

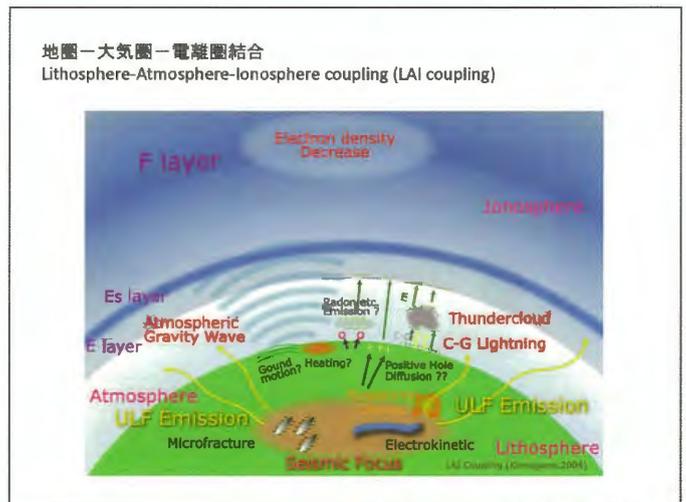
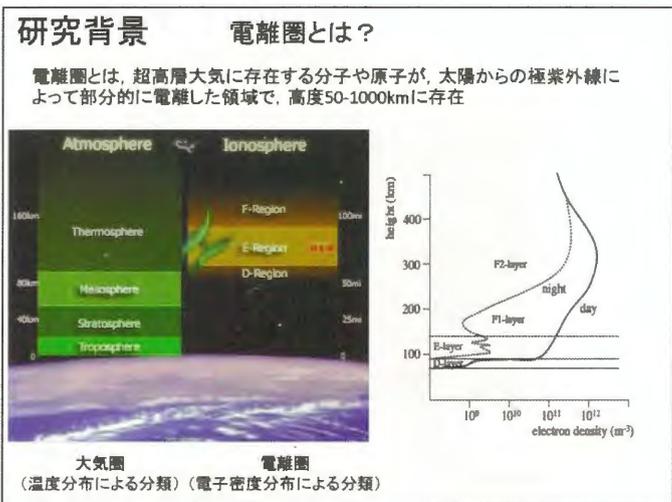
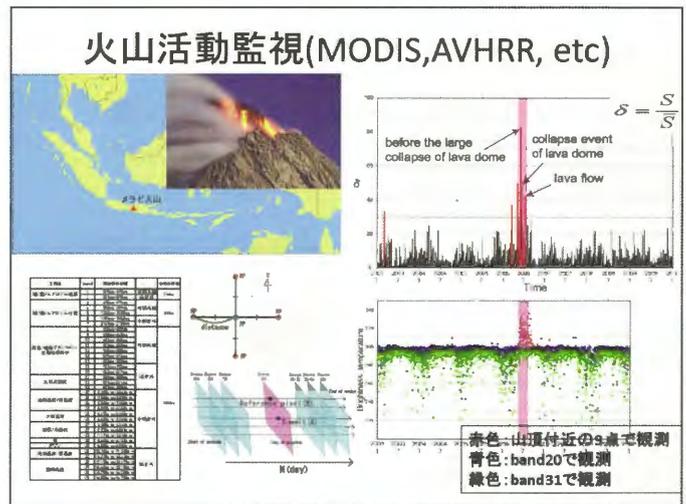
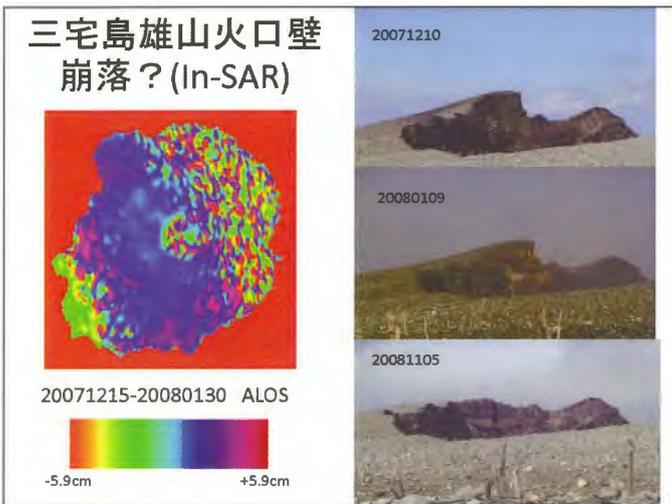


衛星リモートセンシングを用いた 自然災害の監視と予測 ～大気圏/電離圏擾乱と地震活動～

服部克巳(千葉大学大学院理学研究科)
 紺晋平(千葉大学大学院理学研究科)
 廣岡伸治(千葉大学大学院理学研究科)
 劉正彦(台湾国立中央大・太空科学研究所)
 D. Ouzounov (NASA/Chapman Univ., USA)

自然災害(地殻変動Geohazard)の 監視・予測と衛星リモートセンシング

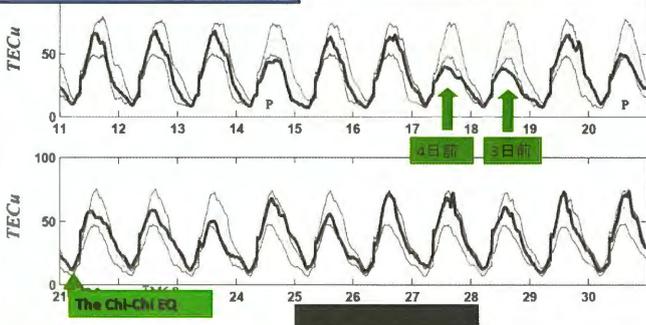
- (1) 測地学的リモートセンシング: SAR (In-SAR)、GPS測位
 - (2) 熱・電磁気学的リモートセンシング
 - ・火山活動監視: 可視光, 赤外, マイクロ波(MODIS, AVHRR, MT-SAT, GOES etc)
 - ・地震活動監視: 地震電磁気衛星(DEMETER(仏), Quake-Sat (米))
電磁放射
- 電離圏/大気圏擾乱の監視(電子/イオン密度異常、温度異常)
 → GPS 電波を用いた電離圏擾乱の監視
 事例解析
 統計解析
 3次元電離圏トモグラフィ



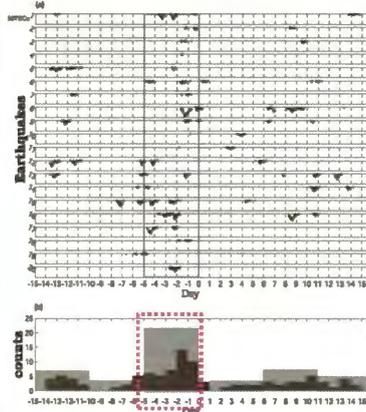
研究背景 地震活動に先行する電離圏総電子数異常

電離圏総電子数(TEC)がChi-Chi地震の3, 4日前に顕著に減少
(Liu et al., 2001) (負のTEC異常が出現)

1999年台湾Chi-Chi地震



研究背景 地震活動とTECとの統計解析(1)



[台湾]
M ≥ 6.0 地震の1-5日前に
負のTEC異常が統計的に
有意.

(Liu et al., AG, 2004)

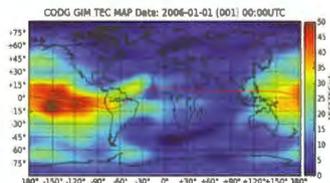
Global Ionosphere Maps (GIM)

ヨーロッパ軌道決定センター(CODE)が公開している
全球のTECグリッドデータ

空間解像度: 2.5° (緯度方向)
5° (経度方向)
時間解像度: 2時間

線形補間

空間解像度: 1° (緯度方向)
1° (経度方向)
時間解像度: 1時間

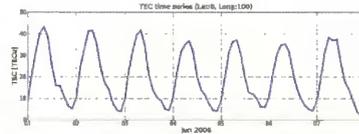


GIMデータの例(2006年1月1日)

任意の時空間における
GIM-TECを算出して解析に使用

GIM-TEC*の算出

TECは昼すぎにピークをもつ
規則的な日変動を示す



地震に関連する電離圏異常の識別の為、
TECの日変動の除去が必要

同時刻の過去15日間のTECの平均をモデルとして、
差(ΔTEC)を算出し、同時にその標準偏差σで規格化

$$GIM-TEC^*(t) = \frac{GIM-TEC(t) - GIM-TEC_{mean}(t)}{\sigma(t)}$$

地磁気擾乱に起因するTEC異常の除去

本研究では、地磁気擾乱に起因するTEC異常を除去するため、
以下の基準を設定する

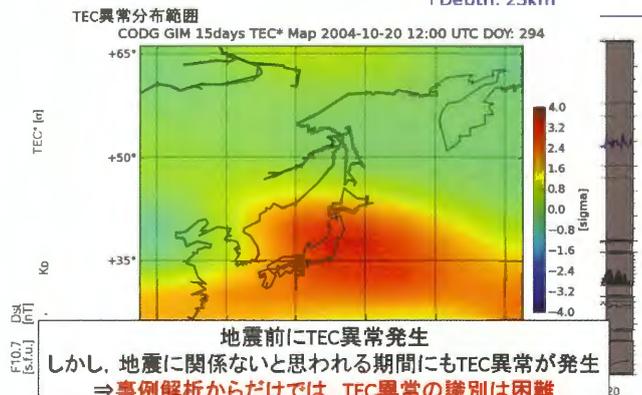
Dst 指数が -60 nT を超えた場合、
地磁気嵐と定義する

★地磁気嵐発生の数時間～2日後にかけて
中低緯度のTECが減少する
(Kelley, 1989; Davies, 1990)

地磁気嵐の主相～回復相開始の2日後までを
地磁気擾乱期間として、解析から除外する

事例解析

2004中越地震
M: 6.8
Depth: 23km



地震前にTEC異常発生
しかし、地震に関係ないと思われる期間にもTEC異常が発生
⇒事例解析からだけでは、TEC異常の識別は困難

統計解析 Superposed Epoch Analysis : SEA

SEAとは？

時系列データがある基準日を原点として重ね合わせ、S/N比を向上させる為の統計手法

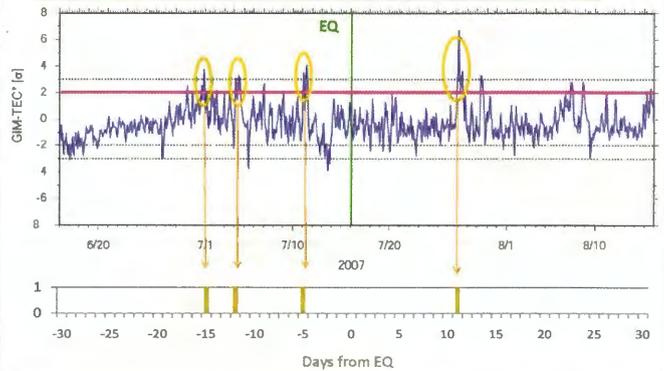
- 周期性を持つ現象
- 先行現象
- 複数の現象間の因果関係



典型的な特徴を抽出

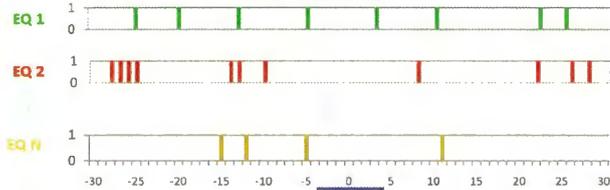
Superposed Epoch Analysis手順(1)

① 地震日の前後30日を対象として、1日ごとにGIM-TEC*が10時間以上閾値 $2\sigma(2\sigma)$ を超えたとき正の(負の)異常とカウント

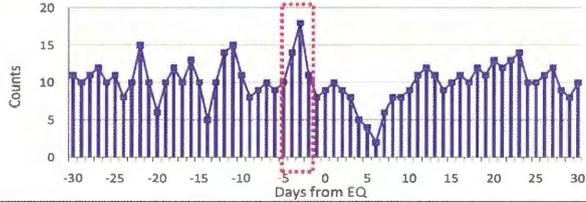


Superposed Epoch Analysis手順(2)

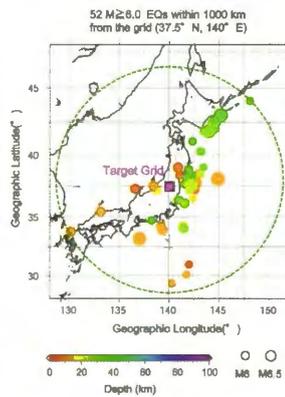
② 対象とするN個の地震に対して①の手順を実施



③ 足し合わせる



SEA解析



[解析対象地震]
1998/05 - 2010/05 (12年間)に日本付近で発生した
M ≥ 6.0, 深さ ≤ 40 kmの52個の地震
地震カタログ: USGS

解析対象のTECグリッドを
(37.5° N, 140° E)に固定

地震とは関係ない日を時系列からランダムに抽出することで有意性を評価

SEA解析結果 [固定したTECグリッド]

負のGIM-TEC*異常

$0 \leq R < 1000\text{km}$ (52EQs)

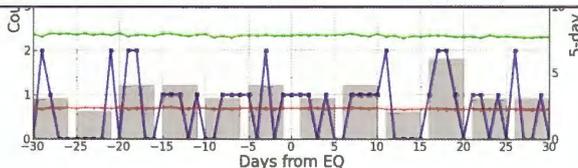
Negative anomaly ($A \leq 0 \leq R < 1000\text{km}$)

[統計的なSEA結果の評価]

➤ Random-mean

“12年間のGIM-TEC*データの中から、地震数と同じ52日をランダムに抽出し、SEAを行う”ことを10000回繰り返した平均

➤ Random-mean + 2σ

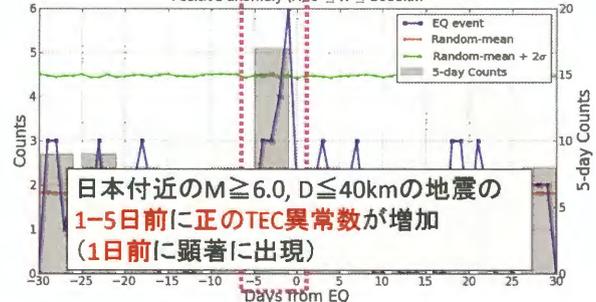


SEA解析結果 [固定したTECグリッド]

正のGIM-TEC*異常

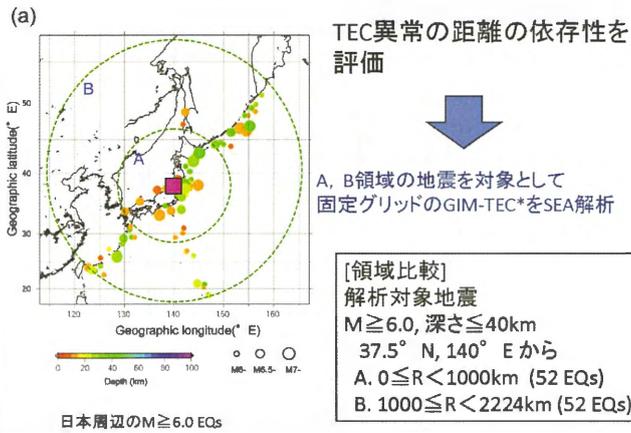
$0 \leq R < 1000\text{km}$ (52EQs)

Positive anomaly ($A \geq 0 \leq R < 1000\text{km}$)

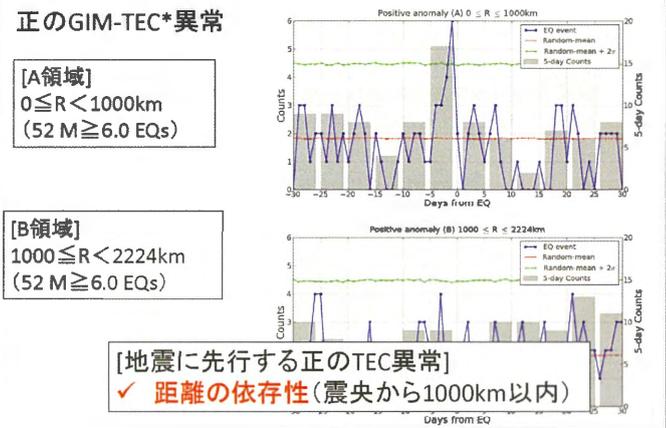


日本付近のM ≥ 6.0, D ≤ 40kmの地震の
1-5日前に正のTEC異常数が増加
(1日前に顕著に出現)

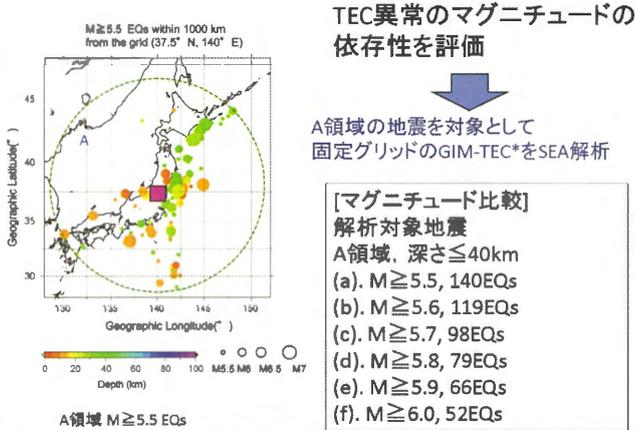
SEA解析 [領域比較]



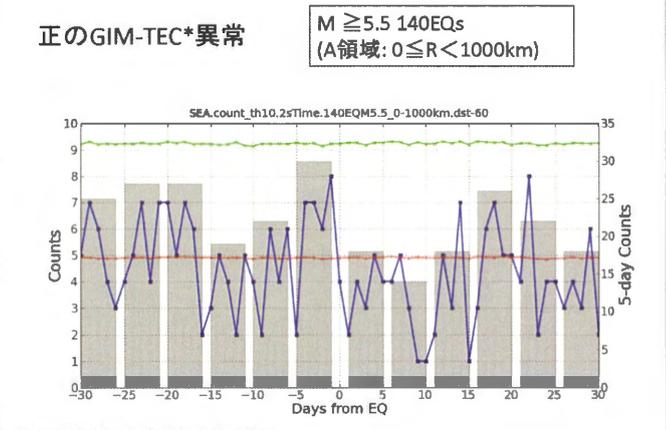
SEA解析結果 [領域比較]



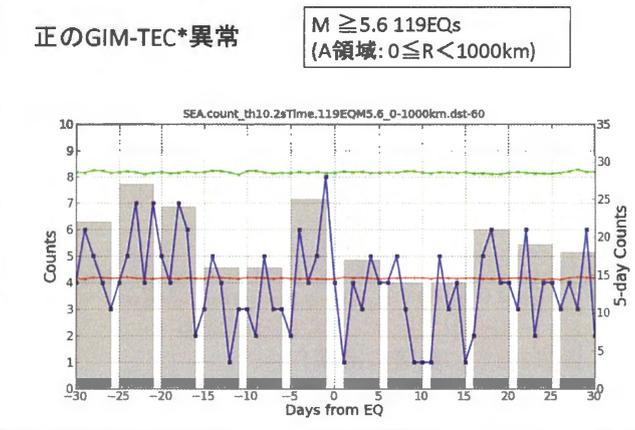
SEA解析 [マグニチュード比較]



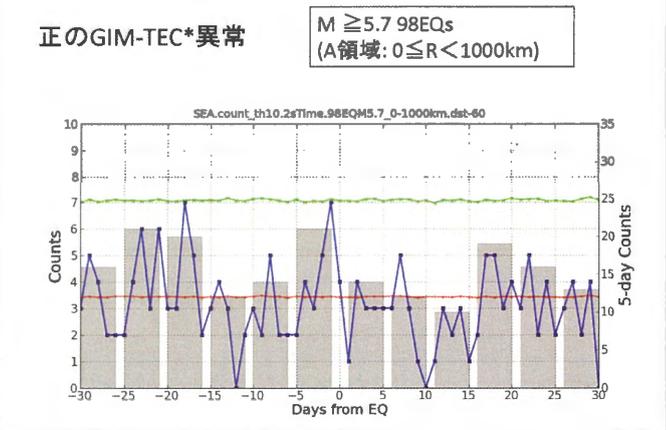
SEA解析結果 [マグニチュード比較]



SEA解析結果 [マグニチュード比較]



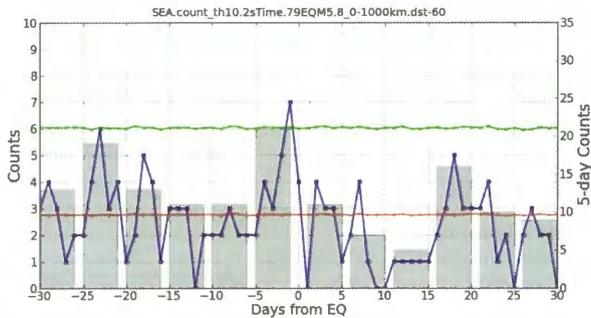
SEA解析結果 [マグニチュード比較]



SEA解析結果 [マグニチュード比較]

正のGIM-TEC*異常

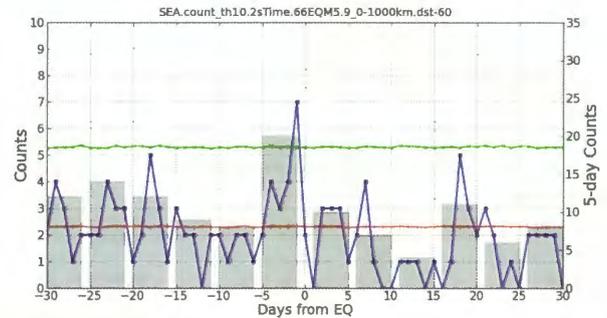
$M \geq 5.8$ 79EQs
(A領域: $0 \leq R < 1000\text{km}$)



SEA解析結果 [マグニチュード比較]

正のGIM-TEC*異常

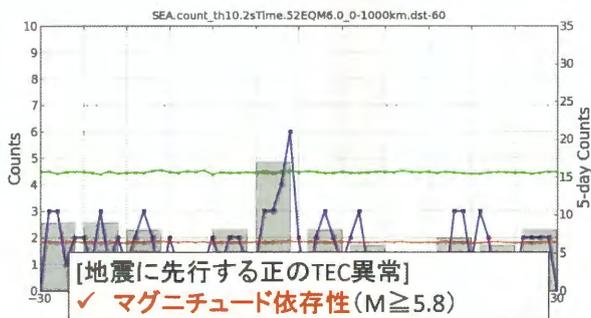
$M \geq 5.9$ 66EQs
(A領域: $0 \leq R < 1000\text{km}$)



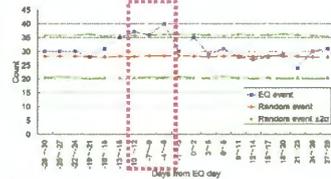
SEA解析結果 [マグニチュード比較]

正のGIM-TEC*異常

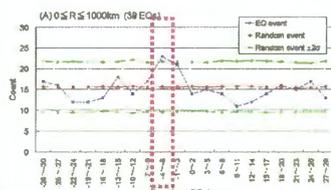
$M \geq 6.0$ 52EQs
(A領域: $0 \leq R < 1000\text{km}$)



地震活動とTECとの統計解析(低磁気緯度領域)



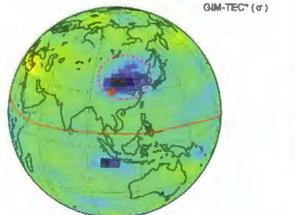
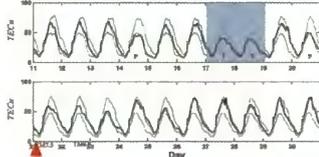
[インドネシア]
 $M \geq 6.0$ 地震の4-12日前に負のTEC異常が統計的に有意.



[中国]
 $M \geq 6.0$ 地震の4-6日前に負のTEC異常が統計的に有意.

トモグラフィーの開発

地震に先行する電離圏異常



Liu et al.,(2004)

Liu et al.,(2009)

地震の数日(1~5日前)にTEC(総電子数)の顕著な減少

- ・電離圏下部の擾乱
- ・F層での電子密度低下 ... 電離圏内で観測される様々な現象

電離圏異常の総合的(3次元)構造の解明

メカニズム解明のヒント

Ionospheric Tomography

Slant TEC observed by ground GPS receiver.

Reconstruct the electron density at any coordinates.

ill-posed problem ... Lack of horizontal ray paths.

Previous study ...

- Austen et al.,(1988)
- Garcia-Fernandez et al.,(2003)
- ...

To apply to the study of earthquake...

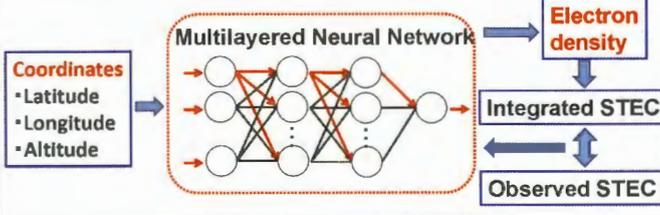
- Reconstruction from sparse data
- Model independent

Most of these method need a lot of data and/or ionosphere model for initial value.

Tomography using Neural Network
Ma et al.,(2005)

Neural Network

1. Divide a ray path into any segments.
2. Construct the **Neural Network**
 - input : coordinates of divided segments
 - output : electron density
3. Integrate the output along ray paths



Basic Function

Observed Slant TEC

$$I_i^j = \int_{r_i}^{r_j} N(\vec{r}) ds + B_i + B_j \quad \dots(1)$$

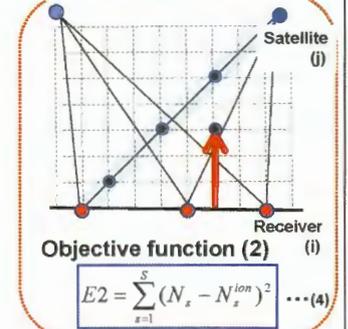
Discretization

$$I_i^j \approx \sum_{q=1}^Q \alpha_q N(\vec{r}) + B_i + B_j + P_i^j \quad \dots(2)$$

Objective function (1)

$$E1 = \sum_{q=1}^Q (\alpha_q N(\vec{r}) + B_i + B_j + P_i^j - I_i^j)^2 \quad \dots(3)$$

Constrain by ionosonde data



$$E2 = \sum_{s=1}^S (N_s - N_s^{ion})^2 \quad \dots(4)$$

$$E = gE1 + E2 \quad \dots(5)$$

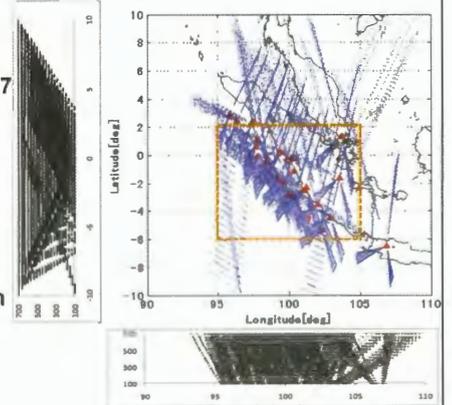
g : Penalty Coefficient

Application to observed data

Sumatra region

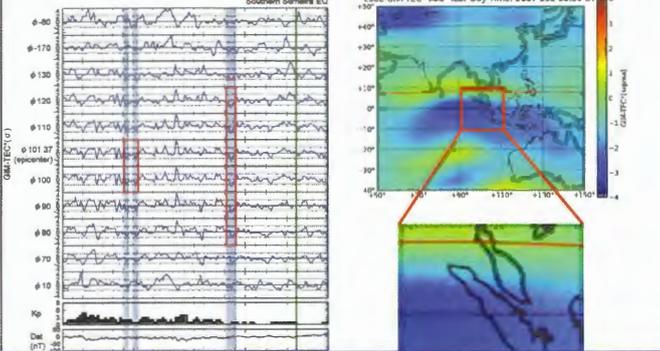
Parameters

- Date/Time
07:30-07:45(UT)
9 September, 2007
- GPS receiver
25 site
- Ionosonde
Kototabang
- Number of ray path
883
- Iteration
10,000 (fix)



異常の検出と2次元分布

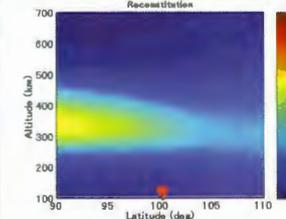
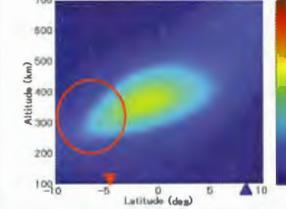
9/9, 14-15LT



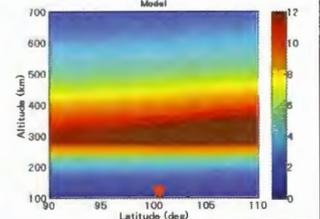
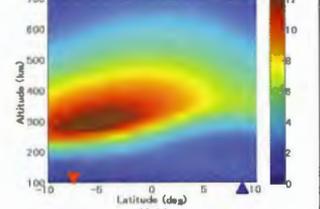
地震の3日前(9/9), 14:00-15:00LTに注目
トモグラフィーは14:30-14:45LTに適用

トモグラフィー

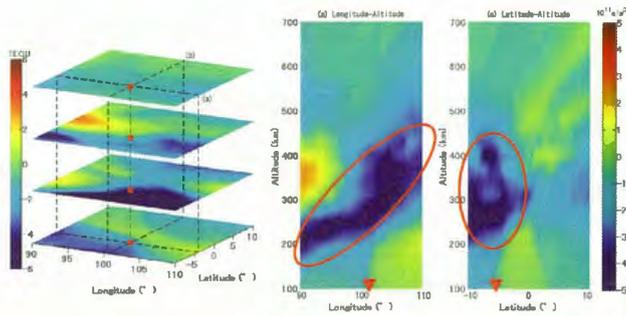
トモグラフィー(震央上空)



IRIモデル(震央上空)



震央周辺の電子密度低下領域の構造



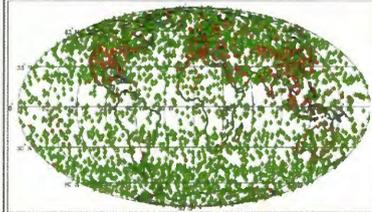
- ・南北方向：震央上空のF層高度に集中
- ・東西方向：高度と共に東方へ傾く

FORMOSAT-3/C

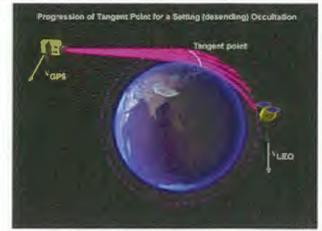
- ・2006年4月打ち上げ
- ・高度800kmを周回する
- 6機の小型衛星により構成.

気圧、温度、湿度、電子密度等の高度プロファイルデータを取得.

Occultation Locations for COSMIC, 6 SVs, 6 Planes, 24 Hrs



<http://www.cosmic.ucar.edu/index.html>



- ＜長所＞
- ・海上など地上からの観測が困難なエリアのデータが取得可能.

- ＜短所＞
- ・任意の時刻、エリアの連続観測が困難

プロファイルデータの異常検出

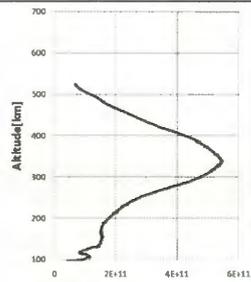
Liu et al.,(2009)の手法に準拠

異常が報告された時刻の±90分、
Lat:-15~10deg, Lon:80~120deg
を通るプロファイルを抽出

プロファイルを等間隔に補間(10km)

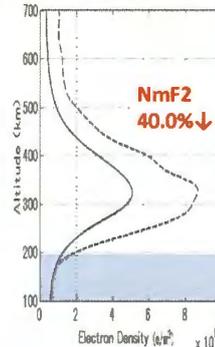
各高度における過去15日間の
電子密度の中央値を算出

中央値と異常報告日時の
プロファイルと比較

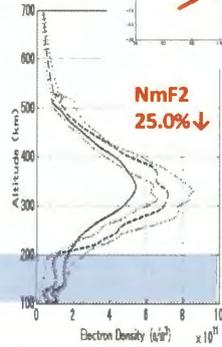


FORMOSA-3/Cによる検証

トモグラフィー(震央上空)



FORMOSAT-3/C



高度200 km以下での不一致

まとめ

- ・地震に先行する電離圏総電子数異常
事例解析/統計的解析
磁気赤道~低緯度域 減少が有意
磁気中緯度(日本など) 増加が有意
- ・3次元電離圏トモグラフィー
ニューラルネットワークの適用により概ね良好な再構成を実現
低高度にエラー→適切な拘束条件の導入の必要性(衛星による掩蔽観測、イオノゾンデ)