

広葉樹再生林の林分動態解析と成長予測 — 栃木県唐沢山における実証的研究 —

西上 愛*

Stand dynamics and prediction of regenerated broad-leaved forests – An empirical study at Mt. Karasawa in Tochigi prefecture, Japan –

Ai NISHIKAMI*

I はじめに

本研究は栃木県唐沢山の広葉樹再生林を対象に林分動態を解析し、その結果を基に成長予測を行ったものである。

かつて薪炭林・農用林として利用されていた里山林は、昭和 30 年代から化学肥料や化石燃料の普及に伴い人々の利用が減少していった。その面積は旧薪炭林だけでも日本の全森林面積の約 3 割 (7,000,000 ha) あるといわれている (蜂屋, 1981)。放置された里山林の利用については、シイタケ原木の採取や有用広葉樹林への転換などが検討されていた (相場ら, 1983, 1984; 小菅, 1986; 宇都宮大学林学科, 1991) が、直接の利用価値と経済価値は失われていった (只木, 1997)。その後、住宅・工場・ゴルフ場などの開発が進められるなか (只木, 1997)、1990 年代に入ってから里山林に対する意義や価値が再発見された (張・北尾, 2001)。それらは林業的な価値ではなく、二次的自然をめぐる生物多様性、都市にとってのアメニティー空間、市民にとっての自己実現の場としての価値であり (張・北尾, 2001)、里山林を景観改善、レクリエーションや市民活動、環境教育の場として利用する例も多くみられる (中川, 2001; 野尻ら, 1998)。このように放置された里山林に代表される広葉樹再生林に対しての関心の高まりや里山林を利用した活動が拡大している現状をふまえると、広葉樹再生林を管理するための指針が必要になると考えられる。例えば、里山特有の種多様性は定期的に人手が加わることにより維持されてきたものであり、今後もこのような多様性を維持していくためには過去の森林利用と同様の管理が必要になるであろうし、レクリエーションや環境教育の場としての利用には、景観の美しさや林内における活動のやすさが求められ、広葉樹再生林の管理が必要になるであろう。

ところで、あらゆる森林の管理においてもっとも基本的なことは、将来の林の姿を描いた上で計画を立てること、すなわち、成長予測に基づいて計画を立てることである。成長予測を適切に行うためには、①現在の林分構造的な把握と分類 (林型区分)、②林型区分に基づく成長解析、③成長モデルの作成と予測、という 3 つの段階が必要である。本研究で対象にする広葉樹再生林は、その成立過程から考えて、元々は特定の種 (アカマツやナラ類) のみが存在する単純林

* 東京大学大学院農学生命科学研究科
Graduate School of Agricultural and Life Sciences, University of Tokyo

であった可能性があるものの、放置されることにより遷移が進んだ現段階においてはさまざまな樹齢の多様な種で構成される異齢混交複層林になっている。一般に、多くの天然林に代表される異齢混交複層林の林分構造はスギ・ヒノキの人工林に見られるような同齢単純一斉林や二段林に比べて、非常に複雑である。これは樹種構成や樹齢構成が多様で立木位置の規則性が低いことが主な要因であろう。このように複雑な林相を呈する天然林を対象にした林分構造や動態の解析、成長モデルによる成長予測を行った研究は、林業経営的な側面を持つもの生態研究に重点をおく



図-1 調査地位置

Fig. 1. Location of field plots (solid circle) in the study site, Mt. Karasawa (solid triangle), Tochigi Prefecture, Japan.

ものを問わず、盛んに行われてきている（例えば、NAKASHIZUKA, 1982；石橋, 1989a, 1989b, 1990；山本, 1990；MASAKI *et al.*, 1992）。しかしこうした成長予測の研究対象はいわゆる「極相」に近い状態か少なくともかなり遷移が進んでいる天然林を対象としたものが多い。一方、里山林と呼ばれる広葉樹再生林の多くは「極相」を呈するはるか以前の林分であり遷移の方向性が明確ではなく、現在の下層の状況や潜在植生から推定していく必要がある。したがって、広葉樹再生林の林分構造や動態を把握するにあたっては、従来の天然林を対象とした研究以上に、林分下層の状況についての資料をより多く収集し解析する必要がある。また、広葉樹再生林（二次林、旧薪炭林など）を対象とし、林分構造や成長過程を解析した研究は数多く見られるものの（例えば、汰木・薛, 1982；真鍋ら, 1986；西村ら, 1990；高柳ら, 1991；小谷, 1993），その結果を基に成長予測を行うという段階へ進んだ研究は少ない。

このような背景に基づき、筆者らは栃木県南部に位置する唐沢山の広葉樹再生林に試験地を設置し、調査、解析を行ってきている（西上・石橋, 2000；西上, 2004等）。唐沢山は、落葉広葉樹と常緑広葉樹の両方が生育可能な範囲にあること、人手が加わらなくなってから数十年という時間が経過していること、という日本の多くの広葉樹再生林が持つ特徴を有しており、唐沢山で得られた知見は多くの日本の広葉樹再生林に応用できるものと期待される。筆者らはこれまでに、唐沢山の広葉樹再生林の林分構造（直径分布、胸高断面積合計、樹種構成、林床付近のバイ

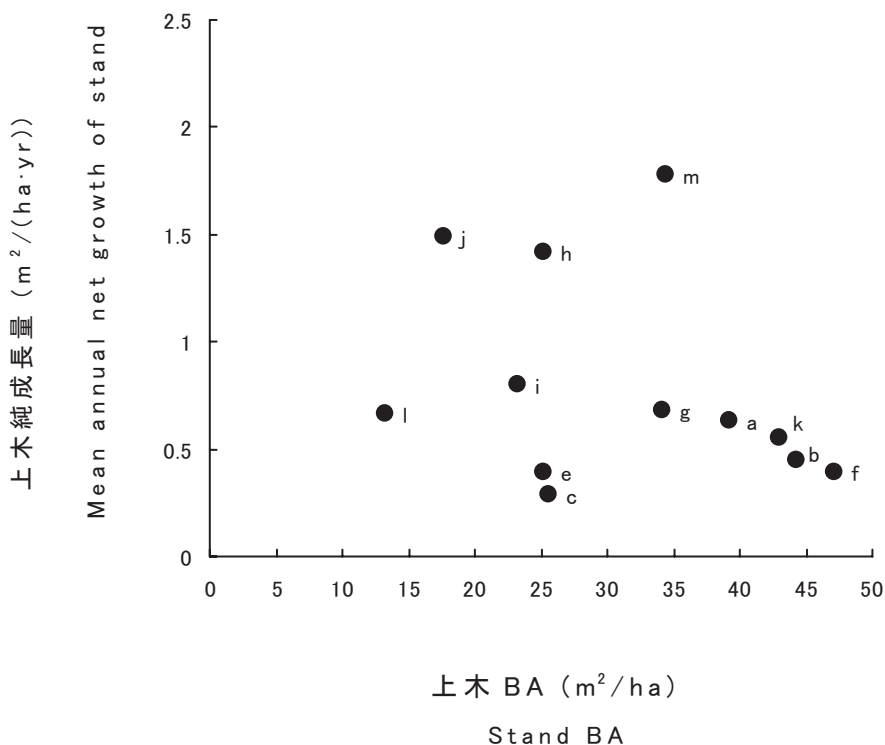


図-2 上木BAと純成長量との関係
 Fig. 2. Relationship between stand BA and mean annual net growth of stand.

オマス)や、気温、地温、風向などの環境要因を検討することにより、直径分布が指数形を示すこと、高木層を優占している樹種はコナラ (*Quercus serrata*) やサクラ類などの落葉広葉樹であること、斜面方位によって林分下層の常緑広葉樹の侵入程度が異なり、遷移の方向が異なる可能性が高いこと、などを指摘してきた(西上・石橋, 2000; 西上, 2004)。そこで、本研究では、この林分構造の特徴と成長量や更新状況の情報を基に広葉樹再生林の動態解析を行い、その結果を成長モデルに応用し、広葉樹再生林の成長を予測することを目的とした。

II 資 料

1. 調査地の概要

本研究の調査地は栃木県佐野市(旧安蘇郡田沼町)に位置する東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センター・フィールドミュージアム唐沢山(以下、唐沢山とする)内の広葉樹再生林である(図-1)。唐沢山は面積161.73 ha、標高90~290 mの関東山塊が関東平野に突出した丘陵地である。基岩の大部分は秩父中・古生層に属し、チャートと砂岩、一部頁岩からなる。土壌条件は一般に良好であるが、一部乾燥しやすい土壌もみられる。1997~2002年のデータによると年平均気温は13.8℃、年間降水量は1,377 mmである(小柳ら, 2003)。唐沢山の広葉樹再生林は、もとはアカマツ (*Pinus densiflora*) 林であったが、昭和50年代から

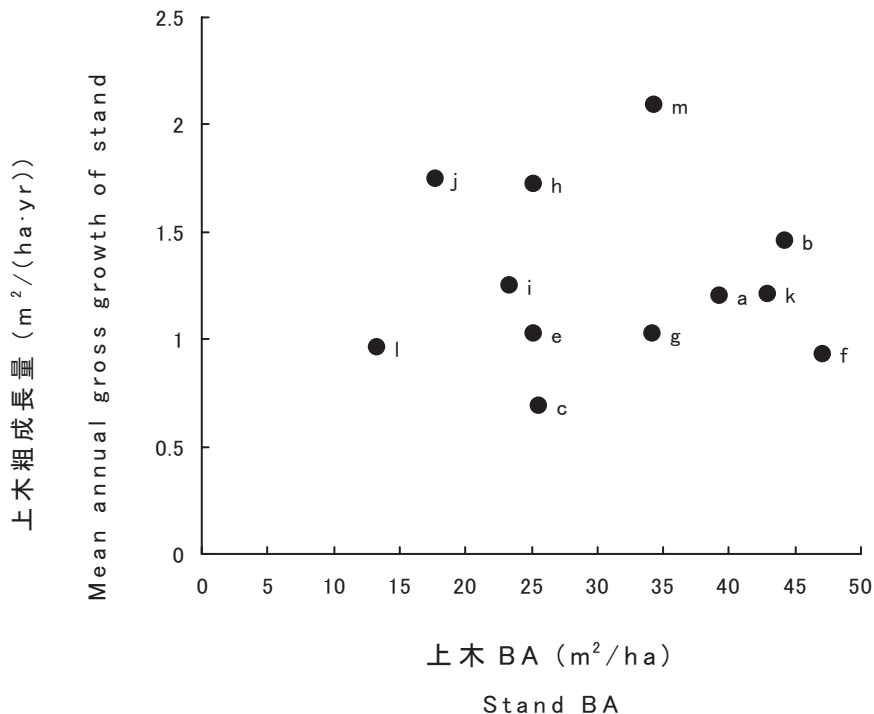


図-3 上木BAと粗成長量との関係

Fig. 3. Relationship between stand BA and mean annual gross growth of stand.

主にマツ枯れが原因でアカマツが衰退し、広葉樹が優占するようになったといわれている。温帯性のリョウブ (*Clethra barbinervis*)、アズキナシ (*Sorbus alnifolia*)、暖帯性のスダジイ (*Castanopsis sieboldii*)、ウラジロガシ (*Quercus salicina*)、アラカシ (*Quercus glauca*) などがみられる (東京農工大学農学部附属演習林編, 1994)。

2. 調査内容

唐沢山の各林小班の調査データ (竹内, 1995) を用いて、広葉樹再生林の林相曲線 (直径分布) やそれらの位置する斜面方位を考慮し、様々な林相を含むように林分を 13 カ所選び、それぞれの林分に 20 m × 20 m の成長試験地 (以下、プロットと呼ぶ) a ~ m を設置した (図-1)。プロットはその上辺と下辺はおおむね等高線に沿うように設置した。第1回目の調査では、1997年にプロット a ~ h, 1998年にプロット i ~ m において、胸高 (1.2 m) 以上の樹高をもつすべての林木 (以下、「上木」と呼ぶ) を対象に胸高直径と樹高の計測、樹種の記録を行った。2003年には第2回目の調査として胸高直径を再計測した。プロット d は広葉樹の成長解析のため1993年に全林木を伐採した林分であり (TANAKA and ISHIBASHI, 1995), 1997年の調査時には胸高直径 5 cm 未満の個体だけが非常に高密度に存在していた。

林床から胸高までの構造を把握するため、第1回目調査時に、各プロットに 1 m × 1 m のコド

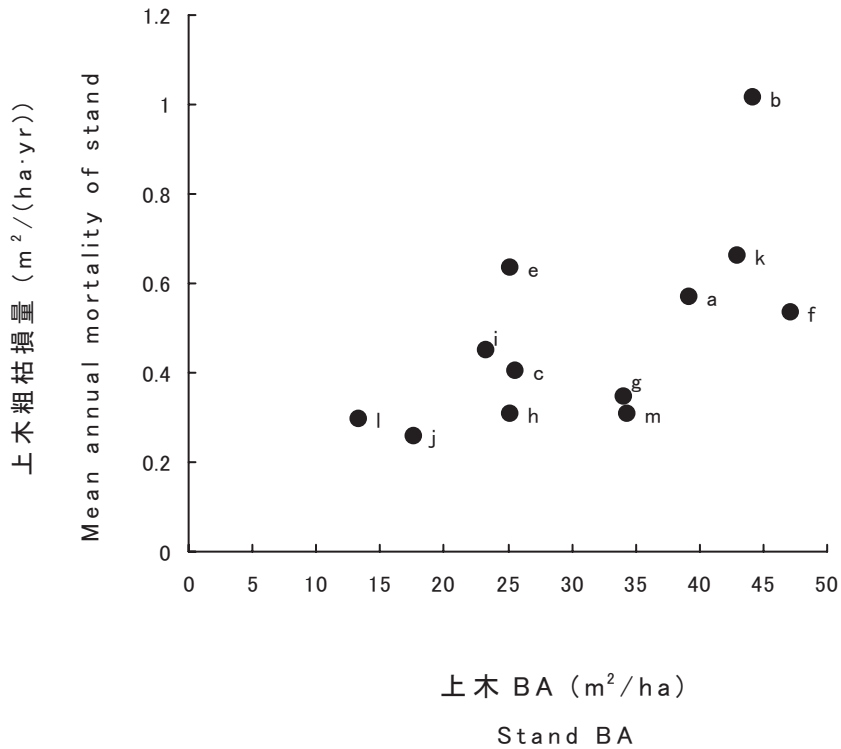


図-4 上木BAと枯損量との関係
Fig. 4. Relationship between stand BA and mean annual mortality of stand.

ラートを格子状に 12 カ所設け、胸高に達さない木本の全個体を刈り取り、種類別に絶乾重量を測定した。

3. 本論文で用いる用語の定義

本研究では、胸高 (1.2 m) 以上の樹高を持つ上木と、まだ胸高に達していないが将来上木になる可能性を持つ樹木 (以下、「後継稚樹」と呼ぶ) とに分けて木本を扱った。さらに、上木を胸高直径を基準にして二つの直径級に分けて扱う。径級区分の基準は用途によってさまざまであるが (和田ら, 1988; 船越, 1988), 本研究では、過去の唐沢山の広葉樹再生林の林分を対象にした研究 (田中・石橋, 1996) を参考にし、研究対象の 13 プロットのうち階層構造の発達している 5 プロット (a, b, f, g, k) の胸高直径と樹高との関係からその基準を決定した。胸高直径 10 ~ 15 cm (樹高では 10 m 前後に対応) より小径の林木の本数は多いがそれ以上のサイズをもつ林木は多くないことから、2 cm 括約の直径階で 10 cm 階以下を下層木、12 cm 階以上を上層木とした。

次に、樹種についてであるが、広葉樹再生林を構成する樹種は多く、すべての種の特性を考慮することは困難である。そこで、本研究では馬場 (2000) を参考に、プロットに出現した全樹種を林内で似たような性質を持つと考えられる七つの生育形に分けて扱った。具体的には、コナラ

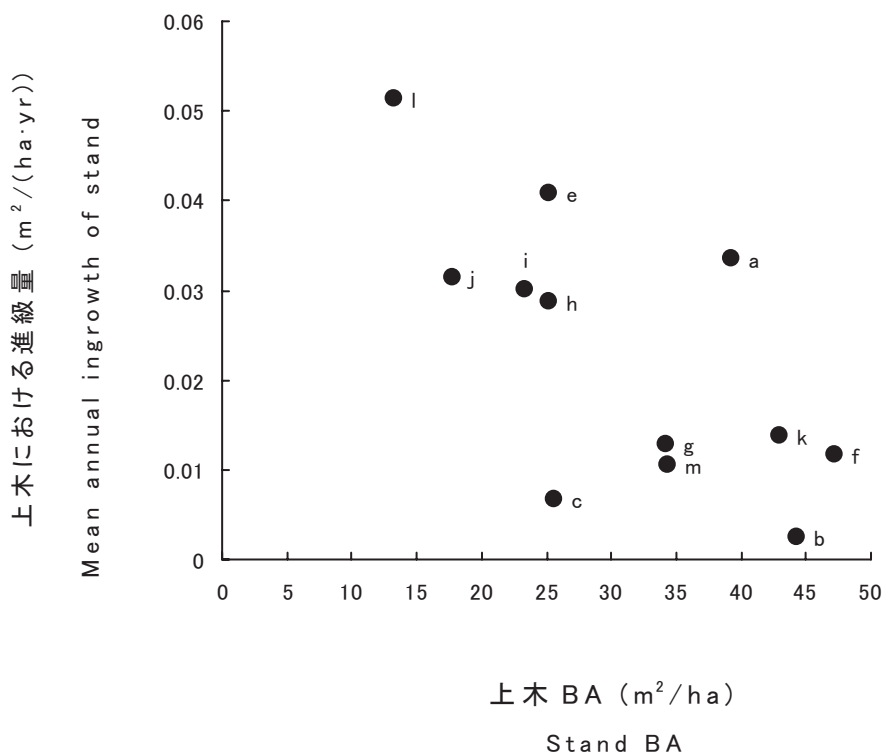


図-5 上木BAと上木への進級量との関係
Fig. 5. Relationship between stand BA and mean annual ingrowth of stand.

やヤマザクラ (*Prunus jamasakura*) などの高木性落葉広葉樹, リョウブなどの小高木性落葉広葉樹, ヤマトツジ (*Rhododendron obtusum*) などの低木性落葉広葉樹, アラカシやシラカシ (*Quercus mysinaefolia*) などの高木性常緑広葉樹, ヤブツバキ (*Camellia japonica*) やヒサカキ (*Eurya japonica*) などの小高木性常緑広葉樹, アオキ (*Aucuba japonica*) などの低木性常緑広葉樹, アカマツなどの針葉樹に分けて扱った。生育形の分類は樹種ごとに予想される最大樹高を主な基準とし, 本研究で用いる径級区分 (上層木と下層木) に対応させると, 高木性と小高木性の樹種は上層木になりうる種であり, 低木性の種は上層木にはならない種であると考えている。

Ⅲ 動態解析

広葉樹再生林の動態を明らかにするため, まず, 上木全体の成長量を把握する。次に, その成長を示す要因を, 上層木, 下層木, 後継稚樹 (下層木への進級木) の成長量に分けて検討し, 生育形別のそれらの胸高断面積合計 (以下, BA とする) や成長量の分析を行う。唐沢山の広葉樹再生林では, 高木性・小高木性常緑広葉樹の量の多少によって, 北向き斜面に位置する林分とそれ以外の林分の構造と遷移の方向性の違いが指摘されており (西上, 2004), 林型が異なっていると考えられることから, 高木性・小高木性常緑広葉樹を初めとする生育形の違いに注目した解

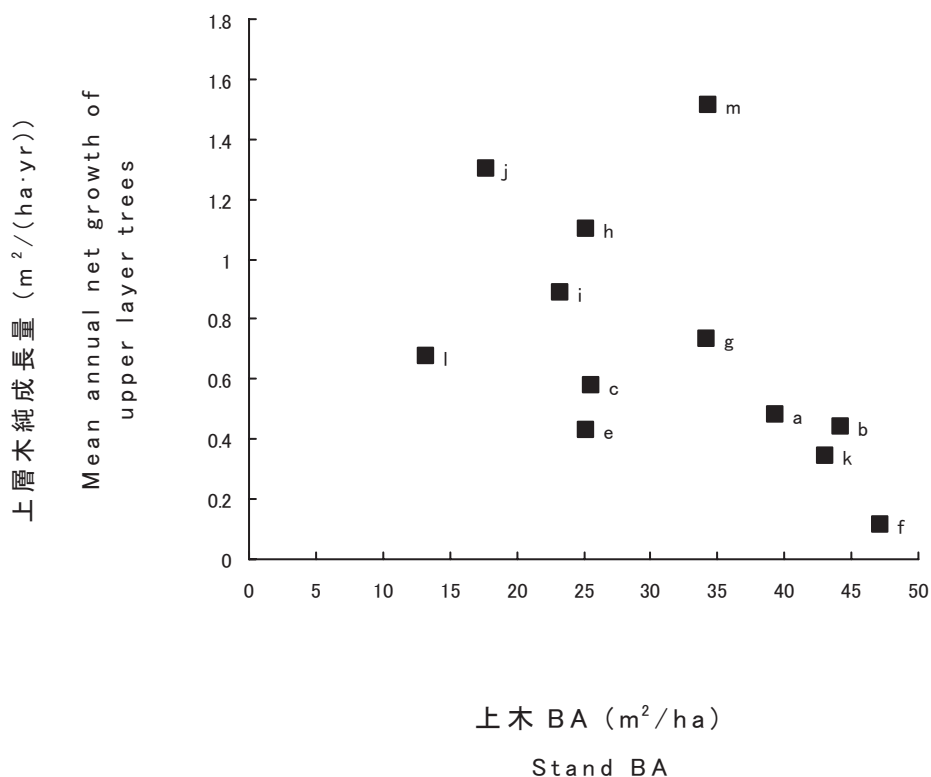


図-6 上木BAと上層木純成長量との関係
 Fig. 6. Relationship between stand BA and mean annual net growth of upper layer trees.

析が重要である。

1. 上木全体の傾向

期首の上木BAと各成長量との関係をみたところ、純成長量はすべてプラスを示し(図-2)、プロット h, j, m の純成長量が大きかった(順に 1.42, 1.49, 1.78 $\text{m}^2/(\text{ha}\cdot\text{yr})$)。これら3プロットは粗成長量も大きく、期首の上木BAが中程度(15~35 m^2/ha)であり、それよりBAが少ない場合と多い場合の両方とも成長量が低くなっていた(図-3)。つまり、上層木BAに対する純成長量と粗成長量の上限は緩い一山形の分布を示していた。石橋(1990)は東京大学北海道演習林の天然林の固定試験地を対象にした林分成長の検討において、林分蓄積と林分粗成長との間に直線関係ではなく、上限と下限が認められること、ある蓄積において林分成長量の上限がピークを持ちそれより高蓄積でも低蓄積でも林分成長量の上限は低くなることを指摘している。本試験地においても、BAではあるが期首の現存量と粗成長量との間には上限と下限が認められる。しかし、本試験地は常緑広葉樹の優占する林分へ推移していく途中相にあると考えられ、よりBAの大きな林分になる可能性がある。ここで、天然林のBAについてみると、中国山地の温帯林において樹高3 m以上の林木を測定した結果、ブナ極相林では43.5 m^2/ha であったと報告されている(和田・中越, 1994)。針広混交林ではあるが東京大学北海道演習林の大型試験地において胸高直径5 cm以上の林木を測定した結果、21.25~56.12 m^2/ha であったと報告されている(本

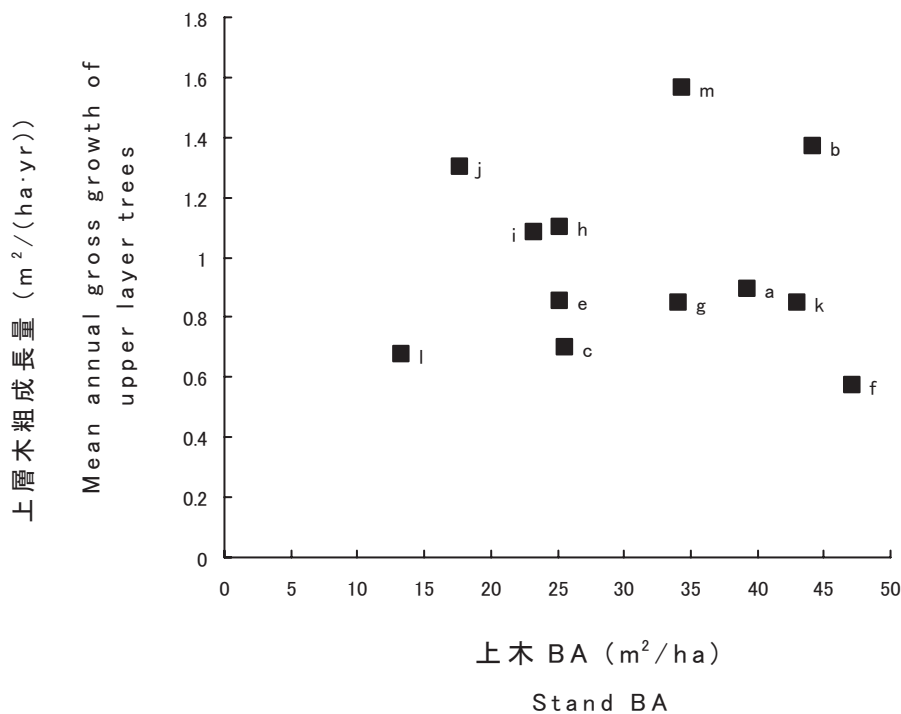


図-7 上木BAと上層木粗成長量との関係

Fig. 7. Relationship between stand BA and mean annual gross growth of upper layer trees.

阿弥ら, 1997)。他に, 群馬県東部に位置する東京農工大学草木演習林の64年生の広葉樹林で2 cm以上の林木を測定した結果は28.18~39.12 m²/ha (相場ら, 1984), 島根大学三瓶演習林の56年前後の落葉広葉樹二次林において5 cm以上の林木を測定した結果は1995年に20.5~58.6 m²/haであり, 2000年には23.6~51.3 m²/haであったこと (寺田ら, 2000), 宮崎大学田野演習林の73年生の常緑広葉樹二次林で3 cm以上の林木を測定した結果, 10.7~46.4 m²/haであったこと (松田ら, 1998) などから推察して, プロットbやfのBAの値は決して低くなく, どちらかという高い方に分けられる。したがって, 本試験地でみられるBA34 m²/haあたりの粗成長量の最大値を石橋 (1990) の指摘する粗成長量の上限のピークと考えることができよう。

枯損量は上木BAが大きくなるほどその上限が上昇し (図-4), 上木への進級量は, 他の成長量に比べてその量は0.003~0.05 m²/(ha·yr)とわずかであるが, 下降する傾向を示していた (図-5)。

2. 上木の成長に対する上層木・下層木の影響

次に, 上木全体の成長を上層木と下層木の成長に分けて検討を行った。上木の純成長量と粗成長量の大きかったプロットh, j, mでは上層木の純成長量と粗成長量も大きかった (図-6, 7)。これは, 期首から存在している林木 (生存木) の成長量はプロットjとhでは大きくないものの (図-8) 枯損量がゼロであること (図-9), 下層木の成長が大きく上層木へ進級するBAが他のプ

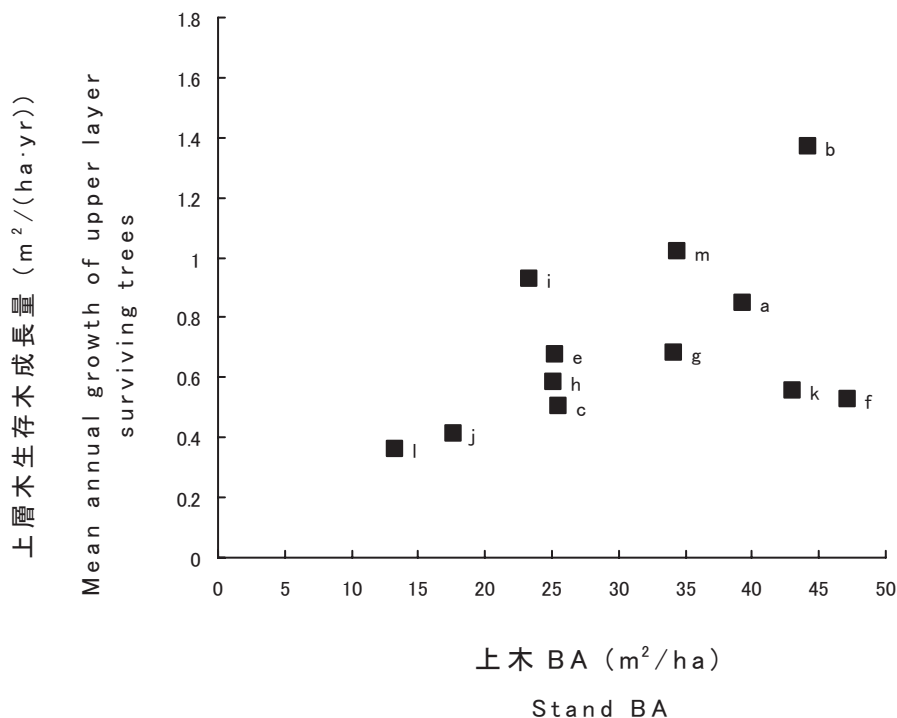


図-8 上木BAと上層木生存木成長量との関係

Fig. 8. Relationship between stand BA and mean annual growth of upper layer surviving trees.

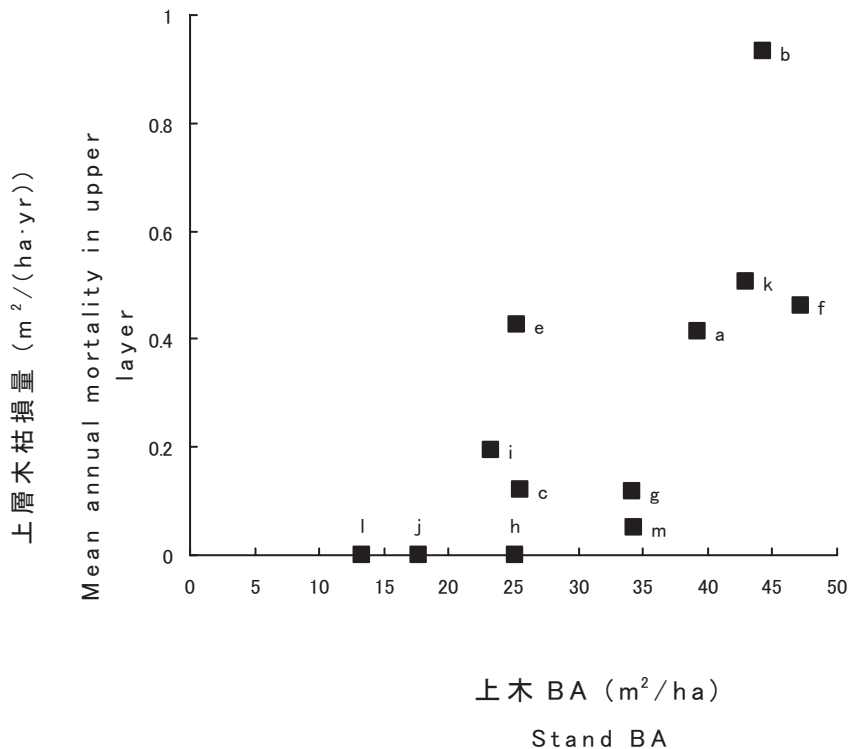


図-9 上木BAと上層木枯損量との関係

Fig. 9. Relationship between stand BA and mean annual mortality of upper layer trees.

ロットと比べて多いこと（図-10）、が原因である。同程度の上木BAを持つプロットc, e, g, iでは、上層木と下層木の粗成長量は両者ともプロットh, j, mに比べて小さく、特に下層木の粗成長量は大きく下回っていた（図-7, 11）。さらに、下層木の枯損量はプロットh, j, mとあまり変わらないが（図-12）、上層木の枯損量はそれら3プロットに比べて大きいため（図-9）、上木の純成長量が小さくなっている（図-2）。プロットlは上木BAが小さい林分である（13.3 m²/ha）。他のプロットと比べて上層木の粗成長量が0.68 m²/(ha·yr)と小さく（図-7）、成長が旺盛なプロットh, j, mと同様に下層木では0.30 m²/(ha·yr)程度枯損しているが（図-12）、粗成長量は0.41 m²/(ha·yr)でプロットh, j, mほど大きくない（図-11）。相対的に上層木と下層木の成長が小さいことと下層木の枯損が多いことがプロットlの上木全体の純成長量を小さくしている（図-2）。上木BAの大きいプロットa, b, f, kでは下層木の粗成長量（順に0.34, 0.087, 0.38, 0.54 m²/(ha·yr)）はばらついており（図-11）、下層木粗成長量の大きいプロットkでは上層木への進級量が比較的多いが他の3プロットでは小さい（図-10）。生存木の成長量はプロットbで特に大きく（1.4 m²/(ha·yr)）aでも0.85 m²/(ha·yr)と比較的大きいが（図-8）、これら4プロットの枯損量は0.41～0.93 m²/(ha·yr)であり他のプロットに比べて高いことから（図-9）、上木全体の純成長量が小さくなっている（図-2）。

このように上層木と下層木に分けて各プロットの成長量を検討した結果、上層木の生存木の成

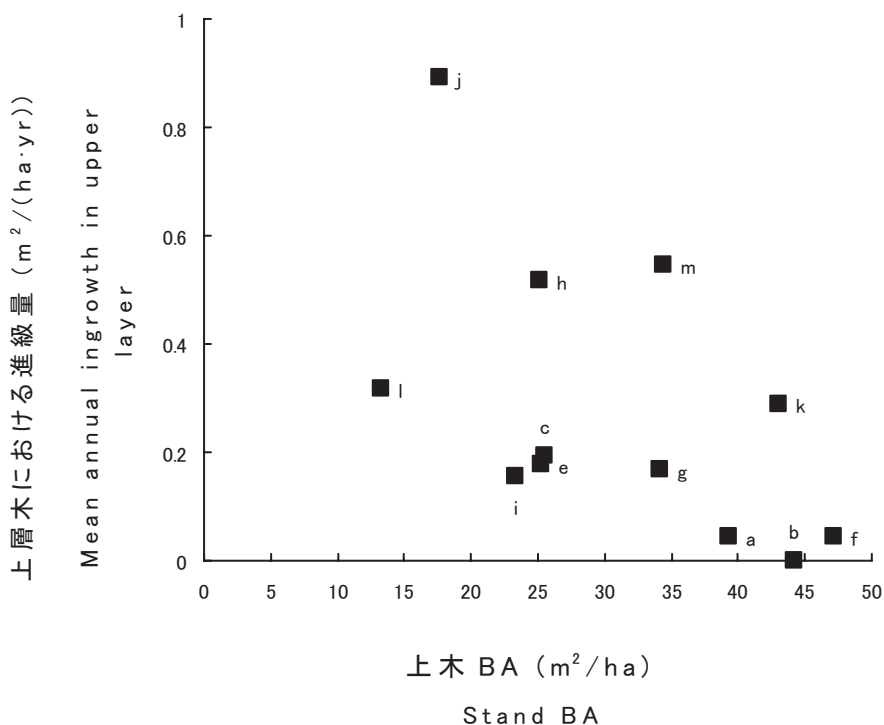


図-10 上木BAと上層木における進級量との関係
 Fig. 10. Relationship between stand BA and mean annual ingrowth in upper layer.

長はさまざまであり上木全体の純成長量の大きいプロット h, j, m において必ずしも大きな成長を示しているわけではないこと (図-8), これら 3 プロットでは下層木の成長が他のプロットと比べて明らかに大きく (図-10, 11) 上木全体の成長量に影響していること, 上層木の枯損量は下層木の枯損量に比べてプロット間での差が大きく上木全体の純成長量への影響が大きいこと (図-9, 12), がわかった。また上木への進界木の BA は図-5 に見られるように全体量が小さく, 上木全体の成長量に対する影響は小さい。以上のことから, 上木の純成長量におけるプロット h, j, m とその他のプロットとの大きな差は, 下層木成長の大小, 上層木枯損量の大小が大きく影響していると考えられる。

3. 常緑・落葉広葉樹別, 生育形別の成長特性

前節で下層木の成長や上層木の枯損が上木全体の成長に大きく影響している可能性が示されたので, 本節ではそれらの大小に関わる要因を生育形を中心に分析する。上層木や下層木における生育形の違いによる成長の差, そして, その差が上層木や下層木全体の成長に及ぼす影響を明らかにする。

(1) 上層木

○全体の成長量

まず、上層木全体についてであるが、上層木BAとその粗成長量との間には特に関係はみられなかった(図-13)。一方、上層木BAが増加するにつれ、下層木からの進級量を除いた粗成長量(上層木の生存木の成長量に等しい)はやや増加する傾向がみられたことから(図-14)、粗成長量全体と関係が顕著ではなかった原因は下層木からの進級量にあると考えられる。上層木BAの大きいプロットほど枯損量が多く(図-15)、粗成長量は傾向がみられないことから、その差である純成長量は上層木BAの増加に伴い減少する傾向がみられた(図-16)。

○生育形別の成長量

次に生育形別のBAについてみると、上述のように、上層木は主に高木性落葉広葉樹で占められている(西上, 2004)。プロットcとm以外のプロットで80%以上(BA)が高木性落葉広葉樹である(表-1)。プロットcではアカマツの占める割合が比較的高く32%であるが、高木性落葉広葉樹の割合が最も高く60%である。プロットmではさらにアカマツの占める割合が70%と高かった。高木性落葉広葉樹の割合は30%であった。プロットb, c, g, h, i, lでは小高木性落葉広葉樹、プロットe, f, kでは高木性常緑広葉樹も存在する。このように高木性落葉広葉樹は上層木に占める割合が高いため(表-1)、上層木全体の傾向とほぼ一致していた。小高木性落葉広葉樹・高木性常緑広葉樹・針葉樹(アカマツ)の傾向については、これらの出現するプ

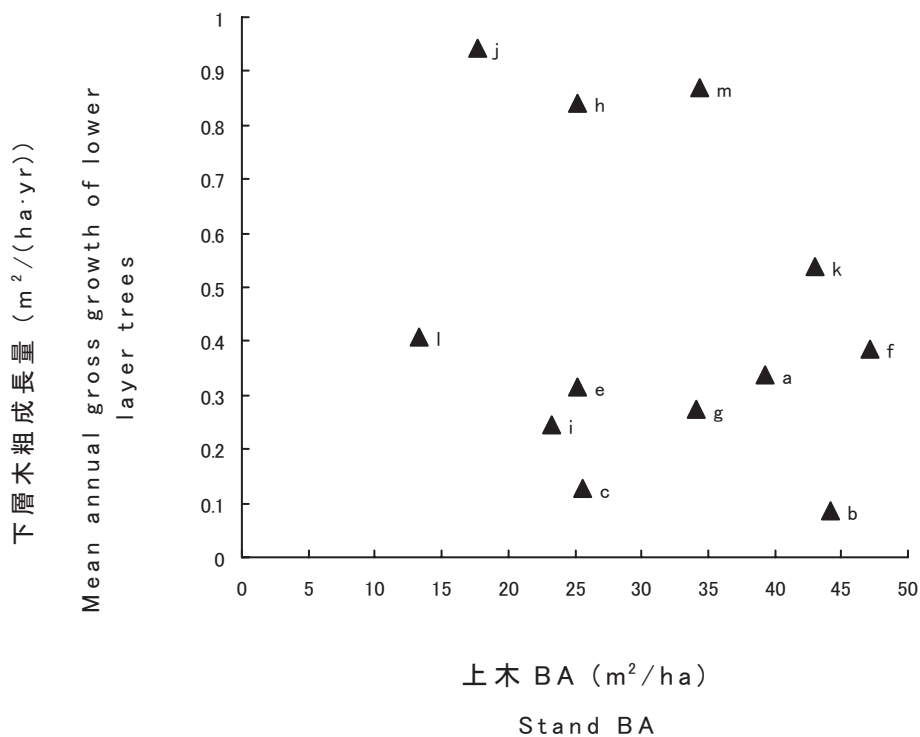


図-11 上層木BAと下層木粗成長量との関係

Fig. 11. Relationship between stand BA and mean annual gross growth of lower layer trees.

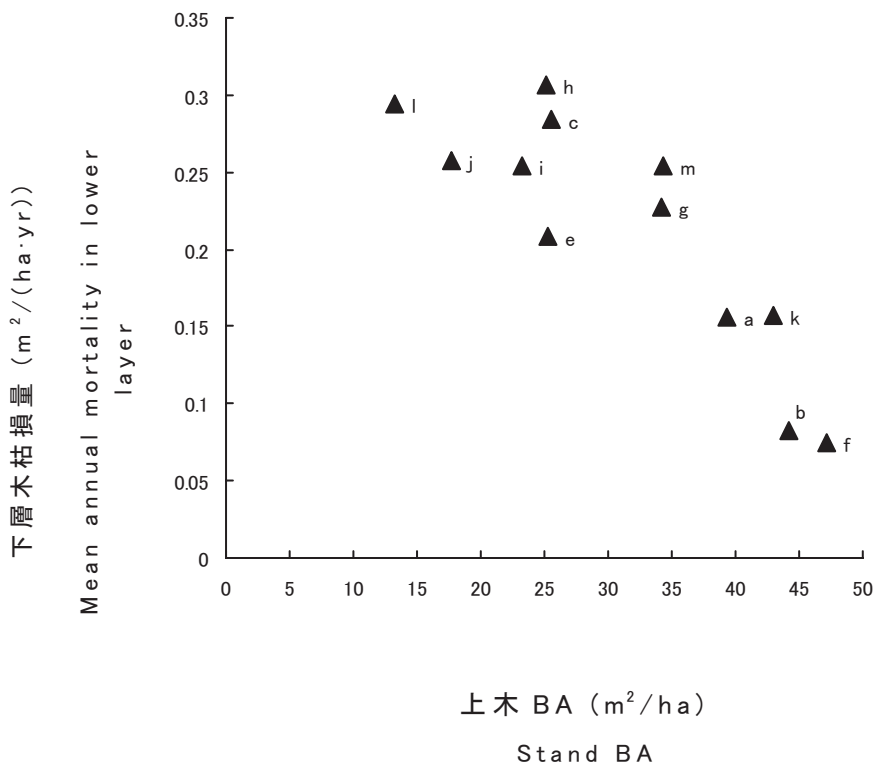


図-12 上木BAと下層木枯損量との関係
 Fig. 12. Relationship between stand BA and mean annual mortality of lower layer trees.

ロットが少ないが、全体的には期首の生育形別のBAの大きいプロットほどその粗成長量も大きい傾向がみられた。

上層木において枯損量の大きかったのはBAの大きいプロットa, k, b, fであり、上層木BAの小さいプロットj, h, lでは上層木枯損量がゼロであった(図-15)。BAの大きい4プロットの枯損個体は上層木の中でも小さいサイズであった(図-17)ことから、上層木内で大径の個体によって被圧されたことが原因と推察される。全プロットにおいて高木性常緑広葉樹は上層木で枯損しておらず、プロットkとmでアカマツが枯損していた他は、すべて高木性落葉広葉樹の枯損であった。

(2) 下層木

○全体の成長量

下層木全体の粗成長量については、期首の上層木BAの大きいプロットほど減少する傾向があり(図-18)、下層木BAの大きいプロットほど大きい傾向が見られた(図-19)。もともと上層木BAの大きいプロットほど下層木BAの上限が下降する傾向を示している(図-20)、上層木BAと下層木全体の粗成長量との関係は下層木BAに対するその関係と逆の傾向を示している。

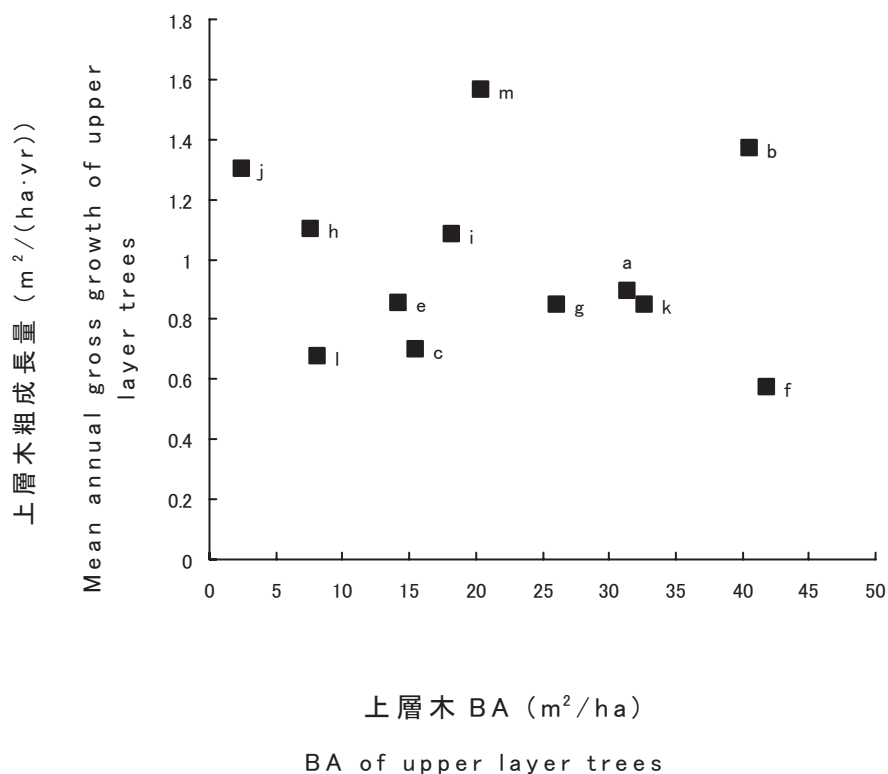


図-13 上層木BAと上層木粗成長量との関係

Fig. 13. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual gross growth of upper layer trees.

○常緑・落葉樹別，生育形別粗成長量

下層木BAが大きくなるにつれて下層木全体の粗成長量が増加していたように（図-19），各生育形の粗成長量についてもその下層木BAの大きいプロットほど大きくなる傾向があった（図-21）。そして，上層木BAが小～中程度（2.4～20.4 m²/ha）であるプロットh, j, mでは高木性落葉広葉樹の下層木粗成長量が大きく（0.26～0.42 m²/(ha·yr)），上層木BAの大きいプロットa, b, f, kでは小さい（0.0027～0.025 m²/(ha·yr)）という傾向があった（図-22 A）。小高木性落葉広葉樹の粗成長量も同様にプロットh, j, mで大きく（0.25～0.28 m²/(ha·yr)），上層木BAの大きいプロットa, b, f, kでは小さかった（0.0022～0.057 m²/(ha·yr)）（図-22 C）。一方，常緑広葉樹については顕著な関係はみられなかった（図-22 B, D）。落葉広葉樹，常緑広葉樹別の下層木粗成長量についても，上層木BAの大きいプロットほど落葉広葉樹の成長量は減少していたが，常緑広葉樹についてはそのような傾向はみられなかった（図-23）。

上層木BAの増加に伴う落葉広葉樹やその生育形別の粗成長量の減少は，この計測期間に上層木が下層木を被圧した結果であると考えられるべきなのだろうか。図-20に示されるように上層木BAの増加に伴って下層木BAの上限が減少する傾向があり，これと同様に，上層木BAの大きい

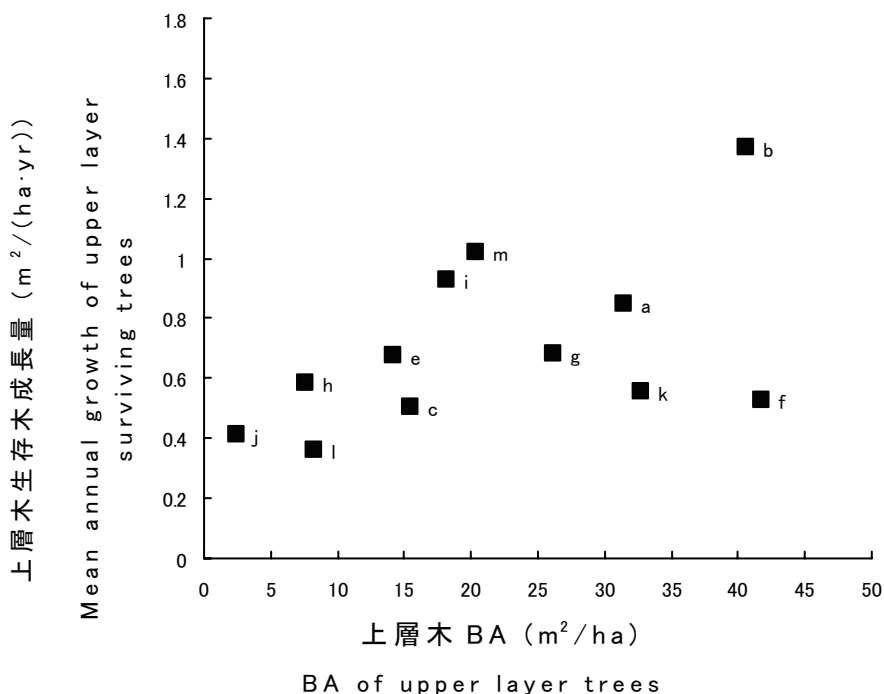


図-14 上層木BAと上層木生存木成長量との関係

Fig. 14. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual growth of upper layer surviving trees.

プロットではそもそも落葉広葉樹や高木性・小高木性落葉広葉樹の下層木BAが少ないため粗成長量が小さいという可能性もある。そこで、上層木BAと常緑・落葉広葉樹別、生育形別の下層木BAとの関係を調べた。上層木BAの大きいプロットほど下層木の高木性落葉広葉樹BAが減少する傾向がみられ(図-24 A)、落葉広葉樹BAも全体的に上層木BAの大きいプロットほど小さくなる傾向がみられた(図-25 A)。下層木全体のBAと粗成長量の大きかったプロット h, j, m(図-19)では落葉広葉樹BAと高木性落葉広葉樹BAも他のプロットに比べて大きかった(図-24 A, 図-25 A)。小高木性落葉広葉樹BAについては、全体的には上層木BAとの間に顕著な傾向はみられないものの、上記の3プロットの値は他のプロットと比較して大きい方であった(図-24 C)。プロット b や g で小高木性落葉広葉樹が比較的多いのは、それらのプロットが北向き斜面に位置し、高木性・小高木性の常緑広葉樹が入りにくいため(西上, 2004)他の生育形の個体が生存しやすい状況にあるのかもしれない。このように考えると、全般的には高木性落葉広葉樹と小高木性落葉広葉樹とは同じような傾向があると言えよう。一方、上層木BAの大小と常緑広葉樹全体のBAとの関係性は低く(図-25 B)、高木性・小高木性常緑広葉樹の下層木BAも上層木BAに応じた傾向は見られなかった(図-24 B, D)。また、下層木全体の粗成長量の大きいプロット h, j, m に共通した特徴も常緑広葉樹やその生育形別下層木BAではみられなかった。したがって、上層木BAに対する落葉広葉樹やその生育形別下層木粗成長量との関係には、それらの期首の下層木BAが上層木BAの増加に伴いおおむね減少傾向を示すことが影響している

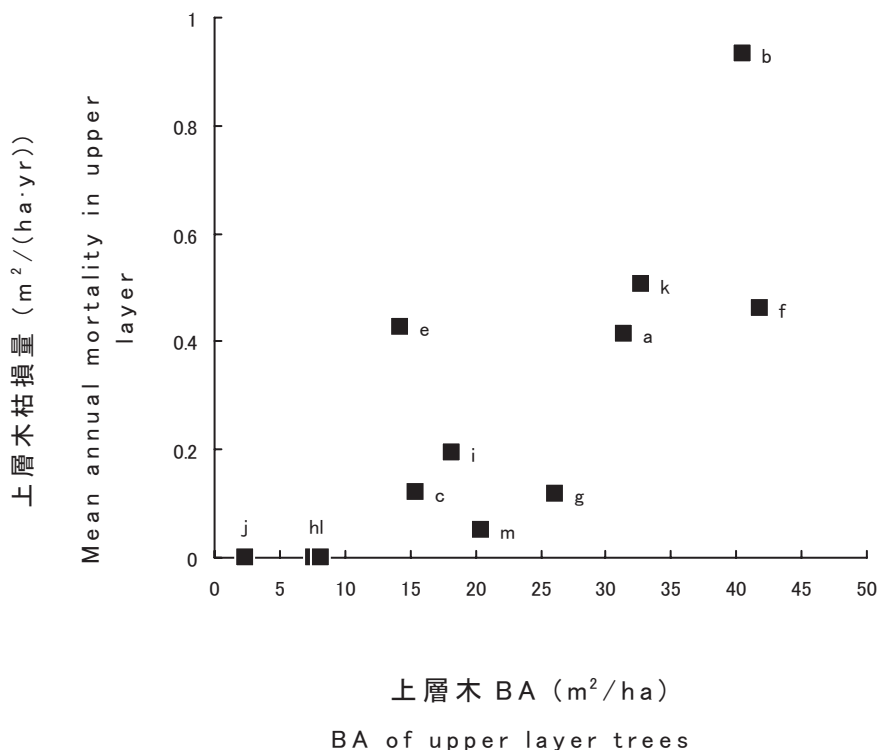


図-15 上層木BAと上層木枯損量との関係

Fig. 15. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual mortality in upper layer.

ものと考えられる。

以上のことと、低木性落葉広葉樹・常緑広葉樹のBAは他の生育形に比べて小さかった(表-2)ことから、上層木BAと下層木BAとの関係(図-20)と下層木全体の粗成長量との関係(図-18)には、落葉広葉樹、特に高木性落葉広葉樹の傾向が強く表れていると考えられる。下層木における常緑広葉樹の量は決して小さくはないが、上層木BAに対する増加や減少といった変動がみられず、プロットh, j, mの落葉広葉樹でみられるような $10 \text{ m}^2/(\text{ha}\cdot\text{yr})$ 前後の大きな成長をしていないため、下層木全体の示す傾向への影響が小さい。このような上層木BAに対する下層木の落葉広葉樹と常緑広葉樹の成長の傾向の違いに成長速度と耐陰性の差が表れていると考えられる。第1回目調査時に、上層木BAの比較的小さいプロットは下層木において高木性落葉広葉樹が多く(図-25)、また、いずれのプロットでも上層木BAにおけるその種の個体が占める割合は高い(表-1)。これは高木性落葉広葉樹が他の生育形、特に常緑広葉樹より成長が大きかったこと、または、更新時期が早かったこと、もしくはその両方が原因であろう。さらに、高木性落葉広葉樹の方が小高木性落葉広葉樹より成長が旺盛であったために現在上層を占めていると考えられるが(高橋・椎林, 1988; 小谷, 1993)、多くのプロットにおいて高木性落葉広葉樹の下層木BAの大きいプロットの方が小高木性落葉広葉樹のその量も大きかったことから、高木性と小高木性落葉広葉樹の個体は林分の中で似たようなふるまいを示しているものと考えられる。

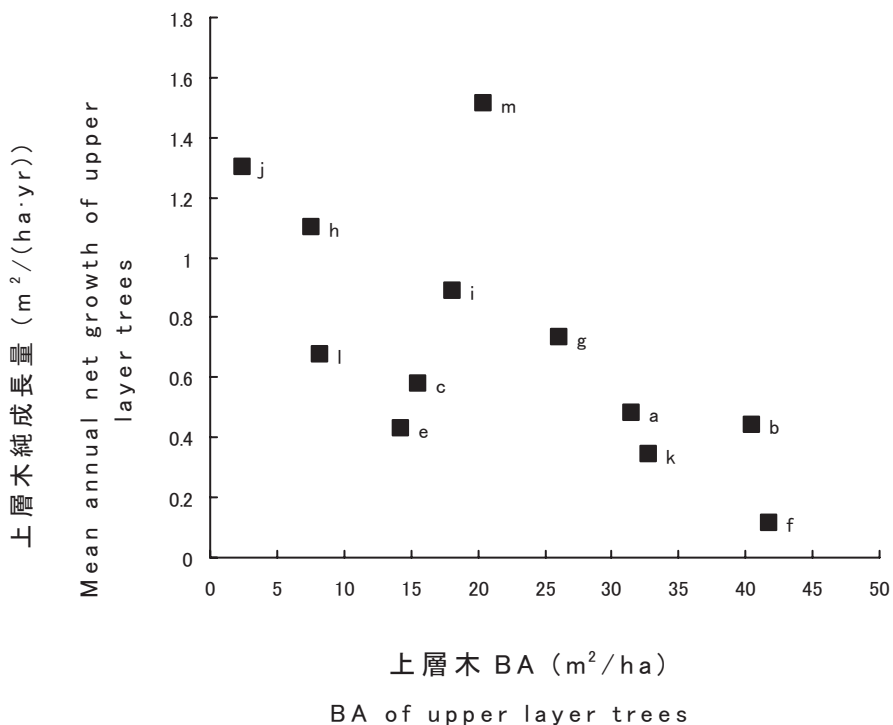


図-16 上層木BAと上層木純成長量との関係
 Fig. 16. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual net growth of upper layer trees.

表-1 上層木における生育形別BAとその割合
 Table 1. BA and percentage of each tree group in upper layer.

プロット名 plot	a	b	c	e	f	g	h	i	j	k	l	m	
BA (m²/ha)	DC_T*1	31.5	39.7	9.3	11.9	35.7	23.1	7.2	17.5	2.4	26.2	7.9	6.2
	DC_SC*2	0.0	0.8	1.3	0.0	0.0	1.4	0.2	0.7	0.0	0.0	0.3	0.0
	EG_T*3	0.0	0.0	0.0	2.4	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0
	CF*4	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	14.2
	Total	31.5	40.5	15.5	14.2	41.8	26.1	7.4	18.2	2.4	32.7	8.2	20.4
%	DC_T*1	100%	98%	60%	83%	85%	88%	97%	96%	100%	80%	96%	30%
	DC_SC*2	0%	2%	8%	0%	0%	6%	3%	4%	0%	0%	4%	0%
	EG_T*3	0%	0%	0%	17%	15%	0%	0%	0%	0%	14%	0%	0%
	CF*4	0%	0%	32%	0%	0%	6%	0%	0%	0%	6%	0%	70%

*1: 高木性落葉広葉樹, tall deciduous tree; *2: 小高木性落葉広葉樹, sub-canopy deciduous tree;
 *3: 高木性常緑広葉樹, tall evergreen tree; *4: 針葉樹, conifer tree

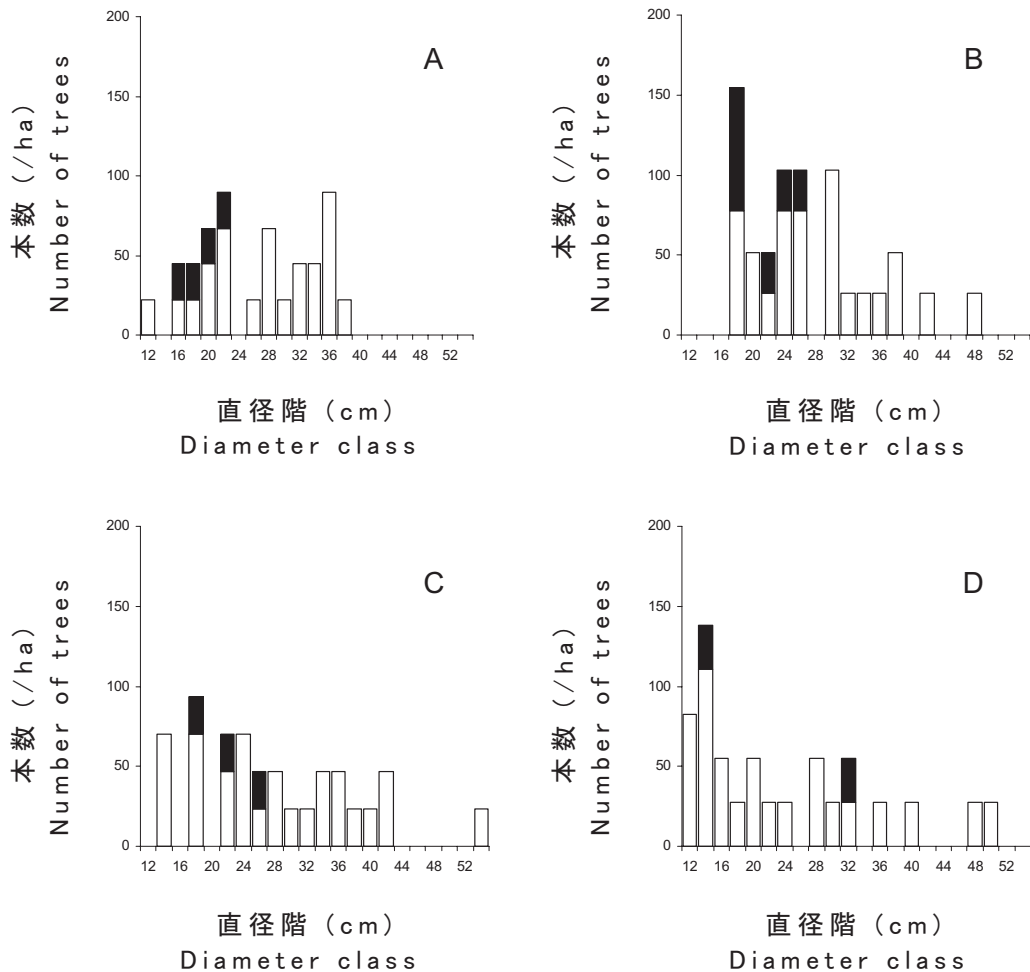


図-17 上層木直径分布

A: プロットa, B: プロットb, C: プロットf, D: プロットk

□: 生存木 ■: 枯損木

Fig. 17. Diameter distribution of upper layer trees.

A: plot a; B: plot b; C: plot f; D: plot k

□: surviving trees ■: dead trees

プロットdの第1回目(皆伐後5年)と2回目(同11年)計測時の直径分布の変化において、高木性・小高木性落葉広葉樹の個体が他の生育形に比べてより大径の直径階を占めるようになってきていることから、これらの種が他の生育形に比べて成長が大きいことが読み取れる(図-26)。時間の経過(遷移の進行)に伴い、高木性落葉広葉樹は後継稚樹から下層木、さらに上層木クラスへと進級し肥大成長する。小高木性落葉広葉樹も後継稚樹から下層木へと進級していく。一方で、

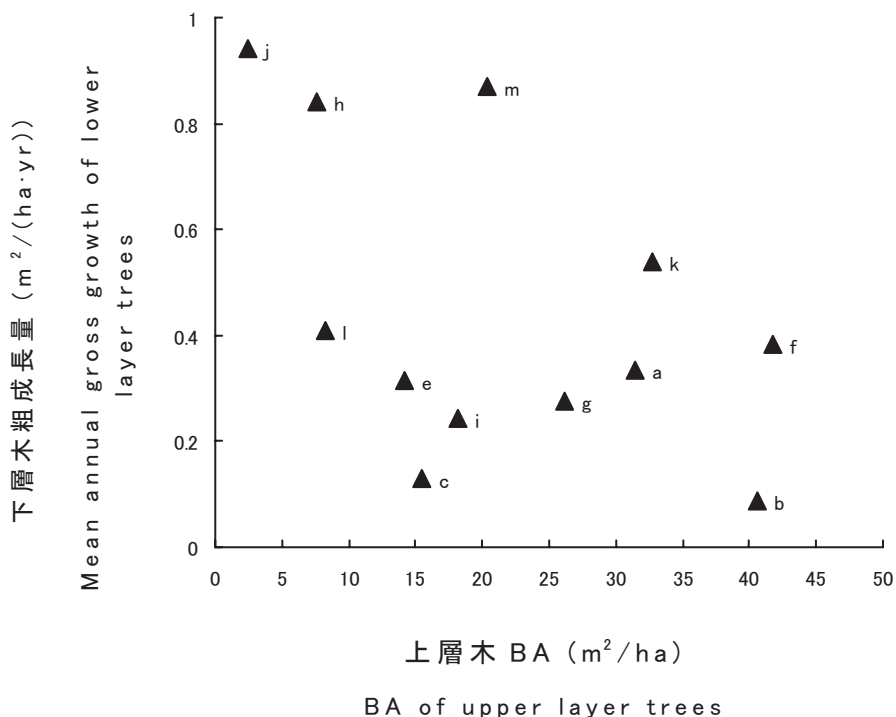


図-18 上層木BAと下層木粗成長量との関係

Fig. 18. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual gross growth of lower layer trees.

後継稚樹の絶乾重量を生育形別に比較すると、高木性・小高木性落葉広葉樹は非常に少なく（図-27）、下層木クラスへの進級も減っていくので、結果として下層木における高木性・小高木性落葉広葉樹は減少していく。このような樹種構成の変化は他の林分でもみられ（例えば、高橋・椎林, 1987; 西村ら, 1990; 達・大沢, 1992; 島野・沖津, 1993）、唐沢山においてはこの遷移に伴う上層木BAの増加と下層木の変化が、上層木BAの小さいプロットで下層木における高木性・小高木性落葉広葉樹のBAが比較的大きく、上層木BAの大きいプロットでそれらが小さい傾向（図-24 A, C, 図-25 A）に表れていたものと考えられる。そして、北向き斜面に位置するプロット以外では、下層木に高木性・小高木性常緑広葉樹の割合が増加していく（図-28）。北向き斜面のプロットでは、後継稚樹に高木性の個体が少ないが、低木性の種は多く、全体的に後継稚樹のバイオマスが小さい傾向がある（図-28）。

後継稚樹において高木性・小高木性落葉広葉樹の個体が少ないのは、耐陰性が低いことが原因であろう。一方、常緑広葉樹は落葉広葉樹に比べて耐陰性が強いいため、後継稚樹や下層木において上層木BAの大小にかかわらず生存することができるものと考えられる。上述のプロットdでは、第1回目計測時に対する第2回目計測時の落葉広葉樹の生育形別本数は11～48%に減少して

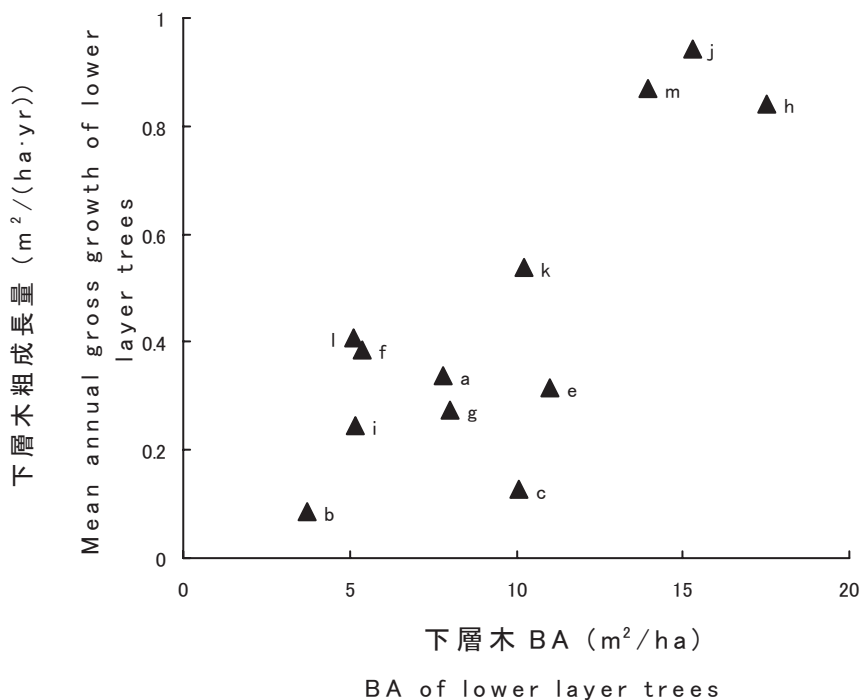


図-19 下層木BAと下層木粗成長量との関係

Fig. 19. Relationship between BA of lower layer trees and mean annual gross growth of lower layer trees.

いたが、常緑広葉樹については123～170%と増加しており、これは両者の耐陰性の違いによるものと推察される。

このように、唐沢山の広葉樹再生林の北向き斜面以外のプロットにおいて、高木性落葉広葉樹の上層木BAが増加し下層木BAが減少すると同時に下層木や後継稚樹において高木性・小高木性常緑広葉樹の優占度が増していくといった一般の遷移の様子が表れていたといえる。北向き斜面のプロットについては、数が少ないため推測するのが困難ではあるが、下層木にも後継稚樹においても高木性の種が少ないことから、これらの林分が維持されるには大規模な攪乱（中静・山本, 1987）などによる高木種の更新が必要なのかもしれない。

○上層木の下層木に対する影響

上層木BAの大小は遷移の進行具合と下層への被圧の度合いという二つの側面を示していると考えられる。ここまで、遷移の進行という視点から上層木BAと下層木の粗成長量（常緑・落葉広葉樹別、生育形別粗成長量）との関係を理解してきた。以下では、上層木BAの大小の下層木の成長量への影響、具体的には、上層木BAの大小に対する下層木の枯損量、下層木への進級量、下層木生存木の直径成長量の変化について検討を行う。

まず、枯損量であるが、上層木BAの大きいプロットほど下層木の枯損量が小さくなる傾向が顕著であった（図-29）。同時に、全体的に下層木BAの大きいプロットほどその枯損量が多い傾向もみられたことから（図-30）、上層木BAと下層木枯損量との関係は下層木BAとその枯損

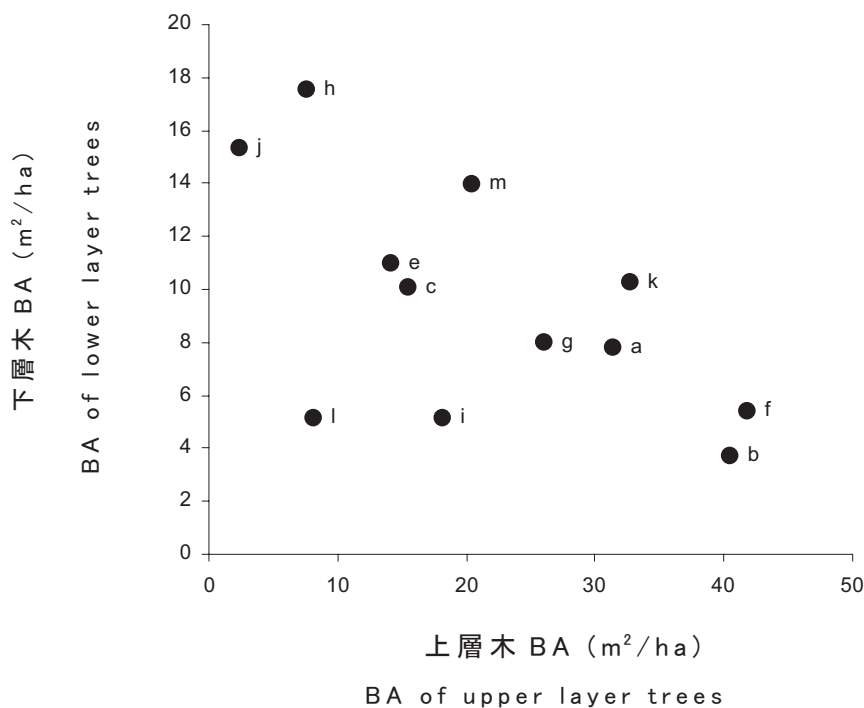


図-20 上層木BAと下層木BAとの関係
 Fig. 20. Relationship between BA of upper layer trees and BA of lower layer trees.

量との関係の裏返しであるとも考えられる。期首の下層木の量の影響を除くために下層木BAの枯損率を算出し上層木BAと比較したところ (図-31), プロットiやlで比較的枯損率が高い (5~6%) が他のプロットではあまり差がなく2%前後であったことから, 下層木の枯損に対する上層木BAの影響は実際には大きくないと考えられる。また, 常緑・落葉広葉樹別, 生育形別の枯損量も上層木BAとは関係がみられなかった。枯損量の内訳をみるとプロットfとk以外のプロットでは常緑広葉樹より落葉広葉樹が多く枯損しており (図-32), 枯損率はすべてのプロットで常緑広葉樹よりも落葉広葉樹の方が高かった。期首の生育形別下層木BAの大きいプロットの方が各枯損量も大きい傾向がみられた (図-33)。

後継稚樹から下層木への進級量は枯損量 (図-29) や粗成長量 (図-18) に比べてわずかである。北海道の針広混交林において進界量は林分BAや個体数などの関係がみられなかった例もあるが (佐野, 2001), 唐沢山では上層木BAの小さいプロットで進級量が大きく, 上層木BAの大きいプロットでは進級量が小さかった (図-34)。落葉広葉樹の生育形別では, 上層木BAの小さいプロットj, h, lで進級量の大きい場合が多かったので, 落葉広葉樹全体の進級量はその傾向が強く出ている (図-35 A)。一方, 常緑広葉樹は生育形別でも全体でも特に傾向はみられなかった (図-35 B)。しかし, 粗成長量 (図-21) や枯損量 (図-33) と同様に生育形別下層木BAの大きいプロットの方がその下層木への進級本数が多い傾向がみられた。

上層木の下層木生存木の直径成長への影響を調べるために, 生存木を常緑広葉樹・落葉広葉樹

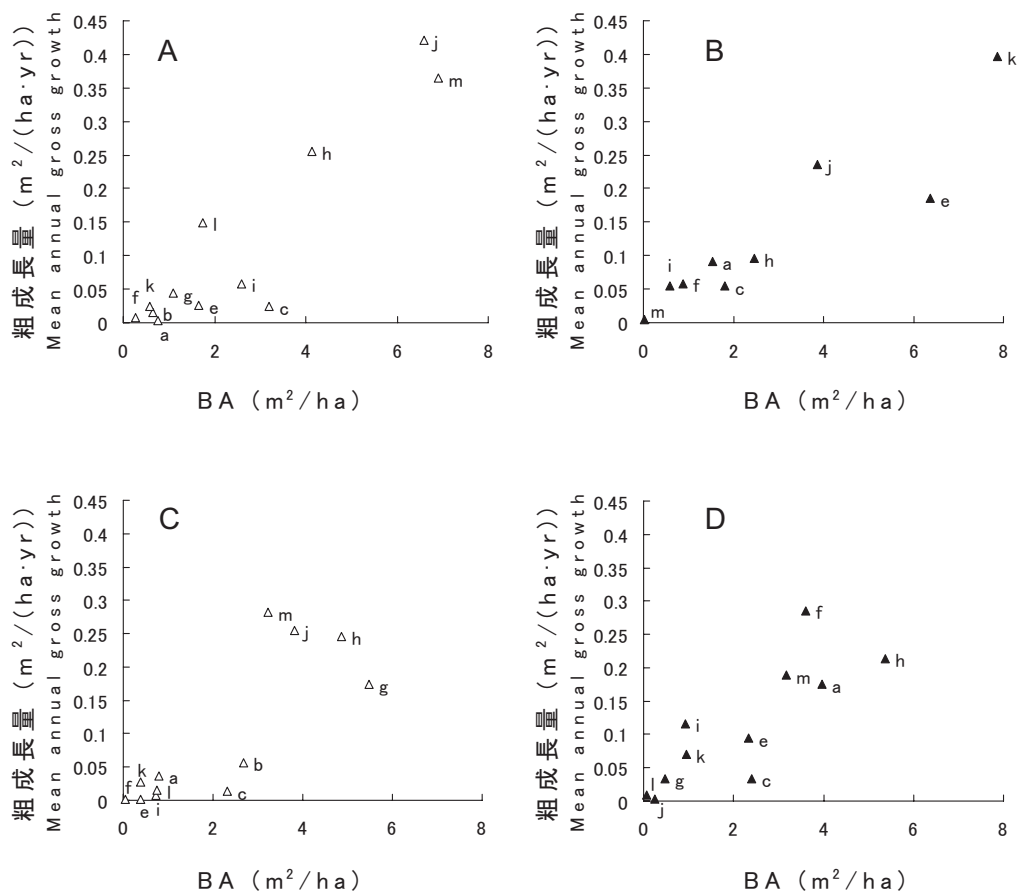


図-21 生育形別下層木BAと粗成長量との関係

A: 高木性落葉広葉樹, B: 高木性常緑広葉樹, C: 小高木性落葉広葉樹, D: 小高木性常緑広葉樹
 Fig. 21. Relationship between BA of lower layer trees and mean annual gross growth of lower layer trees for different tree groups.

A: tall deciduous tree; B: tall evergreen tree; C: sub-canopy deciduous tree; D: sub-canopy evergreen tree

に分け、それぞれの直径階別平均直径成長量を算出し、上層木BAとの関係を比較した(図-36, 37)。生育形別の直径階別平均直径成長量では各直径階に存在する本数がわずかでその値に大きく左右される場合があり、全体的な傾向を捉えづらかったので、常緑・落葉広葉樹別にまとめて検討した。また、同様の理由で、対象直径階に存在する林木が5個体未満の場合も検討対象から外した。落葉広葉樹の直径階別平均直径成長量は0 cm階では上層木BAとの関係はみられないものの、他の直径階においては上層木BAの小さいプロットで成長量が大きく、上層木BAの大きいプロットでは成長量の小さい傾向があった(図-36)。このことから、落葉広葉樹の下層木の直径成長には上層木が影響しているものと考えられる。一方、常緑広葉樹では、上層木BAの大きいプロットにおいても成長量が旺盛な場合も多くみられ、上層木BAと顕著な傾向はなく(図-

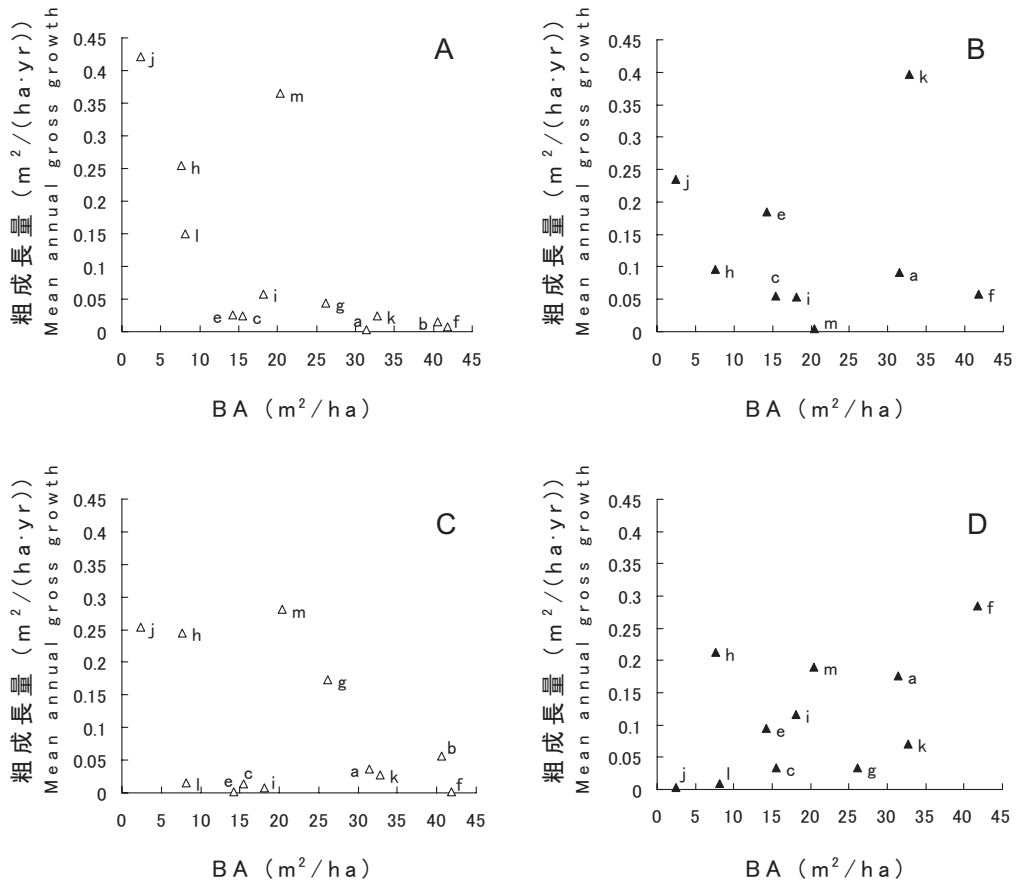


図-22 上層木BAと生育形別下層木粗成長量との関係

A : 高木性落葉広葉樹, B : 高木性常緑広葉樹, C : 小高木性落葉広葉樹, D : 小高木性常緑広葉樹
 Fig. 22. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual gross growth in lower layer for different groups.

A: tall deciduous tree; B: tall evergreen tree; C: sub-canopy deciduous tree; D: sub-canopy evergreen tree

37), 上層木 BA の存在によって常緑広葉樹の成長が妨げられているということはないようである。

上層木 BA の大小と下層木の枯損量との間に傾向がみられなかったことから、唐沢山の広葉樹再生林においては、下層木の枯損量に対する上層木の被圧の影響が小さいものと推測される。また、落葉広葉樹の方が常緑広葉樹に比べて枯損量・率が大きい場合が多かった。さらに、落葉広葉樹の進界成長量や直径階別平均直径成長量は上層木 BA の小さいプロットでは大きく、逆に上層木 BA の大きいプロットでは小さかったことから、上層木の被圧の影響を受けているものと考えられる。一方、常緑広葉樹は上層木の多少に関わらず生育・成長できるという性質が改めて確認された。

IV 成長予測

1. 成長モデルFSDの改良

天然林（異齡混交複層林）に対する成長モデルは様々なものが開発されており、それらのモデルは使用目的によって構造が大きく異なる。例えば、単木の胸高直径、樹種特性、位置データを用いて単木レベルで成長・生存・種子散布・更新を予測するサブモデルと光の利用可能性を予測するサブモデルから森林の動態を再現するモデル（例えばPACALA *et al.*, 1993）など主に生態系の仕組みに重点を置いているモデルもあれば、林分全体の胸高断面積合計成長の推定（例えばMOSER, 1969）や択伐林の行列モデルを開発し無伐採林分の長期的な成長予測を試みたもの（例えばBUONGIORNO, 1980）など林分の成長量（収穫量）に重点を置いているモデルもある。本研究では広葉樹再生林の管理に成長モデルを利用することを考えているため、後者の視点に立っている。

日本において管理を視野に入れた天然林の成長モデルに関する研究は直径遷移確率を用いたものが主であり、直径遷移確率の使い方によってそれらの成長モデルを二つに分けることができる。例えば、吉田・河原（1968）や南雲（1981）は過去の成長を調べ、その値から得た直径遷

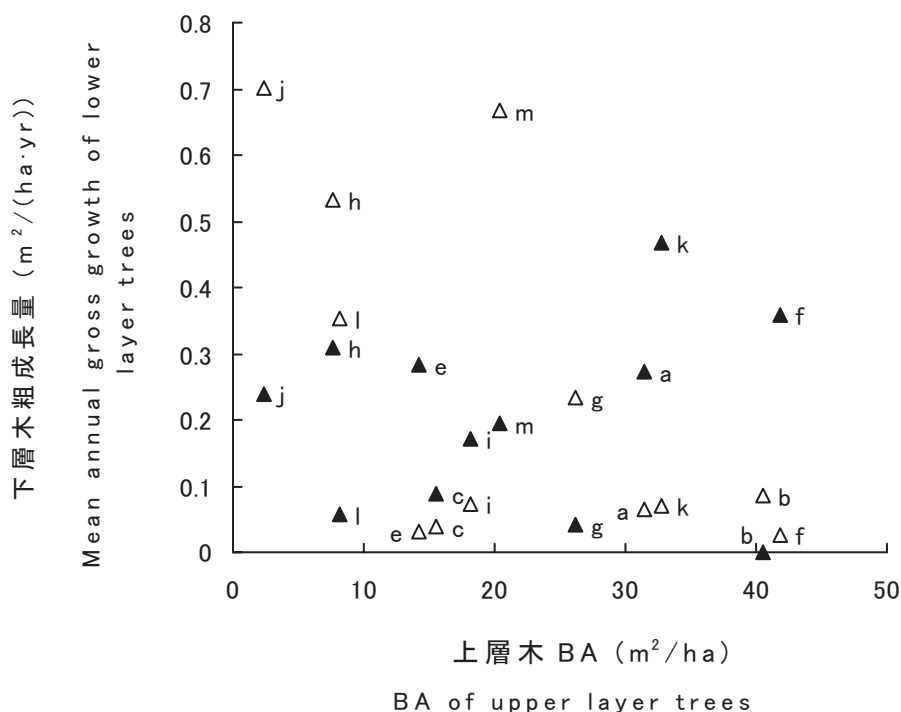


図-23 上層木BAと常緑・落葉樹別下層木粗成長量との関係

△: 落葉広葉樹 ▲: 常緑広葉樹

Fig. 23. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual gross growth of deciduous or evergreen trees in lower layer.

△: deciduous tree; ▲: evergreen tree

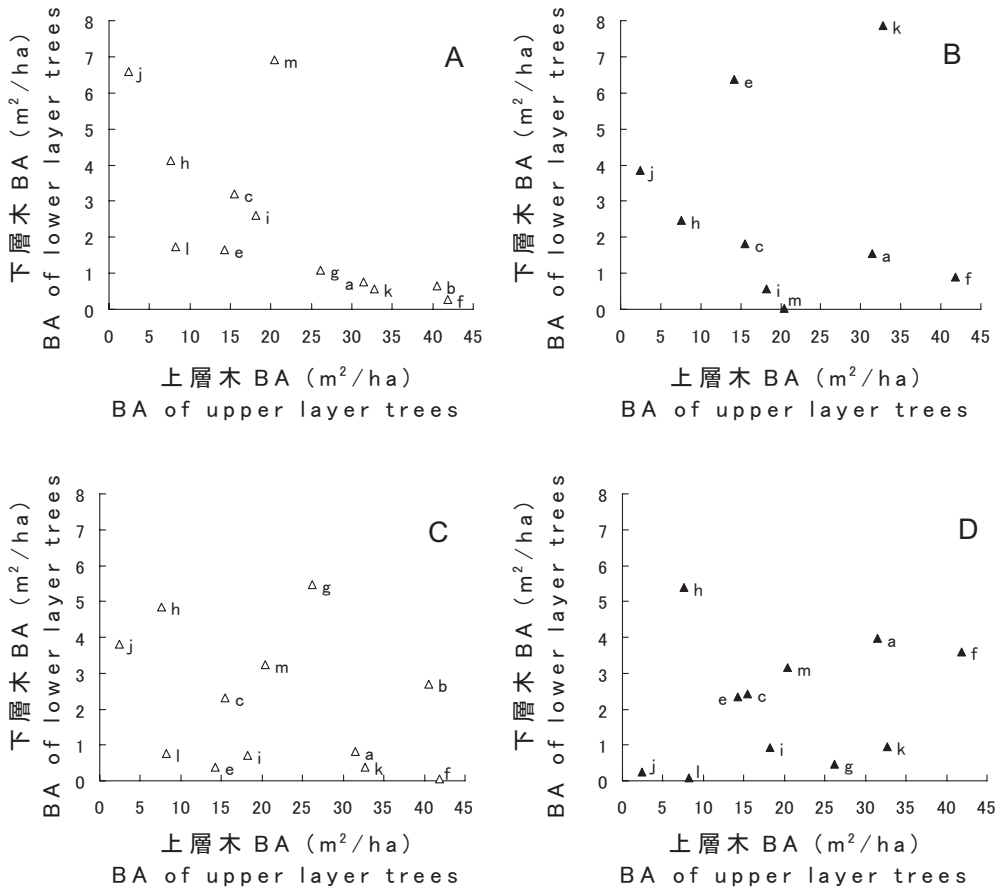


図-24 上層木BAと生育形別下層木BAとの関係

A：高木性落葉広葉樹，B：高木性常緑広葉樹，C：小高木性落葉広葉樹，D：小高木性常緑広葉樹

Fig. 24. Relationship between BA of upper layer trees and BA of lower layer trees for different tree groups.

A: tall deciduous tree; B: tall evergreen tree; C: sub-canopy deciduous tree; D: sub-canopy evergreen tree

移確率を用いて将来の成長を予測している。このとき、長期にわたる成長予測において同じ直径遷移確率を繰り返して用いる場合が多い。一方、石橋（1989a）は「現実にはある林分が将来までまったく同じ成長を繰り返すとは考えにくい」として、成長予測に同じ直径遷移確率を繰り返し用いるのではなく、林分構造の変化に応じた直径遷移確率を求める手法を提案している。同じ直径遷移確率を繰り返し用いて成長を予測する方法では「安定した施業のおこなわれている択伐林では、その直径遷移確率は時間に関して不変であると想定することは妥当である（南雲，1981）」とあるように、ある程度安定した林分を対象にしている。しかし、本研究で扱っている広葉樹再生林は今後樹種構成の変化が考えられるため、安定した林分であるとは考えにくく、過去の成長と今後の成長が同程度であるとするには無理があろう。そこで本研究では、林分構造によって林

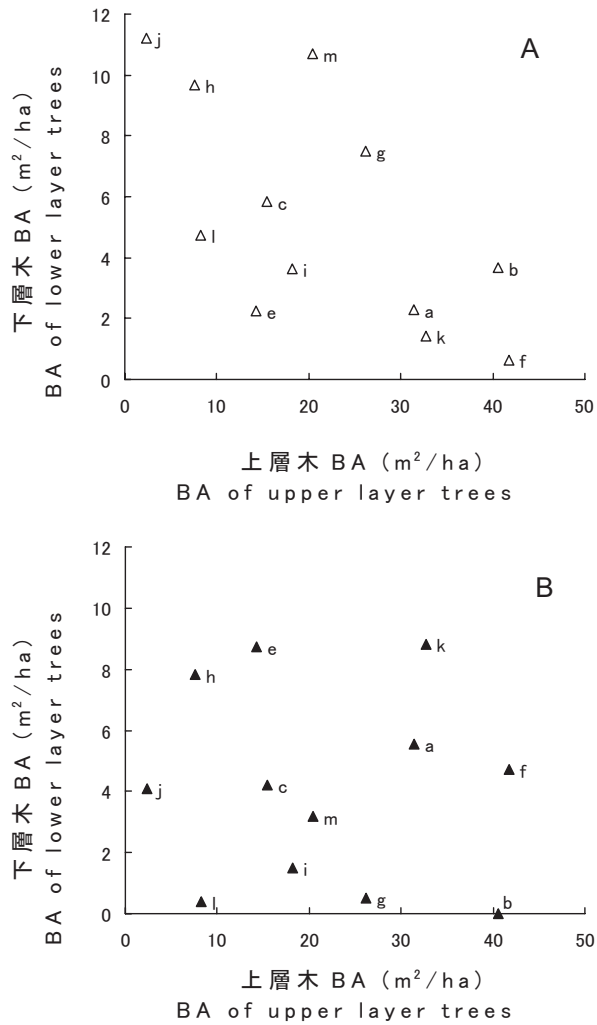


図-25 上層木BAと常緑・落葉樹別下層木BAとの関係

A: 落葉広葉樹, B: 常緑広葉樹

Fig. 25. Relationship between BA of upper layer trees and BA of deciduous or evergreen trees in lower layers.

A: deciduous tree; B: evergreen tree

分成長が決まるとする考え方に基づいて開発されたFSD（直径遷移確率を用いたフィードバック型林分成長シミュレーションモデル：Feedback type Stand growth simulation model using Diameter transition probability）を用いて広葉樹再生林の成長予測を行うことにする。

(1) FSDの概要

FSDは東京大学北海道演習林の天然林を対象に作成された林分成長モデルである。FSDの構造の特徴は以下の3点にまとめられる。

表-2 下層木における生育形別BAとその割合
Table 2. BA and percentage of each species group trees in lower layer.

プロット名 plot	a	b	c	e	f	g	h	i	j	k	l	m
DC_T*1	0.77	0.65	3.19	1.65	0.27	1.09	4.12	2.60	6.60	0.57	1.74	6.91
DC_SC*2	0.80	2.68	2.31	0.38	0.05	5.48	4.85	0.72	3.82	0.38	0.75	3.23
DC_S*3	0.70	0.36	0.35	0.24	0.30	0.94	0.70	0.33	0.78	0.47	2.23	0.55
BA (m ² /ha)												
EG_T*4	1.54	0	1.81	6.37	0.88	0	2.46	0.58	3.86	7.86	0	0.02
EG_SC*5	3.96	0	2.41	2.34	3.60	0.47	5.38	0.92	0.25	0.96	0.08	3.16
EG_S*6	0.03	0.01	0.00	0.03	0.25	0.04	0	0.01	0	0.01	0.30	0
CF*7	0	0.01	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0.09
Total	7.8	3.7	10.1	11.0	5.4	8.0	17.5	5.1	15.3	10.2	5.1	14.0
%												
DC_T*1	10%	17%	32%	15%	5%	14%	24%	50%	43%	6%	34%	49%
DC_SC*2	10%	73%	23%	3%	1%	68%	28%	14%	25%	4%	15%	23%
DC_S*3	9%	10%	3%	2%	6%	12%	4%	6%	5%	5%	44%	4%
EG_T*4	20%	0%	18%	58%	16%	0%	14%	11%	25%	77%	0%	0%
EG_SC*5	51%	0%	24%	21%	67%	6%	31%	18%	2%	9%	1%	23%
EG_S*6	0%	0%	0%	0%	5%	1%	0%	0%	0%	0%	6%	0%
CF*7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%

*1: 高木性落葉広葉樹, tall deciduous tree; *2: 小高木性落葉広葉樹, sub-canopy deciduous tree;

*3: 低木性落葉広葉樹, short deciduous tree; *4: 高木性常緑広葉樹, tall evergreen tree;

*5: 小高木性常緑広葉樹, sub-canopy evergreen tree; *6: 低木性常緑広葉樹, short evergreen tree;

*7: 針葉樹, conifer tree

①期首の直径分布（林分構造）から直径遷移確率（林分成長）を予測し、その直径遷移確率（林分成長）によって新たな直径分布（林分構造）を予測するモデルであり、林分構造に応じた林分成長を予測することができる。

②直径分布の変化を予測するモデルなので、直径階別の立木本数を知ることができ、直径階別の伐採計画やその影響を予測することができる。

③林分成長全体の限界値を想定し、その範囲内で林分構造と林分成長との個別的な解析結果を統合して構築されるモデルであるので、地況要因や樹種特性、単木の成長特性などについての情報を取り込んでいけば、より複雑な成長現象に適用することが可能である。また、林分構造と林分成長との関係についての解析が進めば、より信頼度の高い予測モデルが作成できる。

FSD のフローチャート（図-38）にしたがって、期首の直径分布から直径遷移確率を計算し、期末の直径分布を推定する方法を簡単に説明する。詳細は石橋（1989a）を参照されたい。

①直径階別蓄積、直径級別蓄積および林分蓄積の計算：直径分布と一変数材積式から計算する。直径級は小径級（s）、中径級（m）、大径級（l）の3階級であり、小径級に含まれる最小直径階は実際の予測では6cmとなっている。

②林分蓄積に応じた林分粗成長量の上限および下限の設定：散布図を用いた解析により林分蓄積（v）と林分粗成長量（z）との間に図-40に示されるような上限（z_U）と下限（z_L）の存在が指摘されており（石橋，1990）、これら天然林の林分成長全体の限界値がFSDに組み込まれている。林分粗成長量の上限が最大となる林分蓄積をV_p、そのときの最大林分粗成長量をZ_pとし、

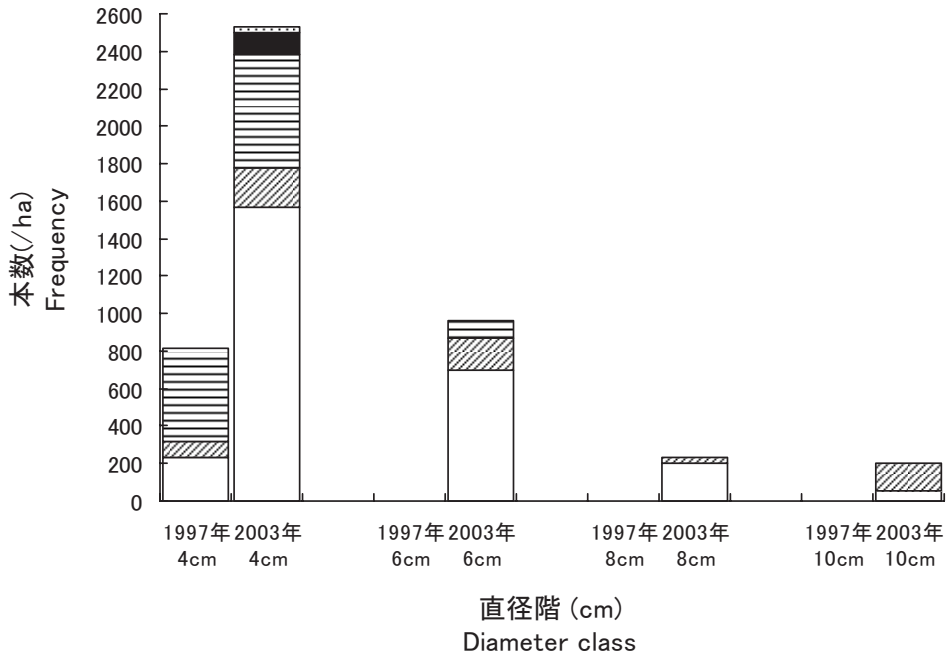


図-26 プロットdの直径分布の変化
Fig. 26. Change of diameter distribution in plot d.

- 高木性落葉広葉樹
tall deciduous tree
- 小高木性落葉広葉樹
sub-canopy deciduous tree
- 高木性常緑広葉樹
tall evergreen tree
- 小高木性常緑広葉樹
sub-canopy evergreen tree
- 低木性落葉広葉樹
short deciduous tree
- 低木性常緑広葉樹
short evergreen tree

上限曲線には点 (V_p, Z_p) を極大とする以下の2次方程式が用いられている。

$$z_U = \frac{-Z_p}{V_p^2} v^2 + \frac{2Z_p}{V_p} v \quad (1)$$

ただし、 Z_p は地位によって決まるものとする。成長解析の結果、林分成長の良否が林分自身の持つ生産力すなわち地位の影響を受けるといった特徴が指摘されており(石橋, 1990), 地位によって異なると考えられる関係については、FSDでは常に「地位によって決まるパラメータ」という形で地位の影響を表現できるようになっている。

次に、林分蓄積が高くなると林分粗成長量の上限はあまり変わらなくなると考え、その境界の林分蓄積を V_B とする。 V_B 以上の林分蓄積においては林分粗成長量の上限を $Z_p/2$ とすると、

$$z_U = \frac{Z_p}{2} \quad (2)$$

(1) 式と (2) 式より

$$V_B = (1 + 1/\sqrt{2})V_p$$

が求められる。以上をまとめると上限曲線は

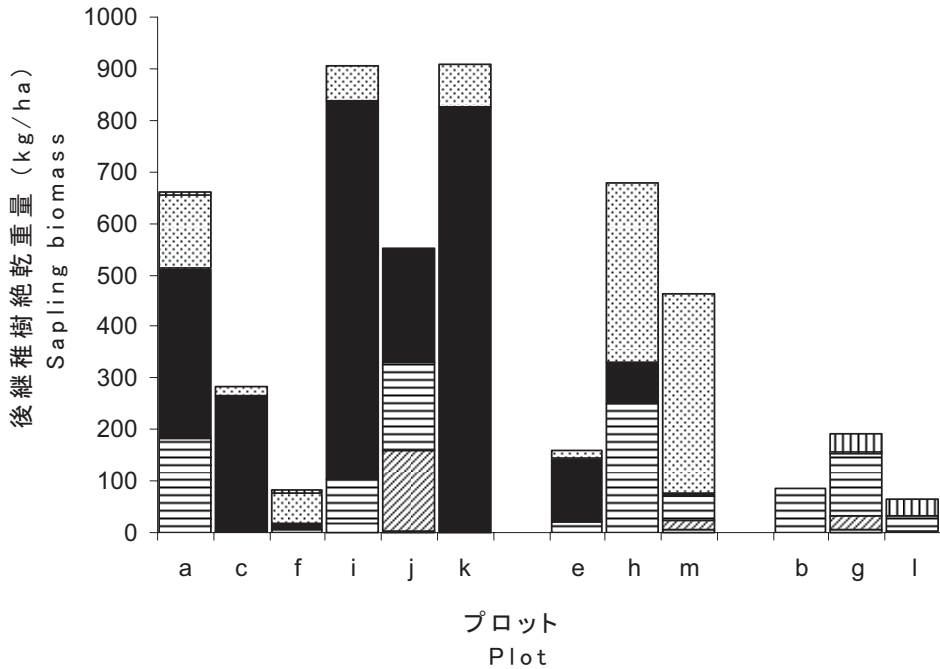


図-27 後継稚樹の生育形別絶対乾重量
Fig. 27. Sapling biomass of each tree group.

- 高木性落葉広葉樹 tall deciduous tree
- 高木性常緑広葉樹 tall evergreen tree
- ▨ 小高木性落葉広葉樹 sub-canopy deciduous tree
- ▩ 小高木性常緑広葉樹 sub-canopy evergreen tree
- ▤ 低木性落葉広葉樹 short deciduous tree
- ▥ 低木性常緑広葉樹 short evergreen tree

$$z_U = \begin{cases} \frac{-Z_P}{V_P^2}v^2 + \frac{2Z_P}{V_P}v & (0 < v < V_B) \\ \frac{Z_P}{2} & (V_B \leq v) \end{cases}$$

と表される。

一方、下限曲線は基本的には林分蓄積 v にかかわらず一定 (Z_R) とするが、林分蓄積が V_P 以下の場合には上限曲線と同様に凸の二次曲線として表す。したがって、下限曲線は

$$z_L = \begin{cases} \frac{-Z_R}{V_P^2}v^2 + \frac{2Z_R}{V_P}v & (0 < v < V_P) \\ Z_R & (V_P \leq v) \end{cases}$$

と表される。

これらの式を用いて、期首の林分蓄積からその粗成長量の取り得る範囲を計算することができる。

③直径級別蓄積に応じた直径級別粗成長量の上限および下限の設定：径級別蓄積と径級別粗成

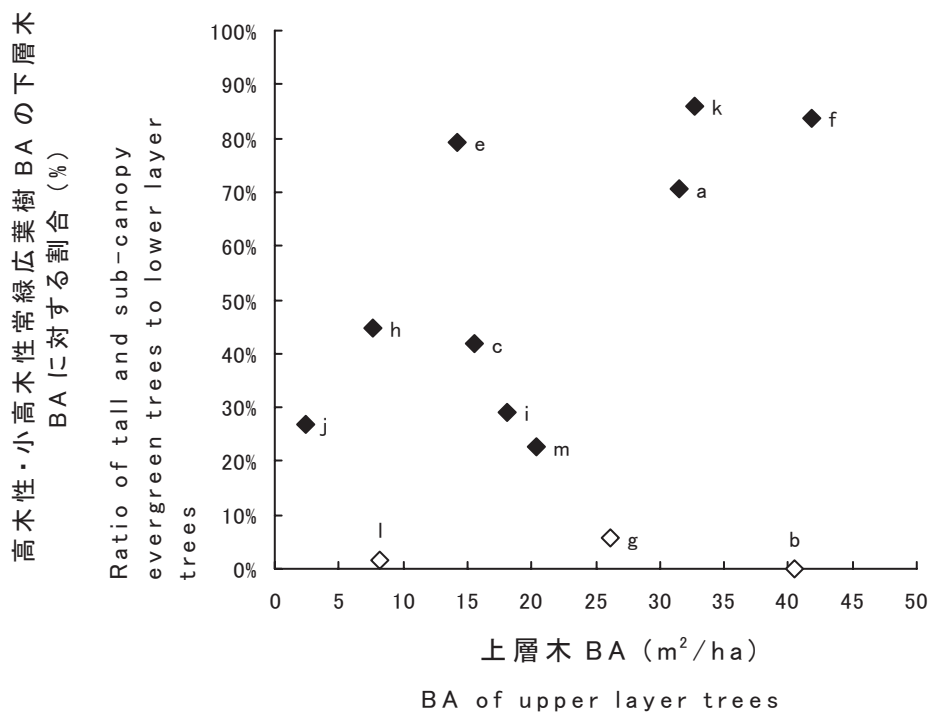


図-28 上層木BAと下層木における高木性・小高木性常緑広葉樹の下層木全林木に対する割合との関係
 ◆：南・西向きプロット，◇：北向きプロット

Fig. 28. Relationship between BA of upper layer trees and ratio of tall and sub-canopy evergreen tree to lower layer trees.

◆: data of plots facing south or west; ◇: data of plots facing north

長量との関係の解析結果（石橋，1990）より，径級別蓄積とその粗成長量の上限との間に比例関係が成り立つと仮定し，（3）式を用いて期首の径級別蓄積から粗成長量の上限を決定する。林分粗成長量の場合と同じく，径級別粗成長量の上限も，林地の持つ生産力すなわち地位の影響で値が変化すると考える。

$$z_{kU} = a_k v_k \quad (3)$$

ただし， z_{kU} ：径級別粗成長量の上限（ $k=s, m, l$ ）， v_k ：径級別蓄積（ $k=s, m, l$ ）， a_k ：地位によって決まるパラメータ（ $k=s, m, l$ ）である。各径級の粗成長量の合計が②で計算した林分粗成長量の上限（ z_U ）と下限（ z_L ）の間に入っている場合は，（3）式によって求めた径級別粗成長量の上限をそのまま用いる。しかし， $\sum_{k=s}^l z_{kU}$ が z_U を上回る場合，または z_L を下回る場合は，（3）式によって求めた径級別粗成長量の上限の比率をそのままにして， $\sum_{k=s}^l z_{kU}$ が z_U ，または z_L と等しくなるように径級別粗成長量の上限を決める。

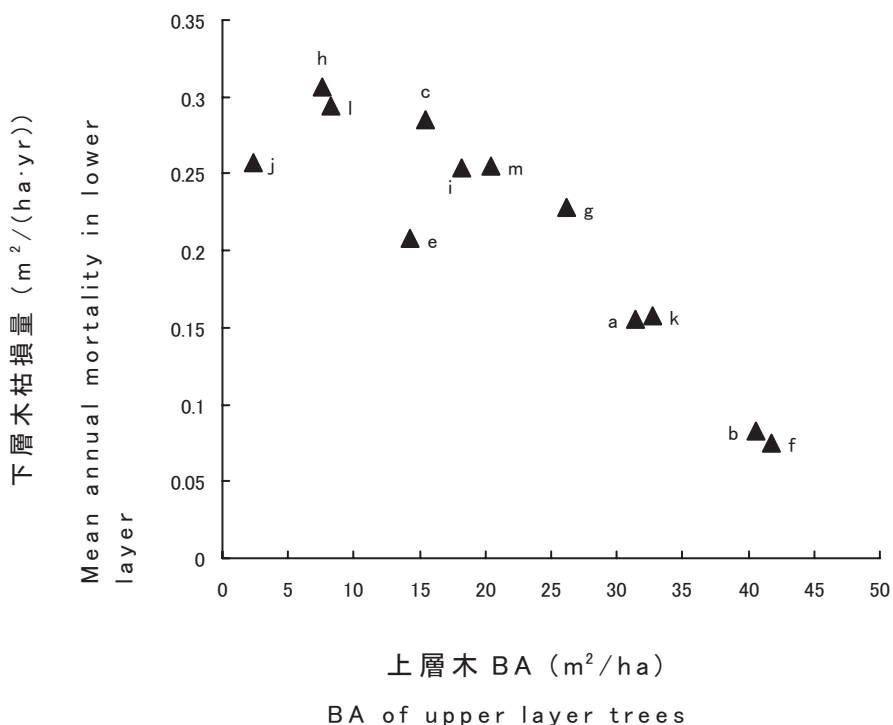


図-29 上層木BAと下層木枯損量との関係
 Fig. 29. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual mortality in lower layer.

次に、径級別粗成長量の上限と同じ比率で合計が z_L と等しくなるように(4)式によって径級別粗成長量の下限 z_{sL} , z_{mL} , z_{lL} を求める。

$$z_{kL} = \frac{z_{kU}}{\sum_{k=s} z_{kU}} z_L \quad (4)$$

ただし、 z_{kL} ：径級別粗成長量の下限 ($k = s, m, l$) である。ここで求めた z_{sU} , z_{mU} , z_{lU} , z_{sL} , z_{mL} , z_{lL} は以下で直径別直径成長量を推定する際の制約条件となる。

④直径階別直径成長量の平均および分散の推定：大径木については、直径成長は直径階によらず安定しているものと仮定し、初期値 $\Delta \bar{d}_1$ を与える。中径木、小径木については大径木蓄積 (v_1) と中径木の平均直径成長量 ($\Delta \bar{d}_m$) との間および中大径木蓄積 (v_{m1}) と小径木の平均直径成長量 ($\Delta \bar{d}_s$) との間におおの直線関係を仮定する。

$$\Delta \bar{d}_m = p_{m1} v_1 + p_{m2}$$

$$\Delta \bar{d}_s = p_{s1} v_{m1} + p_{s2}$$

ただし、 p_{m1} , p_{m2} , p_{s1} , p_{s2} は地位によって決まるパラメータである。

ここで得られた平均直径成長量を用いて、林分蓄積の粗成長量を計算し、その値が②で求めた上限と下限の間がない場合は、適宜修正を行い、各径級の平均直径成長量を決定する。

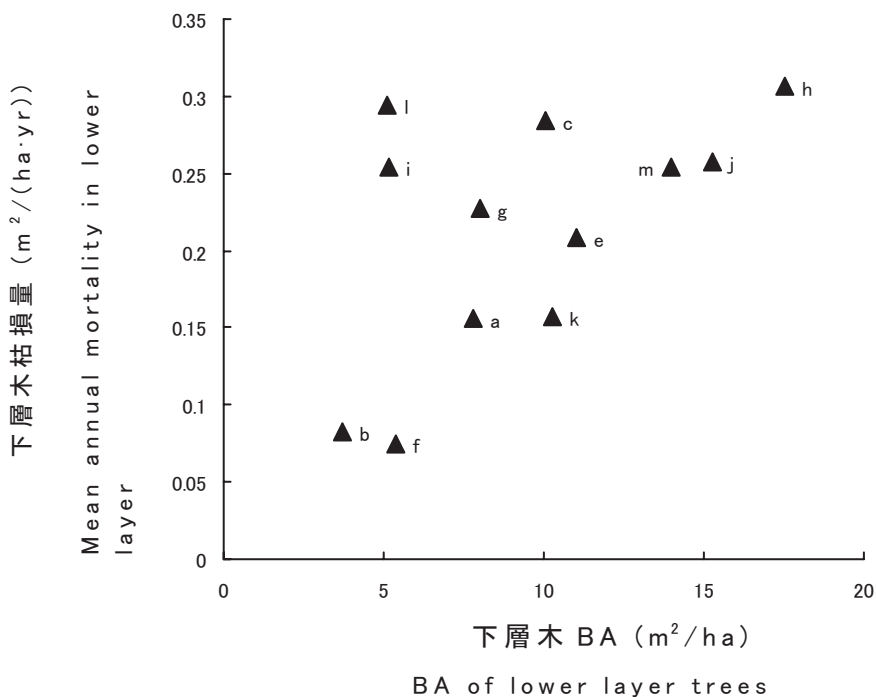


図-30 下層木BAと下層木枯損量との関係

Fig. 30. Relationship between BA of lower layer trees and mean annual mortality in lower layer.

次に、直径階別直径成長量の分散については、確定的な関係を決めることが難しいので、解析結果からいくつかの仮定をおき、直径成長量の変動係数と平均から求める。変動係数は、大径木については一定 (CV_{dl}) とする。中径木の変動係数 (CV_{dm}) は大径木蓄積 (v_l) から、小径木の変動係数 (CV_{ds}) は中大径木蓄積 (v_{ml}) から推定される。

$$CV_{dm} = q_{m1}v_l + q_{m2}$$

$$CV_{ds} = q_{s1}v_{ml} + q_{s2}$$

ただし、 q_{m1} , q_{m2} , q_{s1} , q_{s2} はパラメータである。

直径階別直径成長量の平均 ($\Delta \bar{d}_i$) と変動係数より、直径階別直径成長量の分散 (σ_{di}^2) は次式によって求められる。

$$\sigma_{di}^2 = \left(\frac{CV_d \cdot \Delta \bar{d}_i}{100} \right)^2$$

⑤直径階別枯損量の推定：大径木の枯損は上層構成中心樹種の寿命 (A_l) やその種が上層に達するまでの年数 (t) などから決定される枯損率 (P_{Ml}) に応じてランダムに起こると仮定する。

$$P_{Ml} = x \frac{1}{A_l - t}$$

ただし、 x は直径に応じて決まる係数である。

また、中径木の枯損率 (P_{Mm}) は大径木蓄積 (v_l) から、小径木の枯損率 (P_{Ms}) は中大径木

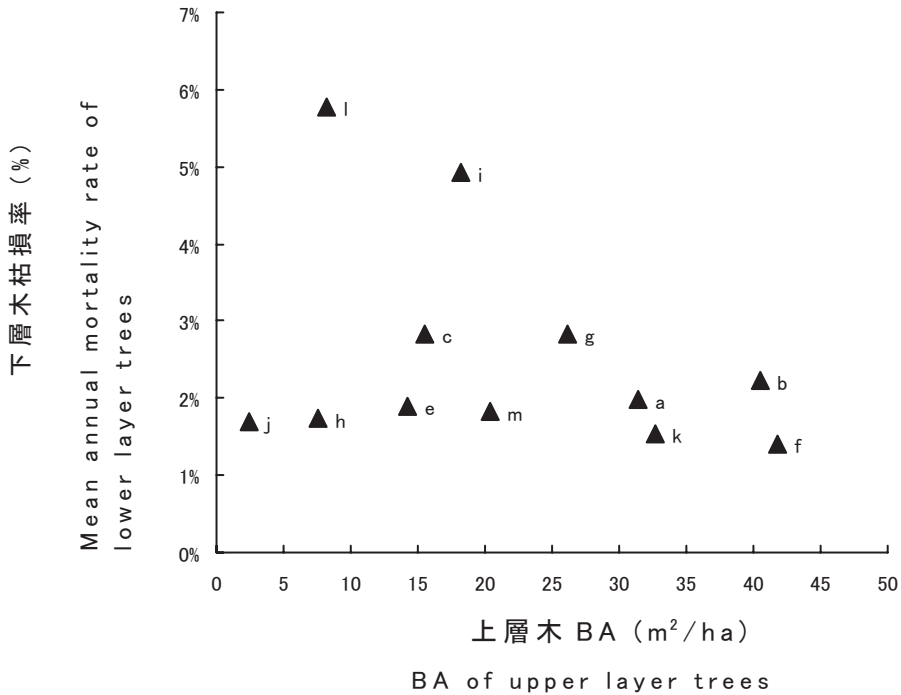


図-31 上層木BAと下層木枯損率との関係

Fig. 31. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual mortality rate of lower layer trees.

蓄積 (v_{ml}) から推定する。

$$P_{Mm} = r_{m1}v_1 + r_{m2}$$

$$P_{Ms} = r_{s1}v_{ml} + r_{s2}$$

ただし, r_{m1} , r_{m2} , r_{s1} , r_{s2} はパラメータである。

⑥進界量の推定：まず, 中大径木蓄積と小径木本数の間に直線関係を仮定し, 中大径木蓄積 (v_{ml}) から推定される小径木本数 (\hat{n}_s) を求める。

$$\hat{n}_s = t_1v_{ml} + t_2$$

ただし, t_1 , t_2 はパラメータである。

ここで求める \hat{n}_s は中大径木蓄積から推定される小径木の“推定本数”であり, 現実の小径木本数 n_s ではない。次に, \hat{n}_s を小径木に相当する直径階の数で除し, 直径階別平均立木本数を求め, その値の2倍を最小直径より下の直径階 (D') における立木本数を推定する。また, D' における直径成長量の平均および分散は最小直径階と同じであるとする。

以上により, D' についての直径分布と直径遷移確率が求められる。進界量は D' より上のクラスへ進級してくる林木本数として推定される。

⑦直径遷移確率の計算：ここまでで求めた直径階別直径成長量の平均と分散を用いて, WEIBULL 分布を当てはめ, 直径遷移確率を計算する。この際, D' の直径遷移確率についても計算し, 直径遷移行列としてまとめる。

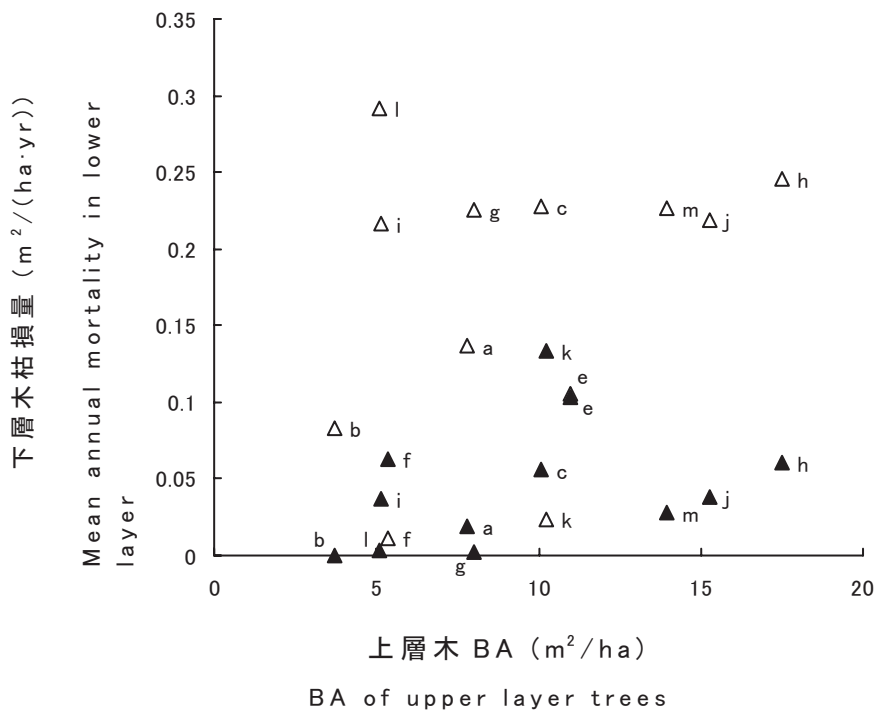


図-32 上層木BAと常緑・落葉樹別下層木枯損量との関係

△: 落葉広葉樹 ▲: 常緑広葉樹

Fig. 32. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual mortality in lower layer for deciduous or evergreen tree.

△: deciduous tree; ▲: evergreen tree

⑧直径分布の計算：すべての林木について、モンテカルロ法により枯損か残存かを決定する。残存する林木を対象に、同じくモンテカルロ法により、期末の直径階を決定する。

(2) FSDの改良

FSDが開発された対象は北海道演習林の針広混交の天然林であり、主に広葉樹のみからなる比較的若い再生林である唐沢山の広葉樹再生林へそのまま適用することはできない。そこで以下の点を変更した。

・林分の現存量を表す指標として蓄積ではなくBAを用いた。FSDは直径分布から一変数材積表によって求めた蓄積を基本にして粗成長量等を求めている。一般に林分の現存量を表すのに蓄積を用いるが、関東地方の森林は傾斜地が多く広葉樹は直立して成立していない場合が多いので、胸高直径と樹高から材積を求める二変数材積式を用いても精度のよい値が得られるとは考えにくく、一変数材積式ではさらに精度が落ちると考えられる。そこで、蓄積ではなくBAをベースにしたモデルに変更した。

・林分を3つの層(径級)ではなく2つの層に分けて扱った。FSDではある直径階以上(実際の予測では6 cm階以上)の林木(主木)を対象に3つの径級に分類して成長予測を行っている。

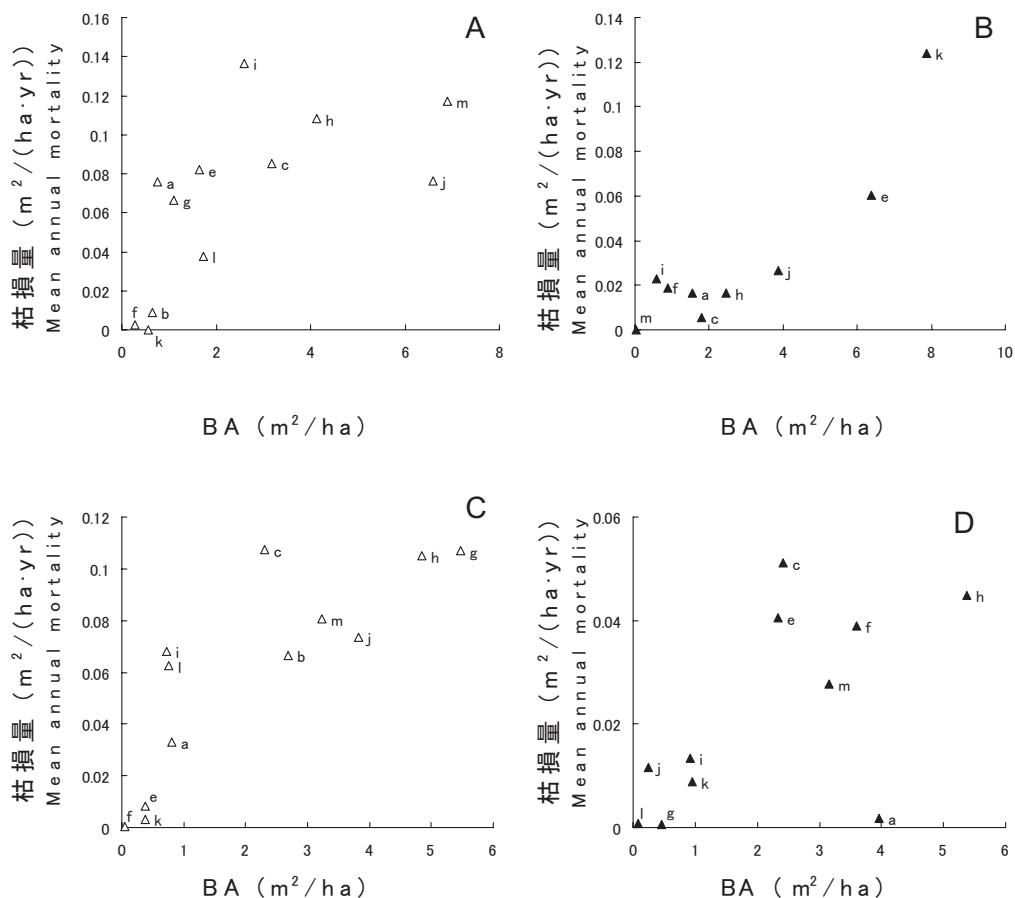


図-33 生育形別下層木BAとその枯損量との関係

A：高木性落葉広葉樹，B：高木性常緑広葉樹，C：小高木性落葉広葉樹，D：小高木性常緑広葉樹
 Fig. 33. Relationship between BA of lower layer trees and mean annual mortality in lower layer for each tree group.

A: tall deciduous tree; B: tall evergreen tree; C: sub-canopy deciduous tree; D: sub-canopy evergreen tree

本研究で用いた胸高直径 10 cm を境界にした上層木・下層木の区分は，上層木 BA と下層木 BA との関係などから林分の層構造を適切に捉えていると考えられるので，二径級を扱うモデルに変更した。

・第 2 点に関連して，進界量の推定方法を変更した。期末に主木に参入してくる個体数（進界量）は FSD では中大径木蓄積から推定した小径木本数をもとに予測している。本研究では，胸高以上の樹高を持つ林木（上木）は主木とそれ以外ではなく，胸高直径 10 cm で上層木と下層木に分けて扱っている。したがって，進界量は主木と分けて推定するのではなく，下層木内の成長の結果として推定される。

・針広混交の天然林を対象にして開発された FSD では基本的に針葉樹と広葉樹の 2 種類に分けて予測を行っているが，樹種構成は北海道と唐沢山では明らかに異なる。本研究の動態解析では

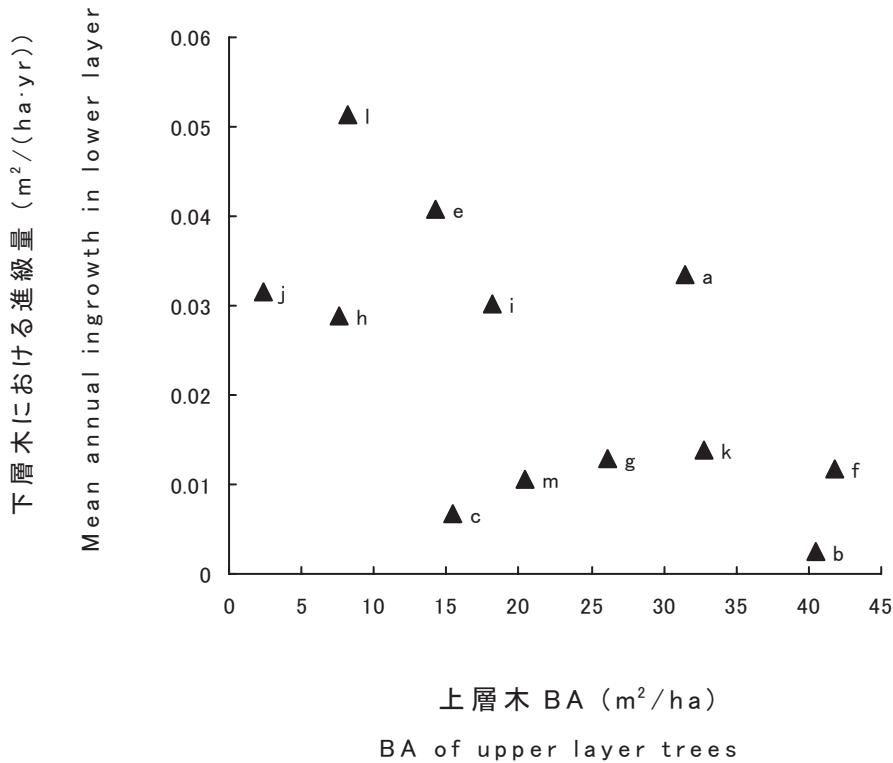


図-34 上層木BAと下層木における進級量との関係
 Fig. 34. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual ingrowth in lower layer.

生育形を考慮して分析を行ったが、モデルでは高木性・小高木性落葉広葉樹、低木性落葉広葉樹、高木性・小高木性常緑広葉樹、低木性常緑広葉樹、針葉樹 1 (耐陰性大)、針葉樹 2 (耐陰性小) の六つに分けて推定を行うことにした。針葉樹 1 は主にアカマツで、針葉樹 2 はカヤなど下層木にわずかながらみられる種である。低木性種が少ないためにそれらの生育特性が見出しにくかったが、上層木にならない種であると考えられること、常緑広葉樹、落葉広葉樹それぞれの高木性種と小高木性種は同じような性質を持っていると考えられることから、低木性種は高木性・小高木性の樹種から分けることにした。

・上層木の枯損率の推定方法を変更した。FSDにおいて林冠層を構成すると考えられる大径木は寿命などを考慮して枯損率が決定されているが、本研究では落葉広葉樹の寿命等、考慮するのが困難であった。ただ、上層木の量が多いほど落葉広葉樹の上層木の枯損率が高い傾向がみられたので、その関係から上層木の枯損率を推定した。

・下層木の枯損率の推定方法を変更した。FSDにおいては小径木および中径木の枯損率はおのおのより上層にある中大径木蓄積および大径木蓄積の影響を受けるとされているが、本研究では下層木の枯損率は上層木のBAの影響が小さいと考えられる。また、下層木の中でもDBH 5 cm未滿とそれ以上の枯損率が大きく異なっていたことから、それぞれの枯損率を求め、上層木BA

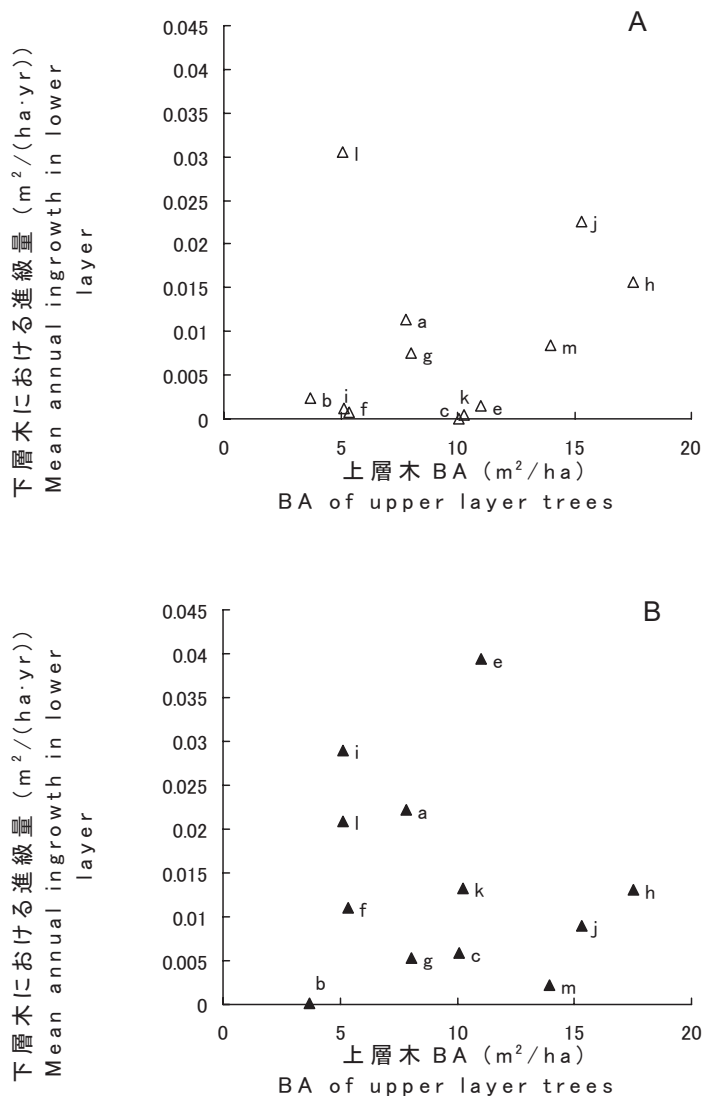


図-35 上層木BAと常緑・落葉樹別下層木における進級量との関係

A: 落葉広葉樹, B: 常緑広葉樹

Fig. 35. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual ingrowth of deciduous or evergreen trees in lower layer.

A: deciduous tree; B: evergreen tree

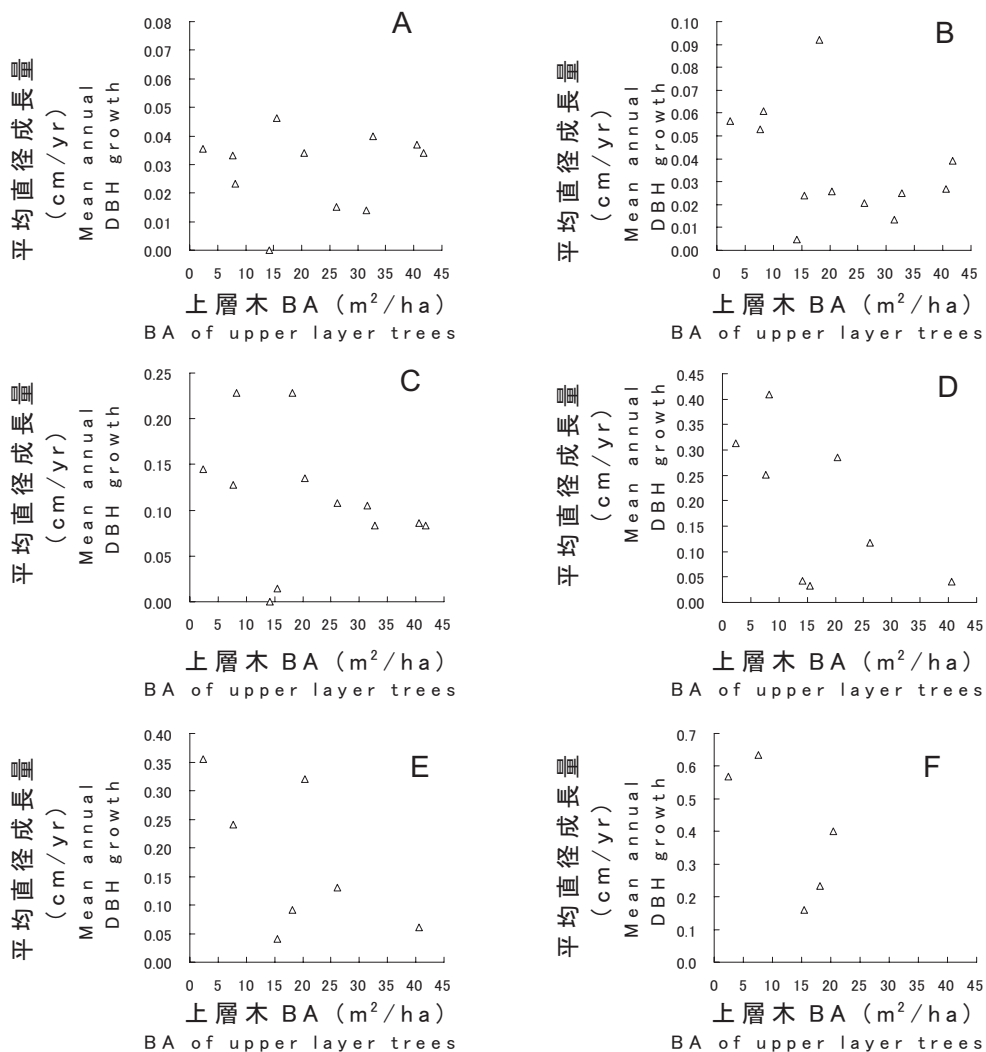


図-36 上層木BAと下層木落葉広葉樹の直径階別平均直径成長量との関係

A : 0 cm階, B : 2 cm階, C : 4 cm階, D : 6 cm階, E : 8 cm階, F : 10 cm階

Fig. 36. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual diameter growth of deciduous trees in lower layer.

A: 0 cm class; B: 2 cm class; C: 4 cm class; D: 6 cm class; E: 8 cm class; F: 10 cm class

にかかわらず一定とした。

以上の点を変更したモデルを改良モデル, 進界木の推定のみ従来の方法を用いたモデルをオリジナルモデルと呼ぶことにする。改良モデルのフローチャートを図-39に示す。

2. 成長予測

(1) パラメータの決定

前節第1項 (1 成長モデルFSDの改良 (1) FSDの概要) の順に沿って, FSDを唐沢山の広葉樹再生林に適用するためのパラメータの決定について説明する。直径階の幅は1 cmとし, 0 ~ 11 cm (0.5 ~ 10.5 cm階) を下層木, 11 cm 以上 (11.5 cm階以上を上層木とした。また, オリジナルモデルでは5 ~ 11 cm (5.5 ~ 10.5 cm階) を小径木とした。以下の説明では「生育形」

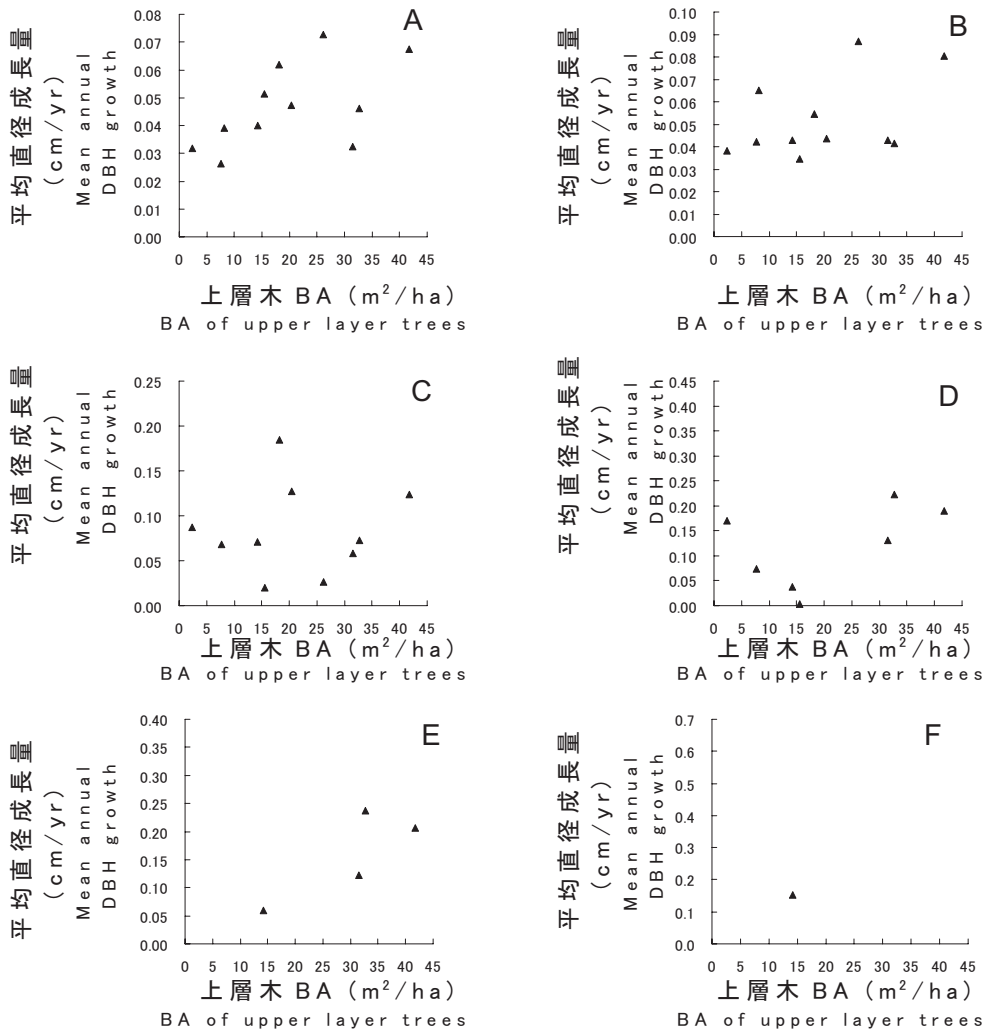


図-37 上層木BAと下層木常緑広葉樹の直径階別平均直径成長量との関係

A : 0 cm階, B : 2 cm階, C : 4 cm階, D : 6 cm階, E : 8 cm階, F : 10 cm階

Fig. 37. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual diameter growth of evergreen trees in lower layer.

A: 0 cm class; B: 2 cm class; C: 4 cm class; D: 6 cm class; E: 8 cm class; F: 10 cm class

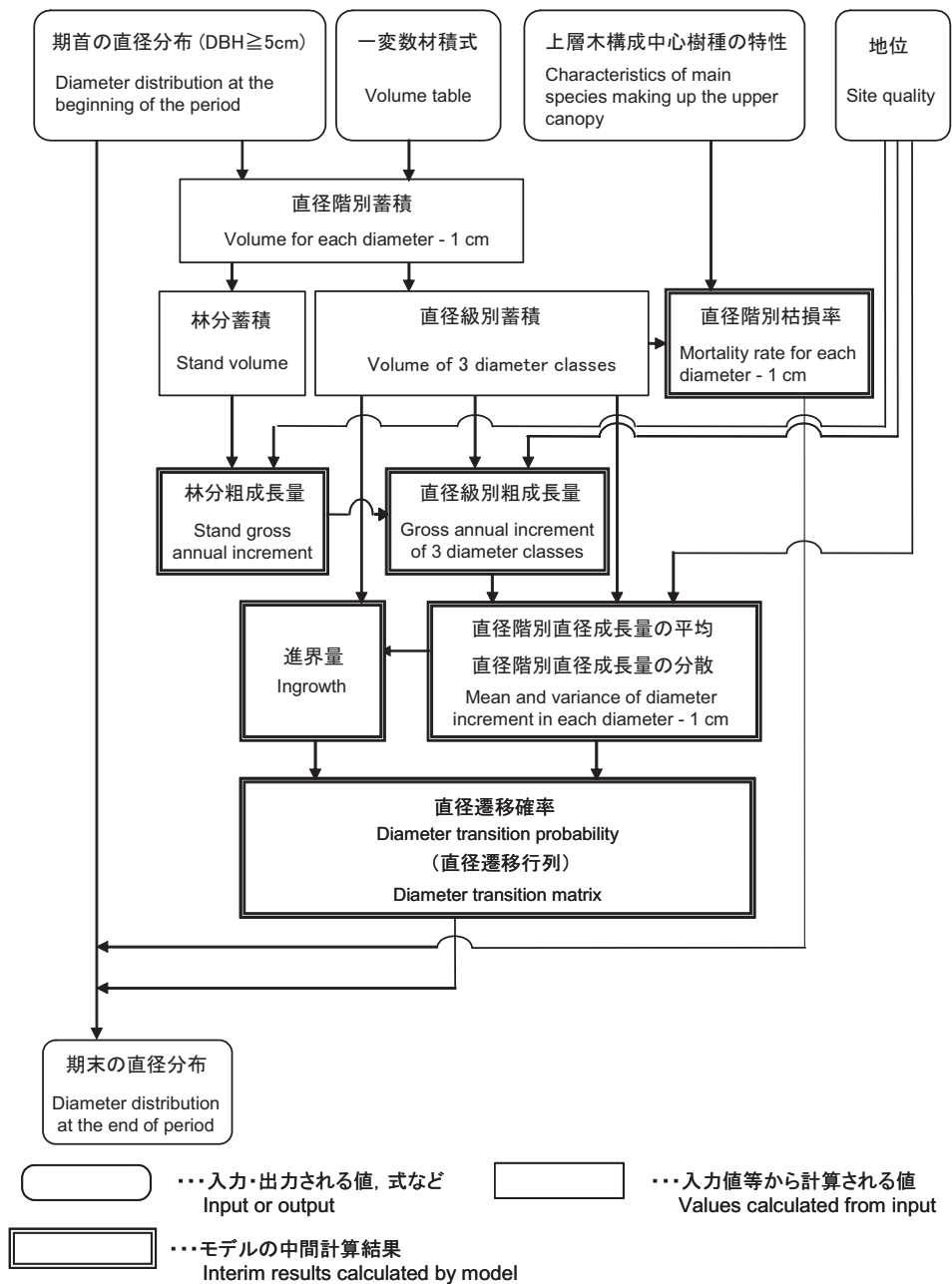


図-38 FSDのフローチャート (石橋, 1989)
 Fig. 38. The system flowchart of FSD (Ishibashi, 1989).

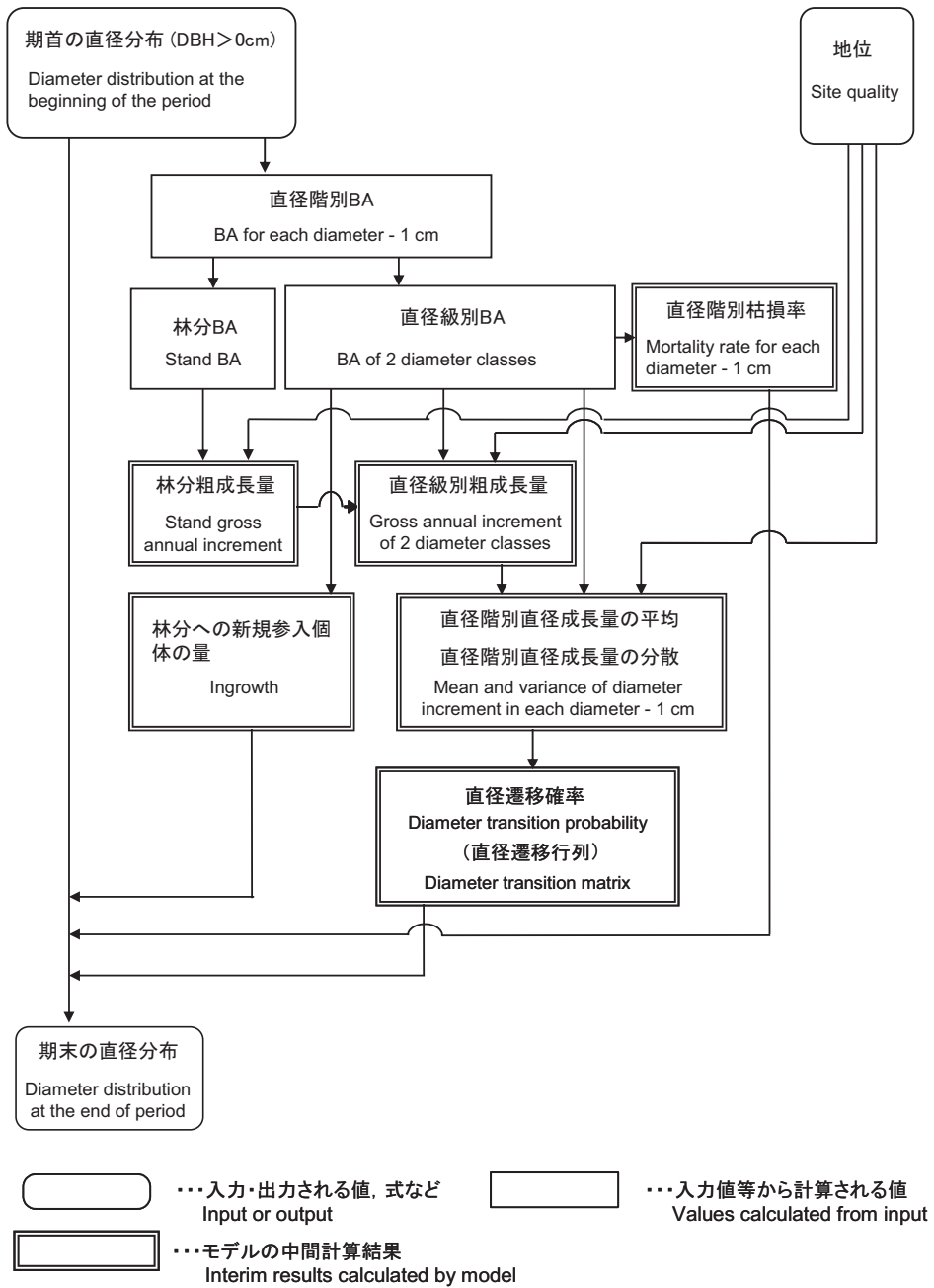


図-39 改良モデルのフローチャート
Fig. 39. The system flowchart of modified FSD.

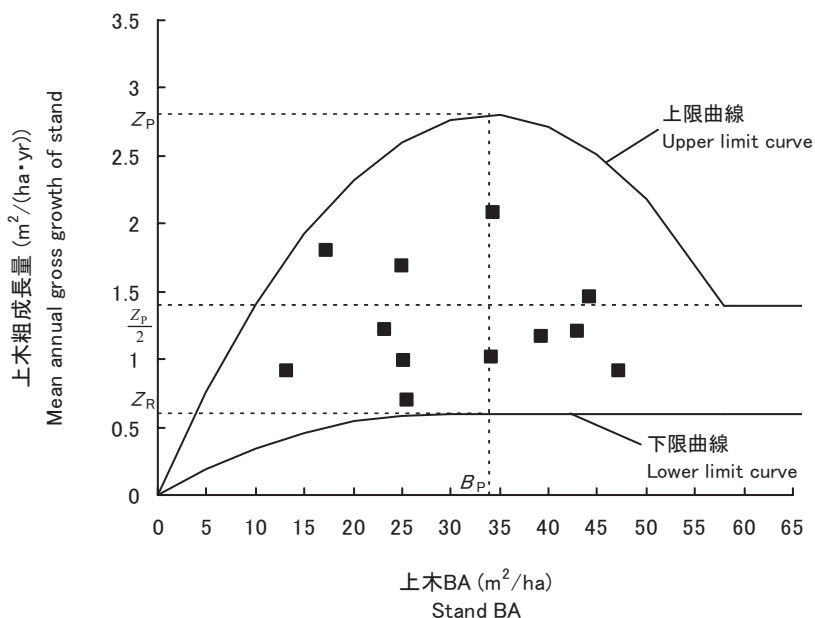


図-40 上木BAと粗成長量の上限と下限

Fig. 40. Relationship between stand BA and mean annual gross growth, and the upper and lower limit of gross growth.

Z_p : 上木粗成長量の最大値

Maximum gross growth of stand

B_p : Z_p をとるBAの値

Value of stand BA where maximum gross growth of stand takes place

Z_R : 上木粗成長量の下限が一定となる値

Saturation value of lower limit curve

は高木性と小高木性を一つの生育形とし、また、針葉樹を耐陰性の大小により二つに分けた、高木性・小高木性落葉広葉樹、低木性落葉広葉樹、高木性・小高木性常緑広葉樹、低木性常緑広葉樹、針葉樹1（耐陰性大）、針葉樹2（耐陰性小）の六つの生育形を指すことにする。なお、針葉樹のデータが少なく、パラメータを計算することが困難であったので、針葉樹1の各パラメータは高木性・小高木性常緑広葉樹のパラメータを用い、針葉樹2については高木性・小高木性落葉広葉樹のものを用いることにした。地位については、石橋（1989a）と同様に林地のもつ潜在的生産力という意味で捉え、林分成長に影響を与える因子であると考えている。本来ならば、林分粗成長量の上限と下限の推定などのパラメータに地位の違いを反映させるのであるが、本研究においては、地位の違いを明確にするには標本数が少ないため、すべて同程度の地位であると考えてパラメータの決定を行った。

①直径階別BA、上下層別BAおよび林分BAの計算：上述のように、下層木 (s_1) 上層木 (1) に分けて、各区分のBA (b_{s1} , b_1) を計算する。オリジナルモデルでは小径木 (s_2) のBA (b_{s2}) を計算する。

②林分BAに応じた林分粗成長量の上限および下限の設定：

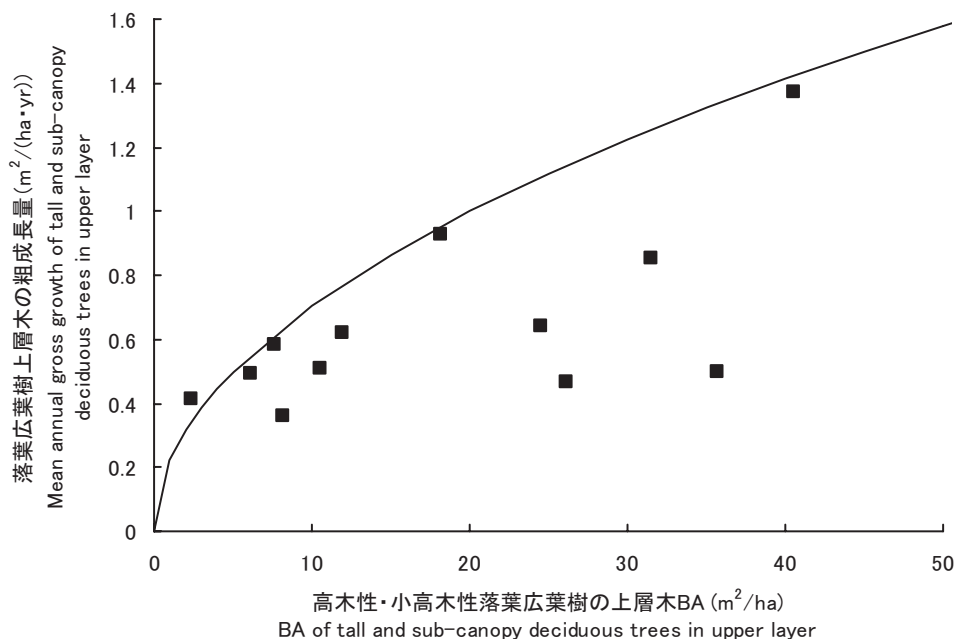


図-41 高木性・小高木性落葉広葉樹の上層木BAと粗成長量との関係
 Fig. 41. Relationship between BA of tall and sub-canopy deciduous trees in upper layer and mean annual gross growth of tall and sub-canopy deciduous trees in upper layer.

(a) 上木 上木の成長に関する分析の結果より、石橋（1990）と同様に、上木 BA と上木粗成長量との間に粗成長量の上限 (z_U) とピーク (Z_P)、下限 (z_L) がみられたので、図-40 から以下の値を決定した。

上木粗成長量の上限が最大となる BA : $B_P = 34 \text{ m}^2/\text{ha}$

B_P における上木粗成長量の最大値 : $Z_P = 2.8 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$

上木粗成長量の下限 : $Z_R = 0.6 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$

主木 BA と主木粗成長量との関係

(b) 主木 主木 BA と主木粗成長量との関係についても上木と同じ傾向がみられたので、以下のパラメータを主木についても決めた。

主木粗成長量の上限が最大となる BA : $B_P = 27 \text{ m}^2/\text{ha}$

B_P における主木粗成長量の最大値 : $Z_P = 2.6 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$

主木粗成長量の下限 : $Z_R = 0.5 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{年}$

③上下層木 BA に応じた上下層木別粗成長量の上限と小径木 BA に応じた小径木粗成長量の上限：期首の高木性・小高木性落葉広葉樹の上層木 BA の大きい林分ほどその上層木粗成長量（下層木からの進級量を除いた値）の上限が大きくなる関係がみられたことから（図-41），その粗成長量の上限 (Z_{lu_d}) と上層木 BA (b_l) との間に以下の関係を仮定した。また、高木性常緑広葉樹上層木については、上層木に常緑広葉樹が存在するプロットが少ないためデータ数が十分ではないが、その粗成長量（同じく下層木からの進級量を除いた量）は落葉広葉樹と同様の関係を仮

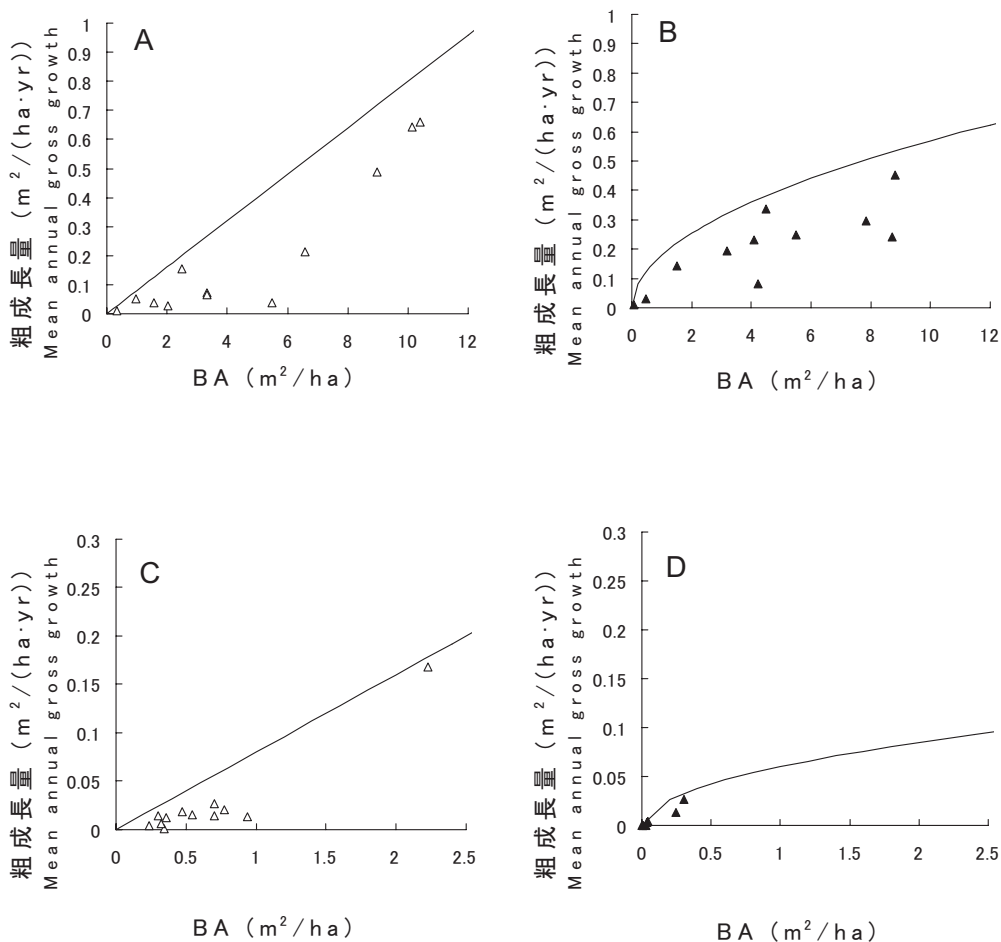


図-42 生育形別下層木BAとその粗成長量との関係

A: 高木・小高木性落葉広葉樹, B: 高木・小高木性常緑広葉樹, C: 低木性落葉広葉樹, D: 低木性常緑広葉樹
 Fig. 42. Relationship between BA of lower layer trees and mean annual gross growth in lower layer for different tree groups.

A: tall and sub-canopy deciduous tree; B: tall and sub-canopy evergreen tree; C: short deciduous tree; D: short evergreen tree

定することにし、常緑広葉樹上層木の粗成長量の上限 (Z_{lu_e}) を以下の式で仮定した。各生育形の下層木BA (b_{s1_dt} , b_{s1_ds} , b_{s1_et} , b_{s1_es}) の大きい林分ほどその粗成長量の上限 (Z_{s1u_dt} , Z_{s1u_ds} , Z_{s1u_et} , Z_{s1u_es}) も高くなることから (図-42), 以下の関係を仮定した。高木性・小高木性の落葉広葉樹と常緑広葉樹の小径木BA (b_{s2_dt} , b_{s2_et}) とその粗成長量の上限 (Z_{s2u_dt} , Z_{s2u_de}) との間にも下層木の場合と同様の傾向がみられた。一方、低木性についてはデータ数が十分でないこともあり、特に傾向はみられなかったが、動態解析の結果より期首のBAに伴って粗成長量が大きくなると思われるので、低木性の下層木と同様のパラメータを用いることにした。石橋 (1989a) では、径級別粗成長量の上限のラインは径級別蓄積との比例関係で表されているが、本

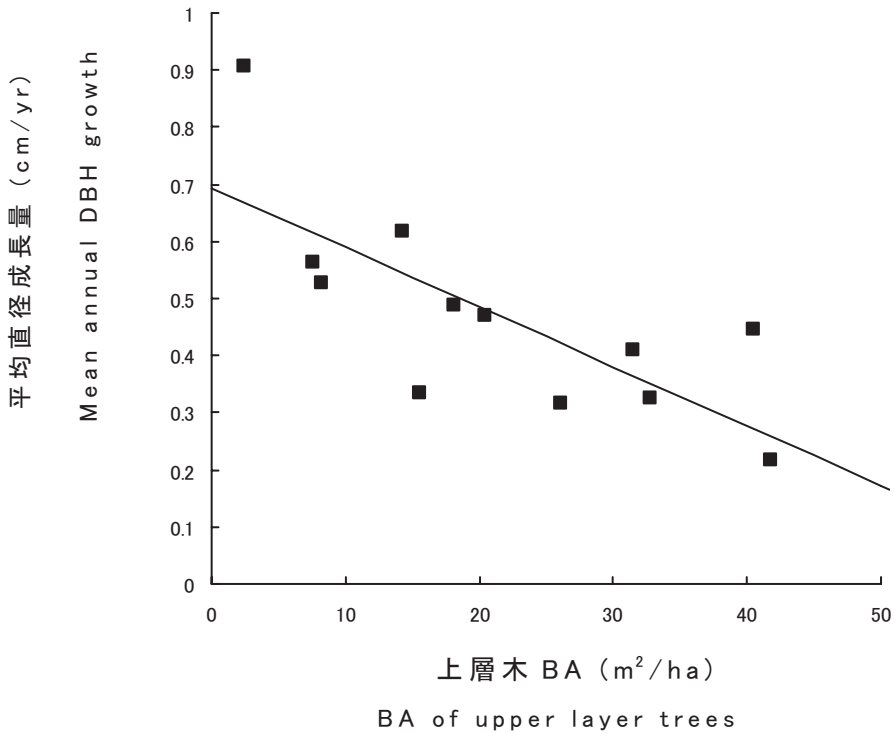


図-43 上層木BAと高木性・小高木性落葉広葉樹の上層木平均直径成長量との関係
 Fig. 43. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual diameter growth of tall and sub-canopy deciduous trees in the upper layer.

研究においては、上層木と常緑広葉樹の下層木の粗成長量の上限についてはそのような比例関係を読み取ることが難しかったことから、これらの上限に沿う形としてべき乗式を仮定することにした。

- 上層木 高木性・小高木性落葉広葉樹 : $Z_{lu_dt} = 0.224 \sqrt{b_{L_dt}}$
- 高木性・小高木性常緑広葉樹 : $Z_{lu_et} = 0.05 \sqrt{b_{L_et}}$
- 下層木 高木性・小高木性落葉広葉樹 : $Z_{s1u_dt} = 0.08 b_{s1_dt}$
- 低木性落葉広葉樹 : $Z_{s1u_ds} = 0.08 b_{s1_ds}$
- 高木性・小高木性常緑広葉樹 : $Z_{s1u_et} = 0.18 \sqrt{b_{s1_et}}$
- 低木性常緑広葉樹 : $Z_{s1u_es} = 0.06 \sqrt{b_{s1_es}}$
- 小径木 高木性・小高木性落葉広葉樹 : $Z_{s2u_dt} = 0.08 b_{s2_dt}$
- 低木性落葉広葉樹 : $Z_{s2u_ds} = 0.08 b_{s2_ds}$
- 高木性・小高木性常緑広葉樹 : $Z_{s2u_et} = 0.15 \sqrt{b_{s2_et}}$
- 低木性常緑広葉樹 : $Z_{s2u_es} = 0.06 \sqrt{b_{s2_es}}$

④上下層木別平均直径成長量の基準値 :

(a) 平均直径成長量 オリジナルモデルでは大径木の直径成長は直径階によらず安定している

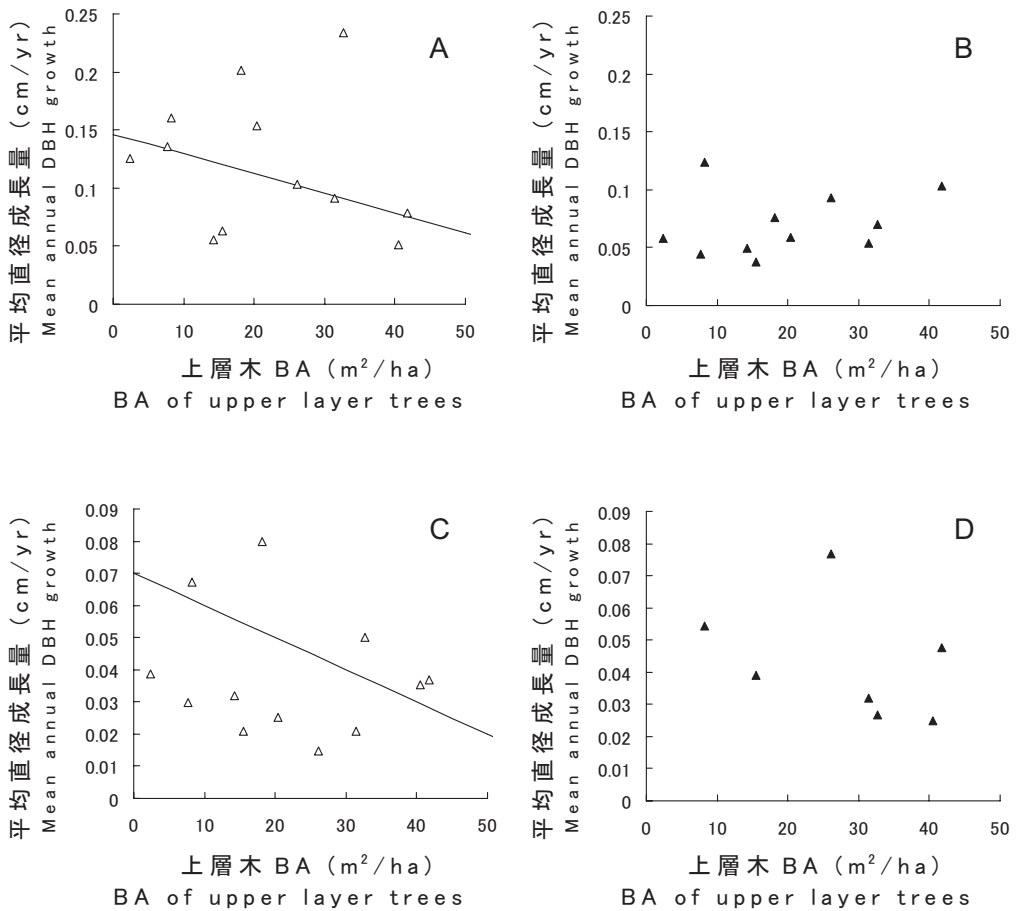


図-44 上層木BAと下層木平均直径成長量との関係

A: 高木・小高木性落葉広葉樹, B: 高木・小高木性常緑広葉樹, C: 低木性落葉広葉樹, D: 低木性常緑広葉樹
 Fig. 44. Relationship between BA of upper layer trees and mean annual diameter growth in lower layer for different tree groups.

A: tall and sub-canopy deciduous tree; B: tall and sub-canopy evergreen tree; C: short deciduous tree; D: short evergreen tree

るものと仮定しているが、唐沢山においては、上層木BAの大きい林分ほど落葉広葉樹の上層木平均直径成長量 (Δd_{1_dt}) が小さくなる傾向がみられた (図-43)。一方、常緑広葉樹に関しては上層木に達している林木が存在するのは3プロットと少なく、それらの傾向は特にみられなかったことから、上層木BAの大きさにかかわらず同程度の成長量 (Δd_{1_et}) を示しているとした。

下層木の高木性・小高木性落葉広葉樹全体の平均値では上層木BAの大きい林分ほど平均直径成長量が小さいというわけではないが、動態解析で示したように上層木BAの大きいプロットほど直径階別平均直径成長量は小さくなる傾向がみられていることから (図-36)、下層木全体の平均値 (Δd_{s1_dt}) についても上層木BAの大きい林分ほど平均直径成長量が小さくなるとし、低木性落葉広葉樹の平均直径成長量 (Δd_{s1_ds}) についても上層木BAの増加に伴い減少していくもの

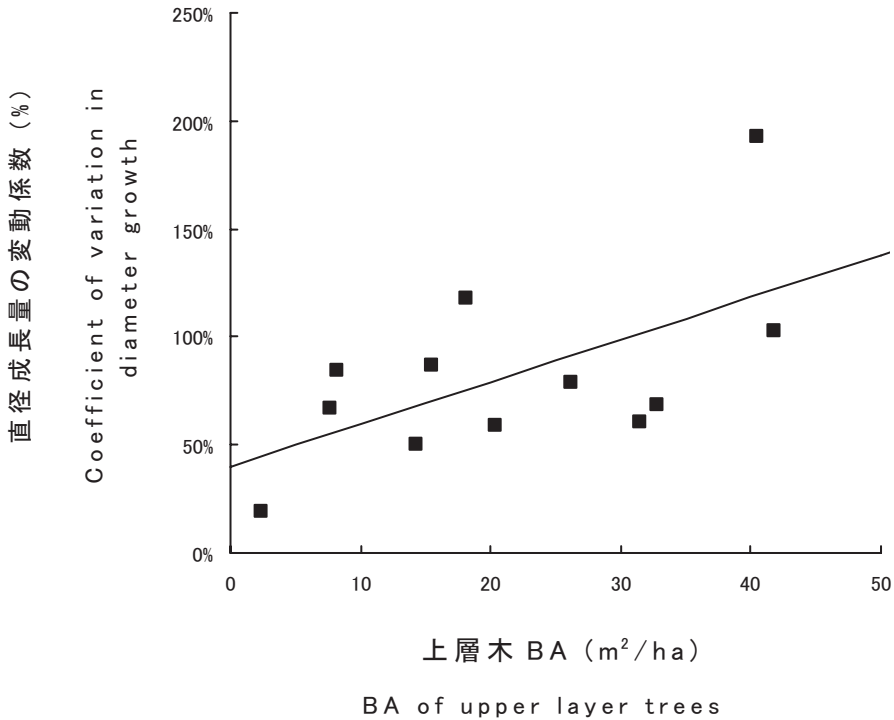


図-45 上層木BAと高木性・小高木性落葉広葉樹上層木の直径成長量の変動係数との関係
 Fig. 45. Relationship between BA of upper layer trees and coefficient of variation in diameter growth of tall and sub-canopy deciduous tree in upper layer.

とした (図-44 A)。常緑広葉樹については、高木性・小高木性常緑広葉樹も低木性常緑広葉樹も上層木BAとの関係はないものと考えた (図-44 B, D)。

また小径木の落葉広葉樹の平均直径成長量 (Δd_{s2_dt}) についても同様の傾向がみられた。しかし、常緑広葉樹については下層木、小径木 (Δd_{s1_et} , Δd_{s1_es} , Δd_{s2_et} , Δd_{s2_es}) とともに上層木BAの大きさにかかわらず成長量はばらついているので以下の関係を仮定した。また、小径木の低木性常緑広葉樹はデータが少ないため、傾向をつかめなかったことから、高木性・小高木性常緑広葉樹のパラメータと同じものを使うことにした。

平均直径成長量の計算式には上層木BAと関係がみられた生育形については、オリジナルモデルと同様に直線関係を仮定した。

- 上層木 高木性・小高木性落葉広葉樹 : $\Delta d_{1_dt} = -0.010b_1 + 0.69$ ($R^2 = 0.56$)
- 高木性・小高木性常緑広葉樹 : $\Delta d_{1_et} = 0.12$
- 下層木 高木性・小高木性落葉広葉樹 : $\Delta d_{s1_dt} = -0.0017b_1 + 0.15$ ($R^2 = 0.19$)
- 低木性落葉広葉樹 : $\Delta d_{s1_ds} = -0.0010b_1 + 0.07$ ($R^2 = 0.78$)
- 高木性・小高木性常緑広葉樹 : $\Delta d_{s1_et} = 0.070$
- 低木性常緑広葉樹 : $\Delta d_{s1_es} = 0.033$
- 小径木 高木性・小高木性落葉広葉樹 : $\Delta d_{s2_dt} = -0.0088b_1 + 0.45$ ($R^2 = 0.51$)

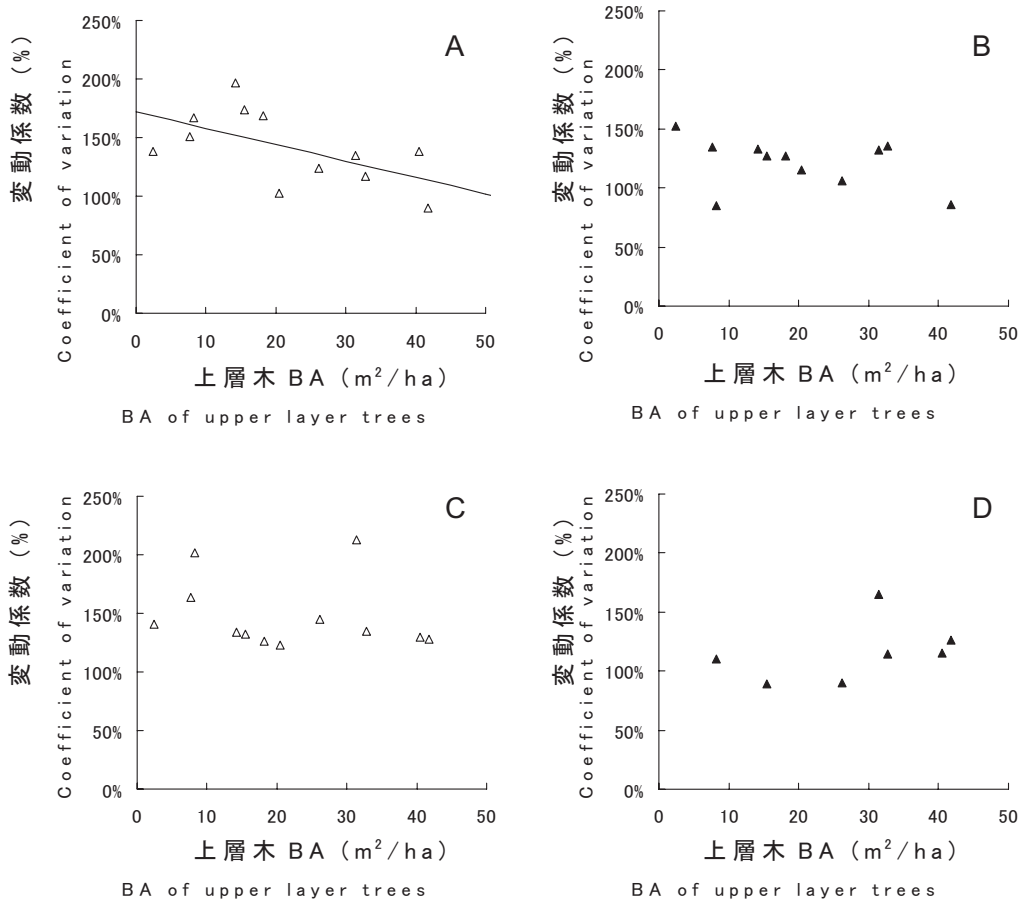


図-46 上層木BAと下層木の直径成長量の変動係数との関係

A: 高木・小高木性落葉広葉樹, B: 高木・小高木性常緑広葉樹, C: 低木性落葉広葉樹, D: 低木性常緑広葉樹
 Fig. 46. Relationship between BA of upper layer trees and coefficient of variation in diameter growth in lower layer for different tree groups.

A: tall and sub-canopy deciduous tree; B: tall and sub-canopy evergreen tree; C: short deciduous tree; D: short evergreen tree

低木性落葉広葉樹 : $\Delta d_{s2_ds} = -0.0045b_1 + 0.25$ ($R^2 = 0.71$)

高木性・小高木性常緑広葉樹 : $\Delta d_{s2_et} = 0.17$

低木性常緑広葉樹 : $\Delta d_{s2_es} = 0.17$

(b) 変動係数 散布図によって上層木 BA と落葉広葉樹上層木の直径成長量の変動係数 (CVD_{1_dt}) との関係を見たところ, 上層木 BA の大きい林分ほど変動係数が大きい傾向がみられた (図-45)。一方, 常緑広葉樹上層木の直径成長量の変動係数 (CVD_{1_et}) についてはデータ数も少なく傾向がつかめないの上層木 BA によらず一定と仮定した。上層木 BA の大きい林分ほど高木性・小高木性落葉広葉樹下層木の直径成長量の変動係数 (CVD_{s1_dt}) は低くなる傾向がみられたことから (図-46), 以下の関係を仮定した。低木性落葉広葉樹の下層木, 生育形別常緑広

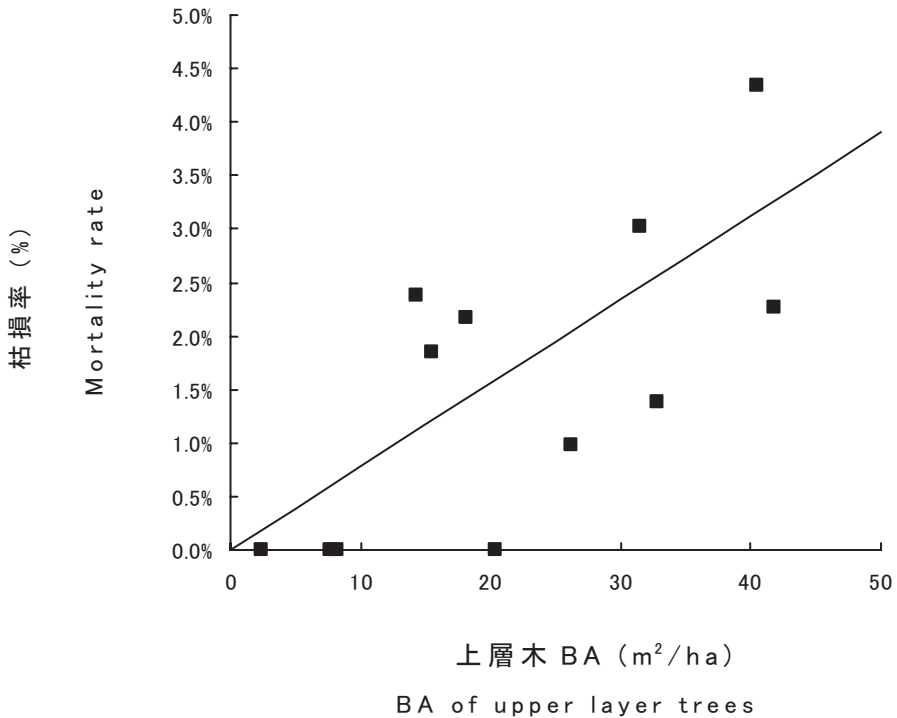


図-47 上層木BAと高木性・小高木性落葉広葉樹上層木の枯損率との関係
 Fig. 47. Relationship between BA of upper layer trees and mortality rate of tall and sub-canopy deciduous trees in upper layer.

葉樹の下層木, 生育形別の小径木の変動係数 (CVd_{s1_ds} , CVd_{s1_et} , CVd_{s1_es} , CVd_{s2_dt} , CVd_{s2_ds} , CVd_{s2_et} , CVd_{s2_es}) については上層木BAとの関係がみられなかったので一定とした (図-46)。

変動係数の計算式には上層木BAと関係がみられた生育形については, オリジナルモデルと同様に直線関係を仮定した。

上層木 高木性・小高木性落葉広葉樹 : $CVd_{1_dt} = 2.0b_1 + 40.0$ ($R^2 = 0.36$)

高木性・小高木性常緑広葉樹 : $CVd_{1_et} = 77.2$

下層木 高木性・小高木性落葉広葉樹 : $CVd_{s1_dt} = -1.4 b_1 + 172.0$ ($R^2 = 0.34$)

低木性落葉広葉樹 : $CVd_{s1_ds} = 147.7$

高木性・小高木性常緑広葉樹 : $CVd_{s1_et} = 121.1$

低木性常緑広葉樹 : $CVd_{s1_es} = 115.9$

小径木 高木性・小高木性落葉広葉樹 : $CVd_{s2_dt} = 108.3$

低木性落葉広葉樹 : $CVd_{s2_ds} = 91.6$

高木性・小高木性常緑広葉樹 : $CVd_{s2_et} = 85.6$

低木性常緑広葉樹 : $CVd_{s2_es} = 85.6$

⑤直径階別枯損量の推定: 上層木の枯損については, 唐沢山においては上層木BAの大きい林分ほど落葉広葉樹上層木の枯損率 (P_{ml_d}) が高い傾向がみられた (図-47)。常緑広葉樹上層木

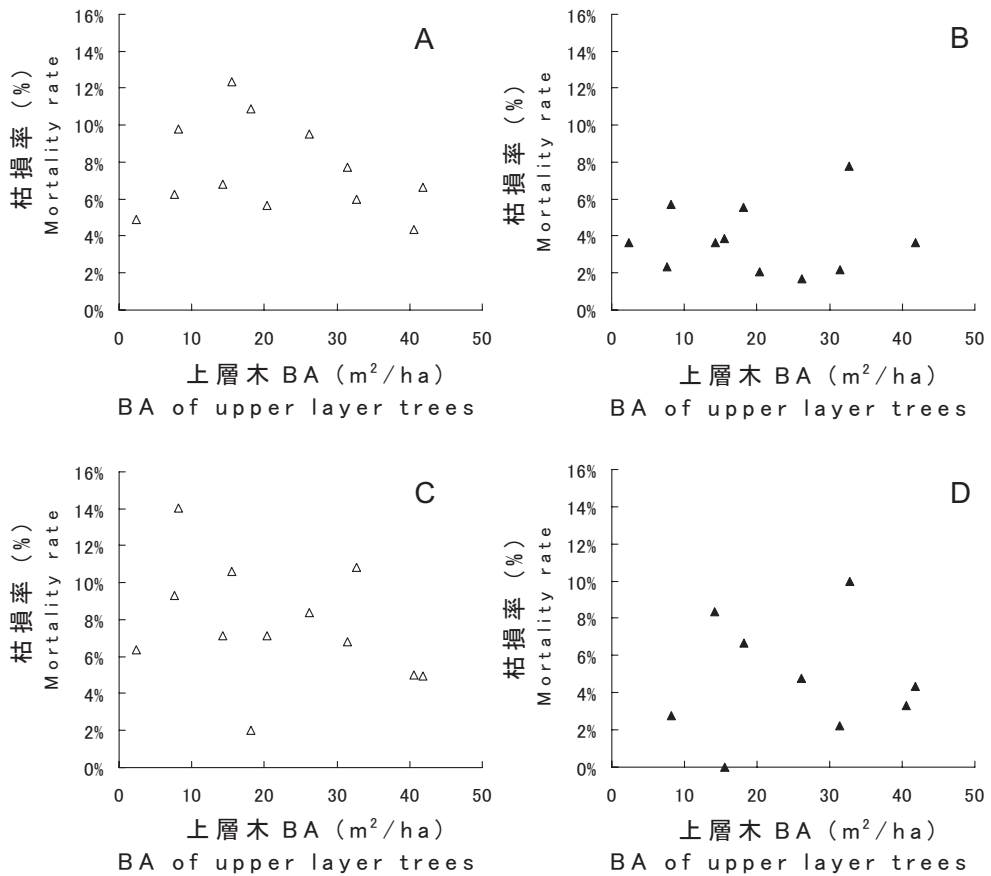


図-48 上層木BAと生育形別下層木 (DBH < 5 cm) の枯損率との関係

A: 高木・小高木性落葉広葉樹, B: 高木・小高木性常緑広葉樹, C: 低木性落葉広葉樹, D: 低木性常緑広葉樹
 Fig. 48. Relationship between BA of upper layer trees and mortality rate in lower layer (DBH < 5 cm) for different tree groups.

A: tall and sub-canopy deciduous tree; B: tall and sub-canopy evergreen tree; C: short deciduous tree; D: short evergreen tree

の枯損率 (P_{ml_e}) については、今回の試験地では上層木にもともと常緑広葉樹が少なく、枯損がまったくみられなかったため、情報を得ることができなかった。下層木の動態解析の結果より、落葉広葉樹よりも常緑広葉樹の方が枯損率が低いことがわかっているの、便宜的にパラメータを落葉広葉樹上層木の二分の一と仮定した。枯損率の計算式には、オリジナルモデルと同様に直線関係を仮定した。次に、下層木の枯損率についてであるが、動態解析でも示したように上層木 BA との関係は特にみられず、また、5 cm 未満とそれ以上の枯損率が著しく異なっていたので、下層木の枯損については下層木を二群に分けて推定することにした (図-48, 49)。5 cm 以上のサイズの高木性常緑広葉樹はほとんど枯損していなかったこと、低木性常緑広葉樹は一つのプロットにしか出現せず枯損していなかったことから、データから枯損率を算出することが困難な

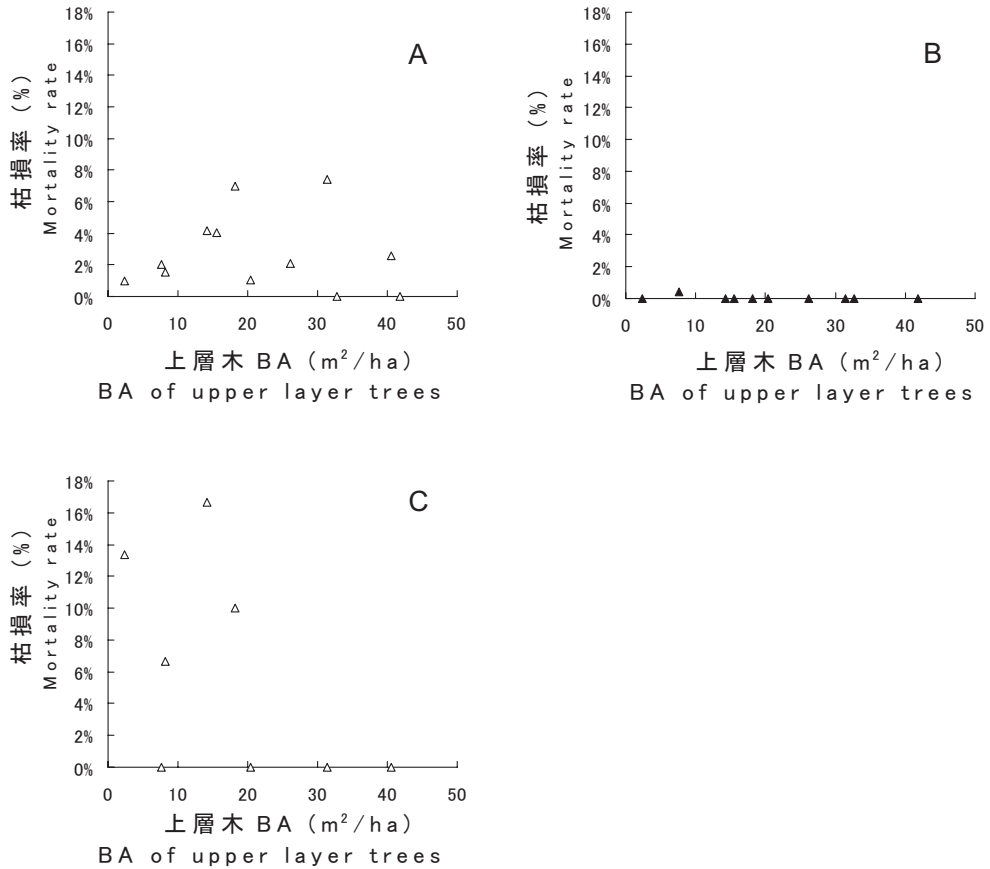


図-49 上層木BAと生育形別下層木 (5 cm ≤ DBH) の枯損率との関係

A : 高木・小高木性落葉広葉樹, B : 高木・小高木性常緑広葉樹, C : 低木性落葉広葉樹

Fig. 49. Relationship between BA of upper layer trees and mortality rate in lower layer (5 cm ≤ DBH) for different tree groups.

A: tall and sub-canopy deciduous tree; B: tall and sub-canopy evergreen tree; C: short deciduous tree

ため、これらのパラメータは便宜的に 5 cm 未満のサイズのパラメータの二分の一とした。小径木は下層木のうち 5 cm 以上の林木と同じものであるため、それらのパラメータを用いた。

- 上層木 高木性・小高木性落葉広葉樹 : $P_{ml_dt} = 0.00078b_1$ ($R^2 = 0.51$)
- 高木性・小高木性常緑広葉樹 : $P_{ml_et} = 0.00039b_1$
- 下層木 高木性・小高木性落葉広葉樹 : $P_{msl_dt} = 0.0758$ (DBH < 5 cm)
- $P_{msl_dt} = 0.0274$ (5 cm ≤ DBH)
- 低木性落葉広葉樹 : $P_{msl_ds} = 0.0771$ (DBH < 5 cm)
- $P_{msl_ds} = 0.0583$ (5 cm ≤ DBH)
- 高木性・小高木性常緑広葉樹 : $P_{msl_et} = 0.0384$ (DBH < 5 cm)
- $P_{msl_et} = 0.0192$ (5 cm ≤ DBH)

低木性常緑広葉樹	: $P_{ms1_es} = 0.0405$ (DBH < 5 cm)
	$P_{ms1_es} = 0.0203$ (5 cm ≤ DBH)
小径木 高木性・小高木性落葉広葉樹	: $P_{ms2_dt} = 0.0274$
低木性落葉広葉樹	: $P_{ms2_ds} = 0.0583$
高木性・小高木性常緑広葉樹	: $P_{ms2_et} = 0.0192$
低木性常緑広葉樹	: $P_{ms1_es} = 0.0203$

北向き斜面のプロットでは常緑広葉樹が生存しにくいいため、それらの枯損率はデータではほとんど得られなかった。便宜的に、1 経理期間 (5 年間) で上層木の枯損率が 100%, DBH 5 cm 未満で 80% (P_{ms1_et} , P_{ms1_es} とともに 0.28), DBH 5 cm 以上で 60% (P_{ms2_et} , P_{ms2_es} とともに 0.17)

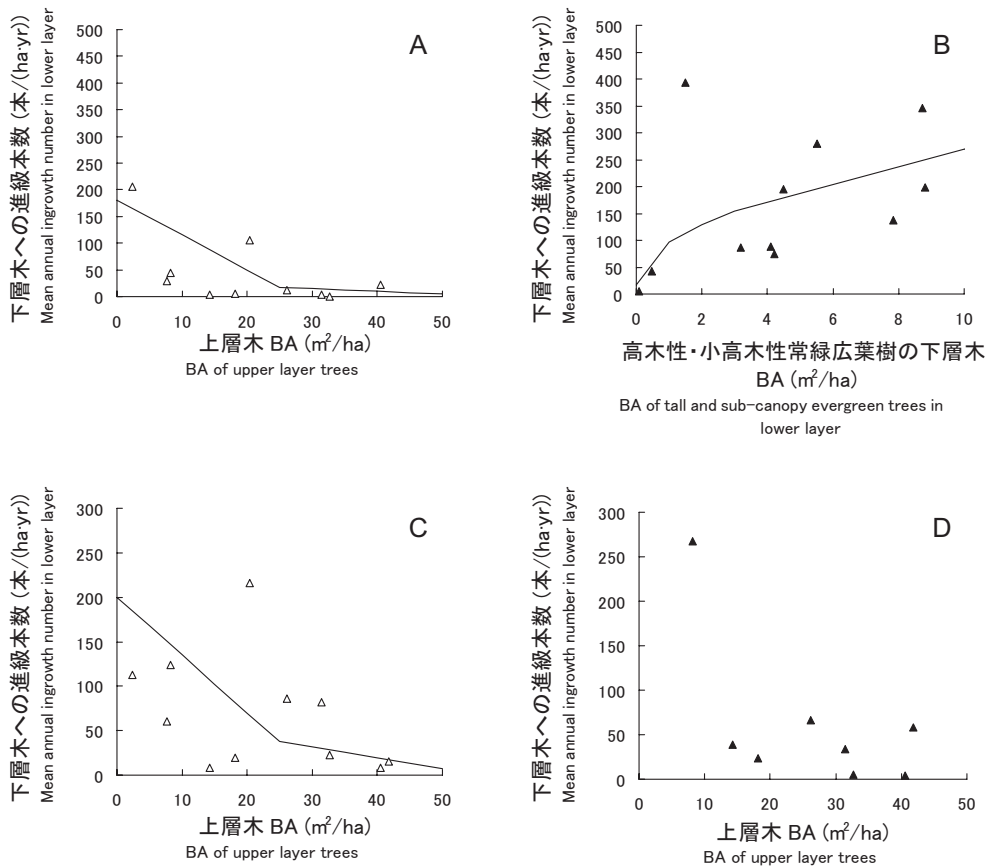


図-50 BAと下層木への進級本数との関係

A: 高木・小高木性落葉広葉樹, B: 高木・小高木性常緑広葉樹, C: 低木性落葉広葉樹, D: 低木性常緑広葉樹
 Fig. 50. Relationship between BA and mean annual ingrowth number in lower layer by tree group.

A: tall and sub-canopy deciduous tree; B: tall and sub-canopy evergreen tree; C: short deciduous tree;
 D: short evergreen tree

となるように高く設定した。

⑥進界量・上木への進級個体の推定：

(a) 上木への進級本数 既往の唐沢山の広葉樹再生林の成長予測では(田中・石橋, 1996), ある中大径木蓄積の値を境に中大径木蓄積と5 cm未満の林木本数との直線関係が変化していることを用いて, オリジナルモデルの進界量推定の修正を試みている。本研究でも, 上層木BA 25 m²/haを境界として, 上層木BAと後継稚樹から上木へ進級してくる高木性・小高木性落葉広葉樹と低木性落葉広葉樹の個体数(n_{m_dt} , n_{m_ds})との関係が変化しているものと考え(図-50), 以下のように推定することにした。高木性・小高木性常緑広葉樹は高木・小高木性常緑広葉樹の下層木BA (b_{s1_et})の大きいプロットほどその本数(n_{m_et})が多い傾向がみられたが, これはたぶん後継稚樹レベルでの本数が多かった結果として, 下層木でそれらの種も多くなっていった

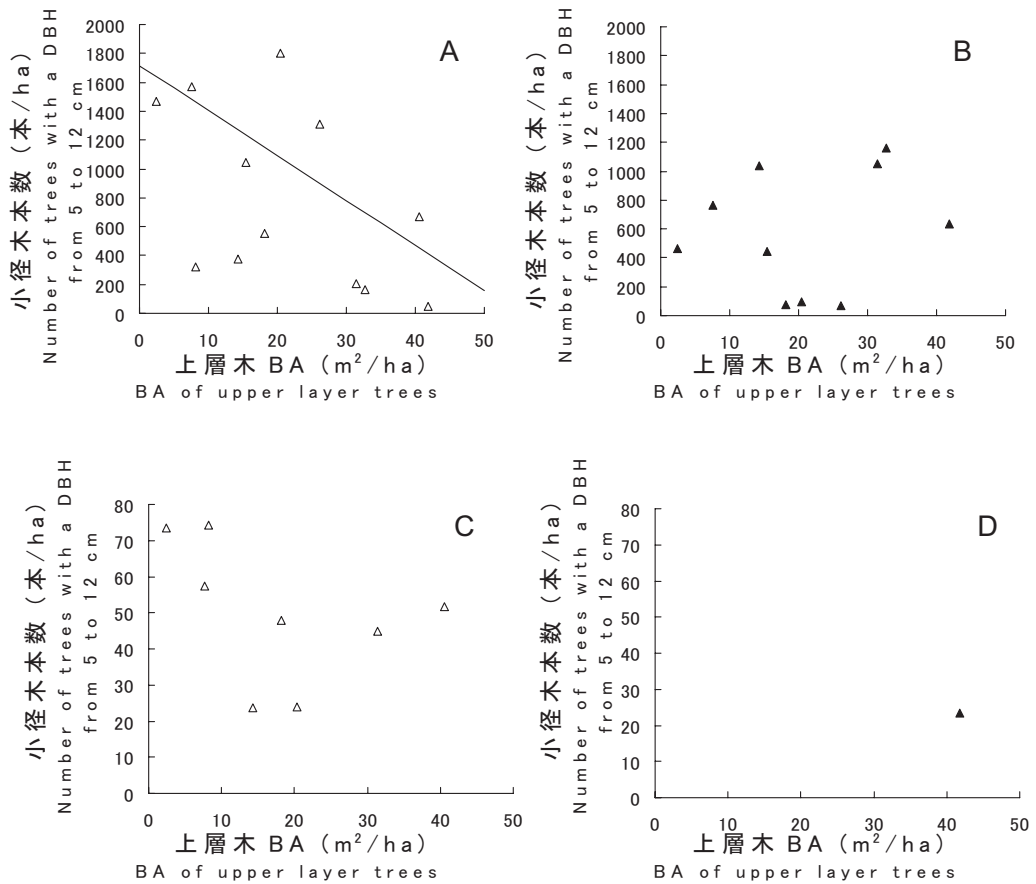


図-51 上層木BAと小径木本数との関係

A: 高木・小高木性落葉広葉樹, B: 高木・小高木性常緑広葉樹, C: 低木性落葉広葉樹, D: 低木性常緑広葉樹
 Fig. 51. Relationship between BA of upper layer trees and number of trees with a DBH from 5 to 12 cm by tree group.

A: tall and sub-canopy deciduous tree; B: tall and sub-canopy evergreen tree; C: short deciduous tree; D: short evergreen tree

と考えられるので、期首の b_{sl_et} から n_{m_et} を推定するのはこの仕組みにそぐわないだろう。そこで、 b_{sl_et} を直接使うのではなく、上層木 BA と下層木 BA との関係 (図-20) と上層木 BA と下層木に占める高木・小高木性常緑広葉樹の割合との関係 (図-28) を表す推定式から高木・小高木性常緑広葉樹の下層木 BA を求め (この推定された値を b_{sl_et}' とする)、 b_{sl_et}' から n_{m_et} を計算することにした。 b_{sl_et}' と n_{m_et} との関係には、高木性・小高木性下層木の粗成長量の上限の推定と同様にべき乗式を当てはめた。低木性常緑広葉樹 (n_{m_es}) は一定とした。

高木性・小高木性落葉広葉樹: $n_{m_dt} = -6.5b_1 + 180$ ($b_1 < 25 \text{ m}^2/\text{ha}$) ($R^2 = 0.61$)
 $n_{m_dt} = -0.5b_1 + 30$ ($25 \text{ m}^2/\text{ha} \leq b_1$) ($R^2 = 0.53$)
 低木性落葉広葉樹 : $n_{m_ds} = -6.5b_1 + 200$ ($b_1 < 25 \text{ m}^2/\text{ha}$) ($R^2 = 0.55$)
 $n_{m_ds} = -1.2b_1 + 68 + 16$ ($25 \text{ m}^2/\text{ha} \leq b_1$) ($R^2 = 0.27$)
 高木性・小高木性常緑広葉樹: $n_{m_et} = 100\sqrt{b_{sl_et}'}$ ($R^2 = 0.61$)

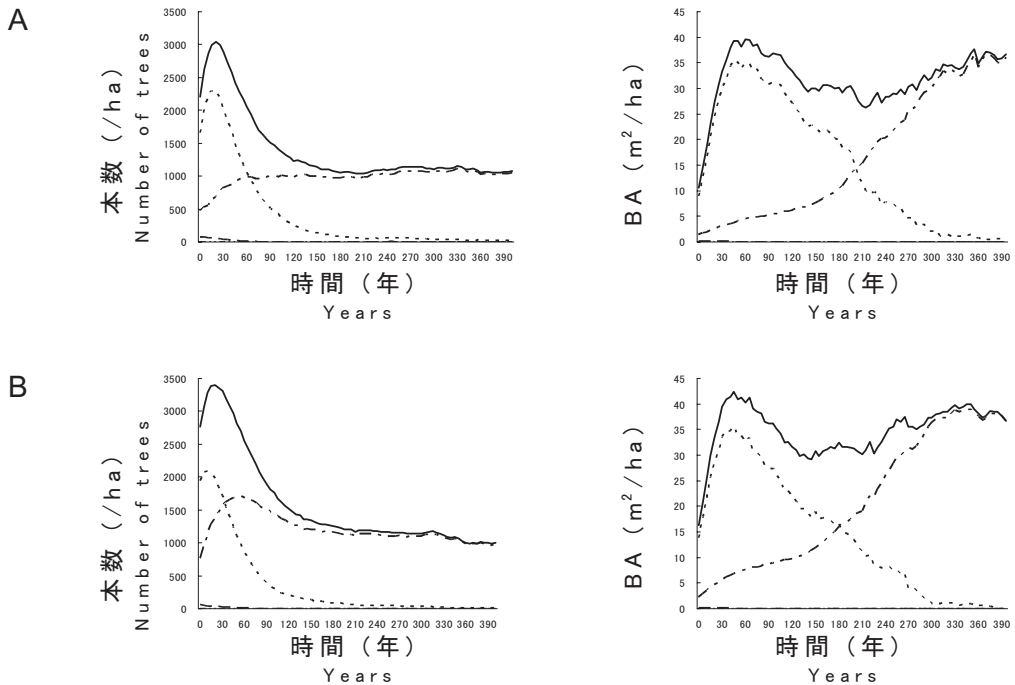


図-52 改良モデルによる予測結果 南～西向き斜面 (左:本数, 右:BA)

A: プロットj, B: プロットh, C: プロットa, D: プロットk

Fig. 52. Prediction of plots facing south and west by the modified model (Left: number of trees, right: BA).

A: plot j, B: plot h, C: plot a, D: plot k

- 合計
Total
- - - - - 高木性・小高木性落葉広葉樹
Tall and sub-canopy deciduous trees
- · - · - 高木性・小高木性常緑広葉樹
Tall and sub-canopy evergreen trees

低木性常緑広葉樹 : $n_{m_es} = 24$

ただし、北向き斜面のプロットでの高木性・小高木性常緑広葉樹は上木への進級本数が少なかったことから低木性常緑広葉樹と同じ値の $n_{m_et} = 24$ とした。

(b) 4.5 cm 階の直径階別平均立木本数 オリジナルモデルでは中大径木の蓄積と小径木の本数の間に直線関係を仮定し、中大径木蓄積から小径木本数 (\hat{n}_s) を推定し、 \hat{n}_s を小径木の直径階数で除して直径階別平均立木本数を求め、その2倍を小径木の一つ前の直径階 (D') の立木本数としている。そして、 D' の立木本数に小径木の直径遷移確率を適用させることで、進界量の計算を行っている。この推定方法に則り、高木性・小高木性落葉広葉樹については上層木 BA と小径木本数との間に直線関係を仮定し (図-51) \hat{n}_s を計算することにした。一方、他の生育形については上層木 BA に関わらず一定として、進界量の推定に用いた (図-51)。

高木性・小高木性落葉広葉樹: $\hat{n}_{s_dt} = -35.152 b_1 + 1715.5$ ($R^2 = 0.62$)

低木性落葉広葉樹 : $\hat{n}_{s_ds} = 50$

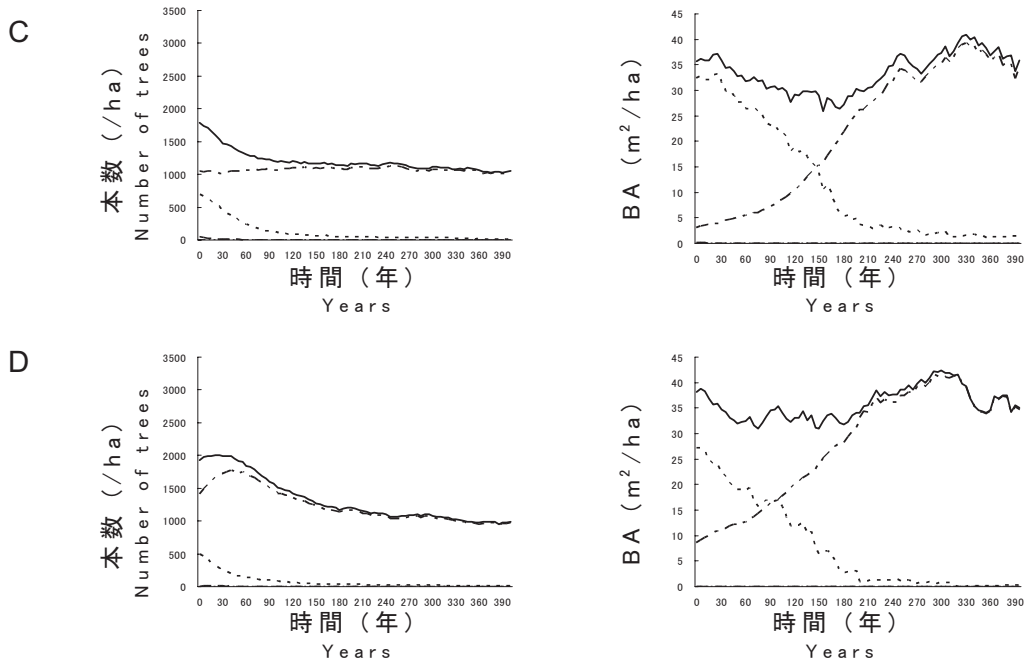


図-52 改良モデルによる予測結果 南～西向き斜面 (左: 本数, 右: BA) (続き)

A: プロットj, B: プロットh, C: プロットa, D: プロットk

Fig. 52. Prediction of plots facing south and west by the modified model (Left: number of trees, right: BA). (Continued)

A: plot j, B: plot h, C: plot a, D: plot k

- 合計
Total
- 高木性・小高木性落葉広葉樹
Tall and sub-canopy deciduous trees
- · - · - 高木性・小高木性常緑広葉樹
Tall and sub-canopy evergreen trees

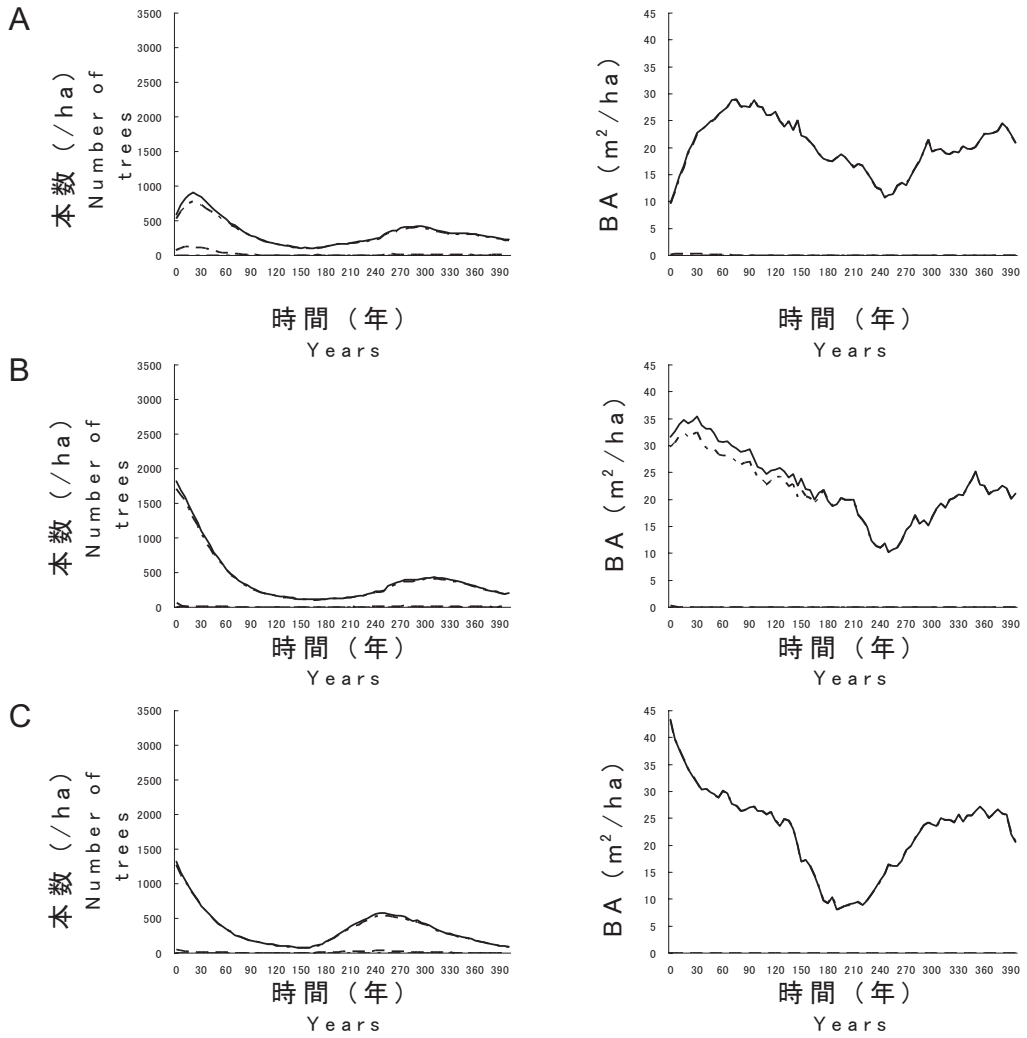


図-53 改良モデルによる予測結果 北向き斜面 (左: 本数, 右: BA)

A: プロットl, B: プロットg, C: プロットb

Fig. 53. Prediction of plots facing north by the modified model (Left: number of trees, right: BA).
A: plot l, B: plot g, C: plot b

- 合計
Total
- - - - 高木性・小高木性落葉広葉樹
Tall and sub-canopy deciduous trees
- . . . 高木性・小高木性常緑広葉樹
Tall and sub-canopy evergreen trees

高木性・小高木性常緑広葉樹： $\hat{n}_{s_et} = 579$
 低木性常緑広葉樹： $\hat{n}_{s_es} = 23$
 ただし、北向き斜面のプロットにおいては $\hat{n}_{s_et} = 24$ とした。

(2) 予測結果

前項で示したパラメータを用い、まず、改良モデルによって400年後までの唐沢山の広葉樹再生林の変化を予測した。ここでの予測結果は胸高直径5cm以上の主木について示す。次に、従来の方法で進界成長量の推定するオリジナルモデルで予測を行い、改良モデルによる予測結果と比較した。

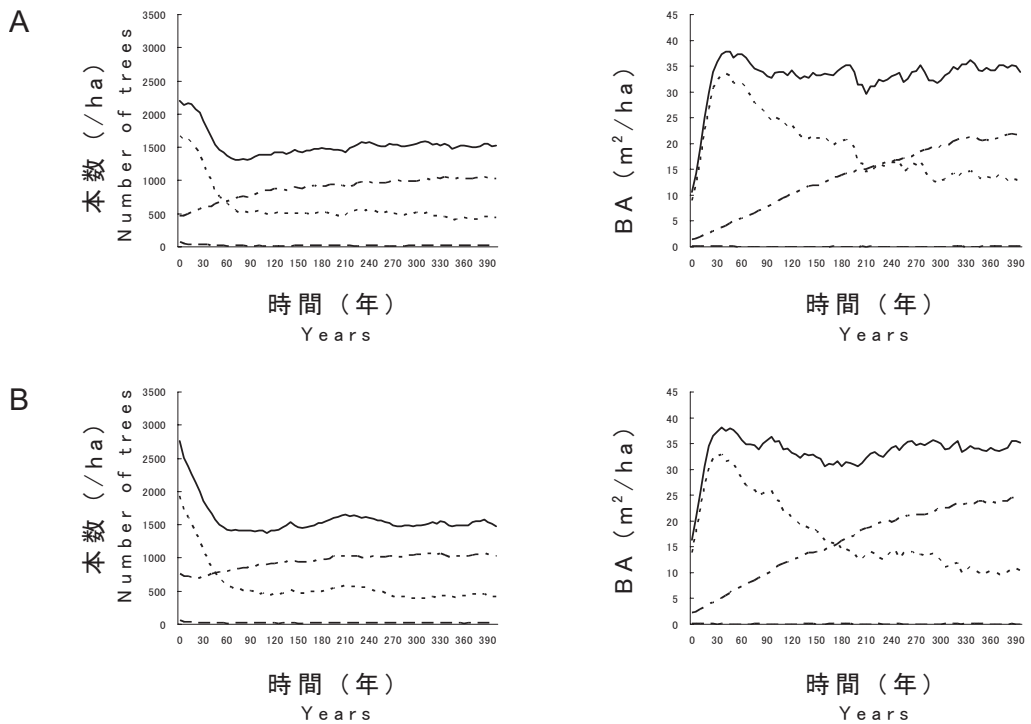


図-54 オリジナルモデルによる予測結果 南～西向き斜面 (左：本数, 右：BA)

A：プロットj, B：プロットh, C：プロットa, D：プロット

Fig. 54. Prediction of plots facing south and west by the original model (Left: number of trees, right: BA).

A: plot j, B: plot h, C: plot a, D: plot k

- 合計
Total
- 高木性・小高木性落葉広葉樹
Tall and sub-canopy deciduous trees
- · - · - 高木性・小高木性常緑広葉樹
Tall and sub-canopy evergreen trees

○BAと本数の変化

南～西向き斜面に位置するプロット (a, c, e, f, h, i, j, k, m) では、プロット全体の本数の増減やBAの増減に大きく影響しているのは、高木性・小高木性落葉広葉樹と高木性・小高木性常緑広葉樹であった (図-52)。高木性・小高木性落葉広葉樹の下層木BAの大きいプロット h, j, m では (順に $9.4 \text{ m}^2/\text{ha}$, $10.3 \text{ m}^2/\text{ha}$, $9.7 \text{ m}^2/\text{ha}$)、その本数はまず増加していき、5-20年後にピークを示した後、減少していた (図-52 A B)。その他のプロットでは増加はせず、減少するのみであった (例えば図-52 C)。同様に、下層木における高木性・小高木性常緑広葉樹BAの大きいプロット e, h, k でも (順に $7.9 \text{ m}^2/\text{ha}$, $7.8 \text{ m}^2/\text{ha}$, $8.6 \text{ m}^2/\text{ha}$)、その本数が40-55年後にピークを示すという特徴があった (図-52 B D)。他のプロットではそのようなピークは示さず、徐々に増加していた (例えば図-52 A C)。高木性・小高木性落葉広葉樹も常緑広葉樹も、ある時

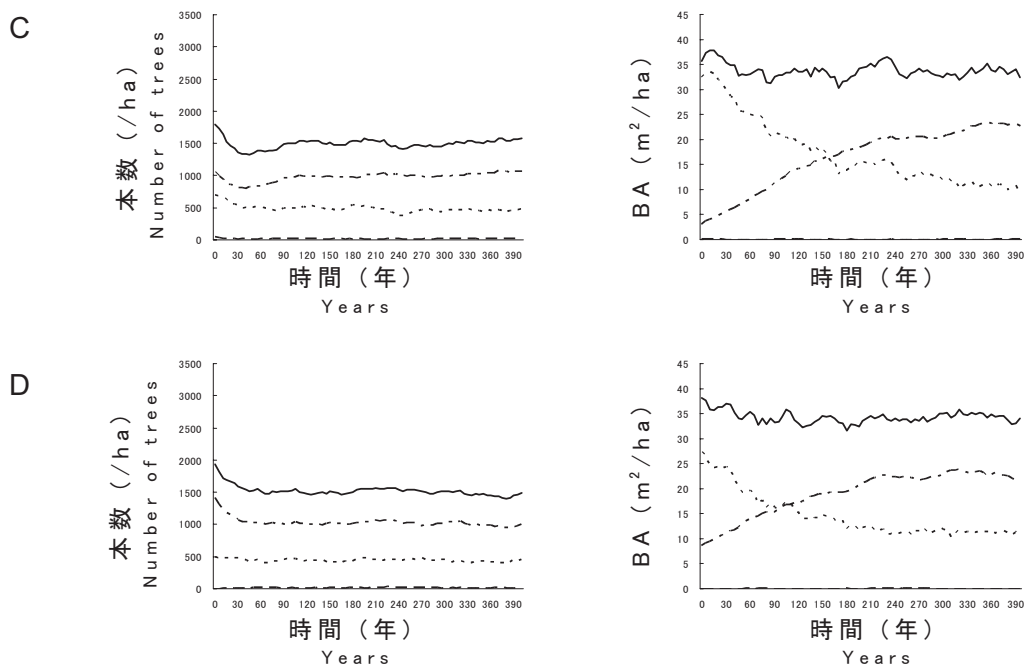


図-54 オリジナルモデルによる予測結果 南～西向き斜面 (左:本数, 右:BA) (続き)

A: プロットj, B: プロットh, C: プロットa, D: プロット

Fig. 54. Prediction of plots facing south and west by the original model (Left: number of trees, right: BA). (Continued)

A: plot j, B: plot h, C: plot a, D: plot k

- 合計
Total
- - - - - 高木性・小高木性落葉広葉樹
Tall and sub-canopy deciduous trees
- . . . - 高木性・小高木性常緑広葉樹
Tall and sub-canopy evergreen trees

期からは増減が小さくなり、落葉広葉樹は非常に少ない本数で推移し（20 本/ha 前後）、常緑広葉樹は落葉広葉樹よりは多くほぼ1,000 本/ha 前後に収束していた。

BA についても、落葉広葉樹が減少し、常緑広葉樹が増加していく傾向がみられた（図-52）。主木BAの大きいプロットa, f, k（順に35.6 m²/ha, 44.1 m²/ha, 37.5 m²/ha）では落葉広葉樹BAはほぼ減少していたが、その他のプロットではいったん増加してから減少していたのでBA

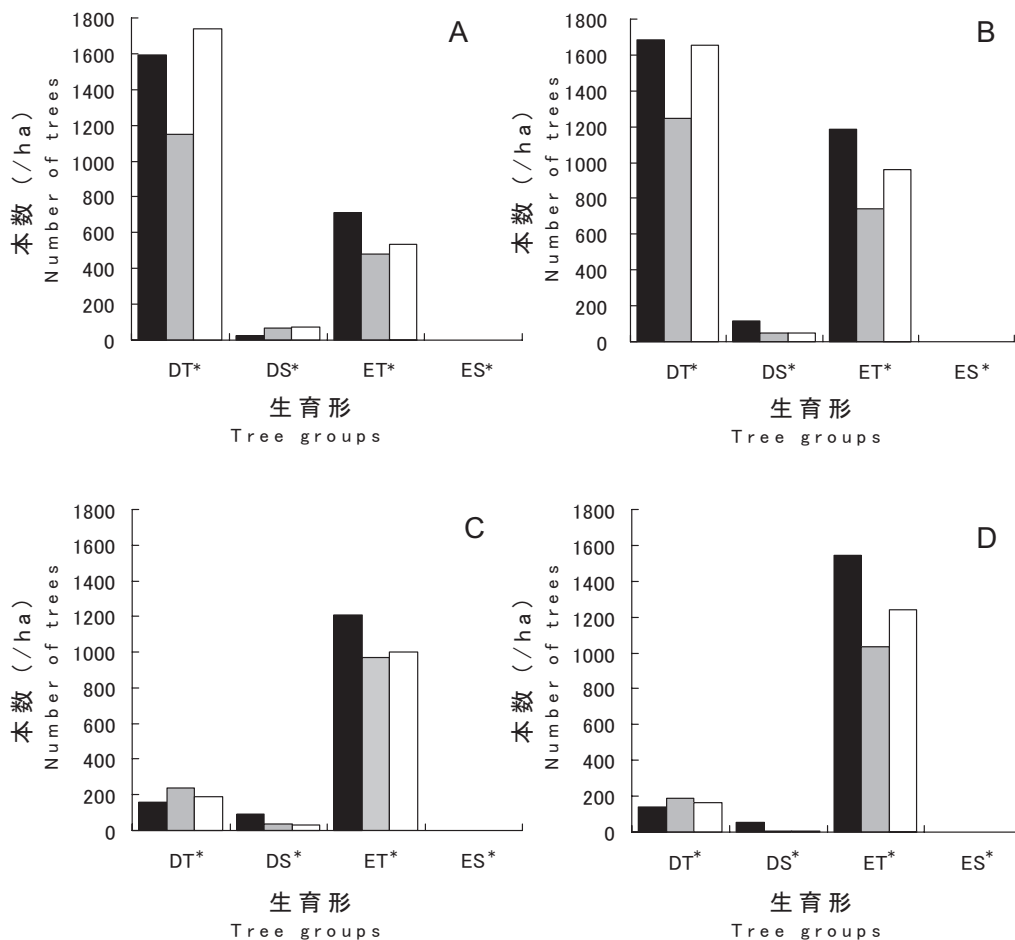


図-55 改良モデルとオリジナルモデルによる小径木本数予測結果の比較

A：プロットj, B：プロットh, C：プロットa, D：プロットk

■：実測値, ■：オリジナルモデル, □：改良モデル

Fig. 55. Observed and predicted number of trees with a DBH from 5 to 12 cm.

A: plot j, B: plot h, C: plot a, D: plot k

■: observed, ■: predicted by the original model, □: predicted by the modified model

*DT：高木性・小高木性落葉広葉樹, tall and sub-canopy deciduous tree ; DS：低木性落葉広葉樹, short deciduous tree ; ET：高木性・小高木性常緑広葉樹, tall and sub-canopy evergreen tree ; ES：低木性常緑広葉樹, short evergreen tree

の変化にピークがみられた。すべてのプロットにおいて、期首の落葉広葉樹 BA は常緑広葉樹より大きい、時間が経つにつれて常緑広葉樹 BA が落葉広葉樹 BA を上回り、最終的には林分 BA のほとんどを常緑広葉樹が占めるようになる。常緑広葉樹 BA が落葉広葉樹 BA を上回るまでの年数は、プロットによって異なっており、主木 BA が大きく常緑広葉樹のもとと多いプロット k では最も早く 95-105 年後であり (図-52 D)、期首に主木 BA が小さく常緑広葉樹も少ないプロット j と m では 195-205 年後と推定された (例えば図-52 A)。

北向き斜面に位置するプロット b, g, l でも、プロット全体の BA や本数の変化に対して高木性・小高木性落葉広葉樹が与える影響が強い。これら 3 プロットでは本数が大きく減少した後、また増加するという予測結果が得られた (図-53)。これは枯損による上層木 BA の減少に伴い、進界木が増加し、小径木本数や BA も増加する様子が示されたものである。

以上のように、本数や BA の増減のパターンはプロットによって違いが見られるものの、南～西向き斜面に位置するプロットについての全体的な傾向としては、時間が経つにつれて落葉広葉樹が減少し、常緑広葉樹が増加していくという傾向を予測することができ、北向き斜面においては上層木の減少に伴う進界木の増加を表すことができた。既往の唐沢山の広葉樹再生林の成長予測 (田中・石橋, 1996) では、BA ではなく蓄積ベースであること、樹種群の分け方やパラメータの決め方等、いくつかの点が今回の予測方法と異なっているが、本研究と同様に、陽樹の上層木が枯損した後、陰樹が優占していくという遷移の過程が予測されている。

○オリジナルモデルと改良モデルの予測結果の比較

改良モデルによる予測結果とオリジナルモデルによる予測結果との最も大きな違いは、高木性・小高木性落葉広葉樹の本数である (図-54)。改良モデルにおいてもオリジナルモデルにおいても細かい増減はみられるものの、大きな変化はなく一定の値に収束していつているという点は共通しているが、改良モデルでは、高木性・小高木性落葉広葉樹の個体数は大幅に減少し、300～400 年後には 16～32 本/ha 程度しか存在しない。しかし、オリジナルモデルでは、425～467 本/ha 程度が存在している。この違いが BA の推定結果にも影響している (図-54)。一方、高木性・小高木性常緑広葉樹については、改良モデルでは 990～1,069 本/ha、オリジナルモデルでは 988～1,047 本/ha と大きな違いはなかった。

それぞれのモデルを用いて、5 年後の DBH 5～11 cm の林木の本数を算出し、第 2 回目フィールド計測結果の値と比較したところ、改良モデルによる推定結果の方がよりフィールド計測結果を再現している場合が多かった (図-55)。今後、さらにデータを収集し、長期的な予測結果と計測結果との比較が必要ではあるが、現段階では進界木本数の推定という点において、オリジナルモデルを改善できたと言えよう。

今後予測の精度を上げていくためには、以下の点について解析を行い、モデルに組み込んでいく必要がある。

まず、常緑広葉樹の成長量に関わる要因を解明することである。今回の結果からは、耐陰性の強い常緑広葉樹は落葉広葉樹とは異なり、上層木の被圧の影響はみられなかった。しかし、なんらかのメカニズムに基づいて成長をしているはずなので、その大小を決める要因を明らかにするために、個体レベルでの環境要因も含めて、調査、検討する必要があるだろう。また、今回の上層木の常緑広葉樹のデータが圧倒的に不足していたので、より精度の高い成長予測を行うためには多くの成長データを収集していくことが必要である。

次に、枯損量に関わる要因を明らかにすることである。下層木において、落葉広葉樹と常緑広

葉樹の両者とも、その枯損量は上層木BAと関係がみられなかった。萌芽している個体もみられることから繁殖形態による枯損の違い、また、成長量と同様に個体レベルの環境要因も考慮していく必要があるだろう。

V お わ り に

本研究では、広葉樹再生林という「極相」より以前の遷移段階にある林分を対象に、下層木や後継稚樹といったサイズの小さい個体を含めた生育形別の林分成長解析を行い、成長予測を試みた。その結果、唐沢山の広葉樹再生林の変化をBAや本数などの量で捉えることができたのと同時に、遷移の方向性を示すことができた。さらに、この動態解析結果を基にした成長モデルを用いることにより、従来のモデルより進界成長量を精度よく推定することが可能になり、また、落葉広葉樹の優占する林分から常緑広葉樹の優占する林分への変化を表すことができた。

VI 謝 辞

本研究を行うにあたり、多くの方々のご協力を得た。様々な視点でご助言くださった東京大学大学院農学生命科学研究科科学の森教育研究センターの石橋整司教授を始めとする先生方と学生の諸氏、唐沢山の調査でお世話になった熊倉充氏、故松崎秀司氏、植物の絶乾方法の指導、気象データの提供および助言をしてくださった東京農工大学農学部の戸田浩人教授、さらに、調査・研究・論文作成に際してご助言や励まし多大なご協力をいただいた方々に、心より厚く御礼申し上げる。

要 旨

本研究は、放置された里山林に代表されるような広葉樹再生林の管理を念頭に置き、栃木県唐沢山を対象に資料を集め動態解析を行い、その結果を基にした成長モデルによる予測を試みたものである。林分成長について解析したところ、(1) 林分全体の傾向として、胸高断面積合計(BA)の大きいプロットの方が大量に枯損し、粗成長量には上限と下限が存在する可能性があること、(2) 林分全体の変化には、下層木の成長量と上層木の枯損量が強く影響していること、(3) 下層木の落葉広葉樹では、上層木の多少が成長に関係している可能性があるが、枯損に対しては上層木の影響は低いこと、(4) 下層木の常緑広葉樹の成長や枯損については、上層木の量の影響はあまりみられないこと、(5) 落葉広葉樹よりも常緑広葉樹の方が枯損量、枯損率が低く、枯損しにくいこと、(6) 落葉広葉樹の成長量の大小が下層木や上層木全体の成長量の傾向に強く影響していること、などが明らかになった。以上の知見をもとに既存の天然林成長予測モデル(FSD)を改良し、広葉樹再生林の成長を予測したところ、従来の方法を用いたモデルの予測結果より現実の進界量を正確に予測しており、進界量の予測に今回のモデルが有効であることが示唆され、改良モデルが広葉樹再生林の成長予測を行うことが十分可能であることが示された。

キーワード： 広葉樹再生林・上層木・下層木・生育形・成長モデル

引用文献

- 相場芳憲, 相沢孝夫, 生原喜久雄, 新井雅夫 (1984) 北関東における北向き斜面での薪炭林から広葉樹用材林への転換. 東京農工大学農学部演習林報告 **20**: 1-15.
- 相場芳憲, 生原喜久雄, 玉木真一郎, 新井雅夫, 相沢孝夫 (1983) 北関東における旧薪炭林の林分構造. 東京農工大学農学部演習林報告 **19**: 9-20.
- 馬場多久男 (2000) 葉でわかる樹木. 396pp, 信濃毎日新聞社, 長野.
- BUONGIORNO, J and MICHIE, B.R. (1980) A matrix model of uneven-aged forest management. *Forest Science* **26**: 609-625.
- 張玉鈞・北尾邦伸 (2001) 「里山」の発見とその展開方向. 林業経済 **54**(8): 10-17.
- 達 良俊・大沢雅彦 (1992) 都市景観域における放棄アカマツ植林の二次遷移とアカマツの一斉枯死による影響. 日生態会誌 **42**: 81-93.
- 船越三朗 (1998) 落葉広葉樹林の林分構造の変化－樹種と直径級構成. 北大演報 **45**: 187-212.
- 蜂屋欣二 (1981) 広葉樹林の生態. (広葉樹林とその施業. 大日本山林会, 262pp, 地球社, 東京): 59-70.
- 本阿弥俊治・山本博一・高橋康夫・芝野伸策・岡村行治・井口和信 (1997) 北方針葉樹天然林の林分構造－大型試験地における分布様式－. 日林論 **108**: 89-90.
- 石橋整司 (1989b) 天然林の成長予測 (II) シミュレーションモデルによる長期予測. 日林誌 **71**: 356-362.
- 石橋整司 (1989a) 天然林の成長予測 (I) シミュレーションモデルの作成. 日林誌 **71**: 309-316.
- 石橋整司 (1990) シミュレーションモデルに基づく天然林の林分構造の動態に関する研究. 東大演報 **82**: 11-101.
- 小谷二郎 (1993) コナラ二次林の成長特性. 石川県林試研報 **24**: 1-10.
- 小菅久 (1986) 都市近郊里山の高度利用に関する一考察. 日林関東支論 **37**: 7-10.
- 真鍋逸平・吉村健次郎・竹内典之・谷口直文・紺野絡 (1986) 和歌山演習林における二次林の動態について (I)－固定標準地の林況と樹種の分布様式－. 京大農学部演習林報告 **58**: 12-24.
- MASAKI, T., SUZUKI, W., NIYAMA, K., IIDA, S., TANAKA, H. and NAKASHIZUKA, T. (1992) Community structure of a species-rich temperate forest, Ogawa Forest Reserve, central Japan. *Vegetatio* **98**: 97-111.
- 松田敦・伊藤哲・佐藤盛樹・野上寛五郎 (1998) 天然生広葉樹二次林の森林構造に及ぼす地形因子の影響. 日林九州支論 **51**: 59-60.
- MOSER Jr, J.W. and HALL, O.F. (1969) Deriving growth and yield functions for uneven-aged forest stand. *Forest Science* **15**: 183-188.
- 南雲秀次郎 (1981) 天然林施業研究序説－東京大学北海道演習林における林分施業法. 森林文化研究 **2**: 25-35.
- 中川重年 (2001) 里山を考える－神奈川県における里山活動. 林業技術 **707**: 21-25.
- NAKASHIZUKA, T. and NUMATA, M. (1982) Regeneration process of climax beech forests I. Structure of a beech forest with the undergrowth of *Sasa*. *Jap. J. Ecol.* **32**: 57-67.
- 中静 透・山本進一 (1987) 自然攪乱と森林群集の安定性. 日生態会誌 **37**: 19-30.
- 西上 愛・石橋整司 (2000) 北関東における広葉樹再生林の林分構造－後継稚樹を中心にした林床空間の分析－. 森林環境資源科学 **38**: 107-121.
- 西上 愛 (2004) 北関東における広葉樹再生林の林分構造. 森林計画学会誌 **38**: 1-9.
- 西村尚之・山本進一・千葉喬三 (1990) 都市近郊コナラ林の構造と動態 (I)－林分構造とコナラの個体群特性－. 日本緑化工誌 **16**: 8-17.
- 野尻智周・林進・伊藤栄一 (1998) 二次林保全の社会的意義. 岐阜大農研報 **63**: 11-23.
- 小柳信宏・桑原 繁・桑原 誠・内田武次・熊倉 充・戸田浩人 (2003) 東京農工大学フィールドミュージアムにおける森林地域の気象観測記録 (1997-2002). *フィールドサイエンス* **3**: 37-47.
- PACALA, S.W., CANHAM, C.D., and SILANDER Jr, J.A., (1993) Forest models defined by measurements: I. The design of a northeastern forest simulator. *Can. J. For. Res.* **23**: 1980-1988.
- 佐野真琴 (2001) 針広混交林の動態に関する基礎的研究. 森林総研研報 **380**: 1-33.
- 島野光司・沖津 進 (1993) 東京郊外奥多摩, 三頭山に分布するブナ・イヌブナ林の更新. 日生態会誌 **43**: 13-19.
- 只木良也 (1997) 雑木林の仕組みと働き. 森林科学 **21**: 31-35.
- 高橋和規・椎林俊昭 (1987) 北関東広葉樹林の林分構造 (II) コナラ林主要樹種の生育特性. 39回日林関東支論: 15-16.

- 高橋和規・椎林俊昭 (1988) コナラ二次林における主要樹種の生長特性. 99 回日林論 : 141-142.
- 高柳敦・真鍋逸平・竹内典之・上西謙次・松場京子 (1991) 和歌山演習林における二次林の動態について (II) - 固定標準地における5カ年の動向について -. 京大農学部演習林集報 **22** : 91-102.
- 竹内雅代 (1995) 小規模演習林における施業計画作成手法に関する研究 - 森林情報管理システムの開発. 東京農工大学卒業論文. 306pp
- 田中邦宏・石橋整司 (1996) 広葉樹再生林を対象とした林分成長モデルFSDのパラメータの決定手法. 森林環境資源科学 **34** : 9 ~ 23.
- TANAKA, K. and ISHIBASHI, S. (1995) Reconstructing Past Stand Structures using Tree Ring Data. *Journal of Forest Planning* **1**, 55-61.
- 東京農工大学農学部附属演習林編 (1994) 東京農工大学農学部附属演習林概要. 11pp, 東京農工大学農学部附属演習林, 東京.
- 寺田和雄・尾崎嘉信・山下多聞・新村義昭 (2000) 鳥根大学三瓶演習林における落葉広葉樹二次林の林分構造および種組成の5年間の変化. 鳥根大学生物資源科学部研究報告 **5** : 59-65.
- 宇都宮大学農学部林学科 (1991) 広葉樹林業の育成と利用開発に関する研究. 68pp.
- 和田秀次・中越信和 (1994) 温帯林の遷移と構造. 日林論 **105** : 271-274.
- 和田茂彦・竹内典之・川村 誠・酒井徹朗・山田容三 (1988) 森林の動態に関する研究 (I) 北海道演習林の天然林について. 京大演報 **60** : 91-110.
- 山本博一 (1990) 択伐林施業計画のシステム化に関する研究. 東大演報 **83**: 31-142.
- 吉田孝久・河原漠 (1968) 直径遷移確率による天然林の生長予測. 日林北支講 **17** : 46-49.
- 辻木達郎・薛孝夫 (1992) 九州山地における落葉広葉樹二次林の発達に関する研究 - 階層構造と齡構成 -. 九大演報 **66** : 1 ~ 18.

(2009年 9月3日受付)

(2009年 11月9日受理)

Summary

The objective of this study is to analyze stand dynamics and predict stand growth of regenerated broad-leaved forests in Mt. Karasawa for forest planning. Regenerated broad-leaved forests cover extensive areas of unmanaged countryside forests in Japan. Analysis of stand growth results show: (1) some field plots with large stand basal area (BA) have larger amount of mortality than the small stand BA plots do and the relationship between BA and gross growth for all field plots have upper and lower limits. (2) Growth in lower layer trees and mortality in upper layer trees affect stand growth more than mortality and ingrowth in lower layer trees and growth in upper layer trees. (3) The growth of deciduous trees in the lower layer is probably affected by BA in the upper layer but its mortality is not. (4) Evergreen trees' growth and mortality in the lower layer are not related to BA in the upper layer. (5) Also evergreen trees have smaller amount of mortality and a lower mortality rate than deciduous trees and (6) the growth of deciduous trees strongly affects both the upper and lower layer growth trend of all trees. Based on these results, the existent stand growth model FSD (Feedback type Stand growth simulation model using Diameter transition probability) developed for mixed forest was modified to predict regenerated broad-leaved forests. The modified model predicts growth better than the existent one, thus this model is useful for the management of regenerated broad-leaved forests.

Key words: Regenerated broad-leaved forests, upper layer trees, lower layer trees, tree groups, growth model