

森林の保全と自然環境の変化に 関する統計的研究

—天然林の生長モデルとそのコンピュータシミュレーション (その1)—

石 田 正 次

(1974年8月 受付)

Statistical Study of the Preservation of Natural Forest (I)
—Ecological model of natural forest and its computer simulation—

Masatugu Isida

The aim of this study is to describe the ecological structure of natural forest by statistical model and to follow up the process of forest growth or change in the long term by computer simulation. The results of this study is anticipated to be of use for the preservation and protection of natural forest. In order to construct the model, we set the following assumptions.

1. Soil quality and water supply are equally distributed in the stand.
2. The growing speed of each tree depends on its species, light supply and oppression by surroundings.
3. Wind and snow damage are large in exposed part of stand. (upper story and boundary trees)
4. Damaged tree stops growing temporarily and its period depends on the degree of damage.
5. Heavily oppressed or damaged tree dies.
6. Growth formula is
$$\Delta H/\Delta t = P(H_0 - H)$$

where P is the function of light supply and species and H_0 is the constant which depends on species.

7. Law of death
 - i) amount of oppressed part of crown
 - ii) conditional random (damage)
 - iii) systematic (artificial effect)
8. Sprout of sampling
 - i) conditional random
 - ii) systematic

The English report of this study will be published in near future (Computer Science Monographs, The Institute of Statistical Mathematics)

The Institute of Statistical Mathematics

1. 概 要

最近、自然保護の一環として森林、特に天然林の保全の問題が強調されるようになった。しかし天然林の変化は非常にデリケートであるために、その将来を予測したり、地域開発などの人為的影響を定量的に把握することは非常に困難なことであり従来考えられてきた。本研究の目的は、森林の生態調査を基調として、その生長過程を統計的モデルによって記述し、森林の長期的な推移をコンピュータ・シミュレーションによって追跡しようとするものである。

本研究は単なる森林の生態学的な研究に止らず、その成果は自然環境の保護に立脚した天然林施業や道路計画などにも一つの指針を与え得るものと思われる。この報告ではその基本的な考え方を述べ、第2報以下で具体的な問題を取り扱うことにする。

天然林の調査と基本データ

この研究の基礎となる調査は文部省科学研究費により昭和43年から始められ、今までに北海道（チミケップ、置戸、トムラウシ、薄別）、関東（戦場ヶ原）、切込刈込湖、高尾山）の各フィールドでのデータが集められており、更に環境庁研究費によってその追試とシミュレーションの試算が重ねられている。調査の内容は

1. 樹木位置図と樹冠投影図
2. 毎木調査（樹種、樹形、樹高、胸高直径）
3. 稚樹及び植生調査
4. 土壌調査（チミケップ、トムラウシのみ）
5. 生長量調査

であって調査回数はチミケップが4回、関東各地が3回、他は1回である。

モデルの構成

天然林のもつ多様な年次変化をマイクロ・デターミニスティックな立場からモデル化しようとする。森林の変化に関与する因子には数多くのものがあるが、今回のモデルでは受光量と庇圧度によって樹木の生長や枯損が決定されると考え、林内の立木の相互関係から林相の変化の追跡を試みた。モデルの中で用いられる各常数は、今までに行われた天然林調査から得られたものである。

モデルの再現性を検討するためのコンピュータ・シミュレーションには、500 KB の HITAC 8700 を用いた。

モデル構成のための仮定

- 1) 林分面積
計算機内の面積は、約 327 m × 51 m が標準であるが、周辺効果を除くためにモデル上では林分の両端を結合して無限大とした。
- 2) 林分の傾斜
南区北方向のみに傾斜があるとする。
- 3) 樹形
円筒形の樹冠をもつ樹木を想定し、標準の樹冠の大きさは樹種と樹高によって定まると仮定した。
- 4) 受光量 (L)
各立木について隣接木を探し、その樹高、方位、太陽高、土地の傾斜から受光量を求める。
- 5) 庇圧度 (O)
立木間の樹冠の重複率を計算し、樹種 (S) と樹高 (H) で優先順位を定めて庇圧度を求める。
- 6) 樹高 (H) の生長則
 - i) $\Delta H / \Delta T = P * (Q - H)$
 - ii) $\Delta H / \Delta T = P$
 ここで P は、樹種 (S)、受光量 (L)、庇圧度 (O) の関係、Q は樹種 (S) によって定まる常数である。
- 7) 枯損と伐木

樹種毎に庇圧度が一定の値を越すと枯れる。樹種、樹高、樹令などに比例してランダムに枯れる。樹種別に一定樹高に到達するとその木を取り除く。

8) 稚樹の発生と補植

ある地区（全林又は母樹や枯損木の周辺）にランダムに発生する。一定以上の空間があるところに発生する。発生本数は別に指定する。

9) 植生

笹の類は、一つの樹種として取り入れる。その他は目下のところ配慮していない。

コンピュータ・シミュレーション

まず、立木本数は2万本とし、各立木毎に座標値、樹種、樹高、樹令、ブロック名のためのメモリーを用意する。次に、林地の傾斜角、既存木のデータ及び各樹種毎に稚樹発生、生長、枯損の計算に必要な定数を入力する。

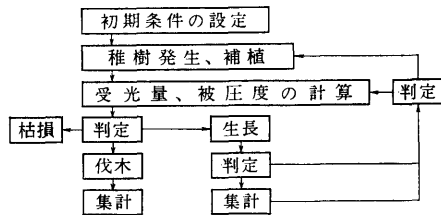
ここまですべて準備で、これからは各年に生長計算、枯損判定をくり返し、10年毎に集計（毎木調査）を行って結果を出力する。稚樹は樹種によって発生の時間間隔を定める。通常は、300年までの計算を行っている。その流れは、次表の通りである。

シミュレーションの主な結果

シミュレーションの結果は、ごく当然と思われるものと、今までの常識からみて、モデル構造に疑問がもたれるものといろいろあるが、比較的安定していると思われるものを次に上げる。

- 1) 稚樹発生数が極端に少ない場合を除いては、発生数の差は成林結果に大きな影響はない。
- 2) 枯損条件の微細な差によって安定期に入った林相（樹高分布、樹種混交率）に大きな変化が生ずる。
- 3) 上層木の樹令分布は樹種によりかなり規則的な形をもつ。

モデルの流れ



本研究は文部省科学研究費（代表者、近藤正己）、及び環境庁研究費によるものの一部であり、これらの協同研究の方々、林野庁各営林局及びぶ林業試験場、北海道庁林務部及び道庁立林業試験場に御協力を得た。その中で特にお世話になった方々とシミュレーション・モデルの研究協力者は次の通りである。

統計数理研究所	林	知己夫
	駒	沢 勉
	仁	木 直 人
新潟大学	高	田 和 彦
	斉	藤 昌 宏
宇都宮大学	近	藤 正 己
札幌営林局	武	居 猛
北海道庁林業試験場	小	林 正 吾
	前	崎 武 人
		（敬称略）

これら各機関、各研究者に深く感謝の意を表す。

2. 基礎調査

生長モデルの基礎となるデータを得るために天然林の調査を実施したが、その手順は概略次の通りである。

i) 調査地の選択

調査地は針葉樹を主体とした天然林で、できるだけ人の手が入っていない場所を選んだ。但し置戸（北海道有林）調査は皆伐跡地で天然林の樹令分布の測定に主体を置いたものであり、また薄別（林業試験場北海道支場試験地）は人為的影響の入った森林も対象地域として含まれている。林分面積 1 ha 内至 4 ha である。

ii) 樹木位置図の作製

樹木位置図は本研究の最も基本となるものであり、その作製に当っては格子法と交合法を用いた。前者は林内に 10 m × 10 m の格子を作り、毎木についてその格子点杭から斜距離、方位、高低角を測定して毎木の $x-y$ 座標を求めた。測定はメートル縄とポケット・コンパスを用いたが、格子線測量にはかなりの誤差（100 m 先で約 1.5 m から 2 m）を生じた。今後この方法を用いる場合は格子線だけはセオドライトを使用する必要がある。後者の方法では林内に設定した任意の基線（基線長は通常 10 m ないし 20 m）の両端にセットされたセオドから毎木を望み、交合法によって各基線とこれに直交する線を座標軸とした $x-y$ の値を求めた。一つの基線から測定し得る立木の範囲は約 50 m × 50 m 程度であり、この大きさでは面積的に小さすぎるので、実際には林内にいくつかの基線を設け、各基線別の座標を次に示すような方法で一つの基本座標系に統一した。

まず林内又林縁附近に相対位置の明確な点を n 個設定し、その座標を (X_i, Y_i, Z_i) とする。例えば林内を貫く直線を設け、その上線に 10 m 毎の基準点を置くとか、既に位置のわかっている他物、林斑界の杭などを利用するなどである。

これら n 個の基準点を基線長 L （水平距離）の 2 つの基点 A, B から測定し、それぞれ水平角 α_i, β_i 、垂直角 θ_i, φ_i を得たとする。基点 A, B の座標をそれぞれ $(0, 0, 0), (L, 0, Z_B)$ としたときの基準点の座標を (x_i, y_i, z_i) とすれば、

$$x_i = \frac{L \sin \beta_i \cos \alpha_i}{\sin (\beta_i - \alpha_i)}$$

$$y_i = \frac{L \sin \beta_i \sin \alpha_i}{\sin (\beta_i - \alpha_i)}$$

$$z_i = \frac{L \sin \beta_i \tan \theta_i}{\sin (\beta_i - \alpha_i)} \text{ 又は } z_i = \frac{L \sin \alpha_i \tan \varphi_i}{\sin (\beta_i - \alpha_i)} + Z_B$$

が得られる。 z_i としては二つの値が考えられるが実際はどちらか一方又は両者の平均値をもってその値とすればよい。ここで我々の問題は標準座標値 (X_i, Y_i, Z_i) と基線 AB による測定座標値 (x_i, y_i, z_i) を用いて、基線 AB 座標系から標準座標系に変換する式を求めることである。その座標式を

$$\xi_i = x_i \cos r - y_i \sin r + X_0$$

$$\eta_i = x_i \sin r + y_i \cos r + Y_0$$

$$\zeta_i = z_i + Z_0$$

とし

$$A = \sum_{i=1}^n (\xi_i - X_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\eta_i - Y_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\zeta_i - Z_i)^2$$

が最小になるように r, X_0, Y_0, Z_0 を決めれば

$$r = \tan^{-1} \frac{\sigma_{zY} - \sigma_{yX}}{\sigma_{zX} + \sigma_{yY}}$$

$$X_0 = \bar{X} - (\bar{x} \cos r - \bar{y} \sin r)$$

$$Y_0 = \bar{Y} - (\bar{x} \sin r + \bar{y} \cos r)$$

$$Z_0 = \bar{Z} - \bar{z}$$

が得られる。又、

$$\zeta_i = a z_i + b$$

によって高低を求めれば

$$a = \frac{\sigma_{zZ}}{\sigma_z^2}, \quad b = \bar{Z} - a \bar{z}$$

となる。傾斜の急な場合はこの式を用いた方が精度がよい。

実際のデータ処理では基線番号、立木測定値、基準点測定値を入力すれば自動的に標準座標に変換された各立木の位置が出力され、 $X-Y$ プロッターによって立木位置図が描かれる。ついでに

$$x = PL, \quad y = QL$$

とにおいて

$$\frac{\partial A}{\partial L} = 0$$

を計算すれば

$$L = \frac{\sigma_{PX} + \sigma_{QY}}{(\sigma_P^2 + \sigma_Q^2) \cdot \cos r}$$

となるが、この L の値と実測の基線長とを比較すれば測量の精度の目安にもなり、又実質的には基線長の測定は不要ということにもなる。 $(\sigma_x^2$ は x の分散、 σ_{xy} は x と y の共分散、 \bar{x} は x の平均)

交合法は二つのセオドライトで同時に一本の樹木を見通さなければならないが、これは高低に変化のある林地や、低木の多い森林ではなかなか困難なことであり、基線をしばしば変えることを余儀なくされる。そこでスタジア測量とか最近普及しつつある電波測距儀を利用することも有力な手段と思われる。

iii) 樹冠投影図

当初、樹冠投影図は樹木位置図に見取りで記入する方法を取ったが、精度が思わしくないために最近では 6 cm × 6 cm のカメラ（通常焦点距離 80 mm）を 1 m の間隔をおいて二台設置し、これを水平方向及び垂直方向で撮影して樹冠の重なるの解析を行っているが、いずれにせよ定量的なデータを広い範囲で得ることは困難である。我々の場合は大略の値をこれらの写真から求め、あとはモデルの中のパラメータを動かして cut and try 的に樹冠の相対関係を求めている。

iv) 毎木調査

胸高直径 4 cm 以上の樹木については樹種、胸高直径、樹高、樹木の特性（枯れ折れ、枝わかれ、病虫害など）を測定した。胸高直径は地上 130 cm を基準とし、許される場合は測定位置をペンキでマークした。樹高は喬木についてブルーメライズ測高計による間接測定、矮木についてはポールなどを用いた直接測定を行った。胸高直径 4 cm 以下樹高 30 cm 以上の樹木は樹種、樹高のみの測定である。

v) 稚樹及び植生の調査

これは全林分について実施することは無理なので林内に面積 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 又は $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 程度のプロットを何個か設けて測定を行った。プロットの形は方形又は正三角形（1辺 15.2 m 又は 7.6 m ）である。このプロット内にある胸高直径 4 cm 以下樹高 30 cm 以上の樹木については地上高 10 cm の直径を測り、樹高 30 cm 以下の場合には樹種別の本数のみを数えた。植生はそのプロット内の主要植物名を調べその密度と高さを目算した。

vi) 土壌調査

土壌はチミケップ、トムラウシについてのみ小林正吾氏によって調査し、他の地区では対象林分内でその特性が著しく異なると思われるところのみ試掘したにすぎない。我々の研究で必要なのは林内の土壌特性の均一性である。昆虫、土壌動物の調査は未だ考慮していない。

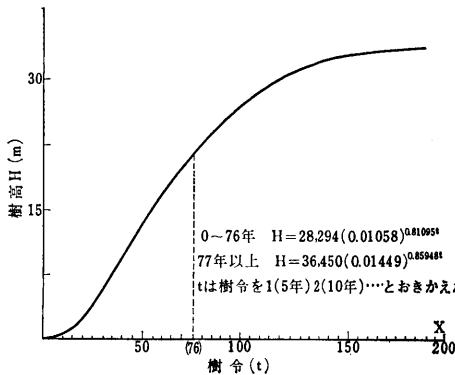
vii) 生長量調査

直径生長量は主要な針葉樹についてのみ生長錐（ 30 cm ）によって測定した。置戸調査では伐根について広葉樹を含めた調査を行い、又チミケップは5年間の生長を胸高直径調査から求める試みが高田和彦氏によって行われたが、未だ明確な結果は得られていない。

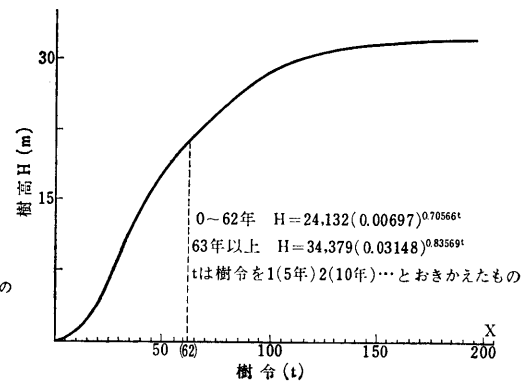
樹高生長量は軽井沢地区で“うらじろ・もみ”46本と“しんしゅう・からまつ”36本について6年間継続調査を行っている。調査は毎年5月初めに1ケ年の伸びの一節を測り、又9月末に5月からの伸びを測った。

3. 天然林における樹高生長則

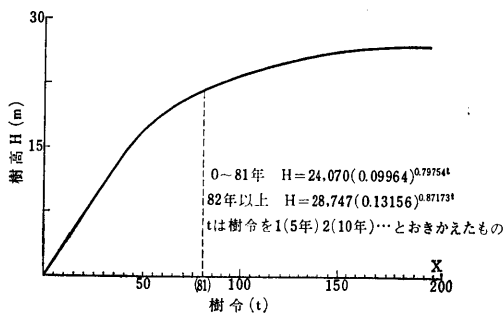
樹木の生長を胸高直径、樹高、幹材積、林分蓄積などいろいろの面から多項式、指数曲線、



第1図 (A) エゾマツの樹令と樹高の関係



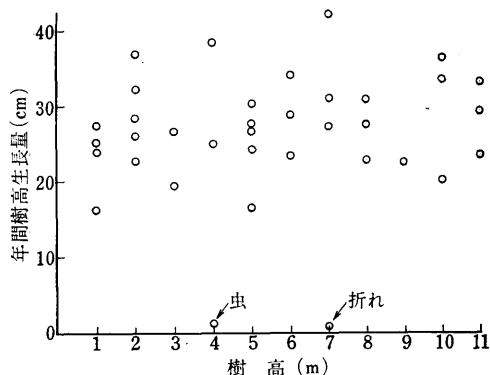
第1図 (B) トドマツの樹令と樹高の関係



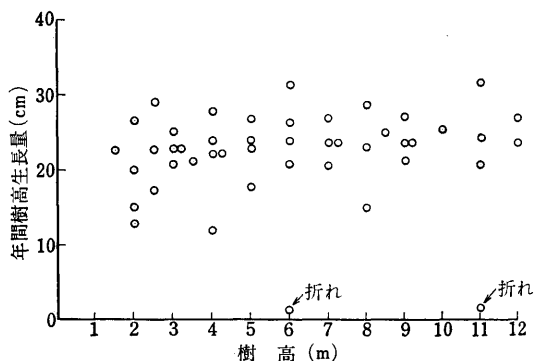
第1図 (C) ミズナラの樹令と樹高の関係

Logistic 曲線、Mitscherlich 曲線、Gompertz 曲線など様々な数式によって記述しようとする試みが数多く行われてきた。しかしこれら単純な曲線によって樹木の生長を記述し尽すことは到底不可能なことであり、更にパラメータを増して数式を複雑化してみてもその中に一つの法則性を見出すことは困難なことである。第1図 (A)、第1図 (B)、第1図 (C) はそれぞれエゾマツ、トドマツ、ミ

ズナラ（データはいずれも北見営林局管）について比較的順調に生長したと思われる個体の樹高生長を追ったものである。これだけ見てもあるものは Mitscherlich 型、又あるものは Gompertz 型の如く見える。これが天然林の中でいたためつけられながら生長したものになればその生長の型は一層複雑なものになってくるであろう。しかしいずれの場合も風害などによる折れさえなければ単調増大型で、しかもある高さ以上になれば伸びは次第に減少し終には生長が止るような様相を示している。この辺が生長微分方程式に速度抑制項が入る所以であろう。そこで各年ごとの生長がわかり易いモミとカラマツについていくつかの観測を行った。その一つは樹高別（樹令も異っているであろうが正確な情報は得られなかった）の年間樹高生長を計ることで、その結果を第2図 (A)、第2図 (B) に示す。



第2図 (A) カラマツ (人工林) の年間樹高生長 (軽井沢—1972)



第2図 (B) ウラジロモミ (人工林) の年間年長 (軽井沢—1972)

この二つの図から見るとこの程度の樹高であればその年間生長量は樹高そのものとは無関係にはほぼ一定である。第2の試みは同じくモミとカラマツ（樹高 20 m 前後）について鳥止りの新芽の出方を双眼鏡で観察することである。ここでは生長を定量的に求めることはできないが、伸びのある木とない木の上部樹冠形を見ることがその目的である。ここで利用したことは伸びのない木は明確な鳥止りがなく樹頂がかなり太い部分で折れている場合と新芽が出たにもかかわらず、それが風、虫、りす、鳥などによると思われる害を受けている場合で、明確な鳥止りさえ持てばかなり高い木でも 30 cm 程度の伸びがあるということである。そこで第3の試みでは約 1 m のモミの木 20 本を植えて第1年、第2年ではそのまま樹高の伸びを測り第3年目の秋にその樹頂をいろいろな所から折ってみた。その後の観察は未だ4年であるが、折ったところがその年伸びた部分であればそのほとんどが翌年その下から枝が立ち上った。折れが下部になるにつれ枝の立ち上りは遅くなるか、又はまったく立ち上りはない。

そこで針葉樹の樹高生長を次のように考えてみた。つまり、その樹木の環境が

一定である限り生長は一定である。これは新芽が正常に生長すればその年間の伸びは樹高そのものには本質的に関係なく一定であるという意味である。しかし何等かの害を受けるとその害の程度によりある期間生長が止る。そして害を受ける回数が増加すればその影響は累加されていき、樹形まで大きく変化するようになれば以後の生長は止る。樹高が大きくなれば当然その環境も変化するので見かけ上の生長量や被害の様子も変ってくる。

このような考え方はほとんどの針葉樹のように樹幹の明瞭な樹木についてはかなりうまく適

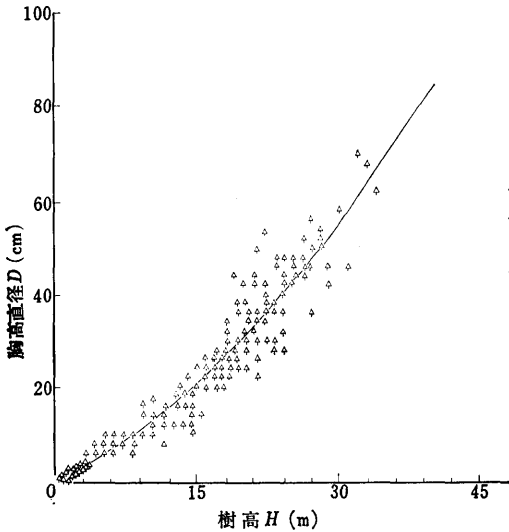
用できるようなのであるが、一般の広葉樹のような相対的に枝条部の多い樹木にあっては限界高を入れた生長式を用いる必要があるように思われる。この限界高が樹木の強度から力学的に決るものであるか、それとも生物としての本質から定まるものなのかは今後のモデル構成で大きな問題であるが、当面は実測データとシミュレーション結果との対比で各樹種ごとに適当な生長式を定めることにする。

以上の樹高生長を数式で書けば次のようになる。

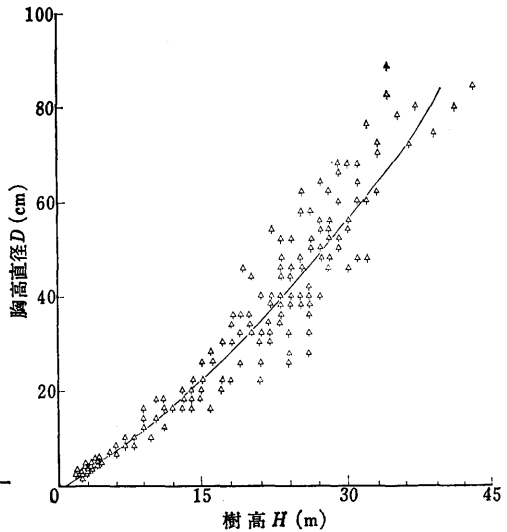
$$i) \Delta H/\Delta T = P$$

$$ii) \Delta H/\Delta T = P (H_0 - H)$$

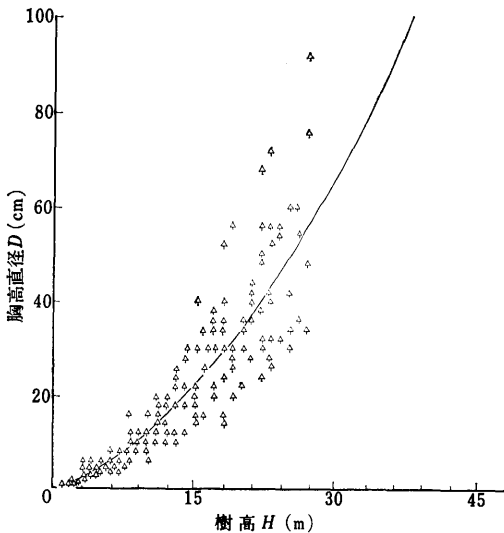
ここで H は樹高、 T は時間、 H_0 は限界樹高であり、 P は生長率で更にこれは樹種とその



第3図 (A) トドマツの樹高と胸高直径の関係



第3図 (B) エゾマツの樹高と胸高直径の関係



第3図 (C) 広葉樹の樹高と胸高直径の関係

樹木の環境の函数である。

樹幹直径の生長については我々の場合未だこれを定量的に記述し得るまでのデータは得られていない。ただ、現在までの測定で言えることは樹木が弱っていない限り、樹種が同一で環境に大差がなければ太い樹木ほど幹材蓄生長がよいといこうとである。あるいは又、樹冠が大きいほど、葉量が多いほど生長がよいと言うべきなのかも知れないが、その定量的表現のためには今後の調査が必要である。一方、樹幹直径と樹高との間にはかなり強い相関がある(第3図(A), (B), (C))ことは明白な事実であるが、これが生態的な意味でどこまで本質的なものであるかは不明である。そこで本稿に於ては樹

幹直径の生長についてとりあえず次の三つの立場を取ることにする。

- i) $\Delta D/\Delta T = P$ (P は樹種, 環境の函数)
- ii) $\Delta D/\Delta T = k\Delta H/\Delta T$ (k は常数)
- iii) $\Delta D/\Delta T = K * P$ (K は樹冠の大きさ)

4. 森林生長モデル

篠崎吉郎氏は生長理論として長い伝統をもつ Logistic 曲線のパラメータを一般化して四手井綱英氏, 吉良竜夫氏等と共に植物生長に適用し, 樹木の限界密度に関して興味ある結果を得た。又一方, 鈴木太七氏は直径生長を遷移確率で表現し, 直径分布の型の考察を行った。前者は生長をまったく deterministic な立場から, 後者はこれと反対にそれを純粋な stochastic な立場から記述している。そして両者で共通していることは森林を構成するそれぞれの樹木が互に独立に, 又はすべて同じ相互関係をもって生長するという macro model の形をとっていることである。macro model の面白さは単純な model 構造からどこまで現実の大局を記述できるかということであるが, 調査や測定で知り得た生態学的な知識を model の中に織り込むことが困難であり, 更に人為的な影響などを配処する余地がない。一方, deterministic な立場では森林生長に関係する数多くの要因の細部的な機構を数量的な形で model の中に持ち込むことは至難であり, stochastic model では当初からそれらを考慮しない。

もし森林の細部についての法則性が定量化されていれば, それらを基にして micro-deterministic な model を作りいろいろな条件下の森林の変化について詳細な予測を行うことができる。しかし, これはほとんど不可能に近いことなので我々の場合は, 明確な因子については deterministic な立場をとり, 不明なもの又は測定が困難なものについては確率的な表現を取って micromodel を作り上げた。いわば deterministic と stochastic の折衷でここでは statistical model とでも名づけておこう。

次にその基本的な考えについて述べて見ることにする。

- i) 土壌の特性と水の供給状態は対象林分内のどの部分でも均一であると仮定する。

勿論かなり小さな面積であっても土壌, 地下水高が異なることは稀なことではないし, 林内の微細地形によって各樹木に供給される水量も変化する。特に傾斜地ではその影響が大きいであろう。しかしこれらの測定を林内で詳細に測定することは難かしいので, ここではひとまず林内均一と考えることにした。

- ii) 気象は random factor と考える。

気温, 降雨量, 台風, 積雪などの気象因子は各年で変化するが, 過去におけるそれらのデータを考えた model を構成することは大変な仕事であり, 更に将来の気象を予測することは不可能である。しかし長期モデルにおいては気象の影響, 特に台風や早魃などを配慮しないわけにはいかない。そこでこの model では異常気象のみを取り上げ, それらを被害の形で捕えることにした。つまりあるランダム周期をもって,

特定樹種の枯損確率を高める (早魃など)。

上層木, 林縁木の折れ, 枯損の確率を高くする (台風など) ことにする。

- iii) 地形は平坦であるか, 若しくは南北方向のみに傾斜している。

これは受光量計算の場合に関係してくる。南北のみの傾斜を考えるのは単なる計算の便のみである。

- iv) 樹高の生長則

生長速度は樹種 (S), 受光量 (L), 庇圧量 (O) によって定まり, 生長式は樹種により

$$\Delta H/\Delta t = f(S, L, O)$$

又は

$$\Delta H/\Delta t = (H - H_0) f'(S, L, O)$$

のいずれかをとる。但し H_0 は樹種によって定まる常数であり、 f, f' いくつかの形で試算した。

v) 直径の生長

$$\Delta D/\Delta t = g(S, L, O)$$

$$\Delta D/\Delta t = k \Delta H/\Delta t$$

vi) 被害

ii) で述べたように被害は条件付きの確率変数とし、それぞれの場合に応じて次の値を与える。

$P(0)$	被害なしの確率
$P(1)$	1年間樹高生長を休む確率
$P(2)$	2年間樹高生長を休む確率
$P(3)$	3年間樹高生長を休む確率
$P(4)$	樹高生長が止る確率
$P(5)$	枯れる確率

vii) 枯損

樹木が次の条件を満たしたとき枯損する

被害が5のとき (vi)

$O > O_0$ (底圧による枯損)

$H > H_0$ (択伐)

樹木密度 $> N_0$ (間伐)

ランダム周期で一定樹種が全部枯れる。 (笹など)

(ここで O_0, H_0, N_0 は樹種その他で定まる定数)

viii) 稚樹の発生は

母樹の附近で条件付き(枯損木, 空間などのウエイト)ランダム(天然更新)

特定の場所(補植など)

5. シミュレーション・プログラムの基本構成と初期条件

森林生長の model を計算機によってシミュレートするためのプログラムの構成について述べる。プログラムを作る場合、あまり現実に忠実に考えていくと、シミュレーションの計算に夥しい時間がかかって実用性に乏しくなるし、又計算の便宜ばかり考えていると森林の生態を記述するという本来の目的が消え失せてしまうので、その折衷がここでは問題である。次にプログラム個々の部分について述べる。

i) 林分の形と大きさ

現実の林分の形や大きさはまちまちであるが計算の便のためには形は方形を基準とし、大きさも2の n 乗にしておくのが都合がよい。我々の場合は計算機がバイト・マシンであるために林分の最大長を 32767 cm (2 Bytes) とし、樹木座標は cm 単位で計算した。又大面積林分の場合は南北又は東西の林縁をそれぞれ結合したいいわゆるシリンダー状又はドーナツ状のモデルを作った。つまり南端の樹木の南隣りには北端の樹木と同一のものがあると考えた。

ii) 立木に関する数値

各樹木について樹種 (IS)、位置 (DX)、樹令 (IA)、樹高 ($H1$)、樹幹半径 (CR)、樹冠係数 (CK) を変数とする。ここで樹冠係数とは標準木における樹高と樹冠直径との比である。

iii) 生長に関する常数

各樹種毎に最も条件のよい場合の最大生長率 (PX) ともし必要ならば最悪条件下の最小生長率 (PN) を与える. 又 Mitscherlich の生長式を用いる場合は最高樹高 (HX) を定めておく.

iv) 林分の初期の状態

母樹となる木をシミュレーションに先だって予め林分に植えておくことであって, 各樹種毎に樹令, 樹高及びその位置 (X 座標) を与える. 本数は任意であるが最低 1 本は入れておかなければならない.

v) 稚樹の発生に関する常数

各樹種毎に母樹となり得る条件として, その最低樹令 (IAN), 最低樹高 (HMN) と更に種子を生ずる周期 (ランダム周期でもよい), 種子がひろがる広さ, 母樹 1 本当りの稚樹発生本数を与えておく.

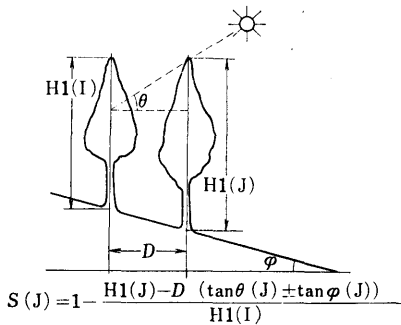
vi) 受光量の計算

受光量 (S) は隣接木の陰が樹冠の何パーセントを蔽うかを計算する. 今, I 番の立木の樹高を H1 (I) とする. その隣接木 J の樹高を H1 (J), IJ 間の距離を D とする. 又 I→J 方向の傾斜角を φ (J), その方位の太陽高を θ (J) とすれば, 隣接木 J が樹木工の上に落す影の比率は

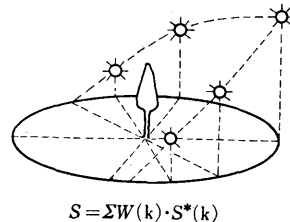
$$S(J) = 1 - \frac{H1(J) - D * (\tan \theta(J) \pm \tan \varphi(J))}{H1(I)}$$

となる. S (J) が負ならば 0, 又 1 より大ならば 1 とおく.

次に各方位別 (通常 8 又は 16 方位) の S (J) の最小値を SS (k) とし, 全方位の受光量 S を次式で求める. (第 4 図イ, ロ参照)



第 4 図 イ 受光量 (一方向)



第 4 図 ロ 受光量 (全方向)

$$S = \sum_k W(k) * SS(k)$$

但し, W (k) は k 方位の光量のウェイトである.

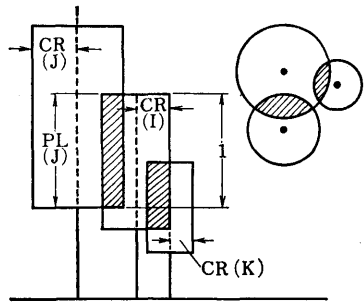
vii) 底圧度の計算

樹木 I が樹木 J から受ける底圧度 CV (J) は計算の便宜上樹冠を円筒と仮定して

$$CV(J) = ((D - CR(J))/CR(I) - 1.) * PL(J)$$

で計算する. (第 5 図参照)

ここで D は樹木間の距離, CR は樹冠半径, PL は重複部の樹冠長に対する比率である. 樹木 I の全底圧度 CV は



第5図 底圧度の計算

$$CV = \sum_j CV(J)$$

で CV が負であれば 0, 1 より大ならば 1 と置く.

viii) 乱数

これは稚樹の発生場所を定めるためと, 被害木(生長の休み及び停止と倒木)を決めるために用いる. 擬乱数は計算速度が遅くしかもその性質が悪いので特別に製作された電子的乱数発生機を利用して, 8 bits と 16 bits の乱数を必要数だけ作った.

ix) 樹高生長率の計算

まず前章の vi) 被害で生長の休みの「くじ」を引き当てた樹木は「くじ」の値に応じた回数だけ生長を止める.

それ以外の場合の生長率 P は樹種 (IS) と受光量 S の函数であるとし, 通常は次式を用いた.

$$P = (PX(IS) - PN(IS)) * S + PN(IS)$$

ここで PX は最大生長率, PN は最小生長率である.

x) 樹高生長の計算

1年後の樹高を $H2$ とすれば

$$H2(I) = H1(I) + P * (1 - H1(I)/HX(IS))$$

又は

$$H2(I) = H1(I) * (1 + P)$$

とする. 但し $HX(IS)$ は樹種 IS の最大樹高である.

xi) 枯損及び伐木

まず前章の vi) の被害木を取り除き, 更に

$$S(\text{受光量}) > SO(IS)$$

$$CV(\text{底圧量}) < CVO(IS)$$

の条件で枯損木を作った. 上式の右辺は樹種別に定めた定数である. 又, 各種の施業方式による伐木は樹高, 樹種, 樹木密度などを判定条件として樹木を除去すればよい.

6. アルゴリズム上の工夫

一般にコンピュータ・シミュレーションの計算は記憶容量, 計算時間共に大がかりなものになるのでその節約を考える必要がある. ビット処理を有効に利用すれば両者の大幅な軽減が見込まれるのであるが, そのためにはプログラムをアセンブラで組まなければならない. しかしこれは手間が大変であり, 内容の変更も不自由であるので我々の model の主要部分は計算能率をできるだけ配慮しながら FORTRAN で書き, 乱数, プロッターなどの一部をアセンブラで書いた.

プログラムを組むに当って,

- メモリー節約のためにできるだけ 2 Bytes の整数を使用する.
- 頻繁に使う部分には SUBROUTINE を用いない.
- 各部分での必要精度を配処して簡易計算を行う.
- 三角函数などの外部函数は使用しない.

などの方針をとった. 次にその具体的な例として方位と距離の計算をあげておく. 樹木 I からみた樹木 J の方位と IJ 間の距離を求める. 二本の樹木の座標をそれぞれ $(X(I), Y(I))$,

($X(J)$, $Y(J)$) としたときの8方向(北, 北北東間を1とし時計まわりで順次8まで)の方位を ID とする.

```

DX = X(J) - X(I)
DY = Y(J) - Y(I)
ID = 1
IF (DY, LT, DX) ID = ID + 1
IF (DY, LT, -DX) ID = ID + 1
IF (DY, GE, 0.) GO TO 10
ID = ID + 1
DY = -DY
10 IF (DX, GE, 0.) GO TO 20
ID = 9 - ID
DX = -DX
20 IF (DY, GE, DX) GO TO 50
R = DY / DX
IF (R, LE, 0.14) GO TO 30
IF (R, LE, 0.5) GO TO 40
D = DX * 0.806847 + DY * 0.597979
GO TO 100
30 D = DX
GO TO 100
40 D = DX * 0.958148 + DY * 0.302233
GO TO 100
50 R = DX / DY
IF (R, LE, 0.14) GO TO 60
IF (R, LE, 0.5) GO TO 70
D = DY * 0.806847 + DX * 0.597979
GO TO 100
60 D = DY
GO TO 100
70 D = DY * 0.958148 + DX * 0.302233
100 .....

```

通常二点間の距離 D は

$$D = \text{SQRT}(DX * DX + DY * DY)$$

で計算するが平方根の計算を判定と割算で代用した上記の方法の方が誤差は多い(最大1%以下)が平均的に早い。しかしその程度はコンパイラによって大幅に違うから、計算機を変えた場合はテスト・ランを行いその速度を調べる必要がある。

7. 二次元モデル

我々の森林生長モデルのコンピュータ・シミュレーションに要する計算時間は HITAC 8700 で3時間から5時間を要する。これはかなりの量なのでパラメータの値をいろいろ変えて何回も計算を繰り返すことは困難である。そこで、初期条件の検討やパラメータ決定などの計算用として二次元モデルを作った。このモデルは樹木が南北方向の一つの直線上にのみある

とすべく簡単なもので、計算時間も20分から30分であり、その内容は次のようなものである。

i) 林分

林分は南北方向に延びる水平長 32767 cm の直線であって、地形は水平又は南北方向の一定傾斜である。

ii) 樹木

樹種の数 は 8 種とし、樹冠の形は矩形で、樹冠の幅と樹高との比は樹種毎に一定とする。

iii) 太陽高

太陽の位置は常に 45 度として受光量を計算する。

vi) 稚樹の発生

母樹の前後の樹高の 2 倍の幅の間に一定数（初期条件で決める）だけ発生する。

v) 出力

50 年毎の林相を X-Y プロッターで出力する。

統計数理研究所

附記

森林生長のシミュレーション結果とその現地調査との対比は第 2 報に述べる。又、シミュレーション・プログラムの詳細は Computer Science Monographs (The Institute of Mathematical Statistics) に発表する予定である。

参 考 文 献

- [1] 篠崎吉郎 (1961) 植物生長の Logistic 理論
- [2] 鈴木太七 (1971) 「林学におけるマルコフ・プロセスの応用」 統計数理研究所シンポジウム記事 3
- [3] 依田恭二 (1971) 森林の生態学
- [4] 高田和彦, 小林正吾, 阿部信行 (1969) 「北海道の天然林におけるエゾマツ, トドマツ単木の胸高断面積, 生長量について」北海道林業試験場報告 第 7 号
- [5] 札幌営林局 (1969) 空沼天然林施業実験林報 (I)
- [6] 札幌営林局 (1973) 空沼天然林施業実験林報 (II, III)
- [7] 札幌営林局 (1966) 漸伐作業における天然更新補助作業の方法に関する調査 (第 1 報), (1967) 同 (第 2 報), (1968) 同 (第 3 報)
- [8] 札幌営林局 (1972) 森林施業の方法に関する調査
- [9] 坪井睦定 (1969) 「天然林施業のための数量化法について」昭和 44 年度長期委託研修報告書
- [10] 青木尊重, 宮崎安貞, 今田盛生 (1965) 「天然更新によるミズナラ林施業に関する研究」九州大学演習林研究経過報告
- [11] 藤村重任 (1932) 千本スギ植林に関する調査

```
1      PROGRAM ECOSIM
2 C    UNI-DIMENSIONAL FOREST MODEL (1973/10)
3      DIMENSION H1(2000),H2(2000),DX(2000),IS(2000)
4      DIMENSION PX(8),PN(8),HX(8),NEW(8)
5 C    INITIAL CONDITION
6 C      NUMBER OF REGENERATION
7      DATA NS/3/,NEW/20,30,50/
8 C      MAXIMUM HIGHT
9      DATA HX/35.,30.,25./
10 C     GROWTH (MAX, AND MIN.)
11     DATA PX/0.5,0.6,0.7/,PN/0.2,0.1,0.0/
12 C     NATIVE TREES
13     DATA H1/10.,10.,10./,DX/10.,20.,30./
14     DATA IS/2,1,3/
15     DATA H2/10.,10.,10./
16 C
17     WRITE(6,500) (I,I=1,NS)
18     500 FORMAT(1H0,'SPECIES',13X,8I10)
19     WRITE(6,510) (HX(I),I=1,NS)
20     510 FORMAT(1H0,'MAXIMUM HEIGHT (M)',2X,8F10,0)
21     WRITE(6,520) (PX(I),I=1,NS)
22     520 FORMAT(1H0,'GROWTH (M) PER YEAR'/1H ,5X,'MAX,',11X,8F10,1)
23     WRITE(6,530) (PN(I),I=1,NS)
24     530 FORMAT(1H ,5X,'MIN.',11X,8F10,1)
25     WRITE(6,540) (NEW(I),I=1,NS)
26     540 FORMAT(1H0,'REGENERATION'/1H ,2X,'TREES PER YEAR',4X,8I10)
27     CALL PLTCK
28     CALL PLOTS (8HJUKEI ,0.0)
29     CALL PLOT (0.,25.,-3)
30     NC=3
31     YE=0,
32     CALL ITIZU (DX,IS,H1,NC,YE)
33     DO 10 ID=1,6
34     DO 11 IY=1,50
35     YE=YE+1,
36     N=NC
37     DO 14 I=1,NC
38     IF(H1(I).LT,10.) GO TO 14
39     K=IS(I)
40     L=NEW(K)
41     X=L
42     D=H1(I)*4,
43     DS=DX(I)-D
44     IF(DS,LT,0.) DS=0,
45     DE=DX(I)+D
46     IF(DE.GT,250.) DE=250,
47     X=(DE-DS)/X
48     DO 15 J=1,L
49     N=N+1
50     IF(N.GT,2000) GO TO 600
51     H1(N)=0,5
52     IS(N)=K
53     P=J-1
54     DX(N)=DS+P*X
55     IF(DX(N).LE,250.) GO TO 15
56     DX(N)=250,
57     GO TO 14
58     15 CONTINUE
```

```

59      14 CONTINUE
60      N1=N-1
61      DO 1700 I=1,N1
62      W=DX(I)
63      LM=I
64      DO 1800 J=I,N
65      IF(W,LE,DX(J)) GO TO 1800
66      W=DX(J)
67      LM=J
68  1800 CONTINUE
69      IF(LM,EQ,I) GO TO 1700
70      DX(LM)=DX(I)
71      DX(I)=W
72      W=H1(LM)
73      H1(LM)=H1(I)
74      H1(I)=W
75      IW=IS(LM)
76      IS(LM)=IS(I)
77      IS(I)=IW
78  1700 CONTINUE
79      DO 12 I=1,N
80      VB=0,
81      SF=1,
82      VF=0,
83      DO 100 J=1,N
84      K=I-J
85      IF(K,EQ,0) GO TO 150
86      D=DX(I)-DX(K)
87      IF(D,GT,10.) GO TO 150
88      IF(H1(K),LE,H1(I)*0.5) GO TO 100
89      V=1,+(H1(K)-5.*D)/H1(I)
90      IF(V,GT,VB) VB=V
91  100 CONTINUE
92  150 DO 160 J=1,N
93      K=I+J
94      IF(K,GT,N) GO TO 200
95      D=DX(K)-DX(I)
96      IF(D,GT,15.) GO TO 200
97      IF(H1(K),LE,H1(I)*0.5) GO TO 160
98      S=1,-(H1(K)-0.6*D)/H1(I)
99      IF(S,LT,SF) SF=S
100     V=1,+(H1(K)-5.*D)/H1(I)
101     IF(V,GT,VF) VF=V
102  160 CONTINUE
103  200 IF(SF,LT,0.) SF=0,
104     V=VB+VF
105     L=IS(I)
106     IF(L,EQ,1,AND,V,GT,0.5) GO TO 210
107     IF(L,EQ,2,AND,V,GT,0.4) GO TO 210
108     IF(L,EQ,3,AND,V,GT,0.3) GO TO 210
109     P=(PX(L)-PN(L))*SF+PN(L)
110     H2(I)=H1(I)+P*(1,-H1(I)/HX(L))
111     GO TO 12
112  210 H2(I)=0,
113  12 CONTINUE
114     NC=0
115     DO 13 I=1,N
116     IF(H2(I),EQ,0,) GO TO 13

```



```

117      NC=NC+1
118      H1(NC)=H2(I)
119      DX(NC)=DX(I)
120      IS(NC)=IS(I)
121      13 CONTINUE
122      11 CONTINUE
123      N=NC
124      CALL ITIZU (DX,IS,H1,N,YE)
125      10 CONTINUE
126      GO TO 700
127      600 NYE=YE
128      WRITE(6,610) N,NYE
129      610 FORMAT(/////1H0,2I10)
130      700 CALL PLOT (0.,-25.,-3)
131      CALL PLOTE
132      CALL PLTCE
133      STOP
134      END

135      SUBROUTINE ITIZU (D,IS,H,N,YE)
136      DIMENSION D(N),IS(N),H(N),FX(10,3),FY(10,3)
137      DATA FX/0.05,-0.75,0.5,-0.5,0.8,0.7,-0.5,0.8,-0.95,0.05,
138      #0.05,-0.85,0.1,0.3,0.5,0.6,0.2,0.2,-0.95,0.05,
139      #0.05,-0.85,-0.2,0.2,0.6,0.7,0.5,0.1,-0.95,0.05/
140      DATA FY/1.4,-0.2,1.1,-0.2,2.4,-1.9,0.,-1.4,0.2,-1.4,
141      #1.4,0.4,0.8,1.1,0.8,-0.5,-1.,-1.1,-0.5,-1.4,
142      #1.4,0.5,0.4,1.7,0.5,-0.1,-0.6,-1.9,-0.5,-1.4/
143      CALL NUMBER (3.5,-1,3,0,3,YE,270.,-1)
144      CALL SYMBOL (3.5,-2.5,0,3,4HYEAR,270.,4)
145      CALL PLOT (4.,0.,-3)
146      DO 400 I=1,N
147      X=0,
148      FH=H(I)/45,
149      LS=IS(I)
150      IF(H(I).LT,1.) GO TO 400
151      IF(H(I).LT,5.) GO TO 350
152      Y=0,1*FH-D(I)*0,1
153      CALL PLOT (X,Y,2)
154      DO 330 K=1,10
155      X=X+FY(K,LS)*FH
156      Y=Y-FX(K,LS)*FH
157      330 CALL PLOT (X,Y,2)
158      GO TO 400
159      350 Y=-D(I)*0,1
160      FH=H(I)*0,1
161      CALL PLOT (X,Y,2)
162      CALL PLOT (FH,Y,2)
163      CALL PLOT (X,Y,2)
164      400 CONTINUE
165      CALL PLOT (0.,-25.,2)
166      RETURN
167      END

```

An Example of the output of simulation

