

地球科学における SAR 差分インターフェロメトリの応用例と 地熱レザパーモニタリングへの適用可能性

浦井 稔*・山口 靖**

URAI Minoru and YAMAGUCHI Yasushi (1996) Applications of Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry to the Earth Sciences : Potential for Geothermal Reservoir Monitoring. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.47(1), p.23-31, 5 figs., 1 table.

Abstract : Differential Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry can be used to detect deformations of the earth's surface. Some of the types of deformations that can be detected, and their temporal and spatial scales are reviewed in this study. In particular, differential SAR interferometry may be used to detect deformation of the earth's surface induced by vapor production in geothermal system. It is concluded that effective monitoring of surface deformation associated with geothermal reservoirs requires long-term observation and use of short wavelength sensors such as C-band SAR.

要 旨

地熱発電所の付近においても、蒸気の生産に伴う地形の変化が報告されているが、地形変化を検出するための測量は費用的な面や技術的な面で困難な場合が多かった。二次元的な地形変化を数 cm の精度で測定する方法として、SAR (Synthetic Aperture Radar: 合成開口レーダ) の差分インターフェロメトリ技術が注目されている。SAR 差分インターフェロメトリの原理および地球科学への応用例についてレビューすることによって、この技術で検出可能な地形変化の時間的、空間的な特性を検討した。これを基に、SAR 差分インターフェロメトリの地熱レザパーモニタリングへの応用について考察した。その結果、波長の短い SAR センサを用いて長期間の観測を行えば、地熱地帯の二次元的な地形変化は SAR 差分インターフェロメトリによって検出可能であることがわかった。検出された二次元的な地形変化から地熱レザパーモニタリングが可能であると考えられる。

1. はじめに

地下水の汲み上げによって地盤沈下が起こることはよく知られている。地熱発電所の付近においても、蒸気の生産に伴う地形の変化が報告されている。米国の Geysers 地熱地帯においては、蒸気圧の減少がほぼ最大の地点で、4年半の期間に 13 cm の沈降が観測された (Lofgren, 1978)。イタリアの Travale-Radicondoli 地熱地帯においても、蒸気の生産によると見られる 10 年間に 20 cm 以上の沈降が観測された (Geri *et al.*, 1985)。このような地形変化は、重力値の変化や蒸気圧の変化とともに、地熱レザパーモニタリングなどの研究に使用することができる (Denlinger *et al.*, 1981)。

しかし、地熱レザパーモニタリングなどの研究に必要な数 10 km²におよぶ地域の地形変化を、数カ月から数年毎に数 cm の精度で測量するには、多大の費用を必要とする。また、地熱地帯は山岳地にあることが多く、測量が困難な地点が多い。

* 地殻物理部

** 国際協力室

Keywords : geothermal reservoir, monitoring, surface deformation, Synthetic Aperture Radar, differential interferometry, remote sensing

二次元的な地形変化を数 cm の精度で測定する方法として、SAR (Synthetic Aperture Radar: 合成開口レーダ) の差分インターフェロメトリ技術が注目されている。この SAR インターフェロメトリ技術は、後述するように、地表に現れた地震断層による地形変化の検出やマグマの貫入に伴う火山体の地形変化の検出に応用され、多大の成功をおさめている。

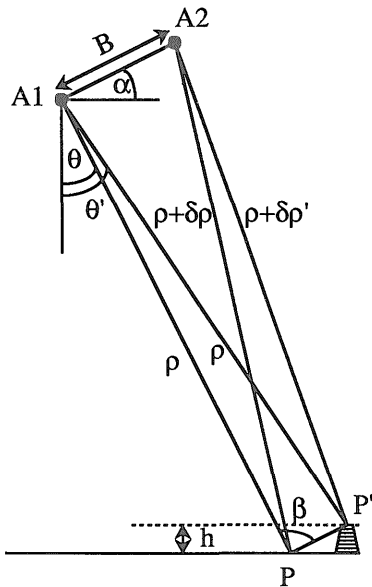
本論文では、SAR 差分インターフェロメトリの原理および地球科学への応用例についてレビューすることによって、この技術で検出可能な地形変化の時間的、空間的な特性を検討した。これを基に、SAR 差分インターフェロメトリの地熱レザバースモニタリングへの応用について考察した。

2. SAR 差分インターフェロメトリの原理

SAR 差分インターフェロメトリの原理については、Gabriel *et al.* (1989), Zebker *et al.* (1994) および Massonnet and Rabaute (1993) などで詳しく解説されている。ここでは Massonnet and Rabaute (1993) および Zebker *et al.* (1994) にそって簡単に説明する。

2.1 二つの軌道から観測される SAR 信号の位相差

A1 および A2 の両方の軌道から、SAR で標高 0 m



第 1 図 SAR インターフェロメトリにおけるレーダー撮像ジオメトリ

Fig. 1 Radar imaging geometry for SAR interferometry.

の点 P を観測したとする (Fig. 1)。A1 から照射されたマイクロ波は地表の点 P で散乱され、その散乱波の強度と位相が A1 で観測される。A2 についても同様に、散乱波の強度と位相が観測される。A1 で観測された散乱波の位相と A2 で観測された散乱波の位相の差 ϕ は、A1 と P の間の距離を ρ 、A2 と P の間の距離を $\rho + \delta\rho$ とすれば、

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\rho + 2N\pi + C \tag{1}$$

と等しい。ここで、 N は ϕ を $0 \sim 2\pi$ にするための整数、 C は観測機器に固有の定数である。一方、(1) は余弦定理によって、

$$(\rho + \delta\rho)^2 = \rho^2 + B^2 - 2\rho B \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \theta\right) \tag{2}$$

と表すことができる。ここで B は A1 と A2 の間の距離、 θ はオフナディア角、 α は A1 から見た A2 の方向である。(2) を展開して両辺を ρ^2 で除算すれば、

$$2 \frac{(\delta\rho)}{\rho} + \left(\frac{(\delta\rho)}{\rho}\right)^2 = \left(\frac{B}{\rho}\right)^2 + 2 \frac{B}{\rho} \sin(\theta - \alpha) \tag{3}$$

が得られる。二次の微小量を見捨れば、

$$\delta\rho = B \sin(\theta - \alpha) \tag{4}$$

となる。したがって、二つの軌道から観測される SAR 信号の位相差 ϕ は、(1) と (4) から、

$$\phi = \frac{4\pi B \sin(\theta - \alpha)}{\lambda} + 2N\pi + C \tag{5}$$

で表現できる。

A1 と A2 の軌道が平行であれば、 ϕ は θ のみの関数となる。

2.2 標高による位相差

A1 および A2 の両方の軌道から、SAR で標高 h の点 P' を観測したとする (Fig. 1)。A1 から点 P' と A2 から点 P' との距離差 $\delta\rho'$ は、(4) と同様に

$$\delta\rho' = B \sin(\theta' - \alpha) \tag{6}$$

と表現される。また、A2 から点 P と A2 から点 P' との距離差は、

$$\begin{aligned} \Delta\rho_a &= \delta\rho - \delta\rho' \\ &= B \sin(\theta - \alpha) - B \sin(\theta' - \alpha) \end{aligned} \tag{7}$$

と表現される。θ と θ' の差は極めて小さいので、(7)は、

$$\Delta\rho_a = B(\theta - \theta')\cos(\theta - \alpha) \quad (8)$$

に近似することができる。一方、角 β はほぼ直角となるため、

$$h = \rho(\theta' - \theta)\sin(\theta) \quad (9)$$

で表現できる。このため、

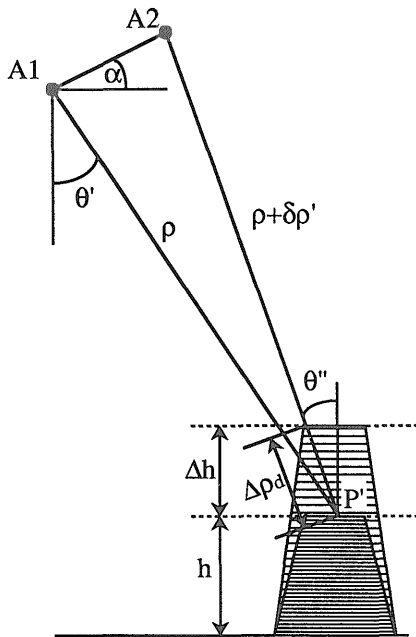
$$\Delta\rho_a = -\frac{hB\cos(\theta - \alpha)}{\rho\sin(\theta)} \quad (10)$$

となる。したがって、二つの軌道から観測される SAR 信号の位相差 φ は、

$$\phi = \frac{4\pi B\cos(\theta - \alpha)}{\lambda} + \frac{4\pi hB\cos(\theta - \alpha)}{\lambda\rho\sin(\theta)} + 2N\pi + C \quad (11)$$

で表すことができる。

(11)の右辺の第1項目は観測ジオメトリに依存する項である。第2項目は標高と観測ジオメトリに依存する項である。第3項目は、位相のオーバーラップのために失わ



第2図 SAR 差分インターフェロメトリにおけるレーダー撮像ジオメトリ

Fig. 2 Radar imaging geometry for differential SAR interferometry.

れた距離に関する情報であるが、離散的な値をとるため ρ が衛星進行方向や θ に関して連続的に変化すると仮定すれば、推定できる。最後の項は、観測機器に固有の定数である。したがって、観測ジオメトリが明確であり、ρ が衛星進行方向や θ に関して連続的に変化すると仮定すれば、二つの軌道から観測される SAR 信号の位相差から標高を求めることができる。これを SAR インターフェロメトリと呼ぶ。

2.3 地形の変化による位相差

A1 から観測した時の点 P' の標高は h であったが、その後、地殻変動等で点 P' の標高が変化し、A2 から観測した時点では h + Δh であったとする (Fig. 2)。P' の標高が Δh 変化したために生じた A2 と P' の距離の変化は、θ'' が Fig. 1 の θ にほぼ等しいとして、

$$\Delta\rho_a = \frac{\Delta h}{\cos(\theta)} \quad (12)$$

となる。A1 と A2 の二つの軌道から観測される SAR 信号の位相差 φ は、

$$\phi = \frac{4\pi B\cos(\theta - \alpha)}{\lambda} + \frac{4\pi hB\cos(\theta - \alpha)}{\lambda\rho\sin(\theta)} - \frac{4\pi\Delta h}{\lambda\cos(\theta)} + 2N\pi + C \quad (13)$$

で表現できる。

(13)の右辺の第3項目は標高の変化と観測ジオメトリに依存する項であり、その他の項は(11)と同じである。したがって、観測ジオメトリと標高が明確であり、ρ が衛星進行方向や θ に関して連続的に変化すると仮定すれば、二つの軌道から観測される SAR 信号の位相差によって標高の変化を求めることができる。これを SAR 差分インターフェロメトリと呼ぶ。

ここでは、標高の変化に限って説明したが、標高変化を伴わない水平方向の地形変化も、対応点と衛星の距離 ρ が変化すれば SAR 差分インターフェロメトリでその変位を検出することができる。

2.4 SAR 差分インターフェロメトリの感度および精度

前章までの説明で、SAR 差分インターフェロメトリで標高の変化が観測できることがわかった。しかし、既存の地形モデルの精度は観測しようとする標高の変化より悪い場合が多いと考えられる。このような場合でも SAR 差分インターフェロメトリが適用可能であるかとの疑問が生じる。このため、SAR 差分インターフェロメトリで

観測される位相差の、標高および標高変化に関する、感度解析を実施した。(13)を h および Δh で微分すると

$$\frac{\partial \phi}{\partial h} = \frac{4\pi B \cos(\theta - \alpha)}{\lambda \rho \sin(\theta)} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \Delta h} = -\frac{4\pi}{\lambda \cos(\theta)} \quad (15)$$

が得られる。両者の比の絶対値は $\frac{B \cos(\theta - \alpha)}{\rho \tan(\theta)}$ である。この値は、衛星からの観測の場合、 $\frac{1}{100}$ より小さくなることが多い。このため、二つの軌道から観測される SAR 信号の位相差は、標高よりも標高の変化に強く依存する。

位相差の観測誤差が ϕ_e であったとすると、観測標高変化の誤差 Δh_e は

$$\Delta h_e = -\frac{\lambda \cos(\theta)}{4\pi} \phi_e \quad (16)$$

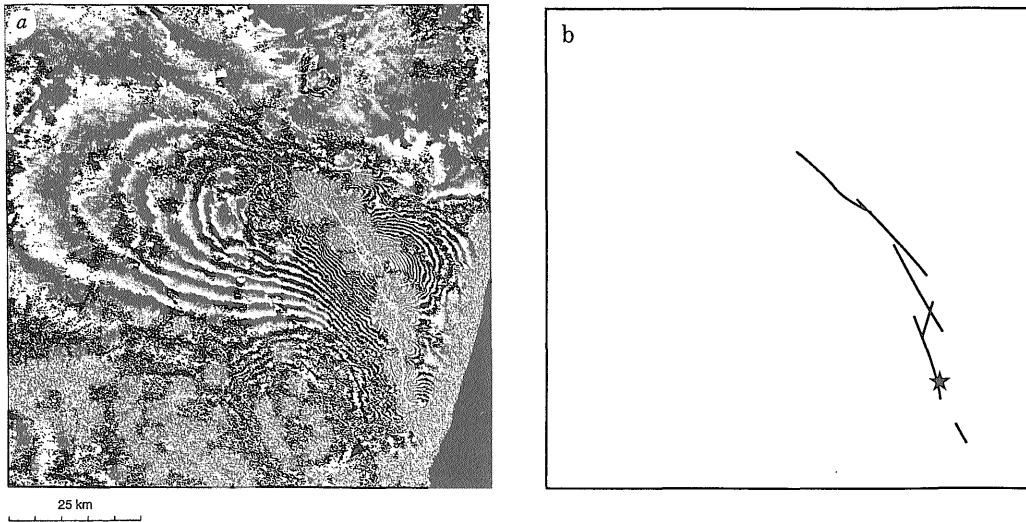
となる。

3. 利用可能な衛星データ

Gabriel *et al.* (1989) は、SEASAT 衛星のデータに SAR 差分インターフェロメトリを適用して、灌漑による土壌の膨張および収縮による数 cm の標高変化を検出した。この研究は、SAR 差分インターフェロメトリが地球科学分野の研究に有効であることを示した。しかし、SEASAT 衛星の運用は 1978 年の打ち上げ後数カ月で停止しており、1991 年に ERS-1 衛星が打ち上げられるまで、SAR 差分インターフェロメトリを適用できる衛星データは得られなかった。

現在、SAR 差分インターフェロメトリに利用可能な衛星センサは、欧州宇宙機関が打ち上げた ERS-1 と ERS-2 衛星に搭載された AMI センサ (Francis *et al.*, 1991) および日本が打ち上げた JERS-1 衛星 (Yamaguchi *et al.*, 1991) に搭載された SAR センサである。また、1995 年にはカナダの RADARSAT 衛星が打ち上げられた。

ERS-1 衛星は太陽同期軌道を周回し、その回帰日数は 3 日、35 日、176 日の一つを選択できる。イメージ(SAR)



第3図 ランドース地震に関連したインターフェロメトリック・フリンジと地表の断列 (Massonnet *et al.*, 1993) に加筆修正)

a : 地震前 (4月24日) と地震後 (8月7日) 撮像された ERS-1 AMI 画像のペアから得られたインターフェロメトリック・フリンジ。濃度変化の1サイクルは28mmのレンジ距離の変化に対応する。

b : 地表の断列。実線および★印はランドース地震に伴う断列と震央の位置を示す。

Fig. 3 Interferometric fringes related to the Landers earthquake and the surface rupture (modified from Massonnet *et al.*, 1993).

a: Interferometric fringes obtained with the pair of ERS-1 AMI images taken before (24 April) and after (7 August) the earthquake. One cycle of gray shading represents a range difference of 28mm.

b: Surface rupture. Solid lines indicate surface rupture associated with the Landers earthquake. A star indicates the epicenter of the Landers earthquake.

モードにおいて, AMI センサの観測幅, 空間分解能, 観測波長はそれぞれ 100 km, 30 m, 5.7 cm (C バンド) である. このため, 位相測定誤差を $2\pi/5$ 程度と仮定すれば, AMI センサは数 100 km²以上の範囲における 1 cm 以上の地形変化を検出できる可能性がある. また, 1995 年に ERS-2 衛星が 50 分遅れの ERS-1 衛星と同一軌道に投入されたことによって, 衛星の回帰を待たずに SAR インターフェロメトリ技術による地形図の作成が可能 (Butler, 1995) となるばかりでなく, 観測時刻のずれの間 (50 分間) に生じた地形変化が観測できる可能性がある.

JERS-1 は太陽同期軌道を周回し, その回帰日数は 44 日である. SAR センサの観測幅, 空間分解能, 観測波長はそれぞれ 75 km, 18 m, 23.5 cm (L バンド) である. このため位相測定誤差を $2\pi/5$ 程度と仮定すれば, SAR センサは数 100 km²以上の範囲における数 cm 以上の地形変化を検出できる可能性がある.

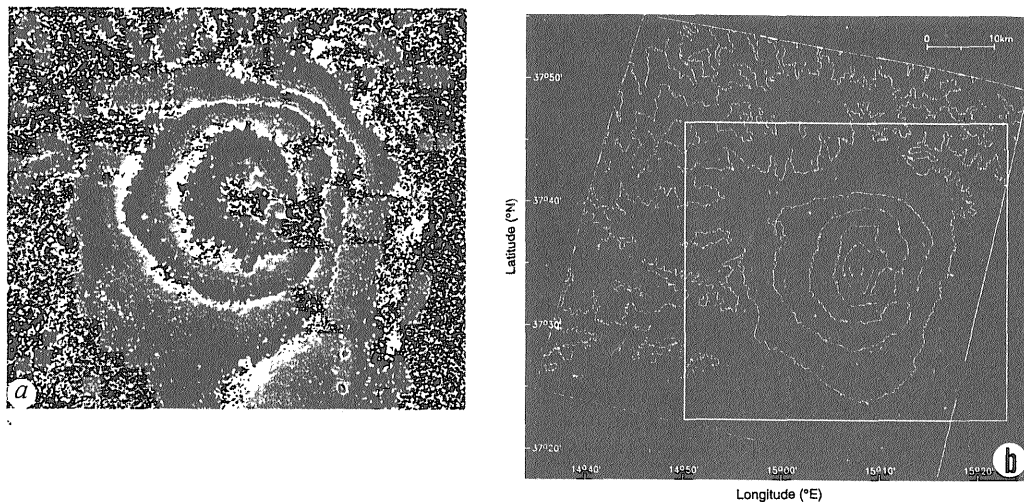
4. SAR 差分インターフェロメトリの応用例

SAR 差分インターフェロメトリは広域の地形変化を高

精度で捉えることができるため, さまざまな地球科学分野に応用できると考えられる. とりわけ, 地震による地形変化, 火山体の地形変化および氷河・海氷の動きの検出については注目すべき研究がなされている. 以下に, これらの分野に関する最近の研究結果を紹介する.

4.1 地震による地形変化の検出

Massonnet *et al.* (1993) は, 地震が発生する前後の ERS-1 AMI データとデジタル地形モデルを用いて, 1992 年に米国カリフォルニア州ランダースで発生したマグニチュード 7.3 の地震に伴って地表に現れた地震断層による地形変化を二次元的に捉えた (Fig. 3). 地形変化は現地調査による地震断層の変位と一致した. Zebker *et al.* (1994) は同じ地震断層による地形変化を ERS-1 による 3 回の観測データから, 地震断層付近の地殻が数 km から数 100 m のブロック状に割れたことを示した. さらに, Massonnet *et al.* (1994) は同地震の余震に伴う数 cm の地形変化を捉えた. 同様に, Peltzer and Rosen (1995) および Massonnet and Feigl (1995) は 1993 年に米国カリフォルニア州とネバダ州の境界で発生したマ



第 4 図 エトナ山におけるインターフェロメトリック・フリンジとその位置図 (Massonnet *et al.*, 1995 に加筆修正)

- a : 385 日の期間において撮像された ERS-1 AMI 画像のペアから得られたインターフェロメトリック・フリンジ. 濃度変化の 1 サイクルは 28mm のレンジ距離の変化に対応する
b : 位置図. 小さい四角形は a の位置を示す.

Fig. 4 Interferometric fringes at Mount Etna and the location map (modified from Massonnet *et al.*, 1995).

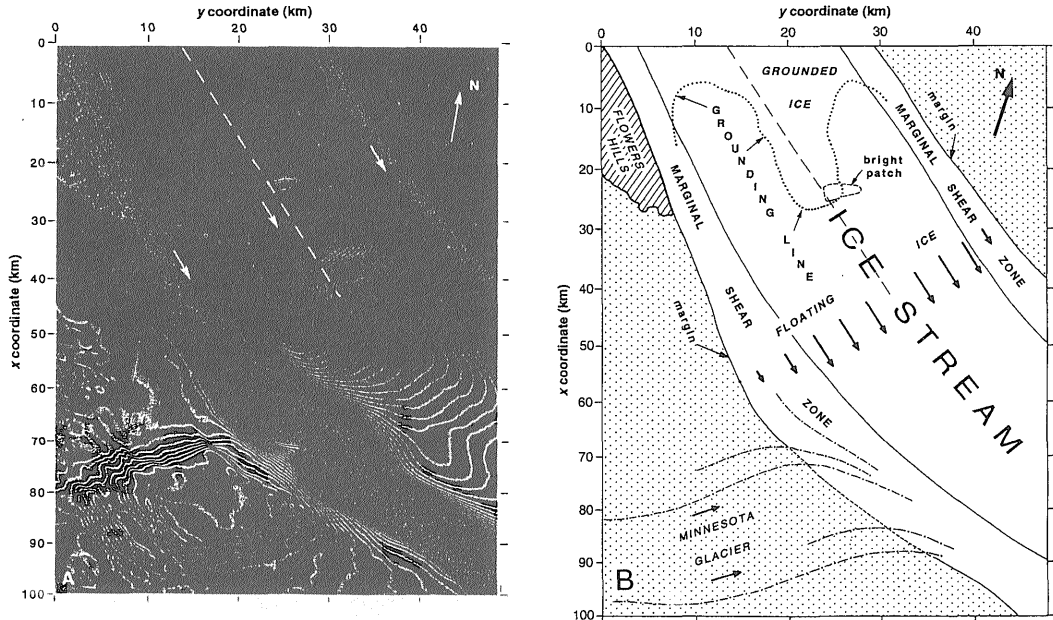
- a : Interferometric fringes obtained with the pair of ERS-1 AMI images taken 385 days separation. One cycle of gray shading represents a range difference of 28mm.
b : Location map for features in (a). The smaller box indicates the location of (a).

マグニチュード 6.1 のヨーロッパ地震によって震央付近に最大 10 cm の地盤沈下が生じたことを示した。

Murakami *et al.* (1995) や Kawai *et al.* (1995) は, JERS-1 SAR のデータから, 1994 年に米国カリフォルニア州ノースリッジで発生したマグニチュード 6.7 の地震による地盤沈下が最大 20 cm であったことを示した。

同様に, 村上ほか (1995) は平成 7 年兵庫県南部地震 (マグニチュード 7.2) によって地表に現れた地震断層による地形変化を二次元的に捉えた。

これらの例から, 地震の前後に SAR 差分インターフェ



第 5 図 南極のラトフォード・アイスストリームで得られたインターフェログラム (Goldstein *et al.*, 1993 による)

A: 6 日の期間において撮像された ERS-1 AMI 画像のペアから得られたインターフェロメトリック・プリンジ。濃度変化の 1 サイクルは 28mm のレンジ距離の変化に対応する。

B: A の位置図。

Fig. 5 Interferogram of an area that includes a portion of the Rutford Ice Stream, Antarctica (after Goldstein *et al.*, 1993).

A: Interferometric fringes obtained with the pair of ERS-1 AMI images taken 6 days separation. One cycle of gray shading represents a range difference of 28mm.

B: Location map for features in (A).

第 1 表 SAR 差分インターフェロメトリによって検出された地質現象の最大変形速度と空間的広がり
Table 1 Maximum deformation rates and spatial extents of geological phenomena detected by Differential SAR Interferometry.

Geological phenomena	Maximum deformation /day	Maximum deformation /month	Maximum deformation /year	Spatial extent	Reference
Earthquake	6m	6m	6m	>100km ²	Massonnet <i>et al.</i> (1993)
Volcano	-	2cm	14cm	>100 km ²	Massonnet <i>et al.</i> (1995)
Ice Sheet	1m	30m	390m	>1000km ²	Goldstein <i>et al.</i> (1993)

ロメトリによる良好なデータが得られれば、地表に現れた地震断層や地震による地盤沈下はほぼ確実に検出できると考えられる。

4.2 火山体の地形変化の検出

火山地域においては、火山体が変形することによって地形変化が生じる場合と溶岩等が噴出して地表に堆積したために地形変化が生じる場合がある。溶岩等が噴出して地形変化が生じた場合には、地表の物質が置き換わるため、地形変化の前後に取得された SAR データの間に相関が無くなる。この場合には、地形変化の前後に取得された SAR データの位相差を検出することができなくなるため、SAR 差分インターフェロメトリは適用できない。したがって、火山体の変形することによる地形変化にのみ SAR 差分インターフェロメトリを適用することができる。

Massonnet *et al.* (1995) は、SAR 差分インターフェロメトリをイタリアのエトナ火山の ERS-1 AMI データに適用して、385 日間に火山体が最大 10 数 cm 収縮したことを示した (Fig. 4)。

雲仙火山において溶岩ドーム以外の地点で数 m の地形変化が観測されていること (安田ほか, 1991; 安田ほか, 1993) から、良好なデータが得られれば、この地域においてもマグマの貫入に伴う火山体の地形変化が、SAR 差分インターフェロメトリの適用によって捉えられることが期待される。

4.3 氷河・海水の動きの検出

Goldstein *et al.* (1993) は、SAR 差分インターフェロメトリを南極の氷河の ERS-1 AMI データに適用して、6 日間の間に生じた数 m の氷河の流れを捉えた (Fig. 5)。このとき、氷河の運動の精度は、垂直方向約 1.5 mm、レーダー照射方向の水平方向は 4 mm であった。この精度は、ほかの例に比較して高い。これは、観測地域が人工雑音の少ない地域であることや、観測間隔が短期間であったため地表のマイクロ波散乱特性の変化が少ないことによると推定される。

SAR 差分インターフェロメトリを適用することによって、氷河・海水の動きを高精度で検出できる。このため、氷河の運動の解明や地球規模の気候変動と雪氷圏の関係の解明等の新たな研究への応用が期待される。

5. 地熱レザバーモニタリングへの応用

これまでに地熱レザバーの地形変化を SAR 差分インターフェロメトリによって観測した例は報告されていない。

これは、地熱レザバーの時間的地形変化率 (数 cm/年程度) が、今までに SAR 差分インターフェロメトリによって観測された地質現象に伴う地形変化に比較して小さいためであろう (Table 1)。このため、地熱レザバーの地形変化を SAR 差分インターフェロメトリによって観測するためには、時間的地形変化率が大きい地熱地域に適用すること、および、以下の点に注意する必要がある。

5.1 観測波長

SAR 差分インターフェロメトリの地形変化検出精度は観測波長が短いほど高くなることから、短い波長のマイクロ波を使用した観測システムを使用しなければならない。現在、運用されている衛星 SAR システムの中で最も短い波長を使用したセンサは C バンドの ERS-1、ERS-2 の AMI である。このセンサを用いた場合、地形変化検出精度は 1 cm 程度となる。将来、さらに波長の短い X バンドの衛星 SAR システムが開発されれば、地形変化検出精度はさらに向上できる。

5.2 SAR 差分インターフェロメトリを適用する期間

地熱レザバーの時間的地形変化率は小さいので、SAR 差分インターフェロメトリを適用する期間は長くしなければならない。地熱レザバーの地形変化が 5 cm 以上となれば、C バンドの SAR 差分インターフェロメトリによって検出される可能性は高い。地熱レザバーの地形変化が 5 cm 以上になるためには最低 2-3 年の期間が必要と考えられるが、期間が長くなると植物の成長等によって地表のマイクロ波散乱特性が変化するため、SAR 差分インターフェロメトリの適用が困難になる可能性がある。また、SAR 差分インターフェロメトリの適用例が少ないため、どの程度長い期間に SAR 差分インターフェロメトリが適用できるか不明ではあるが、ERS-1 AMI を用いた SAR 差分インターフェロメトリのこれまでの最長期間は 385 日であった (Massonnet *et al.*, 1995)。

6. ま と め

二次元的な地形変化を数 cm の精度で測定する方法として、SAR の差分インターフェロメトリ技術が注目されている。この SAR 差分インターフェロメトリ技術は、地表に現れた地震断層による地形変化の検出やマグマの貫入に伴う火山体の地形変化等の検出に応用され、多大の成功をおさめている。

地熱レザバーの時間的地形変化率 (数 cm/年程度) は、今までに SAR 差分インターフェロメトリによって観測された地質現象に伴う地形変化の例に比較して小さい。こ

のため、地熱レザパーの地形変化を検出するためには 1) Cバンド SAR 等の短波長のマイクロ波を使用した観測システムを使用すること 2) 適用期間を長くすることが必要である。SAR 差分インターフェロメトリを適用して、蒸気の生産等に伴う地形変化を観測すれば、二次元的な地形変化を基にした地熱レザパーモニタリングが可能であると考えられる。

謝辞：地質調査所の杉原光彦氏には本論文の査読をしていただくなかで、数多くの有益な助言をいただきました。地質調査所の田中明子氏には草稿を読んでいただき、数式の誤りを指摘していただきました。以上の方々に謝意を表します。

文 献

- Butler, D. (1995) Europe sets hopes on twin eyes in the sky. *Nature*, vol.374, p.665.
- Denlinger, R. P., Isherwood, W. F. and Kovach, R. L. (1981) Geodetic Analysis of Reservoir Depletion at the Geysers Steam Field in Northern California. *Journal of Geophysical Research*, vol.86, no.B7, p.6091-6096.
- Francis, R., Graf, G., Edwards, P. G., McCaig, M., McCarthy, C., Dubock, P., Lefebvre, A., Pieper, B., Pouvereau, P. -Y., Wall, R., Wechsler, F., Louet, J. and Zobl, R. (1991) The ERS-1 Spacecraft and Its Payload. *ESA Bulletin*, vol.65, p.27-48.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A. (1989) Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry. *Journal of Geophysical Research*, vol.94, no.B7, p.9, 183-9, 191.
- Geri, G., Marson, I., Rossi, A. and Toro, B. (1985) Crustal Deformation and Gravity Changes During the First Ten Years of Exploitation of the New Travale-Radicondoli Geothermal Field, Italy. *Geothermics*, vol.14, no.2/3, p.273-285.
- Goldstein, R. M., Engelhardt, H., Kamb, B. and Frolich, R. M. (1993) Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion : Application to an Antarctic Ice Stream. *Science*, vol.262, p.1525-1530.
- Kawai, S., Shimada, M., Ohkura, H., Fujinawa, Y., Okada, Y. and Yamada, Y. (1995) Detections of Earth Surface Deformation Change by means of INSAR Technique. 第1回 SAR (合成開口レーダー) インターフェロメトリワークショップ報告書, p.31-40.
- Lofgren, B. E. (1978) Monitoring crustal deformation in the Geysers-Clear Lake geothermal area, California, *USGS Open-File Report*, 78-597. USGS, Sacramento, 18 p.
- Massonnet, D. and Rabaute, T. (1993) Radar Interferometry: Limits and Potential. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.31, no.2, p.455-464.
- , Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T. (1993) The Displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, vol.364, p.138-142.
- , Feigl, K., Rossi, M. and Adragna, F. (1994) Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature*, vol.369, p.227-230.
- , Briole, P. and Arnaud, A. (1995) Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, vol.375, p.567-570.
- and Feigl, K. L. (1995) Satellite radar interferometric map of the coseismic deformation field of the M=6.1 Eureka Valley, California earthquake of May 17, 1993. *Geophysical Research Letters*, vol.22, no.12, p.1541-1544.
- 村上 亮・藤原 智・斉藤 隆(1995) 干渉合成開口レーダーを使用した平成7年兵庫県南部地震による地殻変動の検出。国土地理院時報「兵庫県南部地震特集号」。no.83, p.24-27.
- Murakami, M., Tobita, M., Saito, T. and Masaharu, H. (1995) Coseismic Crustal Deformations of 1994 Northridge California Earthquake Detected by Interferometric JERS-1 SAR. 第1回 SAR(合成開口レーダー) インターフェロメトリワークショップ報告書, p.47-66.
- Peltzer, G. and Rosen, P. (1995) Surface Displace-

- ment of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, Earthquake Observed by SAR Interferometry. *Science*, vol.268, p.1333-1336.
- Yamaguchi, Y., Tsu, H. and Sato, I. (1991) Japanese mission overview of JERS and ASTER programs. *SPIE Proc.*, vol.1490, p.324-334.
- 安田 聡・須藤 茂・遠藤秀典(1991) 空中写真を用いた雲仙・普賢岳周辺の火山活動に伴う地形変動の計測. 日本リモートセンシング学会誌, vol.11, no.3, p.61-64.
- ・—————・—————(1993) 空中写真解析による雲仙火山1991年溶岩噴出活動による地殻変動. 地調月報, vol.44, no.10, p.631-637.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A. and Werner, C. L. (1994) On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research*, vol.99, no.B 10, p.19617-19634.
- (受付: 1995年10月4日; 受理: 1995年12月8日)