

アカマツ林木の地上部サイズと葉量指数との関係 ：若齢林と高齢林の比較

國崎 貴嗣*・関原美美子**・山崎 遥***・白旗 学*

Relationships between the size variables of aboveground and leaf mass index for individual trees in young and old *Pinus densiflora* stands

Takashi KUNISAKI*, Fumiko SEKIHARA**, Haruka YAMAZAKI** and Manabu SHIRAHATA*

1. はじめに

林分の育成にあたり、目標林型を設定することが重要視されつつある（藤森，2012）。木材生産を目的とした林分の目標林型を設定する際には、目標林型に先立ち、生産目標を設定することが必要である（今田，2005）。生産目標は採取する丸太の長級・径級で表されるため、目標林型には目標とする平均胸高直径，平均樹高，平均枝下高を明示することになる（國崎，1999）。こうした林分構成値を目標にしながらか、密度管理のために定期的に胸高直径，樹高，枝下高が調査または目視確認されることになる。

一方、アカマツ林における間伐木選定（以下、選木とする）では、林木葉量の多寡が重要な判断要素の一つとなる（四手井，1963）。換言すれば、今後の旺盛な成長を確保するために葉量の多い林木を残存させることになる。林木葉量を正確に把握するためには破壊的調査が必要であり（四手井，1963）、目標林型に林木葉量の目標値を設定するのは容易でない。ただ、林木葉量の多寡を目視で把握し、葉量指数として段階的に示すことで、林木葉量を非破壊的に定性評価することはできる（吉田，2007）。そこで、こうした葉量指数を用いて、胸高直径，樹高，枝下高などの地上部サイズ指標と葉量指数との関係を明らかにし、密度管理と葉量の多い林木の確保を整合させることが、アカマツ林を育成する上で重要となるであろう。

Received February 28, 2014

Accepted June 9, 2014

* 岩手大学環境科学系

** 東京都

*** 北海道大学環境科学院

アカマツの樹冠形は、若齢時には円錐体もしくは放物線体に近いのに対し（梶原，1995），高齢時にはより扁平な傘型となる。このため，地上部サイズ指標と葉量指数との関係が若齢林と高齢林で異なる可能性が考えられる。アカマツ若齢林と高齢林を対象に，林木の地上部サイズ指標と葉量指数との関係を明らかにするのが本研究の目的である。若齢林，高齢林ごとに葉量指数に強く影響する地上部サイズ指標を抽出し，密度管理への反映を試みた。

II. 調査地と方法

調査地は，岩手大学農学部附属寒冷フィールドサイエンス教育センター滝沢演習林（以下，滝沢演習林とする）内にある。滝沢演習林の気象観測資料（1983～2003年）によれば，年平均気温9.2℃，暖かさの指数76.7，年平均降水量1,219mmである。最深積雪深は40cm程度であり，少雪地域に相当する。調査地は5林班と・る・わ小班のアカマツ林である。5林班と小班は林齢35年生（2012年）の若齢アカマツ人工林（以下，若齢林）1 haであり，5林班の・る・わ小班は林齢166年生（2012年）の高齢アカマツ天然生林（以下，高齢林）8 haである。いずれの林分も傾斜0～5度であり，ほぼ平坦地にある。

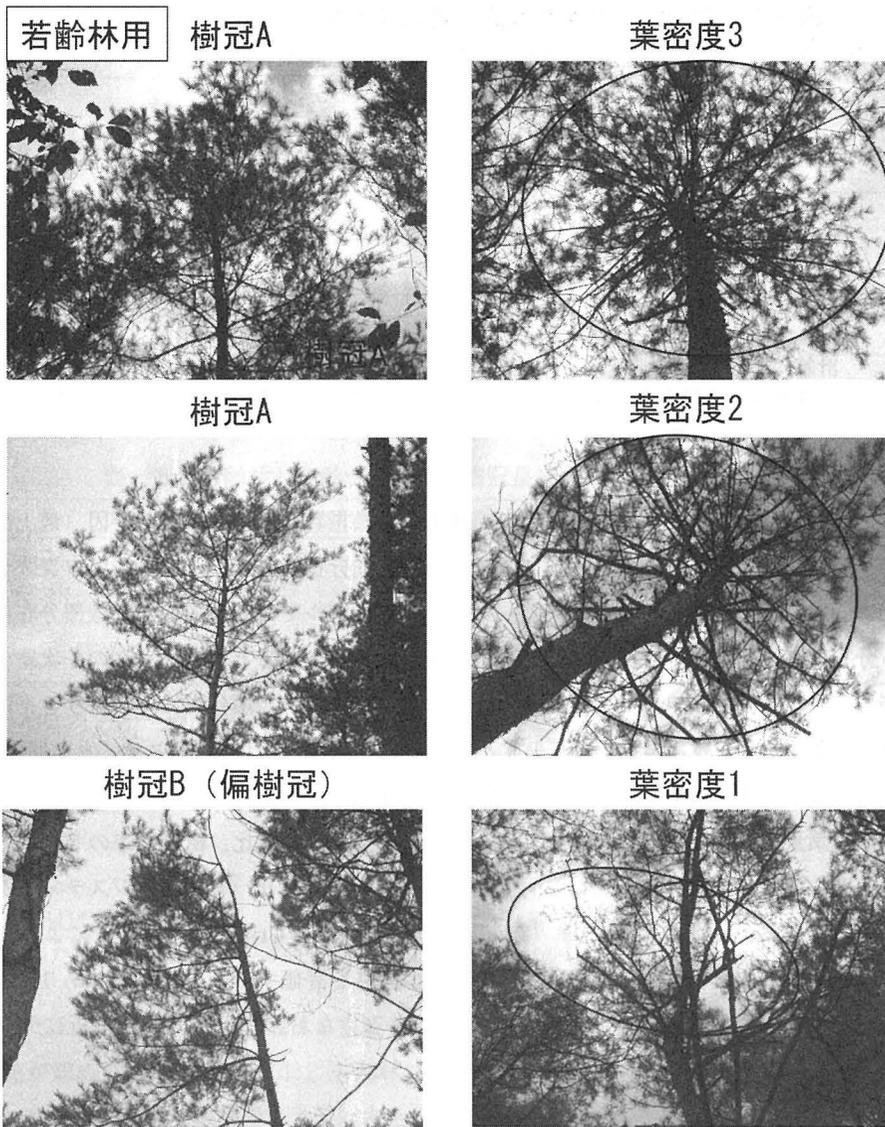
現地調査を2012年11月におこなった。若齢林と高齢林においてそれぞれ調査対象木が100本になるように幅8mの帯状標準地を設定した。帯状標準地については，各小班内でアカマツが林分状態で生立している地点に設定した。調査面積は若齢林で0.1268ha，高齢林で0.4992haである。調査対象木の測定項目は，帯状標準地内のアカマツの胸高直径，樹高，枝下高である（表－1）。調査対象木にナンバリングし，胸高直径（地上高1.3mの幹直径）を若齢林では直径巻尺，高齢林では輪尺を用いて0.1cm単位で測定した。樹高と枝下高についてはVertex IIIを用いて0.1m単位で測定した。

アカマツの林木葉量指数を求めるために，日本緑化センター（2001）の衰退度判定票の評価項目を参考に，まず樹形と葉密度を評価した。評価に先立ち，滝沢演習林のアカマツ林を複数踏査し，吉田（2007）を参考に樹形と葉密度の基準写真帳（図－1）を作成した。そして，基準写真帳と比較しつつ，調査者3人による合議制で目視に基づき評価した。樹形については，アカマツの樹冠を全体的に観てA（普通），B（偏樹冠）の2段階で評価した。ここで，偏樹冠とは樹冠の半分以上に枝葉がない状態の樹冠とした。葉密度については，アカマツの樹冠を真

表－1 調査林分の概要

林分	林齢 (年)	本数密度 (本/ha)	相対幹距 (%)	胸高直径* (cm)	樹高* (m)	枝下高* (m)	形状比*	樹冠長率* (%)
若齢林	35	789	19.5	21.0±4.0	17.2±1.9	12.4±1.0	83.8±12.7	27.5±6.4
高齢林	166	200	24.7	55.4±8.9	26.8±3.5	20.4±3.0	49.5±9.0	23.6±7.4

* 平均±標準偏差



図一 1 アカマツ林における基準写真帳の例（若齢林用）

下から観て、樹冠長の長短を意識しながら3（普通）、2（やや疎）、1（疎）の3段階で評価した。次に、樹形評価と葉密度評価の両方を加味して葉量指数を求めた。樹形評価のAを1、Bを0.5、葉密度評価3、2、1として両者を乗じた数値を大きい順に並べ、5段階評価としたものを葉量指数とした。5を普通、4をやや少ない、3を少ない、2をかなり少ない、1をほぼ枯死状態とみなした（表-2）。

まず、若齢林と高齢林の間で葉密度、葉量指数の度数分布を比較するために正確確率検定をおこなった。また、若齢林と高齢林の間で形状比と樹冠長率を比較するためにMann-Whitney

表一 2 アカマツ林木の葉量指数の求め方

葉密度 ¹⁾	樹形 ²⁾	葉密度×樹形 ³⁾	葉量指数 ⁴⁾
3	A	$3 \times 1 = 3$	5
2	A	$2 \times 1 = 2$	4
3	B	$3 \times 0.5 = 1.5$	3
2	B	$2 \times 0.5 = 1$	2
1	A	$1 \times 1 = 1$	2
1	B	$1 \times 0.5 = 0.5$	1

¹⁾ 3は普通, 2はやや疎, 1は疎

²⁾ Aは普通, Bは偏樹冠

³⁾ 計算にあたり, Aを1, Bを0.5とした。

⁴⁾ 5は普通, 4はやや少ない, 3は少ない, 2はかなり少ない, 1はほぼ枯死状態

のU検定をおこなった。

次に, 若齢林と高齢林それぞれにおいて, 林木の葉量指数に影響を与える要因(地上部サイズ指標)を明らかにするために順序ロジスティック回帰分析をおこなった。順序ロジスティック回帰は一般化線形モデルの一つである。一般化線形モデルでは応答変数が指数型分布族に含まれる分布に従い, 応答変数の期待値をリンク関数で変形させるとパラメータの一次結合(線形予測子)で表される。ロジスティック回帰とは, 応答変数が二項分布に従い, リンク関数がロジット関数である一般化線形モデルのことである。そのうち, 順序ロジスティック回帰とは, 応答変数の水準が3つ以上であり, かつその水準に順序がある場合の一般化線形モデルである。応答変数を葉量指数, 説明変数を胸高直径, 樹高, 枝下高, 形状比, 樹冠長率の5つとし, 5つの説明変数すべての組み合わせ(説明変数なしを含めて31通り)で順序ロジスティック回帰分析をおこなった。赤池情報量規準(Akaike's Information Criterion: AIC)により最も予測能力の高いモデルを求めた。AICは統計モデルの良さを評価するための指標であり, AICが最小となるモデルが最も予測能力の高いモデルである。なお, すべての統計解析についてはR2.8.1(R Development Core Team, 2008)を用いた。

III. 結 果

若齢林と高齢林における葉密度と葉量指数の度数分布を表一3に示す。いずれの度数分布も林分間で有意差が認められた($P < 0.001$)。葉密度については, 若齢林では3(普通), 高齢林では2(やや疎)の度数が最も多かった。葉量指数についても, 若齢林では5(普通), 高齢林では4(やや少ない)の度数が最も多かった。また, 葉量指数3以下の度数は若齢林の23本に対して高齢林では10本と少なく, 高齢林に1の林木は存在しなかった。

若齢林と高齢林における形状比の度数分布を表一4に示す。林分間で形状比に有意差が認められた($P < 0.001$)。若齢林では形状比80以上の林木が60本であるのに対し, 高齢林では0本

表-3 若齢林と高齢林における葉密度と葉量指数の度数分布

林分	葉密度 ¹⁾			葉量指数 ²⁾				
	3	2	1	5	4	3	2	1
若齢林	63	28	9	53	24	10	7	6
高齢林	45	55	0	41	49	4	6	0

¹⁾ 3は普通, 2はやや疎, 1は疎

²⁾ 5は普通, 4はやや少ない, 3は少ない, 2はかなり少ない, 1はほぼ枯死状態

表-4 若齢林と高齢林における形状比の度数分布

林分	70未満	70以上80未満	80以上90未満	90以上
若齢林	16	24	29	31
高齢林	98	2	0	0

表-5 若齢林と高齢林における樹冠長率(%)の度数分布

林分	20%未満	20%以上25%未満	25%以上30%未満	30%以上
若齢林	12	24	25	39
高齢林	34	26	20	20

表-6 若齢林におけるモデル選択

AIC	回帰係数				
	胸高直径	樹高	枝下高	形状比	樹冠長率
241.790	-0.481	-2.479	4.431	-0.133	0.838
241.798	—	-2.648	3.808	—	0.750
242.789	—	-2.702	3.932	-0.017	0.751
243.481	0.038	-2.692	3.832	—	0.743
260.841*	—	—	—	—	—

* 参考のため, 説明変数なしのモデルのAICを掲載した。

であった。若齢林と高齢林における樹冠長率の度数分布を表-5に示す。林分間で樹冠長率に有意差が認められた ($P < 0.001$)。若齢林では樹冠長率30%以上の林木が39本と最も多いのに対し, 高齢林では20%未満の林木が34本と最も多かった。

若齢林における順序ロジスティック回帰分析の結果を表-6に示す。AICが最小の最良モデルは5つの説明変数すべてを含んだモデルであった。最良モデルのAICとの差が2未満のモデルは3つあり, いずれも樹高, 枝下高, 樹冠長率を含んだ。回帰係数の符号は, 樹高で負, 枝下高と樹冠長率で正であった。枝下高と樹冠長率については, 説明変数を単一にした場合のモデル(単回帰モデル)における回帰係数の符号も正であった。一方, 樹高を単一の説明変数にした単回帰モデルにおける回帰係数の符号は正となり, AICの小さなモデルでの符号と一致しなかった。樹高, 枝下高, 樹冠長率のいずれも回帰係数の絶対値が大きかった。

高齢林における順序ロジスティック回帰分析の結果を表-7に示す。AICが最小の最良モデルは説明変数なしのモデルであった。最良モデルのAICとの差が2未満のモデルは10あり, そ

表一七 高齢林におけるモデル選択

AIC	回帰係数				
	胸高直径	樹高	枝下高	形状比	樹冠長率
208.531	—	—	—	—	—
208.578	—	0.077	—	—	—
209.856	—	—	—	—	0.021
209.964	—	—	0.047	—	—
210.039	—	—	0.098	—	0.041
210.113	0.014	—	—	—	—
210.246	—	0.093	—	-0.014	—
210.295	—	0.070	—	—	0.014
210.418	—	0.101	-0.037	—	—
210.492	0.006	0.072	—	—	—
210.513	—	—	—	0.003	—

のうち樹高を説明変数に含んだモデルが5つと最も多かった。樹高の回帰係数の符号はいずれも正であった。ただし、樹高を含め、いずれのモデルでも回帰係数の絶対値が小さかった。

IV. 考 察

1. 若齢林と高齢林の林分構成

若齢林においては、葉密度や葉量指数が普通と評価された林木は過半数を占めた（表-3）。また、樹冠長率30%以上の林木が全体の約4割を占めた（表-5）。これらのことから、若齢林では葉量を普通に保持している林木が多いといえる。ただし、葉密度が疎、葉量指数が少ないからはほぼ枯死状態、樹冠長率20%未満の林木は、いずれも全体の1割前後を占めており（表-3、表-5）、劣勢木も見受けられた。これは若齢林が過密であるためと考えられる。若齢林の相対幹距は19.5%であり（表-1）、アカマツ林で自己間引きが発生する基準である20%以下（國崎, 2014）に該当した。また、平均形状比は84であり（表-1）、林木全体の6割が形状比80以上であった（表-4）。アカマツ林でも形状比80以上では風雪害の危険性が顕著となるため（石川ら, 1987；桜井, 2002）、過密を判断する基準の一つとなっている。このように、林分が過密であることが葉量の少ない劣勢木を発生させる要因になっていると考えられる。

一方、高齢林においては、葉密度がやや疎、葉量指数がやや少ないと評価された林木は半数を占めた（表-3）。また、樹冠長率30%以上の林木が全体の2割にとどまり、逆に樹冠長率20%未満の林木が全体の3割以上と最も多かった（表-5）。これらのことから、高齢林では葉量のやや少ない林木が主体となっている。ただし、葉密度が疎、葉量指数がほぼ枯死状態と評価された林木は存在しなかった（表-3）。これは高齢林が過密でないためと考えられる。高齢林の相対幹距は24.7%であり（表-1）、自己間引きが発生する基準20%以下（國崎, 2014）

を上回っていた。また、平均形状比は50であり（表-1）、形状比80以上の林木は存在しなかった（表-4）。このように、林分が過密でないにもかかわらず、葉量のやや少ない林木が主体であるのは、林齢が166年生であり、林分の発達段階（藤森, 2012）が老齢段階に移行しているためと考えられる。杉田（1984）は、滝沢演習林の高齢アカマツ天然生林における樹幹解析により、アカマツ林木の樹高成長は樹齢120年生までに停止したことを報告している。上方への樹冠伸長がない状態で徐々に下枝の枯れ上がりが進んだり、高齢化した一次枝の葉量が低下している可能性が推察される。

2. 葉量指数に影響する地上部サイズ指標

若齢林における順序ロジスティック回帰分析の結果から、葉量指数の説明変数として樹高、枝下高、樹冠長率を含むモデルが選択された（表-6）。樹高の回帰係数の符号が負になったものの（表-6）、樹高のみを説明変数とする単回帰モデルにおける回帰係数の符号は正であった。樹高については、枝下高、樹冠長率との間に有意な正の相関が認められ、線形モデル（重回帰モデル）における樹高の分散拡大係数は115.3であった。分散拡大係数が10以上だと多重共線性が疑われることから（中澤, 2007）、樹高の回帰係数については多重共線性の影響で符号が逆転した可能性が考えられる。そこで以下では、回帰係数の符号が単回帰モデルのそれと一致した枝下高と樹冠長率に注目して考察する。まず、順序ロジスティック回帰分析における回帰係数は対数オッズであり、この値が0から離れるほど、影響力が大きいとみなせる。AICの小さなモデルにおける枝下高、樹冠長率の回帰係数（対数オッズ）の絶対値はそれぞれ4前後、0.8前後であり（表-6）、0より大きかった。次に、AICの小さなモデルから、枝下高と樹冠長率が高いほど林木の葉量指数が高くなることわかる（表-6）。植杉（1952）はアカマツ林について、幼齢段階で密仕立てにより枝下高を高める形質成長を促し、若齢段階では平均樹冠長率40%前後を維持する密度管理を推奨している。また、佐藤（1962）は間伐時の基準として、なるべく枝下の長い幹材を生産できるように導く、均等に広がる樹冠を維持することを推奨している。本研究の結果は、これらの推奨事項と矛盾しない。これらのことから、若齢林における密度管理では枝下高と樹冠長率に着目するのが有効であり、枝下高と樹冠長率が高い林木を残しながら、目標林型を目指せば良いと考えられる。

高齢林における順序ロジスティック回帰分析の結果から、最良モデルとして説明変数なしのモデルが選択された（表-7）。これは、高齢林では葉量指数に強く影響する地上部サイズ指標がないことを意味する。このことは、AICが比較的小さなモデル群の回帰係数からも判断できる。最良モデルのAICとの差が2未満の10のモデルのうち、樹高を説明変数に含んだモデルが5つと最も多かった（表-7）。樹高の回帰係数の符号はいずれも正であるものの、いずれのモデルでも回帰係数の絶対値が0.1前後と小さかった（表-7）。樹高以外の説明変数における回帰係数の絶対値は0.1未満であった（表-7）。回帰係数（対数オッズ）が0.1前後である場

合、オッズ比は1.0から1.1程度であり、説明変数の値が高くなっても、その影響力は低い。正木ら (2011) は岩手県内の94年生アカマツ人工林の間伐区と対照区を比較し、間伐は胸高直径成長量に正の影響を与えるものの、その間伐効果が林木ごとにどのように反映されるかを、樹高や樹冠長率では事前に予測できないことを報告した。また、140年生アカマツ天然木の胸高直径成長量に対し、樹高は正の影響を与えるものの、その影響度は低いこと、樹冠長率は逆に負の影響を与えることも報告した (正木ら, 2011)。一般に、アカマツ若齢林では、林木葉量と胸高直径成長量との間に正の相関が認められる (四手井, 1963)。こうした対応関係が高齢林でも認められると仮定すれば、アカマツ高齢木の胸高直径成長量に対して地上部サイズ指標が強い正の影響を示さないこと (正木ら, 2011) は、本研究で確認された地上部サイズ指標と葉量指数との間に対応関係が認められない事実と矛盾しない。

先述のとおり、高齢林は過密ではなく、ほとんどの林木の形状比は70未満であった。このため、高齢林は密度管理という概念を適用する必要のない状態にあると考えられる。そのため、高齢林における衰退木の選木、換言すれば主伐候補木の残存にあたっては、地上部サイズ指標と葉量指数との対応関係を想定せずに、樹冠を見上げて、樹形や葉密度を直接評価すれば良いといえる。

本研究を遂行するにあたり、九州大学の吉田茂二郎教授には貴重な文献や基準写真帳の見本をご提供頂くとともに、葉密度評価に関して有益な助言を頂いた。ここに記して深甚の謝意を表す。

引用文献

- 藤森隆郎 (2012) 森づくりの心得. 全国林業改良普及協会, 353pp
- 今田盛生 (2005) 森林組織計画. 九州大学出版会, 258pp
- 石川政幸・新田隆三・勝田柁・藤森隆郎 (1987) 冠雪害. 林業科学技術振興所, 101pp
- 梶原幹弘 (1995) 樹冠と幹の成長. 森林計画学会出版局, 120pp
- 國崎貴嗣 (1999) 九州中部山岳地帯におけるアカマツ天然生林の構造発達様式に関する研究. 岩大演報 30 : 1-95.
- 國崎貴嗣 (2014) 過密なカラマツ, アカマツ人工林における簡便な密度管理指標の探索. 岩大演報 45 : 25-36
- 正木隆・森茂太・梶本卓也・相澤州平・池田重人・八木橋勉・柴田鏡江・樫間岳 (2011) 高齢・高密度のアカマツ林の間伐は個体の成長を改善するか. 日林誌 93 : 48-57.
- 中澤港 (2007) Rによる保健医療データ解析演習. ピアソン・エデュケーション, 263pp
- 日本緑化センター (2001) 最新・樹木医の手引き. 財団法人日本緑化センター, 511pp
- R Development Core Team (2008) R: A language and environment for statistical

computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.

桜井尚武 (2002) 長伐期林の実際. 林業科学技術振興所, 173pp

佐藤敬二 (1962) 日本のマツ3 経営編. 全国林業改良普及協会, 226pp

四手井綱英 (1963) アカマツ林の造成. 地球出版, 326pp

杉田久志 (1984) 岩手地方のアカマツ林の成立過程I 岩手大学滝沢演習林のアカマツ老齢単純林分の場合. 岩大演報 15:51-66.

植杉哲夫 (1952) 岩手地方赤松林の成長収穫並びに施業法に関する研究. 収穫表調製業務研究資料第1号, 246pp

吉田茂二郎 (2007) 霧島屋久国立公園霧島地区におけるモミ・ツガ育成天然林施業の展開. 平成16~18年度科学研究費補助金(基盤研究B)研究成果報告書, 167pp

要 旨

アカマツ若齢林と高齢林を対象に、林木の地上部サイズ指標と葉量指数との関係を調べた。順序ロジスティック回帰分析の結果、若齢林では葉量指数の説明変数として樹高、枝下高、樹冠長率を含むモデルのAICが小さい傾向にあった。枝下高、樹冠長率が高いほど若齢林の林木葉量指数は高くなった。一方、高齢林では説明変数なしのモデルがAIC最小であった。

Summary

We selected principal variables correlated to the leaf mass index of young and old *Pinus densiflora* trees. Crown- and stem-related variables were used in ordinal logistic regression procedures to model the leaf mass index of individual trees in young and old pine stands. Ordinal logistic regression analysis revealed that the Akaike information criterion (AIC) of models using the height, branch height, and live crown ratio as predictor variables were less than those of models without these variables as predictor variables in the young pine stand. The branch height and live crown ratio were positively correlated with the leaf mass index of the young individual trees. However, the AIC of the null model was the least of the 31 models examined in the old pine stand.