

林畜複合経営のための収穫予測手法の開発

Development of a yield prediction method for composite management of forestry and grazing

松本光朗

Mitsuo MATSUMOTO

目次

はじめに		2.4.1. 収穫予測手法	35
第1章 混牧林施業の概要と課題		2.4.2. 収穫予測の手順	35
1.1. 混牧林施業の概要	21	2.4.3. スギ幼齢混牧林の収穫予測	36
1.1.1. 混牧林施業の特徴	21	2.4.4. スギ壮齢混牧林の収穫予測	37
1.1.2. 混牧林施業の類型	21	2.5. 利活用の展望	37
1.2. 日本国内における混牧林施業とその研究	22		
1.2.1. 混牧林施業の歴史	22	第3章 広葉樹林における混牧林施業のための収穫予測手法	
1.2.2. 混牧林施業の現状	22	3.1. クヌギ混牧林のための収穫予測手法の開発	38
1.2.3. 混牧林施業に関する研究	23	3.1.1. 資料と方法	39
1.3. 海外における混牧林施業とその研究	23	3.1.2. クヌギ混牧林施業の概要	39
1.3.1. アメリカ	23	3.1.3. 立木密度の減少	39
1.3.2. ニュージーランド	23	3.1.4. 樹高成長と直径成長	40
1.3.3. 発展途上国	23	3.1.5. 放牧強度と植生	40
1.4. 混牧林施業のための収穫予測手法の開発	24	3.1.6. 林木への被害	41
		3.1.7. 立木密度と放牧強度	42
第2章 針葉樹人工林における混牧林施業のための収穫予測手法		3.1.8. 収穫予想表の作成	43
2.1. 混牧林施業のシステム	24	3.1.9. クヌギ混牧林施業体系	43
2.1.1. 全体システム	24	3.1.10. 利活用の展望	43
2.1.2. 林と草の関係	24	3.2. 国内の広葉樹資源分布と混牧林施業のポテンシャル	43
2.1.3. 林と畜の関係	24	3.2.1. 広葉樹資源分布の推定	45
2.1.4. 畜と草の関係	25	3.2.1.1. 資料と方法	45
2.1.5. 管理	25	3.2.1.2. 資源量推定の手順	45
2.2. 野草放牧地における混牧林牧養力の推定	25	3.2.1.3. 広葉樹資源量の分布	45
2.2.1. 資料	25	3.2.1.4. 広葉樹優占樹種分布	45
2.2.2. 林分密度と牧養力	25	3.2.1.5. 樹種別分布	48
2.2.3. 放牧強度と林木被害	28	3.2.2. クヌギ混牧林施業のポテンシャル	48
2.2.4. 混牧林牧養力の推定	28	3.2.3. コナラ混牧林施業のポテンシャル	48
2.3. 牧草放牧地における混牧林牧養力の推定	29		
2.3.1. 資料と方法	30	おわりに	50
2.3.2. 林分密度と牧養力	30	謝辞	50
2.3.3. 施肥による樹高成長の促進	32	引用文献	50
2.3.4. 牧草型混牧林における混牧林牧養力の推定	33	摘要	51
2.4. 混牧林施業のための収穫予測手法	35	Summary	53

はじめに

本論文は林畜複合経営である混牧林施業の技術的側面に關して、そのシステムの分析と数理的なモデル化を通し、混牧林施業における収穫予測手法を開発することを目的としている。

林業は、行政的あるいは技術的な視点から見ると、農業や畜産業とは別個の経営として捉えられる。しかしながら、現実の農山村においては林業が専業となっている場合は少なく、農作物の生産や畜産業などと並行して複合的に経営されていることがほとんどである。本論文で取り扱う混牧林施業はこのような複合経営の一形態であるが、単に複数種の経営が並行して組み合わせられているというのではなく、同一地において同時に林業と畜産業を実施する立体的な複合経営形態と言える。

歴史的に見ると、混牧林施業は江戸期まで天然林での放牧など自然発生的に行われていた。明治期の地租改正や森林法成立により林業と畜産が分離されたが、馬産限定地における混牧林利用、第二次世界大戦後の拡大造林にともなった幼齡人工林における放牧、シイタケ原木生産を目的としたクヌギ混牧林といったように、混牧林施業は時代によりその形を変えながら行われてきた。

混牧林施業においては利用形態が確立した施業は多くはないが、その中で幼齡人工林の混牧林利用は放牧地の確保や下刈りの代用効果を目的にしたものであり、その利用形態は比較的確立しているといつてよい。また、広葉樹林を対象にしながらも、その取り扱いが人工林に類似したクヌギ混牧林についても確立した利用形態と考えられる。しかしながら、混牧林は林・畜・草といった複数の構成要素から成立しているため、一般的な林業と比較してシステムは複雑となり、上記のような利用形態が確立した混牧林施業においても収穫予測手法は確立されてはいない。

このようなことを背景に、筆者は混牧林施業を林・畜・草からなるシステムと位置づけ、数理モデルによってこれら三者を関連づけた収穫予測手法を開発した。本論文はその収穫予測手法について論じたものであり、第1章ではこれまでの混牧林研究の概要と問題を提示し、第2章では針葉樹人工林における混牧林施業を対象に、第3章では広葉樹天然林における混牧林施業を対象に議論するという形態を取っている。

第1章 混牧林施業の概要と課題

1.1. 混牧林施業の概要

混牧林とは木材生産と家畜の放牧とをあわせて行う森林のことであり、森林の複合的利用形態の一つである(岩波1989)。幼齡林や密度の低い林分では下草の発達が豊かであり、これを放牧に供することにより、林業を行うと同時に草資源を有効的に利用することができる。なお、一般的に森林に放牧を行うことを林内放牧あるいは林間放牧と呼ん

でいる。

ところで、混牧林施業は複合的農業経営の一形態であり、アグロフォレストリーの一形態でもある。Nair (1993) は ICRAF (International Council for Research in Agroforestry) の定義を引用し、アグロフォレストリーを、空間的配置、あるいは時間的継起関係において同じ経営単位の土地で、木本の永年作物(樹木、灌木、パーム類、タケ類)を農作物や他地区と意図的に組み合わせる土地利用のシステムと技術の総称とし、アグロフォレストリーシステムを agrisilvicultural system, silvopastoral system, agrosilvopastoral system といった3つの主要な型に分類した。その中で混牧林施業は家畜の放牧と樹木を組み合わせた agrosilvopastoral system に含まれる。

1.1.1. 混牧林施業の特徴

混牧林施業は林業と畜産を同じ土地で同時に行う点が最も大きな特徴であり、これを基礎として以下のような経営的・施業的特徴を持つ。

- (1) 収穫までに長時間を必要とする林業と、毎年収入を得られる畜産の繁殖経営を組み合わせることにより、相互補完的な経営が可能となる。
- (2) 混牧林施業では野草利用が主体であり、いわば面積で牧養力をかせぐ粗放的な放牧が行われるが、その粗放性を利用することにより省力的な経営が可能となる。
- (3) 大規模な草地開発は経費的にも環境保全上からも問題が多いが、混牧林では林野を自然状態のまま利用することから、低コストで保全的な山地畜産経営が期待できる。
- (4) 幼齡人工林においては下刈り作業が大きな負担となるが、放牧により下草が採食されるので下刈りの省力効果をもたらす、その省力率は80%に達する。また、放牧中は常に林床が整理されるため林内作業を行いやすい。
- (5) 放牧管理としては1～数日に1度の看視ですみ、作業的にも林業作業とあわせて行うことができる。
- (6) 広葉樹林における放牧は天然下種更新を促進させる効果がある。

ところで、林内放牧については一般の林業家は批判的であり、放牧による被害により森林が荒廃することを恐れている。また、熱帯地方では林木の伐採後の放牧が、林分の更新を妨げ、荒廃をもたらしていることが報告されている(小林1992)。しかしながら、そのような被害は放牧自体が原因ではなく、むしろ過放牧に至る無秩序な放牧管理が原因といつてよい。混牧林施業は林畜のバランスを考慮しながら実施することが基本となる。

1.1.2. 混牧林施業の類型

岩波(1994a)の報告を参考にして、混牧林施業をそれらの特徴から分類した(表1.1)。ここに示したように、混牧

林施業は人工林を対象とした幼齡林型と長伐期林型、天然林を対象としたシイタケ原木林型、チップ林型、牧野林型といった5つのタイプに分類することができる。以下、その概要を紹介する。

- (1) 人工林幼齡林型はスギ・ヒノキを主体とした幼齡人工林を対象とし、豊富な下草を放牧に利用する。樹冠が閉鎖するまでの十数年を放牧利用するのが一般的であり、放牧に下刈り省力効果を期待したものである。
- (2) 人工林長伐期林型は壮・高齢林を対象とし、低い立木密度を維持しながら林内放牧を行うというもので、長期間安定した放牧利用が期待できる。近年、人工林の長伐期化傾向が見られる中、スギ、ヒノキ、カラマツを対象とした長伐期混牧林の事例がみられる。
- (3) シイタケ原木林型はシイタケ原木の生産を目的としたクヌギ・コナラ林で行われる。シイタケ原木林はもともと十数年程度の短伐期であり、林畜ともに短いサイクルで収穫を得ることができるという特徴を持つ。この形態は主に九州阿蘇・九重地方及びその周辺のクヌギ林を対象に行われている。
- (4) チップ林型はパルプ用材の生産を目的としたもので、天然更新を活用し、除間伐などの保育を頻繁に行うことはない。つまり、混牧林の粗放性を活用したより省力的な経営形態といえる。
- (5) 牧野林型は牧野林として活用しながら80~150年の長い歳月をかけて有用大径林に誘導するものである。

1.2. 日本国内における混牧林施業とその研究

1.2.1. 混牧林施業の歴史

日本の混牧林施業の歴史を、井上(1977)および岩波(1989)の記述を参考にしながら要約する。

日本の牧畜の歴史は701年の大宝律令に始るが、その頃にはすでに牛馬の放牧地である「牧(まき)」が諸国に広く設けられていた。江戸期においては幕府が直轄の牧を設けていたのと並行し、諸藩も独自に牧を設けていた。このよ

うに官として牧畜振興が進められた一方、一般の農民は山野を放牧地として使用していた。

明治維新直後の地租改正条例によって林野の官有と民有の区別が行われた。さらに1897年に森林法が制定され、他人の森林には放牧をしてはならないと定められたため、官有地に組み込まれた土地から牛馬が締め出されることとなった。その後、軍馬の生産の必要性が高まり、農商務省と陸軍の間で「国有林野馬産限定地」が発足した。これは国有林内で軍馬生産のために林野を共用するもので、第二次世界大戦まで利用された。

第二次世界大戦後、軍馬の需要がなくなるとともに馬の生産は役牛の生産に替わったが、後に農業の機械化が進むとともに役牛の需要が減り、その一方で食生活の変化から家畜は役牛から肉用牛へ移った。拡大造林が盛んになってからは、それまで放牧利用がなされていた林野も拡大造林の対象となったものの、牛馬の放牧地は必要不可欠であったため、造林後も同地で放牧利用が行われ、結果的に混牧林となった事例も多い。また、人工林では幼齡時の下刈りが大きな負担となっていたため、その代用効果を狙った放牧も行われるようになった。

拡大造林が一段落してからは大面積一斉皆伐が行われなくなったことから、幼齡林を対象とした放牧は減少した。その後、小規模ながら混牧林の多様化が進み、壮齡・高齢林を対象とした混牧林や、クヌギなど広葉樹を対象とした混牧林が見られるようになり現在に至っている。

1.2.2. 混牧林施業の現状

現在、実施されている混牧林施業の事例は少ない。1936年頃には172万haを記録した牧野面積は1990年には17万haに、そのうち森林面積は6万4千haとなった(岩波1994a)。この原因としては、行政的にも技術的にも林業と畜産業の両者を取り扱う必要のある混牧林施業そのものの難しさも考えられるが、むしろ農業の機械化により役牛馬が不要になったことや、放牧を主体とした畜産業の低迷、および林業の低迷といった社会的な変化が影響しているこ

表 1.1 混牧林施業のタイプ
混牧林施業の基本類型(岩波 1994a)を改訂

区分	人工林		天然林		
	幼齡林型	長伐期林型	シイタケ原木林型	チップ林型	牧野林型
生産材の種類	構造材	構造材, 造作材	シイタケ原木	パルプ用材	各種用材
樹種	スギ, ヒノキ等	スギ, ヒノキ等	クヌギ, コナラ	カンバ等広葉樹	ミズナラ, ブナ等
更新様式	植栽	植栽	萌芽更新	天然下種更新, (萌芽更新)	天然下種更新
植栽密度	普通	普通~疎植	—	—	—
保育方法	枝打ち, 除間伐	枝打ち, 除間伐	除間伐, (枝打ち)	放置	放置, 間伐
伐期齡(年)	40	60~100	10~20	10~40	80~150
林床植生	野草	野草	野草(牧草)	野草	野草
主な放牧可能林齡	10数年生まで	全期間	全期間	全期間	30年生以降
林地利用の規模	小規模	小規模	小中規模	中規模	大規模
主な林地所有形態	私有林	私有林	私有林, 公有林	公有林, 国有林	国有林, 公有林
主な放牧利用者	個人	個人	個人, 共同	共同	共同

とが大きい。

このような中でも新しい形の混牧林施業が生まれている。高知県嶺北地域ではヒノキ高齢林を対象とした混牧林施業が見られ(岩波 1994a), 北海道釧路地方においてはカラマツ・トドマツ林を対象とした施業が見られる(岩波 1994b, c)。また, 九州・阿蘇九重地方においてはクヌギ林を対象に混牧林施業が行われ, 長野県カヤノ平国国有林ではブナ林での放牧が長期間実施されている(岩波 1994a)。これらの事例から見ても混牧林施業は技術的に十分に成立可能な経営であると言える。

1.2.3. 混牧林施業に関する研究

日本の混牧林施業の研究は大迫(1934)の庇陰と草生産の研究から始まり, その研究において疎密度0.3において草生産が最大となることなどを明らかにした。

井上由扶は混牧林施業に関する研究を戦前より行い, 混牧択伐林に関する大まかな施業案を提示した(井上 1941)。その後も広葉樹林を対象とした研究を続けたが(井上 1951, 1952, 1953, 1955, 1957a, b; 井上ら 1958, 1969), 本論文で取り扱うような施業体系の作成などの一般化には至らなかった。

井上揚一郎を中心とする林業試験場(現森林総合研究所)のグループは, 混牧林施業の事例報告を数多く行いながら, スギ・ヒノキの幼齢林を対象とした放牧利用に関して林木への被害を類型化した(経営部経営第二科営農林牧野研究室・東北支場経営部経営第三研究室 1968; 井上 1977)。

林野庁は全国に牧場を設置して1967~78年の12年間にわたり混牧林施業の事業実験を行った(林野庁業務課 1979)。この実験の結果は芳しいものではなかったが, その原因は混牧林施業自体よりも, むしろ実験計画とその実行に問題があったのではないかと考えられる。

岩波は林業試験場高萩試験地での針葉樹幼齢混牧林の研究(林試高萩試験地 1982)を行い, 筆者と共に混牧林利用の指標として林分密度管理図の利用を進めた(岩波ら 1986a, b, c)。また, 高齢林や広葉樹林における混牧林利用など, 新しい形態の混牧林に関して積極的に報告している(岩波 1986, 1990, 1994a, b, c)。

以上のように様々な研究が長期間なされてきたが, その多くが事例調査や試験報告にとどまっていた。このような背景から, 本論文では事例研究にとどまらず, 施業研究として収穫量の調整や施業体系の提案を目標とし, それらのためのモデル化など一般化を指向するものとした。

1.3. 海外における混牧林施業とその研究

1.3.1. アメリカ

William (1985)によれば, アメリカの国有林における放牧利用は歴史的に森林局がリーダーとなって行政, 研究が行われてきた。1900年以前は国有林では無制限に放牧利用がなされていたが, 過放牧など問題が多発したため, 森林局が利用基準を作り利用料を徴収することとなった。1970

年以降は森林の多目的利用の一つとして位置づけられて管理・利用されている。

Leiningr, Sharrowらは, Hedrick and Keniston(1966)の研究を基礎とし, オレゴン州など太平洋岸北東部においてダグラスファー林などの針葉樹人工林の幼齢林を対象に羊の放牧の試験を行い, 放牧が林分の更新を妨げることは無く, 雑草の制御に有効であることを報告した(Sharrow *et al.* 1989, 1992; Leiningr and Sharrow 1987)。また, 牛や鹿による放牧でも同様な結果が得られている(Kosco and Bartolome 1983)。

アメリカ南部地方においては, Pearson *et al.* (1971)によってロングリーフスラッシュパイン林での放牧が研究された。Grelen (1978)はアメリカ南部の混牧林についてのレビューを行い, 混牧林の将来として土地所有者による多目的利用の視点が必要であるとしている。

以上のように, アメリカにおいては森林を対象とした放牧や混牧林施業が歴史的に古くから行われており, その技術的な可能性はすでに示されている。特に最近では, 更新を成功させるのため道具として放牧を見ており, 下刈りの代用, あるいは環境的な配慮からの除草剤の代用を期待していることが特徴としてあげられる(Doescher *et al.* 1987)。しかしながら, 実際に経営を行うにあたっては, 上記のような研究だけではなく収穫予測という観点からの研究が不可欠であり, これを行う必要がある。

1.3.2. ニュージーランド

ニュージーランドの林業に関してはラジアータパインの人工造林が有名であるが, そのラジアータパイン林を対象とした混牧林利用が盛んに行われている。Knowles (1991)はニュージーランドのラジアータパイン人工林における20年にわたる放牧利用の実態を報告しており, 林木成長の促進, 保育コストの低減, 林木と家畜を合わせた生産による収入の増加などの利点があったとしている。また, 施業計画として欠点を抑えるための枝打ちや, 収穫時に150~250本/haになるような間伐計画を示している。

このように, ニュージーランドにおけるラジアータパイン林を対象とした混牧林施業は, 具体的かつ現実的な収穫予測および施業計画が提示されており, 混牧林施業としては世界的にも希有な先進的な事例である。本論文としては方法論を異にしながらも収穫予測を目標とする点は共通しており, 参考すべき事例と考える。

1.3.3. 発展途上国

Nair (1993)はアグロフォレストリーの一形態であるagrosilvopastoral system(樹木と放牧の組み合わせ)の事例として, 東南アジア及び太平洋におけるココナツプランテーションでの放牧, マレーシアにおけるゴム林での放牧, ケニアにおけるカシューナツ林での放牧, アマゾン地域における伝統的な放牧, フィジーやコスタリカにおけるカリビアマツ植林地での放牧などを紹介している。しか

しながら、これらの agrosilvopastoral system の研究はまだ途上であり、改善の余地が多いとしている。

このように、発展途上国の混牧林研究は事例報告が主であり、次の段階として収穫予測にかかわる研究が望まれる。

1.4. 混牧林施業のための収穫予測手法の開発

詳細は次章に示すが、混牧林施業は複数の要素の相互関係を利用し、バランスを保ちながら成立するものである。したがって、伝統的な林分収穫表のような固定された密度管理計画ではなく、幅広い密度管理計画に対応可能な収穫予測手法が求められ、さらには林の予測のみならず、同時に畜としての収穫予測が可能な手法が望まれる。そのためには、動的モデルを背景とした収穫予測手法が必須であり、要素間の関係について表現した複数の個別モデルからなるシステムモデルの形を取ることが適切である。

このようなことから、本研究では複数の個別モデルからなる動的モデルを開発し、これを基礎として林畜を含めた収穫予測手法を開発することとした。

ここで、モデルの開発や収穫予測の対象となる混牧林施業は、施業方式として確立している必要がある。このことから、日本における混牧林施業の代表的な形態である針葉樹人工林を対象とした混牧林施業と、クヌギ林を対象とした混牧林施業を取り上げ、これらの収穫予測手法を検討することとした。

第2章 針葉樹人工林における混牧林施業のための収穫予測手法

放牧を行う上で管理者がまず把握すべきことは放牧地の牧養力であり、これを基礎にして放牧管理が実施される。しかしながら、混牧林施業においては草量だけに注目するのではなく、林木への被害も考慮して放牧管理を行う必要がある。この視点から、草地の草生産量に計算の基礎をおく「牧養力」に対し、林木を含めた放牧地を荒廃させずに飼養できる最大家畜頭数という意味で「混牧林牧養力」という概念を提案し、これに注目しながら混牧林施業のための収穫予測手法を検討した。

2.1. 混牧林施業のシステム

混牧林施業は林分、家畜、草地といった複数の構成要素からなっており、モデル化のためにはこれらの関係を適切に把握する必要がある。収穫予測手法の検討の準備として、ここでシステムとしての混牧林施業を分析することとする。

2.1.1. 全体システム

混牧林は林木・林分、家畜、草・草地の3つの主要素からなり、これらの要素を適正にバランス良く管理・制御することにより全体としての施業が成立する(図2.1)。これらの3要素はそれぞれ相互作用をもたらす。以下、簡潔に

表現するため、これらの要素をそれぞれ林、畜、草と称することとし、それぞれの関係を調べる。

2.1.2. 林と草の関係

林と草の関係は混牧林において最も重要な関係である。立木密度や林分成長は林内の光環境に大きく影響を与える。林木が成長し、樹冠が閉鎖していくに従い林内照度が低くなり、林床植生の生産量の低下をもたらす。さらに、草生産量の低下は、最終的に牧養力の低下を意味する。混牧林施業の収穫予測手法を確立するためには、まずこのような林と草の関係を的確に把握し、これを表現するモデルを構築する必要がある。

このような林から草への影響とは逆に、草から林への影響も見られる。植栽直後は苗が小さく、同時に野草など草量が非常に豊富なことから、林木が草に被圧される。このような場合、一般には下刈りにより被圧を排除するが、混牧林では家畜が草を採食するため草による被圧は少なく、下刈り作業は省力化される。

2.1.3. 林と畜の関係

幼齢時、家畜が移動することにより幹や枝の折れや剥皮、また家畜による葉の採食といった林木への被害が発生することがあり、これが多発すると成林にさえ達しないことがある。幹や枝の折れは家畜の体軀が林木に接触することにより発生するものであるが、幹折れは枯死に達する場合が多いものの、枝折れはそれほど大きな被害をもたらさない。また、剥皮は家畜の蹄により林木の根元の樹皮を剥がすものであり、これにより被害木は枯死に達する場合が多い。これらのような被害の発生は放牧強度と深い関係があり、放牧強度が高いほど接触機会が増加し、その結果被害の発生率は高くなる。なお、採食害は単に放牧強度のみではなく、樹種による嗜好性の高低によっても左右される。

一方、家畜にとっては林分は庇陰の場を提供するものである。林分の庇陰機能は家畜にとって重要であり、風雨や寒暑を防ぐ効果がある。

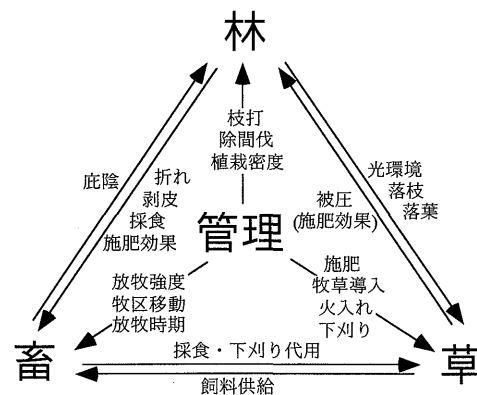


図2.1 混牧林施業システム

2.1.4. 畜と草の関係

家畜は草を採食し、その飼育頭数は草量に依存する。草を主体としてみれば、草は家畜に飼料を供給しているとも捉えることができる。

草量に見合った以上の放牧強度を与えることを過放牧と呼ぶ。過放牧は一時的には飼育頭数を増やすことができるが、草の回復が遅れ、結果的に安定した草量を生産できなくなる。極端な過放牧は裸地化をもたらし、林地荒廃の引き金となる。したがって、草生産に応じた放牧強度で管理することが必要となる。

2.1.5. 管理

混牧林施業における管理とは、上記の林・畜・草の間の関係をふまえ、これら3要素のバランスを取りながら経営を進めることを意味する。

林の管理には植栽密度や密度管理となる除間伐、枝打ちがあげられる。これらは林分の密度効果の制御を通して特に林木の直径成長を制御するものであるが、同時に林内照度の制御を通して草生産を制御するものである。

畜の管理としては、草の状態と同時に林木への影響を監視しながら、放牧強度や放牧時期、牧区の輪換などの判断・管理を行うことがあげられる。これらの放牧管理は放牧強度を制御し、それを通して林木被害の制御へつながる。

草の管理としては、利用率やその状態の監視、下刈り、火入れなどがあげられる。また、牧養力の改善を目的とした牧草の導入と、それに伴う施肥も草の管理に含まれる。

2.2. 野草放牧地における混牧林牧養力の推定

混牧林内の草量は、林木の成長や保育作業による光環境の変化にともなって大きく変化する。一方、草量だけに注目して放牧強度を高めると多数の枯死木が生じる恐れがある。したがって、健全な混牧林経営を行うためには、林木の成長と林内草量の両者を考慮した適正な放牧を行う必要がある。ここでは、そのような放牧強度を「混牧林牧養力」と名付け、林・畜・草からなる混牧林の構成因子のうち、特に林分密度と牧養力、放牧強度と林木被害の二つの関係に注目し、その推定方法を検討した。

これまでの林分密度と牧養力に関わる研究では、大迫(1934)、井上ら(1969)による疎密度と林内草量の研究、経営部経営第二科営農林牧野研究室他(1968)、林試高萩試験地(1982)、林野庁業務課(1979)、笹村ら(1982)などの針葉樹人工林を対象とした林齢と牧養力の研究がある。これらの報告では疎密度と牧養力、あるいは林齢と牧養力の関係に注目したが、林木の成長や除間伐による林分密度の変動に対応しては牧養力の推定は示されていなかった。また、放牧強度と家畜による林木被害に関わる研究では、井上(1977)、林試高萩試験地(1982)、林野庁業務課(1979)の報告などがある。しかしながら、これらの報告では被害の質的な把握が中心であり、放牧強度と林木被害の量的な把握には及んではなかった。

本研究では混牧林における林分密度と牧養力の動的な関係および放牧強度と林木被害の量的な関係から、混牧林牧養力の推定方法を確立することを目的としている。

2.2.1. 資料

資料には、林業試験場(現森林総合研究所)高萩試験地の針葉樹幼齢林における放牧試験(林試高萩試験地1982)と、小川(1985)のカラマツ間伐林における放牧試験で得られた成果を利用した。その概要は以下の通りである。

高萩試験地は茨城県北部の十王町に位置する。スギ、ヒノキ、アカマツの植栽地におおの0.33haの禁牧区、野草区、牧草区が設けられ、黒毛和種牛が放牧された。本論文ではこれらの資料のうち植生が安定した5年生以降のスギ混牧林のデータを利用した。このスギ混牧林は当初3000本/haの本数密度で植栽され、10年生時の本数密度は野草区で2400本/ha、牧草区で2000本/haであった。

カラマツ間伐林における放牧試験は、岩手県岩手山麓の平笠試験地において行われた。すでにうっ閉していたカラマツ林(2000本/ha)が16年生時に700、1000、1300本/haと3段階の密度に間伐された。それぞれの密度で0.47haの野草区と牧草区が設けられ、19年生時から6年間にわたり黒毛和種牛が放牧された。本論文では放牧条件が年2回と定まった20年生以降5年間のデータを利用した。以下、高萩試験地および平笠試験地については、これらを高萩、平笠と表記する。

ここで、牧養力とは草地を荒廃させずに単位期間、単位面積当りに飼養しうる最大の家畜頭数で、その土地が草を生産する能力を表す。また、放牧強度とは草地に対する放牧の強さを表す(松本1998)。本報告では牧養力、放牧強度の単位はともにカウデイ(CD/ha)を用いた。これは体重500kgの牛を基準としてha当りの延べ頭数を日単位で表したものである。また、特に断らない場合は1年単位のカウデイを表すものとする。

2.2.2. 林分密度と牧養力

林木の成長にしたがって樹冠は閉鎖し、林内は暗くなっていく。さらに、林内植生は減少し、牧養力も減少していく。牧養力の推定を行うためには、このような動的な林・畜・草の関係を的確に把握する必要がある。

安藤(1983a, b)は林分密度管理図における収量比数 R_y (以下 R_y)と林内相対照度の相関が高いこと示した。 R_y とは最多密度曲線上の幹材積に対する材積比率であり、最多密度曲線からのへだたりを示す相対的な密度の尺度である(安藤1968, 1982)。このことに注目し、林分密度と牧養力の関係を把握するにあたって、 R_y を林分密度を表す指標として取り上げることとし、 R_y と牧養力の関係を調べた。

林分密度管理図は吉良を中心とする植物生態学のグループが明らかにした密度効果の法則を応用したものであり、収量密度効果の逆数式を利用した(2.1)式を基礎としている。以下の数式の記述は安藤(1982)に依っている。

$$1/V = A + B/N \quad (2.1)$$

ここで、 V ：幹材積 (m^3/ha)、 N ：本数密度 (本/ha)。

A, B は本来時間の関数であるが、密度の影響の少ない上層木樹高で表すことができるとして(2.2)式と(2.3)式が導かれた。

$$A = aH^{-b} \quad (2.2)$$

$$B = a'H^{-b'} \quad (2.3)$$

ここで、 H ：上層木樹高 (m)、 a, a', b, b' ：パラメータ。

したがって、(2.1)式は(2.4)式のように書き直すことができる。

$$V = (aH^{-b} + a'H^{-b'}/N)^{-1} \quad (2.4)$$

ここで、 V ：幹材積 (m^3/ha)、 N ：本数密度 (本/ha)、 H ：上層木樹高 (m)、 a, a', b, b' ：パラメータ。

さて、林分密度管理図の収量比数 Ry は等平均樹高線上から得られる最多幹材積と、同一等平均樹高線上のある密度における幹材積の比として次のように定義される。

$$RY = V/VRf \quad (2.5)$$

$$VRf = (aH^{-b} + a'H^{-b'}/NRf)^{-1} \quad (2.6)$$

$$NRf = a''H^{-b''} \quad (2.7)$$

ここで、 RY ：収量比数 Ry ($0 \leq RY \leq 1$)、 V ：幹材積 (m^3/ha)、 VRf ：最多幹材積 (m^3/ha)、 H ：上層木樹高 (m)、 N ：本数密度 (本/ha)、 NRf ：最多密度 (本/ha)、 a, b, a', b', a'', b'' ：パラメータ。

したがって(2.4)~(2.7)式を用いて Ry は本数密度と上層木樹高の関数として次のように導かれる。

$$RY = \frac{aH^{-b} + a'H^{-b'}/a''H^{-b''}}{aH^{-b} + a'H^{-b'}/N} \quad (2.8)$$

ここで、 RY ：収量比数 Ry ($0 \leq RY \leq 1$)、 a, b, a', b', a'', b'' ：パラメータ。

出版されている林分密度管理図には、作図するにあたって用いられた関係式が示されており、(2.8)式に含まれる係数 a, b, a', b', a'', b'' を求めることができる。混牧林では一般の施業と比較して Ry の低い林分を対象としており、被圧木は余り発生しないと考えられる。そのためここでは混牧林における上層木樹高は平均樹高と等しいと仮定し、林分密度管理図 (林野庁 1981, 1982) の係数から(2.8)式により Ry を算出した。また、牧養力は放牧実績から算出した。

その結果、 Ry と牧養力の関係は、図 2.2、図 2.3 に示したように、高萩、平笠ともに高い相関を示し、 Ry による牧養力の推定式 (2.9)~(2.13) を得た。これを「 Ry -牧養力モデル」と名付ける。

$$\text{基本式} \quad GC = c + d RY \quad (2.9)$$

$$\text{高萩 スギ野草区} \quad GC = 170.0 - 169.5 RY \quad (2.10)$$

$$R = 0.87$$

$$\text{高萩 スギ牧草区} \quad GC = 469.8 - 595.5 RY \quad (2.11)$$

$$R = 0.91$$

$$\text{平笠 カラマツ野草区} \quad GC = 118.3 - 124.6 RY \quad (2.12)$$

$$R = 0.88$$

$$\text{平笠 カラマツ牧草区} \quad GC = 467.0 - 636.8 RY \quad (2.13)$$

$$R = 0.98$$

ここで、 GC ：牧養力 (CD/ha)、 RY ：収量比数 Ry ($0 \leq RY \leq 1$)、 c, d ：パラメータ、 R ：相関係数。

これらのうち、 Ry の増大に対する牧養力の低下は、牧草区において急激であった。これは、牧草はもともと無立木地の高い照度に適応しているため、林内が暗くなるにしたがい生産量は急激に低下したものと考えられる。また、野草区と牧草区の回帰式は高萩、平笠ともに Ry 0.7 付近で交わっていることから、 Ry 0.7 以上では牧草導入の効果がなくなったことがわかる。実際の高萩、平笠の試験における放牧終了時の Ry は、高萩の野草区で 0.50、牧草区で 0.61~0.63、平笠の野草区で 0.41~0.65、牧草区では 0.43~0.67 であった。また、高萩の試験では、牧草区においては 9 年生以降は牧草の収量が急激に低下したので施肥を行わなかったと報告されており (林試高萩試験地 1982)、その時の Ry は 0.55~0.59 であった。これらの事例から判断すると、実務上は Ry 0.5 付近が放牧の限界であり、林内放牧は Ry 0.5 以下が好ましいと考えられる。

大迫 (1934) は林内草量の無立木地に対する草量比は、上木の疎密度が 0.3 内外で最大になると報告した。この疎密度 0.3 の林況を密度管理図に当てはめるとおおよそ Ry 0.2 に相当する。しかし、 Ry 0.2 以下の林況とは植栽後わずかの期間か、極端な強度間伐をおこなった場合などに限られる。そこで、本報告において Ry から牧養力を推定するモデルを考える場合、0.2 以下の場合はすべて $Ry = 0.2$

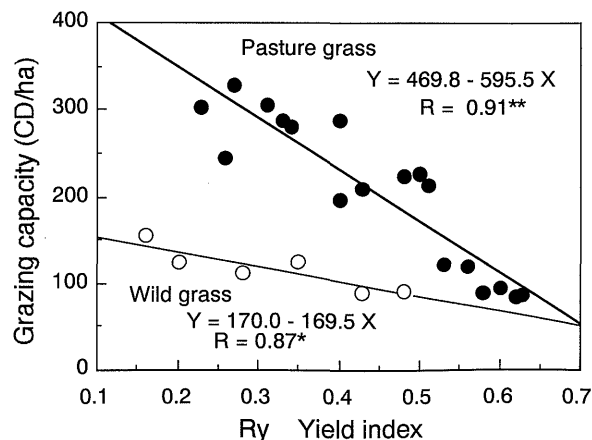


図 2.2 スギ幼齢林における Ry と牧養力の関係 (高萩)

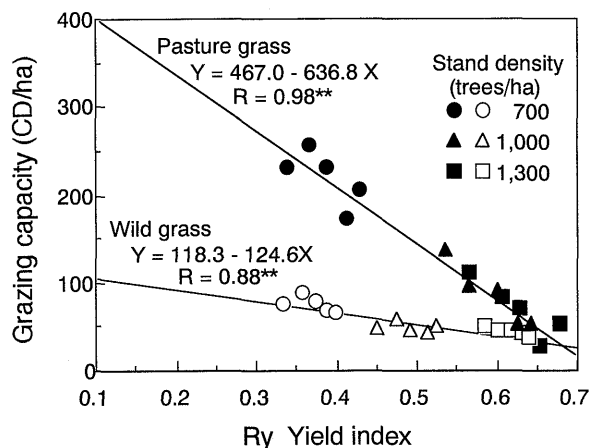


図 2.3 カラマツ間伐林における Ry と牧養力の関係 (平笠)

と見なすこととする。

多くの場合、混牧林における林況は一般の林分密度管理図上の範囲外であり、そのような Ry を推定することは外挿にあたる。しかし、以上のように異なる林分、林況において Ry と牧養力の同様な結果が得られたことから、混牧林における牧養力の推定に外挿した Ry を利用しても良いと判断した。

ところで、牧養力は牧区面積に影響を受ける。一般に牧区面積が大きくなるにつれ単位面積当りの牧養力は低下することが知られている。これは大面積になるにつれて同一牧区の中でも低利用箇所や未利用箇所が多くなり、牧区全体にわたる均一な草利用が難しくなるためである。岩波ら(1986c)はこれまでに行われた試験や報告から、東北地方の混牧林における牧区面積の大きさと単位面積当りの牧養力の関係を報告した。その内容を図化すると、図 2.4 のように牧区面積の常用対数を取った片対数目盛りのグラフ上で線形関係を示し、(2.14)式を得た。

$$GC = 50.7 - 11.7 \log S \quad (2.14)$$

ここで、GC：牧養力 (CD/ha)，S：牧区面積 (ha)。

前述の(2.9)～(2.13)式は試験の牧区面積に規制されているので、牧区面積を一般化するための補正項は(2.14)を利用して次のとおりとなる。

$$AC = (e + f \cdot \log S) / (e + f \cdot \log S') \quad (2.15)$$

ここで、AC：牧区面積による補正値，S：推定したい牧区面積，S'：基準となる試験地の牧区面積，e，f：パラメータ。

したがって、任意の Ry，牧区面積に対する牧養力は、(2.9)，(2.15)式の積から次のように求められる。

$$GC = (c + d \cdot RY) \cdot AC \quad (2.16)$$

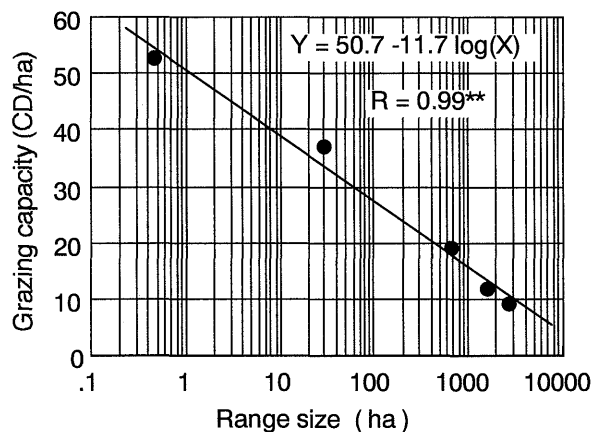


図 2.4 牧区面積と牧養力の関係

ここで、GC：牧養力 (CD/ha)，RY：収量比数 Ry (0 ≤ RY ≤ 1)，AC：牧区面積による補正値。

この式は林分密度の指標である Ry と牧区面積から牧養力を推定するものであり、これを「Ry・S—牧養力モデル」と名付ける。

高萩および平笠の野草区について、(2.15)，(2.16)式を求めると次のようになる。

牧区面積による補正値

$$\begin{aligned} \text{高萩 } AC &= (50.7 - 11.7 \log S) / (50.7 - 11.7 \log 0.33) \\ &= 0.900 - 0.208 \log S \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \text{平笠 } AC &= (50.7 - 11.7 \log S) / (50.7 - 11.7 \log 0.47) \\ &= 0.930 - 0.215 \log S \end{aligned} \quad (2.18)$$

Ry・S—牧養力モデル

高萩 スギ野草型

$$GC = (170.0 - 169.5 RY) \cdot (0.900 - 0.208 \log S) \quad (2.19)$$

平笠 カラマツ野草型

$$GC = (118.3 - 124.6 RY) \cdot (0.930 - 0.215 \log S) \quad (2.20)$$

ここで、AC：牧区面積による補正値，GC：牧養力 (CD/ha)，S：牧区面積 (ha)，RY：収量比数 Ry (0 ≤ RY ≤ 1，RY < 0.2 の場合 RY = 0.2 と見なす)。

Ry・S—牧養力モデルは、林分成長や林分密度の変化、牧区面積の大きさに対応した牧養力の推定が可能となるだけでなく、Ry という共通の指標によって林分密度と牧養力を管理できるという特徴を持つ。これは従来の混牧林研究では見られなかったものであり、本論文で取り扱っている混牧林施業における収穫予測手法の根幹をなすものであ

る。

2.2.3. 放牧強度と林木被害

放牧牛による林木被害の発生は単に放牧強度の大小により決まるものではなく、樹高をはじめとする林況によって大きく左右される。松本ら（1986）は新植時から調査時の林齢34年生まで放牧が続いていた牧場内の林分について、樹高方向0.2mごとに円板を採取し樹幹解析によって樹高の成長経過を調べた。図2.5に水飲場近くの極めて放牧強度の高い場所において、通常の成長を示した正常木と幼齢期に被害を受けたと思われる被害木の成長経過を示した。図のように被害木では幼齢期の樹高成長が著しく停滞していたが、林齢10年（平均樹高1.55m）頃から回復し、次第に正常木に近づいていた。このような抑圧木は全体の約45%を占めており、同一林分内でも成長過程で大きな差があることが分かった。

一方、放牧による林木被害と樹高の関係について、井上（1977）はカラマツ林において樹高ごとの被害発生率を調査し、林木被害は樹高が0.68~1.07mの林分において最も多く発生していたことを報告した。また、実験牧場においては被害が最も多く発生した期間は樹高が1m未満の時であり、それ以降は被害発生率が低下した（林野庁業務課1979）。同様に高萩の試験でも図2.6のように樹高が1.0~1.5mの時に枯死率が最大となり、樹高が1.5~2mを越えるとほとんど枯死が生じなくなった。これらの現象が放牧牛の体高に関係していることは明らかである。

そこで、樹高が1.5mに達するまでの放牧強度と、その期間に生じた累積枯死率の関係を高萩の試験結果から調べた（図2.7）。ここでは禁牧区の放牧強度を0とし、スギ、ヒノキ別にそれぞれの回帰式を求めたが、両者間には有意差が無かったので、これらをこみにして次の回帰式を得た。

$$MR = 9.75 + 0.0875 GI \quad (2.21)$$

ここで、 MR ：樹高1.5mに達するまでの累積枯死率(%),
 GI ：樹高1.5mに達するまでの平均放牧強度(CD/ha)。

この(2.21)式により樹高1.5mに達するまでの枯死は放牧強度の管理により制御できると考えられ、これを「放牧強度-枯死率モデル」と名付ける。

ところで、(2.21)式における定数項9.75は放牧強度が0の時の枯死率を示している。通常の林分でも苗木の1~2割の活着不良が生じることは珍しくない。したがって(2.21)式において純粋な放牧による枯死発生率は第2項の $0.0875GI$ ということになる。また、枯死が放牧牛の体高と関連があることから、枯死の発生が幹折れなど物理的な原因に起因していると考えられ、スギ、ヒノキ両者ともに同様な回帰式であったことから(2.21)式は樹種に関わりなく成立するものと考えられる。

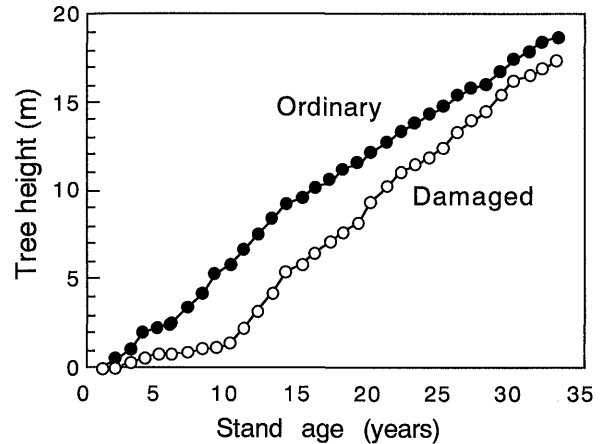


図2.5 混牧林におけるスギの樹高成長

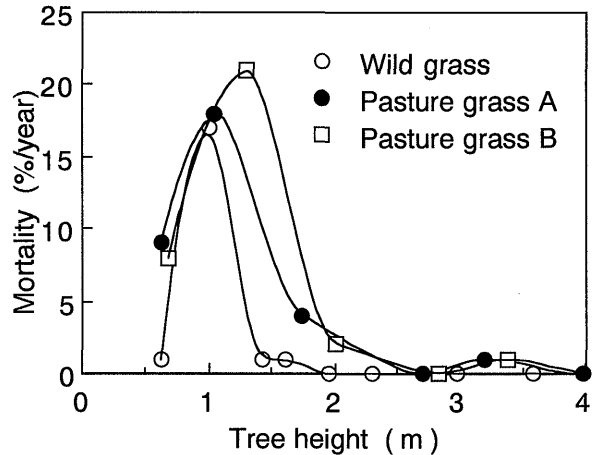


図2.6 樹高と枯死率の関係

2.2.4. 混牧林牧養力の推定

経営期間が長期にわたる林業にとって林木の枯死は経済的に大きな痛手であり、もちろん混牧林においても枯死が少ないことが望ましい。もし、放牧による枯死発生を極力避けたいならば、前項の結果をふまえて樹高が1.5mに達するまでの期間は放牧を禁止するという計画も考えられる。しかしながら、最も下刈りの必要な時期に禁牧とすれば、下刈りの代用効果と草資源の有効利用という元来の混牧林の目的から外れることとなる。

ここで、混牧林施業において林と畜のバランスを保ちながら林分と放牧の管理を行うために、あらかじめ林木枯死の許容範囲を設定し、それを越えない放牧強度に管理するという方法を提案する。つまり、林木枯死を許容枯死率の範囲内にとどめる放牧強度の上限と、草資源が持つ牧養力のうち、いずれか低い値を混牧林における適正な牧養力、つまり混牧林牧養力とするものである。

この考え方を基礎に、これまで得たモデルを組み合わせた混牧林牧養力の推定手順を図2.8に示した。その概略

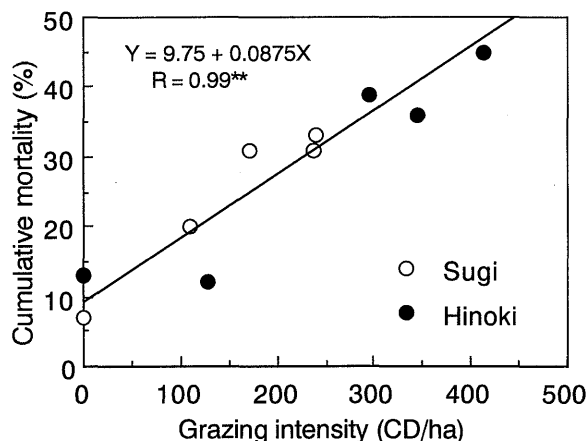


図 2.7 樹高が 1.5 m に達するまでの放牧強度と累積枯死率の関係

は次の通りである。まず、林分収穫表や既存のデータから対象林地の毎年の樹高を求める。一方、林分収穫表や密度管理計画から本数密度を求め、該当する林分密度管理図から毎年の収量比数 Ry を算出する。この Ry と牧区面積から Ry・S-牧養力モデルを用い牧養力を推定する。次に、あらかじめ定められた許容枯死率から放牧強度-枯死率モデルを用い、樹高が 1.5 m に達するまでの放牧強度の上限を推定する。樹高が 1.5 m に達した後は、前項の結果から放牧による林木枯死は発生しないと考え、放牧強度の上限は設定しない。このようにして推定された牧養力と放牧強度の上限を比較し、低い方の値を混牧林牧養力とする。これを毎年繰り返し、Ry が 0.5 を越えた時点で放牧の終了とする。

ここで、樹高が 1.5 m に達するまでの年枯死率は、樹高が 1.5 m に達する時点の残存率から経過年数による累乗根を求め、それを年残存率として算出する。例えば、許容枯死率を 20%、樹高が 1.5 m に達する林齢が 3 年とすれば、年残存率は $(1-0.2)^{1/3}$ 、年枯死率は $1-(1-0.2)^{1/3} = 0.0717$ 、つまり 7.2% と算出される。なお、牧養力が低く放牧強度の上限に達しない時は累積枯死率が許容枯死率を下回るため、推定された混牧林牧養力から放牧強度-枯死率モデルを用い累積枯死率と年枯死率を求め直す必要がある。

この混牧林牧養力推定方法の適合性を調べるため、笹村ら (1982) によって報告されている岩手県畜産試験場外山分場における混牧林試験結果を利用し、推定値と観測値を比較した。報告によれば、笹村らの試験地は平均牧区面積が 30.2 ha、平均本数密度 3500 本/ha のカラマツ・アカマツの混植林であったが、ここでは便宜的にこれを一般のカラマツ人工林として取り扱い、(2.20)、(2.21) 式のモデルを用いた。また、許容枯死率を一般的な林業と同等な 20% とし、樹高成長に関しては試験で得られたデータを利用した。

混牧林牧養力の推定値と放牧強度の観測値を図 2.9 に示した。牧区面積が広いため、推定された混牧林牧養力は最

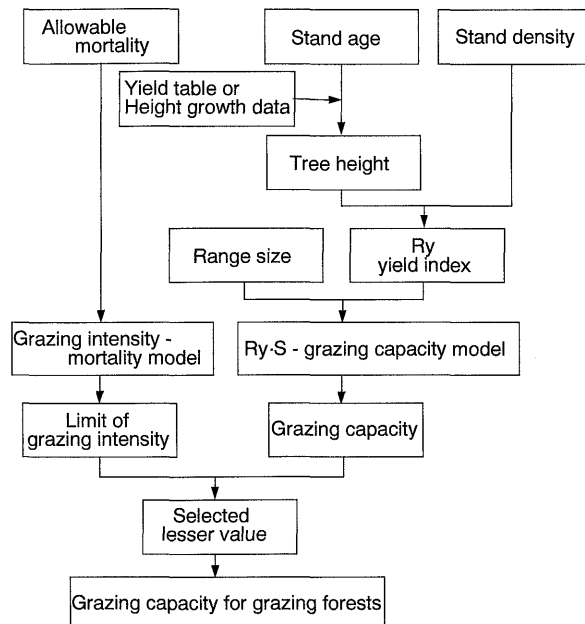


図 2.8 混牧林牧養力の推定手順

高 57 CD/ha であった。許容枯死率 20% が守られるためには、樹高 1.5 m 未満の林分の放牧強度を 117 CD/ha 以内に抑えればよく、結果的に 20% という許容枯死率の制限に達しなかった。推定による平均誤差率は 18.6% であり、1~5 年の適合が悪かった。笹村らの報告によれば、当初数年間は林木の被害を低くするために意図的に放牧強度を低くしたとしており、必要以上に放牧強度を低くしたことが適合の悪さをもたらしたものと考えられ、当手法の問題を示すものではない。その一方、6 年生以降においては誤差率 5.3% であり、林分の成長、樹冠の閉鎖にしたがい混牧林牧養力が低下していく動的な変化を的確に推定できたと考えて良い。

以上の結果から、本収穫予測手法が混牧林牧養力を推定するために適切であることが明らかとなった。

2.3. 牧草放牧地における混牧林牧養力の推定

前節では混牧林における混牧林牧養力の推定方法について、林分密度と牧養力、放牧強度と枯死の関係を中心に論じた。その中ではモデルの単純化を目的として野草利用の混牧林を対象とし、牧草を導入した場合にはふれなかった。

無立木の草地に牧草を導入した場合、その影響は牧養力の向上として現れる。しかしながら、混牧林の場合では放牧がもたらす林木への影響を考えなければならない。例えば林木の枯死発生率を許容量以下に維持するためには、可食草量が増加しても放牧強度を増加できるとは限らない。また、牧草を維持するための施肥の影響は牧草のみならず林木にもおよび、林木の成長をも促す。その結果として林分のうっ閉が早まり、放牧利用年限が短くなる (林試高萩

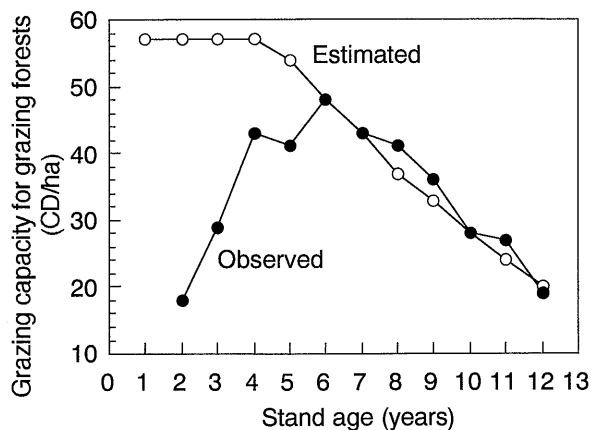


図 2.9 混牧林牧養力の推定値と放牧強度の観測値

試験地 1982)。

これらのことから、ここでは前節で示した混牧林牧養力の推定手順において、樹高成長の推定に関する部分と収量比数 R_y から牧養力を推定する $R_y \cdot S$ —牧養力モデルに関する部分について改良を行い、牧草導入した混牧林に対応した混牧林牧養力の推定方法について検討した。

これまでの牧草を導入した混牧林試験に関しては、林野庁業務課(1979)、経営部経営第二科営農林牧野研究室・東北支場経営部経営第三研究室(1968)、笹村ら(1982)、林試高萩試験地(1982)による報告があり、牧草導入による牧養力向上について事例報告がなされている。施肥が林木成長にもたらす影響については、林地肥培の研究として芝本(1961, 1977)をはじめとする多くの報告があるが、牧草用の施肥は林地肥培における施肥と比較量が多く、結果的に林木成長への効果も大きくなるため混牧林には応用しにくい。混牧林において林木の成長におよぼす施肥の効果については、林試高萩試験地(1982)によって詳しく示されているが、牧養力の推定や混牧林牧養力についてはふれられていない。これらのように、これまで牧草導入した混牧林における牧養力の推定方法についての研究は行われてきておらず、これは本研究の独自性を示すものである。

2.3.1. 資料と方法

利用した基礎的な資料は、前節と同様に林業試験場(現森林総合研究所)高萩試験地(林試高萩試験地 1982)による針葉樹幼齢林における放牧試験と、小川(1985)によるカラマツ間伐林における放牧試験で得られた成果にもとめた。試験地については前節と同様なため、牧草を中心に試験概要を記述する。

高萩試験地は茨城県北部の十王町に位置する。スギ、ヒノキ、アカマツの植栽地におおの 0.33 ha の禁牧区、野草区、牧草区が設けられ、黒毛和種牛が放牧された。牧草区はさらに 3 区に分けられ、オーチャードグラス、ペレニアルライグラス、イタリアンライグラス、ラジノクローバー

といった長草型牧草が導入された A 区、ケンタッキーブルーグラス、レッドトップ、トールオートグラス、ホワイトクローバーといった短草型牧草の B 区、バヒアグラス、ダリスグラス、ローズグラスといった暖地型牧草の C 区が設定された。C 区は牧草の定着が悪く、4 年次からトールフェスク、イタリアンライグラスが改めて導入された。これらの牧草区には植栽当初 N, P_2O_5 , K_2O をそれぞれ 36, 49, 36 kg/10 a, 翌年からは 9.6, 13.2, 9.6 kg/10 a が施肥された。

カラマツ間伐林における放牧試験は、岩手県岩手山麓の平笠試験地において行われた。すでにうっ閉していたカラマツ林(2000 本/ha)が林齢 16 年時に 700, 1000, 1300 本/ha と 3 段階の密度に間伐された。それぞれの密度で 0.47 ha の野草区と牧草区が設けられ、黒毛和種牛が林齢 19 年から 6 年間放牧された。牧草区にはオーチャードグラス、ペレニアルライグラス、メドウフェスク、ケンタッキーブルーグラスが導入され、放牧期間の平均で N, P_2O_5 , K_2O がそれぞれ 14.2, 8.6, 11.0 kg/10 a 施肥された。

ここでは前節で開発した野草利用の混牧林牧養力推定手順を基本に、牧草導入した場合の牧養力と樹高成長に注目しながら改良を行った。牧草導入に関しては牧草管理に関する要因との量的な関係は明らかになっていない。そこで、いくつかの仮定のもとに基礎的な関係を示すモデルを作成し、その具体的な例として高萩、平笠で得られた観測値を用いるという方法をとった。

2.3.2. 林分密度と牧養力

すでに 2 章 2 節で議論したが、高萩および平笠の試験において林分密度管理図の収量比数 R_y と牧養力の間には図 2.2, 2.3 のような高い相関関係が見られ、(2.9)~(2.13)式のような回帰式を得た。

$$\text{基本式} \quad GC = c + d RY \quad (2.9)$$

$$\text{高萩 スギ野草区} \quad GC = 170.0 - 169.5 RY \\ R = 0.87 \quad (2.10)$$

$$\text{高萩 スギ牧草区} \quad GC = 469.8 - 595.5 RY \\ R = 0.91 \quad (2.11)$$

$$\text{平笠 カラマツ野草区} \quad GC = 118.3 - 124.6 RY \\ R = 0.88 \quad (2.12)$$

$$\text{平笠 カラマツ牧草区} \quad GC = 467.0 - 636.8 RY \\ R = 0.98 \quad (2.13)$$

ここで、 GC : 牧養力 (CD/ha), RY : 収量比数 R_y ($0 \leq RY \leq 1$), c, d : パラメータ, R : 相関係数。

牧草区では R_y が低い状態では野草区と比較して 2 倍以上の牧養力を持っていたが、林分が閉鎖するにしたがって急激に低下した。牧草はもともと無立木地の高い照度に適応しているため、林内が暗くなるにしたがい生産性が急激に低下したものと考えられる。野草区と牧草区の 2 つの回帰直線は、高萩では R_y が 0.703, 平笠では R_y が 0.680 と

Ry が 0.7 付近で交わっていた。このことは Ry がおよそ 0.7 となる林分の光環境では牧草の導入効果が無くなることを表している。

ところで、藤森 (1983) は「林内相対照度が 1% 以下では下層植生は皆無、5% 以下では目立って少なく、10% でも草丈は低い。20% 前後になると下層植生が全面を密におおい下刈りの必要が生じてくる」と報告している。やはり藤森 (1989) が示している相対照度と Ry の関係から推定すると、相対照度 20% はおおむね Ry 0.75 にあたる。このことは、Ry 0.75 付近が草本の成長のために最低必要な照度をもたらず林分状態であることを示しており、Ry 0.7 付近で牧草の導入効果が消滅する背景となっているものと考えられる。

以上の試験結果から、牧草導入した混牧林における Ry と牧養力の関係について次のような仮定を設定した。

仮定 1: 牧草型においても野草型と同様に、Ry と牧養力の間には一次式で表される関係がある。

仮定 2: 牧草型では Ry が 0.7 を越えると牧草導入の効果は消滅する。

これらの仮定から、図 2.10 に示すような牧草導入した混牧林における Ry—牧養力モデルを考案した。このモデルでは、牧草区の関係式は Ry 0.7 の時点で野草型の関係式と交わる。また、主に牧草の管理方式や地域により、関係式の傾きが増減する。

本モデルにおいては Ry と牧養力と関係式は以下のよう表される。

$$\text{野草型 } GC_w = g_w - h_w RY \quad (2.22)$$

$$\text{牧草型 } GC_p = g_p - h_p RY \quad (2.23)$$

ここで、 GC_w : 野草型の牧養力 (CD/ha), g_w, h_w : 野草型の係数, GC_p : 牧草型の牧養力 (CD/ha), g_p, h_p : 牧草型の係数, RY : 収量比数 Ry。

h_p は牧草型における関係式の傾きであり、この傾きは牧草の管理方式や地域によって変化する。したがって、牧草型の傾きは牧草導入による牧養力増加を表す項 i を含み、次のように表される。

$$h_p = h_w + i \quad (2.24)$$

ここで、 i : 牧草の管理方式や地域によって定まるパラメータ。

仮定 2 から (2.22), (2.23) 式は Ry 0.7 において交わるので、次の (2.25) 式が得られる。

$$g_p = g_w + 0.7 i \quad (2.25)$$

したがって牧草型の関係式は (2.26) 式のように表すこと

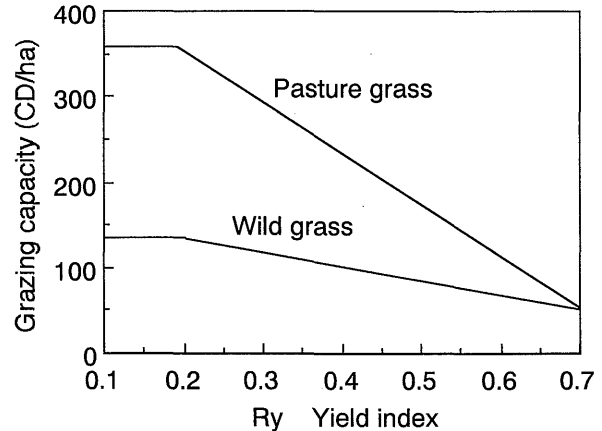


図 2.10 収量比数 Ry と牧養力の関係を表すモデル

ができる。

$$GC_p = g_w + 0.7 i - (h_w + i) RY \quad (2.26)$$

(2.26) 式のなかで、地域および樹種に規定されるパラメータ g_w 及び h_w は一意的に定まるので、牧草導入に関わるパラメータ i が求められれば牧草型の関係式が求められることになる。しかしながら、現在のところ i をそれらの関数として推定することはできない。そこで、ここでは高萩あるいは平笠と同様な牧草管理を行った場合を想定して進める。

実測値では正確に Ry 0.7 で交わるというわけではない。そのためモデルの推定値も実測値と差が生じるので、実測値からパラメータを算出し直した。高萩の場合、(2.23) 式と (2.26) 式の比較から 2 つの i が導かれる。つまり、切片の比較からは $i = 428.3$ 、傾きの比較からは $i = 426.0$ が得られる。モデルとしてはこれらの平均をとることとした。

$$i = 427.2 \quad (2.27)$$

このようにして、高萩および平笠における牧草型の Ry と牧養力の関係式として、次の (2.28) 式、(2.29) 式を導いた。

$$\text{高萩 スギ牧草型 } GC_p = 469.0 - 596.7 RY \quad (2.28)$$

$$\text{平笠 カラマツ牧草型 } GC_p = 471.9 - 629.8 RY \quad (2.29)$$

ここで、 GC_p : 牧草型の牧養力 (CD/ha), RY : 収量比数 Ry ($0 \leq RY \leq 1$, $RY < 0.2$ の場合 $RY = 0.2$ と見なす)。

さて、牧区面積と牧養力の関係は前節で導いており、次のように表される。

$$GC = 50.7 - 11.7 \log S \quad (2.14)$$

ここで、 GC : 牧養力 (CD/ha), S : 牧区面積 (ha)。

このような牧区面積と牧養力の関係は、牧草利用でも野草利用の場合と同等なものと考えられるので、牧区面積による補正も前節で得られた式を利用することができる。

$$\text{高萩 } AC = 0.900 - 0.208 \log S \quad (2.17)$$

$$\text{平笠 } AC = 0.930 - 0.215 \log S \quad (2.18)$$

ここで、 AC ：牧区面積による補正值、 S ：牧区面積 (ha)。

以上の結果から、高萩あるいは平笠と同等な牧草管理を行った場合の牧草型における $R_y \cdot S$ —牧養力モデル (2.30)、(2.31)を得た。

高萩 スギ牧草型

$$GC_p = (469.0 - 596.7 RY) \cdot (0.900 - 0.208 \log S) \quad (2.30)$$

平笠 カラムツ牧草型

$$GC_p = (471.9 - 629.8 RY) \cdot (0.930 - 0.215 \log S) \quad (2.31)$$

ここで、 GC_p ：牧草型の牧養力 (CD/ha)、 S ：牧区面積 (ha)、 RY ：収量比数 R_y ($0 \leq RY \leq 1$, $RY < 0.2$ の場合 $RY = 0.2$ と見なす)。

先に述べたように、実際に放牧計画を作成する場合にはパラメータ i を要因から推定するのは困難である。この場合、高萩の牧草導入計画を参考にして管理計画を作成し、最初の年の R_y と放牧実績の関係を図上にプロットしてパラメータを推定し、2年以降の混牧林牧養力の推定を行うのが現実的である。

2.3.3. 施肥による樹高成長の促進

牧草導入を行った場合、牧草を維持するための継続的な施肥が不可欠である。高萩の試験では N 、 P_2O_5 、 K_2O の施用量は年間それぞれ 96、132、96 kg/ha であった。一方、林地肥培を目的とする場合では、植栽当年のスギ苗木 1 本当り N 、 P_2O_5 、 K_2O をそれぞれ 8~12、5~7、5~7 g が基準量とされている (芝本 1977)。これを高萩の試験基準である 3000 本/ha に換算すると、それぞれ 24~36、15~21、15~21 kg/ha であり、高萩の試験の施肥量が林地肥培の施肥量の約 3 倍と非常に多いことがわかる。また、林木のための施肥では 2~3 年に 1 度根元に施す方法が一般的だが、牧草のための施肥は毎年一面にばらまく方法がとられる。このように牧草導入にともなう施肥は林木成長の促進を目的としたものと比較して量的にも多く、また頻繁に行われるため、林木の成長にも大きく影響を与えるものと考えられる。

高萩の試験における禁牧区、野草区、牧草区の樹高成長を図 2.11 に示した。試験終了の林齢 10 年時には、牧草区における樹高が 7.90 m と禁牧区に比べ 2.25 倍であり、施肥の効果が顕著に見られた。また、野草区においても樹高は 5.16 m と、禁牧区の 1.47 倍を示した。この野草区にお

ける成長促進の理由としては、家畜の糞尿による効果や下刈の代用効果があげられるが、現在のところ明確な関係は明らかになっていない。特にしばしば聞かれる糞尿による効果については、岩波 (1986) は疑問を投げかけている。このように成長を促進させる原因と機構については明かではないものの、現実に野草型においても樹高成長の促進は観測されているため、ここではこれを放牧効果と呼び、施肥効果と区別することとする。

ある時点の樹高とその年の樹高成長量の関係を求めたところ、図 2.12 のような関係が見られ、(2.32)~(2.34)の回帰式を得た。牧草区回帰式(2.34)については施肥が行われた林齢 8 年時までの結果を用いた。

$$\text{禁牧区 } AI = 0.1853 + 0.0752 H \quad R = 0.52 \quad (2.32)$$

$$\text{野草区 } AI = 0.1742 + 0.1461 H \quad R = 0.83 \quad (2.33)$$

$$\text{牧草区 } AI = 0.3714 + 0.1413 H \quad R = 0.79 \quad (2.34)$$

ここで、 AI ：樹高年成長量 (m/year)、 H ：樹高 (m)、 R ：相関係数。

図 2.12 からわかるように、野草区および牧草区における樹高と成長量の関係は明らかであった。禁牧区においてはその関係はややあいまいであったものの、いずれも樹高が高いほど成長量が高まるという基本的な傾向は同様であった。樹高成長については、一般的に年齢が高くなるにしたがい成長量が減少することが知られている。このことは樹高成長に対しミッチャーリッヒ式の当てはまりが良いことから確認される。したがって、図に示したような傾向は成長の初期段階に見られる特徴と考えるのが妥当である。

さて、図中の回帰直線を比較すると、禁牧区と野草区は切片がほぼ同じで傾きが異なり、野草区と牧草区は傾きはほぼ同じだが切片が異なることがわかる。したがって、放牧効果は傾きに、施肥効果は切片に現れているものと理解できる。

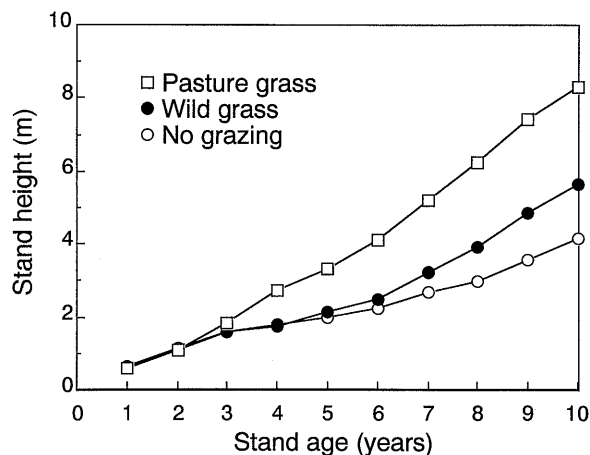


図 2.11 植生型と樹高成長

以上のことから、樹高成長の放牧効果について次のような仮定を設定した。

仮定 3：植栽初期において、樹高と樹高年成長量は一次式で表される線形関係をもつ。

仮定 4：樹高と樹高年成長量の関係式において、放牧効果は傾きに、施肥効果は切片に現れる。

これらの仮定をもとに図 2.13 で表される混牧林におけるモデルを考案し、これを「樹高一年成長量モデル」と名付けた。このモデルでは禁牧型の樹高と成長量の関係を基準とし、放牧効果によって傾きが急になり、施肥効果により直線が上に移動する。したがって、(2.35)式のように表される。

$$AI = j + k + (l + m)H \quad (2.35)$$

ここで、 AI ：樹高年成長量(m/year)、 H ：樹高(m)、 j ：禁牧型での切片、 k ：施肥効果を表すパラメータ、 l ：禁牧型での傾き、 m ：放牧効果を表すパラメータ。

この樹高一年成長量モデルについて、高萩の結果をもとに係数を求めた。まず、禁牧区、野草区、牧草区の傾きの関係から、禁牧区では 0.07523、野草区及び牧草区ではそれらの平均を取って 0.1437 とした。これらの傾きを利用して元のデータに当てはめ直すなどの調整を行った結果(2.36)～(2.38)式を得た。これらは高萩付近において、高萩の試験と同様な管理を行った場合の樹高と成長量の関係式である。

$$\text{禁牧型 } AI = 0.1853 + 0.0752 H \quad (2.36)$$

$$\text{野草型 } AI = 0.1853 + 0.1437 H \quad (2.37)$$

$$\text{牧草型 } AI = 0.3809 + 0.1437 H \quad (2.38)$$

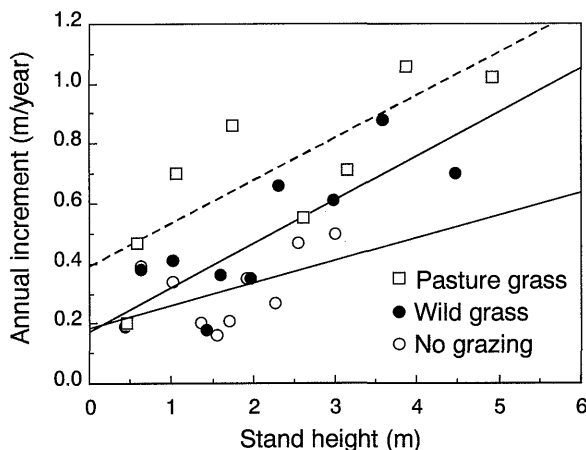


図 2.12 樹高と年成長量の関係
 Pasture grass $y = 0.3714 + 0.1413 x$
 Wild grass $y = 0.1742 + 0.1461 x$
 No grazing $y = 0.1853 + 0.0752 x$

ここで、 AI ：樹高年成長量 (m)、 H ：樹高 (m)。

さて、このような樹高と年成長量の関係は、(2.39)式の樹高成長に関する微分方程式として見ることができる。

$$dH/dT = j + k + (l + m)H \quad (2.39)$$

ここで、 H ：樹高、 T ：時間、 j, k, l, m ：パラメータ。

この解は次式のように表される。

$$H = -(j+k)/(l+m) + n \cdot \exp[(l+m)T] \quad (2.40)$$

ここで、 H ：樹高、 T ：時間、 j, k, l, m, n ：パラメータ。

初期条件として高萩の試験結果から初年時の平均樹高 0.60 m を与え、(2.36)～(2.38)式の回帰式の係数から(2.40)式のパラメータを求めた。これにより(2.41)～(2.43)式の樹高成長式を得た。

$$\text{禁牧型 } H = -2.463 + 2.841 \cdot \exp(0.0752 T) \quad (2.41)$$

$$\text{野草型 } H = -1.289 + 1.637 \cdot \exp(0.1437 T) \quad (2.42)$$

$$\text{牧草型 } H = -2.651 + 2.816 \cdot \exp(0.1437 T) \quad (2.43)$$

ここで、 H ：樹高 (m)、 T ：林齢 (年)。

以上のように、牧草導入を行った場合の樹高成長を推定する成長式を導くことができた。ここでは放牧効果と施肥効果を含んだ樹高成長のモデル化を意図してこのような方法を取ったが、過去の実績等から牧草導入した場合の樹高成長が推定できるのであれば、その数値自体を利用すればよいだろう。

2.3.4. 牧草型混牧林における混牧林牧養力の推定

牧草型においても、混牧林牧養力を推定する手順自体は野草型におけるそれと同様である。つまり、草の生産量が

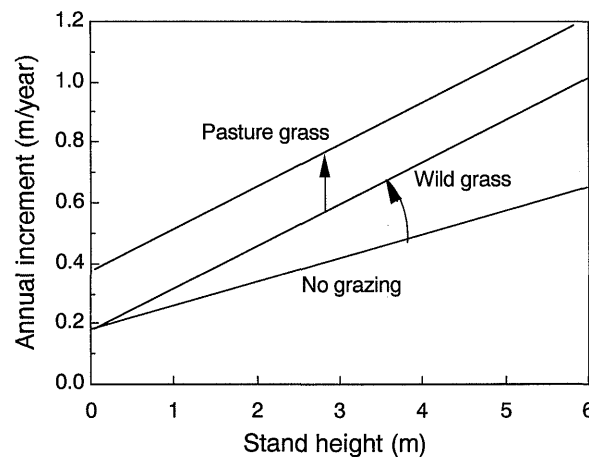


図 2.13 樹高と年成長量の関係を表すモデル

ら推定される牧養力と、林木の枯死をあらかじめ設定した許容範囲にとどめる放牧強度の上限について、いずれか低い値を混牧林牧養力とするというものである。

牧草型混牧林では、図 2.8 に示した野草型における推定手順のうち、牧草導入に関する樹高成長と牧養力推定に関する部分だけが、部品を取り替えるように変更される。それに対し、牧区面積と牧養力の関係、および樹高が 1.5 m に達するまでの放牧強度と累積枯死率の関係については草種は関係しないので、牧草導入に関しても変更は無い。以上の牧草導入を行った場合の混牧林牧養力の推定手順を図 2.14 に示した。

この混牧林牧養力の推定手順に従って野草型と牧草型の場合のシミュレーションを行い、高萩の試験結果との適合性を調べた。シミュレーション上の条件は次のようなものである。まず、対象地域を高萩の試験が行われた関東とし、Ry は南関東・東海地方スギ林分密度管理図(林野庁 1981)を利用して求めた。また、林木の枯死率の上限を 20% とし、牧区面積については高萩の試験と同様に 0.33 ha とした。牧草管理も高萩の試験と同様であるとし、(2.42)、(2.43)式を利用して樹高を推定した。

推定された混牧林牧養力と牧養力、および試験での観測値を図 2.15、2.16 に示した。野草型の場合、林木の枯死発生率をおさえるために、林齢 4 年時まで牧養力に対して混牧林牧養力がやや抑制されることになった。11 年時に Ry 0.5 を越えたため放牧は終了と推定された。全期間通した混牧林牧養力の積算値は 1242 CD/ha、年平均混牧林牧養力は 113 CD/ha と推定された。高萩の試験と比較すると、林齢 4 年まではやや過大に推定されたものの、林齢 5 年以降混牧林牧養力が順次の低下していく様子については適合性が高かった。

一方、牧草型では牧草用施肥の副次効果として樹高成長が促進されるために、樹高が 1.5 m に達するまでの時間が 1 年短縮され 3 年となった。この林齢 3 年までは、豊富な草量を背景とする高い牧養力に対し、あらかじめ設定した 20% という枯死率の許容限界によって混牧林牧養力は極端に抑制されることとなった。また、放牧の終了は林齢 8 年時と野草型に比較して 3 年早くなった。

全期間通した混牧林牧養力の積算値は 1626 CD/ha、年平均混牧林牧養力は 203 CD/ha と推定された。高萩の試験では林齢 3 年までに枯死率が 30% を越えていたが、この枯死率の相違が混牧林牧養力の推定値と試験結果の差に現れたものと考えられる。林齢 6 年以降、混牧林牧養力が低下していく様子については非常に良く適合していた。シミュレーションでは林齢 8 年時に Ry が 0.5 を越え、その時点で放牧の終了を示した。高萩の試験では林齢 10 年まで放牧が行われたため、Ry が 0.5 を越えた後の牧養力の推定も行ったところ、これも良く適合した。

以上のように、本手法による混牧林牧養力の推定は良く適合し、本手法が適切なものであることが明らかとなった。なお、本来ならば適合性の検証にはパラメータを得たもの

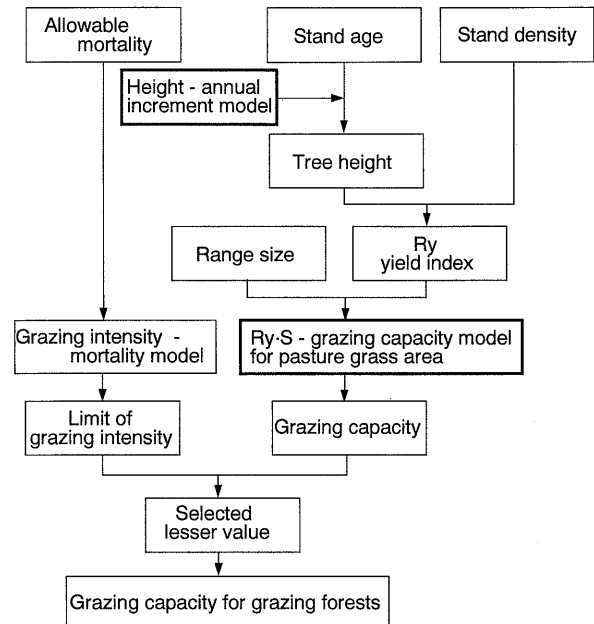


図 2.14 牧草導入した混牧林における混牧林牧養力の推定手順
(太枠は牧草導入に関して変更された部分)

とは別の試験結果を用いるべきだが、同様な試験が行われていないためこのような方法を取らざるを得なかった。しかし、野草利用の場合の推定手順についてはすでに前節で適合性が検証されており、牧草導入に関しても牧養力推定と成長促進に関わる部分的な変更だけで対応が可能であることを示すには妥当なものであろう。

さて、混牧林牧養力推定の適合性を調べるためのシミュレーションであったが、牧草の導入効果について興味のある結果が得られた。牧草導入は草原状態に近い植栽直後においては飛躍的に草量を高める。しかしながら、このシミュレーションでは樹高が 1.5 m に達するまでの枯死発生率を 20% 以内に抑制するため、放牧強度は 117 CD/ha にとどめる必要があった。したがって、この間の牧養力と混牧林牧養力の差は草の余剰生産と言うことができる。図 2.15、2.16 では黒丸と白丸の差が余剰を表しており、例えば牧草型の林齢 3 年までは 234 CD/ha の余剰となる。

林分がうっ閉するまでの全期間にわたる混牧林牧養力と、草量から算出された牧養力の比較を図 2.17 に示した。牧草型混牧林では草量から求められた牧養力は 2327 CD/ha に達するが、現実にはその 70%、つまり混牧林牧養力に示される 1626 CD/ha しか家畜の飼養に利用できない計算となった。また、混牧林牧養力の積算値は野草型 1242 CD/ha に対し牧草型では 1626 CD/ha と、牧草導入による効果は 31% 増であることが推定された。つまり、単年の比較では牧草型の混牧林牧養力は野草型に対し最大 2.6 倍に達するものの、林木の成長も促進させるため放牧可能期間が短くなり、全期間を通せば 3 割程度の改善にとどまるわけである。

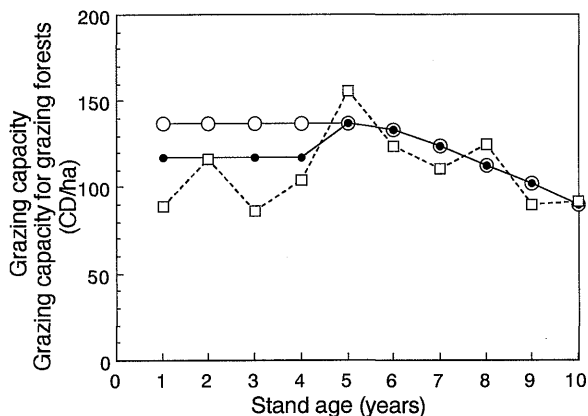


図 2.15 野草区における混牧林牧養力および牧養力の推定値と放牧強度観測値の比較
○：牧養力，●：混牧林牧養力，□：観測値

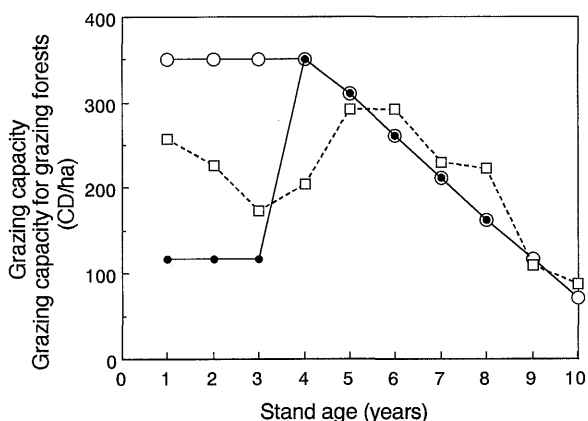


図 2.16 牧草区における混牧林牧養力および牧養力の推定値と放牧強度観測値の比較
○：牧養力，●：混牧林牧養力，□：観測値

野草利用に対し牧草導入やその維持のための施肥には大きなコストがかかるが、その効果が3割程度の牧養力の向上では割に合わないことは明らかであろう。このことは、針葉樹混牧林施業の場合、植生利用としては野草利用を中心に考えるべきであることを示唆するものである。

2.4. 混牧林施業のための収穫予測手法

2.4.1. 収穫予測手法

これまで、混牧林施業をなす林・畜・草およびその管理の関係性を明らかにし、混牧林牧養力を推定する方法を述べた。その中で得られた $Ry \cdot S$ —牧養力モデルにより、 Ry を介して任意の密度管理計画に応じて牧養力を示すことができる。この特徴を活用して、林畜の両者を見据えた混牧林施業のための収穫予測手法を開発した。

当手法を要約すると、林分密度管理図と樹高成長データを用い、 Ry の管理範囲や間伐強度、材積、胸高直径を考慮

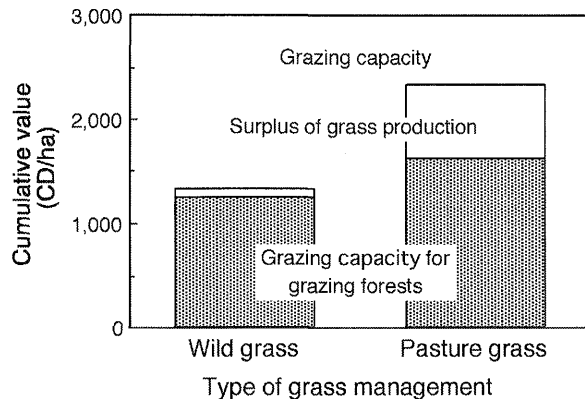


図 2.17 野草型と牧草型における牧養力と混牧林牧養力の積算量

しながら密度管理計画を立て、それに対応する混牧林牧養力を推定して混牧林施業としての収穫予測を行うというものである。

ところで、針葉樹人工林を対象とした収穫予測手法として、1990年頃からシステム収穫表による手法が開発されてきた。システム収穫表とは、これまでの林分収穫表では固定された密度管理計画について収穫予測量が示されたのに対し、幅広い密度管理計画に対して収穫予測が可能なコンピュータプログラムシステムの総称であり、ダイナミックな成長モデルを基礎にしていることに特徴がある (Konohira 1995)。木平 (1992, 1995) や鄭 (1994) が示しているように、これまで様々なシステム収穫表が開発・提案されてきたが、その中で稲田 (1991) は林分密度管理図を基礎としたシステム収穫表を提案しており、その基本的な考え方は本研究での収穫予測手法と類似したものである。

さて、前節の混牧林牧養力の推定方法は幼齢林を想定したものであったが、これを幼齢林以外へ適用することは可能であろうか。 $Ry \cdot S$ —牧養力モデルを導く基礎データの一つとなった平笠の試験において、カラマツ若齢林の間伐強度を3段階に変えた場合でも Ry と牧養力の関係は幼齢林と同様であった (小川 1985)。一方、放牧強度—枯死率モデルは樹高 1.5 m までを対象とすることから、幼齢林以外を対象とはならない。このことから、幼齢林以外を対象とした場合でも単純に $Ry \cdot S$ —牧養力モデルを利用することにより、牧養力の推定は可能であると考えた。

2.4.2. 収穫予測の手順

混牧林施業のための具体的な収穫予測の手順を図 2.18 に示した。以下作業順序に従い、その要点を示す。

- (1) 対象地域、樹種、地位、牧区面積を定める。
- (2) 対象地域、樹種に対応した林分密度管理図と、林分収穫表など樹高成長を知るためのデータを用意する。
- (3) Ry の上限あるいは管理範囲、許容枯死率を定める。これらはシミュレーションの結果をふまえて変化させても

- 良い。
- (4) 初期値としての植栽密度および密度管理計画を仮定する。
 - (5) 仮定した密度管理計画についてシミュレーションを行い、結果として得られた材積、胸高直径、 R_y などを参考として、新しい密度管理計画を設定する。
 - (6) 計画策定とシミュレーションを繰り返しながら、林業としての目的に適合した密度管理計画を求める。
 - (7) 得られた密度管理計画に関して、 $R_y \cdot S$ —牧養力モデルを利用し牧養力を推定する。
 - (8) 樹高1.5 m未満においては、許容枯死率から定まる放牧強度の上限と牧養力を比較して低い値を混牧林牧養力とする。
 - (9) 推定された混牧林牧養力が畜産側の目的に対して不相当である場合は、(5)~(8)を繰り返して目的に適合した密度管理計画を求め直す。
 - (10) 以上の結果を林分収穫表の形にまとめる。

2.4.3. スギ幼齢混牧林の収穫予測

まず、当研究の基盤となったスギ幼齢林を対象とした混牧林施業に関し、その収穫予測を試みた。

幼齢林での放牧は、樹冠の閉鎖および林内植生の減少に伴って中止されるのが一般的であるが、余り短期間のうちに放牧利用ができなくなることは、代替する放牧地と牧柵

などの施設が必要となることを意味し、経営実行上不利となる。そこで、放牧利用期間の延長を目標に、低い植栽密度を仮定して収穫予測を行った。ここで設定した条件は以下のとおりである。

- (1) 地域、樹種、地位：茨城県、スギ林、地位2等。
- (2) 植栽密度：2000本/ha。
- (3) 牧区面積：1ha。
- (4) R_y の上限：0.5。
- (5) 許容枯死率：20%。

上記の地域、樹種から、林分密度管理図として南関東・東海地方スギ林分密度管理図（林野庁1981）を、樹高成長の資料として北関東、阿武隈地方スギ林分収穫表（林野庁・林業試験場1955）を利用した。

このような条件を基礎に、図2.18に示した混牧林牧養力の推定手順に従って収穫予測を行った。その結果、表2.1に示したように2000本/haという低い植栽密度により樹冠の閉鎖が遅れ、 R_y が0.5を越え放牧が中止されるのは林齢14年時と予測された。同条件で植栽密度を一般的な3000本/haとすると、放牧の中止は林齢10年時と予測されたことから、3000本/haから2000本/haへの植栽密度の低下は4年の放牧期間の延長をもたらしたことになる。

放牧中止となる14年生までの混牧林牧養力は74~123

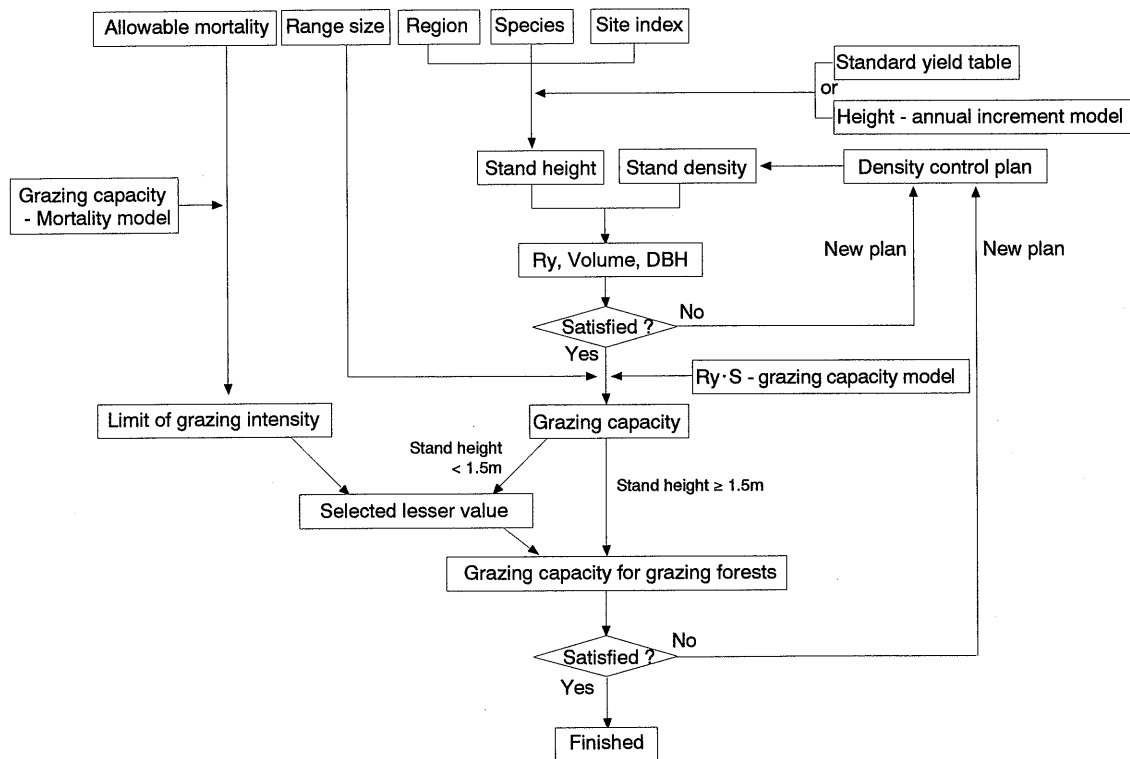


図 2.18 混牧林収穫予測の手順

CD/ha と推定され、その積算値は 1450 CD/ha であった。3 年生までは許容枯死率による放牧強度の上限が牧養力を上回ったが、草生産量の余剰は 6 CD/ha と小さいことから、下刈りの代用効果は高いものと考えられた。

2.4.4. スギ壮齢混牧林の収穫予測

幼齢混牧林においては、樹冠の閉鎖までの十数年だけが放牧利用が可能である。このことは、放牧中止から主伐までの 20 年以上にわたって休牧を余儀なくされることを意味するが、このような長期間の休牧は代替する放牧地が必要となり経営上不利となる。

さて、強度間伐などにより林分密度を低く維持すれば、林内照度が増し長期間の混牧林利用が可能となる。立木密度を低く維持することは、放牧利用を行う側ばかりでなく、大径材生産を狙う林業側にとっても都合が良い。このような施業形態は、高知県嶺北地域のヒノキ高齢林を対象とした混牧林 (岩波 1994a)、北海道釧路地方のカラマツ・トドマツ林を対象とした混牧林 (岩波 1994b, c) があり、林業の長伐期化が進む中、今後このような利用が広まるものと予想される。

このような背景をふまえ、植栽時から主伐までの全期を通じた混牧林利用を目標とし、スギ壮齢混牧林の収穫予測を行った。ここでは、前項で予想したスギ幼齢混牧林を強度間伐により壮齢混牧林に導くものとし、以下の条件を設定した。

- (1) 地域、樹種、地位：茨城県、スギ林、地位 2 等。
- (2) 植栽密度：2000 本/ha。
- (3) 牧区面積：1 ha。
- (4) Ry の上限：0.5。
- (5) 許容枯死率：20%。
- (6) 密度管理：Ry 0.3~0.5 を維持。

(7) 主伐：80 年生時。

図 2.18 に示した混牧林牧養力の推定手順に従って収穫予測を行い、その結果を表 2.2 に示した。まず、林齢 14 年生で Ry 0.5 を越したので、その時点で立木密度を 1600 本/ha から 800 本/ha に落とすこととした。それにとともに、Ry は 0.53 から 0.34 に落ち、牧養力は前年の 78 CD/ha から 102 CD/ha に回復することが予測された。同様な間伐を 25, 45, 60 年生時に行うことにより、それぞれ 66.6, 52.0, 35.2, 91.6 m³/ha の副林木の収穫が予想され、低い立木密度のため 25 年生において主林木の平均胸高直径が 20 cm を越えることが予想された。80 年生の主伐時には、立木密度 200 本/ha、平均胸高直径 47.1 cm、材積 456 m³/ha が予測されるが、60 年生時においてもそれぞれ 200 本/ha、42.6 cm、325 m³/ha が予測され、この時点でも十分に主伐が可能であろう。全期を通し 79 CD/ha 以上の混牧林牧養力を維持し、野草利用の混牧林としては十分な牧養力を持つことが予測された。

この密度管理計画で示されたような主伐時 200 本/ha という立木密度は、一般的な林業から見れば極めて低い印象を与える。しかしながら、北海道釧路地方のカラマツ混牧林では主伐時 (60 年生) の立木密度を 190 本/ha としていることや (岩波 1994c)、ニュージーランドのラジアータパイン林を対象とした混牧林では主伐時の立木密度を 150~200 本/ha としていることから (Knowles 1991)、壮齢林を対象とした混牧林ではこのような低い密度管理計画が必要となるものと考えてよい。

2.5. 利活用の展望

システム収穫表については 2.4.1 において簡単にふれたが、本研究の収穫予測手法も林分密度管理図を基礎とした一つのシステム収穫表とも捉えられる。したがって、その

表 2.1 スギ幼齢混牧林の収穫予測

茨城県地方スギ林 地位2等 Ibaraki, Sugi, Site: 2						
林齢	平均樹高	平均胸高直径	立木密度	幹材積	Ry	混牧林牧養力
Stand age	Mean height	Mean DBH	Stand density	Volume		Grazing capacity for grazing forests
year	m	cm	trees/ha	m ³ /ha		CD/ha
Planted			2000			
1	0.5	0.7	1857	0.1	0.02	117
2	1.2	1.9	1723	0.7	0.06	117
3	1.8	3.2	1600	2.2	0.09	117
4	2.4	4.4	1600	4.8	0.14	123
5	3.0	5.5	1600	8.7	0.19	123
6	3.6	6.5	1600	13.9	0.23	119
7	4.2	7.5	1600	20.3	0.28	112
8	4.8	8.4	1600	28.0	0.32	105
9	5.3	9.2	1600	36.7	0.36	99
10	5.9	10.0	1600	46.5	0.40	93
11	6.4	10.7	1600	57.2	0.43	88
12	7.0	11.4	1600	68.7	0.47	83
13	7.5	12.0	1600	80.9	0.50	78
14	8.0	12.6	1600	93.8	0.53	74
Total						1450

表 2.2 スギ壮齡混牧林の収穫予測

茨城県地方スギ林 地位2等 Ibaraki, Sugi, Site:2								
林齢 Stand age	主林木 Main trees				副林木 Sub trees		Ry	混牧林牧養力 Grazing capacity for grazing forests CD/ha
	平均樹高 Mean height	平均胸高直径 Mean DBH	本数 Number of trees	材積 Volume	本数 Number of trees	材積 Volume		
	m	cm	trees/ha	m ³ /ha	trees/ha	m ³ /ha		
Planted			2000					
2	1.17	1.91	1723	0.7			0.06	117
4	2.41	4.35	1600	4.8			0.14	123
6	3.61	6.53	1600	13.9			0.23	119
8	4.77	8.40	1600	28.0			0.32	105
10	5.88	10.01	1600	46.5			0.40	93
12	6.96	11.39	1600	68.7			0.47	83
14	8.00	14.52	800	60.3	800	33.5	0.34	102
20	10.90	18.39	800	125.4			0.46	84
25	13.09	24.05	400	122.3	400	66.6	0.35	101
30	15.09	26.78	400	172.0			0.40	93
35	16.93	29.07	400	224.7			0.45	85
40	18.60	31.01	400	278.5			0.49	79
45	20.14	34.80	300	280.2	100	52.0	0.44	87
50	21.54	36.45	300	327.0			0.47	82
55	22.82	37.88	300	372.6			0.49	79
60	23.99	42.58	200	325.1	100	91.6	0.40	93
65	25.07	43.92	200	360.3			0.42	90
70	26.05	45.12	200	393.9			0.44	87
75	26.95	46.18	200	426.0			0.45	85
80	27.77	47.13	200	456.3			0.46	83
Total					1400	243.7		2706

特徴も林分密度管理図のそれに起因し、同一平面上で4変数を表すことによる精度の悪さや林齢が二次的に取り扱われていることなどの問題をあわせて持つ (Konohira 1995)。

様々なシステム収穫表の中で、白石 (1985) は標準的な密度管理を表す平均管理曲線と対象林分の林分密度および直径の隔たりを直径成長に反映させる直径生長モデルを開発し、それを基礎にした収穫表作成システム (LYCS) を開発した。この方法では従来の林分収穫表を利用しながら、それを拡張していることから、基礎となった林分収穫表と矛盾がなく、パラメータを得るためのデータ量が少なく済むという特徴を持つ。さらに、Matsumoto (1997) は LYCS を利用して熊本地方スギ林分収穫表を基礎としたシステム収穫表を開発し、具体的な適用方法の提示するとともに、その妥当性を明らかにした。

この LYCS を混牧林施業の収穫予測手法に応用する場合、やはり密度管理のための Ry を利用することになる。Ry は林分密度管理図上で示されているものであるが、理論的に Ry は立木密度と上層木樹高から算出されることから、Ry の利用と LYCS の利用により矛盾が生じることは無い。

このようなことから、針葉樹人工林の若齢・壮齡林を対象とした混牧林利用の場合、当研究で開発した混牧林牧養力の推定方法と併せて LYCS のようなシステム収穫表を利用することは、今後の混牧林施業のための収穫予測手法として有効であるものと考えられる。

第3章 広葉樹林における混牧林施業のための収穫予測手法

広葉樹林における混牧林経営は、針葉樹人工林を対象とした混牧林よりもはるか昔から行われていたものであり、混牧林の基本的な形態ともいえる。しかしながら、その多くは極めて粗放なものであり、現在ではカヤノ平で行われているブナ林での放牧などいくつかの例を見るくらいである。

そのような中、九州阿蘇・九重地方では長くクヌギ混牧林施業が行われている。これは、シイタケ原木生産と子牛を生産する繁殖経営を同時に行うというもので、シイタケ生産と畜産経営が盛んな同地方の特色が反映されている。

クヌギ混牧林の施業形態はおおよそ確立されているものの、密度管理やそれに影響される林内植生の生産、牧養力の変化については具体的な数値が示されていない。また、クヌギ混牧林を前提とした収穫予測手法が確立されておらず、その開発が期待されている。

本章ではクヌギ混牧林を対象とした施業方法について取りまとめを行い、その収穫予測手法の開発について述べる。さらに、広葉樹資源分布の把握を通して、クヌギ混牧林施業のポテンシャルを検討する。

3.1. クヌギ混牧林のための収穫予測手法の開発

戦後の拡大造林期、針葉樹幼齡林において下草の活用と下刈りの代用を狙った混牧林施業が行われたことから、混牧林の対象は針葉樹林を主体とされ、その研究もまた針葉樹林を対象としたものが多かった。しかし、元来混牧林施業は広葉樹林を対象としたものである。現在、広葉樹林を

対象とした混牧林施業で最も知られているものは、九州・阿蘇九重地方において行われているクヌギ林を対象とした混牧林施業である。この地方はシイタケ生産と同時に畜産業が盛んであり、そのためにシイタケ原木となるクヌギと放牧地が求められている。このような背景がクヌギ混牧林という特有の土地利用形態を生んだものと考えられる。

シイタケ原木生産のためのクヌギ林施業は、伐期が10～15年生と一般的な林業と比較して非常に短い。また、混牧林における放牧経営形態である繁殖経営では、毎年安定した子牛の生産が可能である。したがって、クヌギ混牧林経営の特徴として、一般的な林業と比較して極めて短いサイクルで収入を得られることがあげられる。

1, 2章でも示したように、混牧林に関しては数十年の間に多くの研究が行われている。しかしながら、針葉樹林を対象とした混牧林研究が中心であり、これまでクヌギ林のような短伐期の広葉樹林における放牧利用や、その収穫予測については報告を見ない。また、針葉樹林を中心とした研究結果の一部はクヌギ混牧林にも利用できるであろうが、放牧に対する林分・林木の反応は針葉樹林のそれとは異なるだろう。

本研究は、試験結果や調査結果を基礎とし、クヌギ混牧林のための収穫予測手法の開発、ならびに標準的な管理計画を提示することを目的としたものである。

3.1.1. 資料と方法

研究対象地は九州阿蘇九重地方に位置する南小国町とした(図3.1)。南小国町の平均気温は12.3°Cであり、降水量は約2500mmである。

試験プロットを南小国町牧野組合が管理するクヌギ混牧林内に設定し、皆伐後に褐毛和種牛の放牧を開始した。試験プロットは野草の林床植生を持ち放牧を行わない「禁牧区」(面積0.068ha)、野草の林床植生を持ち放牧を行う「放牧区」(面積0.159ha)、牧草を導入し放牧を行う「牧草区」(面積0.162ha)の計3プロットであり、林木と植生の測定を8年間行った。

上記の試験と並行し、南小国町および朝地町の14カ所のクヌギ混牧林において林分調査および植生調査を行った。林木については、各林分に0.02haの円形プロットを設け、胸高直径と樹高について毎木調査を行った。また、植生に関しては各林分につき10点の1m²のコドラートを設け、コドラート内の植生を刈り取った後、草種ごとに乾重量を測定した。

以下、南小国町および朝地町については、それぞれ南小国、朝地と称する。

3.1.2. クヌギ混牧林施業の概要

クヌギ混牧林施業の特徴は以下のようにまとめられる。

(1) 目的：シイタケ原木生産と肉用牛の繁殖経営を同時に同一地において行うことを目的としている。

- (2) 樹種：クヌギを利用する。クヌギは九州地方の郷土樹種であり、同地方ではシイタケ原木として最も一般的に利用されている樹種である。
- (3) 林床植生：一般にはススキやササを主体とする野草が利用されるが、時に牧養力改善のため牧草導入が行われることもある。
- (4) 更新：皆伐後の萌芽により更新が行われるのが一般的である。
- (5) 立木密度：クヌギ林の立木密度は、収穫時において1000～2000本/haが一般的である。
- (6) 放牧管理：放牧地は普通20～40haの牧区に分割され、植生の状態や林木への被害を考慮しながら輪換放牧される。
- (7) 植生管理：阿蘇地方では毎年春に火入れが行われ、クヌギ混牧林もその対象になる。クヌギは厚い樹皮を持つため焼失することはないが、侵入してきたマツなどは火入れにより焼失し、その結果クヌギの純林が成立しやすい。
- (8) 林木管理：萌芽更新直後は密度が高いため、萌芽整理と称して除伐を行うことが多い。また、被害木や被圧木は早めに除伐を行うが、放牧牛の歩行の邪魔にならないように下枝を払うこともある。
- (9) 伐期：通常のシイタケ原木生産を目的としたクヌギ林と同様に、伐期は10～15年である。

3.1.3. 立木密度の減少

皆伐・更新後、他植生による被圧や放牧牛による被害、火入れのために、クヌギ林の立木密度は大きく減少した。

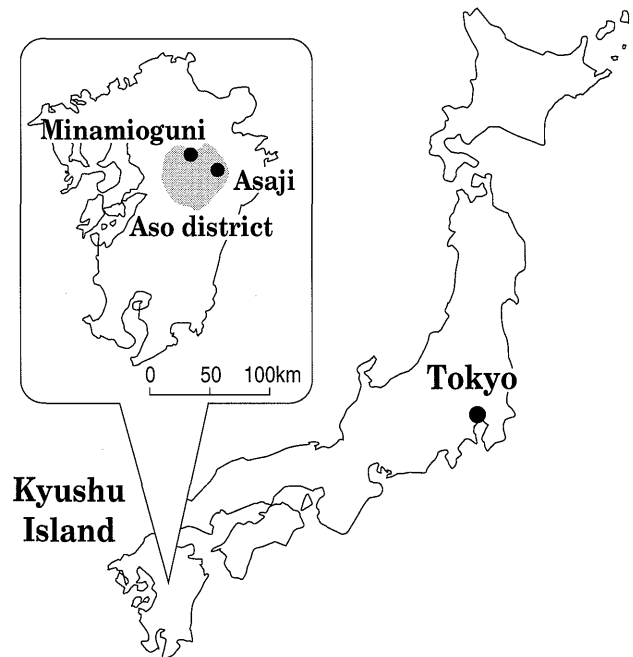


図3.1 試験地の位置

図3.2に禁牧区、野草区、牧草区における立木密度の変化を示した。

禁牧区の立木密度は当初6647本/haであったが、その年の秋の生存率は79.9%に、最初の2年のうちに41.6%に激減した。これは林床植生が豊富なため火入れ時の火勢が強くなってしまい、これによって多くの萌芽が焼失したためである。

更新当初、野草区の立木密度は7937本/ha、牧草区の立木密度は5960本/haであった。放牧牛は葉の採食や幹の折れなどの被害を林木に与えたものの、その生存率は禁牧区よりも高かった。これは、放牧により林床植生が少ないために禁牧区ほど火勢が強くならず、萌芽の焼失が少なかったためと考えられる。

禁牧区では2年生時に、野草区・牧草区では3年生時に萌芽整理を行い、立木密度は当初の20~25%となった。なお、萌芽整理はクヌギ混牧林のみで行われるものではなく、シイタケ原木生産を目的としたクヌギ林では一般に行われている作業である。

萌芽整理後、いずれの牧区でも林木密度の減少はわずかとなり、安定化した。更新8年後、禁牧区の立木密度は1223本/ha(生存率18.4%)、野草区では1365本/ha(同17.2%)、牧草区では840本/ha(14.1%)であった。野草区と牧草区の間での生存率および立木密度の差異は、放牧強度の違いによるものと考えて良い。

これらの結果から、成林時のクヌギ混牧林の林木の生存率は萌芽時を基準として20%以下であり、成林時の立木密度としては野草区では1500本/ha以下、牧草区では1000本/ha以下が適当であると考えられる。

3.1.4. 樹高成長と直径成長

図3.3に樹高成長を示した。更新当年の秋、禁牧区の平均樹高は170cmであり、野草区・牧草区での平均樹高115cmよりも高かった。これは放牧牛による萌芽の採食、特に

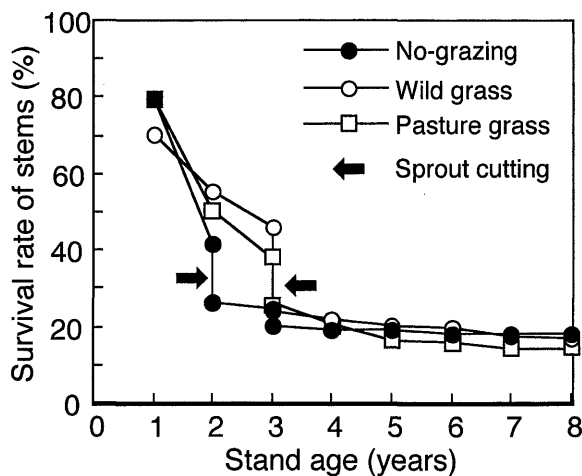


図3.2 立木密度の変化

頂芽の採食が原因と考えられた。野草区においては更新から2~3年間樹高成長が抑制され、その影響は8年後の試験終了時においても残存していた。牧草区では更新初年に樹高成長の抑制が見られたが、その後の成長速度は禁牧区と同等であった。これは牧草用の施肥が林木の成長にも効果をもたらしたものと考えられる。

萌芽の採食による成長抑制は直径成長にも現れた(図3.4)。しかし、牧草区における直径成長は2年生以降旺盛で、試験終了時には牧草区の直径は禁牧区の直径を越した。これは牧草区の立木密度が結果的に低くなったことと、牧草用の施肥が直径成長にも影響を与えたことが原因として考えられた。

これらの結果から、更新当初の数年、放牧や採食被害は樹高成長および直径成長を抑制するものと考えられる。これを避けるためには、採食を中心とした林木への被害状況を監視しながら放牧強度を調整するといった綿密な放牧管理が必要である。

3.1.5. 放牧強度と植生

当試験において放牧管理は牧野組合が行い、植生や林木への被害を見ながら牧区移動の時期を判断した。試験地における放牧では毎年2~4回牧区移動が行われ、その結果125~164 CD/haの放牧実績となった。なお、この試験においては放牧実績と林齢との関係は見られなかった。

図3.5は各牧区の草量の変化を示したものである。禁牧区においては草量は徐々に増加したが、野草区では徐々に減少し、牧草区では急激に減少した。野草区・牧草区における草量の減少は、林木成長と連続した放牧利用によって林床の植生型および生産量が変化したためと考えられた。

林床植生はネザサを主体とするササ類、ススキを主体とするススキスゲ類、広葉草類、ツル類、牧草類、およびシダ類の6つの草種に分類できた。このうちシダ類は放牧牛の飼料としては適さないため、草量の積算には含んでい

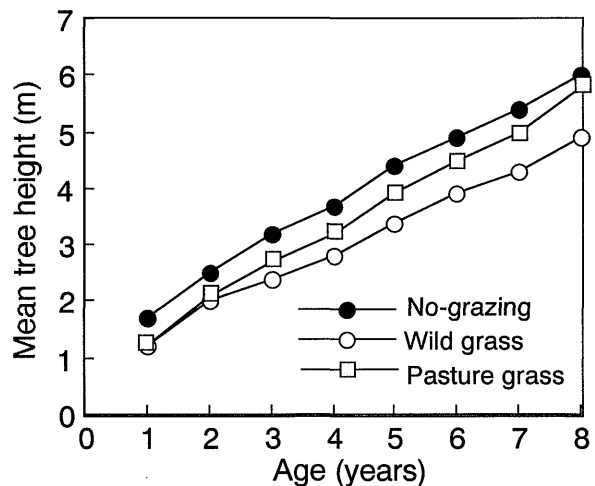


図3.3 樹高成長

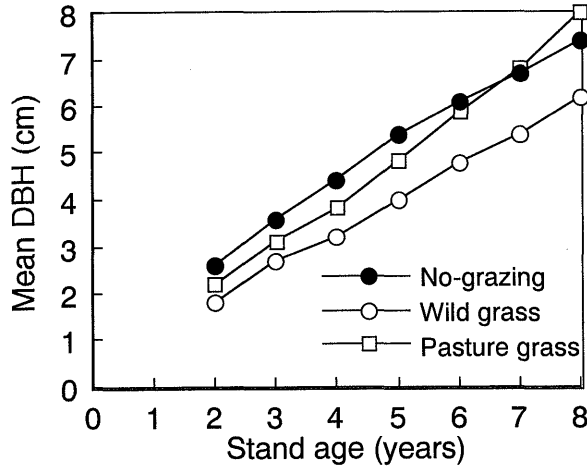


図 3.4 直径成長

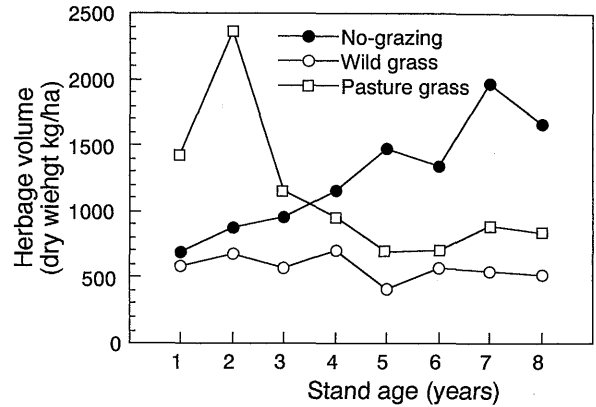


図 3.5 草量の変化

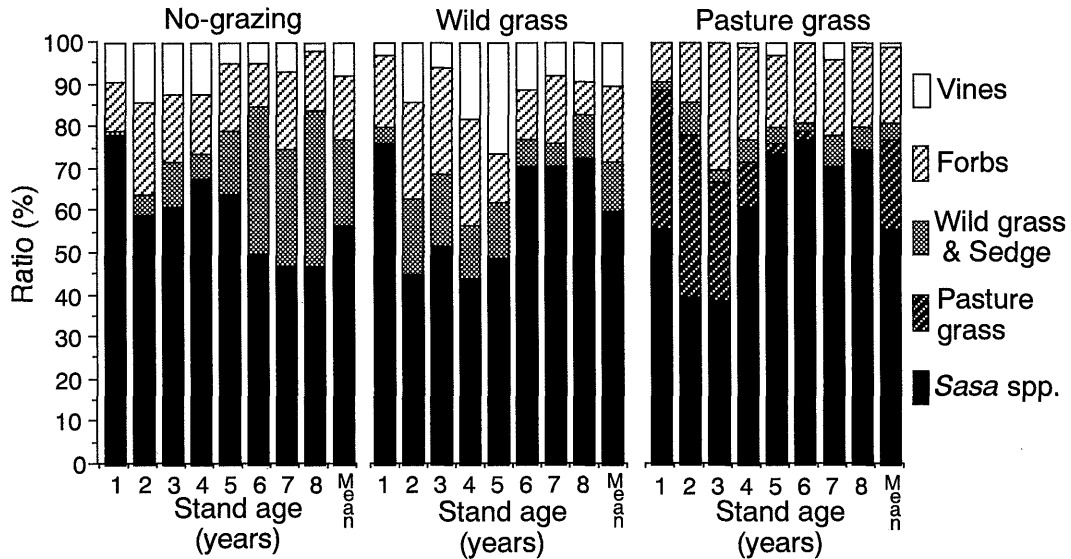


図 3.6 草種の比率の変化

ない。これらの草種の比率は時間の経過に伴い、つまり放牧を繰り返し、林木が成長するに従って変化した(図 3.6)。禁牧区では成長するに従いスキースゲ類の比率が増加したが、野草区・牧草区ではその比率は減少した。その一方で、野草区・牧草区のササ類は徐々に増加した。内藤(1988)はスキースゲ草地は放牧利用によってササ型草地に推移することを示したが、クヌギ混生林における結果もそれに準ずるものであったことが分る。

3.1.6. 林木への被害

放牧牛による林木への被害は放牧開始から4年目まで見られ、被害は採食、枝折れ、幹折れ、剥皮といった4種類に分類された。クヌギは牛の採食嗜好性が高い樹種であり(岡野・岩元 1989)、採食被害は無視できない。これは採食

嗜好性が低く、通常の放牧管理下では採食被害がほとんど発生しないスギ・ヒノキと大きく異なる点である。

採食被害は更新当初及びその翌年の秋に林木の70~80%で発生し、平均採食高は140~150 cm、最高は270 cmであった。採食被害の中でも頂芽の採食は樹高成長に影響を与えた。このことは放牧牛が頂芽を採食できる間、つまり樹高2 m程度までは慎重な放牧管理が必要であることを示している。

幹折れと剥皮といった被害は枯死に至る大きな被害をもたらす。図 3.7 に幹折れと剥皮の発生率を示した。これらの被害の発生率は林木が成長するに従って減少した。また、野草区よりも牧草区での発生率が高かったが、これは牧養力の高い牧草区において結果的に放牧強度が高くなったためと考えられる。

更新当初, このような被害が発生し立木密度が急激に減少したが, 萌芽整理後は立木密度が安定した。このことは, この試験で実施された程度の放牧強度であれば, 被害が成林を妨げるまでは至らないことを意味している。

このようなことから, 放牧牛による林木への被害は樹高が2 mに達するまでの更新当初2~3年間に発生するものの, 放牧強度が150 CD/ha程度であれば被害の発生率もそれほど高くなく, 大きな問題には至ることはないと考えられる。

3.1.7. 立木密度と放牧強度

2章1節に示したように, 混牧林施業は林・畜・草からなるシステムであり, その中でも林分密度と牧養力の関係が最も重要である。正しく牧養力を推定することが経営計画の樹立の際に重要となる。

前章では, 針葉樹人工林においては林分密度管理図における収量比数 Ry (以下, Ry と表す) と牧養力の間に高い相関があることを示した。このことを背景に, 表3.1に示した南小国と朝地におけるクヌギ混牧林の調査結果を利用し, クヌギ混牧林における Ry と牧養力の関係を調べた。牧養力はコドラート法によって測定した草量から, 利用率を65%, 放牧牛1頭につき乾重で18.2 kg/dayを採食するという条件で算出した。

上層木樹高と本数密度から Ry を算出する(2.8)式について, 広葉樹(クヌギ, ナラ類)人工林林分密度管理図(林野庁1985)に示されているパラメータを用いることにより, クヌギ林の Ry は次式のように表される。

$$RY = \frac{0.057424 H^{-1.005549} + 13421.6 H^{-3.016648} / 606827.1 H^{-2.011099}}{0.057424 H^{-1.005549} + 13421.6 H^{-3.016648} / N} \quad (3.1)$$

ここで, RY: 収量比数 Ry (0 ≤ RY ≤ 1), H: 上層木樹高(m), N: 本数密度(本/ha)。

る Ry と牧養力の関係を示したものであり, 以下の回帰式が得られた。

$$GC = 96.4 - 84.0 RY \quad R = 0.52 \quad (3.2)$$

ここで, GC: 放牧強度(CD/ha), RY: 収量比数 Ry (0 ≤ RY ≤ 1), R: 相関係数。

この回帰式の相関係数は0.52とそれほど高くはない。このことは, 広葉樹では Ry を求めるための樹高の測定において, 針葉樹と異なり梢端を特定しにくいことや, 牧養力を推定するための草量の測定において, 測定箇所による分散が大きいということも起因しているものと考えられる。しかしながら, Ryが高くなるに従って牧養力が低下していくことは明らかであり, この回帰式により林分の状態から牧養力を推定することができる。これをクヌギ混牧林における「Ry-牧養力モデル」と名付けた。

ところで, 一般的な放牧管理を行っている南小国においては, Ryが0.5以下の状態で放牧利用が行われていた。一方, 朝地は集約的な放牧管理を行っており, Ryが0.45~0.73の間で放牧利用されていた。このことから, 一般的な

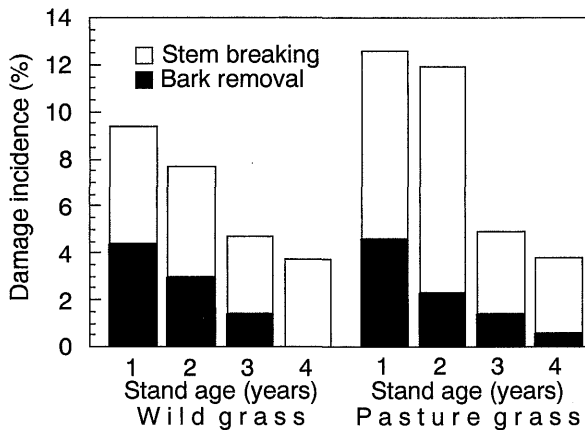


図3.7 被害の発生率

図3.8は南小国と朝地の野草利用のクヌギ混牧林におけ

表3.1 南小国・朝地における調査結果

調査地	番号	標高	方向	傾斜	平均直径	平均樹高	立木密度	断面積	材積	樹冠占有率	収量比数	平均相対照度	上層木樹高	平均草量	牧養力
Site	Plot No.	Altitude	Slope direction	Angle of slope	Mean diameter	Mean height	Stand density	Basal area	Volume	Rate of crown coverage	Ry	Relative light illuminance	Predominant height	Mean hebage	Grazing capacity
		m		°	cm	m	trees/ha	m ² /ha	m ³ /ha	%		%	m	g/m ²	CD/ha
南小国 Minami-oguni	1	730	E	20	10.4	7.9	1100	9.81	41.2	73	0.37	34.4	8.7	335.3	80
	2	760	E	23	9.5	6.5	1300	10.01	35.9	71	0.35	36.7	7.7	301.3	71
	3	740	NW	26	13.5	9.2	650	10.50	46.1	70	0.33	32.3	10.5	288.5	70
	4	760	NE	22	11.4	8.2	850	9.24	39.0	70	0.34	43.8	9.4	435.9	118
	5	750	SE	21	11.9	8.2	1050	12.85	56.6	69	0.44	32.3	10.0	186.9	28
	6	750	NW	26	9.9	6.6	950	7.91	28.4	53	0.27	56.7	7.7	350.9	89
	7	770	SE	11	14.0	9.7	1000	16.04	74.9	68	0.49	24.9	11.2	234.7	55
	8	670	S	24	9.7	6.4	1700	15.00	55.3	76	0.46	34.3	8.2	243.0	50
	9	670	S	22	7.5	5.6	1050	5.36	19.8	60	0.28	53.7	7.5	230.9	48
	10	660	NW	26	8.5	6.4	1350	8.90	35.4	66	0.43	30.5	8.7	227.8	39
朝地 Asaji	11	580	S	16	7.7	7.6	3450	16.91	73.8	91	0.73	5.8	8.6	215.2	48
	12	570	S	9	11.8	8.2	1200	14.03	59.0	94	0.45	6.1	9.5	262.3	39
	13	560	SE	8	8.2	8.9	2500	14.09	69.3	89	0.73	18.5	10.1	153.9	37
	14	570	SW	24	7.9	7.7	2250	11.84	51.7	69	0.62	44.7	9.1	184.2	50

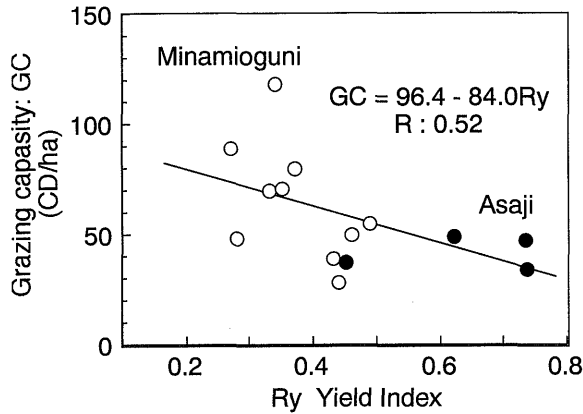


図 3.8 クヌギ混牧林における Ry と牧養力の関係

放牧管理を行う場合は Ry 0.5 以下、集約的な放牧管理を行う場合は Ry 0.6 以下で放牧利用が可能であると考えられる。このように、経営者は経営目的に応じ、放牧利用の上限となる Ry を決める必要がある。

3.1.8. 収穫予想表の作成

表 3.1 に示したデータから、平均樹高、平均直径、立木密度および立木材積について以下の関係式を得た。

$$\log H_m = 0.1276 + 0.6646 \log T \quad R = 0.967 \quad (3.3)$$

$$\log N = 3.4536 - 0.3530 \log T \quad R = 0.993 \quad (3.4)$$

$$\log D = 0.2652 + 1.1589 \log H_m - 0.0867 \log N \quad R = 0.997 \quad (3.5)$$

$$D_b = 0.204 + 1.027 D \quad R = 0.997 \quad (3.6)$$

$$G = \pi D_b^2 N / 4000 \quad (3.7)$$

$$\log V = 0.12216 + 0.5274 \log H_m + 1.0227 \log G \quad R = 0.998 \quad (3.8)$$

$$H = 2.37 + 0.88 H_m \quad R = 0.944 \quad (3.9)$$

ここで、 H_m ：平均樹高 (m)、 T ：林齢 (年)、 N ：本数密度 (本/ha)、 D ：平均直径 (cm)、 D_b ：平均断面直径 (cm)、 G ：断面積合計 (m^2/ha)、 V ：材積 (m^3/ha)、 H ：上層木樹高 (m)、 R ：相関係数。

これらの関係式と、先に示した(3.1)式、(3.2)式を利用することにより、表 3.2 の収穫予想表を得た。この収穫予想表は一般の項目に加え、Ry と混牧林牧養力を付加したところに特徴がある。なお、この収穫予想表が想定する放牧強度では、放牧牛による林木への被害は問題にはならないとして、草地としての牧養力をそのまま混牧林牧養力とした。

3.1.9. クヌギ混牧林施業体系

先に示したクヌギ混牧林の施業概要を基礎に、南小国での試験結果と作成された収穫予想表を加えて、クヌギ混牧

林施業体系を図にまとめた (図 3.9)。この図は立木密度、材積および混牧林牧養力と、林、草、畜に関する管理項目を示したものである。カッコで示されている事項は任意を意味し、必要かつ可能であれば行うと良いということを示している。

この施業体系図の要点は次のようにまとめられる。

- (1) 放牧が繰り返され、林木が成長するにつれて牧養力は減少する。牧養力は施業体系図で示されているような林分の密度管理によって制御できる。
- (2) 混牧林牧養力は野草利用で 60~80 CD/ha、平均 70 CD/ha であり、このような放牧強度では林分の更新を妨げることはない。
- (3) 最初の 2~3 年は放牧牛による林木への被害や成長抑制を抑えるため、慎重な放牧管理が必要である。
- (4) 適正な放牧により立木密度は安定する。萌芽整理により安定した密度に早く達するので、必要かつ可能であれば行うのが良い。

3.1.10. 利活用の展望

クヌギ林は一般に皆伐後の萌芽により更新される。したがって、その直径分布はスギ・ヒノキといった針葉樹人工林とは異なり、いわゆる L 型分布をなすことが多い。L 型の直径分布は天然更新した広葉樹林において一般的に見られ (松本 1986)、このことが林分密度管理図の広葉樹林への適用を難しくしている。

Matsumoto (1996) は、もともと直径分布が正規分布を示す針葉樹人工林を対象に考案された林分密度管理図とその手法を、L 型分布をなすことが多い広葉樹林にも適用するため、平均直径と同時に上ヒンジ値を利用することを提案した。上ヒンジ値とは直径分布のうち大きいものから数えて全体の 25% の数の位置にある直径を表し、その定義から分布形に関わらずそれよりも大きな林木の数を把握できるという利点を持つ。したがって、用材やシイタケ原木を生産目的とし目標径級以上の本数を推測する場合、この上ヒンジ値は良い指標となる。

図 3.10 はシイ類再生林林分密度管理図 (粟屋・松本 1986) を基礎とし、平均直径を上ヒンジ直径に置き換えて作成した「シイ林の林分密度管理図 (改良版)」である。例として、本数密度が 1000 本/ha、上層樹高が 12 m であるとき、上ヒンジ直径は 20 cm と表されており、これは直径が 20 cm 以上の林木が 250 本/ha 存在することを示している。

現在のところ、クヌギ林を対象とし上ヒンジ値を使用した林分密度管理図は開発されていないが、クヌギ混牧林の収穫予測においてもその活用が期待される。

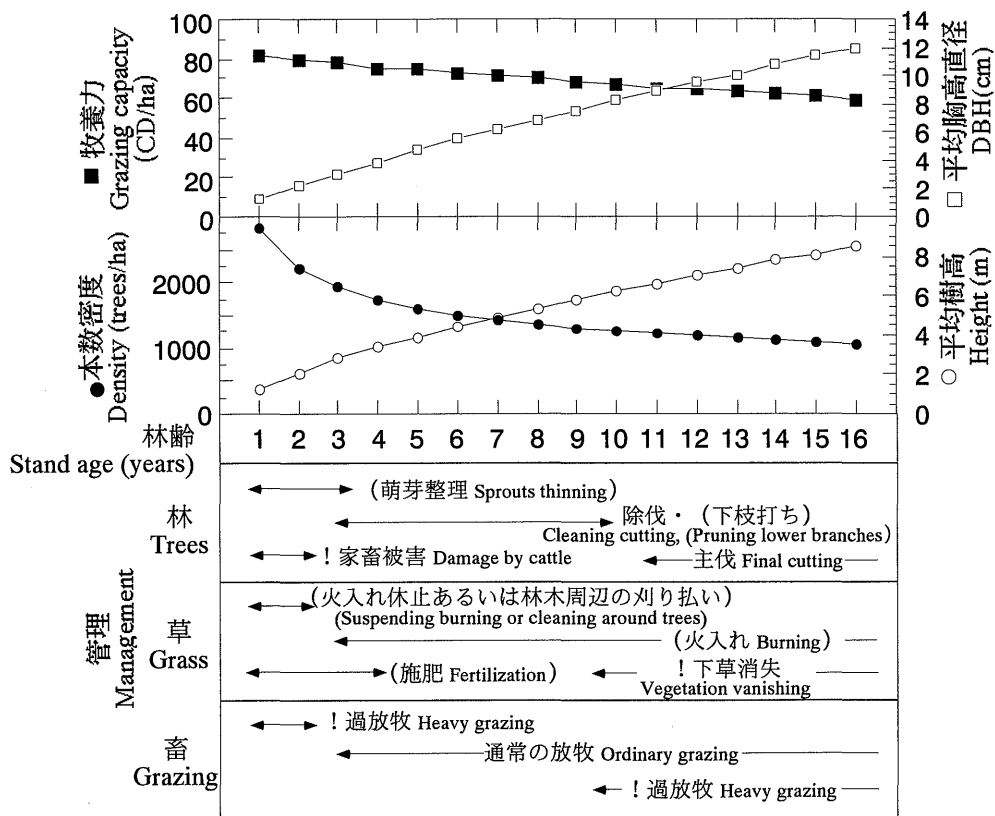
3.2. 国内の広葉樹資源分布と混牧林施業のポテンシャル

クヌギ混牧林施業は、クヌギ原木生産と子牛を生産する繁殖経営という組み合わせのため、一般的な林業と比較し

表 3.2 クヌギ混牧林収穫予想表
(九州・阿蘇九重地方)

林齢 year	平均直径		平均樹高	本数密度	断面積	材積	上層木樹高	収量比数	地位中 Site:Middle 混牧林牧養力 Grazing capacity for grazing forests
	Mean diameter cm	Mean height m	Mean height m	Stand density No./ha	Basal area m ²	Volume m ³	Predominant height m	Ry	CD/ha
1	1.3	1.3	2842	0.5	0.7	3.5	0.18	81	
2	2.3	2.1	2225	1.2	2.4	4.2	0.20	80	
3	3.1	2.8	1928	1.7	3.9	4.8	0.22	78	
4	3.9	3.4	1742	2.4	6.2	5.4	0.25	75	
5	4.7	3.9	1610	3.2	8.9	5.8	0.26	75	
6	5.5	4.4	1510	4.1	12.3	6.2	0.28	73	
7	6.2	4.9	1430	4.8	15.2	6.7	0.30	71	
8	6.9	5.3	1364	5.7	18.9	7.0	0.31	70	
9	7.5	5.8	1308	6.4	22.3	7.5	0.34	68	
10	8.2	6.2	1261	7.4	26.9	7.8	0.35	67	
11	8.9	6.6	1219	8.4	31.6	8.2	0.37	65	
12	9.5	7.0	1182	9.2	35.8	8.5	0.38	65	
13	10.1	7.4	1149	10.1	40.5	8.9	0.39	64	
14	10.8	7.8	1119	11.2	46.3	9.2	0.41	62	
15	11.4	8.1	1093	12.2	51.6	9.5	0.42	61	
16	12.0	8.5	1068	13.2	57.3	9.9	0.44	59	

注：株数は800株/ha
Note: Number of stumps is 800 stumps/ha.



注：管理欄の！マークは注意の必要性を示す
Note: Exclamation marks '!' in management boxes mean cautions about the matters.

図 3.9 クヌギ混牧林施業体系

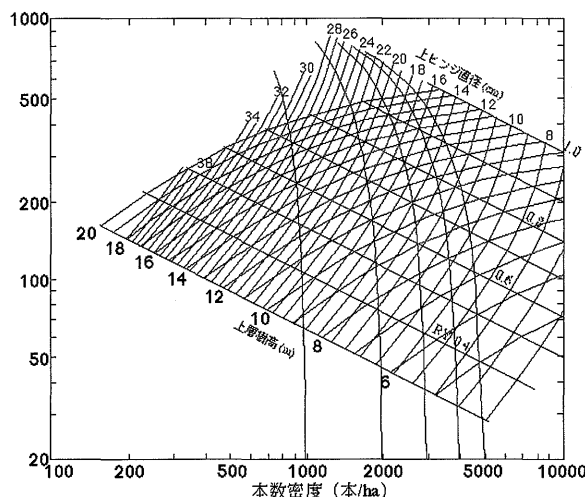


図 3.10 シイ林の林分密度管理図 (改良版)

て短期間に収益を得られる。さらに、収穫された原木を利用したシイタケ生産を組み合わせることにより、複合経営を促す効果ももたらすなど利点は多い。現在のところクヌギ混牧林施策が実施されているのは阿蘇・九重地方を中心とする九州地方に限られているが、立地環境には特に厳しい条件はなく、クヌギの分布域であれば他地方での実施も十分可能と考えられる。このような背景から、広葉樹資源量と分布の把握を通して、九州地方以外でのクヌギ混牧林施策のポテンシャルを調べた。

3.2.1. 広葉樹資源分布の推定

近年、広葉樹資源について多方面から関心が集まっている。しかしながら、戦後の長い間、針葉樹人工林が林業の中心であったことから、広葉樹資源に関する情報は針葉樹と比較して不足している。例えば、林業センサス（農林水産省統計情報部 1991）でも明らかなように、広葉樹資源量の総量は把握されているものの、樹種別の資源量は明かにはされておらず、分布に関しても生態学的な把握にとどまっている。このような広葉樹資源の現状を背景に、広葉樹資源について「何が、どこに、どれだけ」分布しているのかを明らかにすることを目的とした。

3.2.1.1. 資料と方法

分布把握の対象地域は北海道から鹿児島県まで 46 都道府県とした。資源量推定の資料は、国有林および民有林の森林簿と広葉樹賦存状況調査に求めた。広葉樹賦存状況調査は林野庁によって昭和 56～60 年に行なわれた全国規模の調査である。この調査の概要を広葉樹賦存状況調査要領（林野庁計画課 1981）を参照してとりまとめ、これを表 3.3 に示した。この調査では有用広葉樹の資源量把握を狙い、表 3.3 に示したような樹種区分が行われた。そのため、本論文でもこの樹種区分および表記に従った。特にクヌギに

おいては、アベマキも含んだものとして区分されているので注意が必要である。

資源量の推計計算および分布把握に関しては、取り扱うデータ量や作図作業が膨大なのでコンピュータの活用を徹底することとし、資源量に関するデータベースの構築と分析、地理情報システムによる分布図の作成を行った。当システムは、パソコンと市販のソフトウェアを組み合わせたものであり、目的に適合したコンパクトなシステムである（Matsumoto 1991）。なお、分布図の区画単位は市町村とし、3198 市町村が対象となった。

3.2.1.2. 資源量推定の手順

広葉樹資源量の推定と分布の把握については、図 3.11 に示した手順に従って行った。広葉樹資源量の推定では、森林簿から得られた広葉樹林の齢級別面積と、広葉樹賦存状況調査から得られた都道府県別の収穫表から幹材積資源量を推定した。

樹種分布に関しては、森林簿の内容の違いのため民有林と国有林とは異なるアプローチを取った。民有林の森林簿では広葉樹の樹種情報は極めて不足していたため、広葉樹賦存状況調査結果を利用して市町村ごとの樹種比率を算出し、これを民有林の広葉樹資源量に乗じて樹種別資源量を算出した。一方、国有林に関しては森林簿の樹種情報が詳細であったため、これを積算することにより樹種別資源量を市町村別に集計した。これらを合算して市町村別の樹種別資源量を算出し、併せて各市町村の樹種比率を把握した。

3.2.1.3. 広葉樹資源量の分布

推定の結果、広葉樹林面積は 1121 万 ha であり、広葉樹資源量は 14 億 6500 万 m^3 であった。また、単位面積当たりの平均資源量は 148.6 m^3/ha であった。

図 3.12 に広葉樹資源量の分布を示した。ha 当りの資源量は近畿以西で高く、半数の市町村で 200 m^3/ha を越えていた。それに対し、中部以北ではせいぜい 150 m^3/ha であった。これは近畿以西ではシイ、カシといった常緑樹の分布が主体であるのに対し、中部以北の広葉樹がコナラ、ミズナラといった落葉樹が中心であり、このような樹種の違いによって ha 当りの資源量に差が現れたものと考えられる。

3.2.1.4. 広葉樹優占樹種分布

図 3.13 に優占樹種の分布を示した。ここでの優占樹種とは、対象市町村において最も蓄積比率が高い樹種を意味しており、生態学的な意味とは異なる。

分布域が最も広いものは 41% の市町村で優占樹種となったコナラであり、以下シイ 10%、カシ 9.4%、クヌギ 8.0%、ブナ 6.4% と続いていた。

全国を総計した主要広葉樹の蓄積比率を図 3.14 に示した。また、表 3.4 に都道府県別の樹種別蓄積量を示した。最も蓄積量が多い樹種はコナラで 2 億 1600 万 m^3 （全体の

表 3.3 広葉樹賦存状況調査の概要
 広葉樹賦存状況調査要領（林野庁計画課 1981）を参照して作成

目的	天然広葉樹資源の賦存状況を把握し、地域森林計画の樹立及び実施に寄与する。		
実施主体	林野庁計画課。現地調査は都道府県が実施。		
調査期間	1981～1985年。		
対象林分	民有林の広葉樹林及び針広混交林。		
調査設計	森林簿をもとに齢級により6区分に層化し、小班単位で系統抽出。標本数は計画区ごとに220点以上。全国で約5万点。		
現地調査	プロット設定	3段円形プロット。大円：0.1 ha、中円：0.04 ha、小円：0.02 ha。	
	調査対象木	各円において胸高直径により選定。大円：36 cm以上、中円：18 cm以上、小円：4 cm以上。	
	樹種	樹種名	備考
	1	ブナ	ブナノキ属全部。
	2	クリ	クリ属全部。
	3	カシ	アカガシ属全部。ウバメガシを含む。
	4	シイ	シイノキ属。マテバシイ属。
	5	クスノキ	アベマキを含む。
	6	コナラ	
	7	ミズナラ	
	8	カシワ	カシワ類全部。
	9	カンバ	シラカンバ属全部。
	10	ケヤキ	
	11	クスノキ	タブを含む。
	12	カツラ	
	13	ニレ	ニレ属全部。
	14	シナノキ	
	15	センノキ	
	16	ヤチダモ	トネリコを含む。
	17	シオジ	
	18	ホオノキ	
	19	キハダ	
	20	クルミ	
	21	カエデ	カエデ属全部。
	22	ハンノキ	ハンノキ属全部。
	23	ドロノキ	ヤマナランを含む。
	24	ニセアカシア	
	25	その他L	
	26	N	

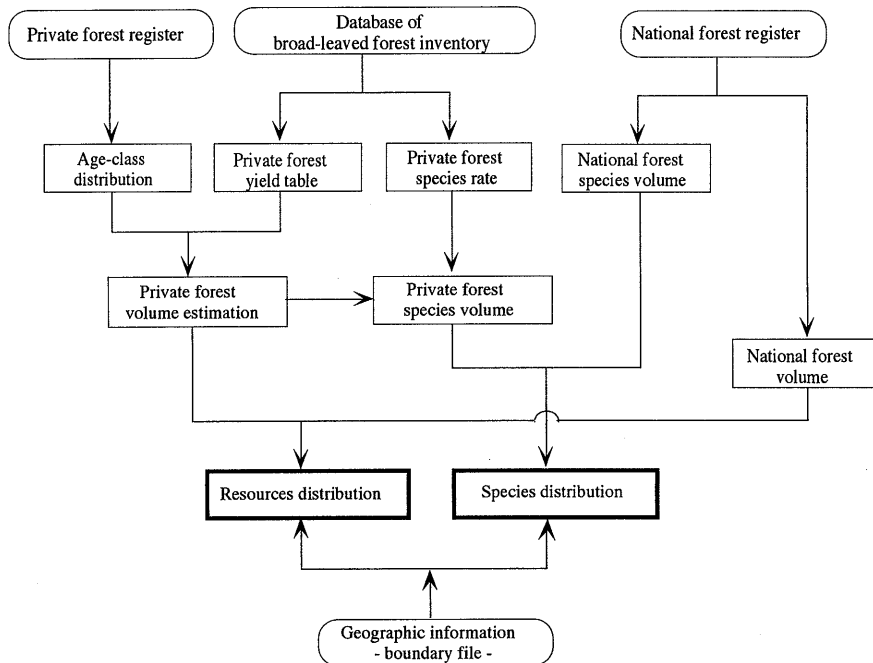


図 3.11 広葉樹資源推定手順

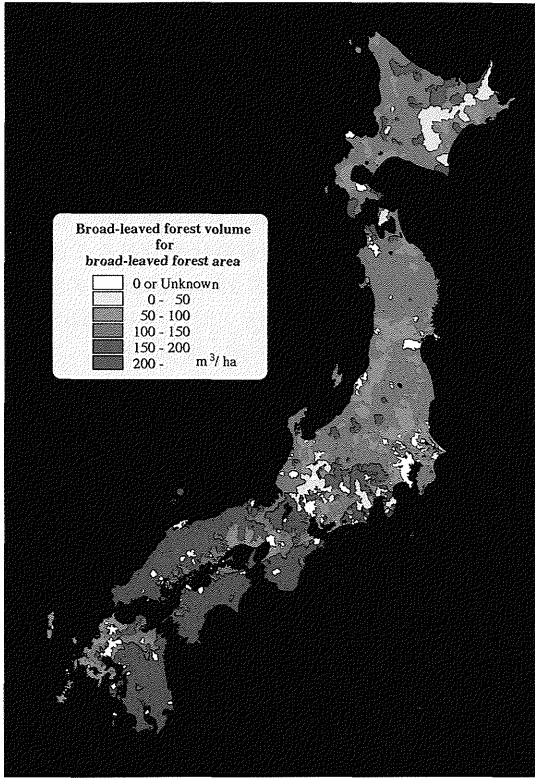


図 3.12 広葉樹資源量の分布

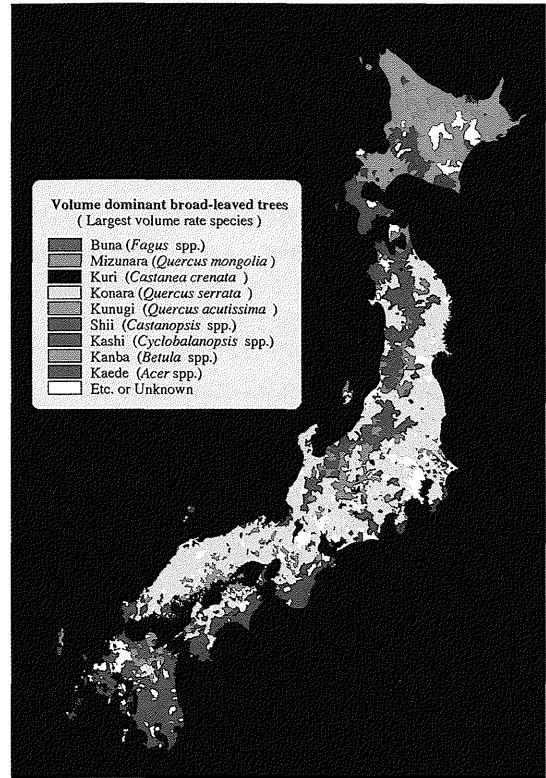


図 3.13 広葉樹優占樹種の分布

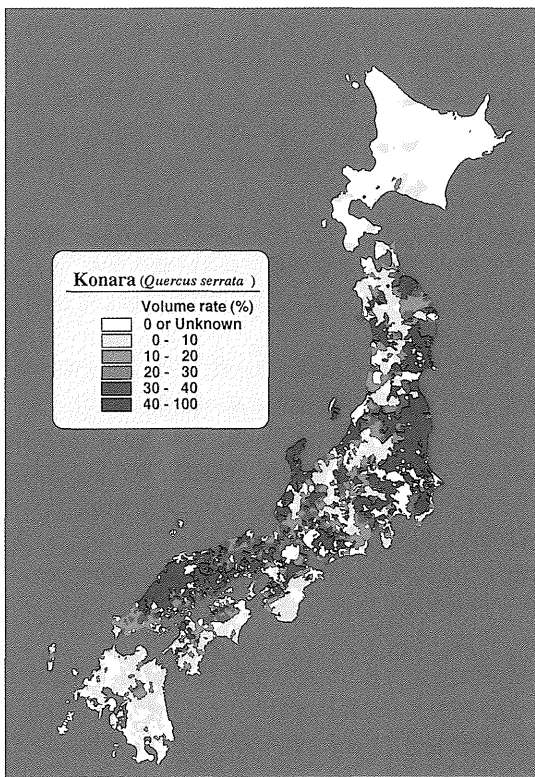


図 3.15 コナラの分布

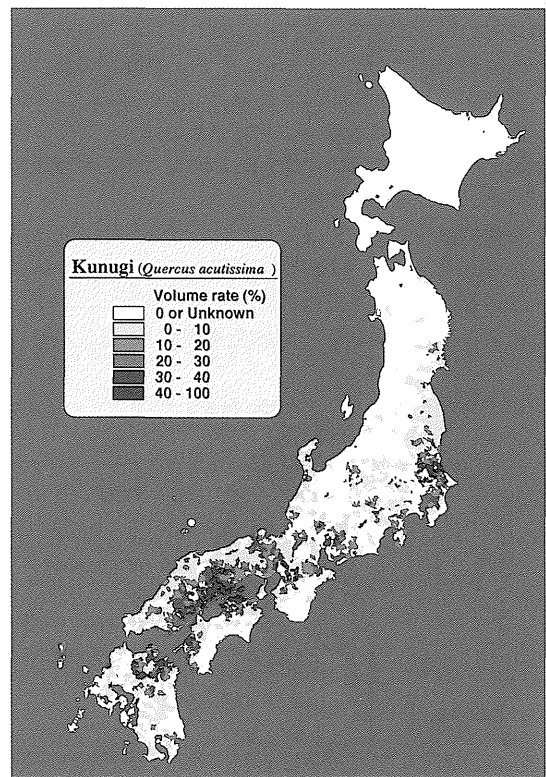


図 3.16 クスギの分布

14.8%)の蓄積を持っていた。それ以降はブナ1億2400万 m^3 (8.5%), ミズナラ1億900万 m^3 (7.4%)と続く。このように分布域の広さ, 資源量ともにコナラが群を抜いていた。

3.2.1.5. 樹種別分布

最多の蓄積量を持つコナラは, 東北地方から九州まで広い範囲で分布していると同時に, いずれの地方でも極めて高い蓄積比率を示した(図3.15)。特に岩手県, 宮城県, 福島県, 茨城県の4県では蓄積比率が高い市町村が広く分布しており, 80%の市町村でコナラの蓄積比率が20%以上であった。また, 鳥取県を中心として山陰地方でも高い蓄積比率が分布しており, 鳥取県, 島根県, 岡山県, 広島県の4県では74%の市町村でコナラの蓄積比率が20%以上であった。

クヌギは福島県以南, 関東・中部地方の太平洋側から九州まで分布していた(図3.16)。瀬戸内海をはさんだ中国・四国および九州阿蘇・九重地方で20%を越す高い蓄積比率が分布しており, 特に岡山県, 広島県では50%の市町村でクヌギの蓄積比率が20%以上であった。なお, 中国地方ではアベマキが多く分布するが, ここでは「3.2.1.1 資料と方法」に示したように, 基礎データとした広葉樹賦存状況調査に従ってクヌギとアベマキをあわせてクヌギと称しているので注意が必要である。

3.2.2. クヌギ混牧林施業のポテンシャル

本研究の広葉樹資源推定方法においては, 民有林の森林簿が樹種別の森林面積を持たないため, 樹種別の蓄積比率から樹種別資源量を推定している。したがって, この方法では樹種別の面積を求めることはできない。そこで, 樹種別面積比を樹種別蓄積比と等しいと仮定してクヌギ混牧林施業のポテンシャルを概算した。

広葉樹林面積1121万haに対し, 表3.4に示したクヌギの比率3.56%から, クヌギ林面積は40万haと計算される。これを全てクヌギ混牧林に供すると仮定し, 表3.2で示したクヌギ混牧林収獲予想表を基準にha当りの平均混

牧林牧養力を70CD/ha, 放牧日数を年間180日として試算したところ, 年間16万頭の飼育が可能という結果を得た。これは, 現在日本で飼育されている肉用牛286万頭(農林水産省統計情報部1999)に対して5.6%にあたる。

現在, クヌギ混牧林施業が実施されているのは九州・阿蘇九重地方に限られている。しかしながら, これまで示したクヌギの分布域と蓄積比から見れば, 岡山県, 広島県が九州阿蘇・九重地域と同等な資源状況であることがわかる。岡山県, 広島県の2県では7万ha規模のクヌギ林が存在するものと推定され, 先の推定と同じ方法で算出すると, その飼養可能頭数は年間2.7万頭と推定された。このような資源的背景に加えて当地方はもともと畜産が盛んな地域でもあり, クヌギ混牧林施業に適した地域であると考えられる。

3.2.3. コナラ混牧林施業のポテンシャル

シイタケ原木用樹種としてはクヌギと並んでコナラが良く利用される。特に中部以北においてはコナラの資源量が豊富であることから, シイタケ原木用樹種としてはコナラの方が一般的に利用されている。先に示したように, コナラは日本において最も広く分布し, 資源量も最も多い広葉樹種であり, その効果的な利用は里山における未利用資源の有効利用につながる。

森林総合研究所高萩試験地ではクヌギ林と共にコナラ林を対象とした混牧林施業試験が行われていたが, その動態はクヌギ林と非常に似たものであった。このようなことから, クヌギ林だけではなく, コナラ林も同様な混牧林利用の対象と考えることは理にかなっており, コナラの資源量とその分布の広さから, シイタケ原木林を目標とした混牧林施業の対象地域は広く, その対象面積も増大する。

クヌギ林と同じ方法で試算したところ, コナラ林の面積は全国で179万haであり, 年間70万頭を飼育できることが分かった。クヌギ, コナラ林の両者を混牧林の対象とすれば, 年間86万頭の牛を飼養できる計算になる。これは現在国内で飼育されている肉用牛の頭数に対して30%にあたるものである。

コナラは岩手県, 宮城県, 福島県, 茨城県の太平洋沿岸, 鳥取県を中心とした中国地方に高い蓄積比率が広く分布している。コナラ林の面積は岩手県, 宮城県, 福島県, 茨城県の4県では37万ha, 鳥取県, 島根県, 岡山県, 広島県の4県においては25万haと推定され, 飼養可能頭数はそれぞれ年間14万頭, 9.9万頭と推定された。このように豊富な資源が分布していることから, これらの地方においてシイタケ原木生産を目標としたコナラ混牧林施業のポテンシャルは高いものと考えられる。

以上のように, あくまでも試算ではあるが, クヌギ・コナラ林を利用した混牧林施業を行うことにより, 日本の肉用牛の飼養頭数を大幅に引き上げることが明らかとなった。現在, クヌギ・コナラ林の多くは里山の主たる樹種として未利用の状態であり, その活用方法が模索されている

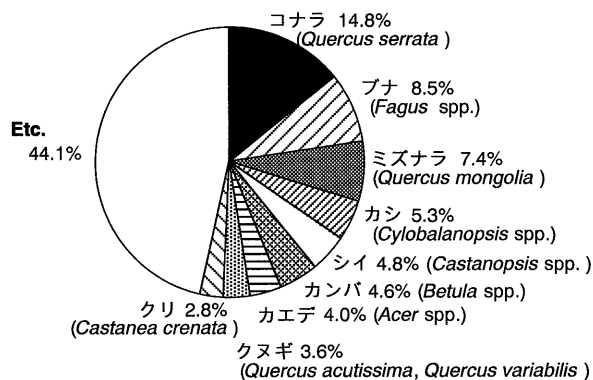


図3.14 広葉樹の蓄積比率

表 3.4 都道府県別の樹種別蓄積量

都道府県樹種	(千m ³)																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
北海道	329,503	18,340	385	0	0	1,172	42,288	2,243	55,308	4	0	1,761	7,786	33,441	4,338	5,129	0	3,643	3,540	1,481	29,204	8,164	937	371	86,402
2 岩手県	32,461	11,938	784	0	5	2,005	3,075	429	62	155	0	3	0	154	118	32	0	219	1	238	752	205	1	146	11,722
3 宮城県	65,298	10,401	4,289	0	4	194	14,147	6,488	344	1,814	877	0	57	27	316	297	210	1	1,310	43	702	2,561	547	112	0
4 岩手県	16,822	2,256	902	3	0	371	5,007	590	7	23	195	15	2	1	10	31	40	0	183	0	55	644	67	7	0
5 秋田県	39,886	14,911	1,734	0	0	17	7,588	6,466	48	96	303	0	35	16	347	81	24	6	950	11	223	1,772	105	62	162
6 山形県	47,867	12,884	1,155	0	0	95	5,343	7,770	4	99	272	0	3	13	150	44	13	0	879	9	154	1,345	134	8	16
7 福島県	63,322	10,717	3,046	31	53	978	20,700	5,227	17	208	488	0	23	30	268	132	28	1	1,141	52	435	1,783	136	16	43
8 茨城県	6,328	30	346	104	61	996	2,742	21	0	0	47	8	0	0	4	0	0	0	31	0	0	36	7	1	6
9 栃木県	15,849	1,633	719	9	3	528	3,259	1,709	15	494	25	0	40	7	14	27	2	0	62	11	15	217	59	1	13
10 群馬県	20,684	3,572	943	3	4	103	3,076	2,046	9	810	313	0	26	41	56	143	53	141	144	40	277	442	176	7	93
11 埼玉県	5,583	125	276	32	1	199	1,658	146	4	64	83	0	30	5	3	14	1	111	68	17	168	229	30	5	10
12 千葉県	8,236	0	116	575	2,393	666	2,577	0	0	0	66	54	3	3	0	1	0	0	3	1	7	28	26	0	14
13 東京都	2,525	337	89	4	0	17	419	311	0	67	8	0	8	0	11	7	18	57	21	0	16	192	31	4	0
14 神奈川県	3,478	299	43	133	15	255	796	29	5	16	124	33	17	6	3	9	1	6	35	13	42	206	28	1	16
15 新潟県	51,302	12,343	1,206	18	10	63	9,566	7,624	53	399	586	11	36	28	250	59	51	0	1,547	91	730	3,497	196	30	50
16 富山県	15,922	3,166	411	54	2	106	2,204	2,851	36	346	187	0	23	10	87	6	11	0	526	15	270	1,010	133	15	0
17 石川県	21,630	2,060	976	143	23	612	7,538	2,546	44	66	527	25	4	3	51	67	40	0	797	22	242	618	90	5	42
18 福井県	21,494	1,496	808	231	817	392	3,950	2,199	19	10	599	29	22	51	35	7	5	2	619	4	257	1,361	161	20	0
19 山梨県	22,486	550	1,550	185	0	1,427	7,897	1,141	35	343	465	0	60	4	43	68	0	115	151	62	345	1,046	617	14	22
20 長野県	49,668	5,334	2,456	109	0	1,656	7,408	6,752	62	5,373	635	11	114	58	340	59	91	3	492	140	326	1,748	475	51	198
21 岐阜県	25,474	3,522	755	293	6	1,256	3,950	1,634	1	863	80	1	23	8	43	15	46	0	251	14	69	684	64	9	0
22 静岡県	22,823	781	401	1,143	3,393	1,728	4,824	86	7	70	127	258	0	0	10	43	8	0	94	15	9	423	203	0	0
23 愛知県	5,216	24	237	328	55	637	2,182	89	0	9	38	5	7	0	0	1	0	0	54	0	0	50	20	0	1
24 三重県	20,051	350	277	3,568	2,468	991	2,393	85	29	2	162	90	0	0	0	0	1	2	0	39	1	8	482	128	1
25 滋賀県	18,161	593	565	304	29	1,045	4,604	1,692	0	353	1	18	0	3	2	0	0	0	446	2	81	589	11	10	5
26 京都府	1,157	4	21	114	20	179	177	1	0	0	23	3	0	7	0	0	0	0	0	0	0	5	1	0	0
27 大阪府	30,766	348	1,874	1,781	495	3,131	7,457	270	138	50	913	52	21	73	1	15	5	1	300	15	389	685	67	21	2
28 兵庫県	18,295	1,602	113	2,372	656	594	1,701	965	0	227	150	13	4	0	0	34	0	0	153	16	99	1,590	59	12	0
29 奈良県	21,838	162	133	4,963	3,216	320	2,300	65	11	66	152	114	11	27	0	8	17	0	42	2	122	220	85	7	0
30 和歌山県	24,877	886	1,534	1,159	710	899	7,935	614	45	6	284	20	0	0	0	0	0	291	5	131	415	21	3	0	
31 鳥取県	57,660	302	3,584	3,616	2,228	4,207	22,335	562	87	13	497	778	13	6	6	51	0	535	36	1,403	561	5	0	0	
32 島根県	26,340	312	1,595	875	9	6,281	8,762	564	288	4	219	10	1	2	0	13	0	0	319	9	338	298	1	0	0
33 岡山県	38,951	443	2,721	1,082	27	5,249	12,138	868	403	12	281	30	3	2	0	29	30	2	345	16	234	402	157	5	22
34 広島県	32,122	17	802	4,924	4,567	1,304	5,720	20	7	1	183	1,590	10	74	0	31	11	0	233	0	124	206	34	0	0
35 山口県	24,050	442	558	3,094	1,868	1,925	2,797	0	0	102	569	16	0	0	6	0	0	0	88	2	84	543	0	0	0
36 徳島県	3,691	0	45	343	14	943	698	0	1	0	20	9	0	1	0	1	0	0	17	0	93	34	24	0	0
37 香川県	20,822	604	191	2,878	2,182	2,169	2,983	147	124	98	199	100	11	42	11	40	22	0	40	15	132	407	244	0	86
38 愛媛県	35,029	469	628	6,133	8,766	57	2,323	573	98	134	296	756	1	0	9	3	4	0	92	2	59	758	40	0	0
39 福岡県	4,001	18	12	402	729	45	152	0	3	0	22	285	5	1	0	4	0	0	7	0	16	8	0	0	0
40 福岡県	2,760	1	19	563	558	99	112	1	6	0	7	173	0	0	0	1	0	0	6	17	4	3	6	0	1
41 佐賀県	8,394	9	57	1,096	2,170	286	231	0	27	0	62	392	4	24	0	1	0	0	7	0	121	30	0	0	0
42 長崎県	41,352	312	658	10,084	4,618	1,886	2,172	136	142	144	270	2,682	17	72	7	13	0	18	20	2	52	869	23	0	89
43 熊本県	21,894	102	220	4,563	3,038	736	65	39	6	110	234	0	18	0	8	0	1	8	0	73	266	0	0	0	0
44 大分県	54,596	317	1,114	13,514	10,839	1,287	2,353	457	0	97	318	2,842	0	52	0	3	0	3	77	0	3	461	0	0	0
45 宮崎県	39,269	17	233	4,761	12,501	658	559	1	0	0	11	2,800	0	2	0	2	0	0	11	0	0	13	0	0	0
46 鹿児島県	3,870	0	0	536	958	0	0	0	0	0	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47 沖縄県	1,464,569	124,180	42,010	77,415	70,251	52,178	216,265	108,818	4,813	67,505	11,740	13,764	2,480	8,500	35,679	5,788	5,947	470	16,640	4,244	9,624	59,072	12,605	1,373	1,409
合計	848	287	529	480	356	14,777	74,3	0.33	4.61	0.80	0.80	0.17	0.58	2.44	0.40	0.41	0.03	1.14	0.29	0.66	4.03	0.86	0.09	0.10	30.18

注：樹種区分については表 3.3 を参照のこと。

ところであるが、そのひとつとして考えられるものである。

おわりに

本論文は複合経営の一形態である混牧林施業の技術的側面に関し、動的な数理モデルを基盤として林畜の両面を見据えた収穫予測手法を検討したものである。

農林業の低迷が続く現在、混牧林施業の事例は少なくなっているものの、技術的には十分に成立可能な施業である。現実的には林業の主流になるとは考えられないが、農林業の複合的経営を指向する場合の一つの選択肢として考えられるべきである。

ところで、混牧林施業の一つの土地利用システムとして見ると、効率的かつ土地保全的な土地利用システムと捉えることができる。本論文で開発された収穫予測手法は、人工林の有効利用や里山を主体とした未利用資源の利用のために活用可能であるばかりでなく、アグロフォレストリーの一形態として発展途上国での活用が期待されるものである。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、ご指導を賜った岩波悠紀元森林総合研究所室長、名古屋大学梅村武夫教授の両博士には深甚の謝意を表するとともに、試験地の管理に関わり貴重な資料を提供してくださった、岡野誠一元森林総合研究所高萩試験地主任、神長每夫元森林総合研究所東北支所牧野研究室長、小川 澄元森林総合研究所高萩試験地主任、本田健二郎元九州支所主任研究官、黒木重郎元九州支所主任研究官に心より感謝を申し上げる。

引用文献

- 安藤 貴 (1968) 同齡単純林の密度管理に関する生態学的研究. 林試研報 210: 1-153.
- 安藤 貴 (1982) 林分の密度管理. 126 pp. 農林出版.
- 安藤 貴 (1983a) スギ林間伐後の林内相対照度, 林試研報 323: 58-59.
- 安藤 貴 (1983b) 林内の光環境. 林業技術 393: 10-13.
- 栗屋仁志・松本光朗 (1986) シイ類再生林分密度管理図. 林業試験場 1-15.
- Doescher P.S., Tesch S.D. and Alejandro-Castro M. (1987) Livestock grazing: a silvicultural tool for plantation establishment. *J. For.* 85: 29-37.
- 藤森隆郎 (1983) 複層林の保育. 新版スギのすべて. pp.288-294. 全国林業改良普及協会, 東京.
- 藤森隆郎 (1989) 複層林の取扱い. 94pp. 林業科学技術振興所, 東京.
- Grelen H.E. (1978) Forest grazing in the south. *J. Range Manage.* 31 (4): 244-249.
- Hedrick D.D. and Keniston R.F. (1966) Grazing and Douglas-fir growth in the Oregon White-oak type. *J. For.* 64: 735-738.
- 稲田充男 (1991) 林分密度管理図に基づく人工林収穫予想表等の作成. 森林計画学会誌 16: 71-85.
- 井上由扶 (1941) 混牧林の法正状態に関する研究. 日林論 382-389.
- 井上由扶 (1951) 混牧林業に関する基礎的研究 (1) 混牧択伐矮林の放牧による林木の被害について. 日林九州支論 4: 85-86.
- 井上由扶 (1952) 混牧林業に関する基礎的研究 (4) 混牧択伐矮林の樹種について. 日林九州支論 6: 118-119.
- 井上由扶 (1953) 混牧林業に関する基礎的研究 (5) 混牧択伐矮林の林分構成とその択伐について. 日林九州支論 7: 100-102.
- 井上由扶 (1955) 混牧林業に関する基礎的研究 (6) 混牧林業経営の意義. 日林九州支論 9: 8-9.
- 井上由扶 (1957a) 混牧林業に関する基礎的研究 (7) 混牧林の分類について. 日林九州支論 10: 14-15.
- 井上由扶 (1957b) 混牧林業に関する基礎的研究 (8) 混牧林の自然的条件について. 日林九州支論 10: 15-16.
- 井上由扶・宍戸元彦・関屋雄偉・柿原道喜 (1958) 九州中部山岳地帯治山緑化. 研究報告 1. 熊本営林局, pp.1-125.
- 井上由扶・宍戸元彦・関屋雄偉・柿原道喜 (1969) 九州中部高原地方における牧野および牧野林の研究. 九州大学演習林集報 23: 1-66.
- 井上楊一郎 (1977) 混牧林の経営. 234pp. 地球出版, 東京.
- 岩波悠紀・神長每夫・蛇沼恒夫 (1986a) 混牧林経営における林分密度管理図の活用 (1). 畜産の研究 40: 482-486.
- 岩波悠紀・神長每夫・蛇沼恒夫 (1986b) 混牧林経営における林分密度管理図の活用 (2). 畜産の研究 40: 613-618.
- 岩波悠紀・神長每夫・蛇沼恒夫 (1986c) 混牧林経営における林分密度管理図の活用 (3). 畜産の研究 40: 727-731.
- 岩波悠紀 (1986) 林業側から見た林畜複合経営技術—広葉樹林を中心として—. 日草近中支報 15: 35-46.
- 岩波悠紀 (1989) 草地農業における林野. 新草地農学 (山根一郎他). pp.186-199. 朝倉書店, 東京.
- 岩波悠紀 (1990) これからの林畜複合経営技術 (特に長伐期の林業経営に対応して). 草 その情報 68: 41-55.
- 岩波悠紀 (1994a) 林内放牧による肉牛振興と森林・環境・国土保全. 畜産の研究 48: 224-230.
- 岩波悠紀 (1994b) 林業サイドの指導による釧路地方の混牧林 (I). 草 その情報 84: 7-15.
- 岩波悠紀 (1994c) 林業サイドの指導による釧路地方の混牧林 (II). 草 その情報 85: 11-20.
- 上中作次郎・尾方信夫・安藤 貴 (1983) ヒノキ間伐後の林内の相対照度. 林試研究 323: 55-57.
- 経営部経営第二科営農林牧野研究室・東北支場経営部経営第三研究室 (1968) 東北地方における針葉樹人工林の役肉牛放牧について. 林試研報 212: 1-58.
- Knowles R.L. (1991) New Zealand experience with silvopastoral systems: A review. *For. Ecol. Manage.* 45: 251-267.
- 小林繁男 (1992) 沈黙する熱帯林—現地からの報告—. 東洋書店, 東京.
- 木平勇吉編 (1992) システム収穫表. 文部省科学研究費総合 (A) 研究成果報告. 138pp.
- 木平勇吉編 (1995) システム収穫表プログラム. 文部省科学研究費総合 (B) 研究成果報告. 198pp.
- Konohira Y. (1995) Definition of the system yield table. *J. For. Plann.* 1: 63-67.
- Kosco B.H. and Bartolome J.W. (1983) Effects of cattle and deer on regenerating mixed conifer clearcuts. *J. Range Manage.* 36: 265-268.
- Leiningr W.C. and Sharrow S.H. (1987) Seasonal diets of herded sheep grazing Douglas-fir plantations. *J. Range Manage.* 40: 551-554.
- 松本光朗・岩波悠紀 (1986) 針葉樹人工林における放牧可能年限の推定. 日林論 95: 125-126.
- 松本光朗・岩波悠紀・岡野誠一 (1986) 放牧が林木生長に与える影響. 日林論 97: 185-186.

- 松本光朗 (1986) 広葉樹資源量の推定について (II) —ローレンツ曲線による広葉樹林分構造の表現—. 林業統計研究会誌 11: 42-47.
- 松本光朗 (1990) 針葉樹混牧林に関する研究 (I) 適正放牧強度の推定. 日林誌 72: 286-291.
- Matsumoto M. (1991) Geographical estimation of broad-leaved forest resources in Japan. Proceedings of IUFRO international symposium on integrated forest management information systems. pp.330-339.
- 松本光朗 (1994) 針葉樹混牧林に関する研究 (II) 牧草導入した混牧林における適正放牧強度の推定. 日林誌 76: 35-42.
- Matsumoto M. (1995) Proceedings of IUFRO international workshop on sustainable forest management. pp.330-339.
- Matsumoto M. (1996) Improvement of the stand density-control diagram and construction of yield tables for Shii (*Castanopsis* spp.) stands. *J. For. Plann.* 2: 77-83.
- Matsumoto M. (1997) Construction of yield tables for Sugi (*Cryptomeria japonica*) in Kumamoto district using LYCS. *J. For. Plann.* 3: 55-62.
- 松本光朗 (1998) 混牧林. 林業技術ハンドブック. pp.946-957. 全国林業改良普及協会, 東京.
- Nair P.K.R. (1993) An Introduction to agroforestry. Kluwer academic publishers, Dordrecht, Netherlands.
- 内藤俊彦 (1988) 森林から草原へ. 日本の植生 (矢野悟道編). pp.22-30. 東海大出版会, 東京.
- 農林水産省統計情報部 (1991) 1990年世界農林業センサス. 農林統計協会.
- 農林水産省統計情報部 (1998) 肉用牛の飼養動向. 農林水産省統計速報 10-214.
- New Zealand Forest Service (1980) Forest farming research at Tikitere. Report of forest research institute, pp.33-36.
- 小川 澄 (1985) カラマツ間伐林における牧草栽培が牧養力ならびに林木の生長に及ぼす影響. 日林東北支部誌 37: 50-54.
- 岡野誠一・岩元守男 (1989) 林野植物に対する放牧家畜の採食嗜好性. 林試研報 353: 177-211.
- 大迫元雄 (1934) 樹林庇陰の草生に及ぼす影響について. 山林彙報 29: 1-10.
- 大谷義一・河合英二・竹下 幸・黒木重郎 (1985) 牧野樹林を含む山地斜面からの土砂流出. 日林九支研論 38: 336.
- Pearson H.A., Whiteaker L.B. and Duvall V.L. (1971) Slash pine regeneration under regulated grazing. *J. For.* 69: 744-746.
- 林試高萩試験地 (1982) 針葉樹人工幼齡林の放牧利用. 181pp.
- 林野庁 (1981) 南関東・東海地方スギ林分密度管理図. 28pp. 日本林業技術協会, 東京.
- 林野庁 (1982) 東北地方国有林カラマツ林分密度管理図. 6pp. 日本林業技術協会, 東京.
- 林野庁 (1985) 広葉樹 (クヌギ, ナラ類) 人工林林分密度管理図 (九州・四国地方). 32pp.
- 林野庁業務課 (1979) 肉用牛生産育成実験事業成績報告書. 62 pp.
- 林野庁計画課 (1981) 広葉樹賦存状況調査要領. 森林計画業務必携. pp.318-327. 日本林業調査会, 東京.
- 林野庁・林業試験場 (1955) 北関東. 阿武隈地方すぎ林林分収穫表. 9pp.
- 笹村 正・新渡戸友次・落合昭吾・小針久典・雉子剛資・及川稜郎・道又敬治・菅原休也・蛇沼恒夫・瀧向正四郎・谷地仁・斉藤精三郎 (1982) 肉牛放牧による高原造林地牧養力の年次推移. 岩手県畜試研究報告 11: 1-22.
- Sharrow S.H., Leiningr W.C. and Rhodes B. (1989) Sheep grazing as a silvicultural tool to suppress brush. *J. Range Manage.* 42: 2-4.
- Sharrow S.H., Leiningr W.C. and Osman K.A. (1992) Sheep grazing effects on coastal Douglas fir forest growth: a ten-year perspective. *For. Ecol. Manage.* 50: 75-84.
- 芝本武夫 (1961) 林地肥培の理論と実際. 231pp. 森林資源総合対策協議会, 東京.
- 芝本武夫 (1977) 森林土壌の肥培. 142pp. 農林出版, 東京.
- 白石則彦 (1985) 同齡単純林の生長予測に関する研究. 東大農演報 75: 199-256.
- William R.D. (1985) U. S. Forest service grazing and range lands. 270pp. Texas A&M University Press.
- 鄭小賢 (1994) システム収穫表の作成方法. *J. Jpn. For. Soc.* 76 (2): 132-137.

摘 要

本論文は林業と畜産の複合的経営形態である混牧林施業の技術的側面に関して、そのシステムの数理的なモデル化を通して林・畜を包含した収穫予測手法を開発することを目的としたものである。

1. 混牧林施業のシステム

混牧林は林・畜・草の3要素からなり、それらの要素を適正にバランス良く管理・制御することにより施業として成立する。その中で、特に林と草の関係、畜と林の関係は重要である。立木密度や林分成長は林内の光環境に大きく影響を与え、林木が成長し樹冠が閉鎖していくに従い林内照度および林床植生の生産量は低下し、結果として牧養力の低下をもたらす。また、林内放牧により幹や枝の折れや剥皮、葉の採食といった林木への被害が発生することがあるが、被害の発生は放牧強度と深い関係がある。このような牧養力の低下や林木への被害については、林分密度および放牧の適正な管理により制御・管理を行うことができる。

このようなことから、針葉樹人工林を対象とした混牧林施業とクヌギ林を対象とした混牧林施業を取り上げ、上記の関係を表現する個別モデルを組み合わせた動的なシステムモデルを開発し、林畜両者を対象とした収穫予測手法を検討した。

2. 針葉樹人工林における混牧林施業のための収穫予測手法

(1) 野草放牧地における混牧林牧養力の推定

林分密度と牧養力に関して、林分密度管理図における収量比数 R_y が相対的な林分の混み具合を表し、林内の相対照度と相関があることに注目した。高萩試験地 (茨城県) のスギ混牧林と平笠試験地 (岩手県) のカラマツ混牧林の試験結果を基礎に、 R_y と牧養力が高い相関を示すことを明らかにし、以下のような牧養力の R_y に関する回帰式を導いた。これを「 R_y -牧養力モデル」と名付けた。

高萩 スギ野草区	$GC = 170.0 - 169.5 R_y$
高萩 スギ牧草区	$GC = 469.8 - 595.5 R_y$
平笠 カラマツ野草区	$GC = 118.3 - 124.6 R_y$

平笠 カラマツ牧草区 $GC = 467.0 - 636.8 RY$

ここで、 GC ：牧養力(CD/ha)， RY ：収量比数 $Ry (0 \leq RY \leq 1)$ ，ただし混牧林利用は $RY \leq 0.5$ が望ましい。

これらの実験においては、林分が閉鎖し放牧を中止した時の Ry がいずれも 0.5 付近であったことから、混牧林利用は Ry が 0.5 以下で成立するものと考えた。

また、放牧地の牧区面積が広いほど単位面積当りの牧養力は低くなり、以下のような牧養力の牧区面積に関する回帰式を得た。

$$GC = 50.7 - 11.7 \log S$$

ここで、 GC ：牧養力(CD/ha)， S ：牧区面積(ha)。

これらの関係から牧区面積に関する補正項を導き、先の Ry と牧養力の関係との積により、以下のような任意の牧区面積を対象とした野草地利用の林地における Ry と牧養力の関係式を得た。これを「 $Ry \cdot S$ —牧養力モデル」と名付けた。

高萩 スギ野草型

$$GC = (170.0 - 169.5 RY) \cdot (0.900 - 0.208 \log S)$$

平笠 カラマツ野草型

$$GC = (118.3 - 124.6 RY) \cdot (0.930 - 0.215 \log S)$$

ここで、 GC ：牧養力(CD/ha)， RY ：収量比数 $Ry (0 \leq RY \leq 1, RY < 0.2$ の場合 $RY = 0.2)$ ， S ：牧区面積(ha)。

一方、放牧による林木被害と樹高の関係を明らかにし、樹高が 1.5 m に達するまでの放牧強度とその期間に生じた累積枯死率(植栽本数に対する枯死木数の比率)の関係を導いた。これを「放牧強度—枯死率モデル」と名付けた。

$$MR = 9.75 + 0.0875 GI$$

ここで、 MR ：樹高 1.5 m に達するまでの累積枯死率(%)， GI ：樹高 1.5 m に達するまでの平均放牧強度(CD/ha)。

混牧林施業において林と畜のバランスを保ちながら林分と放牧の管理を行うために、あらかじめ林木枯死の許容範囲を設定し、それを越えない放牧強度に管理するという方法を提案する。つまり、林木枯死を許容枯死率の範囲内にとどめる放牧強度の上限と、草資源が持つ牧養力のうち、いずれか低い値を混牧林における適正な牧養力、つまり「混牧林牧養力」とするものである。

この考え方を基礎に混牧林牧養力の推定手順を考案し、放牧試験で得られた観測値との比較によってその適合性を調べた。その結果、林木の成長や樹冠の閉鎖にしたがって混牧林牧養力が低下していく様子を的確に推定でき、この予測手法が適切なものであることが示された。ただし、放牧試験において林木の被害を避けるため当初数年間過度に放牧が抑えられたため、この間に限り推定値との差が見られた。

(2) 牧草放牧地における混牧林牧養力の推定

牧草導入された混牧林の場合、牧草および牧草用の施肥がもたらす影響を含んだモデル化が必要となる。そこで、高萩と平笠の試験結果を基礎として、牧草導入された林分

の牧養力を推定するための $Ry \cdot S$ —牧養力モデルを導いた。

高萩 スギ牧草型

$$GC_p = (469.0 - 596.7 RY) \cdot (0.900 - 0.208 \log S)$$

平笠 カラマツ牧草型

$$GC_p = (471.9 - 629.8 RY) \cdot (0.930 - 0.215 \log S)$$

ここで、 GC_p ：牧草型の牧養力(CD/ha)， S ：牧区面積(ha)， RY ：収量比数 $Ry (0 \leq RY \leq 1, RY < 0.2$ の場合 $RY = 0.2)$ 。

また、牧草の施肥が同時に林木成長をも促進することから、高萩のスギ林に関し次のような施肥効果を包含した樹高成長モデルを導いた。

$$H = -2.651 + 2.816 \exp(0.1437 T)$$

ここで、 H ：樹高(m)， T ：林齢(年)。

これらのモデルを加え、先の混牧林牧養力の推定手順を一部改良し、牧草導入された混牧林の混牧林牧養力を推定した。その結果、3、4年生までは混牧林牧養力の推定値は観測値よりも若干低かったものの、林木の成長にともない混牧林牧養力が減少していくといった動態について良く適合しており、本予測手法が適切であることが示された。

(3) 混牧林施業のための収穫予測手法

$Ry \cdot S$ —牧養力モデルは任意の密度管理計画に対応する牧養力を推定することができることから、これを利用した混牧林施業のための収穫予測手法を導いた。つまり、樹高成長の資料として収穫予想表などを用い、林分密度管理図を利用して Ry の管理範囲や間伐強度、材積、胸高直径を考慮ながら密度管理計画を立て、それに対応する混牧林牧養力を推定することにより林畜の両者を見据えた収穫予測を行うというものである。

この方法を利用し、放牧利用期間の延長を目的として 2000 本/ha という低い植栽密度を仮定し、スギ幼齢混牧林の収穫予測を行ったところ、放牧が中止されるのは林齢 14 年時と予測され、一般的な 3000 本/ha 植栽と比較し 4 年の放牧期間の延長をもたらすことが予測された。また、主伐までの全期を通して混牧林利用を行うことを目標に、スギ強度間伐混牧林の収穫予測を行ったところ、80 年生の主伐時には立木密度 200 本/ha、平均胸高直径 47.1 cm、材積 456 m³/ha が予測されるとともに、全期を通し混牧林牧養力は 79 CD/ha 以上を維持し、野草利用の混牧林としては十分な牧養力を持つことが予測された。

3. 広葉樹林における混牧林施業のための収穫予測手法

(1) クヌギ混牧林施業のための収穫予測手法

広葉樹林を対象とした混牧林施業は、混牧林施業の中でも最も基本的な形態である。そのひとつとして九州阿蘇・九重地方で行われているクヌギ混牧林を取り上げ、その収穫予測手法を検討した。クヌギ混牧林においても Ry と牧養力には以下のような相関関係があることを明らかにし、この回帰式をクヌギ混牧林における Ry —牧養力モデルと

した。また、クヌギ混牧林においても一般的な密度管理を行う場合には、 R_y が 0.5 以下とする必要があることを明らかにした。

$$GC = 96.4 - 84.0 RY$$

ここで、 GC ：牧養力(CD/ha)、 RY ：収量比数 $R_y (0 \leq RY \leq 1)$ 、ただし混牧林利用は $RY \leq 0.5$ が望ましい)

R_y —牧養力モデルと平均樹高、平均直径、立木密度および立木材積に関する関係式から、一般の収穫予想表に R_y と混牧林牧養力を付加したクヌギ混牧林用の収穫予想表を作成し、さらにこの収穫予想表とクヌギ混牧林試験結果から施業体系図を作成した。この施業体系図は立木密度、材積および混牧林牧養力と、林、草、畜に関する管理項目を示したものであり、その要点としては林分の密度管理による牧養力の制御、野草利用で 60~80 CD/ha という牧養力、植栽後 2~3 年の慎重な放牧管理、適正な放牧による立木密度の安定があげられる。

(2) 国内の広葉樹資源分布と混牧林施業のポテンシャル

日本における広葉樹資源分布推定をもとに、クヌギ混牧林施業のポテンシャルを調べたところ、中国・四国地方の瀬戸内海側が九州阿蘇・九重地方と似た資源状況であり、クヌギ混牧林施業が可能な地域であると考えられた。また、コナラ林の放牧に対する動態がクヌギ林と似ていることから、コナラ林を混牧林利用の対象と考えれば混牧林施業のポテンシャルは大きく広がり、岩手県から茨城県にかけての太平洋沿岸、鳥取県を中心とした中国地方においてポテンシャルが高いものと考えられた。このように、全国のクヌギ・コナラ林を混牧林施業の対象とすれば、年間 86 万頭の牛を飼養できることが推定された。

現在、混牧林施業の事例は少なくなっているものの、農林業の複合的経営を指向する場合の一つの選択肢として考えられるべきものである。本研究で開発された収穫予測手法は、針葉樹人工林や里山を主体とした広葉樹未利用資源の利用のために活用可能であるばかりでなく、アグロフォレストリーのひとつとして発展途上国での活用が期待されるものである。

キーワード：混牧林、収穫予測、収量比数、牧養力、密度管理

Development of a yield prediction method for composite management of forestry and grazing

Mitsuo MATSUMOTO

This report is intended to develop a yield prediction method of forest grazing that is a composite management of forestry and grazing, based on analysis of the system and mathematical modeling.

1. Systems of forest grazing

Forest grazing can be managed by controlling its three components of forest stand, grass and cattle. Relationships between forest stand and grass, and between cattle and forest, are especially important to manage forest grazing. Stand density and growth affects the light environment in the forest. As a forest grows and its crown closes, its light intensity and vegetation production decrease, which in turn decreases the grazing capacity. Forest grazing may also damage trees. This decreasing of grazing capacity and damage by cattle can be managed by appropriately controlling the stand density and grazing intensity. Considering the background, this report examines forest grazing in conifer plantations and *Kunugi* (*Quercus acutissima*) plantations, and discusses a yield prediction method for forest grazing that includes developing dynamic models to represent the relationships described above.

2. Yield prediction method for conifer plantations

(1) Estimation of forest grazing capacity with wild grass

Relationships between stand density and grazing capacity are the most important considerations for forest grazing systems. In the present study, there was a large correlation between R_y s (yield index in stand density control diagrams) and grazing capacities of Sugi (*Cryptomeria japonica*) plantations at the Takahagi experimental station and Karamatsu (*Larix kaempferi*) plantations at the Hirakasa experimental station. Based on these results, "Ry - grazing model" was derived as follows.

Takahagi	Wild grass area	$GC = 170.0 - 169.5 RY$
	Pasture grass area	$GC = 469.8 - 595.5 RY$
Hirakasa	Wild grass area	$GC = 118.3 - 124.6 RY$
	Pasture grass area	$GC = 467.0 - 636.8 RY$

where GC is grazing capacity (CD/ha), and RY is yield index. Because it has been reported that stands could be grazed while the Rys were less than 0.5 at the stations, this report supposes that forest stands are available for grazing while the Rys are less than 0.5.

Grazing capacity also depends on grazing area size. Several experiments showed there was a negative correlation between grazing capacity and range size, as follows.

$$CG = 50.7 - 11.7 \log S$$

where S is range size (ha). Using these equations, the "Ry * S - grazing capacity model" was developed as follows.

Takahagi	Sugi stand and wild grass area	$GC = (170.0 - 169.5 RY) * (0.900 - 0.208 \log S)$
Hirakasa	Karamatsu stand and wild grass area	$GC = (118.3 - 124.6 RY) * (0.930 - 0.215 \log S)$

Heavy grazing may damage young trees. Most damage was caused while the trees were less than 1.5 m height. There was also a large correlation between grazing intensities and cumulative mortalities while trees are less than 1.5 m in height. The regression equation is as follows.

$$MR = 9.75 + 0.0875 GI$$

where MR is cumulative mortality (%) and GI is mean grazing intensity (CD/ha) while trees are less than 1.5 m in height. This equation is defined as the "grazing intensity - mortality model". This model is available to control tree mortality by controlling grazing intensity.

Here, I propose an appropriate method of managing forest grazing so that grazing intensity does not cause more than the allowable mortality that is decided at planning. This means that we chose the lesser value of the upper limitation of grazing intensity by "grazing intensity - mortality model" and grazing capacity determined by the "Ry * S - grazing capacity model". The selected value can be called "forest grazing capacity". Based on this concept, the values estimated by the models were compared with observed values in an experiment to test the model. Estimated grazing capacities seemed to fit observed grazing intensities except for the first few years when grazing intensity was

restricted. The results of the comparisons indicate that this model can be used to manage forest grazing.

(2) Estimation of forest grazing capacity with pasture grass

Grazing forests containing introduced pasture grass also requires modeling of fertilization. Based on the results of Takahagi and Hirakasa, the "Ry * S - grazing capacity model" for improved grazing forest was developed as follows.

Takahagi	Sugi stand and pasture grass area	$GC = (469.0 - 569.7 RY) * (0.900 - 0.208 \log S)$
Hirakasa	Karamatsu stand and pasture grass area	$GC = (471.9 - 629.8 RY) * (0.930 - 0.215 \log S)$

Grasslands are often fertilized to improve the grazing capacity. Fertilization improves not only grass production but also tree growth. Based on the relationships between stand heights and the annual increments, a stand height growth model was obtained as follows.

$$H = -2.651 + 2.816 \exp(0.1437 T)$$

where H is stand height (m) and T is stand age (years).

The values estimated by the models were compared with observed values in an experiment to test the model. Although estimated forest-grazing capacities were not always accurate, the values and the trends of forest grazing capacity were adequate.

(3) Yield prediction method for forest grazing

The "Ry * S - grazing capacity model" can give the grazing capacity of any forest stand. Using the model, a yield prediction method for forest grazing was developed that can predict the yield of both a forest stand and grazing through planning of stand-density control and estimated forest-grazing capacity.

Yield prediction was carried out on the assumption of low density control such as 2000 trees/ha for an extended grazing period. It was estimated that grazing would cease at a stand age of 14 years and the grazing period would be 4 years longer than a 3000 trees/ha stand. Another prediction was made based on the assumption of strong thinning for grazing throughout the management period. As a result, it was estimated that there would be 200 trees/ha at age 80, average DBH would be 47.1 cm, volume would be 456 m³/ha and forest-grazing capacity would be over 79 CD/ha, more than enough capacity for grazing management.

grazing capacity, density control

3. Yield prediction method for forest grazing in broad-leaved forests

(1) Yield prediction method for Kunugi grazing forests

Grazing in broad-leaved forests can be said to be a basic system as forest grazing. Here, a yield prediction method for forest grazing in Kunugi (*Quercus acutissima*) forests in the Aso and Kuju areas of Kyushu island was examined. There was the following correlation between Ry and grazing capacity, and the regression model was named the “Ry - grazing capacity model”.

$$GC = 96.4 - 84.0 RY$$

It was clear that Ry must also be under 0.5 for ordinary management of Kunugi grazing forest. Using relationships between Ry - grazing capacity model and stand height, mean DBH, tree density and stand volume, a yield table including Ry and forest-grazing capacity and a diagram of a management system was developed. This diagram shows stand density, stand volume, forest-grazing capacity and management of forest stand, grass and cattle. It shows that grazing capacity such as 60 - 80 CD/ha can be achieved by controlling stand density and grazing intensity.

(2) Volume and distribution of broad-leaved forest resources and potentiality of forest grazing

The potential capacity of Kunugi grazing forests was estimated using broad-leaved forest resources in Japan. It was found that the Chugoku and Shikoku regions are available for forest grazing because they have the same forest environment as the Aso and Kuju area in Kyushu island. Incidentally, Konara (*Quercus serrata*) forests seem to have the same potential as Kunugi forests for grazing use. If Konara forests can be used for grazing, potentially high-yield forest grazing could be extended to the pacific area from Iwate Prefecture to Ibaraki Prefecture, as well as to the Chugoku region. If Konara forests were available for forest grazing, another 860,000 head of cattle could be raised each year in Japan.

Although forest grazing is not popular in Japan today, it should be recognized as an option in a composite management system for forestry and agriculture. The method developed here could be available not only for conifer plantations and underutilized forest resources such as natural broad-leaved forests in Japan, but also for agro forestry in developing countries.

Keywords: grazing forest, yield prediction, yield index,

付表1 変数一覧

変数	内容	単位
A	時間の関数	
AC	牧区面積による補正值	
AI	樹高年成長量	m/year
B	時間の関数	
D	平均直径	cm
D_b	平均断面直径	cm
G	断面積合計	m ² /ha
GC	牧養力	CD/ha
GC_p	牧草型の牧養力	CD/ha
GC_w	野草型の牧養力	CD/ha
GI	樹高 1.5m に達するまでの平均放牧強度	CD/ha
H	上層木樹高 (樹高)	m ² /ha
H_m	平均樹高	m
MR	樹高 1.5m に達するまでの累積枯死率	%
N	本数密度	本/ha
N_{Rf}	最多密度	本/ha
RY	収量比数	
S	牧区面積	ha
S'	基準となる試験地の牧区面積	ha
T	林齢 (時間)	年
V	幹材積	m ³ /ha
V_{Rf}	最多幹材積	m ³ /ha

付表2 パラメーター一覧

パラメータ	数式番号
a	2.2
a'	2.3
a''	2.7
b	2.2
b'	2.3
b''	2.7
c	2.9
d	2.9
e	2.15
f	2.15
g_p	2.23
g_w	2.22
h_p	2.23
h_w	2.22
I	2.24
j	2.35
k	2.35
l	2.35
m	2.35