

## 第1章 緒 論

### § 1 - 1 まえがき

林分生長モデルをテーマにした1973年のIUFROのJoint meeting (S 4.01, S 6.02)においてMUNRO<sup>54)</sup>(1973)は、それまでの林分生長モデルの研究動向について報告している。その内容はすでに木梨<sup>27)</sup>(1974)によって紹介されているが、そこでMUNRO<sup>54)</sup>は、モデリングの原理面から林分生長モデルを3種に大別し、それぞれの特徴について論述を加えている。

その分類の第1は、単木をモデル構成の基礎単位とするもので、立木間の距離がパラメーターとして与えられる。各立木は、それぞれの空間座標によって位置づけられ、そのシミュレーションにはこの立木位置を必要とするものである。NEWNHAM<sup>38)</sup>(1964)を始めとするLEE<sup>44)</sup>(1967)、MITCHELL<sup>52)</sup>(1969)、LIN<sup>46)</sup>(1970)、BELLA<sup>5)</sup>(1971)、ARNEY<sup>4)</sup>(1972)などによる研究がこの林分生長モデルの範ちゅうに属するとしている。これらの林分生長モデルには、林木は相互に競争し合って生正しており、ある立木の受ける競争量はその立木競争圏(competition circle)の重複度に比例するという共通した概念が取り入れられている。

第2の林分生長モデルは、草木をモデル構成の基礎単位とすることは、第1のモデルと同様であるパラメーターとして立木間の距離を必要としない。立木の生長は、単木あるいは直径階ごとに数式によって記述される。また、立木の生長や枯死現象について、第1の場合のような共通した概念は見当らない。このモデルには、経験的な回帰式によるタイプから、より複雑な確率過程モデルまで含まれるとし、前者の例としてGOULDING<sup>16)</sup>(1972)、STAGE<sup>89)</sup>(1973)、などの研究による林分生長モデルを、また、後者にはDRESS<sup>12)</sup>(1968)、PIENNAR and TURNBULL<sup>76)</sup>(1973)、CLUTTER and ALLISON<sup>10)</sup>(1973)などによるモデルをあげている。

第3の林分生長モデルは、林分をモデル構成の基礎単位とする原理に立つもので、個々の立木についての情報を必要としない。収穫表や林分生長量を表わす回帰式などがこの範ちゅうのモデルに該当するとしている。

以上のMUNRO<sup>54)</sup>による分類をモデル構成の手法の面からみると、第1のモデルは、電子計算機を利用するシミュレーション・モデルといえる。第2のモデルは、決定論あるいは確率過程論などに基づくいわゆる数学的モデルである。また、第3のモデルは林分収穫表まで含まれており、いわば広義的林分生長モデルを指すものと理解され、統計的方法がその中心的な手法として使われる。

広義的林分生長モデルは別として、個々の林分生長のモデル化を目的とする場合に、そのモデルの構成手法として、シミュレーション・モデルと数学的モデルは、それぞれの長所、短所をもっている、一般的に数学的モデルは、一貫した理論によって構成され、生長にともなう森林の動態を明確に記述する。森林の生長要因については、生態学や森林立地学の分野でかなりの範囲にわたって定量的な解析が進んでいる。しかし、それぞれの要因に対する森林の有機的な反応を総合して、森林の生長現象を定量的に再現できる水準に達しているとはいえない。こうした背景のもとで、林分構造の細部にわたる情報を必要とする施業効果の判定という実際的要求に応じうる数学的モデルの構成は容易ではない。

一方、シミュレーションを手法とするモデルでは、森林の生態学的要因の作用について知りえた法則性を比較的容易にモデルに組み込むことができる。その過程で理論的な面に不満が残っても、試行錯誤を重ねることによって、適確に現実現象を記述する機能をもたせることができるであろう。

本研究においては、上で述べた観点からシミュレーションを手法とし、林分生長を単木生長の総和として実現す

### § 1-2 林分生長モデルの研究小史

#### § 1 - 2 林分生長モデルの研究小史

シミュレーションの意義や手法については、すでに多くの専門書が出版されている。また、林学での応用面では、高田<sup>96)</sup>(1967c)やNEWNHAM<sup>61)</sup>(1968)による解説、あるいは高田<sup>(94)1967a, (95)b, (97)1968, (98)1969, (99)1970, (100)1971, (101)1972a, (102)b, (103)1974a, (104)b)</sup>の一連の研究が報告されているのでその論述を省き、ここでは直接シミュレーションを手法とする林分生長モデルに限定して、その研究の発展小史をたどることにした。

電子計算機を利用して林分の生長をシミュレーションする方法は、NEWNHAM<sup>58)</sup>(1964)のDouglasfir林分を対象にした研究によって、その端緒が与えられたといえる。このシミュレーション・モデルでは、林分内の単木の直径生長は、その樹冠を隣接木と接するまで疎開木(open-grown tree)と同等であり、樹冠が接した後は、競争度(competition index)の上昇にともなって減少すると仮定されている。競争度として、対象木から植栽間隔の8倍の範囲内の距離にある全立木との樹冠の交差角(intersection angle)の和が用いられた。シミュレーションは、225本の方形の立木配置から出発し、5年間隔で単木ごとに競争効果に応じた量を疎開木の直径生長量から差し引いて、対象木の直径に加算するという方法で進められた。このような手順によって、4種の植栽間隔についてのシミュレーションが試みられた。また、いく通りかの枯損木の発生率を見込み、その発生分布が2項分布にしたがうものとして、林分生長への影響がテストされた。このように、林分生長を個々の立木の生長の総和として追跡するという発想は、電子計算機の発達という背景に基づくものと思われるが、以降の林分生長モデル研究の方向づけがこの研究で示されてたといえよう。

上のDouglasfirの林分生長モデルは、つづいて若干の修正力加えられてLodgepole pineに適用された(NEWNHAM and SMITH<sup>59)</sup>1964)。このモデルでは、新たに単木ごとの樹高が推定され、立木幹材積の算定機能も加えられた。

上のNEWNHAM<sup>58)</sup>の研究に先んじて高田<sup>92)</sup>(1961)は、スギの人工林を対象とし、林分の樹高生長を林内における立木の受光環境から説明するモデルを提示している。このモデルでは、対象木の梢端と近接木の梢端との角度を求めこれを受光角と呼び、その大小によってそれぞれの立木の樹高生長量が定まるものとしている。また、受光角がある一定値以下になると、その立木は枯死するという条件が取り入れられている。

つづいて高田<sup>93)</sup>(1963)は、立木の幹材積生長が同化量と呼吸量の差によって定まるという生態学的根拠に基づいて、天然林を対象にした林分生長のモデル化を試みている。この2つの生長モデルによるシミュレーションは、いずれも電動計算機を使用して実行された単純なものであったが、林分の生長をその生態学的要因から説明しようとする点は、以後の林分生長モデルの研究に1つの示唆を与えたものといえよう。

NEWNHAM<sup>58)</sup>の林分生長モデルは、LEE<sup>44)</sup>(1967)によって引継がれLodgepole pine林分の立木密度と出材される丸太の経済的関係の検討に利用された。

つづいてLIN<sup>46)</sup>(1970)は、立木間の競争関係を測る尺度として生育空間指数(growing-space index, GSI)を提案した。この基本的な考え方は、NEWNHAM<sup>58)</sup>の交差角と同様なものであるが、対象木からみた競争木の胸高直径への視角を用いたものである。その上限(無競争)は、疎開木が互いに樹冠を接し合ったときの視角 $\theta_1$ をとり、下限は、立木が接近して競争のために枯死寸前に達したときの視角 $\theta_2$ とした。

対象木から隣接する競争木への視角 $\theta$ は、両者の直径によって重みづけ

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{\frac{SD_2}{2}}{L} \cdot \frac{(SD_1 + SD_2)}{2SD_1}$$

ここで、 $SD_1$ 、 $SD_2$ はそれぞれ対象木、競争木の胸高直径、 $L$ は両立木間によって求められた。視角 $\theta$ は、対象木を原点とする平面座標の4象限でそれぞれ測定され、各象限においてGSIを次によって定める。

$$\begin{array}{ll}
<_1 (= 2.15^\circ \text{ の場合}) & \text{GSI} = 25 \\
<_2 (= 5.25^\circ) \text{ " } & \text{GSI} = 0 \\
1 & 2 \quad \text{"} & \text{GSI} = \frac{25}{5.25^\circ - 2.15^\circ} (q - 2.15^\circ)
\end{array}$$

4象限の GSI を合計して対象木の GSI とするものである。Western hemlock の立木密度試験や間伐試験林の測定資源を用いて、GSIの外に地位指数、年齢、胸高直径およびこれらを組合せた7項目を独立変数とし、重回帰式による2年間の直径生長量の予測式が組み立てられた。予測された2年間の直径生長量を期首の胸高直径に加算し、これを用いて次の2年間の直径生長量を求めるという手順を繰返して、伐期齢までの林分生長がシミュレートされた。以上の林分生長モデルは、いずれも立木の樹冠の大きさと関連した単木の競争度合いといった因子を基礎にするものであったが、MITCHELL<sup>52)</sup>(1969)は、white spruceの一斉林を対象にやや趣を異にする林分生長モデルを構成した。その構成は、次のような内容からなっている。

- (1) 力枝高より上の樹冠部の枝の連年伸長量は、樹高の連年生長量の函数である。したがって、(2) 樹冠の半径生長量は、樹高生長量から推定される。(3) 単木の樹高は、優勢木の樹高と樹冠比(その立木の樹冠幅/無競争状態で達する樹冠幅)の函数である。(4)  $\ln(\text{樹冠比}) - 1.75$ の範囲にある立木は、50%の確率で被圧木となる。(5) 立木の幹の直径と幹材積は、シミュレートされた樹冠幅と樹高から求められる。(6) 説明されない変動については、モンテ・カル口法によって処理する。

以上のように MITCHELL<sup>52)</sup>のモデルは、まず単木ごとに樹高生長を求め、そのときの樹高長を推定して、その樹冠長に応じた幹の肥大生長を、求めるという手順によってシミュレートされてゆく。このようなモデル構造から、立木の幹材積生長は、葉量によって左右されるという生態学的な知見を基にしたいわば生態的モデルともいべき性格がうかがえる。この点はNEWNHAM<sup>58)</sup>流のモデルとは別な観点に立った林分生長モデルといえよう。

単木を基礎単位とする林分生長モデルの場合に、立木間の競争関係をどのようにモデル化するかがもっとも重要な問題となる。BELLA<sup>5)</sup>(1971)は、OPIE<sup>74)</sup>(1968)の提示した立木の影響圏(zone of influence)の考え方を発展させ、林分内における各立木の競争圏(competitive influence-zone)を立木を中心とした次式によって与えられる半径Rの円として定義した。すなわち

$$R = (CR) \cdot (FC)$$

ここで、CRは疎開木の樹冠半径、FCは補正係数(adjusting factor)

さらに、隣接木の競争圏との重複度(competitive influence-zone overlap, CIO)を

$$CIO_i = \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{ZO_{ij}}{ZA_i} \right) \left\{ \frac{D_j}{D_i} \right\}^{EX} \right]$$

ここで、 $CIO_i$ はi対象木の重複度、nは対象木の競争圏に重複している競争木の本数、 $ZO_{ij}$ はi対象木とj競争木の重複面積、 $ZA_i$ はi対象木の競争圏の面積、 $D_j/D_i$ はそれぞれi対象木とjは競争木の胸高直径、EXは指数

によって定義し、立木の競争度合いの尺度とした。パラメーターEXとFCの値は、CIOを独立変数とする直径生長量の重回帰式の残差を最小にするように反復計算によって推定する方法がとられた。この競争モデルは、Douglas fir, Jack pine, Red pine, Aspen, および Eucalypt の一斉同齡林に適用され、直径生長への競争効果の説明に有効であることが示された。

以上の林分生長モデルは、高田<sup>93)</sup>(1963)の研究を除いて、森林としてもっとも単純な同齡の一斉林を対象にしたものであったが、坪井<sup>105)</sup>(1969)は、より複雑な北海道の針広混交の天然林の生長をシミュレーションするモデルの構成を試みている。このモデルは、母樹から種子が林床に落下し、稚樹の発生する過程を確率現象としてとらえ、以後は樹高生長の函数として幹の直径を生長させようとするものである。上の試みは、方法論の提示にとどまっ

たが、石田<sup>22)</sup>(1974)はさらに各種の天然林を対象に、その生態的調査資料を基とし森林の生長過程を実現する統計的モデルを構成した。単木の生長をモデル構成の基礎単位とすることは、上述した各モデルと同様であるが森林の重要な生態学的要因である受光量および競争関係の優劣を表わす被圧度が、単木ごとに定量的に求められるように仕込まれている。各立木の樹高生長は、樹種ごとにこれらの要因の函数として与えられる。さらに被害による生長阻害作用が確率的に考慮されている。このモデルは収穫量の予測というよりは天然林の成立過程の説明を主な狙いとしたものである。このモデルによるシミュレーションの結果は、森林のサクセッションの面からいくつかの興味ある結果がえられている。

BOTKINら<sup>7)</sup>(1972)も、アメリカ北東部の Sugar maple, Beech, Birch, Red spruce, Balsam fir などが優占する天然林を対象に土壌、気温、受光量などを要因として取り入れ、樹種ごとにその特性に応じたパラメータをもつ生長曲線を適用する構造の生長モデルを構成した。このモデルのシミュレーションによって、この地帯の海拔高と森林の樹種構成との関係を明らかに説明する結果がえられた。

さらに EKら<sup>13)</sup>(1974)は、同齢の一斉林および異齢の混交林の生長と更新をシミュレートするコンピューター・モデル(FOREST)を作成した。モデル構造の細部については明らかではないが、上の石田<sup>22)</sup>や BOTKIN<sup>7)</sup>らのモデルと同様に、生態学的要因と樹種特性との関係を組み込んだ生態的モデルと思われる。

NEWNHAM<sup>5)</sup>(1964)以来の単木を基礎単位とする林分生長モデルの研究においては、林分内における立木間の競争関係をどのようにモデル化するかが主要な課題とされてきた。この中で、NEWNHAM<sup>5)</sup>(1964)の交差角で示された考え方が1つの流れとして引継がれてきている。すなわち、林分内でそれぞれの立木を中心とし、その大きさに比列した拡大円を考え、円の重なり度合いによって、立木の生長に影響を及ぼす競争効果を測るという方法の発展である。このような研究動向は BITTERLICH<sup>6)</sup>(1947)によって提示された定角測定法の理論の発展がその背景となって促進されてきている。OPIE<sup>74)</sup>(1968)の zone-count 法から BELLA<sup>5)</sup>(1971)による重複度への発展は、その流れの典型とみることができる。この流れをくむ立木間の競争モデルは、生態学的な説明に欠ける点はあるが、測定理論の明解性と測定法の簡易性という点で優れており、今後さらに研究が進められるものと思われる。

一方、MITCHELL<sup>52)</sup>(1969)の研究は、立木の生長の直接的な要因である樹冠の拡張関係から林分の動態をモデル化しようと試みたもので、林分の収穫量の予測にとどまらず、生態的モデルとしての性格が強い。さらに、より複雑な天然林を対象にし、その成立過程のモデル化の研究へと発展するに及んで、MITCHELL<sup>52)</sup>にみられる生態学的な立場は一層鮮明となり、直接、土壌、気温という環境要因に対する立木の反応をモデル化する方向に進んできている。

しかしながら、MITCHELL<sup>52)</sup>のモデルの例にみられるように、例えば直接樹冠の拡張をモデル化しながらも、その幹部の肥大生長量については、経験的な推定式によって求めるにとどまっている。林分生長モデルの意義は、ある条件の基で林分の生長を一般的に説明し、実現することにある。始めに述べたように、ミクロ的な林分生長モデルは、その構成に際して理論的な面で不十分でも、現実現象に適合した結果がえられることを特徴とする。とはいえ、ここで概観してきた研究小史を通じて、モデル構成上の理論的根拠の希薄性が感じられる。

より一般化され、また説得力のあるモデルを構成するには、ミクロ的な林分生長モデルといえども、そこに一貫した理論的根拠をもつことが必須の条件といえよう。このことは、本研究においても重要な課題の1つである。

### § 1 - 3 単木の生育空間と疎開木の定義

前節でみてきたように、NEWNHAM<sup>5)</sup>(1964)のモデルを始めとする一斉同齢林分を対象にする林分生長モデルでは、いずれも単木の生育空間(growing space)について両端の状態が存在するという仮定に立っている。その最

大値は、十分に発達した樹冠をもつ疎開木(open-grown tree)の空間であり、最小値は、生長が停止した枯死寸前の立木の樹冠空間で示されるとしている。逆にいえば、疎開木の生育空間は、立木が最大の生長を遂げるに必要な空間であり、そのような意味から最大影響圏(maximal zone of influence)(OPIE<sup>74</sup>1968)とも呼ばれている。閉鎖林分では、近接する立木の最大影響圏が重なり合い、立地要因のうばい合いが生じている。そのため、この重複面積が大きいほど立木の生育空間は狭ばまり、隣接木との競争が激しくなり、遂には下限の生育空間となり、立木は枯死に至るといった考えが基本となっている。

立木の生育空間の基準として疎開木の生育空間の利用は、KRAJICEK ら<sup>(41)1957, (42)1961</sup>によって提示されたものである。この研究で Oak, Hickory および Norway spruce の3樹種について疎開木の胸高直径と樹冠幅の間に地位・年齢にかかわらず、それぞれ直線的な関係が成立することが確かめられた。そのような疎開木の樹冠断面積の1エーカーに対する百分率を最大樹冠面積(maximum crown area, MCA)と呼んだ。さらに現実林分の直径分布に見合うMCAの総和を取り、この値が林分の競争度の指標となるとして、これを樹冠競争因子(crown competition factor, CCF)と名付けている。

OPIE<sup>74</sup>(1968)の最大影響圏は、上のKRAJICEK<sup>(41)</sup>らの考えを単木の生育空間に適用したものである。しかし、その影響圏の範囲については、Eucalyptの更新林分における上木として生育している老雌木の観察から、立木を中心とし、ほぼ円形をなし、地位に逆比例するという直観的な判断を提示するにとどまっている。

LIN<sup>(46)</sup>(1970)の生育空間指数は、疎開木の樹冠投影面積をそのまま最大影響圏と考えて求められている。これに対して BELLA<sup>(5)</sup>(1971)は、最大影響圏を樹種によって変化すると考えて、疎開木の樹冠半径に、樹種によって

定まる補正係数を乗じた競争半径(influence or competition radius)を提示した。固定試験林の直径生長量の分析の結果、Aspen, Jack pine, Douglas firの3樹種の補正係数の値は、ほぼ3.0で、Red pineは1.5前後であることを見いだしている。すなわち、いずれの樹種も疎開木の樹冠が、隣接木と接する前に競争効果が直径生長に作用していることを示している。

一方、KEISTER<sup>(26)</sup>(1972)は、立木の競争圏の範囲は、その立木の大きさに比例するとして、その半径Kを

$$K=hc/m$$

ここで、hは総樹高、cは樹冠半径、mは樹冠高

と定めた。さらに、この半径の範囲内における重複面積の総和を取り、これと対象木の競争圏の面積との比を、競争指数(competition index)と定義した。いままでみてきたように、単木のうける競争度を表わすため、種々の方法が提案され、また試みられている。多くの場合、競争度を測る基

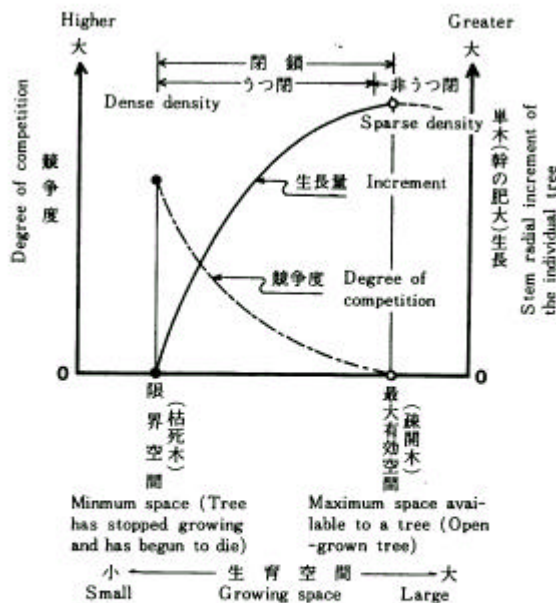


図-1.1 同じ生育段階の林分における単木の生育空間・競争度・生長の関係を表わす概念図  
Fig.1.1 Schematic representation showing relationships among growing space, degree of competition and stem radial increment of the individual tree in even-aged stand at the same growth stage.

準として疎開木の生育空間が利用されていざし、その範囲は明確なものでなく、また疎開木の明確な定義も見当らない。以後本研究での疎開木の利用に先だて、まず疎開木に対して、はっきりとした定義を与えておかなければならない。

一般的に、疎開木は無競争状態で生育した立木という意味で用いられているが、これでは野中に立つ孤立木のように無限に近い占有面積をもつ立木も含まれることになる。植物体の葉量が多くなると、葉の同化生産量より呼吸による消耗が勝りその総生産量は低下するといわれている(MONSI and SAEKI<sup>53</sup>1953)。またある程度以上の疎林になると、森林自体による環境への緩衝作用が低下し、風やその他の原因によって立木は生理的な不均律を生じ、正常な生長が阻害されることも考えられる。すなわち、ある限界以上の生育空間では、立木の生長とくに幹の肥大生長は、むしろ低下するものと考えられる。このような観点から、立木の生長とくに幹の肥大生長は、競争状態から脱した直後の生育空間で最大となると考えてよいであろう。このような理想的な生育空間を考え、これを最大有効空間と呼ぶことにする。もし、立木が全生育段階を通じて、常に最大有効空間のもとで生育してきたとすれば、その立木は、最大の肥大生長を遂げることになる。ここでは、そのような理想的な生育空間で生長してきた立木を考えて、これを疎開木と呼ぶことにする。

上で定めた最大有効空間は、先に述べてきた交差角(NEWNHAM<sup>58</sup>1964)、生長空間指数(LIN<sup>46</sup>1970)、重複度(BELLA<sup>5</sup>1971)および競争指数(KEISTER<sup>26</sup>1972)などの指標で、いずれも0の場合と概念的に一致するものである。このような考え方から、疎開木は常に最大有効空間のもとで生長を遂げてきた立木と定義づけられる。

以上の検討結果を総合して、単木の生育空間とその単木の受ける競争度合および生長との関係を概念的に示したものが図 - 1.1 である。

図 - 1.1 は立木の幹部の肥大生長を対象にするもので、定義によって、最大有効空間をもつ疎開木は最大の生長を遂げる。同じ立木で生育空間が狭ばれば、競争の度合いは強まり、生長は低下する。さらに生育空間が狭ばれば、立木は生長を停止して枯死するに至る。この状態に達したときの生育空間を限界空間と呼ぶことにする。

図 - 1.1 は、以後のカラマツ人工林の林分生長モデルを構成する上の基礎的概念を示したもので、次章の研究で、この模式図の定量化を進めてゆくものである。