

地震に伴う電磁気現象のいろいろ

早 川 正 士

Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes

Masashi Hayakawa

Abstract

There have been accumulated a lot of evidences on the presences of electromagnetic phenomena associated with earthquakes. This report reviews these seismo-electromagnetic phenomena taking place not only in the lithosphere, but also in the atmosphere and ionosphere. Observational results and also theoretical hypotheses are presented, and we finally suggest the importance of a new science field, "Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling".

1. 地震予知の可能性

地震学や地震地質学, 測地学の進歩に伴い, (1) 長期的 (数百年オーダー) 地震予知, (2) 中期的 (数十年~数年オーダー) 予知に関してはそれなりの進歩が見られる。しかし, (3) 短期的 (数ヶ月~数日オーダー) 予知は実現はその重要性にもかかわらず、まだ道は遠いように見える。各種観測網 (地震, 地殻変動等) が整備されつつあるにもかかわらず、大災害をもたらした北海道南西沖地震, 兵庫県南部地震を含めて、短期 (事前) 予知に成功した例はない。現時点では、短期的地震予知は当面不可能であるという悲観的見解が支配的である (特に、地震関係者の間では)。しかし、ラドン濃度, 地下水位, 地下水温度などの変化, 及び各種の電磁気変化などに関連しては、有望な報告が近年多くなされている。また近年地震前兆としての電磁気現象を集中的に取り扱う国際会議も企画され、活発な議論がなされている。

2. 地震前兆電磁気現象

近年の研究成果を踏まえて、地震に伴う電磁気現象の観測手法を表1にまとめている。(1) 自然放射波の観測 (地震に伴う広い周波数にわたって発生する放射を受信

し、地震との関係を調べる), (2) 送信局電波を用いた大気圏や電離圏の擾乱を観測するもの (いろいろな周波数において存在する送信局電波を用いて送信局と受信点を結ぶ経路近くの地震に伴う大気や電離層の擾乱を検出するもの), (3) 電離層内の直接観測 (人工衛星により直接電離層内においてプラズマ異常や波動も観測するもの), (4) リモートセンシングによる地表面温度の上昇観測 (人工衛星からのリモートセンシングによる地震に伴う地表面温度の変化を観測するもの) に分類される。

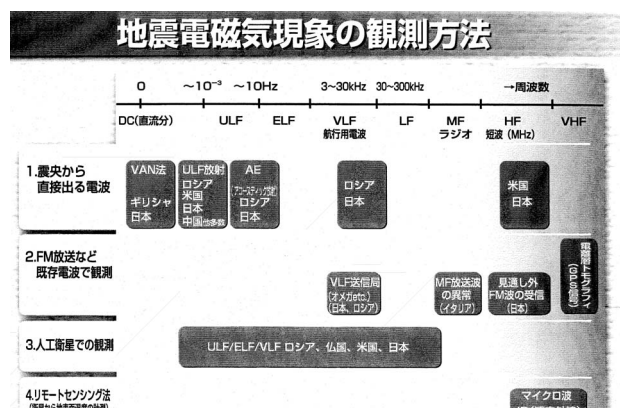


表1 地震電磁気現象の観測手法

Table 1 Classification of observation methods of seismo - electromagnetic phenomena

Received on May 7, 2001

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

これらについて順次初期の結果から最新の成果までをまとめてみよう。本文では文献は引用しないが、末尾の文献リストにて情報は得られるようにしてある。

3. 広い周波数での自然放射（受動観測）

以下では直流（DC）放射（地電流測定，VAN法など）に関しては理研、東海大グループのこれまでのいろいろな報告があるので本稿では述べない。

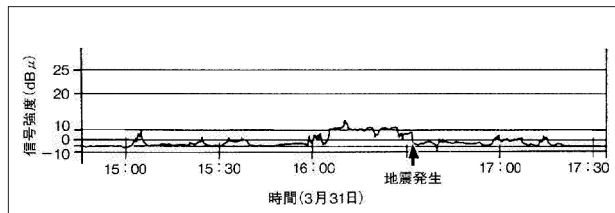


図1 LF帯（81 kHz）電磁雑音の時間変化

Fig.1 Temporal evolution of LF radio noise (81kHz) associated with an earthquake.

1982年にGokhbergらは地震前兆の電磁雑音の異常を報告する論文を発表した。図1は彼らの結果の一例である。これは1980年3月31日の近畿地方の深さ480kmの地震（ $M_s = 7$ ）に対する長野県にある菅平観測所におけるLF帯の81 kHzでの背景雑音を常時モニターしていた結果である。そのデータはLF雑音強度が地震の約30分前より異常に上昇し、地震とともに平常のレベルに戻るというものであった。

そして、その後の研究によって、地震前兆電磁気現象は、VLF/LF帯のみならず、広い周波数範囲において発生していることがわかってきた。即ち、低い周波数から順に、ULF（超低周波（Ultra Low Frequency）で周波数が10Hzより低い）から、ELF（Extremely Low Frequency；10Hz～3kHz）／VLF（Very Low Frequency；3～30kHz）／LF（Low Frequency；30～300kHz），さらに高周波のHF（High Frequency），VHF（Very High Frequency）まで、様々な周波数帯でデータが得られている。今回は、それらについてそれぞれ紹介しよう。

3.1 ULF電磁放射における観測事実と考察

まず、筆者が最も有望と考えているULF（周波数が10Hz以下）電磁放射について述べる。後述するVLF/LF/HF波に比べ歴史は浅いが、大きな地震に対して信頼出来る観測事実が近年蓄積されつつある。VAN法が直流（DC）の電界を測定するのにに対し、ULF法ではAC（交流）のうちULF帯の電界、磁界を測定対象とする。

2つの大きな地震、即ち、(1) 1988年12月8日に発生したアルメニアのスピタック地震と、(2) 1989年10月

特性	スピタック	ロマ・プリータ
マグニチュード (M_s)	6.9	7.1
深さ (km)	6	15
観測	周波数レンジ (Hz) 感度 (nT/√Hz) 震央から観測点までの距離 (km)	0.005～5.0 0.003 129
ULF放射の特性	開始時期と継続状況 振幅 (nT) 最高周波数 (Hz)	3～4日前より発生 12日前より発生し、1週間程度続く、その後しばらく鎮静化し、1日前より上昇 ＜0.5 ～2.0
の主特異性前	発生時期 振幅 (nT) 最高周波数 (Hz)	4時間前より急上昇 0.2～0.4 ～1
の主特異性後	主震後の発生 余震との相関	1カ月程度で消滅 あり 数か月以上後に消滅 なし

表2 ULF電磁放射のまとめ
(スピタック，ロマ・プリータ地震)

Table 2 Summary of ULF emissions associated with large earthquakes.

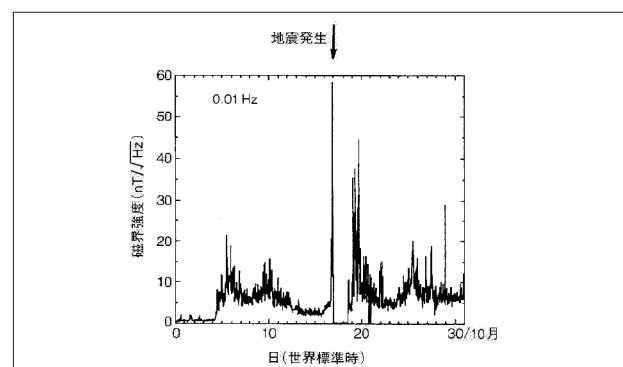


図2 ロマ・プリータ地震でのULF放射の観測

Fig.2 Temporal evolution of ULF emissions (0.01Hz) for the Loma-Prieta earthquake.

18日に発生したカリフォルニアのロマ・プリータ地震に対して明瞭な前兆的ULF電磁放射が観測された。これら2つの地震に対するULF電磁放射の諸特性をまとめたものが表2である。

2つの地震はその規模もほぼ同じ（ $M_s \sim 7$ ）であり、またその震源の深さもともに浅い。更に、両地点での観測装置（ともにインダクション磁力計）も表からもわかるようにほぼ同程度のものである。しかし、この2つの事例において大きく異なる点は、ロマ・プリータ地震では観測点が震央から7kmときわめて近いのに対して、スピタック地震では129kmと離れていることである。項目3にULF放射の特性がまとめられている。スピタック地震の際には地震の3～4日前から強度上昇が認められている。他方、図2はロマ・プリータ地震での0.01Hzにおける磁界強度の時間変化を示しているが、12日ほど前から磁界強度が上昇し、1週間前まで続く。その後、一時的に強度が鎮静化し、1日前から上昇が始まる。この上昇はスピタック地震と同様である。更に、地震の3～4時間前から急上昇が認められることも両地震に対して同じである。もう一つ注意しなければならないのは、ロマ・プリータ地震では測定値が磁界の水平成分1成分

である。

次に、受信された ULF 波が真に地震の前兆かどうかに関する考察をしなければならない。そのためには、VAN 法におけるノイズ除去法と同様の考察が必要となる。スピタック地震では磁界の3成分が測定されており、超高層からのプラズマ波（地磁気脈動という）との分離がそれなりに試みられている。他方、ロマ・プリータ地震では観測期間では Kp_{27} (Kp は3時間当たりの磁気活動度で、 Kp はその1日の総和を示す) であり、地磁気の活動は比較的静穏であったことから、宇宙からの波動である可能性は低いとしている。

前述の2つの大きな地震に対する ULF 電磁放射に加えて、私たちの1993年8月8日のグアム地震 ($M_s=8.0$, 震源の深さは ~ 60 km) に対する解析結果を示す。この解析では地震前兆波と宇宙プラズマ波動との弁別に最大限の考慮を払っている。ULF 放射を扱う際、超高層（磁気圏）から飛来するプラズマ波動が地震前兆波の検出には妨害となるが、この除去法が前述の2地震では明らかではなかったため、私たちの研究は1つの明確な指針を与えたものといえる。

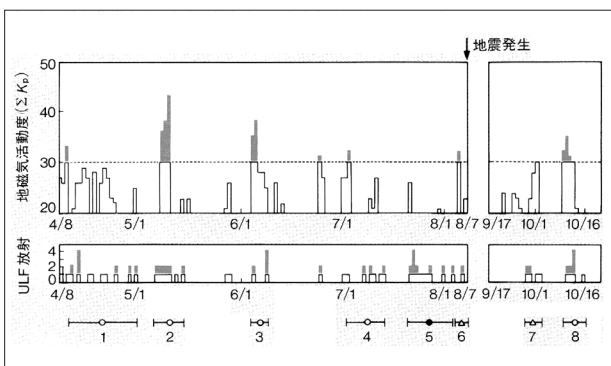


図3 グアム地震に対する ULF 放射の活動状況と地磁気活動の変化

Fig.3 Temporal evolution of ULF activity and geomagnetic activity for the Guam earthquake.

グアム地震の際、ULF 観測点は震央より 65km の場所に位置しており、観測用の磁力計はプロトンフラックスゲート型磁力計であり、3成分 (H 成分 (南北方向), D 成分 (東西方向), Z 成分 (垂直方向)) 波形を1秒サンプリングし、記録するシステムである。図3はこのグアム地震に対する ULF 放射活動が下段に示してあり、上には地磁気活動度を示してある。昼間は夜間に比して ULF 電磁放射の変動が大きいので、夜間 (地方時, 22 時 ~ 2 時) のデータのみを用いて、30 分ごとのデータに対して FFT 解析を行い、月平均値 (m), および標準偏差 (σ) との比較から、ULF (0.01 ~ 0.05 Hz) の活動度を分類している。まずこれらの ULF 活動と地磁気擾乱 (即ち宇宙活動) との相関をとった。従来の研究から宇宙波動は地磁気活動と強い相関があることがわかってい

る為、宇宙のプラズマ波動の影響であることが明らかなもの (図中で σ で表示) と、明らかにそうでないもの (m), どちらとも判断に苦しむもの (σ) に分類する。次に、3成分計測を用いての解析 (一種の偏波解析) を行なった。即ち、宇宙のプラズマ波動は上空より飛来するので Z/H が極めて小さいことが予想されるのに対し、そうでないもの (恐らく地震前兆 ULF 波) は $Z/H \sim 1$ を越えることが予想される。事実、図3の σ で表される ULF 放射に対しては H/Z が最大で 0.2 ~ 0.3 であるが、 σ で示される ULF 放射に対しては Z/H が 1.0 を越えている。図4は5日のランニング平均を取っており、絶対値自体は小さく居るが、地震の前1ヵ月間では、 Z/H が大きな値を取っており、地震前兆 ULF 波であることを示唆する。

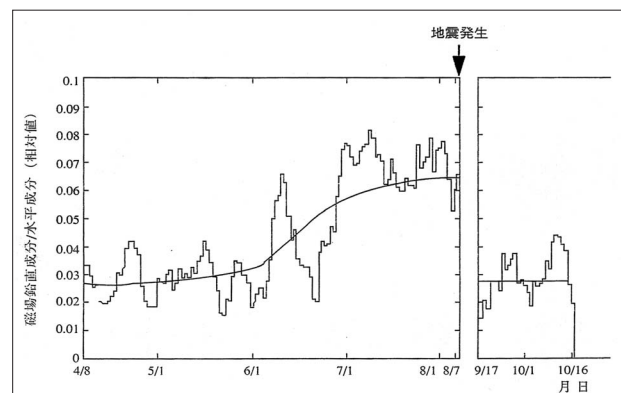


図4 グアム地震の ULF 偏波 (Z/H) の時間変化

Fig.4 Temporal evolution of ULF polarization (Z/H) (at 0.01Hz) for the Guam earthquake.

その他の ULF の結果についても述べよう。ロシアのグループは比較的小さな地震 ($M \sim 5$) に対しても ULF 前兆波があると報告しており、私たち同様、地震前兆に対しては Z/H が大きいことも示している。次に、1994年1月17日のノースリッジ地震 ($M_s = 6.7$) では ULF 前兆は認められなかったと報告されているが、これは観測点と震央との距離が 100km を越えていることが関係しているのではないかと結論している。しかし、米国の他グループは水平二成分での磁界成分の観測からこの地震に対しても前兆 ULF 波が受信されていると報告している。更に、防災科学技術研究所の藤縄らは火山噴火の前兆としての ULF 波受信にも成功している。しかし、いかなせんイベント数が少ない。従って、ULF 放射は大きな地震の際に発生する可能性が高いので、地磁気観測が地震の震央近くで行われていれば、そこでの ULF 波解析が強く望まれる。

最新の ULF 放射の成果を簡単に述べよう。服部らの九州地震に対する解析、秋永らの台湾集々地震での ULF 波の解析が偏波解析を用いて行われ、前兆的 ULF

波の存在が認められている。早川らはSOC(Self-organized criticality)概念に基づき、グアム地震に対するULFデータのフラクタル解析を初めて行い、その有用性を示した。その後、フラクタル解析が各国にて盛んに行われる様になっている。更に、2000年7月の伊豆諸島群発地震に対して、伊豆での3観測点ULFデータを用いて、後藤らは主成分解析という新しい信号解析を行い、明瞭な前兆ULF波の存在を明らかにしている。又、ロシアのIZMIRANグループとの協力により種々の方位測定方式も開発されつつある。

DCのVAN法のところで提案されている複数の地震前兆現象の発生機構はDC(直流)の変動に対しては有効であるが、ULFの周波数領域での波動の発生機構には適用できない。私たちは地震の前の震源近傍での圧力変化に伴う岩石破壊(マイクロフラクチャー)による電荷生成(小さなアンテナの集合)に基づくULF波の発生を提唱した。この効果は多数のクラックの生成による電荷及び電磁気現象の早い変動(例えばULF)を説明しうるものである。又、この機構は多くの室内実験における結果を体系化したものである。簡単にそのメカニズムを紹介しよう。

地震の1ヵ月程度、前になると蓄積されてきた圧力がある限界を超えることとなる。この際、岩石内に多数のクラック(ひび)が発生する。そのとき、圧電効果などにより電荷生成が起こり、パルス状の電流が発生し、それらのパルス電流の複合により電波が放射される。初期にはクラックの数が著しい速さで生成され、図2、図4のような1週間から2週間前後までの第1の磁界強度上昇が起こる。その後、クラックのサイズは大きくなるが、電波放射としては鎮静化する。そして、数日前よりはクラックのサイズの上昇が効き、第2の強度上昇となる。別の機構としては、electro-kinetic(streaming potential; 電気動力的)機構も提案されている。

以上に述べた観測事実の考察およびULFのはの発生メカニズムの理論、震源から地上、超高層への伝搬に関する理論的考察を総合すると、前兆ULF波の諸特性は次のように要約できる。ひいてはこれが将来の地震予知方式の提案にもつながるであろう。

- (1) VAN法同様、他の雑音(ここでは、宇宙のプラズマ波や人工雑音(電車など))との分離方法が重要であるが、それには多成分計測に基づく偏波解析(例えばZ/H)がきわめて有用である。また更なる信号解析法の開発も重要である。
- (2) ULF電磁放射の時間的变化に関しては、1つの特徴的なパターンがある。即ち、約1ヶ月前に1度目の強度上昇があり、その後鎮静化して数日前より再び上昇する。更に、数時間前に急上昇を示す。このパターンはその後のいくつかの地震(ピアク地震)に対しても

同様であることが判明している。

- (3) ULF波の通常の受信範囲は、観測点より100km程度と考えられる。しかし、微弱電波の受信を可能とする信号解析が大事である。

- (4) 予想される地震のマグニチュードを現時点にて特定できないが、少なくともULF波は大きな地震(マグニチュード6以上の)に対して感度がよいことだけははっきり言える。

3.2 VLF/LF電磁放射

前述した様に、VLF/LF電波関係の先駆的研究は1982年のGokhbergらの論文にさかのぼることができる。その後も世界各国において多くの報告が行なわれている。ここではVLF/LFの観測結果のいくつかの例を紹介しよう。

防災科学技術研究所と通信総合研究所との共同研究では、関東地方での複数の観測点においてボアホールアンテナ(深さ300~800m)による電界を測定している。このケーシングタイプを用いたアンテナは地中での垂直電界を受信すると考えられるが、空中での電波に対しても表皮効果により感度をもつと思われる。これは新しい受信法であるが、実験的にアンテナの諸特性を明らかにすることも望まれる。彼らの従来の観測結果の統計によると、 $M \geq 5$ の地震にはかなりの頻度で、 $M \geq 6$ の、しかも浅発かつ陸に近い地震ではより高い頻度でVLF帯電磁場の異常が観測されている。

同様のVLF/LF帯での電磁放射観測が京大グループによって続けられている。兵庫県南部地震に対してもLF帯の異常電波が前兆的に発生していると報告している。更に、近年はVLF帯の波形を分類することにより空電によるものか、地震に伴うものかを判別しようとする試みを行なっている。新しい方向として評価できる。

ELF帯電波を用いて名工大畑グループ(現在中部大)は国内に40ヶ所程度の観測点を構築し、大量の観測データを蓄積している。ポイント周波数(223Hz)にて受信器を狭帯域にすることにより基本的にはS/N比を充分に上げることに重点を置き、しかも磁界3成分の観測を行なっている。水平成分と鉛直成分との対比が重要な意味を持っている。この点は前述したULF波の観測と同じ思想に基づいている。例えば、1985年10月の伊豆半島の群発地震に伴うELF異常など多数の報告がある。

次に、東海大グループと中部大グループについて述べよう。東海大馬場グループは国内数点でのVLF広帯域信号の連続観測から方位測定(磁界2成分によるゴニオメータ法)を行い、地震に伴うVLF異常と大気現象に伴うVLF異常との分離を目指している。中部大グループも中津川観測点において複数のポイント周波数での方探を行っている。方位測定は新しい方向として是非とも

行なうべきものである。

最後、インドグループは我々との共同研究として地中（ボアホール）アンテナと空中アンテナとの同時使用により地震に伴うVLF波の検出を目指すという方向が示される。事実、地中アンテナに強く受信され、空中アンテナでは受信できない場合が多く見つっている。

結論としてVLF/LF帯の電磁放射は、ULF放射よりも周波数が高いのでずっと容易に発生すると考えられ、いったん大気中に出れば、電離層・大地導波管によりかなり長距離を伝搬するという特徴をもつ。又、地震前兆として地震の数時間前から1ヶ月程度前までに発生する。しかし、これらのVLF/LF帯電磁放射に関しては、発生機構が充分には解明されていないという問題点があるが、考えられるメカニズムには以下のようなものがある。

- (1) 地震の起こる前に、震源域での岩石の微小破壊などにより、ULF放射のように直接的に放射される。
- (2) 広い地域で応力が増大し、震央から離れた広い地域の地表面付近でも微小破壊などが発生して電磁波を放射する。
- (3) (1) または (2) の仕組みで放出されたラドン等による電離や荷電粒子が空中に放出され、地震前に空電を誘発する。
- (4) 落雷による地電流が岩盤の破壊を誘発して地震が発生する。
- (5) 前線の通過などで空電が増えるとともに、集中的な降雨が活断層帯に増水をもたらす、地震を誘発する。

筆者は、(2) または (3) の機構が最も可能性が高いと考えている。VLF/LF電磁放射の発生機構に関する考察は今後不可欠である。もう1つの問題点は、前兆であることは疑いがないとしても、その発生場所を固定できれば地震予知には使えないことである。

3.3 HF / VHF 電磁放射

次に、さらに高周波（HF）の領域での前兆現象を示そう。つくばの機械技術研究所グループは地下60 mおよび6 mに電極を設けた観測システムを作った。これは地表近くの雑音を避ける為で、地表と鉛直2電極間の回路系に流れる電荷変動のうち高周波成分を計測するものである。1992年5月からの測定で、観測点より約数十km以内に発生した8件の $M_s > 4$ の地震に対して前兆異常信号を記録した。彼らの結果をまとめると、

- (1) これらのHF放射は地震の3～4日に発生し、1日前から急上昇を示す。
- (2) HF放射を伴う地震のマグニチュードは4以上で、観測点から感度がある震央までの距離は50km程度である。

特に、項目(2)の事実は地震発生場所の同定には極めて意味のある事実であろう。このHF帯の電磁気変動

の発生に関しては、地震の前駆段階に放電現象が生ずるのではないかとしている。この原因は、岩石の破壊の際、放射性物質が放出・電離し、それに伴う放電が生じた為と考えられる。

近年はHF、VHF帯の電波雑音の測定が多くの機関にて始められている。もともとは串田氏が提唱した見通し外FM放送波の受信に関連して、その周波数での雑音状況を調査することが重要なテーマとなった為である。千葉大、広島市大、東京学芸大、電通大などのグループが研究を行っている。

3.4 ULF/ELF/VLF 波の衛星観測

地震前兆の電磁放射が衛星でも受信されるという報告を1988年にロシアのグループが初めて行なって以来、フランスやアメリカなどのグループがそれぞれの衛星波動データを用いて研究した。この分野の最近の私たちの研究の内容を紹介しよう。

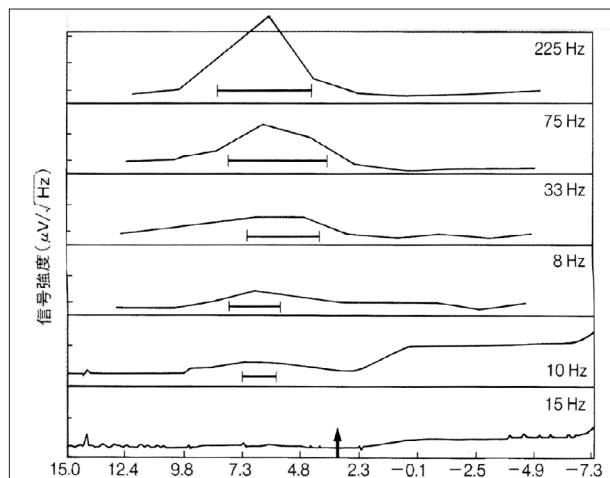


図5 日本上空での波動観測結果

Fig. 5 Result of wave observation over Japan. An upward arrow indicates the position of the earthquake epicenter.

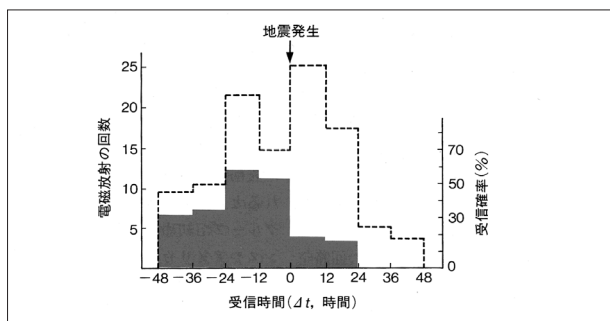


図6 地震の時刻と異常電波の受信時刻との関係

Fig.6 Relationship between the earthquake time and observation time of anomalous radio emissions.

研究に用いた衛星はIntercosmos-24衛星で、この衛星は1989年9月28日に打ち上げられた。この衛星はもと

もと宇宙プラズマ波動の研究のためのものであり、観測周波数が8Hzから20kHzであるため、この研究にも使いうるものであった。まず、衛星観測の特長は、たとえ数ヶ月の間でもきわめて多くの地震を対象とすることができる点であろう。事実、1989年11月16日より12月31日までの観測期間中に $5.2 < M_s < 6.1$ の28の地震を対象とすることができた。図5はその観測の結果の1例で、日本の領域である地震に関する放射であり、ELF帯とVLF帯の両周波数帯において放射が発生している。図の上側の4曲線はELF帯の4つのフィルターバンク(上から225,75,33,8Hz)の出力であり、下側の2つの曲線はVLF帯の10kHzと15kHzでのフィルターバンクの出力である。横軸は観測時間、すなわち観測場所を示す。地震の2時間前に、矢印で示した震央の緯度より少々離れた所(図中で横棒で示した所)で電磁放射が受信されている。低緯度領域での地震関連電波の受信の妨害となるのは自然雑音(雷からの空電、ホイスラー、磁気圏放射)である。私たちは受信器の検波回路、プラズマ波の諸特性に関する従来の研究成果を最大限に活用して、この分離を試みた。図6は観測された電磁放射の受信時刻と地震時刻との時間関係を示したものである。

フランスのグループはGEOS、AUREOL衛星の波動データを用いてVLF帯の前兆現象を報告、地震前兆電磁放射の存在を支持している。しかし、スタンフォード大学のグループはアメリカのDE衛星データの解析に基づいて少なくともVLFには同様の現象はなかったと報告している。ニュージーランドグループもネガティブな結果を報告している。しかし、これに対して仏国グループは解析方法に問題があるとの指摘を行っている。今後、地球の電磁気環境をモニターする衛星の登場が望まれるところである。

最後にやはり2004年6月29日に打ち上げられた仏国の地震電磁気専用衛星(DEMETER)について述べる必要がある。仏国のCNES(宇宙センター)の小型衛星プロジェクトの1番として採用されたものである。ロシアがCOMPAS衛星を打ち上げたが失敗であったため、本DEMETER衛星の成否は我々の学問領域にとって極めて重要な意味を持つことと考えられる。低周波からVHFまでの電波観測とプラズマ測定を行いつつある。特に、日本上空飛翔時には日本国内での地上観測との同期観測が予定され、この学問の最終目標である“地圏・大気圏・電離圏結合”解明に大きく貢献するであろう。筆者は本衛星計画の段階から参加し、本衛星のPI(Principal Investigator)であり、是非とも成功させたい。

4. VLF/LF送信波の受信による方法(能動実験)

VLF送信局は航行用としてのオメガ局など多数が世界

中に存在している。本方法の原理図を図7に示す。送信局から発信された電波は電離層と大地からなる導波管内を伝搬し、受信点で受信されるが、その振幅と位相とをモニタするのである。送信局と受信点とを結ぶ大円上において地震の影響として電離層が影響を受けていると、その効果が振幅、位相にて検出されている。特に、位相観測は下部電離層の小さな変化に対しても極めて敏感であることがわかっている。Gufeldらはアルメニアのスピタック地震(ULF電磁放射の節参照)においてはじめてこの異常を発見した。即ち、リベリアのオメガ局をロシアのモスクワとオムスクにて受信した際、その位相の日変化が地震の2週間ほど前から平常値よりも著しく大きな変動(とくに夜間)を示し、地震後にはそのような異常は全く認められなかったのである。震央はリベリアのオメガ局と受信点とを結ぶ大円のすぐ近くに位置しており、これは長距離(数千km以上)伝搬に対する結果である。

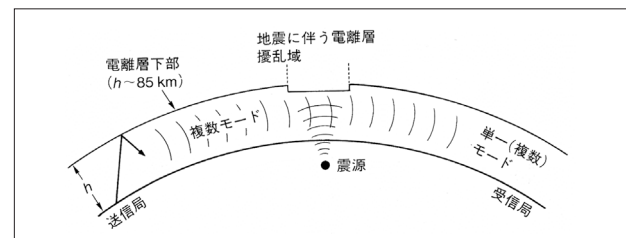


図7 地震前兆の電離層擾乱によるVLF導波管伝搬の異常

Fig. 7 Schematic illustration on the VLF subionospheric propagation anomaly due to the seismo-ionospheric perturbation.

次に、兵庫県南部地震の際の観測結果(通信総合研究所との共同研究)について簡単に述べる。図8aは送信点(九州の対馬オメガ局)との受信点の位置関係を示すが震央がほぼ大円上にあると考えられる。伝搬距離はほぼ1000kmで、前述の長距離伝搬の結果とは著しく異なったまったく新しい異常を示すことがわかった。図8bは銚子の犬吠観測所での10.3kHzの電波の位相の変化を日を追って描いたものである。この図の複数モードの干渉による位相が最小となる日出入の時間の変化に注目しよう。図は、地震の数日前より位相最小を示す日出の時間は早くなり、位相最小を示す日入の時間は遅くなるという顕著な変化を示している。即ち、等価的に日中が長くなっている。地震後の2週間の変化は地震前の1週間の変化とまったく同じである。この間の地磁気活動は $K \leq 15$ という極めて静かな状況で、超高層からの粒子降下の可能性はきわめて低いといえる。このVLF伝搬以上、即ち下部電離層異常は神戸地震の効果である可能性が極めて高いと言える。前述したDEMETER衛星のパンフレットには地震に伴う電離層擾乱の明瞭な例として図8が引用されている。

本 VLF 送信波による方法では地震に伴う擾乱域はほぼ送信局 - 観測点を結ぶ大円の近くであることからいろいろな送信局 - 観測点のパスを考えてネットワークを組むことにより擾乱域を同定することも可能であろう。我々は NASDA フロンティアの枠内にて国内に 7 観測点を構築し、各観測点では (1) CHI (中国) 局, (2) NWC (オーストラリア) 局, (3) NPM (ハワイ) 局, と (4) JJY (40kHz, 福島県) を受信することによりほぼ日本全土をモニタすることが可能となっている (図 9 参照)。ULF 波のような局所観測と異なり, 本 VLF/LF 観測は積分観測であり, 事例の数を増やすことが容易であり, すでに統計処理を行い得る事例を持っている。

近年, 同様の擾乱が中波の放送波を用いても観測されている。

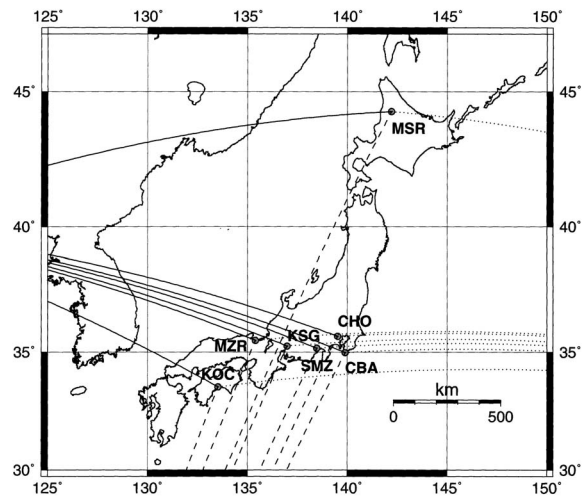


図 9 国内ネットワーク

Fig. 9 Network of VLF receivers in Japan (7 observing stations). At each station we observe 3 VLF transmitters (from China, Hawaii and Australia) and 1 LF transmitter (JJY).

5. 見通し外 VHF 波の受信

串田氏は FM 波の異常な見通し外受信について調査し, どうも地震に関係しているのではないかと結論に達した。同氏はこの事実を積極的に使用し, 更に受信局を著しく増加させる事により地震予知の公開実験を行っている。そのメカニズムに関しては同氏は電離層擾乱によるものとしている。

近年, この串田法に対して科学的な調査が多数機関によって行われて来ている。電通大, 千葉大, 広島市大, 東京学芸大グループなどである。先ず, 電通大グループは FM 仙台を対象とし, 方位測定を駆使した研究を行った。その結果, (1) 見通し外 VHF 波は事実受信されることがあり, 地震と関係する可能性が高いこと, (2) 方位測定からどうも入射角は水平方向に近く, 大気圏の擾乱による反射であることを突きとめた。我々のこのテーマに関する更なる発展としては, (1) 金沢にて FM 仙局を受信し, 調布データとの有機的比較による見通し外 FM 波の反射域の同定, (2) 和歌山 静岡パス, 鹿児島 大阪パスの構築を終了している。広島市大グループは高感度の受信器を開発し, 2 周波を同時に見るなどの改良を行っているし, 千葉大は東南アジアのテレビ放送波が地震に伴う電離層擾乱により受信されるなど新しい結果を報告している。この発生機構の解明のため電通大グループは干渉計システムを現在開発中であり, 予備観測では満足すべきデータが出ており, 近々本格的観測に入る予定である。

更なる観測データの蓄積とメカニズムを同定する観測手法の開発が急務である。

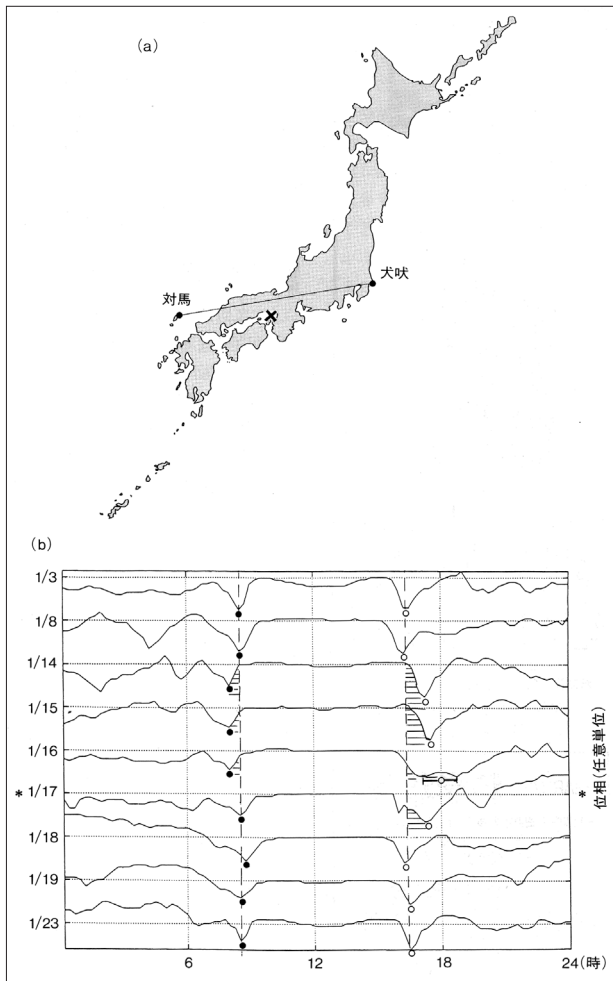


図 8 神戸地震の時の VLF 送信局 (対馬) と受信点 (犬吠) の位置関係 (a) と犬吠での位相の変化 (b)

Fig. 8 (a) Relative location of VLF transmitter (at Tsushima) and a receiving point (Inubo). The epicenter is given by a cross. (b) Sequential plot of the diurnal variation of phase at Inubo. Seismic effect appears as significant changes in terminator times.

6. リモセンによる地表面温度の上昇

表1の一番下の欄にある手法で、観測手法の高度から一番下を書いてあるが、物理的には地圏内での地球化学的プロセスと密接に関係し、自然放射の欄とも関連しているものである。我々 NASDA グループ (Tronin を中心として) の多くの事例解析から、どうも地震前に将来の震央近くの断層において地表面温度が数度上昇することを確認している。近年米国 NASA グループも米国での地震に対して同様の事実を認めている。本研究は地圏での地震活動が大気圏の擾乱をトリガーする機構の解明にもつながる。

7. 短期的地震予知の実現に向けて

以上地震前兆電磁気現象を記述してきたが、かかる電磁気現象が(1)前兆性および(2)遠隔性(伝搬性)の理由から短期的地震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、すでに地震の短期予知の観点からは(1)ULF放射と(2)VLF送信局電波による下部電離層擾乱が最も有望であることが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、多くの努力が望まれることはいうまでもない。

学問的には地圏の効果が如何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」という言葉は我々ソサエティの合言葉となっている。図10は我々が提唱する可能な結合機構をまとめたものである。現時点では、三つのチャンネルが考えられます; (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到大気の導電率の変化に伴う、大気電界の変調が電離層擾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)による直接的電離層加熱・電離やULF波が磁気圏へ侵入し内部放射体プロトンと相互作用し、電離圏へ粒子を降下させるなどするものである。特に、第一のchemical channelと、第二の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機構の追究が行われている。

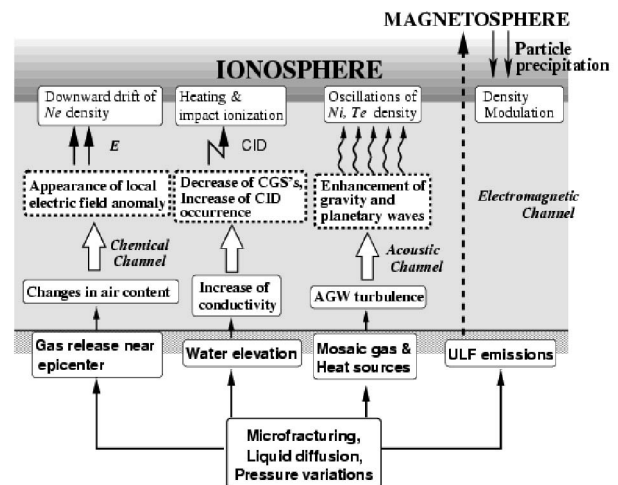


図10 地圏・大気圏・電離圏結合機構の説明図

Fig.10 Schematic illustration of possible channels of the lithosphere - atmosphere - ionosphere coupling.

参考文献

- 全般的文献 [この分野の世界的動向を知ることができる]
 Hayakawa, M., and Y. Fujinawa, Editors, *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, TERRAPUB, Tokyo, pp.667, 1994.
 Hayakawa, M., Editor, *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, TERRAPUB, Tokyo, pp.997, 1999.
 Hayakawa, M., and O. A. Molchanov, Editors, *Seismo Electromagnetics: Lithosphere - Atmosphere - Ionosphere Coupling*, TERRAPUB, Tokyo, pp.447, 2002.
 長尾年恭: 地震予知研究の新展開, 近未来社, pp.209, 2001.
 上田誠也: 地震予知はできる, 岩波科学ライブラリ, 79, pp.120, 2001.
 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, pp.204, 2003.
 Hayakawa, M., O. A. Molchanov, P. Biagi and F. Vallianatos, Editors, Special Issue on "Seismo-Electromagnetics and Related Phenomena", *Phys. Chem. Earth*, vol. 29/4-9, 287-662, 2004.

引用文献 [本文中で引用したもの]

- 上田誠也, VAN論争に関して[「VAN法は地震予知か, 単なる予言か」(1999年2月号)], *パリティ*, Vo. 14, No. 03, 1999.
 上田誠也, 早川正士, VAN法とは何か, *パリティ*, 1996年2月号, 1996.
 Akinaga, Y., M. Hayakawa, J. Y. Liu, K. Yumoto, and K. Hattori, A precursory ULF signature for the Chi-Chi earthquake in Taiwan, *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol. 1, 33-36, 2001.
 Enomoto, Y., and H. Hashimoto, Anomalous electric signals detected before recent earthquakes in Japan near Tsukuba, in "Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction", Ed. by M. Hayakawa and Y. Fujinawa,

- TERRAPUB Tokyo, 261-270, 1974
- Fraser-Smith, A. C., 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, 1465-68, 1990.
- Fujinawa, Y., and K. Takahashi, Electromagnetic radiations associated with major earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 105, 249-259, 1998.
- Fukumoto, Y., M. Hayakawa and H. Yasuda, Investigation of over-horizon VHF radio signals associated with earthquakes, *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol. 1, 107-112, 2001
- Gokhberg, M. B., Y. A. Morgounov, T. Yoshino and I. Tomizawa, Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related with earthquakes in Japan, *J. Geophys. Res.*, vol. 87, 7824, 1982.
- Gotoh, K., 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, No. 1., 1-12, 2002.
- Gulfeld, I., VLF法と大地震短期予知. 予知活動の経験, 大地震発生日の予知. 公開シンポジウム (電気通信大学) 資料集「電磁気現象と地震予知」, 83-98, 平成7年11月5日.
- Hayakawa, M., 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, 241-244, 1996.
- Hayakawa, M., T. Itoh and N. Smirnova, Fractal analysis of geomagnetic ULF data associated with the Guam earthquake on August 8, 1993, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 26, 2797-2800, 1999
- Hayakawa, M., O. A. Molchanov, T. Ondoh and E. Kawai, On the precursory signature of Kobe earthquake in subionospheric VLF propagation, *J. Comm. Res. Lab.*, vol. 43, 169-180, 1996.
- Hayakawa, M., T. Itoh, K. Hattori, and K. Yumoto, ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia on February 17, 1996, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, No. 10, pp. 1531-1534, 2000.
- Hayakawa, M., O. A. Molchanov, NASDA/UEC team, Summary report of NASDA's Earthquake Remote Sensing Frontier Project, *Phys. Chem. Earth*, vol. 29, 617-625, 2004.
- Hata, M. and S. Yabashi, Observation of ELF radiation related to volcanic and earthquake activities, in *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, Ed. by M. Hayakawa and Y. Fujinawa, TERRAPUB, Tokyo, 159-174, 1994.
- Hattori, K., 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. by M. Hayakawa and O. A. Molchanov, TERRAPUB, 19-28, Tokyo, 2002
- Ismaguilov, V. S., Yu. A. Kopytenko, K. Hattori, P. M. Voronov, O. A. Molchanov, and M. Hayakawa, ULF magnetic emission connected with under sea bottom earthquakes, *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol. 1, 23-31, 2001.
- Kushida, Y. and R. Kushida, Possibility of earthquake forecast by radio observations in VHF band, *J. Atmos. Electr.*, vol. 22, No. 3, 239-255, 2002.
- Molchanov, O. A. and M. Hayakawa, Generation of ULF electromagnetic emissions by microfracturing, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 22, 3091-94, 1995.
- Molchanov, O. A., Yu. A. Kopytenko, P. M. Voronov, E. A. Kopytenko, T. G. Matiashvili, A. C. Fraser-Smith and A. Bernardi, Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak (Ms-6.9) and Loma Prieta (Ms=7.1) earthquakes: Comparative analysis, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 19, 1495-98, 1992.
- Molchanov, O. A., O. A. Mazhaeva, A. N. Goliavin, and M. Hayakawa, Observations by the Intercosmos-24 satellite of ELF-VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes, *Ann. Geophysicae*, vol. 11, 431-440, 1993.
- Molchanov, O. A. and M. Hayakawa, Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes, *J. Geophys. Res.*, vol. 103, p. 17,489-17,504, 1998.
- Oike, K., and T. Yamada, Relationship between shallow earthquakes and electromagnetic noise, in the LF and VLF ranges, in "Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction", Ed. by M. Hayakawa and Y. Fujinawa, TERRAPUB, Tokyo, 115-130, 1994.
- Parrot, M., Statistical studies with satellite observations of seismogenic effect, in "Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes", Ed. by M. Hayakawa, TERRAPUB Tokyo, 685-696, 1999.
- Rodger, C. J., R. L. Dowden and N. R. Thomson, Observations of electromagnetic activity associated with earthquakes by low-altitude satellites, in "Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes", Ed. by M. Hayakawa, TERRAPUB Tokyo, 697-710, 1999.
- Singh, R. P., B. Singh, P. K. Mishra and M. Hayakawa, On the lithosphere-atmosphere coupling of seismo-electromagnetic signals, *Radio Sci.*, Vol.38, No.4, 1065, doi:10.1029 / 2002RS002683, 2003.
- Tronin, A. A., M. Hayakawa and O. A. Molchanov, Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China, *J. Geodynamics*, vol. 33, 519-534, 2002.