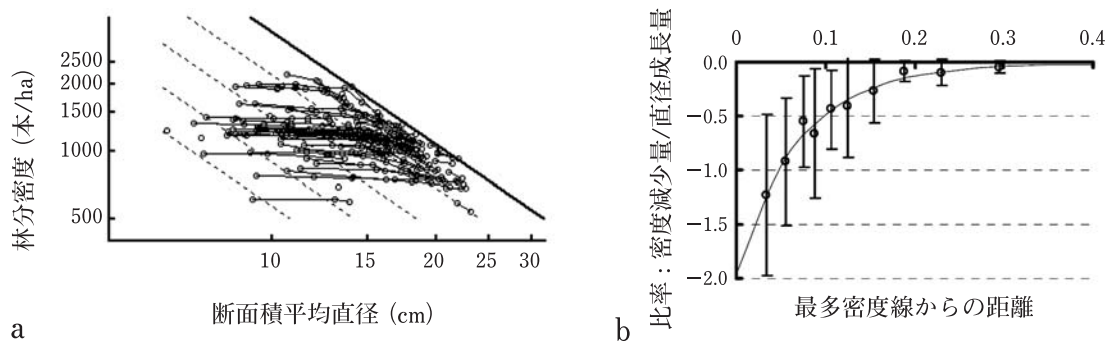


図 2 アカシア・マンギウムの最多密度線 (a) と自己間引き曲線 (b)²⁾

自己間引き曲線

自己間引きの現象は、最多密度線と測点との距離 (x) に応じて林分密度の減少量と断面積平均直径の増加量の比 ($r_t = \Delta N / \Delta D$) が変化して、距離 0 に近づくと最多密度線の傾きにほぼ一致すると仮定した。アカシア・マンギウムの事例では、この距離と比率の関係を表すために、漸近曲線であるミッチャーリッヒ式を用いた³⁾。

$$r_t = b_1 [1.0 - b_2 \exp(b_3 x)] - 2.0 \quad (3)$$

この計算では、まず 2 年間連続して計測したプロットを抽出して、林分密度の減少量と断面積平均直径の増加量の比を求めるとともに、初年次の測定値を用いて最多密度線からの距離を算出した。こうして得た 183 対のデータを距離の順に 10 階級に区分して、それぞれの級毎に平均距離と比率を計算し、(3) 式をあてはめて 3 つのパラメータを推定した (図 2 b, 表 1e)。

成長モデルへの一体化

この成長モデルでは、地位指数曲線 (1 式) を用いて樹高成長を予測する。そして、最多密度線から導いた密度効果の逆数式 (2 式) と自己間引き曲線 (3 式) によって表される断面積平均直径と林分密度を数式的に一体化する必要がある。このため、林齢 $t + 1$ 年の断面積平均直径 (d_{t+1}) と林分密度 (n_{t+1}) が、林齢 $t + 1$ 年の樹高 (h_{t+1}) ならびに林齢 t 年の

断面積平均直径 (d_t) と林分密度 (n_t) を用いてどのように表せるかを検討した³⁾。

まず、(2) 式を用いると d_{t+1} と n_{t+1} との関係は以下の (4) 式で表せる。

$$1/d_{t+1} = A_{t+1} n_{t+1} + B_{t+1} \quad (4)$$

ここに、 $A_{t+1} = a_1 h_{t+1}^{a_2}$ 、 $B_{t+1} = a_3 h_{t+1}^{a_2/(k+1)}$ である。 h_{t+1} は地位指数曲線の (1) 式によって与えられるので、 A_{t+1} と B_{t+1} はいずれも定数となる。一方、(3) 式は r_t の定義により以下の式となる。

$$r_t = \frac{\log(n_{t+1}) - \log(n_t)}{\log(d_{t+1}) - \log(d_t)} \quad (5)$$

さらに、(5) 式を用いて $\log(n_{t+1})$ を表すと以下の式を得る。

$$\log(n_{t+1}) = r_t \log(d_{t+1}) - r_t \log(d_t) + \log(n_t) \quad (6)$$

(6) 式の右辺第 2 項と第 3 項は、 d_t と n_t として与えられているので定数とすれば、 $c_t = 10^{-r_t \log(d_t) + \log(n_t)}$ となる。そして、 n_{t+1} をべき乗の形で表すと、以下の式となる。

$$n_{t+1} = c_t d_{t+1}^{r_t} \quad (7)$$

(4) 式に (7) 式の n_{t+1} を代入して d_{t+1} について整理すると (8) 式を得る。

$$A_{t+1} c_t d_{t+1}^{r_t+1} + B_{t+1} d_{t+1} - 1 = 0 \quad (8)$$

(8) 式は d_{t+1} の高次方程式となるので、ニュートン・ラプソン法による逐次近似で解を得ることがで

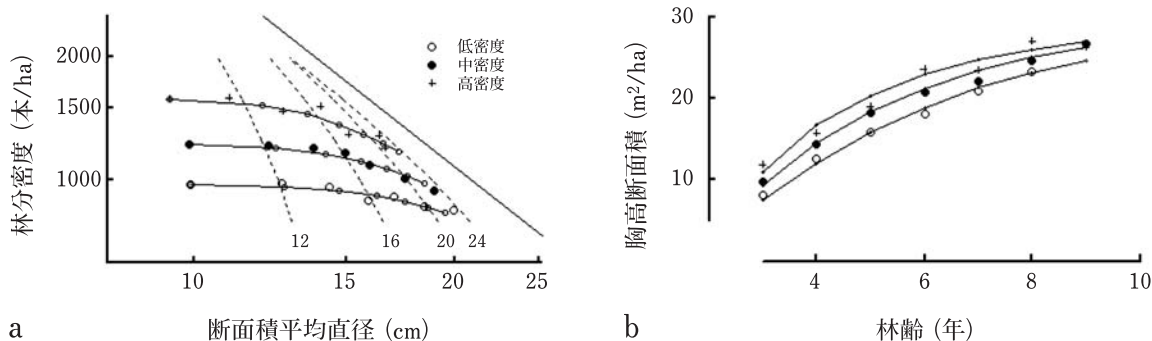


図3 林分成長モデルの予測値と実際のデータとの適合性（実線が予測値）³⁾
 注) 図3a中の右下がりの破線は樹高12~24mに対応する等樹高曲線を表す。

きる。そして、得られた d_{t+1} を(7)式に代入すれば n_{t+1} が算出できる。

以上に述べた手順で、林齢 t 年次の樹高、直径と林分密度を用いて林齢 $t+1$ 年次の樹高、直径と林分密度を予測することが可能となった。したがって、ある林分の地位指数を推定して植栽本数を決めれば、このモデルを用いて林齢の増加に伴う直径と本数密度の変化を逐次予測することができる。さらに、このモデルは林分成長を1年毎に予測するので、間伐を実施した場合には林分密度の減少程度に応じた直径成長の目安が求められる。言い換えれば、生産目的とする径級の材を得るための施業法は、このモデルを用いて地位毎に初期密度と間伐強度と頻度を変えながら検討することが可能となる。

実際のデータとの適合性

このモデルの予測値と実際のデータとの適合性を確かめた³⁾。実際のデータは、51箇所の固定プロットを3年次の初期密度に応じて疎、中、密の3段階に区分したグループ毎の樹高、断面積平均直径及び林分密度の年次別平均値である。まず、各グループの地位指数と3年次の密度を林分成長モデルの初期値として与え、その後、9年次までの直径成長と林分密度をシミュレーションで予測した(図3a)。図から明らかなように、モデルの予測値と実際のデータとの適合は概ね良好であった。

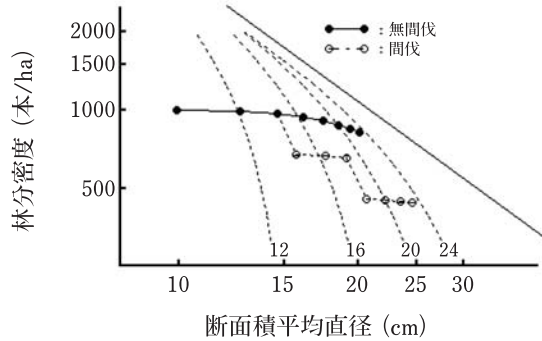
次にこのモデルの林分収穫量予測への適用の可能

性を検討するために、3つのグループの林齢の増加に伴う胸高断面積成長の適合性を確かめた(図3b)。このモデルの予測値は、中・高密度グループと低密度グループとの差が林齢の増加に伴い縮小する傾向を精度良く再現している。また、密度効果の逆数式に断面積平均直径を用いた場合には、密度の違いによって変化する樹高と直径の関係がどう表現されるかが問題となる。この逆数式は等樹高曲線として、対数化した林分密度と断面積平均直径の平面に描かれる(図3a)。等樹高曲線は最多密度線よりも急な右下がりの傾きを持つ曲線になる。このことから、同じ樹高でも低密度ほど直径が大きい一般的な傾向は、このモデルにより適切に表わされたと見なせる。以上のことから、このモデルは、無間伐のアカシア・マンギュームの林分収穫量の予測に適用できる条件を満たしていると考えられる³⁾。

予測の事例

この林分成長モデルを用いて、2通りの植栽密度と間伐の有無を組み合わせた施業オプション別に10年次の林分密度と断面積平均直径を予測した(図4)。このシミュレーションは、南スマトラで平均と見なされる地位指数20m(8年次)での予測である³⁾。植栽間隔は3×3mと3×2mの2通りで、3年次にそれぞれ1,000本/ha及び1,500本/haの林分密度で成林していると想定した。また、間伐は5年次と7年次に、それぞれ30%の本数率で劣勢木や

a 植栽間隔 3×3 m (1,100 本/ha) の場合



b 植栽間隔 3×2 m (1,600 本/ha) の場合

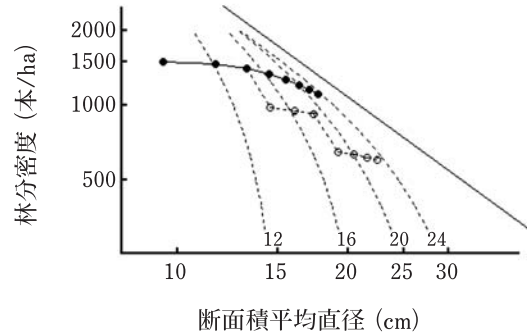


図 4 林分成長モデルを用いた施業オプション別の直径成長と林分密度の予測³⁾

不良木を除去すると仮定した。

パルプ材の生産のように無間伐で推移させると、平均直径は 3×3 m の植栽間隔の場合に 20 cm をやや上回る程度、3×2 m の場合には 20 cm に達しないと予測された。一方、間伐を行うと、直径は 3×3 m の植栽間隔の場合に 25 cm に達するが、3×2 m の場合は 23 cm 程度と試算される。製材に用いる幹の形態の適否は 3~4 年次から判断できるので、この事例よりも早めに初回の間伐を実施すれば、収穫時の平均直径は大きくなり製材用材の歩留まりはさらに向上すると思われる。

生産材の用途は収穫時の直径サイズに依存するので、その直径を直接予測できるこのモデルは生産目的別の施業を検討するのに適した手法であると言える。ただし、間伐による平均直径の変化やその後の成長は予測の域を出ないので、今後、実際の試験結果を用いて検証する必要がある。また、このモデルによる予測値を林分材積に換算するためには、適切な立木幹材積式を必要とする。さらに、この成長モデルの適用範囲は南スマトラであり、他の地域で使用するには地位指数曲線、最多密度線、密度効果の逆数式等をその地域のデータで適宜修正することが望ましい。

おわりに

以上、アカシア・マンギウム の林分成長モデル

作成に係る一連の過程を解説するとともに、このモデルを用いた林分成長の予測事例を紹介した。モデル自体は、我が国で従来から用いられている地位指数曲線と林分密度管理法を一体化させたものである。ただし、最多密度線を測点との距離を用いて決定し、その距離との関係で自己間引き現象を表したこと、さらに密度効果の逆数式に断面積平均直径を用いることにより林分成長を樹高、直径、密度を用いてわかり易くモデル化した点は、これまでにない特徴である。

〔文献〕 1) A. Nirsatmanto, S. Kurinobu, E. Hardiyanto (2003) A projected increase in stand volume of introduced provenances of *Acacia mangium* in seedling seed orchards in South Sumatra, Indonesia. *J For. Res.* 8(2) : 127-131. 2) H. Arisman, S. Kurinobu, E. Hardiyanto (2004) Minimum distance boundary method : maximum size-density lines for unthinned *Acacia mangium* plantations in South Sumatra, Indonesia. *J For. Res.* 9 (3) : 233-237. 3) S. Kurinobu, H. Arisman and E. Hardiyanto (2006) Growth model for predicting stand development of *Acacia mangium* in South Sumatra, Indonesia, using the reciprocal equation of size-density effect. *Forest Ecology and Management* 228 : 91-97.