

(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 22 年度成果の概要 :

1 . 地震前に現れる VHF 帯電波伝播異常の観測

地震発生前に観測される FM 放送などの VHF 帯電波の伝播異常現象を観測的に解明するために観測をえりも地域や道東地域を重点的に行っている。北海道では 11 カ所に観測点を設けている。また、64Mhz 帯の地震予知独自の発信点を 4 カ所に設けて FM 放送局のない領域をカバーしてきた。

えりも地域では、2004 年より日高山脈を挟んで反対側にある広尾放送局の FM 放送波を北大えりも観測所構内で受信する観測を行ってきた。その結果、ふだん届かない広尾局の放送波が、日高山脈直下で起こる地震の前にある一定の時間断続的に受信されることがわかってきた。我々は、この電波伝播異常現象を地震エコーと呼ぶこともある。しかも、その伝播異常が観測される時間の総和は、その後発生する地震のマグニチュードと一定の関係があることもわかってきた (Moriya et al. 2010)。一方、伝播異常が観測されなくなってからある時間の経過後 (1 日から 10 日位の範囲) に地震が起きるが、その時間とマグニチュードとの間には相関性は見られなかった。

これまでに、日高山脈周辺で起こる概ねマグニチュード 4 以上の地震 50 例以上についてこの伝播異常は観測され、上記のような統計的關係も得られてきた。そこで、このような現象はえりも観測所付近特有のものか、周辺にも広がりをもつ現象であるかを確かめるために、えりも観測所から南東側にえりも町東洋、北西側に様似町留崎および冬島に約 8km 間隔で広尾局の FM 放送波を受信する観測点を設置した (図 1 右図)。また、冬島観測点では異常伝播の到来方向を調査するために、いろいろな方向へ向けたアンテナを接続した受信機を用いて観測を始めた。

これらの 4 観測点で 2009 年 1 月から観測をしたところ、日高山脈直下では 2010 年 12 月までにマグニチュード 4 以上の地震が 9 個起こり、そのうち 2009 年 3 月 10 日 (M4.7)、4 月 5 日 (M5.7)、2010 年 10 月 10 日 (M5.8) の地震の前に伝播異常がほぼ同時に複数の観測点で観測された。図 1 の左図は、3 月 10 日発生した地震に対して 3 月 8 日に観測された伝播異常の例である。これにより伝播異常は、えりも観測点固有の現象ではなく、少なくとも 20km 程度の範囲で観測される現象であることがわかった。また、その開始時間が FYS:0:50、RSK:1:03、ERM:1:18 と観測点により異なり、西の観測点から東へ移っていくようすが見られた。もし、伝播異常が上空の散乱体によるものと考えれば、それが移動または東へ拡張している可能性も考えられる。

また、冬島観測点では 2010 年 9 月から 6 方向に向けたアンテナにより伝播異常を観測を始めたが、10 月 10 日の地震に対して図 2 に示す伝播異常が観測できた。このデータから異常伝播の到来方向を検討するために、各アンテナに対していろいろな方向からの電波の受信感度を調べた。得られた受信感度は、5 素子八木アンテナに対する理想的な感度に対して周囲の樹木、建造物等の影響を受けて歪んだものになったが、この感度を基にこの異常伝播の到来方向を決めたところ、東から南東の方向になり、予想に反して放送局や震源の方向ではなく海側から到達していた。また、その方位も伝播異常が観測された 5:30 から 7:30 の間に東 ~ 南南東に時間的にもしだいに変化しているようすが見られた。この結果は初期的なものでまだ検討すべき点は多いが、現在までの結果によると、これまで異常伝播は放送局の方向か震央の方向から来ると予想して、アンテナをその方向に向けていたが、必ずしもそ

うではない可能性があるので全方位をカバーするように複数のアンテナを設置する必要があることがわかってきた。また、アンテナの電波の到来方向に対する感度も到来する仰角によっても変化する可能性もあるので、この点の検討も今後必要である。

2. 地震前の TEC 日変化の異常の GPS による観測

(1) はじめに

全地球測位システム (Global Positioning System, GPS) は、衛星が発射する Lバンドのマイクロ波を地上局で受信し、その搬送波位相の変化から高精度の測位を行うシステムである。一方、電離圏と呼ばれる超高層大気では、太陽放射によって大気分子・原子の一部が電離しており、電子がマイクロ波の伝搬を遅延 (電離圏遅延) させる。搬送波は 1.5 GHz (L1) および 1.2 GHz (L2) の二つの周波数が同時に用いられているが、GPS 受信機は二周波を同時受信することにより、周波数の二乗に逆比例する電離圏遅延を除去しているのである。L1 と L2 の単純な差 (L4 と呼ぶ) 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。そのため Geometry-free Combination (幾何学的要素が含まれない線形結合) と呼ばれる。L4 は視線に沿って積分した電子の数に比例するため、主に電離圏研究に用いられてきたが、地震や火山噴火などの固体地球に関連した現象に起因する電離圏擾乱の研究も行われている。本節では、GPS 生データから L4 時系列を作成する方法、および地震の前兆とされる日変化の異常を見るために必要な手順について説明する。

(2) RINEX ファイルからの L4 の作成

GPS データの解析は、衛星や局の位置、地球回転、潮汐、中性大気遅延等の様々な要因をすべて考慮する必要があるため、概して複雑で個人レベルでのプログラム作成は難しい。一方 L4 では、これらの要因のすべてが位相差を取る時に取り除かれているため、データ解析は本質的に簡単である。既存の GPS 解析ソフトウェアで L4 に相当する量を出力させて解析に用いることも可能だが、共通フォーマット (Receiver Independent Exchange format, or RINEX format) の GPS 生データのファイルを直接読んで L4 の時系列を作るのが手取り早い。我が国では地殻変動の計測を目的とした稠密な連続観測網 GEONET (GPS Earth Observation Network) が国土地理院によって展開されているが、その RINEX ファイルもオンライン公開されている。北大・日置研究室のウェブページで RINEX ファイルを入力して L4 に変換するフォートランプログラム `rdmx.f` を公開している (<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/heki/software.htm>)。そのプログラムでは、最初に RINEX ファイルのヘッダーを読みこみ、次にデータ本体部分をエポック毎 (GEONET では 30 秒毎) に読み込み、様々な衛星で得られた L1 と L2 の位相を取り出す。位相にそれぞれの波長を掛けて単位をラジアンから長さに変換し、差をとって L4 を求め、衛星毎にソートした時系列を出力する。本プログラムでは L4 (単位 m) に下式に示すファクターを掛けて、視線方向の電子数を積分した全電子数 Total Electron Content (TEC、しばしばテックと発音される) に換算してある。

$$[\text{TEC}] = (1/40.308) f_1^2 f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) [L4]$$

TEC の単位は TECU (TEC unit, 1 TECU は視線に沿った底面積 1m^2 の円柱に 10^{16} 個の電子が含まれることを意味する) を用いている。日本列島では、太陽静穏時の昼間の TEC はおおむね 10-20 TECU 程度であり、夜間は数 TECU に下がる。位相データには一般的に整数値の不確実性があるため、実際には L4 の絶対値に意味はなく、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。上式で [L4] および [TEC] となっているのはそのためである。上記のページには入力ファイル (RINEX 形式) と出力ファイルの見本も置いてある。

図 3 にはこうして得られた鹿児島県屋久島の GPS 点での 2009 年 7 月 22 日の TEC 変化を衛星毎に曲線で示している (衛星毎の時間変化にのみ意味があり、縦軸の絶対値には意味がない)。左半分で U 字型の変化が顕著であるが、これは主に昇って沈む衛星の仰角変化に伴って視線ベクトルが貫通する電離圏の厚さが変化するためである。U 字型の変化の大きい部分が電子密度の高い昼間、小さい部分が電子密度の低い夜間に相当する。この日は皆既日食が起こっており、UT で 2 時頃を中心に TEC が少し下がっているのが、生の TEC 変化でも見ることができる。

(3) 地震前兆としての TEC 日変化の異常

TEC 日変化の異常を地震発生と関連付けた最近の研究を紹介する。Liu et al. (2001) は、1999 年に台湾で発生した集々地震の 4-5 日前に、TEC の日変化の振幅が異常に小さくなったことを見出し、地震の前兆の可能性を示唆した。地震の数日前に TEC 日変化の振幅が小さくなることは、その後 2008 年四川地震を始め複数の地震で報告されている (Liu et al., 2009)。磁気赤道において大気潮汐によって生じた東向きの電場と北向きの磁場に、電子が相互作用して鉛直上方に高度千 km 付近まで移送され (EXB ドリフト)、それらが磁場に沿って電離圏 F 領域に降りてきて赤道の南北両側磁気緯度 15 度付近に電子密度の濃い地帯を形成するのが赤道異常である。これらの地震はいずれも赤道異常の直下に震源域を持っているが、Liu et al. (2009) は、地震に先立つ岩石破壊が東向きの電場を何らかの原因で弱めることによって、赤道異常の位置と強さが変わり TEC 日変化の振幅に異常が生じると考えた。

2008 年岩手宮城内陸地震は、日本列島内陸浅部で生じた地震としては比較的大きく、かつ太陽活動の最小期に発生している。我が国において、地震の前兆として台湾のような TEC 変化が見られるかを確認するには絶好の条件がそろっている。ここでは震源近傍の岩手県奥州市胆沢の GPS 点において、地震を含む六週間の期間をとり、前の章で述べた手法で TEC 絶対値を 1 時間毎の折れ線で求めた (図 4)。一般に RINEX ファイルは UT で一日毎に別ファイルになっており、VTEC (天頂方向の TEC) の絶対値の推定も一日毎に行われる。しかしそのようにして求めた時系列を複数日ならべると、零時で不自然な不連続がしばしば見られる。一方、日の境界をまたいても衛星毎のバイアスは変わらない。したがって、零時の VTEC 不連続を防ぐために、複数日のデータを結合し、日をまたぐ衛星の TEC 時系列からは一つのバイアス値を推定する必要がある。ここでは、TEC 変化を求めたい日の前後の日のデータを結合して三日間の TEC 変化を一度に推定し、その真ん中の日のデータだけを取り出した。このようにして求めたデータを並べてゆけば、図 4 のように日の境界でも自然な連続した変化を見せる。

異常の判定は Liu et al. (2009) に倣い、過去 15 日間の median (中央値) を取り、median と quartile の差の 1.5 倍を自然な揺らぎと仮定してそれを超えるものを異常値とした。地震の一日後に見える大きな正の異常は、偶然に発生した磁気嵐によるもので地震とは無関係である。図 4 をみると、Liu et al. (2009) が主張する地震 4-5 日前の TEC の減少は負の異常として確かに見えている。しかし、その異常の量はわずかであり、地震と関係ない時にもしばしば起きている程度の異常であった。

近年、日本では 2008 年岩手宮城内陸地震 (Mw:7.1) をはじめ、2007 年新潟県中越沖地震 (Mw:6.6)、2004 年新潟県中越地震 (Mw:6.5) と緻密 GPS 網が存在する日本列島の文字通り内陸部で比較的大きな地震が発生しており、電磁気的な前兆の有無の議論に好条件が揃っている。その中で 2007 年中越沖地震では、過去に中国等で報告されたような地震に先行する TEC 減少が比較的確確に見られたが、一方、2004 年 10 月の中越地震では太陽活動が活発過ぎて地震に先行する異常は確認できなかった。また、2008 年岩手宮城内陸地震でも上記のように地震数日前に負の TEC 異常は見えたが 2007 年中越沖地震ほど明瞭ではない。

ここでは前兆の有無は議論しないが、条件が良いと思われる 2008 年岩手宮城内陸地震でも TEC 日変化の振幅異常がこの程度の大きさであれば、地上 GPS による TEC の監視を我が国で地震予知に役立てるのは難しいかもしれない。

3. えりも地域での大気電場の観測

地震に伴う電磁気現象は、上記の VHF 帯の電波伝播異常や電離圏の電子密度異常だけでなく VLF 帯電波での異常伝播などいろいろな現象が世界中で報告されている。これらの多くは、大気圏や電離圏にまで地震に伴う異常が及んでいる可能性を示している。特に、地震の前に現れるこのような現象の原因については、いろいろな議論がされてきた。最近になってひとつの有力な説として、地震前に放出されるラドンが大気中で壊変することによって大気のイオン化し、それが凝縮して核となりエアロゾルを生成することにより大気の電気伝導度や大気電場が変化し、その影響がグローバルサーキットの変化として電離圏にまで及ぶという説が提案されている (Pulinets and Ouzounov, 2011)。そもそも地震の前にラドン等のガスが放出されているかという点についても多く議論があるが、いくつかの観測例 (例えば、Yasuoka et al. 2006) も報告されている。もし、そういうことがあるとすればガスを直接観測する方がよいが、ガスが地表に放出される場所は狭い範囲であり、それがどこかはわから

ないことが多いので、そのことがガス観測による地震予知を難しくしているように思われる。しかし、どこからか（これまでの観測例によると震源断層の周辺であろう）放出されたガスが上記のような過程で空間に電磁気的変動をもたらすとしたら、それは長距離を飛ばす電波や衛星で監視されている電離層の異常として観測される可能性もあるであろう。以上はひとつの仮説にすぎないが、それによっても VHF 帯電波伝播異常や電離層の電子密度の異常を引き起こすメカニズムを調べるために、大気電場の変動観測は重要であると思われる。

雷放電により駆動される全球三次元電流回路（グローバルサーキット）を観測するため、また、地震に伴うと考えられている電磁擾乱現象を観測するため、フィールドミルを用いた大気電場計測を 2009 年 1 月 23 日から冬島観測点において開始した。この大気電場観測器は、一定の速度で回転する半遮蔽板と電極からなる検出器と、微弱電流信号を増幅し電圧信号として出力するアンプ部によって構成される。半遮蔽板が電極を曝露する位置にくると、大気中の電場によって地表面の電荷が GND 線を通じて電極に集まり、逆に半遮蔽板が電極を遮蔽する位置にくると、電極に集まっていた電荷は GND 線を通じて再び地表面へと流れる。このような交流的電流信号を整流し、直流的電圧信号に変換して大気電場を計測する装置がフィールドミルである。通常の大気電場強度は数 100V/m であるのに対し、用いているフィールドミルのダイナミックレンジは -20 kV/m から +20 kV/m までと広い。16bit の A/D 変換器を内蔵したデータロガーを用いているため、分解能は 9.8 V/m であり十分といえる。

観測器の設置以降 2011 年 2 月現在まで、フィールドミルは安定した動作を続けデータを取得し続けている。これまでに、VHF 帯電波異常が観測された時刻におけるフィールドミル観測データの比較を行っている。またその結果から、今後検討すべき観測システムの改修点が浮き彫りとなった。以下に、それらの内容をまとめる。

2009 年 3 月 24 日の 13:30 JST 頃から地震に先行すると考えられる VHF 帯電波伝播異常が冬島観測点とえりも観測点において共に観測された。継続時間は冬島観測点において約 1.5 時間であった。このときフィールドミルデータは良好に取得されており、比較のために波形プロットを作成した。2009 年 3 月 23 日から 25 日まで 3 日分のフィールドミルデータと、冬島観測点に近い浦河で観測された気圧、気温、平均風速のアメダスデータをそれぞれプロットしたものが図 5 である。まずフィールドミルデータを見ると、24 日 13:30 JST ごろから 22:00 JST ごろまで電場強度が非常に強い擾乱を受けていることが解る。前後の 23 日と 25 日は比較的静穏な電場強度波形を示しているが、この期間に限り特異な擾乱を受けていたことが判明した。一方このときのアメダスデータを見ると 23 日から 25 日にかけて気圧（細実線）は徐々に上昇しており、また気温は下降（波線）傾向にあったことから、悪天から徐々に回復傾向にあったことが推測できる。24 日は曇りであったが降水量は終日 0 mm であり、降水や降雪などは無かったと推測される。また、平均風速は常に高く 5 m/s 以上が継続していたが、フィールドミルで観測された擾乱時には、平均風速および瞬間最大風速ともにほぼ一定値を保ち安定していた。以上の気象データから、降雨や風による影響でフィールドミルの擾乱が引き起こされた可能性は低い。また、図から VHF 帯電波異常が観測された継続時間（13:30 - 15:00）よりも、フィールドミルデータに強い擾乱が発生している計測時間が長いことも明らかとなった。

上記のフィールドミル擾乱を発生させた可能性として、次の 3 つが考えられる。第一に、24 日の天候は曇りであったため、フィールドミル上空を通過する雲の雲内電荷が引き起こした可能性、第二に、大気中のイオン濃度の変化により引き起こされた可能性、第三に地震に関連した擾乱の可能性である。現時点でどの可能性がもっともらしいかを断言するのは早計であり、原因を切り分けるためには、冬島よりやや離れた場所でフィールドミルの同時観測を行うことと、天気監視カメラ・イオン計測装置を用いた観測を平行して実施することが重要である。また、冬島観測点での接地の改良や全天候カメラによるモニターも必要である。

フィールドミルで計測される電場強度は上空の雲の有無、大気中のイオン濃度の変動など、環境由来の擾乱に大きく左右される。また、十分にフィールドミル直近で接地をとることも極めて重要である。これらがクリアされない限り、本来のフィールドミルデータとしての真の価値が発揮されないと考えられる。これらの観測で時間・空間的特異性を明らかにすることにより、可能性の絞り込みを行

うことができると考える。

4．2003年十勝沖地震震源域の比抵抗構造

2003年十勝沖地震の震源は海底下であったが、震源域は広くえりも地域にまで広がっている。そこで、震源域の比抵抗構造を調べるためにえりも地域の27地点でMT探査を行った。この探査では、通常の広帯域MT探査で観測する周波数領域(320Hz-0.00055=周期1800秒)に加えて、深部までの比抵抗構造を求めるために長周期MT探査により周期10秒から12000秒の範囲の観測も行った。観測地点の分布を図6に示す。

現在までに、図に示した3測線沿いの2次元比抵抗構造を予備的に求めている。ここでは、そのうちひとつとしてB LINEの比抵抗構造を図7に示した。それによると、プレート上面より深い部分は概ね数百オームメートル以上の高比抵抗構造が分布するが、上面より浅いところでは余震発生域およびその外側で低比抵抗構造が分布する。また、東端に見られるアスペリティーでは高比抵抗構造が見られる。このような比抵抗構造から、余震域やその外側では水が多いと解釈することもできる。アスペリティーは高比抵抗であり堅い岩盤が分布すると推定される。

以上のように現時点では部分的な構造の議論しかできていないが、今後すべてのデータを解析し3次元比抵抗構造を作成して震源域の比抵抗構造の特徴を考えていく予定である。

5．道東地域での地磁気観測

道東地域の南岸域には、強い磁気異常があることがあることが知られている。この地域では、海溝型の巨大地震が想定されることから、地震の準備過程に伴う応力の蓄積がピエゾ磁気として観測可能なのではないかと考えられてきた。Nishida et al. (2004)は、1990年代の観測データに基づき、この地域の地磁気全磁力は磁気点毎にその永年変化のトレンドが異なっていることを指摘した。また、彼らはその変化率の空間パターンがプレート運動によるピエゾ磁気効果である可能性をモデル計算によって示唆している。

北海道大学では、この地域で1972年より厚岸・標茶で全磁力の繰り返し観測を開始し、1996年からは根室・弟子屈地域を加えて連続測定を行っている。図8に観測点の位置図と各観測点の最近の変化を示した。このような長期の観測を継続していると観測地点の移設や機材の交換等によりデータの不連続が生じたり、また、地磁気の長期にわたるトレンド的变化や地磁気全磁力差の永年変化には偏角・伏角が地点毎に異なることによる見かけの変化成分が含まれる可能性があると考えられるので、詳細な変動を調べるためには3成分の絶対測定を行うことが望ましい。道東地域には地磁気観測所女満別出張所があり絶対観測が定期的に行われているが、観測点での絶対観測は時間がかかるので多くの点で頻繁に行うことは困難である。

この問題の実証可能性を高めるため、北海道大学は気象庁地磁気観測所と協力して、各磁気点における地磁気三成分の絶対測定を2009年から開始した。昨年度は仁多・標茶・厚岸GPSを利用した真方位観測により絶対測定を試みた。今年度は、厚岸北・初田牛・別海・仁伏においてジャイロによる真方位観測により地磁気偏角・伏角の測定を行った。

絶対測定の結果、各磁気点と女満別(気象庁の観測所)の全磁力差に見られるトレンドの大部分は、偏角・伏角の違いによる見かけの効果では説明できず、各磁気点に固有のものであることが明らかになった(図9)。また、近年の全磁力差変化率は、Nishida et al. (2004)が報告した1990年代とはかなり異なっていることも明らかとなった。このことは、彼らがモデル計算によって示唆したピエゾ磁気効果のモデルが、現状では有効ではなくなっていることを意味する。今後、何らかのモデルの変更が必要となるであろう。ただし、このようなサブリージョナル・スケールの地磁気永年変化は、これまで他の地域では報告されておらず、特異な現象であることには変わりない。コア起源の永年変化であれば、空間的スケールがもっと大きいことが予想されるので、以前として地殻活動起源の現象である可能性が高い。今後は、海溝型の巨大地震に伴うコサイスマックな変化が捉えられるかどうかピエゾ磁気効果モデルを検証する上で本質的に重要となる。

参考文献

Liu, J. Y., Y. I. Chen, C. H. Chen, C. Y. Liu, C. Y. Chen, M. Nishihashi, J. Z. Li, Y. Q. Xia, K. I. Oyama, K.

Hattori and C. H. Lin, Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, *J. Geophys. Res.*, 114, A04320, doi:10.1029/2008JA013698, 2009.

Liu, J. Y., Y. I. Chen, Y. J. Chuo and H. F. Tsai, Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1383-1386, 2001

Moriya, T., T. Mogi and M. Takada, Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes. *Geophysical J. International*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04461.x. 180, 858-870, 2010.

Nishida, Y., Y. Sugisaki, K. Takahashi, M. Utsugi and H. Oshima, Tectonomagnetic study in the eastern part of Hokkaido, NE Japan: Discrepancy between observed and calculated results, *Earth Planets Space*, 56, 1049-1058, 2004

Pulinets, S. and D. Ouzounov, Lithosphere-Atomosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model, An unified concept for earthquake precursors validation, *J. Asian Earth Science*, 2011, in press.

Yasuoka, Y., G. Igarashi, T. Ishikawa, T. Tokonami and M. Shinogi, Evidence of precursor phenomena in Kobe earthquake obtained from atomospheric radon concentration, *Appl. Geochemistry*, 21, 1064-1072, 2006.

- (8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
森谷武男、茂木透、浦河沖 えりも沖の地震活動と VHF 伝播異常との関係、日本地球惑星科学連合 2009 年大会、2010 年 5 月、千葉
森谷武男、茂木透、えりも沖の起こる地震の前に札幌観測点(HSS)で観測される特徴的な VHF の地震エコー、日本地球惑星科学連合 2009 年大会、2010 年 5 月、千葉
山下晴之、渡邊朋典、森谷武男、茂木透、ウェーブレット変換の VHF 地震エコー記録への適用と効果、日本地球惑星科学連合 2009 年大会、2010 年 5 月、千葉
森谷武男・茂木透・山下晴之・佐々木智彦、定常的 55-70MHz 帯電波の地震エコー観測のための調査とその利用、日本地震学会 2010 年秋季大会、2010 年 10 月、広島
Yamashita, H., T. Mogi, T. Moriya, M. Takada and M. Morisada, Simultaneous observation of VHF radio wave transmission anomaly propagated beyond line of site prior to earthquakes in multiple sites, AGU Fall meeting, Dec. 2010, San Francisco.

(9) 平成 23 年度実施計画の概要：

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、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：mogitstv@mail.sci.hokudai.ac.jp

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

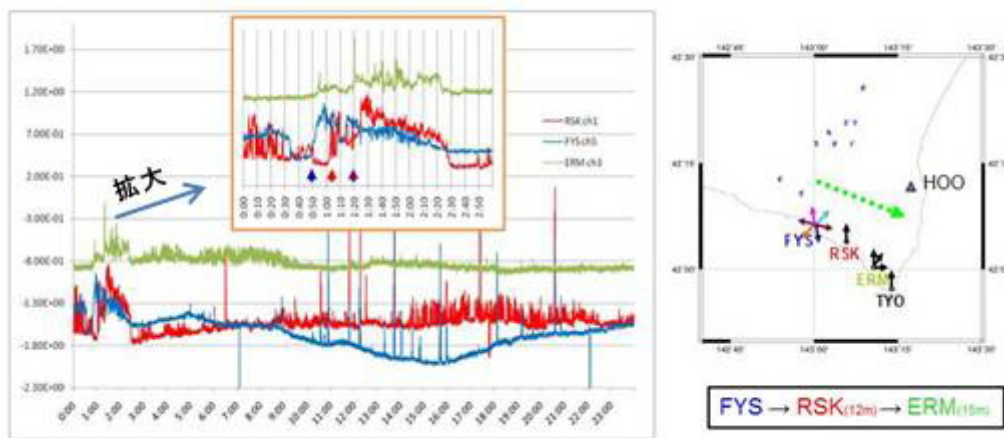


図1．電波伝播異常が冬島（FYS、青線）、留崎（RSK、赤線）、えりも（ERM、緑線）観測点で同時に観測された例（2009年3月8日）。各観測点の矢印はアンテナの方向を示す。異常の開始時間は、西のFYSから東のRSK、ERMの順であった（左図の拡大図参照）。

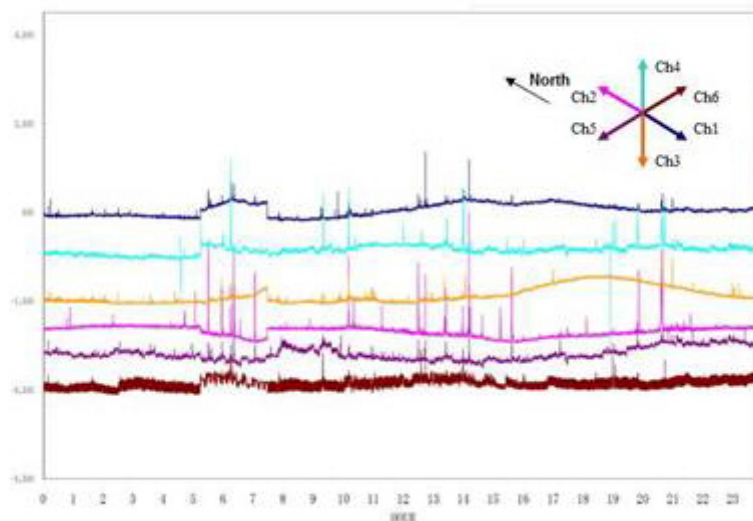


図2．冬島（FYS）観測点の6方向のアンテナで受信した電波伝播異常（2010年10月8日）。右上の図は受信チャンネルにつながるアンテナの方向を示す。

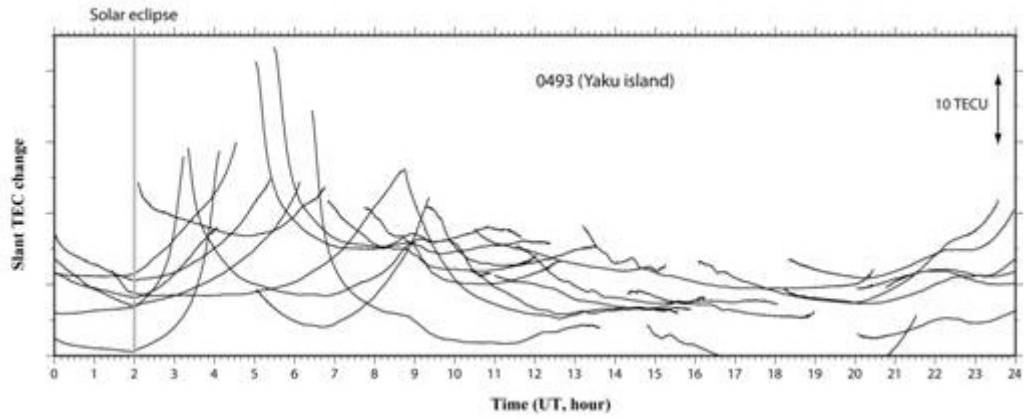


図3．鹿児島県屋久島のGPS点での2009年7月22日に観測された衛星毎のTEC変化（衛星毎の時間変化にのみ意味があり、縦軸の絶対値には意味がない）。

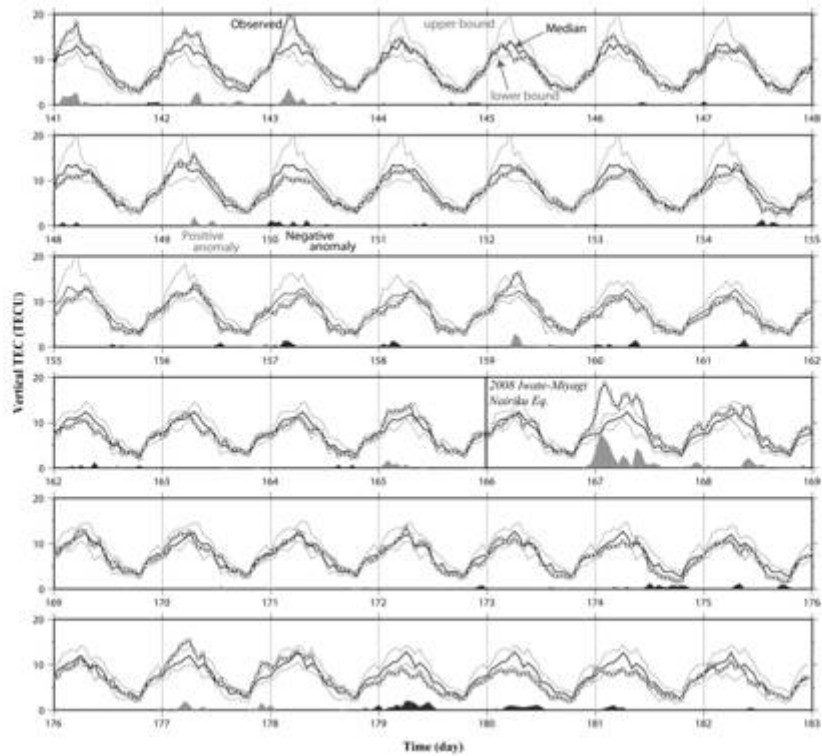


図4．2008年岩手宮城内陸地震前後に近傍の岩手県奥州市胆沢のGPS点において、地震を含む六週間の期間をとり、本文に述べた手法求めたTEC絶対値の1時間毎の変動。黒線はそれ以前15日間の中央値であり、細い灰線は中央値と四分位点との差の1.5倍の範囲を表す（自然のゆらぎと仮定し、それを越えるものを異常と判定）。

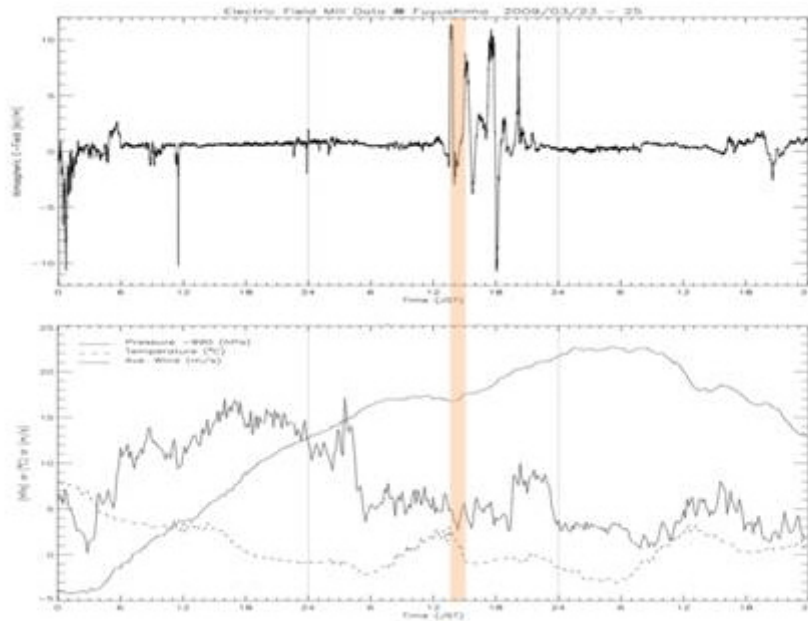


図5 . 2009年3月23?25日の期間における、(上)冬島におけるフィールドミルデータと、(下)浦河におけるAMEDAS気圧、気温、平均風速データ。ハッチ部分はVHFで擾乱が観測された時間帯。



図6 . えりも地域のMT探査測点位置図

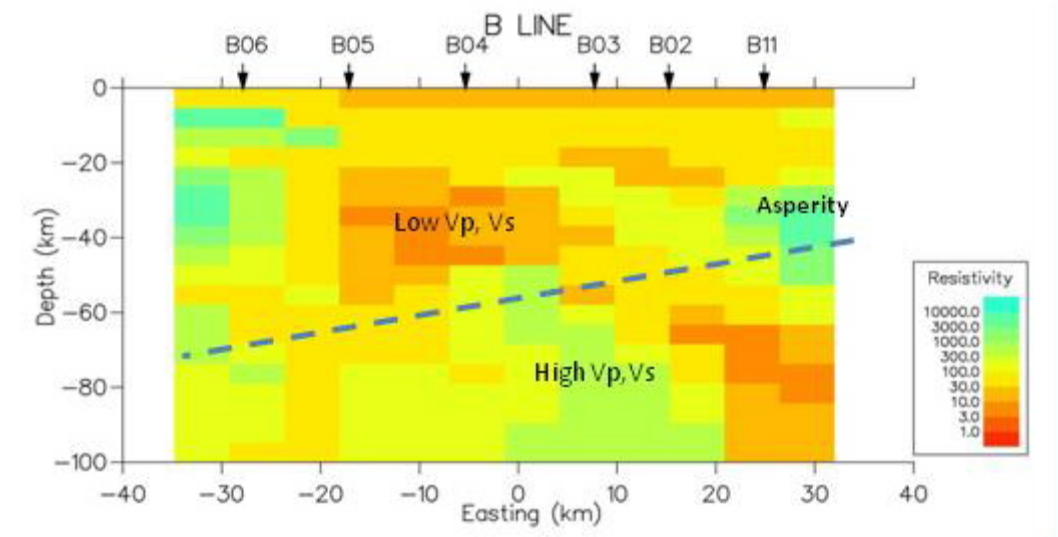


図7. B LINE 沿いの2次元比抵抗構造

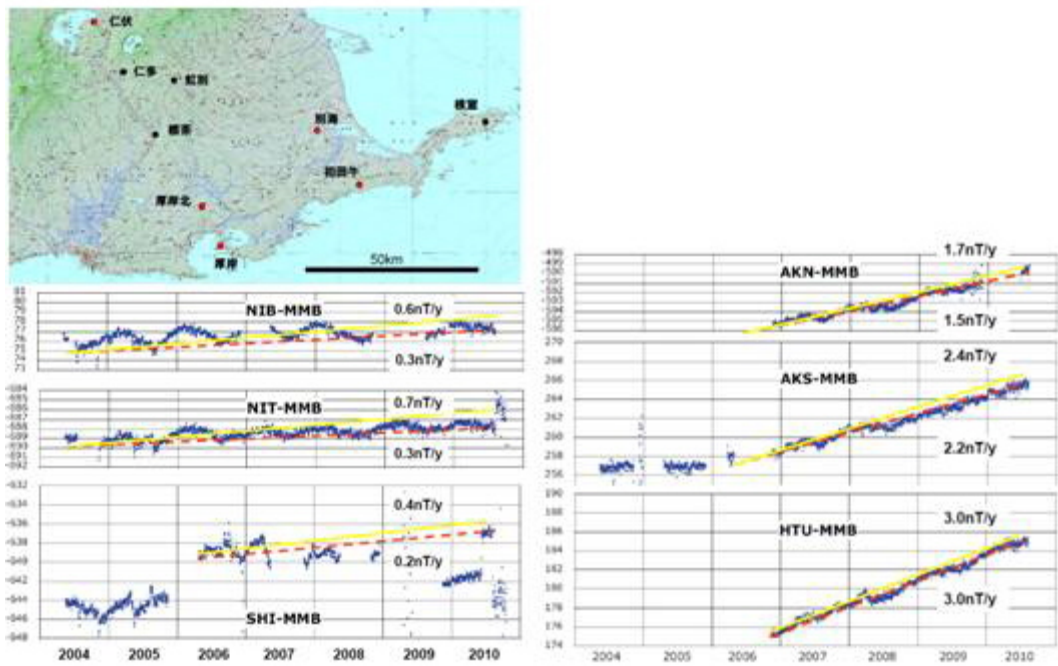


図8. 道東での地磁気観測点と各測点での全磁力変化。左図は、仁伏・仁多・標茶観測点における全磁力変化、右図は厚岸北・厚岸・初田牛観測点における変化。女満別との単純差。点線はDI効果補正前、実線はDI効果を補正したトレンド。

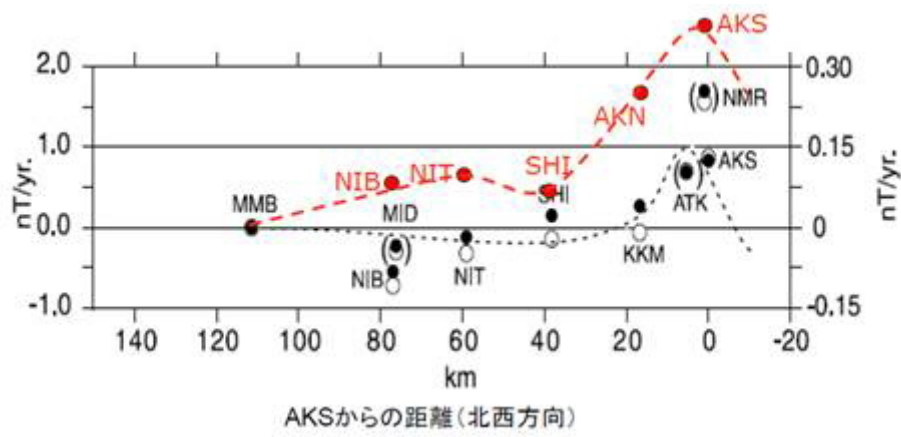


図9 . 全磁力永年変化率の空間分布 (Nishida et al., 2004 に加筆)。横軸は厚岸から北西方向にとった距離。黒丸は Nishida et al. (2004) による 1990 年代の変化率、赤丸は本研究課題によって求めた 2004 ~ 2010 年の変化率 (DI 補正後の値)。