

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—

加藤 芳信^{*1}

Detection Methods of Asian Dust and PM2.5 by Using MODIS Data - Their Applications to Asian Dust Events Which Aggravated Respiratory Symptoms in Western Japan in May 2011-

Yoshinobu KATO^{*1}

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

Asian dust (i.e., dust and sandstorm: DSS) is a phenomenon that wind-borne soil and mineral particles are raised thousands of meters into the air in arid and semi-arid regions of China and Mongolia, and is carried by westerly winds and sometimes reaches Japan. The PM2.5 air pollution is often generated in urban and industrial areas of China recently, and sometimes flows into Japan. DSS and PM2.5 affect the human health. DSS can be detected by using AVI method of the satellite remote sensing technique. AVI 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. PM2.5 can be detected by using the proposed method {R, G, B = band10, band 9, T11}. In this paper, these methods apply to the DSS events which aggravated Respiratory Symptoms (Asthma) in Western Japan in May 2011.

Key Words : MODIS, Asian Dust, Dust and Sandstorm, AVI, PM2.5, Air Pollution, Bio-Aerosol, Respiratory Symptom

1. 緒 言

黄砂 (Asian dust または Dust and sandstorms (略称 DSS)) は中国大陸のタクラマカン砂漠・ゴビ砂漠・黄土高原などで発生し、時々日本へ飛来する。日本に飛来する黄砂粒子の大きさは 1~10 μ m が多い。微小粒子状物質 PM2.5 (Particulate Matter 2.5 の略) とは大気中に浮遊している 2.5 μ m 以下の粒子のことである。PM2.5 は小さいため肺の奥まで入りやすく、肺癌や呼吸系・循環器系への影響が懸念されている。近年、日本では中国大陸から飛来する PM2.5 大気汚染が問題となっている⁽¹⁾。

黄砂及び PM2.5 と人間の健康との関係に関する生物学的、薬学的、医学的な研究 (バイオエアロゾル分野の研究) として、金沢大学の岩坂泰信教授 (現在、滋賀県立大学) らの研究⁽²⁾、大阪大学的那須正夫教授らの研究⁽³⁾⁽⁴⁾、鳥取大学の渡部仁成講師らの研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾、大分県立看護科学大学の市瀬孝道教授らの研究⁽⁷⁾⁽⁸⁾がある。これらの研究で共通して扱っている内容は、2011 年 5 月の黄砂飛来と呼吸器症状との関係に関する部分である。即ち、那須正夫教授ら⁽³⁾は 2011 年 5 月 2 日に小型飛行機を用いて鳥取県沿岸部の海上約 1km の地点で黄砂を捕集し、黄砂表面に付着した細菌の可視化に成功し、更に細菌の一部が増殖能力を保持していたと報告している。渡部仁成講師ら⁽⁶⁾は西日本での成人の呼吸器症状 (喘息) が 10~20%増悪したと報告している。市瀬孝道教授ら⁽⁷⁾はマウスを使った実験により、きれいな黄砂に比べて微生物や PM2.5 が付着した黄砂の方が、より肺胞にダメージを与えたと報告している。金沢大学の成果は文献⁽⁷⁾に含まれている。

本論文では、まず、衛星データを用いた黄砂検出法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾と PM2.5 検出法⁽¹²⁾について説明し、次に、それらを 2011 年 5 月に西日本で呼吸器症状 (喘息) の増悪が認められたときの黄砂飛来に応用する⁽¹³⁾。本研究の最終的な

* 原稿受付 2016 年 2 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

目標は中国大陸のどこで発生して（微生物の付着に関係）、どこを通過して（PM2.5 化学物質の付着に関係）、日本へ飛来してくる黄砂が、人間の健康に危険をもたらすのかを明らかにすることである。本論文はその初期検討結果の報告である。

2. MODIS データを用いた黄砂検出法

MODIS には 36 個のバンドがあるが、その一部を Table 1 に示す。黄砂の検出には、昼画像にも夜画像にも適用できる AVI 法を用いる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。AVI は $AVI = T12 - T11$ と定義され、T12, T11 はそれぞれ 12 μm 波長熱赤外バンド (band32), 11 μm 波長熱赤外バンド (band31) の輝度温度 (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 $AVI > 0$ で黄砂ありとなる。AVI 法の黄砂検出原理は次のように説明できる⁽¹⁰⁾。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 μm 波長熱赤外線よりも 11 μm 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。なお、雲は通常 $AVI < 0$ 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⁽¹¹⁾。その場合、AVI 法ではその雲を黄砂であると誤認するのであるが、それを克服する方法として、文献⁽¹¹⁾では、昼の場合の黄砂・雲等識別画像 {R,G,B = AVI, band7-band1, T11}, 夜の場合の黄砂・雲等識別画像 {R,G,B = T11, AVI, none} を提案している。

AVI 画像はそのまま用いることもある (これを AVI リニア画像と呼ぶ) が、黄砂のレベル、発生・移動・消散を分かり易くするために AVI6 段階表示画像 (Table 2 参照) とすることもある。

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
8	405 – 420 nm (purple-blue)	1000m
9	438 – 448 nm (blue)	1000m
10	483 – 493 nm (blue-green)	1000m
11	526 – 536 nm (green-yellow)	1000m
12	546 – 556 nm (yellow)	1000m
31	10.780 – 11.280 μm (thermal infrared)	1000m
32	11.770 – 12.270 μm (thermal infrared)	1000m

Table 2. Classification of the level of DSS

Level of DSS	Range of AVI value	Coloring
5 (DSS very strong)	$4K \leq AVI$	red
4 (DSS strong)	$3K \leq AVI < 4K$	orange
3 (DSS medium)	$2K \leq AVI < 3K$	yellow
2 (DSS weak)	$1K \leq AVI < 2K$	green
1 (DSS very weak)	$0.1K \leq AVI < 1K$	light blue
0 (DSS none)	$AVI < 0.1K$	dark blue

3. MODIS データを用いた PM2.5 検出法

文献⁽¹²⁾では MODIS データを用いて、バンド合成画像による手法で PM2.5 を検出する方法を提案した。即ち、RGB 合成カラー画像表示の最良の組合せとして {R,G,B = band10, band 9, 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。{R,G,B = band10, band9, T11}の場合、PM2.5は「薄紫～ピンク～肌色」で表示される。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⁽¹⁾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⁽¹²⁾。

提案手法のPM2.5検出原理は次のように説明できる⁽¹²⁾。文献⁽¹⁴⁾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}、大気汚染粒子{球形、0.19 μ m, 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、提案手法は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。

文献⁽¹⁵⁾では、大気エアロゾルのサイズ分布は小粒子と大粒子の2ヶ所にモードを持つ2つ山分布であり、東アジア域のエアロゾルは大気汚染粒子と砂塵粒子（黄砂）が卓越しているとして、北京上空のエアロゾル・リトリバルを行っている。また、文献⁽¹⁶⁾には中国でのPM10に占めるPM2.5の割合は5～7割と記されている。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PM2.5として検出されることがある。従って、AVI法による黄砂検出画像と提案手法によるPM2.5検出画像を比較することにより、黄砂とPM2.5大気汚染物質は、Table 3のように分類される。

Table 3. Classification of DSS and PM2.5 air pollution by using AVI method and the proposed method.

	AVI method	Proposed method	Classification
Case A	Detected	Not detected	DSS
Case B	Not Detected	Detected	PM2.5 air pollution
Case C	Detected	Detected	DSS, or Small-particle-sized DSS, or Mixture of PM2.5 air pollution and DSS

4. 黄砂とPM2.5と健康に関する大気バイオエアロゾル分野の研究内容紹介

本章では、大阪大学的那須正夫教授らの研究⁽³⁾、鳥取大学の渡辺仁成講師らの研究⁽⁶⁾、大分県立看護科学大学の市瀬孝道教授らの研究⁽⁷⁾について、本論文の内容（2011年5月の黄砂飛来）に関係する部分をまとめる。

4.1 那須正夫教授（研究代表者）らの研究⁽³⁾

平成21年度環境省環境研究総合推進費・環境問題対応型研究課題B-0902「黄砂現象の環境・健康リスクに関する環境科学的研究」：研究期間2009-2011年度。

研究体制は、（サブテーマ1）「黄砂付着微生物の微生物生態学的解析」：大阪大学2名、（サブテーマ2）「黄砂付着微生物の遺伝子生態学的解析」：大阪大谷大学3名、（サブテーマ3）「黄砂の環境毒性学的解析」：大阪大学3名、（サブテーマ4）「黄砂現象の環境および健康への影響評価」：大阪大学2名、となっている。

サブテーマ1では次のことが記されている。(1)大規模な黄砂現象が観測された2010年11月12日、2011年5月2日に航空機を用いて鳥取県北部の沿岸部の高度約1,000mで採取した黄砂について、バイオイメージングにより黄砂粒子上に微生物が付着していることを確認（黄砂に付着した細菌の可視化に成功）した。粒子の粒径が大きいほど微生物が付着している割合が高く、特に直径5 μ m以上の粒子においてその傾向が顕著であった。マイクロコロニー法により、黄砂粒子上の微生物が増殖活性をもっていることを明らかにした。(2)黄砂試料から直接DNAを抽出し、定量的リアルタイムPCR法により細菌現存量を測定した結果、黄砂飛来時の大気1m³あたりの細菌数は、最大時で約10⁴ cellsであり、黄砂現象の終息とともにその現存量は10² cells/m³以下に減少した。この結果より、黄砂現象とともに細菌が移動していることを明らかにした。

4.2 渡辺仁成講師（研究代表者）らの研究⁶⁾

平成 23 年度環境省環境研究総合推進費・環境問題対応型研究課題 5C-1154「黄砂のヒト健康への影響に対する臨床および基礎研究の融合アプローチ」：研究期間 2011-2013 年度。

研究体制は、(サブテーマ 1)「黄砂飛散が気道炎症に与える影響について Biomarker による評価」：鳥取大学 1 名、(サブテーマ 2)「黄砂飛散が喘息および COPD 患者の症状および活動性に与える影響調査」：鳥取大学 2 名、(サブテーマ 3)「黄砂が気道炎症細胞および気道構成細胞に与える影響についての基礎的検討」：鳥取大学 2 名、(サブテーマ 4)「大気粉塵の量及び化学成分の季節変動の解析」：京都薬科大学 3 名、となっている。

サブテーマ 1 では次のことが記されている。18 歳以上の鳥取大学医学部附属病院に通院する成人喘息患者 184 名を登録し、2011 年 5 月の黄砂時に、鳥取県米子市、島根県松江市、兵庫県豊岡市、福岡県北九州市に在住する成人喘息患者 182 名を対象にして電話での聞き取り調査を実施したところ、喘息患者 16.5%で呼吸器症状が黄砂後に増悪していた。

4.3 市瀬孝道教授（研究代表者）らの研究⁷⁾

平成 23 年度環境省環境研究総合推進費・環境問題対応型研究課題 5C-1155「黄砂エアロゾル及び付着微生物・化学物質の生体影響とそのメカニズム解明に関する研究」：研究期間 2011-2013 年度。

研究体制は、(サブテーマ 1)「黄砂エアロゾル及び付着微生物・化学物質による呼吸器系・生殖器系・免疫系への影響とそのメカニズム解明」：大分県立看護科学大学 3 名、京都大学 1 名、国立環境研究所 2 名、(サブテーマ 2)「黄砂付着微生物の解析とその毒性物質の検出に関する研究」：金沢大学 5 名、(サブテーマ 3)「黄砂エアロゾルに含まれる化学物質の計測とその細胞毒性に関する研究」：産業医科大学 3 名、となっている。2011 年 5 月の黄砂に関しては、5 月 1-3 日採取の黄砂を ASD1、5 月 12-14 日採取の黄砂を ASD2 と名付けている。

サブテーマ 1 では、マウスを用いた実験により、(1)PM2.5 や微生物成分 (LPS, β -glucan) を多く含む黄砂はアレルギー喘息を悪化すること、(2)黄砂に含まれる化石燃料燃焼由来の化学物質のタール成分はアレルギー喘息を悪化すること、などが記されている。

サブテーマ 2 では、金沢大学 (石川県金沢市角間町) で黄砂を観測し、(1)5 月 2、3 日の黄砂エアロゾル中に、中国・敦煌上空での (従って、タクラマカン砂漠由来の) 優占種である *Bacillus pumilus* と *Bacillus subtilis* が多く含まれていたこと、(2)アレルギーを増悪させる微生物 (担子のう菌, グラム陰性細菌) は、黄砂が発生すると 10 倍から 100 倍の細胞密度に増大し、2011 年 5 月のように黄砂が長期化すると、その高い濃度を数日間維持すること、などが記されている。

サブテーマ 3 では、産業医科大学 (福岡県北九州市八幡西区折尾) で採取した黄砂を使った実験により、(1)黄砂の粒径別重量分布比較では、ASD1 は PM10 が多く、ASD2 は PM2.5 が多い (即ち粒径の小さいものが多い) こと、(2)含有量 ($\mu\text{g}/\text{mg}$) 比較では、例えば①黄砂の主成分である SiO_2 と Al_2O_3 は、ASD1 が 710 と 130 に対し ASD2 が 510 と 94 で、ASD1 の方が多いこと、②硝酸塩 (NO_3^-) と硫酸塩 (SO_4^{2-}) は、ASD1 が 13 と 9.2 に対し ASD2 が 50 と 16 で、ASD2 の方が多いこと、③微生物由来の毒素成分 (ng/mg) のリポポリサッカライド LPS と β -glucan は、ASD1 が 0.061 と 0.355 に対し ASD2 が 0.214 と 28.16 で、ASD2 の方が多いこと、(3)粒径 $0.9\mu\text{m}$ 以上の黄砂粉塵中の化石燃料燃焼由来の多環芳香族炭化水素 PAHs 濃度 (ng/g 粉塵) 比較では、例えば BaP (Benzo(a)pyrene) と BkF (Benzo(k)fluoranthene) は、ASD1 が 439 と 296 に対し ASD2 が 660 と 455 で、ASD2 の方が大きいこと、などが記されている。

5. 2011 年 5 月に西日本で呼吸器症状 (喘息) の増悪が認められたときの黄砂飛来への応用

5.1 2011 年 4 月下旬～5 月の黄砂飛来状況

気象庁¹⁷⁾によれば、福岡管区气象台及び大分・下関地方气象台では 2011 年 4 月下旬には黄砂が観測されず、5 月 1～5 日、13 日に黄砂が観測されている。同様に、鳥取地方气象台では 5 月 1～4 日、13 日に黄砂が観測され、福井・金沢・富山地方气象台では 5 月 2～4 日、13 日に黄砂が観測されている。Table 4 に詳しい日時を示す。

Table 4. Date and time when DSS was observed in the period from the end of April to May, 2011.

Name of meteorological observatory	Date and time when DSS was observed.
Fukuoka Regional Headquarters, JMA	11:20JST on 1 May to 17:00JST on 5 May, 4:50JST to 17:30JST on 13 May.
Tottori Local Meteorological Office	15:10JST on 1 May to 17:00JST on 4 May, 7:00JST to 23:00JST on 13 May.
Kanazawa Local Meteorological Office	5:50JST on 2 May to 23:30JST on 3 May, 8:00JST to 14:00JST on 4 May, 10:00JST to 23:00JST on 13 May.

5.2 MODIS 衛星画像の作成手順

使用した Terra/Aqua 衛星 MODIS データは、2011 年 4 月 28 日～5 月 5 日と 5 月 9～15 日のデータで、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ものと NASA⁽¹⁸⁾から入手したものである。処理手順は次の通りである。(1)衛星データ処理ソフトウェア HDF-EOS を用いて、Level 1B データをアンパック、大気補正、幾何補正する。(2)衛星画像処理ソフトウェア ER Mapper を用いて、①トルーカラー画像、②T11 温度画像、③AVI リニア画像、④AVI6 段階表示画像、⑤PM2.5 検出画像の各モザイク画像を作成し、Geotif 画像保存する。(3) GIS ソフトウェア Arc Map を用いて、地図と Geotif 画像を重ね表示する。なお、モザイク画像とは、衛星のパスをつなげた画像のことで、Terra/Aqua 衛星の場合、パス間は 99 分（衛星が地球を 1 周する時間）の時間差がある。

5.3 2011 年 4 月 28 日～5 月 5 日の衛星画像処理結果と考察

Figs. 1～10 に 2011 年 4 月 28 日～5 月 5 日の Terra/Aqua 衛星 MODIS の昼または夜の衛星画像（表示範囲：東経 70-150 度，北緯 20-60 度）を示す。図の(a)はトルーカラー画像，(b)は T11 温度画像（温度範囲：210-320K，K はケルビン温度を表す。温度バーは Fig. 1(b)参照.），(c)は AVI6 段階表示画像（黄砂検出画像），(d)は PM2.5 検出画像 {R, G, B = band10, band 9, T11} である。地図として 20 度ごとの緯度経度線，国境，主な川と湖を表示してある。

なお，MODIS センサの特性上，band10，band 9 では許容範囲外の観測値の場合は null 値になる（例えば雲を観測した場合などに null 値になることがある）ので，その場合，(d)では R（赤），G（緑）がないことになり，更に B（青）の値も小さい（即ち温度 T11 が低い）場合は青黒色となることに注意されたい。

時刻は世界標準時 UT で記してある。日本標準時 JST=UT+9 時間，中国標準時 CST=UT+8 時間，の関係がある。昼と夜は，衛星が観測している地上の場所が昼または夜であることを意味する。以下の Figs. 1～20 の説明では (b)T11 温度画像について他の画像(a)(c)(d)との関係を特には記していないが，次のために使われている。即ち，昼の場合，(c) AVI6 段階表示画像で AVI>0 であるものが，黄砂なのか，粒径が非常に大きく且つ光学的厚さが非常に大きい雲（この場合 T11 温度が低い）なのかを識別するために使われる。(a)トルーカラー画像で雲と非常に濃い大気汚染を識別しにくい場合にも(b)は役立つ。夜の場合，(c)で黄砂が検出されていない場所が，本当に黄砂が存

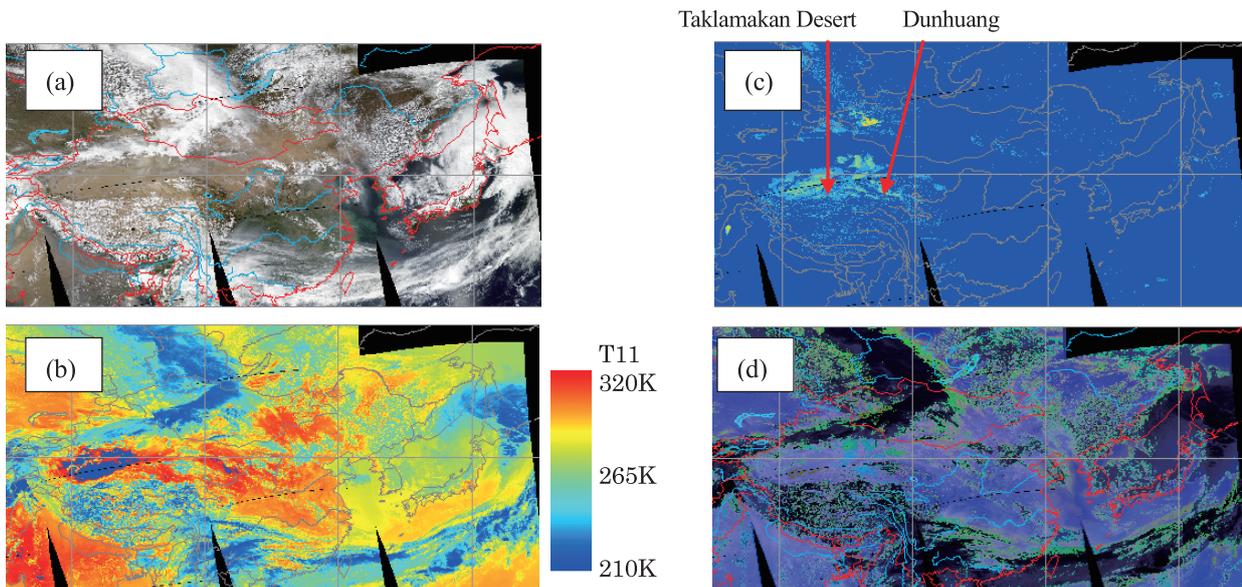


Fig. 1 April 28, 04:01-09:10UT, Aqua-MODIS

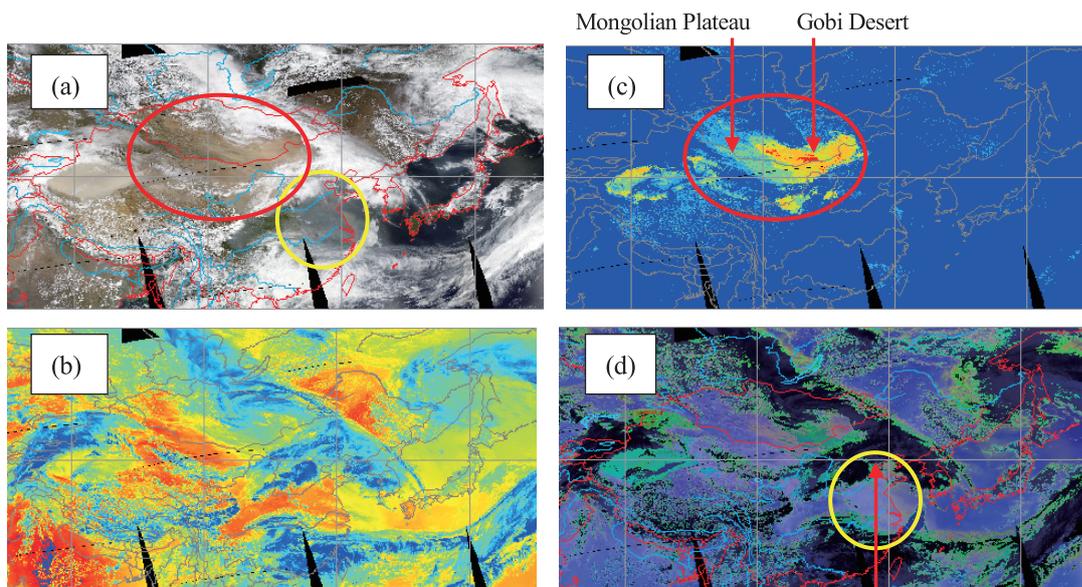


Fig. 2 April 29, 03:05-08:15UT, Aqua-MODIS
Mongolian Plateau Gobi Desert
Beijing

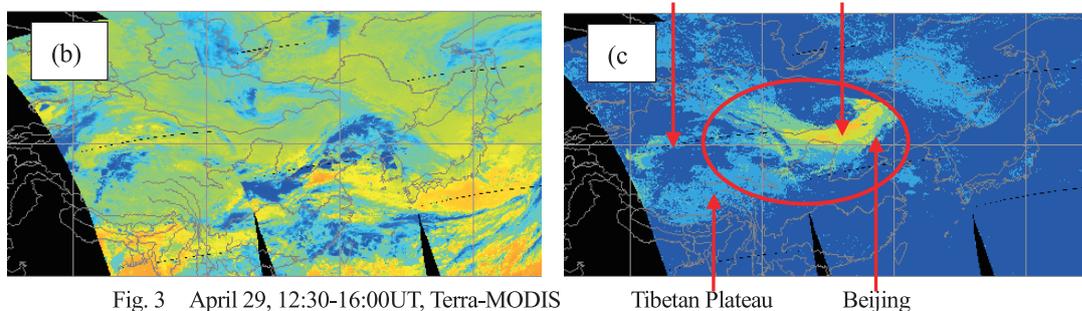


Fig. 3 April 29, 12:30-16:00UT, Terra-MODIS
Taklamakan Desert Gobi Desert
Tibetan Plateau Beijing

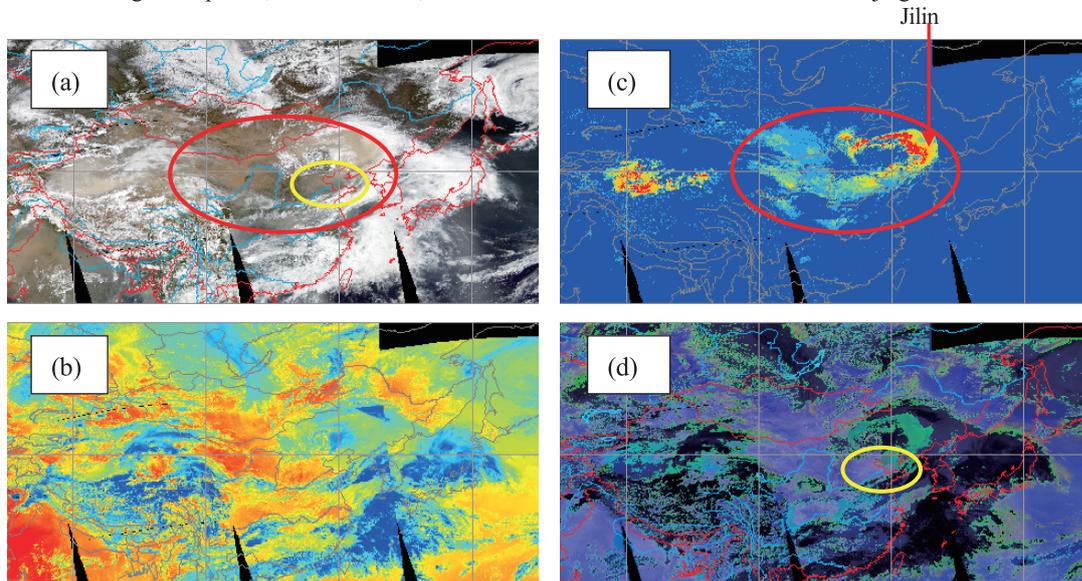


Fig. 4 April 30, 03:49-09:00UT, Aqua-MODIS
Jilin

在しないのか、雲があるために黄砂が検出されない（この場合 T11 温度が低い）のかを識別するために使われる。

以下の図の説明で、黄砂または PM2.5 大気汚染で存在や移動について言及しないものがあるが、それらは最終的に日本に到達しないものであるためである。日本に到達するものについては説明してある。

4月28日昼には、Fig. 1(a)(c)に示すようにタクラマカン砂漠から流出した黄砂が敦煌（Dunhuang）などに飛来している。

4月29日昼には、Fig. 2(a)(c)の赤丸で示すようにモンゴル高原、モンゴルと中国のゴビ砂漠を含む広い領域で強い黄砂が発生しており、また、Fig. 2(a)(d)の黄丸で示すように中国東部に強いPM2.5大気汚染がある。(文献⁽¹⁹⁾によれば北京の5:00UTのPM2.5濃度は $165 \mu\text{g}/\text{m}^3$ である.)

4月29日夜には、Fig. 3(c)の赤丸で示すように黄砂はゴビ砂漠を東南東に移動しており、タクラマカン砂漠から続く黄砂とチベット高原からの黄砂も混じろうとしている。北京も黄砂の範囲に入っているため、北京上空で黄砂と大気汚染物質が混じった可能性がある。(文献⁽¹⁹⁾では北京の15:00UTのPM2.5濃度は $168 \mu\text{g}/\text{m}^3$ である.)

4月30日昼には、Fig. 4(a)(c)の赤丸で示すように黄砂は全体的に東に移動し、先端は吉林(Jilin)まで来ている。Fig. 4(a)(d)の黄丸で示すように中国東部のPM2.5大気汚染は雲に隠れて小領域しか見えない。

4月30日夜には、Fig. 5(c)の赤丸で示すように黄砂は全体的に南に移動し、黄海も黄砂の領域に入っている。

5月1日昼には、Fig. 6(a)(c)の赤丸で示すように黄砂は黄海～朝鮮半島にある。この黄砂はFig. 5(c)の黄砂のほぼ北緯40度以南の部分が東進したものである。従って元をたどれば、ゴビ砂漠だけでなくタクラマカン砂漠起源の黄砂も混じっていると推測できる。Fig. 6(a)(d)の黄丸で示すようにPM2.5が黄海～朝鮮半島～日本海にある。従って、Fig. 6(c)(d)より黄海上空で黄砂とPM2.5大気汚染物質が混じりあったと推測できる。Fig. 6(c)の九州北部～鳥取県で黄砂が検出されないのは、Fig. 6(a)(b)より雲が存在するためである。(Fig. 6の九州北部～鳥取県の衛

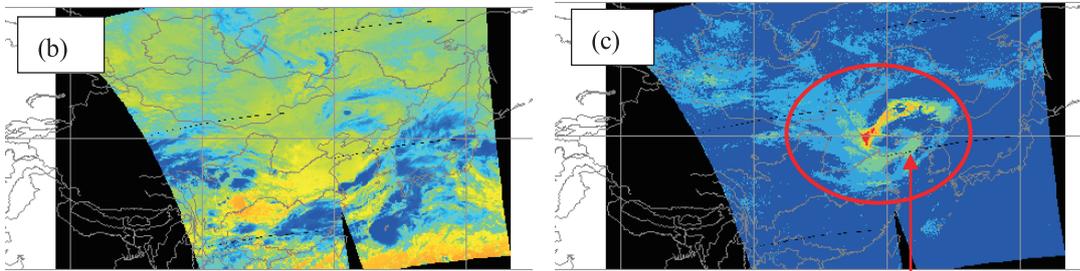


Fig. 5 April 30, 13:15-15:05UT, Terra-MODIS

Yellow Sea

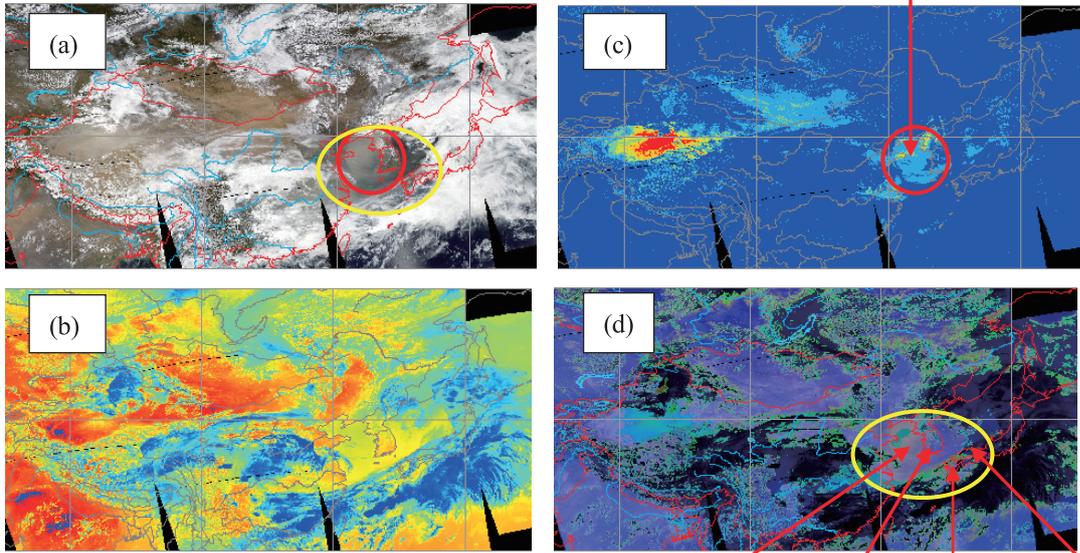


Fig. 6 May 1, 02:55-08:05UT, Aqua-MODIS

Yellow Sea Korea Fukuoka Tottori

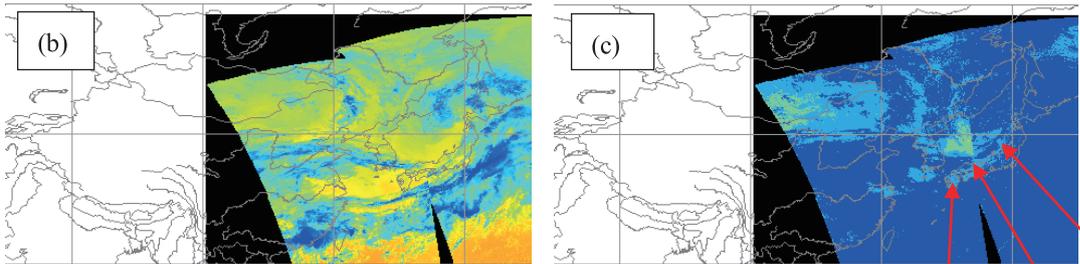
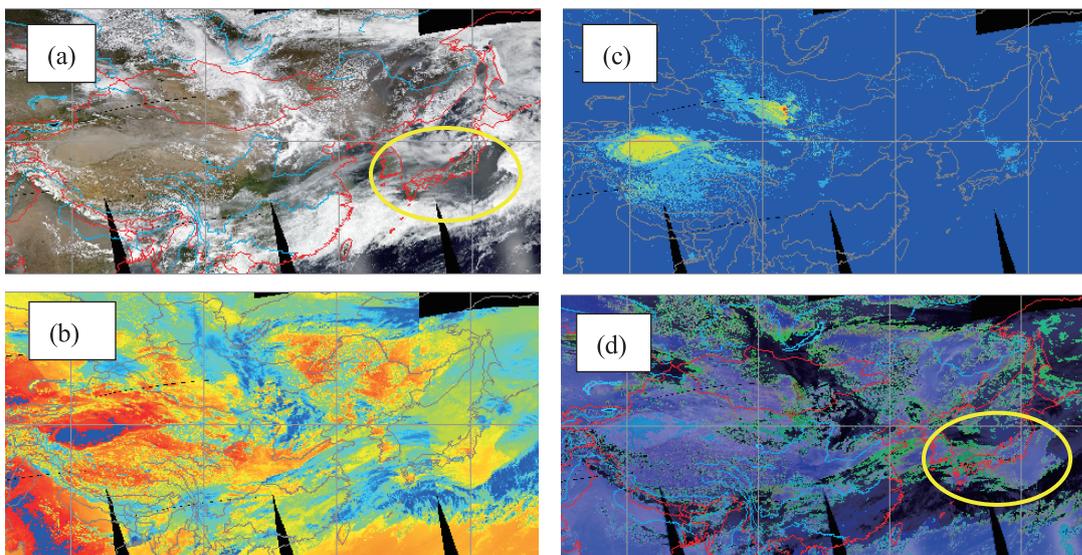
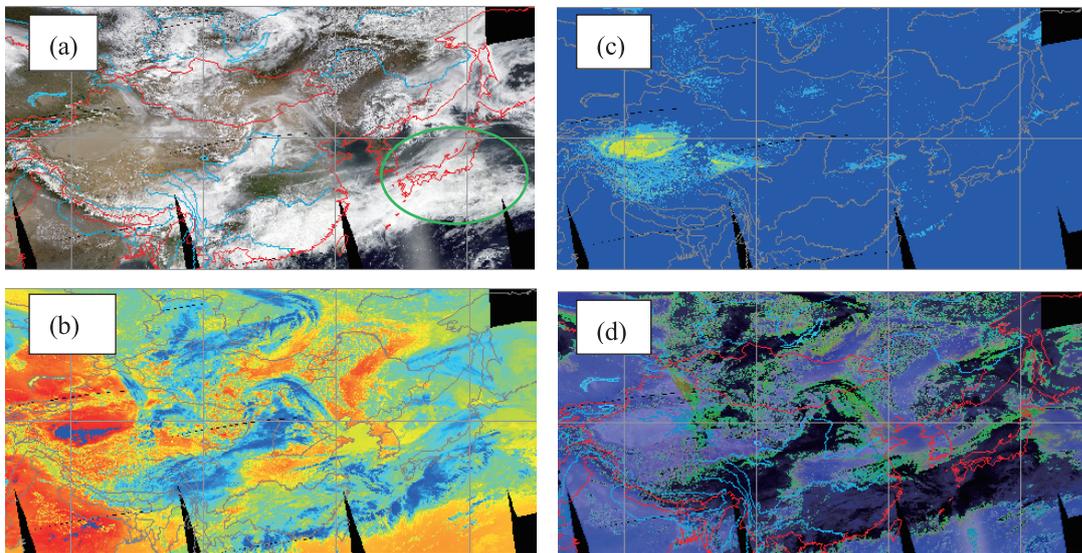
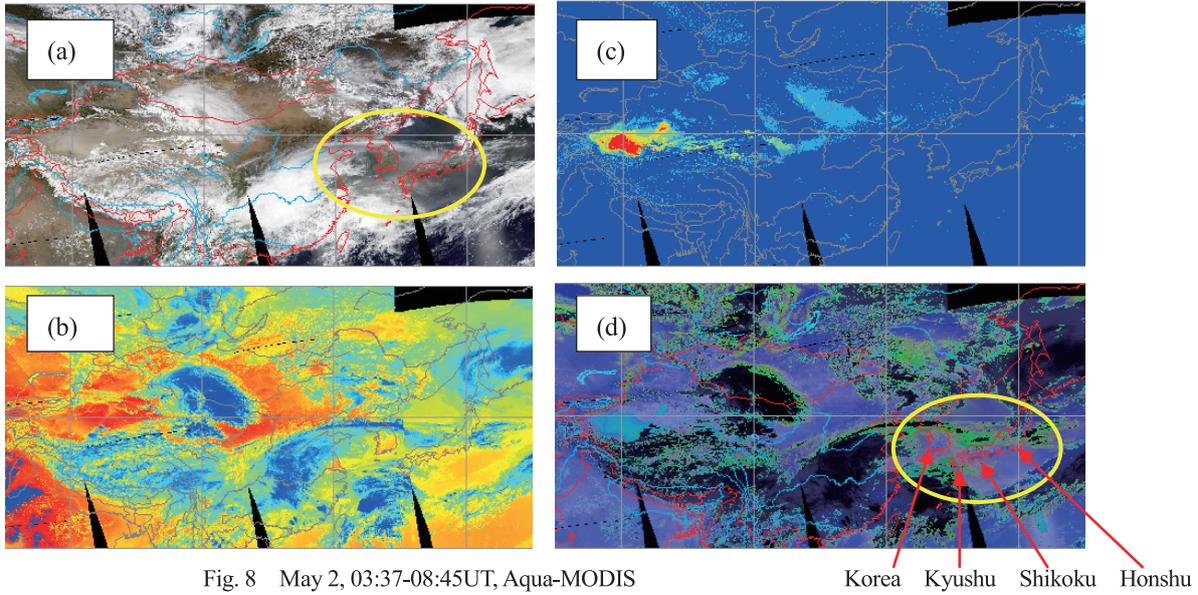


Fig. 7 May 1, 12:18-13:56UT, Terra-MODIS

Kyushu Tottori Niigata



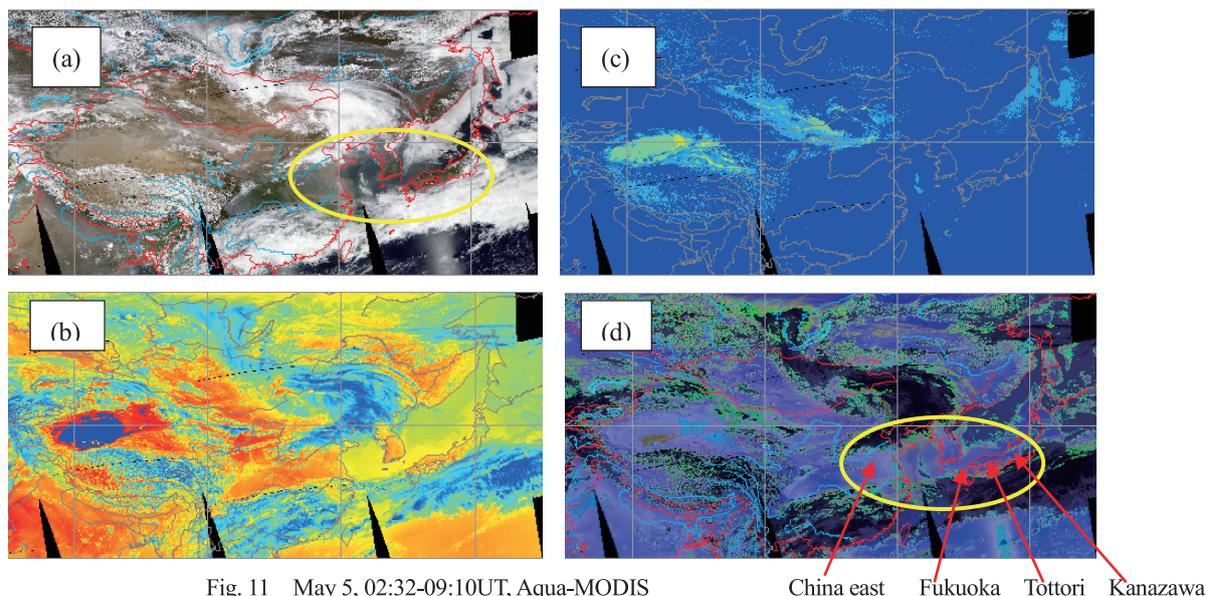


Fig. 11 May 5, 02:32-09:10UT, Aqua-MODIS

China east Fukuoka Tottori Kanazawa

星観測時刻は4:40UT=13:40JST頃であるので、Table 4より九州北部では黄砂があり、鳥取県では黄砂がないことになっている。) Fig. 6(d)の九州北部でPM2.5が検出(肌色で表示)されているのは、細かい粒子の黄砂を検出したためと推測される。このことは5月1日夜の画像(Fig. 7(c))で確認される。

5月1日夜には、Fig. 7(c)より九州～鳥取県～新潟県で黄砂が検出されている。

5月2日には、Fig. 8(a)(d)の黄丸で示すように日本の本州・四国・九州と韓国を含む広い領域でPM2.5が検出(肌色で表示)されている。第5.1節で記した九州北部から北陸の気象台で観測された黄砂は、細かい粒子*なのでPM2.5として検出されている。(*黄砂は、黄砂発生源から風で運ばれてくる途中で大きな粒子が地上に落下していき、細かい粒子が残っていく。)

5月3日はFig. 9(a)の緑丸で示すように日本上空を雲が広く覆っているので、黄砂(Fig. 9(c))もPM2.5(Fig. 9(d))も検出されない。

5月4日には、Fig. 10(d)の黄丸で示すように、第5.1節で記した九州北部から北陸の気象台で観測された黄砂はPM2.5として検出(薄紫～肌色で表示)されている。

5月5日は、第5.1節で記したように、九州北部の気象台で黄砂が観測されているが、鳥取県や北陸の気象台では黄砂が観測されていない。Fig. 11(d)の黄丸で示すように、中国東部の大気汚染は肌色で表示されPM2.5として検出されている。鳥取県や北陸はごく薄い薄紫色なのでPM2.5ではない(従って細かい粒子の黄砂でもない)。九州北部は薄紫色なのでPM2.5である。従って、気象台の結果とFig. 11(d)の結果とは矛盾しない。

以上をまとめると、4月29日にモンゴル高原やゴビ砂漠付近で発生した強い黄砂にタクラマカン砂漠からの黄砂が混じったものが、東南東に進み、中国東部で発生したPM2.5大気汚染と4月30日夜～5月1日に黄海上空で混じりあい、それが5月1～2日に日本に飛来し、4日または5日まで観測されたと結論できる。これは、第4.3節のサブテーマ2の「5月2, 3日の黄砂エアロゾル中に、中国・敦煌上空での(即ち、タクラマカン砂漠由来の)優占種である *Bacillus pumilus* と *Bacillus subtilis* が多く含まれていたこと」と矛盾しない。(注: 金沢大学のグループ⁽²⁾⁽⁷⁾は遺伝子解析を行って、種を同定している。)

5.4 2011年5月9～15日の衛星画像処理結果と考察

第5.3節と同様に、Fig. 12～21に2011年5月9～15日のMODIS画像を示す。但し、(b)T11温度画像の範囲は210-330Kである。温度バーはFig. 12(b)に示してある。

5月9日(Fig. 12)には、最終的に(即ち5月13日に)日本へ飛来する可能性のある黄砂はない。

5月10日昼にFig. 13(a)(c)の赤丸に示すようにモンゴル高原で黄砂が発生した。また、Fig. 13(d)の黄丸に示すように、瀋陽市(Shenyang)・長春市(Changchun)などを含む中国東北部(石炭産業などの重工業が集中している)にPM2.5大気汚染がある。

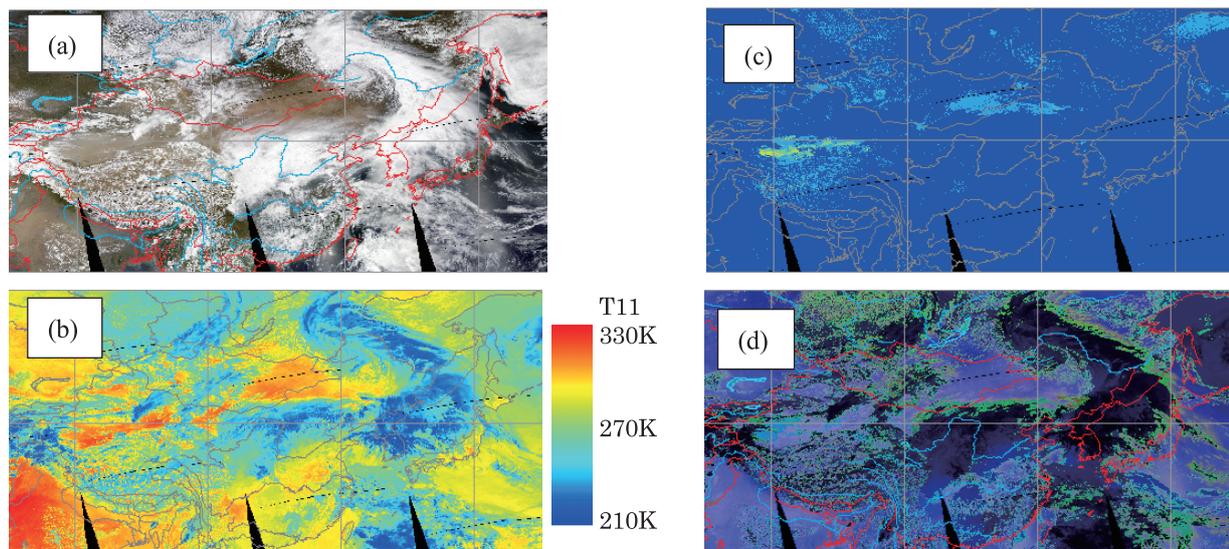


Fig. 12 May 9, 03:40-08:55UT, Aqua-MODIS

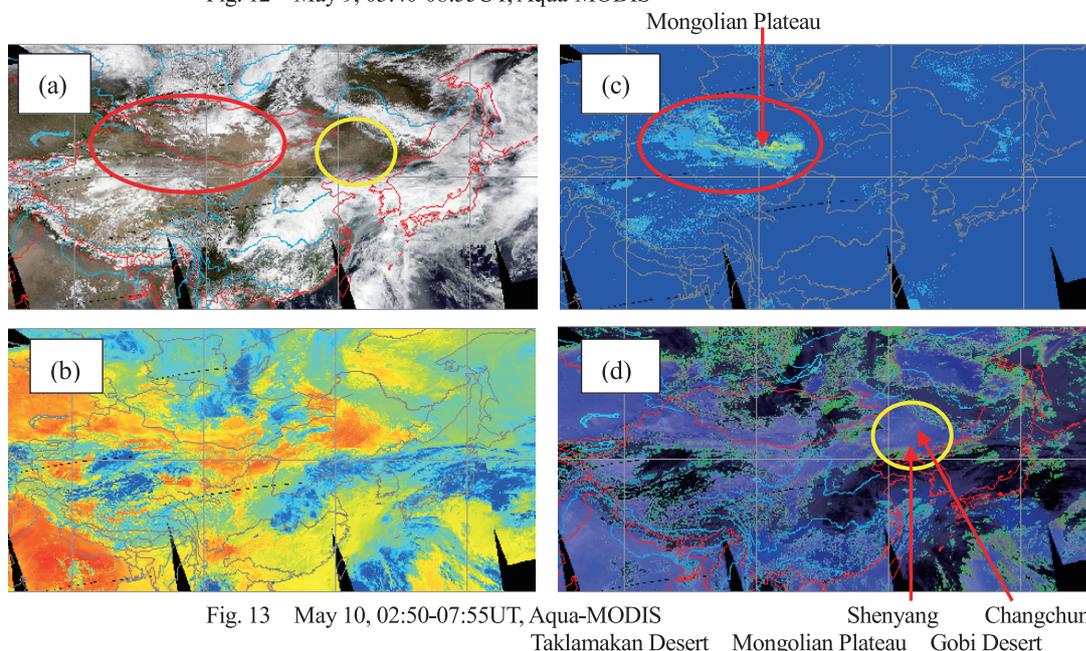


Fig. 13 May 10, 02:50-07:55UT, Aqua-MODIS

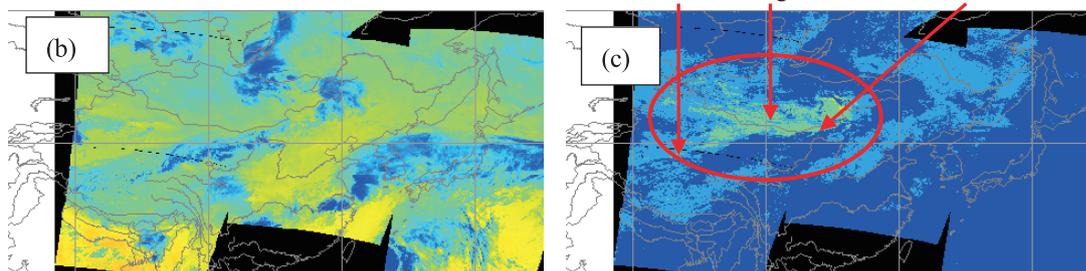


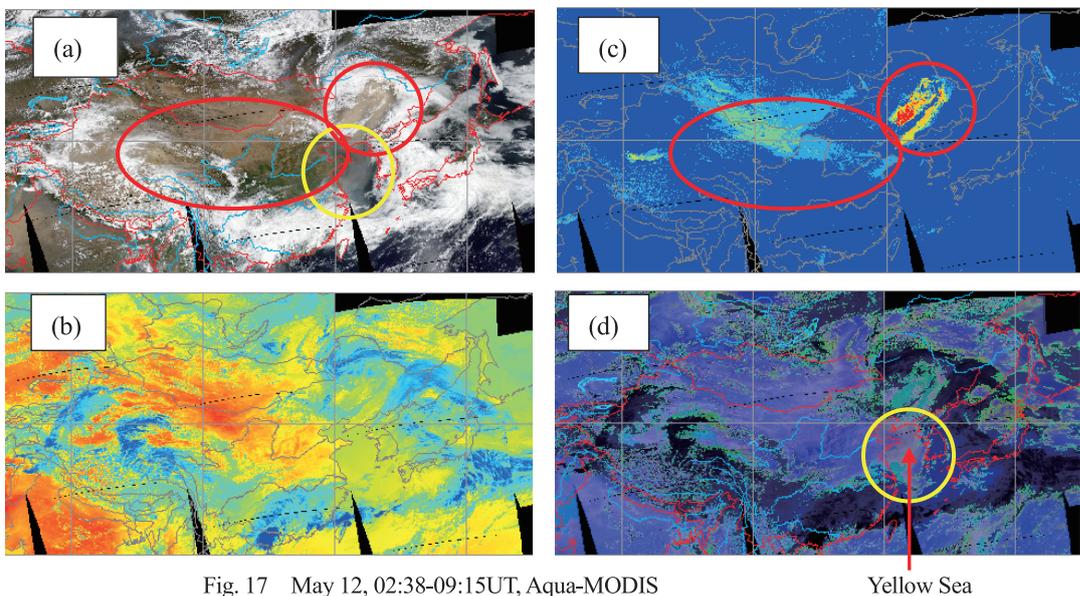
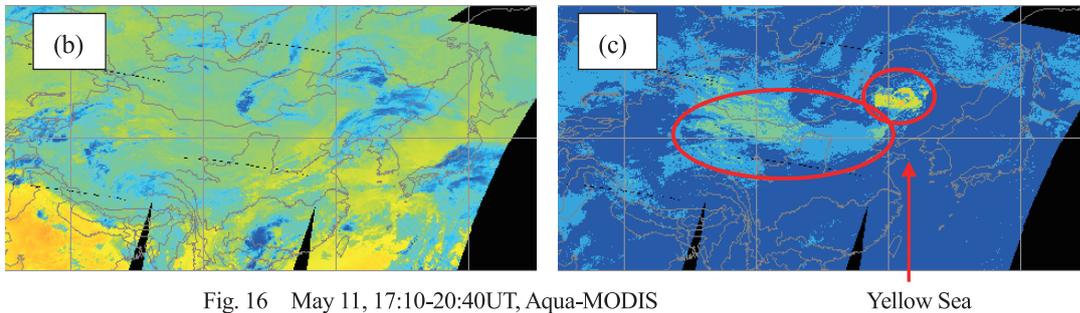
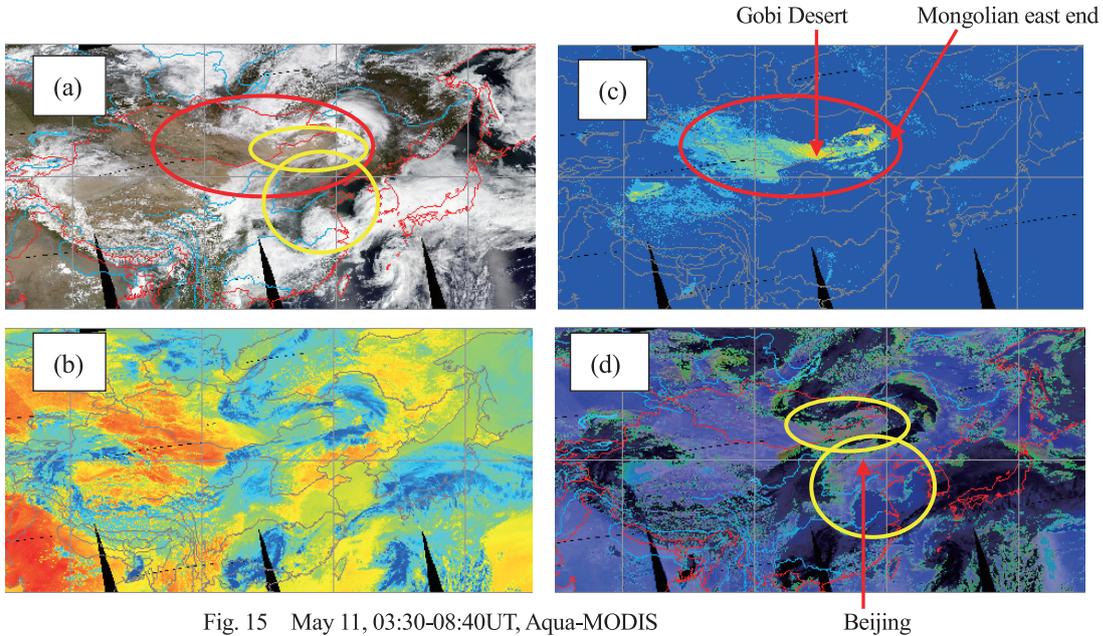
Fig. 14 May 10, 16:27-19:55UT (Night), Aqua-MODIS

黄砂は10日夜には Fig. 14(c)の赤丸に示すようにモンゴル高原からゴビ砂漠までの大規模な黄砂に発達し、タクラマカン砂漠からの黄砂も合流し、11日昼には Fig. 15(a)(c)の赤丸に示すように黄砂の先頭部分はモンゴルの東端に到達した。黄砂には細かい粒子も含まれるため、黄砂の先頭部分の強い黄砂の部分は Fig. 15(a)(d)の上側黄丸に示すようにPM2.5としても検出(肌色で表示)されている。また、下側黄丸の所は中国東部のPM2.5大気汚染で、北京も含まれている。

Fig. 15(c)の黄砂の先頭部分は、11日夜には Fig. 16(c)の上側赤丸の所に移動し、12日昼には Fig. 17(c)の右側赤

丸に示すように強い黄砂に発達した (Fig. 15(c), Fig. 16(c)と比べて, 広い領域で黄砂レベルが5まで上がっている, 新たな黄砂を地上から巻き上げたと推測できる). そして, 12日夜にはFig. 18(c)の右側赤丸の所に移動した. なお, この黄砂の12日昼と夜の位置は, 10日昼の衛星画像 (Fig. 13(a)) でPM2.5大気汚染が検出された場所なので, 衛星画像からは確認できないが, この場所 (中国東北部) で黄砂と大気汚染がまじりあった可能性がある. 13日昼にはFig. 19(c)の上側赤丸に示すように, 黄砂の先頭部分がウラジオストック付近から日本海上空を南進し, 鳥取県~石川県~新潟県付近に到達している.

一方, Fig. 15(c)の黄砂の先頭部分以外の部分は, 11日夜にはFig. 16(c)の下側赤丸に示すように東南東に移動し,



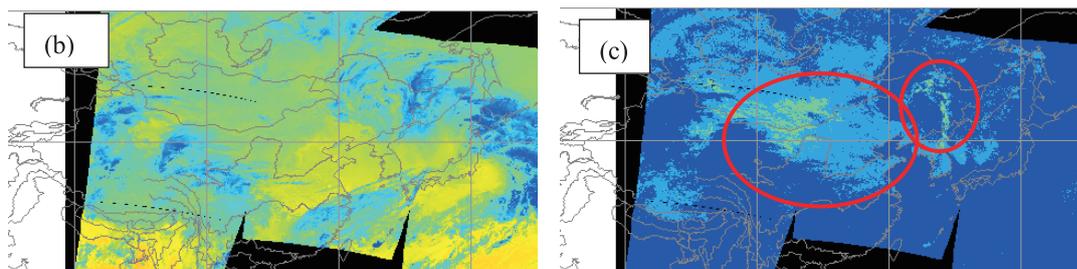


Fig. 18 May 12, 16:15-19:45UT, Aqua-MODIS

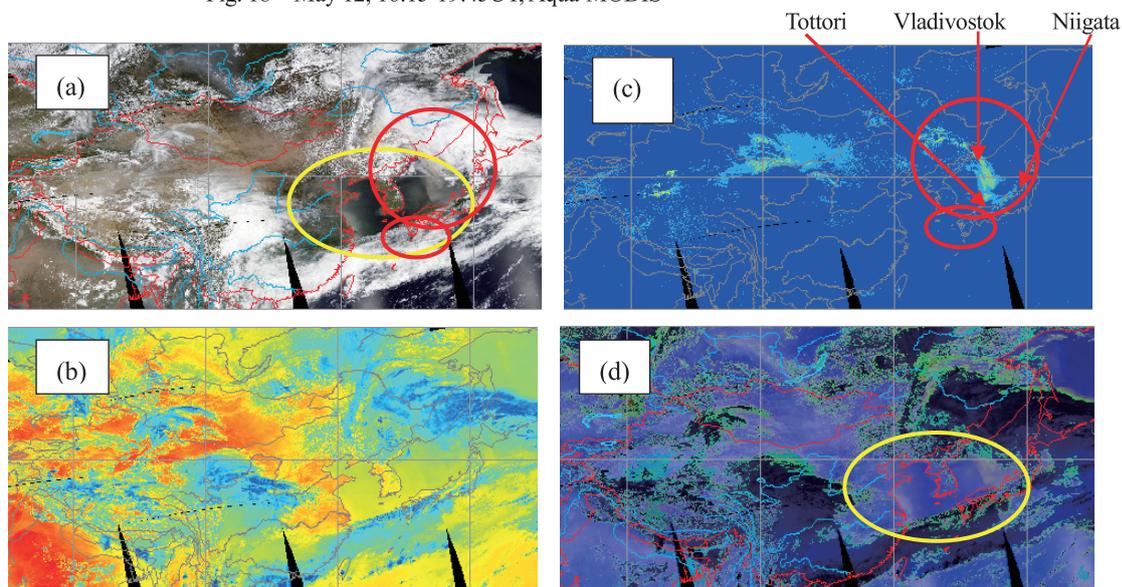


Fig. 19 May 13, 03:19-08:25UT, Aqua-MODIS

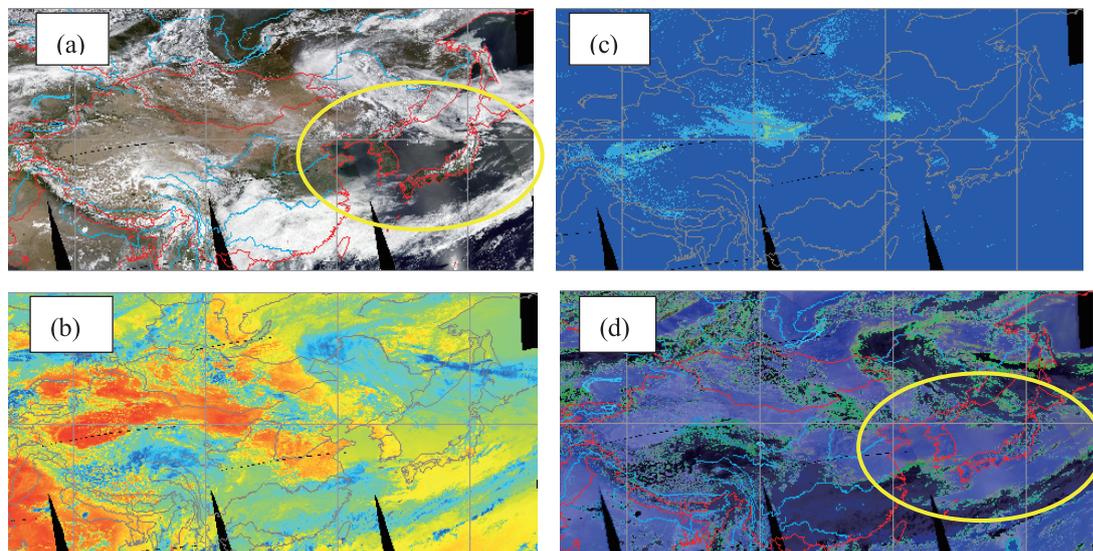


Fig. 20 May 14, 02:27-09:10UT, Aqua-MODIS

先頭部分が黄海沿岸近くまで来ているが、12日昼までには黄砂の大粒子は地上に落下して小粒子だけが残ったらしく、Fig. 17(c)に示すように先頭部分は黄砂として検出されにくくなっている。しかし、Fig. 15(d)の下側黄丸に示す中国東部のPM2.5大気汚染と混合した状態のものが、Fig. 17(a)(d)の黄丸に示すように黄海でPM2.5として検出されている。13日昼にはFig. 19(d)の黄丸に示すように中国東部～黄海～韓国～日本海でPM2.5が検出されているが、これは小粒子の黄砂とPM2.5大気汚染の混合物である。Fig. 19(c)の下側赤丸に示すように九州北部～島根県の日本海側の所々でレベル1の黄砂が検出されている。

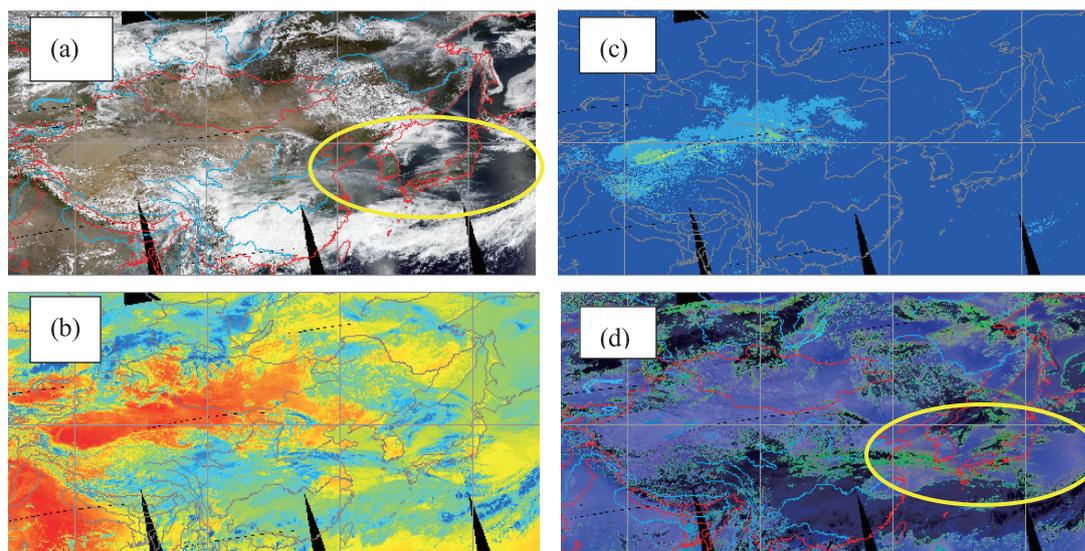


Fig. 21 May 15, 03:07-08:15UT, Aqua-MODIS

Fig. 19(c)の下側赤丸では九州北部から島根県までで、上側赤丸では鳥取県から新潟県までで、黄砂が検出されているので、Fig. 19(c)の結果は、13日に九州北部～北陸の气象台で黄砂が観測されたことと矛盾しない。

5月14日及び15日の日本上空では、AVI画像では黄砂は殆ど検出されないが、Fig. 20(d)及びFig. 21(d)の黄丸に示すように、PM2.5が日本を広く覆っている。

以上をまとめると次のようになる。5月10日昼にモンゴル高原で黄砂が発生し、10日夜にゴビ砂漠まで含めた大規模な黄砂に発達し、11日夜に2方向に分かれ、中国東北部へ行った黄砂は12日に強い黄砂に発達し、(衛星画像では確認できないので推測ではあるが、中国北東部のPM2.5大気汚染と混合して)13日にウラジオストック付近から日本海を通り、鳥取県～新潟県に到達した。一方、11日夜に山東半島付近へ行った黄砂は小粒子になり、中国東部起源のPM2.5大気汚染と12日に黄海上空で混合し、13日に九州～島根県に到達した。

このように5月13日には黄砂が2方向から日本に来たのである。即ち、文献⁷⁾のサブテーマ2で金沢大学が捕集した黄砂 ASD2 は、モンゴル高原～ゴビ砂漠で発生した黄砂が中国東北部で再度黄砂を巻き上げて、ウラジオストック～日本海を経由して金沢大学(石川県金沢市)に到達したものであり、サブテーマ3で産業医科大学が捕集した黄砂 ASDS2 はモンゴル高原～ゴビ砂漠で発生した黄砂が中国東部～東シナ海を経由して産業医科大学(福岡県北九州市)に到達したものである。従って、同じ ASD2 と名付けてはいるが、金沢大学と産業医科大学が捕集した黄砂は同じものではないと筆者は考える。このことは新しい知見である。なお、ASD1に関しては金沢大学と産業医科大学が捕集した黄砂は同じものである。

6. 結 言

第2章では黄砂検出法としての AVI 法、第3章では筆者提案の PM2.5 検出法を説明した。それらを第5章では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飛来(第4章で説明)に応用した。即ち、文献³⁾⁷⁾では黄砂に微生物と PM2.5 化学物質が付着していたこと、文献⁶⁾⁷⁾では呼吸器症状(喘息)が増悪したことを報告していることに対し、衛星リモートセンシングの立場から検討を行った。

その結果、2つの黄砂イベント、即ち、2011年4月29日～5月5日の黄砂イベント(第5.3節, Figs. 2-11 参照)と5月10～13日の黄砂イベント(第5.4節, Figs. 13-19 参照)、があり、衛星画像で黄砂と PM2.5 の挙動を追いかけることにより、(1)微生物の付着は4月29日または5月10日のモンゴル高原～ゴビ砂漠での黄砂発生時、及び黄砂の一部が中国東北部へ行ったときに再度黄砂を巻き上げた時、黄砂と一緒に微生物も舞い上がったためと推定できること、(2)化学物質の付着は4月30日夜～5月1日の黄海上空、または5月12日の黄海上空または中国東北部、で黄砂と PM2.5 大気汚染が混じり合ったためと推定できること、(3)そしてそれらが5月1～5日または5月13日に日本に飛来したと結論する。

なお、5月13日に黄砂が2方向から日本に飛来したことを明らかにしたことは、本研究の成果の1つである。今後も人間の健康に係る黄砂とPM2.5についてリモートセンシングの立場から研究を続ける予定である。

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) 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.
- (2) 岩坂泰信, 小林史尚, 皆巳幸也, “黄砂バイオエアロゾル学: 大気中を浮遊する微生物”, エアロゾル研究, Vol.25, No.1 (2010-03), pp.4-12.
- (3) 那須正夫, 環境省研究成果報告「B-0902 黄砂現象の環境・健康リスクに関する環境科学的研究(2009-2011年度)」(2012), https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/pdf/B-0902.pdf より入手 (全112頁).
- (4) 山口進康, 一條知昭, 迫谷有希子, 馬場貴志, 那須正夫, “黄砂現象による細菌の長距離移動 - バイオイメージングによる細菌の可視化 -”, 第7回大気バイオエアロゾルシンポジウム予稿集 (2013-01), pp.21-22.
- (5) 渡部仁成, 倉井淳, 山崎章, 渡辺徹志, 清水英治, “黄砂が慢性呼吸器疾患患者に与える影響について”, 第7回大気バイオエアロゾルシンポジウム予稿集 (2013-01), pp.13-14.
- (6) 渡部仁成, 環境省研究成果報告「5C-1154 黄砂のヒト健康への影響に対する臨床および基礎研究の融合アプローチ(2011-2013年度)」(2014), https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/h25/pdf/5C-1154.pdf より入手 (全124頁).
- (7) 市瀬孝道, 環境省研究成果報告「5C-1155 黄砂エアロゾル及び付着微生物・化学物質の生体影響とそのメカニズム解明に関する研究(2011-2013年度)」(2014), https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/h25/pdf/5C-1155.pdf (全104頁).
- (8) 市瀬孝道, He Miao, 嵐谷奎一, “中国大都市のPM2.5と黄砂由来のPM2.5の気管支喘息増悪作用に関する研究”, 第9回大気バイオエアロゾルシンポジウム予稿集 (2015-01), pp.29-30.
- (9) 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.
- (10) Yoshinobu Kato, “Detection properties of dust and sandstorms by using AVI of MODIS data”, *Proceedings of SPIE*, Vol.7859, (2010-12), pp.78590H/1-12.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 加藤芳信, “2011年春の鳥取県で呼吸器症状増悪が認められた時の黄砂-MODISデータを用いたタクラマカン砂漠から日本までの黄砂の検出”, 平成27年度電気関係学会北陸支部連合大会, F2-41 (2015-09).
- (14) 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.
- (15) 向井苑生, 佐野到, 中田真木子, 中口讓, 井口信和, 保本正芳, Brent N. Holben, “衛星および地上データの統合解析による北京上空大気汚染粒子の解明”, エアロゾル研究, Vol.29, No.S1 (2014-04), pp.125-132.
- (16) 井上直己, “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~”, 在中国日本大使館「大気汚染と健康管理に関する講演会」資料 (2013年10月28日), http://www.cn.emb-japan.go.jp/consular_j/131031air_pollution_1.pdf (参照日 2016年2月1日).
- (17) 気象庁, 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php> (参照日 2016年2月1日).
- (18) NASA, EOSDIS, <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/> (参照日 2016年2月1日).
- (19) 環境省, PM2.5モニタリングデータ(海外), <http://www2.env.go.jp/pm25monitoring/download.html> (参照日 2016年2月1日).

(平成28年3月31日受理)