

# 地電位観測のあゆみ

山田 守

教育・研究技術支援室 計測・制御技術系 地震火山・防災研究センター

## 概要

むかしからナマズが騒ぐと地震がおこると言われるが、この異常行動を地震予知に役立てようといろいろな機関で研究調査が行われた。確かに異常行動はかなりの確率で確認されたが、何時、何処でどれくらいの地震が起こるかという予知には無理があつた。しかし、動物の異常行動を起こす理由は地中に流れる電流によるものであると言われている。これらを調べることにより地震予知あるいは地震との関係が見いだせないものだろうかと思ひ立ったのが、地電位観測の始まりである。

観測方法は大地の2点間の電位差（地電位差あるいは自然電位とも言う）、すなわち、長い電線（観測ライン）の両端を地中に埋め込んで電極を設置し、それぞれの地中電位を測定しその差を求める。これを東西、南北に100m前後の長さに設置するのが一般的である。地中に電極を埋め込むといういたって単純な話ではあるが、電極に何を使用するか、観測点の場所を何処に選ぶかで観測精度は決まってしまうため、観測は意外に難しいものである。

## 1 電極

観測を始めた頃は、素焼きの瓶に銅板と硫酸銅溶液を入れた電極を使用し、伊豆東方沖地震を観測したように記憶している。この電極は中の硫酸銅溶液が素焼きの瓶を通して地中に1ヶ月程で拡散してしまい観測不能になる。手間暇がかり観測には不向きで新しい電極を捜していた時、ナショナルカーボンアース棒を紹介され使用するようになった。

図1は構造を、図2は接地抵抗の経年変化を示している。同アース棒はその後、いろいろなところで使用するようになり、後で図8に示す、掛川で設置後から最近まで20年以上接地抵抗を測っているが、図2と同様大変安定している。

また、短期間の観測には鉛の筒、長さ20-30cmを電気分解し、塩化鉛にした物を使用している。掛川を始め縦穴の観測点は塩ビ製のパイプで出来ており、その周りに鉛板を帯状に巻いて使用している。

最近では、鉛でなくチタンの板に電導コンクリートを巻いた電極を作り使用している所もある。

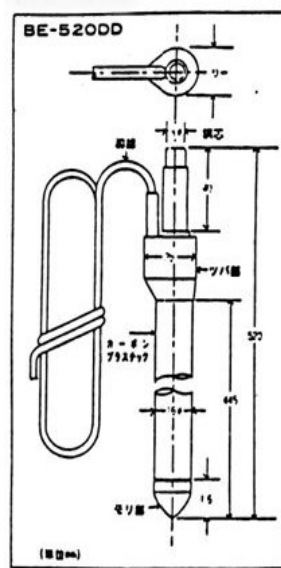


図1. カーボンアース棒電極の構造図

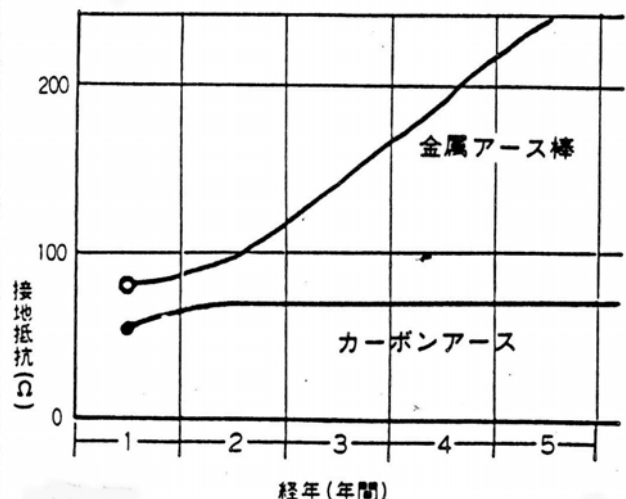


図2. カーボンアース棒と金属アース棒の接地抵抗の経年変化の比較図

## 2 観測

### 2.1 初期の観測

本格的観測はカーボンアース棒を御岳山の周りや、伊豆半島の地殻変動観測点の大仁（大仁金山の坑道内）、地震観測点の戸田（採石場跡地）、南伊豆（森の岩場）に図3の方向に電極を打ち込み観測した。3観測点ともテレメータ装置が有ったが、データ数の関係で地電位データまでは送れなかった。その為、テレメータの空きビットを用いてゆっくり送る装置を作り、1データ20分程掛けて送って記録していた。その後、パーソナルコンピュータを用い1時間に1回のサンプリングで3ヶ月間記録できる記録計を作り最近まで観測していた。これらの記録からは伊東の群発地震の時に変化したことが有るが、地震時以外にも類似の動きもあり確定できなかつた。御岳など他の観測点も同様に地震と地電位変化の関係を確認できる記録は取れなかつた。



図3. 伊豆の観測点及び電極配置図

### 2.2 最近の観測（高時間分解能観測）

1998年8月7日14時頃から始まった長野・岐阜県境の群発地震は、16日3時31分に活動中最大となるM5.4が発生し、上高地で震度4であつた。この地域には焼岳地震観測点が設置されており、地震観測の他、地中垂直地電位観測を行っている。観測点は群発地震の震源域から約10Km西の焼岳山麓中尾地区にあり、電極は図4のように配置されている。現地地で1時間に3cm送りの連続記録を取っており、その記録で有感地震時にカク状の変化が見られた。（図5の下の図）

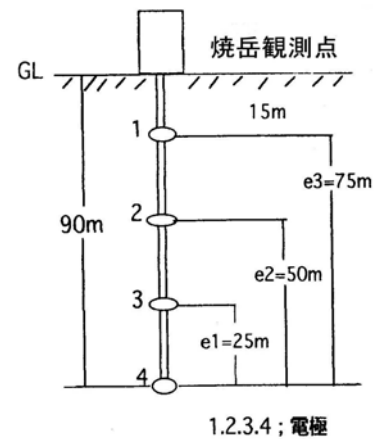


図4. 焼岳観測点の電極配置図

この地震発生に伴う変化を時間分解能を上げて解析するため、衛星テレメータの短周期地震観測用チャンネル（1秒100サンプリング）を利用して地電位観測を試してみた。この観測は群発地震発生1ヶ月後から始められたが、その後1年間で地震発生に伴う地電位変化が50例以上観測された。上高地で震度1、M2.7程度以上の地震は必ず記録された。また上高地が無感でもM2.5前後の場合には半数程度は記録された。

この新たな高時間分解能観測の結果、地震に伴って地震波形と同様な地電位変化を観測することができた。図5の上の図に地震波形と、ともに地電位変化出力例を示す。地震波形は固有周期1秒の地震計によるものである。この例で示されているように地震波に比較して、

- (1) 変化が地震波形に類似している。
- (2) P、Sに対応して振幅の大きい地電位変化が生じている。
- (3) 振幅は地震の規模にほぼ比例している。
- (4) 変化の振幅はeの長さにはほぼ比例している。

以上のような特徴をもっていた。

名古屋大学では図6のように、地震・地殻変動観測点で縦穴を持っており、新野、水見色、板取、宇賀溪で焼岳と同様な高時間分解能垂直地電位観測

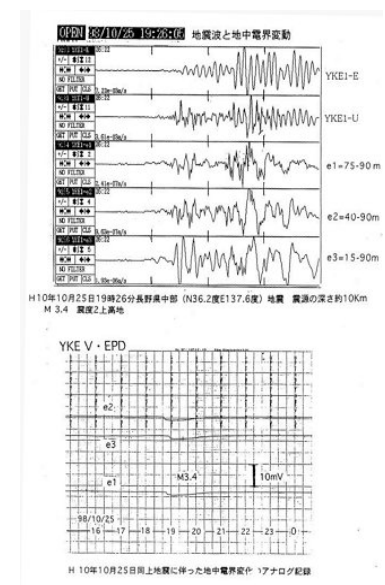


図5. 地震と地電位変化

を実施し衛星テレメータを介してセンターで連続データ収録を行なった。

例として2000年を見ると、大きな地震が多数発生し、それらに伴う地電位変化が観測されている。主なものをあげると、6月3日千葉県北東部 M5.8 深さ約 50 Km、6月5日福井県嶺南地方 M4.7 極浅発、6月7日石川県西方沖 M5.8 深さ 10 Km、8月23日静岡県東部 M4.0 深さ約 20 Km、10月6日鳥取県西部 M7.1 深さ約 10 Km、10月11日静岡県中部 M3.9 深さ約 30 Km、10月31日三重県南部 M5.5 深さ約 40 Km、7月1日新島・神津島近海 M6.4 深さ約 10 Km ほか、三宅島近海地震を含めこの付近の地震を約 30 例、その他多数を観測した。

新野で観測された新島・神津島地震の記録を図7に示す。

これらの例で示される電位差出力について e 3 (図4参照) で調べると、鳥取県西部地震で最大約  $1.2 \mu V/m$ 、新島・神津島地震で最大約  $0.4 \mu V/m$  ほどになる。

次に各観測点での通常時のノイズレベルについて測定した結果を表1に示す。新野のノイズレベルが低く観測に適しているのに反し、宇賀溪のノイズレベルは高い。このノイズは時間とともに変化し、焼岳は最近になって高いノイズレベルを示し、現在では群発地震発生時と同等な観測が困難になっている。以上の結果から、垂直地電位観測では次の事項が明らかになった。

- (1) 有感地震に同期した地電位変化が観測される。
- (2) 水平方向地電界より垂直方向地電界が強い。
- (3) サンプルレートを大きくすることにより地震動に同期した電界変動を観測することが出来その変動は地震波形に極めて似ている

### 2.3 掛川地電位変化の立体Aレー観測

観測点は掛川駅から北へ約 6Km 離れた所に位置し、掛川市上西郷の旧三笠中学跡で、現在は掛川市教育委員会が校舎を使用している。その校庭内の地殻変動観測点に設置された3本の縦穴を利用、地電位変化の立体Aレー観測を実施している。

また地電位変化と比較するため、CMG3 長周期地震計を新たに設置した、これは地電位変化とより合致する長周期成分を観測するためである。

図8に電極配置図と電極位置を示す。この地方の有感地震は少ないが、2004年9月5日19時の紀伊半島沖 M6.8、23時の東海道沖 M7.3 は共に掛川では震度3を観測し、地電位変化もわずかではあるが観測された。その他、7月27日岐阜県美濃中部 M4.6、2005年1月9日愛知県西部 M4.4、12月26日スマトラ島沖地震でもわずかに観測されている。これらの結果からはまだ立体Aレー観測の本来の成果は無いが、正常に観測されていることを示している。紀伊半島沖地震時の地電位変化3次元図(60秒間)を図9に示す。まだ考察は必要だが地電位変化の方向が立体的に見えるようになった。

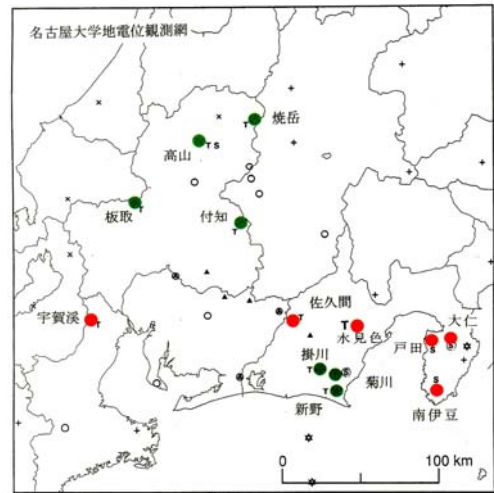


図6. (緑) 地電位観測中の観測点 (赤) は観測が終了した観測点

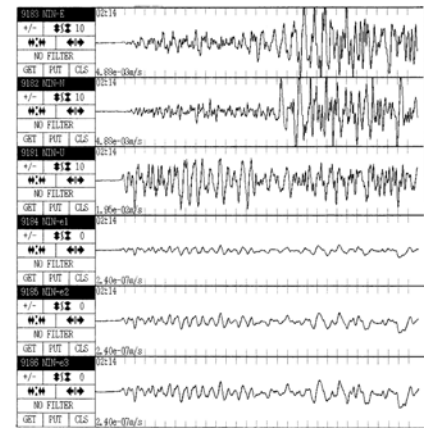


図7. 新島・神津島地震記録

表1. 各観測点のノイズレベル ( $\mu V/m$ )

|     | e 1 (25m) | e 1 (50m) | e 1 (75m) |
|-----|-----------|-----------|-----------|
| 新野  | 0.002     | 0.002     | 0.002     |
| 水見色 | 0.03      | 0.03      | 0.03      |
| 板取  | 0.01      | 0.02      | 0.04      |
| 宇賀溪 | 0.6       | 0.08      | 0.3       |
| 焼岳  | 0.02      | 0.04      | 0.1       |

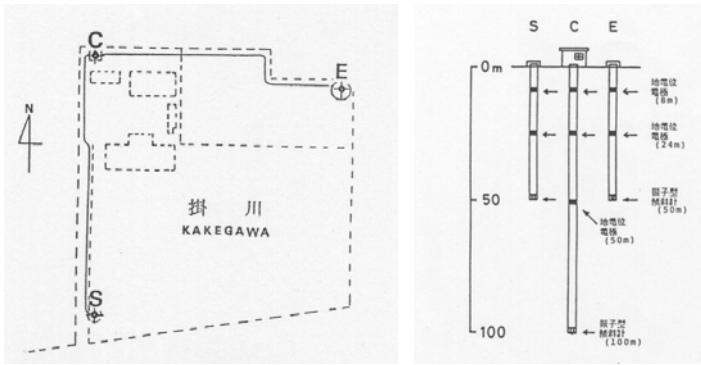


図 8. 掛川観測点の電極配置と電極位置

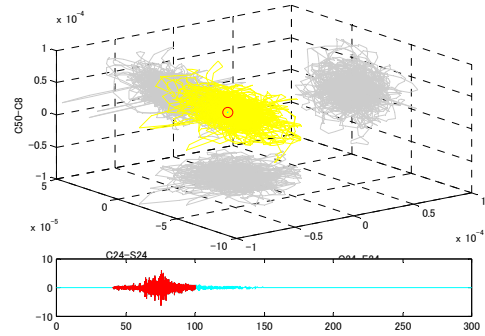


図 9. 紀伊半島沖地震 M6.8  
掛川震度 3 の 3 次元図

### 3 人工地震（発破）に伴う地電位観測

陸域地下構造コンテニア研究の一環として、茂住・祐延断層、跡津川断層で行われた人工地震実験の際に地電位観測を行った。人工地震の日時は 2000 年 10 月 24 日 22 時 02 分 (S1、12.5 Kg)、12 分 (S3、100 Kg)、22 分 (S2、12.5 Kg)、32 分 (S4、25 Kg) で、その位置及び観測点を図 10 に示す。地電位観測は、電極の安定性を考慮して 10 月 12 日から 24 日にかけて観測した。電極は図 10 に示すように、ほぼ N-S (50 m)、E-W (35 m) の両方向に配置し、各電極は最上部が地中 50 cm ほどになるよう突き棒で穴をあけた上で塩化鉛電極 (長さ 30 cm、太さ 3 cm) を押し込み、周りに抵抗減摩剤をかけて埋め戻した。接地抵抗は電極の表面変化を避けて、測定終了後におこなった。それぞれの接地抵抗は N=267 Ω、S=880 Ω、E=361 Ω、W=681 Ω と、やや高い抵抗値を示した。この原因を調べるために電極を抜いた所、抵抗減摩剤が 3 分の 1 ほどまでしか浸透していないことが判明した。電極の接地にあたっては、より大きな穴をあけ抵抗減摩剤を電極に巻き込むように入れることで接地抵抗の改善が期待される。電極の埋め込み方法は今後の課題として残った。記録計は白山工業の LS8000WD で、2 GBit の HDD を有している。バッテリー駆動により、200 Hz サンプルングで約 1 ヶ月間の観測が可能である。

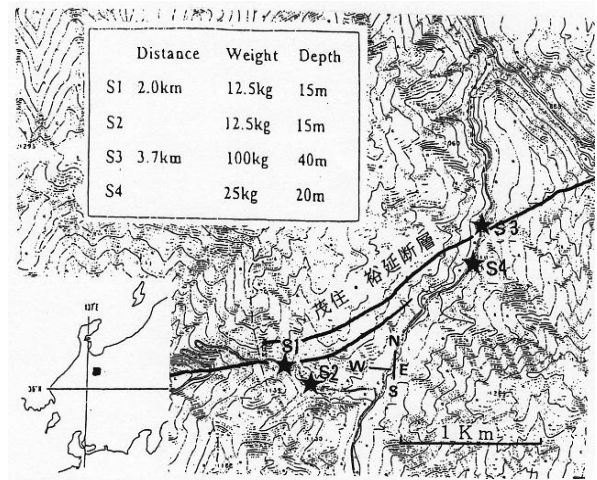


図 10. 茂住の観測点及び電極配置図

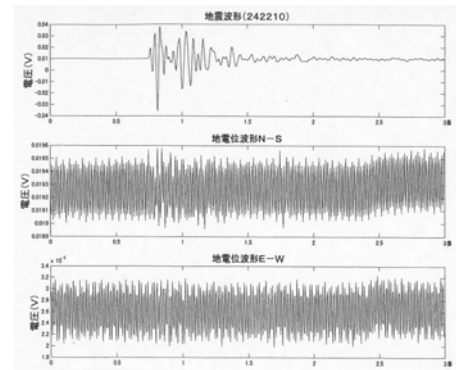


図 11. 発破の観測データ

観測記録例として、薬量が一番大きい S3 について触れる。図 11 に発破前後の 3 秒間を示す。地電位記録にはハザイルの波が乗っているが、これは 60 Hz のハムである。ハムを取り除いた結果を図 12 に示す。この臨時観測では次のようなことがわかった。

- (1) 地震波形より N-S 成分は 0.02 秒早く、E-W 成分は 0.01 秒遅く変化が生じている。
- (2) 観測電圧は 0.2-0.3mV で、他の記録から推測すると震度 1 程度に思われる。

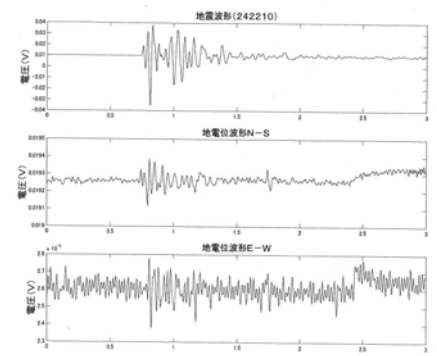


図 12. 60Hz を取り除いたデータ

(3) ノイズはN-Sが  $0.6 \mu\text{V/m}$ 、E-Wが  $2.8 \mu\text{V/m}$  前後の値で、垂直地電位観測の際のノイズレベルとほぼ同様に、SN比の良い観測点であつた。

#### 4 断層近傍での地電位観測

いままでに地震及び地殻変動観測点の横穴や縦穴を使用して、衛星テレメータで地電位観測をしたり、人工地震時の地電位変化を高サンプリング（100Hz–200Hz サンプリング）で観測してきた。

その結果次のようなことが解ってきた。

- (1) 有感地震に同期した地電位変化が見られ、震度1程度から観測される。
- (2) 地震波形と地電位変化には到着時間に若干の差がある。
- (3) 観測された地電位変化は水平方向地電界より、垂直方向地電界が強い。

これらを元に、岐阜県益田郡下呂町の阿寺断層を挟むように2001年から2003年に掛けて、三ツ石地区と乗政地区の2箇所で地電位観測をした。図13のように、断層からは乗政が約200m、三ツ石は700m離れている。両観測点ともにほぼ東西、南北に約100m間隔で電極配置した。電極は長さ30cm、太さ3cmの塩化鉛電極を用い、小型のコンボで表層部分を約2mほど取り除いて接地抵抗減摩材を入れて埋め戻した。また地震計はL22D(2Hz)を乗政のN電極近傍に埋め、三ツ石ではE電極近くの転石上に地震計を置いた。記録計は白山工業のLS8000WD(HDD 2GB)でバッテリー(105AH)駆動により、200Hzサンプリングで約1ヶ月連続収録できる。

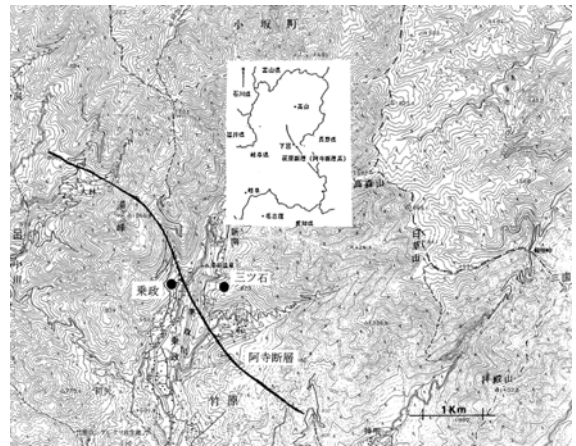


図13. 下呂市周辺の阿寺断層と観測点

この観測では観測点からほぼ東方向の、長野県王滝村周辺でおきる群発地震を利用し、断層の前後での地電位変化の違いを観測する予定であったが、残念ながら乗政の観測点が人家に近いためか、ノイズが大きく地震による地電位変化を観測できていない。通常は電極間約100mほどの長さの場合、震度1で数mVの変化が観測される

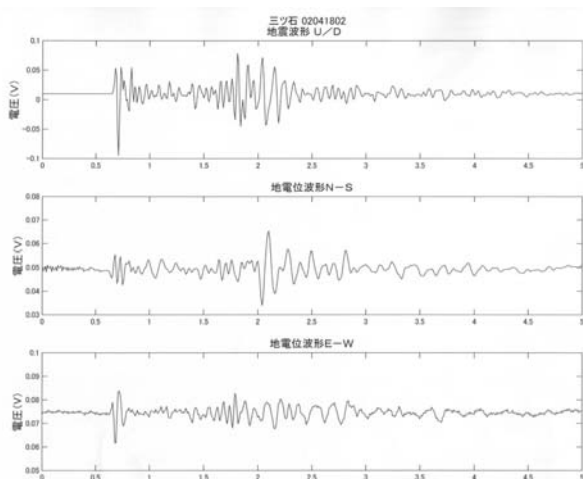


図14. 長野県南部地震 M3.0 震度1の地電位変化

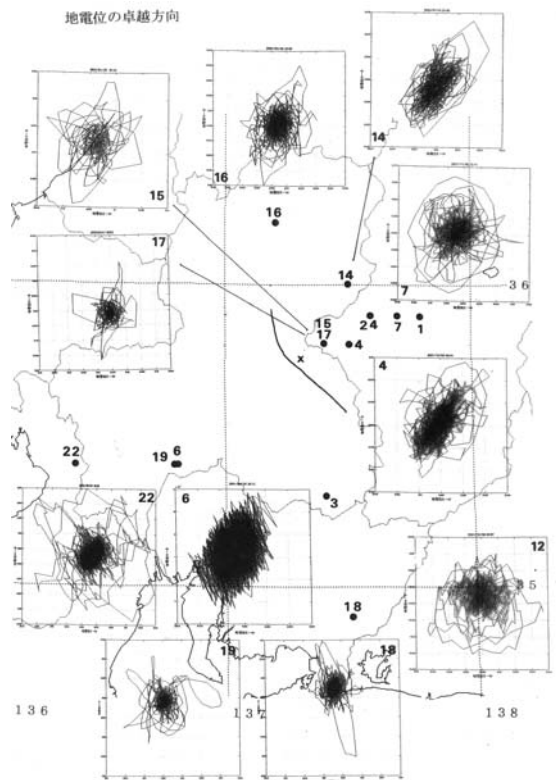


図15. 地電位変化の卓越方向

が、乗政のノイズは約 100mV ほどに達している。このノイズは電話回線のアース回路に流れる矩形波ではないかと推測されるが詳しいことは解っていない。観測期間中、王滝周辺の群発地震数は少なくなかったが、その大きさが小さく地電位変化を伴うような地震は非常に少なかった。三ツ石では王滝の地震を含め、数個の地震で地電位変化を観測したが、その変化は小さい。今回の観測では、観測された地震数が少なく当所期待していた断層のあらゆる方向から来る地震について観測できなかった。

三ツ石で観測された地電位変化を図 1 4 に示す（長野県南部 北緯 35.8 度 東経 137.4 度 深さ約 10Km M3.0）。この地震は下呂町では無感であったが隣の加子母村では震度 1 を記録した。この観測で記録した地震に伴う地電位変化の卓越方向を図 1 5 に示す。

## 5 まとめ

各観測点で記録された、地震時の地震波形と地電位変化を拡大して比較すると、初動立ち上がりは地震波より地電位変化の方が 100 分の数秒早く見えることがある。立ち上がりの良い記録で比較すると、この傾向はよりはっきりと認められる。これらについては地震計と電極の位置の関わりと考えられる。縦穴観測点の場合、地震計は地上の花崗岩あるいはコンクリート台に置かれており、電極は地下にあり、その距離は約 100m 程度ある。地震波の速度（P 波で 2.5~4km/s 程度とする）と距離を考慮すると、地震波の到着と地電位変化の始まりは 2.5/100~4/100 秒程度の差が出て良い。このことから地電位変化の原因は電極周辺が揺られたことにより現れたものと考えるのが妥当である。

各観測点で観測された記録や、発破の記録から震源から伝搬してきたものではなく地震波の通過に伴う電気現象で記録されたと思われる。したがってこれらの原因としては

- (1) 地球磁場中での誘導電流
- (2) 岩石中の石英による圧電効果
- (3) 間隙水の流動による界面動効果

これらを見積もると圧電効果と界面動効果十分満足できるようだが、これらの観測記録からは確定出来るものでなく幾つもの要因が絡みあった結果と考えられる。

通常、縦坑での地電位変化観測は地上における観測より外来ノイズの影響が少ない。このことは、縦坑で記録された雷時の e1, e2, e3 の地電位変化差から確認されているが、掛川観測点や宇賀溪観測点のように定常的に大きいところもある。掛川観測点はノイズ源が特定でき取り除くことが出来たが、宇賀溪観測点での原因はまだ突き止められていない。また、焼岳観測点での上高地地震の地電位変化を周波数解析した結果から地電位変化信号の周波数の上限は 30Hz 程度まで、新野観測点で同様に周波数解析した紀伊半島沖や東海道沖の地震では 20Hz だった。今後はフィルター等の使用により、それらより高い周波数のノイズの除去を考える。

これらの操作により記録感度を 10 倍程度上げて測定することができれば、これまで以上のデータ収集が可能になる。また震源より発生した電磁変化があるとなれば、それをとらえることも可能となる。掛川のように立体的に地電位観測ができるようになると、地電位変化の到来方向もより確実にとらえられるようになる。

これら縦坑を使用した観測で複雑な動きをする地電位変化が少しでも解明できるよう今後もきめ細かい観測をしなければならない。

このように、いろいろな観測を続けてきたが、本年度で定年退職になり、諸般の事情により観測自体が終了することになり残念であるが、現状では出来ることは全てしてきたように思う。今後は全く新しい方法で観測を再開して欲しいものである。

謝辞

これらの観測については名古屋大学地震火山・防災研究センターの先生方を始め、多くの職員の方々、元京都大学防災研究所の中山 武先生などのご協力を仰ぎました。また快く観測のために土地を提供していただいた地主さん始め、ご協力していただいた多くの皆さんにお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 静岡県地震対策課, “地震前兆現象分析の現状”, 昭和 60 年 2 月
- [2] 竹内伸直, 成田憲一, 小野 巖, 後藤幸弘, 中鉢憲賢, “地中垂直方向の地電位差法による地震波の計測”, 電学論 C, 115 巻 12 号, 1548-1553.
- [3] M.Saitou, 2001, “Earth Potential Difference by Seismic Wave”, 名古屋大学理学部惑星科学科卒業論文
- [4] H. Mizutani, T. Ishido, T. Yokokura and S. Ohnishi, 1976, “Electrokinetic Phenomena Associated with Earthquakes, Geophys. Res. L.”, Vol.3, NO.7, 365-368.
- [5] 山田 守・中村 勝・角野由夫・奥田 隆・宮島力雄・山田功夫・村上英記, “中部日本における地電位観測網について”, CA 研究論文集 1990, P55 – P60
- [6] 山田 守・中山 武, “縦坑を用いた高時間分解能垂直地電位観測”, 東京大学地震研究所技術研究報告 2005, 短報 P24 – P30