地中垂直方向の地電位差法による地震波の計測

正員 竹内 伸直 (東 北 大)

正員 成田 憲一 (宮城職能開発短大)

非会員 小野 巖 (東 北 学 院 大)

正員 後藤 幸弘 (東 北 学 院 大)

正員 中鉢 憲賢 (東 北 大)

Measurement of Seismic Wave with Vertically Induced Earth Potential Difference

Nobunao Takeuchi, Member (Tohoku University), Ken'ichi Narita, Member (Miyagi Polytechnical College), Iwao Ono, Non-member, Yukihiro Goto, Member (Tohoku Gakuin University), Noriyoshi Chubachi, Member (Tohoku University)

The earth potential difference (EPD) has been observed continuously for monitoring an earthquake at the urban area. A new measuring method of EPD is proposed to reduce the unnecessary signals induced by artificial and natural earth current sources. On this method EPD is measured through two electrodes that are buried at vertically different positions. On the earthquakes of more than 1 of intensity scale we can clearly observe EPD signals. These P-wave arrival times agree exactly with ones obtained by meteorological agency seismograph. The obtained data show that electrical field of vertical direction is higher by one order than one of horizontal direction.

キーワード：電磁計測，地震波，地電位差，地震観測，照合電極

1. はじめに

現在のところ、地震現象の観測においては大地の振動を直接検出する各種の地震計および地殻ひずみ計が信頼できる唯一の測定法である。他の観測として、地震と関連する電磁現象の測定⁽¹⁾や地球化学的測定⁽²⁾などが試みられている。このうち地震に関連する電磁現象としては、磁界変動、地中電流の変動、地電位差変動、および大地導電率の変動などと電磁波の発生があると考えられている⁽³⁾。観測に電磁変動を用いる利点は、観測値が広い範囲の応力やひずみの平均値を反映しており、深い場所や遠距離からの情報が得られること、地震動以外の地震に関連した物理量を測定することにより地震発生機構の解明に役立つこと、電氣的信号が直接得られることなどである。一方、欠点としては、観測される電磁現象の信号には種々の発生要因からの信号が重なり、更に測定環境の変化によっても出力が変動するために、得られる信号は複雑なものとなり解析が困難となる。従って、変動を起こす原因や機構は必ずしもよく理解できないことが挙げられる。また、地震に関連して期待される変動が人為的信号などによって乱される場合が多いので、信頼できる結果を得るためのデータ処理が難し

い。特に日本のような高度に発達した社会では観測が困難となる。これらの変動には、比較的簡単な装置によって測定可能なものもあり、昔から数多くの報告がなされてきたが、地震との因果関係が明らかでない場合が多いのが現状である。

地震に関連した電磁現象を発生時間関係で分類すると、地震の前に起こるもの、地震の際に起こるもの、地震後に起こるものの三つに分類される。地震の前に起こる現象は地震予知の研究に重要であるが、地震と因果関係があることを断定するのが難しく、現象発生の機構が理解しにくいものも多い。それに比べると、地震時の現象は発生時刻が特定されており、また変化速度が速いので検出が比較的容易であり、発生機構も推定しやすい。現在のところ地震の予知を目的として、地震前の現象に多くの関心が集中しており観測例も多い。これに反して、地震波伝搬に伴う電磁変動については地震と電磁現象の因果関係を解明するうえで重要であるにもかかわらず、詳細な観測を行った例はごくわずかしか報告されていない。

本論文では、地震現象と電磁現象の因果関係を明確にすることを目的として、まず地震波の伝搬時に発生する電磁現象に限定して観測を行った結果について述べる。また電

磁現象を利用した測定法のなかで、地電位差法について人為的地中電流や地磁気変動の影響をあまり受けない測定方式を提案している。この方式により得られた地震との時間関係が明白な地電位差信号について述べ、更にそれに対する検討を行った。

2. 観測方法

地震観測の電磁界測定のうちで、数十 m から数百 m 離れた 2 地点間の地電位差 (EPD) を測定する方法は、最も古くから行われてきた。また、地震の予知法としても有効であることがしばしば報告されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

本論文では、地中電流の影響をできるだけ少なくするために、従来の地表面に水平方向の地電位差の観測に加えて、新たに地中垂直方向の地電位差の観測を行った。この方式の特徴は、人為的および自然的な地中電流は水平方向にほとんど流れるため、この電流による電位差の影響を受けないことにある。従って、地中垂直方向に発生する電位差のみを測定することになる。また信号の解析を地震発生時に特定しているため、ゆっくりした変動の影響は除くことができる。

測定電極に単一金属を使用した場合、金属と土壌の間に発生する接触電位が大きく地電位差の観測には好ましくない。この点を改良するため金属と金属の化合物を用いて、できるだけ接触電位を一定に保つようにした複合電極が考案されている⁽⁶⁾。本観測においても、図 1 に示すような銅と飽和硫酸銅溶液からなる複合電極であるマクミラー社製の RE-5 型照合電極を使用した⁽⁷⁾。従来の金属棒電極のような場合、電極と土壌の接触は線接触または面接触と考えられるが、この電極ではほぼ点接触と考えられる。通常の 1 m の棒電極のような場合、土壌と電極の接触状態は電極の表面各点で異なるため、測定される電位は電極全表面に

わたっての平均となる。この場合、電位変動が平均化されて変動分が減少することが考えられる。また本観測のように電極間隔が短い場合 (2 m)、垂直方向の変動分が平均化されて検出感度が落ちることになる。

この電極を用いて地中垂直方向の地電位差を観測するため、水平方向の地電位差観測に使用した自動観測システム⁽⁸⁾を東北大学工学部電気系の構内に設置している。電極の埋設点は図 2 に示すように、測定室のある建屋から約 70 m 離れた林の中である。

電極配置は以下の 4 組である。すなわち、地表面に水平方向の測定には、(a) 深さ 50 cm で東西方向に約 20 m、(b) 南北方向に約 20 m の電極間隔で埋設した。地中垂直方向の場合には、(c) 2.5 m と 50 cm の深さに約 2 m の電極間隔で埋設した。更に測定系統自体の不要信号を調べるために、(d) 50 cm の深さに 20 cm の近接した間隔で 2 個の電極を埋設した。図 3 にこれらの電極配置を示すが、このうち (c) が新たに提案した電極配置である。ただし、常時観測できるのはこの 4 組のうち最大 3 組である。

図 2 地電位差観測地点
Fig. 2. Location of observatory.

図 1 複合電極
Fig. 1. Reference electrode.

図 3 青葉山観測地点における 4 組の電極配置
Fig. 3. Four arrangements of electrodes at Aobayama.

電極間の電位差出力は定常時に約 10 mV 程度あるが、解析しようとしている時間領域（1 秒から 10 分）での変動信号の振幅は数十 μV である。ただし、直流成分は 2 個の電極の土壌との接触電位の差が含まれているため、実際の地中の直流電位差がどの程度になるかは決定できない。2 個の電極を埋設する前に硫酸銅溶液に浸して電位差を観測した結果、電極の組合せにより多少異なるが、定常的には数 mV の電位差があり、1 時間での電位差変動は 3 μV 以内であった。

測定された信号は、いったんペンレコードに入力され、内蔵の低周波（10 Hz）通過フィルタを通り、デジタル化される。このデジタル信号は更にパーソナルコンピュータにより、1 秒に 1 回サンプルされてハードディスクに記録される。埋設されている電極部分を除いたこのシステムの周波数特性は、ナイキスト周波数が 0.5 Hz である一様出力をもつ。また、このシステムには可動部分がなく地震動による影響は考慮しなくてもよいことになる。

3. 観測結果

〈3・1〉 水平方向の地電位差 従来のような水平方向の地電位差には多くの発生要因による変動が常時観測され、地震波伝搬に伴う変動を明確にすることが困難である。これまでの長期観測により以下のような人為的および自然的な発生要因による変動信号を確認している。

（1）人為的発生に起因する変動信号として、（i）直流電気鉄道、（ii）周期性パルス、（iii）電気溶接工事、（iv）その他、が観測され、

（2）自然発生に起因する信号として、（i）磁気サブストームによる地磁気変動、（ii）磁気脈動による地磁気変動、（iii）大気電気現象⁽⁸⁾が観測される。

〈3・2〉 地中垂直方向の地電位差 垂直方向の地電位差信号には、直流電気鉄道による漏れ電流の変動および周期性パルスは観測されないが、大きな地磁気の変動による電位変動がわずかに認められる場合がある。電極があまり深く埋設されていないために、大きな気温（土温）の変化および激しい降雨の場合にはその影響があり、数時間でのゆっくりした変動が起こる。

平成 6 年 3 月から 8 月末までの観測期間中、地震発生時に垂直方向電極間に明りょうな地電位差変動信号が得られた。仙台で観測された震度 1 以上の 10 個の地震すべてに変動信号が得られているが、震度 0 の無感の場合でも変動信号が得られる場合もある。代表的な地震発生時の変動信号の例を図 4～図 6 に示す。これらの図では直流成分は除かれ、微小変動成分のみが表示されている。すなわち、観測値の表示時間範囲での平均値を元の値から差し引いて表示してあり、平均値を基準値（ゼロレベル）としてある。

図 4 と図 5 には、水平方向の電極間隔 20 m および 20 cm と垂直方向の電極間隔 2 m で得られた地電位差変動信号を示す。このうち図 4 は、宮城県沖で発生した震源の深さ 42 km、マグニチュード 6.0 の地震であり、仙台で震度 3 を記録したものである。このとき、垂直方向の変動電界は最大 0.5 mV/m に達する。図 5 は福島県沖で直前に発生した地震の余震で、震源の深さ 20 km、マグニチュード 5.3 であり、仙台での震度は 1 であった。水平方向の地電位差は地中水平方向に流れる電流と土壌の抵抗により発生する。すなわち、抵抗は電極間隔に比例するから、発生する地電位差も電極間隔に比例することになる。従って 20 cm の出力は 20 m の 1/100 となり、出力は非常に小さく、図 4 と図 5 に示されるようにほとんど観測されないことになる。電極間隔 20 m の場合、直流電車からの漏れ電

上：水平方向東西成分（20 m）の EPD，中：水平方向東西成分（20 cm）の EPD，下：垂直方向（2 m）の EPD
EQ：発震時刻，P：P 波の仙台到達時刻，S：S 波の仙台到達時刻

図 4 地電位差法により観測された地震波形（平成 6 年 8 月 14 日
午後 6 時 5 分から 15 分まで日本標準時）

Fig. 4. Seismograph obtained by EPD method (1994 August 14, 18:05-18:15 JST).

上：水平方向東西成分（20 m）のEPD，中：水平方向東西成分（20 cm）のEPD，下：垂直方向（2 m）のEPD
EQ：発震時刻，P：P波の仙台到達時刻，S：S波の仙台到達時刻

図 5 地電位差法により観測された地震波形（平成 6 年 8 月 16 日
午後 7 時 15 分から 25 分まで日本標準時）
Fig. 5. Seismograph obtained by EPD method (1994 August 16, 19:15-19:25 JST).

上：水平方向東西成分（20 m）のEPD，下：垂直方向（2 m）のEPD
EQ：発震時刻，P：P波の仙台到達時刻，S：S波の仙台到達時刻

図 6 地電位差法により観測された地震波形（平成 6 年 7 月 22 日
午前 3 時 35 分から 45 分まで日本標準時）
Fig. 6. Seismograph obtained by EPD method (1994 July 22, 03:35-03:45 JST).

流による数分の変動が重なり、地震波だけを明確にすることが困難である。震度 3（図 4）と震度 1（図 5）の S 波で垂直方向の地電位差の最大振幅は、だいたい 0.48 mV と 0.08 mV くらいであり 6 倍異なるが、これは震度の目安となる大地加速度の大きさの違いにだいたい対応している。

ケーブルなどの測定系統に地震動により不必要な変動信号が発生している可能性があるが、図 4 および図 5 に示されるように 20 cm 間隔の電極間には変動信号出力が見られない。このことから、電極間から測定器までのケーブルの揺動や電極の地中での微小振動などによる電位差は発生していないことがわかる。

図 6 は直流電車の休止時間帯に地震が発生した場合である。これはロシアのウラジオストック付近の大深度地下

（551 km）で発生した、かなり大きな（マグニチュード 7.6）地震である。このとき、水平方向東西成分の波形にも地震波による変動信号を比較的良好に見ることができる。このときの S 波の主周波数成分は 0.1 Hz 程度である。水平方向（東西成分）と垂直方向の両者の信号を比較すると、垂直方向には地震発生以前と以降に不規則な微小変動はほとんど見られず、信号対雑音比が非常に良いことがわかる。地震波伝搬時の変動電位差の振幅はほぼ同じであるが、電極間隔が垂直方向では 1/10 であるので、もし電位分布が同様であるとする、変動電界は垂直方向が約 10 倍大きいことになる。

仙台管区気象台の地震データ速報値と比較してみると、P 波の仙台到達時刻は得られたデータすべての場合、地電位差変動信号の発生時刻と非常によく一致している。ただ

し、このシステムの時間精度は±1秒以内であり、これ以上の詳しい検討はできない。一方、このシステムで得られる波形ではS波の到達時刻を明確に示す顕著な変動は見られない場合がある。

通常、地震計は岩盤に設置されているが、本システムの場合、地表面近くであり軟弱地盤と考えられるため、観測地点での地震動の振幅は増大すると思われる。また地震計で得られる地震波形は、短周期の成分に観測の重点がおかれているが、本システムではサンプル時間が1秒のため比較的長周期の成分しか記録されず、両者の変動波形はかなり異なったものと推定される。

4. 検 討

本研究で行っている地中垂直方向の電位差を測定するものとして地層の状態を調べる検層があり、地下資源の物理探査や土木工事の土質調査で行われている⁽⁹⁾。しかしながら、これらは測定期間が短時間であり、測定電位差も数十mVと大きな値である。微小な垂直方向電位差の変動を長期間にわたって観測した例は今まで報告されていない。また地震発生の際に観測された地震波に対応する地電位差としては、アラスカ地震の際に地震波の一部である表面波が地表面の水平方向に観測⁽¹⁰⁾された以外ほとんど報告されていない。

地電位差法で地震発生の際どのような電磁変動を検出するかを検討してみると、

- (1) 震源からの電磁変動を直接検出
- (2) 地震波伝搬に伴って発生する観測地点での電磁変動を検出
- (3) 他の要因（例えば直流電気鉄道）で発生している電位差が地震により変動するのを検出

とに分類できる。今回観測された波形では、仙台に地震波が到達する以前には電位差変動を検出していない。また図6に示すように、最も大きな地電位差の原因となる直流電車の休止期間中においても地震波の顕著な変動が検出される。従って、(2)の観測地点での大地の振動により発生する電界変動を検出していることになる。地中を伝搬してくる電界変動や電磁波を検出するには現在の検出能力では困難であり、もし震源で何らかの電磁変動が発生しているならば、これを検出するには更に感度を向上させる必要があらう。

次に、観測で得られた地震の際に発生する地電位差の原因について検討する。地震に直接関係した地電位差変動の原因としては界面動電効果が考えられる。界面動電効果は地中の水の流動によって発生する流動電位が、地電位差の変動として現われ、これによって電流が流れる現象である。もし空隙圧の勾配が急激に時間的に変化したときには、電流をさまたげるように地中に電圧が生じ、地電位の勾配が生じる。地震発生時の空隙圧の勾配をいろいろの条件から推定すると、震源近傍で0.1~10 V/kmの変化が観測されると推定されている⁽¹¹⁾。もし電界が震源から反

表 1 地電位差法の比較
Table 1. Comparison of two EPD methods.

新しい方式	項 目	従来の方式
地震発生時、その直前	主な観測対象	地震予知
あまり重視しない	長期間安定性	重視する
短い	サンプリング時間	長い
地電位差、電荷	対象とする測定量	地中電流
地中垂直方向	測定方向	地表面水平方向
10 m 以下	基軸長	100 m~数 km
点接触	電極と土壌の状態	線、面接触

比例して減少するとすれば、震源から100 km離れた観測点では0.001~0.1 mV/m程度となる。この値は観測で得られた地電位差の値と大きく違わず、観測された地電位差変動の原因として流動電位による可能性はあると考えられる。このほかにもいくつかの原因が考えられるが、その解明のためには更に多くの観測データの積み重ねが必要である。

原因が流動電位とすれば電位は大地の振動圧力に従うので、地電位差信号は地震動の加速度波形に対応することになる。通常、地震動では水平方向と上下方向の振幅、速度および加速度に大きな差は生じない。ところが、観測で得られた垂直方向と水平方向の変動電界には大きな違いが生じている。この違いの原因を明らかにするには、地盤の違い、垂直方向の電位分布および他の測定地点での観測など、いろいろな条件下での観測が必要となる。

地震波の伝搬速度は横波で4 km/s程度であるから、主振動周波数0.1 Hzでは地震波の波長は40 kmとなる。電極間隔は水平方向に20 m、垂直方向に2 mであるから、この間の電流および電位分布はほとんど一様と考えられる。電極埋設点での土壌の固有抵抗を4電極法で測定した結果165 Ω・mであった。電極間隔20 mで1 μVの変動は、地中垂直断面1 m²当たり0.3 nAの変動となる。また土壌の比誘電率は約3であり、比透磁率はほぼ1である。これらの値は、電極間隔程度ではほぼ一定と考えられる。

地震波の伝搬時に発生する地電位差については、これまでの他の多くの長期観測においても観測されていた可能性が高い。しかし、時間分解能や変動分解能の違い、および研究対象の違いなどから見逃されてきたものと思われる。また主に地中電流に関心が持たれ、地中垂直方向の地電位差を長期観測する試みは行われてこなかった。本観測での垂直方向地電位差観測方式と従来の方式との比較をまとめて表1に示す。

5. ま と め

これまで地震と電磁変動の関係を明確に示した観測はほとんど報告されていない。本論文では、これらの関係を観測により示し、更に地中垂直方向の地電位差法により地震波の観測を行うことが可能なことを明らかにした。得られた観測結果より以下の事項を明らかにした。

- (1) 震度 1 以上の地震すべてに必ず地電位差変動が観測されるが、震度 0 の場合でも観測される場合がある。
- (2) P 波の仙台到達時刻はすべての場合について地電位差変動の発生時刻と非常によく一致している。
- (3) S 波の仙台到達時刻は明確でない場合がある。
- (4) 観測された変動波形の最大振幅の大きさは震度の大きさとほぼ対応する。
- (5) この地電位差変動は観測地点での大地振動により発生する電位差変動と考えられる。

新たに提案した地電位差観測方式の特徴として、

- (i) 垂直方向の測定では不要な信号を検出しないために大都市のような悪条件のもとで観測が可能である。
- (ii) 地震波に対しての変動電位分布が一様とすれば、地中垂直方向の変動電界は水平方向に比べて 10 倍強い。
- (iii) 測定電極間隔が短くても明りょうな変動信号が得られるので、地中の局所的な電界が観測可能である。

また今後の課題として、

- (i) 地盤の違い、垂直方向の距離および他の測定地点での観測など、いろいろの条件による違いを明確にする必要がある。
- (ii) 更に検出能力の向上を図る。
- (iii) データ収集のサンプル時間を短くして地電位差変動測定の時間分解能を上げる。

などが挙げられる。

地震データを提供していただいた仙台管区気象台地震津波火山監視センターに厚く感謝いたします。

(平成 7 年 1 月 18 日受付, 同 7 年 5 月 10 日再受付)

文 献

- (1) 力武常次・乗富一雄・藤田尚美・水野浩雄・山崎良雄・木下 肇・浜野洋三・木蔵義守: 地震予知 I (昭 55) 学会出版センター
- (2) T. Yamauchi: "Variations in Air Radon Concentrations in Tunnels for Observation of Crustal Movement in the Tokai Region of Japan", *Res. Lett. Atmos. Electr.*, **12**, 193 (1992)
- (3) M. Hayakawa, I. Tomizawa, K. Ohta, S. Shimakura, Y. Fujinawa, K. Takahashi & T. Yoshino: "Direction Finding of Precursory Radio Emissions Associated with Earthquakes: A Proposal", *ibid.*, **12**, 211 (1992)
- (4) 木下正高・上田誠也: 「再びギリシャの地震予知について」, *科学*, **56**, 770 (昭 61-12)
- (5) 藤縄幸雄・高橋耕三・熊谷貞治: 「地震先行現象としての極低周波地中電界変動」, *地震*, **43**, 287 (平 2-2)
- (6) 宇津徳治・嶋 悦三・吉井敏尅・山科健一郎: 地震の事典, p. 431 (昭 62) 朝倉書店
- (7) 電気学会電食防止研究委員会: 新版電食・土壤腐食ハンドブック (昭 52) 電気学会
- (8) 竹内伸直・成田憲一・高橋忠利・中鉢篤志・本間規泰・後藤幸弘: 「地表面電位差の長期観測および地表面静電界との関連 (電位差微小変動の特徴解析)」, *電学論 C*, **115**, 568 (平 7-4)
- (9) 土と基礎の物理探査編集委員会: 土と基礎の物理探査, p. 90 (昭 56) 土質工学会
- (10) F. Elman: "The Responce of Magnetic Instruments to Earthquake Waves", *J. Geomag. Geoelectr.*, **18**, 43 (1966)
- (11) 浅田 敏: 地震予知の方法, p. 185 (昭 53) 東京大学出版会

竹内伸直 (正員) 1942 年 4 月 6 日生。1965 年 3 月東北大学工学部電子工学科卒業。1970 年 3 月同大学大学院工学研究科電気および通信工学専攻博士課程単位取得退学。1970 年 4 月同大学工学部助手。現在、地震、雷、親父 (生体) の電磁変動量の計測とその信号解析の研究に従事。工学博士。

成田憲一 (正員) 1945 年 4 月 17 日生。1968 年 3 月東北大学工学部電気工学科卒業。1970 年 3 月同大学大学院工学研究科電気および通信工学専攻修士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手。現在、雇用促進事業団宮城職業能力開発短期大学校講師。現在、主として冬季雷の研究に従事。

小野 巖 (非会員) 1935 年 5 月 15 日生。1961 年 3 月宮城県第二工業高等学校卒業。1957 年 2 月東北大学工学部電気工学科勤務。1985 年 4 月東北学院大学工学部勤務。現在、大気圧放電と大地電気現象の研究に従事。

後藤幸弘 (正員) 1937 年 4 月 1 日生。1960 年 3 月東北大学工学部電気工学科卒業。1965 年 3 月同大学大学院工学研究科電気および通信工学専攻博士課程修了。1968 年 4 月同大学工学部助教授、教授を経て、1991 年 4 月東北学院大学工学部教授。現在、主として大気圧放電に関する研究に従事。工学博士。

中鉢憲賢 (正員) 1961 年東北大学工学部電気工学科卒業。1965 年同大学大学院電気および通信工学専攻博士課程修了。同年 4 月同大学電気通信研究所助手、1966 年 1 月同助教授、1969 年 1 月同大学工学部電気工学科教授、1994 年 4 月同大学大学院工学研究科教授、現在に至る。工学博士。電気通信および超音波工学の研究に従事し、超音波顕微鏡などを開発。本会東北支部長、日本音響学会東北支部長、応用物理学会東北支部長、IEEE-UFPC 東京支部長などを歴任。現在、日本音響学会副会長。1965 年電気通信学会稲田賞、1989 年 IEEE-UFPC 論文誌最優秀論文賞、1990 年電気学会学術振興賞進歩賞、1995 年科学技術庁長官賞 (研究功労者) 受賞。IEEE、応用物理学会、電子通信情報学会、日本音響学会、非破壊検査協会、日本 ME 学会、日本機械学会会員。