Logarithmic Residual 法および その類似法のためのスペクトルパターン指標*

Spectral Pattern Index for Logarithmic Residual and the similar methods

土 田 聡**, 田中壮一郎***, 小田島高之****

Satoshi TSUCHIDA, Soichiro TANAKA, Takayuki ODAJIMA

Abstract : Logarithmic Residual (LR), Least Upper Bound Residual (LUB) or Gray Scale Log Residual (GSLR) methods have been used for the purpose of converting digital numbers (DNs) of multiband remote sensing data to apparent band-to-band reflectance patterns. However, converted values by these methods show the specific distribution pattern in the N -dimension space defined by the N -band data, because these methods reduce the dimension to $N-1$. Thus, application of the spectral indices, which was previously developed for the original DN of N -dimension, to the converted values may lead incorrect index values.

The authors propose Spectral Pattern Index (SPI), which allows us to measure a band-to-band pattern similarity ("spectral pattern" and "spectral contrast") converted $N-1$ dimension values by the LR, LUB and GSLR methods. The Landsat TM data of Teshionakagawa area in northern Hokkaido, Japan, was processed by this new index after conversion to apparent reflectance pattern using the GSLR method. The result show more detailed information on vegetation and lithology.

1. はじめに

Logarithmic Residual 法²⁾ (LR 法と呼ぶ) はリモートセンシングデータから得られたスペクトル情報より, 簡易に地形および入射エネルギーの波長依存性を除き, その地表面物質の反射率パターンを導くものである。本手法は航空機による多バンドデータ用に開発され, 変質鉱物抽出のための一処理としてよく利用されており³⁾⁴⁾, 衛星データに対してもしばしば利用されている⁵⁾。また, その熱赤外域への適用も考案され, 有効性は極めて大きい⁶⁾。

スペクトル指標については, この LR 法により処理されたデータを用いれば, 地表面上に入射する放射エネルギーの波長依存性および地形の影響が減少され, より精度の高い結果が得られることが期待された。距離 (ユークリッド距離, 重み付きユークリッド距離, マハラノビスの距離など) による方法, および, ベクトルの内積を利用した方法 (ALI 指標⁵⁾など) の適用が試みられたが, LR 法による値の特徴から, これらの方法にはいくつかの問題が考えられた。

本研究においては, LR 法およびその類似法 (Least Upper Bound Residual 法, Gray Scale Log Residual 法⁷⁾, それぞれ, LUB 法, GSLR 法と呼ぶ) による値の特徴を示し, これらの問題を明確にし, さらに, その特徴を生かした新たなスペクトルパターン指標 (Spectral Pattern Index : SPI 指標と呼ぶ) の提案をする。

* 日本写真測量学会平成 3 年度秋季学術講演会にて一部を発表¹⁾。

** 早稲田大学教育学部

現在 : 工業技術院地質調査所 (科学技術特別研究員)

*** 同和工営株式会社

**** 早稲田大学理工学研究科

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 32, No. 1, 1993

2. LR 法および

その類似法(LUB 法, GSLR 法)²⁾⁷⁾

LR 法およびその類似法は入射エネルギー・地形による影響の乗法性に注目し、その相乗平均をもって平均化するものである²⁾⁷⁾。

LR 法の値は、次の基本式から求められる。この式は、入射エネルギー・地形の影響を乗法的因子のみで表すことができるという仮定に基づいている。

$$D_{ij} = T_i \cdot R_{ij} \cdot I_j \quad (1)$$

D_{ij} は i ピクセル、 j バンドにおけるラジアンズである。通常は便宜上 DN 値を D_{ij} として取り扱う。 T_i は斜面の傾きの変化による地表の放射輝度の違いを示す地形的要因であり、 R_{ij} は i ピクセルにおける j バンドの反射率を示している。 I_j は j バンドにおける画像全体の地表への平均的な入射エネルギーを示している。(1)式の i ピクセルにおける全バンドの相乗平均 $D_{i\cdot}$ は、

$$D_{i\cdot} = T_i \cdot R_i \cdot I \quad (2)$$

ここで、 R_i は i ピクセルにおける全バンドの反射率の相乗平均を、 I は I_j の相乗平均を示している。ここで、地形的要因を除くために(1)式を(2)式で除算する。

$$D_{ij}/D_{i\cdot} = (R_{ij}/R_i) \cdot (I_j/I) \quad (3)$$

(3)式の j バンドにおける全ピクセルの相乗平均は、次式で表される。

$$D_{j\cdot}/D_{\cdot\cdot} = (R_{j\cdot}/R_{\cdot\cdot}) \cdot (I_j/I) \quad (4)$$

$D_{j\cdot}$ は j バンドにおける全ピクセルの D_{ij} の相乗平均を、 $R_{j\cdot}$ は j バンドにおける全ピクセルの反射率の相乗平均を、そして、 $D_{\cdot\cdot}$ は全バンドおよび全ピクセルの D_{ij} の相乗平均を、 $R_{\cdot\cdot}$ は全バンドおよび全ピクセルの反射率の相乗平均を示している。入射エネルギーの影響を除くために(3)式を(4)式で除算する。

$$\begin{aligned} (D_{ij}/D_{i\cdot})/(D_{j\cdot}/D_{\cdot\cdot}) \\ = (R_{ij}/R_i)/(R_{j\cdot}/R_{\cdot\cdot}) = Y_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

以上のようにして、LR 法では Y_{ij} 値 (LR 法の値) が求められる。

LUB 法では、次式のようにして X_{ij} 値 (LUB 法の値) が求められている²⁾。

$$\begin{aligned} X_{ij} &= (D_{ij}/D_{i\cdot})/\text{LUB}_i[D_{ij}/D_{i\cdot}] \\ &= \{ (D_{ij}/D_{i\cdot})/(D_{j\cdot}/D_{\cdot\cdot}) \} / \\ &\quad \{ \text{LUB}_i[D_{ij}/D_{i\cdot}]/(D_{j\cdot}/D_{\cdot\cdot}) \} \\ &= Y_{ij}/\text{LUB}_i[Y_{ij}] \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\text{LUB}_i[\dots]$ は、各バンドにおいて、最大の D_{ij} 値をそれぞれ選び、これらの D_{ij} を一組として $\dots$ の値を求めたものである。この(6)式は、 $\text{LUB}_i[Y_{ij}]$ が反射率100%の物体に対する Y_{ij} を反映している”という仮定するものである。しかしながら、この仮定は満足されないことが多く、さらに、単独のピクセルの値を $\text{LUB}_i[Y_{ij}]$ に用いるので、雑音に弱く、必ずしも良い結果を得られるわけではない。よって、その利用には十分な注意が必要である。

GSLR 法は、対象とする波長領域で反射率の波長依存性が少なく、その値がほぼ一定の物質の画像上の PIXEL (REFERENCE PIXEL と呼ぶ) を用い、この REFERENCE PIXEL が地表面への入射エネルギーを間接的に表現していると考ええるものである。

REFERENCE PIXEL i の j バンドにおける DN 値を $G_i[D_{ij}]$ とすると、

$$G_i[D_{ij}] = G_i[T_i \cdot R_{ij} \cdot I_j] \quad (7)$$

と表せる。(7)式の i バンドにおける REFERENCE PIXEL の相乗平均 $G_i[D_{j\cdot}]$ は、

$$G_i[D_{j\cdot}] = G_i[T \cdot R_{j\cdot} \cdot I_j] \quad (8)$$

ここで、 $T = k_1$ とおく。さらに、REFERENCE PIXEL における $R_{j\cdot}$ の値はバンド毎に差異はないので、 $R_{\cdot 1} = R_{\cdot 2} = R_{\cdot 3} = \dots = R_{\cdot n} = k_2$ とおける。 n はバンド数。

$$\begin{aligned} G_i[D_{j\cdot}] &= G_i[k_1 \cdot k_2 \cdot I_j] \\ &= k_1 \cdot k_2 \cdot I_j = k \cdot I_j \\ &\quad (k = k_1 \cdot k_2 : \text{定数}) \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式的全バンドの相乗平均は、

$$\left\{ \prod_{j=1}^n (G_i[D_{j\cdot}]) \right\}^{1/n} = k \cdot I \quad (10)$$

(9)式を(10)式で除算すると

$$G_i[D_{j\cdot}]/\left\{ \prod_{j=1}^n (G_i[D_{j\cdot}]) \right\}^{1/n} = I_j/I \quad (11)$$

入射エネルギーの波長依存性の影響を除くために(3)式を(11)式で除算する。

$$(D_{ij}/D_{i.})/\{G_i[D_{.j}]/\{\prod_{j=1}^n (G_i[D_{.j}])\}^{1/n}\} = S_{ij} = R_{ij}/R_{i.} \quad (12)$$

さらに、式変形を行い、

$$\begin{aligned} S_{ij} &= (D_{ij}/D_{i.})/\{G_i[D_{.j}]/\{\prod_{j=1}^n (G_i[D_{.j}])\}^{1/n}\} \\ &= Y_{ij} \cdot (D_{.j}/D_{..})/\{G_i[D_{.j}]/\{\prod_{j=1}^n (G_i[D_{.j}])\}^{1/n}\} \end{aligned} \quad (13)$$

(13)式により GSLR 法による値 S_{ij} が求められる。

3. LR 法およびその類似法による値の特徴

バンド数 n のデータを n 次元空間にあてはめた場合、その複数のデータによって生じる分布は、特別な場合を除き、 n 次元の広がりを持っている。しかしながら、LR 法およびその類似法 (LUB 法, GSLR 法) を施した値の分布は、特徴的な $n-1$ 次元の広がりを持っている。以下、この説明を示す。

この LR 法による値 Y_{ij} の i ピクセルにおける全バンド ($j: 1 \cdots n$) の相乗平均は、

$$\begin{aligned} (\prod_{j=1}^n Y_{ij})^{1/n} &= \{\prod_{j=1}^n ((D_{ij}/D_{i.})/(D_{.j}/D_{..}))\}^{1/n} \\ &= ((\prod_{j=1}^n D_{ij})^{1/n}/D_{i.})/((\prod_{j=1}^n D_{.j})^{1/n}/D_{..}) \\ &= (D_{i.}/D_{i.})/(D_{..}/D_{..}) = 1 \end{aligned} \quad (14)$$

となる。さらに、LUB 法および GSLR 法による値 X_{ij} , S_{ij} の相乗平均も同様に、

$$(\prod_{j=1}^n X_{ij})^{1/n} = 1 \quad (15)$$

$$(\prod_{j=1}^n S_{ij})^{1/n} = 1 \quad (16)$$

となる。LR 法およびその類似法による値の相乗平均

(a) LR 法およびその類似法による値

(b) (a) の対数値

第1図 2バンド (2次元空間) における LR 法およびその類似法による値の分布

第2図 3バンド (3次元空間) における LR 法およびその類似法による値の分布

は常に 1 となる。このことは、それらの値が $n=2$ (2次元空間) の場合、第1図 a のように双曲線を示し、 $n=3$ (3次元空間) の場合には第2図 a のような曲面を示すことを意味する。バンドの n 次元空間上で LR 法およびその類似法を施した値の分布は $n-1$ 次元の広がりを持つことになる。

4. スペクトル指標に対する問題点

LR 法およびその類似法によって処理された値が前章で示したような特徴的な分布を持つことは、これらの方法による値 (Y_{ij} , X_{ij} および S_{ij}) に対して線形空間上で一般に利用されるスペクトル指標が適用できないことを示している。これは、 Y_{ij} , X_{ij} および S_{ij} の値が放射輝度の量から独立した波長特性のパターンのみを提供していることによる。バンドごとの大きさには物理的な量の大小の意味がなく、オリジナルのデータに存在した線形性が保存されていないことも意味している。この線形性については、より単純化した以下の説明を加える。

第3図はバンド数 $n=2$ のデータを考えた場合の概念図である。まず、異なった成分 (純粋単一物質) を持つ2画素のオリジナル・データ (第3図: A, B) を考える。LR 法 (もしくはその類似法) による値の分布は第1図 a と同様に曲線 (第3図: V) をなす。A, B も LR 法 (もしくはその類似法) によって変換され、この曲線 V 上 (第3図: A', B') に分布する。A', B' のそれぞれの大きさはその物質の反射率および表面から反射されるエネルギーに制限されず、そのスペクトルのパターン (特に、コントラスト) のみによって一義的に決定される。さらに、この2成分が1画素

第3図 LR法の線形性（2バンドにおける例）
（直線W上の値はV、L上の値に比べ小さいので本図上ではW上の値のみ拡大して示す）

中に混在したデータ（第3図：C）を考えた場合、オリジナル・データにおいて、ベクトルCはA、Bの線形結合として表され、空間的に特別な事情、たとえば、“植生と土壌の場合、植生と土壌の量比によって影の占める量が変化する”などのことがない限り、A、Bを結んだ直線L上に位置する。しかしながら、LR法（もしくはその類似法）を施した後のデータ（第3図：C'）は、曲線V上に位置し、A'、B'ベクトルを結んだ直線上には位置せず、その線形性が成立しないことが理解できる。

以上のように線形性が保証されない分布に、単純な距離（ユークリッド距離、重み付きユークリッド距離、マハラノビスの距離など）を用いたスペクトル指標は利用できない。また、ベクトルの内積を利用した方法も、ベクトルの大きさを情報として用いているので利用できない。さらに、この内積を利用した方法は距離を用いた方法よりも誤った結果を生じさせる可能性がある。つまり、スペクトルのパターンの種類によっては、そのベクトルの絶対値（大きさ）は非常に大きい。このスペクトルが指標の基準のスペクトルと全く異なるパターンであっても、その指標の値は大きな値をもち得るのである（実例は第6章）。

5. スペクトルパターン指標（SPI指標）

以上、述べてきたように、LR法およびその類似法によって処理された値にはオリジナルのデータで存在した線形性がない。線形空間上で用いるべき手法論・指標をこの値に適用することは、結果の如何に関わらず、避けるべきであろう。データの条件によって、その結果が左右される可能性があり、また、方法論・指標より求めた値にどのような意味が存在するのか？といった問題もおこる。

本章においては、これらの問題が生じ得ない指標、スペクトルパターン指標（Spectral Pattern Index：SPI指標と呼ぶ）を提案する。これは、LR法およびその類似法による値のバンドごとの大きさに物理的な意味がないことを考慮し、そのスペクトルのパターンにのみ注目した指標である。ここで注意しなければならないのは、SPI指標はオリジナルのデータにあった線形性を保存するものではない。もし、その保存を目的とする指標を考えるのなら、バンドごとの大きさに再び物理的な意味を持たさなければならず、新たな情報および様々な仮定・条件を必要とする⁹⁾。このような指標は、LR法（もしくはその類似法）による全ての値に対して利用できるものではない。SPI指標は、LR法（もしくはその類似法）が正確なスペクトルのパターンを示す限り、特別な情報・仮定・条件などを必要とせず成立するものである。

SPI指標は、数学的には、バンド数 n の Y_{ij} 値（もしくは X_{ij} 、 S_{ij} ）に対して対数を取り、新たな空間（ V_n 空間とする）を求め、その空間上で定義される。以下、この説明を述べる。

LR法による値 Y_{ij} に対数をとることは、軸（ y_j ）に対して対数をとることになる。ここで、その対数軸（ z_j ）上の値を Z_{ij} （ $=\log Y_{ij}$ ）とおくと、(14式より

$$\begin{aligned}\log\left\{\left(\prod_{j=1}^n Y_{ij}\right)^{1/n}\right\} &= 1/n \cdot \log\left(\prod_{j=1}^n Y_{ij}\right) \\ &= 1/n \cdot \sum_{j=1}^n (\log Y_{ij}) \\ &= 1/n \cdot \sum_{j=1}^n Z_{ij} = 0\end{aligned}\quad (17)$$

となる。さらに、LUB法およびGSLR法による値 X_{ij} 、 S_{ij} は、(15)、(16式より同様に、

$$\log\left\{\left(\prod_{j=1}^n X_{ij}\right)^{1/n}\right\} = 1/n \cdot \sum_{j=1}^n (\log X_{ij}) = 0 \quad (18)$$

$$\log\left\{\left(\prod_{j=1}^n S_{ij}\right)^{1/n}\right\} = 1/n \cdot \sum_{j=1}^n (\log S_{ij}) = 0 \quad (19)$$

となる。LR 法およびその類似法による値に対して対数をとった値の相加平均は常に 0 となる。グラフ上では、 $n=2$ (2 次元空間) の場合、LR 法およびその類似法による値の分布は第 1 図 b のように直線を示し、 $n=3$ (3 次元空間) の場合には第 2 図 b のような平面を示す。 n バンドのデータについて、以上のように対数化して得た空間を V_n 空間とすれば、この空間上で LR 法およびその類似法の値は $n-1$ 次元の分布、超平面をなす。

このような線・平面もしくは超平面を考えることによって、数学的にその処理が容易になり、前章で示したような線形性の問題を考えなくとも良い指標が構築できる。このことは第 3 図からも理解できる。LR 法 (もしくはその類似法) による値が分布する曲線 V 上においては、ベクトル間 (たとえば $A' \cdot B'$ 間) の長さもしくはそれらのベクトルの大きさ・方向の違いに関する量の意味は、単にスペクトル・パターンの違いを示すのみであり、定量的な意味を持たせることは極めて難しい。たとえば、 $A' \cdot B'$ 間と $A' \cdot D'$ 間は等距離ではあるが、この 2 つの距離に対して共通の波長特性の量的違いを見いだすことは不可能である。一方、 V_n 空間での LR 法 (もしくはその類似法) の値の分布を第 3 図上 (V_2 空間となる) に上書きすれば、第 1 図 b と同様に直線分布 W となる。この分布上におけるベクトルの大きさ (距離とも考えることができる) は波長特性の強さ、スペクトル・コントラストの違いを示し、その大きさの違いを指数的な表現で定量化できる。また、その原点を中心とした方向の違いは、波長特性の種類、スペクトル・パターン (本文中以後のスペクトル・パターンはスペクトル・コントラストを除いた意味で用いる) の違いを示し、HIS 変換における Hue にも類似する。ただし、この $n=2$ の場合にはスペクトル・パターンは 2 種類 (A' と B'・C') のみである。スペクトル・パターンが複数ある例として、バンド数 $n=3$ の場合について示したものが第 4 図である。 $n=3$ の場合、空間 V_3 における LR 法 (もしくはその類似法) の値の分布は 2 次元平面 ($n-1$) であり、第 4 図はこの平面を、視線はこの平面の法線ベクトルに対し平行に、視野の中心は原点に置いて表現している。原

第 4 図 スペクトル・パターンおよびスペクトル・コントラスト ($n=3$ 場合)

点とは特徴的な波長特性のない平坦なパターンを示す (第 4 図 A)。原点からデータ (第 4 図 B) への方向はスペクトル・パターンの違いを示す。原点からのその距離 (第 4 図の d) はスペクトル・コントラストを示すことになる。

つまり、 V_n 空間における $n-1$ 次元の超平面上のそれぞれの量が明確な意味を持ち、数学的にも扱い易いものとなっている。これらの定量値の意味を生かした指標を用いれば、従来の方法を用いた場合のような線形性の問題は生じない。以下、この V_n 空間における最も単純な指標と、この空間上における定量値の意味を生かした SPI 指標について示す。

まず、この V_n 空間における単純な指標としては、基準とするスペクトル (基準スペクトルと呼び、 V_n 空間上のベクトルを α とおく) とデータ i (V_n 空間上のベクトルを $\beta_i = \{Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}, \dots, Z_{in}\}$ とおく) との単純な距離 L_i を用いることが考えられる。

$$L_i = |\beta_i - \alpha| \quad (20)$$

$$(C_0 - L_i) / C_0 \quad (21)$$

ここで、 C_0 はしきい値であり、 C_0 以上の距離を持つものは指標が0となる。簡易ではあるが、前述したような V_n 空間での超平面上の特徴を生かしてはいない。

SPI 指標は、基準スペクトルとデータ i との角度 a_i から指標の値 p_i を計算し、この二者のスペクトル・コントラストの差 d_i を用い、明らかにスペクトル・コントラストの異なるデータを指標から除き (p_i を 0 とする)、最終的な指標の値 p_i を得るものである。具体的には以下の式に従う。スペクトル・パターンについては、

$$a_i = \cos^{-1} \left(\frac{\alpha \cdot \beta_i}{|\alpha| \cdot |\beta_i|} \right) \quad (22)$$

$$p_i = \begin{cases} (C_1 - a_i) / C_1 & (a_i < C_1) \\ 0 & (a_i \geq C_1) \end{cases} \quad (23)$$

($\because 0 < C_1 \leq \pi$)

となる。 C_1 は指標の最低値の設定のための値であり、基準スペクトルのスペクトル・パターンより $C_1 \text{rad}$ 以上離れているデータの指標値 p_i は 0 となる。さらに、スペクトル・コントラストの差 d_i を用い、

$$d_i = |\beta_i| - |\alpha| \quad (24)$$

$$p_i = \begin{cases} p_i & (d_i \leq C_2) \\ 0 & (d_i > C_2) \end{cases} \quad (25)$$

SPI 指標の値 p_i を設定する。 C_2 はスペクトル・コントラストに関するしきい値であり、スペクトル・コントラストの差 d_i が C_2 より大きい場合には p_i 値を 0 にするものである。なお、 $\sim$ は差を表す。

以上のように、SPI 指標は V_n 空間における値の特徴、つまりは、LR 法およびその類似法の特徴を生かし、スペクトルの形状にのみ注目し、スペクトル・パターンとスペクトル・コントラストに分け、その指標の値を導出している。よって、線形性の考えは特に必要とせず、従来の方法に比べ優位性を持つ。次章では、この SPI 指標を実際に適用した例を示し、従来の方法との比較を行う。

6. SPI 指標の適用例

対象地域は、植生が全域にわたって存在する北海道北部天塩中川地域である(第5図)。この植生下の岩相は、主に白亜系の堆積岩(蝦夷層群)よりなり、東方

第5図 北海道北部天塩中川地域のランドサット画像(TM5)

第6図 北海道北部天塩中川地域の地質概略図⁹⁾

の山脈は蛇紋岩帯よりなる。また、西方には第三系の堆積岩が分布する(第6図⁹⁾)。この岩相の違いは植生に反映し、岩相ごとに異なる植生相を示している¹⁰⁾。なお、第6図の地質概略図のその全てを信じることはできない。これは、本来、地質図を作る場合、植生に覆われていないわずかな露頭の情報(ポイント的データ)を主体としているため、植生に覆われている部分は推定し、作製しているためである。これを補う方法として、現在、岩相の違いによって生じる植生相の違い¹¹⁾をリモート・センシングデータから取得し、より詳細な地質図作りを進めている¹⁰⁾。

植生が解析対象地域全体にわたって存在する本地域においては、LR 法より GSLR 法の方が適している。これは LR 法が「解析対象地域全体における平均的な地表の放射エネルギーのスペクトルのパターンは、その入射エネルギーのスペクトルのパターンとほぼ等しい。」という前提条件の上に成立しているためである。つまり、植生が全域にわたって存在する本地域のデータに対して、LR 法を施した場合、解析対象地域全体に

(a) オリジナル・データのパターン

(b) LR法による値

第7図 植生が調査地域全域にわたって分布する地域におけるLR法によるパターンの変化
(Bが対象地域全域にわたって分布する植生のパターン)

おける平均的な地表の放射エネルギーのスペクトルのパターンは本地域全域にわたって存在する植生のスペクトルのパターンとほぼ一致することになる。これを入射エネルギーのスペクトルのパターンに置き換えるので、植生に関しては、入射エネルギーと放射エネルギーのパターンが変わらないと仮定される。つまり、LR法によって推定される反射率のパターンはほぼ平坦になってしまう(第7図B)。さらに、平坦なパターン(第7図a-D)を示すはずのものが、他のパターン(第7図b-A, C)であったものが、逆のパターン(第7図b-A, C)を示すことになる。SPI指標によって、スペクトル・パターンの違いを示すことは不可能となる。

GSLR法では、波長依存性の少ない物質のスペクトルのパターンを入射エネルギーのパターンと考え、より正確なスペクトルのパターンを導出しているので、以上の問題は生じ得ない。

よって、REFERENCE PIXELに積雲(晴天域に点々と存在する雲、鉛直に発達する)を用い、本地域の1988年7月26日のランドサットTMデータ(512×400pixels)のうち6バンドを除いた1～5, 7バンドにGSLR法⁷⁾を施し、その値にSPI指標を適用した。

第8図 基準スペクトルのパターン(実線)
(点線は第13図におけるスペクトル・コントラストの上限・下限)

第9図 蛇紋岩上の笹

第10図 蛇紋岩上の植生相
(笹・エゾマツ・カンバなど)

基準スペクトル(第8図)は、蛇紋岩上の植生を対象とし、実地調査より最もその特徴を表していると思われる地点の画像上でのデータを用いた。蛇紋岩帯は対象地域東域の山頂部に南北に分布し、その直上の植生は笹(第9図)を主とし、エゾマツ、カンバなどが見られる¹⁰⁾(第10図)。

(20), (21)式に従い単純な距離によって示された指標の画像が第11図である。ここで、 $C_0=0.6755850$ である。

第11図 単純な距離における指標

第12図 スペクトル・パターンのみによる指標

(22), (23)式に従いスペクトル・パターンのみに注目した指標が第12図であり、 $C_1=0.4000000\text{rad}$ である。第13図が本研究で提案する SPI 指標であり、(22)~(25)式に従っており、 $C_1=0.4000000\text{rad}$ 、 $C_2=0.1823216$ (C_2 の幅以内の波長特性のパターンを第8図に示す)である。バンド数は6なので V_n 空間上での分布の次元は5となるが、この分布を基準スペクトルのベクトルを含んだ2次元平面で切り、これら指標の関係を示した断面図が第14図にあたる。さらに、第11図に緑、第12図に赤、第13図に青をあてたものが、第15図である。第15図の配色と指標の関係は第14図上に示している。

現地との対応および第6図から考えて、第15図上の白色部が蛇紋岩上の笹を主とする植生の分布、赤色部が蛇紋岩分布地域を除いた山上の植生の分布、緑色部が都市域に近い植生の分布をほぼ示している。よって、第11図は主に蛇紋岩上の笹を主とする植生と山上の植生部分を示しており、第12図は蛇紋岩上の笹を主とす

第13図 スペクトル・パターンおよびスペクトル・コントラストによる指標 (SPI 指標)

第14図 指標間の関係 (断面図)

R, G, Y および W : 第15図上で表現されている色
括弧内の色 (例えば (BLUE)) : 第15図に与えた色

第15図 複数の指標による蛇紋岩帯の抽出画像
B : 第13図 G : 第11図 R : 第12図

る植生の部分と都市地域に近い植生の部分を示し、さらに、第13図がほぼ蛇紋岩上の笹を主とする植生の部分のみを示していることになる。SPI 指標が、十分に機能していることが読み取れる。

さらに、その第15図の色相と第14図より、蛇紋岩分

(a) 主成分分析

(b) ユークリッド距離

(c) 直交基底による方法

第16図 オリジナルのデータに対する
従来の方法による指標

布地域を除いた山上の植生は、基準スペクトルとスペクトル・パターンは似るがスペクトル・コントラストが異なり、都市地域に近い植生はそのパターンが異なると言える。

(a) 主成分分析

(b) ユークリッド距離

(c) 直交基底による方法

第17図 GSLR 法による値に対する
従来の方法による指標

最後に従来の方法との比較を行いたい。第16図は、TM のオリジナルのデータを用い、(a)主成分分析、(b)ユークリッド距離、(c)直交基底による方法により得られた画像である。また、第17図は、GSLR 法の値を用

い、第16図と同様な各種の方法により得られた画像である。GSLR法の値に線形空間を前提とした従来の方法を用いるのは、第4章で示したように好ましくはないが、比較のため適用した。

主成分分析については、最も蛇紋岩上の植生の分布を表現していた主成分の画像を選んだ。興味深いことに、オリジナルのデータを用いた解析では、最も寄与率が低い第6主成分(0.076%)の画像(第16図a)にのみ、その分布がわずかに現れ、GSLR法の値に対する処理においては第1主成分に明瞭(ただし、都市域の牧場・草原と区分できない)に現れている(第17図a)。さらに、ここには示していないが第2～6主成分においても、第1主成分と同様な分布(その明瞭さは第1主成分の画像よりも劣る)が現れている。

ユークリッド距離を用いた方法は、本研究における単純な距離の算出方法(20), (21)式)と同じだが、用いる空間は異なり、 V_n 空間上ではなくオリジナルのデータもしくはGSLR法による値からなる空間上で算出される。基準スペクトルにはSPI指標の場合と同じ基準スペクトル(第8図)を用い、その距離を算出した。ただし、オリジナルのデータに対しては、地形効果を考慮に入れ、なるべく平坦な領域のデータを新たに基準スペクトルとして選択し、その処理に適用した。オリジナルのデータでは地形の影響が強く、その画像はかなり不明瞭となっている(第16図b)。GSLR法の値では、都市域の牧場・草原が明瞭に現れ、蛇紋岩上の植生と区分できずSPI指標の画像(第13図)ほど明瞭ではないが、比較的良好な画像を得ている(第17図b)。

直交基底による方法はALI指標・CLI指標を導く方法を蛇紋岩上の植生に対する指標に置き換えたものである。基準スペクトルをアルーナイト、カルサイトから蛇紋岩上の植生に置き換え、本研究に適合させている。1軸目には全バンドに対して1対1の関係になる軸をとり、2軸目に基準スペクトルを用いて1軸目に直交する軸を決定し、この軸の値を指標の値とするものである。本方法による画像(第16図c、第17図c)では、オリジナルのデータ、GSLR法の値、ともに良好な結果は得られていない。

SPI指標の画像(第13図)を以上の結果(第16図、第17図)と比べた場合、SPI指標の優位性は理論のみならず実例においても確認できる。ただし、第17図bのみは比較的良好な画像である。これは、本地域のほとんどが植生に覆われており、類似したスペクトル・パター

ンおよびコントラスト(植生のパターン)を持つデータのみが存在することに起因すると考えられる。GSLR法の値がそのバンド空間上で一部に集中するため、その値の分布を曲面ではなく、平面であると仮定できることによるのであろう。しかし、比較的良好な画像を得たとしても、データの条件によってその信頼性は左右されるわけであり、また、前章でも述べたように距離に厳密な定量的意味を見いだせないことにも変わりはない。

一方、直交基底による方法(第16図c、第17図c)は良い結果を示していない。しかし、ユークリッド距離の場合と同様に、条件によっては良好な画像を得られる場合⁵⁾もある。しかし、ユークリッド距離の場合と同様に、より進んだ考察を行うことは難しいと考えられる。

以上、従来の方法とSPI指標の比較を行ったが、実際にはまだ数多くの方法論があり、その全てとの比較は不可能であろう。しかし、LR法およびその類似法による値には、第3章、第4章で示したように特異な性質があり、この特徴を生かした指標は未だ案出されていなかった。SPI指標はこの特徴を生かしたものであり、他のいかなる従来の方法よりも有効なものと推定できる。

7. 終 り に

SPI指標の特徴は、LR法およびその類似法の特徴を生かし、スペクトルの形状をスペクトル・パターンとスペクトル・コントラストに分けて考えることにある。これは、LR法およびその類似法によって得た値に”対数”をとり、新たな V_n 空間を得たことによって可能となった。よって、この V_n 空間上で処理を行えば、SPI指標に類似した効果的な指標は他にも考えられるかもしれない。また、LR法およびその類似法は、通常、全ての値に対して”対数”を取って処理を行っており、 V_n 空間(つまりはSPI指標)はこの点でもLR法およびその類似法に適している。本指標が、今後、有効な指標として利用されることを期待する。

なお、本研究の一部は早稲田大学特定課題研究助成費(No.92A-176)および同和工営株式会社からの委託研究費(早稲田大学理工学研究所委託研究: No.1363)を使用した。また、工業技術院地質調査所の山口靖博士には多くの御助言を戴いた。早稲田大学教育学部の

永沼浩一氏（現・岩波書店）には、有意義な御討論をして戴いた。北海道天塩中川地域では現地調査にあたって、北海道大学中川地方演習林の方々に様々な御配慮を戴いた。以上の方々に、謝意を表します。

（受付92. 7. 17, 受理93. 1. 12）

参 考 文 献

- 1) 土田聡・田中壮一郎, 多バンドデータのためのスペクトル指標, 日本写真測量学会平成3年度秋季学術講演会発表論文集, 173-176, 1991.
- 2) Green, A. A. and Craig, M. D., Analysis of Aircraft Spectrometer Data with Logarithmic Residuals, *Proceedings of the Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, Jet Propulsion Laboratory*, 111-119, 1985.
- 3) Roberts, D. A., Yamaguchi, Y., and Lyon, R. J. P.: Calibration of Airborne Imaging Spectrometer Data to Percent Reflectance using Field Spectral Measurements, *Proceedings of the Second Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, Jet Propulsion Laboratory*, 21-30, 1986.
- 4) 岡田和也, 高スペクトル分解能リモートセンシングを用いた岩石・鉱物分布の高精度マッピング, 物理探査, 44(6), 426-441, 1991.
- 5) 山口靖・浦井稔・フランク R. ハニー, スペクトル指標による岩相識別—Geoscan AMSS Mk Iによるオーストラリアでの例—, 日本リモートセンシング学会, 9(3), 291-301, 1989.
- 6) Hook, S. J., and Kahle, A. B., Techniques for the Extraction of Emissivity Variations from Multispectral Thermal Infrared Data, *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, College Park, Maryland*, 983-990, 1990.
- 7) 土田聡・小田島高之・田中壮一郎, Gray Scale Log Residual 法—反射率パターン解析のための一手法—, 日本リモートセンシング学会, 12(3), 29-44, 1992.
- 8) 土田聡・永沼浩一・関根秀真, Log Residual 法における線形性, 日本リモートセンシング学会, 第12回学術講演会論文集, 39-42, 1992.
- 9) 地質調査所, 日本地質アトラス, 1982.
- 10) 小田島高之・土田聡, Gray Scale Log Residual 法を用いた密植生地域の地質解析, 日本写真測量学会, 平成3年度秋季学術講演会発表論文集, 111-114, 1991.
- 11) Kruckeberg, A. R., California Serpentine: Flora, Vegetation, Geology, Soils and Management Problems, *University of California Press*, 190p, 1984.