滝首湿原周辺広葉樹二次林における樹種分布の推定

角江俊一郎・龍原 哲

Estimating spatial distribution of species composition in secondary hardwood forests around Takigashira Bog

Shun-ichiro KAKUE and Satoshi TATSUHARA

Abstract: The objective of this research is to estimate species composition of hardwood species using measurements on plots and GIS. The study area is secondary hardwood forests around Takigashira Bog. The subject species are *Fagus crenata*, *Quercus serrata* and *Quercus crispula*, which are dominated in this area. First, species composition was investigated in 13 plots, which were divided into 55 subplots, and DEM was created from digitized contour lines. Then, the relationship between species composition and topographical and environmental factors calculated from the DEM was examined using multiple regression analysis and regression equations were derived. Applying the equations on GIS, the species composition in terms of basal area and stocking for each species was estimated and mapped. Finally, the estimates were evaluated, comparing with the measurements.

Keywords: 種組成 (species composition), 数値標高モデル (digital elevation model), 天然林 (natural forest), 地形 (topography), 環境要因 (environmental factors)

1. はじめに

新潟県農林水産部治山課(2000)は現在の森林計画図・森林簿による森林情報管理の限界を指摘し、打開案とし次世代の情報管理の形として森林GISに言及している。GISの利用によって情報の更新によるデータの書き換えも容易に行うことができ、情報更新による時間的損失も抑えることができる。また広域の解析に適している。つまり森林計画図や森林簿が非常に困難としていた作業を容易に、かつ効率的に行うことができる。また、現在の森林計画図と森林簿では情報管理単位が小班となっている。したがって、特に広葉樹天然林に関しては天然更新のために、どのような樹種が各小班に生育しているのか

が詳細に把握できない状況である。

各樹種の生育特性は立地条件によって異なっており(山田・丸山, 1968; 橋詰, 1985; 本間, 1998; 横山・丸山, 1951), 佐野ほか(1998)はヤナギ類の特性をもとにしてGISを用いて立地条件から分布可能性領域を推定した。多雪地域における樹種の分布は、積雪と深く関係している(小笠原, 1965)。兼平(1991)はミズナラ、コナラ林分布と積雪深の関係を指摘し、Homma(2001)は、ブナ林の種構成、分布構造は降雪量の影響を受けると指摘している。しかし、積雪深は降雪量の年変動の影響を受けるほか、標高、斜面傾斜角、斜面方位、微地形など様々な因子の影響を受け、毎年変動するため、特に山岳地域のような地形が複雑な場所で詳細な積雪の分布を把握したり、モデル化したりするのは困難である。

そこで本研究では、GISでモデル化が容易な地形

龍原：〒950-2181 新潟市五十嵐二の町8050
新潟大学自然科学系
Institute of Natural Science and Technology,
Niigata University, Niigata 950-2181
E-mail tatsu@agr.niigata-u.ac.jp

や地形から求められる水文や光環境を用いて多雪地域における樹種分布の推定を試みた。新潟県東蒲原郡上川村管内滝首湿原周辺落葉広葉樹二次林を対象地とし、この地域で優占する樹種の各林地における混交率を推定した。

2. 対象地と使用データ

2. 1 対象地の概況

対象地のある新潟県東蒲原郡上川村の区域面積は36,113ha（平成10年度全国都道府県市区町村別面積調）、林野面積は34,448haであり、林野比率は95.4%（下越計画区地域森林計画書：計画期間平成12年4月1日から平成22年3月31日）である。対象地は人工の滝首湿原を中心とした落葉広葉樹天然林約307haで、森林簿によるとほとんどの林分が最後の伐採後40年以上経過している。この地域における他の林分はスギ人工林、アカマツ林、キリ林、草生地である。

対象地から北へ約10kmの津川（標高60m）の気象観測資料によると、1981年から1990年までの10年間の年平均気温は11.4℃、年降水量は2,204mmである。

各プロットの樹冠上層木は、大半がブナ（*Fagus crenata* Blume）である。その他の樹種はコナラ（*Quercus serrata* Thunb. ex Murray）、ミズナラ（*Quercus crispula* Blume）、ホオノキ（*Magnolia obovata* Thunb.）、トチノキ（*Aesculus turbinata* Blume）等がみられた。亜高木層はアカイタヤ（*Acer mono* Maxim. var. *mayrii* Sugimoto）、コハウチワカエデ（*Acer sieboldianum* Miq.）、ハウチワカエデ（*Acer japonicum* Thunb.）、ヤマモミジ（*Acer amoenum* Carr. var. *matsumurae* Ogata）等のカエデ類が多く見られた。林床にはシダ類などが見られた。

土壌型はほとんどが適潤性褐色森林土（B_D型）であり、稀に受食により土壌の一部が欠如した受蝕土（Er型）がみられる。地質は古生代第三紀層である。

2. 2 使用データ

本研究のGIS解析に用いたデータは、上川村森林基本図27-9、27-10である。森林基本図の縮尺は1/

5000、現地調査は昭和39年4月に行われており、修正は平成6年9月に行われている。この基本図に記載されている10m間隔の等高線をデジタイザによってGISに入力し、DEM作成の元データとした。本研究で用いたGISソフトは、米国ESRI社が開発したArcGIS 8.1（ESRI, 2001）である。

3. 方法

3. 1 現地調査

滝首湿原周辺の広葉樹天然林地域に、600～1000 m²の調査地をコンパスと巻尺を用いて13プロット設置した。最後の伐採後40年から60年経過している。さらに、微地形の変化による植生変化をとらえられるように、各プロットにおいて縦10m×横20m（200m²）の小区画に分けて調査を行った。小区画は山側から谷に向かって、縦50m×横20mのプロットではA、B、C、D、Eの5つ、縦30m×横20mのプロットでは、A、B、Cの3つを設置した。区画毎に胸高直径5 cm以上の立木について樹種名を記録し、胸高直径を計測する毎木調査を行った。枯損木や幹の上部が折れて無くなった木については、記録対象外とした。プロットの位置を地図上に落とすため、各プロットの4隅の位置座標をDGPS（Trimble社 PathfinderProXR）を用いて測定した。その結果を用いて、測位できなかった点も含めてプロットの位置座標を決定した。以下、プロットを小さく区分けした小区画を区画とする。図1に対象地における各プロット及び区画の位置を示す。

3. 2 数値標高モデルおよび各因子主題図の作成

Zhou and Liu（2004）はラスタ型数値標高モデル（DEM）の斜面傾斜角と斜面方位角の誤差をDEM作成アルゴリズムによる誤差とデータ取得における誤差とによって表し、仮想的な二つの立体面（楕円面、ガウス関数を合成した面）について斜面傾斜角や斜面方位の誤差を最も小さくする空間解像度が存在することを示した。そして、アルゴリズムによる誤差がない場合、斜面傾斜角を最小にする解像度はデータによる誤差に応じて8 mから14m程度になることを示した。そこで、本研究では縦10m×横20m

の区画内の状況がより表現されるように、空間解像度10m×10mのラスタ型数値標高モデル (DEM) を作成した。等高線データからTINモデルを作成し、TINモデルからラスタ型のDEMを作成した。

分析に用いる因子は標高、斜面傾斜角、集水域積算 (flow accumulation)、水湿指数 (wetness index)、陰影起伏 (shaded relief)、日射量である。このうち水湿指数は後で述べるように斜面傾斜角と集水域積算から求められるので、水湿指数または斜面傾斜角と集水域積算との組み合わせを水文環境因子とした。また、陰影起伏または日射量そのものを光環境因子とした。標高はDEMから読み取り、それ以外の因子もすべてDEMから作成した。

集水域積算は各セルに集積する流入量を合計したもので、あるセルに流入するセル数の合計を示す (Jenson and Domingue, 1988)。あるセルの水がその周囲の最も低いセルへ移動しながら次第に集積していくことを仮定して求められる。

水湿指数は集水域積算と同様に斜面上の水文環境を示す (Beven and Moore, 1993)。しかし、集水域積算があるセルに対する流入量を算出するのに対し、水湿指数は式 (1) のようにセルにおける表流水の流速と関係ある斜面傾斜角も考慮して計算する。

$$\text{Wetness index} = \ln(\text{FA} / \tan \beta) \quad (1)$$

FA, 集水域積算; β , 斜面傾斜角

なお、集水域積算、斜面傾斜角とも最小値が0で対数が計算できないため、もとの値に1を加えて対数を求めた。

陰影起伏は仮想的な光源の位置を設定し、斜面の方位角、傾斜角及び周囲の山地との位置関係に応じて各セルの相対的な照度を算出したものであり、各セルにおける日射量を相対的に示した因子である。単純に光が当たる、当たらないという判断ではなく、光が当たる程度を0から255までの相対的な数値として算出する。本研究では式 (2) (ESRI, 2001) によって計算する。

$$\text{Shaded relief} = 255 (\cos S \sin s \cos(a - A) + \sin S \cos s) \quad (2)$$

S, 光源の高度角 (水平からの角度); A, 光源の方位角 (北からの角度); s, セルの斜面傾斜

角; a, セルの斜面方位角

光源の方位及び高度はIverson et al. (1997)が林分生産力や種組成を推定するため用いた方位角202°, 高度角45°を採用した。

日射量は日射によって各セルの受けるエネルギー (J/m^2) とした。この値はRich et al. (1994) が開発した ArcGIS・Workstation で動作するプログラム solarflux を利用して算出した。吉岡・金子(1962)は融雪によって多量に供給される水の排水不良が植生の分布に影響していると指摘し、渡辺(1996)は、ブナは春の開葉期に大量の水分を必要としているため、その時期に水分の多い場を選択している、と指摘している。春先の日射が融雪に大きな影響を与えていると考えられるので、算出した日付は3月22日から4月12日まで1週間間隔で3週間と、3月22日から5月10日まで1週間間隔で7週間の2通りとした。算出周期は1時間毎とした。また影による影響を考慮に入れて算出した。

3. 3 林分因子の算出

現地調査の結果から各区画の胸高断面積合計と立木本数を求めた。区画における各樹種の胸高断面積合計と立木本数を算出し、各樹種の混交率を胸高断面積と立木本数について求めた。これらをそれぞれ断面積割合、本数割合と呼ぶ。胸高断面積割合は各樹種が地表面をどの程度被覆しているか (被度) を表しており、本数割合は各樹種の個体数の割合である。これら2つの林分因子を求めることにより、より林況の把握ができると考えた。

3. 4 推定式作成

GIS上で各プロットの位置を各因子の主題図におとし、それぞれの値を読み取った。一つのセルが区画の大部分を占めている場合にはそのセルの値を区画の値とした。区画を占めている主要なセルが2つまたは3つある場合にはそれらのセル値の平均値を区画の値とした。各区画で算出した各樹種の断面積割合と本数割合を目的変数、各主題図から読み取った値を説明変数として重回帰分析を行った。その際、プロット順、区画順に並べたデータのうち奇数番と

図1 対象地とプロットの位置図

図2 対象地における各因子の分布

(a) 標高；(b) 斜面傾斜角；(c) 集水域積算；(d) 3月22日から5月10日までの日射量

なった28区画のデータをデータ1、偶数番となった27区画のデータをデータ2とし、2つのデータ群に分けて分析した。変数の選択は変数増減法（ステップワイズ法）で、 $F_{in}=1.5$ 、 $F_{out}=1.5$ として行った。この時、相関の高い因子の組み合わせを説明変数に含まないようにした。また、水文環境や光環境を意味する因子が重複しないように変数を組み合わせた。

3. 5 推定および精度の算出

前節で求めた推定式を用いて各樹種の混交率を推定した。ただし、推定値が負になるものは0とし、100%を超える値は100%とした。3樹種の混交率の合計値が100%を超える場合には、合計値が100%となるように変換したが、その際3樹種の混交率の比が変わらないように変換した。

森林簿で広葉樹天然林となっている小班を抜き出し、推定式を適用して各樹種の分布を推定した。推定精度の算出には推定式作成に用いなかったデータを用いた。

4. 結果

4. 1 各因子の頻度分布

標高、斜面傾斜角、集水域積算、3月22日から5月10日までの日射量について、対象地全域のセル数の頻度分布と標本として設置した各区画のセル値の頻度分布は図3のようになった。頻度の少ない階級に関しては標本が採れなかった階級があるが、全体的には対象地全域のセル数の頻度分布に応じて標本を採ることができたといえる。

図3 各因子における対象地全体と標本の度数分布表

(a) 標高；(b) 斜面傾斜角；(c) 集水域積算；(d) 3月22日から5月10日までの日射量

4. 2 推定式

各樹種の断面積割合及び本数割合の推定式、各推定式の重相関係数は表1の通り求められた。重相関係数は断面積割合、本数割合ともにブナが最も高く、コナラ、ミズナラの順に低くなった。分散分析の結果、ブナとミズナラに関しては5%水準で有意となったが、コナラに関してはミズナラより重相関係数

が高かったにも関わらず、説明変数の数が多いためデータ2の断面積割合を除いて有意とはならなかった。重相関係数をデータ1と2との間で比較すると、両者の間にはほとんど差が見られなかった。また、推定式で組み合わせた因子間には、絶対値0.3以上の相関はみられず、内部相関は無いといえる。

表1 回帰式

データ	目的変数	樹種	重回帰式	重相関係数
1	断面積	ブナ	$y = -0.000000791 \times SR_{3-5} + 13.3 \times \ln(FA) - 28.7 \times \ln(\tan S) + 0.501 \times A - 138.8$	0.643*
		ミズナラ	$y = -8.80 \times \ln(FA) + 28.0$	0.403*
		コナラ	$y = -6.67 \times \ln(FA) + 10.9 \times \ln(\tan S) - 0.478 \times A + 236.4$	0.448
	本数	ブナ	$y = -0.00000189 \times SR_{3-4} - 23.8 \times \ln(\tan S) + 0.457 \times A - 97.6$	0.650**
		ミズナラ	$y = -9.17 \times \ln(FA) + 27.9$	0.410*
		コナラ	$y = -3.72 \times \ln(FA) + 6.11 \times \ln(\tan S) - 0.274 \times A + 134.5$	0.455
2	断面積	ブナ	$y = -0.000002 \times SR_{3-4} - 18.3 \times \ln(FA) - 15.2 \times \ln(\tan S) + 127.1$	0.627**
		ミズナラ	$y = 0.462 \times A - 175.6$	0.450*
		コナラ	$y = 0.332 \times SR - 0.455 \times A + 155.3$	0.483*
	本数	ブナ	$y = -0.0000022 \times SR_{3-4} - 18.0 \times \ln(FA) - 10.2 \times \ln(\tan S) - 141.4$	0.601*
		ミズナラ	$y = 0.175 \times SR + 0.255 \times A - 120.8$	0.448
		コナラ	$y = 0.00000122 \times SR_{3-4} - 5.34 \times WI - 0.379 \times A + 134.2$	0.511

SR_{3-4} , 3-4月の日射量; SR_{3-5} , 3-5月の日射量; SR , 陰影起伏; FA , 集水域積算; S , 傾斜角; WI , 水湿指数; A , 標高; *, 5%有意; **, 1%有意

表2 回帰式における各因子の偏相関係数

データ	目的変数	樹種	SR_{3-4}	SR_{3-5}	SR	$\ln(FA)$	$\ln(\tan S)$	WI	A
1	断面積	ブナ		-0.294		0.387	-0.595**		0.352
		ミズナラ				-0.403			
		コナラ				-0.252	0.326		-0.395*
	本数	ブナ	-0.447*				-0.584**		0.373
		ミズナラ				-0.410*			
		コナラ				-0.252	0.327		-0.405*
2	断面積	ブナ	-0.450*			-0.449*	-0.434*		
		ミズナラ							0.450*
		コナラ			0.427*				-0.374
	本数	ブナ	-0.489*			-0.446*	-0.310		
		ミズナラ			0.302				0.277
		コナラ	0.374					-0.262	-0.385

SR_{3-4} , 3-4月の日射量; SR_{3-5} , 3-5月の日射量; SR , 陰影起伏; FA , 集水域積算; S , 傾斜角; WI , 水湿指数; A , 標高; *, 5%有意; **, 1%有意

図4 推定誤差の分布

(a) プナの断面積割合；(b) ミズナラの断面積割合；(c) コナラの断面積割合；
(d) プナの本数割合；(e) ミズナラの本数割合；(f) コナラの本数割合

4. 3 混交率と各因子との関係

表1に示した回帰式における各因子の偏相関係数は表2に示すとおりである。回帰式の係数の検定結果も合わせて示した。混交率と標高、水文環境、光環境との関係は以下ようになった。

混交率と標高との関係を見る。プナに関してはデータ1では正の相関が見られたが、データ2では相関は見られなかった。ミズナラに関してはデータ1では単相関係数が0.1から0.2程度の正の値となったが、データ2では正の相関が見られた。コナラに関してはいずれも負の相関が見られた。

混交率と水文環境との関係を見る。プナに関しては $\ln(\text{集水域積算})$ と $\ln(\tan(\text{傾斜角}))$ の両方または一方が説明変数として選択された。 $\ln(\tan(\text{傾斜角}))$ はいずれの場合にも負の相関を示したが、 $\ln(\text{集水域積算})$ はデータ1とデータ2の場合では偏相関係数の符号は逆になった。ミズナラに関しては $\ln(\text{集水域積算})$ と負の相関が見られた。コナラに関して

はデータ1では $\ln(\text{集水域積算})$ が負、 $\ln(\tan(\text{傾斜角}))$ が正となったが、データ2では本数割合で水湿指数が負となった。水湿指数は式(1)の定義のように $\ln(\text{集水域積算})$ を $\ln(\tan(\text{傾斜角}))$ で割ったものである。同じ傾向を示したといえる。

混交率と光環境との関係を見る。プナに関してはいずれも日射量と負の相関が見られた。ミズナラに関してはデータ2の本数割合で正の相関となった以外は光環境因子は選択されなかったが、他の場合にも単相関係数は0.1から0.2程度の正の値となった。コナラに関してはデータ2で正の相関が見られ、データ1では変数としては選択されなかったが単相関係数は0.1から0.2程度の正の値となった。

プナに関して $\ln(\text{集水域積算})$ がデータ1とデータ2の場合では偏相関係数の符号は逆になったが、それ以外についてはデータ1とデータ2では選択された変数が若干入れ替わったものの、混交率と各変数との間の関係は同様な関係が示された。

4. 4 推定結果

表1で示されたデータ1から作成した推定式を用いてデータ2の27区画の混交率を推定した結果を図4に示す。各樹種の断面積割合及び本数割合を対象地全域に対して推定した結果を図5に示す。

27区画中3樹種の混交率の合計が100%を超えた

区画は断面積に関しては2区画、本数に関しては3区画あった。これらの区画については3.5節で述べた方法で合計が100%になるように補正した。

推定結果は誤差0.2(20%)以内で推定された区画はミズナラが7~8割、ブナとコナラが5割前後となった。誤差0.3(30%)以内で推定された区画

図5 各樹種の混交率推定図

はミズナラとコナラが8～9割、ブナに関しては6～7割となった。また、誤差の正負の偏りは見られなかった。

5. 考察

5. 1 混交率と各因子との関係

混交率と標高との偏相関はブナが正の傾向を示し、コナラが負の傾向を示した。特にコナラの場合には断面積割合、本数割合いずれの場合にも有意な相関を示した。しかし、ミズナラの場合には明確な傾向が見られなかった。新潟県魚沼地方の広葉樹の分布様態は、小林・高田(1985)によると、高海拔ほどブナの優占度が高く、海拔高が低くなるに従いブナに変わってミズナラの構成率が高くなり、海拔高が400m以下ではミズナラが優占種となり、その下部には替わってコナラが出現する。また「天然林の生態」研究グループ(1972)は、京都大学芦生演習林内で標高は異なるが同様の結果を得た。本研究の結果はブナ、ミズナラ、コナラ3樹種の標高による分布の違いと一致している。また、本研究におけるほとんどのプロットが標高400mから500mに位置し、3樹種の移行帯にあるので、上記の結果は妥当なものであると考えられる。

混交率と水文環境因子との相関関係は比較的明確に示された。ブナに関しては水湿度と正の傾向を示しており、ミズナラ、コナラに関しては、負の傾向を示した。土壤の水湿状態による植生の変化について、ブナ天然林は適潤から弱湿性土壤に多く、ミズナラ天然林は乾性土壤に多く(大政, 1951)、乾燥が進むにつれての機能の低下はミズナラ、コナラに比べて、ブナが最も早く、土壤水分に敏感な樹種である(Maruyama and Toyama, 1987)と指摘されている。コナラに関しては、一般にコナラは弱乾性から乾性の土壤に分布が多い(三浦, 1983)、と指摘されている。以上のことを考慮すると、ブナは比較的湿性の土壤に、ミズナラ、コナラは比較的乾性の土壤に分布するといえるので、上記の結果と一致する。ただし、ミズナラとコナラを比較すると、ミズナラのほうが負の相関が若干高く、丸山(1991)の若干ながらミズナラはコナラよりも湿性土壤の出現率が高い、

に反する結果となった。

混交率と光環境要因との相関をみると、ブナは日射量との間で負の傾向が見られた。コナラとミズナラの場合には、光環境要因との単相関係数が正の傾向を示した。日射量が多い場所は土壤が乾燥すると考えられるので、混交率と光環境要因との偏相関係数が混交率と水湿指数との偏相関係数とは逆の符号になったことは樹種の特性と一致しているといえる。

5. 2 推定結果について

重回帰における重相関係数に関してはブナが最も高く、ミズナラが最も低い値となった。これは標高や土壤水分環境に対する反応においてミズナラはブナとコナラの間間的な性質をもつため、単調な関係を仮定する重回帰式では十分に表現できなかった可能性がある。また、本論文の推定式には他の樹種との相互作用を示す項が含まれていないため、推定した3樹種の混交率の合計値が100%を超える可能性があった。実際、精度検証用の27区画で推定した結果、約1割の区画で合計値が100%を超えた。本研究では単純な重回帰式を推定式として用いたが、推定式に他の樹種との相互作用に関する項を加えるなど新たなモデルを検討する必要がある。

混交率は25%以上、25～75%、75%以上の3つに区分されたり、20%ごとや25%ごとに区分される。そこで、混交率の推定値と実測値を比較し、両者の差の絶対値が0.2(20%)以内となる割合を精度の目安と考えた。推定結果に関しては、誤差0.2(20%)以内で推定された区画の割合がブナとコナラに関しては5割前後となり、大まかな種組成の分布を把握することが可能となったが、信頼性の高い分布図を作成する上ではまだ十分な精度とはいえない。本研究で用いた水文環境や光環境に関する因子と混交率との関係は従来の知見と多くの点で一致したが、これらの因子だけでは種組成の分布を推定するには十分ではなかったといえる。そのため、精度の向上を図る上で他の因子を説明変数として追加することも検討する必要がある。

推定方法における誤差要因としてそれ以外に考えられることは、調査した区画とDEMとの対応精度、DEMの作成精度、DEMの基になった等高線の精度

である。これらのうち、DGPSを利用した調査区画とDEMとの対応精度に関しては、立木ら(2004)によって樹冠に葉がある森林内におけるPathfinderProXRの平均測位誤差がDGPSの場合に約3mであることが示されている。Zhou and Liu(2004)は仮想的な立体面を用いて斜面傾斜角と斜面方位角の誤差を調べている。その結果によると、空間解像度が10mの場合、データに誤差がない時には平均誤差は傾斜角で1度強、方位角で約5度であるが、データに誤差が含まれている時には平均誤差は両者とも10度程度に増加する。したがって、本研究の手法をより有効にするためには、これらの誤差要因を少なくすることも必要である。

6. おわりに

本研究では多雪地域にある滝首湿原周辺広葉樹二次林内でプロット調査を行い、優占するブナ、ミズナラ、コナラの情報を得た。この情報を目的変数、DEMより作成した各主題図から読み取った値を説明変数として、重回帰分析から推定式を作成した。推定式より3樹種の分布を推定し、推定図を作成した。またその推定精度の検証を行った。

推定式の説明変数にはDEMから簡単に推定可能な環境要因として水文環境や光環境を用いた。標高やこれらの環境要因と各樹種との関係においては、従来の知見と一致する結果を得ることができた。

また、2つのデータ群に対して同様な結果が得られ、本研究で用いた環境要因と樹種構成との間に定量的な関係があることが示された。推定結果に関しては、大まかな種組成の分布傾向を示すことが可能となったが、森林計画を策定する上でさらに推定精度の向上が望まれ、推定式そのものの、新たな説明変数の追加、DEMの精度向上などの検討が必要と考えられる。

謝辞

現地調査を行うにあたり、新潟大学大学院自然科学研究科のGuridno Bintar Saputro氏、新潟大学農学部伊藤真一氏に協力していただいた。ここに感謝の意を表す。本研究の一部は独立行政法人日本学術

振興会科学研究費補助金・基盤研究(C)(2)課題番号15580121の助成を受けて行なわれた。

参考文献

- 大政正隆(1951) ブナ林土壌の研究, 「林野土壌調査報告」, **1**, 1-243.
- 小笠原和夫(1965) 北アルプス立山・剣の積雪調査ー積雪の地形的分布と植生との関係についての提唱ー, 『北アルプスの自然』, (富山大学学術調査団), 123-152, 古今書院.
- 兼平文憲(1992) 広葉樹施業体系に関する研究 (5) 最深積雪深とミズナラ・コナラ林の分布, 「青森県林業試験場報告」, **43**, 10-11.
- 小林正吾・高田和彦(1985) 新潟県魚沼地方における広葉樹二次林の林相改良施業に関する研究 (2), 「新潟大学農学部演習林研究報告」, **18**, 33-43.
- 佐野真・小木和彦・石橋聡・鷹尾元(1998) ヤナギ類・カンバ類の最適生産システムに関する研究 (IV) 奥定山溪流域におけるヤナギ類の分布, 「日本林学会北海道支部論文集」, **46**, 86-88.
- 立木靖之・吉村哲彦・長谷川尚史・酒井哲朗・尾張敏章・三田友規・中村太士(2004) 森林内における歩行時のGPS測位精度評価, 「日本林学会誌」, **86**, 5-11.
- 新潟県農林水産部治山課(2000) 新潟県における森林GISの取り組みと市町村等への導入について, 「森林計画研究会会報」, **395**, 13-18.
- 橋詰隼人(1995) 広葉樹林の生育特性に関する研究 (I) 樹種および立地条件による生育特性の違い, 「広葉樹研究」, **3**, 15-32.
- 本間航介(1998) ブナ個体群の初期更新段階における生存過程とそれを規定する要因, 「植物物理・分類研究」, **46** (1), 29-36.
- 丸山幸平(1991) ブナの生理・生態的性質, 『ブナ林の自然環境と保全』(村井宏・山谷孝一・片山寛統・由井正敏), 70-83, ソフトサイエンス社.
- 三浦直美(1983) 山形県における広葉樹二次林のスコア表について, 「日本林学会東北支部会誌」, **34**, 105-108.
- 「天然林の生態」研究グループ(1972) 京都大学芦生演習林における天然生林の植生について, 「京都大学農学部演習林報告」, **43**, 33-52.
- 山田昌一・丸山幸平(1968) 地形解析にもとづく立地因子および森林生産力の推定, 「新潟農林研究」, **21**, 85-105.
- 横山吾朗・丸山幸平(1951) 多雪地方ブナ天然林の成長に関する微地形的考察ー伐根による調査ー, 「新潟大

- 学農学部学術報告」, 8, 90-109.
- 吉岡邦二・金子多賀夫 (1962) 八甲田山石倉岳付近の植生群落の分布と地形の関係, 「日本生態学会誌」, 12, 26-31.
- 渡辺定元 (1996) ブナ林を歩くーブナ林の春夏秋冬ー, 「遺伝」, 50 (4), 47-52.
- Beven, K. J., Moore, I. D., eds. (1993) *Terrain analysis and distributed modelling in hydrology: Advances in hydrological processes*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- ESRI (2001) *ArcGIS8.1*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Homma, K. (2001) Effects of snowfall on the species composition and population structure of Siebold's beech (*Fagus crenata* Blume) forest in Echigo Mountains, Central Japan. *Research Bulletin of the Niigata University Forests*, 34, 1-16.
- Iverson, L. R., Dale, M. E., Scot, C. T., Prasad, A. (1997) A GIS-derived integrated moisture index to predict forest composition and productivity of Ohio forest (U.S.A.), *Landscape Ecology*, 12, 331-348.
- Jenson S. K., Domingue, J. O. (1988) Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1593-1600.
- Maruyama, K., Toyama, Y. (1987) Effects of water stress on photosynthesis and transpiration in three tall deciduous tree, *Journal of the Japanese Forestry Society*, 69, 165-170.
- Rich, P. M., Hetrick, W. A., Saving, S. C. (1994) *Modeling Topographic Influences on Solar Radiation: A Manual for the SOLARFLUX Model. LA-12989-M*. Los Alamos, New Mexico, USA: Los Alamos National Laboratory.
- Zhou, Q., Liu, X. (2004) Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties. *Computers & Geosciences*, 30, 369-378.