

地震電磁気現象の計測技術と研究動向

早川 正士[†]

Observation of Seismogenic Electromagnetic Phenomena and Recent Results

Masashi HAYAKAWA[†]

あらまし 近年地震に伴って各種の電磁気現象が発生することが報告されている。すなわち、地圏から直接放射する電磁気現象や地震に伴う大気圏や電離圏のじょう乱などである。本論文では、地震の短期予知の観点から極めて注目されている二つの観測項目；(1) ULF 電磁放射（地圏から直接放射される極低周波電磁放射）；(2) 電離層じょう乱（VLF/LF 送信局電波の伝搬異常として検出）を取り上げ、その計測手法や最新の成果までをレビューする。

キーワード 地震電磁気現象, ULF 磁場変動, 短期地震予知, VLF/LF 電離層・大地導波管伝搬

1. ま え が き

近年地震に先行して発生する電磁気学的な現象が様々な周波数帯において報告されている [1]~[3]。これらは、観測方法によって (a) 地殻内部から出てくる電磁波（自然放射）を直接観測する方法と (b) 既存電波の伝搬異常として地震に伴う現象を検出する方法（電波サウンディング）とに大別される。前者は、地震の発生準備段階において地殻内部で応力変化等の原因で自然放射が発生するとの考えに立脚している。後者は、地震に関連するじょう乱が大気圏や電離圏に発生するとの仮説に基づく。もし伝搬経路上の大気圏や電離層に異常があれば、精密に制御されて送信されている既存電波の観測点での振幅や位相に異常が出現するとの考えによる。地震電磁気現象が目指す地震の短期予知の観点から注目されているのが、(1) 地圏内現象である ULF 放射と (2) 電離層じょう乱観測の二つである。(1) は (a) の直接放射のうちの極超低周波の電波である。(2) の観測には (b) の既存の VLF/LF 送信局電波の伝搬異常を用いている。本論文ではこれらの計測技術と最新の成果や研究動向を紹介する。

2. ULF 観測

2.1 ULF 放射研究の歴史と現状

1980 年代後半に入り、地震に関連すると見られる ULF 帯の電磁気変動に関する研究が開始された。一般に高い周波数の電磁波は表皮効果により地表まで伝搬できないが、ULF 帯電波にはこの問題はない。後出する日本のフロンティア計画が開始されるまでで、地震に先行する磁場変動として信頼できる事例は、(1) アルメニア・スピタク地震（1988 年 12 月 8 日マグニチュード (M) 6.9, 深さ (d) 6 km), (2) アメリカ・ロマプリータ地震（1989 年 10 月 8 日 M7.1, $d = 15$ km), (3) グラム地震（1993 年 8 月 8 日 M8.0, $d = 60$ km) の三つであった。観測点と震央（地震は地下で発生するが、それをまっすぐ地表に投影した点）の距離は (1) では 129 km, (2) では 7 km, (3) では 65 km であった [4]~[6]。(2) のロマプリータ地震の際の ULF 波変動を図 1 に示す。地震の 12~5 日前に磁場の水平成分の強度が著しく上昇し、その後静穏化した後、1 日前から再び強度が上昇し、地震の 3~4 時間前から急激な上昇が観測された。ほかの二つの地震でも有意な磁場強度の変化が観測されており、ULF 磁場変動と地震活動との関係を詳細に研究するきっかけとなった。実は、後述する研究により、ULF 放射の時系列変化は観測されたすべての地震に対しても同じであることも分かっている。まず地震と ULF 磁場変動の関係について解説する。最初に、関東地区に構築した我々の

[†] 電気通信大学電子工学科, 調布市

Department of Electronic Engineering, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, 182-8585 Japan

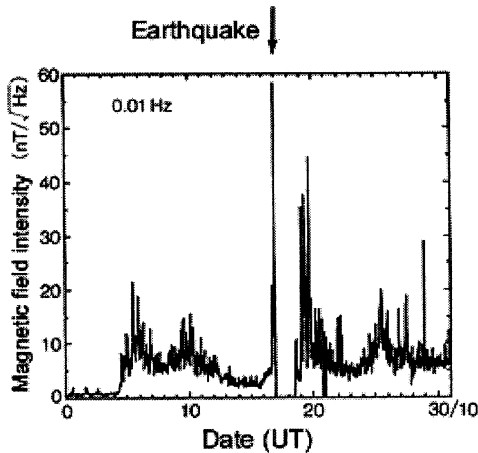


図1 ロマプリータ地震に伴う磁場変動 (0.01 Hz)
Fig. 1 Geomagnetic anomalous changes for Loma Prieta earthquake (0.01 Hz).

ULF ネットワークを紹介する。続いて、ULF 帯の磁場データを用いた解析においては、観測された ULF 帯のデータが地殻内部起源であるかどうかを弁別することが重要なことであり、信号処理法も述べる。

2.2 関東地区における ULF 観測ネットワーク

国内での地震電磁気現象の研究は神戸地震後の旧科学技術庁主導によるフロンティア計画により大きな発展をとげた。二つのフロンティアは (1) 理化学研究所と (2) 旧宇宙開発事業団 (早川担当) によるものである。理化学研究所のフロンティアでは直流の地電流の測定を中心テーマととらえ、他方宇宙開発事業団は地震リモートセンシングフロンティア研究の名が示すように、地圏のみならず、大気圏や電離圏での地震に伴うじょう乱を総合的に調査した。

両フロンティア研究の境界領域である ULF 放射に対して両フロンティアグループが協力して ULF 放射の観測及び研究を行ってきた。まず、理化学研究所の主眼である地電流 (VAN 法) 測定は直流の測定であるが、より高周波の ULF 現象とも密接に関係していることが予想される。また、前述した大地震に対する明りょうな前兆 ULF 放射が確認されるに至り、関東地区での大地震に備えることを目的として、図 2 に示すように関東地区に ULF ネットワークを構築した。このネットワーク構築に必要な事項は ULF 放射がどの程度の距離まで地震に感ずるかであるが、これは我々の理論計算 [7] に基づいている。 $M = 7$ では半径 100 km, $M = 6$ では ~ 70 km である。図 2 では

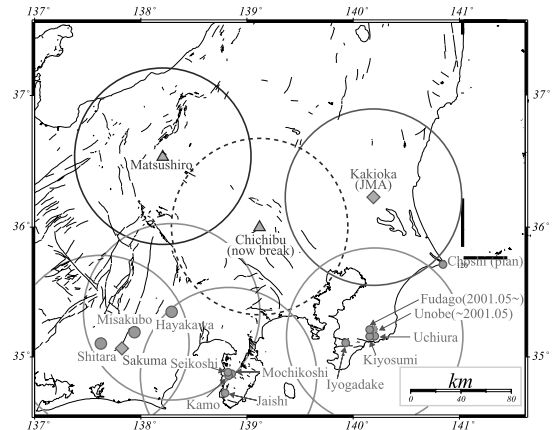


図2 関東地区での ULF 観測ネットワーク。丸印の観測点はトーション型磁力計が、三角形の観測点はインダクション磁力計が、ダイヤモンド印の観測点はフラックスゲート型磁力計が設置されている。

Fig. 2 A network of ULF observing stations in the Kanto (Tokyo) area. The observing station with a circle indicates that it is equipped with a torsion type magnetometer, a triangle, induction type, and a diamond, flux-gate type.

この点を考慮した観測点の設定となっている。伊豆半島、房総半島、柿岡、秩父、松代の 5 観測地点で構成され、観測点間の距離はほぼ 80 km である。しかも、伊豆、房総半島ではそれぞれ 3~4 箇所 (間隔 10 km 程度) の観測点が設置されている。すなわち、伊豆には清越、持越、賀茂観測点があり、房総には宇野辺、内浦、清澄観測点があり、これらによりローカルなアレーも構成し、全体のグローバルアレーと相補う形となっている。

両半島でのすべての観測点の観測システムはトーション型の磁力計 (ロシア製, MVC-2DS) を採用している。その特性を要約すると、

- (1) 型式: トーション型, 3 成分 (x, y, z) 測定
- (2) 観測周波数: 0~10 Hz
- (3) 動作範囲: ± 5000 nT
- (4) 雑音レベル: $3pT_{rms}/\sqrt{Hz}$ (1 Hz) である。

上記磁力計による観測は順調に稼動しており、清越では 50 Hz, 持越でも 50 Hz, 賀茂では 12.5 Hz のサンプリング周波数で観測を行っている。

次に柿岡は気象庁の柿岡地磁気観測所を意味し、同所のデータを使用することを考えている。同所ではインダクション型磁力計も使用している。次に、秩父及び松代はウクライナ製のインダクション型の磁力計であるが、その諸元を次にまとめている。なお、柿岡の

磁力計も下記とほぼ同等の性能である。

- (1) 型式：サーチコイル（インダクション）磁力計
- (2) 観測周波数：0.01～30 Hz
伝達関数：線形（0.01～1 Hz）
平たん（1～30 Hz）
- (3) 雑音レベル： $\leq 20pT/\sqrt{Hz}$ （0.01 Hz において）
 $\leq 2pT/\sqrt{Hz}$ （0.1 Hz）
 $\leq 0.2pT/\sqrt{Hz}$ （1.0 Hz）
- (4) 雑音除去：60 dB 以上（50 Hz $\pm$ 0.2 Hz, 60 Hz $\pm$ 0.2 Hz）

2.3 ULF 帯の磁場変動の検出法

- (1) 磁場スペクトルの鉛直成分と水平成分の比（偏波解析）

地殻活動に関連する磁場変動を検出するためにスペクトルの鉛直成分と水平成分の比 S_Z/S_H が有効である [6]。地圏、大気圏、電離層を代表する電気的特性をもつ多層構造中にダイポールソースを置き、そこから放射される電磁場を理論的に計算する。宇宙から飛来するプラズマ波動では磁場スペクトルの鉛直成分と水平成分の比 S_Z/S_H （偏波と呼ぶ）が 1 よりかなり小さいことが予想されるが、地殻活動に起因する ULF 波動ではビオ・サバルの法則からも容易に $S_Z/S_H \gtrsim 1$ が予想される。

関東 ULF ネットワークで検出される地震は極めて少ないため、他のイベントを探すことが不可欠である。そこで、1997 年 3 月 26 日及び 5 月 13 日に鹿児島県北西部で発生した M6.5 と M6.3 の地震（ともに深さ $d \simeq 20$ km であった）を対象として、偏波解析を適用する [8]。これらの地震から距離約 60 km の鹿児島県垂水でフラックスゲート磁力計による 3 成分磁場観測が 1 秒サンプリングにて行われていた。ここでは 1996 年 8 月から 1997 年 9 月まで約 1 年間のデータを示す。地殻活動と ULF 磁場変動の関係を明らかにするため、地磁気データから地殻活動に起因すると考えられる地磁気変化を抽出することが重要である。このために、偏波解析を適用する [6]。偏波解析の手順を示す。(1) 人工雑音及び地磁気変動の影響をできるだけ小さくするために地方時午前 0 時から 4 時の夜間データを使用した。(2) データを 30 分ごとの 8 個のセグメントに分割し、そのセグメントごとに FFT 解析を行った。(3) スペクトルの平均値及び分散を求め、地震に関連する ULF 放射の主たる周波数領域を推定した。(4) 地殻活動に起因すると考えられる地磁気変化を抽出するため

に偏波解析 (S_Z/S_G) を行った (図 3 中での S_G は水平成分の合成 ($S_G^2 = S_H^2 + S_D^2$) の意)。この計算においては 8 個のセグメントから求められた平均スペクトル及び平均偏波を 1 日の代表値とした。(5) 得られた現象が局所的なものか地球規模のものを判別するためにリモートリファレンスデータと比較検討した。(6) 平均スペクトルの平均偏波の時間変化と地磁気活動を表す指標である ΣKp と地域的な地震活動度と比較検討を行った。垂水観測点で観測された磁場変動の空間的広がりを見積もるため、1200 km 離れた小笠原諸島・父島における地磁気 3 成分データと、垂水観測点の地磁気共役点であるオーストラリア・ダーウィン観測点の地磁気 3 成分データを調査した。これら 2 観測点をリモートリファレンスという。読者の中にはなぜ日本の地震を研究するのにオーストラリアのデータを参照したのかと疑問をもつ方もあるに違いない。地震に関連する ULF 帯電磁放射の最大の雑音源は太陽活動に起因する地磁気変動である。この変動は磁力線の弦の振動のように伝搬し、その弦の両端（地磁気共役点）ではほとんど同じ地磁気変化が観測されるためである。3 個所では全く同じ磁力計が稼働していた。ちなみに解析期間では、父島観測点及びダーウィン観測点の周囲 100 km 以内では地震はほとんど発生していない。

図 3 (a) に垂水観測点の半径 90 km 以内の地震活動度（1 日当りの地震放出エネルギーをマグニチュード (M) に換算）を示した。図 3 (b) は 3 観測点の偏波 (S_Z/S_G) の 10 日間の移動平均（当該日の前のみ 10 日間の）をプロットしたもので、太線が垂水である。(c) には地磁気活動度 (ΣKp) を示した。図 3 (b) の点線は父島、ダーウィンの変化を示しているが、両者は全期間を通して安定していることが分かる。それに対し、太線の垂水のグラフは特異な変動をしている。すなわち、最初の地震の前に通常レベルの 1.0 から 2 倍以上に増加している。その後減少が始まり、その減少が落ち着いたところで最初の地震が発生し、しばらくその値が継続している。再び減少が始まり、第 2 の地震が発生している。偏波は 7 月初旬には通常レベルに回復している。このような変動はダーウィン及び父島観測点では認められず、垂水観測点固有の変化である。垂水観測点周辺の地震活動のエネルギーを積算したグラフ（図 3 (a) の M）と偏波の結果を比較すると、(1) 偏波の値が地震活動に先行して高まっていることと、(2) その変動が地震活動度の変動と似ていること

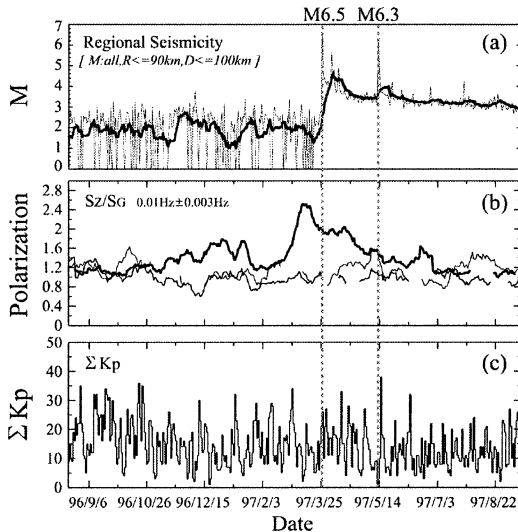


図3 垂水、父島、ダーウィン観測点のスペクトル解析結果 (0.01 Hz バンド)。(a) は地震活動を、(b) は偏波特性 (S_z/S_g) を、(c) は地磁気活動 (ΣK_p) を示す。(b) で垂水の結果が太字で示されている。

Fig. 3 Result of spectral analysis (S_z/S_g) at Tarumizu, Chichijima, and Darwin stations (0.01 Hz). (a) Seismic activity, (b) Polarization (Tarumizu result in a full line) and (c) Geomagnetic activity (ΣK_p).

が分かる。このことは偏波の値が地域の地震活動度を表すパラメータである可能性を示唆し、しかも偏波の値の異常が地震活動に先行していることを示している。他方、地磁気活動度とは顕著な関係が認められない。

(2) 主成分解析

伊豆半島及び房総半島で3成分磁力計3台を用いたアレー観測 (50 または 12.5 Hz サンプリング) を実施している。2000年6月末より三宅島で地震活動が活発化し、噴火活動が始まった。同時に三宅島だけでなく、その周辺でも極めて活発な群発地震活動が発生した。2000年6月から9月末までに周辺地域で発生した地震総数は12,000個を超えるという気象庁観測開始以来の著しい地震活動を呈するに至った。この地殻変動は我々が関東にULFネットワークを構築して以来最大の活動であり、関東ULFネットワークデータを使用する。ここでは主成分解析 (Principal Component Analysis) と呼ばれる手法を伊豆に展開している地磁気アレー観測のデータに適用した [9]。空間的に近接した地点に展開された3台の磁力計のデータを用いたため3組のデータ群が存在し、原理的にPCA解析では3個の信号源に分離される。ある観測点で受信される

地磁気変化は一般に、(1) 磁気嵐などに起因する超高層 (磁気圏・電離圏) の効果、(2) 人工ノイズ、(3) それ以外のもの (地震活動に関連する地磁気変化を含む) の合成であると考えられる。各観測点の30分ごとの時系列データをもとに周期10秒ないし100秒の変化に注目して固有値解析を行い、その固有値 λ_n ($n=1\sim3$) の時間変化を追跡した。その結果、第1主成分の λ_1 (第1主成分の電力を反映する) は(1)の太陽活動を代表する地磁気活動度指数 A_p と極めて良い相関を示した。第2主成分の λ_2 は24時間周期をもち、昼間大きく、夜間小さいという特徴から人間活動に起因するノイズと判断した。図4は第3主成分の λ_3 の時系列変化を示した。群発地震活動の始まる前の4月下旬から全体のレベルがやや上昇し、特にM6クラスの三つの地震の数日前から顕著に λ_3 の値が上昇していることが確認された。我々はこの変動が地殻活動起源のものであった可能性が極めて高いと考えている。固有ベクトルを考慮した解析でも前述の可能性を支持している [10]。以上の結果は、高度な信号処理が地震及び火山噴火に関する地殻内電磁現象の研究にとって極めて重要な貢献をすることを示した。

(3) 新しい信号処理

新しい信号処理として、(1) フラクタル解析と(2) 方位測定を挙げておく。まず、(1)のフラクタル解析の最新の結果を簡単に紹介する。地震発生のような非線形現象は自己組織化臨界概念 (SOC, Self-organized criticality) にて説明できることが分かっている。このSOC概念がULF磁場データからも読み取ることができるのではないかの発想に基づいた解析がフラクタル解析である。グアム地震に対してULF波形の周波数スペクトル ($S(f) \propto f^{-\beta}$ (べき乗則)) のスペクトルこう配 (β) を初めて評価し、この β 値が地震の1カ月前から1に近づき (フリッカー雑音) 臨界状態に達することが明らかになった [11]。更に、フラクタル (モノ) 解析での解析手法の改良やマルチフラクタル解析も発表し [12]、更なる前兆効果を得ている。

次に、(2)の方位測定について述べよう。前述の伊豆諸島群発地震に対して信号の到来方向を推定する方位測定を実施した。伊豆半島も房総半島も複数 (3~4個) の観測点が設置されていることは述べたが、複数観測点での磁界データに基づいてその磁界こう配を評価する方位測定を採用した。伊豆よりの測定方位と房総よりの測定方位との交叉法によりその発生位置を決定したが、この発生位置はその後の地震震央とほぼ一

後を伝搬してきたものと考えている。

2.5 将来の3成分磁場観測網の構築に向けて

現在、日本では気象庁地磁気観測所、国土地理院等で3成分磁場の連続測定が行われているが、サンプリングレートは1分に1データといったものが多い。大学等でもかなりの観測網が構築されているが、残念ながら固体地球物理学の分野ではプロトン磁力計による全磁力計測が主流を占めている。この磁力計は直流測定では優位であるが、ULF帯ではその性能が落ちる。磁場データを地震予知研究に応用するためには、(1) 3成分磁場測定データであること、(2) サンプリングレートは毎秒1サンプリング以上、(3) 分解能として10 pT以下が望ましい。

また、磁場変動による地殻活動監視には地磁気活動/太陽活動をよく知る必要がある。規模の大きな地震の直前には地磁気変動のような変動があることもいくつかの例で見つかっており、信号の時空間的な特徴を正確に把握し、信号を弁別する上で衛星による宇宙からの監視と陸上からの監視をネットワーク化させることも必要である[17]。

3. 電離層じょう乱観測

3.1 VLF/LF 送信局電波を用いた電離層じょう乱の観測

既存の送信局電波を用いて地震に伴う大気圏や電離層のじょう乱を検出しようとするものである。送信局電波を用いた能動実験の長所は送信点の諸特性（場所、送信周波数、送信出力等）が完全に把握されており、受信点（観測点）との間（大円という）のどこで発生する地震に対しても感知できる点である。前述したULF波観測は局所観測であり、主として観測点の近くにて地震が発生しないと、ULF波を受信することができない。このため、今までに観測された事例は世界中のデータを集めても図5のように、10数例にすぎない。それに反して、送信局電波を用いた能動実験は積分観測と呼べ、事例数を蓄積することが極めて容易であるという重要な特徴をもっている。この能動実験は神戸地震後の旧宇宙開発事業団の地震リモートセンシングフロンティア計画（早川担当）にて多くの成果を収めた。高周波（VHF帯）での送信局としてFM放送波があり、見通し外でも受信されることがしばしばある。このような見通し外VHF波（FM放送波）に対する方位測定（八木アンテナを用いて方位角と入射角を決定する）から、この見通し外VHF波の

受信は地震に伴う大気圏じょう乱によることを初めて明らかにした[2]。以下ではVLF/LF伝搬に基づく電離層じょう乱の事例を示す。

まず、我々の神戸地震に対する電離層じょう乱の発見を述べよう。本研究は前述したフロンティア計画直前の結果である。対馬にはオメガ局（10, 11, 13 kHz）送信局が設置されており（航行用であったが、1997年9月末に停波した）、その発射された電波は電離層・大地導波管内を伝搬し、犬吠観測点（当時通信総合研究所）にて観測されたVLFデータを同研究所と共同にて解析した結果を示す[18]。図6(a)は対馬-犬吠伝搬路を示し、この距離は約1,000 kmで、VLF伝搬にとっては極めて短距離といえる。このような短距離伝搬では多モードによる干渉により日出、日没において振幅、位相に最小となる時刻（ターミネータと名づけた）が出現することが電離層・大地導波管伝搬理論から明らかとなっている。この日出、日没付近でのターミネータタイムが神戸地震に対して異常を示した（図6(b)を参照せよ）。この異常は地震の数日前から発生し、地震当日に消失した。日中が等価的に長くなっていることを示し、下部電離層が数km低下することにより説明できる[18]。本発見は地震に伴う電離層じょう乱の初めての信頼できる結果として世界的に認められ、2004年6月に打ち上げられた地震電磁気専用衛星（仏国DEMETER衛星）のパンフレットの第1頁に図6(b)が引用されている。更に、本神戸地震も含め過去13年間の対馬-犬吠データにより11例（マグニチュード6.0以上の）に対する解析から、浅い（深さ30 km以下）、しかも大円近くの地震の約80%に対して電離層じょう乱が発生することを確かめた[19]。

前述した旧宇宙開発事業団フロンティア計画ではこのVLF/LF送信局電波を用いた電離層じょう乱観測を最重要項目として位置づけた。

3.2 VLF伝搬による電離層じょう乱観測の現状と最新の結果

(1) 国内VLFネットワークの構築

図7は国内7観測点（北から北海道母子里、東京調布、千葉館山、清水、春日井（名古屋）、舞鶴、高知）をフロンティア計画にて設置し、各観測点では、(1) NWC局（オーストラリア西部、19.8 kHz）、(2) NPM局（ハワイ、21.4 kHz）、(3) NLK局（米国、24.8 kHz）、(4) JJY局（福島、40 kHz）、(5) JJI局（九州えびの、22.2 kHz）を同時受信している。多く

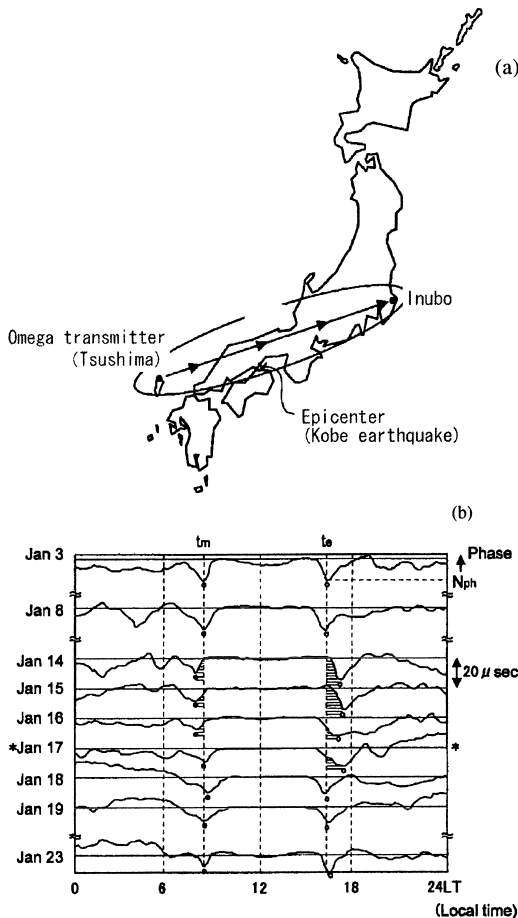


図6 神戸地震に対する VLF 伝搬 (対馬オメガ局-犬吠観測点) 異常の観測 (a) 伝搬経路 (b) 伝搬異常 (ターミネータタイムの異常)

Fig. 6 Observation of anomaly in subionospheric propagation between the Omega (Tsushima) transmitter and the Inubo observatory for the Kobe earthquake. (a) Propagation path, and (b) anomaly in terminator time.

の VLF/LF 送信局電波の電離層・大地導波管内伝搬波の振幅と位相を各観測点では精度良く計測している。地震に伴う電離層じょう乱観測では 120 秒 (2 分) のサンプリングとなっている。従来の VLF 局電波観測システムでは 1 局だけを受信するシステムで 1 分サンプリングがほとんどであったが、我々のシステムでは次のような改良を行っている。複数局の同時受信と時間分解能を変化させること (50 ミリ秒から 120 秒まで) を初めて実現している。7 観測点と各観測点での 5 局の VLF/LF 送信局電波の受信により、本国内 VLF ネットワークを用いてほぼ日本全域の地震に対

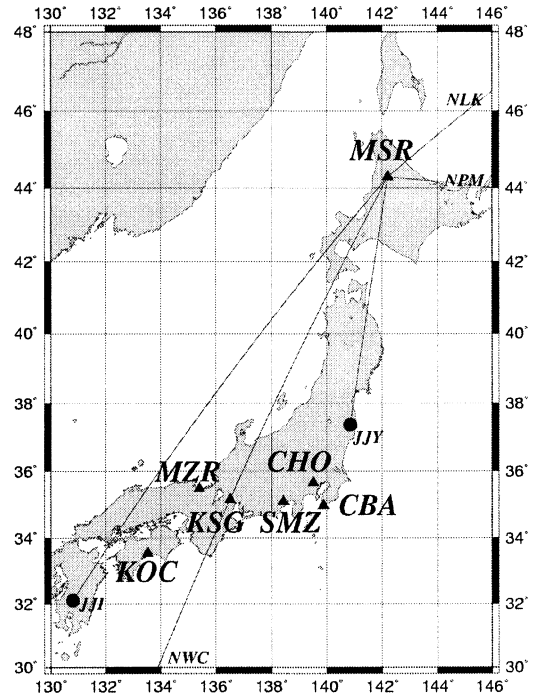


図7 国内 VLF ネットワーク (電離層じょう乱観測). 観測点は母子里 (MSR), 調布 (CHO), 千葉 (CBA), 清水 (SMZ), 春日井 (KSG), 舞鶴 (MZR), 高知 (KOC) である。各観測点では同じ VLF/LF 送信局を受信しているが、図では母子里だけに表示した (NLK, NPM, NWC, JJY, JJI)。

Fig. 7 VLF network for observation of ionospheric perturbations. The network is composed of seven observing stations and 5 VLF/LF transmitter signals are received at each station.

応することができる。また、多くの伝搬経路での異常の出現 (非出現) の比較により地震に伴う電離層じょう乱域を 100 km 程度の精度にて推定することも可能としている。

更に、外国との共同研究として、我々の VLF/LF 受信器の設置要請があり、ロシアカムチャッカ、台湾、南ヨーロッパ (ギリシャ、イタリア) にも設置され、データが蓄積されている。

(2) 電離層じょう乱の事例解析

フロンティア計画期間のみならず、現在までには多数の大きな地震が発生している。例えば、2000 年鳥取西部地震、2003 年十勝沖地震 [20]、2004 年紀伊半島沖地震、新潟中越地震、2004 年 12 月のインドネシアスマトラ地震などがあり、既にこれらの地震に対して明りょうな電離層じょう乱が VLF 伝搬異常 (ターミネータタイムの異常、夜間振幅揺らぎ) として発生し

ていることを報告している．本論文では最新の一例を示そう．図 8 は 2004 年 12 月 26 日にインドネシアスマトラで発生した大地震 (M9.0) に対する我々の結果である．図 8 (a) にて用いた伝搬路はオーストラリアの送信局 NWC 局と日本の国内 3 観測点 (千葉, 調布, 高知) である．地震の円の大きさがマグニチュードに比例し, 色は深さを表している．伝搬路長約 6,000 km で, スマトラ地震の震央は大円より 2,000 km ほど離

れており, 通常 (マグニチュード 6~7 では) では伝搬異常は期待できない．図 8 (b) が夜間の揺らぎ量 (夜間の平均 (例えば当該日の前後 10 日間) 振幅変化からのずれを夜間にわたって積分した量) を評価したもので, 12 月 8 日と 12 月 21~27 日において著しい揺らぎの上昇 (図 8 (b) にて矢印にて示す) を検出していることを示した [21]．すなわち, 12 月 8 日の鋭いピークについては千葉と調布受信局にて $m+2\sigma$ (m : 平均, σ : 標準偏差) を超えている．また, 12 月 21~27 日の広いピークについても調布, 高知にて対応する $m+2\sigma$ を超えるという異常である．インドネシアでの GPS 信号を用いた TEC (Total Electron Contents, 総電子数) 測定において同日に有意な異常を見出しており [22], 我々の検出したものがスマトラ地震の影響である可能性が高いと結論している．

(3) 統計解析

多くの事例解析に加えて, 電離層じょう乱と地震との因果関係を統計的にも調べている．まず, Rozhnoi ら [23] は日本の JJY 局をロシアカムチャッカ観測点にて受信した 2 年間にわたるデータを用いて, M5.5 以上の地震に対しては電離層じょう乱を検出できることを報告している．また, 国内での JJY 局-高知観測点間の伝搬パスに対して, 6 年間のデータを用いて, Superimposed epoch analysis により地震 (M5.5 以上) と電離層じょう乱 (VLF 電界強度) との明りょうな因果関係を統計検定により確認している．

3.3 地圏・大気圏・電離圏結合の解明に向けて

学問的には地圏の効果がいかに大気圏や電離圏まで影響するかという問題が注目され, 我々が提唱した「地圏・大気圏・電離圏結合」という言葉は地震電磁気分野で一般的な言葉として近年定着している [17]．図 9 は早川らが提唱する, 可能な結合機構である [24]．三つのチャンネルが考えられる．(1) Chemical channel, (2) acoustic channel と (3) electromagnetic channel である．(1) の化学チャンネルは地震の前に地下からのラドン放出等により大気の導電率が変化し, それに伴う大気電界の変調が電離層じょう乱を引き起こすものである．(2) の音響チャンネルは大気振動 (主としては大気重力波, 大気音波) によるエネルギーの下部電離層への伝達によるもの．最後の (3) の電磁チャンネルは電磁波による結合で, 地震前兆の電磁波 (ULF 波等) による下部電離層の直接的加熱・電離や ULF 波が磁気圏へ侵入し内部放射帯プロトンと相互作用し, 電離圏へ粒子を降下させるなどとするものである．第 3 チャンネル

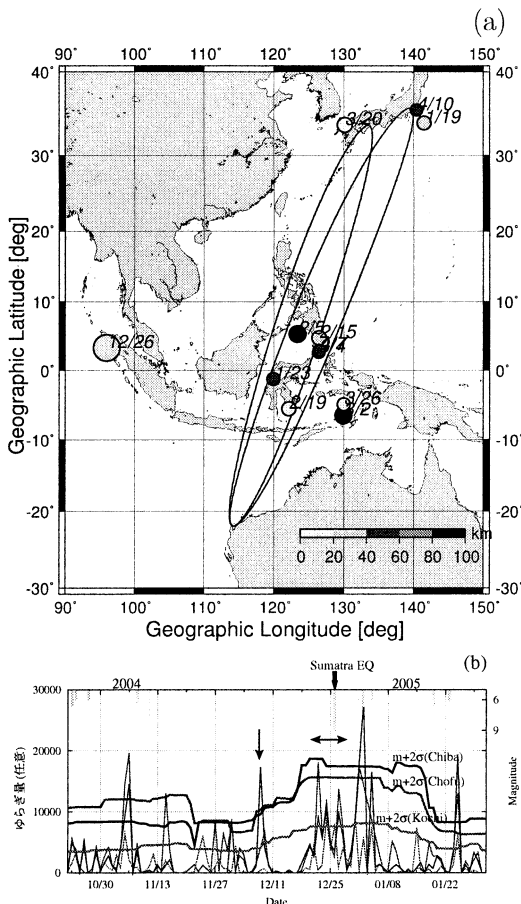


図 8 インドネシアスマトラ地震に伴う電離層じょう乱の検出 (日本とオーストラリア NWC 局の伝搬経路) (a) 日本の VLF 観測点と NWC 局との伝搬経路とスマトラ地震の位置関係 (b) VLF 強度の揺らぎの変化

Fig. 8 Detection of ionospheric perturbations for the Indonesia, Sumatra earthquake. (a) Propagation path between Japanese VLF stations and the NWC transmitter, and (b) temporal evolutions of VLF fluctuations at three stations (together with their corresponding $(m + 2\sigma)$ variations (m : mean, σ : standard deviation)).

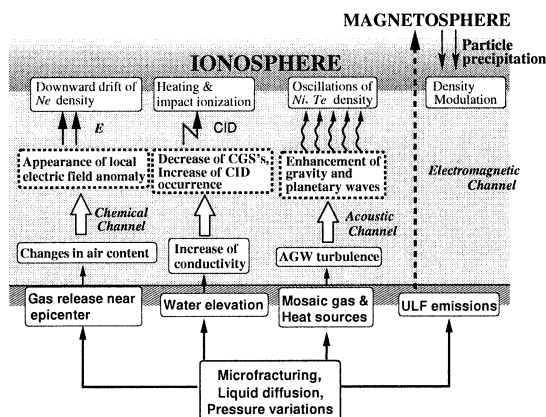


図9 地圏・大気圏・電離圏結合のメカニズム

Fig. 9 Possible channels of the Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere (LAI) coupling.

は強度的に不十分であることを我々は既に示しており、第1の chemical channelと第2の acoustic channel についての考察が重要になると思われる。我々を含め世界各国にて精力的にこちらの機構の追究が行われている [17]。

4. む す び

以上地震に伴う電磁気現象を記述してきたが、かかる電磁気現象は(1)地震の主として前兆として出現すること(前兆性)と(2)かなり深い震源での情報を地表や電離層へ伝達する(遠隔性)という二つの重要な特徴から、地震の短期予知に極めて有望なものと理解されよう。我々の研究を中心とした考察から、地震の短期予知の観点から(1) ULF 放射と(2) VLF 送信局電波による下部電離層じょう乱が最も有望であると主張してきたが、この点は近年世界的に認知されつつある。もちろん、観測的にも理論的にも解明すべき興味深い問題が多く残っており、多くの努力が望まれることはいふまでもない。

この分野の最新の流れとして注目されるのが衛星観測である。米国での小型衛星に続いて、仏国の地震電磁気専用衛星(DEMETER)が2004年6月末に打ち上げられ、良質のデータを獲得している。地震(また津波)に伴うプラズマ異常や電波雑音の検出を目指している。地上観測との密接な連携により図9に示したメカニズムの解明に大きく貢献すると信ずる。

謝辞 本研究は国内外の多くの研究者との共同研究によるところが多い。とりわけロシア地球物理研究所 O.A. モルチャノフ教授、千葉大学海洋バイオ研究セ

ンター服部克巳助教授に感謝します。

文 献

- [1] M. Hayakawa and Y. Fujinawa, ed., *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, p.677, Terra Scientific Pub. Comp., Tokyo, 1994.
- [2] M. Hayakawa, ed., *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, p.996, Terra Scientific Pub. Comp., Tokyo, 1999.
- [3] M. Hayakawa and O.A. Molchanov, ed., *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*, p.477, TERRAPUB, Tokyo, 2002.
- [4] A.C. Fraser-Smith, A. Bernardi, P.R. McGill, M.E. Ladd, R.A. Helliwell, and O.G. Villard, Jr., "Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake," *Geophys. Res. Lett.*, vol.17, pp.1465-1468, 1990.
- [5] O.A. Molchanov, Y.A. Kopytenko, P.M. Voronov, E.A. Kopytenko, T.G. Matiashevili, A.C. Fraser-Smith, and A. Bernadi, "Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of Spitak (Ms = 6.9) and Loma Prieta (Ms = 7.14) earthquakes: Comparative analysis," *Geophys. Res. Lett.*, vol.19, pp.1495-1498, 1992.
- [6] M. Hayakawa, R. Kawate, O.A. Molchanov, and K. Yumoto, "Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993," *Geophys. Res. Lett.*, vol.23, pp.241-244, 1996.
- [7] O.A. Molchanov, M. Hayakawa, and V.A. Rafalsky, "Penetration characteristics of electromagnetic emissions from an underground seismic source into the atmosphere, ionosphere and magnetosphere," *J. Geophys. Res.*, vol.100, pp.1691-1712, 1995.
- [8] K. Hattori, Y. Akinaga, M. Hayakawa, K. Yumoto, T. Nagao, and S. Uyeda, "ULF magnetic anomaly preceding the 1997 Kagoshima earthquakes," in *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*, ed. M. Hayakawa and O.A. Molchanov, pp.19-28, TERRAPUB, Tokyo, 2002.
- [9] K. Goto, Y. Akinaga, M. Hayakawa, and K. Hattori, "Principal component analysis of ULF geomagnetic data for Izu Islands earthquakes in July 2000," *J. Atmos. Electr.*, vol.22, pp.1-12, 2002.
- [10] K. Hattori, A. Serita, K. Gotoh, C. Yoshino, M. Harada, N. Isezaki, and M. Hayakawa, "ULF geomagnetic anomaly associated with 2000 Izu Islands earthquake swarm," *Phys. Chem. Earth*, vol.29, pp.425-435, 2004.
- [11] M. Hayakawa, T. Itoh, and N. Smirnova, "Fractal analysis of ULF geomagnetic data associated with the Guam earthquake on August 8, 1993," *Geophys. Res. Lett.*, vol.26, no.18, pp.2797-2800, 1999.
- [12] Y. Ida, M. Hayakawa, A. Adalev, and K. Gotoh, "Multifractal analysis for the ULF geomagnetic data

- during the 1993 Guam earthquake,” *Nonlinear Processes Geophys.*, vol.12, pp.157–162, 2005.
- [13] M. Hayakawa and K. Hattori, “Ultra-low-frequency electromagnetic emissions associated with earthquakes,” *IEEJ Trans. FM*, vol.124, no.12, pp.1101–1108, 2004.
 - [14] K. Ohta, N. Watanabe, and M. Hayakawa, “The observation at Nakatsugawa of ULF/ELF emissions in possible association with the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake,” *Earth Planets Space*, vol.57, pp.1103–1108, 2005.
 - [15] O.A. Molchanov and M. Hayakawa, “Generation of ULF electromagnetic emissions by microfracturing,” *Geophys. Res. Lett.*, vol.22, pp.3091–3094, 1995.
 - [16] M.A. Fenoglio, M.J.S. Johnston, and J.D. Byerlee, “Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault zones: Application to the Loma Prieta ULF emissions,” *J. Geophys. Res.*, vol.100, pp.12951–12958, 1995.
 - [17] International Workshop on Seismo Electromagnetics, IWSE2005, Programme and Extended Abstracts, p.492, March 2005.
 - [18] M. Hayakawa, O.A. Molchanov, T. Ondoh, and E. Kawai, “The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals,” *J. Comm. Res. Lab.*, Tokyo, vol.43, pp.169–180, 1996.
 - [19] O.A. Molchanov and M. Hayakawa, “Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes,” *J. Geophys. Res.*, vol.103, pp.17489–17504, 1998.
 - [20] A.V. Shvets, M. Hayakawa, and S. Maekawa, “Results of subionospheric radio LF monitoring prior to the Tokachi ($m = 8$, Hokkaido, 25 September 2003) earthquake,” *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol.4, pp.647–653, 2004.
 - [21] T. Horie, S. Maekawa, T. Yomaiuchi, and M. Hayakawa, “A possible effect of ionospheric perturbations for the Sumatra earthquake, as revealed from subionospheric VLF propagation (NWC-Japan),” *Int’l J. Remote Sensing*, in press, 2005.
 - [22] J.Y. Liu, private communication, 2005.
 - [23] R. Rozhnoi, M.S. Solovieva, O.A. Molchanov, and M. Hayakawa, “Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions,” *Phys. Chem. Earth*, vol.29, pp.589–598, 2004.
 - [24] M. Hayakawa, “Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: A frontier in terrestrial electromagnetic noise environment,” *Recent Res. Devel. Geophysics*, vol.6, pp.81–112, 2004.
- (平成 17 年 11 月 30 日受付, 18 年 1 月 31 日再受付)



早川 正士 (正員：フェロー)

1966 名大・工卒. 1968 同大学院工学研究科修士課程了, 1970 年 9 月同大学院博士課程中退. 1970 年 10 月名古屋大学空電研究所助手. 1978 同研究所講師, 1979 助教授. 1991 年 4 月より電気通信大学教授, 現在に至る. 工博. 一貫して電磁環境学を研究対象とし, 宇宙プラズマ, 大気電気学, 地震電磁気学, 環境電磁工学 (EMC), アンテナ・伝搬, 信号処理等に関する研究に従事. 電気学会, 日本大気電気学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会, AGU, URSI 等各会員.