

国土地理院における航空機SAR研究 Observation and Research on Airborne SAR

測図部 小荒井衛・茂木公一・渡辺信之・岡谷隆基・山田陽子・松尾馨

Topographic Department Mamoru KOARAI, Kouichi MOTOKI, Nobuyuki WATANABE,
Takaki OKATANI, Youko YAMADA, Kaoru MATSUO

1. はじめに

災害の発生時には、被災状況を一刻も早く把握することが重要である。しかし、豪雨災害の場合には雲などによって視界がさえぎられることが多く、火山噴火などの場合には噴煙によって地上から得られる情報は大幅に減少する。特に、光学センサを用いた観測においては、これらの状況下での地表情報の取得はかなり制限される。その点において、合成開口レーダ（SAR）はマイクロ波を用いた能動的センサという特性を生かし、雲や噴煙などの悪天候下だけでなく昼夜を問わず観測が可能であるという利点を有している。

このセンサは主にJERS, ERS, RADARSATなどの人工衛星に搭載され地球を観測しているが、観測周期・解像度等の問題から、必ずしも緊急時に適切な情報が迅速に得られないという問題がある。この様な視点で見た場合、航空機による観測は、衛星による観測と比べて、迅速性・解像度の面できわめて有利である。一方で、今後更に解像度が高いSAR衛星の打ち上げが順次予定されており、将来的に解像度等が向上した際にどの程度災害状況を把握でき、地形図作成にどの程度利用可能かを検討することも重要である。

国土地理院では、これらの問題についての調査研究を行うため、平成8年度～平成9年度にかけて航空機搭載型SAR（以下、航空機SARと呼ぶ）を整備した。航空機SARの観測の概念を図-1に示す。平成10年度に本装置による初めての観測を行い、平成11年度からは、建設省の総合技術開発プロジェクト「先端技術を活用した国土管理技術の開発」（平成11～14年度：以下、国土管理総プロと略す）、及び「災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究」（平成11～13年度：以下、災害衛星総プロと略す）の一環として研究を行っている。

国土管理総プロは、建設省の施策が「国土建設から国土マネジメントへ」に転換してきたことに伴い、国土全体に対する面的で広域かつ定常的な観測・監視を行い、国土管理に必要な諸情報を一体的、包括的に収集、管理、分析し、迅速な情報提供を実現する等の機能を持ち、国土の状況を常時監視し、管理者が適切に対応できる「国土管理技術」を確立する必要性から、スタートしたものである。この中で、航空機SARも国土管理に必要な先端技術として位置付けられており、「SARデータの取得・処理技術の開発」、「SARデータ利用技術の開発」の2課題が、

航空機SARに関する研究として設定されている。

本論文では、これまで国土地理院で行ってきた航空機SARによる観測の概要を紹介すると共に、国土管理総プロ及び災害衛星総プロで行ってきた航空機SAR研究の内、地図作成分野と関わりの深い、DEMの作成とその精度評価、SAR画像による地物の判読性の評価を中心に、研究の中間成果を紹介する。

2. 国土地理院航空機搭載型SARの概要

国土地理院で整備した航空機SAR（以下、GSI-SARと呼ぶ）の外観と仕様を図-2、表-1に示す。Xバンド：波長3.14cm；水平偏波送信／水平偏波受信；分解能：アジマス方向1.5m、レンジ方向1.5mである。オフナディア角は55度から75度まで可変である。プラットフォームは、（株）本田航空所有のセスナ208を使用している。

アンテナが2基あり、1つが送受信アンテナ、もう一つが受信専用アンテナである。両アンテナの基線長は約62cmである。2つのアンテナによる同時受信が出来るため、シングルパス干渉処理によりデジタル標高モデル（DEM）を作成することが可能である（小荒井ほか：1999）。

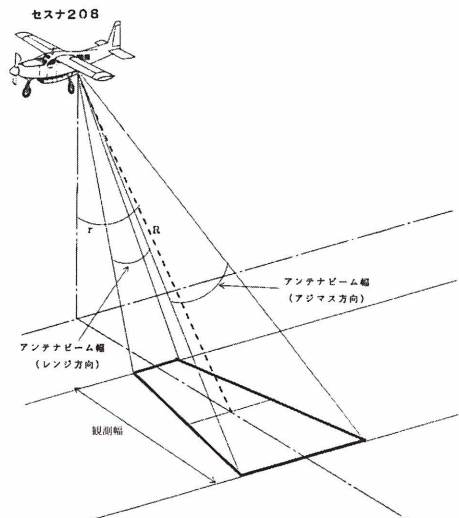
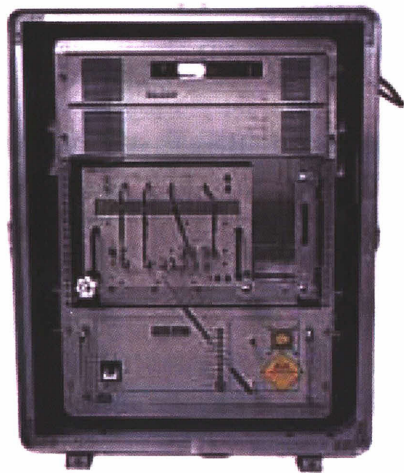


図-1 航空機SAR観測概況図



SAR本体



アンテナ装置

図－2 SAR装置

表－1 航空機SAR仕様

項 目	性 能
送信中心周波数	9.555GHz(Xバンド)
帯 域 幅	100MHz
オフナディア角	55～75° (観測前に設定,観測中は固定)
量子化ビット数	4 ビット／8 ビット
PRF(パ ル ス 繰り返し周波数)	3 ～2000Hz
偏 波	水平偏波送信／水平偏波受信(HH)
送 信 パ ル ス 幅	10 μsec
観 測 幅	～ 5 km
分 解 能	アジマス:1.5m／レンジ:1.5m

3. 観測概要

国土地理院では、これまで航空機SARによる観測等を行ってきた経験がないため、まずは様々な地域について、様々な時期に、様々な対象物を計測して、データの蓄積から行うこととした。平成10年度、11年度の観測内容を表－2に示す。

観測地域は都市域、平野、山地、湿地と様々な地域を観測しており、災害に特徴的な地形など様々なものを対象とした観測を行っている。

国土管理総プロ・災害衛星総プロでの主な研究内容は、以下の通り設定している。平成11年度の観測は、それらの設定を満たすデータが取れるように考慮して、観測内容を決定した。

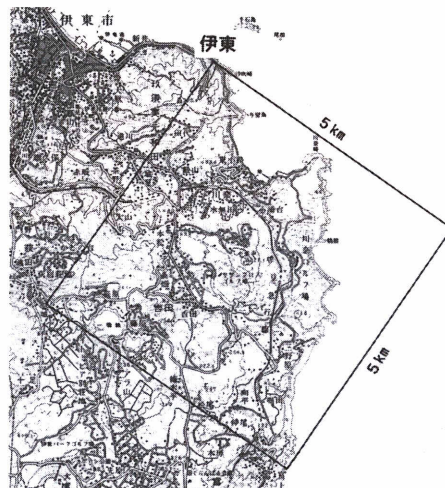
1. 観測方向・オフナディア角を変えて観測を行い、地物のレーダ画像における見え方の違いを調べ、観測目的に応じた組み合わせを検討する。
2. 季節を変えて観測を行い、植生・土壌水分量・地形の凹凸等により、地物のレーダ画像における見え方がどう違うのかを調べ、地形条件・季節に応じた観測方法を検討する。
3. 同一箇所を観測した衛星SAR画像、光学画像と比較し、バンド（周波数）の違い、分解能の違いによる特徴をとりまとめると共に、SAR（衛星・航空機）を用いる場合のメリット・デメリット及びSAR画像の特徴を把握する。
4. 林分構造パラメータ（樹高、林齢、胸高直径等）の異なる場所でコーナリフレクタを用いて航空機SARにより樹高測定を行い、現地測定と比較する。
5. 2時期（活葉期・落葉期）の航空機SARデータによる樹高測定結果と現地測定とを比較し、落葉の影響を評価する。
6. 崩壊地、火山、洪水、都市域を対象に、SAR画像（衛星・航空機）判読カードを作成する。
7. 活動中の地すべり地を対象に航空機SARによるリピート干渉処理を行い、地すべり変動の抽出を試みる。

表－2 観測内容

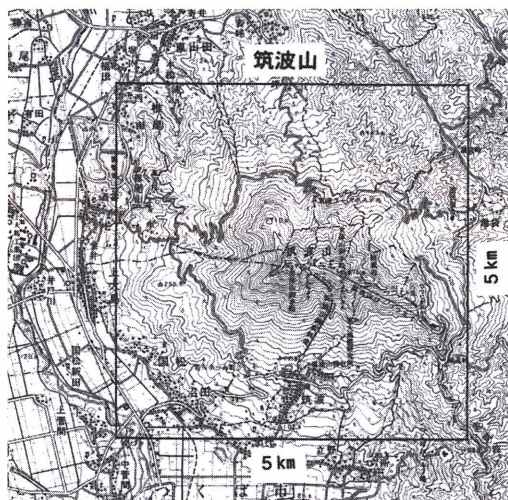
観測地域	地域名	観測対象	観測日	機体位置	観測角
都 市	新 宿	高層ビル等	10/19	西	55度
			10/19	東/西/南/北	65度
			10/19	西	75度
平 野	つくば市 農林研究団地	平坦地形等	10/19	東	55度
			10/19	東/西/南/北	65度
			10/19	東	75度
			12/14	東	65度
山 地	筑波山	起伏地形等	10/19	東	55度
			10/19	東/西/南/北	65度
			10/19	東	75度
			12/14	東	65度
	伊東市 小室山	起伏地形等	2/25	北	65度
			12/15	北	65度
	静岡県 口坂本	地すべり	12/15	北東	65度
	長 野 姫川上流	崩壊地形	10/ 6	北東	75度
湿 地	古河市 遊水地	土壌水分	10/19	東	65度
			12/14	東	65度

※観測年はすべて1999年

図の山地における等高線の間隔は4mであることから、その半分の2m以下の精度は有していると考えられる。この2mという値は以下に述べる航空機SARによるDEMの精度と比較しても十分なものであり、これを用いることにより参照標高を算出することとした。



図－3 伊東観測範囲



図－4 筑波山観測範囲

4. DEMの作成とその精度検証

4－1 研究手法

航空機SARのシングルパス干渉処理によるDEM作成とその精度検証を丘陵地（伊東）と山地部（筑波山）で行った。観測対象範囲は、図－3・4に示す5×5kmの範囲である。伊東は画面のほぼ中央に位置する小室山（標高321m）など比較的標高の高い場所もあるものの、比較的傾斜は穏やかであり航空機から見えない部分もそれほど多くないと予想される。一方、筑波山（標高877m）は傾斜が比較的急峻であるため、単一の画像では多くの影ができることが予想される。このため、DEMの補間の有効性を検討するのに適している地形条件である。

GSI-SARによる観測を1999年の2月（伊東）と10月（筑波山）に実施し、再生画像の作成とDEMの取得を行った。この際、筑波山については後に述べるDEMの合成を実施するために観測データは4方向（東西南北）から取得した。そして、作成されたDEMの精度検証やそれらを用いたオルソ画像作成・精度検証などを行った。

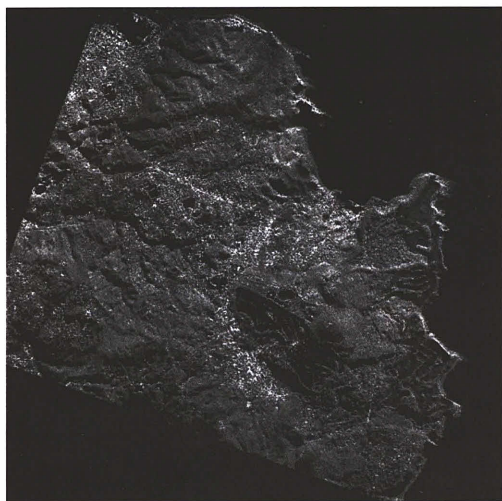
航空機SARにより作成したDEMの精度検証は、1994年11月に伊東周辺を撮影した1：25,000空中写真と、1998年10月に筑波山周辺を撮影した1：30,000空中写真を用いることとした。1：30,000の空中写真でも1万分1地形図を作成するのに十分な精度を持っており、この地形

4－2 再生画像とDEMの作成

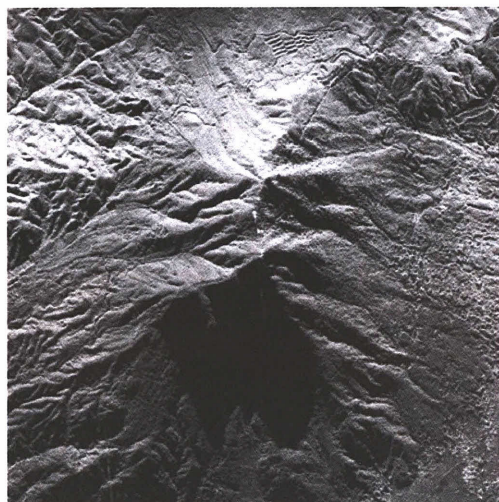
伊東周辺と筑波山付近を観測したデータの再生画像を図－5・6に示す。伊東の画像は北東方向から観測されたものであり、回転によって北が上方になるように補正されている。筑波山の画像は東側から観測されたものであり、回転は施していないため東が上方になっている。いずれも、顕著な影が飛行機と反対側の山体に形成されている。

DEMの取得は2つのアンテナの観測データの位相差を光路差に読み直すことによって行われる。単方向のDEMを作成した段階ですべての画像は幾何補正等を行い、北が上部になるようにしている。取得されたDEMの画像は

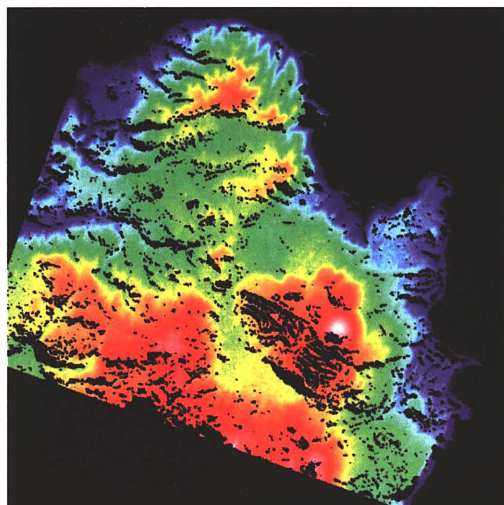
図－7・8の通りである。暖色ほど高い標高、寒色ほど低い標高を示している。図7で示される伊東のDEM画像と比較して図8の筑波山のDEM画像は飛行機の陰になってDEMが示されない黒い部分が多いことが分かる。図－9の上方に示した筑波山における各方向から観測したDEMは、いずれも黒くなっている部分が多い。図－10で示されるように、筑波山におけるDEMの取得率は単方向では4割程度と低く、筑波山の山体を表現するには不十分である。これは同時に、火山などの観測においてSARのセンサの反対側になっているところについては、溶岩の噴出量などの計測等が全くできないことを示している。



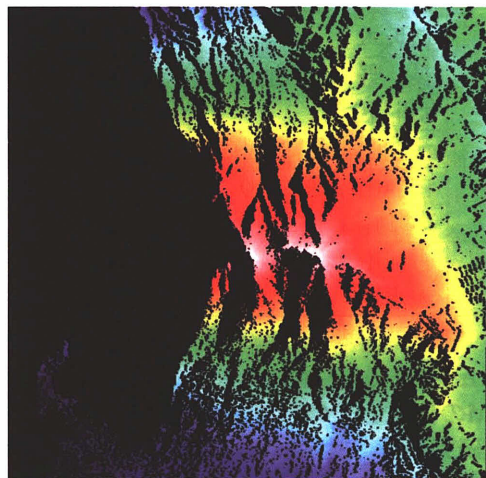
図－5 伊東SAR再生画像



図－6 筑波山SAR再生画像



図－7 伊東DEM画像



図－8 筑波山DEM画像

4-3 DEMの合成

筑波山について2つの相対する方向から観測されたDEMを統合するという処理を行った。組み合わせ方は、図－9に示す東と西、南と北を採用した。方法は、解析範囲5×5km中に10×10mおきに並んでいる格子点それぞれに対して、2つのDEMデータにどちらかでも同じ場所にデータがあるときにはそれを採用し、双方にある場合は平均値を新しい標高値として代入した。双方共にデータが欠損している場合は合成前と同様にデータが欠損しているとみなした。

これにより図－10の通りデータの完全性は約3／4まで改善した。ただ、この場合でも飛行機から見てアジマス方向に伸びるような谷などについては補間が仕切れていない。

このことを踏まえて、東西のDEMと南北のDEMを合成するという処理を行った。処理方法は2方向のDEM同士を合わせるのと全く同様である。その結果、図－10の通りデータの完全性は9割を大きく超え、ほとんど欠損がなくなったと言える（図－9の最下部）。

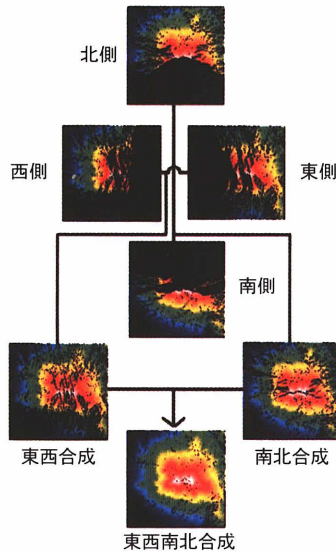


図-9 4方向DEMの合成

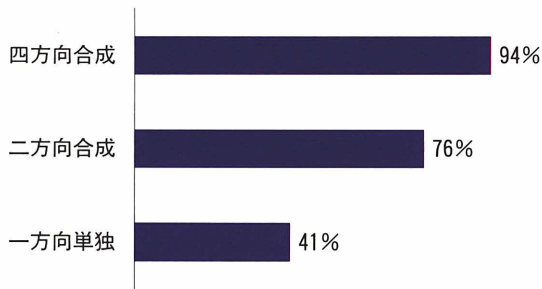


図-10 DEMの合成程度とデータの完全性の関係

4-4 DEMの精度検証

以上のことから、DEMの合成はデータの完全性を高める上で非常に有効であることが分かった。次に、作成されたそれぞれのDEMについて、精度面からどのような効果があったのかについて検討を行った。まず、先に述べた空中写真によるDEMを参照値として航空機SARによるDEMの誤差を各格子点において計算するという作業を作成したすべてのDEMについて行った。その結果を表-3に示す。

伊東・筑波山ともに、単方向から観測したDEMは10m程度の標準偏差を持っているという結果が出た。これは、5万分1地形図の精度には多少及ばないものの、詳細なDEMを作成することができることを示している。

次に、筑波山における合成後のDEMについて同様に検討する。まず、2方向合成のものについてであるが残念ながら精度はほとんど良くなってはいない。この原因として一番考えられるのは、DEMの合成の際に双方向のデータが共に存在する場所が1~2割程度と極めて少なかったことが挙げられる。すなわち、DEMの合成はデータの完全

性を高めるためだけに働いたといえる。一方で、4方向のものについては2方向合成DEMと比較して両方とも値が上回っていることから精度も向上したと考えられる。これは、4方向合成の場合は、合成前の2方向ずつのデータが重なる割合が7~8割と多く、ランダムに起こるエラーを減らす方向に働いたためと思われる。すなわち、東西南北のDEMを合成することは単にデータの欠損を補うだけでなく、誤差の分散や抑制に対しても効果があることが明らかとなった。

表-3 航空写真DEMとSARDEMの比較

単位：m	ずれの絶対値	差分の標準偏差
伊 東	7.5	9.7
筑波山・東	9.1	7.7
筑波山・西	11.1	13.6
筑波山・南	7.5	8.8
筑波山・北	7.7	9.6
東 西 合 成	9.9	11.4
南 北 合 成	7.5	9.5
全 方 向	7.4	9.0

5. SAR画像の判読について

SAR再生画像を用いた地図作成可能性を検討するため、道路の判読性について検討を行った（山田ほか：2000）。平野部（つくば市農林研究団地周辺）と山地部（筑波山）の秋（10月）の再生画像について、様々な観測方向、オフナディア角の画像について、道路の真幅毎に判読率と誤読率を求めた。ここでは、「平成7年度つくば市作成1万分1都市計画図」に描画されている道路を正解データとして取り扱った。ここで、判読率=判読距離÷総道路距離×100、誤読率=誤読距離÷（判読距離+誤読距離）×100である。平野部での結果を表-4に、山地部での結果を表-5に示す。

幅4m以上の道路ではおおよそ7割から9割が判読できている。オフナディア角が大きい方が判読率が悪くなっている傾向が認められる。幅2~4mでは、平野部・山地共約半数の判読率である。2m以下の幅の道路では、平野部ではほとんど判読できないのに対して、山地の方の判読率がそれほど悪くはなっていない。

今後は、オフナディア角と地形の関係や観測方向と道路の延びている方向の関係など、様々な判読特性について検討する予定である。また、道路以外の項目についても判読特性を検討して、SAR画像の判読マニュアルを作成する予定である。

表－４ 平野部における道路判読率(%)

	東55°	東65°	東75°
道路幅 1m 未満	0.0	0.0	0.0
1～2m未満	13.4	16.3	17.4
2～4m未満	54.7	55.8	47.9
4 m 以上	95.4	83.4	73.0
誤読率 1 m 未満	0.0	0.0	100.0
2～4m未満	11.7	12.5	14.8

道路幅 1～2 m未満、4 m以上については、誤読はなかった。

表－５ 山地部における道路判読率(%)

	北55°	西65°	南75°	東65°	東75°
道路幅 1m 未満	28.3	59.1	14.9	31.0	9.1
1～2m未満	12.1	37.2	10.6	22.2	51.2
2～4m未満	58.9	52.4	63.9	46.9	55.2
4 m 以上	67.0	55.4	95.0	91.6	72.5
誤読率 1 m 未満	0.0	0.0	50.0	0.0	20.7
2～4m未満	1.8	11.6	7.8	17.5	3.2
4 m 以上	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6

道路幅 1～2 m未満については、誤読はなかった。

現地計測は、池田計器製作所の土壌水分計ML 2 シータプローブを使用した。観測地としては、沼地の畔、草地(公園)、河原で計測しており、その結果は表－6に示す。測定結果は、秋(10月)よりも冬(12月)の方が土壌水分量がいずれの箇所においても低下している。平成12年度は、夏の時期(7月)のデータ取得も行っており、これら3時期の土壌水分の影響について、SAR再生画像においてこれらが後方散乱の違いとして出ているのか、検討を開始したところである。

表－６ 土壌水分量の現地計測結果単位(V)

観測地名\観測月	10月	12月	差分
公園内草地	0.760	0.664	－0.096
谷中村役場跡	0.795	0.681	－0.114
雷電神社跡	0.802	0.755	－0.047
沼A	0.959	0.956	－0.003
沼B	1.008	0.994	－0.014
沼C	0.848	0.823	－0.025
河原A	0.906	0.823	－0.083
河原B	1.013	0.929	－0.084

6. 国土管理への適用性について

前章まで、地図作成分野に直結したDEM作成や地物の画像判読の研究成果を紹介した。ここでは、それ以外の国土管理に関する航空機SARの研究(小荒井ほか:2000)について、進捗状況を含めて簡単に紹介する。

6－1 植生影響の評価について

ステレオマッチングにより作成したDEMは樹木の上部の標高を示すことになり、地表の標高を示すものではない。マイクロ波は葉をある程度は透過することが知られており、SARで作成したDEMの植生影響については、評価が必要である。このため、つくば地区(果樹試験場内等)において広葉樹林の内外にコーナリフレクタを置き、活葉期(秋:10月)と落葉期(冬:12月)の2時期観測を行い、再生画像における後方散乱の違いから、植生種類毎、樹木密度毎の電波透過率、反射率の違いを調査した。平成12年度は、夏の時期(7月)のデータ取得も行っており、これら3時期の植生の影響について検討を行っているところである。

現在のところ、平野部においてDEM作成がうまくなされておらず、DEM作成ソフトのアルゴリズムそのものからの再検討を行っているところである。

6－2 湿地のモニタリング

マイクロ波は植生の他、土壌水分量にも反応する事が知られている。環境モニタリングへの航空機SARの適応として、湿地の乾燥問題等に関してSARでどの程度モニタリングできるか等を検討するため、SAR観測と同時に古河の渡良瀬遊水池で土壌水分の現地同時計測等を行った。

6－3 災害状況把握

災害状況把握の対象としては、崩壊地(植被地と裸地の違い、地すべり特徴地形の抽出)、火山(噴煙下での特徴地形の抽出、溶岩・火砕流・土石流等による地形変化)、洪水(冠水域の抽出と時間変化)、都市地物(建物の形状変更の抽出、建造物と破碎建造物の後方散乱の違い)等が考えられる。平成11年度の観測として、火山、地すべり、崩壊地等については行っているため、今後これらについて検討していく予定である。

また、現在活動中の地すべり地を対象にリピート干渉処理を行い、地すべり変動の抽出を試みる予定で、白山の甚之助谷地すべり地において第1回目の計測を行った。第2回目の観測は、平成12年の9月に行う予定である。

なお、この部分の研究は、災害衛星総プロでの研究内容である。

7. まとめ

以上、国土地理院における航空機SARの研究について、国土管理総プロ及び災害衛星総プロの初年度を含むここ2年間の観測状況とその結果を報告した。まずは、様々な観測を様々な条件で行い、観測データを多く取得することに主眼をおいて行っており、データの蓄積が進められてきている。その内、地図作成に関する部分については、DEMの作成と精度評価を含め、成果が出てきている。

約10mの標準偏差というDEMの標高精度は、5万分1地形図の等高線精度とほぼ同等であり、国内における地図作成という視点から見た場合には、まだまだ不十分である。しかしながら、全天候型という利点を考慮すると、ま

だ十分な精度の地形図の無い雲に覆われていることの多い熱帯雨林地帯などでの地図作成など、海外での利用には十分な精度があるものと考えられる。

国内の利活用という視点では、10m程度の標高精度でも有効な地形変化のモニタリングという点で、溶岩ドームの成長に伴う隆起や、火砕流や土石流による大規模な地形変化が想定される火山地域での活用が期待される。火山は麓が晴天でも山頂部が雲に覆われていることが多く、全天候型のSARの特徴が十分活かされるものと考えられ、噴火の危険性等から上空の飛行が制限された場合でも、サイドルッキングであることから、計測の機会は制限されないことが多い。

ただし、この全天候型というのはSAR本体の機能であり、プラットフォーム自体は有視界飛行のセスナ機であるために、飛行場周辺の天候が不良である場合や、飛行高度に雲がある場合などは、計測することが出来ず、プラット

フォーム自体の制限も考慮しなければならない。現に、1999年12月の観測では郵政省通信総合研究所／宇宙開発事業団所有の航空機SAR（PI-SAR）（浦塚ほか：1999）との同期観測を予定していたが、PI-SARはプラットフォームがジェット機であるため、当時曇りの天候でPI-SARでは観測が行えたが、GSI-SARでは観測が行えず、機動性の弱点を示すこととなった。

今後は、平成11年度までに計測した画像、平成12年夏季に計測した画像について、判読性の検証も含めて、様々な国土管理及び災害時ニーズを想定した検討を行っていく予定である。また、GSI-SARは理論的には約5m程度の標高精度（標準偏差）が期待できる（岡谷ほか：投稿中）ので、より精度の高いDEMの作成に向けて、コーナリフレクタ等のGCPの活用等の工夫を行っていく予定である。

参 考 文 献

- 浦塚清峰・小林達治・梅原俊彦・灘井章嗣・佐竹誠・黒須隆志・松岡建志・島田政信・若林裕之・大倉博：航空機搭載SAR（PI-SAR）によるX-SAR／SRTM地形観測検証実験、日本リモートセンシング学会第27回学術講演予稿集、167-168.
- 岡谷隆基・小荒井衛・茂木公一・渡辺信之・山田陽子・松尾馨（投稿中）：航空機SARを用いた急峻地形地におけるDEMの抽出とその応用、写真測量とリモートセンシング、
- 小荒井衛・岡谷隆基・茂木公一・渡辺信之・山田陽子・松尾馨（2000）：国土地理院航空機搭載型合成開口レーダによる観測結果とその地理学的応用、第57回日本地理学会春季学術大会予稿集、224-225.
- 小荒井衛・茂木公一・渡辺信之・岡谷隆基・山田陽子・松尾馨（1999）：航空機SARにより作成したDEMの精度検証、日本リモートセンシング学会第27回学術講演予稿集、275-278.
- 山田陽子・小荒井衛・茂木公一・渡辺信之・岡谷隆基（2000）：航空機XバンドSAR観測結果の判読について、日本リモートセンシング学会第28回学術講演予稿集、199-200.