

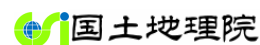
衛星干渉SARによる高度な地盤変動監視の ための電離層補正技術に関する研究

国土地理院 地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室



Geospatial Information Authority of Japan

研究期間と予算



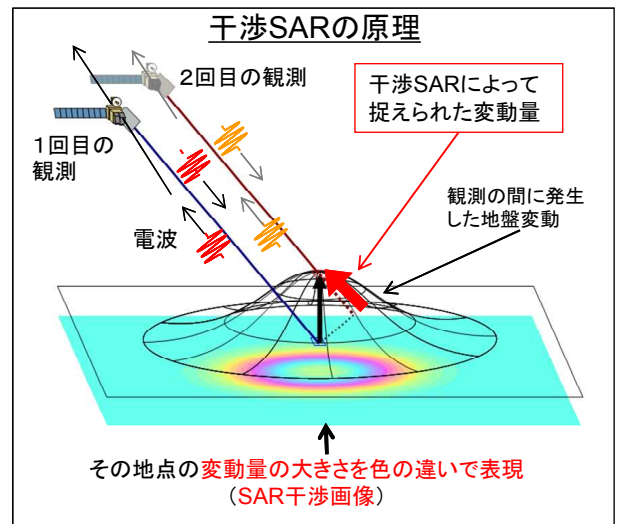
【研究期間】

平成25年4月～平成28年3月（3年間）

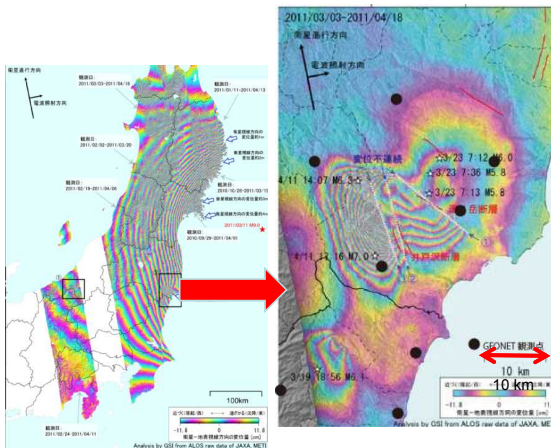
【予算】

特別研究経費31,696千円（3年間の総額）

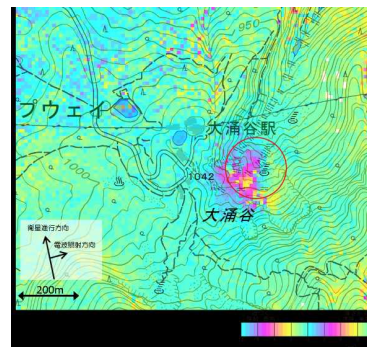
干渉合成開口レーダ(干渉SAR)とは、人工衛星などから斜め下の地上方向に電波を照射して得られた反射画像について、異なる2時期の画像の差を取り、その間に生じた地盤変動を面的に捉える技術である。国土地理院では、干渉SARを用いた国土の地盤変動の監視を実施している。



東北地方太平洋沖地震によって誘発されたとされる地震



2015年箱根山の活動に伴う地殻変動



Slide 3

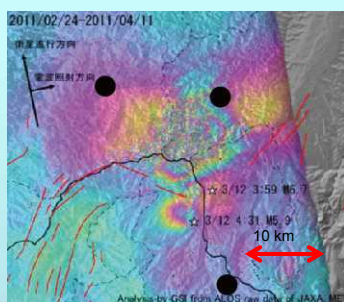
干渉SARの特徴はその高い空間分解能(～10m)にあり、その特徴を生かして地震・火山活動に伴う地殻変動や地すべり等の地表面の変動現象の把握に威力を発揮している。

地表面の変動把握についての空間分解能のイメージ

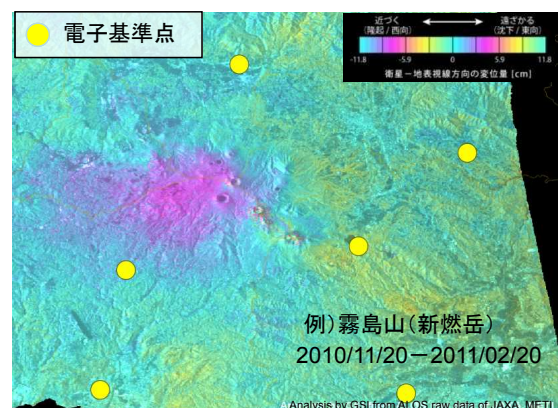
火山活動に伴う地殻変動の面的な把握

干渉SAR
(空間分解能◎:～10m)
(時間分解能△:～50日)

電子基準点
(空間分解能△:～20km)
(時間分解能◎:～1日)



内陸活断層は空間スケールが小さい(～10km)のため、電子基準点に加えて干渉SARによる監視が不可欠

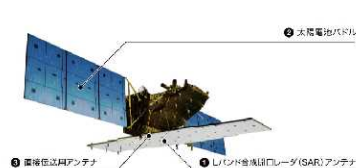


→地下のマグマの移動や膨張・収縮の状況

Slide 4

H26年度に打ち上げられただいち2号においては、だいちに比べ、
1)緊急時に**速やか**な画像取得が可能、2)衛星の位置制御および
位置推定がより正確になることによる地盤変動検出の**高精度化**、3)
広域(~350 km)を一度に観測するScan-SARモードが利用可能、な
どの改良が行われた。

注:緊急観測要求後、おおむね3日以内に取得

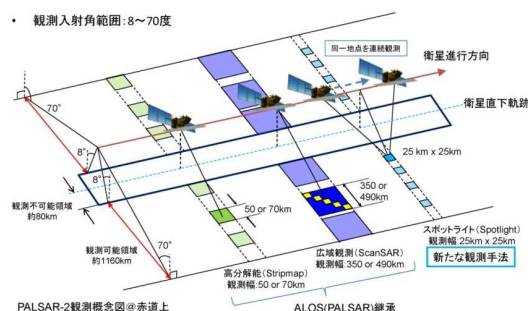


観測センサ
SAR周波数
観測モード
高分解能
広域観測
軌道
高度
降交点地方時
回帰日数
設計寿命
打上げ年月日
打上げロケット

合成開口レーダ(SAR)
Lバンド(1.2GHz帯)
スポットライト
分解能:1×3m 観測幅:25km
分解能:3m~10m 観測幅:50km,70km
分解能:100m 観測幅:350km
太陽同期準回帰軌道
628km
12:00(正午)
14日
5年(7年目標)
2014年5月24日
H-IIAロケット24号機

JAXAホームページより

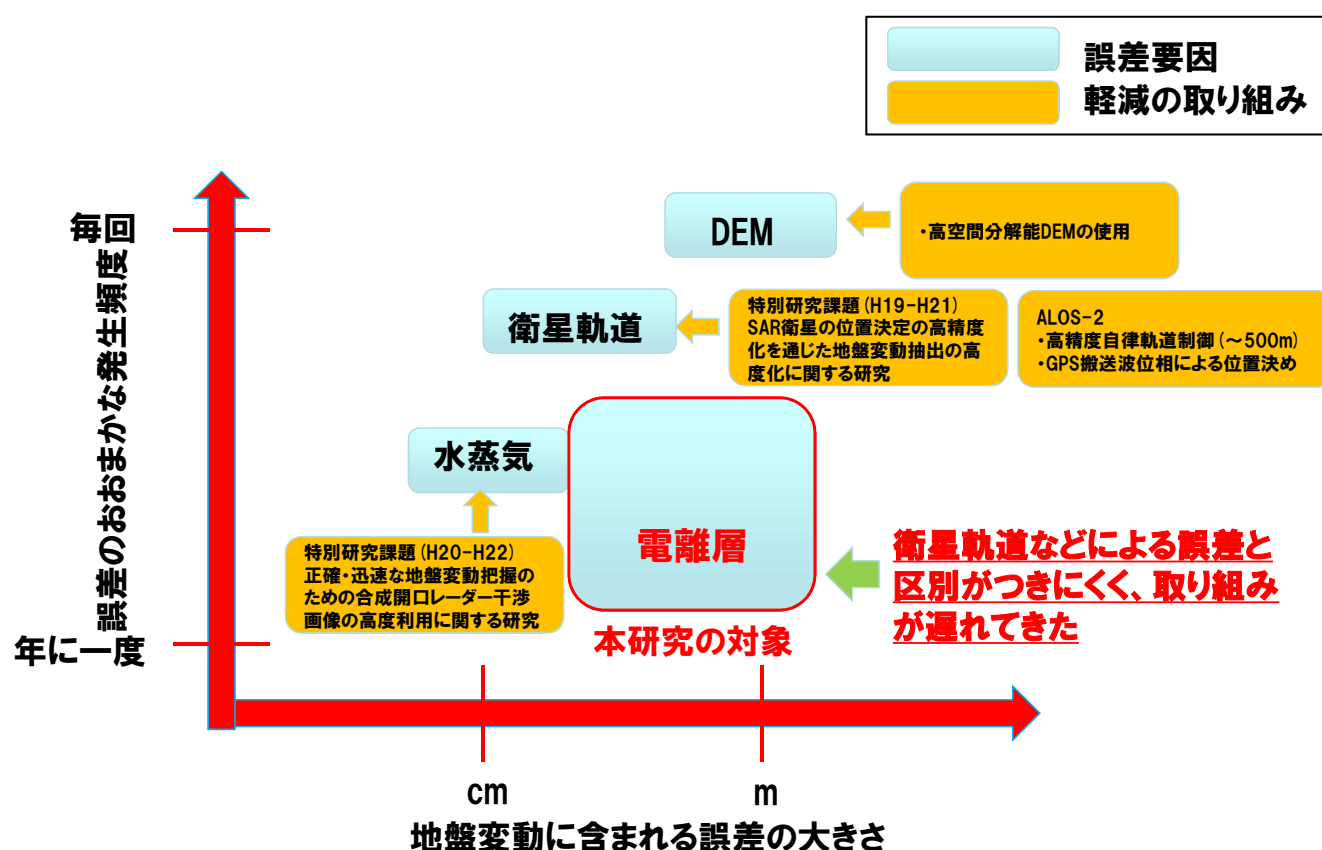
PALSAR-2の観測概念図



JAXAホームページより

Slide 5

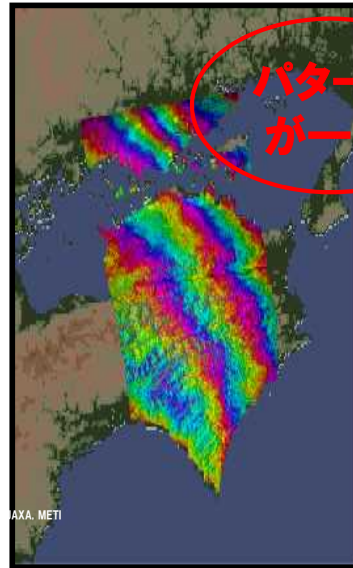
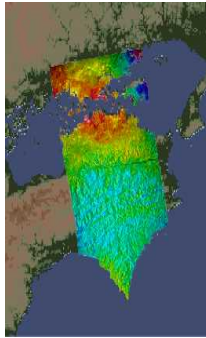
干渉SARの主な誤差要因とその軽減の取り組み



Slide 6

2008/07/18－2009/7/21
のSAR干渉画像

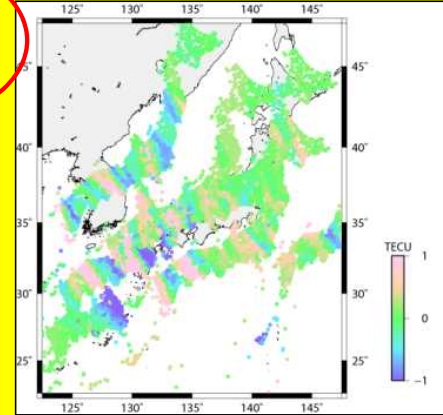
誤差が少ない場合



先行研究「GPS統合解析技術の高度化」(H21-H23)
電子基準点データを用いた、GPS解析(1周波観測注)に適用可能な電離層補正

成果の利用

同日、同時刻の電離層の状態



「中規模伝播性電離層擾乱(MSTID)」が発生していた数100km程度の空間スケール。北西－南東の波面をもち、南西に伝播。

電離層補正をSAR干渉解析に適用することで精度が向上する可能性がある

実現への鍵: 電離層の状態の表現の高度化

- ・ SAR観測方向の電離層の状態を高精度に表現
- ・ 電子基準点の受信機固有の誤差の推定を高度化 等

Slide 7

本研究の目的・概要

● 目的:

国土地理院が実施する干渉SARによる国土の定常的な地盤変動監視において、**電子基準点データに基づく電離層補正を実現**することで、地盤変動の正確で面的な情報の安定的な提供を可能とし、「だいち2号」の特徴を生かした干渉SARを用いた国土の**地盤変動監視の信頼性向上**を図る。

● 概要

- (1) 電離層擾乱の特性把握および干渉SARにおける影響評価
- (2) 電子基準点データを用いた干渉SAR電離層補正技術の開発
- (3) 国土地理院における「だいち2号」による干渉SARを用いた国土の地盤変動監視に適合した電離層補正システムの構築

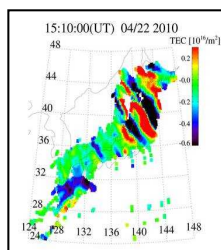
Slide 8

① 電離層現象の種類、発生日時などの特定

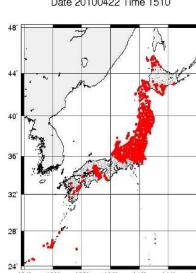
1) 伝搬性電離層擾乱 (Traveling Ionospheric Disturbance; TID)

電離層電子密度の強弱が、波として広がる現象

電離層変化

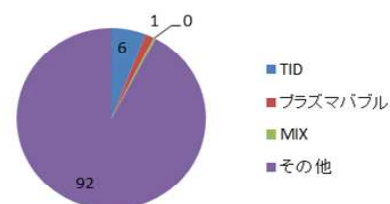


影響範囲



現象の発生割合

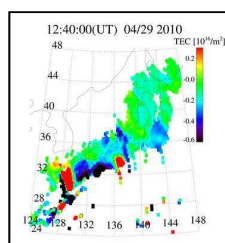
総件数 = 約9000件 / 11年



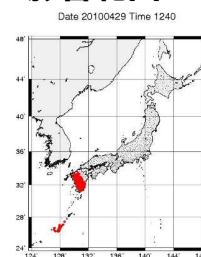
2) プラズマバブル

電離層電子密度の低い部分が局所的に広がる現象

電離層変化



影響範囲



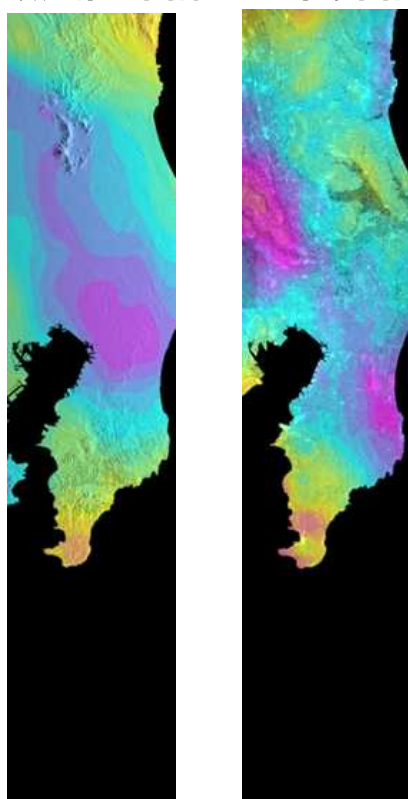
・TIDのほうがプラズマバブルより発生頻度が高い
 (「その他」は電離層の広域的变化が多く干渉SARに対する影響は少ないものが多い)

* 電離層変化図はNICTによる

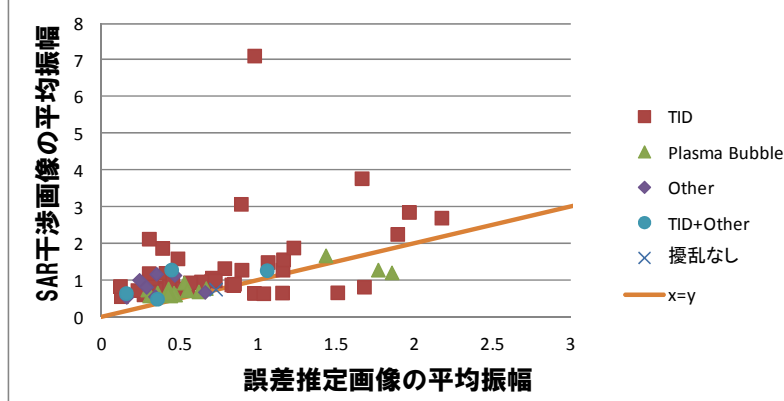
Slide 9

② 電離層誤差の推定画像とSAR干渉画像「だいち」との比較

誤差推定画像 SAR干渉画像



推定画像の平均振幅とSAR干渉画像の平均振幅の関係

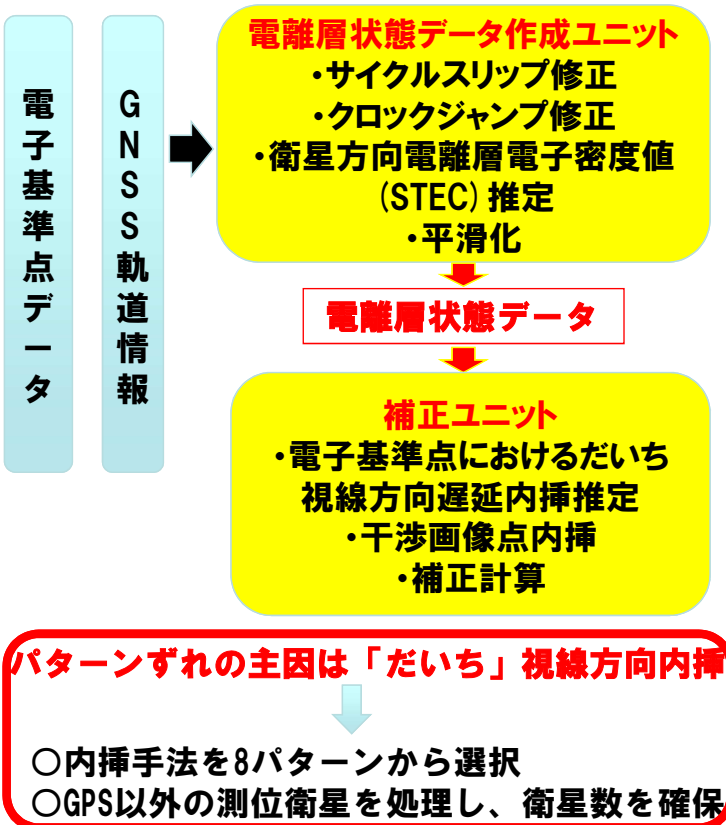


・電離層誤差推定画像とSAR干渉画像の平均振幅には相関が見られる
 ・ただしパターンの位置がずれる場合が多い

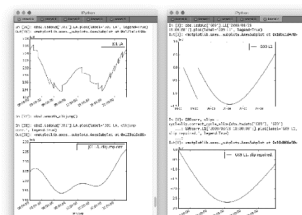
Slide 10

①電子基準点データ(電離層電子密度)に基づく干渉SAR電離層補正

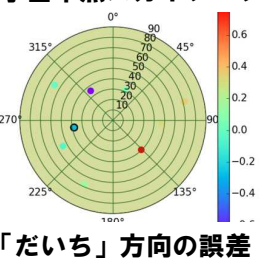
成果(1)②の結果に基づき、以下の手順で補正手法を構築した



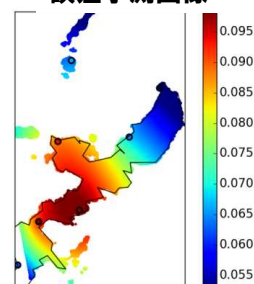
サイクルスリップ・クロックジャンプ修正例



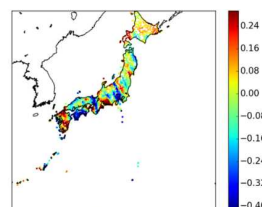
電子基準点スキャットプロット



誤差予測画像



「だいち」方向の誤差



Slide 11

①電子基準点データ(電離層電子密度)に基づく干渉SAR電離層補正

電離層擾乱(TID, プラズマバブル)の影響を受けている干渉ペア29ペアを用いて補正効果の評価を行った

原画像

誤差予測画像

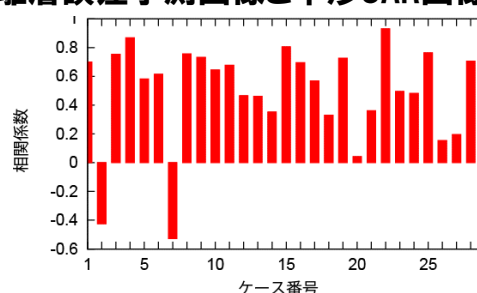
補正後画像



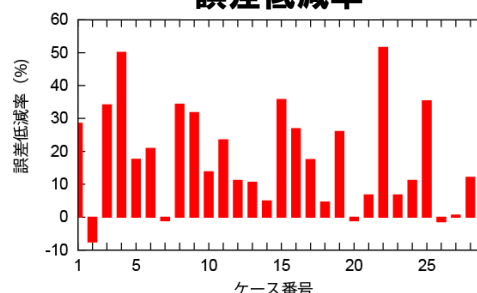
補正前平均振幅: 1.04 (cycle)
補正後平均振幅: 0.67 (cycle)
誤差低減率=38.1%

概ね良好な補正効果が得られることを確認

電離層誤差予測画像と干渉SAR画像の相関



誤差低減率



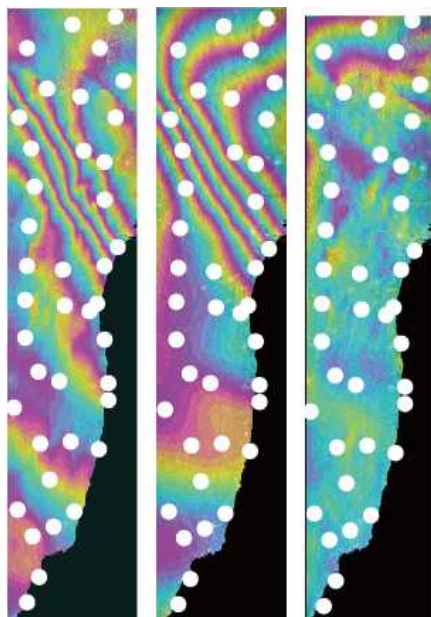
*誤差低減率=画像の平均振幅が減少した割合

Slide 12

②電子基準点データ(座標変化)に基づく干渉SAR電離層補正

電子基準点位置における電子基準点座標変化と干渉SARによる視線距離変化が整合するように、その差を画像全体に内挿して補正する

原画像 誤差予測画像 補正後画像



・今回調査したケースでは、
①電子基準点データ(電離層電子密度)と比較して、ほとんどの場合でより優れた補正効果が得られることを確認した

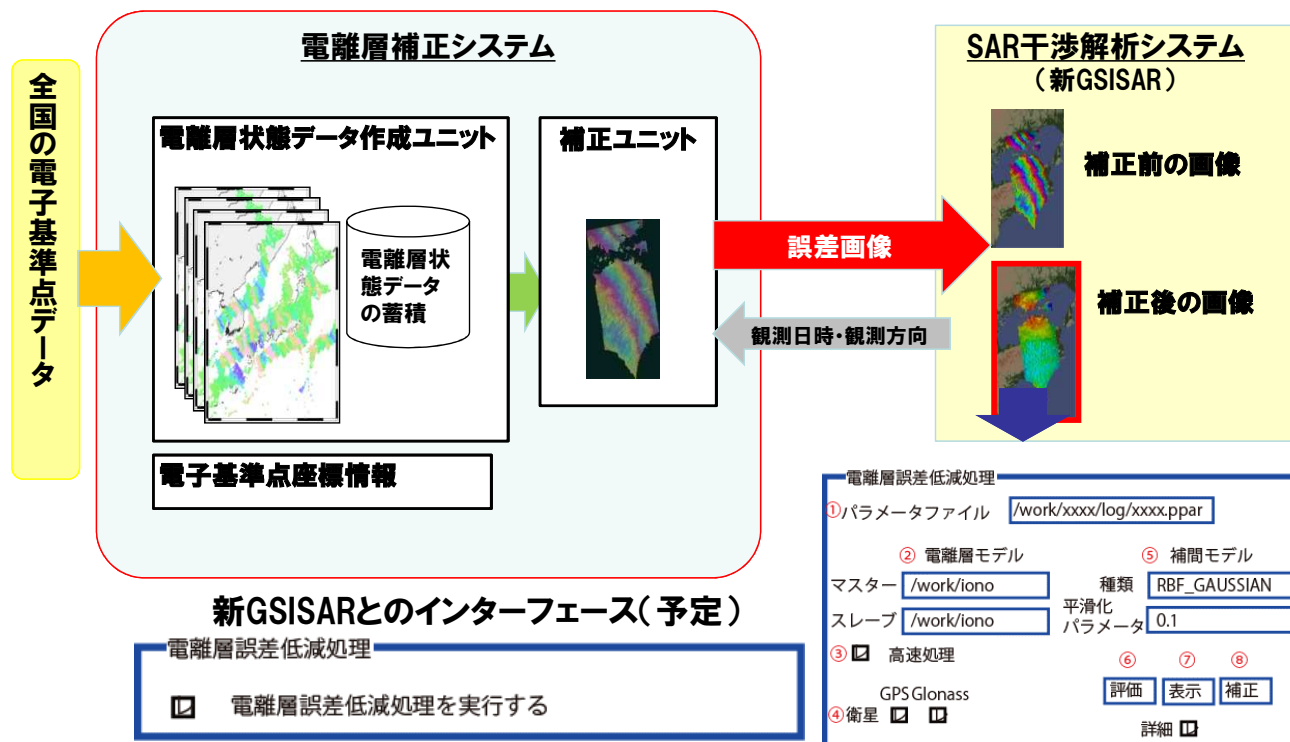
・ただし、電子基準点の座標変化における誤差がそのまま反映されるため注意が必要

誤差低減率=89.1%

Slide 13

成果(3) 国土地理院におけるALOS-2を用いた干渉SARによる国土の地盤変動監視に適した干渉SAR電離層補正システムの構築

(2)で構築した干渉SAR電離層補正手法について、国土地理院の解析ソフトウェアである**新GSISAR**で利用可能なよう、必要なインターフェースの作成を行った(現在一部外注作業中)



5. 当初目標の達成度

(目的・目標)

- (1) 電離層擾乱の特性把握および干渉SARにおける影響評価
- (2) 電子基準点データを用いた干渉SAR電離層補正技術の開発
- (3) 国土地理院におけるだいち2号を用いた干渉SARによる国土の地盤変動監視に適合した干渉SAR電離層補正システムの構築

(達成度)

- (1) 電子基準点データから電離層電子密度を計算し、統計処理することで、電離層擾乱の種類、発生時期などの特性を抽出しとりまとめた。また、計算された電離層電子密度を用いて干渉SAR誤差予測画像を作成し干渉SAR画像と比較し、補正手法構築における課題を明確化した。
- (2) (1)を踏まえ、電子基準点データを用いた干渉SAR電離層補正手法として、
①電子基準点データ(電離層電子密度)を用いた手法、②電子基準点データ(座標変化)を用いた手法、の2手法を構築した。
- (3) (2)で構築した手法について、国土地理院における干渉SARによる国土の地盤変動監視に用いられる解析ソフトウェアで利用可能なよう、必要なインターフェースの作成を行った

→目標達成の見込み

Slide 15

7. 成果活用の見込み

- 1. 本研究で開発した**干渉SAR電離層補正システム**は、「だいち2号」を用いて国土地理院で実施する定常的なSAR干渉解析に適用されることで、**地盤変動のより正確で詳細な情報の安定的な取得**が実現され、地盤変動監視の信頼性向上に寄与する。
(既に一部は定常的なSAR干渉解析において実用化済み)
- 2. 本研究で開発した**干渉SAR電離層補正システム**は、地殻変動研究室で実施している特別研究「干渉SAR時系列解析による国土の地盤変動監視の時間的推移の面的検出に関する研究」において、**時系列解析システム**に組み込まれ、活用される。
- 3. また、本研究で開発した**干渉SAR電離層補正手法**を公開することで、大学・研究機関におけるだいち2号以外の衛星も含めた**干渉SARを用いた地盤変動把握の高精度化**に寄与する。
- 4. 本研究で**アーカイブされた電離層状態のデータ**については、大学や研究機関、測量会社等の要望に応じて提供され、**電離層研究、測位誤差の分析等に活用される。**

Slide 16

8. 達成度の分析

(1) 有効性の観点からの分析

●初年度に**電離層擾乱の特性把握および干渉SARにおける影響評価**を実施したことは、次年度以降の**評価データの抽出**に効果的であった上、最終目標である電子基準点データを用いた干渉SAR電離層補正手法の構築における**課題を明確化**することにつながったため、有効であった。

●電子基準点データ(電離層電子密度)に基づく干渉SAR電離層補正に加え、電子基準点データ(座標変化)に基づく手法をあわせて開発したことが、国土の地盤変動監視に適合した電離層補正システムを構築する上で有効であった。

(2) 効率性の観点からの分析

●電子基準点データを用いた干渉SAR電離層補正手法の構築にあたっては、**汎用のオープンソースのツールを積極的に導入**

●干渉SAR電離層補正システムのGUI化については、**外注を活用**

地殻変動監視能力向上のための電子基準点誤差分析の高度化に関する研究

Slide 17

9. 残された課題と新たな研究開発の方向

●GPS以外の測位衛星を追加した場合の、電離層補正効果の向上については、実データによる評価が不足しているため、今後更なる評価を実施する必要がある。

●最近の研究*で、SARデータのみを用いた電離層補正手法の有効性が期待されており、今後の研究の伸展を注視する必要がある。

*Gomba, G. et al. (2015) IEEE Geosci. Remote Sens., in press.

●干渉SARの誤差低減には、個別の誤差源に対する対策に加え、複数画像を統計的に処理して地盤変動の時系列を抽出する時系列解析とよばれる手法が有効であることがわかっており、今後の研究の進展が望まれる。

*国土地理院特別研究(地殻変動研究室:H26-H30)

「干渉SAR時系列解析による国土の地盤変動の時間的推移の面的検出に関する研究」

Slide 18

Slide 19

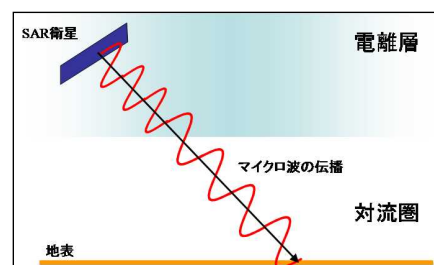
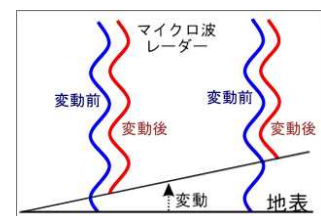
参考：電離層の粗密による干渉SARの誤差

GSI 国土地理院

- ・ 干渉SARは異なる2期間のSAR観測から、この間の地盤変動を検出

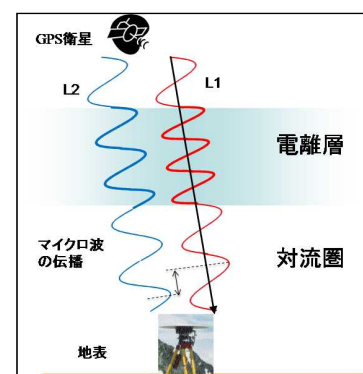
国土地理院HP
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism03.html>より

- ・ 電波は、電離層を通過する際に**遅延**が生じる。遅延の大きさは、電波の周波数によって異なる。
- ・ **電離層の粗密**があると**同じ周波数の電波でも遅延にも差**が生じ、見かけの地殻変動が現れる。



GPS観測

- ・ 2種類の周波数の電波を送信
 → 電離層により、それぞれの電波には**遅延に差**が生じる
 → 2周波観測から**電離層の粗密を推定可能**



Slide 20

- Fukushima and Hashimoto (2009) :
 - ALOSの干渉画像にしばしば顕著なノイズが入る
 - そのパターンは電離層擾乱のパターンに整合的であるように見える
- 「合成開口レーダーによる地震活動に関連する地殻変動観測手法について」
(平成23年10月7日 地震調査研究推進本部 地震調査委員会)
 - 「京都大学によるGPS-TECのwebsite(<http://stegps.kugi.kyoto-u.ac.jp/>)から取得したパス417 観測時刻近傍13:30 (UT) のGPS-TEC (perturbation)の分布を見ると・・・**TEC^{注)}の擾乱が見られる日を含む干渉画像には、顕著な干渉縞が現れている**」

注) TEC:電離層全電子数(Total Electron Content)。電離層を構成する気体中の電離電子の量。
 - 「現状では、経験的に擾乱の大きい日のデータを除くことにならざるを得ない」

Slide 21

参考：日本域においてSAR干渉解析に影響を与える可能性がある電離層現象

●中規模伝搬性電離層擾乱 (MSTID)

数100km程度の空間スケールを持ち、中・低緯度域で夏と冬の夜間に発生する北西－南東の波面をもち、南西に伝播

●プラズマバブル

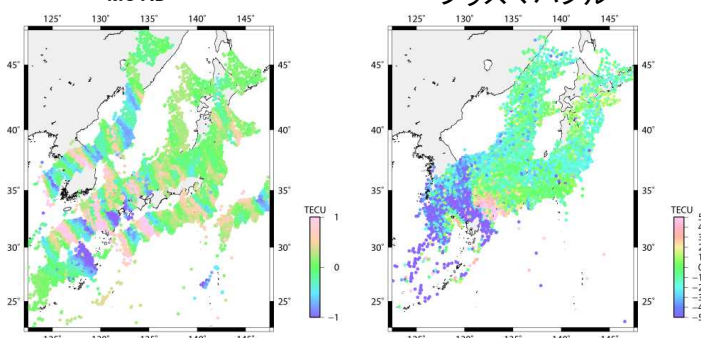
磁気赤道^{注1)}・低磁気緯度域で日没後～夜間に発生する現象で、電離層下端がRayleigh-Taylor不安定により波打ち、電子密度が周辺よりも極端に低い領域が発達。日本付近では、春分、秋分の前夜によく見られる

注1)磁気赤道:地磁気の伏角(地磁気の向きが水平面となす角度)がゼロの点を結んだ線

GPS-TEC^{注2)}で捕らえた電離層現象

MSTID

プラズマバブル



注2) TEC: 電離層全電子数(Total Electron Content)
電離層を構成する気体中の電離電子の量

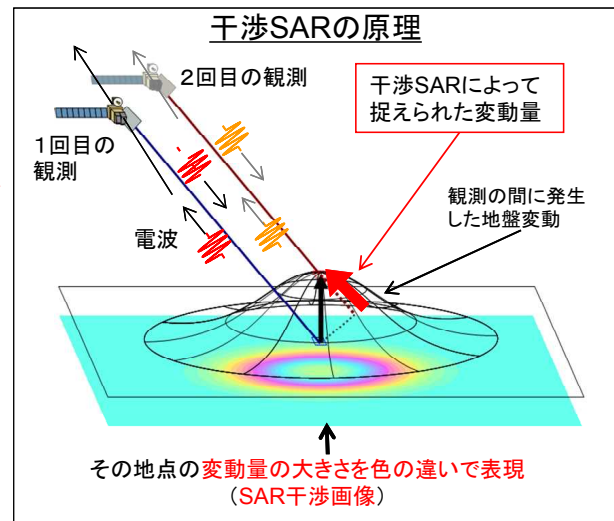
- 複雑な空間構造(小スケール～数100km)を有し、単純な曲面近似では完全な補正は不可
- 大規模構造(数100km)の振幅が大きい

- 通常の観測モード(観測幅70km)でも、スケールの小さい電離層の粗密により、見かけの地殻変動が生じる
- 広域を観測できるScan-SARモード(観測幅350 km)では、電離層の粗密の大規模構造の影響により、より大きな空間スケールで見かけの地殻変動が生じる

Slide 22

SAR(Synthetic Aperture Radar:
合成開口レーダ)
人工衛星などに搭載して斜め下の地上
方向に電波を照射し、その反射波の**画像**
を取得するレーダ。

干渉SAR
異なる2時期に地表の同じ範囲をSARで
観測すると、その期間に生じた地盤変動
がレーダから地表までの距離の変化とし
て**面的に捉えられる**。この技術を干渉
SARという。

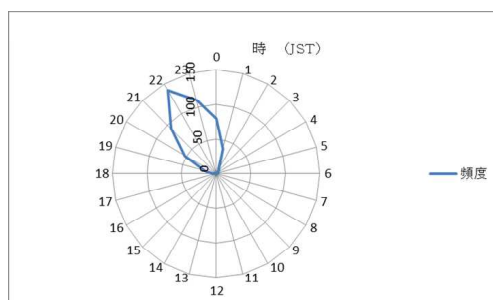


電離層
高度約60～800kmにある、太陽からの紫外線やX線によって大気分子が電
離して生じた**電子やイオンを多く含む大気**の層。
電波は電離層を通過する際に**遅延が発生**する。**電離層に粗密**が生じると電波
の遅延にも差が生じ、電波による距離計測の結果に見かけの変化が生じる。
電離層による遅延を補正することを**電離層補正**という。

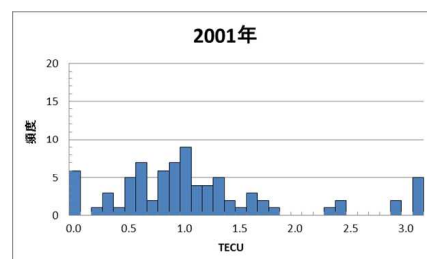
Slide 23

TID(伝搬性電離層擾乱)の特徴

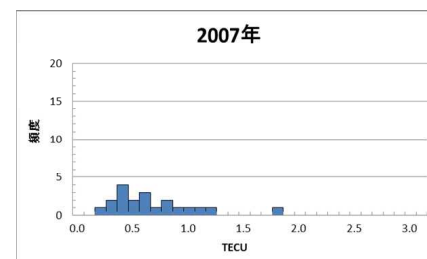
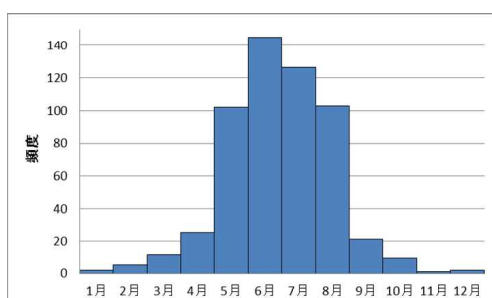
発生頻度



振幅の頻度分布



月別発生頻度分布

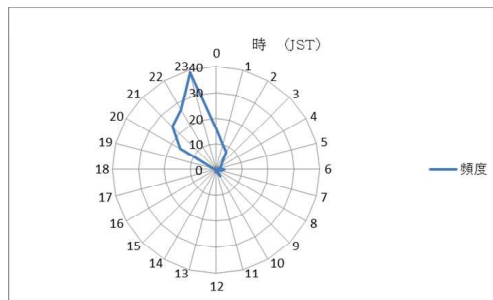


***電離層活動が激しいときほど回数、振幅
ともに大きくなる傾向にある**

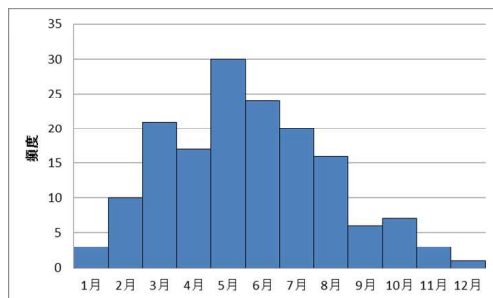
***5-8月、22時ころに多い**

Slide 24

発生頻度

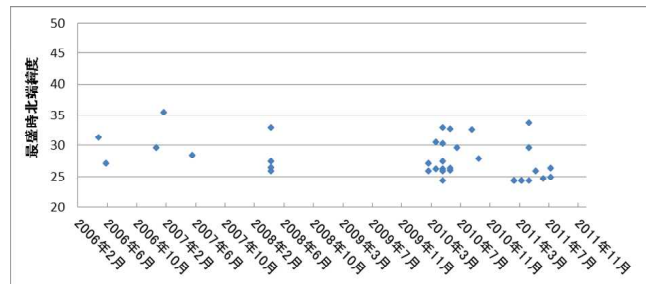
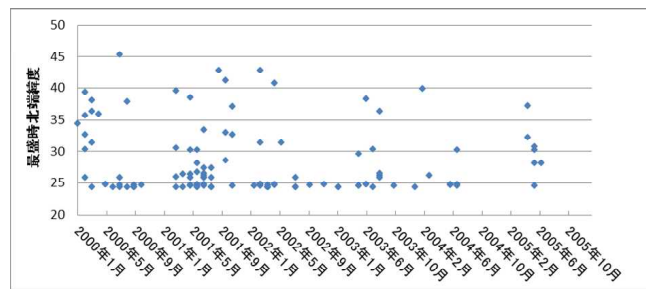


月別発生頻度分布



*3月、5-6月、23時ころに多い

年次別時間帯別最北端の電子基準点緯度分布



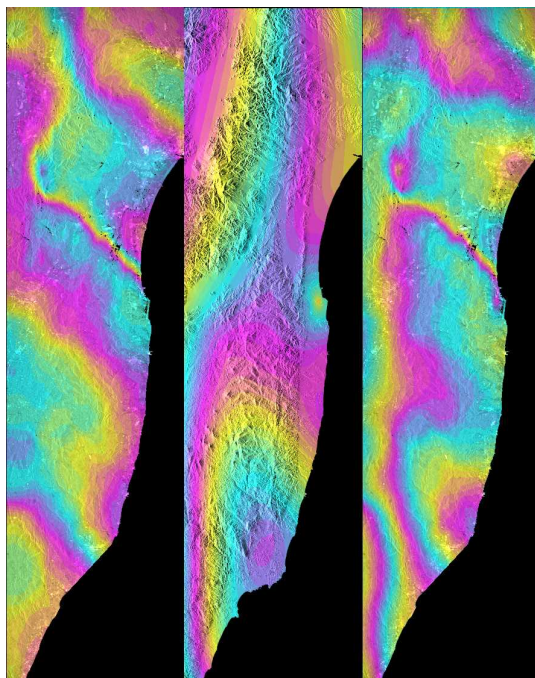
*電離層活動が激しいときほどより北まで到達する傾向にある

Slide 25

成果(2) 電子基準点データに基づくSAR電離層補正技術の開発

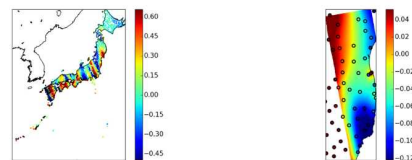
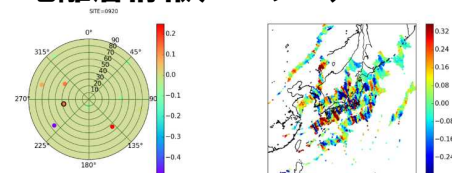
① 電子基準点データ(電離層電子密度)に基づく干渉SAR電離層補正失敗事例

原画像 誤差予測画像 補正後画像

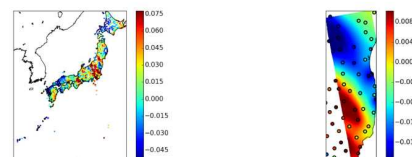
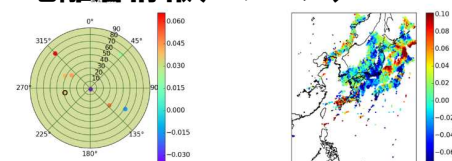


相関0.32, 誤差低減率=-12%

電離層情報(マスター)



電離層情報(スレーブ)



Slide 26

長野県神城断層地震(2014年11月22日)

電子基準点データ(座標変化)を用いた補正を適用した結果、地震時地殻変動のみを高精度に抽出することに成功した

原画像

誤差予測画像

補正後画像

