

針広混交林の動態に関する基礎的研究

佐野真琴⁽¹⁾

SANO Makoto: Fundamental Study on Dynamics of Mixed Forest

要 旨：本研究はトドマツ・エゾマツを主とする針広混交天然林の成長を解析し、成長モデルを作成することにより、針広混交林の動態の把握を目的とした。使用した資料は、旧旭川営林局天然林固定成長量試験地と旧札幌営林局簾舞天然林施業実験林のものである。はじめに、針広混交林の成長解析を行った。進界量は個体数や胸高断面積合計などの林分構成因子と弱い負の相関しか認められなかった。直径階ごとの枯死量では、直径階 21cm 以下の枯死量はその直径階とそれより大きい直径階の個体数、合計個体数と関係が強く、直径階 27 ~ 45cm の枯死量はいずれとも関係は弱い。直径階 51cm 以上の枯死量はその直径階前後の直径階の個体数と関係がやや強かった。径級別平均直径成長量と各径級を組み合わせた個体数合計の相関関係では、最も強い負の相関を示したのは小径級平均直径成長量と大~特大径級の合計個体数、それに次いで強い負の相関を示したのが中径級平均直径成長量と大~特大径級の合計個体数である。遷移行列を利用した成長モデルによる動態の把握には2つのタイプのモデルを使用した。第1は遷移行列に進界量を含むモデルで、行列の固有値を計算し直径分布の型で分類した林分タイプと比較した。これより、林分タイプは異なるが、固有値の面から見ると同じ遷移傾向にあると判断されるものがあつた。第2は遷移行列に進界量を含まないモデルで、これにより直径・樹高分布の予測を行った。また、この遷移行列要素の推定方法の検討も行った。トドマツ稚樹のモデルによる予測では、150cm 以上の直径階では予測値と実測値はほぼ一致しているが、130cm 階以下ではかなり低く計算された。稚樹と成木の成長モデルによる予測では、伐採が行われた林分において、伐採前の利用可能径級の本数に達するまで60年近く必要であることが分かった。また、モデルに利用される遷移行列の要素推定では、進界量について説明変数を樹高層別の胸高断面積合計とする重回帰式を用い、進級率について説明変数を胸高直径とその直径階より上の胸高断面積合計とするロジスティック回帰分析を用い算出した。これより直径分布を予測した結果、進界量の予測適合度がやや低いことから6cm 階で差があるものの、他の直径階ではおおむね良好な適合を示した。最後に、単木ごとの時系列データを必要とせず、期首と期末の直径分布から直径遷移行列の推定を行う方法を検討した。この結果、2つの仮定を制約とすることにより、精度よく推定できることがわかった。

目 次

1 研究の背景と目的	2
2 研究の方法と調査成績	3
2.1 研究小史	3
2.2 研究方法	4
2.3 調査成績 (資料)	4
3 針広混交林の成長解析	6
3.1 旭川地方天然林の成長	6
3.2 トドマツ稚樹の動態	12
4 針広混交林の成長予測モデル	13

4.1 成長予測モデルの構成	13
4.2 モデル A による天然林の動態	16
4.3 モデル B による天然林の成長予測	19
5 総合的考察	29
謝辞	30
引用文献	30
Summary	33

1 研究の背景と目的

北海道の森林帯は、水平的には黒松内低地帯を境として、その西南部は夏緑広葉樹林帯からなり、東北部は針広混交林帯に含まれる。また、針広混交林帯を垂直的に見ると温度指数45度線の±100m範囲で、その上部は亜寒帯に移行し、通常亜寒帯性針葉樹林が発達する。その針葉樹林の上部限界は一般に森林限界を示す(柳沢, 1971)。針広混交林帯ではトドマツ、エゾマツ、ミズナラ、カンバ類、シナノキ等を主とする森林が発達しており、これは北海道を代表する林相であると言える。

北海道の森林、特に、面積・蓄積とも60%近くを占める国有林の森林の取り扱いについてみると、当初の森林施業法は主に択伐作業が実行されていた。これは、森林の伐採が開拓政策の一つとして考えられていたこと、立木価格が低いため伐採する樹種・径級が限られていたこと、自然的環境条件が厳しく人工造林が困難であったことなどが理由としてあげられる。したがって、このような理由から始まった択伐作業であるため、その実行上はいわゆる良木選伐であり、跡地は自然の成育に任せていた。しかし、大正末期になるとこのような掠奪伐採の実態の分析が進められ択伐作業を正常な形に戻す努力がなされるようになった。すなわち、選木に対する注意と更新補助作業による集約的な択伐作業である。戦後は、戦時中の無計画な伐採による森林荒廃の回復作業と皆伐作業中心の考え方が主流となったため、人工造林による森林施業が重要な位置を占めるようになった。さらに、昭和30年代になると高度成長期による木材の不足などに起因する林力増強計画などにより拡大造林時代を迎えることになる(脇元, 1969)。

しかし、昭和40年代後半、政策的に外材の輸入の促進が図られたことと、森林のもつ公益的機能を確保するという社会的な要請から「新たな森林施業」が採用された。これによると皆伐面積の制限や保護樹帯の設定など拡大造林を大きく規制する方向となった。さらに、木材価格の低迷が続いたことにより「昭和62年度に講ずべき措置を中心とする行政改革の実施方針について」のなかで、事業運営の改善、合理化を推進するためそれぞれの森林の機能に着目した適切な施業を推進することとし、天然林施業の展開、複層林造成等の一層の推進を図ることにより森林施業の合理化及び投資の効率化を図るとされた。これにより、現在の国有林における北海道内の新植面積は、大幅に減少している。

また、世界的に見ると1992年の国連地球環境開発会議(地球サミット)以降「持続可能な森林経営」への取り組みが始まった。この取り組みには、モントリオールグループによる基準指標づくり、森林管理協議会(FSC)などによる森林認証制度、カナダを中心とした運動であるモデルフォレストがあり、

いずれも森林のもつ多様な機能の重要性からその持続的な管理経営を目標としている。

このような状況から、北海道を代表する天然林である針広混交林においても多様な森林機能を総合発揮可能とする持続的な管理経営が重要で、このためには、針広混交林の動態の定量的把握、予測が必要である。本研究では、針広混交林の動態を定量的に解析するとともに、遷移行列による予測手法について検討する。

2 研究の方法と調査成績

2.1 研究小史

針広混交林に関するこれまでの研究は、個別林分における植生、成長、林分構造に関する報告が多く、動態を長期間のデータから説明するような報告は少ない。しかし、天然林施業に関し、択伐施業効果や天然更新補助作業の効果については多数報告されている。

針広混交林の植生に関しては、北海道大学の雨竜演習林において群落生態的な違いから森林型を分類し、森林型ごとに種を列挙した報告(館脇, 1932)、天塩演習林において地域ごとに代表的な植生について記載した報告(館脇, 1928)、林型について論じた報告(今井, 1936; 中島 巖, 1970)、羊蹄山の垂直的植物分布についての報告(長谷川, 1962)、北海道の森林について垂直的限界について考察した報告(林, 1927)、樹種の分布と樹種間の親和性について論じた報告(酒井, 1979)、組成と構造についての報告(ISHIZUKA, 1986; ISHIZUKA, 1989)、空間的・時間的分布について述べた報告(太田, 1970; 太田 1971; 太田, 1973; 太田, 1976)などがある。また、植物地理学的な視点から、汎針広混交林帯を定義した報告(館脇, 1955)、汎針広混交林帯が北海道の極相林として成立することをサクセッションのパターンからみた報告(渡辺, 1970)、花粉分析により植生の変遷を追った報告(五十嵐, 1987)などがある。

成長・林分構造に関しては、エゾマツ・トドマツ天然林の生産力を相対成長の面から評価した報告(四出井, 1961)、天然林の成長を胸高直径成長量・材積成長量・枯損量などの基礎的な項目について調べた報告(青柳, 1968; 前崎, 1971)、更新や稚幼樹の成長についての報告(石田, 1991)、林冠下の個体の成長についての報告(石塚, 1989)、成長量と蓄積の関係について述べた報告(大貫, 1966; 大貫, 1968)、あるいは択伐林分における成長を観察した報告(石橋聡, 1993; 高島, 1972)、択伐林の施業計画に関する報告(山本博一, 1990)などがある。

これらを歴史的にみれば、研究の初期段階では博物学的な植生の種の記載や、直径分布など林分の構造を捉える研究が多く、しだいに、林分の組成と構造あるいは動態に関する報告が多くなってきた。また、林分の成長や更新に関しては古くから、施業との関連で関心が高かったものと思われ、今日まで類似の研究は多い。しかし、これらの研究を通して、針広混交林の動態は非常に複雑なため、総合的な研究は少なく、どちらかというと事例研究の要素が強い。

本研究では、動態の予測に遷移行列による成長モデルを使用した。遷移行列は、LESLIE が動物個体群へ適用した報告(LESLIE, 1945)が初期のものとして有名である。これは、個体群を年齢により階級に分け、時間の変化に伴い階級別個体数がどのように変化するかを遷移行列で表したものである。その後 LEFKOVITCH は、LESLIE のモデルをサイズ構造を表すモデルへ応用した(LEFKOVITCH, 1965)。このことから、年齢構造の

変化を表す行列を LESLIE 行列, サイズ構造の変化を表す行列を LEFKOVITCH 行列と呼んでいる。

森林に関して遷移行列を使用したのは USHER で, 遷移行列に遷移行列自身の固有値を導入したモデルを作成し択伐林に応用した (USHER, 1969)。MANDERS は山火事による被害の多い林分の遷移行列を作成し, 山火事がない場合, 個体数は増加することを示した (MANDERS, 1987)。また, OSHO は南西ナイジェリアの熱帯雨林に遷移行列を適用し, 多量の更新あるいは直径成長の増加により林分の安定は維持されたとした (OSHO, 1991)。また, BUONGIORNO は線形計画法と遷移行列を利用し経済価値を最大にするようなモデルを作成した (BUONGIORNO, 1980)。

日本においては, 鈴木が直径遷移を確率過程として捉え同齢単純林に適用し (鈴木, 1966; 鈴木, 1967a; 鈴木, 1967b, 鈴木, 1967c), 吉田らは東京大学北海道演習林の資料へ鈴木のモデルを当てはめ直径分布を推定した (吉田, 1968)。南雲は択伐林の施業モデルへ遷移行列を適用し森林の安定状態を算出した (南雲, 1972)。石橋は遷移行列を利用したフィードバック型林分成長シミュレーションモデルを提案している (石橋整司, 1989)。

遷移行列を利用した研究は多岐に渡っているが, 遷移行列の推定には固定試験地のデータを利用したものも多く, これを他の地域へ応用するためには遷移行列推定手法が必要となる。本研究においては, 最後にこの点を考慮した推定手法 (佐野, 1990b; 佐野, 1992) を検討する。

2.2 研究方法

本研究では, 針広混交林の動態について, 成長解析, 成長予測モデルの点から考察する。

成長解析では, 施業が行われていない固定試験地の資料を用い, 進界量・枯死量・直径成長量など基礎的な項目について解析する。これらの項目は, 針広混交林の動態に強く関与する要因である。

成長予測モデルでは, 遷移行列を使用したモデルを提案する。最初に, 遷移行列の固有値による針広混交林の動態を直径分布との関連から解析する。次に, 遷移行列を利用した稚樹の成長モデル, 稚樹から成木に至るまでを対象とした成長モデルを作成する。さらに, 遷移行列の要素に関する推定法として, 林分構造などを説明変数として行列の要素を推定するロジスティックモデルによる方法と線形計画法により単木データがない場合の遷移行列の推定方法を提案する。

2.3 調査成績 (資料)

本研究では, 旧旭川営林局において行われていた天然生林固定成長量試験による資料 (旭川営林局, 1973) と旧林業試験場北海道支場 (現: 森林総合研究所 北海道支所) と旧札幌営林局 (現: 北海道森林管理局) が共同調査を行っている空沼天然林施業実験林の資料 (札幌営林局技術開発委員会, 1969) を利用する。

2.3.1 天然生林固定成長量試験

旧旭川営林局が, 天然生林の成長状態, すなわち伐採量算定の根拠となる林分成長量や成長率, 枯損量および枯損率を把握し, 森林施業の基礎とするため, 1950 年～1956 年にかけて, 地域別・林相別・蓄積別に標準地 1 ha を基準とする固定試験地 90 か所を設け, データを収集した。その後, 林野整備・林道新設, 台風被害等により調査不能箇所が生じたため, これらを廃止し, 最終的に 57 か所となった。

試験地の配置を事業区別にみると, 大雪・富良野の事業区を除き, 各事業区に 1～5 か所設置されて

いる。また、各試験地は立木密度の高い林分に設けられている場合が多く、初回調査の結果から成長量は高いものとなっている。

試験地の林況は、通常みられる樹種として針葉樹ではトドマツ・エゾマツのほか、一部にアカエゾマツを交え、広葉樹ではミズナラ・カンバ類・ニレ類・イタヤ類・シナノキ・ホウノキ・ハンノキ・ハリギリ・ヤチダモ・キハダ・ナナカマド等で、種類の多い試験地では30種類に及び、少ないところでも十数種を数える。林床は、沢沿いにオオブキ・エゾイラクサ・エゾニウ等の大型草本が優勢であるほかは、ほとんどがチシマザサ・クマイザサで被われている。

調査方法は、胸高直径6 cm以上の立木に対して、毎木調査を行った。胸高直径は、直径巻尺によりmm単位で測定した。調査木には一連番号を記入した調査札を取り付け、胸高位置には赤ペンキを帯状に塗布し明示した。なお、調査間隔は5年を基本とし、調査回数は4～5回である。

本試験地のデータは、後述の「3.1 旭川地方天然林の成長」, 「4.2 モデルAによる天然林の動態」, 「4.3.3 多変量解析による遷移行列の推定」, 「4.3.4 線形計画法による遷移行列の推定」に使用した。

2.3.2 空沼天然林施業実験林

1967年、林野庁は研究課題として「トドマツ、エゾマツを主とする天然林施業の基礎的試験」を提案した。この目的は、北海道の天然林施業に対する作業体系の資料を得ることにあり、1968年に技術開発課題として示された。天然林施業法の確立は、投資効果より見た天然林施業における更新の成否、伐木集材作業方式と更新の関係を検討することにより達成されたと考えられた。

空沼天然林施業実験林は、上述の研究課題提案と同時に、天然林施業実験林の候補地として選定された。この際、長期に渡る基礎的な試験項目は旧林業試験場北海道支場が、現地導入のための短期試験は旧札幌営林局が担当することとなった。

空沼天然林施業実験林は、旧定山溪営林署、東篠舞国有林1128～1130林班の面積約120 haである。この実験林内の第9号区画にある固定調査区は、施業が行われていない保残区(1.08 ha)、1968年に径級伐採を行った漸伐区(0.90 ha)がある。漸伐区で行われた径級伐採とは、漸伐の予備伐、下種伐を省略したもので、後伐のみをトドマツでは30 cm以上、エゾマツ・広葉樹では40 cm以上の径級へ実行したものである。

両調査区の林況(漸伐区においては伐採前の林況)は、針葉樹では、トドマツ・エゾマツを主体とし、一部アカエゾマツが存在し、広葉樹ではダケカンバ・ウダイカンバ・ハリギリ・シナノキが成育している。

林床植生は、クマイザサを主体とし、フッキソウ・ゴトウヅル・ツタウルシなどが繁茂している。

調査方法は、胸高直径5 cm以上の立木に対し、毎木調査を行った。胸高直径は、輪尺により2 mm括約で測定した。調査木には、赤ペンキで一連番号と、胸高位置を明示した。なお、調査は1968年から7年間隔で行っている(漸伐区では伐採前の調査も実行した)。

漸伐区では、立木調査のほかに更新調査も行った。調査プロットのサイズは4 m×6 mで、合計10か所に設置した。各プロットはさらに1 m×1 mの方形区に分割され、方形区ごとに稚樹の種類と高さを測定した。測定期間は1969年からの7年間と1989年で、1989年の調査は高さ50 cm以上の個体を対象とした。

本試験地のデータは、後述の「3.2 トドマツ稚樹の動態」, 「4.3.1 稚樹の遷移行列」, 「4.3.2 稚樹と成木の遷移行列」に使用した。

3 針広混交林の成長解析

3.1 旭川地方天然林の成長

本節では、針広混交林の成長因子の内、進界量・枯死量・径級別直径成長量を解析し、それらと直径分布との関係を考察する。

資料は、天然林固定成長量試験のデータのうち調査期間内に施業されず、5 年間隔の期間成長データが 4 セット以上得られる試験地を抽出して使用した。この結果 15 ヶ所の試験地が選出され、各試験地から 3 成長期間のデータが得られるため、延べ 45 データが得られた。これらのデータは、自己相関が低いと考えられたため同一レベルのデータとみなした。初回調査年のデータから計算した林分の概況は（表 1）の通りである。これより、各林分の胸高断面積合計は 6.03 m² から 42.81 m² の範囲にあり、胸高断面積合計による針葉樹の割合は 0 % から 80.78 % となっている。

3.1.1 進界量・枯死量

各成長期間の 1 ha 当り進界本数・枯死本数を進界量・枯死量とし、頻度分布図を作成した（図 1）。進界量は、15（本／ha）以下の 2 つの階に集中し、最低 0、最高 97 で、平均は 18.3、変動係数は 1.08 となっている。

進界量は種子量や林床植生と密接にかかわっていると考えられるが、これらは個体数や胸高断面積合計などの林分構成因子とも関係が深いことから、進界量と林分構成因子との相関を調べた（表 2）。その結果、これらの間には弱い負の相関しか認められなかった。北海道の天然林における更新タイプは主として大面積一斉更新タイプ（山本進一，1984）で、林分構成因子が進界量を規制するというよりはササ

Table 1 試験地の概況
Summary of plots

試験地番号 Plot No.	面積 (ha) Area (ha)	個体数 (本) Number of trees	胸高断面積合計 (m ²) Sum of basal area	針葉樹率 (%) Softwood ratio	広葉樹率 (%) Hardwood ratio
3	1.00	257	24.00	80.78	19.22
14	1.00	229	23.78	16.05	83.95
18	1.00	392	16.71	43.73	56.27
22	1.00	381	18.97	36.72	63.28
23	1.00	427	23.30	39.23	60.77
26	1.00	341	22.25	30.57	69.43
29	1.00	115	6.03	0.00	100.00
33	1.00	431	22.65	7.63	92.37
34	1.00	969	42.81	62.62	37.38
39	1.00	338	25.66	43.41	56.59
43	1.00	413	36.70	64.37	35.63
45	1.00	308	22.39	45.84	54.16
47	1.00	396	27.36	8.03	91.97
51	1.00	301	26.63	30.65	69.35
53	1.00	465	21.58	52.29	47.71

の一斉枯死や風倒など林床や樹冠の大きな変化により発生した更新木が主たる進界木となると考えられている。ここでは林床植生に関するデータがないためこれ以上の解析はできないが、この結果もその考え方に適合しているといえる。

枯死量は、7.5(本/ha)の階にピークを持ち、最低枯死量0、最高は45で、平均は14.0、変動係数は0.82となっている。枯死の原因は、枯死したときの直径の大小により異なると考えられるため、直径階別枯死量と林分構成因子の関係を調べた(表3)。このとき利用した直径階は、最小直径階の下限6cm、直径階の幅6cm、直径階数は11で、各直径階を中央値で表すことにする。表3より、強い相関がある組み合わせは、直径階15cmの枯死量と直径階15, 21, 27cmの個体数および合計の個体数である。このことと1%の水準で有意であるもの(表中の**)から次のようなことが考えられる。直径階21cm以下の枯死量はその直径階と39cm以下の直径階の個体数、合計個体数と関係が強い。直径階27~45cmの枯死量は、いずれとも関係は弱い。直径階51cm以上の枯死量はその直径階前後の直径階の個体数と関係がやや強い。これより直径階21cm以下の個体の枯死は上部近傍の個体との競争のため、すでに林冠を構成し樹高にそれほど差がない直径階51cm以上の個体の枯死は周囲の密度に弱い影響をうけたためと推察された。

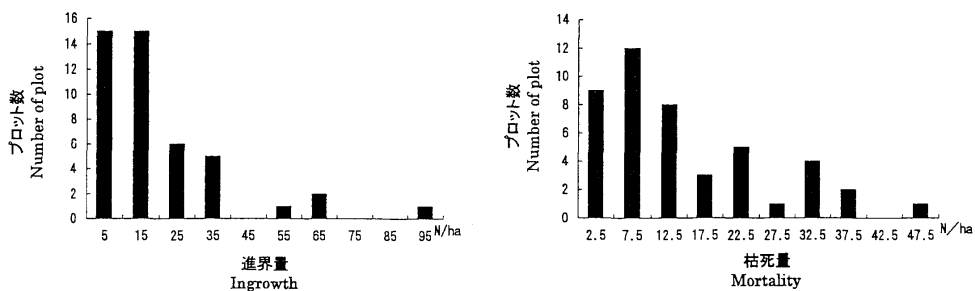


Fig. 1 進界量・枯死量の頻度分布
Distribution of ingrowths and mortality

Table 2 進界量と林分構成因子の相関関係
Correlation coefficient between ingrowth and some stand characteristics

	相関係数 Correlation coefficient
個体数 Number of trees	-0.08
胸高断面積合計 Sum of basal area	-0.28
針葉樹胸高断面積合計 Sum of basal area on softwood	-0.18
広葉樹胸高断面積合計 Sum of basal area on hardwood	-0.16

Table 3 枯死量と林分構成因子の相関関係

Correlation coefficient between mortality and some stand characteristics

	直径階 (cm) Diameter class	個体数 Number of trees							
		9	15	21	27	33	39	45	51
枯死量 Mortality	9	0.40**	0.46**	0.46**	0.42**	0.33*	0.28	0.30*	-0.04
	15	0.25	0.80**	0.91**	0.79**	0.69**	0.55**	0.12	-0.28
	21	0.21	0.36*	0.49**	0.40**	0.35*	0.33*	-0.13	-0.31*
	27	0.10	0.08	0.12	0.18	0.18	0.12	-0.25	-0.34*
	33	0.18	0.08	0.18	0.20	0.22	0.14	-0.14	-0.20
	39	0.02	-0.05	0.10	0.07	0.03	0.16	-0.16	-0.06
	45	-0.01	0.28	0.39**	0.30*	0.25	0.35*	0.01	0.02
	51	0.06	-0.15	-0.12	-0.17	-0.17	-0.11	0.06	0.29
	57	0.15	-0.07	-0.15	-0.15	-0.23	-0.19	-0.09	0.40**
	63	-0.14	-0.22	-0.20	-0.23	-0.33*	-0.21	-0.17	0.06
	69	0.13	-0.10	-0.17	-0.14	-0.26	-0.16	0.41**	0.42**
	全体 Sum of trees	0.34*	0.50**	0.59**	0.53**	0.43**	0.38**	0.07	-0.17

	直径階 (cm) Diameter class (cm)	個体数 Number of trees				胸高断面積合計 Sum of basal area		
		57	63	69	全 体 Sum of trees	針葉樹 Softwood	広葉樹 Hardwood	合 計 Total
枯死量 Mortality	9	0.11	0.23	0.05	0.53**	0.35*	0.19	0.48**
	15	-0.26	-0.11	-0.35*	0.83**	0.55**	0.01	0.55**
	21	-0.23	-0.14	-0.21	0.42**	0.22	-0.02	0.21
	27	-0.43**	-0.22	-0.26	0.10	-0.01	-0.15	-0.11
	33	-0.25	-0.07	-0.07	0.17	0.04	0.02	0.05
	39	-0.10	-0.10	0.02	0.04	0.07	-0.07	0.02
	45	0.08	-0.13	-0.05	0.32*	0.35*	-0.08	0.30*
	51	0.42**	0.07	0.16	-0.10	0.08	-0.07	0.03
	57	0.39**	0.09	0.10	-0.08	-0.11	0.13	-0.02
	63	0.15	0.07	-0.13	-0.27	-0.08	-0.27	-0.26
	69	0.36*	0.43**	0.47**	-0.06	0.11	0.14	0.20
	全体 Sum of trees	-0.11	0.01	-0.13	0.59**	0.39**	0.04	0.42**

*:P<0.05, **:P<0.01

3.1.2 直径階別直径成長量

直径階別直径成長量の解析は、上述の直径階では直径階が大きくなると1階級あたりの個体数が少なくなることから、直径階をまとめた方がよいと考えられた。そこで、直径階別平均直径成長量間の相関をとって(表4)、相関の高い直径階を統合することにした。各直径階の平均直径成長量はそれぞれ直上あるいは直下の直径階と強い相関を示すが、直径階57以上ではどの階とも相関が低い。この結果から、4つの径級区分(小径級9~21cm, 中径級27~33cm, 大径級39~51cm, 特大径級57~69cm)を作成し、この区分ごとに径級別平均直径成長量を計算した。

Table 4 直径別直径成長量間の相関関係

Correlation coefficient between diameter growth in each diameter class

直径階 Diameter class	9	15	21	27	33	39	45	51	57	63	69
9	1.00										
15	0.87**	1.00									
21	0.77**	0.87**	1.00								
27	0.63**	0.69**	0.89**	1.00							
33	0.68**	0.78**	0.83**	0.81**	1.00						
39	0.37*	0.51**	0.64**	0.66**	0.71**	1.00					
45	0.14	0.32*	0.42**	0.48**	0.57**	0.76**	1.00				
51	0.20	0.33*	0.37*	0.35*	0.56**	0.53**	0.71**	1.00			
57	0.10	0.29	0.20	0.15	0.47**	0.52**	0.58**	0.49**	1.00		
63	-0.35*	-0.27	-0.18	-0.15	-0.03	0.20	0.34*	0.28	0.59**	1.00	
69	-0.06	-0.06	0.08	0.22	0.24	0.28	0.31	0.19	0.45**	0.55**	1.00

*:P<0.05, **:P<0.01

Table 5 径級別平均直径成長量と径級個体数合計との相関関係

Correlation coefficient between diameter growth and number of trees in some size (diameter) classes

個体数合計 Sum of trees	平均直径成長量 Mean diameter growth			
	小径級 Small	中径級 Middle	大径級 Large	特大径級 Extra
小～中径級 Small-Middle	-0.32*	-0.23	-0.34*	-0.33*
小～大径級 Small-Large	-0.38*	-0.28	-0.37*	-0.34*
小～特大径級 Small-Extra	-0.42**	-0.32*	-0.39**	-0.34*
中～大径級 Middle-Large	-0.46**	-0.35*	-0.37*	-0.36*
中～特大径級 Middle-Extra	-0.56**	-0.43**	-0.42**	-0.36*
大～特大径級 Large-Extra	-0.72**	-0.63**	-0.44**	-0.17

*:P<0.05, **:P<0.01

各林分の径級別平均直径成長量と各径級を組み合わせた個体数合計の相関関係を調べた(表5)。最も強い負の相関を示したのは小径級平均直径成長量と大～特大径級の合計個体数、それに次いで強い負の相関を示したのが中径級平均直径成長量と大～特大径級の合計個体数である。小・中径級の直径成長が大～特大径級の合計個体数と負の相関が強いという結果になったことは、小径級の直径成長には被陰の程度(上木の個体数)が大きく影響することを示していると考えられる。これと反対に、すでに上層木になっている特大径級の直径成長は、被陰の影響が少ないため各径級の個体数との相関は小さいと考えられる。

次に、径級別平均直径成長量の示すパターンを検討した。石橋（石橋整司，1990）によると直径階別直径成長量の平均は、①大径木ほど大きな成長を示す「右上がりのパターン」と②中径級に成長のピークを持つ「山型のパターン」がみられるとしている。本報で用いた資料から各径級と平均成長量の関係を調べると、「凸型」、「非凸型」というように区分するのが妥当であると考えられた。「凸型」の径級別平均直径成長をする林分は容易に判別することができるが、それ以外の林分では、凹型、右上がり型、左上がり型、水平型など多様な型を示すからである。また、同一林分でも調査期間により異なるタイプとなる場合があることが分かった。それぞれ代表的な径級別平均成長量の関係を示した（図2）。

3.2.3 直径分布と進界量・枯死量・径級別平均直径成長量

各林分の成長期間ごとに直径階別本数分布を作成したところ、大きく分けて3つのタイプがあることが分かった。第一のタイプ（8林分）は、直径階9～21cmに分布の最大値を持つL型の分布（タイプⅠ）、第二のタイプ（4林分）は、直径階15～33cmになだらかな凸部を持つ分布（タイプⅡ）、第三のタイプ（3林分）は、はっきりとした凸部を示さず、なだらかな右下がりの分布（タイプⅢ）である。分布のタイプ分けは、各林分の直径分布を同一スケールで図化し、視覚的に決定した。それぞれ典型的な林分の直径階別直径分布を示した（図3）。

これらの林分タイプ別に進界量・枯死量を示した（表6）。タイプⅠ林分は、進界量が1番多く枯死量は2番目に多い。小径級の個体数が多い林分タイプであることから、他と比較して個体の交代が頻繁に起きている林分と言える。タイプⅡ林分は、進界量が1番少なく枯死量が1番多い。林分全体の個体数が減少していく傾向がある林分と言える。タイプⅢ林分は進界量が2番目で枯死量は1番少ない。タイ

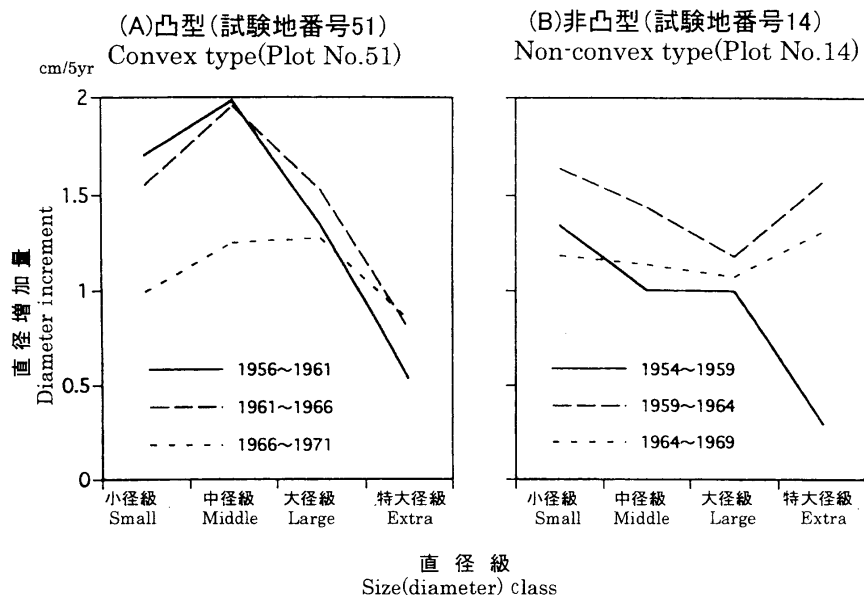


Fig. 2 径級別平均直径生長量
Mean diameter increment in each diameter class

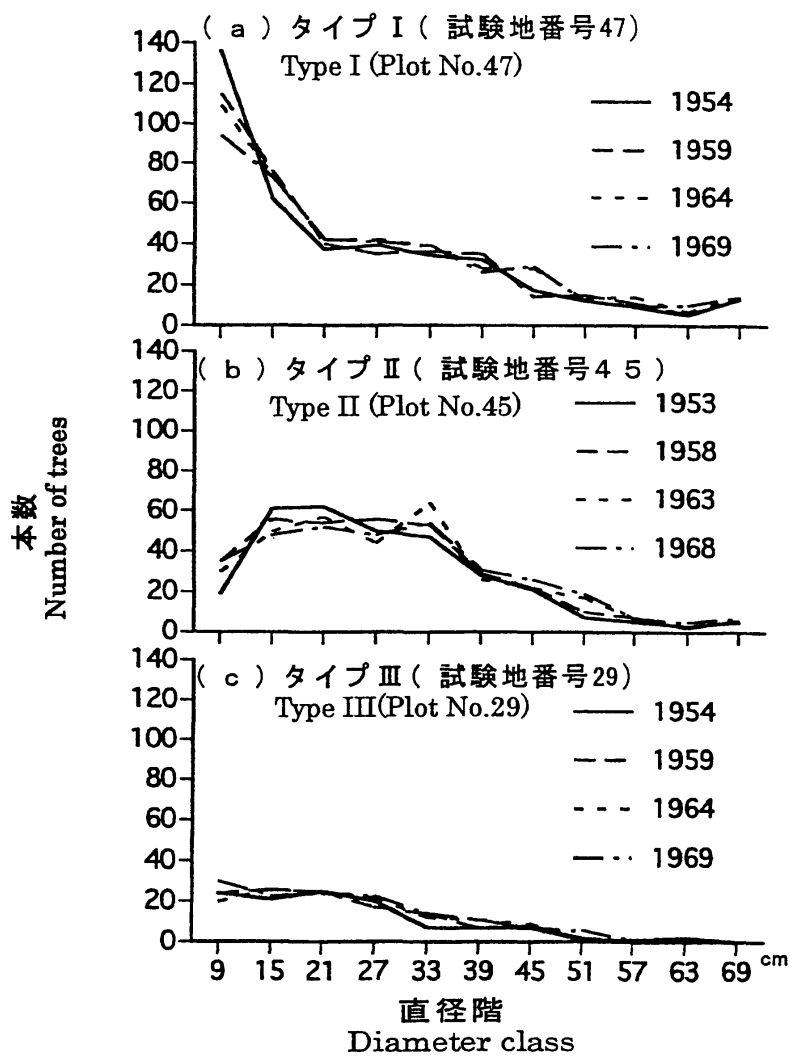


Fig. 3 直径階別本数分布
Diameter distribution in 3 forest types

Table 6 林分タイプ別進界量・枯死量
Ingrowth and mortality in 3 forest types

林分タイプ Stand type	平均進界量 (本/ha) Mean number of ingrowth	変動係数 Coefficient of variation	平均枯死量 (本/ha) Mean number of mortality	変動係数 Coefficient of variation
タイプ I Type I	23.00	1.03	14.25	0.77
タイプ II Type II	10.25	1.03	18.25	0.79
タイプ III Type III	16.67	0.94	7.67	0.59

ブⅠ林分と比較して個体の置き替わりが少ない林分と言える。

林分のタイプと径級別平均直径の型の関係を示した(図4)。タイプⅠ林分は、径級別平均直径成長量が緩やかな「凸型」を示す林分が多い。また、「非凸型」を示す林分では水平型を示す林分が多い。このため、各径級の成長は直径階ごとに変わらなく全体が同じように進級する林分であるといえる。タイプⅡ林分は、径級別平均直径成長量が基本的に「凸型」を示す林分で、中径級の個体が他の径級の個体より相対的に早く進級する。タイプⅢ型の林分は、径級別平均直径成長量が「非凸型」で、右下がり型を示す林分が多く小～中径級の個体が他の径級の個体より早く進級する。

3.2 トドマツ稚樹の動態

本節では針広混交林の動態を考える際、重要な位置を占めるトドマツ稚樹の動態を把握する(佐野, 1990a)。

資料は、空沼天然林施業実験林9号区画の漸伐区のものである。

各調査年毎の樹高階別本数分布を示した(図5)。年の経過とともにそのピークは右側へシフトし、L形分布から正規分布に近いような形へと変化している。これは、発生年別の稚樹の生存曲線(図6)の発生経過より1973年以降新しい稚樹の発生がみられず、この傾向が1989年に至っても変わらないためだと考えられる。このことより、伐採が更新に強く影響したことが推測され、その後は前生稚樹と更新稚樹だけによって個体群が形成されたとみられる。従って、このような天然林における更新は伐採や風害などの比較的大きな環境の変化が必要となるのかも知れない。

次に、7年間の樹高階別枯死数(図7)では、枯死した稚樹はほとんどが10cm階に属し90cm階では0となっている。この図より更新に関して安全な樹高を推測すると極端に枯死数が少なくなっている50cm階あたりが妥当と考えられ、その下のしきい値である40cmとすることができる。また、更新に安全な本数についてみると、図6より初期の稚樹減少率は71・72・73年発生の何れもほぼ同じ様な傾きを示し、この減少傾向が3年程度続いても負にならない本数と仮定し、各発生年のデータから平均して

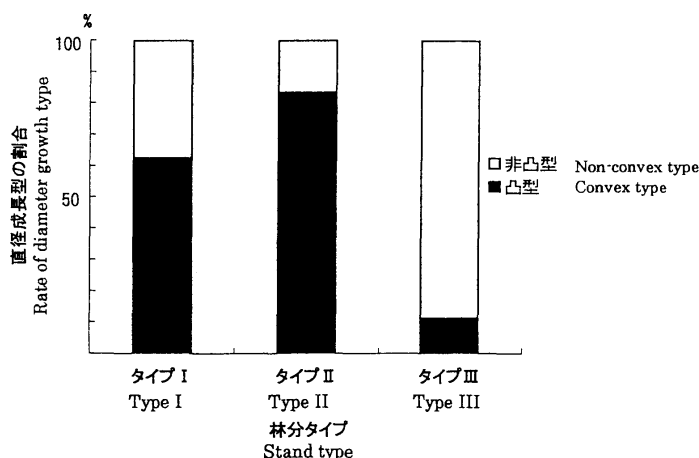


Fig. 4 林分タイプ別直径成長型の割合
Rate of diameter increment type in 3 forest types

求めると 100m^2 当たり 51 本となった。

1970 年発生の稚樹で 1988 年まで枯死しなかったものすべて (23 本) の樹高データをプロットした (図 8)。中心線の当てはめには 1988 年時点で著しく大きな値を示した 3 本のデータを除き、原点を通る場合の Richards 関数

$$W = A \cdot [1 - \exp(-kt)]^{1/(1-m)}$$

を用いた。計算には伊藤の SSFTR/86 を使用した (伊藤, 1985)。ここで, W , t は樹高と年齢であり m , k , A はデータによって決まる定数である。中心線の傾向から, トドマツ稚樹の成長パターンは, 3 年生頃まではやや緩慢に, その後勾配を増している。これは, 先にも述べたように稚樹の生存曲線の変曲点とも一致し, 生存率と樹高曲線のターニングポイントが同じと言う興味深い結果となった。

4 針広混交林の成長予測モデル

4.1 成長予測モデルの構成

遷移行列を利用した成長モデル作成の際, 進界量の取り扱いにより 2 つの方法がある。

4.1.1 モデル A (遷移行列に進界量を含める場合)

直径分布の階級数を m , 期首の各階級の個体数を $n_{t,1}, \dots, n_{t,m}$ 期末の各階級の個体数を $n_{t+1,1}, \dots, n_{t+1,m}$ 更新に関する個体の直径が直径階 3 以上とすると, 成長モデルは次のようになる。

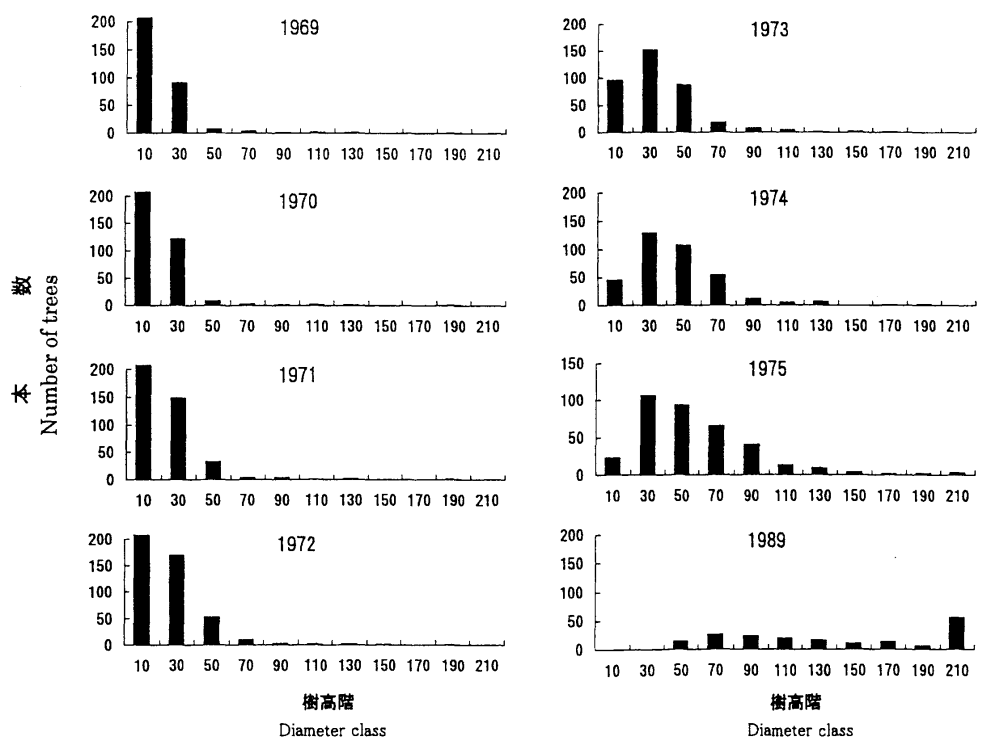


Fig. 5 樹高階別本数分布の変遷
Change of height distribution

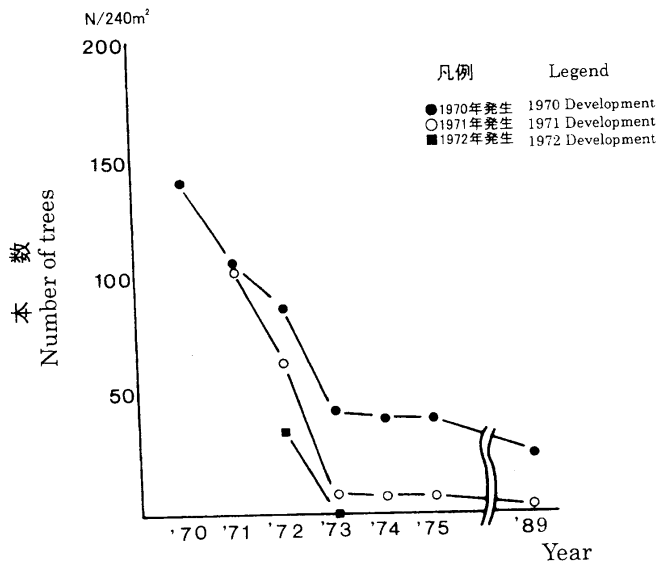


Fig. 6 発生年別の稚樹の生存曲線
Survival curve of seedling in each development year

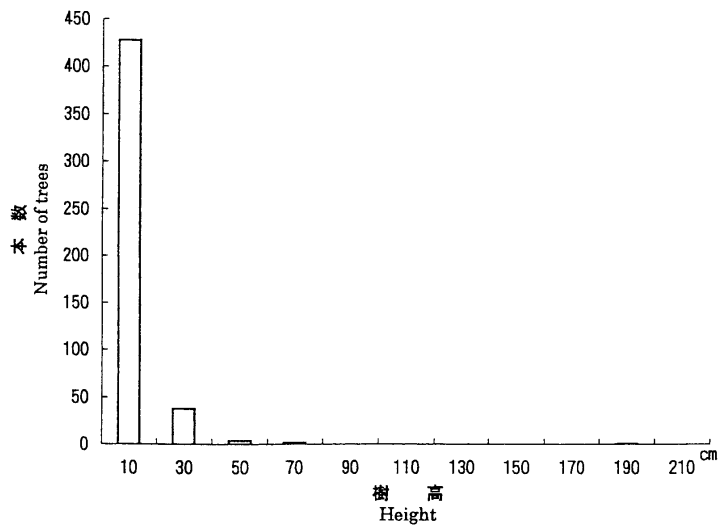


Fig. 7 7年間の樹高階別枯死数
Mortality in each height class between 7 years

$$n_{t+1} = T \times n_t$$

$$T = \begin{pmatrix} a_1 & 0 & c_3 & c_4 & c_{m-1} & c_m \\ b_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & a_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{m-1} & a_m \end{pmatrix}$$

$$n_{t+1} = \begin{pmatrix} n_{t+1,1} \\ n_{t+1,2} \\ \vdots \\ n_{t+1,m} \end{pmatrix} \quad n_t = \begin{pmatrix} n_{t,1} \\ n_{t,2} \\ \vdots \\ n_{t,m} \end{pmatrix}$$

ここで、 n_t が期首の直径分布ベクトル、 n_{t+1} が期末の直径分布ベクトル、 T が遷移行列を表す。遷移行列 T の要素は、 a_m が原級にとどまる比率、 b_{m-1} が1階級進級する比率、 c_m は、各階級の1個体当たりの進界量である。

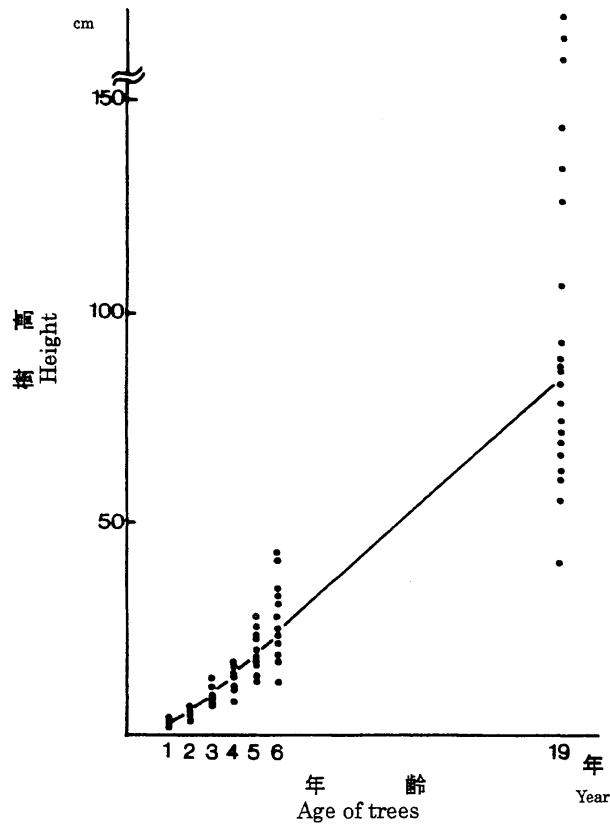


Fig. 8 稚樹の成長経過
Growth curve of seedling

c_m についてみると、たとえば直径階 3 (c_3) に属する個体数を y_3 、直径階 3 に属する個体が生産した進界量を x_3 とすると、

$$c_3 = x_3 / y_3$$

である。

また、直径階の幅を適切にとることにより、2 階級以上進級する場合を考慮の対象から外すことができる。

4.1.2 モデル B (遷移行列に進界量を含めない場合)

期首と期末の個体数、階級数をモデル A と同じとし、期間中の進界量を r_1 (進界個体は第 1 直径階にしか発生しない) とすると、遷移行列を使用した成長モデルは次のように表される。

$$n_{t+1} = T \times n_t + r$$

$$T = \begin{pmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & a_3 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{m-1} & a_m \end{pmatrix}$$

$$r = \begin{pmatrix} r_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

ここで、 T は 1 個体当たりの進界量 c_m を含まない遷移行列で、 r は進界ベクトルである。

4.1.3 2つのモデルの必要性

両モデルは進界の表現方法が異なる以外は基本的に変わらない。しかし、進界は天然林の成長を考える場合、最も重要な問題であり、今日まで多くの研究がなされているが、まだ決定的な評価方法は無い。このため、本研究では解析方法の違いにより使い分けた。

モデル A は、遷移行列に進界に関する要素が含まれるため、進界量が期首の直径分布に依存する。これより、進界量の推定方法が重要な位置を占めるモデルであると考えられるが、この行列のみで天然林の成長を表せるという利点がある。本研究では、この利点を生かし、行列の固有値による林分の動態解析を行う。

モデル B は進界量を、実際の進界量、あるいは、推定式から計算し、その結果を遷移行列の中には組み入れずに、進界量ベクトルというかたちでモデルへ取り込んでいる。このため、期首の直径分布に依存せずに進界量の予測が可能である。このモデルは、一定期間後の直径分布を予測するために使用する。

4.2 モデル A による天然林の動態

ここでは、3.1 で使用した天然林固定成長量試験地 (試験地数 15) のデータを使用し、モデル A の遷移行列の固有値を算出し、直径分布タイプとの関係を解析した。この際、針広混交林の遷移行列は多様

な樹種を含んでいるため、樹種ごとに作成すべきものと考えられるが、ここでは一つの遷移行列により表すことにした。これは、樹種別では個体数が極端に少ないものがあること、針広別では全林分の直径階別直径成長量についてマン・ホイットニーの U 検定を行った結果、1%の有意水準で全体の18.8%のみに差があると検定されたためである。

モデル A では、天然林の成長を

$$n_{t+1} = T \times n_t$$

と表現した。この式を繰り返して計算すると、十分大きな t に対し、各直径階の比率が一定となり、直径分布の形が収束する。直径分布のベクトルを $n_t = u$ とおくと、一定期間後には方向はそのまま、長さが λ 倍になり、 $n_{t+1} = \lambda u$ とおける。すると、前式は

$$\lambda u = Tu$$

となる。ここで、 λ が遷移行列の固有値である。遷移行列 T の要素が非負なため、フロベニウスの定理が成り立ち、固有値の正の実数解は最大の絶対値を持つ。このことより、直径分布が収束し、個体数が λ を公比とする等比数列で増大するという結果がもたらされる（巖佐，1990）。

この性質を利用することにより、混交林の直径分布の遷移傾向が予測できる。すなわち、固有値は個体群の大きさ（個体数）の成長率に対応している（高田，1990）と考え、森林全体の動態を行列の特性値としての固有値によって表す。従来、混交林の動態を捕らえるためには、林分構造（直径分布の型）、成長量、個体の配置、樹勢、更新状況、枯死量などの因子を把握し、それらを総合化して判断してきた。これに対し、遷移行列の固有値による林分の動態解析は直径階別直径成長量、進界量、枯死量の情報を含んだ遷移行列を一つの数値に集約して林分の動態を捕らえようとする方法で、複雑な混交林の動きを単純化する効率的な方法であると考えられる。

計算された最大固有値の値が、1 より小さいとき減少傾向、1 と等しいとき平衡状態、1 より大きいとき増加傾向にあると判断できる。森林に関する研究でこれを用いた例では、MANDERS が山火事による被害の多い林分の遷移行列を作成し、山火事がない場合固有値は 1.02026 になり、増加傾向であることを示した。また、OSHO は南西ナイジェリアの熱帯雨林の遷移行列の固有値が 0.97 であることから、この林分は衰退状態にあり、5 倍の更新あるいは 40% の直径成長の増加を図ることにより林分の安定は維持されるとした。

ここでは、直径階の幅を 6 cm、直径階の数を 11 として直径分布を表し、原級にとどまる比率 (a_m)、および 1 階級進級する比率 (b_{m-1}) は成長期間内の直径階の移動本数をカウントして求めた。また、直径階の幅を 6 cm と十分に大きくとったため 2 階級以上進級する個体はなかった。進界量 (c_m) は、本来直径階ごとに異なると考えられるが、ここではそのデータがないため、期間内の進界量を種子生産可能直径階 21 以上に属する個体数で除したものを使用した ($c_3 = c_4 = \dots = c_{11}$)。これはすなわち 21cm 以上の直径階の個体 1 本につき成長期間内にどれだけの進界量を生み出せるかの期待値である。このようにして求めた各林分各成長期間の遷移行列の一例を林分タイプごとに示した（表 7）。

各遷移行列の固有値を計算し（Mathematica を使用）、林分タイプごとに箱ひげ図にまとめた（図 9）。箱ひげ図は偏りのあるデータの解析に有効である。図の固有値の中央値はタイプ I・II・III 林分それぞれ 1.02, 1.00, 1.04 となっている。また、ヒンジの幅は固有値のばらつきを示すが、タイプ I・III 林分

a) タイプⅠ林分 (試験地番号47)
Type I (Plot No.47)

(b) タイプⅡ林分 (試験地番号45)
Type II (Plot No.45)

(c) タイプⅢ林分 (試験地番号29)
Type III (Plot No.29)

[illegible]

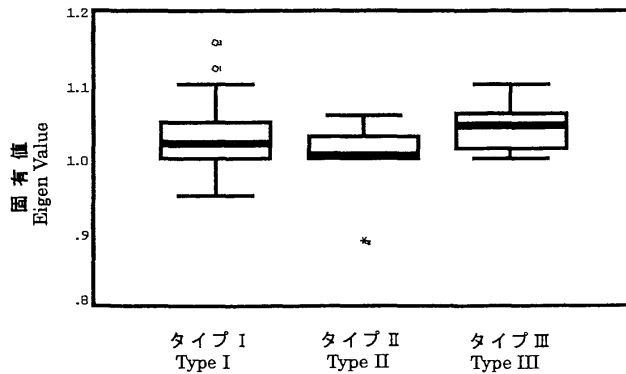


Fig.9 林分タイプ別固有値
Eigenvalue of 3 forest types

では相対的にタイプⅡ林分よりばらつきが大きい。したがって、タイプⅠ・Ⅲ林分ではやや変動があるものの林分の動きとしては増加傾向にあり、タイプⅡ林分ではタイプⅠ・Ⅲ林分にくらべて変動は少なく林分の動きとしては平衡状態にあると考えられる。

タイプⅡ林分は成長が旺盛な中径級の個体がタイプⅠ・Ⅲ林分にくらべて多いため、この径級以下の個体間の競争が起こる。また、平均枯死量は平均進界量を上まっている(表6)。このような状態では個体数の減少と直径成長が相殺する形となり、林分全体の動きとしては平衡状態にあると考えられる。

これに対しタイプⅠ・Ⅲ林分は、タイプⅡ林分のような中径級での個体数のふくらみがなく、成長は被圧の影響を受けにくく、大きな径級の個体の消失も進級により賄われる。また、平均進界量は平均枯死量を上まっているため(表6)、林分全体の成長が増加傾向にあると考えられる。さらに、タイプⅠ林分では平均進界量が多く、かつ平均枯死量も多いため固有値のばらつき(隣接値)の幅がタイプⅢ林分より大きい。

タイプⅠ・Ⅲ林分は直径分布のタイプから見ると全く違う遷移傾向を示すように見えるが、固有値の面から見ると同じ遷移傾向であると判断された。タイプⅡ林分の直径分布は中央が凸な型であるが、タイプⅠ・Ⅲ林分は変化率には差があるものの小径級から大径級に向かい直径階別個体数が減少するという点で共通であり、このことにより遷移が増加傾向を示すということに反映されているのではないかと推察された。

以上示したように、大きく3タイプに分類される現実林分の直径分布に対し、遷移行列の固有値の解析から、直径分布に関し理論的な考察を行うことができた。

4.3 モデルBによる天然林の成長予測

4.3.1 稚樹の遷移行列

ここでは、空沼天然林施業実験林の漸伐区において実行された稚樹調査のデータを利用して、遷移行列を樹高分布へ適用しトドマツ稚樹の成長モデルを作成した。樹高階は、10, 30, 50・・・190 cmと20 cm活約としtは1年である。進界量に関する要素に関しては、今回のデータのなかでは存在が認められず0とした。各要素の決定には、7年間すべて、各年毎、後期2年だけのデータなどを利用し検討したが無れも余りよい適合をしめさなかった。そこで、各年の樹高成長をもとに樹高と進級率の1次の直線

関係を仮定して、各要素を決定した。これは、樹高の増大と共に原級に留まる個体が減少し、進級する個体が増加すると考えられたからである。

この結果得られた行列は表 8 で、これより予想した 1988 年の樹高階別本数分布と実測値の関係は表 9 のようになっている。これを見ると 150cm 以上の樹高階では予測値と実測値はほぼ一致しているが、130cm 階以下ではかなり低く計算されている。これは、測定期間には進界は見られなかったが、測定期間終了後若干の進界があったためと考えられる。

4.3.2 稚樹と成木の遷移行列

ここでは、空沼天然林施業実験林において実行された漸伐区の稚樹と成木の調査データを使用し、トドマツだけを対象にした林分の成長モデルを作成した（佐野，1991）。

稚樹から成木までを対象にするため、稚樹の樹高の大きさによる進級率と、成木の胸高直径の大きさによる進級率を同一行列中に配置しなければならない。このため、稚樹の胸高直径と樹高の関係を調べ、胸高直径測定の際、最小測定限界である直径 5 cm 以上になるときの樹高を算出し、その樹高階以上を成木の最初の直径に関する階とする。ここで胸高直径と樹高の関係を、NÄSLUND 式であてはめると、図 10 のようになる。この図から、胸高直径が 5 cm 以上になる樹高を読み取ると 400cm であり、これより大きい時（樹高階との関係から実際には 405cm より大きい時）、成木の胸高直径による最初の階とすることとした。また、各大きさ階の幅は稚樹の樹高階は 50cm、成木の直径階は 8cm を基準とし区

Table 8 樹高遷移行列
Transition matrix of height

樹高階 Height class	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190
10	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.23	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	0.00	0.27	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70	0.00	0.02	0.29	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	0.06	0.31	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
110	0.00	0.00	0.00	0.10	0.33	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00
130	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.35	0.42	0.00	0.00	0.00
150	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.37	0.38	0.00	0.00
170	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.39	0.34	0.00
190	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.41	0.83

Table 9 実測値と予測値の比較
Comparison of actual value and predicted value

樹高階 Height class	70	90	110	130	150	170	190
実測値 Actual	26	23	19	16	10	13	62
予測値 Predicted	3	5	7	9	11	13	69

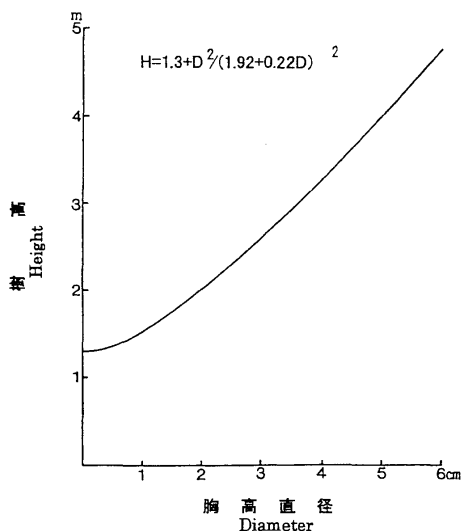


Fig. 10 NÄSLUND 式による稚樹の樹高曲線
Height curve of seedling by NÄSLUND equation

Table 10 トドマツ成長モデルの大きさ階
Definition of size class in the growth model of Todo fir

大きさ階 Size class	定義 Definition
1	樹高 Height < 55cm
2	55cm ≦ 樹高 Height < 105cm
3	105cm ≦ 樹高 Height < 155cm
4	155cm ≦ 樹高 Height < 205cm
5	205cm ≦ 樹高 Height < 255cm
6	255cm ≦ 樹高 Height < 305cm
7	305cm ≦ 樹高 Height < 355cm
8	355cm ≦ 樹高 Height < 405cm
9	405cm ≦ 樹高, 胸高直径 Height, Diameter < 13cm
10	13cm ≦ 胸高直径 Diameter < 19cm
11	19cm ≦ 胸高直径 Diameter < 27cm
12	27cm ≦ 胸高直径 Diameter < 35cm
13	35cm ≦ 胸高直径 Diameter < 43cm
14	43cm ≦ 胸高直径 Diameter

分した (表 10)。

この区分を使用して実際の進級率の計算を行った。稚樹の比率の計算は、1969 年からの 7 年間のデータを使用した。しかし、この期間内のデータには、大きさ階 5 以上の個体がなかったため、その部分に関しては、樹高と比率の一次の直線関係を仮定して、それから得られた推定値を使用した。

成木の比率の計算は、稚樹とは測定間隔の違いがあるため、同一行列上に配置するためには、それを基準化して稚樹の測定の間隔に合わせる必要がある。ここでは、成木の測定間隔 7 年を稚樹の間隔 1 年に基準化しなければならない。この手法は、MANDERS により提案されており、その考え方は次のとおりである。

各個体は、枯死する (d) か生存する (s) かであり、生存するものは原級にとどまる (q) か進級する (p) かである。どちらの場合も比率の和は 1 に等しい。

$$s + d = 1 \quad (1)$$

および

$$q + p = 1 \quad (2)$$

また、ある大きさ階の X 本の個体は、時間の経過とともに次のようになる。

	期首	枯死	生存	進級	原級
1 年後	X	dX	sX	psX	qsX
2 年後	qsX	qsdX	qssX	qspX	q ² s ² X
3 年後	q ² s ² X	q ² s ² dX	q ² s ² sX	q ² s ² pX	q ³ s ³ X

この大きさ階において、N 年後であれば、枯死本数 (D)、進級本数 (P)、原級にとどまる本数 (S) は、次のように表わされる。

$$D = (1 + qs + q^2s^2 + \cdots + q^{N-1}s^{N-1}) dX \quad (3)$$

$$P = (1 + qs + q^2s^2 + \cdots + q^{N-1}s^{N-1}) psX \quad (4)$$

$$S = q^N s^N X \quad (5)$$

ここでは進級する比率 ps および原級にとどまる比率 qs を求めるため、次のような計算をする。

(3) 式を (4) 式で割って

$$p = P(1 - s)/Ds \quad (6)$$

(5) 式と (2) 式から

$$qs = (S/X)^{1/N} = (1 - p)s$$

(6) 式を代入し、 $K = (S/X)^{1/N}$ を使うと

$$s = (P + DK) / (P + D)$$

この 3 式よりそれぞれの比率が計算できる。この手法を用いて、成木の比率の計算を行った。

以上の結果より、得られた行列は、表 11 のようになった。この値を使用して、伐採前の林分状態になるまでの時間を計算した。使用したデータは、稚樹と成木が同一年に調査された 1975 年のもので、伐採後 7 年経過している。また、稚樹の個体数は、プロットが成木のプロットと同一面積ではないので、その割合で換算した。表 12 は、大きさ階 9 以上の直径分布を伐採の直前、直後、及び、その後の

Table 11 トドマツ成長モデルの遷移行列
Transition matrix of the growth model of Todo fir

大きさ階 Size class	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.06	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.15	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.21	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.38	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.96	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.95	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.96	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.00

Table 12 直径階別本数分布の予測
Prediction of diameter distribution

大きさ階 Size class	9	10	11	12	13	14
伐採前 Before Selective Cutting	137	72	62	41	44	44
伐採後 After Selective Cutting	108	59	43	25	21	2
10年後 After 10yrs	91	37	54	26	20	6
20年後 After 20yrs	494	52	55	27	19	9
30年後 After 30yrs	794	130	79	30	18	11
40年後 After 40yrs	641	170	126	41	20	14
50年後 After 50yrs	426	157	164	57	24	17
60年後 After 60yrs	267	122	178	73	31	21

推定値を10年間隔で表わしたものである。これにより、利用可能な径級の本数を大きさ階12以上としたとき、その本数が伐採前と同じ129本前後となるのは、伐採してから60年近く必要であることが分かる。

ここで使用したような遷移行列は、稚樹から成木までを含んでいるため、さまざまな成長段階を反映するモデルといえ、林分成長モデルとして有効であると考えられた。

4.3.3 多変量解析による遷移行列の推定

上述の成長モデルでは、遷移行列の各要素は実測値から計算された。ここでは、遷移行列の各要素を

林分内容から多変量解析を用い推定し、直径分布を予測する。計算に使用したのは固定成長量試験地の金山及び幾寅営林署管内のデータ（表 13）である。

固定試験地 6 か所のうち、予測モデル作成に試験地 42 以外のデータを、予測値の検証のため試験地 42 の最新データを用いた。なお、採用した直径階は 6～70cm で、階級の幅を 2cm とした。予測期間は 5 年である。また遷移行列作成の際、広葉樹を 2 つに区分した。この区分は、中島の北海道立木幹材積表（中島廣吉，1947）において定義されている広 1・広 2 である。また、1987 年に試験地 36，37 において、樹高の測定を行い、このデータも使用した。

はじめて 6cm 階に進界する個体数を進界量とした。データの中には、8cm 階や 10cm 階へ直接進界する場合もあったが、これはすべて 6cm 階へ進界したものとして処理した。進界量の予測には、説明変数を樹高層別の胸高断面積合計とする重回帰式を用いた。樹高層は、上・中・下で、そのしきい値を 5m と 15m と仮定し、その時の胸高直径を 51 い林班（試験地 36）のデータから作成した樹高曲線（図 11）か

Table 13 試験地の概況
Summary of plots

試験地番号 Plot No.	材 積 (m ³) Volume			合 計 Total
	針葉樹 Softwood	広 1 Hardwood 1	広 2 Hardwood 2	
36	170.60	20.46	12.52	203.58
37	86.42	16.81	11.24	114.47
40	294.35	27.19	7.19	328.73
41	199.83	35.83	5.58	241.24
42	367.06	36.54	9.49	413.09
44	409.25	23.98	4.92	438.15

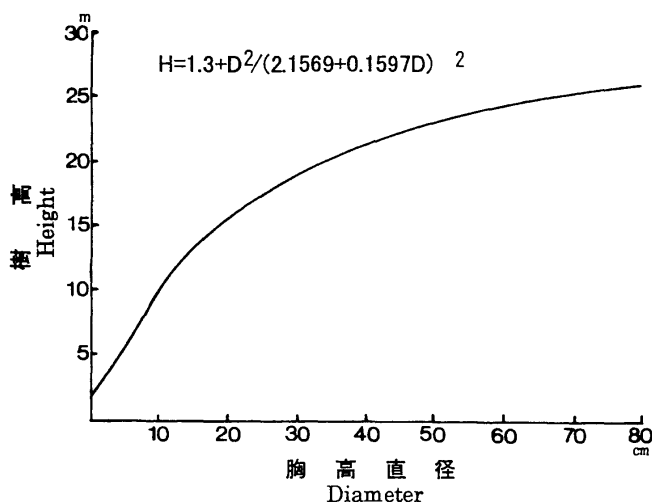


Fig. 11 NÄSLUND 式による樹高曲線
Height curve by NÄSLUND equation

ら読み取った。これから算出した結果が表 14 であり、説明変数の針葉樹・広 1 の上層断面積合計は 5 % で有意となったが、重相関係数はあまり高くなかった。実測値と予測値の比較を表 15 に示した。

樹種区分直径階ごとに原級に留まる、1 階級進級する、2 階級進級する比率を、説明変数として胸高直径とその階より上の胸高断面積合計を用い、ロジスティック回帰分析により算出した。ロジスティック回帰分析は多変量解析により比率を推定する手法であり、独立変数が 0 から 1 に限定されている。この方法は、基本的には、まず比率に次式のような従属性を仮定する。

$$\theta_i = \exp(\alpha_i \beta) / (1 + \exp(\alpha_i \beta))$$

ここで、 α_i は既知の定数からなる行ベクトル、 β は未知のパラメーターからなる列ベクトル、 θ_i は比率である。

この式は次式と同等である。

$$\lambda_i = \log \{ \theta_i / (1 - \theta_i) \} = \alpha_i \beta$$

このとき、 $\lambda_i = \log \{ \theta_i / (1 - \theta_i) \}$ を θ_i のロジスティック変換とよび、この値を比率の代わりに用い、通常重み付き最小自乗法で解いた (Cox, 1970)。この結果得られたパラメーターは表 16 に示す通りで、これから予測した針葉樹の原級に留まる比率の実測値と予測値の比較は図 12 のようである。これを見ると、実測値は変動が大きいため、予測値と隔たりがあることが分かる。

以上の結果をもとに、実際の胸高直径階別本数分布を予測したのが表 17 である。各樹種区分とも 6 cm 階で差があるものの、他の直径階ではおおむね良好な適合を示している。

また、各樹種区分を合計した実測値と予測値の比較 (図 13) を見てもこの傾向は、変わらない。しか

Table 14 進界量の推定式の結果
Result of estimation equation on ingrowths

樹種 Species	胸高断面積合計 Sum of basal area		定数項 Invariable	重相関係数 Multiple Correlation Coefficient
	中層 Middle-Layer	上層 Upper-Layer		
針葉樹 Softwood	-8.40	-1.58	73.05	0.55
広 1 Hardwood 1	-3.02	-0.76	32.51	0.53
広 2 Hardwood 2	0.60	-0.27	6.98	0.55

Table 15 進界量の実測値と予測値の比較
Comparison of actual value and predicted value in ingrowths

	針葉樹 Softwood	広 1 Hardwood 1	広 2 Hardwood 2
実測値 Actual	6	24	3
予測値 Predicted	7	3	0

Table 16 進級率の推定式の結果

Parameter of estimation equation in probability of trees staying/advancing

樹種 Species	進級数 Advancing	胸高直径 Diameter	胸高断面積合計 Sum of basal area	定数項 Invariable
針葉樹 Softwood	0	0.17	0.75	-2.48
	1 ~ 2	-0.17	-0.69	2.07
	2	-0.33	-1.12	0.93
広 1 Hardwood 1	0	0.37	0.23	-1.63
	1 ~ 2	-0.37	-0.28	1.54
	2	-0.32	0.39	-2.07
広 2 Hardwood 2	0	0.22	0.40	-1.31
	1 ~ 2	-0.28	-0.68	1.67
	2	-0.52	-1.09	0.63

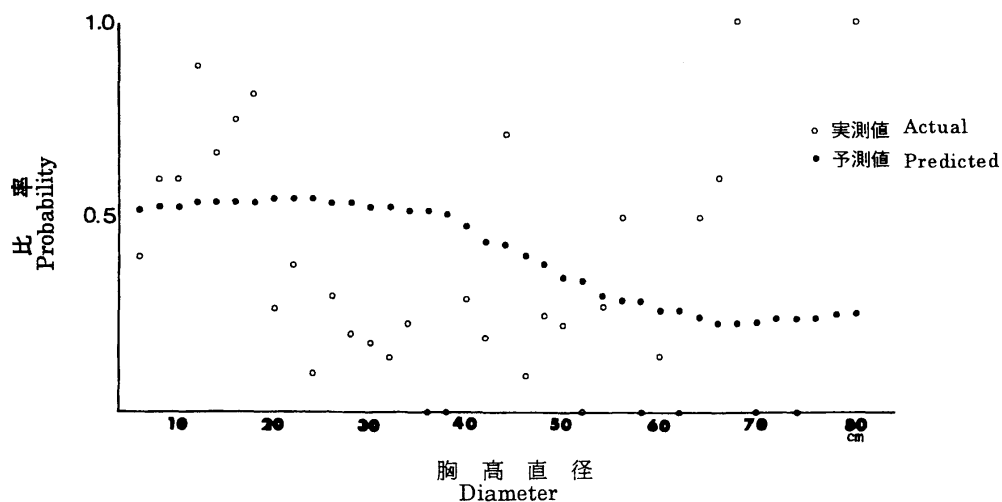


Fig. 12 針葉樹の原級に留まる比率の実測値と予測値の比較

Comparison of actual value and predicted value in probability of trees staying of softwood

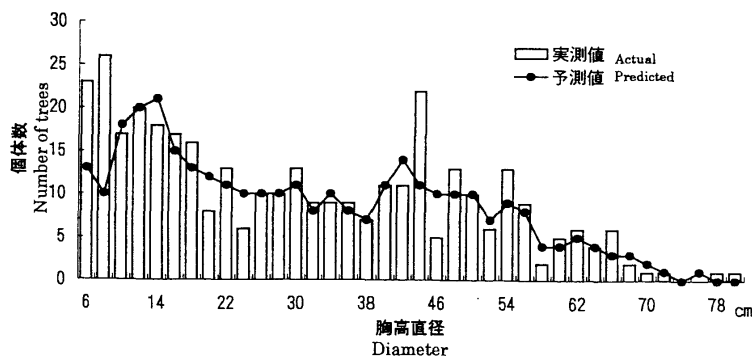


Fig. 13 区分を合計した実測値と予測値の比較

Comparison of actual value and predicted value in all tree species

Table 17 直径分布の実測値と予測値の比較

Comparison of actual value and predicted value in diameter distribution

	胸高直径 Diameter	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
針葉樹 Softwood	実測値 Actual	7	6	8	11	12	11	11	5	10	5	10	9	12	9	9	9	7	10	10
	予測値 Predicted	10	5	7	9	12	11	10	10	9	9	9	9	10	8	10	8	6	10	13
広 1 Hardwood 1	実測値 Actual	13	20	7	6	6	5	5	3	3	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
	予測値 Predicted	3	4	9	10	8	4	3	2	2	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
広 2 Hardwood 2	実測値 Actual	3	0	2	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	予測値 Predicted	0	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	胸高直径 Diameter	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80
針葉樹 Softwood	実測値 Actual	21	4	11	8	5	11	8	2	4	6	3	5	2	1	1	0	0	1	1
	予測値 Predicted	11	8	8	8	7	7	7	3	4	4	3	3	3	2	1	0	1	0	0
広 1 Hardwood 1	実測値 Actual	1	1	2	2	0	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	予測値 Predicted	0	2	2	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
広 2 Hardwood 2	実測値 Actual	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	予測値 Predicted	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

し、これは、連続する直径階の個体数を平準化する方法によって、さらに適合度が良くなるものと思われる。

ここで用いた手法を利用し長期間の予測を行うには、1回の予測ごとに進界量と遷移行列の各要素を再計算し利用することになる。このため、計算は煩雑になると考えられるが、予測手法としては堅実なものと考えられる。また、説明変数として環境要因を加えた進界量・進級率の推定により、さらに精度の高いモデル作りが可能と考えられ今後の課題である。

4.3.4 線形計画法による遷移行列の推定

これまでの、遷移行列の算出に単木ごとの時系列データを利用した。しかし、このようなデータの収集は、固定試験地を利用した長期にわたる調査が必要であり、多大な時間と労力を必要とする。そこで、ここでは単木ごとの時系列データを必要とせず、期首と期末の直径分布から直径遷移行列の推定を行う方法を検討する。

利用した資料は、旧旭川営林支局天然生林固定成長量試験地の幾寅営林署 25 ろ林小班のデータである。この試験地は針葉樹の比率が高く（胸高断面積合計で 87.2%）、樹種区分は必要がないと考えられたため、全樹種をまとめて計算に使用した。

農業経済学の分野では、専業別農家構成や作目別土地利用構成などの予測に推移行列が用いられている(武藤, 1979)。この推移行列は、個々のデータがある状態から他の状態への移動を表わす形で得られれば計算することができる。しかし、現実のデータはこのようなになっていない場合も多い。このような場合でも、データが状態ごとに総数の変化として得られれば、線形計画法などを用いて推定できる。本報では、この方法を利用して直径遷移行列を求め、その有効性を確かめることとした。

ある林分の期首と期末の直径分布ベクトルを n_0, n_1 とする。ここでは、説明を簡単にするため直径階数が 2 の場合を示す。

$$n_0 = (n_{0,1}, n_{0,2})^t$$

$$n_1 = (n_{1,1}, n_{1,2})^t$$

また、遷移行列を T 、進界量ベクトルを f とすると期末の直径分布は次のように表わされる。

$$n_1 = T \times n_0 + f \quad (1)$$

$$T = \begin{pmatrix} a_1 & 0 \\ b_1 & a_2 \end{pmatrix} \quad f = \begin{pmatrix} f_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

ここで、 a_1 は原級に留まる比率、 b_1 は 1 階級進級する比率、 f_1 は進界量である。

この場合、 T の要素はつぎの条件を満たす必要がある。

$$a_1 + b_1 \leq 1 \quad (2)$$

$$a_2 \leq 1 \quad (3)$$

$$a_1, b_1, a_2 \geq 0 \quad (4)$$

さらに、期首と期末の間には、(1) 式の関係が成立しているはずである。ただし、この場合は誤差 u_i を含む次のような式で表わされる。

$$n_{0,1} \times a_1 + f + u_1 = n_{1,1} \quad (5)$$

$$n_{0,1} \times b_1 + n_{0,2} \times a_2 + u_2 = n_{1,2} \quad (6)$$

したがって、求めようとする遷移行列の各要素は、(2)~(4) 式を満足し、(5) 式と (6) 式の関係をもっともよく表わしていることが必要である。その一つの方法として、誤差 u_i の絶対値和を最小化することが考えられる。

$$z = |u_1| + |u_2| \quad (7)$$

すなわち、これは、(2)~(6) 式の条件下で (7) 式の値を最小化するような a_i, b_i, f を求める線形計画法の問題として定式化される。ここで、誤差 u_i は、負値となる可能性があるため、非負の変数として正の誤差を表わす d_i^+ 、負の誤差を表わす d_i^- を導入する。

$$u_1 = -d_1^+ + d_1^- \quad (8)$$

$$u_2 = -d_2^+ + d_2^- \quad (9)$$

実際に最小化するのは (8), (9) 式の変数の和である次式となる。

$$z = d_1^+ + d_1^- + d_2^+ + d_2^-$$

基本的には上述の制約条件のもとで、線形計画法の問題を解くことにより遷移行列の各要素の推定は可能である。しかし、ここではさらに、林分の性質から得られる 2 つの仮定を制約とし付加して計算す

ることとした。①採用した直径階の幅は6 cm と十分大きいことから、各直径階において原級に留まる比率が1階級進級する比率より大きい、②直径階が大きくなると個体間の競争が減少し枯死率は小さくなることから枯死率は直径階が大きくなると減少し、かつ、50 cm 階以上であれば枯死しない、という仮定である。

解法としては、改訂シンプレックス法（玄，1988）を使用した。

この結果を示した（図 14）。直径階の小さい部分ではやや適合が悪くなっているが、全体的にはほぼ良好な適合を示している。本手法は、期首と期末の直径分布のみから遷移行列を推定できるため、単木毎の時系列データのない林分に遷移行列を利用した解析を行う際、有用な手法であると考えられた。

5 総合的考察

本研究は針広混交林の成長を解析し、成長モデルを作成することにより、針広混交林の動態を把握した。これらの解析結果を林分タイプごとに要約すると次のようになる。

タイプ I 林分は、直径分布は L 型である。進界量が 3 林分中 1 番多く枯死量は 2 番目に多いことから、個体の世代交代が頻繁に起きている林分といえる。固有値は 1.02 で増加傾向にあると考えられる。

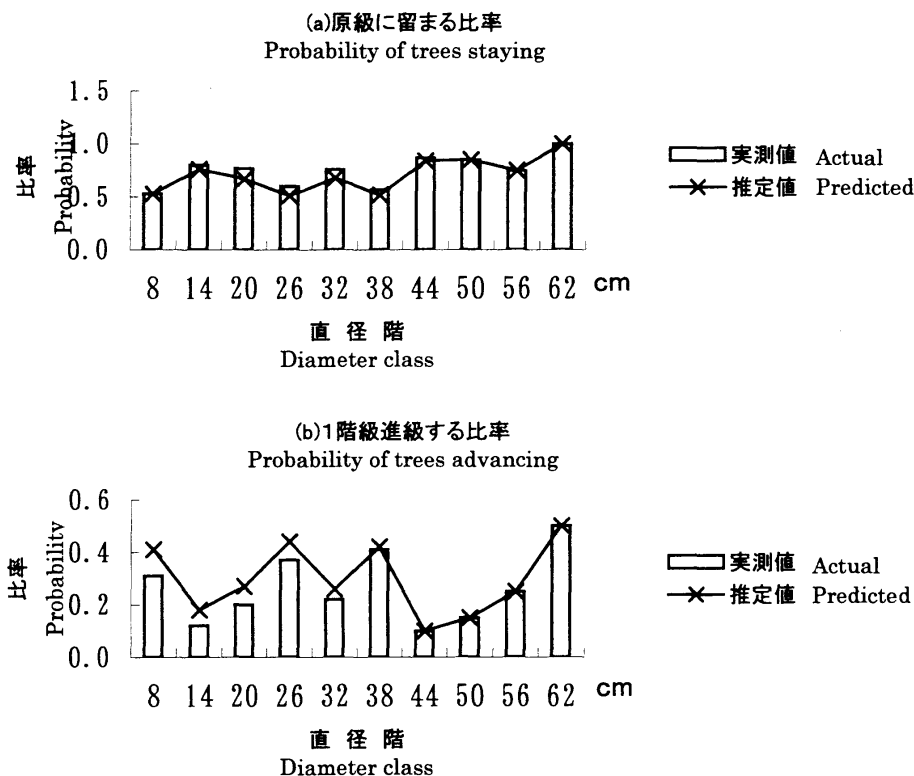


Fig. 14 計算値と推定値の比較

Comparison of actual values and predicted value

タイプⅡ林分は、直径階の中央付近に凸部を持つ分布である。進界量が3林分中1番少なく枯死量は1番多い。個体数が減少傾向の林分といえる。固有値は1.00で平衡状態にあると考えられる。

タイプⅢ林分は、はっきりした凸部を示さずなだらかな右下がりの分布である。進界量が3林分中2番目で枯死量は1番少ない。個体の置き換えりの少ない林分といえる。固有値は1.04で増加傾向にあると考えられる。

針広混交林内では、上述のような3林分タイプがパッチ状に存在し、その構造を維持しながら林齢を重ねていく。中村は林型の動きを論じ、それは更生状態にもとづき推測できるとしている(中村, 1931)。本研究においては、各林分タイプは定常状態を維持すると考えたが、この定常状態の維持にも進界量が深く関与すると考えられる。

施業の観点から針広混交林の取り扱いについて考えると、上述のことより更新に特に注意を払うことが必要であると考えられる。すなわち、タイプⅠ林分を択伐林型の基本型とすると、タイプⅡ及びⅢ林分をタイプⅠ林分へ変化させるためには、第1に十分な更新を確保しなければならない。従来行われてきた択伐ではこの点の配慮が欠けていたため、林況が良好とはいえない林分が発生していると考えられる。本研究の結果よりこれからの天然林施業を考えると、更新の確保を最も重要な課題として考慮しなければいけない。また、更新が確保されれば、本研究に示した遷移行列を利用したモデルを利用することにより林分の直径分布が予測でき、合理的な天然林施業を推進することができる。

謝 辞

本論文をまとめるに当たり適切な助言をいただいた北海道大学農学部 孝雄元教授ならびに松田 彊教授、新潟大学阿部信行教授、森林総合研究所北海道支所猪瀬光雄経営部長、白石則彦天然林管理研究室長(現東京大学大学院)に深く感謝する。また、本論文の最終的な内容、構成に関し、森林総合研究所天野正博資源計画科長に助言と指導をいただいた。

さらに、天然林固定成長量試験地の調査資料を提供してくださった旭川営林支局、簾舞天然林施業実験林の調査を担当されていた旧林業試験場北海道支場経営研究室各位に謝意を表する。

引 用 文 献

- 青柳正英(1968)道有林北見経営区天然林の成長量について, 北方林業 20(8), 231 ~ 235
 旭川営林局(1973)旭川営林局の林業諸試験, 旭川営林局
 BUONGIORNO, J. and MICHIE, B.R. (1980) A matrix model of uneven-aged forest management, For. Sci. 26 (4), 609 ~ 625
 Cox, D.R. (後藤昌司・畠中駿逸・田崎武信訳)(1970)コックス二値データの解析—医学・生物学への応用—, 朝倉書店
 玄 光男・井田憲一(1988)BASICによる線形計画, 共立出版
 長谷川順一(1962)羊蹄山における垂直植物帯の研究, 日生態会誌 12(2), 67 ~ 72
 林 常夫(1927)北海道森林の垂直的限界に関する一考察, 林學會雑誌 第9巻(8), 24 ~ 33
 五十嵐八枝子(1987)苫小牧演習林地域における植生の変遷, 北大演報 44(2), 405 ~ 428
 今井 亮(1936)北海道中央高地に於るトド, エゾ天然林に就て, 日林誌 18(1), 5 ~ 17

- 石橋 聡・猪瀬光雄・佐野 真・渡辺 惇 (1993) 北海道天然林における択伐施業方法に関する研究
—北海道営林局 (直轄) 択伐試験地における成長解析—, 日林論 104, 213 ~ 214
- 石橋整司 (1989) 天然林の成長予測 (I) シミュレーションモデルの作成, 日林誌 71(8), 309 ~ 316
- 石橋整司 (1990) シミュレーションモデルに基づく天然林の林分構造の動態に関する研究, 東大農学部演習林報告 82:11 ~ 101
- 石田 仁・菊沢喜八郎・浅井達弘・水井憲雄・清和研二 (1991) ギャップと閉鎖林内における高木性各種稚幼樹の分布と伸長成長—北海道日高地方の針広混交林—, 日林誌 73(2), 145 ~ 150
- ISHIZUKA, M. and SUGAWARA, S. (1986) Composition and Structure of Natural Mixed Forests in Central Hokkaido (I) Composition Differences and Species Characteristics by Elevation and from Disturbances, J. Jpn. For. Soc. 68(8), 79~86
- ISHIZUKA, M. and SUGAWARA, S. (1989) Composition and Structure of Natural Mixed Forests in Central Hokkaido (II) Effect of Disturbances on the Forest Vegetation Patterns along the Topographic Moisture Gradients, J. Jpn. For. Soc. 71(3), 89~98
- 石塚森吉・金沢洋一 (1989) 針広混交林におけるエゾマツ・シナノキ・イタヤカエデ樹冠下のトドマツの成長過程, 日林誌 71(7), 281 ~ 287
- 伊藤達夫 (1985) SSFTR/86 Version 1.5 ユーザーズマニュアル, 京都府立大学農学部森林経理学講座
- 巖佐 庸 (1990) 数理生物学入門, HBJ 出版局
- LEFKOVITCH, L. P. (1965) The study of population growth in organisms grouped by stages, Biometrics 21(1), 1~18
- LESLIE, P. H. (1945) On the use of matrices in population mathematics, Biometrika 33(3), 183 ~ 213
- 前崎武人 (1971) 天然林の成長と調査法—美深経営区での調査例—, 北方林業 23(3), 87 ~ 95
- MANDERS, P.T. (1987) A transition matrix model of the population dynamics of the Clanwilliam Cedar (*Widdringtonia cedarbergensis*) in natural stands subject to fire, For. Ecol. Manage. 20(1,2): 171~186
- 武藤和男・森島 賢編著 (1979) 地域農業計画の方法と実際, 明文書房
- 南雲秀次郎 (1972) 択伐林の施業モデル, 83 回日林講, 83 ~ 86
- 中島廣吉 (1947) 樹種及び林区別北海道立木幹材積表, 日本農林種苗
- 中島 巖・樋渡幸男・長谷川訓子・大貫仁人 (1970) 天然林の調査法に関する研究 北海道トムラウシ天然林の調査, 林試研報 227, 83 ~ 239
- 中村賢太郎 (1931) 原始林の樹種, 林形及更生状態に就て, 林學會雜誌 第 13 卷(3), 136 ~ 152
- 大貫仁人・中川一郎・河原 漢 (1966) 天然林成長資料 (その 1), 日林北支講 15, 12 ~ 19
- 大貫仁人・中川一郎・河原 漢 (1968) 天然林成長資料 (その 2), 日林北支講 16, 5 ~ 7
- OSHO, J.S.A. (1991) Matrix model for tree population projection in a tropical rain forest of south western Nigeria, Ecol. Model. 59, 247~255
- 太田嘉四夫・五十嵐恒夫・藤原滉一郎 (1970) 北海道の森林における主要樹木の時間的・空間的分布
その 1 トドマツ天然林 (予報), 日林北支講 18, 45 ~ 48
- 太田嘉四夫・五十嵐恒夫・藤原滉一郎 (1971) 北海道の森林における主要樹木の時間的・空間的分布
その 2 アカエゾマツ天然林—(1) 令構成と樹高 (予報)—, 日林北支講 19, 61 ~ 64
- 太田嘉四夫・五十嵐恒夫・湊 克之 (1973) 北海道の森林における主要樹木の時間的・空間的分布
その 3 アカエゾマツ天然林伐採跡地 (予報), 日林北支講 21, 97 ~ 101
- 太田嘉四夫・五十嵐恒夫・藤原滉一郎 (1976) 北海道の森林における主要樹木の時間的・空間的分布
その 2 アカエゾマツ天然林—(2) 平面分布—, 日林北支講 24, 143 ~ 146
- 酒井寛一・千葉 茂 (1979) 天然林における樹種の分布と樹種間の親和性 (予報), 日林誌 61(12),

444 ~ 447

- 佐野 真 (1990a) 天然林におけるトドマツ稚樹の動態, 日林北支論 38, 189 ~ 191
- 佐野 真・猪瀬光雄・小木和彦 (1990b) トドマツ・エゾマツ天然林の直径遷移, 101 回日林論, 219 ~ 220
- 佐野 真・猪瀬光雄・小木和彦 (1991) 天然林におけるトドマツの直径階別本数分布, 日林北支論 39, 128 ~ 130
- 佐野 真・猪瀬光雄・石橋 聡 (1992) 単木ごとの時系列データがない場合の直径遷移行列の推定, 103 回日林論, 125 ~ 126
- 札幌営林局技術開発委員会 (1969) 空沼天然林施業実験林報 (I), 札幌営林局
- 四出井綱英 (1961) エゾ・トド天然林の生産力, 北方林業 13(4), 109 ~ 115
- 鈴木太七 (1966) 確率過程としての林分の遷移 (I), 日林誌 48(12), 436 ~ 439
- 鈴木太七 (1967a) 確率過程としての林分の遷移 (II), 日林誌 49(1), 17 ~ 20
- 鈴木太七 (1967b) 確率過程としての林分の遷移 (III), 日林誌 49(5), 208 ~ 210
- 鈴木太七 (1967c) 確率過程としての林分の遷移 (IV), 日林誌 49(11), 402 ~ 404
- 高田壮則 (1990) 植物個体群のサイズ構造モデル, 個体群生態学会会報 46, 52 ~ 61
- 高畠雅克・渡辺 惇 (1972) 紅葉山固定成長量調査地の推移, 日林北支講 20, 59 ~ 63
- 舘脇 操 (1928) 天塩演習林植物目録 (第一報), 北大演報 5, 1 ~ 48
- 舘脇 操 (1932) 雨竜演習林植物調査 (第一報), 北大演報 7, 99 ~ 129
- 舘脇 操 (1955) 汎針廣混交林帯, 北方林業 7(11), 240 ~ 243
- USHER, M.B. (1969) A matrix model for forest management, Biometrics 25(2), 309~315
- 脇元裕嗣 (1969) 北海道の天然林施業 前編, 北方林業
- 渡辺定元 (1970) 北海道天然生林のサクセッションのパターンについて I, 北方林業 22(12), 349 ~ 356
- 山本博一 (1990) 択伐林の施業計画のシステム化に関する研究, 東大演報 83, 31 ~ 142
- 山本進一 (1984) 森林の更新—そのパターンとプロセス—, 遺伝 38 (4), 43 ~ 50
- 柳沢聡雄・山谷孝一・中野 實・前田禎三・宮川 清・加藤亮助・尾方信夫 (1971) 新しい天然更新技術, 創文
- 吉田孝久・河原 漠 (1968) 直径遷移確率による天然林の成長予測, 日林北支講 17, 46 ~ 49

Fundamental study on dynamics of a mixed forest

SANO, Makoto

Summary

Prediction of the growth of uneven-aged forest is very important for forest management in Hokkaido, Japan, especially because the management system of all national forests changed from clear cutting to selective cutting in Hokkaido area in 1987. But uneven-aged forest structures and growth processes are very complex. Therefore it is very difficult to predict uneven-aged forests.

In this research, data on mixed forests, one type of uneven-aged forests were analyzed. The data were obtained from permanent plots in the Asahikawa and the Sapporo regional forest office. At first, ingrowth, mortality and diameter increment were examined in relation to the stand structure. Average ingrowth of plots was 18.3 per hectare for 5 yrs. The ingrowth slightly correlated with stand structure such as sum of basal area. Average mortality of plots was 7.5 per hectare for 5 yrs. The mortality of small trees (under 21cm in diameter) correlated with upper tree population and the mortality of large trees (over 51cm in diameter) correlated with the population near the trees. The stands were classified into 3 stand types by diameter distribution. Each stand type correlated with the curves that show the relation between diameter increment and diameter class.

Next, growth models were made for mixed forests. Two types of transition matrices were used for the growth model. One is a model for the transition matrix that includes ingrowth. The eigenvalues of these transition matrices for each plot were calculated and added up for 3 stand types. The stand type that had large population at middle diameter class indicated a stable state. The other stand types indicated an increasing state.

The other transition matrix is a model that doesn't include ingrowth. The diameter or high distribution was predicted according to these models. 1) The height distributions of Todo fir seedlings were predicted by the model. The predicted value and the actual value almost completely corresponded in the height class of 150cm or more. However, the predicted value under 130cm class was not fitted well. 2) The stand growth that was predicted by the model included mature trees and seedlings. In the stand where selective cutting had been done, it was understood that 60 years were needed for the number of trees reached the number of each diameter class before cutting.

The method for predicting the matrix element in this model was also examined. 1) The prediction of ingrowth used the multiple regression analysis and the prediction of probability of trees advancing used logistic regression analysis. There was a difference in 6 cm class because the ingrowth was not predicted well, but there was good fitting with the other classes. 2) The method used only the diameter distribution at the beginning and the end of period, a time series data of each single tree was not needed. It was well fitting when some constraints were assumed.