

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

Ionospheric TEC changes immediately before large
earthquakes: Derivation of the standard curve and
discussion on the physical mechanisms

北海道大学 理学部 地球惑星科学科

宇宙測地学研究室 4 年

高坂宥輝

Yuki Takasaka

指導教員名 日置幸介

2019年1月31日

概要

地震の前兆現象は捉えることができない。現在でも多くの科学者がそう考えているのではないだろうか。2011年東北沖地震を契機に地震の前兆が地球の超高層大気である電離圏の電子数の変化として現れることが見いだされた(Heki, 2011)。原因となる物理過程に関しては未解明な部分も多いが、観測事実は確かであり、本格的な断層滑りが始まる前に地震の最終的なサイズがある程度決まっていることも示唆されている。

現在地震前における電離圏電子数の変化の原因はどのように考えられているのか。仮説として以下のような考えがある。地震の前に応力の高まりとともに地殻を構成する各部分に微小な割目や食い違いができる。その過程で過酸化架橋と呼ばれる格子欠陥が切断され、電子の空隙（正に帯電しているので正孔と呼ばれる）が残り、それを補うために電子が次々に移動するとともに正孔は逆向きに移動する。この過程が隣接する岩石粒を通して繰り返され、正孔は互いの反発によって拡散し地表に蓄積する。蓄積した正孔は大気中に電場を生じさせる。この電場は地震の起こる断層が大きいと超高層大気に達する。この電場が地球磁場と相互作用（ $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト）して電離圏の電子が移動する。この仮説は He and Heki(2018)が推定した 2015 年チリ地震直前の電離圏電子密度の 3次元構造からも支持される結果となっている。

本研究では上で紹介したような物理過程の解明に向けて、GNSS (Global Navigation Satellite System) 衛星から発せられる周波数の異なる 2 種類のマイクロ波の位相データを使用し、電離圏の全電子数 (Total Electron content、TEC) を求めることにより、地震直前から地震直後までの電離圏全電子数の変化を、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、それらのデータを使用し地震前 TEC の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照らし合わせて考察した。

先ほど紹介した物理過程から考えると、地震が起こる瞬間には地震の前兆現象としての TEC の変化は停止すると予想される。地震時には応力が解放され、新たな食い違いや割れ目の発生が起こらず、正孔の地表での蓄積も頭打ちになると考えられるからである。また地震前 TEC 異常は地域性を持つ可能性がある。陸域の割合が少ない、つまり海域の割合が大きい地域で起こった地震では、電気伝導度の高い海水の影響で電荷が地表に蓄積しにくく、TEC 異常の成長も早期に定常状態になると推測されるからである。逆に陸域での地震では電荷の拡散が小さく地震まで継続して TEC 異常も成長を続けると考えられる。導出した標準曲線から、地震時から音波擾乱が生じる地震約十分後までの間は、TEC はほぼ一定で推移していることが示唆された。しかし TEC 標準曲線と各々の地震における TEC 変化曲線との比較から、一見違うように見える各地震の地震前 TEC 上昇曲線の形の差異は少なく、地域性に関してはそれほど顕著ではないことが示唆された。

目次

1. Introduction	1
1.1 東北沖太平洋沖地震直前の電離圏 TEC 擾乱	1
1.2 東北、スマトラ、マウレ地震直前の電離圏 TEC 擾乱	3
2. 観測・解析方法	4
2.1 GNSS	4
2.2 GPS	5
2.3 GNSS-TEC 法による解析	5
2.4 GNSS-TEC 法による TEC の算出	7
3. 先行研究	8
3.1 M_w と地震前 TEC 変化の規模・変化開始時間の関係	8
3.2 AIC を利用した地震前 TEC 異常の検出	10
3.3 地震前 TEC 変化の物理的メカニズムの仮説	11
3.4 2015 年チリ地震直前の電離圏電子数密度の 3 次元トモグラフィー	12
4. 結果	14
4.1 18 個の地震についての VTEC データ	14
4.1.1 VTEC 変化	15
4.1.2 VTEC とレファレンス曲線の残差	17
4.1.3 VTEC とレファレンス曲線の相対残差	18
4.2 標準曲線	20
4.2.1 標準曲線(VTEC 残差)	20
4.2.2 標準曲線(VTEC 相対残差)	21
4.2.3 標準曲線と VTEC 残差の比較	23
5. 考察	24
6. 謝辞	26
7. 参考文献	26
8. 付録	27

1. Introduction

地球の高度 80 km から 1000 km 程度の高層大気では、太陽光に含まれる紫外線などにより大気分子の一部が電離したプラズマとして存在している。この領域を電離圏（電離層）と呼ぶ。

電離圏の電子数は、太陽光をはじめとする様々な物理的パラメーターにより季節変化・日変化する。さらに太陽活動など様々な要因により突発的な電離圏擾乱が起こることがわかっている。その変化する電子数は GPS（全地球測位システム Global Positioning System）をはじめとする GNSS（全地球航法衛星システム Global Navigation Satellite System）衛星からの電波を地上で観測し解析することによって TEC として求めることができる。この手法に関しては 2 章で詳しく述べる。電離圏電子密度は高度 300km あたりで最も高い値を示し、衛星と地上局を結ぶ視線が、その高度に仮定した薄い層と交わる点（IPP, Ionospheric Piercing Point）を地上に投影した点を SIP（Sub-Ionospheric Point）と呼ぶ。これによって衛星が電離圏のどのあたりの電子数を観測しているかを表すことが多い。

本章 1.1 では、2011 年に起きた東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）の直前に観測された TEC 擾乱を 2 つの衛星からみた事例を紹介する。続いて 1.2 では東北沖地震に加え 2004 年のスマトラ・アンダマン地震、2010 年のチリ・マウレ地震の解析結果を示し、同様の異常が複数の巨大地震の直前に確認されたこと紹介する。

1.1 東北沖太平洋沖地震直前の電離圏 TEC 擾乱

ここでは GNSS 衛星からの搬送波を利用する GNSS-TEC 法（詳細は 2. 1 章）を用いて解析した東北沖地震直前の TEC 変化を示す。国土地理院

(https://terras.gis.go.jp/sso_guide.php) から取得した GNSS データを用いて解析した TEC の地震前後の変化と SIP の軌跡を示す。ここでは衛星の仰角の変化に伴って生じる変化を取り除くために鉛直方向の TEC (VTEC; Vertical TEC) に換算したものを示している。

図 1 に示した GPS15 番衛星と 26 番衛星は地震時にそれぞれ日本列島上空と太平洋沖の上空に位置しており、地震の 40 分前ほどに、TEC がそれまでのなめらかな変化曲線から正にずれ始めたことが分かる。また、複数衛星が同様な結果を示すことから地震前 TEC 変化はある程度の空間的な広がりを持つことが分かる。

図 1 の右図は図上で示された局と衛星の組み合わせにおける SIP の軌跡である。地震の 10-15 分後に起こっている急激な TEC の乱れは地震による地殻上下変動で励起された音波による擾乱である。

図 2 ではすべての GEONET (GNSS Earth Observation Network System) 点から

GPS15 番衛星を見て求めた、2011 年東北沖地震直前の VTEC 異常 (Heki, 2011) を表している。時間が地震発生に近づくにつれて、断層上空付近で正の VTEC 異常が起こっていたことがわかる。

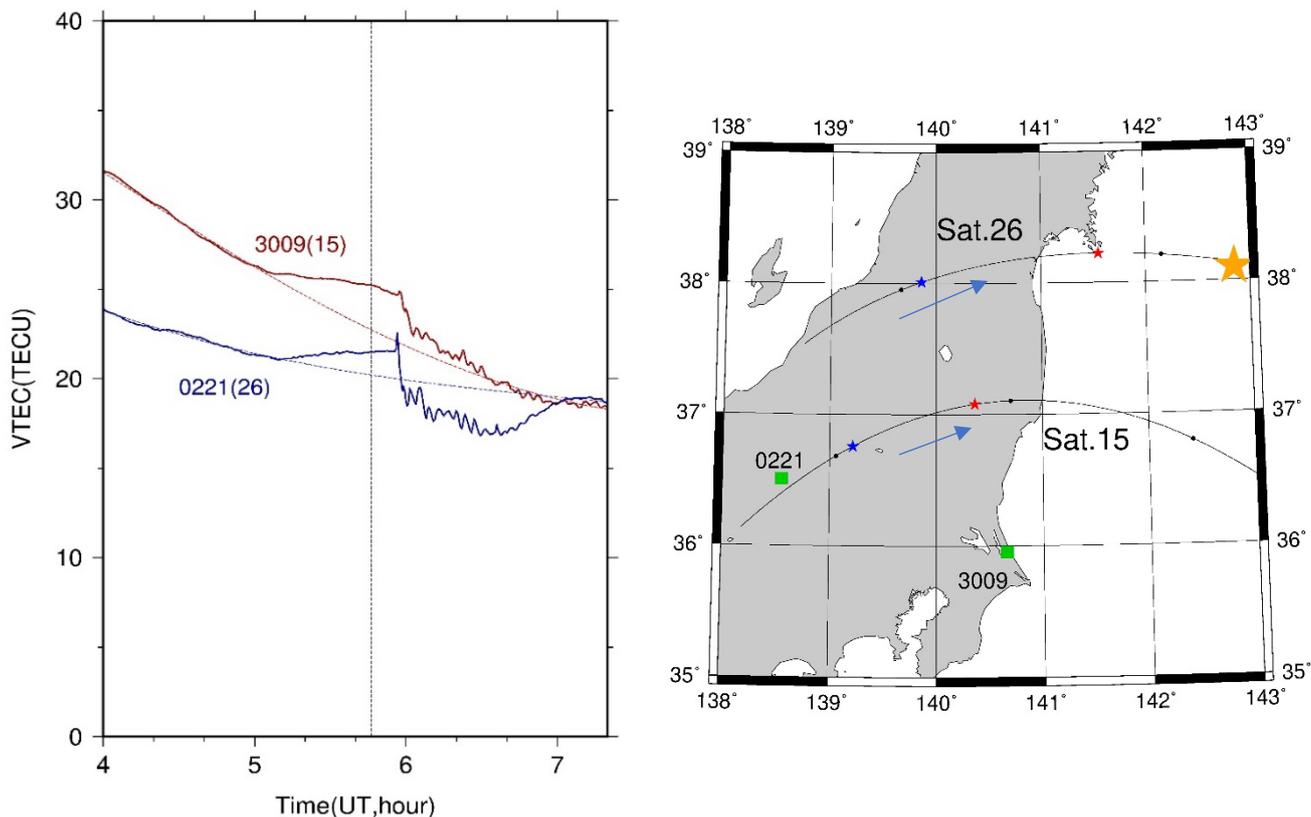


図1：2011年東北沖地震の前後のVTEC変化(左図)、実線が実際に観測されたVTEC、点線は地震前後のTEC擾乱が起こっていない部分を用いて多項式近似で求めたレファレンス曲線である。0221局からGPS26番衛星を見たものと、3009局からGPS15番衛星を見たものを示す。UT 5:46における縦線は地震が起こった時間を表している。右図は左図に対応するそれぞれの局と衛星のペアにおけるSIPの軌跡を示す。黄色の☆印が震源で、緑の□印と数字はそれぞれの観測局を、赤い☆印が地震時のSIPの位置、青い☆印がTECの増加が始まった時間のSIP、黒い○印が毎時0分のSIPの位置を表す。

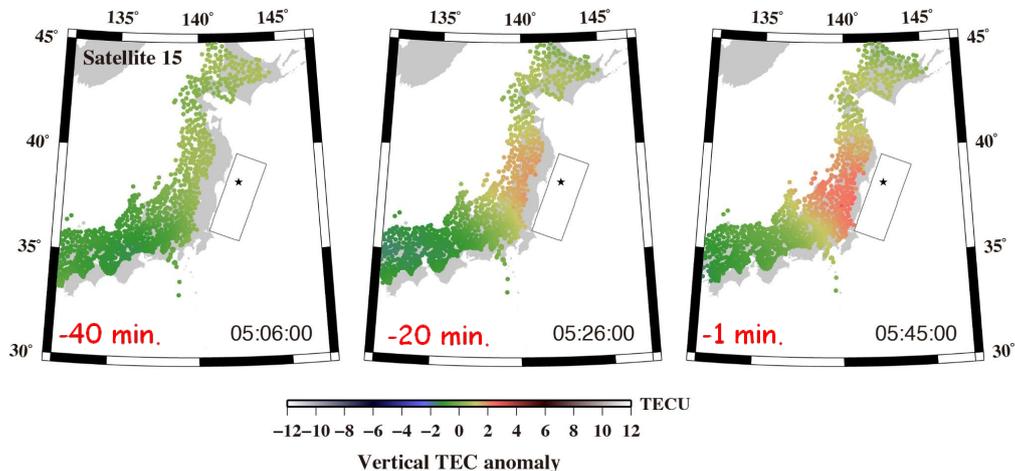


図2：すべての GEONET 点から 15 番衛星を見て求めた、2011 年東北沖地震時直前の VTEC 異常。観測された VTEC から地震前後一時間を除いた部分に当てはめた多項式モデルからの差を異常と定義した。赤い色が正の異常を示す。左から地震の (a) 1 時間前 (b) 20 分前 (c) 1 分前をしめす(Heki, 2011)。

1.2 東北、スマトラ、マウレ地震直前の電離圏 TEC 擾乱

次にカリフォルニア大 San Diego 校にある GNSS のデータセンター (ftp.garner.ucsd.edu) を始めとする様々なデータセンターから取得した GNSS データを使い、2010 年のチリ・マウレ地震 (M_w 8.8)、2004 年のスマトラ・アンダマン地震 (M_w 9.2)、2011 年の東北沖地震 (M_w 9.0) の前後の VTEC の変化を同じスケールで比較したものを示す。TEC 擾乱を比較しやすくするためにそれぞれの地震が起こった時間をゼロとして表示してある。実際に起こった時間 (現地時間) はチリ地震が 3:34、スマトラ地震が 7:58、東北沖地震が 14:46 である。

電離圏には太陽放射によって大気分子からはじかれた自由電子が漂う。これによって電子数は昼間側に多くなる。東北沖地震に比べ、深夜に発生したチリ地震の VTEC が小さいのはこのためである。またスマトラ・アンダマン地震では、最初は小さかった VTEC の値が、太陽が昇るにつれて上昇してゆく様子がわかる。

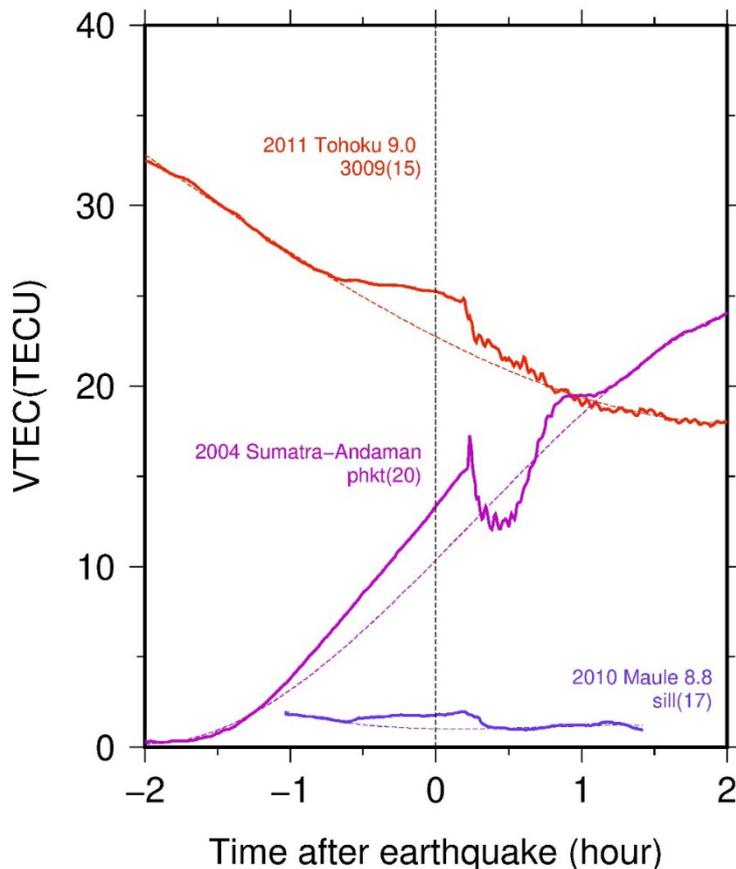


図3：3つのM9クラスの巨大地震前後のVTEC変化。図上にはそれぞれの地震の発生年、マグニチュード、4文字の観測局、カッコ内に2桁の衛星番号(GPS)が示してある。実線がVTEC変化、点線がレファレンス曲線である。

2. 観測・解析方法

ここでは、TECを観測する際に使用されるGNSS、特にアメリカのGNSSであり、最も早い時期から実用化されていたGPSを引き合いに出し、その概要について説明する。2.2章では本論文での解析においてTECがどのようにしてGNSSの観測生データ標準形式から取り出されるのか記述する。

2.1 GNSS

GNSSとは、地球をまわる複数の人工衛星から送信される電波を利用して、それぞれ受信点間での電波受信の時間差を観測・解析することで、測位・航法・測量を行うシステムである。GNSSにはアメリカ合衆国が運営するGPS、ロシアのGLONASS (GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema)、中国の北斗 (BeiDou) やEUのGalileoがあり、地域限定のシステム(RNSS)としてインドのNAVIC (Navigation Indian Constellation)、日本のQZSS (Quasi-Zenith Satellite System)がある。GPS、GLONASSは元来軍事目的の測位システムとして整備されてきた経緯があり、軍事分野からのニーズを中心として利活用が進められてきたが、現在は軍事以外の様々な分野で利活用されている。Galileoは民生利用を主体とする衛星測位システムとして、北斗は中国が自国の安全保障の観点からGPSに依存しない測位システム構築のため整備された。2018年4月の内閣府の資料ではそれぞれのGNSS衛星の数は下図のような状況である。

国	測位衛星システム	信号精度	運用状況
米国	GPS	5~10m	31機
ロシア	GLONASS	10~25m	24機
欧州	Galileo	15~20m	14機
中国	BeiDou	10~15m	15機
インド	NAVIC	~20m	7機
日本	QZSS	5~10m	4機

2020年にはGalileoとBeiDouは30機体制を予定しており、これからも増えていくと思われる。

2.2 GPS

GPSとは、アメリカによって運用されるGNSSである。

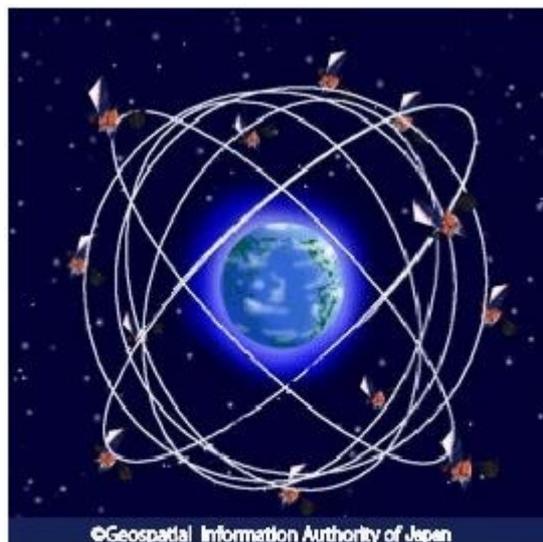
航空機・船舶等の利用では、4個以上のGPS衛星からの距離を同時に測量することによって自分の位置等を決定する。GPS衛星からの距離は、GPS衛星から発信された電波が受信機に到達した時間から求めることができる。衛星から発信される電波には衛星の軌道情報、セシウム・ルビジウム原子時計の正確な時刻情報が含まれる。

GPS衛星からはL1・L2の2つの周波数の搬送波に軌道や時間等の情報を載せ、衛星ごとに固有のコードで変調して送っている。これにより衛星からの信号を識別している。

L1・L2の周波数は以下の通りである。

L1：1575.42 MHz

L2：1227.60 MHz



GPS衛星のイメージ

図4：GPS衛星のイメージ（国土地理院のページより）

2.3 GNSS-TEC法による解析

前の節で示したGNSS衛星から発せられる電波は、大気屈折率の不均一などの影響により受信局への到達時間にずれが生じる。電離圏においては、電子がマイクロ波の伝搬を遅延（電離圏遅延）させる。この電離圏によるマイクロ波の遅延は遅延要因のなかで影響が最も大きいものの一つである。ただし、この電離圏での遅延は地殻変動を観測するような精度の高い受信機での観測の場合は完全に補正される場合がほとんどである。理由として、マイクロ波は電離圏の電子数に比例して、位相速度を速め、群速度を遅らせる性質がある。この速度変化は電子数だけでなく、周波数の二乗に反比例するという依存性を持つ。そのため2つの周波数を観測して遅延を比較すれば、電離圏での遅延は簡単に補正することができる。そしてこれを逆に利用することによって、衛星視線（LOS, Line Of Sight）に沿った電離圏の電子数（TEC）を算出しようというのが、GNSS-TEC法である。LOSに沿ったTECをとくにSTEC(Slant TEC)、STECを鉛直方向のTECに直したものをVTECという。TECの単位にはTECU（TEC Unit= 10^{16} electron/m²）がよく用いられる。また便宜的に電離層の電子数が高い高度に薄い層を仮定し、その層とLOSが交わる点をIPP、その地表への投影点をSIPという。ここでは日置幸介、菅原守、大関優、

岡崎郁也による「GPS-TEC 法による地球物理学」(測地学会誌 2010) を大いに参考にし
て記述した。

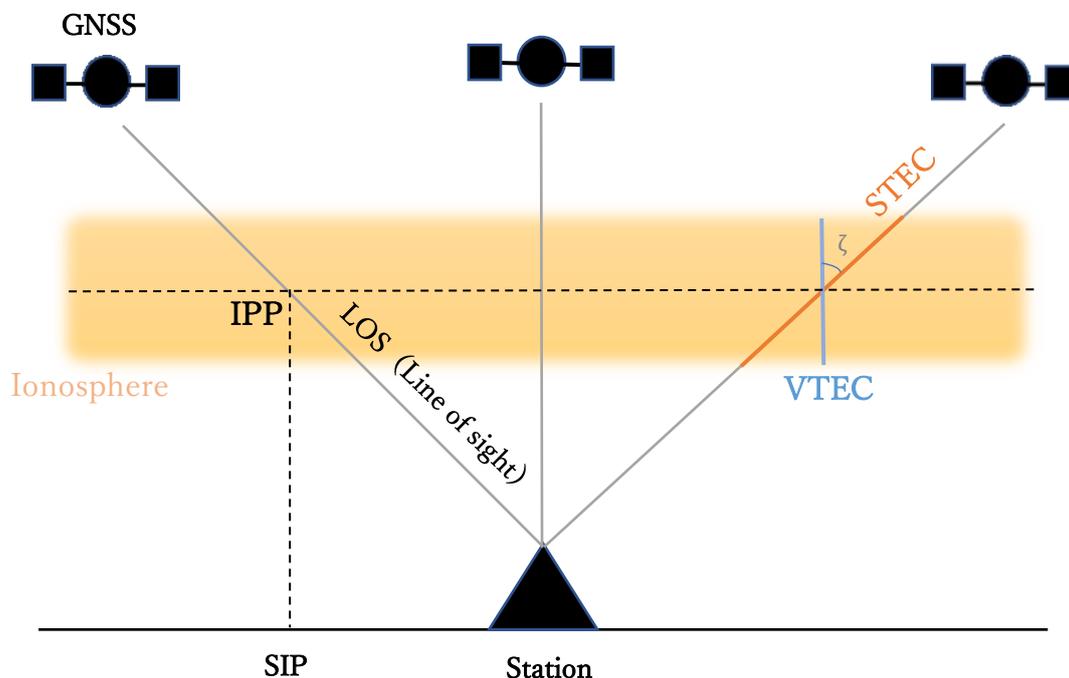


図 5 : GNSS 衛星と受信機、LOS、IPP、SIP、STEC、VTEC の模式図

GPS 受信機では $L_1 \cdot L_2$ の 2 周波を同時受信することにより、周波数の 2 乗に逆比例する電離圏遅延を除去している。その時に用いられる L_1 と L_2 の線形結合（ここでは L_3 と表記する）はそれぞれの搬送波周波数を f_1, f_2 とすると、

$$L_3 = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) L_1 - f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) L_2 \quad \dots (1)$$

で表される。この線形結合には電離圏遅延が含まれないため、Ionosphere-free linear combination と呼ばれる。ここで $L_1 \cdot L_2$ は、観測された位相に波長をかけて長さ (m) の単位にしている。一方 L_1 と L_2 の単純な差（ここでは L_4 と表記する）は、電離圏の情報のみを含んでおり、中性大気遅延や衛星位置、局位置などの情報は差をとった時点で除かれている。

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad \dots (2)$$

この線形結合は電離圏遅延以外の幾何学的な情報を含まないため、Geometry-free linear combination と呼ばれる。 L_4 は衛星視線に沿って積分した電子の数に比例するため、電離圏そのものの研究に広く用いられてきたが、本研究のような固体地球の現象に関わる電

離圏擾乱の研究にも使用されている。

2.4 GNSS-TEC 法の算出及び解析

本節では、TEC がどのようにして GNSS の観測生データ標準型式 (Receiver Independent Exchange Format; RINEX 型式) から取り出されるか記述する。

本論文で取得した RINEX データには様々な衛星で得られた L_1 と L_2 の位相が含まれている。位相にそれぞれの波長をかけて単位をラジアンから長さに変換する。光速を c とすると波長は $c/f_1, c/f_2$ で表され、 L_4 は以下のようなになる。

$$\begin{aligned} L_4 &= L_1 - L_2 \\ &= -\frac{c}{f_1}L_{1c} - \left(-\frac{c}{f_2}L_{2c}\right) + N \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3) \end{aligned}$$

L_{1c} と L_{2c} はそれぞれ L_1, L_2 の位相、 N は位相データの整数値の不確定性である。 L_4 に次のようなファクターをかけて、視線方向の電子数を積分した STEC に換算する。

$$\Delta\text{STEC} = \left(\frac{1}{40.308}\right) f_1^2 f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \Delta L_4 \cdot \cdot \cdot \cdot (4)$$

位相データには一般的に整数値の不確定性があるため、実際には L_4 の絶対値には意味はなく、衛星の観測開始から終了までの時間変化にのみ意味がある。上の式で ΔL_4 および ΔSTEC となっているのはそのためである。RINEX ファイルに二周波のコード情報が含まれている場合は、それらの差に L_4 を合わせることで整数値不確定性を除去することができる。さらにそこから、受信機の周波数間バイアスと衛星の周波数間バイアスを除去すれば正しい STEC が得られる。衛星のバイアスは GIM (全球電離圏図) ファイルに、受信機バイアスは GIM ファイルにある場合とない場合があり、ない場合は Minimum Scalloping 法 (Rideout & Coster, 2006) を使って独自に決定する。

また STEC に視線の電離圏の入射角をかけることで VTEC に換算できる。STEC は仰角の変化に伴う見かけの変化を含むが、VTEC の変化は実際の電子数の増減を示す。そのため本研究では VTEC での議論を行った。STEC から VTEC への換算は、薄い層で近似した電離圏への視線の入射角を ζ として以下の式で表される。

$$\text{VTEC}(t) = [\text{STEC}(t, \zeta) - \text{bias}] \cos \zeta \cdot \cdot \cdot \cdot (5)$$

(5)式で bias となっているのは上で説明した衛星や受信機内部における L_1 と L_2 の経路差に

起因する周波数間バイアスである。

3 先行研究

ここまで地震前 TEC 変化の観測例とその解析手法の説明を行った。本章では本研究における結果の考察の助けとなる地震前 TEC 変化に関する先行研究の紹介を行い、地震前 TEC 変化の特徴やこれまでに解明されている事実について詳しく整理する。

はじめに 3.1 節で M_w と地震前 TEC 変化の規模・変化開始時間の関係 (Heki & Enomoto, 2015; He & Heki, 2017; 日置, 2018) を、次に 3.2 節で AIC (赤池情報量規準; Akaike's Information Criterion) を利用した地震前 TEC 異常の検出 (Heki & Enomoto, 2015)、また 3.3 節では現在考えられている地震前 TEC 変化の物理的メカニズムを、3.4 節では地震前 TEC 変化のメカニズムを 2015 年チリ地震直前の電離圏電子密度の 3 次元トモグラフィー (He & Heki, 2018) の結果と関連づけて説明する。

3.1 M_w と地震前 TEC 変化の規模・変化開始時間の関係

2011 年東北沖地震の直前に起こった TEC 変化 (Heki, 2011) と同様の変化は、その後の GNSS データが利用可能な他の地震の解析の結果、地震による実際のエネルギー解放量を反映するモーメントマグニチュード (M_w) が 8.2 以上ならほぼ毎回起こることが確認された。図 6a はそれらの地震の代表的な局と衛星の組み合わせで観測された TEC 変化 (レファレンス曲線からのずれ) を比較したものである。また M_w の大きな地震ほど、大きな TEC 変化が広い範囲に早く生じるという依存性が明らかになってきた。図 6b は様々な地震について先行時間と地震発生時における異常の大きさを M_w と比較したものである。図 6a と図 6b は、これらの内容が報告されている Heki & Enomoto (2015)、He & Heki (2017)、日置 (2018) などの文献を参考に再現した図である。

図 6b は、プレート間地震とプレート内地震の直前の TEC 変化の、先行時間と地震時の異常の大きさ (background VTEC に対する割合で示した相対的な大きさ) を M_w と比較したものである。 M_w と先行時間および異常の大きさとの相関がわかる (Heki, 2018)。

ここで、断層運動による仕事 (断層面積 \times すべり量 \times 剛性率) の量を表す地震モーメント M_0 と、モーメント・マグニチュード M_w の関係を表した式

$$M_w = (\log_{10} M_0 - 9.1) / 1.5$$

と地震のスケーリング測からこの結果について考察すると、図 6b の TEC 変化の先行時間は地震が起こる断層の長さに、TEC 変化の地震時の異常の大きさは断層の面積に比例していることが推測される。図 6 では、先行時間がおおむね $M_0^{1/3}$ に、また異常の大きさがお

おむね $M_0^{2/3}$ に比例していることが示されている。一般に地震の M_w が 1 上がるとエネルギーが 30 倍になるといふときのエネルギーは M_0 に相当する。断層の長さ、幅、すべり量が比例すると考えると、 M_w が 1 変わると断層の長さや幅、すべり量は約 3 倍になることを意味する。また断層の面積は M_w が 1 変わると約 10 倍になる。つまり前者の量は $M_0^{1/3}$ に比例、後者の量は $M_0^{2/3}$ に比例することになる。言い換えると先行時間は断層の長さに比例し、異常の大きさは断層の面積に比例するともいえる。

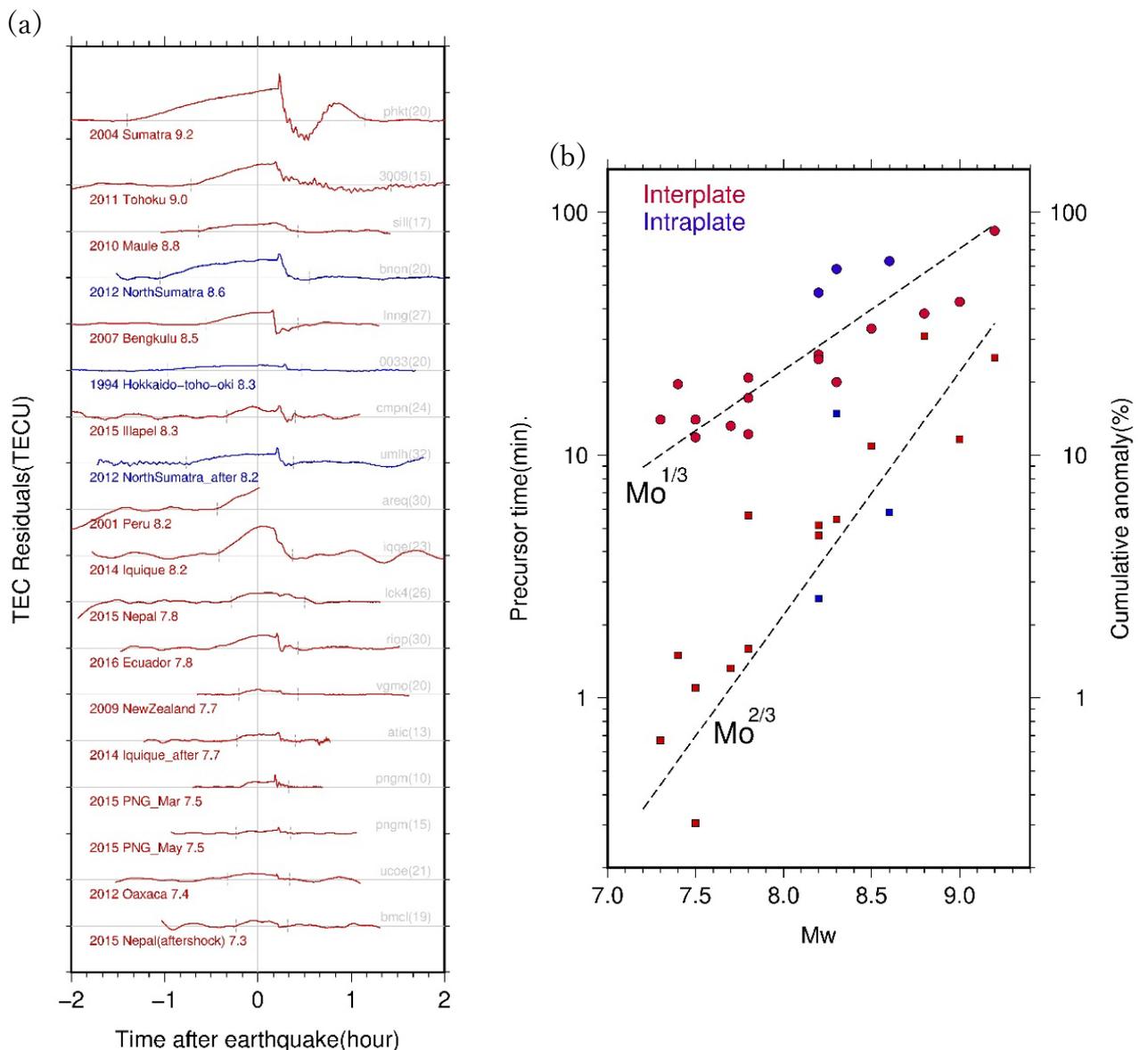


図 6 : M_w が 7.3 から 9.2 におよぶ 18 の事例において、地震前 TEC 擾乱をレファレンス曲線（地震の影響を受けている部分を除いて近似した多項式）からの差として示したもの (a) と、それらの例における先行時間（丸印）と地震直前の異常の大きさ（四角印）を M_w の関数として示したもの

(b)。両図とも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。
 (a)において、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記載してある。(a)において 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。二つの線で囲まれた部分を地震に影響された部分としてレファレンス曲線の導出時に除外した。(b)でみられる関係は、先行時間は地震断層の長さ（または幅）に比例、最終的な異常の大きさは地震断層の面積に比例することを示唆する。

3.2 AIC を利用した地震前 TEC 異常の検出

TEC の異常を示す方法として、本研究やその他の先行研究では異常が起こっている時間帯を除いて、多項式近似によって得られたレファレンス曲線を用い、実際の TEC と比較する方法をとっている。地震の約 10 分後から始まる音波擾乱でも地震の規模に応じた TEC の変化が起こるため、この手法で用いた地震後のデータがレファレンス曲線自体を不適切にゆがめて、見かけ上の M_w 依存性を見せているのではという批判があった。それに対し Heki & Enomoto (2015) は、図 7 のように赤池情報量規準 (AIC) を用いた統計的な手法を利用して、地震発生前のデータのみを用いて TEC のトレンド変化（正の折れ曲がり）を検出する方法で過去のデータを再解析して反論した。

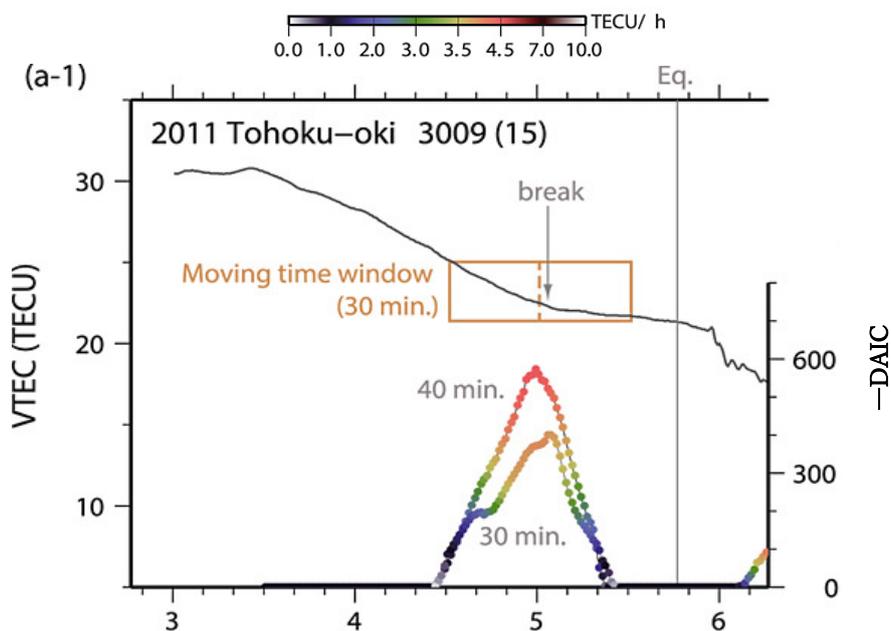


図 7：東北沖地震前後の VTEC データに対して、AIC を利用して正の折れ曲がりを検出した例(Heki & Enomoto, 2015). オレンジ色の四角で示す時間窓（図の例では ± 30 分）を動かして、時間窓の中央に折れ曲がりを入れた場合と入れなかった場合の AIC の差 ($-\Delta AIC$) によって折れ曲がりの有意性を定量化し、その時系列をプロットしている（色のついた丸、色は折れ曲がり前後のトレンド変化を示す）。

3.3 現在考えられている地震前 TEC 変化の物理的メカニズム

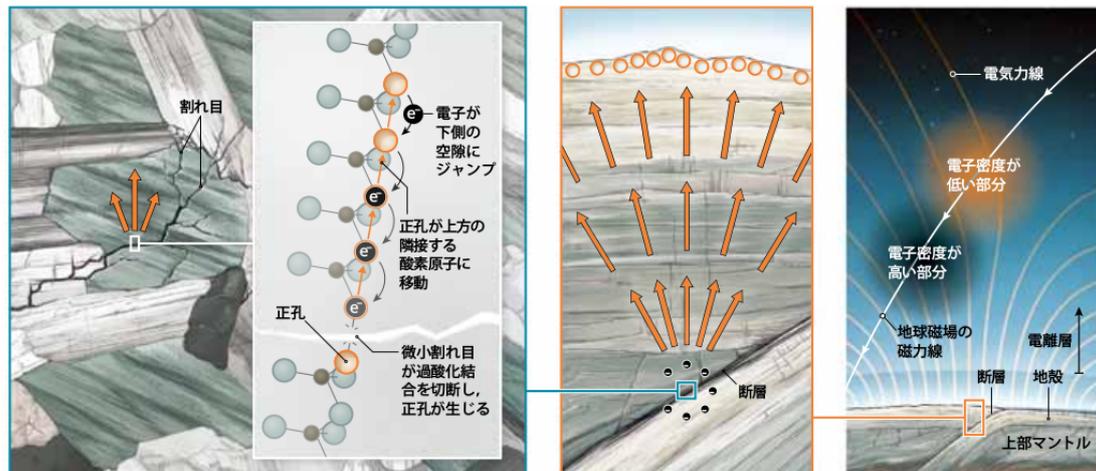
ここでは概要で触れた、現在考えられている地震直前 TEC 変化の物理メカニズムについて E・バンス(2018)に掲載されているイラスト (図8) を用いて再度説明する。

地震発生が近くなると、応力の高まりとともに断層周辺の地殻を構成する各部分に微小な割目や食い違いができる。その過程で過酸化架橋と呼ばれる格子欠陥が切断され電子の空隙 (正に帯電しているので正孔と呼ばれる) が残り、それを補うために電子が次々に移動し、同時に正孔は逆向きに移動する。この過程が隣接する岩石粒を通して繰り返され、正孔は互いの反発によって拡散し地表に蓄積する。蓄積した正孔 (正電荷) は大気中に上向きの電場を生じさせる。この電場は地震の起こる断層が大きいと超高層大気に達する。この電場が地球磁場と相互作用 ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト) して電離圏の電子が移動する。この仮説は、次の節で紹介するが推定した 2015 年チリ地震直前の電離圏電子密度の 3 次元構造 (He and Heki, 2018) から支持される。

大地から空へ

新研究によると、大地震発生の30分以上前に、地表から数百 km 上空で電氣的な乱れが生じるようだ。地震の初期警報と

なる可能性があるだろう。岩石中の割れ目がはるか上空で変化を生み出す仕組みについて、下のような仮説が提唱されている。



1. 割れ目ができる

地下では地殻を構成する各部分が互いにゆっくりとずれている。これらはときどき断層において急に動き、その動きが生んだ歪みによって岩石が引き裂かれて、マイクロフラクチャーと呼ばれる微小な割れ目が生じる。

2. 電子がジャンプ

マイクロフラクチャーが生む力は、岩石粒の分子内で酸素原子どうしを結びつけている結合 (過酸化架橋) を切断するだけの強さがある。この力が、岩石粒内にある負に帯電した電子のエネルギーを変え、電子を動かす。移動の跡には「正孔」という正に帯電した空隙が残る。電子の移動が進むにつれて正孔は逆向きに移動し、岩石粒の内部に小さな電流が生じる。

3. 地表へ

電子が動いて正孔を残すこの過程が、隣接する岩石粒を通じてドミノ倒しのように続く。正孔の正電荷は、岩石粒から岩石粒へと飛び移りながら、元の割れ目から地表へと移動していく。元の場所では、蓄積した歪みが臨界に近づく。

4. 上空へ

地表に正孔が蓄積すると、周囲に電場を生じて反対の電荷を持つ電子を引き寄せる。この電場の電気力線ははるか上空に及ぶ場合がある。日置は、この電場と地球磁場の電磁気的な作用で電子が移動、電離層内の電子の分布パターンを変えて、密度の高い部分と低い部分を生み出すと考えている。こうした電子密度の異常は GPS 衛星で検出できる。

図8：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・バンス, 2018)

3.4 2015 年チリ地震直前の電離圏電子密度の 3 次元トモグラフィー

3.3 節で記載した物理過程は、3.1 節の M_w と地震前 TEC 変化の規模・変化開始時間の関係とも整合性があり、かつ He and Heki(2018)による 2015 年チリ中部地震直前の電子密度異常の空間分布からも支持される。He and Heki (2018)では 5 つの GPS、5 つの GLONASS、146 個の GNSS 観測局を使用して 2015 年チリ・イジャベル地震前の電離圏電子数密度異常の三次元トモグラフィーを行った。それによると、電子密度は上空 200km 程までは正の異常を示し、その上の 400km 程までは負の異常を示した。そして、それらの正と負の異常は大まかに地磁気に沿って並んでいることが分かった。このことから、地震前 TEC 異常は地表に蓄積した正電荷が作る巨大な電場と地球磁場の相互作用によって生じた下向きの $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトによることが示唆された (電場に西向き成分があると、北向きの地球磁場との相互作用で下向きに電子がドリフトする)。

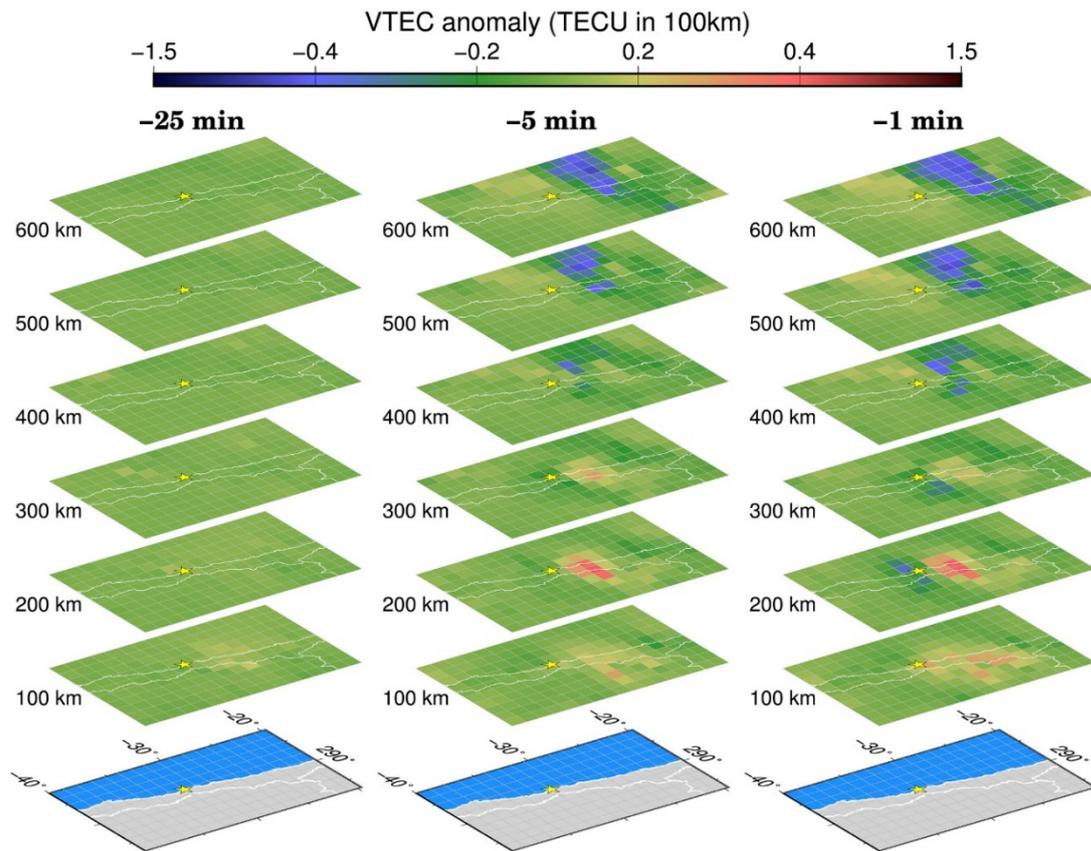


図9：3D トモグラフィーによる、2015 年チリ・イジャベル地震直前における、高度 100 km から 600 km までの電子密度異常の空間分布 (He & Heki, 2018)。左から地震 25 分前、5 分前、1 分前の異常を示す。図中の白い線は海岸線と国境を表す。黄色い☆印は震源である。

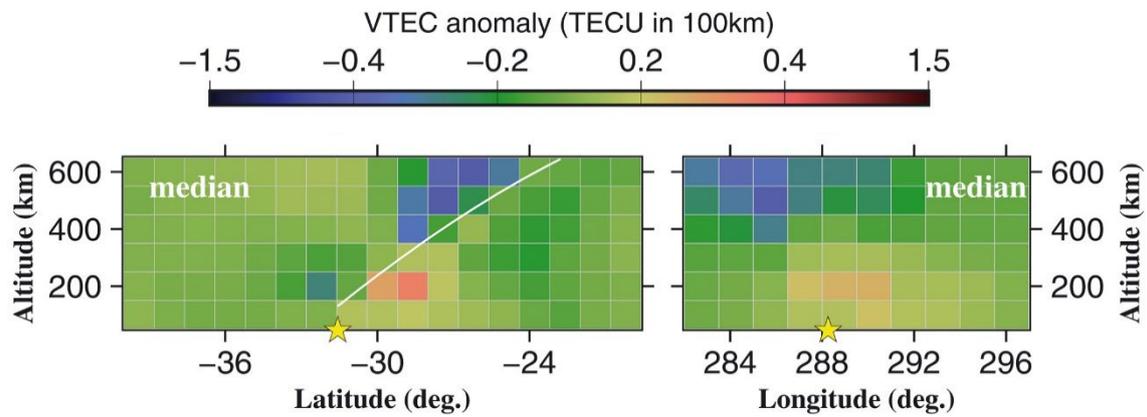


図 10：2015 年チリ・イジャペル地震の直前の、3 次元トモグラフィーによる電子密度異常の東西断面（右）と南北断面（左）。右は経度 285.75 度から 1.5 度ごとに 290.25 度までのブロックの値の中央値を、左は緯度-29.8 度から 1.2 度ずつ-26.2 度までのブロックにおける電子密度異常の中央値をしめす (He & Heki, 2018)。白色の曲線は地球磁場を、黄色の☆印は震源を表す。

4 結果

本研究では、日置(2018)で使用された地震前 TEC 異常開始時間・終了時間と衛星・観測局のペアを最適化したデータを入手、それらを使用して、地震前 TEC 変化が確認された地震の発生前後の VTEC 変化と VTEC のレファレンス曲線からの残差の絶対数（以降 VTEC 残差）と、VTEC とレファレンス曲線からの残差の割合を解析し、それらを用いて VTEC 残差の標準曲線と、VTEC 残差を背景 VTEC で正規化した相対残差（以降 VTEC 相対残差）の標準曲線を作成した。

4.1 18 個の地震の前後の VTEC データ

ここでは 18 個の地震の VTEC 変化、VTEC 残差、VTEC 相対残差の解析結果を示す。VTEC 変化の解析結果をまとめた図 11 では 18 個の地震を共通の縦軸と横軸で比較したため、個々の地震のデータは小さく表示されている。拡大した図は、第 1 章 1 節の図 1 を参照されたい。また各地震の TEC 変化の比較のために地震が起こった時間をゼロとして表示してある。実際に起こった時間に加え、地震の M_w 等の情報を表 1 に記載した。

表 1 直前に電離圏全電子数に異常がみられた 18 個の地震の名前、発生年、 M_w 、発生時刻 (UT hour) をまとめたもの

地震(図中表記)	発生年	M_w	発生時刻
スマトラ・アンダマン (Sumatra)	2004	9.2	0.95
東北沖 (Tohoku)	2011	9.0	5.77
チリ・マウレ (Maule)	2010	8.8	6.57
北スマトラ (North Sumatra)	2012	8.6	8.62
スマトラ・ブンクル (Bengkulu)	2007	8.5	11.17
北海道東方沖 (Hokkaido-toho-oki)	1994	8.3	13.33
チリ・イジャペル (Illapel)	2015	8.3	22.90
北スマトラ(余震) (North Sumatra_afters)	2012	8.2	10.72
ペルー (Peru)	2001	8.2	20.55
チリ・イキケ (Iquique)	2014	8.2	23.78
ネパール (Nepal)	2015	7.8	6.18
エクアドル (Ecuador)	2016	7.8	23.97
ニュージーランド (New Zealand)	2009	7.7	9.37
チリ・イキケ(余震) (Iquique_after)	2014	7.7	2.72
パプアニューギニア(3月) (PNG_Mar)	2015	7.5	23.80
パプアニューギニア(5月) (PNG_May)	2015	7.5	1.73

メキシコ・オアハカ (Oaxaca)	2012	7.4	18.03
ネパール (余震) (Nepal_after)	2015	7.3	7.08

4.1.1 VTEC 生データ

第一章では地震直前の TEC 変化の事例の紹介のため、2011 年東北沖地震、2004 年スマトラ・アンダマン地震、2010 年チリ・マウレ地震の 3 個の M9 級地震の VTEC 変化の解析結果を紹介した。ここではその 3 地震に加え、15 個の地震を解析した。各地震において VTEC の値に大きな差があるのはバックグラウンドの TEC が時間帯や緯度等の要因でそれぞれ異なるからである。M_w7.8 以上の地震前の TEC の折れ曲がり（異常開始）は先行研究の章で紹介した AIC により検出できている。より小さい地震の異常開始と地震後の異常終了時刻は He & Heki (2017) に倣った。レファレンス曲線を作成する際に近似する曲線の次数は L カーブ法(He & Heki, 2017)で決定している。

図から分かるように、地震直前に TEC 擾乱がみえた最も小さな地震は M_w7.3 (2015 年ネパール地震最大余震) であるが、これは震源がバックグラウンドの電離圏 TEC が非常に大きい赤道異常の直下であったために観測されたものである。一方 M_w8.2 以上の事例では、地震前 TEC 変化は GNSS データが利用できるすべての地震で確認されている。イキケ地震を見てみると、バックグラウンド TEC が大きいと M_w8.2 レベルの地震でも M9 級地震に劣らない大きな変化を示すことが分かる。2001 年ペルー地震の例で観測結果が途中で切れているのは地震の発生とともにアレキーパ局の GNSS 受信機の観測データが失われたことによる。

また、地震発生 1 時間前から地震発生 30 分後までの SIP の軌道を付録の章に記載するので必要があれば参照していただきたい。

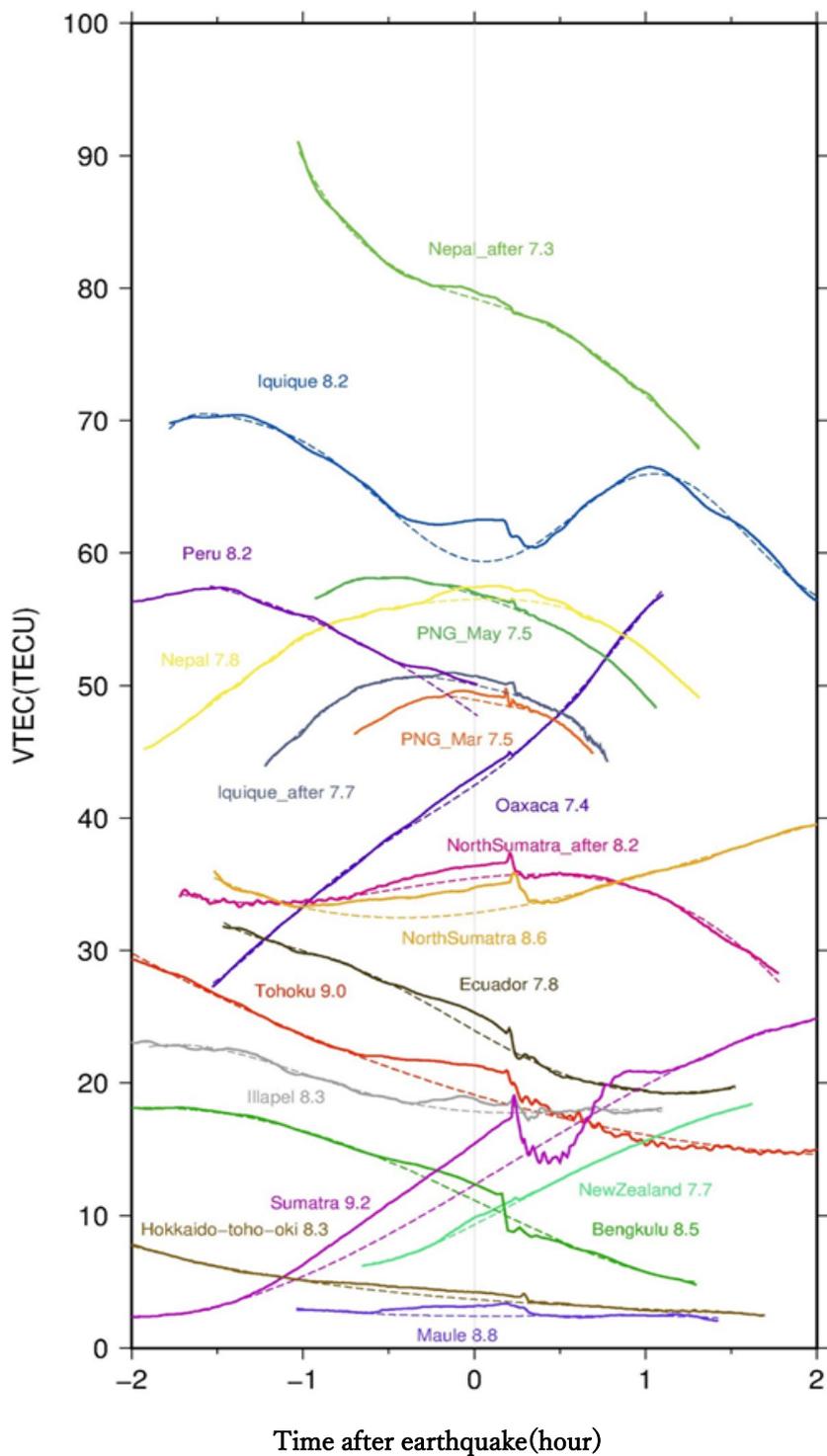
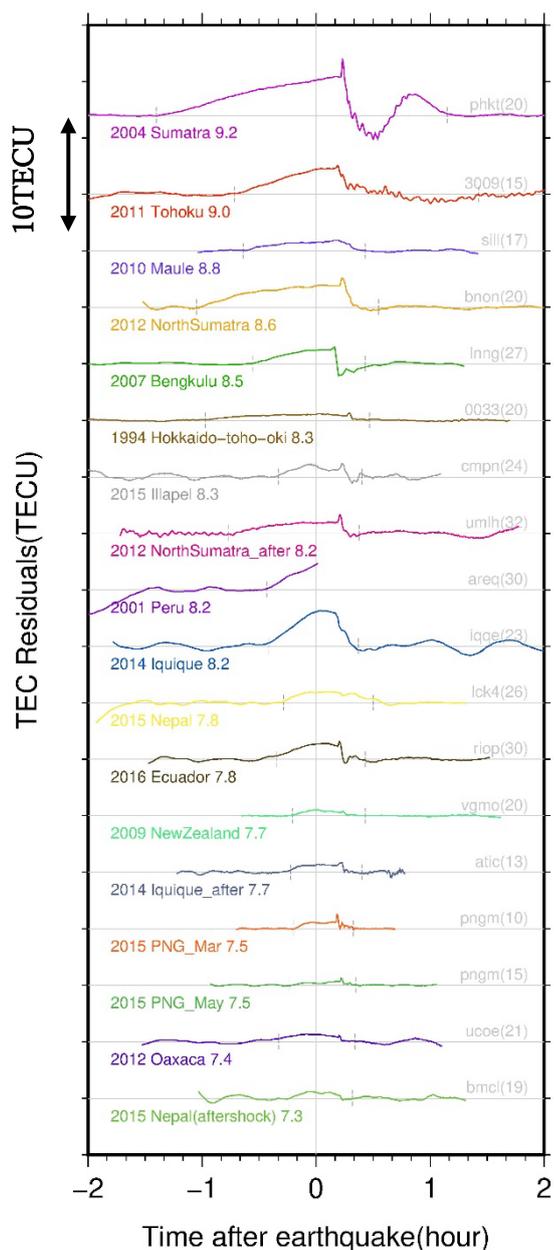


図 11: 地震前 TEC 擾乱が確認された 18 個の地震前後の VTEC 変化。横軸は地震発生時をゼロとした時間を、縦軸は VTEC の絶対数を示す。実線が実際の VTEC 変化、点線がレファレンス曲線を表す。詳細は表 1 を参照のこと。

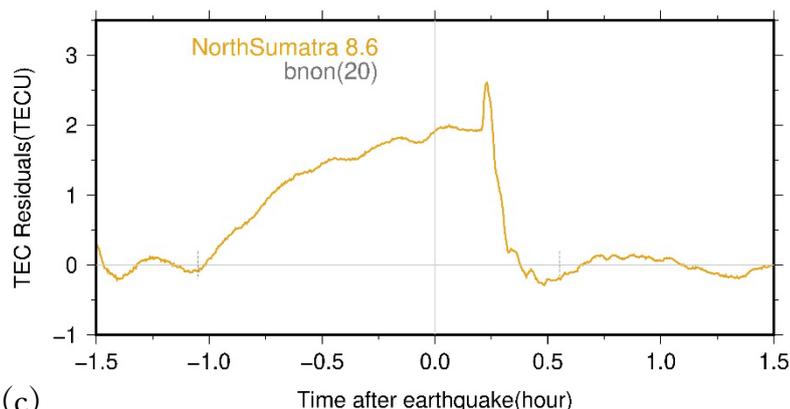
4.1.2 VTEC 残差の解析結果

ここでは図 12 として、実際の VTEC の値からレファレンス曲線の値を引いたもの (VTEC 残差) を示す。この結果が示すものは地震前に TEC が通常時 (なめらかに地震前後をつないだ値) よりどれだけ増加 (または減少) しているかである。各地震の VTEC の線を表す色は図 11 と対応している。図 12(b)~(d)は(a)中の結果の拡大図である。(a)を見ると、 M_w と異常の大きさ、異常開始時間の相関が見て取れる。

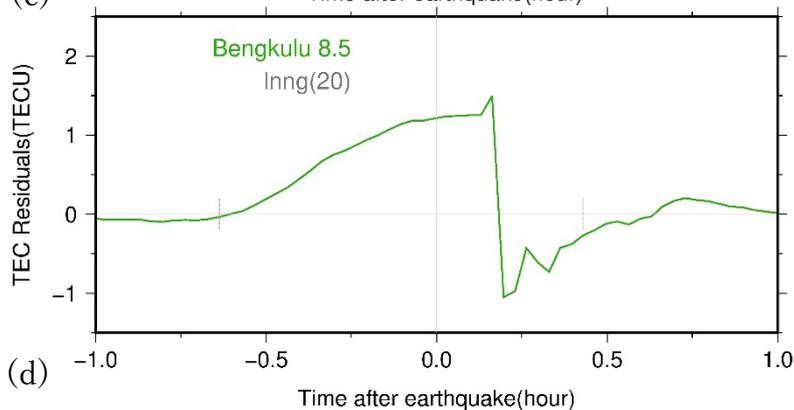
(a)



(b)



(c)



(d)

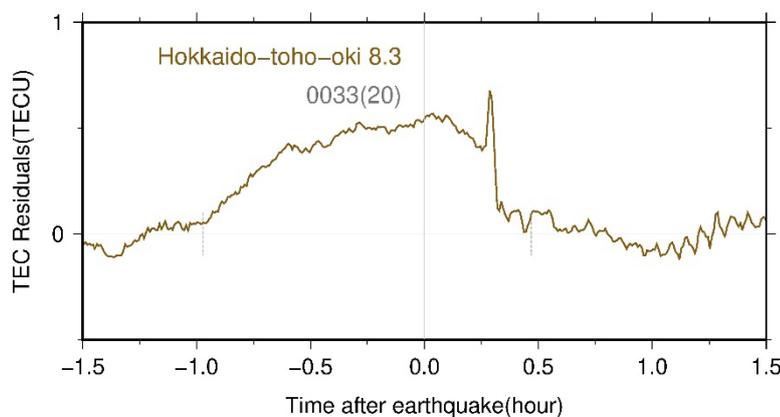
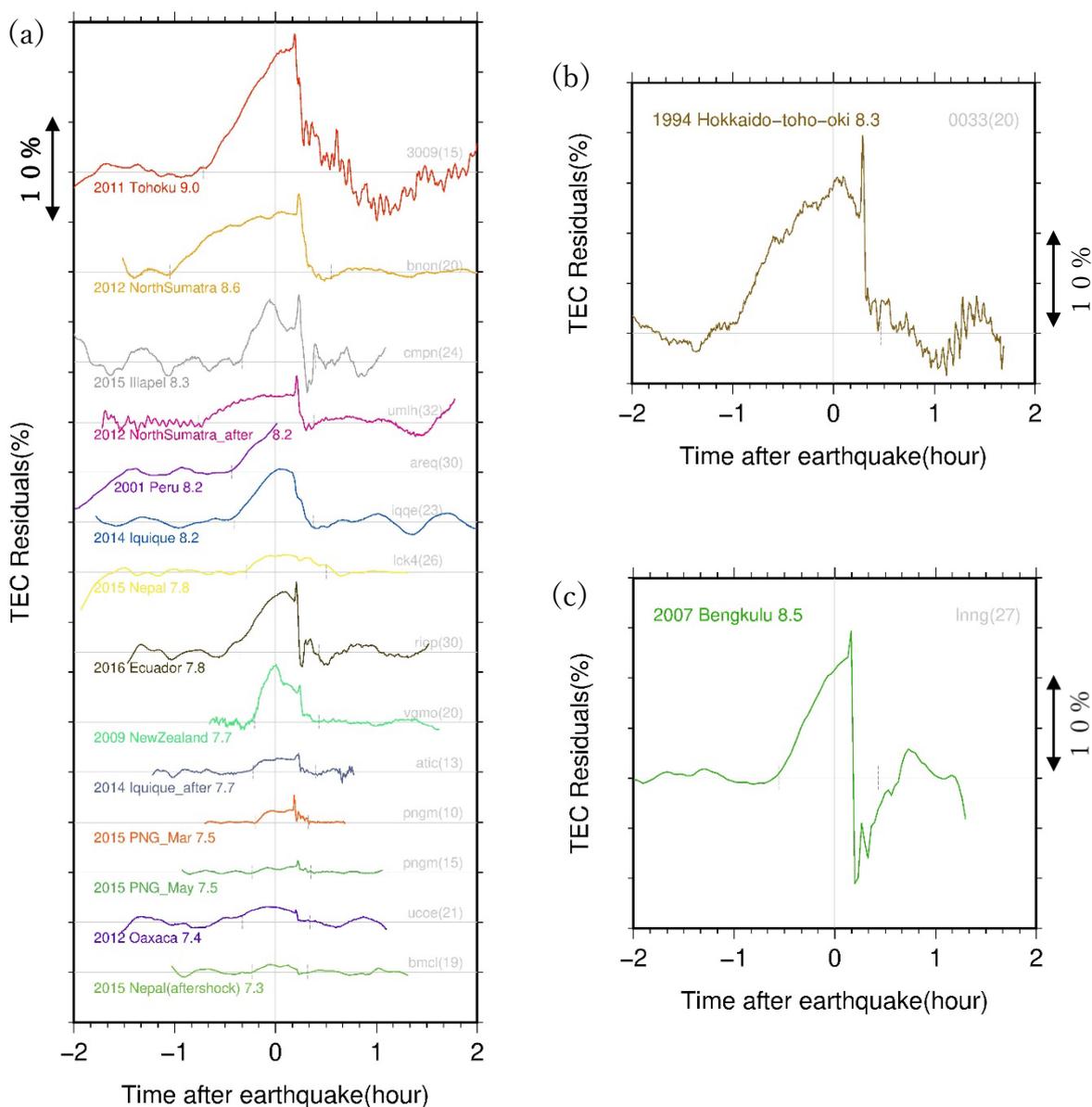


図 12：レファレンス曲線に対する VTEC 残差を M_w が大きい順に並べたもの。(a)では地震の発生年と名

前と M_w を左に、観測局と衛星番号（すべて GPS）を右に記載してある。(b) (c) (d) では左上にそれぞれ示してある。また、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短い縦線で示している。レファレンス曲線は、二つの短い縦線で囲まれた部分を除いたデータに関して、多項式（次数は L カーブ法で決める）近似して求めている。(a) 中の 3 地震を拡大して (b)、(c)、(d) に見やすく表示した。

4.1.3 VTEC 相対残差の解析結果

図 11 ではレファレンス曲線からの VTEC 残差の値そのものを見た。この節では VTEC 残差を背景 VTEC で正規化した相対残差を図 12 に示す。異常の割合が極めて大きかったもの 4 つについては縮尺を同じにして別に示した。



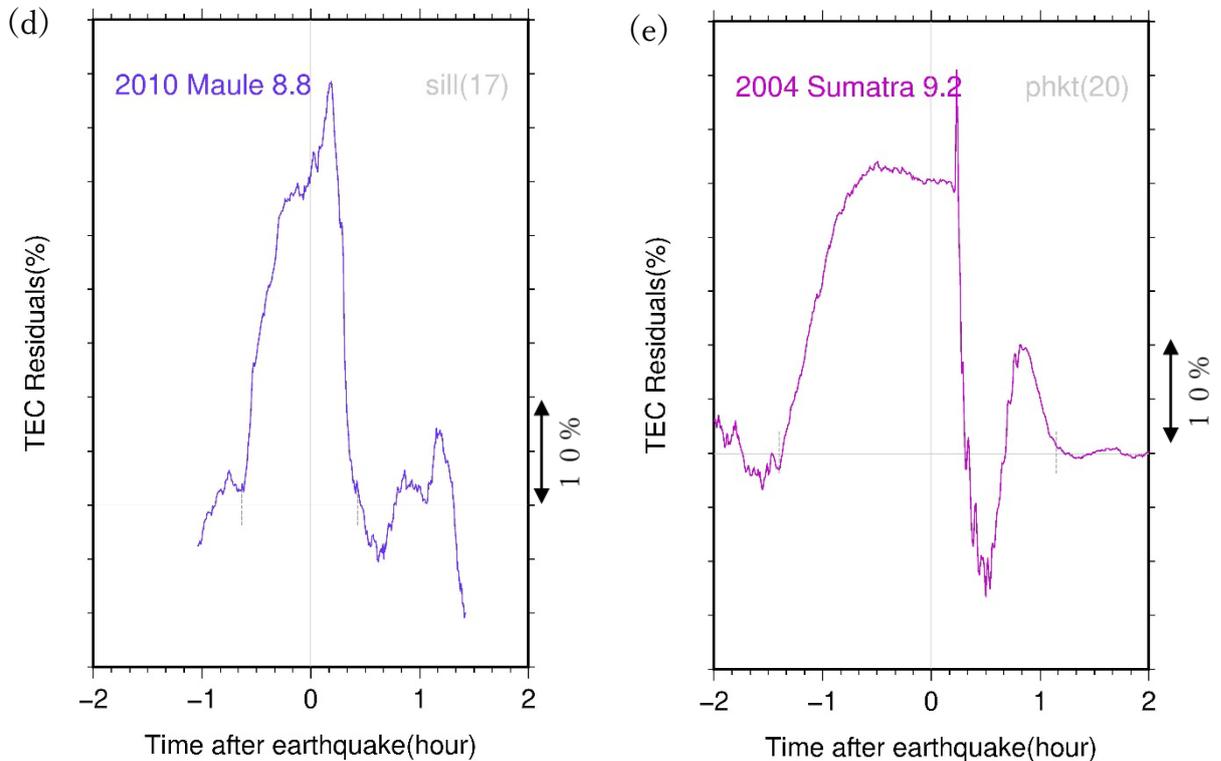


図 12：VTEC 残差を背景 VTEC で正規化した相対残差を M_w の大きい順に並べたもの(a)と異常の割合が極めて大きいもの(b)~(e). 図 11 と同様に地震の発生年と名前と M_w を左に、観測局と衛星番号を右に、TEC 異常の発生時刻と地震の音波による影響が終わった時間を縦線で示している

以上、地震前の VTEC、VTEC 残差、VTEC 相対残差から、 M_w と地震前 TEC 変化の相関が確認できた。また VTEC と VTEC 残差の割合についての結果の比較から、当然であるがバックグラウンド TEC の値が小さい場合は、残差の割合は大きくなることが分かった。

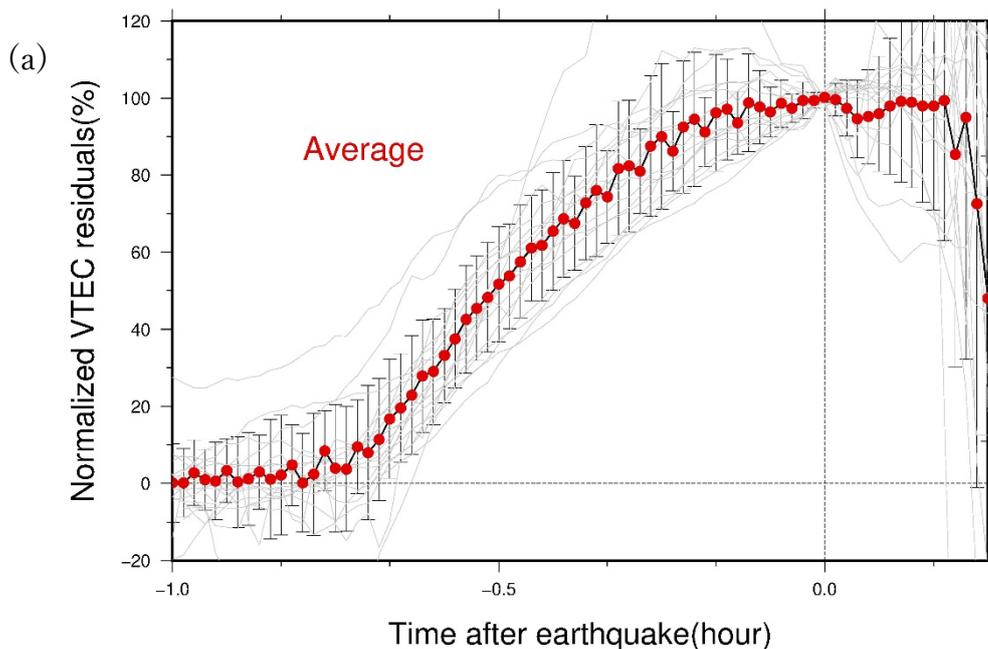
次に、地震前 TEC 変化の標準的な振る舞いを解明しそこから物理的過程を考察するために、VTEC 残差と VTEC 相対残差についての標準曲線を作成した。この標準曲線は、個々の事例における VTEC 変化曲線と比較することにより、個々の地震の直前における電離圏変化の個性を浮かび上がらせるために使用される。

4.2 標準曲線

本研究では地震前 TEC 変化の標準的な振る舞いと個々の地震の個性を解明するために、地震前 TEC 変化が確認された 18 個の地震の VTEC 残差と VTEC 相対残差をそれぞれスタックして標準曲線を作成した。標準曲線の作成に当たっては、地震前 TEC 異常開始時間から地震発生までの時間と地震発生時の VTEC 残差または VTEC 相対残差の値が地震によってそれぞれ異なるので単純に足し合わせても意味のある曲線は得られない。そのため本研究では**地震前**の TEC 変化に関して、①それぞれの地震のデータの TEC 異常開始から地震までの時間を東北沖地震の事例に正規化し、②地震時の VTEC を 100%として正規化しスタックした。**地震後**のデータに関しては時間に関しては伸び縮みさせず、地震時の VTEC のみ 100%として正規化しスタックした。また、各データの VTEC の時系列の間隔は一定でないため、各地震データの VTEC 残差または VTEC 相対残差の時系列を、60 秒の幅を持つ時間枠に次々に入れてゆき、それらの枠の中に入れられたデータの平均および中央値を計算した。

4.2.1 標準曲線 (VTEC 残差)

ここでは、**地震前**に関し、各地震の TEC 異常開始から地震時までの時間を東北沖地震の TEC 異常開始から地震時までの時間 (0.612 時間) にあわせ、地震時の VTEC 残差を 100%に合わせ正規化しスタック、**地震後**に関して、時間方向には伸び縮みさせず地震時の VTEC 残差のみを 100%に合わせ正規化してスタックした標準曲線を示す。標準曲線は 18 個の地震について平均をとったものと中央値をとったものの双方を作成した。これら二



つの図を見ると、地震発生時から地震後の音波擾乱が起こるまで TEC はほぼ一定で推移している（地震後に TEC の増加は停止）ことが分かる。また TEC 増加は上に凸の曲線を描いており、地震発生に近づくにつれて TEC 増加は減速していることが確認された。

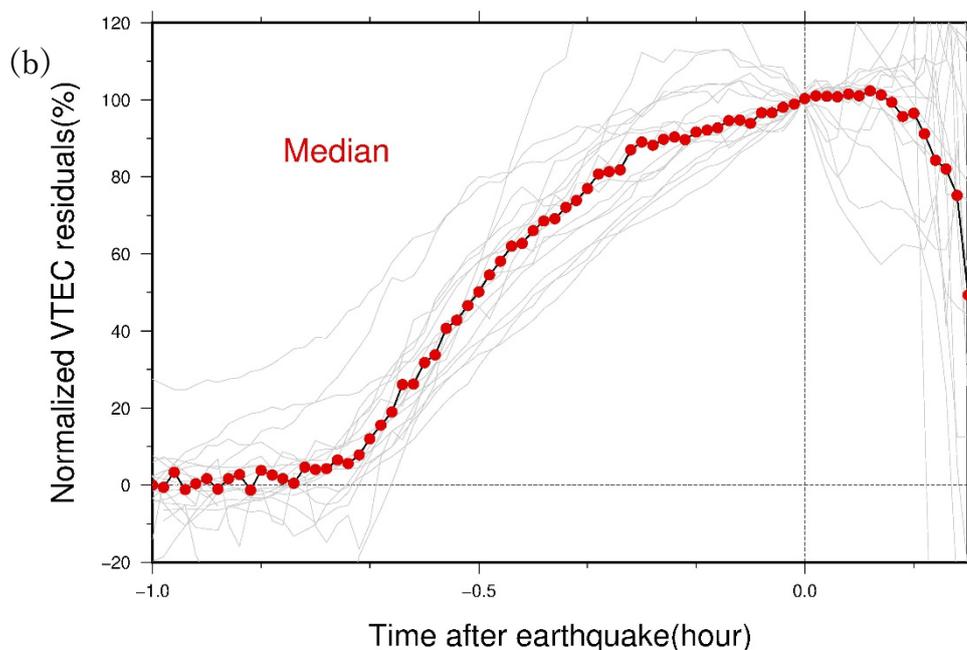


図 13：地震直前 TEC 異常が確認された 18 個の地震の VTEC 残差を足し合わせて作成した標準曲線。赤い丸で 60 秒毎の平均(a)と中央値(b)を表す。それぞれの図の薄い灰色で書かれた線は、本来の 18 個の地震前の VTEC について異常開始から地震時までの時間を東北沖地震の事例に、地震時の VTEC 残差を 100%に合わせて正規化、地震後の VTEC について、地震時の VTEC 残差を 100%に合わせて正規化した曲線を表す。標準曲線はこれらをスタックすることによって得られた。(a)に関して、各時間窓のデータのばらつきを示す標準偏差 (1σ) をエラーバーで示してある。

4.2.2 標準曲線 (VTEC 相対残差)

ここでは背景 VTEC を基準とした VTEC 相対残差を用いて求めた標準曲線を示す。VTEC 相対残差の場合でも、VTEC 残差の場合と同じで、各地震の地震前に関して TEC 異常開始から地震時までの時間を東北沖地震の TEC 異常開始から地震時までの時間 (0.612 時間) に合わせ伸び縮みさせ地震時の VTEC 相対残差を 100%として正規化、地震後に関しては地震時の VTEC 相対残差のみを 100%として正規化してスタックし曲線を作成した。上に凸な地震前の上昇曲線、および地震発生とともに上昇が頭打ちになる点

等、前節で示した VTEC 残差の場合とほぼ同じ特徴を示す結果が得られた。

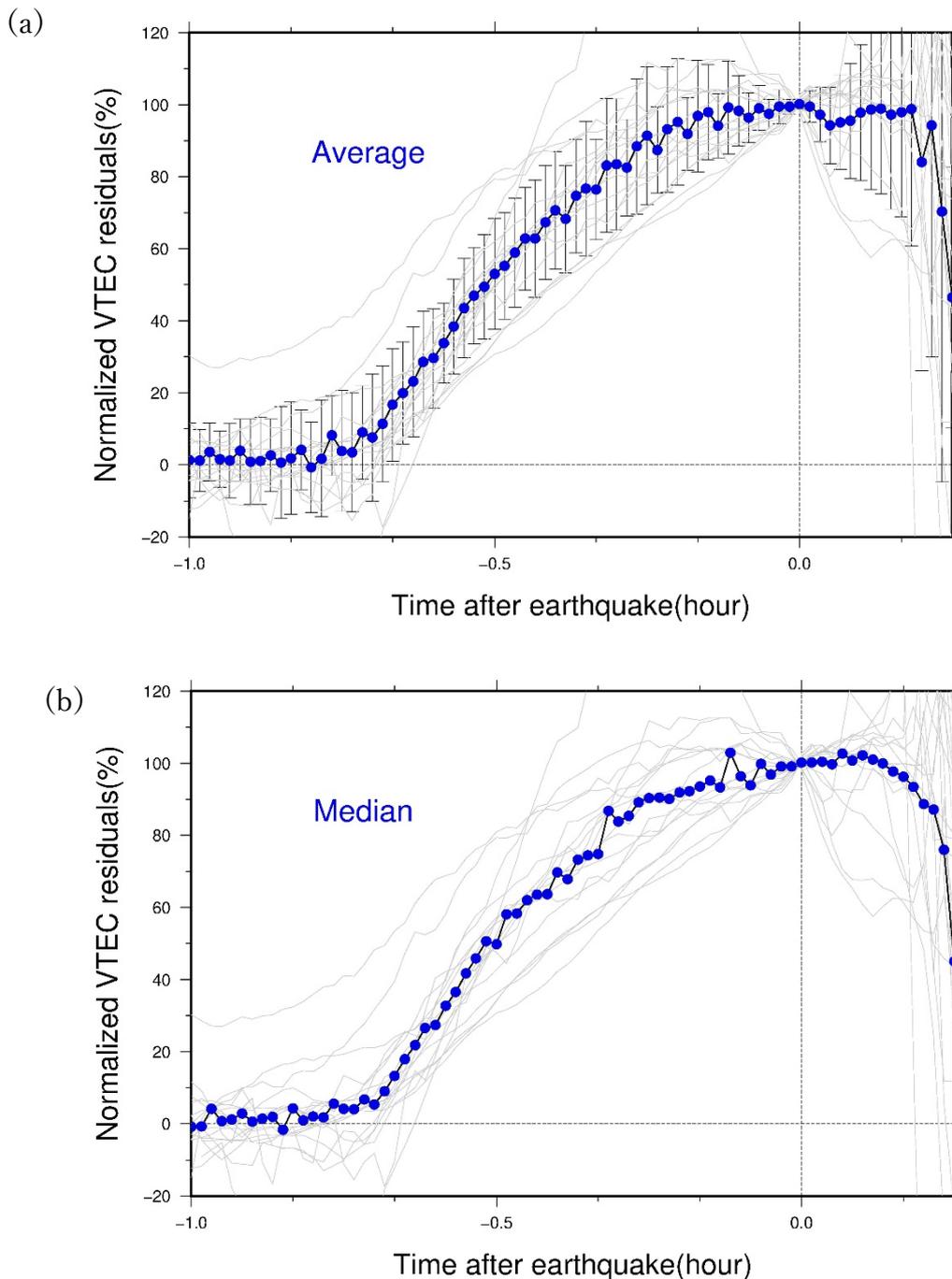


図 14： 地震直前 TEC 異常が確認された 18 個の地震の VTEC 相対残差を足し合わせて作成した標準曲線。青い丸で 60 秒毎の平均(a)と中央値(b)を表す。それぞれの図の薄い灰色で書かれた線は、本来の 18 個の**地震前**の VTEC について異常開始から地震時までの時間を東北沖地震の事例に、地震時の VTEC 相対残差を 100%に合わせて正規化、**地震後**の VTEC について地震時の VTEC 相対残差を 100%に合わせて正規化した曲線を表す。標準曲線はこれらをスタックすることによって得られた。(a)に関して、各時

間窓のデータのばらつきを示す標準偏差 (1σ) をエラーバーで示してある。

4.2.3 標準曲線と VTEC 残差の比較

ここではそれぞれの事例の地震前の TEC 変化の特徴を考察するために、4.2.1 で示された中央値で得られた標準曲線を逆にそれぞれの事例の縦・横軸に戻して、各事例と重ね書きした例を示す。ここでは、地震前の変化に関してそれぞれの事例の縦・横軸に合わせて重ね書きしているのので、地震後の TEC 変化の比較についてはあまり意味がない。

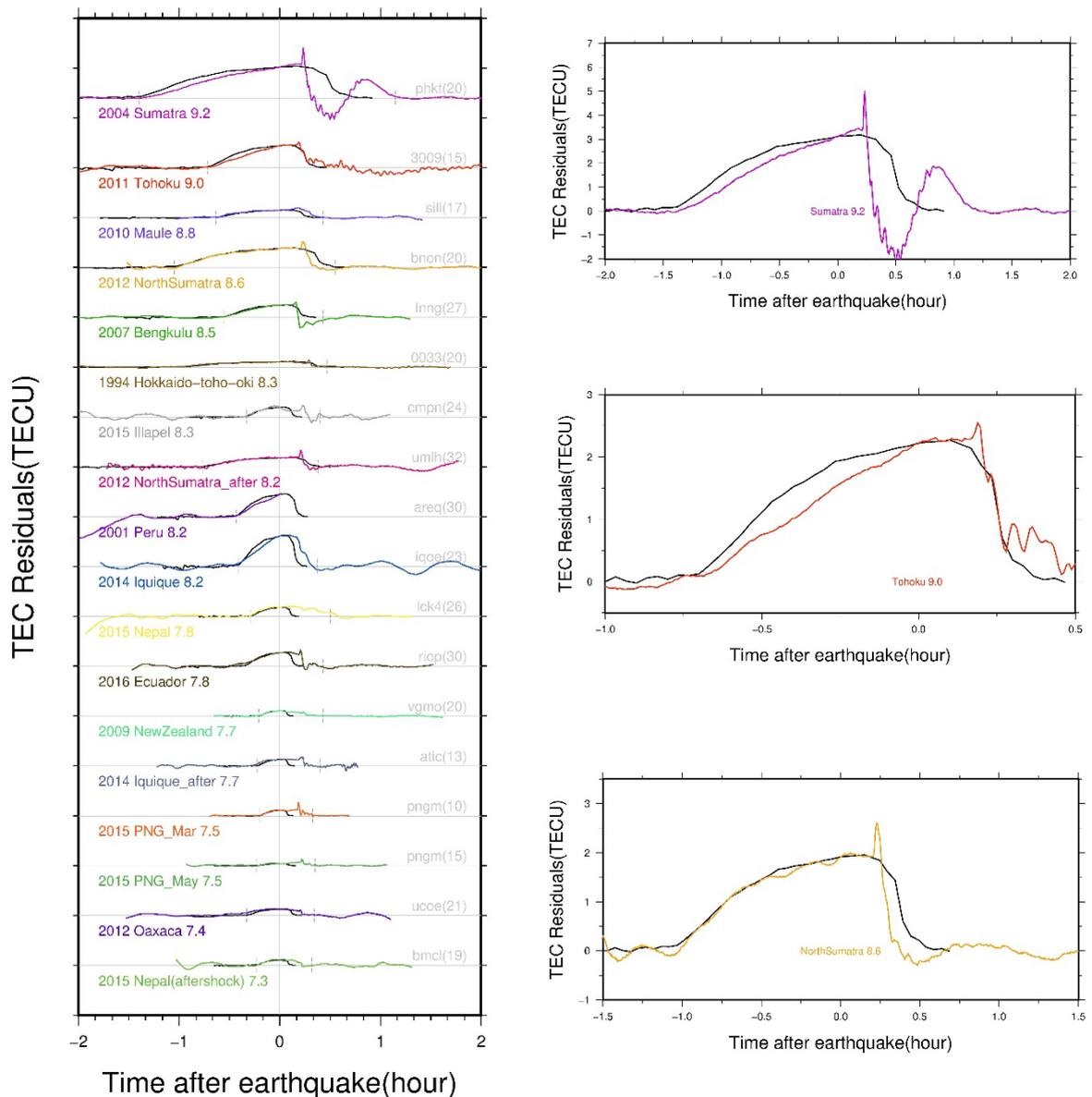


図 15：中央値として求めた VTEC 残差の標準曲線を、18 個の地震それぞれの事例の本来の横軸（時間軸）と縦軸（VTEC 残差）に戻して、元のデータに重ね書きしたもの。地震の発生年と名前と M_w を左

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。右側の3つの図は、2004年スマトラ・アンダマン、2011東北沖、2012インド洋（本震）の三つの事例について拡大したものである。

標準曲線でみられた二つの特徴（地震前の TEC 上昇は地震発生時に頭打ちになること、および上昇曲線が上に凸になること）は個々の事例でもおおむね成り立っていることが分かった。それぞれの地震の VTEC 異常曲線は一見違うように見えるが、標準曲線と比べるとそれらの間に特筆すべき大きな違いは見られない。

次の章では、標準曲線の形から地震前 TEC 変化の物理的メカニズムを3章で紹介した先行研究と合わせて考察する。

5 考察

図8で示したモデルによると、地震前 TEC 変化の原因は、(Step 1)断層付近における微小な割目や食い違いの発生によって断ち切られた過酸化架橋から正孔が動きやすくなり、(Step 2)正に帯電した正孔が互いの反発によって拡散して地表に蓄積、(Step 3)それらが作る上向きの電場が電離圏まで到達し地球磁場と相互作用 ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト) することによって電子が再配置、電子密度の濃淡が生じる、という三つのステップが考えられている。本章では標準曲線の形からこのプロセスに対して様々な考察を行う。

第一に標準曲線でみられた特徴である、地震前の TEC 上昇は地震時にはほぼ停止し、その後（地震約十分後の）音波の到達までほぼ一定の値で推移する点について考察する。この結果を Step1 と関連させて考察すると、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思われる。新たに mobilize される正孔が無いと、地表での蓄積も頭打ちになり電場もそれ以上強くならない。したがって、さらなる電子の移動も起こらないということであろう。

第二に、TEC 変化率は異常開始直後が最も大きく、それ以降は減速してゆく（曲線が上に凸になる）ことについて Step 2 と関連させて考察する。一つの可能性として考えられるのが、地表電荷の量がある程度以上増えないことである。時間の経過とともに地表に蓄積する正孔の絶対量が増えると、海洋への拡散等で減少する率も増加していく。したがってある時点で生まれる正孔と失われる正孔がバランスして一定値に達することが考えられる。穴のあいたバケツに一定の割合で注水してゆくと、ある水位で注水と漏洩がバランスしてそれ以上水位が上がらなくなるのと同様である。正孔の蓄積率が下がると、上空に形成される電場の成長率も小さくなって電子の再配置もスローダウンするのだろう。また、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトによって動ける電子数は時間とともに減少していくことも可能性として考えられる。しかし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、動ける電子が時間とともに少なくなる効果はあまり関係ないのではと思われる。

る。

さらに当初の考えでは正孔の蓄積のしやすさの地域性（たとえば断層の上の地表が海面下にある割合が多いと海水を通じて失われる正電荷が多くなり電荷の頭打ちが早くなる）が、TEC 標準曲線と各々の地震における TEC 変化曲線との比較から浮かび上がることを期待していたが、一見違うように見える各地震の地震前 TEC 上昇曲線の形の差異は、図 15 でわかるように意外に少ないことが示唆された。これについては、地球磁場の強さや向きの地域性からくる、地表電荷によって形成された電場との相互作用に地域性が大きいこと、GNSS 衛星と局を結ぶ視線が電離圏にたいして移動することによる空間変化が時間変化と完全に分離できないこと等々、様々な要因による相違を取り除かないと個々の地震の個性は浮かび上がってこないのかも知れない。

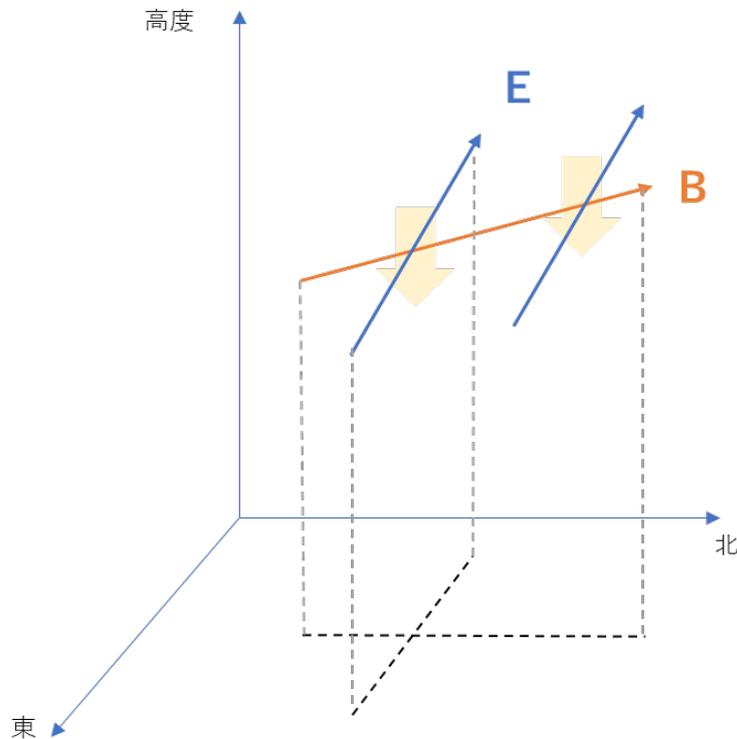


図 16：地震前 TEC 変化の原因と考えられている電場 E と地球磁場 B の相互作用 ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト) による電子の再配置の概念図。薄い黄色の矢印が電子の移動を表す。

また、プレート内地震（2012 年インド洋地震等）のほうがプレート間地震よりも相対的に早い段階で擾乱が始まることが Heki & Enomoto (2015) で示唆されたが、その原因について最後に考察する。地震前の地下での物理過程に不明な部分が多い現状では憶測の域を脱しえないが、おそらくプレート内地震の場合は海溝型に代表されたプレート間地震よりも断層強度が強いことが関係しているかも知れない。後者では応力による微小割れ目が発

生してから完全に破壊される（地震が発生する）まで、前者より多くの時間を必要とすることが、前兆開始から地震発生までの時間が長くなる原因の一つと考えることができる。

6. 謝辞

本研究で使用した RINEX データは国土地理院、カリフォルニア大学から、GIM ファイルはベルン大学から提供していただきました。

本研究を行うにあたり、宇宙測地学研究室をはじめ、固体ゼミの皆様には多くのご指摘やご指導を賜り大変お世話になりました。

指導教官である日置幸介教授には、現在のテーマを扱うにあたり、基礎的な知識や解析のためのプログラム、研究の方向性、論文指導などあらゆる点でご教授頂きました。また、固体ゼミの先輩方には卒業研究に向けて様々なことを教えていただきました。ゼミ発表の際には先生方に多くのご指摘を頂き、発表の仕方から研究そのものに対してまで勉強させていただきました。皆様ありがとうございました。修士課程でも、ご指導ご鞭撻のほどよろしくお願い致します。

7. 参考文献

- Coster, A. and W. Rideout (2006), Automated GPS processing for global total electron content data, *GPS Solutions*, Volume 10, Issue 3, pp 219–228, doi: 10.1007/s10291-006-0029-5
- He, L. and K. Heki (2017), Ionospheric anomalies immediately before Mw 7.0-8.0 earthquakes, *J. Geophys. Res. Space Phys.*122, 8659–8678, doi:10.1002/2017JA024012.
- 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, doi:10.1029/2017JA024871.
- 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、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

参考 Web ページ

国土地理院ホームページ

<http://www.gsi.go.jp/>

各国測位衛星の状況について－内閣府

www8.cao.go.jp/space/comittee/dai68/siryou3.pdf

ベルン大学・データセンター

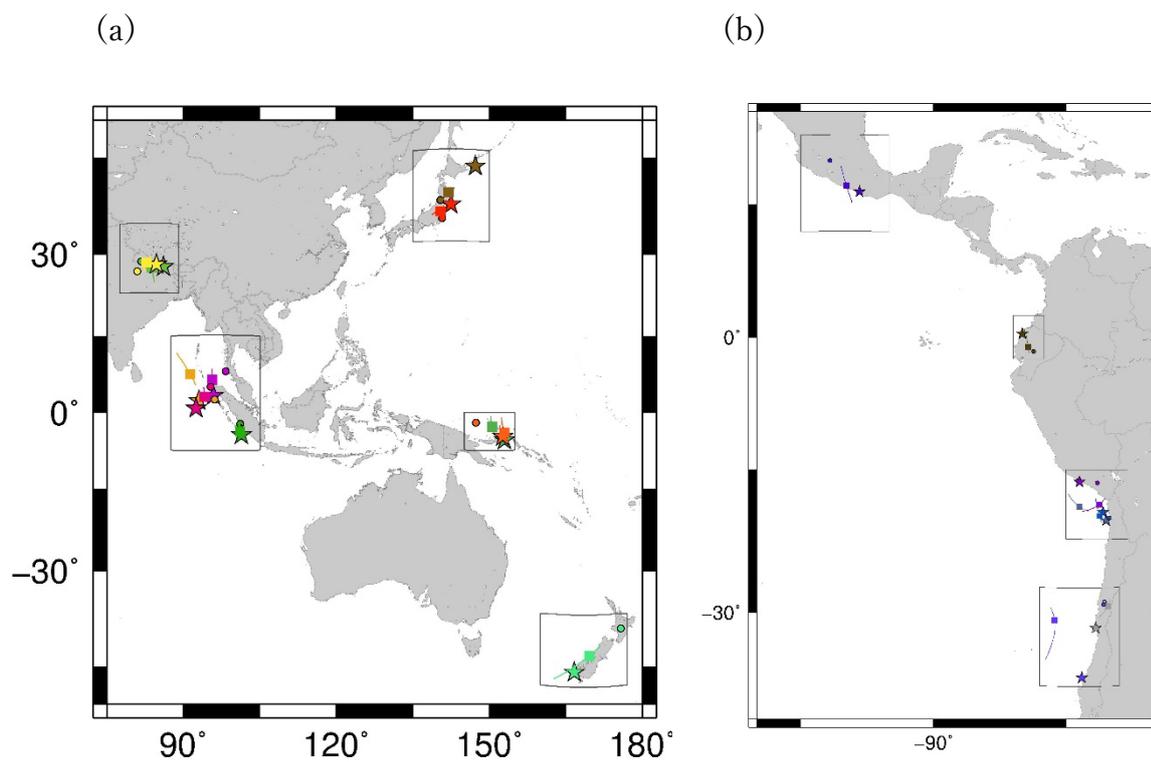
<http://www.aiub.unibe.ch/download/>

カリフォルニア大学サンディエゴ校・IGS データセンター

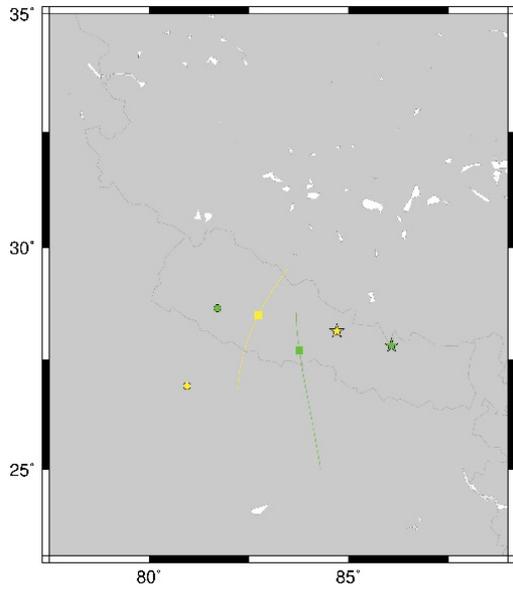
<http://garner.ucsd.edu/>

8. 付録

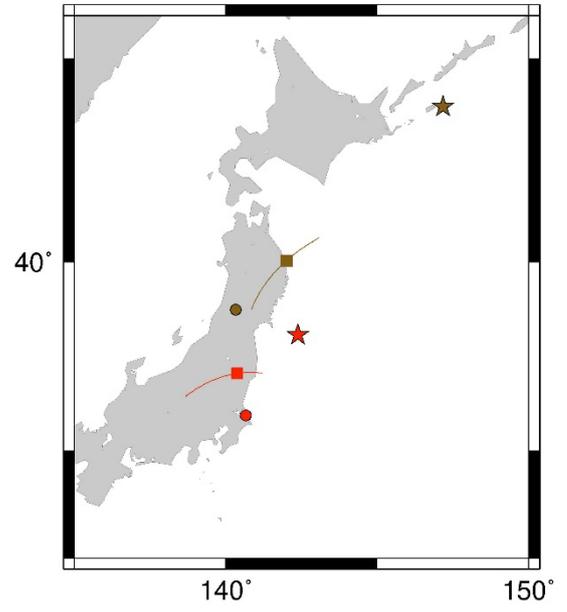
ここでは地震前 TEC 変化の地域性の比較をする際に用いた、各地震に対応する SIP の軌道と観測局と震源の情報を記載する。図(a)、図(b)の資格で囲われた部分を拡大して下に示す。各情報の色は、4章で示した VTEC 変化等を表した曲線の色と対応させてある。



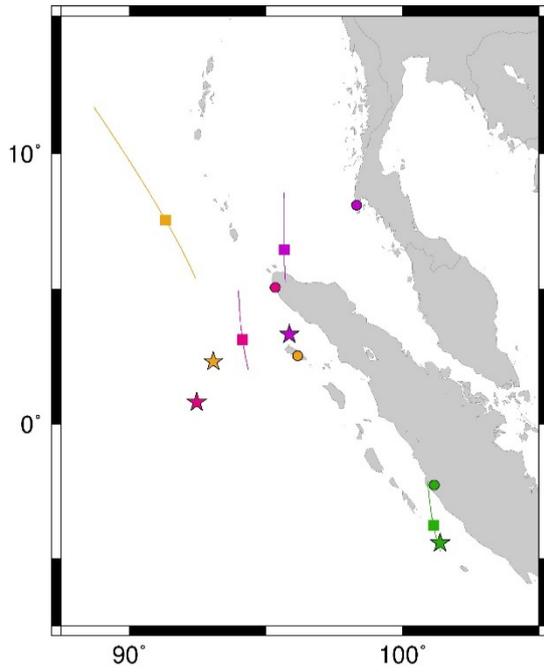
(c)



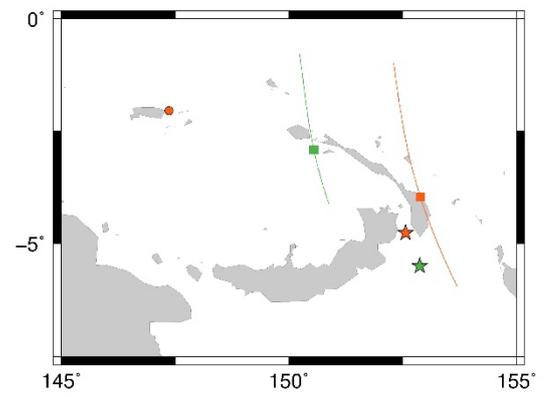
(d)



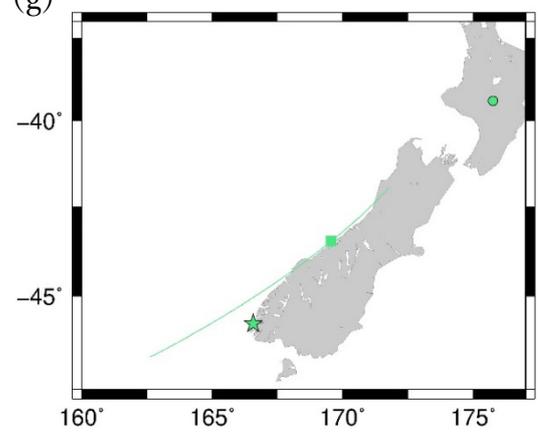
(e)



(f)



(g)



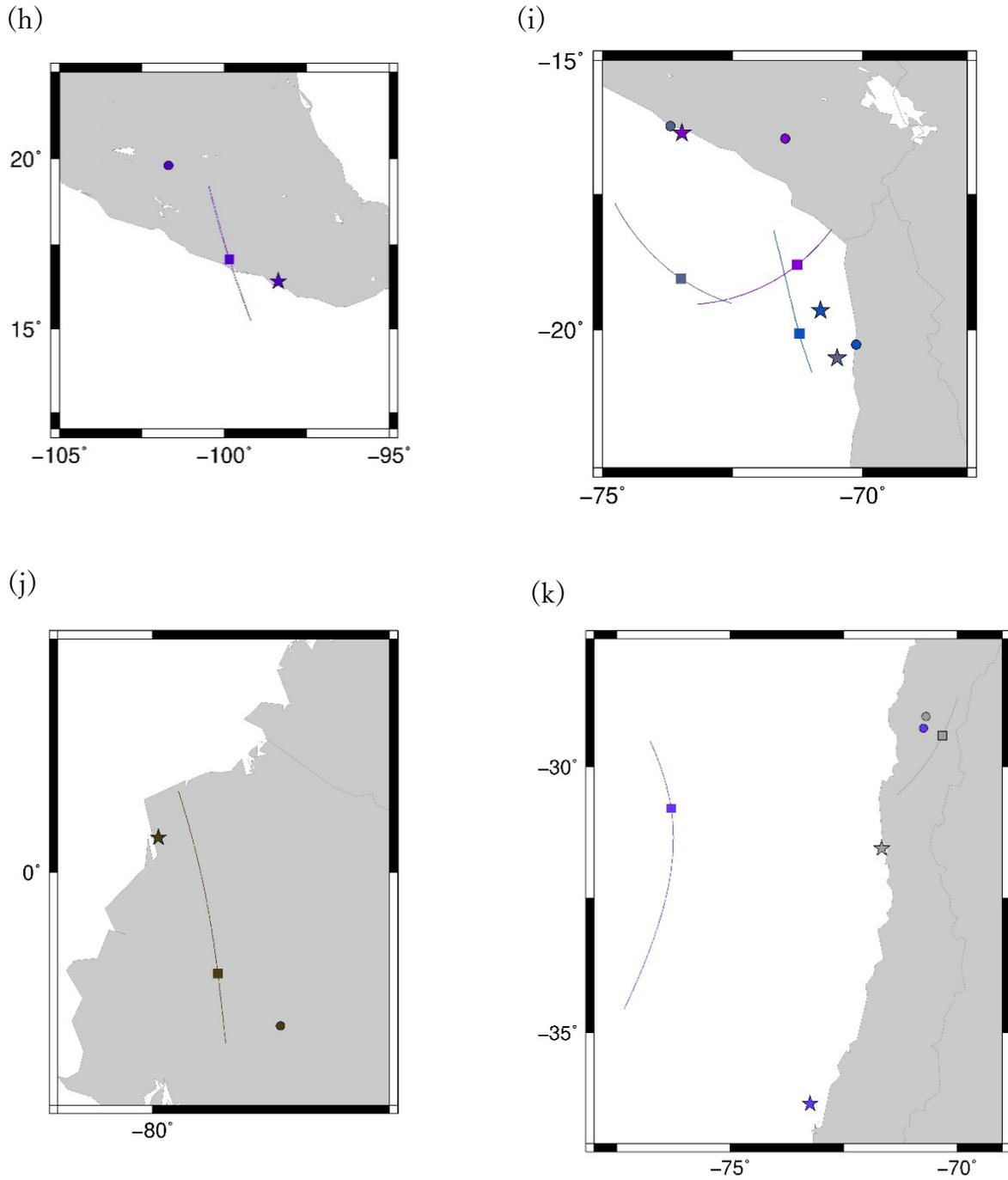


図 17：18 個の地震前 TEC 擾乱の観測に対応する、地震発生 1 時間前から地震後 30 分までの SIP 軌道と観測局と震源を示した図。☆印が震源を、○印が観測局を、SIP 軌道上の□印が地震の発生した時間における SIP を表す。(a)中の四角で囲われた部分を拡大したものを(c)~(g)に、(b)中の四角で囲われた部分を拡大したものを(h)~(k)に示す。各図の色は 4 章の VTEC 変化の解析結果の曲線の色に対応している。