

(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. U L F 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めざす。

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わかってきた。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) 平成 23 年度成果の概要 :

A. 地磁気地電位観測

3 月 11 日の地震発生直後から明瞭な地電位変動が見られた。特にえりも観測所では大きな変動がみられた。最初は地震波到達時間に電場、磁場ともに大きな変動が見られた。その後 1 時間ほどして地電位に大きな変動が観測された、この変動は 3 月 12 日の 7:00 頃まで明瞭であり、それ以降は振幅が小さくなり不明瞭になる。この変動はえりも験潮所で観測された潮位記録とよく対応しており、津波に伴う地電位変動と考えられる。地電位変動は津波の方向と直交するので、地電位変動の方向より津波の到来方向が予測できる。

B. VHF 帯電波伝播異常

えりも観測所で 89.9MHz (北海道・中標津 FM 局) の電波を観測していたところ、2010 年 6 月 27 日より明瞭な異常が観測され、1 日当たりの異常観測時間の総和は 2010 年 10 月頃をピークとして減少し、異常は 2011 年 2 月 25 日まで続いた。89.9MHz の電波は震源域に近い岩手県北部の葛巻町や種市町にある FM 放送局からも発信されており、これによる電波が異常伝播したと考えることもできる。もし、2 月末までの変動が地震に先行する電波伝播異常とすれば、その異常観測時間の総和は 20 万分以上になり、えりも地域で経験的に作られた観測時間総和とマグニチュードとの関係式によれば、この総和時間はマグニチュード 8 ~ 9 クラスの地震に対応する。

この異常は 2 月末以降ほとんど観測されなかったが、4 月上旬より再び異常な変動が増加していて、現在でも異常が継続している。しかし、この変動はえりも観測所だけで観測され、近隣の地点で観測している 89.9MHz の電波では観測されないもので、それが大地震に関係あるものかどうか分からない。本年度は周囲が開けている観測点では 4 方向ないし 6 方向にアンテナを設置して異常伝播の到来方向を調べられるようにした。また、えりも、弟子屈、根室地域では 10km ほどの間隔で複数の観測サイトを設置し、異常現象の広がりも調べることにした。各サイトでは 1 分毎に受信周波数を切り替えているいろいろな場所からの電波を受信することにした。2011 年 11 月 24 日の浦河沖地震 (Mw6.2) では、えりも地域の複数のサイトで 11 月 21 日、22 日に明瞭な異常伝播が観測された。このデータから異常伝播を起こす散乱体の場所やその移動に関する議論ができる。

また、えりも地域の FYS と TYO 観測点ではフィールドミルによる大気電場の観測を開始した。VHF 帯電波の見通し外伝播を生じさせる散乱体が上空にできる帯電性エアゾールのような物質であれば、それが大気電場の変化で観測される可能性がある。実際これまでも数例、電波伝播異常と大気電場変動に相関がみられた例がある。

また、東北、関東地方で地震活動が活発化しているため、福島県会津地域、群馬県沼田地域にも観測点を設置し、大地震と電波異常伝播との関連を調べている。

C. GPSTEC (電離圏総電子数) の観測

C1. 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。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。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。

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 2 TECU 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 (地震時電離圏変動) 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。なお同様の図は 9/26/27 番衛星を用いても描くことができる。

C2. 東北地方太平洋沖地震後の津波に伴う 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 [Liu et al., 2011, Kamogawa et al., 2012, Kakinami et al., 2012]。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 [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 ($1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$) の TEC 減少していることが分かった [Kakinami et al., 2012]。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。

D. 道東地域における地磁気観測

道東地域の既設磁気点では、2009 年から地磁気三成分絶対測量を実施している。2011 年までに、既設の 8 か所の磁気点すべてにおいて絶対測量を実施した。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。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。変化率について見ると、1990 年代に推定されていた永年変化よりも、2000 年代後半の方が明らかに大きくなっており、そのままでは Nishida et al. (2004) で提案された応力磁気効果モデルとは整合しない。そこで、グローバル地磁気モデル (IGRF-11) を用いて広域の永年変化場を推定し、道東地域にどの程度影響があるかを考察した。その結果、グローバルな変動場は道東地域スケールにも影響を及ぼしており、実際に観測されている永年変化の傾向とも一致することが明らかとなった。想定される地殻活動起源の永年変化を抽出するために、この広域変動場からの偏差に着目して、地点毎の変化率を求めたところ、応力磁気効果モデルに比較的近い分布が得られた。ただし、この結果の有意性については議論の余地があり、観測された永年変化が、広域変動場と誤差範囲で一致していると考えた方が正しい可能性も残されている。その場合には、応力磁気効果仮説は否定されることになるが、現時点でこれを証明するのは難しく、今後の観測結果を待つ必要がある。

- (8) 平成 23 年度の成果に関連の深いもので、平成 23 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
Heki, K. 2011, Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku Oki earthquake, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 38, L17312, doi:10.1029/2011GL0479

Kakinami, Y., M. Kamogawa, Y. Tanioka, S. Watanabe, A. R. Gusman, J Y Liu, Y. Watanabe and T. Mogi,
2012, Tsunamigenic ionospheric hole, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS,, in press
橋本武志・茂木透・西村三治・有田真・清水淳平・井智史・源泰拓・長町信吾, 2012, 道東地域の地
磁気永年変化と三成分絶対測量, 北海道大学地球物理学研究報告, 75, 印刷中
森谷武男, 茂木透, 2011, 長期間の地震工コー監視による近未来地震予測, 日本地震学会講演予稿集
2011 年秋季大会, A32-10
茂木透, 橋本武志, 高田真秀, 2011, えりも地域で観測された東北太平洋沖地震, 津波に伴う地電位
変動, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 130 回総会及び講演会予稿集, A003-19

(9) 平成 24 年度実施計画の概要 :

- 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、その原因を探る。そのため大気電場の観測も継続する。
- D. 道東で行っている地磁気変動観測を継続すると共に、FG 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。

(10) 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

(11) 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 : mogitisev@mail.sci.hokudai.ac.jp

URL : <http://www.sci.hokudai.ac.jp/grp/isv/isv-web/>

(12) 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