# 黄砂と火山性エアロゾルの衛星データ解析

## 木下紀正

### 黄砂と火山性エアロゾルの衛星データ解析

木下紀正1・飯野直子2・菊川浩行3・小山田恵1(鹿児島大学 )教育学部・2工学部・3水産学部)

1. はじめに

大陸から飛来して日本の広い地域を覆う黄砂と、火山灰を多く含む桜島などの噴煙は、衛星データから 検出される土壌性エアロゾルとして共通している。黄砂解析鹿児島グループでは、噴煙の衛星画像解析の 結果を踏まえ、NOAA/AVHRR、GMS-5/VISSR データの熱赤外輝度温度差を用いた Aerosol Vapor Index (AVI) 画像を作成し、大陸から洋上にわたる黄砂の移流拡散を鮮明に捉えることに成功した。その結果を黄砂輸 送モデルの詳細なシミュレーションや国内各地および中国・韓国のライダーデータ、各種地上観測データ と比較することが進みつつある。これまでに取り組んだ 1997-2001 年黄砂の衛星画像解析の論文・資料に 加え4編の寄稿を頂き、関連論文とともに冊子にまとめた[1]。そのうち、2000 年までの概要は CEReS の シンポジウムで報告させて頂いた [2]。ここでは、さらに進行中の 2001 年についての解析や AVI からの水 蒸気量の分離の問題等について述べる。

2000 年 7 月から三宅島雄山が活発な噴火活動を開始し、8 月末から大量の火山ガスが放出されている。 火山ガスに含まれる高濃度の二酸化硫黄などは有害であり、2000 年 9 月以来の全島避難が続くとともに、 時には南寄りの風で本土部にも移流している。火山ガスに含まれる SO<sub>2</sub>放出量は、COSPEC 観測によれば 1万 t/day をこえる状態が 2001 年秋になっても続いている。火山ガスが大気中で噴煙と挙動をともにする ならば、衛星データから噴煙の流れや拡散を調べる事によって火山ガスの動きをつかむ事が出来る。この 仮定は桜島や九州各地の地表での SO<sub>2</sub>連続測定データと桜島噴煙観測や衛星画像などの解析から裏付けら れてきたが、最近の TERRA 衛星搭載の ASTER センサーによる SO<sub>2</sub>ガスの直接検出 [3] でも確かめられつつあ る。噴煙火山ガス研究グループでは 2001 年 3 月に噴煙と火山ガスの動態について論集をまとめ [4]、引き 続き解析を進めている [5]。CEReS シンポジウムで報告した 2000 年秋までの結果 [6] などは英文論集にまと めた [7]。ここでは、AVHRR データによる三宅島噴煙の検出法について簡単に議論する。

#### 2. 2001 年春季の大黄砂

2001年の黄砂は早くも1月2日に日本で観測され、以来度々発生し、4月20日には北米大陸を超えて大 西洋に到達した。そのうち、2001年3月3日から5月6日にかけては4つのケースに分けて解析した[8]。 また、NOAA/AVHRRから作成した AVI 画像は次のホームページで公開し、GMS-5/VISSR による AVI 画像のま とめも公開の準備を進めている。 http://www-sci.edu.kagoshima-u.ac.jp/sing/kosa/kosa-e.htm

大西洋に到達した大黄砂が4月6日頃に中国北部やモンゴルで発生し北寄りのルートを移流する状況は、 NOAA, GMSのAVI 画像で良くつかむことが出来る。このイベントは大規模で顕著なため、GMSの熱画像や可視 画像単独でもある程度わかるが、AVI 画像では一層鮮明に検出される。Fig. 1(a)に4月7日15時のGMS/AVI 画像(メルカトール図法)、(b) 熱画像(VISSR-IRIの反転、幾何補正なし)を示す。Fig. 2 は黄砂発生源の位置 図であるが、最新の情報による再検討が望まれる。濃い黄砂の領域は、Fig. 1(a)の AVI 画像では中国東北部 の巨大な白い渦巻きとして表されている。これが大規模な寒冷低気圧の晴天域に当たることは、熱画像(b) の白い雲域との対比で判る。この熱画像では、濃い黄砂の存在は晴天域がやや低温の薄いベールがかかった 状態として読みとれるが、決定的ではない。

Fig. 1の前後の4月6-11日の3時間毎のGMS/AVI 画像をFig. 3に示す。但し0時欠測の場合は1時の データによる。4月6-7日には寒冷前線上の強い低気圧が発達して寒冷渦を形成し、ゴビ砂漠や黄土高原で 巻き上げられた黄砂が渦に吹き込む晴天域に見られる。これに先立ち、4月4日にタクラマカン砂漠に物凄 い砂塵嵐が発生したとの報があり、4月5日のGMS/AVI 画像では100E付近に濃い黄砂が見られるが、そのあ とは雲に覆われたため、雨に洗われたか雲の下に留まったか分からない。ここで解析した GMS/VISSR データ は日本気象協会の標準製品のため、90E 以西のタクラマカン砂漠の領域を調べるには別の切り出しが必要で ある。なお、鹿大受信の NOAA データでは 90E 付近が含まれることがある。

4月8日になると大規模な寒冷渦はゆ っくり東進しながら段々崩れて行き、そ の西から東進する低気圧の前面に逆「く」 の字、あるいはブーメラン形の黄砂域が 発達して9日に最盛期を迎え、10-11日 には東進しながら段々幅広く拡散してい る。その西から9日には「ノ」の字形の 黄砂域が現れて東進し、10-11日には南 にも発達して 11 日には揚子江流域を覆 っている。これは安寧省合肥のライダー で11日20時に高度4kmと7kmに観測さ れたもの[9]に良く対応する。以上述べた 一連の黄砂の主要部は中国東北部からロ シヤ沿海州、日本海を東進し北海道にか かっているが、6-7 日に北京の passing type [10] や 10-11 日に韓国 Suwon [11]、 東京 [12]、筑波など[13] のライダーで黄 砂層として観測されている。但し北寄り のルートのため、これらの地点でのもっ と濃い事象はこれとは別である。また、 最後の揚子江流域にかかった部分は長崎 の12日の0PCデータ[14]や鹿児島の地表 SPM 濃度[8]の上昇をもたらしている。 AVI 画像に見られるこれらの黄砂の発達 と移流は、鵜野氏らの CFORS (chemical weather forecasting model) によって良 く再現される[8]。



Fig. 1. GMS-5/VISSR images on 7 April 2001 at 15 JST. (a) AVI image of IR2-IR1. (b) TIR image of IR1 inverted.

これら一連の黄砂が4月15-16日にソルトレイクシティ上空を、19日に5大湖上空を通過し、4月20日に は北大西洋カナダ沖に達してものと思われる[15]。Figs. 1,3よりさらに東方への移流について、日付変更 線を越えるまで GMS/AVI 画像で追跡する予定である。



Fig. 2. The sources of Asian dust in East Asia.



Fig. 3. GMS-5/AVI images during 6-11 April 2001 with 3 hour intervals.

#### 3. 黄砂飛来時の AVHRR 熱赤外差画像と可降水量の関係

AVI 画像には水蒸気と土壌性エアロゾルの相反する効果が含まれている。その中での土壌性エアロゾルの 影響を明らかにするための基礎的な検討として、比較的穏やかな黄砂現象が観測された 1997 年 4 月 7~14 日と著しい黄砂現象が観測された 1998 年 4 月 16~20 日を対象に、AVHIRR 熱赤外差画像と高層気象データか ら求められる可降水量との関係を検討した。

解析には鹿児島大学大学院連合農学研究科が受信している NOAA データ(KU)を主に使用した。1997 年は6 シーン、1998 年は8 シーンを解析に用いた。また、1998 年については、KU の受信状態が良くない3シーン を気象協会から購入した(JWA)。解析ポイントは雲の影響がない高層気象観測点付近をターゲットとした。 ここでの熱赤外差分値は、12 $\mu$ m-11 $\mu$ m を計算する AVI とは逆の、split window 法として広く一般で使用 されている 11 $\mu$ m-12 $\mu$ m (4m5=AVHRR4-AVHRR5)を計算し、高層気象観測点付近の海上約8km 四方の領域の 4m5 の平均値 (dN)を求めた。輝度温度の分解能は dT=0.1K であるので、dN=10 dT に対応する。衛星データ の解析方法および高層気象データから可降水量(PW)を計算する方法の詳細は文献[16] に示されている。Table 1 は使用した衛星データの観測日時および解析ポイントを示している。

Fig. 4 と Fig. 5 に 1997 年と 1998 年のそれぞれについて PW と dN の関係を示す。PW はライングラフ、dN は プロットで示す。グラフ中の垂直の破線は日にちの区切りを示しており、グラフ上部に日付を示す。各日付 のブロック中のプロットの左からの順番は表の中の左からの順番に対応している。

| 1997.4 | - 7 | 14:23 | - KU | 那覇,名瀬,鹿児島,福岡                                     |
|--------|-----|-------|------|--|
|        | 10  | 13:50 |      | 鹿児島,米子,館野,輪島,秋田,札幌                               |
|        | 11  | 13:39 |      | 那覇,名瀬,鹿児島,福岡,潮岬,米子,館野,輪島,根室                      |
|        | 12  | 13:28 |      | 那覇, 名瀬, 鹿児島, 福岡, 潮岬, 米子, 八丈島, 館野, 輪島, 仙台, 札幌, 稚内 |
|        | 13  | 13:18 |      | 鹿児島,福岡,潮岬,館野,輪島,仙台,根室,札幌                         |
|        | 14  | 6:31  |      | 潮岬,米子,八丈島,館野,輪島,根室                               |
| 1998.4 | 16  | 3:17  | KU   | 鹿児島, 福岡, 潮岬, 米子, 輪島                              |
|        |     | 7:15  | JWA  | 鹿児島,福岡,米子,輪島                                     |
|        | 17  | 6:53  |      | 那覇,名瀬,鹿児島,福岡                                     |
|        | 18  | 2:55  | κυ   | 鹿児島,福岡,米子  |
|        |     | 6:31  |      | 那覇,名瀬,鹿児島,米子                                     |
|        | 19  | 2:44  |      | 那覇,名瀬,鹿児島,福岡,米子,輪島,札幌                            |
|        |     | 6:09  |      | 名瀬,鹿児島,福岡,潮岬,米子                                  |
|        |     | 14:05 | JWA  | 那覇, 鹿児島, 福岡, 潮岬, 米子, 館野, 輪島, 仙台, 秋田              |
|        |     | 17:26 | - KU | 鹿児島, 福岡, 潮岬, 米子                                  |
|        | 20  | 2:33  |      | 鹿児島,福岡,潮岬,米子,八丈島,館野                              |
|        |     | 13:53 | JWA  | 福岡, 潮岬, 米子, 館野, 輪島, 仙台, 秋田, 根室, 札幌, 稚内           |

Table 1 A list of the satellite data and points analyzed.



Fig. 4. Comparison between precipitable water amounts (PW) and split window difference (dN) during 7-14 April 1997.



Fig. 5. Same as in Fig. 3 but during 16-20 April 1998.

PW と dN は算出方法も単位もまったく異なる値であるが、相関係数は 0.845 と高いので[17]、ここでは両 者を直接比較する。はじめに述べたように、1997 年は、前線の移動とその後ろの高気圧が日本を覆うことで 比較的穏やかな黄砂現象が認められている。図1を見ると、PW と dN は同程度の値を示している。一方、1998 年については、寒冷渦に取り込まれた濃い黄砂がゆっくりと移動してきたため、大規模で顕著な黄砂現象が 確認されている。九州がまさに寒冷渦に覆われた 4/18 は dN が著しい負の値を示している。また、19日、20 日の dN は PW よりも明らかに小さな値を示している。

熱赤外差画像に与える土壌性エアロゾルの影響を定量的に評価するために、SPM や大気の光学厚さ、シミ ュレーションから求められた黄砂濃度などとの比較や岬や島の GPS 可降水量の詳細な時間変化の利用などは 今後の課題である。また、天気図なども併せて、1 年を通した PW と dN の関係を検討することで、気団の影 響、季節の特徴を明らかにして行きたい。

#### 4. AVHRR データによる三宅島火山の噴煙検出

桜島の噴煙は AVI 画像でよく検出される場合が多いが、三宅島では 2000 年 8 月までの爆発噴煙の他は AVI 画像 による検出は困難である。これは 2000 年 9 月以来、陥没して出来た大きな火口から出ている大量の白煙には火山 灰があまり含まれていないためと考えられる。白煙は水蒸気の凝結した水滴に SO₂ などの火山ガス成分が溶解し、 その中で一部は酸化されて硫酸エアロゾルになる。乾燥大気中では水分は蒸発していくが、濃縮された化学成分を 含む液状のエアロゾルはいつまでも残ると思われる。

Fig.6は、風の強い時の三宅島噴煙の典型的な事例である。この画像 の断面 AB の、AVHRR 各バンドの値をFig.7に示す。band4 と5では噴煙 は検出されていないが、band 1・2・3では検出されている。 band1 と band2 の差をとることで、噴煙と薄い雲を判別することが出来る。これ は、雲粒よりも噴煙下流の液状のエアロゾルの方が粒径が小さいためと 思われる。また、厚い雲と噴煙は band1 と band2 の差が同程度になるた め、噴煙よりも雲の方が強く検出されていた band3 をあわせて、R:G:B= band1:band2:band3 の画像を作ることで、カラー画像として噴煙と雲を 区別できる場合が多い。この様な方法で、鹿児島大学の衛星画像受信装 置 (ELM 社製) で受信した朝から夕方までの NOAA/AVHRR データから三宅 島の噴煙を検出して、順次下記のホームページ SiNG Kagoshima 「0. 2001 年 NOAA/AVHRR による三宅島の噴煙」に掲載し、島内や本土での火 山ガス高濃度事象との関係を調べている [4,5]。



Fig. 6. A composite image of NOAA-16/AVHRR R:G:B=1:2:3 on 2001/7/12 at 13:27JST.





Fig. 7. The data values of the band1  $\sim$  5 (left scale) and the difference band1 - band2 (right scale) along the section AB in Fig. 6.

**謝辞**: この研究の一部は標記のテーマで千葉大学環境リモートセンシング研究センターの 2000, 2001 年 度共同利用研究プロジェクトとして進められた。また、科学技術振興事業団の ACT-JST のご援助も頂いた。 共同研究を進めた[1.2.4] の共著者の方々や Asian Dust Network で黄砂情報を提供された方々、御支援を頂 いた諸機関、ノアデータを提供された鹿児島大学衛星画像受信・解析システム管理委員会の関係各位に深く 感謝致します。

#### 参考文献

[1] 黄砂解析鹿児島グループ、黄砂の衛星画像解析、鹿児島大学, 2001.

[2] 木下紀正,岩崎亮治,鵜野伊津志,天野宏欣,飯野直子,矢野利明,増水紀勝、NOAA/AVHRR データによる噴煙・黄砂の検出と水蒸気量評価、CEReS 共同利用研究会「衛星画像データに対する大気補正:周辺効果の評価」、pp. 46-51、2000

K.Kinoshita, R.Iwasaki, M.Koyamada, N.Iino, T.Yano, I.Uno, H.Amano, H.Yoshii, and T.Masumizu, Observation of Asian dusts during 1997-2000 by NOAA/AVHRR, The CEReS International Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere and Validation of Satellite Data, pp. 7-12, 2001

[3] 浦井稔、ASTER による火山から放出される二酸化硫黄分布の推定、日本リモートセンシング学会第 30 回学術 講演会論文集、pp. 61-62、2001.

[4] 噴煙火山ガス研究グループ、噴煙と火山ガスの動態を探る-三宅島 2000 年噴火にあたって-、鹿児島大学, 2001.

[5] 小山田恵・木下紀正、衛星画像に見る三宅島噴煙と島内の火山ガス濃度、日本火山学会講演予稿集、p. 127, 2001;小山田恵・木下紀正・飯野直子、2001 年夏季の NOAA/AVHRR に見る三宅島噴煙、日本リモートセンシング学 会第 31 回学術講演会講演論文集、2001、印刷中.

M. Koyamada, K. Kinoshita, N. Iino and C. Kanagaki, Satellite detection of volcanic aerosol at Miyakejima and Sakurajima, Nagasaki Workshop on Aerosol-Cloud Radiation Interaction and Asian Lidar Network, 2001.

[6] Iino N., Kinoshita K., Koyamada M., Saitoh S., Maeno K., and Kanagaki C., Satellite imagery of ash clouds of Miyake-jima Volcano, Proc. CEReS International Symp. on Remote Sensing of the Atmosphere and Validation of Satellite Data, Chiba, 2001, p. 13-18.

[7] K. Kinoshita (ed.), Flow and Dispersion of Volcanic Clouds, Kagoshima Univ., 2001.

[8] T. Masumizu, R. Iwasaki, M. Koyamada, K. Kinoshita, I. Uno, S. Satake, T. Yano and N. Iino, Asian dust events in 2001 observed by GMS-5/VISSR and NOAA/AVHRR, Nagasaki Workshop 2001.

增水 紀勝、岩崎 亮治、小山田 恵、木下 紀正、鵜野伊津志、佐竹晋輔、矢野利明、飯野 直子、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、2001、印刷中 [9] Zhou, Lider Observation of Asian dust over Heifei, China in the spring of 2001, Nagasaki Workshop, 2001 [10] Y. Chen, Continuous measurement of dust aerosols with a Dual-Polarization lider in Beijing, Nagasaki Workshop, 2001

[11] C. H. Lee, Lider measurement of Asian dust over Suwon in spring 2001, Nagasaki Workshop, 2001

[12] T. Murayama, Observation of tropospheric aerosols by Mie and Raman lidar over Tokyo during ACE-Asia intensive observation period, Nagasaki Workshop, 2001

[13] A. Shimizu, N. Sugimoto I. Matsui, K. Arao and Y. Chen, Continuous observation of clouds and aerosols by Mie-scattering lidars at Beijing, Nagasaki and Tsukuba, Nagasaki Workshop, 2001

[14] K. Arao in AD-Net information, 2001.

[15] http://capita.wustl.edu/Databases/UserDomains/SaharaDust2000/

[16] 飯野直子・菊川浩行・木下紀正・矢野利明、黄砂飛来時の AVHRR 熱赤外差画像と可降水量の関係-1997 年4 月および 1998 年4 月の場合-、日本リモートセンシング学会第 31 回学術講演会講演論文集、2001、印刷中 [17] 中村真・木下紀正・飯野直子・幸野淳一・菊川浩行、NOAA/AVHRR データと可降水量、鹿児島大学水産学 部紀要、Vol.49、 pp.9-16, 2000.