

干渉 SAR の教育利用に関する調査

新居 浩*, 武市朋彦*, 伊藤陽介**

合成開口レーダ(SAR)による干渉(干渉SAR)技術を用いると地震や地すべりなどの大規模な地盤変動を数cmオーダーで計測できる。近年, 学校教育用情報システムのデータ処理機能が向上し, SARデータも処理できるようになった。東日本大震災の発生によって防災教育の重要性が再認識される中, 過去に発生した地震による地盤変動を面的に捉えることのできる干渉SAR技術の啓発が求められている。本研究の目的は, 地盤変動を計測する技術の啓発活動を念頭におきつつ, 干渉SARを情報技術教育に応用することである。本論文では, 干渉SARの概要と適用例, 干渉SARの教育利用に関する調査について述べるとともに, 干渉SARを用いた地形計測技術学習を提案する。

[キーワード: 合成開口レーダ, 干渉 SAR, 教育利用, 地形計測技術学習]

1. はじめに

人工衛星による地球観測が広範囲に長期間行われ, その成果の利活用分野は拡大している。とくに, 合成開口レーダ(SAR)による干渉(干渉SAR)技術を用いることによって, 地震や地すべりなどに起因する広範囲にわたる地盤変動を数cmオーダーで計測できる。干渉SARは1969年ごろから利用されている技術であるが, その結果を得るためには専門知識と特別な解析装置を必要としていた^[1]。近年, 高速に並列演算できるCPUと大規模な記憶容量を備えたパーソナルコンピュータの普及, SARデータの蓄積, オープンソースの干渉SAR処理ソフトウェアと全球的なデジタル標高モデル(DEM)データの無償提供などの条件が整いつつあり, 一般的に干渉SARを利用できるようになっている。東日本大震災の発生によって防災教育の重要性が再認識される中, 過去に発生した地震による地盤変動を面的に捉えることのできる干渉SAR技術の啓発が求められている。

本研究の目的は, 地震災害の多いわが国において地盤変動を計測する技術の啓発活動を念頭におきつつ, 情報技術教育に応用することである。本論文では, 干渉SARの概要と適用例, 干渉SARの教育利用に関する調査について述べるとともに, 干渉SARを用いた地形計測技術学習を提案する。

2. 干渉 SAR の概要

干渉SARの基本原理を図1に示す。同一地点 P を点 S_1 と点 S_2 にあるSARのアンテナ(基線長 $B = \overline{S_1S_2}$)からそれぞれ観測した複素信号の位相成分の差をとる干渉処理により点 P の高さや変動量を求める。干渉SARで必要な2つの信号の計測方法として様々なものが考案されてきたが, ここでは地盤変動を計測できるリピートパス方式(1アンテナ繰返観測方式)を用いる^[2]。干渉処理して得られる位相 Φ を初期干渉縞と呼び, 平行軌道間距離 $B_{||} = B \sin(\theta_0 - \alpha) \approx r_1 - r_2$ に起因する軌道

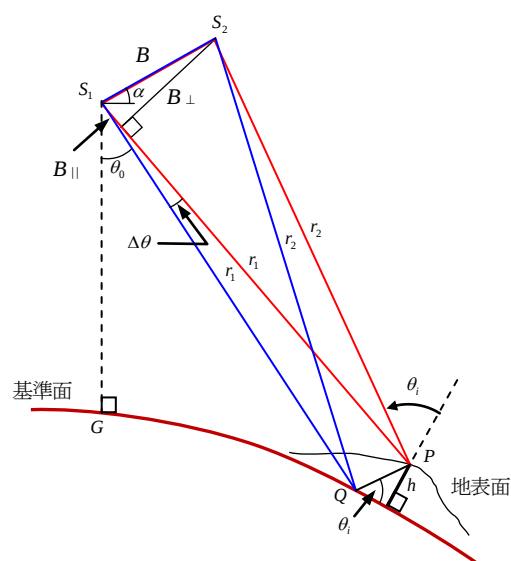


図1 アンテナと観測地点の座標関係

* 鳴門教育大学 大学院(修士課程) 教科・領域教育専攻 健康・生活系コース(技術・工業・情報)

** 鳴門教育大学 大学院 生活・健康系教育部

縞 ϕ_1 ，基準面からの高さ h に起因する地形縞 ϕ_2 ，観測期間内で生じた点 P の変動のうち視線方向（アンテナから観測地点へ方向）成分の変動量 d に起因する変動縞 ϕ_3 及び大気や電離層による電磁波の遅延などに起因する一時誤差 ε を含み

$$\Phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \varepsilon \quad (1)$$

$$\phi_1 = -(4\pi/\lambda)B_{\parallel} \quad (2)$$

$$\phi_2 = -(4\pi/\lambda)B_{\perp}h/(r_1 \sin \theta_1) \quad (3)$$

$$\phi_3 = -(4\pi/\lambda)d \quad (4)$$

と表される。ここで λ はレーダ波長， $B_{\perp}$ は垂直軌道間距離 $B \cos(\theta_0 - \alpha)$ ， h と θ_1 はそれぞれ点 P の基準面からの高さ とレーダの入射角を示す。

初期干渉縞 Φ から軌道縞 ϕ_1 ，地形縞 ϕ_2 を除去し変動縞 ϕ_3 が得られると視線方向の変動量 d を推定できる。軌道縞 ϕ_1 は2時期の軌道情報に基づき生成される。地形縞 ϕ_2 はDEMから生成する方法（2パス法）と変動を含まない地形を観測したペアから求める方法（3パス法，4パス法）がある。一般に $B_{\perp}$ の異なるペアを用いる後者の方法では $(-\pi, +\pi]$ の範囲内にある ϕ_2 をアンラッピングしなければならない。一時誤差 ε を単独で除去することは難しいため複数ペアの干渉処理結果を平均し除去する。

コヒーレンス（干渉性の尺度）の高いペアを選定する場合，（1） $(\lambda r_1 \tan \theta_1)/(2\Delta r)$ より小さい $B_{\perp}$ (Δr ：視線上の分解能）（2）観測期間が短い（3）季節的な変化がある地域では観測月日が近い（4）観測時の降雨量や積雪量が同じ，などの要件を考慮する。

観測期間中に、地震などのイベントによって計測対

象地域に変動があれば、あらかじめ求めておいた地形情報から地形縞を除去し、変動縞を抽出する方法として干渉SAR処理が提案されている。この処理の流れを図2に示す^[3]。まず、イベント前と後のSAR生データのペアを用意し、それぞれ画像再生処理を施し、位相情報を保持した複素数の画素からなるSLC（Single Look Complex）データ（G1，G2）を生成する。マスターとスレーブの画像マッチングを行い位置ずれ情報に基づきG2をG1と精密に位置が合うように再配置しG2'を得る。つぎに、G1とG2'の干渉処理を行い初期干渉縞画像（E1）とコヒーレンス画像（C1）を生成する。C1は干渉の

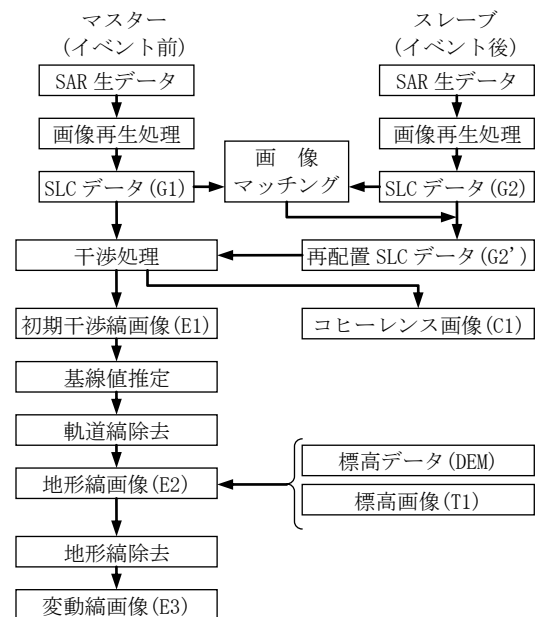


図2 干渉 SAR 処理の流れ

表1 一般的に入手可能な主な干渉 SAR 処理ソフトウェア

名 称	提 供 元	国	提供	機 能		主 な 課 題
				画像再生	地図投影	
GAMMA SAR	Gamma Remote Sensing	スイス	有償	○	○	完成度は高いソフトウェアであるが、一部不具合が報告されている。
PuLSAR	Phoenix Systems	英 国	有償	○	○	使用ライセンスに期限があり買い取り契約できない。
ENVI	Exelis Visual Information Solutions	米 国	有償	○	○	元々光学式センサ用として開発されているので SAR 処理にやや不向きである。
APEX	Seaspace	米 国	有償	○	○	システム規模が大きい。
Doris	Delft University of Technology	オランダ	無償		○	基線再推定機能がなく、地図投影機能が限定されている。
NEST	Array Systems Computing	カナダ	無償		○	Java 環境で動作するため処理速度が遅い。
GMTSAR	Scripps Institution of Oceanography	米 国	無償	○	○	干渉 SAR 処理に関係する設定が複雑である。
ROI_PAC	Caltech/Jet Propulsion Laboratory	米 国	無償	○		ソースコードが複数種類のプログラム言語で記述されているためわかりにくい。
RAT	Berlin University of Technology	ドイツ	無償			IDL (有償) がないと改良したソースコードを実行できない。

度合いを示す。基線値を推定し、軌道縞をE1から除去するとともに、あらかじめ準備しておいたDEMから標高画像(T1)を作成し、地形縞画像(E2)を得、地形縞も除去する。最終的に変動縞画像(E3)を得る。

3. 干渉SAR処理ソフトウェアの比較

これまで干渉SAR処理を行うためのソフトウェアとして様々なものが開発されている。本論文では教育利用を前提として干渉SAR処理ソフトウェアを調査し選定する。表1に一般的に入手可能な主な干渉SAR処理ソフトウェアを比較した結果を示す。ここで取り上げたすべてのソフトウェアは欧米で開発されている。各ソフトウェアは多くの機能を備えているが、ここでは生データからSLCデータを画像再生する機能と地図投影処理の有無について調査した。なお、ソースコードはGAMMA SARと無償のソフトウェアで提供されている。表1に示した有償提供のソフトウェアは、導入時に加え継続的な運用と維持に高額のコストを必要とし一般的な教育機関における利用は困難と判断した。そのため、ここでは無償提供されるソフトウェアに限定し教育利用することを検討する。

各ソフトウェアとも一長一短があり、主な課題についても表1に示す。機能面ではGMTSARが最も優れているが、スクリプト言語を用いているため干渉SAR処理に係る設定が複雑である。一方、DorisはC++で記述され処理内容を把握しやすいという特長に加え、各種処

理の設定を「カード」と呼ばれる単純なキーワードで指定できる。しかし、画像再生機能を備えていないので他のソフトウェアと併用する必要がある。RATはIDLで記述されているためソースコードに改良を施した場合、有償提供のIDL環境を必要とする^[4]。

以上の比較結果と課題に関する調査に基づき、干渉SAR処理ソフトウェアとしてDorisが最適と考え、本研究において利用することにした。また、SLCデータを画像再生するためのソフトウェアは、鳴門教育大学で既に開発済みの教育用SARプロセッサEduSARを使用する^[5]。

4. 干渉SAR処理による地盤変動の計測例

干渉SAR処理(3パス法)を施し、イラン国Bam地域で2003年12月26日に発生した地震(M6.5)による地盤変動の計測を行う。使用するSARデータは、ヨーロッパ宇宙機関(ESA)が運用していた地球観測衛星ENVISATのASAR($\lambda=5.6\text{cm}$)によって取得された表2に示す3シーンのSLCデータである。Dorisを用いて、A1とA2の干渉SAR処理によって標高画像を生成し、A2とA3の干渉SAR処理結果から前記標高画像を用いて地形縞を除去する。3パス法による干渉SAR処理を行った結果、図3に示す変動縞画像が得られ、点Pと点Qに変動縞の中心が見られた。縞が一巡すると $\lambda/2=2.8\text{cm}$ 変動したことになるため、点Pと点Qではそれぞれ視線方向に22.4cm、25.2cm変動したと推定される^[6]。

5. 干渉SARの教育利用

中学校学習指導要領(平成20年3月)を参照し、干渉SARを中学校で教育利用可能な教科とその内容を抽出した結果を表3に示す。理科の第2分野では、干渉SARによって得られた標高や地盤変動量などの成果を画像化して利用できる。技術・家庭科(技術分野)では、干渉SARを計測技術として捉え情報処理の手順を考察させる学習が考えられる。

同様に高等学校学習指導要領(平成21年3月)を参照し、干渉SARを高等学校で教育利用可能な教科・科目とその内容を抽出した結果を表4に示す。「各学科に共通する教科」(共通学科と表記)と「主として専門学科において開設される教科」(専門学科と表記)の両者に開設される科目において干渉SARを教育利用できる。物理関係科目では干渉SARの原理、教科「工業」と地学関係科目では干渉SARによって得られた広域の標高、

表2 干渉SAR処理用データ

センサ	観測日	シーン名
ENVISAT ASAR	2003年 6月11日	A1
	2003年12月 3日	A2
	2004年 1月 7日	A3

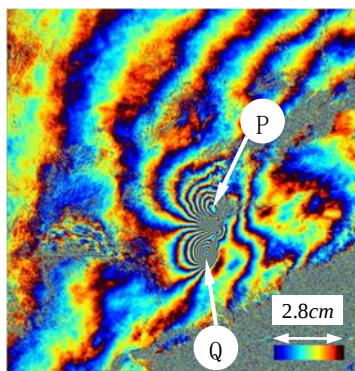


図3 干渉SAR処理による変動縞画像例

地震や火山活動による地盤変動などの成果、情報関係科目では干渉SARに関連する画像処理や数値計算などの情報処理過程に関する内容を学習できる。さらに、専門学科の課題研究において干渉SARに関する技術や成果を取り上げ既習事項に応じて幅広く学習活動に利用できる^[7]。

6. 地形計測技術学習の提案

本論文では中学校・技術科で学習する「D 情報に関する技術」の題材として干渉 SAR による地形計測技術を取り上げることを提案する。表 5 に既習内容を考慮し、中学校第 2 学年における全 5 時間とした学習指導計画と主な教材を示す。

まず、学習の導入として日本では地震が多いということ想起させ、地形計測技術と干渉 SAR の原理や成果などを示す。これからの学習に対する興味・関心の増長を図るために、インターネットによる地図検索サービスや電子国土 Web システムなどの技術を知る。過去の地震観測結果を調査し、観測日と干渉性の高い SAR データのペアを検索する。気象庁や SAR データ提供機関の Web サイトを教材とする。つぎに地震と SAR データの関係を班ごとに発表する。干渉性の高い SAR データのペアを教材として処理手順に従い干渉 SAR 処理を行い、変動縞画像を生成する。最後に、干渉 SAR 処理の過程と成果をレポートにして考察させ、地形計測と情報技術を展望させ学習のまとめとする。

この学習の教材例として 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9)及び 2011 年 4 月 11 日に発生した福島県浜通りの地震(M7)による地盤変動を取り上げる。干渉条件を満たし、かつ前者の地震の前と後者の地震の後に観測された SAR データのペアを用いる。ここでは、地球観測衛星 ALOS に搭載された SAR(PALSAR)によって 2011 年 3 月 3 日と 2011 年 4 月 18 日に観測された SAR データを用いて、EduSAR と Doris による干渉 SAR 処理を行った。図 4 に示すように両地震による地盤変動が明確に縞模様として現れ学習教材として利用できることが分かった^[8]。

7. まとめ

本論文では、干渉 SAR を情報技術教育に応用することを目的として、干渉 SAR の概要を述べた後、干渉 SAR 処理ソフトウェアの提供元や機能などを比較することにより課題を示し、教育利用に適したものとして

Doris を選定した。さらに、干渉 SAR を教育利用可能な教科と内容を抽出し、中学校技術科において干渉 SAR を題材とする地形計測技術学習を提案した。具体的な教材例として日本国内で発生した地震による地盤変動を捉えた変動縞画像を示した。

今後、地震や火山、地盤沈下などによる地盤変動の事例を調査し、干渉 SAR による地形計測によって変動

表 3 中学校における干渉 SAR の教育利用

教科	分野	内 容	利用
理科	第 2 分野	(2) 大地の成り立ちと変化	成果
技術・家庭科	技術分野	D 情報に関する技術 (3) プログラムによる計測・制御	過程

表 4 高等学校における干渉 SAR の教育利用

学科	教科	科 目	内 容	利用
共通	理科	物理基礎	(2) イ 波	原理
		物理	(2) 波 (3) 電気と磁気	原理
		地学基礎	(2) 変動する地球	成果
		地学	(2) 地球の活動と歴史	成果
専門	情報	情報の科学	(2) 問題解決とコンピュータの活用	過程
		プログラミング技術	(2) 応用的プログラム (3) プログラム開発	過程
	工業	測量	(6) 測量技術の応用	成果
		社会基盤工学	(1) 社会基盤整備 (4) 社会基盤システム	成果
	理数	地球環境化学	(2) 資源とエネルギー	成果
		アルゴリズムとプログラム	(5) アルゴリズムの応用	過程
	理数	理数物理	(2) 波 (3) 電気と磁気	原理
		理数地学	(2) 地球の活動	成果

表 5 学習指導計画と主な教材

時	学 習 内 容	主 な 教 材
1	・ 地形計測技術と干渉SARの原理、成果などについて理解を深める。	・ 地図検索サービス ・ 電子国土Webシステム
2	・ 過去に発生した地震観測の調査を行う。 ・ 観測日と干渉性の高いSARデータのペアを検索する。	・ 気象庁のWebサイト ・ SARデータ提供機関のWebサイト
3	・ 地震の発生日、規模、地域などと、SARデータの関係をまとめ、発表する。	・ プレゼンテーションソフトウェア
4	・ 処理手順に従い干渉SAR処理を行う。	・ 干渉性の高いSARデータのペア ・ 干渉SAR処理ソフトウェア
5	・ 干渉SAR処理の過程と成果をレポートにまとめ考察する。 ・ 地形計測と情報技術を展望する。	・ プレゼンテーションソフトウェア ・ 変動縞画像

(1 単位時間:50 分)

量を明確に捉えられる教材例を追加するとともに、干渉 SAR 処理ソフトウェアの利用手引書の作成を行い、干渉 SAR 技術による地盤変動計測方法の精度向上についても研究する予定である。

謝 辞

地球観測衛星 ENVISAT の ASAR データは、ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) より提供を受けた。陸域観測技術衛星 ALOS の PALSAR データは、(財)宇宙システム開発利用推進機構より提供を受けた。SAR データを提供していただいた関係機関に感謝する。

参考文献

- [1] (財)資源観測解析センター(1992): 合成開口レーダ (SAR), (財)資源観測解析センター, pp. 347-354
- [2] R. F. Hanssen (2001): Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic Publications, pp. 9-60
- [3] Delft Institute of Earth Observation and Space Systems (DEOS), Delft University of Technology Delft (2008): Object-oriented Radar Interferometric Software User's manual and technical documentation, http://doris.tudelft.nl/software/doris_v4.02.pdf
- [4] 新居浩, 武市朋彦, 伊藤陽介 (2012): 合成開口レーダ処理ソフトウェアの比較と課題, 日本産業技術学会第 28 回四国支部大会講演要旨集, p. A2
- [5] 寺本雄平, 伊藤陽介, 阿部健治 (2009): 教育用合成開口レーダ画像処理 Web アプリケーション・システム, 電気学会論文誌, Vol. 129-C, No. 9, pp. 1759-1767
- [6] 武市朋彦, 伊藤陽介 (2012): 干渉 SAR による地形計測技術を教育利用するための授業開発, 日本産業技術教育学会第 27 回情報分科会研究発表会講演論文集, pp. 89-90
- [7] T. Takeichi and Y. Ito (2012): Development of technology education using interferometric SAR processing, Proceedings of the 33rd Asian Conference on Remote Sensing, CD-ROM
- [8] 武市朋彦, 新居浩, 伊藤陽介 (2012): 干渉 SAR による国内の地震を事例とする地形計測技術学習の開発, 日本産業技術学会第 28 回四国支部大会講演要旨集, p. A3

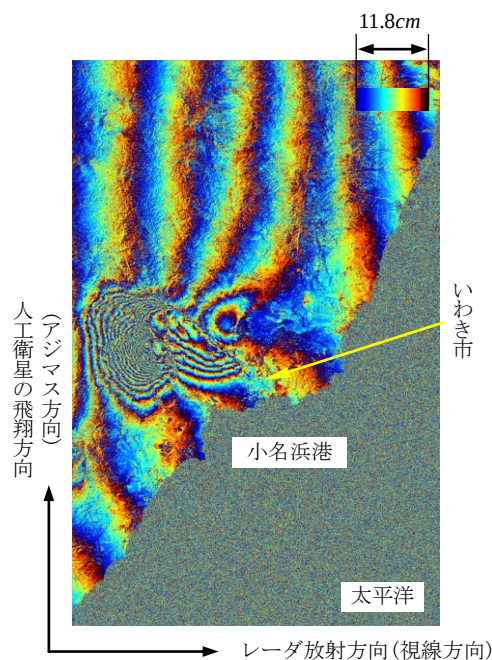


図 4 日本国内で発生した二つの地震による地盤変動を捉えた画像