NOAA GVI データの太陽天頂角依存性の検討及びその補正

Investigation of Solar Zenith Angle Dependence of
NOAA GVI Data and its Correction.

松本 雅雄*, 小田島高之**

梶原 康司***, 建石隆太郎***

*Masao MATSUMOTO, Takayuki ODAJIMA,**Koji KAJIWARA, Ryutaro TATEISHI*

Abstract : Solar zenith angle (SZA) dependence of NDVI from NOAA AVHRR data is clarified by the simulation using LOWTRAN7 based on 10 atmospheric models and 4 surface models. In the simulation, the effect of SZA to radiative transfer is taken into account. It becomes evident that NDVI decreases and NDVI contains much path radiance in larger SZA condition. It can be concluded that in a limited condition when the atmospheric condition is uniform, NDVI with SZA less than 80° is correctable by an approximated formulation of SZA dependence of NDVI (5th. order polynomial of $\cos(\text{SZA})$). For more precise correction, it is necessary to estimate atmospheric condition.

1. はじめに

NOAA から GVI (Global Vegetation Index) として供給される NDVI (Normalized Deference Vegetation Index) データは、広域の植生モニタリングに広く活用されている^{1),2),3)}。しかし GVI データは AVHRR のチャンネルデータをそのまま用いて作成されるため、大気の影響、及び太陽天頂角の影響を含んでいる。加えてこの GVI データは 7 日分の daily データからサンプリングされた weekly データであり⁴⁾、各画素に対応する大気状態は一定でなく、かつ未知であるため、数百 km 四方の 1 シーンのリモートセンシング画像に対して用いられる大気補正法は適用できない。この影響は、GVI データの年間変動パターンに基づいた地球規模での植生モニタリング^{5),6)}を行う上で、特に問題と

なる。Singh⁷⁾は単純なモデル大気、モデル地表面を用いて NDVI データの太陽天頂角依存性を検討し、太陽天頂角補正式を作成しているが、大気中の放射伝達計算における過剰近似により、その結果は太陽天頂角が 70° 以下の限られた範囲でのみ有効である。

本研究では、10 種の大気モデル、及び 4 種の地表面反射率を基に、放射伝達計算ルーチン LOWTRAN 7⁸⁾を用いて、AVHRR のデジタルカウント、及び NDVI をシミュレートし、NDVI の太陽天頂角依存性をより詳細に検討し、加えてより広範囲の太陽天頂角に対応した NDVI の補正法について検討した。

2. シミュレーション

太陽天頂角の変動は、地表面の反射特性だけでなく、大気中の放射伝達にも影響を与えるため、太陽天頂角の影響を検討する際には、大気中の放射伝達を考慮しなければならない。本研究では、大気中の多重散乱、大気—地表面間の多重反射が考慮された放射伝達計算ルーチン LOWTRAN 7⁸⁾を用いて、4 種の植生被覆率に対応した地表面モデル、及び LOWTRAN 7 に内蔵

* 九州工業大学 情報工学部

** 早稲田大学 理工学部

*** 千葉大学 映像隔測研究センター

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 30, No. 3, 1991

されている10種の標準大気モデルから各太陽天頂角における AVHRR チャンネル1, 2のデジタルカウントを計算し, NDVI をシミュレートした。

2.1 太陽天頂角の範囲

本研究では、地方時の午後2時30分頃に赤道を通過する NOAA-9号の AVHRR データから作成された GVI (NDVI) データを対象とする。作成時の太陽天頂角の範囲を明確にするため、北緯80°から南緯80°に10°おきに、夏至及び冬至における地方時の午後2時30分での太陽天頂角を計算した⁹⁾。結果を図1に示す。

図1 夏至、冬至における、各緯度での午後2：30の太陽天頂角

NOAA GVI データは北緯75°から南緯55°の間をカバーしており、この範囲での太陽天頂角は、ほぼ35°から105°の間であることが示された。

2.2 シミュレーション手順

表1, 2に示されている地表面モデルの反射率¹⁰⁾, 大気モデル⁸⁾を LOWTRAN 7にして太陽天頂角が0°から110°の間で AVHRR チャンネル1, 2における分光輝度 L_1, L_2 を計算した。表2の大気混濁度とは、エアロゾル量の多少を表し、各気候帯、季節において、清浄大気とは地上視程が23km, 混濁大気とは地上視程が5 km となるエアロゾル量の大气をさす。NOAA/GVI データ作成時には、AVHRR チャンネルデータを用いて混濁大気下のデータは除外されている⁴⁾が、本研

表1 地表面反射率

植生被覆率[%]	AVHRR/ch. 1 (0.635μm)*	AVHRR/ch. 2 (0.833μm)*
98	0.02	0.43
53	0.08	0.29
10	0.15	0.27
0	0.17	0.23

*：中心波長

表2 大気モデル

気候帯	季節	大気混濁度
熱帯	—	清浄／混濁
中緯度	夏期	清浄／混濁
中緯度	冬期	清浄／混濁
亜寒帯	夏期	清浄／混濁
亜寒帯	冬期	清浄／混濁

表3 変換係数

係数	ch. 1	ch. 2	単位
E	196.4	248.1	$\times 10^{-4} [W/cm^2/sr]$
G	0.10634	0.10749	$\times 10^{-6}$
I	-3.8464	-3.8770	$\times 10^{-6}$
W	0.117	0.239	$[\mu m]$

究では比較の意味で混濁大気下における NDVI データの太陽天頂角依存性もシミュレートした。

得られた分光輝度 L_1, L_2 を、(1)式にしたがって AVHRR のデジタルカウント DN_1, DN_2 に変換する¹¹⁾。計算に必要な各係数を表3に示す。

$$DN_i = \frac{L_i \cdot w_i - b}{a}, \quad (1)$$

$$a = \frac{G_i \cdot E_i}{100\pi}, \quad b = \frac{I_i \cdot E_i}{100\pi}$$

(i = 1, 2：各チャンネルに対応する)

ここで、w, G, I, Eはそれぞれチャンネルの波長幅、デジタルカウント当りのアルベド(単位%), 切辺値(単位%), チャンネルの波長域における地球外太陽照度である。

算出されたデジタルカウントを用い、(2)式に基づいて NDVI を計算する

$$NDVI = \frac{DN_2 + DN_1}{DN_2 - DN_1}, \quad (2)$$

2.3 NDVI データの天頂角依存性の検討

各大気モデル、地表面モデルからシミュレートされ

図2 NDVIの太陽天頂角依存性

たNDVIを図2に示す。図2(a)は清浄大気、(b)は混濁大気におけるNDVIである。全ての地表面モデル(4種の土地被覆率)において最も高いNDVIを示すのは、亜寒帯冬期モデルであり、中緯度冬期モデル、亜寒帯夏期モデル、中緯度夏期モデル、熱帯モデルの順で小さくなる。これは、大気中の水蒸気によって生じる近赤外の吸収のため、AVHRRチャンネル2では、乾燥した大気状態ほど高いデジタルカウントが得られるためである。混濁大気、清浄大気の両者においてNDVIは $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ の間ではほぼ一定値をとり、 30° 以上では太陽天頂角が増加するとともに減少する傾向を示すが、植生被覆率が低い場合、ある天頂角までは減少、そしてそれ以上では増加する傾向がみられた。また、減少の度合は植生被覆率が高いほど大きいことが示された。太陽天頂角が 90° を越えた場合、NDVIは全ての条件で0となった。同一の地表面であっても、混濁大気におけるNDVIは清浄大気のそれよりも小さい。

ここで、各太陽天頂角におけるNDVIデータの質を把握するため、観測輝度に含まれるパスラジアンズと観測輝度の比を上記の大気モデル、及び地表面モデルについて計算した。地球表面を観測する場合、パスラジアンズはノイズと考えられるため、この比は得られた情報に含まれるノイズの割合を表していることになる。図3、4にそれぞれチャンネル1、及び2の結果を

示す。両者とも(a)は清浄大気の場合、(b)は混濁大気の場合である。各地表面モデルに対応する2本の曲線は、亜寒帯冬期モデルと熱帯モデルである。すなわち仮定した5つの大気モデルのうち、最も乾燥したモデルと最も湿潤なモデルの場合を示した。他の3つのモデルはこの2本の曲線の間になる。いずれの場合においても地表面反射率の小さい場合(チャンネル1では植生被覆率が高い場合、チャンネル2では植生被覆率が低い場合)は、観測輝度が小さくなるため観測輝度中のパスラジアンズの割合は相対的に大きくなる。また混濁大気においては、パスラジアンズの割合が清浄大気の場合と比較して大きく、NDVI低下の原因となっている。パスラジアンズの割合は、チャンネル1ではどの大気モデルでもほぼ一定の値(グラフが重なる)をとり、チャンネル2では湿潤な熱帯モデルが大きく、乾燥した亜寒帯冬期モデルでは小さい。これらのことは、可視域においては、水蒸気の吸収が少ないため、パスラジアンズは大気中の水蒸気量に依存せず、大気の混濁度(エアロゾル量)のみに依存するため、ほぼ一定の値をとるのに対し、近赤外域では水蒸気の吸収が大きいため、パスラジアンズも大気中の水蒸気量の増加とともに減少する傾向にあるということと説明できる。

全ての大気モデル、地表面モデルにおいて、太陽天頂角の増加に伴い観測輝度中のパスラジアンズの割合

図3 AVHRR チャンネル1の観測輝度中のパスラジアンスの割合

図4 AVHRR チャンネル2の観測輝度中のパスラジアンスの割合

は増加し、80°を越えると、チャンネル1では80%以上、チャンネル2では60%以上がパスラジアンスとなる。このことは、データ取得時の太陽天頂角が大きくなると、得られたデータ中には、ノイズが多く含まれ、それから作成されたNDVIは地表面の観測に適さなくなることの意味している。

3. 太陽天頂角補正の検討

前章において、NDVIは太陽天頂角の増加とともに減少し、それに含まれるノイズが増加することが示された。しかし、データ取得時の大気条件が同一または類似であると仮定できれば、NDVIの太陽天頂角依存

性は、簡単な関数形で表され、太陽天頂角補正が可能となると考えられる。本研究では、太陽天頂角補正とは“ある太陽天頂角 SZA で得られた NDVI から、同じ大気状態での、あらかじめ定められた太陽天頂角 SZAO における NDVI を推定すること”と定義する。

3.1 太陽天頂角補正式の定義

ここで、NDVI の太陽天頂角依存性を数式で表すために図 2 (a), (b) の曲線群を表現する関数として(3)式を提案する。

$$\text{NDVI}(\text{SZA}) = \sum_{i=0}^N \{(\alpha_i \cdot \text{NDVI}(\text{SZAO}) + \beta_i) \cdot \cos^i(\text{SZA})\} \quad (3)$$

(N は整数)

(3)式において SZA は太陽天頂角、NDVI (SZA) はプロダクトに記録された SNDVI (Scaled NDVI) から算出した NDVI、NDVI (SZAO) は太陽天頂角が SZAO のときの NDVI である。

ここで、前章で求めた NDVI のシミュレート値を用いて、(3)式の回帰係数 α_i 及び β_i を求める。

(3)式を NDVI (SZAO) について解けば太陽天頂角補正式(4)式を得る。

$$\text{NDVI}(\text{SZAO}) = \frac{\text{NDVI}(\text{SZA}) - \sum_{i=0}^N \beta_i \cdot \cos^i(\text{SZA})}{\sum_{i=0}^N \alpha_i \cdot \cos^i(\text{SZA})} \quad (4)$$

太陽天頂角 SZA における NDVI は量子化誤差、スキャン角の差などによる誤差 $\Delta\text{NDVI}(\text{SZA})$ を持つと考えられる。この誤差は(4)式で得られる NDVI (SZAO) の誤差 $\Delta\text{NDVI}(\text{SZAO})$ に伝播する。(5)式で定義されるこの誤差伝播の感度係数 S (SZA) は(6)式で表される。

$$\Delta\text{NDVI}(\text{SZAO}) = S(\text{SZA}) \cdot \Delta\text{NDVI}(\text{SZA}) \quad (5)$$

$$S(\text{SZA}) = \frac{\partial \text{NDVI}(\text{SZAO})}{\partial \text{NDVI}(\text{SZA})} = \frac{1}{\sum_{i=0}^N \alpha_i \cdot \cos^i(\text{SZA})} \quad (6)$$

また、大気モデルが異なれば、(4)式の各係数も異なるため、回帰式作成時の大気モデルと実際の大気モデルが異なる場合、推定値 NDVI (SZAO) には大気モデルの誤推定の誤差も含まれる。

3.2 太陽天頂角補正式の決定

前節で示した太陽天頂角補正式を作成するに当たり、大気モデル、補正後の太陽天頂角 SZAO、次数 N、及び補正限界天頂角を決定しなければならない。以下にこれら 4 種のパラメータを決定し、太陽天頂角補正式を作成する。

(1) 大気モデルの選択

GVI プロダクト作成時に混濁大気下のデータは除外されている⁹⁾として、混濁大気は対象外とした。大気混濁度 (エアロゾル量) 以外に NDVI の変動に影響を与える因子は大気中の水蒸気量であるため、湿潤大気 (熱帯、中緯度夏期、亜寒帯夏期の 3 種) の清浄モデル、及び乾燥大気 (中緯度冬期、亜寒帯冬期の 2 種) の清浄モデル、及びその両者をつにしたもの、合計 3 種を補正のための大気モデルとして選定し (表 2 参照)、それぞれに対し一つの補正式を作成した。

(2) SZAO の決定

(4)式の SZAO は、原理的にはどの角度でもよいが、補正に伴う誤差を最小にするため、SZA の最頻値を SZAO とした。NOAA/GVI データから作成した 1987 年の月別 GVI データ¹⁰⁾ (陸域のみ) の SZA のヒストグラムを図 5 に示す。1987 年の場合、最頻値は、ほぼ 50° であるため SZAO = 50° とし、太陽天頂角補正として、太陽天頂角が 50° の場合の NDVI を求めることにした。

(3) 次数の決定

(1)で示した 3 種の大気モデルのそれぞれの場合において、次数 N = 2 ~ 9 の間で、回帰係数 α_i 及び β_i を SZA、シミュレーションから求めた NDVI (SZA)、NDVI (50) から最小二乗法により求め、その値を用いて、推定式の RMS 誤差を計算した。各次数での RMS 誤差を図 6 に示す。

どの大気モデルにおいても RMS 誤差は、N = 5 でほぼ収束するため次数を 5 とした。乾燥大気 (2 つの気候帯、季節)、湿潤大気 (3 つの気候帯、季節)、及び乾燥大気 + 湿潤大気 (5 つの気候帯、季節) の 3 種の大気モデルの中で、多くの気候帯、季節の一つの式で代表させている場合ほど、RMS 誤差が大きくなる。N = 5 の場合の各大気モデルにおける回帰係数、相関係数、及び RMS 誤差を表 4 に示し、回帰式により計算された NDVI と太陽天頂角の関係を図 7 に示す (表 2 参照)。

(4) 補正限界天頂角

図5 1987年月別 GVI データ (12ヶ月分) の太陽天頂角ヒストグラム

図6 乾燥大気, 湿潤大気, 乾燥大気+湿潤大気における回帰式の次数と RMS 誤差の関係

図7 回帰式から推定した NDVI

図8 乾燥大気, 湿潤大気, 乾燥大気+湿潤大気における感度係数

(3)で作成した回帰係数から, 各太陽天頂角における感度係数を計算した。太陽天頂角と感度係数の関係を図8に示す。感度係数は, 太陽天頂角が 80° を越すと急激に増大する。

また, 大気モデルを誤って仮定したことにより生じる NDVI (SZA_O) の誤差の挙動を調べるため, ある太陽天頂角 SZA での NDVI (SZA) を, 前述の湿潤大気モデルで補正した場合の補正值 NDVI (SZA)_{hum}と

乾燥大気モデルで補正した場合の補正值 NDVI (SZA)_{dry} の差を $0 \leq \text{SZA} \leq 90^\circ$, $-0.05 \leq \text{NDVI (SZA)} \leq 0.3$ の間で計算した。結果を図9に示す。太陽天頂角が 60° 以下の場合, 大気モデルを誤って仮定したことにより生じる差は少ないが, 太陽天頂角が 60° を越えた場合は, 差が増大していく。このことは, 60° 以上の太陽天頂角の NDVI を補正する場合, 大気モデルを正しく見積もる必要があることを示している。特に

表 4 回帰係数, 相関係数, RMS 誤差

	湿潤 大気	乾燥 大気	湿潤+乾燥
α_0	-1.735e-004	5.247e-003	7.313e-003
α_1	1.149e+000	1.799e+000	1.603e+000
α_2	8.208e+000	5.469e+000	6.192e+000
α_3	-2.389e+001	-1.965e+001	-2.063e+001
α_4	2.448e+001	2.147e+001	2.208e+001
α_5	-8.828e+000	-7.975e+000	-8.142e+000
β_0	-3.590e-003	9.021e-003	1.357e-004
β_1	-5.554e-001	-2.051e-001	-4.569e-001
β_2	2.648e+000	9.089e-001	2.154e+000
β_3	-4.743e+000	-1.682e+000	-3.867e+000
β_4	3.841e+000	1.445e+000	3.153e+000
β_5	-1.171e+000	-4.766e-001	-9.720e-001
相関係数	9.993e-001	9.997e-001	9.979e-001
RMS誤差 (NDVI)	8.606e-003	6.753e-003	1.648e-002

図9 乾燥大気と湿潤大気とを誤って仮定したことにより生じる NDVI の推定値の差

80°以上の場合、差がきわめて大きくなり補正が困難になる。

以上 2 種類の誤差解析から、補正限界天頂角は約80°であると考えられる。図 5 に示した GVI データの場合、80°未満の太陽天頂角のデータは陸域の全データの約88%であった。

4. 結 論

以上の結果から以下の結論が導かれる。NDVI データは、太陽天頂角の増加とともに減少し、その中に含

まれるパスラジアンズの割合が増加するため、大きな太陽天頂角の場合、地表面の観測には適さないことが明らかになった。また地表面状態が等しくても、混濁（エアロゾル量が多い）大気、湿潤（水蒸気量が多い）大気では観測される NDVI の値は小さくなることが示された。

グローバルな植生状況把握のためには太陽天頂角が大きい地域の植生状況を、異種のデータ（例えば SMMR, SSM/I のような偏波検出が可能なマイクロ波放射計¹²⁾）を用いて補填してやる必要がある。また、大気条件がほぼ一様であると仮定した場合、NDVI の太陽天頂角依存性は、太陽天頂角の余弦の 5 次式で近似できることが示された。

この近似式により太陽天頂角の影響の補正が可能であるが、太陽天頂角が約80°以上の場合には補正が不可能であることがわかった。

今後の検討課題として、高精度な補正のために、その画素に対応した大気状態の推定法の開発、スキャン角の影響の検討を行う予定である。

謝 辞

AVHRR のデジタルカウント算出法に関して、気象衛星センターの徳野正巳博士のご指導をいただきました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- Justice, C. O. et al, 1985, "Analysis of the Phenology of Global Vegetation Using Meteorological Satellite Data", Int. J. Remote Sensing. vol. 6, No. 8, 1271-1318.
- 小田島, 梶原, 建石, 1989, "GVI 画像の時系列解析", 日本リモートセンシング学会第 9 回学術講演会論文集, 1-4.
- Goto, T., K. Kajiwarara and R. Tateishi, 1990, "Integration of Multi-Source Data for Land cover", Proc. 11th. Asian Conference of remote Sensing. vol. II, G-7-1, G-7-6.
- SDSD, 1986, "GLOBAL VEGETATION INDEX USER'S GUIDE", Satellite Data Service Division, National Climatic Data Center, NESDIS/NOAA.
- Honda, Y. and S. Murai, 1990, "Vegetation Mapping using Global Vegetation Index", Proc. ISPRS Comm. 4 Symp., 608-615.
- Odajima, T., K. Kajiwarara and R. Tateishi, 1990, "Global Land Cover Classification by NOAA AVHRR Data", Proc. 11th. Asian Conference on Remote Sensing, Vol. II, S-3-1-S-3-6.
- Singh, S. M., 1988, "Simulation of solar Zenith Angle Effect on Global Vegetation Index (GVI)", Int. J. Remote Sensing, Vol. 9, No. 2, 237-248.
- Kneizys, F. X., et al, 1988, "LOWTRAN 7 Users'

- Guide”, AFGL-TR-88-0177, AFGL/USAF.
- 9) 国立天文台, 1987, “理科年表 昭和63年度”, 丸善.
- 10) Short, N. M., 1982, “LANDSAT Tutotial Handbook” Scientific and Technical Information Branch, NASA.
- 11) Louritson, L., G. J. Nelson and E. W. Porto, 1988, “Data Extraction and Calibration of TIROS/NOAA Radiameters”, NOAA Technical Memorandum NESS 107-Rev. 1, NESDIS/NOAA.
- 12) Justice, C. O., J. R. G. Townshend and B. J. Choudhury, “Comparison of AVHRR and SMMR Data for Monitaring vegetation Phenology on a Continental Scale”, Int. J. Remote Sensing, Vol. 10, No. 10, 1607-1632.

いままでだされている学会発行の本を会員特価で買うことができます（消費税を含むため、会員価格を変更いたしました）

1. 立体写真のみかた、とりかた、つくりかた
技報堂出版 定価1,900円 会員価 1,770円
2. 空中写真の判読と利用
鹿島出版 定価3,900円 会員価 3,600円
3. 空中写真にみる国土の変遷
鹿島出版 定価8,300円 会員価 7,500円
4. 写真による三次元測定
共立出版 定価3,800円 会員価 3,400円
5. 解析写真測量（改訂版）
学会自費出版 会員価 1,800円 10冊以上1割引
6. 熱赤外線リモートセンシングの技術と実際
鹿島出版会 定価4,500円 会員価 4,000円
7. 写真測量の歴史
学会自費出版 会員価 2,000円 10冊以上1割引（送料込）
8. 第16回国際写真測量・リモートセンシング（ISPRS）京都会議論文集
Part A 10,000円（送料込）
Part B 30,000円（送料別）（全13分冊）
9. ISPRS 第4部会つくばシンポジウム論文集 10,410円（送料込）