

スギ一次枝の分枝角度の特徴

齊藤哲・川崎達郎（森林総研）

Abstract: We analyzed the azimuth angle θ_n , zenith angle α_n , branch length ratio L_n / l_n (branch length / distance between branch base and top) and depth from stem top to branch base D_n of first-order branch of *Cryptomeria japonica* to understand the characteristics of branching pattern for reconstruction of crown structure from branch modules by simulation model. Difference of θ_n between successive branches $\Delta \theta_n$ had no relation to the D_n . Frequency distribution of the $\Delta \theta_n$ showed mono-modal distribution with peak of 140~160 degree class. The relation between α_n and D_n could be approximated by a rectangular hyperbola with maximum α_n of about 90 degree. The relation between L_n / l_n and D'_n (distance between the first branch base that start bending and the target branch base) could also be approximated by a rectangular hyperbola with maximum L_n / l_n of about 1.2. The measured values of $\Delta \theta_n$, α_n and L_n / l_n showed large fluctuation. In constructing crown structure by a simulation model, it is important to reflect the results in this study with considering the fluctuation stochastically.

Keywords: azimuth angle, branch bending, depth from stem top, zenith angle

要旨：本研究は、シミュレーションモデルにより枝葉のモジュールから樹冠を再生することを念頭におき、樹木の分枝特徴の解明を目的として、スギ一次枝の方位角 θ_n 、天頂角 α_n 、枝長比 L_n / l_n (枝長／枝元から枝先までの直線距離)と各枝元の樹幹頂部からの距離 D_n を調査した。直上の枝との方位角の格差 $\Delta \theta_n$ ($0 \leq \Delta \theta_n < 360^\circ$) は、いずれの個体も D_n とは相関が見られず、全個体のデータをまとめた $\Delta \theta_n$ は 140~160° の区画が最も大きいひと山型の頻度分布を示した。全個体のデータをまとめた α_n は $D_n < 200\text{cm}$ まで D_n の増加とともに急激に増加するが、 $D_n > 200\text{cm}$ になると $\alpha_n = 90^\circ$ でほぼ頭打ちになった。 L_n / l_n も枝が曲がり始めた位置からその枝元までの距離 D'_n が 200~300cm 程度までは D'_n の増加とともに急激に増加し、それ以降は $L_n / l_n = 1.2$ で頭打ちになった。 α_n と D_n 、および L_n / l_n と D'_n との関係はいずれも直角双曲線で近似できた。各項目の実測値には大きなばらつきもみられ、樹冠の再生では本研究で明らかにした分枝角や枝の湾曲の特徴を基に、こうしたばらつきも確率的に組込むことが重要と考えられた。

キーワード：枝湾曲、樹冠の深度、方位角、天頂角

I はじめに

近年の日本の林業の低迷により、戦後造成した人工林をどのように扱っていくかが大きな問題となっている。例えば、十分な手入れがなされず放置されてきた高齢過密人工林を、今後なんらかの手を入れることによって優良な林分へと誘導できるかという問題や、そのためにはどのような方法が有効かなど、いまだ明快な答えが出ていない。こうした問題に対して、木材価格変動の将来予測や施業コストの低減などのコスト面での予測・対策も重要である。しかし、現在ある林分が様々な条件下で今度どのように成長してゆくか、あるいは成長できるかというテーマは、根源的なものであろう。それを的確に把握・予測することが、こうした林業問題を考える上で重要である。

林分の成長予測に関しては林分収穫表や林分密度管理図などがある(1)。これらは群落における個体間の

競争原理などを応用し、森林を均質的なまとまりと見なしてその成長を予測したものである。従来のよく管理された均質な森林における、成長予測や施業管理指針に対して有益な情報を提供してきた。しかし、近年の林業低迷の影響で、手入れ不足の高齢化密林分や林内に非均質的な空間をつくる列状間伐を実施する林分が増加しつつある(2)。密度管理図のように森林を均質的なまとまりとみる従来の捉え方では、こうした管理不十分あるいは非均質的な林分の成長を予測するには、限界がある。

群落全体をひとまとまりとするらえ方よりも、個々の樹木や枝葉などのモジュールの集合体として森林が形成されているととらえた方が、林内の非均質性をうまく表現できる。例えば、樹木・森林を比較的単純な規則によるモジュールの集合体としてとらえ、林内個体の枝の枯れ上がりや、林縁個体の片枝をうまく

再現させた事例も報告されている(5, 6)。台風などによって形成された林冠ギャップの修復プロセスを予測するにも、こうした非均質的な樹冠型の表現が必要となる。モジュールや個体の集合体としての森林に、光・水分条件などの環境モデルや光合成などの生理モデルを組み合わせたアプローチが、非均質な森林の今後の成長予測には有効な手段であると考える(4)。

こうしたアプローチでは、第一段階として枝葉のモジュールから個々の樹木の樹冠を再生する場合の特徴・規則性などを明らかにしてゆく必要がある(3)。本研究では枝葉モジュールから樹冠の再生を念頭において、一次枝の分枝角度や湾曲の程度のデータを整理し、一次枝の出方に関する特徴を明らかにすることを目的とする。

II 調査方法

調査は森林総合研究所千代田苗畠(茨城県かすみがうら市)の17年生スギ人工林で実施した。当林分から6個体を選定・伐倒しサンプル木とした。林分は2m間隔の方形植え(密度2,500本/ha)で、サンプル木の平均樹高(範囲)は936cm(843~1,004cm)、平均胸高直径(範囲)は14.3cm(11.0~17.0cm)、平均枝下高(範囲)は224cm(150~379cm)であった。各個体の樹冠部分のみを主幹が垂直になるよう地面上に立て、主幹から分枝している一次枝を対象として以下の項目を測定した。このとき明らかに後生枝と分かるものは対象外とした。

まず主幹の頂部から数えてn番目に分枝している一次枝の方位角 θ_n (°)および天頂角 α_n (°)を記録した。方位角は樹冠のある向きで固定させ、北を0°とし時計回りで0~360°の範囲で記録した。次に枝元から枝先までの直線距離 I_n (cm)と枝に沿った枝長 L_n (cm)を測定した。枝の直線距離 I_n は事情により3個体のみにつ

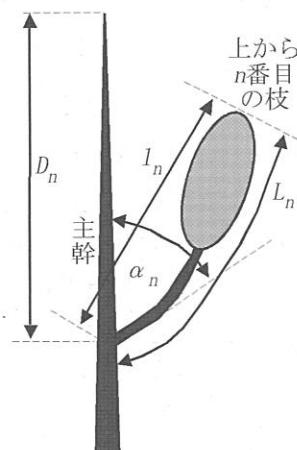


図-1. 樹幹先端からn番目の枝の測定項目

いて測定した。そして、主幹の頂部から枝元までの長さ D_n (cm)を記録した(図-1)。

以上の測定項目から、直上の枝との方位角の格差 $\Delta\theta_n$ ($0 \leq \Delta\theta_n < 360^\circ$)を式(1)により算出した。

$$\begin{aligned}\Delta\theta_n &= \theta_n - \theta_{n-1} \quad (\theta_n - \theta_{n-1} \geq 0 \text{ のとき}) \\ &= \theta_n - \theta_{n-1} + 360 \quad (\theta_n - \theta_{n-1} < 0 \text{ のとき})\end{aligned}\quad (1)$$

このとき、林冠閉鎖による枝の枯死の影響がみられないよう、主幹先端から300cm未満の深さ($D_n < 300\text{cm}$)までの枝のみを対象として $\Delta\theta_n$ を算出した。次に枝の直線距離 I_n に対する枝の全長 L_n の比 L_n/I_n (枝長比)を求めた。枝長比は枝を直線で表す場合と比べて実際の枝長が何倍あるかを意味し、 L_n/I_n が大きいと枝がより湾曲していることを表す。樹幹上部の枝はほぼ直線的に($L_n/I_n \approx 1$)出ており、樹幹頂部から湾曲し始める枝元までの距離を d とし、枝が湾曲し始めてから各枝元までの距離 D'_n ($=D_n-d$)と L_n/I_n との関係を調べた。

III 結果

1. 枝の方位角 枝方位角の格差 $\Delta\theta_n$ と主幹の先端からの枝元までの長さ D_n との関係を個体ごとに表す(図-2)。いずれの個体も $\Delta\theta_n$ と D_n との間の相関係数の絶

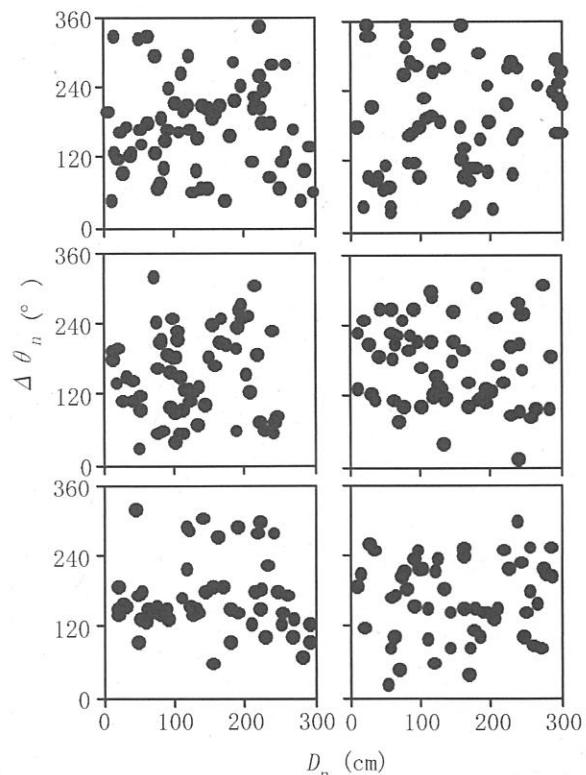


図-2. 方位角格差 $\Delta\theta_n$ とその枝元の主幹の先端からの長さ D_n との関係。それぞれ散布図が各個体を表す。

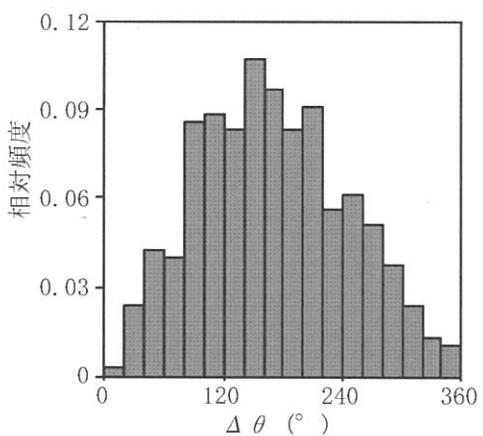


図-3. 6個体分のデータをまとめたときの枝方位角の格差 $\Delta\theta_n$ の相対頻度

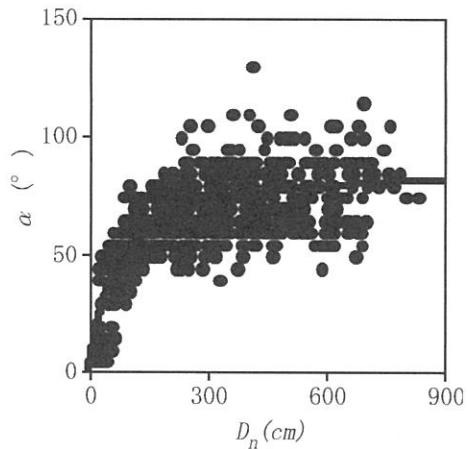


図-4. 6個体分のデータをまとめた枝の天頂角 α とその枝の主幹の先端から枝元までの長さ D_n との関係。

対値は 0.15 以下で有意な相関はみられなかった (Pearson's correlation coefficient, $p>0.25$)。 D_n の範囲を 100cm ごとに 3 つ樹冠深度で区切り、3 つの樹冠深度間の $\Delta\theta_n$ の等分散性と平均値の差を調べた。いずれの個体も分散 (Bartlett test, $p>0.86$)、平均値 (One-factor ANOVA, $p>0.66$) とも 3 つの樹冠深度間で有意な差はみられなかった。

6 個体分のデータをひとつにまとめ、枝方位角の格差 $\Delta\theta_n$ を 20° の幅で区切ったときの相対頻度を図-3 に示す。方位角格差は $140\sim160^\circ$ の区画の頻度が最も高いひと山型の分布を示した。方位角格差は $0\sim360^\circ$ の全ての区画にみられたが、 $80\sim220^\circ$ の区間の頻度が全体の 63% を占めた。

2. 枝の天頂角 天頂角 α_n と主幹の先端からその枝元までの長さ D_n との関係をみると、 α_n はいずれの個体も

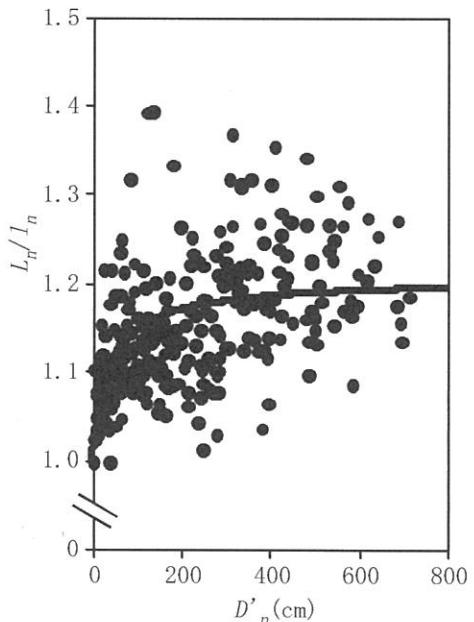


図-5. 3個体分のデータをまとめた枝長比 L_n / l_n と枝が湾曲し始めてから枝元までの樹冠の深さ D'_n との関係。

$D_n=200\text{cm}$ 程度まで D_n の増加とともに急激に増加するが、 $D_n>200\text{cm}$ になるとほぼ頭打ちになる変化を示した。6 個体分のデータをひとつにまとめた場合の α_n と D_n との関係を図-4 に示す。両者の関係を、 a, b を定数とした直角双曲線 (式2) で近似すると

$$\alpha_n = a * D_n / (b - D_n) \quad (2)$$

$a=-87.8, b=-73.2, R^2=0.652$ となった。

図-4 にもみられるように、それぞれの D_n の値に対しても α_n の値はばらついていた。

3. 枝長比 樹幹先端から枝が湾曲し始める枝元までの距離 d は個体によりばらつきがあり、21~74cm の範囲の値を示した。枝長比 L_n / l_n も枝の天頂角と同様に、枝が曲がり始めた位置からその枝元までの深さ D'_n が 200~300cm 程度までは D'_n の増加とともに急激に増加し、それ以降は頭打ちになる傾向がみられた。3 個体分のデータをひとつにまとめた場合の L_n / l_n と D'_n との関係を図-5 に示す。 L_n / l_n は 1 以上の値をとるため、両者の関係を、 a, b を定数とした以下の直角双曲線 (式3) で近似すると、

$$L_n / l_n = a * D'_n / (b - D'_n) + 1 \quad (3)$$

$a=-0.20, b=-41.9, R^2=0.270$ となった。

図-5 にもみられるように、それぞれの D'_n の値に対しても L_n / l_n の値はばらついていた。

IV 考察

1. 枝の方位角 本研究の結果から、主幹から枝が発生する方位角は、直前に出た枝の方位角の影響を受けていると考えられた。多くの枝は直前に出た枝とある一定の方位角のズレをもって出るが、そのばらつきも大きい。上下で連続して出る枝の方位角の格差は種によって異なり、 135° のとき上下の枝の重なりが少なく、モジュールの受光効率がよく理想的な枝の出方であるというシミュレーション結果も出ている(8)。本研究のスギの結果では、理想的な 135° に近い $140\sim160^{\circ}$ の区画の頻度が最も高く、比較的効率よく光を受けられる枝の出方といえる。

図-2に示したように $\Delta \theta_n$ は D_n とは無関係で、樹齢や樹冠の発達に伴って $\Delta \theta_n$ が変化するわけではないと考えられた。幹の極端なねじれや枝の枯死がない限り、上下の枝の方位角格差 $\Delta \theta_n$ は枝が発生した時点で決まる。樹幹頂部は横方向に十分な空間が確保されており、樹幹頂部における枝の出方は隣接個体との距離や植栽密度にも影響されないと考えられる。

一方で $\Delta \theta_n$ が大きくばらついた(図-3)ことから、実際の枝の方位角は、種特異的な方位角格差のみで決まるわけではなく、様々な要因も影響していることが分かる。個々の樹冠が画一的なものとならず多様なバリエーションをもつのは、こうした分枝方位角のばらつきにも一因があると考える。

2. 枝の天頂角・枝長比 一次枝は、最初主幹から鋭角的な天頂角でほぼ直線的に出現し、加齢に伴う枝の成長とともに天頂角や枝の湾曲程度が大きくなることを本研究は示した。天頂角の広がりは枝の成長による重力の増加に起因するのであろう。また、枝長比で表される枝の湾曲程度が、樹冠深度とともに大きくなる点は枝の天頂角の広がりと枝が垂直上方に伸長しようとする動きの総合作用による結果と考える。

また、本研究は、枝の天頂角が約 90° 、枝長比が約1.2の値に収束することも示した。天頂角や枝長比がこの程度の値で収束するのは、林冠閉鎖による枝の枯れ上がりや、隣接個体との接触による物理的制約に起因する可能性がある。その場合、個体間の距離や個体密度によって収束する値が異なってくることも考えられる。今後、異なる条件下での調査が必要であろう。

まとめ

本研究では、枝葉モジュールから樹冠の再現を念頭に

おいて、一次枝の分枝角度や湾曲に関する特徴を明らかにした。樹冠の再現ではシミュレーションモデルが有効であり(2)、その際本研究で明らかにした分枝特徴は重要な情報となる。しかし、方位角格差 $\Delta \theta_n$ や天頂角 α 、枝長比 L_n / l_n の実測値には大きなばらつきがみられた。本研究ではこうしたばらつきの原因までは詳細に調べていない。複雑な要因が絡んだ現象の全要因の関係を完全に解明することはほぼ不可能である。結果に大きな影響を及ぼす主要因以外の複数の細かな要因はばらつきとしてとらえ、確率的に表現する方が現実的なアプローチといえる。樹冠再現のシミュレーションモデルを構築するうえで、本研究でみられたばらつきを定量的に表すことが今後必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、科学研究費補助金基盤(B)20380088「風害リスクを制御する林冠分断と修復シナリオ-葉群動態と先端流体力学とのリンク」による援助を受けた。野外調査では森林総合研究所千代田苗畠の鈴木利明氏に協力いただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

引用文献

- (1) 安藤貴 (1982) 林分の密度管理. 126pp., 農林出版, 東京.
- (2) HONDA, H., TOMLINSON, P.B. and FISHER, J.B. (1982) Tow geometrical models of branching of botanical trees. Ann. Bot. 49:1-11.
- (3) 石井弘明 (2006) 樹木生理と森林群落動態をつなぐ樹型研究. 日林誌 88 : 290-301.
- (4) 隅田明洋 (1996) 広葉樹群落の空間構造—個体レベルからのアプローチ—. 日生態誌 46 : 31-44.
- (5) SUMIDA, A., TERAZAWA, A., TOGASHI, A. and KOMIYAMA, A. (2002) Spatial arrangement of branches in relation to slope and neighbourhood competition. Ann. of Bot. 89:301-310.
- (6) TAKENAKA, A (1994) A simulation model of tree architecture development based on growth response to light environment. J. Plant Res. 107: 321-330.
- (7) 植木達人 編著 (2007) 列状間伐の考え方と実践. 203pp., 全国林業改良普及協会, 東京.
- (8) 渡邊昭・篠崎一雄・寺島一郎 監修 (1999) 植物の環境応答. 216pp. 秀潤社, 東京