

# 熱帯林の生長・収穫に関する最近の研究動向

—ユフロ国際セミナーを中心として—

西川 匡 英

## はじめに

最近熱帯の森林破壊や地球の温暖化現象の問題がクローズアップされ、熱帯林の造成と維持管理に対する関心が高まっている折、昭和63年6月20日より24日まで、ユフロ（国際林業研究機関連合 IUFRO）とマレーシア林業試験場の共催により「熱帯湿潤林の生長と収穫」というテーマで国際セミナーが開催された。

内容は、熱帯林の生長モデル化技術、森林資源調査と生長・収穫、施業と経営、生産力の評価など6つのセッションに分かれている。参加者は約100名（発表者19名）で、地元マレーシア（サバ、サラワクを含む）を始め、カナダ、アメリカ合衆国、イギリス、西ドイツ、デンマーク、オーストラリア、日本など先進国の参加も多く、そのほかはブラジル、台湾、パプア・ニューギニア、フィリピン、インドネシア、スリランカなどの熱帯諸国となっており、このテーマに関する関心の高さがうかがわれた。

各セッションごとの発表後総合討論が行われたがその内容も加え、筆者なりに以下の項目別に最近の研究動向の分析を行ってみたい。本文でとりあげた論文についてはカッコ書きで発表者名を示したが、全発表論文のリストは巻末に掲げておくので参考にしていただきたい。またプロシーディングスも間もなく発刊される予定と聞いている。

## 1. 生長・収穫把握のためのサンプリング法

熱帯林での地上サンプリングの方法は、温帯で行うものと原理的には変わらないものの、熱帯林特有の板根のあつかいをどうするか、樹高測定がきわめて困難なこと、樹種が多様で一つ一つの樹種の同定がむずかしいことなど問題も多く、熱帯林の特性に合ったサンプリングを行う必要がある。

熱帯の60カ国で実際行われている地上調査法に関してアンケート調査が行われた（G. B. Wood）。これによるとアフリカやアジア太平洋諸国では円形、長方形プロットのほか帯状プロットによるシステムティックサンプリングが多いのに比べ、ラテン

---

NISHIKAWA, Kyoei: Recent Research Trends on Growth and Yield in Tropical Forests  
農林水産省森林総合研究所林業経営部

アメリカでは単純、または制約付ランダムサンプリングがよく使われている。大陸別のサンプリングの特徴を表-1 に示しておく。アメリカ合衆国でよく使われている 3P サンプリング法が一部の地域で用いられていることは興味深い。

ビッタリヒ法（可変プロット法、定角測定法）は 3 割の国で何らかの形で使われているが、実際の森林資源調査に定期的に採用しているのは 17% にすぎない。林内の明るさや視界に限界があること、器材（レラスコープ）が高いこと、方法になじみが薄く特別のトレーニングを必要とすることなどがその主な理由である。

約 8 割の国で胸高直径と枝下高（bole height）を用いた材積表を利用している。日本のように全樹高（total height）による材積表を用いないのは全樹高測定がむづかしいためである。

近年リモートセンシングによるデジタルデータの処理技術は新しい方法となりつつある（今回の発表の中でも J.K. VANCLAY はオーストラリアのクインズランドの多雨林の生産力調査に地形情報とランドサット TM データを利用している）が、これらの方法でも効率のよい地上サンプリング法の開発は避けられないであろう。

生長や収穫を把握する基礎となる収穫表や材積表は、近年では前者は生長モデルとやや近代的ないい方で呼ばれるようになり、生態学や数理統計学を取り入れ森林動態をモデル化する技術として発展している。また後者は先進国では幹曲線（樹木の細りの程度を表わす式）を用いて任意の径級別材長別の丸太量を算出できるよう工夫されつつある。今回のセミナーのテーマである生長モデルについては項を改めて述べることにする。

材積表に関しては熱帯地域では集約な木材利用が行われていないこともあり、丸太利用材積表作成にまで到っていない場合が多い。熱帯諸国の材積表の作成または利用に関しては次のようなステップが考えられよう（K. NISHIKAWA）。

表-1 熱帯地域の地上サンプリング法 (％)

地 域	サンプリングの種類					
	有為的	システムティック	単純ランダム	層化ランダム	クラスター	その他
アフリカ	0	66	10	12	4	7
アジア・大平洋	8	49	30	1	8	5
ラテンアメリカ	1	24	32	24	11	9
合計	3	44	25	13	8	8

- 注) ① システムティックサンプリングには層化システムティックも含まれる(ケニヤ、インドネシア)  
 ② その他には 3P サンプリング(ナイジェリア)、クラスターを組入れた層化ランダムサンプリング(フィリピン)、システムティックと単純ランダムサンプリング併用法(パナマ)が含まれる。  
 ③ G.B. Wood の結果を一部修正した(西川)

マレーシアでは半島マレーシアの主要樹種別の立木幹材積表（胸高直径または、胸高周囲と枝下高により幹材積を表示したもの）をすでに作成している。従ってマレーシアの近隣諸国では少数の標本（伐倒木調査）をとり、マレーシア立木幹材積表を検定（*t* または *F* 検定）し、適合すればこれらの材積表値を利用することも短期的な方法として効率的であろう。もし適合しなければ自前の材積表をつくることになる。この場合予備的材積表（preliminary volume table）でも少なくとも 100 本以上の伐倒木調査を必要とし、さらに本格的な材積表作成となると 300 から 1000 本程度の伐倒木調査を行われなければならない。

熱帯でとくにマレー統一方式（Malayan Uniform System）をとる地域ではある一定径級（例えば 50 cm）以上のみの樹木の伐採を許可しており、50 cm 以下の径級の樹木についてはデータ収集ができないため立木のまま上部直径の測定を行わなければならない。

上部直径の測定にはイギリス製デンドロメータが使われていたが、現在生産を中止している。これに代わるものとして日本で最近開発された測樹タキオメータがあるが、200 万円もし今回のセミナーでも話題となったものの値段を聞いただけで皆溜め息をつく始末であった。

しかし林道沿いの森林や疎開地の樹木測定には、測樹タキオメータあるいは精度は少し落ちるがテレレラスコープを用いれば環境維持の面からも有効であろう。マレーシアでは早生樹種の材積表作成に一部シュピーゲル・レラスコープを、またエクアドルの森林資源調査では天然林の材積表作成に一部ペンタプリズム・ウィラーを用いた例があるが、器械の精度からみて材積表作成には無理であろう。これらの器械は資源把握のための地上サンプリング調査に用いられるのが適当である。

## 2. 熱帯林の生長量、枯損量について

熱帯林の生長・収穫問題で一番の関心は何といっても、熱帯有用樹種の生長量・枯損量がどれくらいあるかということであろう。これについては 4 編の発表があり、ブラジルの J.N.M. SILVA は熱帯諸国の主要樹種の生長量について表-2 のようにまとめている。彼によればアマゾンの熱帯多雨林の伐採跡地 8 年後の調査では、年間胸高直径生長量は 0.5 cm 程度であり、他の熱帯諸国のものとほとんど変わらないという。そして個々の樹木の生長量についてみればバラツキがあるものの、直径階ごとの平均値を求めれば直径階の中での変動はならされるため、直径の大きさと生長量とは高い相関関係を示すという。またやはり光は生長に強い影響を与えており、太陽の直射光を受ける樹木は散光、側光を受ける樹木に比べると 3 倍の生長量を示したと同氏は報告している。

一般的に天然林の調査では生長量だけでなく、枯損量と進界量（一定径級に新しく算入する本数または量）の測定はその林の純生産量を算出する場合重要になる。熱帯林でも理屈は同じであり、枯損量も生長量の場合と同様固定プロットを設定して観察するしか方法がない。マレーシアではこのような目的で全域に多くの固定標準地を設

表-2 熱帯林の生長量

地域	樹種群	森林型	施業の程度	年平均直径 生長量 (cm)	測定期間 (年)
(新熱帯)					
ブラジル					
Tapajos	全樹種	高林	伐採	0.5	6
	商業用樹種	高林	伐採	0.5	6
プエルトリコ					
St. Just	全樹種	二次林初期	間伐	0.5	2
Cambalache	全樹種	二次林 (低傾斜地)	無処理	0.1	26
Cambalache	全樹種	二次林 (山岳地)	無処理	0.1	26
Caribbean For.	全樹種	山岳上部	間伐	0.2	27
スリナム					
Sarwa	全樹種	高林	弱度伐採	0.4	9
Sarwa	商業用樹種	高林	弱度伐採	0.3	9
Tonka	商業用樹種	高林	無処理	0.4	2
ベネズエラ					
Merida	全樹種	高林	弱度伐採	0.5	8
Amazonas	全樹種	高林	無処理	0.2	4
S.C. Rio Negro	全樹種	高林	無処理	<0.1	4
	下層木	高林	無処理	<0.1	4
	巨木層	高林	無処理	0.1	4
(アジア)					
インドネシア	全樹種	フタバガキ科林	無処理	0.5	6
半島マレーシア	フタバガキ科	高林	伐採	0.5	1
	フタバガキ科	低地林	更新	0.8	5
	非フタバガキ科	高林	伐採	0.4	1
	非フタバガキ科	低地林	更新	0.5	5
サラワク					
	商業用樹種	高林	無処理	0.3	2
	商業用樹種	高林	伐採*	0.7	2
	全樹種	高林	伐採	0.6	4
(アフリカ)					
ガーナ	商業用樹種	<i>Celtis</i> , <i>Triplochiton</i>	伐採(択伐)	0.6	6
アイボリコースト	商業用樹種	常緑および 推移帯	無処理	0.4	4
	商業用樹種	常緑および 推移帯	間伐	0.7	4
	商業用樹種	半落葉	伐採	0.4	4
ナイジェリア	商業用樹種	高林	伐採(傘伐)	0.6	5

注) ソース: J.N.M.SILVA がまとめたものを一部修正 (西川)

\* Liberation thinning (除伐, 受光伐)

定して定期的な測定を行っている (H.C. TANG *et al.*)。枯損量についていえば、例えば Gunung Tebu 保存林の結果では年平均枯損率は 5 cm 以上の全樹種で 6.4% となっており、以下 10 cm 以上の全樹種 4.9%, メランティ 6.8%, メランティ以外のフタバガキ科樹種 3.2%, 非フタバガキ科樹種 4.8% である。

また年平均進界量 (%) は 10 cm 直径階以上の全樹木の 0.93% となっている。

1つ1つの固定標準地についてはこのようにして生長量、枯損量、進界量に関する情報が得られる。もっと広い地域では多数の固定標準地データを用いてモデル式のパラメータを決め予測を行うことが考えられる。Wan RAZALI はマレーシア内の 54 個の固定標準地のデータをもとに、ロジスティック式を用いた直径階別枯損発生モデルで予測した結果、フタバガキ科など 4 つの樹種グループのうち、3 つのグループでは予測結果が良好であったと報告している。

このような枯損のモデル化の研究は、次に述べる熱帯林のモデル化による生長予測研究の一翼を担うものである。

### 3. 熱帯林の生長モデルとその応用

今回の論文の中で生長モデルについては次の 2 つのタイプに分けられる。

1) 生長、枯損、進界量およびこれらを統合化した純生長のモデル化を行うもので、保続計画に必要な生長予測あるいは、施業診断に使用される。

2) 森林生態系の解明を主眼としており、ギャップモデルやシステムアナリシスなどの手法を研究するもの

まず 1) の場合から述べてみよう。一般的には生長モデルとしてマトリックスモデルや微分方程式によるモデルなどが研究されている (P. ADLARD)。J. K. VANCLAY はオーストラリアのクインズランドの熱帯多雨林でいろいろなモデルを検討し、回帰式やロジスティック式を主とするモデルが細かい分析にはむしろ適していると述べている。彼は直径生長は直径、最大直径などを独立変数とする回帰式 (log 変換などを含めて)、また枯損量はロジスティック式 (直径、断面積合計、伐採後の経過年数を変数とする) でそれぞれ適合よく表わされることを明らかにした。進界生長量はモデル化がむずかしい面もあるものの、林分断面積、地位 (地位が良い場合 1, 悪い場合 0 とするダミー変数を使う) の関数として表わすモデルが適当であるとしている。

一方、樹木の直径分布の推移に着目するモデルは先進国では一種の「流行」ですらある。直径分布にワイブル分布をあてはめた場合、日本ではスギ、ヒノキなどの人工林、広葉樹などの二次林には比較的あてはまりがよい反面天然林ではあまりよくないとされている。台湾の熱帯林にワイブル分布はよく適合するという報告 (F.L. FENG) もあり興味深いものであった。

また森林の保続計画に使われる林分表 (stand table) による生長予測モデルは実用化の面からも有望である。ヨーロッパでは択伐林のコントロールに  $q$  値 (隣接する直径階の立木本数の比) を用いてきた。この  $q$  値は樹種によって異なるが例えば

スイスの択伐林では1.3をとり、一定の理想林型あるいは目標林型を表わすものとして施業の重要な指標となっている。

デンマークの S. KORSGAARD は、サラワクの熱帯林にこの手法を適用し、林分推移のシミュレーションを行った結果を発表した。基本的には将来の林分の径級分布の予測を行ったものであるが次のようなデータを入力する。

- ① 初期の林分表（直径階別本数表）
- ② 直径間隔, 最小直径階, 最大直径階など
- ③ 直径階ごとの生長率
- ④ 直径階ごとの枯損率
- ⑤ 5~30 cm, 30~80 cm 別の q 値
- ⑥ 期間年数
- ⑦ 進界生長率

この結果各年次別の林分表が次々に打出されることになる。

これを行う前に生長パターンに影響を与えると思われる樹種群, 伐採方法, 施業方法 (巻枯らしなどを含めて) 別にデータを分類しておく。ここでは KORSGAARD がサラワクの事業区でシミュレーションを行った結果を示しておく (図-1)。

図は林型タイプ A, B, C ごとに 30 年後の林分直径分布の推移を予測したものである。林型 A は巨木層または完全に上部からの光を吸収できる樹冠型をなすもの (DAWKINS の crown illumination class 1, 2), 林型 B は少量の直射光しか上部から吸収できないもの (同 3), 林型 C は側光のみで, 直射光が期待できないもの (同 4, 5) である。

次に 2) について述べてみよう。収穫表が生長モデルへと発展していることは前述したが, 現在生長モデル研究も森林環境因子とは切り離して論じられている場合が多く, 「あてはめの精度」に関心が集中している。

これに対して H. BOSSEL らの研究は H.H. SHUGART の森林動態の解析研究の流れを汲むもので森林環境との関連の中で生長モデルを位置づけていく態度が強い。ドイツの研究グループ (H. BOSSEL *et al.*) はドイツ・中国共同計画 (CERP) のもとに中国熱帯多雨林の生態系の機構や機能のモデル化やシステム分析を行っている。

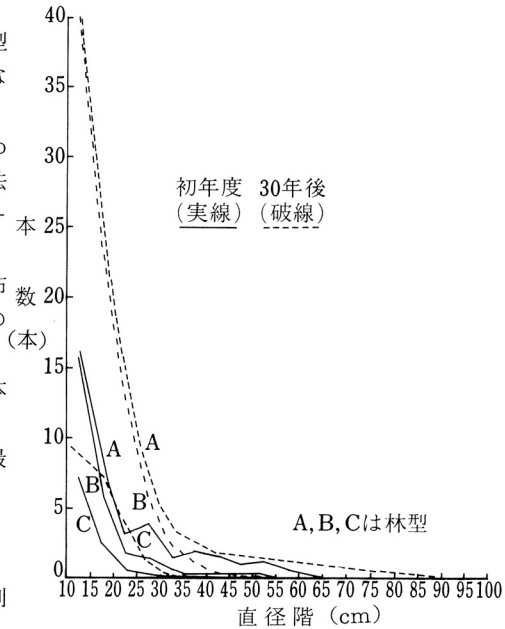


図-1 サラワクのテスト林での林分直径分布の推移シミュレーション (ソース: S. KORSGAARD, 一部加筆)

そのアプローチの方法は、ギャップ（スポットまたはエコユニット）モデルと林分モザイクモデルの2つの段階に分けられる。ギャップモデルは森林内の小区域（0.1 ha ~ 1 ha 程度の面積）での伐採、気候の変化などの攪乱要因とこれにともなう更新過程を単木的にモデル化し、環境要因との相互作用を解析するものである。

さらにいくつかのギャップをもつ広い面積の森林を考えた林分モザイクモデルでは、ギャップ間の相互作用などは量的には連立微分方程式などで表わされ、森林動態がシミュレートされる。この際生態学的に意味をもつモデルのパラメータの分析は重要な役割を占める。

以上のモデル化には、呼吸量、蒸発散、養分動態の情報を始め、樹木の幹、枝、葉の生長や樹高、胸高直径、樹冠などの生長について、単木または林分に関する情報が求められ、さらに日射量、風力や大気、土じょうの温度、湿度など森林の立地環境に関する広い情報の収集分析が必要とされる。

最終的にはモデル化を行うことにより、長期または短期のストレスがどのような影響をおよぼすか、攪乱の後どのような過程で現在の安定の状態に達したか、その場合の主要因子は何か、この安定はいつまで続くかなどの課題が追求されることになる。

以上のように研究対象が広範に及ぶため現在ドイツ・中国共同計画でも各部門間の研究がうまくかみ合っているとはいいい難い面はあるものの、その研究方向は既成の森林計測学的手法へ重要な示唆を与えているといっても過言ではない。

#### 4. 施業面からみた森林の生長・収穫問題

いろいろな施業のもとで森林の生長・収穫量はどのように変化するかを知ることは基本的な問題といつてよい。半島マレーシアは1927年より下種伐を加えた更新を重視する林分更新改良施業法（Regeneration Improvement Felling System ; RIF）を採用していたが、経済的でないこと、実行しにくいなどの点から、1948年マレー統一方式（Malayan Uniform System : MUS）を導入した。この方式は予備伐、下種伐を省略し、均等に（樹種群単位でない）択伐する前更作業であるが、林分によっては蓄積や更新の状態に差があること、山岳地では急激な疎開は土じょう侵食の恐れがあることなどのためうまくいかなかったとされている（H.C. THANG *et al.*）。

1972年以降は択伐経営方式（Selective Management System : SMS）が導入され、とくに中径木層の育成に重点がおかれた。この方式はマレー統一方式に比べて回帰年が25~40年と短かく、林分に応じた施業が出来るなどの特徴がある。しかし、マレー統一方式よりきめ細かい方式であるため統一な作業がとれないこと、回帰年の決定、伐採木の指定に高度の技術が必要なこと、生長、更新などの状況の正しい把握が必要なことなどの問題もかかえている。

半島マレーシアでは択伐経営方式のもとで6カ所の森林内に固定標準地を設定した。2~5年間隔で再測されており、各標準地ともすでに3~9回目の調査に達している（H.C. THANG *et al.*）。

例えばセミナー後のエクスカージョンで訪れたジョホール州のラビ保存林では、伐

採基準（胸高直径 30, 38, 46, 53, 61 cm 以上の樹木の伐採）と樹種（メランティ、メランティ以外）の組合わせによる 10 通りのプロットが設定され測定が続けられている。今回のセミナーでもその成果の一部が紹介されていたが、生長・収穫問題は常に伐出方法を含めた施業と常に関連があることをもう一度思い起す必要がある。

### あとがき

当初セミナーに出席するまでは正直のところ内容についてはあまり期待できないのではないかと想像していた。とくに今回のセミナーの中心課題の生長モデル化技術は近年著しい進歩をとげているとはいえ、中でも天然林に関してはいろいろモデル化がむずかしい条件があるからである。

しかし、現在いろいろの角度から熱帯林の生長・収穫のモデル化が行われようとしている。サラワクで行われている林分生長シミュレーション予測システムは、その基礎理論がヨーロッパで成熟したものであってもいくつかの修正を加えつつ熱帯林に適用されつつあり、一つの驚きであった。

〔参考文献〕 1) SHUGART, H.H. (1986) : A theory of forest dynamics, 278 pp., Springer-Verlag 2) 国際協力事業団 (1981) : 森林施業計画基準作成調査報告書

### 発表論文リスト

#### Session 1 : Modelling Overviews–Present and Future

ADLARD, P. : Current thinking on modelling the tropical moist forest (Oxford Forestry Institute, U.K.)

VANCLAY, J.K. : Enhancing a stand growth model for yield regulation in rain forests (Department of Forestry, Brisbane, Australia)

BOSSEL, H. *et al.* : Tropical rain forest ecosystem structure, function and dynamics ; The state of system analysis and modelling of structure change and growth in CERP and ASEAC (University of Hamburg, W. Germany)

#### Session 2 : Inventory, Growth and Yield Interface

WOOD, G.B. : Ground sampling methods used to inventory tropical mixed/moist forests ; the challenge before us (Department of Forestry, Australian National University, Canberra, Australia)

FRANCIS CHAI, Y.C. *et al.* : Standtable projection for the mixed swamp forest of Sarawak (Forest Department Headquarters, Sarawak, Malaysia)

NISHIKAWA, K. : Some considerations on inventory and data analysis in tropical mixed forests (Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba, Japan)

#### Session 3 : Tree Modelling Techniques–Tropical Experiences



- KORSGAARD, S. : The standtable projection simulation model (The Royal Veterinary and Agriculture University, Copenhagen, Denmark)
- RAZALI, W. : Modelling the mortality in mixed tropical forests of Peninsular Malaysia (Forest Research Institute, Malaysia)
- RAI, S.N. : Rate of diameter growth of tree species in humid tropics of western Ghats, India (Karnataka Forest Department, Bangalore, India)
- Session 4 : Growth and Yield I - Implication to Modelling**
- SILVA, J.N.M. *et al.* : Growth of logged-over tropical rain forest of the Brazilian Amazon (EMBRAPA, Belem, Brazil)
- THANG, H.C. *et al.* : Status on growth and yield studies in Peninsular Malaysia (Forest Department Headquarters, Kuala Lumpur, Malaysia)
- LIM, C.J. : Analysis of cross-sectional area estimation errors (University of Kentucky, U.S.A.)
- Session 5 : Growth & Yield II - Management and Silvicultural Consideration**
- PRIMACK, R.B. *et al.* : Relative performance of dipterocarp tree in natural forest. Managed forest, logged forest and plantations throughout Sarawak, East Malaysia (Boston University, U.S.A.)
- FENG, F.L. : The growth and stand structure of natural and man-made tropical forest in Taiwan (National Chung Hsing University, The Republic of China)
- TANG, H.T. : Status on growth and yield studies by the Sabah Foundation (Sabah Foundation, Sabah, Malaysia)
- Session 6 : Growth and Yield III - Productivity and Assessment**
- BOSE, K.J.C. : Potential productivity-Growth model of tropical forest (thermodynamic approach) (Andhra Pradesh Forest Department, Hyderabad, India)
- BORHAN MOHAMMAD and ABDUL RAHMAN KASSIM : The growth and yield of *Dipterocarpus baudi* under plantation in FRIM (Forest Research Institute, Malaysia)
- THAMMINCHA, S. *et al.* : Variation in radial growth of Merkus Khasia pines in Thailand (Kasetsart University, Bangkok, Thailand)
- VANCLAY, J.K. : Site productivity assessment in rain forest ; an objective approach using indication species (Department of Forestry, Brisbane, Australia)