平成１１年度

「SAR 画像の災害状況把握への適用可能性に関する調査作業」

調査報告書

平成１２年３月

財団法人　リモート・センシング技術センター
REMOTE SENSING TECHNOLOGY CENTER OF JAPAN
建設省国土地理院

はじめに

SAR（Synthetic Aparture Radar）は，衛星や航空機に搭載される地形や海面の波浪，海氷などを鮮やかに写し出すことができる高分解能な画像センサーである．しかも，昼夜，天候を問わず地表の画像が得られという特徴は，災害の監視にうってつけなものである．

ＳＡＲに関する研究は，１９５０年代に米国で始まったが１９６１年に機密が解除されるまでは軍事機密であった．当時はコンピュータが未発達であり，受信信号の記録・再生映像化は光学アナログ処理で行われた．得られた画像は，明るさが不均一であるなど見劣りのするものであった．しかし，電子技術の飛躍的な発展によって，デジタル受信信号のコンピュータを用いた再生映像化が可能となり，画質は飛躍的に向上した．

１９９２年に打ち上げられたＥＲＳ-１（ヨーロッパ宇宙連合）とＪＥＲＳ-１（日本）のＳＡＲ画像が公開され，ＳＡＲ画像データが自由に利用できるようになった．ＪＥＲＳ-１は１９９８年１０月に運用を終了しているが，２０００年２月現在，ＥＲＳ-２（ヨーロッパ宇宙連合），ＲＡＤＡＲＳＡＴ（カナダ）が運用中であり，これらによって新たな画像データが取得されている．さらに，２００２年には，ＰＡＬＳＡＲ（Phased array L-band SAR）を搭載したＡＬＯＳ（日本）の打ち上げが予定されている．

航空機ＳＡＲに関しては，日本では，通信総合研究所／宇宙開発事業団，国土地理院，日本電気，三菱電機がＳＡＲ装置を所有し，観測を行っている．

これら衛星搭載ＳＡＲ，航空機搭載ＳＡＲの画像データを用いて，災害状況把握の研究がなされている．特に，防災分野においては，兵庫県南部地震のような，大規模地震による地震被害地の抽出や地表面の変位の抽出，岩手山などの火山活動に伴う山体の変位などに着目した研究が次々と報告されている．また，１９９７年に日本海で発生した石油流出事故では，流出した原油の拡散状況などの観測にもＳＡＲデータが用いられた．

こうした災害に関するさまざまな観測において，晴天時でなければ良好なデータが取得できない光学センサでは，必要とされる時間にデータが提供されない可能性も高く，先に述べたＳＡＲの特徴が期待される所以である．

ＳＡＲデータから得られた後方散乱係数は，光学センサーのみでは得られない新しい情報源として期待されている．しかし，ＬＡＮＤＳＡＴ以来の画像処理技術の蓄積が応用・展開できる光学系センサのデータ処理・解析と異なり，ＳＡＲに関する画像処理・解析技術は，現時点においても整理・体系化がなされているとは言い難い．さらに，通信総合研究所／宇宙開発事業団の航空機ＳＡＲ，２００２年に打ち上げ予定のＡＬＯＳ衛星のＳＡＲには多偏波観測機能を有しているが，多偏波ＳＡＲデータの災害観測をめざした解析技術も確立していない．

本報告書は，こうした背景を受けて，災害状況把握の為のＳＡＲ画像利用を検討したものであり，各種災害に関してＳＡＲ画像の利用例，利用の課題，近未来の展望をまとめたものである．

本報告書の作成にあたり，災害状況把握の為のＳＡＲ画像利用方法検討委員会を構成し，災害ごとの分担委員を定めその報告を委員会で検討・討議した後まとめた．

委員および分担

■委員長

大倉　博　　防災科学技術研究所　先端解析技術研究部　隔測解析研究室　室長
担当分野：斜面災害

■委員

大村　誠　　高知女子大学　生活科学部　環境理学科　助教授
担当分野：火山活動・水害（日本の事例）

木村　宏　　岐阜大学　工学部　電気電子工学科　助教授
担当分谷：SAR原理（ＳＡＲ技術）

佐竹　誠　　郵政省　通信総合研究所　地球環境計測部　主任研究官
担当分野：SARシステム（航空機SARによる災害状況把握）

竹内　章司　　広島工業大学　環境学部　環境情報学科　教授
担当分野：水害（海外の事例）・森林火災

中山　裕則　　日本大学　文理学部　地球システム科学科　助教授
担当分野：油流出

若林　裕之　　宇宙開発事業団　地球観測データ解析研究センター　副主任開発部員
担当分野：雪氷関連災害（雪氷）

小野　誠　　RESTEC　解析利用本部　主任研究員
担当分野：SARの現状と近未来展望（SAR技術）

米澤　千夏　　RESTEC　研究部　研究員
担当分野：地震被害（建物崩壊）

■オブサーバー

向井　幸男　　ＲＥＳＴＥＣ　理事

東　誠　　ＲＥＳＴＥＣ　データ提供部　部長

■事務局

根岸　せつ子　ＲＥＳＴＥＣ　調査部　部長

関　三恵子　　ＲＥＳＴＥＣ　調査部　調査国際課　技師

委員会開催

第１回　　平成１１年１１月１１日
　調査事例分類
　委員分担決定
　過去事例について
　報告書目次案作成

第２回　　平成１２年１月２０日
　中間報告
　　文献検索結果
　　報告書各項目構成案
　報告書目次案決定

第３回　　平成１２年２月２２日
　文書案について
　　各担当者の内容説明
　　目次案確認
　　文形態について

目次

はじめに

1. SAR 技術

1.1SAR 原理（木村委員）・・・

2.4 火山災害（大村委員）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
2.4.1 火山災害状況把握と SAR の特性
2.4.2 SAR による火山災害観測の事例
2.4.3 まとめ
2.5 地震被害（米澤委員）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 62
2.5.1 都市域における地震の被害
2.5.2 兵庫県南部地震の実例
2.6 雪氷関連災害（若林委員）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 71
2.6.1 SAR 画像を雪氷分野で利用する場合の一般的特徴
2.6.2 積雪に起因する災害
2.6.3 陸氷に起因する災害
2.6.4 海氷に起因する災害
2.6.5 氷山に起因する災害
2.6.6 雪氷関連災害を状況把握するための SAR に対する要求
2.7 油流出（中山委員）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 77
2.7.1 SAR データによる油流出状況把握
2.7.2「ナホトカ号油流出事故」における SAR の利用事例
2.7.3 その他の事例
2.7.4 SAR データによる油流出状況把握の展望

1. ＳＡＲ技術

1.1　ＳＡＲの原理

ＳＡＲ（合成開口レーダ：Synthetic Aperture Radar）は，マイクロ波と呼ばれる電磁波（波長1mm（周波数 300GHz）～1m（同 0.3GHz）の電磁波）を地表に向けて照射し，地表からのその散乱波を受信して映像化する能動型センサである．波長数 cm 以上のマイクロ波は，大気の透過率がほぼ 100%であり，さらに雲や雨等にじゃまされずに伝搬するため，可視光や赤外線領域の光学センサと異なり全天候下で地表観測が可能である．また，マイクロ波の波長は光領域に比べて 6 桁程度長いため，観測情報や画像の特徴も光学センサのものとは異なる．

基本的な知識として，周波数fと波長λ，大気中の光速c(3.0×10^{8}m/s)の間には次の関係がある．

$$f = c/\lambda \tag{1.1.1}$$

周波数の単位に用いられる GHz は Hz の 10^9倍，MHz は 10^6倍，kHz は 10^3倍である．マイクロ波領域のスペクトルは，表1.1.1 のようなバンド名称が国際電気通信連合（ＩＴＵ）に採用されており，周波数や波長の変わりにバンド名を引用することがよくある．また，dB(デシベル)という単位は，ある基準電力値P_0に対する比P/P_0を次式で変換したものである．

$$X = 10\log_{10}(P/P_0) \tag{1.1.2}$$

基準電力値P_0の設定には任意性がある．ちなみに，30dB，20dB，10dB，0dB，-10dB，-20dB，-30dB はそれぞれ，1000 倍，100 倍，10 倍，1 倍，1/10，1/100，1/1000 を意味する．

表1.1.1　マイクロ波領域のスペクトルバンド[1)]

バンド	P	L	S	C	X	K	Q	V	W
周波数 (GHz)	0.30 ～0.39	0.39 ～1.55	1.55 ～3.9	3.9 ～5.75	5.75 ～10.9	10.9 ～36	36 ～46	46 ～56	56 ～100
波長 (cm)	100 ～77	77 ～19	19 ～7.7	7.7 ～5.2	5.2 ～2.8	2.8 ～0.83	0.83 ～0.65	0.65 ～0.54	0.54 ～0.10

1.1.1　ＳＡＲの観測原理

ＳＡＲはレーダの一種である．レーダの語源 RAdio Detection And Ranging が示すように，レーダの主機能は目標物の検出と測距である．この機能を発展させて，目標物の 2 次元分布映像を得るのが映像レーダで，ＳＡＲもその一つである．近年，人工衛星や航空機をプラットホームとする映像レーダのほとんどはＳＡＲである．映像レーダは，図 1.1.1.1 のようにプラットホームの移動に伴なって，マイクロ波パルスを進行方向と直角に繰り返し発射し，地表からの反射波のうちレーダに戻ってくる波（後方散乱波という）を受信する．レーダからr(m)だけ離れた目標物からの後方散乱波は，パルス送信後 $2r/c$(s)に受信される．つまり，パルス照射方向（距離方向あるいはレンジ方向という）については，受信波の遅延時間と地表の位置とが 1 対 1 に対応するので，受信信号の時刻変化がそのまま地上を走査したものに等しくなる．この走査をプラットホームの移動に伴なって繰り返すことにより，進行方向（方位方向あるいはアジマス方向という）についても走査することとなり，地表からのマイクロ波後方散乱の２次元分布を映像として得る．

映像レーダの空間分解能は，レンジ方向についてはレーダのパルス幅が短いほど，アジマス方向についてはアンテナのビーム幅が狭いほど向上する．ＳＡＲでは空間分解能を向上するため，レンジ方向については一般のレーダでも利用されているパルス圧縮技術を，アジマス方向については合成開口技術を用いる．合成開口技術によりアジマス方向の分解能を向上させた映像レーダをＳＡＲという．合成開口技術は，小さなアンテナで等価的に大きなアンテナ（ビーム幅が狭い）を合成する技術で，その原理は次のとおりである．

レーダは移動しながら，同じ場所が数百回から数千回も照射されようにパルスの送信と反射波の受

信を繰り返す．レーダは地表に対して運動しているため，反射波はドップラ効果により周波数が変調する．広いビーム幅の中には多数の散乱体があり，受信信号はこれら全ての散乱体からの反射波の合成となるが，個々の散乱体はレーダとの位置関係が他と異なるため，個々の散乱体からの反射波の周波数は異なっている．従って，受信信号から特定の位置にある散乱体からの反射波のみを加算して他の散乱体と分離して圧縮することにより，等価的にビーム幅の狭いアンテナで捉えた場合の信号を再現できる．この場合の圧縮は，パルス圧縮と原理的に同様で，受信波の信号処理によって実現される．

合成開口方式での分解能の理論限界はアンテナの物理長の 1/2 である．しかし，最終的分解能は信号処理系によって決まる．衛星ＳＡＲは 10m 程度のアンテナを用い，等価的に数 km から 10 数 km の長さのアンテナを合成し，20m 程度の空間分解能を得ている．数 km から 10 数 km の長さのアンテナを衛星に搭載することは現実的に不可能であり，合成開口方式が極めて有効な技術であることが認識できる．また，合成開口やパルス圧縮では，信号対雑音比(S/N)の向上を伴う．衛星ＳＡＲでは，レーダ・地表間の距離が長いために受信波の減衰が極めて大きいが，合成開口とパルス圧縮がS/Nの改善にも寄与している．

1.1.2　ＳＡＲ画像の情報表現

ＳＡＲの受信信号は，生データの段階では画像となっていない．ＮＡＳＤＡのＪＥＲＳ－１レベル０プロダクトはこの段階に属する．これに対して，パルス圧縮と合成開口の信号処理を施すことによって，初めて画像形式のデータに変換される．この過程の処理は，一般に圧縮処理，画像再生処理，相関処理などと呼ばれる．

画像となったＳＡＲデータの画素値$z(x,y)$は，基本的に次の形式で表現される．

$$z(x,y)=a(x,y)\exp[j\phi(x,y)] \qquad (1.1.2.1)$$

$$\phi(x,y)=-4\pi r/\lambda+\phi_s(x,y) \qquad (1.1.2.2)$$

ここで，x，y はそれぞれレンジ座標およびアジマス座標である．式(1.1.2.1)は，画素値が振幅 a と位相ϕをもつ複素数であることを意味する．a は後方散乱強度の振幅に比例する．位相ϕは式(1.1.2.2)で表せる．第 1 項は，レーダ・目標物間の往復の伝搬位相で，r はレーダ・目標物間の視線距離，λ はレーダ波長である．第２項ϕ_sは後方散乱時の変化位相である．

普通の多くのＳＡＲ画像は，図 1.1.2.1 に示した富士山周辺のＪＥＲＳとＥＲＳのＳＡＲ振幅画像のように，振幅 a の濃淡分布表示画像である．これに対して，1.1.5 のインターフェロメトリでは位相情報を，ポラリメトリでは振幅と位相の両情報を利用する．図 1.1.2.1 では，同じ場所であるにももかかわらず，2 つの画像の特長が異なる．その理由は，両ＳＡＲに対する地表のマイクロ波後方散乱特性が異なるためである．次項では，そのマイクロ波後方散乱について記述する．表1.1.2.1 には，両衛星ＳＡＲの主要パラメータを示した．

表1.1.2.1　ＪＥＲＳとＥＲＳのＳＡＲ主要パラメータ

	ＪＥＲＳ	ＥＲＳ
周波数（波長）	1.275GHz(24cm)	5.3GHz(5.7cm)
偏波（送信/受信）	H/H	V/V
レーダ入射角	38°	23°
レーダ照射方向（下降軌道/上昇軌道）	東から西/西から東	東から西/西から東
空間分解能	18m	30m

1.1.3　マイクロ波の後方散乱

通常のＳＡＲ画像では，画像の輝度がマイクロ波の後方散乱の強弱を示す．一般的白黒画像では，

強い後方散乱ほど明るく(白)，弱い後方散乱ほど暗く(黒)表現される．ＳＡＲに写るマイクロ波の後方散乱や反射・散乱は，大気と地表の電気的特性（誘電率）の不連続部分で発生する．その後方散乱強度の大きさは，周波数，偏波，入射角，照射方向，表面粗さ，散乱体の誘電率に依存する．また，地表表層におけるマイクロ波後方散乱は図 1.1.3.1 のように，(a)～(c)の表面散乱と(d)の体積散乱に大別できる．表面散乱は大気と地表表層境界で起こる散乱であり，体積散乱は表層下内部でおこる散乱である．物体表面に入射したマイクロ波は，一部が反射・散乱し，残りは表面下に透過する．透過波は，一部が物体内で散乱されつつ吸収されながら深部に進む．従って，一般化した散乱は，表面散乱と体積散乱の和であり，それぞれの重みが対象物によって異なると考えられる．表面散乱が卓越する代表的物体が海である．また，体積散乱が卓越する物体の代表は，乾燥した土壌や雪氷である．

(1)表面散乱

表面散乱に影響する大きな要因の一つが地表面粗さである．概念的には図 1.1.3.1 が示すように，滑らかな地表面がほど鏡面反射が卓越して後方散乱は弱く，逆に粗い地表面ほど鏡面反射は小さく後方散乱が大きくなる．地表面の粗さの程度は，マイクロ波の波長λに対する相対的な高さの標準偏差σ_hおよび入射角θによって決まる．例えば，滑らかさの境界基準として次の２つがある[4]．

レーリー基準：　$\sigma_h=\lambda/(8\cos\theta)$　(1.1.3.1)

フランホーファー基準：　$\sigma_h=\lambda/(32\cos\theta)$　(1.1.3.2)

具体的には，ＪＥＲＳ－１の場合(λ=0.24m, θ=38°), σ_h=1cm～4cmが，ＥＲＳ－１の場合(λ=0.057m, θ=23°），σ_h=2mm～8 mmがその境界となる．

式(1.1.3.1)と(1.1.3.2)は，地表面粗さによる散乱が，地表面の物理的な凸凹だけでなく，さらに入射角の影響も受けることを示す．図 1.1.3.2 は後方散乱強度の入射角変化を 3 種類の粗さの地表面について示したものである．滑らかな地表面ほど入射角による変化が大きい．また，入射角の大小で，表面粗度と後方散乱強度の関係が逆転する．小入射角では滑らかな面ほど後方散乱が大きく，大入射角では逆に粗い面ほど後方散乱が大きくなる．これは，小入射角では，鏡面反射成分が後方散乱成分に寄与し，滑らかな面ほどこの鏡面反射が大きいためである．

図 1.1.2.1 のＳＡＲ画像で，例えば山中湖や河口湖が両画像で暗い理由は，湖面が鏡のように滑らかなためである．一方駿河湾は，ＪＥＲＳ画像が一様に暗いのに対して，ＥＲＳ画像には一部に明るい領域が現れている．この明るい領域では，海面の凸凹が 1cm～4cm 程度に達していると推察される．

大気や地球は誘電体と考えることができるが，散乱や反射はその誘電率の不連続面で生じる．誘電率は，大気がほぼ１であるのに対して，周波数1GHz～10GHzの水・海水が40～90，海氷2.5～4，真水氷 3.2，乾燥雪 1.2～2.0，湿雪 1.2～3.6，岩石 2～10，土壌 2.5～30 である．大気との誘電率の違いが大きいほど反射・散乱は大きく，自然の散乱体では含まれる水の量によって誘電率が変動する．図 1.1.3.3 は，4.5 GHz において測定された土壌水分と後方散乱強度の関係である．土壌水分の0.0g/cm^{3}から 0.3 g/cm^{3}への増加に伴い，後方散乱強度に 10 倍近い増加がみられる．同図では，3 種類の異なった表面粗度の土壌を一緒に示してある．後方散乱が表面粗度や波長，入射角の影響を受けることを先に示したが，Ulaby らは，4.25 GHz や 7.25 GHz の入射角 10°～20°において（図 1.1.3.3 の状況と同じ），あるいは 1.1 GHz の入射角 10°において，後方散乱強度が地表面粗度の影響を受けず，土壌水分のみで変化することを示した[7]．

(2)体積散乱

誘電率の不連続は，大気と地表面の境界だけでなく，境界下の地表物質内部にも存在する．入射マイクロ波の一部がこの地表物質の内部に透過し，さらにこの物質内部に誘電率の不連続があった場合には，その不連続部で透過波の反射・散乱が起こる．このような散乱は体積散乱とよばれる．代表的な体積散乱物質が土壌や雪氷であり，巨視的に考えれば森林等の植生も空気，葉，枝，幹の混成による体積散乱物質といえる．体積散乱には，透過波の存在が不可欠である．図 1.1.3.4 は典型的地表について，体積散乱の違いを 3 つの周波数で比較したものである．Ｌバンド(23cm)あるいはそれ以下の周波数は比較的透過力が強いため，表面だけでなく森林内部や土壌，雪氷内部でも散乱が起こる．

周波数が大きくなると（波長が短くなると），透過力は低下し，X バンド(3cm)あるいはそれ以上の周波数では，森林の樹冠頂部，土壌や雪氷では表面およびその近傍だけで散乱が起こる．

図 1.1.3.4 は透過の程度を強調しすぎているきらいがある．例えば，森林樹冠部における L バンド透過力は，6m で電力が 1/2 程度に減衰する [8]．透過に影響する周波数以外の要因の第一は，含水量である．物質が含む水の量が増えると，伝搬中の減衰が大きくなり透過力が低下する．以前，アフリカの砂漠の下に埋もれた古代地形を，ＳＡＲが露呈したという例が注目された．これは，極度に乾いた砂漠の砂に L バンドのマイクロ波がよく透過したためで，透過の最大は，深さ 3m 地点で電力約 1/10 と調査されている [9]．これは，極度に乾燥した土壌の例である．この他，米国の比較的乾いた砂漠(質量含水率 3～5%)では，L バンドの透過力は 1m で電力 1/10 から 1/1000 以下という例がある [8][10]．さらに，物体中で散乱されたマイクロ波は，レーダ方向に戻る過程でもう一度同じ量の減衰を受ける．従って，湿った土壌では，透過による地下深くからの散乱はあまり期待できないと考えられる．雪氷では，表面近傍や内部の水分状態よって表面散乱と体積散乱の大きさやそれぞれの重みが大きく変わると考えられている．

図 1.1.2.1 では，富士山麓の北側や東側，西側の一部にＪＥＲＳ画像では暗く，ＥＲＳ画像では周囲と同じような明るさで写っている場所があるが，このような場所は草地あるいは裸地である．その他の山麓部はほぼ森林であり，波長 6cm のＥＲＳ画像では裸地や草地，森林での後方散乱強度の違いが小さいことが分かる．

(3)レーダ照射方向

建物の壁面と電波の到来方向が直交するような市街地では，後方散乱が強く現れる．例えば，図 1.1.2.1 の駿河湾北部富士から沼津にかけて見える明るい領域のほとんどがこれで説明できる．強い後方散乱が生じる理由は，壁にあたった電波がさらに下の地面で反射するために強い電波がレーダに戻る，あるいはその逆の経路でレーダに戻る強い電波が生じるためである．このような構造は，建物地だけでなく，同じような構造をもつ堤防や橋梁，道路，水路等でも起こる．注意が必要なことは，このような構造による強い後方散乱は，構造の面がレーダ照射方向に直交かあるいは±10°～±20°の範囲でのみでおこることである．この範囲から外れると，同じ構造であっても後方散乱は急激に減少する [11]．

(4)偏波

偏波は電界ベクトルの方向で定義される．ＳＡＲでは送信と受信の偏波を規定し，もっぱら水平偏波(H)と垂直偏波(V)の 2 種が利用される．現在の衛星ＳＡＲでは，1 通りの組合せとして HH または VV が用いらる．これに対して，多くの航空機ＳＡＲでは，HH，HV，VH，VV の 4 種の組合せが採用されている．このような 4 種の偏波の組合せからレーダポラリメトリという手法が発展している（1.1.5(3)参照）．

波長に比べてあまり粗くない海面や裸地の地表面では，Bragg 共鳴散乱 [12]と呼ばれる散乱が起こる．この散乱では，VV 偏波の散乱強度が HH 偏波の散乱強度より大きくなり，さらに HV 偏波や VH 偏波の散乱強度は小さくなる．また，斜めに伸びた枝をもつ樹木からの後方散乱では，散乱時に偏波の回転が起こるため，HV 偏波や VH 偏波の後方散乱が，裸地や海面よりも強く生じる．

1.1.4 ＳＡＲ画像の特徴

(1)幾何学的な歪み

ＳＡＲ画像の幾何学的特徴として，図 1.1.4.1 示す幾何学的な歪みある．このような歪みは，レーダに現れる像のレンジ方向位置が，レーダとターゲット間の距離を表すというレーダの性質に起因する．本来のレーダ画像のレンジ方向表現は，図中の視線距離形式に従い，レーダとターゲット間の距離（これを特に「視線距離」という）に対応している．図(a)は平面を観測した場合であるが，レーダが斜めから観測すると，地上に等間隔に並ぶ abc は，視線距離形式では等間隔に並ばない．これでは，地上の距離を測れないために都合が悪い．そこで，多くのレーダ画像では平らな地表を仮定して，平面上の abc が等間隔に並ぶ地上距離形式に補正されている（ＮＡＳＤＡのレベル 2.1 のプロ

ダクト等）．

図(b)は斜面を観測した場合である．真上から見れば，abc が等間隔に並ぶが，標高の高い b がレーダに近づくため，レーダ画像上の位置は b_1 となる．従って，レーダに面する斜面(ab)がレーダ側に倒れ込み短く写る(ab_1)．この現象は「フォアショートニング」と呼ばれる．一方，後ろ向きの斜面(bc)は逆に長く写る(b_1c)．図(c)は斜面の傾斜角がレーダの入射角よりも大きくなった場合である．標高の高い地表点がさらにレーダに近づくため，真上から見た並び abc がレーダ画像では b_1ac となって b の位置に逆転が生じる．この現象は「レイオーバ」と呼ばれる．図(d)はＳＡＲに背を向ける斜面の傾斜が大きい場合である．この場合，bcd の区間が斜面の影になって見えなくなる．この現象は，「レーダシャドー」と呼ばれ，画像中の b_1cd の区間には地表の後方散乱の情報は一切含まれない．

図 1.1.2.1 で，山岳部の斜面がレーダ側に倒れこんだように見える歪みのほとんどは，上記のフォアショートニング歪みである．富士山山頂部では，ＪＥＲＳとＥＲＳの画像が著しく異なる．これはレーダ入射角の小さなＥＲＳの方では，レイオーバが生じているためである．これらの幾何学的歪みは，地形を強調する効果をもつ．

(2)ラジオメトリックな特性

ＳＡＲのようなレーダやレーザでは，スペックルと呼ばれる 1 種のノイズとも考えることができる後方散乱強度のゆらぎがおこる．均質一様なターゲットからの後方散乱強度にゆらぎが生じ，画像にはこのゆらぎが砂模様のようになって見える．その理由は，ＳＡＲ画像の 1 画素あるいは 1 分解能セル中には，実はたくさんの散乱体が存在し，その散乱体の 1 個 1 個が式(1.1.2.1)のような後方散乱振幅と位相を独立にもっているためである．1 画素あるいは 1 分解能セルの後方散乱は，個々の散乱体の後方散乱の和となるが，和をとると強め合ったり弱め合ったりしてゆらぐためである．

スペックルを抑えるため，ＳＡＲでは基本的にルック加算平均という考えが採用されている．ルックとは独立な画像と等価な意味をもつ．ゆらぎが異なる別々の画像の電力加算平均によりゆらぎを低下させる．通常，ＪＥＲＳでは 3 つのルックを，ＥＲＳでは 5 つのルックを生成し，これを加算平均する．ルック加算平均の等価的方法として，空間平均法がある．ＳＡＲのアジマス方向分解能の理論的限界はアンテナ長の 1/2 で，ＪＥＲＳの場合は 6m となるが，3 ルックの加算後に分解能 18m という設計になっている．空間平均法は，元のＳＡＲ画像でスペックルの抑制が不十分な場合に，簡便で有効な方法である（2.7 の例参照）．この他，画像中のエッジ等の構造を保存しながら滑らかにするというような目的のフィルタも多数提案されている．

ＳＡＲ画像の輝度はマイクロ波の後方散乱の強度を表すが，広がりをもつ地表面の後方散乱強度を定量的に表すのに用いられるのが（規格化）後方散乱係数で，σ^0 と表記される．一方，対象物の実効的な散乱面積である σ は後方散乱レーダ断面積と呼ばれ，$\sigma^0=\sigma/A$ の関係がある．ここで，A は画素の地上面積である．σ も面積の次元をもつので，σ^0 は無次元になるが，その解釈は，単位面積当たりの後方散乱レーダ断面積（m^2/m^2）である．後方散乱係数は，例えば図 1.1.3.3 の縦軸のように，後方散乱強度を普遍化するために使われる．σ^0=0dB の物理的意味は，「波長に対して十分に大きな金属球を密に敷き詰めた面からの後方散乱強度に等しい」と考えることができる．金属球は入射電力のすべてを全方向に等しい強度で散乱するので，入射電力が全方向に等しく散乱される場合との比と考えることもできる．

ＮＡＳＤＡのレベル 2.0 以降のプロダクトやその他の校正済みと称するプロダクトでは，画素値を後方散乱係数に変換できる．後方散乱係数に変換したデータを扱うことにより，データ間の絶対比較が可能となる．一般に画素値からの変換式は次式で表せる．

$$\sigma^0 = 20 \log I + CF \ (dB) \qquad (1.1.4.1)$$

ここで，I は画素値（振幅値），CF は補正係数である．ＮＡＳＤＡプロダクトについては，例えば，ＪＥＲＳでは CF=−70(dB)，ＥＲＳでは CF=−65.3(dB)である [14]．CF の値は，処理のバージョン等によって随時更新される．また，一般のプロダクトでは平坦地表を仮定して校正されているため，斜面については正確な後方散乱係数を得ることはできない．

1.1.5　ＳＡＲ画像の利用

(1)後方散乱強度の判読・解析

最も基本的な利用が図 1.1.2.1 のような後方散乱強度画像の判読や定量解析である．特に地形や地物，海面現象が判読される．定量解析では，前述のように，実際の地表のマイクロ波後方散乱には，表面粗さ，構成散乱体，水分等複数のパラメータが関わる．また，周波数や偏波，入射角，照射方向によっても変化するため，後方散乱強度と地表の状況を関係付けることは単純ではない．しかし，ある特定の状態であれば，あるいはその状態が分かれば，複数の波長や，偏波のＳＡＲ画像を組み合わせることによって，植生のバイオマスや分類，土壌水分，表面粗度に関する情報を抽出することが可能である．

(2)インタフェロメトリ（干渉）

1.1.2 で述べたように，ＳＡＲ画像の基本画素値は複素数であり，振幅と位相の２つの情報を有する．振幅は，散乱電界の振幅に比例する量であり，位相は次式で表せる（1.1.2.1 の再出）．

$$\phi = -4\pi r / \lambda + \phi_s \qquad (1.1.5.1)$$

ここで，r はレーダ・目標物間の視線距離，λはレーダ波長，ϕ_s は後方散乱時の変化位相である．つまり，位相はレーダとターゲット間の往復の伝搬と散乱時の変化分からなる．図 1.1.5.1 に示すように２つの軌道から得られた２つのＳＡＲ画像での位相差は，ϕ_sが同じと仮定すれば次式となる．

$$\Delta\phi = 4\pi B \sin(\theta - \alpha) / \lambda \qquad (1.1.5.2)$$

ここで，B は基線長（アンテナ間の距離），αは基線の傾き角，θは入射角である．なお，同時に 2 つのアンテナを利用する場合，位相差$\Delta\phi$は式(1.1.5.2)の半分の値となる．また，地形の標高は次式で表せる．

$$z = H - r\cos\theta \qquad (1.1.5.3)$$

ここで，Hはレーダ高度である．もし，B，α，λ，H，rが既知であれば，位相差$\Delta\phi$と式(1.1.5.2)からθを知り，さらに式(1.1.5.3)から標高 z を求めることができる．式(1.1.5.2)と(1.1.5.3)からは，基線が長いほど標高精度の向上が導かれるが，実際には，基線が大きくなるとϕ_sが同じにならなくなるため標高の測定精度は低下する．このため，現実には適当な基線長が存在する．

インターフェロメトリの高度な応用として，地震による地殻変動 [15]や，南極の氷河の動きを検出した例 [16]がある．これは，地表の変動によってレーダと地表ターゲット間の距離が変わり，この変化を位相として検出できるためある．図 1.1.5.2 にＪＥＲＳで検出した山形県板谷における地すべり検出例を示す．cm から mm オーダの変位を検出できる可能性が多くの例で実証され，最近最も注目されているＳＡＲの利用技術の一つである．

インターフェロメトリでは，２ヶ所からのＳＡＲ画像を利用する．航空機搭載型のＳＡＲには，地形標高計測（ＤＥＭ作成）を目的に，２つのアンテナをインターフェロメトリ用に離して配置したものがある（1.3 参照）．衛星搭載型ＳＡＲでは，立体地図ミッションのスペースシャトル（2000 年 2 月）を除くと，すべてが 1 台のアンテナだけしかもたないため，繰り返し観測でえられた 2 回別々の時刻の画像を利用する．図 1.1.5.1 では，レーダ位置のずれ（基線）を誇張して画いている．干渉が成立する基線長は，衛星の場合は通常 1km 以下，２つのアンテナを搭載する航空機ＳＡＲ場合は 2m 程度以下である（厳密には波長に比例する）．式(1.1.5.2)の導出ではϕ_sを等しいと仮定したが，これが成立するのは，基線長 0 かつ地表の散乱特性が同じ（同時観測）場合である．衛星ＳＡＲのインターフェロメトリでは基線長も小さくなく，かつ観測時刻の間隔も最低 1 ヶ月程度あるため，干渉性が低下しやすい．近年では，大気におけるマイクロ波伝搬遅延の時間的変動の与える影響も問題視されている．

(3)ポラリメトリ

近年の航空機ＳＡＲの一部やＳＩＲ－Ｃでは（1.3 参照），送受信のマイクロ波偏波に HH, HV,VH,

VV の 4 種の組合せが用いられる．この 4 種の偏波の後方散乱は，それぞれ式(1.1.2.1)，(1.1.2.2)の形式で表せる．式(1.1.2.2)中の r は 4 種の偏波で等しいが，ϕ_s は異なる．この位相ϕ_sの相対関係を正確に計測することにより，偏波に対する後方散乱特性を完全に知ることが可能となる [18]．このような偏波計測法をポラリメトリ（正確にはレーダポラリメトリ）という．

レーダポラリメトリの利点は，後方散乱に関するより多くの情報が得られることにある．例えば，観測ターゲットの散乱メカニズムや構成する散乱体の分解が可能となる．例えば，球や平面，凸凹の大きくない平面では 1 回反射型の散乱が起こる，これに対して建物の壁と地面のような 2 面のコーナ構造のターゲットでは 2 回反射型の散乱が起こる．多重反射型の散乱が起こりやすい体積散乱物体では拡散的な散乱が起こりやすい．また，レーダポラリメトリの分野では,いくつかの単純物体における散乱特性が分かっている．観測されたデータから散乱メカニズムを解析したり，単純物体に分解したりすることができる．このような特徴から，単周波数ポラリメトリや多周波数ポラリメトリによる地表面粗度や土壌水分 [19]，積雪水分 [20]，バイオマス [21]のような生物物理量の計測，地表物分類等の事例が示され，今後のＳＡＲ利用技術として期待されている．

参考文献

1) F. Ulaby, R. Moore and A. Fung: Microwave remote sensing, vol. I, p.19, Artech House, 1981.

2) T. Nishidai, Early results from 'Fuyo-1' Japan's Earth Resources Satellite (JERS-1), International Journal of Remote Sensing, 14, 9, pp.1825-1833, 1993.

3) F. Ulaby, R. Moore and A. Fung: Microwave remote sensing, vol. II, p.819, Artech House, 1982.

4) F. Ulaby, R. Moore and A. Fung: Microwave remote sensing, vol. II, pp.826-827, Artech House, 1982.

5) －, SAR, Earth Observation System Report Volume IIf, p.114, NASA.

6) F. Ulaby, R. Moore and A. Fung: Microwave remote sensing, vol. III, p.1820, Artech House, 1986.

7) －, SAR, Earth Observation System Report Volume IIf, pp.5-6, NASA.

8) H. Kimura and N. Kodaira: Antenna pattern and penetration measurement using spectrum analyzers, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 30, 6, pp.1153-1158, 1992.

9) J. McCauley, G. Schaber, C. Breed, et. al.: Subsurface valleys and geoarcheology of the eastern Sahara revealed by Shuttle radar, Science, 218,pp.1004-1020, 1982.

10) T. Farr, C. Elachi, P. Hartl and K. Chowdhury: Microwave penetration and attenuation in desert siol: A field experiment with the Shuttle imaging radar, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, GE-24, 4, pp.590-593, 1992.

11) M. Bryan: Analysis of two Seasat synthetic aperture radar images of urban areas, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 48, 3, pp.393-398, 1982.

12) F. Ulaby, R. Moore and A. Fung: Microwave remote sensing, vol. II, pp.841-842, Artech House, 1982.

13) J. P. Ford, R. G. Blom, M. L. Bryan, M. I. Daily, T. H. Dixon, C. Elachi and E. C. Xenos, Seasat Views North America, the Caribbean, and Western Europe With imaging Radar, pp.4-5, JPL Publication 80-67, 1980.
14) －, JERS-1 Newsletter, NASDA, 1, 1993.
15) D. Massonnet, P. Briole and A. Arnaud: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, Nature, 364, pp.138-142, 1993.
16) I. Joughin, R. Kwok and M. Fahnestock: Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using ascending and descending passes, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 36, 1, pp.25-37, 1998.
17) H. Kimura and Y. Yamaguchi: Detection of landslide areas using satellite radar interferometry, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, in press.
18) H. Zebker and J. van Zyl: Imaging radar polarimetry: A review, Proc. of the IEEE, 29, 11, 1583-1606, 1991.
19) P. Dubois, J. van Zyl and T. Engman: Measuring soil moisture with imaging radars, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 33, 4, pp.915-926, 1995.
20) J. Shi and J. Dozier: Inferring snow wetness using C-band data from SIR-C's polarimetric systhetic aperture radar, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 33, 4, pp.905-914, 1995.
21) M. Dobson, F. Ulaby, L. Pierce, et al.: Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 33, 4, pp.877-895, 1995.

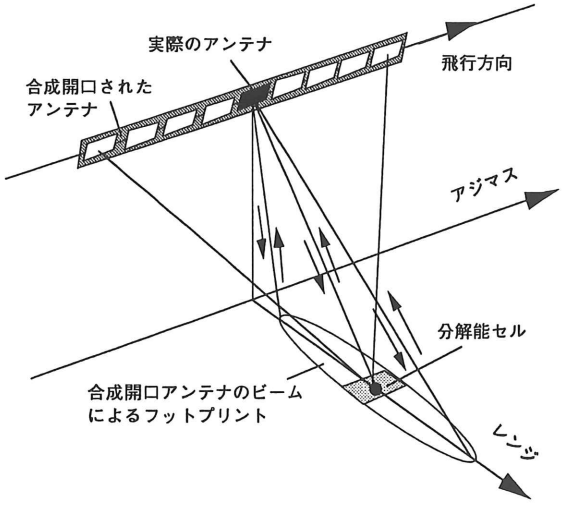


図 1.1.1.1　映像レーダの観測原理

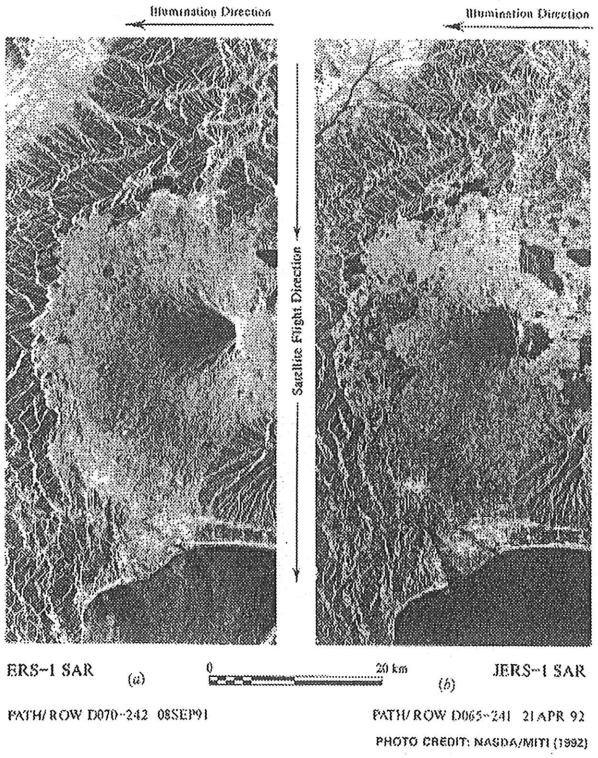


図 1.1.2.1　富士山地域のＳＡＲ画像例
（右：ＪＥＲＳ，左：ＥＲＳ）[2)]

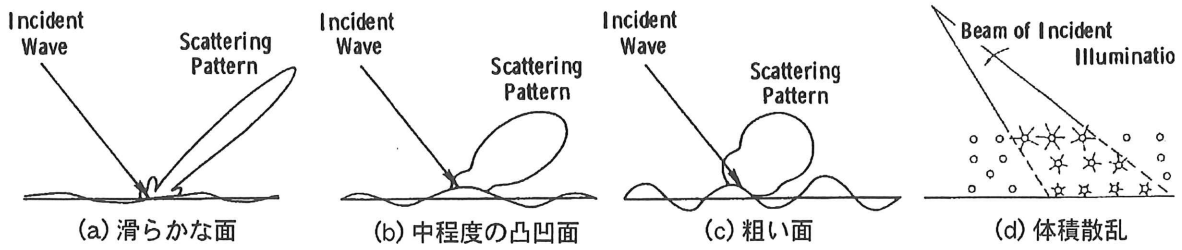


図 1.1.3.1　表面散乱(a)～(c)と体積散乱(d)[3)]

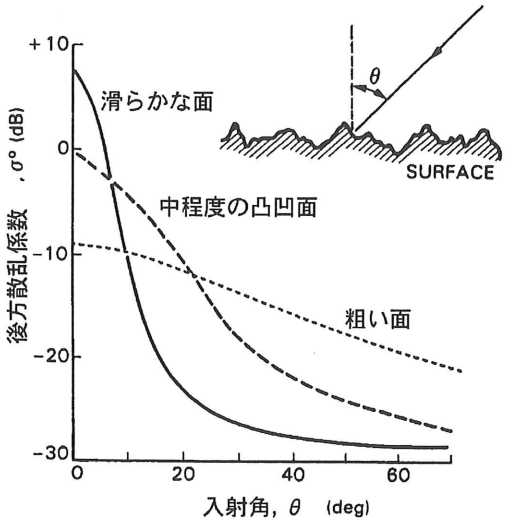


図 1.1.3.2　表面散乱強度の入射角区依存性[5)]

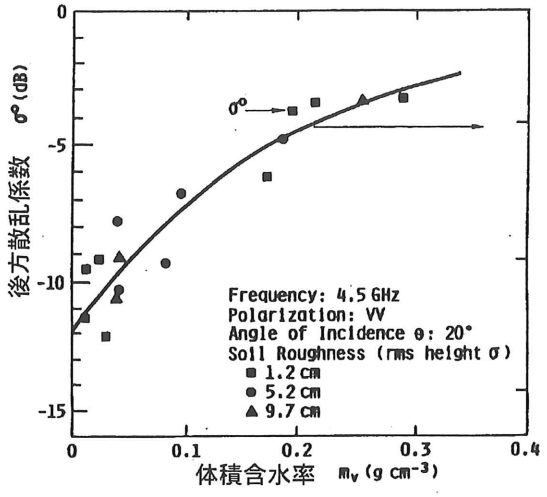


図 1.1.3.3　土壌水分と後方散乱強度の関係[6)]

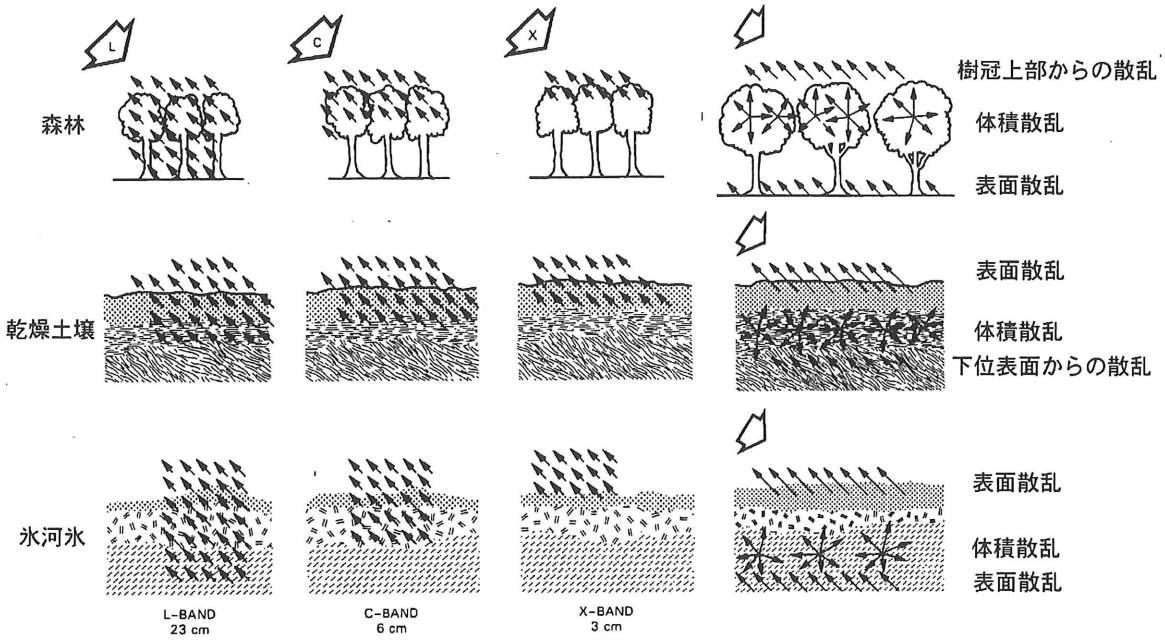


図 1.1.3.4　代表的地表物の体積散乱と周波数の関係[7)]

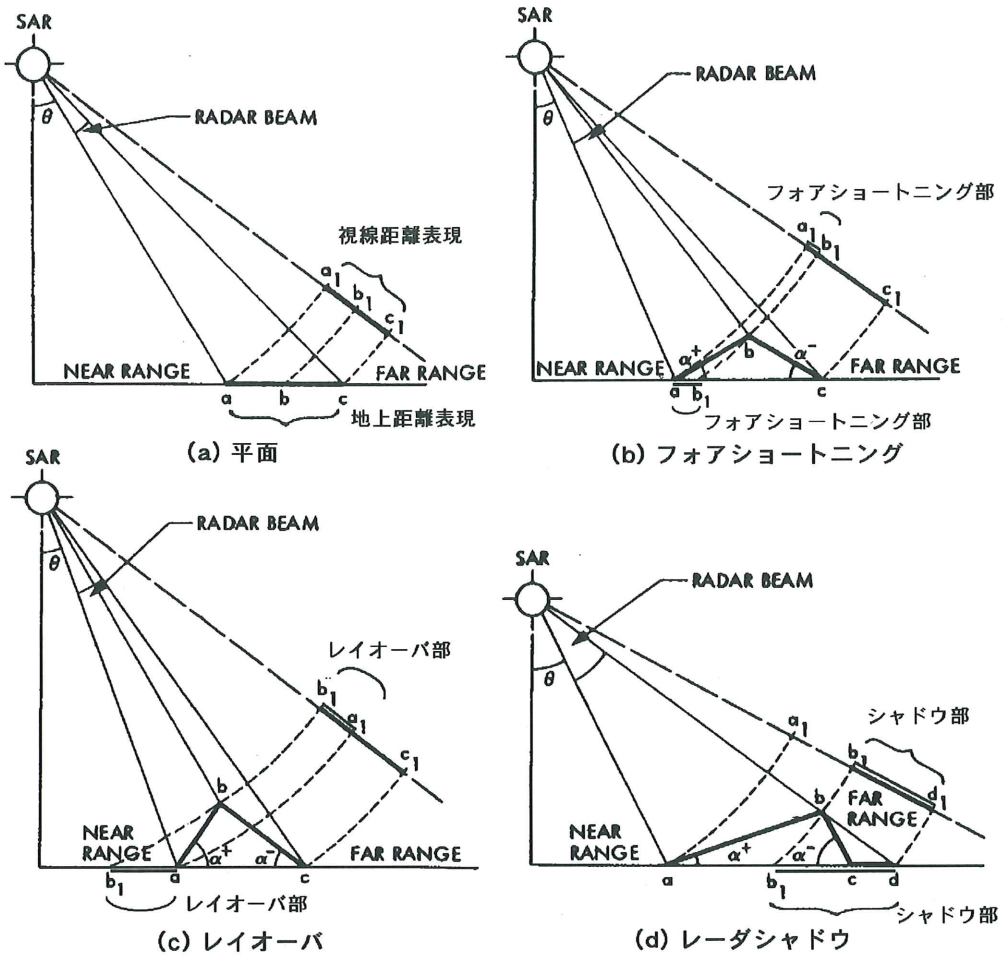


図 1.1.4.1　ＳＡＲ画像の幾何学的歪み(原典[13]に加筆変更)

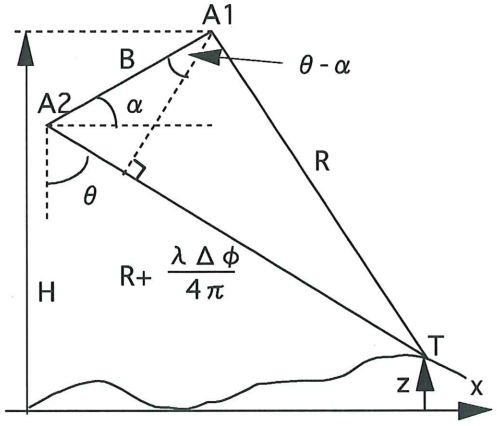


図 1.1.5.1　ＳＡＲインターフェロメトリの原理図

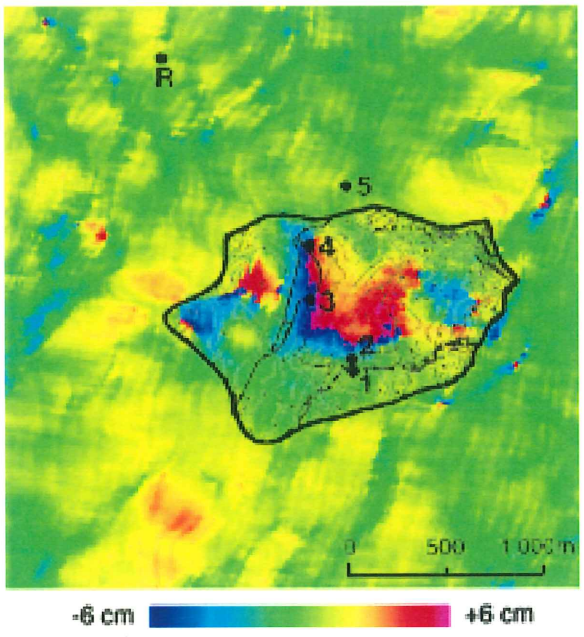


図 1.1.5.2　インタフェロメトリによる山形板谷の地すべり検出例[17]

1.2 SARの現状と近未来展望

1.2.1 データソースと衛星技術

表 1.2.1.1 は衛星搭載システムとしてアーカイブがあるもの，稼動中あるいは打ち上げ計画があるものをまとめている [1),2)]．この計画では２０１０年まで残存するものもあると期待できるが，それ以降は今後立ちあがる計画を待たねばならない．衛星設計技術の観点で既存システムのパラメータを眺めると，設計条件の制約から，色々な妥協の産物であることが読み取れる．設計上の大きな制約は重量，電力並びにデータレートで特に，パラメータを支配的に決定してしまうのはデータレートである．この制約を満たすために，分解能と観測幅がトレードオフされ，高い分解能のものほど観測幅が狭くなる．全球観測を実現するにはクロストラック方向にアンテナビームを変化させる必要がある．これにより，特定地域の観測について見かけの回帰日数を小さくすることも可能となる．クロストラックのビーム方向を変化させる方式として，衛星自体をロールさせる方法とフェーズドアレーによる方法とがある．前者は ERS-1 で実験され成功している．また後者は Radarsat, Alos, Envisat 等近年の SAR 衛星で好んで採用されている方式である．この方式のメリットとして，ビーム方向の変化を瞬時に行えることから，Scan SAR というバーストモードを利用した広域低分解能観測を実現出来，＜洋面の観測やグローバルスケールの観測を容易にしている．
しかし，この方式はまたモードが多く取れすぎるためリピートパスインタフェロメトリの組み合わせを阻害する要因ともなり，Radarsat でもその弊害が見られる．

SAR データを利用面から見ると，情報量を増すために，多周波数，ポーラリメトリは必須となるが衛星搭載の場合データリンクの速度の制約が大きく，完全な多周波数化，ポラリメトリを実現するシステムの構想は無い．量子化ビット数を極限まで減らしてデータレートを下げる等の工夫が必要であろう．

表 1.2.1.1 衛星搭載 SAR の主要性能

ERS-1, 2	AMI	C band 分解能 30m，観測幅 100km
(打ち上げ 1991.7.17,1995.4.12 稼動中)		
JERS-1	SAR	L band 分解能 18m，観測幅 75km
(打ち上げ 1992.2.10 完了)		
Radarsat	SAR	C band 分解能 9-100m，観測幅 45km-510km
(打ち上げ 1995.11.4,Radarsat-2 は 2000-2002 の間に打ち上げ予定)		
ENVISAT	ASAR	C band 分解能 30m 2 偏波，観測幅 100km
(打ち上げ 2001 予定)		
ALOS	PALSAR	L band 分解能 10-100m, 2 偏波，観測幅 70-360km
(打ち上げ 2003 予定)		
SICH-2	SAR	L band 分解能 10-50m，観測幅 40-120km
(打ち上げ 2002)		
ALMAZ-1b	SAR10 S band,5-40m,30-170km	
	SAR-3 X band, 5-7m, 20-35km	
	SAR-70 P band, 20-40m, 120-170km	
	SLR-3 x bans, 190x1200m, 450km	

1.2.2 SAR の個別技術の動向

(1) インタフェロメトリ技術

衛星搭載 SAR を利用するリピートパスインタフェロメトリは地震前後の地殻変動や火山活動の把握等に必須となりつつある．現状では適切なペア画像が必ず見つかるとは限らないが，衛星軌道の制御技術が進歩すれば必要なペアがいつでも得られるようになり，防災あるいは災害後の分析等に必須のデータとなり得る．スペースシャトルで実験された Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)ではほぼ全球の DEM を作成することとなっており，一般に公開されれば災害対策立案のベース情報として有効になる．

(2) コヒーレンスマップ

インタフェログラム作成時の複素画像間の相関係数はしばしばデータ取得時間間隔

における観測対象の変化を示す目安となる．これを利用して植生分類等を行う例があり，マングローブの識別等が可能とされている [3]．コヒーレンスの利用はレーダ反射に対するモデルを確立する必要があり，コヒーレンスマップが捕らえ得る事象を識別する必要がある．理論的に明らかなことは，観測対象が電気的に変化していなければ相関係数は高くなり，観測対象が変化すれば相関係数がちいさくなるので，災害による変化を捉える技術として活用されるものと思われる．

(3) ポーラリメトリ

現状では衛星搭載レベルでは完全なポーラリメトリの実現はデータレート等の制約から難しいが，災害監視という観点では重要な技術である．特に都市部における多重反射のメカニズムがポーラリメトリに反映されると考えられるので，地震や大規模火災等の災害における被害地域の特定等に活用できると期待される．衛星システム実現のために，データレートを下げるドラスチックな設計構想が望まれる．

(4) 多時期組み合わせ

衛星搭載 SAR データが一般には単一波長で情報が少ないのを補うものとして，定期的にデータ取得が行えることを利用した多時期合成がある．これは SAR の後方反射係数が地表面の特性変化，特に水による表面変化に敏感であることを利用するもので，洪水による冠水域の検出等に特に有効である．多時期合成には衛星軌道が一致していることが重要で前述のインタフェロメトリの軌道条件を満たす程度でも平地と山頂での位置ずれが認められる．これらは DEM 情報により補正が可能であるので，データ利用が定常的に行われる環境になるためには補正のためのデータをバックにそろえる必要があろう．

(5) データフュージョン

SAR は全天候型のセンサーである反面画像が光学センサーと余りに違うため，既存の画像解析ソフトで解析するのは難しい．災害監視においては全天候性は重要であるので，既存の画像と組み合わせて利用するデータフュージョンが画像分析において重要になる．すなわちベースデータとして条件の良い時期に取得された光学センサー画像を使用し，これに SAR 画像を重ねることにより，ベース画像からの変化の候補として SAR 画像を使用するという用い方が考えられる．データフュージョンを行うためには光学センサーと SAR 画像で異なる画像の幾何歪みを補正することが必要で，DEM 等の環境を整える必要がある．なお光学センサーのみならず地図データ等との重ね合わせにも幾何歪みの補正は重要である．

1.2.3　地上設備

SAR の処理プロセッサは計算機の目覚しい発達により，最早地上設備の大きな負担とは言えない．しかし，処理データ量が大きな事も事実で集中型の処理設備で処理するのは限界にきている．既に ESA の ERS シリーズでは，地域対応に分散したシステムで独立に処理を行っており，ALOS でもデータノードの設立等の発想がある．これをもっと進めれば当然，エンドユーザ側でデータ処理をする方式が生まれてくる．既に SAR の処理は PC でもこなせるレベルになっており，エンドユーザが１シーンを１時間未満で処理できれば，データ伝送の時間のみが全体プロセスの主要時間となり，これもネットワークの発達で解決できるものと考えられる．防災あるいは災害監視を考えた場合，データを直接エンドユーザが扱える必要が生ずる．特に，データ伝送インフラそのものが損傷するようなケースではエンドユーザ側で縮退レベルでも処理能力を有する必要が発生する．

このような環境を想定した場合，必要なことは未処理データを迅速にシーン切り出し出来ることと，リアルタイムでのアンシラリデータ切り出しが出来ることとを満たす，衛星システム並びに受信設備の設計が重要になる．場合によっては，放送衛星対応の設備のような簡便なシステムでエンドユーザにリアルタイムダイレクトにデータを伝送する仕組み等も考える必要がある．

1.2.4　防災ミッションに対応する衛星構想

技術の現状と発達ならびにデータインフラの発達を前提として，防災に対応できる SAR システムの構想として表 1.2.4.1 のような案が考えられる．この案では１周波数に対応する衛星として３個の別々な機能を持つ SAR 衛星をグループとして運用するもので，多周波数に対応しようとすればさらに数が増える．これらを一国で持つのは負担が大きくまた全世界の人々が利用できることを考えれば，数ヶ国で分担開発するのが望ましい．このような構想を実現するには，国際協力の枠組みつくりと，規格作りが大切である．既に神戸大震災，トルコ地震や台湾の地震を背景に，ESA が防災協力憲章なるものを提唱している．これは災害発生時に衛星保有国は可能な限り支援観測を行い，データ提供や技術支援を無償で行うというもので，実現に向けて動き出してるものと考えられるが，これを積極的に進めて衛星計画にまで反映できれば望ましい．

普段はこれらの衛星は通常の地球観測衛星として利用できるので，被災地域以外にも利用面で貢献できることと思われる．

この衛星からのデータ受信は２つのパスを持つのが望ましい．一つは従来からの地球局へ直接ダウンリンクあるいはデータ中継衛星を介してデータを伝送する方法である．他のパスは被観測地域への直接ダウンリンクで，リアルタイムで被観測地域へリンクするものである．このパスは緊急用の性格が強く，簡便な受信設備で受信できることが必要である．一つの案としては直接放送衛星の受信設備で受信できるものが望ましい．データリンクを２系統持つことは，リスクマネジメントの観点から重要で特に災害を対象とする場合，データ伝送インフラが被害を受け，データ利用部門が健在でもデータが送れないケースが生じえるので，２系統あるいはそれ以上の系統を備えることが必要である．

データ処理は前述のように PC レベルで実用的処理速度が達成し得るので，直接受信が出来れば準リアルタイムで必要なデータが必要な場所に届けられる仕組みを実現出来る．

表 1.2.4.1　防災適合衛星案

防災対応 SAR 衛星の基本構想

即応性と即時対応を考慮した SAR 衛星としては次の３衛星をセットにして利用するのが望ましい

（１）狭域精密観測衛星

観測幅２０－３０ｋｍ，分解能５ｍ程度，ポラリメトリ．入射角可変．

特定地域を２日以内で観測可能．

（２）中地域標準観測衛星

観測幅１５０ｋｍ，分解能２０－３０ｍ，単一偏波，入射角固定．

リピートパスインタフェロメトリ対応．回帰周期２０日．

（３）広域低分解能観測衛星

観測幅５００ｋｍ以上，分解能５０ｍ．全球面を３日で観測可能．

参考文献：

(1) Jane's Space Directory 1999-2000

(2) 1997 CEOS Yearbook

(3)S. Takeuchi and C. Yonezawa,"A Possible Method for Forest Type Classification Using Coherence Information from JERS-1/SAR", RESTEC Newsletter, No. 30, March 1997.

1.3 ＳＡＲシステム

ＳＡＲシステムの実例について，衛星搭載システムを 1.3.1 項に，航空機搭載システムを 1.3.2 項に紹介し，災害状況把握の観点による両者の比較を 1.3.3 項に示す．衛星搭載ＳＡＲシステムと航空機搭載ＳＡＲシステムの根本的な違いは，プラットフォームの違いから生ずる観測高度と観測期間の違いである．前者は人工衛星をプラットフォームとし，高度が 200km から 1,000km 程度の地球を周回する軌道から数年にわたり地球観測を行うのに対して，後者は航空機をプラットフォームとし，飛行高度は 500m から 20km 程度で，１回の観測フライトは数時間から十数時間に限られる．米国のスペースシャトル搭載ＳＡＲシステムは，観測期間が比較的短期間（１０日間程度）で繰り返しのフライトでセンサが使用できる点は航空機搭載に近いが，観測高度の観点から衛星搭載ＳＡＲと分類した．

実際に運用されているＳＡＲシステムは軍事用のものを含めると多数存在すると考えられるが，それらを全て網羅することは不可能であるし，本書の目的からも外れるため，ここで取り挙げるのは，科学研究のためにデータが入手可能なＳＡＲシステムに限った．衛星搭載ＳＡＲについては，現在運用中のものに加えて，既に運用が終了しているもの，及び，現時点で具体的な計画が発表されている将来計画も含めた．航空機搭載ＳＡＲについては，現在各国で開発が進行中のものも多く，全てを詳述することは困難であるため，学術誌，学会発表あるいは運用機関の広報活動等により，情報が得られやすいものをその代表例として取り挙げた．

1.3.1　衛星搭載ＳＡＲ

衛星搭載ＳＡＲシステムの歴史は，1978 年に米国 NASA が海洋観測を主目的として打ち上げた SEASAT 衛星搭載のＳＡＲより始まった．米国はその後，ジェット推進研究所（Jet Propulsion Laboratory, JPL）が中心となって開発・運用したスペースシャトル搭載ＳＡＲシリーズ — SIR-A, SIR-B, SIR-C/X-SAR (SIR: Shuttle Imaging Radar) — により，入射角可変や多偏波・多周波観測といった先進的な機能を実践して，センサ開発をリードしてきた．SEASAT の運用期間は衛星の不具合によりわずか数ヶ月であったので，本格的な長期観測を行う衛星搭載ＳＡＲの登場は 1990 年代に入ってからで，ロシア（ソビエト連邦）による Almaz，欧州宇宙機関（European Space Agency, ESA）の ERS-1（European Remote Sensing Satellite-1）及び日本の宇宙開発事業団（National Space Development Agency of Japan, NASDA）の J-ERS-1（Japanese Earth Resource Satellite-1）が相次いで運用を開始し，継続的なＳＡＲ観測データを提供してきた．その後，カナダ宇宙機関（Canadian Space Agency, CSA）による Radarsat が加わった．1995 年に ERS-1 と同じ仕様のＳＡＲを搭載した ERS-2 が打ち上げられ，両機は１年間程度同期（タンデム）運用され，同一地点の観測間隔を縮めて，インタフェロメトリ観測のためのデータを供給した．ERS-1/2, JERS-1，Radarsat の後継機として，それぞれ，ENVISAT，ALOS，Radarsat-2 の打ち上げが計画され，ＳＡＲデータの継続的な供給が図られている．

ＳＡＲのパラメータの中で最も重要なものの一つが周波数，すなわち使用する電波の波長である．波長が異なると同じターゲットを見ても散乱のしかたが変わるので，ターゲットから得られる情報に違いが生ずる．衛星搭載ＳＡＲでは，米国の SEASAT，SIR-A，SIR-B，及び日本の J-ERS-1 で使用されているＬバンド（1.3 GHz，波長が 20～25cm 程度），並びに，ERS-1，Radarsat 等で使用されているＣバンド（5.3 GHz，波長が 5～6cm 程度）が主流である．SIR-C/X-SAR ではＬ，Ｃ双方の周波数帯に加えてＸバンド(10 GHz，波長が 3cm 程度)の周波数帯も使用された．

各衛星搭載ＳＡＲシステムについて，その運用時期と主要パラメータ（高度，観測周期，使用周波数，偏波，観測入射角，分解能）を表 1.3.1.1 にまとめて示す．

表1.3.1.1　衛星搭載ＳＡＲシステム（1／3）

衛星名称 （SARセンサ名）	SEASAT	SIR-A	SIR-B		Almaz
運用国・ 機関	アメリカ NASA (JPL)	アメリカ NASA (JPL)	アメリカ NASA (JPL)		ロシア (ソビエト連邦) GlavKosmos
運用時期 [年．月]	1978. 6 – 1978. 9	1981.11 (2.5 日間)	1984.10 (8 日間)		1991.3 – 1992.10
観測高度 [km]	800	260	350/ 225		300
観測周期 (回帰日数) [day]	17/ 3	N/A	N/A		(variable)
使用周波数帯 （中心周波数）	L 1.28 GHz	L 1.28 GHz	L 1.28 GHz		S 3GHz
使用偏波 H: 水平偏波 V: 垂直偏波	HH (*1)	HH	HH		HH
観測入射角（範囲） [度]	23	50	15 – 64		30 – 60
分解能（代表値） [m] rg:レンジ方向, az:アジマス方向 処理ルック数	25 m (rg) 25 m (az) 4 looks	40 m (rg) 40 m (az) 6 looks	25 m (rg) 17 – 58 m (az) 4 looks		15 – 30 m (rg) 15 m (az) > 4 looks
備考	光学処理方式 (フィルムレコーダ) 図 1.3.1.1	光学処理方式 (フィルムレコーダ)			

(*1) 'HH'は水平偏波で送信し水平偏波で受信，'HV'は水平偏波で送信し垂直偏波で受信，の意.

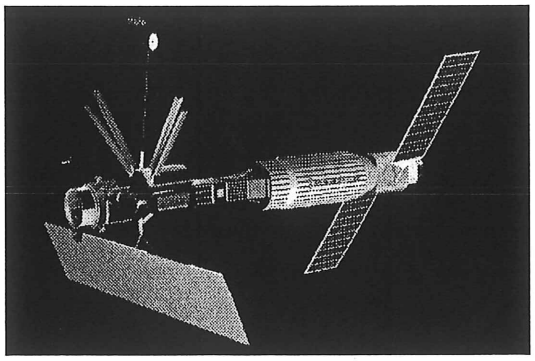


図 1.3.1.1　SEASAT © JPL

表1.3.1.1　衛星搭載ＳＡＲシステム（2／3）

衛星名称 （ＳＡＲセンサ名）	ERS-1	J-ERS-1	SIR-C/X-SAR	ERS-2	Radarsat
運用国・ 機関	ESA	日本 NASDA/MITI (*2)	アメリカ NASA (JPL), DLR, ASI (*3)	ESA	カナダ CSA
運用時期 [年．月]	1991. 7－	1992. 2－ 1998.10	1994. 4 (11 日), 1994.10 (11 日)	1995. 4－	1995. 11－
観測高度 [km]	780 (variable)	568	215	780	798
観測周期 (回帰日数) [day]	35 (一部3/ 176)	44	N/A	35	24
使用周波数帯 （中心周波数）	C 5.3 GHz	L 1.28 GHz	L : 1.28GHz/ C: 5.3 GHz/ X: 9.6 GHz	C 5.3 GHz	C 5.3 GHz
使用偏波 H: 水平偏波 V: 垂直偏波	VV	HH	HH/HV/VH/VV (L/C), VV (X)	VV	HH
観測入射角（範囲） [度]	23	39	17－63 (L/C) 22－55 (X)	23	10－60
分解能（代表値） [m] rg:レンジ方向, az:アジマス方向 処理ルック数	26 m (rg) 28 m (az) 6 looks	18 m (rg) 18 m (az) 3 looks	10 –30 m (rg), 30 m (az) (L/C); 25 m (rg, az) (X) 4 looks	26 m (rg) 28 m (az) 6 looks	10–100 m (rg) 9–100 m (az) 1–8 looks
備考	ERS : European Remote Sensing Satellite. 図1.3.1.2	J-ERS : Japanese Earth Resource Satellite. 図1.3.1.3	多周波ＳＡＲ (L/C/X) ポーラリメトリックＳＡＲ (L/C)	ERS-1 と同仕様. 1995.8-1996.5 ERS-1/2 タンデム （同期）運用	Standard/Wide/ Fine Resolution /ScanSAR/ Extended beam モード

(*2) MITI: Ministry of International Trade and Industry，通商産業省.
(*3) DLR（ドイツ），ASI（イタリア）はX-SARを開発・提供.

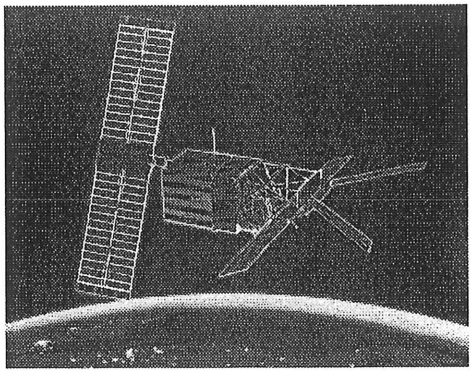


図1.3.1.2　ERS-1 © esa

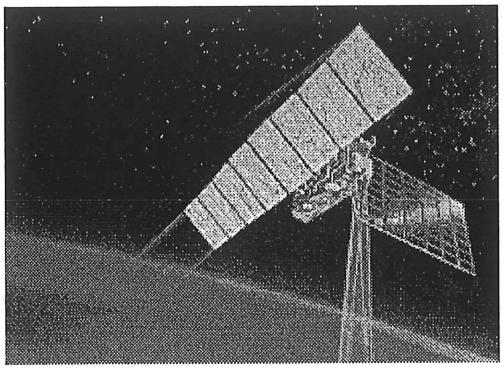


図1.3.1.3　JERS-1 © NASDA

表1.3.1.1　衛星搭載ＳＡＲシステム（3／3）

衛星名称 （ＳＡＲセンサ名）	SIR-C/X-SAR (SRTM)		ENVISAT ASAR	ALOS PALSAR	Radarsat-2
運用国・ 機関	アメリカ NASA(JPL), DLR, ASI		ESA	日本 NASDA/MITI	カナダ CSA
運用時期 ［年．月］	2000. 2 (11 日)		2001.6	2002. 8	2002.10
観測高度 ［km］	233		800 (780 –820)	692	798
観測周期 （回帰日数） [day]	N/A		35	46	24
使用周波数帯 （中心周波数）	C: 5.3 GHz/ X: 9.6 GHz		C 5.33 GHz	L 1.27 GHz	C 5.3 GHz
使用偏波 H: 水平偏波 V: 垂直偏波	HH/HV/VH/VV(C) , VV (X)		HH/VV, HH+VV or VV+VH	HH/HV/VH/VV, HH,VV, HH+HV or VV+VH	HH, VV
観測入射角（範囲） [度]	23–63(C), 52(X)(off-nadir)		15 – 45	8 – 60	10 –60 (どちら側も可)
分解能（代表値） [m] rg:レンジ方向, az:アジマス方向 処理ルック数	30 m (rg, az), 10m (DEM) (C) 25 m (rg, az), 6m (DEM) (X)		27.5 m (az) 28.1 m (rg)	10–100 m (rg, az)	3 -100 m (rg, az) 1 –8 looks
備考	60m マストの先にサブアンテナを持ち, 干渉SAR(*4). 図1.3.1.4		ERS-1/2 後継機.	J-ERS-1 後継機.	Radarsat 後継機. Radarsat モード +Ultrafine Wide/Narrow 図1.3.1.5

(*4) 干渉ＳＡＲ：　２つのアンテナで同じ場所を観測し（あるいは１つのアンテナで複数回観測し），両者のデータの干渉を利用して，観測場所の高度情報（Digital Elevation Model, DEM）を得る手法.

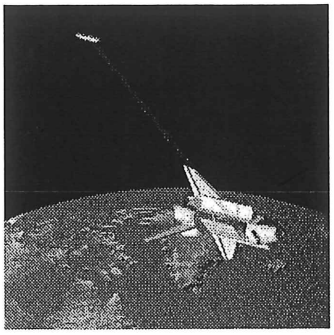


図1.3.1.4 SIR-C/X-SAR(SRTM) © JPL

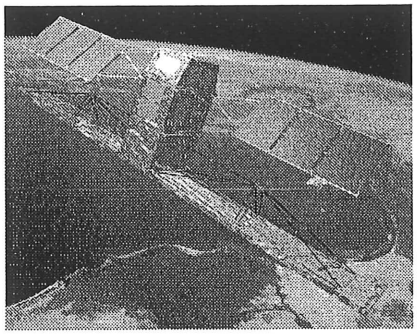


図1.3.1.5 RADARSAT-2 © MacDonald Dettwiler

1.3.2 航空機搭載ＳＡＲ

ここでは情報が公開されている学術研究用の航空機搭載ＳＡＲシステムを何例か取り挙げ，それらについて紹介する．

おそらく最もよく知られた航空機搭載ＳＡＲは，カナダ・リモートセンシングセンター（Canadian Remote Sensing Center, CCRS）のグループによって開発・運用されている SAR-580 とアメリカ JPL によって開発・運用されている AIRSAR であろう．この２つのシステムの観測実績は自国内に留まらず，外国でもキャンペーン観測実験を行っている．両者の観測データを用いた研究成果は学術雑誌等に多く発表されている．次に活発な研究活動を実施している航空機ＳＡＲシステムとして，ドイツ航空宇宙センタ（Deutsches Zentrum fur Luft und Raumfahrt (German Aerospace Center), DLR）の E-SAR, デンマーク・リモートセンシングセンター（Denmark Center for Remote Sensing, DCRS）（デンマーク工科大学）の EMISAR が挙げられる．日本では，研究目的の航空機ＳＡＲシステムとしては，郵政省通信総合研究所（Communications Research Laboratory, CRL）と宇宙開発事業団が共同で開発・運用している Pi-SAR （Polarimatric and Interferometric SAR）及び国土地理院（Geographical Survey Institute, GSI）の GSI-SAR があり，近年活発に観測実験を実施している．

衛星搭載システムには無い航空機搭載システムの大きな利点の一つは，ＳＡＲセンサの修理あるいは高機能化のための改造を加えて継続的な運用が可能なことであり，特に，上に挙げた研究が主目的のシステムでは，システム仕様の変更や機能付加が継続的に行われることが多い．従って，その運用（開始）時期や仕様を正確に詳述することは困難であるが，上記の航空機搭載ＳＡＲについて，学術誌，学会発表あるいは運用機関の広報活動（インターネット上のホームページを含む）により得られる特徴・仕様についてまとめたものを表 1.3.2.1 に示す．

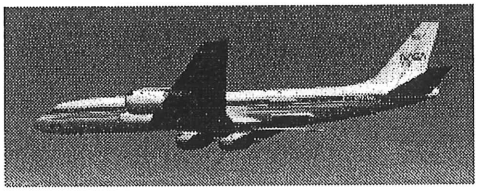


図 1.3.2.1　AIRSAR © JPL

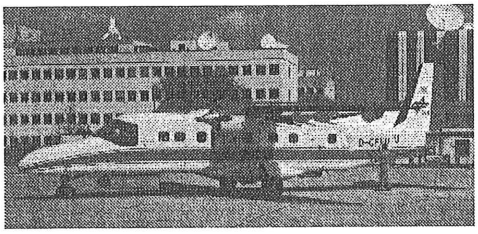


図 1.3.2.2　E-SAR © DLR

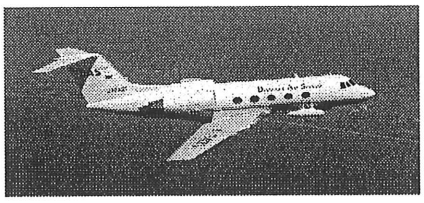


図 1.3.2.3　Pi-SAR © CRL/NASDA

表1.3.2.1　航空機搭載ＳＡＲシステム

レーダ名称	SAR-580	AIRSAR	E-SAR	EMISAR	Pi-SAR	GSI-SAR
運用国･機関	カナダ CCRS	アメリカ JPL	ドイツ DLR	デンマーク DCRS	日本 CRL/NASDA	日本 GSI
運用開始時期	1986	1988	1989	1989	1997	1998
使用航空機	Convair 580	DC-8	Dornier DO 228	Gulfstream G 3	Gulfstream G 2	Cessna 208
観測高度（代表値）[m]		8,000 m	3,600 m (1,000-6,000)	12,000 m	6,000 - 12,000 m	3,000 - 4,500 m
周波数帯	C/ X	P/ L/ C	P/ L/ S/ C/ X	L/ C	L/ X	X
偏波	HH/HV/VH/VV (C), HH/VV (X)	HH/HV/VH/VV	HH/VV	HH/HV/VH/VV	HH/HV/VH/VV	HH
分解能（代表値）[m] rg:レンジ，az:アジマス方向 処理ルック数		5 m (sr) (*1) 1 m (az)	4m(rg,az) (L)	2 m (rg,az) (L/C)	3.0m (rg,az) (L), 1.5m (rg,az) (X) 4 looks	1.5 m (rg,az)
その他の特徴	干渉ＳＡＲ機能, RT処理(*2)	干渉ＳＡＲ機能(L,C)	干渉ＳＡＲ機能(X), RT処理	干渉ＳＡＲ機能, RT処理	干渉ＳＡＲ機能(X)	干渉ＳＡＲ機能
備考	機体のどちら側でも観測可能	図1.3.2.1	図1.3.2.2		Pi-SAR: Polarimetric & interferometric SAR. 図1.3.2.3	

(*1) sr：slant-range，スラントレンジ．レンジ(rg.) は地上における距離であるが，スラントレンジは（地上投影前の）レーダの視線方向における距離.

(*2) RT処理：リアルタイム処理装置を持ち，観測時にその場で取得した映像を見ることが可能.

1.3.3 衛星搭載ＳＡＲと航空機搭載ＳＡＲの比較

災害状況把握の観点から，衛星搭載ＳＡＲと航空機搭載ＳＡＲ，両者の比較を行う．

衛星搭載ＳＡＲと航空機搭載ＳＡＲの違い，まず，その観測高度，観測範囲及び運用期間にあるといえる．すなわち，衛星搭載ＳＡＲ（スペースシャトル搭載のものを含む）のそれは搭載される人工衛星の高度，軌道及びミッション期間で決まり，高度 200km～1,000km で地球全体をグローバルに 1～5 年程度（スペースシャトル搭載のものでは 10 日間程度）にわたり連続的に観測を行う．一方，航空機搭載ＳＡＲでは搭載される航空機によって決まり，通常高度500m～20kmから数千kmの巡航距離の範囲内で数時間から十数時間の観測を行う．ただし，航空機搭載ＳＡＲの観測範囲，運用時間は燃料補給のための着陸，離陸を繰り返すことにより延長可能である．また，航空機搭載ＳＡＲとスペースシャトル搭載ＳＡＲは，観測後にＳＡＲセンサに修理あるいは改修を加えて再飛行することが可能であることが利点であるが，衛星搭載ＳＡＲは打ち上げ後衛星軌道上で不具合が発生した場合にそれを修理することはきわめて困難であり，その代替機を直ちに打ち上げることもほとんど不可能である．

以下，災害状況把握のために必要と考えられる要求事項毎に，両者のＳＡＲシステムの優劣を考える．

(1) 観測の連続性・広範囲性

ＳＡＲのようなリモートセンサへ要求される一般的な事項として，まず，災害発生可能性のある領域を広範囲にわたって，長期にわたり連続的に観測することが要求される．この点で衛星搭載ＳＡＲは，観測幅が数十 km から数百 km と広く，ミッション期間の数年間にわたり連続的に観測することができるので，優れている．一方，航空機搭載ＳＡＲは観測幅が数 km からせいぜい 20km 程度と狭く，観測時間は航空機の１フライトに限られるため，不利である．

(2) 観測の即応性・柔軟性

上記(1) で衛星搭載ＳＡＲが広い範囲を連続的に観測するのに優れていると述べたが，ある 1 地点に限ってみると，その点の観測機会は衛星の軌道（回帰日数）によって制約され，一般的には数日から数十日に１回に限られ，観測時刻もある（ローカル）時刻に限定される．従って，豪雨（洪水）災害，油流出災害のような数時間から数日間程度の時間スケールの変動の観測が要求される場合には，衛星搭載ＳＡＲは適さない．一方，航空機搭載ＳＡＲは，人工衛星のような軌道の制約は無いので，災害発生時に即時に観測場所へ向かい，必要なら連続的に同一地点の観測も可能である．この点は，機動性のある航空機搭載ＳＡＲが大きな利点を持つ．また，衛星搭載ＳＡＲでは観測方位角は軌道によって固定されるため，火山災害や山岳域の地すべり災害等において，特定の斜面を観測したい場合に困難が伴う．航空機搭載ＳＡＲは任意の方位角から観測が可能で，たいへん有利である．

ただし，観測が緊急を要する場合であっても，ＳＡＲの性能を十分に発揮した高分解能画像を得るためには，衛星，航空機搭載に関わらず，観測後のデータ処理に一定の時間（観測範囲，分解能によって異なるが通常１時間から数時間）を要することに注意すべきである．

(3) 高分解能・詳細観測

局所的な地すべりや地震発生時の都市の建造物や道路の損壊状況等を観測しようとするような場合，分解能はできるだけ高いことが望ましいが，現状の衛星搭載ＳＡＲの分解能は数十mから最高でも十m程度であり，やや不足である．これに対して，航空機搭載ＳＡＲの分解能は一桁高い数mが期待でき，より優れている．衛星搭載ＳＡＲの分解能の制約は，レーダから観測対象までの距離（高度）が大きいと信号対雑音比（Ｓ／Ｎ）が悪化することが一つの大きな要因である．

また，ターゲットの情報をより詳しく得る方法として，複数の偏波を利用するポーラリメトリック観測や複数の周波数を用いる多周波観測などがあるが，搭載センサの重量や電力の制限が厳しい衛星搭載ＳＡＲでは，シャトル搭載（SIR-C/X-SAR）を除いて，これらの機能を持つものはまだ実現されていない．（今後の衛星搭載ＳＡＲではそのような機能が順次導入されていく計画はある．）機能

付加や調整が比較的容易で，しかも実験的要素の強い研究用の航空機搭載ＳＡＲでは，最近はポーラリメトリック観測や多周波観測機能を持つものが主流であり，ターゲットの詳細観測の上では優れている．

(4) システムの信頼（安定）性

衛星搭載ＳＡＲではいったん打ち上げられ，運用が開始された後は，ミッション期間中のセンサの性能は比較的安定している．一方，航空機搭載ＳＡＲでは一般に，フライト毎に装置の輸送や搭載航空機への設置等が必要であることや，観測時（上空）と非観測時（地上）の周囲環境（温度，湿度等）が大きく異なることにより，ＳＡＲ装置がストレスやダメージを受ける機会が多い．また，良好な高分解能画像を得るためにはＳＡＲプラットフォームの移動（飛行)及び姿勢が安定であることが要求されるが，航空機が飛行する高度は風や降水等の気象現象の影響があるため，条件が厳しい．衛星の軌道や姿勢は安定している．これらの要因によりデータ取得の安定性は，航空機搭載ＳＡＲに比べて，衛星搭載ＳＡＲの方が優れていると言える．

以上を表1.3.3.1 にまとめて示す．

表1.3.3.1　災害状況把握の観点からの衛星搭載ＳＡＲと航空機搭載ＳＡＲの比較

要求項目	衛星搭載ＳＡＲ	航空機搭載ＳＡＲ
広範囲観測	◎　数十kmの範囲を瞬時に観測可	△　観測幅は衛星より狭い，航続距離に制限
多時期繰返し（連続観測）	○　長期にわたり（ミッション期間中）繰り返し観測が可	△　一般には散発的観測
即応性	×　軌道（回帰日数）により制約	◎　必要な時に必要な場所へ移動可
柔軟性	△　軌道により観測方向が限定	○　同一地点の繰り返し，多方向観測が可
高分解能	△　10m程度	○　１～3ｍ程度
詳細観測（多パラメータ）	△　現状では単周波・単偏波（将来的にはマルチ化）	○　多偏波，多周波観測が可，機能付加が容易
システム信頼性（データ供給安定性）	○　運用中は比較的安定	△　装置の周囲環境の変化が大きい（トラブル発生の可能性が大） 飛行経路の制限，気象の影響
その他の特徴	○複数（タンデム）衛星により即応性・柔軟性を補強可	○故障（トラブル）修理後再飛行が可 ○機能付加（変更）が可
備考	△高分解能ＳＡＲ画像を得るには観測後に一定の処理時間を要する	△高分解能ＳＡＲ画像を得るには観測後に一定の処理時間を要する

◎：たいへん優れている／　○：優れている／　△：適さない／　×：不能

参考文献

1) F. M. Henderson, A. J. Lewis (ed.), Manual of Remote Sensing: Principles & Applications of IMAGING RADAR, John Willey & Sons, New York, 1998.
2) Jane’s Space Directory 1999-2000.
3) 1997 CEOS Yearbook.

2. SAR 画像の各種災害状況の把握

2.1 水害

衛星リモートセンシングによる水害被害の監視は，実質的には，洪水によってもたらされた湛水域の検出およびその経時変化の監視に集約される．このような応用に関しては，SAR は非常に適したセンサーと考えられる．一つ目の理由は，SAR が天候に左右されずに観測可能なことであり，水害が大量の降雨によってもたらされることから，洪水時の天候は雨天あるいは曇天であることが多く，SAR の全天候性の利点が最大限に発揮される観測対象といえる．二つ目は，SAR では地表面からのマイクロ波の後方散乱の強さにより地表面状態の識別を行うが，洪水により地表面が湛水状態になると，表面の滑らかさが増大し，地表面における SAR の後方散乱（表面散乱）が非常に大きな影響をうけることにある．一般的には，鏡面反射成分が増大し，その結果後方散乱は大きく低下する．したがって，洪水による湛水域（以下これを洪水域と呼ぶ）の検出は，一般的には SAR の後方散乱の低下した地域を抽出することにより，かなりの確度で行えることがこれまでの様々な事例研究からわかっている．

しかしながら，実際には，洪水の規模やその時間変動のスピードにより，衛星搭載の SAR による洪水域の抽出能力がかなり変わることも事実である．特に，日本のような狭い国土と急峻な地形を有する国では，洪水域の空間的範囲がかなり狭い地域に限定されるとともに，その時間変動も非常に速く，衛星搭載 SAR では洪水域の検出自体が困難な場合も考えられる．一方，中国のような広い国土を持ち緩やかな地形が支配する国では，洪水域が空間的に広大な地域を占め，しかも時間変動は緩やかであるため，相対的に衛星搭載 SAR による洪水域の検出は容易であることが予想される．このように，空間的規模とその時間変動が衛星搭載 SAR による洪水域検出の可能性を大きく左右する要因と考えられる．以下，そのような要因の違いによる衛星搭載 SAR の洪水域検出能力の検証の意味も含めて，衛星搭載 SAR による日本と海外（中国）における洪水域検出の事例について述べる．

2.1.1　日本の事例

日本国内における水害では，悪天候が比較的短期間に終わること，また，数 m 程度の地表分解能で観測を行い，観測後数時間のうちに成果を作成することを求められる場合が多いので，小型固定翼機およびヘリコプターなどに航空カメラやビデオカメラを搭載して被害状況の把握が行われている．そのため，ＳＡＲ（合成開口レーダ）による水害観測の事例は，ほとんど見あたらない．

ここでは，RADARSAT 衛星に搭載されたＳＡＲ（波長：5.6cm：Ｃバンド）による２つの観測事例をあげ，衛星搭載ＳＡＲによる国内の水害状況把握とその課題をまとめる．

(1)　茨城県那珂川下流域（1998 年 8 月）[1)]

1998 年 8 月 26 日から 31 日にかけて，北・東日本は平成 10 年 8 月末豪雨に襲われた．那珂川上流の栃木県那須町における，同26日から30日にかけての総雨量は年間降水量の2/3を超える 1242mm に達した[2)]。このため，那珂川上流（余笹川）地域および同下流の茨城県水戸市周辺などが水害を受けた．

水害が著しかった同８月29日５時43分，RADARSAT ＳＡＲ　Fine モード（分解能10m）による観測が行われた．水戸市岩根町付近の状況を図 2.1.1.1 に示す[1)]．画像幅は約 7.5km である．川幅を約 190mに増した那珂川が，画面中央上端から右下端に流れている状況が，黒い（マイクロ波の後方散乱強度が低い）帯として見られる．画像の中央上部，川のすぐ左側下に認められる略楕円形の黒い部分が岩根町の湛水域である[1)]．その他にも川の周囲に湛水域が認められる．

建設省国土地理院は 8 月 28 日・ 29 日に「地形・地盤条件と水害状況に関する現地調査」を実施し，「那珂川下流域水害調査図」[3)] などを作成した．この図のうち，ＳＡＲ画像に対応する付近を切りだし，ＳＡＲ画像の方位に合わせて回転したものが，図 2.1.1.2 である．水色と緑色で示された部分が平常時の水域と今回の湛水域をそれぞれ表す．

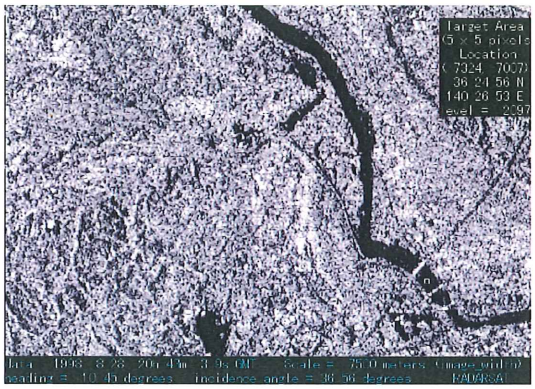


図 2.1.1.1　ＳＡＲ強度画像[1)]
RADARSAT Fine モードによる水戸市岩根町付近の水害状況(1998 年 8 月 29 日)



図 2.1.1.2　那珂川下流水害調査図[3)]（部分）
国土地理院による現地調査結果．
緑色の部分が湛水域．(1998 年 8 月 28-29 日)

これは，昼夜の別なく，雲の存在にも影響を受けないＳＡＲ強度画像を用いて，低後方散乱強度の領域として水面の分布が抽出できることを示す好例である．しかしながら，現地情報がない場合には，１回の観測によっては通常の水域と水害による湛水域との区別はできない．たとえば，図 2.1.1.1 の中央部下端にある楕円形の黒い領域は，楮川ダムの湖である．したがって，地図が整っている国内の場合には，数値地図 25000（地図画像）や他の時期に取得された光学センサによる衛星画像などとの重ね合わせを行えば，ＳＡＲ画像の判読が容易となる．この試みは，次の事例において述べる．

(2)　高知県四万十川下流中筋川流域（1999 年 8 月）[4, 5]

1999 年 7 月末から 8 月初旬にかけて，四国を含む西日本では，台風 5 号，台風 7 号などのため局地的な大雨に襲われた．たとえば，四国山地内の高知県本川村などでは 7 月 24 日からの 4 日間で 1000mm を超える雨量となった[6]．高知県西南部の四万十川下流域では，水田の水没がいくつかの地区で起き，刈り入れ直前の稲が完全に水没した[7]．高知県中村市の四万十川支流中筋川流域では，7 月 27 日から 28 日にかけて水位が平常より約 7 m高くなり[8]，同 29 日午前の時点で東中筋地区などの水田が湛水域となっていた[7]．なお，同 31 日夜には，ほぼ平常水位に回復した[8]．

この被害状況を観測するため，7 月 29 日には観測スケジュールを決定し，8 月 1 日 18 時 8 分，RADARSAT ＳＡＲ　Standard モード（分解能 30m）による観測が行われた[4, 5]．Fine モードを使用できなかったのは，このときは，Fine モードではこの地域の観測日が遅くなるためであった．ＳＡＲ強度画像を図 2.1.1.3 に示す．図中で四角で囲まれた領域が，四万十川下流と中筋川の流域である．この観測時点では，四国地方は雨雲に覆われており光学センサでは観測できない状態であった．全天候性を持つＳＡＲによる災害状況把握の有効性は明らかである．

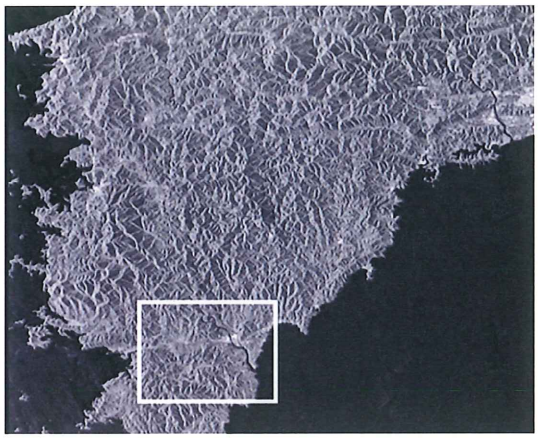


図 2.1.1.3　ＳＡＲ強度画像[4, 5]
RADARSAT Standard モードによる
四国西南部．四角の中が，四万十川下流と
中筋川流域(1999 年 8 月 1 日 18 時 8 分)

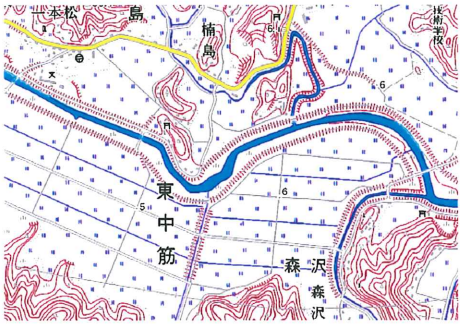


図 2.1.1.5　東中筋地区（画像幅約 2 km）
数値地図 25000 地図画像「土佐中村」[9]
より切りだし

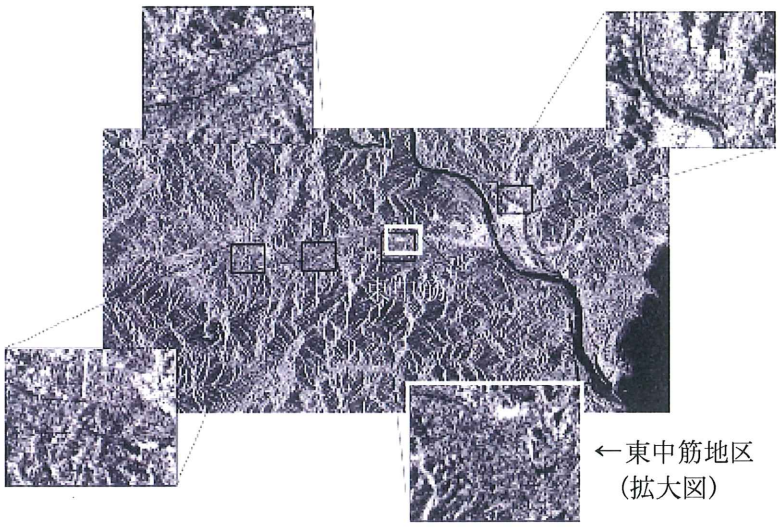


図 2.1.1.4　RADARSAT ＳＡＲ Standard モード　強度画像[4, 5]
四万十川下流と中筋川流域(1999 年 8 月 1 日 18 時 8 分)

中筋川流域のＳＡＲ画像を図 2.1.1.4 に示す[4, 5]．このうち，中央部分の白い四角で囲まれている領域が詳細に検討された東中筋地区である．この地域の地図画像を図 2.1.1.5 に示す[9]．中筋川の特徴的な屈曲部が見られる．この南側の水田が湛水した．さらに，平常時期の画像と比較するために，1999 年 8 月 25 日 18 時 8 分にも同条件で RADARSAT による観測が実施された．8 月 1 日および 25 日に取得された東中筋地区のＳＡＲ強度画像を図 2.1.1.6 に示す[4, 5]．8 月 1 日のグランドトゥルースは行われていないが，中筋川の水位変化[8]から判断すると，すでに水はほとんど引いていたと推定される．また，同 25 日については，観測に合わせてグランドトゥルースを行い，刈り取り直後で水のない水田，倒れた稲が残っている水田などが広がっていることを確認した[4, 5]．

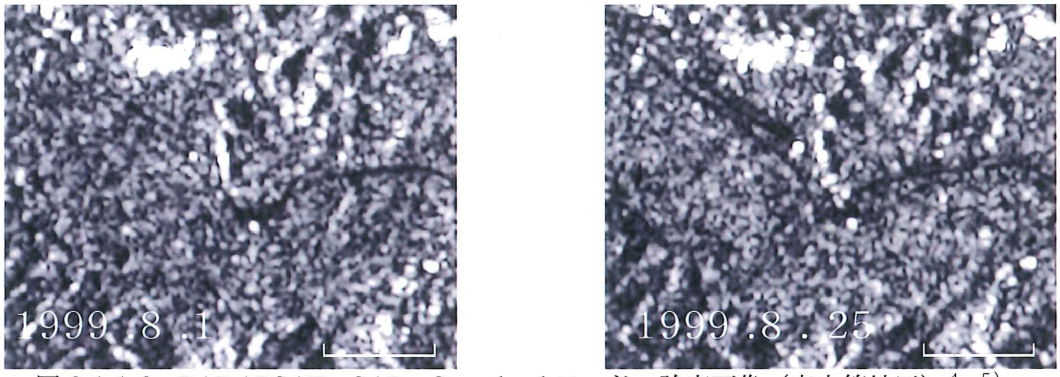


図 2.1.1.6　RADARSAT　SAR　Standard モード　強度画像（東中筋地区）[4, 5]
1999 年 8 月 1 日および 25 日に取得．図中右下のスケールは 0.5 km.

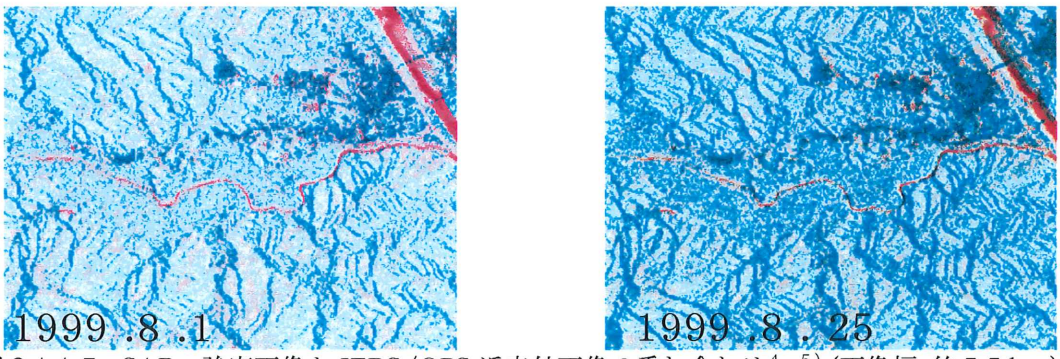


図 2.1.1.7　SAR　強度画像と JERS/OPS 近赤外画像の重ね合わせ[4, 5]（画像幅　約 5.5 km）
赤：ＳＡＲ強度画像の輝度レベルを反転した画像，緑および青：OPS（1998.7.3)近赤外画像

さらに，ＳＡＲ強度画像の判読を容易にする試みとして，RADARSAT ＳＡＲ強度画像データの輝度レベルを反転させて赤チャンネル，1998 年 7 月 3 日に取得された JERS/OPS 近赤外バンドを緑および青チャンネルに割り当てて画像を表示した．この場合，平常時の水域が暗く，ＳＡＲ強度画像での水域が赤く表示されることから，湛水域が赤で抽出されることが期待された．しかし，図 2.1.1.6 および図 2.1.1.7 に示されるように，水害直後の 8 月 1 日および 3 週間以上が経過した同 25 日についての解析とも，湛水域またはその痕跡は抽出できなかった[4, 5]。これは，すでに水が引いていたからであると考えられ，もう 3 日～4 日観測が早ければ湛水域を抽出できたと思われる．

(3)　衛星搭載ＳＡＲによる国内の水害状況把握に関する課題

日本の河川は増水から減水までの時間が短く，上記の 2 例についても約 5 日～6 日であった．そのため，観測計画の柔軟性が高い RADARSAT を使用しても，観測要求受付が最短約 30 時間前の現状では，被害を予測して観測を依頼することになる．また，国内の観測には空間精度も要求されるため高分解能 Fine モードでの観測が必要であり，観測計画が制約を受ける．今後，計画から判読まで，全体としての時間的改善も望まれる．さらに，航空機搭載ＳＡＲの活用も重要である．

2.1.2　海外の事例[10)11)12)]

－中国の洪水事例を用いたSARとTMによる洪水域抽出の比較研究－

広島工業大学（HIT）では，学内に設置した可搬型衛星受信装置（TGS）により，1998年から日本の地球観測衛星 JERS-1（ふよう１号）の SAR データの直接受信を開始した．その受信期間中に，中国の長江流域および東北地方で大洪水が発生した．HIT では，直接受信した JERS-1/ SAR データから長江流域と東北部の洪水域を抽出し，特に長江の洪水に関しては，解析結果をいち早く新聞等に公開するなど，洪水災害の周知に努めた．さらに，東北部の洪水事例においては，SAR データからの洪水域の抽出方法やランドサット TM データとの比較による SAR データによる洪水域抽出精度についての研究を行なった．以下その結果を述べる．なお，本研究の内容は，後の参考文献 10 から 12 に発表されている．

(1)　研究の目的

人工衛星リモートセンシングは一度に広域を観測できるため，大規模な洪水災害を把握する上で非常に有効な手段である．しかし，洪水のような気象災害時には雲や霧が多く，光学センサだけで広域を観測することは困難である．このような場合には合成開口レーダ(SAR)の利用が有効であることが，これまでにも報告されている．しかし，SARデータを用いて洪水域を抽出するための解析手順の定量化やその抽出精度については，まだ十分に検討されているとは言えない．本研究では，SARデータと光学センサデータから抽出される洪水域の比較を行うことにより，SARデータによる洪水域抽出手順の定量化とその精度評価を行うことを試みた．

(2)　使用データ

本研究に使用したSARデータは，広島工業大学に設置されているTGS(Transportable Ground Station)により直接受信処理されたJERS-1/SAR（1998年6月3日，1998年8月30日）と宇宙開発事業団（NASDA）により受信されたJERS-1/SAR（1996年8月12日）である．光学センサデータはLandsat TMのデータ（1996年8月21日，1998年6月8日，1998年8月27日）を使用した．観測日はSARデータ，光学センサデータ共にほぼ同じ時期のデータである．これらの画像をLandsat TMのデータを基準としてアフィン変換により重ね合わせた．全ての画像のピクセルサイズは28.5×28.5mである．解析対象地域は，中国東北部の松花江支流の嫩江流域の102ｋｍ×30ｋｍの地域である．表2.1.2.1に洪水域抽出に使用した経年変化と季節変化のデータの組を示す．また，図2.1.2.1に解析対象地域を示す．

表2.1.2.1　使用したデータの組み合わせ

センサー	データの日付けの組み合わせ (日付は dd/mm/yy)	
	季節変化データ	経年変化データ
JERS-1/SAR	12/08/96-30/08/98	03/06/98-30/08/98
Landsat/TM	21/08/96-27/08/98	08/06/98-27/08/98

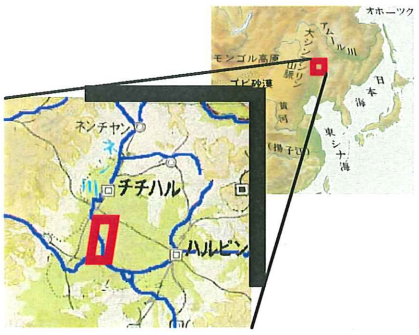


図 2.1.2.1 解析対象地

(3) SARデータのキャリブレーション

広島工業大学では，TGSにより直接受信したデータをVEXCEL社のSARプロセッサ（VSARP）で再生処理を行っている．再生されたJERS-1/SAR画像は，後方散乱係数が分からない状態であるため，宇宙開発事業団（NASDA）の標準処理データ（レベル2.1）を基にキャリブレーションを行った．まず，VSARPで処理した4バイトの4ルックSAR画像とレベル2.1の画像をアフィン変換により互いに重ね合わせ，散乱強度が強い箇所から弱い箇所まで30点抽出し，各画素を中心とする5×5画素（合計25画素）の平均値を求めた．2つのSARデータの間には乗法性の相関があるため，回帰直線が原点を通るという仮定をいれて，NASDAのレベル2.1とVSARPで処理したデータから回帰式を求め，その結果を用いてVSARP処理のデータのキャリブレーション定数を求めた．

上記のキャリブレーションの結果，両者のSARデータから後方散乱係数（σ^0）を求める式は以下の通りである．

$$\sigma^0 = 10\log 10Pn - 68.2 \quad [dB] \quad (\text{NASDAレベル2.1})$$

$$\sigma^0 = 10\log 10Pn - 23.1 \quad [dB] \quad (\text{VSARP処理データ})$$

ここで，Pnは処理済みSARデータのパワー値である．さらに，σ^0を8ビットの画像データで表すために，以下のような変換式によりσ^0を画像のディジタルカウント(DN)に変換した．

$$DN = 5(\sigma^0 + 30)$$

(4) SARデータによる洪水域抽出方法

SAR画像においては，通常洪水域は後方散乱強度が非常に低い領域として（すなわち暗い領域として）現れる．しかし，洪水域以外にも元々後方散乱強度の低い土地被覆が存在するので，SARデータのみから洪水域を抽出するには，洪水前後のSARデータを用いて，後方散乱が低下した地域を抽出することが有効である．本研究においても，表2.1.2.1に示すように洪水時の1998年8月30日と洪水前の1998年6月3日，同じく1998年8月30日と1996年8月12日のSAR画像を重ね合わせることにより，洪水域を抽出した．

まず，洪水前後の画像で，σ^0の変化に対してしきい値（Tc）を用いて洪水域を抽出した．しきい値（Tc）として，-2dB,-3dB,-4dBの3種類を用いた．しかし，湛水域以外の所でも季節や年により変化があり，これらの影響を除くため洪水時の画像をしきい値（Tw）を用いて水域と陸域とに分け，水域として現れている箇所だけを洪水域として抽出した．洪水域抽出の条件式を以下に示す．

$$\sigma^0_2 - \sigma^0_1 \leqq Tc \quad AND \quad \sigma^0_2 \leqq Tw$$

ここで，σ^0_1は洪水前の後方散乱係数，σ^0_2は洪水後の後方散乱係数である．なお，Twは-14.4dBに設定した．

洪水域抽出画像はSAR特有のスペックルによりゴマ塩状のノイズが目立っていた．そのため，洪水前後の画像にウィンドウサイズ3×3のミーンフィルター処理を行った．この処理後もゴマ塩状のノイズがなお残るため，洪水域抽出後の画像に対してさらに多数決フィルタ処理を行った．図2.1.2.3には季節変化の組み合わせによる洪水前後のSAR画像と，これらの画像からTc=-3dBの条件で洪水域を抽出した画像を示す．

(5) TMデータによる洪水域抽出方法

TMなどの光学センサーで洪水域を抽出する場合には，近赤外域で水の反射が非常に低いことを利用するのが一般的である．しかし，実際には，水の濁度，水面からの反射，大気の影響などにより近赤外バンドの値は変化する．たとえば，増水により水が濁っている場合，

澄んだ水よりも輝度が高く表れる．また，太陽光が水面で反射して輝度が高くなることがある．これらの影響を減少させるために，近赤外バンドのみでなく，可視域（TMバンド３）と近赤外域のバンド（TMバンド４）から得られるNDVI（正規化植生指標）を求めて洪水域抽出に利用した．NDVIは，近赤外域と可視域の差をとるため，水の濁りや水面反射，大気の影響を少なくすることができるためである．また，NDVIは，水域で低い値をとることが知られており，湛水により陸域から水域に変化した場合には，NDVIは低下する．この性質を利用して，２時期のデータのNDVI変化から洪水域を抽出した．

まず，洪水前後のNDVIの画像の差をとり，この差画像のヒストグラムの谷の部分の値をしきい値（Tc）として，洪水前後のNDVIの変化値にスレッシュホールドをかけた．また，洪水以外の季節や年の違いによるNDVI値の変化の影響を除くためSARと同様，洪水後の画像に対してしきい値（Tw）を設定して，以下の条件式によって洪水域を抽出した．

		SAR	
		その他	洪水域
Landsat TM -NDVI	その他	a	b
	洪水域	c	d

TPR(True production rate) d／（c＋d）
FPR(False production rate) b／（b＋d）

図 2.1.2.2　洪水域抽出における評価指標

$NDVI_2 - NDVI_1 \leqq Tc$　AND　$NDVI_2 \leqq Tw$

ここで，$NDVI_1$は洪水前のNDVI，$NDVI_2$は洪水後のNDVIである．Twの値は-0.02に設定した．

図2.1.2.4に，季節変化の組み合わせによる洪水前後のNDVI画像とこれらの画像から洪水域抽出を行った画像を示す．

(6)　SARデータとTMデータによる洪水域の比較

本節では，前節までに求めたSARデータとTMデータによる洪水域の比較検討を行った．ここでは，TM画像から抽出された洪水域が正しいという仮定の下に，SAR画像から抽出された洪水域の精度を定量的に評価した．評価のための指標として図2.1.2.2に示すようなTPRとFPRを用いた．

表2.1.2.2には，経年変化によるTPRとFPR，表2.1.2.3には，季節変化によるTPRとFPRの結果を示す．表2.1.2.2と表2.1.2.3の結果をTPR-FPRで評価すると経年変化では，Tcが-3dBで最も良い結果となる．一方，季節変化では，TPR-FPRはTcを小さくする程良い結果となった．しかし，同時にFPRはTcが小さいほど大きくなり，TPR-FPRだけで最適結果を決めることには問題がある．SAR画像による洪水域抽出の誤差の原因の一つであるスペックルノイズは，本来の洪水域の内部でランダム状に分布している．したがって，それらは洪水

表2.1.2.2　洪水抽出におけるTPRとFPR（経年変化データの場合）（単位：%）

	Tc	TPR	FPR	TPR-FPR
Without filter	-2.0dB	72.5	41.9	30.6
	-3.0dB	65.4	33.7	31.7
	-4.0dB	57.7	25.3	32.4
Mean filter	-2.0dB	75.7	30.3	45.4
	-3.0dB	67.3	15.9	51.4
	-4.0dB	58.2	8.8	49.4
Majority filter	-2.0dB	76.6	27.3	49.4
	-3.0dB	68.1	12.2	55.9
	-4.0dB	58.8	7.1	51.6

表2.1.2.3　洪水抽出におけるTPRとFPR（季節変化データの場合）（単位：%）

	Tc	TPR	FPR	TPR-FPR
Without filter	-2.0dB	73.5	19.8	53.7
	-3.0dB	64.4	16.3	48.0
	-4.0dB	54.4	13.2	41.3
Mean filter	-2.0dB	79.7	15.4	64.3
	-3.0dB	68.6	11.0	57.6
	-4.0dB	55.6	7.4	48.1
Majority filter	-2.0dB	81.0	14.3	66.7
	-3.0dB	69.7	9.9	59.8
	-4.0dB	56.0	6.2	49.8

域の目視判読を行う場合には，無視することができる．したがって，FPRが小さい場合を選択する方が洪水の全体像を掴むためには効果的であると考えられる．

以上のような考察から，Tc=-3dBで洪水域を抽出すると，TM画像で抽出した洪水域と比較して，経年変化では約68％一致し，約12％が誤り，季節変化では約70％一致し，約10％が誤りという結果になり，経年変化，季節変化ともにほぼ同程度の結果が得られたものと考えられる．

TM画像で洪水域として抽出されながら，SAR画像では抽出されなかった場所は，TM画像の目視判読から洪水前に裸地および湿地と考えられる場所であった．JERS-1/SARはLバンドであり，裸地および湿地からの後方散乱はもともと小さく，黒っぽい地域として捉えられる．したがって，湛水しても洪水前後の後方散乱の変化が少なく，洪水域として抽出されなかったと考えられる．一方，河川水など水域の一部においては，TM画像では洪水域として抽出されなかった一方，SAR画像で洪水域として抽出された．これは，洪水前の水面の一部が波の影響により後方散乱が高くなっていたためと考えられる．

(7) 長江流域における洪水域抽出結果

上記の研究結果を踏まえ，長江流域での洪水域抽出を，JERS-1/SARデータとTMデータを用いて上記の研究と同じ方法で実施した．対象地域は，長江中流域の洞庭湖から武漢にいたる地域である．同地域をカバーするためにはJERS-1/SARでは３パス，TMでは２パスのデータを接合する必要があった．図2.1.2.5には３パスのJERS-1/SARデータを接合した後，非洪水時の1995年のデータと洪水時の1998年のデータを重ね合わせた画像，および同様に1995年と1998年のTM接合画像のNDVI画像を重ね合わせた画像をそれぞれ示す．図2.1.2.6には，SAR画像とTM画像から上記の方法と同じ方法により抽出された洪水域をそれぞれ示す．さらに，TM画像とSAR画像による洪水域を互いに比較したが，長江の場合のTPRは約50％という結果となった．これは，SARとTMの観測日が東北部の場合ほど良く一致していなかったためと考えられる．このように定量的な一致率はそれ程高い結果ではなかったが，図2.1.2.6を見ると，洪水域のパタンとしては，SARとTMでかなり良い一致が得られていることがわかる．

(8) 研究のまとめ

本研究では，SARデータと光学センサ（TM）データを用いて洪水域の抽出を行い，光学センサデータによる洪水域を基準としてSARデータによる洪水域の精度を定量的に評価した．本研究の結果として得られた結論は以下の通りである．

1) SARデータとTMなど光学センサデータを用いて抽出された洪水域は，パタンとしては良く一致し，東北部のケースではSARとTMの観測日が近かったため，互いに70％程度の一致率が得られた．一方，長江流域では両者の観測日にかなりの差があったこともあり，一致率は50％程度であった．

2) 洪水域抽出のためのJERS-1/SARの後方散乱の変化量としては，-3dB程度が妥当であると考えられる．

本研究の事例となった中国の洪水の特徴として，洪水規模の時間的変化が比較的緩やかである点がある．これは，東北部でのSARとTMデータの洪水後の観測日が３日違っているにもかかわらず，両者による洪水域抽出の比較が十分出来たことにも現れている．人工衛星による観測ではその軌道の関係上どうしても観測日に関する制約が生ずるため，洪水域をタイミング良く抽出することは，一般的にはかなり困難さを伴う．その意味で，今回事例となった中国の洪水は衛星搭載のSARによる観測にはかなり適した事例ということが出来る．中国

以外に，タイやベトナムなどの東南アジアでも，中国の洪水と同様洪水発生から収束までかなり長い時間がかかるので，衛星搭載のSARによる洪水モニタリングが現実的に可能な対象と考えられる．ただし，韓国や北朝鮮においては，地形条件が日本に似ているため，洪水がかなり短期間で発生・収束する場合が多く，衛星による観測は前者に比べると難しい場合があろう．

参考文献

1) Tanaka S. : Radarsat looks at flooding in Japan (Summer 1998), RESTEC newsletter, March 1999, 34, p.6, 1999. （謝辞：田中總太郎氏より画像データの提供を受けました.）
2) 野村祐守：1998 年 8 月の日本の天候，気象 1998 年 10 月号，498，p.26，日本気象協会，1998.
3) 建設省国土地理院：1998 年 8 月集中豪雨に伴う那珂川の緊急現地調査について（速報），http://www.gsi-mc.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/1998/0901.htm，1998.
4) 向井幸男，林　彩，山之口　勤，大村　誠：衛星画像による水田の水没域抽出に関する研究，第 25 回リモートセンシングシンポジウム講演論文集，pp. 33-34，1999.
5) 向井幸男，山之口　勤，林　彩：合成開口レーダー画像による災害状況把握手法に関する調査研究，RESTEC 内部研究報告，2000.
6) 宮内　秀：1999 年 7 月の日本の天候，気象 1999 年 9 月号，509，p.26，日本気象協会，1999.
7) 高知県農林水産部：私信，1999.
8) 建設省中村工事事務所：私信，2000.
9) 国土地理院：数値地図25000地図画像「土佐中村」，CD-ROM版「宇和島」，1998.
10) 小西，竹内，菅，幾志：SARデータと光学センサーデータによる洪水域抽出の比較，平成11年度日本写真測量学会／日本リモートセンシング学会合同学術講演会発表論文集，pp465-468,1999年5月.
11) S.Takeuchi, Y.Suga, and T.Konishi, : A Comparative Study on Flood Detection Using JERS-1/SAR and Landsat/TM Data, Proceedings of IGARSS'99, Hamburg, pp873-875,June,1999.
12) Y.Suga, S.Takeuchi and S.Kishi : Flood Monitoring in China Using JERS-1/SAR and Landsat/TM Data, Presented at 50th IAF Congress,IAF-99-C.2.06, Amsterdam,Oct.,1999.

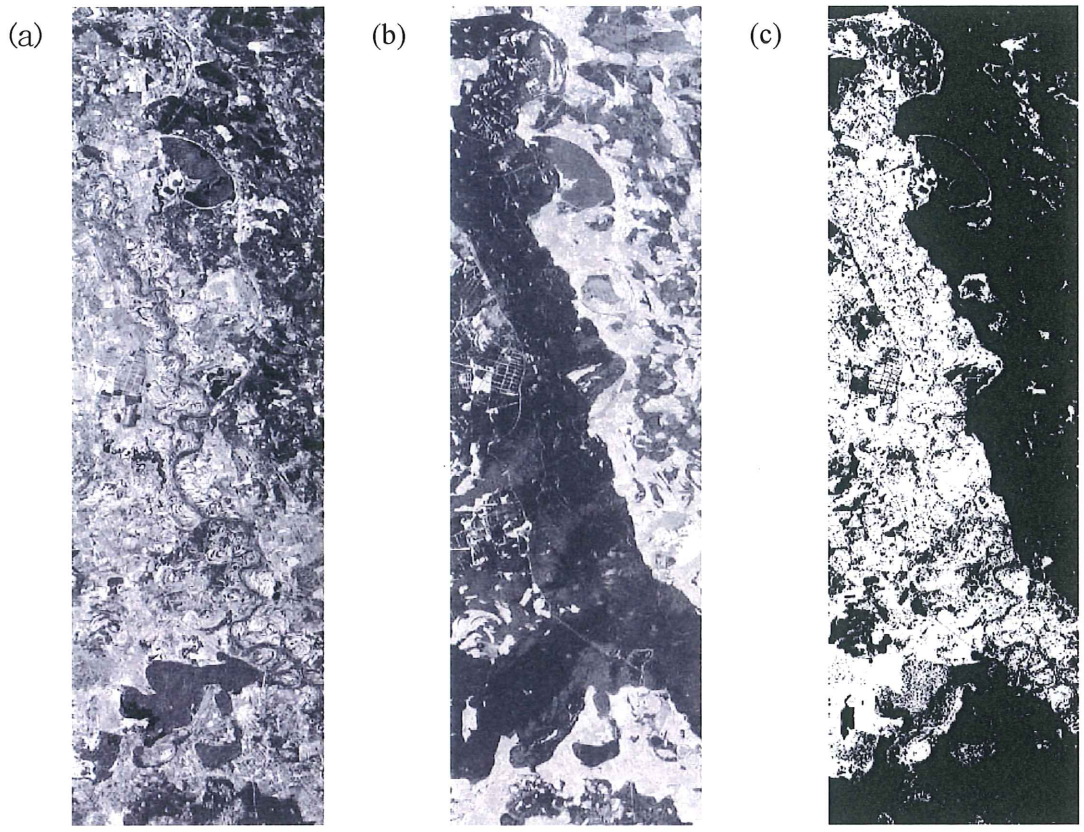


図 2.1.2.3 (a) JERS-1 SAR 画像(03/06/98)　　(b) JERS-1SAR 画像(30/08/98)
(c) JERS-1 SAR 画像から抽出された洪水域（白い部分）（MITI/NASDA 所有）

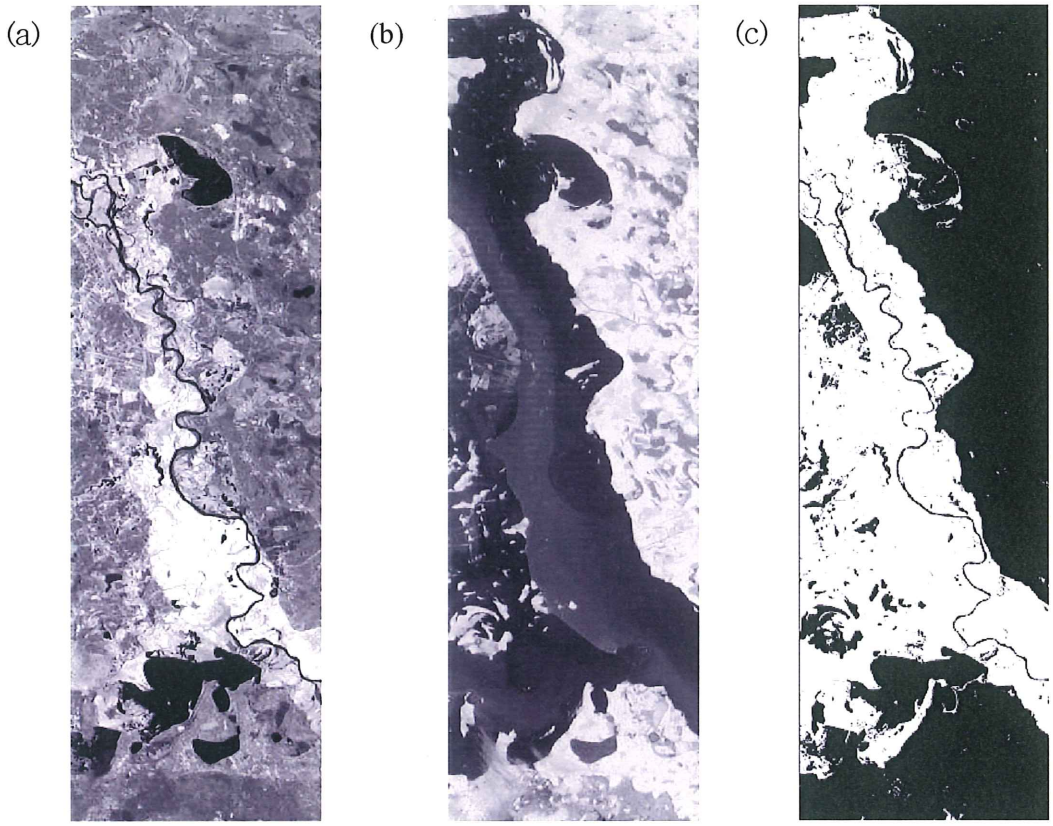
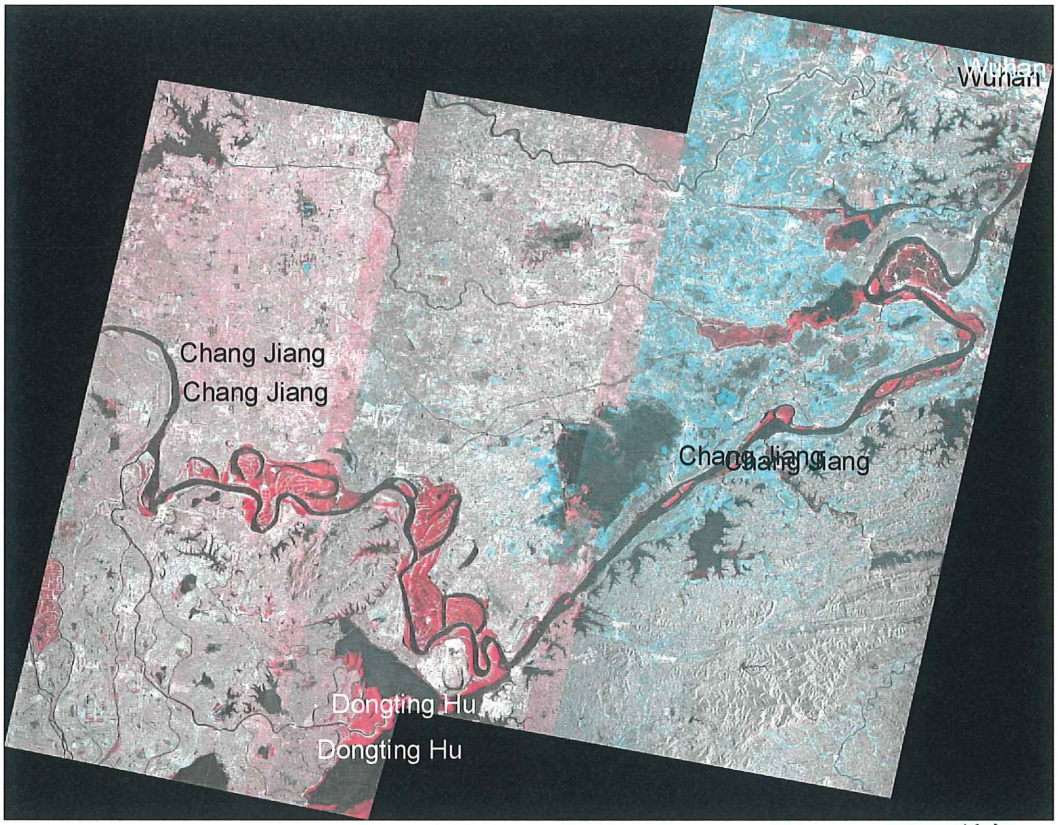


図 2.1.2.4　(a) TM-NDVI 画像(03/06/98)　　(b) TM-NDVI 画像(30/08/98)
(c)　TM-NDVI 画像により抽出された洪水域（白い部分）



(MITI / NASDA 所有)

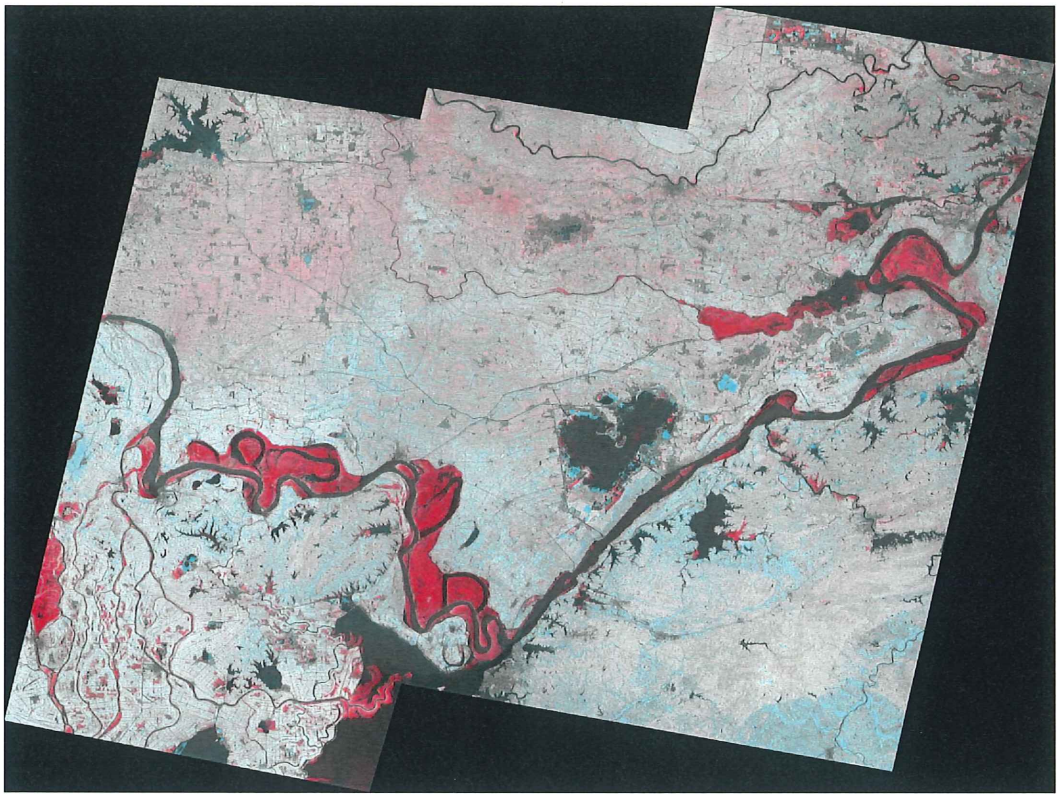


図 2.1.2.5　1995 年と 1998 年の JERS-1/SAR 接合画像の重ね合わせ画像（上）および TM-NDVI 接合画像の重ね合わせ画像（下）
　上：JERS-1/SAR (23/10 + 22/10 + 11/06, 1995) + (13/09 + 12/09 + 11/09, 1998)
　下：TM-NDVI　(30/07 + 06/08, 1995) + (14/08 + 23/08, 1998)
(SAR 接合画像と TM-NDVI 接合画像の各々のデータの日付は左から右の順に示す)

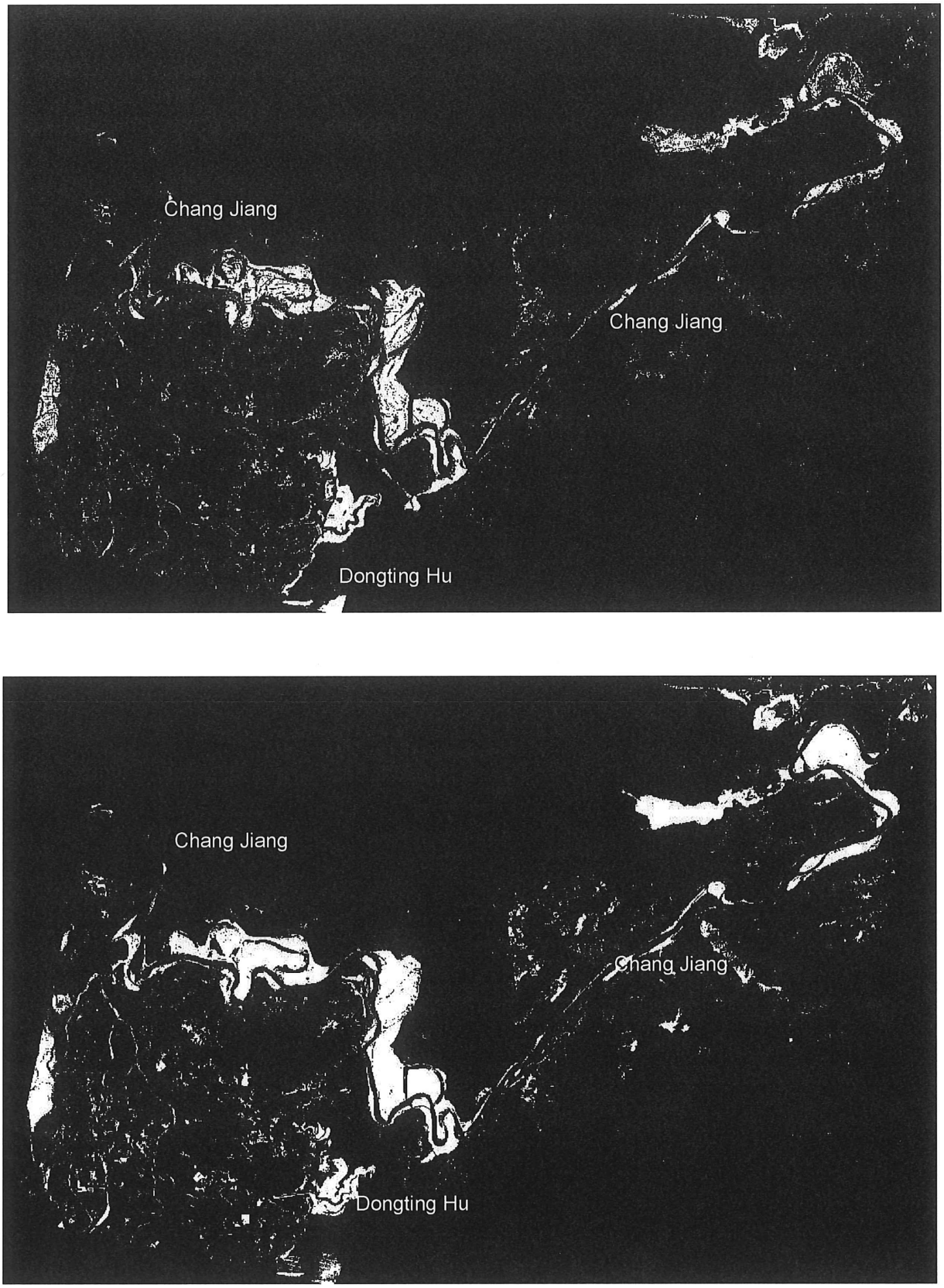


図 2.1.2.6　JER-1/SAR（上）およびTM-NDVI（下)から抽出された洪水域（白い部分）

2.2 斜面災害

2.2.1 斜面災害とは

斜面災害には，地すべり，斜面崩壊・崩落，土石流・泥流からなる土砂災害と雪崩が含まれるが，雪崩は雪氷関連災害で述べるものとして，残りの地すべり，斜面崩壊・崩落，土石流・泥流の定義を述べる[1)]．

地すべりは広義には，土地の一部が地下水等に起因してすべる現象またはこれにともなって移動する現象をいう（地すべり防止法）．動きの速さと発生機構により，（狭義の）地すべりと崩壊（slope failure）に分類されるが境界は明確でない．地すべりは速さの最も遅いもので，緩斜面上の土塊がすべり面に沿って１日数ｾﾝﾁﾒｰﾄﾙから数ﾒｰﾄﾙとゆっくり継続的もしくは間欠的に滑動するものを呼び，ある特定の地域や地質条件のところに発生している．これに対し，斜面崩壊・崩落は急激に土塊が崩落する現象を呼び，斜面であればどこにでも発生するといわれている．広義の地すべりの発生の誘因は，降雨や融雪水の地下浸透が多いが，地震の場合もある．地すべりは，水の地下浸透による水位の上昇により，土の剪断強度が低下し，すべり面を境に，重力の作用で土塊が移動する．

土石流・泥流は，大雨でゆるんだ山腹から，主として谷沿いに土砂石礫等が供給水と混合して流下する現象をいう．水と土砂石楽とが一体となり，かゆ状となってそれ自体に働く重力の作用によって土砂石楽が運動する様式で流下する．土石流は，巨礫，岩塊及び流木を含み，巨礫が先頭に集中して回転・滑動しつつ移動する．侵食力がきわめて強く，流下の途中で渓床材料をまきこみ，渓岸をけずっていく．また，直進性があって進路にある小山を乗り越えて進むことも珍しくない．泥流は，細粒分を多く含み，活火山や火山噴出物地帯に多く発生する．

2.2.2 ＳＡＲデータを用いた地すべりの検出

斜面崩壊や土石流の発生する日本の山地は，多くの場合，植生に覆われている．斜面崩壊が起きた斜面や，土石流が流下した渓谷は侵食によって植生がはぎ取られ，光学センサーでは可視域の輝度が増加し，近赤外の輝度が減少する．

ＳＡＲでは後方散乱に注目すると，波長と災害が起きる前の植生の状態（たとえば樹木に覆われているか草本に覆われているか）と災害後の地表面の起伏度（たとえば，巨礫・岩塊に覆われているか泥に覆われて滑らかであるか）によって災害前後での後方散乱の様相が多様なため，土砂災害の検出は容易な場合や困難な場合など様々である．さらに，土砂災害は山地，急傾斜地で発生するため，斜面傾度の差異が及ぼす後方散乱変化，フォアショートニングやレイオーバによる画像の歪み等，ＳＡＲによる土砂災害の状況把握を困難にする要素が多い．

清水ら[2)]は，航空機搭載のＳＡＲから観測されたデータを用いて過去の地すべりの痕が刻まれた地すべり地形の目視判読がどの程度まで可能であるかを詳細に検討している．カナダ国立リモートセンシングセンターのＳＡＲ搭載コンベア580によって1984年10月から11月にかけて取得した八幡平，二ツ井町（秋田県）のＳＡＲ画像を用いて地形を判読した．ＳＡＲ画像は，縮尺1/5万に地理補正されている．X-HHとL-HHとの比較ではX-HHがはるかに有効であることと，X-HVとL-HH，L-HVとL-HHのでは画質の違いに大差ないことを示した．オフナディア角65度と50度の場合の比較も行っており，60度では照射背後の斜面が大きな影になり，滑落崖が判定できず地すべりの判読に適さないとしている．ＳＡＲ画像を立体視すると単一画像のみでは判定が困難な部分の判定が容易になるが，画質は同縮尺の垂直空中写真に比べてかなり落ちると報告している．

地すべりの状況把握では，インターフェロメトリＳＡＲ（ＩｎＳＡＲ）を用いて地表変位が生じた地点を抽出して地すべりを検出するとともに移動量の測定も可能である．

木村ら[3]は，ＪＥＲＳ-１　ＳＡＲデータを用いて３パス・ディファレンシアルＩｎＳＡＲにより山形県板谷地区の地すべりの発生地域を検出した．検出された地域は他の方法で検出したグランドトルースとほぼ一致した．しかし，背斜面でいくつかの小面積の誤抽出があった．

渡辺ら[4]は，インドネシアジャワ島の地すべり地を１回帰のＪＥＲＳ-１　ＳＡＲのペア画像を用いてＩｎＳＡＲ解析を行った．コヒーレンスが0.1以上の領域だけをアンラップしたが，低周波ノイズが重畳していたため，高周波成分での局所的な変動の評価を試みた．３～４kmの距離で積算変位が１ｃｍ程度と変動が非常に少ない範囲の中に，300～400ｍで数センチの変動がある箇所が何カ所か認められた．また，小山の東斜面全体（約1ｋｍ×１ｋｍ）が大きく変動していると思われるものもあった．

Fruneauら[5]は，フランスアルプスのLa Clapiere地すべりのＥＲＳ-１ＳＡＲ画像を３日間隔で連続して５画像取得し，これから得られた６枚の位相干渉画像を解析した．２週間の時間間隔ではコヒーレンスは，地すべり地のほとんど全域でかなり残存していた．ペア画像間で位相干渉画像は驚くほど似ており，少なくとも１２日間は変位が定常的であったことが分かった．干渉図から得られた変位の場は，地すべりの頂部と下端部にかけて非線形的に徐々に変化していた．また，地すべりの西側部分では，かなり早い動きが見られた．干渉図から得られた運動の大きさは地上調査と良く一致した．ＳＡＲインターフェロメトリは不連続的な地上調査では得られない，小規模な不定常な動きの証拠を示すことが出来た．

2.2.3　土石流・泥流の検出

ＳＡＲを用いた土石流や泥流の検出は国内では，まだ報告されていない．海外では，ＥＲＳ-１　ＳＡＲを用いてフィリピンのピナツボ火山のラハールを観測した例がある．

ラハールとは，水が誘因となる火山の斜面災害を一括して表現する専門用語である．火山体斜面に何らかの理由で大量に水が発生し，砕屑物と一緒になって流下することがある．このような流れは，砕屑物が占める割合が大きいものから順に，土石流（debris flow），泥流（mud flow），洪水（flood）などと区別して呼ぶこともあるが，インドネシア語のラハール（lahar）を総称として用いると便利である[6]．

Chorowiczら[7]は，1993年６月９日と1993年８月１３日のピナツボ火山のＥＲＳ-１　ＳＡＲを用いてラハールの検出を行った．1993年６月９日は雨季の前，1993年８月13日は雨季の最中である．現地調査やラハールの表面の物理的性質の考察から表面の粗さ，土壌水分量，形状・形態を手がかりにして，新しいラハールや活動中のラハールに覆われた地域を検出することができた．

図2.2.3.1に研究対象域を示す．ＥＲＳ-１　ＳＡＲの白黒画像を図2.2.3.2と図2.2.3.3，および，図2.2.3.4にを示す．これらの画像中の新・旧ラハールおよび活動中のラハール等の説明を表2.2.3.1にまとめて示した．

最近のラハールは，表面粗度の高いものや低いものがあるが湿っている．流走中のラハールの表面が乱れて粗い．最近堆積したラハールと流下中のラハールの後方散乱は値が高く，平坦で滑らかな表面の乾燥している古いラハールの堆積地や浅く穏やかな水に覆われたラハールの後方散乱の値とは異なる．

図2.2.3.5は，1993年６月９日の画像に青と緑を割り当て，1993年８月13日の画像に赤を割り当てて作成したカラー合成図である．1993年６月９日の画像で平坦で滑らかなラハールに覆われていて，1993年８月13日の画像で表面が粗い新しいラハールや流動しているラハールに覆われている部分は赤く見える．また，1993年８月13日の画像で新しく堪水した部分の多

くはあさぎ色に見える．

ラハールの堆積によって，流水路の合流，扇状地に似た模様，湖の堰や涵養源，流路の移動などの地形要素が現れ，これを認識・観測できた．さらに，台風シーズン中に本川の河床やその近傍で発生したラハールのみならず，大きな海岸平野に発生した洪水も検知できた．

2.2.4 斜面災害のまとめ

本報告をまとめるにあたり新たに文献調査を行った．文献調査の範囲では，ＳＡＲを用いて地すべりを検出した例は日本でもあったが，ＳＡＲインターフェロを用いて地すべりの移動量を測定しグランドトルースと比較したものはなかった．ＳＡＲインターフェロメトリを用いた地すべりの観測は，解析の過程でルック処理や空間フィルタ処理が必要なため，十数メートルの小規模な地すべりの観測は困難である．日本では大規模な地すべりの兆候が見られると，災害を未然に防ぐために迅速な対策工事がなされる．このため，日本では2.2.2で紹介したフランスアルプスの例のように１-２cm/dayの変位が継続して発生することは希であり，研究を目的として事前に調査地域を設定してＳＡＲ画像をタイミング良く取得することは困難である．しかし，ＩｎＳＡＲは地すべりの兆候を検知する手段として有効と考えられるので，実利用・実運用を実現するために引き続き研究することが必要である．

日本では災害による人的被害は，大地震を除くと土砂災害，特に土石流，斜面崩壊・崩落によるものが多い．この状況を鑑み，ピナツボ山のラハールの観測例を詳しく紹介した．土石流，斜面崩壊は短時間・急激の発生するため，発災時には迅速な対応が必要である．このため，昼夜を問わず全天候性をもつＳＡＲの特徴が生かされる．

発災時のみならず災害が予測される台風等の豪雨時に航空機SARで上空から監視を行い住民に災害情報をリアルタイムで伝える航空機SARによる災害情報システムがすでに提案されている[8)]。

参照文献

１）資源・環境観測解析センター：新編リモートセンシング用語辞典, pp.122, pp.135, 1996.

２）清水文健，大八木則夫：地すべり・地すべり地形判読への利用，日本リモートセンシング学会誌，Vol.13, No.4, pp.68-81, 1993.3.

３）木村宏，山口靖，藤堂正裕：干渉ＳＡＲによる地すべりの検出，日本リモートセンシング学会学術講演会論文集，Vol.23, pp,3-4, 1997.

４）渡辺英久，塚田誠：地すべり災害へのＳＡＲデータ活用に関する研究，地すべり学会研究発表講演集，Vol.38, pp.67-70, 1999.

５）B.Fruneau, J.Achache, C.Delacourt :Observation and modeling of the Saint-Etienne-de-Tinee Landslide using SAR interferometry, Tectonophysics, No.256, pp.181-190, 1996.

６）下鶴大輔，荒牧茂雄，井田喜明：火山の辞典，pp.130, 1995，朝倉書店.

７）J.Chorowicz, E.Lopez, F.Garcia, J.-F.Parrot, J.-P.Rudant and R.Vinluan :Key to Analyze Active Lahars from Pinatubo on SAR ERS Imagery, REMOTE.SENS.ENVIRON, Vol.62, pp.20-29, 1997.

８）水谷完治：航空機SARによるリアルタイム土砂洪水災害情報の避難への応用、水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ, pp.157-161，1998.

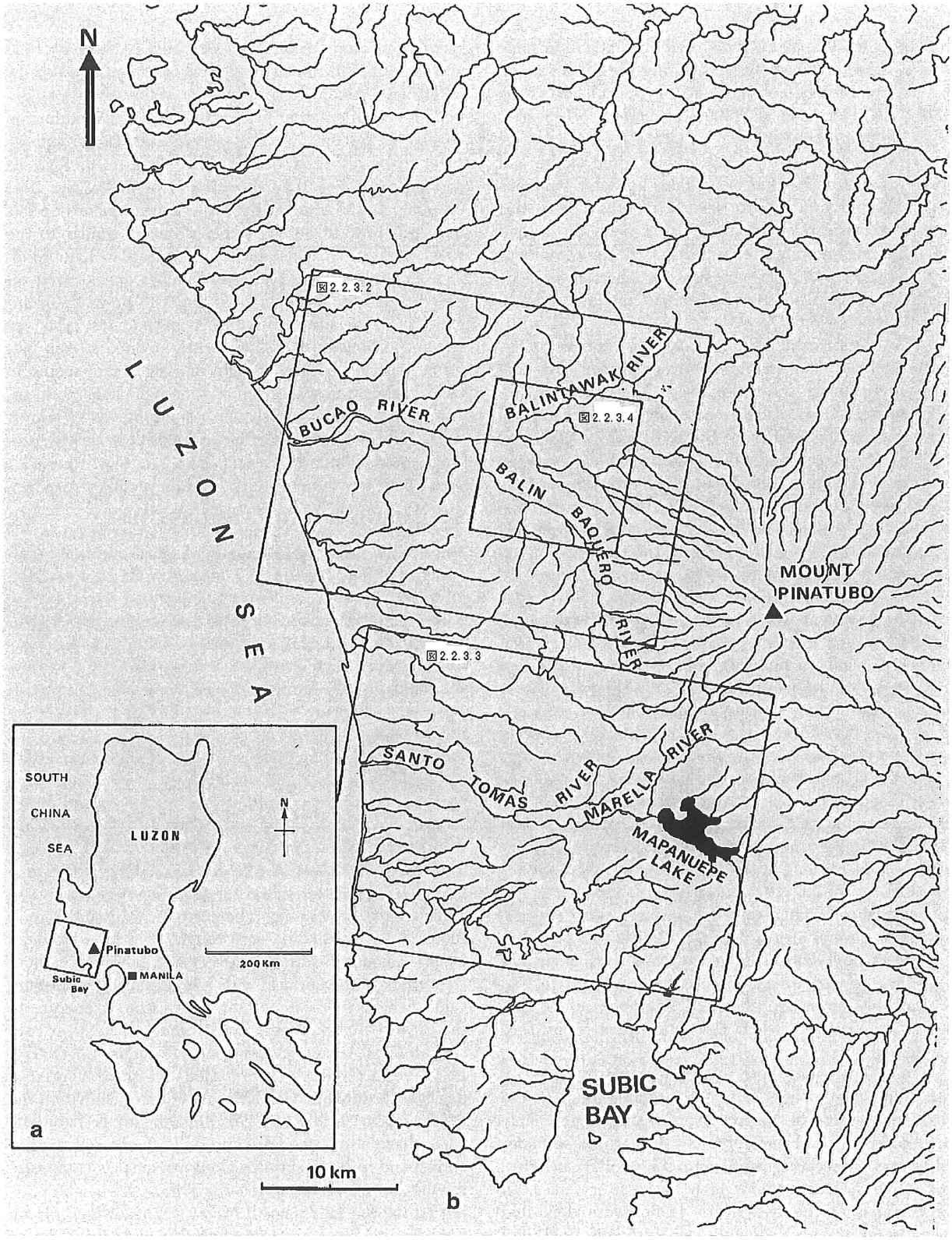


図2.2.3.1　ピナツボ火山とその周辺：ａ）位置図（枠はＥＲＳ-１　ＳＡＲのシーンの位置）；ｂ）流路網（枠は図2.2.3.2，図2.2.3.3，図2.2.3.4の位置）.

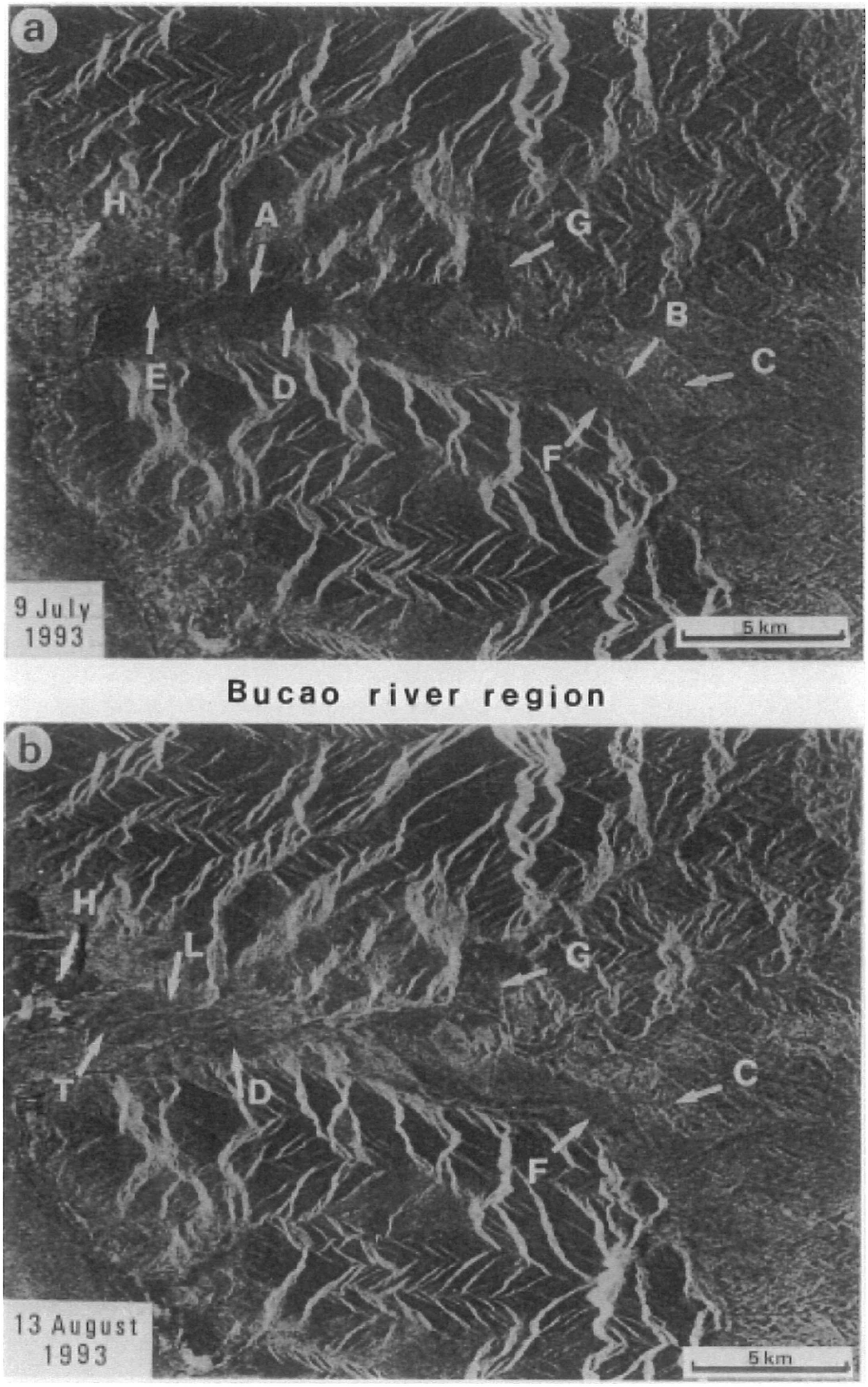


図2.2.3.2　Bucao川地域：　a）1993年６月９日の画像；b）1993年８月１３日の画像.

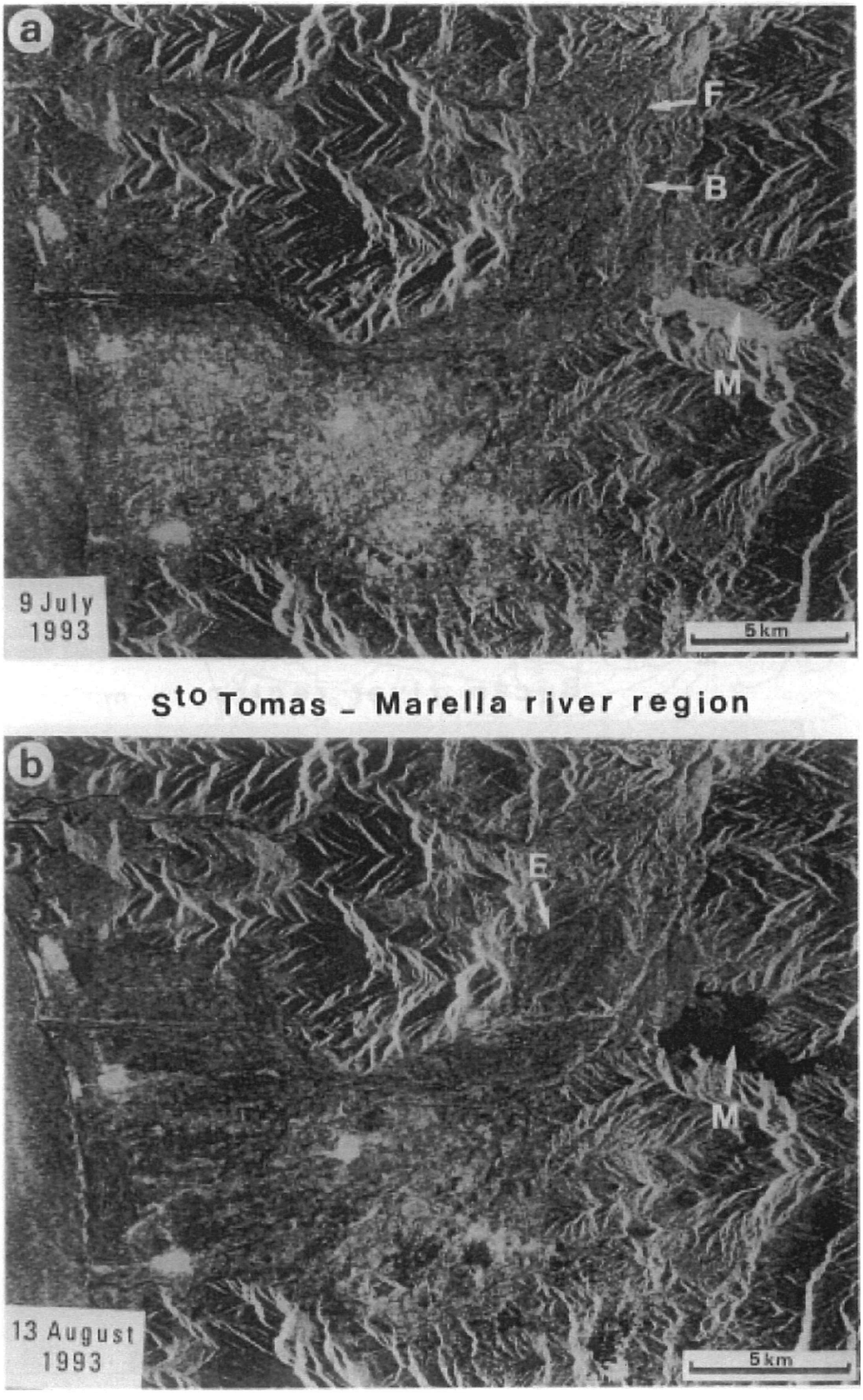


図2.2.3.3　Sto. Tomas-Marella川地域：a）1993年６月９日の画像；b）1993年８月１３画像.

表2.2.3.1　新・旧ラハールおよび活動中のラハール等の特徴

図2.2.3.1 (a)

A： 非常に明快な表面の粗い小川
B： 古いラハール（1993. 6/3, 6/26）の浸食によってできた急な斜面（明るさは斜面の方向に依存）
C：(Bよりさらに）古いラハールで小さなガーリに刻まれたもの
D： 平らで滑らかな表面の乾いたラハールの堆積物または穏やかな浅い水
F： 滑らかなラハールの堆積物や穏やかな流水に満たされた狭い谷を形成する主要な川
　川の位置が異なる（図2.2.3.1 (b)に対して）
G： 扇状地の形状がわずか（図2.2.3.1(b)と異なる）
H： Buao River 下流北側の平らな土地，明るい灰色の表面

図2.2.3.1 (b)

C：(Bよりさらに）古いラハールで小さなガーリに刻まれたもの
D： 現に活動中の荒いラハールまたは湿った滑らかな新鮮なラハール（8/13）
F： 川の位置が異なる（図2.2.3.1 (a)に対して）
G： 扇状地のような構造が明確
H： Buao River 下流北側の平らな土地，穏やかな静水がに対応（明るい灰色の表面→黒い表面）
L： 平らで滑らかな表面の湿ったラハールの堆積物または穏やかな浅い水
T： ラハール合流するようなパターンで走る

図2.2.3.2 (a)

B：:古いラハール（1993. 6/3, 6/26）の浸食によってできた急な斜面（方向によって明るくなったり暗くなったりする）
F： 滑らかなラハールの堆積物や穏やかな流水に満たされた狭い谷を形成する主要な川
M： Mapanuepe 湖（風が強く波が立っている）

図2.2.3.2 (b)

E： 川に沿った表面が黒く見えるもの
M： Mapanuepe 湖（風が穏やかで暗く見える）

図2.2.3.4 (a)

G： 扇状地の形状がわずか（図2.2.3.1 (b)， 図2.2.3.4 (b)と異なる）

図2.2.3.4 (b)

G： 扇状地のような構造が明確（図2.2.3.1 (a)，図2.2.3.4 (a)と対比）
W：ラハールによる扇状地の北に生じた小さな湖

図2.2.3.5 (a)

P： ラハールによる扇状地
Q： 新しく乱れたラハールが，表面の粗いラハールの上に堆積
W：ラハールによる扇状地の北に生じた湖
　6月の画像では表面が粗く灰色，8月の画像では静水に覆われ暗いため，あさぎ色にになる.

図2.2.3.5 (b)

N： 本来の古い粗い表面のラハール上に8月の画像では平坦な表面が乗る.
Q： 新しく乱れたラハールが，表面の粗いラハールの上に堆積

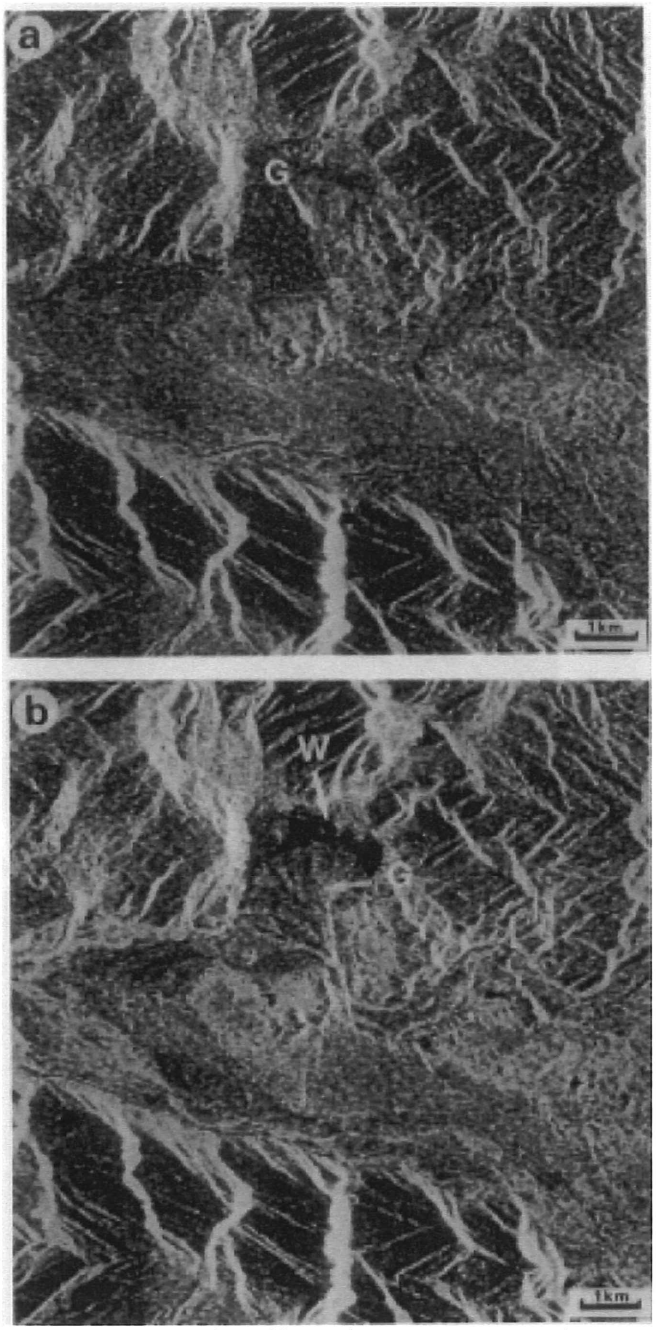


図2.2.3.4 扇状地に似た構造（図2.2.3.2のWの位置を参照）：
a）1993年６月９日の画像；b）1993年８月１３日の画像.

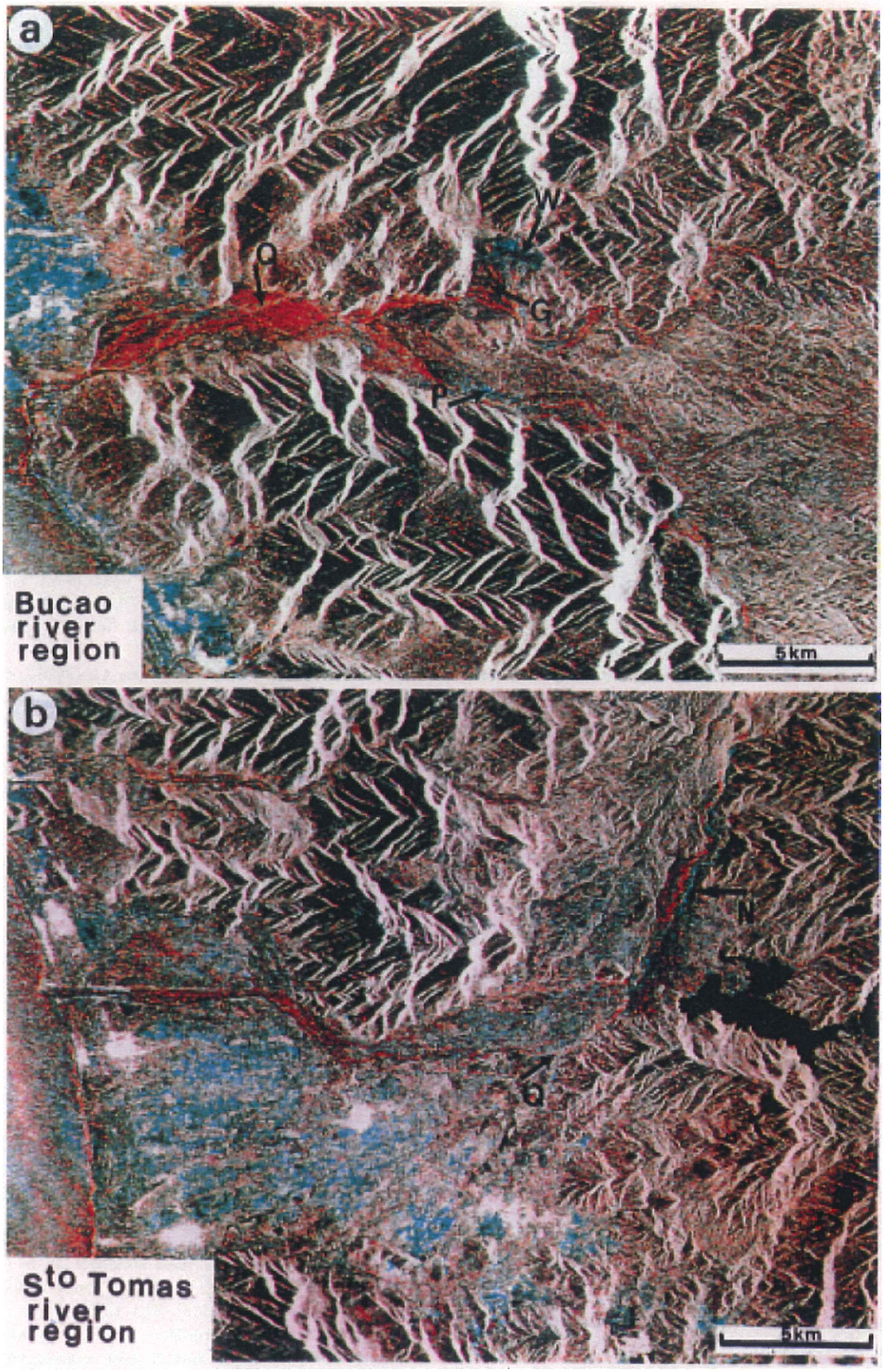


図 2.2.3.5　1993 年 6 月 9 日の画像（青と緑）と 1993 年 8 月 13 日の画像（赤）のカラー合成画像：a）Bucao 川地域；b）Sto. Tomas-Marella 川地域.

2.3 森林火災

森林火災は，人工衛星リモートセンシングによるモニタリングの重要な対象の１つである．しかし，一般的には光学センサーに頼ることが多い．これは，森林のスペクトル特性が火災により非常に大きく変化するため，森林火災地域をスペクトル変化として捉えることが容易であるためである．一方，SAR データを用いた場合には，後方散乱の変化として捉えることになるが，一般的には森林火災による後方散乱の変化を捉えることはそれ程容易ではない．この理由としては，まず森林の後方散乱特性が葉だけでなく，枝，幹および地表面状態といった複数の要因により左右されることがある．さらに，森林は山岳地域に位置することが多く，森林の後方散乱には傾斜の影響も入り込んでくるため，後方散乱特性が森林だけの要因で決まらないことも理由の１つである．一方，森林火災とは直接の関連はなくても，森林の変化，特に伐採による変化をSARデータによりモニタリングすることは可能であり，特に，熱帯林の変化のモニタリングには SAR データの利用が有望視されている．ここでは，最初に，広島工業大学で行なった SAR データによる森林火災抽出の事例研究を紹介し，山岳地での森林火災における SAR データの適用の困難さを明らかにするとともに，スマトラ島における JERS-1/SAR データによる熱帯林モニタリングの事例研究を紹介し，熱帯林モニタリングへのSARデータの適用可能性を明らかにする．

2.3.1 光学センサーとSARデータによる山火事跡地の検出の事例

(1) はじめに

瀬戸内沿岸地方では毎年山火事が発生している．広島県大野町の経小屋山の斜面では，1998年3月8日および1999年5月2日に，ほぼ同じ場所で山火事が発生した．広島工業大学では，衛星リモートセンシングによる災害モニタリングシステム開発の一環として，光学センサと合成開口レーダ（SAR）データを用いて，上記の山火事のモニタリングを試みたので，その結果を報告する．

(2) 対象地域及び使用データ

解析対象地域は，広島県西部に位置する大野町である．衛星データとしては，表2.3.1.1に示す光学センサ及びSARデータを用いた．

表 2.3.1.1 使用した光学センサーおよびSARデータ

Satellite Sensor	Observation Date
LANDSAT/TM	1998.4.4
SPOT/XS	1999.5.10
ERS-1/SAR	1993.6.5
JERS-1/SAR	1998.5.14
RADARSAT/SAR	1999.6.2

(3) 地上調査

1999年の山火事後の5月9日に，被災地現場においてMSR-7000によるスペ> Nル観測を行った結果を図2.3.1.1に示す．曲線はMSR-7000により観測した分光反射率，直線は5月10日に観測されたSPOTデータから算出した分光反射率である．焼失地の分光反射率は，炭化

した場所で近赤外の極端な低下を示す．本観測においても正常林の葉に対して，焼失した葉は近赤外域において分光反射率の低下が確認された．

(4) 山火事跡地の検出

(a) 光学センサデータによる山火事跡地の抽出

高分解能衛星データによる山林焼失地の検出では，まず衛星データを精密に地図に重ね合わせる必要があり，そのためには標高差を考慮した精密な幾何補正が必要となる．ここでは，標定残差１画素以内で回帰モデルによる標高歪みの補正を行った．図2.3.1.2及び図2.3.1.3に幾何補正された焼失前後の時系列データセットを示す．次に上記に示したスペクトルの変化を利用して焼失地を抽出するため，幾何補正後の画像に教師付き最尤法によるマルチスペクトル分類を施した．1998年の焼失地の抽出には図2.3.1.2に示した1998年4月4日のLANDSAT/TMデータ，1999年の焼失地には図2.3.1.3に示した1999年5月10日のSPOT/XSデータを使用した．1999年のデータの分類による焼失地域を図2.3.1.4に示す．白色が山火事跡地，グレー色が海域，黒色がその他の地域である．また，表2.3.1.2に現地の消防署による公表値と，衛星データにより抽出した焼失面積[ha]を示す．

表2.3.1.2 衛星データと公表値による焼失面積

Year	Official announcement[ha]	Satellite data [ha]
1998	28	27.36
1999	136	128.70

(b) SARデータによる山火事跡地の検出

山火事発生前のERS-1(1993年6月5日)，および発生後のJERS-1(1998年5月14日:図2.3.1.5)とRADARSAT(1999年6月2日:図2.3.1.6)のSAR画像を用いて山火事跡地の観測を行った．図2.3.1.5と図2.3.1.6に示すJERS-1/SAR画像とRADARSAT画像には，それぞれ1998年と1999年の山火事で焼失した地域が含まれているが，画像中で，焼失した森林と正常な森林を区別することは困難である．したがって，L-band，C-band共に山火事による焼失地をSARデータの後方散乱の変化により抽出することは困難であった．また，焼失地の検出においてはSAR特有のフォアショートニングによる幾何学的歪みのため，他のデータと完全に重ね合わせることは困難であり，山火事跡地抽出の際の障害の一つとなった．

(5) 研究のまとめ

本研究では，災害モニタリングシステム開発の一環として光学センサと合成開口レーダデータを用いて山火事跡地の検出を試みた．光学センサデータでは，回帰モデルによる標高歪みの補正を行い，最尤法分類を行うことで精度良く山火事跡地を抽出することができた．

一方，SARデータでは，今回の解析結果を見る限り，後方散乱強度だけでは，山火事跡地の検出は困難と考えられる．しかし，これまでの研究によると，干渉SARを利用すると後方散乱強度の変化では捉えられない土地被覆変化も検出できる可能性が明らかになっているので，今後の課題としては，干渉SARを利用した山火事跡地の検出可能性を検討する必要があろう．

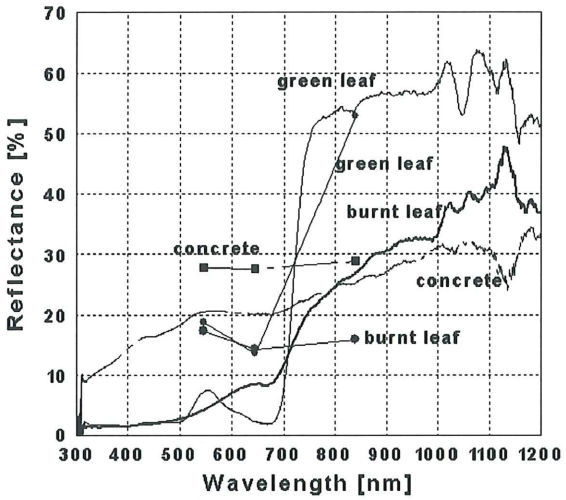


図2.3.1.1　MSR-7000とSPOT/XSによる山火事焼失地のスペクトル測定結果

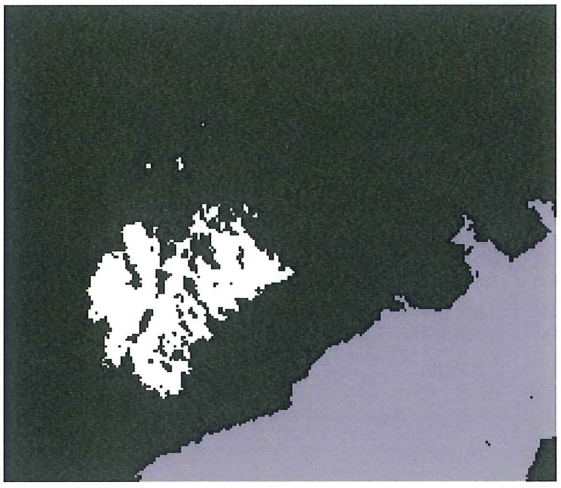


図 2.3.1.4 SPOT/XS(1999.5.10) の分類により抽出された焼失地（白の領域）



図 2.3.1.2　LANDSAT/TM (1998.4.4)
（暗緑色の地域が焼失地を示す）

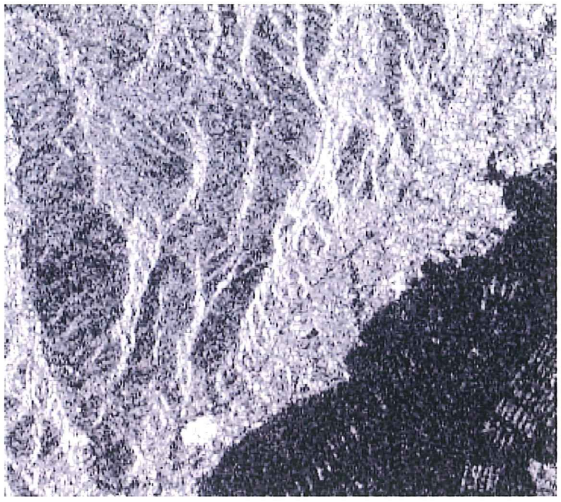


図 2.3.1.5　JERS-1/SAR (1999.5.14)
(MITI / NASDA 所有)

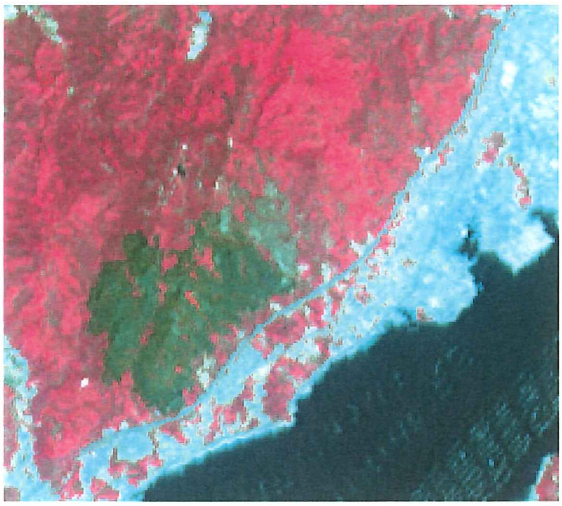


図 2.3.1.3　SPOT/XS (1999.5.10)
© CNES 1999 (暗緑色の地域が焼失地を示す)

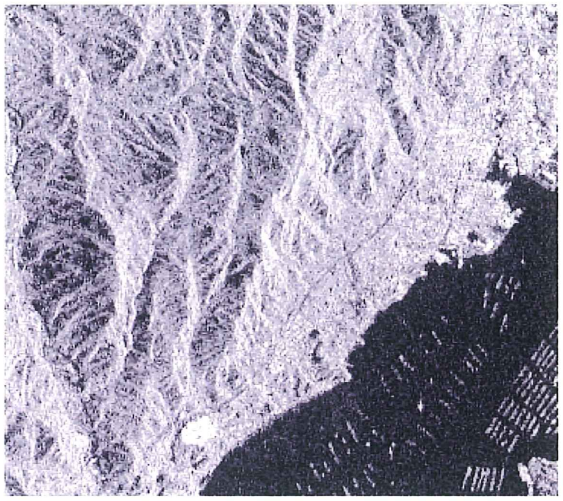


図 2.3.1.6　RADARSAT/SAR F4F (1999.6.2)
© CSA/RSI 1999

2.3.2　SARデータによる熱帯林変動モニタリング事例

現在，地球上の森林の消失が地球環境の観点から大きな問題となっている．特に，熱帯地方の森林，いわゆる熱帯林は，そのほとんどが開発途上国にあり，それらの国の経済発展に伴って，熱帯林が急速に減少していくことが懸念されている．熱帯林の消失の直接の原因はそのほとんどが人為的な開発行為によるものであり，森林火災などの災害に起因するものは少ない．一方，現実に発生する森林火災は，森林伐採などの開発行為が原因となっている場合が多い．したがって，熱帯における森林火災と森林伐採は互いに密接に関連するものである．SAR データでは，2.3.1 の事例研究に示されている通り，森林火災そのものを捉えることは，光学センサーに比べると相対的に困難であると言えるであろう．しかし，森林伐採による土地被覆変化を捉えることは十分可能であり，特に熱帯地方では雲に覆われる確率がたかいこともあり，SAR データの利用が大いに期待されている．ここでは，広島工業大学で実施した JERS-1/SAR データを用いた熱帯林の伐採のモニタリング事例を紹介し，SAR データの森林モニタリングへの適用可能性を明らかにする．

(1)　研究の目的

近年，地球環境問題の観点から，開発に伴う熱帯雨林の伐採と消滅が問題とされている．しかし，その実態は必ずしも十分に明らかにされているとは言えない．熱帯雨林の伐採が現在どのように進行しているのかを適確に把握するためには，衛星リモートセンシングが１つの有効な手段と考えられる．特に，全天候型の合成開口レーダ（SAR）データは，雲被覆の多い熱帯地方でも観測が出来，これまでの研究からも熱帯林のモニタリングへの適用可能性が得られている．本研究では，光学センサと SAR センサによる人工衛星データを用いて，熱帯雨林の開発と伐採状況のモニタリングを行うためのケーススタディを行った．研究対象地域は，インドネシアのスマトラ島の一部であり，衛星データとして，時系列の MOS-1 MESSR, SPOT HRV，および JERS-1 SAR データを用いた．

(2)　対象地域の状況

研究対象地域を図 2.3.2.1 に示す．スマトラ島南部の中央部に位置する５０Ｋｍ四方の地域を対象とした（図の四角で囲まれた地域）．スマトラ島は全島的に泥炭地が広く分布し，その上に生育する湿地林も広く分布する．このような湿地林は人間の生活には適さないため，これまではほとんど手付かずの自然の状態で維持されてきた．しかし，近年，油やし等の商品作物の需要の増大が経済発展のための開発の原動力の１つになり，また，政府の開発奨励策も相まって，対象地域においてもプランテーション開発が進み，それに伴って湿地林もまた開発のターゲットになっている．その開発のテンポは最近になるほど加速されており，今回対象とした地域では，現在，湿地林はほとんど消滅状態にある．また，1997 年に問題となった森林火災においても，NOAA 画像により対象地域からも火災の煙が盛んに放出されていることが確認されており、プランテーション開発が煙害とも密接に関係していることがうかがえる．



図 2.3.2.1　研究対象地域

(3) 使用データおよびデータ処理

表 2.3.2.1 に使用した衛星データの一覧を示す．JERS-1 SAR データについては，宇宙開発事業団(NASDA)作成の Level-0 データを Vexcel SAR Processor (VSARP) により画像化し，マルチルック処理により 25m分解能のパワー画像を生成した．さらに，VSARP によるパワー画像と NASDA Level-2.1 プロダクトの比較に基づいて，パワー画像を SAR 後方散乱係数(σ^0)に変換した．最後に，すべてのデータについて，SPOT HRV 画像を基準として互いに位置合わせを行った．

表 2.3.2.1 使用した衛星データ一覧

Sensor	Observation Date (yy/mm/dd)
MOS-1 MESSR	90/5/23
SPOT HRV	97/06/30 & 98/08/10
JERS-1 SAR	92/10/24, 94/07/02, 96/09/01, 97/02/24, 97/07/06, 97/10/02, 97/12/29, 98/03/27, 98/09/19

(4) 衛星データによるモニタリング結果

(a) 光学センサによる結果

MOS-1 MESSR および SPOT HRV の光学センサのフォールスカラー画像では，天然の湿地林は暗い赤色で表わされ，他の人手のはいった択伐林等との判別は容易である．図 2.3.2.2 には，画像判読によって求めた天然林の面積の経年変化を示す．これにより対象地域の天然湿地林の面積が近年になって急激に減少したことがわかる．すなわち，1990 年から 1997 年の 7 年間に天然林の面積は約半分に減少したが，その後の 1 年間に，残った天然林がほぼ完全に消滅したことになる．

図 2.3.2.3 には，1997 年と 1998 年の SPOT HRV 画像から求めた植生指標(NDVI)の画像を示す．図から，画像の上部および中央部にかけて NDVI の低下が顕著に現れており，これらの地域の森林（実際にはほとんどが天然林）が 1 年の間に伐採されたことがわかる．なお，画像の右側の領域では NDVI がむしろ上昇傾向にあるが，これはプランテーション作物の作付けまたは生長によるものである．

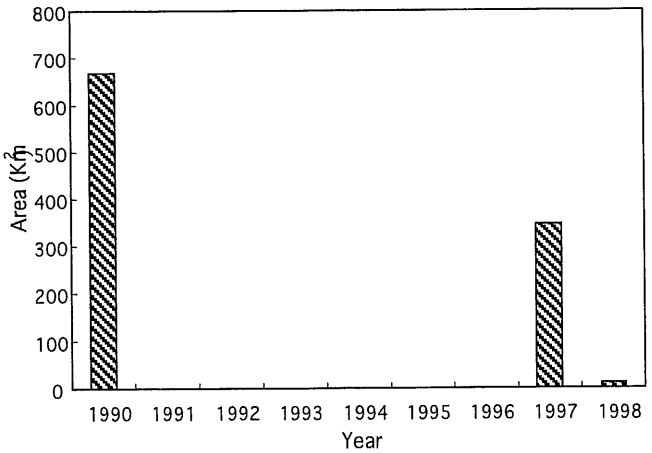


図 2.3.2.2 光学センサーデータから求めた天然林の面積の経年変化

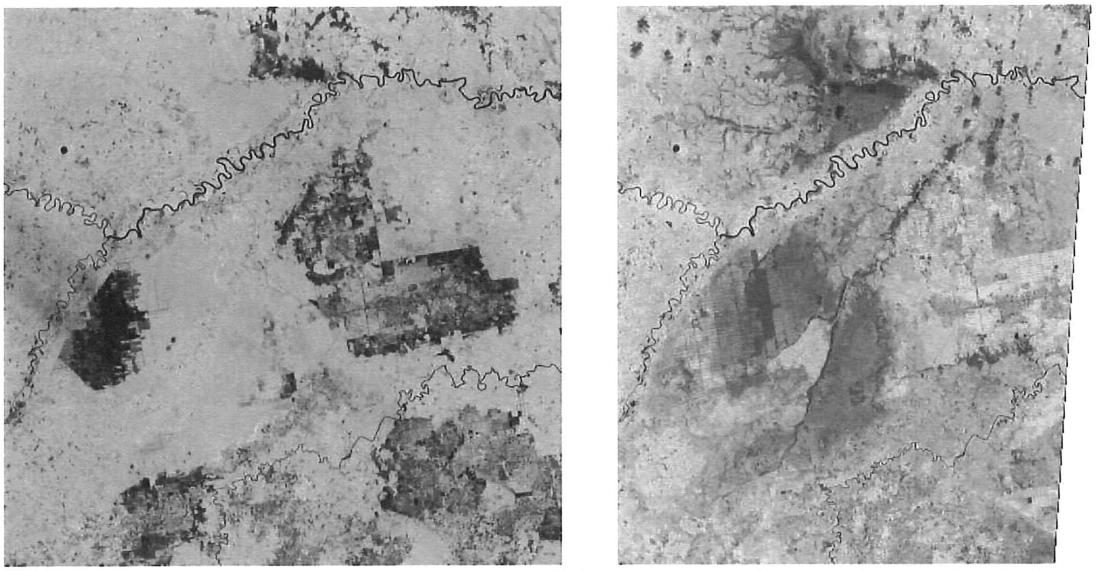


図 2.3.2.3　SPOT データによる NDVI 画像(Left: 97/06/30, Right: 98/08/10)

© CNES 1997/1998

(b)　SAR データによる結果

JERS-1 SAR 画像では，光学センサ画像で容易に判別された天然林と択伐林は，両者ともに同じような後方散乱の強さを示し，それらの判別は困難である．しかし，熱帯林が伐採されると SAR 画像の後方散乱に何らかの変化が起こるので，伐採地の判読は可能である．図 2.3.2.4 には，表 2.3.2.1 に示す時系列の JERS-1 SAR 画像の判読により得られた森林伐採の面積の経年変化を示す．図 2.3.2.4 により，対象地域の森林伐採が 1996 年までは比較的緩やかに進行していたのが，1996 年以降急激に進んだことがわかる．このような森林伐採速度の変化は，図 2.3.2.2 の天然林の急激な減少に対応していることが明白である．

図 2.3.2.5 には，1996 年 9 月から 1 年半後の 1998 年 3 月までの間の時系列の SAR 画像を示す．これらの画像のパタンからも，対象地域の土地被覆状況が 1 年半の間に大きく変化したことが読み取れる．

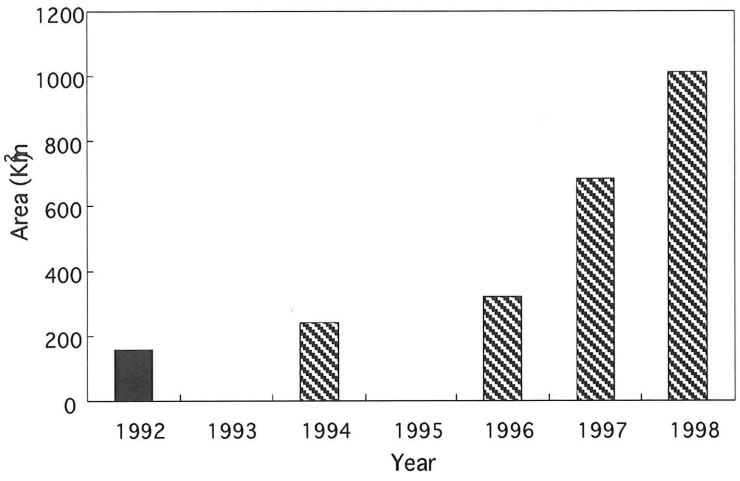


図 2.3.2.4　ＪＥＲＳ－１／ＳＡＲデータから求めた森林伐採面積の経年変化

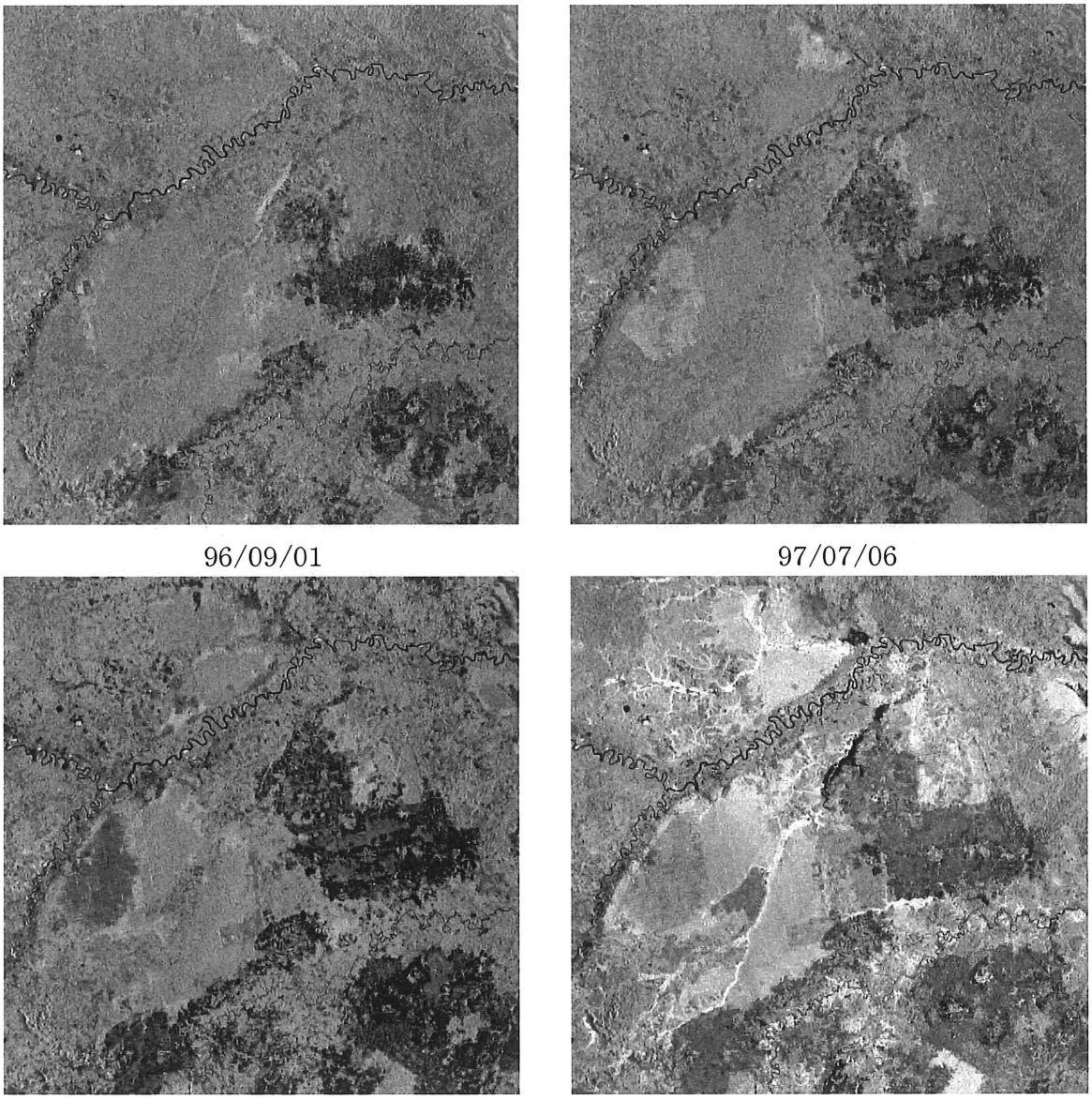


図 2.3.2.5　時系列の JERS-1/SAR 画像　(MITI / NASDA 所有)

(c)　森林伐採による SAR 後方散乱の変化

図 2.3.2.5 の画像を見ると，森林の後方散乱強度は伐採後にむしろ上昇する傾向が見られる．さらに，場所によっては一旦上昇した後に逆に低下する傾向も見られる．森林伐採により後方散乱が上昇することは，SAR の特性と一見矛盾するように見える．しかし，アマゾンの熱帯雨林を対象とした既存の研究でも同様な結果が報告されている．これは，伐採後に地面に放置された倒木の単散乱によるものとされている．本研究の対象地域においても，例えば図 2.3.2.5 の 1997 年 7 月 6 日の画像で後方散乱が明るく変化した場所で，火災による煙が上がっているのが SPOT HRV 画像(97/06/30)により確認されており，伐採後に倒木の焼却処理が行われたことが容易に推定できる．このような状況を考えると，伐採後に後方散乱が上昇することは十分に説明がつくものと考えられる．

図 2.3.2.6 は，以前は天然の湿地林であったが，1998 年の SPOT 画像で伐採が確認された地域を 9 個所選び，それらの後方散乱の時間変化を表わしたものである．9 個所の天然

林のうち，1 から 3 までは，1997 年の SPOT 画像ですでに伐採が確認された地域，4 から 9 までは，その後に伐採されたことが確認された地域である．また，伐採されずに残った択伐林の後方散乱の変化も同時に示してある．この図から，9 個所の天然林ともすべて，伐採後に一旦後方散乱が上昇しその後低下していることが明白である．それに対して，伐採されなかった択伐林は後方散乱の変化が少なく，伐採地とは対照的であることがわかる．

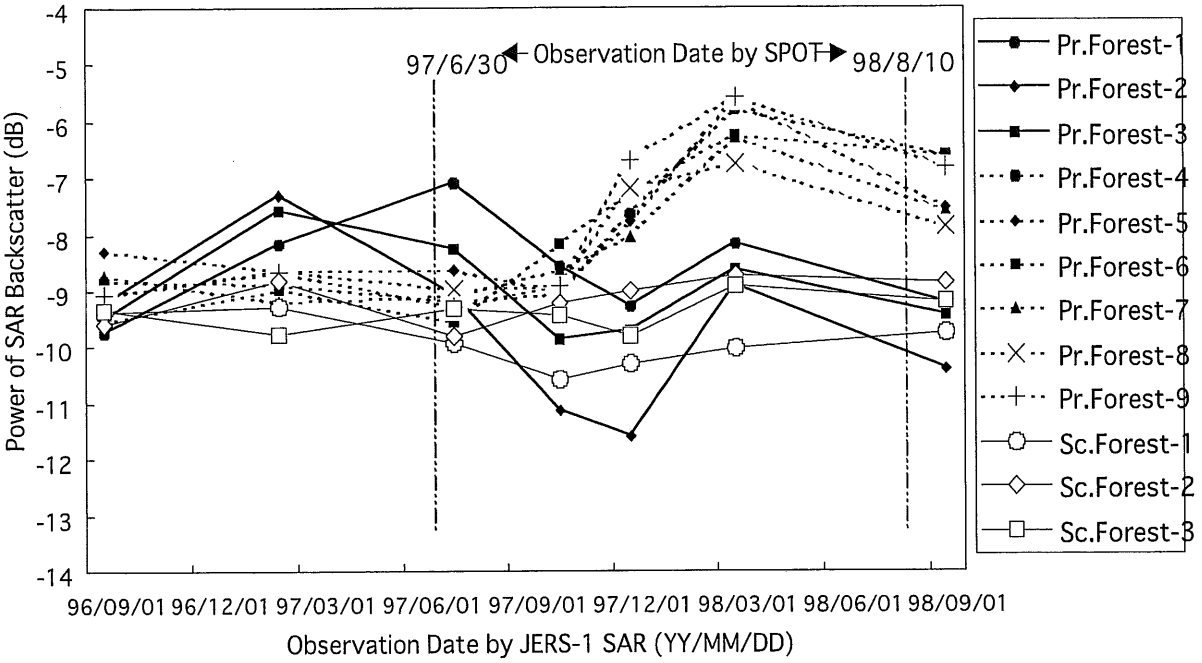


図 2.3.2.6.　伐採された天然林(Pr.Forest)と伐採されずに残った択伐林(Sc.Forest)における SAR の後方散乱の時間変化

(6)　研究のまとめ

以上述べたケーススタディにより，熱帯林の伐採のモニタリングに JERS-1/SAR データを用いることは十分可能であると考えられる．ただし，伐採による SAR の後方散乱の変化は，従来言われているように，伐採により森林バイオマスが減少するため後方散乱が低下するという単純な変化ではなく，少なくとも本対象地域においては，熱帯林の伐採後に一旦上昇し，その後低下するというかなり複雑な変化をすることが明らかにされた．このような JERS-1/ SAR 画像の特性が明らかにされたことにより，今後打ち上げ予定の L バンドの ALOS/PALSAR による熱帯林のモニタリングの可能性を示したものとして注目される．

2.3.3　森林火災検出における干渉ＳＡＲの利用可能性

2.3.1 の研究のまとめにおいては，干渉ＳＡＲ利用の可能性について述べた．日本においては現在のところ干渉ＳＡＲにより森林火災地を検出した事例はないが，海外，特に，インドネシアの熱帯林においては，火災跡地の検出にＥＲＳ－１，２のタンデムモードで得られたＳＡＲの干渉ペアが使用された事例が報告されている．これは，火災跡地では，ＳＡＲデータの干渉処理から得られるコヒーレンスが通常の森林より高く出ることを利用するものである．ＪＥＲＳ－１／ＳＡＲおよび今後打ち上げ予定のＡＬＯＳ／ＰＡＬＳＡＲの場合には，タンデムの運用は存在しないが，これらのＳＡＲはＬバンドであり，ＥＲＳ－１，２／ＳＡＲのＣバンドに比べると，森林部分での干渉性に優れているという特徴がある．したがって，

繰り返し観測（リピートパス）による干渉ペアでも，熱帯林等における森林火災跡地や森林伐採地の検出に十分利用できる可能性が考えられる．実際，2．3．2で述べた熱帯林の伐採地の検出においては，ＪＥＲＳ－１／ＳＡＲのリピートパス干渉ペアから得られたコヒーレンス情報を併用することにより，伐採地の検出がより確実になるという結果が予備的に得られている．したがって，今後，森林火災検出にＳＡＲデータを有効に利用するためには，ＳＡＲデータの後方散乱強度の情報だけでなく，干渉ＳＡＲから得られるコヒーレンス情報の利用方法についても，種々の事例研究を行っていく必要があろう．

参考文献

1) 菅，小黒，竹内，小西：光学センサと合成開口レーダデータによる山火事跡地の検出，第２７回日本リモートセンシング学会学術講演会発表論文集，pp225-226,1999年11月．
2) 竹内，菅，小西：衛星リモートセンシングによるスマトラ島の熱帯雨林伐採のモニタリング，平成11年度日本写真測量学会／日本リモートセンシング学会合同学術講演会発表論文集，pp63-66，1999年５月．
3) S.Takeuchi and Y.Suga：Monitoring of the Change of Tropical Rain Forest Using Optical and SAR Sensor Data, Presented at 50th IAF Congress, IAF-99-C.2.07,Amsterdam, Oct.,1999.

2.4 火山災害

合成開口レーダ（ＳＡＲ）による火山観測の目的には，あえて区別すれば，主として地球科学的な目的を持った観測と，差し迫った災害対応のための資料収集を目的とするものがある．両者を峻別することは困難であるが，本報告書では後者への適用に絞って述べる．

ＳＡＲによる火山観測が地球物理学的な目的で実施される場合には，火山周辺の地下での圧力状態変化やマグマ移動・地震活動にともなう地表面の変形を，数ｃｍの精度・数十m程度の空間分解能で面的に計測することができる干渉ＳＡＲ技術[1) 2)]を用いることが多い．この分野での成果は，たとえば Massonnet and Feigl (1998)[3)] にまとめられている．また，火山学，地質学，あるいは土木工学的な見地から，火山周辺の地質構造・堆積物の分布・地盤特性などを面的に調査するため，ＳＡＲによる観測を行う場合もある．とくに，雲の多い地域ではＳＡＲの全天候性が生かされて，火山周辺の地質構造や時代別の溶岩・火砕流・泥流の分布などが明らかになっている[4) 5)]．これらも，災害対応のための重要な基礎情報ではあるが，現に起こっている災害状況の把握というよりは，より広い意味での土地被覆分類におけるＳＡＲの応用と考えられるので，本報告書では対象としない．

2.4.1 火山災害状況把握とＳＡＲの特性

本報告書では，地表で比較的短時間のうちに生じる火山活動（とくに噴火）が直接的に引き起こす火山災害の把握ついて述べる．火山災害状況を把握する際にも，マイクロ波を用いる能動型センサであるＳＡＲの次の特性[6)]が生かされる．

1) 雲・噴煙の存在や太陽光線の状況（昼・夜）による影響をほとんど受けない（全天候性）．
2) 衛星高度（数百ｋｍ）からでも10m程度の高分解能を達成できる．
3) 目標の形状，表面の状態（あらさ，含水率など），散乱過程などを反映した情報をもたらす．
4) 後方散乱波の位相および偏波の情報を活用できる．前者ではインターフェロメトリ（干渉処理）による地形計測，後者ではポラリメトリ（多偏波観測）による地表被覆分類を行うことができる．

ＳＡＲにより取得されたデータは，適切に処理されて，マイクロ波の後方散乱強度が強いほど画素が明るく表現される強度画像（振幅画像），または，各画素について受信されたマイクロ波の位相情報まで含んだ複素画像として利用される．

また，ＳＡＲによる火山観測に使われるプラットフォームには，人工衛星（JERS-1，ERS-1 および ERS-2，RADARSAT，スペースシャトル），航空機（ジェット機，セスナ機）などがある．噴火活動が激しいときには，航空機が火山周辺を飛行することは危険であり，はるか大気圏外から観測できる人工衛星はこの点で優れている．また，人工衛星では，軌道の条件が合えば，地球上ほとんどすべての地域の火山観測が可能である．一方，人工衛星は一定の軌道を周回することが通例で，火山を自由な方向から適時に観測することができない．その点では，観測条件（向き，時）を比較的自由に設定でき，観測から結果を得るまでの時間が比較的短いという点では，航空機が優れている[7) 8)]．しかし，使用機種によっては，天候，航続距離および使用可能な空港施設などの条件から，航空機運用上の制約を受けることがある．

実際には，観測目的，ＳＡＲの特性（波長，偏波，分解能，入射角），データ処理システム，観測結果作成までの時間的余裕，プラットフォーム運用上および経済的な制約などを総合的に考慮して観測方法が決定される．

2.4.2　ＳＡＲによる火山災害観測の事例

(1)　噴煙および空中の火山噴出物

噴煙や空中の火山噴出物の分布を早期に把握することは，航空機の安全確保や降灰被害予測などのために重要である．人工衛星に搭載された光学センサやカメラによって，噴煙や空中に放出された噴出物の濃密な部分を観測することはできる[9]が，噴煙の下の状況を観測することはできない．一方，マイクロ波は噴煙などを透過するため，ＳＡＲ画像では噴煙などを観測することはできない．その事例[10]を図 2.4.2.1 に示す．なお，干渉処理を応用した場合には，噴煙などに含まれる水蒸気分布を抽出できる可能性[11]はあるが，その実現可能性の検討は今後の課題である．



図 2.4.2.1　Kliuchevskoi 火山噴火（カムチャツカ）の光学カメラとＳＡＲ観測結果の比較[10]

左はスペースシャトル搭乗員が光学カメラで撮影（噴火開始直後：1994 年 9 月 30 日）．噴煙は高度 18km に達している．噴煙と噴煙の影が火山表面の観測を妨げている．右は同じシャトルに搭載された SIR-C/X-SAR による，偏波を考慮したＣバンドおよびＬバンド画像の重ね合わせ（同年 10 月 5 日）．画像の下が北，画像範囲は約 75km×100km，画像の上方から下方に向けてレーダ波が照射されている．噴煙に妨げられずに地表の観測が行われ，積雪域が赤く表示されている．各色へ割り当てられた画像の波長および偏波の組み合わせ（H：水平，V：垂直，送信・受信の順）は次の通り．
赤：ＬバンドHH，緑：ＬバンドHV，青：ＣバンドHV．
(©NASA/JPL)

(2)　溶岩流

流動性に富む玄武岩質溶岩を噴出する火山では，大量の溶岩が火山の斜面を流れ下って構造物を破壊し，災害を引き起こすことがある．

ここでは，玄武岩質溶岩が頻繁に噴出されているハワイ島で，スペースシャトルに搭載された SIR-C/X-SAR (Spaceborne Imaging Radar-C and X-Synthetic Aperture Radar)により，溶岩分布を観測した事例を，Mauna Loa 火山[12) 13)]と Kilauea 火山[14) 15)]について図 2.4.2.2 に示す．

Ｃバンド（波長６ｃｍ）とＬバンド（波長24ｃｍ）の多波長，直交する水平（H）偏波と垂直（V）偏波の多偏波による観測を行い，それぞれの強度画像を表示色の赤，緑，青にそれぞれ割り当てることにより，溶岩表面の粗さや火山堆積物のマイクロ波に対する相互作用の差を反映したカラー画像が合成されている．Mauna Loa 火山[12) 13)]では，表面のなめらかな溶岩は赤で，より表面の粗い溶岩は黄および白で表されている．また，Kilauea 火山[14) 15)]では，かつての火山活動で噴出した溶岩が，植生に覆われた溶岩も含めて，容易に判別できる．なお，このときの Kilauea 火山の観測では約 200mの長さの移動する溶岩流も観測されており，将来の観測によって溶岩流がもたらす地形変化を把握できる可能性がある[15)]．

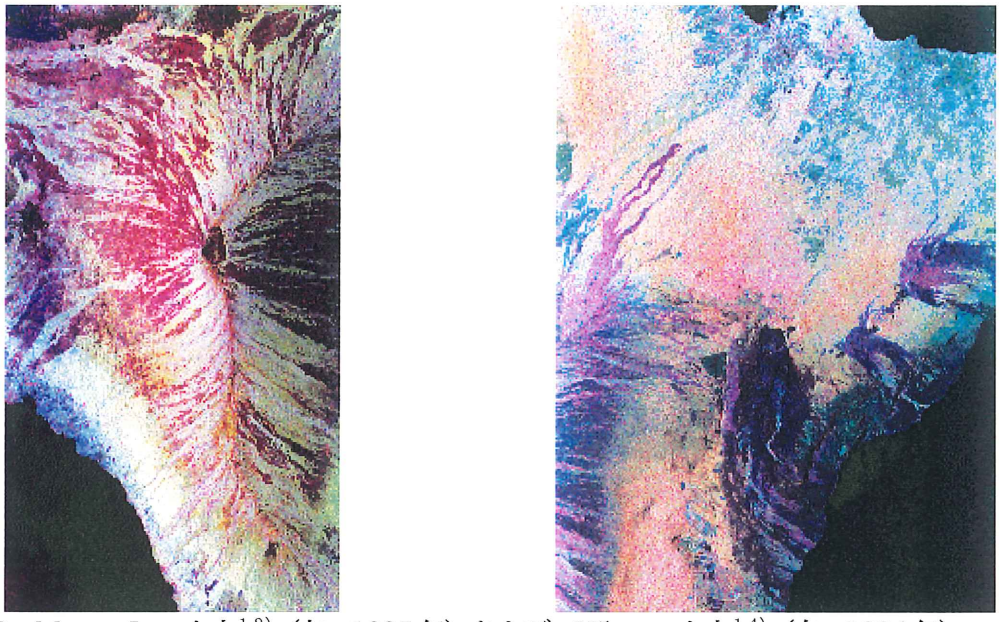


図 2.4.2.2　Mauna Loa 火山[12]（左：1995 年）および　Kilauea 火山[14]（右：1994 年）
SIR-C/X-SAR（スペースシャトル搭載）による，偏波を考慮したＣバンドおよびＬバンド強度画像の重ね合わせ．赤：Ｌバンド HH，緑：Ｌバンド HV，青：Ｃバンド HV．
(©NASA/JPL)

また，Kilauea 火山では，航空機（NASA DC-8）搭載 TOPSAR（Aircraft Topographic Synthetic Aperture Radar）のＣバンド（波長 5.6ｃｍ）干渉ＳＡＲ観測によって数値標高モデル（DEM）を作成し，既存の DEM と比較して，溶岩の体積を求める試みも行われた[16]．まず，地表での光学的手段による測量と TOPSAR による同一地点の標高値が比較され，TOPSAR にる標高計測精度は，玄武岩質溶岩の上で，おおむね 1-2mであり，十分な観測精度を持つことが示された．SAR は海面下に流入した溶岩の体積を計測できないので，補助的な地上観測を行い，また，溶岩内部の空隙の状況などについては仮定をおいて，稠密な岩石に換算した場合の溶岩の体積を推定した．TOPSAR の観測によって推定された溶岩の体積は，地上観測による推定値の 81％-125％となり，妥当な結果が得られたと思われる．これは，あらかじめ火山地域で DEM を整備しておき，火山活動開始後の適切な時期に航空機搭載（または人工衛星搭載）SAR による干渉 SAR 観測によって DEM を迅速に作成し，これらの差から噴出した溶岩の量を推定できることを示す．

日本国内では，伊豆大島三原山において郵政省通信総合研究所／宇宙開発事業団（CRL/NASDA）の Pi-SAR による観測が行われた[17) 18) 19)]．これは航空機（ジェット機 Gulfstream II）搭載のＬバンド（波長 24ｃｍ）およびＸバンド（波長 3ｃｍ）の多偏波観測可能なＳＡＲである．Ｘバンドでは，航空機の左右に取り付けた 2 つのアンテナにより，1 回の飛行での干渉 SAR 観測を実現している[17) 18) 19)]．三原山山頂部の干渉 SAR 観測結果[19)]を図 2.4.2.3 に示す．多波長・多偏波観測が可能な Pi-SAR は，火山の地形変化と表面被覆変化を同時に観測できるので，火山災害の把握において大きな可能性を有している．

また，雲仙普賢岳では小型航空機（セスナ 208）に搭載された２つの受信アンテナを用いて，Ｘバンド（波長 3ｃｍ）ＳＡＲによる干渉ＳＡＲ観測が行われ，活動中の火山の地形図を迅速に作成する試みが行われた[7) 20) 21)]．このように，国内でも溶岩分布や火山体の地形変化などをＳＡＲによって観測する研究が進展している．

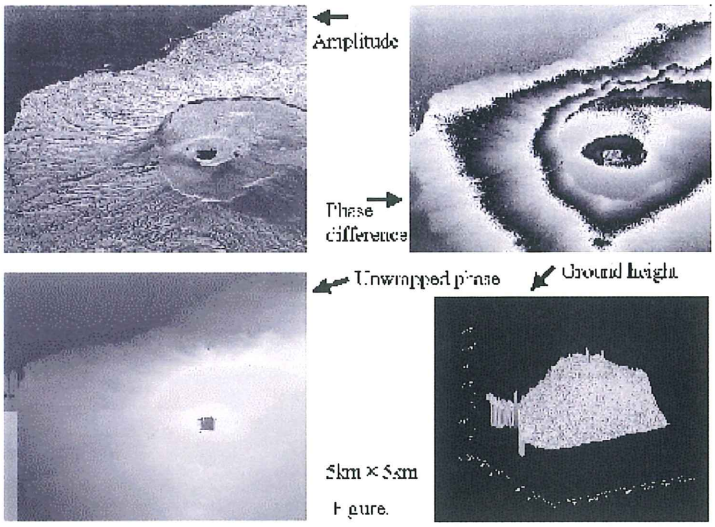


図 2.4.2.3　Pi-SAR による伊豆大島三原山周辺の干渉ＳＡＲ観測の事例[19)]
ジェット機搭載Ｘバンドｓａｒによる観測．観測範囲：５ｋｍ×５ｋｍ
画像の上方から下方に向けてレーダ波が照射されている．　(©CRL)
左上：強度画像，右上：位相差画像，左下：絶対位相画像，右下：標高変換後の鳥瞰図

(3)　火砕流

火砕流は高温の溶岩の破砕物・火山灰・火山ガスなどが混合した高速の流れであり，溶岩塊や溶岩片を多く含む下層の本体部と火山灰と火山ガスが主体の上層の熱風部からなる[7)]．火山の上部に形成された溶岩ドームの崩壊などにより発生した火砕流の本体部は，谷地形や河道に沿って流下し，周辺の地域に大きな被害を与える．さらに，後述するように，谷を埋めた堆積物は大量の降雨により泥流となる．なお，火砕流発生の契機となる火山体上部の溶岩ドームの崩壊を予測するため，ドームの形状を雲の影響を受けない航空機搭載ＳＡＲで観測する試みが行われている[7) 20) 21)]．これらの試みは，どちらかといえば災害の予測を目的とするものである．ここでは，雲に包まれて光学センサの適用が難しいことが多い，熱帯湿潤地域の標高の高い火山で発生した火砕流およびその後の降雨で発生した泥流（ラハール）を RADARSAT 衛星に搭載されたＳＡＲによって観測した事例[22) 23)]を述べる．RADARSAT　SAR はＣバンド（波長 5.6ｃｍ）で，分解能（ビームモード）・入射角（ビームポジション）・観測方向などを柔軟に選択でき，観測の自由度が高い．また，処理要求を出すことにより，観測からデータの入手までの時間を短縮することができるので，災害の監視には向いている．

対象となったのは 1998 年 7 月中旬に Merapi 火山（インドネシア・ジャワ島，標高 2960m）で発生した火砕流である[22) 23)]．乾季・雨季がはっきりしているこの地域では，雨季には山体が雲に包まれ，地上観測が難しい．とくに火砕流が雨季に発生した場合には，全天候性をもつＳＡＲによる観測がきわめて有効である．1997 年から Merapi 火山の観測を行い，高分解能（約 10m）の Fine モードのデータを山体の西側と東側からの両方向から取得し，これらを処理して火砕流発生前の強度画像を作成した．そして，1998 年 7 月中旬，山頂から南西側に火砕流が発生したため，1998 年 8 月 15 日に Fine モードでの再観測を行った．このとき，事前に取得されていた画像を検討し，火砕流の流下した南西側斜面でレイオーバーが生じないよう，衛星が北から南へ移動する際に，東側から観測が行われた．地上調査によると，このときの火砕流の崩落量は 880 万m^3，堆積域は 18.1km^2であった[24)]．火砕流発生前（1997 年 8 月 20 日）および発生後約１ヶ月後（1998 年 8 月 15 日）の RADARSAT SAR 強度画像[23)]を図 2.4.2.4 に示す．

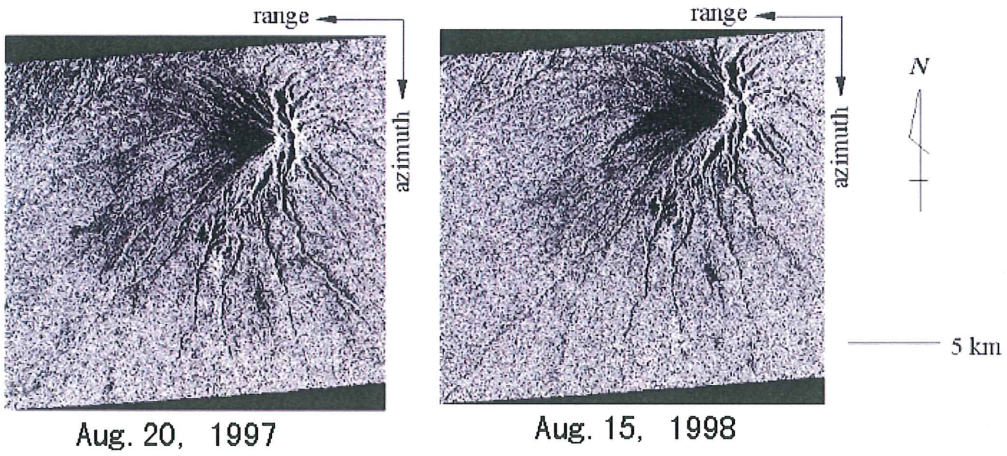


図 2.4.2.4　Merapi 火山（ジャワ島）の RADARSAT SAR 強度画像[23)]

左：火砕流発生前（1997 年 8 月 20 日）Data : ©CSA 1997; received by CRISP; distributed by RSI/RESTEC; RESTEC retains ownership of the data

右：火砕流発生後(1997 年 8 月 15 日)Data: ©CSA 1998; distributed by RSI/RESTEC

これらの強度画像を比較すると，1998 年の画像では，山体の南西側に流下した火砕流およびその後の降雨による泥流（ラハール）の分布が主として後方散乱強度の低い（黒い）部分として認識できる．しかし，これらの画像を並べて比較しているだけでは，詳しい検討は困難である．そこで，これらの画像での同一目標を幾何変換により重ね合わせ，対応する画素における輝度の差演算および比演算を行った．その結果，どちらの演算でも，火砕流やラハールを詳しく抽出できた．差演算の結果を，適切に輝度調整したものを図 2.4.2.5 に示す．

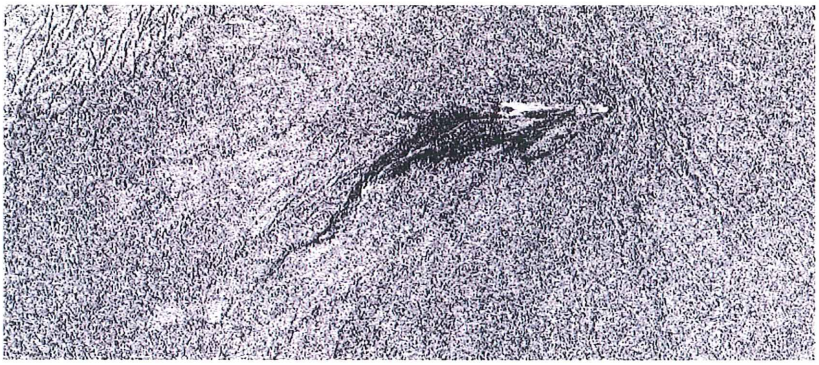


図 2.4.2.5　Merapi 火山（ジャワ島）で 1998 年 7 月に発生した火砕流およびラハールの分布[22)]
火砕流発生前後の SAR 強度画像から差画像を作成し，演算結果の画像輝度を適切に調整した．

簡単な画像処理を施すことで，堆積物の詳細な分布が明らかになった．この事例では，災害の発生が予想される火山のＳＡＲデータをあらかじめ取得しておき，災害発生後に同条件で観測が行われたことが良好な結果に結びついている．災害監視のためには，災害発生前からのデータの蓄積が重要であることを示している．また，このときの２回の観測はどちらも雲のない条件で行われたが，雲に覆われていても Merapi 火山の良好な RADARSAT ＳＡＲ強度画像が得られている[22) 23)]ので，山体が雲に隠されている場合でも SAR 強度画像の全天候性を生かした観測が可能である．

(4) 降灰および泥流

大規模な火山噴火が起こると，周囲には大量の降灰が起こる．さらに，火山からの噴出物が火砕流などとなって周囲の谷を埋めると，その後の降雨によって堆積物は泥流となり，噴火後数年が経過しても流域の農地などに被害を与え続ける．典型例としては，Pinatubo 火山（フィリピン・ルソン島）の 1991 年 6 月の大噴火の事例[25) 26)]があげられる．まず，スペースシャトルに搭載された SIR-C/X-SAR による画像[27) 28) 29) 30)]を 図 2.4.2.6 に示す．

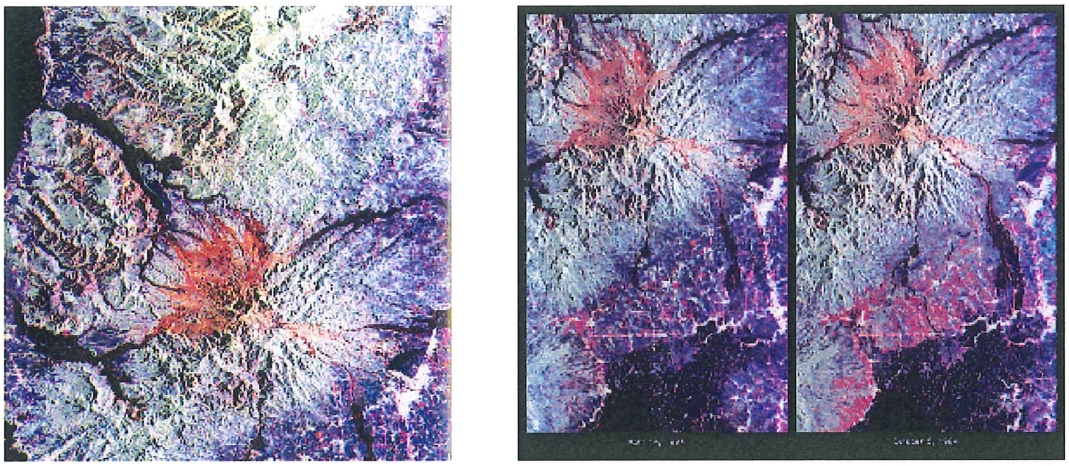


図 2.4.2.6 Pinatubo 火山（ルソン島）の SIR-C/X-SAR（スペースシャトル搭載）による画像
波長と偏波を考慮．赤：L バンド HH，緑：L バンド HV，青：C バンド HV．
左の画像[27) 28)]：1994 年 4 月 13 日，画像範囲：約 45 km×68 km （©NASA/JPL）
右の画像[29) 30)]：左半分（1994 年 4 月 14 日），右半分（1994 年 10 月 5 日）

これらのカラー画像では，赤に L バンド HH，緑に L バンド HV，青に C バンド HV での強度画像が割り付けられている．山頂火口周辺の赤い部分は 1991 年噴火の際の降灰地域で，C バンド（波長 6 cm）および L バンド（波長 24 cm）とも交差偏波成分が弱いため赤で表示されている[28)]．一方，河川の形状をした黒い部分は，表面がなめらかな泥流（ラハール）の堆積物である．鏡面反射を起こし，後方散乱成分が弱くなるため黒で表示される．図 2.4.2.6 右の画像からは，1994 年の雨季に発生したラハールが画像中の右下（Pasig-Potrero 川下流）へ広がったことなどが分かる[30)]．

つぎに，衛星（JERS-1，ERS-1，ERS-2）搭載 SAR を用いて，Pinatubo 火山周辺での泥流（ラハール）の分布および植生被覆率（ VCR：Vegetation Cover Ratio ）を観測した事例[25) 26)]を示す．まず，SAR 強度画像を用いた泥流分布とその変化の観測について述べる．これは，泥流の表面がなめらかでマイクロ波の後方散乱強度が弱くなることを利用する．JERS-1 の L バンド SAR は緑葉を透過し，しかも ERS-1 の C バンド SAR にくらべると泥流表面の小さな起伏の影響を受けにくい．そのため，JERS-1 SAR による観測のほうが泥流の発生域を容易に区別することできる．JERS-1 の 2 時期の画像の後方散乱強度を用いた正規化差分演算値（ NDC： Normalized Differential Count ）を式(1)のようにして求めて画像化したところ，1993 年 3 月と 1995 年 2 月の約 2 年間における泥流分布の変化を把握できた[25)]．

$$NDC = (DNold - DNnew) / (DNold + DNnew) \quad (1)$$

NDC：正規化差分演算値（Normalized Differential Count ）
DNold：古い時期の測定値（DN： Digital Number ）
DNnew：新しい時期の測定値

また，ＳＡＲデータの位相情報を活用して，植生被覆率を求める試みも行われた[25) 26)]．まず，光学センサ（JERS-1 OPS など）による観測に基づき，植生指数（ＫＶＩ）を式(2)によって求め，さらに式(3)によって植生被覆率（ＶＣＲ）を適切な広さの地表領域ごとに計算する[31) 32)]．

$$KVI = NIR - a \times R - b \qquad (2)$$

ＮＩＲ：近赤外バンドのCCT値
Ｒ：赤バンドのCCT値
ａ，ｂ：定数

$$VCR = KVI / KVI_{max} \qquad (3)$$

KVI_{max}：ＫＶＩの最大値

火山上空に雲がなければ，光学センサによるデータに基づいてそれぞれの地表領域でのＶＣＲを求めることができ，その時間的変化を適切な方法で計算すれば，火山噴火の影響による植生被覆減少率の空間的な分布を把握できる．この方法は，観測地域が雲に覆われた場合には適用できない．全天候性をもつＳＡＲを活用するため，次のように２回の観測によって取得された位相情報（コヒーレンス）を使用する方法が試みられた[25) 26) 32)]．

さて，同一目標をほぼ同一の軌道から観測した対をなす SAR データの干渉処理を行うとき，互いに位相が保存されて干渉縞が生成される場合はコヒーレンスが高いといい，位相が保存されず干渉縞が生成されない場合をコヒーレンスが低いという[26)]．ERS-1 および ERS-2 のＣバンドＳＡＲは，樹冠の影響で位相が乱されるので，植生が多い地域ではコヒーレンスの低下が期待される．ERS-1 および ERS-2 が１日の遅れで同じ軌道を飛ぶタンデムミッションによって取得された 1996 年 4 月 21 日と 22 日のＳＡＲデータによって求められたコヒーレンスの分布[25)]を 図2.4.2.7 に示す．

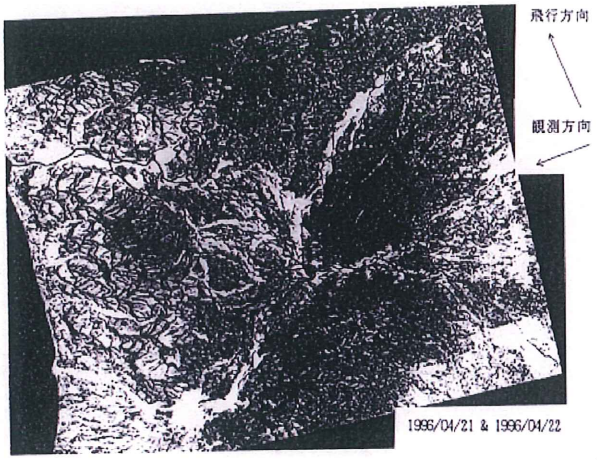


図2.4.2.7　ERS-1 とERS-2 による位相コヒーレンス画像[25)]
１日おいて観測された２つのＣバンドＳＡＲデータを使用
白：コヒーレンスが高い，黒：コヒーレンスが低い

光学センサによるＶＣＲとＣバンドＳＡＲのコヒーレンスの間には強い負の相関（R=－0.91）が認められる[25)]．.そこで，コヒーレンスの高いところは裸地，低いところは植生に被覆されているとして，コヒーレンスからＶＣＲを推定した．コヒーレンスから推定したＶＣＲと光学センサ（JERS-1　OPS）によって求めたＶＣＲの分布図を図 2.4.2.8 に示す．このようにして求められたＶＣＲを適用すれば，ＳＡＲによるコヒーレンスの観測からもＶＣＲの変化を把握することができる．現時点ではまだ光学センサからのデータの方が明確に泥流被害地を判読できるが，雨天時にも観測できる SAR データの利用が可能になった点で意義は大きい[25)]．



図 2.4.2.8　SAR の位相情報によるＶＣＲ（植生被覆率）と光学センサによるＶＣＲ[25)]
左：ERS-1/2 SAR による位相コヒーレンスからのＶＣＲ（1996 年 4 月 21 日と 22 日）
右：JERS-1 OPS による輝度からのＶＣＲ（1996 年 1 月）

その他にも，ERS-1 SAR による泥流分布の観測事例はあるが，強度画像を判読したり，複数の観測日に取得された画像を赤，緑，青の各色に割り当ててカラー合成する手法を用いている[33)]．この際にも，表面がなめらかな泥流堆積物や浅い静かな水面では，後方散乱が弱いことを利用している．

(5)　氷河下での噴火による洪水

火山活動で噴出した溶岩などの高温物質が，火山周辺の雪氷を急激に融解させると大量の融解水が生じたり氷体の崩壊を引き起こす．そのため，洪水や泥流による災害が発生する．日本では，積雪期の火山噴火で急速な融雪が起き，泥流が発生して被害を与えた例がある[34)]．大規模な氷河の下で火山噴火が起こるアイスランドでは，氷河の融解で発生した大量の水が氷下に一旦滞留した後，一気に流れ出し，洪水となって大きな被害を引き起こすことがある[35) 36)]．氷河下の噴火を直接ＳＡＲで観測することはできないが，氷河の表面に現れる変形を観測することによって，間接的に氷河下の火山活動や水の動きをとらえた事例を述べる[36) 37) 38)]．

アイスランド南部の大規模な氷河の下で火山噴火が起こり，氷河表面に生じた亀裂，陥没，隆起が ERS-1 および ERS-2 衛星に搭載されたＳＡＲ（Ｃバンド）によって観測され，また，ERS-1 と ERS-2 のタンデムミッションによる 1 日間隔のデータから，コヒーレンス画像と表面の変形（主として上下変動）を表す画像も得られた[37) 38)]．これらを図 2.4.2.9 に示す．

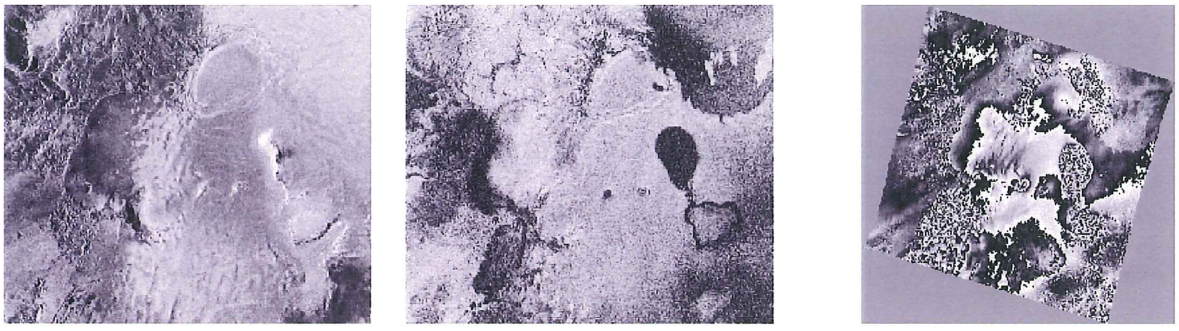


図 2.4.2.9 Vatnajökull 氷河（アイスランド）下の噴火による氷河表面の変形[37) 38)]　(©DLR/ESA)

左：ERS-1 SAR 強度画像（1996 年 10 月 21 日），画像幅約 53ｋｍ
中央：ERS-1 と ERS-2 SAR によるコヒーレンス画像（1996 年 10 月 21 日および 22 日）
右：ERS-1 と ERS-2 SAR データの干渉処理による表面変形分布（UTM 図法で投影）
縞模様 1 つが，1996 年 10 月 21 日から 22 日の氷河表面の上下変動約３ｃｍに対応

1996 年 10 月 21 日の強度画像（図 2.4.2.9 左）では，画面中央やや右に縦に約６－８ｋｍの割れ目が生じていることがわかる．1996 年 10 月 21 日と 22 日のデータを用いた干渉処理により，さらに変動の状況もわかってきた．コヒーレンス画像（図 2.4.2.9 中央）では，黒い部分のコヒーレンスが低く，表面変化が生じた部分で，クレバス帯など大きく変動した部分も含まれる．画面右中央の西洋梨型の黒い部分の下が噴火地点，その下の黒い帯でハンドル状に囲まれた領域の下に氷河下の湖がある．さらに，表面変形分布（図 2.4.2.9 右）では，地形の影響を取り去って主として上下変動状況が明らかになっている．噴火地点付近では，大量の氷河が融解してその南の地下の湖に移動したため，その上の氷河面は１日間に約 80ｃｍ低下した．その南の地下の湖では，大量の融解水が流入したため氷が持ち上げられ，その中央上の氷河面は１日間に約 40ｃｍ上昇した．この結果はＧＰＳ測定による１日あたり約 50ｃｍ上昇ともよく一致した[37) 38)]．氷河面の上昇量から，地下の湖の水位上昇が推定できた[36)]．そして，1996 年 11 月 5 日夜始まった洪水は，ピーク時で流量が少なくとも毎秒 45000m^3に達し，その下流に 1000 トン以上の氷塊を流下させた．このため，海岸沿いの橋・道路を初めとする構造物が破壊された[35) 36)]．

この事例では，ERS-1 と ERS-2 が１日の時間間隔をおいて同じ軌道を飛ぶように制御されたタンデムミッションによって，ＳＡＲデータが取得された．軌道がよく制御されて，両衛星は非常に近い位置から観測を実施できた．さらに，１日という短い時間間隔のため，氷河の表面状態もほぼ一定で，マイクロ波の散乱過程に大きな差が生じなかった．これの条件が揃うため，ERS-1/2 タンデムミッションデータは干渉する可能性が高く，干渉処理用データとして優れている．また，受信および処理地（ドイツ）から現地（アイスランド）へのデータ転送が迅速に行われたため，洪水の予測に役に立った[36)]．このように，ＳＡＲによるリアルタイムの災害監視には，観測・処理・成果配布のシステム化をはかり，観測から成果配布までの時間を短縮することも重要である．

2.4.3 まとめ

さまざまな火山災害の把握にＳＡＲを活用できることが示されたが，まず，悪天候下でも観測できることや太陽光線に依存しないという長所が生かされている．

ここに示した事例では，１回の観測での災害把握では，主として堆積物表面の粗さや水面の波立ちの違いを後方散乱強度の違いとして認識するものが多い．また，同一地域の災害発生前のデータとの比較を行うと，観測精度を向上させることができる．さらに多波長・多偏波での観測では，表面付近の物質での散乱過程の差もあわせて観測することができ，被覆状況判別の精度を高めている．

また，２回の観測データの位相情報を利用するコヒーレンス解析を行うと，地表変化の著しい部分が容易に判別できたり，植物被覆の状況を推定することができる．同じく，２回の観測データの位相に関する干渉処理によって，DEM を作成したり変動成分を定量的に解析することができる．

今後は，多波長・多偏波かつ干渉処理可能なデータを取得できる航空機搭載または人工衛星搭載ＳＡＲシステムの発展が注目される．また，時間的推移がはやい火山災害把握の条件として，災害発生の予想される地域の事前の観測データ，地形データ（複数の衛星観測データ，DEM を含む）・地球科学的データ（地質分類，被覆分類を含む）の組織的蓄積を行い，これらのデータと災害時の観測データを総合的に解析できる体制の確立が必要である．さらに，ＳＡＲによる観測から成果配布までの時間を短縮することも，センサシステムの開発と並ぶ重要な課題である．

参考文献

1) Rocca F., C. Prati and A. Ferretti：An overview of ERS-SAR interferometry, Proc. 3rd ERS Symp. on Space at the service of our Environment, Florence, Italy, 17-21 March 1997, (ESA SP-414, 3 Vols.), pp. xxvii-xxxvi, 1997.

2)島田政信：ＳＡＲインターフェロメトリ，信学技報, 95, 435, pp. 1-8, 1995.

3) Massonnet D. and K. L. Feigl：Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, Rev. Geophysics. 36, 4, pp. 441-500, 1998.

4) Carn S. A.：Application of synthetic aperture radar (SAR) imagery to volcano mapping in the humid tropics: a case study in East Java, Indonesia, Bull. Volcanol, 61, pp. 92-105, 1999.

5) Bulmer M., A. Johnston and F. Engle：Analysis of Sabancaya Volcano, southern Peru using RADARSAT and Landsat TM data. RADARSAT ADRO Program CD-ROM, 1999.

6)日本写真測量学会編 (飯坂譲二 監修)：合成開口レーダ画像ハンドブック, pp. 6-8, 朝倉書店, 1998.

7)石川芳治：特集　近未来の砂防技術　火砕流対策技術の開発, 砂防と治水,97, 1, pp. 16-22, 1994.

8) 水谷完治：航空機ＳＡＲによるリアルタイム土砂洪水災害情報の避難への応用，水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ　平成１０年　東京，京都大学防災研究所Ｓ，pp. 157-159, 1998.

9)堤　毅一，増水紀勝，木下紀正，石黒悦爾：JERS-1 データを用いた桜島の噴煙抽出と土地被覆の検討，日本リモートセンシング学会　第17回学術講演会論文集，p.75，1994.

10) NASA/JPL：Kliuchevskoi Volcano optical/radar comparison, P-44823/P-44828, http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/kliucomp.html.

11) 藤原　智，飛田幹男，村上　亮：第13章　干渉ＳＡＲにおける水蒸気情報の重要性，気象研究ノート　第192号 ＧＰＳ気象学，pp. 199-212，1998.

12) NASA/JPL：P-45351，http://southport.jpl.nasa.gov/pio/srl2/sirc/srl2-maunaloa.gif

13) NASA/JPL：　Mauna Loa,Hawaii, http://southport.jpl.nasa.gov/pio/srl2/sirc/captions/srl2-maunaloa_cap.html

14) NASA/JPL：P-43918，http://southport.jpl.nasa.gov/pio/srl1/sirc/srl1-kilauea.gif

15) NASA/JPL：Kilauea, Hawaii, http://southport.jpl.nasa.gov/pio/srl1/sirc/captions/srl1-kilauea_cap.html

16) Rowland S. K., M. E. MacKay, H. Garbeil and P. J. Mouginis-Mark：Topographic analyses of　Kilauea Volcano, Hawaii, from interferometric airborne radar, Bull. Volcanol, 61, pp. 1-14, 1999.

17) 増子治信：電磁エネルギーの有効利用　航空機搭載高分解能映像レーダ，電磁環境工学情報　ＥＭＣ，11，6，pp. 36-46，1998.

18) 小林達治，灘井章嗣，梅原俊彦，佐竹　誠，浦塚清峰，増子治信：航空機搭載合成開口レーダによる干渉ＳＡＲ，日本リモートセンシング学会　第25回学術講演会論文集，pp. 177-178，1998.

19) 小林達治，梅原俊彦，灘井章嗣，佐竹　誠，松岡建志，浦塚清峰：航空機搭載SAR（π-SAR）によるインターフェロメトリ処理，平成11年度東京大学地震研究所共同利用（研究集会）講演論文集「干渉SAR技術の応用とその課題」CD-ROM，2000.
(http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/HIGHLIGHT/KYODO/1999-W-04/paper/p09/p09.html)

20) Ishikawa Y., A. Yazawa, N. Osanai, S. Yajima, T. Yasue, S. Abe, E. Tomoda, H. Sinohara, M. Miyawaki：Measurement of topography used by synthetic aperture radar at Mt. Unzen, Japan，砂防学会誌，47，2，pp. 15-22，1994.

21) 矢澤昭夫，石川芳治，小山内信智，矢島重美，阿部宗平：合成開口レーダ（ＳＡＲ）を用いた雲仙岳の地形計測，土木技術資料，37，8，pp. 60-65，1995.

22) 大村　誠，小池克明，井口正人，リモート・センシング技術センター　データ提供部：メラピ

火山（インドネシア）の観測，「RADARSAT SARデータ検証・評価」研究報告集，pp. 57–69，リモート・センシング技術センター，1998.
23) 馬庭慎吾，冨山信弘，小池克明，大村　誠，井口正人，リモート・センシング技術センター：RADARSAT SAR強度画像を用いたメラピ火山火砕流（1998年7月）の分布解析，日本リモートセンシング学会　第26回学術講演会論文集，pp. 573–574，1999.
24) Purbawinata M. A., A. Ratdomopurbo and D. S. Sayudi：July 1998's Merapi activity, Program and Abstract, Symp. Japan–Indonesia IDNDR Project, Bandung, 1998, pp. 31–32, 1998.
25) 斎藤元也，小川茂男，美濃伸之：熱帯地域の環境変動モニタリングに関する国際共同研究 熱帯生態系変動の把握手法の開発と実証　多種データ利用による農業環境モニタリング実施研究，マイクロ波センサデータ利用等によるリモートセンシング高度化のための基盤技術開発（第2期）成果報告書　平成7－8年度，科学技術庁研究開発局S，pp. 119–132，1998.
26) 斎藤元也，美濃伸之，小川茂男，大倉　博：フィリピンピナツボ山地域のリモートセンシングデータによる環境モニタリング，日本写真測量学会平成9年度年次学術講演会発表論文集，pp. 297–300，1997.
27) NASA/JPL：P–43915，http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/sc–pinat.gif
28) NASA/JPL:MtPinatubo,Philippines
http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/pinatubo.html
29) NASA/JPL：P–44729，http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/sc–pina2.gif
30) NASA/JPL:Mt.Pinatubocomparison,
http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/pinatubo2.html
31) 斎藤元也：環境変化と人間活動の影響　噴火災害，農業リモートセンシング（秋山，福原，斎藤，深山 編著），pp. 100–102，農林水産省農業環境技術研究所，1996.
32) Saito G., S. Ogawa, N. Mino, A. Hirano and H. Ohkura：The environmental monitoring on Mt. Pinatubo area in the Philippines using remote sensing data, Adv. Astronaut Sci., 96, pp. 423–432.
33) Chorowicz J., E. Lopez, F. Garcia, J.–F. Parrot, J.–P. Rudant and R. Vinluan：Keys to analyze active lahars from Pinatubo on SAR ERS imagery, Remote Sens. Environ, 62, 1, pp. 20–29, 1997.
34) 勝井義雄：噴火災害と噴火予知　噴火災害，岩波講座 地球科学7 火山（横山，荒牧，中村 編），pp. 83–99，岩波書店，1979.
35) グレン・オーランド，スティーブ・ウィンター：火山爆発で解けた大氷河　アイスランドを襲った記録的洪水，ナショナルジオグラフィック（日本版）1997年5月号，pp. 92–105，日経ナショナルジオグラフィック社，1997.
36) Müschen B., C. Böhm, A. Roth, M. Schwäbisch and A. Holz：
Monitoring of subglacial volcanic eruption and glacial flood in southern Iceland using ERS–1/2 SAR data, Proc. International Seminar on The Use and Applications of ERS in Latin America, Vina del Mar, Chile, 25–29 Nov. 1996, (ESA SP–405), 1997.
37) Thiel, K.–H., X. Wu, P. Hartl：ERS–tandem–interferometric observation of volcanic activities in Iceland, Proc. 3rd ERS Symp. on Space at the service of our Environment, Florence, Italy, 17–21 March 1997, (ESA SP–414, 3 Vols.), pp. 475–480, 1997.
38) Thiel, K.–H., X. Wu, P. Hartl：ERS–tandem–interferometric observation of volcanic activities in Iceland, http://earth1.esrin.esa.it/florence/data/thiel/398c.htm.

2.5 地震被害

2.5.1 都市域における地震の被害

1990 年以降世界で 1000 人以上の死者および行方不明者が報告されている地震を表 2.5.1.1 に示す．特に 1999 年はトルコ，台湾で相次いで地震がおき，大きな被害があった．地震が都市域を直撃した場合，被害は甚大となる．斜面崩壊や地震に伴う津波によって多くの死傷者が生じることもあるが，地震による死傷者の多くは家屋の倒壊および火災によって犠牲となる場合が多い．多くの死傷者をもたらした地震の被害を衛星リモートセンシングで捉えるには，建造物の被害の状況を把握することが一つの目安となりうる．

SAR 画像では都市域は植生に覆われた地域と比較して後方散乱が大きく，強度画像上で明るく見える．その原因の一つは構造物自身あるいは構造物と地面が直角に交わり 2 面のコーナリフレクタ構造を作ることによる [1) 2)]．SAR は方向依存性はあるものの線構造の検出に有効であるため，都市域を対象とした人工衛星搭載 SAR 画像の解析の報告も多い [3)]．

しかしながら SAR 搭載衛星で観測された都市域における地震被害（建造物被害）の実例は現在のところ日本における兵庫県南部地震による建造物被害のみである．そこで本章では兵庫県南部地震による被害を特に ERS-1/SAR によって抽出した例 [4) ~6)] について詳しく述べる．

表 2.5.1.1 1990-1999 年におきた 1000 人以上の死者が報告されている地震 [7) 8)]

年	月	日*	国・地域	M	死不明者数(人)	被害
1990	6	20	イラン西部	7.7	4万～5万	家屋倒壊・地滑り
1990	7	16	フィリピン・ルゾン	7.8	1621以上	
1991	10	19	インド北部	7	2000以上	
1992	12	12	インドネシア	7.5	2500以上	津波・地滑り
1993	9	29	インド南部	6.2	9748	家屋倒壊など
1995	1	16	日本・本州西部	6.8	6427	
1995	5	27	ロシア・サハリン	7.5	1989	
1997	5	10	イラン北部	7.3	1572以上	
1998	1	10	中国・北東部	5.8	1万人以上	家屋倒壊
1998	2	4	アフガニスタン北東部	6.1	2323以上	家屋倒壊
1998	5	30	アフガニスタン北東部	6.9	4000以上	
1998	7	17	パプアニューギニア北西海岸	7.1	2613以上	津波
1999	1	25	コロンビア	6.3	1885以上	
1999	8	17	トルコ西部	7.4	15657以上	
1999	9	20	台湾中部	7.6	4800以上	家屋倒壊

*グリニッジ標準時による

2.5.2 兵庫県南部地震の実例

(1) 兵庫県南部地震による被害

1995 年 1 月 17 日午前 5 時 46 分に発生した兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）は表 2.5.1.1 にみられるように過去 10 年におきた地震のうち死不明者数は 5 番目に多く，世界的にも最大級の被害

をもたらした地震の一つである．死不明者は 6427 人，全半壊戸数は約 42 万世帯を数える．とりわけ神戸市から芦屋市，西宮市にかけての市街地では建造物の倒壊・破損のほか，火災による建造物の焼失，道路や鉄道の破損など都市構造が大きく破壊された．これらの被害は幅約 2km，延長約 20km の帯状の地域に集中し，「震災の帯」と称されている [9]．被害集中地域の中心部では震度は 7 に達しており，木造家屋の全壊率は 30%を越えた．

震災の被害地域の分布については各種調査がおこなわれた．うち，航空写真の詳細な判読結果である平成 7 年兵庫県南部地震災害現況図 [10]をもとに建造物の被害があった地域を示したものが図 2.5.2.1 である．災害現況図では西宮市以東．明石市以西は調査区域外である．図 2.5.2.1 では災害現況図「神戸西部」「神戸東部・西宮」（縮尺２万５千分の１）をスキャナで読み込み，色区分された被害地域のうち，「家屋・建物の倒壊及び大きな破損」「火災（焼失範囲）」「道路・高速道路・鉄道の破損」「海岸堤防の破損」の各区分を抽出し，抽出された情報を残すように画像を縮小し，SAR 画像にあわせて歪ませた [11]．倒壊した建造物についてはこのほか，現地調査によって建造物の 1 軒毎の被害状況を記載した記録もある [12]．

人工衛星リモートセンシングによっても被害状況の観測・解析が試みられており [13]，光学センサデータを用いた解析のうち，SPOT 画像によって大規模焼失地域および液状化地域が確認されている [13) 14)]．

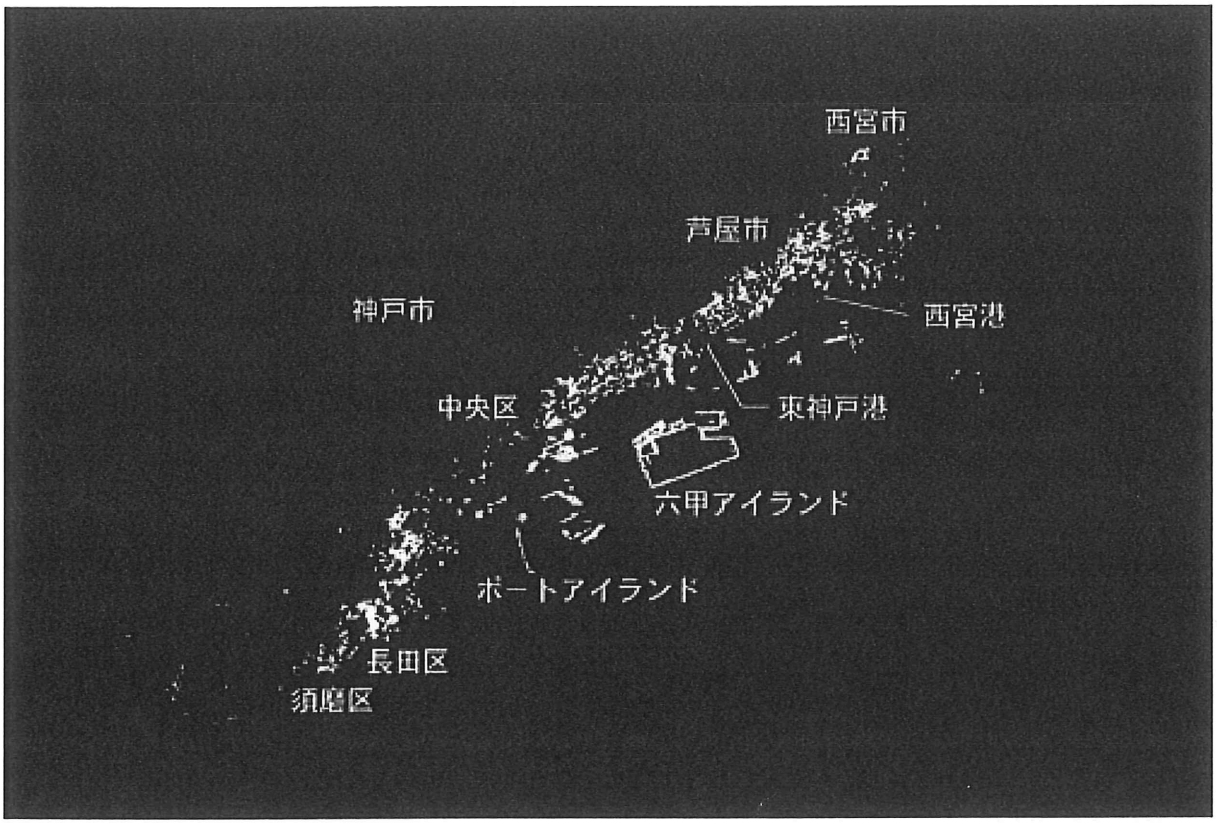


図 2.5.2.1　災害現況図から抽出した被害地域（SAR 画像への重ね合わせ済み）[5]

(2) JERS-1/SAR 画像の差分による建造物被害地域抽出の試み

JERS-1/SAR による解析では地震前後（1994 年1月5日と 1995 年2月5日）取得データの比較による地表面の変化を抽出する試みが報告されている [13]．レベル 0 データを用い，輝線状のノイズ除去を考慮して再生された強度画像について画像間の重ね合わせが行われた．地震前画像の輝度値を基準とした地震後の画像の輝度値の補正後，地震前後の差画像が得られた．差画像を H，地震後の画像を I，S を一定として HSI 変換を行うことにより，被害地域の抽出が試みられた．その結果．岸壁の破壊部分や倒壊家屋に対応する画素に変化は認められたが，被害地域全域を抽出するには至っていない．

(3) ERS-1/SAR 画像の目視判読および強度画像の相関とコヒーレンスによる建造物被害地域の試み

(a) 使用データおよびデータ処理

使用したデータは ERS-1/SAR のパスーロウ：72-243 のレベル 0 データ（生データ）である．兵庫県南部地震前の 3 つのデータ（取得日時：92 年 11 月 1 日，93 年 9 月 12 日，94 年 10 月 12 日），および地震後の3つのデータ（取得日時：95 年5月 23 日，96 年5月7日，96 年2月 27 日）を用いた．

レベル 0 データを Atlantis Scientific System 社の ERGOvista SAR Processor で処理することにより，1 ルック複素画像（SLC）を生成した．SLC 画像を強度画像へ変換し，93 年 9 月 12 日取得データを基準として，対応点から二次多項式を用いて画像間の重ね合わせをおこなった．対応点は画像全般にわたって 15～20 点目視によって選択し，さらに面積相関を用いて最適画素を決めなおした．

(b) 強度画像の目視判読

目視判読のために幾何補正後の画像はレンジ方向 2 アジマス方向 10 のウィンドウで平均化した．平均化後の地震前後の神戸市内から西宮にかけての強度画像を図 2.5.2.2（地震前）と図 2.5.2.3（地震後）にそれぞれ示す．強度画像にみられる後方散乱特性は地震前と地震後では明らかに異なっていることがわかる．すなわち図 2.5.2.2 では長田区付近から西宮市にかけての市街地で道路のパタンがはっきりとあらわれているのに対し，図 2.5.2.3 ではこれら道路のパタンは不明瞭になっている．また，輝度自体も全般的におちている．ただし，中央区周辺では，他の地域ほどこれらの変化は明瞭ではない．ポートアイランド，六甲アイランドにおける部分的な輝度値の変化も認められる．図2.5.2.2 および 2.5.2.3 以外の画像においても地震前，地震後それぞれ同様な特徴を備えていた．地震前後で強度画像に変化があったところは被害集中地域とよく一致しているように見える．

(c) 強度画像の相関の計算

2 時期の強度画像間の相関を調べることによって2画像間の後方散乱特性の変化抽出を試みた．相関を計算することによって，2 画像間の対応する小領域の後方散乱パタンの変化をみることができる．画像間のノルム相関は以下の式によって計算される．

$$\rho_I = \frac{|E\ (I_1 I_2)|}{[E\ (I_1^2)\ E\ (I_2^2)]^{1/2}} \qquad (1)$$

ここで I_1，I_2 は2つの SAR の SLC の強度画像で同じ位置にあたるそれぞれの画素値を，$E(\ )$ は画像

の小領域内における期待値を表す．重ね合わせ済みの２つの強度画像間で，式(1)より 4×20 の小領域でノルム相関を計算した．このとき画像間での重ね合わせのずれを補正するため，基準画像の画素の周囲 3x5 について相関値を求め，最大値をとる画素を最適画素とした．その後 3x3 のウィンドウサイズで平滑化をおこなった．

(d) コヒーレンスの計算

コヒーレンスは２画像間の干渉性の良し悪しの目安として一般に複素相関から計算される．

$$\rho_c = \frac{|E\ (c_1 c_2^*)|}{[E\ (c_1 c_1^*)\ E\ (c_2 c_2^*)]^{1/2}} \qquad (2)$$

c_1，c_2は２つのSAR画像で同じ位置にあたるそれぞれの画素の複素データを，*は複素共役を表す．
(2)式より重ね合わせ済みデータ組み合わせにおいて 4x20 の領域でコヒーレンスを計算した．コヒーレンスにおいても重ね合わせのずれを補正するため，周囲 3x5 画素の最適画素からコヒーレンスを求め，さらに3x3のウィンドウサイズで平滑化をおこなった．

(e) 建造物被害地域における強度画像の相関およびコヒーレンスの低下

強度画像間の相関画像では目視判読で認められた被害集中地域における地震前後の差異はより明確になった．画像間の相関は，地震前同士・地震後同士のデータ組み合わせでは，変化のおきにくい市街地では大きく，植生地域では小さくなる（図 2.5.2.4）．地震前後のデータ組み合わせでは，神戸から西宮にかけての相関は植生地域よりも小さくなり，強度画像の後方散乱特性に大きな変化があったことがはっきりと認められた（図 2.5.2.5）．コヒーレンス画像も強度画像の相関同様，地震前後のデータ組み合わせでは，神戸から西宮にかけての地域における相関の低下を示した．

図 2.5.2.4，5 では強度相関の大きさの土地被覆によるパタンは明瞭である．これらのデータ組み合わせ間のベースライン長は比較的短く，図 2.5.2.4 では 139m，図 2.5.2.5 では 32m であった．しかしながら．ベースライン長が長いデータ組み合わせ（997m）では．強度画像の相関，コヒーレンスとも神戸から西宮にかけて以外の都市域における値が低下し，パタンがかなりぼやけることが明らかになった．基線長が大きくなるほどコヒーレンスが低下することは知られている [15]．後方散乱特性の変化を示す強度画像の相関もコヒーレンスと同様の挙動を示したことは，強度画像の相関も２つのデータの干渉性の良し悪しに影響されることを示唆している．その理由としては，地表面の変化による画像のスペックルパタンの変化が考えられる．

(f) 航空写真の判読結果との比較

地震前後の強度画像の相関を,地震前同士ないしは地震後同士の画像の相関と比較するため,２組のデータ組み合わせの相関性ρ_{I1}，ρ_{I2}の和分の差（Normalized Difference）Nd を計算した．

$$Nd = \{(\rho_{I1} - \rho_{I2}) / (\rho_{I1} + \rho_{I2})\} \times Gn + Of \qquad (3)$$

ここでGnはゲイン,Ofはオフセットであり,それぞれ100を用いた．

式(3)でρ_{I1}を 93 年 9 月 12 日と 92 年 11 月 1 日に取得されたデータの相関,ρ_{I2}を 93 年 9 月 12 日と 96 年 2 月 27 日に取得された画像の相関として計算し,3×3 で平滑化後,一定値以上を示す画素

を抽出した結果を対象地域について切り出したものが図 2.5.2.6 である．データ取得間に地震のないデータ組み合わせとの比較によって,地震前後で後方散乱特性に変化があった地域がより明確に抽出されていることがわかる．

図2.5.2.6を航空写真で確認された建造物の倒壊などがあった地域の分布を示した図2.5.2.1と比較・照合した．被害集中地域の西端は須磨区であり,長田区にかけての大規模な火災による焼失も含めて被害は広範囲に及んでいる．図５においても後方散乱特性の変化が集中しはじめる西端は須磨区付近である．六甲アイランドやポートアイランドなどの埋め立て地では地盤の液状化とともに大規模な海岸堤防の破損がおこっている．これら埋め立て地の内部では大きな変化がみられないが,周縁部では後方散乱特性の変化が抽出されている．中央区周辺では被害の集中度は他地域と比べると小さく,後方散乱特性の変化も比較的まばらである．被害の空白域は部分的なものも図 2.5.2.6 と図 2.5.2.1 で一致している．たとえば,東神戸港周辺,西宮港周辺では工場,公園などの占める面積が大きく,被害を受けた建造物はほとんどみられず,被害の空白域となっている．図 2.5.2.6 をみるとこれらの地域では後方散乱の変化は抽出されていないことがわかる．



図 2.5.2.2　神戸市周辺 ERS-1/SAR 強度画像（93 年 9 月 12 日）[5)]

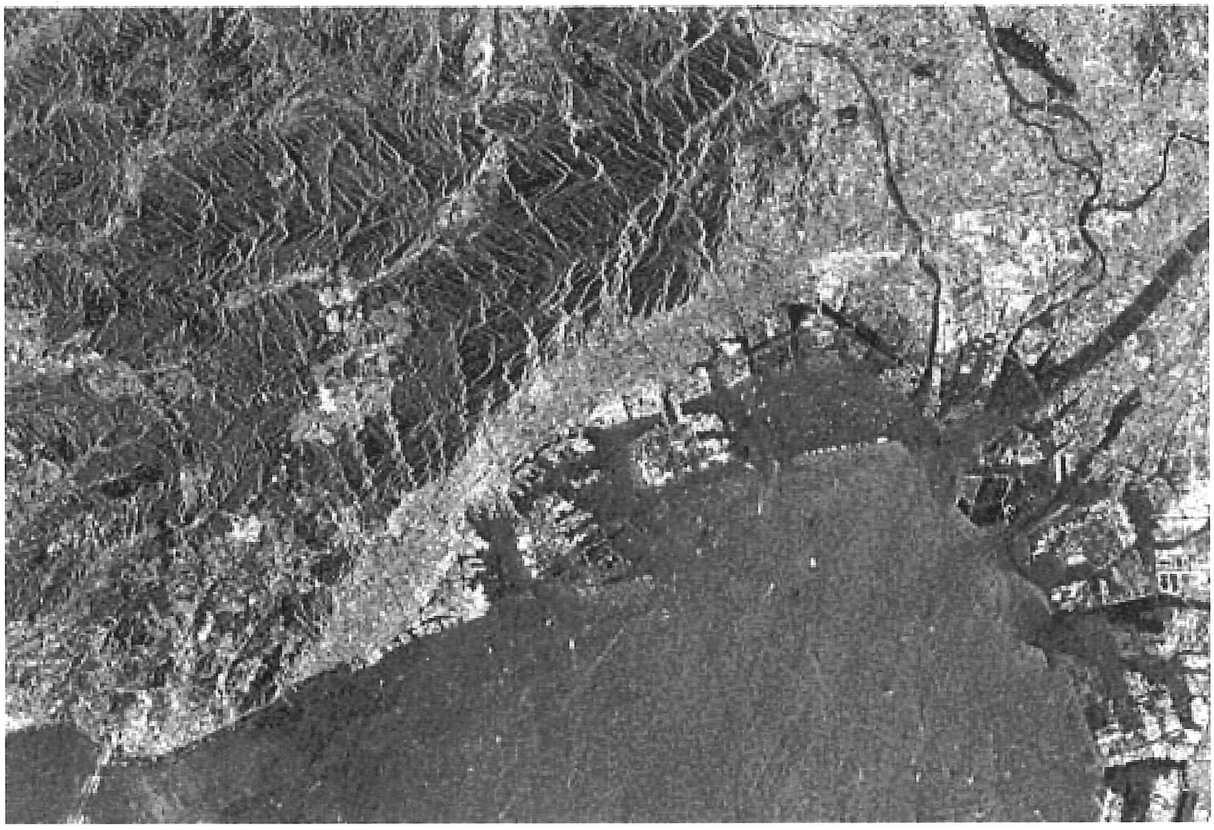


図 2.5.2.3　神戸市周辺 ERS-1/SAR 強度画像（96 年 2 月 27 日）[5)]

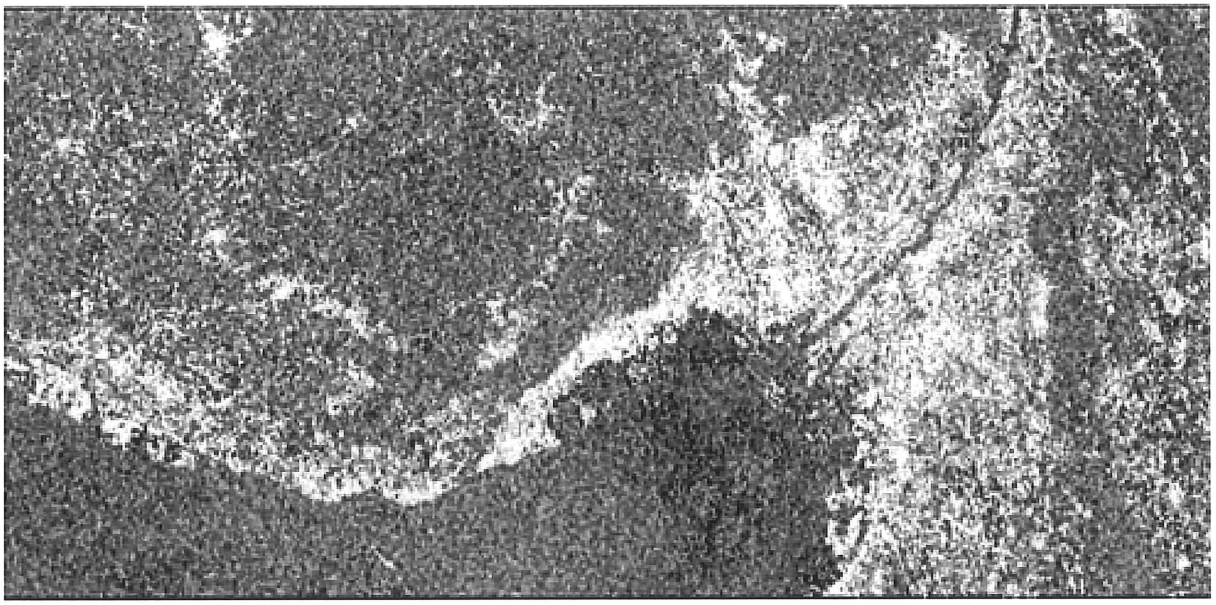


図 2.5.2.4　地震前の強度画像同士（93 年 9 月 12 日と 92 年 11 月 1 日）の相関[5)]

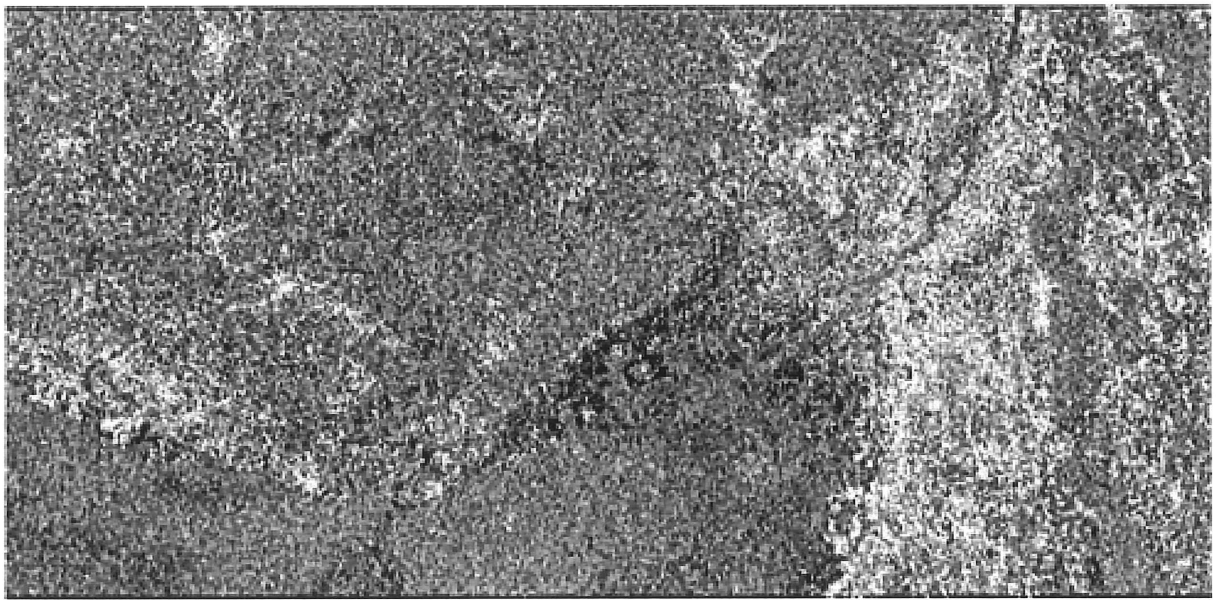


図 2.5.2.5　地震前（93 年 9 月 12 日）と地震後（96 年 2 月 27 日）の強度画像の相関[5)]

被害集中地域の東端は西宮市であり以東は災害現況図では調査範囲外である．SAR 画像では後方散乱の変化は西宮市以東,大阪市などでもおきている．災害現況図にはあらわれていない地域での後方散乱特性の変化は調査範囲内でもみられるが,航空写真による調査以降の建造物の建て直しなどの影響であることは十分考えられる．また,災害現況図は航空写真判読の結果であり,二階建て家屋の一階部分の崩壊など判読不能な被害もあることも考慮する必要がある．逆に,埋め立て地の海岸堤防崩壊部分などを見ると,災害現況図にあらわされたすべてが SAR 画像の後方散乱変化として抽出されているわけではない．その理由の一つとしては相関をとる小領域の中に海水の影響がはいってきたことが考えられる．

(g) おわりに

強度画像の相関の低下として表れる後方散乱の変化地域は，SAR 画像と災害現況図では全体的によく一致しており,建造物の倒壊や火災による焼失などによる地表面の変化が SAR 画像における後方散乱特性に影響したことは明らかである．ERS-1/SAR の SLC 画像の１画素の大きさはレンジ方向に 20m，アジマス方向に 4m 程度であり,都市構造物の破損をとらえるには適した大きさであると考えられる．

地震前後の強度画像の目視判読によっても建造物被害地域のある程度の変化は識別できたが,強度画像のノルム相関を用いることにより，災害による市街地の建造物の焼失・倒壊などがあった地域をより明確に抽出することが出来た．データ取得間に地震を含むデータ組み合わせと含まないデータ組み合わせの相関値の和分の差についての検討は，ここでは強度画像の相関についてのみ行ったが，コヒーレンスについても同様の結果が得られることが期待できる．強度画像の相関を用いる場合も２つのデータの干渉性が重要であり，今後ここに示した手法を他地震被害地域の抽出に応用する場合にもデータ組み合わせの選定が重要であるといえる．

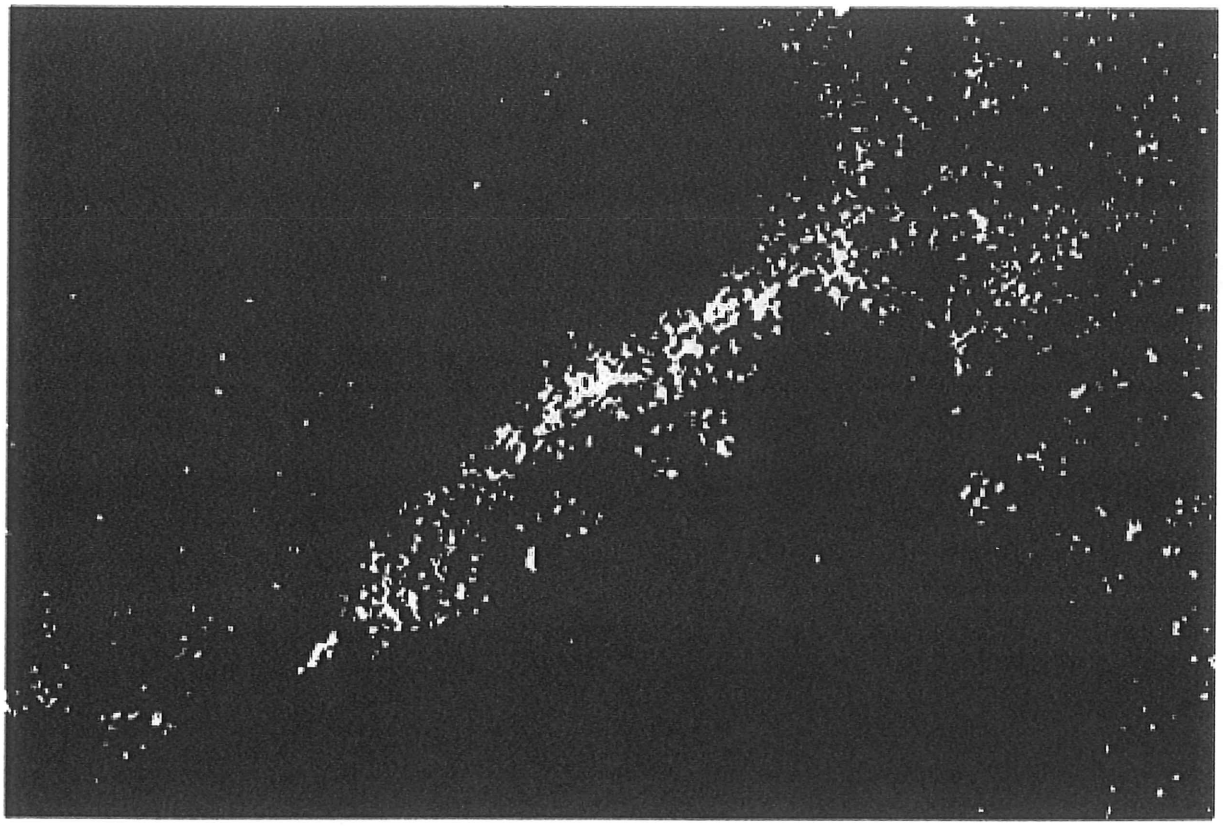


図 2.5.2.6　図 2.5.2.4 と図 2.5.2.5 の和分の差によって抽出された画素[5)]

なお，本章で用いた ERS-1/SAR データは宇宙開発事業団より研究目的で提供されたものである．

参考文献

1) F. T. Ulaby, R. K. Moor and A. K. Fung : Microwave remote sensing, vol II, Addison-Wesley publishing Company, 1982.

2) Hardaway, G. and Gustafson, G. C.: Cardinal effect on seasat images of urban areas, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.48, No.3, pp.399-404, 1982.

3) Henderson, F. N., and Xia, Z. : Radar applications in urban analysis, Settlement detection and population estimation, Principles and applications of imaging radar (eds Henderson, F. M. and Lewis, A. J.), pp. 733-768, John Wiley and Sons, Inc., 1998.

4) 米澤千夏, 竹内章司：SAR 画像における地表の後方散乱特性の変化抽出, (社)日本リモートセンシング学会第 24 回学術講演会論文集, pp.119-120, 1998.

5) 米澤千夏, 竹内章司：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, 1998.

6) YONEZAWA, C and TAKEUCHI, S. : Decorrelation of SAR data by urban damages caused by the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake, Int. J. Remote Sensing, to be published.

7) wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqsmajr.html

8) 国立天文台編：理科年表, 2000.

9) 嶋本利彦：“震災の帯”の不思議, 科学, Vol. 65, No. 4, pp.195-198, 1995.

10) 国土地理院：平成 7 年兵庫県南部地震災害現況図（第・版）,国土地理院技術資料, D-1-No.322, 1995.

11) 米澤千夏, 竹内章司：インターフェロメトリック SAR のための地形縞シミュレーションの一方法, (社)日本リモートセンシング学会第 21 回学術講演会論文集, pp.189-190, 1996.

12) 震災復興都市づくり特別委員会：阪神・淡路大震災被害実態緊急調査被災度別建物分布状況図集. 沿岸域環境研究所, 1995.

13) 地球観測委員会, 宇宙開発事業団, (財) リモート・センシング技術センター：兵庫県南部地震災害調査報告, 1995.

14) 田中修三, 石田哲朗, 山崎利文, 田中考道:ポートアイランドの液状化被害への測量学的考察, 写真測量とリモートセンシング, Vol.36, No.6, pp.13-20, 1997.

15) Zebker, H. A., and Villasenor, J. : Decorrelation in Interferometric radar echoes, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 30, No. 5, pp.950-959, 1992.

2.6 雪氷関連災害

2.6.1 SAR画像を雪氷分野で利用する場合の一般的特徴

SAR は基本的には後方散乱の強度を計測するセンサである．雪氷が関連する災害で，観測できる対象物として考えられる主なものは，雪(積雪)，陸氷(湖氷，氷河)，海氷及び氷山である．以下にそれぞれをSARで観測した場合の特徴を示す．

(1) 雪(積雪)

降っている雪自体を SAR で観測することは困難であり，通常は地上に積った雪(積雪)を観測する．積雪は大きく乾雪と湿雪に分類され，乾雪は空気と氷の混合物，湿雪は空気，氷及び水の混合物と考えられる．

乾雪はその誘電率の実部が空気(1.0)と氷(3.2)の中間となり，虚部は非常に小さく 0 に近い．従って，空気層と積雪層の境界での散乱も小さく，積雪内部の伝搬損失も小さいため，SAR 画像中への積雪の影響は非常に小さい．それに対して，湿雪は水という誘電率が大きい物質が加わり，積雪表層からの散乱が支配的になるため，雪自体の後方散乱に対する影響は湿雪の方が乾雪よりも大きい．また，湿雪は後方散乱に影響するので，干渉 SAR を利用したコヒーレンスを使用して，湿雪のマッピングを行うことも有効と考えられる．

(2) 陸氷(湖氷及び氷河)

湖氷や氷河は基本的には淡水が凍結した物体である．中に含まれている気泡の密度にもよるが，誘電率の実部はほぼ 3 程度で虚部も非常に小さい．従って，表面の粗度による表面散乱以外にも，内部からの体積散乱や，氷の下の境界面からの散乱も無視することはできない．湖氷は，一般的に表面が非常に滑らかであり，氷表面の後方散乱は非常に小さいと考えられるが，内部には円柱状や円板状の気泡が含まれているため，気泡からの体積散乱が後方散乱に影響する．また，氷の下に水が存在する場合は，境界面の誘電率の差が大きく，そこでの後方散乱も無視できない．氷河は，氷表面が非常に粗く後方散乱強度も比較的大きい．また流れる方向に依存したラフネスパターンができる．また，氷河は動きを伴うので，干渉SARを利用した動きの検出も数多くの例がある．

(3) 海氷

海氷は，年周期で発生及び消滅する一年氷と，複数年にわたって存在する多年氷に分類される．一般的には，一年氷は厚さが 2 メートル以内で，多年氷は 2 メートル以上になる．一年氷は，表層における塩分濃度が高く(ブライン:高塩分濃度の食塩水を多く含む)，マイクロ波の侵入深さが小さい．また氷表面は比較的滑らかである．以上から，一年氷からの後方散乱に寄与するのはほとんどが表面散乱と考えられる．それに対して，多年氷は，氷の成長に伴う重力によるブラインの排出等によって塩分濃度が減少し，さらにブラインが抜けた後に気泡ができ，体積散乱をおこすようになる．また，夏に氷上の積雪及び氷表面が融解して淡水の池(メルトポンド)を形成し，それがまた凍結したものが，体積散乱に寄与する．海氷は冬期間は，多年氷の方が一年氷よりも体積散乱が大きくなるために後方散乱強度が大きく，夏期は，どちらも表面散乱が主になるために後方散乱の強度に差がなくなる．干渉 SAR の適用を考慮すると，表面散乱が支配的な一年氷が，干渉性が高いと考えられる．

(4) 氷山

氷山は、氷河の先端が海に流れ込み，海上に浮かんで自由に動けるようになったものである．従って，起源は積雪が圧力で固まったもので淡水氷である．大きさは，大きいものでは100kmを越えるものも存在する．氷表面は氷河同様にラフネスが大きく，淡水氷でありマイクロ波の浸透深さが大きく体積散乱も大きいため，SAR では容易に後方散乱強度のみで検出が可能である．

2.6.2　積雪に起因する災害

積雪及び降雪が原因となる災害として代表的なものは，雪崩，積雪融解に起因する洪水，降雪による樹木倒壊等が考えられる．いずれも，湿雪または融解時に関連するものが多く，湿雪を確実にマッピングする技術がその状況把握の第一歩と考えられる．

(1)　モニタリング事例 1[1)]

本事例は，南ノルウェー Kvikne 地区(62.5N,10.5E)で観測された事例である．
ERS-1 SAR データと TM データから算出した Snow ratio の比較を行った．
後方散乱係数の局所入射角補正を Muhleman の後方散乱モデルを使用して行った．
後方散乱モデルを以下に示す．

$$f(\theta)=0.0133\times\cos\theta/(\sin\theta+0.1\times\cos\theta)^3$$

以上より，モデルの入射角特性と ERS-1 の入射角特性はほぼ一致した．
また，TM から算出した Snow ratio と後方散乱係数の相関値は，局所入射角の補正を行うことによって増加することが分かった．

(2)　モニタリング事例 2[2)]

本事例は，南ノルウェー Kvikne 地区（４月～6 月,1992）で観測された事例である．
使用データは，ERS-1 SAR データ 8 シーンと積雪面積，積雪深，密度，等価水量，粗度，温度の地上観測データである．また，補助データとしてディジタル標高モデル（DEM）を使用して局所入射角補正を行っている．
以上より，局所入射角毎に収集された ERS-1 データと Snow wetness との相関を見つけた．
乾雪と湿雪(3%の含水率増加)の後方散乱係数の差は，3～4dB であった．

(3)　モニタリング事例 3[3)]

本事例は，Mammoth mountain,Nevada で観測された事例である．
SIR-C/X-SAR データと TM の土地被覆分類図の比較を行った．
L-VV コヒーレンスと偏波比(V/H)の L バンド/C バンド比を使用して，DTC(Decision Tree Classifier)分類を行った．
以上より，積雪領域の抽出結果は TM から抽出した結果に対して，86%の精度であった．本手法にて，乾雪も湿雪もマッピング可能である．

(4)　モニタリング事例 4[4)]

本事例は，ノルウェー Eina 及び Kjeller 地区で観測された事例である．
使用データは，ERS-1 SAR データと 1/5000,1/10000 の土地利用図の地上観測データである．
スペックルノイズ低減フィルタを適用した後，後方散乱係数レベルを解析した．
以上より，地表面粗度の大きな領域において，積雪域と他の領域では，後方散乱係数の差が 5.5dB であるが，地表面粗度が小さくなるとその差も減少する．
地表面の後方散乱が大きくかつ湿雪の場合は，積雪域抽出精度は 90%に達する．

(5)　モニタリング事例 5[5)]

本事例は，フィンランド Sodankyla 地区(67.41N,26.58E)で観測された事例である．
使用データは，ERS-1 SAR データ 21 シーンとディジタル土地利用図及び Digital stem volume map である．
融解の前後の後方散乱係数の差を利用して，融解の度合い(融解後の積雪の無い領域の面積比)を次式によって推定する．

$$Fg=100\times(Sigma\_I-Sigma\_W)/(Sigma\_G-Sigma\_W)$$

ここに, Fg:融解後の積雪の無い領域の面積率, Sigma_I:対象時期の後方散乱係数, Sigma_W:融解始めの後方散乱係数, Sigma_G:融解終了後の後方散乱係数.
以上より，湿雪は他のカテゴリーから分離して抽出できる.
積雪の融解は多時期の SAR 画像からモニタリング可能であると結論している.

(6) まとめ
積雪及び降雪が関連する災害に関して直接的な事例は見つからなかったが, 積雪の面積把握, 湿雪の度合把握は数多くの事例が文献化されている.
(a)積雪面積把握
多時期の SAR 画像を使用して，積雪が有ることによる後方散乱係数(減少)の変化をもとに面積を把握する手法が一般的である．しかし，この手法を適用する場合は，DEM による局所入射角の補正が不可欠である．DEM を使用しない手法としては，干渉 SAR で取得されるコヒーレンスを利用する方法も，原理的には有効と考えられる.
(b)湿雪把握
湿雪の後方散乱係数は乾雪のそれに比較して小さいので，その特性を利用して面積把握が可能である．また，雪が無くなった地面露出部分の後方散乱係数と融解し始めの後方散乱係数の差を利用して，融解の度合いを把握することも可能である.

2.6.3 陸氷に起因する災害
陸氷に起因する災害で直接的なものは少ないが，氷河舌落下がおよぼす災害，氷河が融解することによって発生する氷河湖決壊による水害が考えられる．その状況把握は，氷河下流部の氷河の流れをモニタリングすることによって達成できると考えられる.
氷河の動きを SAR によってモニタリングする手法は，干渉 SAR を使用することによって実現されている．また，2 次的に発生する水害については，洪水域の後方散乱低下を利用する，SAR がもっとも得意とするモニタリング手法がある.

(1) モニタリング事例[6)]
本事例は，グリーンランドの Ryder 氷河を観測した事例である.
使用データは，ERS-1/2 SAR タンデムデータである.
昇交軌道及び降交軌道で取得したそれぞれの干渉 SAR データセットを使用し，DEM を使用して地形に起因する干渉縞を除去する．得られた昇交及び降交軌道の地表の動きに起因する干渉縞についてアジマス方向の視差を利用して氷河の動きを 3 次元で推定する.
上記手法を, 1995 年 9 月 21,22 日及び 11 月 8,9 日に取得されたデータに適用した結果, Ryder 氷河の高さ方向の動きを推定し妥当な推定値を得た．将来的には L バンド SAR データに本手法を適用することによって，より良い条件で推定値が得られるであろう.

(2) まとめ
陸氷による災害としては，氷河に起因するものしか例がない．災害の状況を把握するためには，事例に示したように氷河そのものの動きをモニタリングするか，二次的に発生した災害(水害等)をモニタリングすることになる．氷河の流速等を把握するためには，たとえ干渉性に優れる L バンド周波数を使用したとしても，速度が大きい場合には干渉しないケースが多くなる．従って，短い時間間隔でデータをとることが，状況把握に役立つことは間違いない.

2.6.4 海氷に起因する災害
海氷に起因する災害として代表的かつ直接的なものは，船舶の航行への障害と考えられる．その状況を把握するためには，海氷の面積及び厚さ，海氷の動きのモニタリングが必要となる．海氷の影響による船舶の航行障害等を直接モニタリングした例はないが，海氷のモニタリング自体は，SAR のアプリケーションとして代表的なものであり，数多くの例がある.

以下に事例を示す.

(1) モニタリング事例 1[7)]
本事例は，シベリア北方の北方航路での観測事例である.
使用データは，ERS-1 SAR データとロシアの砕氷船で取得した海氷データの地上観測データである.
SAR による北方航路のモニタリングについてのデモンストレーションプロジェクトの紹介を行っている．ERS-1 を使用して，海氷の境界，海氷分類及び海氷の動きのモニタリングを試行した結果を示している．海氷境界及び海氷分類は，後方散乱係数をベースにして行い，海氷の動きに関しては，2 画像中の海氷位置から算出する手法を用いている．なお，SAR データはトロムソ局及び Alaska SAR Facility(ASF)で取得したデータを使用している.
以上より，海氷境界及び動きのモニタリングは SAR データから可能であり、また，海氷分類についても，夏期を除いて可能であった．しかし，海氷厚さの検出は困難であった．全体として ERS-1 等の SAR データを使用した航路モニタリングは非常に有効であったと結論している.

(2) モニタリング事例 2[8)]
本事例は，北極域の海氷の観測事例である.
使用データは，SEASAT SAR データである.
ASF に整備されている Geophysical Processing System(GPS)の海氷の動きを算出するソフトウェアのアルゴリズムに関して記述している．基本的には，2 時期に観測された SAR データセットを使用して，マッチングポイントを抽出して，位置の差から移動速度を算出する手法である．オーバラップした領域で，移動速度の早いマージナル領域か，移動速度の遅いパック領域に分離した後に，それぞれ異なるアルゴリズムでマッチングを行う.
以上より，SEASAT データに本アルゴリズムを適用した結果，マージナル領域でもパック領域でも，移動速度が算出可能であった.

(3) モニタリング事例 3[9)]
本事例は，北極域の海氷(アラスカ北方)の観測事例である.
使用データは，ERS-1 SAR データである.
ASF の Geophysical Processing System(GPS)の出力データを使用して，5km グリッドの海氷の動きのデータからリード(狭い海水面)及びその動きを抽出する.
以上より，1953 個のデータセットからなる ERS-1 データに本手法を適用し，リードの動きを定量的に推定した.

(4) まとめ
海氷は，SAR で観測できることが実証されている代表的な対象物であり，数多くのモニタリング手法が提案されている．また，衛星データを使用した実利用システムもアメリカやカナダ等で稼働していて，密接度等の算出に使用されている.
災害状況を把握するという観点から見た場合，海氷の厚さや動きをモニタリングすることに焦点が絞られる．文献調査からは，海氷厚については後方散乱係数を使用した海氷分類をベースに経験的に推定し，海氷や海氷中の海水面の動きに関しては，短い間隔で取得されたデータからの位置差から推定している.

2.6.5 氷山に起因する災害
氷山に起因する災害として代表的かつ直接的なものは，海氷同様に船舶の航行への障害と考えられる．その状況を把握するためには，氷山の面積及び厚さ，氷山の動きのモニタリングが必要となる．氷山が及ぼす災害は規模が大きく，SAR 観測データを利用した監視システ

ムが構築されつつある．以下に事例を示す．

(1)　モニタリング事例 1[10)]
本事例は，北極海の氷山についての観測事例である．
使用データは，SAR-580 航空機 SAR データ(L & X-band)，AN/APS 94E SLAR(X-band)である．
5 種類の氷山(Pinnacled, Domed, Drydock, Blocky, Tabular)について，SAR 及び SLAR を用いた検知可能性について評価を行った．
以上より，入射角が大きい場合は検出が困難になる．また，氷山を分類するのは L バンドでは不可能であり，X バンドにおいては可能であった．
氷山の検出に優れているのは X バンドの直交偏波データであったが，必要な後方散乱レベルを確保するためには送信電力を大きく取らなければならない．従って，総合的に判断すると，今回のケーススタディでは X バンドの HH 偏波が最も優れていると判断した．

(2)　モニタリング事例 2[11)]
本事例は，南極の氷山 (69.9S, 61.1W)についての観測事例である．
使用データは，ERS-1／2 SAR タンデムデータ (Nov.6 and Nov.7,1995)である．
干渉 SAR で得られるレンジ方向及びアジマス方向の縞の周波数を使用して，氷山の動きを把握した．干渉 SAR で取得された初期フリンジから軌道間隔に起因する軌道縞を取除く．
その後に残っている縞は，レンジ方向及びアジマス方向共に氷山の回転を示している．
以上より，ケーススタディとして，2 つの氷山のアジマス方向の回転角を検出した．

(3)　まとめ
氷山が関係する直接的な災害のモニタリング事例は見つけられなかったが，氷山を検出するのに適した周波数及び偏波について，特定することができた．また，干渉 SAR を応用した動きのモニタリングについても，データ取得の頻度の点で現状の衛星システムでは問題点があるが，可能性の高いことがわかった．

2.6.6　雪氷関連災害を状況把握するための SAR に対する要求
雪氷関連に起因する災害を SAR データによってモニタリングするという観点に立った場合，使用している SAR の観測手法として代表的なものは以下の 2 点である．
1)多時期のデータ後方散乱の変化を使用
2)干渉 SAR の位相差及びコヒーレンスを使用
以上から，特別な手法を用いているわけではなく，タイミング良くデータが取得できればモニタリング可能であり，観測頻度の向上というのが SAR に対する最重要要求であると結論づけられる．
また，使用されている SAR の観測周波数としては，単一周波数を使用するものでは C バンド(ERS-1/2, RADARSAT)がほとんどであり，複数周波数を使用するものも C バンドと他の周波数の組合わせのケースが多い．観測偏波に関しては，平行偏波を使用するものがほとんどで，直交偏波を使用するものの例は少い．しかし，この結果は，あくまでも現在までの事例を見た場合であり，今後計画されているマルチパラメータ SAR データを使用した場合は別の結論が出る可能性もある．

参考文献：

1) T.Guneriussen, Analysis of DEM corrected ERS-1 SAR data for snow monitoring, IGARSS Proceedings, pp.1505-1507, 1995

2) T.Guneriussen, H.Johnson and K.Sand, DEM corrected ERS-1 SAR data for snow monitoring, IJRS Vol.17 No.1 pp.181-195, 1996

3) J.Shi, S.Hensley and J.Dozier, Mapping snow cover with repeat pass synthetic aperture radar, IGARSS 1997 Proceedings

4) R.Solberg, Mapping of snow cover by ERS-1, Digest Int. Geoscience Remote Sensing Sumposium, Vol.3, pp.1273-1275,1993

5) J.T.Koskinen, J.T.Pulliainen and M.T.Hallikainen, The use of ERS-1 SAR data in snow melt monitoring, TGARS, Vol.35, No.3, pp.601-610, 1997

6) I.R.Joughin and R.Kwok, Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using ascendng and descending passes, TGARS, vol. 36, No. 1, pp.25-37, 1998

7) O.M.Johannessen, S. Sandven and V.V.Melentyev, Ice watch - Ice SAR monitoring of the northern sea route, Proceesings of the Second ERS Applications workshop, pp. 291-296

8) R.Kwok, J.Curlandar, R.McConnell and S.S.Pang, An ice-motion tracking system at the Alaska SAR Facility, IEEE Journal of Oceanic engineering, Vol.15, No.1, pp.44-54, 1990

9) H.L.Stern, D.A.Rothrock and R.Kwok, Sea ice lead dynamics from ERS-1 SAR, Proceedings of second ERS-1 symposium, pp.269-270, 1994

10) M.E..Kirby and R.T.Lowry, Iceberg detectability problems using SAR and SLAR systems

11) M.Thomas, M.Steffens and R.Roth, Measuring changes of ice berg attitude by SAR interferometry, Proceedings of 3rd. ERS-1 symposium, pp.955-958, 1997

2.7 油流出

2.7.1 SARデータによる油流出状況把握

タンカー事故や海岸沿いの石油施設，油田あるいは航行中船舶などからの油流出は，近年の海洋上物流の活発化に伴い増加する傾向にある．これら油流出による海洋または沿岸地域への影響は，深刻なものになる場合が多く，その状況の迅速な把握と対策が強く求められている．

油流出状況把握には，比較的広域にわたり，迅速で密な観測が必要である．また，しばしば天候の厳しい場合があり，その影響に左右されない観測方法が必要となる．このような観点から，広域を反復して観測し，また昼夜や天候の影響をあまり受けない人工衛星搭載の SAR により観測されたデータは，油流出状況把握に適しているといえる．

油には多くの種類があるものの，一般に，油流出海域の海面は油膜により表面の波が減少し，周囲の海面に比べより滑らかになる場合が多い．ここに人工衛星搭載の SAR よりマイクロ波が斜めに入射すると，後方散乱強度（SAR 方向への反射）を減衰させる．従って，取得され処理された SAR 画像上では，油流出海域は周囲の海面に比べ暗く(データが低く)なって見えることにより，識別が可能となる．しかし，油流出状況把握のための人工衛星(SAR)データ観測と解析には，幾つかの条件や問題点がある．

海面が滑らかになる現象は油だけではなく，海洋微生物の発生，海上廃棄物，船舶の航跡，あるいは風の静穏状態などによっても認められる．ノルウェーで検討された ERS SAR の例では，海上の風速が 3-4m/s 程度以下になると，逆に波の少ない海面や油以外の要因による後方散乱の低い部分との識別が難しくなるとの指摘もある[1)]．

これに対して強い海上風や波高が高いという海象や気象の条件により油流出域の識別に制約を受けることがしばしばある．実験によれば約 10m/s の風速以下で識別が可能であることが報告されている[1)]．実際の評価例では，英国のケースで，6-7m/s 以内の風速である必要であると示され[2)]，ナホトカ号重油流出事故による日本海の例においても，風速約 6m/s 以内，波高 2m 以上という条件[3)]が示された．

漂流油の分布や広がりの状態についても影響を受ける．すなわち SAR の地表解像度により識別に制約を受けることが考えられる．ERS の観測例で，流出油の面積が $1km^2$ 以下のものについて検出結果が低下したとの報告[4)]がある．現在運用中の SAR データのうち，最も高分解能のものは，RADARSAT/SAR Fine モードで約 6.8m（スラントレンジ）である．しかし，この場合は観測範囲が狭くなるという問題が生じる．

観測された SAR データの解析方法についても検討が必要である．SAR データには特有のスペックルノイズが見られ，流出油の分布が小さいかあるいは幅が細い場合は，これにより識別を難しくすることがある．このスペックルノイズの除去には，平均化あるいはフィルタリング等の処理が施される．ナホトカ号重油流出事故による RADARSAT データの解析では平均化処理が用いられ比較的良好な結果が得られた(後述)．また，ヨーロッパの実運用を目指した流出油監視システムの例では，Lee フィルターと Median フィルターが用いられている[6)]．

流出油の監視システムを実運用ベースで実施するには，人工衛星 SAR データ観測時から処理・解析画像提供までがなるべく短時間である必要がある．また，システムの運用には，従来の航空機や船舶による監視に対してのコスト面からの評価が必要である．

2.7.2「ナホトカ号油流出事故」におけるSARの利用事例

(1) ナホトカ号油流出事故と緊急調査

1997 年 1 月に，日本海をカムチャッカ半島に向かって航行中のロシアのタンカー「ナホトカ」号が対馬沖で船体破断および沈没事故を起こし，多量の重油が流出して日本海沿岸地域に大きな災害をもたらした．この事故に対しては，関係機関による集中的な調査が行われたが，この中で人工衛星による観測・調査が集中的に行われた．この人工衛星を使った集中的観測・調査は前例があまりないような大規模のもので，この結果により多くの知見が示された．ここではそのうち SAR を使った事例について概要を示すと共に，この観測・調査を通して明らかになった点を述べる [7]．特に詳しく検討した例として次の 2 点を取り上げる．

1) SAR準リアルタイム処理データの利用

2) 実用的空間解像度及びブラウズ画像作成方法の検討

(2) 油流出状況モニタリングのためのSAR準リアルタイム処理データの利用

1997 年 1 月初めに発生した日本海でのタンカー事故による重油流出(以下「油流出」とする)に関しては，その状況把握においてカナダの地球観測衛星 RADARSAT SAR の準リアルタイム処理データが利用された．

(a) RADARSAT SAR データの特徴

RADARSAT は 1995 年 11 月 4 日に Canadian Space Agency により Delta-II ロケットで打ち上げられた SAR 専用の地球観測衛星である．赤道通過が午前 6 時（下降時）の太陽同期軌道が設定され，ほとんど 1 日中日照を受けることにより SAR を上昇下降両軌道で運用できる．他衛星搭載のSARと比較したRADARSAT SARの観測に関する主な特徴としては次のような点が上げられる．

1) SAR専用軌道を有する．

2)入射角度が可変である．

3)ScanSARを含む5観測モードを有する．

4)下降，上昇の両軌道で安定して観測が可能である．

一方，データ提供に関しては，複数のデータ処理レベルやプライオリティ処理が設定されている．このため，多目的の利用，同一対象地域の観測頻度の向上，データ入手の迅速化等が可能となった．RADARSAT のデータ処理には，火山噴火，洪水，地震等の大規模な災害に対して公的な特別処理リクエストの『準リアルタイム処理』が設定されている．現在は日本での直接受信が行われているが，1997 年当時は日本での受信が行われておらず，緊急を要するデータ取得について，カナダでデータ受信後，数時間以内にデータを送信し日本で処理を行い，提供･公表するという試みが行われた．

(b) 準リアルタイム処理ブラウズ画像の取得

1997 年 1 月 2 日に日本海の島根県沖で発生したタンカー「ナホトカ」号の事故に伴う油流出状況を把握するために，RADARSAT SAR データの観測リクエストと準リアルタイム処理がカナダに依頼された．これにより，カナダで準リアルタイム処理データからブラウズ画像データを作成し，通信回線（インターネット）で日本へ緊急に送信して，油流出状況の把握の試みが行われた．RADARSAT SAR データの観測から日本での画像提供までの流れと時間経過は図 2.7.2.1 の通りであった．右側に付記した時間は日本時間（午前および午後）であり，〔 〕内は処理等の所要時間を表している．

RADARSAT が日本付近の SAR データを観測後，最大 2 時間でカナダ・ガティノ受信局でダウンリンク（軌道によってはプリンスアルバートで受信後ガティノへ転送）を行った．続く SAR データ処理では，まずパスイメージを作成し，さらにこのフルレゾリューション画像に対して 8 分の 1 に画素を間引く処理を施してブラウズ画像が作成された．これらの処理に要した時間は約 1 時間 30 分である．ブラウズ画像作成後，通信回線で日本へ画像データが送信されたが，送信時間は1シーン10

～20 分であった．今回の画像は 1～3 シーンで対象地域をカバーしたが，日本でそれらの画像取得後，シーン間のモザイク処理，写真出力等を実施した後，関係機関に提供・公表が行われた．

このケースでは主に"Standard Beam Mode"で観測が行われたが，準リアルタイム処理によるパスイメージデータはフルレゾリューション画像（空間解像度約 12.5m）で約 9000×8500 画素程あり，これを 8 分の 1 に間引いて約 1100×1050 画素程度のブラウズ画像（空間解像度約 100m）を作成した後に，日本への転送が行われた．データ観測から日本での画像確認･解析の開始まで約 4 時間 30 分と海外局受信・処理による日本国内での解析という過程としては，かなり迅速な処理と，短時間での画像提供・公表が可能であった．

1999 年 12 月以降は日本での RADARSAT SAR データの直接受信が行われるようになったが，図 2.7.2.2 に日本受信による現在のデータ観測から提供･公表までの流れを示す.内容については後述する．

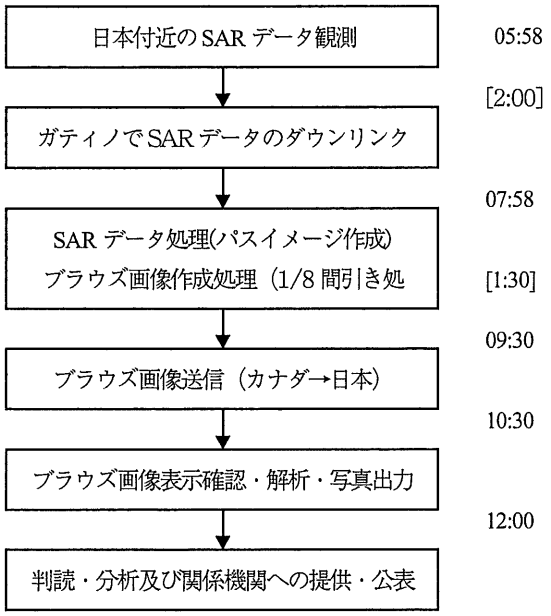


図 2.7.2.1 カナダ受信による RADARSAT 準リアルタイム処理データの入手



図 2.7.2.2 日本直接受信による RADARSAT 準リアルタイム処理データの入手

(c) ブラウズ画像による流出油浮遊状況

「ナホトカ」号の油流出に関した RADARSAT SAR データの観測は 1 月 9 日から 2 月 24 日まで約 3 日に 1 回程度の頻度で 18 回実施された．このうち油と考えられる明瞭なパターンが確認できたのは，以下のような 3 時期のものであった．

<1>1 月 11 日 17:53 STANDARD 5 BEAM MODE,（アセンディング）

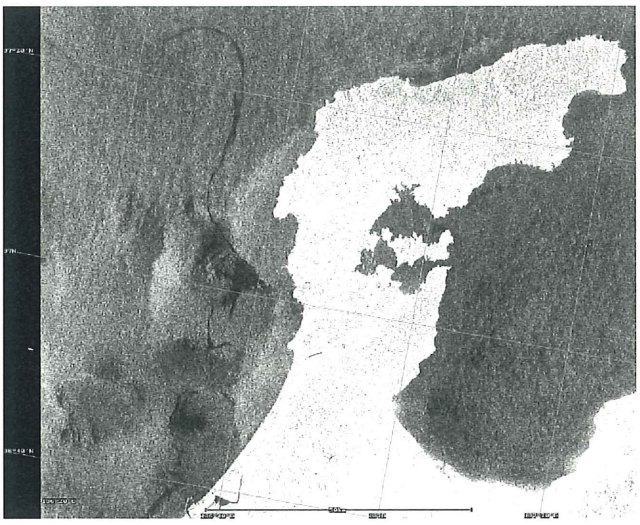
<2>1 月 12 日 06:08 STANDARD 1 BEAM MODE,（ディセンディング）

<3>1 月 16 日 05:51 STANDARD 6 BEAM MODE,（ディセンディング）

これら<1>～<3>の画像のうち浮遊油と考えられるパターンが明瞭に示された海域の画像をそれぞれ図 2.7.2.3～2.7.2.5 に示す．

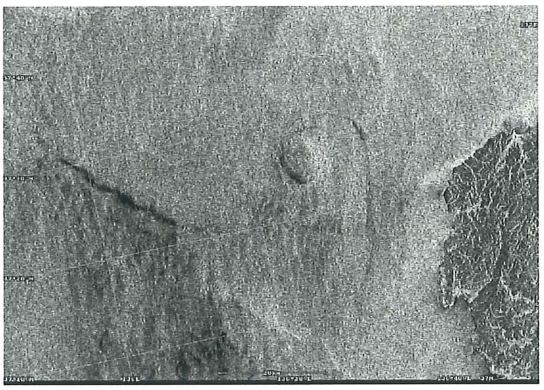
1 月 11 日<1>と約 12 時間後の 12 日<2>の画像上には，北部が屈曲した鍵状の筋状パターンが示されていた．図 2.7.2.6 のように両画像を重ねて筋状パターンの移動距離を計測すると，約 12 時間の間に北北東へ最大約 9km 程度移動したことが分った．同時期の海洋速報海流図（海上保安庁）によれば，この付近の流速は 0.3～0.9kt（ノット)となっており，ほぼ海流の流れと共に浮遊したと考

えられる．また 4 日後の 1 月 16 日<3>の画像では新たなパターンが示されていた．しかし，これら 3 時期以外の画像では流出油と考えられるパターンは確認できなかった．これは前項で述べたように風速が強いか，海面の波浪が高かった理由が考えられる．



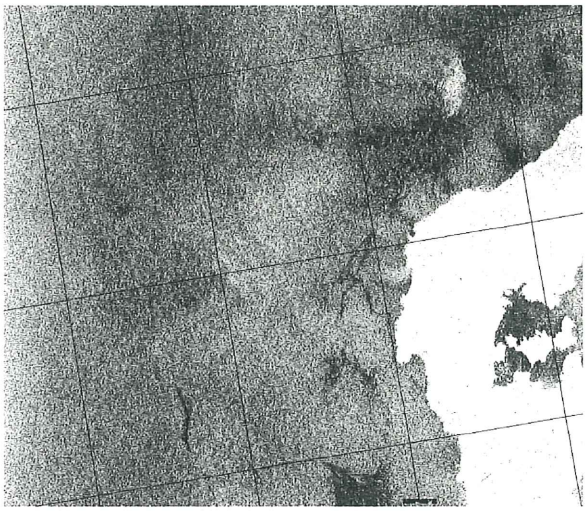
©CSA1997

図 2.7.2.3　1 月 11 日の RADARSAT SAR 準リアルタイム処理ブラウズ画像



©CSA1997

図 2.7.2.4　1 月 12 日の RADARSAT SAR 準リアルタイム処理ブラウズ画像



©CSA1997

図 2.7.2.5　1 月 16 日の RADARSAT SAR 準リアルタイム処理ブラウズ画像



©CSA1997

図 2.7.2.6　1 月 11 日(紫)と 12 日(緑)の合成 RADARSAT SAR 準リアルタイム処理ブラウズ画像

(d) 準リアルタイム処理データの利用

RADARSAT SAR の準リアルタイム処理に基づくブラウズ画像が，流出油の把握に利用され，迅速に観測から処理･解析･提供までが行えることが確認された.現在では日本周辺の RADARSAT SAR データが日本で直接受信されており，

1) 観測から受信までの短縮
2) 受信から処理設備までの転送の節約
3) ブラウズ画像送信の短縮
4) 処理・解析方法の向上
等で原理的には観測から提供・公表までの過程がさらに時間的に短縮可能である.

現在, 日本周辺が観測された RADARSAT SAR データは, まず熊本で受信後, 東京の(財)リモート・センシング技術センターへ送られ, 処理・解析・提供までが行われる. しかし, 熊本・東京間の通信回線が整備されてなく, 現在は飛行機による輸送方法をとっている. このため観測から提供までは 1997 年の「ナホトカ」号当時よりも多くの約 7 時間 30 分が必要となっている. この時間は, ヨーロッパなどで計画されている提供までが 2 時間以内というものに比較し, 時間がかかりすぎる. 今後, 通信回線の整備などにより緊急時における時間短縮の検討が必要であろう.

(3) 油流出状況把握のための実用的空間解像度及びブラウズ画像作成方法

(a) 実用的空間解像度及びブラウズ画像作成についての検討の概要

「ナホトカ」号油流出事故において RADARSAT SAR のブラウズ (簡易) 画像をカナダより通信回線で入手し, 緊急情報処理・提供を行ったが, ブラウズ画像による判読や, 空間解像度等の点において, 検討の必要性が示された. このため, フルレゾリューション (詳細) 画像を実際に用いて, 詳細表示画像による流出油の同定の評価と可能性, 流出油同定のための実用的な空間解像度の検討, あるいはフルレゾリューション画像からブラウズ画像を作成する方法の検討等が行われた. この研究は「平成 8 年度科学技術振興調整費 ナホトカ号油流出による環境影響に関する緊急研究」の一つとして実施された. 内容は以下の通りである.

1) 「ナホトカ」号油流出について RADARSAT ブラウズ (簡易) 画像で流出油浮遊が確認されたシーンのフルレゾリューション画像を入手して詳細表示画像の作成.
2) RADARSAT SAR データの観測に比較的同時期で観測された航空機観測の可視域画像データを参照し, RADARSAT フルレゾリューション画像の判読による, 油流出状況の識別, 同定の評価.
3) RADARSAT フルレゾリューション画像からブラウズ画像までの空間分解能の異なるシミュレーション画像の作成.
4) シミュレーション画像の比較分析により, フルレゾリューション画像がブラウズ画像に比べて, どの程度高度な浮遊油の同定が可能か, および油流出状況の実用的な把握のために, どの程度まで空間解像度を落とすことが可能かについての検討.
5)ブラウズ画像を作成時の, 「間引き処理」と「平均化処理」の 2 方法による画像の作成・評価によるブラウズ画像作成方法の検討.

(b) フルレゾリューション画像による詳細表示画像作成と評価

油流出に対して取得された RADARSAT SAR 取得データのうち, 前述<1>～<3>の 3 時期の RADARSAT フルレゾリューション (詳細) 画像を入手し, 検討に用いた. また, RADARSAT SAR 画像上の流出油浮遊状況の評価用参照データとして, RADARSAT 観測日に比較的近い日時に撮影された航空機画像を用いた.

1 月 11 日の RADARSAT 画像 (図 2.7.2.3) で能登半島の西方海域に認められた鍵型に曲ったパターンは, 航空機画像の参照により, 油が棚引くように連なって浮遊している様子を示していると考えられた. また, 1 月 12 日の RADARSAT 画像金沢沖において示された筋状の集合パターンは, 油が三国町海岸付近に浮遊してきて接岸した状態を示していることが確かめられた. 同様に, 1 月 16 日の能登半島沖の RADARSAT 画像 (図 2.7.2.5) に示される幾つかの線状パターンは, 油が線状に連なって浮遊している状態と考えられた.

以上のように, フルレゾリューション画像では, ブラウズ画像で把握できない微細な筋状の浮遊油

の同定が可能であり，この筋状あるいは線状の流出油の状況が鮮明に把握できることが確かめられた．

(c) フルレゾリューション画像とブラウズ画像の比較による流出油同定の評価検討

i) 流出油同定の実用的なモニタリングのための空間分解能

<1>～<3>のフルレゾリューション画像（空間解像度 12.5m）からブラウズ画像（空間解像度 100 m）までに相当するシミュレーション画像（12.5m, 25.0m, 37.5m, 50.0m, 62.5m, 75.0m, 87.5m, 100.0m）を，ピクセルおよびラインをそれぞれ間引いて空間解像度を段階的に低下させて，それぞれ作成し，それらを互いに比較検討しながら，流出油の実用的な把握のために，どの程度まで空間解像度を落とすことが可能かについての検討が行われた．通常，RADARSAT SAR ブラウズ画像は，フルレゾリューション画像を 8 分の 1，すなわち 8×8 の画素から 1 画素を選択する（間引く）処理を施して作成される．

<1>～<3>それぞれの空間解像度毎のシミュレーション画像間の比較により，5 分の 1（62.5m）程度の空間解像度までの低下であれば，フルレゾリューション画像に対し，空間解像度低下の影響が比較的少ないことが分った．また，データ量に関しては，フルレゾリューション画像が約 9000×8500 画素（8 ビットで約 76.5M バイト）に対し，62.5m（5 分の 1 間引き）空間解像度画像は約 1800×1700 画素（約 3.1M バイト）と 25 分の 1 になる．このため，通信回線によるデータ転送や，画像処理，解析でのデータの操作が向上すると考えられた．

ii) 単純間引き画像と平均化画像の比較

フルレゾリューション画像から空間解像度を落とした画像を作成する単純な方法は，前述のように，目的の空間解像度の画素サイズに合うように，画素を順にサンプリングして間引き画像を作成するものである．しかし，SAR 画像にはスペックルノイズが含まれており，間引き処理ではそれを取り除けず，流出油の判読結果を低下させるような影響を強く残す．この影響を低減する方法のひとつとして，平均化処理が考えられる．

ここでは，空間解像度を落とす段階で，この平均化処理を適用してシミュレーション画像を作成し，間引き処理によるシミュレーション画像と比較・検討を行った．平均化処理では，RADARSAT ブラウズ画像の場合，フルレゾリューション画像から 8×8 画素の画素値の平均を計算し，この値を 8 分の 1 空間解像度の 1 画素値とするものである．<1>～<3>の間引き処理画像を図 2.7.2.6，2.7.2.8，2.7.2.10 に示し，平均化処理画像を図 2.7.2.7，2.7.2.9，2.7.2.11 にそれぞれ示す．

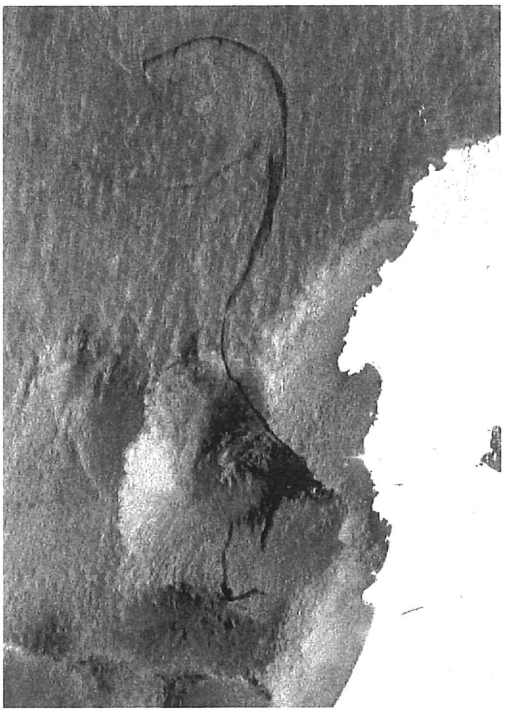
ブラウズ画像や間引き処理による各空間解像度の画像との比較の結果，平均化処理によるブラウズ相当画像は，間引きによるブラウズ画像に比べはるかに細いパターンも把握でき，流出油の同定の可能性が格段に向上することが分る．さらに，間引き処理による 62.5m（5 分の 1）空間解像度のシミュレーション画像に比べても同定の可能性が高く，37.5m（3 分の 1）空間解像度のシミュレーション画像程度まで向上していることが視覚的に確かめられた．

以上の検討結果から，流出油パターンの把握においては，平均化処理によるブラウズ画像の方が，間引き処理によるブラウズ画像よりもはるかに優れ，適していることが分かり，今後，迅速な流出油同定には平均化処理によるブラウズ画像を用いることにより，その精度が向上するとが示された．



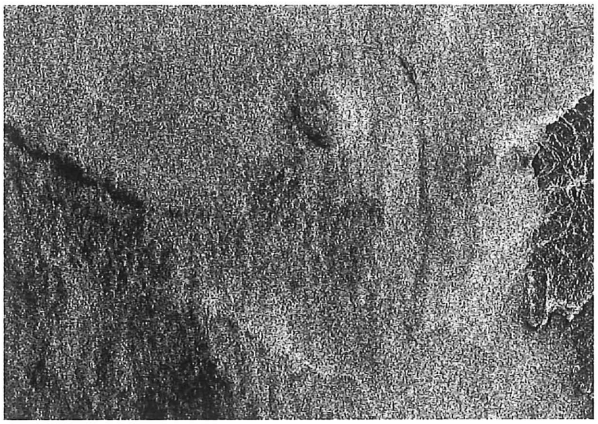
©CSA1997

図 2.7.2.7　1 月 11 日の単純間引き
ブラウズ画像（100m）



©CSA1997

図 2.7.2.8　1 月 11 日の平均化
ブラウズ画像（100m）



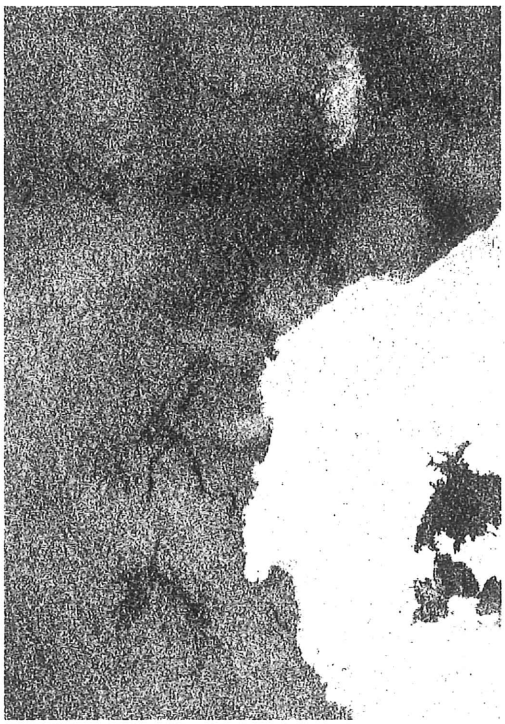
©CSA1997

図 2.7.2.9　1 月 12 日の単純間引き
ブラウズ画像



©CSA1997

図 2.7.2.10　1 月 12 日の平均化
ブラウズ画像



©CSA1997

図 2.7.2.11　1 月 16 日の単純間引き
ブラウズ画像



©CSA1997

図 2.7.2.12　1 月 16 日の平均化
ブラウズ画像

2.7.3 その他の事例

SAR データによる流出油把握について実験的な検討は幾つかみられるが，ナホトカ号の例を除くと，実際の油流出事故に関して SAR データを用いた流出油把握の試みについてまとめられた事例は比較的少ない.

1996 年 2 月に英国ウェールズ・ミルフォードヘブンの近海で発生した Sea Empress タンカーの事故では，約 7 万トンの油流出が発生した．この油流出に対し RADARSAT SAR および ERS SAR データを使って，2 月 22 日～26 日までの 6 日間の油流出状況が調べられ，漂流方向と速度 10cm/s が求められた．解析にはデラウエア大学で開発された手法（MSSM:Maximum Similarity Shape Matching method）が用いられた．これは海岸線の対応点を参照して画像間の幾何補正を行い，スペックルノイズ除去と強調のために Lee filter と Median filter を適用し，さらにエッジ強調と画像強調を施して検出精度を上げる処理方法である. また, 過去の事例も含め, 条件として, 海上風が 3m/s 下になると SAR による流出油の識別が低下することが示唆され，逆に，海上風が 6-7m/s を超えると波のために識別が難しくなることも示唆されている[2),6),8)].

ノルウェー(NSC:Norwegian Space Centre)によるノルウェー海，北海，バルト海における SAR データを中心とした流出油監視システムの一般的な運用についての検討結果が報告されている．ここでは，予備的な運用が開始されており，海上の流出油の早期発見と警戒が主要な目的である．このため ERS SAR データ観測時から 2 時間以内にエンドユーザーに情報を提供することを目指してシステムの開発が進められている．ここでは費用的な評価もなされており，従来の航空機と船のみによる監視に比べて人工衛星データを利用することで約 70％のコストで実施可能であることが報告されている. また, 本システムに将来的に利用が考えられている SAR としては, ERS, RADARSAT, ENVISAT 搭載のものがあげられている[1)].

2.7.4 SARデータによる油流出状況把握の展望

実験的な検討を除けば，実際の油流出に対して SAR データを用いた観測に関する検討あるいは調査事例は比較的少ない．その中で 1997 年に発生した日本海の「ナホトカ」号による油流出は，SAR データをはじめ人工衛星データを集中的に用いた調査の検討が行われたという点で重要である．この検討により多くの知見が得られ，今後の油流出状況の把握や監視に有益な情報を提供した．

一方，ヨーロッパでは流出油の監視の重要性が指摘され，実利用ベースで実施されつつある．日本においても，日本付近を観測した RADARSAT SAR データの直接受信が開始され，前述〔第 2 章 7 節 2 項の(2)の(b)〕転送時間の節約及び処理・解析方法の向上などにより，原理的には観測から提供までの時間が1997年の「ナホトカ」号の油流出のケースに比べて時間的に短縮が可能である．しかし，第 2 章 7 節 2 項の(2)の(d)で述べたように，現在，日本周辺が観測された RADARSAT SAR データを熊本で受信後，東京の(財)リモート・センシング技術センターへ送られ，処理・解析・提供が行われる過程で，通信回線の未整備により，観測から提供までは約 5 時間が必要となっている．これは，ヨーロッパなどで計画されている監視システムの実運用における提供までの 2 時間以内と比較すると時間がかかりすぎる。今後，通信回線の整備などにより緊急時における時間短縮の検討が必要である．また，油流出状況の把握・監視をシステム的に実施するには，費用的な面からの検討も必要になることが予想される．

海象や観測条件において検討問題が残っているものの，SAR データによる流出油監視の有効性は明らかである．現在の RADARSAT SAR，ERS SAR 等に加え，2 年後には日本の ALOS PALSAR のデータも利用可能となり，油流出状況の把握・監視のためのリアルタイム利用の期待も高まると考えられる．

(参考文献)

1) J.P. Pedersen, et al., Oil spill detection by use of ERS SAR data – From R&D towards pre-operational early warning detection service –, Proc. the Second ERS Application workshop, pp.181-185, 1995

2) B. Jones, et al., On the interpretation of SAR imagery from the Sea Empress oil spill, Int. J. Remote Sensing, 1998

3) 宇宙開発事業団編：人工衛星・航空機による漂流重油の観測 ナホトカ号重油流出事故衛星観測調査報告書，108p，1997

4) H. Konings, Oil pollution monitoring on the North Sea, Spill Science & Technology Bulletin, Vol.3, No.1/2, pp.47-52, 1996

5) 科学技術庁編，流出油による環境汚染の監視方法に関する研究 成果報告書 —人工衛星搭載合成開口レーダによる海上浮遊観測解析手法の開発—，pp.35-46，1997

6) P. C. Colon, et al., Evolution of oil slick patterns as observed by SAR off the coast of Wales, Proc. 3rd ERS Symp. on Space at the service of our Environment, pp.565-568, 1997

7) 中山裕則，竹内章司，高崎健二，山之口勤，東誠，伊藤恭一，RADARSAT SAR 準リアルタイム処理データによる重油流出状況のモニタリング，(社)日本リモートセンシング学会第 22 回学術講演論文集，pp.259-260, 1997

8) T.I. Bern, T. Wahl, T. Anderssen and R. Olsen, Oil spill detection using satellite based SAR： Experience from a field experiment, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.59, No.3, 1993