

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

加 藤 芳 信*

Detection of Dust and Sandstorms from Taklamakan Desert to Japan by using MODIS Mosaic Images

Yoshinobu Kato

The MODIS mosaic images of true-color, AVI and thermal images are made for the detection of dust and sandstorms (DSS) from Taklamakan Desert to Japan. The detection of DSS is possible both at daytime and night, because the AVI method is used. The level of the density of DSS is divided into six stages from 0 (DSS none) to 5 (DSS strong) based on the AVI values. The DSS phenomena from April 6, 2006 to the 11th are analyzed by using the mosaic images of Terra-MODIS. The number of pixels, which is approximately equal to the area of [km²], at each level of the density of DSS is measured.

1. はじめに

近年、日本では4月頃をピークとして、黄砂が数多く観測されている。黄砂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る[1,2]。日本に関係する黄砂の主な発生源は、(1)ゴビ砂漠、(2)タクラマカン砂漠、(3)黄土高原、(4)中国北東部（モンゴルの東隣付近）、(5)モンゴル高原（但し、ゴビ砂漠以外の部分）、(6)チベット高原である。なお、ゴビ砂漠とは、中国・モンゴルにまたがる石ころだらけの荒地の通称である。中国ではそれぞれの砂漠に名前が付いているが、モンゴルでは特に名前は付いていない。黄砂は発生から約1～6日で約1500～6000km離れた日本に到達する。黄砂は日本、韓国では大気汚染現象であるが、中国では砂塵嵐として認識されている。日本での黄砂の降下量は、年間1km²あたり1～5トンと推測されている[1]。

本論文では、2006年4月6日～11日の黄砂について、Terra衛星Modisデータを用いて、タクラマカン砂漠から日本までのトゥルーカラー、AVI及び温度画像のモザイク画像を作成し、解析を行っている。黄砂検出はAVI法に基づくので、検出は昼データ、夜データの両方ともに可能である。黄砂濃度レベルを0（黄砂なし）から5（黄砂強い）までの6段階に分けたAVIカラー表示モザイク画像の作成により、タクラマカン砂漠から日本までの広範囲の黄砂の状況がある程度定量的に議論できるようになっている。

2. 2006年の黄砂多数発生の原因

黄砂発生の必要条件は、(1)乾燥した露出表土（即ち、植生や積雪がなく、土壌が乾燥状態であること）、(2)強風が吹くこと、である。本論文では、2006年4月6日～11日の黄砂を扱う。2006年4月前後の黄砂多数発生の原因は、中国からの報道[3]等によれば次の通りである。(1)2005年夏以降、砂漠化の進む内モンゴル自治区の中西部、黄土高原および中国北部で降水量が非常に少なく、植物が育たなかった。(2)2005年冬以降、中国北部の降水量が平年を30～50%、地区によっては80%も下回り、過去50年で2番目に少なかった。このため表土が乾燥し、土壌に含まれる水分が減っていた。(3)2006年春に入ってから気温が、中国北部の多くの地域で例年より1～2度高かった。このため凍った土の融解が例年より早く、土壌から水分が蒸発した。(4)例年に比べてシベリアからの冷風が強いことにより、砂嵐が多発した。(5)モンゴル付近に発生した低気圧の影響で、砂嵐が頻発した。(6)中国北部には砂漠が広がっており、更に一部で砂漠化が急速に進んでおり、大量の黄砂の供給源となっている。

* 宇宙通信工学科

3. AVI 法による黄砂検出の原理

黄砂検出法として AVI (Aerosol Vapor Index : エアロゾル-水蒸気-指数) 法[4-6]と YDI (Yellow Dust Index : 黄砂指数) 法[7]が有名である。文献[8]では Modis の場合について AVI 法と YDI 法を比較検討し、AVI 法が優れていることを示している。

AVI 法は、元々、鹿児島大学黄砂解析研究グループが提案したもので、Noaa 衛星 AVHRR データによる黄砂検出法であった[4]。これを Terra/Aqua 衛星 Modis データに読み替えて、原理等を以下に記す[8-13]。

AVI 法では、Modis の熱赤外バンドの band31 (10.780~11.280 μm) と band32 (11.770~12.270 μm) を用いる。AVI の定義は次式であり、黄砂があれば通常 $\text{AVI} > 0$ となる。

$$\text{AVI} = \text{band32} - \text{band31}$$

AVI 法の黄砂検出の原理は次の通りである。

- (1) エアロゾルの影響がない場合、水蒸気の透過率は、band31 よりも band32 の方が低いため、 $\text{AVI} < 0$ になり、透過水蒸気量にほぼ比例する。
- (2) 土壌性エアロゾルは、粒径や高度分布によって若干の違いがあるものの、水蒸気と逆の効果 ($\text{AVI} > 0$) を与える傾向がある。
- (3) 水蒸気の空間分布の広がり比べ、黄砂の分布は局所的である。
- (4) 従って、黄砂の層が厚い場合、放射率の違いから $\text{AVI} > 0$ になり、水蒸気をバックグラウンドにして黄砂の濃い部分を抽出できる。

特に、AVI 法の利点は、熱赤外バンドを用いるので、昼でも夜でも観測できることにあるが、一方、AVI 法の欠点は、ごく稀にはあるが、層の厚い雲、従って高度の高い雲が $\text{AVI} > 0$ となり、層の厚い雲を黄砂と誤認することがあることである。但し、筆者が 2006 年 3~5 月と 2007 年 3~5 月の Terra/Aqua 衛星 Modis データ 100 例以上を処理した結果では、Terra 衛星 Modis では誤認した例はなく、Aqua 衛星 Modis で 2 例だけ誤認していた。その 2 例とは Aqua 衛星の 2006 年 4 月 8 日 4 時 34 分 UT 受信画像 (画像左側の雲) と 2007 年 4 月 3 日 3 時 47 分 UT 受信画像 (画像下側の台風 1 号の雲) である[10,12,13]。

4. 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

4. 1 MODIS モザイク画像の作成

使用したデータは 2006 年 4 月 6 日~11 日の昼の Terra 衛星の Modis データである (註 1 参照)。

まず、Modis データ (MOD02 即ち Calibrated, および、MOD03 即ち Geolocated) を、フィンランド VTT 開発のリモートセンシングデータ処理ソフト HDF-EOS により、アンパック、大気補正 (この処理により、反射バンドの場合は輝度値が 0~100 の実数値に変換され、放射バンドの場合は Kelvin 温度に変換される)、幾何補正 (即ち、Bowtie 処理と等緯経度表示) を行った。

次に、リモートセンシング画像処理ソフト ER Mapper を用いて、トルーカラー画像 ($\text{RGB} = \text{band143}$)、Band31 温度画像 (註 2 参照)、AVI 画像 ($\text{AVI} = \text{band32} - \text{band31}$) のモザイク画像を作成し、Geo Tiff 画像 (即ち、位置情報を持った Tiff 画像) で保存した。なお、トルーカラーのモザイク画像作成では、組み合わせる画像間の色と明るさの調整が難しい。AVI 画像では、AVI の表示範囲を -5~5K, -4~4K, -3~3K, 0~5K としたリニア表示画像や、6 段階に分けた画像を種々作成し、黄砂濃度レベルの適切な分け方について検討した (註 3 参照)。その結果、表 1 のように分けるのが良いと判断し、色分け表示を行った。なお、レベル 0 が「黄砂なし」、レベル 1 以上が「黄砂あり」である。この 6 段階の分類に基づいてコンピュータで計測することにより、黄砂の強度や範囲を議論できるようになる。

(註 1) 福井工業大学あわらキャンパス設置の「テラ・アクア衛星受信システム」[9]で受信したデータと NASA (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data/dataset/MODIS/>) から入手したデータである。

(註 2) Band31 は地表温度と雲の表面温度をバランスよく測定できるバンドである。

(註 3) 黄砂濃度レベルの分類で特に詳しく検討したのは、黄砂の有無の境界値を AVI 値のどこにするかであった。これを 0K, 0.1K, 0.2K, 0.3K, 0.5K とし、トルーカラー画像や気象庁による日本近辺の黄砂観測実況図 (<http://www.jma.go.jp/jp/kosa/>) などと対応させて検討した。「黄砂あり」を 0K 以上とすると黄砂以外の所も含まれ、0.5K 以上とすると黄砂の範囲が狭すぎた。最終的に表 1 に示す 0.3K を採用した。

表1 黄砂濃度レベルの分類 (6段階)

黄砂濃度レベル	AVI の範囲	色分け
(黄砂強い) 黄砂濃度レベル 5	AVI=4K 以上	赤
黄砂濃度レベル 4	AVI=3~4K	橙
黄砂濃度レベル 3	AVI=2~3K	黄
黄砂濃度レベル 2	AVI=1~2K	緑
(黄砂弱い) 黄砂濃度レベル 1	AVI=0.3~1K	水色
(黄砂なし) 黄砂濃度レベル 0	AVI=0.3K 未満	青

最後に、各モザイク画像を GIS ソフト Arc Map で地図 (緯度経度, 国境, 主な川と湖を表示) と重ね表示した。これにより、黄砂の位置関係が明確に分かる。なお、衛星のパス間で時間差が 99 分あるので、画像間で黄砂や雲の不連続が若干ある。

4. 2 処理結果の画像と検討

図 1, 2, 4~7 に 2006 年 4 月 6 日~11 日の昼の北緯 25~65 度, 東経 70~150 度の範囲のトルーカラー画像(a)および AVI 6 段階表示画像(b)を示す。時刻は世界標準時 UT で記した。図 3 に 4 月 7 日夜の北緯 25~65 度, 東経 104~147 度の AVI 6 段階表示画像(a)と band31 温度画像(b)を示す。

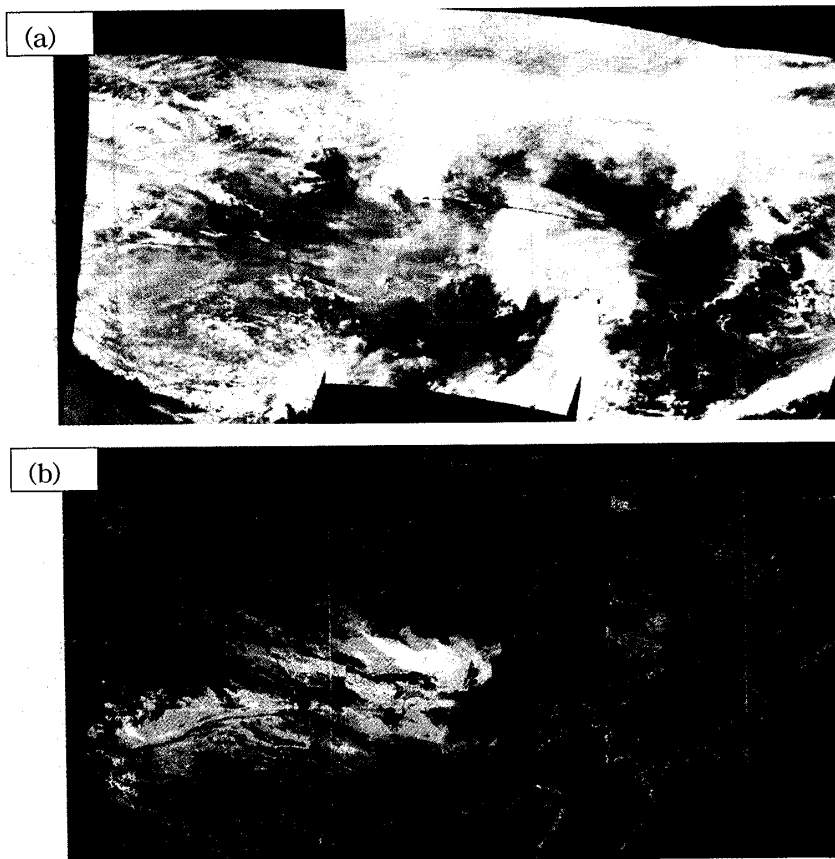


図1. 2006 年 4 月 6 日 1 時 32 分~5 時 0 分 UT 受信 Modis モザイク画像
(a)トルーカラー画像, (b)AVI 6 段階表示画像

図 1 (a)(b)より, 4 月 6 日にはモンゴルのゴビ砂漠で強い黄砂 (レベル 2~4) が発生している。また, モンゴル国内ではゴビ砂漠以外の所でもレベル 1~2 の黄砂が検出されている。モンゴル高原の荒漠化が懸念される現象である。タクラマカン砂漠でも強い黄砂 (レベル 2~5) が発生している。

図 2 (a)(b)より, 4 月 7 日には 6 日の強い黄砂が渤海北側からモンゴル国境の範囲に到達し, 黄砂濃度レベルが 2~5 と強い。即ち黄砂は 1 日で約 1000km 移動したのであるが, トルーカラー画像(a)ではそれに加えて新たに黄砂が巻き上げられているように見える。その黄砂の発生源は, 雲の下に隠れており, トルーカラー画像(a)と AVI 画像(b)だけでは検出できないが, band31 温度画像 (d) も考慮すると, ロシアとモンゴルと中国が接する国境付近であると推測できる。これは, 温度画像でその位置

の温度が最も低い (約 212K) ことより, 雲の雲頂高度が高いことが分かり, 上昇気流の発生が推測され, 従ってその位置で黄砂を巻き上げている可能性が示される。この推測は, 気象庁の地上解析天気図 (ASAS JMH 070000UTC APR. 2006 SURFACE ANALYSIS) で, その位置付近に低気圧があるので, 正しいと言える。雲頂高度は, band31 によるその近くの地上温度が約 275~283K である (標高は約 0.6km である) ので, 湿潤大気の温度下降率 6.5 度/km を用いると, $(275-212)/6.5+0.6=10.3\text{km}$ から $(283-212)/6.5+0.6=11.5\text{km}$ 程度

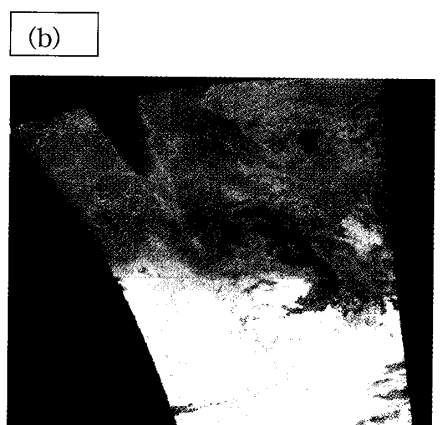
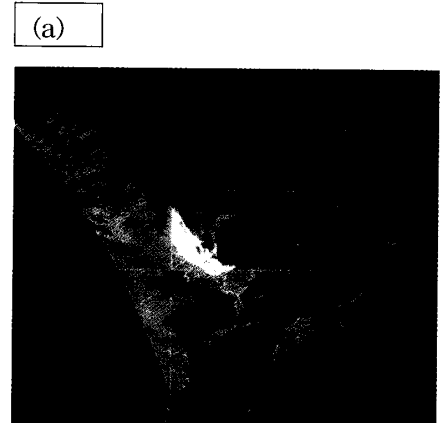
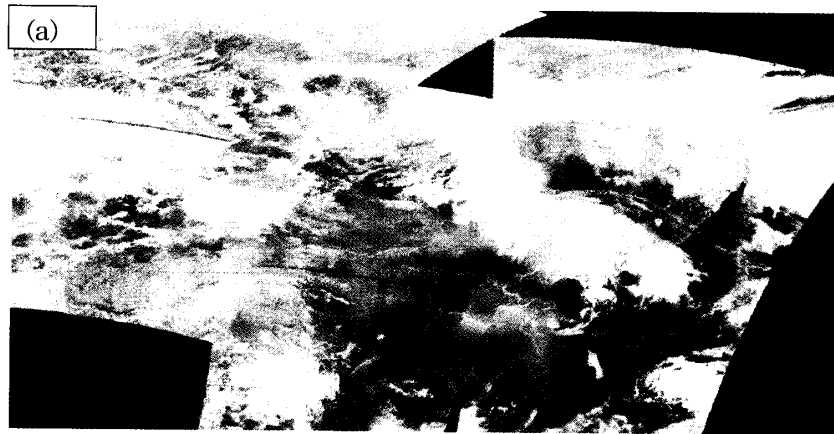


図3. 2006年4月7日(夜)
13時17分～31分 UT 受信
Modis 画像
(a)AVI 6 段階表示画像,
(b)band31 温度画像

温度
320K
265K
210K

図2. 2006年4月7日2時15分～5時40分 UT 受信 Modis モザイク画像
(a)トゥルーカラー画像, (b)AVI 6 段階表示画像, (c)AVI (-5～5K) リニア表示画像, (d)band31 温度画像

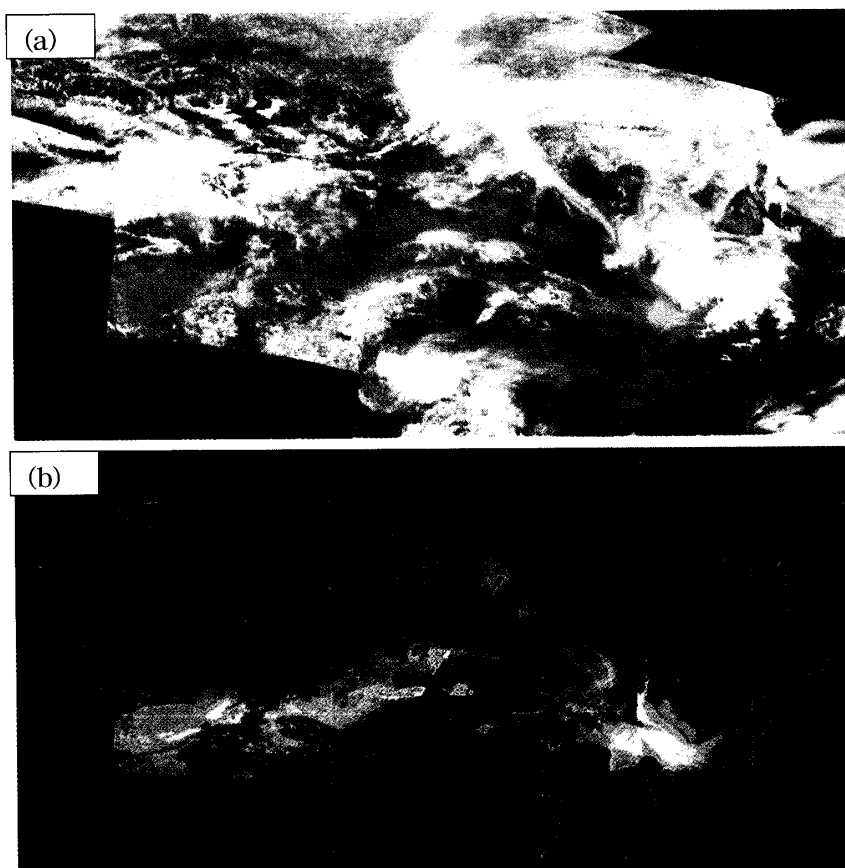


図4. 2006年4月8日1時21分～6時20分 UT 受信 Modis モザイク画像
(a) トルーカラー画像, (b) AVI 6 段階表示画像

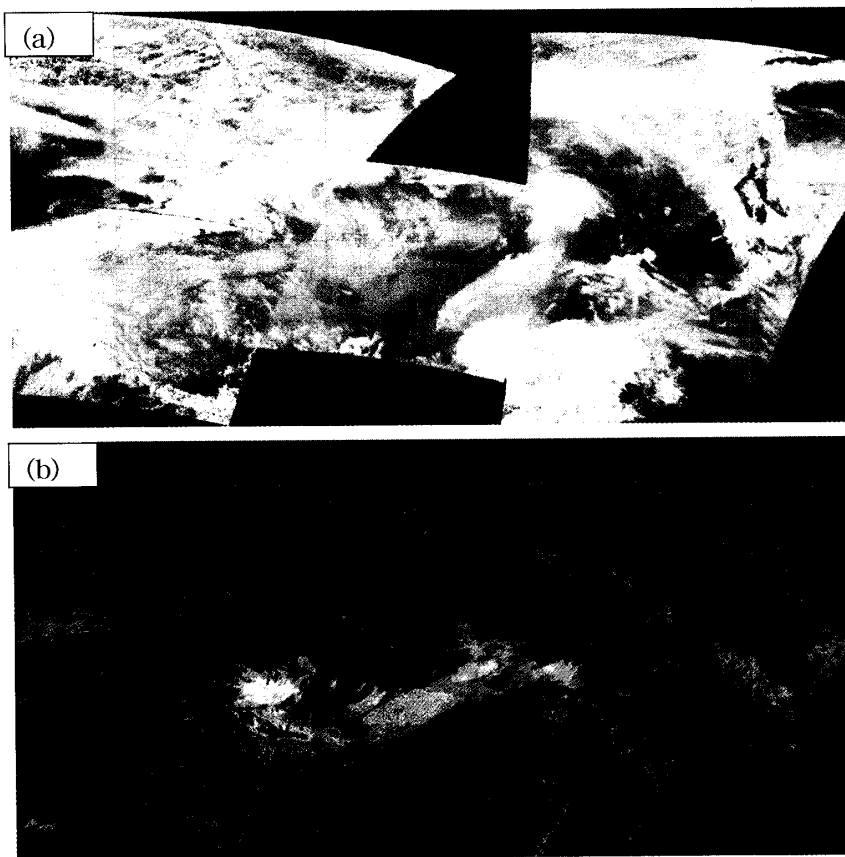


図5. 2006年4月9日2時2分～7時5分 UT 受信 Modis モザイク画像
(a) トルーカラー画像, (b) AVI 6 段階表示画像

と計算される。なお、この強い黄砂以外にもレベル1～3の黄砂がゴビ砂漠全体に広く存在する。タクラマカン砂漠では強い黄砂（レベル2～5）が発生している。

図2(c)の AVI リニア画像は参考用に示したもので、緑が AVI=0 であり、水色～青色の所は AVI 法の原理より、水蒸気が多い場所である。リニア画像のままでも、黄緑～黄～橙～赤色が黄砂のある所で、赤色になるほど黄砂の強い所と判断できるが、段階評価はできない。定量的判定のためには、図2(b)のような段階に分ける必要がある。

図3(a)(b)は4月7日夜の画像で、強い黄砂（レベル2～5）が中国から朝鮮半島に南下しようとしている。この黄砂は7日昼の画像（図2(b)）で強い黄砂と判断した領域が、気流に乗って半日で約500km 移動してきたものである。

図4(a)(b)は4月8日昼の画像である。7日夜の強い黄砂は8日朝までに北朝鮮、韓国を通り日本海に到達した。図4(b)では、この黄砂と、8日昼に新たに西から東へ動く黄砂が中国・山東半島から韓国を通り日本海へ出た黄砂領域が、日本海で合流し、日本へ流入している。即ち、韓国では、8日朝までと昼の2回強い黄砂に襲われ、この日の黄砂を「スーパー黄砂」、「黄砂テロ」と呼んでいる。韓国と日本の黄砂レベルは2～5と強い。ゴビ砂漠、タクラマカン砂漠の黄砂レベルは1～4である。

図4(b)を詳細に検討すると、韓国と日本海の境界、日本海と日本の境界で若干ではあるがレベル値の不連続があり、日本海の方がレベル値が低い。これは、陸地に比べ海上の方が水蒸気が多いため、AVI 法の原理より、水蒸気が多い

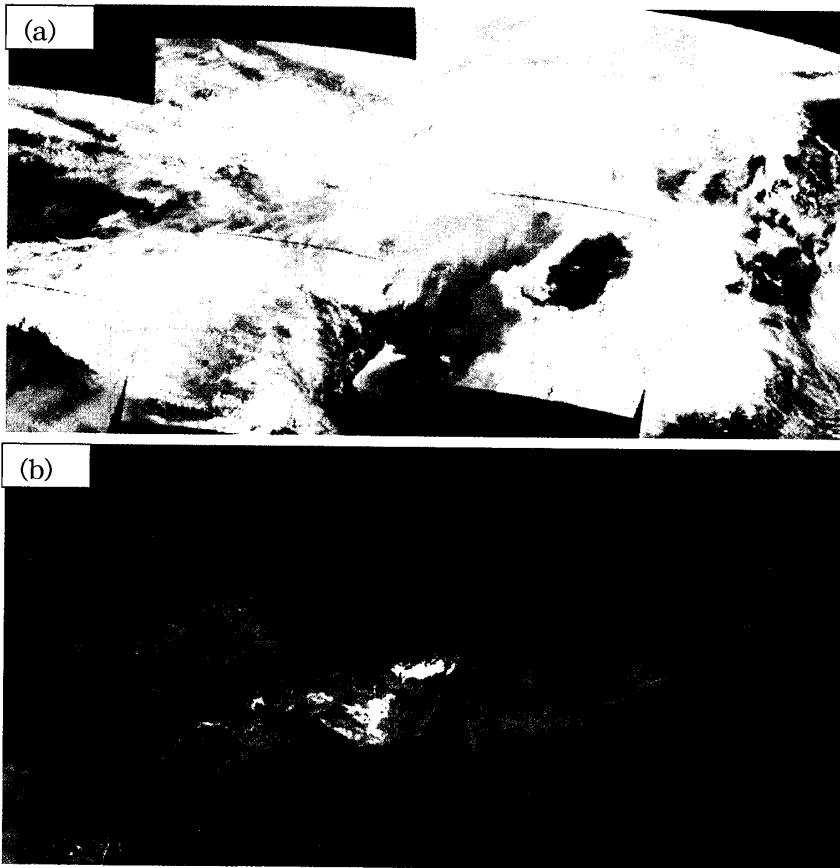


図6. 2006年4月10日1時7分～6時15分 UT 受信 Modis モザイク画像
(a) トルーカラー画像, (b) AVI 6 段階表示画像

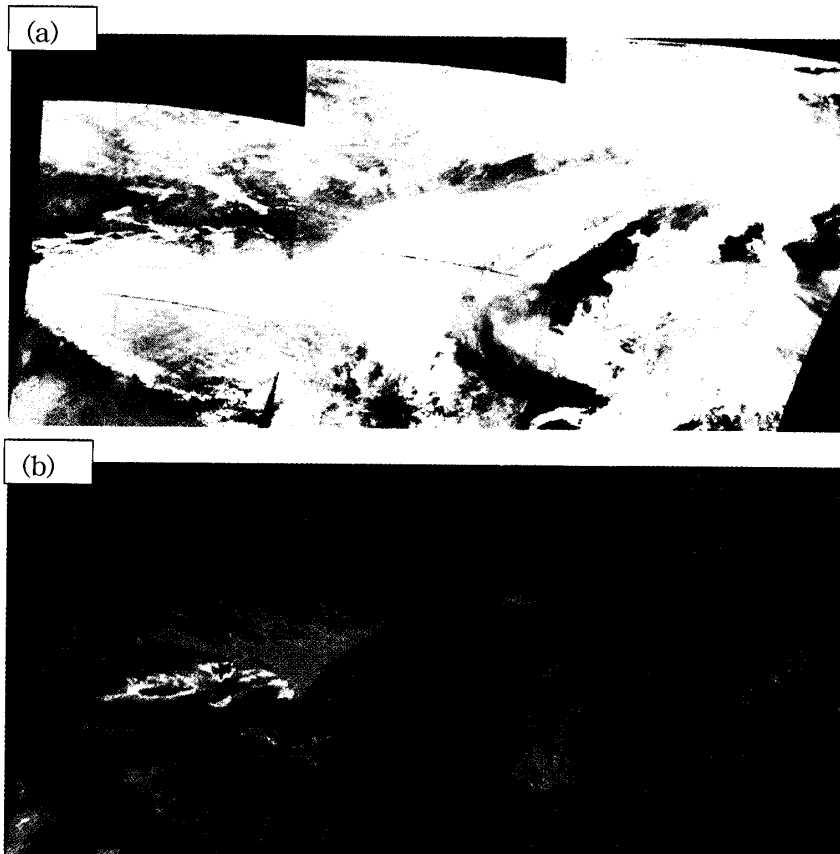


図7. 2006年4月11日1時50分～5時20分 UT 受信 Modis モザイク画像
(a) トルーカラー画像, (b) AVI 6 段階表示画像

ほど AVI 値が低くなるからである。AVI リニア画像で調べると、陸地に比べ海上の方が、約 0.2～2.3K 低い。

図5(a)(b)は4月9日の画像で、強い黄砂（レベル 2～5）が甘粛省・酒泉市付近にある。実際、9日に酒泉市で建設現場に向かっていていた作業員が砂嵐に巻き込まれ、2人が死亡している。図5(b)ではタクラマカン砂漠の黄砂は殆ど検出されていない（レベル 0～2）が、図5(a)では薄い雲の下に黄砂が見える。これは雲の水蒸気の影響で AVI 値が低くなったためである。

図6(a)(b)は4月10日の画像で、ゴビ砂漠（より正確に言えば、中国のバーダンジン砂漠、トングリ砂漠、ウランブハ砂漠）で強い黄砂（レベル 2～5）が発生している。タクラマカン砂漠では、図6(a) トルーカラー画像で雲の下に強い黄砂が見えるのであるが、図6(b) AVI 画像では、9日と同じ理由で、黄砂を殆ど検出できていない。この黄砂は図6(a)を見れば敦煌付近まで続いており、敦煌付近の雲の隙間より AVI 画像でレベル 2～5 の黄砂が検出される。

また、報道[14]では新疆東部の小草湖～紅層の地域で激しい砂嵐があったとされている（註4参照）。図6(a)でその位置を見ると、タクラマカン砂漠から続く強い黄砂の存在が確認できる。

（註4）9日19時（中国時間）頃、ウルムチ駅から北京西駅に向かう21両編成の特快列車 T70 号が、新疆東部の小草湖～紅層の間で砂嵐（最大瞬間風速約 51m/s）に巻き込まれ、約24時間立ち往生した（列車左側の窓は全て割れたが、乗客約700人は全員無事であった）。従って、図6の時刻でも T70 号は激しい砂嵐の中にあることになる。

図 7 (a)(b) は 4 月 11 日の画像である。10 日の画像では強い黄砂が東進し、韓国、日本へ到達する可能性があったが、実際には 11 日の図 7 (a) を見れば分かるように、東北方向への強い気流が発生し、黄砂は樺太の北の方向へ運ばれ、韓国、日本へは来なかった。タクラマカン砂漠、ゴビ砂漠では強い黄砂（レベル 5）が検出されている。

以上、2006 年 4 月 6 日～11 日の処理画像を示し、画像から読み取った黄砂状況と実際に起きた出来事について記し、両者に矛盾がないことを示した。いずれの日もタクラマカン砂漠、ゴビ砂漠で黄砂が検出されている。4 月 6 日、8～11 日のチベット高原で黄砂が検出（レベル 1～2）されている。これはチベット高原も黄砂の発生源の 1 つであることの証拠である。4 月 10 日、11 日の AVI 6 段階表示画像で左下に見えるレベル 2～5 の黄砂はタール砂漠（インド・パキスタンにまたがる砂漠）によるものである。表 2 に、AVI 6 段階表示画像で検出された各地の黄砂濃度レベルの最大値をまとめている。

表 2 AVI 6 段階表示画像で検出された各地の黄砂濃度レベルの最大値

場所	4 月 6 日	4 月 7 日	4 月 8 日	4 月 9 日	4 月 10 日	4 月 11 日
タクラマカン砂漠	5	5	3	2 *	3 *	5
ゴビ砂漠	4	5	3	5	5	5
韓国	1	1	5	1	0	1
日本	1	1	5	2	1	1

*：トルーカラー画像では強い黄砂が雲の下に見えるのであるが、雲の存在により AVI 値が低くなっている。

4. 3 黄砂濃度レベルごとのピクセル数

図 1～7 を見れば、黄砂は北緯 40 度付近を中心に、北緯 55 度（バイカル湖の北部）付近から南は 25 度付近までに分布している。そこで、リモートセンシング処理ソフト ER Mapper を用いて、AVI 6 段階表示画像の北緯 25～55 度、東経 70～150 度の範囲を等緯経度表示形式のままで、3000×8000 ピクセルの Geo Tiff 画像で保存した。その画像を汎用画像処理ソフト Photoshop で読み込み、黄砂レベルごと（即ち、色ごと）のピクセル数を計測した。なお、図 1～7 を見れば衛星の受信範囲外の部分（即ち黒の部分）には殆ど黄砂が存在しないと推測されるので、その部分もレベル 0 としてカウントした。1 ピクセルは経度の 0.01 度、緯度の 0.01 度に対応させている。結果を表 3 に示す。黄砂の分布が北緯 40 度付近を中心に分布していることを考慮すれば、レベル 1～5 のピクセル数は黄砂分布の概算面積 [km^2] にほぼ等しい。

表 3 北緯 25～55 度、東経 70～150 度の範囲の黄砂検出ピクセル数（全ピクセル数=24,000,000 個）

黄砂濃度レベル	4 月 6 日	4 月 7 日	4 月 8 日	4 月 9 日	4 月 10 日	4 月 11 日
5 (AVI : 4K 以上)	31	4,643	219	757	1,924	59,714
4 (AVI : 3～4K)	8,714	36,813	28,772	16,290	43,585	71,195
3 (AVI : 2～3K)	185,768	124,495	195,975	82,931	181,814	108,567
2 (AVI : 1～2K)	1,133,496	877,795	768,826	509,592	495,020	636,890
1 (AVI : 0.3～1K)	2,003,841	2,109,677	1,563,030	1,890,671	1,569,288	1,617,834
0 (AVI : 0.3K 未満)	20,668,150	20,846,577	21,443,178	21,499,759	21,708,369	21,505,800

5. 検討

今後の課題として、本文で述べた AVI 法に基づく黄砂濃度レベル 0～5 が実際の何 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に対応するのかを明らかにする必要がある。韓国気象庁からの報道による数値例を示すと、韓国ソウルの 4 月 7 日 23 時 UT に $665 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、8 日 4 時 UT に $1077 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、14 時 UT に $2015 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、ゴビ砂漠の 6 日に最大 $9974 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、10 日 4 時 UT に $9959 \mu\text{g}/\text{m}^3$ である。本論文での判定では、ゴビ砂漠の 6 日 3 時 15 分 UT（図 1）はレベル 4、10 日 4 時 30 分 UT（図 6）はレベル 5 であり、韓国ソウルの 8 日 3 時 5 分 UT（図 4）はレベル 3 である。従って、レベル 3 は $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度、レベル 5 は $10000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度ということと言える。

6. むすび

本研究の成果は以下の通りまとめられる。

- (1)黄砂濃度レベルを0（黄砂なし）から5（黄砂強い）までの6段階に分けたAVIカラー表示モザイク画像を作成したことにより、タクラマカン砂漠から日本までの広範囲の黄砂の状況が表示され、特にコンピュータによるピクセル数計測が可能になり、分布と強度の定量化が可能となった。
- (2)黄砂検出はAVI法に基づくので、昼夜ともに対応できる（図3参照）。
- (3)黄砂濃度レベルの6段階分類で、適切なAVI値の範囲を決定した。この場合「黄砂あり」を0.3K以上とした（表1参照）。
- (4)トルーカラー、AVI、温度画像のいずれのモザイク画像もGISソフトにより地図と重ね表示し、位置関係を明示した。
- (5)昼間においては、AVI画像、トルーカラー画像、温度画像を比較することにより、雲の下に隠れた黄砂の発生すなわち巻き上げ場所の推定が可能であることが示された（図2参照）。
- (6)水蒸気の影響により、陸地に比べ海上では、AVI値が約0.2～2.3K低い（図4参照）。
- (7)AVI 6段階表示モザイク画像を作成する手法を2006年4月上旬の黄砂検出に適用し、処理画像から読み取った黄砂状況と実際に起きた出来事を対比し、両者に矛盾がないことを示し、本研究で取ったAVI 6段階表示法の有効性を示した。
- (8)黄砂濃度レベルごとの概算の面積[km²]（ピクセル数に等しい）を示すことができた（表3参照）。

謝辞 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「次世代環境調和型科学技術の研究開発（2005～2009年度）」の補助を受けたことを記し、謝意を表す。

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]Ministry of the Environment, Japan：“Dust and Sandstorms (Pamphlet)”，<http://www.env.go.jp/en/earth/dss/pamph/pdf/full.pdf>
- [3]人民網日本語版：“今年の黄砂はなぜ深刻か(1) 冬場の干ばつ，砂漠化”，http://www.people.ne.jp/2006/04/19/jp20060419_59110.html（2006年4月19日）
- [4]木下，西之園，矢野，飯野，鶴野：“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）
- [5]飯野，矢野，木下：“AVHRR Channel 3 データを用いた鉱物質エアロゾルと雲との識別の試み”，日本リモートセンシング学会第33回学術講演会論文集，pp.71-72（2002-11）
- [6]西町，飯野，福原，片野田，木下，後藤：“2006年春の黄砂輸送の静止気象衛星による解析”，日本リモートセンシング学会第41回学術講演会論文集，pp.103-104（2006-11）
- [7]宋，朴，安田：“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）
- [8]加藤，中田：“テラ・アクア衛星 MODIS データによる黄砂画像処理の検討”，平成18年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集 CD，F-96（2006-09）
- [9]加藤：“福井豪雨・黄砂・エチゼンクラゲに関するリモートセンシング画像解析”，福井工業大学オープン・リサーチ・センター研究成果中間報告書（平成17年4月～平成19年7月），pp.151-164（2007-08）
- [10]加藤：“MODIS による黄砂検出のための雲・雪原などとの識別画像表示”，平成19年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集 CD，F-76（2007-09）
- [11]加藤：“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”，ibid. F-77（2007-09）
- [12]仲村，加藤：“衛星リモートセンシングによる黄砂と光化学スモッグの検出”，電気関係学会北陸支部平成19年度学生による研究発表会講演論文集，F-37，p.179（2008-03）
- [13]加藤：“衛星受信と2006年7月豪雨・黄砂・エチゼンクラゲに関するリモートセンシング応用”，平成19年度福井工業大学オープン・リサーチ・センター公開研究成果発表会発表要旨集，pp.29-30（2008-03）
- [14]天津港保税區交警大隊：“列車遭遇沙塵暴”，<http://jjdd.big5.tjftz.gov.cn/system/2006/12/14/010007462.shtml>

（平成20年3月31日受理）