巨大地震前に起こるTEC変化:標準曲線の導出とそれが示唆する 物理過程

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 高坂宥輝 space Geodest

1はじめに Introduction

2011年東北沖地震を契機に巨大地震の前兆が地球の電離圏の電子 数の変化として直前に現れることが示唆された(Heki, 2011)。観測 事実は確実であるが原因となる物理過程の究明は途上である。本 研究では地震前の電離圏電子数変化の物理的なメカニズム解明に 向けて、電離圏全電子数(Total Electron Content, TEC)を求めるこ とにより、地震前後数時間のTECの変化を、地震の前兆が認められ た18の地震について解析した。そして、それらのデータから地震 前TEC変化の「標準曲線」を導出した。その標準曲線を用いて、原 因となる物理過程を、先行研究や地震のスケーリング則と比較し て様々な考察を行いたい。

卒論の目標 Goals of the BSc thesis

- ・地震前TEC変化の標準的な曲線の導出
- ・地震発生時にTEC増加が頭打ちになるかの検証と考察
- ・地震前のTECの増え方とその物理過程の考察

②観測·解析方法 Data analysis

TECはGPS (Global Positioning System)に代表されるGNSS (Global Navigation Satellite System)衛星から送信される周 波数の異なる搬送波、L1とL2の位相差L4 (= L1-L2)から 求められる。本研究ではGNSSの観測データ標準型式

(Receiver Independent Exchange Format; RINEX型式)か らTECを抽出し、仰角変化に伴う変化を含むSTEC (Slant TEC)を、電離圏に直交する視線でのVTEC (Vertical TEC)に 変換し、実際の電子の増減をもとめた。

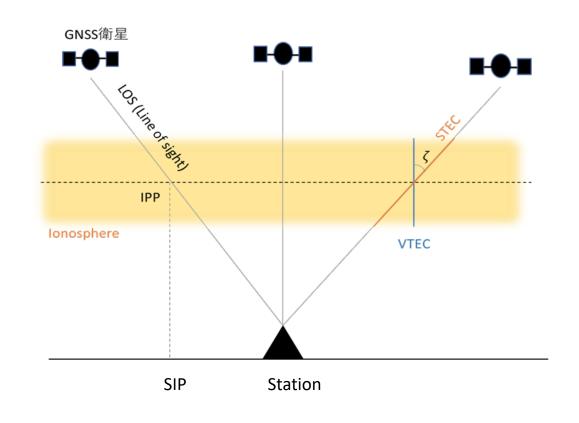


図1:GNSS衛星と受信機、LOS, IPP, SIP, STEC, VTECの模式図

④これらの物理過程を支持する観測事実 Support from observations

18個の地震の M_W と地震前TEC変化の大きさ(断層面積に 比例)と先行時間(断層の長さに比例)のスケーリング則

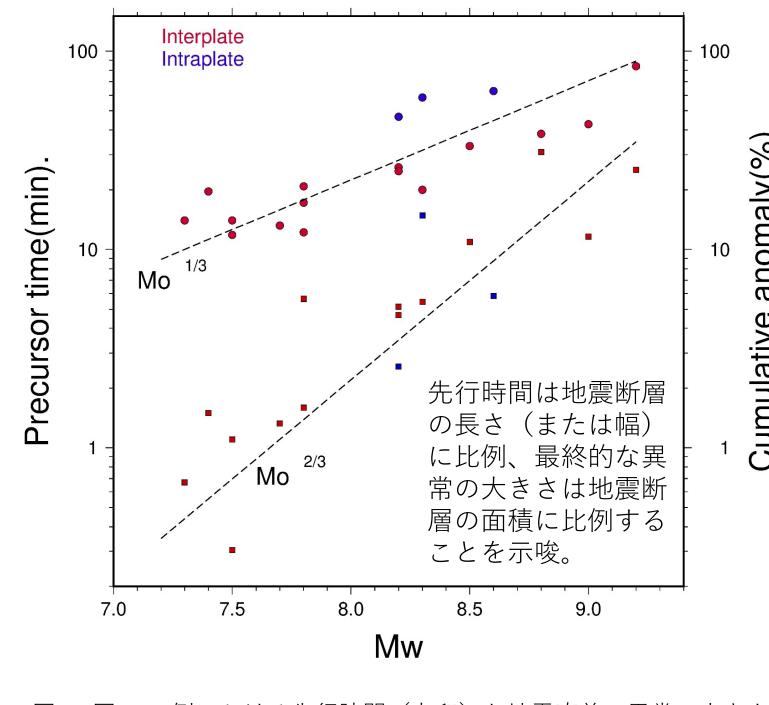


図3:図6,7の例における先行時間(丸印)と地震直前の異常の大きさ (四角印)を M_W の関数として示したもの(b). 赤で示されたものがプ レート間地震、青で示されたものがプレート内地震を示す。それぞ れ地震モーメント(Mo)の1/3乗および2/3乗に比例することがわかる。

2015年チリ中部地震(M_w8.3)直前の電子密度異常の空間分布

電子密度は上空~200 kmまで正の異常、~400 km以上 では負の異常を示し、それらは大まかに地磁気に 沿って並ぶ。⇒誘電分極または下向きのE×Bドリフ トによる異常と示唆される。(He & Heki, 2018)

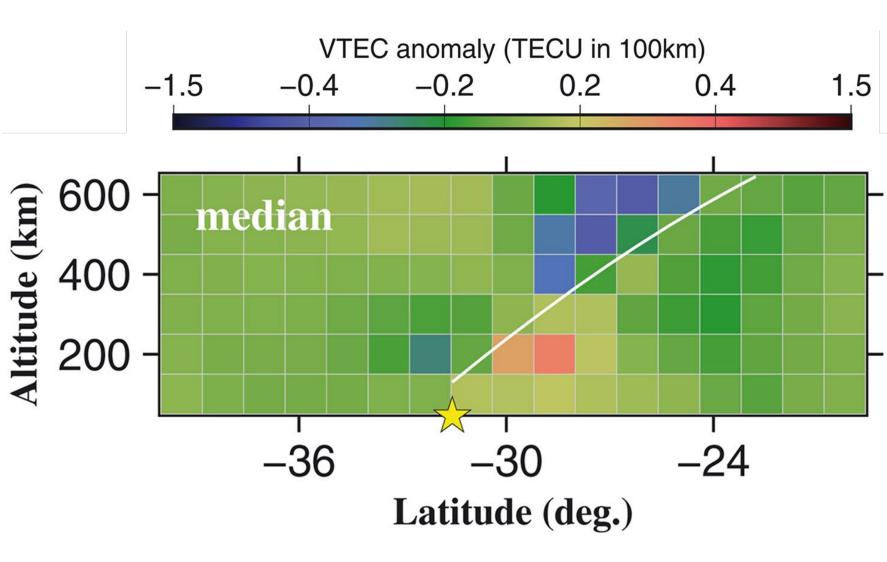
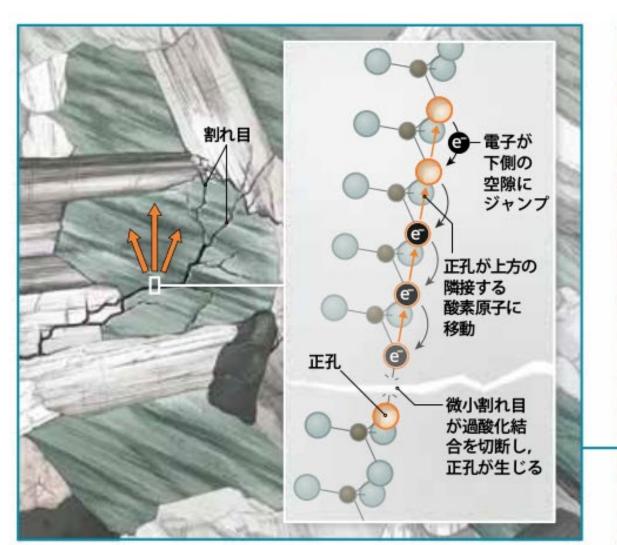


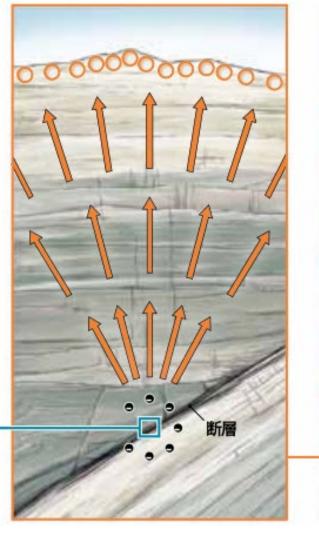
図4:2015年チリ・イジャペル地震 $(M_w 8.3)$ の直前の、南米の多くの地上GNSS局にお けるTEC異常を観測値として、トモグラフィーによって求めた電子密度異常の三次 元構造を、緯度-29.8度から1.2度ずつ-26.2度までの電子密度異常南北断面の中央値 をしめす(He & Heki, 2018)。白色の曲線は地球磁場を、黄色の☆印は震源を表す。

③地震前TEC変化の物理過程(仮) Physical Mechanisms

- ①地震発生数十分前、破壊が生じる断層の全体を弱化する何らかの現象(SSE?)が起こり、 断層全域に微小な割目や食い違いが生成。
- ②過酸化架橋と呼ばれる格子欠陥が切断され電子の空隙(正孔)が残り、それを補うため に電子が次々に移動、正孔は逆向きに移動
- ③この過程が隣接する鉱物を超えて繰り返され、正孔は互いの反発によって拡散し地表に 正電荷として蓄積(電荷は海など良導体に触れて急速に失われてゆく)
- ④地表に蓄積した正孔は大気中に上向きの電場を作り、地球磁場と相互作用(誘導電荷お) よびExBドリフト)して電離圏の電子を再配置させる



Time(UT,hour)



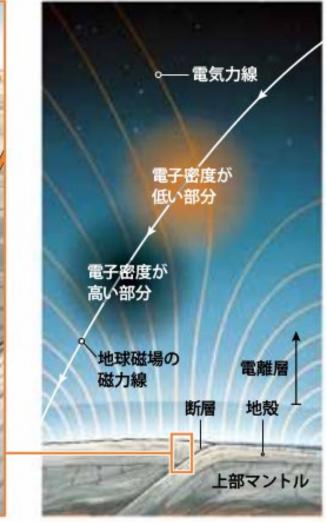


図2:現在考えられている地震前TEC変化の物理メカニズムの説明図(E・Vance, 2018)

⑤2011年東北沖地震直前のVTEC変化の例 **VTEC** changes before the 2011 Tohoku-Oki EQ

ここでは衛星による観測の例を示すため東北沖 地震前のVTEC変化とSIPの軌道の例を二つ示す。 Sat.26 0221(26) Sat.15

図5:2011年東北沖地震の前後約3時間のVTEC変化(左)、実線が実際に観測されたVTEC、点線は地震前後のTEC擾乱が 起こっていない部分を用いて多項式近似で求めたレファレンス曲線である。0221局からGPS26番衛星を見たものと、 3009局からGPS15番衛星を見たものを示す。UT 5:46における縦線は地震が起こった時刻を表す。これらの局と衛星のペ アにおけるSIP(視線が高度300 kmの総と交わる点)の軌跡を右に示す。黄色の☆印が震源で、緑の□印と数字はそれぞ れの観測局を、赤い☆印が地震時のSIPの位置、青い☆印がTECの増加が始まった時間のSIP、黒い○印が毎時0分のSIPの 位置を表す。

⑥18個の地震のVTEC変化と標準曲線の比較 Comparisons of TEC change before 18 earthquake and the "standard curve"

本研究では、日置(2018)で使用された18地震前後のVTECデータを入手、それらのレファレンス曲線からの残差(以降VTEC残差)を解析し、それらの平均または中央値としてVTEC残差の標準曲線を作成した。その形か ら、地震が発生してから音波擾乱が始まるまでの約10分間のTECはほぼ一定で推移していることが分かり、地震とともにTEC増加は停止していることが示唆される。またTEC異常の増加は上に凸の曲線を描いてお

り、時間が地震発生に近づくにつれてTECの増加率は減少していることが確認された。

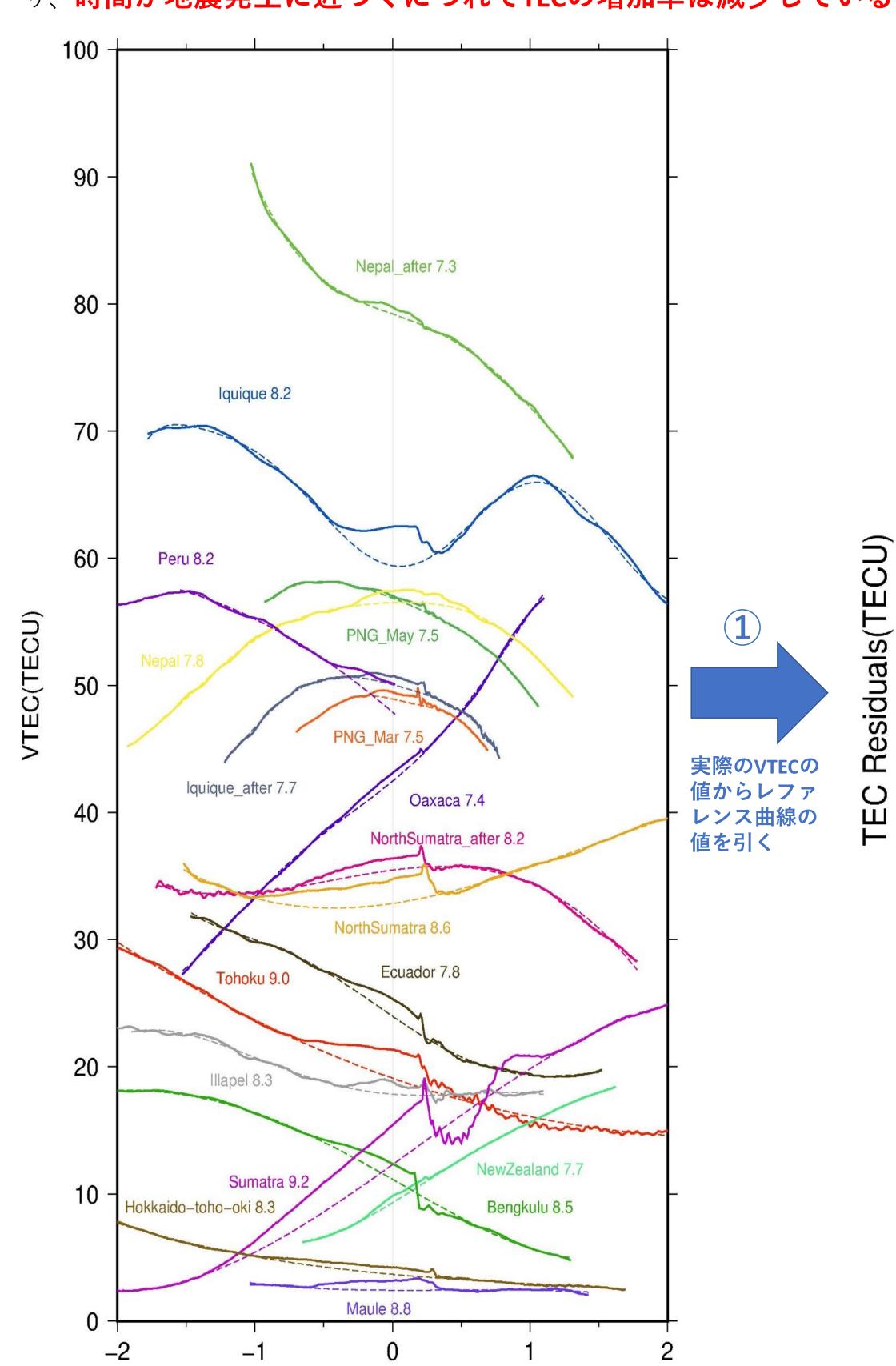


図6:地震前TEC擾乱が確認された18個の地震前後のVTECの変化。横軸 は地震発生時をゼロとした時間を、縦軸はVTECの絶対値を示す。実線 が実際のVTEC変化、点線が地震前後のデータをなめらかにつないだレ ファレンス曲線を表す。各曲線近くに地震の略称と M_W を記載。

Time from earthquake(hour)

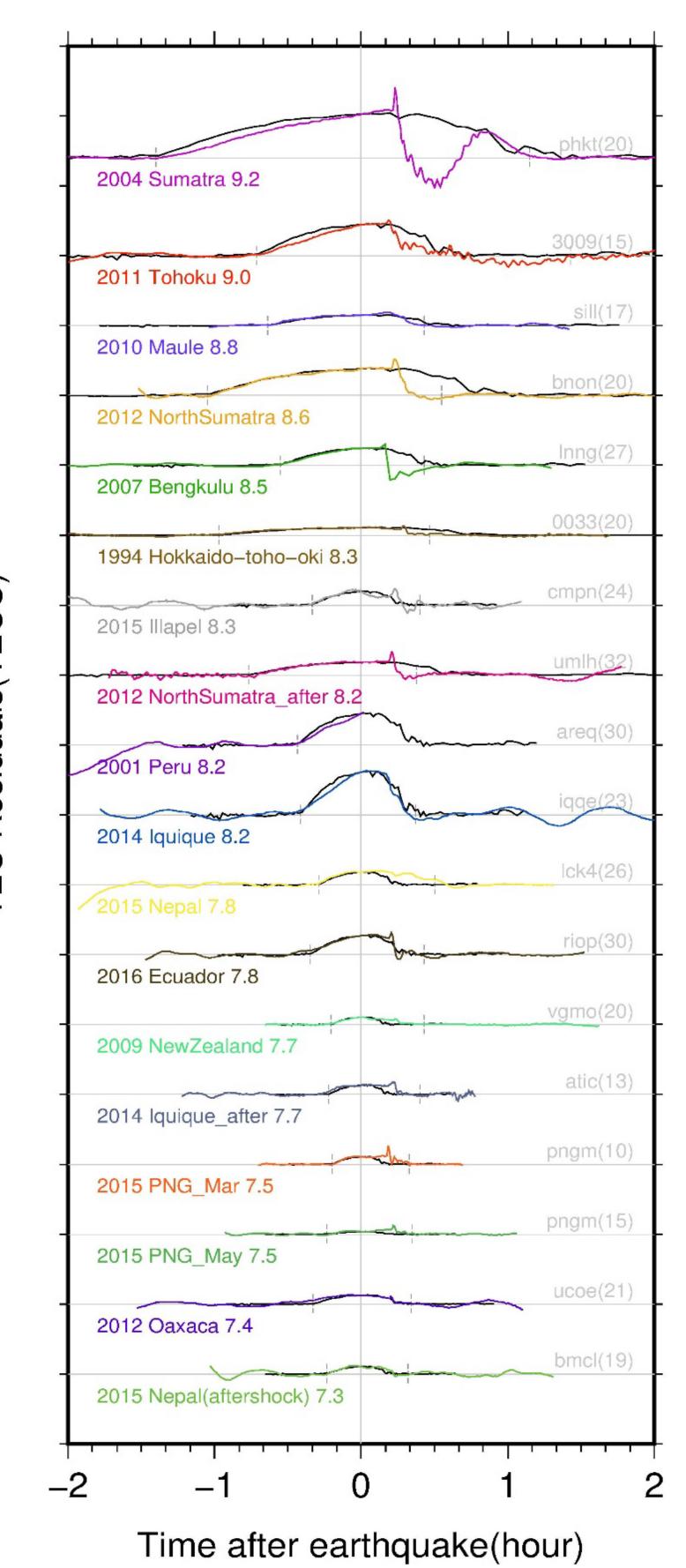


図7:図6の例のレファレンス曲線からのVTEC残差。中央値として求めたVTEC残差 の標準曲線を、18個の地震それぞれの事例の本来の横軸(時間軸)と縦軸(VTEC 残差)に戻して、元データに重ね書きしてある。地震の発生年と名前と M_W を左に、 観測局と衛星番号を右に、TEC異常の発生時刻と地震の音波による影響が終わった

時間を縦線で示している。

residuals(%) Average 各地震のTEC異常開始 から地震時までの時間 と地震時のVTEC残差を 正規化しスタック -0.50.0 Time after earthquake(hour)

図8:図7の各地震(色付きの曲線)で、先行時間を2011年東北沖地震の例にあ わせて横軸を伸縮させ、さらに地震時(時刻ゼロ)のVTECを100%として縦軸 も正規化し(薄い灰色で描かれた曲線)、スタックして得た標準曲線。赤い丸 で60秒ごとの時間枠の中での平均と標準偏差を表す。

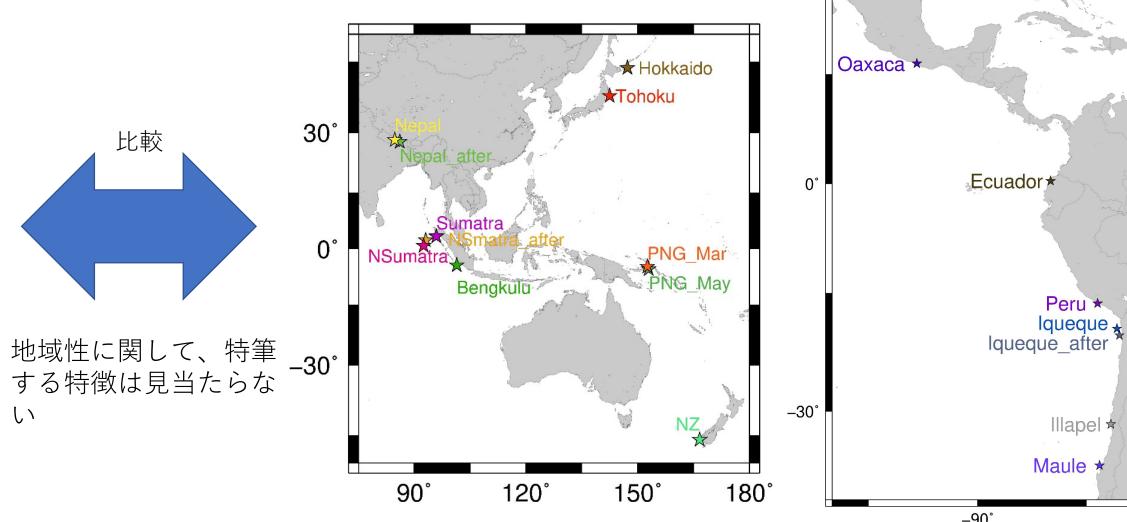
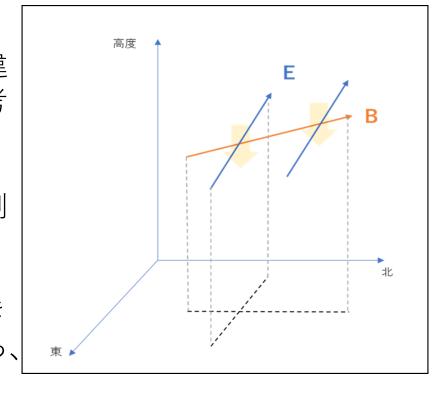


図9:図7で使用した18の地震の震源の分布(☆印が震源)、各震源の色は図6、図7の曲線の色に対応。

Discussion

- ①地震時にTEC増加が頭打ちになる⇒地震時には断層 付近における応力が大部分解放され、新たな食い違 いや割れ目の発生が少なくなることに相当すると考 えられる。
- ②地震前のTEC変化が上に凸⇒地表電荷の量がある程 度以上増えない、すなわち地表電荷の蓄積量に比例 してそれらが失われることを示唆。
- ③E×Bドリフトによって動ける電子数が時間ととも に減少する可能性は、標準曲線とのフィットが大き な地震と小さな地震でそれほど変わらないことから、 あまり関係ないと考えられる。



参考文献

標準曲線を、18個の地震そ

れぞれの事例の本来の横軸

差)に戻し重ね書き

(時間軸)と縦軸(VTEC残

He, L. and K. Heki (2018), Three-dimensional tomography of ionospheric anomalies immediately before the 2015 Illapel earthquake, central Chile, J. Geophys. Res. Space Phys., 123 Heki, K. (2011), Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. Res. Lett. 38, L17312, doi:10.1029/2011GL047908 Heki, K. and Y. Enomoto (2015). Mw dependence of the preseismic ionospheric electron enhancements, J. Geophys, Res. Space Phys., 120, 7006-7020, doi:10.1002/2015JA021353 日置幸介 (2018)、地震直前の電離圏変化、パリティ、2018年二月号

日置幸介、菅原守、大関優、岡崎郁也(2015), GPS-TEC法による地球物理学、測地学会誌, 56 (解説・入門講座), 125-134. Vance. E. (2019). 特集:超巨大地震に至る地下の変動 大地震直前に観測された電離層の変化, 日経サイエンス, 2019年2月号