

# 衛星データを用いた房総半島スギ林と 地質の相関解析

西川 肇<sup>1</sup>・藤井 壽生<sup>2</sup>・工藤 勝輝<sup>3</sup>・近田 文弘<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 習志野市泉町1-2-1)

<sup>2</sup>正会員 博士(農学) 日本大学助教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 習志野市泉町1-2-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 日本大学専任講師 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 習志野市泉町1-2-1)

<sup>4</sup>理博 国立科学博物館植物第一研究室 (〒305-0005 茨城県つくば市天久保4-1-1)

森林は、水資源涵養機能の立場から大きく評価されるようになってきた。森林の水資源涵養機能の評価に関しては、森林を構成する樹木の生育と森林の土台となる地質との地植物学的関係を把握することが大切である。本研究は、千葉県に広く分布するスギ人工林を対象に、ランドサット TM データから算定する  $\{50.0 \times (\text{Band-4}/\text{Band-3}) + (\text{Band-5})\}$  の値で示されるスペクトル指標の地域分布とその基盤となる地層の分布とを比較したところ、その分布パターンがほぼ一致することを見出した。本研究では、このスペクトル指標を地植物指標と名付け、房総半島のスギ林地土壌の理学的性質を推定する可能な手法として、衛星データ解析によって求まる地植物指標の利用を提案した。

**Key Words :** remote sensing, forest soil, geobotany, vegetation index, geobotanical index

## 1. はじめに

地植物学(Geobotany)は、地球植物学とも言い<sup>1)</sup>、地球と植物との関係を論ずる新しい研究の一分野である。地植物学の研究対象は、地質的にまとまりのある地域とそこに存在する植生の関係等、比較的広い面積の地球上の一範囲であり、人工衛星を使ったリモートセンシングは、広い範囲を短時間で調査できるので地球植物学の有効な方法である。

変成を受けている蛇紋岩地では、変成を受けていない砂岩や泥岩地に比べて樹木の生育が極めて不良であり<sup>2)</sup>、カルスト台地を形成する石灰岩地も同様に不良である。南アルプスでは、花崗岩の卓越する東部の鳳凰山系と、四万十層の堆積岩が卓越する中央部の赤石山脈本体と、変成岩が分布する中央構造線付近では、同一樹種の樹木の分布密度と樹種の分布パターンに相違が見られる<sup>3)</sup>。鳳凰山系では、岩石地に多い浅根性のコマツガやカラマツが高密度で分布し、赤石山脈本体では、深い土壌を好むシラビソが高密度で分布している。そして中央構造線付近では、ヒメコマツ、サワラ、ネズコ、ヒノキ等、他の2地域では見られない樹木が高い密度で分布することが3カ年を要した現地調査で明らかにされ

た。

このように、林地の土台である地質は樹木が直接的に根を張る林地土壌の性質や構造と密接に関係しており、林地土壌の性質や構造を解析することにより、その林地の性質が明らかになる。一方、樹木の生長の如何は、林地土壌によるところが大きいので、樹木の生長と林地土壌の性質や構造の間に相関関係を見出すことにより、森林の生育状況から、その林地の地質を判定することが可能になると考えられる。著者等はこのような地植物学的な考え方で、森林の生育状態と林地土壌の理学的性質について定量的な相関解析を行い、樹木の生育状態を定量的に示すことのできる分光反射特性と林地土壌の粗孔隙率との間に相関関係があることを見出している<sup>4)</sup>。

森林を対象にして地植物学的な解析を進めるにあたっては、森林の生育状態の違いを定量的に扱うこと、ならびに単一樹種から成る森林を対象にすることが必要である。森林の生育状態の中でも生長活力のような定量化がむずかしい要因は分光反射特性によって定量化が可能であり、これには可視光～赤外線波長域の分光反射率を測定している人工衛星リモートセンシングデータ(以後、衛星データ)の利用が有効である。また、スギ人工林は、我が国で

はどこにでも見られる単一樹種から成る森林であり、地植物学的解析の対象森林として最適であると思われる。

本研究は、異なった地質が相互に明瞭に異なる地理的分布をし、かつその全域に樹齢や生育状態の異なるスギ人工林が広く分布している千葉県房総半島を地植物学的な解析の対象地域に選定した。研究の内容は、現地調査によってスギ人工林の生育状態と林地土壌の理学的性質との関係を定量的に解析するとともに、その解析結果を基に本研究で提案する衛星データから得られる森林の地植物指標を媒介としてその林地の地質を把握できるかどうかを検証したものである。

スギ等の人工林を含む広域的な森林は、近年、水資源涵養機能の立場から大きく評価されるようになってきた。それは、空間を立体的に占める樹林そのものではなく、立木が育つ土地のダムとしての能力を評価することである。建設省や林野庁等が打ち出している河川の流域管理の考え方は、この立場に立脚したものとと言える。森林の水資源涵養機能に関しては、森林を構成する樹木の種類、密度、生育状態等と、森林の土台となる地質の関係を把握することが大切である。本研究は、その基礎となるものである。

## 2. 研究対象地の概況

本研究で解析の対象にした千葉県房総半島における地形・地質、植生および気候の概況は以下のとおりである。

### (1) 地形・地質の概況

房総半島は、本州弧が北東から西南西に転ずる中央部から南方へ突き出した形になっており、東および南面を大平洋に面し、西の一部は東京湾を形成している。南部の丘陵、中央部の台地および海岸や河川沿いの低地からなる。半島南部では、陸地の大部分は100~300mの丘陵山地からなる。このうち、嶺岡山地は、房総半島の最も古い地質単位である古第三系嶺岡層群が隆起地塊をなし分布する地域であり、この最高点をなす愛宕山(408.2m)は千葉県下の最高峰でもある<sup>9)</sup>。この北部は下総台地で、そこから北西に緩く高度を下げて北縁の利根川下流低地へと達する。また、東京湾に面して東京湾岸低地が、利根川河口と上総丘陵との間の南部の大平洋に面した地域に九十九里低地が立地する。

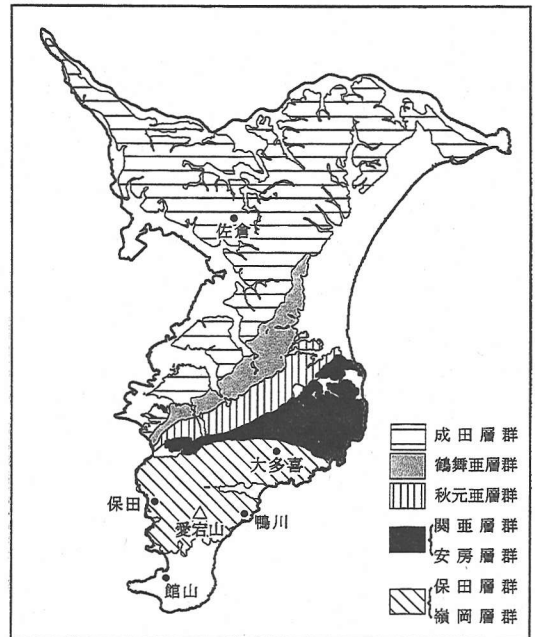


図-1 千葉県の地質分布図

(財) 深田地質研究所発行の千葉県地質図を基に作成

千葉県の地質は、新生代の非火山性堆積物が大部分を占めている。北部下総台地は、第四紀洪積世の砂を主とする浅海堆積層としての下総層群が大部分を占め、上層は古富士火山などの火山灰風化物(ローム)が薄く覆っている。南部丘陵地帯は、大部分が第三紀の固結度の低い砂岩や泥岩およびその互層からなる<sup>9)</sup>。南端部の保田から鴨川にかけて嶺岡破砕帯が横断しており、地すべり地帯になっている。

図-1は、(財) 深田地質研究所発行の千葉県地質図<sup>9)</sup>を基に作成した研究対象地域の概略地質図を示したものである。なお、最南端部の関亜層群および安房層群は調査対象林が無いので除外した。

表-1は、前出千葉県地質図から読み取った各地層における地質を示したものである。

### (2) 植生の概況

植生は、温暖な気候の影響をうけて暖温帯性のものが多い。上総丘陵および下総台地のほとんどが人工的な樹林および耕作地で占められているが、安房丘陵にはコナラ・クリの広葉樹林やカシ類混交のような照葉樹林が見られ、安房丘陵南部にはシイ・ブナ林の照葉樹林が見られる<sup>10)</sup>。ちなみに、千葉県全域に見られる針葉樹林はほとんどスギの人工林で、特に半島中央西部鶴舞亜層群に接する成田層群の山武スギは成長の早さでは全国的にも知られ、植

表-1 千葉県地質概況

{(財) 深田地質研究所発行の千葉県地質図を基に作成}

地層	地質	
成田層群	成田層群上部	礫, 砂, シルト(ロームに覆われる)
	敷層	礫, 砂, シルト(ロームに覆われる)
	地藏堂層	細砂, (ロームに覆われる)
鶴舞亜層群	周南層	砂, 泥互層
	佐貫層	砂質泥
	笠森層	泥質砂
	長浜, 万田野層	砂礫層 (一部がロームに覆われる)
	長南層	砂, 泥互層
秋元亜層群	柿の木台	砂質泥
	市宿層	砂(ロームに覆われる)
	国本層	泥岩および砂, 泥互層
	梅ヶ瀬層	砂礫層および砂, 泥互層
関亜層群	黄和田層, 大田代層	泥および砂, 泥互層
	豊房層	砂および泥互層
	飯岡層	泥岩
	黒滝層	灰質砂岩, 礫岩
	中三原層	灰角礫岩
安房・保田・嶺岡層群	天津層, 西岬層	泥岩
	夫婦ヶ鼻層	泥岩, 砂岩互層および凝灰角礫岩
	佐久間層	泥岩, 砂岩, 泥岩互層および凝灰質砂岩
	保田層群	泥岩, 砂岩
	嶺岡層群	泥岩, 泥岩互層
	塩基性岩類	蛇紋岩, 玄武岩

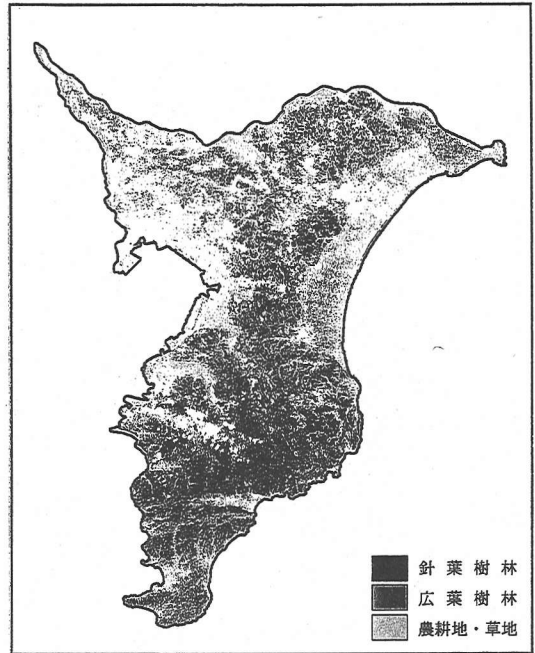


写真-1 千葉県の植生分類

(1997年4月14日観測のランドサット TM データより作成)

林に多く利用されている。

写真-1 は、現存植生図や本研究の踏査等から得た結果を教師(分類カテゴリーごとのスペクトルパターンが示す特徴量)として、1997年4月14日観測のランドサット TM/Band-2,3,4 データを用いた多次元レベルスライス処理によって作成した千葉県の植生分類を示したものである。植生分類は針葉樹林(スギ人工林)、広葉樹林および農耕地(草地を含む)の3カテゴリーで表示した。

### (3)気候の概況

気候は、大太平洋に突出した半島という地理的特徴から下総台地北部でやや内陸性の特徴を示す以外は県内ほとんどの地域で海洋性の特徴を示している。1999年の冬期1月における月平均気温について見ると、内陸の佐倉の3.7℃に対して、海岸に面する館山では6.5℃となっており、温暖な冬は海岸に面する地域で顕著である。

図-2 は、千葉県内雨量観測所において1979~1990年までの12年間に記録した年平均降雨量から作図した年平均降雨量の地域分布を示したものである。年降雨量が2,100mmを越える南部山間地方に対し県北西部は1,300mm程度で、多雨地域と寡雨地域が存在し、その差は800mmにもなる。積雪は1,2月に数回程度で、その積雪深は4cm以

下であるが、多い年には多雨地域の大多喜で40cm(1984年)を記録した。各地層の年平均降雨量は、図-2から成田層群:1,384mm、鶴舞亜層群:1,642mm、秋元亜層群:1,843mm、関亜層群:1,963mm、安房・保田・嶺岡層群:1,846mmと算定された。

気温は、1999年8月の月平均で県北部の佐倉で27.3℃、県南部太平洋岸の鴨川で27.5℃となっており、県内の地域差は特に認められない。

### 3. 現地調査データを用いた地植物学的解析

各地層で選定した樹齢の異なるスギ人工林を調査対象に、生育状況と林地土壌の理学的性質を測定し、その相関分析を行った。なお、調査対象スギ林は日射要因による生育への影響を最小限に止めるために、全て日射面の山腹斜面の森林とした。なお、現地調査は、本研究で利用した衛星データ観測日に同期させて1998年8月に実施した。

#### (1)調査項目の概要

##### a)生育状態に関する調査

調査対象スギ人工林に対する生育状態の調査項目

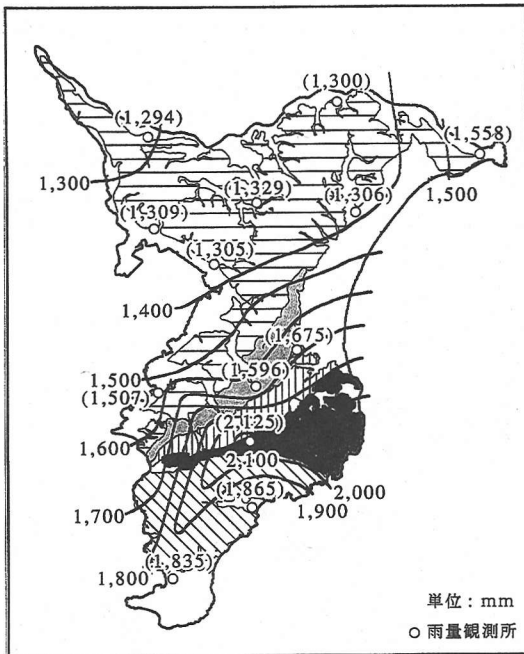


図-2 平均年降雨量の地域分布  
(千葉県雨量観測所資料より作成)

は、肥大生長量、葉中含水率および比植生指標の3項目で、それらの概要は以下のとおりである。

### ①肥大生長量 (cm)

立木の幹の肥大生長量は、胸高部における水平方向の年平均成長幅(年輪幅)で表し、現地で測定した年輪と胸高直径との比率(胸高直径/年輪)によって求めた。なお、年輪数は、調査時に直接伐採は行わず、林内の間伐による立木切り口で調査した。胸高直径は、円周長から算定した。

### ②葉中含水率 (%)

葉中含水率は、現地で採集した試料スギ葉 50g を 60℃ で 30 時間乾燥した後の乾燥重量を計測し、葉中含水率(%) =  $\{(50 - \text{乾燥重量}) / 50\} \times 100$  の計算式から算定した。なお、葉中含水率の測定に供した試料スギ葉は、複数立木から採集した約 500g の葉を良く攪拌した後に抽出した 50g の葉である。

生きた葉の分光反射特性は、葉中水分量が多いほど 1.6 μm 付近の反射強度が低下することが知られている。この特性を利用して、人工衛星リモートセンシングの分野では中間赤外線波長域(ランドサット TM では Band-5)の観測データが植生調査における葉中含水率の判読に利用されている<sup>14)</sup>。

### ③比植生指標

人工衛星リモートセンシングの分野では、地球上の植生の存在や植物の生長活力の判読の際に、可視

光赤波長域反射率(red: Visible red)と近赤外線波長域反射率(NIR: Near-Infrared)の比率 NIR/red で示される指標 RVI(Ratio Vegetation Index) を利用している。生きた葉が示す可視光赤波長域の反射率は葉緑素の葉中含有量が多いほど低下し、近赤外線波長域の反射率は葉緑素の活性が高いほど上昇する特性を有する<sup>12)</sup>。これまでの研究から、この両波長域反射率の比率で算定される RVI は、(1)植生への日射条件によって異なる<sup>13)</sup>、(2)植生地土壌との間に相関性が認められる<sup>14)</sup>、(3)潮風害による生長阻害の程度と関連する<sup>15)</sup>、など植生の生育状態との相関性が確認されている。

本研究では、この比植生指標 RVI をスギ人工林の生育状態を定量的に示す指標の一つとして利用することにした。現地調査では、調査対象林の RVI を得るために、現地で採集したスギ葉に対して(0.400~1.050 μm)の観測幅を持つアレイ(株)製ポータブルフォトメータを使用して NIR と red をそれぞれ測定した。なお、本研究で利用する衛星データはランドサット TM データとなるので、ランドサット TM センサの可視光赤波長観測域(0.63~0.69 μm)、ならびに近赤外線波長観測域(0.76~0.90 μm)に合わせて各波長域の平均反射率を測定した。分光反射率の測定は、現地で胸高直径が大・中・小 3 本の樹木から採取したスギ林を 70cm×70cm の板の上に、板面がすべて隠れるくらいに敷きつめ、野外において、太陽を背にして測定した。

### b)林地土壌に関する調査

調査対象スギ人工林に対する林地土壌の理学的性質の調査項目は土壌含水率、土壌間隙率および有効土層深の3項目で、各調査項目の概要は以下のとおりである。なお、含水率と間隙率の測定対象土壌は、A0層(有機物層)を除いた、樹木の落枝落葉が土壌に影響の顕著なA層(表層あるいは溶脱層)の土壌に対するものである。

#### ①土壌含水率 (%)

土壌の含水率は、φ50×H51mm(容積 100cc)のステンレス製採土器を使って現地で採取した試料土壌の自然重量と乾燥重量の差分から求めた。自然重量は採土器+現地で採取したままの土壌の重量、乾燥重量は試料土壌を採土器に入れたまま 100℃ の乾燥器に 24 時間入れた後に計量した重量である。

#### ②土壌間隙率 (%)

土壌の間隙率は、土壌含水率の測定に使用した採取器で採土した試料土壌を水に十分含ませた飽和重量から上記の乾燥重量を差し引いて求めた。飽和重量は、試料土壌を採土器に入れたまま 5 分~10 分程度水に浸した後に計量した重量である。

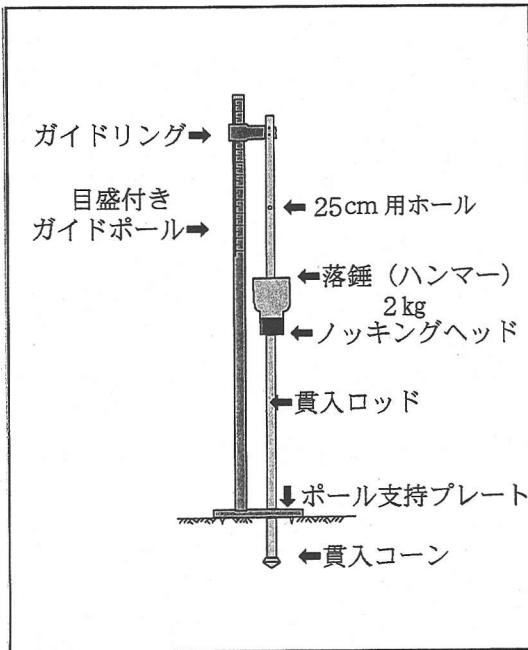


図-3 長谷川式土壌貫入計



図-4 調査対象スギ人工林の位置

### ③有効土層深(cm)

森林の生育に大きく関与している土壌の理学的性質のうち、透水性と粗孔隙量については土壌硬度がその指標となる。土壌中の根系の発達状況は土壌硬度に大きく影響を受けるが、土壌硬度が土壌中の毛細管間隙と非毛細管間隙との境界値より大きくなると根系の発達は悪くなり、その境界値は山中式土壌硬度計により測定される指標硬度 18mm とされている<sup>10)</sup>。この境界値までの土壌深は樹木の根が呼吸し養水分を吸収できる物理的・化学的性質を持った土層であり<sup>11)</sup>、本研究ではこれを林地土壌の有効土層深と名付けた。

本研究では、山中式土壌硬度計よりも現場で連続的かつ簡易に土壌硬度を測定することができる長谷川式土壌貫入計を用いて山中式土壌硬度計による指標硬度 18mm に対応する土壌の軟らかさ (1.9cm/drop) 以内の土壌を有効土層深とした。

図-3 は、長谷川式貫入計の構造を示したものである。この測定器は、1m の高さから 2 kg の錘りを貫入ロッド上のノッキングヘッドに貫入ロッドの最上端のガイドリングの位置から錘りを 25cm および 50cm 落下(drop)させ、錘りの一回の落下でロッドが土壌内に貫入する深さ(cm/drop)で土壌の軟らかさを計測する構造になっている。

### (2)測定データ

地層における調査対象スギ人工林の生育状態および林地土壌の理学的性質に対する測定値は、以下のとおりである。

図-4 は、各地層における調査対象スギ人工林の位置を●印で示したものである。なお、本図には後述する衛星データによる解析結果の検証地点も▲印で記入してある。

表-2 は、各地層に設定した 6 ヶ所の調査対象スギ人工林を対象に測定した肥大生長量、比植生指標、葉中含水率、土壌含水率、土壌間隙率および有効土層深の計 6 項目の測定値を示したものである。

表-3 は、各地層における調査対象スギ人工林の生育状態および林地土壌の理学的性質の違いが識別し易いように、測定値の算術平均値を示したものである。なお、括弧内の数字は、現地調査における測定値のばらつきを示す標本標準偏差の値を示した。

### (3)現地調査結果の地植物学的分析

スギ人工林の生育状態および土壌の理学的性質に関する現地測定データに対して定性的および定量的に分析した結果は、以下のとおりである。なお、現地調査の時点では、成田層群の調査地点は隣接する年平均降雨量が多くなる鶴舞亜層群との境界付近に選定したため、成田層群で降雨量の少ない北部下総台地における地植物学的分析は含まれていない。

表-2 現地調査地点における植生および土壌の測定結果

地層	植生生育状態			土壌の理学的性質		
	肥大生長量 (cm/year)	比植生指標	葉中含水率 (%)	土壌含水率 (%)	土壌間隙率 (%)	有効土層深 (cm)
成田層群	0.975	10.995	62.0	49.0	55.7	88.6
	0.903	10.525	50.2	56.1	59.2	98.0
	1.500	13.807	64.3	52.7	61.6	100.0
	1.225	11.817	57.9	50.6	62.1	67.1
	0.657	8.992	60.7	51.5	51.5	81.0
	0.961	10.441	59.8	53.5	55.8	90.5
鶴舞亜層群	1.152	8.787	66.5	21.7	42.1	23.6
	0.596	7.414	65.5	21.7	37.1	23.6
	0.560	6.477	58.5	27.2	42.9	85.7
	1.041	9.173	63.0	33.6	45.9	63.0
	0.990	8.668	63.5	50.6	48.0	73.0
	1.366	11.122	66.5	53.5	49.2	20.0
秋元亜層群	1.294	10.24	60.4	71.8	52.3	30.7
	1.155	9.936	64.6	50.9	54.8	17.5
	0.793	9.018	64.2	50.9	51.5	27.6
	1.181	10.131	63.8	41.1	52.4	33.0
	0.765	8.974	64.4	41.1	48.4	20.0
	1.428	10.556	60.3	46.3	55.5	42.9
関亜層群	0.512	10.939	61.0	51.2	55.5	9.3
	0.787	11.180	62.9	43.4	54.8	20.0
	0.812	11.903	63.4	43.7	56.2	4.9
	1.000	12.873	66.7	48.0	58.6	6.2
	1.300	13.278	64.9	48.0	58.6	6.2
	1.133	12.993	66.0	53.5	58.1	13.8
安房・保田・嶺岡層群	0.833	10.734	62.2	41.9	51.2	16.0
	1.103	11.599	63.9	51.1	59.0	27.6
	1.035	11.669	65.8	57.8	60.3	31.0
	1.475	11.911	67.4	45.7	58.1	10.8
	1.084	11.511	61.9	54.8	61.1	10.0
	1.080	12.050	68.6	47.1	57.8	12.0

a) 定性的な分析結果

本研究で対象としたスギ人工林は、相互に異なる三つの地質、異なる地層が明瞭に区別され、また多雨地域と寡雨地域が存在する千葉県房総半島の日射条件のほぼ等しい山腹斜面の森林を対象にしていることは既述した。スギは、林地土壌がいつも湿っているが、土壌に水が永く溜まらないような林地(谷間で土砂が崩れて堆積したような土壌)を好み、しかも浅根性である生育特性を有する。また、スギは広葉樹が春だけ生長し、夏には見かけの光合成が停止するのとは違って、気温や水分条件が良好であれば、春から秋にかけて常に新葉を展開し、生長を続ける性質があり、夏でも生長の活力を失わない。このようなスギの立地条件ならびに生育特性を考慮に入れながら、気温の地域差があまり無い8月に測定した生育状況ならびに林地土壌の理学的性質に基づいて、地植物学的関係について定性的な分析を行い、以下に記述する①～⑤の知見を得た。なお、本調査では、年平均降雨量が多い地域ほど葉中含水率が大きい傾向が数量的に認められたが、葉中含水率は林地土壌の理学的性質とも関係しており、降雨量と葉中含水率との関係についての有意性に言及はしていない。

①成田層群の調査対象林

本地層の林地は有効土層深、含水率および間隙率がいずれも大きく水が永く留まる土壌で、降雨時には水分過多となる土壌と思われる。また、一方で本

表-3 各地質分類層における植生および土壌の平均測定値

地層	植生生育状態			土壌の理学的性質		
	肥大生長量 (cm/year)	比植生指標	葉中含水率 (%)	土壌含水率 (%)	土壌間隙率 (%)	有効土層深 (cm)
成田層群	1.037 (0.265)	11.096 (1.475)	59.2 (4.456)	52.2 (2.252)	57.7 (3.716)	87.5 (11.069)
鶴舞亜層群	0.954 (0.294)	8.607 (1.452)	63.9 (2.775)	34.7 (12.921)	44.2 (4.059)	48.2 (26.602)
秋元亜層群	1.103 (0.245)	9.809 (0.604)	63.0 (1.854)	47.0 (10.394)	52.5 (2.315)	28.6 (8.430)
関亜層群	0.924 (0.256)	12.194 (0.909)	64.2 (1.983)	48.0 (3.655)	57.0 (1.530)	10.1 (5.320)
安房・保田・嶺岡層群	1.102 (0.190)	11.579 (0.420)	65.0 (2.517)	49.7 (5.434)	57.9 (3.218)	17.9 (8.388)

地層域が寡雨地域であることから、乾燥が続いて水分がやや不足する傾向にもある。そのために肥大生長量および比植生指標ともに中庸な生育状態になると考えられる。

②鶴舞亜層群の調査対象林

本地層の林地は、含水率および間隙率がいずれも小さくて乾燥した性質の土壌であると思われ、有効土層深も中庸であるので肥大生長量および比植生指標ともに小さい生育状態になると考えられる。

③秋元亜層群の調査対象林

本地層の林地における土壌の理学的性質と生育状態との定性的な関係については、現地測定データからは特に見出すことはできなかった。

④関亜層群の調査対象林

本地層の林地は土壌間隙率が大きい土壌でしかも多雨地域であるので、有効土層深は小さいが気候因子が卓越して立木の生育に十分な水の供給を受けて樹高生長が促進されると考えられる。比植生指標が大きいのはそれを示すと考えられる。肥大生長量の小さい理由としては立木密度が大きいことが考えられ<sup>10)</sup>、本地層の調査対象林における立木密度が、同じ多雨地域である安房・保田・嶺岡層群の調査対象林と比べて大きいことは現地調査で確認している。

⑤安房・保田・嶺岡層群の調査対象林

本地層の林地は、含水率が小さく間隙率が大きい水切りの良い土壌であると思われる。一方、本地層は海洋性を帯びた高温・多雨地帯の気候であるため、林地土壌の養分の分解がスピーディで吸収が大きいので、土壌の有効土層深が小さいにもかかわらず、気候因子が卓越して肥大生長および比植生指標ともに大きい生育状態になると考えられる。

b) 定量的な分析結果

①肥大生長量と比植生指標との関係

樹木の生育状態を表す肥大生長量と分光反射特性を定量化した比植生指標との相関分析を行い、比植生指標が生育状態を定量的に示す値であることを検



証した。

図-5 は、全調査対象林において測定した肥大生長量と比植生指標との関係を示したものである。各地層では肥大生長量が大きくなるほど比植生指標が増大する良好な正の相関関係（相関係数:0.9428(関垂層群)~0.9997(成田層群))を示すことが認められるが、各地層の相関関係は同一でないことが認められる。この結果から、比植生指標から生育状態を評価できること、林地の地質や土壤の違いで生育状態に差が生ずることなどが確認できる。

②生育状態と土壤の性質との関係

肥大生長量と比植生指標との相関関係が確認できたので肥大生長量を除く比植生指標と葉中含水率によって計算される生育状態の定量値と実測土壤間隙率との回帰分析を行い、生育状態と林地土壤の理学的性質との相関性を検証した。なお、林地土壤の性質として土壤間隙率を用いたのは、土壤含水率および有効土層深より測定値のばらつきが少なかったためである。

表-4 は、比植生指標および葉中含水率から構成される4つの算定式と実測土壤間隙率に対する回帰分析結果を示したものである。なお、各算定式における葉中含水率の係数は、算定値が負にならないように設定した。4つの算定式に対する回帰分析結果から、相関係数の最も高い(0.8997)次式の右辺を調査対象林における林地土壤の性質に関する生育状態の定量値を求める算定式とした。

$$\text{土壤間隙率} = 0.0335 \times \{(\text{比植生指標}) - (\text{葉中含水率}) / 10\} + 0.3925 \quad (1)$$

上式の右辺は、比植生指標が大きく葉中含水率が小さい森林ほど土壤間隙率の大きな土壤を有することを示しており、葉中含水率に対する土壤間隙率の関与を示していると言える。

図-6 は、全調査対象林における実測土壤間隙率と式(1)で求めた計算土壤間隙率との関係を示したものである。

4. 衛星データを用いた地植物学的解析

現地測定で得たスギ人工林の土壤間隙率と生育状態との関係を示す式(1)右辺の比植生指標と葉中含水率の項に対応する衛星データに置き換えた算定式は多バンドのスペクトルデータからバンド間の応答パターンの違いをある程度まで定量的に表現した衛星データのスペクトル指標である。本研究では、衛星データに置き換えた算定式で得られる定量値を、

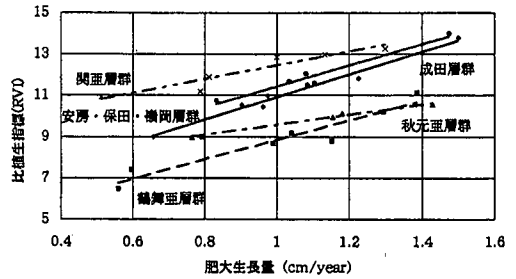


図-5 比植生指標と肥大生長量との関係

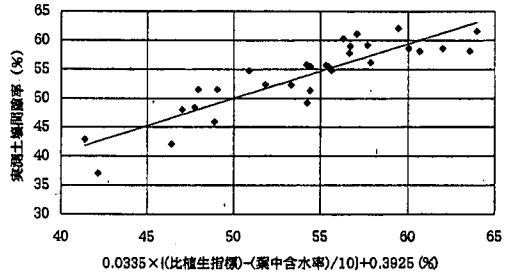


図-6 実測土壤間隙率と計算土壤間隙率との関係

表-4 実測土壤間隙率と土壤間隙率算定式との回帰分析結果

回 帰 式	相 関 係 数
$(\text{土壤間隙率}) = 3.0913(\text{比植生指標}) + 20.8990$	0.8521
$(\text{土壤間隙率}) = 0.2283(\text{比植生指標}) + (\text{葉中含水率}/10) + 4.6662$	0.7656
$(\text{土壤間隙率}) = 0.0335((\text{比植生指標}) - (\text{葉中含水率}/10)) + 0.3925$	0.8997
$(\text{土壤間隙率}) = 0.2316(\text{比植生指標}) - (\text{葉中含水率}/20) + 1.3392$	0.8164

森林の生育状態と林地土壤の性質を媒介する地植物指標(GBI:Geobotanical Index)と名付けた。

本研究では、1997年8月4日観測のランドサット TM データ/Path107, Low35.36 の2シーンデータから得た調査対象地域の地植物指標と、現地測定で得た土壤間隙率との関係について回帰分析を行い、以下の結果を得た。

(1)本研究で提案した衛星データの地植物指標算定式(1)右辺の比植生指標の値は(近赤外線波長域/可視光赤波長域)で算定されること、葉中含水率の値は、中間赤外線波長域の反射に応じて変化することは既述した。ランドサット TM データにおいては、可視光赤波長域は Band-3、近赤外線波長域は

Band-4, 中間赤外線波長域は Band-5 にそれぞれ対応しているので, 現地調査で得られた地植物指標の算定式は, ランドサット TM データから算定する次式に変換した。

$$\text{地植物指標} = 50.0 \times (\text{Band-4} / \text{Band-3}) + (\text{Band-5}) \quad (2)$$

上式において, (Band-4/Band-3) 項に係数 50.0 を乗じたのは, ランドサット TM 各 Band データの DN 値(記憶媒体に記録されている地表面輝度値), ならびに輝度値として示される地植物指標の値が解析対象全域で 0~255 の範囲に分布するようにしたためである。また, 式(1)に示した差分形の算定式を加算形にしたのは, 葉中含水率が大きいほど近赤外線波長域電磁波の吸収が大きくなり Band-5 データの値が小さくなるという逆比例関係にあるためである。

### (2)衛星データから算定した地植物指標の地域分布

解析対象地の日射域に分布するスギ人工林の地植物指標をランドサット TM データを用いて式(2)から算定し, その地域分布と地質分類域(図-1 参照)とを比較した。なお, 日射面のスギ人工林は, 衛星データの分類処理によって得た解析対象地の全スギ人工林の中から, 国土地理院発行の数値地図 50m メッシュデータ(標高)によって求めた西~東向きの日射面に生育している箇所だけを抽出して画像出力した。

図-7 は, 日射面に生育しているスギ人工林を示す画素の地植物指標をランドサット TM データから算定し, その結果を画像出力するまでの画像解析の流れを示したものである。

写真-2 は, 日射面に生育しているスギ人工林が示す地植物指標の値を小・中・大の3集団に等分割し(DN 値 138~177, 178~216, 217~255), それぞれの分割集団域に属するスギ人工林をそれぞれ3段階の白黒濃淡で示し, 地層分布図と重ね合わせて出力した画像である。画像上の濃淡分布と地層分類図とを視覚的に比較すると, 成田層群と濃色域, 鶴舞, 秋元亜層群と中間色域, 関亜層群, 安房・保田・嶺岡層群と淡色域がほぼ対応しているように判読できる。

図-8 は, 地植物指標分布画像(写真-2)から計測した各地層の地植物指標構成比を示したものである。各地層における地植物指標の構成比を比較すると, そのパターンは(1)成田層群, (2)鶴舞, 秋元亜層群, (3)関亜層群, 安房・保田・嶺岡層群のおおよそ3つに分類することができる

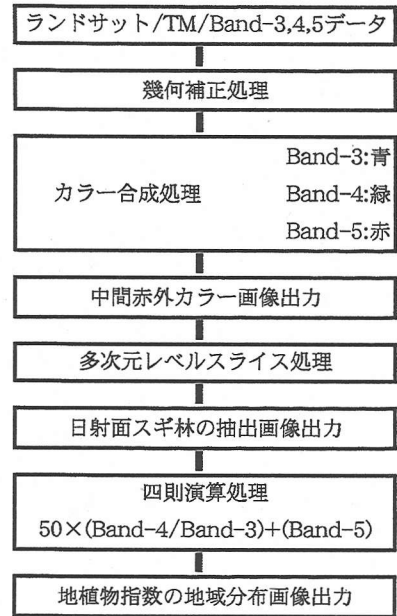


図-7 衛星データによる地植物学的画像解析の流れ

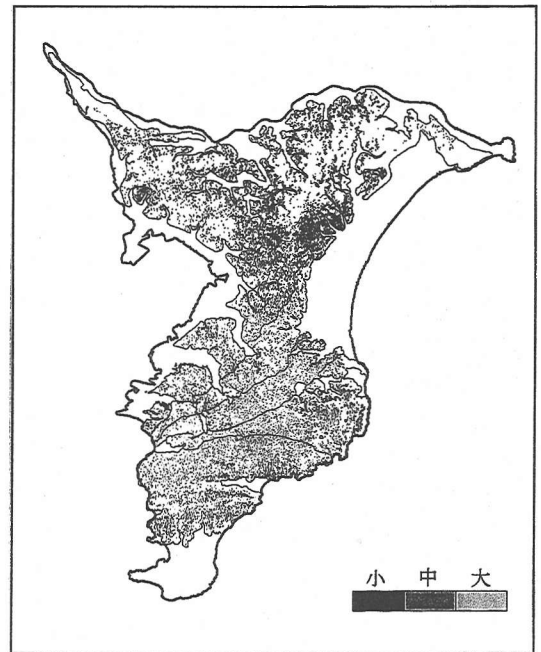


写真-2 衛星データの画像解析で判読した地植物指標分布画像

### (3)画像解析結果の検証

衛星データの画像解析から得られた地植物指標分布画像に対する妥当性は, 研究対象地において新たに設定した各地層の日射面に生育する 60m×60m のスギ人工林(図-4 の▲印)において測定した土壤間隙率と(写真-2)から読み取った地植物指標との相



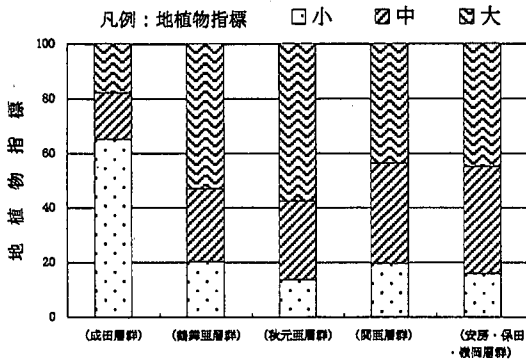


図-8 地植物指標分布画像から判読した各地層における地植物指標の分布

関解析によって検証した。

表-5 は、検証スギ人工林において実測した土壌間隙率と写真-2 に示した地植物指標分布画像から読み取った検証地点の地植物指標の値を示したものである。なお、写真から計測した地植物指標の値は地表面積(60m×60m)に対応する衛星データの4画素(60m×60m)の平均値である。

図-9 は、検証地点におけるスギ人工林の地植物指標と新たに測定した土壌間隙率との関係を示したものである。図から、両者の間には良好な正の相関関係(相関係数=0.9014)が認められ、衛星データによる地植物指標分布画像が妥当であることを検証することができた。

## 5. 総括

千葉県に広く分布するスギ人工林を対象に、ランドサット TM データから得た比植生指標 (Band-4/Band-3)と葉中含水率 (Band-5) から算定した衛星データによる地植物指標でその生育状況を解析したところ、地植物指標の地域分布が異なる地層の地域的な分布域とほぼ対応することが示された。この解析結果は、本研究で提案した衛星データから得られるスギ人工林の地植物指標が、林地土壌の地質学的特性を推定する過程で重要な役割を持つ実用的な指標であることを示している。また、地植物指標の算定式は、現地調査で測定した土壌間隙率で代表される土質条件を基に導いたものであるが、(Band-4/Band-3) が大きく、(Band-5) が小さいスギ人工林ほど間隙率の大きい土壌を持つことを示している。この地植物指標は、現地調査データの解析により林地の土壌間隙率に対して良好な相関性があること、さらに衛星データの解析によりスギ人工

表-5 検証地点における地植物指標と土壌間隙率

地層	地植物指標	土壌間隙率 (%)	地層	地植物指標	土壌間隙率 (%)
成田層群	201.0	54.575	関屋層群	228.0	61.080
	196.0	50.612		174.0	50.582
	205.0	59.932		187.5	48.351
	173.0	49.621		144.0	43.831
	220.0	57.500		247.0	63.214
-	-	-	-	-	-
龍舞垣層群	174.0	44.356	安房・保田・横間層群	202.0	51.231
	170.0	43.563		205.0	58.993
	210.0	53.171		252.0	64.280
	231.0	61.506		187.5	54.280
	157.0	45.307		253.0	59.881
	170.0	45.736		215.0	61.144
秋元亜層群	158.0	41.274	-	-	-
	173.0	50.445	-	-	-
	199.0	54.803	-	-	-
	212.5	54.334	-	-	-
	198.0	49.484	-	-	-
198.0	50.754	-	-	-	

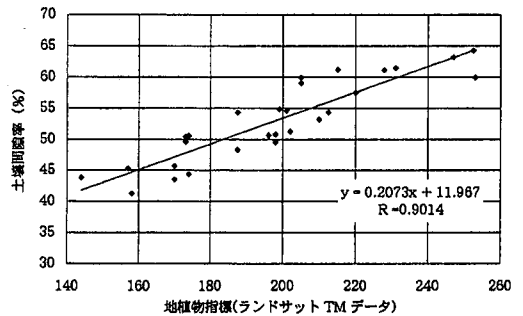


図-9 検証地点における土壌間隙率と地植物指標との関係

林の生育状態と林地土壌の地質にも相関性があることを確認した。なお、地植物指標の算定式はあくまでも千葉県房総半島に適用できるものであり、他地域にそのまま適用できるものでないが、広域的に同一樹種が分布する森林で、分散する多くの林分の樹木の生長パターンと林地土壌の理学的特性を比較することによって、その森林域に適用できる算定式を求めることが可能である。

本研究では、土壌の理学的性質として土壌間隙率の他に土壌含水率や有効土層深などを測定しているが、土壌含水率と地植物指標との相関性は土壌含水率が乾燥や降雨等の気象条件で変化するため確認できなかった。また、林地土壌の有効土層深はロームに覆われている成田層群,秋元亜層群では平均87.5~47.0cmを示したが、関屋層群以南では10~20cmと非常に浅く、相関解析に利用できなかった。しかしながら、東北地方の阿武隈川流域を対象にした地植物学的解析では、スギ人工林の有効土層深と生育状態の間には良好な相関関係が存在す

ることを確認している<sup>14)</sup>。

林地における土壌間隙率や有効土層深の探査は、森林の保水・貯水機能など森林水文学的な解析において重要なキーポイントとなる。我が国森林の約1/3を占めると言われるスギ人工林を対象にした地植物学的解析は河川流域の水資源管理に重要な役割を果たすと考えられ、水源としての森林を軸とした流域管理が求められ始めた今日、衛星データを利用した地植物学的研究の役割は大きくなると期待されよう。なお、本研究で利用したランドサット TM データは宇宙開発事業団の研究目的配付データであることを付記する。

#### 参考文献

- 1) American Society of Photogrammetry : MANUAL OF REMOTE SENSING, Second Edition, Vol.2 ,pp.1893-1894, 1983.
- 2) 資源・環境観測解析センター：リモートセンシング用語辞典, pp.122,1998.
- 3) 近田文弘：静岡県の植物群落，第一法規出版，pp.24, 1981.
- 4) 斉藤余生，近田文弘：森林植生の樹種別密度分布による解析，南アルプスの植生，静岡大学理学部生物学教室，1979.
- 5) 青山定敬，西川 肇，村井 宏：衛星リモートセンシングデータによる林地水保全機能の判読と降雨流出解析への応用，日本リモートセンシング学会誌，Vol.10, No.4, pp.539-551, 1990.
- 6) 地質調査所：日本地質図大系・関東地方，朝倉書店.
- 7) 関東地方土地地質図編纂委員会：関東地方土地地質図解説書，国土開発技術研究センター，pp.101, 1996.pp.13, pp.48, 1989.
- 8) 全国国土調査協会：日本の自然と土地利用・Ⅲ関東，武揚堂，pp.107, 1979.
- 9) (財)深田地質研究所：千葉県地質図，内外地図(株)，1959.
- 10) 環境庁：千葉県現存植生図，(財)日本野性生物研究センター，1981.
- 11) 和達清夫，土屋 清，安田嘉純，江森康文，飯坂穰二，長尾 真：リモートセンシング，朝倉書店，pp.110-115, 1976.
- 12) 石山 隆，土屋 清，岡山 浩：葉の分光反射および偏光特性，日本リモートセンシング学会誌，Vol.4, No.4, pp.19-21, 1984.
- 13) American Society of Photogrammetry : MANUAL OF REMOTE SENSING, Second Edition, Vol.2, pp.2152, 1983.
- 14) Nishikawa,H, Iwashita,K, and Yamamoto,Y : Study Upon Establishing Data of Watershed Information Using JERS-1 Data, Proceeding of International Symposium on Application of Remote Sensing and Geographic Information System to Disaster Reduction, Geological Survey of Japan, 1998.
- 15) 西川 肇，近田文弘，塩坂邦雄，工藤勝輝，藤井啓生：防潮堤に係わる海岸林の生育に関するリモートセンシング，土木学会論文集，No.542 /IV-32, pp.9-18,1996.
- 16) 伊藤忠夫，近田文弘，久保田光政，細川和弘：樹種および森林の密度管理が土壌の理学的性質に及ぼす影響，37回日林中支論，pp.7-10, 1989.
- 17) 久馬一剛，佐久間敏雄，庄子貞雄，鈴木 皓，服部 勉，三土正則，和田光史：土壌の事典，朝倉書店，pp.461, 1993.
- 18) 堤 利夫編：森林生態学，朝倉書店，pp.83, 1990.

(1999.11.15 受付)

## THE CORRELATION ANALYSIS OF CEDAR FOREST AND GEOLOGY USING SATELLITE DATA IN BOSO PENINSULA

Hajime NISHIKAWA, Hisao FUJII, Katsuteru KUDOH and Fumihiko KONTA

The forest has greatly been evaluated from viewpoint of the water resource cultivation. On the evaluation of the water resource cultivation of the forest, it is imperative to grasp the geobotanical relation between the state of vegetation health as a constituent element of the forest and the geological feature. As a result of comparative analysis of geological distribution with spectral index computed by  $\{50 \times (\text{Band.4}/\text{Band.3}) + \text{Band.5}\}$  of Landsat TM data, distribution pattern of both is nearly agreed. This spectral index was named "geobotanical index". This study proposes the use of the geobotanical index by satellite data analysis as a possible method of assessing the physical property of cedar-forest soil in Boso Peninsula.