

高度な国土管理のための複数の衛星測位システム (マルチGNSS)による高精度測位技術の開発 平成23年度新規総合技術開発プロジェクトの取り組み

国土交通省国土地理院測地観測センター 衛星測地課長 辻 宏道
つじ ひろみち
辻 宏道

1. はじめに

米国が1970年代に開発を始めたGPS(Global Positioning System; 全地球測位システム)は、1980年代から時刻管理や測量等の民生分野に利用されるようになり、21世紀に入るとカーナビをはじめとする航法や位置情報サービスを支える世界規模の社会基盤となっている。このGPSに、当初からソ連(ロシア)が追随し、2000年頃からは欧州・中国等も独自の測位システムの開発を計画し、日本も2010年9月11日に準天頂衛星初号機「みちびき」を打ち上げるなど、近い将来、多数の衛星測位システムが利用できる環境の実現が期待されている。これらのGNSS(Global Navigation Satellite System)と総称される衛星測位システムは、国土管理のさまざまな局面で必要となる高精度測位(測量)においても活用が期待される。

本稿では、その活用に向けた課題を整理するとともに、今年度から4カ年計画で始まる表題の総合技術開発プロジェクトの概要を述べる。複数の衛星測位システムを統合的に利用することで、現在のGPS測量が抱える課題の解決を目指していることから、プロジェクトの名称は「マルチGNSS」としている。

2. GPS測量

(1) カーナビとの違い

GPSというとカーナビでの利用が有名だが、この方式では1台の受信機で四つ以上の衛星までの距離を測り、衛星の位置を頼りに受信機の位置を10m程度の精度で瞬時に求めている。現在では携帯電話にも標準的に装備されるようになっているが、この精度では測量に使うことは難しい。

このため、測量分野では、一回り大きい測量用のGPS受信機を2台以上用意し、四つ以上の衛星までの距離を正確に測り、そのデータを組み合わせて処理することで、受信機間の相対的な位置関係(距離、方向)を求めている。例えば1時間程度の観測で10km先の点の位置を2cm程度の精度で決めることができる。今回の技術開発の対象となるのは後者である(図1)。

(2) GPS測量の現状と課題

国土管理の各工程、例えば、公共工事の用地取得や施工、地図作成等においては、従来、距離・角度を求める測量機器(トータルステーション)による測量技術が主流であったが、現在ではGPS測量が主流となっている。また地震や火山噴火が多発する日本ではGPSは地殻変動の観測にも利用

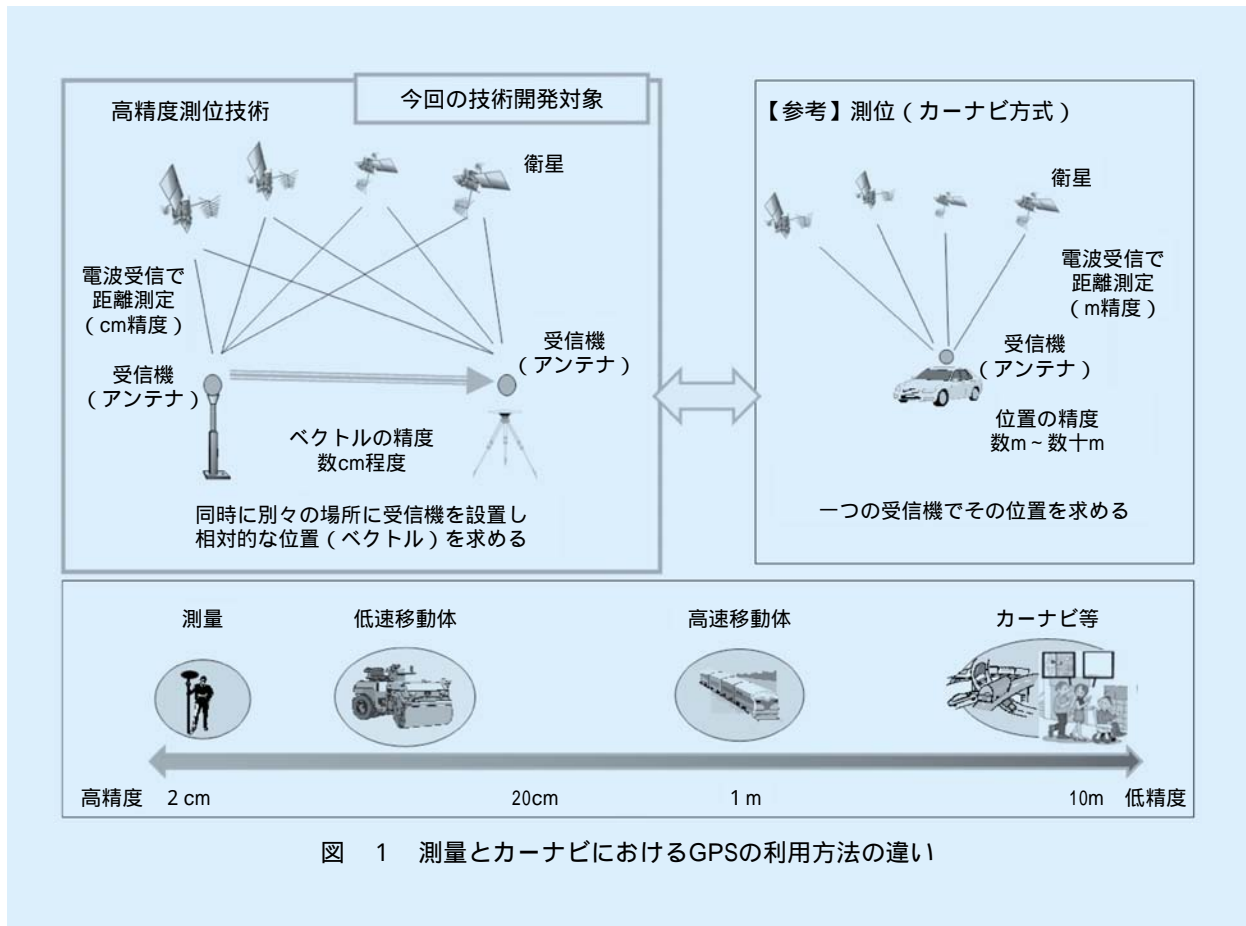


図 1 測量とカーナビにおけるGPSの利用方法の違い

されており、国土地理院はGPSを常時観測する電子基準点を全国に設置し、地震・火山噴火があった場合は速やかに地殻変動情報を提供して防災に貢献している。

このようにGPS測量は、国土管理上不可欠な測量技術の一つとなっているが、現場で困っていることが二つある。

一つ目の課題は、都市部や山間部ではビルや山等の障害物によって衛星からの電波が遮断され、GPS測量が実施できない場所があることだ。このような場所ではトータルステーションを用いた地上測量を行わざるを得ないが、かなりの手間がかかる上、実務的には両方の測量機材を用意する必要があり、経費もかかる。

二つ目の課題は、さらなる短時間化への対応である。通常の測量でもそうだが、特に必要性が高いのが、災害時である。大きな地震や火山噴火があった場合、電子基準点のデータから地殻変動を把握し、地震・噴火を引き起こした地下の現象

(断層運動、マグマ上昇)について情報を取り出し、災害の推移予測や避難の判断に用いることができる。しかし広い地域で正確な変動量を出すには、観測に十分な時間が必要となり、現在のところ、結果が出るまでに5時間程度を要している。GPS測量をリアルタイムで行う技術も開発されているが、やや誤差が大きいため広域の地殻変動を安定的に把握するまでには至っていない。

このようなGPS測量が抱える課題を解決するのに必要な環境が、今整備されようとしている。マルチGNSSの登場である。

(3) マルチGNSSへの期待

各国の計画が順調に進展すると、2014年頃までには、近代化GPS(米国)、準天頂衛星(日本)、GLONASS(ロシア)、Galileo(EU)といった70機程度のGNSS衛星が利用可能になる見込みであり、これらの衛星が同時に利用できれば都市部や山間部などでの測位で問題となる衛星の可視性は

格段に向上する(図 2)。また、従来の L1, L2 帯の信号に加え, L5 (E5b)等の新たな周波数帯の信号も送信されるため(図 3), 三つの周波数で観測されたデータの組み合わせにより, GPS測量の効率化の鍵を握るデータ処理(いわゆる搬送波位相のアンビギュイティ決定)を効率的に行うことが期待される。つまり, 衛星数および周波数帯が増えることにより, 衛星測量の実施可能地域を広げ, 観測に必要な時間を短縮することが可能になるわけである。

一方, 電子基準点での地殻変動監視では, 24時間観測データと国際GNSS事業(IGS)の作る精密暦(衛星軌道情報)の利用により, 現在のGPSでも1cmを切る水平精度が得られており, マルチGNSSデータを利用しても, この精度が大幅に向上することはあまり期待できない。しかし, 地震等の緊急時の解析では, マルチGNSSデータの利用で, より短い時間で安定的な解析結果を出すことが期待される。

3. マルチGNSS測量の課題

マルチGNSSを測量分野で利用するには, 各システムが整備され 相互運用性のある信号が送信されることが前提となるが, 測量分野側にも次のような課題がある。

- ① GNSSに対応した測量用受信機, 解析ソフトウェアの普及
- ② GNSSの正確な軌道情報の確保
- ③ 電子基準点のマルチGNSS対応化
- ④ マルチGNSSに対応した公共測量作業規程(準則)の作成

これらの課題のうち, ①は基本的には測量機器メーカーの, ②は各衛星の運用者や国際GNSS事業の対応を待つことになる。③は電子基準点がさまざまなGPS測量の出発点(既知点)として利用されるインフラであることを踏まえたもので, 国

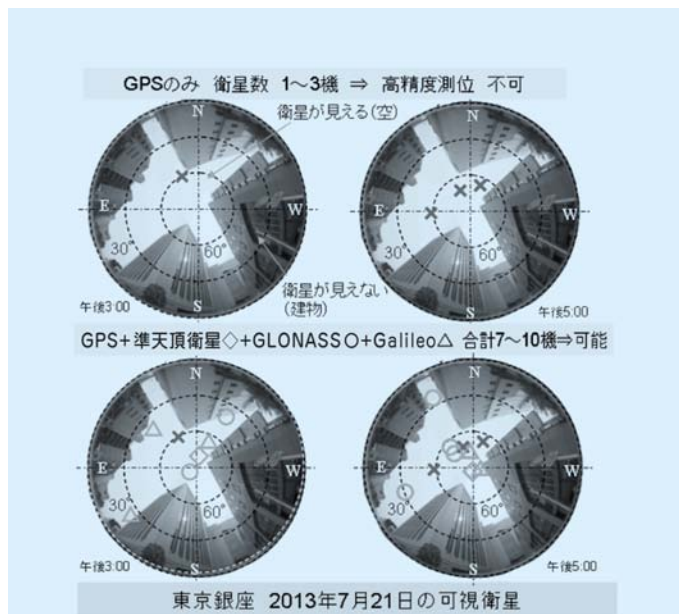


図 2 2013年7月21日に銀座上空で見える衛星の予測
GPSのみでは衛星数が不足するが, マルチGNSSが利用できれば克服できる。

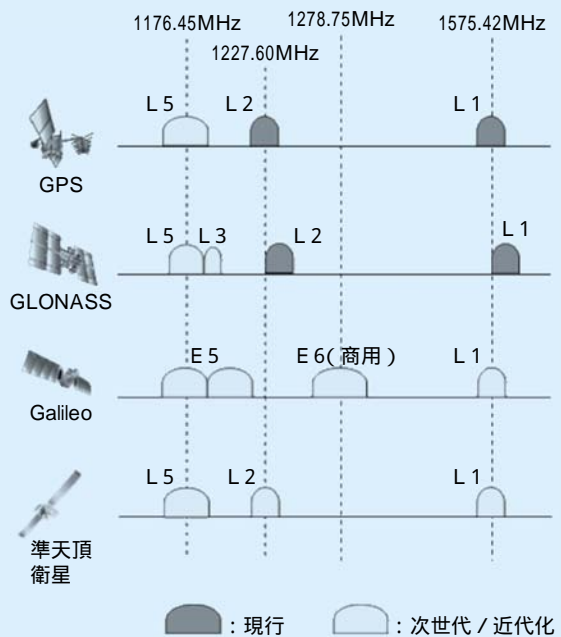


図 3 各GNSSの周波数帯(簡略化したもの)
これらの信号を賢く組み合わせ, 衛星測位の効率化を図ることを目指す。

土地院では受信機等の年次更新に合わせてGNSS対応を図ることにしている。

④は公共測量での利用に必須であり, そのためにはさまざまな実証実験を行って手法を標準化する必要がある。この際, 新たな衛星系と周波数帯

に対応できる解析ソフトウェアが必要だが、現時点では、大学等の学術用解析ソフトウェアも含め、現行のGPSおよびGLONASSの2周波データに対応したものしか公開されていない。

4. 技術開発の概要

以上の状況を踏まえ、国土地理院では、国土交通省総合技術開発プロジェクトの枠組みにより、マルチGNSSによる高精度測位技術の開発と標準化を行うことを提案し(表 1)、今年度から4カ年計画でこの課題に取り組むことが認められた。

本技術開発は、①マルチGNSSの統合解析手法を開発し、②シミュレーションや現地実証実験で検証を行って最適な観測・解析手法を確立の上、③同手法を公共測量作業規程の準則に盛り込むという三つの課題から構成される(表 2)。

真の意味でのマルチGNSS解析を行うためには、課題1において、異なる衛星系間のさまざまな周波数データの組み合わせによる統合解析の実現が鍵になる(図 4)。このため、宇宙航空研究開発機構(JAXA)、大学・研究機関、測量機器メーカー、衛星測位関連団体等との共同研究や連携を通し、オールジャパンの体制で技術開発に当たる。マルチGNSS解析技術を産学官で共同開発することによりわが国の技術力の底上げが図られ、今後の国際展開を優位に進めることが期待される。また、JAXAが提唱している「マルチGNSSアジア地域等実証実験」と連携し、開発した解析技術の普及を図ることも視野に入れている。

国土地理院においては、衛星測位に関連する測地観測センター・地理地殻活動研究センター、標準化を担当する企画部(公共測量担当)の関係者からなるチームを設けて技術開発を実施する。4年間の開発スケジュールの概要を図 5に示す。

表 1 技術開発の概要

名称	高度な国土管理のための複数の衛星測位システム(マルチGNSS)による高精度測位技術の開発(H23~26)
目的	これまでGPS測量が困難であったビル街等を含め、国土管理に必要な高精度測位の効率的な実施のため、GPS、準天頂衛星、GLONASS、Galileoの衛星測位システム(マルチGNSS)を統合的に利用し、短時間に高精度の位置情報を取得し、測量等に適用するための技術開発および標準化を行う。 「新成長戦略」(H22.6閣議決定)に位置付けられた「宇宙開発利用の促進」「衛星データ利用促進」に寄与。
効果	<ul style="list-style-type: none"> 従来のGPSでは困難であったビル街等での高精度な測量等を常時実現 GPS測量に比べ現地での観測時間を約半分に短縮して測量が可能 地殻変動量の提供時間(約5時間)を約半分に短縮し、災害時対応を迅速化 マルチGNSS解析・利用技術のアジア地域等への国際展開に寄与

表 2 技術開発の内容

<p>課題1. マルチGNSSの解析技術等の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> マルチGNSSデータを組み合わせ、cm級の精度で位置情報を短時間に取得可能とするためのマルチGNSS解析手法を開発
<p>課題2. 解析技術の検証</p> <ul style="list-style-type: none"> マルチGNSS解析のシミュレーション実験や現地実証実験の実施 上記の結果を定量的に分析し、現地条件に応じた最適な衛星の組み合わせやデータ補正といった観測・解析方法を検証の上、確立
<p>課題3. 高精度測位技術の標準化</p> <ul style="list-style-type: none"> 「公共測量作業規程の準則」改正案 地震時等の地殻変動把握等への適用指針案の作成

周波数	L1	L2	L5	E6
現行GPS	○	○	現在の組み合わせ	
GLONASS	○	○		
近代化GPS	○	○	○	
準天頂衛星	○	○	○	
Galileo	○		○	○

図 4 マルチ衛星，マルチ周波数対応により，GPS測定の課題克服を狙う

5. おわりに

本稿では，今年度から開始されるマルチGNSSによる高精度測位技術の開発について，その背景を中心に紹介した。国土地理院では，本プロジェクトや電子基準点のGNSS化対応等の施策を通し，現在のGPS測定の課題を克服したマルチGNSS測量が早期に実用化されるよう，必要な環境整備に努めていきたい。

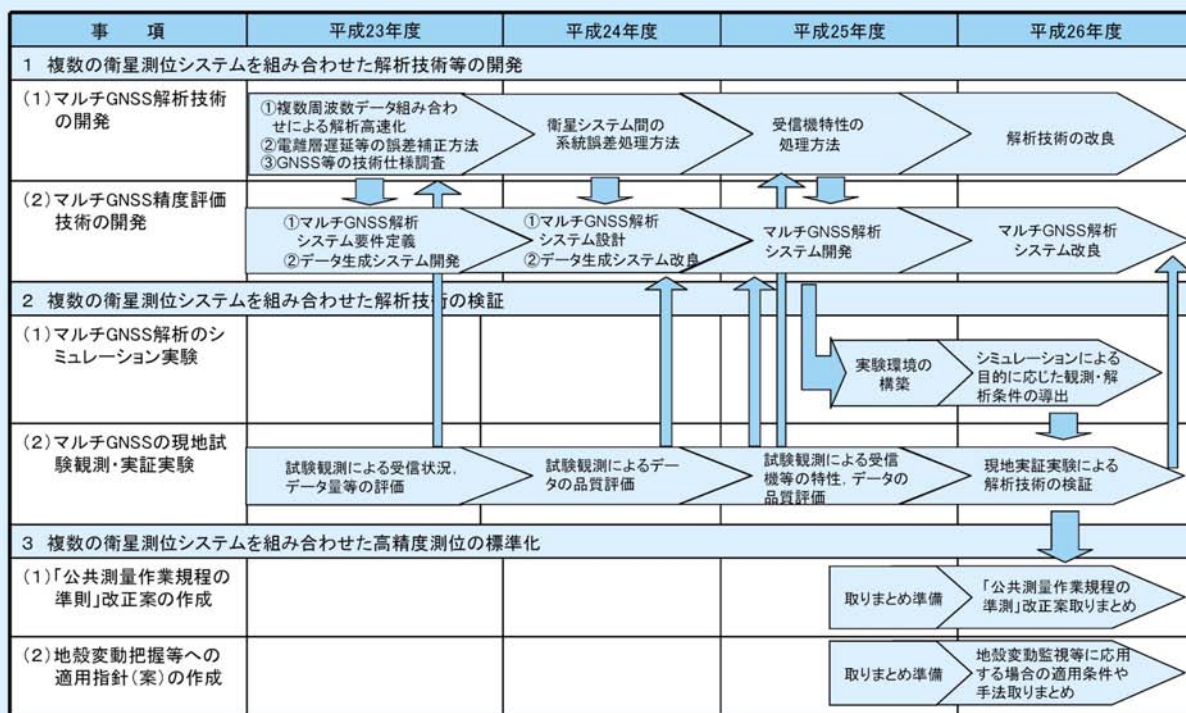


図 5 4年間の開発計画

SAR干渉解析を活用した 地盤沈下監視

国土交通省国土地理院測地部宇宙測地課 調査係長 すずき あきら
鈴木 啓

1. はじめに

国土地理院は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)によって平成18年1月24日に打ち上げられた陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)に搭載されているLバンド合成開口レーダー(SAR)の観測データを用いて、SAR干渉解析を定期的に実施しています。SAR干渉解析は、衛星からの信号を用いて地表面の変動を捉える技術で、主に地震や火山活動に伴う地殻変動の把握、地盤沈下や地すべりで発生する地表変動の監視を目的として行われています。

特に地盤沈下の監視では、平成4~10年まで運用されていた「ふよう1号」(JERS 1)や「だいち」(ALOS)のSARデータの解析からも検出事例が報告され、検出された変動量は、水準測量とも高い相関が得られています。そこで、国土地理院では、SAR干渉解析の特徴を生かした効率的な地盤沈下監視の手法についての取り組みを行っています。

この取り組みの一環として、SAR干渉解析によって検出した地盤沈下地域において、効率的な水準路線を選定して観測した結果、少数の地上観測点で地盤沈下域を詳細に把握できたことについて報告します。

2. 地盤沈下監視の現状

地盤沈下被害が増加した背景としては、戦後の経済復興時に地下水採取量を増加したことが挙げられます。そこで、国や地方自治体が、地下水採取を制限する法律や条例を定めた結果、地盤沈下は長期的に沈静化の傾向を辿るようになりました。

地盤沈下量を監視する代表的な手法としては、水準測量が挙げられます。環境省から公表された「平成21年度 全国の地盤沈下地域の概況」では、22都道府県の32地域で地盤沈下監視のための水準測量が実施されています。近年の水準測量の結果からは、最大で年間数cm程度の沈下量が観測されています。

3. SAR干渉解析の原理

SAR(「サー」と発音する)とは、英語のSynthetic Aperture Radarの頭文字で、日本語では「合成開口レーダー」になります。SAR観測では、人工衛星や飛行機などから地表へ電波(マイクロ波)を照射し、反射された電波から対象物の性質などが計測できます。この電波は雲なども通過す

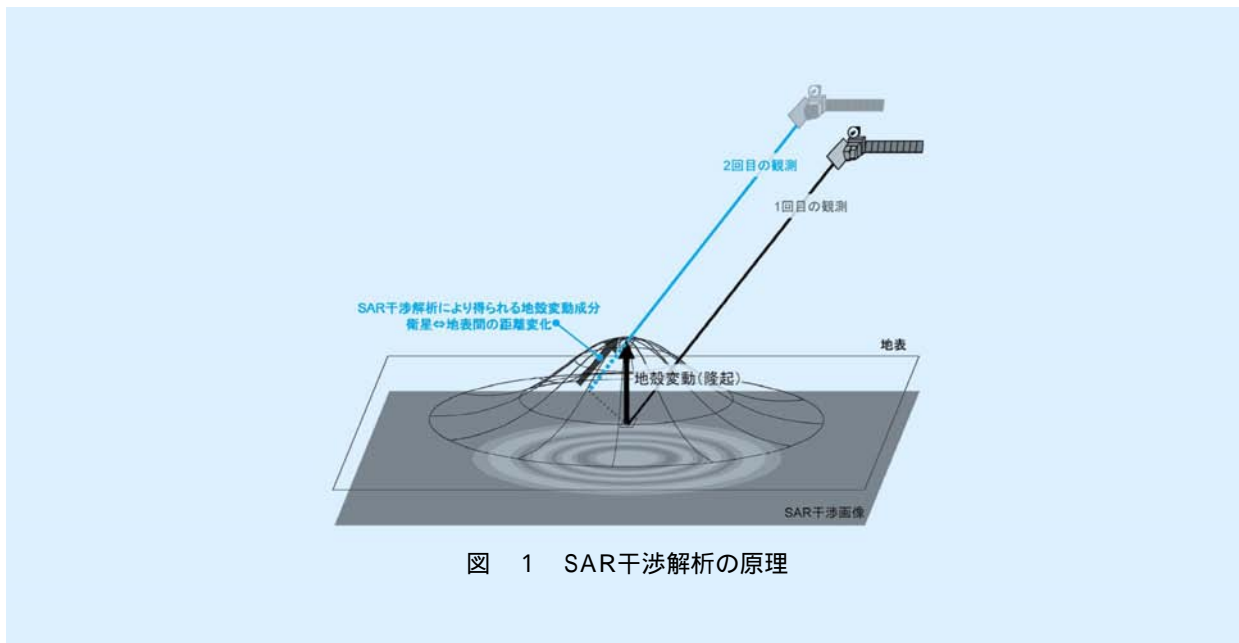


図 1 SAR干涉解析の原理

るため、夜間や雨天でも観測できます。SAR干渉解析は、地表の同一地点に対してある一定の期間を挟んだ2時期にSAR観測を実施し、反射波の位相差を取ることで(干渉)によって、その期間内に起きた地表面の変動を捉える技術です(図1)。

この変動量は、人工衛星などに搭載されたSARアンテナと地表の間に生じた距離の変化であり、この変化を地表面の変動として捉えるため、レーダーを発するアンテナから地表を結ぶ方向(電波照射方向)の一次元的な変動量が計測されます。SAR干渉解析で捉えられた変動量(位相変化)は、SAR干渉画像では、色の違いで表現されます。SAR干渉解析により、地表面の変動を面的かつ広範囲に検出することができます。

4. 水準測量とSAR干渉解析

水準測量とSAR干渉解析の特徴をまとめた結果を表1に示します。水準測量は、計測の精度が数mmと非常に高く、沈下量を精密に計測することができます。しかし、長期間にわたり広い範囲の上下変動を捉えるためには、対象となる地域に数多くの水準点を設置し、観測を行わなくては

表 1 SAR干渉解析と水準測量の特徴

	SAR干渉解析	水準測量
計測精度	~数cm	~数mm
計算される変動量	面状 (幅約70km)	点(線)状
観測頻度	46日回帰 最大8回/年	1回/年 (標準)
地上の観測機器	不要	要

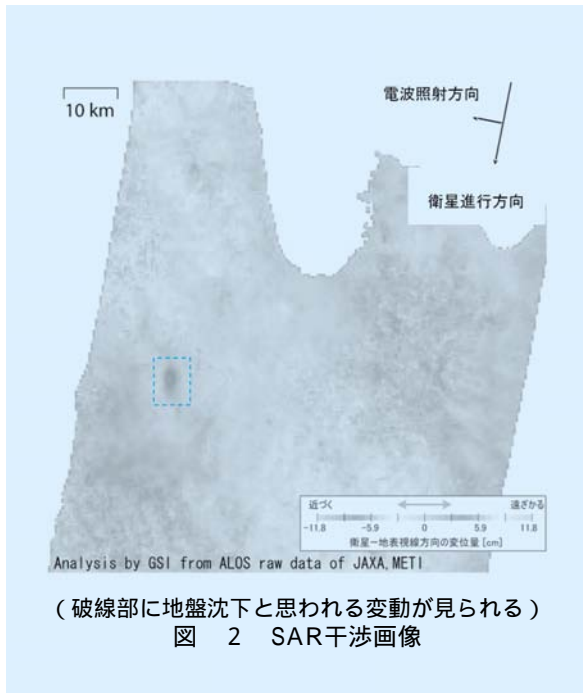
なりません。

一方、SAR干渉解析の結果から得られる計測精度は数cm程度ですが、地上に観測機器も不要であり、面的かつ広範囲の変動を把握することが可能です。近年、地盤沈下量が沈静化してきたことから、一部地方公共団体では、費用対効果を考慮した監視手法を検討するなど、効率化した監視に期待が高まっています。

5. SAR干渉解析を利用した地盤沈下監視の実用例

(1) SAR干渉解析により検出された地盤沈下地域での水準測量実施への試み

平成18年4月27日と平成19年4月30日のSAR観測データを用いて解析した結果、津軽平野の一



部で約2 km四方地域にわたる地盤沈下（最大の沈下量は4～5 cm）が検出されました（図2）。原因は、融雪のための地下水くみ上げと考えられていますが、現地調査の結果、特段被害もなく、水準測量等による地盤沈下監視も実施されていない地域であることが分かりました。

そこで、同地域においてSAR干渉解析の結果を参考に水準路線を選定し、平成19年11月、平成20年4月、および平成21年5月に水準測量を実施し、水準測量とSAR干渉解析によって得られた変動量の比較を行いました。

(2) 水準測量の実施

水準路線は、SAR干渉解析の結果から沈下が認められない場所にある一等水準点5951を始点とし、沈下域の中心である仮②を通過し、沈下が認められない地点である仮⑤を終点として選点しました（図3）。

また、沈下域を詳細に把握するため、沈下域周辺の仮①～仮②～仮③の間隔を約1 km程度として、密に配点することに留意しました。このような水準路線の選定は、SAR干渉解析による面的な情報があって初めて可能になります。

表 2 水準測量とSAR観測日

			短期	長期
水準測量	観測日		平成19年11月14日 平成20年4月22日	平成19年11月14日 平成21年5月26日
	間隔日数		160日	559日
SAR観測日	北行	観測日	平成19年6月21日 平成20年6月23日	平成19年12月22日 平成21年6月26日
		間隔日数	368日	552日
	南行	観測日	平成19年9月15日 平成20年5月02日	平成19年11月17日 平成21年5月22日
		間隔日数	230日	552日

3回の水準測量により、不動点を一等水準点5951とした平成19年11月～平成20年4月の変動（短期間）と平成19年11月～平成21年5月の変動（長期間）を求めました。

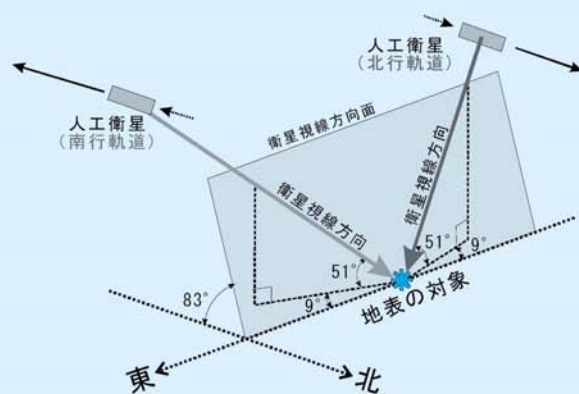
(3) SAR干渉解析と上下方向の変動量の算出

SAR干渉解析は、水準測量実施日に近い観測日のデータを用いて、短期間と長期間の2期間の

解析を北行軌道と南行軌道の2方向それぞれで実施しました（表2）。

また、水準測量と間隔日数を同一とするため、SAR干渉解析によって得られた変動量に対して間隔日数に応じた係数を乗算しました。

そして、2方向（北行軌道と南行軌道）の結果を合成する解析（図4）を行い、電波照射方向の変動量から上下方向の変動量を分離しました



2つの方向からの観測を合成することで変動を2次元で検出できる

図4 上下方向へ分離するための概念図



図5 短期間のSAR干渉解析の結果と水準路線（数字は等変動量線における変動量（cm））

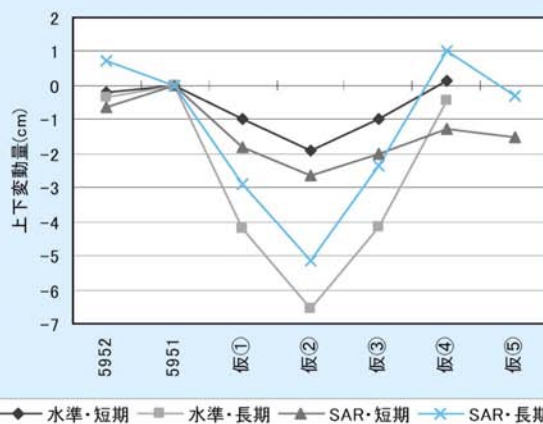


図6 水準測量とSAR干渉解析の上下変動量の比較（平成19年4月の水準測量において、仮⑤は未観測）

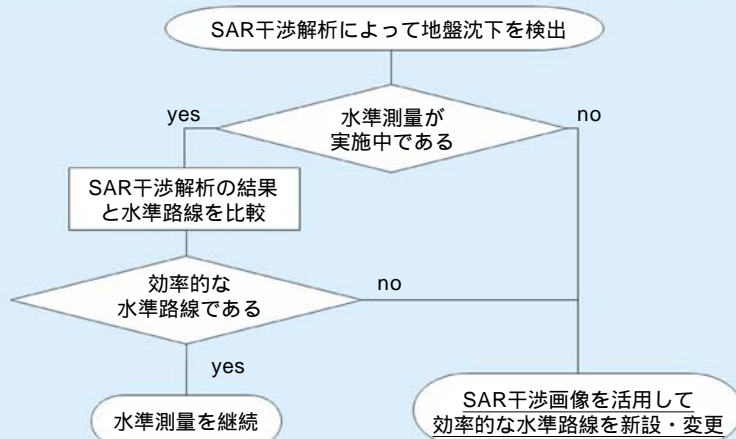


図 7 SAR干渉画像と水準測量を併用した地盤沈下監視の実施手順例

(図 5)。また、各水準点上の変動量は、不動点を一等水準点5951として変動量を算出しました。

(4) 水準測量とSAR干渉解析結果の比較

変動量の比較では、地盤沈下の進行が水準測量、SAR干渉解析ともに捉えられており、沈下の傾向や領域については、よく一致しています(図 6)。

各水準点上における水準測量とSAR干渉解析による変動量の差の標準偏差は、短期間の比較で0.9cm、長期間の比較で1.4cmとなり、SAR干渉解析の計測精度の範囲内と考えられます。

SAR干渉解析の結果を利用することにより、少数の水準点で地盤沈下域を面的に捉えることが可能になるため、効率的な水準測量が実施できていることが分かります。

6. 新たな地盤沈下監視体制へ向けて

SAR干渉解析の結果を参考に水準路線を選定

し水準測量を実施した結果、水準測量とSAR干渉解析の双方で地盤沈下の進行が検出できました。よって、SAR干渉解析結果の面的な情報と高精度な水準測量を併用することによって、図 7のような地盤沈下監視実施手順が考えられます。

現時点では、津軽平野ほど明瞭な地盤沈下が検出された地域は少ないため、全国の地盤沈下地域でSAR干渉解析を活用した効率的な水準測量を実施するためには、検討する時間が必要です。

今後もSAR干渉解析によって地盤沈下検出事例を増やすことにより、SAR干渉解析が有効であることを広く一般的に理解していただくことも重要と感じています。

謝 辞

ここで使用した「だいち」のPALSARデータの所有権は、JAXAおよび経済産業省にあります。また、これらのデータは、宇宙航空研究開発機構との共同研究協定に基づいて、提供を受けています。この場を借りて、御礼申し上げます。