

# AVI 法を用いた黄砂検出における雲の影響と識別

加藤 芳信 \*

## Influence and Discrimination of Clouds in the Detection of Dust and Sandstorms using AVI Method

Yoshinobu Kato

The AVI method can detect the dust and sandstorms (DSS) in satellite images both at daytime and night. The aerosol vapor index (AVI) is defined as  $AVI = T_{12} - T_{11}$ , where  $T_{12}$  and  $T_{11}$  are the brightness temperatures at  $12\mu m$  and  $11\mu m$  wave lengths, respectively. The fault of AVI method is to mistake thick clouds for DSS occasionally. In this paper, it is explained that usual clouds bring the effect of  $AVI < 0$ , and the clouds with very large optical thickness and very large grain size may bring the effect of  $AVI > 0$ . Two MODIS images of the cloud of  $AVI > 0$  are shown and interpreted by using the AVI vs.  $T_{11}$  scatter charts. The composite color images which can discriminate DSS from clouds etc. are proposed. Two are for daytime MODIS and another one is for nighttime MODIS.

**Keywords:** dust and sandstorms, cloud, MODIS, Terra/Aqua, AVI, BT, AVI vs.  $T_{11}$  scatter chart, composite color image

### 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、地球全体の気候などに影響を与えている。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、AVI (Aerosol Vapor Index) 法[1-3,6-14]とYDI (Yellow Dust Index) 法[4]がよく知られている。YDI 法は可視バンドを使うため昼の衛星画像だけにしか適用できないが、AVI 法は熱赤外バンドを使うため昼と夜の衛星画像に適用できるという特長を有する。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  $12\mu m$  波長と  $11\mu m$  波長での輝度温度 (単位はケルビン K) である。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 band32 ( $11.770 \sim 12.270\mu m$ )、 $T_{11}$  は band31 ( $10.780 \sim 11.280\mu m$ ) の輝度温度に対応する。AVI 法では、水蒸気や雲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[1]。飯野ら[2,3]は、AVI 法の弱点として、稀にはあるが、層の厚い雲を黄砂と誤認する ( $AVI > 0$  となる) ことがあること (但し、理由は明言されていない) を指摘し、これを克服するために、R,G,B に (原文の NOAA のバンドを MODIS のバンドで示すと) AVI, band6-band1, band31 を割当てて合成カラー画像を提案している。同様に、向井ら[5]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。筆者[9-12]も黄砂、黄砂混じりの雲、雲を識別するために、AVI と  $T_{11}$  対 AVI 散布図を併用している。

本文では、まず、井上[15]の氷雲と水雲の  $T_{11}$  対 BT (BT =  $-AVI$ ) グラフに基づき、雲は通常  $AVI < 0$  となる効果をもたらすが、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は  $AVI > 0$  となる効果を

---

\* 産業ビジネス学科

もたらしことがあることを説明する[11,12]。次に, Terra/Aqua 衛星 MODIS センサ・データを用いた場合の  $AVI>0$  となる雲画像の実例を示し,  $AVI>0$  となった理由を T11 対 AVI 散布図を用いて解釈する。更に, 黄砂と雲などを画像の色で識別する飯野ら[2,3]の方法(昼のみの NOAA 衛星データを対象)を検討し[6], その変形版(昼と夜の MODIS データを対象)を提案する。使用したソフトウェアは, 衛星データ処理ソフトウェア HDF-EOS(フィンランド VTT 社製)と衛星リモートセンシング画像処理ソフトウェア ER Mapper 7.1 である。

## 2. これまでに発表されている黄砂検出のための式

文献[1-4]の結果を MODIS の band に読み替えて示す。

(1) AVI 法:  $AVI>0$  で黄砂ありと判定する。但し, 文献[1-3]は NOAA 衛星の band を対象とする。

$$AVI = T12 - T11 = \text{band32 の輝度温度} - \text{band31 の輝度温度} \quad (1)$$

(2) YDI 法: 黄砂の青バンドの吸収効果を利用した黄砂検出法で, 2 つの定義式がある[4]。YDI $>0$  で黄砂ありと判定する。

$$YDI(B4, B3) = (\text{band4} - \text{band3}) / (\text{band4} + \text{band3}) \quad (2-1)$$

$$YDI(B1, B3) = (\text{band1} - \text{band3}) / (\text{band1} + \text{band3}) \quad (2-2)$$

(3) T12-T8.5 法: 文献[4]に記されたもう 1 つの方法で, T12-T8.5 $>0$  で黄砂ありと判定する。水晶(黄砂の主成分と考えられる)の熱赤外バンドでの複素屈折率の虚数部の差が大きいことに着目した黄砂検出法である[10]。

$$T12 - T8.5 = \text{band32 の輝度温度} - \text{band29 の輝度温度} \quad (3)$$

(4) AVI 応用合成カラー表示法: 文献[2,3]に記された方法で, 黄砂と雲を色で識別する。

$$R:G:B = AVI : \text{band6} - \text{band1} : T11 \quad (4)$$

ここで, 本文で用いるバンドの観測波長帯をまとめると, band1=620~670nm(赤), band3=459~479nm(青), band4=545~565nm(緑), band6=1628~1652nm(中間赤外), band7=2105~2155nm(中間赤外), band29=8.400~8.700  $\mu\text{m}$ (熱赤外), band31=10.780~11.280  $\mu\text{m}$ (熱赤外), band32=11.770~12.270  $\mu\text{m}$ (熱赤外)である。

## 3. 雲が存在する場合の AVI 法の特性と T11 対 AVI 散布図による解釈

水蒸気や雲が存在しない場合で黄砂が存在する場合,  $AVI>0$  となる。水蒸気または雲が存在する場合で黄砂などのエアロゾルが存在しない場合, 一般に  $AVI<0$  となる。飯野ら[2,3]は黄砂検出を目的とした場合の AVI 法の弱点として, 非常に厚い雲があると  $AVI>0$  となり, 黄砂有りと誤認することがあると指摘している(但し, その理由および画像例は明示されていない)。

本章では, まず, (1)雲は通常  $AVI<0$  であるが, 光学的厚さが非常に大きい場合  $AVI>0$  となりうることを説明し[11,12], 次に, (2)2007 年 4 月 3 日の Aqua 衛星 MODIS 画像に写っている台風 1 号の雲で  $AVI>0$  となる画像例とその解釈[11,12], (3)2006 年 4 月 8 日の Aqua 衛星 MODIS 画像に写っている一部の雲が  $AVI>0$  となる画像例とその解釈を示す。

### 3. 1 T11 対 BTD グラフによる雲の特性

井上[15]に基づき説明する。水雲および氷雲の粒子サイズは約 1~100  $\mu\text{m}$  であるので, 雲中の 11  $\mu\text{m}$  と 12  $\mu\text{m}$  波長の放射伝達はミ-散乱の影響を受ける。井上[15]の p.7 図 1.6 より, 氷の複素屈折率の虚数部(吸収の強さに関係)は 11  $\mu\text{m}$  で 0.24, 12  $\mu\text{m}$  で 0.42 であり(差は 0.18), 水のそれは 11  $\mu\text{m}$  で 0.10, 12  $\mu\text{m}$  で 0.20

である（差は 0.10）。井上[15]の p.18 図 1.15 には熱帯標準大気の高度 12km の氷雲（雲の温度 223K）の場合の T11 対 BTD グラフが示されている。ここで、BTD は Brightness Temperature Difference の略であり、 $BTD = T_{11} - T_{12} = -AVI$  と定義される。放射計算は RSTAR ソフトウェアで行われている。氷粒子の有効半径 10, 20, 30  $\mu\text{m}$  の場合の T11 対 BTD 曲線が光学的厚さを 0.01~9.0 まで変化させてプロットされている。全ての BTD は正である（即ち  $AVI < 0$ ）。有効粒子半径 10, 20, 30  $\mu\text{m}$  の曲線において、それぞれ光学的厚さ 2.7, 2.4, 2.3 で BTD は最大値 12.3K, 6.0K, 4.3K をとる。有効粒子半径 10  $\mu\text{m}$  の場合の BTD は有効粒子半径 20  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  の場合の BTD よりも大きい。

井上[15]の p.20 図 1.19 には熱帯標準大気の高度 3km の水雲（雲の温度 279K）の場合の T11 対 BTD グラフが示されている。水粒子の有効半径 6, 8, 12, 16  $\mu\text{m}$  の場合の T11 対 BTD 曲線が光学的厚さを 0.01~10.0 まで変化させてプロットされている。{光学的厚さ 10.0, 半径 12  $\mu\text{m}$ } と {光学的厚さ 8.0 と 10.0, 半径 16  $\mu\text{m}$ } の場合のみ  $BTD < 0$  であり、それ以外は  $BTD > 0$  である。有効粒子半径 6, 8, 12, 16  $\mu\text{m}$  の曲線において、それぞれ光学的厚さ 2.5, 2.0, 1.5, 1.0 で BTD は最大値 1.23K, 1.02K, 0.77K, 0.62K をとる。有効粒子半径 6  $\mu\text{m}$  の場合の BTD は有効粒子半径 8, 12, 16  $\mu\text{m}$  の場合の BTD よりも大きい。即ち、粒子半径が小さいほど、BTD は大きい。氷と水の屈折率の虚数部の差の大きさにより、氷雲の BTD は水雲の BTD よりも大きい傾向がある。

井上[15]の p.18 図 1.15（氷雲の場合、計算結果は全て  $AVI < 0$  となった）と p.20 図 1.19（水雲の場合、計算結果は殆ど  $AVI < 0$  であるが、雲粒子が大きく雲の光学的厚さ大きいとき  $AVI > 0$  となった）は、ある条件を仮定した場合の計算結果のグラフである。条件を変えればグラフの形も若干変わる可能性があることを考慮すれば、次のようにまとめられる。

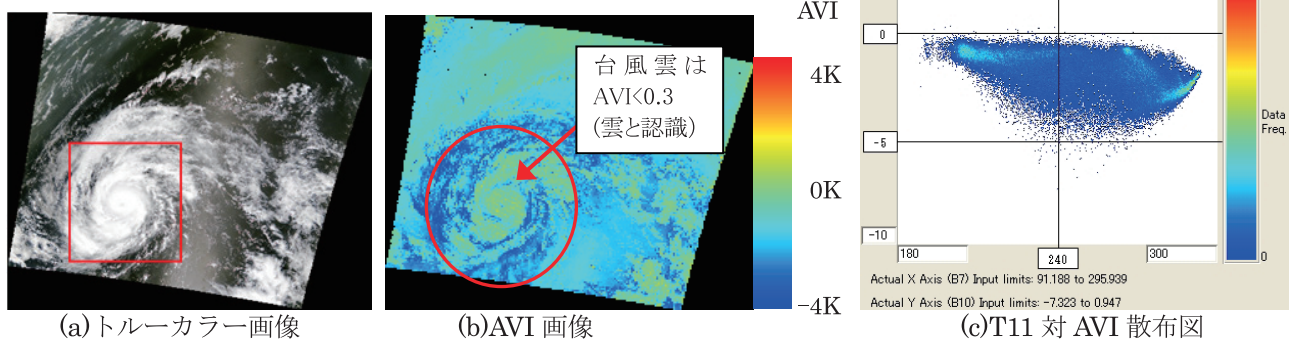


図 1. 2007 年 4 月 3 日 0 時 40 分~45 分 UT 受信 Terra 衛星 MODIS 画像の台風 1 号

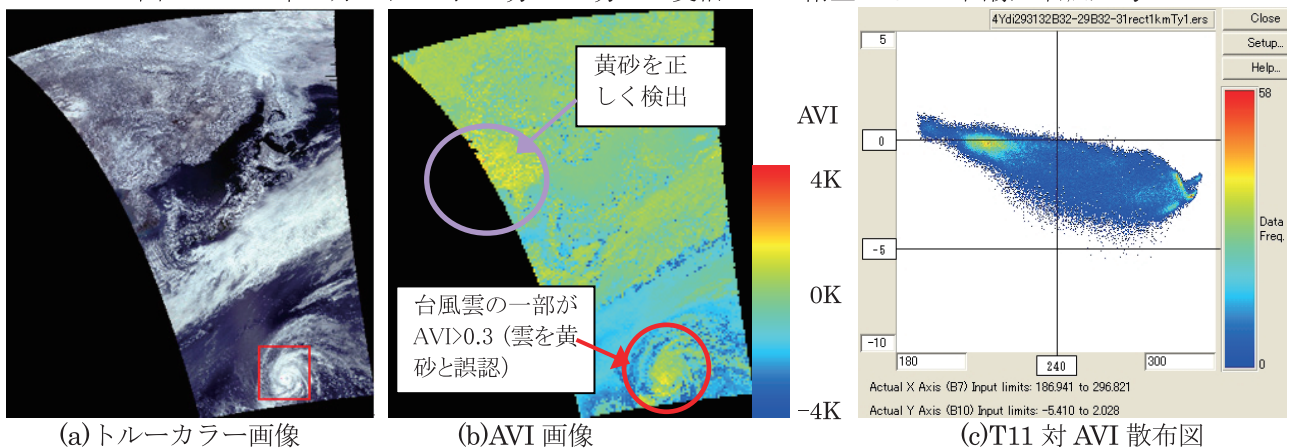
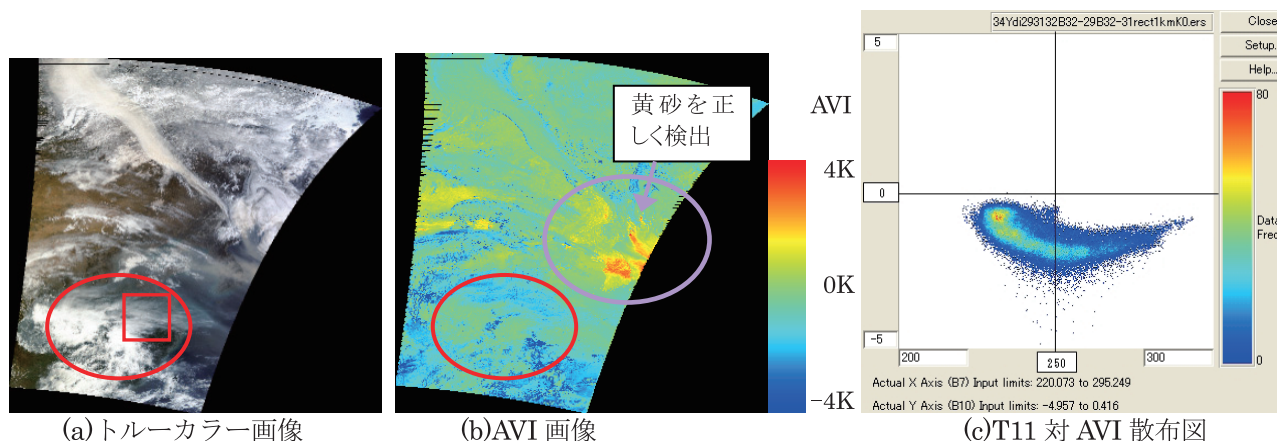


図 2. 2007 年 4 月 3 日 3 時 47 分~4 時 1 分 UT 受信 Aqua 衛星 MODIS 画像の台風 1 号



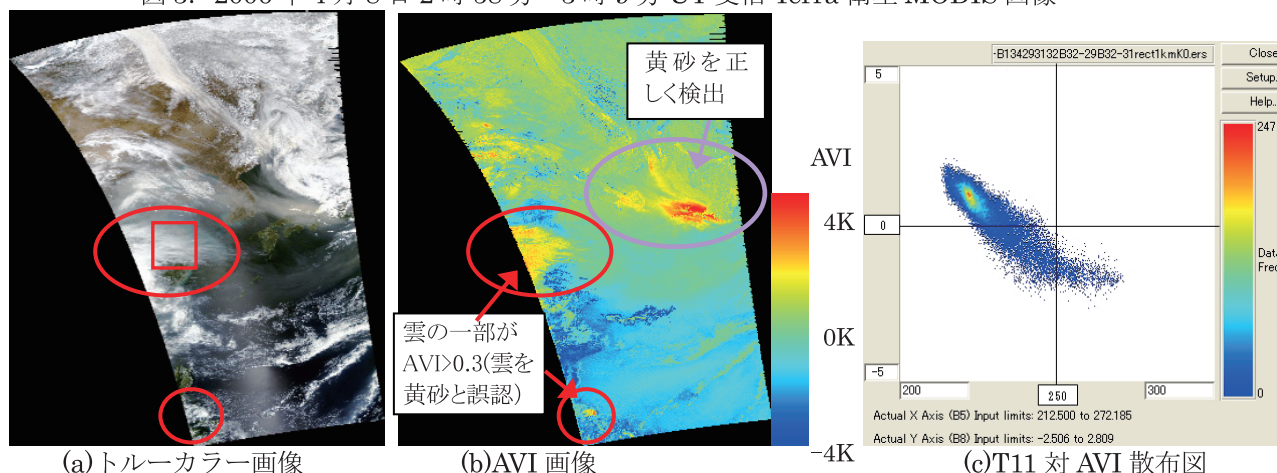


(a) トルーカラー画像

(b) AVI 画像

(c) T11 対 AVI 散布図

図 3. 2006 年 4 月 8 日 2 時 58 分～3 時 9 分 UT 受信 Terra 衛星 MODIS 画像



(a) トルーカラー画像

(b) AVI 画像

(c) T11 対 AVI 散布図

図 4. 2006 年 4 月 8 日 4 時 34 分～47 分 UT 受信 Aqua 衛星 MODIS 画像

(1)雲は通常、 $AVI < 0$  となる効果をもたらす。

(2)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は、氷雲であっても水雲であっても、 $AVI > 0$  となる効果をもたらすことがある。

なお、本文でいう「光学的に厚い雲」とは、1層の雲で光学的に厚い場合と、多層の雲（いくつかの雲が上下に重なっている）で光学的に厚い場合を含む。また、筆者が採用している黄砂の有無の閾値は 0.3K である[7-14]。

### 3. 2 2007 年 4 月 3 日の台風 1 号の Terra/Aqua 衛星 MODIS 画像と T11 対 AVI 散布図

図 1 (4 月 3 日 0 時 40 分～45 分 UT 受信) の MODIS データは NASA から入手したものであり、図 2 (4 月 3 日 3 時 47 分～4 時 1 分 UT 受信) の MODIS データは福井工業大学あわらキャンパスの Terra/Aqua 衛星 MODIS 受信システムで受信したものである。図 1(b)の赤丸で囲まれた台風雲は  $AVI < 0.3K$  (緑～青色で表示) で、正しく雲と判定されている。図 2(b)の台風雲の一部に  $AVI > 0.3K$  (黄～橙色) の部分があり、AVI 法ではその部分を黄砂と誤認することになる。

図 1(c)および図 2(c)は、図 1(a)および図 2(a)の赤四角枠で囲った台風 1 号の雲の部分の T11 対 AVI 散布図(縦軸  $AVI = -10 \sim +5K$ , 横軸  $T11 = 180 \sim 300K$ ) である。図 1(c)は通常の雲の場合の散布の形であり、AVI の正値は殆どない。図 2(c)は散布が左上がりの形で、AVI 値は最大約 2.0K まで上がっている。この変化は第 3.1 節を考慮すると、図 2 は図 1 の約 3 時間後の画像であるため、この間で台風が発達し、一部で雲粒子が大きくなり、雲の光学的厚さも厚くなったためと推測できる。この推測は、気象庁発表のアジア地上解析天気図 ASAS で、



台風の中心気圧が 2007 年 4 月 3 日 0 時 UT のとき 975hPa, 6 時 UT のとき 970hPa となっており, 台風が発達していることから妥当である。

### 3. 3 2006 年 4 月 8 日の Terra/Aqua 衛星画像と T11 対 AVI 散布図

図 3 は 2006 年 4 月 8 日の 2 時 58 分～3 時 9 分 UT 受信の Terra 衛星画像である。図 3(a)はトルーカラー画像であり, 黄砂が朝鮮半島を横切っている様子が見える。図 3(b)の AVI 画像は-4K から+4K の範囲を表示しており, 紫丸のところでは朝鮮半島を横切っている黄砂が黄色～赤色で表示されており, 黄砂は正しく検出されている。図 3(a), (b)の赤丸で囲った雲の部分は, 図 4(a), (b)の大きな赤丸で囲った雲の部分に対応している。図 3(b)の赤丸の範囲は緑～水色～青色である (即ち,  $AVI < 0.3$ ) ので, 黄砂なしと正しく判定されている。

図 4 は, 4 月 8 日 4 時 34 分～4 時 47 分 UT 受信の Aqua 衛星画像である。この画像は図 3 の Terra 衛星画像の約 90 分後の画像である。図 4(a)トルーカラー画像の紫丸のところでは, 黄砂が朝鮮半島を横切って日本へ流入しているのがはっきりと見える。なお, 図 4(a)の下半分の真中左寄りに見える縦の光は, 太陽光が海面で反射した光である。図 4(b)の AVI 画像では,  $AVI < 0$  (黄砂なしに対応) の場所は青色から水色で表示され,  $AVI = 0$  付近 (黄砂なしに対応) の場所は緑色で表示され,  $AVI \geq 0.3$  (黄砂ありに対応) の場所は黄色から赤色で表示されている。図 4(b)の紫丸のところでは朝鮮半島から日本へ続く黄砂の帯は正しく検出されている。しかし, 図 4(b)の左側の 2 つの赤丸の中に黄色～赤色部分 ( $AVI > 0.3$ ) がある。この部分は, 図 4(a)を見れば分かるように雲であり, 黄砂ではない。

この雲の部分 (図 3(a)と図 4(a)で赤四角枠の部分) の T11 対 AVI 散布図を図 3(c)と図 4(c)に示す。横軸は T11 で 200～300K の範囲, 縦軸は AVI で -5～5K の範囲を表示している。図 3(c) (Terra-MODIS) の散布の形は通常の雲の場合の散布の形であり, AVI の正値は殆ど無い。図 4(c) (Aqua-MODIS) では散布が左上がりになっており, AVI 値も最大約 2.8K まで上がっている。

もし, Aqua-MODIS センサと Terra-MODIS センサの特性に違いがないとすれば, 図 3(c)と図 4(c)の散布図の形の違いは次のように解釈される。図 4(c)の T11 の最低値は図 3(c)に比べ約 20K 低い。これが雲とすると, Aqua と Terra では高度が 3km 以上異なる雲を見ていることになり, 別の雲の影響を受けた画面を解析したことになる。即ち, 図 4 の Aqua 衛星画像は図 3 の Terra 衛星画像の約 90 分後の画像であるので, 図 4 の当該雲の部分は, 図 3 の低空にあった雲 (ゆっくりと西進している) の上に, 高速に西進してきた高空の雲が重なって, 光学的に厚い雲となったと解釈される。なお, 別の解釈として, トルーカラー画像では見えない程度の濃さの黄砂またはエアロゾルが当該雲の上空に來たためとも考えられるが, 図 10(b)より, その可能性は低い。

## 4. MODIS による昼の場合の黄砂と雲などを識別するための合成カラー画像の検討

黄砂と雲などを識別する良い方法を見つけるために, 式(4)の AVI 応用合成カラー表示法を参考にして, MODIS の band を種々組合せたものを R,G,B に割り当てて検討した。使用した MODIS データは, 福井工業大学あわらキャンパスの「テラ・アクア衛星受信システム」で受信した 2006 年 4 月 4 日～24 日の 17 パスである。検討のために用いた band は, band1(赤), band3(青), band4(緑), band6(中間赤外), band7(中間赤外), band31(熱赤外), band32(熱赤外)である。以下では, まず, 単バンドおよび差バンドの画像を示して対象物 (黄砂, 雲など) の見え方を表にまとめる。次に, その表に基づき, R,G,B に単バンドまたは差バンドを割り当てた時の色を予測し, 有望な組合せを選定して合成カラー画像を作成し, 評価する。最後に, 黄砂と雲などを識別する最良の組合せを明らかにする。

#### 4. 1 2006年4月7日 Aqua 衛星 MODIS 画像による検討

図5に4月7日5時31分～39分 UT 受信の Aqua 衛星 MODIS の単バンド画像と差バンド画像, 合成カラー画像 (R:G:B=AVI : band4-band3 : T11) を示す。また, 図8にトルーカラー画像と合成カラー画像 (R:G:B=AVI : band7-band1 : T11) を示す。画像の説明等は, 第4.3節, 第4.4節で行う。

#### 4. 2 2006年4月8日 Aqua 衛星 MODIS 画像による検討

図6に4月8日4時34分～46分 UT 受信の Aqua 衛星 MODIS の単バンド画像と差バンド画像, 3つの合成カラー画像を示す。また, 図10にトルーカラー画像と1つの合成カラー画像 (R:G:B=AVI : band7-band1 : T11) を示す。画像の説明等は, 第4.3節, 第4.4節で行う。

#### 4. 3 昼の場合の黄砂, 雲などの対象物に対する単バンド画像と差バンド画像の見え方

図5, 図6およびその他の2006年4月4日～24日の画像を参照して, 8種類の対象物 {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} に対する単バンド画像 {band1(赤), band3(青), band4(緑), band6とband7(中間赤外), T11とT12 (熱赤外のband31とband32の輝度温度)}, 及び, 差バンド画像 {band1-band3, band4-band3, band6-band1, band7-band1, AVI=T12-T11} の見え方 (明るさ) を調べた。画像の明るさは, 明るさの順に, 「明, 中明, 中, 中暗, 暗」に分けた。結果を表1にまとめる。なお, 単バンド画像の場合, band6とband7, T11とT12, はほぼ同じ画像に見える。Aquaのband6にはモアレがあるので, band6は使わないほうがよい。

#### 4. 4 昼の場合の黄砂と雲などを識別するための合成カラー画像 (黄砂・雲等識別画像)

図5と図8の合成カラー画像, 図6と図10の合成カラー画像より判断すると, 黄砂と雲などを識別するための合成カラー画像として最良の組合せは

$$R:G:B=AVI : band7-band1 : T11 \quad (5)$$

である。式(5)の画像表示の原理は, 表1の結果を使って次のようである (黄砂と層の厚い氷雲の場合を示す)。

表1. MODIS による昼の場合の単バンド画像および差バンド画像に対する対象物の見え方 (明るさ)

	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
band1 (赤)	中	明	明	明	明	中	中～暗	暗
band3 (青)	中～中暗	明	明	明	明	中	中～暗	中～中暗
band4 (緑)	中	明	明	明	明	中	中～中暗	暗
band6 (中間赤外)	明	明～中	中～中暗	中	中暗	暗	中明～中	暗
band7 (中間赤外)	明	明～中	中～中暗	中	中暗	暗	中明～中	暗
T11 (band31(熱赤外))	中明	中	中～暗	中	暗	中	明～中	明～中
T12 (band32(熱赤外))	中明	中	中～暗	中	暗	中	明～中	明～中
band1-band3	明	中暗	暗	中	中暗～暗	中	中明	中～中暗
band4-band3	明	中～中暗	中明～中暗	中	中暗～暗	中	中	中～中暗
band7-band1	明	中明～中	中暗～暗	中暗	暗	中暗	中	中
AVI=T12-T11	明	中～暗	中～暗	中	明	中暗	中	中～暗

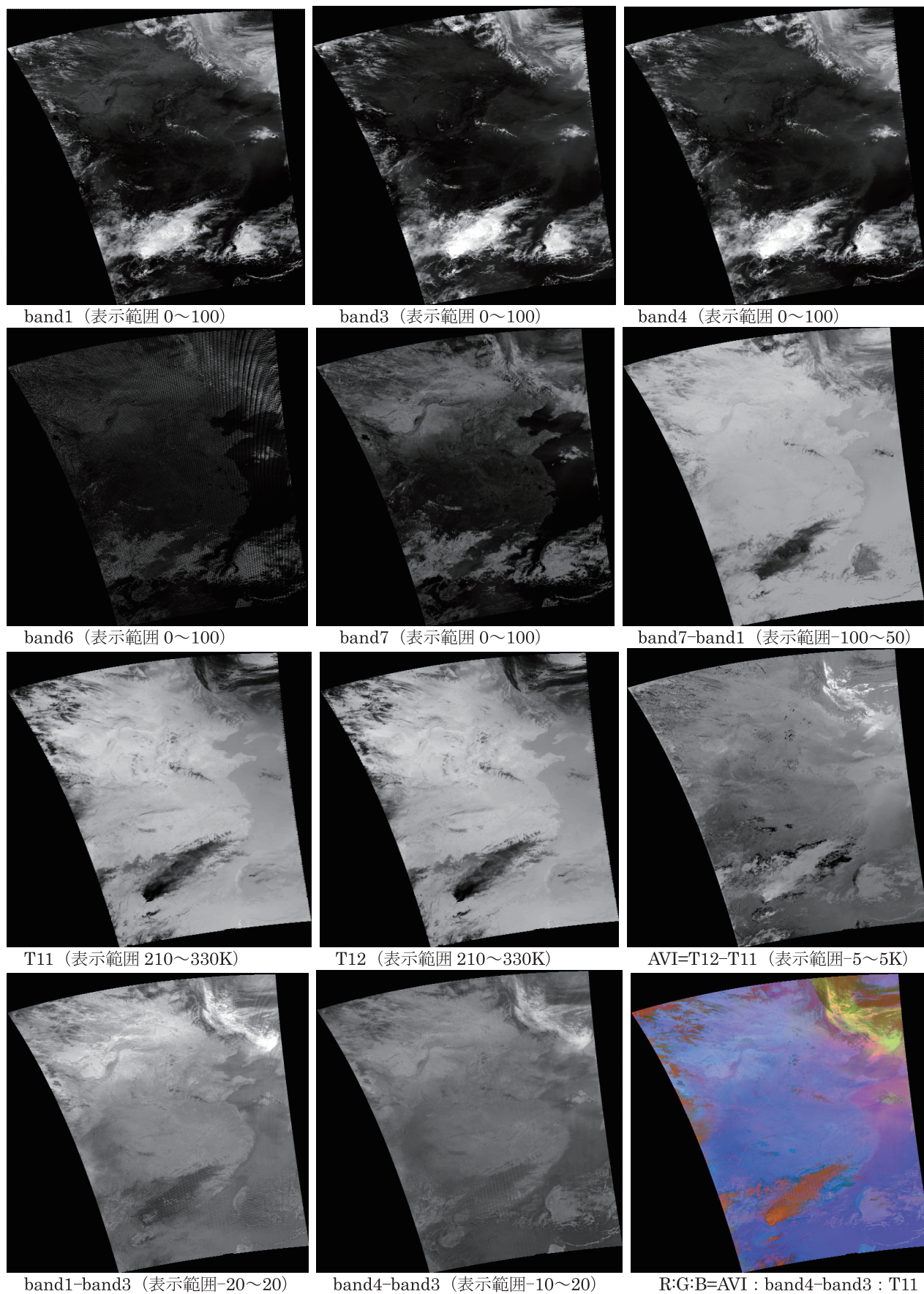
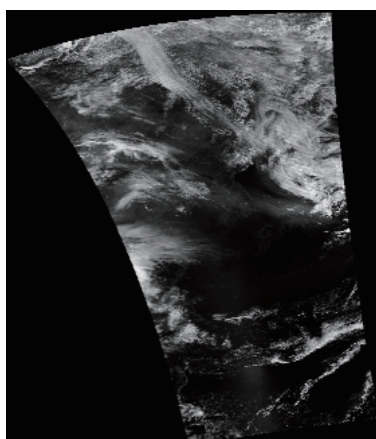
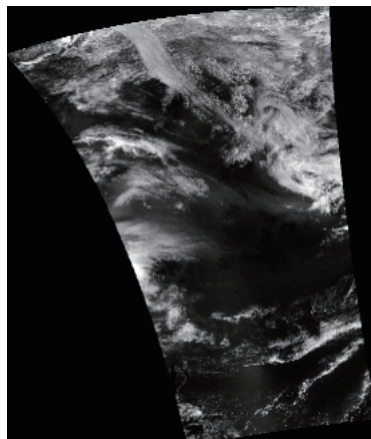


図 5. 2006 年 4 月 7 日 5 時 31 分~39 分 UT 受信の Aqua 衛星 MODIS 画像

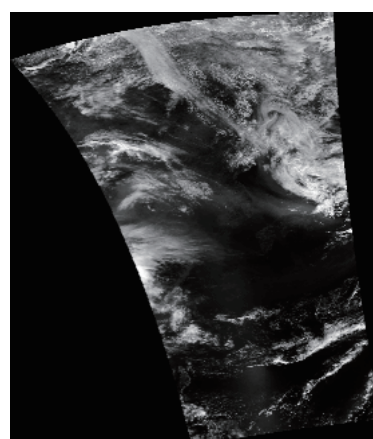




band1 (表示範囲 0~100)



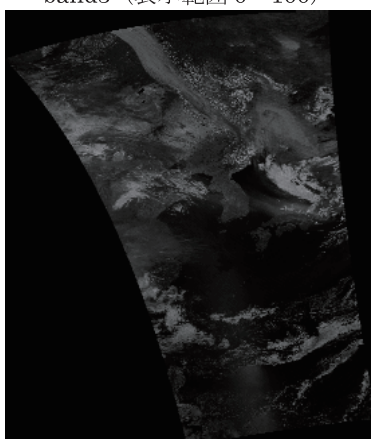
band3 (表示範囲 0~100)



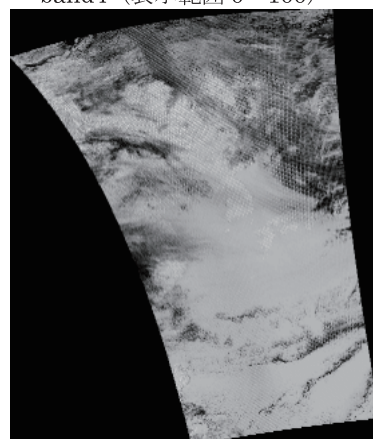
band4 (表示範囲 0~100)



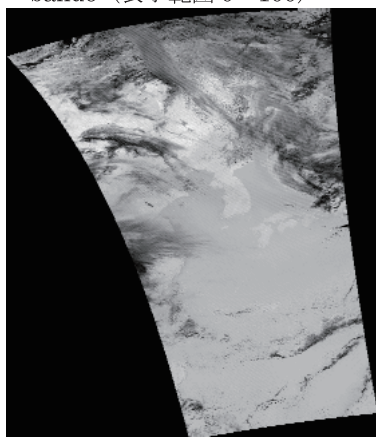
band6 (表示範囲 0~100)



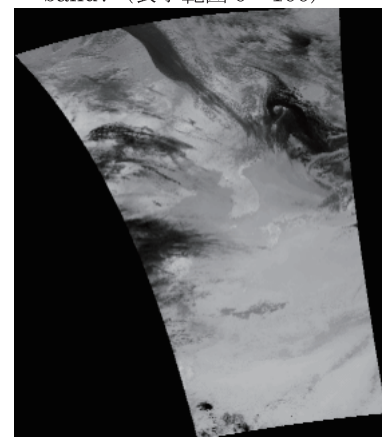
band7 (表示範囲 0~100)



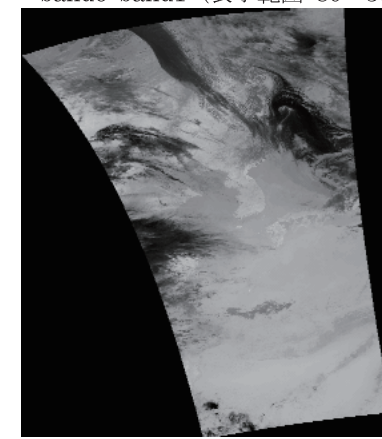
band6-band1 (表示範囲 -80~30)



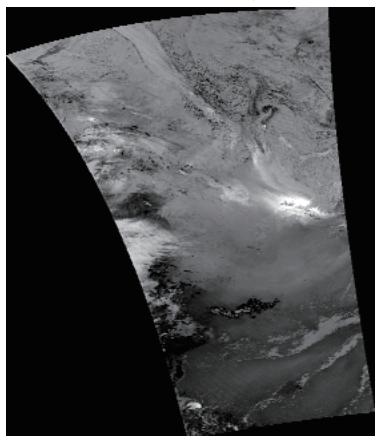
band7-band1 (表示範囲 -80~30)



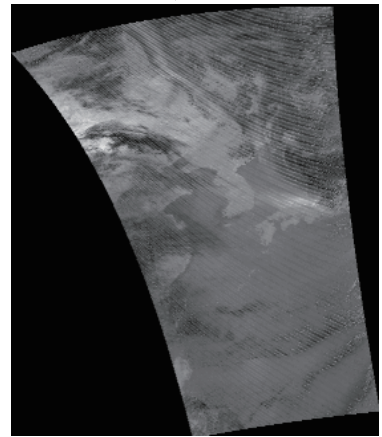
T11 (表示範囲 210~330K)



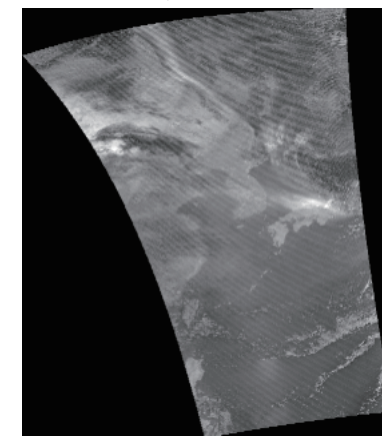
T12 (表示範囲 210~330K)



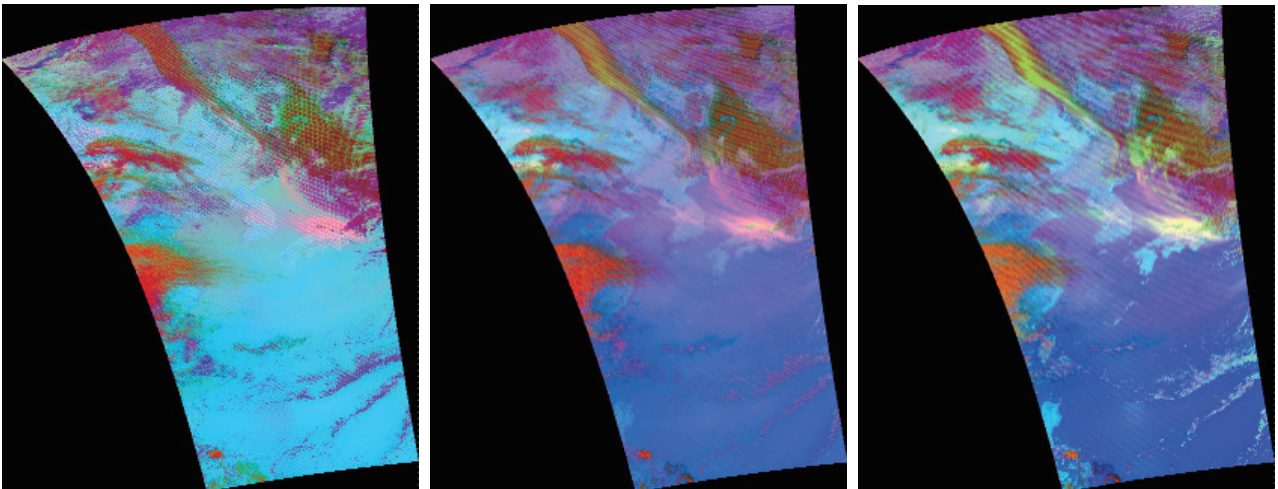
AVI=T12-T11 (表示範囲 -3~3K)



band1-band3 (表示範囲 -20~20)



band4-band3 (表示範囲 -10~10)



R:G:B=AVI : band6-band1 : T11      R:G:B=AVI : band1-band3 : T11      R:G:B=AVI : band4-band3 : T11  
 (表示範囲 : AVI=-3~3K, T11=210~300K, band6-band1=-70~20, band1-band3=-15~15, band4-band3=-5~5)  
 図 6. 2006 年 4 月 8 日 4 時 34 分~46 分 UT 受信の Aqua 衛星 MODIS 画像

R←AVI=T12-T11      (黄砂は明るい。層の厚い (即ち, 光学的に厚い) 氷雲は明るい。)  
 G←band7-band1      (黄砂は明るい。層の厚い (即ち, 光学的に厚い) 氷雲は暗い。)  
 B←T11      (温度が高いと明るい。温度が低いと暗い。)

従って, 黄砂は, R が強く, G が強く, B が普通~弱いので, ピンク~黄色で表示される。層の厚い氷雲 (温度が低い) は, R が強く, G が弱く, B が弱いので, 赤色で表示される。

ここで, 各対象物の色をまとめると次のようである。(1)黄砂は明るい黄色~ピンクである。(2)普通の水雲は, RGB の各値が比較的小さいので緑, 水色, 橙, 茶, 紫である。(3)普通の氷雲は, RGB の各値が比較的小さいので緑, 橙, 茶, 紫である。(4)光学的に厚い水雲は紫である。(5)光学的に厚い氷雲は赤である。(6)雪原・氷は紫である。(7)陸地は青 (暖かい所) ~緑 (冷たい所) である。(8)海は青 (暖かい所) ~緑 (冷たい所) である。従って, 黄砂と雲は識別できる。

2 番目に良い組合せは

R:G:B=AVI : band4-band3 : T11      (6)

である (図 5, 図 6 の最後の画像参照)。この場合, 黄砂は黄緑~黄~ピンクとなる。

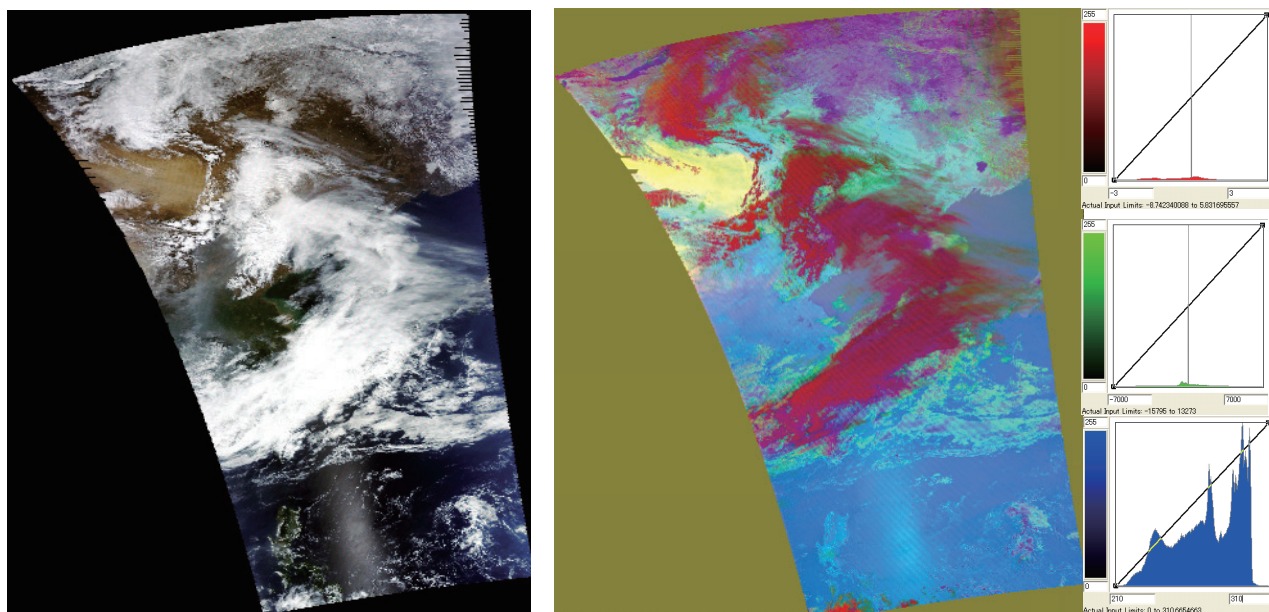
図 7, 図 8, 図 10 に, 4 月 6 日, 7 日, 8 日の昼のトルーカラー画像と式(5)に基づく合成カラー画像 (黄砂・雲等識別画像) を示す。これらの画像について説明する。

図 7(a)では (上側左から) バイカル湖, フルン湖, シンカイ湖が凍っている。ゴビ砂漠で黄砂が発生している。図 7(b)で, 黄砂は黄色である。陸上で黄砂が薄い所は, 元々の色 (陸上の青~緑, 黄砂の黄) の合成で黄緑である。赤は厚くて高度が高い氷雲 (温度が低い) である。紫は, それより高度が低い水雲または雪原または氷 (バイカル湖, フルン湖, シンカイ湖) である。緑は高度がもっと低い水雲である。青は海と平野である。

図 8(a)では, 黄砂が右上の雲の中に混じって南東に移動している。中国の北京から上海にかけてスモッグがある。図 8(b)で, 黄砂はピンク~黄色である。赤は, 厚くて高度が高い氷雲 (温度が低い) である。濃い緑は, 薄くて高度が高い氷雲である。橙は, 厚さは中間で, 高度が高い雲である。紫は, ある程度厚いが, 高度が低い水雲 (温度が高い) である。

図 10(a)では, 黄砂が中国から朝鮮半島を横切り, 日本の関東地方まで帯状に覆っている。なお, この日の黄



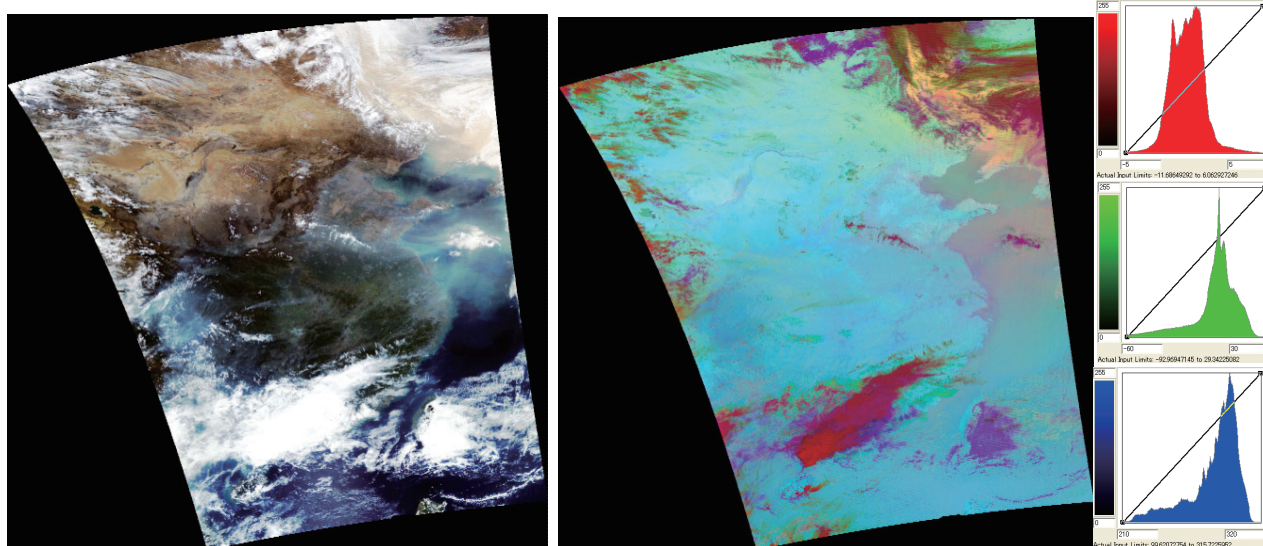


(a) トルーカラー (RGB=band1,4,3)

(b) R:G:B=AVI : band7-band1 : T11

(表示範囲 : AVI=-3~3K, band7-band1=-7000~7000 (大気補正なしで処理), T11=210~310K)

図 7. 2006 年 4 月 6 日 4 時 46 分~59 分 UT 受信 MODIS による トルーカラー画像(a)と 黄砂・雲等識別画像(b)

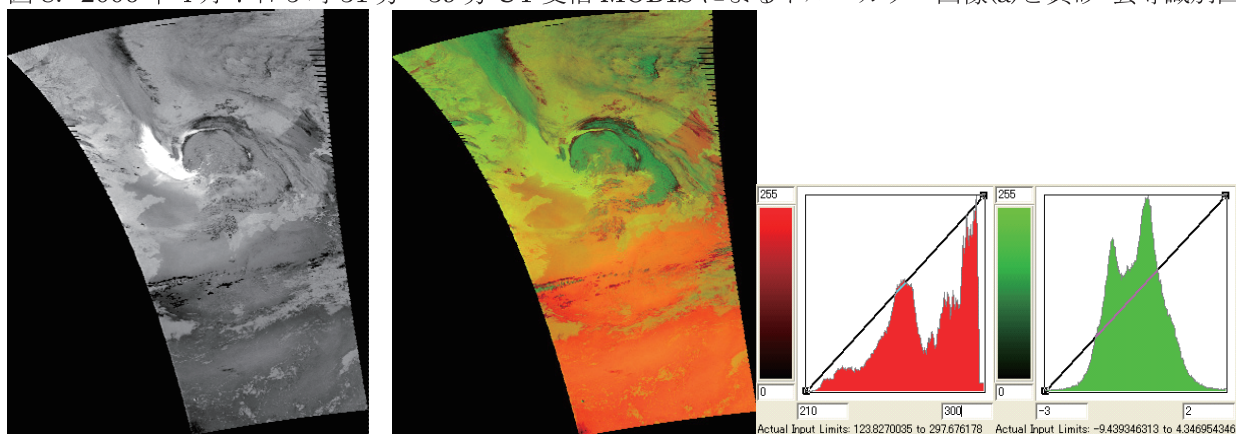


(a) トルーカラー (RGB=band1,4,3)

(b) R:G:B=AVI : band7-band1 : T11

(表示範囲 : AVI=-5~5K, band7-band1=-60~30, T11=210~320K)

図 8. 2006 年 4 月 7 日 5 時 31 分~39 分 UT 受信 MODIS による トルーカラー画像(a)と 黄砂・雲等識別画像(b)

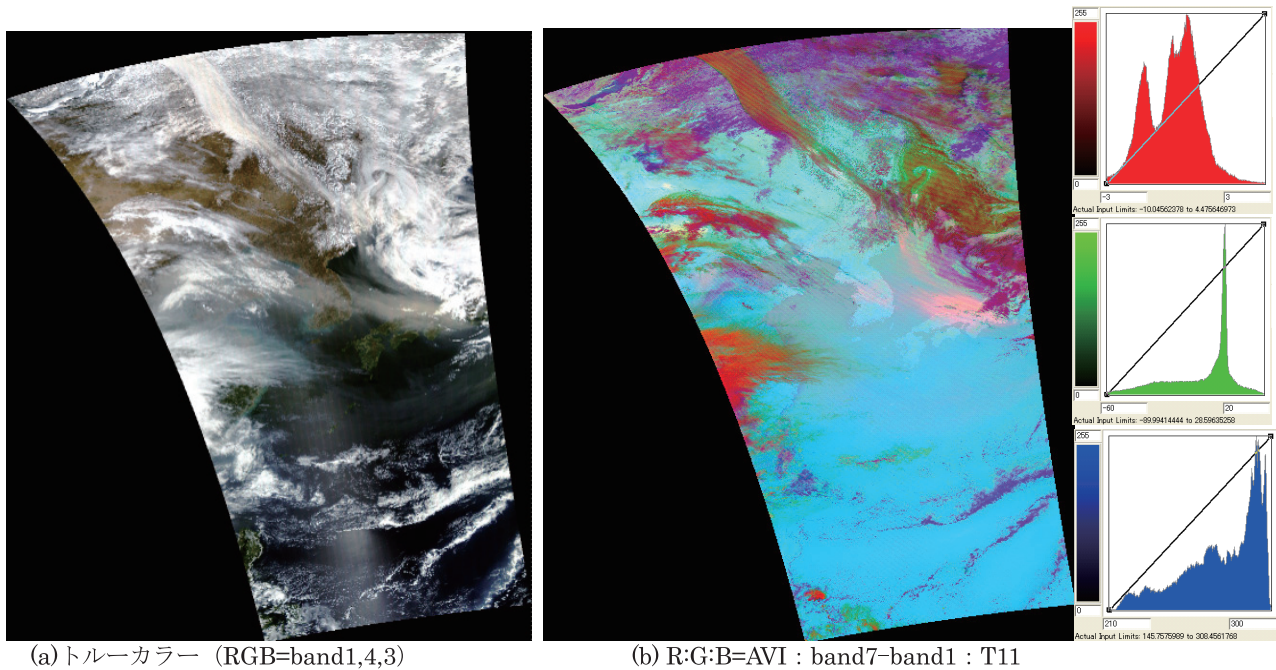


(a) AVI 画像

(b) R:G:B=T11 : AVI : なし (表示範囲 : T11=210~300K, AVI=-3~2K)

図 9. 2006 年 4 月 7 日 13 時 17 分~31 分 UT (夜) 受信 MODIS による AVI 画像(a)と 黄砂・雲等識別画像(b)





(a) トルーカラー (RGB=band1,4,3) (b) R:G:B=AVI : band7-band1 : T11  
(表示範囲 : AVI=-3~3K, band7-band1=-60~20, T11=210~300K)  
図 10. 2006 年 4 月 8 日 4 時 34 分~46 分 UT 受信 MODIS によるTRUEカラー画像(a)と黄砂・雲等識別画像(b)

砂は韓国では「スーパー黄砂」と呼ばれるほどの激しさであった。図 10(b)で、黄砂はピンクである。上部の紫は雪面である。赤は、厚くて高度が高い氷雲である。薄青緑は地面（土）である。緑は、薄くて高度が高い雲（温度が低い）である。橙は、厚さは中間で、高度が高い雲である。紫は、ある程度厚いが、高度が低い雲（温度が高い）である。

## 5. MODIS による夜の場合の黄砂と雲などを識別するための合成カラー画像（黄砂・雲等識別画像）

夜の場合は、可視バンド、近赤外バンド、中間赤外バンドは使えず、熱赤外バンド（band20~25, band27~36）だけが使える。検討の結果、黄砂と雲などを識別するための合成カラー画像としては

$$R:G:B=T11 : AVI : \text{なし} \quad (7)$$

の組合せがよいと判断した。黄砂は明るい黄緑、雲は緑~黄土色で表示され、黄砂と雲は識別できる。

図 9 に 2006 年 4 月 7 日夜の画像を示す。図 9(b)で、黄砂は明るい黄緑である（印刷でははっきりしないかもしれないが、ディスプレイでは明るくはっきり見える）。高度の高い氷雲は緑である。温度の高い海は赤である。温度的には人間の感性に合う画像である。日本の陸地（黄土色）も海（橙色）と区別して見える。日本への薄い黄砂も黄色っぽく、それらしく見える。

## 6. むすび

第 3 章では、まず、AVI 法による黄砂検出で、雲を黄砂と誤認する（即ち、雲が  $AVI>0$  となる）場合は、雲が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場合であることを、井上[15]の T11 対 BTD グラフより説明した。次に、 $AVI>0$  となる雲の実例として、2007 年 4 月 3 日の台風 1 号の雲と 2006 年 4 月 8 日の雲を示し、T11 対 AVI 散布図を用いて、 $AVI>0$  となった理由を解釈した。

第 4 章では昼の MODIS の場合の黄砂・雲等識別画像について検討した。雲には水雲と氷雲があり、また、

AVI法による黄砂検出の際の誤認に関係する光学的厚さの大きい雲とそうでない雲に分けて考えるため、まず、単バンド画像での各対象物の見え方、差バンド画像での各対象物の見え方を調べ、結果を表1にまとめた。次にその結果を考慮して、黄砂と雲などを識別する合成カラー画像作成のためのRGBへのバンドの与え方を検討し、式(5)と式(6)の組合せがよいことを示した。第5章では、夜のMODISの場合の黄砂・雲等識別画像について検討し、式(7)の組合せがよいことを示した。

**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：深尾昌一郎)の助成を受けており、感謝する。

## 参考文献

- [1] 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)
- [2] 飯野直子, 矢野利明, 木下紀正: “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)
- [3] 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, pp.48-56 (2004-12)
- [4] 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>
- [5] 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)
- [6] 加藤芳信: “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, F-76 (2007-09)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 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, pp.350-359 (2010-06)
- [10] Yoshinobu Kato: “Detection properties of dust and sandstorms by using AVI of MODIS data”, Proceedings of SPIE, vol.7859, pp.78590H/1-12 (2010-12)
- [11] 加藤芳信: “雲が存在する場合の AVI 法の特性と台風雲の T11 対 AVI 散布図による解釈”, 平成23年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, F-98 (2011-09)
- [12] 加藤芳信: “TERRA/AQUA 衛星 MODIS データを用いた黄砂検出”, 平成23年度「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」プロジェクト・キックオフミーティング: 北陸地域の環境研究の新しいアプローチ (発表要旨集), pp.32-39 (2011-10)
- [13] Yoshinobu Kato: “Detection properties of dust and sandstorms by using AVI of MODIS data”, 5<sup>th</sup> International Symposium on the Environment of the Rim-Japan Sea Regions (第5回環日本海域の環境シンポジウム), pp.24-25 (2012-02)
- [14] 加藤芳信: “人工衛星によるタクラマカン砂漠から日本までの黄砂観測”, 第3回能登総合シンポジウム, pp.38-39 (2012-03)
- [15] 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)

(平成24年3月31日受理)