

MODIS 衛星データを用いた黄砂と PM2.5 と雲の識別法*

加藤 芳信^{*1}

Discrimination Methods of Asian Dust, PM2.5 and Clouds Using MODIS Data

Yoshinobu KATO^{*1}

^{*1} Faculty of Sports and Health Sciences, Department of Sports and Health Sciences

Asian dust (i.e., dust and sandstorm: DSS) can be detected by AVI method. AVI is defined as $AVI=T12-T11$, where T12 and T11 are the brightness temperatures at 12 μ m and 11 μ m wave lengths, respectively. But AVI method cannot detect PM2.5 air pollution. The PM2.5 detection methods {R, G, B = band10, band 9, T11}, etc. using MODIS data can detect PM2.5, but are not suitable for DSS detection. In this paper, we propose the simple methods for the discrimination of DSS, PM2.5 and clouds {R, G, B = AVI, band10+band 9, T11}, etc. In these composite color images, DSS is displayed in pink, and PM2.5 is displayed in light blue, and clouds are displayed in green, red or purple.

Key Words : Asian dust, Dust and sandstorm, PM2.5, Air pollution, MODIS, AVI, DustRGB, Composite color image

1. 緒 言

黄砂 (Asian dust または Dust and sandstorms (略称 DSS)) は, 中国やモンゴル, カザフスタン等の乾燥・半乾燥地域で強風により発生する. PM2.5 (Particulate Matter 2.5, 微小粒子状物質 2.5) 大気汚染は, 中国の都市・工業地域で近年たびたび発生する. 黄砂も PM2.5 も西風によって運ばれ, 時々日本に到達する. 黄砂と PM2.5 は人間や動物の健康, 交通システム, 地球温暖化などに影響を与える⁽¹⁾⁽⁶⁾.

黄砂は衛星リモートセンシング技術の AVI 法を用いることにより検出できる⁽⁷⁾⁽⁸⁾. AVI (Aerosol Vapor Index, エアロゾル-水蒸気 指標) は $AVI=T12-T11$ と定義され, T12 と T11 はそれぞれ 12 μ m 波長と 11 μ m 波長での輝度温度である. MODIS データの場合, T12 と T11 はそれぞれ band32 と band31 に対応する⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾. AVI 法はミー散乱理論と放射伝達理論に基づいている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾. AVI 法の欠点は, ごくまれにはあるが, 厚い雲を黄砂と誤認することである⁽⁸⁾. 2つの方法, 即ち, {R, G, B = AVI, band7-band1, T11}⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ と {R, G, B = AVI, T11-T8.5, T11}⁽¹⁵⁾, では黄砂と雲を識別できるが, PM2.5 大気汚染を検出できない. ここで T8.5 は 8.5 μ m 波長での輝度温度である.

筆者⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾が提案した PM2.5 検出法の {R, G, B = band10, band 9, T11} などでは, PM2.5 と雲を識別できるが, 黄砂検出には適当でない.

そこで, 本論文では, まず第2章で黄砂検出法, 第3章で PM2.5 検出法について概要と特徴及び問題点を説明し (一部, 第5章で説明), その後, 第5章で黄砂, PM2.5, 雲を識別するための方法について考察し, 提案する.

2. MODIS データを用いた黄砂検出法

2.1 AVI 法

MODIS には 36 個のバンドがあるが, その一部を Table 1 に示す. AVI 法は昼と夜の衛星画像において黄砂を検出できる. AVI は

$$AVI=T12-T11 \quad \text{Eq. (1)}$$

と定義され, T12 と T11 はそれぞれ 12 μ m 波長熱赤外バンド (band32) と 11 μ m 波長熱赤外バンド (band31) の

* 原稿受付 2019年3月29日

^{*1} スポーツ健康科学部 スポーツ健康科学科
E-mail: y-kato@fukui-ut.ac.jp

輝度温度（単位はケルビン K）である。雲や水蒸気の影響が無視できる場合には、基本的に AVI>0 で黄砂ありと判定される。AVI 法の黄砂検出原理は次のように説明できる^{(11),(12)}。黄砂には 1~10 μ m の粒径のことが多い。地上から放射された熱赤外線が黄砂の層を通るときミー散乱により、12 μ m 波長熱赤外線よりも 11 μ m 波長熱赤外線の方がより減衰して、人工衛星のセンサに届くのである。

AVI 法の欠点は、ごく稀にはあるが、厚い雲を黄砂と誤認することである⁽⁸⁾。筆者^{(13),(14)}は、井上⁽¹⁸⁾の BTD vs. T11 グラフを用いて、通常の雲は AVI<0 となるが、特別な場合、即ち、雲の粒径が非常に大きく、かつ、雲の光学的厚さが非常に大きい場合には AVI>0 となることがあることを説明した。ここで BTD=-AVI=T11-T12 である。Fig. 1 に AVI>0 の雲を含む画像例を示す。Fig. 1(b)に示すように、左側の雲は AVI>0 であり、AVI 法では黄砂であると誤認している。

Fig. 2 に Fig. 1 に示した画像のヒストグラムを示す。ヒストグラムを示した理由は、衛星画像を RGB 合成カラー画像や擬似カラー画像で作成する場合、表示範囲（最小値と最大値）およびヒストグラム変換の方法（linear 変換や logarithmic 変換など）の与え方が重要であるためである。

<ヒストグラム及びヒストグラム変換についての補足説明>

まず、Fig.2 のタイトルの下に付記してある文について説明する。例えば「Fig.1(a) has histograms of Figs.2(a),(b),(c).」は、Fig.1(a)のフルカラー画像（24 ビット RGB 合成カラー画像）のヒストグラムが、R=Fig.2(a) に示したものの、G=Fig.2(b)に示したものの、B=Fig.2(c)に示したものの、であることを意味する。また、例えば「Fig.1(b) has a histogram of Fig.2(d).」は、Fig.1(b)の AVI 画像（8 ビット擬似カラー画像）のヒストグラムが Fig.2(d)に示したものであることを意味する。次に、ヒストグラムの見方について説明する。ヒストグラムの下側（横軸）の左四角枠内の数値が表示範囲の最小値、右四角枠内の数値が表示範囲の最大値を示す。色のついてある部分が横軸の値に対する画素の頻度分布を示す。linear 変換式（右上がりの直線）または logarithmic 変換式（右上がりのカーブ）により、横軸の値が縦軸に示す 0~255（即ち、8 ビット）の値に変換され、RGB 合成カラー画像または擬似カラー画像が作成される。変換の結果の頻度分布は灰色線のグラフで表される。なお、当然、linear 変換の結果の頻度分布は元の頻度分布と同じである。以下、Fig.3 から Fig.11 についても同様である。

Table 1. Bands of MODIS and their observation wavelengths and resolutions

| Band | Observation wavelength | Resolution |
|------|--|------------|
| 1 | 620 — 670 nm (red) | 250m |
| 2 | 841 — 876 nm (near infrared) | 250m |
| 3 | 459 — 479 nm (blue-green) | 500m |
| 4 | 545 — 565 nm (green-yellow) | 500m |
| 5 | 1,230 — 1,250 nm (near infrared) | 500m |
| 6 | 1,628 — 1,652 nm (middle infrared) | 500m |
| 7 | 2,105 — 2,155 nm (middle infrared) | 500m |
| 8 | 405 — 420 nm (purple-blue) | 1000m |
| 9 | 438 — 448 nm (blue) | 1000m |
| 10 | 483 — 493 nm (blue-green) | 1000m |
| 29 | 8.400 — 8.700 μ m (thermal infrared) | 1000m |
| 31 | 10.780 — 11.280 μ m (thermal infrared) | 1000m |
| 32 | 11.770 — 12.270 μ m (thermal infrared) | 1000m |

2.2 黄砂と雲などの識別法

筆者^{(13),(14)}は昼の MODIS の場合の黄砂・雲などの識別法

$$\{R, G, B = AVI, \text{band7-band1}, T11\} \quad \text{Eq. (2)}$$

を提案している。この画像での対象物と色との関係は次のようである。(1)黄砂は、明るい黄色、または明るいピンクである。(2)通常の水雲は、RGB のそれぞれの値が比較的小さいため、明るい青、緑、橙、茶または紫である。

(3)通常の氷雲は、RGB のそれぞれの値が比較的小さいため、緑、橙、茶または紫である。(4)大きな光学的厚さをもつ水雲は紫である。(5)大きな光学的厚さを持つ氷雲は明るい赤～赤橙である。(6)雪原と氷は紫である。(7)温かい地面は青、冷たい地面は緑である。(8)温かい海は青、冷たい海は緑である。Fig. 1(c)に示すように、左側の雲は赤橙色であるため、正しく雲と判定されている。

筆者^{(13),(14)}は夜の MODIS の場合の黄砂・雲などの識別法

$$\{R, G, B = T11, AVI, \text{none}\}$$

$$\text{Eq. (3)}$$

も提案している。この画像での対象物と色との関係は次のようである。(1)黄砂は明るい黄緑である。(2)氷雲は、低い温度なので、緑である。(3)水雲は暗い黄色である。Fig. 3 に画像例を示す。Fig. 3(c)に示すように、黄砂は明るい黄緑色で表示されている。

Fig. 4 に Fig. 3 に示した画像のヒストグラムを示す。

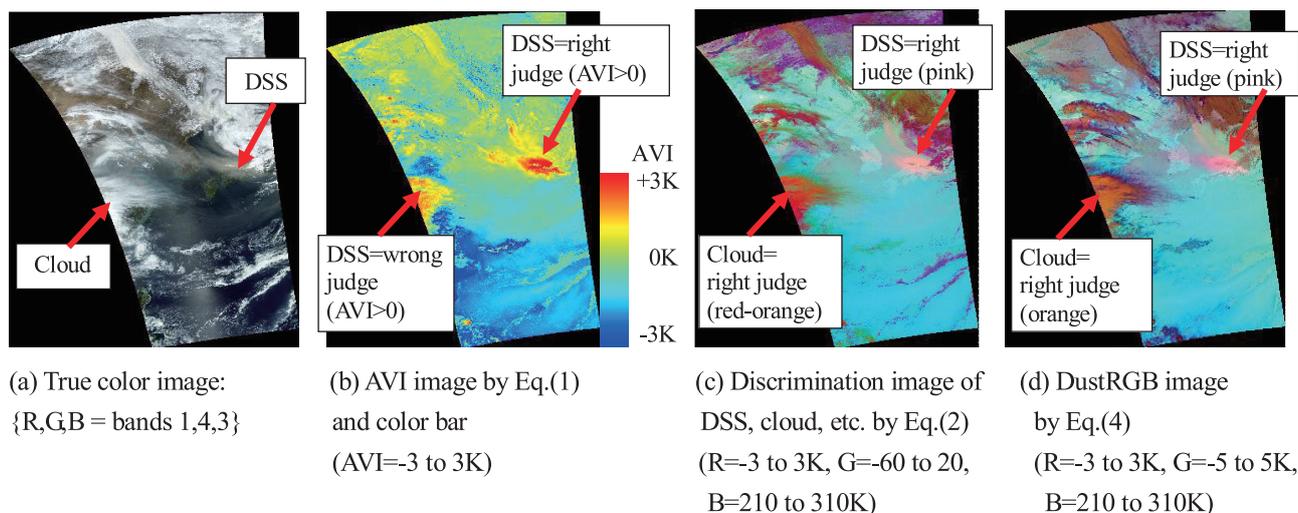


Fig. 1. Aqua-MODIS at 4:34-4:47 UT on April 8, 2006 (9.57-57.88°N, 102.08-143.65°E).

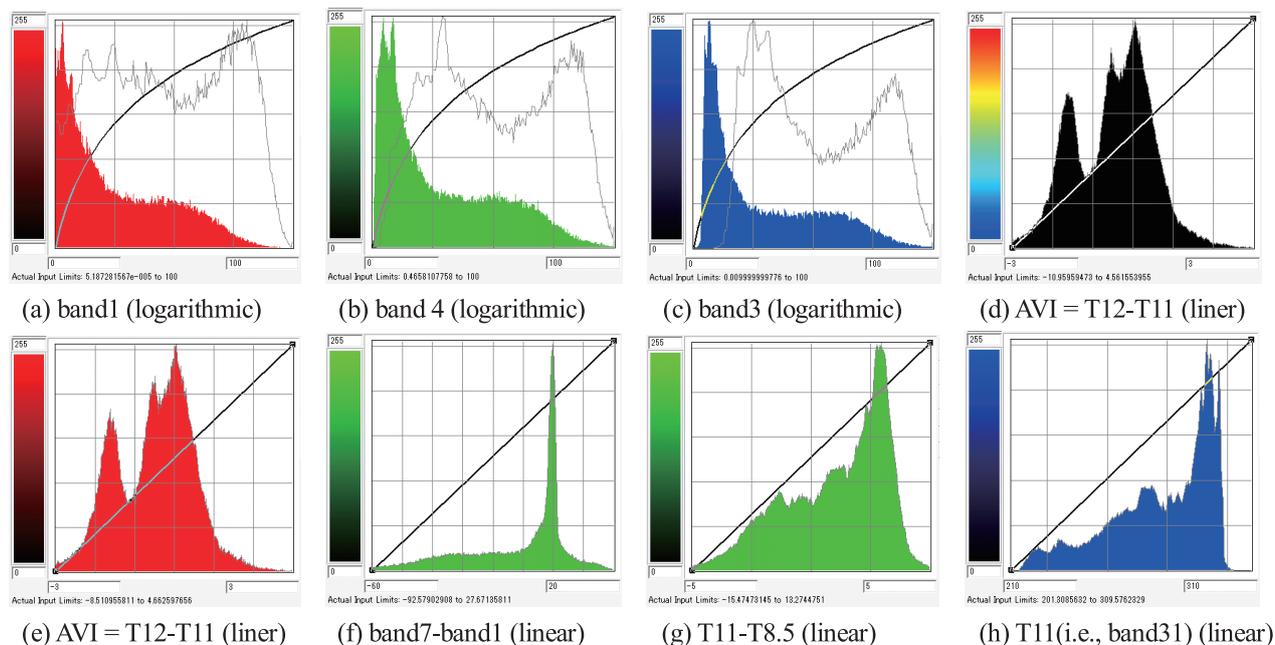


Fig. 2. Histograms for images shown in Fig. 1.

(Fig.1(a) has histograms of Figs.2(a),(b),(c). Fig.1(b) has a histogram of Fig.2(d). Fig.1(c) has histograms of Figs.2(e),(f),(h). Fig.1(d) has histograms of Fig.2(e),(g),(h).)

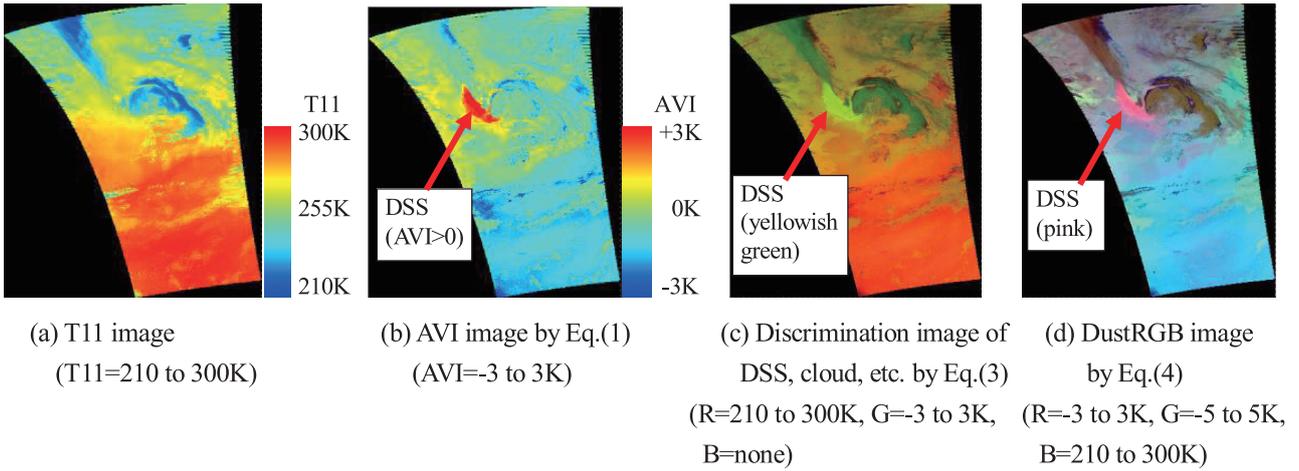


Fig. 3. Terra-MODIS at 13:17-13:31 UT on April 7, 2006 (9.22-59.56°N, 103.65-146.84°E).

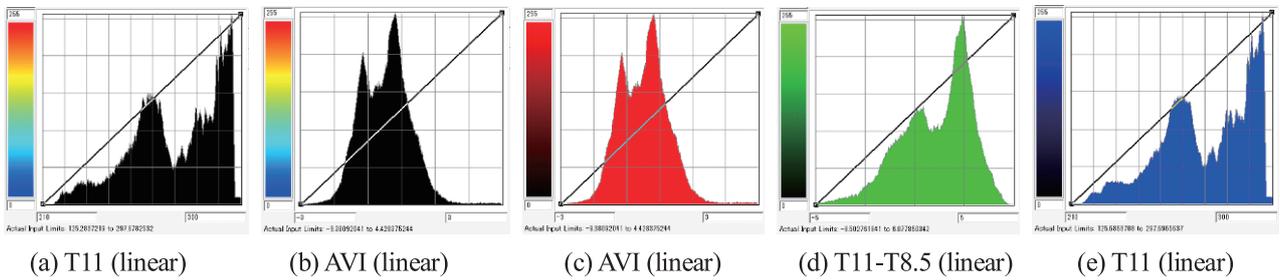


Fig. 4. Histograms for images shown in Fig. 3.

(Fig.3(a) has a histogram of Fig.4(a). Fig.3(b) has a histogram of Fig.4(b). Fig.3(c) has histograms of Figs.4(e),(c). Fig.3(d) has histograms of Figs.4(c),(d),(e).)

2.3 DustRGB 法

DustRGB 法は 2011 年に EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, 欧州気象衛星開発機構) により, 黄砂, 雲・砂漠などを識別するために提案された⁽¹⁵⁾:

$$\{R, G, B = AVI, T11-T8.5, T11\} \quad \text{Eq. (4)}$$

ここで T8.5 は $8.5 \mu m$ 波長での輝度温度である. DustRGB 法の特徴は熱赤外バンドだけを用いるため, 昼でも夜でも適用できることである. この DustRGB 法を EUMETSAT は Meteosat 衛星に実用しており, また, 日本の気象衛星センターは 2017 年よりひまわり 8 号衛星に実用している. T8.5 は MODIS では Table 1 に示すように band29 に対応する.

本節では DustRGB 法 (Eq. (4)) と筆者の黄砂・雲などの識別法 (Eq. (2)と Eq. (3)) との比較を行う. 特に, (1) 昼の場合, $AVI > 0$ の雲を含む画像でも DustRGB では黄砂と雲を正しく識別できるのか, (2)夜の場合の DustRGB の特徴は何か, を調べる⁽¹⁹⁾.

2.3.1 昼の場合の DustRGB 法

Fig. 1 の左側の雲が $AVI > 0$ の雲である. Fig. 1(d)では, 左側の雲は橙色であるので, 正しく雲と判定されており, また黄砂はピンクで表示されている. 従って, DustRGB 法は $AVI > 0$ の雲を含む画像でも黄砂と雲を正しく識別できると結論する.

次に, 昼の場合の DustRGB 法 (Fig. 1(d)) と筆者の黄砂・雲などの識別法 (Fig. 1(c)) との比較であるが, 識別対象物 (黄砂, 雲, 雪, 砂漠, 地面, 海など) の観点から比べると, 筆者の黄砂・雲などの識別法 (Fig. 1(c)) の方が少しだけ優れている. (筆者の黄砂・雲などの識別法の方が, 雪原の検出, 雲の種類分け (通常の水雲・氷雲, 大きな光学的厚さを持つ水雲・氷雲) の点で優れている.) その原因は, 筆者の黄砂・雲などの識別法では可視バンド (band1), 中間赤外バンド (band7), 熱赤外バンド (band31 と band32) を使っているのに対し, DustRGB 法では熱赤外バンド (band29, band31, band32) だけを使っているためである.

<補足>筆者も文献^{(13),(14)}の研究時, band31-band29 (T11-T8.5 のこと) の画像を検討したが, 黄砂と砂漠を検出し, 区別できなかったので band31-band29 は黄砂検出には使えないと判断してしまい, band32-band31 (AVI のこと) と昼だけ使える band7-band1 を採用したのであった. 一方, DustRGB 法では, band31-band29 が黄砂と砂漠を検出し, band32-band31 が黄砂を検出するのなら, $R=band32-band31$, $G=band31-band29$ とすれば, 昼でも夜でも, 色で黄砂と砂漠を区別できると考えたのである.

2.3.2 夜の場合の DustRGB 法

夜の場合の DustRGB 法 (Fig. 3(d)) と筆者の黄砂・雲などの識別法 (Fig. 3(c)) との比較であるが, 識別対象物の観点から比べると, DustRGB 法 (Fig. 3(d)) の方が優れている. (筆者の黄砂・雲などの識別法も DustRGB 法も黄砂と雲を識別できることは同じであるが, DustRGB 法は砂漠を識別できる点で優れている.) その原因は Fig. 3(c)は熱赤外の 2 バンド (band31 と band32) だけを使っているのに対し, Fig. 3(d)では熱赤外の 3 バンド (band29, band31, band32) を使っているためである.

さらに夜の場合の DustRGB 法には優れた特長がある. 即ち, 黄砂の色により, 黄砂の高度を次のように推定できるのである: (1)マゼンタ (赤紫) は 4-5km, (2)ピンクは 2-3km, (3)紫は 0-1km, である. Fig.3(d)では黄砂の色がピンクで表示されているため, 黄砂の高度は 2-3km と推定される.

3. MODIS データを用いた PM2.5 検出法

筆者^{(16),(17)} は PM2.5 検出のためのシンプルな方法として

$$\{R, G, B = \text{band10, band9, T11}\} \quad \text{Eq.(5)}$$

$$\{R, G, B = \text{band10, band8, T11}\} \quad \text{Eq.(6)}$$

$$\{R, G, B = \text{band9, band8, T11}\} \quad \text{Eq.(7)}$$

の 3 つを提案した. どの式を選ぶかの選定基準は, band10, band9, band8 で null 値の個数が少ないバンド 2 個を選ぶことである. その理由は, band10, band9, band8 の観測波長帯 (Table 1 参照) で人工衛星のセンサが観測するとき, 雲のところで観測範囲外の強度になり, その結果, 観測値が null 値となることがあるからである.

これらの PM2.5 の検出原理は次のように説明できる^{(16),(17)}. 文献⁽²⁰⁾では大気中の主要なエアロゾル種として, 黒色炭素, 海塩粒子, 鉍物ダスト (黄砂のこと), 及び, 黒色炭素を除いた大気汚染粒子 (硫酸塩, 硝酸塩, 有機エアロゾルの混合物), を仮定し, それらの光学モデル {形状, モード半径 R_m , 標準偏差 S_d , 355nm 及び 532nm 波長での複素屈折率} として, 黒色炭素 {球形, 0.05 μm , 2.0, 1.75-i0.5 及び 1.76-i0.4}, 鉍物ダスト {回転楕円体, 2.0 μm , 2.2, 1.51-i0.009 及び 1.51-i0.003}, 大気汚染粒子 {球形, 0.19 μm , 1.6, 1.42-i0.002 及び 1.41-i0.002} を仮定している. また, 個々のエアロゾル種の体積粒径分布としてログノーマル分布 (対数正規分布) を仮定している. 従って, モード径 (最頻の粒径) は $2R_m$ であるので, 大気汚染粒子の最頻の粒径は 380nm となり, 青 (約 440nm) 付近の光の波長と同程度である. 従って, 青付近の光が大気汚染粒子の層を通るときミー散乱が起こり, 短い波長の光の方が長い波長の光より, より減衰するのである. 従って, これらの手法は PM2.5 を検出するためのものであるが, 特に, PM2.5 大気汚染を検出するのに適している. ただし, 黄砂 (PM10) が存在すれば, 小粒子の黄砂 (PM2.5) も含まれることは当然なので, 提案手法の PM2.5 検出画像でも黄砂を PM2.5 として検出することがある.

本手法の画像例は, 第 5 章に含まれている.

4. 使用データと画像作成手順

本論文で使用する MODIS データは, 福井工業大学あわらキャンパスにある衛星受信システムで受信したものと, NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) からダウンロードしたものである. MODIS 画像の作成手順は次の通りである.

(ステップ 1) MODIS データ (MOD02/MYD02 および MOD03/MYD03) を, 衛星データ処理ソフトウェア HDF-EOS (VTT information technology, Finland) を用いて, アンパック, 大気補正, 幾何補正する. 大気補正により, 反射

バンドの輝度値は 0.0~100.0 の実数値に変換され、放射バンドの輝度値は輝度温度（ケルビン温度，単位は K）に変換される。幾何補正により表示画像は等緯度・等経度表示画像に変換される。

（ステップ 2）衛星画像処理ソフトウェア ER Mapper 2011（ERDAS, USA）を用いて、次に示す単一画像またはモザイク画像を作成し、Geo-tif 画像として保存する。

- (a) トルーカラー画像： True color image: {R, G, B = band1, band4, band3}.
- (b) AVI 画像： AVI image (by Eq.(1)).
- (c) 黄砂-雲識別画像： DSS-cloud discrimination image (by Eq.(2) or Eq.(3)).
- (d) DustRGB 画像： DustRGB image (by Eq.(4)).
- (e) PM2.5 検出画像： PM2.5 detection image (by Eq.(5) or Eq.(6) or Eq.(7)).
- (f) 黄砂-PM2.5-雲識別画像： DSS-PM2.5-cloud discrimination image (by Eq. (8) or Eq.(9) or Eq.(10)).
- (g) T11 温度画像： T11 thermal image.

（ステップ 3）黄砂や PM2.5 の位置をわかりやすくするため、Geo-tif 画像を、GIS（地理情報システム）ソフトウェア Arc Map 10.6（ESRI, USA）を用いて地図（緯度・経度線，国境線，主な川と湖を含む）と重ね表示する。

5. 黄砂，PM2.5，雲を識別するための RGB 合成画像法

第 2 章で記した黄砂検出法（黄砂と雲などの識別法，DustRGB 法）では，黄砂と雲を識別できるが，PM2.5 大気汚染を検出できない。第 3 章で記した PM2.5 検出法では，PM2.5 と雲を識別できるが，黄砂検出には適当でない（これについては，第 5.3 節で画像例とともに説明する）。そこで本章では，黄砂，PM2.5，雲を識別するための方法について検討する。

黄砂，PM2.5，雲を識別する RGB 合成画像法を見出すために，まず，黄砂検出法や PM2.5 検出法の研究時に可能性のあるものとして検討していたものを，次のようにリストアップした。

- (1) 黄砂検出の可能性のあるバンド組合せ：band1-band3, band4-band3, band32-band31 (=AVI), band31-band29, band32-band29, (band1-band3)/(band1+band3) (=YDI 法⁽²¹⁾), (band4-band3)/(band4+band3) (=YDI 法⁽²¹⁾).
- (2) PM2.5 検出の可能性のあるバンド組合せ：band10, band9, band8, band10-band9, band10-band8, band9-band8, band10+band9, band10+band8, band9+band8, band8+band9-band10, band8+band9-band3, band8+band9-band4, band8+band9-band1.
- (3) その他の事物の識別に関係するバンド組合せ：band6-band1, band7-band1.
- (4) 温度バンド：band31 (=T11)：温度バンドは黄砂と雲の識別，または，PM2.5 と雲の識別のために必要である。

次に，これらを R,G,B に割り当てて画像を作成していった。その中で，黄砂検出には AVI が良いことが分かった。これは第 2 章の結果 (Eq.(1),(2),(3)(4)) と矛盾しない。また，PM2.5 大気汚染検出には，band10-band9 などの差のバンド組合せは駄目なことが分かり，band10 などの単バンドまたは band10+band9 などの和のバンド組合せが良いことが分かった。これは第 3 章の結果 (Eq.(5),(6),(7)) と矛盾しない。band10, band9, band8 には null 値が含まれることがあるのでその影響を軽減するため，単バンドでなく，band10+band9 などの和のバンド組合せを使うのが良いと判断した。従って，あとは AVI, band10+band9 または band10+band8 または band9+band8, T11 を R,G,B のどれに割り当てればよいかを検討すればよいことになる。

検討の結果，次の 3 つが良いと結論した⁽²²⁾。これらの RGB 合成画像を「黄砂-PM2.5-雲識別画像」と名付ける。

$$\{R, G, B = AVI, band10+band9, T11\} \quad \text{Eq.(8)}$$

$$\{R, G, B = AVI, band10+band8, T11\} \quad \text{Eq.(9)}$$

$$\{R, G, B = AVI, band9+band8, T11\} \quad \text{Eq.(10)}$$

どの式を選ぶかの選定基準は，band10, band9, band8 で null 値の個数が少ないバンド 2 個を選ぶことである。これらの RGB 合成画像において，(1) 黄砂はピンクで表示される，(2) PM2.5 は水色で表示される，(3) 雲は緑，赤，紫で表示される。

以下に，特徴的ないくつかの場合について画像例を与え，説明する。

5.1 黄砂無しで PM2.5 有りの MODIS 画像の例

Fig. 5(a)において、中国の平原に直径約 900km の大きな渦巻き状のсмоッグ (PM2.5 大気汚染) が見える。この PM2.5 大気汚染は、Fig. 5(b), (c), (d)では検出されていないが、Fig. 5(e), (f)では検出されている。即ち、Eq.(5) と Eq.(8)の方法では PM2.5 大気汚染を検出できている。Fig. 6 に Fig. 5 の画像のヒストグラムを示す。

なお、DustRGB 法で PM2.5 大気汚染を検出できないのは当然である。なぜなら、第 3 章で記したように大気汚染粒子のモード径は 380nm 付近であるため、DustRGB 法が使う band32, 31, 29 の波長 (10 μ m 付近) の熱赤外線ではミ-散乱が起こらないからである。

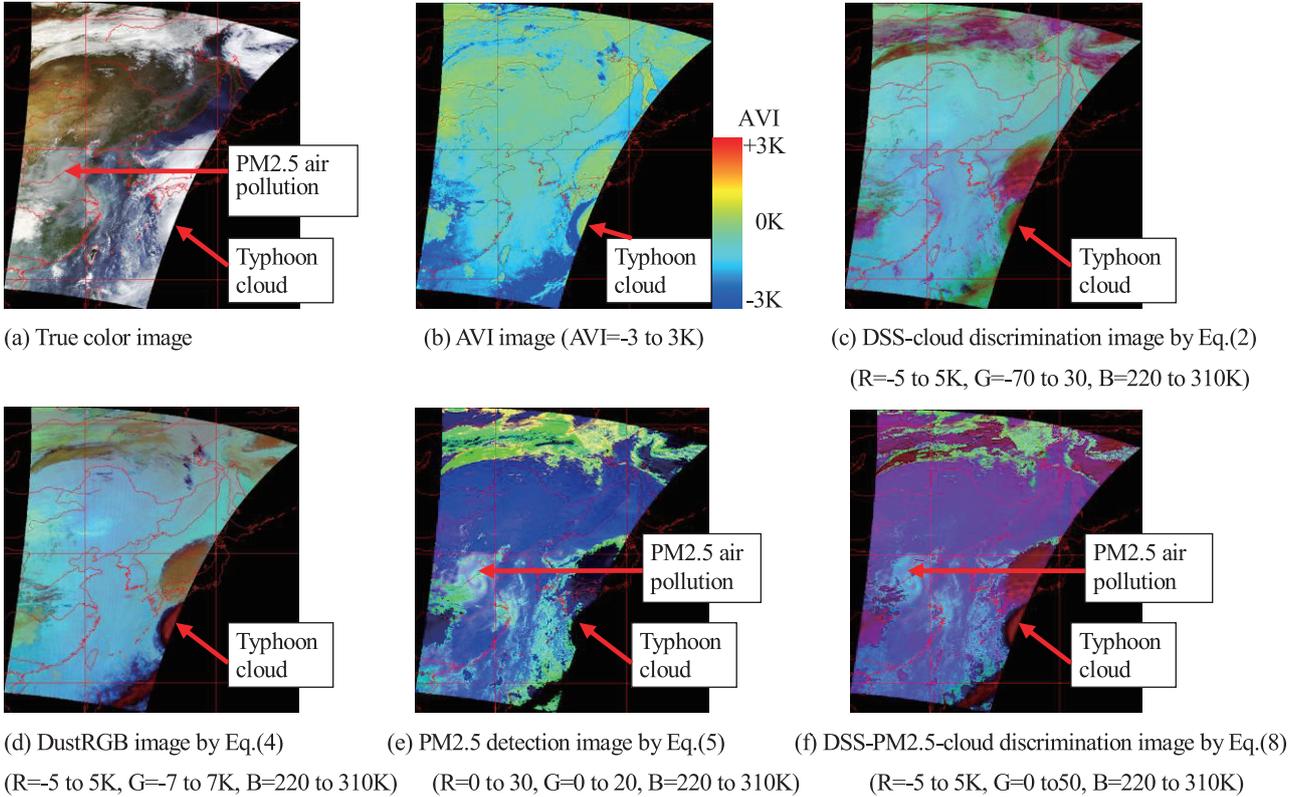


Fig. 5. Terra-MODIS at 2:33-2:45 UT on Oct. 5, 2006 (15.36-62.63°N, 107.53-152.65°E).

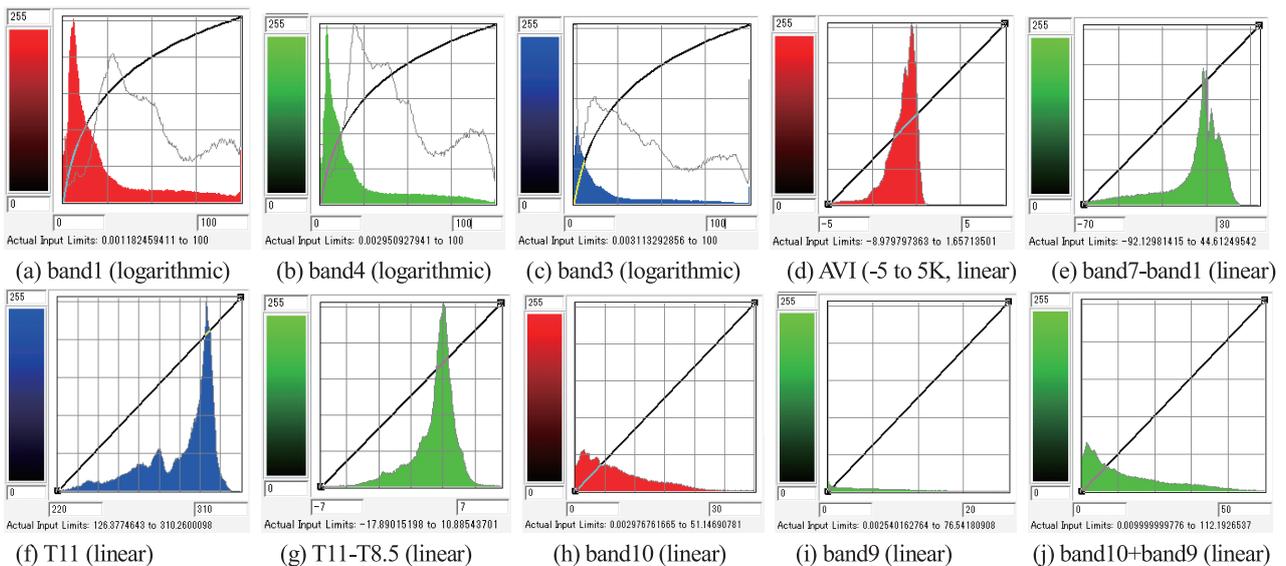


Fig. 6. Histograms for images shown in Fig. 5.

(Fig.5(a) has histograms of Figs.6(a),(b),(c). Fig.5(c) has histograms of Figs.6(d),(e),(f). Fig.5(d) has histograms of Figs.6(d),(g),(f). Fig.5(e) has histograms of Figs.6(h),(i),(f). Fig.5(f) has histograms of Figs.6(d),(j),(f).)

5.2 黄砂有りて PM2.5 が少ない MODIS 画像の例

Fig. 1 に示した衛星画像を例として説明する. 黄砂検出法による画像は Fig. 1(b), (c), (d)であり, これらにおいて, 黄砂は検出されているが, PM2.5 大気汚染は検出されていない. PM2.5 検出画像を Fig. 7(e)に, 黄砂-PM2.5-雲識別画像を Fig. 7(f)に示す. Band10 にたくさんの null 値が存在するので, band9 と band8 が用いられている.

Fig. 7(e)では, 微小粒子の黄砂と PM2.5 大気汚染は PM2.5 として検出されており, ピンクで表示されている. Fig. 7(f)では, 黄砂はピンク色, PM2.5 大気汚染は水色, 氷雲は赤色, 水雲は紫色で表示されている. 即ち, 黄砂と PM2.5 と雲は識別できている. Fig. 8 に Fig. 7 の画像のヒストグラムを示す.

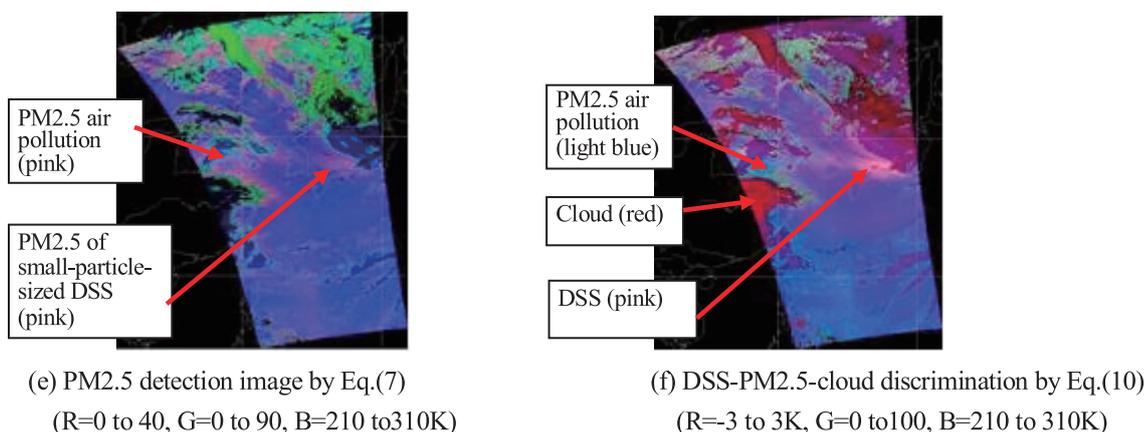


Fig. 7. Aqua-MODIS at 4:34-4:47 UT on April 8, 2006.

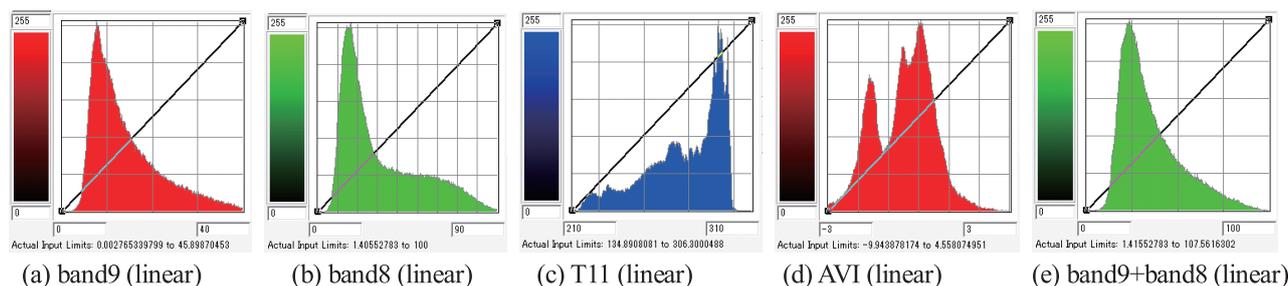


Fig. 8. Histograms for images shown in Fig. 7.

(Fig.7(e) has histograms of Figs.8(a),(b),(c). Fig.7(f) has histograms of Figs.8(d),(e),(c).)

5.3 黄砂と PM2.5 が有る広域の MODIS 画像の例

Fig. 9 は 2019 年 3 月 1 日の昼のタクラマカン砂漠から日本までの Aqua-MODIS の画像である. 強い黄砂はタクラマカン砂漠 (約 77-90°E) から東経約 100 度まで広がっている. 弱い黄砂はゴビ砂漠にある. PM2.5 大気汚染は, 北京を含む中国平原部, 黄海および韓国にある. また, 中国北東部およびロシア東部での森林火災による煙を含む PM2.5 が, 日本の北海道に流れ込んでいる. これらのことは黄砂-PM2.5-雲識別画像である Fig. 9(f)でも検出されており, Fig. 9(f)では黄砂, PM2.5, 雲, その他が識別されている. なお, Fig.9(b),(e),(f)では黄砂と PM2.5 の位置と大体の領域を赤矢印と赤楕円または白楕円で示してある.

黄砂-PM2.5-雲識別画像の色と対象物の関係をまとめると次のようである.

- ピンク 黄砂
- 水色 PM2.5
- 緑 雲, 雪原, 氷
- 赤, 赤っぽい茶色 氷雲 (すなわち, 冷たい雲)
- 紫 水雲 (すなわち, 温かい雲)
- 青 温かい陸地と海

なお、Fig. 9 は、NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) からダウンロードした Aqua-MODIS データ 8 個を画像処理し、つなぎ合わせたモザイク画像である。表示範囲が広いので、ヒストグラムの Linear 変換を使うと、Fig. 9(a),(e),(f)では各データ画像間の色合わせが難しい。各データ画像間で統一的な画像処理を行うためには、トルーカラーの R,G,B, PM2.5 検出画像の R と G, 黄砂-PM2.5-雲識別画像の G では、ヒストグラムの Logarithmic 変換を使うのがよい。

PM2.5 検出画像の Fig. 9(e)では、タクラマカン砂漠 (約 77-90°E) の強い黄砂 (PM10) は検出されていない。タクラマカン砂漠から西側に続く微粒子化した黄砂 (約 96-106°E) は PM2.5 として検出されている (Fig.9(e)の左側の白楕円のところ)。ゴビ砂漠の弱い黄砂 (PM10) は検出されていない。これらのことが、第 5 章の最初のところでは記した「PM2.5 検出画像は、黄砂検出には適当でない。」の実例である。なお、Fig. 9(e)の真ん中の白楕円のところでは PM2.5 大気汚染が検出され、右側の白楕円のところでは煙まじりの PM2.5 が検出されている。

Fig. 10 に、Fig. 9 の一部分である日本を含むデータの拡大画像を示す。ロシア東部・中国北東部の森林火災の煙を含む PM2.5 が北海道に流れ込む様子がよくわかる。Fig. 11 に Fig. 10 の画像のヒストグラムを示す。AVI 画像 (Fig.10(b)) の左上に弱い黄砂が検出されているが、PM2.5 検出画像 (Fig. 10(e)) ではそれを検出できない。黄砂-PM2.5-雲識別画像 (Fig. 10(f)) では、弱い黄砂 (ピンク)、PM2.5 大気汚染 (水色)、煙まじりの PM2.5 (水色)、雲 (赤、紫、緑) が検出できている。なお、Fig.10(b),(e),(f)では黄砂と PM2.5 の位置と大体の領域を赤矢印と赤楕円または白楕円で示してある。

報道⁽²³⁾によれば、東北大学の工藤純一教授が提供した 3 月 1 日 Aqua-MODIS の北海道付近を拡大した PM2.5 表示画像の説明で、ロシア東部・中国北東部の森林火災の煙だけが北海道での PM2.5 の原因のように書かれているが、より広い範囲の Fig. 9 を見ればわかるように、北京を含む PM2.5 大気汚染がロシア東部・中国北東部の森林火災の煙に混じって PM2.5 となり、それが北海道に流れ込んでいることの方が正しい。16 時の PM2.5 観測値は利尻町で $135 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、札幌市で $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であるが、環境省の大気汚染物質広域監視システム (<http://soramame.taiki.go.jp/>) の 3 月 1 日の観測最大値は利尻町で 18 時に $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、札幌市で 22 時に $176 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。これらの値は PM2.5 の環境基準値 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ をはるかに超える値で、健康への影響が懸念される値である。

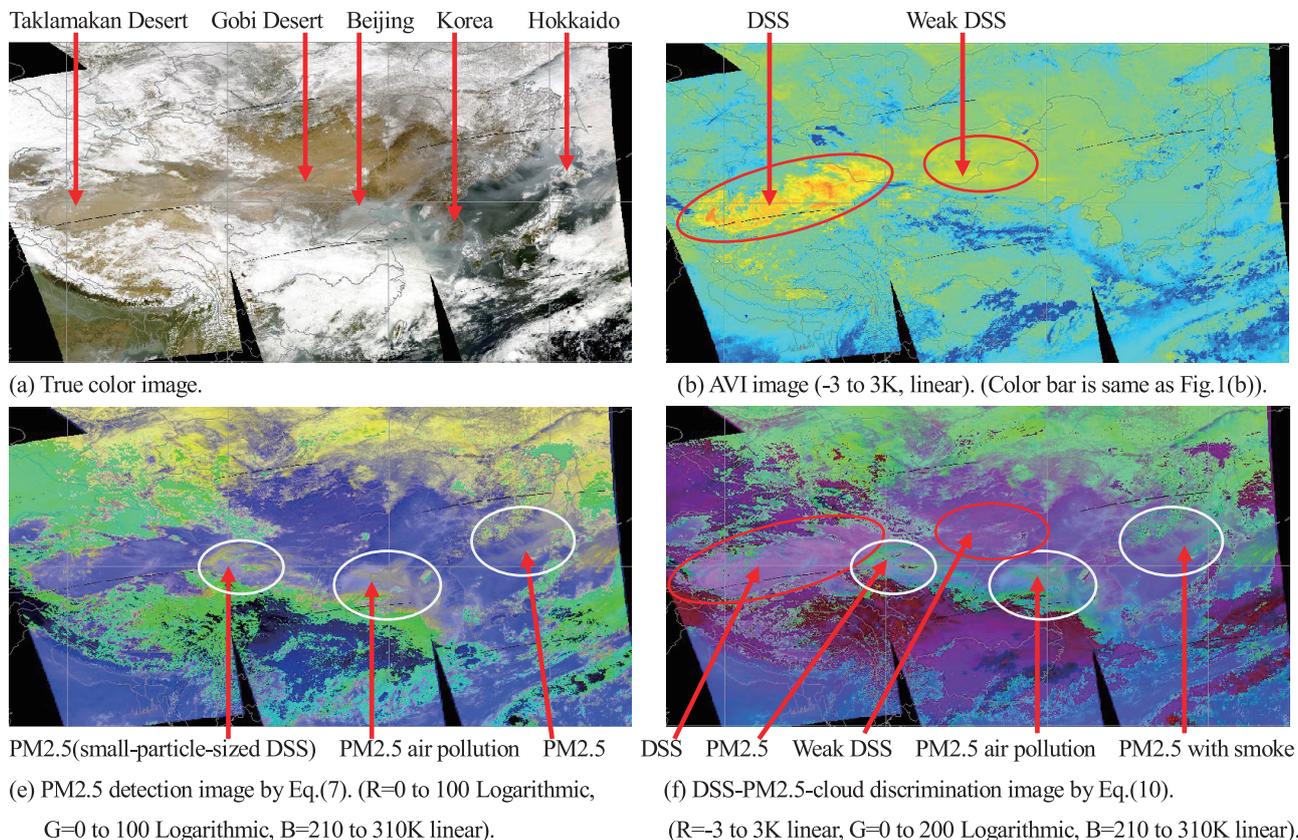
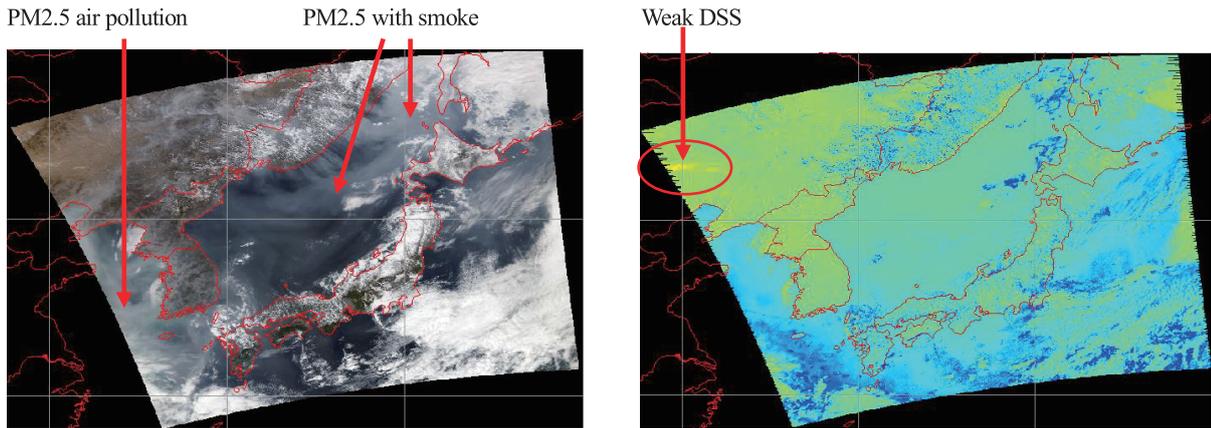
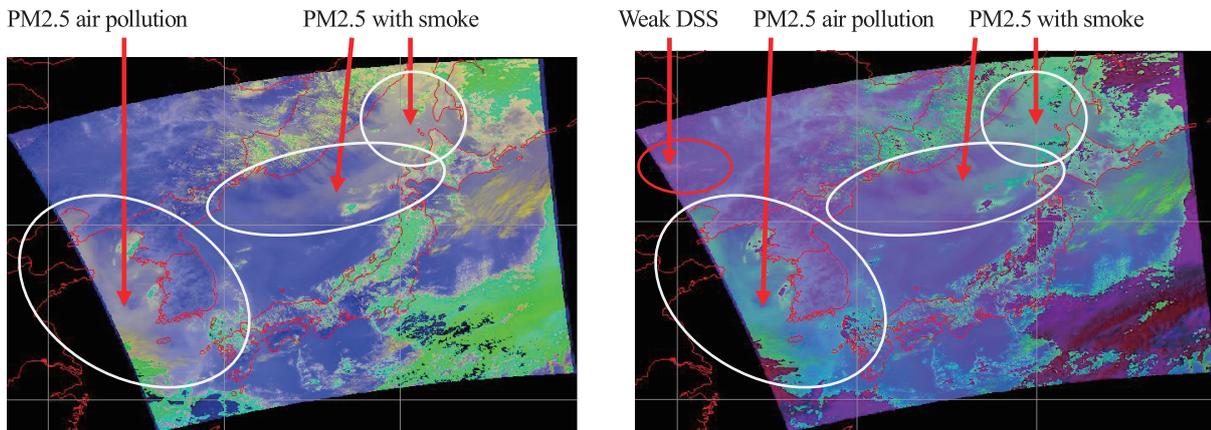


Fig. 9. Aqua-MODIS at 4:00-7:30 UT on March 1, 2019 (20-60°N, 73-150°E).



(a) True color image

(b) AVI image by Eq.(1)



(e) PM2.5 detection image by Eq.(7)

(f) DSS-PM2.5-cloud discrimination image by Eq.(10)

Fig. 10. Enlarged images of Fig. 9 (Aqua-MODIS at 4.05 to 4.10 UT on March 1, 2019, 20.16-49.55°N, 117.66-150.02°E).

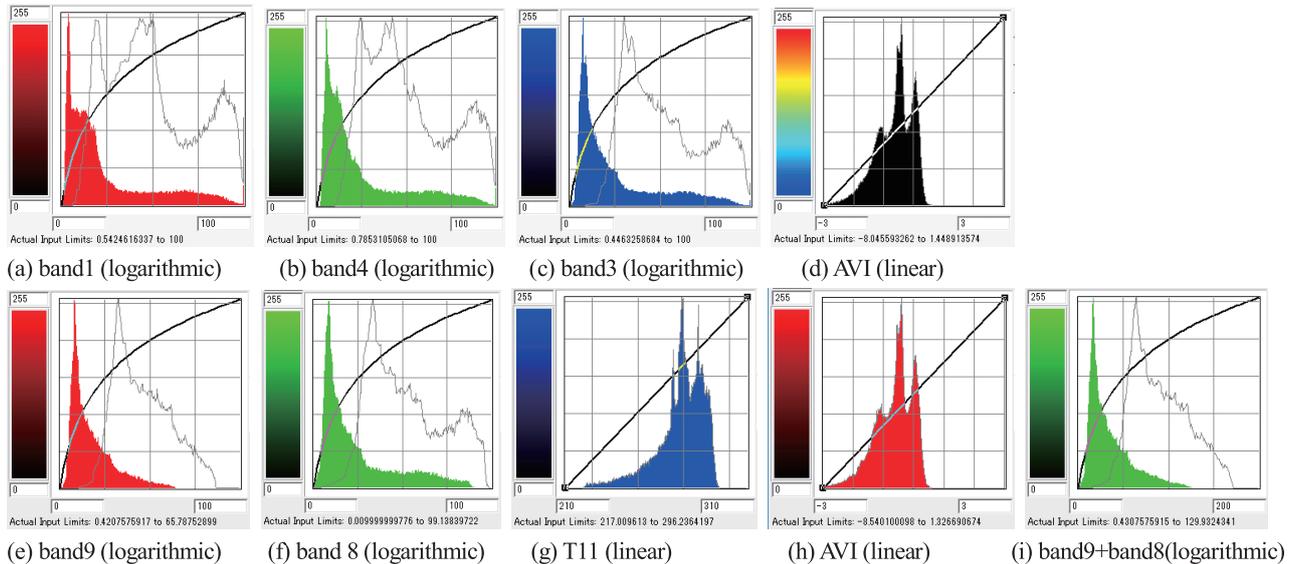


Fig. 11. Histograms for images shown in Fig. 10.

(Fig.10(a) has histograms of Figs.11(a),(b),(c). Fig.10(b) has a histogram of Fig.11(d).

Fig.10(e) has histograms of Figs.11(e),(f),(g). Fig.10(f) has histograms of Figs.11(h),(i),(g).)

6. 結 言

本論文の成果は、MODIS 衛星データを用いた場合の黄砂、PM2.5、雲を識別する方法について検討し、Eq. (8), (9), (10)の方法「黄砂-PM2.5-雲識別法」を提案できたことである。

この研究を行った理由は、これまで、1つの衛星画像による黄砂の検出、黄砂と雲の識別、PM2.5の検出、PM2.5と雲の識別、に関する研究は報告されていたが、黄砂とPM2.5と雲の3種類を1つの衛星画像で識別する方法については研究報告がなかったためである。

そこで、本論文では、まず第2章で、従来の黄砂検出法 (Eq. (1), (2), (3), (4)参照) について、概要と特徴と問題点を説明した (一部、第5章でも問題点を説明した)。次に、第3章では、従来のPM2.5検出法 (Eq. (5), (6), (7)参照) について、概要と特徴を説明した (第5章では問題点を説明した)。これらの問題点の最大のことは、(1)黄砂検出法では、黄砂を検出でき、黄砂と雲を識別できるが、PM2.5大気汚染を検出できないこと、(2)PM2.5検出法では、PM2.5大気汚染や微粒子化した黄砂 (PM2.5) を検出でき、PM2.5と雲を識別できるが、通常黄砂 (PM10) の検出には適当でないこと、である。そして、第5章で黄砂とPM2.5と雲を識別する方法について検討を行った。

第5章では、まず、第2章、第3章の結果も踏まえて、黄砂検出の可能性のあるバンド組合せ、PM2.5検出の可能性のあるバンド組合せ、その他の事物の識別に関係するバンド組合せ、温度バンド、をリストアップし、次に、それらをR, G, Bに割り当てていく中で、黄砂検出にはAVIがよく、PM2.5検出にはband10などの単バンドや和のバンド組合せが良いことが分かったので、温度バンド (T11) とともに、R, G, Bのどれに割り当てればよいかだけの問題となり、最終的に、Eq. (8), (9), (10)を「黄砂-PM2.5-雲識別法」として選定し、提案した。Eq. (8), (9), (10)のどれを選ぶかの選定基準は、band10, band9, band8からnull値の少ないバンド2個を選ぶこととしている。

第5.1節、第5.2節、第5.3節では、特徴的な3つの場合の例 (すなわち、「黄砂無しでPM2.5有りのMODIS画像の例」、「黄砂有りてPM2.5が少ないMODIS画像の例」、「黄砂とPM2.5が有る広域のMODIS画像の例」) について、黄砂-PM2.5-雲識別法による画像を、従来の黄砂検出法による画像とPM2.5検出画像とともに示すことにより、黄砂-PM2.5-雲識別法が正しく機能していることを確認した。

また、第5.3節では、画像の色と対象物の関係をまとめ、ピンクは黄砂、水色はPM2.5、緑は雲、雪原、氷、赤または赤っぽい茶色は氷雲、紫は水雲、青は温かい陸地と海であることを述べた。更に、衛星画像処理のテクニックとして、表示範囲が非常に広いモザイク画像の場合、ヒストグラムのLinear変換を使っただけでは各データ間の色合わせが難しいので、ヒストグラムのLogarithmic変換も使うと統一的な画像処理を行うことができることも述べた。

以上、本論文で提案したEq.(8), (9), (10)による「黄砂-PM2.5-雲識別法」は、黄砂、PM2.5、雲を識別できる簡便な (シンプル) な方法と言える。

謝 辞

本研究では文部科学省の平成28~31年度 (2016~2019年度) 私立大学研究ブランディング事業「宇宙事業推進のために地域と協働するふくいPHOENIXプロジェクト」の支援を受けており、感謝する。

文 献

- (1) 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 (2010-01), pp.1-10.
- (2) 永谷泉, 柳澤文孝, 三浦崇史, 工藤純一, “大陸からの越境大気汚染飛来把握のためのMODISデータ利用法”, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.33, No.4 (2013-09), pp.298-307.
- (3) 加藤芳信, “2010年3月宮崎県口蹄疫発生の黄砂原因説に対するMODIS衛星画像による検討”, 福井工業大学研究紀要, 第43号, 第1部 (2013-06), pp.254-265.

- (4) Yoshinobu Kato, “Possibility of relationship between the yellow sand and the foot-and-mouth disease in Miyazaki Prefecture, Japan in March 2010 by using MODIS images”, *Proceedings of SPIE*, Vol.9259 (2014-), pp.92591V-1-12.
- (5) 加藤芳信, “MODIS 衛星データを用いた黄砂と PM2.5 の検出法 —2011 年 5 月に西日本で呼吸器症状の増悪が認められたときの黄砂への応用—”, 福井工業大学研究紀要, 第 46 号, 第 1 部 (2016-06), pp.236-249.
- (6) Yoshinobu Kato, “Application of dust and PM2.5 detection methods using MODIS data to the Asian dust events which aggravated Respiratory Symptoms in Western Japan in May 2011”, *Proceedings of SPIE*, Vol.10776 (2018-10), pp.1077619-1-16.
- (7) N. Iino, K. Kinoshita, R. Iwasaki, T. Masumizu and T. Yano, “NOAA and GMS observations of Asian dust events during 2000-2002”, *Proceedings of SPIE*, Vol. 4895 (2003), pp.18-27.
- (8) N. Iino, K. Kinoshita, A. Tupper and T. Yano: “Short-wave and mid-infrared imagery to distinguish silicate dusts and volcanic aerosols from meteorological clouds”, *Proceedings of SPIE*, Vol.5652 (2004), pp.48-56.
- (9) 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 (2008-05), pp.329-336.
- (10) Yoshinobu Kato, “Detection of dust and sandstorms from Taklamakan Desert to Japan by using MODIS mosaic images”, *Proceedings of SPIE*, Vol.7152 (2008-12), pp.71520P-1-10.
- (11) 加藤芳信, “AVI 法の黄砂検出特性に関する検討”, 福井工業大学研究紀要, 第 40 号, 第 1 部 (2010-06), pp.350-359.
- (12) Yoshinobu Kato, “Detection properties of dust and sandstorms by using AVI of MODIS data”, *Proceedings of SPIE*, Vol.7859 (2010-11), pp.78590H-1-12.
- (13) 加藤芳信, “AVI 法を用いた黄砂検出における雲の影響と識別”, 福井工業大学研究紀要, 第 42 号, 第 1 部 (2012-05), pp.365-376.
- (14) Yoshinobu Kato, “Influence and discrimination of clouds in the detection of dust and sandstorms using AVI”, *Proceedings of SPIE*, Vol.8523 (2012-11), pp.85231F-1-11.
- (15) Nuno Moreira, “Dust Detection, The DUST RGB product,” (2011-10), https://www.eumetsat.int/website/home/Data/Training/TrainingLibrary/DAT_2042669.html?lang=EN (参照日 2019 年 3 月 20 日).
- (16) 加藤芳信, “MODIS 衛星データを用いた PM2.5 大気汚染の検出 (その 1 : 黄砂検出との違い)”, 福井工業大学研究紀要, 第 45 号 (2015-07), pp.231-242.
- (17) Yoshinobu Kato, “A simple method for the detection of PM2.5 air pollutions using MODIS data,” *Proceedings of SPIE*, Vol.9876 (2016-05), pp.98762X-1-12.
- (18) 井上豊志郎, “第 1 章 : マルチチャンネルデータの利用”, 気象研究ノート 第 212 号, 日本気象学会 (2006-12).
- (19) 加藤芳信, “MODIS による黄砂と雲などの識別画像表示法の比較”, 平成 30 年度電気関係学会北陸支部連合大会, F2-39 (2018-09).
- (20) 西澤智明, 杉本伸夫, 松井一郎, 清水厚, 岡本創, “EarthCARE 衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル種推定アルゴリズムの開発”, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.33, No.5 (2013-11), pp.367-376.
- (21) 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 (2003), pp.153-156.
- (22) Yoshinobu Kato, “An attempt to discriminate between Asian dust and PM2.5 using MODIS data”, *Proceedings of ISRS 2019*, ISRS2019-Kato-151 (2019-04).
- (23) 北海道ニュース UHB, “利尻島 午後以降 PM2.5 上昇 基準値"4 倍"高濃度 札幌市や小樽市でも高い状態続く 北海道 (2019 年 3 月 1 日 18:27) ”, <https://uhb.jp/news/7472/> (参照日 2019 年 3 月 20 日).

(2019 年 4 月 26 日受理)