高解像度衛星データから得られるテクスチャ情報と スギ本数密度との関係解析 —シミュレーションを用いた検討—

The relationship between the density of *Cryptomeria japonica* stands and texture statistics derived from very high resolution imagery —The research using simulated very-high-resolution imagery—

太田 徹志*・村上 拓彦**・加治佐 剛*

溝上 展也***・吉田茂二郎***

*Tetsuji OTA, Takuhiko MURAKAMI, Tsuyoshi KAJISA,
Nobuya MIZOUE and Shigejiro YOSHIDA*

Abstract: To detect non-thinned stands using very-high-resolution imagery, we assessed the relationship between the texture statistics derived from the gray level co-occurrence matrix (GLCM) and the density of *Cryptomeria japonica* stands. Because it was difficult to make the condition, like stand age and slope, consistent using real images and stands, simulated images were used. The results showed that each texture statistic had a unique pattern of variation, owing to stand density. Moreover, the amount of thinning affected the texture statistics. Because the values of the texture statistics varied according to the amount of it even if the stand density was the same, it was indicated that it was difficult to predict stand density using the texture derived from GLCM. Nevertheless, it should be possible to extract stands that have not been thinned using the texture statistics from very-high-resolution imagery, especially the homogeneity and the angular second moment.

1. 目 的

森林資源の持続的な管理を行うためには、森林資源の現況と、その動きを把握することが不可欠となる(猪瀬, 1998)。しかし、森林域は広く、山岳地帯にも分布するために現地調査が容易ではない。そこで、森林資源の効率的な把握のためにリモートセンシング技術の活用が期待されている(林野庁, 2003)。これまでリモートセンシングで用いられてきた衛星画像の多くは、解像度が数10m～1 km 以上の、中・低解像度衛星データ

であった。そのため、林相区分などの林分概況の大きな把握に利用が限定されていた(加藤, 2002)。だが、1999年のIKONOS 打ち上げ以降、解像度が数10cm から数 m の高解像度衛星データが利用可能となった。これにより、森林内のギャップ把握や樹冠直径推定、詳細な林相区分など、リモートセンシングによる詳細な森林資源把握が可能になると期待されている(栗屋ら, 1998)。

高解像度衛星データでは、樹冠内に出来る影や、樹冠内での輝度値の違いが表現される(古家, 2004)。そこで、高解像度衛星データの解析手法として、画素値の空間分布パターンであるテクスチャを使用した解析が注目されている。テクスチャを算出する手法は様々あるが、その中で注目を集めているものに、同時生起行列 (Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM) の特徴量を用いる手法が挙げられる (Haralick *et al.*, 1973)。高解像度衛星データの登場もあり、リモートセンシングに GLCM 特徴量を用いる事例は、近年多くみられる (例えば、大西ら, 2005, Franklin *et al.*,

* 九州大学大学院生物資源環境科学府
Graduate School of Bioresource and Bioenvironment
of Science, Kyushu University

** 新潟大学農学部
Niigata University
〒950-2181 新潟市五十嵐 2 の町8050番地

***九州大学大学院農学研究科
Faculty of Agriculture, Kyushu University
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 46, NO. 6, 2007

2001, Ge *et al.*, 2006, Moskal & Franklin, 2004, Puissant *et al.*, 2005, St-Louis *et al.*, 2006, Wulder *et al.*, 1998)。その中には、GLCM 特徴量と林分構造因子との関係解析を行った例はいくつか見られる（例えば, Kayitakire *et al.*, 2006, Tuominen & Pekkarinen, 2005)。その結果, GLCM 特徴量と林分構造因子との関係性が明らかにされつつある。しかしながら, その研究例は少なく, 更なる検証が望まれている (Kayitakire *et al.*, 2006)。また, 日本の人工林の多くを占めるスギを対象とした研究は行われていない。

ところで, 現在の日本では, 材価低迷などの要因により, 間伐の停滞が問題となっている (仁多見, 2006)。間伐は, 残存木の形質を向上させることを目的とした, 間引きの伐採である (河原, 2001)。間伐は経営目的に適した林分を形成するための保育施業の一つであるわけだが, 間伐の遅れにより, 過密になった林分では, さまざまな問題が生じることが明らかになっている。例えば, 山田・諫本 (2001) は, 20年生のスギ無間伐林分において, 林内照度の低下による下層植生の減少から, 降雨時の土壌流出量が多くなることを示した。この他にも, 間伐の遅れた林分では, 冠雪害や強風による折損, 倒木の影響を受けやすいこと, 病虫害の発生原因になりやすいことなどが指摘されている (安藤, 1992)。以上のような理由から, 間伐は, 健全な林分を育成する上で不可欠である。それゆえ, 森林法において, 行政には, 間伐の適正に行われていない森林の所在を報告する義務が課せられている。今後, 間伐の推進を効果的に進めるためには, 間伐が必要な林分を効率良く把握する手法の開発が必要である。そこで高解像度衛星データのテクスチャ情報を用いる手法が考えられる。しかしながら, 高解像度衛星データのテクスチャ情報を用いた要間伐林分把握の研究は, ほとんど行われていない。

以上の点から, 本研究では, 要間伐林分把握の上で重要な因子であるスギ林分の本数密度に着目し, 高解像度衛星データから得られる GLCM 特徴量との関係を定量的に把握することを目的とした。

GLCM 特徴量とスギ林分の本数密度との関係を解析する上では, 本数密度以外の要因を可能な限り一定にした上で, 本数密度を変化させていくことが望ましい。これを実現するためには, 同齢級で施業条件なども等しい密度試験地が必要である。しかしながら, 現実の林分で, この条件を満たすのは困難である。また,

リモートセンシングの分野においては, 大気や地形などの影響により, 調べたい要因以外のすべての要因を一定とすることは困難である (Coops & Culvenor, 2000)。そこで, 本研究では, スギ密度試験地の地上測定データからスギ林分のコンピュータ・グラフィックス・モデル (以下, CG モデル) を作成し, CG モデルから高解像度衛星データをシミュレーションする手法を選択した。

2. 使用データ

本研究で使用した衛星データは, 2006年11月13日11時22分撮影の QuickBird パンクロマチックである。国土地理院発行の「数値地図50m メッシュ (標高)」と NTT データが販売する「BASEIMAGE™」をもとに, 地形歪み補正を伴うオルソ処理を行い, 8 bit に圧縮し, 空間分解能0.6m にリサンプリングした上で使用した。8 bit に圧縮した理由は, テクスチャの計算量を圧縮するためである。また, 衛星データに含まれる林分のうち, 大分県県有林41林班に小班に存在する34年生スギ人工林内に設置したプロットに対して, 全立木の根元位置, 樹高, 枝下高, 胸高直径, 樹冠半径を測定した。立木の根元位置に関しては, パーソナル・レーザ測量システム (MDL 社製 LaserAce 300) を用いて, 方位は0.1度括約で, 水平距離および高低差は0.1m 括約で測定した。樹高および枝下高は, 超音波樹高測定器 (Haglof 社製 VERTEX III) を用いて0.1m 括約で, 胸高直径は, 直系割巻尺を用いて0.1m 括約で測定した。樹冠半径は斜面上下方向と等高線方向の4方向それぞれを, ポールを用いて0.1m 括約で測定した。

樹冠の反射率を算出するためのデータとして, 西川ら (2006) のスギ複葉と白板の分光放射のデータを使用した。このデータは, 野外分光放射計 Field Spec Pro FR および Field Spec Pro JR (米国 Analytical Spectral Devices 社) を用い, 九州大学福岡演習林内にて, 2004年11月9日に測定されたものである。さらに, 密度毎の樹木モデル形状を決定するために, 福地ら (2006) のスギ植栽密度試験地の測定データを使用した。この植栽密度試験地は, 宮崎県北郷町大字郷之原内の大荷田国有林140林班ぬ林小班に位置する。本植栽密度試験地は Nelder (1962) の提案する系統的配置法に基づいて設計されている。Nelder (1962) の系統的配置法による密度試験地の形状は, スポークの付いた

車輪と評される（図-1，Hummel，2000）。円周とスポークの交点に樹木が植栽されており，各円周が特定の密度に対応している。この手法により，少ない面積で植栽密度試験を行うことが可能である。一般に，植栽密度試験では，プロット法が用いられるが，この手法には，広大な面積を必要とし，プロット間の地力差のため，密度効果の差が隠れるという欠点がある（粟屋・本田，1969）。しかし，系統的配置に基づく植栽密度試験は，地力差が密度効果に及ぼす影響を大幅に軽減させることが出来る（粟屋・本田，1969）。そのため，本試験地で得た測定データは，密度が与える影響を従来の試験法よりも詳細に捉えたものと考えられる。なお，本研究で測定したデータは，32年生無間伐時のものであり，376本/ha から10000本/ha までの10段階の密度試験の結果を利用した（表-1 参照）。

図-1 系統的配置による密度試験地概要

3. 方 法

3.1 樹木モデルによる衛星データシミュレーション

本研究では，葛岡・新井（2002）のモデルを用いた。このモデルは，レイトレーシング法を用いた樹木モデルから，衛星画像をシミュレーションする手法である。レイトレーシングとは，CG 作成の1手法で，光が目に到達する過程，とくに反射や屈折を忠実に計算し，物体を表現するものである（宇野，2001）。この手法を用いることにより，対象の樹木および太陽による陰影を正確に計算することができ，複雑な対象物に対しても容易に幾何学的計算が可能となる（葛岡・新井，2002）。

3.2 林分モデルの作成

林分は樹木と下層の2種類から成るものとした。図-2は樹木モデルの概要を示したものである。胸高直径を直径，枝下高を高さとする円柱上に，樹冠長と樹冠直径を基に仮定した樹冠を配置する形状とした。これらの値は，植栽密度試験地の測定データから，密度毎

図-2 樹木モデル

表-1 密度試験地調査データ概要。値は各密度の平均値を示す。

密度（本数/ha）	樹高（m）	胸高直径（cm）	樹冠半径（m）	枝下高（m）	樹冠長（m）	樹木間距離（m）
10000	13.27	12.26	0.52	12.0	1.3	1.00
6944	13.48	12.75	0.58	11.8	1.7	1.20
4823	14.01	14.59	0.65	12.1	1.9	1.44
3349	14.84	18.22	0.79	12.5	2.3	1.73
2326	15.10	19.53	0.85	12.8	2.3	2.07
1615	15.91	22.26	1.03	12.8	3.1	2.49
1122	16.53	26.74	1.20	12.3	4.2	2.99
779	16.52	29.14	1.36	11.2	5.3	3.58
541	16.88	33.12	1.63	9.4	7.5	4.30
376	17.11	34.74	1.86	7.4	9.7	5.16

に平均値を算出したものを利用した。本研究の対象樹種であるスギの樹冠は、その形状がパラボラ型で近似できることが報告されている（竹下，1985，林・高橋，1997）。そこで、樹冠の形状は、パラボラ型とした。樹冠の反射率は、西川ら（2006）のスギ複葉と白板の分光放射のデータから、QuickBird パンクロマチックの観測波長帯に基づき算出した。その結果反射率は0.12となった。下層は、平面で傾斜は無いものとした。また、裸地を想定した。これは、林分が32年生無間伐林分であるゆえ、下層の下層植生の発生が抑制されると考えられるためである。なお、裸地のアルベドがおおよそ10から25であることを考慮し（小倉，1999），下層の反射率は0.20とした。

樹木および下層の表面特性としては、両者とも太陽光の鏡面反射だけの反射、屈折・透過は無いものとし、その表面で拡散反射するものとした。その際の拡散反射係数は0.6とした。これは、対象物に入射した光の60%があらゆる方向に反射することを意味する。なお、今回は間接光の代わりに、環境光というバイアス光を仮定した。バイアス光は対象と光源との位置に関係なく与えられる光である。葛岡・新井（2002）は、全対象物に対し、一律に0.2の値を用いていた。これはシーン全体に対して、白色の光が強さ0.2で一様に与えられていると考えたことになる（葛岡・新井，2002）。しか

し、樹冠の遮断により下層は、樹冠と比べ間接光の入射量が少ないことが予想される。また、全対象物に0.2の値を用いた場合、樹冠の頂端に次いで画素値の高い箇所として、下層が含まれる結果となり、現実の林分と対応しない結果となることが予想された。そこで、下層の環境光には0.02の値を、それ以外の箇所に0.2の値を用いた。

以上の設定した樹木を下層上に配置することで林分とみなした。このとき、樹木の配置方法を変えることで、無間伐の林分と間伐直後の林分の2種類を試行した。まず、無間伐の林分に関し述べる。無間伐の林分では、表-1における樹木間距離を基に、正方形格子上に樹木が生えていると仮定した（図-3）。

次に間伐直後の林分に関して述べる。今回は、無間伐の林分から、樹木を一定本数間引くことで、間伐直後の林分を再現した。具体的には、格子点上に一定本数樹木の配置を行わないことで間伐とみなした。間伐前の植栽密度として、1615本/ha（図-4），2326本/ha，3349本/haを用いた。日本国内で現実に見られる林分密度を検討するという観点からこれらの密度を選択した。間伐率は、本数ベースで計算し、5%間隔で30%を上限とした。今回のモデルでは、間接光の割合を、ギャップの大きさに関わらず一定にしている。そのため、極端に大きなギャップのある林分では、モデルと

(a) 376本/ha

(b) 1122本/ha

(c) 2326本/ha

(d) 10000本/ha

図-3 無間伐林分をシミュレーションした図。左側はレイトレーシングにより作成したCGを、右側は衛星画像に変換した画像を、それぞれ意味する。解像度は0.6mである。

(a) 5%間伐

(b) 10%間伐

(c) 15%間伐

(d) 30%間伐

図-4 間伐前1615本/haの林分に対して、ランダムに間伐を与えた図。左側はレイトレーシングにより作成したCGを、右側は衛星画像に変換した画像を、それぞれ意味する。

現実林分との差が大きくなることが予想される。そこで、間伐後の本数が、Nelder のプロットにおいて、一段階低い密度の本数と同程度となるまでの検討に留めることとした。それゆえ、今回の間伐率は30%を上限とした。今回のモデルでは、樹高の違いが考慮されていないため、低層間伐、全層間伐、上層間伐の違いが無い。そこで、ランダムに間伐木を決定した。それぞれの間伐割合で、50回ずつの間伐木の決定を行った。なお、本研究ではうっ閉した林分を想定して、林縁からの光の入射の影響のない林分とした。この条件を満たすため、無間伐林分、間伐直後の林分ともに、解析対象範囲の周囲に20mほど広く樹木を配置した。また、今回の検討は下層の反射率を一定としているため、間伐による下層の植生回復が起こる前の状態を表現していることとなる。

3.3 衛星画像のシミュレーション

図-5にモデルの座標、衛星と太陽との位置関係を示す。観測範囲を狭い範囲に限定し、地表は平面であるとした。観測座標原点は、地上の観測対象中心とし、x軸は、東西方向、y軸は南北方向、z軸は天頂方向とした。衛星位置は直下視とした。

撮影日時は11月13日11時22分、撮影場所は、東経131度32分、北緯32度06分とした。これは使用データであ

る QuickBird データの観測条件と同様である。その結果、太陽方位角が167度、太陽天頂角が56度となった。太陽は、白色平行光とした。すなわち、太陽は観測対象と衛星間の距離に比べてはるかに遠いところにある、全スペクトル帯一様のスペクトル輝度を持つと仮定した。今回、パンクロマチックを仮定していることから、問題は無いものと考えられる。加えて、大気によるスペクトル選択的な吸収効果は無視した。

図-5 観測条件

以上の条件を基にレイトレーシングにより、林分のCGを作成した。作成したCGを低解像度化することにより、衛星画像に変換した。低解像度化する際は、観測センサにおけるポイントスプレッド関数が矩形であると仮定し、衛星が観測する画像をシミュレーションするように分解能を低下させた。すなわち、観測視線方向を中心として分解能の範囲を1、そのほかの部分をも0という特性を持つ二値の最も簡単なセンサを考えた。このとき、解像度を0.6mとした。

最後に、以上の工程を経て作成される画像の濃度補正を行った。レイトレーシングで作成した画像の画素値のレンジと実際に QuickBird にて観測された画素値のレンジを揃えるための工程である。まず現地調査のデータを基に実際の QuickBird 衛星の範囲内の林分を今回と同様のモデルで再現した。作成した画像における林床と樹冠の頂端の値と、実際の QuickBird パンクロマチックにおける林床と樹冠の頂端の値を合計25点比較し、最小二乗法により、モデルの画素値を実衛星画像の画素値に近づけるための一次回帰式を算出した。

$$(QuickBird \text{ モデル}) = a \times (\text{モデル計算結果}) + b \quad (1)$$

このとき算出される a の値を、レイトレーシングに用いる光量に乘じたのち、再度レイトレーシングを実行した。 b の値は、低解像度化したのちに、足し合わせた。 b は全体に対して、一律に付加するものであるため、この方法で、問題は無いものと考えられる。 b を足し合わせた画像を持って、衛星画像とみなした。

3.4 GLCM

GLCM は、画像の濃度 i の点から一定の変位 $\delta=(r, \theta)$ だけ離れた点の濃度が j である頻度、 $p(i, j)$ 、($i, j=0, 1, \dots, n-1$) を要素とする同時生起行列を求め、その行列から特徴量を計算し、それらの値によってテクスチャを特徴付ける手法である (高木・下田, 1991)。本研究では、同時生起行列の算出のためのウィンドウサイズを20mとした。変位距離 r は1とし、変位方向は、 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ, 360^\circ$ の8方位を利用することとした。これは、濃度 i の点に隣接する8ピクセルから、GLCMを算出することを意味する。算出したGLCMから、今回以下の6つの特徴量を使用した。同時生起行列の要素を $p(i, j)$ とした時、

$$\text{均質性 (HOM)} \quad \sum_i \sum_j \left(\frac{1}{1+(i-j)^2} \right) p(i, j) \quad (2)$$

$$\text{コントラスト (CON)} \quad \sum_i \sum_j (i-j)^2 p(i, j) \quad (3)$$

$$\text{異質性 (DISS)} \quad \sum_i \sum_j |i-j| p(i, j) \quad (4)$$

$$\text{エントロピー (ENT)} \quad - \sum_i \sum_j p(i, j) \log p(i, j) \quad (5)$$

$$\text{角2次モーメント (ASM)} \quad \sum_i \sum_j (p(i, j))^2 \quad (6)$$

$$\text{相関 (COR)} \quad \sum_i \sum_j \frac{(i-u)(j-u)p(i, j)}{\delta^2} \quad (7)$$

$$\text{ここで、} u = \sum_i \sum_j ip(i, j) \quad (8)$$

$$\delta^2 = \sum_i \sum_j (i-u)^2 p(i, j) \quad (9)$$

となる。なお、GLCMの算出に合わせて、画像全体の画素値の平均値と標準偏差も合わせて算出した。

4. 結 果

4.1 無間伐林分における GLCM と本数密度との関係解析

本数密度と GLCM 特徴量の関係を図-6に示す。均質性は本数密度の上昇とともに値が減少する傾向が見られ、3349本/ha以降はほとんど一定の値となった。コントラストは、本数密度376本/haから2326本/haまでの間は、本数密度の上昇に伴い値が上昇した。2326本/ha以降は、本数密度の上昇に伴い値が減少した。Kayitakire *et al.* (2006) は、本数密度267本/haから2100本/haにおいて、コントラストと本数密度の間に正の相関関係を示しており、これとほぼ一致する結果となった。異質性は、コントラストとほぼ同様の傾向を示した。エントロピーは、本数密度の上昇に伴い値が上昇したが、2326本/haで頭打ちとなり、その後はほぼ一定の値を示した。角2次モーメントは、本数密度1615本/haまで値が急激に減少した。それ以降は、ほぼ同じ値をとった。相関は、2326本/haまでは値が減少した。2326本/ha以上では、本数密度の上昇とともに値が上昇した。しかし、本数密度10000本/haにおいて、若干の減少傾向が見られた。

図-6 無間伐時に置ける本数密度とテクスチャの関係。なお、(g)平均と(h)標準偏差は、画像全体の画素値の平均値および標準偏差を意味する。

図-7 間伐が本数密度とテクスチャの関係に及ぼす影響。間伐後の値は、間伐後の本数密度に合わせてプロットしている。菱形は間伐前に1615本/haであった林分、三角は間伐前に2326本/haであった林分、四角は間伐前に3349本/haであった林分の値を表す。菱形、三角、四角は、50回の平均値、誤差線は標準偏差である。

4.2 間伐直後の林分における GLCM と本数密度との関係解析

図-7 は、間伐が本数密度と GLCM 特徴量の関係に与える影響を示したものである。間伐の結果、間伐前と比べ、均質性、角 2 次モーメントは上昇し、コントラスト、異質性、エントロピーは減少する傾向が見られた。また、間伐後の GLCM 特徴量と、間伐後の本数密度における無間伐林の GLCM 特徴量を比較すると、間伐率が上がるにつれてその差が大きくなる傾向が見られた。ただし、1122 本/ha を間伐したときのテクスチャ特徴量では、コントラスト、異質性において無間伐林におけるテクスチャ特徴量とほぼ同じ軌道を描くことが予想された。

5. 考 察

5.1 無間伐林分における GLCM と本数密度との関係解析

376 本/ha から 2326 本/ha までは、均質性、角 2 次モーメントが低下し、コントラスト、異質性、エントロピーが上昇する傾向が見られた。これらは、画像中の画素値の変化が、本数密度が増すにつれ大きくなったことを示す。高解像度衛星で針葉樹人工林を撮影した場合、梢端付近で画素値最大となる（古家，2004）。そのため、本数密度が増えると、画像中で、局所最大値をとるピクセル数が増加する（図-8）。376 本/ha から 2326 本/ha までの、均質性、角 2 次モーメントの低下とコントラスト、異質性、エントロピーの上昇は、これを反映したものと考えられる。

2326 本/ha 以上になると、コントラスト、異質性が低下する傾向が見られる。これは、本数密度が増えるに従い、画像中の局所最大値と最小値の差が小さくなったためと考えられた（図-8）。今回使用した密度試験地の測定データには、本数密度が増すにつれて、樹冠半径、樹冠頂ともに減少する傾向が見られた（表-1）。また密度が増えることは、樹木間の距離が縮まることを意味する。これらから、本数密度が増すと梢端と樹冠の中部、縁部とのミクセル、また下層と樹冠縁部、樹冠中部とのミクセルが生じやすくなる。その結果、画素値最大となる梢端のピクセルはより低い値をとり、画素値最小となる下層のピクセルがより高い値をとったものと考えられる。また、相関は、2326 本/ha までは減少傾向となり、その後増加に転じた。2326 本/ha

は、コントラスト、異質性が傾向を変化させた値でもある。そのため、相関の傾向の変化も、ミクセルの影響があると思われるが、その詳細は不明であった。

5.2 間伐直後の林分における GLCM と本数密度との関係解析

間伐直後の林分では、本数密度が同程度の無間伐林分と比べ、均質性、角 2 次モーメントは上昇し、コントラスト、異質性、エントロピーは減少する傾向が見られた。このことは、間伐した林分では、画像中の画素値のばらつきが小さいことを意味する。これは、樹冠疎密度の違いが影響していると思われる。同じ本数密度であっても、間伐直後の林分では、樹冠の被覆率が低く、下層が露出した状態となる。樹冠と比べ、下層は、画素値が安定していたため、間伐直後の林分では、画素値のばらつきが小さくなったと考えられる。

5.3 GLCM 特徴量を用いた本数密度把握

5.1, 5.2 を総合して、GLCM 特徴量を用いた本数密度把握について考察する。図-6 より、本数密度と GLCM 特徴量には関連性があることが分かった。現在の日本における、標準的な植栽密度である 3000 本/ha までを考えると、解像度 0.6m の均質性、エントロピー、角 2 次モーメント、平均などは、本数密度に対して減少もしくは増加傾向を示すため、本数密度把握の可能性を有するようにも思える。しかしながら、図-7 で示すように、同じ本数密度でも、ギャップの有無で、テクスチャは大きく変動することが示唆された。また、今回は、全ての樹木が同じ形状で、かつ格子状に配置されている。しかし実際は、樹木ごとにその大きさや形状、配置も異なる。そういった中で、同じ本数密度でも値がばらつくことが予測される。これらのことを踏まえると、GLCM 特徴量での詳細な本数密度把握は困難であると予想された。

次に、より大まかな本数密度把握について考察する。現在、日本の人工林では成熟化が進んできている（林野庁，2006）。その中で、日本のスギ人工林には、1000 本/ha 以上の林分が多いと思われる。それゆえに、大まかな指標であったとしても、本数密度把握の上では、1000 本/ha 以上の林分を数分割するような指標であることが不可欠であると考えられる。今回算出した GLCM 特徴量のほとんどは、1122 本/ha 以上から変化が少なくなる傾向が見て取れた（図-6）。その中で、

図-8 無間伐林における画素値の変動。樹冠の梢端を表す画素を通るように、東西方向にプロファイルを取ったときの値を示している。

ギャップの有無には敏感に反応する傾向もあった(図-7)。これらの理由から、大まかな本数密度把握という点においても、GLCM 特徴量は、条件を満たさない。それゆえ、GLCM 特徴量での本数密度把握は、困難であると思われる。なお、本数密度把握に関しては、画素値での解析でも同様のことが言える。

5.4 GLCM 特徴量を用いた間伐遅れ林分把握

最後に、GLCM 特徴量を用いた間伐遅れ林分の把握に関して言及する。図-6 から、1122本/ha 付近からスギの標準的な植栽密度である3000本/ha まで、均質性や角2次モーメントで値が一定となる傾向が見られた。更に、間伐を行った場合、無間伐のときと比べて、値が上昇する傾向が見て取れた(図-7)。そのため、均質性や角2次モーメントのより低い林分を抽出することで、1122本/ha 以上の本数密度で、無間伐に近い林分を把握できる可能性を有していると考えられる。このことから、GLCM 特徴量を用いることで1122本/ha 以上で間伐の遅れた林分を把握できる可能性があると考えられる。

6. おわりに

GLCM 特徴量と本数密度には関連性があることが示された。また、GLCM 特徴量は本数密度だけでなく、間伐で生じたギャップの影響を強く受けることが分かった。そのため、本数密度による詳細な密度把握は困難であることが予想された。一方で、GLCM 特徴量を用いることにより、間伐の遅れた林分を把握できる可能性があることが示唆された。

テクスチャは、高解像度衛星データの持つ利点の一つである。しかしながら、テクスチャを使う手段や方法について、未だ説明が不十分である。本研究では、その足がかりの一つとして、GLCM 特徴量とスギ本数密度との関連性を示唆する結果を得ることが出来た。その手法として、今回は、シミュレーションモデルを用いた。その為、現実の林分で、必ずしも同様の結果となるとは限らない。例えば、今回、林分は傾斜の無い平面にあるものとした。山岳地に位置する森林では、斜面による陰影の発生、地形効果が衛星データを解析する上で最大の障壁となる(Leprieur *et al.*, 1988, Colby, 1991)。その為、地形効果により、林分構造因子の違いに起因するテクスチャ情報の差が覆い隠され

る可能性がある。以上のことから、現実の林分を用いて、妥当性を検討する必要があると思われる。

(受付日2007.3.30, 受理日2007.11.9)

引用文献

- 栗屋仁志・本田健二郎, 1969. 系統的配置による植栽密度試験の設計, 日本林学会誌, 51, pp.217-220.
- 栗屋善雄・露木 聡・田中邦宏, 1998. 高地上分解能衛星データの効用と問題点, 森林計画誌, 31, pp. 59-64.
- 安藤 貴, 1992. 閉鎖後の保育, 造林学(川名 明・片岡寛純編著), pp.137-158, 朝倉書店, 東京.
- 猪瀬光雄, 1998. 林資源調査の目的, 林業技術ハンドブック(林野庁監修), pp.325-398, 全国林業改良普及協会, 東京.
- 宇野 栄, 2001. 情報科学こんせぶつ11 グラフィックスのしくみ, 朝倉書店, 東京, 148pp.
- 大西紀子・村上拓彦・溝上展也・吉田茂二郎, 2005. オブジェクトベース画像分類による林相区分—高分解能衛星データと中分解能衛星データの比較—, 九州森林研究, 58, pp.131-134.
- 加藤正人, 2002. 高分解能 IKONOS 衛星による針広混交林の樹種分類, 森林航測, 198, pp. 6-9.
- 河原輝彦, 2001. 森林・林業百科事典(日本林業技術協会編著), p.171, 丸善株式会社, 東京.
- 葛岡成樹・新井康平, 2002. Ray Tracing を用いた樹木モデルとパラメータ推定, 日本リモートセンシング学会誌, 22, pp.394-404.
- 小倉義光, 1999. 一般気象学, 東京大学出版会, 東京, 308pp.
- 高木幹雄・下田陽久, 1991. 画像解析ハンドブック, pp.475-637, 東京大学出版会, 東京.
- 竹下敬司, 1985. パラボラ樹冠形モデルによるスギ人工林の構造解析, 九州大学農学部演習林報告, 55, pp.55-104.
- 西川僚子・村上拓彦・大槻恭一・溝上展也・吉田茂二郎, 2006. 衛星データおよび地上測定データからみた竹林の分光反射特性の季節変動, 日本森林学会誌, 88, 473-481.
- 仁多見俊夫, 2006. 間伐施業と基盤整備, 森林技術, 770, 14-16.
- 林 拙郎・高橋洋子, 1997. 樹形のモデル化について—スギ・ヒノキの場合—, 日本林学会誌, 79, 222-228.

- 福地晋輔・吉田茂二郎・溝上展也・村上拓彦, 2006. 系統的配置によるオビスギの密度試験, 日本森林学会学術講演集, 117, p.190.
- 古家直行, 2004. 単木樹冠, 森林リモートセンシング(加藤正人編著), pp.150-153, 日本林業調査会, 東京.
- 森 信宏・佐藤宣子, 2002. 森林整備における地方自治体の役割―間伐における地方単独事業の分析―, 九州森林研究, 55, pp.1-5.
- 山田康裕・諫本信義, 2001. 間伐が下層植生および表層土壌の流出に与える影響, 九州森林研究54, pp.79-80.
- 林野庁, 2003. 森林資源モニタリング調査データ地理解析事業報告書. p.16.
- 林野庁, 2006. 平成18年版森林林業白書, 283pp., 日本林業技術協会, 東京.
- Colby, J.D., 1991. Topographic normalization in rugged terrain, Photogrammetric Engineering And Remote Sensing, 57, pp.531-537.
- Coops, N., and Culvenor, D., 2000. Utilizing local variance of simulated high spatial resolution imagery to predict spatial pattern of forest stands, Remote Sensing of Environment, 71, pp.248-260.
- Franklin, S.E., Wulder, M.A., and Gerylo, G.R., 2001. Texture analysis of IKONOS panchromatic data for Douglas-fir forest age class reparability in British Columbia, International Journal of Remote Sensing, 22, pp.2627-2632.
- Ge, S., Carruthers, R., Gong, P., and Herrera, A., 2006. Texture analysis for mapping *Tamarix Parviflora* using aerial photographs along the Cache Creek, California, Environmental Monitoring and Assessment, 114, pp.65-83.
- Hummel, S., 2000. Height, diameter and crown dimensions of *Cordia alliodora* associated with tree density, Forest Ecology and Management, 127, pp.31-40.
- Haralick, R.M., Shanmuga, K., and Dinstein, I., 1973. Textural features for image classification, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, SMC3 (6), pp.610-621.
- Kayitakire, F., Hamel, C., and Defourny, P., 2006. Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-1 imagery, Remote Sensing of Environment, 102, pp.390-401.
- Leprieur, C.E., Durand, J.M., and Peyron, J.L., 1988. Influence of topography on forest reflectance using Landsat Thematic Mapper and digital terrain data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54, pp.491-496.
- Moskal, L.M., and Franklin, S.E., 2004. Relationship between airborne multispectral image texture and aspen defoliation, International Journal of Remote Sensing, 25, pp.2701-2711.
- Nelder, J.A., 1962. New kind of systematic designs for spacing experiments, Biometrics, 18, pp.283-307.
- Puissant, A., Hirsch, J., and Weber, C., 2005. The utility of texture analysis to improve per-pixel classification for high to very high spatial resolution imagery, International Journal of Remote Sensing, 26, pp.733-745.
- St-Louis, V., Pidgeon, A.M., Radeloff, V.C., Hawbaker, T.J., and Clayton, M.K., 2006. High-resolution image texture as a predictor of bird species richness, Remote Sensing of Environment, 105, pp.299-312.
- Tuominen, S., and Pekkarinen, S., 2005. Performance of different spectral and textural aerial photograph features in multi-source forest inventory, Remote Sensing of Environment, 94, pp.256-268.
- Wulder, M.A., LeDrew, E.F., Franklin, S.E., and Lavigne, M.B., 1998. Aerial image texture information in the estimation of Northern deciduous and mixed wood forest leaf area index (LAI), Remote Sensing of Environment, 64, pp.64-76.