

# GPSによる地震発生時の電離層擾乱観測

笠井 晶二 (有) 笠井デザインオフィス

## 1. 概要

本研究では地震及び津波により引き起こされる電離層擾乱を GPS による TEC (電離層総電子数) 観測により検出した事例を紹介し、GPS による TEC 観測が防災システムとして利用可能であることを示す。対象とした地震は以下の 2 つである。

|          |   |
|----------|---|
| 北海道十勝沖地震 | 発生時刻：2003 年 9 月 26 日午前 4 時 50 分(LT)<br>震源位置：北緯 41.7 度、東経 144.2 度<br>マグニチュード：7.0           |
| スマトラ地震   | 発生時刻：2004 年 12 月 26 日 00:58:53(UTC)<br>震源位置：北緯 3.307 度 東経 95.947 度 深さ：30Km<br>マグニチュード：9.0 |

## 2. GPS 観測による TEC (電離層総電子数) 推定

STEC (視線方向電離層総電子数) は GPS 二周波数観測データから以下の幾何学フリー観測モデルに従い求めることができる。その際、下記の電離層遅延量以外の項目(時間不変な定数)は複数観測点から構成される観測網を使用し、電離層薄膜モデル等を仮定して推定する。

$$GF\text{CP}_r^s(t) \equiv \lambda_{L2} CP_{L2,r}^s(t) - \lambda_{L1} CP_{L1,r}^s(t)$$
$$= c\{Br_{L2,r} - Br_{L1,r}\} - c\{Bs_{L2}^s - Bs_{L1}^s\} - \frac{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}{f_{L2}^2} I_{L1,r}^s(t) + (\lambda_{L2} N_{L2,r}^s - \lambda_{L1} N_{L1,r}^s)$$

$$\text{STEC}_r^s(t) = \frac{f_{L1}^2}{40.3} I_{L1,r}^s(t)$$

$GF\text{CP}_{ij}^s(t)$ : 電離層フリー搬送波位相 ( $i$ : 周波数ID,  $r$ : モニタ局ID,  $s$ : 衛星ID,  $t$ : 時刻)

$CP_{Li,r}^s(t)$ : 搬送波位相観測値 ( $i$ : 周波数ID,  $r$ : モニタ局ID,  $s$ : 衛星ID,  $t$ : 時刻)

$$\begin{cases} B_{Li}^s: \text{衛星Li送信周波数間バイアス} \\ B_{Li,r}^s: \text{モニタ局Li受信周波数間バイアス} \\ I_{L1,r}^s(t): \text{L1電離層遅延量} \end{cases} \begin{cases} N_{Li,r}^s: \text{Li搬送波位相整数アンビギュイティ} \\ f_{Li}: \text{Li搬送波周波数} \\ \lambda_{Li}: \text{Li搬送波波長} \end{cases}$$

## 3. TEC 偏差による電離層擾乱の発生・伝搬検出(十勝沖地震)

地震及び津波により引き起こされる電離層擾乱を TEC 観測で捕捉する場合、TEC 絶対値に対し地震の影響による TEC 変動幅が小さく(0.5TECU 以下)、周期も短い(10 分以下)ことから、短時間(30 分以下)の微小 TEC 変動を検出する必要がある。本研究では各観測時刻の前後 7.5 分の TEC 値を 2 次関数近似し、近似値と観測値の差を TEC 偏差とした。

国内で発生した十勝沖地震地震の場合、国土地理院の高密度な GPS 観測網を利用することができ、更に地震発生時の衛星配置が良好(高仰角に PRN24 衛星、本州から震源方向の低仰角に PRN13 衛星)なことから電離層擾乱の移動方向、移動速度、高度幅などを容易にも求める

ことができた。以下に解析結果を示す。

### 3.1 PRN24 観測（真上観測）による電離層擾乱の発生位置・移動方向・移動速度

発生位置：震源直上

発生時刻：地震発生から約 10 分後

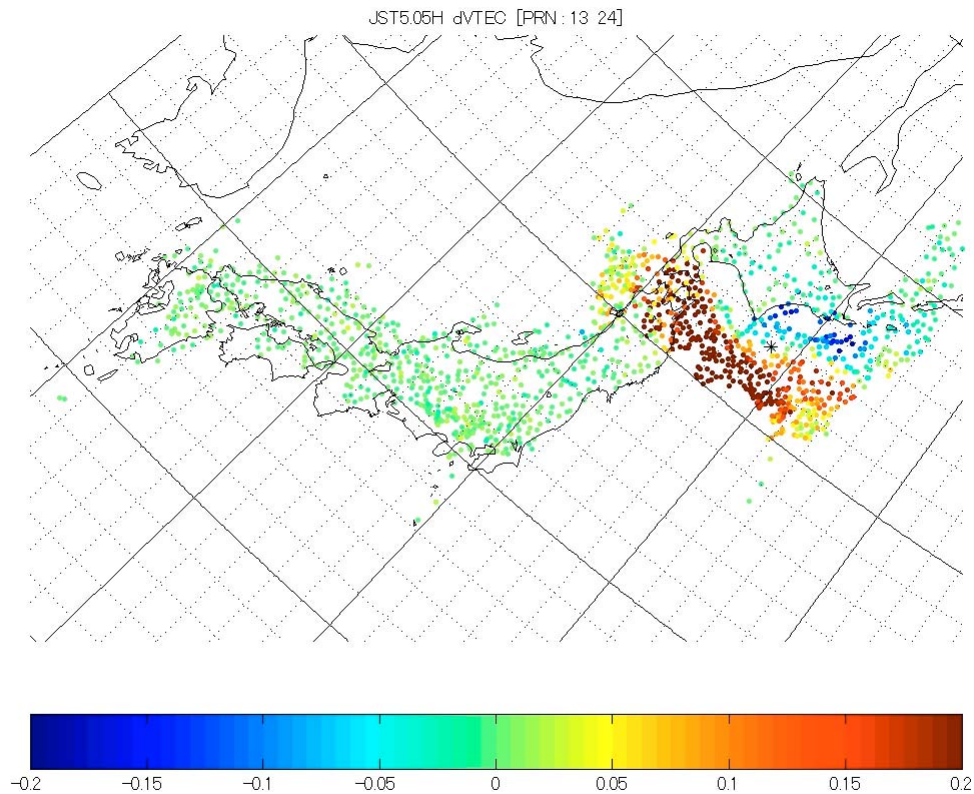
移動方向：震源から 210 度方向

移動速度：1.2Km/sec

### 3.2 PRN13 観測（低仰角・震源方向観測）による電離層擾乱の高度幅

高度 200Km から 500Km（F 層）

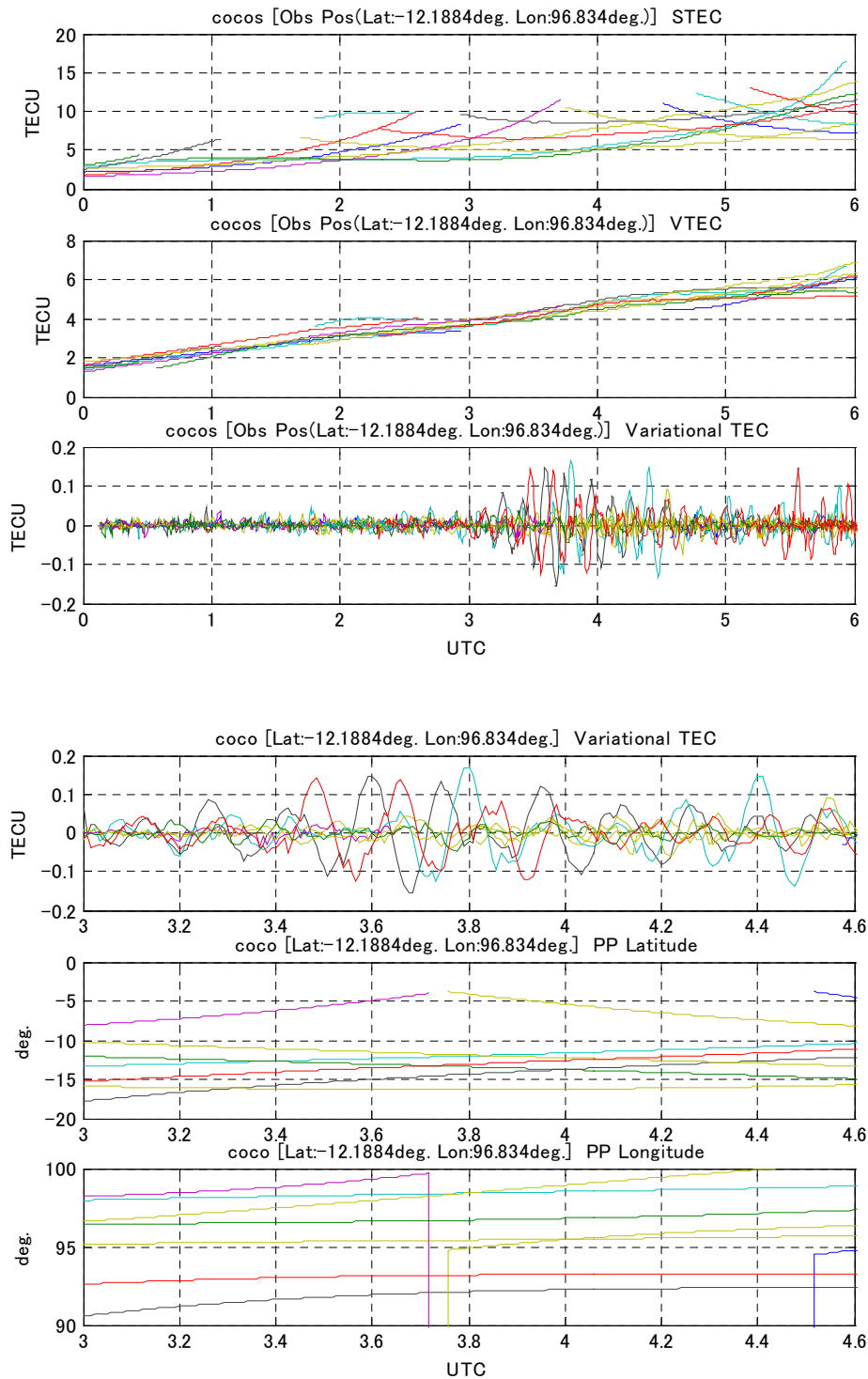
下の図は地震発生から約 10 分後の、地震による大気振動が F 層に達し電離層擾乱を引き起こしている状況を示す。



## 6. 津波到達時刻と電離層擾乱(スマトラ地震)

スマトラ地震の震源は電離層変動が激しい赤道領域にあり、インド洋周辺の IGS GPS 観測網は粗ということもあり、地震発生時の電離層擾乱を検出することは出来るが十勝沖地震と同様の電離層擾乱伝播の追跡は難しい。しかし、津波到来に伴う電離層擾乱は検出することが可能であり、これが防災に役立つ可能性が大きい。本報告では IGS 観測点があるインド洋 cocos（南緯 12:07 東経 96:53）に 3 時 20 分（UTC）に到達した津波に伴って発生した電離層擾乱を

GPS による TEC 観測で検出した例を示す。



下の3組のグラフは津波到達時刻近傍を拡大したものであるが、約5分の顕著な周期性が見られ地震発生直後の電離層擾乱とは異なる特徴をもつ。また TEC 変動を検出している衛星が限定されることから、TEC 変動を検出している衛星の観測方位及び TEC 変動の衛星間位相差から津波進行方向を推定することが可能と考えられる。

## 7. まとめと今後の課題

GPS による TEC 観測により地震発生直後及び津波到来時の電離層擾乱を検出することが可能であることを示し、GPS による TEC 観測が防災システムとして利用可能であることを示した。

今後は引き続き以下の課題に取り組むことが必要である。

### (1) 事例研究及び解析精度向上

地震、津波に伴う TEC 変動は微小(0.5TECU 以下)であり、他の要因との分離は難しい。防災システムとして利用するには多数の事例から地震、津波に伴う TEC 変動の特徴(周期性、伝播速度等)を抽出し高精度で安定したアルゴリズムを構築することが必要不可欠である。

### (2) 地震発生に伴う電離層擾乱 (及び TID) のトモグラフィー

地震、津波に伴う TEC 変動検出方法は TID の解析にも利用できる。また、十勝沖地震の解析例に見られるように衛星配置が良好ならば電離層擾乱の高度分布もある程度得ることができ、電離層擾乱のトモグラフィーへ発展させてゆくことが可能と考えられる。

### (3) 日本近傍の標準的な電離層モデルの構築

(1)の事例研究、(3)のトモグラフィー共に何らかのモデルを仮定せずには出来ない。更に精度を上げる為には IRI を精密化した日本近傍の標準的な電離層モデル及び地震発生に伴う電離層擾乱発生・伝搬の物理モデルの構築が必要不可欠である。

### (4) 地震前兆現象検出

地震、津波に伴う電離層擾乱は大気の振動によって引き起こされると考えられるが、地震の前兆現象と思われる電離層下部の異常は全く異なる条件で発生すると考えねばならない。地震前兆現象の検出には地震、津波に伴う電離層擾乱検出とは異なる手法を考える必要がある。上で構築したモデルとの比較による微小な TEC 変動の時間空間分布から地震前兆現象を捉えてゆくことになるであろう。

## 参考文献

日置幸介：電離層を伝わる地震波：2003 年十勝沖地震の GEONET による観測

日本測地学会第 102 回講演会 2004

Philippe Lognonne : Detection and modeling of ionospheric signals associated to seismic surface waves and tsunamis GeoHazards 2004