

# InSAR を用いた中緯度スホラディック E の検出

北海道大学理学部地球惑星科学科 4 年

宇宙測地学研究室

02110166

鈴木貴斗

指導教官 古屋正人 教授

## 概要

近年、世界的に宇宙測地技術は急速に進歩してきている。合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) はその中の一つである。SAR を用いて地表の変動を検出する方法の一つに干渉 SAR (InSAR: Interferometric SAR) があるが、得られた InSAR 画像に電離圏の影響が載ることがある。電離圏の影響はノイズとして扱われることがほとんどであり、この影響を InSAR 画像から除去する方法についての研究はあるが、電離圏の現象を対象とした研究はまだ少ない。InSAR 画像で電離圏の面的な情報が得られ、これは、電離圏のダイナミクスを考えるための手助けになりうる。

電離圏には、スポラディック E という現象がある。発生する場所によって出現性質が異なり、極光 (オーロラ) 型、中緯度型、磁気赤道型の三つに大別される。日本上空の中緯度スポラディック E は、5~8月の午前中と夕方によく発生することが知られている。しかし、空間的な広がりの詳細がわかっていないため、発生メカニズムが未解決である。Maeda and Heki (2014) は観測点上空のみでしか観測できなかったスポラディック E を、GPS-TEC 法を用いることで二次元的に観測することに成功した。InSAR は GPS より高い空間分解能で検出できると期待される。

本研究では、日本上空のスポラディック E を、ALOS (Advanced Land Observing Satellite) のフェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダー (PALSAR) が取得したデータを InSAR を用いて世界で初めて検出した。また、InSAR 画像を作成した結果、ほとんど全ての画像で局所的な位相変化が見られたのでその原因についての考察を行った。

# 目次

1. はじめに	4
1.1. 本研究の目的	4
1.2. 宇宙測地技術の発達	4
1.3. 合成開口レーダー	5
1.4. 干渉 SAR	7
1.5. MAI	9
1.6. ALOS/PALSAR	11
1.7. スポラディック E	13
1.8. イオノゾンデ	14
1.9. GPS-TEC	15
2. 使用したデータ	16
3. 結果と考察	18
3.1. No.1 のデータ (20070611_20070911)	19
3.1.1. InSAR の結果と考察	19
3.1.2. スポラディック E 検出の可能性	20
3.1.3. 対流圏遅延に関する考察	21
3.2. No.2 のデータ (20090328_20090628)	23
3.2.1. InSAR の結果と考察	23
3.2.2. スポラディック E 検出の可能性	23
3.2.3. 対流圏遅延に関する考察	30
3.3. No.3 のデータ (20100614_20100914)	32
3.4. No.4 のデータ (20100525_20101010)	33
3.4.1. InSAR の結果と考察	33
3.4.2. スポラディック E 検出の可能性	33
3.4.3. 対流圏遅延に関する考察	34
3.5. No.5 のデータ (20100705_20101005)	36
3.5.1. InSAR の結果と考察	36
3.5.2. スポラディック E 検出の可能性	36
3.5.3. 対流圏遅延に関する考察	37
4. まとめ	39
5. 謝辞	39
6. 参考・引用文献	40

## 1. はじめに

### 1.1. 本研究の目的

干渉 SAR (InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar) において、電離圏の影響はノイズとして扱われることがほとんどであり、Jung et al. (2013)をはじめ、InSAR 画像から電離圏の影響を補正する研究はあるが、電離圏の現象を対象とした研究はまだ少ない。また、GPS (Global Positioning System) を用いたスプラディック E の観測例は先駆的であるが (Maeda and Heki, 2014)、InSAR を用いてスプラディック E を捉えたという研究例はまだない。

本研究では、2006~2010 年の 5~8 月の稚内、国分寺、山川のイオノゾンデで午前中にスプラディック E の臨界周波数値が  $f_oE_s \geq 15\text{MHz}$  となった日時との観測場所と観測時間が近い ALOS/PALSAR の Descending のデータに InSAR を用いることでスプラディック E を検出することを目的とした。

### 1.2. 宇宙測地技術の発達

1957 年に初めての人工衛星がソ連により打ち上げられた。その後、測地技術の進歩と共に数多くの地球観測用の人工衛星が打ち上げられ現在に至る。使用用途は地球環境の変化、農業、災害の被害の観測など、多岐にわたる。GPS (Global Positioning System) もその中の一つで、カーナビゲーションシステムや携帯電話等に用いられるなど、私たちの生活に身近であり、また、地殻変動の研究手法として一般的である。しかし、測地技術のほぼ全てにおいて地上に観測点を設置しなければ観測できないという短所を持つ。

本研究で用いる合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) は地上の観測点が不要であり、SAR はマイクロ波を地上に照射し、その反射波を受信する能動型センサーである。また、昼夜、天候を問わず、マイクロ波が照射される面全体を一度に観測できることも利点である。二つの異なる時期に得られた SAR の位相データに InSAR を用いることでその間の期間に起きた変動を検出することができる。

### 1.3. 合成開口レーダー

合成開口レーダー（SAR: Synthetic Aperture Radar）は、航空機や衛星などのプラットフォームに搭載されたアンテナを用いて、地上ターゲットがビームの中に入り続ける間中の反射波を全て集めることで、仮想的に大きな開口長のアンテナを実現し、高分解能のレーダー画像を生成する技術である。

プラットフォームの進行方向をアジマス（Azimuth）方向、それに直交する方向をレンジ（Range）方向とよび、それぞれの方向で空間分解能は異なる。以下、古屋（2006）を参考に述べる。

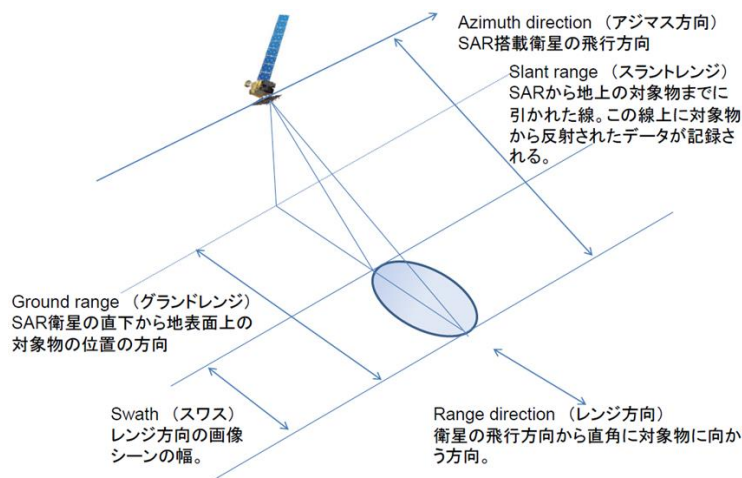


図 1 : SAR の基本用語

3 時間で分かる合成開口レーダ

(<http://members3.icom.home.ne.jp/yasuka.t/sarthreehours.pdf>) より

- ・ レンジ方向の分解能

図 2 において、A 点と B 点の信号往復時間は、

$$t_A = \frac{2R}{c}, t_B = \frac{2(R+\Delta R)}{c}$$

信号を分離できる限界は、 $t_A$ と $t_B$ の差がパルス継続時間（ $\tau$ ）と等しくなるところで、

$$t_A - t_B = \frac{2\Delta R}{c} = \tau \quad \therefore \Delta R_r = \frac{c\tau}{2}$$

グラウンドレンジ上では、 $\Delta R_r = \frac{c\tau}{2\sin\theta}$ となる。

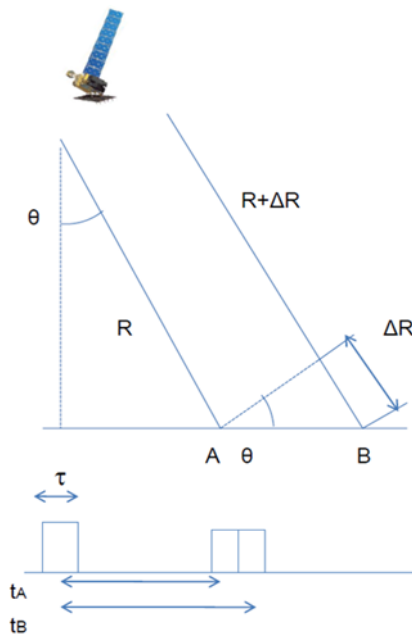


図 2 : 矩形パルスの場合

3 時間で分かる合成開口レーダ

(<http://members3.jcom.home.ne.jp/yasuka.t/sarthreehours.pdf>) より

パルス継続時間を短くすればレンジ方向の分解能が向上するが、短すぎるとノイズが大きくなってしまい、出力を大きくしようとしても回路的に限界がある。このため、周波数が時間的に変化するチャープパルスが用いられる。また、マイクロ波を真下 ( $\theta = 0^\circ$ ) に照射すると分解能が無限大に発散してしまうので、マイクロ波は斜め下方向に照射される。

チャープパルスを用いたパルス圧縮後の分解能は、

$$\Delta R_r = \frac{c}{2B_w}$$

$B_w$ : バンド幅

パルス継続時間を短くする代わりにバンド幅を大きくすることで、高い分解能を達成することができる。

・ アジマス方向の分解能

合成開口を用いない実開口レーダー (RAR: Real Aperture Radar) での分解能は、

$$\Delta R_a^R = \frac{\lambda R_0}{l}$$

$\lambda$ : 波長  $R_0$ : スラントレンジ上での距離  $l$ : アンテナの長さ

一方、SAR の分解能は距離や波長に依存せず、

$$\Delta R_a^S = \frac{l}{2}$$

アンテナの長さを短くすればアジマス方向の分解能が向上するが、短すぎると送受信ができなくなってしまう。

SAR から得られた生データの画像を見ただけでは何を示しているかわからない。このデータを処理することで、Single Look Complex (SLC) 画像が得られ、これは反射強度と位相データが含まれる白黒の画像である。また、SLC 画像の複素数データから反射強度を計算することで、Multi Look Intensity (MLI) 画像を得ることが出来る。

## 1.4. 干渉 SAR

干渉 SAR (InSAR:Interferometric SAR) は SAR の解析技術の一つであり、異なる二つの時期に得られた SAR の位相データの差を取る干渉処理によって、二つの時期の間に起きた地殻変動を検出する技術である。InSAR では相対的な変化量はわかるが、絶対的な変化量はわからない。InSAR の原理はヤングの二重スリットの実験と同じで、二本のスリットが InSAR では衛星の軌道にあたり、その距離を基線長 (Baseline) と呼ぶ。

しかし、基線長の視線方向に垂直な成分 (Bperp:Perpendicular Baseline) が離れ過ぎていたり、データ取得期間が離れ過ぎていたりすると干渉が上手くいかなくなる。

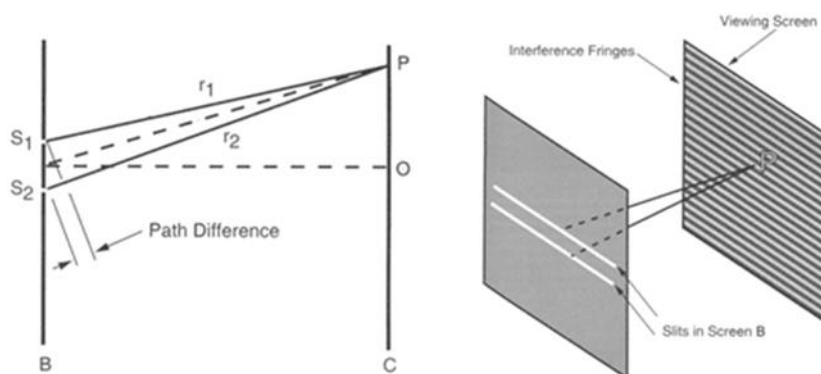


図 3 : ヤングの干渉縞

花泉 弘 研究室 – リモートセンシング | 法政大学 情報科学部

([https://cis.k.hosei.ac.jp/research/laboratory/digital/hanaizumi/remote\\_sensing.htm](https://cis.k.hosei.ac.jp/research/laboratory/digital/hanaizumi/remote_sensing.htm)

1) より

得られる InSAR 画像の位相差 $\varphi_{int}$ は次のように表される。

$$\varphi_{int} = \varphi_{disp} + \varphi_{orb} + \varphi_{topo} + \varphi_{iono} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise}$$

$\varphi_{disp}$ :地形変位量  $\varphi_{orb}$ :軌道縞  $\varphi_{topo}$ :地形縞

$\varphi_{iono}$ :電離層による遅延効果  $\varphi_{atm}$ :大気による遅延効果  $\varphi_{noise}$ :その他のノイズ

軌道縞と地形縞はそれぞれ衛星軌道データと数値標高モデル (DEM:Digital Elevation Model) を用いて取り除くことができる。電離圏や大気による影響を取り除く方法は Jung et al. (2013) などがあるが、完全にこれらの効果を取り除くことはできていない。その他のノイズはほとんど無視できる程度である。

InSAR 画像は図 4 や図 6 のような虹色で表現される。これは実際の地表変位量を衛星視線方向 (LOS:Line of Sight) に投影したもので、位相変化で表される。また、InSAR の観測量は往復距離によるものなので、一波長分の LOS 変位は  $4\pi$  の位相変化となる。日本の SAR 人工衛星である ALOS のレーダー波長は 23.6cm なので、一周期分の位相差は  $23.6/2=11.8\text{cm}$  となる。位相差は  $2\pi$  の任意性を含んでおり、位相アンラッピング (Phase unwrapping) の処理を行うことで変動の絶対値を知ることが出来る。

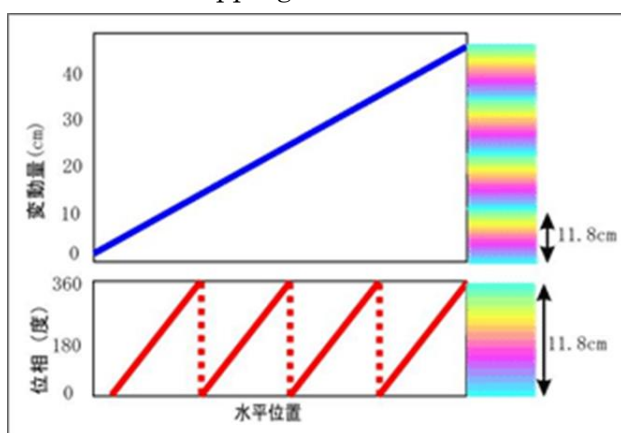


図 4 : L-バンド InSAR で得られる位相変化

国土地理院 : 干渉 SAR

( <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism04.html> ) より

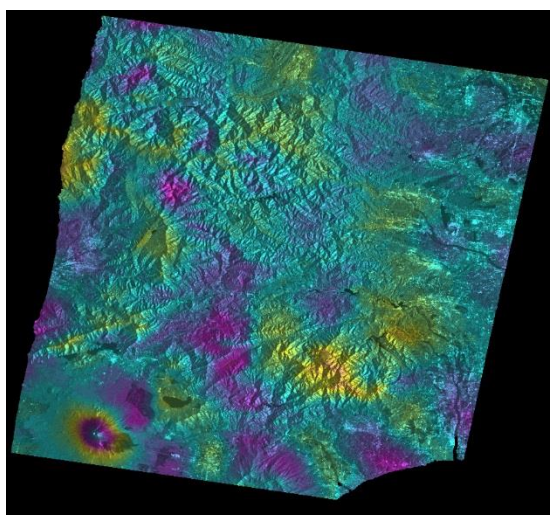


図 5 : InSAR 画像

画像が傾いているのは衛星の軌道方向が傾いているからである

また、InSAR 画像は青色を基準として、青→赤となっている場所は衛星から遠ざかる方向、青→黄となっている場所は衛星に近づく方向に変動していることを表す。



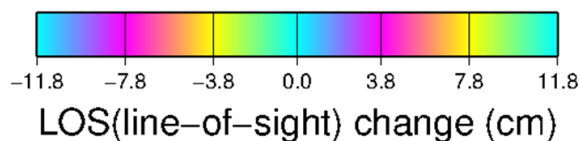


図 6 : L バンド InSAR での干渉カラーバー

地震や DEM の効果は単調減少か単調増加で表され、電離圏の影響はプラスとマイナスが交互に出る。また、地震の影響が InSAR の画像に現れるのは経験的にマグニチュード 5 以上かつ震源の深さが 15km より浅いものであることが多い。

## 1.5. MAI

MAI (Multiple Aperture Interferometry) は SAR の解析技術の一つであり、レーダー画像の前半分、後ろ半分のみでそれぞれの干渉画像を作り、二つの画像の差をとることで azimuth 方向成分の変動のみを得る技術である。そして、得られた MAI の位相を用いて電離圏のフェーズマップを得ることが出来る。以下,Bechor and Zebker (2006), Jung et al. (2013)および Liu et al. (2014)を参考に述べる。

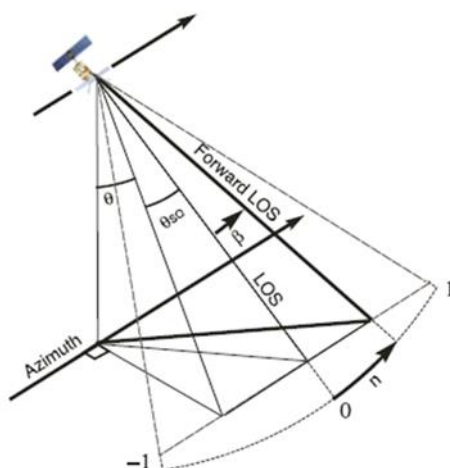


図 7 : MAI のイメージ

Bechor and Zebker., 2006 より

衛星のビームの中央を LOS とし、ビーム幅を  $\alpha$ 、斜視角 (Squint angle) を  $\theta_{sq}$  とする。LOS より  $+\beta$  の位置を前 (forward)、 $-\beta$  の位置を後ろ (backward) とする。前側について、斜視角は  $\theta_{sq} + \beta$  だが、簡単のために  $\beta = \frac{\alpha}{4}$  とする。よって、前側の干渉位相  $\varphi_f$  は次のように表される。

$$\varphi_f = -\frac{4\pi\Delta x}{\lambda} \sin\left(\theta_{sq} + \frac{\alpha}{4}\right)$$

$\Delta x$ : azimuth 方向の変位

後ろ側についても同様にして干渉位相 $\varphi_b$ は以下のように表せる.

$$\varphi_b = -\frac{4\pi\Delta x}{\lambda} \sin\left(\theta_{SQ} - \frac{\alpha}{4}\right)$$

結果, MAI の位相 $\varphi_{MAI}$ は以下のように表せる.

$$\varphi_{MAI} = \varphi_f - \varphi_b = -\frac{4\pi\Delta x}{\lambda} 2\sin\frac{\alpha}{4} \cos\theta_{SQ}$$

$\alpha$ ,  $\theta_{SQ}$ は微小なので,  $\varphi_{MAI} = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda} \alpha$ となる. また,  $\alpha \approx \frac{\lambda}{l}$  ( $\lambda$ :ビームの波長,  $l$ :アンテナ

の長さ) とすると,  $\varphi_{MAI} = \frac{2\pi\Delta x}{l}$ となる.

電離圏の位相の azimuth 方向の導関数は以下のように与えられる.

$$\frac{d\varphi_{ION}}{dx} = \gamma \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x$$

$\gamma$ : システムやジオメトリ依存のファクター

よって, MAI の位相 $\varphi_{MAI}$ と電離圏の位相の azimuth 方向の変位 $\frac{d\varphi_{ION}}{dx}$ の関係は以下のよ  
うに与えられる.

$$\frac{d\varphi_{ION}}{dx} = \gamma \frac{2l}{\lambda} \varphi_{MAI}$$

これは, azimuth 方向の変位が MAI の位相と線形比例していることを表している. し  
たがって, 電離圏の位相は MAI の位相によって以下のように表される.

$$\varphi_{ION} = \gamma \frac{2l}{\lambda} \int \varphi_{MAI} dx$$

得られた電離圏のフェーズマップは InSAR 画像での電離圏の影響の補正に使われる.  
(Raucoules and Michele. 2010 など)

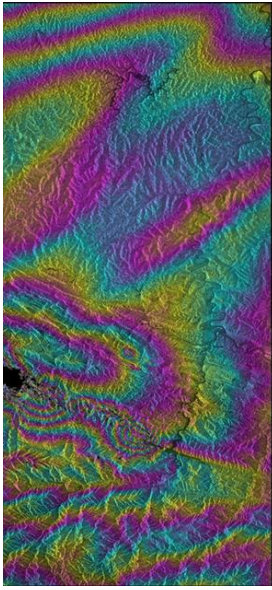


図 8 : InSAR の画像

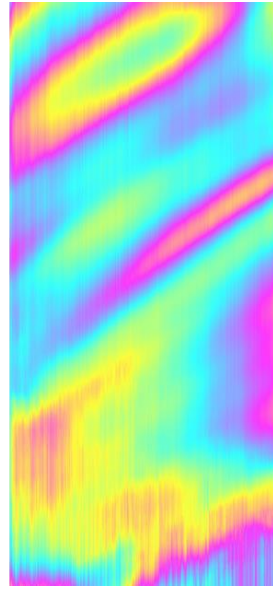


図 9 : MAI を用いた電離圏  
のフェーズマップ

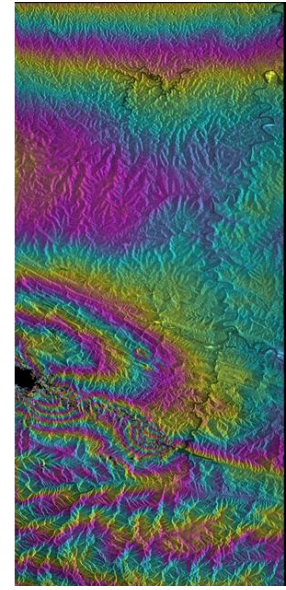


図 10 : InSAR の画像  
から電離圏の影響を  
補正したもの

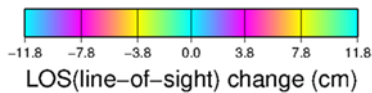


図 8 は四川の大地震 (2008 年) のときの InSAR の画像である。画像の下半分の縞 (青枠で示した範囲) は地震によるものであり、上半分は電離圏の影響が現れている。図 9 は MAI を用いて作成した電離圏のフェーズマップであり、図 8 の電離圏の影響が出ているところとのパターンが似ている。図 10 は、図 8 に図 9 を用いて電離圏の影響を補正したものである。図 8 の上半分に出ていた電離圏の影響を取り除くことができた。上半分で残存している位相変化は大気ノイズや軌道縞によるものと考えられる。

## 1.6. ALOS/PALSAR

Advanced Land Observing Satellite (ALOS) は地図作成や災害状況把握などの目的の下、2006 年 1 月 24 日に宇宙航空研究開発機構 (JAXA:Japan Aerospace Exploration Agency) により打ち上げられ、2011 年 5 月 12 日に運用を停止した。



図 11 : ALOS

JAXA | 人工衛星・探査機による貢献

(<http://www.jaxa.jp/projects/sat/>) より

同じ場所を観測した際、衛星の軌道方向でデータの取り方が異なる。衛星が南から北方向に移動する軌道をアセンディング (Ascending) 軌道といい、北から南方向に移動することをディセンディング (Descending) 軌道という。

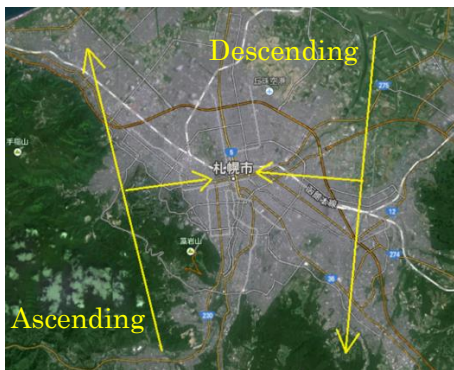


図 12 : Ascending と Descending の違い

地図は Google マップ

(<https://maps.google.co.jp>) より

これ以降の地図も全て Google マップ

ALOS は、標高など地表の地形データを読み取るパナクロマチック立体視センサ (PRISM)、地表の状態を知るための高性能可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2)、昼夜、天候に問わず陸域が観測可能なフェーズドアレイ式 L バンド合成開口レーダー (PALSAR) の三つのセンサを搭載している。ALOS/PALSAR の高分解能モードの概要を表 1 に示した。

衛星高度	692km	
軌道	太陽同期 準回帰軌道	
	回帰日数: 46日	
	傾斜角: 98.16°	
アンテナサイズ	アジマス方向: 8.9m × エレベーション方向: 3.1m	
中間周波数	1270MHz (L-band)	
モード	FBS	FBD
バンド幅	28MHz	14MHz
偏波	HH or VV	HH+HV or VV+VH
入射角範囲	8~60°	
地上分解能	7~44m	14~88m
観測幅	40~70km	

表 1 : ALOS/PALSAR の高分解能モードの概要

観測には L バンド (波長 : 23.6cm) のマイクロ波が用いられている。X バンド (波長 : 3cm) や C バンド (波長 : 5cm) などの波長の短い電波は地表変動検出の分解能は

高くなるが、植生の透過性が悪くなる。一方、Lバンドは植生を透過する。また、山岳地帯のように地形が険しいところではマイクロ波の波長が長い方が干渉に有利である。

電離圏の影響については、以下のようになる。(Meyer et al. 2006)

$$n_{iono} = 1 - K \frac{n_e}{f^2}$$

$n_{iono}$ :電離層の屈折率  $K:40.28m^3/s^2$   $n_e$ :電子密度  $f$ :レーダーの周波数  
電離層の屈折率はレーダーの周波数に強く依存している。周波数の低いLバンドでより顕著に電離圏の影響が現れるので、Lバンドのマイクロ波が用いられている  
ALOS/PALSAR は電離圏の現象を調べる際に有利である。

## 1.7. スポラディック E

高層大気には電離層という電子密度の高い領域があり、高さ毎に D 層 (60~90km)、E 層 (高度: 90~130km)、F 層 (高度: 130~1000km) と呼ばれ、それぞれで異なった性質をもつ。

スポラディック E (Sporadic E) は、高度 100km 付近に現れる電子密度の高い領域で、赤道域から極域に至る広い範囲で発生し、出現特性は緯度範囲によって異なり、極光 (オーロラ) 型、中緯度型、磁気赤道型の三つに大別される。日本で発生するスポラディック E は中緯度型であり、毎年 5~8 月の午前中と夕方に多く発生し、普段は通過する周波数の高い電波を反射して通信障害を起こす。大きさは、長さが 50~500km、幅が 10~30km で移動速度は約 1.8~6km/min。スポラディック E の反射する電波の周波数の最大値 (臨界周波数) の定義は決定されていないが、情報通信研究機構 (NICT:National Institute of Information and Communications Technology) では臨界周波数値  $foEs \geq 4.5MHz$  のときスポラディック E が存在するとしている。日本では稚内、国分寺、山川のイオノゾンデでよく観測されている。また、発生メカニズムについては大気重力波や中性風などが考えられているが、明確には解明されていない。

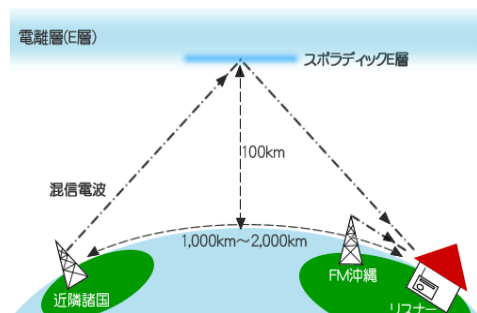


図 13: スポラディック E  
スポラディック E 層の発生による受信障害について -FM Okinawa  
(<http://www.fmokinawa.co.jp/espo/>) より

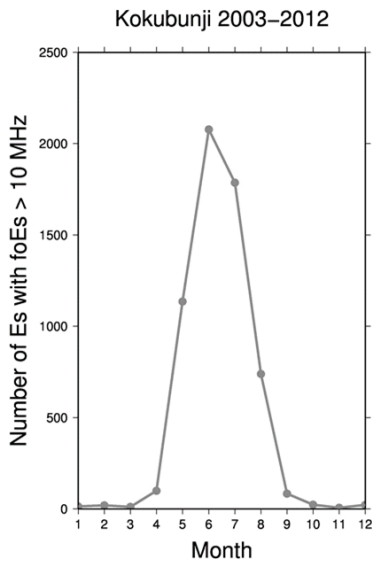


図 14: 国分寺のイオノゾンデで 2003~2012 年に観測されたスプラディック E の臨界周波数が 10MHz を超えた回数 (時間毎)

Maeda (2015)より

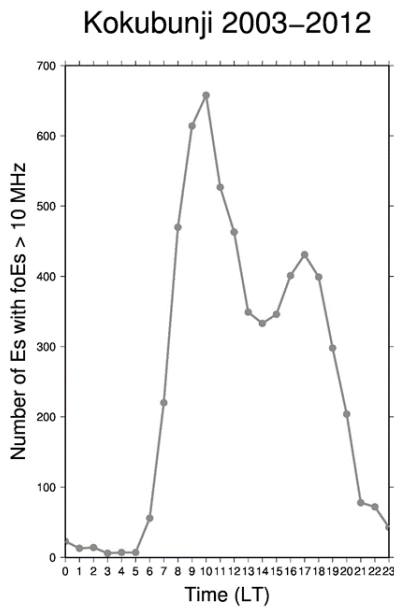


図 15: 国分寺のイオノゾンデで 2003~2012 年に観測されたスプラディック E の臨界周波数が 10MHz を超えた回数 (月毎)

Maeda (2015)より

## 1.8. イオノゾンデ

電離圏の観測はイオノゾンデ (Ionosonde) という装置を使っており、現在、国内には稚内、国分寺、山川、沖縄に観測施設がある。その基本原理は、周波数を変化させながら電波を上空に送信し、その電波が電離圏で反射されて地上に戻ってくるまでの時間を計測するというものである。イオノゾンデによって取得される電離圏の一次観測デー

タをイオノグラム (Ionogram) と呼び、ある時刻のどの高さの電離層がどの周波数の電波をどの程度の強さで反射したのかを知ることが出来る。



観測施設	地理緯度(世界測地系)	地理経度(世界測地系)	海拔
稚内/サロベツ	45.16° N	141.75° E	10m
国分寺	35.71° N	139.49° E	75m
山川	31.20° N	130.62° E	60m
沖縄/大宜味	26.68° N	128.15° E	270m

表 2 : 国内のイオノゾンデの地理的データ

図 16 : イオノゾンデの場所

日本国内のイオノゾンデ観測データ

(<http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/>) より

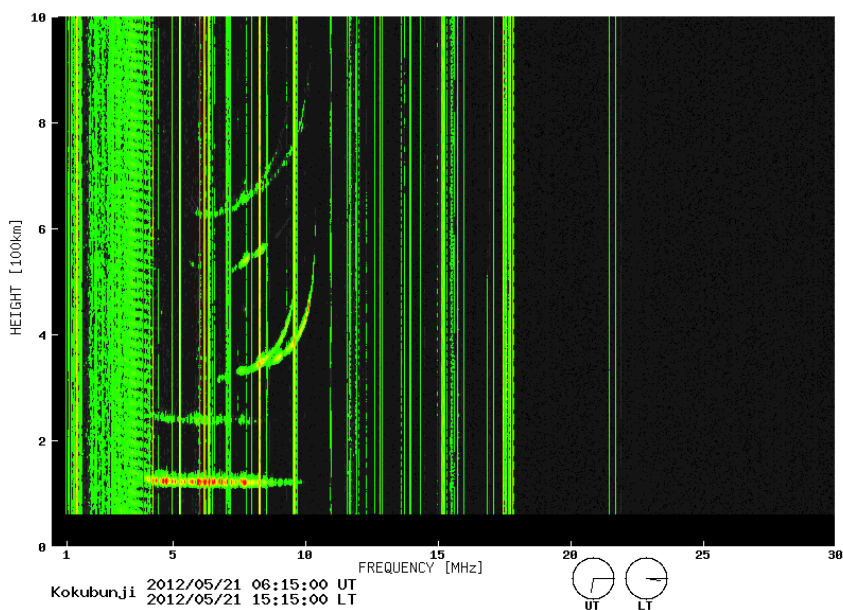


図 17 : 2012 年 5 月 21 日 15:15:00 (LT) の国分寺での垂直観測のイオノグラム

## 1.9. GPS-TEC

Global Navigation Satellite System (GNSS) の一つである Global Positioning System (GPS) は複数の衛星からの測位コードを同時に受信することで三次元位置を

特定することができる技術である。正確な位置を測定するためには4機以上の衛星からの測位信号が必要である。軌道傾斜角  $55^\circ$  の6枚の軌道面があり、一つの面には4機以上のGPS衛星が配置されており、現在約30機ある。全てのGPS衛星にはCs（またはRb）の原子時計が搭載され、Coordinated Universal Time (UTC) に同期している。元来は軍事用のシステムであったが、現在はカーナビゲーションシステムなどの非軍事目的にも用いられる。

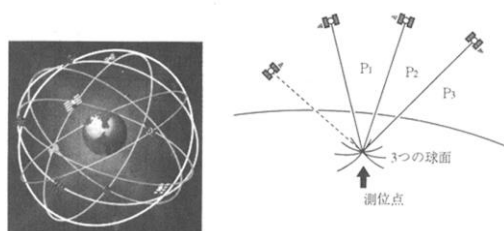


図 18 : GPS

日本船舶電装協会へようこそ

(<http://www.ship-densou.or.jp/yogo/yogo-zu-gps.html>) より

GPS は  $1.5\text{GHz}$  (位相 :  $L_1$ ) と  $1.2\text{GHz}$  (位相 :  $L_2$ ) の二つの周波数の搬送波を用いており、これにより電離圏の情報を得ることができる (GPS-TEC 法)。全電子数 (TEC: Total Electron Content) は信号に沿う経路で積分した電離層の総電子数である。TEC は TECU (TEC Unit) を単位として表され、 $\text{TECU} = 10^{16} \text{electron/m}^2$  である。TEC の変化量  $\Delta\text{TEC}$  は以下の式で表される。(Heki et al. 2010)

$$\Delta\text{TEC} = \frac{1}{K} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Delta L_4$$

$$K: 40.308 \text{m}^3/\text{s}^2 \quad f_1: 1.5\text{GHz} \quad f_2: 1.2\text{GHz}$$

$$\Delta L_4: L_1 - L_2 \quad (\text{m})$$

$\Delta L_4$  は大気遅延、位置の情報は除かれ、電離圏の情報のみを含んでいる。

スプラディック E では  $\Delta\text{TEC}$  の値は  $0.5 \sim 1\text{TECU}$  となることが知られている。

## 2. 使用した SAR データ

本研究で使用したデータは、まず、スプラディック E が多く観測されている稚内、国分寺、山川のイオノゾンデが 2006~2010 年の 5~8 月の午前中に  $f_oE_s \geq 15\text{MHz}$  となった日時を選び、それと観測時刻と観測場所が近い ALOS/PALSAR の Descending のデータを選んだ。InSAR 画像を作るにはペアが必要なため、5~8 月以外で期間が離れすぎず、出来るだけ Bperp が短いものをペアとした。実際に使用したデータを表 3 に



まとめた。表中の Date はデータの取得日時を示し，“YYYYMMDD” = “西暦/月/日”で示した。また,日付の早い方を Master, 遅い方を Slave とした。SAR の解析には GAMMA 社が開発した GAMMA Software を使用し, DEM は米国航空宇宙局 (NASA:National Aeronautics and Space Administration) が作成した 90m メッシュの SRTM4 (Shuttle Radar Topography Mission) を使用した。

No.	Path	Frame	Date (YYYYMMDD)	Date of pair (YYYYMMDD)	Mode	Bperp (m)	Time (SAR)	Time (Ionosonde, foEs ≥ 15MHz)
1	74	2940	20070611	20070911	FBS	21.99	10:48	11:30
		2950				27.99		
		2960				34.32		
		2970				40.04		
		2980				45.75		
2	72	2920	20090628	20090328	FBS	146.8	10:44~45	8:15,12:15
		2930				143.78		
		2940				139.84		
		2950				136.21		
		2960				132.92		
3	71	2950	20100614	20100914	FBS	-531.78	10:42	9:45~10:15
		2960				-525.89		
4	59	2860	20100525	20101010	FBS	-557.85	10:15~16	9:45~11:45
		2870				-548.8		
		2880				-540.32		
		2890				-532.11		
		2900				-523.54		
5	56	2910	20100705	20101005	FBS	-514.93	10:08~09	10:15
		2920				-506.27		
		2870				-493.66		
		2880				-488.2		
		2890				-482.99		
		2900				-477.71		

表 3 : 使用したデータ

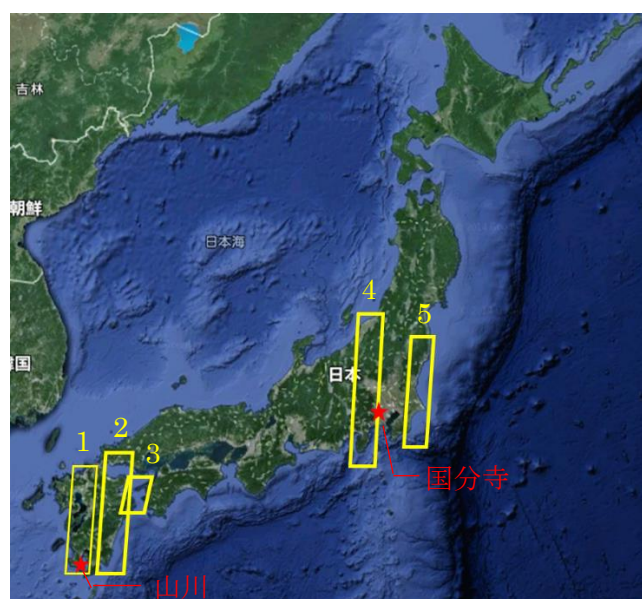


図 19 : 使用したデータの位置  
(黄色数字は表 3 中の No.に対応している)

### 3. 結果と考察

図 20 のように azimuth 方向に水面が入ると, MAI の結果の水面での値は異常な値を示す. これにより, MAI の結果を積分して得られる電離圏のフェーズマップは図 9 のように上手くはいかなくなる. 全てのデータに水面が入っており, 上手くいかなかったので, MAI を用いた電離圏フェーズの結果はこれ以降載せていない.

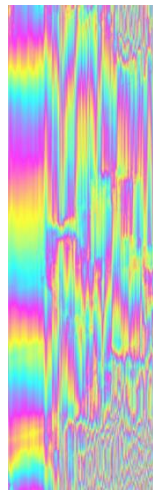
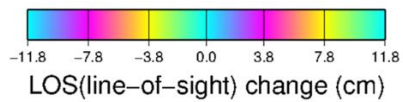


図 20 : 表 3 中の No.1 のデータ (20070611\_20070911) の MAI を用いた電離圏フェーズマップ (レーダー座標)



### 3.1. No.1 のデータ (20070611\_20070911)

#### 3.1.1. InSAR の結果と考察

表 3 中の No.1 のデータ (20070611\_20070911) の InSAR の画像を図 22 に示した.

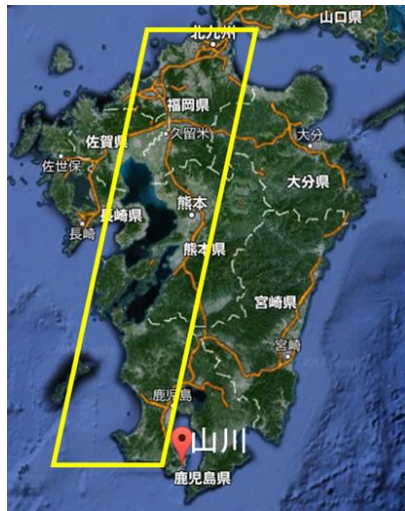


図 21 : No.1 のデータの位置

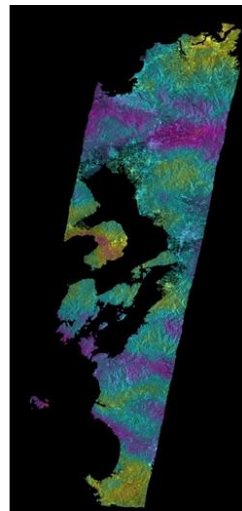
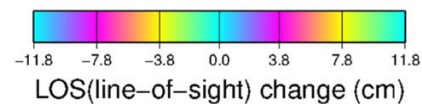


図 22 : No.1 の干渉画像



InSAR のデータには 1.4.で述べたように様々な効果による位相変化が含まれる. 軌道縞や地形縞は高い精度で取り除くことが出来るので, 残る位相変化を生じさせる原因は地表変位と大気, 電離圏によるノイズと考えてよい.

図 22 では約 4cm と約 -4cm 分の局所的な位相変化が見える. 二つのデータの期間内に InSAR の画像に現れるような規模の地震は発生せず, このデータの Bperp は DEM の誤差への感度が十分小さい. また, 位相変化がプラスとマイナスの交互になっていないので, この位相変化の原因は地震や電離圏の影響ではないと考えられる.

次にスプラディック E の検出の可能性について考察した.

### 3.1.2. スポラディック E 検出の可能性

山川のイオノゾンデで foEs のピークが観測されたのは 11:30 で、SAR によってこの領域が撮られたのは 10:48 であった。スポラディック E の速度は 1.8~6km/min で、イオノゾンデの観測と SAR での観測時間のズレは 42 分なので、その間に約 76~252km 移動する。



図 27 : イオノゾンデで観測されたスポラディック E のおおよその存在範囲 (赤矢印の範囲)

図 27 を見ると干渉画像の範囲に含まれていることがわかる。

この局所的変動の LOS 変位量は約±4cm であり、これを用いて Meyer et al. (2006, n.d.)および Hannsen (2001)を参考に $\Delta\text{TEC}$ を計算した。天頂方向の電離圏遅延 $S_{k,iono}^z$ を 1.6.に示した電離圏の屈折率 $n_{iono}$ を用いて表すと、以下のようになる。

$$\begin{aligned} S_{k,iono}^z &= \frac{1}{10^6} \int_0^H (n_{iono} - 1) \cdot 10^6 dh \\ &= -\frac{K}{f^2} \int_0^H n_e dh \\ &= -\frac{K}{f^2} \text{TEC} \end{aligned}$$

K:  $40.28\text{m}^3/\text{s}^2$   $n_e$ :電子密度 f:レーダーの周波数

マッピングファンクション  $M=1/\cos X$  (X:ビームの天頂角) を定義する。また、 $\cos X$  は以下の式で表される。

$$\cos X \approx \sqrt{1 - \left(\frac{R_e \cos \varepsilon}{R_e + h_{sp}}\right)^2}$$

$R_e$ :地球の半径 (6400km)     $\varepsilon$ :90° - 入射角

$h_{sp}$ :最大電子密度層の高度

No.1 のデータでの入射角は 38.8° だったので、 $\varepsilon = 51.2^\circ$  となる。  $h_{sp}$  はスプラディック E の高度 (100km) とすると、 $\cos X = 0.787$  となり、 $M(51.2^\circ) = 1.27$  となる。

InSAR での電離圏の LOS 変位量を  $\Delta\delta_{iono}$  とすると、 $\Delta\text{TEC}$  との関係は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta\delta_{iono} &= M \int_0^H \Delta S_{k,iono}^z dh \\ &= -M \frac{K}{f^2} \int_0^H \Delta n_e dh \\ &= -\frac{K}{f^2} M \Delta\text{TEC} \end{aligned}$$

$f=1270\text{GHz}$ ,  $M=M(51.2^\circ)$  を代入し、 $\Delta\text{TEC}$  を TECU で表すと以下ようになる。

$$\Delta\delta_{iono} = -0.317 \Delta\text{TEC}$$

$\Delta\delta_{iono} = \pm 0.04\text{m}$  を代入した結果、 $\Delta\text{TEC} = \pm 0.13\text{TECU}$  となり、これはスプラディック E が発生したときの TEC 変化量と比べとても小さいので、スプラディック E が原因ではない。

次に対流圏遅延も原因として考えられるので、それについても考察した。

### 3.1.3. 対流圏遅延に関する考察

気象庁が保有する全国 20 台の気象レーダーで観測した 10 分間隔の 1km メッシュエコー強度を用いて降雨レーダー画像を作り、SAR でデータを取得した時間にその場所でどの程度の雨が降っていたのかを調べた。

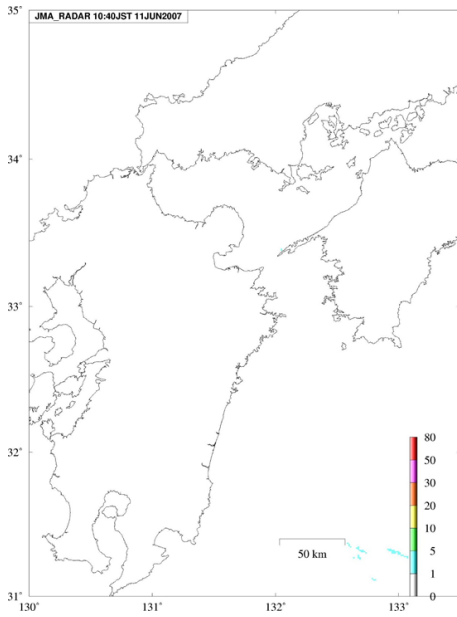


図 23 : 20070611 の 10:40 の降雨  
レーダー画像

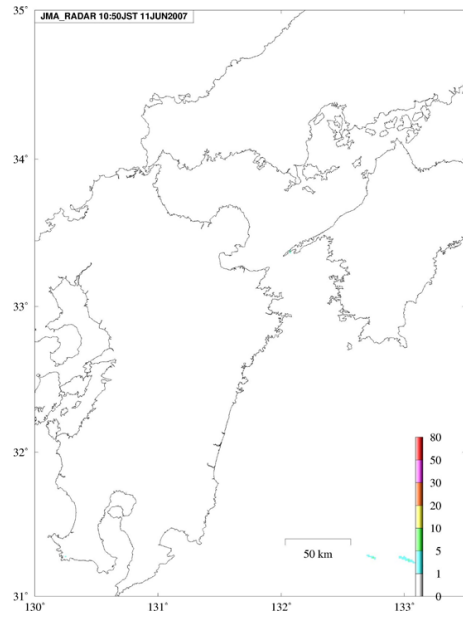


図 24 : 20070611 の 10:50 の降雨  
レーダー画像

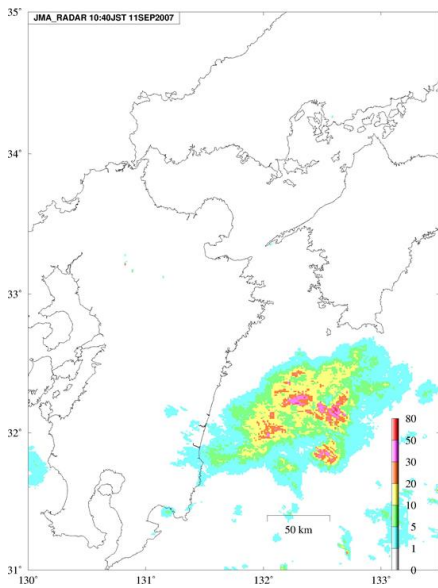


図 25 : 20070911 の 10:40 の降雨  
レーダー画像

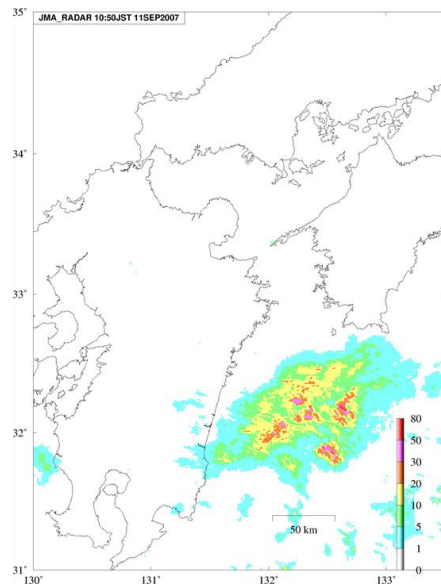


図 26 : 20070911 の 10:50 の降雨  
レーダー画像

No.1 のデータの領域は雨がほとんど降っていなかったことがわかった。しかし、雨が降ってなくても水蒸気遅延が起きる場合がある。また、対流圏大気遅延の効果がノイズとして頻出するので、図 22 で見られた局所的な位相変化は大気によるノイズが原因である可能性が最も高い。

## 3.2. No.2 のデータ (20090328\_20090628)

### 3.2.1. InSAR の結果と考察

表 3 中の No.2 のデータ (20090328\_20090628) の InSAR の画像を図 29, 30 に示した。

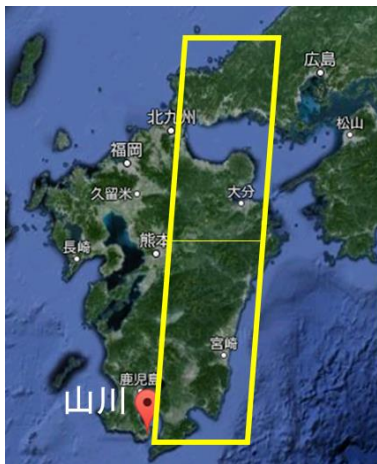


図 28 : No.2 のデータの位置

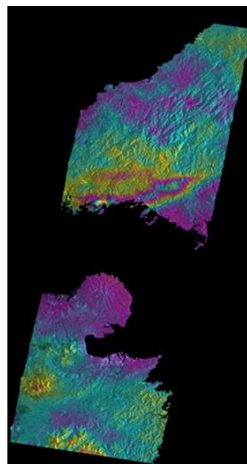


図 29 : No.2 の Frame:2920 ~ 2950 (図 28 の黄色枠の上半分) の干渉画像

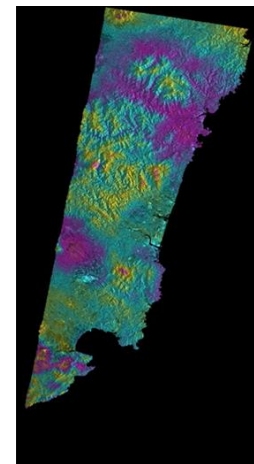
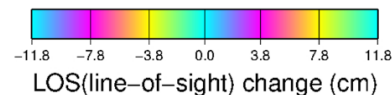


図 30 : No.2 の Frame:2960 ~ 2990 (図 28 の黄色枠の下半分) の干渉画像



山口県南部で最大約 $-14\text{cm}$ 分の局所的な位相変化が見える。他にも約 $4\text{cm}$ と約 $-3.5\text{cm}$ 分の局所的な位相変化が見える。3.1.1.と同様に地震や DEM は原因ではないと考えられる。

次にスプラディック E の検出の可能性について考察した。

### 3.2.2. スプラディック E 検出の可能性

山川のイオノゾンデで foEs のピークが観測されたのは 8:15, 12:15 で, SAR によってこの領域が撮られたのは 10:44~45 (図 29 は 10:44, 図 30 は 10:45) であった。スプラディック E の速度は  $1.8\sim 6\text{km/min}$  で, イオノゾンデの観測と SAR での観測時間

のズレは約 150 分 (8:15 とのズレ), 約 90 分 (12:15 とのズレ) なので, その間に約 270~900km (8:15 での考察), 約 162~540km (12:15 での考察) 移動する.

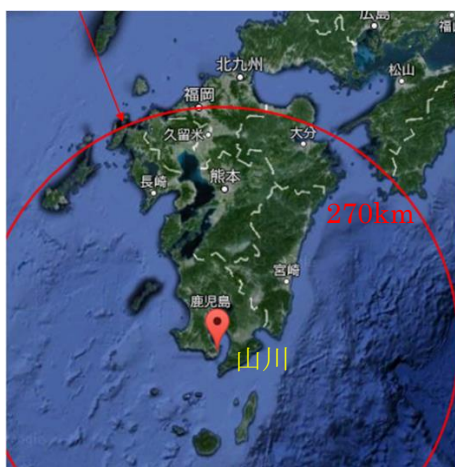


図 35 : 8:15 にイオノゾンデで観測された  
スプラディック E のおよその存在範囲  
(赤矢印の範囲)

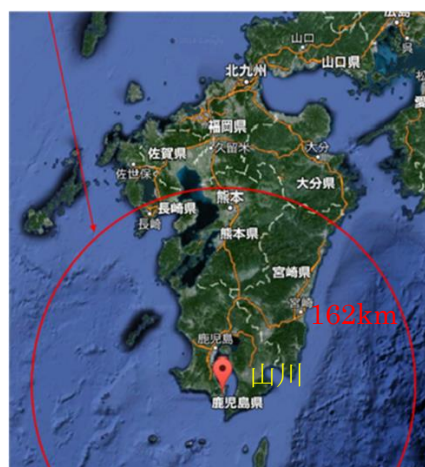


図 36 : 12:15 にイオノゾンデで観測された  
スプラディック E のおよその存在範囲  
(赤矢印の範囲)

8:15 と 12:15 のスプラディック E は図 29 に含まれている可能性がある. 図 30 には 12:15 のスプラディック E が含まれている可能性がある.

宮崎県と大分県の県境などに見られる局所的な位相変化は No.1 での結果と似ており,  $\Delta\text{TEC}=\pm 0.13\text{TECU}$  となったので, スプラディック E が原因でない.

山口県南部の局所的な位相変化について考察する.



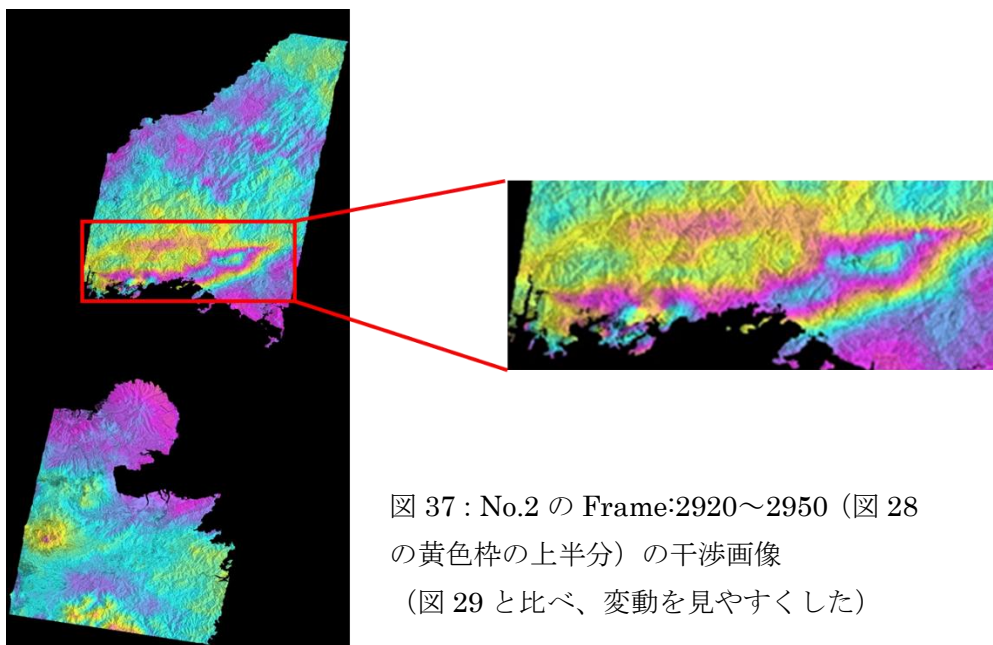


図 37 : No.2 の Frame:2920~2950 (図 28 の黄色枠の上半分) の干渉画像 (図 29 と比べ、変動を見やすくした)

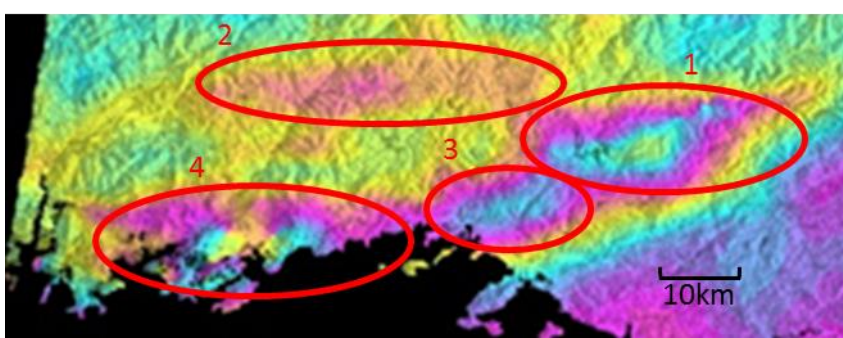
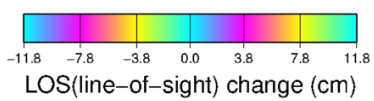
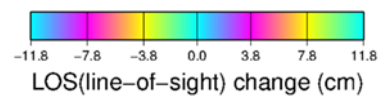


図 38:局所的な位相変化の細かいパッチ状構造に番号を振ったもの



画像を拡大すると四つの細かいパッチ状構造が見え、それらに番号を振り、それぞれの LOS 変化量, 幅, 長さを表 4 にまとめた.

No.	LOS変化量(cm)	幅(km)	長さ(km)
1	-14	15	40
2	-7	10	55
3	-11	15	15
4	-	-	-

表 4 : 図 38 のそれぞれのパッチ状構造のデータ

No.4 のパッチは海で途切れてしまっており、また、**unwrapping** のエラーが起きているので LOS 変化量，幅，長さはわからない。

この局所的な位相変化の LOS 変位量は最大約−14cm であり、これを用いて 3.1.3. と同様に $\Delta\text{TEC}$  を計算した。

No.2 のデータでの入射角は  $38.8^\circ$  だったので、 $\Delta\delta_{iono}$  は以下のように表される。

$$\Delta\delta_{iono} = -0.317\Delta\text{TEC}$$

$\Delta\delta_{iono} = -0.14\text{m}$  を代入した結果、 $\Delta\text{TEC} = 0.44\text{TECU}$  となり、これはスプラディック E が発生したときの TEC 変化量にはほぼ等しい。しかし、スプラディック E であることを示すには高さが 100km 付近であることも示さなくては行けないが、InSAR の画像だけでは高さを拘束できない。

そこで、同研究室の D3 の前田隼さんに、SAR でこの領域が撮られた時刻（10:44～45）付近での山口県南部の TEC 変化量を GPS を用いて調べてもらった。

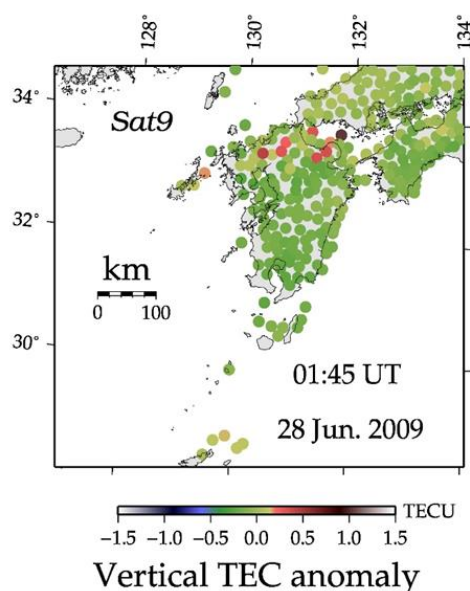


図 38 : 9 番衛星のみを用いた TEC の異常値マップ

画像は同研究室の前田さんから頂いた。(これ以降の TEC の画像についても同じである)

図 38 は一つの衛星のみからのデータしか使っていないので高さを拘束はしていない。また、空間分解能は 20km なので山口県の南にある約 1TECU の異常を示した点は、実際には山口県に現れている可能性がある。次に高さを拘束した。

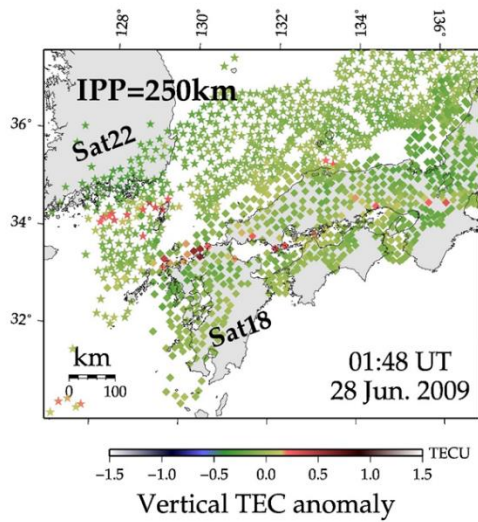


図 39 : 18 番と 22 番衛星を用いて高さを F 層 (250km) とした際の TEC の異常値マップ

図 39 では TEC の異常値を示す帯が二本出ており、これは、高さの拘束が間違えていることを示す。

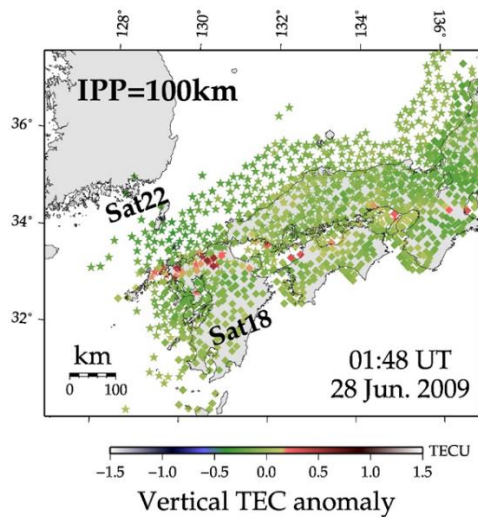


図 40 : 18 番と 22 番衛星を用いて高さを E 層 (100km) とした際の TEC の異常値マップ

図 40 では TEC の異常値を示す帯が一本しかないので、高さの拘束が正しいことを示す。よって、高度 100km のものであることを示すことが出来た。

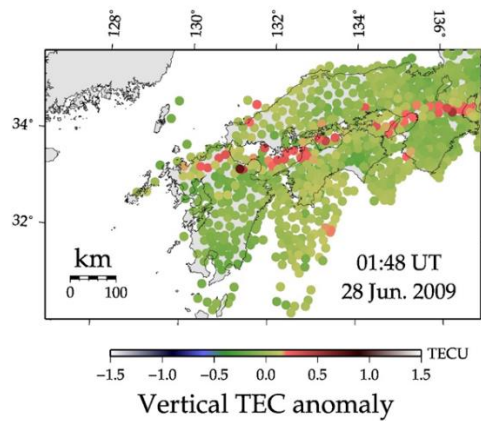


図 41：図 39 で見えた二本の帯を一本に合わせたもの

図 41 ではスプラディック E が福岡県から愛知県にかけて存在していることがわかる。

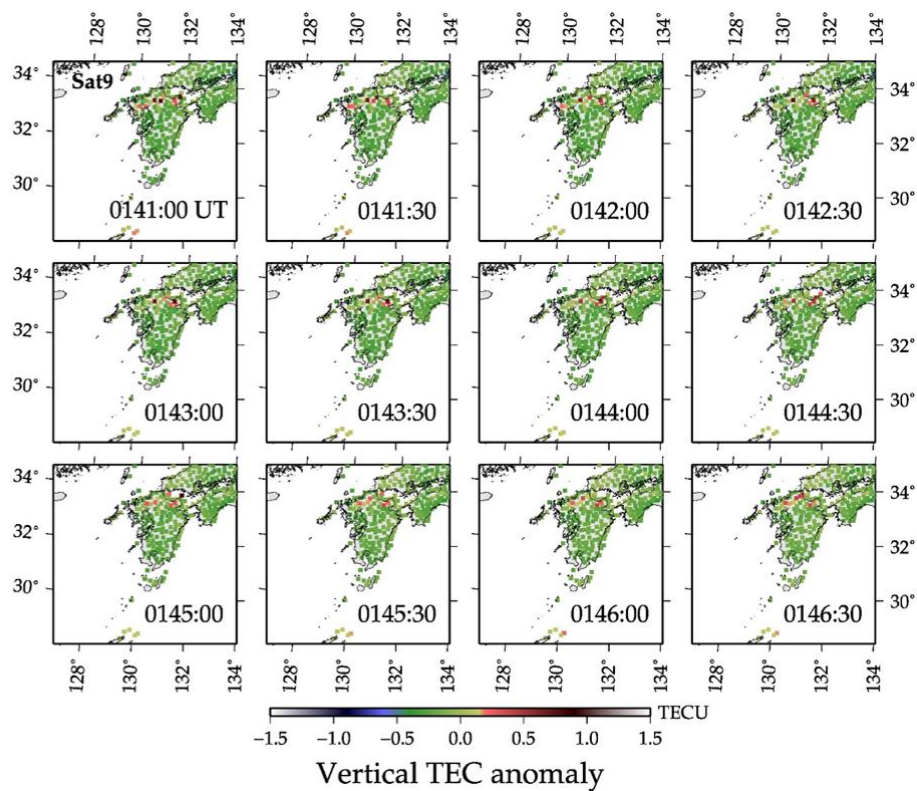


図 42：9 番衛星を用いた TEC の異常値マップの時間変化

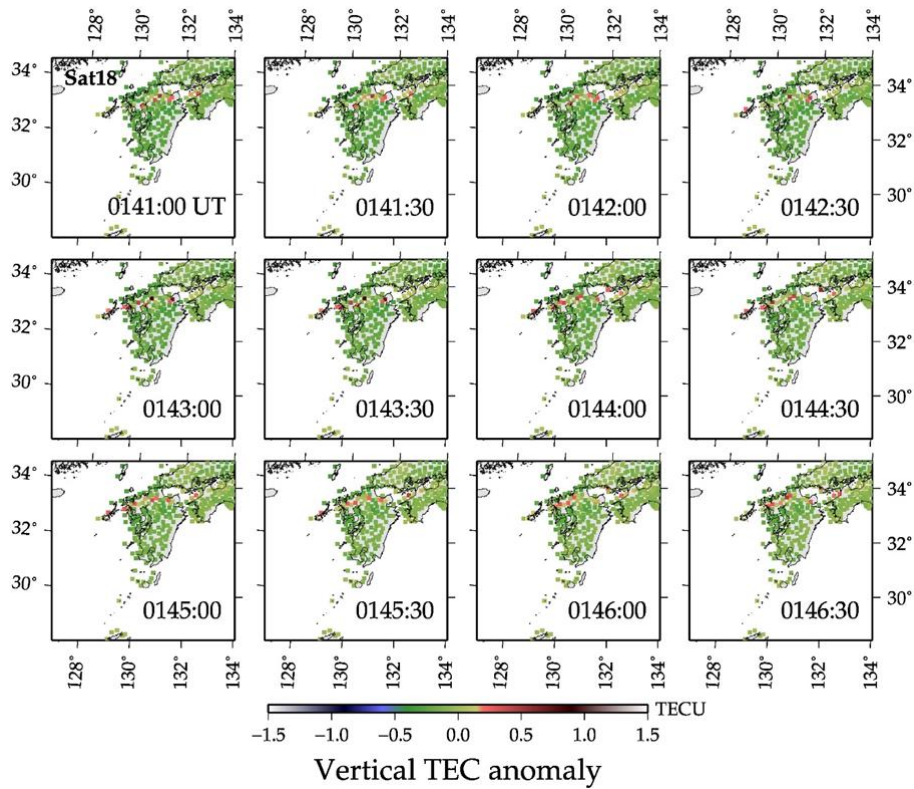


図 43 : 18 番衛星を用いた TEC の異常値マップの時間変化

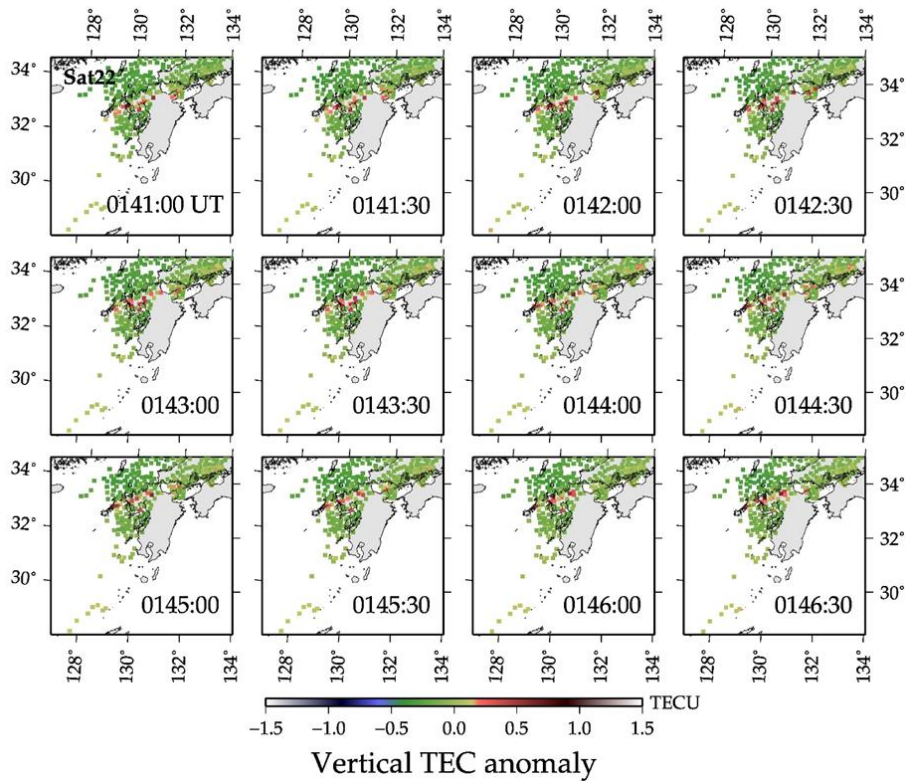


図 44 : 22 番衛星を用いた TEC の異常値マップの時間変化

図 42～44 を見ると，SAR でこの領域が撮られた時間にスポラディック E が九州北部辺りに存在していたことがわかる。

これらのことから，山口県南部で見られた局所的な位相変化はスポラディック E が原因であることがわかった．また，その少し上の約  $-5\text{cm}$  分の位相変化と大分県北東部の約  $4\text{cm}$  分の位相変化もスポラディック E の一部である可能性がある．しかし，イオノゾンデで観測された 8:15 と 12:15 に発生したものであるかどうかはわからなかった．

次にそれ以外の局所的な位相変化については対流圏遅延も原因として考えられるので，それについて考察をした．

### 3.2.3. 対流圏遅延に関する考察

3.1.2.と同様に降雨レーダー画像を作り，SAR でデータを取得した時間にその場所での程度の雨が降っていたのかを調べた．

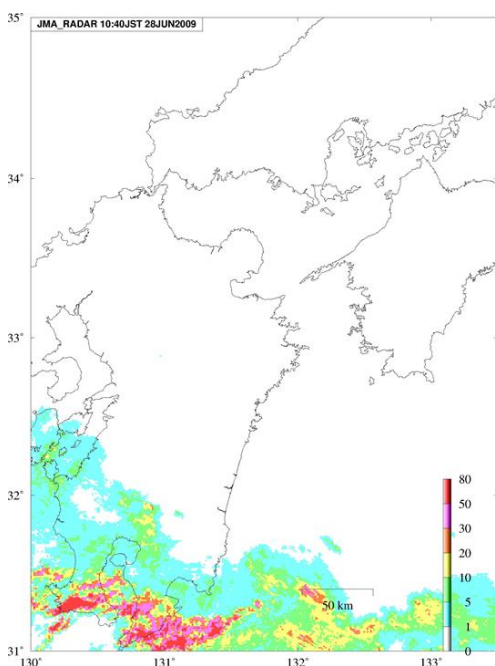


図 31 : 20090628 の 10:40 の降雨  
レーダー画像

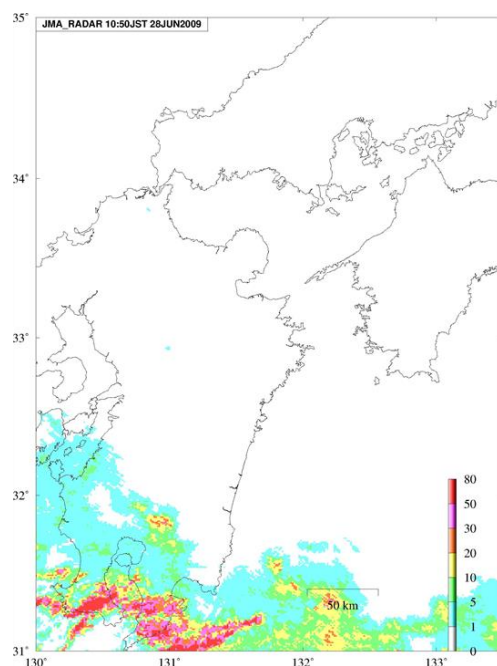


図 32 : 20090628 の 10:50 の降雨  
レーダー画像

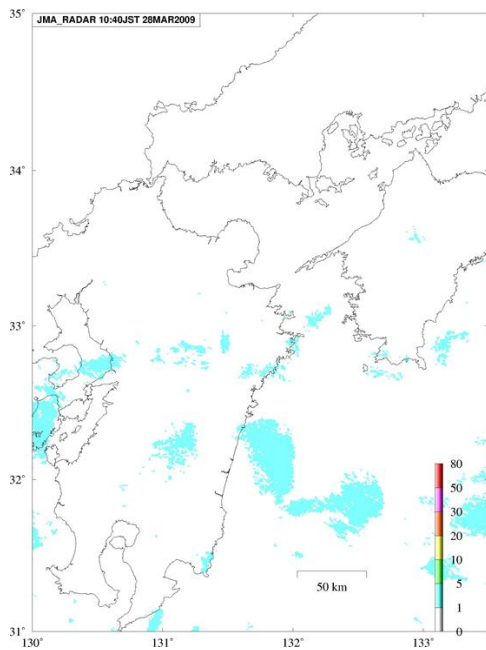


図 33 : 20090328 の 10:40 の降雨  
レーダー画像

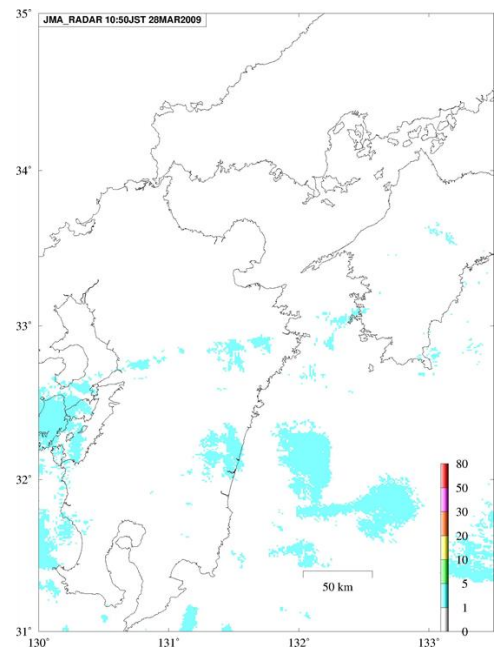


図 34 : 20090328 の 10:50 の降雨  
レーダー画像

宮城県と鹿児島県の県境で見られた局所的な位相変化については、雨が原因の可能性も考えられる。その他の領域については、雨が降っていなくても水蒸気遅延が起きる場合があり、また、対流圏大気遅延の効果がノイズとして頻出するので、大気に因るノイズが原因である可能性が最も高い。

### 3.3. No.3 のデータ (20100614\_20100914)

表 3 中の No.3 のデータ (20100614\_20100914) の InSAR の画像を図 46 に示した.

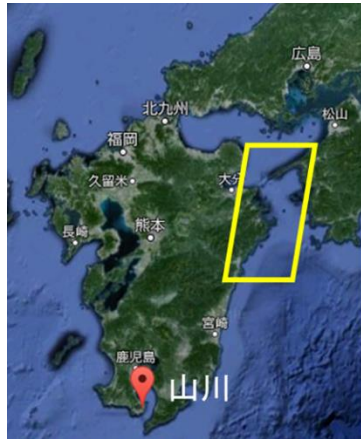


図 45 : No.3 のデータの位置

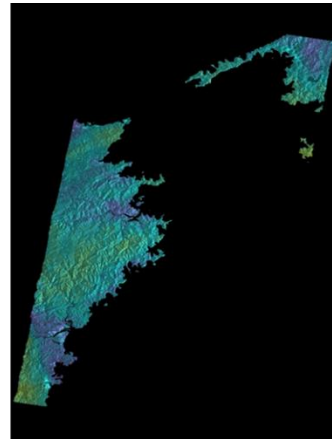
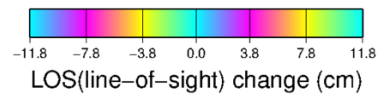


図 46 : No.3 の干渉画像



結果, 顕著な位相変化は見られなかった.



### 3.4. No.4 のデータ (20100525\_20101010)

#### 3.4.1. InSAR の結果と考察

表 3 中の No.4 のデータ (20100525\_20101010) の InSAR の画像を図 48, 49 に示した。



図 47 : No.4 のデータの位置

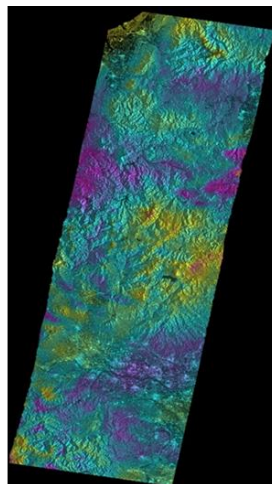


図 48 : No.4 の  
Frame:2860~2890  
(図 47 の黄色枠の  
北半分) の干渉画像

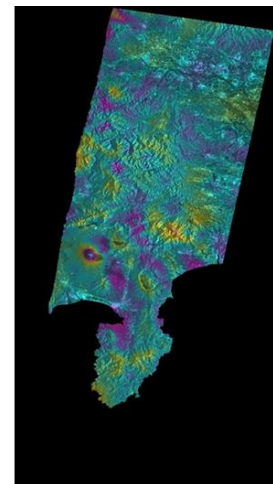
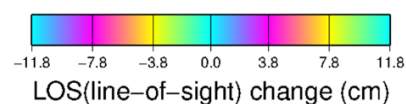


図 49 : No.4 の  
Frame:2890~2920  
(図 47 の黄色枠の  
南半分) の干渉画像



約 4cm と約 -5cm の局所的な位相変化が見える。3.1.1.と同様に、この位相変化の原因は地震や DEM や電離圏の影響ではないと考えられる。

次にスプラディック E の検出の可能性について考察した。

#### 3.4.2. スプラディック E 検出の可能性

国分寺のイオノゾンデで foEs のピークが観測されたのは 11:30 で、SAR によってこの領域が撮られたのは 10:15~16 (図 48 は 10:15, 図 49 は 10:16) であった。スプラ

ディック E の速度は 1.8~6km/min で、イオノゾンデの観測と SAR での観測時間のズレは約 45 分なので、その間に約 81~270km 移動する。

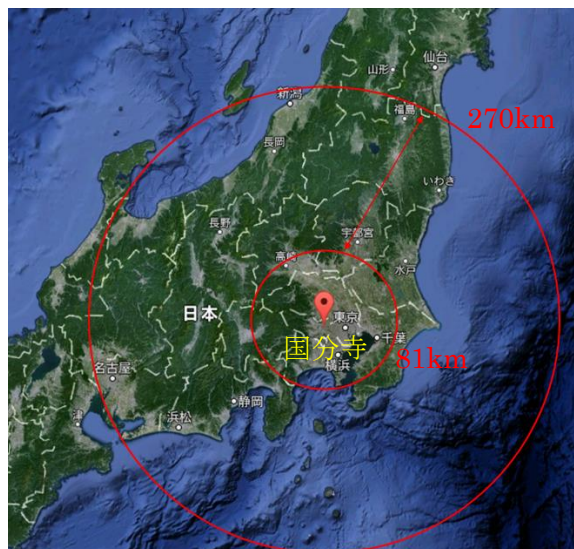


図 54:イオノゾンデで観測されたスプラディック E  
のおおよその存在範囲  
(赤矢印の範囲)

図 54 を見ると干渉画像の範囲に含まれていることがわかる。

3.1.3.と同様に $\Delta\text{TEC}$  を計算したところ、 $\Delta\text{TEC}=\pm 0.13\text{TECU}$  となり、これはスプラディック E が発生したときの TEC 変化量と比べとても小さいので、スプラディック E が原因ではない。

次に対流圏遅延も原因として考えられるので、それについて考察した。

### 3.4.3. 対流圏遅延に関する考察

3.1.2.と同様に降雨レーダー画像を作り、SAR でデータを取得した時間にその場所での程度の雨が降っていたのかを調べた。

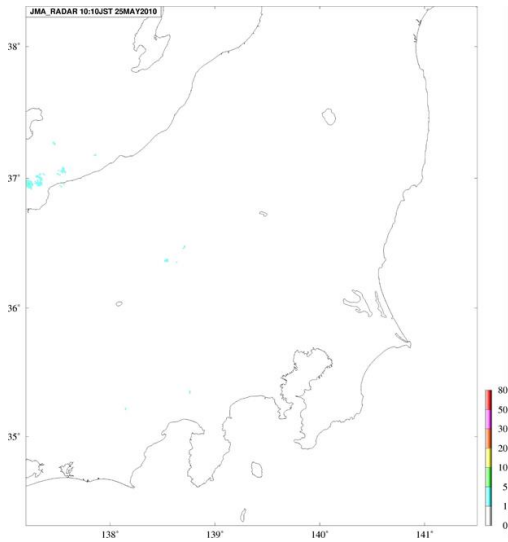


図 50 : 20100525 の 10:10 の降雨  
レーダー画像

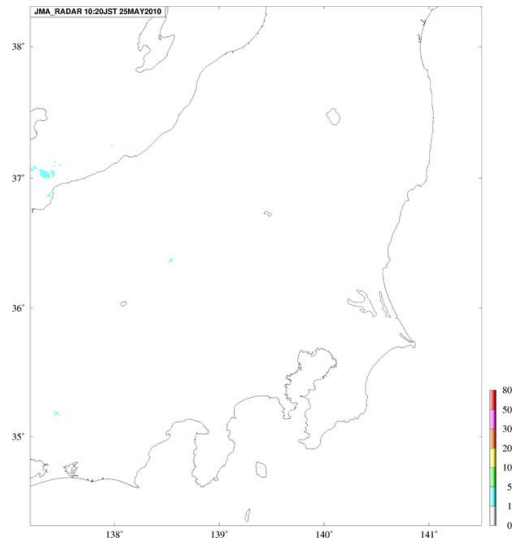


図 51 : 20100525 の 10:20 の降雨  
レーダー画像

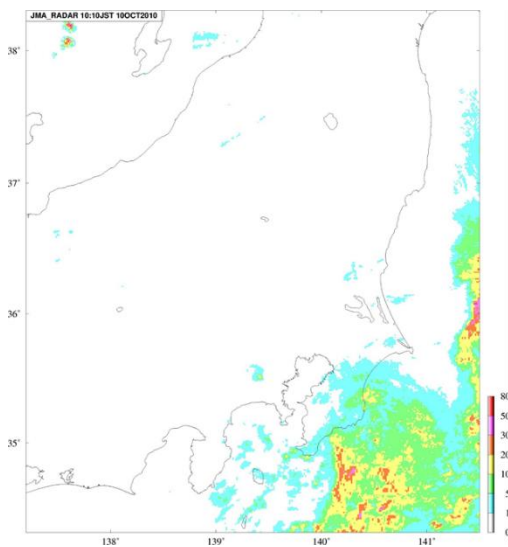


図 52: 20101010 の 10:10 の降雨  
レーダー画像

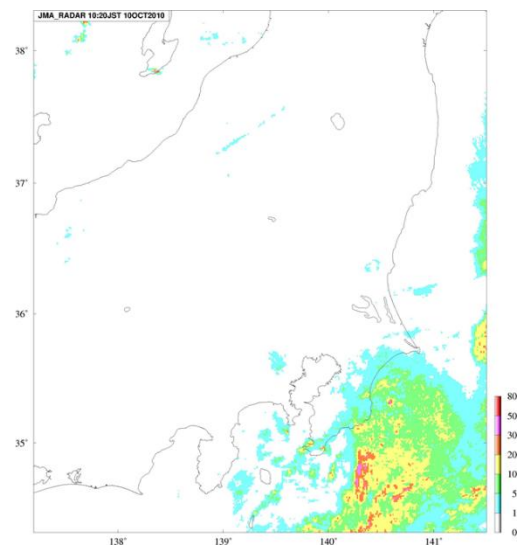


図 53 : 20101010 の 10:20 の降雨  
レーダー画像

No.4 のデータの領域は雨がほとんど降っていなかった。しかし、雨が降っていても水蒸気遅延が起きる場合がある。また、対流圏大気遅延の効果がノイズとして頻出するので、図 48, 49 で見られた局所的な位相変化は大気によるノイズが原因である可能性が最も高い。

### 3.5. No.5 のデータ (20100705\_20101005)

#### 3.5.1. InSAR の結果と考察

表 3 中の No.5 のデータ (20100705\_20101005) の InSAR の画像を図 56 に示した.

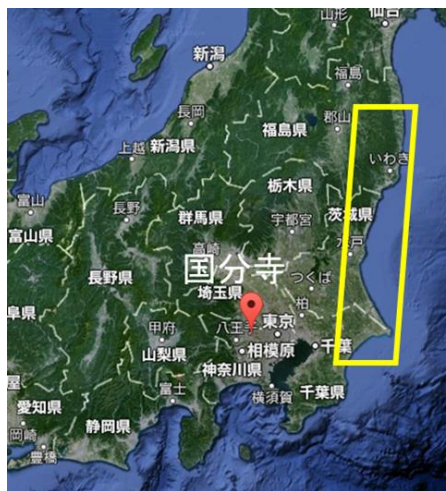


図 55 : No.5 のデータの位置

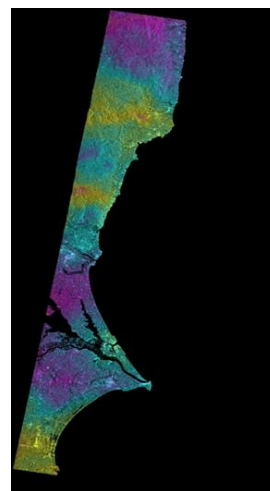
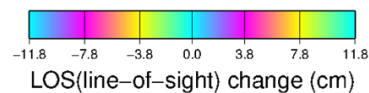


図 56 : No.5 の干渉画像



約 4cm と約 -5cm 分の局所的な位相変化が見える. 3.1.1.と同様に, この変動の原因は地震や DEM や電離圏の影響ではないと考えられる.

次にスプラディック E の検出の可能性について考察した.

#### 3.5.2. スプラディック E 検出の可能性

国分寺のイオノゾンデで foEs のピークが観測されたのは 10:15 で, SAR によってこの領域が撮られたのは 10:08~09 であった. スプラディック E の速度は 1.8~6km/min で, イオノゾンデの観測と SAR での観測時間のズレは約 7 分なので, その間に約 13~42km 移動する.



図 61 : イオノゾンデで観測されたスプラディック E のおおよその存在範囲  
(赤矢印の範囲)

イオノゾンデで観測されたスプラディック E が東西方向に長かった場合、干渉画像の範囲に含まれる可能性がある。

3.1.3.と同様に $\Delta\text{TEC}$ を計算したところ、 $\Delta\text{TEC}=\pm 0.13\text{TECU}$ となり、これはスプラディック E が発生したときの TEC 変化量と比べとても小さいので、スプラディック E が原因ではない。

次に対流圏遅延も原因として考えられるので、それについて考察した。

### 3.5.3. 対流圏遅延に関する考察

3.1.2.と同様に降雨レーダー画像を作り、SAR でデータを取得した時間にその場所での程度の雨が降っていたのかを調べた。

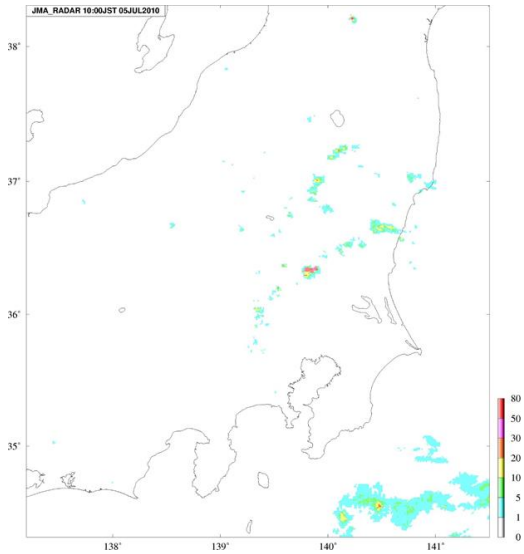


図 57 : 20100705 の 10:00 の降雨  
レーダー画像

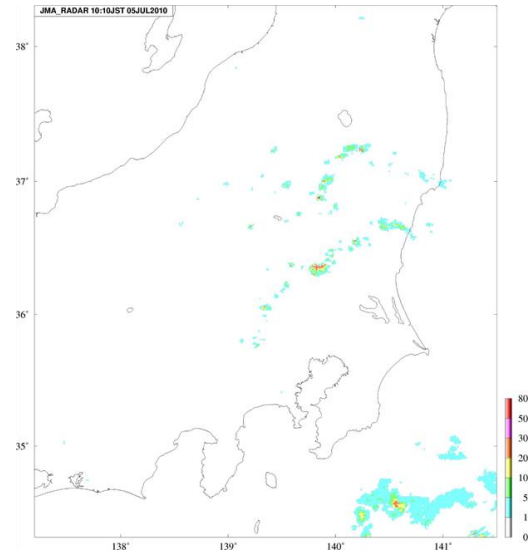


図 58 : 20100705 の 10:10 の降雨  
レーダー画像

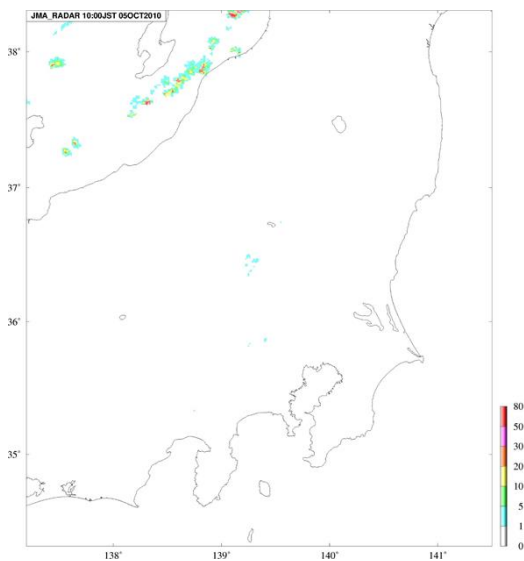


図 59 : 20101005 の 10:00 の降雨  
レーダー画像

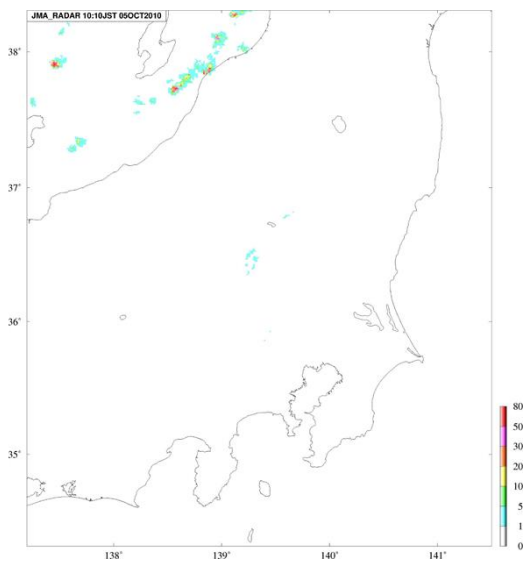


図 60 : 20101005 の 10:10 の降雨  
レーダー画像

No.5 のデータの領域は雨が少ししか降っていなかった。しかし、雨が降っていなくても水蒸気遅延が起きる場合がある。また、対流圏大気遅延の効果がノイズとして頻出するので、図 56 で見られた局所的な位相変化は大気によるノイズが原因である可能性が最も高い。

## 4. まとめ

InSAR を用いた観測により、ほぼ全ての画像で局所的な位相変化が見えた。

多くの場所で見られた約±4cm 分の位相変化は大気に因るノイズが原因である可能性が最も高い。

2009年3月28日と2009年6月28日のペアによる干渉画像には山口県南部に興味深い位相変化が見られた。約−14cm 分の位相変化で、TEC に換算すると、 $\Delta\text{TEC}=0.44\text{TECU}$  となり、これはスプラディック E が発生したときの TEC 変化量にほぼ等しい。しかし、E 層であるという高度の拘束は干渉画像からではわからない。GPS-TEC を用いることで高度を特定した。その結果、空間分解能は劣るが同様の局在したシグナルが検出され、高度が 100km 付近であることがわかり、山口県南部で見られた位相変化はスプラディック E によるものであることがわかった。しかし、このスプラディック E がイオノゾンデで観測されたものと同一であるかどうかはわからない。また、山口県南部の局所的な位相変化の少し上の約−5cm 分の位相変化と大分県北東部の約 4cm 分の位相変化もスプラディック E の一部である可能性がある。

これは InSAR を用いて中緯度スプラディック E を捉えることができた世界で最初の例である。

## 5. 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にご指導、ご協力をいただきました。この場をお借りして感謝の意を示したいと思います。

指導教官である古屋正人教授には必要なデータの用意や研究の進め方についてなど、様々なことを教えていただきました。また、前田さんには本研究のきっかけを与えてもらい、スプラディック E やイオノゾンデなどについての基本的な知識を教えてもらい、また、研究に必要な GPS のデータを頂くなど、多大な協力をしていただきました。姫松さんには、干渉画像の作り方やその見方などを教えていただきました。そして、固体系ゼミの皆様にはゼミでの発表を通して様々なことを教えていただきました。皆様、本当にありがとうございました。

本研究で用いた PALSAR データは、PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) において共有しているものであり、宇宙航空研

究開発機構（JAXA）と東京大学地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供されたものです。データの所有権は経済産業省および JAXA にあります。

本研究で用いたイオノゾンデのデータは情報通信研究機構（NICT:National Institute of Information and Communications Technology）からいただきました。

本研究で用いた GPS のデータは日本測量協会の電子基準点 RINEX データ (30 秒値) を使わせていただきました。

本研究で降雨レーダー画像を作成するために用いた全国合成レーダ GPV は京都大学生存圏研究データベースにあるものを使わせていただきました。

## 6. 参考・引用文献

J. Maeda, K. Heki, “Two-dimensional observations of midlatitude sporadic E irregularities with a dense GPS array in Japan,” *RADIO SCIENCE*, vol. 49, 28–35, doi:10.1002/2013RS005295, 2014

古屋正人, 2006, 地殻変動観測の新潮流 InSAR, 測地学会誌, 52, 225-244.

H.-S. Jung, D.-T. Lee, Z. Lu, J.-S. Won, “Ionospheric Correction of SAR Interferograms by Multiple-Aperture Interferometry,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 5, May 2013.

Z. Liu, H.-S. Jung, Z. Lu, “Joint Correction of Ionosphere Noise and Orbital Error in L-Band SAR Interferometry of Interseismic Deformation in Southern California,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 52, no. 6, Jun 2014.

N. B. D. Bechor, H. A. Zebker, “Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, L 16311, doi:10.1029/2006GL026883, 2006.

D. Raucoules, M. de Michele, “Assessing Ionospheric Influence on L-Band SAR Data: Implications on Coseismic Displacement Measurements of the 2008 Sichuan Earthquake,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 7, no. 2, Apr 2010.



F. Meyer, R. Bamler, N. Jakowski, T. Fritz, “The Potential of Broadband L-Band SAR Systems for Small Scale Ionospheric TEC Mapping,” n.d.

F. Meyer, R. Bamler, N. Jakowski, T. Fritz, “The Potential of Low-Frequency SAR Systems for Mapping Ionospheric TEC Distributions,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 3, no. 4, Oct 2006.

日置 幸介、菅原 守、大関 優、岡崎 郁也、 “GPS-TEC 法による地球物理学,” 測地学会誌 第 56 巻第 4 号, pp125-134, 2010.

R. F. Hanssen, “Radar Interferometry -Data Interpretation and Error Analysis-“ Springer, 2001.

3 時間で分かる合成開口レーダ

(<http://members3.jcom.home.ne.jp/yasuka.t/sarthreehours.pdf>)

気象庁

(<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)

国土地理院 干渉 SAR

(<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>)

JAXA

(<http://www.jaxa.jp/>)

Google マップ

(<https://www.google.co.jp/maps/>)

日本国内のイオノゾンデ観測データ

(<http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/>)