

2011年3月11日東日本地震の前兆電磁気現象

早川正士* (榊早川地震電磁気研究所、電気通信大学、地震解析ラボ), 芳原容英(電気通信大学),
安田好広(榊早川地震電磁気研究所), A. Rozhnoi (Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russia),
M. Solovieva (Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russia),
A. Schekotov (Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russia),

Precursory electromagnetic phenomena of the 2011 March 11 Japan earthquake

Masashi Hayakawa* (Hayakawa Institute of Seismo-Electromagnetics, Co. Ltd.,
The University of Electro-Communications, Earthquake Analysis Laboratory),
Yasuhide Hobara (The University of Electro-Communications),
Yoshihiro Yasuda (Hayakawa Institute of Seismo-Electromagnetics, Co. Ltd.),
A. Rozhnoi (Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russia),
M. Solovieva (Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russia),
A. Schekotov (Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russia)

The precursory anomalies for the 2011 March 11 Japan earthquake have been reported. The first is the propagation anomaly by means of subionospheric VLF/LF signals particularly on the propagation path of NLK (Seattle, USA) to Chofu, which is characterized by an extreme depletion of nighttime amplitude, together with an enhancement in dispersion on March 5 and 6. The second is the depression of ULF magnetic field (of magnetospheric origin), which is the decrease in the ground-based ULF magnetic field intensity observed at Kakioka on the same days. This phenomenon is also interpreted in terms of the enhanced absorption of magnetospheric ULF emissions when penetrating through the disturbed lower ionosphere. Two completely different phenomena are found to be explained by a unified concept of seismo-lower-ionospheric perturbation.

キーワード : 2011年東日本地震、前兆電磁気現象、VLF/LF 伝搬異常、下部電離層擾乱、ULF 磁界強度減少

Keywords : 2011 Japan earthquake, precursory electromagnetic phenomena, VLF/LF propagation anomaly, lower ionospheric perturbation, ULF magnetic field depression

アブストラクト

2011年3月11日の東日本巨大地震の明瞭な前兆現象を報告する。まず、第一はVLF/LF送信局電波を用いた下部電離層の擾乱で、3/5-6の二日にわたり明瞭な伝搬異常を検出している。他方、ULF(ultra-low-frequency, 周波数<1Hz)磁界強度の振幅減少が同日に発生している。 $f=0.03-0.05\text{Hz}$ の地上観測された水平磁界が明瞭な減少を示した。この減少は磁気圏起源のULF放射が下部電離層の異常がある時の吸収による事であり、両者は矛盾なく説明できる。

1. 地震短期予知の定義

ここで言う「地震予知」とは、地震の数日から1ヶ月程度前に地震を予知するという地震の短期予知の意味であ

り、日本のような地震国では社会的要請の強い課題である。地震災害を軽減するという目的のためには予知研究よりは防災の方がより直接的であるから、建造物の耐震性等を高めることが必要であることは論を待たない。しかし、地震予知ができれば人的損失の著しい軽減だけでなく、防災上からも大変重要であることから、地震予知研究は国民的関心も高く、また学問的に見ても地球科学に残された最大のフロンティアの一つと言っても良いと考える¹⁻⁵⁾。更に付け加えれば、防災、地震予知、地震災害事後処理は等しく重要であり、三位一体として考えるべきであると思う。

2. 地震予知不可能論の不毛

「現在の科学では地震予知は出来ない」という見解はかなり一般的のようである。しかしここで注意すべき点はいくつかある。第一は地震予知の定義である。「いつ、どこで、どの程度の大きさの地震が起こるか(地震予知の三要素という)を事前に知る」というのが至極当然の定義と思

* 榊早川地震電磁気研究所
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学 インキュベーションセンター
Hayakawa Institute of Seismo-Electromagnetics, Co. Ltd.,
1-5-1 Chofugaoka Chofu, Tokyo 182-8585

われる。それには観測可能な何らかの前兆現象と地震との間に科学的関連があるか否かの確立が最重要であり、ひとたびそれが確立されたら原理的には地震予知は出来たことになる。前兆現象と地震との関連についての物理学的究明が科学的地震予知といえ、現在我々はこの段階にあるといえよう。

「実用的地震予知」となると話は違ってくる。地震予知の三要素を、「役立つ精度」で社会に伝えるという条件が加わるからだ。ここで重要なのは「役立つ精度」が単義的でなく、地震予知が出来る出来ないという議論を不毛にしがちな原因の一つはここにある。「東京に一週間程度後に比較的大きな(マグニチュード(M) 6以上)の地震があるかも」(これは短期予知(から「南関東地域に十年以内に M8の地震の恐れあり」(これは中期予知(予測)と言えよう)など「役立つ精度」はいろいろあり得る。ところが地震学者の中には、初めから著しく厳しい条件を課し、それに適合しない予知は予知ではないとする否定論者が多いようである。その種の立場からは、「社会・経済損失が大きいため、絶対確実ではない予知はむしろ有害だ」といった議論までもが出るに及んでは何をか言わんやである。「東海地方ではこれこれの異常事象がおきているから、当分の間警戒した方がいい」といった程度でも「役に立ち」得るのではないか。更に、「東京地区には来週は地震はなさそう」でも大いに有用ではないか。それすらも失敗することもある。しかし、数回失敗が続いたからといって諦める必要はない。科学・技術は失敗と成功を重ねて育つものであることを忘れてはならない。しかも以下に述べるように実際は地震予知研究は既にかかなりのレベルまで到達している¹⁻⁵⁾。

3. 地震電磁気学の創成

過去 50 年以上にわたり地震学者が用いてきた力学的地震予知法は、基本的には地殻の変動を地震計、ひずみ計等によって測定するものである。大地震(本震)の前にその前触れのような小さな地震(前震という)が起こることがある。この情報が地震の直前予知に貢献した例(例えば、中国海城地震)はあるが、如何せん前震を伴う地震の割合は 2~3 割にとどまるため、極めて有用な地震予知法とは言えない。これらの状況や過去の前兆研究を踏まえ、1998 年文部省(当時)の測地学審議会は「地殻変動測定(地震測定)では地震予知は不可能である」とする報告書を公表した。その後、地震予知不可能論が地震学者、メディアでの強い風潮となっており、更に前兆、予知という言葉を使用することすら憚れることもある。

地震観測による地震予知が困難であるとするれば、非地震観測に基づく新しい手法を模索することになる。この新しい手法として登場したのが“電磁気的手法”である。電気、磁気、電磁気(電磁波)現象の観測に基づくもので、神戸地震後著しい発展を遂げている¹⁻⁵⁾。従来の地震観測では地圏のマクロな(巨視的)情報を、特に地震の起こった後に得ることができ、地震発生メカニズムの解明に貢献

している。地圏内では震源付近の圧力上昇に伴い微小岩石破壊(マイクロフラクチャという)が必ず先行し、電気/電子工学ではお馴染みの圧電効果、摩擦電気等のメカニズムにより電荷分離(即ち、電流)が発生することとなる。これらの地圏内のマイクロな(微視的)情報が地震予知では重要となる。一旦電磁気現象が起これば、その効果は周波数にもよるが、数 10km~100km 地圏内を伝達し、地表近くでも受信され得る。この前兆性と遠隔性が電磁気的手法(非地震観測)が力学的手法に対して決定的に優れている点である。勿論、基本的には地圏内でのマイクロフラクチャというマイクロな力学効果が原因ではあるが。

電磁気現象が地震の短期予知において近年注目されるようになったのにはいくつかの理由があるが、以下ではそれらを具体的に述べよう⁹⁾。第一の理由は、地震に伴う興味ある現象の発見である。まず、第一は大地震(M7、8 程度)の前兆として ULF (ultra-low-frequency、周波数 1Hz 以下)放射が検出された。1988 年旧ソ連グルジア共和国でのスピタク地震とその一年後の 1989 年のカリフォルニア・ロマブリエタ地震の際に、極めて類似の ULF 放射が発見された。その後 1993 年グアム地震に対して早川らは全く新しい信号解析法を開発し、前兆 ULF 放射の検出に成功した^{5,6)}。続いて、地上高度 60-70km に存在する電離層までもが地震に伴って擾乱されていることが神戸地震(1995 年)の際早川らによって明瞭に発見され、世界的な注目を集めた^{5,6)}。ULF 放射は地圏からの直接的な放射であり、比較的受け入れ易いものであったが、電離層が地震の影響を受けることは地圏の何らかの効果が大気圏を通して電離層まで伝達されることを示唆し、にわかには認めがたい発見であった。第二の理由は神戸地震後日本政府(旧科学技術庁)による地震総合フロンティア計画の実施である。二つの研究機関、理化学研究所と旧宇宙開発事業団(NASDA)に対して電磁気現象を用いた地震予知の可能性を追究せよとの要請があった。早川は後者のフロンティアを担当し、幾多の成果を挙げたが、最も重要なものの一つとして地震電磁気研究分野での国際的活動母体を創出したことであろう。過去 4 回(1994, 1997, 2000, 2005 年)電気通信大学(電通大)において IWSE (International Workshop on Seismo Electromagnetics) (地震電磁気現象と地震予知)という国際会議を開催し、国際的研究活性化に寄与している。日本のフロンティア研究の成功に刺激され、台湾、インド、イタリア、ロシア、メキシコ等の国でも、地震電磁気に関する国家プロジェクトが採択されている。最後の理由として、仏国による地震電磁気専用人工衛星(DEMETER)が 2004 年 6 月 29 日に打ち上げられたことを挙げることでできよう。早川は当初よりこの衛星計画に関与してきたが、我々も含め各国の研究者が Guest Investigator として参加し、興味ある結果が出始めている。この種の衛星観測は地上観測との同期連携観測により地圏・大気圏・電離圏結合メカニズムの解明には不可欠の手段である。この状況を概念的に描いたのが図 1 である。以上述べた様に、地震予知の可能性を追究する地震予

知学は、地震電磁気学という極めて学際的な新しい学問分野として創成されつつある。

4. 地震に伴う電磁気現象

地震に伴う電磁気現象の研究は神戸地震以降世界的高まりを示しており、すでに地震の前兆的電磁気現象が複数報告され、地震予知の可能性も追求されている⁷⁾。即ち、直流の地震流⁸⁾、ULF電磁放射⁹⁻¹²⁾、これらは地圏内での現象。続いて、大気圏内の擾乱は主として見通し外のFM電波¹³⁾や衛星からのOLR(Outgoing long-wave-earth radiation, 8-12 μ m)観測¹⁴⁾を用いて調査され、最上層の電離層擾乱に関しては、VLF/LF送信局電波を用いた手法¹⁵⁾やVHF帯電波の垂直打ち上げ(bottomside sounding)、GPS衛星を用いたTEC(Total electron content)測定¹⁶⁾などがある。

地震に伴う電磁気現象が前兆的に出現することはほぼ間違いのない事だと思われまます。勿論、これに対して批判的な論文が数論出ていることは承知しているが¹⁷⁾。各種の前兆現象が報告されてはいるものの、最大の問題はその前兆と地震との因果関係が確立しているか否かという点である。その点で、“電離層擾乱”に関しては、統計的因果関係を示す論文が発表されている。先ず、下部電離層擾乱を検出するVLF/LF送信局電波を用いた我々の論文では、7年間の観測データ(15年以上の観測を行っているが、欠測の少ない連続観測という条件から7年に)を用いて、マグニチュード6以上の地震を対象にし、浅い(深さ40km以下)と深い(深さ40km以上)ものに分類して、Superimposed epoch analysisを行った。その結果、浅い地震に対しては、地震の約1週間前に -2σ (σ : 標準偏差)を超えて夜間振幅が減少し、また分散が 2σ を超えて上昇するという因果関係を得ている。他方、電離層上部(F層)に関しては、foF2に関する統計結果(数年にわたる)が得られ、両者の間の明確な因果関係がすでに確立している¹⁶⁾。

以上述べた様、地震電磁気現象においてやるべき事は統計に耐え得るだけの観測事例を蓄積し、その後地震との因果関係を確立することが急務です。しかし、巨大地震の際の事例解析も大きな意味があり、2011年3月11日の東日本巨大地震の前兆現象を報告する。二つの明瞭な前兆を報告する。(1)VLF/LF伝搬異常と(2)ULF(ultra-low-frequency)磁界強度の減少であり、これらはともに下部電離層の擾乱にて統一的に説明されることを示す。

5. 2011年東日本地震

東日本巨大地震の諸元をまとめよう。本地震は2011年3月11日14:46:18LT東北沖にて発生した。震央の場所は地理経緯度にて(36°6' N, 142°52' E)で、その深さは20km前後。そのマグニチュードは9.0で、海の中でのプレート型地震の典型である。

6. VLF/LF伝搬異常¹⁹⁾

神戸地震での電離層擾乱の発見以来は、国内VLF/LFネッ

トワークを構築し、永年にわたり観測を続けている。現時点での観測体制をまとめよう。先ず、VLF/LF観測点(受信点)は北から北海道の母子里(MSR)、中標津(NSB)、東京調布(CHF)、春日井(名古屋)(KSG)、岡山津山(TYM)、高知(KCH)の6点である。近々に三宅島に新規受信点を予定している。次に、受信する送信局電波について述べよう。対象とする送信局は、国内の2送信局(JJY局(福島、40kHz)とJJI局(宮崎、22.2kHz)及び外国局3局(NWC局(オーストラリア)、NPM局(ハワイ)とNLK局(シアトル、米国))である。

このVLF/LFネットワークは15年以上にわたり稼働している。欠測の少ない色々な伝搬パスの7年間のデータを用いた解析を行った。その結果、マグニチュード6以上の、しかも浅い(深さ40km以下)地震に対して、伝搬異常(即ち、電離層擾乱)(トレンドの減少と分散の上昇)と地震との統計的有意な因果関係が確立している(Hayakawa et al., 2010¹⁷⁾)。この統計は主として陸域での地震を対象としている。

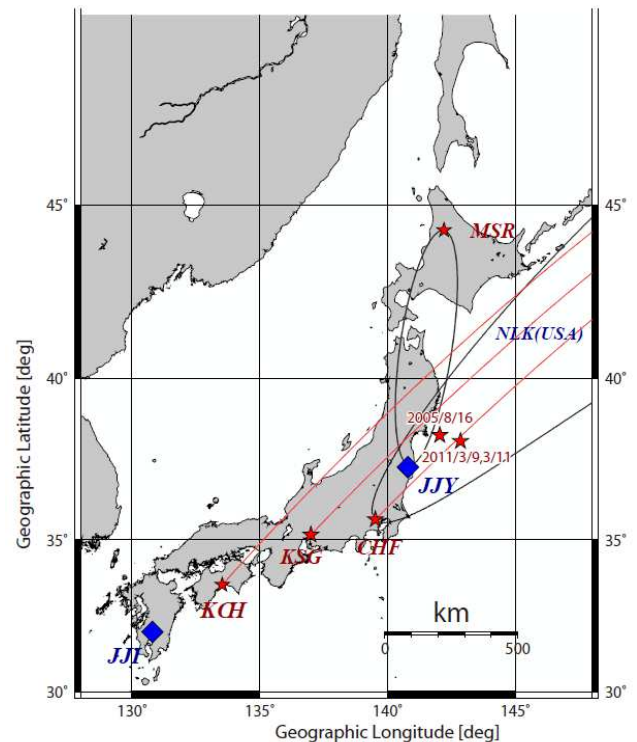


図1 2011年3月11日東日本地震の震央(右の星印)とCHF-NLK(シアトル、米国)パス。KSG-NLK, KSG-NLKパスも示している。

Figure 1. The epicenter of the 2011 Japan earthquake (right star), and CHF-NLK path (with wave sensitive area). The paths (KSG-NLK and KCH-NLK) as well.

図1は2011年東日本地震に伴う伝搬異常を観測した伝搬パス(CHF-NLKパス)を示す。その大円とフレネルゾーン(感知領域)を描いたものである。比較のため、KSG-NLK, KCH-NLKパスの大円だけでも示してある。VLF/LF伝搬異常の解析手法を複数個すでに開発しているが、本論では夜間ゆらぎ法(nighttime fluctuation method)を用いる。ある日の夜間帯の

ある時刻(t)の振幅 A(t)を用い、同じ時刻 t の振幅データの過去 30 日にわたる平均値 $\langle A(t) \rangle$ を求め、その偏差 $dA(t)=A(t)-\langle A(t) \rangle$ を評価する。この $dA(t)$ を用いて、(1)trend(夜間の平均振幅: $dA(t)$ の夜間の平均値、(2)Dispersion(分散)を評価する。更に、それらの値は対応する標準偏差(σ)にて規格化する。尚、長距離の夜間伝搬のため、全パスが完全夜間の時間帯は UT=10 時~12 時に限られ、この時間帯の振幅データを用いる。

解析結果を図 2 に示す。CHF-NLK パスの結果である。上図は trend、下図は dispersion の時系列変化を示したものである。2011 年 1 月 1 日から地震直後までの期間である。従来の陸域の地震に対する統計結果¹⁷⁾では、伝搬異常は(1)trend の有意な減少と(2)分散の上昇で特徴づけられる。勿論、両パラメータは同じ日に変化することもあれば、1-2 日ずれることもあり、全体のパターンとして見るのが大事である。今回の地震はプレート型の典型的な海域地震であり、陸域地震の特性がそのまま同じであるか否かは不明であるが。図 1 を見て明瞭に言える事は 3 月 5 日、6 日にトレンドが急激な減少を示し、同時に分散も上昇を示している。特に、3 月 5 日のトレンドは -3σ を超えて、 -4σ に接近するほどの超異常である。同様の異常が接近する KSG-NLK, KCH-NLK でも観測されている。陸域地震での伝搬異常と同じ特性であると言える。

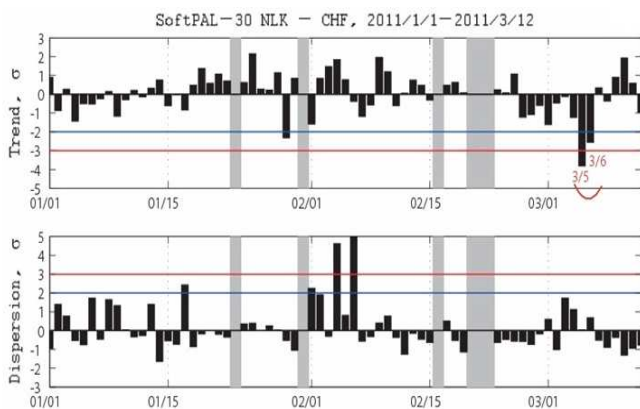


図 2 CHF-NLK パスでの伝搬特性の時系列変化。上図はトレンドに関するもの、下図は分散に関するもの。ともにその標準偏差にて規格化されている。

Figure 2. Temporal evolutions of propagation characteristics of the CHF-NLK path. The upper band refers to trend, and the lower, dispersion. Both parameters are normalized by their corresponding standard deviations.

7. ULF 磁界強度の下降現象

地震に伴う ULF 現象としては、地震の前に ULF 電磁放射が地圏にて発生することはよく知られている⁶⁻¹²⁾。しかし、この現象とは全く関係なく、もう一つの新しい現象を我々は発見し、いろいろと研究して来た。これは地上観測される ULF 波動強度の下降現象(depression)である(Schekotov et

al., 2006²⁰⁾。すでに、ロシアの 4 年間のデータ、また日本の 2 年間のデータを用いて、本現象の統計的特性も明らかにしている。その結果を要約しよう。

- (1) 地震の 1-5 日前(平均的には 3 日)に地上観測される ULF 波動の強度が深夜に著しい減少を示す。
- (2) この減少は水平成分にて明瞭に現われ、その周波数は 0.03 - 0.05Hz (30-50mHz)である。
- (3) 減少の値は将来の地震の大きさ(マグニチュード)に線形的に依存する。

この新しいタイプの ULF 波動変化を 2011 年 3 月 11 日巨大地震に対して事例解析した結果を報告する。

次に使用したデータについて述べる。WDC(世界データセンター)(京都)のデータを使用した。日本国内の三観測点、北海道女満別(MMB)、柿岡(KAK)及び九州鹿屋(KNY)で、各観測点の磁界データの 1Hz サンプリング値である。震央との距離は、それぞれ MMB は 640km, KAK は 300km, KNY は 1300km となっている。図 3 に地震の震央と三観測点(ガウゼント印)を示してある。

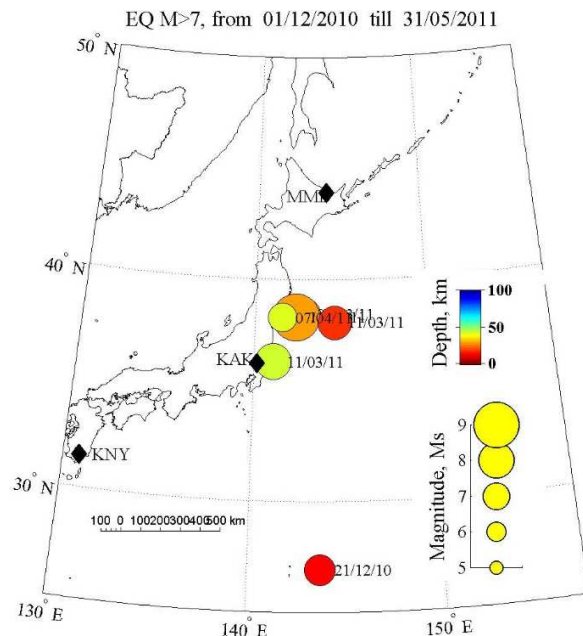


図 3. 3 月 11 日地震と三観測点(KAK, MMB, KNY)との相対位置関係

Figure 3. Relative location of the epicenter of the 2011 earthquake and three magnetic observatories (KAK, MMB and KNY).

重要な水平成分(H 成分)だけを解析に用いる。用いる時間帯は midnight が良いが、三観測点の生データ(電磁環境)を調べた結果、LT=3h が最良との結論である。従って、解析時刻は $\Delta T=3h \pm 2$ 時間としている。次に、ULF 磁界強度低下 (Depression)は次式にて計算する。

$$Dep = \frac{1}{\langle U^2 \rangle_{\Delta T}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、U はセンサーの出力(H 成分)の 2 乗値、即ち周波数のバンド $\Delta f=0.03-0.05\text{Hz}$ にて、 $\Delta T=3h \pm 2$ 時間にて平均化し

た値である。次に、i 番目の日の相対減少(relative depression)を次式にて計算する。

$$\delta Dep_i = \frac{Dep_i - \frac{1}{N} \sum_{j=i-N}^{j=i-1} Dep_j}{\frac{1}{N} \sum_{j=i-N}^{j=i-1} Dep_j} \dots\dots\dots (2)$$

分母は平均値を、分子は平均からのずれを表している。N はフィルタパラメータで、本解析では N=5(日)としている。

ULF 磁界強度の低下に関する最終結果を図4にまとめている。上図は地磁気活動(Dst)や地震活動(Ks)の時系列変化である。下図は δDep の三観測点での値であり、上から MMB、KAK、KNY の結果である。3/11 の地震の日は縦線にて表示してある。図4より分かることは、三観測所において、3月11日の地震の前に δDep が著しく上昇していることが分かる。即ち、ULF の磁界強度が有意な低下(図では上昇である)を示していることを示している。更に、3観測点での結果を比較すると、KAK が最も上昇が著しい。即ち、KAK にて最も強度が低下していると言える。 δDep の変動を見ると、KAK が ULF 低下には最も感度が低いと言える。人工雑音との関係で、 δDep の変動幅(変動の標準偏差)とピークとの比を考えると、KAK がやはり最も ULF 強度が低下していると結論できる。三観測点のうち、KAK は最も地震震央に近いためであろう。

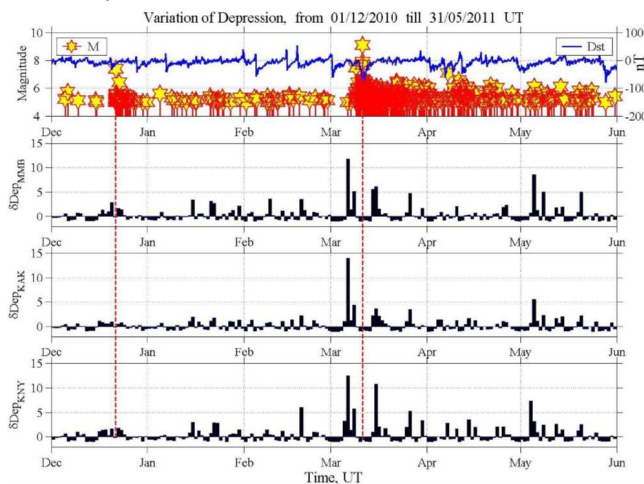


図4 ULF 磁界強度の下降現象の結果。上図は Dst 指数(地磁気活動度)と地震情報である。第2~第4図は国内三観測点での δDep の時系列変化を示す。上から MMB, KAK, KNY である。縦の点線は 3/11 の地震日を示す。

Figure 4. Temporal evolution of geomagnetic activity (Dst) and earthquake activity (top panel). The 2nd to fourth panels refer to the results of δDep at three observatories (from top, MMB, KAK and KNY). The vertical dotted line indicates the date of 3.11 earthquake.

8. まとめ

6 節、7 節で得られた観測事実を要約しよう。

- (i) VLF/LF 伝搬異常は 3 月 5 日、6 日日本データ (NLK-CHF パス)にて明瞭に認められ、ロシアデータでも 3 月 4, 5, 6 日に同様に異常が認められた。
- (ii) ULF 波の強度低下は 3 月 6 日に明瞭に認められ、3 観測点のうちでは特に KAK が顕著であった。

先ず、各現象の発生メカニズムを考えてみよう。(i)の VLF/LF 伝搬異常は、これらの電波の反射レベルである下部電離層(D/E 層)での異常電離であることはすでに合意されている。即ち、3 月 5 日、6 日前後に明らかに下部電離層は地震の前兆として擾乱を受けていると言える。次の(ii)に関しては、仮説として Molchanov and Hayakawa (2008)⁷⁾では、線形過程として、磁気圏起源の ULF 波がアルフヴェン波にて下降してくる際、下部電離層が擾乱していると、より高い吸収を受けるとの考えを提案している。VLF/LF 伝搬異常の発生している日に ULF 減少異常が観測されていることはこの考えと矛盾しない。勿論、VLF/LF 伝搬異常と ULF 磁界強度下降でみている領域が空間的に少々異なるので、完全な日の一致はないが、ほぼ同じ日に同時に発生していることは、この下部電離層擾乱が地震の前兆だと考えるのにより強い支持を与えられる。

一般に地震の前兆は誰もが証明できるものではない。そこで、我々が異常だと考えるものが前兆であると言うためには、二、三の方法が考えられよう。先ず、第一は種々の観測項目のデータを比較し、相関を取ることで信頼度を高めることが考えられる。また、本論文の様に、現象的には全く異なる現象が単一の考えにより統一的に解釈できることを示すなどが挙げられよう。

文 献

- (1) 早川正士：「最新・地震予知学(電磁波異常でわかる、その前兆)」, 祥伝社 (1996 年)
- (2) 上田誠也：「地震予知はできる」, 岩波科学ライブラリ, 79 (2002 年)
- (3) 早川正士：「なぜ電磁気で地震の直前予知ができるか」, 日本専門図書出版 (2003 年)
- (4) 早川正士：「地球環境とノイズの意外な関係 (地震、大気、宇宙の声をきく)」, 技術評論社 (2009 年)
- (5) 早川正士：「地震予知できる」, KK ベストセラーズ (2011 年)
- (6) 早川正士：「地震電磁気現象の計測技術と研究動向」, 電子情報通信学会論文誌, vol. J89-B, No. 7, 1036-1045 (2006 年)
- (7) Molchanov, O. A., and M. Hayakawa : "Seismo Electromagnetics and Related Phenomena": History and latest results, TERRAPUB, Tokyo, 189 p. (2008).
- (8) Varotsos, P. : "The Physics of Seismic Electric Signals", TERRAPUB, Tokyo, 338p (2005).
- (9) Fraser-Smith, A. C. : "The ultra-low-frequency magnetic fields associated with and preceding earthquakes, in "Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes", Ed. by M. Hayakawa, Transworld Research Network, Trivandrum India, 1-20 (2009).
- (10) Kopytenko, Yu. A., V. S. Ismagilov, and L. V. Nikitina : "Study of local anomalies of ULF magnetic disturbances before strong earthquakes and magnetic fields induced by tsunamis", in "Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes", Ed. by M. Hayakawa, Transworld Research Network, Trivandrum India, 21-40 (2009).
- (11) Hayakawa, M. : "VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes", Sensors, vol. 7, 1141-1158 (2007).
- (12) Hattori, K. : "ULF electromagnetic anomalous changes possibly associated with earthquakes", in "The Frontier of Earthquake Prediction Studies", Ed.

by M. Hayakawa, Nihon-senmontosho-Shuppan, Tokyo, 122-174 (2012).

- (13) Hayakawa, M. : "Seismogenic perturbation in the atmosphere", "Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes" Ed. by M. Hayakawa, Transworld Research Network, Trivandrum (India), Chapter 5, 119-136 (2009).
- (14) Ouzounov, D., S. Pulinets, K. Hattori, M. Kafatos, and P. Taylor : "Atmospheric signals associated with major earthquakes. A multi-sensor approach", in "The Frontier of Earthquake Prediction Studies", Ed. by M. Hayakawa, Nihon-senmontosho-Shuppan, Tokyo, 510-531 (2012).
- (15) Hayakawa, M. : "Lower ionospheric perturbations associated with earthquakes, as detected by subionospheric VLF/LF radio waves", in "Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes", Ed. by M. Hayakawa, Transworld Research Network, Trivandrum (India), Chapter 6, 137-185 (2009).
- (16) Liu, J. Y. : "Earthquake precursors observed in the ionospheric F-region, in "Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes", Ed. by M. Hayakawa, Transworld Research Network, Trivandrum (India), 187-204 (2009).
- (17) Campbell, W. : Natural magnetic disturbance fields, not precursors, preceding the Loma Prieta earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 114, A05307, doi:10.1029/2008JA013932 (2009).
- (18) Hayakawa, M., Y. Kasahara, T. Nakamura, F. Muto, T. Horie, S. Maekawa, Y. Hobara, A. A., Rozhnoi, M. Solovieva, and O. A. Molchanov : "A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes", *J. Geophys. Res.*, vol. 115, A09305, doi:10.1029/2009JA015143 (2010).
- (19) Hayakawa, M., Y. Hobara, Y. Yasuda, H. Yamaguchi, K. Ohta, J. Izutsu, and T. Nakamura : "Possible precursor to the March 11, 2011, Japan earthquake: ionospheric perturbations as seen by subionospheric very low frequency/low frequency propagation", *Ann. Geophysics (Italy)*, vol. 55, N. 1, 95-99, doi: 10.4401/ag-5357 (2012).
- (20) Shekotov, A., O. Molchanov, K. Hattori, E. Fedorov, V. A. Gladyshev, G. G. Belyaev, V. Chebrov, V. Simitsin, E. Gordeev and M. Hayakawa : "Seismo-ionospheric depression of the ULF geomagnetic fluctuations at Kamchatka and Japan", *Phys. Chem. Earth*, vol. 31, 313-318 (2006).