

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)

加藤 芳信^{*1}

Detection of PM2.5 Air Pollutions by Using MODIS Data (Part 1: Differences between the Detection of PM2.5 Air Pollutions and the Detection of Dust and Sandstorms)

Yoshinobu KATO^{*1}^{*1} Department of Industrial Business and Engineering

In recent years, PM2.5 air pollution is a social and transboundary environmental issue with the rapid economic growth in many countries. As PM2.5 is small and includes various ingredients (e.g., sulfur oxide, nitrogen oxide, vitriol, nitrate salt, soot, etc.), the detection of PM2.5 air pollutions by using satellite data is difficult compared with the detection of dust and sandstorms (DSS). DSS can be detected by using AVI method and YDI method. AVI (Aerosol Vapor Index) is defined as $AVI = T_{12} - T_{11}$, where T_{12} and T_{11} are the brightness temperatures at 12 μ m and 11 μ m wave lengths, respectively. For MODIS data, T_{12} and T_{11} correspond to band32 and band31, respectively. YDI (Yellow Dust Index) is defined as $YDI = (band4 - band3) / (band4 + band3)$. AVI and YDI methods detect PM2.5 air pollutions only a little. In this paper, we examine various RGB composite color images for detecting PM2.5 air pollutions by using MODIS data, i.e., {R, G, B = band4, band3, T11}, {R, G, B = band10, band9, T11}, {R, G, B = band9, band8, T11}, {R, G, B = AVI, band7-band1, T11}, {R, G, B = AVI, band10-band9, T11}, etc. A good method for the detection of PM2.5 air pollution is {R, G, B = band10, band9, T11}. In this composite color image, PM2.5 air pollutions are represented by light purple or pink color. This proposed method is applied to the detection of PM2.5 air pollutions in the wide area from China and India to Japan by using MODIS data on 12 January 2013, and AVI method is applied to DSS detection in the same area. By comparing the AVI image with the image by the proposed method, PM2.5 air pollutions can be distinguished from DSS. The proposed method is simpler than the method by Nagatani et al. (2013), and is useful to grasp the distribution of PM2.5 air pollutions in the wide area.

Key Words : PM2.5 Air Pollution, Dust and Sandstorms, MODIS, AVI, YDI, Composite Color Image

1. 緒 言

近年、東アジアの経済発展に伴い、大陸から日本へ飛来する大気汚染（特に、微小粒子状物質 PM2.5）が問題となっている⁽¹⁾⁽³⁾。衛星リモートセンシングによる PM2.5 の検出が黄砂（Dust and sandstorms : DSS）の検出と比べて難しい理由は、(1) PM2.5 は大気中に浮遊する直径 2.5 μ m 以下の粒子状物質で小さいこと、(2) 工場のばい煙や車の排ガス、家庭の調理・暖房の煙などによる硫酸化物、窒素酸化物、硫酸塩、硝酸塩、すす成分など、あるいは自然由来の物（黄砂・火山排出物・森林火災の煙・海塩粒子などで粒径の小さいもの）など、多様な物質を含んでいること⁽³⁾⁽⁴⁾、(3) 大気汚染は smog（smoke と fog の合成語）と呼ばれることがあるように水分を含むことが多いこと、のためである。

筆者は、Terra/Aqua 衛星 MODIS データを用いての黄砂の検出に関する研究を、AVI 法を基本にして行ってきた⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾。文献⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾で示した手法と同様な方法を大気汚染の検出に適用できないかと考え、今回、バンド合成画像による色で大気汚染を検出する方法を提案する⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。また、黄砂検出方法との比較も示す。更に、永谷ら⁽¹⁾⁽²⁾の大

* 原稿受付 2015年2月27日

^{*1} 産業ビジネス学科

E-mail: y-kato@fukui-ut.ac.jp

気汚染検出法との比較も示す。なお、本研究の目的が衛星データを用いた PM2.5 大気汚染検出画像として最適な方法を探索することであるので、本文では処理画像が多く示されている。

2. 黄砂検出法の PM2.5 検出への拡張可能性

衛星リモートセンシングによる黄砂検出法として AVI 法⁽¹³⁾と YDI 法⁽¹⁴⁾が良く知られている。

衛星データとして MODIS データを用いる場合の AVI 法では、熱赤外バンドの band32 (12 μ m 波長) と band31 (11 μ m 波長) の輝度温度 (単位はケルビン K) をそれぞれ T12 と T11 とし、「AVI=T12-T11」と定義して、基本的に AVI>0 で黄砂ありと判定される。この原理は、地表から放射される 10 μ m 付近の熱赤外線が黄砂の層を通るとき、ミー散乱で波長の短い方がより減衰して、衛星に到達することによる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

YDI 法では、「YDI = (band4-band3) / (band4+band3)」と定義して、基本的に YDI>0 で黄砂ありと判定される。この原理は、青付近のバンドで、(1) エアロゾル (黄砂または大気汚染物質) は、波長の長い光 (band4) よりも波長の短い光 (band3) をよく吸収すること、また、(2) 黄砂の層は黄色～茶色なので、光学的に厚い黄砂の層で太陽光が反射するとき、黄色～茶色に近い band4 の方の反射率が高いことによる。

AVI 法も YDI 法も大気汚染を少しだけ検出するので、これらの PM2.5 大気汚染検出への拡張可能性を考察する。

AVI 法の検出原理であるミー散乱の計算に粒径や複素屈折率などが関係する⁽⁴⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。黄砂の粒子は直径 1~10 μ m が多く、比較的大きい (黄砂は PM10 に分類される)。黄砂の成分は Si や Al の化合物などで、ある程度決まっている (即ち、ミー散乱の計算のときに必要な複素屈折率がある程度決まっている)。しかし、PM2.5 大気汚染の場合、粒子の成分が多様なため複素屈折率が多様となり⁽⁴⁾、ミー散乱の計算が複雑になる。更に MODIS の場合、2.5 μ m 波長付近の放射バンド (2 個必要) がない。もし、2.5 μ m 波長付近の放射バンドが 2 個あれば、夜の PM2.5 大気汚染を検出できる可能性がある (昼の場合、2.5 μ m 波長付近では太陽光の反射と地上からの放射の両方が含まれるため、AVI 法は使えない)。従って AVI 法の拡張は難しい。

YDI 法の PM2.5 への拡張を考えると、band4 や band3 より短い波長のバンド (即ち、band10, band9, band8) の使用を検討すればよいことがわかる (Table 1 参照)。

【補足】文献⁽¹⁵⁾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、鉱物ダスト (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 μ m, 2.0, 1.75-i0.5 及び 1.76-i0.4}, 鉱物ダスト {回転楕円体, 2.0 μ m, 2.2, 1.51-i0.009 及び 1.51-i0.003},

Table 1 Bands of MODIS and their observation wavelengths.

Band	Observation wavelength
1	620 - 670 nm (red)
2	841 - 876 nm (near infrared)
3	459 - 479 nm (blue-green)
4	545 - 565 nm (green-yellow)
5	1,230 - 1,250 nm (near infrared)
6	1,628 - 1,652 nm (middle infrared)
7	2,105 - 2,155 nm (middle infrared)
8	405 - 420 nm (purple-blue)
9	438 - 448 nm (blue)
10	483 - 493 nm (blue-green)
11	526 - 536 nm (green-yellow)
12	546 - 556 nm (yellow)
29	8.400 - 8.700 μ m (thermal infrared)
31	10.780 - 11.280 μ m (thermal infrared)
32	11.770 - 12.270 μ m (thermal infrared)

大気汚染粒子 {球形, $0.19 \mu\text{m}$, 1.6 , $1.42-i0.002$ 及び $1.41-i0.002$ } を仮定している. モード径 (最頻の粒径) は $2R_m$ となる. 従って, 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, 短い光の方がより減衰するのである.

3. MODIS データの画像処理の手順

次節以降で種々の画像を示すので, ここで MODIS データの画像処理の手順を記しておく.

(Step 1) 福井工業大学あわらキャンパスの衛星受信システムで受信した MODIS データ, または, 米国 NASA (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>) から入手した MODIS データ (MOD02, MOD03) を, 衛星データ処理ソフトウェア HDF-EOS でアンパック, 大気補正, 幾何補正する. 大気補正により, 反射バンドでは元のカウント値は $0.0 \sim 100.0$ の実数値に変換され, 放射バンドでは元のカウント値は輝度温度 (単位はケルビン K) に変換される. 幾何補正では等緯度経度の座標表示に変換される.

(Step 2) 衛星画像処理ソフトウェア ER Mapper を用いて画像処理し, 必要に応じて Geo-tiff 画像として保存する.

(Step 3) 必要に応じて, 地理情報システムソフトウェア ArcGIS を用いて Geo-tiff 画像を地図 (緯度・経度線, 国境線, 主要な川と湖, 都市) と重ね合わせ表示する.

4. MODIS データを用いた PM2.5 大気汚染検出のための各種検討

本節では, 福井工業大学あわらキャンパスの衛星受信システムで受信した 2013 年 1 月 26 日 4 時 57 分~5 時 7

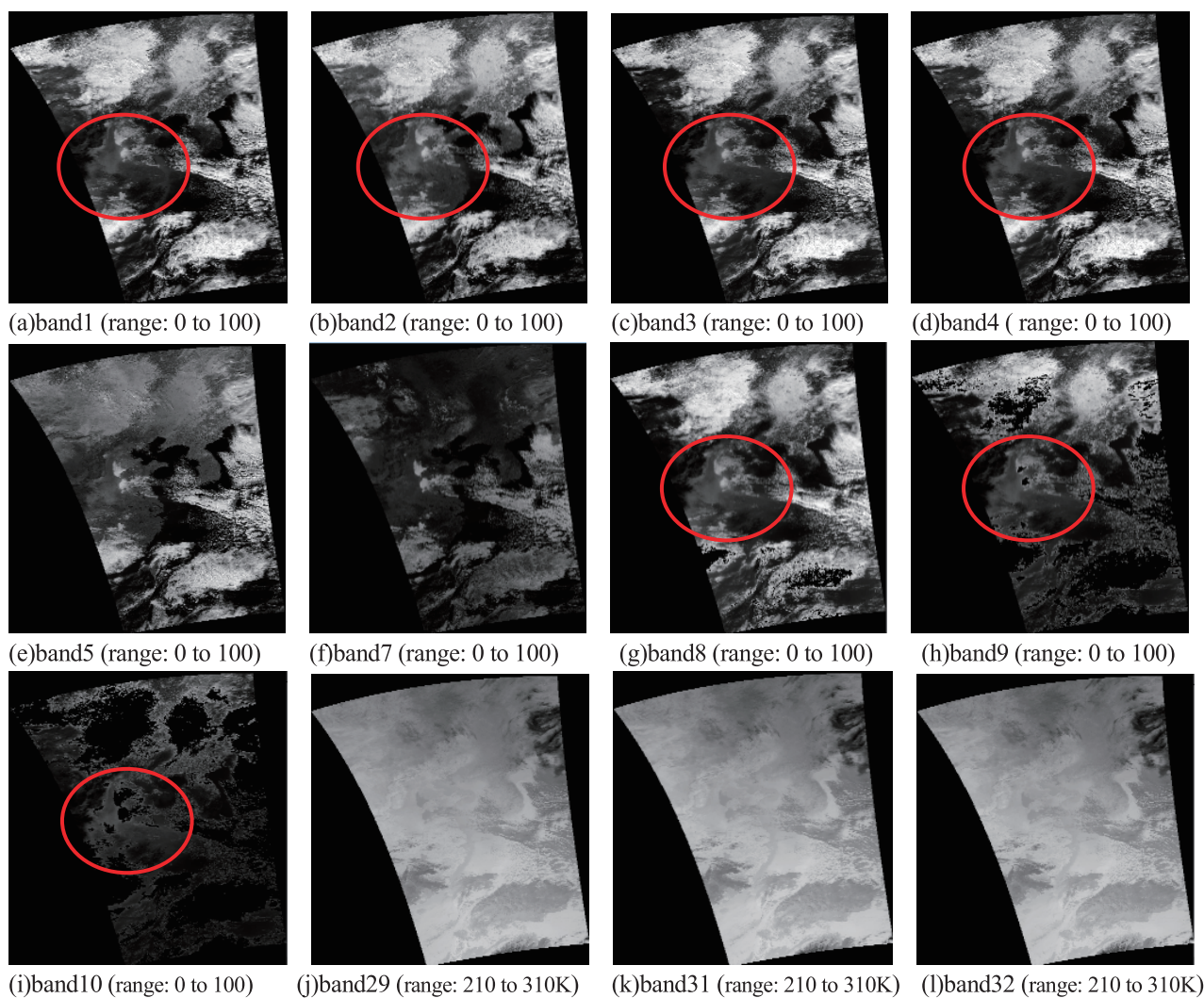


Fig. 1 Single-band images (histogram transformation: linear).

分 UT (13 時 57 分~14 時 7 分 JST) の Aqua-MODIS データ⁽¹⁶⁾を用いて種々の検討を行い、最適な PM2.5 大気汚染検出法を見出すことを目的とする。トルーカラー画像は Fig. 3(a)および Fig. 8(a)に示されている。

4.1 MODIS の単バンド画像の検討

Fig. 1 に単バンドの grey scale 表示画像を示す。Fig. 3(a)または Fig. 8(a)と見比べると分かるように、Fig. 1 の band1~4, band8~10 では中国の大気汚染の部分 (赤丸で図示) をかなり明瞭に認識できる。band5, band7 でも大気汚染がある程度見える。熱赤外バンドである band29, band31, band32 では当然ではあるが、大気汚染の部分を確認できない。これらの画像をもとに、差バンド画像や RGB 合成画像などを検討する。なお、band29, band31, band32 と記したものは、厳密にはそれらの輝度温度である T8.5, T11, T12 のことである。band8, band9, band10 の画像で真っ黒の部分は null 値となっている (画像から判断すると、null 値となった理由は、雲の輝度値がセンサの許容範囲を超えたためのものである)。一部の単バンドについてはヒストグラムを Fig. 3, Fig. 6, Fig. 7 に示してある。

4.2 MODIS の差バンド画像の検討

Fig. 2 に差バンド画像を示す。黄砂の検出に関する {band1-band3} と {band4-band3} では、画像の左上側 (ゴビ砂漠) にある黄砂を明るく検出するのは構わないのであるが、長江河口付近の沿岸の泥水を明るく検出してしまうので、大気汚染検出として不適當である。次の {band7-band1} は黄砂と雲を区別するために使われるものなので、大気汚染検出とは関係ない。次の {band9-band8}, {band10-band8}, {band10-band9} の画像は大気汚染の部分をも特徴づけないので、大気汚染検出として不適當である。熱赤外バンドで黄砂を検出できる {band31-band29} と {band32-band31}=AVI では、画像の左上側 (ゴビ砂漠) にある黄砂を明るく検出している。また、モノクロなので分かりづらいが大気汚染も若干検出している。{band31-band29} は長江河口付近の沿岸の泥水をある程度検出してしまうので、黄砂検出法としては良くない。{band32-band31} は泥水を検出しないので、黄砂検出法として良い。結論として、差バンドで大気汚染検出に使えるようなものはない。

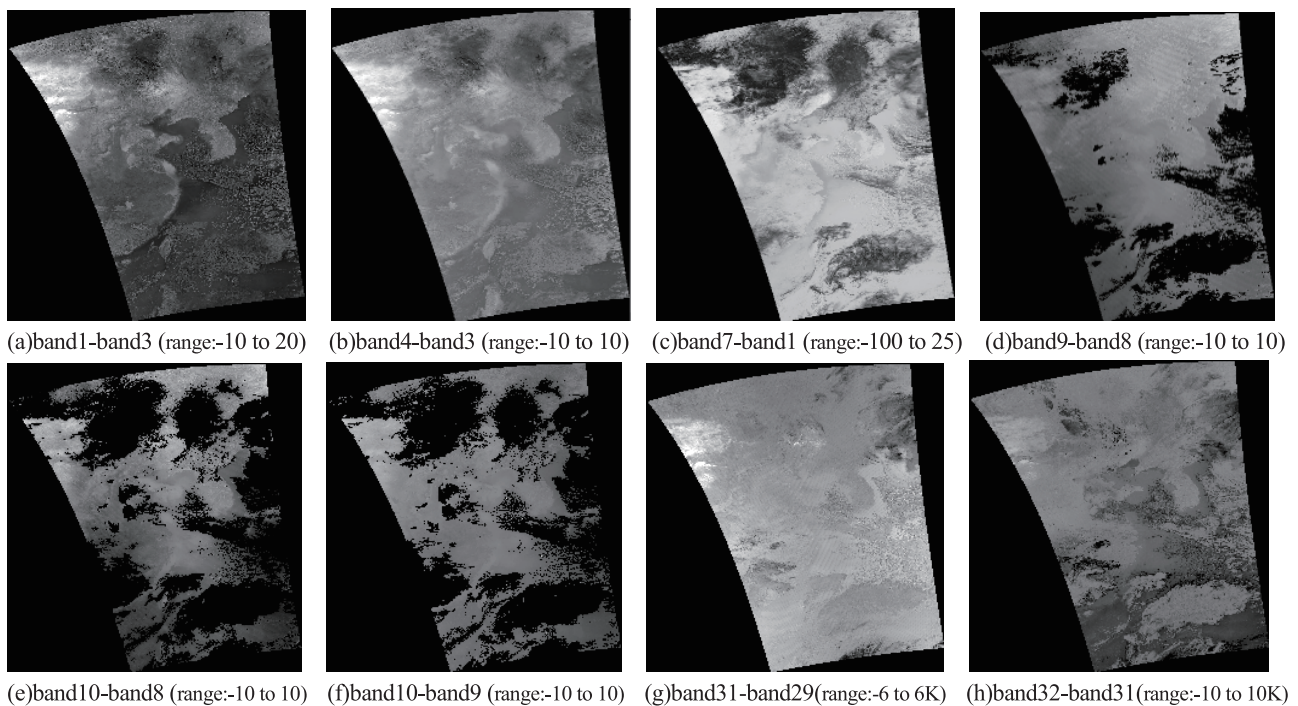


Fig. 2 Band-difference images (histogram transformation: linear).

4.3 トルーカラー画像と黄砂検出のための AVI 画像と YDI 画像

Fig. 3 にトルーカラー画像とそのヒストグラムを示す。ヒストグラムが Linear のままでは画像が暗かったので、図示したようにヒストグラムに Logarithmic 変換をかけて画像を明るくしてある。北京周辺から中国中央部の長江流域まで覆っている半透明の「もや」が PM2.5 大気汚染であり、白い部分は雲である⁽¹⁶⁾。この「もや」が PM2.5

大気汚染であることは、環境省の Web ページ (http://www2.env.go.jp/pm25monitoring/data/csv/H_2014.zip) で、衛星画像の観測時間帯 (2013 年 1 月 26 日 5 時 UT=中国時間 13 時) の PM2.5 濃度が、北京(Beijing) $156 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、成都(Chengdu) $178 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、広州(Guangzhou) $155 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、上海(Shanghai) $179 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であることより明らかである。

Fig. 4 の AVI 画像では、ゴビ砂漠で黄砂をやや強く (橙) 検出し、PM2.5 大気汚染も弱く (黄) 検出している。

Fig. 5 の YDI 画像では、ゴビ砂漠で黄砂を強く (赤) 検出するが、地面と長江河口付近沿岸の泥水も弱く (黄) 検出するので、黄砂検出法としては AVI 法よりも劣る。但し、雲の中の黄砂の検出に役立つ。PM2.5 大気汚染をわずかに検出している。

Chengdu Beijing Guangzhou Shanghai

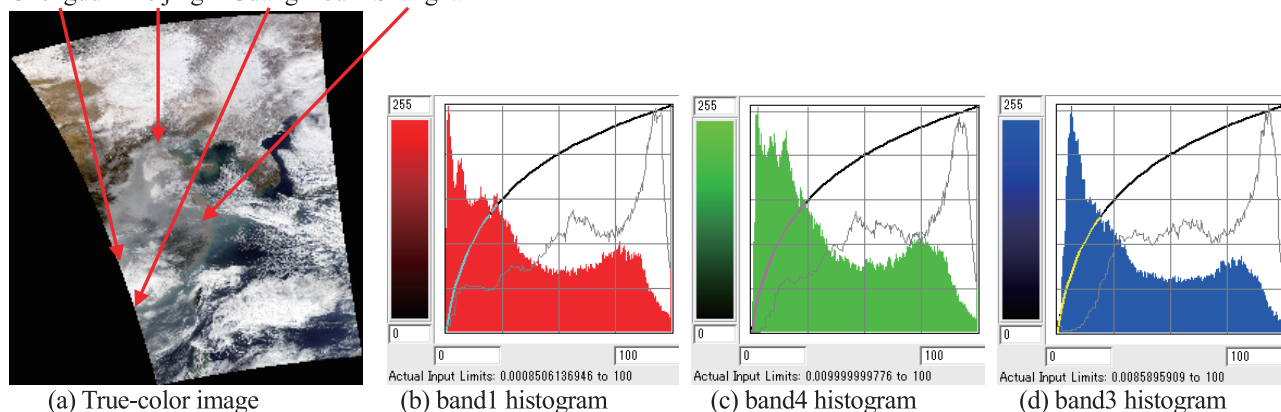


Fig. 3 True-color image(R,G,B=bands 1,4,3) and its histograms (range: 0 to 100, histogram transformation: logarithmic).

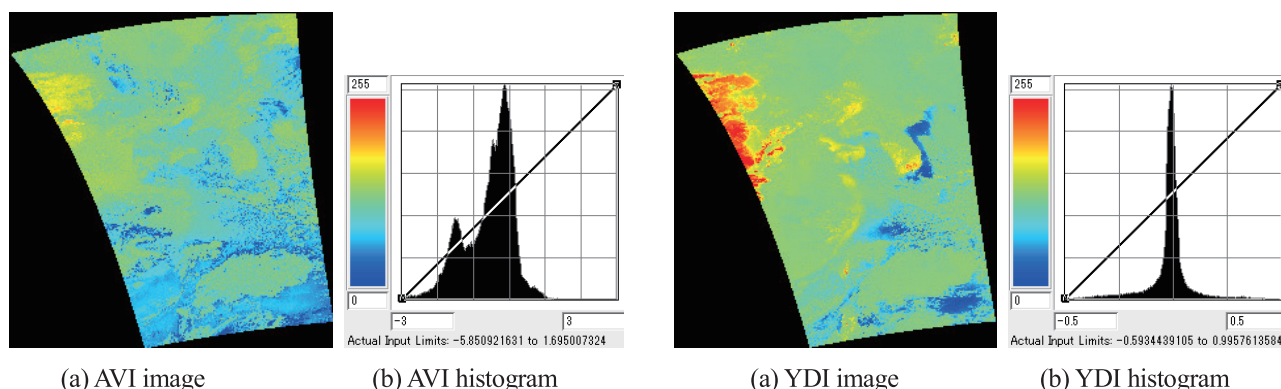


Fig. 4 AVI image (range:-3 to 3K, histogram transformation: linear). Fig. 5 YDI image (range:-0.5 to 0.5, linear).

4.4 黄砂や雲などを色で識別する RGB 合成画像とその変形の検討

文献⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾では、黄砂や雲などを色で識別する RGB 合成画像として、最良の組合せ{R,G,B=AVI, band7-band1, T11} と、2 番目に良い組合せ{R,G,B=AVI, band4-band3, T11} を提案した。なお、{R,G,B=AVI, band7-band1, T11}画像は、黄砂、普通の水雲、普通の氷雲、光学的に厚い水雲、光学的に厚い氷雲、雪原・氷、陸地、海を識別できる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。第 4.2 節に示したように、AVI や{band4-band3}は、わずかではあるが PM2.5 を検出するので、これらを含めた RGB 合成カラー画像、およびその変形法の画像がどのように表示されるのかを調べた。

Fig. 6(a)の{R,G,B=AVI, band7-band1, T11}画像では黄砂を検出 (黄色) している。しかし、PM2.5 をごく弱くしか検出しない (薄い紫色) ので、PM2.5 の検出には不適當である。

Fig. 6(b)の{R,G,B=AVI, band4-band3, T11}画像では、黄砂を検出している (黄緑色) が、PM2.5 をごく弱くしか検出しないので、PM2.5 の検出には不適當である。また、長江河口付近沿岸の泥水を黄砂と同様の黄緑色で検出しているため、黄砂検出法としても Fig. 6(a)より劣る。

Fig. 6(c)の{R,G,B=AVI, band10-band9, T11}画像は、Fig. 6(b)の band4, 3 よりも観測波長が短い band10, 9 を用いるとどうなるかを調べるために作成した画像である。黄砂は検出 (黄緑) しているが、PM2.5 は薄紫ではっきりしてなく、PM2.5 の検出には不適當である。

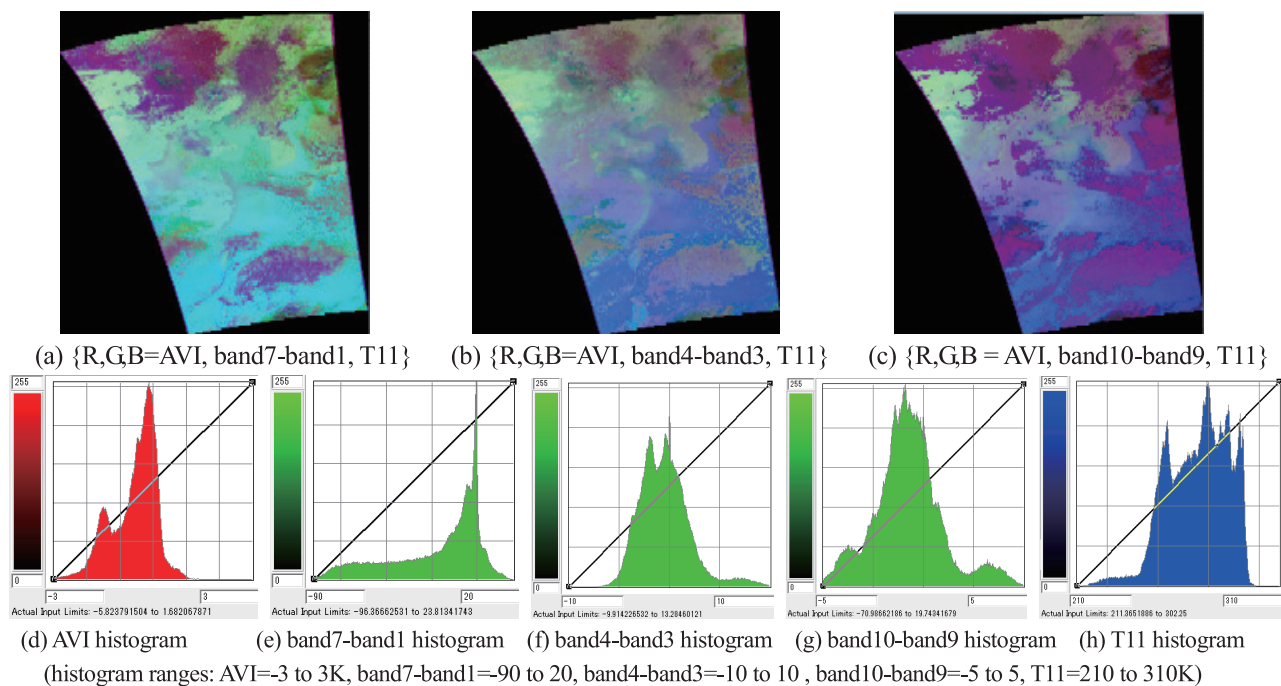


Fig. 6 Composite color images for the evaluation of PM2.5 air pollution detection and their histograms.

4.5 PM2.5 大気汚染を検出するための RGB 合成画像の検討

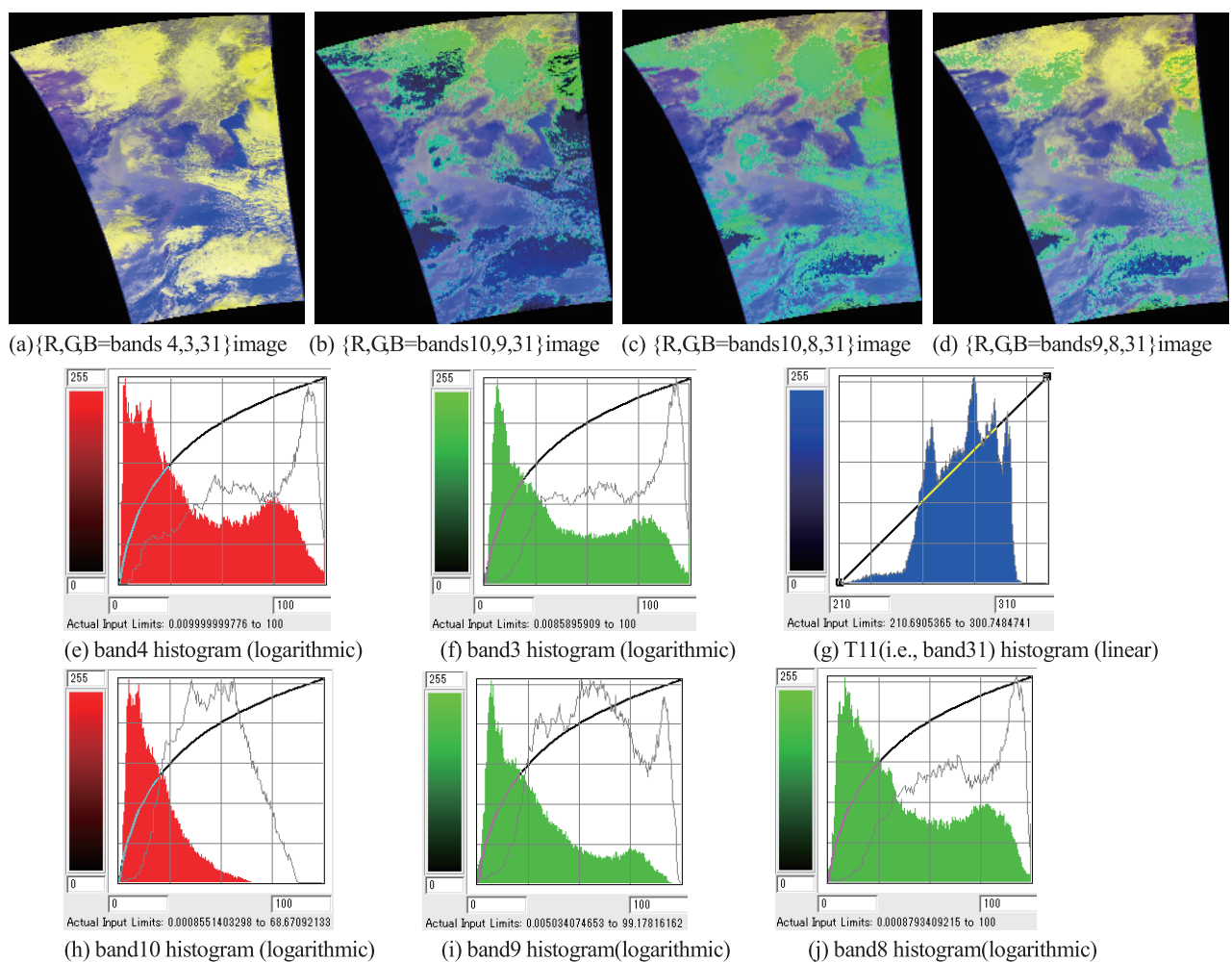


Fig. 7 Composite color images for the evaluation of PM2.5 air pollution detection and their histograms.

第4.2節および第4.4節で示したように、差バンド画像、差バンドを含む画像はいずれも、PM2.5の検出には不適當であった。しかし、第4.1節の単バンド画像 (band1~band10) を見れば、PM2.5 大気汚染を認識できていた。従って、R,G,Bのそれぞれに単バンドを割り当てれば、PM2.5をうまく検出できる可能性があると予測できる。Fig.7にその予測に基づいた画像を示す。なお、ヒストグラムがLinearのままでは画像が暗かったので、図示したようにRとGに割り当てるバンドのヒストグラムにLogarithmic変換をかけて、画像を明るくしてある。

Fig.7(a)の{R,G,B=band4,band3,band31}画像は、雲を黄色、大気汚染を黄色がかかった薄紫色で検出するのは良いのであるが、沿岸域の泥水を茶色がかかった薄紫色で検出する(大気汚染と泥水がよく似た色になる)ので、PM2.5大気汚染検出画像としては不適當である。

Fig.7(b)の{R,G,B=band10,band9,band31}画像はPM2.5大気汚染を薄紫~肌色、雲を緑色、雪原を黄色で検出し、沿岸域の泥水を検出しないので、PM2.5大気汚染検出画像として適當である。なお、濃い青色はband10とband9でnull値となった雲の部分である(第4.1節参照)。雲の一部は黄色で表示される場合もある。

Fig.7(c)の{R,G,B=band10,band8,band31}画像、および、Fig.7(d)の{R,G,B=band9,band8,band31}画像もPM2.5大気汚染検出画像として適當であるが、Fig.7(b)より劣る。その理由は、Fig.3(a)のトルーカラー画像を基準にして判断すると、Fig.7(c)(d)は大気汚染を強く検出しすぎている。また、Fig.7(d)では雲の一部が緑色でなく黄色になっており、雪原と区別がつかないためである。

4.6 最適なPM2.5大気汚染検出法

第4.5節の結果より、PM2.5大気汚染の検出法として次のものを提案する。

最良の組み合わせ {R,G,B=band10,band9,T11} 式(1)

2番目に良い組合せ {R,G,B=band10,band8,T11} 式(2)

および {R,G,B=band9,band8,T11} 式(3)

この提案方法では、陸上及び海上の大気汚染(PM2.5)が「薄紫~ピンク~肌色」で表示される。検出原理は次のようである。PM2.5大気汚染(黄砂を除く)は、青付近のバンドでは波長の短い光の方をよく吸収する⁽¹⁷⁾。即ち、式(1)(2)(3)ともにRの値の方がGより大きい。PM2.5大気汚染の場所のT11(Bに割り当てられている)は雲より温度が高く、地表より温度が低い。従って、RとBで紫がかかった色になるのである。

雲の場合、青付近のバンドでの雲の反射率は元々高く、波長によってもあまり変わらないのであるが、雲は波長の長い光の方を多く吸収する。雲の温度T11は低いのでBの値は小さい。従ってGがRより優勢であれば緑色になり、GとRが同レベルであれば黄色になるのである。

式(1)と式(2)の違いは、Gがband9かband8の違いである。PM2.5大気汚染があった場合、band8の光の方がband9の光よりも、PM2.5大気汚染で多く吸収されるので、Gの値は式(2)の方が小さくなる。従って、式(2)の方が式(1)より紫色が濃くなる。これが、第4.5節で述べた「Fig.7(c)がFig.7(b)よりも大気汚染を強く検出する」理由である。式(2)と式(3)の違いは、Rがband10かband9の違いである。雲があった場合、band10の光の方がband9の光よりも若干ではあるが、雲に多く吸収されるので、Rの値は式(3)の方が大きい。従って、雲は式(3)の方が黄色になる可能性が大きい。これが、第4.5節で述べた「Fig.7(d)では雲の一部が緑色でなく黄色になる」理由である。

5. 中国から日本へのPM2.5大気汚染の飛来

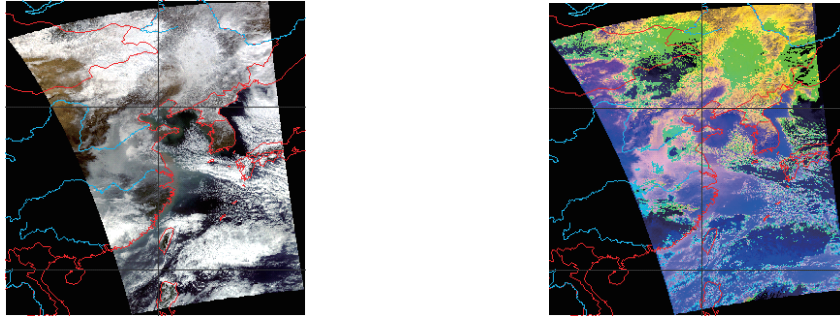
Fig.8は、第4節で使用したAqua-MODISデータと同じものを画像処理し、地図と重ね合わせ表示したものである。Fig.8(a)のトルーカラー画像では、中国の北京から上海にかけての広範囲の平野部が大気汚染状態(白っぽいもやのように見える)である。白そのものは雲である⁽¹⁶⁾。Fig.8(b)の大気汚染検出画像では、陸上及び海上の大気汚染がピンク色でうまく表示されている。なお、この衛星画像の観測時間帯(2013年1月26日中国時間13時)の中国各地のPM2.5濃度は第4.3節で記した通りである。

Fig.9は、Fig.8の中国大陸のPM2.5が日本へ飛来⁽³⁾⁽¹⁸⁾してきた時(2013年1月31日)の画像である。朝鮮半島付近から日本の九州、山陰、四国付近へ大気汚染が飛来している。即ち、Fig.9(a)では大気汚染が白っぽいもやのように見え、Fig.9(b)では大気汚染が薄紫色~ピンク色で表示される。なお、北九州市のWebページ

(<http://www.city.kitakyushu.lg.jp/files/000157633.pdf>)によれば、北九州観測局における1月31日のPM2.5濃度の

日平均値 (即ち, 24 時間の平均値) は $44.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった.

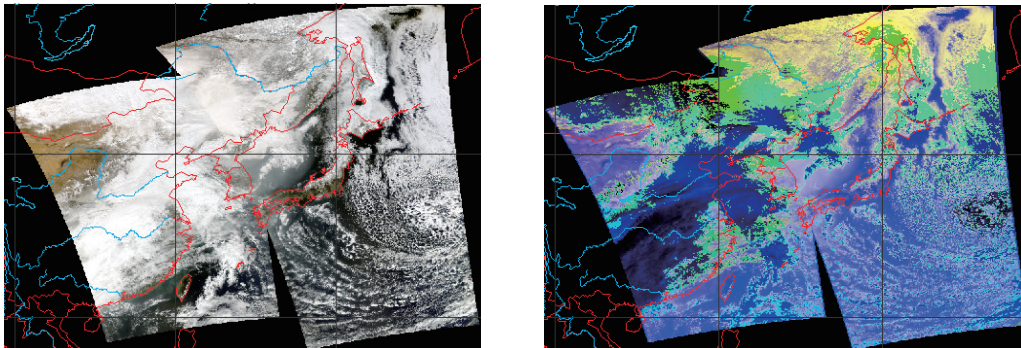
中国では PM10 (黄砂) があった場合, PM10 に占める PM2.5 (黄砂で粒径の小さなもの) の割合は 5~7 割程度とのことである⁽¹⁹⁾. 従って, Fig. 9(b)ではゴビ砂漠に PM2.5 が薄く検出されている. なお, 小粒子の黄砂か, 黄砂以外の PM2.5 大気汚染かは, AVI 画像との比較で分かる.



(a) True-color image {R,G,B=band1, band4, band3}

(b) PM2.5 air pollution detection image {R,G,B=bands10,9,31}

Fig. 8 Aqua-MODIS images at 4:57-5:07 UT on 26 January 2013.



(a) True-color image {R,G,B=band1, band4, band3}

(b) PM2.5 air pollution detection image {R,G,B=bands10,9,31}

Fig. 9 Aqua-MODIS images at 3:37-5:24 UT on 31 January 2013.

6. 永谷らの大気汚染検出法

学会で良いと認められた MODIS データを用いた大気汚染検出法として永谷らの方法⁽¹⁾⁽²⁾がある. これはディスプレイの RGB に次のように割当ててる方法である.

$$R,G \leftarrow AE = 2.0 * B3 - B1 + C_m$$

$$B \leftarrow WI = \max(wi_{TCl}, wi_{AVI}, wi_{NDWI}, wi_{NDSI})$$

ここで $wi_{TCl} = -1.0 / (290 - 265) * BT32 + 11.6$

$$wi_{AVI} = -1.0 / (\exp(0.08 * BT31 - 23.2) + 1.0) * AVI \quad AVI = BT31 - BT32 \quad (\text{加藤とは逆の定義になっている})$$

$$wi_{NDWI} = 1.8 * NDWI * \text{landmask}, \quad NDWI = (B2 - B5) / (B2 + B5)$$

$$wi_{NDSI} = 1.2 * NDSI * \text{landmask}, \quad NDSI = (B4 - B7) / (B4 + B7)$$

AE: エアロゾル強調, C_m : オフセット, WI: 水分指数

B1, B2, B3, B4, B5, B7: band 1, 2, 3, 4, 5, 7 の反射率 (0.0~1.0 の値), BT31, BT32: band 31, 32 の輝度温度

landmask (陸域マスク): 陸域 1, 海域 0

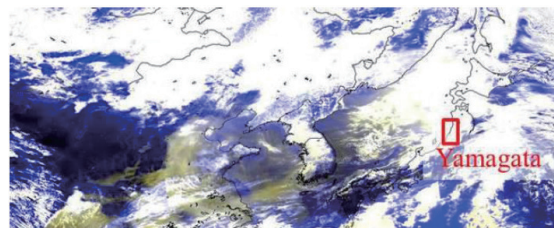


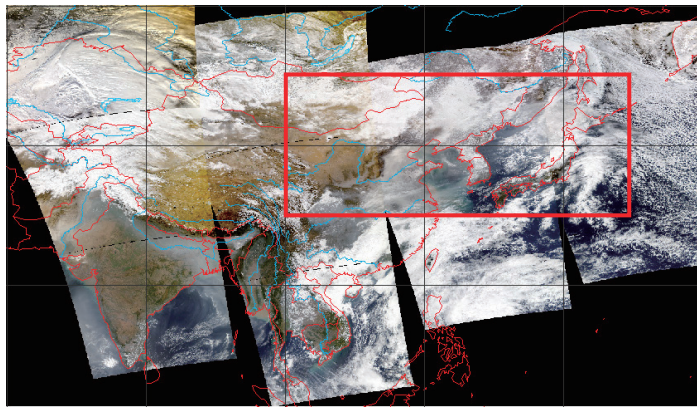
Fig. 10 False color composite image of Aqua-MODIS on 12 January 2013 (Fig. 6(a) of Nagatani et.al.⁽¹⁾).

以上のようにすると、AE が 0.2 以上で濃度の高い大気エアロゾルを示し、WI が 1.0 以上で雲や雪氷を示す。

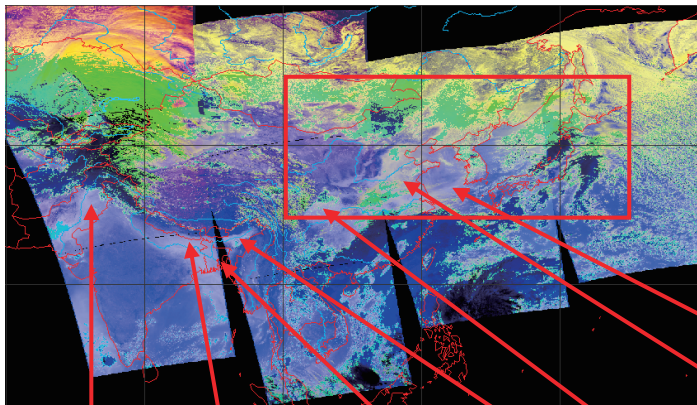
更に、 $R, G \leftarrow AE = 0.0 \sim 0.3$, $B \leftarrow WI = 0.0 \sim 1.0$ として、256 階調に割当てると、大気汚染物質は黄色、雲や雪氷は白色、その他は青色で表現される。Fig. 10 に、本手法による 2013 年 1 月 12 日の Aqua-MODIS の大気汚染検出画像を示す。中国大陸から日本までの大気汚染の分布が黄色で表示されている。

7. インド・中国から日本までの PM2.5 大気汚染と黄砂の検出

Fig. 11(a)-(d) は北緯 3~60 度、東経 60~160 度の広範囲の画像であり、赤の四角枠は Fig. 10 の永谷らの画像範囲を示す。Fig. 11(a) のTrue-color 画像では白っぽいもやのように見えるものが黄砂なのか大気汚染なのかを判別できないが、Fig. 11(b) の大気汚染検出画像でピンク色の部分が大気汚染であり、Fig. 11(c) の AVI 黄砂検出画像で黄~橙~赤色の部分が黄砂であると判別できる。(例えば、インド北東部は大気汚染であり、黄砂ではないと



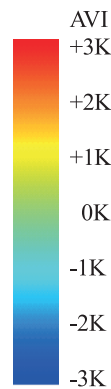
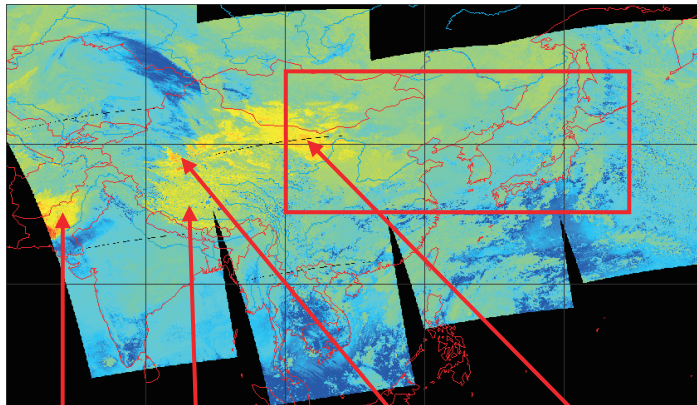
(a) True-color image (R,G,B=bands 1,4,3)



PM2.5 大気汚染は薄紫~ピンク~肌色で表示される。
雲は緑、青~黒で表示される。黄色は雪原と雲の場合がある。

Air Pollution (Pakistan east, India northeast, Bangladesh, Assam, Szechwan-basin, Chinese east, sea)

(b) PM2.5 air pollution detection image (R,G,B=band10,band9,T11)



黄砂は黄色~橙~赤色で表示される。
普通の雲は青色で表示される。光学的に厚い雲ほど濃い青で表示される。但し、非常に大きな光学的厚さと非常に大きな粒子サイズを持つ雲の場合は AVI > 0 となることがある⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

DSS (Pakistan west, Tibetan plateau, Taklamakan Desert, Gobi Desert)

(c) DSS detection image using AVI (AVI=T12-T11)

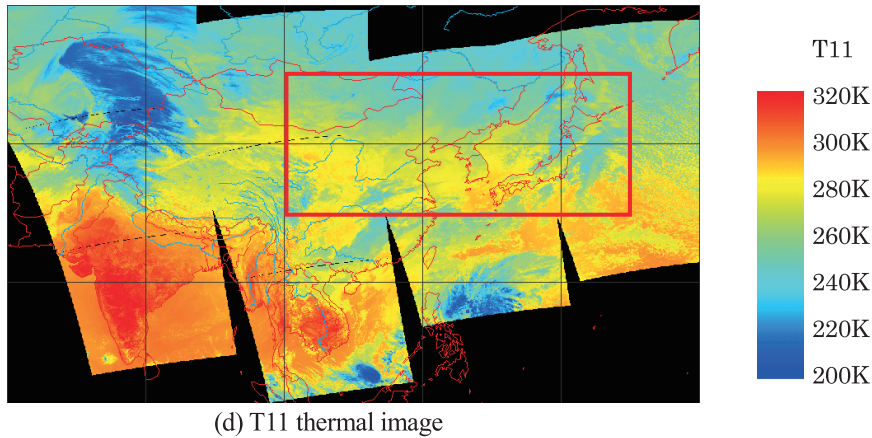


Fig. 11 Aqua-MODIS images at 3:07-8:15 UT on 12 January 2013 (Display area:3-60N, 60-160E).

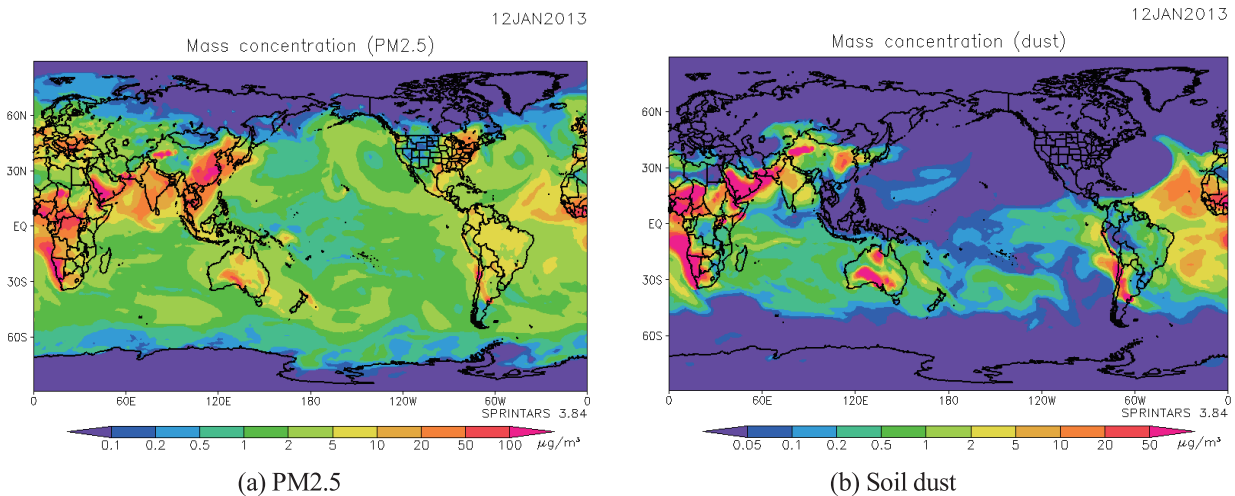


Fig. 12 Surface concentration maps of PM2.5 and soil dust on 12 January 2013 by SPRINTARS.

判別できる。) また、Fig. 11 (b)の赤の四角枠の中のピンク色 (大気汚染を表す) の部分は、Fig. 10 の永谷らの大気汚染検出結果 (黄色) と同じである。

なお、中国東部を衛星が観測した時間帯 (2013 年 1 月 12 日中国時間 13 時) の PM2.5 濃度は、環境省の Web ページ (http://www2.env.go.jp/pm25monitoring/data/csv/H_2014.zip) によれば、北京 $458 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、成都 $338 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、広州 $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、上海 $236 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。この日の北京の PM2.5 濃度の最大値は 20 時の $886 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。このように北京市が激甚な大気汚染状態になった原因は、地上付近の空気の冷え込みにより大気の大気対流が停止し、市内及び周辺地域の工場や自動車から排出された大量の汚染物質が、長時間・広範囲・高濃度に蓄積し、滞留したためである⁽¹⁹⁾。

ここで、Fig.11(b)(c)の妥当性を調べる。PM2.5 や黄砂などの分布状況をシミュレーションする数値モデルとして評価の高い SPRINTARS の結果と Fig.11(b)(c)とを比較する。なお、SPRINTARS とは、九州大学応用力学研究所気候変動科学分野が開発した数値モデルで、大気中の浮遊粒子状物質 (エアロゾル) による地球規模の気候変動および大気汚染の状況をシミュレーションするものである (実測結果ではない)。Fig. 12(a)は PM2.5 の地表濃度の地図で、Fig. 12(b)は土壌粒子 (即ち、黄砂) の地表濃度の地図である。1 日 (24 時間) を通したシミュレーション結果なので、Fig. 11(b)(c)の観測結果とは単純には比較できないが、傾向は分かる。Fig. 11(b)(c)と Fig. 12(a)(b)を比較すれば、ほぼ同じ結果となっているので、Fig. 11(b)(c)は妥当であると結論できる。

8. 中国の大気汚染の実際の写真とそれに対応する衛星画像の例

Fig. 13 は 2014 年 10 月 17 日の中国時間 9 時頃の北京市にある天安門から天安門広場を見た写真 (加藤撮影) である。空は少しかすんだ青空で雲があり、地上は大気汚染で約 600m 先の建物 (毛主席記念堂) がかすんで見

えている。環境省の Web ページ (http://www2.env.go.jp/pm25monitoring/data/csv/H_2014.zip) によれば、この時間帯の北京市の PM2.5 濃度は $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。

Fig. 14 は、福井工業大学あわらキャンパスの衛星受信システムで受信した 2014 年 10 月 17 日 5 時 20 分 UT (中国時間 13 時 20 分) の Aqua-MODIS データを、衛星データ処理ソフトウェア HDF-EOS と衛星画像処理ソフトウェア ER Mapper を用いて画像処理し、その結果 (画像) を地理情報システムソフトウェア ArcGIS を用いて地図と重ね合わせ表示したものである。表示範囲は北緯 37 度~42 度、東経 113.5 度~119.5 度である。大気汚染は中国としてはそれほど強くないので、Fig. 14(a)のトルーカラー画像、Fig. 14(b)の PM2.5 大気汚染検出画像ともに大気汚染を通して地上の様子がうっすらと見える。北京市の場所は赤の星印で示されている。この時間帯の北京市の PM2.5 濃度は $105 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であるので、Fig. 14(b)では大気汚染が薄紫~ピンク色でうまく検出されていることが分かる。このように、提案方法は、永谷らの方法よりも簡単に PM2.5 大気汚染を検出できる。



Fig. 13 Picture of Tian'anmen Square viewed from Tian'anmen in Beijing on 17 October 2014 and its zoom lens pictures.

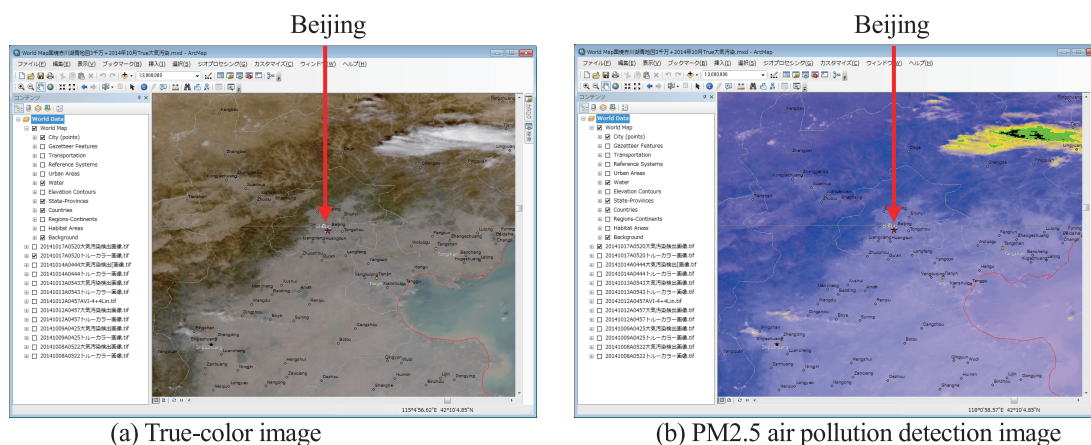


Fig. 14 Aqua-MODIS images at 5:20 UT (i.e., 13:20 CST) on 17 October 2014 which are displayed with ArcGIS.

9. 結 言

第 2 節では、AVI 法や YDI 法の黄砂検出法が PM2.5 大気汚染を少しではあるが検出することに着目し、黄砂検出法の PM2.5 大気汚染検出への拡張可能性を検討した結果、MODIS データを用いた場合、AVI 法の拡張は難しいこと、YDI 法で使う band4, band3 よりも短い波長の band10, band9, band8 を使うと PM2.5 大気汚染を検出できる可能性があること、を述べた。

第 4 節では、MODIS データを用いた場合の最適な PM2.5 大気汚染検出法を見出すために、2013 年 1 月 26 日の Aqua-MODIS データを用いて種々の画像処理を行った結果、PM2.5 大気汚染検出のための RGB 合成カラー画像表示の最良の組合せとして {R,G,B=band10, band9, T11}, 2 番目に良い組合せとして {R,G,B=band10, band8, T11} および {R,G,B=band9, band8, T11} を提案した。

第 5 節、第 7 節では、提案手法 {R,G,B=band10, band9, T11} を用いた応用例を示した。特に第 7 節では、インド・中国から日本までの広範囲について、提案手法による PM2.5 大気汚染検出と AVI 法による黄砂検出を行い、両画像を比較することにより、PM2.5 大気汚染と黄砂が識別できることを示した。

第 6 節では、大気汚染検出法として良いと認められている永谷らの方法を概説し、その処理画像例 (Fig. 10)

を示した. そして第 7 節の Fig. 11(b)の赤枠で囲まれた範囲の PM2.5 大気汚染検出結果が, Fig. 10 と一致することを示した. 即ち, 本提案手法は, インド・中国から日本までのような広い範囲に対して, 永谷らの方法よりも簡単に, PM2.5 大気汚染の分布を把握することができるのである.

謝 辞

本研究は, 文部科学省・平成 23~27 年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「北陸地域における環境の計測と保全に関する研究拠点形成」(研究代表者: 青山隆司) の助成を受けており, 感謝する.

文 献

- (1) I. Nagatani, T. Miura, F. Yanagisawa and J. Kudoh, “A methodology for detecting transboundary air pollution using MODIS data”, *Proceedings of ISRS 2013* (2013-05), pp.552-555.
- (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) 内閣府, “PM2.5 大気汚染と健康への影響”, 政府インターネットテレビ, <http://nettv.gov-online.go.jp/prg/prg7769.html> (2013 年 4 月 4 日公開).
- (4) 向井苑生, “エアロゾル (PM2.5) レトリバーブル: 放射計算の役割”, 日本リモートセンシング学会第 56 回学術講演会講演論文集 (2014-05), pp.63-64.
- (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 (2008-05), pp.329-336.
- (6) Y. 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, “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 (2010-05), pp.350-359
- (8) Y. Kato, “Detection properties of dust and sandstorms by using AVI of MODIS data”, *Proceedings of SPIE*, Vol.7859 (2010-12), pp.78590H/1-12.
- (9) 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.
- (10) Y. 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.
- (11) 加藤芳信, “MODIS データを用いた中国大陸から日本までの冬季の大気汚染の検出”, 平成 26 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集 (2014-09), F80.
- (12) 加藤芳信, “MODIS 衛星データを用いた PM2.5 大気汚染の検出—黄砂検出との違い—”, 第 9 回大気バイオエアロゾルシンポジウム要旨集 (2015-01), pp.35-36.
- (13) 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 (1999), pp.253-256.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 日刊 県民福井, “中国大気汚染くっきり 福井工大・加藤教授が衛星画像処理”, 2013 年 3 月 15 日第 1 面掲載.
- (17) 中島孝, 中島映至, 日暮明子, 菊池信行, 久慈誠, “ADEOS-II 衛星搭載 GLI センサは大気の何を見てきたか”, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.26, No.1 (2006-01), pp.33-36.
- (18) 国立環境研究所 地域環境研究センター, “日本国内での最近の PM2.5 高濃度現象について (お知らせ)”, 2013 年 2 月 21 日発表, <https://www.nies.go.jp/whatsnew/2013/20130221/20130221.html>
- (19) 井上直己 (在中国日本国大使館経済部書記官), “北京市の大気汚染について ~微小粒子状物質 PM2.5 による汚染の現状と対策~, 2013 年 10 月 28 日「大気汚染と健康管理に関する講演会」資料, http://www.cn.emb-japan.go.jp/consular_j/131031air_pollution_1.pdf

(平成 27 年 3 月 31 日受理)