

学 位 論 文

択伐林施業計画の
システム化に関する研究

東京大学農学部林学科

山本 博一

論文の内容の要旨

論文題目 択伐林施業計画のシステム化に関する研究

氏名 山本 博一

本論文は択伐林施業における伐採許容量の決定をシステム化するための基本的な事柄について、東京大学北海道演習林を対象として考察したものである。

択伐林施業は森林の持つ多面的な機能を最大限に発揮させることのできる施業方法として期待されている。しかしながら、同齢単純林に比べて成長現象が複雑であるため、現在、択伐林施業はごく一部の森林においてしか実施されていない。

東京大学北海道演習林では1958年以来、「林分施業法」という一貫した施業方針のもとに択伐林施業を実施している。その施業対象は約2万3千haにおよび、膨大な測定記録が残されている。また、これらの資料を用いて数多くの研究が行なわれ、択伐林の成長現象に関する新たな知見も示されている。択伐林施業を実施するにあたっては、これらの情報を総合的に利用して様々な決定がなされなければならない。

従来の択伐林施業においても、これらの情報が全く使用されていなかったわけではなく、それぞれの施業担当者がその経験と観察力に基づき判断を下していた。しかし、これらの情報を統合してある決定をする際には個人差もかなりあった。このことが、択伐林施業の一般化を阻む一つの原因になっていたとも考えられる。

そこで、本論文では東京大学北海道演習林を対象として、これまでに得られ

た情報および知見を整理し、すべての施業担当者が共有することのできる択伐林施業意思決定支援システムを構築する方法について考察した。ここでは意思決定の対象として、択伐施業林の伐採許容量をとりあげ、コンピュータシミュレーションによってこれを決定する方法について検討した。さらに、択伐林施業において保続原則と経済性原則をともに満たすことをめざし、形質が優れ用材として価値の高い優良広葉樹を管理するための立木の価値に基準をおいた新しい経理方式についても考察した。

本論文は4章からなる。第1章においては、択伐林施業およびその伐採許容量についての様々な考え方を整理した。まず、第1節では、現代社会における択伐林施業の位置づけと実行上の問題点を明確にした。第2節では、ヨーロッパおよびわが国における択伐林施業の歴史について概観し、これまでの択伐林施業をめぐる議論を整理した。第3節では、択伐林施業における収穫規整の問題に焦点を絞り、従来の考え方を整理したうえで、本研究における択伐林施業の伐採許容量の考え方について考察した。そして、複数の目的をもって施業を行う森林において、様々な価値観を調整する手段として作業級を位置づけ、従来の木材生産の保続のためという作業級概念をさらに発展させた。

第2章では、本研究の対象となった東京大学北海道演習林について述べた。第1節では、演習林の位置、地形、地質、気候、植生、林況などについて概観し、第2節では、粗放な択伐を繰り返した1907年から1957年までの演習林の施業の経過について述べた。第3節では、1958年以降、演習林の森林施業の基本となっている林分施業法の考え方と方法について述べた。第4節では、林分施業法導入以降現在にいたる施業の経過および現行施業計画について述べた。第5節では、これまでの択伐林施業の経過を踏まえてさらに林分施業法を発展させるための課題について考察を加えた。そして、森林経営を取り巻く社会的・経済的環境の変化のもとで、これまでどうりの林分施業法を踏襲することは困難で、機械力による施業の合理化にも限界があり、情報面の整備によって集約的な択伐林施業に導いて行かねばならないことを明らかにした。

第3章では、このような知識集約的な択伐林施業を具現化するために、伐採許容量決定のための意思決定支援システムについて検討した。第1節では、演習林の管理経営の中における本システムの位置づけおよび設計にあたっての基

本的な考え方を明らかにした。第2節では、本システムにおいて使用する情報の種類を明らかにし、その収集方法および利用の程度について述べた。第3節と第4節では、直径遷移確率に基づく択伐林の成長予測の方法について検討した。なお、直径遷移確率とは、林木の成長をマルコフ過程に基づく確率事象としてとらえ、ある林木が一定期間後に次の直径階に進界する確率のことである。第3節では、ある範囲内の林分構造のもとでは直径遷移確率も一定であるという前提に立ち、林分の構造に応じてあらかじめ用意された直径遷移確率を用い、成長予測を行った。しかし、その精度は施業上許容される範囲にあるとはいえなかった。そこで、第4節では、直径遷移確率は立地条件や樹種構成の違いに応じて、林分ごとにそれぞれ異なるものであると考え、各林分の過去の成長量を将来の成長量とみなし、これを現在の直径分布に応じて成長量を配分し、各林分固有の直径遷移確率を計算する方法を明らかにした。第5節では、択伐林の林分構造を視覚的に表現するために新たに考案した樹形グラフについて述べ、択伐林施業の意思決定に利用する方法を明らかにした。第6節では、地理情報システムを用いて広範囲にわたる択伐林を管理する手法について、その考え方と具体的な利用法を明らかにした。第7節では、択伐林施業を実行する際に設定する長期的目標林の考え方について検討した。そして、安定した直径遷移確率の存在を想定し、目標林の林分構造を逆算する方法を試みたが、前提条件との矛盾が生じ、この方法は適切ではなく、それぞれの林分の遷移の段階に応じて目標林を変更しながら柔軟に設定しなければならないことを明らかにした。第8節では、これらを統合し、東京大学北海道演習林をテストサイトとして構築した伐採許容量決定システムの情報処理の方法について述べ、第9節では、その問題点について考察した。そして、広大でかつ変化に富む択伐林を対象とした林分調査の方法に課題があることが明らかになった。

第4章では、択伐林に含まれるウダイカンバ・ミズナラなどの形質が優れ、用材として価値の高い優良広葉樹の単木管理の考え方について考察した。このような考察を行った理由は、第3章で検討したような材積面のみから伐採許容量を決定していたのでは単価の高い優良広葉樹が優先的に伐採され、残された林分の内容が安定した森林経営を行うには十分でなくなる恐れがあるからである。そこで第1節では、材積に代わる尺度として立木価値という概念を新たに

導入し、立木価値の成長量に基づく優良広葉樹管理の考え方を明らかにした。第2節では、ウダイカンバ・ミズナラなどの優良広葉樹の樹幹形を解析し、その相対幹形が用材としての利用部分では安定していることを明らかにし、上部直径の推定に相対幹曲線を適応する手法の有効性について考察した。そして、優良広葉樹における相対幹曲線の有効な範囲を明らかにした。第3節では、優良広葉樹用材の市場調査の結果をもとに、形質・長径級と木材価格との相対的な関係を明らかにし、相対価値表を作成した。さらに、第4節では、この相対価値表を用いた立木の価値評価の方法および優良広葉樹の伐採許容量の決定方法について考察した。第5節では、優良広葉樹の直径遷移確率を計算し、これをもとにした本数管理曲線を用いて優良広葉樹を樹種別に管理する方法を明らかにした。第6節では、これらを踏まえた東京大学北海道演習林における優良木管理の具体的な進め方について述べ、第7節において実行上の問題点について考察した。そして、優良広葉樹の更新の確保の問題および管理上の人的・物的な基盤整備の問題が残されていることを明らかにした。

本論文の独創点として次の三点をあげることができる。一番目は、保続の単位である作業級概念を発展させて同一の森林空間に複数の作業級を設定させたことである。このことによって、複数の経営目的を調整するための森林管理手法が確立された。二番目は、天然林の成長量配分を相対化し、各林分の将来の成長を予測する直径遷移確率の計算にそれぞれの林分の直径分布を用いる手法を開発した点にある。このことによって、林分の特徴に応じたきめの細かい成長予測が可能となった。三番目は、優良広葉樹の伐採許容量の計算に、相対幹曲線を用いて生産される丸太の規格を予想し、立木価値という新しい尺度を開発したことである。

以上、本論文では択伐林施業における伐採許容量管理のための森林の物的組織の考え方と具体的な情報処理の方法について検討を加え、より集約な択伐林施業の発展方向を実証的に明らかにした。

択伐林施業計画のシステム化に関する研究

目次

はじめに	…	1
第1章 択伐林施業についての考え方	…	3
第1節 択伐林施業の今日的意義	…	3
第2節 択伐林施業の歴史	…	6
第3節 択伐林施業における伐採許容量の考え方	…	12
第2章 東京大学北海道演習林における択伐林施業の実践結果	…	21
第1節 東京大学北海道演習林の概況	…	21
第2節 林分施業法導入以前の施業経過	…	24
第3節 林分施業法	…	28
第4節 林分施業法導入以降の施業経過	…	32
第5節 林分施業法を発展させるための課題	…	36
第3章 択伐林施業における伐採許容量決定のシステム化	…	38
第1節 システムの基本設計	…	38
第2節 資源調査の方法	…	41
第3節 林型別直径遷移確率に基づく天然林の成長予測	…	45
第4節 林分直径遷移確率に基づく天然林の成長予測	…	51
第5節 樹形グラフによる天然林の林分構造の比較	…	59
第6節 地理情報システムによる天然林の管理	…	64
第7節 目標林の設定についての考え方	…	71
第8節 伐採許容量決定システムの概要	…	75
第9節 考察	…	79
第4章 択伐林施業における優良広葉樹の単木管理理論	…	82
第1節 優良広葉樹の単木管理の考え方	…	82
第2節 広葉樹の相対幹形の解析	…	89
第3節 優良広葉樹の丸太価格の長径級による相対的な関係	…	101
第4節 立木価値の評価	…	105
第5節 本数管理曲線の設定	…	111
第6節 東京大学北海道演習林における優良木管理の方法	…	117
第7節 考察	…	123
おわりに	…	124
引用文献		
図表		

はじめに

本論文では、択伐林施業をシステム化するための基本的な事柄について考察する。択伐林施業は森林の持つ多様な機能を最大限に発揮させることのできる施業方法として期待されている。しかしながら、現在、択伐林施業はごく一部の森林においてしか実施されていない。その理由として、択伐林の成長現象があまりにも複雑すぎて、これを定式化することができなかつたり、仮に、定式化できたとしてもその計算が複雑になり過ぎて、膨大な計算量の割には、経済的な見返りが少なかつたりしたこと、などが考えられる。しかし、択伐林施業の重要性が高まり、天然林の成長現象に関する新たな知見が得られ、コンピュータの発達した今日では、択伐林施業を取り巻く環境は著しく変化している。その結果、より精密な択伐林施業の収穫規整が実行可能となってきている。

東京大学北海道演習林では1958年以来、約30年間にわたり「林分施業法」という一貫した施業方針のもとに択伐林施業を実施している。その施業対象は約2万3千haにおよび、膨大な測定記録が残されている。

これらの資料を用いて数多くの研究が行なわれ、新たな知見が示されている。吉田ら¹¹⁹⁾は鈴木⁸⁵⁻⁸⁸⁾の林分遷移の理論を天然林の直径分布に持ち込み、直径遷移確率を用いて天然林の成長予測を行った。柴田⁷⁹⁾は天然林の林分構造をもとに林型を区分し、同一林型の林分は同じ成長パターンを示すという前提をおき、独自に考案した林型区分ごとに直径遷移確率を用いて将来の直径分布を予測し、これに応じた施業方法を提示した。一方、石橋²²⁾は同一林型の林分でも必ずしも同じ成長パターンを示すとは限らないと考え、林型に拘わらず期首の直径分布に応じて直径遷移確率を変化させるフィードバック型の成長モデルを提案している。さらに、空中写真や衛星リモートセンシングの技術によって、広大な区域の森林を繰り返し調査し、その結果を数値情報化することが容易になった⁶⁶⁾。

近年、これらの情報を処理する技術は飛躍的に進歩している。森林情報は属地的に整理することが不可欠であるが、これを数値化して処理する地理情報システム(G.I.S.)は、地形図や土壌図といった地理情報を演算処理することを可能にする。また、データベースは、既存の情報や互いに関連のある複数の業

務から得られる情報を統合し、集中的に維持管理し、検索やより高度な情報への加工に利用できる⁷³⁾。

択伐林施業を実施するにあたっては、当然これらの情報や技術を総合的に利用して様々な意思決定がなされるべきである。従来の択伐林施業においても、これらの情報が全く使用されていなかったわけではなく、個々の施業担当者がその経験に基づき判断を下していたわけである。しかし、その判断には経験と観察力に基づくかなりの情報量が要求され、同時にそれらの情報を統合してある行為をなす際には個人差もかなりあった。このことが、択伐林施業の一般化を阻む一つの原因になっていたと考えられる。

そこで、本論文では東京大学北海道演習林を対象として、これまでに得られた価値ある情報を整理し、すべての施業担当者が共有することのできる択伐林施業意思決定支援システムを構築する方法について考察する。ここでは意思決定の対象として、択伐施業林の伐採許容量をとりあげ、コンピュータシミュレーションによって決定する方法について検討する。さらに、択伐林施業において保続原則と経済性原則をともに満たすことをめざし、形質が優れ用材として価値の高い優良広葉樹を管理するための立木の価値に基準をおいた新しい経理方式について考察する。

第1章 択伐林施業についての考え方

本章では、択伐林施業およびその伐採許容量についての様々な考え方を整理する。第1節では、現代社会における択伐林施業の位置づけと実行上の問題点について述べる。第2節では、ヨーロッパおよびわが国における択伐林施業の歴史について概観し、これまでの択伐林施業をめぐる議論を整理する。第3節では、択伐林施業における収獲規整の問題に焦点を絞り、従来の考え方を整理したうえで、本研究における択伐林施業の伐採許容量の考え方について考察する。

第1節 択伐林施業の今日的意義

森林は人間社会に対して木材をはじめとする林産物を供給するという直接的効用だけでなく、様々な間接的効用を与えている。すなわち、森林は、第一に、生活用水、農工業用水などの水需要増大に対して、水資源を涵養する機能を果たしている。第二に、人間の活動域の拡大に伴い、洪水や土壌の侵食・崩壊の防止など国土の防災面における役割を大きくしている。第三に、都市化の進展に伴う各種のストレスが表面化し、人々の自然に対する精神的欲求が増大しているため、人間性回復の場としての役割も求められている。そのほかに、大気や水の浄化、騒音の防止、都市気温の調節、野生の鳥獣や植物の保全など自然環境としての効果も認められている。このような森林の公益的機能を重視する傾向は、わが国だけでなく欧米諸国においても顕著にみられる¹⁶⁾。そのためには一定の地域内に様々な機能を果たしうる森林がバランスよく配置されなければならない。いま、森林利用の新しい秩序⁴¹⁾が求められているが、これらの様々な要求を満たすための森林施業として択伐林施業が見直されようとしている。

例えば、水保全機能や国土保全機能を最高度に発揮させるためには、森林土壌を確実に保全することが必要である。このためには、地表侵食や崩壊等から森林土壌を守り、かつ浸透・浸水・保水能を改善する作用について望ましい森林植生を保たなければならない。具体的には、根系が深く、かつ偏りなく伸張り、林床には落葉層や低木・草生が豊かで安定しており、地表侵食防止効果の高い森林を常に保持することが理想である。そのためには、その地域に適した

複数の樹種からなり、健全な大径木を主林木とし、樹齢・樹高階層とも多様で、現存量が大きく、生態系として安定した生命活動の盛んな複層林を維持することが必要である⁵⁶⁾。また、林業経営の面からみても、このような森林は次のような有利な面を持っている。まず第一に、樹冠層や根系部が多層にわたって存在することから、地上部・地下部の空間を最も有効に利用し、太陽エネルギーを効率的に利用して林木を成長させることができる。第二に、森林土壌の維持によって地力の低下を防ぎ、成長量の高い状態を恒続的に維持することができるので、長期的な観点に立てば林分の平均成長量でも皆伐施業より優れていると考えられる。第三に、多種多様な林木を保持し、需要構造の変化や病虫害の発生など様々な社会的、自然的要因の変化に対して柔軟に対応することのできる安全性をも兼ね備えている。第四に、適度に被圧を受けることによって林木は、通直で木目のつまった高い品質の木材を生産することができる。第五に、同一林分からの収穫回数を多くすることができ、経営の弾力性を増すことができる。第六に、更新にあたって気象害を回避することができ、皆伐後の造林では更新不適とされるところまで更新地域を拡大することができる。さらに、森林景観の面でも、このような森林は優れているといえることができる。

このような森林を維持するための森林施業として、択伐林施業は十分大きな今日的意義をもつといえることができる。しかしながら、現在、積極的な森林施業としての択伐林施業はごく一部の森林においてしか実施されていない。それには、いくつかの要因をあげることができる。まず、択伐林施業は一斉皆伐方式に比較してより集約的なものであり、その前提として高密度の道路網が必要であるが¹⁰⁸⁾、現実に十分な道路網を備えた森林が少ない。また、一斉皆伐方式が理論的に明確であり、森林の秩序づけや造林上の各種の技術の基礎が確立しているのに対し、択伐林施業はいろいろ実験されているにも拘わらず、その構成・生産方法を明確に定式化できない。これまでの択伐林施業では、道路網が未整備のために地利級のよい箇所に伐採が集中し、跡地の更新・保育も十分に行われなかったため結果的に生産力の低い粗悪林になる例が多くみられた。このため、択伐林施業は一般に収益性の低い消極的な森林施業と見なされてきた。択伐林施業を一般化するためには、地利級のよい林分で伐採間隔を短くすることによって伐採率を低くし、林分の破壊を最小限に抑えるような施業を確

実に実行して行かねばならない。本研究は、そのうちの択伐林の伐採間隔については東京大学北海道演習林における現行の回帰年を前提としながら、そのなかで各々の林分の伐採許容量および広範囲にわたり点在する優良広葉樹の伐採許容量の問題に焦点を当て、択伐林の成長量と経済的価値の維持を図るための方法について考察するものである。

第2節 択伐林施業の歴史

原始的な択伐は、人類が森林と関わりを持ち始めたときから行われているが、それは更新を無視した略奪的抜伐りに過ぎず、施業といえるものではなかった。択伐林を表す“Plünderwald”という言葉は、いつも不規則な施業が行われ、濫伐によって経済的価値の低下をきたしている百姓林に対して悪い意味で用いられたといわれている³⁾。こうしたなかで、択伐林施業は法正林思想に基づく皆伐一斉人工林方式に対する反省として生まれた。皆伐一斉人工林方式は森林経理学による理論的裏付けを得て、19世紀の終わりにはドイツを中心にヨーロッパ各地に広がっていた。法正林思想は、G.L.Hartig(1764~1837)とH.Cotta(1763~1844)によって創案された平分法に基礎をおき、Hundeshagen(1783~1834)は森林経営の理念的目標として法正林を位置づけた。さらに、Judeich(1828~1894)は保続性よりも経済性を重視した林分経済法を提案した。そこでは経済的犠牲をできるだけ小さくして、最も有利に森林を経営しようとする営利追求の精神が主体になってきた。しかし、19世紀の終わりから20世紀のはじめ頃になると、ドイツでは大規模な皆伐の繰り返しに起因する地力の衰えによる生産力の低下、病虫害の発生など多くの問題が生ずるようになり、森林の病的状態を回避するため漸伐作業や択伐方式による施業を試みるものがあらわれた。ドイツ・ミュンヘン大学の造林学教授K.Gayer¹⁰⁾は「造林上の目的を達するには、我々はあらゆる森林形を使用すべきであって、そのいずれの一つにも専制を許すべきではない。しかし、一切の健全な施業の目標は、森林を有用ならしめることのほかに、その生産力を損なわずに維持することにおかねばならない。」と主張した。しかし、その思想はドイツ国内では多くの技術者から非難を受け、地形的な要因から皆伐施業の困難なスイスにおいて受け入れられた。ドイツ国内でこれに続いて皆伐一斉林の施業方式に対する批判を行ったのはC.WagnerとA.Möllerであった。C.Wagner¹⁰⁵⁾は「施業が森林を決定するのではなく、森林が施業を決定する」という立場から、帯状択伐作業を主張した。A.Möller⁴⁷⁾は「森林は、ただ単に多くの生物(有機体)によって構成されているだけでなく森林そのものも一個の生命体(有機体)である」として、「有機体は、あらゆる部分が完全に健康である場合にのみ、その生活機能を力強く実現することが

できる。われわれにとって、実際的に最も重要な森林有機体の機能は、木材生産である。これが、最大の量と最良の質において、保続的に、恒久に、かつ円滑に行われなければならないとすれば—そして、それが、まさしく造林の努力目標なのである—森林有機体は健全でなければならず、森林は、あらゆる部分が無条件に、健全な状態に導かれなければならない。そして森林が、かかる状態に在り、また、その状態を持続するには、森林有機体の恒常性が維持されなければならない。かくして、恒続ということが、造林の基本的普遍的な要求となったのである」と述べて、恒続林思想を主張した。ここでは、恒続林施業とは真に森林有機体の恒続を確保するという目的によって特徴づけられる施業法であり、恒続林はそのような目的の下に施業される森林をさすことになる。したがって、森林有機体の恒続を図ることを最高基本原則と認めている施業はすべて恒続林施業と名付けることができ、皆伐以外の作業種については森林有機体の恒続が可能である。しかし、恒続林施業の結果得られる林相は混交林、異齡林であり、いわゆる択伐林型、複層林型の択伐林施業が恒続林施業の基本形となる。

フランスにおける択伐林施業の歴史は、17～8世紀までたどることができる。こうした施業はビュッフォン、コルベール、デュアメルらを経てA. Gurnaudに至って照査法という形で完成を見た⁴⁹⁾。A. Gurnaud¹¹⁾は1879年万国博覧会に際して、エペロン (Eperon) の森林で実施している照査法の結果を発表した。しかし、これは他の地域では実行するための条件が整わないものとして無視された。A. Gurnaudの思想を受け継いだのはスイスの林業であった。Biolley⁶⁾は、1887年以來ヌーシャテル州 (Neuchatel) のクヴェエー (Couvét) において実験を続け、1914年にその結果を発表した。照査法の基本的な考え方は次のようにまとめることができる。森林の多層化を図り、空間の効率的な利用を間断なく行えるようにする。そして、森林の量的向上とともに質的向上を図る。このことをBiolleyは以下の3項目で表している。1) できるだけ多量の木材を生産する。2) できるだけ少額の資本によって生産する。3) できるだけ価値の高い木材を生産する。しかし、この思想が認められるまでには長期にわたる実践と研究が必要であった。このほかに、R. Balsiger⁵⁾は択伐林の森林經理をEmmentelのモミ林施業を通じた実践的立場から論じ、伐出作業の直営方式や補助造林を提唱し、

W. Ammon³⁾は、技術者尊重の管理原理を強調して、更新の連続性と気象害やその他の危害に対する最大限の抵抗性を維持するような森林施業を指向した。また、H. Knuchel³⁴⁾は照査法を森林経理学の立場から、具体的な経営案を提示しながら論じている。

わが国に択伐林施業の思想が導入されたのは1920年代であった。これは先進的林業技術を学ぶため渡欧した当時の林業試験場技師寺崎渡⁹⁶⁾らがヨーロッパにおける最新の林業技術として伝えたものであった。この思想はわが国の多くの林業技術者の支持を受けた。その当時の背景として、林業技術者の地位の向上と待遇の改善を図るため、林業技術を駆使した集約な森林施業の拡大を図る必要に迫られていた。また、1899年に開始された国有林野特別経営事業が1921年に終了し、山林局の予算は伐採経費を除いて削減されていた。このため造林経費は減額され、保育の手遅れのために成林の危ぶまれる造林地が増加していた。山林局では1929年から天然更新作業に関する予算を新たに計上し、択伐林施業が実行に移された。その結果、1940年までに皆伐林の面積割合は65.4%から39.5%に減じ、択伐林は17.3%から40.5%に増加した³²⁾。従来の択伐作業は国土保全上重要であったり、標高が高いなどの理由で皆伐作業の適さない森林を対象とする消極的択伐作業であった。しかし、このとき択伐作業が増加したのは青森のヒバ林、秋田のスギ林、魚梁瀬のスギ林を中心とする良質の天然林であり、積極的択伐作業の増加であった。御料林においても国有林における作業方法の変更の影響を受けて、1936年の施業規程の改訂にあたり施業の主体を択伐作業に改め、皆伐作業27%に対して択伐作業67%となった。とくに帝室林野局旭川支局において黒化促進策が行われ、択伐作業の面積割合が92.5%となった。これは、天然更新補助事業の一環であり、上木を広葉樹に占められ、樹下に多くのトドマツ稚樹を含んで、両者の激烈な競争下にある森林に対して、上木を伐りのぞくことによって競争を緩和させ、下木であるトドマツ稚樹の成長を促進させようとする施業であった¹⁰⁶⁾。

このような急激な択伐林施業の導入に際し、1928年の林学会春期大会において「近時の森林施業法に対する造林学的考察」と題し、その是非をめぐる討議がなされている。ここで、佐藤弥太郎⁷⁵⁾は造林学の立場から天然更新の技術は研究途上にあり、普遍的なものとなっていないため技術的确实性に問題がある

ことを指摘した。吉田正男¹¹⁸⁾は経営論の立場から、著しく集約な施業である択伐林施業を大規模に実行するには管理組織面での改編が必要であること、交通・運輸設備が十分でないわが国の現状において、造林費が節約できても管理費・搬出費が増額となるので経済的确实性に問題があることを指摘している。寺崎渡⁹⁷⁾も国有林の施業形式と管理機構は不十分なものであり、スイスで行われているような照査法をそのまま実行することは困難であることを認め、指導者の養成が重要な課題であると述べている。和田国次郎¹⁰⁴⁾はヨーロッパの林地と比較して下層植生の繁茂が著しいこと、林内の搬出路の整備が十分でないこと、現在の林分構造が天然更新に不適當であることを理由に普遍的に天然更新を目的とする作業法を実行するべきではなく、急激な作業方法の変更は林業上危険であると主張している。これに対して、山林局側³⁸⁾も、択伐林施業は天然更新の确实なところにおいてのみ実行する、搬出費・管理費の増額は成長量の増加に比べれば問題にならない程度の大きさであると反論し、択伐林施業を実行するという主張を変えなかった。このとき国有林には択伐林施業実行の目的の一部に老齡過熟林分開発の目的も含んでいた。皆伐施業をとった場合、老齡過熟林分は成長量も期待されず死蔵されるが、択伐林施業に編入されれば回帰年の間には伐採がおこなわれ、老齡過熟林分であるため収穫量も多く、優良木・大径木の伐採により収入も増大するということも考えられていた。

しかし、これらの択伐林施業は、その本質が十分に究明されず、技術的にも不完全なうちに導入されたため、資金不足も加わり必ずしも集約な施業を実行することができず多くは更新の面で失敗した。これに加えて、第二次世界大戦に入り緊急伐採などもあって、結果として成長量を上回る伐採が行われ、択伐林施業のほとんどが失敗した。

戦前の択伐林施業が簡単にくずれさった原因について、四手井⁸²⁾は次のように説明している。「ドイツにおける森林生態学の発展は、皆伐の繰り返しによるトウヒの人工造林、なかでも落葉広葉樹林への針葉樹人工造林のくりかえしによって、代をかさねるにつれて急速に森林生産力が減退し、また病虫害、風害などの多発などのために自然、森林植生の推移に立った新しい更新作業法の研究に対する要求が強くなったことによる。そして、人工植栽による土壌の悪化が研究され、森林生態学的研究が発展したのである。わが国では、明治末期

からの特別経営による大面積人工造林地に不成績造林地が多発するようになったとき、この新しいドイツにおける造林思想が入ってきたが、わが国の人工造林の不成績の原因はドイツにおけるような数代の造林の繰り返しによるものではなく、むしろ手入不足、保育管理の粗末さの故であった。しかし、表面的によく似た様相を呈した人工造林不成績地に対してその原因をさぐる前に、無批判に自然主義的な作業を適用しようとした。すなわち、ドイツとわが国では森林の組成もかなりちがいが、ドイツの亜寒帯造林では植生も単純で、群落組成と気候、土壌、地形がよく一致し、立地の判定が容易であったが、わが国の暖温帯の森林は高温多湿で地形複雑で植生と立地との直線の結び付きを求めることは困難であった。しかも、これらの作業法は一部の学者、研究者、技術者に支持されただけで、一般の林業技術者や実行者には理解できず、また熱意はなかった。そこへ第二次大戦がかさなり、更新保護が無視された森林の無計画な伐採が行われるようになったためである。」

このように、当時の択伐林施業導入はヨーロッパの造林思想を十分に消化しきれないうちに、わが国に当てはめてしまったといえる。しかも、集約的であるべき択伐林施業の実施にあたって、十分な資金面、組織面、技術面での裏付けがなかったため失敗に終わり、かえって択伐林施業そのものの印象を悪くする結果になった。

第二次大戦後は北海道を中心として択伐林施業の試みがなされた。1950年、旭川、函館両営林局では「天然林施業方針」を採用し、北見営林局では「天然林改良事業」を開始した。この時期の施業方法は、成長量の低下した荒廃林地を小面積に人工造林し、その成林を待って徐々に更新を広げてゆくというもので、その本質は小面積皆伐というべきものであった¹⁰⁶⁾。1955年、国有林では国有林長期生産計画を樹立した。その施業方針は、急速に拡大した木材需要に対応して人工造林可能な地域は原則として皆伐作業を採用し、跡地には積極的に針葉樹を植栽するというもので、国土保全上または風致上皆伐施業を不適当とする森林、地利の悪い奥地林などを除き択伐林施業は大きく後退した。しかし、北海道のエゾマツ・トドマツおよび青森ヒバ、木曽ヒノキについては天然更新による成林が期待できるとして、択伐林施業が採用された³²⁾。

しかし、1954年の洞爺丸による大規模な風倒被害のため、北海道国有林の択

伐林施業は実行が困難となった。そして、1958年の経営規程改訂により生産力増強計画による大面積の拡大造林方式が実施に移された⁷⁹⁾。

一方、北海道有林でも林力増強計画を策定し、1958年から1968年までは過熟老齢の天然林を成長量の大きい人工林に転換しようとしたが、カラマツ先枯病の被害が続出し1962年度に表面化した財政赤字をきっかけとして、1968年からは自然力を活用する天然林施業へと転換し、現在に至っている²⁹⁾。

国有林でも木材生産重視から公益的機能の確保を重視するよう方針を転換し1973年「国有林における新たな森林施業」を策定した。これによると、一定の標高以上の林分は皆伐新植の対象から除外され、択伐もしくは漸伐林の施業面積が拡大した。しかし、この時の施業方法の変更は、拡大造林を行わないという点に主眼がおかれ、積極的に択伐林施業を実施しようというものではなかった。さらに、1987年には森林資源基本計画の見直しが行われ、複層林施業および天然林施業の目標面積を増加させた。ここでは、天然林施業に「育成天然林施業」を新たに設け、地表かきおこし、刈払い、植え込みなどの更新補助作業によって積極的に人手を加える施業方法を増加させている。

一方、東京大学北海道演習林では、国有林・道有林が林力増強計画のもとに大面積拡大造林を始めた1958年以降、これと全く逆な考え方のもとに「林分施業法」として体系化された積極的な択伐林施業を一貫して実行している。林分施業法の内容については第2章で述べる。

第3節 択伐林施業における伐採許容量の考え方

森林資源の特徴は、第一にそれが再生可能な循環資源であるという点にある。第二の特徴はこの資源が前述のような様々な機能を保持していることにある。第三の特徴は、この資源が極めて破壊されやすいことである。それは、森林のかなりの部分が将来利用可能となる資源を生み出す原資であるのに、この原資と収穫可能の部分が不可分に結び付いているため、様々な理由により過剰な収穫がされやすいからである。そしていったん破壊されたならば、その回復には長い年月と多大な育成努力を必要とする。このような観点から生まれた概念として「保続」がある。これは、永続的な収穫を図るべく森林を管理してゆかねばならないということである。森林を経営・管理するための物的組織を研究することを中心的課題としてきた森林経営学がこの「保続」を森林経営の第一の指導原則として掲げてきたのは至極当然であった。

しかし、この「保続原則」が具体的にどのように森林経営学の中で生かされるかという点については、森林の経営目的やその目的を遂行する施業手段などによって変化する。

森林が多面的な機能を常時適切に発揮できることの前提は、森林が人々に様々な利用されながら常にその状態が再生産されていること、すなわち、森林が動的に安定した状態にあることである。森林を適切な方法で利用していくなれば、それによって森林を安定的に維持してゆくことができる。これに関連して「伐採許容量」という概念が生まれてきた。それはこの保続生産の可能な最大収穫量であると定義できる。

こうした森林資源の保続とか伐採許容量という概念が社会的に認識されるようになったのは、森林を乱伐することによって森林が荒廃したり、木材が不足してそれが社会的な問題となってからである。

森林資源が十分に存在している場合、人々にとって問題となることは、そこからいかに能率よく木材を伐採搬出するかということである。その結果、森林の伐採や集運材の技術が発達し木材が大量に伐り出されるようになる。こうして森林資源が減少し、このままでは資源がいずれ枯渇するということが明らかになると、はじめて人々の前に、いかに森林資源を管理してゆくかという問題

が提起される。そこで森林を管理する方法とか、森林を再生させる技術が発達してくる。

ところで、適切な収穫量とはどのようにして決まるのであろうか。収穫量は一般的には所与の森林において大きければ大きいほど好ましいことは明らかである。しかし、その量がある限界を超えると、将来、収穫を続けることができなくなるような事態の生ずる危険性がある。そこで生産の保続が可能である収穫量（＝伐採許容量）をいかにして決定するかが森林経営上の重要な課題となる。

保続生産が保障されるための十分条件は、収穫量を森林の成長量以下に抑えることである。これは現在でも森林を管理経営する上での根本的原則である。収穫技術を体系化した森林経営学の中の収穫予定法でも、その根底にこの思想がある。しかし、この森林からの収穫を成長量以下に抑えるという思想を現実に適用しようとする場合、多くの問題が生じてくる。

まず第一は、何を保続するかという問題である。木材は質的にも多様である。この多様なものの中で、一体何を保続するのかということが問題なのである。最も単純な保続とは、木材の質を捨象した量のみでの保続である。木材を単に量としてみるのには、例えば住民がこれを日常生活で炊事や暖房等に利用する場合が典型的である。このような保続は歴史的にも最初に現れた保続概念であり、これが基本的なものである。しかし、木材を商品として交易の対象に使用とする場合には単に量的なもの以外に質的な面も考慮されるようになる。この場合、市場で素材として一定以上の価値の認められたものの保続が考え出されてくる。例えば「木曾の五木」というように樹種が限定されたり、それらが目通り七寸以上でなければならないというような様々な規定をもった素材の保続生産が問題となるのである。したがって、こうした収入に大きく寄与する木材の生産保続が重要なのである。そして、現在では森林から生ずる木材以外の様々な効用を生産物として捉え、これを保続生産する考え方も生じている。

このように何を保続の対象とするかということは社会経済的要請および当該森林の経営者の意志によって様々に変化する。

第二の問題は伐採許容量を決定するために森林成長量をいかに査定するかということである。これは森林計測とそれに基づく成長予測の問題である。計測

の対象としての森林資源には次のような特徴がある。

- ①形が複雑で重量が重いこと
- ②山野にあって直立しており動かすことのできないこと
- ③大量のものを取り扱わなければならないこと
- ④成長するものであること。この成長量の査定では、論理的には蓄積査定の場合の2倍の誤差をもつ。

以上のような特徴から、森林の計測は極めて労多くしかもその精度は低いものとならざるをえない。このように現在と将来を含めた資源量の把握には必然的に大きな誤差を伴うため、現実には伐採量を決定しようとする場合、本質的には森林の成長量を基準にするとしてもこれには安全度をかけることが必要となる。このように様々な側面から安全度がかけられて決定されるのが伐採許容量である^{53, 55)}。

蓄積や成長量の把握が困難な場合とか、より確実に保続を守るために、時として伐採量の基準が木材の量ではなくて森林の面積であったりする場合もある。これは森林の成長量を伐採面積を単位として査定したものであり、保続生産の手段としては最も単純かつ確実性がある。

このように伐採許容量を決定する方法は極めて多様である。その手続きは収穫予定法として森林経営学の中で体系づけられている。しかし、それが現実の経営の中でとる姿は必ずしも明確ではない。そこで、代表的な択伐林の収穫規整法について概観することにする。

1. 古典的収穫規整法

Beckmannの材積配分法は、大小不揃いな林木が散在する針葉樹択伐林を対象に考案されたもので、これについて井上¹⁷⁾は「全域の林木を直径の大小により成木と未成木にわけ、未成木が成木となるまでの期間を経理期間として、その間の成木の成長量を推定して成木の現蓄積に加え、これをその期間の収穫予定量とし、その年平均額を標準年伐量とするものである。」としているが、これでは成長量が過大に評価されるので、鈴木⁸⁹⁾は次のような解釈を示している。

「ある択伐林において、一定の直径より大きなものの蓄積をVとし、これが一定の成長率 $0.0q$ で成長するものと仮定する。このような森林から毎年一定の収

穫 E をあげたとすると、第 u 年の終わりの蓄積は $V1.0q^u - E(1.0q^{u-1} + \dots + 1.0q + 1)$ となる。 u 年でこれが全部伐採され尽くすとすれば、毎年の収穫量 $E = V1.0q^u 0.0q / (1.0q^u - 1)$ となる。」

法正蓄積法は成長量を収穫の基礎とし、法正蓄積の造成を目標としている。Kameraltaxe法は法正蓄積法のうち最も古く生まれたものであり、択伐作業にも適用される。標準伐採量 E_w は次式で示される。 $E_w = Z + (V_w - V_n) / a$ ただし、 Z は当初、総伐期平均成長量とされたが、現在は現実連年成長量。 V_w は現実蓄積。 V_n は法正蓄積。 a は更正期。この式で、 Z 、 V_w 、 a は時間とともに変化するので、必要に応じて E_w は見直さなければならない。成長量法は、査定した成長量をそのまま収穫量とするもので、間接的に連年成長量を査定する成長率法と直接的に連年成長量を査定する照査法がある。成長率法は現実蓄積 V_w に成長率 $0.0q$ をかけたものを連年成長量 Z としこれを収穫予定量 E_w とするものである。したがって、 $E_w = Z = V_w \times 0.0q$ となる。成長率の査定には成長錘を用いて標準木の成長率を算出し、枯損率を差し引いて全林の成長率を推定する。

これに対して、照査法⁶⁹⁾では直接的に連年成長量を収穫予定量とする。そのための手順として、まず、森林を面積の小さい林班に区画する。林班数は経理期間の年数以上、できればその年数の数倍を設け、これを一つの経営区とする。経理期間ごとに測径限界以上の全立木の胸高直径を測定し、立木材積を求める。そして、いかなる理由により伐採されたかに関係なく、林分から取り除かれた樹木は蓄積の減少として記入する。照査法では立木材積を表すときは、丸太材積の場合と区別して“sylve”という単位を用いる。経理期間は各林班が原則として1回の伐採を受ける期間をいう。成長の経過を正しく把握するためには調査を短期間で繰り返すことが必要であり、また経理期間が短いと、それだけ弱度の伐採を繰り返すことになるので撫育的にも望ましい。したがって、短い期間を考えるものであるが、必ずしも固定的なものではなく、林木の成長状態に応じて決められる。一般に成長が旺盛である林班は状態の悪化も改善も急激であると考えられるので経理期を短くしなければならない。次に、経理期間の初めと終わりに行われた2回の蓄積調査をもとに、経理期間内の成長量を求める。いま経理期間のはじめにおける蓄積を V_1 、その経理期間の終わりにおける蓄積

を V_2 、その期間内に伐採収穫した立木材積を N とすれば、その期間の成長量 Z は $Z = V_2 - V_1 + N$ とあらわされる。このようにして求めたある経理期間の成長量を次の経理期間の収穫予定量とする。しかし、この収穫予定量は、あくまで見込みとして提示するものであり、いかなる意味でも実行者を束縛してはならない。実行者は、施業上から稚樹発生状態や各林木の生育状態などを観察し、将来最も理想的な質および量を備えた森林を実現すべく、提示された収穫予定量を調節加減して実行する。照査法において、成長量の調査は森林状態を絶えず観察することに比較すれば第二義的な問題に過ぎない。

2. 択伐林の法正状態

照査法は、収穫規整法としては *Kameraltaxe* 法と同じ手法であって、理想状態をめざして実行者が調節加減するというのは、*Kameraltaxe* 式の $(V_w - V_n) / a$ の部分に相当すると解釈できる。しかし、根本的に異なるのは *Kameraltaxe* 法では法正蓄積 V_n をあらかじめ定め、これに向けて施業を進めるのに対して、*Biolley*⁶⁾ は皆伐林で数字的に求めたような架空的の法正林を決めることは無駄であって、それぞれの森林につき経験に基づいて生まれる合理的な森林状態を見いだすほかに方法はないという。また、*Knuchel*³⁴⁾ はできるだけ高い成長量が恒久的に確保されるような平衡状態が獲得されるべきであり、この状態は一定の蓄積量・径級比でのみ達成されるものではなく、ある範囲内でのみ得られるという。この点について吉田¹¹⁸⁾ は次のように指摘している。「若し果して照査法が、具体的なる目標林に近づくべく目標付けられたるものとすれば、それは既にいわゆる経験法、帰納法としての本質を失ったものといわねばならぬであろう。従来のできる法正林を目標として施業するものと本質的な差異は存せぬといわねばならぬ。又もし、目標林は常に未知なりとするならば、*Waldbauer* 氏も指摘するごとく、照査に依る過去の施業の成果の判断の基礎は抑も如何なるところに求むべきか、将来への精進の基準は何に求むべきか、目的とするところは何れの時に実現されるか、又これを実証し規定しうるかという疑問も成立するであろう。」

天然林を取り扱うにあたり、注意深く森林を観察し、経験に基づいてその発展させるべき方向を見定め、きめ細かな施業を行っていくというのが照査法の

考え方である。しかし、大面積にわたって択伐林施業を実施しようとする場合、一人の担当者だけで実行することは不可能であり、複数の施業担当者が森林を管理することになる。そのためには、具体的な目標林の姿を描いておく必要がある。このとき、択伐林の平衡状態が存在するか否かについては意見の分かれるところである。一つの考え方は、個々の択伐林にはそれぞれ固有の平衡状態が存在するものであり、それは一つの数式で表現可能であるという見解である。他の一つは、択伐林の状態は一つの過程で常に動いているものであり、そのなかで人間の志向に適合するように保育管理を繰り返して行くのが択伐原理であるという見解である。

南雲⁴⁹⁾は前者の立場に立ち、択伐林の施業方法が明確に規定され、それに基づいて施業が実施されている場合には、森林は蓄積とか成長量の面で何らかの限界に達した状態があり、森林をこの状態の近傍にとどめておくことは可能であると考え、その状態を択伐林の法正状態と定義した。そして、法正状態とは①成長量が恒等的に高いこと。②森林を任意の状態からその状態の近傍に誘導することが可能であること。③その状態の近傍に安定的に維持することが可能であることの3条件が満足されるものでなければならないとしている。さらに、南雲はある時点の直径分布が次の時点までにどのように変化するかということは直径階ごとにあらかじめ定まっている確率に基づいておこなわれると考え、直径遷移確率を用いて森林の状態の変化や施業の結果を表現し、法正状態の直径分布を数学的に導く方法を示した。

これに対して、石橋²²⁾は後者の立場をとり、天然林の状態は決して安定したものではなく一定のサイクルのもとに遷移するものであると考え、東京大学北海道演習林の固定標準地の資料を用いて、直径分布の遷移パターンを示した。それによると、例えば、トドマツ主体の天然林では、上層木の寿命が150年前後であり、その度に中小径木の成長が促進されて指数型の直径分布が崩れ、直径分布のフクラミが生じ、そのフクラミが大径級へ移動し、やがてこのフクラミは中径級と大径級に分離されて消滅し元の指数型の直径分布に戻るという繰り返しが行われる。

3. わが国における択伐林の収穫規整

現在、わが国で実行されている択伐林施業の収穫規整のあらまは以下のとおりである。東京大学北海道演習林¹⁰¹⁾では、成長率法により収穫量を決定している。具体的には、まず、固定試験地の成長資料をもとに枯損量などを勘案して求めた平均成長率を定めておく。次に、標準地調査により林分材積を推定し、これに平均成長率をかけた成長量をもとに収穫量を決定している。現行の施業計画では、回帰年10年の択伐林分の標準伐採率を16%、再生林択伐林分の標準伐採率を25%と定めている。このほか北海道内の択伐林施業の事例^{57,63)}を見てみると、定山溪国有林でも成長率法による収穫規整を行っており、回帰年15年の択伐林分の標準伐採率を25%としている。また、北海道大学の中川演習林では基本的には成長率法にあたるが、回帰年や標準伐採率にかなり幅をもたせ、弾力的な択伐林施業を実施している。これは、天然林に対する施業方針が確立されていない状況下で、今後の新たな技術の確立や利用状況の変化に対応するためと説明されている。一方、北見地方の道有林の一部では、蓄積の回復のために目標蓄積を設定し、これと現実蓄積の差を勘案して収穫量を定めるといった、法正蓄積法を採用している。また、下北のヒバ択伐林においても法正蓄積法を採用している。一方、置戸町の道有林の一部では、約79haの試験林を設定し、Biolleyの照査法を忠実に実行している^{31,33)}。ここでは、回帰年は8年とされ全林毎木調査の結果から成長量を割り出し、収穫量を決定している。伐採率は林分ごとに異なるが、おおむね20%前後である。

4. 新たな視点に立った収穫規整の考え方

Speidel⁸⁴⁾は、林業経営の永続・恒常・均等に対する努力を有形・無形の目的設定要素に方向づけ、とくに国土保全的給付と保健休養的給付を保続性の内容に取り入れることができるとしている。また、保続性を静的・動的に理解し、静的保続性（状態の保続）には面積保続性・蓄積保続性・価値保続性・資産保続性・資本維持などを掲げ、動的保続性には、林木成長の保続性・林木収穫の保続性・貨幣収益の保続性・付加価値・保安効果・多目的利用などの保続性を示している。択伐林施業を行うときにもこの静的保続性と動的保続性を組み合わせ、施業の仕組みを考えるべきである。

森林有機体の維持を第一義的に考える照査法の立場にたつならば、静的保続性を重視しなければならないであろうし、従来からの木材生産を重視するならば、動的保続性を重視しなければならないであろう。そこで本論文では次のような管理水準を想定し、それぞれの水準ごとにこれらの問題を解決することにする。

第一水準として森林施業の最も基礎となる小面積の個々の林分を考える。次に、この林分の集合体である小班程度の広がりをもつ第二水準を考える。そして、さらに広い事業区のレベルの第三水準を考える。

第一水準においては、植物社会学的見地から林木の単木的な管理を行い、後で述べる林分施業法の6原則を遵守しながら伐採を行う。次に、第二水準においては伐採許容量という量的な概念を導入して静的保続性を重視し、目標林に向けて林分構造の管理を考える。具体的には収穫調査を行うにあたってのガイドラインを数値で示すことになる。そして、さらに広い第三水準において、動的保続性を考慮し、生産量の維持を図らなければならない。第二水準の静的保続性が確実に守られるならば、第三水準はできるだけ広範囲に設定し、第二水準の組合せが柔軟に行われるように配慮すべきである。

作業級とは、「一事業区内において、樹種・作業法・伐期齢がほぼ等しく、施業上同一の取り扱いを受けるべき林分の集団であって、これを収穫規整の基礎として保続作業を行う森林経理上の単位である。」とするならば、この第三水準が作業級に相当することになるであろう。また、作業級の実体を、「林分の集団とその土地を含めた森林概念である。」と考えるならば、一つの林分には一つの作業級しか存在しないことになる。しかし、現実の森林は必ずしも単一目的ではなく、複数の目的をもって施業されていることが多い。このようなときに、いくつもの目的を同時に満足させるため、それぞれの目的ごとに作業級を設定することを考える。

例えば、ある地域の森林に対して、貴重な動植物の遺伝子を保護するという目的、国土の保全や水資源の確保という目的、山村住民に生活の場を提供するという目的、都市住民に憩いの場を提供するという目的が重複して存在するでしょう。ここでは、それぞれの目的ごとに作業級を設定し、保続を図るべきものを明らかにする。例えば、貴重な動植物の遺伝子を保護するためには特定の

種の個体数を維持しなければならないし、国土の保全や水資源の確保のためには、一定面積以上の成熟した森林が必要である。また、山村住民に生活の場を提供するためには一定量以上の伐採量が求められ、都市住民に憩いの場を提供するためには新緑や紅葉の美しい樹種の森林が要求されるであろう。

このように考えるならば、作業級というものを必ずしも一つの林分に一つの作業級と考える必要はなく、保続の対象が複数あるならば、それぞれに作業級を設定し、一つの林分に複数の作業級を設定すればよい。このようなときに、仮に目的についての優先順位を遺伝子保護、国土保全、山村住民の生活、都市住民の憩いとするならば、まず、遺伝子保護のための施業を優先し、次に国土保全のことを考える。こうして次々に優先順位が下がるにつれて、十分な面積や量が確保できないことが起こりうるが、その場合には与えられた条件のもとで許される量に変更することになる。

このように、優先順位の高い作業級の施業方法が決まると、次の優先順位の作業級ではこれを制約条件として施業上の上限や下限が与えられ、その中でその経営目的に最もふさわしい施業方法を選択する。こうして、次々に制約条件を追加しながら各作業級の施業方法を決定することになる。

この時、各作業級の大きさは同じである必然性はなく、それぞれの経営目的に応じた広さを持つことになる。このように考えることによって、複数の経営目的を持つ森林の施業方法を調整することが可能となる。このような作業級設定の具体例は、第4章の第1節および第6節において詳しく述べる。

以上、新しい作業級の考え方を示したが、ここでの優先順位の決め方についてはまた別の次元の重要な検討課題であると考えられる。しかし、このように直列的に優先順位をつけたのは、各経営目的を並列的に調整していたのでは、いくら重みづけをしてみても、結局どの経営目的をも満足させることができなくなると考えるからである。

第2章 東京大学北海道演習林における択伐林施業の実践結果

本章では、本研究の対象となる東京大学北海道演習林について述べる。第1節では、演習林の位置、地形、地質、気候、植生、林況などについて概観する。第2節では、粗放な択伐を繰り返した1907年から1957年までの演習林の施業の経過について述べる。第3節では、1958年以降、演習林の森林施業の基本となっている林分施業法の考え方と方法について述べる。第4節では、林分施業法導入以降現在にいたる施業の経過および現行施業計画について述べる。第5節では、これまでの択伐林施業の経過を踏まえて、さらに林分施業法を発展させるための課題について考察を加える。

第1節 東京大学北海道演習林の概況

東京大学農学部附属北海道演習林（以下「演習林」という）は、北海道のほぼ中央（北緯43° 10′ ~ 20′、東経142° 18′ ~ 40′）に位置し、空知川の右岸にあって、富良野市内東山、麓郷地区の森林地帯の大部分と、山部地区の一部が互いに接続し、中央の農地を取り囲む形で展開している。演習林の東北端に林内最高峰の大麓山（1,459m）があり、ここから西達布川、布部川の2流が西へ流れて空知川に合し、分水界も中央部を東西に走って林域をほぼ2分する。林内の標高最低地は布部付近の190mで、標高差は1269mである。地形は概して緩やかであるが、空知川および北端の布礼別川や布部川沿いの地帯は比較的急峻である。

地質は、東北部の大麓山一帯では第4紀層の安山岩質溶岩からなり、西南部の空知川沿いの地域では先白亜紀に属する輝緑凝灰岩、蛇紋岩、黒色粘板岩、砂岩などが複雑に交錯しているが、林内の大部分は第四紀溶結凝灰岩からなる砂質壤土であり、林木の生育には概ね適している。

気温は一般に低く、寒暖の差が激しい内陸性気候を呈している。演習林西端の標高224mにある山部事務所における年平均気温は6.8℃であるが、気温の日較差、年較差が大きく、最高極値34.2℃、最低極値-28.5℃が記録されている。

本章の内容は、高橋⁹⁰⁾、柴田⁷⁹⁾の記述に基づくものである。

また年平均降水量は1,230mm、積雪量約1m、根雪期間は11月下旬から4月上旬である。

森林土壌は、標高による気候の違いから生成を異にする山岳黒色土、ポドソル、暗色森林土、褐色森林土の4つの土壌型が現れる。山岳黒色土は標高800m以上の森林限界付近で最もよく発達し、ポドソルは標高500～800mの凸状地形や傾斜面のふち、700m以上の針葉樹林の一部にみられる。暗色森林土は標高500～800mに現れ、針葉樹林を形成しているところの典型的な土壌型である。褐色森林土は標高600m以下の傾斜地に現れ、針広混交林帯の択伐林の大部分を占める。このほか、局所的な条件の影響を受けて生成される低湿黒色土、グライ森林土、岩屑森林土も波状地形の凹地や沢沿いなど見られる。

植生は、森林植物帯上は冷温帯から北方林帯への移行帯である汎針広混交林帯に属する。林相は針葉樹林、広葉樹林、針広混交林の3種に大別されるが、その大部分は針広混交林によって占められている。林内自生植物は、106科379種および114変種が記録され、うち木本類は、針葉樹が4科8種3変種、広葉樹が42科117種36変種、草本類は60科254種75変種となっている。主要樹種を資源量の多い順にあげると、針葉樹が、トドマツ、エゾマツ、アカエゾマツ、イチイ、広葉樹が、ダケカンバ、シナ類、イタヤカエデ、ウダイカンバ、ミズナラ、ニレ類、ハリギリ、アサダ、シウリザクラ、ホオノキ、ヤチダモ等である。

森林の垂直分布は、低地から高地に向かって、まず、標高300mまでの河岸、沢沿い、平坦地ではヤチダモ・ニレ・ハンノキ・ヤナギ類等を主とした広葉樹林があり、標高300～600mの山腹斜面ではトドマツ・広葉樹混交林もしくはトドマツ・エゾマツ・広葉樹混交林が見られ、標高600～800mではエゾマツ・トドマツ・ダケカンバ混交林が現れ、さらに上部にはエゾマツ・アカエゾマツ・ダケカンバの疎林、ハイマツその他の高山植物地帯となっている。この他、1911年の山火事後に生じたウダイカンバを主体とした再生林が代表的林相である。林床の大部分はササが密生して更新の障害となっており、標高700m付近を境に、下部はクマイザサ、上部はチシマザサが繁茂している。

1985年度末現在の演習林の所管面積は22,866ha、総蓄積は3658千 m^3 (N:L=54:46)、ha当りの蓄積は160 m^3 、総成長量は62千 m^3 、成長率1.7%、ha当りの成長量は2.7 m^3 である。このうち、面積で83%にあたる18,896haを天然林が占めてお

り、総蓄積は2149千 m^3 で全体の90%を占める、ha当りの平均蓄積は180 m^3 である。一方、1907年から植栽を始めた人工林はヨーロッパトウヒ・ストロークマツ・トドマツ・アカエゾマツ・カラマツを主体として2,606haあるが、幼壮齡林が多く、ha当りの平均蓄積は約95 m^3 である。

第2節 林分施業法導入以前の施業経過

演習林は、北方林業、林学の研究・教育を目的として、1899年に内務省より台帳面積で23,597haの森林の移管を受け、東京帝国大学農科大学試験地として設定された。その後、隣接地域約7,000haの追加譲渡および購入等により総面積は30,002haとなった。移管の際の付帯条件として林内の農耕適地を農地として開拓することが定められており、1910年西達布川沿いに21戸、79haの入植を行ったのをはじめとして林内植民が進められた。この背景には、当時の地元の人口が極めて少なく、林業労働者の確保が困難であったことが挙げられるが、林内植民は、その後の演習林の変遷の中で重要な位置を占めることとなった。しかし、戦後は林内植民への農地の解放、緊急開拓農地、道路用地、河川敷地としての他機関への移管などによって、1985年度末現在の所管面積は22,866haとなった。本節では、林分施業法導入以前の第1期から第7期までの施業計画のもとで⁹⁹⁾どのような森林施業が行われてきたかをみることにする。

(1) 第1期施業計画（1907年～1911年）

北海道庁からの移管後、数年間の準備期間において、1907年に第1期施業計画が編成された。実施にあたって境界・面積・林況など不明な部分が多く、一時に全林を施業することは容易ではなかったので、全体を4つの分区に分け、最も便利な5,000ha（現在の東山からオンコ沢地域）を整理期30年として施業を行うこととした。原生林のha当り平均蓄積は約300m³であったが、腐朽や曲がりなどが多く、利用可能な蓄積は針葉樹100m³/ha、広葉樹20m³/ha弱であった。したがって、伐採方針は更新良好林分を主とし、林相の改良を目標としたものであった。計画では年伐量は17,800m³で69%が直営生産であった。直営生産はほぼ計画どおりに実行されたが、1911年の山火事被害木処理のため立木処分量が2.4倍になり、年伐量は24,000m³となった。造林は、更新の悪いところにはエゾマツ天然苗、ヨーロッパトウヒを植え、ササが優占する疎林は焼き払ってカラマツを植栽した。造林実績は68haであった。

(2) 第2期施業計画（1912年～1915年）

1911年、全道各地に山火事が発生し、演習林においても3,680haにおよぶ被害が発生した。このため同年、山火事被害木の処理を主眼とした第2期施業計画が編成された。被害木を25万m³と推定し、第1期計画の約4倍に相当する年伐量69,000m³および600haの造林を計画した。労働力確保のため、林内植民を積極的に推進し、470haの開墾地を設けた。その結果、被害木を1915年までの5年間で整理完了し、年伐量は60,000m³であった。造林は計画の95%にあたる567haに針葉樹を植栽した。また、このときに約1500haにおよぶ山火再生二次林が生じ、現在の施業に大きな影響を与えている。

(3) 第3期施業計画（1916年～1920年）

山火事被害整理完了に伴い山火事跡地の施業、原生林の択伐、農地の開拓等を特徴とする第3期施業計画が編成された。全林（24,887ha）を1事業区、2分区、26林班制と改めた。原生林の施業法は技術上ならびに経済上の理由から択伐を中心とし、回帰年25年、択伐率25～30%、伐採木の基準は針葉樹36cm以上、広葉樹45cm以上とした。年伐量は38,200m³を予定したが、実際には入植予定地900haが皆伐されたため74,000m³となった。山火事跡地への造林は1,000haを計画したが、480haにとどまった。この原因は山火事跡地の更新が良好であったためと推測される。

(4) 第4期施業計画（1921年～1925年）

第4期施業計画は、土地購入により面積が広がったため、28林班に増加して編成された。施業の内容は第3期と同様に、大面積にわたる人工造林、収入源としての開墾予定地の皆伐、原生林の択伐であった。択伐施業では回帰年25年、択伐率25～30%とし、伐採木の基準は広葉樹の基準を下げて、残存稚幼樹の状況を見ながら24cm以上とした。年伐量は52,000m³を予定し、51,200m³を実行したが、この他に開墾予定地の皆伐に伴い、年平均53,000m³が伐採されている。第3期より続いた山火事跡地の造林は1922年頃までにほぼ完了した。植栽樹種は、ヨーロッパトウヒ、ヨーロッパアカマツ、カラマツ、ストロブマツ、ヨーロッパクロマツ等であるが、野鼠の被害が甚大であったため、外来樹種による造林地1,100haのうち約3分の1しか成林せず、残りは消滅した。また、第

4期から森林軌道の敷設が開始された。

(5)第5期施業計画（1926年～1937年）

第5期施業計画からは計画期間が10年となった。造林はまったく行われず、天然更新による原生林の択伐のみが実行された。第5期から初めて作業級を採用し、天然林を択伐作業級、山火事跡地を人工植栽作業級とした。択伐作業級では回帰年25年、平均択伐率を16%とし、伐採木の基準はエゾマツ75cm・トドマツ60cm以上のもの、近い将来枯死となるもの、更新上の障害木等であり、計画年伐量70,000m³、開墾予定地の年伐量39,000m³はほぼそのとおりに実行された。しかし、過伐の弊害が生じたため、1931年に伐採の方針を老齡過熟林分の整理を目的とする施業に切り替え、施業計画を一部修正し、回帰年20年、択伐率は枯損を含めて20%とした。この結果、開墾予定地の皆伐が減少したこともあり、後半期の年伐量は56,000m³とほぼ半減した。第5期には、利用事業の施設拡充に力点がおかれ、森林軌道の延長は50kmに達した。なお1935年から1937年まで林班区画改訂測量が進められたため、計画期間を2年間延長した。

(6)第6期施業計画（1938年～1947年）

第6期では精密な測量により、総面積は26,545haから30,002haとなった。このうち森林面積約25,000ha（天然林約20,000ha、ha当り蓄積は針葉樹108m³、広葉樹95m³、計204m³）を用い、全林を新たに109林班に分けた。この林班区画は現在も使用されている。作業級は天然林を第Ⅰ、山火再生林を第Ⅱ、人工造林地を第Ⅲとした。さらに第Ⅰ作業級の天然林を本期主伐区域6,000haを直営生産区域に、奥地林5,000haを菌害・枯損木等の整理伐区域に、里山の9,000haを成長促進撫育作業区域に3区分した。主伐区における回帰年を20年とし、平均択伐率は原生林25%、既択伐林20%とした。このほか、第Ⅱ作業級の山火再生林3,000haを地元民および公共団体に対する用・薪材供給地域に指定した。年伐量は主伐区15,000m³、整理伐区2,500m³、里山の用・薪材供給地区7,000m³、人工造林地200m³の計24,700m³とした。これは第5期の実績の1/3に相当した。しかし、この数字が当時の木材需給の実状にそぐわないものであったことに加え、第二次世界大戦開戦による優良軍用材供出、終戦後の緊急開拓のための伐採の

影響を受け、施業計画を無視した伐採が成長促進撫育作業区域に集中して行われた。その結果、平均年伐量は $38,200\text{m}^3$ と原案の55%増しとなり、里山は極端な過伐となった。

(7) 第7期施業計画（1948年～1957年）

第7期は戦時中の変則的な施業の整理を主眼として編成された。作業級の再編を行い、蓄積が著しく減少した里山地域 $5,000\text{ha}$ （ ha 当り蓄積は針葉樹 70m^3 、広葉樹 85m^3 、計 155m^3 ）を第Ⅰ作業級とし、撫育を主とする施業を行って林力回復をねらい、回帰年を10年、平均択伐率を12%とした。奥地林 $10,000\text{ha}$ （ ha 当り蓄積 230m^3 ）は第Ⅱ作業級とし、第6期と同じく回帰年20年、平均択伐率25%とした。また、第Ⅲ作業級の山火再生林 $1,900\text{ha}$ （ ha 当り蓄積 68m^3 ）については不良広葉樹の淘汰を主眼として、整理期を20年、平均択伐率は本数で40%、材積で30%と定めた。第Ⅳ作業級の人工造林地は間伐のみとした。この結果、年伐量は $39,200\text{m}^3$ （第Ⅰ作業級 $10,500\text{m}^3$ 、第Ⅱ作業級 $25,500\text{m}^3$ 、第Ⅲ・Ⅳ作業級 $3,200\text{m}^3$ ）となった。しかし、本計画を編成後の1952年、緊急農地開拓による林地解放（川松沢地区 764ha ）等があり、さらに1954年の洞爺丸台風により $34\text{万}\text{m}^3$ におよぶ風害木・虫害木が生じたことで、施業計画に基づいた施業は行われず、年伐量は計画の2倍にあたる $80,200\text{m}^3$ となった。

第7期までの森林施業は、大規模な山火事の発生、農地開拓、戦時伐採、台風被害などにより施業案にそった伐採は実行されなかった。その結果、径級伐採、良木伐採が続けられ、蓄積は極度に低下し、林分構造も不良となるなど、きわめて粗放な択伐作業の繰り返しであったといえることができる。

第3節 林分施業法

1. 林分施業法の技術的背景

演習林ではその歴史の初めから択伐林施業が行われてきたが、第7期までの施業の結果、天然林の立木蓄積は減少してしまった。このような過去の施業への反省と恒続林施業、照査法などによる天然林施業法であるヨーロッパの択伐作業の研究とから、1955年に高橋⁹⁾¹⁰⁾は林分施業法を提唱した。

まず高橋は、演習林の過去の施業への反省として次の3点をあげている。

(1) 選木の失敗

良木のみを繰り返し伐採したため、森林には老齡過熟の病害木や不良木が残されてしまったこと。針葉樹がより多く伐採され、成長量が減少し、また林床にササが多くなり、更新がさらに困難になってきたこと。

(2) 補助造林が行われなかったこと

北海道の天然林内はササが多く天然更新を妨げている。こうした更新の不良な地域では、積極的な補助造林が必要であるのに、現実にはほとんど行われなかった。

(3) 天然更新が期待できないところにも択伐作業を行ったこと

平坦地、沢地、北向きのなだらかな地形の広葉樹が発達しているところにも、形式通りの択伐作業を行い、林相、林床の悪化を招いた。

高橋は、これら3点は、いずれも択伐作業法そのものが悪いのではなく、立地、選木技術、補助造林などに十分配慮すれば、広義の択伐作業が北海道において可能であり、また有力な作業法となり得ると考えた。

次に、北海道における人工造林の困難性をあげている。すなわち、主要樹種であるトドマツ・エゾマツは初期成長がおそく、霜害・寒害に弱いため、安定性のある造林樹種が見あたらないとしている。また、地力の低下、成長量の減少、病虫害の発生など大面積皆伐造林の弊害を指摘している。さらに、演習林内の択伐林分の成長量を測定し、人工林の成長量と比較して天然林の成長量が著しく低いものではないことを示している。そして、北海道の天然林の特徴として、主要な樹種が陰樹であり非皆伐施業に適すること、形質優良な広葉樹材の市場価値が高いこと、ササの存在が天然更新の障害となること、天然林の林

分構造は環境要因のほか過去の経緯によっても異なり画一的な施業は不適當であることをあげ、その林分の特徴に応じて、天然力を尊重した、きめ細かな森林施業が演習林の施業方法として最も適切であると主張した。

2. 林分施業法の技術体系

林分施業法は森林生態系の諸法則に従い、これを意識的に活用して、効率的な生産活動を行うことを目的としている。このような健全な森林を維持することにより、資源の充実が図られ、価値の高い材を持続的に生産し、同時に公益的機能も果たすことができる。林分施業法を実行するための基本的な考え方として、以下のような6原則が示されている。

- ①天然林の施業は対象の森林が途中相であれば、物質生産量の最も大きい極相林に向かってより早く動いていくように施業し、また、その森林が極相林であれば、その内部において回転をより早めるように施業する。
- ②天然林施業は画一的でなく、森林を構成する林分ごとに将来に向かってその機能がより発展するように施業する。
- ③森林は常にうっ閉しておくことが理想であり、太陽エネルギーを最初に受ける上層が最も生産能力が高まるように誘導し、しかも、散光を下層で吸収する複層林が理想型である。
- ④森林を構成する各生物系・非生物系の破壊と消滅を、できるだけミクロにかつ弱度にとどめるよう施業する。
- ⑤天然林施業では、林木の遺伝子を考え、伐採することによって望ましい遺伝子がより発展し、好ましからざる遺伝子がより減少または淘汰するよう施業する。
- ⑥天然林の施業は地力を維持し、気象害、病虫獣害などへの抵抗力の高い健康林の造成を目標とする。

以上の6原則は施業実行者に対する森林取り扱い規範とみなすことができる。また、林分施業法は、施業の度に林分の状態を注意深く観察し、次の取り扱い方法を決めるという意味で、照査法に含めることができる。

林分施業法は、林分ごとに施業する方法であり、その基本的な施業技術として林分の仕分け、すなわち類型化が必要となる。現実の森林の構成状態から類

型化すると、林型数が非常に多くなるため、これをできるだけ単純化しなければならない。演習林では立地条件・林木の品質・天然更新の困難さを判断基準として、天然林を択伐林分、補植林分、皆伐林分の3種類に区分し、それぞれに適した施業を行っている。

択伐林分は、立地が天然更新の比較的容易なものであることを前提条件とした極めて広義の択伐的取り扱い可能な林分がすべて含まれている。択伐林分における最も重要な基本的技術は選木法である。選木基準として挙げられるのは、

- ①不良蓄積（枯損木、病虫害木、過熟老齢木、形質不良木等）を淘汰する。
- ②上層にあって樹冠が貧弱で着葉量が少なく生産能力の低い林木を優先して伐採する。
- ③更新を妨げるササを減少させる意味で、針広混交林では針葉樹を残し、広葉樹をより多く伐採する。
- ④針葉樹の幼稚樹の発育を妨げる中下層の不良広葉樹を淘汰する。
- ⑤広葉樹がきわめて少ない林分では針葉樹をやや強度に伐採し、広葉樹の更新を図る。
- ⑥針葉樹は量的成長増大を中心に、広葉樹は価値成長増大を中心に選木する。
- ⑦群落のはっきりしている部分は群単位の選木をする。

などである。基本的には、量的・質的成長を考えて、森林がより良くなるように伐採木を決定していくもので、目標として針広混交林の実現をめざしている。この「選木」という点では、照査法同様、施業実行者の熟練が必要となる。また択伐林分においても補助造林を併用することもある。

補植林分は、択伐林分同様、本質的には天然更新可能の立地であるが、優良幼稚樹が少なく、林床がササで占められている疎林である。このままでは天然更新が望めず将来の期待が持てないので、優良な中小径木は残して不良木を整理伐し、その跡地にトドマツを補植する。補植林分は、立地や林相からみても成林後は択伐林分に編入されるべき林分である。

皆伐林分は、沢の凹地形や北向きのなだらかな地形にみられるような、天然更新が難しく将来にわたって量的・質的成長が期待できない林分である。しかし、立地は土壌が深く肥沃であり、人工林造成は確実で、皆伐して林種転換を図ることによって森林生産力の増大が期待できる。

演習林における林分施業法は、以上のような理論と技術のもとで1958年の第8期施業計画⁹⁸⁾の実行と同時に開始された。以来、第10期施業計画に引き継がれ、北海道の大面積森林における択伐を中心とした天然林施業の有効性を実証する好例となっている。

第4節 林分施業法導入以降の施業経過

前述したように、林分施業法は当時の林力増強計画に基づく大面積拡大造林という国有林および道有林の施業方針とは全く逆の考え方により実行に移された。本節では林分施業法の導入以降現在にいたる第8期から第10期の施業の経過についてみることにする。

(1) 第8期施業計画（1958年～1967年）

1958年、第8期施業計画が編成された。林分施業法では、施業林全体を3つの作業級に分け、第Ⅰ作業級（里山の天然林）9,000haを16施業区に、第Ⅱ作業級（奥地林）11,000haを2施業区に分けた。第Ⅲ作業級は人工造林地を対象とした。第Ⅰ作業級では、択伐林分は回帰年8年、平均択伐率15%、補植林分は整理期を回帰年の3倍の24年とし、年伐区内の補植林分面積の1/3について35%を伐採し、補助造林を行った。また、皆伐林分は整理期を回帰年の4倍の32年とした。第Ⅱ作業級では、択伐林分は回帰年20年、伐採率25%とし、補植林分、皆伐林分については、第Ⅰ作業級における同林分の改良が完了するまでは本格的施業を見合わせることにした。第Ⅲ作業級の人工林は可能な限り長伐期としたため、主伐対象林分はなく間伐のみで標準間伐率は15%とした。施業区は全く独立した単位として施業を行い、第Ⅰ作業級の各施業区は8年回帰に基づく8つの伐採列区が区画され、第Ⅱ作業級では施業区ごとに20年回帰に基づく20の伐採列区が設定された。第8期では標準年伐量70,000m³、年造林面積（補助造林および皆伐造林）91haを計画し、実行結果は年伐量69,000m³、年造林面積79haであった。年伐量はほぼその目標を達成できたが、年造林面積は計画量の87%にとどまった。第8期からは林分施業法の可否の決め手となる収穫調査について、技術の標準化を図るための収穫調査仕組が定められた。また、高度経済成長に伴う労働力の減少に対応して、林道の開設と機械化作業の導入に力点がおかれた。

(2) 第9期施業計画（1968年～1980年）

1968年、引き続き林分施業法による第9期施業計画が編成された。この計画では労働力の不足等により、作業の能率化、合理化を図るため林道の拡充と施業区の統合が重要な事項とされた。第Ⅱ作業級のうち地利のよい区域を第Ⅰ作業級へ1,377haを編入し、新生造林地を加え第Ⅲ作業級が500haほど増大した。第Ⅰ作業級を16施業区から8施業区に統合したほかは、各作業級における回帰年・伐採率などは第8期と同じとした。第9期では標準年伐量74,000m³、年造林面積80ha、林道開設年40kmを計画し。実行結果は、年伐量67,000m³、年造林面積60ha、林道開設年40kmであった。林道開設がほぼ計画通り行われた結果、ha当り林道密度は1968年に8.7mであったものが、1980年には29.7mとなった。しかし、年伐量、造林面積は計画量を下回り、特に造林面積は予定の75%にとどまった。その要因として労働力の減少と賃金の高騰があげられる。第9期では労働生産性を高めるためブルドーザをはじめ各種大型機械・車両を導入し機動性を高め合理化を進めた。補植・皆伐林分の改良を伴う施業は林道周辺に限定し、大型機械による地こしらえ作業に切り替えられた。なお、第9期施業計画は、当初1977年に完了する予定であったが、社会経済条件の変動期にあって以後の対策を検討するため1980年まで2年間延長された。

(3) 風害処理暫定計画（1981年～1985年）

1981年8月23日、15号台風により風害が発生した。被害面積は8,735ha（演習林森林面積の約40%）、被害数量は81.3万m³（演習林蓄積の約18%）におよんだため、同年より開始された第10期施業計画は急拠中止され、風倒木処理を中心とした5年間の暫定計画¹⁰⁰に切り替えられた。伐採は、以後の施業上の影響、虫害、山火事などの保護対策や材質の経年的低下を考慮し、順次風倒木の整理を行うこととした。育林は、激害地3,100haを対象に、幼樹の保育や補助造林、地表かき起こしによる天然下種促進作業、倒木更新などを立地に応じて行うこととした。計画量は、風害木処理量571,400m³、新植861ha、地がき150ha、車道開設10.3km等とした。実行結果は、風害木が予想より多かったため、風害木処理量81万m³とかなり計画を超過したほか、地がき273ha、車道開設15.5kmであった。しかし、新植は483haにとどまった。

(4)第10期施業計画（1986年～1995年）

風害処理が完了した1986年から第10期施業計画¹⁰¹⁾が実施され、現在、この第10期施業計画（第10期試験研究計画）に基づいて施業が実行されている。第10期計画は、第8期以降の28年間におよぶ林分施業法の成果を踏まえ、さらに発展させることを目標に作られている。従来の施業方法を再検討した結果、合理的な施業法と施業計画の検討、天然林の種特性と森林成立過程の解明、路網設定と管理システムの確立、林産物の付加価値形成等、最適な施業法を確立するために必要な研究課題を掲げている。

第10期計画では、労働力の不足、事業予算の縮小等により従来の施業組織を改編した。まず、散在する人工林によって構成されていた第Ⅲ作業級をそれぞれの人工林を取り巻く第Ⅰ・Ⅱ作業級に併合することによって、従来3つあった作業級を里山の集約施業実施地域である第Ⅰ作業級とやや粗放な択伐作業実施地域である第Ⅱ作業級の2つにした。また、10施業区はそのまま踏襲するものの第Ⅰ作業級の8施業区については2施業区ずつを1単位としてこれを10の伐採列区に区画することとした。施業内容は、第Ⅰ作業級の択伐林分では回帰年8年から10年に延長し、これに伴い平均択伐率を15%から16%にあげた。また、選木基準を変更し、従来温存してきた優良大径木を逐次、計画的に収穫するほか、従来の成長量見合いの単木択伐から群状択伐による積極的な天然更新促進の方向への転換を図っている。補植林分は択伐林分の回帰年変更に伴い整理期を見直し、従来の24年（8年×3回帰）を20年（10年×2回帰）に短縮した。択伐率は35%から40%にあげて、群落単位の取扱いを一層強め、補植後に更新する有用広葉樹もあわせて保育することにした。また、大型機械（レーキトローザ）を使った地がきによる天然更新促進作業も導入した。再生択伐林分は、回帰年を8年から10年に延長し、伐採率を30%から25%に下げた。そして、ウダイカンバを中心とする有用広葉樹林分への誘導を図っている。第Ⅱ作業級の択伐林分では回帰年は従来どおり20年とするが、伐採率を25%から17%に下げた。また、今まで施業を見合わせていた補植林分および皆伐林分は、整理期を40年として本期より改良に着手した。

主な計画年間事業量は、年伐採量47,000m³、風害跡地の復旧を含む年造林面

積113ha、年林道新設距離20kmである。また、従来の林分区分（択伐林分、補植林分、皆伐林分等）を基本とする方法を改善し、さらに細かい林型区分を基本とする施業を試みることも特徴の一つである。

第5節 林分施業法を発展させるための課題

林分施業法は30年以上にわたり実行されてきたが、この間演習林を取り巻く社会的・経済的環境は大きく変化した。すなわち、第一次産業に比して第三次産業の労働生産性が飛躍的に向上し、これに伴い第一次産業の労賃も大幅に上昇した。これは第一次産業の労働生産性の向上や木材価格の上昇をはるかに上回るものであった。この結果、一定面積の森林を施業するのに投入することのできる労働量は、林分施業法を導入した当時に比べてはるかに減少した。また、これを管理する職員の数も減少し、その高齢化に伴う行動力の低下が生じている。演習林ではこれに対処するために、林道・作業道の拡充して路網密度をha当たり30mとし^{36・60)}、馬搬集材からトラクターなど大型機械による伐出方法への転換を行い、レーキドーザによる地表かきおこし、大苗またはポット苗による植え込みなど保育作業においても大型機械の導入を図っている⁷⁴⁾。そのために伐採列区を大型化し、回帰年を長くした。すなわち、当初、16の施業区にわけてその中を8つの伐採列区に区分していたものが、8つの施業区の中を5つの伐採列区に分けることになった。その結果、1つの伐採列区の大きさは、平均すると3.2倍になっている。また、第I作業級の択伐林分では回帰年が当初の8年から10年に延長されている。この結果、一回の択伐による伐採量は増加し、伐採列区の拡大と相まって、労働生産性の向上が期待できる。また、単木択伐から群状択伐への転換の試みも始められており、省力化を目指す工夫がなされている。このように、機械化による択伐林施業の合理化が進められているが^{37・61)}、林分ごとにきめ細かくその特徴に合わせて施業を行うという林分施業法の理念からすれば、その取り扱い単位を大きくして合理化を図ることには限界があると思われる。このような状況のもとで、さらにより集約な択伐林施業を行うためには、これまで行ってきたいわゆるハード面の合理化だけではなく、ソフト面での合理化を同時に進行させなければならない。すなわち、択伐林施業に関する様々な知識・情報を整備して、合理的な施業に結び付けなければならない。始めにも述べたように、30年以上にわたる林分施業法による施業のもとで収集された調査結果や研究成果の集積を総合的に活用することによって、より高度な択伐林施業を行うことが可能になっている。したがって、いま、

演習林の林分施業法の発展にとって必要なことは、選木方法など具体的な林型別の管理技術の定着化を図るとともに、情報処理の大型化による集約的森林施業を図ることである。そのためには、できる限り幅広く広域的な情報を管理し、普遍的かつ迅速な意思決定を援助する情報処理システムを構築することが必要である。

第3章 択伐林施業における伐採許容量決定のシステム化

本章では、知識集約的な択伐林施業を具現化するために、伐採許容量決定のための意思決定支援システムについて検討する。第1節では、演習林の管理経営の中における本システムの位置づけおよび設計にあたっての基本的な考え方を明らかにする。第2節では、本システムにおいて使用する情報の種類を明らかにし、その収集方法および利用の程度について述べる。第3節と第4節では、直径遷移確率に基づく択伐林の成長予測の方法について考察する。第3節では、ある範囲内の林分構造のもとでは直径遷移確率も一定であるという前提に立ち、林分の構造に応じてあらかじめ用意された固定標準地の直径遷移確率を用いて成長予測を行う。第4節では、直径遷移確率は立地条件や樹種構成の違いに応じて、林分ごとにそれぞれ異なるものであると考え、各林分の過去の成長量を将来の成長量とみなし、これを現在の直径分布に応じて成長量を配分し、各林分固有の直径遷移確率を計算する方法を検討する。第5節では、択伐林の林分構造を視覚的に表現するために新たに考案した樹形グラフについて述べ、択伐林施業の意思決定に利用する方法を検討する。第6節では、地理情報システムを用いて広範囲にわたる択伐林を管理する手法について、その考え方と具体的な利用法について検討する。第7節では択伐林施業を実行する際に設定する長期的目標林の考え方について考察する。第8節では、これらを総合し、東京大学北海道演習林をテストサイトとして構築した伐採許容量決定システムの情報処理の流れの方法について述べる。第9節では、その実行上の問題点について考察する。

第1節 システムの基本設計

本論文において、システムとは「多数の構成要素が有機的な秩序を保ち、同一目的に向かって行動するもの」と定義する⁴⁶⁾。したがって、システムを設計するには、まずその設計の目的と構成要素を明らかにしておかなければならない⁴⁶⁾。この場合、システムの目的は東京大学北海道演習林の択伐林施業における伐採許容量の決定である。具体的に述べれば、ある回帰年が与えられたときに、いま、どういう樹種の、どういう大きさの林木を、どれだけ伐採すること

ができるかを林分ごとに決定するということである。システムの構成要素を規定するためには、このシステムの位置づけを明確にしておかなければならない。位置づけとは、このシステムがどのような上位システムに属しているのか、上位システムに対してどのような情報を提供しうるか、また下位にはどのようなサブシステムがあり、そこからどのような情報を得ることができるかということである。この意思決定支援システムの上位システムには森林管理システムが想定される。これは演習林の管理経営そのものであり、演習林の社会的役割、財務、労務、林道作設、木材の販売などの問題が総合的に検討され、最終的な意思決定がなされる。本システムからは資源面からみた現在の状況や予測される将来の状況が情報として提供される。また、本システムの下位システムからは、対象林分の過去の施業記録、標高・土壌型などの地況因子、現在の樹種構成・直径分布・蓄積量、固定標準地の成長測定記録などが情報として提供される。本システムは下位システムから提供される情報をもとに、①現在の林分構造の把握、②施業方法の選択、③将来の林分構造の予測、④施業方法の適否の判断を行う。したがって、本章での中心的な課題は、下位システムから提供される情報を如何に有機的に結び付けてこの4つの問題を解決するかということである。

ここで、強調しておかなければならない点は本システムはシミュレーションシステムであって、必ずしも最適化システムとはいえないということである。なぜならば、天然林は同齢単純林と比較して、個体間の変動が非常に大きく、現在の蓄積量や将来の成長量を推定してもその信頼性に限界があるため、これらのデータを用いて最適化手法による分析を行い最適解を得たとしても、それは必ずしも最適解とはいえないからである。本システムでは、これらの不確実性を踏まえた上で、施業担当者が具体的に施業方法を検討することができるようにシミュレーションによる方法を採用する⁵⁴⁾。

本システムはあくまでも施業担当者の意思決定支援のためのものであるので、最終的な判断を下すのはあくまでも施業担当者であるという立場をとり、ここでは林分全体のマクロな視点から伐採許容量を捉えることとし、個々の林木間の詳細な相互関係は考慮しないことにする。そのため林分構造の表現は極力単純化する。すなわち、樹種区分は針葉樹(N)・広葉樹(L)の2区分、直径級は大

径級(45cm以上)・中径級(25cm以上45cm未満)・小径級(25cm未満)の3区分とする。また、常に森林の状態を注意深く観察しながら施業を行って行くという調査法の考え方はできるだけ踏襲し、固定標準地だけではなく、対象となる森林の全域にわたり定期的な標準地調査を実行することを前提とする。

第2節 資源調査の方法

西沢⁵⁹⁾は、森林調査を①事業計画に必要な森林調査、②経営計画に必要な森林調査、③国家的な森林資源調査の3つの型に分類している。これから検討する資源調査はこの内の②経営計画に必要な森林調査に該当し、森林資源の現状およびその時間的変化を推定するために実施される。大貫⁷³⁾は資源調査システムの備えるべき要件として、森林の時系列的変化を正確に把握でき、計画の実行やその結果の判定を可能とするように、連続する整合性のある調査法で構成されること。情報の統一の利用が図れるように、データベースへの情報収集システムとして位置づけられることをあげている。このような観点から、資源調査の方法について検討する。

択伐林施業の伐採許容量を査定するためには、査定の対象となる林分に関する情報を収集しなければならない。東京大学北海道演習林に関していえば、森林管理のための情報として次の8種類の情報があげられる。

- ①森林調査簿：小班を択伐林分・補植林分・皆伐林分などに区分した林分ごとに、標高・方位・地形・地質・土壌型などの地況情報と林相・疎密度・下層植生などの地況情報がコード番号で記載され、面積、混交歩合、針葉樹・広葉樹別（以下「NL別」という）の標準地調査によるha当り蓄積および本数、標準木の直径などの数量が記載されている。これをもとに総蓄積が計算され、総蓄積に固定標準地の成長測定資料から算出した成長率をかけて求めた連年成長量が記載されている。
- ②林班沿革簿：森林調査簿と同様に小班を区分した林分ごとに、過去の施業の記録が時系列的に記載されている。すなわち、伐採面積、伐採方法、NL別の総伐採材積・本数、更新・保育の記録が発生順に記載され、林況調査から得た径級別の本数・蓄積が記載されている。
- ③林況調査：伐採対象となる林分の状況を把握するために、収穫調査の前に標準地調査を実施している。標準地は0.2ha程度を標準とし、帯状に標準的な林相を選び、一小班の林分区分当り3～5箇所設定し、毎木調査を実施している。この調査では胸高直径4cm以上を対象に2cm括約で測定され、樹種ごとの直径階別本数を記録している。この調査結果は小班ごとにNL別および大・中・小径級

別の本数・蓄積のha当りに平均値としてまとめられている。この数値に予め設定された標準択伐率をかけて各林区分の伐採許容量が決定され、収穫調査の指標となる作業指令書が作成されている。

④収穫調査：伐採対象となる全林木について樹種、胸高直径、品等区分、形質の4項目の調査を行う。この結果は樹種別、径級別に本数・蓄積が集計され販売予定価格の算定基礎となる。この調査では枯損木もすべて測定するので、枯損の状況を知ることができる。

⑤森林基本図：1/5000の縮尺で林班界、小班界、10m間隔の等高線、林道路網が記入された図面が施業計画のたびに作成されている。この図から各林分の位置関係、搬出経路、地形、方位などを視覚的に知ることができる。これまでの①～④の情報は数値情報であったのに対して、これは地理情報であることから情報としての性質が異なる。

⑥森林土壌図：1963年に朝日⁴⁾が1/20000の土壌図を作成している。この土壌図では演習林全域が21種類の土壌型に区分されている。この情報も⑤と同様に地理情報である。

⑦空中写真：1987年に演習林全域を対象に1/25000のモノクロ写真を45枚撮影している。この写真から林相や疎密度・林分樹高を判読することができる。しかし、写真の歪みがあるためそのまま⑤の森林基本図に重ね合わせることはできない。また、写真判読の技術は個人の技量に左右される面があり、大まかな林相区分は可能であっても、詳細な林分構造を把握することはできない。

⑧衛星リモートセンシング情報：米国から打ち上げられたランドサット衛星からは16日周期で、30mの地上分解能の7つの波長帯のセマティックマッパー（TM）データが送られてくる⁶⁴⁾。この程度の分解能ではこの情報だけで蓄積を推定することは不可能であるが、ある程度の林相区分は可能となっており、標本調査の層化の基礎資料としては利用できる⁶⁵⁾。また、この情報の特徴は繰り返し同レベルの観測結果を得ることができる点にあるので、大きな規模の自然災害や病虫害の発生状況とそのモニタリングに利用できる。

これらの情報のうち、①～④は小班を単位とした数値情報であり、⑤～⑧は情報単位の異なる地理情報である。情報の質や精度もかなり差があり同じレベルで扱うことは困難であるが、それぞれ伐採許容量の決定に利用価値のある情

報である。すなわち、⑦⑧は資源調査のための標準地設定のための基礎情報として利用可能であり、③④は現在の資源把握や成長予測のための資料として利用することができる。また、①②⑤⑥は伐採許容量の決定の総合判断の材料として利用できる。

筆者⁵⁴⁾は、資源調査のための最も重要な情報は、その精度と内容から判断して林況調査と収穫調査の情報であると考え、これらの情報を有機的に組み合わせることを考えた。実際、演習林ではこの二つの調査に膨大な労力を投入している。ただ、現在のところ林況調査の情報は収穫調査のための基礎資料となっているのみであり、他方、収穫調査の情報は主に販売価格の積算に利用されているだけで、資源調査のための情報としては十分にフィードバックされていないように思われる。そこで、この2種類の情報を時系列的に結び付けて施業計画情報として利用することにした。そのために、2種類の情報の集計をコンピュータ処理できるように林況調査集計システムと収穫調査システムを作成し、従来は手計算によって膨大な労力と時間をかけて集計されていたこれらの調査の結果をパーソナルコンピュータを用いて短時間に集計できるようにした。

林況調査集計システムは、樹種ごとの直径階別本数をもとにha当りの本数・蓄積およびNL別・径級別の本数・蓄積の内訳・構成比を集計し、3～5箇所の標準地の平均値を計算するシステムである。収穫調査集計システムは、毎木調査野帳から木材単価が同じである樹种群ごとに、品等・形質・径級別に本数・蓄積を集計するシステムである。二つのシステムはともに単なる集計をするだけで特に解析を加えるものではないが、現地調査で集められた情報を加工しないでそのままデータとして取り込み、再利用することができる点に意味がある。したがって、この二つのシステムの特徴はその入力環境にあるといえる。できるだけ幅広く情報を集めるためには、誰もが気軽にコンピュータを使って集計業務ができるようにしなければならない。コンピュータを使って集計をしようとする時、常に入力ミスをする危険性をもっている。このようなときに起こりうるあらゆる種類の入力ミスを想定してこれに対応して、修正できるようにしなければならない。一度入力ミスをして、トラブルに巻き込まれた人の中には「コンピュータアレルギー」にかかり、再びコンピュータの前には戻ってこないものもいるかもしれない。この意思決定支援システム適用の端緒でこの

ようなことが生じてはこのシステムはとうてい機能しえない。このシステムの最大の特徴は事業用の情報をそのまま経営計画のための情報に取り込んでしまう点にあるので、入力環境の整備に特に気が配られている。次に、この二つの集計システムを結び付けるために樹種コードの調整が必要になる。収穫調査集計では木材価格の種類に応じて26種の樹種に区分しているのに対して、林況調査ではその結果を他の分野の調査にも利用するために64種の樹種を区分して調査している。したがって、この二種類の樹種区分に共通して利用できる樹種コードの体系を用意しなければならない。

林況調査や収穫調査などの記録はこれまで一度ずつしか利用されず、そのまま放置されていた。これは一つには、情報の量が多すぎて分析しきれないという面もあったと思われるが、現在ではコンピュータの利用により大量の情報処理が可能になり、データベースとして何度も利用することが可能になっている。ある調査結果を様々な角度から分析することができるし、同一の林分においてなされる複数の調査結果を時系列的に整理することによって、その間の変化を知ることができる。本システムでは、林況調査の情報をもとに各時点の林分構造を知り、これに収穫調査の結果を加えて回帰年ごとの林分構造の変化を把握する。さらに、後述する固定標準地の測定記録の解析結果を用いて将来の林分構造の変化を予測する。

第3節 林型別直径遷移確率に基づく天然林の成長予測

同齡単純林に比べて、天然林の成長現象は非常に複雑で、その予測は困難である。しかし、択伐林の伐採許容量を査定するためには、何らかの方法で、将来の林分構造を予測しなければならない。ここでは、本システムで採用する成長予測の方法についての検討を加える。第2節で述べたとおり、成長量を予測するための材料として、定期的に繰り返し測定される固定標準地の資料と施業の際の一回限りの測定資料である林況調査資料および収穫調査資料がある。前者は精密で信頼性の高い資料であるが、限られた林分での測定資料である。後者は、精度は落ちるが広範囲に測定が行われている。成長予測を行うのに、前者と後者のどちらに重きをなすかによって、二通りのアプローチが考えられる。すなわち、前者の資料に重きをなすならば、固定標準地の資料から直径遷移確率を予め計算しておき、林分構造の類似する林分にあてはめて成長予測を行う方法が考えられる。また、後者の資料に重きをなすならば、それぞれの林分ごとに過去の成長記録から直径遷移確率を推定し、成長予測を行う方法が考えられる。そこで、本節では前者の方法について検討し、後者の方法については次節において検討することにする。

1. 天然林の成長予測に関するこれまでの研究

欧米における、天然林の成長モデルに関する研究は、その手法によって2つの流れに分けることができる。一つはLiocourtに端を発する手法で、数式を用いて直径階別本数を直接求める方法である。Duerrら⁹⁾は限界効用の手法を用い、5年の回帰年を前提に、成長率、材価、税金、利率の影響を要因として、経済的な収益性の最大化を目的とした異齡林の最適な蓄積量について論じた。Meyer⁴⁵⁾はLiocourtの指数関数によって各直径階の立木本数を表現し、三角グラフを用いて材積の構成比について検討を加えているが、経済的な価値成長を比較をすることには否定的であった。Adamsら¹⁾は直径階別本数、進界木、枯死木の本数を各直径階の本数と断面積を用いて非線形なモデルによって表現する方法を示し、途中の伐採木の現在価を最大にするような伐採方法、回帰年、直径分布について検討した。このモデルでは伐採による立木密度の変化が成長

量に反映されている。Chang⁸⁾は、比較静学分析 (comparative static analysis) を用いて、土地希望価が最大になるような異齡林の最適蓄積量と回帰年を二つ同時に検討した。Haightら¹²⁾は、安定状態の伐採方法は林分の初期条件に依存することを示した。

いま一つの流れは、各直径階からの直径遷移確率を定めベクトルと行列を用いて林分の状態を表現する手法である。Usher^{102, 103)}はLeslie^{42, 43)}の動物の個体数の経年変化を表現するモデルを用いて最初に遷移確率を森林に応用し、直径分布をベクトルで表現し、行列によってその状態の変化を表した。彼は資源量を維持しつつ収穫量を最大化するような直径分布を求め、最終的な直径分布が安定することを示唆している。Buongiorno⁷⁾は、Adamsらと同じ資料を用いて直径遷移行列により林分の状態変化を表現し、リニアプログラミングの手法を用いて森林の現在価を最大にするような、回帰年や伐採方法を計算するモデルを示している。しかし、経済的な分析に力点がおかれているため立木密度の影響の表現など生態的な部分は非常に単純化されている。

わが国における天然林の成長モデルに関する研究は後者の流れをくんでいる。鈴木⁸⁵⁻⁸⁸⁾は林分の直径遷移を確率過程として記述する林分遷移の基礎方程式を提唱し、この遷移確率を時間の関数としてそのモデルを同齡単純林に適用した。吉田ら¹¹⁹⁾や南雲⁴⁸⁾は直径遷移確率の考え方を天然林に適用し、天然林を構成する林木の年齢が一様でないことから遷移確率を時間の関数としないで一定の値とし、現実林分の成長量から直接計算できることを示した。

東京大学北海道演習林では、林分施業法による林分の量的・質的推移を捉えるため、択伐・補植林分のほぼ全域にわたり、林相、土壌条件、地形などの異なる地域に固定標準地を設定している。標準地数は第Ⅰ作業級76箇所、第Ⅱ作業級30箇所の計106箇所で、1958～1981年に設定され、面積は0.146ha～1.394haで、平均0.40haの大きさである。固定標準地の調査は原則として第Ⅰ作業級で4年ごと、第Ⅱ作業級で5年ごとに行い、胸高直径5.0cm以上の全林木について、胸高直径を0.1cm単位で測定する。また、固定標準地を含む林分において択伐が実行される場合は、伐採に伴う測定を行い、伐採木・残存木の別を記録する。当初は針広別、径級別にまとめて本数、材積が記載されていたが、1968年より各林木に樹木番号をつけ、個々の林木の成長を追跡できるような測定・記

帳が行われるようになった。固定標準地の概要および測定記録を表-3.3.1,表-3.3.2,表-3.3.3,図-3.3.1に示す。

これまで、この固定標準地の資料を用いて、大貫ら^{67,68)}、竹内ら⁹¹⁻⁹⁴⁾、芝野ら⁷⁶⁻⁷⁸⁾、柴田ら^{80,81)}、石橋ら²⁴⁻²⁸⁾、田中ら⁹⁵⁾、平田ら^{13,14)}が天然林の成長解析および林型区分に関する研究を行っている。本システムにおいても1968年以降の単木成長記録を成長予測の資料に用いることにする。

2. 林型区分に基づく天然林の成長予測の方法

柴田⁷⁹⁾は天然林の施業を体系化するために、対象林分の類型化すなわち林型区分を行った。その林型区分の因子は、①天然更新の良否および施業方法に基づく択伐林分Ⅰ・Ⅱ、補植林分Ⅰ・Ⅱ、皆伐林分Ⅰ・Ⅱ、再生林択伐林分Ⅰ、再生林皆伐林分Ⅰの8つの林分区分、②樹種構成を表現するための針葉樹対広葉樹の材積比、③一斉林・二段林・複層林といった樹冠階層を表現するための大・中・小径木の材積比（ただし、大：胸高直径45.0cm以上、中：25.0～44.9cm、小：5～24.9cm）、④材積と立木本数の関係から導かれる林分疎密度、⑤針広混交林における優占樹種のNL別、の5項目であった。組合せの数としては288種類の林型が可能であるが、柴田が林況調査773例の集計結果を調べたところ、実際の出現率が1%以上の林型は22種類であった。

石橋¹⁸⁾は固定標準地資料の存在する18の林型について、同一林型で直径分布の変化が同じといえるかを調べ、試験地44例の予測値と測定値について、直径分布のカイ二乗検定を行い、分布型に有意な差が認められたのは1例のみであったと報告した。柴田ら⁸¹⁾はこの結果から、同一林型の森林においては、林木の更新、成長のパターン、目標とすべき森林の状態が森林施業上許容される範囲において同一であるとし、林型ごとに求めた直径遷移確率を目標林の設定に用いた。筆者はこれらの研究結果を踏まえて、林型ごとに求めた直径遷移確率をもとに、成長量を予測し、伐採許容量の査定に用いることを考えた。しかし、石橋の行った検定はあくまでも直径分布型の比較であって、この結果から直ちにこの方法が伐採許容量の計算に妥当であると断定するわけには行かないので、伐採許容量の査定に使えるか否かの判定は、この方法によって計算される成長量が現実の成長量にどの程度適合しているかを判断の基準にすることに

した。

3. 林型別直径遷移確率の計算

直径遷移確率の計算にあたり、まず、固定試験地のうちから2回以上の測定記録のある86箇所、延べ177成長期間の成長測定資料を選び、これを柴田⁷⁹⁾の林型区分にしたがい32種類に分類した。次に、このうちから延べ58,556本の成長記録を用いて、林型別に、NL別に、2cm括約の直径階別に5年間の直径成長量の平均と分散を計算した。このとき、固定標準地の面積が均一ではなかったので、全ての試験地の資料が同じ重みを持つように単位面積あたりに換算してからこの計算を行った。次に石橋¹⁸⁾の行った方法と同様に、資料数の少ない直径階の偶然誤差を排除するため、直径階方向に平均と分散の移動平均をとり、この平均と分散をもとに各直径階ごとの成長量分布にワイブル分布を当てはめ、各直径階ごとの直径遷移確率をNL別に求めた。この計算を32種類の林型について行ったが、その結果の一部を表-3.3.4と図-3.3.2に示す。

4. 断面積成長量予測の結果と考察

1で述べたとおり、固定標準地では胸高直径のみを測定しており、樹高の測定は行っていない。材積を求めるときにはあらかじめ用意された一変数材積表を用いている。この一変数材積表は樹高曲線および材積式を用いており、材積を比較する場合、材積表のもつ誤差が含まれるおそれがある。そこで、材積表のもつ誤差の要因を除くため、胸高直径から直接求められる断面積合計の値を成長量予測の指標として用いることにする。

資料は、固定標準地測定記録のうち、3年以上の測定間隔のある138成長期間のものを用いた。比較の方法は、成長期間の期首における直径分布と林型別の直径遷移確率を用いて、期末の直径分布を計算し、この間の胸高断面積合計の一年分の成長量を指標として、林型別の直径遷移確率が成長量の推定に有効であるか否かを調べた。

その結果は、図-3.3.3に示したとおりである。これをみると総成長量については、測定値と計算値の間はかなり大きな差が認められた。測定値に対する計算値の誤差率が±5%以内であったのは138例のうち27例(19.5%)であった。誤差

率±10%以内が53例(38.4%)で、許容範囲を±20%以内に広げてみても、93例(67.4%)であった。このことは測定値と計算値の間に20%以上の誤差が生じることが30%以上の割合で起こっていることを意味している。この誤差は森林施業上許容される範囲にあるとはいえない。このことから、筆者は伐採許容量の査定に林型別の直径遷移確率からえられる総成長量をそのまま使うことは適当でないと判断した。

次に、この成長量の内訳について調べた。その結果は図-3.3.4、図-3.3.5に示したとおりである。成長量に占める針葉樹と広葉樹の割合は、測定値と計算値の誤差が±8%以内のものが121例(87.8%)であった。成長量に占める径級別の割合を比較すると、測定値と計算値の誤差が±4%以内のものが、針葉樹の小径木で111例(80.4%)、中径木で125例(90.6%)、大径木で115例(83.3%)あった。広葉樹では、小径木で101例(73.2%)、中径木で116例(84.1%)、大径木で119例(86.2%)あった。この比較の結果から、成長量に占める針広別や径級別の割合については、許容される範囲内で予測値が得られているといえる。

このように径級間の成長量のバランスはよく捉えていながら、全体の総成長量に大きな相違の生じた原因は、この方法が単木の成長量を確率的に捉え、一本一本の林木の成長量を積み上げて林分全体の成長量を表現する方法をとっていることにあると考えられる。同齡単純林の成長に関する研究¹¹⁴⁾では、単木の成長はその林木のおかれている立木密度の影響を受けることが知られている。このことは、異齡混交林においても同様に考えることができる。柴田⁷⁹⁾の提案した方法では林型を区分する際に材積と立木本数の関係から林分疎密度を3段階に区分している。しかし、この区分では同じ蓄積量に対してha当り立木本数に300本の差があっても同じ林分疎密度に区分されることがある。単木の成長と立木密度の関係を考慮すれば、これらを同じ直径遷移確率のもとで総成長量の計算を行うことは適当でないと考えられる。

また、林分構造については材積比で小径木が10%以上、中径木が15%以上、大径木が20%以上占めている場合、対応する樹冠階層を形成しているものと見なし、一段林・二段林・複層林の3段階に区分している。しかし、この区分では同じ二段林でも小・中径木の二段林と中・大径木の二段林との間の区別がなされていない。上層木の存在は下層木の成長に対して少なからぬ影響があると考えら

れる。ここで例にあげた二つの二段林では、上層木の存在の有無によって、中径木の成長パターンには大きな違いがあると考えられる。前述した成長量に占める径級別の成長量割合が小径木で最も多くの推定誤差を生じたのはこのためであると考えられる。

第4節 林分別直径遷移確率に基づく天然林の成長予測

第3節で述べたように、天然林の成長現象が余りにも多様であるため、限られたパターンの林型ごとに直径遷移確率を求め、単木の成長量を積み上げる方法を、伐採許容量の査定に用いるには多くの問題を含んでいる。そこで、直径遷移確率は立地条件や樹種構成の違いに応じて、林分ごとにそれぞれ異なるものであると考え、林木の成長を限られた種類の直径遷移確率の枠に押し込めるのではなく、個々の林分の個性を尊重し、それを認めた上で互いの類似性を見いだしてゆくことにする。そのために、まず林分全体の総成長量を捉えておいて、次の段階で径級別に成長量を配分する方法をとる。このとき、断面積合計や林分成長量を径級ごとの構成比で表すことによって、全ての量を相対化し、無次元量にすることにする。こうすると、断面積合計や林分成長量の絶対量の違いに拘らず、様々な状態の林分を同じ尺度で比較することができる。すなわち、断面積比の類似する林分を集めて、成長量比の類似性を見いだすことができる。本節ではこのような考え方に立ち、成長予測の問題を考えて行くことにする。

1. 林分別直径遷移確率の考え方

択伐林の成長現象を定式化するに当たって、各林木の直径成長現象は、それぞれの直径階ごとにあらかじめ定まっている確率に基づく確率事象であるという前提をおく。この点は柴田⁷⁹⁾の考え方と同様であるが、次の二つの仮説を設定する点が大きく異なる。

仮説1

林分の断面積合計の定期成長量は、立地条件や樹種構成によって決まる林分固有の生産力によって規定され、適切に施業され十分にうっ閉した林分の今後10年間の断面積粗成長量は、過去10年間の成長量に等しい。

仮説2

断面積合計の定期成長量が与えられたとき、各直径階への成長量の配分比は、各直径階が占める断面積合計の構成比によって決まる。

以上の仮説が成り立つならば、過去の断面積成長量を基に林分固有の直径遷移

確率を計算し、将来の林分構造を推定することができる。こうして得られる将来の林分構造を目標とする林分構造と照らし合わせながら、現在なすべき森林施業の方法を判断することができる。

まず、仮説1について検定する。ヒルミ¹¹¹⁾は林分の成長量をエネルギー論の立場から考察し、うっ閉状態を維持しながら生育する林分は太陽エネルギーを十分に吸収しており、そのとき林分が吸収するエネルギーの総量は一定であるとしている。また筆者¹¹⁴⁾は、東京大学秩父演習林のスギ・ヒノキ・サワラ・カラマツの人工林成長試験地における胸高断面積の測定結果から、同一の立地条件のもとでは、同齢単純林の一定期間中の胸高断面積合計の粗成長量が林分構造に拘らずほぼ等しいことを確認した。さらに照査法の収穫規整においては、前の経理期間の成長量をもって次の経理期間の伐採許容量としている。これらのことから、十分にうっ閉した天然林の胸高断面積合計の粗成長量も一定の値を保つであろうことは容易に想像できる。そこで、このことを固定標準地の測定結果から確認することにする。

資料としては、固定標準地のうち、3年以上の測定間隔の成長記録を2つ以上もつ45の試験地の100成長期の測定記録を用いた。このうち36成長期については期首において伐採が行われている。比較の指標としては、各試験地の胸高断面積粗成長量の平均値に対する、各成長期の胸高断面積粗成長量の誤差率を用いた。その結果は図-3.4.1に示したとおりで、誤差率5%以内のものが45%、10%以内のものが77%、20%以内のものが100%であった。これは先に調べた林型別の直径遷移確率を用いた成長量の予測結果と比較して、極めて良好な結果と言える。気象等の要因による天然林の成長量の変動を考慮すれば、この結果から同一林分の胸高断面積合計の粗成長量がほぼ一定の値を維持すると認めることができる。このことは、一定の伐採強度の範囲内においては、立木密度に拘らず林分全体の粗成長量の総量は安定しており、各林木の個体成長が立木密度の影響を受けるという事実を裏付けている。こうして過去の成長記録からその林分固有の生産力を知ることができれば、将来の成長量を予測することが可能となる。

次に仮説2について検定する。これは、同じ林分構造を持つ林分は、成長量の配分パターンも同じであるか否かという問題と考えることができる。「林分

構造」という言葉には、樹種構成も含まれるが、成長量の配分に最も強い影響を与えるのは立木の空間配置と考えられる。したがって、樹高階別の構成比が重要な情報となるが、天然林において樹高を測定した資料は少ない。そこで、一般に林木の樹高と胸高直径の間には高い相関関係があると考えられるので⁵⁸⁾、直径の大きい木の樹冠は上層を占めるものと見なし、直径階ごとの断面積構成比によって林分構造を表現することにする。

いま、各直径階の直径成長率が均一な林分を想定すると、ある成長期間における断面積成長量の構成比は期首における断面積構成比に等しくなる。例えば、 d_1, d_2, d_3 の3つの直径階の断面積構成比が50:30:20であったとすると、10年間の成長率が一律に10%であるならば、断面積成長量の構成比も5:3:2となる。しかし、現実の林分ではこのようなことはなく、直径成長率は均一でない。ある直径階の直径成長率が平均成長率より大きいとき、その直径階の断面積成長量の構成比は、期首における断面積構成比に較べて大きくなる。このような関係を全ての直径階にわたって考えることができる。一つの林分のある直径階 j について、断面積成長量を ΔG_j 、期首における断面積合計を G_j 、断面積成長量構成比と断面積構成比の変換係数を k_j とすると、次のように表現することができる。

$$\frac{\Delta G_j}{\Delta G} = k_j \cdot \frac{G_j}{G} \quad (3.4.1)$$

$$\Delta G = \sum \Delta G_j \quad (3.4.2)$$

$$G = \sum G_j \quad (3.4.3)$$

ここで、変換係数 k_j とは、(3.4.1)式から次のように表わすことができる。

$$k_j = \frac{\Delta G_j / \Delta G}{G_j / G} = \frac{\Delta G_j / G_j}{\Delta G / G} \quad (3.4.4)$$

このことから、変換係数 k_j は林分全体の断面積成長率に対する直径階 j の断面積成長率の比であるということが出来る。この林分の直径階の数が n 個あれば、変換係数である k_j の数も n 個となる。成長量配分パターンは n 個の変換係数 k_j の組合せとして、 n 次元ベクトル $K = (k_1, \dots, k_j, \dots, k_n)$ で表現することができる。この n 次元ベクトルを「構成比変換ベクトル」と呼ぶこととし、その特性を調べることにする。しかし、 n 次元空間のベクトルを比較するのは複雑であるので、ここでは n 個の直径階を大・中・小の3つの直径級に統合し、3次元空間で変換ベクトルの比較を行うことにする。このように考えると、図-3.4.2に示したような三角グラフ上で林分構造を表現することができ、この三角グラフ上で近接する林分は林分構造の類似する林分であるとみなすことができる。この林分構造の類似する林分が断面積成長量の配分においても類似性を保つか否かを調べることにする。そのため、大・中・小径級の断面積成長量の構成比も同様な三角グラフを用いて表現することにする。

各直径階の直径成長率が均一であれば、断面積成長率も均一となり、期首の断面積合計と断面積成長量の構成比は三角グラフ上で同じ位置を占めることになる。これに対して、小径木の直径成長率が中・大径木より大きい場合、三角グラフ上の断面積成長量の構成比の位置は断面積構成比の位置よりも左下に移動する。逆に大径木の直径成長率が小・中径木より大きい場合、断面積成長量の構成比の位置は上方に移動する。

このように、三角グラフ上での移動距離と方向は、小・中・大径級の断面積成長量の構成比と断面積構成比との変換係数である k_s, k_m, k_l の値によって決まる。これを3次元の構成比変換ベクトル $K = (k_s, k_m, k_l)$ で表現すると、断面積成長量構成比ベクトル $\Delta G = (\Delta G_s, \Delta G_m, \Delta G_l)$ は、構成比変換ベクトル K と断面積構成比ベクトル $G = (G_s, G_m, G_l)$ によって示すことができる。すなわち、期首の径級ごとの断面積構成比と構成比変換係数から、断面積成長量の構成比が導かれるということである。さらに、断面積成長量の総量が与えられると径級ごとの成長量を求めることができる。このことを数式で示すと、次のように表現できる。

$$G = G_s + G_m + G_l \quad (3.4.5)$$

$$\Delta G = \Delta G_s + \Delta G_m + \Delta G_L \quad (3.4.6)$$

$$\Delta G_s / \Delta G = k_s \times G_s / G \quad (3.4.7)$$

$$\Delta G_m / \Delta G = k_m \times G_m / G \quad (3.4.8)$$

$$\Delta G_L / \Delta G = k_L \times G_L / G \quad (3.4.9)$$

$$\Delta G = K \cdot G$$

$$= k_s \cdot G_s + k_m \cdot G_m + k_L \cdot G_L \quad (3.4.10)$$

次に、この構成比変換ベクトルKと林分構造の関係を調べることにする。資料としては固定標準地のうち、3年以上の測定間隔のある択伐林分の100成長記録を用いた。各成長記録を成長期間の期首における径級ごとの断面積構成比から図-3.4.3のように6つのグループに分けることにした。第1のグループは大径級の構成比が70%以上のもの、第2のグループは大径級の構成比が50%以上70%未満でかつ小径級の構成比が20%未満のもの、第3のグループは大径級の構成比が50%以上70%未満でかつ小径級の構成比が20%以上のもの、第4のグループは大径級の構成比が20%以上50%未満でかつ小径級の構成比が25%未満のもの、第5のグループは大径級の構成比が20%以上50%未満でかつ小径級の構成比が25%以上のもの、第6のグループは大径級の構成比が20%未満のものである。この断面積構成比と断面積成長量構成比の関係を三角グラフ上で調べたところ、図-3.4.4のとおりそれぞれのグループごとに一定の傾向をもって三角グラフ上を移動することが認められた。例えば、大径級の割合が非常に高い林分や逆に非常に低い林分では、三角グラフ上の断面積成長量の構成比の位置から断面積構成比の位置への移動距離は比較的小さい。大径級の割合が20%から70%の林分では、三角グラフ上の断面積成長量構成比の位置は断面積構成比の位置から大きく移動する。この移動の方向や大きさは中小径級の割合によって異なり、小径級の割合が20%前後の林分で最も大きく左下に移動する。すなわち、中径級の構成比

はあまり変わらず、大径級から小径級への転移が大きい。小径級の割合が小さくなると移動の方向がやや下方に振れ、中径級の構成比がやや高まる。このことから林分構造によって断面積構成比を断面積成長量の構成比に変換する一定の傾向が存在するということができる。この一定の傾向を林分構造別の変換パターンとして抽出することができるならば、期首の直径分布と断面積粗成長量から断面積成長量を径級ごとに推定することが可能になる。また、この考え方を径級ごとの構成比から直径階ごとの構成比に展開させることもできる。

構成比変換ベクトルを定めるためには、断面積構成比を断面積成長量構成比に変換する係数を求めなければならない。そこで、対象となった延べ35437本の林木を期首の林分構造から6つのグループに分け、針葉樹と広葉樹のそれぞれについて、(断面積成長量構成比) / (断面積構成比)の直径階ごとの平均値を計算した。さらにこの平均値を直径階間の変化が滑らかになるように移動平均して、グループごとの変換パターンを描いたのが図-3.4.5である。これをみると、針葉樹と広葉樹とでは変換パターンに大きな差があることがわかる。針葉樹では、大径級の断面積構成比の大きい林分では、径級間の変換比の差が小さく、大径級の割合がやや下がると、小径級の変換比が高くなって大径級との差が広がり、さらに大径級の割合が下がると、今度は中径木の変換比が高くなる。これに対して広葉樹では、大径級の断面積構成比の大きい林分では、小径級の変換比が高く、大径級の割合が下がるにつれて径級間の変換比の差が縮まる傾向が認められた。したがって、広葉樹主体の林分と針葉樹主体の林分では、断面積構成比が同じであっても、断面積成長量構成比には差が生じることになる。

2. 林分別直径遷移確率の計算

ここまでの検討により、林分の総断面積成長量を知り、これを各直径階に配分する方法が確立された。次に、林分別に直径遷移確率を計算する方法について考察する。先に述べたように直径遷移確率を計算するためには直径階ごとの直径成長量の平均と分散の値が必要である。そこで、直径階ごとの断面積成長量から直径成長量の平均と分散を導くことを考える。

ある直径階 d における断面積粗成長量を ΔG 、立木本数を N 、 i 本目の立木の

直径成長量を x_i とすると、

$$\begin{aligned} \Delta G &= \left\{ \sum_{i=1}^N (d + x_i)^2 - \sum_{i=1}^N d^2 \right\} \cdot \frac{\pi}{4} \\ &= \left\{ \sum_{i=1}^N d^2 + 2 \sum_{i=1}^N d \cdot x_i + \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N d^2 \right\} \cdot \frac{\pi}{4} \\ &= \left(2d \sum_{i=1}^N x_i + \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) \cdot \frac{\pi}{4} \end{aligned} \quad (3.4.11)$$

いま、直径成長量の平均を \bar{x} 、直径成長量の分散を σ^2 、変動係数を C_v とすると、

$$\sum_{i=1}^N x_i = N \cdot \bar{x} \quad (3.4.12)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N x_i^2 &= N \cdot (\bar{x}^2 + \sigma^2) \\ &= N \cdot \bar{x}^2 (1 + C_v^2) \end{aligned} \quad (3.4.13)$$

(3.4.12) 式と (3.4.13) 式を (3.4.11) 式に代入すると、

$$\Delta G = \left\{ (2d \cdot N \cdot \bar{x} + N \cdot \bar{x}^2 (1 + C_v^2)) \right\} \frac{\pi}{4} \quad (3.4.14)$$

が成り立つ。

(3.4.14) 式を \bar{x} の 2 次方程式と見なすと、次のように書き換えることができる。

$$\bar{x}^2 (1 + C v^2) + 2 d \cdot \bar{x} - \frac{4 \cdot \Delta G}{N \cdot \pi} = 0 \quad (3.4.15)$$

(3.4.15)式から、方程式の解として

$$\bar{x} = \frac{-d \pm \sqrt{d^2 + 1.2732 \cdot \Delta G \cdot (1 + C v^2)} / N}{1 + C v^2} \quad (3.4.16)$$

が得られる。しかし、 \bar{x} は正の数であるので、

$$\bar{x} = \frac{-d + \sqrt{d^2 + 1.2732 \cdot \Delta G \cdot (1 + C v^2)} / N}{1 + C v^2} \quad (3.4.17)$$

となる。

このように、変動係数の値が与えられれば、直径階ごとの断面積成長量から直径成長量の平均と分散を導くことができる。そこで、変動係数の値を固定標準地の測定資料をもとに定めることにした。資料は固定標準地測定記録のうち、3年以上の測定間隔のある138成長期間、延べ46,250本の成長記録を用いた。針葉樹と広葉樹について、測定記録ごとの直径成長量の平均と分散から変動係数を直径階ごとに計算し、測定本数に応じて加重平均し、さらにこの平均値を直径階間の変化が滑らかになるように移動平均して直径階ごとの変動係数の値を定めたのが図-3.4.6である。針葉樹・広葉樹ともにほぼ同様なカーブを描いているが70cm以下の直径階では針葉樹がわずかに大きな値を示し、70cm以上ではその関係が逆になっている。個々の測定記録における直径成長量の変動係数をみると、測定本数が少ないためかなり幅広い値をとっているが、数多くの資料を集めて平均をとってみると移動平均をする前の値でも連続的な変化を示しており、このような方法によって得た変動係数の値も妥当な数値であると考えられる。

第5節 樹形グラフによる天然林の林分構造の比較

前節では、択伐林の林分構造を定量的に表現して、成長予測を行ったが、ここでは最終的な意思決定者である施業担当者に対して、成長予測の結果を視覚的に表示し、隣接する他の林分や目標とする森林との林分構造の比較に利用する方法について考察する。

1. 樹形グラフについて

石橋^{20, 21, 23)}は天然林を構成する18の要素をチャーノフの顔形グラフを用いて視覚化し、クラスター分析による林型区分に利用した。しかし、顔形グラフでは、変数が多すぎて全体的なイメージをつかむのが困難である。また、林型区分を目的としたため、全体の材積や立木本数が表現されていない。そこで、筆者¹¹³⁾はよりわかりやすくかつ施業上実用的な林分構造の表現方法として、新たに「樹形グラフ」を考案した。

樹形グラフとは、林木の集合である林分を一本の樹木の形に表したものである。この樹形グラフは天然林を管理して行く上で、林分構造を視覚化するための道具として利用することができる。例えば、林分構造の時間的変化を表現したり、類似した林分構造を持つ林分を見つけ出したり、目標林との対比をしたりすることができる。

東京大学北海道演習林では、天然林の林分構造を把握するために林況調査を実施し、最小限の因子として林分ごとに単位面積当りの大・中・小径木別の材積および本数の6項目の情報を収集している。そこで、筆者はこれらの情報を用いて、石橋の顔形グラフよりシンプルに林分構造を視覚的に表現することを試みた。

図-3.5.1に示したように、樹形グラフは林分構造を示す6項目($n_1, n_2, n_3, v_1, v_2, v_3$)に、これから得られる単位面積当りの材積(V)および立木本数(N)、針葉樹対広葉樹の材積比($N:L$)の3項目を加え、合計9項目を用いて林分構造を表現する。すなわち、このグラフの樹高が総材積(V)を、クローネ直径が総本数(N)を示している。この縦横のバランスから林分疎密度を読み取ることができる。樹高に対してクローネ直径が相対的に大きければ密度の高い林分を意味し、逆

にクローネ直径に対して樹高が相対的に大きければ比較的疎な林分を意味する。次に、クローネ長が大径木の材積 (v_3) を、幹の長さが中径木の材積 (v_2) を、根張りの高さが小径木の材積 (v_1) を示している。この3つのバランスから大・中・小径木の材積比を読み取ることができる。相対的にクローネが長ければ大径木の割合が多く、根張りが高ければ小径木の割合が多い林分を意味する。また、各部の横方向の長さが大・中・小径木の本数を示している。幹上部の幅は大径木の本数 (n_3)、幹下部の幅は中径木の本数 (n_2)、根張りの幅は小径木の本数 (n_1) となる。クローネ直径に対するこの3つの幅のバランスから大・中・小径木の本数比を読み取ることができる。さらに、クローネの形が針葉樹と広葉樹の材積比を示している。ここではクローネの頂点と底辺の両端を結ぶ線を $y = a x^p$ という式で表し、 $p = \text{針葉樹材積} / \text{広葉樹材積}$ という関係を与えている。したがって、広葉樹材積 = 針葉樹材積の時には $p = 1$ となり、 $y = a x^p$ は直線となる。広葉樹材積 > 針葉樹材積の時には $p < 1$ となり、 $y = a x^p$ は上に凸な曲線となる。広葉樹材積 < 針葉樹材積の時には $p > 1$ となり、 $y = a x^p$ は下に凸な曲線となる。この結果、樹形グラフがいかにも広葉樹らしくクローネが丸みをおびた形をしているときは広葉樹の材積比が大きい林分を意味し、針葉樹らしくクローネが尖った形をしているときは針葉樹の材積比の大きい林分を意味する。

次に、林型によってどのように樹形グラフが変化するかを見てみることにする。図-3.5.2は東京大学北海道演習林の固定標準地資料の中から、いくつかの林型を代表する林分の樹形グラフを示したものである。先に述べたように、疎密度の高い林分ではクローネの幅が大きくなり傘を開いたような樹形になっており、広葉樹主体の林分では丸みを帯びたクローネが描かれている。択伐林分のうち里山林の場合、更新が旺盛で小径木の本数・材積が比較的多く、樹形グラフはどっしりとした安定感のある形をしている。これに対して、奥地林の場合は蓄積が高く、本数の少ないスマートな樹形をしているが、大径木の割合が多く更新があまり旺盛でないため、やや足元の不安定な感じを与えている。再生林択伐林分では広葉樹の割合が多く、小径木の材積比が大きい。大径木がほとんどなく、材積に対して本数が多いため、樹木の形と云うよりもウィングラスを伏せたような形になってしまっている。補植林分では更新が不良で中・小

径木の蓄積割合が小さい。このままでは林分として将来の発展が期待できないので、不良木を整理して、その跡地に補植したり、下種更新の促進作業を行っている。風害林分は1981年に発生した風害を受けた林分であるが、樹形グラフで表してみると、風害を受けていない林分に比べて本数・材積がともに減少している様子がよくわかる。ここでも、補植林分と同様に積極的な下木の育成が図られている。

以下に、樹形グラフを用いて、いろいろな角度から林分構造の比較を行った結果を示す。

2. 樹形グラフによる時系列変化の把握

東京大学北海道演習林の固定標準地資料の中から代表的な林分を選び、林分構造の時間的変化を見てみることにする（図-3.5.3）。一番目の例は、疎密度の高い針葉樹主体の里山択伐林分の4年間の成長を捉えたものである。この間に $38\text{m}^3/\text{ha}$ の蓄積増加がみられている。しかし、小径木には大きな変化はなく、針葉樹の中・大径木で成長量を稼いでいる。その結果、針葉樹の割合が増加している。こうしたことは、二つの樹形グラフを重ねてみるとその様子がよくわかる。二番目の例は、疎密度が中程度の針葉樹主体の奥山択伐林分の5年間の成長を捉えたものである。この間に蓄積は $34\text{m}^3/\text{ha}$ 増加しているが、その内訳は里山林分の例よりも大径木における蓄積増加が顕著である。三番目の例は、伐採の前後で林分構造がどのように変化するかを比較したものである。これは疎密度が中程度の広葉樹主体の里山択伐林分を14%の択伐率で伐採したものであるが、針葉樹の大径木を主体に伐った結果、広葉樹の割合が増し、大径木の蓄積と小径木の本数が著しく減っている。このように樹形グラフを重ねてみると、同一の林分の時系列変化や伐採による変化を視覚的に捉えることができる。

3. 樹形グラフによる林分相互の比較

択伐林施業を実施しようとする場合、具体的な目標林の姿を描いておく必要がある。図-3.5.4は、東京大学北海道演習林の固定標準地資料の中からha当りの材積が 250m^3 以上で成長率のよい林分を選び、その樹形グラフを描いたものである。ここには実に様々な構造の林分が登場するが、これを見る限り針葉樹の

割合が高いこと、大径木または中径木の割合の大きいことが成長のよい林分の特徴とされるであろう。このような資料を集めることによって、どのような樹形グラフを示す林分が望ましい林分であるかを知ることができる。

図-3.5.5の上段は、一般に択伐林施業の目標とされている林分構造を樹形グラフに表したものである。すなわち、蓄積 $300\text{m}^3/\text{ha}$ 、針葉樹の蓄積割合70%、立木本数1000本/ha、大・中・小径木の材積比を5:3:2としたものである。図-3.5.5の下段は、東京大学北海道演習林の林況調査資料から蓄積 $300\text{m}^3/\text{ha}$ 、立木本数1000本/haに近い択伐林分を選び、その樹形グラフを描いたものである。この中から目標林に最も近い林分がどれであるかを選ぶことにする。このようなとき、図-3.5.6のように樹形グラフを重ね合わせてその林分構造を比較すると、数値だけを眺めるより容易にその違いを知ることができる。まず、1番目の03a01と3番目の35d06の林分は大径木の割合が低すぎるのがわかる。これとは逆に、2番目の35d05と5番目の51A1と6番目の104c1の林分は大径木の割合が高すぎて、中・小径木の割合が低い。こうしてみると、4番目の35b24の林分が最も目標林に近い林分であるということが出来る。そして、これらの林分は速やかに目標林の林分構造に誘導されなければならない。そのためには、大径木の割合が低い林分では大径木の伐採を抑制するような施業が必要であり、逆に大径木の割合が高い林分では積極的に大径木の伐採を進め、中・小径木の成長を促すような施業が必要である。また、最も目標林に近い林分では、その状態を安定的に維持することを図らなければならない。そこで、直径遷移確率を用いて将来の林分構造を予測し、これを樹形グラフに描いて現在の状態と重ねてみれば、いまどのような施業をしなければならないかということが見えてくるであろう。

林分の構造は連続的に変化しており、あるところできれいに線が引けるわけではない。したがって、いくつかの林型に区分して成長を捉えようとしても、どうしてもうまく捉えられない林分が生じる。このようなときに、よく似た林分構造の林分を選び出し成長パターンを比較することが考えられる。このような選び出し作業に当たって樹形グラフは有効である。しかし、天然林は様々な要素が有機的に関係しており、この樹形グラフの要素だけで全てを判断することは不可能である。択伐林施業では、最終的な施業方法については担当者に委

ねられる部分が大きいが、その際にできるだけ多くの客観的な情報が提供されることが望ましい。樹形グラフは施業担当者が樹木の形での視覚的表現から、林分構造を速やかに把握することを可能にするので、第一段階の判断基準として役に立つ。したがって、樹形グラフは択伐林施業のための意思決定支援システムの中で有効な表現手段の一つであるといえることができる。

第6節 地理情報システムによる天然林の管理

択伐林施業を行うには、林分構造の予測だけでなく、地形や土壌の情報や周囲の林分の情報、搬出条件などを総合的に勘案して判断がなされなければならない。ここでは、これらの図形的な情報を取り扱う方法について考察する。

1. 地理情報システムについて

地理情報システムとは、森林資源情報、森林施業情報、地質・地形などの地況情報のように台帳の形で整理されている数値情報と、森林基本図、林相図、土壌図、地形図などの図形的情報とをコンピュータを用いて統合し、これらの情報を重ね合わせたり検索したりする機能を持つデータベースとしたものである³⁹⁾。地理情報システムはそれ自体では最終的な判断を下すわけではないが、これらの情報を解析することにより、意思決定者が最終的な判断を下すための情報を様々な形で提供し、従来よりも高度な判断をするための計画支援システムとして位置づけられる。

地図情報の取り扱い方法としてはメッシュとポリゴンの2方式がある。メッシュ方式ではデータの単位が規格化されているので、計算機でのデータ処理が容易であり、多様な統計的処理が可能である。また情報の出力もプロッターのような特殊な機器がなくとも、通常のプリンターによるデジタルマップでの出力が可能である¹²⁰⁾。しかし、既存の森林資源情報である森林調査簿や森林基本図の情報が小班を単位としているため、これをメッシュ情報に変換しなければならない。これには多大な労力を要する。これに対してポリゴン方式は情報の単位が自由な次元の多角形であるため、林相や小班、土壌型分布のような複雑な区画をそのまま保持することができる。ただし、ポリゴン方式は情報量が比較的大きくなるため、広範囲にわたりデータ解析を行うような場合、メッシュ方式と比べて処理時間が長くなる。また、情報の構造が複雑であるためこれを処理するためのソフトウェアも大きくなり、デジタイザーやX-Yプロッターのような特殊な入出力装置が必要となる。本システムでは統一的な座標系を設けてメッシュ情報とポリゴン情報を一つのデータベース管理システム内で取り扱う。そして、地図情報と数値情報は別々の情報ファイルで管理することとし、

両者をコントロールする索引ファイルを通じてこれらを制御する。

2. 本システムにおける地理情報システムの考え方

北海道演習林の森林基本図は国土地理院作成の地形図に基づいて作成されているが、山部地区(74.5km²)は1/5000の正確な地形図が作成されているのに対して、西達布、麓郷地区(135.0km²)は1/25000の地形図を1/5000に引き延ばしたものを使用している。したがって、現在の森林基本図の精度は決して高いものではないが、1987年度に地形図作成のための航空写真撮影が実施されており、今後この撮影成果に基づいて森林基本図が整備される。本地理情報システムは新たに森林基本図が整備されることを前提として構築する。

(1)メッシュ方式の考え方

縮尺1/5000の森林基本図上で基本単位50m×50mのメッシュ図を作成し、地況・林況情報を格納する。地況情報としては、標高、方位、傾斜、土壌などがあり、林況情報としては林区分、林種、主要樹種、材積、立木本数、成長量などがある。これらの情報は各メッシュと1対1の対応を持つものであるが、このほかにも必ずしも1対1の対応を持たない情報もある。例えば、次章において詳しく述べる優良広葉樹や各種試験地、特定の種の動植物の分布状況などの情報の管理の単位としてもこのメッシュを用いる。しかし、メッシュ数が13万個以上に達するため、これらの情報の入力には膨大な労力を要する。したがって、以下に述べるポリゴン情報を利用してこれをメッシュ情報に変換する方法を採用する。

(2)ポリゴン方式の考え方

ポリゴン方式では表示しようとする領域を多角形(ポリゴン)で表現し、多角形の各頂点のXY座標値のデータ列として取り扱う⁵⁵⁾。例えば、ある領域をn角形で表現すると、ポリゴンデータは(x₁, y₁), (x₂, y₂), ..., (x_n, y_n)という組の座標値データによって構成される。ポリゴン方式で林班の領域を表示する場合、「陣取り法」と呼ばれる手法を用いてポリゴンデータを作成する。本システムでは、ポリゴンデータの作成にデジタイザー(座標測定装置)を用いる。

林班界のポリゴンデータの場合は、反時計回りに入力することとし、座標列の左側の領域が表示の対象となる。陣取り法は、隣接する林班がその境界部分のポリゴンデータを共有するための手法である。陣取り法の手順を図-3.6.1、図-3.6.2に示す。まず、第1の林班の領域を示すポリゴンを作成しておき、これを「原図形」とする。いま、原図形が k_1 角形のポリゴンであるとする。これに隣接する第2の林班を選び、そのポリゴンの第1番目の点をその接点の近くで原図形の内部にとる。次に、接点の近くで今度は原図形の外部にポリゴンの2番目の点をとる。この2つの点を結ぶ線分を「開始線分」と呼ぶことにする。開始線分と原図形を構成する k_1 個の線分すべてについて交点を計算すると、このうち1つの線分のみが交点を持つ。この線分が原図形の j 番目の線分であるならば (x_j, y_j) と (x_{j+1}, y_{j+1}) の間に新たな座標値 (x_{start}, y_{start}) が求められる。これを改めて第2の林班のポリゴンの第1番目の点とする。3番目以降の点は原図形と隣接しない部分のポリゴンを作成し、再び、原図形のところまで戻ってきたら、第1番目の点を定めたときと同様に、ポリゴンの最後から2番目の点を接点の近くで原図形の外部にとり、原図形の内部に最後の点をとる。最後の点が p 番目の点であるとする。この2つの点を結ぶ線分を「終了線分」と呼ぶことにする。終了線分と原図形との交点を改めて第2の林班の p 番目の点 (x_{end}, y_{end}) と定める。この点が原図形の i 番目の線分上にあるならば、 $i > j$ のとき、原図形上の境界部分の $(i - j)$ 組の座標値データ $(x_{j+1}, y_{j+1}), \dots, (x_i, y_i)$ はそのまま第2の林班のポリゴンデータに取り込まれ、隣接しない部分の p 組の座標値データと併せて第2の林班の領域を示すポリゴンデータが作成される。ただし、原図形との境界線であった部分のデータ列の順序は逆向きとなり、 (x_{end}, y_{end}) のあとに $(x_i, y_i), \dots, (x_{j+1}, y_{j+1})$ と続くことになる。そして、原図形上の境界部分を除いた $k_1 - (i - j)$ 組の座標値データと第2の林班の p 組の座標値データを用いて原図形の領域に第2の林班の領域を合併させたポリゴンを作成し、これを新たな原図形とする。そして、図-3.6.2に示したようにA, B, C, Dの順にポリゴンを作成する。このようにして、新しい林班のポリゴンを陣取り遊びのように次々に作成することができる。林班の領域は半永久的なものと考えられるので、各ポリゴンのデータは各林班名をそのままファイル名にしたシーケンシャルフ

ファイルを作り管理する。

小班界ポリゴンの作成は林班界のポリゴンデータを基にして、陣取り法を内側に折り返す「陣崩し法」によって行う。この方法では林班を分割して次々に新たな小班を作成する。小班原図はだんだん小さくなってゆき、最後の小班は残された原図をそのまま小班とする。小班界は林班界の場合と異なりその領域は流動的なものであり、様々な属性を持ち、その属性もまた流動的なものである。したがって、データファイルもこれに対応して部分的な修正の容易なランダムアクセスファイルとする。小班ファイルはポリゴンデータファイルと属性ファイルの二つのファイルによって構成される。ポリゴンデータファイルには、林班ポリゴンファイルと同様にXY座標値のデータ列が格納される。属性ファイルには、森林簿情報が格納されると同時にこのファイルが索引ファイルとしての機能を果たし、対応する小班ポリゴンデータを格納するファイル名およびファイル内にアドレス、ポリゴンの頂点の数、XY座標の最大値・最小値、小班のシンボルを示す際の位置を決めるためのポリゴン内部の1点のXY座標値が格納される。

こうして作成された小班ポリゴンは属性ファイルの森林簿情報で検索の上、任意の縮尺でディスプレイに出力したり、プロッターを用いて書き出すことができる。また、ポリゴン情報のままで小班の面積や、他の小班間との距離、林道までの最短距離を計算することができる。このような機能は森林施業上の重要な判断材料を提供する。さらにこのような領域を示すポリゴンは林相区分、土壌型、地質区分、等高線、等温線についても作成することができる。これらの情報の質の異なるポリゴンを重ね合わせて二つの領域の和集合 ($A \cup B$) や真理集合 ($A \cap B$) のポリゴンを作成することができる。

n角形とm角形の二つのポリゴンの和集合ポリゴンを作成するには、それぞれのポリゴンを構成するn個の線分とm個の線分の交点を求める。図-3.6.3のように二つの図形が隣接しているならば、交点を求めることはできない。このときには二つの図形が共有する境界部分の線分のポリゴンデータを見いだす。共有線分の本数がk本であるならば、これはn角形のi番目の点からi+k番目の点と、m角形のj番目の点からj+k番目の点にあたる。したがって、座標値データ列としては、n角形の1番目の点からi番目の点までと、m角形のj+k+1番目の点

から m 番目の点までと、 m 角形の1番目の点から j 番目までと、 n 角形の $i+k+1$ 番目の点から n 番目までの点の $(n+m-2k)$ 組の座標値からなる $(n+m-2k)$ 角形のポリゴンを作成することによって、和集合ポリゴンができる。図-3.6.4のように二つの図形が接していないならば、 n 角形と m 角形の二つのポリゴンの交点の数は $2k$ ($k=0,1,\dots$)という偶数になる。この $2k$ 箇所の交点においてそれぞれのポリゴンをアーク（線分群）に分割する。分割された $2k$ 組のアークが起点と終点を共有するときは、起点における第一番目の線分と x 軸との角度を比較し、時計回りのデータ列のポリゴンにおいては角度の大きい外側のアークを和集合のアークとして選択する。ただし、二つの線分のなす角度が 180 度以上の場合には小さい方に 360 度を加えなければならない。真理集合のポリゴンはこの逆で、 $2k$ 組のアークのうち、 x 軸との角度の小さい内側のアークを選択する。こうしてそれぞれのアークをつなぐと和集合と真理集合のポリゴンを作成することができる。このようにポリゴン情報のレベルで和集合と真理集合のポリゴンを作成することができるならば、例えば、林相図と土壌図を重ね合わせ一定の条件を満たす領域を取り出すといったことが可能となる。

次に、ある点を与えられてこれを含むポリゴンを見いだす問題を考える。

図-3.6.5に示すように与えられた点 P の座標を (x_0, y_0) とすると、この点からポリゴンの存在する範囲よりも十分に長い線分を引き、すべてのポリゴンについてこの線分との交点を求めその数を調べる。交点数が 0 を含めて偶数であれば、そのポリゴンは点 P を含んでおらず、交点数が奇数であればそのポリゴンは点 P を含んでいるといえる。ただし、属性ファイルからポリゴンの XY 座標の最大値・最小値をあらかじめ知ることができるならば、 x_0, y_0 の値のいずれかが XY 座標の最大値・最小値の範囲外であるときには交点を計算する必要はない。これは地図上の任意の点の標高、林小班、地質、土壌型、林分区分などを知るのに有効な手段である。

このようにポリゴン情報を取り扱う方法についてはすでにいくつかの方法が示されているが、本システムの特徴は特別な機器を使用することなく手近にあるデジタイザーとプロッターおよびパーソナルコンピュータによって地理情報システムを構築した点にある。

(3) ポリゴン情報からメッシュ情報への変換

メッシュ情報としてデータベースに格納する標高、方位、傾斜、土壌、林区分、林種、主要樹種、材積、立木本数、成長量などの情報は(2)で述べた「与えられた点を含むポリゴンを見いだす手法」を用いて、メッシュを構成する格子点の属性を調べることによって、すべてポリゴン情報からの変換が可能である。その方法をポリゴン情報の種類によって次のように分類する。

a) 等高線ポリゴンを用いるもの

前述したとおり北海道演習林では縮尺1/5000の森林基本図が作成されているが、これには10m間隔の等高線が記入されている。メッシュ図の標高・方位・傾斜については森林基本図から標高階別の等高線ポリゴンを作成し、各メッシュの格子点がどの標高階に属するかを調べ、次のような考え方で各メッシュの属性を決定する。

- ① 標高：50m×50mのメッシュの4隅の格子点の標高の平均値をもって当該メッシュの標高とする。
- ② 方位：メッシュの4つの格子点の標高の差が最大である向きを方位とする。
- ③ 傾斜：方位を形成する2つの格子点の標高の差と距離から傾斜角度を計算する。

b) 土壌型ポリゴンを用いるもの

北海道演習林の土壌図は1963年に朝日⁴⁾によって21の土壌型に分類され、1/20000の縮尺で作成されている。これを用いて土壌型ポリゴンを作成することができる。

- ④ 土壌型：メッシュの4つの格子点がどの土壌型ポリゴンに属するかを調べ、最も数の多いものをもって当該メッシュの土壌型とする。数が同数の場合は、面積の広いものを採用する。

c) 林区分分ポリゴンを用いるもの

北海道演習林では、すべての森林を択伐林分、補植林分、皆伐・風害林分、再生林択伐林分、制限林分、造林地、天然林地がき地の7種類の林分に区分し、

縮尺1/5000の森林基本図上に林分区分を記載している。これを用いて林分区分ポリゴンを作成することができる。

⑤ 林分区分：林分区分図からメッシュの4つの格子点の属性を調べ、最も数の多いものをもって当該メッシュの属性とする。数が同数の場合は、面積の広いものを採用する。

d) 小班ポリゴンを用いるもの

林分区分ポリゴンと同様に、縮尺1/5000の森林基本図から林小班界を読み取り小班ポリゴンを作成することができる。一方、森林調査簿は小班を単位として、各種の林況情報がデータベース化されている。

⑥ 林種・主要樹種・材積・立木本数・成長量：メッシュの4つの格子点の属する小班ポリゴンを調べ、最も数の多いものをもって当該メッシュの小班名とする。数が同数の場合は、面積の広いものを採用する。森林調査簿から当該小班の情報を得る。

第7節 目標林の設定についての考え方

第1章第3節で述べたように、大面積にわたって択伐林施業を実施しようとする場合、一人の担当者だけでは実行することは不可能であり、複数の施業担当者が森林を管理することになる。そのためには、具体的な目標林の姿を描いておくことが必要である。南雲⁴⁹⁾は、択伐林の施業方法が明確に規定され、それに基づいて施業が実施されている場合には、森林は蓄積とか成長量の面で何らかの限界の状態があり、森林をこの状態の近傍にとどめておくことは可能であると考え、その状態を択伐林の法正状態と定義した。そして、この法正状態は一つの直径分布で記述することが適当であるとしている。さらに、ある時点の直径分布が次の時点までにどのように変化するかということは直径階ごとにあらかじめ定まっている確率に基づいておこなわれると考え、直径遷移確率を用いて森林の状態の変化を表現した。

ここでは、天然林の成長現象は次のように記述される。天然林の成長過程では常に三種の事象が生じている。すなわち、林木の成長、林木の新たな流入、そして、枯損ないしは収穫に基づく林木の林分外への流出の三種である。これを数式で表示すれば、

$$N_k = N_{k-1} P_{k-1} + F_{k-1} - R_{k-1} \quad (3.7.1)$$

となる。ここで N_k は第 k 施業期期首における直径分布ベクトル、 N_{k-1} 、 P_{k-1} 、 F_{k-1} 、 R_{k-1} はそれぞれ第 $k-1$ 施業期の直径分布ベクトル、直径遷移行列、進界木の直径分布ベクトル、枯損ないしは収穫により林外に流出する直径分布ベクトルである。もしこれら右辺の要素がすべて定まれば、次の施業期の直径分布ベクトルは一意的に決定されることになる。

いま、適切な森林施業を繰り返し、ほぼ安定した状態にある林分を考えると、ここでは常に林分は安定しているのであるから、理想的状況のもとではこれらの要素はすべて一定となる。すなわち、

$$N_k = N_{k-1} = N \quad (3.7.2)$$

$$P_{k-1} = P \quad (3.7.3)$$

$$F_{k-1} = F \quad (3.7.4)$$

$$R_{k-1} = R \quad (3.7.5)$$

となる。

また、収穫量は期首の直径分布に対する一定の割合で表示されるからその収穫行列を T とすれば、

$$R = N T \quad (3.7.6)$$

となる。 T はそれぞれ択伐方式によって決まる行列である。したがって、上式より、

$$N = N (P - T) + F \quad (3.7.7)$$

となる。ここで $Q = P - T$ として施業行列 Q を定義すると、

$$N (I - Q) = F \quad (3.7.8)$$

となり、

$$N = F (I - Q)^{-1} \quad (3.7.9)$$

となる。

この N は時間的に安定しており、その特質から云って目標林である。

筆者⁵¹⁾は、この南雲の考え方に基づき東京大学北海道演習林を代表する林型について目標林の計算を行った。計算を行ったのは、第3節の3で直径遷移確率の計算例として示した第I作業級の択伐林のうち、複層林を形成している林

分で、疎密度中針葉樹優占 (T1C3CN)、疎密度中広葉樹優占 (T1C3CL)、疎密度疎針葉樹優占 (T1C3SN) の3つの林型である。

このとき前提条件として、次の4項目を設定した。

①伐採率は5年ごとに7%とし、各直径階から一様に伐採する。

②目標林の最終蓄積は300m³/haとする。

③目標林の針葉樹:広葉樹の蓄積比は針葉樹優占の林分では3:1、
広葉樹優占の林分では1:3とする。

④進界成長量は、最終蓄積は300m³/haになるよう調整する。

この目標林の計算結果を直径分布に表現したのが、図-3.7.1である。

この計算結果をみると、目標林の立木本数は、T1C3CNの林型では310本/ha、T1C3CLの林型では471本/ha、T1C3SNの林型では277本/haとなっている。柴田⁷⁹⁾の林型区分によれば蓄積300m³/haでは、立木本数が480本/ha以下の林分は疎密度疎に区分される。するとT1C3CNの林型とT1C3CLの林型では、目標林の疎密度が疎となり、現在の林型とは異なる林型になってしまう。すなわち、(3.7.2)式の前条件と矛盾することになる。第3節において考察してきたように、柴田の林型区分では、同一林型の中でも林分構造にかなりの幅があり、これを一まとめにして伐採許容量を査定することはできないとしてきたが、目標林の計算はこの範囲をも超えてしまうことになった。

このことは、同じ林型のなかでも、現在の林分構造が目標林と同一の林分構造でない限り、森林施業行列をかけることによって、林分構造の変化をきたし、現在の直径遷移確率がそのまま維持されないことを意味している。したがって、ここで考えてきたような安定した直径遷移確率を前提とした目標林の設定には限界があり、長期的な見通しを立てる際には適切な方法とは考えられない。

このように考えると、目標林は個々の林分の特質と施業方針によって決定されるべきものであり、数学的な計算によるよりも、担当者のこれまでの経験と過去の記録に基づいて決定しなければならない。

高橋⁹⁰⁾は北海道演習林における目標とすべき森林の状態として、蓄積300m³/ha、NL蓄積比7:3の林分をあげており、石橋²²⁾は固定標準地の測定結果から蓄積300m³/ha前後の林分が最も粗成長量が大きいことを確認している。また、Biolley⁶⁾はヌーシャテル州での経験から大・中・小径木の材積比の指標とし

て5:3:2という数値を示している。これらのことから目標林の姿を描くことができそうである。しかし、目標林は個々の林分の立地条件や樹種構成によって異なり、同一林分においてもその森林の生態的なステージによっても変化するものと考えられる。したがって、この目標林の設定にはかなり柔軟な考え方が必要である。すなわち、ただ一つの目標林があるわけではなく、幾種類かの目標林が想定され、個々の林分の状態に応じてこれを選択して行くべきである。

第8節 伐採許容量決定システムの概要

これまで述べてきた考え方にしたいがい、具体的に伐採許容量を定める方法について述べる。本システムは固定標準地の測定記録、今期の林況調査、前期の林況調査、前期の収穫調査の4種類の情報をもとに将来の林分構造、すなわちNL別の直径分布を予測し、これを目標林の林分構造と対比し、地理情報システムから提供される隣接林分の施業情報を勘案しながら、施業担当者が適正な伐採許容量を決定するための意思決定支援システムである。図-3.8.1のフローチャートにそって、具体的なシステムの流れを以下に示す。

(1) 成長期間の期首における林分構造の推定

林況調査集計システムと収穫調査集計システムからデータベースに提供された前期の林況調査結果と林況調査後の収穫調査結果をもとに、成長期間の期首における林分構造を推定する。すなわち、林況調査の際に各小班ごとに設定される3～5箇所の標準地調査では胸高直径の毎木測定が行われるので、伐採前の直径階別立木本数 $n_{e,i}$ をNL別に推定する。また、収穫調査からは伐採された全ての林木の胸高直径を知ることができるので、伐採後、すなわち成長期間の期首のNL別の直径階別立木本数 $n_{s,i}$ を推定する。

(2) 成長期間の期末における林分構造の推定

同様な方法で、今期の林況調査結果から、林況調査集計システムによって現在、すなわち成長期間の期末の直径階別立木本数 $n_{e,i}$ をNL別に推定する。

(3) 胸高断面積合計の成長量の推定

こうして求めた成長期間の期首と期末の林分構造から期首と期末の胸高断面積合計を対比させて、二時点間の胸高断面積合計の成長量 ΔG を計算する。

$$\Delta G = \left\{ \sum_{i=6}^{110} n_{e,i} \cdot d_i^2 - \sum_{i=6}^{110} n_{s,i} d_i^2 \right\} \cdot 4/\pi \quad (3.8.1)$$

(4) 伐採許容量案の提示

施業担当者は現在の胸高断面積合計に妥当であると考えるNL別・径級別の択伐率 (r_s, r_m, r_L) を乗じて、総伐採量およびNL別・径級別の伐採量の案を提示する。そして、これを直径階別断面積合計の割合に応じて直径階別伐採量 C_i に割り振る。

(5) 伐採後の林分構造の推定

直径階別伐採許容量案に基づいて直径階別の立木本数 n_{ci} を減じ、伐採後の直径階別立木本数 n_{bi} をNL別に計算する。

(6) 林型の判定

伐採後の直径階別立木本数をもとに、径級別の断面積構成比 (g_s, g_m, g_L) を求め、第4節の1で定めた林型区分の基準にしたがい林型判定を行い、断面積構成比から断面積成長量構成比への変換係数 k_i を決定する。

(7) 直径階別断面積成長量の推定

(5)で推定した伐採後の直径階別立木本数 n_{bi} から断面積構成比 g_i を求め、これに(6)で定めた構成比変換係数 k_i をかけて断面積の成長量構成比 z_i を推定する。(3)で求めた胸高断面積合計の成長量 ΔG にこの構成比 z_i をかけると、直径階別断面積成長量 ΔG_i が得られる。

(8) 直径階別連年成長量の平均値の推定

第4節の2において詳しく述べたように、直径階別断面積成長量 ΔG_i と直径階別立木本数 n_{ei} および直径階別連年成長量の変動係数 C_v が与えられれば、(3.4.10)式から直径階 D_i における連年成長量の平均値 Δd_i を次のように求めることができる。

$$\Delta d_i = \frac{-D_i + \sqrt{D_i^2 + 1.2732 \cdot \Delta G_i \cdot (1 + C_v^2)}}{1 + C_v^2} \div n_{ei}$$

(9) 直径階別連年成長量の分散の推定

直径階別連年成長量の平均値 Δd_i と変動係数 Cv から、直径階別連年成長量の標準偏差 σ_i を求めることができ、これから分散 σ_i^2 がえられる。

(10) 直径遷移確率の計算

第3節の3で述べたように、直径階別連年成長量の平均値と分散をもとに、各直径階における成長量分布にワイブル分布を当てはめて求めた10年間の成長速度の分布から10年後に元の直径にとどまる確率、他の直径階に移る確率を求めることができる。この確率が直径遷移確率 P となり、 P は NL 別に各直径階ごとに計算する。

(11) 将来の林分構造の予測

(5)で求めた伐採後の直径階別立木本数 n_{bi} にこの直径遷移確率 P をかけると10年後の直径分布を計算することができる。ただし、ここまで求めてきたのは、断面積の粗成長量であり、枯損木の断面積を含めた数値である。したがって、10年間の枯損量を差し引いておく必要がある。また、10年間に4cm以上の直径階に新たに進界してくる林木の量も加算しなければならない。これらの値は固定標準地の測定結果から林型別に一定の率を定め、伐採後の直径階別立木本数 n_{bi} をもとに推定することとする。

(12) 目標林との対比

施業担当者はこの将来の直径分布をみて、それがその林分を誘導させるべき方向に向かっているか否かを判断しなければならない。そのためには、第5節で述べた樹形グラフによる林分構造の比較システムを用いて、第7節で定めた目標林と林分構造を対比する。

(13) 伐採許容量案の適否の判断

施業担当者は目標林の林分構造と対比し、地理情報システムから提供される隣接林分の施業情報を勘案しながら、(4)で定めた伐採許容量案の適否を判断し、否であるならば、(4)に戻って伐採許容量案を修正する。この作業を満足のゆく

伐採許容量が得られるまで繰り返す。

(14) 伐採対象木の選定

こうして定められた伐採許容量をもとに実際の選木過程に移るわけであるが、この伐採許容量は非常にマクロな視点からみた林分全体のガイドラインというべきものであって、個々の伐採木の選定に当たっては従来からの林分施業法の6原則が優先されるべき性格のものである。

第9節 考察

本章では択伐林施業における伐採許容量決定の問題を論じてきた。そして、林分別に直径遷移確率を計算し、シミュレーションによって適切な伐採量を決定する手法を明らかにした。本節では、この手法を実行するに当たっての問題点について考察する。

前節に述べた伐採許容量決定支援システムでは、第1章で述べた3つの管理水準のうち、第2水準のレベルでの伐採許容量を対象にしている。すなわち、収穫調査の際の量的なガイドラインである。したがって、個々の林木の選木に当たっては、第1水準のレベルの植物社会学見地からの定性的な判断が必要になる。また、さらに広い第3水準のレベルでは、個々の林分の持つ伐採許容量をもとに、これらを適正に組み合わせて各年度の木材生産量および所要労働量が平準化するように伐区の調整を図らなければならない。こうした中で、管理対象とする森林全体の生産量を最大にするためには、各林分を最も生産力の高い状態に維持するように施業がなされなければならない。そのためには、伐採の間隔をできるだけ短くし、1回の伐採率を極力低く抑えるような集約な施業が必要である。したがって、各林分の地利級を高めるような林道網の整備や搬出方法の改善も併せて必要である。北海道演習林の実行結果から判断して、伐採率は15%以下、林道密度は60m/ha以上が望ましい。

このシステムでは、林況調査の情報が正確に林分の状況を反映しているということを前提としている。しかし、林況調査の情報は標準地調査から得られる推定値であって、真の値の周辺に一定の誤差率の範囲内で分布している。このシステムを実行に移して行くためにはこの誤差率の範囲を正確に把握し、伐採許容量の修正を行なう必要がある。このようなとき、従来の考え方は安全率をかけて伐採率を少なくするということであった。しかし、択伐林施業の場合、必ずしも少なく伐ることが安全であるとは限らない。なぜならば、目標とする林分構造に対して過大な蓄積を持つ林分では、過少な伐採は森林を過密な状態に導き、生産力の減退を招きかねないからである。したがって、ここで求められるのはより精度の高い情報である。精度の高い情報としては固定標準地の測定結果があげられるが、固定標準地はすべての林分をカバーしているわけでは

なく限られた部分の情報でしかない。一方、林況調査の情報は広範囲にわたり集められているが、測定のために場所が変わるのでこれに伴う変動が、林分の成長量を上回り結果として負の成長量が現れることがありうる。そこで、これらの問題を解決するためには、精度を維持しつつより簡便な方法で数多くの測点を確保する調査方法を確立しなければならない。そのための具体的な方法として、まず、プロットレスサンプリングによる林況調査の導入が考えられる。このことによって、調査の省力化が図られ、より多くの測定を行うことが可能となる。しかし、プロットレスサンプリング調査の精度を現在のプロットサンプリングと同程度のものとするのが課題となる。次に、測定箇所の固定化を図る必要がある。例えば、調査箇所に永久的な杭などを立てて固定標準地と同様な管理を行う方法である。ただし、固定標準地と異なるのは一本一本の林木ごとにデータを管理するのではなくあくまでも林分単位のデータを管理するという点である。また、将来は測定箇所の同定に人工衛星からの情報をもとに位置を確認することも可能となるであろう。いずれの方法をとるにせよ、測定箇所を固定化することによって成長量を正確に把握することができる。このように、標準地を固定化し定期的に測定を繰り返しながら資源量の変化を把握する方法は、連続調査法 (Continuous Forest Inventory) として、すでに米国およびスイスにおいて実行されている。Were and Cunia¹⁰⁷⁾ は連続調査法による固定プロットの情報と暫定プロットの情報を組み合わせて林分の成長量を推定する S P R (Smampling with Partial Replacement) 理論を森林調査に適用した。北海道演習林の固定標準地と林況調査の測定結果に、この方法を適用すれば、林分の蓄積と成長量を推定することは可能である。しかし、S P R 推定法の理論によれば、その推定の精度には、母集団の分散の大きさがかなり影響を与えている。したがって、北海道演習林の場合天然林であるため、この母集団の分散が大きくなり、成長量の推定に用いるためには固定プロットの情報を増やさなければならない。

次に、天然林を構成する様々な樹種の林木の成長現象を針葉樹と広葉樹の直径遷移確率だけに基づき、このような単純なシステムによって予測してもよいのかという点について検討する。

森林を構成する個々の林木はそれぞれ影響を与えあって複雑な関係を持って

いる。また、同じ直径の林木であっても樹種によって成長速度も異なる。したがって、正確な成長予測を行うためにはこれらの関係を表現する成長モデルを樹種別に作成し、計算するべきであろう。しかしながら、現時点ではこのようなモデルをつくるだけの知見は得られていないし、仮にこのようなモデルを構築することができたとしても、次の問題として計算時間の問題が起こるであろう。したがって、筆者はこのような予測の問題は施業を行う上で支障のない範囲の精度であればよいと考え、このようなシステムを作成した。ここで扱う予測の結果は、現在実行する行為を誤りなく行うためのものであって、予測自体に多少誤りがあつたとしてもそれは次の機会に修正すればよいものであると考える。このシステムでは、10年目ごとに林況調査がなされ、その結果に基づき次の10年間を予測するものである。決して、100年先、200年先を予測するべきものではないと考える。なぜならば、長期的な予測を行うためには100年や200年に1回しか起こらないような気象害や病虫害の発生などのカタストロフィーを考慮に入れるべきであると考えからである。したがって、前述したとおり本システムはあくまでもマクロな視点から捉えたガイドラインを示す意思決定支援システムであり、最終的な判断は森林に対する注意深い観察力や洞察力に基づき施業担当者が下すべきである。

第4章 択伐林施業における優良広葉樹の単木管理理論

本章では、ウダイカンバ・ミズナラなどの形質が優れ用材として価値の高い優良広葉樹の単木管理の考え方について考察する。このような考察を行う理由は、第3章で検討したような材積面のみから伐採許容量を決定していたのでは単価の高い優良広葉樹が優先的に伐採され、残された林分の内容が安定した森林経営を行うには十分でなくなる恐れがあるからである。第1節では、材積に代わる尺度として立木価値という概念を新たに導入し、立木価値の成長量に基づく優良形質木管理の考え方を明らかにする。第2節では、ウダイカンバ・ミズナラなどの広葉樹の樹幹形に対して相対幹曲線を適応し、上部直径を推定する手法の有効性を明らかにする。第3節では、広葉樹用材の市場調査の結果をもとに、形質・長径級と木材価格との相対的な関係を明らかにする。第4節では、この相対的な関係をもとに、立木の価値評価の方法におよび優良広葉樹の伐採許容量の決定方法について考察する。第5節では、優良広葉樹の直径遷移確率を計算し、これをもとにした本数管理曲線を用いて優良広葉樹を樹種別に管理する方法について述べる。第6節では、これらを踏まえた東京大学北海道演習林における優良木管理の具体的な進め方について述べる。第7節では、実行上の問題点について考察する。

第1節 優良広葉樹の単木管理の考え方

択伐林施業において、伐採対象木の中に優良木をどの程度含ませるかということは重大な問題である。例えば、ha当り材積 250m^3 、 m^3 当り立木単価 $5,000$ 円、伐採率 17% の平均的な択伐林分を想定すると、ha当りの伐採木の立木価格は 21 万円になる。もし、この林分に m^3 当りの丸太価格が 30 万円程度の高品質材を採材することができる優良木が含まれていると、優良木1本で一般木1ha分以上の立木価格に相当することになる。

このように、同一の伐採許容量の中でも、優良木を多く選木すれば、一時的に高い収入が得られるが、その結果として残存林分の価値は低下する。また、逆の場合には、林分の価値は維持されるが、高い収入は得られず、経営として採算のとれない場合が生じる。通常、優良木は林分中に極めてわずかしか存在

しないため、選木の方法いかんでは、量的な保続は守れても質的な保続が守れないような危険性が常に存在している。また、貴重な動植物の遺伝子を保護するためには特定の樹種の個体数の維持も図らなければならないであろう。

これまで、択伐林施業のこうした問題についてはあまり議論されず、もっぱら施業担当者の判断に委ねられていた。しかし、このことは現実の問題として極めて重要なことである。なぜならば、近年の集材技術向上の結果、優良木だけを単木的に抜き伐ることも可能になっており、もし、施業担当者が長期的な価値の保続という視点を無視し、短期的により大きな収入を得る道を選択するような場合には、残存する森林はどうてい望ましい質と量とをもつ林分構造を保ちえないからである。

照査法では、量的な保続が守られれば、それは同時に質的な、いいかえれば価値的な保続もまた守られるということが前提となっていた。しかし、単に林木の形質ばかりでなく、樹種によっても市場価格に大きな差が存在している今日のわが国の天然林においては、従来の照査法をそのまま適用しても、保続原則と経済性原則とをともに満たす択伐施業は保障されない。この不備を改めて新しい経理方式を確立することは、実践的にも極めて重要な課題である。

東京大学北海道演習林のこれまでの施業ではもっぱら林分改良が目的とされ、伐採時における選木の基準は形質不良木の淘汰に主眼がおかれてきた。しかし、不良蓄積の整理が徐々に進行してゆくにつれ、新たな選木基準を設ける必要が生じてきた⁸⁰⁾。そこでは、残された優良木の伐採を今後どのように進めてゆくべきか、その伐採の優先順位を決めることが求められている。そのためには、従来のような定性的な選木基準から、より精密な選木の理論への発展が必要となる。本章では林分施業法をさらに発展させるための研究の一環として、ウダイカンバ・ミズナラなどの形質が優れ用材として価値の高い広葉樹の施業管理方式について検討する¹¹⁵⁾。

択伐林施業を行うにあたり、まず、対象となる林木を3つのグループに分けて考える。一番目を、成長および形質の面で極めて優れた遺伝形質を有する「保存木」グループとする。これは優良遺伝子の供給源として位置づけ、その施業方法は原則として禁伐とする。ただし、風害や病虫害などにより樹勢が衰え枯損のおそれが発生したときには伐採の対象とする。二番目を、形質が優れ、

用材として価値の高い丸太の生産が見込まれる「優良形質木」グループとする。これは経営上重要な収入源となるべき林木で、同時に保存木の候補木としても位置づけられる。残りの林木を三番目の「一般木」グループとする。これは前述したような量的な保続を前提とする一般的な択伐林施業の対象となる。

以上の保存木、優良形質木、一般木の3グループの林木に対してその保続をいかに図るかが次の問題である。「保続」という言葉は、一般的には林木生産を対象とし、森林からの毎年の収穫を均等的かつ恒常的に永続させるという意味で使われている。しかし、林業経営は、人類社会の要望に対応して、森林の持つあらゆる機能を永続的に活用するよう、その運営に努力しなければならない。そのためには、生産の保続の前提となる成長量の維持を第一義的に考えなければならない。したがって、生産装置である森林そのものを維持しなければならない。すなわち、森林を最も望ましい状態に誘導し、その状態を維持することによって保続が図られるのである。そこで、次のような考え方にに基づき森林を組織することによって、この問題に対処することとする。

択伐林施業における伐採許容量の決定過程は次のようになる。まず、保存木の個体数の維持を考える。保存木では蓄積量の維持は本質的なことではなく、優良遺伝子の供給源として必要な個体数を定め、これを確保しなければならない。そして、風害や病虫害などにより保存木が伐採された場合には、優良形質木の中から最も形質の優れたものを新たに加えることによって個体数の維持を図る。また、保存木が特定の地域に偏ることのないようその面的な配置にも考慮を払う必要がある。

次に優良形質木の保続を考える。ここでは立木価値の維持とその直径分布が問題となる。そこでまず優良形質木全体について後述の方法に基づいて価値成長量を査定し、本数管理曲線にそって単木的に選木される立木価値の累計が、価値成長量に達する点で伐採許容量を決定する。この本数管理曲線は、優良形質木の立木価値を維持するために優良形質木の集団が保たれるべき直径分布であると同時に、保存木の個体数の維持を図るために保存木の供給源である優良形質木の集団が保たれるべき直径分布としても位置づけられる。

一方、蓄積量の維持は択伐林施業の基本である。このことは対象地域の純成長量を伐採量の限界とすることによって保障される。したがって、一般木の伐

採許容量は対象地域の純成長量から保存木・優良形質木の伐採量を差し引いた量となる。このように一般木は蓄積量の維持、優良形質木は立木価値の維持、保存木は個体数の維持をそれぞれ図りながら森林を管理することを考える。

ここで、一般木と保存木・優良形質木とでは保続の対象区域と伐採の時期が異なることに注意すべきである。一般木の施業対象区域は複数の施業区に分割され、この中を一定の回帰年で択伐施業が進められてゆく。これに対して保存木・優良形質木は施業対象区域全体で保続を図ることになり、いつでも伐採を行うことができるよう回帰年は設けない。したがって、図-4.1.1に示すように、同一の空間に複数の保続の単位が重複して存在することになる。そして各々の施業区ごとに量的な保続が図られ、それと同時に施業対象区域全体のなかで保存木・優良形質木の保続が図られることになる。

この保続の対象区域は「作業級」と呼ばれる。吉田¹¹⁸⁾は作業級を「一事業区内において、樹種・作業法・伐期齢がほぼ等しく、施業上同一の取り扱いを受けるべき林分の集団であって、これを収穫規整の基礎として保続作業を行う森林経理上の単位である。」と定義しているが、これは林木生産の保続のみを考慮した作業級の概念である。これに対して、保続の対象が多元化すれば、それに応じて作業級も多元化させるべきであると筆者は考える。従来の面的な概念である作業級から単木の集合体である優良形質木作業級のような新たな作業級の概念に発展させることによって、量的な保続と質的な保続を同時に図ることが可能になる。

従来の面的な作業級の概念のもとでは、保存木・優良形質木が一般木作業級と別の作業級を構成する場合、これらの保存木・優良形質木は一般木作業級には含まれないと考えられていた。しかし、ここで新たに提案する作業級の概念のもとでは、一般木作業級では量的な保続を図り、同時に優良形質木作業級では質的な保続を図る。このことを同一空間において両立させるためには、保存木・優良形質木は量的な側面から見れば、同じ空間を占める一般木作業級に属しており、質的な側面から見れば、優良形質木作業級にも重複して所属すると考える。したがって、従来の概念に基づけば、優良形質木が伐採されたときには、その蓄積は一般木作業級とは切り離されて経理されることになるが、新しい概念のもとでは、その蓄積は一般木作業級の蓄積量から控除されることにな

る。

次に優良形質木の価値の評価方法について述べる。立木価値はその木から採材しうる銘木の価値の合計であると定義する。ここで銘木とは、樹種ごとに定める一定の規格を満たす高品質の丸太のことである。この銘木の価値は通常その市場価格で表わされる。しかし、木材価格は市況によって大きく変動することがあるので、ここでは価値の尺度として木材価格をそのまま用いることはできない。こうした市況変動の影響を除くため、基準となる丸太の規格を定め、その価格に対する相対値をもってその銘木の価値と定義する。さて、このように定義された単位材積当りの価値は材の長さや末口直径の大きさによってかなりの部分が説明できる。このほかにも丸太の色つや、偏心の程度によっても影響を受けると考えられるが、これらの要素を立木のままで判定することは困難であるので、本論文においては銘木の価値は外見だけから判断できる材長と末口直径の関数で与えられると考えることにする。

以上のような考え方で立木価値を評価しようとする場合、立木の任意の高さの直径を知ることが必要である。上部直径の値はテレレラスコープを用いれば測定することができるが、測定に多くの労力を費やすことになる。そこで、胸高直径の値から樹高曲線式と相対幹曲線式を用いて任意の高さの直径を推定する方法を採用することを検討する。

いま、ある立木の胸高直径が与えられたとする。すると樹高曲線式を用いてその樹高が推定できる。胸高直径と樹高が得られれば相対幹曲線式から通常の幹曲線式を導くことができる。この幹曲線に関しては、広葉樹は一般的に不規則な枝分かれが数多くあるため変動が大きいものと考えられている。しかし、ここで対象となる広葉樹は特に形質優良なものであるからその幹形も比較的安定していると考えてよい。しかも、ここでは銘木の採材を想定しているので、直径査定の対象となる部分は枝下高よりも下の樹幹である。広葉樹の上部直径の推定に相対幹曲線を用いることの有効性については後に詳しく述べる。こうして一本の立木の任意の高さの直径を知ることができれば様々な採材方法を想定することが可能となる。ここでは考えられる全ての採材方法のうち丸太の価値の合計が最も高くなる採材方法を採用して、その立木の価値とする。このような立木価値の査定を各経理期間の期首において、全ての優良形質木について

実施し、経理期間中の価値成長量を査定する。

択伐林施業の伐採許容量査定のお考えの基本は照査法のお考えと同じである。すなわち、前の経理期間に増加した量だけを次の経理期間内に伐採するということである。従来の照査法と異なるのは、林木を3つのグループに分けそれぞれ個体数、立木価値、蓄積量の維持を図るという点である。ここで、配慮を要するのは経理期間の期首において新たに追加される優良形質木の取り扱いである。従来の照査法のお考えによれば進界木の材積は成長量に加算され伐採許容量に含まれる。しかし、優良形質木への進界木の価値を伐採許容量に含ませるならば、恣意的な進界木の選定がなされる恐れがあるので、優良形質木としての一定の基準を設け、将来銘木の採材が見込まれる林木は、この基準を超える前に優良形質木作業級に所属させておかなければならない。こうすることによって、各優良形質木は、立木価値がゼロの状態から伐採許容量計算の対象となり、その成長に応じて立木価値を増大させるので、進界成長量が急激に増減することは起こらない。

優良形質木を伐採する際の最終的な選木は立木の配置や樹木の状態によって総合的な判断が下されなければならない。したがって、ここではその判断の目安となる伐採の優先順位を示すことになる。伐採の優先順位の尺度は当該経理期間内における立木価値成長量である。そこで、経理期間の期末における胸高直径の値を推定し、これをもとに後述の方法で立木価値を計算する。このとき、胸高直径の成長予測には標準成長曲線という概念を用いる。この標準成長曲線とは、図-4.1.2に示したようにX軸に期首直径、Y軸に連年成長量をとって表現すると、ある地域における林木の直径成長は樹種ごとに一定の成長パターンを持つという考えである。ただし、連年成長量はその林木の生育する立地条件によって影響を受けるので、前の経理期の成長量から標準成長量に対する補正係数を求める。このとき推定の対象となる林木は優良形質木であるので、その生育空間内の優占樹種であり、その成長量は林分密度の影響を受けないものとする。そして、期首の直径の値から標準成長曲線の連年成長量を読み取り、先に求めた補正係数を乗じて今期の直径成長量を予測する。この値を期首直径に加えることによって、期末における胸高直径の値を推定することができる。こうして各林木の期末における立木価値を計算し、立木価値成長量を求める。

この立木価値成長量の大きい林木は今の経理期間内に伐採すべきではなく、立木価値成長量の小さい林木から順に、前の経理期間に価値の増加した分だけを選んで伐採するというのが立木価値成長量に基づく優良形質木選木の考え方である。

第2節 広葉樹の相対幹形の解析

本節では、林分施業法を定量的に行うための研究の一環として、広葉樹の相対幹形の分析と相対幹曲線式を用いた末口径の推定を行い、広葉樹の樹幹形に対して相対幹曲線を適応する手法の有効性について検討する。すなわち、東京大学北海道演習林において伐倒されたウダイカンバとミズナラの資料木の外部直径を分析し、直径や樹高の大きさと相対幹形の関係、ウダイカンバとミズナラの相対幹形の相互関係、枝下高率の高い樹木の相対幹形の分散の大きさ、枝下高率の高くない樹木の枝分かれの位置より下の部分の相対幹形を明らかにする。

そして、実際の測定値と相対幹曲線式を用いた推定値を比較し、広葉樹に対しても用材として利用できるような通直な部分に対しては相対幹曲線式を用いた末口径の推定が十分実用に耐えるか否かを検討する¹¹²⁾。

1. 相対幹形について

相対幹形は樹幹形を純粋な相対数によって表すもので、樹幹の大小とは無関係に樹幹形を相互に比較することを可能にした⁷¹⁾。樹幹形を樹高の1/10の高さにおける直径に対する「相対直径」を用いて表す方法は、Hohenadlによって始められ、Krenn, Prodan⁷²⁾はこれを「相対直径列」という数列の概念に発展させた。大隅⁷⁰⁾は、離散的な数列を連続的な曲線によって表す「相対幹曲線」という考え方を提唱し、梶原³⁰⁾はスギを中心とした針葉樹人工林における相対幹形の特性について数多くの測定結果から実証的に研究した。さらに、南雲ら⁵²⁾は相対幹曲線を用いてスギ材積表の調製を行い、野上⁶²⁾は北海道のナラ林分に対し地ぎわ直径を基準とした相対幹曲線式を求めた。

しかし、一般に広葉樹の樹幹形は不規則であると考えられており⁷⁰⁾、一定の相対幹形によって表現することはなされていない。そこで、以下において広葉樹の樹幹形に対する樹木の大きさや枝下高の影響を調べ、さらに樹種間および針葉樹との相対幹形の比較を行い、広葉樹に対して相対幹曲線を適応するための条件を検討する。また、実際の測定値と推定値の比較を通してその限界の見極めをおこなう。

2. 資料および相対化の方法

本節において用いた資料は、東京大学北海道演習林が広葉樹の材積表調製のために1964年度から1966年度まで行った調査結果⁴⁴⁾の一部である。資料木は北海道演習林内において伐倒したウダイカンバ (*Betula maximowicziana*) およびミズナラ (*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*) 各87本である。この二つの樹種を資料木として選んだのは、同演習林内に成立する広葉樹のうち、用材として最も価値の高い樹種であるからである。測定内容は、胸高（地ぎわから1.3m）における二方向からの直径（mm単位）、伐採高、樹高、枝下高（いずれもcm単位）、伐採高から一定間隔ごとの測定位における二方向からの外部直径（mm単位）であった。樹高は主幹の頂点から地ぎわまでの長さを測定したが、枝が分枝して主幹の判定の困難なものは他の幹より太いものを主幹とし他を枝とみなした。測定位の間隔は測定部位の数が7～8個になるよう樹高に応じて、0.5m, 1m, 2m, 3mのうちから選択された。

本論文では、樹幹形の表現方法として相対幹形を用いる。そのためには、梢端から樹高の9/10の位置（以下「0.9H」という）における直径を相対直径の基準値としなければならない。しかし、原資料には該当する位置の測定値はない。そこで、最初に胸高直径を基準値とした「相対径」を求めておき、これをもとに3次式を用いて0.9Hにおける相対径の値を決定し、他の測定位の相対径を相対直径に変換する。以下にこの相対化の方法について述べる。

まず、胸高直径を基準とした相対化を図る。すなわち、梢端から胸高までの長さに対する梢端から各測定位までの長さの比をその位置における相対高とし、胸高直径に対する直径の比を相対径とする。そして胸高より上部で下から順に3つの位置の相対高の値を x とし、相対径の値を y とすると、 $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$ の3点を定めることができる。この3点に $y = ax + bx^2 + cx^3$ という3次曲線をあてはめ、最小二乗法を用いて係数 a, b, c の値を求める。このとき、この曲線が必ず基準点(1,1)を通るよう $a + b + c = 1$ という条件式を与えておく。次に、0.9Hにおける相対高 $x_{0.9}$ を3次式に代入し、相対径 $y_{0.9}$ を得る。そして、胸高直径を基準とした各測定位における相対径の値を $y_{0.9}$ で割れば、0.9Hにおける直径を基準とした相対直径の値

を求めることができる。ここで、相対径 $\eta_{0.9}$ を得るのに胸高とその上部の3つの測定値のみを用いたのは、根張りと梢端部の影響を排除するためである。

3. 結果および考察

(1) 相対幹形の安定性

相対幹形を用いて樹幹形を表現することの意義は、樹高や直径の絶対量を消去してディメンジョンをもたない相対数とすることにより、様々な大きさの樹木の樹幹形を同じ尺度のもとで比較できることにある。そこで広葉樹の相対幹形の全体のイメージをつかむために、全ての資料木の相対直径と相対高の関係を図-4.2.1に表した。また、相対高ごとに相対直径の平均と標準偏差の値を表-4.2.1に示した。この図と表から次のことが認められる。①相対高0.9Hより地ぎわに近い部分では、根張りの影響による相対直径のバラツキが大きいこと。

②相対高0.8Hから0.7Hの部分では相対直径のバラツキが小さく相対幹形が比較的安定しており、これに対して相対高0.6Hから0.2Hの部分では、相対直径のバラツキが大きいこと。

①の事実から本節における以下の樹幹形の検討においては、地ぎわ付近の測定値は使わないことにする。その理由は根張りによるバラツキが大きいこと、および本節の目的は広葉樹を用材として利用する際に必要な情報を求めることであり、それは末口直径の値であって根元部分の直径は必要ではないことである。

次に、②の相対高0.6Hから0.2Hの部分のバラツキの要因を明らかにするため、各樹木の相対高0.3H, 0.5H, 0.7Hの3箇所において、それぞれの樹木の0.9Hより上部の測定値に当てはめた5次式から相対直径の値 $\eta_{0.3}$, $\eta_{0.5}$, $\eta_{0.7}$ を計算し、胸高直径、樹高および枝下高との関係について調べる。そして、これらの因子の大きさによって相対幹曲線式を替える必要があるか否かを検討する。

a) 胸高直径

まず、相対直径の値が胸高直径の大きさの影響を受けているか否かを見るために、0.3H, 0.5H, 0.7Hの各相対高における相対直径と胸高直径の関係を示した(図-4.2.2)。図-4.2.2および表-4.2.1からわかるように、資料木はウグイカンバ・ミズナラどちらの樹種とも10cm前後のグループ、25cm前後のグループ、40

cm前後のグループ、さらに50cmから100cmまでと幅広い直径階から集められている。そして、0.3Hから相対高が下がるにしたがって相対直径の値はバラツキを小さくしながら、平均値は高くなっている。

次に、相対直径と胸高直径の間の相関関係を見るために、胸高直径（ x ）と相対直径（ y ）との間に $y = ax + b$ という回帰直線の当てはめを行った。回帰直線の係数 a 、 b および相関係数 r を表-4.2.2に示す。そして、「相対直径と胸高直径の間に全く相関関係がない」という帰無仮説をたて検定したところ、ウダイカンバの0.3Hの位置においては危険率1%でこの帰無仮説は棄却された³³⁾。すなわち、全く相関のない母集団からランダムに87個の標本を取り出した時に、このような相関係数の値を取る確率は1%以下であり、危険率1%で相対直径と胸高直径の間に有意な相関が認められた。この他にウダイカンバの0.5H、ミズナラの0.3Hおよび0.7Hにおいても危険率5%で相対直径と胸高直径の間に有意な相関が認められた。

さらに、資料木を胸高直径の大きさによって、20cm未満、20～40cm、40～60cm、60～80cm、80cm以上の5つのグループに分け、「すべてのグループにおける相対直径の母平均は等しい」という帰無仮説を検定し、表-4.2.3に示した。その結果、ミズナラの0.3Hでは1%、ウダイカンバの0.3Hでは5%の危険率で帰無仮説は棄却された。このことは、母平均の等しい5つのグループからランダムに標本を取り出した時に、このようなバラツキの起こる確率がそれぞれ1%以下、5%以下であることを意味しており、各グループの相対直径の母平均の間に有意な差があることを示している³⁵⁾。

以上の結果から、相対高0.3Hにおいては、胸高直径が大きくなるにつれて相対直径が小さくなる傾向が認められ、胸高直径の大きさによる相対直径の差が検出されたため、相対直径が胸高直径の大きさに対して独立であるとは判断できなかった。しかし、相対高0.5Hおよび0.7Hにおいては、相関関係の存在は一部に認められたものの、胸高直径の変動に対する相対直径の変動は小さく、グループ間の母平均の差は検出されなかった。したがって、この位置では胸高直径は相対直径に大きな影響を与えていないと判断することにする。

b) 樹高

相対幹形は互いの形を比較するために各林木の高さの尺度をそれぞれ1/樹

高の大きさに縮小したものである。そこで、相対直径の値が樹高の大きさの影響を受けているか否かを見るために、図-4.2.3に0.3H, 0.5H, 0.7Hの各相対高における相対直径 $\eta_{0.3}$, $\eta_{0.5}$, $\eta_{0.7}$ と樹高の関係を示す。資料木の樹高はウダイカンバでは10mから40mの範囲に、ミズナラはやや低く10mから30mの範囲に分散している。そして、胸高直径の場合と同様に、相対高の下がる順に相対直径の値はバラツキを小さくしながら、平均値は高くなっている。

次に、相対直径と樹高の相関関係を表-4.2.4に示す。ここでまた、「相対直径と樹高の間に全く相関関係がない」という帰無仮説を検定したところ、ウダイカンバについては相関関係が認められないが、ミズナラの0.3Hと0.7Hの位置においては危険率5%で有意な相関が認められる。このときの相対直径に対する樹高の回帰係数 a の値は、それぞれ-0.0036と0.0025である。これは、20mの樹高変動に対する相対直径の変動がそれぞれ-0.072と0.05であることを示しており、この相対直径の変動値は大きな値ではない。

また、資料木を樹高の大きさによって3つのグループに分け、「各グループにおける相対直径の母平均が等しい」という帰無仮説を検定し、表-4.2.5に示した。その結果、相関関係と同様にウダイカンバにおいては母平均の間の有意な差は認められないが、ミズナラの0.3Hと0.7Hの位置において帰無仮説は5%の危険率で棄却された。このことは、ミズナラの各樹高グループの相対直径の母平均の間に有意な差があることを示している。

以上の結果から、ウダイカンバにおいては樹高が相対直径に影響を与えているとは認められないが、ミズナラの0.3Hの相対高において樹高が大きくなるにつれて相対直径が小さくなる傾向が認められ、樹高の大きさによる相対直径の差が検出されたため、相対直径が樹高の大きさに対して独立であるとは判断できない。また、ミズナラの0.7Hの相対高においても樹高の影響が認められる。しかし、図-4.2.3から判断して樹高の変動に対する相対直径の変動幅が小さいので、本節においてはこの程度の樹高の影響は無視することにする。

c) 枝下高率

広葉樹の枝分かれば、幹と枝との太さの差が小さいため、どちらが主幹にな

るのか区別がつけにくい。また、枝分かれより先の部分では幹の太さが急に細くなることが多い。したがって、相対幹形のバラツキの原因として枝分かれの位置をあげることができる。これを検証するために枝分かれの位置、すなわち枝下高と相対直径との関係を調べることにする。ここで、様々な大きさの樹木の枝下高を相対的に比較するため、樹高に対する枝下高の割合である「枝下高率」という概念を導入する⁵⁸⁾。図-4.2.4に0.3H, 0.5H, 0.7Hの各相対高における相対直径 $\eta_{0.3}$, $\eta_{0.5}$, $\eta_{0.7}$ と枝下高率の関係を示す。図からミズナラの枝下高率は0.5を中心に0.2から0.6にかけて分布し、ウダイカンバはやや高く0.25から0.65にかけて分布していることがわかる。したがって、ミズナラの方が比較的低い位置から枝分かれが始まっていると考えられる。また、枝下高率の高い樹木は相対直径のバラツキが小さいという傾向が認められ、ウダイカンバの0.3Hと0.5Hにおいては相対直径と枝下高率の間に明瞭な正の相関関係が認められた。

このことを「相対直径と枝下高率の間に全く相関関係がない」という帰無仮説をたてて検定した結果が表-4.2.6である。この帰無仮説は、ウダイカンバの0.3Hと0.5Hにおいて1%の危険率で棄却され、ミズナラの0.3Hと0.5Hにおいても5%の危険率で棄却された。このことは、相対直径と枝下高率の間に有意な相関関係があることを意味している。それは、これらの相対高においてすでに枝分かれした木とまだ枝分かれしていない木では樹幹の細り方がはっきりと違うからであろう。

以上の結果から、相対高0.3Hと0.5Hにおいては枝下高率が高くなるにつれて相対直径の値は大きくなり、そのバラツキは小さくなるため、相対直径は枝下高率の影響を大きく受けると判断できる。

ここまでの3つの因子の相対直径に与える影響を整理すると、0.7Hにおいてはどの因子も大きな影響は与えず、0.5Hにおいては枝下高率が強い影響を与え、0.3Hにおいては枝下高率と胸高直径が強い影響を与え、樹高の影響も否定できない。したがって、相対幹曲線は、0.3Hにおいて各因子の影響が大きく、林木全体に適用することは困難であると判断できる。しかし、本節の目的は用材として利用できる量の推定であるので梢端部の大きさは重要でない。そして、0.5Hにおいて強い影響を与える枝下高率について条件をつけることによって、ウ

ダイカンバとミズナラの相対幹曲線は安定した形を持つと考えることができる。

(2) 樹種間の相対幹形の比較

これまでの検討においては、ウダイカンバとミズナラがそれぞれ固有の相対幹曲線式を持つことを前提としてきた。しかし、実用上は樹種ごとに相対幹曲線式を作るのではなく、いくつかの樹種に共通の相対幹曲線式を見だし、利用することが望ましい。そこで、ウダイカンバとミズナラの間で共通の相対幹曲線式を作ることが可能であるか否かを検討する。まず、表-4.2.1の相対直径の平均値を比較すると、相対高0.3Hから下部では大きな差は認められない。そこで、すべての相対高において「ウダイカンバとミズナラの相対直径の母平均は等しい」という帰無仮説を検定し、表-4.2.7に示す。その結果、0.3Hより上の梢端部においては帰無仮説は1%の危険率で棄却されたが、0.4Hより下部においては差は検出されない。さらに、この検定を枝下高率0.5以上の樹木に限定して行くと、表-4.2.8に示すように、0.3Hより上の梢端部においても有意な差は認められない。

このことから、二つの樹種の相対幹形が全く等しいと結論づけることはできないが、両者の相対幹形の間には本質的な違いはないと判断することはできる。したがって、両者に共通の相対幹曲線式を作るとは可能であると考えられるので、以下の検討においては二つの樹種の相対幹形を統合することにする。

(3) 針葉樹の相対幹形との比較

(2)における検討によって、ウダイカンバとミズナラのどちらの樹種においても、枝下高率が0.5以上の樹木は相対直径のバラツキが小さいことから、安定した樹幹形をもつことが明らかになった。資料木のうちこの条件を満たす39本の樹木の相対直径と相対高の関係を示すと図-4.2.5と表-4.2.9のようになるが、図-4.2.1と比較してかなり相対幹形が絞り込まれてきていることがわかる。

そこで、この優良広葉樹の相対幹形を針葉樹の場合と比較することにする。表-4.2.10は東京大学秩父演習林の人工林内において測定された50年生のスギとヒノキの相対直径の平均と標準偏差であり¹¹⁶⁾、表-4.2.11は名古屋営林支局付

知営林署管内において測定された同一林分内の天然ヒノキの相対直径の平均と標準偏差である⁵⁵⁾。まず、相対高0.5Hより下の部分で標準偏差をみるとウダイカンバ・ミズナラが0.045から0.03であるのに対して、針葉樹では人工林・天然林ともに0.035から0.02というやや低い値であった。また、平均値をみるとウダイカンバ・ミズナラの方が0.5Hと0.6Hでやや高い値を示していた。

枝下高率の条件をつけたウダイカンバ・ミズナラの相対幹形は針葉樹の相対幹形と比較してややバラツキが大きくなった。しかし、針葉樹の資料が同一林分から採取されているのに対して、ウダイカンバ・ミズナラの資料が東京大学北海道演習林全域から採取されていることを考慮すればバラツキの程度は同じ水準であると見なすことができる。このことは、広葉樹においても一定の条件のもとでは針葉樹と同様に相対幹曲線によって樹木の各部位の相対直径を推定しても同じ程度の正確度で推定値が得られることを意味している。

(4) 枝分かれの位置より下の部分の相対幹形

(3)における議論は対象を枝下高率が0.5以上のウダイカンバ・ミズナラに限定してきたが、この範囲をさらに広げ枝下高率が0.5以下の樹木についても枝分かれの位置より下の部分の相対直径を検討の対象に加えることにする。

そこで、枝下高率が0.5以上のグループとそれ以下のグループとに分け、枝分かれの位置より下の部分の相対直径のみを取り出して「二つのグループの母集団の母平均が等しい」という帰無仮説をたて検定を行った。その結果は表-4.2.12に示すように、帰無仮説は0.6Hから0.8Hのすべての相対高において棄却されなかった。

このことから二つのグループの相対直径の間には有意な差はなく、枝下高率が0.5以下の樹木においても枝分かれの位置より下の部分に限定すればその相対幹形は枝下高率が0.5以上のグループと同じであることが認められた。したがって、枝下高率が0.5以上の樹木から導かれた相対幹形は、さらに一般化され、全ての樹木の枝分かれの位置より下の部分の相対直径に適用することができる。

(5) 相対幹曲線式の実用性の検討

これまでの検討により、ウダイカンバとミズナラは共通の相対幹形をもち、枝下高率の高い樹木の相対幹形は針葉樹と同程度にバラツキが小さく、枝下高

率の低い樹木でも枝分かれの位置より下の部分にはこの相対幹形を適用できることがわかった。

このような知見をもとに広葉樹材の末口直径の推定を行い、どの程度の正確度で推定値が得られるかを調べる。

a) 相対幹曲線式の決定

針葉樹の相対幹曲線式は3次式が一般的であるが、広葉樹の場合樹幹上部に枝分かれによる急激な幹形の変化を持つので、梢端部の影響を避けてできるだけ精度の高い相対幹曲線式を得ることを考え、ここでは5次式を採用することにする。

最小二乗法による5次式の当てはめには、用材としての利用径級を考慮して胸高直径40cm以上の樹木に限定し、枝下高率0.5以上の樹木は地ぎわ部分を除く全ての測定値を用い、他の樹木は枝分かれの位置より下の部分の測定値（地ぎわ部分を除く）を用いる。

その結果、次のような相対幹曲線式を得た。

$$y = 0.9948x + 3.8472x^2 - 7.9908x^3 + 4.1013x^4 + 0.208x^5 \quad (4.2.1)$$

b) 樹高曲線式の決定

相対幹曲線式を用いて任意の位置の末口直径を計算するためには、樹高と基準となる0.9Hの位置の直径 $d_{0.9}$ が必要となる。しかし、全林木の樹高と $d_{0.9}$ を測定することは困難である。そこで、胸高直径の値をもとにこれらの数値を求めることにする。

胸高直径と樹高の関係は図-4.2.6に示すとおりである。この図から同じ直径でもウダイカンバの方が樹高の高いことが明らかである。したがって、相対幹曲線式は共通でも樹高曲線は別にしなければならない。

そこで、樹高曲線式として次の3つを用意し、最小二乗法による当てはめの結果、測定値と推定値の偏差平方和が最も小さくなるものを選ぶことにする。

$$S\ TOFFELS\ 式 \quad H = 1.3 + a D^b$$

$$\text{HENRICKSON式} \quad H = 1.3 + a + b \log D$$

$$\text{NÄSLUND式} \quad H = 1.3 + (D / a + b D)^2$$

当てはめの結果は表-4.2.13に示すとおりで、ウダイカンバはSTOFFELS式、ミズナラはHENRICKSON式を使うことにする。

c) 末口直径の計算

ここでは、実用上の見地から用材として利用可能な部分、すなわち直径20cm以上でかつ枝分かれの位置よりも下にある413個の測定箇所を対象として、相対幹曲線式を用いた末口直径の推定を行い、先に調べた個々の樹木の相対直径のバラツキが直径に変換された時にどの程度の値になるかを次の二つの場合について調べる。

① 胸高直径 d_b と樹高 h から相対幹曲線式を用いて末口直径を求める場合；

相対幹曲線式を

$$y = p_1 x + p_2 x^2 + p_3 x^3 + p_4 x^4 + p_5 x^5 \quad (4.2.2)$$

とし、胸高の相対高を H_{dbh} とすると $H_{dbh} = 1 - 1.3/h$ となり (4.2.2) 式に代入すると胸高の相対直径 D_{dbh} は

$$D_{dbh} = p_1 H_{dbh} + p_2 H_{dbh}^2 + p_3 H_{dbh}^3 + p_4 H_{dbh}^4 + p_5 H_{dbh}^5 \quad (4.2.3)$$

となる。一方、任意の断面高 s の相対高 H_s は $H_s = 1 - s/h$ となる。

そして、任意の断面高 s の相対直径 D_s は

$$D_s = p_1 H_s + p_2 H_s^2 + p_3 H_s^3 + p_4 H_s^4 + p_5 H_s^5 \quad (4.2.4)$$

で与えられ、任意の断面高 s の末口直径 d_s は

$$d_s = d_b \frac{D_s}{D_{dbh}} \quad (4.2.5)$$

として求められる。

例えば、胸高直径40cm、樹高20mの樹木における断面高8mにおける末口直径を(4.2.1)式から計算すると、

$$H_{dbh} = 1 - 1.3/20 = 0.935$$

$$D_{dbh} = 0.9948 H_{dbh} + 3.8472 H_{dbh}^2 - 7.9908 H_{dbh}^3 + 4.1013 H_{dbh}^4 + 0.208 H_{dbh}^5 \\ = 1.0449$$

$$H_s = 1 - 8/20 = 0.6$$

$$D_s = 0.8036$$

$$d_s = 40 \cdot (0.8036/1.0449) = 30.76\text{cmとなる。}$$

こうして計算した推定値と測定値の差を表-4.2.14に示した。

②胸高直径のみが与えられて、樹高曲線式と相対幹曲線式を用いて末口直径を求める場合；

①のケースでは樹高は一本ずつ測定されているとしたが、一般に広葉樹の場合樹高が測定されることは稀である。したがって、樹高は樹高曲線式から推定しなければならない。そのため推定結果は相対幹曲線に対する相対直径の偏差に樹高曲線に対する樹高の偏差が加わる。例えば、胸高直径40cmの樹木に対して、 $H = 1.3 + 4.6475 D^{0.4237}$ というウダイカンバの樹高曲線式を適用すると樹高は23.48mとなる。これは20mという測定値に対して3.48mの増となり、8mの相対高 H_s は0.6593と0.0593だけ大きくなる。しかし、胸高の相対高 H_{dbh} も0.9446となり0.0096だけ増加し、 d_s の値は0.92cmだけ大きくなり31.68cmとなる。

こうして計算した推定値と測定値の差を表-4.2.15に示した。

表-4.2.14と表-4.2.15から相対幹曲線を用いて計算した推定値と測定値の誤差を見ると、樹高が与えられた場合には、1cm以内に413個の測定値の33.9%、2cm以内に55.7%、3cm以内に70.7%が含まれ、相対誤差では5%以内に63.7

%、10%以内に92.5%が含まれている。これに対して、樹高曲線を用いて樹高を推定した場合には、誤差1 cm以内に33.7%、2 cm以内に54.7%、3 cm以内に68.8%が含まれ、相対誤差5%以内に62.2%、10%以内に92.0%が含まれている。

以上の結果から、樹高曲線を用いて樹高を推定しても樹高の推定誤差が直径の推定値に与える影響は小さく、直接樹高を測る場合と比較して正確度の点からみて大きな差はないといえる。また、一般的な直径階の幅である2 cmの誤差の中に53%以上が収まり、10%の相対誤差の中に92%が収まるということから、このように相対幹曲線を用いて広葉樹の用材の末口直径を推定する方法がかなりの実用性を持つということが出来る。

本節における検討により、これまで不安定であると見なされてきた広葉樹の樹幹形について、相対幹形の樹木の大きさに対する安定性と枝下高の相対幹形に対する影響の大きさが確かめられ、ウダイカンバとミズナラが共通の相対幹形をもつことがわかった。また、枝下高率の高い樹木の相対幹形は針葉樹と同程度にバラツキが小さいこと。枝下高率の高くない樹木でも枝分かれの位置より下の部分にはこの相対幹形を適用できることが明らかになった。そして、相対幹曲線を用いて広葉樹材の末口直径を推定したところ、用材として利用できるような通直な部分に対しては相対幹曲線式を用いた末口直径の推定が十分実用に耐えることが認められた。これは、従来からの広葉樹の樹幹形は不規則なものであるという見方を覆すものであり、広葉樹の択伐林施業にとって定量的な施業方法確立へのひとつの足掛りとなるものである。はじめにも述べたとおり、本節は林分施業法を定量的に行うための研究の一環であると位置づけられており、ここで得られた新しい知見をもとに、次節以降の優良木の単木管理システムへと研究を展開させる。

第3節 優良広葉樹の丸太価格の長径級による相対的な関係

立木価値をその木から採材しうる銘木の価値の合計であるとするならば、優良形質木の立木価値を評価するためには、その木から採材される銘木の価値をなんらかの方法によって表現しなければならない。前述したように、銘木の価格は木材市況によって大きく変動することがある。したがって、価値の尺度として銘木の価格をそのまま用いることはできない。そこで、市況変動の影響を排除するため、価値の尺度として一定の規格の丸太の価格に対する相対値を用いることにする。この相対値は材の長さや末口直径の大きさの違いによって増減すると考えられるので、立木価値の評価にあたっては、基準材価格に対する相対値と末口直径、材長、品等の間どのような関係があるのかを明らかにしておく必要がある。これらの関係を解析するために、北海道演習林周辺の国有林から伐採された優良広葉樹の木材市場における入札価格を調査した。

1. 資料および分析方法

分析に用いた資料は、1984年6月から1987年6月までの3年間に旭川市内の二つの原木市場において取り引きされたミズナラ297本、ウダイカンバ529本の銘木の入札結果である。旭川の原木市場は、集荷量が多く、買い手も全国から集まるので、適正な価格が形成されているものと考えられる。銘木の規格は、材長、末口直径、品等によって定められている。品等は日本農林規格に基づき1等から3等まであり、末口直径は表-4.3.1に示したように2cm括約で、ミズナラでは38cm～94cm、ウダイカンバでは34cm～80cmの範囲にあり、材長は0.2m括約で、ミズナラでは2.4m～6.8m、ウダイカンバでは2.4m～6.0mの範囲にある。さらに、この材長・末口直径別の本数を図-4.3.1のように表してみると、材長では4.0m、3.0m、2.6mの規格のものが多いことがわかる。そこで、材長については、4.0m以上、3.0m以上4.0m未満、2.6m以上3.0m未満、2.6m未満の4つのクラスに分けることにする。末口直径については、2cm括約のままでは、大きな直径階の資料数が少なくなるので、直径階を3つまとめて6cm括約とする。

各銘木の市場価格としては、入札価格の上位3番目までの平均値を用いた。ここで最高入札価格を採用しなかったのは、競争入札における最高入札価格は

必ずしも客観的な市場価格を示すものではなく、競争の影響を受け若干高め
の値をとることがあると判断したからである。そして、基準材としては、国有林
における基準材の規格に合わせて、末口直径30～38cm、材長2.4～3.4mの3等
材を用い、各時点における基準材の価格を基準価格とし、基準価格に対する相
対値をもってその銘木の相対価値とすることにした。

2. 品等による価格差

日本農林規格では、広葉樹の素材の品等は節、曲がり、木口割れ、目まわり、
腐れ、虫食い、空洞などを欠点事項として品等を判定するよう定められている。
これらの項目はすべて立木の状態で判断できるものではないが、ここでは品等
の違いが相対価値に与える影響について調べることにする。

資料木の品等別内訳は、ミズナラでは1等53本、2等174本、3等70本、ウダ
イカンバでは1等197本、2等285本、3等47本と2等が最も多かった。品等
による相対価値の違いを比較するために、末口直径と材長が同じクラスもの同
士を比較したのが表-4.3.2である。これをみると、3例を除いて、品等が上
がるにつれて相対価値も上昇しており、品等の違いによって相対価値の格差が存
在することが認められる。逆転現象の起きている3例については、資料数が少
ないために特異な価格を示した物件の影響を受けたものと思われる。また、品
等が高くなるにつれて、材長・末口直径間の格差が顕著に現われていることが
認められる。例えば、ウダイカンバの3.0～3.8m材の場合、2等材の末口直径に
よる価格差は14%であるのに対して、1等材では31%の価格差が現われている。

3. 材長および末口直径による価格差

図-4.3.2は、材長および末口直径による相対価値の格差を示したものである。
これをみると、まず、材長が長いほど銘木としての相対価値が高くなる傾向が
認められる。これは木材を加工する側の立場からすれば、加工の自由度が高ま
るわけで当然の結果といえよう。また、末口直径が大きいほど相対価値は高く
なるが、ミズナラでは60～70cm付近、ウダイカンバでは50～60cm付近に相対価
値のピークが存在し、これを境にしてその傾向が逆転することが認められ、こ
の傾向は材長が長くなるほど顕著に現われる。このように銘木の相対価値が一

定の末口直径でピークとなるのは、ある大きさまでは材長の場合と同様に加工上の自由度の増大に伴い相対価値は上昇するが、ある大きさを超えると色調など銘木としての相対的な品質が落ち、単位材積当りの相対価値が低下するためである。しかし、材長および末口直径と相対価値の間に、このような一定の傾向を見いだすことができる。長期的な観点からすれば、需要構造の変動に伴いこの関係に変化がみられるかも知れないが、優良広葉樹の伐採許容量を査定する10年という経理期間においては一定であると見なしても実用上の問題はないものと思われる。そして、経理期間の期首に再び見直しを行えばよいと考えられる。

4. 同一径級内の相対価値の分散

いま、材長および末口直径のクラスごとの相対価値の平均を調べたが、同じクラスの中で、各銘木の相対価値がどの程度の幅をもつかを明らかにしておく必要がある。そこで、図-4.3.3に示したように、同一径級内の相対価値の分散をみてみることにする。これをみると、同じ材長、同じ末口直径であっても相対価値にかなりの幅があり、この幅は材長が長くなるほど大きくなることが認められる。例えば、ウダイカンバの末口直径62cmの3.0m材では、標本数が29で、相対価値の変動係数が87%に達し、末口直径50cmの2.6m材では、標本数が79で、変動係数が62%である。ミズナラの末口直径62cmの3.0m材では、標本数が28で、変動係数が62%、末口直径50cmの2.6m材では、標本数が27で、変動係数が43%となっている。

また、頻度分布のピークは平均よりも値は小さく、ウダイカンバでいえば、相対価値が3.0~4.0の間にある。これは末口直径の大きさに関係がなく安定している。しかし、50~60cmあたりの平均値の高いクラスでは相対価値の高いものが出現する割合が高くなり、結果として平均値を引き上げている。こうしてみると、大半の銘木には末口直径による相対価値の差はなく、末口直径によって相対価値の高い高品質材の出現する確率が異なり、その結果平均値に差が生じているとみられる。そして、材長が長いほど、銘木としての特別の材質で欠点の少ない高品質材の出現する確率は高くなり、末口直径間の価格差が顕著に現われる。このような相対価値の差は、素材を製品化したときに超高級製品が

生産される確率の差によるものと考えられる。以上のことから、銘木の価値を材長と末口直径をもとに表現する場合、個々の銘木に対する精度は必ずしも高くはないが、それぞれの銘木の持つ価値の期待値であると考えることができる。

5. 相対価値表の作成

これまでに得られた知見をもとに、銘木の価値の期待値を材長と末口直径によって決定するために、表-4.3.3に示すような相対価値表を作成した。相対価値表は基準材価格を100とした指数によって、任意の材長と末口直径の銘木の基準材に対する相対的な価値を表現したものである。

相対価値表の作成にあたり、品等による価格差は認められたが、立木のままで品等を判定することは困難であるので、ここでは品等は確率事象であると考え、品等は込みにすることにした。基本的には、各材長・末口直径のクラスの相対価値の平均を用いたが、材長が長いほど相対価値が高くなること、一定の末口直径に相対価値のピークがあることを勘案し、末口直径階間の変化がスムーズになるよう調整した。

この相対価値表をもとに、先に求めた広葉樹の樹高曲線と相対幹曲線を用いて、立木価値の期待値が最高になるような最適採材の方法を考えることができる。

第4節 立木価値の評価

ここまでの解析によって、東京大学北海道演習林の代表的な優良広葉樹であるミズナラおよびウダイカンバについて、相対幹曲線、樹高曲線および相対価値表が求められた。次に、これらの成果を用いて一本の立木から採材することのできる丸太の価値の総量を直径階別に計算し、胸高直径の成長に伴う立木価値の増加について考察する。そして、この立木価値の増加量の推定値をもとに優良形質木の伐採許容量を査定する方法について検討する。

1. 立木価値評価の考え方

各直径階における立木価値を評価するためには、いく通りか考えられる採材方法のうち、最適な採材方法を選択しなければならない。そこで、この最適な採材方法の決定にあたり、次のような8つの前提条件を設定することにする。なお、単位材積当りの丸太の価値は前節で作成した相対価値表のとおりとする。

(1) 樹高曲線

立木価値を胸高直径の関数として表現するためには、胸高直径と樹高の関係を規定しなければならない。すでに第2節で解析したように、東京大学北海道演習林の広葉樹の樹高曲線式としてミズナラはHENRICKSON式、ウダイカンバはSTOFFELS式が最もよく適合し、次のような樹高曲線式が求められている。

$$\text{ミズナラ} \quad h = 1.3 - 6.2959 + 7.0406 \log d_b \quad (4.4.1)$$

$$\text{ウダイカンバ} \quad h = 1.3 + 4.6475 d_b^{0.4237} \quad (4.4.2)$$

ただし、 h ：樹高、 d_b ：胸高直径

したがって、立木価値の評価にあたってはこの樹高曲線を用いることにする。

(2) 相対幹曲線

樹高曲線と同様にすでに第2節で、ミズナラ・ウダイカンバ共通の相対幹曲線式として、次のような5次式が求められている。

$$y = 0.9948x + 3.8472x^2 - 7.9908x^3 + 4.1013x^4 + 0.208x^5 \quad (4.4.3)$$

ただし、 x ：樹高に対する相対高

y ：相対高0.9の位置の直径を基準直径とする相対径

(1) および上式を用いて、第2節の3の(5)で述べた方法により任意の断面高における末口径を求めることができる。

(3) 採材寸法

丸太の採材寸法は、先に定めた相対価値表の材長に合わせて、4.0m, 3.0m, 2.6m, 2.4mの4種類とする。ただし、各丸太の採材に当たりそれぞれ0.1mの延べ寸を見込むことにするので、実際の採材寸法は4.1m, 3.1m, 2.7m, 2.5mとなる。

(4) 最小末口直径および最短材長

第3節で作成した相対価値表に基づき、最小末口直径を設定する。すなわち、ミズナラで末口直径が38cm未満、ウダイカンバで末口直径が34cm未満の丸太には、銘木としての価値が発生しないものとする。また、材長についても最短材長を設定し、延べ寸を見込んで2.5m未満の丸太には価値が発生しないものとする。

(5) 枝分かれの発生

第2節の3で解析したとおり、樹高の1/2より上の部分では枝分かれの発生する可能性が高い。したがって、この部分では、末口直径が最小末口直径の値を上回っていても採材の対象と考えることにする。

(6) 地ぎわかからの打ち出し

地ぎわから0.5m以下の部分は腐れが発生している可能性が高いので、この部分は採材の対象と考えないことにする。

(7) 樹皮率・偏心率による推定値の修正

胸高直径は皮つきの測定値であるのに対して、末口直径は皮なしの最小直径である。したがって、胸高直径から末口直径を推定する場合、樹皮率と偏心率を考慮に入れなければならない。ここでは、北海道演習林におけるミズナラ・ウダイカンバの樹幹解析資料を参考にして、樹皮率をミズナラで7.5%、ウダイカンバで2.5%とみなすことにする。また、前節で用いた材積表調製のための資料木については2方向の外部直径が測定されているので、ミズナラ89本の835箇所とウダイカンバ88本の910箇所において、偏心に伴う平均直径に対する最小直径の減少率を調べたところ、平均2.5%の減少率であることがわかった。以上のことから、ミズナラでは10%、ウダイカンバでは5%を外部直径から割り引いて末口直径とすることにする。

(8) 丸太材積の計算方法

相対幹曲線式を用いて丸太の両端と中央の直径の値を計算し、RIECKE式で丸太材積を求めることにする。ここで、末口二乗法を適用しないのは、末口二乗法では短材に対して過大評価を示す傾向があり、2.5mから4.1mまでの材長を選択する際に、短材に偏ることがないように配慮したためである。

以上の前提条件をもとに、立木価値が最大になるような採材方法を決定する方法を考えることにする。いま、最小末口直径を d_{min} とすると、その相対径 D_{min} は

$$D_{min} = \frac{d_{min}}{D_{dbh}} \quad (4.4.4)$$

で与えられる。これを(4.4.3)式に代入すると、

$$D_{min} = p_1 x + p_2 x^2 + p_3 x^3 + p_4 x^4 + p_5 x^5 \quad (4.4.5)$$

となる。この x の 5 次方程式の解は、相対径が D_{min} となる相対高 H_{min} である。これに樹高をかけて末口直径が d_{min} となる断面高 h_{min} を求める。こうして、断面高 h_{min} が与えられると採材の対象となる部分の長さを求めることができる。一般に丸太の採材方法を検討する際に、ダイナミック・プログラミングによる最適採材方法がよく用いられるが、ここで検討しているケースのように丸太の採材寸法を 4.1m, 3.1m, 2.7m, 2.5m とした場合には、それぞれの採材寸法間の最大公約数が採材の対象となる部分の長さを超えてしまうので、計算のプロセスを分割しても最適化の手順は簡単にならない。これではダイナミック・プログラミングを適用しても本質的には悉皆法と同じことになり有効ではないと考えられる。したがって、ここでは悉皆法を採用することにする。

まず、採材の対象となる部分の長さを最も短い丸太の材長である 2.5m で割り、最大限何本の丸太が採材可能であるかを知る。この採材可能丸太本数を n 本とすると、 n 番丸太までの採材が考えられる。採材寸法は前述のとおり 4 種類であるが、長い材を採材するときには丸太の本数が減ることがあるので、もうひとつ材長 0m という採材寸法を与え、5 種類の採材寸法で n 番丸太までの採材を想定すると、合計 5^n とおりの組合せが考えられる。このなかから、丸太の長さの合計が $(h_{min} - 0.5)$ を超えるものを除外して、価値の総量が最大になる組合せを選び、直径階別に示したのが表-4.4.1 である。さらに、この関係を図に示したのが図-4.4.1 である。

2. 直径成長に伴う立木価値の増加

表-4.4.1 の丸太価値は基準材 1 m^3 の価値を 100 とする指数で表したものである。ここで、 h_{min} とは、末口における皮なしの最小直径が相対価値表の最低規格である d_{min} となる断面高である。 h_{min} が最短の採材長 2.5m に打ち出しの 0.5m を加えた 3.0m 以上の高さになるのは、ミズナラでは胸高直径が 48cm を超えてからであり、ウダイカンバでは胸高直径が 40cm を超えてからである。すなわち、胸高直径がこの値以下では立木としての価値が発生しないことになる。胸高直径

の増加によって h_{min} の位置が高くなり、採材の対象となる部分の長さは増大し、2番丸太、3番丸太の採材が可能となる。丸太の価値を採材の基準とすると単価の高い長い材が優先的に採材される。しかし、末口直径が一定の値を超えると丸太の価値が低下するので、胸高直径が大きくなると立木価値に占める割合が元玉よりも2番丸太、3番丸太の方が高くなる。このことは、北海道演習林の販売例を基にした渡邊ら¹¹⁰⁾の分析結果とも一致する。また、胸高直径が大きくなると単位材積当りの丸太の価値は低下するが、採材対象となる利用材積が増加するので立木価値の総量としては増加を続ける。しかし、これもミズナラで胸高直径90cm、ウダイカンバで80cm以上で頭打ち傾向がみられる。

採材対象となる利用材積は立木材積の増加に伴い増加するが、ミズナラで胸高直径62cm、ウダイカンバで54cm以降で立木材積に対する利用材積の割合はほぼ一定の値になる。これは、 h_{min} の値が樹高の1/2以上にならないように制約を加えたためである。

次に、胸高直径の成長速度を考慮に入れて立木価値の増大について考察する。ミズナラとウダイカンバの胸高直径の成長速度を知るために、固定試験地の資料から、期首直径が4cm以上の測定記録を樹種ごとに取り出し、各直径階ごとの10年間の定期成長量の平均を表-4.4.2のとおり求めた。そして、各直径階間で定期成長量の変化が滑らかになるように、3点平均法によるスムージングを繰り返し行い修正した。修正前と修正後の各直径階における成長量を図-4.4.2に示した。

次に、ミズナラとウダイカンバについて、胸高直径4cmの時点からそれぞれ10年目ごとの胸高直径の値を推定し、これに対応する立木価値の成長を予測する。表-4.4.3と図-4.4.3にその結果を示した。これを見ると、ミズナラでは180年目から立木価値が発生し、400年目あたりまで立木価値は増加し続け、その後は停滞する。特に、300年目から400年目にかけての立木価値の増加が著しい。ウダイカンバでは、80年目から立木価値が発生し、200年目あたりまで立木価値は増加し続け、その後停滞する。特に、150年目から200年目にかけての立木価値の増加が著しい。この停滞の始まる時期はミズナラとウダイカンバの生理的寿命と言われる時期にほぼ一致している¹⁰⁹⁾。したがって、立木価値を基準とする最適伐期齢は生理的伐期齢に一致することができる。このことは、

このような優良形質木は健全な成長を続けている限りにおいては、伐採せずにできるだけ長くおいた方が有利であることを意味している。

3. 優良形質木の伐採許容量の考え方

これまでの考察により、優良形質木の相対価値は胸高直径の成長とともに増大することが明らかになった。したがって、第1節で述べたとおり管理対象となる森林の相対価値の総量を維持するためには、個々の林木の立木価値の増加量の合計を伐採許容量として優良形質木を管理しなければならない。すなわち、単木ごとに期首の胸高直径の値から経理期間の期末における胸高直径を推定し、これをもとに立木価値の増加量を計算する。そして、この増加量の少ないもの、今後増える見込みのないものを優先させながら、伐採対象木の立木価値の合計が伐採許容量に達するまで選木を行う。ただし、選木の際に、長期的な資源量維持の立場から、樹種ごとの直径分布形を維持することにも考慮が払われなければならない。このための本数管理曲線については次節において詳しく述べる。

しかし、第3節の4で解析したように、同じ材長、同じ末口直径であっても、丸太の色つや、偏心の程度によって一本一本の丸太の相対価値にはかなりの幅があり、平均値が最頻値より高い値を示すことがわかった。したがって、相対価値表から導かれる値は、それぞれの丸太の持つ価値の期待値であると考えの方が適当である。このように考えると、優良形質木の伐採許容量を査定する際に、立木価値の値をそのまま伐採許容量の指標とすることは、場合によっては伐採許容量の過大評価を招きかねないということを考慮に入れておかなければならない。したがって、相対価値による優良形質木の伐採許容量は、唯一の指標ではなく、いくつか考えられる優良形質木管理のヘッジの一つと位置づけ、採材対象となる部分の材積を伐採許容量の指標とするなど他の指標と組み合わせて使用することが適当である。

第5節 本数管理曲線の設定

Biolley⁶⁾は択伐林の立木材積の指標として小径木20%、中径木30%、大径木50%の割合を示している。これは、単に量的な保続では十分でないと考え、林分構造についても考慮を払ったためである。また、高橋⁹⁾も広葉樹の価値成長を林分施業法における選木の基準においている。優良形質木の保続を図るためには、立木価値の成長量分だけを伐採することによってその総量を維持することができる。しかし、林木には寿命があり、樹齢が大きくなるにつれてその生存率は小さくなる。したがって、維持された立木価値総量の内訳についても配慮が加えられなければならない。もし、若・壮齢木のみを伐採し老齢木を残して行けば、総量は維持されても、やがて全体の成長量は減少する。すなわち、成長量を生み出す生産装置の齢級構造も維持されなければ、安定した成長量は期待できない。しかし、天然林において各林木の樹齢を知ることは容易ではない。優良形質木は、すでに樹冠群を形成している個体であることから、優良形質木においては立地条件による成長の差は存在しても、被圧による成長の遅れはないので、樹齢と胸高直径は比例する。よって、樹齢を胸高直径に置き換えて直径階ごとの本数を管理することにする。そして、この直径分布型の形を崩さないような直径階別の選木を行う。このように、優良形質木の管理にあたり、質的な保続を図るためには直径階別の本数管理曲線を規定し、これに沿って施業を進める必要がある。それでは、この本数管理曲線を定めるのにどのような手順を踏めばよいのであろうか。以下、その方法について述べる。

まず、次のような前提をおく。各林木の直径成長現象は、それぞれの直径階ごとにあらかじめ定まっている確率に基づく確率事象であるとする⁴⁾。優良形質木はきわめて恵まれた生育空間を占めていると考えられるので、この確率は他の林木の伐採による影響は受けず安定しているものとする。さらに、優良形質木の施業では病虫害や風害などの被害を受けて樹勢の衰えた樹木を「観察木」としてマークし、伐採木の選木は観察木の中から行うことにする。したがって、枯死する前に観察木となるので枯損という現象は起こらないものとする。そして、優良形質木が一定の期間内に観察木となる確率はその直径階を通過するのに要する時間に比例するものとする。すなわち、成長速度が落ちてその直径階

にとどまる時間が長くなるほど伐採される確率は高くなる。

次に、直径遷移確率を樹種ごとに定める。いま、直径遷移確率 p_{ij} を直径階 i にある林木が次の時点で直径階 j に遷移する確率であると定義する。すると、直径遷移確率は次のように行列で表すことができる。

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ & p_{ij} & \\ p_{n1} & \cdots & p_{nn} \end{pmatrix}$$

これを直径遷移行列 \mathbf{P} と呼ぶことにする。

次に、ある時点 t_0 における直径階別本数を $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ とする。これを $\mathbf{N}_0 = (\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n)$ という直径分布ベクトルで表現することにする。すると、進界成長量を考えないならば、次の時点 t_1 における直径分布ベクトル \mathbf{N}_1 は次の式で計算できる。

$$\mathbf{N}_1 = \mathbf{N}_0 \mathbf{P} \quad (4.5.1)$$

同様にして、 k 期間後の時点 t_k における直径分布ベクトル \mathbf{N}_k は、次のようになる。

$$\mathbf{N}_k = \mathbf{N}_{k-1} \mathbf{P} = \mathbf{N}_0 \mathbf{P}^k \quad (4.5.2)$$

このように、初期の直径分布ベクトル \mathbf{N}_0 と直径遷移行列 \mathbf{P} が与えられれば、任意の時点の直径分布を表現することができる。しかし、天然林の直径分布を表現しようとする場合、進界成長量を考慮にいれなければならない。いま、ある時点 t_{j-1} と t_j の間に優良形質木作業級に進界する林木の本数を f_j とすると、進界木の直径分布ベクトル \mathbf{F}_j は $\mathbf{F}_j = (f_{j1}, f_{j2}, \dots, f_{jn})$ と表すことができる。このとき $f_j = f_{j1} + f_{j2} + \dots + f_{jn}$ となる。すると、時点 t_k における直径分布ベクトル \mathbf{N}_k は、次のように表現することができる。

$$\mathbf{N}_k = \mathbf{N}_0 \mathbf{P}^k + \sum_{j=1}^k \mathbf{F}_j \mathbf{P}^{k-j} \quad (4.5.3)$$

次に、このモデルに収穫行為を加えた直径遷移確率を考えてみる。伐採木の選木は樹勢の衰えた樹木の中から行われるので、各直径階の中で成長の悪いものから収穫することになる。先に定めた前提条件から、一定の期間内に観察木となる確率は、その直径階を通過するのに要する時間の比となる。例えば、二つの直径階における成長速度が2:1である場合に、それぞれの直径階を通過するのに要する時間の比は1:2となるので、伐採される確率の比も1:2となる。各々の直径階を通過するのに要する時間の比は、毎年一定の進界木を与え、直径遷移行列 P を無限回かけて得られる終局的な直径分布における各直径階の本数比として求めることができる。そこで、林木が伐採される確率は、この本数比をもとに定めることができる。この確率は伐採の強度によって増減する。この伐採の強度のことを「施業水準」と呼ぶことにする。すると、観察木の発生割合に施業水準をかけることによって、収穫行為を意味する伐採確率 r を定めることができる。

ここで、伐採確率 r_i を、直径階 i にある林木が次の時点までに伐採される確率とし、森林施業確率 q_{ij} を、直径階 i にある林木が伐採されずに、次の時点に直径階 j へ遷移する確率であると定義すると、森林施業確率 q_{ij} は $q_{ij} = p_{ij} - r_{ij}$ と表すことができる。このとき、 $r_i = r_{i1} + r_{i2} + \dots + r_{in}$ となる。同一直径階の中では直径成長の悪いものから順に伐採するので、直径遷移確率を p_{i1} から順に加えてゆき、その積算値が伐採確率 r_i より小さいときには、 $r_{ij} = p_{ij}$ となり

$$q_{ij} = 0 \quad (4.5.4)$$

となる。そして、ある j の値で積算値が r_i を超える、このとき

$$q_{ij} = \sum_{k=1}^j p_{ik} - r_i \quad (4.5.5)$$

となる。さらに、 j の値が大きくなると $r_{ij} = 0$ となり、

$$q_{ij} = p_{ij} \quad (4.5.6)$$

となる。このようにして、収穫行為の加わった森林施業確率を定めることができる。この確率は次のように行列で表すことができる。

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1n} \\ & q_{ij} & \\ q_{n1} & \cdots & q_{nn} \end{pmatrix}$$

これを森林施業行列 Q と呼ぶことにする。このようにして表現される行列 Q は、自然の直径遷移に人間の干渉が加わった森林施業という行為を意味している。

次に、各期間ごとの進界木の本数が一定であるという条件を加えると、進界木の直径分布ベクトル F は $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ となり、 f の値は一定となる。このとき $f = f_1 + f_2 + \dots + f_n$ 。すると、時点 t_k における直径分布ベクトル N_k は、次のように表現することができる。

$$N_k = N_0 Q^k + \sum_{m=1}^k F Q^{m-1} \quad (4.5.7)$$

ここで、 $k \rightarrow \infty$ とすると初期分布 N_0 はやがては伐採されてなくなるので、 $Q^k = 0$ となる。したがって、

$$N_{\infty} = \lim_{k \rightarrow \infty} N_0 Q^k + F \sum_{m=1}^k Q^{m-1} = F \sum_{m=1}^{\infty} Q^{m-1} \quad (4.5.8)$$

とすることができる。

ここで、 $\sum_{m=1}^{\infty} Q^{m-1}$ を R とおき、この R という行列にもう一度 Q という森林施業行列をかけると、

$$R Q = \sum_{m=1}^{\infty} Q^m \quad (4.5.9)$$

と表現できる。すると、

$$R - RQ = R(I - Q) = \sum_{m=1}^k Q^{m-1} - \sum_{m=1}^k Q^m = 1 - Q^k \quad (4.5.10)$$

となる。ここで、 $k \rightarrow \infty$ とすると $Q^k \rightarrow 0$ となる。したがって、

$$R(I - Q) = 1 \quad (4.5.11)$$

となり、 $R = (I - Q)^{-1}$ とすることができ、

$$N_{\infty} = F(I - Q)^{-1} \quad (4.5.12)$$

となる。

このことは、上述の進界成長量一定の条件の下では安定した森林施業を繰り返して行けば、初期の直径分布がどのような形であっても、終局的な直径分布は進界木本数と森林施業行列とによって一意的に決まることを意味している。

筆者は、第3章第7節において林分レベルの目標林の設定には、ここで用いたように森林施業行列の逆行列から終局的な直径分布を導く方法は適切でないと述べた。それは林分レベルの森林施業では、伐採によって生じる立木密度の変化が与える直径遷移確率に対する影響を見込まなければならないと考えたからである。これに対して、本章で取り扱っている優良形質木の単木管理の場合、それぞれの林木は遠くはなれて存在するので、他の林木の伐採の影響は受けない。したがって、このような場合には直径遷移確率の値を固定し、森林施業行列の逆行列から終局的な直径分布を導く方法も適切であると考えられる。

そして、進界木本数が一定であるならば、森林施業行列を適用することによって、安定した直径分布に導くことが可能になる。このような状態のもとでは、各直径階への進級量とその直径階における伐採量が等しくなる。そのため全体の成長量と伐採量の値も等しくかつ一定となる。このような状態は人工林における法正状態と同様な状態であるといえる。そこで、このような状態を「法正

的管理状態」と呼ぶことにする。本数管理曲線は優良形質木作業級の林木をこの法正的管理状態に速やかに導くための手段として位置づけることができる。

第6節 東京大学北海道演習林における優良木管理の方法

ここまで考察してきた考え方にに基づき、東京大学北海道演習林における優良広葉樹の単木管理の具体的な進め方について述べる。ここでの蓄積経理方式の考え方の基本は、第1節において述べたとおりであるが、具体的に実行方法を検討する段階において若干の修正を行う必要が生じてくる。第1節では林木を保存木、優良形質木、一般木の3つグループにわけようと考えたが、保存木の管理については具体的な指針が確立していないので、優良形質木とあわせて管理することにする。また、立木の相対価値は資料が十分に整ったとはいえないので、ここでは補助的な指標と位置づけ、伐採許容量の指標としては、銘木の採材対象となる利用材積の成長量を用いることにする。また、作業級の名称を「優良形質木」から「優良木」に簡略化する。

ここでの課題は、天然林内にごくわずかしかな存在しない優良木を対象として、その保続を図ると同時に、天然林全体としての保続を図ることのできる蓄積経理方式を確立することである。そこで、以下のように森林を組織することとする。

1. 事業区全体の林木をその形質に応じて優良木とそれ以外の一般木に区分する。
2. 一般木の作業級に加えて、事業区全体を一つの作業級とする優良木作業級を新たに設定する。
3. 優良木作業級で保続を図ると同時に、一般木の作業級においては優良木も含めて保続を図る。

以上のことから、収穫量の決定過程は次のようになる。まず、優良木作業級において伐採許容量が決まり、それに基づいて伐採されるべき優良木が決定される。一般木作業級では、対象区域内の成長量に基づいて伐採許容量が決まるが、そこから、区域内の優良木の伐採量を差し引いた量が一般木の伐採許容量となる。優良広葉樹の単木管理の進め方のフローチャートを図-4.6.1に示すが、その具体的な内容について以下に述べる。

(1) 優良木作業級の設定

まず、優良広葉樹の有効利用を図るため、択伐施業の優良木作業級を設定する。優良木作業級は演習林全体を一つの作業級とする。ここで回帰年は設けず、個々の林木を単木ごとに管理し、いつでも伐採できる状態におく。

(2) 優良木の選定

次に、形質の優れた樹木で、一定の基準を満たす用材価値の高い丸太の生産が可能なものを優良木として登録する。ここでいう一定の基準とは、例えばミズナラ・ウダイカンバの場合、胸高直径40cm以上、樹幹が通直・正円で枝下高が高く4m以上の丸太が採材可能で、かつ、樹冠が健全で樹皮にねじれや腐れなどの欠点のないものである。現在までのところ、ミズナラ423本、ウダイカンバ631本を始めとして、演習林全体で3753本が優良木として登録されている。

(3) 優良木の測定

優良木は登録の際に、樹高・胸高直径・枝下高・クローネ直径などを測定し、林班ごとに一連番号を付す。さらに、次回の測定や伐採を行う際に対象となる林木に速やかに到達できるよう、縮尺1/5000の森林基本図上に50m間隔のメッシュを設定し、各林木の位置がどのメッシュに所属するかを記録する¹¹⁰⁾。ここで、メッシュの大きさを50m×50mとしたのは、広大な天然林の中で樹高20～30mの優良木を発見するのに必要な許容誤差の最大値を50mと考えたからである。そのため演習林では空中写真を用いて林内に多数の基準点を設け、位置情報の精度を向上させている。こうして登録された優良木は、それが属する一般木作業級内の択伐区の間隔年ごとの森林調査の際に胸高直径を測定しその成長量を査定する。

(4) 伐採許容量の決定

演習林の一般木作業級では、作業級ごとに保続を図っている。すなわち、回帰年に相当する期間の各択伐区の成長量を査定し、その分だけをそれぞれの施業区で伐採することを原則にしている。ここで、優良木作業級では回帰年を設

定していないため、優良木の伐採がその優良木が属する一般木作業級内の択伐区の伐採年と異なる時期に行われることがある。このときの伐採量は、その優良木が属する一般木作業級内の択伐区の伐採年の伐採量に加えることとする。

一方、優良木作業級においては演習林全体を単位として、保続を図ることになる。各優良木の価値成長量は定期的な直径測定から、樹高曲線式と相対幹曲線式を用いて、銘木採材対象部分の利用材積を計算し、前回の測定結果と対比してその間の定期成長量を求めることができる。これを合計すれば各年の伐採許容量を定めることができる。

(5) 優良木候補の選定

さて、優良木については本数管理曲線によって直径分布が管理されることになるが、この直径分布を維持するためには安定した量の進界木の存在が前提となる。この進界成長量が大きく増減することのないように、予め将来優良木になりうる条件を備えた中径木を優良候補木として選定しておくことが必要となる。そのため、優良候補木の段階から登録を行い、定期的な直径測定を行う。そして、この優良候補木の胸高直径が40cmを超えたときに初めて優良木として認められる。

ここで、優良候補木の条件とは、胸高直径26cm以上で、形質が特に優れ、枝下高が高く、周辺の優良木と同一家系と思われるものである。優良候補木は優良木作業級に含まれることになるが、胸高直径が40cmに達するまでの成長量は伐採許容量に加算されない。また、優良候補木は原則として禁伐とし、一般木の施業にあたり、優良候補木の生育を妨げるようなものは積極的に伐採する。

(6) 伐採候補木の選定

伐採許容量が決定された場合、次の問題はどの木から伐採してゆくかという選木の問題である。一本の優良木の成長を見ると、健全な成長を続けている間は、材質の向上もあり、長くおくほど価値は増大するといえる。したがって、選木は病虫害や風害などの被害を受けて樹勢の衰えた木から行ってゆくべきである。そこで、このような優良木を伐採候補木として特に注意深く観察する。演習林ではその基準として枯枝率に着目し、ウダイカンバ・ハリギリで30%以

上、その他の樹種で50%以上のものを「観察木」と称し、森林調査の際に葉の量、枝の枯れ方、樹の肌などの変化を観察し、衰弱の程度を記録している。しかし、ここで観察木とされたものでも、すぐに枯死するのではなくて、枯死に至るまでには、当該森林調査時点から起算して少なくとも所定の回帰年の年数以上はかかり、その間の材質の劣化はないものとする。

(7) 優良木の直径分布の管理

次に、この伐採候補木の中から具体的に伐採木を決める方法を述べる。ここでは、以下に詳しく述べる直径階別本数管理曲線を設定し、この直径分布型の形をくずさないような直径階別の選木を行う。そして、伐採許容量の範囲内で、衰弱の程度の著しい観察木から順次伐採して行くことにする。

次に、演習林における本数管理曲線の計算例について述べる。ここでは、優良木の代表的な樹種であるミズナラを例にあげる。演習林にある106ヶ所の固定試験地の資料から、期首直径が19cm以上のミズナラについての482測定記録を取り出し、各直径階ごとの5年間の定期成長量の平均と分散を表-4.6.1のとおり求めた。そして、各直径階間でその平均と分散の変化が滑らかになるように、3点平均法によるスムージングを繰り返し行い修正した平均と分散をもとに、各直径階における成長量分布にワイブル分布をあてはめた。こうして求めた5年間の成長速度の分布から、各直径階ごとに5年後に元の直径階にとどまる確率、他の直径階に移る確率を求めることができる。ここでは、5年後に元の直径階にとどまる確率を P_0 、2cm上の直径階に移る確率を P_1 、4cm上の直径階に移る確率を P_2 、などとする。9cm以上成長するものが認められなかったので、 $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$ となる。この確率をミズナラの直径遷移確率とし、表-4.6.2のとおり求めた。

次に、森林施業行列 Q の要素を定める。それは各直径階における直径遷移確率から、観察木の発生割合に一定の施業水準をかけて得られる伐採確率を差し引いて決定する。この観察木の発生割合は前にも述べたとおりその直径階を通過するのに要する時間の比となる。これは進界木ベクトル F と直径遷移行列 P から、 $F(I - P)^{-1}$ により計算される伐採しない場合の終局的な直径分布か

ら導かれる。表-4.6.3に進界木を10000本としたときのその値を示す。これに、過去のミズナラの枯損率から設定した進界木10000本当たり323本という施業水準をかけて求めた伐採確率を、成長の悪い順に直径遷移確率から差し引いた残りが、表-4.6.4に示す森林施業行列Qの要素となる。ただし、ここでは40cm未満の直径階には観察木の発生はないものとする。

さて、ここで進界木ベクトルFの要素について考察を加える。この進界木ベクトルは26cmから90cmまでの2cm括約の直径階からなるが、すべての進界木が26cmの直径階にあるとは限らない。例えば、24cmの直径階からいきなり28cmの直径階に進む確率も存在する。いま、初期値として20cm, 22cm, 24cmの3つの直径階に10000本ずつ与え、直径遷移行列Pを1回かけて得られる直径分布は、20cm:1963, 22cm:9074, 24cm:9657, 26cm:8237, 28cm:1062, 30cm:7という値になる。そこで、26cm以上の本数比8237:1062:7が進界木の本数比となる。したがって、進界木本数をfとすると、進界木ベクトルは $(0.8851f, 0.1141f, 0.0008f, 0, 0, \dots, 0)$ となる。

演習林における進界木本数をfとし、森林施業行列Qを定めて終局的な直径分布を求めると図-4.6.2のようになる。この直径分布の形は施業水準によって変化するが、いずれの場合にも単調な右下がりの曲線にはならず、50~60cmの付近にピークをもつ。これは、50cm前後の段階で直径の成長速度が急激に低下しこれらの直径階に多くの林木が溜ってしまうことによるものと考えられる。この図で斜線の部分が伐採の対象となる部分で、その合計が左端の進界木本数に一致する。この例では伐採木本数が全体の4.3%になっている。そして、26cm未満の直径階からの進界木の材積合計と26cm以上の林木の成長量合計の和が伐採量の合計となり、この値は常に一定となる。この例では、伐採材積の合計は全体材積の6.4%となる。このような直径分布が維持されるならば、常に安定した森林の状態を維持することができると同時に、木材の供給の面でも安定した量と質を維持することができる。これは人工林における法正状態に相当する状態と見なすことができる。

一般的に現実の直径分布は、理論的に求められる本数管理曲線のように滑らかな形をしていない。そのため、それぞれの直径階ごとに本数を正確に調整することは困難である。そこで、この問題を解決するために直径分布の累積分布

を考えることにする。森林の状態を累積分布を用いて表現しようとする考えは穂積ら^{15,50)}が提案している。それによれば、ある直径 x より大きな直径をもつ木の総数が累積分布 $F(x)$ となる。こうして考えてゆくと、ある直径 x の木はそれよりも小さい木の代わりになりうることになる。したがって、現実の森林の累積分布が理論的に求められる本数管理曲線の累積分布を下回らないように直径分布を管理して行けば良いことになる。また、この方法によって直径分布の本数管理にある程度の幅をもたせることができ、現実林分への適用がやりやすくなる。さて、演習林内の直径50cm以上のミズナラ優良木の累積分布は図-4.6.3の点線のような形をしている。これに50cm以上の優良木本数が等しくなるよう、図-4.6.2に描いた本数管理曲線の累積分布を重ねると実線のようになる。これを見ると、50cm～64cmの直径階では現実林分が本数管理曲線を上回っているが、66cm～76cmでは下回っている。しかし、その差は10本以内であり、法正的管理状態にかなり近いといえる。ここで直径分布を法正的管理状態に誘導して行くためには、現実林分が本数管理曲線を下回っている直径階からの伐採は極力抑制し、上回っている直径階からの伐採を優先させなければならない。

第7節 考察

これまでの議論の中では、直径遷移行列と進界木本数は一定であることを条件としてきた。確かに個々の林木をとってみれば、立地条件や局所的な環境の差はあるが、長期的な視点にたてば、北海道演習林という一定の広がりを持った区域内に点在する林木の成長は、ほぼ安定した確率事象であると考えることができる。ただし、本数の少ない樹種の場合は成長パターンの類似した樹種を集めて母集団を大きくしておく必要がある。ところが進界木本数は、結実の豊凶の周期の問題や気象害の影響も考慮しなければならないので、自然の遷移に委せたままでは一定な値を維持することは困難であると考えられる。したがって、優良木から種子を採取し後継稚樹を育成するなど、安定した進界木本数を維持できるよう積極的に人為を加えて行かなければならないと考える。

以上、演習林における優良広葉樹施業の具体例について述べたが、最後にこのような取り扱いがどのような条件のもとで可能となるかについて検討を加える。まず、このような多数の林木を単木的に管理するためには、情報量が膨大になるのでコンピュータによる樹木情報の管理が不可欠である。次に、これらの優良木に対していつでもアクセスでき、測定や伐採が実行できなければならない。そのためには個々の林木の位置を正確に、少なくとも50m程度の誤差の範囲内で把握できなければならない。さらに林内にくまなくはりめぐらされた高い密度の道路網が必要となる。現在、演習林の林道密度はha当り約32mである。最後に、これを取り扱う施業担当者の明確な目的意識をもった注意深い観察力が求められる。

ここに述べたような広範囲な森林を単木的に管理する方法について、具体的な検討が加えられた例は今までにはない。このような蓄積経理方式は特殊な方法のように受け取られるかも知れないが、集約的な択伐施業においてはこれが一般的な蓄積経理方式であると筆者は考える。

おわりに

本論文では、択伐林施業における伐採許容量の意思決定過程をシステム化するための基本的な事柄について考察してきた。最後に、このようなシステムを実行に移すにあたっての問題点について考察する。まず、こうしたシステムの持つ画一性を如何に克服するかという点である。こうしたシステムを全世界で普遍的に使われるようにするためには、複雑な森林生態系の長期的な現象をかなり大胆に単純化して進めざるをえないが、この点で、それぞれの森林の特徴を受け止めて、如何に柔軟な構造のモデルを作るかという問題が残されている。また、同じ森林においても時間の経過に伴い、モデルも変化させることができるよう、モデルの仕組みそのものをフィードバックして再構築することのできる体制が必要となる。こうして考えてくると、長期的な予測の目的がどこにあるのかを明確にしなければならないが、予測の目的が、将来のある時点の数量を正しく当てることよりも、いま何をなすべきかを判断するために、適切な情報を与えることにあると考えるならば、このような柔軟な姿勢が必要になる。

次に、こうしたシステムの持つブラックボックス性を如何に排除し、思考過程のわかる構造を作るかという問題がある。我々は電卓を使うようになって暗算の能力を失った。ある条件を与えたら、たちまちにして最終的な結果が表示されるならば、このようなシステムのオペレーターはその過程の状態を推理する能力を失う恐れがある。これでは、本末転倒になってしまう。したがって、できる限りモデルの構造はシンプルで分かりやすくなければならないし、推論の過程がチェックできるようになっていなければならない。そして、その途中の段階にオペレーターの常識では考えられないような状態が発生しているならば、そこで作業を一時停止させてモデルを見直さなければならない。森林の生態に関してはわからないことが数多く残されており、そもそも数学的なモデルでこれらを表現することには限界がある。我々は、数学的なモデルに過大な期待を欠けずに、その限界を十分に自覚して、常に立ち止まり、後ろを振り返りながら、前進しなければならない。そうしないと、誤った方向に森林を誘導する恐れがあると筆者は考える。

最後に、本研究を行うにあたり、長年にわたり積み重ねられた貴重な資料を提供していただいた東京大学北海道演習林の職員の皆様に深く感謝の意を表します。また、終始ご指導、ご助言を賜った東京大学農学部南雲秀次郎教授、箕輪光博助教授、東京大学北海道演習林渡邊定元教授、柴田前前講師、東京農工大学石橋整司助手に厚く御礼申し上げます。