

## 林内地形因子が単木の樹高成長に与える影響の解析

高橋與明・山本一清・竹中千里・梅村武夫

名古屋大学大学院生命農学研究科附属稲武演習林内の45年生スギ人工林内において、微小な沢を含みかつ地形変化が急激な小流域に30m×35mのプロットを設置し、上層木の樹高成長と地形因子の関係を検討した。プロット内の上層木樹高と斜面方位の間にはわずかながら有意な相関関係が認められたが、沢からの距離、立木位置の傾斜角及び標高と上層木樹高の間にはいずれも有意な関係が認められなかった。以上のことから、本研究で対象とした小流域においては地形の起伏は上層木樹高の成長にほとんど影響を与えないことが示唆された。

キーワード：傾斜角、沢、上層木樹高、スギ、標高

### I. はじめに

森林の施業法を考えるにあたり、林分構造とくに樹高と林内地形との関係が詳細に把握されれば、それは重要な情報となるであろう。これらの関係を詳細に把握するためには、対象とする林分において直接測定を行えば把握可能であるが、対象とする林分が広域なほど、地形条件が悪いほど、また入山が困難なほどこれらの把握が困難となり、現実にはそのような関係を明確にするには相当な労力と時間を要する。一般的には、標高が高くなると樹高は低くなること(山田1955)や尾根付近より沢付近の方が樹高は高いこと(金森・川崎1994; Chen and Abe 1999)などが知られているが、従来の施業法において実質的にはこのことは考慮されず、無視されてきたのが実状である。しかし、樹高と林内地形との詳細な関係の把握が容易にできるのであれば話は変わってくる。

近年、大規模な森林における樹高や林内地形の短期間での把握や入山不可能な林分におけるこれらの把握に貢献する技術として、航空機にレーザー測距儀、Global Positioning System (GPS: 汎地球測位システム)装置及びInertial Measurement Unit (IMU: 慣性計測装置)等を搭載した航空機レーザースキャナシステムにより、林冠表面の三次元座標を直接測定するという手段が試みられている(Nilsson 1996; Magnusse *et al.* 1999; 田村・高槻2000; 高橋2000)。

スギ人工林など鬱閉した林分においては、航空機レーザースキャナシステムの三次元測量により得られるデータは上層木により形成される林冠表面の三次元座標のみであり、樹高を直接測定することができないため、林分の単

木の樹高を把握する際、正確な地形情報があらかじめ用意されていないとそのデータを利用することができない。そのため、ギャップや沢などの地表面の座標を利用して樹高を測定する方法が考えられている(Nilsson 1996; Magnusse *et al.* 1999; 田村・高槻2000; 高橋2000)。しかしギャップは無数には存在しないため、それら少数の地面の座標と林冠表面の三次元座標から樹高や林内地形を推定することになる。

Chen and Abe (1999)は、スギ人工林における林分平均樹高と地形因子との関係から、斜面方位については南向き→東と西向き→北向きの順に、また、斜面位置については尾根→斜面→沢の順に平均地位指数は上がると指摘している。Chen and Abe (1999)は約687haのスギ人工林において、尾根から沢までが水平距離にして50m程度あるような地域を選択し、そのように大きなスケールで林分を見た場合の尾根や沢における林分レベルでの平均樹高と地形因子の関係を調べた。一方、より小さいスケールで見た場合、とくに微小な沢を含みかつ地形変化が急激であるような局地的な場所に関して、地形因子が単木の樹高成長に与える影響や単木の樹高成長のばらつきを詳細に研究した報告はない。このような小さいスケールにおける地形変化の急激な場所で、地形因子が単木の樹高成長に特異な影響を与えていた場合、上層木林冠表面と林内地形との間に大きな隔たりが生じ、少数の地面座標と上層木林冠表面の三次元座標から推定される林内地形は、現実のものとは大きく異なる可能性が考えられる。一方、地形因子が単木の樹高成長に特異な影響を与えていない場合、少数の地面座標と周囲の上層木林冠表面の三次元座標から周囲の上層樹高を推定し、上層樹高を差し引くことによって現実に近い林内

地形を推定することが可能となる。したがって、航空機レーザースカナーシステムによる森林での詳細な樹高の把握や林内地形の正確な推定のためには、まず地形因子がとくに単木レベルでの樹高成長に与える影響を詳細に検討することが必要となる。

以上のことから、本研究では航空機レーザースカナーシステムによる樹高計測および林内地形推定のための予備調査として、林分内に存在する微小な沢を含み、かつ地形変化が急激であるような林地において、正確な地形測量および樹高測定を行った上で、(1)林内地形因子が単木（特に上層木）の樹高成長に与える影響、(2)上層木林冠表面からの林内地形の推定および樹高推定の可能性、についてそれぞれ検討した。

## II. 調査地および調査方法

愛知県北設楽郡稲武町の名古屋大学大学院生命農学研究科附属稲武演習林内の45年生スギ人工林で調査を行った。対象林地では、2つの微小な沢が西向き大きな斜面の中をそれぞれ縦と横に流れており、ほぼ直角に合流している。

まず始めに、2つの沢に挟まれた小規模な凸型地形のほぼ全域とその周辺にて、水平距離で35 m (X) × 30 m (Y) のプロットを設定した。次にレーザー・デンドロメータ LEDHA-GEO (JENOPTIK Inc) により、2.5 m (X) × 1.0 m (Y) を1メッシュ単位として合計420個のグリッドをプロット内の地表面に設置後、そのグリッドをもとにプロット内で地形測量を行った。地形測量は、Y軸上のメッシュ交点(0, y) (ただし、y=0~30)を原点とし、X軸方向に(0, y) ~ (35, y) のライン上を地形の変化に合わせて1 m未満の間隔で、点(0, y)との高低差(cm)及び点(0, y)からの水平距離(cm)をレーザー・デンドロメータにより測量した。プロットの林内地形の詳細図を図-1に示す。

地形測量ののち、同じくレーザー・デンドロメータを用い、プロット内の枯死木を除く全立木について10 cm活約で樹高(H)を測定した(表-1)。また、地表面に設置したグ

リッドをもとに測量用ポールと巻尺により樹木の位置座標(X, Y)を正確に測定し、樹木位置の標高は後述する Digital Elevation Model (DEM: 数値標高モデル) により算出した。

## III. 解析

航空機レーザースカナーシステムによる林冠表面の三次元測量では、得られるデータのほとんどが上層木林冠表面の三次元座標である。そのため、解析対象としては上層木のみを対象とした。標高(海拔高)に関しては、微地形を追う上で原点からの高低差、すなわち原点からの相対標高を用いて解析する方がわかりやすいと判断し、本研究では以後原点からの相対的な標高を単に標高、地形の標高を地形標高( $H_2$ )、さらに上層木林冠表面の標高を林冠標高( $H_c: H_c = H_2 + H$ )とする。

地形測量によって得られたデータを、LINUX OS上のGeographical Information System (GIS: 地理情報システム) ソフト GRASS 4.2 上に取り込み、スプライン補間機能(2次式)により0.1 mメッシュのDEMを作成した。DEMを3次元表示したものが図-1である。また、実測で得られた樹木位置(図-2)の(X, Y)座標をもとに、GRASS 4.2を利用して、0.1 mメッシュのDEMから樹木位置の標高( $H_2$ )を算出した。

Chen and Abe (1999) は、林分を大きなスケールで見た場合に、沢からの距離が樹高成長に影響を与えていると指摘したが、この関係が本研究で対象とする微小な沢においても成り立つと仮定すると、本研究対象林地においても沢からの距離と樹高成長の間に何らかの関係が認められるはずである。図-1に示したように、対象林地には西向き大きな斜面のほぼ中央を流れる微小な沢(sw1)と、sw1に対しほぼ直角に流れる微小な沢(sw2)が存在する。本研究では、sw2にほぼ平行なX軸に沿った幅2.5 mのトランセクト群( $X_1, X_2, \dots, X_{14}$ : 以後Xトランセクト群と呼ぶ)、およびsw1にほぼ平行なY軸に沿った幅2.5 m

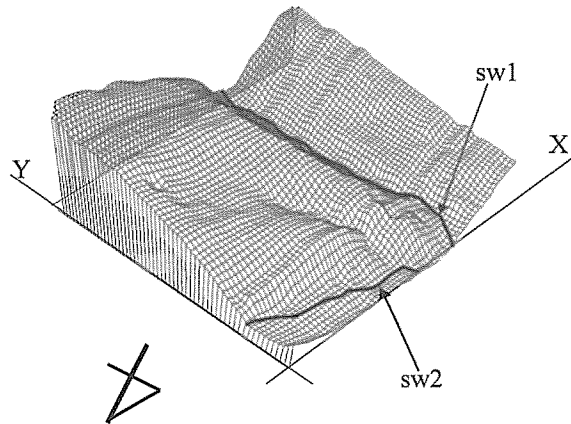


図-1. 対象林地鳥瞰図

表-1. 調査プロットの総括表

	本数	密度
全体	214	2038本/ha
上層木	117	1114本/ha
	平均	分散
樹高(全体)	20.2 m	7.73
上層木樹高	21.6 m	3.47
直径(全体)	21.2 cm	32.3
上層木直径	23.8 cm	26.3

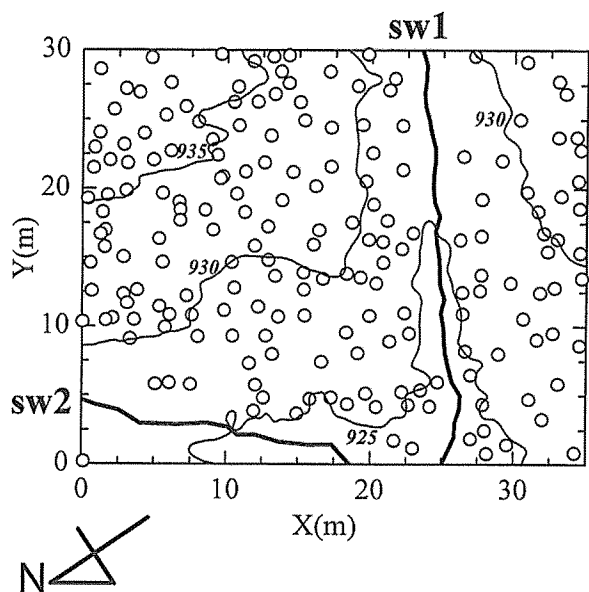


図-2. プロット内における樹木位置図及び等高線

のトランセクト群 ( $Y_1, Y_2, \dots, Y_{12}$ : 以後 Y トランセクト群と呼ぶ) を想定し (図-3), X トランセクト群のそれぞれのトランセクトにおいては sw 1 からの, Y トランセクト群のそれぞれのトランセクトにおいては sw 2 からの距離と樹高を比較することにより, それぞれの沢からの距離が樹高成長に与える影響を詳細に検討した。

次に, Chen and Abe (1999) が沢からの距離以外にも樹高成長に影響を与える因子として指摘している斜面方位についても, 0.1 mDEM から GRASS 上で算出した樹木位置周囲の斜面方位と樹高の関係から, 樹高成長に与える影響を詳細に検討した。

また, 本研究調査地では sw 1 を挟む両側の小斜面の傾斜角がとくに大きいため, 樹高成長に影響を与える地形因子として斜面の傾斜角にも着目し, 0.1 mDEM から GRASS 上で算出した樹木位置周囲の傾斜角と樹高の関係から, 樹高成長に与える影響を検討した。斜面方位と傾斜角に関する解析では, 樹木位置周囲の 0.1 mDEM から樹木を含む 2.5 m メッシュの平均斜面方位と平均傾斜角を算出し, それを解析に用いた。最後に, 上層木林冠表面からの林内地形の推定および樹高推定の可能性を検討するため, 地形標高と樹高との関係, および地形標高と林冠標高との関係を調べた。

#### IV. 結果

Y 軸及び X 軸水平距離と樹高 ( $H$ ) との関係については,  $X_6, X_8, X_{14}$  トランセクト ( $p < 0.05$ ) を除くすべての X および Y トランセクトにおいて, 沢からの距離と樹高との間に有意な相関は認められなかった ( $p > 0.05$ ) (表-2)。一方, 斜面方位に関しては, 本研究対象林地は北向き斜面と西向

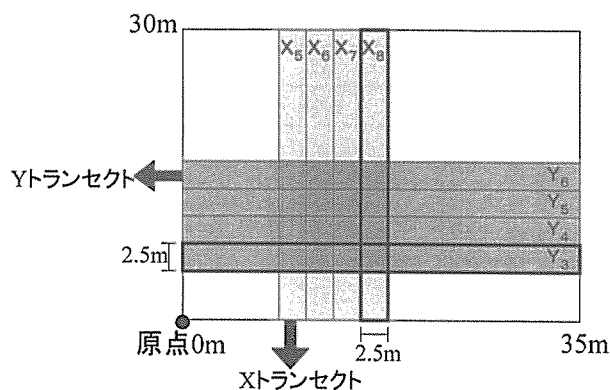


図-3. X トランセクト, Y トランセクトの概念

き斜面に大別され (図-4), 分散分析の結果 (表-3), 北 (平均樹高 22.00 m) は西 (平均樹高 21.15 m) に比べて有意に樹高成長が高かった ( $p < 0.01$ )。また, 傾斜角と樹高との間に有意な相関は認められなかった (図-5)。

最後に, 林分全体における地形標高 ( $H_z$ ) と樹高 ( $H$ ) および林冠標高 ( $H_c$ ) との関係においては,  $H_z$  と  $H$  の間には有意な関係は認められず,  $H_z$  と  $H_c$  との間に有意な相関が認められた。また, 回帰分析の結果,  $H_z$  と  $H_c$  との関係は

$$H_c = 21.5 + 1.02H_z \quad (R^2 > 0.79) \quad (1)$$

で表された (図-6, 7)。

#### V. 考察

ほとんどすべての X および Y トランセクトにおける沢からの距離と樹高の関係 (表-2) が示すように, 樹高成長に与える沢からの距離の影響は認められなかった。また, 図-6, 図-7 に示したように, 林分全体における地形標高と上層樹高の間に有意な相関は認められず, (1) 式の地形標高 ( $H_z$ ) と林冠標高 ( $H_c$ ) の関係における回帰直線の傾きがほぼ 1 であることから, 林分全体で見た場合, 地形標高と林冠標高はほぼ平行であると考えられる。Chen and Abe (1999) は, 林分を大きなスケールで見た場合に, 沢での平均的な樹高成長は尾根や斜面よりも良いとしているが, 本研究で対象としたこのような局所的な林地における単木の樹高成長には, この関係はあてはまらないと考えられる。また, 本研究対象林地は傾斜角が  $40^\circ \sim 60^\circ$  のような急斜面を含んでいるが, 図-5 に示したように, 傾斜角と樹高の間には有意な関係が認められず, 単木の樹高成長に傾斜は影響を与えないものと考えられる。これらの結果が示すように, 沢からの距離や傾斜角など林内地形の形状に関しては, 単木の樹高成長に与える影響は無視できるであろう。

次に斜面方位と樹高との関係では, Chen and Abe (1999) は林分を大きなスケールで見た場合, 斜面方位と平均樹高成長の関係に対し, 南向き→東と西向き→北向きの順に平均地位指数が上がるとしているが, 本研究対象林地におい

表-2. 各トランセクトにおける沢からの距離と樹高の相関

X トランセクト	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
相関 R	0.18	0.08	0.5	0.37	0.71	0.84*	0.37	0.92*	0.47	0.03	0.61	0.26	0.34	0.68*
Y トランセクト	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12		
相関 R	0.49	0.26	0.14	0.44	0.05	0.4	0.18	0.12	0.31	0.43	0.01	0.13		

\*は有意な相関関係 ( $p < 0.05$ ) が認められたことを示す。

表-3. 分散分析表

変動要因	変動	自由度	分散	観測された分散比	p 値
方位間	16829	1	16829	9555	$p < 0.01$
方位内	328	186	1.76		
合計	17157	187			

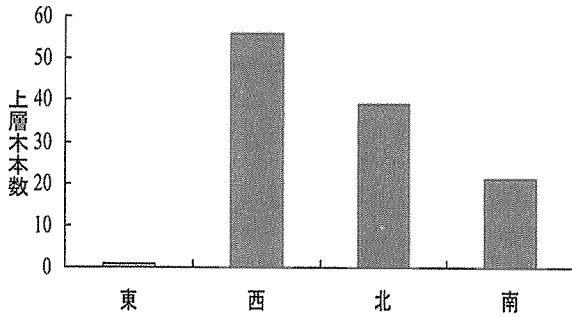


図-4. 樹木位置周囲の斜面方位の分布

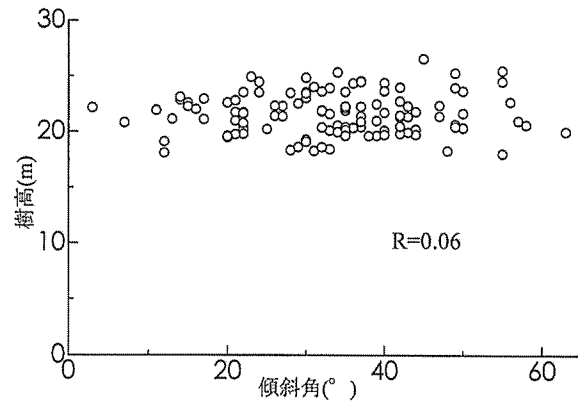


図-5. 林分全体における傾斜角と樹高との関係

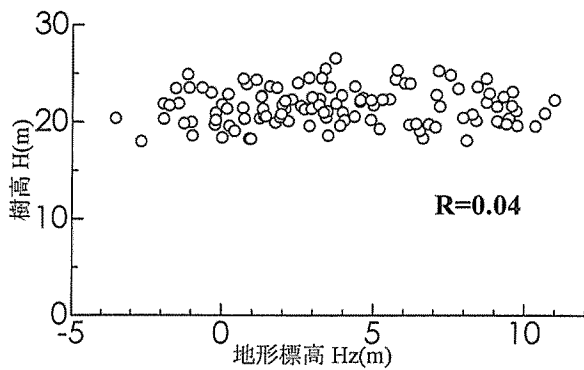


図-6. 林分全体における  $H_z$  と  $H$  との関係

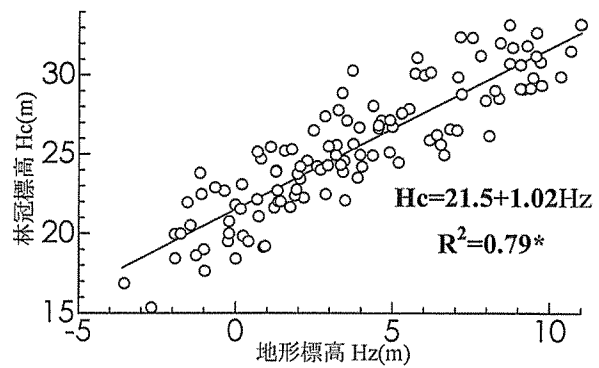


図-7. 林分全体における  $H_z$  と  $H_c$  との関係

ても Chen and Abe (1999) の報告と同様の結果が示された。しかし、北斜面と西斜面での平均樹高の差は 0.85 m であり、その差はそれほど大きくないと考えられる。

以上のことから、林分を小さいスケールで見た場合、微小な沢を含み、かつ標高差 10 m 程度の中で地形変化が急激であるような局地的な場所において、上層木林冠表面は林冠下の地形をほぼ反映しており、航空機レーザーシステムを利用して上層木林冠表面およびギャップ等の地表面の三次元座標を確実に取得することができれば、現実に近い林内地形の推定および樹高推定が可能であることが示唆された。

### 謝 辞

本研究は日本学術振興会および文部省科学研究費補助金(11660145, 11794031)の補助を受けて行った。関係各位に感謝したい。また、調査に御協力くださった名古屋大学の中澤昌彦氏、富岡利恵氏、水野裕子氏、武田和明氏に、また、本研究に対し貴重な御助言を頂いた名古屋大学の林 隆男氏、赤谷正之氏に心から感謝申し上げる。

### 引用文献

- Chen J. and Abe N. (1999) Site classification for plantations using GIS. *J. For. Plann.* 5 (1): 1-8.
- 金森富士雄・川崎圭造 (1994) 同一斜面における土壌水分とカラマツの成長. *日林論* 105: 229-232.
- Magnussen S., Eggermont P. and LaRiccia V.N. (1999) Recovering tree heights from airborne laser scanner data. *For. Sci.* 45 (3): 407-422.
- Nilsson M. (1996) Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sens. Environ.* 56: 1-7.
- 高橋佳昭 (2000) 航空機レーザープロファイラーの地形測量への応用. *写真測量とリモートセンシング* 39 (2): 14-18.
- 田村正行・高槻幸枝 (2000) 航空機レーザーシステムによる樹高計測. *写真測量とリモートセンシング* 39 (2): 8-13.
- 山田昌一 (1955) 微細地形解析に関する森林立地学的研究. pp. 172-180. 林野共済会, 東京.

### The effects of topographical factors on tree height growth

Tomoaki TAKAHASHI, Kazukiyo YAMAMOTO,  
Chisato TAKENAKA and Takeo UMEMURA

We analyzed the relationship between dominant tree height growth and topographical factors within a 45-year-old sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation in the Nagoya University Forest. Within the forest, a 30 m×35 m plot where included two small streams was established, and the geographical features and tree heights of all trees within the plot were measured. The dominant tree height within the plot did not show any significant correlation with the distance from the streams to the tree, the angle of inclination around the tree, and the altitude of the tree. These results suggested that the topographical factors within the forest would not affect the dominant tree height growth.

**Keywords:** altitude, dominant tree height, inclination, stream, sugi