航空機 POLDER 画像データの陸域における解析

Analysis of Airborne POLDER Image Data over Land Surfaces

竹 俣 一 也*・米 倉 哲 也**・川 田 剛 之**

Kazuya TAKEMATA, Tetsuya YONEKURA and Yoshiyuki KAWATA

Abstract : In this study, we have analyzed a subset of the airborne POLDER data over lands obtained in the so-called La Crau campaign conducted by Centre National d' Etudes Spatiales (CNES), France in 1990. The airborne POLDER image data was converted into the surface albedo image data by using our atmospheric correction method, in which the multiple scattering were taken into account for. Then the accurate Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) for selected surface covers were estimated. The estimated BRDF for "Forest1", that was one of vegetated surface covers, shows Lambert's law at 550 nm and 650 nm. But at 850 nm, it is shown that an anisotropic reflection law was valid for the surface and fitting parameters for the BRDF are presented. And we calculated the normalized vegetation index (NDVI) for "Forest1" based on the estimated surface albedos and we found that the NDVI varies significantly with the change of viewing angles in the principal plane.

1. はじめに

航空機 POLDER はフランス国立宇宙開発センター CNES(Centre National d' Etudes Spatiales) および Lille 大学によって開発されたセンサーであり、多波長・多観測角で地表面の反射率と偏光度を観測することができる¹⁾。このセンサーは1996年8月、宇宙開発事業団によって打ち上げられた ADEOS 衛星に搭載されているものと同種である。衛星に搭載された POLDER センサーから取得される観測データは、地球規模での地表面の BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function; 2方向反射分布関数)や BPDF

(Bidirectional Polarization Distribution Function; 2方向偏光分布関数)の推定に対して、その活用が期待されている。航空機 POLDER センサーはこの衛星打ち上げ前の検証実験用センサーであり、陸域や海域における検証実験キャンペーンがフランスやその他の地域で実施されてきた²⁾。

地球環境における植生活動をグローバルに評価する方法として、リモートセンシングデータから求められる正規化植生指標 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)の使用が有効である³⁾。ただし、NDVI 値を用いて定量解析を行う場合、リモートセンシングデータに含まれる大気効果、および地表の2方向反射効果を正確に取り除くことが必要である。地表の2方向反射効果は Sun-target-sensor geometry に依存しており、その効果を定量化するために多くの BRDF モデルが提案されている^{4,5)}。また、NOAA/AVHRR データを用いて NDVI 値を算出する場合の補正についての研究もなされている^{5,6,7)}。NOAA/AVHRR データから BRDF を推定する場合、ひとつの地表対象物に対して複数枚の画像データが必要となり、その処理を複雑にしている。そこで、多観測角で地表面を観測する能力を有する POLDER センサーにより取得された画像データを用いた BRDF 推定^{2,8)}、

* 金沢工業高等専門学校 電気工学科 Department of Electrical Engineering, Kanazawa Technical College 921 石川県金沢市久安2-270 Hisayasu 2-270, Kanazawa, Ishikawa 921, Japan

**金沢工業大学 環境情報総合研究所 Environmental Information Research Laboratory, Kanazawa Institute of Technology 921 石川県石川郡野々市町扇が丘1-1 Ogigaoka 7-1, Nonoichi, Ishikawa 921, Japan

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 36, NO. 2, 1997

および NDVI 値算出が期待される。

本研究では、1990年6月、CNESにより南フランスにて実施された La Crau キャンペーンの観測画像データを解析に用いる²⁾。POLDER センサーにより観測される地表面の2次元放射輝度画像データは、画像内の1画素毎に観測角が異なる。また、航空機によるリモートセンシングでは、センサーに到達する放射エネルギーは、地球大気内部の放射場を考慮しなければならない。本研究ではこれらの2点を考慮した大気補正法^{9,10)}を用いて、観測画像データを解析する。

図1は本研究における陸域 POLDER 画像データの解析手順を示したものである。まず、観測放射輝度画像を我々の提案する多重散乱理論に基づく大気補正法を用いて、地表面反射率画像に変換する。次に、その推定した地表面反射率画像から地表対象領域を選定し、波長毎に地表対象領域の BRDF を推定する。そして、その BRDF モデルに大気モデルを接合してセンサーが観測する反射率をシミュレーションし、観測反射率と比較することで推定した BRDF モデルの妥当

図1 陸域 POLDER 画像データの解析フロー

性を検討する。さらに、地表対象領域における可視域・近赤外域の推定地表面反射率および BRDF を用いて、その領域の NDVI 値を求める。この観測角による NDVI 値の変動をシミュレーションすることにより、NDVI 値の観測角依存性を示す。最後に、本研究で得られた成果を結論で述べる。

2. La Crau キャンペーン観測データセット

航空機 POLDER は、2次元 CCD アレイセンサーを用いてフレーム画像形式で地表面からの放射輝度を、画像の90%をオーバーラップさせながら連続して観測する。センサーの観測角は横方向に±51°、進行方向に±41°である。観測される画像サイズは288ライン×384コラムである。La Crau キャンペーンでは、東西方向に5経路、南北方向に2経路の計7経路の飛行で観測が行われた。前者の5経路の飛行高度は6000mで、地上分解能は37×37m²であった。本研究ではこの5経路から2経路、西から東へ32シーンと東から西へ23シーンの計55シーンをサブセットとして入手し、解析に用いている(表1参照)。La Crau キャンペーンは、3つの波長帯(550nm, 650nm, 850nm)で観測が実施され、各波長に対し放射輝度と偏光度が観測されている。なお、本論文では、地表面の反射特性の解析に対して放射輝度データのみを使用している。

3. 航空機 POLDER 画像データの大気補正

航空機によるリモートセンシング観測の場合、地球大気の内放射場を考慮する必要がある。そこで、内放射場を扱うために、航空機高度に合わせて地球大気を2層に分割し、航空機より上の大気層を大気層1、下の大気層を大気層2とする。各層とも均質な平行平面大気を仮定し、上層大気の上端において(μ_0 , ϕ_0)の方向から平行太陽フラックス πF が入射するものとする。ここで、 μ_0 , ϕ_0 は太陽天頂角 θ_0 の余弦と太陽方位角である。各大気層の大気の光学的厚さと反射・伝達関数を各々 τ_1 , R_1 , T_1 および τ_2 , R_2 , T_2 とする。さら

表1 La Crau キャンペーン観測データ・サブセットの飛行情報

飛行方向	開始経度	開始緯度	太陽天頂角	太陽方位角
西→東	東経 4° 33′ 45″	北緯 43° 39′ 06″	43°	104°
東→西	東経 4° 59′ 19″	北緯 43° 34′ 20″	35°	113°

観測天頂角 θ

観測方位角と太陽方位角との差 $\phi - \phi_0$

図2 航空機 POLDER 画像の観測角の分布図

に、下層は、地表面反射率 A_t のターゲットと平均地表面反射率 $\bar{A}$ のバックグラウンドからなる地表面と接合しているものとする。地表面の反射はランベルト則を仮定する。この場合、地表面反射率は角度によらない地面固有の反射率になる。航空機高度における観測角 (μ, ϕ) 方向からの内部放射輝度は式(1)で表される。ここで、 μ, ϕ は観測天頂角 θ の余弦と観測方位角、 U は航空機高度における上向き拡散放射を示す。

$$I_u(\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) = \mu_0 U(\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) F \quad (1)$$

式(1)は、大気的光学的厚さ、大気の単一散乱アルベド、エアロゾルとレイリー分子の混合比などのパラメータを与えて、Doubling and adding 法を用いて計算する¹¹⁾。

地表面反射率 A_t のターゲットからの1回反射と平均地表面反射率 $\bar{A}$ のバックグラウンドからの2回までの反射を考慮し、内部放射輝度 I_u を A_t と $\bar{A}$ を用いて以下のように近似する。

$$I_u = (s \cdot \bar{A} + t) A_t + (p - s) \bar{A}^2 + (q - t) \bar{A} + r \quad (2)$$

ここで、 p, q, r, s, t は放射係数である。また、平均内部放射輝度 $\bar{I}_u$ は式(2)で $A_t = \bar{A}$ とおき、式(3)となる。

$$\bar{I}_u = p \cdot \bar{A}^2 + q \cdot \bar{A} + r \quad (3)$$

これらの放射係数は、 R_1, T_1, R_2, T_2 を用いて表すことができ、フレーム画像上の各画素毎に対応する放射係数を求める必要がある。

航空機 POLDER の観測では、GPS(Global Positioning System) と IC(Inertial Central) が搭載されており、これらによって航空機の位置(緯度、経度、高度)とロール、ピッチ、ヨーを知ることができる。これらの情報と太陽天頂角・方位角により、観測画像の 288×384 画素全ての観測天頂角 θ 、および観測方位角と太陽方位角との差 $\phi - \phi_0$ が求められる。図2は画像データの観測角の変化(飛行路：西→東)を示したものである。観測天頂角 θ はセンサー直下を 0° として同心円上に拡がり、方位角差 $\phi - \phi_0$ は反時計回りに変化している。これに対応して各画素の放射係数を計算する。本研究では放射係数の計算において、式(1)からいろいろな値の A_t と $\bar{A}$ に対する I_u と $\bar{I}_u$ の値を予め求めておき、式(2)―(3)に最小2乗法を適用することで、簡便に各画素毎の放射係数を求める方法を採用している¹²⁾。

4. 航空機 POLDER 画像データの解析

4.1 地表面反射率画像の作成

地表面反射率 A_t を推定するには、リモートセンシング観測時の大気の情報が必要である。La Crau キャンペーンではエアロゾルの光学的厚さ、エアロゾルの複素屈折率、エアロゾルの粒径分布が飛行前と飛行中において地上から観測されており²⁾、本研究でもそれ

らの値を大気パラメータとして採用した。しかし、分子の光学的厚さに関しては文献2)に与えられていないので、Lowtran6の中緯度春夏型大気モデルの値を採用した¹³⁾。また、文献2)における地上観測結果の内、エアロゾルの粒径分布に関しては、その形状が $\nu=3$ のJunge型エアロゾルモデルの形状に近いと判断し、適切なエアロゾルモデルとして $\nu=3$ のJunge型エアロゾルモデルを採用した。このモデルは以下の式で与えられる。

$$n(r)=\begin{cases} C\cdot 10^{\nu+1} & \text{for } 0.02\mu\text{m}\leq r\leq 0.1\mu\text{m} \\ C\cdot r^{-(\nu+1)} & \text{for } 0.1\mu\text{m}\leq r\leq 10\mu\text{m} \\ 0 & \text{for } r<0.02\mu\text{m} \text{ and } r>10\mu\text{m} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 r は半径、 $n(r)$ は粒径分布である。また、本研究で用いた大気モデルの光学パラメータを表2に示す。なお、エアロゾルの複素屈折率は3波長とも $1.50-0.005i$ である²⁾。

本研究では、上述の大気モデルを用いて全55シーンの各画素に対応する放射係数を求め、地表面反射率画像を作成した。さらに、55シーンから22か所の地表対象領域を、2万5千分の1地形図を参考に選定した。各領域の地表面反射率は、 5×5 画素の平均値を用いた。図3は850nmにおける地表面反射率画像（飛行路：西→東からの連続6シーン）である。図中の○は22地表対象領域のひとつ“森林1”である。飛行方向に従って○の位置が右側から左側へと移動しており、センサーにおける観測角が少しずつ変化しているのが分かる。図4は、連続8シーン($\theta_0=43^\circ$)から求めた“森林1”の推定地表面反射率の観測天頂角に対する変化を示したものである。“森林1”はほぼ主平面（太陽、ターゲット、センサーを含む平面）上に位置することと、植生域であることから選定した。図において横軸の観測天頂角の負値は前方散乱方向を示し、正値は後方散乱方向を示す。以下、この“森林1”の推定地表面反射率を用いて各波長毎のBRDFを推定し、観測天

頂角に対するNDVI値の変化を調べる。

4.2 BRDFの推定

地表面反射の角度依存性を明らかにするため、地表面反射率 A_t を以下のように定義する。

$$A_t=k_0f(\mu,\mu_0,\phi-\phi_0) \tag{5}$$

ここで、 k_0 は角度に依存しない地面固有の反射率、 $f(\mu,\mu_0,\phi-\phi_0)$ はBRDFである。BRDFとしてランベルト則を仮定すると、 $f(\mu,\mu_0,\phi-\phi_0)=1$ と置くことができ、地表面反射率＝地面固有の反射率になる。

(1) 550nmと650nm

図4において、“森林1”に対する推定地表面反射率は、550nmと650nmのどちらの波長においても観測天頂角が大きくなる両端方向でわずかに増加する傾向が見られる。これは大気効果の除去が完全になされていないことを示している。図4では、観測放射輝度値に大気補正を施して地表対象領域の地表面反射率を推定した。次に、異なるやり方で地表対象領域のBRDFにランベルト則を仮定し、上述の大気モデルでセンサーが観測する反射率を満足する地表面反射率を求めたところ、ターゲットの地表面反射率 $A_t=0.15$ 、バックグラウンドの地表面反射率 $\bar{A}=0.15$ と推定された。ここで、センサーが観測する反射率とは、センサーへの上向き放射輝度値を大気上面の入射フラックスで割ったものと定義する。したがって、この計算反射率には地表面のBRDF、地表面反射率、大気散乱の影響が含まれている。図5と図6は、各々550nmと650nmでの主平面における反射率を縦軸に、観測天頂角を横軸に取り、計算値と観測値を比較した結果である。図5と図6を比較すると波長の違いによる差はほとんどなく、両者とも計算値と観測値がよく一致しているのが分かる。これは、“森林1”に対してランベルト則を仮定したことが的確であることを示唆する。換言すると、550nmと650nmでの“森林1”に対するBRDFは観測天

表2 地球大気モデルに用いた光学パラメータ

観測波長 [nm]		光学的厚さ	単一散乱アルベド	分子混合比
850	大気層 1	0.018	0.942	0.422
	大気層 2	0.234	0.814	0.045
650	大気層 1	0.058	0.643	0.618
	大気層 2	0.309	0.931	0.088
550	大気層 1	0.092	0.711	0.699
	大気層 2	0.434	0.951	0.121

Scene 1

Scene 2

Scene 3

Scene 4

Scene 5

Scene 6

図3 連続地表面反射率画像 (850nm) における“森林1”の位置変化

図4 推定地表面反射率の観測天頂角に対する変化

図6 650nmでの反射率の観測天頂角に対する変化

図5 550nmでの反射率の観測天頂角に対する変化

頂角 ($-40^\circ < \theta < 40^\circ$) に対してほとんど一定である。 -40° と 40° 付近での観測値におけるわずかな増加は、センサー直下付近に比べ光がセンサーに到達するまでに通る大気経路が長くなるために起こる大気効果によるものである。

(2) 850nm

図4において、850nmの地表面反射率の観測天頂角に対する変化の特徴としては、前方散乱方向に比べて後方散乱方向において値が上昇している点が挙げられる。この大きな変化から、550nmと650nmの場合と同一

様な手順でBRDFにランベルト則を仮定しても観測反射率をシミュレーションすることはできないと容易に判断できる。後方散乱方向のホットスポットの現象を的確にシミュレーションするBRDFモデルの採用が必要となる。

BRDFモデルには、実験的 (empirical) モデル、半実験的 (semi-empirical) モデル、物理的モデルへと簡素なものから複雑なものへと分類され、モデルの複雑さは地表対象領域の物理的要素をどの程度取り入れているかで決まる¹⁴⁾。そこで、本研究では“森林1”に対するBRDFモデルとしてDeuzéらの実験的BRDFモデルを導入する²⁾。実験的モデルは地表面の持つ物理的なパラメータに依存せず、フィッティングパラメータを用いてBRDFの形状を特徴付ける。選択した理由は、我々は現地の詳細な土地利用データを入手しておらず、地表対象領域の物理的な構造まで解析できないからである。このDeuzéモデルは式(6)に示すように、観測天頂角が大きい部分での反射率の増加を考慮した要因 (c_1) と後方散乱方向におけるホットスポットの影響を考慮した要因 (c_2) の和からなる3-パラメータモデルである。

$$f(\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) = 1 + c_1 \cdot k_1 / k_0 + c_2 \cdot k_2 / k_0 \quad (6)$$

ここで、

$$c_1 = 1 - \mu \mu_0,$$

$$c_2 = [\text{Min}(0, \cos \Theta)]^2 - 1,$$

および Θ は散乱角である。係数 k_0 , k_1 , k_2 は、異なる

表3 Deuzé の BRDF モデルのフィッティング係数

地表対象領域	データ数	k_0	k_1	k_2	残差	決定係数
川 1	13	0.179	-0.070	0.002	0.015	0.038
川 2	13	0.191	-0.114	-0.010	0.020	0.158
池 1	16	0.188	-0.126	-0.010	0.019	0.227
池 2	12	0.229	-0.204	0.004	0.030	0.094
市街地 1	15	0.294	0.454	0.197	0.010	0.958
市街地 2	18	0.376	0.343	0.150	0.011	0.915
道路 1	17	0.414	0.206	0.156	0.014	0.850
道路 2	12	0.276	0.335	0.097	0.006	0.954
田 1	15	0.537	0.278	0.096	0.023	0.554
田 2	17	0.422	0.970	0.095	0.018	0.884
田 3	16	0.674	0.530	0.188	0.025	0.797
森林 1	14	0.392	0.808	0.201	0.017	0.939
森林 2	19	0.407	0.301	0.147	0.010	0.932
森林 3	19	0.350	0.471	0.192	0.045	0.635
果樹園 1	17	0.310	0.812	0.190	0.031	0.795
果樹園 2	13	0.365	0.309	0.123	0.031	0.492
果樹園 3	19	0.377	0.455	0.184	0.017	0.902
ぶどう畑 1	7	0.443	0.304	0.139	0.004	0.967
ぶどう畑 2	9	0.295	0.661	0.210	0.011	0.950
ぶどう畑 3	18	0.522	0.312	0.186	0.017	0.915
湿地 1	18	0.295	0.211	0.047	0.008	0.356
湿地 2	8	0.088	0.682	0.185	0.007	0.954

観測天頂角から得られた地表対象領域の地表面反射率と式(5)–(6)を用いて最小2乗推定によって求める。表3に22か所の地表対象領域に対して求めたこれらの係数を示す。植生領域に対しては決定係数が高く、ほぼ満足のいく結果を得ている。

図7は“森林1”に対して、上述のDeuzéのBRDFモデルに大気モデルを接合して求めたセンサーが感知する反射率と観測値とを比較した結果である。ただし、計算値には10%のバイアスが乗じてある。もし、このシステムティックなバイアスを許すならば、計算値は後方散乱方向における観測値の増加(ホットスポット)をよくシミュレーションしているといえる。我々は、Doubling and adding 法において地表面はすべて同一被覆のBRDFを仮定している。現実には地表面はいろいろなBRDFが混在している。このバイアスはシミュレーションでの地表面の取り扱いにおける我々の仮定が原因であると思われる。

4.3 NDVI 値の算出

地表面の植生変化をグローバルに捉えるためには

図7 850nm での反射率の観測天頂角に対する変化

NDVI 値を用いるのが一般的である。NDVI 値は次式から求めることができる。

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{VIS}) / (\text{NIR} + \text{VIS}) \quad (7)$$

(NIR：近赤外域の観測値，VIS：可視域の観測値)

NDVI 値の変動を定量的に解析するには、その値がリモートセンシング観測値から大気の影響を取り除いた地表対象領域固有の情報で算出されている必要がある。そこで、4.1で求めた地表面反射率と4.2で推定した BRDF を用いて NDVI 値を求め、観測反射率から求めたものと比較する。式(7)の NIR として850nm の推定地表面反射率、VIS として550nm の推定地表面反射率を用いる。また、“森林1”に対する BRDF として850nm では Deuzé モデル、550nm ではランベルト則を仮定する。

図8は観測天頂角に対する NDVI 値の変化を示している。単純に観測反射率から求めた NDVI 値は、後方散乱方向において緩やかな増加の傾向を示しているが、ほぼ平坦である。これに対し、推定地表面反射率から求めた NDVI 値は、観測天頂角が大きくなると前方散乱方向では葉の鏡面反射の影響により、また、後方散乱方向ではホットスポットの影響により著しい増加を示す。これは、実際の植生による反射が観測天頂角に大きく依存しており、厳密に大気補正を施さないと NDVI 値の観測天頂角への依存性が過小評価されてしまうことを示している。さらに、NDVI 値算出においては大気効果の除去に加えて、鏡面反射やホット

スポットなどの地表面効果を表す BRDF モデルの推定も重要な役割を有する。図8は、植生域においてはこれらの点を十分に考慮しないと、NDVI 値を用いて植生域の変化を定量的に評価できないことを示唆している。

5. まとめ

本論文では、La Crau キャンペーンで観測された航空機 POLDER 画像データ55シーンから地表対象領域として22領域を選定し、それらの BRDF モデルを検討した。さらに、NDVI 値の観測角に対する変化を調べた。以下に本研究での結果をまとめる。

1) 航空機 POLDER により550nm, 650nm, 850nm で観測された画像データを、我々の提案する大気補正法を用いて地表面反射率画像に変換し、地表面固有の情報として表した。

2) 3 波長の連続した地表面反射率画像を用いて、植生域“森林1”の BRDF を推定した。植生域における BRDF は850nm で非等方反射を示したが、550nm と650nm でのランベルト面の仮定は一般的に妥当である。さらに、850nm での植生域に対する BRDF モデルとして Deuzé の実験的 BRDF モデル採用し、各地表対象領域のフィッティングパラメータを求めた。

3) 推定した BRDF と地表面反射率を用いて NDVI 値の観測天頂角に対する変化を求め、単純に観測反射率から求めた NDVI 値と比較し、両者の観測天頂角への依存性の違いを調べた。

今後の課題としては、植生域の反射特性を十分に理解するために、地表面モデルとして植生による反射特性を反映した物理的な BRDF モデルの検討や偏光データの活用が挙げられる。さらに、ADEOS/POLDER データを用いた解析を今後行う計画である。

謝辞

La Crau キャンペーン観測データを提供して頂いたフランスの Université des Sciences et Technologies de Lille の Deshamps 教授, Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement の Bréon 博士に感謝致します。また、NDVI の解析に対してご助言をいただいた金沢工業大学環境情報総合研究所 後藤真太郎助教授に感謝致します。

(受付日1996.9.10, 受理日1997.3.7)

図8 NDVI 値の観測天頂角に対する変化

参考文献

- 1) Deschamps, P. M., Bréon, F. M., Leroy, M., Podaire, A., Bricaud, A., Buriez, J. C., and Séze, G., "The POLDER mission: instrument characteristics and science objectives", *IEEE Trans. Geosci. Remote sensig*, vol. 32, no. 3, pp. 598-615, 1994.
- 2) Deuzé, J. L., Bréon F. M., Deschamps, P. Y., and Herman, M., "Analysis of the POLDER airborne instrument observations over land surfaces", *Remote. Sens. Environ.*, vol. 45, pp. 137-154, 1993.
- 3) Box, E. O., Holben, B. N., and Kalb, V.; "Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and CO₂ flux", *Vegetatio*, vol. 80, pp. 71-89, 1989.
- 4) Pinty, B. and Verstraete, M.; "On the design and validation of surface bidirectional reflectance and albedo models". *Remote Sens. Environ.* vol. 41, pp. 155-167, 1992.
- 5) Leroy, M. and Roujean, J.; "Sun and view angle corrections on reflectances derived from NOAA/AVHRR data", *IEEE Trans. Geosci. Remote sensig*, vol. 32, pp. 684-697, 1994.
- 6) 松本雅雄, 小田島高之, 梶原康司, 建石隆太郎; "NOAA GVI データの太陽天頂角依存性の検討及びその補正", *写真測量とリモートセンシング*, vol. 30, no. 3, pp. 34-41, 1991.
- 7) 里見知俊, 沢田迅, 横山隆三; "NOAA/AVHRR データによる補正 NDVI 分布画像の合成", *生研フォーラム「宇宙からの環境モニタリング」第2回論文集*, pp. 153-162, 1994.
- 8) Takemata, K. and Kawata, Y., "Estimation of land surface bidirectional reflectance distribution function by using airborne POLDER image data", *IEICE Trans. Commun.* vol. E78-B, no. 12, 1591-1597, 1995.
- 9) Kawata, Y., Yamazaki, A., Kusaka, T., Ueno, S., and Smokty, O., "Atmospheric correction algorithm for remote sensing data with multi-viewing angles", *Proc. 14th IGARSS*, pp. 1113-1115, 1993.
- 10) Takemata, K. and Kawata, Y., "Atmospheric correction algorithm for a frame data of airborne POLDER", *Proc. 3th ISNCR*, pp. 543-548, 1994.
- 11) Hansen, J. E., and Travis, L. D., "Light scattering in planetary atmospheres", *Space Sci. Rev.*, vol. 13, pp. 527-610, 1974.
- 12) Kawata, Y., Ueno, S., and Kusaka, T., "Radiometric correction for atmosphere and topographic effects on Landsat MSS images", *Int. J. Remote Sensing*, vol. 9, no. 4, pp. 729-748, 1988.
- 13) Kneizys, F. X., Shettle, E. P., Gallery, W. O., Chetwynd, J. H. Jr., Abreu, L. W., Selby, J. E. A., Clough, S. A., and Fenn, R. W., "Atmospheric transmittance/radiance: computer code Lowtran-6", *Air Force Geophys. Laboratory, Hanscom AFB, MA, Rep. AFGL-TR-83-0187*, 1983.
- 14) Hautecoeur, O. and Leroy, M., "Intercomparison of several BRDF models for the compositing of spaceborne POLDER data over land surfaces", *Proc. 17th IGARSS*, pp. 204-208, 1996.