

大気効果を考慮した NDVI

Investigation of the atmospherically corrected NDVI

森山雅雄 (長崎大学工学部情報システム工学科)
 近田朝子、梶原康司、本多嘉明 (千葉大学環境リモートセンシング研究センタ)
 Masao Moriyama (Dept. I&C, Faculty of Eng., Nagasaki Univ.),
 Asako Konda, Koji Kajiwara, Yoshiaki Honda (CEReS, Chiba Univ.)

Abstract To establish the atmospherically corrected NDVI, the following attempts are made. First, the inter-channel dependency of the radiation parameters such as the transmittance, path radiance and downward irradiance at the surface are investigated using the model atmosphere and the radiative transfer code. Second, the NDVI from the surface reflectance is formulated as the function of the satellite radiance and simplified by the inter-channel dependencies of the radiation parameters to the single free parameter formula. Third, the free parameter in the simplified formula is defined from the numerical simulation.

1 はじめに

リモートセンシングデータに含まれる大気の情報除去する大気補正は、衛星観測輝度から地表面反射率、温度などの物理量を推定することである [1,2]。しかし、このような物理量推定を行なうためには、大気状態を把握し、放射伝達方程式を解く必要がある。しかし、大気状態を把握するには、吸収/散乱物質、気温などの項目別に、大がかりな観測体制が必要となり、定常的な時系列観測を必要とする応用には不向きである。このような定常的な時系列観測の一例が、植生モニタリングである。植生モニタリングにおいては、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) が植生 (biomass) 量、活性度などを示す因子として用いられることが多い [3]。NDVI は、大気効果を考慮しておらず、植生状況だけでなく、大気状況、太陽幾何などにより変動することが知られている [4-6]。NDVI の大気補正はいくつか提唱されており [7-10]、特定分野/領域で成果をあげている。本研究では、global dataset 作成のための、簡易でかつ大気効果を陽に取り込んだ NDVI を提案する。

2 放射伝達特性の把握

2.1 放射伝達過程

CZCS, OCTS などの海色センサのデータ処理では、分光バンド間の放射伝達特性を簡単な式で表現し大気補正を実施している。本研究では、この考え方を踏襲し、衛星観測輝度を透過率、パスラジアン、地表における拡散光照射度でモデル化し、それらのバンド間依存性を検討した。第 i バンドの衛星観測輝度 I_i は以下の式で表現できると仮定する。Figure 1 はその模式図である。

$$I_i = \tau_i(\theta) \frac{\rho_i}{\pi} \{ \tau_i(\theta_s) F_{0i} \cos(\theta_s) + Fd_i(\theta_s) \} + Ia_i(\theta, \theta_s) \quad (1)$$

$\tau_i(q)$: 光路天頂角が q のときの透過率

θ : 観測天頂角

θ_s : 太陽天頂角

ρ_i : 地表面反射率 (Lambert 面と仮定)

F_{0i} : 地球外太陽放射照度

$Fd_i(\theta_s)$: 地表での拡散光照射度

$Ia_i(\theta, \theta_s)$: パスラジアン

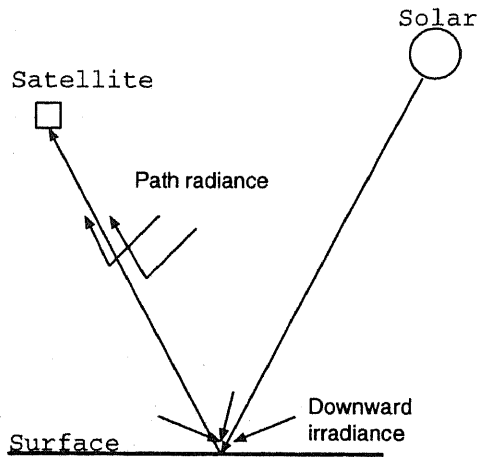


Figure 1: Schematic of the radiative transfer

Eq. (1) の両辺を地球外太陽放射輝度 (地球外太陽放射照度を π で除したもの) で除し、Albedo の単位 (無名数) で表すと以下ようになる。

$$r_i = \tau_i(\theta) \rho_i \{ \tau_i(\theta_s) \cos(\theta_s) + f_{di}(\theta_s) \} + r_{ai}(\theta, \theta_s) \quad (2)$$

r_i 、 r_{ai} 、 f_{di} はそれぞれ、Albedo の単位で表した衛星観測輝度、パスラジアンズ、および地球外太陽放射照度と地表における拡散光照度の比である。ここで、透過率は光学的厚さ ξ_i を用いて以下の Beer の法則で表せると仮定する。

$$\tau_i(\theta) = \exp(-m \cdot \xi_i), \quad m = 1/\cos(\theta) \quad (3)$$

2.2 数値シミュレーションによる放射特性の把握

Eq. (2) での透過率、パスラジアンズ、地表での拡散光照度を以下のシミュレーション条件を入力として、MODTRAN 3 を用いて計算し、各パラメータのバンド間依存性を検討した。

2.2.1 シミュレーション条件

気温、水蒸気量プロファイル: 1990 年 4 月の NCEP Monthly mean データを緯度刻み 10[deg] 毎に経度方向に平均したもの。

その他の気体プロファイル: NRL dataset (緯度刻み 10[deg] 毎の経度方向平均値)

エアロゾルモデル: Rural

地上視程: 5, 10, 23, 50 [km] (@ 550 [nm])

太陽天頂角: 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 [deg]

観測天頂角: 0, 15, 30, 45 [deg.]

センサ: NOAA11/AVHRR chs. 1, 2

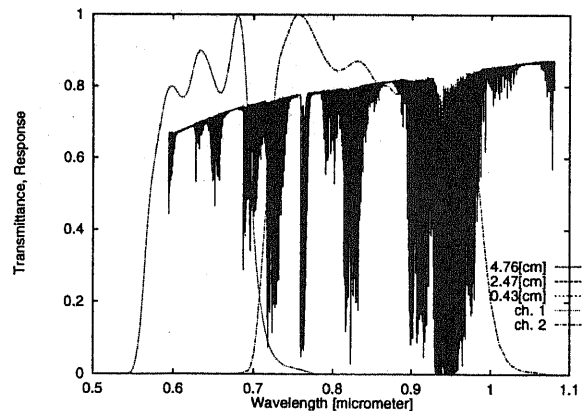


Figure 2: Response of AVHRR chs. 1, 2 and Transmittance under the various precipitable water.

Figure 2 に、NOAA11/AVHRR chs. 1, 2 の応答関数と、3 種類の可降水量における透過率を示す。AVHRR は広帯域センサであり、その感度内に多くの吸収スペクトルを含むため、大気状態に敏感であることがわかる。

2.2.2 放射パラメータの関係

シミュレーションから得られた光路天頂角が 0 の場合の透過率 $\tau_i(0)$ 、パスラジアンズ r_{ai} 、地表面での拡散光強度 f_{di} のバンド間依存性を Figures 3-5 に示す。いずれも横軸が ch. 1、縦軸が ch. 2 である。縦方向のバラつきは、水蒸気の影響によるものである。Figure 6 に太陽天頂角が 60[deg.]、観測天頂角が 0[deg.]、地上視程が 23[km] の場合の chs. 1, 2 の透過率を示す。ch. 1 ではほとんど変動がないのに比較して、ch. 2 では約 1 割の変動が見てとれる。

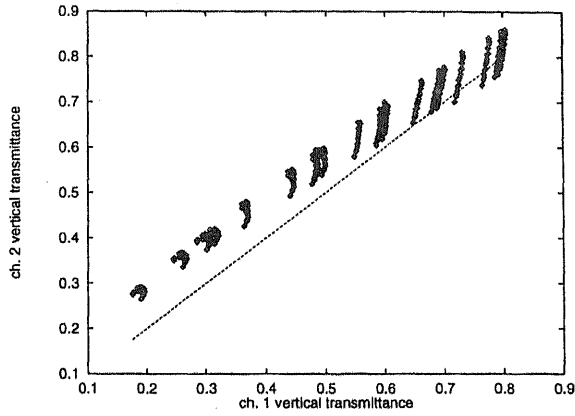


Figure 3: Comparison of the vertical transmittance of chs. 1, 2.

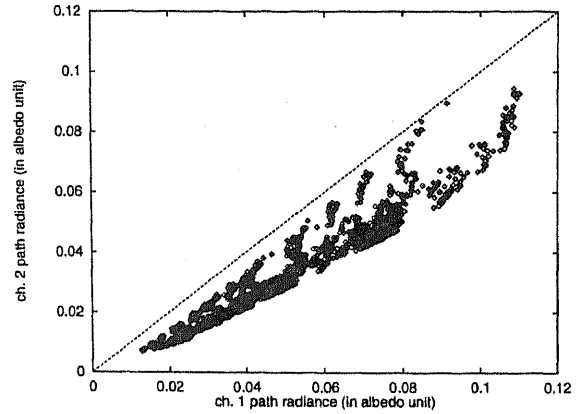


Figure 4: Comparison of the path radiance of chs. 1, 2.

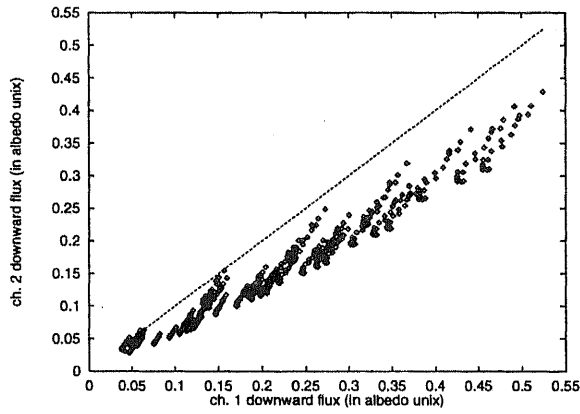


Figure 5: Comparison of the downward flux of chs. 1, 2.

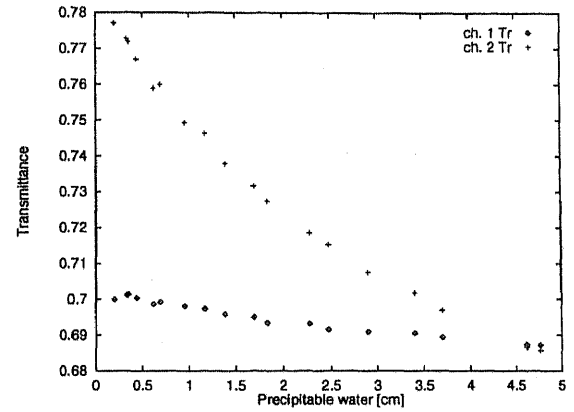


Figure 6: Comparison of the vertical transmittance of chs. 1, 2 under teh SZA=60[deg.], SCAN=0[deg.] and VIS=23[km].

3 大気効果を考慮した NDVI

3.1 大気効果を考慮したバンド比

以上の議論から chs. 1, 2 における地表面反射率の比を観測輝度 (アルベド) で表現する。

$$\frac{r_2 - r_{a2}}{r_1 - r_{a1}} = \frac{\tau_2(\theta) \{ \tau_2(\theta_s) \cos(\theta_s) + f_{d2}(\theta_s) \}}{\tau_1(\theta) \{ \tau_1(\theta_s) \cos(\theta_s) + f_{d1}(\theta_s) \}} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (4)$$

$$C_i = \tau_i(\theta) \{ \tau_i(\theta_s) \cos(\theta_s) + f_{di}(\theta_s) \}, (i = 1, 2) \quad (5)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{r_2 - r_{a2}}{r_1 - r_{a1}}, \quad (6)$$

以上の議論から、地表面反射率のバンド比は、衛星観測輝度および大気状態を表す 4 種のパラメータで規定することができた。言い替えればこれら 4 種の大気パラメータを決定できれば、衛星観測輝度から地表面反射率を推定することができる。

3.2 バンド比の簡易表現

上記の議論は、地表面反射率を求める大気補正に他ならないため、そのまま適用するには、最初に述べたような困難さがつきまとう。このため、2. で述べたような放射パラメータのバンド間の依存性を用いて、Eq. (6)

を簡易表現することを試みる。

3.2.1 C_1/C_2 の簡易表現

Eq. (5) の C_i は、透過率と地表面での拡散光強度を含んだ式であるため、2. の議論から、バンド間の依存性があることが予想される。ここで $C_1/C_2 = q$ とおくと、地表面反射率のバンド比は以下の式で表される。

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = q \frac{r_2 - r_{a2}}{r_1 - r_{a1}}, \quad (7)$$

添字 1, 2 はチャンネルを表す。

q がどのような値をとるかを確認するために、chs. 1, 2 における C_i を比較した、Figure 7 に結果を示す。両者はほぼ一定の比を保って増減することが見てとれ、 q はほぼ一定の値 (0.928) となることがわかる。

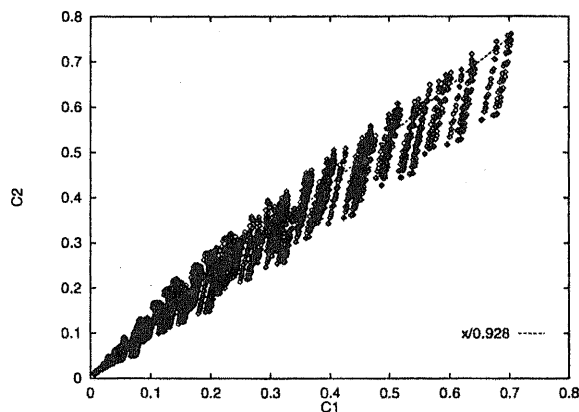


Figure 7: Coefficients for the reflectance of chs. 1, 2.

3.2.2 パスラジアンズのバンド間依存性の導入

2. の Figure 5 に示したパスラジアンズの関係から、回帰分析により chs. 1, 2 のパスラジアンズの間以下関係を当てはめる。

$$r_{a2}(r_{a1}) = \alpha r_{a1} + \beta, \quad \alpha = 0.774, \quad \beta = -0.00586 \quad (8)$$

相関係数は 0.97 であり、バラつきはあるものの ch. 1 のパスラジアンズを用いて、ch. 2 のそれを表現することができる。

3.2.3 r_{a1} と q の関係

上記の簡易表現を用いることで、地表面反射率のバンド比を衛星観測輝度で表す場合、 q を一定とすれば一つのフリーパラメータ (r_{a1}) を定めればよいことになる。しかし、 r_{a1} と q は大気状態を表すパラメータであるため、両者には何らかの関係があるはずである。 r_{a1} を独立変数、 q を従属変数として回帰分析を行なうと以下の関係となる。

$$q(r_{a1}) = a r_{a1} + b, \quad a = -4.31, \quad b = 1.12 \quad (9)$$

総関係数は 0.67 とやや低いが、両者の間にはある関係が存在することがわかる。比較結果を以下に示す。図中の水平線は 3. 2. 1 で得られた $q = 0.928$ である。一定値とおくよりも、線形関係を導入するほうが良い近似となっていることがわかる。

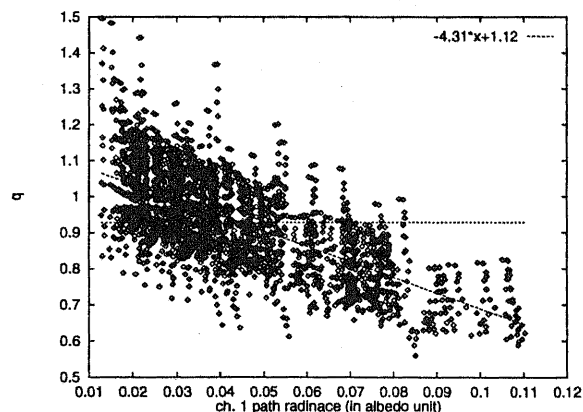


Figure 8: Relationship between r_{a1} and q

3.2.4 地表面反射率のバンド比の簡易表現

以上の議論から、地表面反射率のバンド比は以下のように表現できる。

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = q(r_{a1}) \frac{r_2 - r_{a2}(r_{a1})}{r_1 - r_{a1}} \quad (10)$$

3.3 NDVI の簡易表現

地表面反射率から求めた NDVI を R_s と表記し、 R_s を衛星観測輝度で表せば以下ようになる。

$$R_s = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} = \frac{q(r_{a1})[r_2 - r_{a2}(r_{a1})] - [r_1 - r_{a1}]}{q(r_{a1})[r_2 - r_{a2}(r_{a1})] + [r_1 - r_{a1}]} \quad (11)$$

$$q(r_{a1}) = ar_{a1} + b, \quad r_{a2}(r_{a1}) = \alpha r_{a1} + \beta$$

Eq. (11) は、大気状態を考慮した NDVI の簡易表現であり、大気状態は r_{a1} のみで表わされている。

4 平均的な r_{a1} の決定の例

前節の簡易表現において、大気状態を表すフリーパラメータ r_{a1} は、画素毎に決定する必要があるが、地上観測などで決定するのは手間がかかり過ぎるため、global mapping には不向きである。このため、 r_{a1} の平均的な値を求めておいて、それを用いるのが有用であろう。平均的な値の決定法は、いくつか考えられるが、ここでは、以下の手順で実施した結果を紹介する。

1. r_{a1} の与え方の規定 (そのものか、観測輝度の比か)
2. シミュレーションデータセット (モデル地表面反射率、大気条件、太陽幾何) の規定
3. 評価関数の規定と数値シミュレーションによる決定

4.1 r_{a1} の与え方

r_{a1} は ch. 1 のパスラジアンズであるため、Darkest pixel 法を用いて与えられた画像データから推定することも可能である。しかし、この方法は画像中に、地表面反射率が 0 となる画素がないと誤差を生じ、誤差がシーン依存となる。ここでは、パスラジアンズが観測輝度以下であることを考慮して、以下の手順で r_{a1} を決定する。

$$r_{a1} = p \cdot r_1, \quad \max\left(0, -\frac{\beta}{\alpha r_1}\right) \leq p \leq \min\left(1, \frac{r_2 - \beta}{\alpha r_1}\right) \quad (12)$$

p の範囲上下限は、chs. 1, 2 両方とも観測輝度を越えない正のパスラジアンズを与えるもので、実際の値は、後述するシミュレーションデータセットで決まる。

4.2 シミュレーションデータセット

4.2.1 地表面反射率

シミュレーションに用いるモデル地表面反射率は、地表に存在するすべての被覆物であることが望ましいが、そのようなデータセットを作成するのは不可能であるため、以下に示す 3 種の反射率をもつエンドメンバを任意の混合比で混合した反射率をモデル反射率とする。この場合は、一様乱数により選定された混合比をもとに 100 種の反射率データセットを用いた。以下にその分布を示す。3 種のモデル反射率から作成したため、chs. 1, 2 の空間上では、それらの反射率を頂点とする三角形領域内にモデル反射率が存在することがわかる。

Table 1: Endmember reflectance

	ch. 1	ch. 2
1	0.05	0.55
2	0.15	0.18
3	0.03	0.01

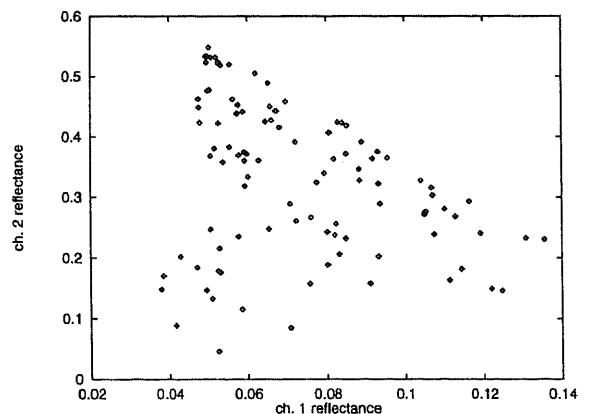


Figure 9: Model surface reflectance

4.2.2 大気条件、および太陽幾何

大気条件、太陽幾何は、どのような global dataset を作成するかで準備するシミュレーションデータセットが異なる。例えば、weekly, monthly のような composite product の場合、大気は清浄 (エアロゾルが少ない) 大気を選択される確率が高いであろうし、太陽天頂角も高いものを選択されることが予想される。このような場合には、エアロゾルの多い場合や、太陽天頂角の大きな場合を少なくしたデータセットが適切である。ここでは、大気条件や太陽幾何の影響を把握するために、以下のような4種類の条件を設定し、それぞれに以下の評価関数を最小にするような p を求める。

1. 2. 2. 1 で示したデータすべて。
2. 1 のデータのうち、可降水量が $(13/2) - (3/40)SZA$ 、(SZA は太陽天頂角) 以下であるもの
3. 2. のうち地上視程が 23 km 以上のもの
4. 3. のうち観測天頂角が 15 [deg.] 以下のもの

4.2.3 評価関数

地表面反射率から計算した NDVI を R_s 、式 (11) から計算したそれを $R_c(p)$ とし、あるの評価関数 $J(p) = f(R_s, R_c(p))$ を最小にする p を求める問題に帰着させる。評価関数はいくつか考えられるが、ここでは R_c を独立変数、 R_s を従属変数として線形回帰したときの RMS 残差を評価関数として採用し、 $J(p)$ を最小にする p を求める際に、二次関数を用いた最適化法 [11] を用いた。

$$J(p) = \sqrt{S_{R_c(p)}^2 \left[1 - \frac{S_{R_c(p), R_s}^2}{S_{R_c(p)} \cdot S_{R_s}} \right]} \quad (13)$$

$S_{R_c(p)}$: $R_c(p)$ の標準偏差

S_{R_s} : R_s の標準偏差

$S_{R_c(p), R_s}^2$: $R_c(p)$ と R_s の共分散

4.3 結果

上記4種の大気条件/太陽幾何に対応する α 、 β 、 a 、 b および、 p の最適値: p^* 、そのときの評価関数の値 (RMS 残差): $J(p^*)$ 、および、衛星観測輝度を補正せずに求めた NDVI と R_s との RMS 残差を以下に示す。

Table 2: Results from the atmosphere/solar geometry conditions.

case	α	β	a	b	p^*	$J(p^*)$	RMS
1	.7742E+00	-.5860E-02	-.4312E+01	.1117E+01	0.968(*)	0.258	0.293
2	.7754E+00	-.6593E-02	-.3974E+01	.1064E+01	0.955(*)	0.220	0.254
3	.7781E+00	-.6312E-02	-.3078E+01	.1050E+01	0.685	0.121	0.148
4	.5317E+00	-.5827E-03	.1843E+01	.9379E+00	0.422	0.0726	0.0742

*: Upper limit (cf Eq. 12) of p , the optimization is not converged.

条件 1、2 は p を求める計算が収束せず、 p の上限値で $J(p)$ が最小となった。 p は、ch. 1 の観測輝度に含まれるパスラジアンズの平均的な割合を表すものであるため、0.9 以上というのは明らかに異常な値である。このため、これらの条件では、大気効果を取り込んだ NDVI を用いるのは不可能であるといえる。言い替えば、この方法は composite しない daily product や、エアロゾルの多い場合には適用できず、composite によって清浄な大気のもとでの観測値を抽出した場合に適用可能であるといえる。どの程度の期間のデータを comsite すればよいか? という問題は、エアロゾルの時系列的な観測値から決定すべきであろう。収束した条件での、 R_s と R_c および補正しない場合の NDVI の比較を以下に示す。

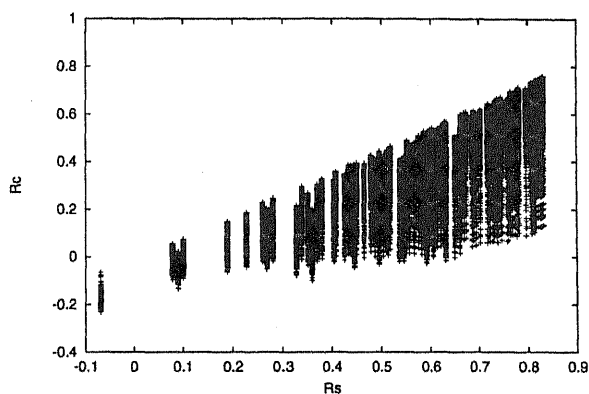


Figure 10: Comparison of R_s and Non-corrected NDVI under the case 3.

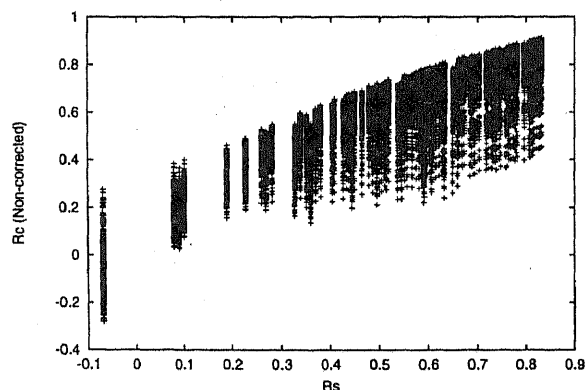


Figure 11: Comparison between R_s and R_c under the case 3.

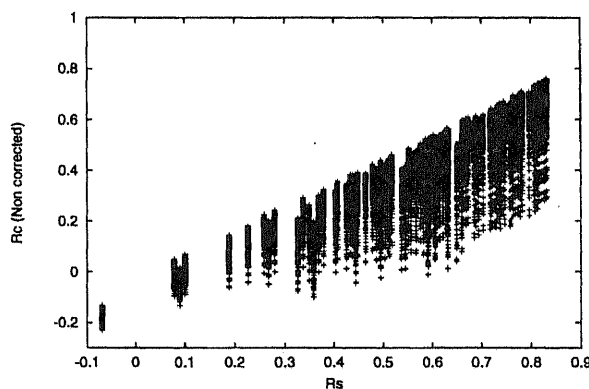


Figure 12: Comparison of R_s and Non-corrected NDVI under the case 4.

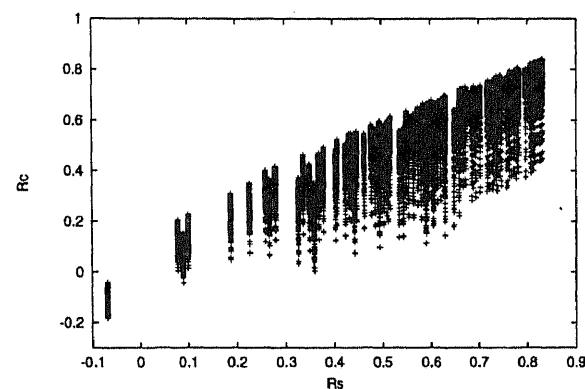


Figure 13: Comparison between R_s and R_c under the case 4.

両方の条件とも、評価関数において減少が見られ、 R_s が大きな場合のバラツキの減少が見られる。但し、評価関数の減少はそれほど大きくなく、 R_s が小さい場合に、バラツキが大きくなることが確認された。これは、評価関数がRMS残差をもとにしているため、 R_s の大きな場合にバラツキを押えるような効果があるためであろうと推察される。

5 結論

以上の結果から以下の結論が得られる。赤、近赤外の二つの分光チャンネルの放射パラメータの類似性から、大気効果を取り込んだNDVIの定式化を行ない、global mappingに用いることができるように、大気状態を表すパラメータを少なくする近似法を検討した。また、簡単なモデル大気、地表面反射率データから、適当な評価関数のもとで、大気パラメータの平均的な値を推定する例を示し、提案手法の限界、効果を確認した。今後は、実際の大気状態の地域/時期的な解析、シミュレーションデータ、評価関数の選定を行ない、より精度の高いモデル構築、およびそれを用いる際のcompositeにおけるデータ選択規範の設定が必要となる。

References

- [1] 土屋清 編著、リモートセンシング概論、朝倉書店、1990
- [2] 日本リモートセンシング研究会、図解リモートセンシング、日本測量協会、1991

- [3] Justice, C. O., et. al., Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data, *Int. J. R. S.*, Vol. 6, No. 8, 1271-1318, 1985.
- [4] 梶原、建石、NOAA GVI データ利用上の問題点の検討、写真測量とリモートセンシング、Vol. 31, No. 3, 16-24, 1992.
- [5] 松本、小田島、梶原、建石、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, 34-41, 1991.
- [6] Singh, S. M., Lowest order correction for solar zenith angle to Global Vegetation Index (GVI) data, *Int. J. R. S.*, Vol. 9, 1565-1572, 1998.
- [7] Holben, B. N., Characteristic of maximum composite images from temporal AVHRR data, *Int. J. Remote Sens.*, 7, 11, 1417 - 1434, 1986.
- [8] Hobbs, T. J., Atmospheric correction of NOAA-11 NDVI data in the arid rangelands of Central Australia, *Int. J. Remote Sens.*, 18, 5, 1051 - 1058, 1997.
- [9] 野木、高木、NDVI 変動観測のための NOAA データの相対的大気補正、写真測量とリモートセンシング、Vol. 34, No. 6, 17-25, 1995.
- [10] 雷、小出、飯倉、横山、「6S」code による AVHRR 画像データの大气効果補正の検討、日本リモートセンシング学会誌、18, 2, 51 - 64, 1998
- [11] 今野、今井、非線形最適化法、日科技連、pp. 384, 1985