

地形因子に基づくスギ樹高成長の空間変動モデル —リモートセンシングによる効率的な森林調査にむけて—

櫻井聖悟, 伊藤達夫

Modeling Spatial Variation in Height Growth of Japanese Cedar Based on Topographical Factors —Toward Effective Forest Inventory by Remote Sensing—

Shogo SAKURAI, Tatsuo ITO

Abstract: Height growth of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D.Don) is affected strongly by moisture condition and is very good in a specific site. Because the use of low or medium resolution satellite imagery is restricted to stand level analysis, there is no room to consider the spatial variation of height growth in a stand with such imagery. On the other hand, using high resolution satellite imagery may provide more precise estimates of stand variables (e.g. stand volume) effectively when the site of very good height growth is treated separately from other site. The purpose of this study is to develop a model of spatial variation in height growth of Japanese cedar based on some topographic variables derived from digital elevation model.

Keywords: スギ(*Cryptomeria japonica* D.Don), 地形条件 (topographic conditions), 樹高成長 (tree height growth), 重回帰分析 (multiple regression analysis), リモートセンシング (remote sensing)

1. はじめに

地球温暖化の緩和を目的とし、温室効果ガスの削減目標を示した京都議定書が 2005 年 2 月に発効した。限定つきながら排出削減目標の達成に森林による二酸化炭素の吸収量を利用できることとなり、広域の森林に対する蓄積や成長量の計測が盛んに議論されている。森林のもつ広域性からその調査への応用性が期待されるリモートセンシング分野においては、センサの高分解能化や三次元計測など技術発展が著しく、解析対象や方法

が多様化してきている。

一方、わが国の主要造林樹種であるスギの樹高成長は個体差に加えて、その場所の土壌の肥沃度や水分状態といった土地条件によって変化する。つまり、同齢林内であっても、斜面上部と下部といった土地条件が異なれば、樹高成長に差が生じる (真下, 1983)。森林科学の分野では、効率的な木材生産を行うために、樹齢 40 年における樹高を地位指数と呼び、その土地における林地生産力の指標とし、その推定のために多くの研究が行われてきた (例えば, Zushi, 2007 ; 美濃羽ら, 2005)。しかし、これらの研究の目的は、林分単位で地位指数を求めるものであり、林分内での単木的な樹高の空間変動を扱ったものはほとんどない。

櫻井 : 606-8522 京都市左京区下鴨半木町 1
京都府立大学大学院生命環境科学研究科
森林計画学研究室
Tel/Fax 075(703)5635 t_ito@kpu.ac.jp (伊藤)

Landsat などの地上分解能が数 10 メートルというリモートセンシング画像を用いた森林蓄積の推定においては、その解析単位である 1 ピクセルがおよそ 1 林分に相当するため、林分内の樹高成長の局所的な変動を考慮する余地はなかった。しかし、地上分解能が 1m をきる近年のリモートセンシング画像では、同齢単純林内での樹高の空間的な変動が、蓄積等の推定に影響を及ぼすため、この樹高の空間的な変動を考慮し、成長状態別の地域区分を行うことで、効率的かつ正確に林分構造を把握できる可能性がある。

そこで本研究では、リモートセンシングにより効率的に森林調査を行うために、事前情報としてのスギ樹高成長の空間変動を、標高データから算出できる数個の地形要因を用いて推定することを試みた。

なお、解析には ESRI 社製 ArcView 9.1 とその拡張機能である 3D Analyst, Spatial Analyst, Geostatistical Analyst を使用した。

2. 資料と方法

2.1. 研究対象地

研究対象地は、京都府立大学付属大野演習林に設定された測定試験地、第 2 施業試験地、第 3 施業試験地である（図-1）。大野演習林は、京都府中部に位置する南丹市美山町にあり、由良川水系上流の水源地帯に属しており、その林地面積は 402.76ha である。測定試験地は、1916 年植栽のスギ林に対して 2.6ha の面積で 1957 年に設定された（設定当時の林齢 41 年）。図-1 からわかるとおり東向きの斜面がほとんどを占めるが、小さい谷を中心に凹地形を示し、谷から尾根までを含んでいる。第 2 施業試験地は、1954 年植栽のスギ林に対して 0.1ha の面積で 1968 年に設定された（設定当時の林齢 14 年）。北向き斜面で凸型に膨らんだ地形である。第 3 施業試験地は、1979 年植栽のスギ林に対して 0.1ha の面積で 1989 年に設定された（設定当時の林齢 10 年）。東向き斜面で、図-1 ではわかりにくいだが、試験地の北半分は小さな谷地形に面している。樹高測定年は表-1 の

表-1. 試験地樹高測定概要

	測定試験地	第2施業試験地	第3施業試験地
面積 (ha)	2.46	0.1	0.1
測定年 (西暦)	林齢 (年)		
1964	48		
1971		17	
1976		22	
1981		27	
1983	67		
1986		32	
1989			10
1991		37	
1993	77		
1994			15
1996		42	
1999			20
2001		47	
2003	87		
2004			25

通りで、現在までに測定試験地では 4 回、第 2 施業試験地では 7 回、第 3 施業試験地では 4 回測定されている。

2.2. 樹齢 40 年時の樹高の推定

各試験地において、樹齢 40 年時の樹高（以下、 H_{40} ）が測定されていないため、樹高測定結果に Richards 成長関数（式-1）をあてはめ H_{40} を推定した。

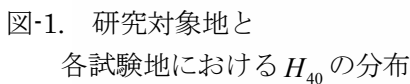
$$H = A (1 - e^{-kt})^{\frac{1}{1-m}} \quad (1)$$

ここで H は林齢 t における樹高、 A 、 m 、 k はそれぞれ、樹高の漸近値、変曲点の相対的位置、成長速度に関するパラメータである。Richards 成長関数はパラメータ数が多いため、最小二乗法によるパラメータ推定値が不安定になりやすい。本研究ではそれを防ぐために、試験地ごとにすべての樹高測定結果から、パラメータ m 、 k を推定し固定値として与え、各個体の樹高成長曲線をパラメータ A の値の違いにより表現した。 H_{40} の分布を図-1、表-2 に示す。

表-2. 各試験地における H_{40} の分布

	測定試験地	第2施業試験地	第3施業試験地
本数	1338	146	193
平均 (m)	18.6	16.6	18.7
標準偏差 (m)	3.0	2.1	3.7
最大値 (m)	26.5	20.4	27.3
最小値 (m)	8.6	9.3	11.2

くなる。試験地と大野演習林全体における地形



2.3. 解析に用いた地形因子

北海道地図の発行する 10m メッシュの標高データを用いて作成した TIN をもとに、5m に補完した標高ラスタ（以下、DEM）を作成した。この DEM から、斜面方位 (Aspect, ASP), 斜面傾斜角 (Slope, SLP), 縦断曲率 (Profile curvature, PRC), 横断曲率 (Planform curvature, PLC), 集水面積 (Catchment area, CA), Wetness Index (WI) を算出した。斜面方位は、真北を 0, 真南を 1 とし、水分条件のよい真北からの相対的な位置を表す変数として用いた。縦断曲率は、勾配方向の凹凸、横断曲率は勾配方向に直行する軸に沿った凹凸を表す。また、集水面積は対数変換した値を用いた。Wetness Index (WI) は土壌の保水条件を特徴付けるために用いられる指標であり、以下の式で表される (Beven, 1997)。

$$WI = \ln(CA / \tan SLP) \quad (2)$$

集水面積が大きく傾斜が緩い場所ほど値が高く、
集水面積が小さく傾斜が急な場所ほど値が小さ

因子の値の分布を表-3 に示す.

2.4. 方法

DEM をもとに算出した地形因子を説明変数、 H_{40} を目的変数とし、重回帰分析を行った。説明変数と目的変数間の相関行列を図-2 に示す。重回帰モデルを総当り法により構築し、赤池情報量基準 (AIC) により、変数変換を施しながら最適モデルを得た。結果の汎用性を高めるために、大野演習林全体にモデルを適用し、地域的な偏りや、異常値を予測しないか確認したうえで、最終的なモデルを得た。

3. 結果と考察

重回帰分析の結果，次式を得た ($R^2=0.20$).

$$H_{m40} = -37.431 \times (1/WI) - 1.626 \times ASP + 0.095 \times PRC + 25.228 \quad (3)$$

表-4 の通り、WI が最も影響力が強い因子にな

っており、次いで ASP となっている。どちらも

表-3. 試験地と大野演習林における
地形因子の値の分布

InCA			ASP		
割合 (%)			割合 (%)		
InCA	大野演習林	試験地	ASP	大野演習林	試験地
3	8.8	0	0.1	8.5	0
4	25.4	1.4	0.2	13.6	15.3
5	37.0	12.0	0.3	12.0	9.7
6	19.3	43.1	0.4	12.4	12.5
7	4.0	20.0	0.5	10.8	14.4
8	1.8	11.5	0.6	11.4	17.5
9	1.3	5.0	0.7	11.2	10.9
10	1.1	2.9	0.8	6.6	11.4
11	0.6	3.3	0.9	7.2	5.5
12以上	0.8	0.7	1.0	6.3	2.9

SLP			PLC		
割合 (%)			割合 (%)		
SLP	大野演習林	試験地	PLC	大野演習林	試験地
10	2.9	0	-15.0	0.1	0
20	5.2	3.5	-10.0	0.8	0.7
30	16.3	20.9	-5.0	3.6	12.0
40	41.9	51.8	0.0	93.2	69.8
50	31.1	19.9	5.0	2.2	15.7
60	2.5	3.9	10.0	0.1	1.4
70	0.1	0.0	15.0	0.0	0.5

PRC			WI		
割合 (%)			割合 (%)		
PRC	大野演習林	試験地	WI	大野演習林	試験地
-15.0	0.1	0	3	4.0	0
-10.0	0.6	0.0	4	22.4	0.3
-5.0	4.9	3.3	5	38.1	9.4
0.0	87.7	95.6	6	24.2	30.8
5.0	5.4	1.1	7	6.1	28.6
10.0	1.0	0.0	8	2.2	12.4
15.0	0.2	0.0	9	1.2	7.9
			10	0.7	4.8
			11	0.4	2.9
			12以上	0.6	2.8

表-4. 重回帰分析の結果

説明変数	偏回帰係数	標準化 偏回帰係数	F	p
1 / WI	-37.431	-0.41	338.99	<0.0001
ASP	-1.626	-0.11	26.50	<0.0001
PRC	0.095	0.07	11.49	<0.0001
定数項	25.228		5146.45	<0.0001

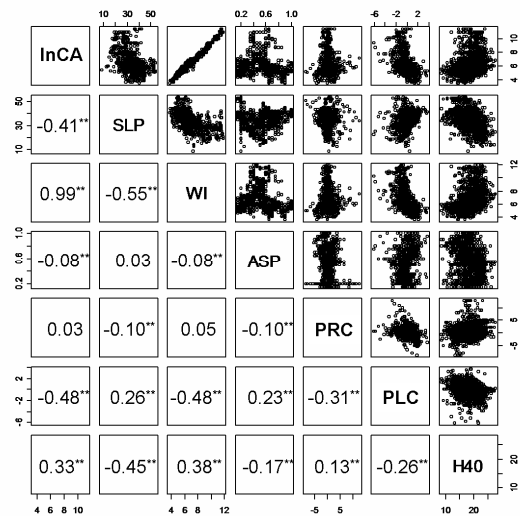


図-2. 説明変数の相関行列 (**:1%, *:5%有意)

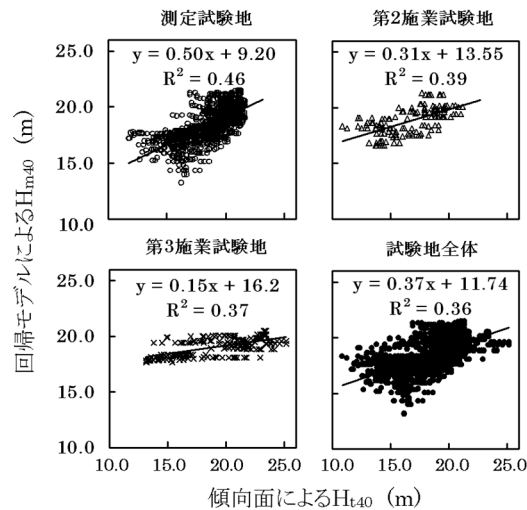


図-4. H_{m40} と H_{t40} の比較

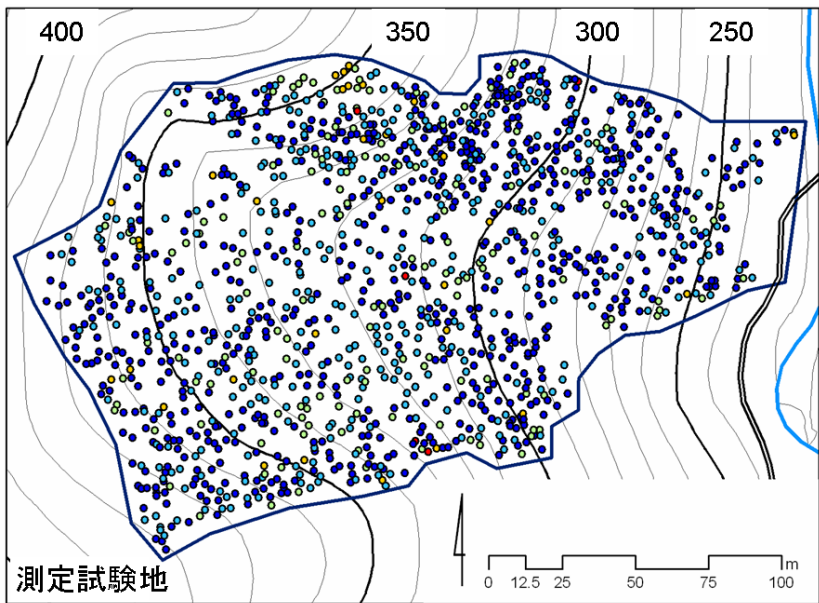
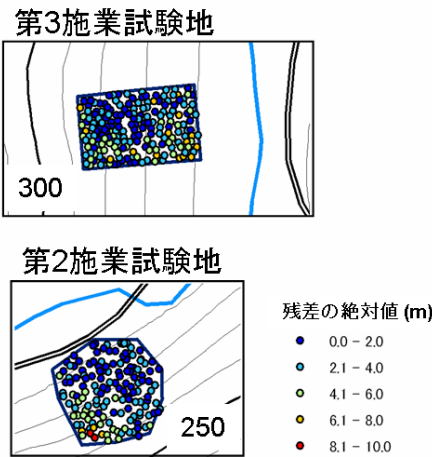


図-3. H_{m40} の残差分布



土壌の水分状態に深く関わる因子であることから、WI が大きいほど、北向きに近いほど樹高成長がよいものと考えられる。また、PRC は選ばれた3つの因子の中で最も影響力が小さい結果となった。PRC は、勾配方向の凹凸を示し、凸地形は一般に尾根型に分類されることが多い。しかしこのモデルにおいては、斜面の水分条件を決める谷や尾根といった大まかな地形区分は WI によってなされており、特に 5m メッシュの標高データで算出した PRC は、タナ地形などの微地形を表していると考えられる。そのため、PRC と H_{40} との間には正の相関関係があり、凸であるほど土壌が厚く樹高成長がよいものと考えられる。

試験地における推定結果と残差分布は図-3 のようになった。残差分布図を見ると、測定試験地においては、残差の分布は一様であり、局所的な偏りは生じていない。第 2, 3 施業試験地においては、多少の偏りがあるが、誤差はその約 85% が $\pm 4\text{m}$ 以内であった。大野演習林全体で、最大 22.8m、最小 11.5m と約 11m の違いが地形因子により表現された。

4. 解析結果の検証

各試験地において、 H_{40} に傾向面を当てはめ (H_{t40})、地形因子を説明変数とした重回帰モデル (式-3) により推定した地位指数 (H_{m40}) とを比較した。なお、傾向面の次数の決定には AIC を用いた。本研究のようにある事象の空間変動をとらえる場合、傾向面モデルは連続的な 1 次空間変動、つまり平均を与えるため、得られた傾向面は H_{40} そのものからみた局所的な地位を表すものと考えられる。AIC による検討の結果、測定試験地では 6 次の傾向面、第 2, 3 施業試験地では 5 次の傾向面が最適であった。 H_{t40} により、測定試験地においては 11.7~21.7m、第 2 施業試験地では 10.9~21.2m、第 3 施業試験地では 13.2~25.1m ままで表現された。

重回帰モデルによる H_{m40} と傾向面による H_{t40} を比較した結果、 $R^2=0.36$ であった (図-4)。

式-3 の回帰モデルは、他の 2 つと比べて 13 倍

の面積と約 4 倍の本数を有する測定試験地のデータに強く依存している。しかし第 2, 3 施業試験地のデータを加えることにより、測定試験地における説明変数の偏りを緩和し、大野演習林全体にモデルを適用する際の過大・過小推定を軽減したと考えられる。大野演習林全体の H_{m40} 推定図を図-5 に示す。

5. おわりに

本研究は、リモートセンシングにより効率的に森林調査を行うための事前情報として、スギの樹高成長の空間変動を、標高データから算出できる地形因子を用いて推定することを目的として、式-3 の回帰モデルを得た。結果の汎用性も考慮し、説明変数には、解析者が閾値を設定する必要のない WI, ASP, PRC を用いた。例としてモデルにより推定された H_{m40} が 20m 以上である地域と、そうでない地域の空中写真上での見え方の違い (テクスチャの違い) を図-6 に示す。赤枠で囲まれた部分が測定試験地内の他の部分に比べて樹木個体の成長状態に影響を受け凹凸が大きいことがわかる。赤枠の内と外で、実際にテクスチャ特徴量がどの程度変化してくるかについては今後の検討課題である。リモートセンシングによる森林調査には、事前情報が不可欠である。本研究のように簡易に広範囲を取り扱える標高データを基に地域区分を行うことは、将来的にはリモートセンシングによる森林の蓄積や炭素固定量の推定に対し、効率や精度の面で貢献するものと考えられる。

本研究の一部は、平成 20 年度社団法人日本森林技術協会学術研究奨励金の助成を受け行った。

参考文献

- 真下育久(1983) 『スギのすべて』。全国林業普及協会(編), 99-123, 全国林業普及協会。
美濃羽靖・鈴木倫史・田中和博 (2005) ニューラルネットワークを応用した地位指数の推定。「森林計画誌」, 39, 23-38。

Beven, K (1997) TOPMODEL: a critique.

Hydrol Process, 11, 1069-1085.

Zushi, K (2007) Regional estimation of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D.

Don) productivity by use of digital terrain analysis. *Journal of Forest Research*, 12, 289-297.

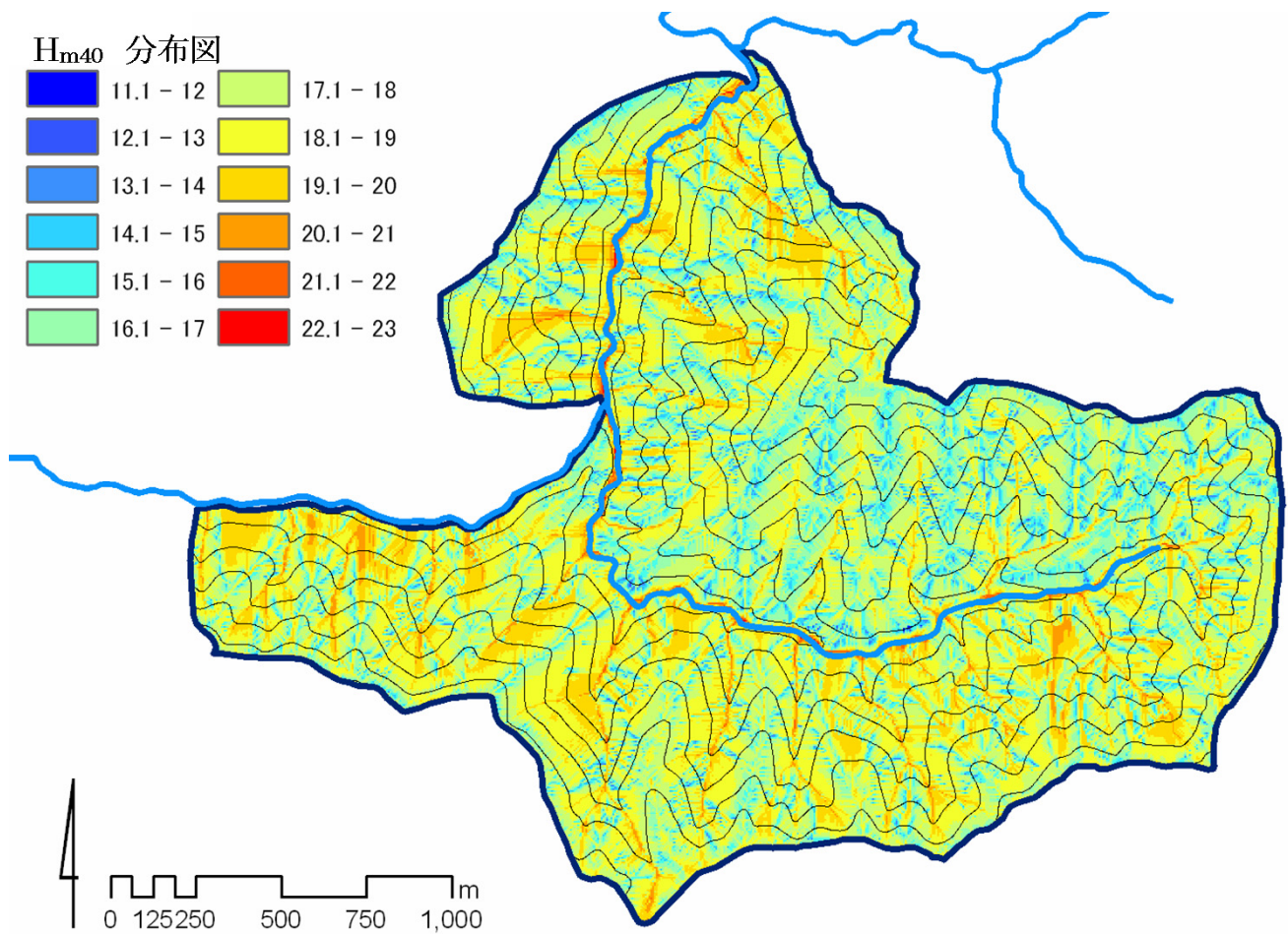


図-5. 回帰モデルによる H_{m40}

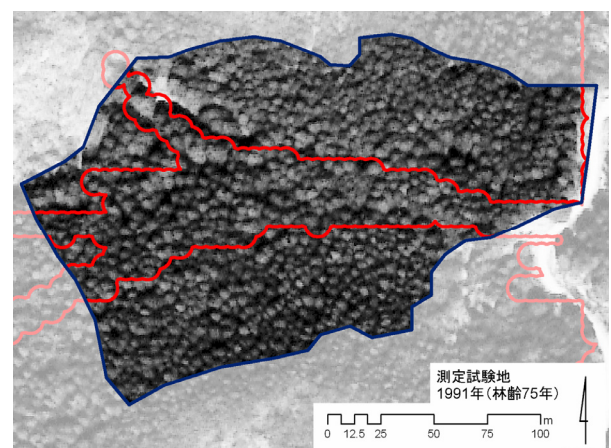
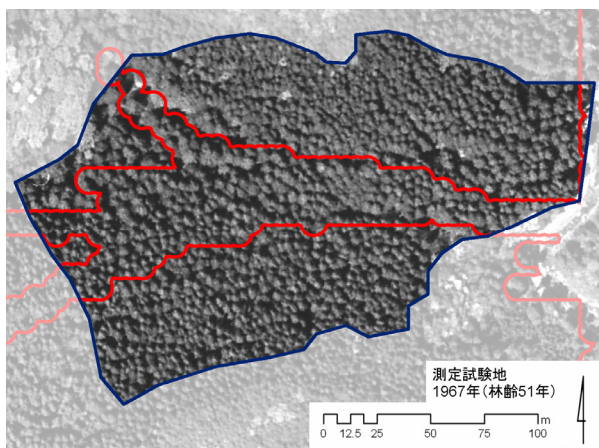


図-6. テクスチャの見え方の違い