

衛星データを利用した森林保水機能解析

西川 肇¹・藤井壽生²・工藤勝輝³・露木延夫⁴・近藤 勉⁵・田原達人⁶

¹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)

²正会員 博士(農学) 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)

³正会員 修士 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)

⁴正会員 修士 日本大学大学院博士後期課程 (〒275-8575 習志野市泉町 1-2-1)

⁵正会員 修士 日本大学助教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 千代田区神田駿河台 1-8-14)

⁶正会員 日本建設コンサルタント技術一部 (〒105-0004 港区新橋 6-17-19 新御成門ビル)

河川流域における森林が緑のダムとして大きく評価されるようになってきている。森林の保水機能を軸とした治水・利水の対策が求めはじめられた今日、河川流域を単位とした森林の生育状況からその保水機能を定量的に評価することが河川管理上で重要なキーポイントとなる。本研究は、東京都民の水瓶である多摩川小河内ダム上流域を対象に、ランドサットデータで判読した森林の生育状況と林地土壌の理学的性質との相関性を定量的に分析し、流域の持つ森林機能について解析した。

Key Words : green dam, remote sensing, forest soil, vegetation index, water conservation

1.はじめに

総合的な治水・利水を考えて計画された大型ダムの新規建設の可否が社会問題化している。これに対し、緑のダムとして流域における森林の役割が大きく評価されるようになってきている。わが国の森林は国土の約 68%に当たる約 2,500 万ヘクタールを占めているが、そのすべてが良好な保水機能を有しているわけではない。特に、全森林の約 45% を占めるスギ・ヒノキ人工林の荒廃が問題である。スギ・ヒノキの人工林は、国産建築用材の利用低下による林業経営の圧迫や、林業就業者の高齢化などによって適切な森林管理がなされなくなったため、林地の土壌が痩せ、雨水を十分保水する機能が低下した林分が増大し始めていると言って過言でない。

スギ・ヒノキ人工林に対して適切な間伐や枝打ちなどの管理をほどこせば、立木は成長活力が旺盛で十分な枝葉を茂らせて土壌深く根系を発達させるので、孔隙性・保水性に富む土壌を持つ林地を醸成することが確かめられている^{1),2)}。

森林の保水機能を軸にした治水・利水の対策が求められ始めた今日、大型ダムの要・不要にかかわらず河川流域を単位とした森林の生育状況や保水機能を定量的に評価することが河川管理上で重要なキーポイントとなる。

森林の生育状況などを定量的に判読する手段とし

て、葉面から反射してくる可視光波長～赤外波長域の電磁波分光反射特性を利用する光学的手法が考えられる。さらに、広域に分布する植生の生育状況を光学的手法によって定量的・面的に調査するには、地球観測衛星によって観測されている可視光波長～赤外波長域の多重分光データ(分光反射特性)の利用が経費および精度的に有効である。

本研究は、東京都民の水瓶である多摩川小河内ダム上流域を対象に、ランドサット ETM データで判読した森林の生育状態と現地測定で測定した林地土壌の理学的性質との相関性を定量的に分析し、流域の森林が受け持つ保水機能について検討したものである。

図-1 は、本論文を構成する研究全体のフロー図を示したものである。

2.研究対象地の概況

流域面積 262.88km² を持つ多摩川小河内ダム上流域に分布する森林は、村山・山口貯水池および小河内貯水池とともに水源施設のひとつとして良好な保護・育成がなされ、安定した河川流量の確保と供給を図るための管理が東京都の手で行われている。当該流域の地形・地質ならびに植生の概況は、以下のとおりである。

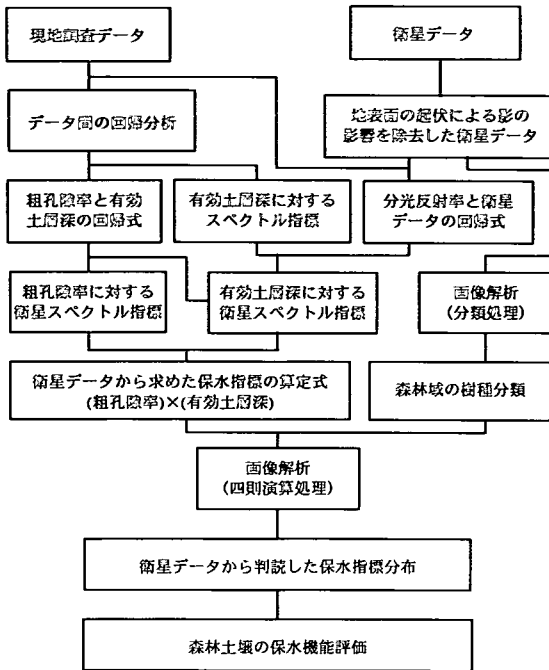


図-1 研究全体のフロー図

(1) 地形・地質の概況

地形は広大な準平原が発達している流域最上流部の花崗岩地帯を除いて全般的に急傾斜が多く、標高1,200m以上の地域が全体の66%を占めている。

地質は、最上流部の花崗岩、その他の地域内は小河内層群と呼ばれる四万十累層群で、砂岩・泥岩・頁岩などを主とした堆積岩が幅2~5kmの地塊となって流域の北西~南東方向に帯状配列で分布している。流域最上流部の準平原部は関東ロームが覆って保水性に富み、また、小河内層群が伴う鳥巢式石灰岩は地層中に形成したくぼ地(ドリーネ)の帯水等により地下水脈が豊富であるので、降雨量がそれほど多くないにもかかわらず渇水期の流量は比較的多い^{3), 4)}。

(2) 植生の概況

多摩川源流域の標高の高い山地は亜高山帯に属し、左岸の稜線部を中心にコメツガ・トウヒ・ウラジロモミ林となっている。また、その下部にはカラマツ植林と共に温帯のブナクラス域の自然林がある。中下流域は温帯と暖温帯に属し、中流の急峻な溪側にはツガやアカマツの針葉樹群落が顕著である。下流域では、代償植生としてのクヌギ・コナラ林とスギ・ヒノキ人工林が卓越する⁵⁾。

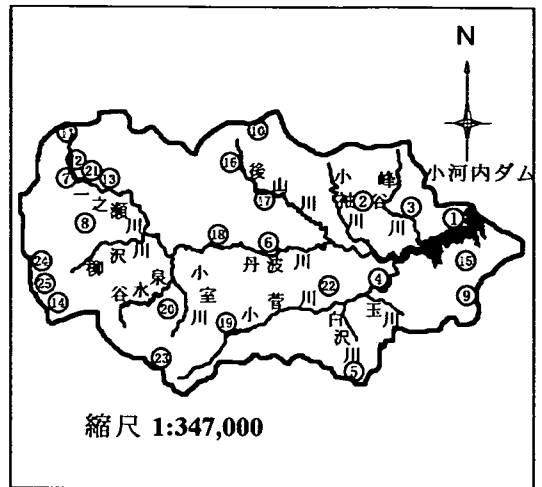


図-2 多摩川小河内ダム上流域に設定した現地調査地点

3. 現地調査による森林保水機能の評価

森林の生育状況は可視光~赤外線波長域の分光反射特性で、保水機能は林地土壌の理学的性質でそれぞれ定量化することができる。本研究では、森林の生育状況と保水機能との相関関係を見出すために、樹種別森林において現地測定した分光反射特性と林地土壌の理学的性質との間の重回帰分析を行い、その関係について検討した。

(1) 本研究で設定した現地調査地点

昭和61年に環境庁発行の現存植生図(1/5万)を参考に選定した多摩川小河内ダム上流域に分布するスギ・ヒノキ林、落葉広葉樹林、カラマツ林、ウラジロモミ林およびアカマツ林に計25カ所の現地調査地点を設定した。

図-2は、多摩川小河内ダム上流域に本研究で設定した現地調査地点の位置を示したものである。

(2) 現地調査の概要

現地調査地点で測定した森林の分光反射特性ならびに林地土壌の理学的性質についての概要は、以下のとおりである。

a) 分光反射特性

すべての地表面被覆物は、太陽光を受けるとその一部を反射し一部を吸収する。地被物が色々な波長域の光をどのように反射または吸収するかは、その材質や被覆状況の違いによって異なる。このような性質を分光反射(スペクトル)特性と言う。

植生の分光反射特性は、同種の植生であっても一定でなく、葉が新しいか古いか、疎であるか密であ

るか、また季節によって、さらに生育している土壌の水分や無機質の含有量による生長活力の差などで変化する。植生の分光反射特性において、可視光緑波長域(VG)の反射は植物葉の緑、可視光赤波長域(VR)の吸収は葉中のクロロフィル含有量、近赤外波長域(NIR)の反射はバイオマスやクロロフィル活性、中間赤外波長域(MIR)の吸収は葉中水分量にそれぞれ応答して変化する⁹⁾。

植生の分光反射特性を定量的に表現するために、各分光反射率の加減乗除によって数値化したのがスペクトル指標である。植生が示す分光反射特性から算定したスペクトル指標による定量化の例としては、近赤外波長域反射率と可視光赤波長域反射率との比演算値によって植生の活性度に対する比植生指標(RVI)、その和と差の比演算値によって植生の有無・多少に対する正規化植生指標(NDVI)などがある。

本研究では、植生のスペクトル指標として、スギ・ヒノキ林の生育状況の良否と相関性があると現地を確認した比植生指標^{7),8)}を軸とした分光反射率で構成される算定式を考えた。

観測は、すべて日射に面した樹種別森林の分光反射率に対し可視光～中間赤外波長域の観測幅を持つオプトリサーチ社製の Stereo-Radiometer によって行った。現地での測定は、胸高直径が異なる大・中・小 3本の立木を調査対象林で選定し、その立木から採集した葉を表面に黒く塗装した測定板がすべて隠れるように同じ厚さで敷きつめ、野外において常に太陽光を背にして行った。なお、現地で測定した分光反射率は、ランドサット衛星の ETM センサが観測している可視光青・緑・赤波長域、近赤外波長域および中間赤外波長域に同期した波長域における値である。

b) 林地土壌の理学的性質

樹木の種類や生育状況の違いは土壌中の主根・副根・細根などの根系の発達に大きく関与する。森林は根系の発達によって樹根が腐敗してできた管状の孔隙あるいは土壌の粗大孔隙を多くし、さらに多量の有機物の供給によって粗孔隙に富む土壌構造をつくりだす⁹⁾。透水性や土壌の軟らかさなどの土壌の理学的性質や土層の発達の違いは主として根系によるもので、樹種にともなう根系分布上の性質や密度管理にともなう根系の発達の相違と考えられる。

本研究では、林地土壌の保水機能は主として粗孔隙の量と土層の深さが大きく関与すると考えられ¹⁰⁾、これらに関与する土壌の理学的性質として土壌中を水が自由に移動できる孔隙の状況を示す粗孔隙率と根系の発達状況を示す有効土層の深さを対象に測定した。

表-1 長谷川式土壌貫入計で計測した土壌の軟らかさと根系の発達状況

土壌の軟らかさ	根系の发育状態
0.7 以下	多くの根が進入困難
0.7～1.0	根系発達に阻害あり
1.0～1.5	根系発達阻害樹種あり
1.5～4.0	根系発達に阻害なし
4.0 以上	膨軟過ぎ

表-2 現地調査結果一覧

調査地点	主たる樹種	分光反射率 (%)				林地土壌の理学的性質	
		可視光緑	可視光赤	近赤外	中間赤外	粗孔隙率 (%)	有効土層深 (cm)
1	ヒノキ	12.110	4.751	62.156	39.746	12.84	14.7
2	スギ・ヒノキ	8.224	3.968	59.743	48.008	21.48	30.0
3	ヒノキ	10.453	3.968	65.332	42.877	31.57	45.7
4	ヒノキ	8.151	4.077	60.837	38.474	30.57	64.9
5	ヒノキ	7.976	3.687	64.522	34.146	41.20	95.1
6	スギ	6.879	3.192	57.706	32.803	41.27	92.0
7	ヒノキ	10.615	3.914	66.254	43.017	33.88	66.0
8	ヒノキ・カラマツ	8.451	3.858	72.106	42.315	45.44	101.2
9	カラマツ	11.587	5.297	60.183	39.746	32.16	69.0
10	カラマツ	11.213	5.694	59.775	40.002	38.71	68.0
11	ツガ・カラマツ	7.860	4.835	66.821	62.579	45.80	69.5
12	カラマツ	11.026	5.421	75.036	41.379	46.47	71.2
13	カラマツ	11.359	5.532	60.498	40.236	39.97	69.0
14	ウラジロモミ	9.139	4.436	67.530	34.734	45.47	64.5
15	コナラ・ミズナラ	11.739	4.709	76.633	70.613	29.96	46.9
16	クヌギ	13.007	6.080	57.845	53.333	29.29	35.9
17	カエデ	10.703	5.710	72.006	67.143	25.06	44.4
18	クヌギ	11.439	5.269	78.919	75.387	33.88	49.5
19	ミズナラ	11.726	5.525	75.002	68.135	33.84	45.1
20	アワブキ・シブキ	9.103	4.180	65.141	54.546	32.26	37.4
21	ミズナラ	10.896	5.120	76.053	73.846	35.37	55.0
22	アカマツ	8.646	4.623	42.747	23.313	19.91	21.0
23	ウラジロモミ	7.383	3.851	49.038	35.358	34.97	41.0
24	ウラジロモミ	6.698	3.615	48.322	28.182	35.07	53.5
25	ミズナラ	11.536	4.110	90.535	70.002	40.17	81.5

①粗孔隙率

土壌の孔隙は大きさによって細孔隙(毛細管孔隙)と粗孔隙(非毛細管孔隙)に区分され、粗孔隙率は土壌中の粗孔隙の占める割合で表される。土壌中を流れる水分は土壌粒子間の非毛細管孔隙を重力によって自由に移動する。植物は非毛細管孔隙内の水分を吸い上げて成長し、粗孔隙率の大きい土壌ほどそれを促進する。

本研究では、A₀層を除いた地表より15～20cm土壌から採集した土壌試料を採土円筒内で十分飽和させた後、乾燥した素焼き板の上に載せ、一昼夜にわたって十分脱水した後の減量の程度から測定した値の平均値である。

②有効土層深

樹木の根系が土壌中を自由に発達して正常な養水分を吸収できる軟らかさを持った土層の厚さを有効土層深と名付け、長谷川式土壌貫入計で測定した有効土層深と考えられる土壌の軟度(1.0cm/drop)以上の値を持つ土層の厚さとした。長谷川式土壌貫入計は50cmの高さから重さ2kgの錘を落下させたとき、一回の落下で土壌内に貫入する深さ(cm)で土壌の軟度を計測する構造となっている。

表-1は、長谷川式土壌貫入計を用いて測定した土壌の軟度と根系の発達状況との関係を示したものである¹⁾。

(3)現地測定データの概要

表-2は、現地調査地点における森林の樹種、現地で測定した4波長域の反射率(可視光緑波長域(VG)、可視光赤波長域(VR)、近赤外域(NIR)、中間赤外域(MIR)、有効土層深および粗孔隙率の各値を示したものである。なお、観測した各波長域の範囲は、本研究で利用するランドサットETMデータの観測波長域と一致させた。

現地調査の結果から、調査対象域における林地土壌の粗孔隙率は10~50%、有効土層深は10~100cmの範囲にあることを確認した。

(4)現地測定データ間の回帰分析

スギ・ヒノキ林・落葉広葉樹林・カラマツ林およびウラジロモミ林に設定した現地調査地点で測定された分光反射率、粗孔隙率、および有効土層深のデータを用いて、(1)有効土層深とスペクトル指標、(2)粗孔隙率と有効土層深との2つの関係についてそれぞれ分析し、森林の保水機能と分光反射特性と林地土壌の理学的性質との相関性を検証した。

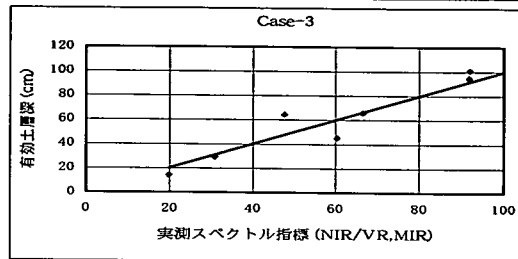
a)有効土層深とスペクトル指標との関係

有効土層深を目的変数ならびに分光反射率を独立変数とし、分光反射率(VG,VR,NIR,MIR)から構成される3Caseの線型重回帰式(スペクトル指標算定式)を仮定し、各回帰式の偏回帰係数および定数ならびに各回帰式の重相関係数を樹種別森林ごとに求めて、有効土層深に対して最も相関性の高いスペクトル指標を見出した。なお、仮定した回帰式は植生の生長活力、葉色および葉中水分量にそれぞれ応答して変化する(NIR/R),(VG)および(MIR)の3独立変数を組み合わせた加算式で式中の(-)符号は回帰分析で得られた偏回帰係数の符号である。

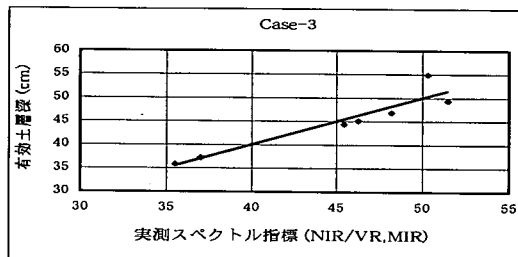
表-3は、3Caseの重相関回帰式との間の回帰分析結果を示したものである。なお、研究対象域にはアカマツ林は分布が少なく、調査地点が1ヶ所

表-3 有効土層深と分光反射率の間の重回帰分析結果

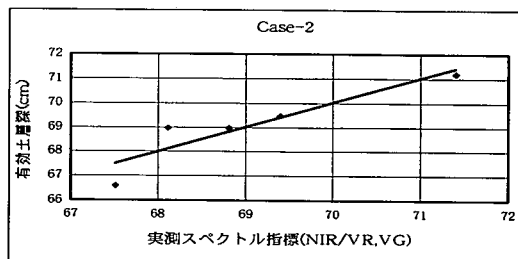
樹種別森林	Case	線形重回帰式 (スペクトル指標)	重相関係数	標準偏回帰係数		
				NIR/VR	VG	MIR
スギ・ヒノキ	1	15.410(NIR/VR)-153.24D	0.899	-	-	-
	2	12.914(NIR/VR)-4.427(VG)-107.004	0.921	0.761	-0.244	-
	③	13.733(NIR/VR)-1.963(MIR)-81.839	0.946	0.809	-	0.309
落葉広葉樹	1	1.452(NIR/VR)+24.533	0.521	-	-	-
	2	1.943(NIR/VR)+0.597(VG)+9.609	0.571	0.661	0.300	-
	③	0.111(NIR/VR)+0.693(MIR)-2.507	0.942	0.038	-	0.922
カラマツ	1	0.603(NIR/VR)+62.048	0.831	-	-	-
	②	1.211(NIR/VR)+0.629(VG)+47.750	0.919	1.190	0.592	-
	3	1.176(NIR/VR)-0.039(MIR)+58.917	0.903	1.149	-	0.541
ウラジロモミ	1	5.436(NIR/VR)-18.384	0.996	-	-	-
	2	2.641(NIR/VR)+3.606(VG)-7.699	0.982	0.823	0.195	-
	③	5.295(NIR/VR)+0.158(MIR)-21.635	1.000	0.974	-	0.092



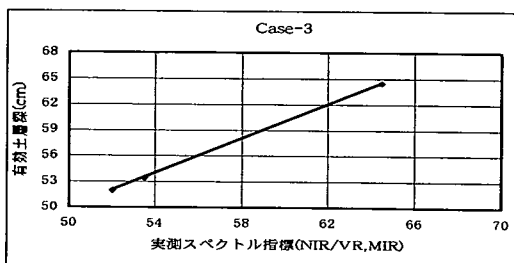
(a) スギ・ヒノキ人工林



(b) 落葉広葉樹林



(c) カラマツ林



(d) ウラジロモミ林

図-3 実測有効土層深と実測スペクトル指標との関係

あったため、回帰分析からは除外した。

有効土層深と最も高い相関性を示すスペクトル指標はスギ・ヒノキ林および落葉広葉樹林は Case-3、カラマツ林は Case-2、ウラジロモミ林は Case-3 の重回帰式から算定される値であることを重相関係数から特定した。(表-3 の○印で囲った case)

図-3(a)~(d)は、スギ・ヒノキ林、落葉広葉樹林、カラマツ林およびウラジロモミ林における有効土層深とスペクトル指標との関係を示したものである。

各樹種別森林域において有効土層深とスペクトル指標との良好な正の相関関係を見出すことができた。

b)粗孔隙率と有効土層深との関係

現地調査地点で測定した林地土壌の粗孔隙率と有効土層深との回帰分析を行い、相関性の良い下記の回帰式を得た。

$$\text{粗孔隙率} = 0.322 \times \text{有効土層深} + 16.00 \quad (1)$$

(相関係数=0.811)

図-4 は、現地調査地点で測定した林地土壌の粗孔隙率と有効土層深との関係を示したものである。有効土層深が 70cm 付近の林地で多少のバラツキが認められるが、粗孔隙率も有効土層深に対するスペクトル指標から算定できることが分かった。

(5)林地土壌の理学的性質と保水機能の関係

森林の地表より土壌中に浸透した降雨水は有効土層内の非毛細管孔隙(粗孔隙・粗大孔隙)を満たし、重力に従って低い方へ移動する。有効土層内の非毛細管孔隙に満たされる水分量、すなわち林地土壌の保水容量は粗孔隙率と有効土層深との積で算定される粗大孔隙量とほぼ一致すると考えることができる。

本研究では、林地土壌の粗孔隙率と有効土層深との積で算定される値を保水指標と名付け、林地土壌の保水機能を定量的に評価できる指標と定義した。

本研究の現地調査では、土壌の粗孔隙率の値は 0~100%、林地土壌の有効土層深は 0~1m となることが確認されるので、粗孔隙率と有効土層深との積、すなわち保水指標の値は 0~1 の間となり、保水指標(m 単位)が 1 に近い値を持つ林地土壌ほど保水機能が高いことを示す。

本研究で提案した保水指標は、(mm)単位で表せば林地土壌が飽和状態になるまで浸透する降雨量(飽和雨量)、10 倍すれば 1(ha)あたり有効土層の単位保水量(土壌保水容量)にそれぞれ相当することになり、流域の森林が持つ保水機能を工学的に評価する際に大変便利な指標である。さらに、衛星データに含まれる分光反射情報から保水指標の地域的分布の判読が可能になれば、水資源管理や洪水流出管理などの流域管理に役立つものと考えられる。

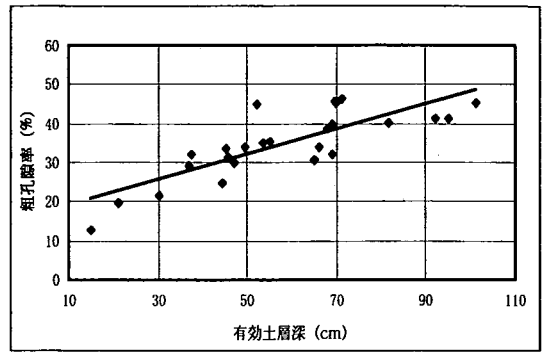


図-4 林地土壌の粗孔隙率と有効土層深との関係

4.衛星データによる森林保水機能の評価

有効土層深と衛星画像から読み取った現地調査地点の衛星データとの回帰分析で見出した有効土層深に対する衛星スペクトル指標から算定した保水指標を媒介として、小河内ダム上流森林域の保水機能を判読した。本研究で利用した衛星データは、2000年5月23日観測のランドサット ETM データの長野シーン(Path-108, Low-35)である。

(1)地表面起伏の影響を除去する衛星データ補正

日本を観測した衛星画像は太陽光を南東の斜め上空から受けるため、地表面によって影を生ずる。山岳地域の衛星画像を利用して必要な情報を抽出するには、地表面の起伏によって生ずる影の影響を除去しなければ正しい結果は得られない。

本研究では、衛星画像の各画素に観測されている地表面の輝度値に対して、地表対応面の法線と太陽光とのなす角度で除した次式を用いて、地表面の起伏によって生じた影の影響を除去した^{12),13)}。

$$L_c = (L - L_a) / \cos \gamma \quad (2)$$

$\cos \gamma = \sin \alpha \cdot \sin \eta \cdot \cos(\phi - \psi) + \cos \alpha \cdot \cos \eta$
ここに、

- L_c : 地表面起伏による影の影響を除去した衛星データの輝度値
- L : 補正前の衛星データ
- L_a : 大気による上方散乱成分(補正前の衛星画像内の最小輝度値)
- γ : 衛星画像 1 画素の地表対応面の法線と太陽光とのなす角度
- α : 衛星観測日における太陽高度
- η : 衛星画像 1 画素の地表対応面の最大傾斜角
- ϕ : 衛星画像 1 画素の地表対応面の方位角
- ψ : 衛星観測日の太陽方位角

(2)有効土層深に対する衛星スペクトル指標

現地調査で見出した有効土層深に対して最も高い相関性を示すスペクトル指標算定式の分光反射率(VG,VR,NIR,MIR)と同じ波長域のランドサットETM データ衛星データ(Band-2, Band-3, Band-4, Band-5)を当てはめ、新たに回帰分析を行って有効土層深に対する衛星スペクトル指標の算定式を求めた。

表-4 は、スギ・ヒノキ林、落葉広葉樹林、カラマツ林およびウラジロモミ林における有効土層深に相関する衛星スペクトル指標の算定式を示したものである。

表-4 有効土層深に対する衛星スペクトル指標

樹種別森林域	理学的性質	スペクトル指標の算定式
スギ・ヒノキ林	有効土層深	$44.028(\text{Band}4/\text{Band}3) - 1.051(\text{Band}5) - 65.910$
	粗孔隙率	$14.177(\text{Band}4/\text{Band}3) - 0.338(\text{Band}5) - 5.223$
落葉広葉樹林	有効土層深	$0.356(\text{Band}4/\text{Band}3) + 0.371(\text{Band}5) - 11.211$
	粗孔隙率	$0.115(\text{Band}4/\text{Band}3) + 0.119(\text{Band}5) - 12.390$
カラマツ林	有効土層深	$3.833(\text{Band}4/\text{Band}3) + 0.221(\text{Band}5) + 48.397$
	粗孔隙率	$1.234(\text{Band}4/\text{Band}3) + 0.071(\text{Band}5) + 31.584$
ウラジロモミ林	有効土層深	$16.985(\text{Band}4/\text{Band}3) + 0.056(\text{Band}5) - 26.886$
	粗孔隙率	$5.469(\text{Band}4/\text{Band}3) + 0.018(\text{Band}5) - 7.349$

(3)情報を取り出すための画像解析

衛星データから必要とする情報を抽出するには、観測波長域の異なる衛星データをそのまま画像出力して利用するのではなく、各観測波長域が持つ固有情報を複合させて表現した衛星画像を作り出して利用することになる。

本研究では、調査対象域における保水指標の地域分布を衛星データによって判読する衛星画像を作成するために、以下の画像解析を行った。

a)分類処理

3つの異なる観測波長域を座標軸とする多次元空間に分布する各画素に対して、それらの位置の近接度合いにより対象物の類似度を教師とし、各画素を分類クラス別に色分けして画像出力する処理である。

本研究では、衛星リモートセンシングによる植生分類調査において一般的に行われる可視光線緑・可視光線赤・近赤外線波長域の3衛星データを用いた森林域の樹種別分類画像を作成する過程で行った。

b)四則演算処理

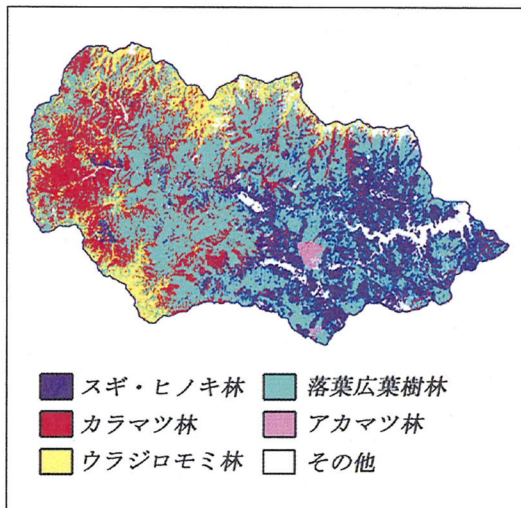
2つ以上の観測波長域の衛星データ間の四則演算値を求め、それを新たな輝度値として画像出力する処理である。

本研究では、林地土壌の「土壌保水降雨量」ならびに「土壌保水容量」の地域分布画像を作成する過程に必要なスペクトル指標の算定の過程で行った。

(4)衛星データによる樹種別森林の分類

研究対象地域の既存植生分類図を参考にして衛星画像上の樹種別森林域を数箇所選定し、その可視光線緑・可視光線赤・近赤外線波長域の衛星データが示す分光反射特性を教師とした画像解析(分類処理)によって森林域を樹種別に分類抽出した。それぞれの森林面積は、分類された衛星データの画素数に1画素の地表面対対応面積を乗じて求めた。

画像-1 は、地表面の起伏による影の影響を除去



画像-1 調査対象域の森林分類画像

表-5 衛星データから判読した調査対象樹種別森林面積

樹種別森林分類項目	画素数(個)	面積(km ²)
スギ・ヒノキ林	68,784	62.960
落葉広葉樹林	121,783	111.472
カラマツ林	22,227	20.345
ウラジロモミ林	25,433	23.280
アカマツ林	1,743	1.595

処理したランドサット ETM/Band-2, Band-3/Band-4 データを用いた分類処理によって、研究対象域の森林域からスギ・ヒノキ林、落葉広葉樹林、カラマツ林、ウラジロモミ林およびアカマツ林を分類抽出した衛星画像である。

表-5 は、多摩川小河内ダム上流域の総面積(262.88km²)を衛星データ全画素数(287,197 個)で除して得た1画素の地表対対応面積ならびに樹種別分類面積を示したものである。

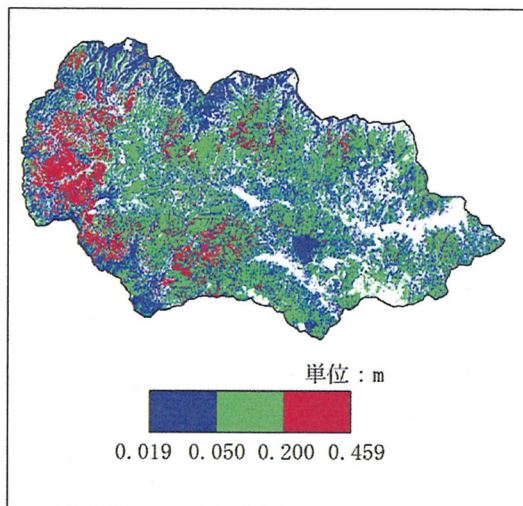
(5)衛星データによる保水機能の判読

樹種別森林域の全画素について有効土層深と粗孔

隙率を、これに相関する衛星スペクトル指標から計算し、両者の積で求まる算定値(保水指標)を新たな輝度値として画像出力する画像解析(四則演算処理)によって保水指標の地域分布画像を作成した。

画像-2 は、ランドサット ETM/Band-2,3,4,5 データの四則演算処理によって求めた保水指標の地域分布画像を示したものである。

表-6 は、衛星データから判読した樹種別森林域の全画素が示す保水指標の平均値を示したものである。平均値は、樹種別森林域の全画素が示すヒストグラム(度数分布)から求めた。なお、アカマツ林については、当該林に唯一設定した現地調査地点で測定した有効土層深と粗孔隙率を乗じて得た値で一樣に分布するとした。



画像-2 調査対象域の保水指標分布画像

(6)保水指標による森林の保水機能評価

衛星データから求めた樹種別森林域の面積と平均保水指標とから、保水機能の指標となる飽和雨量、単位保水容量および総保水容量を求めた。

表-7 は、平均保水指標を(mm)単位で表示した飽和雨量、100,000 倍して(m^3/ha)単位で表示した単位保水容量ならびに樹種別森林面積を乗じて求めた有効土層の総保水容量($\times 10^6 m^3$)を示したものである。

衛星データで判読した多摩川小河内ダム上流域における樹種別森林域の保水指標機能について、以下の知見を得た。

- (1)カラマツ林の飽和雨量が 249(mm)と判読されたが、保水機能が優れているとされている有名な白神山地のブナ林が 300(mm)というオーダーを考えると妥当な数値と思われる。
- (2)カラマツ林の単位保水容量が $2,490(m^3/ha)$ と判読されたが、日本の森林地帯を地質母材別に区分したとき、花崗岩類における保水容量が $2,030(m^3/ha)$ という数値もあり¹⁴⁾、当該地域ではカラマツ林が花崗閃緑岩帯に分布していることから妥当な数値と思われる。
- (3)有効土層深の総保水容量が $15.962(\times 10^6 m^3)$ と判読されたが、この値は小河内ダム貯水池の総貯水容量 $185.500(\times 10^6 m^3)$ の約 9%にあたること分かる。

5.総括

最近、さかんに論議されている「緑のダム構想」の基幹は、森林の保水力の捉え方に集約される。森林の保水力は樹種、根系の発達および林地土壌の理

表-6 樹種別森林域平均保水指標

樹種別森林	平均保水指標 (m)	標準偏差
スギ・ヒノキ林	0.046	6.574
落葉広葉樹林	0.063	1.728
カラマツ林	0.249	1.733
ウラジロモミ林	0.039	2.746
アカマツ林	0.042	-

表-7 衛星データから判読した樹種別森林域の保水機能

樹種別森林	面積 (km^2)	飽和雨量 (mm)	貯水容量 (m^3/ha)	総貯水容量 ($\times 10^6 m^3$)
スギ・ヒノキ林	62.960	46	460	2.896
落葉広葉樹林	111.472	63	630	7.023
カラマツ林	20.345	249	2,490	5.066
ウラジロモミ林	23.280	39	390	0.908
アカマツ林	1.595	43	430	0.069
			合計	15.962

学的性質により異なり、植生の根が水分を吸収できる土壌の深さ(有効土層深)が 1m あってもその全層に貯留するわけではなく、土壌中の粗孔隙の割合(粗孔隙率)によって保水量は変化する。特に、森林の大きい部分を占めるスギ・ヒノキなどの人工林は手入れが放置されれば、根系の発達が衰えて有効土層深が減少するので、生育状況を考慮せずに森林

が一様な保水機能を持つと考え、保水機能を過大に評価する恐れがある。

本研究は、このような森林に対する保水機能の定量的評価の問題点を考慮して、森林の生育状況と林地土壌の保水機能を定量的に解析可能な衛星リモートセンシングに着目し、樹種別森林域に設定した調査ポイントにおける樹木の生育状況と林地土壌の保水機能との関係を明らかにするとともに、その関係を衛星データにフィードバックして森林の保水機能を面的にしかも定量的に評価した。さらに、本研究で提案した保水指標を利用すれば、衛星データから森林の保水機能を飽和雨量および保水容量を媒介として容易に評価できることを示した。

森林域における降雨量から河川流出量を精度よく推定する過程で重要な要素となるのが有効降雨の算定である。有効降雨の算定には葉面による遮断、地面の凹凸への貯留、表面流出が始まるまで土壌中に浸透する降雨量(飽和雨量)などが関与するが、中でも飽和雨量の値が大きなウェイトを占める。従来、飽和雨量の値は地質母材の違いで提案された数値¹⁵⁾が利用され、確かな理論的な裏付けのある数値ではないように思われた。それに対して、衛星データによって判読された保水指標の地域分布は分光反射特性という科学的な根拠に基づいたリアルタイムの情報であり、実測ハイドログラフのすり合わせのような従来の流出解析のあいまいさによる結果を更正し、降雨流出計算の信頼性を向上させる工学的な手法の確立に役立つものと考えられる。

最後に、現地調査の許可ならびに貴重な資料の提供など本研究の進行にご便宜を頂いた東京都水道局水源管理事務所、ならびに植物学上のご教示を頂いた国立科学博物館植物第一研究室長の近田文弘博士に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.

- 2) 山本義幸, 西川 肇, 岩下圭之, 寺中啓一郎: 阿武隈川流域の流出解析における衛星データの応用, 第27回土木学会関東支部技術研究発表会, pp.568-569, 2000.
- 3) 日本の地質「関東地方」編集委員会: 日本の地質3「関東地方」共立出版, pp.32-33, 1986.
- 4) 高橋 裕: 首都圏の水, 東京大学出版会 pp.46, 1996.
- 5) 環境庁: 1/50000 現存植生図(三峰, 丹波), 1986.
- 6) キヤノンイメージ編集室: REMOTE SENSING, pp.94-95, キヤノン株式会社, 1974.
- 7) 西川 肇, 近田文弘, 塩坂邦雄, 工藤勝輝, 藤井壽生: 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.
- 8) 西川 肇, 藤井壽生, 工藤勝輝, 近田文弘: 衛星データを用いた房総半島スギ林の地質との相関解析, 土木学会論文集, No.671/VII-18, pp.25-34, 2001.
- 9) 中野秀章: 森林水文学, 共立出版, pp.82-83, 1977.
- 10) 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回日本林業学会中部支部論文集, pp.7-10, 1989.
- 11) 大島造園土木緑化・土木研究所: 長谷川式土壌貫入計取扱説明書.
- 12) 飯倉善知, 横山隆三: ランドサットTM画像の大气および地形効果の補正, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.19, No.1, pp.2-16, 1999.
- 13) 大貫仁人: LANDSAT データの地形条件の差による電磁的補正法とその効果, 日本林業学会論文集, pp.147-148, 1981.
- 14) 只木由也, 赤井龍男: 森-そのしくみとはたらき-, 共立出版, pp.206-208, 1979.
- 15) 建設省水文研究会編: 流出計算例題集 2, 全国建設技術協会, pp.91, 1984.

(2001.10.22 受付)

ANALYTICAL APPROACH TO THE FUNCTION OF WATER CONSERVATION OF FOREST USING SATELLITE DATA

Hajime NISHIKAWA, Hisao FUJII, Katsuteru KUDOH ,Nobuo TSUYUKI,
Tsutomu KONDOH and Tatsuhito TAHARA

Recently prompt measures have been taken to deal with the flood control and irrigation works, centering on water conservation of forest as the "Green Dam". It should be a principal factor on river management to assess water conservation of forest quantitatively from forestal vegetation health for individual basin. The scientific characteristics of soil commonly vary depending on growing state of vegetation. The Ogouchi Dam upper-basin of the Tama River, one of principal water resources for Tokyo and its outskirts, was selected as a study area. As results, the followings were discussed; 1) results from correlative analysis between state of vegetation health by the Landsat image processing and scientific characteristics of soil by situ. site-surveying, 2) verification of relevancy to functions of forest in the river basin.