高分解能SARを利用した災害状況把握
Disaster Monitoring using High Resolution SAR

測 図 部　　飯田　洋・渡辺信之・佐藤　潤
Topographic Department　Yo IIDA, Nobuyuki WATANABE, Jun SATO

中国地方測量部　　小荒井衛
Chugoku Regional Survey Department　Mamoru KOARAI

要　旨

合成開口レーダ（SAR）はマイクロ波を利用するため，夜間や雲・噴煙に覆われた状況下などでも地表の情報を取得することができ，特に災害時における状況把握に有効であると期待されている。

本研究では，災害の中で，洪水状況把握，地震災害状況把握，火山噴火状況把握について，SAR技術の適用可能性について調査した。その結果，洪水状況把握においては，2時期SAR画像の輝度値差分法が有効であることが判り，地震災害状況把握については多時期SAR画像の輝度値を利用した相関法が有効であることが判った。また，火山噴火状況把握においては，噴煙等のため光学系センサで画像が取得できない状況において，SAR画像の判読により火口付近の状況が把握できた。さらに，SARデータを用いて干渉処理により作成した噴火後のDEMを，噴火前の火山基本図と比較することにより，火口の陥没状況を捉えることができた。

1．はじめに

災害時に迅速に状況を把握することは，国民の人命・財産を守るために必要不可欠である。また被害の拡大を防ぎ早急に対策を立てるためにも，現場の状況を把握することは重要である。リモートセンシング技術は高高度から広範囲に渡って情報を取得することが出来るので，現場に近づくことが困難な場合や広く状況を把握するために有効な技術である。特にSARはマイクロ波を地面に照射し，その後方散乱波の位相及び強度を受信することによりデータを取得するものなので，光学センサで情報を取得することが困難な夜間や雨天・曇天時，噴煙に覆われた状況下での情報収集に大変有効であると考えられる。

国土地理院では光学センサで災害の状況を把握する技術開発も実施しているが（坂部，2002），本研究ではSARを利用した災害状況の把握を試みた。これは後方散乱波の強度が主に照射マイクロ波の入射角，地表の粗さ，地表の物性に依存するので，災害によって生じた地表の変化が後方散乱波の変化として表れることに依っている。

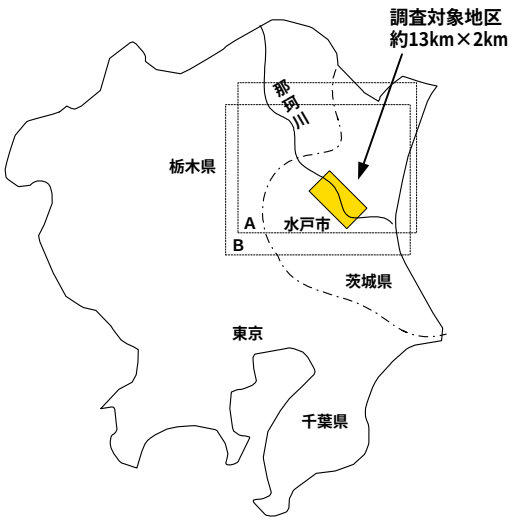
本研究では人工衛星搭載型のSARシステムによって取得されたデータを利用し，洪水状況及び地震災害状況の把握を行った。また，航空機搭載型のSARシステムによって取得されたデータを利用し，火山噴火状況の把握を行った。なお本研究は，国土交通省総合技術開発プロジェクト「災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究」(1999年～2001年度)の１課題として行ったものである。

2．調査地域及び使用したデータ

本研究で調査した地域及び使用したデータを以下に示す。

2.1 洪水状況把握

対象地域　：那珂川流域(水戸市)（図－１）
調査対象範囲　：約13km × 2 km
プラットフォーム：RADARSAT衛星
データ取得年月日：（洪水前）
1997年12月 8 日５時43分
（洪水後）
1998年 8 月29日５時43分
データ範囲　：約75km ×約75km
分解能　：30m
周波数　：5.3GHz(C-band)
入射角条件　：S4(34度～40度)
基線長　：1.174km
照合データ　：1998年８月集中豪雨に伴う水害状況　那珂川下流(茨城県)(国土地理院，1998)
現地聞き取り調査資料



図－１　対象地域（那珂川流域（水戸市））

2.2 地震災害状況把握

対象地域　：神戸市（図－２）
調査対象範囲　：５km×６km
プラットフォーム：JERS-1衛星
データ取得年月日：（地震前）
A：1993年11月22日10時36分
B：1994年１月５日10時35分
（地震後）
C：1995年２月５日10時38分
分解能　：レンジ18m×アジマス６m
周波数　：1.275GHz（L-band）
オフナディア角　：約36度
基線長　：AB間0.89km
BC間4.45km
照合データ　：平成７年兵庫県南部地震災害現況図（第Ⅱ版）（国土地理院，1995）

図－２　対象地域（神戸市）

2.3 火山噴火状況把握

対象地域　：三宅島
プラットフォーム：航空機（セスナ208）
データ取得年月日：2001年１月16日
分解能　：1.5m
周波数　：9.555GHz（X-band）
オフナディア角　：55度
観測コース　：火口中心より４km地点の東西南北４方向（火口付近の入射角約45度）
火口中心より８km地点の東西南北４方向（火口付近の入射角約65度）

3．洪水状況把握

3.1 浸水域抽出方法

洪水前後のRADARSAT衛星のSAR画像を用い，その後方散乱波の輝度値の変化より浸水域を抽出した。照射されたマイクロ波は地上で散乱されるが，水が存在すると鏡面反射をおこし，その後方散乱波の強度は極端に低下する。本手法はこの現象を利用している。この手法は，小西ら（1999）などにより報告されており，その定性的有意性はすでに実証済みであるが，本研究では1998年８月28日に起きた那珂川の洪水を対象に，より定量的な精度を議論するため，幾何補正方法，輝度補正方法及び照合データの精度向上に努めた。以下に浸水域抽出法の詳細を示す。

１）SAR画像の幾何補正

２時期のSAR画像における後方散乱輝度値の差分を利用するためには，両SAR画像は正確に位置あわせを行う必要がある。本研究では基準画像としてデジタルオルソフォトを作成し，このデジタルオルソフォト中に明確に識別できる地点を地上基準点（GCP）として，SAR画像の幾何補正を行った。今回はGCPとして８点取得し，SAR画像に対してアフィン変換による幾何補正を行った。その結果，基準画像との較差は，1997年12月８日のSAR画像で平均二乗誤差0.68ピクセル（1σ），1998年８月29日のSAR画像で平均二乗誤差0.65ピクセル（1σ）となり，ずれは１画素以内となった。

２）SAR画像の輝度補正

洪水域を抽出するためには，浸水現象以外の散乱影響を出来るだけ同一にする必要がある。入射角はほぼ同一であるので，本研究では２時期間の植生の変化による輝度値変化の影響を取り除いた。すなわち浸水を間違いなく受けていない地域において，水田，畑，都市部の３種類のトレーニングエリアを設定し，洪水の前後の画像において両地域の後方散乱輝度値の分布特性を調べた。その結果，水田地域において２画像間に有意な変化が存在したので，水田域において洪水前後の輝度値の分布特性が同一になるように輝度補正をおこなった。なお，後方散乱輝度値はダイナミックレンジの幅を小さくするために下記の式を用いdB変換を行った。

$X(i,j)=20\log_{10}(I(i,j))$

ここで，$I(i,j)$は後方散乱輝度値を，i,jは画像の座標値を示す。

３）照合データ作成

照合データは国土地理院（1998）の那珂川水害状況図を参考にした。しかしながら，SARデータを取得した時刻は最も浸水域が拡大した時刻と異なっており，この時刻における浸水域は水害状況図における浸水域と比較して小さいと考えられる。その為，現地聞き取り調査及び洪水時の現地写真を用い，浸水域の修正を行い，最終的な照合データとした（図－３）。

４）差分解析

洪水前後のSAR画像について差分を取ることにより，浸水域の抽出を行った。ここでノイズ除去を図るため，

差分の閾値を３dBとした。すなわち両画像の差分をとった結果，３dB以上の領域を浸水域とみなした。なお，平水時の河川はマスキング処理を行って，処理領域から除いている。

図－３　浸水域の照合データ

５）精度検証

差分解析によって抽出された浸水域を照合データを用いて検証した。

3.2 結果と考察

輝度値差分法で解析した結果を図－４及び表－１に示す。ここで赤の領域は，輝度値差分法で浸水域とみなした領域の内，照合データでも浸水域であった領域を示し，緑の領域は輝度値差分法で浸水域とみなした領域の内，照合データでは浸水域ではなかった領域を示している。また藍の領域は輝度値差分法では浸水域とは見なされなかったが，照合データでは浸水域であった領域を示す。

照合データの浸水域8846ピクセル中，約85.6%にあたる領域においては本手法で抽出に成功した。しかしながら，本手法で浸水域とみなした領域において約36.0%は照合データでは浸水域とはされていない。これは，スペックルノイズが多い等の問題もあると思われるが，現地聞き取り調査等による照合データの修正が完全ではなく，照合データの浸水域がSARデータを取得したときの浸水域と正確に対応していなかったことに起因していると考えられ，より正確な照合データがあれば，正解率は向上するのではないかと期待される。

図－４　輝度値差分法による浸水域抽出

一般に洪水時においては雲の影響で光学系のセンサでは画像を取得できないことが多い。本研究では衛星搭載型のSARを利用したが，航空機等に搭載したSARセンサで迅速に情報を取得し，洪水域の抽出を行えば，災害状況把握や復旧対策等に重要な役割を果たしうると思われる。

表－１　輝度値差分法による浸水域抽出
（単位：ピクセル）

		SAR解析結果		
		浸　水	非浸水	合　計
照　合 データ	浸　水	7,576	1,270	8,846
	非浸水	4,267	197,054	201,321
	合　計	11,843	198,324	210,167

4．地震災害状況把握

4.1 震災域抽出方法

SARデータを利用した震災域抽出に関する過去の研究例としては，浸水域抽出で使用した輝度値差分法を用いる方法（大倉・実渕，1995）や，地震前2時期及び地震前後のSAR画像の対応する小領域で相関を求め，その相関係数の差分から震災域を抽出する方法（米澤・竹内，1998）などが提案されている。

輝度値差分法は建物倒壊による後方散乱輝度値の変化より，震災域の抽出がある程度は可能であるが，他の擾乱要素のために定量的な解析には至っていない。また相関法についても平成７年兵庫県南部地震災害現況図と比較を行い，定性的には良く一致しているとの報告がなされているが，定量的な議論はなされていない。

本研究では上記相関法を用い定量的な議論を試みた。以下に震災域抽出方法の詳細を記す。

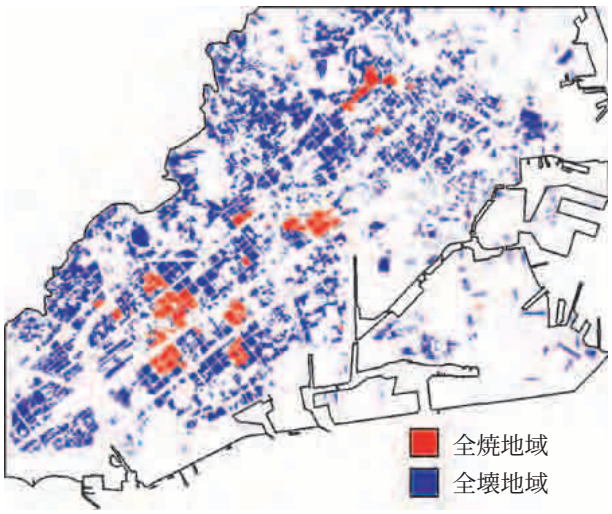
１）SAR画像の幾何補正

３.１浸水域抽出方法で示した方法と同様に基準画像としてデジタルオルソフォトを作成した。このデジタルオルソフォト中にGCPを17点取得し，幾何補正を行った。幾何補正の結果，基準画像との較差は，２.２で示したAの画像でRMSE＝11.93m（1σ），Bの画像でRMSE＝13.71m（1σ），Cの画像でRMSE＝12.89m（1σ）となった。この誤差はレンジ方向には1画素内に収まっているが，アジマス方向には2～3画素の誤差が生じてしまう。このため，相関係数を計算するときにこの誤差を補正する処理を行った。

２）照合データ作成

照合データは国土地理院（1995）の災害現況図を用い

た。印刷図をカラースキャナで読みとった後，災害現況図で「火災地域」に分類された地域を「全焼地域」として，また「倒壊地域」もしくは「大きな破損地域」と分類された地域を「全壊地域」としてポリゴン分けした(図－５)。さらに「全焼地域」及び「全壊地域」を併せて震災域とした。このデータを１）で作成したデジタルオルソフォトを利用して幾何補正した。



図－５　震災域の照合データ

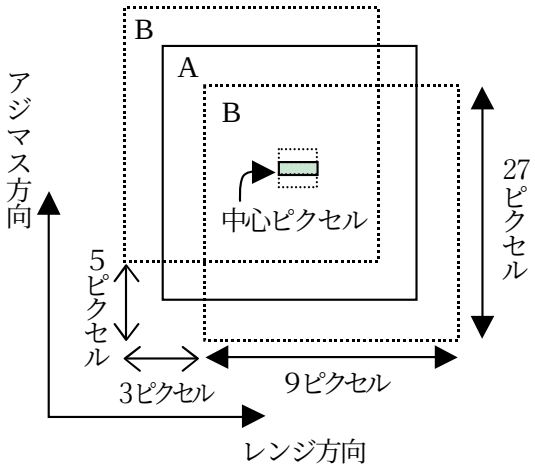
３）相関係数の計算

地震前２時期（A, B）及び地震前後２時期（B, C）の後方散乱輝度値の相関係数を求めた。

図－６に示すように，相関係数計算領域として，９ピクセル×27ピクセルの小領域を設定した。２時期画像の同一小領域において，式－１で相関係数を求めた。

$$\rho = |\Sigma(I_A I_B)| / [\Sigma(I_A^2)\Sigma(I_B^2)]^{1/2} \quad \cdots(式－1)$$

ここでI_A及びI_Bは2時期における同一ピクセルの画素値を示し，Σ( )は画像の小領域内の和を示している。



図－６　相関係数計算領域

１）で示したが，幾何補正時の誤差により画像間で位置ずれのおそれが有るので，１番目の画像に対し，２番目の画像をレンジ方向に±１ピクセル，アジマス方向に±２ピクセル相当分だけ相関係数を計算する小領域を移動して，それぞれで相関係数を計算することにより計15個の相関係数を得た。そしてこの15個の相関係数の中で一番大きい値を，１番目の画像の中心ピクセルにおける相関係数の値とした。

この計算を画像全域に適用して，最終的に画像全域の相関係数を得た。

４）差分解析

上記手法で求めた，地震前2時期及び地震前後２時期の相関係数の差分を，式-2により求めた。

$$N = (\rho_{AB} - \rho_{BC}) / (\rho_{AB} + \rho_{BC}) \cdots(式－2)$$

ここでρ_{AB}はAB間の相関係数を，ρ_{BC}はBC間の相関係数を表す。またNはN≦1.0の値を取る。地震の影響で建物の崩壊や焼失により相関係数が変化するために，N値も変化する。ここでは閾値として，0.10，0.15，0.20を使用し，この閾値を超えた地域を震災域とみなした。

５）精度検証

差分解析によって抽出された震災域を照合データを用いて検証した。この時，アジマス方向に３ルック合成し，18m×18mグリッドの照合データと解像度を揃えた。

4.2 結果と考察

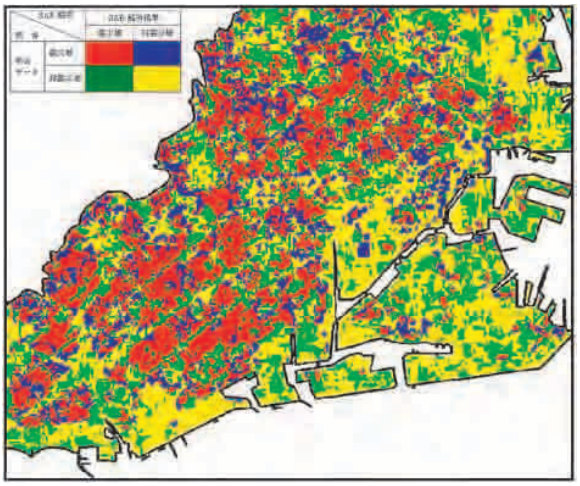
閾値Nを 0.10，0.15，0.20とした時の結果を，表－２，３，４及び図－７，８，９に示す。ここで赤の領域は，相関法で震災域とみなした領域の内，照合データでも震災域であった領域を示し，緑の領域は相関法で震災域とみなした領域の内，照合データでは震災域ではなかった領域を示している。また青の領域は相関法では震災域とは見なされなかったが，照合データでは震災域であった領域を示す。

相関法は単純な輝度値差分法と異なり，まとまった領域における輝度値変化を反映している。従って建物等の倒壊による輝度値の変化を捉えるのは，相関法の方が適していると考えられる。本研究において閾値が小さい（閾値：0.10≦|N|）場合，照合データの震災域において相関法で抽出できる領域（正解領域）は64.6%であり，一定量の領域を抽出することができた。しかしながら相関法で震災域と見なした中で，照合データでは非震災域である領域（不正解領域）も55.1%とかなり大きくなってしまう。閾値を大きく（閾値：0.20≦|N|）すると，不正解領域は49%と減少するが，同時に正解領域は38.6%と大幅に減少してしまう。閾値が大きいということは相関係数の差が大きいことを示し，地震前後で地表状態に大規模な変化があったことを示す。建物等の破壊により地震前後では後方散乱輝度値に変化が生じるのは予想さ

れるが，元々建物があったところは後方散乱輝度値も大きく，建物等の破壊によって後方散乱輝度値が変化しても大きな変化とはならず，閾値を上げても正解率が上がらない理由と考えられる。

表－２　相関法による震災域抽出（閾値：0.10≦|N|）（単位：ピクセル）

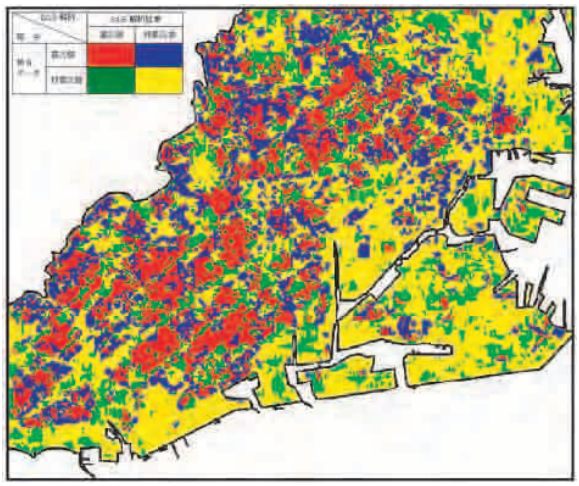
		SAR解析結果		
		震　災	非震災	合　計
照合データ	震　災	14,074	7,721	21,795
	非震災	17,283	19,174	36,457
	合　計	31,357	26,895	58,252



図－７　相関法による震災域抽出（閾値：0.10≦|N|）

表－３　相関法による震災域抽出（閾値：0.15≦|N|）（単位：ピクセル）

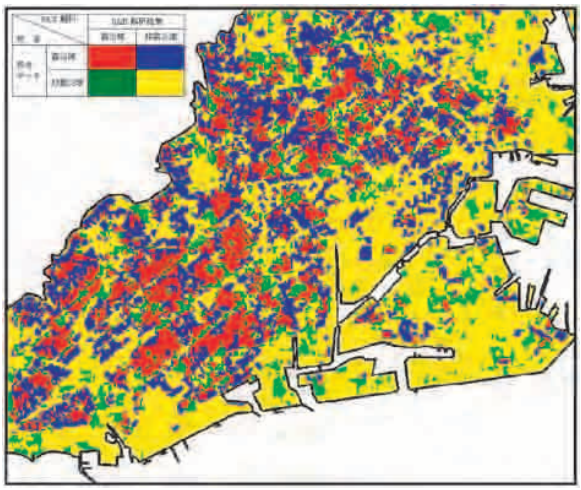
		SAR解析結果		
		震　災	非震災	合　計
照合データ	震　災	10,971	10,824	21,795
	非震災	11,791	24,666	36,457
	合　計	22,762	35,490	58,252



図－８　相関法による震災域抽出（閾値：0.15≦|N|）

表－４　相関法による震災域抽出（閾値：0.20≦|N|）（単位：ピクセル）

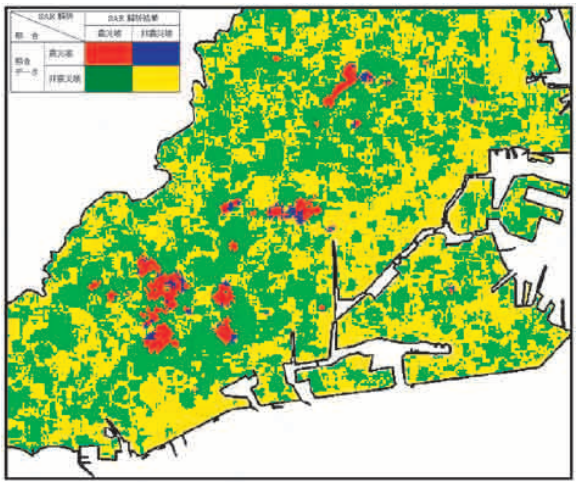
		SAR解析結果		
		震　災	非震災	合　計
照合データ	震　災	8,405	13,390	21,795
	非震災	8,088	28,369	36,457
	合　計	16,493	41,759	58,252



図－９　相関法による震災域抽出（閾値：0.20≦|N|）

表－５　震災域における全焼域抽出（閾値：0.10≦|N|）（単位：ピクセル）

		SAR解析結果		
		震　災	非震災	合　計
照合データ	震　災	1,517	303	1,820
	非震災	29,840	26,592	56,432
	合　計	31,357	26,895	58,252



図－10　震災域における全焼域抽出（閾値：0.10≦|N|）

震災域の中で全焼地域に注目すると，表－５及び図－10が得られる。閾値：0.10≦|N|の場合，照合データの全焼域において相関法で抽出できる領域は83.4％であり，全壊域に比べて多くの領域を抽出することができる。これは全焼域においては，建物等がほぼ焼失してしまうため，後方散乱輝度値が小さくなり，その結果，相関係数の差分が大きくなるためと考えられる。

大規模な地震災害被害が発生したときに，被害の概況を迅速に捉えることは災害対策活動に必要不可欠である。本手法のみで正確な災害状況の把握を行うには更なる研究が必要であるが，光学センサなど他の観測手段と併用して被害状態の概況を知ることは，有効な手段であると思われる。

５．火山噴火状況把握

5.1　火口状況の把握方法

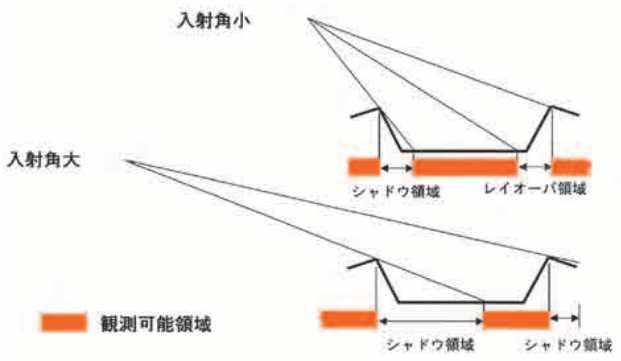
航空機搭載型SARを利用した三宅島雄山の火山噴火に伴う山頂の陥没地形の計測については，長谷川ら（2001）が概略について報告している。本稿では，SAR画像判読による火口部の状況把握及び数値標高モデル（DEM）の作成方法について詳述する。

１）SAR画像を用いた火口部の状況把握

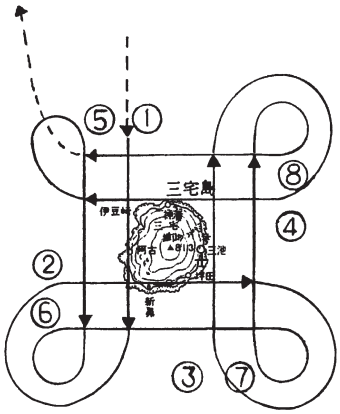
マイクロ波は噴煙や雲を透過するため，地表の状況が光学センサで取得できない時にも情報を収集することができ，大変有効な手段である。

しかしながら火口部のような急傾斜地においては図－11に示すように，レイオーバ（マイクロ波が底部よりも頂部に先に到達し，その結果頂部が底部よりセンサ方向近くに画像再生される現象）やレーダシャドウ（マイクロ波が照射されず再生画像が得られない影の部分）などのレーダに特有な幾何学的性質のため，１回のフライトで火口部全域の情報を得るのは困難である。

このため今回は火口部から４km及び８kmの地点をそれぞれ東西南北４方向にフライトし（図－12），計８画像を得ることにより，火口部全域の情報を得た。



図－11　火口部と観測可能領域の関係
（入射角が小さいと火口底部が観測でき，大きいと火口壁が観測できる）



図－12　三宅島観測コース

２）数値標高モデル（DEM）の作成方法

１）に示したが，三宅島全域のDEMを作成しようとする場合，レイオーバやレーダシャドウによる情報取得漏れを除く必要がある。このため，１）と同様に火口部から４km及び８kmの地点をそれぞれ東西南北４方向にフライトし，計８フライトのSARデータを得た。

国土地理院所有のSARシステムはセスナ機に搭載するため，観測時の強風による機体の動揺により，個々のフライトで得たSARデータを用いて干渉処理により作成したDEMは，満足すべき水平位置精度を得られない。したがって，８フライトで得たDEMを単純に重ねあわせると合成されたDEMの精度が劣化することが予想されるため，機体動揺補正を行った。機体動揺補正は，解析処理時に仮定する直線軌道と実際の観測時における航空機の軌道のずれを，スラントレンジ方向（センサと目標との斜距離）に補正する処理であり，直線軌道上でデータを取得したように位置及び位相補正を行うものである。

このスラントレンジ方向成分を計算するためには航空機の正確な位置と地形情報が必要である。

まず航空機の位置を正確に求めるために，電子基準点及び航空機において１秒間隔でGPSデータを取得した。データ取得後，キネマティックGPSデータ解析を行い，数cm精度の位置データを取得した。また姿勢データは機体に取り付けた４つのGPSにより求めた姿勢角及び慣性計測装置（IMU）により取得した３軸の角速度，加速度より求めた。

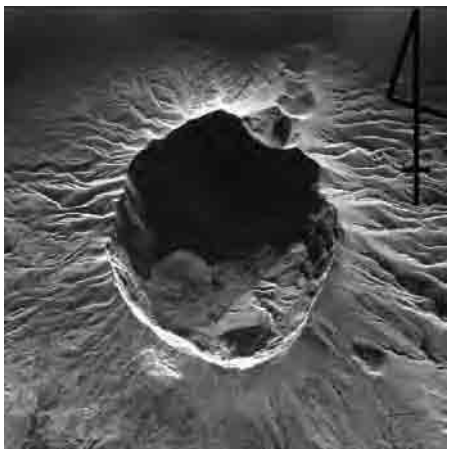
正確な位置データを得ることができたので，地形情報がわかれば機体動揺補正が行えることになる。しかしながら求めようとしているDEMはこの地形情報に他ならないため，あらかじめ正確な地形情報を求めることはできない。そこで，まず平坦面を仮定し，機体動揺補正量を求め，それを基に干渉SAR処理を行って概略DEMを求め，その概略DEMを使用することにより，機体動揺補正量を再度求めるという方法を繰り返し，精度の高いDEMを作成した。この手法により，位置誤差・標高誤差の少ない８方向からのDEMが作成され，これらを合

成することにより，データ欠損領域の少ない火口部のDEMを作成した。

5.2 結果と考察

1）SAR画像判読による火口部の状況把握

取得されたデータの内，火口から北側４km（コース４）をフライトした際に得られたSAR画像（火口部を拡大したもの）を図－13に示す。

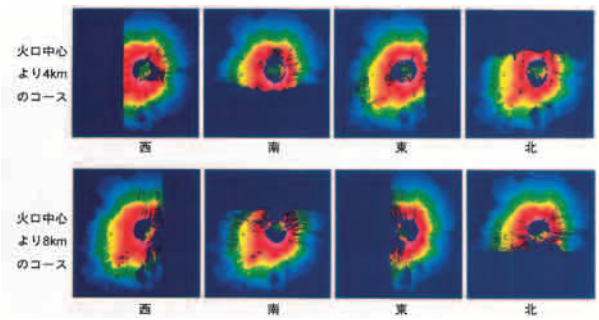


図－13　火口部を捉えたSAR再生画像（火口部水平距離は約1.6km）

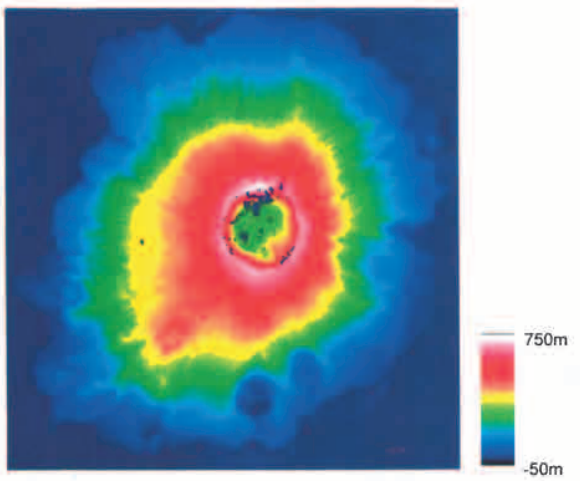
図より，火口の南東部に急傾斜の崖錐堆積物があり，また表面にはガリー状の溝が多数存在することが把握できた。また，後方散乱輝度値が低い場所の内，レーダシャドウによるものとは異なる領域が認められ，水が溜まっている可能性が把握された。なお，４方向から観察された再生画像は，国土地理院のホームページに掲載され，火口部の状況が公開された。（http://www.gsi.go.jp/WNEW/LATEST/MIYAKE/SAR/indexsar.htm）

2）数値標高モデル（DEM）

5.1の2）で示した方法で作成した，三宅島の８方向からのDEM及び合成されたDEMを図－14，15に示す。ここで火口部に存在するデータ欠損領域は火口底にたまった水の影響によるものと思われる。この領域は反射されるマイクロ波強度が小さいためDEMの作成ができ



図－14　干渉SARで得られた三宅島DEM（８方向）



図－15　三宅島合成DEM

きない。

作成したDEMの精度を評価するために，国土地理院の火山基本図「三宅島」（1981年測量，1983年修正）と比較を行った。その結果，陥没領域である火口周辺部３km四方を除いた島全体において，誤差の平均＝-0.37m，RMSE＝5.3mという結果を得た。

三宅島2000年噴火では，火口が大幅に陥没するという特異な形態を示した。今回，SARにより噴火時においても火口部の状況の把握及びDEMの作成が可能であることが示され，陥没量の計算や，陥没の継続性等，火山噴火状況を迅速に把握する手段として特に航空機搭載型のSARが有効であることが示された。

6．まとめ

本稿では合成開口レーダ（SAR）を利用して，洪水，地震，火山噴火時の災害状況を把握する方法について記した（表－６）。

表－６　高分解能SARを利用した災害状況把握

対象災害	プラットフォーム	バンド	手法
洪水	衛星（RADARSAT）	C	輝度値差分法
地震	衛星（JERS-1）	L	相関法
火山噴火	航空機（セスナ208）	X	画像判読 DEM作成

災害前後の後方散乱輝度値の差分より浸水域の抽出に成功し，災害前及び災害前後における後方散乱輝度値の相関係数の変化により震災域を抽出することができた。また噴煙下における火口の状況をSAR画像の判読により把握し，またDEMを作成することにより陥没状況を知ることに成功した。

SARはマイクロ波を利用するため，夜間や雲・噴煙に覆われた状況下などでも地表の画像を取得することがで

き，災害時に迅速に状況を把握する手段として，大変有効であると考えられる。衛星搭載型のSARは広域に情報を収集することが出来るので，洪水や地震災害の全体像を捉えるのにも適している一方，航空機搭載型のSARは災害が起きている現場にフライトすることにより迅速に情報を取得することができ，洪水や火山噴火災害の把握に適している。

しかしながら現段階においては，災害域を正確に抽出することが困難であることや，衛星SARの場合，回帰周期の問題で情報を得たいときに得ることはできないという問題も存在する。

全ての情報をSARで取得するということではなく，情報を収集する一手段として活用していくことが必要であろう。

謝　　辞

本稿を執筆するにあたり，以下の方々にご協力を頂いた。ここに記して感謝致します。
国際航業株式会社　徳田正幸氏，大石哲氏，夏淑輝氏
日本電気航空宇宙システム株式会社　宮脇正典氏

参考文献

大倉　博, 実渕哲也 (1995)，SAR画像による兵庫県南部地震の地表面変化の観測，阪神・淡路大震災関連調査・兵庫県南部地震災害調査報告，pp.75-90.
国土地理院 (1995)，平成７年兵庫県南部地震災害現況図（第Ⅱ版），国土地理院技術資料，D･1-No.322.
国土地理院 (1998)，「1998年８月集中豪雨に伴う水害状況　那珂川下流（茨城県）その１～その２」，国土地理院技術資料，D･1-No.356.
小西智久，竹内章司，菅　雄三，幾志新吉 (1999)，「SARデータと光学センサデータによる洪水域抽出の比較」，日本リモートセンシング学会第26回学術講演会論文，pp.465-468.
坂部真一 (2002)，「災害対応時への衛星データ（可視光，近赤外）利活用について」，第12回国土地理院技術報告会，国土地理院技術資料A･1-No.252, pp.35-36.
長谷川裕之，村上　亮，政春尋志，松尾　馨，小荒井衛 (2001)，「三宅島山頂の陥没地形の計測」，国土地理院時報，No.95, pp.121-128.
米澤千夏，竹内章司 (1998)，「ERS-1/SAR強度画像を用いた兵庫県南部地震による建造物被害地域の抽出」，写真測量とリモートセンシング，VOL.37, No.4, pp.57-61.

以下の文献は本稿を執筆するにあたって参考とした。

小荒井衛，茂木公一，渡辺信之，徳田正幸，大石　哲，河合雅己 (2000)，「SARによる災害状況把握－那珂川水害の例－」，日本リモートセンシング学会第28回学術講演会論文集，pp.55-56.
国土地理院 (2000)，「マイクロ波映像レーダの測量分野への利用に関する検討作業」，国土地理院技術資料，C･1-No.278.
宮脇正典，村田　稔，佐藤　潤，小荒井衛，水野時夫，渡辺信之，飯田　洋，山田陽子，津田勇介 (2002)，「航空機SARによる三宅島火口のDEM作成」，SAR Workshop 2002報告書，pp.32-35.
Masanori Miyawaki, Minoru Murata, Jun Sato, Mamoru Koarai, Tokio Mizuno, Nobuyuki Watanabe, Yo Iida, Yoko Yamada, Yusuke Tsuda (2002),「The DEM Generation of a Volcano using Airborne SAR Interferometry」, Proceedings of IGARSS 2002, June 24-28, Toronto, Canada, 2002.