

地震先行現象研究の過去・現在・未来
—IUGG/EMSEV が果たした役割—

長尾年恭(東海大学海洋研究所)

Past, present, and future of pre-earthquake phenomena study
-The role played by IUGG / EMSEV-

Toshiyasu Nagao (Institute of Oceanic Research and Development, Tokai University)

Abstract

After getting my Ph.D. in March 1987, I served for the Faculty of Science, Kanazawa University, and was enrolled until December 1995. During that time, in 1991, I studied abroad at the University of Athens, Greece for a year, and engaged in research on the VAN method based on geo-electrical potential difference observation. The Kobe Earthquake which occurred in January 1995 changed my research life significantly, and I moved to Tokai University in December 1995. At Tokai University, we participated in the comprehensive earthquake frontier research started by the Science and Technology Agency at that time. In 2001, EMSEV was established in IUGG with the efforts of Professor Uyeda to promote electromagnetic earthquake prediction research. I have been serving as a secretary since the establishment of EMSEV and have appointed as the chair since 2019. In the future, I would like to continue carrying out EMSEV activities, seismic activity analysis applying pattern informatics, and geomagnetic observation at Mt. Fuji as my life work. In this article, I would like to introduce the activities of EMSEV and joint research in Kyrgyzstan, etc.

はじめに

私が博士論文を書いている時、壁一つ向こう側の部屋に歌田久司氏、笹井洋一氏、中川一郎氏などが席を構えていらっしやった。それから40年近くが経過して、今や私自身が東海大学を定年退官する年となってしまった。ある意味あつという間とも言える大学での研究生生活であった。

1988年に金沢大学理学部に就職し、1991年には約1年間ギリシャのアテネ大学で Vartosos 教授の元で VAN 法について研究を実施した。1995年の阪神淡路大震災は、私の研究人生を大きく変える事となった。この地震をきっかけに東海大学へ異動し、今日に至っている。

本論では、電磁気学的な地震予知研究にどのようなきっかけで興味を持ったのか、2001にIUGG内のワーキンググループとして設立されたEMSEV (Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes)を通じての活動(フィリピンやキルギスとの共同研究)や、近年精力的に実施している地震活動度変化を用いた地震発生予測の研究等について紹介を試みる。

VAN 法との出会い

ギリシャで短期の地震予知が成功しているとの論文が投稿され、それが2年ほど *Tectonophysics* 誌への掲載が保留となっていた。保留の理由は「結果が良すぎる」という事であったらしい。当時も今も“予知が出来た”という論文はそのほとんどが小さな地震を“予知”していたり、その統計的扱いに問題がある場合が多いのも事実である。当時、同誌の編集長に就任したばかりであった上田誠也東大地震研教授は、「結果が良すぎる事は掲載拒否の理由に当たらない」として、自ら調査を行ない掲載を決定した(Varotsos and Alexopoulos, 1984)。これが結果として私と VAN 法との出会いとなった。

VAN グループの主張は、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(例えばバロトウソスほか, 1994)。

彼らは岩石破壊直前に岩石中に含まれるマイ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ふ固体物理学の仮説を地震予知に応用したのである。VAN のうちの2人(VおよびA氏)は固体の電気的性質を専門とする物性物理学者であり「地殻には石英のような圧電物質と多くの荷電点欠陥(双極子)を含む物質が含まれている。圧電物質の結晶方向の分布は完全にはランダムではなく、地震の前に応力が高まると、それに比例して圧電物質が分極し、地殻内にマクロな電場が生ずる。この素過程はポテンシャルの山を越える必要がある活性過程であり、その進行にはある時間(緩和時間)を要する。つまり地殻の応力が高まり、ある臨界状態を越えると、マクロな双極子の分極が起こり電流(応力刺激電流, pressure stimulated polarization current)として観測される」といふ仮説を地震前兆現象に適用した。

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、当然の事ながら反対意見が続出した。その理由は大きく分けて、1) SES の物理的メカニズムが不明である。2) SES の伝播メカニズムが不明である、という2点に集約された。SES が震源付近で発生したとすると観測点でVANの主張する程度の電場変化を観測するためには均質大地ではとてつもなく大きな電流源を必要とするというのも批判の大きなポイントであった。このような科学的な批判は良いのであるが、その多くの批判は実態を知った上の意見というより、「従来の経験からみて、そんなにうまく予知できるはずはない」と言ったものや、全くの誤解、結果の曲解によるものである。これについてはアメリカ地球物理学連合(AGU)の機関紙(EOS)に掲載された上田の文章(Uyeda, 2000)や、拙著『地震予知研究の新展開』を参考にして頂きたい(長尾, 2001)。

近年 VAN グループは予知の時間的な精度の向上のために、地震発生領域近傍が臨界状態かどうかを判断できる Natural Time という新しい“時間”の概念を導入しており、SES と組み合わせる事により予知の時間精度(それまでは数日から数ヶ月と幅があった)を数日にまで狭める事に成功したと主張している(例えば Sarlis, et al, 2008, 2015)。

EMSEV の設立

このような状況から地球物理学関係の最大の国際学術団体である国際測地学・地球物理学連合(IUGG)は、2001年に電磁気学的手法による地震ないし火山噴火の発生予測研究を、より促進するための国際作業委員会(略称EMSEV: Electromagnetic Studies of Earthquake and Volcanoes)をIUGG傘下の3つの構成団体(IAGA; 国際地球電磁気・超高層物理学協会、IASPEI; 国際地震学及び地球内部物理学協会、IAVCEI; 国際火山学および地球内部化学協会)を母体として設置する事を決定した。

<http://www.emsev-iugg.org/emsev/>

筆者はこのEMSEVのSecretaryを設立当初から努めており、2019年からは委員長に就任した。EMSEVの活動であるが、2002年9月には最初の国際ワークショップと位置づけられるミーティングをモスクワで開催し、その後2003年には日本で初めて開催された札幌でのIUGG総会の中で会合を持った。EMSEVはそれ以降、独自の総会として2004年にフランス、2005年にメキシコ、2006年にインド、2008年にはルーマニア、2010年にはアメリカ、2012年には日本(御殿場市)、2014年にはポーランド、2016年には中国・蘭州市、2018年にはイタリアで開催された。2020年は台湾で開催の予定であったが、コロナのため2022年夏に延期する事とした。

EMSEVの掲げる目標は、1)地震や火山噴火に関連する各種電磁気学的研究に対しての個々の研究者の連携および国際共同研究の推進、2)各種研究成果の世の中への啓発活動、3)全般的な電磁気学研究の推進およびデータ流通の推進等となっている(図1)。

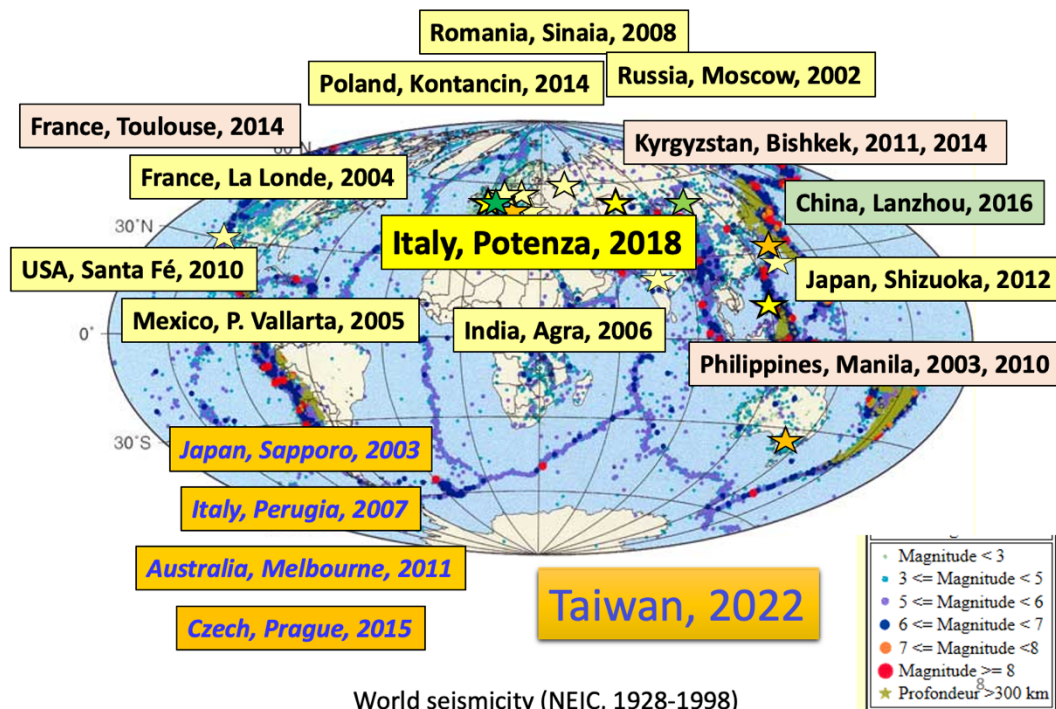


図1 これまでの EMSEV 総会の開催実績

フィリピンとの共同研究

EMSEVの最初の国際共同研究のターゲットはフィリピンのタール火山であった。タールは20-30年で噴火を繰り返すことからDecade Volcanoと呼ばれており、1572年以降33回の噴火が確認されている。最後の噴火は1977年であり、いつ噴火してもおかしくないと考えられていた。結果として2020年1月の大噴火となったのであるが、2004年と2011年には活動レベルが上昇し、観光客入山禁止等の措置がとられた事もあった。また、タールは、“世界一標高が低い活火山”とも言われており、山頂の火口湖にも容易にアクセスできる世界でも稀な火山である。さらに電気伝導度構造から、いわば“水浸しの火山”と考えられており、これまでも水蒸気噴火を頻繁に起こしており、これを目前で観測できる可能性が高いと考えた訳である。EMSEV等を中心とした研究により、タールのマグマ・熱水システムに関して2つの仮説が提案されている。

一つは熱水溜りが火口の直下に発達しているというもの(Yamaya et al, 2013; Alanis et al, 2013, 2015)、もう一つは火口の東斜面浅部に脱ガスを起こしているマグマが存在するというものである(Kumagai et al, 2014)。

前者は電磁気学的な比抵抗構造探査から、後者は地震波の S 波減衰構造から推定されたものである。これらの結果はタールの次の噴火を予測する上で重要な意味を持つ。前者は火口からの水蒸気噴火の可能性、後者は側面からのマグマ噴火の可能性を示唆するからである。結果として 2020 年 1 月の噴火は火山島中央の火口湖から噴火を開始した。写真1はタールでの調査風景である。



写真1 タールでの調査風景、火山ガスの採取など

キルギスでの電磁気学的な地震誘発現象

地震発生をトリガーするものとして、地下での流体の動き、地球潮汐、地震波の通過、火山噴火活動などの自然現象と、ダム貯水や地中への注水、最近ではシェールオイル採掘に伴う水圧破砕、さらには地下核実験などの要因が知られている。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かった。ソビエト連邦は冷戦時代、もし第三次世界対戦が勃発したら、大気中での核爆発で電離層が消滅したり、海底ケーブルの切断、通信衛星の撃墜などで通信手段が無くなる事を恐れ、地下に大電流を流しモールス信号を送る基礎実験を行っていた。これらの情報はソビエト連邦が崩壊してから西側諸国にもたらされた。この大電流パルス送信のために MHD 発電機 (Magneto-Hydro-Dynamics generator) を開発し、その後この装置は地球物理学的な探査のために転用された (写真 2)。ここでは地下深部の電磁探査に使用されていた MHD 発電機の発する大電力電磁パルスと地震発生の関係について紹介する。なお詳しくは長尾ほか (2006) を参照されたい (https://www.jstage.jst.go.jp/article/zisin/59/1/59_69/_article/-char/ja)。

調査域は、テンジャン山脈を境として南に中国・チベットと接するキルギスである。調査期間は 1983 年～1990 年で、この間に地下に向けて送信した電磁パルス (直流電流を強制的に地下に流した) 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 発電機はキルギスの首都ビシュケクの南方に設置され、距離 4.5 km、接地抵抗 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 sec であった。送信は合計 114 回行われ、これらの送信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 日のタイムウインドウを設けた。その中で一日毎の地震発生数を調べた。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た(スーパーインポーズ解析)。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 倍となった。これらの結果は、電磁パルスが送信後 2~6 日かけてビシュケク周辺の地震の発生数を高めたことを示唆している。ここで送信前 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、送信後の方がおよそ 2×10^{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 桁小さかった。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地下に注入された結果、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結論できる。



写真2 現在はモニュメントとして保存されている MHD 発電機

キルギスでの調査結果だけでは電磁パルスと地震発生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のガーム(Garm)地域でも得られている(図 2)。ここでは北東–南西方向に走る2本の断層が知られていたが、MHD の実験を行ったところ、今度は北西–南東方向に地震が発生しだした。これは既知の断層に直交する共役な新たな断層と推定された。

要約するとキルギスでもタジキスタンでも電流を注入すれば必ずどこでも地震が発生するのではなく、すでに地殻がかなり歪エネルギーを蓄積しており、エネルギー蓄積が限界に近い地域でのみ地震が発生しているようである。このキルギスでの実験結果は、究極的な防災とも言える地震制御にもつながるものと考えている。そのため、筆者はこれまでに6回ほど現地を訪問し、独自の地電位差観測点も2地点設置するなど共同研究を進めている(Papadopoulou, et al. 2018)。

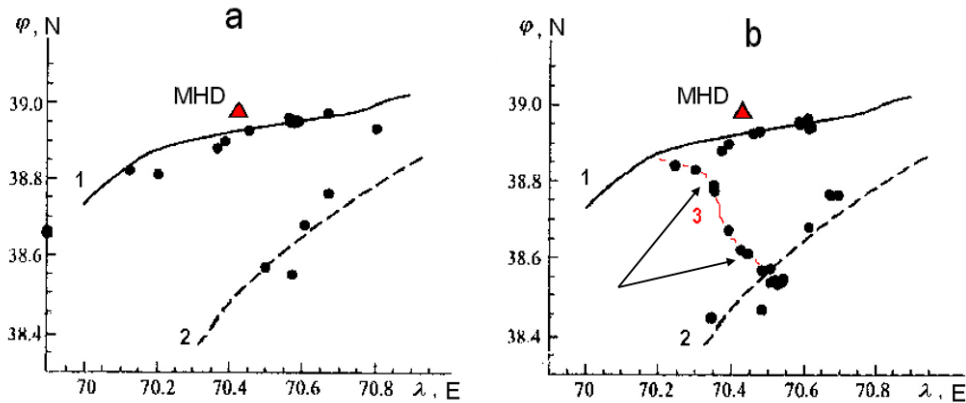


図2 タジキスタン Garm 地区での MHD 実験による潜在断層の発見
a) MHD 実験前の地震活動、b) MHD 実験後に線状に発生した地震[3]

富士山における地磁気観測

火山噴火予知研究において、富士山のような磁性鉱物を多く含む玄武岩質火山(近傍では伊豆大島や三宅島など)では、マグマの上昇による熱消磁という現象が明瞭に観測される事が観測でも理論でも明らかとなっている。富士山のように火道がすでに確立されている火山では、山頂噴火の際には、顕著な山体膨張を起こさずに噴火に至る場合も想定される。現在、富士山では国土地理院が3点、東大地震研が1点を5合目より下で観測を行っているが、5合目以上には地磁気観測点は存在しない(図3)。

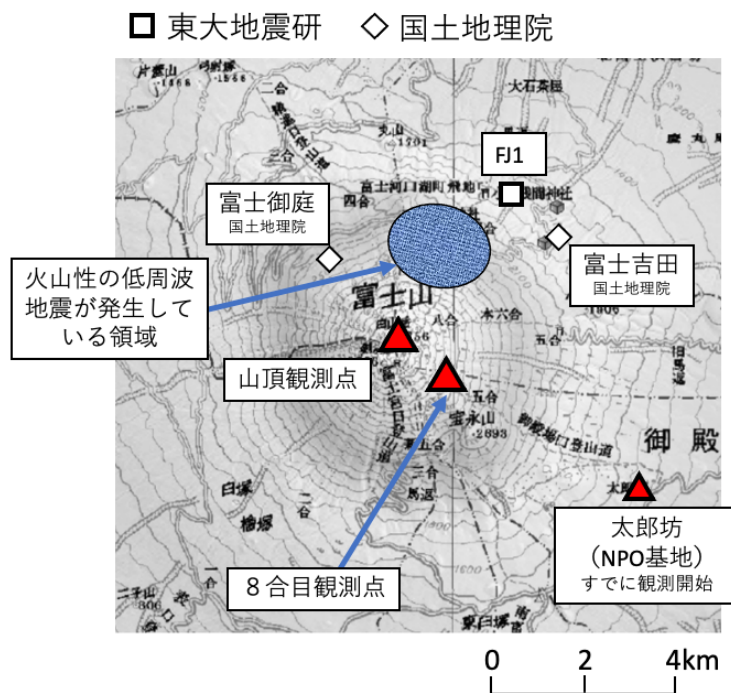


図3 富士山における地磁気観測の現状。今後山頂と8合目に全磁力観測点を配備予定である。

筆者らは、LPWA という長距離・超低消費電力の通信機器を用いて、富士山頂で実証実験を実施した(荒島ほか、2019)。LPWA を用いれば小さなバッテリーだけで富士山頂でも1年間運用できる事をすでに確認し

ている。なお筆者らのフループでは2020年10月より、静岡県側の太郎坊でオーバーハウザー磁力計を用いて全磁力連続観測を開始した(図4)。

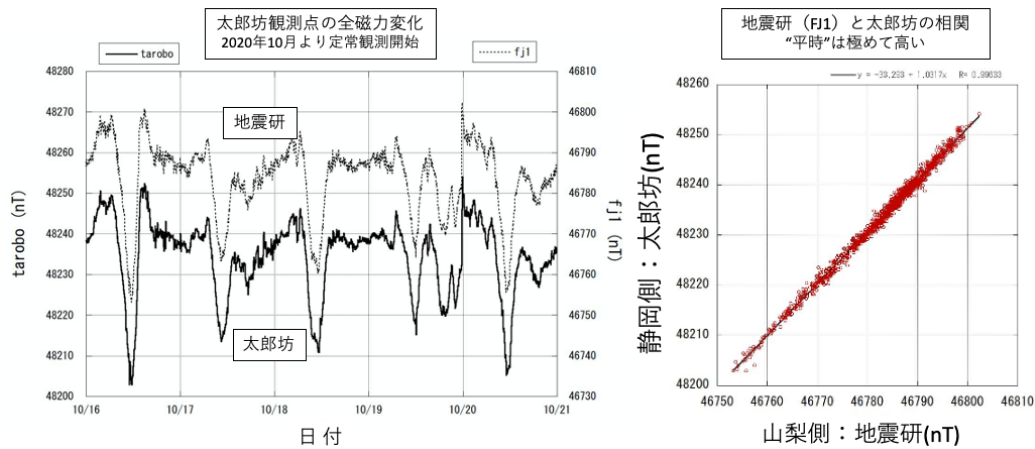


図4 地震研(FJ1)と新設した太郎坊の記録の比較

パターンインフォマティクスを用いた地震発生予測研究

筆者が近年取り組んでいるのは、地震活動静穏化を用いた地震発生予測研究である。大地震の前には地震活動が相対的に低下する現象は古くから指摘されている。地震活動静穏化の指標として、ロシアのソボレフらはRTL法(例えば Sobolev et al, 2002)というアルゴリズムを開発した。また Nagao et al, (2011)ではRTM法と呼ばれるRTL法のLについて改変した新しいアルゴリズムを開発した。以下に式を示す。

$$R(t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) \right] - R_{bk}(t)$$

$$T(t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{t-t_i}{t_0}\right) \right] - T_{bk}(t)$$

$$L(t) = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{r_i}\right) \right] - L_{bk}(t)$$

$$M(t) = \left[\sum_{i=1}^n (M_i) \right] - M_{bk}(t)$$

RTL法、RTM法のRは距離(Region)、Tは時間(Time)、Lは断層長(Length)、Mは地震の規模(Magnitude)の頭文字で、それぞれのパラメータは過去の一定期間のバックグラウンドからの差分で示される。それぞれのパラメータの積の値(RTL法であればR*T*L、RTM法であればR*T*M)が正であれば地震活動活性化、負であれば地震活動静穏化を一般的には意味している。ここで、 R_{bk} 、 T_{bk} 、 L_{bk} 、 M_{bk} はそれぞれのバックグラウンド(線形回帰した際のトレンド)である。

nは解析する地震の数で、 r_i 、 t_i 、 l_i 、 M_i はそれぞれi番目の地震の、解析対象地点までの震源距離、地震発生時刻、震源断層長、マグニチュードを示す。また、 r_0 :特性距離(重みが1/eになる距離)、 r_{max} :計算を打ち切る距離($r_i > r_{max}$ となる地震は解析に使用しない)、 t_0 :特性時間(重みが1/eになる時間)、 t_{max} :計算を打ち切る時間($t_i > t_{max}$ となる地震は解析に使用しない)、 M_{min} :下限マグニチュード($M_i < M_{min}$ となる地震は解析に

使用しないなどのパラメータは可変であり、様々な組み合わせで計算が可能である。RTL 法は L のパラメータに距離 r_1 があることにより解析対象地点周辺の局所的な地震活動の変化(特に活性化)について検出能力が高く、RTM 法は RTL 法よりも地震活動静穏化の検出能力が多くのパラメータ組み合わせによる事例計算の結果、高い事がわかっている (Nagao et al, 2011)。

一例として 2016 年の熊本地震前に観測されていた地震活動静穏化の例を示す(図5、Nanjo et al, 2016)。

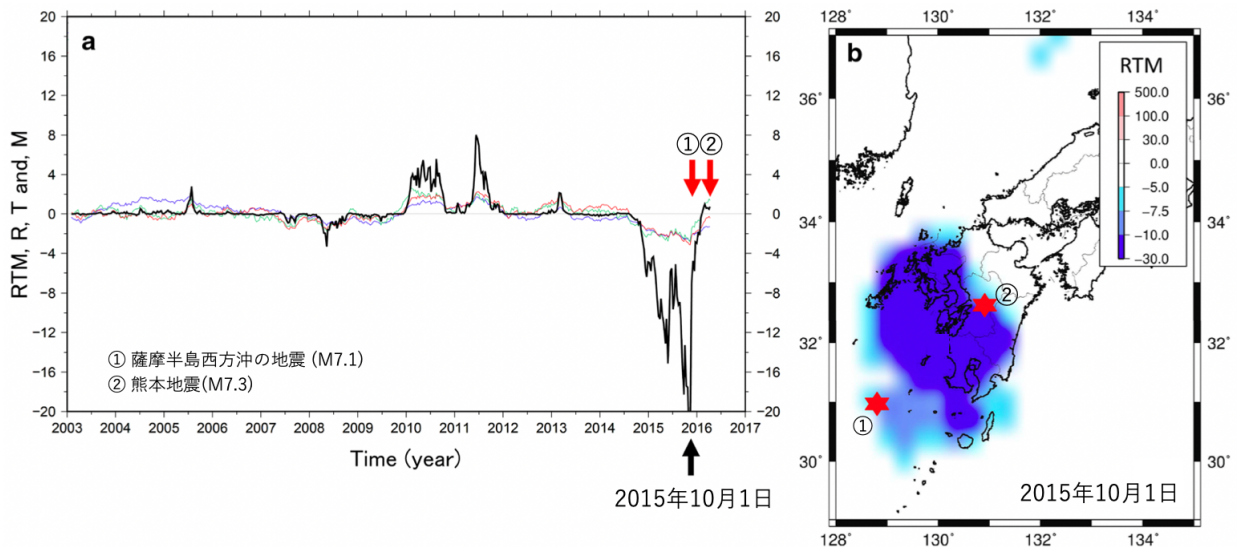


図5 a) RTM の時系列変化。①で薩摩半島西方沖地震が発生、②が熊本地震
b) 静穏化が最も進んでいた 2015 年 10 月の段階の RTM 値の空間分布

熊本地震は地震活動静穏化の観点からは、2015 年 11 月 14 日に発生した薩摩半島西方沖の地震 (M7.1) と対になる地震活動であった可能性が高いと判断しても良いのではないかと考えている。

おわりに

本論では、筆者が関わってきた研究の一部、特に電磁気学的な地震予知研究や火山噴火予知研究について紹介を試みた。さらに近年取り組んでいる地震活動静穏化研究を取り上げた。地震活動静穏化研究はまさに 1995 年の阪神淡路大震災をきっかけとして整備された高感度微小地震観測網(Hi-net)による所が大きい。非常に小さな地震まで観測できるようになったため、地震活動のゆらぎを感度良く検出できるようになったのである。

著者が近年懸念するのは、東日本大震災の後に、科学的根拠の無い民間地震予知会社が複数設立され、さらにメディアが無定見にそれらの予知を取り上げる事である。特に地震学の基本であるゲーテンベルグ・リヒター則で明らかのように、マグニチュードが1小さくなると、およそ10倍の数の地震が発生する。このような基礎知識を持たない一般の方から見ると、民間地震予知会社はマグニチュード5ないし(より多く発生する)それ以下の規模の地震を“うまく予知”していると思ってしまうのだと推察している。地震学会を始めとする一般向けの地震に関する基礎知識の啓発活動が今後さらに重要となる事であろう。

最後に今回の CA 研究会に招待講演としてお声をかけて頂いた小河勉博士と吉村令慧教授に感謝いたします。

引用文献

- Alanis, P. K. B., M. Harada, J. P. Sabit, J. M. Cordon Jr., J. Zlotnicki, Y. Yamaya, A. Takeuchi, Y. Sasai, F. Fauket, T. Nagao and Y. Okada, Geomagnetic and Topographic Survey of the Main Crater Lake, Taal Volcano (Philippines) and an Outlet for a Large Hydrothermal Reservoir related by MT observations, Bull. Inst. Oceanic Res. & Develop., Tokai University, 34, 17-27, 2013.
- Alanis, P. K., Y. Sasai, and T. Nagao, Electromagnetic observations at Taal Volcano, Journal of Disaster Research, vol 10, No 9, 99-105, 2015.
- 荒島謙治, 尾花文一, 青木孝行, 北園真一, 加藤伸雄, 西出葵嘉, 鴨川仁, ELTRES(ソニーのLPWA)の通信実験, NPO 法人富士山測候所を活用する会第13回成果報告会講演予稿集, O-14, 2019.
- Kumagai, H., R. Lacson Jr., Y. Maeda, M. S. Figueroa II, and T. Yamashina, Shallow S wave attenuation and actively degassing magma beneath Taal Volcano, Philippines, Geophys. Res. Lett., 41, doi:10.1002/2014GL061193, 2014
- 長尾年恭, 『地震予知研究の新展開』, 近未来社, 210pp, 2001.
- 長尾年恭, 鴨川仁, 服部克巳, 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, 地震2, Vol. 59, No. 1, 69-85, 2006.
- Nagao, T., A. Takeuchi and K. Nakamura, A new algorithm for the detection of seismic quiescence: introduction of the RTM algorithm, a modified RTL algorithm, Earth Planets Space, 63, 315-324, 2011.
- Nanjo, K. Z., J. Izutsu, Y. Orihara, N. Furuse, S. Togo, H. Nitta, T. Okada, R. Tanaka, M. Kamogawa and T. Nagao, Seismicity prior to the 2016 Kumamoto earthquakes, Earth, Planets and Space, 68:18, DOI 10.1186/s40623-016-0558-2, 2016.
- Sarlis, N., V., E. S. Skordas, M.S. Lazaridou, and P. A. Varotsos, Investigation of seismicity after the initiation of a Seismic Electric Signal activity until the main shock, Proc. Japan. Acad. Ser. B, 84, 331-343, 2008.
- Sarlis, N. V., S., Skordas, P. A. Varotsos, T. Nagao, M. Kamogawa, and S. Uyeda, Spatiotemporal variations of seismicity before major earthquakes in the Japanese area and their relation with the epicentral locations, Proc. National Academy of Science (PNAS), 112 (4), 986-989, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1422893112, 2015.
- Papadopoulou, K., E. Skordas, J. Zlotnicki, T. Nagao and A. Rybin, Study of Geo-Electric Data Collected by the Joint EMSEV-Bishkek RS-RAS Cooperation: Possible Earthquake Precursors, Entropy, 20(8), 614; https://doi.org/10.3390/e20080614, 2018.
- Sobolev, G., Q. Huang and T. Nagao, 2002, Phases of earthquake's preparation and by chance test of seismic quiescence anomaly, J. Geodynamics, 33, 425-432, 2002.
- Uyeda, S., In defence of VAN's earthquake Prediction, EOS, Transcation, American Geophysical Union, 81, 1, pages 3,6, 2000.
- Varotsos, P. and K. Alexopoulos, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I, Tectonophysics, 110, 73-98, 1984.
- バロウソス, P., K. エフタグシアス, M. ラザリドウ, G. アントノプーロス, J. マクリス, VAN地震予知法 その基礎・方法・現状, 地震ジャーナル, 17, 18-26, 1994.
- Yamaya, Y., P.K.B. Alanis, A. Takeuchi, J.M. Cordon Jr., T. Mogi, T. Hshimoto, Y. Sasai, and T. Nagao, A large hydrothermal reservoir beneath Taal Volcano (Philippines) revealed by magnetotelluric resistivity survey: 2D resistivity modeling, Bulletin of Volcanology, 75 (7), 729, doi:10.1007/s00445-013-0729-y, 2013.