

地震電磁気シンポジウム (2006 年 12 月) と 地震電磁気現象の最新の成果について

早川 正 士

Report on “Seismo Electromagnetics Symposium (2006 December)” and latest results on seismo-electromagnetic phenomena

Masashi Hayakawa

Abstract

This report provides you with the summary of a symposium entitled, “Seismo Electromagnetics” held in Tokyo on 21 December 2006, and also we present our latest results on seismo electromagnetics (a statistical result on the correlation between the ionospheric perturbations (as detected by subionospheric VLF propagation) and earthquakes, and a case study for the 2004 December Sumatra earthquake on the spatial scale and dynamics of the ionospheric perturbations for this earthquake).

1. 地震電磁気シンポジウムの開催とその報告

電気通信大学紀要第 19 巻第 1・2 合併号 (2006 年 12 月) においては電気通信大学の「地震電磁気研究ステーション」の活動について紹介した。そのなかでは、研究ステーションが主催した国際会議や研究ステーションが重要な役割を示す国内セミナーなどを報告した。地震に伴う電磁気現象は極めて学際的な研究分野であり、国内外の諸大学、諸機関のいろいろな分野の研究者との共同研究が不可欠のものとなっている。

この一環として 2006 年 12 月 21 日に東京渋谷 (ナジックセミナーホール) において “地磁気シンポジウム” を開催した。大学からの援助を受け、電気通信大学地震電磁気研究ステーション主催として開催した。共催として、地震電磁気セミナー、電気学会電磁界理論技術委員会「自然災害の予測と監視のための電磁界技術」調査専門委員会である。年末の忙しい時期の開催であったにもかかわらず、50 名以上の参加者があり、活発な議論が展開された。

今回のシンポジウムでは、最新のトピックスを科学的に講演していただく様にすべての講演者 (招待講演のみ) をお願いした。地震に伴う地圏から、大気圏そして電離

層までの擾乱を総合的に取り扱っている。早川の開会挨拶に続いて、(1) 地圏からの自然放射の受信、(2) 地震に伴う大気圏擾乱、(3) 地震に伴う電離層擾乱のセッションと関連学会報告があった。各セッションについて簡単に紹介しよう。まず、地圏からの自然放射セッションでは、服部氏 (千葉大) が ULF (周波数 10Hz 以下) 電磁放射に関するレビューを行うとともに高度な信号処理 (方位測定、独立成分解析等) の重要性を強調し、その有効例を示した。太田氏 (中部大) は同大学の中津川観測所での ULF 観測から、新潟中越地震とインドネシアスマトラ地震の前兆 ULF 放射の受信に成功している。中津川観測点からの方位測定が両地震とも震央方向とほぼ一致していることから、その信頼性は高いと考えられ、多くの注目を集めた。続いて、伊田氏 (電通大、DC 大学院生) は地震に伴う ULF 放射の検出のためにフラクタル解析の重要性を指摘し、1993 年 8 月 8 日のグアム地震時の ULF データのフラクタル解析から、地圏内にて非線形プロセスが働いていることを示唆した。又、高野氏 (JAXA) は人工衛星上でのマイクロ波観測から、地震に関係すると思われるイベントを報告した。次の (2) 大気圏擾乱セッションは二つの講演から成り、米内口氏 (電通大、MC

大学院生)は見通し外 VHF 波の諸特性を気象(ラジオダクト)及び地震との相関という観点から統計的に取り扱い、冬期での地震効果の検出がより容易であることを指摘した。他方、森谷氏(北海道大)は同様の見通し外 FM 波受信を取り扱っているが、統計的解析ではなく、事例解析を詳細に行ない、VHF 波散乱と地震には定量的関係があることを示した。特に、VHF 散乱波の継続時間が地震の震度と強く関係することを示し、注目された。最後の(3)の電離層セッションは3つの講演から成る。先ず、小山氏(首都大学東京)は、ひのとり衛星で観測された電子温度の注意深い解析から、地震の前兆として電子温度異常を見出した。しかし、事例数が少なく、事例数の増加が強く望まれる。続いて、堀江氏(電通大、MC 大学院生)は電通大 VLF/LF ネットワークを活用し、オーストラリア NWC 局(周波数=19.8kHz)の国内多点での受信データから、インドネシアスマトラ地震の際震源上空の電離層が半径2,000km以上にわたって擾乱されており、その擾乱が伝搬性特性をもつ事を示した。又、その擾乱の伝搬速度から、擾乱は大気重力波によっていると結論した。最後の早川(電通大)は同じスマトラ地震に対して、人工衛星(仏国 DEMETER 衛星)での同じ NWC 局電波(ホイスラモード波)の受信から、震源上空に発生した電離層擾乱の直径が5,000km程度であることを示し、地上観測とよい一致を示していると述べた。最後の関連報告では、上田氏(東海大)が IUGG(国際地球物理学測地学連合)内での EMSEV ワーキンググループや2007年7月のイタリア(ペルージャ)での総会とその際のセッションの報告があった。又、早川は2005年インドにて開催の URSI(国際電波科学連合)総会における動向(地震電磁気ワーキンググループの継続や地震電磁気セッション)の報告があった。最後に、児玉氏(JAXA)は最新の各国地震電磁気専用衛星やその計画を紹介し、日本の衛星打ち上げを強く要望するとの発言を行った。図1はシンポジウムの1ショットである。シンポジウム終了後、出席者30人前後が近くの居酒屋にて懇親会を開き、いろいろな裏話などに花を咲かせた。



図1 地震電磁気シンポジウムの1ショット

2. 地震に伴う電磁気現象の最新の成果

地震の短期予知を考える時最も有望なのが電磁気現象であることは疑いの余地はない。勿論、その発生機構、伝搬機構において未解明の部分があることは認めるが。最も大事な事は絶対的に事例数を増やすことであると考ええる。そこで、我々のグループの最新の成果を紹介しよう。多くの成果が出ているが(参考文献参照せよ)、我々が最も重要と考える電離層擾乱に関する2,3の成果:(1)電離層擾乱と地震との因果関係に関する統計解析(Maekawa et al., 2006)、(2)インドネシアスマトラ地震の際の電離層擾乱の諸特性の解明(Horie et al., 2007)を取り上げる。

2.1 電離層擾乱と地震との因果関係(多年 VLF/LF データに基づく統計解析)

VLF/LF 電波サウンディングは VLF/LF 送信局の電波が電離層と大地から成る導波管内をマイクロ波の導波管のように長距離伝搬することを利用する手法である。導波管の上層境界の下部電離層(D層/E層)にて反射するため、観測点で受信される VLF/LF 波の振幅、位相は下部電離層のプラズマ状況に敏感に応答する。この VLF/LF 電波サウンディングは積分観測という最大の特徴を持つ。即ち、送信局と受信点とを結ぶ大円(伝搬経路)の周辺の地震の影響を受けることから、事例数を著しく増やすことが出来るという利点を持っている。我々は国内7観測点(北から北海道母子、調布、千葉館山、静岡清水、名古屋春日井、京都舞鶴、高知)に VLF/LF 受信器を設置し、各観測点では多局の VLF/LF 送信局電波受信を可能とするシステムを構築している(図2参照)(早川, 2005 参照)。現在受信している局は(1)JJY局(日本福島県、40kHz(標準電波で、電波時計に使用されている))、(2)JJI局(九州えびの、22.2kHz)、(3)NWC局(オーストラリア、19.8kHz)、(4)NPM局(ハワイ、21.4kHz)、(5)NLK局(米国、24.8kHz)である。

本統計解析では JJY 局-高知観測点間の伝搬路を取り上げる。送信点-受信点との相対位置を考慮し、本伝搬パスでの Sensitive area を次の様に決める。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を Sensitive area と定義した。図3に示している。送受信点間の中間での sensitive area の領域は第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マグニチュード5.0以上の地震の震央をプロットしたものである。しかし、以前の我々の研究から電離層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。一日ごとの地震活動として実効マグニチュード(Meff)を新たに導入した。即ち、ある日の夜間の振幅(位

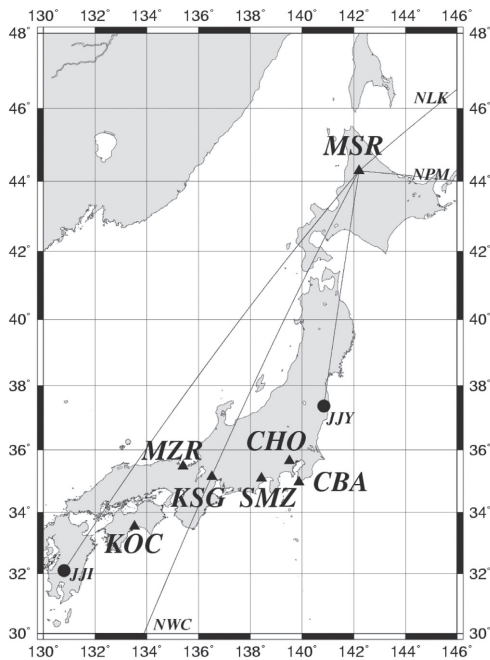


図2 国内でのVLF/LFネットワーク。7観測点（母子里（MSR）、調布（CHO）、千葉（CBA）、清水（SMZ）、春日井（KSG）、舞鶴（MZR）、高知（KOC））。各観測点とも同じVLF/LF送信局を受信しているが、母子里だけの状況を示している。受信局はNLK局、JJY局、NWC局、JJI局、NPM局である。

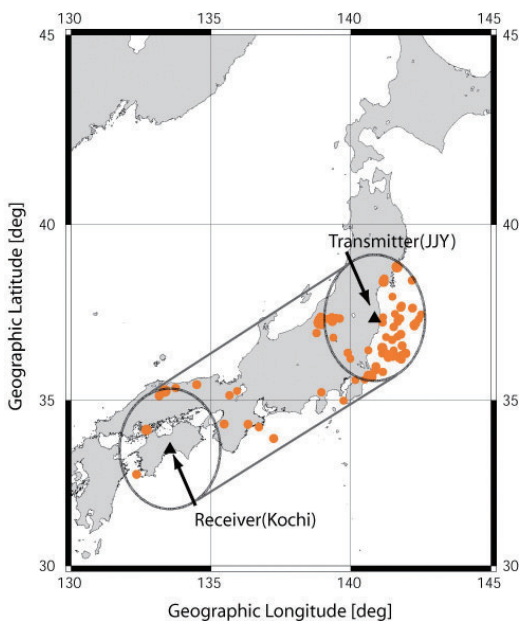


図3 統計解析に用いたSensitive Area。即ち送信局（JJY局）と受信点（高知）とを結ぶ大円近傍の領域で、この領域内の地震が受信信号に影響を与える。

相）データは一日毎の地殻活動を反映するため、ある一日に発生したすべての地震（マグニチュード2.0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ド（ M_{eff} ）を定義する。LFデータの解析方法は“夜間ゆらぎ法”と命名しているもので、

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

という差分を導出する。 $A(t)$ はある日のある時刻 t での振幅を、 $\langle A(t) \rangle$ は時刻 t でのその日の前後10日間の平均を示す。夜間としてUT = 10時～20時（L.T. = 19時～5時）を採用し、振幅の2つの物理量を取り扱う。(1) 振幅（又はトレンド）、(2) 振幅の分散（又はゆらぎ）である。一日のデータとしては夜間の平均振幅と平均分散を用いる。データは1999年6月から2005年6月までの6年間である。但し、2004年には大きな新潟中越地震（マグニチュード6.8）が発生し、その後も多くの余震があることから、全体の統計を著しく混乱される恐れがあり、2004年は解析から除外した。 z 検定を行った結果が図4である。

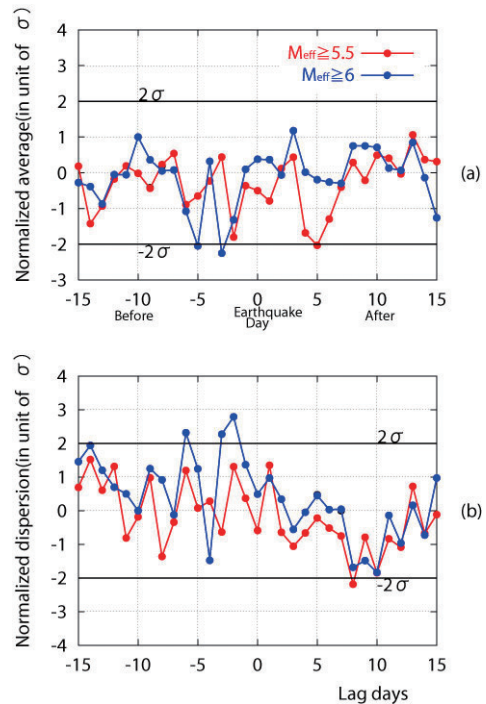


図4 電離層擾乱と地震との因果関係を統計検定した結果。(a)は振幅（トレンド）、(b)は分散（ゆらぎ）に関するもの。横軸の0日は地震日、-（+）は現象が地震の前（後）に発生していることを示す。検定の基準の 2σ （ σ :標準偏差）ラインも示してある。

(a)は振幅に関するもの、(b)は分散（ゆらぎ）に関する結果である。まず、(a)を見よう。横軸の日数は、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。図4(a)より $M_{eff} \geq 6.0$ の地震の前に振幅（トレンド）の減少が3～5日前に前兆的に発生することを示している。統計的に有意な2

σ (σ : 標準偏差) レベルを超えている。次に図4(b)を見ると、 $M_{eff} \geq 6.0$ では同様に振幅の分散(ゆらぎ)が地震の数日~1週間の間に 2σ を超えて上昇することが結論されている。 $M_{eff} \geq 5.5$ 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、同様の事が認められる。以上の統計検定から、地震の前後(主として前兆として)振幅が3dB前後減少し、ゆらぎも著しく増加するという特徴を示した。換言すると、LF波で受信した電離層擾乱と地震($M_{eff} \geq 6.0$)とは強い因果関係があることが結論された。この強い因果関係は我々の以前の別のパスに対する統計結果(Rozhnoi et al., 2004)とも矛盾しないと言える。

2.2 インドネシア スマトラ地震の際の電離層擾乱の検出及び擾乱の空間スケール、ダイナミクスの解明

最近の大きな地震の事例解析としては、(1)新潟中越地震(Hayakawa et al., 2006)と(2)インドネシアスマトラ地震を挙げることが出来る。両地震に対しては多くの現象が観測されているが、紙面の都合上本報告では(2)について詳しく述べよう。

地震に伴う電離層擾乱は大きな地震(例えば、マグニチュード5.5以上ないし6.0以上で、しかも比較的浅い地震)に対しては有意な因果関係があることを前節で述べた。そこで2004年12月26日に発生した巨大地震(マグニチュード9.3)であるインドネシアスマトラ地震に伴う電離層擾乱を紹介する。図5は、日本のVLF観測点(千葉、調布、高知)と送信局NWC局とを結ぶ大円とその第1フレネルゾーンを示している。このゾーンはマグニチュード6~7の地震に対して感ずる領域(Sensitive area)である。スマトラ地震の震央はそのゾーンからかなり離れているが、いかんせん本地震はマグニチュードが9.3であるため、何か出ていることを期待して解析を行った。本伝搬経路は南北伝搬であることから、ターミネータ・タイム法(VLF波の振幅/位相の日変化においては日没、日出前後の最小値を示す時刻をターミネータ・タイムと呼び、これをトレースする方法)(Maekawa and Hayakawa, 2006)は不適切であり、前節の統計解析で用いた“夜間ゆらぎ法”を用いた。即ち、 $dA(t)$ の使用である。図6は地震前後での $dA(t)$ を日本三観測点に対してプロットしたものである。図6からわかる事は、夜間ゆらぎが地震に近づくにつれ、著しく増大していることが、明瞭にうかがわれる。この夜間6時間の dA (< 0 のもの) ($dA < 0$ が地震の効果であることがわかっているので)を積分した($dA^2(t)$)量を時系列としてプロットしたものが図7である。千葉観測点のデータは黒にて、調布は青、高知はピンクにて表示し、各観測点での平均値(m) + 2σ (σ : 標準偏差)を表示している。この図から、次の事が結論される。著しく擾乱されているのは、

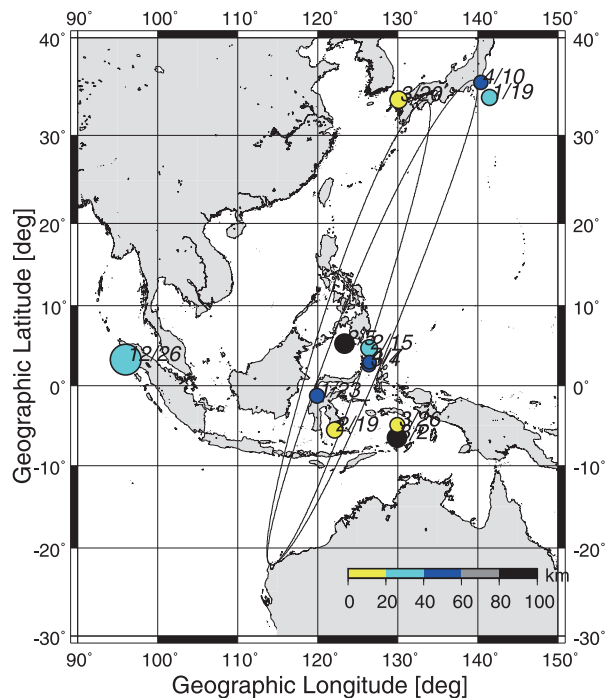


図5 日本のVLF観測点(千葉、調布、高知)とオーストラリアNWC局とを結ぶ大円。スマトラ地震の前後二年間の比較的大きな地震がプロットしてある。12/26という大きな丸がスマトラ地震で、VLF伝搬経路からは約2,000km離れている。

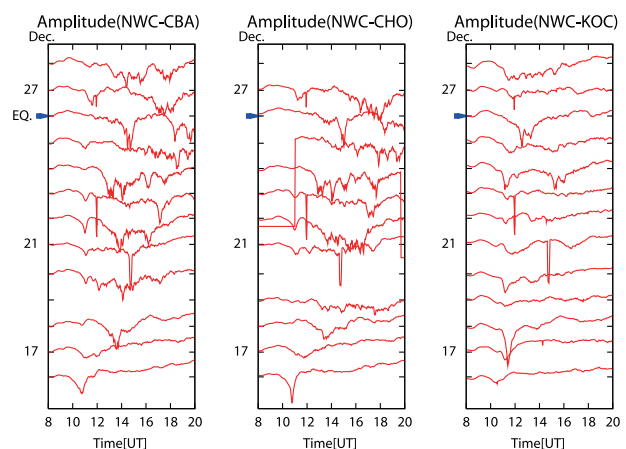


図6 VLF振幅の日変化(特に夜間)パターンの日毎変化。日本の三観測点(高知、調布、千葉)での日変化パターン。横軸はU.T. (地方時L.T. = U.T. + 9時間)、縦軸は12月の日付を書いている。地震は12月26日である。

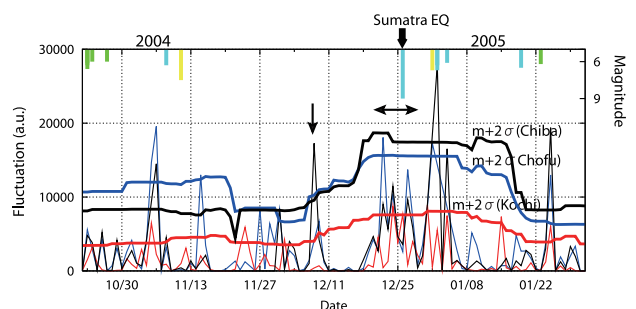


図7 夜間ゆらぎの時系列変化を各観測点に対してプロットしたもの。黒:千葉、青:調布、ピンク:高知。

12月8日と12月21日から1月2日前後までの期間である。特に、後者の期間では三観測点とも著しい振幅ゆらぎを検出しており、前兆の電離層擾乱と言えよう。即ち、第1の重要な結論は、前兆の電離層擾乱の空間的スケールは少なくとも半径2,000kmであることである。

次に、この電離層擾乱のダイナミクスを調べてみよう。 $dA(t)$ に対するウェーブレット解析を行ない、両者の相関、時間的ずれを調査する。図6をみてもわかる様に、ゆらぎの多くは波動的構造をもっている。地震前と地震後の10日間前後での相関の Superimposed epoch analysis の結果を図8に示す。左図は地震前の12月16日～12月26日までの11日間の結果を、右は地震後の2005年5月2日～5月12日（静穏時）の結果を示している。たて軸はゆらぎの周期で分単位である。まず、地震前には周期20分～60分前後の周期にてゆらぎ成分が増大し、高知に対して千葉が2時間遅れていることが明らかになった。この種の状況は図8の右図の地震後には全く認められず、地震前の重要な特長である。即ち、地震前の電離層擾乱は伝搬する波動の特徴を持っていることを示唆している。この周期10分～100分は大気重力波の周波数領域で、その伝搬速度も評価でき、理論値ともほぼ一致している。即ち、結論として、地圏・大気圏・電離圏結合機構において大気重力波が重要な役割を果たしていることを実験的に初めて明らかにしたと言えよう。

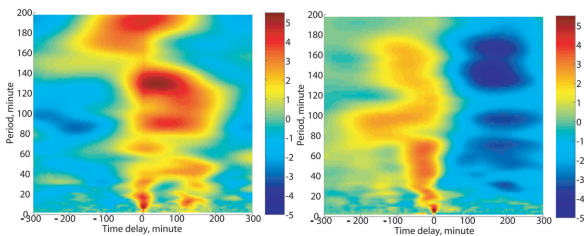


図8 ゆらぎ成分の波動性を示す図。縦軸はゆらぎ成分（周期分にて）。左図は地震前の図、右図は地震後の静穏時の図である。左図では周期20分～60分のゆらぎが高知より約2時間遅れて千葉で観測されていることを示している。

3. むずび

地震電磁気研究ステーションの2006年の活動報告として、(1)2006年12月に開催した地震電磁気シンポジウムと(2)研究ステーションを中心とした最新の研究成果の一部を紹介した。2006年に我々が発表した論文を参考文献として掲げてある。又、2007年末には過去10年間の全成果を集大成したモノグラフ（Molchanov, Hayakawa 共著として）がテラパブより出版されることになっており、この分野の Reference book になると信ずる。学問的には VLF/LF 電波を用いた電離層擾乱の研究は積分観測の特徴を生かして、(1)多くの事例解析（神戸地震

以来、スマトラ地震まで）と(2)統計解析を行っており、ほぼ地震の前に電離層が擾乱されていることは確立したと言えよう。地震短期予知の観点から次に有望な ULF 放射に関しては、いかんせん事例数が充分とは言えない状況である。高度な信号処理を駆使して、事例数の蓄積をはかる必要がある。更には、地震電磁気現象の最終ゴールである地圏・大気圏・電離圏結合機構に関する更なる観測的事実とそれと併行した理論的考察が不可欠であろう。ここ1、2年にて地圏の効果（例えば、地震前兆として地表での物理量（温度、圧力等）での変動（10分～60分周期）が電離層まで大気重力波で伝搬し、電離層の変調を引き起こす過程（我々は Acoustic channel と呼んでいる）の定量的評価を行うとともに、大気電界による別の結合機構も併行して考察する予定である。

第1節で述べた様に、本学問分野では国内、国際共同研究が極めて重要であり、地上観測ではロシア、イタリア、台湾等との共同研究、衛星観測では仏国との共同研究が順調に進められている。更に、欧州では我々の VLF/LF 受信器を用いてネットワークの構築が計画されているなど、多くの国との共同研究が進行している。

最後に、大学院生（MC、DC）の活発な活動についても簡単に紹介する。本稿での地震電磁気シンポジウムでも電気通信大学大学院生が最新の世界レベルの成果を報告しているし、2007年7月にタイ国バンコクにて開催された AOGS（アジアオセアニア地球科学連合）総会でも多くの論文を発表し、国際的に高い評価を受けた（図9参照）ことを述べて、本稿を終える。



図9 AOGS 総会での大学院生の発表後のスナップショット（左から、中部大学太田先生、安田君、堀江君、早川、山下君、吉田君）

参考文献

- (1) 早川正士, 地震に伴う電磁気現象のいろいろ, 電気通信大学紀要, 解説, 第17巻, 第1・2合併号, 1-9, 2005.
- (2) 早川正士, 「地震電磁気研究ステーション」の活動について, 電気通信大学紀要, 第19巻, 第1・2合併号, 211-215, 2006.
- (3) 地震電磁気シンポジウム (2006年12月21日) アブストラクト集, 電気通信大学地震電磁気研究ステーション主催.
- (4) Molchanov, O. A., and M. Hayakawa, Seismo-electromagnetics and related phenomena: History and latest results, TERRAPUB, Tokyo, in press, 2007.
- (5) Hayakawa, M., Recent progress in seismo electromagnetic phenomena (Electromagnetic phenomena associated with earthquakes), *IEEJ Trans. Fundamentals and Materials*, vol. **126**, 1, 43-44, 2006.
- (6) Cervone, G., S. Maekawa, R.P. Singh, M. Hayakawa, M. Kafatos, and A. Shvets, Surface latent heat flux and nighttime LF anomalies prior to the M ω =8.3 Tokachi-Oki earthquake, *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol. **6**, 109-114, 2006.
- (7) Hayakawa, M., Electromagnetic phenomena associated with earthquakes, *IEEJ Trans. Fundamentals and Materials*, vol. **126**, No.4, 211-214, 2006.
- (8) Ida, Y., M. Hayakawa, and K. Gotoh, Multifractal analysis for the ULF geomagnetic data during the Guam earthquake, *IEEJ Trans. Fundamentals and Materials*, vol. **126**, No.4, 215-219, 2006.
- (9) Maekawa, S., and M. Hayakawa, A statistical study on the dependence of characteristics of VLF/LF terminator, *IEEJ Trans. Fundamentals and Materials*, vol. **126**, No.4, 220-226, 2006.
- (10) 太田健次, 石野博一, 渡邊伸夫, 早川正士, 紀伊半島沖地震, 新潟中越地震, スマトラ沖地震の前兆的現象の観測, *J. Atmos. Electr.*, vol. **26**, No. 1, 11-24, 2006.
- (11) Sorokin, V. M., A. K. Yaschenko, and M. Hayakawa, Formation mechanism of the lower -ionospheric disturbances by the atmosphere electric current over a seismic region, *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol. **68**, 1260-1268, 2006.
- (12) 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 (招待論文), vol. **J89-B**, No. 7, 1036-1045, 2006.
- (13) Surkov, V. V., O. A. Pokhotelov, M. Parrot and M. Hayakawa, On the origin of stable IR anomalies detected by satellites above seismo-active regions, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 164-171, 2006.
- (14) Bashkuev, Yu. B., V. P. Melchinov, D. G. Buyanova, L. Kh. Angarkhaeva, M. G. Dembelov, V. B. Khaptanov and M. Hayakawa, Cryosphere of the earth and its influence on electromagnetic processes in seismoactive mountainous areas, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 182-188, 2006.
- (15) Bashkuev, Yu. B., V. B. Khaptanov, M. G. Dembelov, L. Kh. Angarkhaeva, V. P. Boloev and M. Hayakawa, Radioprobing of underground structure of the Failure Gulf, formed as a result of the M7.5 Tsagan earthquake, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 210-214, 2006.
- (16) Alperovich, L., E. Morozov, M. Hayakawa and K. Hattori, Coherence of the ULF fields in the seismoactive zone of Japan, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 248-257, 2006.
- (17) Troyan, V., M. Hayakawa and Yu. Kiselev, Restoration of seismic parameters and electrical conductivity by the diffraction tomography method, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 268-272, 2006.
- (18) Surkov, V. V., and M. Hayakawa, ULF geomagnetic perturbations due to seismic noise produced by rock fracture and crack formation treated as a stochastic process, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 273-280, 2006.
- (19) Hattori, K., A. Serita, C. Yoshino, M. Hayakawa and N. Isezaki, Singular spectral analysis and principal component analysis for signal discrimination of ULF geomagnetic data associated with 2000 Izu Island earthquake swarm, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 281-291, 2006.
- (20) Kopytenko, Yu. A., V. S. Ismaguilov, K. Hattori and M. Hayakawa, Determination of heart position of a forthcoming strong EQ using gradients and phase velocities of ULF geomagnetic disturbances, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 292-298, 2006.
- (21) Guglielmi, A., M. Hayakawa, A. Potapov and B. Tsegmed, Polarization method to detect the co-seismic magnetic oscillations, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 299-304, 2006.
- (22) Shekotov, A., O. Molchanov, K. Hattori, E. Fedorov, V. A. Gladyshev, G. G. Belyaev, V. Chebrov, V. Sinitsin, E. Gordeev and M. Hayakawa, Seismo-ionospheric depression of the ULF geomagnetic fluctuations at Kamchatka and Japan, *Phys. Chem.*

- Earth*, vol. **31**, 313-318, 2006.
- (23) Singh, V., B. Singh, M. Kumar and M. Hayakawa, Identification of earthquake sources responsible for subsurface VLF electric field emissions observed at Agra, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 325-335, 2006.
- (24) Bushkuev, Yu. B., I. B. Naguslaeva, Yu. P. Malyshkov, D. G. Buyanova and M. Hayakawa, Electromagnetic "seismic calm" effect in the Baikal rift zone, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 336-340, 2006.
- (25) Schekotov, A. Yu., O. A. Molchanov and M. Hayakawa, A study of atmospheric influence from earthquake statistics, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 341-345, 2006.
- (26) 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.
- (27) Ondoh, T., and M. Hayakawa, Synthetic study of precursory phenomena of the M7.2 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 378-388, 2006.
- (28) Ohta, K., N. Watanabe and M. Hayakawa, Survey of anomalous Schumann resonance phenomena observed in Japan, in possible association with earthquakes in Taiwan, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 397-402, 2006.
- (29) Biagi, P. F., L. Castellana, T. Maggipinto, R. Piccolo, A. Minafra, A. Ermini, S. Martellucci, C. Bellecci, G. Perna, V. Capozzi, O. A. Molchanov and M. Hayakawa, LF radio anomalies revealed in Italy by the wavelet analysis: Possible preseismic effects during 1997-1998, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 403-408, 2006.
- (30) Rozhnoi, A. A., M. S. Solovieva, O. A. Molchanov, M. Hayakawa, S. Maekawa and P. F. Biagi, Sensitivity of LF signal to global ionosphere and atmosphere perturbations in the network of stations, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 409-415, 2006.
- (31) Rozhnoi, A. A., M. S. Solovieva, O. A. Molchanov, V. Chebrov, V. Voropaev, M. Hayakawa, S. Maekawa and P. F. Biagi, Preseismic anomaly of LF signal on the wave path Japan-Kamchatka during November-December 2004, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 422-427, 2006.
- (32) Soloviev, O. V., M. Hayakawa and O. A. Molchanov, Seismo-electromagnetic phenomenon in terms of 3D vector problem of subionospheric radio wave propagation across the solar terminator, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 428-436, 2006.
- (33) Rapoport, Yu. G., O. E. Gotynyan, V. N. Ivchenko, M. Hayakawa, V. V. Grimalsky, S. V. Koshevaya and D. Juares-R., Modeling electrostatic-photochemistry seismoionospheric coupling in the presence of external currents, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 437-446, 2006.
- (34) Sorokin, V. M., A. K. Yaschenko, V. M. Chmyrev and M. Hayakawa, DC electric field amplification in the mid-latitude ionosphere over seismically active faults, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 447-453, 2006.
- (35) Sorokin, V. M., A. K. Yaschenko, V. M. Chmyrev and M. Hayakawa, DC electric field formation in the mid-latitude ionosphere over typhoon and earthquake regions, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 454-461, 2006.
- (36) Guglielmi, A., A. Potapov, B. Tsegmed, M. Hayakawa and B. Dovbnaya, On the earthquake effects in the regime of ionospheric Alfvén resonances, *Phys. Chem. Earth*, vol. **31**, 469-472, 2006.
- (37) Hayakawa, M., and S. F. Timashev, An attempt to find precursors in the ULF geomagnetic data by means of flicker noise spectroscopy, *Nonlinear Processes Geophys.*, vol. **13**, 255-263, 2006.
- (38) Ida, Y., and M. Hayakawa, Fractal analysis for the ULF data during the 1993 Guam earthquake to study prefracture criticality, *Nonlinear Processes Geophys.*, vol. **13**, 409-412, 2006.
- (39) Molchanov, O., A. Rozhnoi, M. Solovieva, O. Akentieva, J. J. Berthelier, M. Parrot, F. Lefeuvre, P. F. Biagi, L. Castellana, and M. Hayakawa, Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite, *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol. **6**, 745-753, 2006.
- (40) Nickolaenko, A. P., M. Hayakawa, M. Sekiguchi, Y. Ando, and K. Ohta, Model modifications in Schumann resonance intensity caused by a localized ionosphere disturbance over the earthquake epicenter, *Ann. Geophysicae*, vol. **24**, 567-575, 2006.
- (41) 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.
- (42) 早川正士、服部克己、太田健次、ULF帯磁場変動データを用いた地震関連現象の抽出：レビュー、電気学会論文誌A, vol. **126**, No.12, 1238-1244, 2006.
- (43) Hattori, K. and M. Hayakawa, Recent progress and state of the art of seismo-electromagnetics, *IEEEJ Trans. Fundamentals and Materials, Special Issue on Technology 2007: Reviews and Forecasts*, vol. **127**, 4-6, 2007.
- (44) Todoroki, Y., S. Maekawa, T. Yamauchi, T. Horie, and M. Hayakawa, Solar flare induced D region perturbation in the ionosphere, as revealed from a short-distance VLF propagation path, *Geophys. Res. Lett.*, vol. **34**, L03103, doi:10.1029/2006GL0028087, 2007.
- (45) Sorokin, V. M., A. K. Yaschenko, and M. Hayakawa, A perturbation of DC electric field caused by light ion adhesion to aerosols during the growth in seismic-related atmospheric radioactivity, *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol. **7**, 155-163, 2007.
- (46) Yonaiguchi, N., Y. Ida, and M. Hayakawa, On the statistical correlation of over-horizon VHF signals with meteorological radio ducting and seismicity, *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol. **69**, 661-674, 2007.
- (47) Yamauchi, T., S. Maekawa, T. Horie, M. Hayakawa, and O. Soloviev, Subionospheric VLF/LF monitoring of ionospheric perturbations for the 2004 Mid-Niigata earthquake and their structure and dynamics, *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol. **69**, 793-802, 2007.
- (48) Horie, T., T. Yamauchi, M. Yoshida, and M. Hayakawa, The wave-like structures of ionospheric perturbation associated with Sumatra earthquake of 26 December 2004, as revealed from VLF observation in Japan of NWC signals, *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol. **69**, 1021-1028, 2007.
- (49) Hayakawa, M., V. V. Surkov, Y. Fukumoto, and N. Yonaiguchi, Characteristics of VHF over-horizon signals possibly related to impending earthquakes and a mechanism of seismo-atmospheric perturbations, *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol. **69**, 1057-1062, 2007.