衛星リモートセンシングによる火山活動評価

浦井　稔（地質情報研究部門 地質リモートセンシング研究グループ）

1.　はじめに

リモートセンシングによる火山観測では，地形・地質判読，温度測定，火山噴出物の化学組成測定，火山ガスや火山灰の化学組成や噴出量の測定，地形変化の検出等が可能とされている (Mouginis-Mark and Francis, 1992). リモートセンシングによる火山観測は，広域的・周期的・定量的な観測を実施することが容易であるため，今後の火山観測に大きな役割を果たすと期待されている (澤田, 1983). 特に，衛星を用いたリモートセンシングは現地観測のためのアクセスが困難な地域においても利用可能であることから，国内の火山活動評価だけでなく，国際的な貢献も可能である．現時点では，2006 年に打ち上げられた「だいち」をはじめ，多くの地球観測衛星が火山活動評価に利用可能である．本講演では衛星リモートセンシングによる火山観測の実例を紹介するともに火山衛星画像データベースの概要について報告する.

2.　衛星リモートセンシングによる火山観測

リモートセンシングによって観測可能な項目は以下の通りである.

1) 火山地形と地質構造
2) 火山噴出物 (降灰，火砕流，溶岩など)の分布範囲
3) 噴煙の高度・分布，噴煙中の火山灰・火山ガスの量
4) 変色海域・火口湖の色・温度
5) 標高・地殻変動
6) 火山の地表面温度

２.１　火山地形と地質構造

地質構造を反映した大規模な線状構造はリニアメントと呼ばれ，地質構造解析に重要である．リニアメントは航空写真や衛星画像から解析されるが，画像の縮尺によって解析されるリニアメントの空間的規模が異なる．微細な地形を強調する効果がある SAR 画像は溶岩流の上下関係や火砕流台地等の解析にきわめて有効である．また，衛星画像のテクスチャー情報は火山地形の相対的な新旧を推定できる.

２.２　火山噴出物 (降灰，火砕流，溶岩など)の分布範囲

火山灰は数 mm 堆積しただけで農作物に被害を生じると言われる．数 cm 堆積すれば交通機関が麻痺し，健康被害も予想される．数 10 cm 堆積すれば家屋の倒壊が起こる．可視～近赤外域の衛星画像から降灰分布が得られた例は多い．例えば，有珠火山 2000 年噴火では ASTER 等から降灰域が観測された．この時，地表調査では追跡できなかった降灰域が衛星画像によって把握された (浦井ほか, 2001)．噴火の規模を評価する上で，火山灰噴出量はその指針の一つとなる．衛星画像は地表調査による火山灰等重量線図を補間する目的で重要である．火山灰航空機 MSS 観測からは降灰分布の増減が観測された（實渕ほか, 2002).

火砕流とは，火山砕屑物質とガスの混合物が斜面を高速で落下する高温の流れのことで

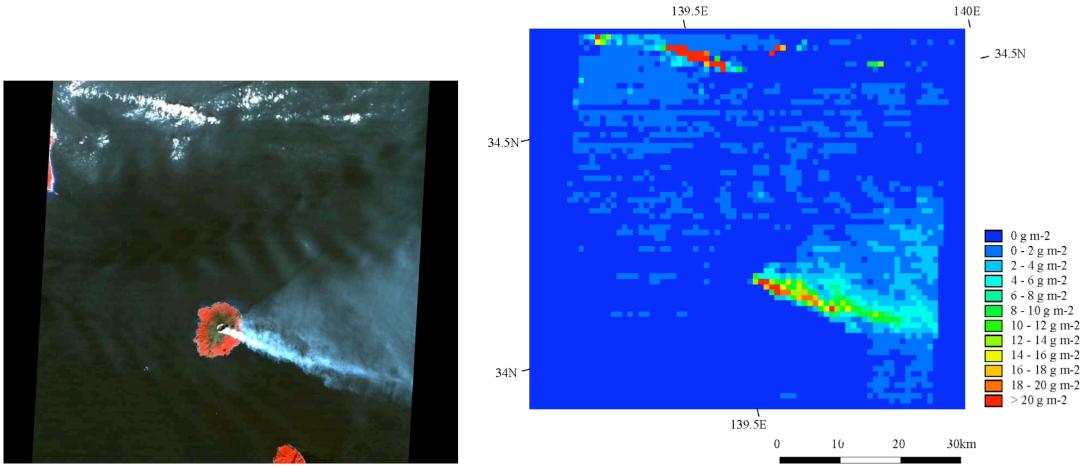
ある．火砕流は道路・建物や農作物に被害を与えるだけでなく，人的被害も深刻である．火砕流の分布域は可視～近赤外域の衛星画像から確認できる．火砕流がまだ熱い場合は短波長赤外～熱赤外域における熱異常として検出できる（Urai，2000）．2 時期の SAR データを用いたコヒーレンス解析を実施すると，その間に火砕流やラハール（土石流)が発生したかどうかが推定できる (Terunuma et al., 2005).

火山活動に伴う溶岩流・火山ガス・降灰・火砕流・泥流・地熱は植生に大きな影響を与える．このため，植生の活動度をリモートセンシングで観測することによって，火山活動による植生破壊を把握することが出来る．過去の溶岩流は溶岩堤防や溶岩末端崖等の地形的特徴から識別できる．

２.３　噴煙の高度・分布，噴煙中の火山灰・火山ガスの量

広域に広がる噴煙を観測するには衛星画像が有効である．航空路火山灰情報センター (VAAC：Volcanic Ash Advisory Center)は火山の噴火によって上空に噴き上げられ浮遊する火山灰から航空機の安全運航を確保するため，火山灰の実況や予測を含んだ航空路火山灰情報を発表している．VAAC は東京をはじめ，全世界に 9 ヵ所設置されており，静止気象衛星等を使用して，浮遊する火山灰の常時監視を行っている．雲と火山灰の識別には NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)衛星に搭載された AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)センサのチャネル４と５の温度差が有効である (Prata, 1989)．この方法は静止気象衛星や ASTER，MODIS にも適用できる．

Wen and Rose (1994)は AVHRR センサのチャネル４と５の温度差からから浮遊する火山灰の量を推定した．大規模な噴火によって SO_2 が成層圏まで到達する場合には，Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) センサによって SO_2 を観測することができる．TOMS による SO_2 観測は，火山以外にこのような大量の SO_2 放出源が考えられないことから，正確な噴火情報としてきわめて重要である (Krueger et al., 2000)．但し，TOMS の空間分解能は衛星直下で 24-62 km であることから小規模な噴火による SO_2 観測は難しい．Urai (2004)は ASTER の熱赤外センサ (TIR)を用いて 2000 年三宅島噴火に伴う SO_2 放出量を観測した（図 1)．ASTER TIR の空間分解能は 90 m であることから，より小規模な噴煙に対する SO_2 観測が可能である．Watson et al. (2004)は空間分解能が 1 km の MODIS センサ用いて二次元的 SO_2 分布を観測した．



(a)　　　　　　　　　　(b)

図 1．2001 年 11 月 8 日に ASTER で観測された SO_2 カラム濃度
(a)：ASTER VNIR 画像，(b)：ASTER TIR から推定された SO_2 カラム濃度

２.４　変色海域・火口湖の色・温度

海底火山を監視することは防災上重要であることは言うまでも無いが，海底火山の活動によって新島が形成された場合，これをいち早く発見することは国の領土・領海を拡大する国益につながる.変色海域は海底火山や火山島の火山活動に伴って出現する場合がある.土出・大谷 (1983)は海底火山に伴う変色海域をランドサット MSS で確認した．Urai and Machida (2005)は薩摩硫黄島における変色海域において衛星リモートセンシングで得られるスペクトル特性から変色海域の化学組成を推定できることを示した.

２.５　標高・地殻変動

標高は地図やハザードマップ作成の基本となるデータである．衛星リモートセンシング技術を用いて標高を測定する方法として 1)立体視画像を用いる方法．2) SAR インターフェロメトリィ (InSAR)技術を用いる方法がある．立体視画像を用いる方法では異なる観測角で観測した画像から視差を求め，標高を求める．ASTER の場合，30 m メッシュの標高が，高さ精度 20 m 水平精度 50 m で，得られる (Fujisada et al., 2005)．ただし，植生が繁茂する地域において, ASTER DEM は樹高を含んだ標高であることに注意する必要がある．Urai et al. (2007)は 2007 年 4 月にフルネーズ火山で発生した噴火の際，山頂の 1100 m×800 m の領域が最大 320 m 陥没したことを噴火前後の ASTER DEM を用いて明らかにした. InSAR 技術を用いる方法ではマイクロ波の位相から標高を求める. ERS-1 (European Remote Sensing satellite No. 1)データで軌道間距離が比較的狭いデータのペアが得られれば, 5 m 程度の精度で標高を計算することができる (Zebker et al., 1994).北緯 60 度から南緯 56 度における全球の InSAR データは 2000 年にスペースシャトルで取得され，全球の 3 秒メッシュの標高データが，米国内において 1 秒メッシュの標高データが公開されている (Farr et al., 2005)．また，ASTER DEM をモザイクした北緯 83 度から南緯 83 度における全球 1 秒メッシュの標高データの作成が開始され，2008 年末にデータ提供が予定されている (http://202.32.29.90/J/index.html).

Gabriel et al. (1989)は Seasat 衛星に搭載された合成開口レーダー (SAR)を用いた差分 SAR インターフェロメトリィ (DInSAR)技術によって，数 10 km 四方の領域の地殻変動を cm 単位で観測できることを示した．Massonnet et al. (1995)は ERS-1 衛星に搭載された SAR を用いて，溶岩の噴出に伴ってエトナ火山が最大 10 数 cm 収縮したことを示した．岩手山の 1998 年火山活動の際，Nishimura et al. (2001)は，岩手山の西約 13 km の地点を中心とする隆起が発生したことを JERS-1 SAR を用いて示した．GPS をはじめとする地殻変動の観測設備は観測点の空間分布に偏りを生じやすく，JERS-1 SAR がなければこの活動に伴う地殻変動の全容を明らかにすることは困難であったと思われる (村上, 2005).

DInSAR 技術では衛星と対象物間の距離変化を検出する技術であることから，対象がどちらの方向に動いたか分からない．しかし，複数の方向から DInSAR 技術を適用できれば動いた方向を特定できる (Fujiwara et al., 2000).

日本のように植生の多い地域で DInSAR 技術を実施する場合，波長の長い L バンド (波長 23cm)センサが適している (Fujiwara et al., 1998)．L バンドセンサである JERS-1 SAR が 1998 年に停止して以来 L バンドセンサを利用することはできなかったが，2006 年「だいち」が打ち上げられ，L バンドセンサである PALSAR が利用できるようになった．小澤ほか (2007)は PALSAR の DInSAR 技術を用いて，小笠原硫黄島における火山活動に伴うと思われる地殻変動を明らかにした.

２.６　火山の地表面温度

火山活動は熱異常を伴うことが多い．幾つかの地球観測衛星は赤外線センサを搭載していることから衛星リモートセンシングによる火山活動評価に利用されている．Urai (2000)はランドサットの夜間観測データを用いて 1990-1994 年雲仙噴火における温度異常の面積と溶岩噴出率に相関関係があることを明らかにした．噴出したばかりの新しい溶岩は温度が高いので，その面積は衛星リモートセンシングによって容易に識別できる．Urai et al. (2007)は 2007 年 4 月にフルネーズ火山で発生した噴火の際，溶岩の堆積面積を ASTER の夜間観測から得られた温度異常を用いて推定した．これは現地観測と一致した．溶岩の厚さが分かれば，面積との積によって溶岩噴出量を求めることができる．

3.　火山衛星画像データベース

AVHRR センサを搭載した NOAA 衛星は，　1 日に複数回観測できる．また．静止気象衛星は 15 分から 60 分毎に同一地点を観測できる．AVHRR センサや静止気象衛星の火山画像から熱異常の有無を自動判別し，判別結果と火山画像を準リアルタイムで Web 上に公開している例が幾つかある（Harris et al., 2002; Kaneko et al., 2002; Dean et al., 2002).

ASTER サイエンスチームは，その火山の活動度に応じた頻度で，全球の火山について観測要求を提出している (浦井ほか, 1999)．産総研は，衛星画像を火山研究者や行政担当者等に提供し火山災害低減を目的として，ASTER で取得された火山画像をデータベース化して，以下の URL で，「火山衛星画像データベース」として公開している．
http://www.gsj.jp/database/vsidb/image
このデータベースは「公式版」と「プロトタイプ版」から構成されている．「公式版」には，現在のところ，主に東アジアある活動的な 49 火山で観測された全ての ASTER 画像が登録されている．新規に観測された画像は毎月このデータベースに登録されている．一方，「プロトタイプ版」には全世界の 900 以上の火山で観測された一部の ASTER 画像が登録されている．東アジア以外の 60 程度の活動的な火山については，数ヶ月中に「公式版」に追加登録される予定である．上記の URL から「公式版」をクリックし，左側の火山選択メニューから希望する火山をクリックすると，最近に観測された画像のサムネールが最上段に，以下，観測日順に観測日と画像のサムネールが表示される (図 2a)．サムネールをクリックすればオリジナルの解像度で画像を表示することができる (図 2b)．2007 年 9 月の時点で，「公式版」には 6,700 回以上，全体では 43,600 回以上の観測画像が登録されている．

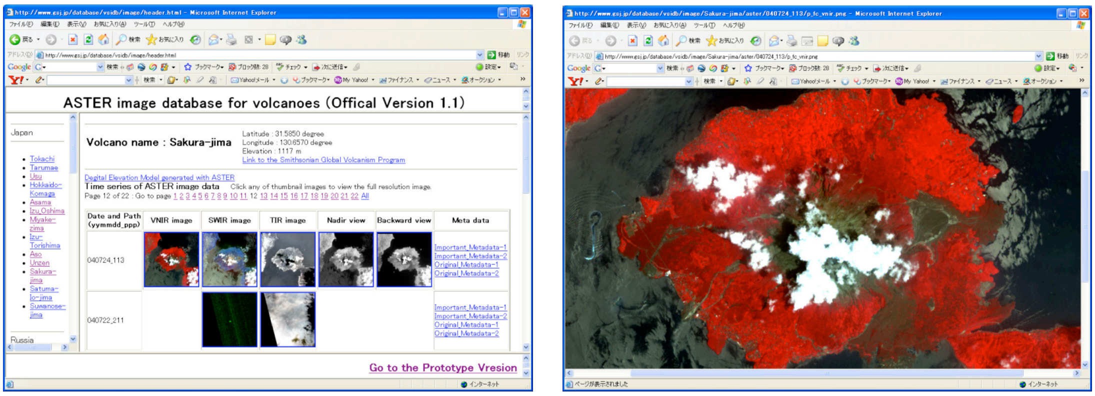


図 2　火山衛星画像データベースの表示例
(a)：火山選択メニューと観測画像のサムネール，(b)：オリジナル解像度の画像表示

4. まとめ

衛星リモートセンシングによる火山観測は，cm 単位の地殻変動・熱異常・変色海水などを広域的・周期的・定量的に観測することが可能である．しかし，観測対象が大気中及び火山表面に制限される点や空間分解能や観測頻度が不十分であることも事実である．このため，複数の衛星データや現地観測結果と組み合わせて解析することが重要である．また，観測されたデータを有効活用するために，データベースの開発も必要である．

文　献

Dean, K. G., Dehn, J., Engle, K., Izbekov, P., Papp, K. and Patrick, M. (2002) Operational Satellite Monitoring of Volcanoes at the Alaska Volcano Observatory. Advances in Environmental Monitoring and Modelling, vol. 1, no. 70-97.

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E. and Roth, L. (2005) The Shuttle Radar Topography Mission. Rev. Geophys., vol. 45.

Fujisada, H., Bailey, G. B., Kelly, G., Hara, S. and Abrams, M. J. (2005) ASTER DEM Performance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, p. 2707-2714.

Fujiwara, S., Rosen, P. A., Tobita, M. and Murakami, M. (1998) Crustal deformation measurements using repeat-pass JERS 1 synthetic aperture radar interferometry near the Izu Peninsula, Japan, Journal of Geophysical Research, vol. 103, p. 2411 -2426.

Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M. and Rosen, P. A. (2000) 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry. Geophysical Research Letters, vol. 27, p. 2049-2052.

Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A. (1989) Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas : Differential Radar Interferometry. Journal of Geophysical Research, vol. 94, p. 9183-9191.

Harris, A. J. L., Pilger, E. and Flynn, L. P. (2002) Web-based Hot Spot Monitoring using GOES: What it is and How it Works. Advances in Environmental Monitoring and Modelling, vol. 1, p. 5-36.

實渕哲也・鵜川元雄・藤田英輔・岡田義光・宮坂　聡・赤池勝明・松岡滋治 (2002) 航空機搭載型多波長走査計による有珠山2000年噴火の多時期観測．火山, vol. 47, p. 297-323.

Kaneko, T., Yasuda, A., Ishimaru, T., Takagi, M., Wooster, M. J. and Kagiyama, T. (2002) Satellite Hot Spot Monitoring of Japanese Volcanoes: A Prototype AVHRR-based System. Advances in Environmental Monitoring and Modelling, vol. 1, p. 125-133.

Krueger, A. J., Schaefer, S. J., Krotkov, N., Bluth, G. and Barker, S. (2000) Ultraviolet Remote Sensing of Volcanic Emissions, in *Remote Sensing of Active Volcanism*, edited by P. J. Mouginis-Mark, et al., p. 25-43, American Geophysical Union, Washington, DC.

Massonnet, D., Briole, P. and Arnaud, A. (1995) Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, Nature, vol. 375, p. 567-570.

Mouginis-Mark, P. J. and Francis, P. W. (1992) Satellite observations of active volcanoes : Prospects for the 1990s. Episodes, vol. 15, p. 46-55.

村上 亮 (2005) 最近 10 年の地殻変動観測の進歩と火山学への貢献．火山, vol. 50, p. S27-S47.

Nishimura, T., Fujiwara, S., Murakami, M., Tobita, M., Nakagawa, H., Sagiya, T. and Tada, T. (2001) The M6. 1 earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate volcano,

northern Japan, observed by satellite radar interferometry, Geophysical Research Letters, vol. 28, p. 635-638.
小澤　拓・上田英樹・島田政信・村上　亮・飛田幹男・矢来博司・和田弘人・雨貝知美・藤原みどり・藤田英輔 (2007) PALSAR/InSAR により得られた小笠原硫黄島の 2006 年火山活動活発化に伴う地殻変動 (速報). 防災科学技術研究所研究報告, no. 71, p. 11-22.
Prata, A. J. (1989) Observation of volcanic ash clouds in the 10-12 μm window using AVHRR/2 data. International Journal of Remote Sensing, vol. 10, p. 751-761.
澤田可洋 (1983) 人工衛星による火山活動監視の試み. 火山第2集, vol. 28, p. 357-373.
Terunuma, T., Nishida, K., Amada, T., Mizuyama, T., Sato, I. and Urai, M. (2005) Detection of traces of pyroclastic flows and lhars with satellite synthetic aperture radars. International Journal of Remote Sensing, vol. 26, p. 1927-1942.
土出昌一・大谷康夫 (1983) 海底火山の活動監視-人工衛星とハイドロホンの可能性. 火山第2集, vol. 28, p. 375-394.
Urai, M. (2000) Volcano monitoring with Landsat TM short-wave infrared bands : the 1990-1994 eruption of Unzen Volcano, Japan. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, p. 861-872.
Urai, M. (2004) Sulfur dioxide flux estimation from volcanoes using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - A case study of Miyakejima volcano, Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 134, p. 1-13.
Urai, M. and Machida, S. (2005) Discolored seawater detection using ASTER Reflectance Products: a case study of Satsuma-Iwojima, Japan. Remote Sensing of Environment, vol. 99, p. 95-104.
浦井 稔・福井敬一・山口 靖・David C. Pieri (1999) ASTERによる火山観測の可能性とグローバル火山観測計画. 火山, vol. 44, p. 131-141.
浦井　稔・川辺禎久・伊藤順一・高田　亮・加藤雅胤 (2001) ASTERによる有珠火山2000年噴火に伴う降灰域の観測. 地質調査研究報告, vol. 52, p. 189-197.
Urai, M., Geshi, N. and Staudacher, T. (2007) Size and volume evaluation of the caldera collapse on Piton de la Fournaise volcano during the April 2007 eruption using ASTER stereo imagery. Geophysical Research Letters, vol. 34, L 22318.
Watson, I. M., Realmuto, V. J., Rose, W. I., Prata, A. J., Bluth, G. J. S., Gu, Y., Bader, C. E. and Yu, T. (2004) Thermal infrared remote sensing of volcanic emissions using the moderate resolution imaging spectroradiometer. Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 135, p. 75-89.
Wen, S. and Rose, W. I. (1994) Retrieval of sizes and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5. Journal of Geophysical Research, vol. 99, p. 5421-5431.
Zebker, H. A., Werner, C. L., Rosen, P. A. and Hensley, S. (1994) Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 32, p. 823-836.