山岳画像データに対する解析的大気・地形効果補正法[†]

川 田 剛 之*・大 谷 敦 久*・日 下 遼*

Analytical Correction Method for Atmospheric and Topographic Effects on Rugged Terrain Image Data

Yoshiyuki KAWATA*, Atsuhisa OHTANI* and Takashi KUSAKA*

The reflected near infrared radiance of rugged terrain as measured from space, includes strong atmospheric and topographic effects. The removal of such effects from satellite image data is very important in the analysis of remote mountainous forest areas. However, the radiative transfer process is much more complex for rugged terrain than for flat terrain, because the complicated local topography, such as elevation, slope and aspect, must be taken into account.

The summary of this study is as follows: 1) In this study we have developed a new analytical correction method for rugged terrain image data which allows the use of the more general Minnaert's law for the bidirectional reflection at the ground surface. In our correction model, single reflection by a target slope and multiple reflection by the mean back ground as well as diffuse reflection by the atmosphere were taken into account. 2) The validity and effectiveness of the proposed method were successfully demonstrated to the MOS-1 MESSR image data. 3) We found that the reflection by rugged terrain vegetation (mostly deciduous forest) follows Minnaert's law, rather than Lambert's law. The appropriate values of the Minnaert constant k and mean ground albedo A for the study site were $k=0.59$ and $A=0.56\pm0.06$ in band 3 and $k=0.63$ and $A=0.79\pm0.08$ in band 4.

Key Words: remote sensing, rugged terrain image, atmospheric effect, topographic effect, radiometric correction, Minnaert's law, Lambert's law

1. はじめに

衛星を利用して地球の環境や資源をリモートセンシングすることが近年活発化している。山岳地帯の情報を直接的な方法で広域に把握しようとしても大変困難である。したがって、リモートセンシング画像データから山岳地帯の意味のある情報を得ることは大変重要なことである。しかし、山岳地帯の画像データは平坦地形の画像データとは異なり、複雑な地形の起伏によって生じる影などの影響が強く含まれているため、従来の平坦地形の画像データに有効な画像処理技術をそのまま山岳地帯の画像データに適用しても、うまくいかないことが明らかになっている (Smith, et al., 1980¹⁾, Dave and Bernstein, 1982²⁾). 換言すると、衛星搭載のセンサによって観測される山岳地帯の画像データには大気散乱や地形起伏による影響が含まれているので、これらの大気・地形効果の補正をせずに観測 CCT レベル値を用いてスペクトル分類を行っても、単に地形起伏の状態を分類するだけで、山岳植生の林相の相違は分類されないと指摘できる (Kawata, et al., 1988³⁾).

これまで、山岳画像データに対する補正手法として提案されたモデルを大別すると、一つはランベルト反射法則に基づいて直達光の他に多重散乱による拡散伝達光、ターゲット斜面の傾きなども考慮してターゲット地点の反射率を求める手法 (Kawata, et al., 1988³⁾, Sojberg and Horn, 1983⁴⁾) であり、他方はミネラルト反射法則に基づいてターゲット斜面の傾きだけを考慮してターゲット地点の反射率を求める手法である。後者のモデルでは大気の影響をまったく無視 (Smith, et al., 1980¹⁾, Justis, et al., 1981⁵⁾, Hugli and Frei, 1983⁶⁾) しているか、あるいは、大気を考慮していても直

† 第15回リモートセンシングシンポジウムで発表
(1989・10)

* 金沢工業大学工学部 石川県金沢南局区内野々市町属
が丘 7-1

* Faculty of Engineering, Kanazawa Institute of
Technology, Kanazawa
(Received July 27, 1990)
(Revised January 14, 1991)

達減衰光など簡単なケースに限られている (Woodham and Lee, 1985⁷⁾, Woodham and Gray, 1987⁸⁾). 本研究ではより一般的なミネラルト反射に基づいて直達光, 拡散伝達光の両者を考慮し, さらに近似的ではあるが周囲地形による多重反射も含めた大気および地形効果の新しい補正手法を提案するものである. このために, 大気モデルとしては Lowtran 6 の中緯度・夏型モデルを使用して, 実際の MOS-1 MESSR 画像データに本研究の大気・地形効果補正手法を適用し, その手法の有効性を定性的にはクラスタ分類によって, 定量的には反射率のヒストグラムの形状によって検証を行っている.

2. 大気・地形効果の近似補正手法

大気・地形効果の補正を行うということは, 衛星高度で測定した山岳地帯上空の放射量データから大気効果と地形効果の影響を除去して地表対象物固有の反射率に変換することと同じである. 最初に平たん地形における大気効果補正について簡単に述べる.

簡単のため, 大気は光学的厚さ τ をもつ平面平行な大気であり, 地表の反射は等方的なランベルト法則に従うと仮定する. この大気上面に入射太陽フラックス πF が方向 $(\mu_0 = \cos \theta_0, \phi_0)$ で照射するものとする. ここで θ_0, ϕ_0 はそれぞれ, 入射光の天頂角とその方位角である. そして衛星センサはターゲットの垂直上方の光を測定するものとする (観測角の余弦を μ とすると $\mu=1$). 前述の仮定のもとで, 地表反射率の水平方向の非一様性は考慮するが, 地形起伏を考慮する必要のない平たん地形の画像データに対する大気効果補正の研究 (上野, 川田, 日下, 羽場, 1982⁹⁾) により, ターゲット地点の大気上面から出てくる垂直上向き ($\mu=1$) の放射輝度 I_r は (1) 式で近似できる.

$$I_r = A_t(t + s\bar{A}) + (p - s)\bar{A}^2 + (q - t)\bar{A} + \mu_0 R(\mu=1, \mu_0)F \quad (1)$$

ここで A_t および $\bar{A}$ はそれぞれターゲット点の反射率およびその周囲 (バックグラウンド) の平均反射率である. さらに p, q, s, t は放射係数と呼ばれ, 大気の拡散反射関数 R と拡散伝達関数 T を使用して計算できる⁹⁾.

(1) 式の第 1 項は太陽光の直達減衰光成分と拡散伝達光成分および周囲地表と 1 回作用した光の成分がターゲットに入射し, そこで 1 回反射した後に大気により減衰されてターゲットの大気上面から垂直上方に出る放射成分であり, 第 2 項と第 3 項はそれぞれ周囲地表と 1 回および 2 回作用した後大気により拡散伝達されてターゲットの大気上面の垂直上方に出る放射成分

であり, また第 4 項は地表とは作用せず大気のみにより拡散反射されてターゲットの大気上面の垂直上方に出る放射成分である. このことから, (1) 式はターゲットに関しては 1 回反射, その周囲地表に関しては高々 2 回反射までを考慮したモデルといえる. 大気上面に出てくる放射量に関しては地表との 3 回以上の多重反射は無視でき, またターゲット周囲の平均反射率 $\bar{A}$ は観測放射輝度のターゲット周囲の平均値 $\bar{I}_{obs}$ から (2) 式により求めることができる⁹⁾.

$$\bar{A} = [-q + \sqrt{q^2 - 4p(\mu_0 R(\mu=1, \mu_0)F - \bar{I}_{obs})}] / 2p \quad (2)$$

ターゲット地点の反射率は, (2) 式より求めた周囲の平均反射率 $\bar{A}$ の値と I_r としてターゲット点に対応する観測放射輝度値を用いて, (1) 式を A_t について解けば計算できる. この方法に基づいた平たん地形の衛星画像データの大気効果補正は大変有効である.

つぎに起伏のある山岳地帯の画像データに対する大気・地形効果補正法について述べる. 地表反射モデルとして, 1) ランベルト反射モデル, 2) ミネラルト反射モデルの二つがこれまで提案されている. Kawata, et al., 1988³⁾ は前者のモデルに基づき, 傾斜角 α をもつ起伏斜面上のターゲット地点の垂直上空の観測放射輝度 I_{obs} の近似式として (3) 式を提案した.

$$I_{obs} = e^{-\tau} A_t B[\gamma(\mu_0, \nu) \pi F e^{-\tau/\mu_0} + \mu_0 F \int_0^{2\pi} \int_0^1 T(\mu', \mu_0, \phi' - \phi_0) \gamma(\mu', \nu) d\mu' d\phi'] + \mu_0 R(\mu=1, \mu_0)F \quad (3)$$

ここで R, T はそれぞれ大気の拡散反射関数, 拡散伝達関数であり, B は両方向反射分布関数 (bidirectional reflectance distribution function) でありランベルト反射では光の斜面への入射角, 反射角にかかわらず一定で $B=1/\pi$ となる. また, γ はターゲット地点の斜面に立てた法線とターゲットへの入射光の方向 (μ, ϕ) とがなす角度 θ の余弦であり, (4) 式で与えられる.

$$\gamma = \begin{cases} \cos \theta & (\cos \theta \geq 0) \\ 0 & (\cos \theta < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\cos \theta = \mu\nu + \sqrt{1 - \mu^2} \sqrt{1 - \nu^2} \cos(\phi - \phi_0) \quad (5)$$

(5) 式の ν はその斜面の法線が天頂方向となす角度 β の余弦であり, 斜面の傾斜角を α とすると, $\beta = \alpha$ の関係があり, $\nu = \cos \alpha$ となる. ϕ_0 はターゲットの斜面の最大傾斜の方向である. 対象とする山岳地帯の標高データがあれば, α, ϕ_0 の値は求められ, したがって ν, γ の値が計算できる. 斜面上に直接太陽光が照射しない幾何学的条件のとき, $\gamma=0$ としている. (3) 式の第 1 項は太陽直達光成分と大気拡散伝達光成分が

ターゲット点に入射し、そこで 1 回反射して垂直上方に減衰して大気上面に出てくる放射成分であり、第 2 項は大気のみによる拡散反射光成分である。ターゲット点の反射率 A_i は観測放射輝度値を (3) 式に代入して計算できる。この近似式を LANDSAT 衛星の MSS 画像データに適用し、Kawata, et al., 1988³⁹⁾ はある程度の画質の改善を得ているが、その研究の欠点は周囲地形による反射光成分を無視している点とミネラルト反射モデルとランベルト反射モデルとの結果の比較がなされていない点にある。

つぎにミネラルト反射モデルを仮定した Smith, et al., 1980¹⁾ の研究では、大気の影響を無視して地形効果のみ補正している。このとき、観測放射輝度 I_{obs} は (6) 式に近似される。

$$I_{\text{obs}} = I_e \beta(\gamma, \nu) \quad (6)$$

ここで I_e は A_i に比例する地形効果を除去した放射輝度である。ミネラルト反射モデルでは、両方向反射分布関数 $B(\gamma, \nu)$ は (7) 式で与えられる (Minnaert, 1941¹⁰⁾ および文献 7))。

$$B(\gamma, \nu) = \frac{k+1}{2\pi} (\gamma\nu)^{k-1} \quad (7)$$

ここで k はミネラルト係数と呼ばれる定数である。 $k=1$ のときはランベルト反射になる。その値は画像データから以下のようにして推定できる。すなわち、(6) 式の両辺に ν を掛け、対数を取ると、

$$\ln(I_{\text{obs}} \nu) = k \ln(\gamma\nu) + \ln\left(\frac{k+1}{2\pi} I_e\right) \quad (8)$$

となり、 $y = k \cdot x + b$ の形に線形化できる。(8) 式に基づいてミネラルト係数 k の値は、 $\ln(I_{\text{obs}} \nu)$ と $\ln(\gamma\nu)$ の値の直線回帰直線の傾きとして最小 2 乗推定できる。Smith, et al., 1980¹⁾ は LANDSAT 衛星の MSS 画像データに、この手法を適用し山岳地帯における Ponderosa 松林では $k=0.4$ を得たことからランベルト反射モデルの妥当性を否定した。その他のミネラルト反射モデルに基づく研究⁵⁾⁻⁸⁾ は、一部太陽光の大気による減衰や一様拡散光を考慮したもの^{7), 8)} もあるが、基本的にはこの手法を山岳地帯に適用して k を推定し、 I_e を画像化して原画像と比較検討したもので、いずれも山岳植生の反射率を推定してはいないし、補正画像の分類結果についても述べていない。

本研究で提案する観測放射輝度に対する新しい近似式はミネラルト反射モデルを仮定し、大気の影響は直達光と拡散伝達光、周囲地形による寄与光および拡散反射光を考慮した (9) 式である。

$$I_{\text{obs}} = e^{-\tau} A_i [B(\gamma, \nu) \gamma \pi F e^{-\tau/\mu_0} + \mu_0 F \int_0^{2\pi} \int_0^1 T(\mu', \mu_0, \phi')$$

$$- \phi_0) B(\gamma(\mu', \nu)) \gamma(\mu', \nu) d\mu' d\phi'] + (p-s) \bar{A}^2 + (q-t) \bar{A} + \mu_0 R (\mu=1, \mu_0) F \quad (9)$$

ここで、(9) 式において $k=1$ とすればランベルト反射になるので、ミネラルト反射モデルとの比較も可能である。複雑な起伏をもつ山岳地帯において周囲地形による多重回反射の寄与を正確に評価することは困難なので、ここでは周囲地形はランダムな斜面の傾きと傾斜方向があるため、平均化されターゲット周囲の平均反射率 $\bar{A}$ で代表できると仮定している。 $\bar{A}$ の値は平坦地形における場合と同様にターゲット周囲の平均観測輝度値から (2) 式により計算する (平均を取る領域としてはターゲット画素を中心とした 5×5 画素領域で平均処理を行っている)。(9) 式と (3) 式とを比較すると、(9) 式ではターゲット周囲地表による反射の平均的效果を考慮している点と地表反射がランベルト法則ではなく、より一般的なミネラルト法則に拡張されている点に改良がある。また、(9) 式ではターゲット点に入射する光の成分として太陽光の直達光と拡散伝達光を考えているものの、(1) 式のように一度周囲地表で反射してからターゲット点に入射してくる光の成分については考慮していない。周囲地形からターゲットに入射する光の成分に関しては周囲地形が雪などに覆われて高い反射率を示す場合には、無視できない可能性がある。しかし、この効果を含めるのは地形が複雑な山岳地帯の場合かなり困難であり、今後の課題といえる。

3. MOS-1 MESSR 画像データへの応用

3.1 使用画像データ

前節の大気・地形効果補正手法の有効性を検証するため、テストサイトとして金沢市郊外の犀川ダムを中心とする標高 300~1,600 m の範囲の山岳地帯を選定した。この領域は 2 万 5,000 分の 1 の地形図では鶴来、湯涌、口直海、西赤尾の 4 区画である。これらの地形図より縦、横 62.5 m 間隔で標高データを作成し、さらに MOS-1 MESSR データの地上分解能 50 m に対応させるため補間により、50 m メッシュの標高データを作成した。使用する MOS-1 MESSR 画像データは 1987 年 6 月 18 日のもので、そのパス・ロウは 0022-069 w, ノーマルゲインモードの二系センサによって観測されている。観測時の太陽の天頂角は 24 度 (高度角 66 度)、方位角は 117 度であった。

Photo. 1 (a) と (b) はそれぞれバンド 1 と 3 の CCT 値を 16 レベルに等頻度分割した濃淡図であり、低い値を暗く、高い値は明るくなるように示してある。パン

(a)

(b)

Photo. 1 The gray level image of the MOS-1 MESSR data in band 1 shown in Photo. 1(a) and that in band 3 in Photo. 1(b). The observed radiance data is divided into 16 gray levels by histogram equalization method

ド1では植生の反射率は低く、バンド3では高いので明暗は反対になって見える。Photo. 1(a)では上部には右から左にかけて薄い雲がかかっており、また中央下部に濃い雲がかかっている。これらの特徴を除いた部分はバンド1では一様に暗くバンド3では山肌の陰影を示している。**Photo. 2**は衛星の観測時の太陽高度および方位角に合わせて計算した地形の起伏を表わすパラメータである γ の値を同様に16レベルに等頻度分割して濃淡付けしたものである。もし $\gamma=0$ なら太陽光が当たらない斜面を意味するが、このときの太陽高度は高いので、そのような斜面は存在していない。 γ が1に近く、値の高い斜面は太陽に面しており、また γ が0に近く、値の低いときは太陽の方向に背を向けた斜面であると判断できる。この図とPhoto. 1(b)とを比較すると両図は強い相関があり、バンド

Photo. 2 The gray level image of γ based on the same histogram equalization method as used in Photo. 1

Photo. 3 The categorized color image of the test site by unsupervised clustering method with 15 different classes. The results are based on the original four band CCT data set

3の観測画像は起伏パラメータ γ の値を観測したものと同じであるといえる。バンド4の観測画像データに関しても同様のことがいえる。これら近赤外波長のバンドで植生は高い反射率を有しているため、起伏の状態を反映した画像が観測されるものと考えられる。しかし、可視波長であるバンド1および2では植生の反射率が低く山岳地帯の観測 CCT 値は全体として低くバンド3や4のように起伏の状態は明確に現れてこない (Photo. 1(a)を参照)。

Photo. 3は大気・起伏効果の補正を行わずオリジナル画像データを15クラスに教師なしクラスタリング手法で分類した結果であり、この結果からわかるように、大気・地形効果補正をせずに分類しても、観測

Photo. 4 The gray level image of the test site based on the albedo data in band 3 in the case of the Lambert reflection model. The effect of the local topography can still be seen

データの分類では山岳地帯の植生分布を反映せず起伏状態を直接的に表わす日陰、日向ぐらしか分類できないことになる。ランベルト反射を仮定し、大気・地形効果を除去したバンド 3 の反射率データを同様の 16 レベルの濃淡図に示したものを **Photo. 4** に与える。この図と Photo. 1(b) と比較すると、地形効果が補正されかなり植生の反射率が一様化してきたことがわかる（テストサイトに選定した山岳地帯はほとんどがブナの広葉樹林帯であり、植生の反射率は一様化しても不思議はない）。しかし、Photo. 4 ではまだかなり山肌の陰影が残っていること、また山肌の濃淡具合は Photo. 1(b) と Photo. 4 とでは逆になっていることに注目すべきである。濃淡が逆になっていることはランベルト反射に基づく補正手法では補正しすぎを意味しているものと思われる。

3.2 植生のミネラルト係数の推定

つぎに非等方反射であるミネラルト反射法則を仮定し $k=0.59$ の値のときのバンド 3 におけるターゲット点の反射率を(1)式より計算して、同様に 16 レベルの濃淡図を作成する。このときの結果は **Photo. 5** に示す。ランベルト反射のときより山肌の陰影が取り除かれて植生の反射率はより一層一様化し、オリジナル CCT 値による Photo. 1(b) とは比較にならないほど画像が改善されていることがわかる。しかも、水系に沿った谷筋や山の稜線をはっきり現れて明らかに画質の改善が見られる。

もう少し定量的にこれらの補正手法の有効性を調べるため、雲の影響のない画像中央部の逆くの字形の犀川ダムを中心として横、縦 230×130 画素領域の濃度

Photo. 5 The same image as in Photo. 4, except in the case of the Minnaert reflection model with $K=0.59$. The effect of the local topography is considerably removed

値のヒストグラムを作成することを行った。Fig. 1 ~4 はそれぞれ同一領域のバンド 3 の CCT 値、3 通りのミネラルト反射を仮定した場合（すなわち、係数 $k=1$, $k=0.59$, および $k=0$ のケース）の反射率値 $\times 100$ のヒストグラムを図示したものである。CCT 値に関するヒストグラムの形状は、山岳斜面の日向、日陰のランダムな分布を反映して値の低い所から高い所の範囲（CCT カウント値 34-50）で一様分布に近い形をしている（**Fig. 1** 参照）。ランベルト反射（ミネラルト係数 $k=1$ ）による反射率のヒストグラムに関しては一様分布の形状は崩れて反射率の低い値をもつ画素の数が多くなり、そして反射率値 $=0.52$ の近傍でそのピーク値を示している（**Fig. 2** 参照）。つぎに $k=0.59$ をもつミネラルト反射による反射率のヒスト

Fig. 1 The histogram of the original CCT values in band 3 for the selected area (230×130) in the test site. The shape of the histogram is, more or less, an uniform distribution

グラムでは **Fig. 3** に示されているように、その形状は平均反射率値=0.56 をもつ正規分布に近い結果が得られている。ここで $k=0.59$ のケースを選んだ理由は後で述べるが k をフリーパラメータとして動かしたとき、 $k=0.59$ で対象領域の反射率の標準偏差が最小になるからである。大気の影響を無視したミネラルト反射モデルについてここでの比較をしない理由は元々この方法では地形効果のある程度除去できるが、 I_0 は相対値であり、反射率を推定しても意味がないことによる。つぎの **Fig. 4** は $k=0$ のミネラルト反射を仮定したときの反射率のヒストグラムであり、正規分布の形状は拡がりその分散値も増加し、またそのピーク値は 0.62 に増加していることがわかる。対象とした山岳地帯の植生分布は現地観測から同一の植生状態(ブナの広葉樹林地)と確認されているので、観測画

Fig. 2 The histogram of the albedo values in band 3 for the same area as in Fig. 1. The albedo values are computed under the assumption of Lambert reflection model. The peak of the albedo histogram is shifted towards the left side

Fig. 3 The same histogram as in Fig. 2, except that Minnaert reflection model with $K=0.59$ is assumed. The shape of the histogram became a normal distribution in this case

像データから大気・地形起伏の影響を除去すればその対象山岳地帯の反射率の濃度分布は正規分布に近くなることは統計的に妥当と判断できる。また、 k の値を変化させて対象領域の反射率標準偏差を計算した結果を **Fig. 5** に示すが、この図からバンド 3 においては $k=0.59$ の近傍で反射率の標準偏差が最小となることがわかる。これらの解析結果から犀川ダムを中心とした対象山岳地帯の植生はバンド 3 において平均反射率 0.59 で標準偏差 ± 0.06 をもつと推定でき、またその反射法則は $k=0.59$ のミネラルト反射に従うと結論できる。この推定値は健康な植生の近赤外波長域の反射率値としては妥当な値と考えられる (Myers, et al., 1966¹¹⁾)。Table 1 に MOS-1 MESSR のバンド 1, 2, 3, 4 におけるテスト領域の推定反射率の平均値とその標準偏差、およびミネラルト係数値 k を示す。また **Photo. 6** に推定反射率データを用いた 15 クラスの教師なしクラスターリング分類の結果を示す。

Fig. 4 The same histogram as in Fig. 3, except $K=0$. The shape of the histogram is a normal distribution, but it is much broader than Fig. 3

Fig. 5 The relationship between Minnaert's constant and the standard deviation of the ground albedo

Table 1 The estimated mean albedos, their standard deviations and the Minnaert coefficients for the selected areas

Band	k	Mean	S. D.
1	0.47	0.061	0.009
2	0.46	0.034	0.008
3	0.59	0.556	0.058
4	0.63	0.790	0.083

Photo. 6 The same color image as in Photo. 3, except the unsupervised clustering method is performed on the albedo data set based on the Minnaert reflection model. We obtained much better classification results here than in Photo. 3

Photo. 3 に比べて山岳植生の分類はかなり改善したことが視覚的に理解できる。たとえば、Photo. 3 では明らかであった山肌が Photo. 6 ではほとんどみられずほぼ同一の植生として分類されていること、画像中央部の山岳地帯に存在する道路が Photo. 3 ではよく分類されていないのに Photo. 6 では正しく分類されていること、また画像右端中央部の高い雲による陰が Photo. 6 では正しく分類されていること、画像右端に手取川が存在するが Photo. 3 では存在しないところまで水域として分類されているが補正後の Photo. 6 では正しい位置にのみ水域として分類されていることなど、数多くの改善を指摘できる。残念ながら正確なランドトランスデータがないので定量的な精度比較はできない。ランド・トランスを山岳地帯で実施して信頼性のある植生の反射率値を測定するのがたいへん困難である現実を考えると、ここでの解析結果は 2 章で提案した大気・地形効果の近似補正手法の有効性を間接的ではあるが実証したものとわれわれは考える。このテスト領域は特殊な山岳植生地帯とは考えに

くいので、山岳地帯の反射法則としては等方反射をするランベルト反射よりも $k=0.59$ の非等方反射をするミネラルト反射法則のほうがより妥当であると判断できる。この結果は大気を無視した単純なモデルに基づく過去の研究^{1), 5), 6)}の結論を支持するものといえる。さらに、この節では山岳植生の反射率推定の新しい手法（すなわち、植生のミネラルト係数値はその反射率の標準偏差の最小値を与える k の値を探すことにより決定する手法）を提案しており、衛星画像データの撮影領域内に一様な植生分布が存在している山岳領域にたいしてこの新手法は有効な方法であると考えられる。大気効果をおる程度きちんと考慮した補正法では前節の(8)式による線形回帰式の傾きとしてミネラルト係数は求めることができない。(8)式が使えるのは大気を無視するか、太陽直達光成分のみを考慮したときだけである。最後に、対象とした領域の反射率は果たして一様と見なせるかということについては多少疑問は残っている。この件については今後本手法を冬季の山岳画像データに適用し、雪に覆われた一様領域を対象に同様の解析を行ってみる必要があると考えている。この場合、地上反射率の一様性はかなり保証できるので大気地形効果のみによる影響を考えることが可能になると思われる。テスト・サイト画像データに対して大気・地形効果補正をする際、ここでは大気モデルとして Lowtran 6 Code の中緯度夏型モデル（水平視程 23 km の田園型エロゾル）を使用した。もし実際の大气の光学的厚さがここで用いたモデルと異なる場合、推定反射率値、ミネラルト係数値に誤差が生じるが、反射率の推定値は大气の光学的厚さに敏感に依存しないので、反射率の誤差はたかだか数%以下と推定される³⁾。

4. 結 論

本研究によって得られた主な結果をまとめるとつぎのようになる。

- 1) 衛星による山岳画像データに含まれる大気および地形効果を除去する解析的な近似補正手法を開発した。
- 2) 開発した近似補正手法を実際の MOS-1 MES-SR の山岳画像データに適用し画質および分類結果にかなりの改善を得ることができた。
- 3) 山岳地帯の植生の反射は等方的なランベルト反射ではなく、非等方的なミネラルト反射に従っていると推定できた。この結果はこれまでの単純地形効果補正法の結果を支持するものである。対象とした犀川ダム流域の広葉樹林帯（ブナ林）のミネラルト係数はバ

ンド3, 4でそれぞれ0.59, 0.63であり, またその平均反射率と標準偏差はバンド3で0.56, ± 0.06 , バンド4で0.79, ± 0.08 を得た.

4) 一様な林相分布からなる対象領域のミネラルト係数 k は, まずその値をフリーパラメータとして動かし, それに基づく地上反射率を求め, その分散を最小にするものを最適値として選ぶことにより, 推定可能であることを示した.

5) 今後の問題点として, 本研究で提案した補正手法を冬季の山岳画像データに適用し, その有効性の検証を確実なものにする必要があると思われる.

本研究に使用したMOS-1画像データは宇宙開発事業団MOS-1検証プロジェクトより提供を受けたものであり, また本研究成果の一部は文部省科学研究費助成金重点領域研究「地球環境」において研究課題番号0222822の援助を受けて行われたものである. 最後に貴重な助言をいただいた査読者に感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 1) J. A. Smith, T. L. Lin and K. J. Ranson: The Lambertian Assumption and Landsat Data, Photo. Eng. Rem. Sens., **16-9**, 1183/1189 (1980)
- 2) J. V. Dave and R. Bernstein: Effect of Terrain Orientation and Solar Position on Satellite-Level Luminance Observations, Remote Sensing of Environment, **12**, 331/348 (1982)
- 3) Y. Kawata, T. Kusaka and S. Ueno: Radiometric Correction for Atmospheric and Topographic Effects on Landsat MSS Images, Int. J. Remote Sensing, **9-4**, 729/748 (1988)
- 4) R. W. Sjöberg and B. P. Horn: Atmospheric Effects in Satellite Imaging of Mountains Terrain, Applied Optics, **22-11**, 1702/1716 (1983)
- 5) C. O. Justis, S. W. Wharton and B. N. Holben: Application of Digital Terrain Data to Quantify and Reduce the Topographic Effect on Landsat Data, Int. J. Remote Sensing, **2-3**, 213/230 (1981)
- 6) H. Hugli and W. Frei: Understanding Anisotropic Reflectance in Mountains Terrain, Photo. Eng. Rem. Sens., **49-5**, 671/683 (1983)
- 7) R. J. Woodham and T. K. Lee: Photometric Method for Radiometric Correction of Multispectral Scanner Data, Canadian Journal of Remote Sensing, **11-2**, 132/161 (1985)
- 8) R. J. Woodham and M. H. Gray: An Analytic Method for Radiometric Correction of Satellite Multispectral Scanner Data, IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, **GRS-25-3**, 258/271 (1987)
- 9) 上野, 川田, 日下, 羽場: ランドサット画像の大気効果補正, 日本リモートセンシング学会誌, **2-2**, 55/77 (1982)
- 10) M. Minnaert: The Reciprocity Principle in Lunar Photometry, Astrophys. J., **93**, 403/410 (1941)
- 11) V. I. Myers, C. L. Wiegand, M. D. Heilman and J. R. Thomas: Remote Sensing in Soil and Water Conservation Research, In Proc. 4th Symp. Remote Sensing of Environment, Inst. Sci. Tech., Univ. of Michigan, Ann Arbor., 801/813 (1966)