

巨大地震前後の電離圏電子数と磁場偏角の変化：
2011年東北沖地震と2010年メンタワイ地震の事例

Changes in Ionospheric Total Electron Content and Geomagnetic
Declination Immediately Before and After Large Earthquakes:
Case Studies for the 2011 Tohoku-Oki and 2010 Mentawai Earthquakes

北海道大学理学院自然史科学専攻 地球惑星ダイナミクス講座 修士課程

高坂 宥輝

Earth and Planetary Dynamics, Dept. Natural History Sci.,
Graduate School of Science, Hokkaido Univ.

Yuki Takasaka

指導教員 日置幸介

2021年2月26日

概要

地球の超高層大気である電離圏では、太陽放射によって大気分子・原子の一部が電離している。その電離圏の全電子数(Total Electron Content, TEC)は GNSS (Global Navigation Satellite System) 衛星から発せられる 2 つの周波数の搬送波の位相差を利用することにより求めることができる。TEC は太陽放射などの物理条件により季節変化・日変化し、さらに太陽活動など様々な要因により突発的な擾乱が起こることがわかっている。そして、地震前後にも TEC の変化が起こることが近年知られるようになってきた。

本研究では、まず 2011 年 3 月 11 日に発生した $M_w9.0$ の東北沖地震に関して、その直前に起こった TEC 変化と同時に発生した地球磁場偏角変化について議論する。地震前 TEC 変化が震源近くの上空で電子が地磁気に沿い電離圏を移動することによって生じるとすると、電子の移動つまり電流が磁場を発生させるはずである。そこで我々は、実際に観測された TEC 変化から、地表で発生すると考えられる磁場変化をビオサバールの法則に従って計算した。東北沖地震が発生した日には宇宙天気による地磁気擾乱が全球的に発生していた。そのため、地表で観測された磁場変化は宇宙天気起源の擾乱の影響が大きく、実在が不確定な地震前 TEC 変化による地上磁場変化の確認は困難である。そこで我々は、地震前 TEC 変化とそのモデルから計算した地上での磁場変化と、日本全国の地上地磁気観測局の観測結果を比較した。それらの地域性から、地上で起こった磁場変化が地震前 TEC 変化に伴うものであったかを議論し、地震前の電離圏電子の移動による地磁気変化が起こっていた可能性を示した。

次に、2010 年のメンタワイ地震直前直後の TEC 変化について議論する。2010 年 10 月 25 日、スマトラ島南西沖で $M_w7.9$ のメンタワイ地震が発生した。巨大地震の直前に起こる TEC 変化については、過去に発生した $M_w7.2-9.2$ の 18 個の地震について TEC 変化が GNSS データ中に見られることを確認し、その TEC 変化の規模と先行時間が M_w に依存することが確認されている。それらの既知の M_w 依存性を利用し、メンタワイ地震についても地震前 TEC 変化を GNSS データ中に見出すことができた。さらにメンタワイ地震後の TEC 変化について、震源直上の地殻隆起・沈降によって励起された音波の伝搬による電離圏擾乱に加え、この規模の地震では通常信号が弱くて検出できない内部重力波による電離圏擾乱の信号が明瞭に見えることを確認した。これはメンタワイ地震が、地震時の断層運動が比較的ゆっくり生じる典型的な津波地震であることに起因すると考えられる。そこで我々は、メンタワイ地震の特殊性を示す為に、過去の 7 つの比較的大きな地震に関して、地殻の隆起沈降により励起された音波による TEC 変化の振幅 (AW) と、より伝搬速度の遅い内部重力波による TEC 変化の振幅 (IGW) の比 (IGW/AW) を求めた。それらの値を比較することによって、メンタワイ地震の内部重力波が同規模の地震に比べて大きかったことを示した。また、IGW/AW は M_w が大きいほど大きな値を示すことも確認した。このことは地震が大きくなるほど断層すべりに要する時間が長いことを反映していると考えられる。

目次

1	はじめに	1
1.1	巨大地震前の TEC 変化	1
1.1.1	2011年東北沖地震直前の TEC 変化	2
1.1.2	巨大地震直前の TEC 変化と、その規模の M_w 依存性	3
1.2	地震後の TEC 変化	7
2	GNSS を用いた TEC の観測方法	9
2.1	GNSS	9
2.2	GPS	9
2.3	GNSS-TEC 法による解析	10
2.4	GNSS-TEC 法の算出及び解析	11
3	東北沖地震直前に観測された地上磁場偏角変化	13
3.1	地磁気の成分について	13
3.2	巨大地震直前の TEC 変化の物理モデルと地磁気の変化	16
3.3	宇宙天気による磁場擾乱に対する考慮	25
4	2010年メンタワイ地震前後の TEC 変化	32
4.1	メンタワイ地震	32
4.2	メンタワイ地震直前の TEC 変化	33
4.3	断層すべり時間を反映した、電離圏の音波擾乱と内部重力波擾乱の振幅比	36
5	おわりに	45
6	謝辞	47
7	参考文献	48

1 はじめに

地球の高度約 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 ionosphere）と呼ぶ。

ある地点における電離圏の電子数は、地球の昼側と夜側の違いによる日変化や太陽高度の変化に伴う季節変化などによってさまざまな周期で変化する。また一か月弱の太陽の自転周期や 11 年の太陽黒点数の周期（太陽磁場の反転周期）などの周期をもつ変動も知られている。さらにコロナ質量放出などに代表される太陽の活動による突発的な電離圏擾乱が起こることがわかっている。変化する電離圏の電子数は GPS（全地球測位システム Global Positioning System）をはじめとする GNSS（全球航法衛星システム Global Navigation Satellite System）衛星からの電波を地上で受信し、解析することによって衛星と受信局を結ぶ視線に沿って電子数を積分した量である電離圏全電子数(Total Electron Content, TEC)として求めることができる。この手法（GNSS-TEC 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代表されることが多い。

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）の事例をはじめとして、巨大地震直前に観測された TEC 擾乱を紹介する。続いて 1.2 では地震発生後に観測される TEC 異常（地震時電離圏擾乱）を紹介する。

1. 1 巨大地震前の TEC 変化

M_w 8 クラス以上の巨大地震の多くで、その直前に TEC が変化することが確認されている。ここでは 2011 年に発生した東北沖地震をはじめとして、TEC 変化が確認されている 18 個の地震の事例を紹介する。この解析では、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用い、それらを鉛直方向の変化である VTEC（Vertical TEC）変化に換算した。また地震に関係ない日周変化等の影響を除くため、VTEC を多項式近似してそこからの残差を地震による VTEC の擾乱と仮定した。複数の地震に関してこれらの VTEC 残差を紹介し、それらの重要な特徴について述べる。表 1 は解析に使用した地震の情報である。

表1：直前に電離圏全電子数に異常がみられた18個の地震について、名前、発生年、モーメントマグニチュード 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・イジャベル (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

1. 1. 1 2011年東北沖地震直前のTEC変化

ここでは、2011年3月11日に発生した東北沖地震の直前に見られたTEC変化について、GNSS-TEC法(詳細は2.1章)を用いて解析した結果を示す。図1に国土地理院(https://terras.gis.go.jp/sso_guide.php)から取得したGEONET(GNSS Earth Observation Network GNSS連続観測システム)のGNSSデータを用いて解析したTECの地震前後の変化の時系列と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VTEC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、異なる場所に位置する二つの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右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の隆起・沈降で励起された音波による擾乱である。

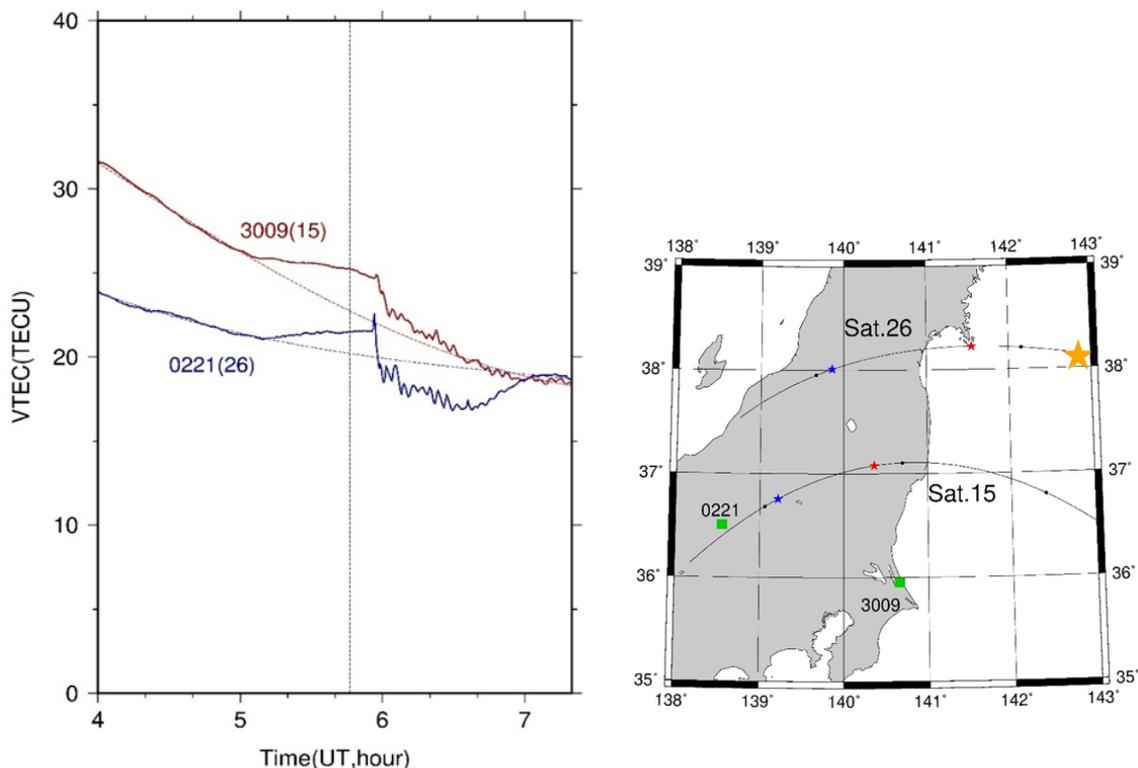


図 1 : 2011 年東北沖地震の前後の VTEC 変化 (左図)、実線が実際に観測された VTEC、点線は地震前後の TEC 擾乱が起こっていない部分を用いて多項式近似で求めたレファレンス曲線である。0221 局から GPS26 番衛星を見たものと、3009 局から GPS15 番衛星を見たものを示す。UT 5:46 における縦線は地震が起こった時間を表している。右図は左図に対応するそれぞれの局と衛星のペアにおける SIP の軌跡を示す。黄色の☆印が震源で、緑の□印と数字はそれぞれの観測局を、赤い☆印が地震時の SIP の位置、青い☆印が TEC の増加が始まった時間の SIP、黒い○印が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

1. 1. 2 巨大地震直前の TEC 変化と、その規模の M_w 依存性

ここでは、過去に解析した $M_w7.2$ から $M_w9.2$ の 18 個の巨大地震直前の VTEC 変化のレファレンス曲線からの残差 (VTEC 残差) を示す。レファレンス曲線は、地震の影響を受けている時間範囲、つまり地震前の TEC 変化が開始した時間から地震動による音波到達による TEC 擾乱が起こっている時間範囲を除いて多項式近似することによって、地震に関連する起源以外の要素である日周変化等の VTEC 変化を表す曲線である。地震は地殻変動と異なり電離圏には恒久的な変化をもたらさないため、地震前後の VTEC が滑らかにつながると仮定できるのである。実際の VTEC 変化からレファレンス曲線を差し引くこと

で、地震の影響による VTEC 変化を取り出すことができる。

この手法では、地震後に電離圏に到達する音波擾乱でも地震の規模に応じた TEC 変化が起こるため、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、見かけ上の地震直前の TEC 変化を見せているのではという批判(Kamogawa & Kakinami, 2013)や、レファレンス曲線の定義の曖昧さ指摘する反論(Masci et al., 2015)があった。それに対し Heki & Enomoto (2015)は、図 2 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。

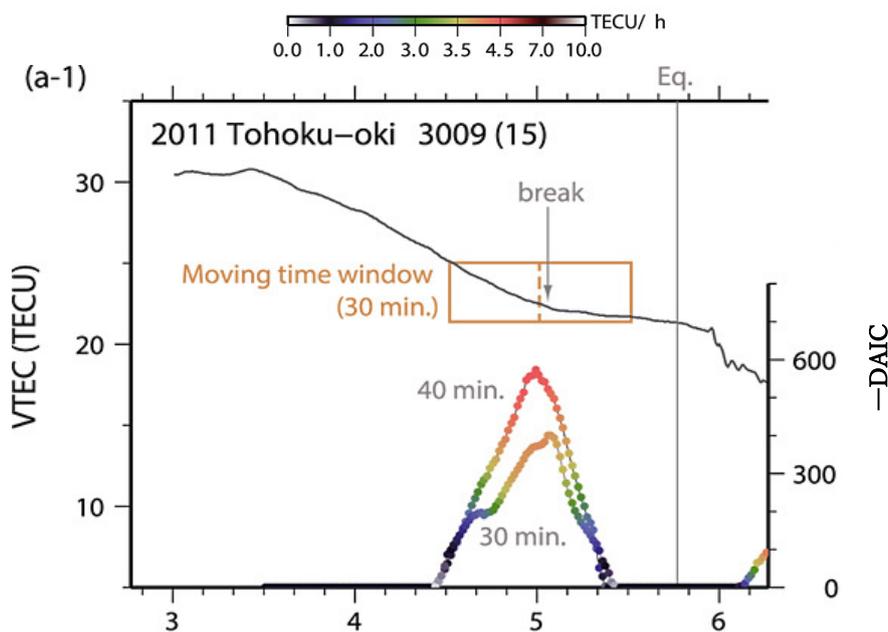


図 2：東北沖地震前後の VTEC データに対して、AIC を利用して正の折れ曲がりを検出した例(Heki & Enomoto, 2015). オレンジ色の四角で示す時間窓 (図の例では ± 30 分) を動かして、時間窓の中央に折れ曲がりを入れた場合と入れなかった場合の AIC の差 ($-\Delta AIC$) によって折れ曲がりの有意性を定量化し、その時系列をプロットしている (色のついた丸、色は折れ曲がり前後のトレンド変化を示す)。

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、かつ電子数が十分な時刻と場所で地震が発生すれば、ほぼ毎回検出されることが確認された。図 3 a 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 VTEC 残差を比較したものである。 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である。図 3 b 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3aと図3b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3b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が意味することについて考察する。

図3b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。前者の関係は、ここで示す地震の前兆が、断層の端から始まって空間中をある速度で伝搬し、もう一つの端に到達したときに地震が発生するという何らかの物理過程がかかわることを示唆する。また後者の関係は、この過程で生じる何らかのもの (おそらく正電荷) が、上記の過程を通じて断層の面積に比例して生じるものであることも示唆する。

これらの M_w 依存性は比較的 M_w が小さい地震の前兆を探す際に有用である。実際にこれらの関係は4章で議論するメンタワイ地震直前の TEC 変化を見出す際に重要な手がかりとしてその役割を果たすことになる。

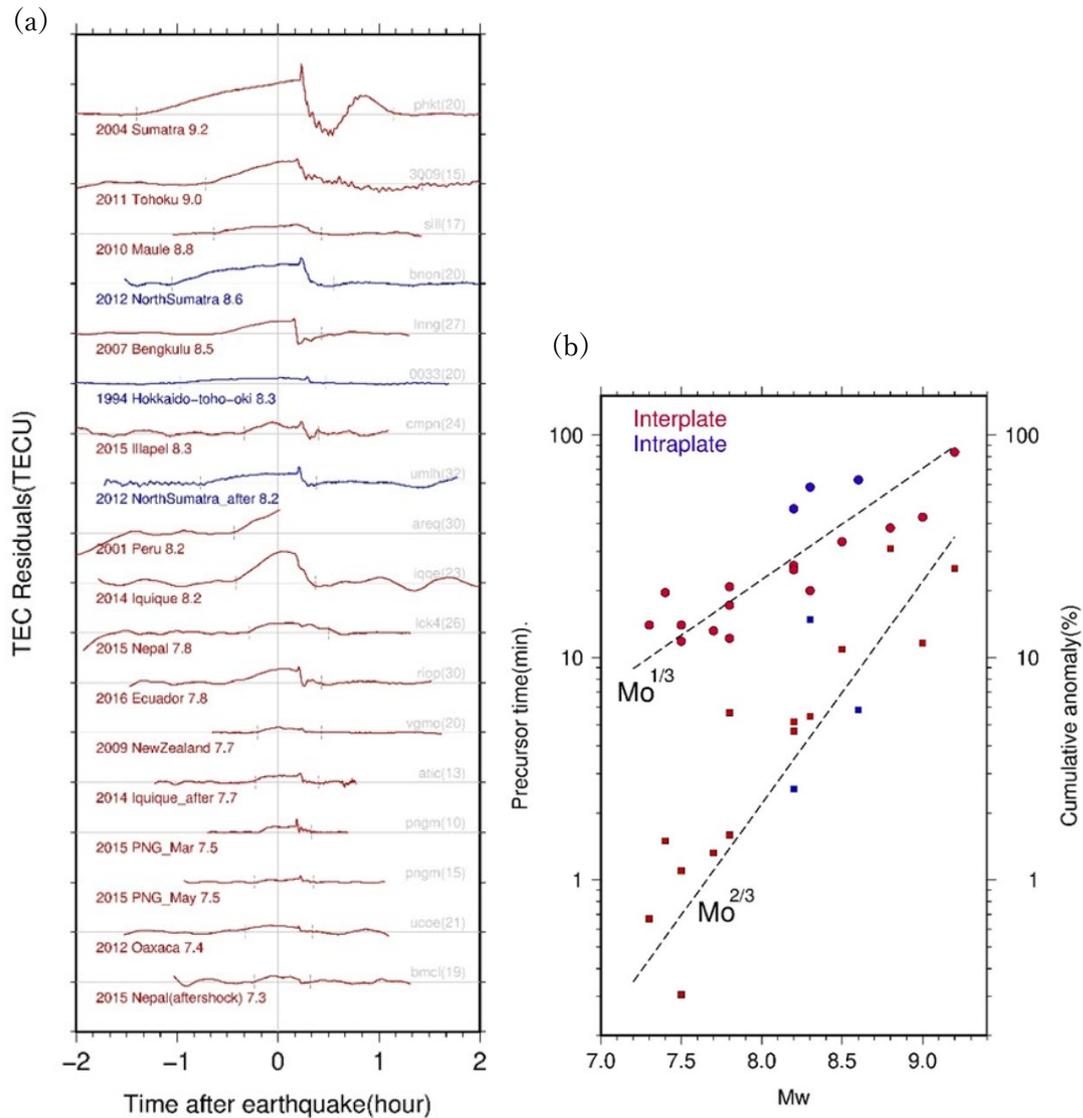


図3：M_wが7.3—9.2の18の地震において、地震前 TEC 擾乱をレファレンス曲線（地震の影響を受けている部分を除いて近似した多項式）からの差として示して M_w の順に並べたもの (a) と、それらの例における先行時間（丸印）と地震直前の異常の大きさ（四角印）を M_w の関数として示したもの (b)。両図とも赤で示されたものがプレート間地震、青で示されたものがプレート内地震を示す。(a)において、地震の発生年と名前と M_w を左に、観測局と衛星番号を右に記載してある。(a)において TEC 異常の発生時刻と地震の音波による影響が終わった時間を縦線で示している。二つの線で囲まれた部分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している。

1. 2 地震後の TEC 変化

地震直後の電離圏擾乱は地震時に励起された大気波動が電離圏に達することで発生する。それらの波動には、①表面波(レーリー波)による地表の上下運動起源の音波による擾乱、②震源近くの地表の地殻上下変動により発生した音波が起こす擾乱、③津波、または震源近くの地殻上下運動が励起した内部重力波による擾乱等がある。これらの大気波動が電離圏に達してもたらず電離圏擾乱は地震時電離圏擾乱(CID, Coseismic Ionospheric Disturbance)(e.g. Heki and Ping, 2005)と呼ばれる。

これらの大気波動は、その伝搬速度と波の周期で区別することができる。

表 2：大気波の種類とその伝搬速度及び周期

大気波の種類	伝搬速度	周期
音波 (地殻励起沈降起源)	~4.0 km/s	約 4 分
内部重力波	~0.2-0.3 km/s	12-20 分
音波 (レイリー波起源)	~1.0 km/s	約 4 分

図 4 a は、GPS6 番衛星と東日本全域の GEONET 点(実際には GEONET の前身となった観測網でおおよそ 100 点から成る)とのペアでの TEC 変化を、時間を横軸に、震央近くの大気波の発生した点からの距離を縦軸にとって描いたものである。図 4 a での TEC 変化は本研究での目的である内部重力波成分を取り出す為に周期 720 秒成分をウェーブレット変換で取り出したものである(4 章参照)。上で述べた三種類の大気波動による TEC 擾乱が確認できる。図 4 b,c はこの衛星と 5 局のペアで、SIP の軌跡と STEC 変化をプロットしたものである。

地震動により励起された音波は、球面波に近い波面で中性大気を伝搬し電離圏に達する。電離圏では、中性大気が少ない為、音波の媒質には多数の電離した分子や原子、電子が含まれる。なかでも軽い電子はローレンツ力により磁場に沿った方向にしか移動できない。従って電離圏中を伝搬する音波による電子の振動は磁場に沿って生じる。したがって音波擾乱を TEC として観測する際には、衛星視線と波面の角度によって TEC 変化の見え方が異なる。内部重力波の場合は、その波面は地表面に対して水平であるので、TEC として観測したとき、その空間的分布は同心円状に観測され、基本的にどの衛星視線からであっても観測している電離圏の場所が同じであれば似た TEC 変化を示す。

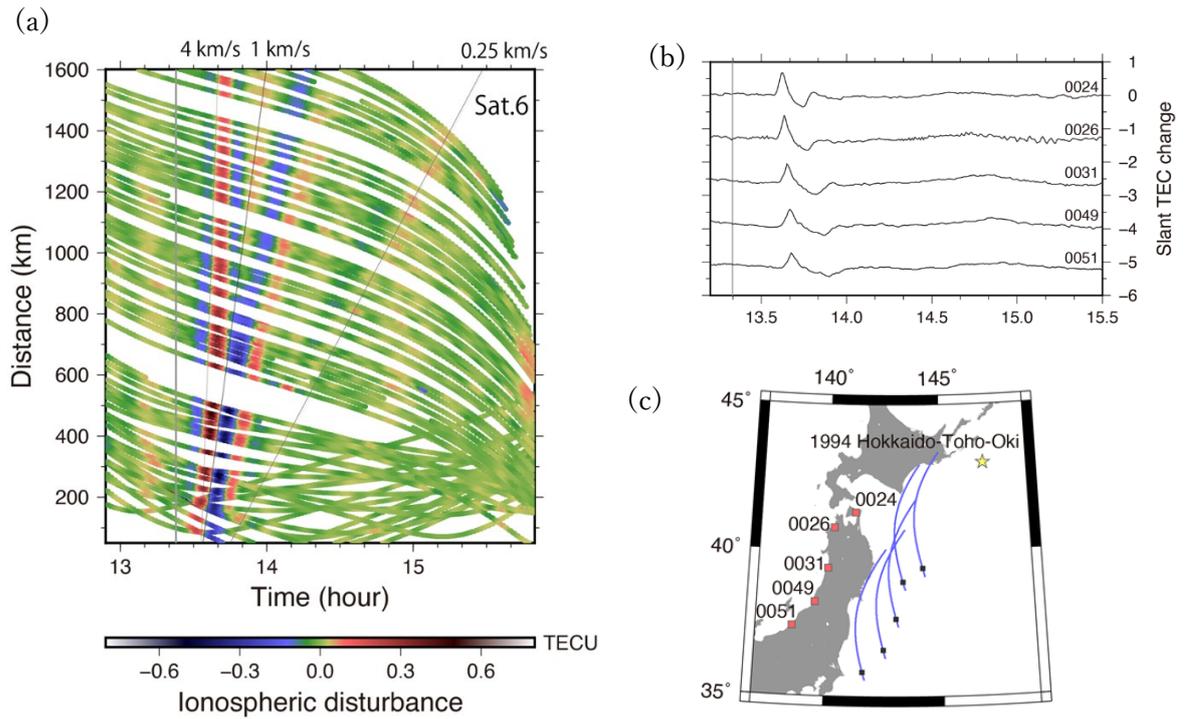


図4：(a) ウェーブレット変換(Heki & Ping, 2005)を用いて取り出した周期12分を中心とした擾乱の伝搬を、横軸に時間、縦軸に震央距離をとって表した図、一つの線が6番衛星と一つの地上局のペアを表し、色がTECの擾乱の大きさを表す。灰色の縦線は地震の発生時刻、擾乱に沿った斜めの線は三種類の波動の典型的な伝搬速度を傾きとして描いた線である。(b)はGPS6番衛星と(c)に赤四角で示してある地上局のペアで観測した1994年の北海道東方沖地震時のSTEC時系列変化であり、灰色の縦線は本震の時間を表す。(c)の黄色の☆は震源を、青い線とその上の■はそれぞれSIP軌跡と地震時のSIPを示す。

2 GNSS を用いた TEC の観測方法

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 を取り上げ、その概要を説明する。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、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。

2. 2 GPS

GPS とは、アメリカによって運用される GNSS であり、1990 年代初めにいち早く実用化された。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定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位相変調



GPS衛星のイメージ

図5：GPS 衛星のイメージ (国土地理院のページより)

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。

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) のファイル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 は以下ようになる。

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

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かさがあるため、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かさ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) ファイルのヘッダーに与えられているが、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る。ない場合は夜明け前の電子密度の空間分布が均一になる時刻において衛星間の TEC のばらつきを最小とするように受信機バイアスを決める Minimum Scalloping 法 (Rideout & Coster, 2006) を使って独自に決定することができる。

またバイアス除去後の 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をすべて含む値である。

3 東北沖地震直前に観測された地上磁場偏角変化

第1章では、2011年に発生した東北沖地震直前に、TECに変化が観測されたことを紹介した。ここでは、そのTEC変化と同時に観測された地球磁場の変化について、観測結果とモデル計算を比較する。それらの結果を踏まえて、地震前のTEC変化がどのような物理メカニズムで磁場変化をもたらすのかを議論する。

3.1 地磁気の成分について

地球が持つ固有の磁場を地磁気という。地磁気は場所によって異なる方向と強さを持ち、長期的に永年変化していることが観測からわかっている。例えば2015年の日本では、地磁気の水平成分である磁北（磁石の針がさす方向）は地図上の北である真北から西に、北海道で約9度、九州で約7度の方向である。地磁気はまた地球内部の核の対流運動、太陽活動などの様々な要因で、より短い時間スケールでも日々変化している。

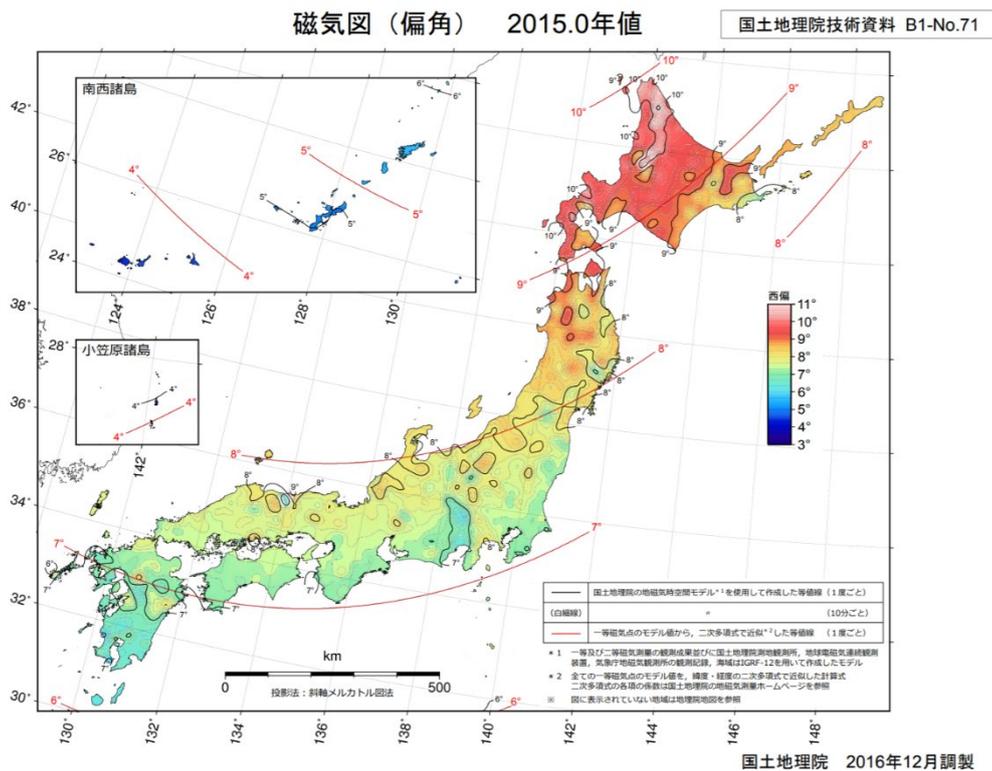


図7：2015年における日本全土の地磁気偏角の分布（国土地理院のページより）。

地磁気はベクトル量であり、 \mathbf{B} で表現されることが多い。ある場所の地磁気は独立な3つの要素で表現することができる。たとえば図7のように地磁気ベクトル全体を全磁力 \mathbf{F} で表し、直交する X (北向きを正とした南北成分)、 Y (東向きを正とした東西成分)、 Z (鉛直下向き

を正とした上下成分)の三つの軸の方向の成分からなる。また、全磁力 F の水平面への投影の長さを H 成分 (水平分力) とし、水平面と F のなす角 I (伏角、水平面下向きを正)、 H と X のなす角 D (偏角、時計回りを正) と組み合わせて表現することもできる。 I (伏角)・ D (偏角) の変化はそれぞれ、上下成分、東西成分の変化の大きさと解釈することもできる。地磁気ベクトルを表現する際は、これらの成分の中の独立した3成分で表現することが多く、本研究では、上空の電子の移動による地上での小さな磁場偏角変化について主に考えるため、水平分力 (H)、偏角 (D)、鉛直分力 (Z) の三成分を用いて (H, D, Z) の組み合わせで地磁気とその変化を表現する。

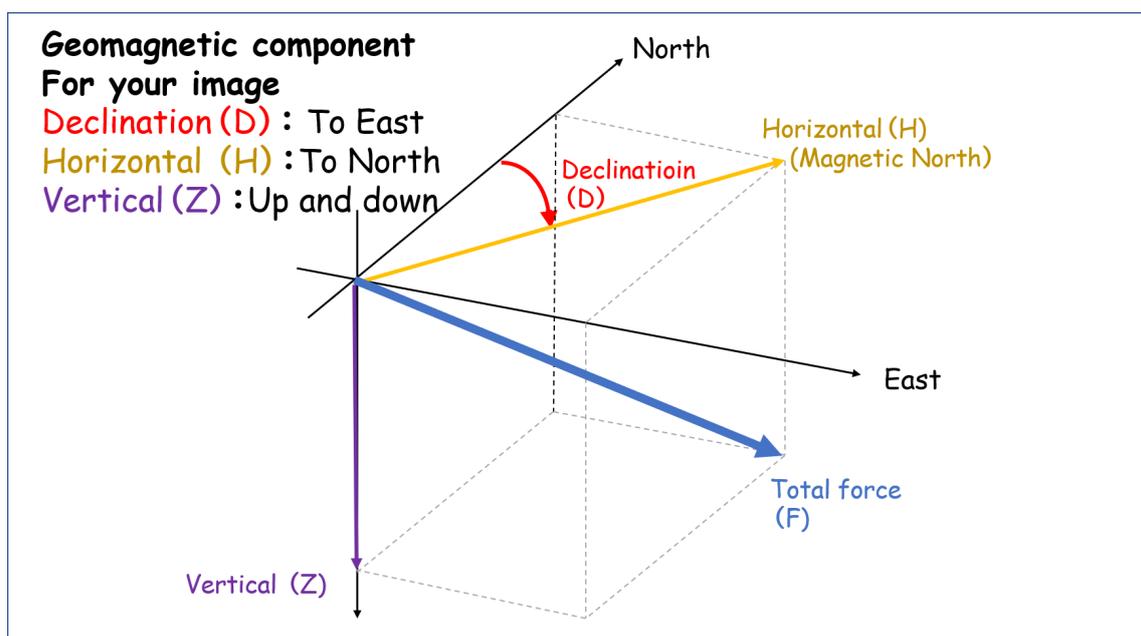


図8：地磁気を (H, D, Z) で表現した場合のイメージ図。 H は水平分力、 D は H が真北となす角度、 Z は上下成分である。

これらの地磁気要素は、日本では柿岡、女満別、鹿屋、父島にある気象庁地磁気観測所や、国土地理院の鹿野山、水沢、江刺等の観測所で連続的に観測されている。観測された観測データは、それぞれの機関の web ページか、京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センターの web ページからまとめて取得できる。

次に、今回の地上磁場変動の解析に使用した地磁気観測所の情報を示す。

表 3：今回使用したデータの観測所とその略称

機関名	地点名	略称
気象庁地磁気観測所	柿岡	KAK
	女満別	MMB
	鹿屋	KNY
国土地理院	鹿野山	KNZ
	水沢	MIZ
	江刺	ESA
	赤井川	AKA
	横浜	YOK
	原町	HAR
	志賀	SIK
	大多喜	OTA
	萩原	HAG
	吉和	YOS
	十津川	TTK
	室戸	MUR
	久住	KUJ

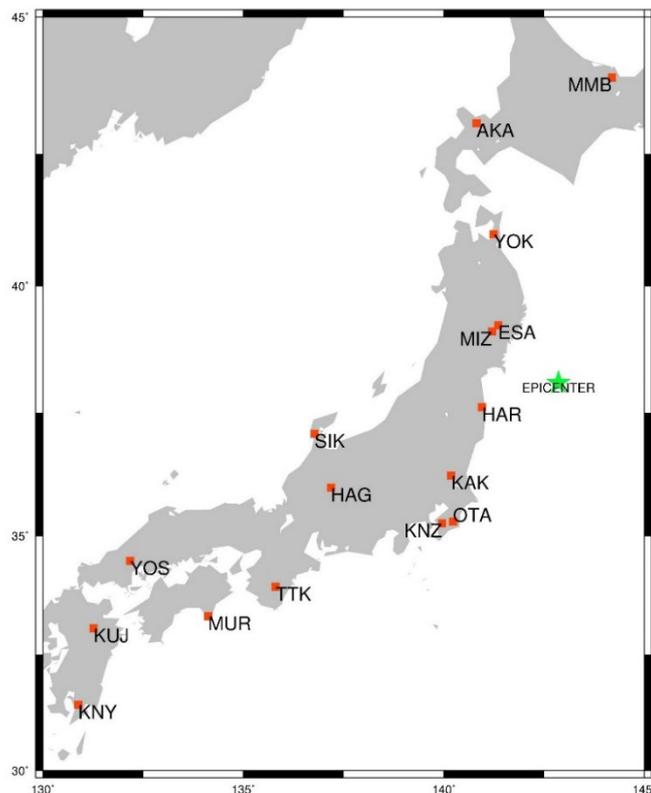


図 9：地磁気観測所の位置（橙の四角）と略称を示す。緑の☆は 2011 年東北沖地震の震源である。

3. 2 巨大地震直前の TEC 変化の物理モデルと地磁気の変化

ところで、地磁気の変動を引き起こす原因が地震直前の TEC 変化とすると、それらのメカニズムはどのようなものか。ここでは、現在考えられている地震直前の TEC 変化、つまり電離圏で生じる電子の移動を引き起こすメカニズムについて述べる。

先ほど紹介した M_w 依存性から考えると、断層が滑り始める前に地震の大まかな規模が決まっており、その規模に対応した現象が断層で起こっていることが示唆される。また、その現象は、先行時間が断層の長さにはほぼ比例することから、断層の一つの端から始まりもう一方の端に向かって一定速度で進行するような現象であるはずである。そのような過程として考えられるのが、断層面における微小な割れ目や食い違いの伝搬である。地震発生が近づくと応力の高まりと共に、断層にそのような微小な破壊が発生する。これらの破壊過程を微視的にみると、隣接する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と移動する。これは正孔がそれと逆向きに移動すると言い換えてもよい。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（図 10）。

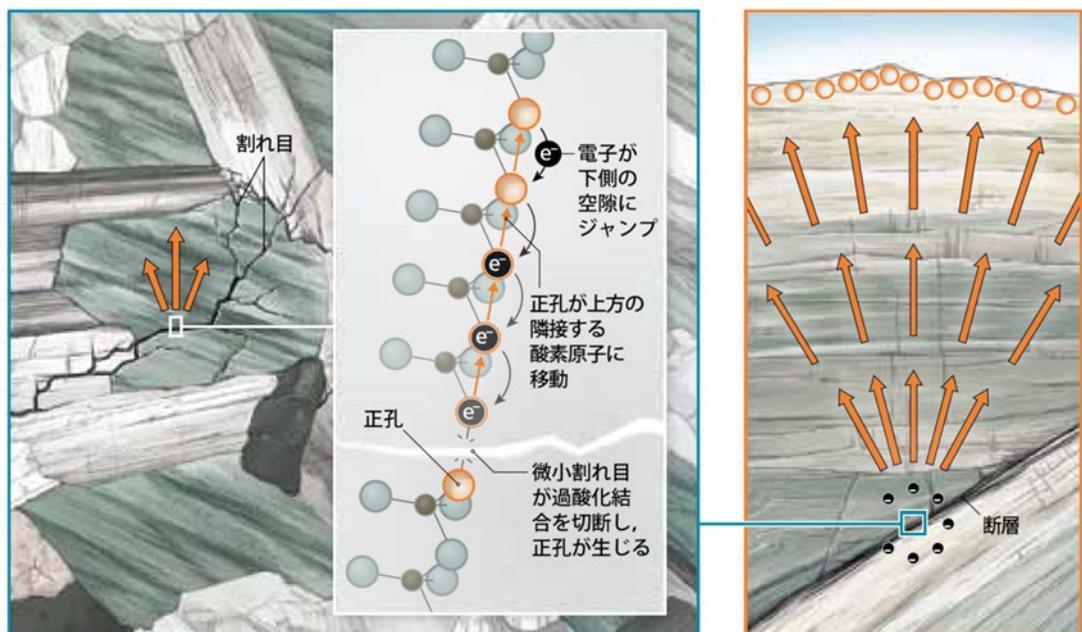


図 10：岩石中の微小破壊で正孔が生じ（左）、それらが拡散して地表にたまって大気中に電場をつくるという、地震前 TEC 変化を説明する物理メカニズムの一つを図解したもの（E・バンス, 2018）。

発生した正電荷の大部分は海水などの良導体を通じて急激に拡散すると思われるが、一定量の正電荷は電気伝導度が比較的小さな地表に存在し続け、空気中に上向きの電場を作る。地表面に蓄積した正孔が大気中につくる上向きの電場は、地震によって破壊される断層が大きければ広範囲に広がって面電荷が作る電場に近くなる。その小さな空間減衰のため

に電場は超高層大気に達すると考えられる。

超高層大気である電離圏では中性大気の密度が少なく、電子が自由に動ける。電離圏を導電体と考えると、地表の電荷によって新たに作られた電場を打ち消す為に誘導電荷が起こる。移動する電子には磁場によってローレンツ力が働き、電子は磁場に垂直の方向に動こうとするとサイクロトロン運動を行って磁力線に巻き付いてしまう。よって電子が移動できる方向は地磁気に平行な方向に限られる。すなわち電離圏はある方向にだけ導電性の高い異方性を持つ導体なのである。したがって地表電荷がつくる電場を打ち消す誘導電場も、電離圏上部にあった電子が地磁気に沿うように電離圏下部に移動することによって生じるはずである。この過程で電離圏電子が再配分され、電離圏下部と上部で正と負の電子密度異常が生じ、それを貫く視線で TEC 変化が観測される。これが地震直前に生じる TEC 変化を定性的に説明する物理過程である。

電子が移動することによって、電子の移動方向とは反対向きの電流が発生する。その電流はビオサバルの法則に従って磁場を発生させ、その一部が地上で地磁気変化として観測されると考えられる。

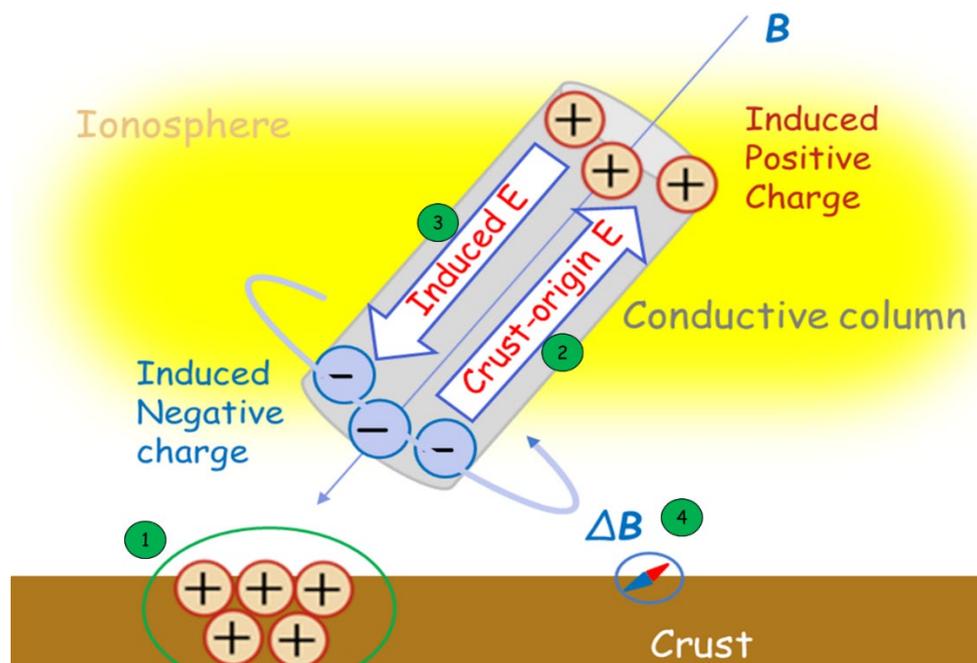


図 1 1 : 巨大地震前の震源上空での電離圏電子再配置のイメージ図。地表に蓄積された正電荷①により新たな電場が生成②され、それを打ち消す電場を作るために電離圏上部の電子が地磁気に沿って電離圏下部へ移動③して電子密度の正と負の異常を作る。電子の移動にともなう電流が作る磁場は地上観測局において地磁気のおよそ 1% の変化として観測される④可能性がある。

このメカニズムは、磁場に沿って低高度の正の電子密度異常と高高度の負の電子密度異常が生じることを予言する。GNSS-TEC データを用いた三次元トモグラフィーによって求められた 2015 年のチリ地震直前(He and Heki, 2018) および 2011 年の東北沖地震直前の

(Muafiry and Heki, 2020)の電離圏電子密度の空間構造は、いずれもそのような三次元構造を明らかにしている。

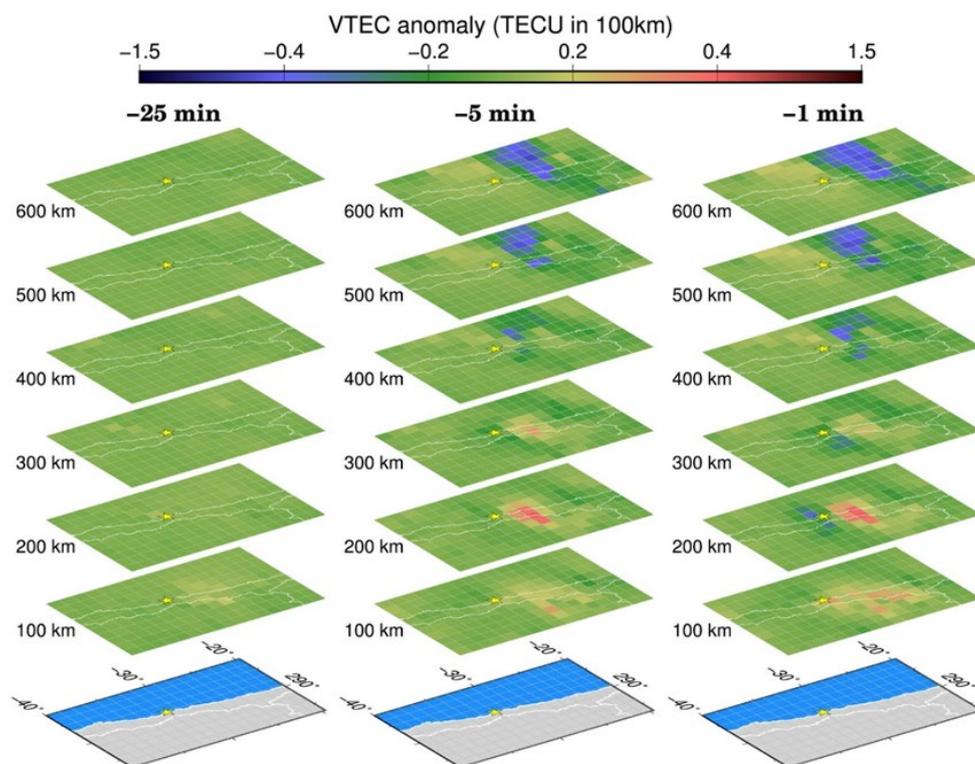


図 1 2 : 3D トモグラフィーによる、2015 年チリ・イジャベル地震直前における、高度 100 km から 600 km までの電子濃度異常の空間分布 (He & Heki, 2018)。左から地震 25 分前、5 分前、1 分前の異常を示す。図中の白い線は海岸線と国境を表す。黄色い☆印は震源である。

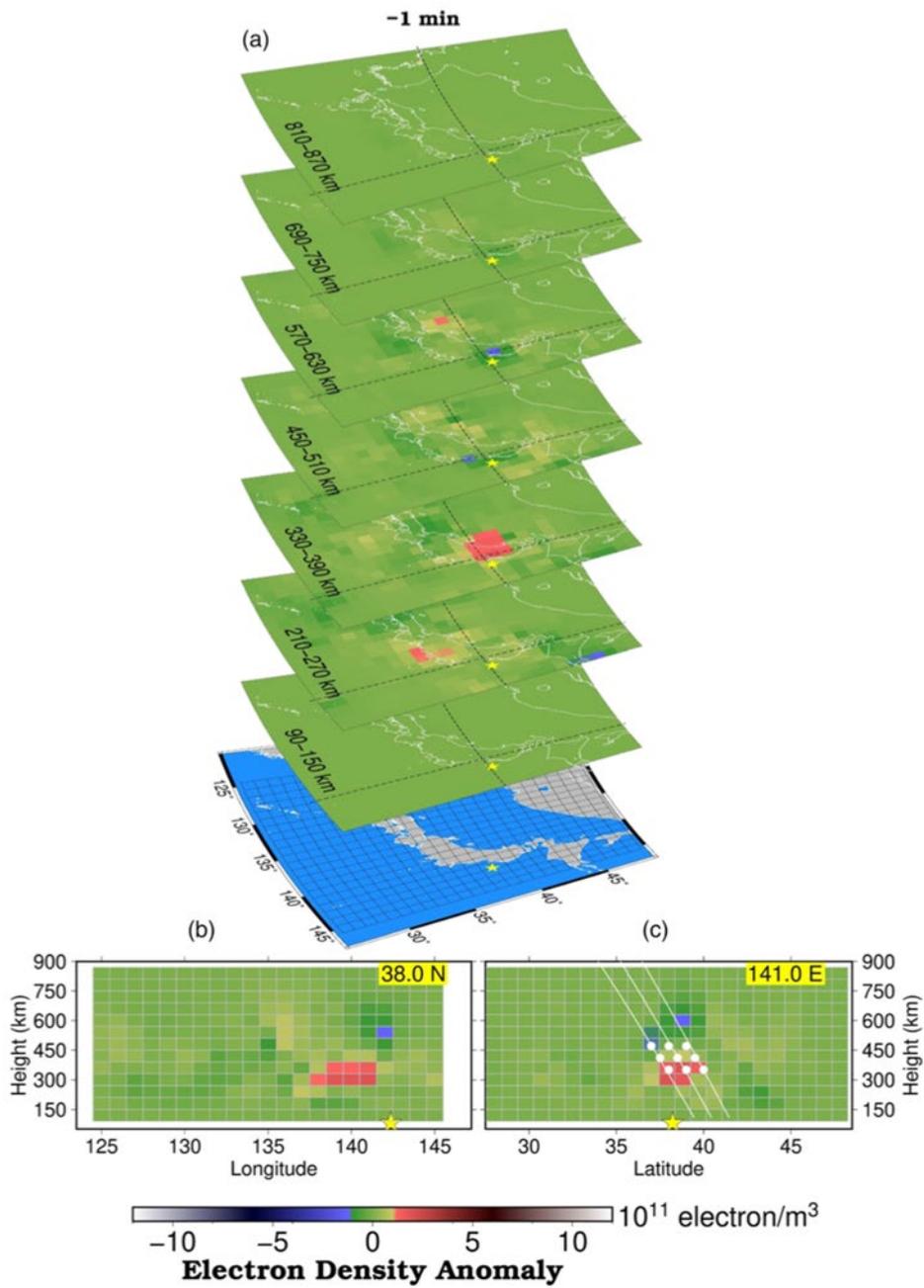


図 1.3 : (a) 3D トモグラフィーによる、2011 年東北沖地震直前における、高度 90 km から 870 km までの電子濃度異常の空間分布 (Muafiry and Heki, 2020)。黄色い☆印は震源である。(b) 東西方向のプロファイル。(c) 南北方向のプロファイル。(c)中の白い曲線は地磁気を表す。

また、Heki & Enomoto (2013)では、柿岡地磁気観測局と鹿屋地磁気観測局の地磁気の偏角成分の相対値が、地震直前の TEC 変化開始と同時に変化し始めたことが報告されており、本研究で地上磁場変動を全国の地磁気観測局のデータを用いて、地上磁場変動の詳細な地理的分布と地磁気成分を調べる動機となっている。

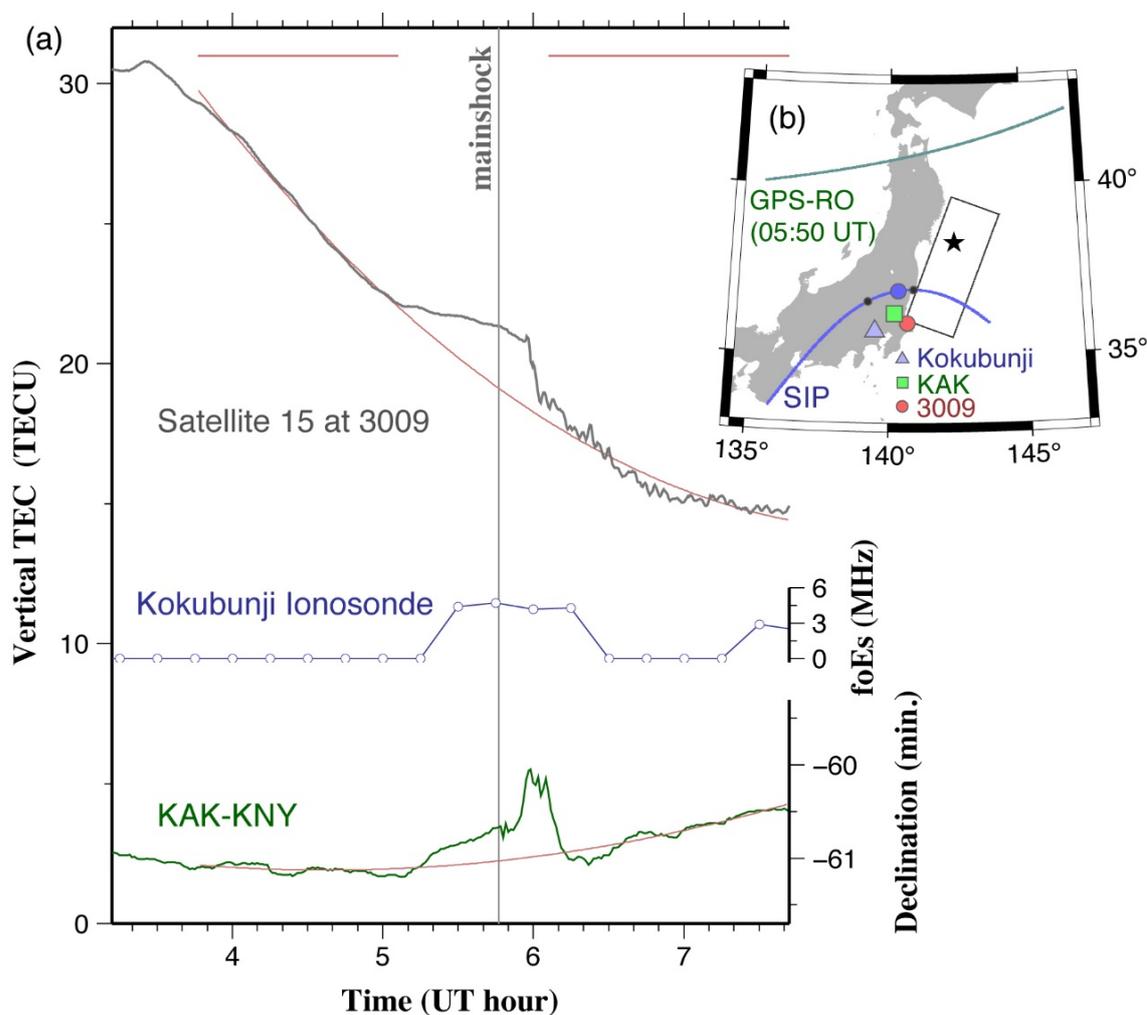


図 1 4 : (a) GPS15 番衛星と 3009 局のペアでの VTEC (灰色の曲線)、国分寺のイオノゾンデからの E 層臨界周波数 (foEs) (青色の曲線)、関東の柿岡と九州の鹿屋の地磁気偏角の差 (緑色の曲線) の三者を比較したもの (Heki & Enomoto, 2013)。2011 年東北沖地震の 40 分前頃に同時に擾乱が介していたことが分かる。VTEC と地磁気偏角のレファレンス曲線 (赤茶色) は、図の上部に赤茶色で書いた横線で示した部分を多項式近似して求めたものである。観測点の位置を(b)に示す。SIP 軌道上の黒い点は、5UT と 6UT の SIP 位置を示す。(b)の濃い緑色の曲線は、Astafyeva et al. (2011)で示された 5:50 UT の GPS 電波掩蔽観測の IPP 軌道を示す。

さらに、本震前後の数日間、本震が起こった同時刻 (5.77 UT) において柿岡局と鹿屋

局の地磁気偏角成分には擾乱が起こっていなかったことも報告されている。また、東北沖地震直前の柿岡局以外の複数局でも地磁気偏角成分が変化していたことが報告されており、広い範囲で地磁気偏角が変化していたことが分かっている。

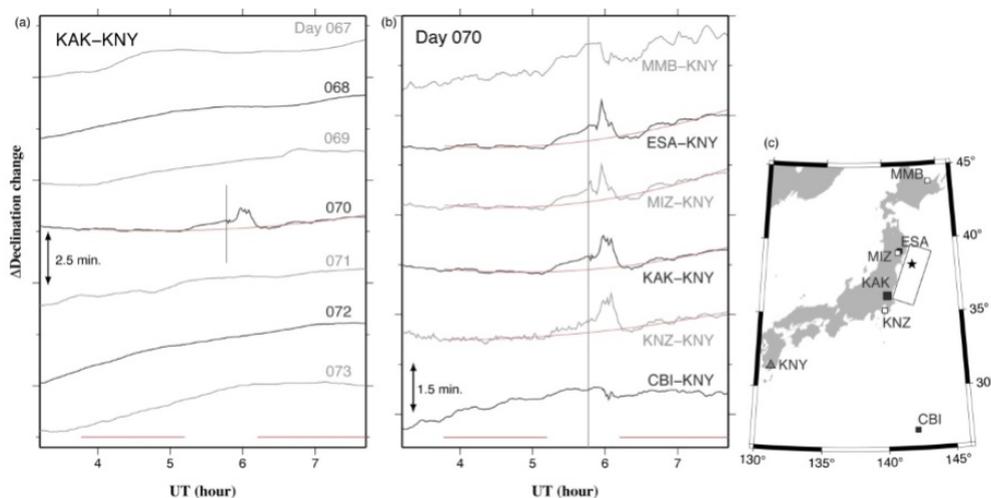


図 1 5 : (a)地震発生日(070)を含む 7 日間の柿岡(KAK)の鹿屋(KNY)に対する地磁気偏角の変化 (Heki & Enomoto, 2013) (b)は、地震当日の国内 6 カ所の地磁気観測所(c)の KNY に対する偏角の変化を示したものである。地震当日のデータ (赤線) については、図 4 と同様に 2 次関数を用いたモデルフィッティングを行っている。東北地方と関東地方の観測点では、2011 年東北沖地震の 40 分前から正の異常が発生していることがわかる。(a)、(b)の縦線は地震発生時刻を示す。

我々は以上のことを踏まえて 2011 年 3 月 11 日の東北沖地震前後の、図 1 5 に含まれない局を含む全国 16 か所の地磁気観測所における磁場変化の、鹿屋局における変化を基準とした時系列を解析した (図 1 6)。その結果、地震発生直後にいずれの成分も有意な擾乱を検出していることがわかる。一方 TEC で異常が生じた地震約 40 分前から地震直前に至る時間帯に関しては、 D 成分、 H 成分に主な変化が見られ、 Z 成分には変化は見られないことが分かった。これは地磁気の東西および南北方向に地震前の磁場変化が生じており、鉛直方向にはほとんど変化がなかったことを意味している。次の章では、TEC 変化をもたらした電離圏内部で磁場に沿った電子の下降 (上向きの電流) がどのような磁場の変化をもたらすかを定量的に議論する。

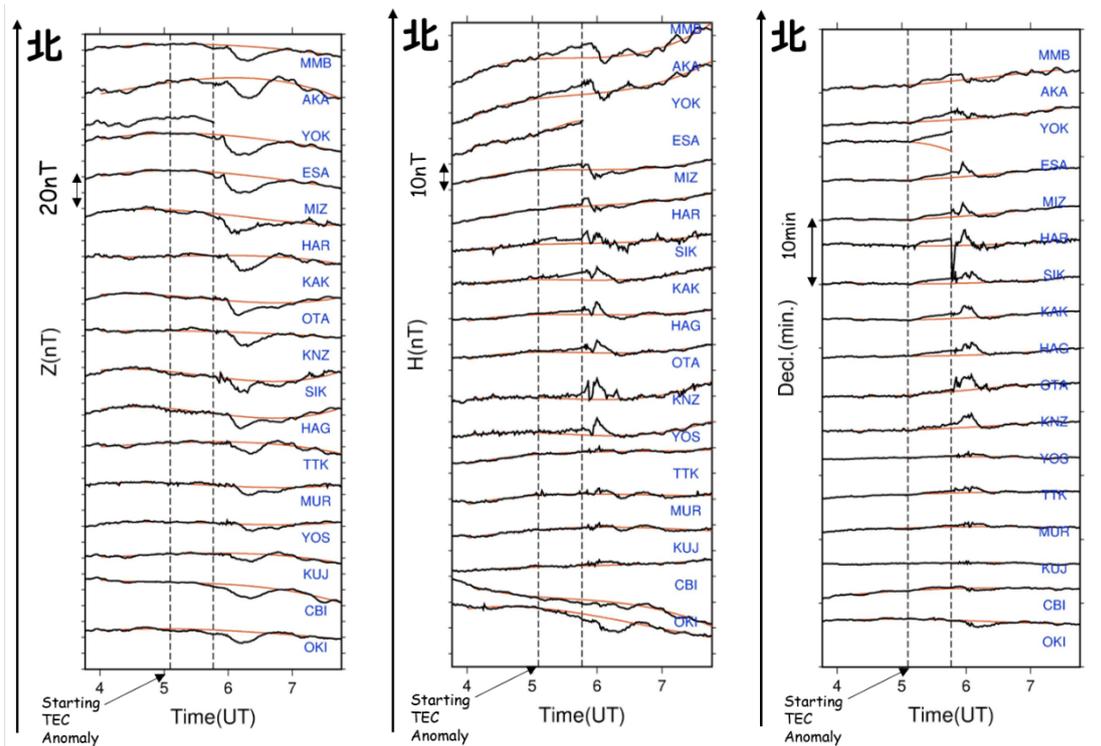


図 16：東北沖地震前後の KNY 局に対する全国 16 か所の観測所における地磁気三成分の変化。左から鉛直分力 Z 、水平分力 H 、偏角 D を示す。それぞれの図の二本の縦線は左からそれぞれ地震前 TEC 変化の開始時間と地震の発生時刻を示す。それぞれの成分の実際の変化を黒い実線で、それらにあてはめた多項式近似曲線を橙色で描いてある。それぞれの図での成分変化は北にある局を上配置して表示した。またそれぞれの実線の右端に局名の略称を示す。それらの位置は図 7 の地図に示されている。

3. 3 ビオサバールの法則による地上磁場変動の計算と観測結果との比較

ここでは、東北沖地震直前に観測された TEC 変化をもたらした電子の移動を電流として考え、それらが地上でもたらす磁場変動のモデル計算を記述する。地震前の TEC 変化が起こるメカニズムとして、前節で説明したような、電離圏電子の電離圏上部から下部への地磁気の磁力線に沿った下降を想定する。また、その TEC 変化から 3D トモグラフィーを行うことによって、電子密度の正と負の異常が陸域上空のそれぞれ低高度と高高度の位置で観測されることが分かっている (Muafiry and Heki, 2020)。ここで行うモデル計算のために、Muafiry and Heki, (2020) の 3D トモグラフィーのデータを入手、そのデータから電子の移動を電流に換算し、電流の下限の緯度経度、電流の高度範囲、電流の量等の値を求めた。また電流が生じる水平面内の領域は、3D トモグラフィーの結果から 200×150 km の範囲と

し、前兆が始まった時間から地震発生までの 40 分間継続したとした。

これらのパラメーターと、国際標準地球磁場(IGRF, International Geomagnetic Reference Field)を用いてビオサバールの法則に従って計算を行い、東北沖地震直前の TEC 変化による地上での磁場がどれだけ変動するのかを算出した。計算に用いたパラメーターと計算結果は表 4 の通りである。計算結果から、地震前 TEC 変化による地上磁場変化は関東付近で 3 nT 程度の水平成分を示すことが分かった。

表 4：地震直前の TEC 変化がもたらす地磁気変化のモデル計算に用いたパラメーターの種類とその値

パラメーター	値
電流の下限の緯度経度	140.5E 38.2N
電流の高度範囲	320km to 540km
電流の量 (TEC の量)	1.53 TECU
電流が流れた時間	40 分
電流の範囲	200km × 150km

図 1 7 に上記パラメーターを用いて計算した地上磁場変動の結果 (灰色のベクトル) と、各観測局で観測された変化ベクトルの鹿屋局からの差 (青いベクトル) を比較する。図で見ている成分は H 、 D 成分として生じる水平成分である。東北や関東ではある程度整合的な結果であるが、北海道では観測された北東向きの成分はモデルと一致しない。そこで我々はこの結果が、地震の日に全球的な地磁気擾乱が起こっていたことに起因すると考え、地震発生日以外の日の地磁気の観測結果とこれらの結果を比較することによって、宇宙天気の影響がこれらの地磁気観測局にどのように現れるかを次の章で考察する。

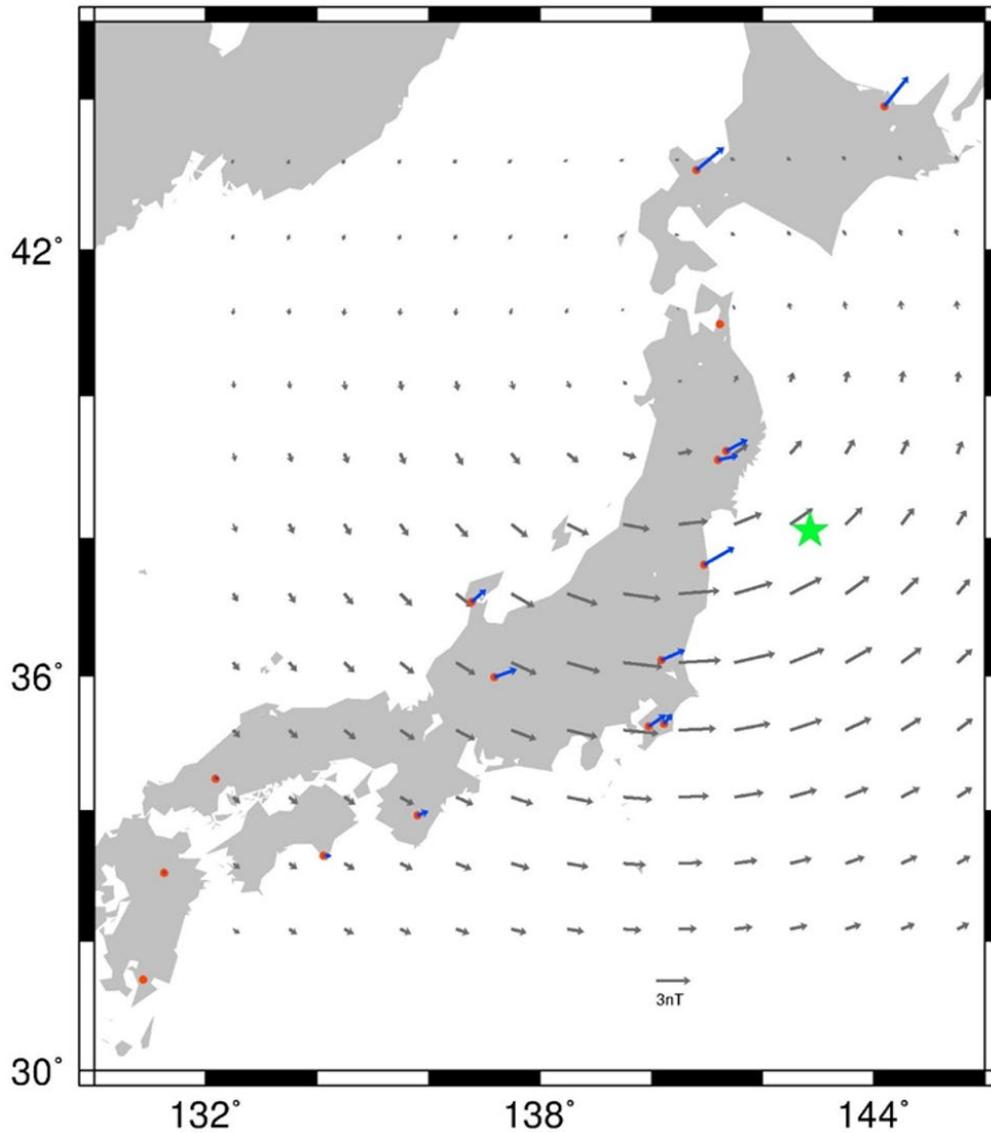


図17：表4のパラメーターとビオサバールの法則に従って計算した地上面での磁場変化の水平成分（濃い灰色の矢印）と、各地磁気観測局（赤○）での観測結果の鹿屋局（鹿児島）からの差（青→）。震源を緑の☆で示す。

3. 3 宇宙天気による磁場擾乱に対する考慮

東北沖地震が発生した 2011 年 3 月 11 日の地磁気擾乱について考える。この地磁気擾乱を考えるため、サブストーム（オーロラ嵐）について簡単に説明する。宇宙空間から地球に向かって地球の固有磁場が支配する領域を磁気圏と言ひ、地球は磁気圏によって太陽からの高エネルギー粒子に直接さらされず、その環境が守られている。磁気圏は、太陽風が吹き付ける昼側で圧縮され、夜側は太陽風によって引き伸ばされ磁気圏尾部を形成する。磁気圏尾部には、プラズマシートと呼ばれるプラズマの密度が高く、磁束密度が小さな領域があり、通常は西向きに尾部電流が流れている。

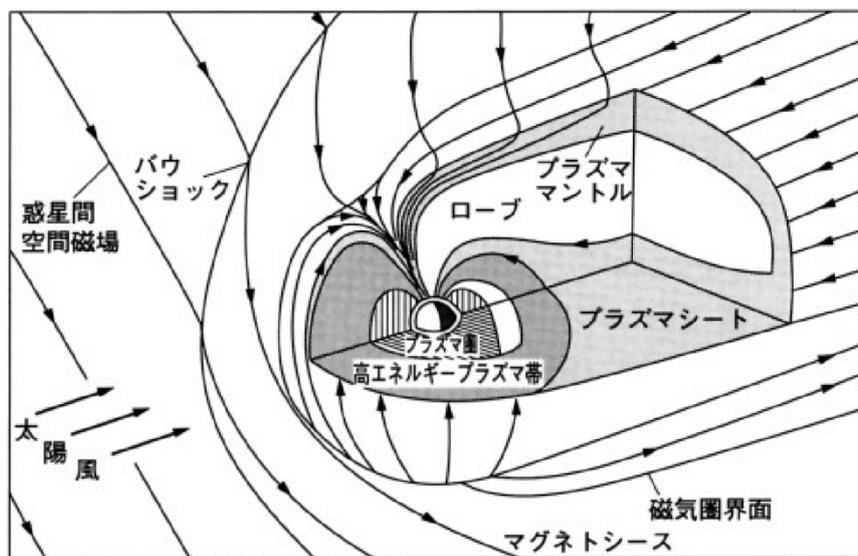


図 1 8 : 地球磁気圏の構造図 (小原、2006)

しかし、太陽風や惑星間磁場等の影響で電流が分断され、余った電流が行き場を失い磁力線に沿ってオーロラ帯の電離圏に流れ込む（沿磁力線電流 field-aligned current）。真夜中過ぎの領域に流れ込んだ電流は電離圏中を流れ、真夜中前の領域から磁気圏に流れ出す。この時に極域の電離圏中を流れる電流をオーロラジェット電流といい電離圏で大きな磁場変動が発生するとされる。この一連の現象をサブストームという。

サブストームを説明する楔形の電流系(McPherron et al., 1973)は観測を説明しやすいので広く支持されているが、未だに議論が続いている。近年では、満足する物理過程をシミュレーションに与えサブストーム中に現れる特徴的なオーロラ構造や関連擾乱を再現できるようになった(Tanaka, 2015)。観測される結果を矛盾なく説明できるようなモデルを構築する事によってメカニズムを解明する研究が続けられている。

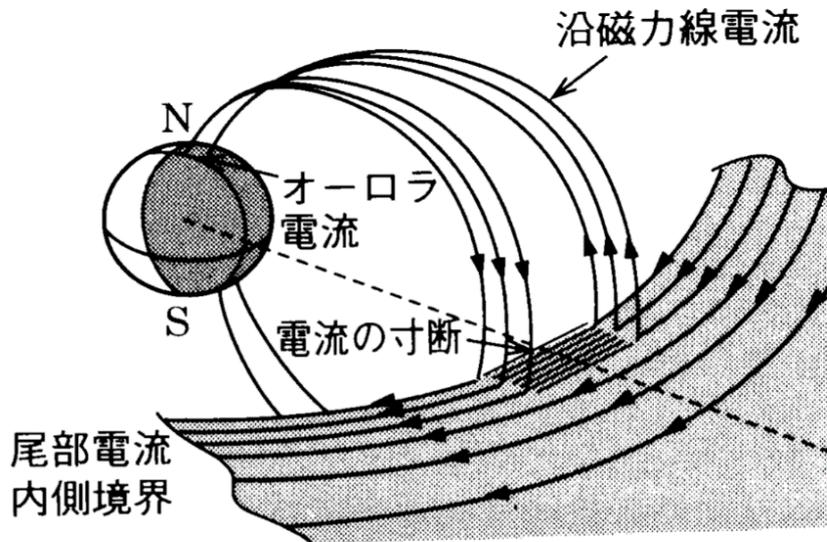


図 19：サブストーム中における磁気圏尾部の電流構造（小原、2006）

サブストームの活動度を示す指標として AE (Auroral Electrojet) 指数がある。AE 指数はオーロラ帯に位置する地磁気観測点のデータを用いてオーロラジェット電流の強さを示したものである。オーロラ帯に位置する 12 点の経度方向におおよそ等間隔に配置された地磁気観測点の地磁気変動の南北成分(H)を用いて算出される。地磁気変動の南北成分は電離層中の東西方向の電流に大きく依存する。東向きジェット電流は地磁気南北成分を正、つまり北向きに変動させ、西向きジェット電流は南北成分を負、つまり南向きに変動させる。

東向きジェット電流の指標となるものを AU 指数、西向きジェット電流の指標となるものを AL 指数と呼ぶ。2つの指標は東西方向それぞれのジェット電流の最大値を示しており、この AU 指数と AL 指数の差をとったものを AE 指数という。このように算出された AE 指数はサブストームに伴うオーロラジェット電流の変動を示す。サブストームが活発に発生しているほどオーロラジェット電流はよく流れるので AE 指数はオーロラサブストームの活動度を表す指標になる。AE 指数は京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センターで公開されている。

図 20 は東北沖地震の発生日である 2011 年 3 月 11 日と静穏日であった同年 3 月 16 日の AE 指数である。東北沖地震が発生した日には大規模なサブストームが発生していたことが分かる。2000 nT を超える AE 指数が確認されたのは 2011 年において合計 5 日のみである。

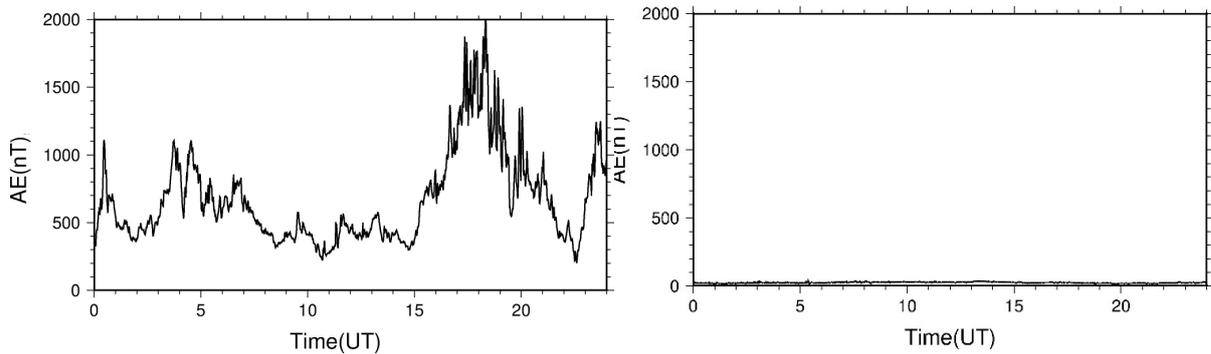


図 2 0 : 東北沖地震が発生した 2011 年 3 月 11 日と同年 3 月 16 日の AE 指数

本研究では、サブストームの活動が活発である AE 指数の値が大きい時に見られる日本での地磁気擾乱を、東北沖地震直前と地震の影響がないとされる日時で比較することにより、地震直前 TEC 変化がもたらした地磁気擾乱の同定を試みた。図 2 1 は擾乱が大きかった 2011 年 3 月の 1 日、10 日、11 日の AE 指数と、全国の地磁気観測局の地磁気偏角成分をまとめたものである。緑の 2 つの線で囲まれた時間範囲は、極域で地磁気擾乱が起きていると AE 指数から考えられ、かつ全国的にもそれと同じ原因 (サブストーム) による擾乱が起きていると考えられる時間帯での全国の地磁気擾乱の地域性を、緯度の関数として考えるために設けたものである。この緑の線で囲まれた時間範囲のレファレンス曲線 (各実線に沿うオレンジ色の線) からの残差を平均して、地磁気偏角の異常と定義した。この異常が極域電離圏に流れるオーロラジェット電流による磁場擾乱だと考えれば、極域により近い高緯度地域で大きな擾乱が見られるはずである。

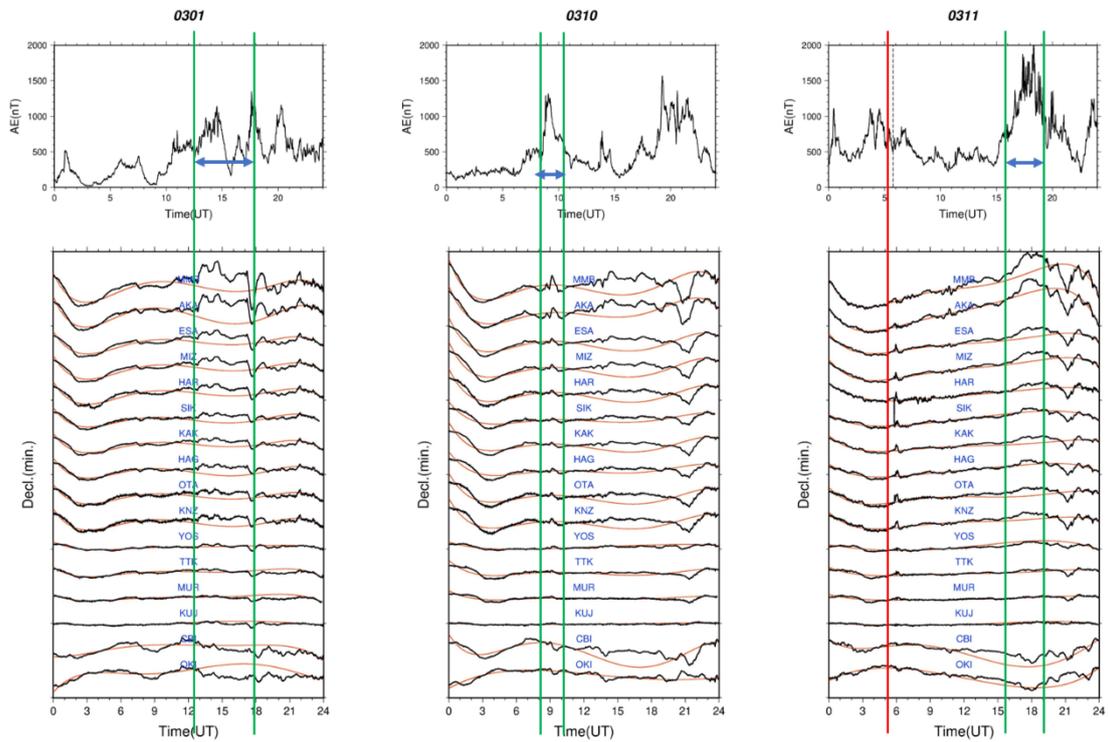


図2 1 : 2011年3月1日、10日、11日のAE指数(上)と全国の磁場偏角(下、KNYからの相対値)の比較。AE指数の図の上の数字は日にちをMMDDで表している。磁場偏角の図では、緯度が高い順に上から表示し、それぞれの局名を黒線で描いた磁場偏角変化の近傍に示してある。またオレンジ色のレファレンス曲線は、偏角変化を考えるとときに黒線から差し引くために描いた、黒線の多項式近似曲線である。3/11の赤い直線は地震発生時刻を示す。

図2 3では、図2 1で計算した異常を緯度の関数としてプロットし、地震が起こっていない日時と地震直前の地磁気偏角変化を比較した。その結果、地震直前以外の日時での磁場偏角変化は、緯度に対して線形に大きな値を示すのに対し、地震直前の磁場偏角変化は、震源南で極大を示すことが確認された。また例外として、同年3月9日の解析では、北方での地磁気擾乱が他の地域に比べそこまで大きくなく、一見整合的でない結果であった。そこで我々は、図2 1と同様にAE指数と全国の地磁気偏角変化の時系列変化を比較した。その結果、地磁気変化が起こった時間と、AE指数が大きい時間のタイミングは一致しておらず、日本付近のローカルな地磁気擾乱を原因とするものだと考えられる。

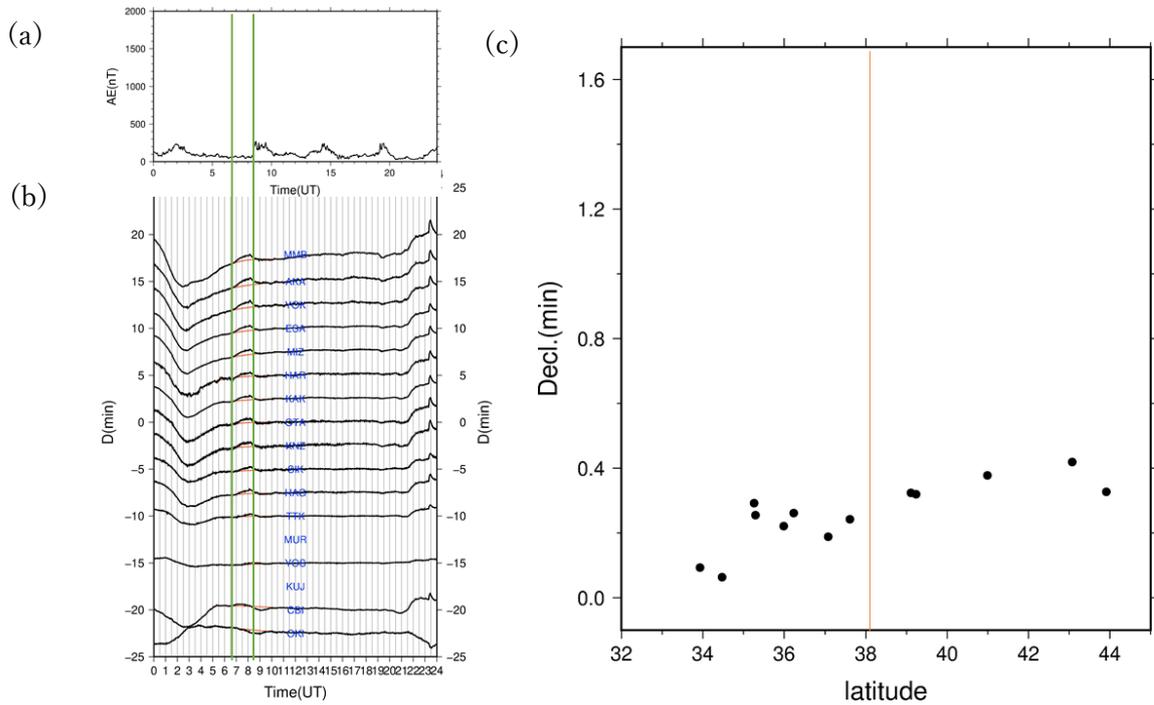


図 2 2 : 2011 年 3 月 9 日の(a)AE 指数、(b) 全国の磁場偏角 (KNY からの相対値)、(c) 地磁気偏角変化を緯度の関数としてプロットしたもの。図 2 1 と同様に緑の線で囲まれた時間範囲のレファレンス曲線 (各実線に沿うオレンジ色の線) からの残差を平均して、地磁気偏角成分の異常と定義し、(c)にプロットしている。(c)のオレンジの縦線は東北沖地震の震源の緯度を表す。

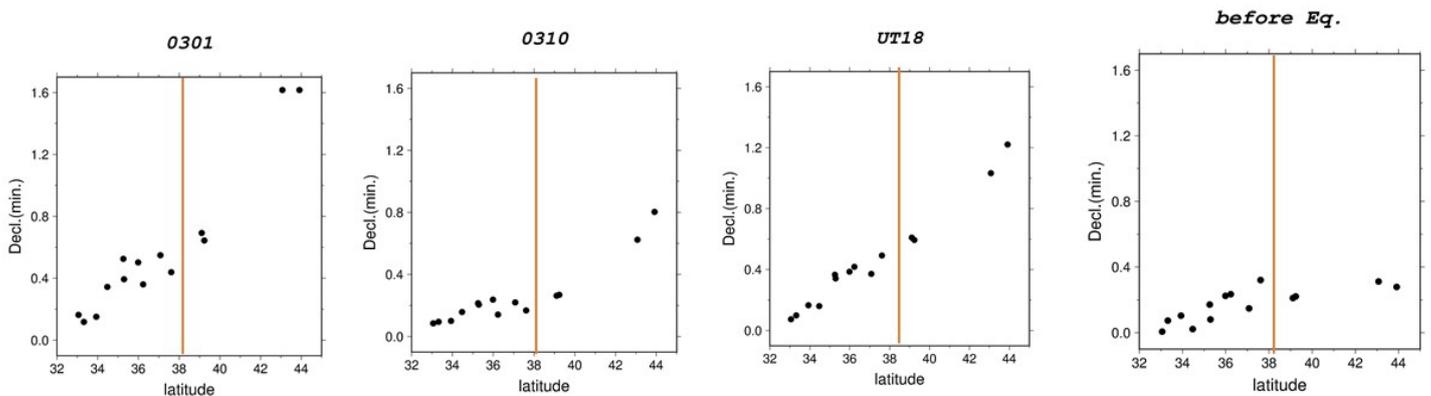


図 2 3 : 図 2 1 で緑の線に囲まれた範囲の異常と (左三つ)、地震直前の地磁気偏角変化 (右の図) を緯度の関数としてプロットしたもの。オレンジ色の線は東北沖地震の震源の緯度を表す。

図 2 4 では、地震が発生した 3/11 において、地震の十時間ほど後の 18UT 頃に見られた地磁気擾乱に伴う磁場水平成分変化を地図上で示す。そこでは明らかに北方の局ほど地磁気が大きく変化していることが分かる。これを電離圏中の電子の再配置に伴って生じると考えられる磁場の水平成分の変化を示す図 1 7 と比較すると、図 2 4 では高緯度地域の地磁気変化が顕著に大きいことが明らかである。図 2 5 では実際に 3/11 の二つの磁場偏角の擾乱の緯度依存性を比較している。それを見る限り地震直前の変化には、震源近辺に最大を

持つ何らかの変動が、単純な緯度依存性を持つ宇宙天気起源の変化に重畳しているようである。

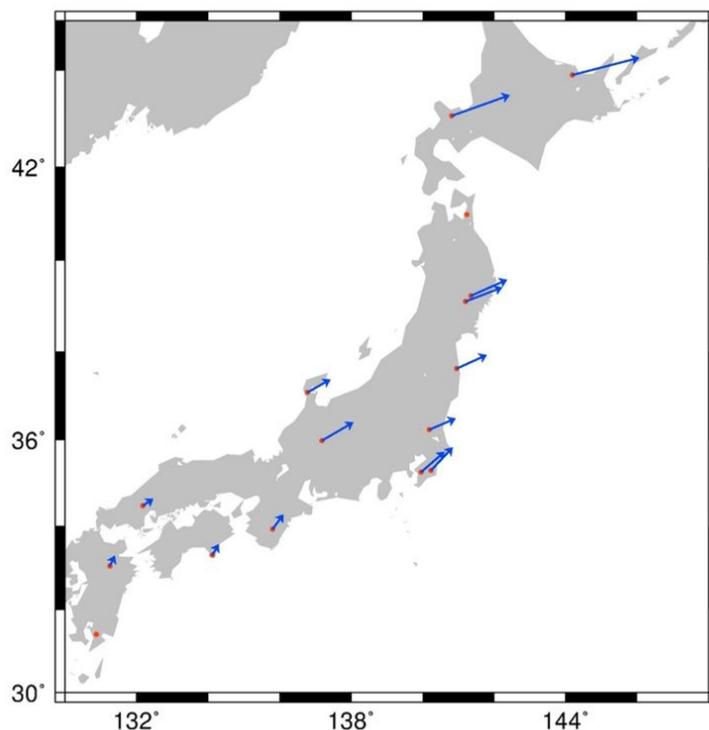


図 2 4 : 2011 年 3 月 11 日 18UT 頃に発生したサブストームに伴う全国の地磁気観測局での地磁気水平成分を青の矢印でプロットしたもの。

以上の考察から、東北沖地震直前の地磁気偏角の変化は、宇宙天気による擾乱と地震直前 TEC 変化に起因する擾乱が重なりあったものであると考えるのが妥当であろう。つまり東北沖地震の直前に見られた地磁気偏角の変化は、実際に地震直前の TEC 変化に伴う現象であったことが示唆される。しかしながら、地震直前の磁場変化は本研究において 1 例しか解析できておらず、またここでの議論も定性的なものにとどまった。超高層大気の複雑な電流系や、局地的な地磁気擾乱の考慮等、さらなる議論の余地があると言えるだろう。

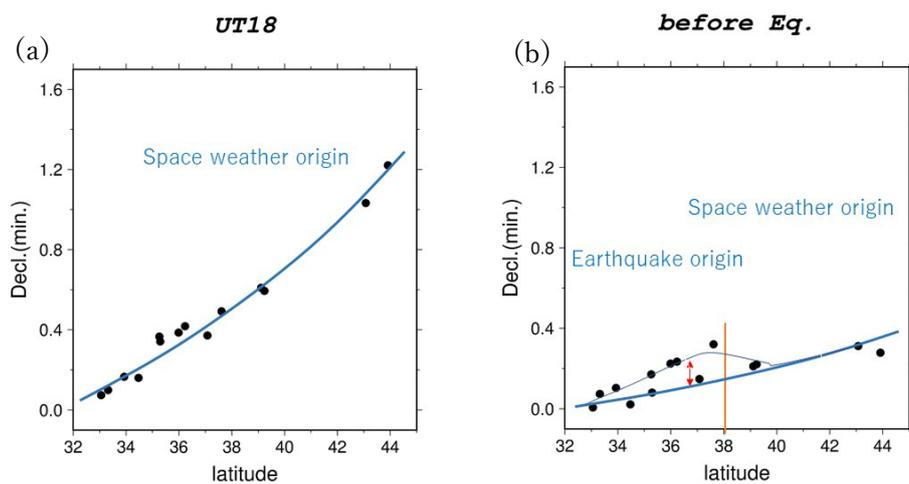


図 25： 2011 年 3 月 11 日 18UT 頃(a)と同日の地震直前(b)の地磁気偏角変化の緯度依存性の比較。大きく単純な緯度依存性を示す 18UT 頃の変化は宇宙天気起源である一方、地震直前の変化は震源近傍で極大を示しており、宇宙天気起源の擾乱と地震直前 TEC 変化を起源とする変化が混在していたものと考えられる。(b)のオレンジの縦線は、東北沖地震震源の緯度を示す。

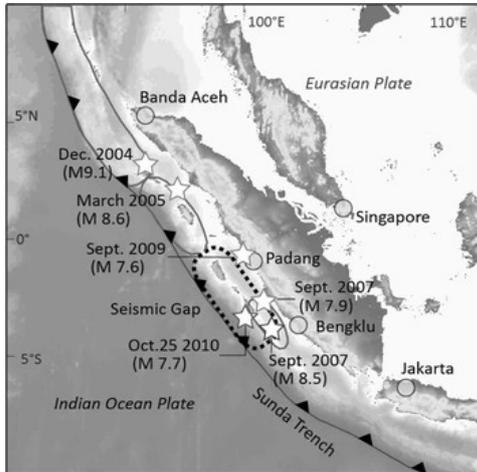
4 2010年メンタワイ地震前後の TEC 変化

この章では、2010年にインドネシアのスマトラ島南西沖で発生したメンタワイ(Mentawai)地震前後の TEC 変化について議論する。地震前の変化については、第一章で説明した地震直前 TEC 変化の M_w 依存性を考慮し、その地震発生に対する TEC 変化開始の先行時間と TEC 変化の大きさについて予測し解析することで、典型的な地震直前の TEC 変化が確認されたことを述べる。地震後の変化に関しては、地震時に励起された音波と内部重力波による TEC 変化について議論する。第一章で述べたように、地震時に励起される大気波動には三種類あり、その伝搬速度と波の周期で区別できる。メンタワイ地震後には、震源直上の地殻隆起・沈降によって励起された音波の伝搬による電離圏擾乱に加え、この規模の地震では通常信号が弱くて検出できない内部重力波による電離圏擾乱の信号が明瞭に見えることが確認された。これはメンタワイ地震が、地震時の断層運動が比較的ゆっくり生じる津波地震であることに起因すると考えられる。そこで我々は、過去の7つの比較的規模の大きい地震に関して、地殻の隆起沈降により励起された音波による TEC 変化の振幅(AW)と、より伝搬速度の遅い内部重力波による TEC 変化の振幅(IGW)の比(IGW/AW)を求め、それぞれを比較することでメンタワイ地震の特殊性を示すことを試みた。

4.1 メンタワイ地震

メンタワイ地震(Mentawai Eq. しばしばムンタワイ地震とも呼ばれる)は2010年10月25日14:42UT(21:42LT)にスマトラ島南西沖のスンダ海溝で発生した $M_s7.7$ のプレート間地震である。その震源域は、第一章で登場した2007年ブンクル地震の震源域の近傍に位置する(図2.6a)。メンタワイ地震は、地震の揺れに比べて非常に大きな津波を発生する典型的な「津波地震」として知られる。一般的に津波地震の断層運動は通常の地震に比べてゆっくりであり、通常の地震に比べ揺れの周期が長くなる傾向があると言われている。図2.6(a)は、メンタワイ地震が発生したスマトラ島沖で発生した地震のMと場所を示した図であり、多くの地震が付近で発生していることが分かる。また図2.6(b)は地震のモーメントの開放の時系列を表す震源時間関数であり、断層のすべりに対応する。この関数の波形を同規模の地震と比較すると、メンタワイ地震では非常に長い時間をかけて断層運動が起こったことが分かる。また、津波波形から断層滑りを求めた Satake et al. (2012)によるとメンタワイ地震のモーメントマグニチュードは $M_w7.9$ であったとしており、地震波から求めたマグニチュードと比較して0.2大きい。

(a)



(b)

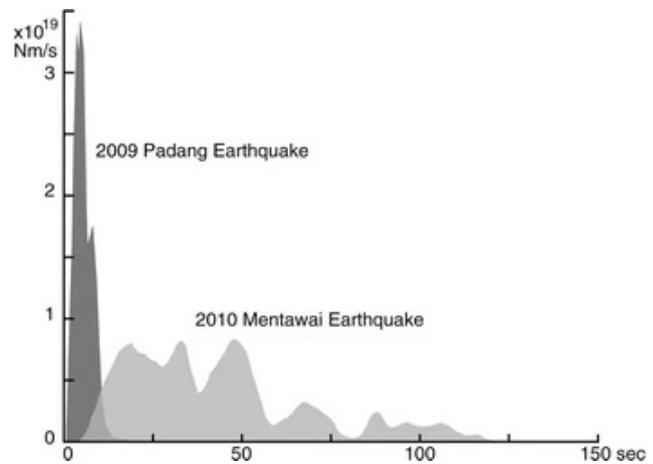


図 2 6 : スマトラ島西岸ではインドオーストラリアプレートがスンダ海溝で沈み込んでおり、過去に多くの大地震が起こっている(a)。(b)は2010年のメンタワイ地震と、その近くで2009年に発生したパダン地震の震源時間関数を比較したもので、メンタワイ地震のモーメント解放が時間をかけてゆっくり起こったことがわかる。

4. 2 メンタワイ地震直前の TEC 変化

ここでは、メンタワイ地震直前の TEC 変化について議論する。地震前 TEC 変化は解析が可能な $M_w 8.2$ 以上の規模のほぼすべての地震で確認されている。また、これまで確認された最も M_w が小さい地震は、 $M_w 7.3$ の 2015 年ネパール地震の余震である。このことから、 $M_s 7.7$ 、 $M_w 7.9$ であるメンタワイ地震の地震前 TEC 変化は非常に小さく、背景 VTEC が小さい場合は確認できない可能性が高い。そこで我々は、第一章で説明した巨大地震直前の TEC 変化についての M_w 依存性から、メンタワイ地震の“地震前 TEC 変化開始の地震に対する先行時間”と、“バックグラウンド TEC に対する TEC 変化の大きさ”を予想し、解析を行うことでメンタワイ地震直前の TEC 変化の確認を試みた。

メンタワイ地震の規模から予想された、TEC 変化開始の時間は地震発生の約 20 分前、TEC 変化の大きさはバックグラウンドの TEC に対して 2% ほどである。図 2 7 に地震発生時刻を含む二時間の時間窓における VTEC 変化の例を示す。VTEC 時系列に、地震発生 20 分前から、地震動により発生した音波による電離圏擾乱が起こった時間を除いて多項式で近似し、それをレファレンス曲線としてそこからずれを異常とした。地震の十分後に音波擾乱ははっきり見えているのに加え、地震の 15 分ほど前から VTEC がレファレンス曲線に対して正の異常を見せていることがわかる。このことからメンタワイ地震直前にも、過去の大規模地震と同様の TEC 変化が起こっていたことが示唆される。

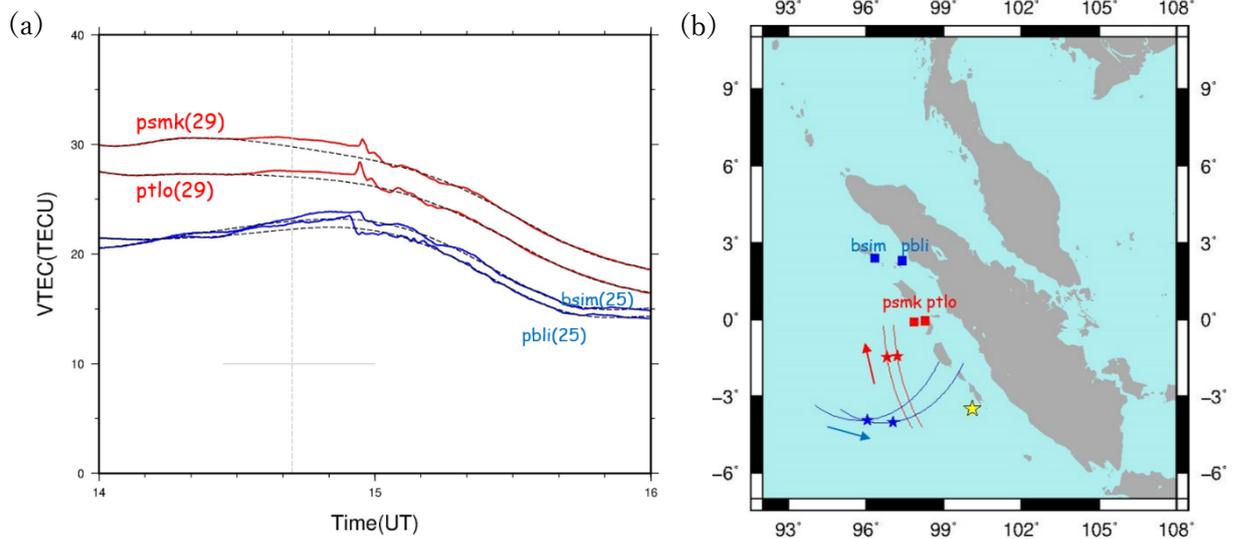


図 27 : (a)メンタワイ地震直前直後の VTEC 変化。各実線は実際の VTEC 変化を表し、近傍に観測局名と衛星番号を示してある。図中の灰色の縦点線は地震が発生した時刻 (14.7UT) で各実線に沿った灰色の横線は、各実線に沿ったレファレンス曲線(点線)を求める際に除いた時間窓を表している。(b)は(a)に対応する色の曲線で SIP を曲線で表しており、SIP 上の☆印は地震発生時の SIP を示す。また、局位置を□印で、震源を黄色の☆印で示している。

その VTEC 変化のレファレンス曲線からの差を、図 3 で示した過去の 18 個の地震の結果に追加したものを図 2 8 に示す。メンタワイ地震直前の TEC 変化は、(1)先行時間、(2)大きさ、(3)波形、のいずれの観点でも巨大地震直前 TEC 変化の M_w 依存性に整合的であり、18 個の地震に加わった新たな事例となった。

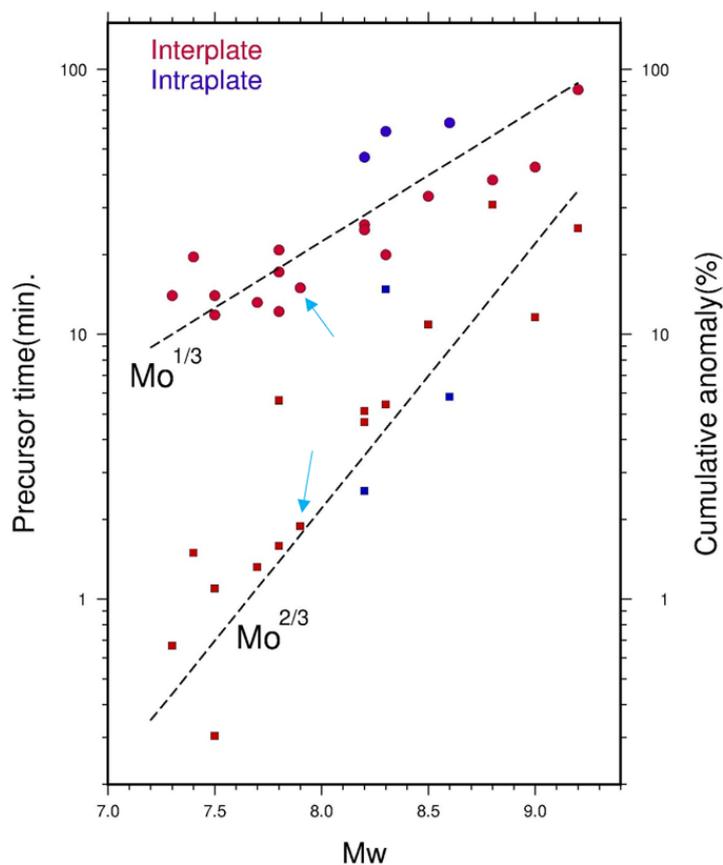
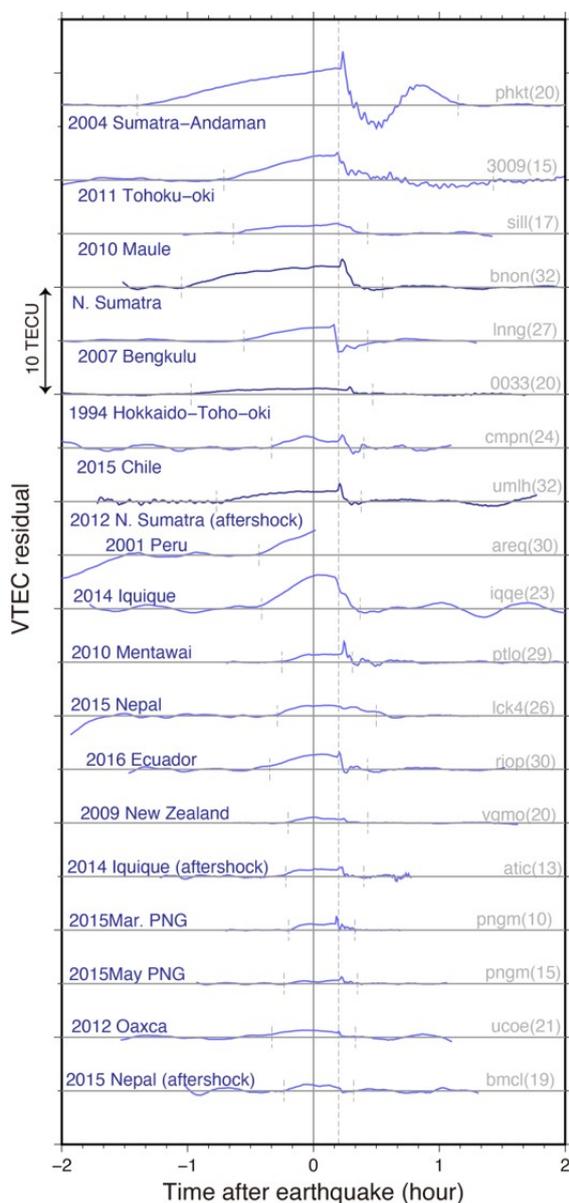


図 2 8 : 図 3 の結果にメンタワイ地震の結果を追加した図。(b)において、メンタワイ地震の結果を矢印で示してある。メンタワイ地震の直前の VTEC 異常は先行時間 (約 15 分)、大きさ (背景 VTEC の約 2%)、波形 (上に凸、急激に増加して飽和する)、の三点で他の事例と調和的である。

また図 2 9 で地震直前の TEC 変化が生じた場所に注目すると、それらは震源近くの陸地の北側に現れたことが分かった。現在想定されている地震直前の TEC 変化のメカニズムで

は、地表面に蓄積した正電荷が作った新たな電場によって電離圏電子が地磁気に沿って移動してきた結果と考えられている (3.3 節参照)。メンタワイ地震は磁気赤道の南で発生しており、その場所での地磁気の向きは北半球と逆に地表から上空に向かって北に向く。そのため、震源の南側に異常が生じる北半球とは逆に、北側に TEC 変化が出現することが期待され、観測結果は予測と調和的であると言える。

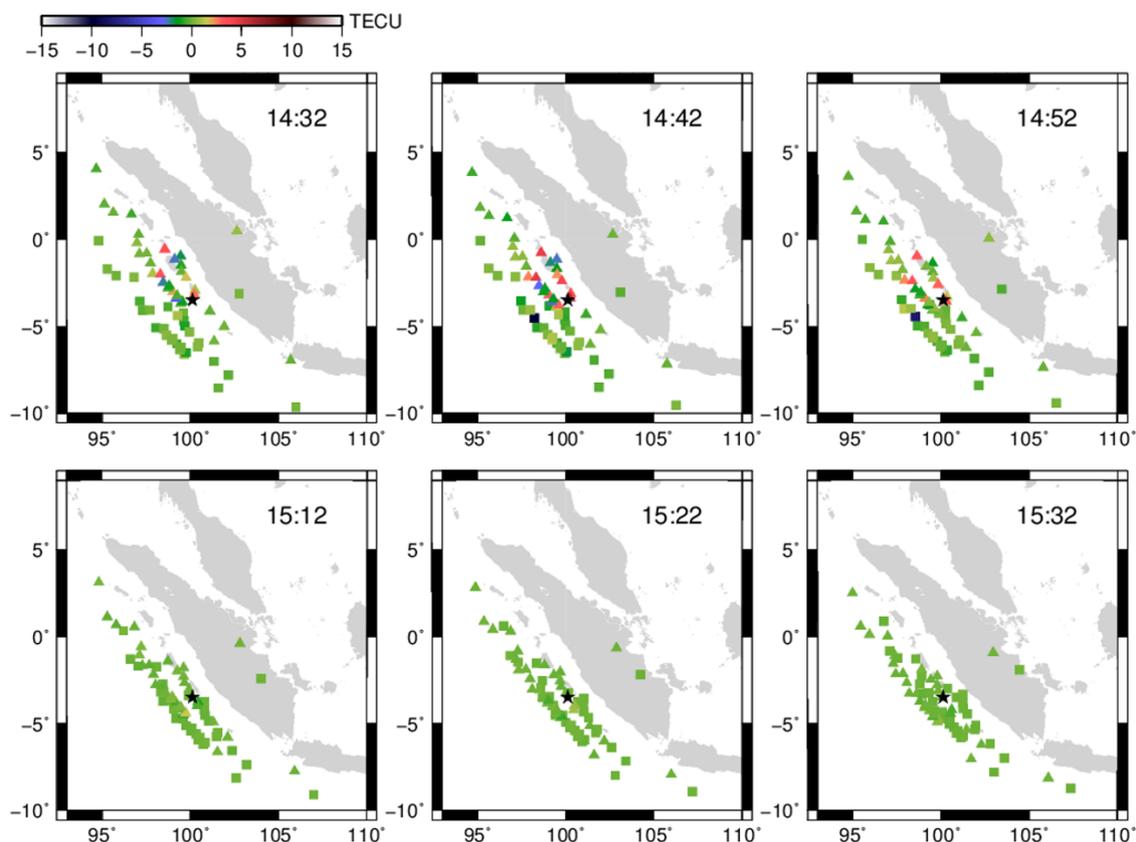


図 2.9 : 25 番衛星(□)と 29 番衛星(△)で観測された地震直前の TEC 変化。各図の右上に時刻(UT)を示す。地震前後に、震源(黒☆)近くの陸域の北側に正の偏差が確認できる。地震発生時刻は 14:42 UT である。

4.3 断層すべり時間を反映した、電離圏の音波擾乱と内部重力波

擾乱の振幅比

メンタワイ地震後の TEC 解析の結果、震源直上の地殻隆起・沈降によって励起された音波の伝搬による電離圏擾乱に加え、この規模の地震では通常信号が弱くて検出できない内部重力波による電離圏擾乱の信号が明瞭に見えることが確認された。この章では、過去の 7 つの比較的規模の大きい地震に関して、地殻の隆起沈降により励起された音波による TEC

変化の振幅 (AW) と、より伝搬速度の遅い内部重力波による TEC 変化の振幅 (IGW) の比 (IGW/AW) を求め、それぞれを比較することで津波地震であるメンタワイ地震の内部重力波の信号が大きいという特殊性を示すことを試みる。

1.2 節で述べたように、地震時電離圏擾乱、CID を引き起こす大気波は 3 種類あり、その伝搬速度と波の周期で区別することができる。メンタワイ地震の IGW が大きかったことを示す為に、本研究ではメンタワイ地震に加え、同地震と同等程度かそれ以上の規模の 6 つの地震について IGW/AW の比較を行った。今回扱った地震の詳細は表 4 に与える。

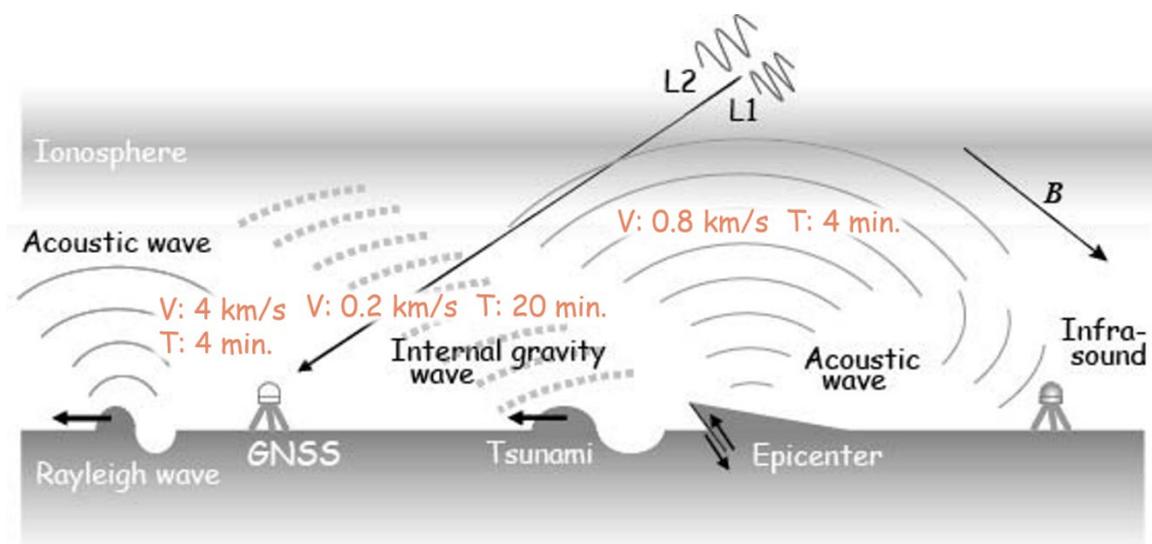


図 3 0 : CID を引き起こす 3 種類の大気波動。図の左側からそれぞれ①表面波(レーリー波)による地表の上下運動起源の音波による擾乱、②津波、または震源近くの地殻上下運動が励起した内部重力波による擾乱、③震源近くの地表の地殻上下変動により発生した音波が起こす擾乱である。赤字でそれらの典型的な伝搬速度と周期を示す。

表 4 : 内部重力波信号の有無に関して議論した 7 個の地震

地震	M _w	内部重力波信号
2011 東北沖地震	9.0	あり
2010 チリ・マウレ地震	8.8	あり
1994 北海道東方沖地震	8.3	あり
2006 千島列島沖地震 (逆断層)	8.2	なし
2007 千島列島沖地震 (正断層)	8.1	なし
2003 十勝沖地震	8.0	あり
2010 メンタワイ地震	7.9	あり

表 4 の地震のうち、最初に 2006・2007 千島列島沖地震について述べる。2006 年の地震

はプレート間逆断層地震として千島海溝で発生し、2007年の地震は海溝海側のアウトターライズにおける正断層地震として発生したものであり、地震後の音波擾乱やレイリー波による擾乱は確認されている。それらの地震について周期10-20分の成分に注目してIGW成分を探したが、確認されなかった(図3 1)。以下ではIGWが確認された5つの地震を取り扱う。

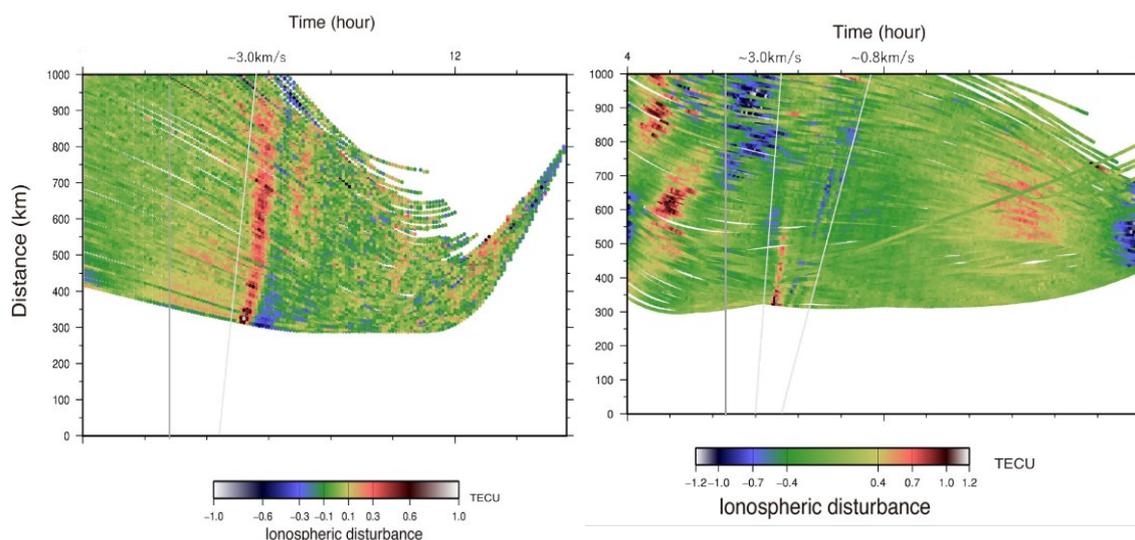


図3 1 : 2006年(左、20番衛星)と2007年(右、1番衛星)の千島列島沖地震の擾乱の伝搬を、横軸に時間、縦軸に震央距離をとって表した図。ウェーブレット変換を用いて取り出した周期12分を中心とした一つの線が衛星と一つの地上局のペアを表し、色がTECの擾乱の大きさを表す。灰色の縦線は地震の発生時刻、擾乱に沿った斜めの線は三種類の波動の伝搬速度を傾きとして描いた線である。図3 0で①と③として示した音波による擾乱は顕著であるが、IGWに相当する信号は不明瞭である。

まず、それぞれの地震のIGWについて第一章図4と同様の方法で解析した。その際にはバンドパスフィルターとしてウェーブレット変換を用い、周期720秒を中心としたIGW成分を取り出している。

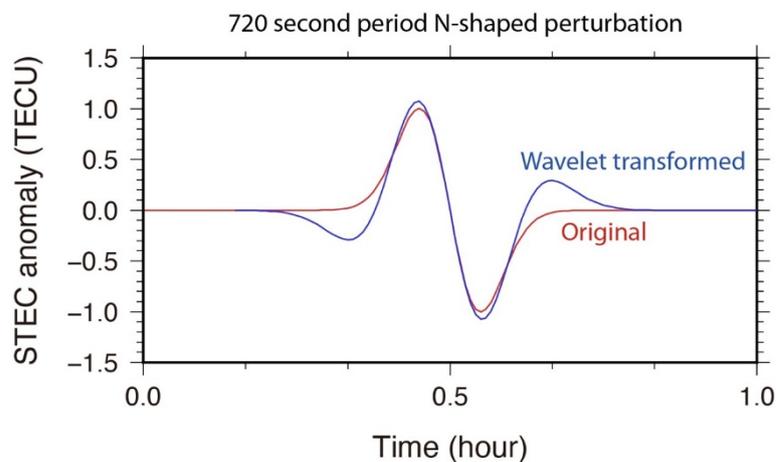


図3 2：周期 720 秒の波（赤）を、同じ周期をもつメキシカンハット型のウェーブレットで変換したもの（青）。ここでは変換後の信号強度が元の振幅を再現するように適当なファクターを掛けている。TEC 時系列から IGW 成分の抽出するためにこのウェーブレットを用いる。

図3 3-3 7は5つの地震のCIDの事例で、それぞれ震源からの距離を縦軸に、時間を横軸にとって TEC 擾乱を色で表した(a)と、衛星と複数の地上観測局とのペアにおける SIP 軌道(黒の曲線)などの情報をまとめた(b)から成る。1.2 節で説明したように、電離圏中を伝搬する音波による電子の振動は磁場に沿って生じるため、見える振幅は視線と波面を貫く角度に依存する。そのため(a)の図のように音波擾乱を距離-時間の図で表す際には、その角度の不連続によって、擾乱を示す直線状の異常に不連続が生じることがある。これを解決するために、大気波の発生中心から見て、ある範囲に指定した方位角の向きに伝搬した波を取り出している。その方位角の範囲は(b)に青い扇形で示してある。

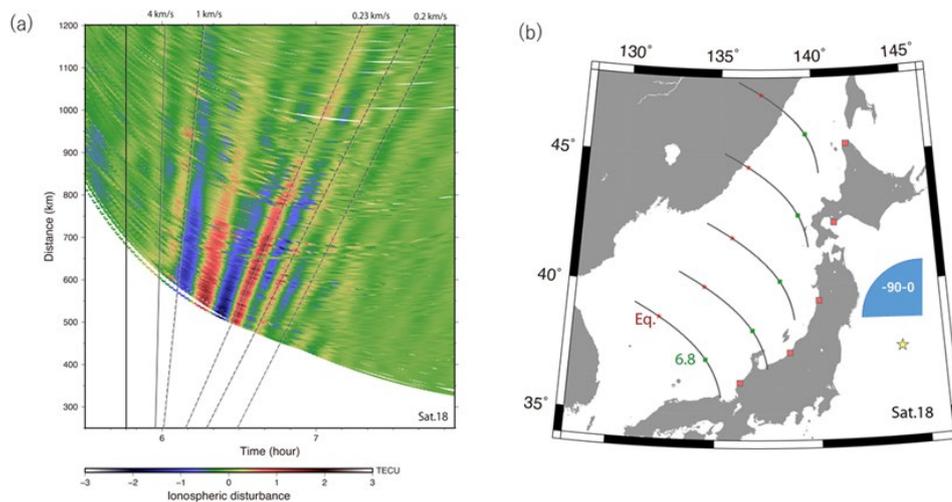


図3 3：IGW 成分を見るためにウェーブレット変換を用いて取り出した周期 12 分を中心とした 2011 年東北沖地震の CID を、震源からの距離を縦軸に、また時間を横軸にとって表した(a)と、衛星と複数地上観測局のペアにおける SIP 軌道(黒の曲線)を地図上に示した(b)で示す。(b)では、震源近くにある大気波動の発生中心を黄色☆でしめす。これは地殻上下変動が最大になる点に相当する。さらに、観測局位置(赤□)、地震時の SIP(赤☆)、IGW 信号が見える頃の時間での SIP(緑□)、取り出した TEC 変化の方位角(青扇形)などの情報が(b)にまとめられている。(a)の黒い縦線は地震の発生時を表し、線状にならぶ赤い色が一つの波動がもたらす電離圏擾乱に相当する。それらに重ね書きした薄い線とその上部に記載してある数字は、波動の伝搬速度に相当する直線の傾きである。

図3 5に示す北海道東方沖地震の例では、三種類の波動による CID がすべて見えている。ここでは、主な研究対象である IGW の信号を効率良く取り出すために、その周期を中心と

したウェーブレット変換を行っている。図3 5の例におけるIGWの信号は、(a)の0.25km/sの線に沿って薄く見える直線状の黄色一赤色の部分である。はっきりした赤色でみえる音波成分に比べて振幅が小さいことがわかる。この事例での振幅は 0.0322 ± 0.0024 TECUであった。

一方、図3 3に示す東北沖地震の事例では、3つのIGWの速度を持つ成分が見えるが、1つ目の擾乱がTEC変化として現れた時間は地震発生後5分であり、中性大気を伝搬してIGWであるとは考えにくい。この1つ目のIGWは、上向きに伝搬するAWが、密度成層した大気を伝搬する過程で内部重力波に変化したものと推測される。本研究では、東北沖地震のIGWの振幅に関しては、2つ目のIGWの速度を持つ波の振幅を取り扱う。

図3 6に示す十勝沖地震の事例では、弱いIGWの信号が見えているが、ところどころで本来直線状に並ぶ異常が直線から少しずれて、かつ振幅が強くなっている見える箇所がある。これは、地震と関係のない西からの移動性擾乱があり、それとCIDが重なったところで二つの波が干渉して振幅が強くなっていると推測される。

ここで注目すべき例は図3 7のメンタワイ地震である。0.8 km/sで伝搬する音波擾乱と変わらない振幅の0.25 km/sで伝搬するIGW成分が顕著に見えている。これはマグニチュードが比較的近い2003年十勝沖地震(図3 6)でIGW成分はほぼノイズレベルすれすれであること、2006/2007年の千島地震では音波成分は明瞭なのにIGW成分が見えないことを考えると特異である。表5に図3 3—3 7で見た5つの地震のIGWの信号強度をまとめて示す。

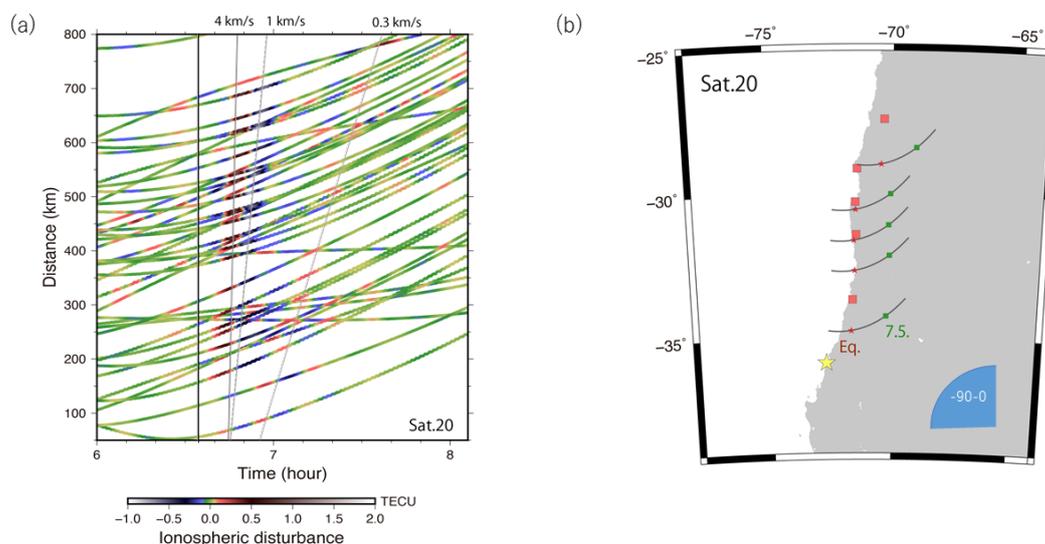


図3 4：2010年チリ・マウレ地震の事例。詳細は図3 3参照。レーリー波や音速で伝搬する強い音波成分に加えて、0.3 km/sで伝搬するIGW成分がかすかだが明瞭に見える。

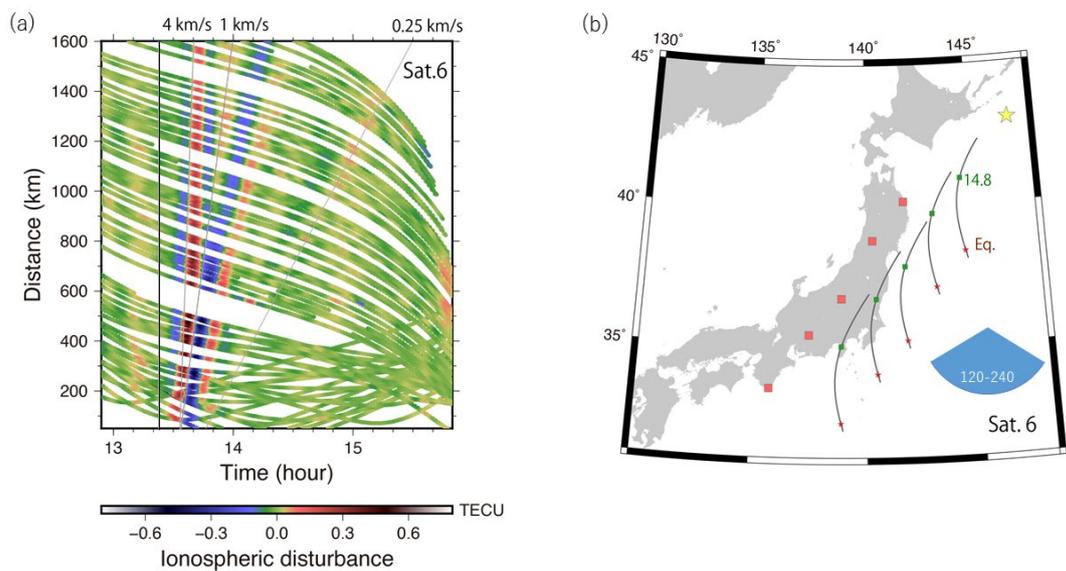


図 3 5 : 1994 年北海道東方沖地震の事例。詳細は図 3 3 参照。あらゆる大気波動の成分が比較的明瞭に見える。

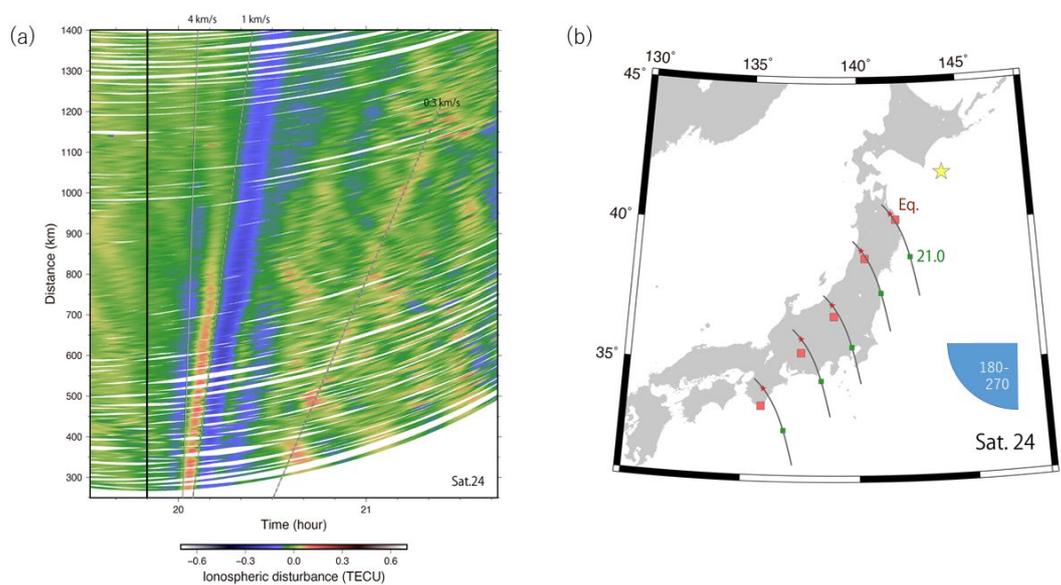


図 3 6 : 2003 年十勝沖地震の事例。詳細は図 3 3 参照。明瞭な音波成分に加えてかすかに IGW 成分が見えるが、左上から右下に延びる別の移動性擾乱と干渉してところどころ振幅が大きくなっている。

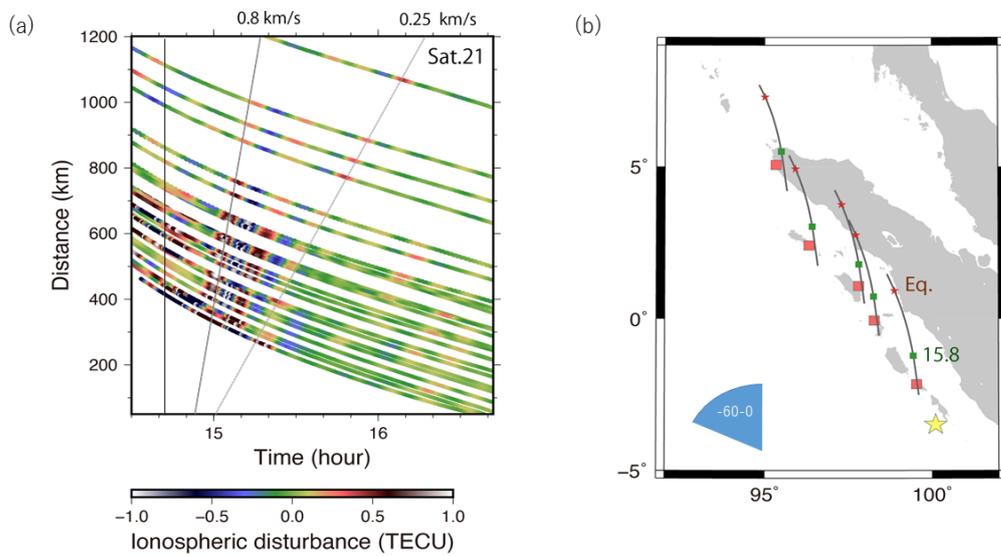


図 3.7 : 2010 年メンタワイ地震の事例。音波擾乱に加えて IGW 成分がはっきり見える点が他の地震と異なっている。詳細は図 3.3 参照。

表 5 : TEC 変化でみた、5 つの地震後の IGW の信号強度

地震	IGW (TECU)
2011 東北沖地震	0.449 ± 0.268
2010 チリ・マウレ地震	0.103 ± 0.012
1994 北海道東方沖地震	0.032 ± 0.002
2003 十勝沖地震	0.031 ± 0.001
2010 メンタワイ地震	0.241 ± 0.042

次に 5 つの地震の AW 成分について表 6 で示す。メンタワイ地震以外の 4 つの地震の AW 成分については Cahyadi and Heki (2015) から引用、メンタワイ地震の AW 成分については 29 番衛星と abgs 局のペアで STEC を観測し、最大振幅を見た結果 3.25 TECU であった。ちなみにこの振幅は Cahyadi and Heki (2015) で示された、CID の AW 振幅 M_w 依存性に関する経験則に誤差の範囲内で一致し、5 つの地震の AW/IGW を比較する際の妥当性が担保されることになる。

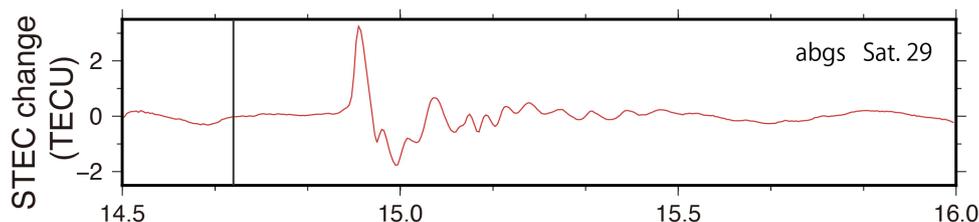


図 3 8 : メンタワイ地震の CID 時系列。abgs 局と GPS 衛星 29 番の組み合わせ。

表 5 に図 3 3 から図 3 7 で見た 5 つの地震の IGW の信号強度をまとめて示す。

表 6 : TEC 変化でみた、5 つの地震に伴う AW の信号強度 (STEC)

地震	IGW (TECU)
2011 東北沖地震	4.22
2010 チリ・マウレ地震	2.44
1994 北海道東方沖地震	0.68
2003 十勝沖地震	0.77
2010 メンタワイ地震	3.25

異なる地震で地震時電離圏擾乱の振幅を比較する場合、通常は背景 VTEC を求め、それに対する割合として表すことが多い。しかし、今回は同じ地震における音波擾乱(AW)と内部重力波擾乱(IGW)の振幅比(IGW/AW)を議論するため、基本的にそれらは不要である。ただし、それら二種類の擾乱の到達時刻には差があるため、夜明けや夕方など VTEC の時空間変化が大きき場合には背景 VTEC の差を考慮する必要がある。

また AW に関して、1.2 節で説明したように波面は球面波に近い形で伝搬し、電離圏に到達すると電子は地磁気拘束された運動をする。そのため、磁場に水平な視線方向から観測すると移動した電子による正と負の TEC 変化を貫くことになり見かけ上擾乱が消えてしまう。結局 AW の振幅を見るには、波面が磁場と直行するところで、波面と水平でかつ磁場に垂直な衛星視線でみた TEC が最大振幅を与えることになる。この研究ではなるべくその条件にあう衛星-地上局のペアを用いて AW の振幅を求めた。

表 7 : TEC 変化でみた、5 つの地震後の AW の信号強度

地震	AW 観測時のバックグラウンド TEC (TECU)	IGW 観測時のバックグラウンド TEC (TECU)	IGW 観測地での地磁気伏角 (degree)
2011 東北沖地震	27.5	23.3	51.0
2010 チリ・マウレ地震	4.2	4.1	- 37.1
1994 北海道東方沖地震	13.7	14.0	56.9

2003 十勝沖地震	10.6	15.0	56.0
2010 メンタワイ地震	29.0	24.9	-24.7

一方、IGW の場合、波面はどこでも水平であるから、中性大気の少ない電離圏では地磁気の伏角によって移動できる電子が制限されてしまう（地磁気の向きが鉛直からずれていると振幅が小さくなる）。このため、IGW の強度を考える際には、伏角の余弦で振幅を割ることによって磁場が鉛直方向であった場合の振幅に換算した。

表 7 にこれらの補正に関する情報として、それぞれ AW と IGW を観測した時間での背景 VTEC と、観測地での伏角をまとめた。なお、VTEC は GIM から読み取った。北海道東方沖地震の日の GIM は 1994 年当時それらが作成されていないため、手に入らなかった。ここでは中緯度では夜の TEC の値は安定していることを考慮した上で、十勝沖地震の日の GIM を使用した。補正を行って IGW/AW の値を比較した結果を図 3 9 に示す。

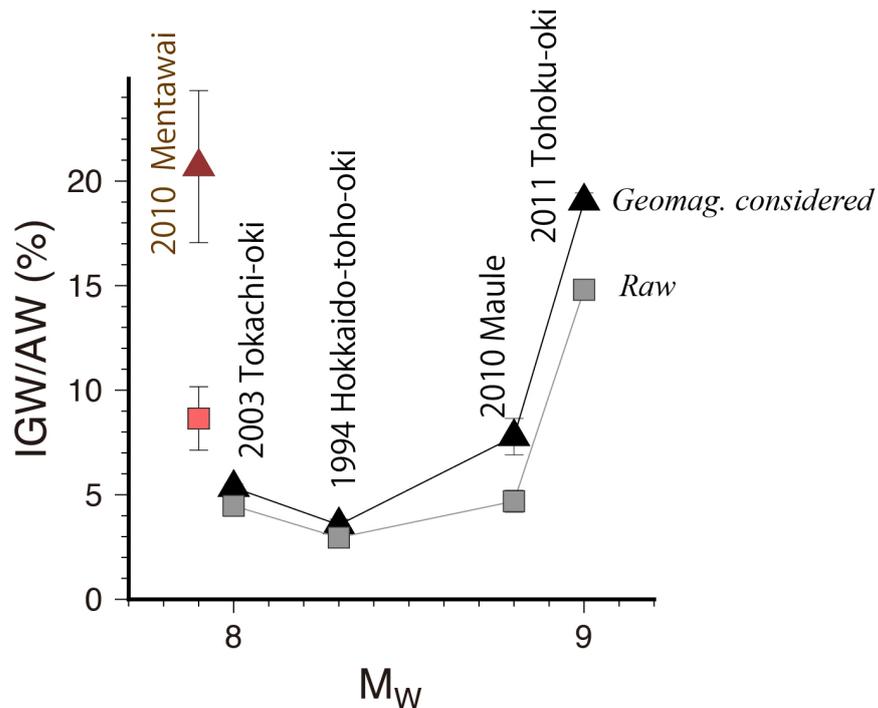


図 3 9 : 5 つの地震での IGW/AW 値。地磁気伏角補正前の IGW/AW 値を四角で、補正後の IGW/AW 値を三角形で示す。赤色でしめした 2010 年メンタワイ地震のみが津波地震であり、あとの 4 つの地震は通常地震である。この図から (1) 一般的に大きな地震ほど IGW/AW 比が大きくなる、(2) 津波地震であるメンタワイ地震のみ地震の規模に似合わない異常に大きな IGW/GW 比を示す、という二点が見て取れる。

図 3 9 でわかる顕著な結果の一つは、大きな M_w の地震ほど大きな IGW/AW を示すことである。このことは、大きな地震であればあるほど断層すべりに時間がかかるので、AW よ

り周期の長い IGW が励起されやすくなることを反映していると考えられる。これは固体地球を伝搬する地震波でも大きな地震ほど低い周波数の成分を大きく含むことと同じ理由によるものである。さらに、Mw7.9 のメンタワイ地震が Mw9 クラスの地震に匹敵する異常に大きな IGW/AW を示していることが分かる。これは津波地震の特徴であるゆっくりしたすべり速度（長い断層すべり継続時間）を反映したものであると考えられる。実際、図 40 に示す各地震の震源時間関数を見ると、断層のすべり時間が長い地震が大きな IGW を励起するという本研究の結果と整合的なものであることが確認できる。

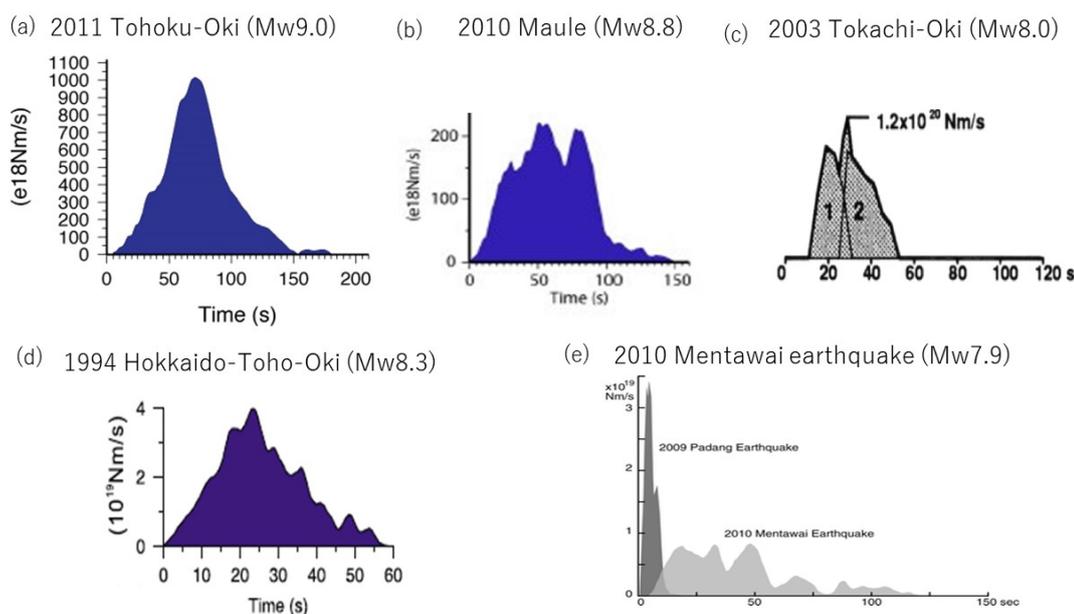


図 40：各地震の事例での震源時間関数。(a)東北沖地震(Yagi & Fukahata, 2011)、(b)チリ・マウレ地震(Pulido et al., 2011)、(c)北海道東方沖地震(Kikuchi & Kanamori, 1995)、(d)十勝沖地震(Yagi, 2004)、(e)メンタワイ地震(Satake et al., 2013)

5 おわりに

3章では、日本全国の地磁気偏角の変化を緯度の関数として表現する事によって、東北沖地震直前の TEC 変化によって震源の南西側の観測局での地磁気偏角が変化していた可能性を示した。また、オーロラジェット電流による地磁気変化があったことも確認された。オーロラジェット電流の影響が非常に大きく、観測され得る変化が非常に小さいものであるため、地震直前の TEC 変化による地磁気変化を確認してその地域性を見るには難しい条件であった。過去の地磁気静穏日に発生した巨大地震直前の地磁気の詳細なデータが存在し、かつそこから日周変化による変化を差し引くことができれば地震直前の TEC 変化による地磁気擾乱が確認できるかもしれない。実際 1960 年のチリ地震直前の地磁気変化について調べた結果、CID に伴うと思われる地震時の変化は確認することができた。しかし地震前の変

化については、近傍の観測局のデータがないため日周変化の影響を上手く差し引くことができず、前兆を確認することはできなかった。このように様々な自然条件や観測局の条件によって、地震直前の地磁気変化の確認は難しいものとなっている。しかし、逆に言えば条件が偶然にそろうことがあれば簡単に確認が可能であると言えるだろう。

4章では、メンタワイ地震直前の TEC 変化が確認されたことを述べた。TEC 変化は M_w 依存性から予測された“変化開始の先行時間”と“変化の大きさ”を調和的であった。またその TEC 変化の起こった位置は、震源近傍の陸地に発生した電荷が地磁気に沿って電子を移動させたというモデルで説明可能なものであった。また、メンタワイ地震後に観測された内部重力波起源の TEC 擾乱が M_w の割に非常に大きいことも確認された。このことは地震時に励起される大気波である音波と内部重力波の振幅比を他の地震と比較することで確認された。典型的な津波地震とされるメンタワイ地震のゆっくりした断層すべりによって、音波より周期の長い内部重力波が励起されやすいことを反映していると考えられる。また大きな地震ほど音波に対する内部重力波の振幅比が大きいことも確認された。この結果も、より長い断層すべり時間が周期の長い大気波動を選択的に励起した結果であると考えられる。

第3章で述べた巨大地震直前の地磁気変化と、4章で議論した津波地震の内部重力波による TEC 擾乱は、条件に合う解析が可能な地震の事例が少ないため、議論の余地が残る結果となった。しかし、いずれもほぼ前例のない初めての研究であり、それぞれの現象の物理的なメカニズムを考慮することによって観測事実を理解できたことは重要であるだろう。

6 謝辞

本研究は、周りの方々のご協力があり達成することができました。研究室の方々をはじめ、学会等で交流させて頂いた方、日常でお世話になった方、ありがとうございます。

特に、指導教官である日置幸介教授には多大なご指導ご鞭撻を賜りました。学部4年生で研究室には属された当時、地震直前の TEC 変化という最先端のテーマを選択させて頂き、ほとんど研究について何もわからないような私に対して丁寧に、かつ的確に指導してくださいました。修士の2年間では多くの学会に参加させていただき、研究に対する理解が深まりました。日置教授の指導がなければ本当に何もできなかったのではないかと感じるほどです。

また、ゼミ発表の際には宇宙測地学研究室の古屋正人教授、高田陽一郎准教授、そして地震学研究室の蓬田清教授、吉澤和範准教授にも大変お世話になりました。自分の発表に対する的確な指摘や、他研究領域の視点による意見は、研究を進め考察を行う上で大変な参考になりました。

そして宇宙測地学研究室、地震学研究室の先輩、同輩、後輩にもお世話になりました。特に先輩方には、コンピューターの使い方からプログラミングまで、自分が困った時には優しく教えて頂きました。同輩、後輩にも研究室で過ごす日常生活において大変お世話になりました。今年度は特殊な状況下で、なかなか研究室に行くことは叶いませんでしたが、元気に過ごせたのは皆さんのおかげだと思っています。

また、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。また、地磁気データについては京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センターから提供していただきました。

この場をお借りしまして、皆様に心より感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

7 参考文献

- Ebihara, Y. and T. Tanaka (2016), Substorm simulation: Quiet and N - S arcs preceding auroral breakup. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 121, Issue 2, doi: 10.1002/2015JA021831
- 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. and J.S. Ping (2005), Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236 845-855, doi: 10.1016/j.epsl.2005.06.010
- 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
- Kamogawa, M. and Y. Kakinami (2013), Is an ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-oki earthquake a precursor?, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 1– 4, doi:10.1002/jgra.50118
- Kikuchi, M. and H. Kanamori (1995), The Shikotan earthquake of October 4, 1994: Lithospheric earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1025-1028, doi: 10.1029/95GL00883
- Masci, F., J. N. Thomas, F. Villani, J. A. Secan, and N. Rivera (2015), On the onset of ionospheric precursors 40 min before strong earthquakes, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 1383–1393, doi:10.1002/2014JA020822
- McPherron, R., C. Russell, and M.P. Aubry (1973), Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968. IX - Phenomenological model for substorms.
- Muafiry, I.N. and K. Heki (2020), 3D tomography of the ionospheric anomalies immediately before and after the 2011 Tohoku-oki (Mw9.0) earthquake, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 125, e2020JA027993, doi:10.1029/2020JA027993
- Pulido, N., Y. Yagi, H. Kumagai, and N. Nishimura (2011), Rupture process and coseismic deformations of the 27 February 2010 Maule earthquake, Chile, *Earth, Planets and Space*, 63, 955–959. doi: 10.5047/eps.2011.04.008
- Rideout, W., and A. Coster (2006), Automated GPS processing for global total electron content data, *GPS Solutions*, 10, 219–228, doi:10.1007/s10291-006-0029-5
- Satake, K., Y. Nishimura, P.S. Putra, A.R. Gusman, H. Sunendar, Y. Fujii, Y. Tanioka, H. Latief, and E. Yulianto (2013), Tsunami Source of the 2010 Mentawai, Indonesia Earthquake Inferred from Tsunami Field Survey and Waveform Modeling, *Pure Appl. Geophys.* 170, 1567–1582, doi: 10.1007/s00024-012-0536-y

- Tanaka, T. (2015) Substorm auroral dynamics reproduced by the advanced global M-I coupling simulation, in Auroral Dynamics and Space Weather, Geophys. Monogr. Ser., 215, 177-190, doi: 10.1002/9781118978719.ch13
- Yagi, Y. (2004), Source rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake determined by joint inversion of teleseismic body wave and strong ground motion data, Earth Planets Space, 56, 311–316, doi: 10.1186/BF03353057
- Yagi, Y. and Y. Fukahata (2011), Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release, Geophys. Res. Lett., 38, L19307, doi: 10.1029/2011GL048701
- 小原隆博(2006)、小特集 宇宙天気予報 5. 磁気圏プラズマ、J. Plasma Fusion Res. Vol.82, No.11 (2006) 756-761
- 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/>

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/>

京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index-j.html>