

静止気象衛星の赤外データを利用した黄砂監視プロダクトの開発

橋本 徹*、大河原 望**

Development of "Kosa monitoring Product" from infrared data of the geostationary meteorological satellite (MTSAT-1R)

HASHIMOTO Toru, OHKAWARA Nozomu

Abstract

Kosa (Yellow sand) monitoring product retrieved from MTSAT-1R infrared split window (11 μm and 12 μm) measurements was developed at MSC in cooperation with the Atmospheric Environmental Division and the Meteorological Research Institute of JMA. This product detects Kosa concentrated area and provides information on its concentration as Kosa index in East Asia. The algorithm of the retrieval is based on the split windows technique which is based on optical characteristics of Kosa particles in the wavelength region. In this product, Kosa concentrated area is detected even over the land and in the nighttime, while aerosol information over the land and in the nighttime cannot be included in the existing aerosol products.

The comparisons between Kosa monitoring product and the ground observations were performed for some notable Kosa events in April 2006 to evaluate the effectiveness of the product in monitoring Kosa. The results show Kosa concentrated area is detected well and its move can be tracked day and night in the product. The effectiveness of the product in Kosa monitoring is confirmed.

This product has been operationally retrieved once an hour since February 2006. It has been provided for the Atmospheric Environmental Division.

要 旨

気象衛星センターでは静止気象衛星 MTSAT-1R の赤外 1・2 データを使用して、黄砂が飛来している領域を算出する黄砂監視プロダクトを開発した。黄砂監視プロダクトの算出アルゴリズムは、赤外窓領域での黄砂粒子の光学特性に基づいたスプリットウィンドウ法を基本にしている。黄砂に関連する従来の気象衛星センタープロダクトと異なり、黄砂監視プロダクトでは夜間、及び陸域についてもデータを算出することが可能である。黄砂監視プロダクトの有効性を確認するため、2006年4月の顕著な黄砂現象時について算出結果と地上観測を比較した。その結果、黄砂監視プロダクトは黄砂域をよく捉えており、昼夜を問わずその動きを捉えることができ、黄砂の実況監視に有効であることが確かめられた。なお、黄砂監視プロダクトは2006年2月より毎時作成され、データを気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官に提供している。

* 気象衛星センターデータ処理部システム管理課、** 気象庁地球環境・海洋部気候情報課

2006年12月19日受領、2007年2月23日受理

1. はじめに

黄砂とは、大気中に浮遊する微小な粒子であるエアロゾルの一種で、大陸の砂漠や耕地の乾燥、半乾燥地帯から強風により大気中に舞い上がった鉱物粒子を指す。近年、日本への黄砂の飛来が増加し、交通機関への影響など社会生活の多様な面への影響が懸念されるようになった。それに伴い、黄砂に関する情報の需要が高まっている。

黄砂の拡がりをも面的に捉えるには衛星からの観測が有効である。気象衛星センターでは、黄砂に関連するプロダクトとして、2002年12月より静止気象衛星及び極軌道気象衛星の可視データからエアロゾルの光学的厚さの水平分布を算出するエアロゾルプロダクトを作成している（橋本、2006、大河原ほか、2002）。しかし、このプロダクトで算出される分布データは、日中及び海域に限られる上に、黄砂粒子以外のエアロゾルの影響も含まれるため、黄砂の監視に利用する際は注意を要する。

このような状況から、気象衛星センターでは、静止気象衛星の赤外データを利用し、夜間、及び陸域についても黄砂などの鉱物粒子が飛来している領域を検出することが可能である黄砂監視プロダクトを開発した。当プロダクトは2006年2月1日00UTCより正式作成を開始、データをエアロゾルプロダクトと同様、気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官に提供しており、気象庁内において黄砂の実況監視及び黄砂予測モデルの検証に利用されている。本稿では、黄砂監視プロダクトの処理内容、及び算出結果の初期評価について報告する。

2. 算出理論

2.1 スプリットウィンドウ法

運輸多目的衛星新1号（MTSAT-1R）は、4チャンネルの赤外センサーを搭載している（表1）。このうち、赤外1、赤外2の観測波長帯において、黄砂や火山灰といった鉱物粒子が含まれない通常の大気では、衛

表1 MTSAT-1Rの赤外チャンネルの観測波長帯

赤外チャンネル名	観測波長帯 (μm)
赤外1	10.3～11.3
赤外2	11.5～12.5
赤外3	6.5～7.0
赤外4	3.5～4.0

星が観測する放射輝度温度は主として水蒸気の影響を受ける。水蒸気による吸収は赤外1よりも赤外2の方が若干大きいため（図1）、赤外差分値（ $T_{bb, \text{赤外1}} - T_{bb, \text{赤外2}}$ 、ただし T_{bb} は黒体放射輝度温度）は正の値となる。

一方、黄砂などの鉱物粒子による吸収は水蒸気と逆の波長特性を持つ（図2）。このため、大気中に多量の黄砂粒子が存在する領域では、赤外差分値は負の値となる。この性質を利用すれば、黄砂粒子を多量に含む大気の領域を検出することが可能である。このような赤外差分値を用いた黄砂検出手法は、一般に「スプリットウィンドウ法」と呼ばれる。これまで、スプリットウィンドウ法を使った黄砂の事例解析は数多くなされている（気象衛星センター、2000、増水ほか、2001など）。図3に黄砂飛来時のMTSAT-1Rの赤外差分画像（赤外差分値を画像化したもの。通常、赤外差分値が負である領域を白く明るくなるように階調化されている。）の例を示す。画像中、白く明るい部分（点線枠内）が赤外差分値が負、すなわち、黄砂濃度が高い領域であると推察できる。

2.2 赤外差分値の特徴

このように、赤外差分値を用いることにより、大気中の黄砂濃度が高い領域を検出することが可能である。しかし、赤外差分値は、地表面状態、地表面温度、大気プロファイル等様々な要素の影響を受ける。また、黄砂粒子が存在するときもその粒径、存在高度によって赤外差分値への影響は異なる。このため、ある領域で赤外差分値が負の時、単純に黄砂濃度が高いと判断することはできない。以下に赤外差分値に影響を及ぼす要素について述べる。

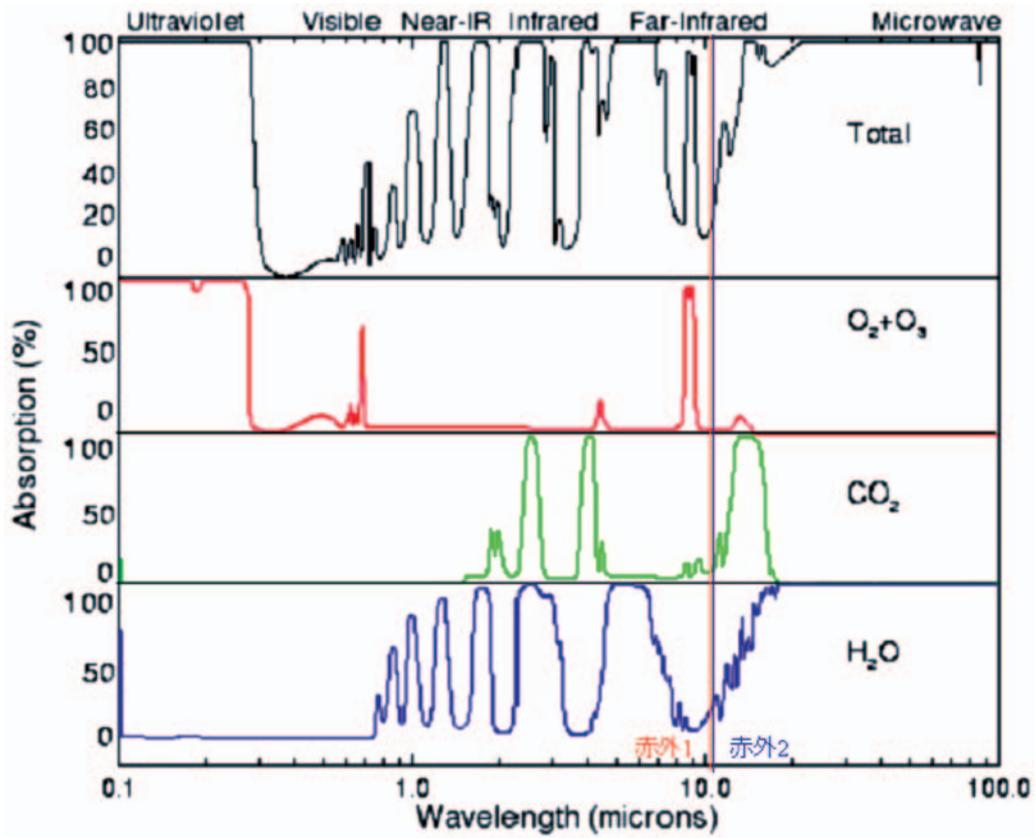


図1 各大気成分の波長別吸収率 (Peixoto, J.P. and Oort, A.H.,1992)

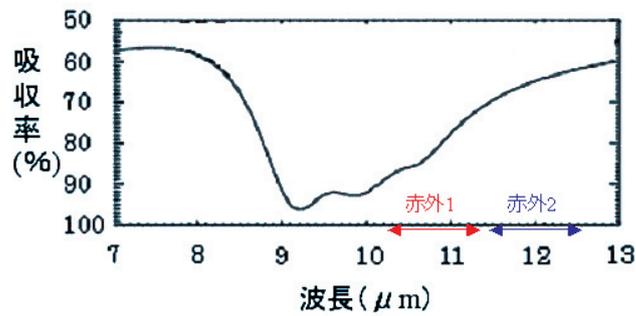


図2 鉱物粒子 (SiO₂) の波長別吸収率例 (Watson et al., 2004)

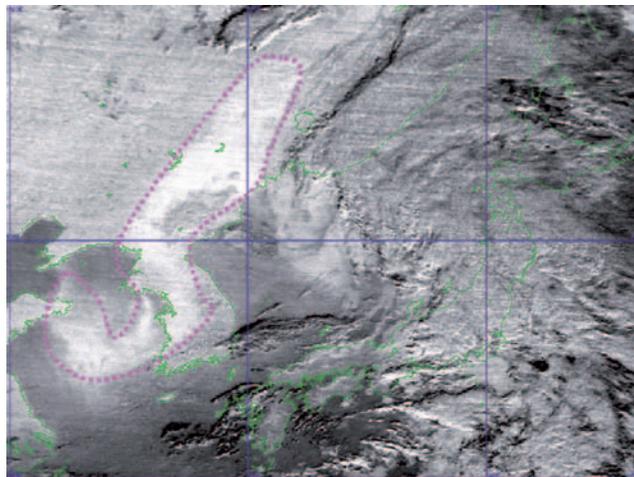


図3 MTSAT-1R 赤外差分画像による黄砂検出例 (2005年11月6日12UTC)

① 地表面状態

地表から射出される赤外放射は、地表面の状態に大きく影響される。地表面は黒体ではないため、そこから射出されるエネルギー I は、黒体物質から射出されるエネルギー I_B と地表面の射出率 ε を用いて表される (λ は波長)。

$$I = \int \varepsilon(\lambda) I_B(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

図4に主な地表面被覆の種類についての赤外波長帯における代表的な射出率を示す。海面の射出率はほぼ1に近く、赤外1波長帯の方が赤外2波長帯より若干射出率が高い。これに対して、陸面では赤外1波長帯よりも赤外2波長帯の方が、射出率が大きくなることもあり、特に砂漠(図4中では砂地)では顕著となる。このため、大気中に黄砂粒子が存在しなくても、陸域では赤外差分値が負となることが多い。図5に砂漠域におけるMTSAT-1Rの赤外差分画像を示す。この時は大気中に黄砂粒子は存在していないが、図5の画像上方(点線枠内)のゴビ砂漠は相対的に白く明るく見えており、赤外差分値が負となっていることがわかる。

また、地表面温度も、射出される赤外放射に大きな影響を及ぼす。式(1)における $I_B(\lambda)$ は次のプランク関数により表される。

$$I_B(\lambda, T) = 2hc^2 / \lambda^5 (\exp(hc / k\lambda T) - 1) \quad (2)$$

ここで、 h はプランク定数、 c は光速、 k はボルツマン定数、 T は黒体の絶対温度 (K) である。

(2)式より、 $I_B(\lambda)$ は T の関数であることがわかる。(1)式及び(2)式から、地表面温度が低い場合、射出されるエネルギーは小さくなり、また、赤外1と赤外2における観測エネルギー差も小さくなる。よって、地表面温度が低い時は、大気中に黄砂粒子が存在しない場合でも赤外差分値は0に近づく。

② 大気プロファイル・衛星天頂角

赤外差分値は、2.1で述べた通り、大気中の水蒸気量に影響される。大気中の水蒸気量が増加すると、

赤外差分値もそれに伴い単調増加するが、同一の水蒸気量でも鉛直分布の違いにより影響は異なる。また、衛星天頂角が大きくなると地表面から射出された放射が大気中を通過する長さが長くなるため、水蒸気や黄砂による放射への影響も大きくなる。図6にMODTRAN4 (Berk et al., 2003) による、大気中の水蒸気量と衛星天頂角が、MTSAT-1Rが観測する赤外差分値に及ぼす影響のシミュレーション例を示す。

③ 黄砂の高度、粒径

赤外1及び赤外2の波長帯では、吸収物質の量が少ない通常の大気の場合、観測値には地表面付近の温度情報が多く含まれる。黄砂粒子の存在する層の高度が低く地表面付近にある場合、地表面温度と黄砂の存在する層との温度差が小さいので、黄砂が吸収～再射出する長波長放射の変化量は小さく、衛星観測データから黄砂の情報を検出することが難しくなる。

また、黄砂粒子の粒径が大きい場合 (20 ~ 30 μm) と小さい場合 (1 ~ 2 μm)、赤外差分値は黄砂濃度に対して単調変化するが、中間サイズ (5 ~ 10 μm) の場合はこの変化傾向はあまり見られないことがわかっている (気象研究所気象衛星・観測システム研究部第一研究室の調査による)。

2.3 赤外差分値を用いて黄砂領域を自動検出するための必要事項

以上より、衛星の赤外データを用いて黄砂領域を自動検出するには、以下の事項が必要だと考えられる。

- ・単純に「赤外差分値が負の場合、黄砂あり (黄砂濃度が高い)」とするのではなく、「赤外差分値が、黄砂がない (黄砂濃度が低い) 場合に比べて小さい時、黄砂あり」とする。
- ・陸域では地表面状態により赤外差分値が負となりやすいため、海陸で黄砂ありと判定する基準を変える。陸についても、地表面の種類によって基準を変化させる。
- ・地表面温度の時間変化を考慮した黄砂あり/なしの判定を行う。

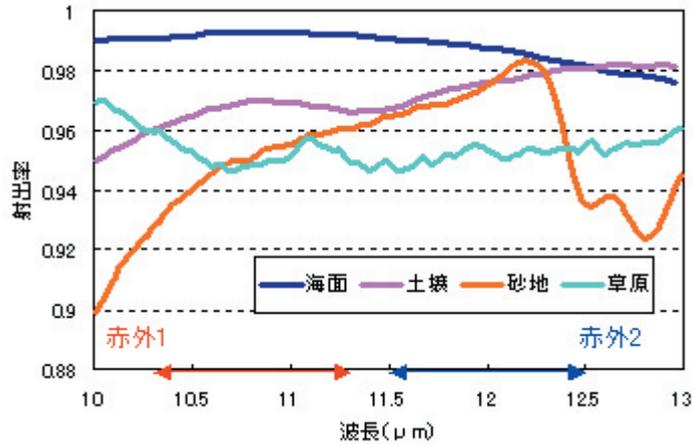


図4 主な地表面の種類についての赤外波長帯における代表的な射出率 (MODIS emissivity library による)

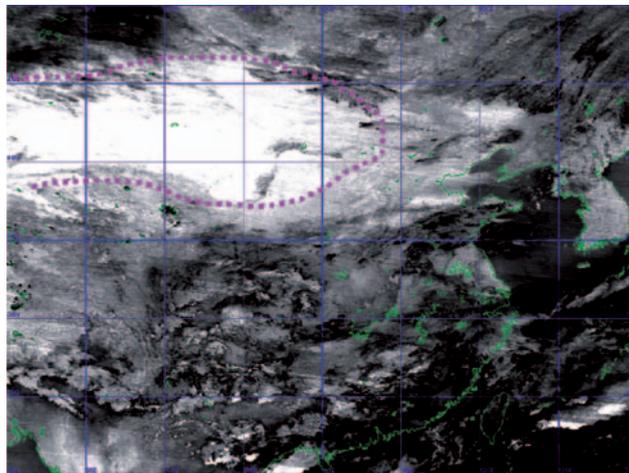


図5 MTSAT-1R 赤外差分画像による砂漠域 (2006年11月20日18UTC)

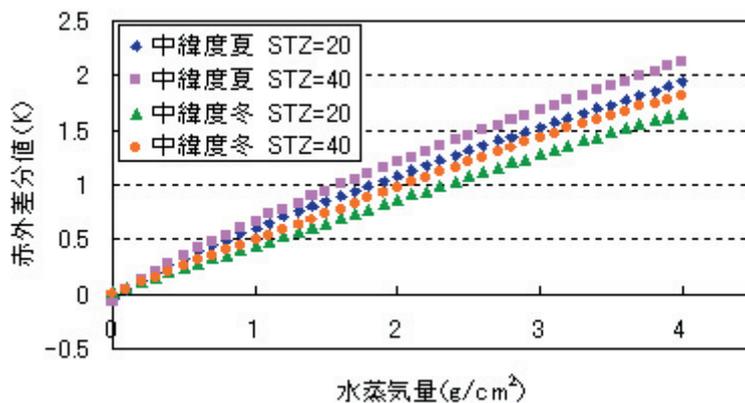


図6 大気中の水蒸気量とその鉛直分布、及び衛星天頂角が MTSAT-1R 赤外差分値に及ぼす影響例
シミュレーションは MODTRAN4 による。入力する大気プロファイルには中緯度夏モデルと中緯度冬モデル (Kneizys et al., 1998) を使用。大気中に黄砂はなし。図中の STZ は衛星天頂角を表す。

3. 算出手法

赤外差分値は大気中の黄砂濃度と相関はあるが、上述の通り他の要素の情報を多く含んでおり、そこから黄砂濃度のみの情報を物理量として抽出するのは難しい。このような赤外差分値の特性を踏まえて、黄砂監視プロダクトでは、スプリットウィンドウ法を基本として、黄砂濃度が高い（黄砂が飛来している）領域を赤外 1・2 データから抽出し、その濃度を定性的に表すことを目的とする。算出データは、黄砂領域を面的に表現しており、地上の黄砂観測を補完する客観的なデータとなる。処理手順を次章に示す。

3.1 黄砂指数

黄砂指数は大気中の黄砂濃度を相対的に表す指数として、次式で独自に定義する（c は定数）。

$$\text{黄砂指数} = 100 \times \log(\text{Tbb}_{\text{赤外}2} / \text{Tbb}_{\text{赤外}1}) + c \quad (3)$$

黄砂指数は基本的に赤外差分値と物理的意味合いは同じであるが、対数をとることで大気中に黄砂粒子が存在するときに衛星が観測する赤外 2 に対する赤外 1 の輝度温度の低下を強調している。大気中に黄砂粒子が存在し、赤外差分値が負の値である場合、黄砂指数は正の値をとる。図 7 は黄砂飛来時の海域における黄砂指数とエアロゾルの光学的厚さ（エアロゾルプロダクト出力）の比較例を示している。これより、大気中の黄砂粒子量が増加すると、一般的に黄砂指数は大きくなるのがわかる。よって、黄砂指数は黄砂濃度の相対的な指標となり得る。ただし、黄砂指数の値自体は黄砂濃度を表す物理量ではない。

3.2 黄砂判定

各格子における大気中の黄砂濃度が高いか否か（黄砂あり / なし）の判定は、算出した黄砂指数を用いて、いくつかの判定テストを組み合わせて行う。テストで用いる各閾値は事例検証により経験的に与えている。図 8 に黄砂判定の流れ図を示す。

① 最小閾値テスト

黄砂指数が最小閾値以下の場合、黄砂なしと判定される。閾値は海陸別に設定する。

② 判別閾値 1 テスト

判別閾値 1 は、各格子における 7 日前～1 日前のデータから計算した黄砂指数の平均値、標準偏差の和により、格子ごとに決定される。黄砂指数がこの値以下の場合、黄砂なしと判定される。ただし、過去曇天が続いた等、平均値、標準偏差が計算できない場合、この閾値は計算しない。このテストにより、地表面特性の赤外データへの影響を格子毎に考慮している。

③ 前時刻比較テスト

地表面温度及び大気プロファイルの時間変化に伴う黄砂指数の変動を考慮し、出力の時間連続性を保つため、前処理時刻の黄砂判定、及び黄砂指数を参照する。前処理時刻が黄砂なしかつ晴天であった場合、この格子が黄砂ありと判定されるには、前処理時刻の黄砂指数との差が前時刻比較閾値以上でなくてはならない。この閾値は海陸別に設定する。

④ 周辺格子出力テスト

誤出力を避けるため、周辺格子の半数以上で黄砂ありと判定されていない場合は、黄砂なしとする。

⑤ 判別閾値 2 テスト

黄砂指数が判別閾値 2 を超えると、無条件に黄砂ありと判定される。閾値は海陸別に設定する。

4. 算出処理

4.1 算出条件

黄砂監視プロダクトの算出処理は、次の条件を満たす格子について算出される。

- ・算出領域：東経 110 度～150 度、北緯 20 度～50 度（格子中心）
- ・格子間隔：0.5 度正方形
- ・晴天画素：

曇天域では雲からの放射の影響を受けるため、衛星から黄砂粒子の存在を検出するのは難しい。このため、処理対象は晴天画素のみとする。判別手法は安田ほか（1999）及び McClain, E.P. et al.（1990）による。ただし、採用する晴天判別テスト、及び閾値は変更して

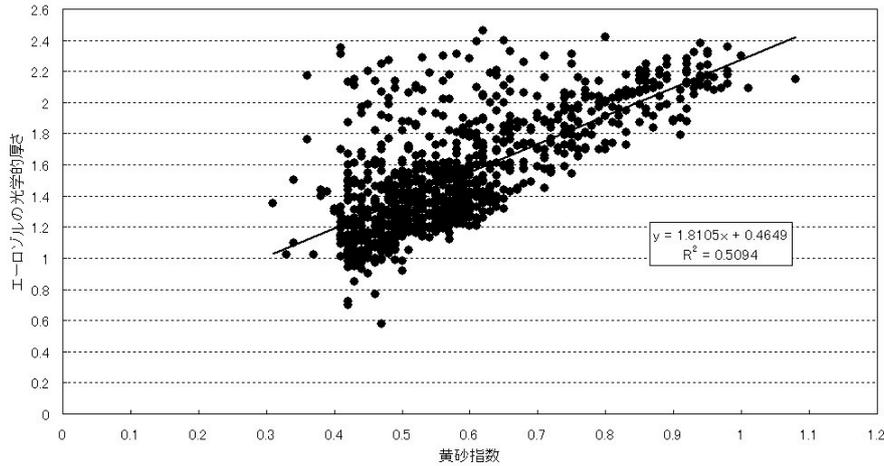


図7 黄砂指数とエアロゾルの光学的厚さの比較例 (2006年4月18日00~06UTC)

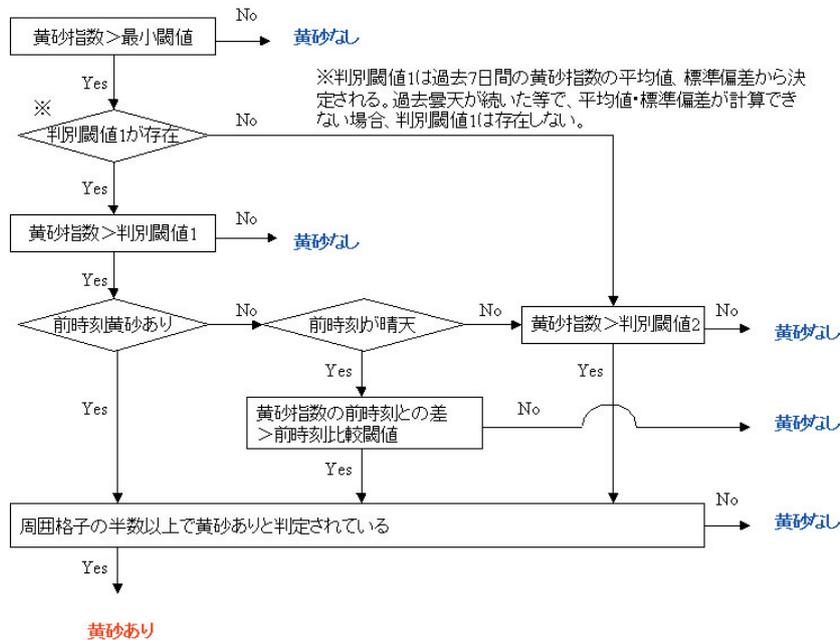


図8 黄砂判定の流れ図

いる。

4.2 必要なデータ

黄砂監視プロダクトの算出処理では、次のデータを使用する。

(1) 画像データ

MTSAT-1R 赤外 1、赤外 2 画像、及び晴天判別用に可視、赤外 4 画像。

(2) 海陸判定

格子毎の海陸情報。

4.3 処理手順

黄砂監視プロダクトの算出処理の流れを次に記す。

- ① 晴天画素の判別、晴天以外の画素を除去
- ② 格子内の晴天画素平均の赤外 1、赤外 2 の輝度温度を算出
- ③ 黄砂指数の算出
- ④ 黄砂判定
- ⑤ 黄砂判定で黄砂ありと判定された格子のみ、黄砂指数を出力する。黄砂なしと判定された格子、及び曇天格子はダミーデータ (= -999) を出力する。なお、黄砂ありと判定されなかった各

格子の黄砂指数についても別ファイルに保存し、以降の計算に用いる。

- ⑥ 参考情報として、同領域の赤外差分画像（格子間隔 0.1°）を別途作成

4.4 運用

黄砂監視プロダクトの算出処理は毎正時に（1日24回）行われる。処理結果、及び参考情報として赤外差分画像をFTPで気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官に配信している。なお、処理結果は気象庁イントラの「黄砂情報支援資料ホームページ」にリアルタイムで掲載され、気象庁内で利用される。

5. 算出結果

2006年春は大規模な黄砂の飛来が多く、度々マスコミにも取り上げられるなど社会的に注目を集めた。ここでは、2006年春の3つの黄砂飛来事例について、黄砂監視プロダクトの算出結果と地上観測（目視観測、エーロゾル観測）との比較を示す。なお、地上気象観測（目視）で黄砂が観測されたと判断できる現在天気の種類は図9に示すとおりである。また、国内においては、「コウサ電文」により報じられる場合がある。地上気象観測では、現在天気は100種類のコードのうち、原則として番号の大きいものを優先して1つだけ報じることになっているため、黄砂が観測されてい

ても降水等他に優先される現象があった場合には報じられないことに留意する必要がある。

- (1) 2006年4月6日～4月9日（低気圧後面を東進例1）

内陸で発生した黄砂域は低気圧後面を東進し、中国東北部で再び濃度を増して朝鮮半島、日本へと進んだ。図10-1、図10-2に12時間ごとの黄砂監視プロダクト出力と地上実況との比較、図11に当時の地上天気図を示す。黄砂監視プロダクトにより、黄砂域の移動が明瞭に捉えられている。また、中国東北区は土地分類において、一般的に砂漠ではなく耕作地帯として扱われる（図12）が、黄砂の発生源としてのポテンシャルをもつことがこの事例では明らかである。なお、9日00UTCでは多くの観測所で黄砂を観測しているが、これらの地域は雲に覆われていたため、黄砂監視プロダクトでは黄砂の検出ができなかった。

- (2) 2006年4月22日～4月25日（低気圧後面を東進例2）

内陸で発生した黄砂域は低気圧後面を東進し、朝鮮半島、日本海、東シナ海沿岸へと広がった。図13-1、図13-2に12時間ごとの黄砂監視プロダクト出力と地上実況との比較、図14に当時の地上天気図を示す。黄砂監視プロダクトの出力は概ね黄砂域の移動を良く表現できているが、25日00UTCでは、西日本は晴

WW Symbol 解説	06 S 空中広くちり、黄砂が浮遊（風に巻き上げられたものではない）	07 \$/\$ 風に巻き上げられたちり、黄砂	08 ε 前1時間内に観測所または付近に発達した塵旋風あり	09 (S) 視程内または前1時間内の砂塵嵐		
WW Symbol 解説	30 S 弱または並の砂塵嵐。前1時間内にうすくなった	31 S 弱または並の砂塵嵐。前1時間内に変化なし	32 S 弱または並の砂塵嵐。前1時間内に濃くなった	33 S 強い砂塵嵐。前1時間内にうすくなった	34 S 強い砂塵嵐。前1時間内に変化なし	35 S 強い砂塵嵐。前1時間内に濃くなった
WW Symbol 解説	98 S/\$ 観測時に雷電砂塵嵐を伴う					

図9 黄砂が観測されたと判断する現在天気の種類

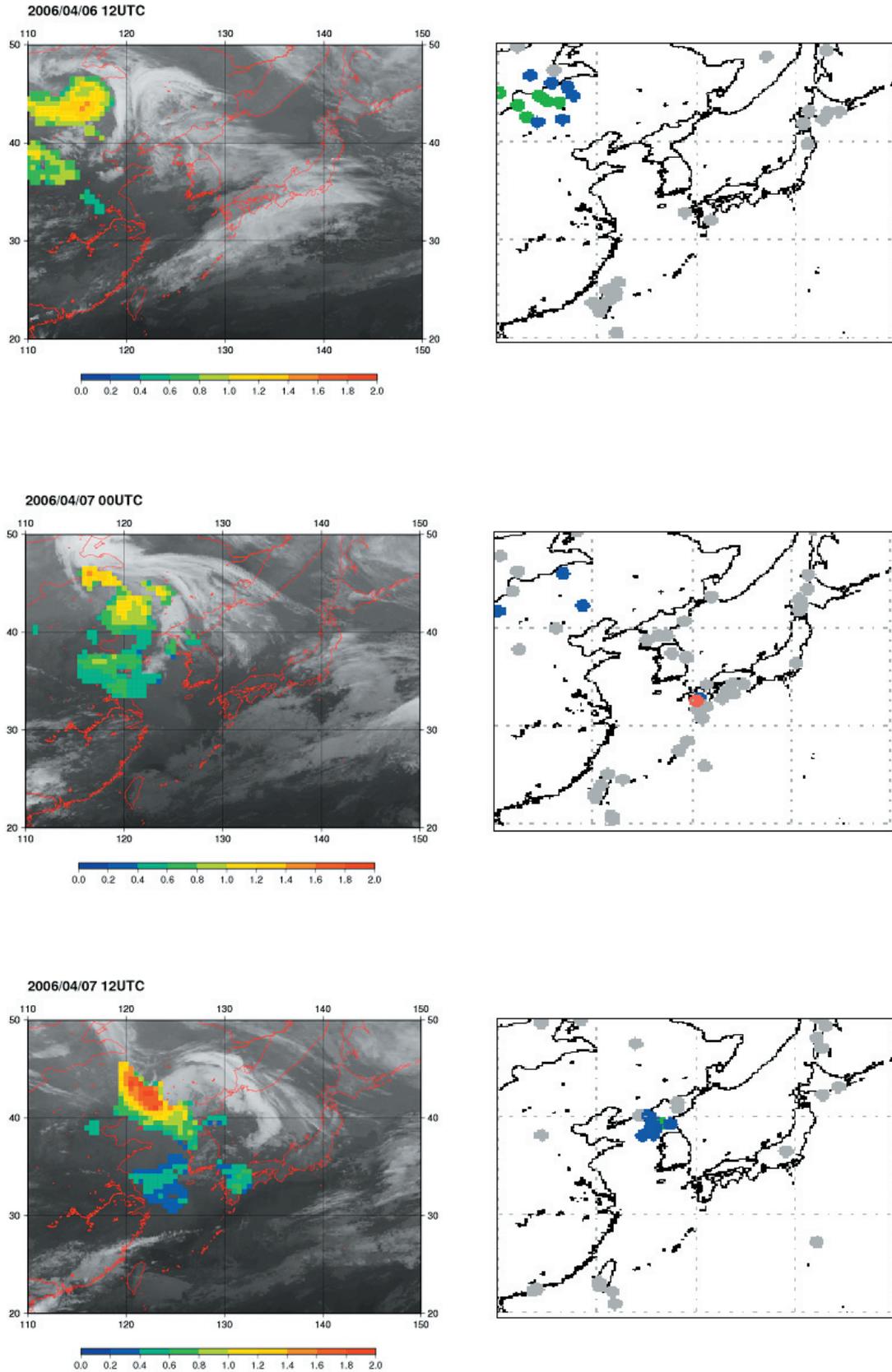


図 10-1 黄砂監視プロダクト算出結果 (赤外 1 画像に合成) と地上実況 (1)
 2006年4月6日12UTC から4月9日00UTC まで12時間ごとに示す。
 地上観測：● コウサ電報 ● WW=98 ● WW=30～35
 ● WW=06～09 ● 黄砂なし (図13でも同様)

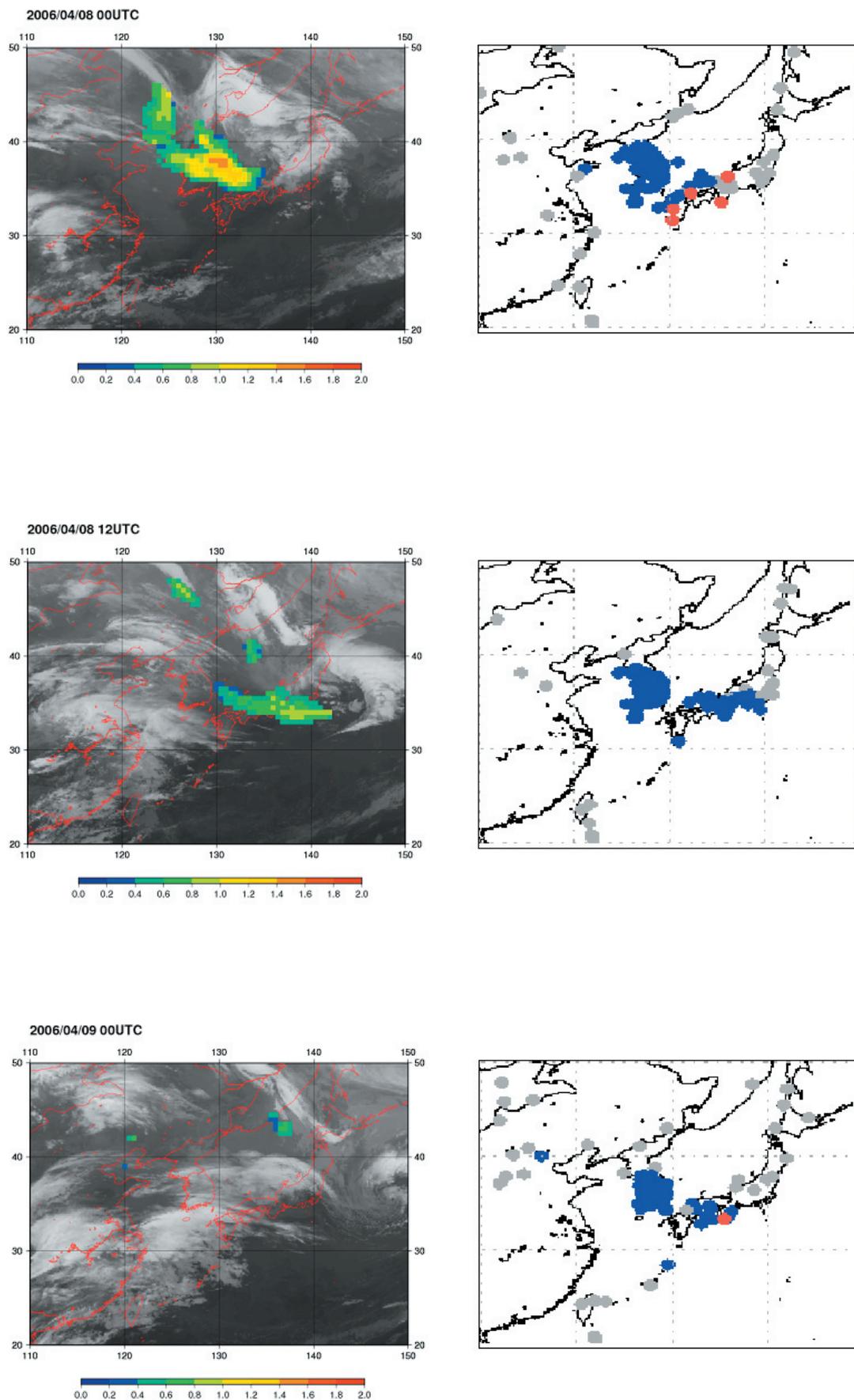


図 10-2 黄砂監視プロダクト算出結果（赤外 1 画像に合成）と地上実況（1）

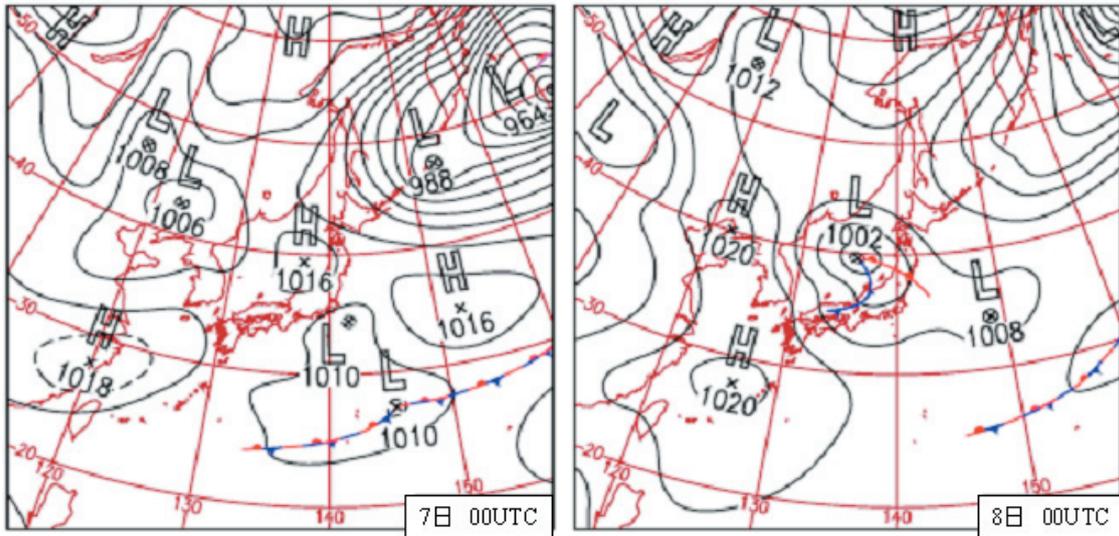


図11 黄砂飛来時の地上天気図 (2006年4月7日00UTC、及び4月8日00UTC)

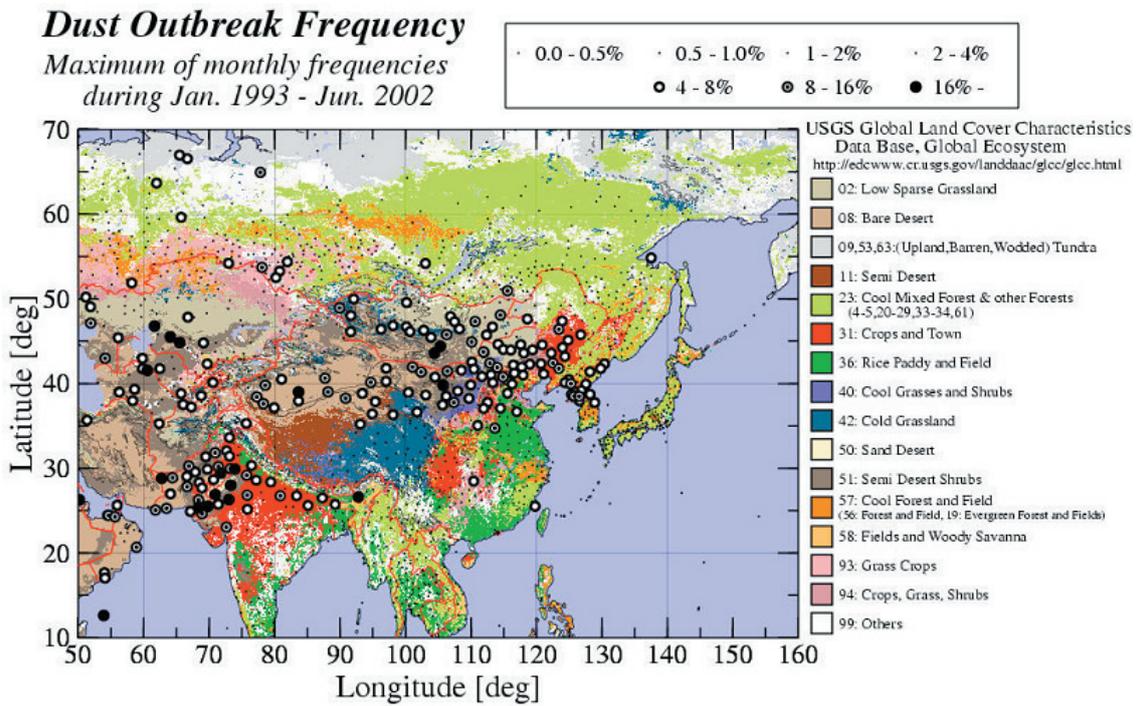


図12 土地被覆分類と黄砂発生頻度 (Kurosaki et al., 2005)

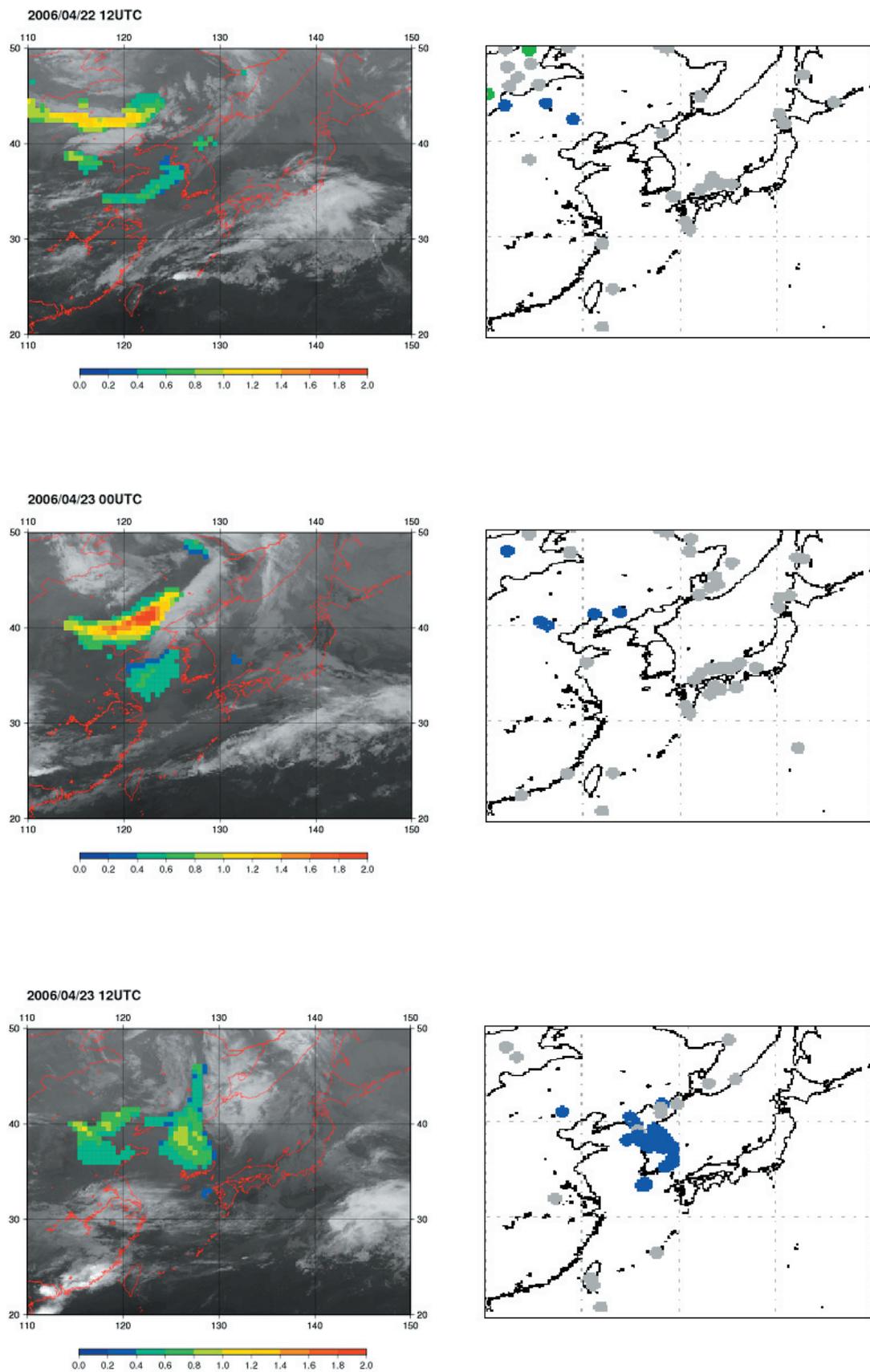


図 13-1 黄砂監視プロダクト算出結果（赤外 1 画像に合成）と地上実況（2）
2006 年 4 月 22 日 12UTC から 4 月 25 日 00UTC まで 12 時間ごとに示す

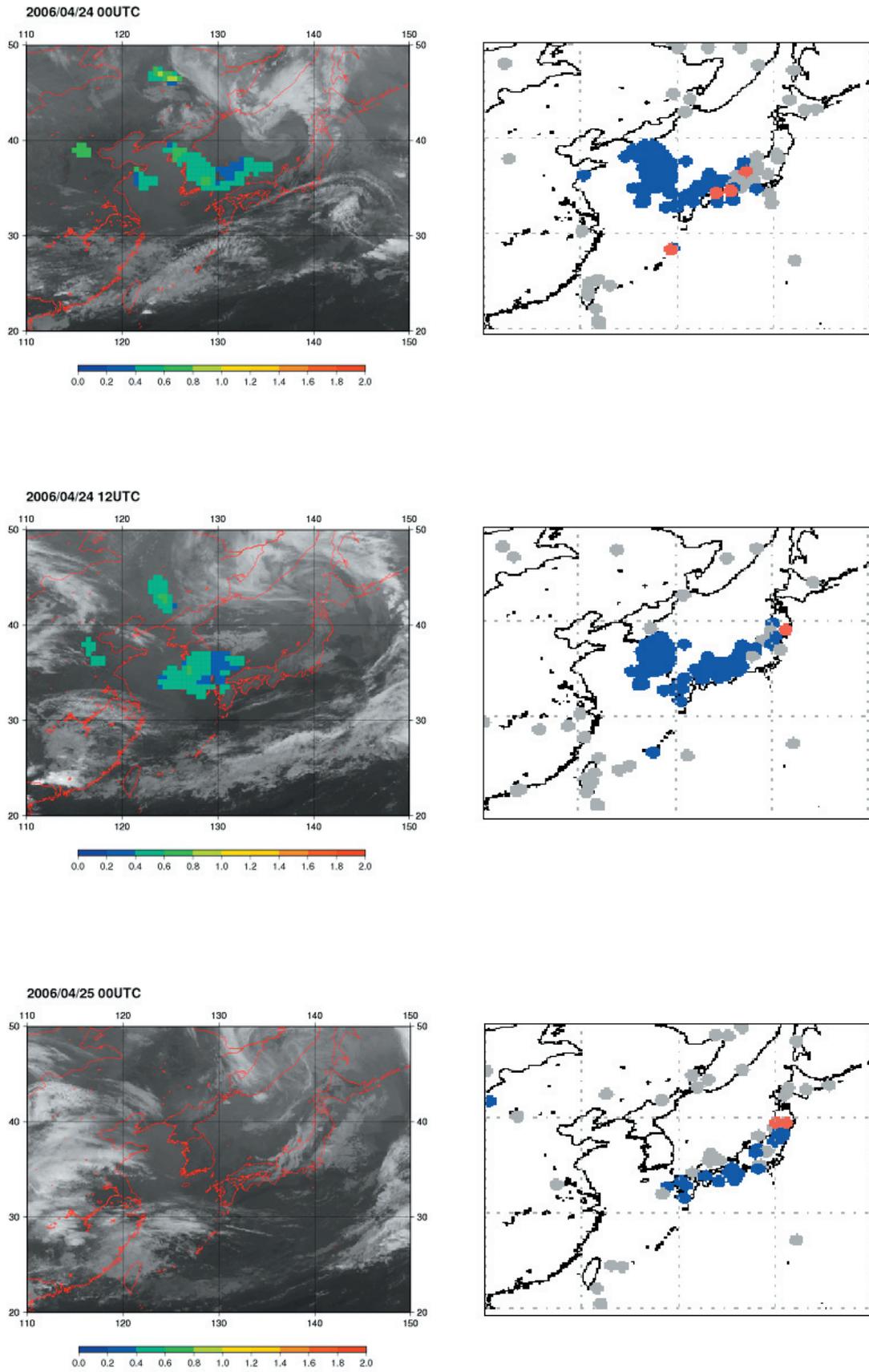


図 13-2 黄砂監視プロダクト算出結果（赤外 1 画像に合成）と地上実況（2）

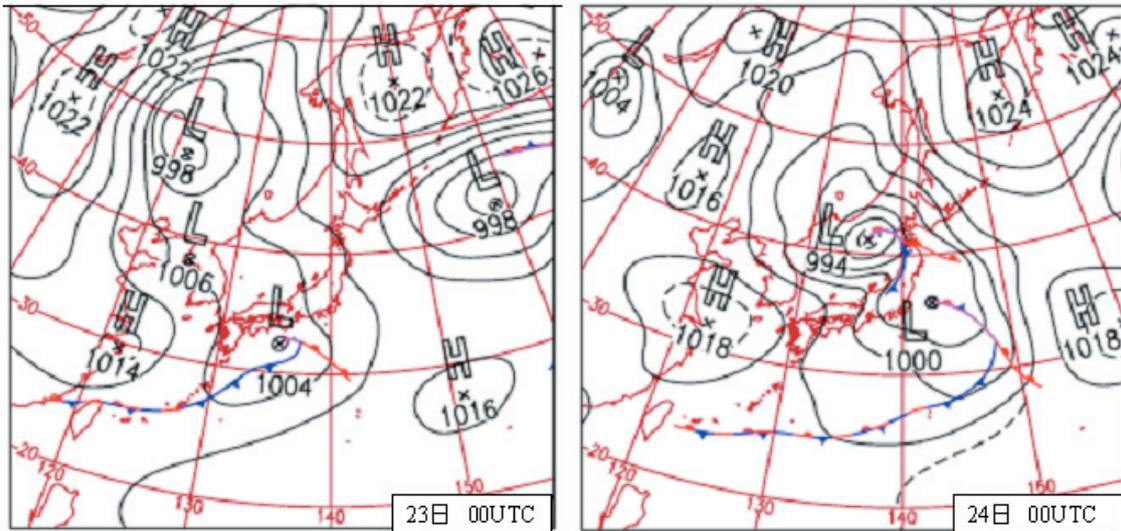


図 14 黄砂飛来時の地上天気図 (2006年4月23日00UTC、及び4月24日00UTC)

2006/04/25 00UTC
Aerosol Optical Thickness (500nm)

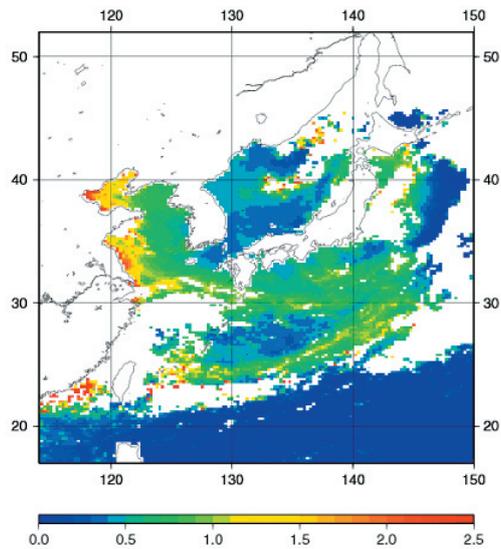


図 15 MTSAT-1R エーロゾルプロダクト算出結果 (2006年4月25日00UTC)

天域にもかかわらず、黄砂監視プロダクトでは黄砂の検出ができなかった。これは、上空の黄砂層が大気下層に沈降、拡散し、衛星の赤外センサーでそのシグナルを捉えられなくなったためと考えられる。同時刻のエーロゾルプロダクトでは、日本周辺で黄砂と思われるエーロゾルを捉えることができていた (図 15)。

(3) 2006年4月18日(地上ライダー観測との比較例)

この日は中国地方から東北地方まで広い範囲で黄砂が観測された。また、東京でも6年ぶりに黄砂を観測し、社会的にも注目を集めた。この黄砂は、岩手県綾里の気象庁大気環境観測所 (図 16) のライダーによるエーロゾル観測でも捉えることができていた。ライダーはレーザーレーダーとも呼ばれ、レーザー光の短いパルス大気中に発射して大気中の空気分子・エーロゾル・雲などにより散乱される光を受信すること

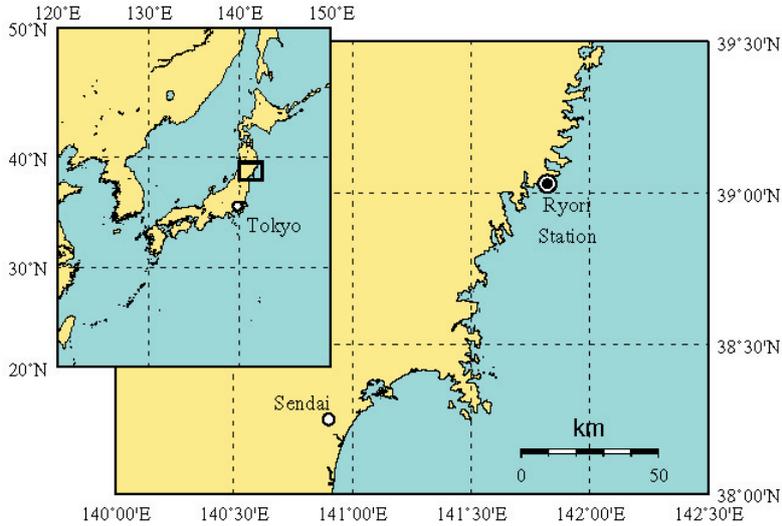


図16 気象庁大気環境観測所（綾里）の位置（気象庁、2006）

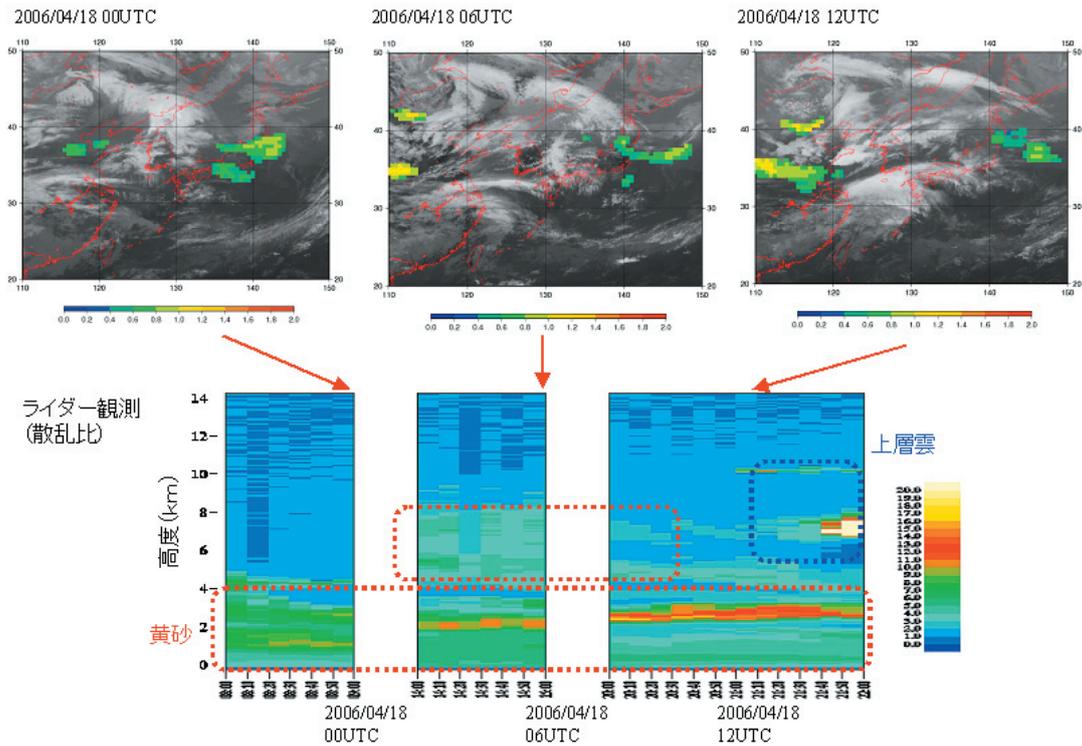


図17 黄砂監視プロダクト算出結果とライダー観測結果比較（2006年4月18日）

により、大気中に散在する物質の濃度・組成・相などの鉛直分布情報を遠隔的に測定するリモートセンシング技術を使った装置である。図17に黄砂監視プロダクト出力とライダー観測結果の比較を示す。ライダー観測から得られる散乱比は、大気中のエアロゾル濃度が高くなると大きな値を示す。ライダー観測から、こ

の日は一日にわたって高度1～4kmに黄砂と思われるエアロゾルが存在していたことがわかる。黄砂監視プロダクトでも、ライダー観測時刻に綾里付近で黄砂を検出していることから、プロダクトの妥当性が確認できる。

6. まとめ

黄砂監視プロダクトの開発により、昼夜・海陸を問わず連続的に黄砂の分布を検出できるようになった。これにより、大陸からの黄砂の飛来をこれまでより早期に把握できるため、黄砂の実況監視強化につながる事が期待される。また、黄砂予測モデルの検証にも有効利用できると考えられる。

しかし、2.2 ③で述べたように、衛星の赤外データでは、地表付近に沈降、拡散した黄砂については検出できない。地上観測では地表付近の黄砂を観測するので、プロダクトの算出結果と地上観測結果が合致しないことがある。一方、可視データは地表付近からの反射光についても観測するので、地表付近に沈降、拡散した黄砂の影響も観測値に含まれる。

このようなプロダクトの特性を踏まえて、黄砂の監視には、黄砂監視プロダクトとエアロゾルプロダクトを合わせて利用することが望ましい。衛星センターにおいても、両プロダクトの利点を合わせた、黄砂の監視に有効な総合プロダクトを今後開発していく予定である。

また、今後の計画として、以下の事項が挙げられる。

- ・ 黄砂領域の検出精度向上のため、黄砂判定方法の改良を検討する。
- ・ 衛星の赤外データから砂漠域での黄砂の発生を検出するのは困難だが、黄砂の飛来をより早い段階で検出できるよう、砂漠域を含む内陸の処理について検討する。
- ・ MTSAT-1R で新たに搭載された赤外 4 (3.8 μ m 帯) データが黄砂検出に有効であるという報告 (Ackerman, 1989) があることから、赤外 4 データの利用について調査する。
- ・ 今後プロダクトのデータを黄砂予測モデルへ利用できるようにするためにも、放射伝達計算などにより、衛星の赤外データから黄砂のデータを定量的に算出することが望まれている。この方法についても調査を行う。

謝辞

プロダクトの開発、検証に協力いただいた、気象研究所気象衛星・観測システム研究部第一研究室、気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官付エアロゾル観測系の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- A. Berk, G.P. Anderson, P.K. Acharya, M.L. Hoke, J.H. Chetwynd, L.S. Bernstein, E.P. Shettle, M.W. Matthew, and S.M. Adler-Golden, 2003: MODTRAN4 Version3 Revision1 USER'S MANUAL.
- Ackerman S.A., 1989: Using the Radiative Temperature Difference at 3.7 and 11 μ m to track Dust Outbreaks., Remote Sensing of Environment, 27, 129-133.
- I.M. Watson, V.J. Realmuto, W.I. Rose, A.J. Prata, G.J.S. Bluth, Y. Gu, C.E. Bader, T.Yu, 2004: Thermal infrared remote sensing of volcanic emissions using the moderate resolution imaging spectroradiometer., Journal of Volcanology and Geothermal Research, 135, 75- 89.
- Kneizys, F. X., Shettle, E. P., Abreu, L. W., Chetwynd, J. H., Anderson, G. P., Gallery, W. O., Selby, J. E. A., and Clough, S. A.,1988: Users guide to LOWTRAN7, Air Force Geophysics Laboratory, AFGL-TR-88-0177, Hanscom AFB, MA, 146pp.
- McClain,E.P., C.G.Walton and L.L.Stowe,1990: CLAVR cloud/clear algorithms and nonlinear atmospheric corrections for multi-channel sea surface temperatures, Preprint volume of the fifth conference on satellite meteorology and oceanography, September 3-7,1990.
- MODIS UCSB emissivity library :
<http://www.icesb.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>

Peixoto, J.P. and Oort, A.H., 1992 : Physics of Climate Springer, 118pp.

Y.Kurosaki and M.Mikami, 2005 : Regional Difference in the Characteristic of Dust Event in East Asia: Relationship among Dust Outbreak, Surface Wind, and Land Surface Condition., Journal of the Meteorological Society of Japan, 83A, 1-18.

大河原望、吉崎徳人、徳野正己、2003 : エーロゾルプロダクトの開発 - GMS/VISSR 及び NOAA/AVHRR 画像データを利用して -、気象衛星センター技術報告第 42 号、43-52.

気象衛星センター、2000 : 気象衛星画像の解析と利用、161pp.

気象庁、2006 : 大気・海洋環境観測報告第 6 号 (2004 年観測成果).

橋本徹、2006 : エーロゾルの光学的厚さ、気象衛星センター技術報告特別号、121-124.

増水紀勝、岩崎亮治、小山田恵、木下紀正、鶴野伊津志、佐竹晋輔、矢野利明、飯野直子、2001 : GMS-5 / VISSR と NOAA / AVHRR による 2001 年春季黄砂の解析、日本リモートセンシング学会第 31 回学術講演会論文集、71-74.

安田宏明、白川嘉茂、1999 : 静止気象衛星データを用いた海面水温算出方法の改良気象衛星センター技術報告第 37 号、19-33.