

東海大学方式 VLF 帯パルス電磁波観測装置の開発 —地震先行現象の存在証明にむけて—

長尾 年恭¹⁾*・鴨川 仁²⁾・井筒 潤³⁾・馬場 久紀⁴⁾・成嶋 友祐²⁾・
高村 直也⁵⁾・櫻田 哲生⁴⁾・上原 宏⁶⁾

First report of the electromagnetic wave detection system in VLF range, Tokai University — Proven for the existence of preseismic phenomena —

Toshiyasu Nagao¹⁾*, Masashi Kamogawa²⁾, Jun Izutsu³⁾, Hisatoshi Baba⁴⁾,
Yusuke Narushima²⁾, Naoya Takamura⁵⁾, Tetsuo Sakurada⁴⁾, and Hiroshi Uehara⁶⁾

Abstract

It has been well known that the preseismic VLF pulse-like electromagnetic signals sometimes increases a few days before the sizable earthquakes especially in-land earthquakes. Almost two decades ago, Tokai University group developed a digital recording system and published remarkable results. However, at the time, due to the limitation of personal computer's data storage and CPU power, they quitted the observation. Therefore, we would like to re-start the research by using current technology. Fortunately, What we call "Japanese National Earthquake Prediction Project" by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) decided to support our proposal. This is a preliminary report of the development of the new observation system. The system has a 12 bits A/D converter and 100MHz sampling capability. We can determine locations of signal source not only direction finding method but also time of arrival (TOA) method.

1) 東海大学海洋研究所地震予知研究センター 〒424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1

Earthquake Prediction Research Center, Institute of Oceanic Research and Development, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu, Shizuoka 424-8610, Japan.

2) 東京学芸大学教育学部物理科学分野 〒184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1

Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikitamachi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan.

3) 中部大学国際 GIS センター 〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200

International Digital Earth Applied Science Research Center, Chubu University,
1200 Matsumoto-cho, Kasugai, Aichi 487-8501, JAPAN

4) 東海大学海洋学部 〒424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1

School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu, Shizuoka 424-8610, Japan

5) NT デザインシステム(株) 〒206-0804 稲城市百村 149-206

149-206 Hyakumura, Inagi 206-0804, Japan

6) 松見科学計測(株) 〒101-0032 千代田区岩本町 2-7-11

Matsumi Kagaku Keisoku Co. Ltd., 2-7-11, Iwamoto-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0032, Japan

* Corresponding author : Toshiyasu NAGAO (nagao@scc.u-tokai.ac.jp)

(2016 年 2 月 22 日受付・受理)

はじめに

科学技術に関するアンケート調査では地震予知は実現してほしい科学技術として常に上位となっている。ところが地震学界全体の雰囲気としては、東日本大震災や阪神大震災を経験して、非常に悲観的に考える研究者が多いのも事実である。特に最も関係が深い1日前とか、一週間前といった短期・直前予知研究が実はほとんど国レベルでは行われていない事を国民が知らない事が問題なのである(たとえば上田, 2011)。

これまでも各種の電磁気学的な地震先行現象が報告されているが(たとえば長尾, 2001, 長尾ほか, 2006), 特に興味深い伝承として地震の前に何らかの雑音が入るという話が残っている。1945年の三河地震では、その頃は第二次世界大戦中であり、空襲警報を聞くためにラジオの電源は常に入った状態であり、「余震の前にはラジオに雑音が入るので前もってわかった」との伝聞が残っている。その後、先駆的な研究が京都大学の尾池らによって行われた(たとえば尾池・小川, 1982)。また1995年の兵庫県南部地震の前にはそれまで観測された事が無いほどのVLF帯パルスが観測されたとの報告もある(Izutsu, 2007)元東海地震判定会会長の浅田敏らは東海大学開発技術研究所在職中の1990年代、VLF帯パルス電磁波観測装置を作成し(川副ほか, 1998, 1999), 非常に興味深い成果を公表した(Asada et al, 2001)。浅田らの結論は、地震に先行する電磁波は、

- 1: 雷放電とは異なったスペクトルを示す,
 - 2: 雷放電より極めて小さい,
 - 3: 地震発生5日ほど前から観測され、2日ほど前にピークを迎える,
 - 4: 先行的な電磁波が少なくなってから地震が発生する,
 - 5: 先行的な電磁波は直線偏波している,
 - 6: 陸域で発生した地震の場合、先行的な電磁波は震央付近から到来している,
- 可能性が高いと述べている。

このような経緯もあり、東海大学海洋研究所地震予知研究センターでは、いわゆる国の地震予知研究計画にVLF帯でのパルス電磁波の観測を現在のテ

クノロジーで再挑戦したいというプロポーザルを提出し、2014年度から開始された、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」でその計画が採択され、2018年度までの5ヶ年計画の中で正式に実施する事が承認された。

試作機の作成

1) センサー

センサーは浅田らが用いたコイルセンサーを忠実に再現した。これは、当時誰も地震に先行する電磁波の性質がわからなかった段階で、最も有望な成果が出ている事から、まずは同じ周波数特性を持つコイルセンサーで研究を再開すべきと考えたためである。ここで問題となったのが、当時は入手が容易であった高透磁率のパーマロイ芯材(フェライトコア)が、現代では極めて入手しづらくなっていた事である。センサーは感度を増大させるフェライトコアを内蔵したボビンに、0.6ΦPEW線を600回巻いた(図1, 2, 3)。ちなみにコイルセンサーのインダクタンスは25mHとなっている。またアンテナから最短でプリアンプに接続され、低インピーダンスで外部処理装置に接続できるようにした。浅田らは

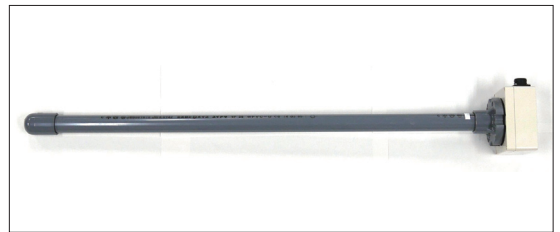


図1 センサー外観の写真

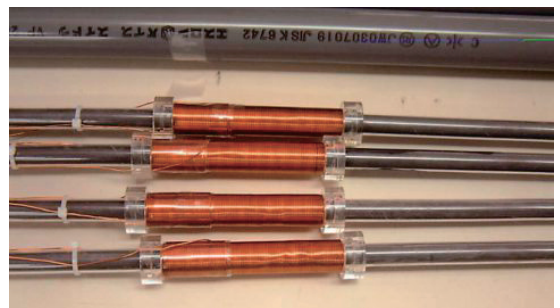


図2 センサー内部の写真

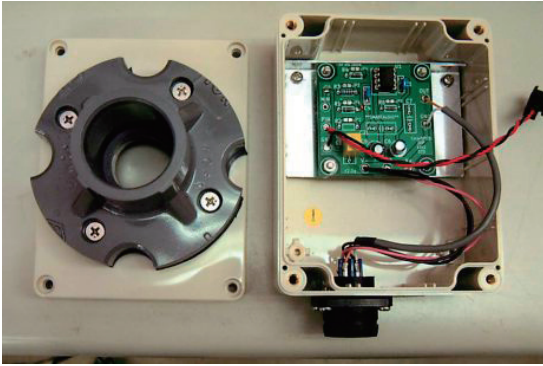


図3 センサー部のプリアンプ基盤とコネクタ

プリアンプの電源供給に乾電池を用いていたが、今回は屋内の計測ユニットから給電する事とした。この結果、Asada らが作成したアンテナとほぼ同様の周波数特性を持つアンテナが再現された(図4, 図5)。

2) A/D コンバータおよびデータ収録システム

Asada et al. (2001) で使用した A/D コンバータは、12 ビット、2 チャンネルで 1 MHz でのサンプリングが可能であった。今回、A/D コンバータとしていくつかの候補が上がったが、最終的に特殊電子回路(株)の 12 ビット、6 チャンネル、最大 100 MHz サンプリングが可能なるものを採用した (Cosmo-Z)。この A/D コンバータの本来の使用目的はガンマ線・X 線・ミューオン等の計測用に開発されたものであったが、このスペックとしては、コストパフォーマンスに優れている事と技術的な質問にもすみやかな対応がみられた事から採用を決定した。

データ収録システムは、Linux で制御する事とした。今回開発したのは、A/D コンバータからのデータ収録システムである。ある閾値を超えたシグナルが入力した場合、波形を記録しておき、トリガ時刻前のデータから波形を収録できるシステムを構築した (プリトリガシステム)。また浅田らは結果的に地震に先行すると考えられた電磁波は直線偏波して

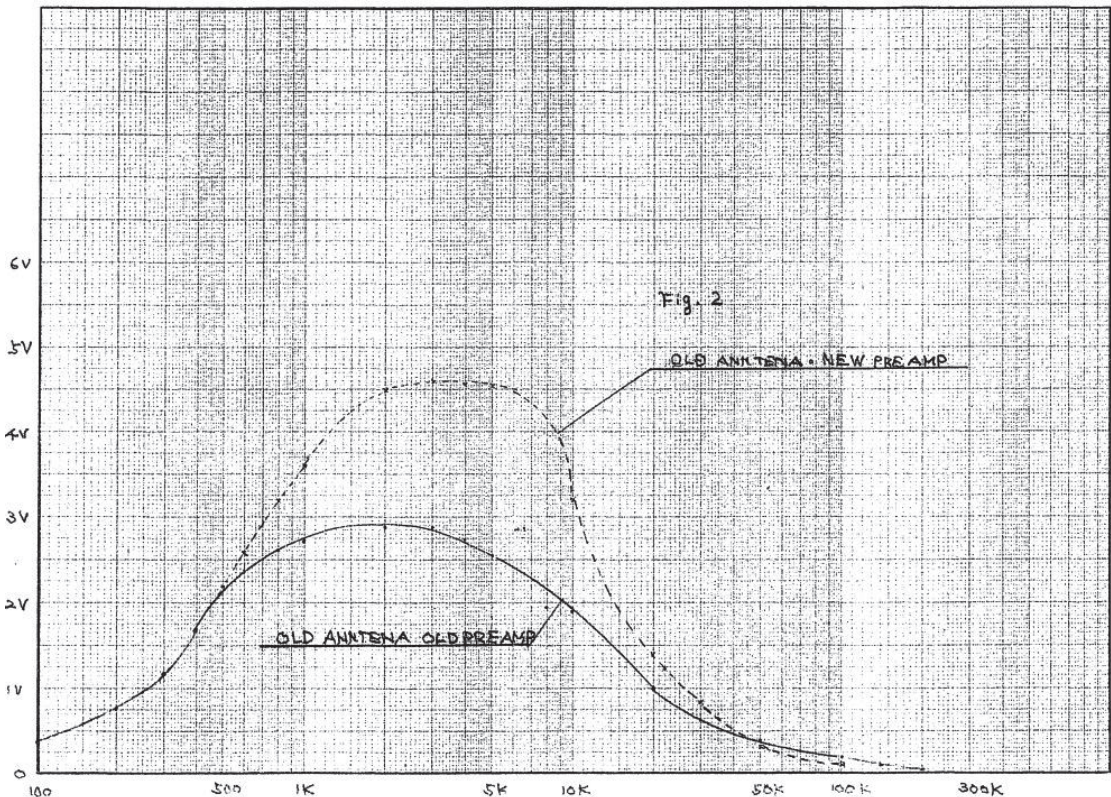


図4 旧アンテナと旧アンプによる特性と、アンプを今回作成したものに変更した特性

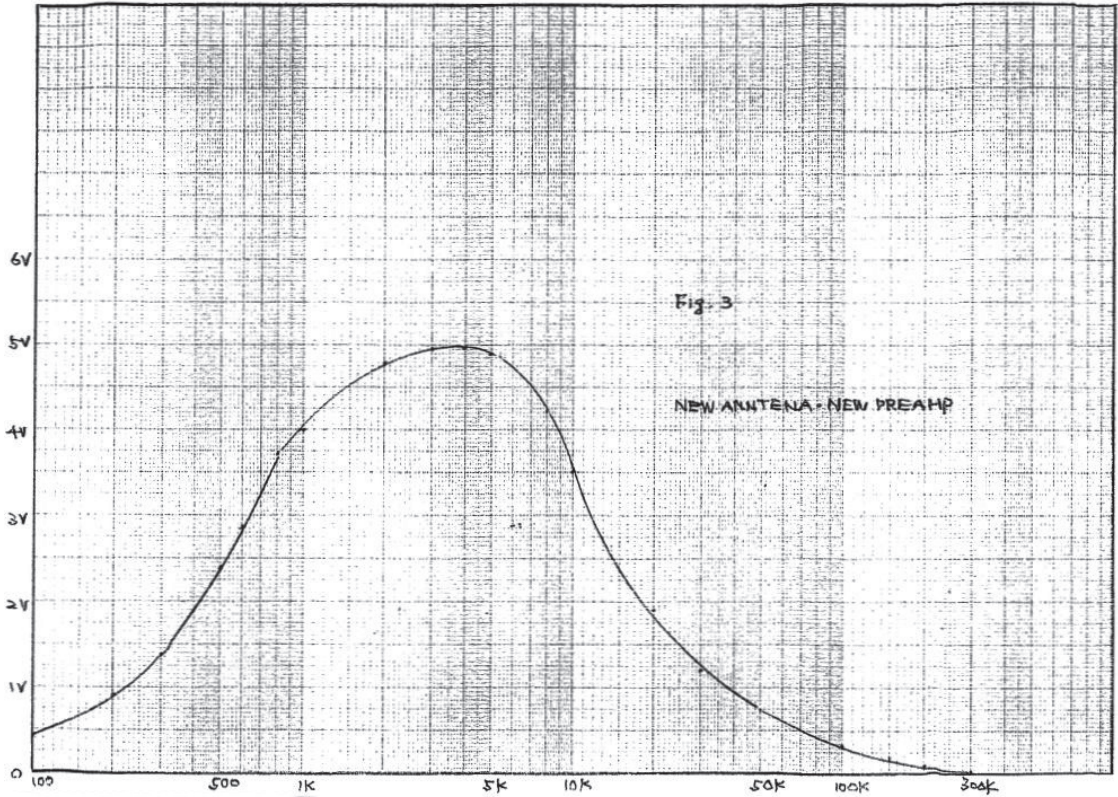


図5 新アンテナと新アンプによる特性. 周波数特性もほぼ再現されている.

いると結論しているため、ゴニオメーター方式で方位探査が可能であった。しかし、磁場観測では、ここ20年の電磁環境の悪化も考えられた事から、方位探査だけでなく、電磁波の到達時間差 (Time of arrival 解析: TOA) を用いて位置を決定できるシステムとした。このために100 MHzでのサンプリングが可能なシステムとした。ちなみに100 MHzサンプリング時の理論的な空間分解能 (1 LSB = 10^{-8} Hz) は3 m となり、地震学と同様な波源決定も可能と考えた。このため、時計の精度を保つため、GPSによる時刻同期システムとし、最大でも10 ナノ秒、ほとんどの場合で2-3 ナノ秒の精度となっている。

まず2014年度に試作機を2台作成し、予備的な観測を行った後、2015年5月から本観測を開始した。1号機を東京学芸大学の屋上に設置し、次に東海大学海洋学部8号館の屋上に2号機を設置した(図6, 図7)。また2015年11月からは金沢大学の協力を得て、金沢大学角間キャンパス屋上に3号機



図6 清水校舎 8号館屋上のセンサー.

を設置した。表1に3観測点の情報をまとめた。

1号機を東京学芸大学に設置した段階で、東西および南北センサーに頻繁に同じ大きさのパルス状ノ

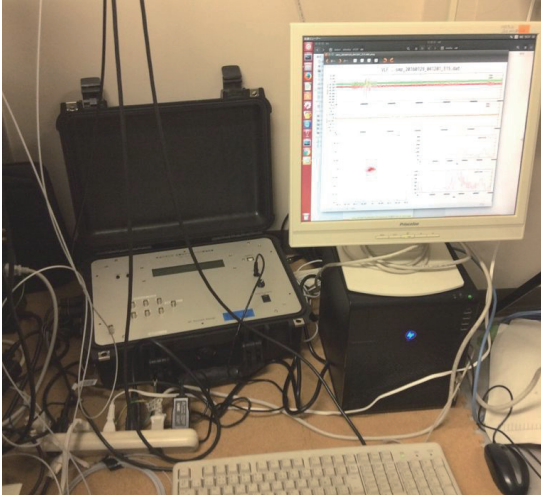


図7 計測装置の室内部。データはCentOSのLinuxマシンに保存している。

イズが記録される事が判明した。アンテナの周波数特性を考慮すると、自然界のシグナルではありえず、今回開発した計測システムのプリアンプや各種回路の非線形部分からのノイズと推察された。一般に大学屋上には各種のセンサーや、実験室で大電力を用いる事も多く、このパルス状ノイズの除去のために、ソフトウェア的にA/Dコンバータのフロントエンドプロセッサで移動平均措置により、このパルスノイズは完全に除去できる事が判明した。具体的には1000個のデータ(単純化して言えば100kHzのローパスフィルタと等価と表現できる)を平均したものが閾値を超えた時にトリガがかかるようなシステムとした。なお個数はソフトウェアで任意の個数に変更可能となっている。

測定がうまく行っているかの確認のため、毎時のデータ数を1日に1回メールで自動的に配信するとともに、大量のデータをハンドリングするため、サーバのハードディスクの容量(使用状況)も毎日自動的に通知されるようになっている。

表1 3観測点の緯度・経度、センサー方位など

学芸大(KGN)	緯度	経度	標高(m)	備考
2015/04/17~	35.705297	139.490519	73.1	
Ch 1	東西向き (先端東向き)		南北方向からの電磁波	先端E8° S方向 (98° 方向)
Ch 2	南北向き (先端北向き)		東西方向からの電磁波	先端N8° E方向 (8° 方向)
2016/01/05~	14時			
Ch 1	南北向き (先端南向き)		東西方向からの電磁波	先端S8° W方向 (188° 方向)
Ch 2	東西向き (先端東向き)		南北方向からの電磁波	先端E8° S方向 (98° 方向)
東海大(SMZ)	緯度	経度	標高(m)	
	34.988	138.5163	8.9	
2015/7/2~				
Ch 1	南北向き (先端北向き)		東西方向からの電磁波	先端N10° W方向 (先端350° 方向)
Ch 2				
Ch 3	東西向き (先端東向き)		南北方向からの電磁波	先端E10° N方向 (先端80° 方向)
金沢大(KNZ)	緯度	経度	標高(m)	
	36.544053	136.705369	114.9	
2015/10/14~				
Ch 1	南北向き (先端北向き)		東西方向からの電磁波	先端N0° 方向 (0° 方向)
Ch 2	東西向き (先端東向き)		南北方向からの電磁波	先端E0° 方向 (90° 方向)
2015/11/5~				
Ch 1	東西向き (先端東向き)		南北方向からの電磁波	先端E0° 方向 (90° 方向)
Ch 2	南北向き (先端北向き)		東西方向からの電磁波	先端N0° 方向 (0° 方向)

得られた波形

浅田らはトリガ前 0.5 mS, トリガ後 1.5 mS の合計 2 mS の記録を行っていた。今回の観測では、波形の性質をまず確認するため、トリガ前 1 mS, トリガ後 9 mS の合計 10 mS で当面記録する事とした。テスト観測の結果、22.2 MHz のえびの高原から送信されている自衛隊通信用の 22.2 MHz の電波も正確に観測されている事が確認され、このような既存の電波源からの電波を使って、システムの経年変化等も監視できると考えている (図 8)。

浅田らは、(ゴニオメーター方式で方位探査が可能な) 直線偏波のものだけを最終的に残しており、楕円偏波ないし円偏波の波形がどの程度の割合であったか、詳細な記録は残されておらず不明である。しかしこれまでの観測の結果、直線偏波とみなせる電磁波はかなり少なく、換言すれば観測されたかなりの電磁波は楕円偏波ないし円偏波をしてい

た。そのため、現時点では、ゴニオメーター方式での電波源位置推定のためのプログラムより、電磁波到達時間差を利用した推定法 (Time of Arrival, TOA) の解析を優先して進める事とした。

TOA 解析

本電波源位置推定が可能なのは、まずは 100 MHz というサンプリングレートに依存する所が大きい。これは理論的な 1 LSB (least significant bit) の空間分解能が 3 m となる事を意味する。現時点では TOA 法はトリガ時刻を使って波源の位置を決定しているが (図 9)、特に小さな雷の場合はトリガ時刻 (換言すればある閾値を超えた時刻) に差がある場合があり、今後は波形の相互相関処理等を用いて波源を決定するソフトウェアの開発や、非常に短時間のパルス状のノイズを除去するデジタルフィルタ等の開発を行っていく予定である。

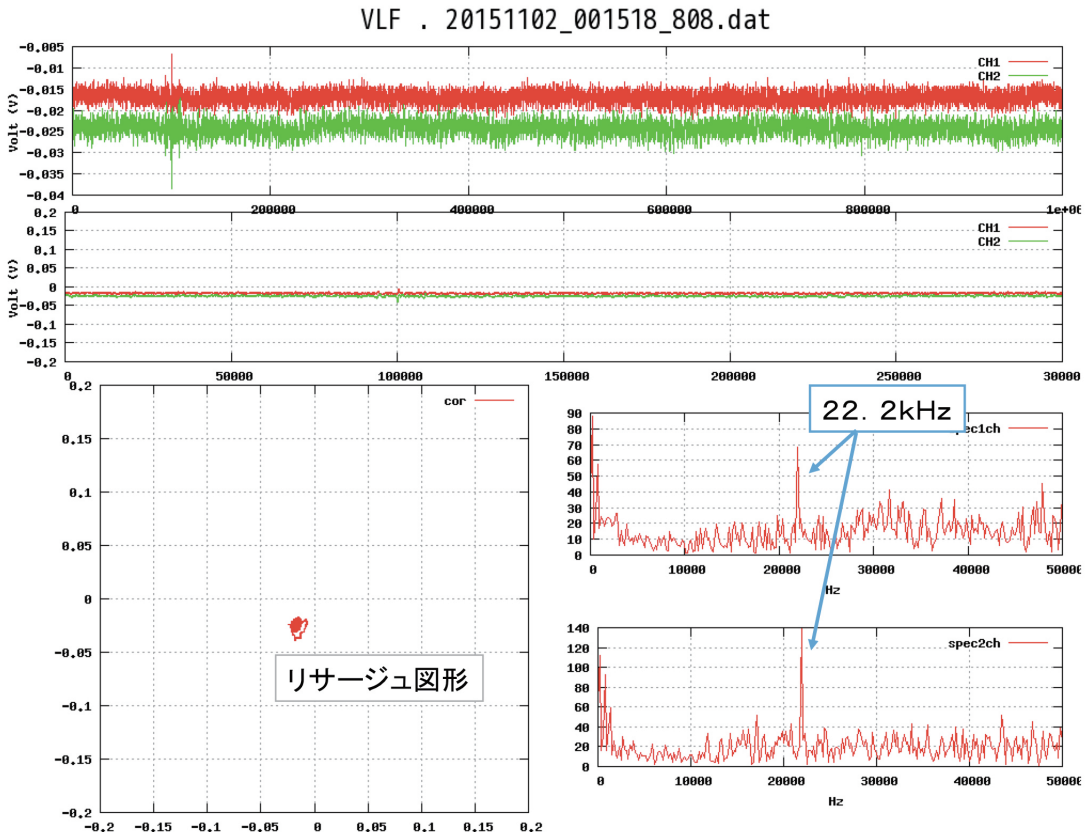


図 8 えびのからの 22.2 MHz が観測されている例。

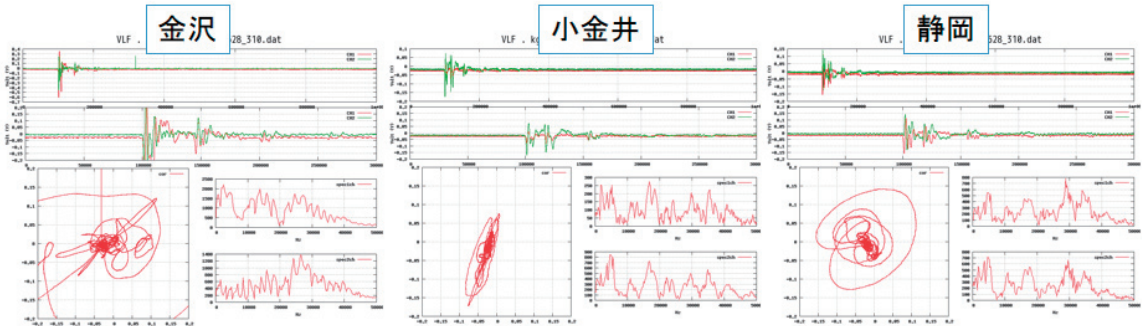


図9 VLF帯パルス観測の3観測点で同時に観測された雷の波形記録(2015年12月18日23時26分28秒)。上2列に時系列データ(上の上:横軸が10msかつ可変レンジ,上の下:横軸が3msで固定レンジで表示)と左下側には東西-南北方向のリサージュ図形(Particle Motion Diagram),右下側には2チャンネルのパワースペクトルとなっている。この図が1イベントにつき1枚自動的に作成される。

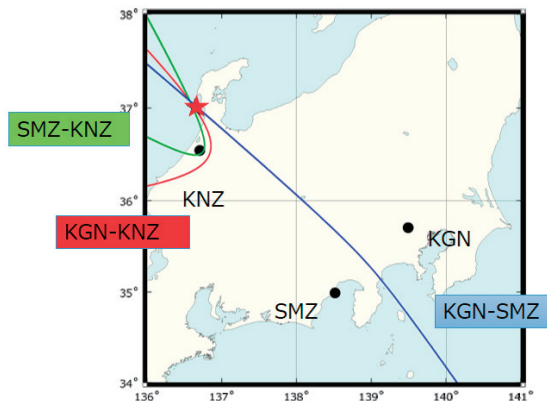


図10 VLF帯パルス観測データを用いたTime of Arrival (TOA)法による落雷位置同定の例。3本の曲線は、2地点からの距離の差が等しくなる点を結んだ双曲線。この場合3本の曲線が1点で交わり、地震学で言えば初動により震源を推定するのと等価な方法で波源を決定した。また図中の星印は、NTTドコモ社から別途予算で購入した同時刻の落雷位置を示しており、両者は誤差の範囲で一致している事が確認された。

今後の課題

観測はまだ始まったばかりであり、まずは雷を用いて機器の性能チェックを行っている段階である。さらに1990年代と違い、携帯電話の普及など電磁環境は悪化している可能性も存在する。また直線偏波として観測される記録の割合は小さく、TOA法にしても、東西・南北成分の波形を合成した波形をTOA計算に用いるほうが良いのか、さらには電磁波到来方向を決定するためのポインティングベクトルの導出のために電場観測をできるだけ早く開始する事を考えている。また、観測がうまく行った場

合、このVLF帯パルス電磁波観測装置は数日前といった直前予知に威力を発揮すると考えられるが、総合的には中長期の先行現象を重ね合わせて予測の精度向上を図るべきと考えており、このあたりのコンセプトは織原・長尾(2015)の中でも触れており、興味のある方はぜひ一読されたい。

謝辞

本装置の開発は平成27年度から開始された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の全面的な支援と、東海大学海洋研究所・個別プロ

ジェクト研究「駿河湾周辺・東海地方における地震・火山・津波災害軽減のための総合的研究」の一部支援を受けて行われた。

引用文献

- Asada, T., Baba, H., Kawazoe, M., and Sugiura, M., An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes, *Earth Planets Space*, 53, 55–62, 2001.
- Izutsu, J., Influence of Lightning on the Observation of Seismic Electromagnetic Wave Anomalies, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, Vol. 18, No. 5, 923–950, 2007.
- 川副護, 馬場久紀, 浅田敏, 地震に関連して観測される VLF 帯電磁放射の基礎研究, *東海大学紀要海洋学部*, 45, 181–195, 1998.
- 川副護, 馬場久紀, 浅田敏, 地震に関連して観測される VLF 帯電磁放射の基礎的研究 — 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, 1999.
- 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*, 59, 69–85, 2006.
- 尾池和夫・小川俊雄, 地震に伴う電磁放射の観測, *京都大学防災研究所年報*, 25B-1, 89–100, 1982.
- 織原義明・長尾年恭, 『地震前兆現象を科学する』, 祥伝社, 226pp, 2015.
- 上田誠也, どうする! 日本の地震予知, *中央公論*, 2011年4月号 (ウェブ版は http://www.chuokoron.jp/2011/03/post_67.html)