

## 高齡級人工林の資源量推定に関する研究 (I)

牧本 卓史

## Prediction of timber volume on mature artificial forest

Takushi MAKIMOTO

## 要 旨

牧本 卓史：高齡級人工林の資源量推定に関する研究 岡山県農林水産総合センター森林研究所研報38：22-29 (2023) 航空機レーザー計測により取得された地形情報を用いて、スギ・ヒノキ人工林の成長と地形条件の関係を明らかにすることにより、従来の成長モデルを補正し、より高精度の森林資源量予測を行う手法を検討した。解析に供した、スギ2,452林分、ヒノキ2,636林分の30m四方のサブコードラートで、地形パラメータとそれぞれの林分の成長動態を解析した結果、両種とも標高800m付近に成長の良否が分かれる境界値が認められ、高標高地域については従来の成長曲線を補正して予測することで精度が向上することが分かった。またスギの場合は地形湿度指数、地形起伏指数及び斜度で、ヒノキの場合は地形起伏指数、斜度及び日照条件で同様の傾向が認められ、それぞれ成長曲線の補正係数を決定した。これらの方法により、従来よりも小さい誤差で人工林資源量の推定が可能になったことに加えて、詳細な地形情報が立地条件を説明するひとつの因子となり得ることが示唆された。

キーワード：GIS, 航空機レーザー計測, 高齡級人工林, 資源量推定

## I はじめに

全国的に多くの人工林が主伐期を超え、岡山県内でも人工林の齡級構成は高齡級に偏りつつある。人工林資源の持続的な利用と森林に求められる様々な機能の効果的な維持のためには、これまで以上に計画的な森林の利用と管理の必要性が高まっていると言える。森林を計画的に管理するためには、森林や林地の特性を知ることが重要であり、とりわけ、その森林の成長特性や資源量を把握することが強く求められる。

包括的な森林の管理については、地域森林計画や市町村森林整備計画に沿って実施されるが、これらの計画の基礎となっている材積等、成長予測やそれに基づく各森林の資源量推定には、一般に地域森林計画の付属資料として県が整備した森林簿や林分収穫予想表が利用されている。森林簿に使用されている森林情報の多くは、昭和中期から始まった編成調査によるものであり、その成長予測は、かつて林分収穫予想表が調整された当時の成長モデルに基づいている。成長モデルは、一般的に各樹種の構成する林分の平均的な成長過程を表現したものであり、必ずしも立地や施業履歴等の特性を反映した個々の林分の状況を正確に表すことはできない。そこで、各林分の樹高成長に基づく地位級を決定し、地位級ごとに予測を行うことでその誤差の軽減を図っている。また、人工林の成長予測は、主に標準伐期齢までを基本として算出されたものであり、それを超える林齢における算出値の信頼度は必ずしも高いとは言えないことから、各所で

長伐期に対応した林分収穫表の改訂が行われている(木戸口ら 2007, 山下ら 2017)。当森林研究所でも、150年生までに対応した林分収穫予想表を作成した(牧本ら 2005)。

森林簿は、大面積かつ長期にわたる森林管理の方向性を決定する上で一定の役割を果たしてきた。一方で、個々の事業者が個別の林分の施業を計画する時、或いは短期的な林業経営を考えると、森林簿の数値を参照する場合があるが、こういった場合には前述のとおり個々の林分データの誤差がしばしば問題にされる。

昨今は、森林におけるレーザー計測とその解析の技術が向上し、広域の大まかな森林情報を、比較的詳細な地形情報とともに把握することが可能になりつつある。とりわけ、地形情報については、これまで地位という概念で表してきた立地条件を、より具体的かつ定量的に表現できる手法が開発されている(Kopecký *et al.* 2020, Reu *et al.* 2013, Riley *et al.* 1999,2017, Rózycka *et al.* 2016, Sorensen *et al.* 2006)。廣瀬ら(2016)は、数値地理情報から算出した地理情報を基に、地位を推定する試みを行った。また、関子(2010)は、数値地形解析によるいくつかの地形条件が地位の分布を説明しうることを示唆した。

本研究では、航空機レーザー計測により取得され、解析が行われた人工林の林況と、同時に取得された地形情報を用いて、人工林の成長と資源量に影響を与える地形

条件を検討し、従来の成長モデルを補正することで、人工林資源量の予測精度を高める方法を開発することを目的とした。

なお、本研究は、2019～2023年度の期間で実施している単県課題「高齢級人工林の資源量推定に関する研究」の中で行ったものであり、本報告は、主に地形情報を用いた成長曲線の補正方法について取りまとめたものである。

## II 調査方法

### 1. 解析供試データの抽出

本研究では、2018年に新庄村が実施した航空レーザー計測成果を、新庄村から提供を受けて用いた。当該成果は、数値地理情報 (Digital elevation model, 以下DEM という) とそれに基づく標高区分図等の地形解析結果及び森林解析の結果を含む。一般に、航空レーザー計測による森林解析は、樹頂点の抽出に始まり、抽出された樹頂点と地表高との差から樹高を算出し、樹頂点を基準として判読した樹冠面積等から胸高直径を推定する (伊藤ら 2008,2011)。また各樹冠の色相を解析し、樹種を決定している。従って、樹頂点抽出の精度がその後の解析成果の精度を大きく左右するが、樹頂点抽出の精度を高めるためには膨大な時間と費用を要するため、通常は大面積の資源量の傾向を大まかに知るための解析では、極めて細かい樹頂点判定の修正は行われない場合が多い。本研究に用いたデータでも、詳細にわたって樹頂点をみていくと、相当数の錯誤判読があることが分かった。また、航空レーザー計測のデータのうち、林齢については森林簿の値が与えられているが、森林簿の記載と解析結果の樹種が異なる林分では与えられた林齢の信頼性が極めて低いと考えられる。しかし、成長動態を解析するためには、ある程度信頼できる林齢のデータが不可欠である。そこで本研究では、全体のデータから、樹頂点の錯誤判読の起こりやすい林縁部や針広混交林を除いた上で、比較的信頼度の高い林齢を参照するために、実際の樹種と解析結果の示す樹種が異なる林分と広葉樹が混交した林分をできる限り除外した上で、計測範囲全体を30m四方のメッシュに分割し、①メッシュの全てが解析結果の示す単一の樹種のまつまり (以下、林相区分という) に含まれること、②そのメッシュの全てが単一の小班単位に含まれること、③そのメッシュを含む林相区分の樹種が森林簿に記載された小班の樹種と一致すること、の3点全てを満たすメッシュをサブコードラートとして抽出し、森林簿の該当する小班に記載された林齢を付与することで解析に供することとした。抽出した林分については、著者ら (2005) が調整した長伐期対応型の成長曲線との適合度を確認した。

### 2. 地形パラメータと林況の解析

DEM と森林解析の結果の一部を使用して地形パラメータを生成するとともに、これらとスギ・ヒノキ人工林の林木の成長と資源量との関係を解析した。

生成した地形パラメータは、DEM から直接読み取ることができる標高の他、地形湿潤指数 (Topographic wetness index, 以下、TWI という)、地形起伏指数 (Terrain ruggedness index, 以下、TRI という)、斜度、日射量とした。各地形パラメータは、2種の GIS ソフト (ESRI 社製 ArcGIS Spatial Analyst, QGIS) の解析ツールを用いて算出し、解析林分を表すポリゴンのラスタ一平均値をその林分の代表値とした。

次に、各解析林分の平均樹高及び平均胸高直径の年平均相対成長率 (Annual Relative Growth Rate, 以下、ARGR という) を算出した。算出した ARGR について、地形パラメータ毎に相関解析を行った。地形パラメータと ARGR との間に相関が認められない場合には、地形パラメータの値を任意の境界値で分け、それぞれの区分ごとの ARGR の分散を分析し、分散が一定程度小さい区間を抽出した上で、分散の小さい区分の集団について従来モデルを補正する係数を決定した。

## III 結果と考察

### 1. 解析供試データの抽出結果と林分の概要

航空機レーザー計測成果に基づく森林解析による新庄村内のスギ、ヒノキの面積は、それぞれ1,365.4ha、1,378.6haで、森林簿に記載された面積は、スギ1,162ha、ヒノキが1,600haであった (岡山県林政課 2018)。森林解析では、それぞれの小班について、樹種毎の優占度に応じて面積を算出している。森林簿でスギと記載されている小班の第1優占種がスギである面積比は、696haで全体の59.9%であった。第2優占種まで含めた場合でも、森林簿と解析結果が一致するスギ林分の面積は743haで全体の63.9%であった。同様に、ヒノキの場合も、森林簿と第1優占種が一致する林分面積は907haで全体の56.7%であり、第2優占種まで含めた場合が、1,025haで64.1%となった (表-1)。本研究に供した解析成果の、樹種の判読については主に色調を解析して行われているが、現地確認を行うと判読樹種の錯誤がある林分も散見された。一方で、森林簿の単一小班の中で、スギとヒノキが混交している林分について、解析の結果区別されたものも一定数あると考えられた。

極力正確な林齢のデータを森林簿から参照するために、森林簿と樹種の一致する30m四方のサブコードラートを抽出した結果、スギ2,452 (220.7ha)、ヒノキ2,636 (237.2ha) が該当した (表-2)。抽出されたスギのサブコードラートは、31～92年生で、平均立木密度は623本・ha<sup>-1</sup>、平均材積は466m<sup>3</sup>・ha<sup>-1</sup>であった。同様にヒノキは、7～

表-1 新庄村における森林簿記載の人工林面積とLiDAR解析による森林面積

森林簿		第1優占種			第2優占種		
樹種	面積(ha)	樹種	面積(ha)	割合(%)	樹種	面積(ha)	割合(%)
スギ	1,162	スギ	696	59.9	スギ	47	4.0
		ヒノキ	109		ヒノキ	93	
ヒノキ	1,600	スギ	226		スギ	191	
		ヒノキ	907	56.7	ヒノキ	118	7.4
その他	2,747	スギ	68		スギ	87	
		ヒノキ	57		ヒノキ	115	

※ "割合"は、森林簿記載の樹種と解析による樹種が一致した面積割合を表す。

表-2 解析に供したスギ・ヒノキ林分サブコドラートの概要

樹種	サブコドラート数	林齢 (範囲,年)	平均立木密度		ha当たり平均材積		平均樹高		平均胸高直径	
			(本・ha <sup>-1</sup> )	範囲(本・ha <sup>-1</sup> )	(m <sup>3</sup> ・ha <sup>-1</sup> )	範囲(m <sup>3</sup> ・ha <sup>-1</sup> )	(m)	範囲(m)	(cm)	範囲(cm)
スギ	2,452	31~92	623	33~1,833	466	27~1,040	23	10~34	33	16~52
ヒノキ	2,636	7~87	1,034	200~2,411	303	1~837	16	4~28	23	7~43

87年生で、平均立木密度は1,034本・ha<sup>-1</sup>、平均材積は303m<sup>3</sup>・ha<sup>-1</sup>であった。いずれも、2005年に長伐期に対応した林分収穫予想表を再調整するために使用した毎木調査による実際の林分のデータよりかなり広い範囲をもっていた。このことは、個々の林木の解析精度の問題とともに、他樹種の混交や施業等の利用履歴の様々な林分が混在していることに起因していると考えられる。

解析に供したスギ、ヒノキの林分について、著者ら(2005)の長伐期に対応した成長曲線との適合度を検討した(図-1)。スギでは、平均樹高及び平均胸高直径

の決定係数R<sup>2</sup>がそれぞれ0.36、0.35であり、また、ヒノキでも、平均樹高及び平均胸高直径の決定係数R<sup>2</sup>がそれぞれ0.44、0.46と、当初期待していたよりかなり低い結果となった。両種とも、平均樹高では、概ね分布の中心付近を成長曲線が通っていることから、決定係数が低かったことについては、成長曲線そのものの問題というより、それぞれの林齢で非常に大きなばらつきが生じていることに起因していると考えられた。また、平均胸高直径では、同様に若齢時からおおきなばらつきを持っているが、成長曲線は分布の中央よりもやや下側にずれて

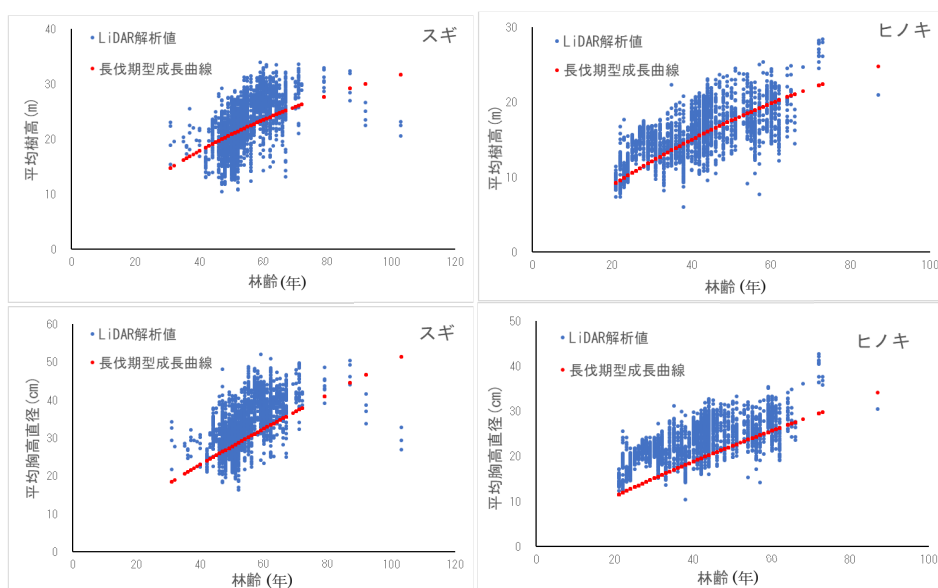
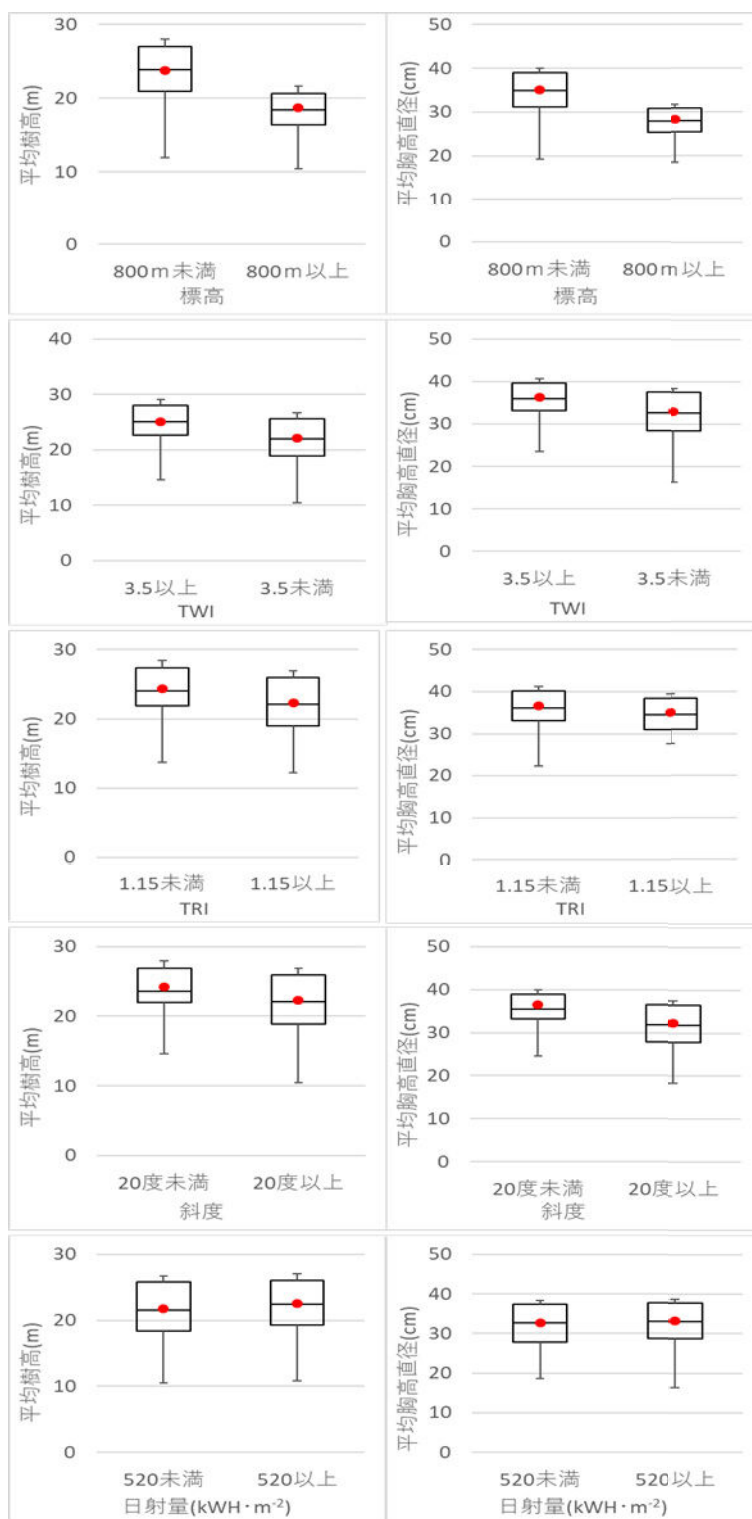


図-1 供試林分の林齢と平均樹高及び胸高直径の関係

いた。このことは、供試林分の平均胸高直径が県下全域で調整した成長曲線によって期待される予測値よりも高いこと、すなわち、やや成長が良好な林分が多いことが示唆されたと考えられる。いずれにしても、著者らが2005年に取りまとめた、毎木調査に基づく解析結果と比べて若齢時から大きなばらつきを持っている点については、今回の多量なデータに樹種の錯誤判読や林齢の錯誤があることが関係している可能性がある。今回の報告で

は調査例が少ないためデータで示さないが、実際の間伐現場に残された伐根から樹齢を判読した結果、50年生以上の林分では、森林簿の林齢と比べて10年程度の誤差が生じている林分が散見された。一方、2005年の報告で使用した毎木調査林分のデータは、現に施業が行われているか、施業履歴の明確な林分を中心に収集したものであり、今回の供試データのように、広範囲の施業履歴も様々な林分を網羅的に集めたものではないため、実際の林



図ー2 地形パラメータの境界値で区分したスギ林の平均樹高及び平均胸高直径の比較

地においては今回のような大きなばらつきが生じていることが不自然とは言い切れない。このようなことから、本研究の解析では、これらの林分データ全てをこの後の地形条件との解析に供することとした。

2. 地形パラメータと林況の解析

スギの平均樹高及び平均胸高直径の ARGR と各地形パラメータの間に明確な相関は認められなかった。しかし、

これらのばらつきの中で分布の幅が小さくなっている区間を見出すことができると考え、それぞれの地形パラメータの平均値を任意の数値で2つに区分し、それぞれの ARGR を比較し、最もその差が大きくなる境界値を探索した。その結果、標高、TWI、TRI、斜度の4つのパラメータについては、ある境界値で分けたときに、その上下で ARGR に有意な差が認められた (Welch の t 検定、図-2、表-3)。また、上記4つの地形パラメータで

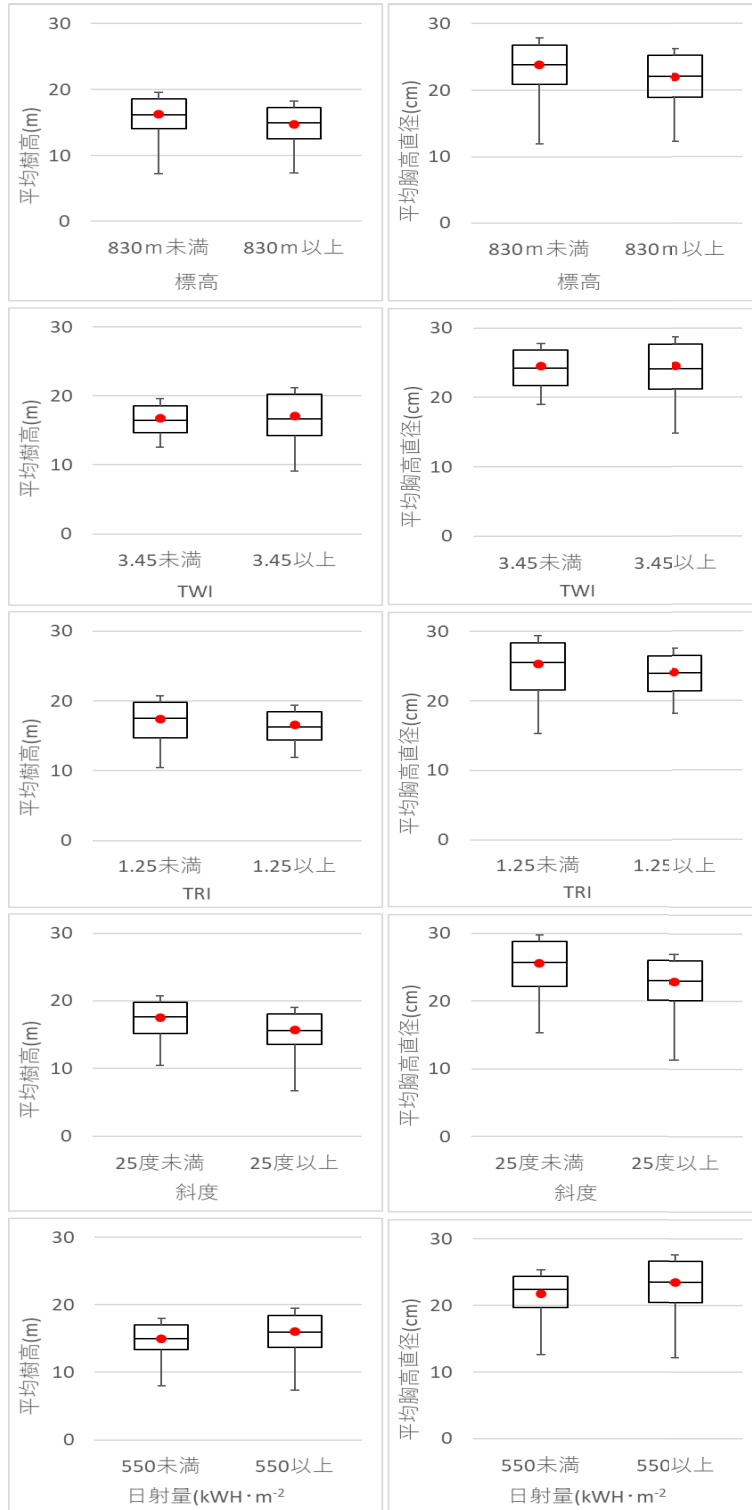


図-3 地形パラメータの境界値で区分したヒノキ林の平均樹高及び平均胸高直径の比較



表-3 地形パラメータの閾値で区分したスギ林のサイズおよび成長特性の比較

	区分	平均樹高 (m)	平均胸高直径 (cm)	年平均相対成長率 (%)					
				平均樹高	平均胸高直径				
標高	800m未満	23.8	**	35.0	**	7.2	**	8.0	**
	800m以上	18.7		28.3		6.9		7.6	
TWI	3.5以上	25.1	**	36.3	**	7.1	*	7.8	N.S.
	3.5未満	22.2		33.0		7.2		8.1	
TRI	1.15未満	24.4	*	36.6	**	6.0	*	6.8	*
	1.15以上	22.3		33.0		5.8		6.6	
斜度	20度未満	24.2	*	36.5	**	7.3	N.S.	8.2	*
	20度以上	22.4		33.2		7.2		8.0	
日射量	520kWh/m <sup>2</sup> 未満	21.7	N.S.	32.7	N.S.	7.1	N.S.	7.9	N.S.
	520kWh/m <sup>2</sup> 以上	22.7		33.5		7.2		8	

※ Welchのt検定において、\*\*はP<0.01, \*はp<0.05でそれぞれ有意差があることを表す。N.S.は有意差なし。

表-4 地形パラメータの閾値で区分したヒノキ林のサイズおよび成長特性の比較

	区分	平均樹高 (m)	平均胸高直径 (cm)	年平均相対成長率 (%)					
				平均樹高	平均胸高直径				
標高	830m未満	16.4	*	23.9	*	9.6	**	10.8	**
	830m以上	14.8		22.0		8.3		9.4	
TWI	3.45以上	15.9	**	23.3	*	9.2	*	10.3	N.S.
	3.45未満	17.1		24.5		9.8		10.9	
TRI	1.25未満	17.4	N.S.	25.3	N.S.	9.3	N.S.	10.5	N.S.
	1.25以上	15.8		23.1		8.8		9.7	
斜度	25度未満	17.5	*	25.6	**	9.3	*	10.4	*
	25度以上	15.8		23.2		8.7		9.6	
日射量	550kWh/m <sup>2</sup> 未満	15.0	*	21.7	**	9.2	N.S.	10.3	N.S.
	550kWh/m <sup>2</sup> 以上	16.1		23.5		9.4		10.6	

※ Welchのt検定において、\*\*はP<0.01, \*はp<0.05でそれぞれ有意差があることを表す。N.S.は有意差なし。

は、林齢と平均樹高及び平均胸高直径についても、同じ境界値で区分することで。それぞれの間に有意な差が認められた (Welch の t 検定)。このことから、各林分が持つ地形パラメータにおいて、一定の条件に合致する林分については、限定された分布域に最もよく当てはまるように成長曲線を補正することで、これまでよりも高い精度で推定値が得られると考えられた。

ヒノキについても同様に、平均樹高及び平均胸高直径の ARGR と各地形パラメータの間に明確な相関は認められなかった。スギと同様にこれらのばらつきの中で分布の幅が小さくなっている区間を見出すことができると考え、それぞれの地形パラメータの平均値を任意の数値で2つに区分し、それぞれの ARGR を比較しながら、最もその差が大きくなる境界値を探索した。その結果、標高、TWI、斜度、日射量の4つのパラメータについては、ある境界値で分けた時に、その上下で ARGR に有意な差が認められた (Welch の t 検定、図-3、表-4)。また、上記4つの地形パラメータでは、林齢と平均樹高及び平均胸高直径についても、同じ境界値で区分することで、それぞれの間に有意な差が認められた (Welch の t 検定)。このことから、ヒノキ林においても各林分が持つ地形パラメータで、一定の条件に合致する林分について

は、限定された分布域に最もよく当てはまるように成長曲線を補正することで、これまでよりも高い精度で推定値が得られると考えられた。

林齢と平均樹高及び平均直径の関係を散布図で表し、前項の地形パラメータ毎の境界値で各点を区分した上で、ばらつきの小さい集団に対して従来の成長曲線を補正する係数を最小二乗法で決定した。それぞれの結果を表-5に示す。

補正した成長曲線で予測した集団については、決定係数 R<sup>2</sup>が、いずれも従来の成長曲線よりも高い値を示し、予測精度が向上していた。標高 800m以上の林地においては、補正係数は1より小さくなり、樹高成長、胸高直径成長ともに全体よりも低くなるのが分かった。TWI、TRI 及び斜度については、いずれも補正係数が1より大きくなったが、TWI が高い林地、TRI が低い林地、斜度が小さい林地は、主に谷筋の緩傾斜地を多く含んでいる。このことは、従来から経験的に言われてきた、谷筋がスギの適地であるという概念を支持するものであると示唆された。一方、スギは実際に谷筋に植栽されているのが一般的であり、日射量において差が生じなかったことは、この点が一因であると考えられた。

スギと同様の方法で決定した補正係数と、補正前後

表一 5 決定したスギ成長曲線の補正係数と寄与率

補正条件	補正係数 上段：樹高 下段：胸高直径	決定係数R <sup>2</sup>	
		補正前	補正後
標高800m以上	0.922	0.763	0.899
	0.941	0.741	0.798
TWI3.5以上	1.074	0.741	0.856
	1.094	0.765	0.822
TRI1.15未満	1.102	0.788	0.834
	1.099	0.723	0.851
斜度20度未満	1.105	0.742	0.840
	1.097	0.755	0.837

表一 6 決定したヒノキ成長曲線の補正係数と寄与率

補正条件	補正係数 上段：樹高 下段：胸高直径	決定係数R <sup>2</sup>	
		補正前	補正後
標高830m以上	0.922	0.763	0.799
	0.941	0.721	0.798
TWI3.45未満	1.025	0.691	0.823
	1.036	0.774	0.847
斜度25度未満	0.959	0.781	0.814
	0.963	0.776	0.827
日射量550kWH/m2以上	1.052	0.688	0.786
	1.073	0.731	0.824

の決定係数R<sup>2</sup>を表一 6 に示す。

ヒノキ林においても、スギ林同様に、補正した成長曲線で予測した集団の決定係数R<sup>2</sup>が、いずれも従来の成長曲線よりも高い値を示し、予測精度が向上していた。標高区分では、スギ同様に高標高域で成長が鈍い傾向が認められた。一方、TWIでは、スギ林とは逆に、TWIが高い林地で、特に樹高成長がやや良好な結果となった。斜度においては、やや中庸な傾斜以下の林地で成長が良好であり、日射量の高い林分の集団でも成長が良好な傾向が認められた。これらのことから、ヒノキ林については、尾根や急傾斜地を除く比較的中庸か緩やかな、水はけと日当たりの良い山腹が適していると考えられた。

#### IV おわりに

この研究で得られた結果は、従来から経験的に言われてきた、スギ、ヒノキの適地の概念が、詳細なDEMによって、様々な地形上の特徴を数値化や指数化する手法が確立されてきたことで、定量的に表現しうることを示唆していると考えられる。一方、これらの指標は解析の

際に与える条件によって大きくその結果が左右されると言われており (Reu *et al* 2013, Riley *et al* 1999, Skentos 2018), どのような条件で解析を行うのが最も樹木の成長動態を良く説明するのかについては、現地調査による検証も交えてより深く検討していく必要がある。

地形条件に基づいて人工林の資源量を知るためのモデル化に当たっては、複数の地形変数を用いた多変量解析から地位を推定する手法が多く取り組まれている (廣瀬ら 2016, 伊藤ら 2021, 和口ら 2019, 山下ら 2017) が、本研究では、単独の地形変数毎に個別に成長曲線を補正し、寄与率を調べる手法をとった。これは、スギ、ヒノキ人工林の資源量推定と成長予測のみならず、両種の造林適地としてこれまでも経験的に言われてきたことの確かさを定量的に表現することや、個々の地形条件の寄与度を知ることで、今後のより効率的な人工林施業と森林管理の一助となることを期待したからである。今後は、地形条件の算出方法の深化などにより説明力の高い予測モデルを構築する必要があると考えられる。

## 謝辞

本研究に当たって、貴重な航空機レーザー計測成果を快く提供して下さった新庄村に心から謝意を表します。

## 引用文献

廣瀬裕基, 川田伸治, 松村直人 (2016) 森林資源有効活用に向けた数値地理情報による地位推定—三重県菰野町の事例—, 中部森林研究64:79-82.

伊藤幸介, 塚原雅美(2021) 高齢級スギ人工林調査データを用いた地位指数曲線の延長, 新潟県森林研究所研究報告61:28-31.

伊藤拓弥, 松英恵吾, 内藤健司 (2008) 航空機LiDARによる森林資源量推定—スギ・ヒノキの樹高・樹冠量による立木幹材積推定式の検討—, 写真測量とリモートセンシング47(1):26-35.

伊藤拓弥, 松英恵吾, 執印康裕, 内藤健司 (2011) 本数密度の異なるスギ・ヒノキ林における航空機LiDARによる単木の立木幹材積推定, 写真測量とリモートセンシング50(1):18-26.

木戸口佐織, 栗野義之 (2007) 岩手県民有林にスギ高齢林の現状と収穫予想表, 岩手県林業技術センター研究報告15 : .

Kopecký M., Macek M., Wild J. (2020) Topographic wetness index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition, *Science of the total environment* 757:1-15.

牧本卓史, 西山嘉寛 (2005) 長伐期林の収穫予測システムの開発, 岡山県林業試験場研究報告21:43-52.

岡山県林政課 (2018) 岡山県の森林資源

Reu J.D., Bourgeois J., Bats M., Zwertvaegher A., Gelorini V., Smedt P.D., Chu W., Antrop M., Maeyer P.D., Finke P., Meirvenne M.V., Verniers J., Crombé P.(2013) Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes, *Geomorphology*186:39-49.

Riley J.W, Calhoun D.L, Barichivich W.J, Walls S.C. (2017) Identifying small depressional wetlands and using a topographic position index to infer hydroperiod regimes for pond-breeding amphibians, *Wetlands*37:325-338.

Riley S.J., DeGloria S.D., Elliot R. (1999) A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity, *Intermountain journal of science* 5(1-4):23-27.

Rózycka M., Migoń P., Micheniewicz A. (2016)

Topographic wetness index and terrain ruggedness index in geomorphic characterisation of landslide terrains, on examples from the Sudetes, SW Poland, *Zeitschrift für geomorphologie*, online:1-20.

Skentos A. (2018) Topographic position index based landform analysis of Messaria (Ikaria Island, Greece), *Acta Geobalkanica* 4-1:7-15.

Sorensen R., Zinko U., Seibert J. (2006) On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations, *Hydrology and earth system sciences*10:101-112.

和口美明, 河合昌孝, 迫田和也, 山下俊二 (2019) 長伐期化に対応した奈良県ヒノキ人工林地位曲線の作成, 奈良県森林技術センター研究報告48:1-4.

山下由美子, 近藤洋史 (2017) 和歌山県スギ・ヒノキ人工林の地位指数曲線と林分収穫表の改訂およびシステム収穫表の作成, 和歌山県農林水産試験研究機関研究報告5:115-132.