

■研究発表論文

シイ・カシ萌芽林とヒノキ人工林の空中写真を用いた画像特性値と林分条件要素の関係

The Aerial Photograph Image Character and Forest Structural Factors relationship of *Castanopsis cuspidata* Coppice Woodland and *Chamaecharis obutusa* Artificial Forest.

朝廣^{*} 和夫 井上^{**} 光平 重松^{*} 敏則 瀬戸島^{***} 政博

Kazuo ASAHIRO Kouhei INOUE Toshinori SHIGEMATSU Masahiro SETOJIMA

Abstract : This research aims to clarify the relationship between image properties of aerial photograph and structural factors of *Castanopsis cuspidata* coppice woodland and *Chamaecharis obutusa* artificial forest, and to develop an algorithm of tree crown analysis using the images. The aerial photographs were taken in May, 1999, the season of flowering *Castanopsis cuspidate*, and converted to monochrome 45cm ground resolution digital images. Fourteen plots were chosen in the field to measure vegetation and forest structure. Correlations were analyzed between image properties such as *SD* (standard deviation) and *CF* (cumulative frequency of tree crown edge) and forest structural factors such as tree crown area, tree density, relative illuminance under tree crown, etc. As a result of only *Chamaecharis obutusa* artificial forest, a -0.79 correlation between *SD* and *CF* was obtained. Also, a 0.79 correlation between *SD* and the relative illuminance under tree crowns was found. Furthermore, in terms of *CF*, a 0.72 (tree crown area) and a -0.82 (tree density) correlation was found. The results suggested that these images contained the information of the tree crown.

Keywords: Tree Crown, Lucidophyllous Forest, Forest Structure, Aerial Photography, Image Processing

キーワード：樹冠，照葉樹林，林分構造，航空写真、画像解析

1. はじめに

近年、航空写真や高分解能衛星画像、そして航空機 LIDAR を用いた樹冠解析、およびギャップ判別の研究が増加している。この背景には、森林モニタリングによる、樹木の本数や種類などの森林資源量について効率的かつ正確な把握が求められているからである¹⁾。樹冠特性の抽出は各種画像処理により試みられており、特に、針葉樹人工林を対象に立木本数の抽出に関する研究が行われている²⁾。一方、広葉樹林については、不明瞭な樹冠像や、生産林としての価値が相対的に低いために研究が遅れている。抽出対象は立木密度よりも樹冠形態・輪郭の抽出に関する研究³⁾⁴⁾が行われており、針葉樹人工林ほどの精度は得られていない。現在の研究動向は、空撮画像や衛星画像より樹冠形態の正確な抽出を目的としたアルゴリズムの開発に重点がおかれている。この研究アプローチだけでは、広葉樹を含めたモザイク状の森林資源の効率的な把握という目的に対し、自ずと限界を生じると考えられる。

衛星画像や LIDAR などと比較し、空撮画像の利点は米軍写真以降のライブラリの豊富さと高解像度の画像が得られる点にある。広葉樹林等の樹冠解析を対象とする場合、最近、研究されている LIDAR による 3 次元解析や高分解能衛星の近赤外データを用いた緑被抽出は、高さや面積等の詳細な計量という面で有効な手法である。しかしながら、一般ユーザーのデータ購入は難しく、ライブラリも少ない状況である。空撮画像を用いた 2 次元解析手法の開発は、戦後 60 年の森林の変遷を面的に探り、中長期的な計画・管理手法を検討する上で、前者の高精度な計測技術を補完する汎用性の高い技術として期待される。本研究は、このような広葉樹林や混交林における樹冠形態の抽出アルゴリズムの開発にあたり、空撮画像の基本的な画像特性値と樹冠形態や林分条件要素との関係に着目し、有効な森林パラメータを得ることを目的とした。

表一 更新年度と階層別に出現した代表的な種名・被度

種 名		調査区番号															
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7		
更新年度 *		43	41	41	43	60	60	43	79	79	79	82	82	35	35		
高木層	スダシイ	C. cuspidata var. sieboldii															
	ヒノキ	Chamaecyparis obtusa															
	クロキ	1	1	1	1	1	1		5	5	5	5	5	5	5		
	アラカシ	Quercus glauca															
	高木層での出現種数																
その他の出現種:		シリブカガシ、ヒメスズリハ、ヤマモモ、シロダモ、ソコゴ、ハゼノキ、モッコク、リュウグ															
亜高木層	タイムタチバナ	Rapanaea nerifolia															
	ヤブツバキ	Camelia japonica															
	亜高木層での出現種数																
その他の出現種:		ネズミモチ、ヒサギ、カクレミノ、サカキ、シイモチ、ネジギ、ホオノキ、ミズバヒ															
低木層	オオカグマ	Woodwardia japonica															
	アラカシ	Quercus glauca															
	ヒサカキ	Eurya emarginata															
	低木層での出現種数																
その他の出現種:		イズセンリョウ、ウラジロ、スダシイ、マンリョウ、ミズバヒ、アリドウシ、イヌビロ、イヌマキ、カラスクリ、サカキ、シリブカガシ、ネズミモチ、ベニシダ、ヤブツバキ															
草本層	コシダ	Dicranopteris linearis															
	ウラジロ	Gleichenia japonica Spr.															
	テイカカズラ	Trachelospermum asiaticum															
	アリドウシ	Damnacanthus indicus															
	イズセンリョウ	Maesa japonica															
	オオカグマ	Woodwardia japonica															
	ヒサカキ	Eurya emarginata															
草本層での出現種数		1	4	0	0	1	0	0	11	10	10	3	1	7	5		
その他の出現種:		ドクダミ、ヤブコウジ、アオキ、サルトリイバラ、ジャノヒゲ、フユイチゴ、ヤブラン、アラカシ、イヌビロ、キタチンドウ、クロガネモチ、クロキ、コケラン、サイゴクベニシダ、サカキ、タイムタチバナ、チヂミザサ、ネズミモチ、ノササゲ、ハナミョウガ、ムベ、ミズバヒ															

*: 更新年度は、福岡県の有する森林簿に記載された西暦の下2桁、19××年。施業方法は、調査区Aが伐採萌芽更新(天然生林)、調査区Bが植林である。

2. 調査方法

1) 調査対象地の選定

空中写真の画像特性値と林分条件要素の関係を明らかにするため、調査区の設定は、シイ・カシ萌芽林とヒノキ人工林の林齢等

*九州大学大学院芸術工学研究院環境計画部門 **九州大学大学院芸術工学研究院視覚情報部門
***国際航業株式会社技術センター

の異なる林分を研究対象とした。表－1に各調査区の更新年度と階層別に出現した代表的な種名および被度を示す。本研究では、森林の空撮画像を用いた面的な解析アルゴリズムの開発を目指しているため、両者を取り扱い、個々の関係の違いを考察で述べることにする。なお、調査対象として両植生を取り上げた理由について、前者は他の広葉樹と比較し、後者はスギ人工林よりも概して林冠閉鎖度が高いためである。樹冠内輝度値のバラツキの小さい対象を用いることにより、今後、バラツキの大きな対象への応用可能性を見込むことができる。本調査結果を1事例とし、今後は、調査対象植生を増やす予定である。

調査対象地は新宮町野区の私有林である。ここは、標高50～200mの比較的急峻な丘陵地に位置し、土壌は受蝕土である。森林の多くは、かつて薪の採取などに利用されており、1960年代、もしくはそれ以前から管理放棄されたり、ヒノキの植林が行われてきた。現存するシイ・カシ萌芽林は比較的若い萌芽林も残存し、現在でも部分的に管理行為が継続されている林分もある。設定した調査区数は、シイ・カシ萌芽林（以下、A調査区という）7調査区、ヒノキ人工林（以下、B調査区という）7調査区である。

2) 調査項目の選定

主な調査項目は、樹冠投影図と各種林分条件要素である。前者は、空撮画像における樹冠範囲の特定や画像特性値、樹冠面積平均の算出に用いた。後者は、画像特性値との関係の検討に用いるため、立木密度、高木層植被率、胸高断面積密度、胸高断面積平均、平均樹高、出現種数、そして樹冠下相対照度を調査項目として選定した。

3) 調査区範囲と樹冠投影図・林分構造調査

調査は2003年10～11月に、デジタルコンパス付レーザーレンジファインダ、およびモバイル端末からなる森林計測システムを用い、不整形な測量範囲を調査区として計算機に記録した。調査面積はシイ・カシ萌芽林が150～625m²（毎木数26～197本）、ヒノキ人工林が52～499m²（毎木数22～48本）であった。調査範囲の決定は、画像解析や林分条件要素のデータを取得するに十分な面積および本数を考慮した。この際、毎木位置も同時にデータ化し、1.2m高さで直径を測定した。樹冠投影図は、地上からの目視

表－2 林分条件要素のデータ

		樹冠面積 平均 (m ²)	立木密度 (本/ha)	高木層 植被率 (%)	胸高断面 積密度 (m ² /ha)	胸高断面 積平均 (m ² /本)	平均 樹高 (m)	出現 種数	樹冠下 相対照度 (%)
シイ・カシ萌芽林	A1	36	233	85	55	0.24	16	39	5.4
	A2	17	501	90	39	0.08	17	31	3.3
	A3	12	743	80	47	0.06	10	27	11.1
	A4	2	4146	80	62	0.01	11	12	4.2
	A5	4	1872	90	42	0.02	10	17	8.2
	A6	4	1638	90	61	0.04	16	21	3.4
	A7	13	610	90	51	0.08	16	11	3.6
ヒノキ人工林	B1	7	1181	90	42	0.04	13	42	0.5
	B2	5	1481	95	52	0.03	13	40	1.3
	B3	6	1413	90	45	0.03	13	32	1.3
	B4	2	3923	95	59	0.02	11	17	1.5
	B5	3	2814	90	44	0.02	11	12	-
	B6	7	1033	85	91	0.09	24	38	1.8
	B7	8	962	90	80	0.08	24	40	4.0

により樹冠の端と思われる直下で反射鏡を移動させながらポリゴンデータとして記録した。また、各階層に出現する全ての種について、種名と被度、平均階層高を記録した。平均階層高の計測は、10m程度までを樹高尺を用い直接計測し、それ以上のものは、光波測量機とクリノメータを用い間接計測を行った。

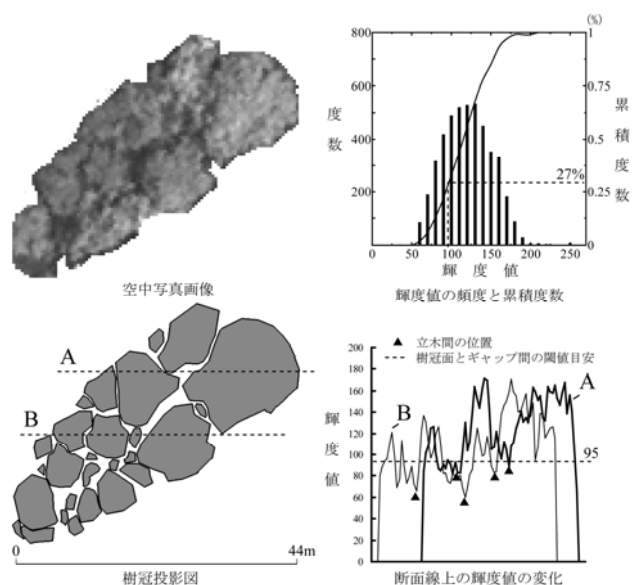
4) 樹冠下相対照度の測定方法

樹冠下相対照度の測定は、LI-COR Radiation Sensors (MODEL:LI-189)を用い、2004年2月20日の10時55分～14時50分の間に、林内で樹高尺上に照度センサーを設置し、調査区内の範囲について、下層植生の上部である樹冠下(5～8m)の高さを移動させながら50点の観測データをデータロガーに記録し、林外についても周囲の影響の及ばない疎開地で同時刻に記録した。林内と林外データの付き合はデータと共に記録された時刻を用い、相対照度平均を算出し、樹冠下相対照度とした。これらの林分条件要素データを表－2に示す。なお、本データの測定時期は次に示す空撮時期から5年を経過しているが、林冠が閉鎖されて成長速度が遅い状態にあること、測定季節については、夏至に行うことが望ましいが、画像特性との相関分析に用いる相対的なデータを必要としたため、有効とした。

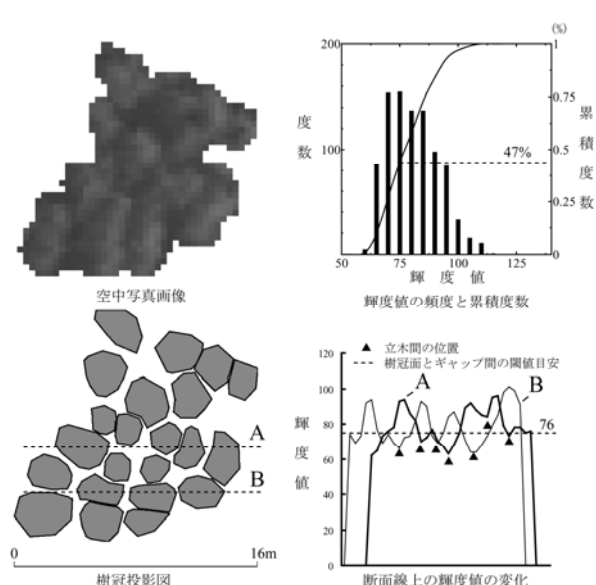
3. 空撮画像の作成と解析方法

1) 空中写真の撮影と空撮画像の作成

空中写真は、スタジオの開花・新葉期である1999年5月12日



図－1 シイ・カシ萌芽林 A2 調査区の空中写真画像、樹冠投影図、画像特性



図－2 ヒノキ人工林 B2 調査区の空中写真画像、樹冠投影図、画像特性

に、GPS(Global Positioning System: 汎地球測位システム)搭載の航空写真測量用カメラ (Leica 社製 RC-30) を使用し、カラー撮影 (撮影縮尺: 約 1/10,000) を行った。5 月を撮影時期に選定した理由は、常緑広葉樹種の開花・新葉により、樹冠面の輝度値の差異が明瞭に出ると考えたからである。撮影したカラー航空写真のネガフィルムを用いて入力用スキャナにより、地上解像度 45cm を 1 画素とするデジタル画像データ (RGB256 階調) に変換した。さらに、市販の数値地図 50m メッシュ標高データ (財団法人日本地図センター発行) を用いて、中心投影の航空写真画像から正射投影 (オルソフォト) 画像を作成した。現地計測した樹冠投影図との重ね合わせは、画像と地上計測の位置作業を参照し、概ね樹冠位置が整合するよう軽微な平行移動処理を行った。また、現地計測した個々の樹冠ポリゴンデータは、部分的重なり等が見られたため、若干の修正を行った。

2) 画像特性値の選定

画像特性値の選定は、次のような考え方をを用いた。空中写真画像の特性は、主に代表値 (平均値、中央値、最頻値、etc) と範囲値 (標準偏差、四分位範囲、etc)、その他、度数分布の形態を示す累積度数などがある。空撮画像から樹冠情報を含む林分条件要素との関係を探るに当たり、林分の斜面方位や空中写真の撮影条件の影響がより少なく、相関性の期待できる特性値は、輝度値に左右されやすい代表値よりも、樹冠面の物理的形体を反映していると考えられる範囲値や度数分布形態を示す特性値であると想定される。そこで、本論では範囲値として標準偏差を、度数分布の形態を示す値として樹冠境界に相当する累積度数 (以下、樹冠境界累積度数という) を用いることとした。

3) 画像特性値の算出及び解析

解析に用いる空撮画像は描画した樹冠投影図の範囲で切り抜き、RGB 画像からモノクロ画像へ変換した。標準偏差の算出は画像処理ソフトウェアを用い、各調査区の値を求めた。樹冠境界累積度数の算出について、空撮画像と共に関連解析図を図 - 1 (シイ・カシ萌芽林を代表して A2 調査区)、図 - 2 (ヒノキ人工林を代表して B2 調査区) を示す。まず、樹冠投影図上の樹冠境界に相当する空中写真画像の輝度値を求めるために、樹冠投影図に 2 本の断面線を引き、断面線に相当する空中写真画像上の輝度値の変化を線グラフで示した。そして、樹冠境界に当たる輝度値を判読し、輝度値のパーセンタイル点を樹冠境界累積度数として求めた。画像特性値である求めた標準偏差と樹冠境界累積度数の数値を表 -

3 に示した。なお、これらの画像特性値は、空中写真の撮影条件、画像解像度、そして、セル範囲で異なると考えられる。本論では、次のような考え方をを用いた。画像解像度 45cm については、樹冠直径が概ね 1.6m 以上であるため、最低、樹冠範囲は 9 つのセルで表現されている。また、セル範囲については、植物社会学的に定量的なデータの得られる面積を扱うことにより、画

像特性値が調査区を代表する特性値であるとした。これらの空撮画像の条件については、今後の研究課題である。

4) 画像特性値と林分条件要素の解析

画像特性値は、標準偏差と樹冠境界累積度数の散布図を描き、相関の関係を考察した。次に画像特性値と林分条件要素の関係についても相関分析を用い、相関係数 r を求め、 r が 0.70 以上の場合は相関があると判定し、画像特性値と林分条件要素間の関係について考察した。

4. 結果と考察

1) 画像特性値間の関係

標準偏差と樹冠境界累積度数の散布図を図 - 3 に示す。なお、図中には相関係数 r と p 値を記載し、後者が 0.05 以下の林分に相関近似直線を記載した。

まず、画像特性値の全体的な傾向として、A, B 調査地区間で明らかな違いが見られた。シイ・カシ萌芽林である A 調査地区の標準偏差は 22.4~44.2 の範囲に分布しているのに対し、ヒノキ人工林の B 調査地区は 9.3~14.0 と、より低い範囲を示した。一方、樹冠境界累積度数は A 調査地区が 19~32 であるのに対し、B 調査地区は 35~50 とより高い範囲を示した。画像特性値間の相関については、シイ・カシ萌芽林が相関係数 -0.34 と低いのに対し、ヒノキ人工林が -0.79 とやや高い負の相関関係を示した。

このような傾向の得られた理由は、林冠が閉鎖し林冠面の高低差の少ないシイ・カシ萌芽林と比較し、林冠の開鎖度が高いといえども、林冠面に凹凸のあるヒノキ人工林の日射を受けた陰影が多いことに起因している、図 - 1, 2 に示したように、シイ・カシ萌芽林のヒストグラムはほぼ正規分布であるのに対し、ヒノキ人工林は右に裾野を引く分布を示しているからである。その他に考えられる理由として、A 調査区のシイ・カシ萌芽林についてスダジイの開花・新葉期である 5 月に撮影したこと。また、そのような色の開花を行わない緑色の常緑・落葉広葉樹との混交率が、調査区ごとに異なることが影響したと推定される。シイ・カシ萌芽林については、夏季撮影の空中写真を用いた検討が今後の研究課題である。

これらの結果から、ヒノキ人工林の画素値の標準偏差は樹冠境界累積度数との間に負の相関関係があること。そして、これらの画像特性値は画像上の樹冠境界の情報を含んでいることを明らかにした。

2) 画像特性値と林分条件要素の相関分析

ここでは、画像特性値間で相関関係の得られたヒノキ人工林に

表 - 3 空撮画像の画像特性値

		標準偏差	樹冠境界累積度数
シイ・カシ萌芽林	A1	44.2	27
	A2	29.8	27
	A3	33.7	19
	A4	22.4	30
	A5	31.9	30
	A6	29.1	32
	A7	31.3	30
ヒノキ人工林	B1	9.3	49
	B2	10.7	47
	B3	10.6	52
	B5	12.4	35
	B6	14.0	36
	B7	11.6	50
	B8	12.7	42

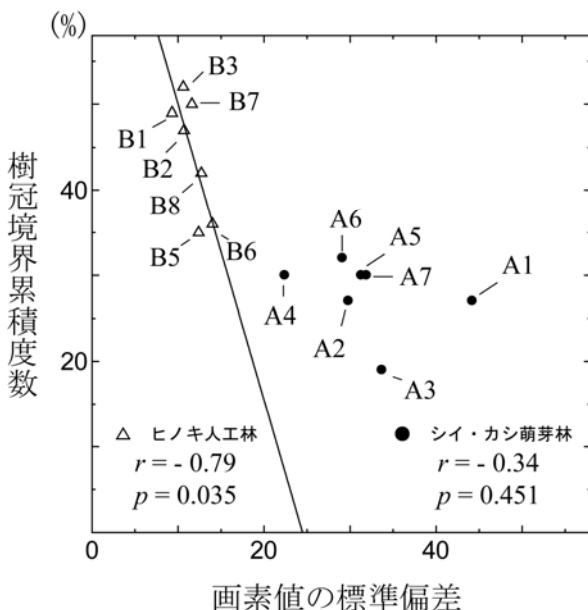


図 - 3 画素値の標準偏差と樹冠境界累積度数の散布図

表-4 空中写真の画像特性値と林分条件要素間の相関係数

	画像 特性値	樹冠3要素			その他の林分条件要素				
	樹冠境界 累積度数	樹冠面 積平均	立木 密度	高木層 植被率	胸高断面 積密度	胸高断面 積平均	平均 樹高	出現 種数	樹冠下相 対照度
標準偏差	-0.34	0.87	-0.75	0.07	-0.19	0.89	0.27	0.75	0.28
	-0.79	-0.51	0.51	-0.02	0.26	-0.01	0.09	-0.71	0.79
樹冠境界累積度数		-0.30	0.39	0.58	0.38	-0.20	0.36	-0.47	-0.75
		0.72	-0.82	-0.44	0.07	0.37	0.31	0.78	-0.35

$r > 0.70$ は太字で表示

シイ・カシ萌芽林

ヒノキ人工林

ついて、空撮画像の画像特性値と林分条件要素の相関分析を行い考察する。なお、シイ・カシ萌芽林については参考として相関分析結果のみを示す。まず、相関係数 r を表-4に示し、 $r > 0.70$ の値は相関があると判定し、表中に太字で標記した。なお、林分条件要素の内、樹冠形態に関する樹冠面積平均、立木密度、高木層植被率を以下、樹冠3要素という。

ヒノキ人工林の結果について、まず、画像特性値と樹冠3要素の関係は、標準偏差が得られなかったのに対し、樹冠境界累積度数が樹冠面積平均との間に **0.72**、立木密度との間に**-0.82**の関係が得られた。次に、その他の林分条件要素との関係は、出現種数との間に標準偏差が**-0.71**、樹冠境界累積度数が**0.78**、そして、標準偏差と樹冠下相対照度の間に**0.79**の関係が得られた。

ここで、画像特性値、樹冠形態、そして林分条件要素との関係について考察を深める。まず、空撮画像に写る樹冠の陰影や粗度は、いわゆる、実際の樹冠が太陽光を受けて反射した光の強度が撮影されたものである。その光の強度の変化は、樹冠形態の粗度と樹冠面の反射特性の違いを示していると想定される。次に、樹冠形態と林内照度の関係について、清野⁶⁾はヒノキ人工林の40年生以上の林齢で下層植生の被度が大きくなり、これには林冠葉量の減少による林内照度の増大があることを指摘している。また、藤森⁷⁾は樹林高が高くなるほど個々の樹木の樹高に差が出ることと、斜光の射し込みの条件が高まることから林内の陽光の透過率が改善されると指摘している。これらの指摘は、樹木の成長途上における樹冠形態と林内照度の変化を述べたものである。樹冠は林齢を重ねながら直径を大きくし、林冠を閉鎖した後に、林齢を重ねながら葉量を減少させる。これは、陽光を受ける上部（陽樹冠）の円錐形を大きくし、後に内部の粗度を高めることといえる。同時に、樹林高の高まりは、隣接する樹冠との間隔を広くすることである。反射する光の強度という観点からこれらの変化を考えると、成長と共に樹冠の陽光を受ける部位と影の部位の面積を広くすることを意味する。画像特性値としては、画素の輝度値の分散が大きくなり、画像の陰影や粗度が深まることといえる。

今回のヒノキ人工林の結果は、標準偏差が樹冠下相対照度と**0.79**の正の相関関係を有しており、樹冠境界累積度数が樹冠面積平均と**0.72**、立木密度と**-0.82**の相関関係を有していた。これらのことから、標準偏差は林内照度、樹冠境界累積度数は樹冠形態や隣接する樹冠との間隔と関係を有する可能性のある指標であることを明らかにした。なお、今回の相関分析では画像特性値と、林内照度と関係の深いと想定される高木層植被率の間に有意な結果が得られなかった。これは、林下から目視で判定した高木層植被率のデータ精度が不十分であったからであると推察される。今後は天空率による検討も課題である。

5. 結論

本論は、空撮画像の画像特性値を用いた樹冠解析アルゴリズムの開発を目的とし、撮影条件の影響が少なくと想定した画素値の標準偏差と樹冠境界累積度数を画像特性値として取り上げ、比較

的、林冠閉鎖度の高いシイ・カシ萌芽林とヒノキ人工林を研究対象植生として、その林分条件要素との関係の検討を行った。その結果、下記のことを明らかにした。

- ・ ヒノキ人工林の画素値の標準偏差は、樹冠境界累積度数と負の相関関係にあり、これらの画像特性値は樹冠境界の情報を含む指標である。
- ・ ヒノキ人工林の画素値の標準偏差は、林内照度と正の相関関係を有する可能性のある指標である。
- ・ ヒノキ人工林の画素値の樹冠境界累積度数は、樹冠直径と正の、樹冠間の隙間と負の相関関係を有する可能性のある指標である。

さらに、下記の研究課題のあることも明らかにした。

- ・ シイ・カシ萌芽林の画像特性値間に関する関係については、開花・新葉期よりも夏の空撮画像を利用する必要がある。
- ・ 画像特性値の解析は、撮影条件や、画像解像度および抽出セル範囲の検討を行う必要がある。
- ・ 標準偏差と樹冠境界累積度数以外の変量の検討を行う必要がある。
- ・ 画像特性値と樹冠の粗度、特に林内照度との関係を深めるには、天空率の検討も可能である。

本論の結果の意義は、ヒノキ人工林について、空撮画像の画像特性値である標準偏差と樹冠境界累積度数が樹冠境界の情報を含む森林パラメータとして、樹冠直径、樹冠形態の粗度、そして、林内照度の推定や、樹冠解析アルゴリズムの開発に利用できる可能性を示した点にある。この考え方は、今回、結果の得られなかったシイ・カシ萌芽林についても適応できると想定され、夏の空撮画像を用いた研究が課題である。今回、明らかとなった研究課題に留意しながら、樹冠解析手法の検討を進めたい。

補注及び引用文献

- 1) 森一弘・力丸厚・向井幸男・高橋一義(2003): 樹木認識におけるマッチング用テンプレートの最適化の検討: (社)日本リモートセンシング学会第35回学術講演会論文集, 73-74
- 2) 土屋智・長倉友紀(1999): 空中写真を用いた樹高と林分密度の測定手法と適用例: 日本林学会誌, 81(3), 254-257
- 3) 小村良太郎・久保守・村本健一郎(2001): 空撮画像を用いた植生形態の定量的解析: 電子情報通信学会, 信学技法9, 23-28
- 4) 朝廣和夫・井上光平・上原三知・重松敏則・瀬戸島政博(2003): 空撮画像の同質領域判定による九州北部里山林の樹冠抽出に関する研究: 日本造園学会誌, 66(5), 499-502
- 5) 簡易積算日射量測定システム、株式会社大成イーアンドエル社製。測定はオプトリーフ測定器; T-METER THS-470を使用。
- 6) 清野嘉之(1988): ヒノキ人工林の下層植物群落の被度・種数の動態に影響を及ぼす要因の解析: 日本林学会誌 70(10), 455-460
- 7) 環境林整備検討委員会編、藤森隆郎他(1993): 環境林の整備と保全: 日本造林協会, 54