
巻頭言 新しい産業創成を目指す衛星リモートセンシング

東京理科大学理工学部教授 大林成行 1

小特集 リモートセンシングと地質調査

リモートセンシングの発展・現状・今後 建石隆太郎 2

地質調査ツールとしてのリモートセンシング 佐藤 功 6

マイクロ波リモートセンシングによる地質調査 五十嵐保 12

最新技術を用いた地殻変動観測による
火山監視：GPS と合成開口レーダー(SAR) 村上 亮 18
他

斜面崩壊とリモートセンシング 島 重章 27

新しい産業創成を目指す衛星リモートセンシング

東京理科大学理工学部教授 大林 成行

最近、人工衛星を用いた地球観測データ（以降、衛星データと言う）の多様化と空間分解能の精度向上が急速に進展するとともに新しい利用方法の模索が始まっている。そして、衛星データは国土空間情報の1つとして、国民の生命と財産を守ることでできる有効な情報として大きな期待がかけられている。そのためには、地質工学、地盤工学、土木工学といった従来の枠組みを越えた新しい総合化領域を前提とした取り扱いが必要である。新しい産業創成に期待をかけられる所以である。しかし、その一方で、衛星データを効果的に利用していこうとした時、数多くの阻害要因を残していることも事実である。それらの中には、衛星データを利用しようとするユーザの立場で解決できる問題も沢山あることが指摘されている。

衛星データの適用分野は多岐にわたり、地上調査では把握することのできない広域を周期的、同時的に観測することができ、得られた情報はさまざまな分野において効用を発揮することが多くの研究成果によって判明している。一方では、衛星データの種類も光学センサデータとマイクロ波映像レーダデータの併用が可能になっただけでなく、それぞれのデータの波長の違いを利用した利用方法も可能になってきた。加えて、衛星データの空間分解能については、特に、光学センサデータについては飛躍的な高分解能化が進み、これまでは考えられなかった新しい利用方法が模索されるような状態になってきた。

80 mの空間分解能と100 nmの観測波長幅で始まった光学センサデータの利用は、30年に満たない期間の内に、空間分解能の面では、30 m, 20 m, 15 m, 10 m, 6 m, 4 m, 1 mと急速な発展を遂げるとともにステレオ衛星データの利用を可能にし、観測波長幅では限りなく10 nmに近づきつつある。今後はハイパースペクトル化に向けての技術開発が行われていこうとしている。一方、SARデータについては空間分解能の向上とともに、波長の異なるマイクロ波での観測と多偏波観測への挑戦が続けられ、多くの期待がかけられている。

最近では、衛星データを単独で利用するだけでなく、種々の既存情報（または属性情報）と融合利用し、より付加価値のある情報を抽出・創造しようとするアプローチが多くなってきた。最近の話題の1つである地理データや社会データに衛星データを付加した融合利用技術に関する研究もその中の1つに位置付けられるが、現状では、蓄積されている衛星データ以外の種々の情報をどのように加工し、利用してよいのかといった点を模索している状況にあり、衛星データそのものの有効性評価にまで言及するには至っていないとも言われている。当面の解決課題である。

衛星データの精度が、LANDSAT/TM, SPOT/HRVに代表される第2世代を経て衛星データの多様化の第3世代から大きく飛躍して第4世代に入ろうとしている現在、地球環境モニタリング、国土防災対策、国土管理、等への適用と言った利用方法の確立を前にして、地理・社会データと衛星データの融合利用といった大きな命題が与えられ、衛星データを利活用するうえで新たな技術の展開が必要となってきた。地球環境のモニタリングといった命題のもとに大きな市場が約束されている一方で、最早、従来からの“地質調査”や“地盤調査”といった枠組みでは処理しきれない問題を抱えていると言える。早急に解決が必要な課題の2つ目である。

国の内外を問わず、このような衛星データを取り巻く諸情勢を見た場合、衛星データの多様化とさまざまなニーズに対応すべき新たな時代に差し掛かっていると言える。

一方では、こうした技術の進歩に対応できるユーザの質が問題視されることにもなる。そして、衛星データの有効性と将来性が次々と実証されていく中で、ソフトウェアとデータウェア両面から新しい利用方法を模索していくことの必要性が求められている。特に、目的指向型の小型人工衛星の打ち上げが幾つも予定されているここ数年は、研究者と実務者が一緒になって模索を続けていく必要性が問われている。技術者の夢と新しい産業の創成には、私たち一人一人の意識改革が求められている。新しい産業創成に向けての3つ目の課題である。

衛星リモートセンシングは、数々の問題点を包含しながらも、1972年以来30年近い間に、地球規模での環境モニタリングの手段としてその地位を着実に築いてきたと言っても過言ではない。最近では、衛星データを用いた広域環境情報の収集方法として「モニタリング工学」といった新しい分野についての議論も行われるようになってきた。ここにも新しい産業分野の萌芽が見られる。20世紀の最後に出現した先端技術の1つである衛星リモートセンシングは30年を経て未だに実用化を前に躊躇している所が見られる。1つの技術が開発され、その効用が実証された後、実用化までに20年以上を要したものはあまり多くない。衛星リモートセンシングも21世紀とともに、社会的価値観の変化、環境状況の変化、経済的な背景、技術者の意識改革等によって大きく飛躍することが期待されている。国土防災や国土管理、あるいは国境を越えた広域環境システムの解明といった分野について、私たち地球人が潜在的に直面している数多くの課題を1つ1つ解決してくれる先端科学の1つとして衛星リモートセンシングに期待するものはきわめて大きいと言える。

リモートセンシングの発展・現状・今後

たていし りゅうたろう
建石 隆太郎*

1. リモートセンシングの発展

リモートセンシングは3つの基盤技術の発展により出現

した。プラットフォームの発展, 特に人工衛星技術の発展。1957年に初めて人工衛星が打ち上げられた。次に, センサの発展, 特に検知素子, レーダーの発展。三番目は, コン

表1 主な地球観測衛星

Year	Japan	China	Korea	India	Canada	France	ESA	Russia	USA	Year
1960									(TIROS-1)	1960
64									(NIMBUS-1)	64
66									(ESSA-1)	66
72									Landsat-1	72
73									(GOES-1)	73
74									Landsat-2	74
75									(METEOSAT-1)	75
76									SEASAT Landsat-3 (NIMBUS-7)	76
77 (GMS-1)									NOAA-6	77
78									(METEOSAT-2) NOAA-7 (GOES-4)	78
79									Landsat-4	79
1980									NOAA-8 (GOES-6)	1980
81 (GMS-2)									Landsat-5 NOAA-9	81
82									(INSAT-1 B)	82
83									NOAA-10	83
84 (GMS-3)									(GOES-7)	84
85									(METEOSAT-3) NOAA-11	85
86									SPOT-1	86
87 MOS-1									NOAA-12	87
88									(GOES-7)	88
89 (GMS-4)									NOAA-11	89
1990 MOS-1 b									NOAA-12	1990
91									NOAA-14	91
92 JERS-1									Resurs NOAA-15	92
93									Resurs Landsat-7 IKONOS Terra	93
94									NOAA-16	94
95 (GMS-5)									Aqua NOAA-M	95
96 ADEOS									NOAA-N	96
97 TRMM										97
98										98
99 (MTSAT) CBERS KOMSAT-1										99
2000										2000
01										01
02 ADEOS-II										02
03 ALOS										03
04										04

* 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター助教授

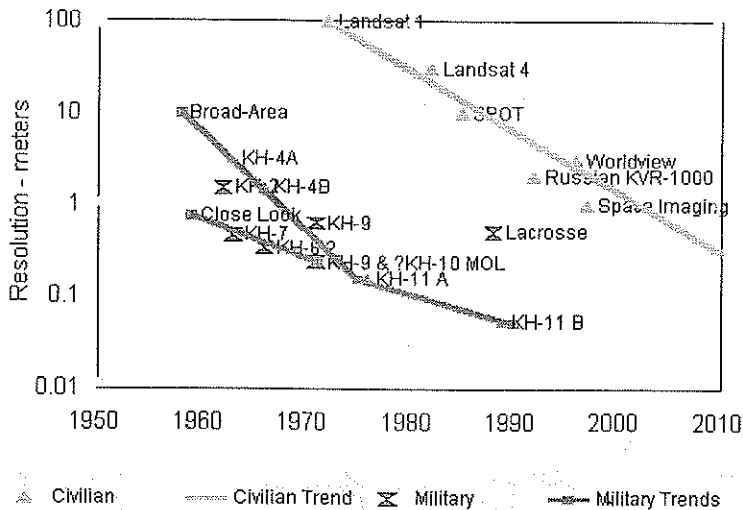


図1 軍事衛星と非軍事衛星の光学センサ解像度の歴史
(<http://www.fas.org/eye/imint.htm>)

ピュータの発展。これらはいずれも、軍事に必要な技術として1950年代60年代に大きく進歩した技術である。

表1は、非軍事の主な地球観測衛星の一覧である。1960年代は、解像度の低い、雲観測を主体とした気象衛星の時代である。1972年の米国NASAによるLandsat-1の打ち上げは、リモートセンシングの歴史上、画期的な出来事であり、このためにリモートセンシングが世界中の人々に広まった。その後、十数年はまさにLandsatの時代であった。1986年のフランスSPOT-1の打ち上げを皮切りに各国がリモートセンシング衛星を打ち上げ始める。

図1は、軍事(Military)衛星と非軍事(Civilian)衛星の光学センサの解像度の高性能化の歴史を示したものであ

る。非軍事衛星の解像度は、国際関係による軍事的制限により決まる。1991年のソ連崩壊、東西冷戦の終結、それに続くロシアによるソ連時代のスパイ衛星写真の公開は、非軍事衛星の解像度の制限を10mから1mに下げた。そして1998年、米国Space Imaging社のIKONOSによる解像度1mの衛星画像が実現した。これに対し、軍事衛星では、解像度1mは1960年代に達成されていた。

2. リモートセンシングの現状

1990年代のリモートセンシングを特徴づける2つのキーワードは「地球環境」および「高解像度衛星」である。1985年に発表された温室効果ガス、二酸化炭素の増加を示すハワイ・マウナロアにおける観測結果(Crane and Liss, 1985)¹⁾は、研究者のみならず一般大衆にも地球環境の脆弱さを示し、地球環境研究の重要性のコンセンサスが社会全体で得られた。1988年に米国NASAにより発表されたEarth System Science (NASA, 1988)²⁾もその代表的な対策である。すなわち、地球を学問分野ごとでなく、一つのシステムとして、学問領域の境界を越えて理解しようという考え方とその計画を発表した。このためのリモートセンシングの役割は地球をグローバルに継続的に観測し、地球環境のさまざまな要素のグローバルデータを作成しようとするものである。米国の衛星Terra, Aqua, フランスのSPOT 4/VEGETATION, 日本のADEOS, ADEOS-IIなどいずれも地球環境観測をその目的に掲げたリモートセンシング衛星である。「地球環境」は現在のリモートセンシングの主要目的となっている。

「高解像度衛星」は現在のリモートセンシングのもう一つの特徴である。米国Space Imaging社は、解像度のさらなる制限緩和を米国連邦政府に申請し、2000年12月、非軍事衛星で初めて解像度0.5mが承認された。同社は、2004年頃に解像度0.5mの高解像度衛星の打ち上げを計画している。

図2は、リモートセンシング衛星の利用分野ごとの要求される解像度、観測頻度を大まかに示したものである。地形・地質は変化の速度が他の分野より遅く、観測頻度が少なくてもよいのが特徴である。しかし、地滑りなどの災害モニタリングは早急な観測を必要とする。

現在のリモートセンシングの利用は、関連するさまざまな技術の発展により、その可能性は大きく広がっている。たとえば、Global Positioning System (GPS)の出現により、人工衛星/航空機および現地調査の位置計測精度が高まり、リモートセンシング画像の利用に役立っている。また、コンピュータおよび記憶媒体、プリンタなどの大衆化(高性能

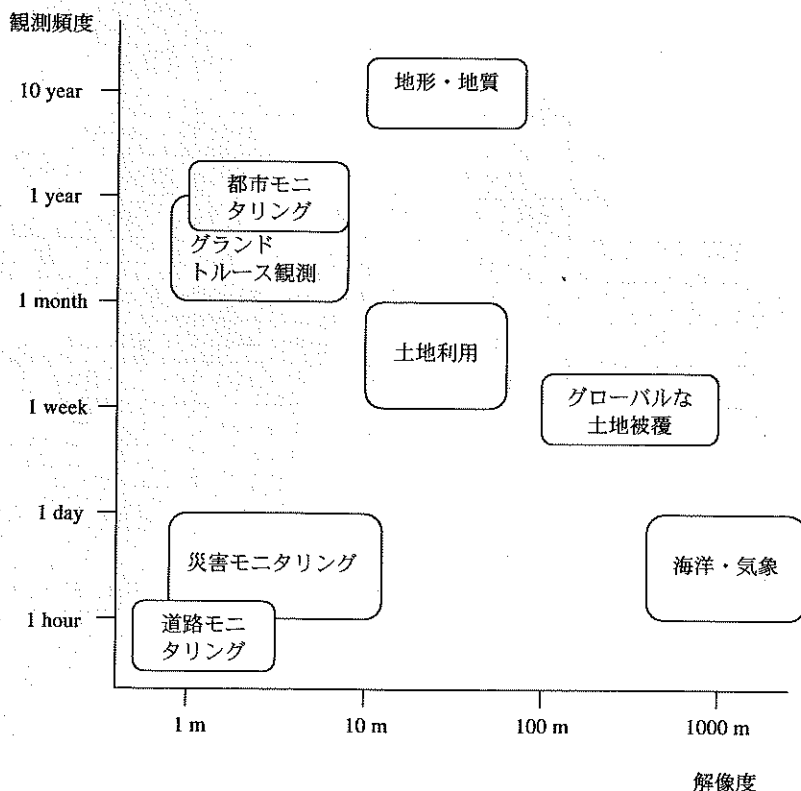


図2 利用分野ごとに要求される解像度と観測頻度

化, 低価格化)は, 1970年代では500万円~1000万円かかったリモートセンシング画像処理システムを50万円以下で可能にしている。

3. リモートセンシングの今後

今後リモートセンシングがどのように推移していくかを述べてみよう。

■継続的地球環境観測

現在,すでに15年程度の継続的な,衛星による地球環境観測ミッションは米国のNASAでも日本のNASDAでも始まっている。地球環境の継続的観測の必要性・重要性は変わらないため,グローバルな地球環境の観測は現ミッションの後も続いてゆく。

■多様な観測

地図作成の分野ではこれまでの光学カメラによる航空写真測量技術に加えて,高度400km~1000km程度の人工

衛星からの光学センサ/SARによる観測が行われるようになってきた。しかし,今後は多様な観測が行われるようになる。例えば,航空機搭載ライダーによる地形の3次元計測はすでに実用化されている。また,2002年にSpace ShuttleにはVegetation Canopy Lidar (VCL)が搭載され,樹高計測が行われる予定である(NASA,2000)⁴⁾。将来は解像度,数十mの静止衛星による常時モニタリングも可能である。静止衛星はIKONOS衛星の約50倍の高度であるため,解像度1mのセンサを搭載すれば解像度50mが可能となる。洪水,海洋の油流出などの災害モニタリングに威力を発揮するだろう。

■SAR利用の拡大

合成開口レーダ(SAR)はつぎに述べる利点と欠点をもっている。利点は全天候型のセンサであること,樹冠を通じた植生量および地表面の観測が可能なことである。たとえば,インドネシアなどの雲量の多い地域では光学センサでは1シーン全体が晴れているケースはほとんどない。このような地域でのSAR利用は有効性は多大である。また,

表2 資源分野における利用可能な衛星センサの一覧(岩下篤,1998を修正)⁵⁾

衛星名	センサ名	石油資源			鉱物資源	重要な諸元			
		地形	地質構造	テクスチャ	スペクトル	分解能(m)	観測幅(km)	回帰日数	その他
ADEOS	AVNIR	○	○			8, 16	80	41	PT (CT)
	PRISM	○	○			2.5	35	46	PT (AT)
ALOS	AVNIR-2	○	○			10	70	46	PT (CT)
	PALSAR	○	○	○		10~100	70~360	46	L, HH, SCAN
EOS AMI	ASTER	○	○		○	15, 60	60	16	PT (AT, CT)
ENVISAT	ASAR	○	○	○		30~1,000	5~1,400	3~35	VV, HH
EROS-A	HRIS	○	○			1.5	14	3	PT (AT, CT)
EROS-B	HRIS	○	○			10	20	3	PT (AT, CT)
EROS-B	MSIS	○	○			10	20	3	
ERS-1, 2	AMI-SAR	○	○	○		30	100	35	C, VV
GDE-System	Pan	○	○			0.8	15	2	PT (AT, CT)
IKONOS-1, 2	PAN	○	○			0.8~1.0	11~110	1~3	PT (AT, CT)
	MSS	○	○			3.3~4	11~110	1~3	PT (AT, CT)
IRS-1c/1d	PAN	○	○			5.8	70	24	PT (AT, CT)
JERS-1	OPS	○	○	○		18	75	44	STEREO
	SAR	○	○	○		18	75	44	L, HH
LANDSAT-5	TM	○	○			30, 120	185	16	
LANDSAT-7	ETM+	○	○		○	15, 30, 60	185	16	
OrbView-3	Pan	○	○			1, 2	4, 8	2	
	MSS	○	○			4	8	2	
RADARSAT	SAR	○	○	○		5~500	50~500	24	C, HH, SCAN
SPOT-1, 2, 3	HRV	○	○			10, 20	60	26	PT (CT)
SPOT-4	HRVIR	○	○		○	10, 20	60	26	PT (CT)
SPOT-5 a/b	HRG	○	○		○	5, 10	60	26	PT (AT, CT)

注) PT:ポインティング機能を有する L:Lバンド HH:水平~水平偏波
 CT:Cross Track方向 C:Cバンド VV:垂直~垂直偏波
 AT:Along Track方向 SCAN:SCAN SARモード

地球環境の研究では植生バイオマスの推定が一つの重要な課題である。光学センサでは植物の表面(樹冠)からの反射光の情報がほとんどであるが、SARでは樹冠の下からの volume scattering (体積散乱)の成分があるため植生バイオマスの推定のもう一つの方法として期待される。また、SAR インターフェロメトリによる高精度地形計測は Space Shuttle に搭載されるなどすでに使われている。SARの欠点は、マルチスペクトル光学センサに比べて土地被覆分類能力が低いことである。しかし、SARは光学センサにない利点をもっているため、今後その利用は拡大していくであろう。

■衛星データの価格

衛星データの価格は、大きく2つのタイプに分けられる。一つは高解像度衛星 IKONOS データのような商業タイプである。商業化された衛星データの価格は市場原理によって決まり、高価格である。もう一つのタイプは、地球環境観測のような研究目的の衛星データである。無料あるいはコピー・媒体代の低価格で配布される。では、国によって運用される実利用可能な多目的衛星データの価格はどうか。恐らく商業ベースの衛星データの育成を阻害しない範囲で低価格化が進むと思われる。その方が国として、地理情報のデジタル化を推進することになり、社会基盤整備に役立つためである。一方、将来は、データに対しての価格ではなく、インターネットを通じたデータ・アクセス権に対してある対価を支払い、データの取り出しは自由とするサービス形態も考えられる。今後の衛星データ配布サービス形態はインターネットの影響を受けて大きく変わるだろう (Harris, 2000)²⁾。

■専門家の需要拡大

衛星データ利用の機会拡大および衛星データ処理システムの低価格化は、いろんな分野でリモートセンシング技術の利用を推進させる。これに伴い、リモートセンシングに関する知識を持った人材が要求されるようになる。すでに大学院修士課程・博士課程でリモートセンシングの知識を

持った人材を排出する体制はできている。不足しているのは、すでに仕事に従事している技術者、管理者に対してリモートセンシングの知識を与える1週間~1カ月程度の短期教育コースである。

4. 資源分野で利用可能な衛星センサ

表2は資源探査分野で利用可能な衛星リモートセンシングセンサを示している。各探査項目ごとに有効なセンサを○印で示している(岩下篤, 1998)³⁾。リモートセンシングにおいて、可視近赤外域では地形形状、リニアメントなどから地質構造を推定する。短波長域では、岩石、土壌などのスペクトル特性の差異が判読できる。熱赤外域では、地表面温度がわかる。SARにより、地形形状の情報が得られる。これらの多様なセンサによる地質調査への利用は後続のページで詳細に解説される。

今後、多くの衛星データが入手できるようになり、処理解析能力を越えてデータが蓄積されるようになる。各分野で如何に衛星データから必要な情報を効率的に抽出するかが重要になっていく。この意味で、リモートセンシングの知識を備えた地質分野の専門家もさらに必要となっていく。

参考文献

- 1) Crane, A. and Liss, P. S.: New Scientist 108 (1483), 50~54, IPC Magazines, London, 1985.
- 2) Harris, R.: Earth observation data pricing policy, ISPRS Highlights, Vol. 4, No. 4, pp. 29~32, 2000.
- 3) NASA: Earth System Science A Closer View, Report of the Earth System Sciences Committee NASA Advisory Council, 1988.
- 4) NASA: EOS Data Products Handbook Volume 2, 2000.
- 5) 岩下篤: 資源分野における衛星センサの利用可能性 (小特集: 最新の衛星センサとその利用可能性, pp. 4~22), 写真測量とリモートセンシング, Vol. 37, No. 3, pp. 15~16, 1998.
- 6) <http://www.fas.org/eye/imint.htm>

地質調査ツールとしてのリモートセンシング

さとう いさお*
佐藤 功*

1. はじめに

地質の調査における衛星映像の利用は、1970年代初期に米国が打ち上げたLANDSAT-1(当時はERTSとよばれていた)衛星によるMSS(Multi-Spectral Scanner)映像を用いた地質判読に関する映像評価から始まった。今では地表での解像力が1m程度という非常に高分解能な衛星映像も、そして撮像された時期はやや古い(1960~1972年)が米国の偵察衛星のコロナ(CORONA)映像(地表分解能が2~8m)も手に入るし、観測バンドがほぼ連続しているようなハイパースペクトル衛星データも近々利用できる可能性がある。しかし、我が国では地形図や航空写真がよく整備されているため、国内の地質調査では衛星映像を広域的な地形や地質構造の概要を把握するという程度にしか利用されていない。これは我が国では国土のほとんどが植生に覆われてしまっていて露岩地域がきわめて少ないことが要因となっている。一方、海外での地質調査では地形図や航空写真の入手は先進国を除けばきわめて困難であり、予察段階や概査段階での衛星映像は地図としても利用されている。地質調査は石油や鉱物資源探査では不可欠な作業である。しかし、地質図が未だに整備されていないとか、20万分の1や50万分の1以上の小縮尺でしか入手できない国も多い。このため、海外地質調査では衛星映像が盛んに使われている。

ここでは、地質調査のツールとして衛星映像をどのように利用してきた、今後どのように変化していくのかを振り返ってみた。

2. 地質調査と映像判読

リモートセンシング映像の地質利用は、航空機や衛星で撮像された映像から地質情報を判読することがその基本となる。初期の頃にはカラー空中写真の利用が主体であったが、現在は多種多様な衛星映像が利用されている。この地質判読作業の主役は地質専門家である。地質判読では、その時々利用可能な衛星映像を用い、調査地域での地質単

元、地質構造(背斜、向斜、断層、スラスト、環状構造など)、リニアメント、水系などを抽出する。そして、これらの判読された地質情報を記載した地質判読図を作成する。判読図は地質構造図であったり、地質単元を抽出した地質区分図であったりする。また、肉眼判読によるリニアメント図や水系図なども作成される。この作業では、映像上の微妙な色調の違い、テクスチャの違い、地形起伏による陰影などが手掛かりとなる。このため、判読にはさまざまな映像が必要となる。地質の違いを色調の差として認識できる鮮明なカラー映像であったり、地層の傾斜が読み取れるような地形状況が見やすい映像であったりである。後者については空中写真のように立体視できる映像ペアがあれば都合が良い。また、複数の映像を繋ぎ合わせたモザイク映像も広域構造の把握に欠かせない。そして今日では、画像のデジタル処理により自動抽出されたりリニアメント図、リニアメント密度図、特定の変質鉱物分布推定図なども使用される。参考として図1に中国遼寧省瀋陽市の南部における位置図(a)、LANDSATモザイク映像(b)、判読したリニアメント図(c)、リニアメント密度図(d)を示す。北部では東西系のリニアメントが発達し、南部では北東-南西系のリニアメントが発達していることが明瞭である。

さて、衛星地質判読はLANDSAT衛星とともに始まった歴史的経緯がある。そのため衛星映像の地質判読と言えば、LANDSAT衛星のMSS画像あるいはTM(Thematic Mapper)画像が用いられた。MSS画像やTM画像による判読経験が重要であり、これを蓄積してきたと言って過言ではない。MSSやTMのフォールスカラー衛星映像上で構造や岩石などがどのように見えるかを知っていれば良かった。ところが、今は地質判読に利用可能な衛星映像として、さまざまな光学センサ画像やSAR(Synthetic Aperture Radar)画像が溢れ、使用映像の選択肢が格段に増えた。しかし、各画像データの特性がわずかに違っていることに注意がいる。たとえば、光学センサ映像では、観測バンドの特性は全く同じではないし、ポインティングによる斜め観測したものもある。SAR映像では、マイクロ波の周波数は同じでも偏波が違っていると、オフナディア角が違ってくる。これらは同じ日の同時刻に、同一地域を観測したとしても地表からの応答は異なり、映像上の色調が違うこ

* 産業技術総合研究所 地質調査所 環境地質部 地質リモートセンシング研究室室長

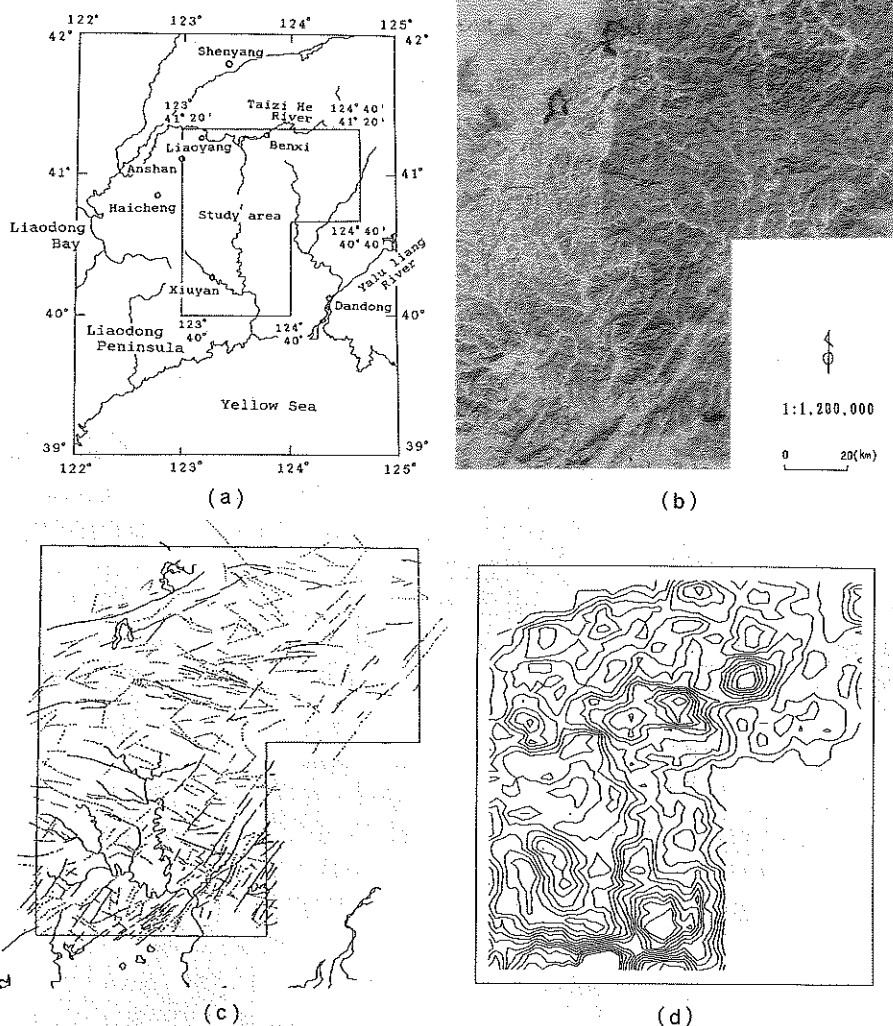


図1 中国遼寧省東部での地質構造解析：(a)位置図, (b)LANDSAT モザイク映像, (c)リニアメント判読図, (d)リニアメント密度図

とになる。また、地形の見え方も違ってくる。映像の判読には、このように使用する衛星映像に関する事前の知識（数多くの観測パラメータや映像化パラメータなど）が前提になる。現在は衛星映像の多様化のゆえに衛星映像に対する選択肢が増えたが、判読に必要な衛星映像の特質に関する予備知識も多く必要になるという新たな負荷が生じている。より精度の高い地質判読のために、衛星データは高精度・高機能化してきたが、同時に地質専門家が地質判読経験を蓄積するための労力も増大するという矛盾が生まれている。衛星データの長期にわたる継続性が望まれるゆえんである。

地質専門家による地質判読作業を軽減あるいは支援する目的で、これまでに2つの側面からの努力が続けられてきた。1つ目は地質判読に適する衛星データを提供するためのセンサを開発することであり、2つ目は衛星データから地質情報を容易に判読できるように、各種の処理・解析ツールを開発することである。地質判読、センサ、処理・解析は三位一体の関係にあると言えよう。つぎに、地質判読に使われているセンサや処理・解析手法について概観する。

3. センサの発展

地質判読に現在利用されている衛星映像は、TM 画像に

代表される光学センサ画像とマイクロ波を利用する合成開口レーダ (SAR) 映像の2種である。表1と表2に地質調査で使用される頻度の高い光学センサおよびSARセンサの一覧を示す。この2つのタイプのセンサについての発展過程を概観する。

光学センサでは、その進化の主たる方向は高分解能化であった。すなわち、空間的な分解能の向上、および観測スペクトル上の分解能を向上することの2点である。空間分解能については、地表をより細かく観察したいという願いに応えるため、MSS 画像での80 m 四方の地表分解能から、TM 画像では30 m へ、そしてSPOT 衛星/HRV (High Resolution Visible Imaging System) 画像やJERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite-1) 衛星/OPS (Optical Sensor) 画像では10 m~20 m 四方の分解能へと向上し、そして今や米国民間衛星のIKONOS 衛星では約1 m 四方にまでに達している。1 m 分解能ともなれば、グラウンドに整列している人までもが判別できるほどである。一方のスペクトル分解能については、観測バンド数と観測波長の高帯域化に置き換えられる。観測バンド数についてみると、MSS 画像では4

バンドで、波長帯は可視~近赤外領域 (0.5 μm ~1.1 μm) であったが、TM では7バンド、1999年12月に打ち上げられたTerra 衛星搭載のASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) では14バンドとなり、両者ともに波長帯が可視~熱赤外領域 (0.45 μm ~12.5 μm) へと拡大している。高空間分解能を特徴とした可視~近赤外領域のバンドのみであったHRVも、短波長赤外バンドを加えたHRVIR (High-Resolution Visible and Infrared) がSPOT-4 衛星に搭載されるようになっていく。このHRVIR 画像も地質の調査に今後使用される頻度がさらに高くなると思われる。航空機搭載の光学センサでは、可視~短波長赤外領域 (0.4 μm ~2.4 μm) で224チャンネルの観測バンドを有するAVIRIS (Advanced Visible/InfraRed Imaging Spectrometer) が米国を中心に地質調査に利用されている。そして、現在は民間のProbe I やCASI/SFSI (Compact Airborne Spectrographic Imager/Short Wave Infrared Full Spectrum Imager) などもある。これらはイメージングスペクトロメトリとか、ハイパースペクトラルイメージャとよばれるものであるが、衛星搭載型のセンサ (EO-1 (Earth Observing-1) 衛星のHyperion) も最近打ち上げられた。オーストラリアもARIES (Australian Resources Information and Environmental

表1 地質マッピングでの代表的な光学センサ

衛星	センサ	VNIR		SWIR	TIR	ステレオ機能	打上げ年
		Multi	PAN				
LANDSAT-1/2/3/4/5	MSS	80 m (4)	NA	NA	NA	NA	1972-
LANDSAT-4/5	TM	30 m (4)	NA	30 m (2)	120 m (1)	NA	1982-
SPOT-1/2/3	HRV	20 m (4)	10 m	NA	NA	CT-Pointing	1986-
JERS-1	OPS	18×24 m (3)	NA	18×24 m (4)	NA	Forward-Viewing	1992
LANDSAT-7	ETM	30 m (4)	15 m	30 m (2)	90 m (1)	NA	1999
SPOT-4	HRVIR	20 m (3)	10 m	20 m (1)	NA	CT-Pointing	1998
Terra	ASTER	15 m (3)	NA	30 m (6)	90 m (5)	Backward-Viewing	1999

()内はバンド数

VNIR: 可視~近赤外 (Visible and Near Infrared)

SWIR: 短波長赤外 (Short-wavelength Infrared)

TIR: 熱赤外 (Thermal Infrared)

表2 地質マッピングでの代表的な SAR センサ

衛星	センサ	波長 (バンド)	偏波	空間分解能	観測幅	打上げ年
ERS-1/2	AMI	5.3 GHz (C)	VV	30 m (3 look)	100 Km	1991/1995
JERS-1	SAR	1.275 GHz (L)	HH	18×18 m (3 look)	75 Km	1992
RADARSAT	SAR	5.3 GHz (C)	HH	(21-26)×28 m	100 Km	1995

Satellite) 衛星で 96 チャンネルのハイパースペクトラルイメージャを上げる予定である。光学センサによる地表観測用の「大気窓」は限られているため、観測チャンネル数が増えると、観測バンド幅を狭くすることになるが、同時に観測データの信号対雑音 (SN) 比を確保する必要から観測バンドはスペクトル上で相互に隣接することになる。その結果、観測バンド間での相関が高い画像になる。また、ハイパースペクトラルデータともなれば、チャンネル間の相関という点以外に、そのデータの可視化方法も従来どおりというわけにはいかない。これは処理・解析への負荷ということになる。さて、このような高分解能化を実現するために犠牲となったのが、観測幅であることも見逃せない。高分解能化すれば、観測幅が同じであると、観測データ量が飛躍的に増大する。一般には高分解能と観測幅とは相反関係となる。すなわち、LANDSAT 衛星の MSS (空間分解能 80 m) および TM センサ (空間分解能 30 m) とともに観測幅は 185 km であるが、SPOT 衛星に搭載された 20 m 分解能の HRV センサでは 60 km となった。JERS-1 衛星の OPS では約 20 m 分解能で 75 km 観測幅である。このように観測幅が狭くなると、後述するように衛星映像のモザイク化のニーズが生まれる。また、狭くなった観測幅のセンサでグローバルに地表を観測しようとするれば、軌道に直交する方向へのポインティング機能が必要になる。衛星軌道で決り隣接軌道間距離が近いので、直下の観測のみでは観測できない領域ができてしまうためである。HRV, OPS, ASTER 等ではこのポインティング機能が使われている。また、世界的に地形図の整備が遅れていることもあり、立体視画像への期待も大きく、初期には TM 画像のオーバーラップ領域を用いて立体視が試みられたが、このオーバーラップ領域は低緯度で

はほとんど実現しない。そこで、HRV, OPS と ASTER では立体視への配慮が行われた。HRV 画像ではクロストラックへのポインティングによる立体視であり、地形誇張率を示す基線対高度 (BH) 比が 1.0 まで可能となるが、撮像日の違う画像ペアとなるので、雲の無いペアを取得する確率が低くなるというデメリットがある。OPS では前方視バンドを付与して軌道内立体視を実現したが、BH 比は 0.3 に抑えられた。OPS の後継機器に位置づけられる ASTER では、北半球に陸地が多いことを加味して、後方視バンドを採用する一方で、BH 比も 0.6 と OPS の 2 倍へと改善されている。

衛星に搭載された合成開口レーダは、1978 年に打ち上げられた SEASAT 衛星に搭載された L バンドの SAR が最初である。これは海洋分野への利用ということと、この衛星自体が短命であったことで、地質分野での利用はほとんどなかった。初期の頃は航空機搭載の SAR 映像に関心が寄せられ、その利用が進められた。我が国でも地熱資源賦存ポテンシャル評価の一環として全国の SAR 映像撮像が実施され、この X バンドの航空機 SAR 映像による全国の断裂系マッピングが行われた。また、TM 映像と SAR 映像とを重ね合せて

地質判読に適する映像作成もしている。これを契機に、SAR 映像の地形情報の強調効果への期待が大きくなり、我が国の JERS-1 衛星へ L バンドの SAR センサを搭載する計画が進められることになった。L バンド SAR についてはセンサ自体が他のマイクロ波周波数の SAR よりも製作しやすいという理由もあったが、L バンドは C バンドや X バンドと比べて波長が長いために、乾燥条件下で数 m 程度の地表透過能力もあり、地質利用には都合がよく、この L バンドが選択された。また、偏波は HH 偏波で、地形の判読に適合するように、オフナディア角は 35 度とされた。一方、JERS-1 衛星の 1992 年打ち上げと同時に欧州では海洋監視を主たる目的とする C バンドの SAR が EERS-1 衛星に搭載されて 1991 年に打ち上げられている。カナダも同様に C バンドの SAR を RADARSAT 衛星として 1995 年に打ち上げた。EERS-1 衛星の SAR では VV 偏波が採用され、RADARSAT 衛星の SAR では HH 偏波が採用されている。なお、RADARSAT では広域を観測するスキャン SAR モードでの運用や多様な用途にも対応できるような複数の地表分解能、入射角、観測幅の異なるモードが加えられている。これらの C バンド SAR 映像は地質判読には我が国ではほとんど用いられていないようである。

4. 処理・解析技術の発達

衛星データを地質判読に利用するうえで、センサの発展に合わせるように数々の支援処理・解析技術が開発されてきた。

まず、鮮明な映像を作成するための画像表現技術の検討が行われてきた。たとえば、複数の観測バンドの光学セン

サ映像では、フォールスカラー映像を作成するのにどの観測バンドを赤(R)、緑(G)、青(B)の3つの色に割り当てると適当であるかという点である。対象物のスペクトル応答を考慮して、三色を割り当てる方法が一般的であるが、情報量を最大化するように情報エントロピー計算により、観測バンドを選択する方法などもある。また、広域の地質構造判読のためにTM映像の切り貼りでモザイク映像が作成されてきたが、高分解能化で観測幅が狭くなったことや衛星映像のロジスティックス分野への利用もあって、デジタル的にモザイク映像を作成できるようにもなっている。このため、10~20シーン程度までのモザイク画像はデジタルモザイクされている。画像表現技術の一部である画像強調については多種多様な方法がすでにある。たとえば、地形情報を強調するための各種のフィルター処理方法などである。一般には、ラプラシアン・フィルターという二次微分フィルターが多用されている。また、地形情報を良く反映しているレーダ映像や光学センサでの空間分解能の高いパンクロバンドとフォールスカラー映像の色(スペクトル情報)とを組み合わせることを目的にHLS処理が用いられる。これはRGB空間でのカラー映像をHLS(Hue(色相), Lightness(明度), Saturation(彩度))という色空間への変換処理を行い、色相を示すHue情報を保持したままで、Lightnessに地形情報を有するバンドを割り当てて、その後RGB空間へ再度戻して表示するものである。SAR画像による写真判読でも、判読に適する鮮明な画像を作成することが出発点になる。SAR映像の前処理としては、画像上にゴマ塩状のスペックルとよばれる雑音成分が存在する。これを低減するため、マルチルック処理やフィルタリング処理が行われる。JERS-1衛星のSAR画像ではニアレンジ(センサに近い側)とファーレンジ(センサからは遠い側)での画像上の明暗、すなわち濃度が違うため、このトレンドを補正する処理が行われる。

さて、スペクトル情報のみを強調したい場合には逆に地形情報を低減する方法もある。この代表的な方法はバンド比演算処理である。バンド比演算では、スペクトル応答のバンド間での差異を強調する最も単純な方法で、TM画像などによる地質判読には良く用いられる。なお、バンド比演算の前処理として、大気多重散乱による加算成分であ

るパスラジアンスを補正する処理が行われる。この補正のための最も簡単な方法として、水域を含む画像では水域の反射率がほぼ0であることを考慮して、この水域でのDN値を単純に減算する方法(Dark Target Subtraction法)がある。スペクトル情報強調での統計的な方法としては、主成分分析による第一主成分に地形情報が集約されていることを用いて、第二主成分以降の高次主成分のみをカラー映像化する方法も用いられるが、データ依存性が高く、判読の一般化が難しいために最近では用いられることが少なくなってきたようである。最近では、観測バンドが増えたため、相関の比較的高い観測バンドのカラー映像化が増えてきている。このような場合には、地質分野では無相関ストレッチ処理を多用している(図2)。無相関ストレッチは、RGB空間での主成分軸を基に、新たな直交座標系を求め、新座標系へ変換後、分散を等頻度化してRGB空間へ戻す方法で、色相を強調することができる。また、HLSコントラスト強調処理もスペクトル強調として用いられる。この場合は、RGB空間からHLS空間への変換後に、Hue成分を線型ストレッチして強調し、元のRGB空間へ戻す処理となる。これらにより、色のバラエティーに富む映像が得られる。また、擬似反射率への変換という目的のために、ログレシジュアル処理も頻繁に実施されている。ログレシジュアル処理は、各画素値が基本的に太陽照射強度、地形起伏による陰影効果、そして物質の反射率の積であると仮定し、地形の効果がバンドに依存しないことを利用して、まず各画素に対して全てのバンドについての加法平均との比をとることで地形効果項が除去でき、そこからさらに太陽照射強度に関する項を除去するために全画素についての加法平均との比を計算すると、都合の良いことに反射率のみに依存する式となることを利用する方法である。このようなスペクトル情報を強調することで、地質単元を区分したり、鍵層の追跡も可能になる。

次に、地質情報の抽出技術としては、光学センサ画像でのリニアメント抽出や特定の鉱物抽出などの手法が特徴的である。リニアメント抽出は、エッジ強調がベースとなるが、一定の長さを有し、かつある幅を有する線状要素としてリニアメントを定義することで、8~16方位ごとに線状要素を求めていく自動抽出手法が開発されている。この代表例がDSDA(Directional Segment Detection Algorithm)法である。また、JERS衛星のOPSデータから、変質鉱物である明ばん石、カオリナイト、そして炭酸塩鉱物の石灰石を抽出するための鉱物指標による方法が開発されている。後者では、抽出しようとする特定鉱物のスペクトルの吸収波長を含む観測バンドを有する衛星データであれば同様な指標を作ることができる。また、ASTERの熱赤外マルチバンドデータから火成岩中の珪酸成分量(SiO₂量)を推定する手法も提案されている。この推定値からは火成岩の種別の推定が可能になると期待されている。なお、これらのスペクトル情報の抽出技術関係では、そ

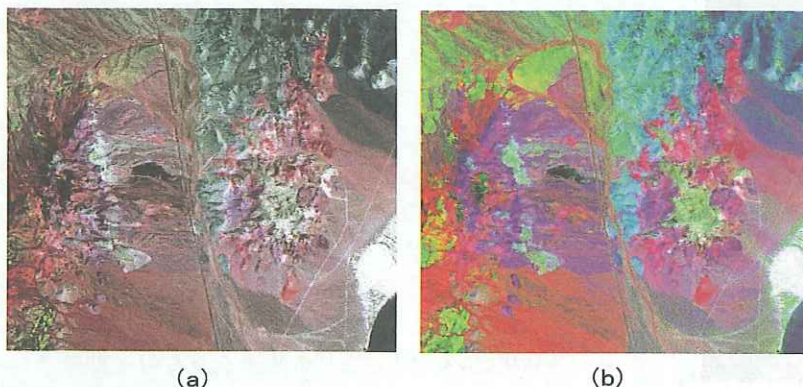


図2 米国ネバダ州 Cuprite 地区の(a)AVIRIS フォールスカラー映像(RGB: 183, 192, 207)と、(b)その無相関ストレッチ処理画像(Alunite hillが紫色に発色し、Kaolinite hillは赤く発色している)

の基礎となる種々の岩石、鉱物、そして植生などのスペクトル・ライブラリが整備されてきていることが、今から十年前頃とは違っている。このスペクトル・ライブラリについては、可視～短波長赤外領域(0.4 μm ～2.4 μm)の反射率スペクトルをはじめ、熱赤外領域(8 μm ～14 μm)の放射率スペクトルも充実してきている。このようなスペクトル・ライブラリが存在することにより、衛星データから観測バンド内での反射率や放射率が推定されれば、ライブラリでのスペクトルデータからのバンド内シミュレーション値と比較・検索することで物質同定も可能になると期待される。

さて、SAR 画像は後方散乱係数を画像化したものであるが、後方散乱係数は誘電率、含水率、ラフネス、波長、偏波、入射角などで違う。このため、SAR 画像から物質を一義的に識別することは、関与する因子が多くて困難であると考えられている。そのため SAR 画像では、後方散乱係数そのものではなく、画像上の空間パターン、形状、テクスチャ、そして画像以外の補助的な情報を有効に活用するのが一般的な地質判読スタイルである。SAR 映像については、テクスチャなどを手がかりとして、石灰岩地域などの地質単元の区分に役立った例もある。

また、地形情報の抽出は地質調査ではきわめて重要であり、そのために立体視観測データから地形起伏を抽出する手法は頻繁に利用される。これは実体鏡による空中写真判読に始まる。SPOT 衛星の HRV 映像では軌道と直交する方向へ側方ポインティングした観測映像と直下視映像とで実体視でき、さらにはデジタル標高モデル(DTM: Digital Terrain Model)が作成できるし、JERS-1 衛星の OPS 映像では直下視と前方視の衛星データを同一軌道内で取得することで DTM 作成ができる。そして、Terra 衛星の ASTER では準前方視と後方視の同一軌道内立体視による DTM 作成が可能になっている。特に、ASTER では標準的な高次プロダクトとして相対 DEM プロダクトが作成され、供給される予定である。光学センサでは雲の無い立体視観測画像データの入手が課題となる。また、SAR データの適当なペア画像(2つの画像の基線長距離がある一定距離以下で、できる限り観測日間隔の短いもの)を用いて、



図3 北海道駒ヶ岳が2000年9月4日頃に噴火した後、10月30日に観測されたASTERのVNIR画像(RGB: 3, 2, 1)。山頂の噴気と火山灰(山頂周辺と東側の灰色部)が確認できる。

干渉 SAR (SAR インターフェロメトリ) 技術を用いることによっても DEM が作成できる。SAR は全天候性で、雲被覆の影響を受けず、夜間においても撮像できるため、この DEM 作成は魅力的である。2000年に米国がスペースシャトルに合成開口レーダを搭載して行った SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) では、グローバルな DEM を順次作成している状況であり、一部は公表されてきている現状である。

5. 地質関連分野での応用

リモートセンシングによる地質関連分野の応用例を少し紹介する。環境監視への利用では、資源開発地での環境評価として廃鉱地での植生回復を監視することが米国地質調査所などで実施されている。石油あるいは天然ガスの採取地では干渉 SAR 技術によって地盤沈下の実態を監視することも試みられている。近年は地質災害監視へ衛星映像を利用する動きが盛んになってきている。たとえば、火山噴火に伴い放出された火山灰の分布(図3)とその厚さを推定することで、火山噴出量を推定したり、火山での高温域を監視することで、火山活動の推移を知る試みもされている。また、火山から放出される噴煙の流れ、火砕流や泥流の流下範囲を検出したり、また熱赤外のマルチバンドデータによって火山からの硫化ガス(SO₂)の検知も試みられている。地すべりでは、その領域を把握するほか、サブピクセルでの移動量を測定し、移動速度を推定したりすることも行われている。地震では、都市部での被害分布の推定、活動した断層セグメントの特定、地表変動量を面的に把握することにより断層モデルの推定なども行われている。このように地質の調査以外の地質関連分野での衛星データ利用は広範囲に及ぶが、そのニーズは今後ともますます高まるものと思われる。

6. 今後の動向と展望

地質調査ツールとしてのリモートセンシングの動向で注目したい観点として以下を挙げたい。

(1) 地理情報システムとの融合

地質調査は地質に係わるデータを総合解釈することである。また、地質調査は資源開発と密接に結びついてきた。その資源探査の対象地域は、探査が困難な地域へと移りつつある。たとえば、水深の浅い沿岸域、地形起伏のきわめて緩やかな砂漠地域、熱帯雨林や植生に覆われた地域などである。このような難探査地域では、地質情報の把握という観点で有効に機能するリモートセンシングデータは限られてくる。しかし、難探査地域は地形図もないような地域でもあり、リモートセンシングはロジスティクス利用という面で威力を発揮するものと期待される。このような利用では、ベースマップとして地理情報システム(GIS)へ取り込まれていくものと期待される。同時に、衛星映像からわずかに抽出される

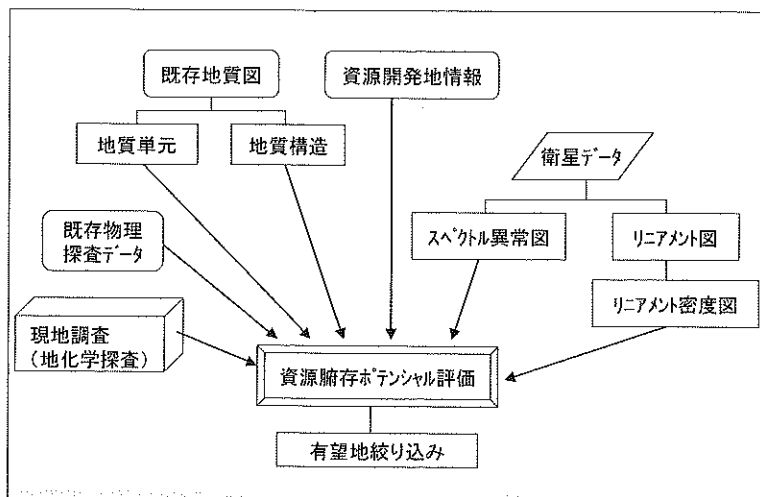


図4 地理情報システムとの融合を旨とする例

であろう地質関連情報を既存のさまざまな情報と統合するためにも地理情報システムの活用が期待が寄せられている。たとえば、図4に示すように、衛星データからはリアメント情報くらいしか利用できないような場合、既存の地質関連情報や地表調査データなどとともに、GISをベースに資源貯存ポテンシャル評価を行い、有望地の絞り込みや選定に活用することが必要となる。

(2) 区分から識別へ

地質調査に限らず、今日では衛星データの物理量（反射率、放射率、温度など）への変換が目ざされている。これは衛星データの校正技術、大気補正技術、種々の物理量変換アルゴリズム（たとえば、温度—放射率分離技術）の開発が進められた結果である。これは「区分」から「識別」へ向かっていることを示唆する。また、衛星データの空間分解能はLANDSAT/MSSデータの80 mからASTERの15 mやSPOT/HRVでの10 mへと格段に向上してきている。空間識別の能力向上は、地表物質の混合画素（ミクセル）問題への緩和になり、対象の識別には都合が良くなっている。また、スペクトル分解能は高くなり、可視—短波長赤外領域ではハイパースペクトラルデータという200チャンネルを越えるデータがある。これらは全て「物質の識別」という流れの中にある。特定の変質鉱物や炭酸塩岩などの識別や熱赤外多バンドデータによる火成岩識別がより精度高く、かつ識別できる対象数も増加すると期待される。

(3) SAR画像の高度利用

SAR画像の地質利用は、光学センサ画像と比べると20年近くも遅れて始まった。今では、干渉SAR技術により、DEM作成や微小な地表変動の可視化が可能となってきているし、多時期のLバンドSAR映像のカラー合成によるテンポラルな変化の可視化の実例も出てきている。しかし、SAR映像の利用技術については未だ利用手法開発の余地が多分にあると考える。今後のSARセンサについては、高分解能化、多バンド化、多偏波化（ポラリメトリ）、可変オフナディア化などが期待される。2002年頃に打上げ予定の我が国のALOS(Advanced Land Observation Satellite)衛星にはPALSAR(Phased Array L-band Synthetic

Aperture Radar)という多偏波、可変オフナディア機能を有するLバンドのSARが搭載される。この多機能SAR画像を地質分野で高度に活用する時も近いと期待したい。

7. おわりに

地質調査へのリモートセンシング利用は、以前と比べてツールとしてかなり高度化してきている。今注目されつつあるのは地理情報システムをベースに、各種の地質判読図と物理探査データや地化学探査データとの融合による総合的な地質解析へのアプローチであろう。そして、今後見直すべき点はこれらのツールを使いこなすことのできる地質判読あるいは地質解析の経験豊かな人材の育成ではなかろうか。幅広い地質調査業務に従事される多くの方々がリモートセンシングデータに興味を持って、1つのツールとして使っていただければ望外の喜びである。

参考文献

- 1) Chavez, P. S., Jr.: An Improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data, *Remote Sensing of Environment*, 24, 459-479, 1988.
- 2) Gillespie, A. R., Kahle, A. B. and Walker, R. E.: Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HIS contrast stretches, *Remote Sensing of Environment*, 20, 209-235, 1986.
- 3) Ninomiya, Y.: Quantitative estimation of SiO₂ content in igneous rocks using thermal infrared spectra with a neural network approach, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 684-691, 1995.
- 4) 宮崎芳徳・山口 靖: 資源分野におけるリモートセンシングの現状と将来, *日本リモートセンシング学会誌*, 11(1), 59-65, 1991.
- 5) Realmuto, V. J., Abrams, M. J., Bongiorno, M. F. and Pieri, D. C.: The use of multispectral thermal infrared image data to estimate the sulfur dioxide flux from volcanoes: A case study from Mount Etna, Sicily, July 29, 1986, *Jour. Geophys. Res.*, 99, 481-488, 1994.
- 6) 六川修一: ASTERによる地表温度および放射率の導出, *日本リモートセンシング学会誌*, 15(2), 33-38, 1995.
- 7) Sato, I., Deng, Z. L., Wang, P. Q., Yamaguchi, Y., Urai, M. and Ninomiya, Y.: Application of TM data to a geologic structure study of the eastern Liaoning Province, China. *Supplements of 16-th Congress of ISPRS*, 27(B 10), VII-424-VII-434, 1988.
- 8) Urai, M.: Volcano monitoring with Landsat TM short-wave infrared bands; the 1990-1994 eruption of Unzen Volcano, Japan, *Int. J. Remote Sensing*, 21(5), 861-872, 2000.
- 9) 山口 靖: ASTERの地質分野への応用, *日本リモートセンシング学会誌*, 15(2), 50-55, 1995.
- 10) Yamaguchi, Y.: Possible techniques for lithologic discrimination using the short-wavelength-infrared bands of the Japanese ERS-1, *Remote Sensing of Environment*, 23, 117-129, 1987.
- 11) 山口 靖・丸山裕一: 地質リモートセンシングの歴史と現状, *日本リモートセンシング学会誌*, 19(5), 2-12, 1999.

マイクロ波リモートセンシングによる 地質調査

いがらし たもつ
五十嵐 保*

1. はじめに

マイクロ波リモートセンシングの地質調査への応用は、我が国の地球資源衛星1号 (JERS-1: Japanese Earth Resources Satellite-1)「ふよう1号」の開発、および1992年2月の打上げから98年10月までの6年8カ月に及ぶ長期観測によって得られた、合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) 画像データの処理・解析の成功に始まった^{1),2)}。

JERS-1衛星の観測データは、国際協力に基づき世界18箇所の受信局で衛星から直接受信され、全球陸域の97%に及ぶ地域を観測したが、空間分解能18mのSAR画像 (1シーン75km四方) が74万6000シーン得られた。このデータセットは、これまで熱帯雨林³⁾⁻⁴⁾に阻まれて地上での測量が困難であった、南米アマゾン川流域、中央・東アフリカ・コンゴ川流域、東南アジア地域の熱帯雨林モザイク画像 (図1)⁴⁾など広域をカバーする基盤的な地理情報データとして利用されている。

これまでに、地質構造、活断層などの判読による資源探査、森林・農地・草地・湿地などの植生分類、土壤水分、氷河・海水の分布・動態や火山・地震の活動に伴う地殻変動、洪水などの環境変動監視・災害管理への応用が実証されてきた。将来、持続可能な人間活動を支える空間情報インフラストラクチャとして、衛星による定常的な観測システムと観測データの実利用の実現が期待されている。

ここでは、マイクロ波固有の特性を活かした地質調査への応用の有用性を示し、JERS-1 SARなどの衛星による観測デー

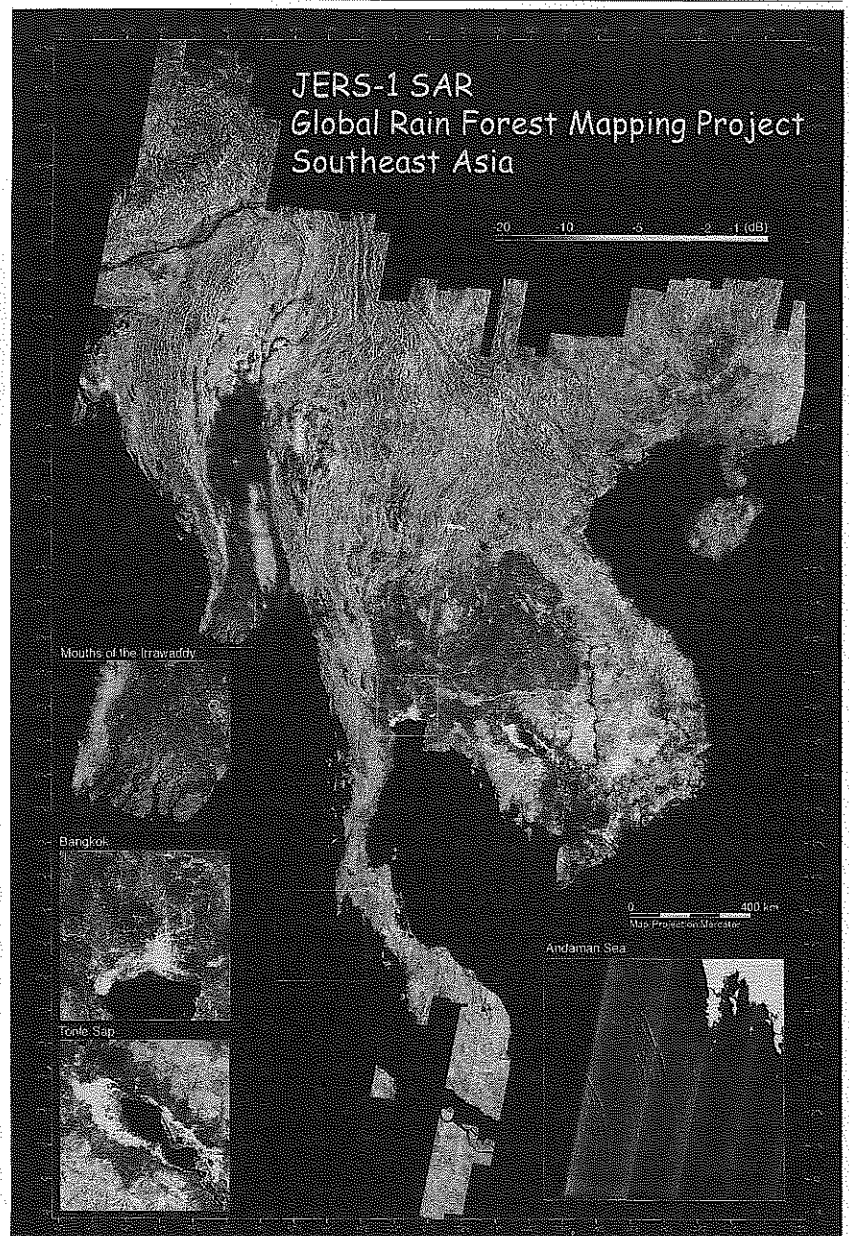


図1 JERS-1 SAR グローバル熱帯雨林マッピング・プロジェクト東南アジア・モザイク画像 (インドユーラシア・プレート境界における衝突で東に押し出されたインドシナ半島のミャンマー・アラカン山脈および北部ベトナムの断層がよく分かる。1997年1-2月観測, NASDA, JPL, JRC EC, 島田政信, 磯口治, 2001)⁴⁾

* 宇宙開発事業団 地球観測システム本部
地球観測データ解析研究センター 主任研究員

タを用いた応用解析事例を紹介し、さらに2003年に打上げが計画されている陸域観測技術衛星(ALOS)計画で期待される将来の応用の発展性について述べる。

2. マイクロ波リモートセンシングの地質調査への応用

2.1 合成開口レーダの特性とデータ処理解析の発展

(1) 衛星からの合成開口レーダ観測

衛星からの合成開口レーダによるリモートセンシング⁵⁾は、センサ・パラメータ(観測波長、偏波、オフナディア角など)の多様化と新たなデータ処理解析技術の実証によって、1990年代に格段の進歩を遂げた。この10年間には、宇宙開発事業団(NASDA)と通商産業省(現経済産業省)の共同開発衛星JERS-1を始め、ヨーロッパ宇宙機関(ESA)のヨーロッパ地球観測衛星(ERS-1, -2)、カナダ宇宙機関(CSA)のRADARSATが長期間継続的な観測データを取得し、データの一般提供が始まり、誰でも利用できるようになった。

一方、次世代の観測精度向上のために新たなセンサの観測実験が、米国航空宇宙局(NASA)のシャトル搭載画像レーダSIR-A, B, Cや日米加などの航空機搭載合成開口レーダにより盛んに行われてきた。

(2) 後方散乱強度情報の利用

合成開口レーダの観測データは、レーダからの送信波が観測対象により散乱されレーダに戻り受信されるが、その後方散乱強度の空間分布画像から、地質構造、活断層などの地形や景観を判読し利用されてきた。

特にJERS-1のSARでは、Lバンドの観測周波数帯(中心周波数1.275 GHz、波長にして約24 cm)を選定し、大気中の水蒸気、雲、降雨などによる減衰を受け難く、また、地表を覆う植生層を透過して地表面まで達する特性を利用し、光学センサでは不可能であった植生層の下にある地表面の地形や景観を反映した空間情報を得ることができる。

後方散乱波には、地表面からの表面散乱成分、森林の樹冠部など電波を透過する土地被覆層内部の多重散乱による体積散乱成分、および森林の幹などと地表面の相互作用(2回反射)成分が含まれている。これらを分離して地表面の情報を得るためには、透過性の高い比較的低い周波数のL(0.390~1.550 GHz)やPバンド(0.225~0.390 GHz)などを用いるか、多周波観測データの組み合わせや散乱モデルによって土地被覆層の成分を除去する必要がある。

さらに、表面散乱成分を決める要素として、地表面を構成する物質の電気的な特性(岩石、土砂、土壌水分、密度、温度などの組成や物理特性による誘電率)と表面形状、垂直・水平の立体構造や表面粗度のような幾何学的な特性がある。これらを分離して地表面を構成する物質そのものの特性を得るためには、他のデータやモデルを併用して補正を行うか、幾何学的な特性に感度の高い偏波情報を利用する方法がある。

(3) 位相情報の利用

この10年、衛星からの観測データ処理解析研究によって、これまで主に利用されてきた後方散乱強度画像の判読に加えて、干渉SAR処理(SARインターフェロメトリー)^{2),3),6),7)}による位相計測を用いた標高計測、および2回の観測時間間の標高変動による位相差分から地殻変動量を抽出する処理解析手法が開発・実証されてきた。

また、位相差情報だけでなく2つの画像データのもつ位相の間で相関をとると、時間経過に伴いコヒーレンスの低下が見られるが、これを情報として利用し後方散乱強度画像と併用することによって、土地被覆分類の精度向上が期待されている。コヒーレンスの低下の定量的評価は今後の研究によるところであるが、植生の成長、植林・再植林・伐採、森林火災や降雨、雪氷・湖沼・凍土の融解、流量などによる土壌水分量の時間変化が考えられる。

(4) 偏波情報の利用

多偏波観測(ポラリメトリー)⁷⁾には、水平(H)・垂直(V)の両偏波での送信と受信が可能な合成開口レーダを用いる。JERS-1とRADARSATのSARは送受ともに水平偏波(HH)、ERS-1, 2のSARは送受ともに垂直偏波(VV)を用いたが、ALOSのPALSARでは水平送受(HH)、垂直送受(VV)の偏波切り替え観測モードに加えて、4つの送受偏波組み合わせ全て(HH/HV/VH/VV)同時に観測するフル・ポラリメトリー観測モードをもつ。4偏波観測データを用いると、水平(HH)・垂直(VV)偏波による地表面反射率の入射角特性、森林の幹のような垂直な構造に対して透過性の高い水平(HH)偏波、樹冠部のように完全拡散散乱により直行偏波成分(HV/VH)が顕著になることなど、偏波による特徴を利用した土地被覆分類精度の向上が期待される。また、4偏波観測データから、任意の送受信偏波の受信電力が算出可能で、奇数回反射、偶数回反射、完全拡散散乱に分離可能である。

2.2 地質調査への応用

地質調査はもとより、観測データ、判読の鍵となる知識データベース、モデル計算など総合科学を駆使して行う、未知の領域の探査といえよう。地球から570~800 kmも離れた地球観測衛星軌道からのリモートセンシングの意義は、広大な森林や砂漠など人間が足を踏み入れにくい未開発地の広域地質構造、地理的な状況を鳥瞰し概査することにより、開発可能性の評価、効果的な開発へのアプローチを探り出すことにある。

SAR画像の解析⁸⁾には、主に後方散乱強度画像が用いられ、石油探査などに重要な情報となる褶曲構造や断層面などの地表面に現われた地質構造のリニアメント(地下の現象を反映すると思われる線状の地形特徴)の抽出、岩相の推定に用いられる岩石の種類によって異なる侵食に対する抵抗力が反映される斜面の傾斜や形状、地形テクスチャの判読、砂漠などの地形・地質やその成因に関する情報が得られる空間的に周期的な配列をする砂丘の地形解析などがある。また、水系パターンや植生分布も間接的に岩相識別に役立つ情報となる。

また、多時期観測画像の差分には、植生被覆や土壌水分量の季節変化や降水等の気象・気候変化が反映されているので、これによって植生被覆や地表面状態の分類が可能となる。乾燥地の表土の電波透過性を利用した地表面下の地形抽出も、表土層下の河床や地形構造からの散乱波が減衰されずに受信されることによる¹⁰⁾。

SAR インターフェロメトリーは、干渉処理法でレーダ受信波の位相情報の干渉処理によって一波長以下 (cm オーダー) の距離精度で距離変化分の抽出が可能となる。二回の観測間の火山活動による隆起・陥没などの山体変化、地震による活断層面のずれなどの地殻変動、地下水の汲み上げや地下工事による都市域の地盤沈下、氷河の変動などの解析に利用できる。

3. 応用事例と今後の可能性

3.1 応用事例

SAR 画像の地質調査への応用事例を紹介する。

(1) インドネシア・カリマンタンにおける地質構造解析
 インドネシア カリマンタン東部のクタイ堆積盆は、東南アジアの代表的な産油堆積盆の一つであるが、図2はその北部に位置する褶曲帯北部の JERS-1 SAR 画像および地質断面図である。画像から数多くのストライク・リッジ、ベディング・スロープ、リニアメントを抽出でき、詳細な地質構造解析ができた。この地域の堆積層厚、基盤深度から質の良い貯留岩の発達する可能性があり、石油胚胎ポテンシャルの高い地域の評価が行われた (ERSDAC)^{11),21)}。

(2) 中国タクラマカン砂漠の地下河床と砂丘の解析
 中国タクラマカン砂漠北部のタリム盆地ホタン川とヤルカント川下流域は、河川流域の農地灌漑など人間活動に伴

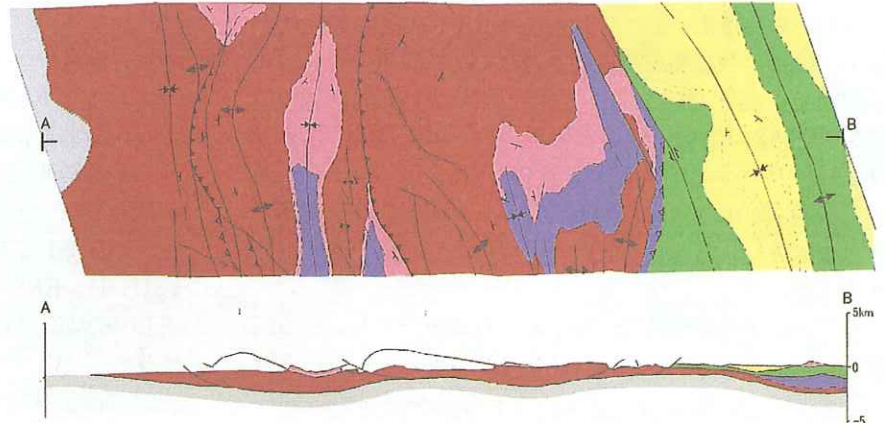
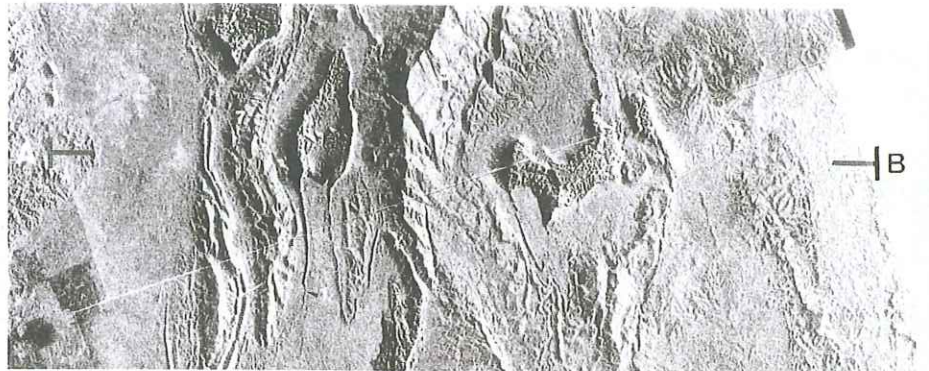


図2 インドネシア カリマンタン東部 クタイ堆積盆北部の褶曲帯北部の SAR 画像および地質断面図 ((財)資源・環境観測解析センター (ERSDAC) 丸山裕一, 塚田誠, 1999)¹¹⁾

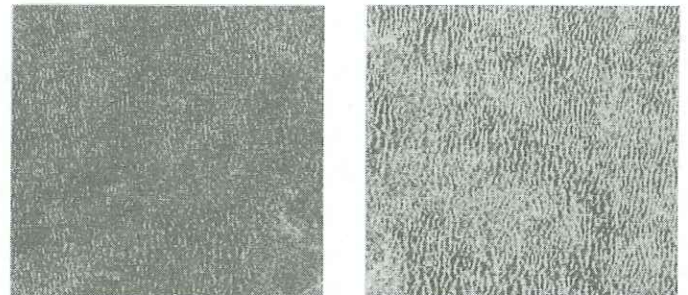


図4 中国タクラマカン砂漠 (ホタンの北 30 km) 線状砂丘の SAR 画像 (6.4 km 四方) (a): JERS-1 SAR (1993 年 12 月 7 日観測) (b): ERS-1 AMI (1992 年 9 月 4 日観測) (ムハタルチョン, 2000)¹³⁾

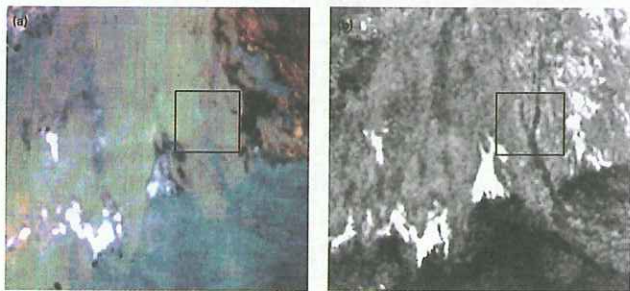


図3 中国タクラマカン砂漠の JERS-1 OPS および SAR 画像
 左図: OPS フォールスカラー画像 (R, G, B=3, 2, 1, 1993 年 9 月 19 日観測), 右図: SAR 画像 (1993 年 7 月 28 日観測) (ムハタルチョン, 五十嵐保, 1999)¹²⁾

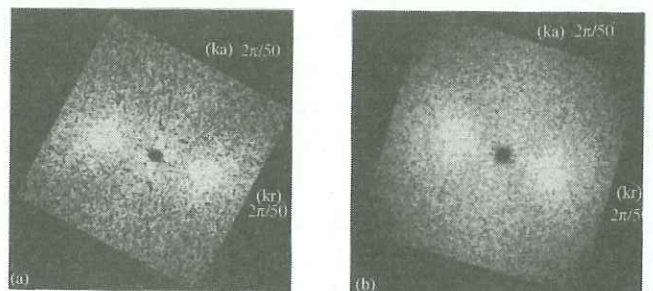


図5 線状砂丘の二次元波数スペクトル図 ((a), (b)はそれぞれ図4の(a), (b)から求めた。kr, ka はアジマス方向, レンジ方向に対応する波数軸で線状砂丘の間隔と方向が分かる。) (ムハタルチョン, 2000)¹³⁾

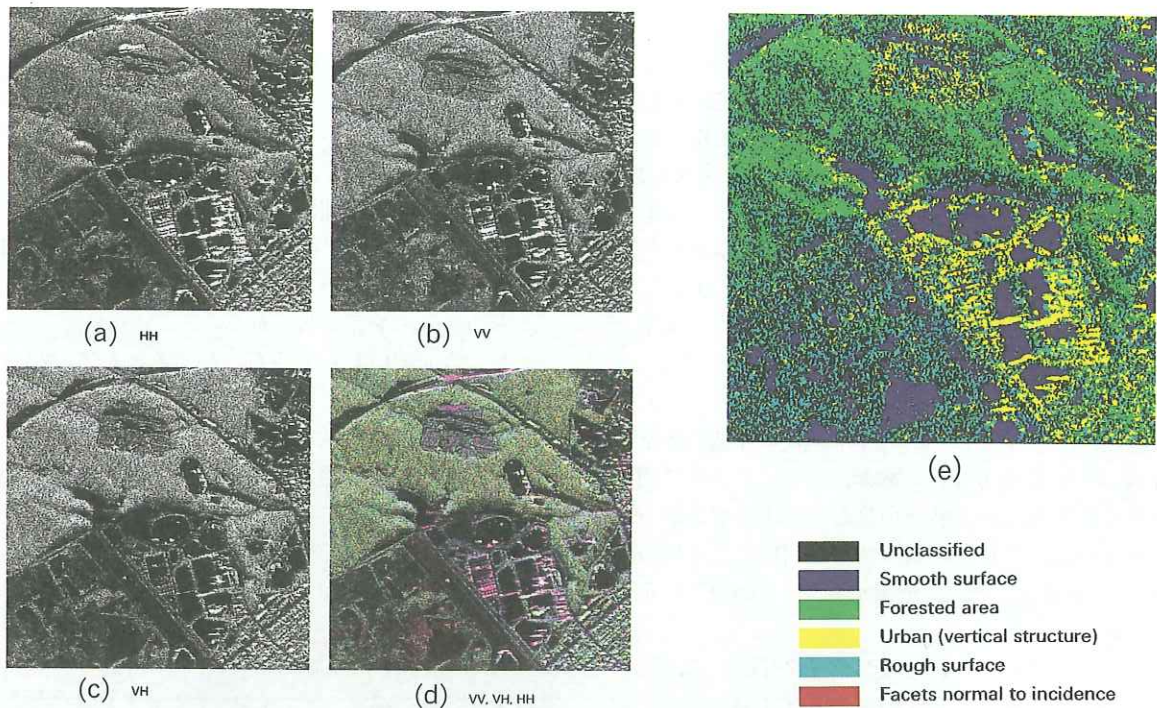


図6 PI-SARの多偏波観測 SAR 画像(北海道 苫小牧, 1999年7月14日観測) (a) HH: 水平偏波送受データ (b) VV: 垂直偏波送受データ (c) VH: 垂直偏波送信・水平偏波受信データ (d) R, G, B=VV, VH, HH: カラー合成画像 (e) モデルに基づく分類画像(分類カテゴリーは、未分類, 滑らかな表面, 森林, 市街地, 粗い表面, 送信波の入射方向に鉛直面の6種類) (ムハタルチョン, 2000)¹⁴⁾

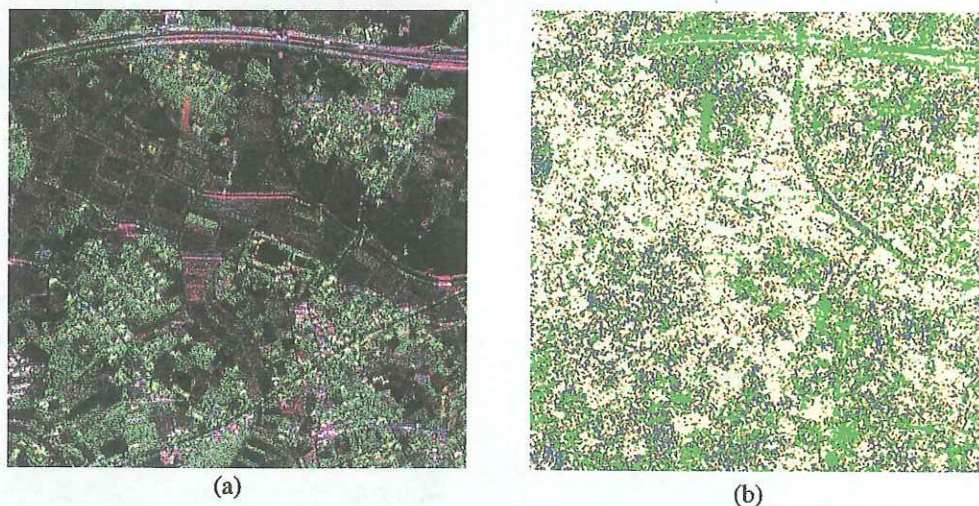


図7 PI-SARの多偏波観測 SAR 画像(つくば, 1997年9月30日観測) (a) R, G, B=VV, VH, HH: カラー合成画像 (b) マルチ・ピクセル・ミューラー・マトリックスに基づく分類画像(分類カテゴリーは、未分類, 奇数回反射, 偶数回反射, 拡散散乱の4種類) (ムハタルチョン, 1999)¹⁶⁾

う河川流域の植生変化や塩害による土壌荒廃などの環境変化がみられる。図3は、この地域の JERS-1 光学センサ (OPS) 画像(左)と SAR 画像(右)を比較したものである。

これらの画像中央に矩形で囲んだ領域を比較すると、SAR 画像では、光学センサでは見られなかった砂に埋もれた河床が暗い筋状に伸びていることが分かる。また、両画像で白く見える領域は、塩害が発生し、地表面の粗度が大きくなり散乱強度が強くなったものと思われる¹²⁾。

一方、線状砂丘の空間的な構造は地上風による砂の輸送が支配的な生因と考えられる。図4は、ホタンの北に位置する領域の SAR 画像にみられる線状砂丘である。左図(a)は JERS-1 SAR, 右図(b)は ERS-1 AMI の画像である。これらの図から後方散乱の変化を用い砂丘の高さが得られる。また、図5(a), (b)は、それぞれ図4(a), (b)の画像をファースト・フーリエ変換し、波数スペクトルを抽出したものである。この図から卓越する風向と砂丘配列

の間隔が分かる¹³⁾。

(3) 多偏波観測による土地被覆分類

多偏波観測の例として航空機 SAR による観測実験の観測データを示す。NASDA が開発した L バンド SAR と郵政省 (現総務省) 通信総合研究所が開発した X バンド SAR を搭載した航空機搭載 SAR (PI-SAR) は、多周波・多偏波観測実験のために共同開発された。図 6 は北海道苫小牧を対象地域とした観測データで、(a) 水平偏波送受 (HH)、(b) 垂直偏波送受 (VV)、および (c) 垂直偏波送信・水平偏波受信 (VH) の各観測データとこれらの観測データを、赤 (R)、緑 (G)、青 (B)=VV, VH, HH で色付けし、カラー合成画像 (d) を作成した¹⁴⁾。この画像から、拡散散乱により VH 成分が大となる森林で緑が、垂直・水平の幾何学的な反射面を構成する人工構造物がある市街地で紫が卓越することが分かる。これらの偏波情報を利用した土地被覆分類図を (e) に示す。この他に土壌水分、地表面粗度推定の研究も行われている¹⁵⁾。

また、つくばを対象地域とした観測データ (図 7) は、R, G, B=VV, VH, HH カラー合成画像 (a) と 4 偏波データからミューラー・マトリックスを計算し、各偏波の受信電力を求め、奇数回反射、偶数回反射、拡散散乱の分類図 (b) を作成したものである¹⁶⁾。

3.2 ALOS の可能性

我が国の次期陸域観測衛星として、2003 年に打上げが計画されている陸域観測技術衛星 (ALOS) は、1992~98 年に運用された JERS-1 と 1996~97 年に運用された地球観測プラットフォーム技術衛星 (ADEOS) 「みどり」の陸域観測を継承し発展させることを目的に、地図作成、地域観測、災害状況把握、資源探査を主な利用分野として開発中の衛星である^{17)~19)}。

これに搭載される地球観測センサは、マイクロ波センサのフェーズド・アレイ方式 L バンド合成開口レーダ (PAL SAR)²⁰⁾、光学センサのパンクロマチック立体視センサ (PRISM) および高性能可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2) である。

PALSAR の特徴は、同時期に世界で計画されている SAR 衛星の中で唯一の L バンド SAR であり、資源探査²¹⁾、インターフェロメトリーによる地殻変動、大気中の二酸化炭素吸収・排出を規定する京都議定書に対応した植林・再植林・伐採などの活動の監視に期待がもたれている。また、新たに水平・垂直の送受偏波の切り替え、同時観測が可能で多偏波観測機能を持ち、オフナディア角、空間分解能も可変である。これらセンサ・パラメータの組み合わせを選択することによって、地表面の散乱特性の違いを判別し、植生・雪氷などの土地被覆、地表面の粗度・地形・人工構造物などの空間的な構造、誘電特性の異なる地表の岩相や土壌などの物性・土壌水分含有量・凍結・融解などの判別に役立つ情報の質的向上が見込まれる。

JERS-1 の打上げ前の 1984~85 年には NASDA と ERSDAC の共同研究により、カナダの SAR-580 を用いた航空機実験が行われ、入射角の異なったデータの重ね合わせ

と地質判読における入射方向の評価が行われ、JERS-1 SAR の観測データ解析に役立てられた。

合成開口レーダの観測は、軌道に直行方向に斜め下に電波を発射する。したがってレーダから発射された電波は、山岳地帯などでは、電波が照射される斜面からは反射波が帰ってくるが、反対側の斜面が急な場合陰になる。極軌道上からの観測では、北行軌道と南行軌道がある。ALOS では、この二つの軌道からの観測データを利用することにより、影の部分の情報が得られる。

また、合成開口レーダ特有のひずみとして、小さいオフナディア角で山岳部を観測する場合、山頂部が画像上で衛星方向への倒れ込み重なるひずみ、フォア・ショートニングとレイ・オーバー現象がある。このひずみを補正し地図と重ね合わせるためには、デジタル標高モデル (DEM) を用いた精密幾何補正を行い、オルソ画像を得ることが、必要となる。日本では、国土地理院が発行している 50 m メッシュの DEM があるので、これを利用することが可能である。ALOS では、PALSAR のインターフェロメトリー、または PRISM のスリー・ライン・スキャナ立体視観測画像を利用した DEM の作成が可能となり、既存の DEM がない地域においても PALSAR の精密幾何補正が可能となる。

マルチ・センサの利用方法には上記のほか、合成開口レーダのもつ地表面と土地被覆層の表面および体積散乱メカニズムに由来する空間情報と光学センサの土地被覆表面からの反射光・赤外放射に由来する分光放射輝度スペクトル情報の両データを複合的に利用するデータ・フュージョン技術により、土地被覆分類精度の向上が可能である。

4. おわりに

マイクロ波リモートセンシングによる地質調査について、衛星と航空機の観測データを用いた解析の有用性と今後期待される実利用へ向けての可能性について概要を述べた。

JERS-1 など観測データの応用事例にみる成果から、実利用の可能性が検証できたといえよう。

今後次世代の ALOS が、国内外の資源探査・管理、災害管理、環境監視、農林水産、地域開発、地理情報利用、地球科学研究など陸域応用に有用な情報が提供できるよう、SAR データ処理解析手法の高度化を図る計画である^{17)~22)}。

参考文献

- 1) (財)資源探査用観測システム研究機構：平成 10 年度石油資源遠隔探知技術研究開発 (資源探査用観測システムの研究開発) 後期運用総合評価報告書、平成 11 年 3 月。
- 2) Masanobu Shimada (editor): JERS-1 Science Program '99 PI Reports, Global Forest Monitoring and SAR Interferometry, EORC NASDA, pp. 1~189, March 1999.
- 3) EORC NASDA: JERS-1 Earth View, 1999.
- 4) Masanobu Shimada and Osamu Isoguchi: JERS-1 SAR Mosaics of Southeast Asia Using Calibrated Path Images, submitted to International Journal of Remote Sensing, 2001.
- 5) Fawwaz T. Ulaby, Richard K. Moore and Adrian K. Fung:

- Active Microwave Sensing of Land, Microwave Remote Sensing Active and Passive, Vol. III, From Theory to Applications, Chapter 21, pp. 1797~1999, Artec House, Inc., 1986.
- 6) 若林裕之: 干渉合成開口レーダと地球観測衛星 ALOS 搭載 PALSAR での可能性, 光学, 28 巻, 7 号, pp. 378~383, 1999.
 - 7) 若林裕之: 合成開口レーダ (SAR) データの特性とその利用, 空間情報統合化の技術, オーム社, 2001 年 3 月 (発行予定).
 - 8) (財)資源・環境観測解析センター: 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ①, 資源リモートセンシング概論, pp. 40~49, 平成 7 年 3 月.
 - 9) Takeo Tadono, Toshio Koike, Jiancheng Shi, Yongjian Ding, Xianzhang, Chen, Shaoling Wang and Meixue Yang: Development of an Algorithm for Soil Moisture Mapping Based on Single-Parameter SAR Images in Permafrost Regions Including the Effect of Surface Roughness, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 29-38, 2000.
 - 10) Fawwaz T. Ulaby, Richard K. Moore and Adrian K. Fung: Introduction, Microwave Remote Sensing Active and Passive, Vol. I, Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry, Chapter 1, pp. 1~60, Addison-Wesley Publishing Company, 1981.
 - 11) (財)資源・環境観測解析センター: 地球資源衛星 1 号 (JERS-1) データ利用成果集, pp. 79~89, 1999 年 3 月.
 - 12) ムハタルチョン, 五十嵐保: 衛星データから見た乾燥地域における環境変化—中国のホタン川とヤルカント川下流域を例として—, 沙漠研究, 第 9 巻, 第 2 号, pp. 153~167, 1999.
 - 13) Muhtar Qong: Sand Dune Attributes Estimated from SAR Images, Remote Sensing of Environment, Vol. 74, No. 2, pp. 217~228, 2000.
 - 14) Muhtar Qong, Akhniyaz Nurmuhhammad, Takeo Tadono, Hiroyuki Wakabayashi, Masanobu Shimada and Tamotsu Igarashi: Preliminary results from the model-based classification of polarimetric airborne SAR images, Proceeding of SPIE-Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment II (AE 03), Sendai, Japan, 2000.
 - 15) 田殿武雄, ムハタルチョン, 若林裕之, 島田政信, 小林達治, Jiancheng Shi: 数値散乱モデルと多偏波航空機 SAR を用いた土壌水分・地表面粗度推定に関する検討, 水工学論文集, pp. 265~270, 第 44 巻, 2000.
 - 16) Muhtar Qong, Takeo Tadono, Hiroyuki Wakabayashi and Masanobu Shimada: Mueller Matrix Based Unsupervised Classification of Polarimetric SAR Data, A Report of the ALOS/PALSAR & CRL/NASDA Airborne SAR & SAR Applications Workshop, 98 P 0 A 1-D 0110, pp. 56~57, 1999.
 - 17) 柴崎亮介: 陸域観測技術衛星 (ALOS) の構想とその背景, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 38, No. 2, pp. 4~7, 1999.
 - 18) Tamotsu Igarashi: Capability of ALOS Satellite Remote Sensing Data Utilization, ISTS 2000-1-03 v, 22nd International Symposium on Space Technology and Science, Morioka, Japan, May 28-June 4, 2000.
 - 19) 五十嵐保: ALOS 計画について, 計測自動制御学会第 26 回リモートセンシングシンポジウム前刷集, pp. 45~50, 2000.
 - 20) 若林裕之: PALSAR の機能・性能と利用可能性, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 38, No. 2, pp. 31~38, 1999.
 - 21) 宮崎芳徳, 津 宏治, 丸山裕一: PALSAR データの資源・環境解析への利用, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 38, No. 2, pp. 17~24, 1999.
 - 22) 島田政信: EORC の高次処理アルゴリズムの開発, 校正, 検証および研究構想, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 38, No. 2, pp. 39~42, 1999.

最新技術を用いた地殻変動観測による火山監視： GPS と合成開口レーダー (SAR)

むらかみ 村上¹、まこと 亮¹、とびた 飛田²、にしむら 西村²、みきお 幹男²、たくや 卓也²、やらい 矢来³、ひろし 博司³、はせがわ 長谷川裕之³、なかがわ 中川⁴、ひろゆき 弘之⁴、こあらい 小荒井⁴、まもる 衛⁴、おざわ 小沢慎三郎⁵、ふじわら 智⁵、さとし 智⁹

1. はじめに

火山活動はマグマによって引き起こされるが、マグマは地下に存在するため、その位置や移動の様子を地表から直接観測することはできない。したがって、地震、地殻変動、地球電磁気、重力、表面温度、噴出物、火山ガス成分・温度など、多様な観測を行い、それらを総合してマグマの動きを推定する。マグマが地下で動くと大きな地殻変動が発生するケースが多く、地殻変動観測はマグマの動きを推定するための重要な手段である。地殻変動の観測手法として、最近 GPS (汎地球測位システム) や合成開口レーダー (SAR) など衛星や航空機を用いた手法が登場し、時間的・空間的に高い分解能で測定することが可能となった。これによりマグマなど、地下の力源に関する情報量がこれまでとは比較にならないほど増し、活動のメカニズムをよりよく理解するために貢献している。

2000 年に相次いで噴火した有珠山および三宅島の活動においても、地殻変動データは、噴火の推移を理解するうえで重要な役割を果たした。一方、2001 年 1 月段階で、三宅島では日量数万トンという膨大な火山ガスの噴出が続いているが、島内では微小な収縮が見られるのみである。このように、顕著な地殻変動を伴わない現象があることも再認識させられており、火山のメカニズムを理解するためには総合的な観測体制をとることが重要であることはいまでもない。

ここでは、最近登場した火山活動に伴う地殻変動を監視するための新しい観測技術である GPS と SAR について紹介し、次に、有珠山と三宅島の噴火を例に取りそれらがどのように役立ったか、またどのような限界が明らかになったかについて報告し、地殻変動観測の現状と将来への課題について議論する。

2. GPS 連続観測

我が国で最初に、そしておそらくは世界で最初に構築された GPS の連続観測システム網は、科学技術庁 (当時) 防災科学技術研究所による東海地方の連続観測点網であった。1989 年の手石海丘の海底噴火を起こしたマグマの移動に伴う地殻変動を検出したのは、同観測網のめざましい成果であり、地殻変動観測における GPS 連続観測の有用性を強く印象づけた。

その後、国土地理院も、東海・南関東地域に 110 点からなる連続観測点網を構築して 1994 年の春から運用を開始した。その後、何度かの増強を経て現在では約 1000 点規模の観測網が全国を覆っている。その間、北海道東方沖地震、三陸はるか沖地震、兵庫県南部地震など、大地震に伴う地殻変動を次々と検出し、GPS による連続地殻変動観測の有用性を実証した。

観測局の外観を図 1 に示す。ステンレス製のタワーは、高さ 5 m で、基盤部は 1 辺が 2 m の立方体のコンクリートで構成されている。タワー内の収納箱に受信機が電話モデムなどの通信制御機器とともに納められている。GPS 観測では、受信機で GPS 衛星から送られてくる電波を常時受信する。大部分の観測局では 30 秒ごとにデータを記録している。

データは電話回線を通じて、茨城県つくば市の国土地理院構内にある中央解析局に転送される。全国から電話回線

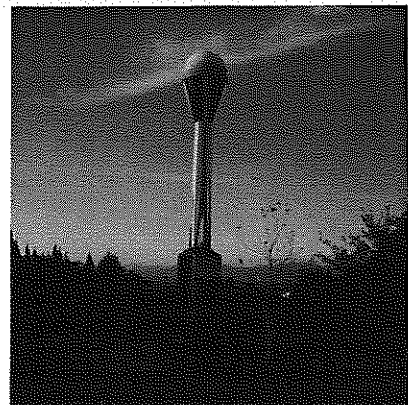


図 1 GPS 連続観測施設の外観

¹⁻⁷ 国土交通省国土地理院地理地殻活動研究センター

⁸ 同測図部

⁹ 文部科学省

を通じて収集した全観測データを一括して集中解析処理を行う。解析には、現在、主としてスイス・ベルン大で開発された Bernese/GPE という GPS 解析ソフトウェアが用いられている。これらのデータの大部分は、インターネットで公開されている (<http://www.gsi.go.jp>) ほか、国内外の研究者に配布、提供されており、さまざまな目的に使用することができる。

GPS 連続観測装置は、活動が活発な火山の周りにも設置されており、2000年に噴火した有珠山周辺ならびに三宅島、神津島、新島などの伊豆諸島にも噴火前からの観測点稼働していた。これらの観測点では噴火に伴う大きな地殻変動が観測された。GPSによって明らかとなったこれらの成果については、3章で説明するリモートセンシングによる成果とともに、それぞれの噴火の理解にどのように役立ったかについて、4章以降で紹介する。

3. 衛星および航空機による合成開口レーダー観測

合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar : SAR) は、人工衛星や航空機に搭載したセンサーから対象物を遠隔測定するリモートセンシング技術である。発射されたマイクロ波の地上からの反射を数値的に解析処理し、数 m から数 10 m の大きさの画素ごとに強度と位相を測定する。観測を繰り返しデータを比較することによって、対象物の位置の時間的な変化をとらえることができる。

一般に 10 m 程度より変動が大きい場合には、画像上の位置の変化として、地殻変動をとらえることが可能である。変動が小さい場合でも、変動前後の 2 つの観測について、画素ごとに位相の差をとる干渉 SAR という手法を用いて、1 cm 程度の精度で地殻変動を明らかにすることができる。衛星搭載のセンサーを利用する場合、1 回の観測で 100 km × 100 km 程度の広い範囲にわたって、数 10 m から数 m の画素ごとに 1 点という高解像度で測定がなされる。航空機の場合は、使用波長にもよるが、通常、撮影範囲は衛星より狭いものの分解能は高い。

SAR は、定期的に広い範囲を測定するのに特に適しており、地表で発生しているさまざまな地殻変動を面的に把握できることに最大の特徴がある。2章で紹介したように、我が国の GPS 連続観測網は 1,000 点規模となったが、現在の平均的な点間距離は約 25 km であり、我が国で発生している地殻変動を総合的に理解するためには、GPS の空間的な配点密度は必ずしも満足できるものではない。合成開口レーダーによる地殻変動検出手法は、高い空間密度で地殻変動を面的にとらえる手段を提供し、特に火山の場合のように比較的狭い地域に集中して地殻変動が発生するような場合に威力を発揮する (資源観測解析センター編, 1992)。

マイクロ波は、雲や霧などを通過するので、天候に左右されることなく観測ができる。また、合成開口レーダーは、太陽など他の光源からの輻射や反射を受信するのではなく、マイクロ波を自ら送信する能動的センサーであるため

に、目的に最適なパラメーター (波長、偏波特性など) を比較的自由に選択することができる。このため、昼夜の別なく観測が可能である。人工衛星搭載の合成開口レーダーは、軌道がカバーする地球のすべての表面を均等な密度で、広大な面積を定期的に観測をすることができるという大きな長所を有している。

合成開口レーダーの信号を解析して得られるのは、地上に一定間隔で並ぶ地点ごとに対応した反射波の強度と位相の 2 種類の情報である。この 2 種類の情報のうち、よく利用されるのは反射波の強度である。反射強度を画像化すると、あたかも空中写真のように地表の起伏や構造物の分布等が識別できる。しかし、画像の分解能は最良でも 10 m 程度であって、数 m よりはるかに小さい地殻変動の情報を反射強度画像から抽出することは一般には難しい。しかしながら、2000年有珠山噴火では、潜在溶岩ドームの形成に伴う地殻変動の大きさが数 10 m に達したため、後で紹介するように変動前後の強度画像の比較によって地殻変動が計測できた。ただし、有珠山のような数 10 m 規模の変動は例外的であって、典型的な大きさである数 m 以内の地殻変動観測には、次に述べるように、位相情報を利用する干渉 SAR 技術により変動を計測する。

合成開口レーダーは基本的にマイクロ波の波動を観測しているため画素ごとに位相の情報ももっている。位相は、衛星と地表間の電波の往復距離を波長で割ったものから、その整数部分を引いた量である。位相は、ピクセルごとにほとんどランダムに分布するため、画像化しても、それだけでは意味のある情報は得られない。しかし、位相は、衛星と地上のターゲットとの間の距離に関する情報を含んでおり、これを利用することができれば、数 cm から 1 m 程度であるレーダー波長を物差しを目盛りとして用いる高精度な距離計測手段が誕生する。干渉 SAR 技術は、次に紹介するように非常に巧妙に反射波の位相情報を利用し、地殻変動の測定を可能としたものである。

干渉 SAR は、NASA のジェット推進研究所で先駆的な研究が開始された (Gabriel et al., 1989) 1)。その後、フランスの Massonnet 等がカリフォルニアランダース地震 (1992) の地殻変動を面的に明らかにした (Massonnet et al., 1993) 2) ことから、にわかに注目を集めるようになった。

合成開口レーダーの位相は送信波と反射波の位相の差として定義され、マイクロ波が伝播したアンテナと地表の間の往復距離を波長で割った量から整数部分を取り除いた端数 (あまり) である。この量は、距離の情報としては整数部分が欠落し端数分だけの情報であるため、これを単純に画像化しても、意味のある情報を引き出すことはできない。

そこで、同一のターゲットに対して、同一の軌道から時期を変えて 2 回のレーダー観測を実施し、それぞれの位相を比較することを考える。同一の軌道から同一のターゲットを観測しているから、2 回の観測の間でターゲットの位置が変化すれば、位相の変化としてとらえることができる。ターゲットが地表であれば、地上の位置の変化、すなわち地殻変動が位相の変化として計測できる。このようにして、2 回の観測を比較し位相情報の変化を計測して地殻変動を

観測する技術が干渉 SAR である。

合成開口レーダーのデータを用いて地殻変動を計測するためには、同一地域を撮影した時期の異なる画像について画素ごとに、同じ地点を特定し、それらの位相差を求める。位相が干渉するとは、位相差に一定の規則性、統一性が保たれており、画像化した場合に何らかのパターンが読みとれることをいうが、そのためには、2回の観測の軌道間距離が一定値以下であることに加え、観測時の地表の反射条件が等しいことが必要である。一般には撮影された全てのデータが利用可能とは限らず、一定の条件を満たし、干渉するものだけが、利用される。使用する電波の波長により、干渉の条件が大幅に異なることが経験上知られている。JERS-1はLバンド(波長約23.5cm)で運用されたが、植生等の影響を受けることが少なく、ほとんどの場合、画像の全域にわたって良好な干渉が得られる。1998年10月に運用停止するまで約6年半に蓄積されたJERS-1のデータは、日本を含め世界各地で発生した地表の変動を記録しており、地殻変動研究の貴重な資源となっている。しかし、蓄積されているデータ量が膨大であるため、解析はまだ十分進んでいない。今後、解析が進めば、次々と興味深い地殻変動の事例が見つかる可能性がある。

位相の値を段階に分けて彩色し、色の縞模様として位相の変化を表した画像を干渉図と呼んでいる。干渉図に現れる縞模様は、地殻変動のほか、

- (a) 利用した2つの軌道が完全に同一でないことから生じる、規則的な縞模様
- (b) 地上の対象物の標高を反映する、等高線状の縞模様

が含まれている。したがって、地殻変動を検出するためには、2回の観測の位相差を画像化した生の干渉図から、これらの縞模様を除去する必要がある。(a)に関しては、軌道情報と地上のターゲットの位置から、幾何学的な考察によって縞模様のパターンが厳密に再現できるので、これを利用して補正する。また、(b)についても、対象となっている地表のデジタル標高データがあれば、軌道間距離を含む衛星と地表の位置関係の幾何学を考慮した計算によって補正が可能である。

なお、(b)を積極的に利用すれば、この間に地殻変動は生じていないという仮定の下に、干渉画像の縞模様から高精度に土地の起伏および標高を知ることできる。2000年三宅島噴火では、噴煙等の影響を受けることなく、機上の2つのアンテナから同時に観測したデータに手法を適用し、詳細な火口内の地形が把握された(本稿の4章を参照)。

また、同様な応用例の一つが2000年に行われたスペースシャトルによるSRTMミッションであり、シャトルに搭載した合成開口レーダーにより観測がなされた。これを干渉処理によって全世界の陸域の幾何学的標高を測定してデータベースにまとめる解析が進行中である。

一方、地殻変動を知りたい場合は、標高によるフリンジ(縞模様)は、地殻変動をマスクするノイズであるという立場に立つので、地形による縞模様を取り除くことが必要である。我が国では、国土地理院の詳細な50mメッシュの標

高データが利用できるため、実用上の問題はない。なお、将来はシャトルミッションのSRTMのデータもこの目的に利用できる可能性がある。

通産省と宇宙開発事業団が1992年に打ち上げ、1998年10月まで運用された地球資源衛星(JERS-1)の場合、通常高度約568kmの軌道を北から南へ向かいながら、波長23.5cmのLバンドのマイクロ波を伏角55度で被撮影地の東方より放射し、地表からの反射波を受信した。設計寿命は打ち上げ後2年であったが、それをはるかに越えて6年半にわたって運用され、貴重なデータが蓄積された。アンテナの不調により設計当初より小さい電力で運用されたため、多少S/Nが落ちたが、結果的に寿命が延びるというメリットがもたらされたと考えられている。

実際に大きな地殻変動を観測した画像を例にとり、干渉SARの観測結果である干渉図の見方を説明する。

1995年1月17日に淡路島および神戸市周辺に壊滅的な被害をもたらした兵庫県南部地震(M7.2)の前後で取得されたJERS-1のデータ処理を行い、この地震に伴って発生した地殻変動を明瞭に示す干渉図を得た(図2)(村上他、1995)⁹⁾。これは、地震前の1992年9月9日に測定した位相と、地震後の1995年2月6日の測定した位相の差をとり作成したものである。

この図において、色彩が変化する縞模様が見られるが、これらの縞が地殻変動の発生パターンを示している。画像の縞模様は周期的に繰り返す色彩変化から成り立っている。同じ色彩をつないでできる曲線上では、衛星から見た距離の変化量が同じである。また、一本別の同じ色を持つ縞の間では、距離の変化量(すなわち地殻変動の大きさ)が11.75cm(マイクロ波の半波長)だけ異なっている。このように、干渉図中の縞模様を、地殻変動の等高線と見ることができる。

干渉図のつながった縞は、上に述べたように「等地殻変動線」であるので、狭い範囲内にこれが密集している場所ほど大きな地殻変動が生じている地域である。図中において、縞は、神戸市の海岸沿いおよび淡路島北部において明瞭に現われており、これらの地域において発生した大きな地殻変動の存在を確認できる。地殻変動は大きいところでは、数10cmに達している。これまで、GPSや水準測量等、従来の測地手法を単独で利用した場合には、再現が難しかった詳細に至るまで断層の走向の様子を明らかにすることができた。干渉合成開口レーダーを用いた結果は、地質学的に従来から知られている断層が動いたことを強く示唆するものとなっている。また、断層面上のすべり分布の量的な推定も可能である。

合成開口レーダーとGPSの大きな違いは、GPSが地殻変動の東西、南北、および上下の3成分の変動の全てを測定するのに対し、合成開口レーダーは、衛星とターゲット間の距離の変化しかわからないということであるが、逆に合成開口レーダーは、高い空間分解能で地殻変動の面的な分布を明らかにするため、弾性論に基づくインバージョンと呼ばれる推定手法などの適当な解析計算手段を用いて、地震の震源断層や火山のマグマの位置の詳細なモデルを構

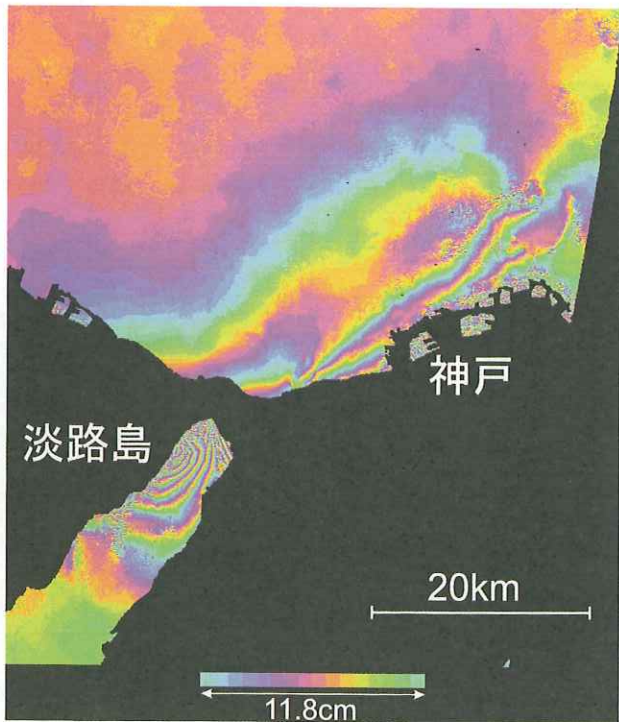


図2 JERS-1の干渉SARが捉えた1995年1月17日兵庫県南部地震に伴う地殻変動

築することができる。また、断層の位置や大きさなどモデルに関するパラメータを推定する過程で、上下地殻変動と水平地殻変動をそれぞれ推定することも可能である。地震や火山活動に伴って発生した地殻変動の解明における合成開口レーダーの有効性は、この例に特有のものではなく、他の多くの地震に伴う地殻変動や余効変動（地震後にゆっくり続く変動）も同様に検出され、発震メカニズム等の推定に利用されている。

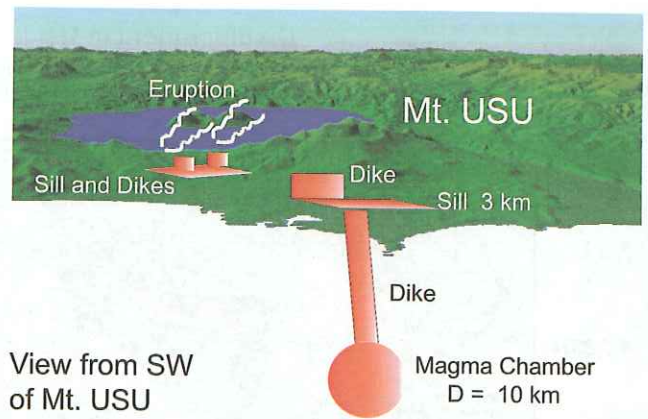
3. 2000年有珠山噴火に伴う地殻変動観測

2000年有珠山噴火に際し、地殻変動の監視を目的として、GPS、測距、測角、写真測量等を用いてさまざまな観測が行われた。その中でも、地殻変動検出に特に効果を高めたGPSと合成開口レーダー観測を取り上げ、得られた結果とそれらに基づいて推定したマグマ挙動のモデルを紹介する。

2000年有珠山噴火は、3月27日の有珠山周辺の地震数の増加とともに始まった。

有珠山周辺では、山頂から約5 kmの距離に山体を取り巻くように3点のGPS連続観測装置が配置されていた。国土地理院は通常24時間ごとに位置の解析計算を実施しているが、地震の増加に伴い地殻変動監視を強化するため、6時間分のデータを用いて3時間ごとに位置を計算し、変動を追跡する緊急的な解析を開始した。その結果、27日夕刻に地震数が増加したのとほぼ同時に、観測点間の距離の伸びが始まったことが確認された。この伸びは31日ころまで継続した後、一転して急激な短縮を始めた。この急激な

Magma Model of the 2000 USU Eruption



View from SW of Mt. USU

図3 2000年有珠山噴火のマグマ活動の模式図（有珠山の南西の噴火湾上空から有珠山および洞爺湖の方向をみた図）。詳細は本文を参照されたい。

縮みが続いていた31日に、最初の噴火が発生している。

他機関によるものを含め、観測結果等を総合して推定しているマグマの挙動は次のとおりである。

- 1) マグマは27日から活動を開始し、有珠山のほぼ直下の深さ約10 kmにあると考えられるマグマ溜まりから地震を発生させながら、29日ころまで上昇し、マグマの通り道が形成された。
- 2) その後31日ころまで山頂地下の2~3 km浅いところにマグマが水平のシート状に貫入した。
- 3) 最後に山麓西側に出口を求めて上昇し、マグマは有珠山西麓の浅い場所に到達し、西山西と金比羅山近くで噴火した。マグマは豊富な地下水と接触して水蒸気爆発が継続している。また、マグマの本体は地表までは到達しなかったが、地下の浅いところで潜在溶岩ドームが形成され、山麓西側では60 m以上に達する隆起に代表される大きな地殻変動が生じた。

それらをまとめたものが、図3である。GPSで観測された最初の伸びは、マグマ溜まりからのマグマの上昇に対応し、その後の短縮は、マグマ溜まりの収縮と山頂直下のマグマのシートの形成に対応していると考えられる。

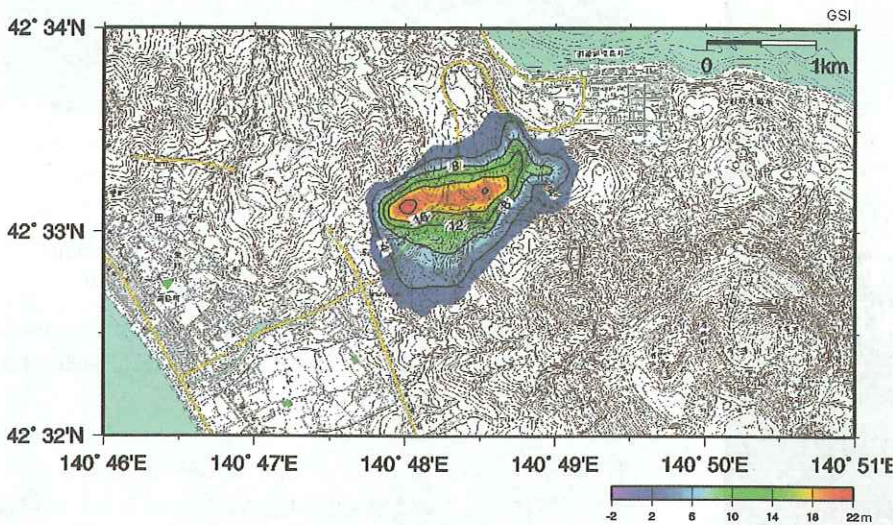
このような大きな地殻変動も、4月上旬以降はほぼ収まったが、噴火後に増設したGPS観測点や水準測量などの結果を総合すると、現在は、有珠山山頂の西側を中心とした収縮が進行しており、今回の活動で浅いところまで上がったマグマが現在は収縮の過程を歩んでいるようである。このような収縮は今回の噴火に限ったものではなく、前回の1977噴火の後にも同様の収縮が長期間継続していたことが次に述べるように合成開口レーダーの観測からも確認されている。

一方、リモートセンシング技術を利用して実施した観測および解析は、RADARSATの合成開口レーダーの画像マッチングによる2000年噴火に伴う地殻変動検出を行った。また、JERS-1合成開口レーダー干渉手法を利用して、今回の噴火以前（1992~1998）の地殻変動の検出も実施した。

今回の有珠山噴火に伴う地殻変動を観測するために利用可能な合成開口レーダーを搭載した衛星は、CバンドによるERS-1、ERS-2、RADARSATであった。波長の短いC

Displacement in Up (m)

RADARSAT F3 2000/04/05-2000/04/29
 RADARSAT F4 2000/04/02-2000/04/26 Dynamic model



バンドは、植生、冠雪等により干渉性が著しく劣化することが予想された。宇宙開発事業団によって実際に行われたRADARSATの干渉解析では、伊達市や虻田町の市街地や平野部では、比較的良好に干渉して地殻変動に対応すると思われるフリッジ（縞）が得られたが、地殻変動を最も知りたかった有珠山の山体部においては、植生、地形の急峻さ、地殻変動が大きいこと、積雪などの影響により干渉条件が成立せず、フリッジが得られていない。

今回の噴火において有珠山周辺で発生した地殻変動が大きいため、位相の干渉ではなく、強度画像の地殻変動に伴う位置のずれを精密に計測することによる地殻変動の検出の可能性が期待された。この場合は画像の空間分解能の高さが精度を左右するため、Cバンド合成開口レーダーの高い分解能が有利な条件となる。その結果、数mの精度で、数10mに達する地殻変動を検出することができた。

また、噴火以前の地殻変動を把握するために、波長が長く干渉性のより高いJERS-1の干渉SAR解析により1992~1998間の地殻変動（沈降）の様子を明らかにすることもでき、今回の噴火活動との関連を考察するための重要な情報が得られた。

まず強度画像の精密比較による2000年噴火に伴う地殻変動の検出について紹介する。この方法では、画像強度を航空写真のようにそのまま画像化した強度画像を用いる。ある地点で地殻変動が発生すればその画像上の位置も変化する。この変動がピクセルの大きさと同程度に大きければ、変動前後の画像に写る同一地点の画像上の位置を比較し、ずれの量やその空間的分布を計測することができる（飛田他、2001）⁹⁾。

解析は、ERSとRADARSATのデータを使用して行ったが、ここでは、画像の分解能がより高く、撮影頻度も高かったRADARSATを利用した解析結果を報告する。RADARSATはCバンドのSARを搭載しており、今回はファインモードという高分解能モードで有珠山地域を繰り返

返し撮影した。1ピクセル（画素）の大きさは約5~7mであるが、新しく開発した高精度画像マッチング技術を使えば、約0.1ピクセル単位（0.5~0.7mに相当する）でずれを計測することができる。その結果、数10cmと比較的高い精度で地殻変動計測が可能となった。

この手法では、画像のずれを計測するために、ある一定面積の領域を設定し、その中で画像の相関をとり対応点を探している。したがって、地殻変動が相関をとる領域内において大きく変化する場合には、この領域内の地殻変動の平均値が計測される。そのため、地殻変動パターンが鋭いピークを持つようなものである場合には、ずれが領域内で平滑化されるため、必ずしもピークに対応し

た地殻変動値が得られないことに注意が必要である。

この手法で計測したずれは、南北方向と東西方向と2つの成分を持つが、南北方向は、地殻変動がそのまま測定されるのに対し、東西方向（軌道と直交方向）の画像のずれは、この方向の水平変動と上下変動の両方の影響を受けており、1枚の画像だけから、これら2つを分離することはできない。しかし、異なる方向から撮影した2つのマッチング画像があれば、3次元化の処理を行うことによって、3次元の情報（上下変動、東西変動、南北変動）を取り出すことができる。ほぼ同時期に観測された、2方向からの観測によるデータを利用して、面的にとらえた3次元変動（4月3日に対する4月27日の変動量）のうち、上下方向の変動を示した画像が図4である。隆起量は、最大で約22mであった。レーザープロファイラ等、他の観測方法で測定された

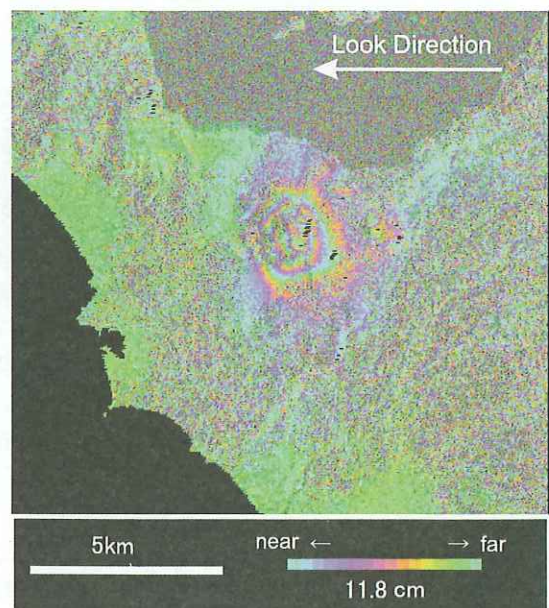


図5 JERS-1による有珠山周辺の干渉画像（1992/10/15-1998/05/01）

隆起量である60 mとの間には差がある。この差は、観測の時期の違いと、上で述べた相関処理時の平滑現象によって、小さめの値が測定されたことによる効果が重なったとして、ほぼ説明できることがわかっている。この手法による観測の意義は、変動の空間分布が明らかにされたことにある。なお、北方向への変動の最大は12 m、南方向では7 mである。東西にも数 mの変動は認められるが、南北に比較すると変動量は小さい。

さらに、各点における変動速度ベクトルがその点の変動ベクトルに比例する等のいくつかの仮定をおき、最小2乗法を用いて、2.5日間(4月3日から4月6日)の平均的な変動速度を得た。変動速度の大きな場所では、隆起速度が3.3 m/日、南北方向に開く速度が2.7 m/日になることがわかった。ただし、平滑化の影響により実際よりは小さめの値である可能性がある。

干渉 SAR に比べた場合、この手法の最大の利点は、干渉の場合のような厳しい条件が必要なく、撮影されたほとんど全てのデータに応用が可能であることである(干渉の場合は全てのデータが利用できるわけではない)。また、計測のダイナミックレンジが大きく、干渉合成開口レーダーでは縞が細くなりすぎて判別できない程の大きな地殻変動が発生した場合には、きわめて有効な地殻変動測定手段となる。また、容易に地殻変動の3次元成分を得られるのも、この手法の特徴であり、計測を繰り返せば変動速度も推定できる。この解析事例では、精度等いくつかの制約はあったが、対象とした変動が大きかったため、地殻変動の面的分布を把握することができ、潜在溶岩ドームの成長の様子を捉えることができた。

一方、有珠山の今回の活動を、以前の活動と比較することは、より長いスパンで今回の活動の意味を総合的に理解するために重要な情報を提供する。今回、1992年から1998年にかけて JERS-1 が取得したデータを解析し、噴火以前の有珠山周辺部の地殻変動を面的に捉えることができた。解析には、1992~1998年に JERS-1 により取得された SAR データを用い、時期の異なる4ペアについて解析を行った。

解析結果の一例として、1992年10月15日と1998年5月1日のデータを用いた解析結果を図5に示す。有珠山頂部東側を中心として、衛星から遠ざかる向きへの変動パターンが見られる。最も変動が大きい領域では、40 cm 以上変動していたことがわかった。また、昭和火山についても、有珠山頂部と同様に、衛星から遠ざかる向きへ変動していたことがわかった。

今回解析した4ペアの結果から、2000年の噴火以前には、有珠山頂部はほぼ一定の速度で沈降していたと考えられ、沈降速度は約10 cm/年と求められる。一方、辺長や測角測量により、前回の活動(1977~1982)終息後、山頂中央部が7~8 cm/年の速度で沈降していたことが観測されており(森・鈴木, 1998)⁴⁾、干渉 SAR の結果はそれと調和的である。

今回の解析により得られた変動域は、有珠山頂部東側を中心とする2~3 kmの領域と昭和火山付近に限定されて

おり、領域が狭いことから、変動の力源はかなり浅いことが示唆される。これらの変動域は、前回の活動(1977~78年)および昭和火山を形成した活動(1943~45年)において、マグマの上昇により隆起した領域とよい一致を示している。したがって、これらの活動の際に上昇したマグマの活動と、1992~1998の地殻変動とは関係が深いと考えられる。また、この地殻変動の空間パターンは山頂直下1 km付近にはほぼ水平の板状の力源を考え、これが閉じたと考えられるとよく説明できる。変動が沈降傾向であること、この6年間にほぼ一定速度で変化が継続していることから、前回およびその前の活動で上昇したマグマの冷却による収縮や脱ガス等による体積減少が考えられる。今後、他のペアでの解析を進めるとともに、重力など他の観測結果をあわせて考察する必要があると考えられる。

4. 三宅島および伊豆諸島の火山・地震活動と地殻変動観測

2000年夏に始まった伊豆諸島における活動は地震活動としても地殻活動としても、近年まれにみる大きな規模を持つ活動である。地殻変動は遠く房総半島や東海地方に及んでおり、神津島付近で継続した群発地震活動も、気象庁の観測史上最大の規模であったと報告されている。

これら一連の活動は、6月26日三宅島の直下を震源とする群発地震から始まった。群発地震の震源は、6月26日夜から27日朝にかけて西へ移動し、小規模な海底噴火を経て、さらに北西へ移動した。その後、島内の地震活動が再び活発になり、三宅島では、島の全体的な収縮が続くなか、7月8日には雄山山頂で噴火し、直径約1 kmの陥没火口が出現した。8月18日には噴煙が15000 mに達する最大規模の噴火が発生し、8月29日にも噴火が発生し低温の火砕流も発生した。9月からは大量の二酸化硫黄が発生するようになり、現在まで様相を変えながら活発な活動が続いている。

一方、神津島近海の群発地震は、震源が北西-南東方向の移動を繰り返し、M5以上の有感地震を多数件いながら継続した。9月に入る頃には沈静化した。活発な活動が2カ月以上にわたって続いた。また、新島や三宅島の南西沖でもM6クラスの地震が発生している。

これらの活動は顕著な地殻変動を伴っており、GPSの連続観測により、伊豆諸島北部を中心としてかなり広範囲の地殻変動が観測された。地殻変動は房総半島にまで及んでいる。これらの地殻変動データは今回の一連の活動のメカニズムを個別に詳細に理解したり、なぜこのような大規模な地殻活動が、この時期に、この場所で起こったかを、広域の応力場との関連づけて考察するための重要な観測データとなると考えられる。現在地殻変動データをさまざまな観点から解析中であるが、ここでは、発生した地殻変動についてその概略を紹介する。

今回の活動域は、島嶼部を中心としているため、活動域の大半を占める海域での地殻変動観測は大きな制約があ

Preliminary Fault Model

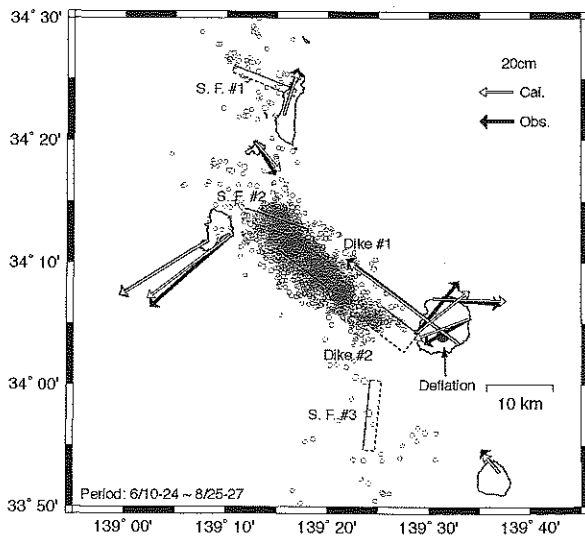


図6 GPS観測により求められた、三宅島と神津島沖の活動に伴う地殻変動を表すベクトル図。黒い矢印が実測値を示す。また白抜き矢印は構築したモデルにより再現された計算値である。

る。三宅島・伊豆大島にそれぞれ4点、神津島に2点、式根島、利島および御蔵島に1点のGPS観測点が活動開始以前から運用されていた。GPS連続観測の解析は、通常の24時間ごとの計算のほか、6時間データを3時間ごとに解析する緊急の解析が実施されている。

その後、島内の停電や通信障害によって、9月中旬以降三宅島の観測は中断されたが、岩手山や有珠山で活動実績がある太陽電池駆動独立運用型のGPS観測装置を設置し観測を続けている。また、7月8日の噴火から続いた火口の陥没を観測するために、航空機による空中写真測量および航空機合成開口レーダーによる干渉観測が実施され、詳細な火口内の地形が計測された。

図6は、GPS観測により求められた、三宅島と神津島沖の活動に伴う地殻変動のベクトル図である。

三宅島のGPS点は、6月26日の地震活動の発生とほぼ時期を同じくして急激な地殻変動が始まったことが確認された。三宅島内には4点のGPS点があるが(現在は停電等のため停止したが、近接地に別途設置した太陽電池駆動の装置により観測中)、島の西部の南北への伸張と南西部の阿古にある観測点の顕著な沈降を特徴とする変動が見られた。その後は、島内基線が短縮する変動が7月～9月初旬まで続いた。観測が中断する9月中旬には、変動は継続はしているものの、鈍化の傾向を見せた。現在は地殻変動はかなり沈静化している。9月中旬までの時点で、地殻変動は、水平で最大80 cm、上下で最大70 cm(沈降)に達している。

一方、6月26日に三宅島で始まった群発地震活動は、その後三宅島から北西の方向に移動した。神津島の東方沖でもM6クラスを含む活発な地震活動からやや遅れて、7月初め頃から、神津島と新島間の距離が伸張するセンスの地殻変動が顕著となってきた。この地殻活動は、いくつかの活動単位から構成されており、群発地震活動の消長と強い

相関をもっているように見える。この活動は8月下旬にはかなり鈍化しながらも継続している。変位量は、神津島の北西方向への水平変位量が60 cmに達し、20 cmを越える隆起も観測されている。地殻変動は、伊豆諸島にとどまらず広域にわたっている。震源域から100 km以上離れた房総半島では、北東方向の変位が観測されている。また伊豆半島では南東方向の変位が観測されている。

今回の活動に伴う地殻変動は、国土地理院以外に、大学・科学技術庁防災科学技術研究所等によっても観測されている。それらのデータも同時に用いて、今回の地殻活動の力源を推定する予備的なモデルの構築を行った。三宅島の南西部の等方的力源(マグマ溜まり)、三宅島西方のダイク、神津島-三宅島間のダイク、三宅島南西海域の横ずれ断層、東西走向の左ずれ断層運動の組み合わせで地殻変動を説明することを試みる。概要は以下のとおりである。

(1) 三宅島

三宅島では、6月26～27日にかけて島の西部を中心に南北へ拡大する変動が観測された。その後は各観測点の沈降と島内の収縮が続いている。これらの地殻変動は、活動の初期において島の南西部から北西方向へ延びるダイクの貫入と島の南西部に位置する等方的な収縮源によって説明することができる。収縮源における体積変化量(収縮)は、現在までに2億 m^3 に達している。

(2) 神津島付近

神津島と式根島は、ほぼすべての期間で、それぞれ南西および南東方向へ変位しているのに対し、新島は期間によって北あるいは北東方向へ変位している。これらは主に地震性の断層運動とダイクの位置が変わることによって説明できる。

(3) 周辺地域

伊豆大島や房総半島で観測されている北東方向への変位と伊豆半島での南東への変位についても、それぞれ主にダイクの開口と東西走行の右横ずれの断層運動によって説明できることがわかった。

図6には、活動開始から8月26日までの力源モデルも示してある。神津島沖の群発地震活動は、神津島東方沖に北西-南東方向の長さ10数kmで14億 m^3 におよぶダイクが貫入したことが主原因と考えることができる。期間分けして力源モデルを推定すると、ダイクの位置は、地震活動と同じく時間とともに北西-南東方向へ移動を繰り返していることがわかった。

一方、今回の噴火活動の過程で見られた、特異な現象として、7月8日の噴火後に出現した巨大な陥没孔とその拡大が上げられる。また、その中の火口からは、世界の他の火山においても類例がない規模の膨大な量の火山ガスが噴出し続けている。陥没孔の形成や継続する火山ガス噴出のメカニズムについては、未だにその全容が明らかとなっていないが、時間経過に伴う陥没の進行の様子を知ることは、

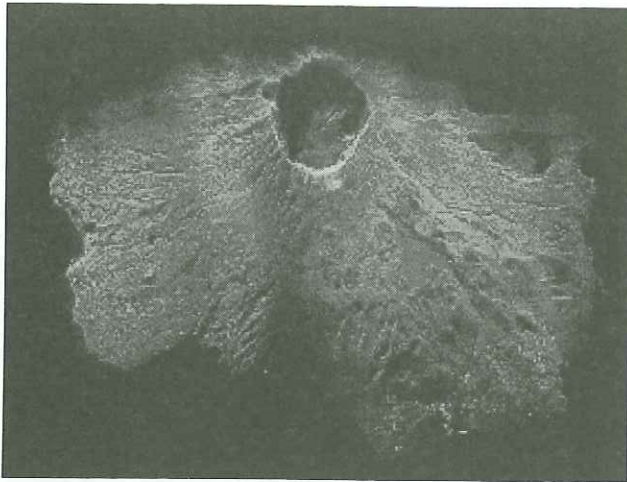


図7 航空機 SAR による三宅島の画像 (9月28日撮影)。図の上が北であり、観測は三宅島の東側からレーダーを照射して島の西部を観測したものである。レーダー観測に特有のフォアショートニングという歪みにより島の東部は縮んで撮影されている。

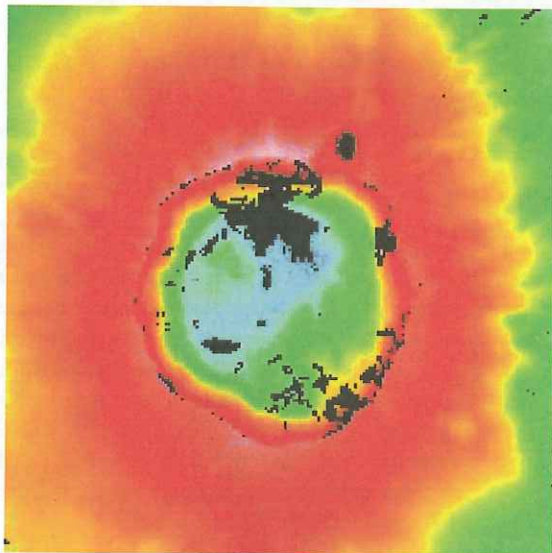


図8 航空機合成開口レーダー干渉処理による三宅島陥没火口周辺の地形。色彩で火口周辺の標高を表している。黒い部分は陰になったり、おそらく水がたまっていたりして信頼できるデータが得られなかった場所である。

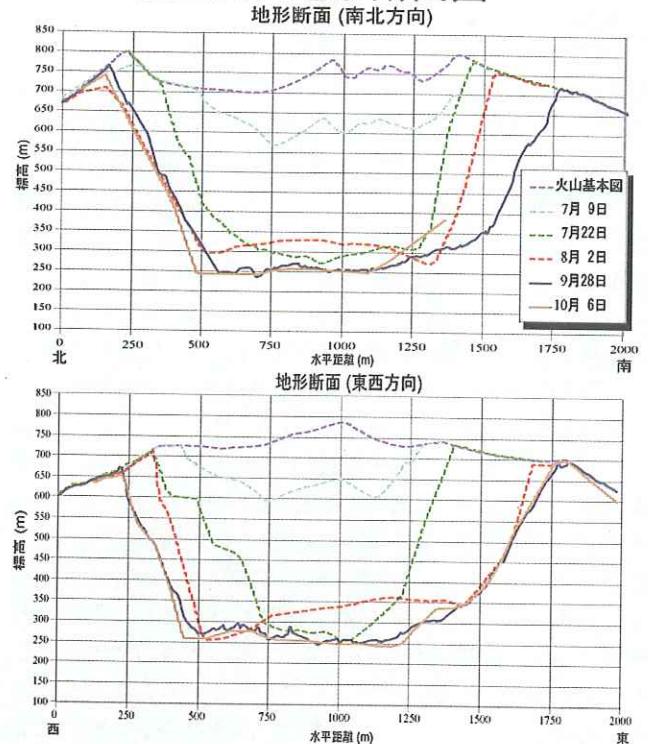
メカニズムの解明にとって重要である。

このため、気象庁、国土地理院等の機関は航空写真測量によって火口内の形状の計測を実施してきたが、火口は噴煙や雲等に覆われることが多く、観測は多くの困難を伴っている。

一方、国土地理院、日本電気株式会社、本田航空株式会社の3者は、三宅島の火山活動に伴い陥没した雄山火口部について、国土地理院所有の航空機搭載型合成開口レーダー(以下、航空機 SAR)を用いた観測を9月28日午前を実施した。飛行高度4,250 m、オフナディア角は55度とし、火口中心から水平距離4 km、8 kmの2つの空路で多方向から三宅島を観測した。この航空機 SAR は波長の短い X バンドの電磁波(マイクロ波)を機体から飛行方向左斜め下に照射して、地表からの散乱強度を観測するものである。

観測は、雄山火口部について4方向から行ったが、これ

雄山火口地形断面図



火山基本図：火山基本図より作成した地形断面図
 7月9日：7月9日撮影の航空写真より作成した地形断面図
 7月22日：7月22日撮影の航空写真より作成した地形断面図
 8月2日：8月2日撮影の航空写真より作成した地形断面図
 9月28日：9月28日に取得したSARデータより作成した地形断面図
 10月6日：10月6日撮影の航空写真より作成した地形断面図

国土地理院

図9 航空写真測量および合成開口レーダー観測により求めた、三宅島陥没火口地形変化の時系列。

まで詳細を観測することができなかった火口底の様子を知ることができた。

図7は、三宅島全島 SAR 画像である。SAR は、斜めから電磁波を照射するため、照射側の火口壁の部分は影となり観測できていない。画像でもその部分は黒くなっている。また、SAR 画像には、標高の高い部分が照射側に倒れ込むフォア・ショートニングという現象があり、画像を判読するには、以上のような SAR 画像の特質に注意する必要がある。

今回の観測では、受信アンテナを2つ同時に用いる single pass 干渉観測も実施され、そのデータ解析から火口内を含めた三宅島のデジタル標高モデルが作成された。図8は、それを画像化した火口周辺地形である。

さらに、三宅島雄山の山頂に形成された陥没地形の時系列変化を見るために、空中写真解析による7月9日、7月22日、8月2日、および10月6日時点の観測結果もあわせて用いて、陥没孔の成長の様子を解析した。図9にその結果を示すが、7月9日から8月2日までは、陥没孔の成長が著しいが、8月以降は拡大が余り進んでいない様子がわかった。(長谷川ほか、2001)⁷⁾

カルデラはほぼ円形で、その直径は時間とともに拡大し9月28日には最大径が約1,640 mとなっている。地形変化から計算した陥没量(体積)は7月9日には5,600万 m^3 、7月22日には2億6,500万 m^3 、8月2日には4億2,600万 m^3 とこの期間で見るとほぼ直線的に増大している。また

9月28日には陥没量が6億 m^3 に達している。

10月6日には、カルデラの直径はやや拡大し、1600mとなった。またカルデラ内の最低標高も以前と比べてやや低くなっている。ただし、このデータは空中写真によるため、噴煙により標高計測が不可能な部分があるため、陥没量については求めることができなかった。

今回の航空機による合成開口レーダー観測により、この手法は雲や噴煙の影響を受けずに比較的遠いところから観測が可能であり、火山の地形観測に有効であることが実証された。三宅島では、このほかに総務省通信総合研究所による航空機SAR観測、文部科学省防災科学技術研究所によるRADARSATの干渉SAR観測による地殻変動検出の試みもなされて同様の成果があがっている。

今回の伊豆諸島北部を中心とする地震・地殻活動は規模が大きいものであったが、変動域の相当部分が海域で生じ、その部分の情報が欠落している。さらに活動を構成する要素が多様であるため、そのメカニズムを十分理解できているとは言い難い。三宅島の噴火活動だけ見ても、山頂の大規模な陥没、山頂部からの噴火、大量のガスの放出等、これまでの噴火の様相とは大きく異なっている。我々が今後明らかにしていかなければならない課題は、下に掲げるように、山積している。

- 1) 三宅島のマグマはどこへ行ったのか？ 三宅島の側方か下方か？
- 2) 三宅島では、噴火前には南西部を中心として、緩やかな膨張と隆起が続いていたが、今回の噴火との関連は？
- 3) 収縮を続けながら発生した噴火のメカニズムは何か？
- 4) 広域地殻応力場から考えて、なぜ、今このような活動が起こったのか？
- 6) 神津島東方のダイクの貫入は、貫入だけで終わり噴火に至らなかったのはなぜか？
- 7) 神津島周辺では、1980年代始めから顕著な隆起が見られていたが、今回の活動との関係は？
- 8) 広域な地殻変動が発生したがそれは周囲に影響を及ぼさないのか？

新しい観測手段の登場により質・量ともに情報量が増えた地殻変動データを詳細に解析することによって、これらの謎を解くための手がかりが少しでも得られることを期待している。

5. おわりに

今回の噴火では、活動の開始から現在に至るまで、GPSや地震、重力、地球電磁気等、最新の地球物理学的手段を用いた多様な観測がなされており、膨大な科学的データが集積されている。地殻変動に関しても、今後、さまざまな観点から検討を重ね、他のデータを総合して考察し、以上の疑問に少しでも回答を与えるよう、解析を続けることにしている。今回の活動は、GPSや合成開口レーダーなど新しい観測手段が実用レベルに達していた時期に発生したが、このような新しい観測手段が貴重なデータを提供できるという実績が築かれた意義は大きい。

謝辞

ここで紹介した衛星合成開口レーダーに係る画像は、宇宙開発事業団から、国土地理院と宇宙開発事業団で実施している共同研究の推進のために提供を受けたデータを利用して作成したものである。ここに、関係者に深く謝意を表す。また、JERS-1のデータの所有権は通産省および宇宙開発事業団が有している。

参考文献

- 1) Gabriel, A. G., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A.: Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, *J. Geophys. Res.* 94, No. B7, 9483-91, 1989.
- 2) Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaue, T.: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364, 138-142, 1993.
- 3) 村上 亮・藤原 智・齊藤 隆: 干渉合成開口レーダーを使用した平成7年兵庫県南部地震による地殻変動の検出, *国土地理院時報*, No. 83, 24-27, 1995.
- 4) 森 濟・鈴木敦生: 有珠山の火山性地殻変動—最近20年間の活動の概要—, *北海道大学地球物理学研究報告*, 61, 275-285, 1998.
- 5) 資源観測解析センター編: 合成開口レーダー (SAR)—資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ5—, 資源観測解析センター発行, 1992.
- 6) 飛田幹男・村上 亮・中川弘之・矢来博司・藤原 智: SAR画像のマッチングによる有珠山周辺の面的な三次元地殻変動, 変動速度, 体積変化, *国土地理院時報*, 95, 2001. (印刷中)
- 7) 長谷川裕之・村上 亮・政春尋志・松尾 馨・小荒井 衛: 三宅島山頂の陥没地形の計測, *国土地理院時報*, 95, 2001. (印刷中)

斜面崩壊とリモートセンシング

しま しげ のり
島 重 章*

1. はじめに

我が国は、急峻な山地や谷地、崖地が多い上に、地震や火山活動が活発であり、台風や豪雨、豪雪の常習地帯であるという気象条件が加わり、土石流、地すべり、がけ崩れ等の土砂災害が発生しやすい条件下にある。特に近年、山地や傾斜地またはその周辺における都市化の進展などの土地利用変化と相俟って、土砂災害による犠牲者は、自然災害の中で大きな割合を占めている。その状況は、図1に示すように、毎年多くの尊い人命や財産が失われていることから、緊急を要する問題である¹⁾。

なかでも降雨による斜面災害は、道路、鉄道、宅地など

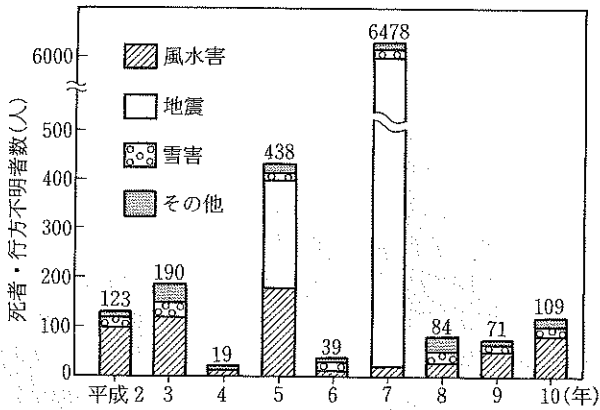


図1 災害原因別被災の状況

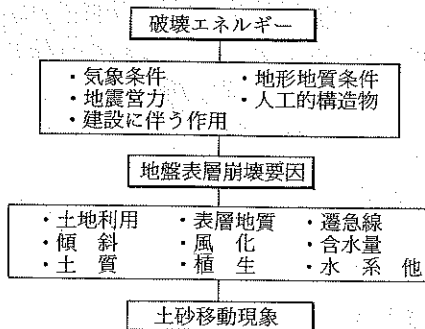


図2 地盤災害の概要と崩壊要因

の安全性に重大な影響を与えている。このような災害は、自然現象としての土砂移動現象と、我々の生活の場が交わった時にはじめて被災の対象となる。その際に発生する崩壊の規模は、地すべりに比較して一般に小規模であるが、崩壊は顕著な前兆現象を伴わずに突発的に発生するケースが多く、毎年のように各地で災害現象として扱われている。このような地盤災害の発生は、降雨や地震力のような直接的な誘因が引き金となるが、災害発生箇所は、地盤の有する各種崩壊要因が複数個重なった場合に土砂移動現象として発生するのである。その状況を図2に示す。

破壊エネルギーとは、地盤災害を引き起こす誘因である。気象条件がもたらす集中豪雨災害は、気象災害の中でも特に多く、毎年のように発生して各地に土砂災害をもたらしている。次に地盤表層崩壊要因とは、地盤表層の自然および社会的要因の中で、特に地理地形および土質土質上の特性を示す。これらの要因が2つ以上重複した箇所に土砂移動現象は発生しやすいのである。しかしながら、これらの要因がどこにどれくらい存在するのかわかり、事前に把握することは容易ではない。結果的には、斜面崩壊のような土砂移動現象が発生した後に、それを確認するのが現状であろう。

このような斜面災害を解明するには、地盤の有する条件と土地利用条件を広域に調査して検討することが必要になる。兵庫県や広島県のように急傾斜地が全国的に多い地域において、指定された斜面やのり面のどこに崩壊が発生するかを事前に知ることは用意ではない。そのためにも多くの調査を必要とし、各方面で緊急を要する課題として取り組みが検討されているものの、効果ある対策までに至っていないのが現状である。

そこで、ここでは広域データとして得られる人工衛星データを用いて、それが有する特性をもとに画像を作成した。ついで集中豪雨の発生と共にどのような地盤が災害を引き起こしやすいのかわかり、作成した画像を用いた近年の事例を示すとともに、災害発生の要因を検討して危険度を広域に予測する方法を述べる。

* 広島工業大学 工学部 建設工学科 助教授

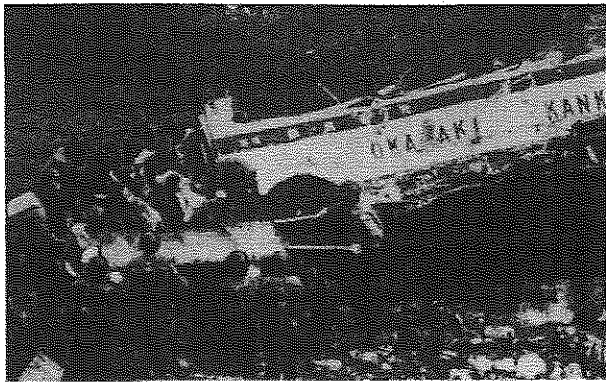


写真1 飛驒川バス転落事故災害

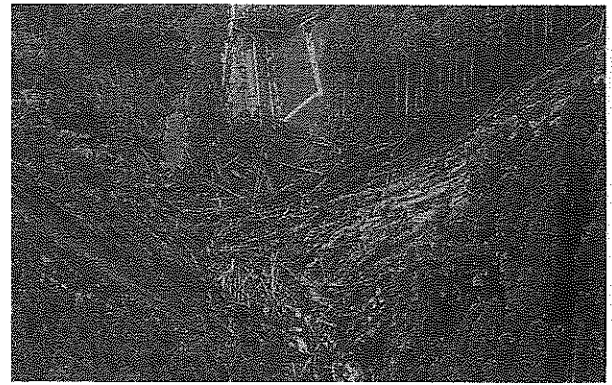


写真2 広島県における風倒木災害

表1 最近の我が国の自然災害

年月日	災害名	主な被災地
H 2.11.17~	雲仙岳噴火	雲仙普賢岳
3. 9.12~	台風17, 18, 19号	全国
5. 1.15	釧路沖地震	釧路市
7.12	北海道南西沖地震	北海道
7.28~	平成5年8月豪雨	全国
6.12.28	三陸はるか沖地震	青森県
7. 1.17	阪神・淡路大地震	兵庫県
8.12. 6	土石流	長野, 新潟
9. 7.10	土石流	鹿児島出水市
10. 8.26~	平成10年8月末豪雨	福島, 栃木, 茨城
10.17~	台風10号	中国地方
11. 6.23~	梅雨前線豪雨	西日本
9.21~	台風18号	九州
12. 3.31	有珠山噴火	北海道



写真3 H 11.6.29の広島土砂災害

2. 集中豪雨災害の事例

日本列島は地核変動帯に位置しているため、地形・地質は複雑であり、急峻な山地に加えてモンスーン地帯に位置するので、豪雨豪雪型の厳しい気象条件下にある。また、環太平洋地震地帯に位置しているため、地震の発生も多い。そのために、降雨災害等が発生しやすい国土構造を有しているといえよう。

このような条件下で発生する災害は、台風、大雨、地震、その他に大分類されるが、なかでも土砂災害が世論の対象となったのは、昭和43年8月に発生した岐阜県の飛驒川バス転落事故災害である。写真1に示すように、集中豪雨によって発生した土石流にのみ込まれ、104名の方が亡くなった災害であり、この災害が契機となって建設省（現、国土交通省）を中心とする道路防災点検が開始されたのである²⁾。

ここには、その後の災害について、大雨による災害を中心に最近の自然災害を表1³⁾に紹介し、さらに、中国地方について若干の説明を加えることにする。

中国地方においては、近年大雨による豪雨災害が毎年のように頻繁に発生している。まず、昭和58年7月に浜田・三隅を中心とする山陰地方に豪雨災害が発生した。22日か

ら23日にかけて1時間に50mm以上の雨が継続し、斜面崩壊や道路流失、構造物損壊、路面冠水が各地で発生し、国道9号線の広範囲に及ぶ災害が発生した。その後も昭和63年7月20日から21日にかけて、広島県北西部に集中豪雨が発生した。加計町災害とよばれるものであった。また、最近の災害として我々の記憶にいま生々しいのは、平成3年9月の台風19号である。それは最大瞬間風速58.9mという、前代未聞の非常に大きな風力を広島市で記録した。その際の山地災害を写真2に示した⁴⁾。山地の植林が強風によってなぎ倒され、それが土石流とともに流下して各所の道路をふさいだのである。この台風の影響は、その後に中国山地の風倒木災害として各方面から取り上げられた。それは、山林の倒壊が根の浮き上がりや地盤表層の脆弱化を促進し、自然斜面の崩壊要因として危惧されたのである。それは平成5年7月末からの集中豪雨によって山陽道を中心とする各地に災害をもたらした。特に最近では平成11年6月29日の広島土砂災害である。広島市を中心とする県南西部において13時から16時に強雨が連続し、各地で180mmから270mmの連続雨量を記録し、写真3に示すような土石流およびがけ崩れが多数発生し、死者・不明者32名、浸水家屋4,203戸等の被害が記憶に生々しく、昭和63年の加計災害を上回るものであった⁵⁾。

3. 人工衛星データの適用

3.1 リモートセンシングの概要

人工衛星を用いた地球表面の観測は、1972年7月23日

表2 LANDSAT 地球観測衛星ノート

LANDSAT; ランドサット衛星, 4号, 5号, 7号	
7号の主要性能	軌道高度: 705 km 回帰日数: 16 日 打ち上げ: 1999.4
センサ	ETM+ (TM+バンド 8)
地上分解能	(Mr): 30 m, (Pa): 15 m
*なお, ここでは, L-5号の TM データ (地上分解能 30 m) を使用している。	

に米国の NASA が打ち上げた地球資源探査技術衛星の成功に始まった。地球資源を有効に利用するためのリモートセンシング技術をランドサット計画と称し、広範な実用研究や実験に必要な画像をもたらした。その後各国の衛星が打ち上げられるとともに、監視システムの開発が行われ、宇宙から地球観測が続けられている。日本で受信されている運用中の地球観測衛星は、ヨーロッパ RS 衛星 (ERS), 日米共同熱帯降雨観測衛星 (TRMM), 仏国スポット衛星 (SPOT) および米国ランドサット衛星 (LANDSAT) である。その中から、使用した衛星 LANDSAT について、表 2 に概要を示す⁹⁾。

わが国においても地球資源や土地利用、環境監視などさまざまな分野において観測システムの開発の必要性が高まるとともに、人工衛星からの情報をできるだけ早く受信し、各分野に役立てるために宇宙開発事業団 (NASDA) 地球観測センターが設置され、1979 年 1 月から衛星データの受信・記録・処理を開始した。国産地球観測衛星は、1986 年 2 月に海洋観測衛星を第 1 号として、MOS-1, JERS-1, ADEOS と続いて打ち上げられ、データの提供を継続したが、いずれも運用を停止した。続いて次世代の ADEOS-II および ALOS などの高性能機が計画されている。

3.2 人工衛星データの処理・解析方法

実務の中で衛星データを利用しようとする場合には、データの入手から画像の処理および解析に至るまでの処理が必要である。建設分野の中で、地盤災害を目的とした主題図の作成について、その手順を図 3 に示す。

以上の各項について、目的に応じた処理がなされる。

(1) については、一般に (財) リモート・センシング技術センター (RESTEC) を通じて、利用したい場所のデータ検

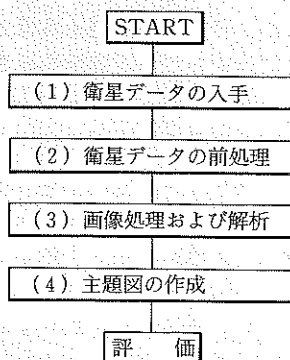


図 3 衛星データ利用の概説図

索および購入が可能である。

(2) については、データにさまざまなひずみがあるため、厳密な解析処理を行う場合には補正処理が必要である。主な補正には、放射ひずみ補正および幾何学的ひずみの補正がある。

(3) については、マルチスペクトルデータの利用を前提とした画像処理/解析システム (ソフトウェア) が市販されている。また汎用コンピュータよりもむしろ小型パーソナルコンピュータの性能向上に伴うソフトウェアが多数作成されている。

(4) については、得られた画像の出力およびその画像の評価を行うものである。得られる主題図としては、カラー合成画像、土地被覆分類図、地図情報との重ね合わせによるサテライトマップや数値地形モデルを利用した 3 次元画像などがある。ここにカラー合成画像を図 4 に示す。

4. 地盤主題図の作成

地球観測衛星が提供するデータには、太陽光線の反射波長をとらえて地面や水面の地被地覆状態を示す光学系 (OPS) データと、照射反射波をとらえて波長強度により地表面の状態を示すマイクロ波 (SAR) データとの 2 種類に大別される。ここでは前者の OPS データを用いた地盤主題図の作成について示す。光学系センサがとらえるデータは、人間の目がとらえる波長と同様の可視光の波長帯と、それよりも長い赤外線の波長帯を提供する。したがって、可視光の示すデータは、地表の地被地覆が示す物体の反射特性であり、人間の目に見えない赤外線の示すデータは、表層物質が有する温度、放熱量、水分および蒸発散量を示す、いわゆる放射特性である⁷⁾。

ここに使用する衛星データは、波長帯に区分したバンド別のデータであり、LANDSAT-5 号の TM センサが提供する地上分解能 30 m のデータである。このようなデータを用いた各種主題図への適用は、処理された作成画像が示す地域にどれだけ相関性を示すかである。そのための画像処理手法には、地表面の既存データを対象とする教師付き分類手法と、地表面の無作為なデータを対象とする教師なし分類手法とに分けられる。

ここでは、地盤主題図を作成するにあたり、教師付き分類のなかでデータが示す反射特性と放射特性をもとに作成した画像が、対象とする地域への相関性を明確にする手法として、重回帰分析を用いた。その地盤主題図の作成方法を図 5 に示す。

地図データは、1/50,000 地形図を主とした土地分類基本調査データを基本とし、約 20 km 四方の面積を表すもので、地表面を主として示した地表データと、地表面の性状を主として示した地覆データとして示されている。地球観測衛星データは、衛星が有する座標 (ライン, カラム) と 1/50,000 地形図の地図座標 (X, Y) を幾何的に一致対応させる補正の後、反射データおよび放射データの有する特徴抽出を行うために、ここでは比演算処理 $R(m, n)$ を採用した。その算式は式 (4.1) である。

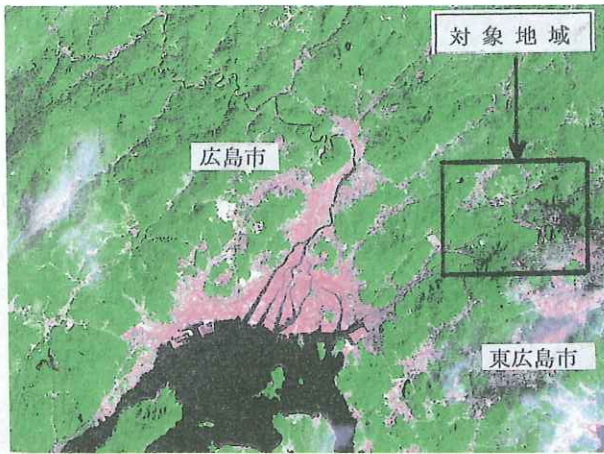


図4 カラー合成画像 (LANDSAT-5, TM センサ)

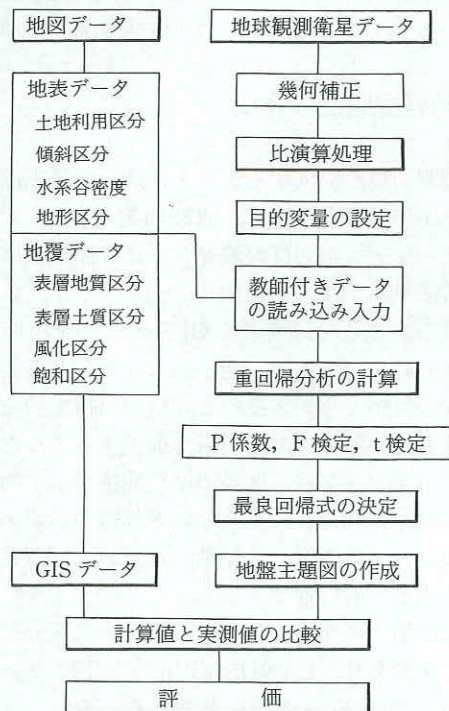


図5 地盤主題図作成のための流れ

$$R(m, n) = \frac{\text{band } m - \text{band } n}{\text{band } m + \text{band } n} \quad (4.1)$$

この手法によって得られる画像は、日向と日陰の差を除去すること、うす雲やもやの影響を除去すること、植生の活性度を示すこと、土質地盤の影響を反映させること等の特徴抽出が可能となる。日向と日陰の差を図6に示す⁹⁾。ここに使用したソフトは、リモートセンシングデータ用解析・可視化ソフトウェア「ENVI」である。

以上のデータを用いた地盤主題図の作成は、比演算処理データを説明変数とし、地図データを教師付きデータとする目的変数の読み込みにより、多変量解析のうちの重回帰分析を適用し、得られた最良回帰式から目的とする新たな地図データを画像として作成するものである。最良回帰式とは、次に示す式(4.2)である。

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_nX_n \quad (4.2)$$

ここに、Y: 目的変数

X₁~X_n: 説明変数

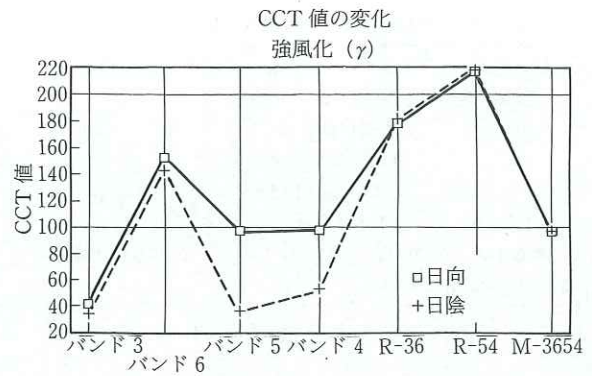


図6 比演算処理による日向と日陰の影響

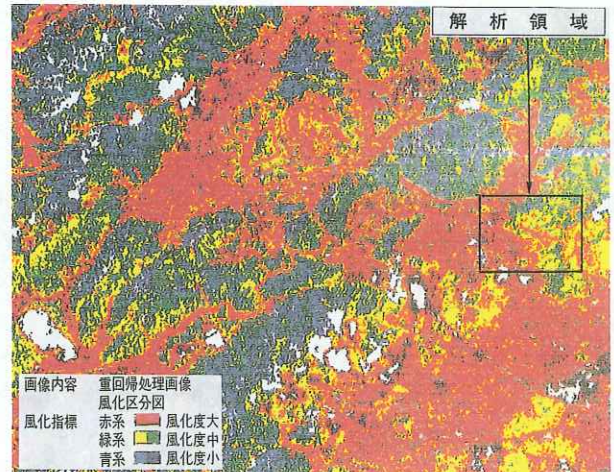


図7 対象地域の風化区分画像

b₀: 定数項

b₁~b_n: 偏回帰係数

結果として得られた画像の質は、まず重回帰分析の精度を検討するために、重回帰係数、F検定およびt検定の中から最良回帰式を決定する。ついで目的変数として使用した地域の地図データまたは現場調査データを実測値とし、位置標定による画像が示すデジタル値を計算値とする両者間の相関を比較検討する⁹⁾。得られた画像のうち、風化区分画像を図7に示す。

5. 斜面の危険度予測手法

5.1 斜面崩壊の予測

近年の土砂災害は、我々の生活の場が急速に山地部へと拡大し、そのために土砂災害に遭遇する機会も増加しているといえる。ここに対象とした災害地を写真4に示す¹⁰⁾。

このように斜面災害を予測しようとする場合には不確かさを伴うが、この不確かさを最小限に抑えるにはどうしたらよいかを考えなければならない。そのためには、主要な要因の効果とそれらの間の相互作用を明確に知ることができれば、将来の予測を正確に表現する数学的モデルを組み立てることが可能であると考えられる。

そこで、各種データを用いて現象を予測する場合、特に、現象に対して数量的な変数や質的な変数を分析する方法として、多変量解析が有効な手段の一つと考えられる。



写真4 集中豪雨後の斜面崩壊

ここでは、リモートセンシング技術の地盤情報の面的な評価法を踏まえ、自然斜面の災害発生箇所を事例対象とした数量化分析を適用した判別区分を検討するとともに、土砂災害に対する危険度評価に対する予測手法を紹介するものである。

5.2 数量化理論の適用

数量化理論第II類は、判別機能を有する質的データによる分類手法である。すでに優、良、可に区分されたデータを外的基準とし、周辺データがどのグループに分かれるかの基準を見出すのが、この解析の目的である。

表3 崩壊要因データの数量化分析

アイテム	カテゴリー	カテゴリー数量	偏相関係数
表層地質	未固結堆積	0.2409	0.0669
	火山性岩石	0.0930	
	広島花崗岩	-0.1486	
	その他	0.1157	
傾斜区分	15°未満	0.0354	0.2496
	15°~30°	-0.0211	
	30°以上	0.1595	
	なし	-0.6041	
水系 (1区画当たり)	1本未満	0.7698	0.0574
	1本~2本	0.0128	
	2本以上	-0.2543	
	なし	-0.0140	
表層土	乾性褐色土	0.4165	0.3757
	黄色土	0.0128	
	灰色低地土	-0.5856	
地形区分	山地	0.9148	0.6646
	台地・丘陵地	0.2678	
	低地	-1.1982	
	その他	1.9882	
植生	活性度小	-0.0415	0.6646
	中	-0.2292	
	大	0.1099	
崩壊履歴	有り	-0.2211	0.0519
	無し	0.0048	
風化度	α (弱風化)	外的基準	-
	β (中風化)		
	γ (強風化)		

数量化分析II類スコア分布
風化度 (西条)

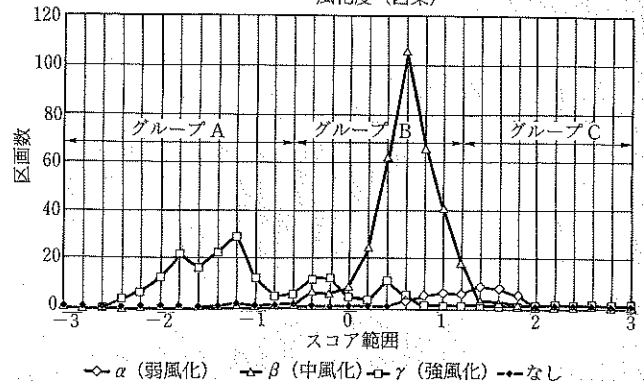


図8 スコア分布図

解析手順は、対象地域をメッシュ化区分し、対象位置の各要因をカテゴリーとする。ここで使用する要因とは、前章の衛星データによる地盤情報データである。使用したアイテム・カテゴリーを表3に示す。各カテゴリーが崩壊要因に関係すると考え、各要因の有効性を偏相関係数で示した。判別区分に対する外的基準は、相関比(η^2)の高い値を示した風化度を採用した。結果的には、スコア値によるグループ分けをもとにした、各要因がどのグループに属するかを数量的に判定表示するものである。

解析に使用したソフトは、多変量解析用ソフトウェア「SPSS」である。

ここに外的基準を風化度としたのは、相関比 $\eta^2=0.72$ に基づくものであり、風化度指標は、 $\alpha < 3$ m, $\beta = 3 \sim 10$ m, $\gamma > 10$ m程度の深さを示す。特に γ は広島型風化花崗岩土の深層風化を示し、脆弱化した表土に覆われている。各アイテム/カテゴリーは、外的基準のいずれかのグループに分類され、スコア値として表示される。それを図示したのが図8である。この分布は、相関比が大きいほど各グループの分離度は良くなるが、お互いに重なる度合いが大きい。ここでは3グループに分類した。外的基準が示すグループは、風化度大(γ)の位置に崩壊発生の可能性のあることを考慮し、関係するアイテム/カテゴリーの数量を考慮すれば、この位置の危険性が大きくなると考えられる。したがって、危険度区分は、スコア分布図から「A」を最も危険な区域、「B」をやや危険とする区域、「C」を危険度の少ない区域と考えた。

5.3 危険度区分図の作成

数量化第II類を適用したアイテム/カテゴリーデータは、衛星データが有する画素単位でメッシュ化した、30 m×30 mを1単位とするデータの読み込みである。したがって、スコア分布から得られた数値も画素単位で判読できることから、ライン方向(南北)およびカラム方向(東西)の各画素へスコア値を設定することが可能である。ここでは、崩壊地およびその周辺の危険度を求めるための事例を紹介する。

図9(写真4)が崩壊位置であり、図10が得られた危険度区分図である。

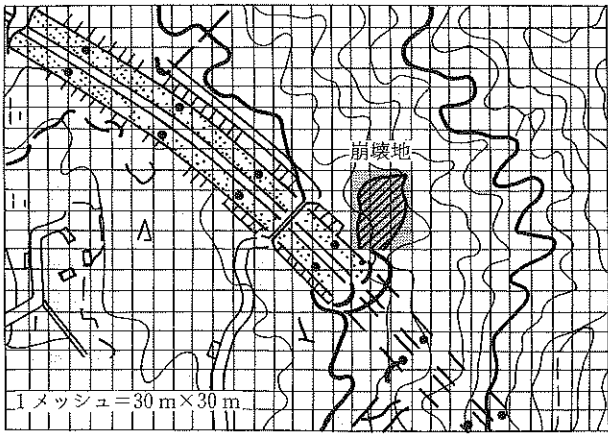


図9 メッシュ表示した崩壊位置図

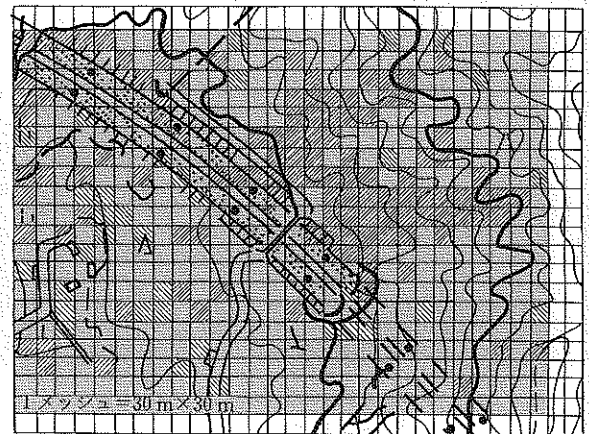
図10に示した危険度区分図は、「A」を■で、「B」を□で、「C」を▨で示した。図示のメッシュサイズは、使用した衛星データの有する1メッシュ=30m×30mと同サイズであり、適用対象範囲を20ライン×28カラムに設定したのについて、地形図を重ね合わせた区分図で示した。この図の評価は、実際の崩壊位置的中率によって、その精度が示されよう。図9に示す崩壊メッシュ数(12個)と、図10に示した「A」の比較により、崩壊的中率92%、未崩壊的中率81%を示す。画素サイズの比較によって示す的中率は、30mメッシュの平均値であるが、「A」の位置に危険度の可能性の大きいことを示した。

6. おわりに

以上、近年多発する土砂災害の中で、集中豪雨に伴う斜面崩壊に対して衛星リモートセンシング技術を適用することにより、崩壊発生要因の高い地盤の絞り込みが可能であることを示した。

危険度区分図のようなデータの利用は、現場における調査範囲の設定や未確認位置の確認などに利用されるものの、さらに今後の数mメッシュ衛星データの出現に期待されよう。

使用したLANDSAT/TMデータの提供は、Space



■ 危険度 A □ 危険度 B ▨ 危険度 C

図10 解析領域の危険度区分図

Imaging EOSAT/宇宙開発事業団のご協力による。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 国土庁編：平成12年度防災白書，pp.1～52，2000.
- 2) 建設省中国地建編：主な災害年史災害写真集，道路防災シンポジウム資料，pp.19～26，1996.
- 3) 前述1)
- 4) 前述2)
- 5) 広島県編：6.29土砂災害（速報版），広島県土木建築部砂防課，1999.
- 6) 宇宙開発事業団ホームページ：<http://www.eoc.nasda.go.jp/>
- 7) 島重章・小川隆一・神谷誠：衛星リモートセンシングを利用した中国自動車道周辺の自然斜面調査，土と基礎，Vol.44，No.1，pp.38～40，1996.
- 8) 島重章・神谷誠・小川隆一：衛星データを用いた数量化法による法面崩壊の危険度評価，(社)地盤工学会四国支部シンポジウム論文集，pp.121～126，1996.
- 9) 島重章・吉國洋・神谷誠・小川隆一：衛星リモートセンシングを利用した法面崩壊発生の予測，土と基礎，Vol.45，No.6，pp.23～25，1997.
- 10) (財)高速道路技術センター編：広島管理局管内のり面防災検討報告書，pp.101～165，1995.