平成 25 年度年次報告

課題番号：1005

（１）実施機関名：

北海道大学

（２）研究課題（または観測項目）名：

地震に関連する電磁気現象の観測研究

（３）最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

（3） 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

（3-1） 地震発生先行過程

ア． 観測データによる先行現象の評価

（４）その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

（2） 地震・火山噴火に至る準備過程

（2-1） 地震準備過程

ウ． ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

（3） 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

（3-1） 地震発生先行過程

イ． 先行現象の発生機構の解明

（５）本課題の５か年の到達目標：

地震発生時やそれに先行する電磁気現象が世界各地で観測されているが、そのメカニズムを説明する物理的なモデルは、いろいろ提案はされてはいるが、検証されたものはほとんどない。本研究では、北海道地域を中心に以下の観測研究を行い、それぞれの電磁気現象発生のメカニズムを説明するモデルの構築をめざした観測研究を行う。これまでの観測実績を考慮して、以下の４項目について観測研究を進める。

A. ＵＬＦ帯で電磁気現象

この現象は、地表で地磁気や地電位の変動を観測することにより行うが、その発生メカニズムとしては、震源域での流体の移動による比抵抗変化または流動電位や結晶破壊による異常電界の発生が考えられている。どちらにしても震源のある地下数 km －数十 km で起こる異常が地表で観測可能な変化として検出されるかが最大の問題である。特殊な比抵抗構造に対しては、地表に大きな変動が引き出される可能性もあるので、震源域の比抵抗構造も観測して、その特徴を明らかにするとともに異常の伝播モデルの解明を目指す。

B. 電波伝播異常

VHF 帯の電波が見通し外に伝播する現象が地震に先行して起こることが内外で観測されている。北海道大学でも 2002 年から道内の地震頻発地域で観測開始している。これまでは、異常の検出の有無を統計的に見てきたが、次期計画では見通し外に伝播させる散乱体の検出、その直下の地表での地電位

変動観測、大気電場観測により、地表の変動が空間の電波伝播に与えている影響を重点的に観測することにより、伝播異常と地震との関連を説明するモデルの提案をめざす。

C. 電離圏との相互作用

地震時あるいはその先行現象として、電離圏にも異常が生じることが観測されている。電離圏の変動過程は非常に複雑で安易に地表の現象とのカップリングがあるかどうかを議論することは難しいが、GPS 衛星を使った TEC（総電子数）観測等電離層の状況をモニタリングする観測も可能となったので、このような観測により大地震と電離層の変化との相互作用について調べる。

D. 応力変動による地磁気変化

いわゆる圧磁気効果により、地下の応力変化が地磁気の変化となって観測される可能性が指摘され、その観測可能性についてモデルシミュレーションも行われている。その結果によると、地下の磁化強度分布が観測変化量を左右していることが分かってきた。従って、構造を知った上で、震源付近での応力変化どのようなパターンで観測されるのかモデル計算を中心に研究を進める。

（６）本課題の５か年計画の概要：

平成 21 年度においては、

A. 道東地域での地磁気、地電位の観測は引き続き行い、地震活動に伴う変動の観測を行う。また、道北、えりも、弟子屈地域等の比抵抗構造について検討を行い、地震発生地域の比抵抗構造について議論する。

B. 日高、道東地域における VHF 帯電波伝播異常観測は継続し、散乱体の方位の探知をめざすとともに伝搬メカニズムのモデル計算を試みる。また、道北地域に観測点を設置する。

C. 地震に伴う電離層総電子数（TEC）の変化や大気圏での変化を GPS 衛星データを用いて調べる。

D. 道東で行っている地磁気変動観測を継続すると共に、A. の地磁気観測で行っている 3 成分地磁気の変化についても検討を行う。また、地磁気の絶対値測定を行う。

平成 22 年度においては、

A. 道東地域での地磁気、地電位の観測は引き続き行い、地震活動に伴う変動の観測を行う。また、地震発生地域の比抵抗構造について検討を行う。

B. 日高、道東、道北地域における VHF 帯電波伝播異常観測は継続し、伝搬メカニズムの解明を試みる。

C. 地震に伴う電離層総電子数（TEC）の変化や大気圏での変化を GPS 衛星データを用いて調べる。

D. 道東で行っている地磁気変動観測を継続すると共に、A. の地磁気観測で行っている 3 成分地磁気の変化についても検討を行う。地磁気の絶対値測定を行う。

平成 23 年度においては、

A. 道東地域での地磁気、地電位の観測は引き続き行い、地震活動に伴う変動の観測を行う。また、地震発生地域の比抵抗構造について検討を行う。

B. 日高、道東地域における VHF 帯電波伝播異常観測は継続し、散乱体の方位の探知をめざすとともに伝搬メカニズムの解明を試みる。

C. 地震に伴う電離層総電子数（TEC）の変化や大気圏での変化を GPS 衛星データを用いて調べる。

D. 道東で行っている地磁気変動観測を継続すると共に、A. の地磁気観測で行っている 3 成分地磁気の変化についても検討を行う。また、地磁気の絶対値測定を行う。

平成 24 年度においては、

A. 道東地域での地磁気、地電位の観測は引き続き行い、地震活動に伴う変動の観測を行う。また、地震発生地域の比抵抗構造について検討を行い、それらのデータを基に地震に伴う地磁気、地電位変化の可能性について議論する。

B. 日高、道東地域における VHF 帯電波伝播異常観測は継続し、伝搬メカニズムの解明を試みる。

C. 地震に伴う電離層総電子数（TEC）の変化や大気圏での変化を GPS 衛星データを用いて調べる。

D. 道東で行っている地磁気変動観測を継続すると共に、A. の地磁気観測で行っている 3 成分地磁気の変化についても検討を行う。また、地磁気の絶対値測定を行う。

平成 25 年度においては、

A. 道東地域での地磁気、地電位の観測は引き続き行い、地震活動に伴う変動の観測を行う。また、地震発生地域の比抵抗構造について検討を行い、それらのデータを基に地震に伴う地磁気、地電位変化の可能性について議論する。

B. 日高、道東地域における VHF 帯電波伝播異常観測は継続し、伝搬メカニズムの解明を試み、その地震予知への適用性について検討する。

C. 地震に伴う電離層総電子数（TEC）の変化や大気圏での変化を GPS 衛星データを用いて調べ、地震予知への適用性について検討する。

D. 道東で行っている地磁気変動観測を継続すると共に、A. の地磁気観測で行っている 3 成分地磁気の変化についても検討を行う。データを基に応力蓄積過程の解明の可能性について議論する。

（７）計画期間中（平成 21 年度～25 年度）の成果の概要：

A. ULF 帯で電磁気現象

1. 津波に伴う地電位変動

道東地域において、地磁気地電位変動観測を継続してきた。研究期間中に発生した東北太平洋沖地震に伴い、津波が北海道東部地域にも達し、それに伴う地電位変動が観測された。えりも観測点では、地震波到着時には地磁気、地電位の変動が観測され、また、潮位計で観測された潮位の変動と相関のある地電位変動が観測された（図１）。この変動や潮位の変動が大きかった第 1 波到達後 20 時間ほど継続して観測された。2 方向の地電位変動を基に電流の流れた方向を推定すると、津波の到来方向と直交していることが分かった。このような変化は、海岸にある厚岸や根室観測点でも観測された。

2. 地震発生域での比抵抗構造

地震発生地域の比抵抗構造を調べ、その特徴を明らかにするとともに地震発生時前後の比抵抗構造の変化を検出する可能性について調べるために、2003 年十勝沖地震の震源域を含む日高山脈南部での 3 次元比抵抗構造を求めた。MT 法による観測は 2004 年に行われたが、本研究期間中に 3 次元インバージョンにより比抵抗構造を求めた。3 次元比抵抗構造を得るためには、海の影響やモデルのグリッドの方向等の影響の検討も行った。日高山脈の直下では、日高衝上断層直下のプレートの上面付近で地震が頻発するところがあるが、そこから地表浅部に達する柱状の低比抵抗域があることが示された（図 2）。この地域で行われた地震波トモグラフィー (Kita et al, 2010) により得られた S 波速度構造と比較したところ、日高山脈の地殻に分布する低速度域の東端に位置していることが分かった。このようすから低比抵抗域は、千島弧と東北日本弧の衝突域に破砕域が生じ、深部から流体が供給される通路となっている可能性が指摘できる。

B. VHF 帯電波伝播異常

1. 統計的考察

VHF 帯の電波が見通し外に伝播する現象が地震に先行して起こることが内外で観測されている。北海道大学でも 2002 年から道内の地震頻発地域で観測開始している。これまでは、異常の検出について特有の異常を探してきたが、結局、いろいろなタイプの変化があることがわかってきたので、統計的に先行現象としての発生確率調べてみた。広尾町 FM 放送局からの電波を日高山脈の反対側にあるえりも町で、2012 年 6 月から 2013 年 12 月までの間に観測された電波強度のデータを対象とした（図 3）。その間データ全体の中央値からの標準偏差 σ を基準に一定以上大きな強度を閾値として、それ以上の強度で観測されたものを異常と定義し、その異常が 10 分以上継続するものについて、地震発生との関係を調べた。限られた期間でのデータであるが、異常の閾値を大きくすると空振りは少なくなるが見逃がしは多くなる傾向後見られ、地震との関連を議論する基礎データが得られた（表 1）。また、現段階では、夏季におけるスポラディック E 層や雷の影響などものぞいていないので、そういうノイズを合理的に除く方法についても今後研究を進める必要がある。

2. 電波伝搬異常発生メカニズム

地震に先行する VHF 電波伝播異常のような大気圏での異常や電離圏での電子密度異常が発生するメカ

ニズムについては、Pulinet and Ouzounov(2011) によるラドン仮説がある。その仮説によると、地震の準備過程で発生するラドンガスが大気と反応することにより、帯電エアロゾルのような電波散乱性物質を生じ、それに伴い大気電場が変化すると考えられている。そのような変化が VHF 伝播異常と関連するかどうかを調べるために、道東地域の弟子屈美留和、根室市別当賀、落石および日高地域の広尾、えりもの観測点において、VHF 電波伝播異常観測とフィールドミルによる大気電場との同時観測を行った。その結果、明瞭なものは数例ではあるが、電波伝播異常と大気電場変動に相関がみられた（図 4）。

また、えりも地域では近接した 4 地点で電波伝播異常観測を行ったところ、一例として、地震の 4 日前に観測された異常は、それぞれの観測点で少し時間がずれて異常が発生していて、一定の方向に散乱体が移動していったと考えてもよいデータが得られた（図 5）。このようなデータを集めることにより電波伝播異常の発生メカニズムについての議論が可能となろう。

C.GPSTEC（電離圏総電子数）の観測

1. 直前に起こった電離圏全電子数の正の異常

2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) に際し、地震約 40 分前から震源域上空の電離圏で最大一割近くに達する全電子数 (TEC) の正の異常が観測された（図 6、Heki, 2011)。これは我が国に多数展開された全地球測位システム (GPS) のキャリア位相差の時系列から得られたもので、データの入手と解析はともに簡単で追試が容易である。今回注目したのは、地震の約 40 分前に始まって地震波が電離圏に到達するまで継続する TEC の正異常である。異常分は地上局と衛星を結ぶ視線ベクトルが電離圏の最大電子密度高度 (約 300 km) を貫く点 (その地上投影点を SIP と呼ぶ) が震源上空にある GPS 点で大きく (鉛直 TEC で 2TECU 程度)、震源から離れるに従って小さくなる。また震源から十分に離れた電離圏では逆に TEC の負異常が見られる。なお TEC 異常は CID が治まった後に元にもどっている。このような地震直前の TEC 変化に関して、地震に伴う異常部分 (UT5.2-6.0) を除いて推定したモデルからの差を鉛直 TEC の異常に換算すると、地震直前の時点で明瞭な正の TEC 異常が震源近傍上空に分布している。同様の前兆変化は 2010 年 2 月のチリ地震、2004 年 12 月のスマトラ地震、および 1994 年北海道東方沖地震においても見出されており、巨大地震に普遍的なものである可能性が高い。

2. 東北地方太平洋沖地震後の Total Electron Content（TEC）変動について

2011 年 3 月 11 日に発生した東北太平洋沖地震は巨大な津波を引き起こした。この津波は東北地方太平洋沿岸に押し寄せるとともに、強い大気波動を励起した。その波動は熱圏まで到達し、電離圏プラズマの擾乱を引き起こした。この様子は Global Positioning System （GPS）を用いて観測された Total Electron Content （TEC）を用いた観測で数々報告されている。津波によって励起された音波が電離圏に到達し、鋭い TEC 上昇を見せたのち、海面・地面と上層大気の間で共鳴を起こし、一定周期の変動を見せる一方、全く上昇を伴わず、TEC 減少から変動が開始する現象も見つかった（図 7、Kakinami et al., 2012)。それに引き続いて、津波発生領域上空を中心とした半径 100 km の範囲で数 TECU 程度の TEC 減少していることが分かった。同様の TEC 減少が 2004 年スマトラ島沖地震と 2010 年チリ地震でも見つかった。一方で、これらの現象は津波の発生していない 1999 年台湾チチ地震では現れなかった。以上のことから津波発生後に見られる現象であると考えられ、津波の早期警報に役立てられると期待される。

なお、１と２は同じデータで異なる解析結果が得られたものであり、地震前の TEC 増加を異常とみるか、地震後の TEC の減少を異常とみるか論争が続いている。

3. 地震に伴って発生する電離圏電子密度異常の伝搬

2011 年東北太平洋沖地震に伴う地震時の電離圏異常（Coseismic ionospheric disturbances 略して CIDs) について GPSTEC と地震波データを用いて調べた。速度約 3km/s で伝播する高速 CID は西から南西方向だけにみられ、速度約 1.2km/s で伝播する低速 CID は、津波ソースから同心円状に広がっている（図 8)。伝播速度や振動数を考えると、高速 CID は Rayleigh 波によるものであり、低速 CID は音波や重力波に伴うものであると考えられる。Rayleigh 波に伴う CID の伝播の南北非対称性は、Rayleigh 波が音波の点震源としてふるまっているものではないことを示唆する。したがって、重なり合った音波

の wave front は Rayleigh 波によって励起されたものであり、高速 CID の伝播の南北非対称性は地磁気の伏角の影響によると考えられる。

D. 道東地域での地磁気観測

道東地域にある 8 地点の磁気点では、1970 年代より地磁気強度の繰り返し測定、1994 年から連続測定を行ってきているが、2009 年からは地磁気三成分絶対観測を実施している。2011 年までに、既設の 8 箇所の磁気点すべてにおいて絶対観測を実施した。この観測は、地磁気観測所の協力を得て、偏角、伏角の観測には地磁気観測所所有の FT 型磁気儀を使用し、全磁力の観測には絶対観測点、参照点とも北海道大学所有のオーバーハウザー磁力計 (OHM) を使用した。絶対観測点と参照点との全磁力地点差は、FT 型磁気儀での観測前後に OHM を用いて観測した。

この結果を用いて、各磁気点の地磁気偏角・伏角の違いに起因する見かけの全磁力永年変化（オリエンテーション効果）を見積もり、観測された永年変化にどの程度見かけの変動が混入しているかを議論した（図 9)。その結果、地点によっては、参照点である女満別の伏角・偏角との間に大きな隔たりがあり、オリエンテーション効果は無視すべきでないことが明らかになった。ただし、推定されたオリエンテーション効果は、実際に観測されてきた永年変化の傾向とは逆センスであり、この効果を補正すると、実際の永年変化場は、補正前に比べて若干大きいものと考えられた。また、全磁力 F は 2010 年から 2 年間で 60〜100nT 程度大きくなっており，その間水平成分はあまり変化しておらず、その増加は主に伏角が増加し z 成分が大きくなったためであることがわかった。このような観測を続けていくことにより，磁場の変化のようすが詳細に示され，プレート運動による地殻中での応力に変化に伴う応力磁気効果仮説の検証に貢献できると考えられる.

参考文献

Kita et al. 2010, EPSL

Pulinet and Ouzounov, 2011, J. Asian Earth Science.

Heki, 2011, GRL

Kkinami, et al., 2012 GRL

（８）平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

Kakinami, Y., M. Kamogawa, S. Watanabe, M. Odaka,3 T. Mogi, J. Y. Liu, Y. Y Sun and T. Yamada, 2013, Ionospheric ripples excited by superimposed wave fronts associated with Rayleigh waves in the thermosphere, J. Geophys. Res., DOI 10.1002/gra50099.

Moriya, T., T. Mogi, H. Yamashita, I. Yamamoto and M. Sato, Quantitative characteristics of anomalous VHF transmissions as an earthquake precursor in the Hidaka mountain range, Hokkaido, Japan Earthquake Prediction Studies: Seismo Electromagnetics, edited by M. Hayakawa, TERRAPUB, 101-112, 2013

Ichihara, H, T. Mogi, K. Tanimoto, Y. Yamaya, T. Hashimoto, M. Uyeshima and Y. Ogawa, 3-D electrical resistivity models in the Erimo area, southern central Hokkaido, Extended Abstract, 5th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics, Sapporo, Japan, May 7-9, 2013

Mogi, T., Y. Kakinami and T. Moriya, Atmospheric and ionospheric phenomena appeared in the VHF-band radio-wave anomalous transmission beyond the line of sight, AGU fall meeting, December 2013,

（9）実施機関の参加者氏名または部署等名：

北海道大学理学研究院　6 名

総括　茂木透

ULF 電磁場観測；茂木透、高田真秀

VHF 電波伝播観測：森谷武男、茂木透、渡部重十、高田真秀

電離層変化観測：日置幸介、渡部重十

地磁気変動観測：橋本武志、茂木透、高田真秀

他機関との共同研究の有無：有

東京大学地震研究所：上嶋誠、京都大学防災研究所：大志万直人、九州大学理学研究院：湯元清文、東海大学海洋学部：長尾年恭、千葉大学理学研究科：服部克己

（10）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター
電話：011-706-4679
e-mail：mogitisv@mail.sci.hokudai.ac.jp
URL：http://www.sci.hokudai.ac.jp/grp/isv/isv-web/

（11）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：茂木透
所属：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

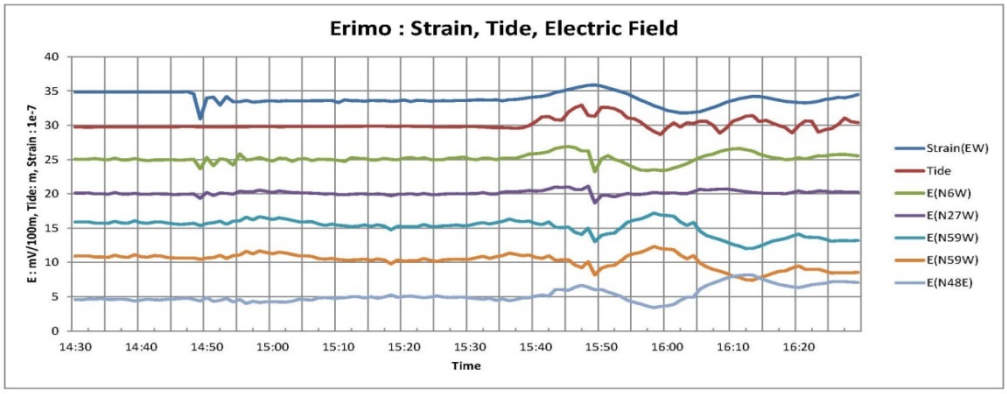

図１．2011 年 3 月 11 日の津波到達時の東西方向のひずみ、潮位、地電位の変動

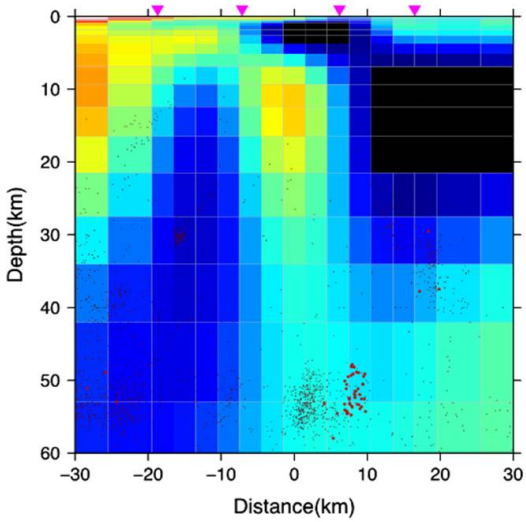

図２．日高山脈地域の比抵抗構造
広尾～えりもを結ぶ北東（右）ー南西（左）方向の断面。ドットは地震の震源分布。

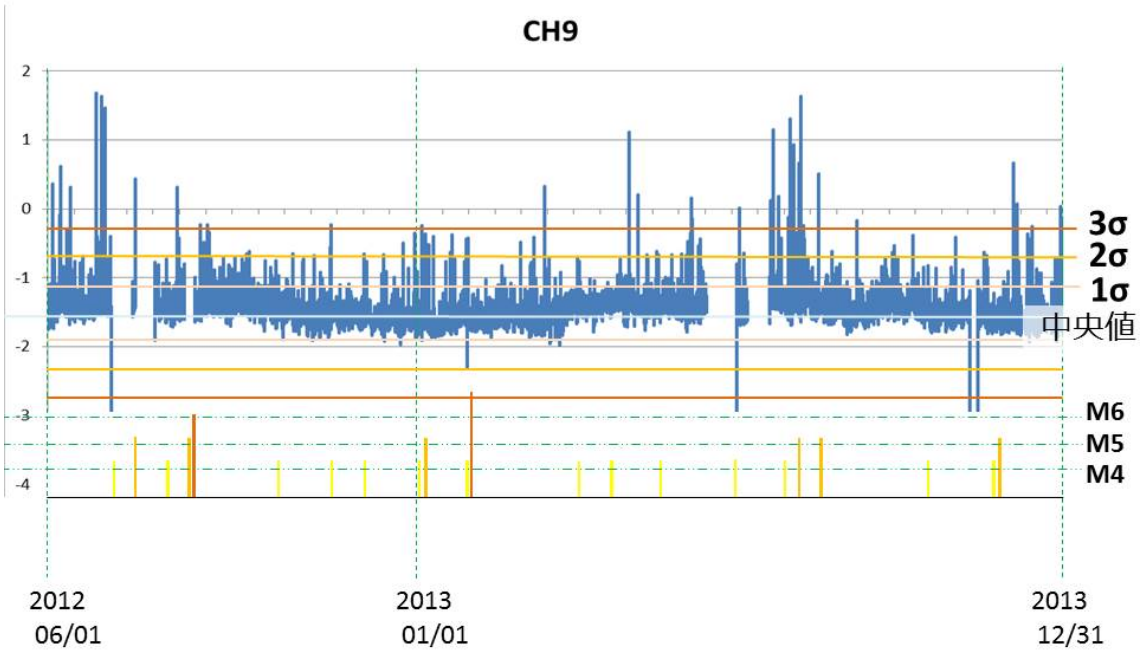

図３．えりもで観測された広尾 FM 放送局からの電波強度

R	σ	2σ	3σ
イベント数	115	13	3
ヒット数	53	8	3
空振り数	62	5	0
地震見逃し数	11/21	17/21	19/21

表１．閾値によるヒット数（15 日以内に地震があった）、空振り数（15 日以内に地震がなかった）、見逃し数（21 個の地震に対して 15 日以内に異常がなかった場合の数）

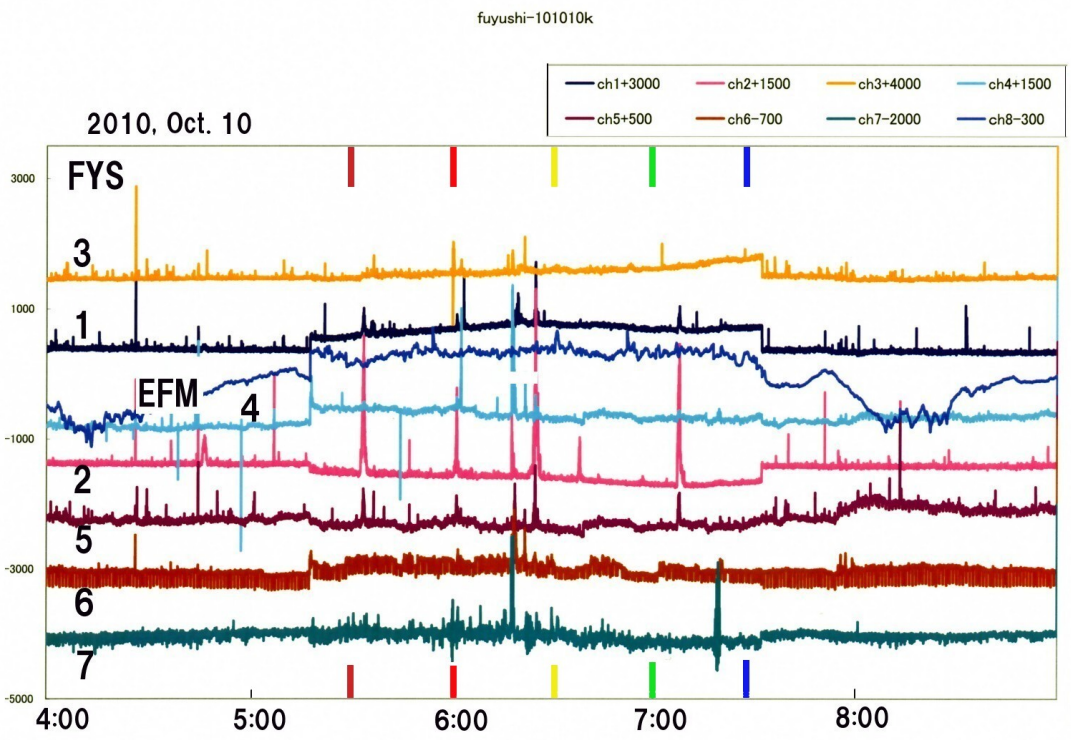

図４．VHF 帯電波伝播異常と相関する大気電場（EMF）の例（2010 年 10 月 10 日冬島観測点の記録。10 月 14 日日高山脈で M5.5 の地震が発生した）

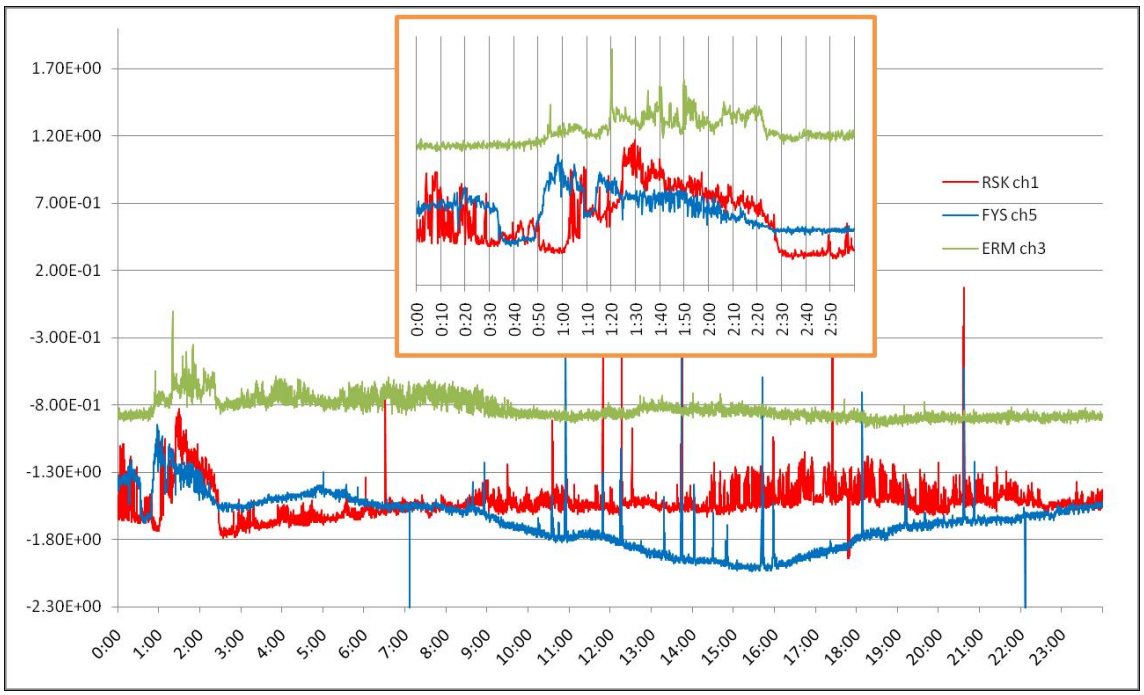

図５．電波伝播異常の移動。冬島、留崎、えりもと東へ行くほど異常の発生時刻が遅くなった例

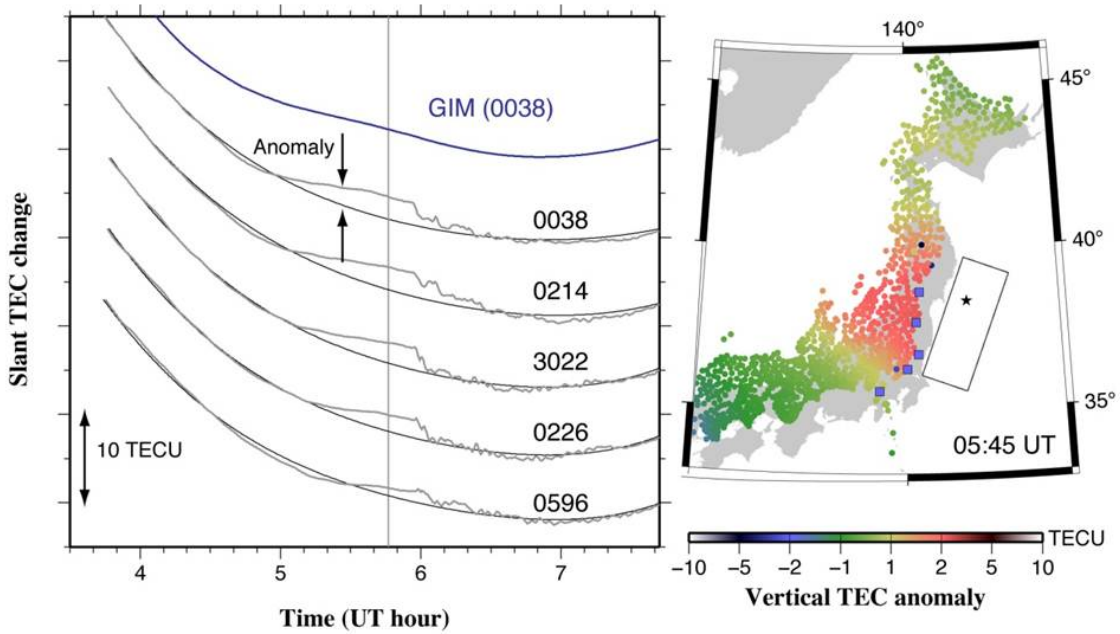

図６．東北太平洋沖地震直前の GPS-TEC の変化

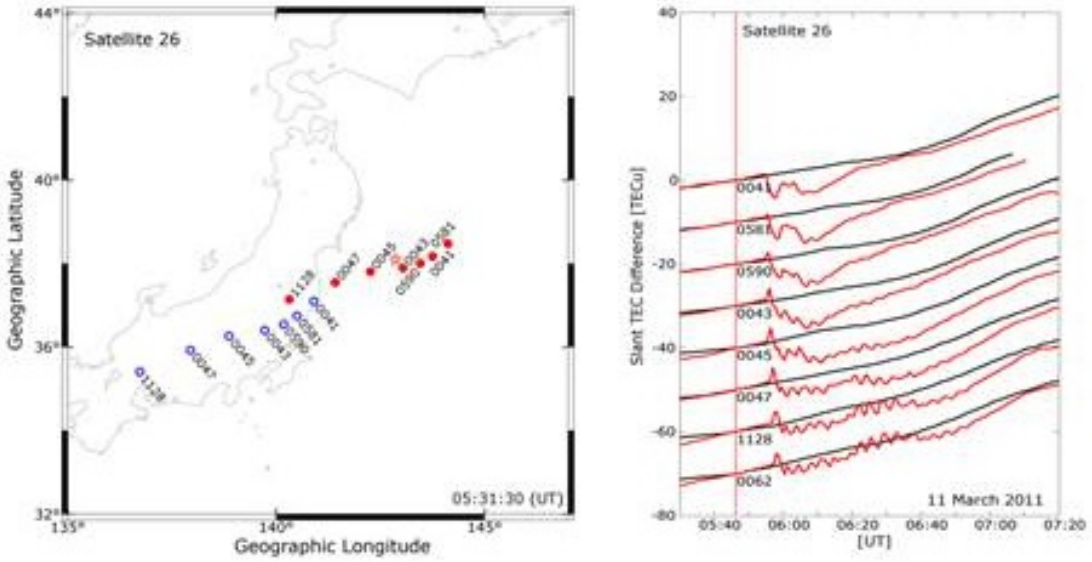

図７．東北太平洋沖地震直後の GPS-TEC の変化。津波による海面変化が重力波が電離圏に達し TEC の変動を起こした。

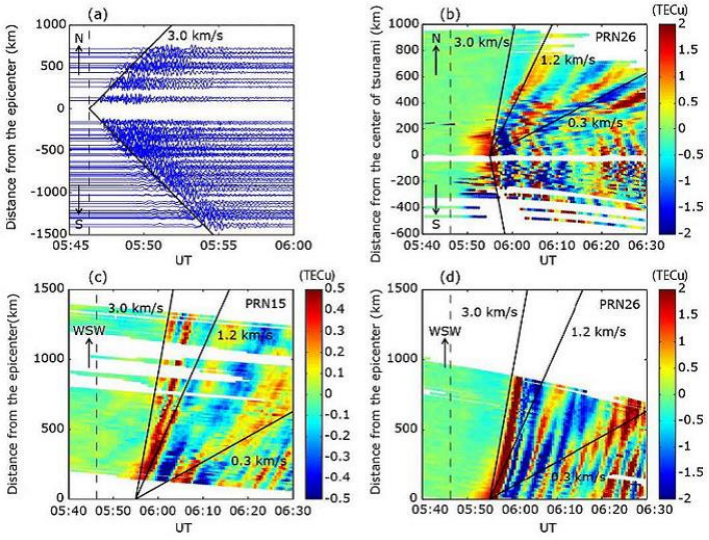

図８．地震波および GPSTEC の走時ダイアグラム．
(a) 地震波および (b)10 分のハイパスフィルターをかけた津波ソース (北緯 48 度, 東経 138 度) と同じ緯度での GPSTEC の走時ダイアグラム．(c),(d) は，震央から西南西方向 (北緯 35 度, 東経 136 度) での GPSTEC 走時でそれぞれ PRN15 および PRN26 衛星による観測．黒の斜め線は速度を示し，垂直な破線は地震の発生時間を示す．

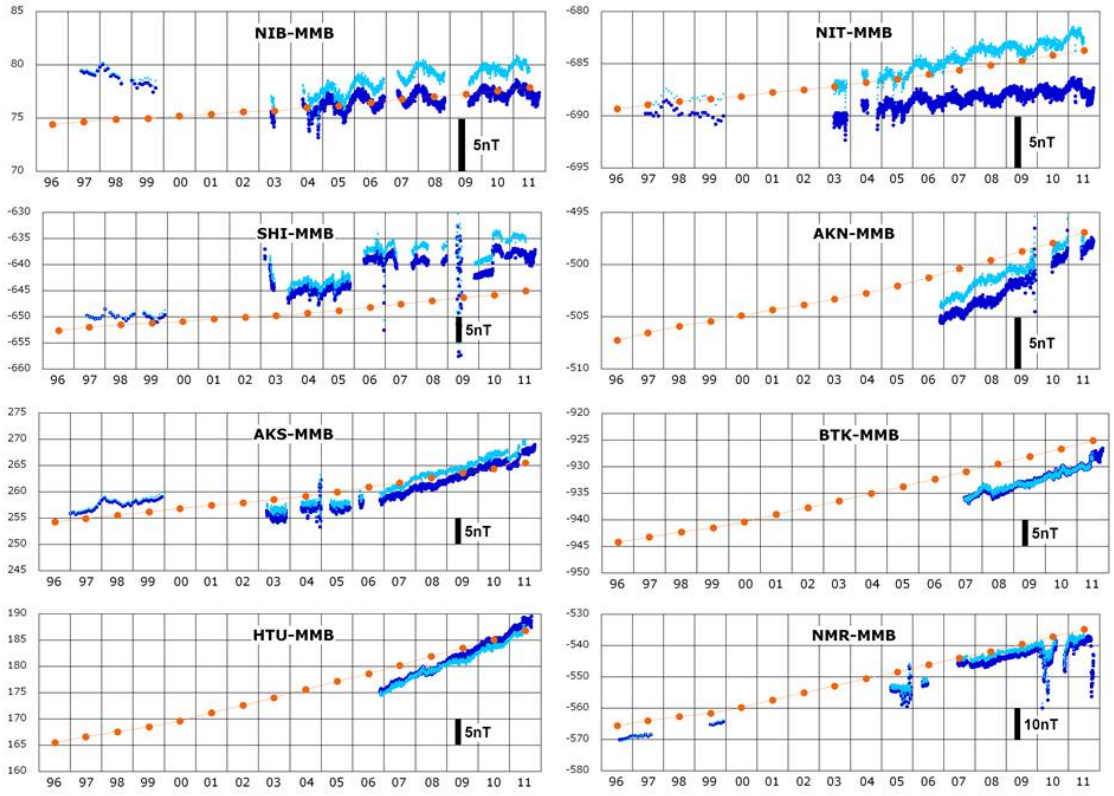

図９．1996 年から 2011 年までの女満別地磁気観測点との差の変化。青点：単純な差、水色点：各点での偏角、伏角の違いによる見かけの全磁力変化（DI 効果）を評価した変化、赤点；地磁気標準磁場の変化