

地震予知研究の動向と電通大地震電磁気研究ステーションの貢献

早川 正士

Is earthquake prediction possible by using electromagnetic effects?

Masashi HAYAKAWA

Abstract

Short-term earthquake prediction is considered to be an urgent subject for the countries like Japan with high seismic activity. Because it is concluded about 10 years ago that the former and conventional seismic measurement of crustal movements is not appropriate for earthquake prediction. Hence, any other, non-seismic method is highly required to be developed. During the last decade there have been accumulated a lot of convincing evidences on non-seismic electromagnetic effects, which would be a very promising candidate for short-term earthquake prediction. This report describes the history of earthquake prediction study and the present situation of this particular science field of seismo-electromagnetics. Also, we present some of our latest results on the seismo-ULF emissions and seismo-ionospheric perturbations. Finally, we mention the important role played by our university and our Research Station on Seismo Electromagnetics in this science field and then we comment on our future direction.

Keywords: 地震短期予知、地震予知学、ULF放射、電離層擾乱、地震電磁気現象、地圏・大気圏・電離圏結合、地震電磁気研究ステーション

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)~4)}。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

Received on September 4, 2009.

Professor Emeritus, The University of Electro-Communications (Department of Electronic Engineering)

電気通信大学名誉教授 (元電子工学科教授)、現在 AWCC 特任教授

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・経済損失が大きいから、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。未完成の度合いを含めて、社会に実状を知らせるのが重要と考え、本レポートを書いている。

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。第一の理由は、地震に伴う興味ある現象の発見である。先ず、第一は大地震(M7、8程度の)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・ロマプリエタ地震の際に、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求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ができよう。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

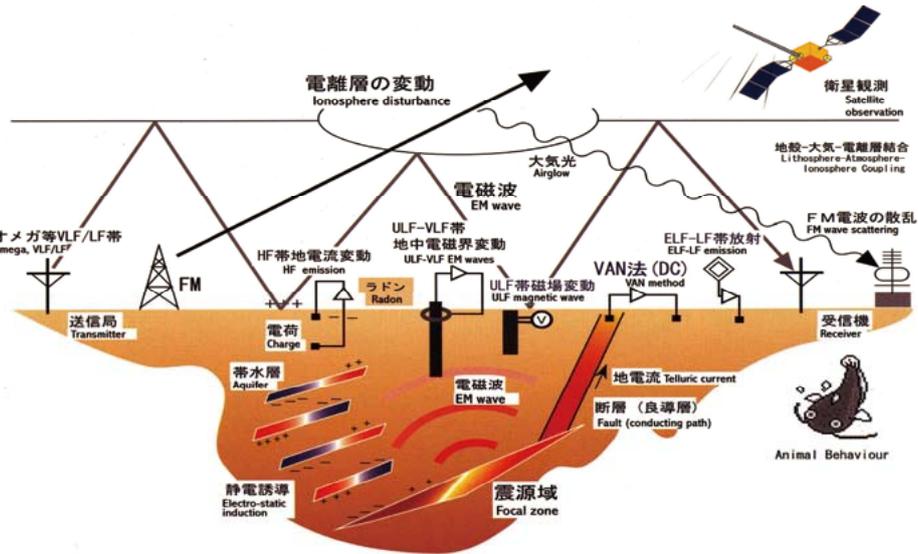


図1. 地震に伴う色々な電磁気現象。地圏内の現象にとどまらず、地殻変動の効果は大気圏、更には電離圏まで及ぶことがわかってきた。各種の観測手法が描いてある。

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. 電通大地震電磁気研究ステーションの貢献

4.1 最近の学術成果の紹介

すでに前節で述べたように、地震電磁気学は、(i)地圏内からの直接的効果(例えば、ULF電磁放射)だけでなく、(ii)大気圏での擾乱、(iii)電離層プラズマの擾乱のように広い領域にわたる現象を対象とし、各々の領域での現象の存在とその検証だけでなく、地圏の効果が如何に大気圏、電離圏まで伝達されるかという「地圏・大気圏・電離圏結合」の解明にまで研究が広がっている^{5),6)}。図1からわかるように、観測手法も地下探査などの地上観測だけでなく、人工衛星による観測も不可欠となってきた。

すでに地震予知の観点から有望と目されているのが、(1)ULF電磁放射と(2)電離層擾乱のモニタである^{5),6)}。我々の代表的な成果を紹介しよう。学術的記述が多くなることをご容赦願いたい。先ず、ULF放射に関する例を述べる。すでに我々は関東地区内にULF放射の観測ネットワークを構築し^{5),6)}、10年来観測を続けているが、この間の最大のイベントは2000年の三宅島噴火に伴う地震活動に先行して出現したULF電磁放射である。図2は伊豆半島でのULF放射観測網を示している。伊豆半島および房総半島では磁界3成分(水平磁界 H_{NS} (南北成分)、 H_{EW} (東西成分)と鉛直磁界 H_z)を測定するアレー観測(50または12.5Hz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。7月上旬にはM6クラスの複数の地震が発生した。

ここでは主成分解析(Principal Component Analysis, PCA)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結果⁷⁾を紹介する。空間的に近接した3地点(清越、賀茂、持越)に展開された磁力計のデータを用いたため、原理的にこのPCA解析では3個の信号(雑音)源を分離することができる。ある観測点で受信される地磁気変化は一般に、(1)超高層(磁気圏/電離圏)の地磁気変動の効果、(2)人工ノイズ、(3)それ以外のもの(地震活動に関連する変化を含む)の合成であると考えられ、PCA解析によりこれらの雑音を分離抽出しようとするものである。世界ではじめての試みである。各観測点の時系列データをもとに

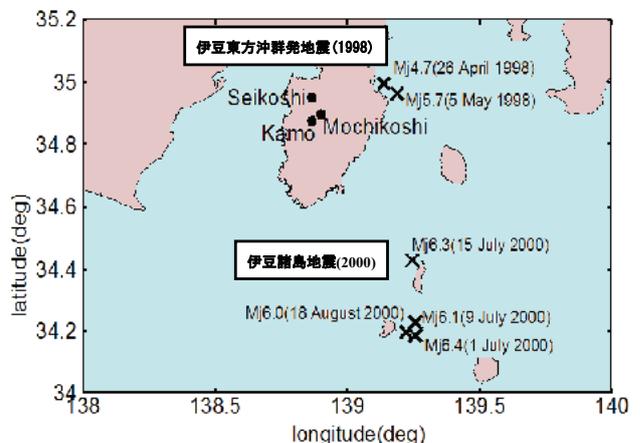


図2. 伊豆半島地磁気観測網(清越、賀茂、持越)と伊豆諸島群発地震。2000年7月、8月に発生したM6以上の地震の位置を×印にて表示している。参考のために1998年に発生した伊豆東方沖地震の震央分布も示している。

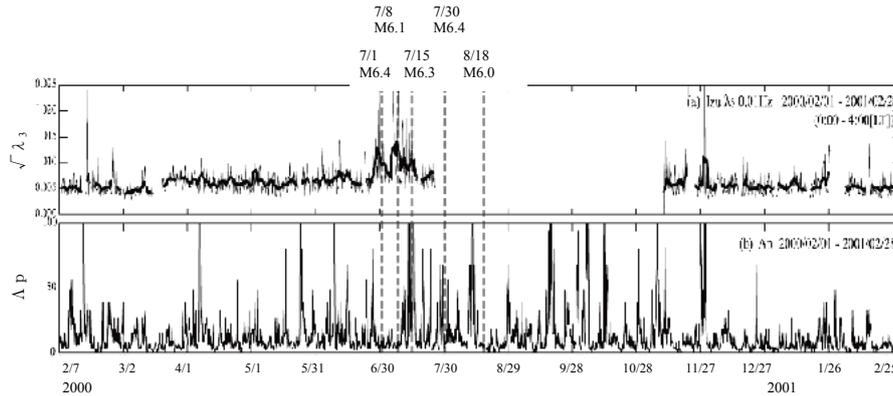


図3. 伊豆半島3点アレーデータを用いた主成分解析 (PCA) 結果。上図は第3主成分の固有値 (λ_3) の時系列変化 (周波数0.01Hz)、下図は地磁気活動 (Δp) の時系列変化を示している。周波数0.01Hz、即ち周期100秒はロマリエタ地震等において主要な周波数であることが判明している。

周期100秒前後の変動に注目して固有値解析を行い、その固有値 λ_n ($n = 1 \sim 3$)、即ち各雑音強度の時間変化を追跡した。解析の結果、第1主成分の λ_1 (第1主成分の電力を反映する) は地磁気活動度指数 Δp と極めて良い相関を示し (図示してないが)、超高層の地磁気の効果であると推測される。同様に図示してないが、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される。図3の上図は第3主成分の λ_3 の時系列変化で、存在するとすれば地震に伴う微弱な放射が含まれている可能性のある成分である。群発地震活動の始まる前の4月下旬から λ_3 のレベルがやや上昇し、特に7月上旬のM6クラスの3つの地震の数日前から顕著に λ_3 値が上昇していることが確認された。この時系列パターンはカリフォルニア・ロマリエタ地震の際の時系列変化とよく似ており、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。

VLF/LF送信局電波を用いた電離層擾乱の観測例を次に示そう。最近の大地震である2004年インドネシアスマトラ地震⁸⁾、2004年新潟中越地震⁹⁾等のケーススタディもあるが、2006年のMaekawa et al.¹⁰⁾による長期間データに基づく統計解析を紹介する。電離層擾乱観測用のVLF/LFネットワークは早川が担当した旧宇宙開発事業団 (NASDA) フロンティア研究の枠内にて構築されたものであり^{5),6)}、10年以上のデータ蓄積がある。ここでは国内観測点の一つ高知観測点において日本の電波時計を担うJJY局 (福島県、周波数40kHz) 電波を受信した6年間 (1999年6月から2005年6月まで) という長期間データを用いた統計解析である。まず、このLF伝搬パスのSensitive area を選ばなければならない。Sensitive areaとはその領域内で起こる地震が伝搬異常として検出できる範囲のことである。送信点及び受信点のまわりに半径200kmの円を取り、それらの外縁をつなげた領域として、図4に示している。送受信点間の中

間のSensitive areaの幅は第10フレネルゾーンに相当している。図示している地震はその範囲内でのM5.0以上の地震である。しかし、以前の我々の研究からVLF/LF伝搬特性は深い地震には反応しないことがわかっていることから、深さ100kmより浅い地震だけを対象としている。

ある日の夜間の振幅 (位相) データは一日毎の地殻活動を反映するため、一日ごとの地震活動として実効マグニチュード (M_{eff}) という新しいパラメータを新たに導入した。ある一日にwave sensitive area内で発生したすべての地震 (M2.0以上の) からの放出エネルギーを積分し、マグニチュードに逆変換して実効マグニチュー

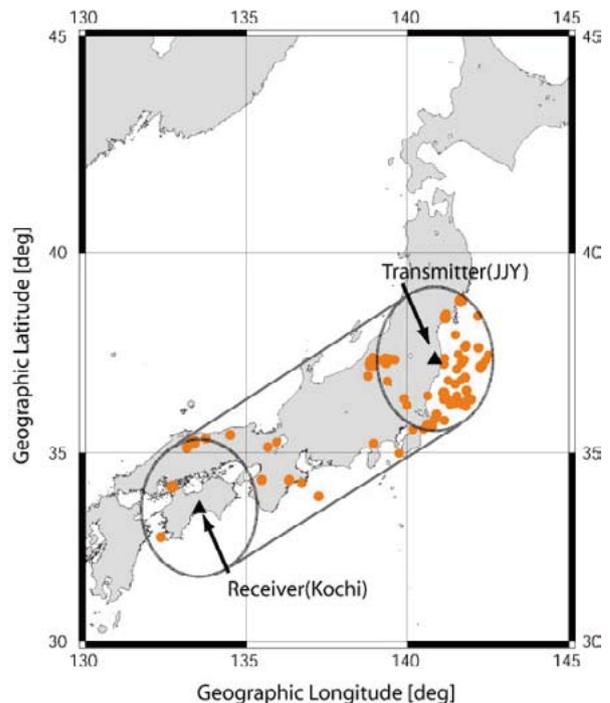


図4. LF送信局 (JJY, 福島) と受信点 (高知) 及びこのパスに対するWave sensitive areaを示している。また、このwave sensitive area内で発生したM5以上の地震の場所もプロットしている。

ド (M_{eff}) を定義する。

我々はLVLV/LFデータの解析方法として二つの方法(ターミネータ・タイム法と夜間ゆらぎ法)を開発しているが、ここでは後者の“夜間ゆらぎ法”を採用する。次式の

$$dA(t) = A(t) - \langle A(t) \rangle$$

という差分を用いる。 $A(t)$ はある日のある時刻 t での振幅を、 $\langle A(t) \rangle$ は同時刻 t でのその日の前後10日間の平均振幅を示す。夜間として UT = 10時~20時 (L.T. = 19時~5時の夜間) の時間帯を対象とした。夜間振幅の2つの物理量:(1) 夜間平均振幅(トレンドと名付ける)、(2) 振幅のゆらぎを1日毎に評価する。図5がLF伝搬異常、即ち電離層擾乱と地震との因果関係を Superimposed epoch analysis を用いて得られた結果である。縦軸はそれぞれの物理量(トレンドとゆらぎ)をそれぞれの標準偏差(σ)にて規格化した量である。横軸の零日は地震日を、マイナスは現象が地震の前に、プラスは地震後に発生することを意味している。(a) はトレンドに関するもの、(b) はゆらぎに関する結果である。先ず、図5(a)は、 $M_{eff} \geq 6.0$ の地震の3~5日前に振

幅(トレンド)が減少することを示している。統計的に有意な 2σ レベルを超えている。次に図5(b)を見ると、 $M_{eff} \geq 6.0$ では、同様に振幅のゆらぎが地震の数日~1週間前に 2σ を超えて上昇することが認められる。地震のマグニチュードを幾分下げた $M_{eff} \geq 5.5$ の時には、 $M_{eff} \geq 6.0$ の時に比較してそれほど顕著ではないが、同様の傾向が認められる。以上の解析結果をまとめると、大きな地震($M_{eff} \geq 6.0$)に対しては前兆的にトレンドの低下とゆらぎの上昇が有意に起こるといえる。この結果は我々の以前の同様の結果^{11),12)}を支持するものである。

4.2 地震電磁気学モノグラムの刊行

2008年初頭早川とロシア人共同研究者モルチャノフ教授との共著による下記のタイトルのモノグラムが刊行された(図6の左)。

O.A. Molchanov and M. Hayakawa, "Seismo Electromagnetics and Related Phenomena; History and latest results", TERRAPUB, Tokyo, 189p, 2008

本書には前述した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研究(1996年~2001年の5年間)の成果から始まり、最新の成果までが集約されている。地震の短期予知の観点から重要と考える(1) ULF電磁放射、(2) 電離層擾乱に重点が置かれているが、地圏・大気圏・電離圏結合メカニズム解明の鍵として地球化学量の重要性が強調されている点も注目されよう。早川編著の以前の三冊(同じく TERRAPUB社からの出版で、1994, 1999, 2002年に出版されている)に加えて、本書は地震電磁気学の Reference bookになると信ずる。

4.3 国際誌での地震電磁気に関する特集号の編集

ここ数年にて重要な会議が複数開催された。列記すると、(1) AOGS(アジアオセアニア地球科学会議)(July-August, 2007)での地震電磁気セッション(早川、J. Y. Liu コンビナー)、(2) Chiba Conference: Bilateral Seminar Japan-Italy on Electromagnetics in Seismic and Volcanic Areas (July, 2007, 服部、Telesca コンビナー)、(3) International Workshop on Seismo Electromagnetic Precursors (November, 2007; 服部 コンビナー)である。各会議とも世界各国から多くの参加者があり、興味ある論文が発表された。これら三つの会議での発表論文のうち厳選された論文を国際誌 Physics and Chemistry of the Earth の特集号として集約することを企画した。Guest Editorsは早川、J. Y. Liu(台湾)、服部(千葉大学)と L. Telesca(イタリア)である。約50論文が投稿されたが、厳しい査読の結果最終的には25論文くらいにて構成される特集号が2009年春に出版された。

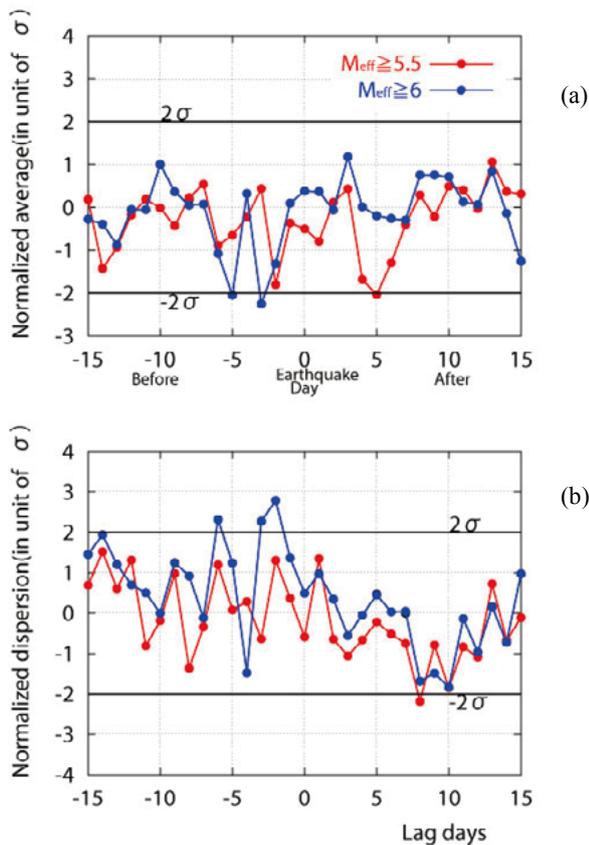


図5. LF伝搬異常 (a)夜間平均振幅(トレンド)、(b)夜間ゆらぎ)と地震との因果関係を Superimposed epoch analysis を用いて解析した結果。横軸の0は地震日、マイナスは地震の前を、プラスは地震の後を示す。縦軸は各々の量の標準偏差にて規格化している。 $M_{eff} \geq 6.0$ (青色の線)と $M_{eff} \geq 5.5$ (赤色の線)の二つの地震規模に分けて表示してある。

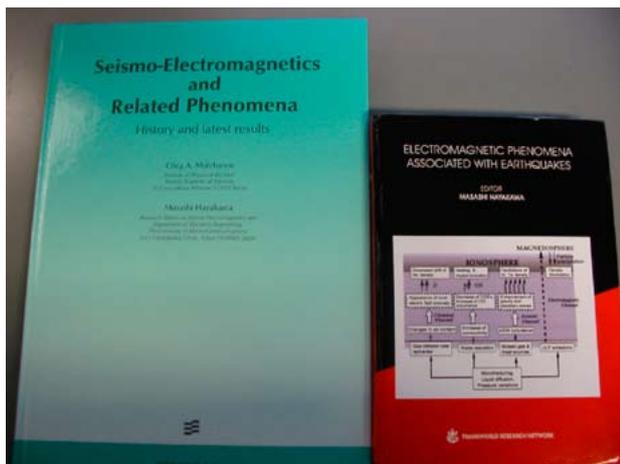


図6. 出版されたモノグラム。

4.4 招聘モノグラムの編集

外国出版社より早川のもとへ地震電磁気に関する招聘モノグラムの打診があり、社会への啓蒙や異なる分野への啓蒙としても良いタイミングと考え、引き受けた。地震電磁気全般を網羅する為、各々の分野のエキスパートにその執筆をお願いした。10章から成り、各章の執筆者は次の通りである；(1) 米国スタンフォード大学A. C. Fraser-Smith教授（米国ロマプリエタ地震でのULF放射の発見者）、(2) ロシアYu. Kopytenko教授（スピタク地震でのULF放射の発見者）、(3) NASA、F. Freund教授（地震電磁気に関する室内実験の第一人者）、(4) イタリアバリ大学P. Biagi教授（地震に伴う地球化学量研究の第一人者）、(5) 早川（大気圏擾乱と下部電離層擾乱（VLF/LF電波を用いた）の研究に従事）、(6) 台湾National Central University, J. Y. Liu教授（電離層（特にF層）擾乱研究に多くの貢献）、(7) 仏国LPCEのM. Parrot博士（仏国人工衛星DEMETERの責任者）、(8) ロシアS. Pulinet博士（地圏・大気圏・電離圏結合機構の解明に従事）、(9) ロシアO. A. Molchanov教授（地圏・大気圏・電離圏結合機構に関する研究）である。本書は2009年11月に出版されたばかりだ（図6の右）が、すでに多くの反応が来ている。

4.5 国内外との共同研究の推進

国内外研究機関、研究者との共同研究を強く推し進めているが、まず国内的な連携として、中部大学「地球ウォッチ・市民安全センター」(後藤俊夫センター長)との連携に関する協定を2008年7月7日に調印した。同大学は文部科学省より私立大学支援として“地震電磁気現象”関連の研究助成を受けており、近年多くの成果を収めている。国立大学と私立大学との連携でもあり、両グループによる観測データの相互交換、大学院生の交流等にて著しい連携を深めている。更に、国内研究者の集

合する「地震電磁気セミナー」も続けられ、毎年12月には「地震電磁気シンポジウム」と題するシンポジウムを電通大にて大々的に開催するのが恒例となっている。

国外との協力も絶えず進めているが、近年の重要なものとしては、欧州でのVLF/LFネットワークの構築への協力を先ず挙げる事が出来る。我々が日本国内、カムチャカ、台湾、インドネシアでの環太平洋VLF/LFネットワークを構築し、多くの成果を収めていることに刺激され、イタリアBiagi教授が欧州内でのVLF/LFネットワークの構築を2008年4月のEGU（欧州地球科学連合）において提案した。欧州（トルコも含め）10ヶ所ほどにVLF/LF受信器を設置し、地震に伴う電離層擾乱の検出とその空間的・時間的変化を追うというものであり、2009年に観測がスタートしている。我々は多くのノウハウを提供している。また外国人来訪者も定常的に多く、色々な国との共同研究（ロシア、米国、英国、仏国、台湾、インド、インドネシア、中国等）は順調である。

5. 地震予知学のすすめとその将来

地震予知研究は神戸地震後の日本グループの輝かしい貢献により、日本が完全に世界をリードする学問となっている。又、各国の地震電磁気研究も急速に進んでいることは頼もしい限りである。今までの経験で確かなことの一つは、事前であれ、事後であれ、予知科学的に意味のあることが言えたのは、何らかの具体的な観測事実があった時に限るといことである。当たり前の事で、科学的根拠を確立し、そのことを広く科学者コミュニティや社会一般に納得してもらわなければならない。

しかし、科学革命はそう簡単ではない。いくら当事者が正しいと主張してもそう簡単には受け入れられない。この地震予知学（地震電磁気学）の歴史もすでに10年以上あり、本レポートで紹介した結果を含め、前兆と思われる報告例は充分であると我々は考える。ところが、一歩他分野（例えば地震学）に踏み出すと、まだほとんど興味を持たれていないことに気付かされる。不思議といえば不思議だが、当然とも言える。その最たる例が地震に伴う電離層の擾乱かも知れない。地殻活動が如何に電離層まで影響するののは大変考えにくい。我々のように永らく電離層研究に従事していた者ですらそうであるから、地圏の研究者には予想だにしないものであろう。

ここで、地震予知研究の将来の方向性について述べよう。先ず、地圏内現象にせよ、大気圏擾乱、電離圏擾乱にせよ、事例の数を著しく蓄積し（百例、千例）、擾乱と地震との間に明確な因果関係があることを証明することが急務である。既に、我々の電離層擾乱に関してはVLF/LF手法の積分観測という利点を最大限に活用

し、本報告で述べた様な統計解析により、両者の間に有意な因果関係を確立している。しかし、他の観測項目に関してはその段階には至っていないのが現状である。前述した様に、地圏、大気圏、電離圏が結合したシステムとして機能していることが理解された以上、地震電磁気現象の信憑性を高めるために、「独立な観測事実の相互整合性」について工夫できることがあるのではないか。複数の研究グループが各種の連続観測を、同じ観測場所で同時に行うというような総合観測も有効であろう。同時に理論のモデル造りとモニタリングの連携プレーも緊急に望まれよう。一つの地震に対して多種多様の観測結果を得ることは、単なる信憑性の向上を超えて何が実際に起ったのかを解明する科学にとっても本質的な意義がある。

また、各観測点での観測物理量のより詳細な情報を得ることも不可欠である。例えば、いろいろな周波数での電磁放射を例に取れば、その詳細な波動特性（周波数スペクトル、放射源等）を把握するための多点アレイ観測などの実施も不可欠である。

続いて地震電磁気学は種々の現象の観測量の連続観測データに基づいており、いつも時系列データが我々の主たる情報源である。しかし、従来の現象の存否は我々が通常用いる 2σ (σ : 標準偏差) 基準等の純粋な統計的手法によっていたが、統計的手法でも予測概念を取り入れた手法や我々が提案している様なフラクタル解析等の適用により地圏内での非線形過程（自己組織化臨界性）を確認するなどの物理的手法の使用も不可欠である。

地震学者の多くは地震予知とは関わりのうすい研究に従事しており、彼らの力だけでは地震予知は不可能であることを知っている。ところが「地震予知」に地震と言う言葉がついているので、自他ともに彼らの仕事ということになる。そして、誰かが予知を行えば、「我々地震学者が出来ないことが素人（非地震学者）が出来るはずがない」と判断する。地震予知研究と地震学とは全く異なるものであるということも、地震学者にも、社会にも、政府にも理解していただきたい。地震予知学は非地震測定、即ち、電磁気現象が主役であることは前述した通りである。この地震電磁気学は実は極めて学際的な学問分野であることも強調したい。即ち、電磁気学のほか、電波理工学、大気電気学、プラズマ物理学、大気物理化学、超高層物理学、信号処理学等が重要な役割を果たすのに対して、地震学、地質学は地圏の基礎的情報を提供するという位置付けである。勿論、地圏内での力学運動と関連付けた電磁気現象のモデリングも今後考えなければならないが。

これらの地震電磁気現象のメカニズムや地圏・大気圏・電離圏結合メカニズムの解明により、科学的地震予知の段階から実用的地震予知への大きな発展も期待される。

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.
- 5) 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.
- 6) Molchanov, O. A., and M. Hayakawa, Seismo Electromagnetics and Related Phenomena: History and latest results, TERRAPUB, Tokyo, 189 p., 2008.
- 7) 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
- 8) Horie, T., S. Maekawa, T. Yamauchi, and M. Hayakawa, A possible effect of ionospheric perturbations associated with the Sumatra earthquake, as revealed from sub-ionospheric very-low-frequency (VLF) propagation (NWC-Japan), Int'l J. Remote Sensing, vol.28, No.13, 3133-3139, 2007.
- 9) Hayakawa, M., K. Ohta, S. Maekawa, T. Yamauchi, Y. Ida, T. Gotoh, N. Yonaiguchi, H. Sasaki and T. Nakamura, Electromagnetic precursors to the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake, Phys. Chem. Earth, vol. 31, 356-364, 2006.
- 10) Maekawa, S., T. Horie, T. Yamauchi, T. Sawaya, M. Ishikawa, M. Hayakawa, and H. Sasaki, A statistical study on the effect of earthquakes on the ionosphere, based on the subionospheric LF propagation data in Japan, Ann. Geophysicae, vol.24, 2219-2225, 2006.
- 11) Rozhnoi, A., 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, 589-598, 2004.
- 12) Hayakawa, M., VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes, Sensors, vol.7, 1141-1158, 2007.