

## AVI 法の黄砂検出特性に関する検討

加藤 芳信\*

### Properties of Detection of Dust and Sandstorms by AVI Method

Yoshinobu Kato

The properties of detection of dust and sandstorms (DSS) by AVI method are examined. The aerosol vapor index (AVI) is defined as  $AVI = T_{12} - T_{11}$ , where  $T_{12}$  and  $T_{11}$  are the brightness temperatures respectively at  $12\mu\text{m}$  and  $11\mu\text{m}$  wave length. MODIS data of Terra/Aqua satellites from China to Japan in April 2006 are used. The  $T_{11}$  vs AVI scatter charts in narrow regions are made. Referring to the simulation result by Gu et. al., it is shown that the larger AVI value is, the larger the optical thickness of DSS is, in the case of narrow region on land and sea with DSS that does not include cloud. The AVI value decreases, in the case of narrow region with DSS that includes cloud.

Keywords: MODIS, Terra/Aqua, AVI, BT, DSS, dust and sandstorms, scatter chart

#### 1. はじめに

黄砂 (DSS: dust and sandstorms) は中国大陸内陸部の乾燥・半乾燥地域で風によって数千mの上空にまで巻き上げられた土壌・鉱物粒子が偏西風に乗って運ばれながら沈降する現象であり、農業、交通システム、人間の健康に影響を与え、地球全体の気候にも影響を及ぼしている[1]。黄砂は中国、モンゴル、韓国、日本などの国境をまたぐ広域の環境問題であるため、人工衛星による広域の黄砂観測が期待されている。衛星リモートセンシングによる黄砂検出法として、黄砂解析鹿児島グループが提案した AVI (Aerosol Vapor Index) 法[2]と、東京情報大学のグループが提案した YDI (Yellow Dust Index) 法[3]がよく知られている[4-9]。AVI は  $AVI = T_{12} - T_{11}$  と定義され、 $T_{12}$  と  $T_{11}$  はそれぞれ熱赤外バンドの  $12\mu\text{m}$  波長と  $11\mu\text{m}$  波長での輝度温度である。AVI 法では、水蒸気の影響が無視できる場合、基本的に  $AVI > 0$  で黄砂ありと判定される。Terra/Aqua 衛星 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer: 中分解能撮像分光放射計) センサの場合、 $T_{12}$  は band 32 ( $11.770 \sim 12.270\mu\text{m}$ )、 $T_{11}$  は band 31 ( $10.780 \sim 11.280\mu\text{m}$ ) の輝度温度に対応する。向井ら[9]は黄砂検出精度を高めるために AVI、 $T_{12}$ 、YDI を組合せた黄砂検出法を提案している。しかし、AVI に関する従来の研究では (1) AVI 法の黄砂検出の原理、(2) AVI 値と黄砂の光学的厚さとの関係、についてあまり明解に論じられていないようである。

Gu ら[10]は、地表と衛星との間に黄砂の層がある場合のモデルとして、地表からの熱赤外線放射が黄砂によるミー散乱により減衰を受けたものと、黄砂自身からの熱赤外線放射との和が衛星に到達すると考える。そして、黄砂が存在する場合の熱赤外線の大気伝播を数値計算し、黄砂の粒径と光学的

---

\* 宇宙情報科学科

厚さをパラメータとした T11 対 BTD の関係の図を示している。但し、 $BTD = -AVI$  である。Gu らの結果からは、AVI 値が大きいほど、黄砂が存在するという信頼度は大きいと言えるが、黄砂の光学的厚さが大きいとは言えない、という結論が導出される[7]。

本文では、Gu らの結果を参考にして、狭い領域（面積）での T11 対 AVI 散布図を作成して、AVI 法の黄砂検出特性について調べ、幾つかの成果を得たので報告する[7]。また、トラバース図を用いた検討も行っている。

## 2. 衛星リモートセンシングによる黄砂検出法の種類

衛星リモートセンシングによる黄砂検出に関係する方法には以下のものがある。

(1) 気象衛星ひまわり（1977 年打上げ）等の可視～近赤外域のモノクロ画像で、白は雲、灰色は黄砂と判定する方法。

(2) LANDSAT 衛星（1984 年打上げ）等のカラー画像で、地面でない茶色部分を黄砂と判定する方法。

(3) 気象衛星 NOAA 7 号（1981 年打上げ）、ひまわり 5 号（1995 年打上げ）等の熱赤外域の  $11\mu\text{m}$  と  $12\mu\text{m}$  での輝度温度差 (Brightness Temperature Difference)  $BTD = T11 - T12$  画像を用いる方法。

水蒸気に対して BTD 正 (Inoue 1990) [11]、雲に対して BTD 正 (Chylek 2006) [12]、火山灰に対して BTD 負 (Prata 1989) [13]、黄砂に対して BTD 負 (Gu 2003) [10] となる、あるいは、なりうるものが理論的（数値シミュレーションを含む）に説明されている。

(4) AVI 法：黄砂解析鹿児島グループが提案（1999）[2]

$AVI = T12 - T11 = -BTD$  であるから、基本的に、水蒸気に対して AVI 負、雲に対して AVI 負、火山灰に対して AVI 正、黄砂に対して AVI 正になる。昼と夜のデータに対して黄砂検出が可能である。

(5) YDI 法：東京情報大学のグループが提案（2003）[3]

MODIS の可視バンドの輝度値 (Brightness Value) を用いる。2つの定義式がある。

$$YDI(\text{band1}, \text{band3}) = (V_{\text{赤}} - V_{\text{青}}) / (V_{\text{赤}} + V_{\text{青}}), \quad YDI(\text{band4}, \text{band3}) = (V_{\text{緑}} - V_{\text{青}}) / (V_{\text{緑}} + V_{\text{青}})$$

昼のデータに対してのみ黄砂検出が可能である。

(6) T12-T8.5 法：東京情報大学のグループが提案（2003）[3]

熱赤外域の  $12\mu\text{m}$  と  $8.5\mu\text{m}$  での輝度温度差 (MODIS では Band32-Band29) を用いる。

(7) その他

## 3. AVI法の理論的検討

AVI 法の原理について、従来の研究ではあまり明解に論じられていないので、ここで説明する。

### 3. 1 「水蒸気があれば、 $AVI < 0$ となる」の説明

土屋[14]の p.160 の図 5.3「低分解能太陽スペクトル」(微量気体成分の  $1 \sim 15\mu\text{m}$  波長での吸収率グラフが描かれている) の  $\text{H}_2\text{O}$  のグラフを見れば、 $11\mu\text{m}$  より  $12\mu\text{m}$  の方が吸収は大きい。従って、地表から出た赤外線が水蒸気を通して人工衛星へ到達すると、 $12\mu\text{m}$  の方がより減衰している。従って、

雲がなく、水蒸気がある場合、「 $AVI = 12\mu\text{m}$ の輝度温度 $-11\mu\text{m}$ の輝度温度 $< 0$ 」となる。

### 3. 2 「雲があれば、 $AVI < 0$ となる」の説明

雲を構成する微小水粒または微小氷粒の大きさは赤外線波長と同じくらい ( $10\mu\text{m}$  付近) であるから、ミー散乱の理論が適用される。Chylek ら[12]の Fig.2 のグラフによれば、微小水粒および微小氷粒の複素屈折率の虚数部 (減衰率に相当) はいずれも、 $11\mu\text{m}$  よりも  $12\mu\text{m}$  の方が大きいので、 $AVI < 0$  になる。

### 3. 3 「黄砂があれば、 $AVI > 0$ となる」の説明

図1は、地表面から人工衛星の間に黄砂の層が存在する場合の説明図である。地表面温度を  $T_s[\text{K}]$  とする。ここで、 $K$ はKelvinである。 $AVI$ 法では  $12\mu\text{m}$ 波長と  $11\mu\text{m}$ 波長の熱赤外線扱う。まず、 $12\mu\text{m}$ 波長 ( $\lambda_{12}$ ) に着目して説明する。プランクの法則より黒体の分光放射輝度は、図1右側に記した1番目の式で  $\lambda = \lambda_{12}$ ,  $T = T_s$ を代入した  $B(\lambda_{12}, T_s)$ になる。これに地表面の放射率  $\varepsilon(\lambda_{12})$  をかけた  $\varepsilon(\lambda_{12}) * B(\lambda_{12}, T_s)$  が地表から放射される。黄砂の粒径の多くは約  $1 \sim 10\mu\text{m}$  なので、ミー散乱の理論が適用される。黄砂の層では、地表からの熱赤外線放射が黄砂によるミー散乱により減衰を受け、また、黄砂自身からの熱赤外線放射が加わる。これが人工衛星に到達する。人工衛星で観測された輝度を  $B_{12}$  とする。輝度温度  $T_{12}$  は、図1右側に記した2番目の式で  $\lambda = \lambda_{12}$ ,  $B = B_{12}$ を代入して得られる。同様に、 $11\mu\text{m}$ 波長 ( $\lambda_{11}$ ) の場合も  $B_{11}$  を経由して  $T_{11}$  が得られる。標題の「黄砂があれば、 $AVI > 0$  となる」とは、人工衛星で観測された  $T_{12}$  と  $T_{11}$  を使って、 $AVI = T_{12} - T_{11}$  が正になることを言う。

次に、Gu ら (ミシガン工科大学) [10]に基づいて、黄砂が存在する場合の  $AVI$  の理論を説明する。 $AVI$  は一般に次の関係式で表される。

$AVI = F$  (黄砂の成分 (複素屈折率), 光学的厚さ, 粒子サイズ分布, 粒子の形状, 黄砂の温度, 地表面の温度, 地表面の種類, その他)

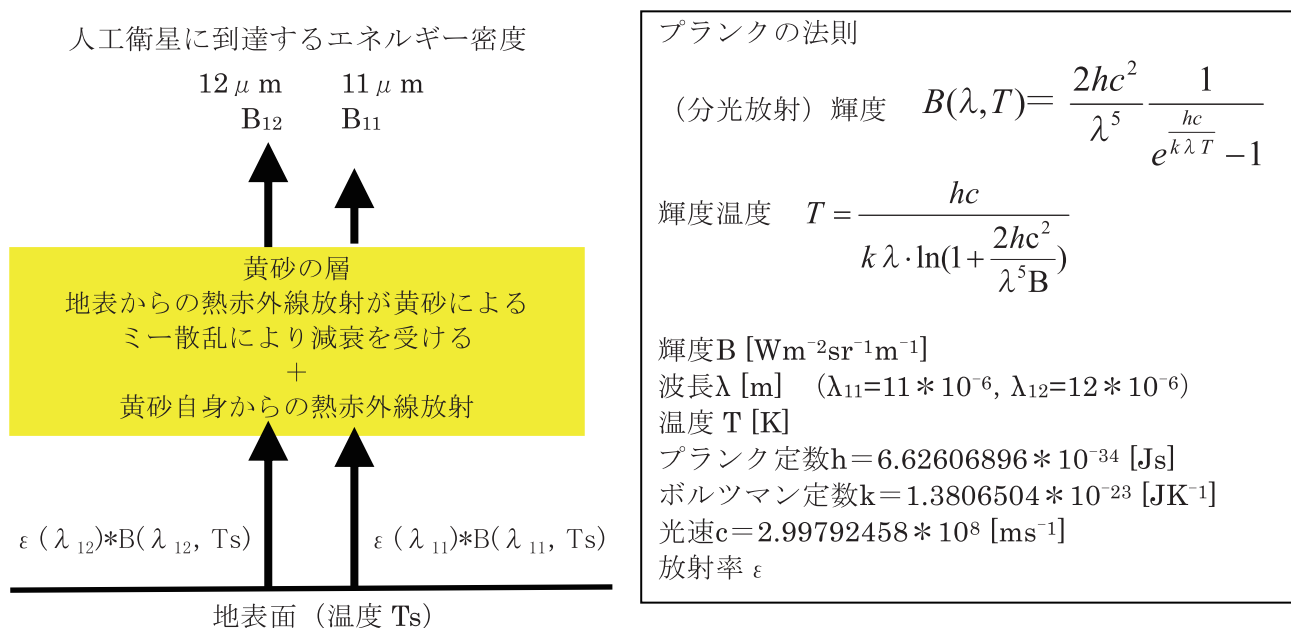
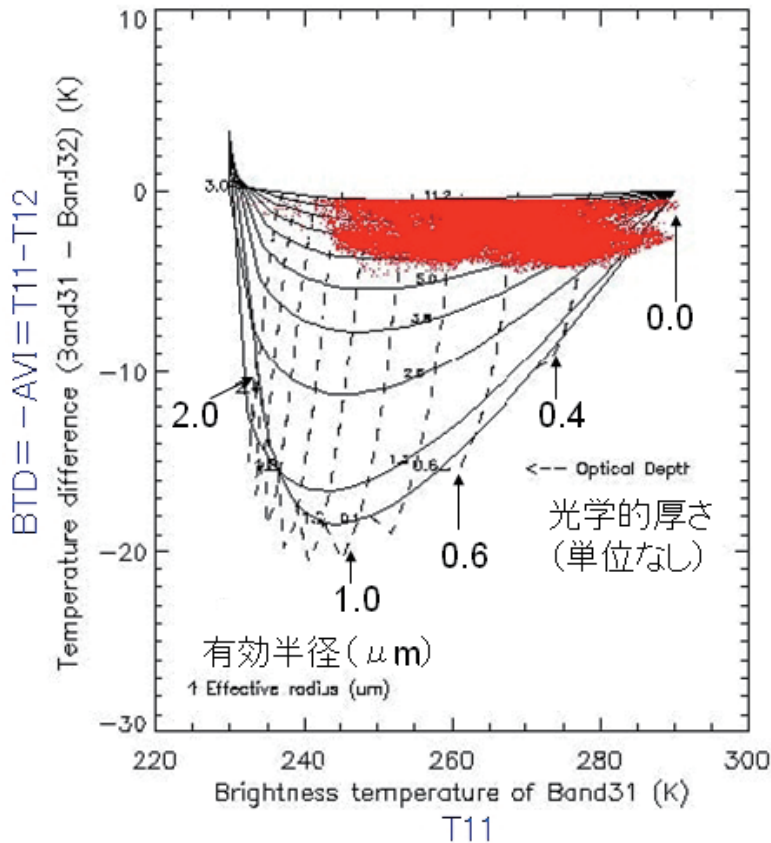


図1. 黄砂の層がある場合の説明図



計算に使用したパラメータ

全スタディ・エリア

(単位: 100 万 km<sup>2</sup>) 2.09

黄砂層の温度 (K) 230.00

黄砂層の下の地表温度 (K) 290.00

Band 31 の中央波長 (μm) 11.03

Band 32 の中央波長 (μm) 12.02

サハラ・ダストの比重 (g/cm<sup>3</sup>) 2.50

Band 31 でのサハラ・ダストの屈折率  
1.860 + 0.302 i

Band 32 でのサハラ・ダストの屈折率  
1.800 + 0.182 i

(比較用) Band 31 での石英の屈折率  
2.021 + 0.016 i

(比較用) Band 32 での石英の屈折率  
1.437 + 0.222 i

図 2. 黄砂のモデルとしてサハラ・ダストを用いた場合のミー散乱による熱赤外線の大気中での放射伝播計算の結果 (T11 対 BTD 特性)。赤い点は MODIS の観測値を示す。(Gu ら[10]の Fig.3 に追加記入)

Gu ら[10]は中国大陸の上の黄砂を研究対象としている。観測された黄砂粒子のサイズは殆ど 1~5 μm であると記されている。図 2 右側に記したパラメータを用いた大気中での放射伝播計算の結果として、図 2 左側のミー散乱による T11 対 BTD 特性が示されている。また、11 μm 波長での観測温度 230K~290K に対して、サハラ・ダストで BTD 観測結果 -5K を上手く説明でき、11 μm 波長での光学の厚さは 0.79 であると記されている。ここで、図 2 を解釈する。

(1) T11 (11 μm 波長での輝度温度) が低くなるに従い、黄砂の光学の厚さは大きくなる。

(2) ある有効半径の黄砂に着目して、光学の厚さを 0 から大きくしていくと、次のようになっている。まず、光学の厚さ 0 で BTD は 0 であり、光学の厚さが大きくなるに従い BTD が負方向に大きくなっていき、光学の厚さがある値 (図 2 では 1.0 付近) で BTD は負方向に最大になり、更に光学の厚さが大きくなるに従い BTD は 0 に向かって小さくなっていき、更には BTD が正になっている。

(3) 黄砂の有効半径が小さいほど、BTD の負方向に凸のカーブは大きくなる。

(4) ある BTD 値に着目すると、光学の厚さは広い範囲に分布する。例えば BTD=-5 とすると、有効半径 5 μm の粒子に対し、光学の厚さは 0.8 から 1.6 の広い範囲に分布する。しかも有効粒径が 1 μm 異なるだけで、BTD は 2 程度変化する。黄砂には多くの径の異なる粒子が含まれるので、赤の観測点で示されるように、T11 対 BTD は広い範囲の分布を示す。従って光学の厚さに対しては BTD



より T11 の方がより良い指標と言える。

Gu らの大気中での放射伝播計算から次のように考察される。BTD と AVI は正負が逆の定義である (BTD = -AVI) ことに注意すれば (4) に述べたように, AVI 値が大きいほど黄砂の光学的厚さが大きいとは言えない。しかし, どの粒径でも光学的厚さが 1 になるまでは AVI 値は増大し, 2 を超えても AVI の減少は小さい。従って, AVI 値が大きいほど, 黄砂が存在する信頼度が高いと推定できる。

#### 4. MODIS データを用いた T11 対 AVI 散布図による AVI 法の黄砂検出特性の検討

2006 年 4 月 6 日～17 日の MODIS データを用いて, 中国 (タクラマカン砂漠, ゴビ砂漠を含む) から日本にわたる広域の場合, ならびに, 海上, 陸上で, 黄砂のある・なし, 雲のある・なし, 黄砂と雲の混在に分けた狭い領域の場合について, T11 対 AVI 散布図を作成した。その散布図をトルーカラー画像, T11 画像, AVI 画像及び Gu らによる数値計算結果 (図 2) を使って解釈した [7]。なお, 狭い領域とは約 100km 四方以下のことである。

(注) 画像処理を行った例すべてにおいて, 約 100km 四方以上になると, 必ず雲を含んでおり, 特徴を持たせた領域分割ができない。

図 3 は, 2006 年 4 月 8 日 1 時 21 分 UT 受信の Terra-MODIS 画像の一部分を表示したものである。図中の幾つかの黒い四角枠は, 小領域に分けて T11 対 AVI 散布図を作成し解析した場所を示す。

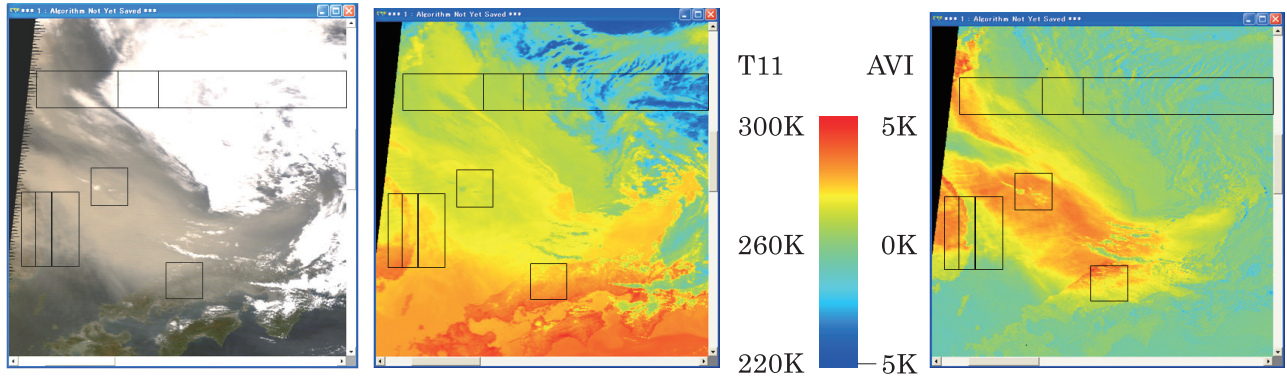
図 4 は, 図 3 の画像範囲全体の T11 対 AVI 散布図である。図 4 では散布点が広く分布し, 散布図の形と黄砂との関係が言えない。しかし, 小領域に分けて T11 対 AVI 散布図を作成すると, 黄砂との関係が以下のように言える。

図 5 は, 図 3 の左側に 3 つ並んだ縦長の四角枠 (韓国の陸上部分を (a), 韓国の陸海の境界部分を (b), 韓国東側の海上部分を (c) とする) の T11 対 AVI 散布図である。(a)(b)(c) の位置は, 北緯はいずれも 37.35 ~ 35.35N であり, 東経は (a) 128.86 ~ 129.23E, (b) 129.23 ~ 129.62E, (c) 129.62 ~ 130.36E である。これら (a)(b)(c) には雲がない。図 5 (a)(c) では, T11 温度の低下とともに AVI 値は上昇している (下降しない)。図 5 (a) では, 陸上の地表面温度が地表の状態 (山, 平野, 市街地など) により種々変わるのので, 地表面温度と黄砂の影響を受けた T11 温度の変化幅は約 18.2K と広い。図 5 (c) では, 海表面温度がほぼ一定なので, 海表面温度と黄砂の影響を受けた T11 温度の変化幅は約 10.5K と狭い。図 5 (b) では, 黄砂が陸上と海上で連続しているので, 陸海の境界における陸上のある程度の濃さの黄砂から海上の同じ黄砂へのつながり, 及び, 陸海の境界における陸上の黄砂無しから海上の同じ黄砂無しへのつながりがある。このつながりで AVI 値は陸上から海上で約 1.5 ~ 2.0K 小さくなっている。

図 6 (a) は図 3 の真中付近の四角枠 (日本海の 38.00 ~ 37.00N, 130.67 ~ 131.67E) の領域の T11 対 AVI 散布図である。図 6 (b) は図 3 の下側の四角枠 (日本の陸上の 35.51 ~ 34.51N, 132.69 ~ 133.69E) の領域 (トルーカラー画像で見て黄砂が強いと判断される出雲市, 松江市を含む) の T11 対 AVI 散布図である。これら 2 つの領域において, 図 3 (a) のトルーカラー画像では黄砂の上か中か下に小さな雲が見える (衛星画像では中か下かは区別できない)。図 6 (a)(b) では, T11 温度が低くなる方向に対して, AVI 値はまず上昇し, その後下降している。図 6 (c) に示すように, まず上昇するのは, 雲のない場所での, 薄い黄砂から, 濃い黄砂への変化による。その後下降するのは, 濃い黄砂またはある程度

の濃さの黄砂が存在する場所での、雲なし（即ち、雲の外側）から、厚い雲（即ち、雲の中側）への変化による。

図 7 は、図 3 の上側に 3 つ並んだ横長の四角枠の領域のトルーカラー画像、Band31 画像（T11 温度画像のこと）、Band32 画像（T12 温度画像のこと）、AVI 画像である。3 つの四角枠を左から領域(a)、(b)、(c)とすると、これらの位置は、北緯はいずれも 40.61~39.61N であり、東経は(a)129.25~



(a) トルーカラー画像  
(RGB=band143)

(b) T11 温度画像  
(T11 表示範囲：220~300K)

(c) AVI 画像  
(AVI 表示範囲：-5~5K)

図 3. 2006 年 4 月 8 日 1 時 21 分 UT 受信 Terra-MODIS 画像 (42.00N~33.00N, 128.50E~137.50E)

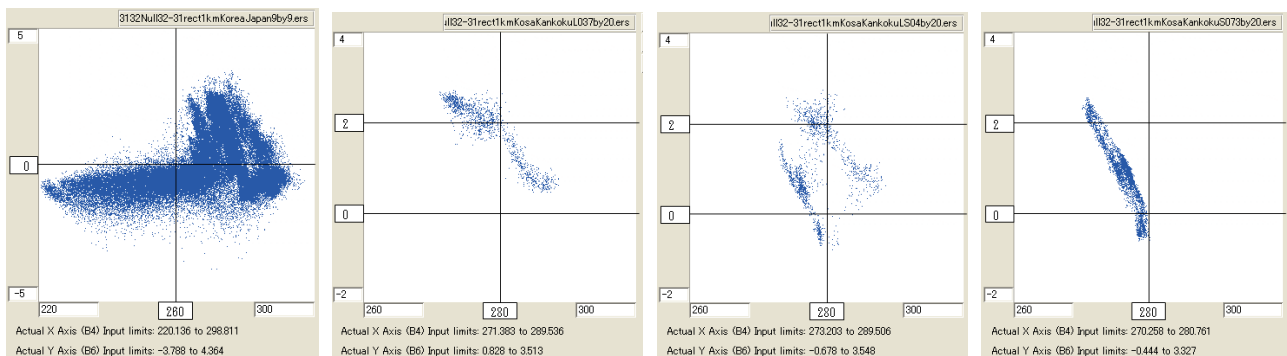
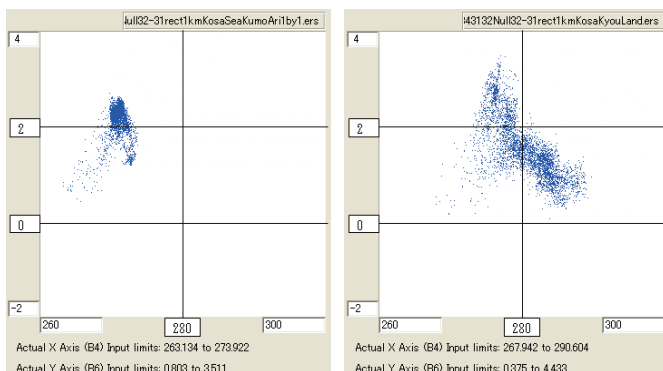


図 4. 図 3 の画像範囲  
の T11 対 AVI 散布図  
(横軸：T11=220~300K,  
縦軸：AVI=-5~5K)

(a) 韓国の陸上部分 (b) 韓国の陸海境界部分 (c) 韓国東側の海上部分  
図 5. 雲なしの韓国付近の T11 対 AVI 散布図  
(横軸：T11=260~300K, 縦軸：AVI=-2~4K)



(a) 日本海上

(b) 日本陸上

(c) 散布図の解釈

図 6. 海上(a)と陸上(b)における小さな雲を含む黄砂ありの領域の T11 対 AVI 散布図  
(横軸：T11=260~300K, 縦軸：AVI=-2~4K), ならびに、散布図の解釈(c)

濃い黄砂がある場所  
での、雲なし(即ち、雲  
の外側)から、厚い雲  
(即ち、雲の中側)へ  
の変化

雲のない場  
所での、薄い  
黄砂から、濃  
い黄砂へ  
の変化

ある程度の濃さの黄砂があ  
る場所での、雲なし(即ち、  
雲の外側)から、厚い雲(即  
ち、雲の中側)への変化

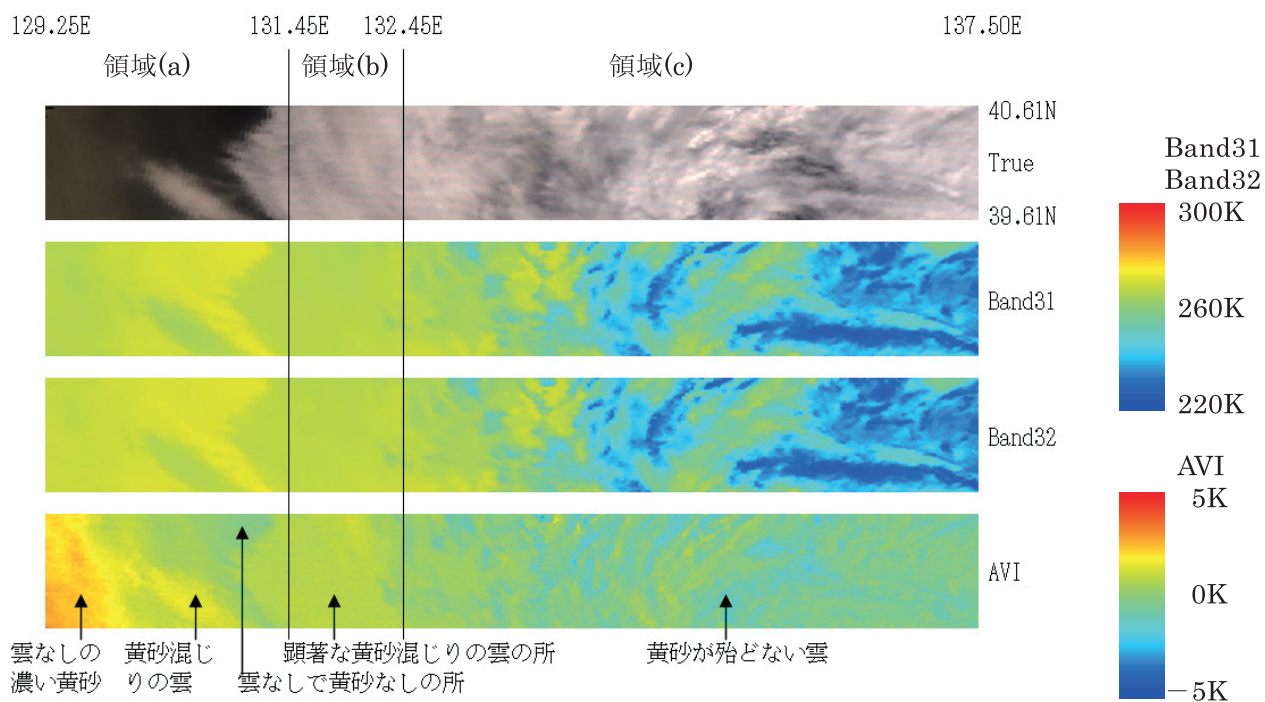
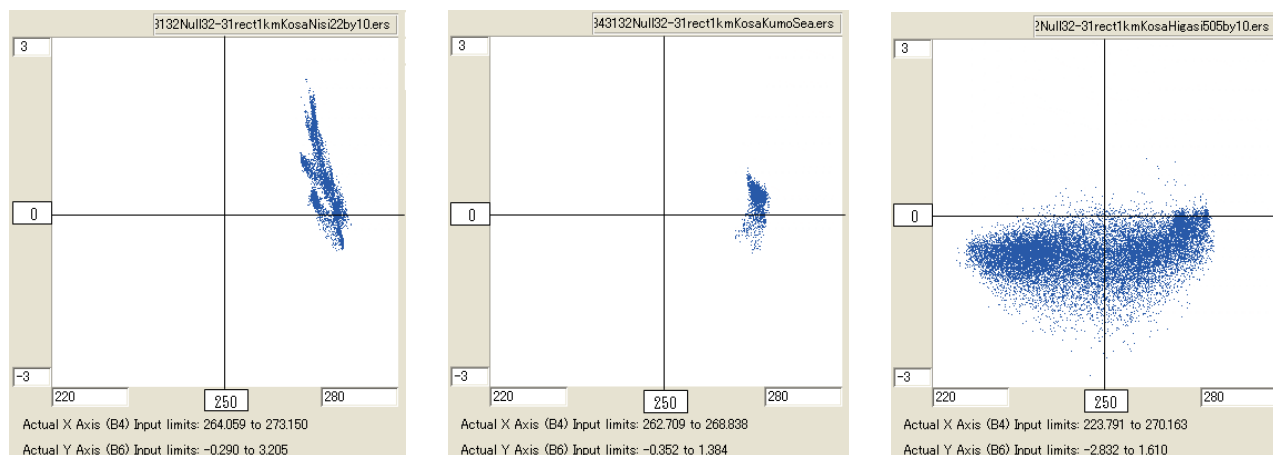


図7. 図3の上側の3つの四角枠の領域(40.61~39.61N, 129.25~137.50E)の拡大画像

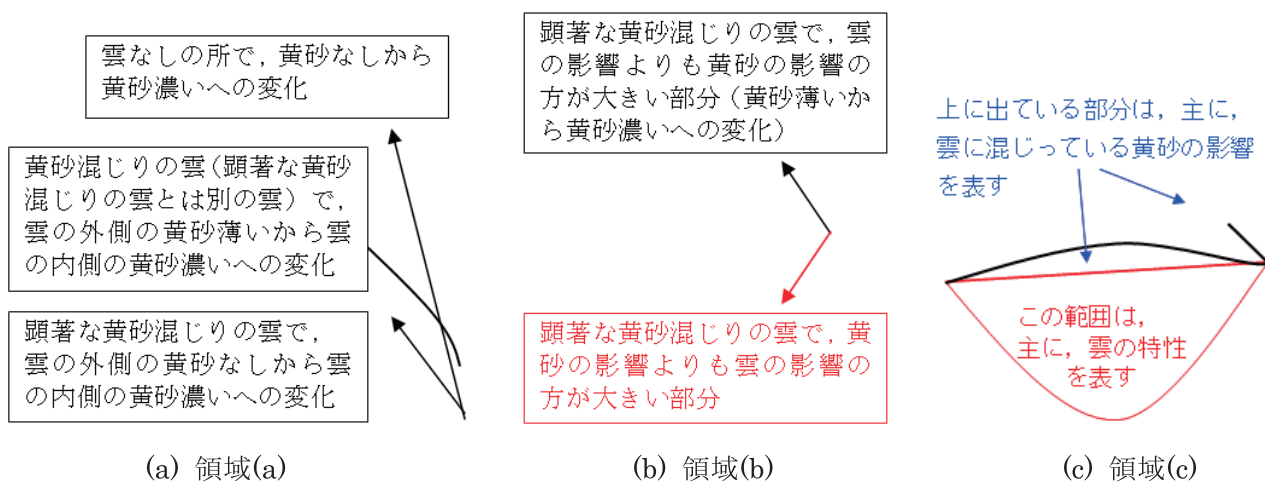


(a) 領域(a)

(b) 領域(b)

(c) 領域(c)

図8. 領域(a)(b)(c)の T11 対 AVI 散布図 (横軸: T11=220~280K, 縦軸: AVI 値-3~3K)



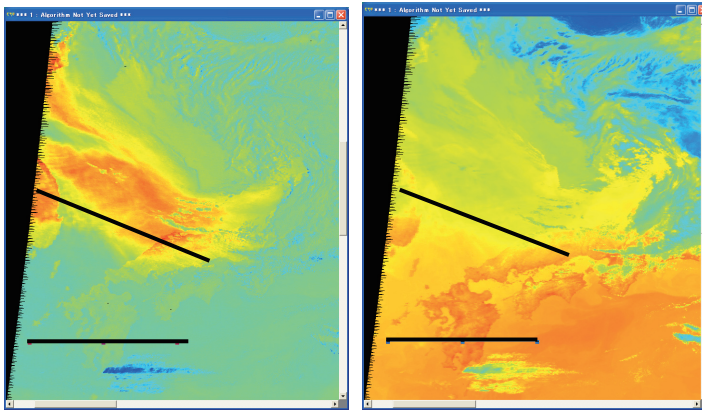
(a) 領域(a)

(b) 領域(b)

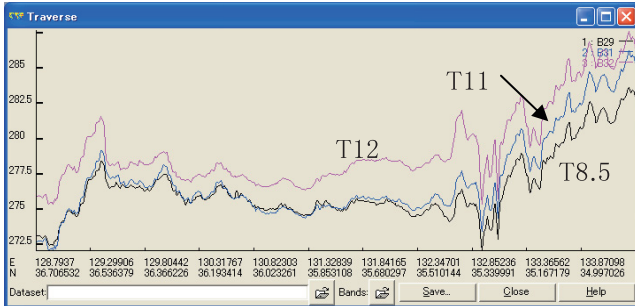
(c) 領域(c)

図9. 図8の散布図の解釈

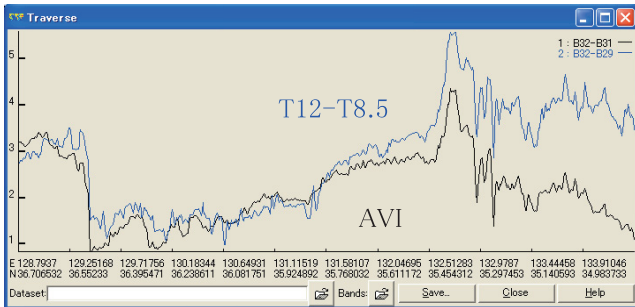




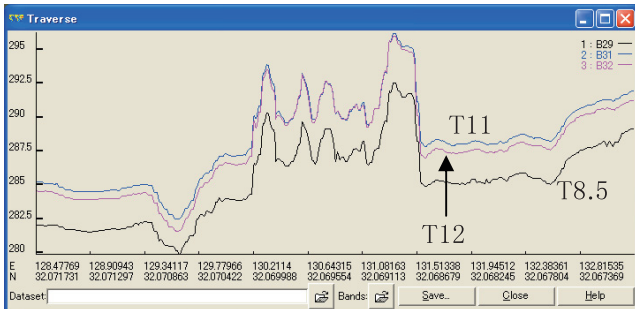
(a) AVI 画像とトラバース線 (b) T11 画像とトラバース線



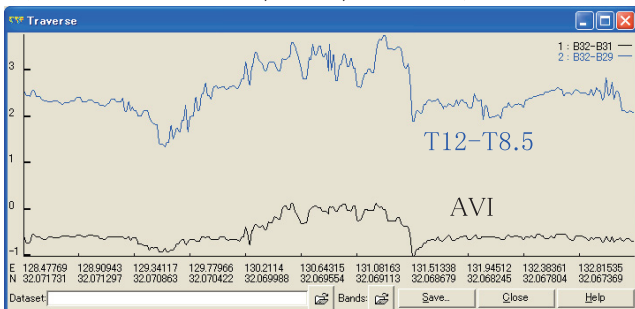
(c) 韓国－日本の T8.5, T11, T12 の各トラバース図



(d) 韓国－日本の T12-T8.5, AVI の各トラバース図



(e) 九州を通る T8.5, T11, T12 の各トラバース図



(f) 九州を通る T12-T8.5, AVI の各トラバース図

図 10. トラバース図

131.45E, (b)131.45～132.45E, (c)132.45～137.50E である。これら領域(a)(b)(c)は海上で、黄砂混じりの雲を含む場所として選ばれている。特に、領域(b)は顕著な黄砂混じりの雲の領域として選ばれている。領域(a)では、トルーカラー画像、Band31 画像、AVI 画像を対比して見れば、左側より、雲なしの濃い黄砂、黄砂混じりの雲（顕著な黄砂混じりの雲とは別の雲）、雲なしで黄砂なしの所、顕著な黄砂混じりの雲、があることが分かる。領域(b)では、右端に黄砂の薄い部分があるが、その他の大部分はほぼ一様な濃さの黄砂と雲に見える。領域(c)は全て雲であり、左側 1/3 に薄い黄砂が混じっており、残り 2/3 には黄砂が混じってないように見える。

図 8 に領域(a)(b)(c)の T11 対 AVI 散布図を示す。図 8 の散布図を図 7 のトルーカラー画像、Band31 画像、AVI 画像と対比して解釈すると、図 9 に示すようになる。

## 5. トラバース図による AVI 法の黄砂検出特性の検討

図 10(a)に 2006 年 4 月 8 日 1 時 21 分 UT 受信 Terra-MODIS の AVI 画像（表示範囲：-5～5K）、図 10(b)に T11 画像（表示範囲：210～310K）を示す。図 10(a)(b)において、斜め黒線は黄砂の存在する韓国－日本のトラバース線、水平黒線は黄砂の存在しない九州を通るトラバース線である。

図 10(c)(d)の横軸は経度・緯度(128.79E, 36.71N)～(134.38E, 34.83N)を表す。図 10(c)と(d)の縦軸に表示されている目盛はそれぞれ 272.5～287.5K と 1～5K である。

図 10(d)では、韓国陸上と日本海上の境界で AVI 値は約 2.0K 下がり、日本海上と日本陸上の境界で約 1.5K 上がっている。即ち、黄砂は陸上と海上で連続して存在しているのであるが、海上の AVI 値は陸上の AVI 値に比べ、約 1.5~2.0K 低いことを示している。

図 10(e)(f)の横軸は経度・緯度 (128.48E, 32.07N) ~ (133.25E, 32.07N) を表す。図 10(e)と(f)の縦軸に表示されている目盛はそれぞれ 280~295K と -1~3K である。図 10(f)では、東シナ海と鹿児島県陸上の境界で AVI 値は約 0.3K 上がり、宮崎県陸上と太平洋海上の境界で約 0.7K 下がっている。即ち、黄砂が無い場所では、海上の AVI 値は陸上の AVI 値に比べ、約 0.3~0.7K 低いことを示している。なお、九州陸上の AVI 値は最大で 0.1K である。この値は筆者の研究[4-6]で採用している黄砂有りの閾値 0.3K より小さいので、九州陸上は黄砂無しと判定される。また、図 10(e)の T8.5 (8.5  $\mu$ m 波長での輝度温度)、T11 及び T12 のトラバース曲線が九州陸上で凸凹しているのは、平地(盆地を含む)は温度が高く、山間部は温度が低いからである。

## 6. 陸海の境界付近の陸上の AVI 値が海上の AVI 値よりも大きい理由

図 5(b)および図 10(d)(f)では、陸海の境界付近の陸上の AVI 値が海上の AVI 値よりも大きい。この理由を考える。土屋[14]の p.252 の図 8.24「熱赤外域における岩石の分光放射率」に描かれている 24 種類の岩石の分光放射率は、いずれも 11  $\mu$ m より 12  $\mu$ m の方が大きい。また、石英の場合の分光放射率は 12  $\mu$ m のとき約 0.8, 11  $\mu$ m のとき約 0.7 である[15]。人工衛星からそのような鉱物を含む地表を観測すると、黄砂がなくても、地表の放射率の関係で輝度温度は 11  $\mu$ m より 12  $\mu$ m の方が高くなる ( $AVI = T12 - T11 > 0$ ) 可能性がある。海上においては、11  $\mu$ m や 12  $\mu$ m 付近での海面の放射率は約 0.99 である[16]ので、黄砂がなければ  $AVI = T12 - T11 \div 0$  となる。黄砂がある場合には、陸上でも海上でも黄砂の影響分が AVI 値に加算される。従って、陸海の境界付近の陸上の AVI 値が海上の AVI 値よりも大きいのである。

## 7. 結論

本研究により、次のことが明らかになった。

(1) T11 対 AVI 散布図を作成し検討した結果、雲がない狭い範囲の陸上、海上の黄砂では、AVI 値が大きいほど黄砂の光学的厚さが大きい。また、黄砂の上か中か下に雲がある場合には、雲がない場合に比べ、AVI 値が減少する。

(2) 黄砂が海陸で連続している場合、海陸の境界の近くの海上の AVI 値は陸上の AVI 値より約 0.2~2.3K 低い。その理由は地面を構成する鉱物の放射特性により、陸上の方が AVI 値が高いからである。また、海陸の境界線上のピクセル (1 km<sup>2</sup>) の AVI 値は、ピクセルを占める海陸の面積の割合によって変化する。

(3) トルーカラー画像と T11 対 AVI 散布図を細かい領域に分けて比較検討することにより、雲のない領域を明確に選別し、場所や時間の移動に従い、黄砂の粒径や成分の相対的变化について知ることが期待できる。

(4) T11 対 AVI 散布図を用いると、雲の影響のない黄砂、雲が上か下にある黄砂、黄砂混じりの雲、



黄砂のない雲等を識別できる可能性がある。

謝辞 AVI法の理論に関して有益な議論を頂いた福井工業大学工学部宇宙情報科学科・永野元彦教授に感謝する。本研究は文部科学省・私立大学学術研究高度化推進事業・福井工業大学オープン・リサーチ・センターの助成を受けており、感謝する。

## 参考文献

- [1] 環境省：“黄砂問題検討会報告書”，<http://www.env.go.jp/earth/dss/report/02/index.html> (2005-09)
- [2] 木下紀正，西之園雅晴，矢野利明，飯野直子，鶴野伊津志：“NOAA/AVHRR データによる黄砂の検出と解析”，日本リモートセンシング学会第26回学術講演会論文集，pp.253-256 (1999)
- [3] 宋杰，朴鍾杰，安田嘉純：“MODIS データによる黄砂の抽出方法に関する研究”，日本写真測量学会平成15年度年次学術講演会発表論文集，pp.153-156 (2003)，および，<http://e-asia.tuis.ac.jp/frontier/result/doc/yellowdust-index.pdf>
- [4] 加藤芳信：“MODIS モザイク画像によるタクラマカン砂漠から日本までの黄砂の検出”，日本リモートセンシング学会第44回（平成20年度春季）学術講演会論文集，P-19，pp.229-230 (2008-05)
- [5] 加藤芳信：“MODIS モザイク画像によるタクラマカン砂漠から日本までの黄砂の検出”，福井工業大学研究紀要，第38号，第1部，pp.329-336 (2008-05)
- [6] Yoshinobu Kato：“Detection of dust and sandstorms from Taklamakan Desert to Japan by using MODIS mosaic images”，Proceedings of SPIE, vol.7152, pp.71520P/1-10 (2008-12)
- [7] 加藤芳信：“衛星画像を用いた黄砂及び豪雨の解析に関する研究”，福井工業大学博士論文（2009年2月受付，2010年3月学位授与）
- [8] 加藤芳信：“福井豪雨の解析および黄砂・エチゼンクラゲ発生の解析”，次世代環境調和型科学技術の研究開発（文部科学省平成17年度～平成21年度私立大学学術研究高度化推進事業「オープン・リサーチ・センター整備事業」研究成果報告書），pp.82-85 (2010-03)
- [9] 向井真木子，佐野到，飯塚卓也，横前拓磨，向井苑生：“東アジアにおけるダストエアロゾル粒子の検出と解析”，日本リモートセンシング学会誌，vol.30，no.1，pp.1-10 (2010-01)
- [10] Yingxin Gu, William I. Rose and Gregg J. S. Bluth：“Retrieval of mass and sizes of particles in sandstorms using two MODIS IR bands: A case study of April 7, 2001 sandstorm in China”，Geophysical Research Letters, vol.30, no.15 (2003-08)
- [11] Toshiro Inoue：“The Relationship of Sea Surface Temperature and Water Vapor Amount to Convection over the Western Tropical Pacific Revealed from Split Window Measurements”，Journal of the Meteorological Society of Japan, vol.68, No.5, pp.589-606 (1990-10)
- [12] Petr Chylek, S. Robinson, M. K. Dubey, M. D. King, Q. Fu and W. B. Clodius：“Comparison of near-infrared and thermal infrared cloud”，Journal of Geophysical Research, vol.111, D20203 (2006)
- [13] A. J. Prata：“Infrared radiative transfer calculations for volcanic ash clouds”，Geophysical Research Letters, vol.16, No.11, pp.1293-1296 (1989-11)
- [14] 土屋清：“リモートセンシング概論”，朝倉書店 (1990-05)
- [15] 通商産業省資源エネルギー庁：“平成11年度鉱物資源探査技術開発調査報告書 リモートセンシングによる探査技術開発”，p.57，図I-3-2 分光スペクトルチャート(23) (2000-03)
- [16] 村上浩：“LOWTRAN 7を用いたMODIS熱赤外バンドのGlobal代替校正”，[http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GLI/ocean/modis\\_nrt/MODIS\\_TIR\\_globalvical.pdf](http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GLI/ocean/modis_nrt/MODIS_TIR_globalvical.pdf) (2002-03)

(平成22年3月31日受理)