地震発生時の地表面電荷発生機構

正員 竹内 伸直 (東北 大)

正員 中鉢 憲賢 (東北 大)

正員 成田 憲一 (宮城職業能力開発短大)

正員 本間 規泰 (東北 電力)

Mechanism of Charge Appearance on Earth Surface at Earthquake

Nobunao Takeuchi, Member, Noriyoshi Chubachi, Member (Tohoku University), Ken'ichi Narita, Member (Miyagi Polytechnic College), Noriyasu Honma, Member (Tohoku Electric Power Co., Inc.)

キーワード：地震波，地電位差変動，圧電効果，流動電位，ピエゾ電気，発光現象

1. はじめに

地震発生の前，または地震発生時に，空が発光するといわれる現象については非常に古くから報告がなされている。このうち，地震発生時については発生時刻が特定されており，信頼のおける報告もある⁽¹⁾。現在，発光現象と地震との因果関係を理論的に説明する幾つかの機構が提案され，その一つとして，地震発生時に地表面電荷が発生し，上空に電氣的影響を与えるという機構が提案されている。この地表面電荷の発生機構は，大きく二つに分けられる。すなわち，電荷が，土壌や岩石を構成する誘電体に発生するというモデルと，これらに含まれる水分に発生するというモデルである。前者については，古くからピエゾ電気⁽²⁾や摩擦電気によるものとして検討されてきている。また後者については流動電位による地電位差発生モデルが，古く寺田寅彦⁽³⁾により提唱されていた。しかし，その後このモデルについての詳しい検討は，地震発生時の地電位差観測データがなかったため，ほとんどなされてこなかった。

著者らは，地中垂直方向地電位差方式によって地震波伝搬時の地電位差変動信号が震度1以上の地震動について例外なく観測できることを示し⁽⁴⁾，地中に実際に加わる圧力差に対してどのくらいの地電位差が観測されるかを評価してきた。本レターでは，流動電位モデルを，ピエゾ電気モデルと対比させてその違いを定性的に説明し，更に流動電位モデルでは，震央でどの位の大気電界が発生するかを，観測結果を用いて定量的に評価している。

2. 地電位差発生モデル

地電位差変動による地表面電荷密度変動の発生機構として代表的な，ピエゾ電気効果によるピエゾ電気モデルおよび界面動電効果である流動電位モデルについて比較する。

〈2・1〉 ピエゾ電気モデル 大地を構成する岩石にはピエゾ素子と呼ばれる結晶構造をもつ圧電物質（例えば水晶）を含むものがある。このような物質に地震波が伝搬し

て圧力差ができると分極電荷による電位差が発生する。しかし，大地は導体であるから，瞬時に電流が流れて分極電荷を打ち消してしまう。大地の時定数は誘電率 ϵ ×抵抗率 ρ であたえられるが，実際の数値を用いると，花崗岩（比誘電率 $\epsilon_s=8$ ，抵抗率 $\rho=10^6\Omega\text{m}$ ）では 10^{-4}s 程度，堆積層（水の値を用いて， $\epsilon_s=80$ ， $\rho=10^2\Omega\text{m}$ ）では 10^{-7}s 程度となる。

〈2・2〉 流動電位モデル 地震動により加速度が働くと，土壌および水には圧力差が生じる。一般に電解質の溶解した液体で満たされた毛細管または多孔栓の両端に圧力差が与えられれば，この両端には電位差が発生する。水谷ら⁽⁵⁾によれば流動電位差 ΔV と圧力差 ΔP の比は，

$$\Delta V/\Delta P=\epsilon\zeta\rho/\eta$$

で与えられる。ここで ϵ は誘電率， ζ はゼータ電位， ρ は抵抗率， η は流体の粘度である。

この比の一般的な値は，毛細管の液体を水とすると $\epsilon\sim 80/4\pi\times 9\times 10^9\text{F/m}$ ， $\eta\sim 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ ， $\zeta\sim 10^{-2}\sim 10^{-1}\text{V}$ となり，観測点での大地の抵抗率 $\rho\sim 10^2\Omega\text{m}$ を用いると，この比は $10^{-6}\sim 10^{-5}\text{V/Pa}$ となる。

これまで得られた観測結果によれば，S波の信号出力の最大は，地震動加速度が1ガル($1\text{cm/s}^2=0.01\text{m/s}^2$)のとき，水の密度を $1\times 10^3\text{kg/m}^3$ とすると，圧力差は 10Pa/m となる。このとき，観測された地中垂直方向電界は，約 0.1mV/m である。従って，観測から得られたこの比は約 10^{-5}V/Pa となる。

3. 等価回路

二つのモデルの電荷発生機構の模式図，等価回路および時間変化を図1に示す。大地は岩石や土壌粒子が大部分の領域を占めるが，わずかな間隙に電荷をもつ水が満たされているような状態にある。これを簡単化すると，図1(a)に示すように，岩石や土壌粒子からなる固体中を，電荷をもつ水で満たされた毛細管が数多く貫通しているモデルが考えられる。地震動の加速度が働くと，大地3方向に圧力

図 1 地表面電荷発生の様式図(左:ピエゾ電気モデル, 右:流動電位モデル)
Fig.1. Two models of charge appearance on the surface ground (left: Piezo effect model, right: streaming potential model).

差が生じるが、ここでは、図 1 (a), (c) のように大地上下二面間に圧力差が発生し、消滅する状況を考える。

等価回路的には、ピエゾ電気モデルでは (b) 図に示すようにピエゾ分極により圧電媒質表面であるコンデンサの両端が充電され、電荷により電位差が生じるが、発生した電荷は直ちに、間隙流体の抵抗を通じて時定数 τ で放電してしまう ((d) 図)。大地を流れる電流は、抵抗を通して流れるため、発生電位と同様に時定数 τ のパルス状となる ((e) 図)。圧力差が開放される場合にも同様に分極電荷が発生し、同様に直ちに消滅する。

一方、流動電位モデルでは電位は間隙流体自体に圧力差が生じて発生するため、圧力差のある間は起電力が発生し、土壤中構成されるコンデンサに充電する。この場合の充電時間は時定数 τ であり、その後一定の電位差を保っている。ただし、大地を流れる電流は充電時間中だけであり、ピエゾ電気モデルと同様に時定数 τ のパルス状となる。

観測条件を考慮してこの二つのモデルを比較検討してみると、(1) 理想的な条件ではピエゾ電気モデルでは非常に大きな電界が発生するが、その継続時間は非常に短く、現在の観測システムでは観測はできない。(2) 観測地点一帯

は岩盤ではなく、大小の土壌粒子からなる堆積層であり、この土壌粒子には石英のような圧電物質はほとんど含まれていない。たとえ含まれたとしても、長い距離にわたって分極の方向が一定方向であることはなく、各粒子の分極の方向は互いに打ち消しあうと考えられる。このため、観測で得られる地電位差信号の発生原因としては、ピエゾ電気モデルよりは流動電位モデルが妥当と考えられる。

次に、震源直上の地表面である震央ではどのくらいの電界になるかを評価する。震央付近では加速度が地球の重力加速度 (約 1,000 ガル) よりも大きな値をとるものがあると思われる。これまで得られたデータでは、観測地点では 1 ガルで 0.1 mV/m であるから震央での電界は 0.1 mV/m となる。これは、堆積層での値であるが、もし震源断層すべてが花崗岩のような場合には、このときの抵抗率 $\rho \sim 10^6 \Omega\text{m}$ を用いると 10^3 V/m となる。

以上は、地中電界であるが、地表面から上の大気電界を評価してみる。流動電位による地中電界により電荷が地表面に現れると、花崗岩の比誘電率は約 8 であるから、大気電界は大地電界の約 8 倍大きくなる。晴天時の大気電界は数百 V/m であるから、それよりも 2 けた程度大きな電界が発生する可能性がある。通常、大気発光現象は雷のような大気の絶縁破壊現象 (破壊電界 3 MV/m) ではなく大気の部分放電 (コロナ放電) 現象であり、電界が集中した領域では微弱な放電が発生する可能性がある。このため、震央の周囲が花崗岩のように抵抗率が非常に高い場合には、電界が集中した領域で大気内の発光現象が考えられる。

(平成 9 年 4 月 14 日受付, 同 9 年 6 月 9 日再受付)

文 献

- (1) 安井 豊:「地震に伴う発光現象に関する調査報告 (第一報)」, 地磁気観測所要報, 13, 22~61 (昭 43-9)
- (2) 例えば, 池谷元何:「地震に伴う電磁気現象と動物の異常行動」, 科学, 66, 408~418 (平 8-6)
- (3) 寺田寅彦:「地震に伴う発光現象に就て」, 地震研究所彙報, 9, 225~255 (昭 6-3)
- (4) 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, 1548~1553 (平 7-12)
- (5) H. Mizutani, T. Ishido, T. Yokokura & S. Ohnishi: "ELECTROKINETIC PHENOMENA ASSOCIATED WITH EARTHQUAKES", *Geophysical Research Letters*, 3, 365~368 (1976)

竹 内 伸 直 (正 員) (電学論 C, Vol. 117, No. 5 参照)

中 鉢 憲 賢 (正 員) (電学論 C, Vol. 117, No. 5 参照)

成 田 憲 一 (正 員) (電学論 C, Vol. 117, No. 5 参照)

本 間 規 泰 (正 員) (電学論 C, Vol. 117, No. 5 参照)