

総合報告

電磁気学的手法による短期的地震前兆の観測的研究の現状

東海大学海洋研究所地震予知研究センター* 長尾年恭
東京学芸大学物理学科** 鴨川 仁
千葉大学理学部地球科学科*** 服部克巳

Current Status of Observational Studies on Short-Term Earthquake Prediction Research by Using Electromagnetic Phenomena

Toshiyasu NAGAO

Earthquake Prediction Research Center, Tokai University,
3-20-1 Orido, Shimizu, Shizuoka 424-8610, Japan

Masashi KAMOGAWA

Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukui-kita-machi,
Koganei, Tokyo 184-8501, Japan

Katsumi HATTORI

Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Chiba University,
1-33 Yayoi, Inage, Chiba 263-8522, Japan

(Received April 5, 2005; Accepted May 30, 2006)

Despite its extreme importance and decades of efforts, practical short-term earthquake prediction still remains to be achieved in future. However, the electromagnetic research has been demonstrating some promises. This paper briefly reviews the recent progress of what we call "seismo-electromagnetics", mainly referring to Japanese studies by the observational point of view. We demonstrate some results of observations, in varied frequency ranges, on the anomalous telluric current, ULF geomagnetic transient change, VLF-HF natural emissions and anomalous transmission of VLF and VHF band radio waves. We also summarize proposed physical mechanisms of these phenomena, including the notion called "Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere (LAI) Coupling". We believe that electromagnetic studies will play an important role in not only earthquake prediction but also in understanding physical processes of earthquake generation.

Key words: Earthquake prediction, Short-term, Electromagnetic phenomena, Precursor

§1. はじめに

地震に先行して電磁気学的な異常現象が観測されたという報告は昔から多く存在する。最も古いものとして

Milne (1890) は、「東京で大気中の電荷変動を観測していると、地震に伴った変化が何度も観測された」と報告している。

地電流観測については、1980年代までに§2で紹介するような報告がいくつかなされた [例えば、小山・本蔵(1978)、宮腰(1985)、Shiratori(1925)]。これらの研究のほとんどは震央に近い観測点1点で1回だけ異常が

* 〒424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1

** 〒184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1

*** 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

観測されたというものであり、現象の空間的広がりやその再現性についての知見は不明であった。これらの問題にも考慮し実際に予測まで行っていると主張するグループが1980年代にギリシャで現れた(VAN法, 2.1で詳述)。この方法は学界でも大きく取り上げられたが、その真偽については議論が分かれている[例えば, Geller (1996)]。

地磁気変化については、古典的な事例として濃尾地震の際に900 nTを超える変化[Tanakadate and Nagao (1893)]が報告されたことがあるが、プロトン磁力計の開発など観測技術の向上に伴い、前駆的と報告される磁場変動は時代とともに小さくなっていった[Rikitake (1968)]。計測方法が違うため直接の数値の比較はできないが、2.2で述べるロマプリータ地震の際には60 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ を超える極めて顕著な変動(彼らは10ほどの周波数のフィルターバンクを用いて計測していたため、全磁力変化がどの程度あったかは不明)が報告されている[Fraser-Smith *et al.* (1990)]。すべての異常を観測装置の問題に帰着させることは困難であり、筆者らは有望な観測手法の一つと位置づけている。

地電流・地磁気変動以外に、地震発生前に電波が発生しているという報告が1980年代になされた[例えば, Fujinawa and Takahashi (1990), Gokhberg *et al.* (1982), 芳野 (1993)]。岩石破壊実験では、主破壊およびそれ以前に電磁波が発生することは確認されているもの[例えば, Yoshida (2001)]。これらの結果は、電波は地中での減衰が非常に大きく地上では観測不可能との一般的な認識と矛盾する(2.2参照)。このような問題は存在するが、電波観測ではいくつかの手法で前駆的な変動が震央方向から到来していることが示され[Asada *et al.* (2001), Tsutsui (2005), Yoshino *et al.* (1985)](2.4で詳述)。地震との対応についてより積極的な議論が行われるようになった。

また近年の最も大きなトピックが、「地圏-大気圏-電離圏カップリング仮説」(§3)である。これは地震現象がコサイスマックやポストサイスマックだけでなく、プレサイスマックにも大気圏や電離層にまで影響を与えている可能性が高いというもので、国際電波科学連合(URSI)などで学際的な取り組みが開始されつつある。

本論では、最近の観測データをもとに、将来の地震予知に資する前兆現象(前駆的現象)の主に日本での観測的研究のまとめを行う。まず周波数または観測手法ごとに分類し、代表的な観測的研究について紹介・検討をする。一方、電磁現象発現メカニズムについては、仮説はいろいろあるものの界面導電現象以外は室内実験での進展はあまりない。したがって今回は§4で文献の紹介

にとどめる。

§2. 地電流・地磁気・自然電磁放射観測

2.1 地電流(地電位差)観測

地電流観測は本論で取り扱う観測手法の中で、最も長い観測の歴史を有するものの一つである。Shiratori (1925)は関東地震の際に仙台で地震に伴うとみられる地電流変化を測定した。福富(1934)は伊豆半島下田で、南伊豆地震(1934年3月21日, $M=5.5$)に伴うとみられる地電流変化を観測した。同様な変化は数km離れた観測点でも捕らえられていたが、柿岡地磁気観測所では変化がみられなかったと報告している。気象庁・柿岡地磁気観測所の吉松は、構内で行われている地電流観測記録の中に地震の前兆と考えられる変化があることを多数報告している[例えば, 吉松(1943)]。萩原(1948)も、地電流が地震の前後に著しい異常を示したという観測例を多数報告している。小山・本蔵(1978)は伊豆大島近海地震($M=7.0$, 1978年1月14日)で、3カ月間以上継続した地電流異常を報告した。地震予知研究のテストフィールドとなった山崎断層では電磁気学的な観測も各種行われ、宮腰(1985)は観測点のほぼ直下で発生した $M=5.5$ の地震の前に明瞭な異常を観測したと報告した。これらの変動は、歪の集中による震源域での微小な割れ目の増加などによる地下の電気伝導度の変化や、その構造変化に起因する地電流の流れのパターンの変化などを観測したのではないかと考えられている[例えば, Chu *et al.* (1996), 本蔵(1978)]。

1980年代中ごろ、ギリシャで地電流観測を用いて驚くべき予知成功を収めているとの論文が国際学術誌に掲載された[Varotsos and Alexopoulos (1984), バロトウソス・他(1994)]。それは多地点での地電流連続観測に基づく短期予知であり、その方法は開発した3人の科学者の頭文字をとってVAN法と呼ばれた。VANグループによると、地電流に継続時間数分から数時間の変化(Seismic Electric Signals; SES)が観測されてから、数日から数週間以内に地震が発生するというものであった。彼らの観測は、岩石破壊直前に岩石中に含まれるミクロな格子欠陥双極子が一斉に分極し、震源において一時的に起電力が生ずるという固体物理学の仮説を地震予知に応用したものであった。近年、Varotsosは過去20年以上の研究の集大成となる本[Varotsos (2005)]を出版したので、VAN法および彼らが地震予知に取り組むようになった理論的背景についてはそれを参照されたい。

この方法が本当に地震を予知しているかという問題については、当然のことながら反対意見が続出した。その

意見は大きく分けて、1) SESは地震とは関係ないノイズである、2) SESの発生と伝播の物理的メカニズムが説明できない、という2点に集約される。1)については、フランスの研究グループがVANグループとほぼ同一箇所で観測を試み「SESは人工ノイズの可能性が高い」と発表した [Pham *et al.* (1998)]. しかし、数カ月程度の観測期間でかつ考察も不十分な状態で結論づけており、追試として耐えうるものではなかった。またVANグループが前兆の判定条件を少しずつ変更したため (例えば、SES activity と呼ばれる先行時間の長い新たな前兆現象の存在の主張など)、第三者を含めた統計的な議論ができず、さらに混乱を招くこととなった [Geller (1996)]. 一方2)については、SESが震源付近で発生したとすると、観測点での電場変化を説明するためには、均質大地ではとてつもなく大きな電流源が必要になるという指摘である [例えば、Utada (1993)]. これに対しギリシャのグループは理論計算により [Sarlis *et al.* (1999)], 大地の電氣的不均一によって「大きな電流源を必要とせず」かつ「遠方でも現象 (=SES) が検知でき、発生箇所も予測も可能 (彼らは Selectivity と呼んでいる)」と反論している。しかし、観測的にはこれらの不均一構造は現時点では発見されていない。

ギリシャの地震予知に注目し、日本での適用を試みたのは東京大学の田上誠也らのグループであった。田上らは日本電信電話会社 (NTT) の協力を得て地電流観測を行った。この間に、北海道弟子屈観測点の事例等 [Uyeshima *et al.* (1989)] で、前駆的地電流変化と地震との対応について発表し、ギリシャ以外で初めて SES 存在の可能性を指摘した。Nagao *et al.* (1996) も同様の NTT 回線を用いた観測を能登半島で実施し、1992年能登半島沖地震の約2カ月ほど前から地電流の異常を観測した。しかし、変動は広域的ではなく震源に最も近い電極のみが変動していたもので、異常開始と前震活動との開始時期が一致することや、地震発生時に異常変化が終息したといった時間的な対応は良いが、ケーススタディにとどまった。このような状況のもと、兵庫県南部地震を契機に、科学技術庁は傘下の特殊法人を使って「地震総合フロンティア研究」を1996年に立ち上げた。その中の理化学研究所「地震国際フロンティア研究」では、地電流を含む電磁気学的手法による前兆現象の基礎研究がテーマとして取り上げられ、ここではVAN法の有効性および日本への適用可能性について一定の結論を出すことが使命とされた。結論として、日本でもギリシャのSESと同様の性質をもつ前駆的な地電流変化を観測した [Uyeda *et al.* (2000)] が、それはM5クラスの地震が観測点から20 km以内に発生したときに限られ、ギ

リシャで報告されているような100 kmを超える距離では、SESとみられる現象は検知されなかった。これは直流電化鉄道や工場などからの漏洩電流によるノイズが日本では極めて大きく、それらの対策が効果的にできなかったという研究方策の甘さにも起因すると考えている。またギリシャでは Selectivity rule という経験則を用いて震央の予測まで実施していたが、「地震国際フロンティア研究」実施中の地震活動度の低さという二次的な要因もあり、日本では経験則を確立するだけのデータが得られず、フロンティア研究実施期間中の日本でのVAN法追試は不十分な結果しか得られなかった。結論として、VAN法そのものだけでは、現象が真であったとしても実用的な予知を日本で行うことは現時点では困難と言えよう。

2.2 ULF帯の地磁気測定

従来、地殻活動に起因する磁気異常の抽出には全磁力測定が主に行われてきた。しかし全磁力はスカラー量であり、異常源の位置を推定するためには、基本的に多数の観測点を配置する必要がある。我々は全磁力のみならず3成分磁力計による観測を併用することが必要と考えている。3成分磁場観測であれば、少数の観測点で異常シグナルの到来方位を推定できる可能性があり、異常源の発生場所についての知見が得られる可能性がある [例えば、Ohta *et al.* (2005)]。

このような流れを受け、1980年代後半に入り、地震に関連するとみられる3成分磁力計を用いたULF帯の地磁気変動に関する研究が開始された。この周波数帯の特長は、一般に高い周波数の電磁波は地下を伝播できないという表皮効果の問題に対して原理的に有利なことである [Park *et al.* (1993)]。

これは、電磁波が有限の電気伝導度をもつ媒質中 (=地球内部) を伝播すると減衰するためである。電磁波強度が $1/e$ になる表皮深度 δ は以下の式で記述される。

$$\delta = \sqrt{2/\omega\sigma\mu} = \sqrt{\rho T/\pi\mu}$$

ここで ω は角周波数、 μ は透磁率、 T は周期、 σ は電気伝導度、 ρ は比抵抗である。なお、 $\sigma = 1/\rho$ の関係がある。たとえば電気伝導度を岩石に比べ大きい (=より電磁波が減衰しやすい) 含水堆積物程度 (0.1 S/m) とすると、周波数 0.01 Hz での δ は約 16 km となる。これは震源域の深さにほぼ相当する。

1989年のロマプリータ地震ではほぼ震源直上で観測が行われており、地震の12日ほど前から0.01 Hz付近の磁場強度が上昇し、さらに地震発生の3~4時間前から $60 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ に達する磁場強度の上昇が観測された (Fig. 1) [Fraser-Smith *et al.* (1990)]. そしてこのような

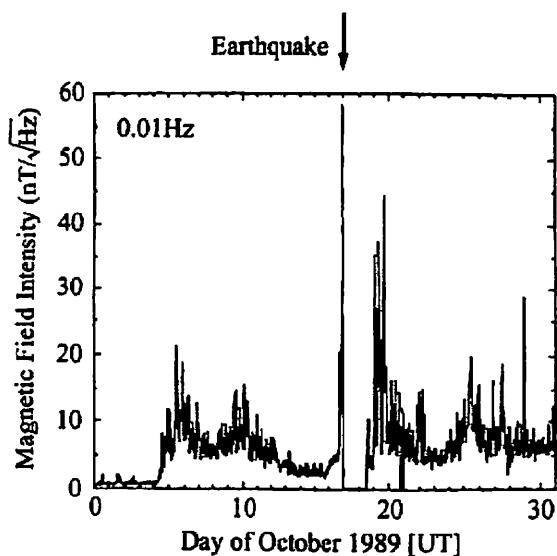


Fig. 1. Anomalous geomagnetic change associated with the 1989 Loma Prieta earthquake [after Fraser-Smith *et al.* (1990)].

変動が記録されたのは15年間にわたる観測期間中でただ一度であった [Fraser-Smith (私信)].

1993年のグアム地震 ($M=8.0$) について, Hayakawa *et al.* (1996) は地球内部起源のULF帯電磁波と太陽起源の地磁気脈動などの識別に注意を払って解析を実施し, この地震に関連する電磁放射が観測されていた可能性が高いと結論した. 具体的には, 彼らは地中に置いた電流ダイポールソースから放射される電磁場を計算し, 地磁気脈動では磁場スペクトルの鉛直成分と水平成分の比が小さいのに対し, 地球内部からのULF帯電磁波では磁場スペクトルの鉛直成分が卓越するという特徴を用いた識別方法を提案した. ここでは筆者らが解析・観測を行った二つのケースを紹介する.

2.2.1 1997年鹿児島県北西部地震

1997年3月26日および5月13日に鹿児島県北西部で $M=6.5$ と $M=6.3$ の地震が発生した (Fig. 2). 震源の深さはいずれも約20 kmであった. 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 Hz サンプリングで行われていた [Yumoto *et al.* (1992)]. ここでは1996年8月から1997年9月まで約1年間のデータを解析した.

我々は, 人工雑音および地磁気脈動などの影響をできるだけ小さくするために午前0時から4時のデータを使用して周波数解析を行い, Fraser-Smith *et al.* (1990) が示唆した0.01 Hz帯で最も顕著な前駆的変動が記録されている可能性が高いことを確認した. そしてこの周波数帯を使用して地磁気水平成分と鉛直成分の比をパラメータとして解析を行った [Hattori (2004)].

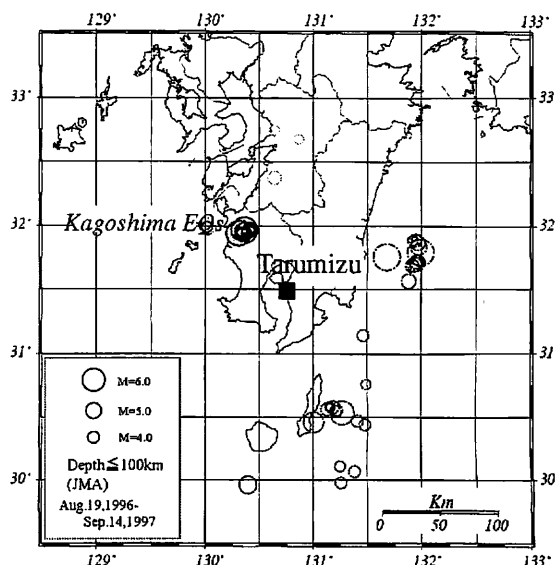


Fig. 2. Map showing the location of 1997 Kagoshima-ken-Hokuseibu earthquakes (EQs) and Tatumizu geomagnetic station (gray rectangle).

さらに, 垂水観測点で観測されたULF帯の磁場変動の空間的広がりを見積るため, 1,200 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成分データを同時に解析した. ULF帯における最大の信号源は太陽活動に起因する地磁気脈動であり, これは太陽からの高速荷電粒子が地球に衝突することが原因である. 実際には高速荷電粒子は地球の周りを取り巻く磁力線に衝突し, その磁力線を振動させる. このため地磁気共役点では原理的にほぼ同じ地磁気変化が観測される. Fig. 3aに父島およびダーウィンと垂水との位置関係を示す. ちなみに解析期間では, 父島およびダーウィンの周囲100 km以内では地震はほとんど発生していない.

Fig. 3bに垂水観測点を中心とした半径90 km以内の地震活動度 (1日あたりの地震エネルギーをマグニチュードに換算) を示した. Fig. 3cは3観測点の地磁気水平成分と鉛直成分の比を図示 (前10日間の移動平均) したもので, 太線が垂水である. Fig. 3cには父島, ダーウィンの変化も示しているが, 両者は安定していることがわかる. 一方, 垂水のグラフはそれらと異なった変動をしている. このような変動はダーウィンおよび父島では認められず, 垂水固有の変化である. 垂水周辺の地震活動のエネルギーを積算したグラフと地磁気水平成分と鉛直成分の比の結果を比較すると, この比の値が地震活動に先行して高まっていること, その形が地震活動度と似ていることがわかる.

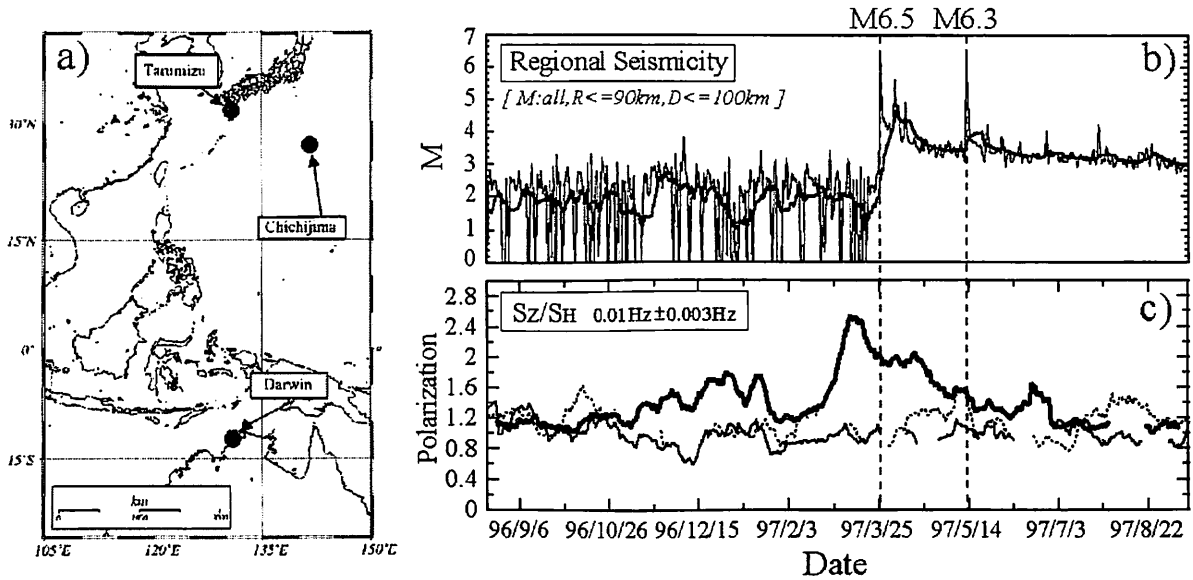


Fig. 3. Anomalous geomagnetic change associated with the Kagoshima-ken-Hokuseibu earthquakes [after Hattori (2004)]. a) Location of remote reference geomagnetic stations (Chichijima and Darwin). b) The regional daily sum of seismic energy expressed in terms of equivalent magnitude (10 days backward running mean). c) The variations of geomagnetic polarization at 0.01 Hz band. The variation of 10 days backward running mean of daily values is plotted. Thick line, thin line and dotted line show the variations at Tarumizu, Chichijima and Darwin, respectively.

2.2.2 2000年、三宅島噴火に始まる伊豆諸島での群発地震活動

2000年6月末、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 (Fig. 4)。ここでは、この火山噴火・群発地震活動に先行して現れたULF帯の電場・磁場の変動について報告する [Uyeda *et al.* (2002)]。

我々は新島で1997年暮より地電位差観測を、2000年初頭より伊豆半島で3成分磁力計3台を用いたアレ観測を行っていた。Fig. 5は新島観測点の3年間の地電位差および伊豆半島の地磁気データである。地電位差変動の実際の大きさはFig. 4のWakとAir間の長基線の電場で2 mV/km程度であった。なお、ここで示したのは地電位差の生データではなく、0.01 Hz帯 (ULF帯) でのWak-AirとAir-Boe間の相対的なスペクトル強度比である。いずれも南北方向に展開された測線である。両者の比を取ることにより、地電流変化における地磁気嵐の影響は相殺され、効率的に除去できたと考えている。

また、図の地磁気データは主成分解析 (Principal Component Analysis; PCA) を適用後のデータである。一般に地磁気データは、1) 太陽活動に起因する地磁気変

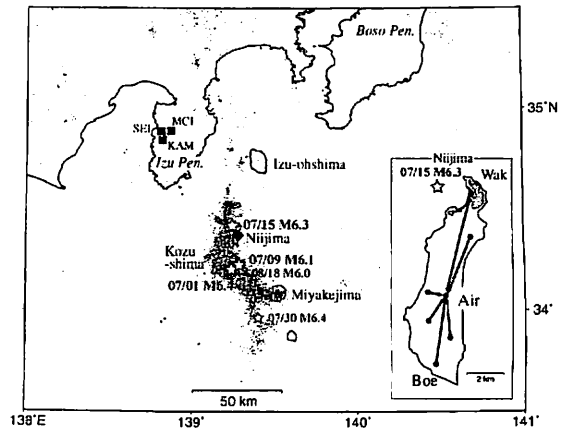


Fig. 4. Index map of Izu Islands region. Dots represent $M > 0$ earthquakes from the JMA catalog in the period from June 1 to September 30, 2000. Stars denote $M > 6$ earthquakes. The solid diamond and solid squares indicate Niijima geoelectric station and geomagnetic stations (MCI, SEI and KAM), respectively. Right Inset shows the long dipole configuration of Niijima station. A short dipole (not shown) is also installed at the far end of each long dipole centered at Air (Airport). Shaded area around Wak is covered by basalt, whereas the rest of the island consists of rhyolite.

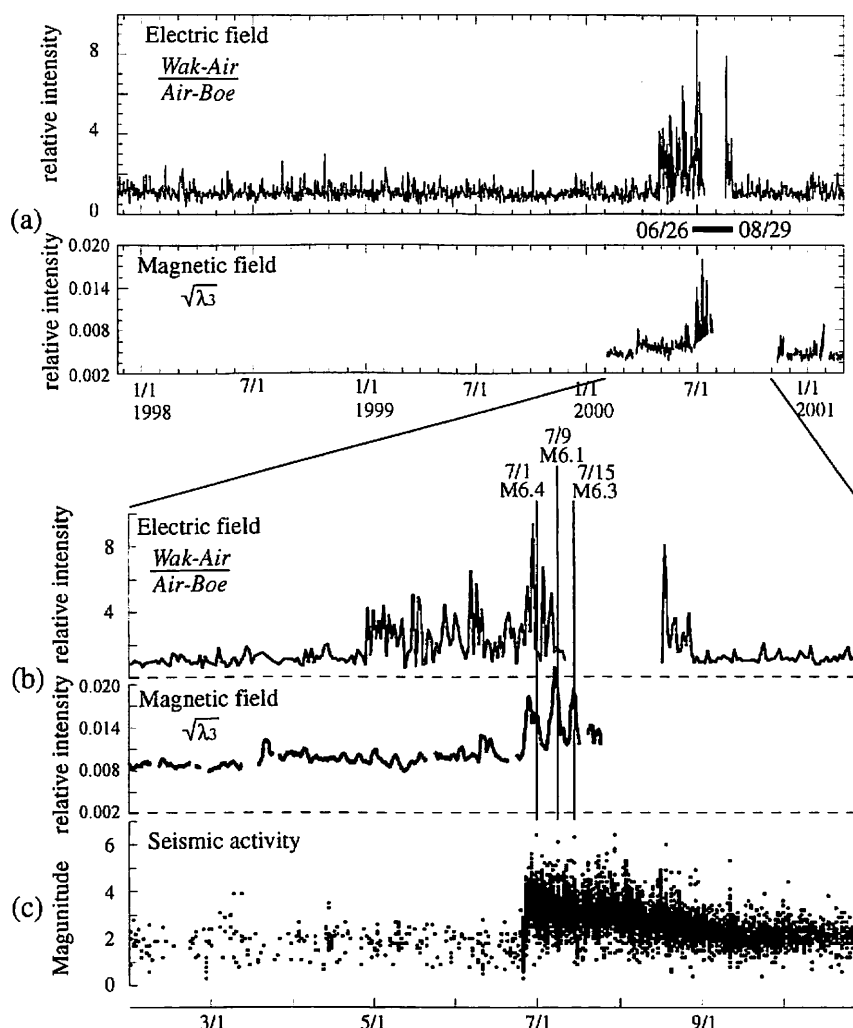


Fig. 5. Temporal change of 0.01 Hz spectral intensity ratio of geoelectric potential difference at the Niijima Island, and the third principal component (λ_3) at 0.01 Hz of the geomagnetic field at the Izu Peninsula array station. The gap in data was caused by system failure in July and August. a) Electric and magnetic record for the period of three years. b) Electric and magnetic record from January through October, 2000. The occurrence of three $M > 6$ earthquakes in July are indicated by vertical lines. c) Seismicity in the Izu Islands region from the JMA catalog. [After Uyeda *et al.* (2002).]

動（磁気嵐など）、2)人工ノイズ、3)それ以外のもの（地震活動に関連する変動を含む）から構成されると考えられる。

今回は地磁気南北成分のデータを用い、0.01 Hz帯で解析を実施した。主成分解析では原理的に測定系の数だけの成分にシグナルを分離できるので、3地点間の磁場の関係を調べることで、三つの固有ベクトルと固有値 ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$)を見積ることが可能となり、それにより異なる起源をもつ（と推定される）三つの成分に分離することができる。その結果、第1主成分は太陽活動度指数とよく似た挙動を示すことが確認された。また第2主成分は明瞭な日変化をしていること、および平日には昼休み（ローカルタイムの12時～13時）にそのレベルが低

下していること（ランチタイム効果）から、人間活動に由来する変動を主に記録していると推察した。第3主成分は前者二つ以外の残りの成分で、地震に先行する磁場変動があるとすれば、おそらくこの中に含まれていると考えられる。Fig. 5はこのようにして求めた第3主成分（固有値の相対的な値で無次元）の時間変化である。第3主成分の値は、期間中に発生した三つの $M6$ クラスの地震において、いずれもその直前に値が増加していたことも判明した。さらに固有値の大きさから、もし第3主成分が地震の先行シグナルであったとすると、磁場変化の大きさは伊豆半島の観測点では 10^{-1} nT程度か、それ以下であったことが推定された。

通常、地殻変動などのPCAを用いた解析では、大き

な成分(第1主成分や第2主成分)について議論をしている。しかし今回は一番小さな主成分について議論しており、その解析の信憑性が問われかねない。今後ULF帯の地磁気データの解析では、まず理論的に推定可能な太陽活動に起因する磁場変動をインターステーション法[Harada *et al.* (2004)]などによって除去してから詳細な議論を行うことが必要であろう。

また最近、伊豆半島の地磁気アレー観測データを用いて、ULF帯変動の見かけ到来方向の推定が試みられている。それによると噴火/群発地震活動の2週間ほど前から三宅島方向にソースをもつと思われる磁場変動が観測され始め、群発地震活動中に最も大きな強度を示し、2002年5月には消滅していた。なお、観測された磁場変動の強度は数十pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 程度であった[Hattori (2004)]。

2.3 VLF帯-HF帯における自然電磁放射(電波)観測

§1でも述べたが、この周波数帯域での電磁波の異常と地震との関係について初めて言及したのは、日本の芳野やロシアのGokhbergのグループである[Gokhberg *et al.* (1982), Yoshino *et al.* (1985), 芳野 (1993)]。ここではケーススタディとして兵庫県南部地震の前後に得られた記録を例として各種観測手法を解説する。

1995年の兵庫県南部地震では、さまざまな周波数で、地震に関連する可能性が高いのではないかと推察された“いくつかの異常現象”が報告された。その中でも注目すべきは、§3で詳述するように、地震の前にその上空の電離層に異常が観測されたというものであった。地震は地下の現象であり、地表ですら明確な前兆が数多くはみつからないなか、電離層に異常が観測されるというのは信じがたいことである。しかし、近年大気圏/電離層の異常と地震との相関について、有意性を示唆する結果が複数の論文で示されるようになった[例えば、Fujiwara *et al.* (2004), Liu *et al.* (2006)]。

Fig. 6は兵庫県南部地震の前後3カ月のデータ(1994年12月~95年2月)をまとめたもので、基本的に上から下に低い周波数から高い周波数の観測を示した[Nagao *et al.* (2002)]。我々は地震に関連する電磁気現象は2種類に分類できると考えている。一つは地下から(または地表から)地震前に直接シグナルが放出されていると思われるもので、もう一つは震源上空の電離圏や大気圏に異常が発生しており、それらが電波伝播などの観測から指摘されているものである。これは異常を引き起こした“真”の原因が電磁気現象によるものだけだとは限らないが、測定方法が電磁気的手法であること、地下ないし地表での電磁気現象の二次的な影響

の可能性があることにより、広義の意味で、「地震に関連する電磁気現象」の枠組みに入ると考えている。これを考慮してFig. 6では上に前者の現象、下に後者の現象に対応するものが並ぶように表示した。また一番下には阪神地区の地震活動のデータも示した。なお図中のカッコ内は観測地を示す。

パネル1-3はいずれも電磁波ノイズで、広い周波数にわたって、しかも震源から数百km離れた場所でも、地震発生の1週間ほど前に鋭いピークを示しているが、この日には雷活動も存在していた。雷は強力な広帯域の電磁波発生源であり、地震前兆と見えたのは単なる雷の電波だった可能性がある。ただし詳しく調べると、雷発生ピーク時と電磁波ノイズ発生のピーク時は一致していない[Nagao *et al.* (2002)]。一方、パネル3の観測を行っていた尾池らのグループは、地震発生直前の約50分間に観測された波形データを解析したところ、そのすべてが雷活動で説明できることを示した[Izutsu and Oike (2003), Izutsu (2005)]。従来地震に関連しているだろうと主張されてきたVLF帯やLF帯で地震前に電磁パルスが増加するという報告[例えば、Oike and Ogawa (1986), Yamada and Oike (1996)]は、その多くが雷を観測していたという可能性が非常に高く、以後雷との識別が重要なテーマと認識された。

パネル4は明石市で22.2 MHzという周波数で簡易干渉計を用いて木星からの電波観測をしていたところ、地震発生の20分ぐらい前から強烈な電波が到来したことを示している。そして干渉計による方位探査の結果、野島断層方向は到来方向として矛盾しないと報告されている[Maeda and Tomisaka (1996)]。

パネル5と6は人工電波の伝播異常に分類される現象である。パネル5は対馬から発信されたVLF帯オメガ航法用電波の強度と位相を千葉県銚子で連続観測していたところ、地震の2日ほど前にターミネータタイム(電離層の電子密度が昼と夜とで急激に変わることによって起因する電波伝播の日の出と日の入りの時刻)というパラメータに大きな異常がみられたというものである[Molchanov and Hayakawa (1998)]。パネル6は、流星の到来を見通し外(直接波到達圏外)のFM放送波の散乱現象で観測中、流星の起源ではない異常電波が受信されたというものである[Kushida and Kushida (2002)]。これら二つ(パネル5と6)は、地震直前に(震源)上空で人工電波(=放送電波)の電波伝播経路(電離圏または大気圏)に異常が起きていたことを意味する(§3で詳説)。

また、地震発生直前に震央付近を走行していた運転手から、中波のラジオ関西(558 kHz)の雑音状況について

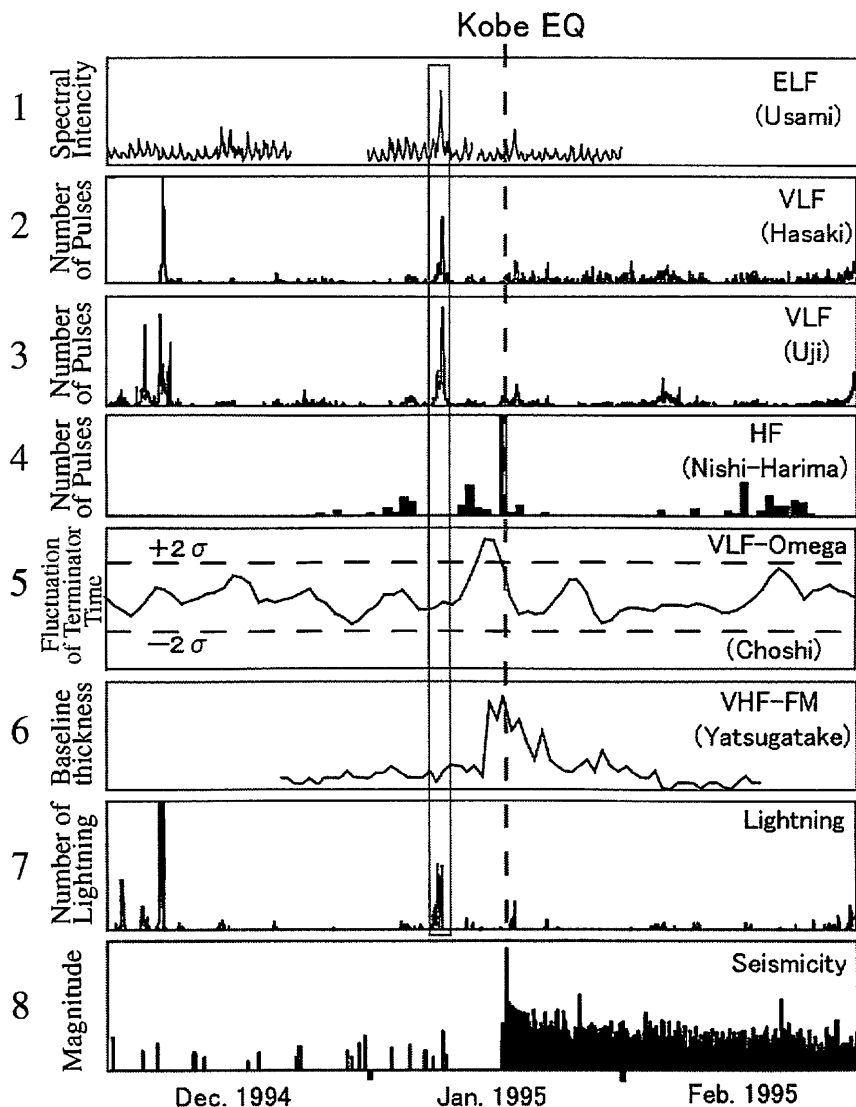


Fig. 6. Three months records around the 1995 Kobe earthquake (EQ). Vertical dotted line shows the day of Kobe EQ. The slender rectangular area is a candidate of precursory phenomena that appeared about a week before the EQ [after Nagao *et al.* (2002)]. Panels 7 and 8 show lightning data observed by electric power companies and regional seismicity from the JMA catalog, respectively.

の詳細な証言も存在する [芳野 (1996)]. この運転手は元電話級アマチュア無線技師の経験があり、明確に雑音レベルの変化を記憶していた。要約すると「神戸に接近するにつれラジオ関西に雑音が混入しているのに気づき、どんどんその雑音が大きくなった。このようなことは以前に経験がなかったので、阪神付近で受信可能な他のAM放送局5局を受信してみたところ、すべての局で同様のノイズの混入が観測された。5時20分頃、垂水に入った途端、急に強烈なノイズが受信された。この時思わずボリュームを絞ってそのまま走行を続けた。この時は受信可能な中波放送すべてが大きなノイズでまったく放送内容を聞き取れない状態であった。神戸市東灘区を通過する頃一層レベルが上がり、高架橋崩壊部分を通り過ぎた直後の5時46分、強烈な振動にハンドルを取ら

れて左右に振り回され、夢中で急停止し、何事が起こったかを確認し安全を確かめると直ちに車外に出た。その後15~20分後に車に戻ったところ、ラジオが地震発生を告げているのが聞こえた。地震発生直前に聞こえていた激烈なノイズは消えていた。」というものである。このドライバーは業務で日々この道路を運転しており、このような雑音によりラジオが聞こえなくなった経験は過去一度もなかったと報告している。本報告は科学的な測定結果ではないが、力武(1998)なども「兵庫県南部地震が顕著な前兆的電磁波異常を伴ったことは明らかである」としている。この報告に注目した研究者は数多い。

2.4 VLF帯における方位探査観測

ここでは2.3に含まれる自然電磁放射観測のうち、VLF帯の結果について別項目として紹介する。VLF帯の電磁ノイズの増加は、単に空電を観測しているだけで、地震活動との相関は擬似的なものであるとの意見も根強い。このような疑問点を解消するためには、地震の前兆的变化としての電磁放射は本当に存在するのか、それらはどのような特徴をもっているのかについて答え、さらに空電との識別方法の確立、そしてその電磁波源の同定が必要となる。

東海大学の浅田・馬場らは地震に関連する電磁放射の研究を1994年頃から開始した。彼らはVLF帯で水平磁場2成分波形を測定し、電磁波パルスの見かけ到来方位が決定できるシステムを構築した[川副・他(1999)]。彼らのシステムはイベントトリガー方式で、電磁波がある閾値を超えた場合、波形を記録するものであった。浅田らの発想の優れていたところは、誰もいわゆる“地震電磁波”の特徴を知らないので、できるだけ閾値を下げ、可能な限り多くの波形を観測しようとしたことである。この結果、彼らは年間600万イベントの波形を蓄積し、それを分類するという作業を行った。比較対象となる空電は電力会社各社により、どこで・どの程度の強さの落雷があったかが同定できるようになっていた。このあたりは北川(1998)など、空電関係の専門書を参考にされたい。

川副・他(1999)によれば震央方向から集中的に到来した電磁波は、1) 波形の形状はすべてが必ずしも似ていない。2) 空電の電磁波と比較すると相対的に振幅が小さく、弱い。3) この種の波形は地震が発生する前に震央方向(=同一方向)から集中的に観測され、地震発生後急激に観測されなくなる、としており、同じシステムで観測した空電とはスペクトルも違うようだ述べている。Fig. 7の上のパネルは、浅田らのシステムで観測された典型的な対地雷の波形である。中と下のパネルは、震央方向から到来したシグナルの波形例であり、空電より振幅も小さく、この例では中心周波数も空電とは異なっている。Fig. 8は震央方向からの電磁パルスが複数の観測点で同時に観測された例である[Asada *et al.* (2001)]。

Asada *et al.* (2001)では「地震前兆電波が観測されたのはマグニチュード5クラスの浅い地震が、観測点から100 km程度以内で発生した場合である。震央が海域、震源が深い(50 km以深)、あるいは観測点から100 kmより遠い地震の場合には顕著なシグナルは観測できていない」と述べている。また観測パソコンの時計の精度の範囲内ではあるが、彼らのシステムでは地震発生時のコサイスマックな電磁パルスは現時点では確認されていない

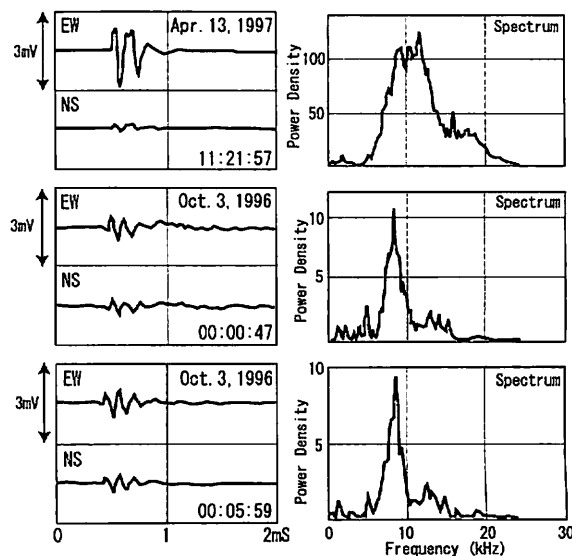


Fig. 7. Examples of the waveforms (left column) and their spectra (right column) observed at Shonan station [after Kawazoe *et al.* (1999)]. Top row shows a typical cloud to ground lightning signal. Middle and bottom rows show the waveforms and spectra of signals preceded the earthquake on October 5, 1996.

い[馬場久紀(私信)]。

京都産業大学の筒井は、高感度のVLF帯電磁界計測装置(垂直電界1成分と水平直交の磁界2成分)を作成し、地表と地下でノイズレベルなどの測定を行っていたところ、地中を伝播してきたVLF帯の電磁波が存在することを発見した[Tsutsui (2002)]。またTsutsui (2005)では、2004年1月6日の紀伊半島付近の地震($M=5.5$)の際に、磁場2成分の振幅比から到来方位を求め、さらに大気圏内を伝播した電磁波の分散性を用いて伝播距離を求めた。そして震源近傍で励起されたコサイスマックと考えられる電磁パルスを観測した。

今後、これらの技術を用いて地震と関連する可能性の高いVLF帯自然電磁波の観測ができると期待され、さらには地中起源かつ地中伝播したVLF帯電磁波が存在するかどうかについても結論を出すことができると考えている。さらに、筒井が観測したコサイスマックのパルスが地震の破壊すべり起源であれば、地震学的手法とは独立に発震時を決定できる可能性が開け、地震学にも大きな飛躍をもたらす可能性を秘めていると筆者らは考えている。

§3. 地圏-大気圏-電離圏結合仮説

3.1 電離圏擾乱

地震に関連する電磁気現象は地上観測だけに現れる現

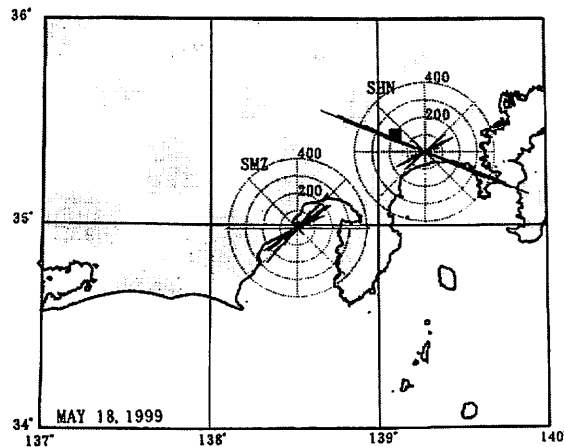


Fig. 8. Result of direction finding made on May, 18, 1999 at two stations SHN (Shonan) and SMZ (Shimizu) [after Asada *et al.* (2001)]. Stations are located at the center of the two concentric circles. The solid square shows the earthquake ($M=4.1$) that occurred on May 21, 1999. The length of bars in rose diagrams is proportional to the number of received signals. They seem to point the future epicenter or atmospherics.

象だけでなく、電離圏擾乱などの現象が近年数多く報告されている [例えば, Kamogawa (2006)]. 後者については1980年代後半ごろから指摘され始め, ロシアの Gokhberg *et al.* (1989), Gufeld *et al.* (1992) をはじめ多くの観測報告が存在する. Molchanov and Hayakawa (1998) は, 先行的な下部電離層の異常は, 震源が 30 km より浅く, かつ陸域で発生した $M6$ を超える地震の場合には 80% の割合で異常は検出できたが, 深い地震, 海域で発生した地震の場合はわずかし下部電離層擾乱は観

測されなかったと報告している. やはり兵庫県南部地震をきっかけとして, VLF 帯のみならず VHF 帯 (FM 放送電波) の異常電波伝播を用いた研究が日本で開始され [Kushida and Kushida (2002)], 複数の日本の大学がこの周波数帯を使い地震の前駆的現象検出を目的とした電波伝播観測を進めている [例えば, Fukumoto *et al.* (2001), Sakai *et al.* (2001)].

一方, 台湾の劉らはイオノゾンデ [Liu *et al.* (2000)] や GPS-TEC [Liu *et al.* (2001)] を使って, 台湾で発生した $M6$ 以上の地震について調べたところ, 台湾上空の F 層の電子密度が地震前に減少するという指摘をした. Liu *et al.* (2006) は, 1994–1999 年の $M5$ 以上の地震について調べたところ, 地震前 5 日以内に有意と考えられる相関があることを示した (Fig. 9a). さらにオッズ比 (5 日前に異常が見られた地震数/異常がみられなかった数) を調べたところ, $M5.4$ 以上かつ観測地点から 150 km 以内の地震に関して有意性が認められるという結果を得た (Figs. 9b, 9c).

3.2 大気圏擾乱

Fujiwara *et al.* (2004) は, VHF 帯で異常伝播電波の電界水平成分および鉛直成分の双方を同時に測定することにより, 電波を散乱/反射する場所が電離圏内ではなく大気圏内であること, およびそれらが地震の前に有意に発生していることを示した (Fig. 10).

詳述すると, 通常 VHF 帯電磁波は電離層を突き抜けるが, 大気圏・電離圏に擾乱がある場合, 通常では受信できない遠方の受信点で電磁波が受信される. 水平偏波で発射された電波 (ここでは FM 放送波) が電離圏で反射・散乱された場合, 電界成分は垂直・水平両成分が観測され, 大気圏経由の場合は水平成分のみが観測され

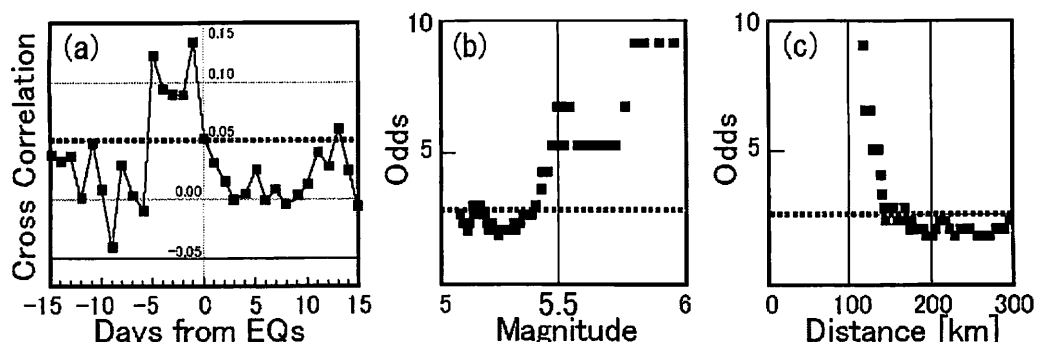


Fig. 9. Summary of the statistical studies by Liu *et al.* (2006). In each figure, horizontal dotted lines show 5% significance level, above which the data is statistically significant. (a) Temporal correlation. 0 and minus in the horizontal axis means the day of earthquakes and “precursory” period, respectively. The cross-correlation exceeds the significance level between one and five days before the earthquakes. (b) Odds versus earthquake magnitude. It exceeds the significance level for earthquakes greater than $M=5.4$. (c) Odds versus distance. It exceeds the significance level for short range less than 150 km.

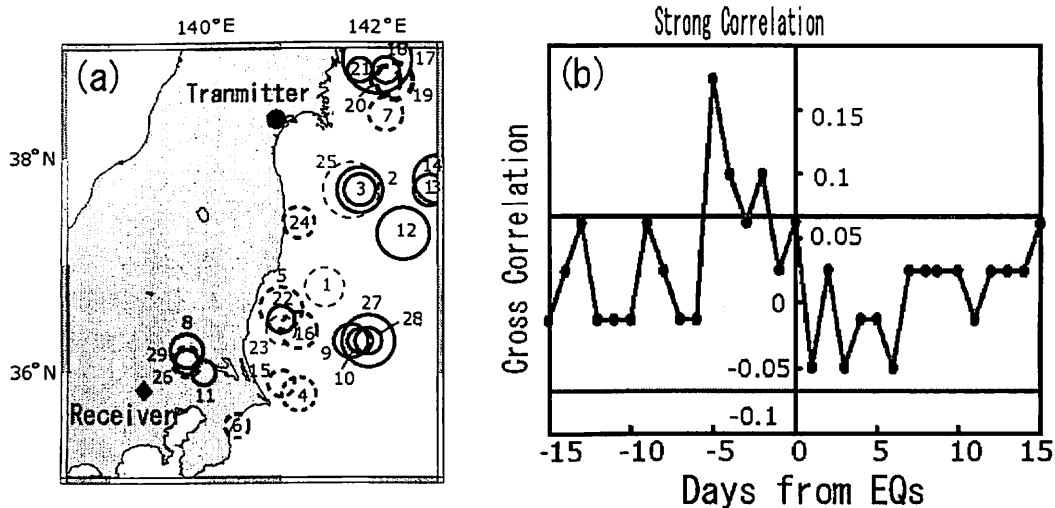


Fig. 10. Summary of statistical study by Fujiwara *et al.* (2004) on anomalous FM radio wave transmission before earthquakes. (a) Solid circle and solid diamond represent the location of the transmitter and the receiver, respectively. Open circles, open dotted circles, and open gray-dotted circles represent the earthquakes with preseismic anomalies, without anomalies, and no data, respectively. (b) Cross-correlation coefficient with time lag between earthquakes and anomalies. Judging from the approximate z -test at significance level of 0.1, the anomalies that appear two to five days prior to the earthquakes (gray shaded area) are statistically significant.

る。そして彼らの結果によれば、地震前5日から2日の間に起こる大気圏内擾乱と地震発生には有意と考えられる相関が見られた。3.1で述べたように、台湾と日本で、それぞれ電離圏と大気圏と、異常の領域は違ってもほぼ同じ統計的性質を示す結果が出てきたことは、本現象を今後解明する上で重要な情報を提供するものであろう。

同様な研究に、北海道大学の森谷らの研究がある〔森谷・他(2005)〕。森谷らは北海道内に5カ所のFM受信点を展開し、観測ネットワークを構築した。森谷らはFM散乱波の継続時間の合計(T_e)が有効なパラメータの可能性が高いのではないかと考え、発生した地震のマグニチュードや深さなどについて検討を行った。その結果、地震が浅い場合、大きい場合にはより顕著な電波伝播の異常が生ずるという結論に達した。さらに日高山脈南部で発生するほぼ同じ深さの地震に着目して解析したところ、 T_e の常用対数がマグニチュードと比例関係にあることを見だした(Fig. 11)。今後のさらなるデータ蓄積が待たれる。なおFM放送を送信局として用いた観測でネックとなっている放送局電波の混信、および商用放送を使う限り避けられない送信放送局の地理的偏在を避けるため、北海道大学では、微小地震観測テレメータ用に大学が保有しているVHF帯(60 MHz帯)の複数のトランスミッターを北海道内に配備して、理想的な送受信点配置の観測を行う準備をしている〔森谷(私信)〕。これにより混信のない高品質のデータの取得が期待される。

3.3 電離圏・大気圏擾乱発現メカニズム

ここで述べる“メカニズム”とは、大気圏あるいは電離圏の擾乱がどのように発生するかについてのメカニズムであり、電離圏・大気圏擾乱を引き起こす地表の現象と地下での“真の”地震電磁気現象発現メカニズムではない。まず電離圏・大気圏擾乱発生・伝播メカニズムの解明を目指し、次に“真の”地震電磁気現象発現メカニズムの解明を目指そうというのが現在の研究者の方針である。

我々は、大気圏・電離圏の擾乱が本震前の“未知の変動”によって起こされているのであれば、地上観測で“未知の変動”が捕らえられるべきだと考えている。一例として、地上に大気電場が発生し、それが電離圏まで及んでいるという考え方がある〔Grimalsky *et al.* (2003), Pulinets *et al.* (2000)〕。しかし震央から数十km離れた範囲ではLiu *et al.* (2006)の電離層観測結果を説明するような大気電場変動はみあたらないという観測結果もある〔Kamogawa *et al.* (2004)〕。さらに、これらの大気電場の発生原因として、本震前のラドン放出や〔例えば、Igarashi *et al.* (1995), Wakita *et al.* (1980)〕、正の電荷を帯びた格子欠陥が地震活動前の微小破壊によって励起され地上まで拡散してくるという考え方〔Freund (2000)〕もある。

一方、地震前に大気重力波が地表から電離圏に伝達しているのではないかと観測結果の解釈やモデル計算もある〔Molchanov and Hayakawa (1998), Pilipenko

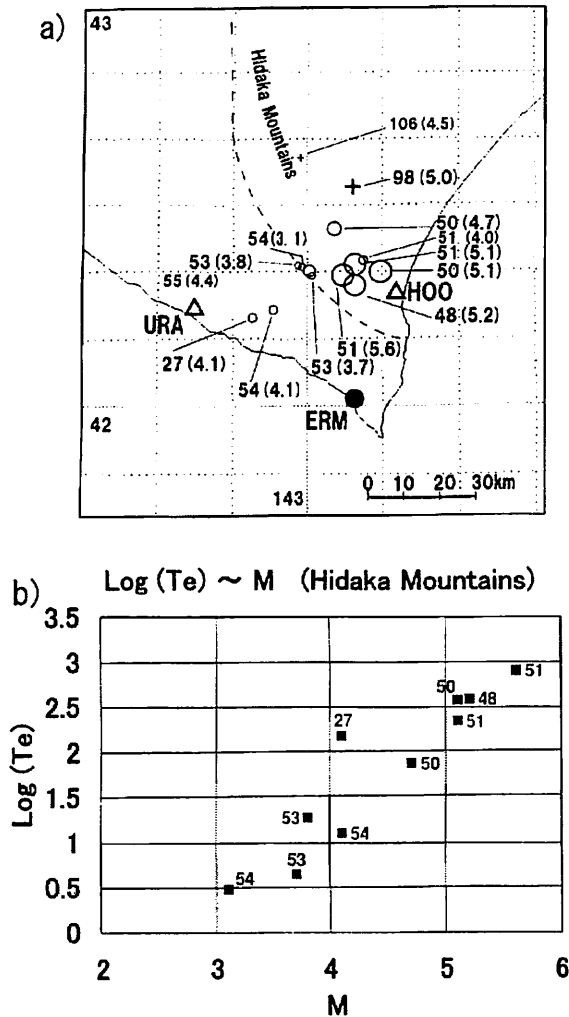


Fig. 11. Results of anomalous FM radio wave transmission before earthquakes [Moriya *et al.* (2005)]. a) Location of epicenters of eleven earthquakes. ERM is the observation point. HOO and URA are the FM radio stations. The ridge of Hidaka mountains is indicated by the broken line. Numerals and those in parentheses denote depth of hypocenter and magnitude of earthquakes. b) Plot of $\text{Log}(T_e)$ versus magnitude of earthquakes that occurred beneath the southern part of Hidaka mountains. T_e is the total time of anomalous FM transmission.

et al. (2001)]. 実際これらのインフラソニック波, 大気重力波の励起を観測で捕らえたという主張は存在するが [Li *et al.* (2003)], 同様の観測を実施していると思われる東京大学地震研究所・海半球研究センターの微気圧変動観測網からの計測データでは, 彼らが前兆的な微気圧変動を観測したという時刻に対応するような変動は検出されておらず, 極めて懐疑的と思われる [深尾良夫 (私信)]. さらに, 大気重力波の励起源として地震前の地表

面の長周期振動が原因であるというモデルが提唱されているが [Molchanov and Hayakawa (1998)], そうであれば, 震源地近傍の超伝導重力計で変動が充分検出可能と思われるが, 現時点でそのような報告は存在しない [福田洋一・今西裕一 (私信)].

§ 4. 電磁現象発現メカニズム

電磁気学的手法を用いた地震予知研究の最大の弱点は, 電磁気現象を定量的に説明する発現メカニズムがまだ存在しないことであろう. しかしながら岩石破壊室内実験では主破壊に至る過程や主破壊の瞬間にさまざまな電磁気現象 (電荷の生成や電磁放射など) が観測され, それがなぜ生じるかの説明もある程度なされている [例えば, Enomoto (1996), Nitsan (1977)]. ところが, 実際の地震における電磁気現象の発生については, 多くのモデルが提出されているにもかかわらず, いまだにどのモデルが最も有効であるかすらわかっていない. ここではいまままでに提出された電磁気現象の発生機構モデルについていくつか紹介する.

圧力刺激電流

このモデルは VAN グループのオリジナルモデルで, 固体物質内の点欠陥がその電流の原因とするモデルである [パロトッソス・他 (1994)]. 圧力刺激電流が流れるためには外部の電場が必要であり, どのようにして外部電場が発生するのかについてのメカニズムが不明瞭な点が欠点といえるだろう.

帯電結晶転位モデル

Slifkin (1993) は応力が急激に変化する場合, 固体内の格子欠陥に起因する帯電転位が大きな電気的雙極子を作る可能性があるというモデルを提案した. 帯電された転位は高速で移動できるが, その周りの遮蔽電荷雲は緩和時間程度でしか動けないので相対的に転位の速度に追いつけず, 外部から見るとプラスとマイナスが生じたように見え, 電子雲が移動して中和するには時間がかかるというものである.

相転移モデル

Lazarus (1996) は相転移によるメカニズムを提唱している. 彼は相転移 (ここでは含水鉱物の脱水反応を考えている) が地震前の応力の集中により断層面の近くで起こると考えたのである. この相転移は体積の変化を引き起こし, 結果として変形を引き起こす. そして断層の長さに比例するようなマクロな電気的雙極子が出現すると主張している. また脱水反応によりもたらされた水が断層面に移動し, 断層面の強度変化を引き起こし, そこで力学的破壊 (地震) が発生するので, 電磁気的な信号が観測されてから (水が移動し) 破壊が生ずるので, 電

磁気シグナルと地震との時間関係を定性的にうまく説明するモデルである。

圧電分極補償電荷説

池谷 (1998) は圧電効果 (ピエゾ効果) をからめた発生メカニズムを提唱している。通常ピエゾ効果は高周波の現象を説明するのに都合の良い現象であり、SES や ULF 帯のシグナルの発生メカニズムにはなりえないと考えられていた。本説は岩石結晶化の時点での配向や長時間同一方向に力が加わることによる微小割れ目の配向などを考慮し、マクロスケールの双極子が生ずる可能性を指摘しており、より継続時間の長い変動の説明を試みている。

変形誘導電流

Nowick (1996) はイオン結晶中の転位と点欠陥の相互作用の実験結果をまとめ、外部電場なしで一方向に電流が流れるという結果を発表した。流れる電流の方向は外部からの応力勾配によって規定されると結論している。彼はこれを「変形誘導電流」と名づけた。この説は外部電場を必要とせず一方向に電流が流れるという仮説である。

流動電位メカニズム

一般に固体と液体との境界部分では電氣的二重層と呼ばれる界面特有の電位分布が形成される。界面を水が流れると、界面に吸着しているイオンは電氣的に拘束されるため、見かけ上反対の極性をもったイオンのみが下流に流されるように見える。マクロにみると間隙を流れる水の上流部分と下流部分とで極性の違うイオンが分布し、電氣的双極子が出現する [例えば, Mizutani *et al.* (1976)]. Ishido and Mizutani (1981) は、流動電位で松代群発地震に関連した地磁気変化がうまく説明できることを示した。しかし流動電位係数等のパラメータが大きくばらつくため、簡単にはそれらが説明できないという理論計算も存在する [Murakami (1989)].

近年、3軸圧縮破壊実験装置により、岩石破壊に先行する電氣シグナルが捕らえられるようになり、この分野の研究の進展が期待される。またいずれの実験でもダイラタンシーが流動電位の発生に重要な役割を果たしていることが示唆されている。本メカニズムは地電流変化や ULF 帯の変動を説明するのに最も確からしいと考えられている説であり、地震に関連する地球電磁気現象のうちのかなりの部分がこの流動電位メカニズムにより説明可能かもしれない。そして地殻内部での水の挙動というのはそれ自体今後研究されるべき重要なターゲットであろう。

地震国際フロンティア研究でも、流動電位は極めて重要と考え、高圧実験装置を作製した [Yoshida (2001)].

この装置を用いた実験で、加圧による亀裂の発生に伴い、間隙水が流れ電流が発生すること、そしてその電流値が間隙水の流量に良く比例すること、岩石によっては 10^{-3} A/m² に達する電流密度が得られるという結果が得られた [Yoshida (2001)]. さらに Yoshida and Ogawa (2004) では、ドライおよびウェット双方の状態でのアコースティック・エミッションと電磁現象の関係について実験を行っている。

その他のメカニズム

最も昔から提唱されている仮説に、岩石中に含まれる石英粒子によるピエゾ電氣仮説がある。しかしピエゾ電氣では少なくとも SES のような継続時間の長い (ゆっくりとした) 変動を説明するのは原理的に難しいと考えられている。ただし、本震発生時 (コサイスマミックな変化) にはこのピエゾ電氣による効果は無視できないであろう。

トライボロジー (固体表面の物理学) の観点から Enomoto and Hashimoto (1990) は、エキソ・エレクトロンを含む固体表面からの荷電粒子の放出仮説を提唱している。榎本らは本仮説を検証するため、鉛直方向の地電流高周波変動測定システムを開発し、観測を開始した [Enomoto *et al.* (1997)]. 榎本らの仮説のユニークなところは、定性的ではあるが、地震前に大きな電氣的シグナルが発生し、本震発生時には発生しなくとも良いということを説明できる点にある。これは力学的破壊の前に荷電粒子の移動 (= 電磁シグナルの発生) は終わっており、力学的な破壊 (= 地震) 時には電磁現象が観測されないと主張するものである。

§5. その他の話題

キルギス Bishkek でのアクティブモニタリング

§3 の 3.3 で空電と地震との関係について言及したが、興味深い観測結果がロシアよりもたらされた。つまり、空電を含む電磁気学的な現象が地震活動を誘発する可能性である。筆者らは地震活動と電磁現象との関係を解明するための新たなアプローチではないかと考えている。

地震の発生をトリガーするものとして、地下流体、地球潮汐、地震、火山噴火活動などの自然現象と、ダム、地中への注水、地下核実験、山はねなどの人為的な要因がよく知られている。しかし、高エネルギーの電磁パルスが地震を誘発するという例は、まだ知られていない。ここでは、地下深部の電磁探査に使用された MHD 発電機 (Magneto-Hydro-Dynamics generator) の発する電磁パルスと地震発生の関係を調べたキルギスでの調査結果 [Avagimov *et al.* (2004)] について紹介する。

調査域は、テンシャン山脈を境として南に中国と接す

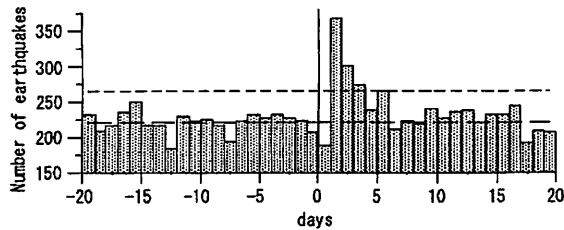


Fig. 12. Summary of the Bishkek MHD experiments [after Avagimov *et al.* (2004)]. The Horizontal axis shows the time (days) prior to (minus) and after (plus) the transmission of electromagnetic pulse.

るキルギス東部である。調査期間は1983~1990年で、この間に送信した電磁パルスと調査域で発生した地震との関係が調べられた。

調査では、このMHD発電機がBishkekサイトに設置され、距離4.5 km、抵抗0.4 Ωの電流ダイポールが配置された。出力は電流値で0.28~2.8 kA、電力値で1.2~32.1 MJあり、パルス長は1.7~12.1 sであった。送信は合計114回行われた。これに対して次のような解析が行われた。まず114回の電磁パルス送信のそれぞれについて、送信時を基準(0)として、±20日のタイムウィンドウを設け、その中で一日ごとの地震数を調べる。次に基準日から数えて同じ日の結果を114回分すべて加算し総数を求める。そのようにして求めたヒストグラムがFig. 12である。その結果、エリア全体では、地震の発生数は送信後2日目に最大になり、その値はバックグラウンド・レベルの1.7倍であった。これらの結果は、電磁パルスが、送信後2~6日かけてローカルな地震の発生数を高めたことを示唆している。

ここでエネルギーの面から、地震と電磁パルスとの関係を考えてみる。送信前20日間と送信後20日間で発生した地震の総エネルギーを比較すると、送信後のほうが 2.03×10^{15} Jだけ大きい。一方、MHD発電機から送出されたエネルギーは、 1.1×10^9 Jと、地震エネルギーの増加分よりも6桁小さい。つまり、電磁パルスが、増加した地震のすべての原因ではないということである。したがって、MHD発電機によって高エネルギーの電磁パルスが放射された結果、地震活動に変化が生じ、通常のテクトニクス場において地殻に蓄えられたエネルギーの解放が加速したものと思われる。つまり、電磁パルスは一種のトリガーの役目を果たしたと考えられる。

キルギスでの調査結果だけでは電磁パルスと地震発生との因果関係を示すことは難しい。しかし、同様な結果がタジキスタンでも得られているとAvagimovらは主張している。本観測結果は、落雷が地震を誘発する可能性が存在するというを示唆しているのかもしれない。

§6. まとめ

本論でも述べたように、地震活動に先行する/伴う電磁気現象の報告は19世紀から存在しているが、特に前駆的な現象は、「なぜその現象を地震に先行すると考えたのか」という問題に対して明確に答えているものは極めて少数である。逆に言えば、ほとんどの報告は「地震の前に然々の現象が近傍の観測点で観測された」という域を出ていないと言わざるを得ない。

近年いくつかの手法で、先行した電磁場変動と震央との関係が議論されるようになり、変動が震央(方向)に起源をもつ可能性が指摘されるようになった(ULF, VLF帯の研究)。またVHF帯の研究では、ようやく統計的な処理ができる程度の事例が集積され、変動との時間的關係、マグニチュードあるいは震度との関係が議論できる段階に到達した。

しかし地震活動に先行する電磁場変動の存在を示唆する報告が増える一方で、なぜこのような電磁場変動が地震の前に生じるのかということについてはいくつもの仮説が提出されてはいるが、解明されたとは言えないのが現状である。

また、ギリシャのVAN法のように、観測された現象(SESと地震との対応)を説明するために、構造の不均質性(特殊な構造)を導入することは、地下の電気的構造を合理的な説明ができる程度に細かく知る必要が生ずる。このことがVAN法が結局認知されてこなかった大きな原因であろう。

また、日本の陸域での地震活動度を勘案すると、地表観測だけでは、特にM6や7クラスの地震の近傍での観測事例の蓄積には極めて長い時間が必要となる。これは前兆的な地震電磁気現象を統計的に取り扱うことの難しさに直結している。この問題に対する一つの回答が、より地震活動度の高い海域での海底ケーブルなどを用いた長期連続観測であろう。

それに対し§3で述べた大気圏-電離圏観測では、地表観測に比べ事例を増やすことが比較的容易であり、いくつか統計的な仕事になされるようになった。しかし、これらの観測では、地下で起きている現象をどのように大気中ないし電離層にまで伝えるのかという点で、地震電磁気現象の理解を進めるのに二重の難しさが存在する。

またキルギスの例でもわかるように、実はこれまで前兆的な電磁気変動として報告されていた変動が、実は多くが地震のトリガーであった可能性も存在する。地震電磁気研究者は単に時系列的に“異常”を観測したからといってそれらをすべて前兆現象と考えることのないように、冷静な研究を進めることが今後さらに必要となるで

あろう。

地震電磁気学ははまだ電磁気現象発現メカニズムを解明するための基礎的な観測データを蓄積している段階であり、学問として極めて初期の段階と位置づけられる。しかし国際的にはこの分野へ参入する研究者が多くなってきている。このような動きを受け、IUGG (国際測地球学・地球物理学連合)では、地震学、火山学、電磁気学にまたがる国際的なワーキンググループ (EMSEV; Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes) を設立し (<http://www.emsev-iugg.org/emsev/>), 2002年に活動を開始した。短期地震予知は確かに困難な研究ではあるが、破壊の物理学という観点からまずは観測面からの研究を着実に進めていくべきであろう。

謝 辞

本論文を作成するにあたり、匿名の2人の査読者には全体の構成を含め極めて有益・的確なアドバイスを頂いた。また本論文で紹介したULF帯およびVHF帯の一部の研究は平成14~17年度科学研究費・基盤研究A (課題番号14208045)の費用の一部を充当して行われた。

文 献

- Asada, T., H. Baba, M. Kawazoe and M. Sugiura, 2001, An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes, *Earth Planets Space*, **53**, 55-62.
- Avagimov, A., L. Bogomolov, T. Cheidze, A. Ponomarev, G. Sobolev, N. Tarasov and V. Zeigamik, 2004, Induced seismicity by trigger stimulation from laboratory and field tests, *Proceedings of 1st International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics*, Mizunami, Japan, 56-59.
- Chu, J. J., X. Gui, J. Dai, C. Marone, M. W. Spiegelman, L. Seeber and J. G. Armbruster, 1996, Geoelectric signals in China and the earthquake generation process, *J. Geophys. Res.*, **101**, 13869-13882.
- Enomoto, Y., 1996, Notes on generation and propagation of seismic transient electric signals, in "A Critical Review of VAN: Earthquake Prediction from Seismic Electrical Signals", ed. by Sir J. Lighthill, World Scientific Publishing Co., Singapore, 324-331.
- Enomoto, Y. and H. Hashimoto, 1990, Emission of charged particles from indentation fracture of rocks, *Nature*, **346**, 641-643.
- Enomoto, Y., A. Tsutsumi, Y. Fujinawa, M. Kasahara and H. Hashimoto, 1997, Candidate Precursors: Pulse-like geoelectric signals possibly related to recent seismic activity in Japan, *Geophys. J. Int.*, **131**, 485-494.
- Fraser-Smith, A. C., A. Bernardi, P. R. McGill, M. E. Ladd, R. A. Helliwell and O. G. Villard, Jr., 1990, Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the M_s 7.1 Loma Prieta earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1465-1468.
- Freund, F., 2000, Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks, *J. Geophys. Res.*, **105**, 11001-11019.
- Fujinawa, Y. and K. Takahashi, 1990, Emission of electromagnetic radiation preceding the Ito seismic swarm of 1989, *Nature*, **347**, 376-378.
- Fujiwara, H., M. Kamogawa, M. Ikeda, J. Y. Liu, H. Sakata, H. Ofuruton, S. Muramatsu, Y. J. Chuo and Y. H. Ohtsuki, 2004, Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L17110, doi:10.1029/2004GL019865.
- Fukumoto, Y., M. Hayakawa and H. Yasuda, 2001, Investigation of over-horizon VHF radio signals associated with earthquakes, *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, **1**, 107-112.
- 福富孝治, 1934, 昭和9年3月21日南伊豆強震調査報告, *地震研究所彙報*, **12**, 527-538.
- Geller, R. (ed.), 1996, Debate on VAN, *Geophys. Res. Lett.*, **23** (11).
- Gokhberg, M. B., V. Morgounov, T. Yoshino and I. Tomizawa, 1982, Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan, *J. Geophys. Res.*, **87**, 7824-7828.
- Gokhberg, M. B., I. L. Gufeld, A. A. Rozhnoy, V. F. Marenko, V. S. Yampolsky and E. A. Ponomarev, 1989, Study of the seismic influence on the ionosphere by super long-wave probing of the Earth-ionosphere waveguide, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **57**, 64-67.
- Grimalsky, V. V., M. Hayakawa, V. N. Ivchenko, Yu. G. Rapoport and V. I. Zadorozhnii, 2003, Penetration of an electrostatic field from the lithosphere into the ionosphere and its effect on the D-region before earthquakes, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **65**, 391-407.
- Gufeld, I. L., A. A. Rozhnoi, S. N. Tyumensev, S. V. Sherstuk and V. S. Yampolsky, 1992, Radiowave disturbances in period to Rudber and Rachinsk earthquakes, *Phys. Solid Earth*, **28**, 267-270.
- 萩原尊禮, 1948, 地震前兆に関する電磁現象, *学術研究会議震災予防委員会研究報告*, **6**, 1-28.
- Harada, M., K. Hattori and N. Isezaki, 2004, Transfer function approach to signal discrimination of ULF geomagnetic data, *Phys. Chem. Earth*, **29**, 409-417.
- Hattori, K., 2004, ULF geomagnetic changes associated with large earthquakes, *Terr. Atmos. Ocean Sci.*, **15**, 329-360.
- Hayakawa, M., R. Kawate, O. A. Molchanov and K. Yumoto, 1996, Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earth-

- quake of 8 August 1993, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 241-244.
- 本蔵義守, 1978, 中伊豆における地磁気・地電流の異常と1978年伊豆大島近海地震との関係について, *地震研究所彙報*, **53**, 931-937.
- Igarashi, G., S. Saeki, N. Takahata, K. Sumikawa, S. Tasaka, Y. Sasaki, M. Takahashi and Y. Sano, 1995, Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan, *Science*, **269**, 60-61.
- 池谷元伺, 1998, 地震の前, なぜ動物は騒ぐのか, *NHKブックス*, 日本放送出版協会, 258 pp.
- Ishido, T. and H. Mizutani, 1981, Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, **86**, 1763-1775.
- Izutsu, J., 2005, Influence of lightning on the observation of seismic electromagnetic wave anomalies, D. Sc. Thesis, Kyoto University, 84 pp.
- Izutsu, J. and K. Oike, 2003, The waveforms of VLF electromagnetic waves recorded at the time of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Proc. Japan Acad. Ser. B*, **79**, 125-130.
- Kamogawa, M., 2006, Preseismic lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling, *EOS Trans. Am. Geophys. Union* (in press).
- Kamogawa, M., J. Y. Liu, H. Fujiwara, Y. J. Chuo, Y. B. Tsai, K. Hattori, T. Nagao, S. Uyeda and Y. H. Ohtsuki, 2004, Atmospheric field variations before the March 31, 2002 M6.8 earthquake in Taiwan, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **15**, 445-461.
- 川副 護・馬場久紀・湖海敬介・飯塚 進・浅田 敏, 1999, 地震に関連して観測されるVLF帯電磁放射の基礎研究—観測される電磁波と地震発生予測の試み—, *東海大学紀要海洋学部*, **48**, 109-129.
- 北川信一郎(編), 1998, *大気電気学*, 東海大学出版会, 200 pp.
- 小山 茂・本蔵義守, 1978, 中伊豆における自然電位観測(1), *地震研究所彙報*, **53**, 939-942.
- Kushida, Y. and R. Kushida, 2002, Possibility of earthquake forecast by radio observations in the VHF band, *J. Atmosph. Electricity*, **22**, 239-255.
- Lazarus, D., 1996, Physical mechanisms for generation and propagation of seismic electrical signals, in "A Critical Review of VAN: Earthquake Prediction from Seismic Electrical Signals", ed. by Sir J. Lighthill, World Scientific Publishing Co., Singapore, 91-96.
- Li, J. Z., Z. Q. Bai, W. S. Chen, Y. Q. Xia, Y. R. Liu and Z. Q. Ren, 2003, Strong earthquakes can be predicted: A multidisciplinary method for strong earthquake prediction, *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, **3**, 703-712.
- Liu, J. Y., Y. I. Chen, S. A. Pulinet, Y. B. Tsai and Y. J. Chuo, 2000, Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 3113-3116.
- Liu, J. Y., Y. I. Chen, Y. J. Chuo and H. F. Tsai, 2001, Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1383-1386.
- Liu, J. Y., Y. I. Chen, Y. J. Chuo and C. S. Chen, 2006, A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly, *J. Geophys. Res.*, **111**, A05304, doi: 10.1029/20053A011333.
- Maeda, K. and N. Tomisaka, 1996, Decametric radiation at the time of the Hyogo-ken Nanbu earthquake near Kobe in 1995, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2433-2436.
- Milne, J., 1890, Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena, *Trans. Seismol. Soc. Japan*, **15**, 135-162.
- 宮腰潤一郎, 1985, 断層破碎帯における自然電位の時間的変化, *月刊地球*, **7**, 39-42.
- Mizutani, H., T. Ishido, T. Yokokura and S. Ohnishi, 1976, Electrokinetic phenomena associated with earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **3**, 365-368.
- Molchanov, O. A. and M. Hayakawa, 1998, Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **103**, 17489-17504.
- 森谷武男・茂木 透・高田真秀・笠原 稔, 2005, 地震に先行するVHF(FM放送波)散乱波の観測的研究, *北海道大学地球物理学研究報告*, **68**, 161-178.
- Murakami, H., 1989, Geomagnetic fields produced by electrokinetic sources, *J. Geomag. Geoelectr.*, **41**, 221-247.
- Nagao, T., Y. Enomoto, Y. Fujinawa, M. Hata, M. Hayakawa, Q. Huang, J. Izutsu, Y. Kushida, K. Maeda, K. Oike, S. Uyeda and T. Yoshino, 2002, Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobe earthquake, *J. Geodyn.*, **33**, 401-411.
- Nagao, T., S. Uyeda, Y. Asai and Y. Kono, 1996, Anomalous changes in geoelectric potential preceding four earthquakes in Japan, in "A Critical Review of VAN: Earthquake Prediction from Seismic Electrical Signals", ed. by Sir J. Lighthill, World Scientific Publishing Co., Singapore, 292-300.
- Nitsan, U., 1977, Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks, *Geophys. Res. Lett.*, **4**, 333-336.
- Nowick, A. S., 1996, The golden age of crystal defects, *Annu. Rev. Mater. Sci.* **26**, 1-19.
- Ohta, K., N. Watanabe and M. Hayakawa, 2005, The observation of ULF emission at Nakatsugawa in possible association with the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake, *Earth Planets Space*, **57**, 1103-1108.
- Oike, K. and T. Ogawa, 1986, Electromagnetic radiation from shallow earthquakes observed in the LF range, *J. Geomag. Geoelectr.*, **38**, 1031-1040.
- Park, S., M. Johnston, T. Madden, D. Morgan and F. Morrison, 1993, Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of ob-

- servations and mechanisms, *Rev. Geophys.*, **31**, 117-132.
- Pham, V. N., D. Boyer, G. Chouliaras, J. L. Le Mouel, J. C. Rossignol and G. N. Stavrakakis, 1998, Characteristics of electromagnetic noises in the Ioannina region (Greece): A possible origin of so called "Seismic Electric Signals" (SES), *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2229-2232.
- Pilipenko, V., S. Shamimov, S. Uyeda and H. Tanaka, 2001, Possible mechanism of the over-horizon reception of FM radio waves during earthquake preparation period, *Proc. Japan Acad. Ser. B*, **77**, 125-130.
- Pulinets, S. A., K. A. Boyarchuk, V. V. Hegai, V. P. Kim and A. M. Lomonosov, 2000, Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling, *Adv. Space Res.*, **26**, 1209-1218.
- Rikitake, T., 1968, Geomagnetism and earthquake prediction, *Tectonophysics*, **6**, 59-68.
- 力武常次, 1998, 予知と前兆, 近未来社, 244 pp.
- Sakai, K., T. Takano and S. Shimakura, 2001, Observation system for anomalous propagation of FM radio broadcasting wave related to earthquakes and its preliminary result, *J. Atmos. Electricity*, **21**, 71-78.
- Sarlis, N., M. Lazaridou, P. Kaporis and P. Varotsos, 1999, Numerical model of the selectivity effect and the $\Delta V/L$ criterion, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3245-3248.
- Shiratori, K., 1925, Notes on the destructive earthquake in Sagami Bay on the first of September, 1923, *Jpn. J. Astr. Geophys.*, **2**, 173-192.
- Slifkin, L., 1993, Seismic electric signals from displacement of charged dislocations, *Tectonophysics*, **224**, 149-152.
- Tanakadate, A. and H. Nagaoka, 1893, The disturbance of isomagnetism attending the Mino-Owari earthquake of 1891, *J. Coll. Sci. Imperial Univ. Japan*, **5**, 149-192.
- Tsutsui, M., 2002, Detection of earth-origin electric pulses, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1194, doi:10.1029/2001GL013713.
- Tsutsui, M., 2005, Identification of earthquake epicenter from measurements of electromagnetic pulses in the Earth, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20303, doi:10.1029/2005GL023691.
- Utada, H., 1993, On the physical background of the VAN earthquake prediction method, *Tectonophysics*, **224**, 153-160.
- Uyeda, S., T. Nagao, Y. Orihara, T. Yamaguchi and I. Takahashi, 2000, Geoelectric potential changes: Possible precursors to earthquakes, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **97**, 4561-4566.
- Uyeda, S., M. Hayakawa, T. Nagao, O. Molchanov, K. Hattori, Y. Orihara, K. Gotoh, Y. Akinaga and H. Tanaka, 2002, Electric and magnetic phenomena observed before the volcano-seismic activity 2000 in the Izu Island region, Japan, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **99**, 7352-7355.
- Uyeshima, M., M. Kinoshita, H. Iino and S. Uyeda, 1989, Earthquake prediction research by means of telluric potential monitoring, Progress report No. 2: Preliminary study on Teshikaga channel 2 signals and the seismicity in the region off Kushiro, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **64**, 487-515.
- Varotsos, P., 2005, *The Physics of Seismic Electric Signals*, Terra Pub. Co., Ltd., Tokyo, 388 pp.
- Varotsos, P. and K. Alexopoulos, 1984, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I, *Tectonophysics*, **110**, 73-98.
- バロトウソス, P.・K. エフタクシアス・M. ラザリドゥ・G. アントノプーロス・J. マクリス, 1994, VAN地震予知法 その基礎・方法・現状, *地震ジャーナル*, **17**, 18-26.
- Wakita, H., Y. Nakamura, K. Notsu, M. Noguchi and T. Asada, 1980, Radon anomaly: A possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-Kinkai Earthquake, *Science*, **207**, 882-883.
- Yamada, T. and K. Oike, 1996, Electromagnetic radiation phenomena before and after the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake, *J. Phys. Earth*, **44**, 405-412.
- Yoshida, S., 2001, Convection current generated prior to rupture in saturated rocks, *J. Geophys. Res.*, **106**, B2, 2103-2120.
- Yoshida, S. and T. Ogawa, 2004, Electromagnetic emissions from dry and wet granite associated with acoustic emissions, *J. Geophys. Res.*, **109**, B09204, doi:10.1029/2004JB003092.
- 吉松隆三郎, 1943, 昭和18年9月10日鳥取地震と地電位差の変化, *地磁気観測所要報*, **5**, 66-67.
- 芳野超夫, 1993, 地震と電波, *地震ジャーナル*, **16**, 8-23.
- Yoshino, T., I. Tomizawa and T. Shibata, 1985, The possibility of using a direction finding technique to locate earthquake epicenters from electromagnetic precursor radiation, *Annales Geophysicae*, **3**, 727-730.
- 芳野超夫, 1996, 阪神大震災における高周波帯の電磁気放射観測(その1), *Conductivity Anomaly研究会論文集*, 173-180.
- Yumoto, K., Y. Tanaka, T. Oguti, K. Shiokawa, Y. Yoshimura, A. Isono, B. J. Fraser, F. W. Menk, J. W. Lynn, M. Seto and 210° MM Magnetic Observation Group, 1992, Globally coordinated magnetic observations along 210° magnetic meridian during STEP period: 1. Preliminary results of low-latitude Pc3's, *J. Geomag. Geoelectr.*, **44**, 261-276.