風速と地電位差変動の関係

正員 竹内 伸直 (秋田県立大)
非会員 大久保 寛 (東北大)
正員 本間 規泰 (東北電力)
正員 成田 憲一 (宮城職業能力開発短大)

Correlation between Wind Speed and Earth Potential Difference Variations

Nobunao Takeuchi, Member (Akita Prefectural University), Kan Ohkubo, Non-member (Tohoku University), Noriyasu Honma, Member (Tohoku Electric Power Co., Inc.), Ken'ichi Narita, Member (Miyagi Polytechnic College)

The earth potential difference (EPD) signals have been observed continuously to monitor the naturally induced earth current together with some meteorological elements at Sado island in the Japan Sea. All these signals were transferred into digital recorded data with 1s sampling time over one winter season. The EPD signals have no variation in a period of no wind, however, multi-trained pulse signals are observed in a period of strong wind. It is revealed that like this EPD variations occur when the wind speed exceeds the threshold value of 20 m/s. The streaming potential effect might be generated under the ground caused by strong wind over the ground surface.

キーワード：地電位差，風速変動，流動電位

1. はじめに

地震現象や雷現象の観測のために地電位差の測定が用いられることがしばしばある。しかし、地電位差の発生要因には、人為的および自然的なものが数多くあり、従って観測される信号も複雑なものとなる。このため得られた信号の解析が困難となり、はっきりした結論を得ることを困難にしている。このうち、人為的な原因による信号については、その信号の特徴や規則性により、多くの変動の中から識別することは、ある程度可能である。

しかし、自然的原因による場合には、その発生要因の多様性、現象の複雑性などのため、その識別は非常に困難である。これまで、地磁気の変動に起因する大地誘導電流による電位差の発生、雷雲の影響、地中イオン濃度の変動、地中自然電池現象など、様々な要因による地電位差の発生について議論が行われてきている。しかし、現象の複雑性からいって、これまでに検討されていない発生要因も多く存在すると考えられる。例えば、エルンストソンとシェーラー⁽¹⁾は地電位差の変動が種々の水理地質学的条件や気象条件に関連していることを明らかにしている。彼らは、変動の原因として、地中の水の流れによる流動電位の変動を考えている。

この地電位差の観測は地震現象と関連して議論されるこ

とが多いが⁽²⁾、いまだに、それらの間の因果関係が明確にできているとは考えられていない。この関係を明確にするためには、できるだけ多くの自然発生による変動要因を明らかにしておく必要がある。この場合、長期間にわたり時間分解能の良いシステムで、できるだけ多くの他の物理量との同時観測が望ましい。著者らは、長期間にわたっていくつかの気象要素と同時に、地電位差の観測を継続して行っている⁽³⁾。この観測で、気象要素の中で特に風速がある一定値以上になると特徴的な地電位差変動が発生する現象があることが明らかとなった。

本論文では、風速と地電位差の同時観測で得られたデータから、これらの相関関係を明らかにしている。また、風速による地電位差変動の発生機構について検討した。

2. 観測地点と観測システム

〈2・1〉 観測地点 現在、図1に示すように新潟県の佐渡島南部の羽茂地点で観測を継続している。この地点(新潟県佐渡郡羽茂町地田地区：北緯37度49分40秒，東経138度18分48秒)は、海岸から1kmほど内陸に位置し、周囲数百メートル四方が水田である平たんな場所である。ここに観測建屋(東北電力(株)研究開発センター雷観測所敷地)を設置し、観測機器を建屋内部およびその周囲に配置している。

図 1 観測地点の位置
Fig. 1. Location of observatory.

図 2 観測要素の配置図
Fig. 2. Arrangement of observation apparatus.

図 3 観測システムの模式図
Fig. 3. Schematic diagram of observation system.

〈2・2〉 観測システム 観測項目は、風速、大気圧、針状電極電流、地表面静電界、地電位差 (EPD) である。地表面静電界観測のためのセンサとしては、検出の原理からフィールドミルとよばれる型式の電界計を使用している。地電位差観測用には二つの測線を準備し、ほぼ南北の

方向およびこれに直角の東西方向に、敷地いっぱいの約 5 m の間隔で電極を埋設してある。地表面付近の大気電流を観測するために、針状電極を建屋に取付け、大気から大地に流れる電流 (コロナ電流) を、抵抗を通して電圧に変換して記録している。風速計はプロペラ型のセルシン式であり、地上高 4 m に設置されている。これらの観測要素の配置を図 2 に示す。

観測で得られるそれぞれの気象要素信号は、侵入サージから観測システムを保護するため、光伝送系で絶縁して記録装置に入力されている。入力された信号はレコード内で増幅され、更に低域通過フィルタを通りデジタル化される。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。この観測システムの模式図を図 3 に示す。

3. 観測結果

風速、地電位差 (東西および南北方向)、およびコロナ電流の四要素の信号を、無風時および強風時の場合についてそれぞれ図 4、図 5 に示す。これらの図で、地電位差信号については、直流分を除いて変動分のみを示している。

無風に近い図 4 では、コロナ電流および地電位差に変動信号は見られない。地電位差の数時間単位での、ゆっくりした変動は気温の変化に対応するものと考えられる。一方、強風時の図 5 の場合には地電位差信号に不規則な連続したスパイク状のパルス波形が観測される。この場合は、電荷をもった雲が強い風を伴って通過している状態であり、雲と地表面の間に生ずる強い大気電界のために、針状電極からコロナ電流が発生して大気電流が流れているときである。この図からは、地電位差変動の発生はコロナ電流の発生とは関係がなく、風速がある一定値を超えると発生していることがわかる。地電位差信号は東西および南北方向とも、その変動の様子はほぼ同様である。一方、地電位差変動信号の変化の方向についてみると、東西方向での信号が負から正に変化するとき、南北方向での信号は正から負に変化しており、変化の方向が逆になっている。東西と南北方向の信号振幅は図 5 では、ほぼ同じであるが、ほかの日には、南北方向のほうが大きい場合、あるいは小さい場合があり、変動の様子は同様であるが両測線方向の振幅間に一定の関係は見られない。また、信号の変化の方向についてもこの二つの測線では同じ場合もあるし、逆の場合もある。

更に詳しく風速と地電位差変動の関係を見るために、風速が急激に増加し始める場合について、風速と地電位差変動信号 (南北方向) の波形について時間軸を拡大して図 6 に示す。このような場合は数多くあるが、そのうちの代表的な 3 例について示す。ただし、風速が急激に増加しても、地電位差変動が発生しない場合もある。この図には、瞬間風速がほぼ 20 m/s を超えると、地電位差変動の発生が観測されることが示されている。いったん変動が発生してしまうと、風速が多少減少しても、地電位差変動は継続

図 4 無風時の風速，地電位差変動（東西方向），地電位差変動（南北方向），針状電極電流信号

Fig. 4. Signals of wind speed, EPD variation (E-W), EPD variation (N-S), and corona current in a breeze.

図 5 強風時の風速，地電位差変動（東西方向），地電位差変動（南北方向），針状電極電流信号

Fig. 5. Signals of wind speed, EPD variation (E-W), EPD variation (N-S), and corona current in a strong wind.

して発生している場合が多い。

4. 検 討

1995 年から 96 年にかけての冬期間に，20 m/s 以上の瞬間風速が断続的に 1 時間以上継続した（風速変動と表現する）時間領域と，地電位差変動にパルス的な信号が観測された時間領域を図 7 に示す。ここでは，代表的な例として 11 月の結果を示してあるが，それぞれの変動の発生が

どのような相互関係にあるかが示されている。すなわち，この両者の変動の発生している領域は良く一致しているが，特に，8 日から 9 日のほぼ 2 日間にわたっては，両者の信号がほとんど途切れることなく発生していた。この間，北海道の北で猛烈に発達した低気圧がほとんど停滞したため，日本海側や北日本に暴風雪や波浪警視が発表されており，佐渡島に近い新潟地方気象台では 8 日に最大平均風速 18.6 m/s，9 日に 14.5 m/s が記録されている。な

図 6 風速増加時の風速と地電位差変動（南北方向）信号
Fig.6. Signals of wind speed, and EPD variation (N-S) at a commence of a strong wind.

お、この図には風速変動のみ、または地電位差変動のみが発生している時間領域もわずかではあるが存在することが示されている。

この冬期間のおおのの月に、瞬間風速が 20 m/s 以上の状態が断続的に 1 時間以上発生した日数、パルスのな地電位差変動が発生した日数、両者が同時に発生した日数、およびどちらかの変動が発生した延べ総時間、両方の変動が同時に発生した総時間、および前者の総時間に対する後者の総時間の割合を表 1 に示す。ただし 1 月は、31 日を除いて落雷の影響と思われる観測システムの停止があったため欠測としている。この表には、11、12、2、4 月は、80% 以上の時間割合で両者が同時に発生していることが示されている。特に 12 月と 2 月には 95% 以上の割合で両者が同時に発生しており、これら二つの信号には強い相関があるといえる。残りの月でも 50% 以上は両者が同時に発生しているが、季節によりどの程度強い相関が見られるの

かについては、年間を通じての観測データが得られていないため現時点では不明である。

ここでは両者の変動信号がそれぞれ 1 時間以上断続的に継続する場合を示したが、1 時間未満でも両者が同時に発生している場合も見られた。

次に、この地電位差変動の発生原因としてどのようなことが考えられるか検討する。地中電位差の発生原因としては、比較的容易に特定することができる人工的あるいは地磁気の変動による場合を除けば、圧電効果によるものおよび流動電位によるものが挙げられる。このうち圧電効果は岩石に含まれる圧電効果をもつ結晶体に圧力差がかかったとき、電圧が発生するものである。しかし、観測地点は土壌であり、このような結晶体はほとんど含まれていない。たとえ、存在したとしてもそれぞれの土壌粒子の結晶軸方向は、ばらばらと考えられるため圧力差が発生しても土壌間全体としての電圧の発生は考えにくい。

1995年11月

図 7 風速変動と地電位差変動の発生関係

Fig. 7. Periods in which instantaneous wind speed exceeds 20 m/s and earth potential difference pulse signals occur.

表 1 変動信号の発生する日数と時間数

Table 1. Days and hours when variations occurred.

年 月	風速 20 m/s 以上の日数(日)	地電位差変動が発生する日数(日)	両方が同時に発生する日数(日)	どちらかが発生する延べ総時間数(時間)	両方が同時に発生する延べ総時間数(時間)	両方が同時に発生する割合(%)
1995年10月	9	10	6	82	46	56
1995年11月	12	12	11	116	97	84
1995年12月	9	10	9	99	96	97
1996年1月	欠 測					
1996年2月	12	13	12	111	105	95
1996年3月	14	16	13	146	104	71
1996年4月	11	12	10	97	78	80

(注)1時間以上断続的に発生する場合のみ

一方、流動電位については、エルンストソンとシェーラー⁽¹⁾が地電位差の変動は、種々の水理地質学的条件や気象条件に関連していることを明らかにしている。また、植物成長によっても小さな流動電位がもたらされること、植物の根の近くでの拡散電位の可能性についても議論している。彼らは年変化のような時間的にゆっくりした変動の原因についても同様に、地中の水の流れによる流動電位の変動と考えている。地中垂直方向の地電位差の変化は、これを3か月シフトしたとき、地表面からの水分の蒸発散の変化と強い相関をもつことを明らかにしている。これについては、数か月におよぶ地中の水の移動を意味している

図 8 流動電位発生の説明図

Fig. 8. Schematic diagram of streaming potential.

ものと解釈している。しかし、彼らの観測は、一か月に2回の測定であり、数か月にわたる長周期の変化についての場合と考えられる。

ここで議論されている界面動電効果の一つである流動電位がどのようなものか、以下に簡単に説明する。

観測を行うための電極を埋設している地点の土壌は堆積層である。堆積層では土壌粒子が大部分の空間を占めるが、わずかな隙間に電荷をもつ水が満たされているような状態にある。これを単純化すると、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。この毛細管を拡大して図8に示す。

このような細管では、一般に管壁には負電荷が付着し、

一方管内の液体（水）には正電荷が分布して存在する。管壁の固体面と水の液体面の接触部分には電気二重層が形成されており、この間の電位差はゼータ電位と呼ばれている。液体の含まれる細管の両端に圧力差が与えられれば、液体の流れが起こるが、この流れは液体中の電荷の運搬も行うので、これによる電荷の分極が起こり、両端に電位差が発生する。これにより液体の流れとは反対方向の電荷の流れを生じこの二つは平衡する。定常状態に達したときには圧力差に比例する伝導電流と電位差による電流の大きさが等しく逆方向となるため、電流は流れないことになる。

この両端に発生する流動電位差は、圧力差と比例している。水谷ら⁽⁴⁾によれば流動電位差 ΔV と圧力差 ΔP の比は、

$$\Delta V/\Delta P = \varepsilon \zeta / \eta \sigma$$

で表される。ここで ε ：誘電率、 ζ ：ゼータ電位、 η ：流体の粘度、 σ ：導電率である。

今考えている地中領域で、電流が流れる回路が形成できない場合は、この流動電位が発生するだけであるが、電流回路が形成される場合には、電位の高いほうから低いほうへ電流が流動電流として流れることになる。

次に、流動電位の応答時間がどれくらいになるかが問題となる。これまでの地震波伝搬に伴う地中電位差変動の観測から、地中電位差変動は地震波によって発生する地中圧力差に比例することが明らかにされている⁽⁵⁾。更に、地中における流動電位の変動応答時間は、地震波の大地速度変動に追従している。従って、地中での流動電位の時間応答は、地中圧力差変動時間と同様に1秒以下と考えられる。観測で得られている風速変動による地電位差変動は数分であり、応答時間に関して、この変動を流動電位の発生として説明することは可能である。

しかし、観測で得られたような、風速による地電位差変動の発生を説明するには、地表での風速変動により地中に地電位差が発生する機構を明確にする必要がある。このためには、更に多くの観測パラメータが必要となるため、現時点ではこの機構を明確にすることは困難である。ここでは、考えられる二つの可能性を挙げておく。

風速が地電位差の発生に影響するとしたとき、風速により変化するものとして、地表面付近での気圧、温度、大気中の水蒸気量が考えられる。そこで、

- (i) 大気中の水蒸気量を示す比湿が風速変動と同じような数秒から数分の時間変動を示す観測データが得られている⁽⁶⁾。この水蒸気量の変動に対応して、地中からの水分の急激な蒸発が起こり、地中での水の流動により電位が発生
 - (ii) 風速変動は地表面の大気圧変動をもたらすため、これにより地中に圧力差が生じ、これによる流動電位の発生
- が考えられる。

5. ま と め

これまでの観測で、気象要素のうち風速が地電位差変動の発生と密接な関連があることが明らかとなった。すなわち、風速がほぼ20 m/sを超えると、特有のパルス状の地電位差変動信号が観測される。

その発生原因について検討し、流動電流による地電位差の発生である可能性が高いことを指摘した。

裸地や草地での観測では、風速がある程度以上を超えると、本論文で述べたような地電位差変動信号が観測される可能性がある。従って、観測された地電位差変動の解釈を行ううえでは風速の影響についても考慮する必要がある。

(平成10年12月10日受付、同11年12月10日再受付)

文 献

- (1) K. Ernstson and U. Scherer: "Self-potential Variations with Time and their Relation to Hydrogeologic and Meteorological parameters", *Geophysics*, 50, No. 10, 1967~1977 (1986)
- (2) 竹内伸直・成田憲一・小野 徹・後藤幸弘・中鉢賢憲:「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)
- (3) 竹内伸直・成田憲一・高橋忠利・中鉢賢志・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, 568~573 (平7-4)
- (4) H. Mizutani, T. Ishido, T. Yokokura, and S. Ohnishi: "ELECTROKINETIC PHENOMENA ASSOCIATED WITH EARTHQUAKES", *Geophysical Research Letters*, 3, 365~368 (1976)
- (5) 竹内伸直・中鉢賢憲・堀田 卓・成田憲一:「地震波信号による地電位差信号の解析」, 電学論 C, 117, 1219~1224 (平9-9)
- (6) 気象利用研究会編: 気象利用学, (平10-11) p. 44, 森北出版

竹内伸直 (正員) 1942年4月6日生。65年3月東北大学工学部電子工学科卒業。70年3月同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修了。同年4月東北大学工学部助手。同助教授を経て、現在、秋田県立大学システム科学技術学部教授。工学博士。地震、雷の電磁変動量の計測とその信号解析の研究に従事。

大久保 寛 (非会員) 1976年5月2日生。99年3月東北大学工学部電気工学科卒業。同年4月同大学院工学研究科博士課程前期課程進学、現在に至る。現在、通信用アンテナに関する研究に従事。

本 間 規 泰 (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)