断層および火山周辺における雷や磁気嵐に伴う 地電位変動の卓越方向*

酒井英男** 上坂麻子** 中山武*** 澤田豊明***

** 富山大学理学部地球科学科 *** 京都大学防災研究所

Abstract. The time sequence of electric fields of the earth at the magnetic perturbation was studied around active fault and volcano. Clear change of electric fields was induced at the time of lightnings and magnetic storm. There is a concentrated principal direction (PD) in the induced electric fields. The PD around the active fault zone directs at right angle to the strike of the fault. It is interpreted that the low electric resistivity zone running parallel to the fault causes the PD. At the active volcano Mt. Yakedake, the PD directs to the summit of the volcano, which is correlated with the resistivity structure of geothermal area.

1. 序論

地電位の測定による地殻変動の研究が最近、注目されている。ギリシャでは従来の地電位観測法を改良したVAN法と名付けられた手法による地震予知が実績を挙げており(上田, 1990; Varotsos et al., 1993), 日本でも同手法を地震や火山活動のモニターに利用する試みが行われている(Nagao et al., 1996)。しかし地電位の変動には種々の要因が影響しているため検討すべき点が多く、観測結果を地殻変動のモニターに利用するには、その要因を十分に見極める必要がある。

地中に電極を埋めて2本の電極間の電位差を測定して行われる、地電位の観測データには、短周期の変動がしばしば認められる。短周期変動を起こす原因の一つに、落雷時の電磁波や磁気嵐の地磁気擾乱がある。地殻変動の観測を目的とした地電位観測に現われる落雷や磁気嵐の影響は、従来ノイズとして除かれているが、本研究では、こうした現象に起因する地電位変動に注目して解析を行った。

解析に用いた地電位データは、中部地域の活断層の直上・近傍の観測点および、岐阜県の焼岳火山の近傍の観測点における記録である。

図1に示す各観測点では、東西と南北方向、または断層走向に直交および走向方向に、それぞれ30m~100m長の測線を設けて地電位が観測されている。電極には鉛-塩化鉛電極が用いられ、地下約1mの深度に埋めている。

* CHANGE OF PRINCIPAL DIRECTION OF ELECTRIC FIELDS INDUCED AT LIGHTNINGS
AND MAGNETIC STORM OBSERVED AROUND THE ACTIVE FAULT AND VOLCANO

** Hideo Sakai and Asako Kousaka

Department of Earth Sciences, Toyama University, Gofuku 3190, Toyama 930

*** Takeshi Nakayama and Toyoaki Sawada

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji 611

Fig.1. Location of observation stations for electric fields.

2. 磁気嵐の時の地電位変動

図1に示す、岐阜県の跡津川断層上に位置する西天生地区および宮川地区では、地電位の観測が10年以上行われており、観測結果はテレメーター回線を通した記録（京都大学防災研）とペンレコーダーによる記録がなされている。

図2は1982年の9月6日18時から7日6時にかけて起きた磁気嵐の時に、気象庁・柿岡地磁気観測所で得られた地磁気の水平成分の変化を示している。

Fig.2. Record of the time variation of horizontal magnetic field of Kakioka Observatory at the time of magnetic storm on September 6 to 7, 1982.

図3には、同期間に西天生と宮川の各観測点で得た地電位変動を示している。図の上は断層走向に直交する測線の観測結果で、下は走向方向の測線の結果である。この地電位変動の方向性を以下の様に検討した。各測線の地電位に現われたパルス状の変動について、平常値からの変動量を読み取る。この値に電極間隔の補正を施した後、南北と東西の成分に変換して、縦軸に南北成分、横軸に東西成分を取ってプロットする。

図4 aと4 bには、一連の磁気嵐で誘導された西天生と宮川の両観測点の地電位変動を同過程により解析し、時間変化としてホトグラフにまとめている。図から明らかなように、地電位の変動方向はともにNW-SEの方向に卓越している。これは断層の走向に直交する方向である。

Fig. 3. Record of the electric fields of Nishiamo and Miyagawa stations at the time of magnetic storm on September 6 to 7, 1982.

図4 c は、同時時間帯に観測された地磁気の水平成分について、時間変化をホトグラフとして示している。図4 c の地磁気変動には、点線で示す方向性が認められるものの、地電位変動にみられる明確な卓越方向ではない。また地電位変動の卓越方向は、点線の磁場変動に誘導される直交方向とはかなりずれている。他の磁気嵐の時も、両観測点における地電位変動は図4と同方向に卓越した。

磁気嵐の際の地電位変動については、力武(1972)などの研究により、図4と同様、磁場変動と直交しない方向に卓越することが幾つかの観測点において報告されている。

西天生観測点の地電位変動の振幅は宮川観測点より常に大きい。地電位変動の振幅は電磁誘導による誘導電流と電気比抵抗により決まる。誘導電流の両観測点における違いを検討していないので断言できないが、予察的な電磁気探査(加藤, 1993)では西天生

Fig. 4. Hodographs of horizontal magnetic field analyzed from the records of Kakioka observatory and those of horizontal electric fields of Nishiamo and Miyagawa stations, at the time of magnetic storm on September 6 to 7, 1982.

観測点の周囲は宮川観測点より地下の電気比抵抗が高い傾向が示されており、比抵抗の高低が地電位変動の振幅を決めている可能性が高い。

3. 落雷に伴う地電位変動

3. 1 跡津川断層での観測

上記の観測点では、図5のような落雷に伴う地電位変動もよく観測されている。落雷時の地電位変動について、磁気嵐の時と同様に変動の方向性を検討した。

Fig. 5. Sample record showing the electric fields at Nishiamo station at the time of lightning.

図6には西天生と宮川観測点における地電位変動を南北と東西成分に分けて表わし、方向性を示した。図の1個のプロットは1回の落雷現象を表している。数時間の地電位変動に対応したプロットから平均の変動方向を最小自乗法で求めた。直線で示される変動方向はNW-S Eに卓越しており、磁気嵐の時の卓越方向と一致している。

Fig. 6. Principal direction of electric fields at Nishiamo and Miyagawa stations at the time of lightning on November 30, 1989.

3. 2 活断層における地電位変動の卓越方向

跡津川断層上に位置する西天生と宮川観測点では、落雷時の地電位変動は断層の走向に直交する方向に卓越した。断層走向に直交する卓越方向は、同断層の他地域における臨時観測でも認められた。図7は、跡津川断層の各観測点で求めた地電位変動の卓越方向を示している。

同様な観測は、富山県東部の黒菱山断層、岐阜県南部の阿寺断層および濃尾地震断層でも実施した。図8には黒菱山断層と阿寺断層における地電位変動の例を示しており、図7に得られた卓越方向を示している。黒菱山断層は、北東-南西の走向を持ち、全長30km以上におよぶ、富山平野断層群で最大の活断層である。阿寺断層は北西-南東走向

の全長約80kmの大活断層である。
阿寺断層上と黒菱山断層上の観測点
でも断層走向に直交する地電位変動
が認められた。濃尾地震断層の結果
については次章に述べる。

Fig. 7. Distribution of principal direction in the induced electric fields at the lightning observed around the Atotsugawa, Neodani and Atera fault zones.

Fig. 8. Principal direction of electric fields at Kurobishiyama (Asahi) and Atera stations.

図9は、黒菱山断層・朝日観測点における数年間の記録から得た、落雷時の地電位変動の卓越方向をまとめている。断層走向に直交する卓越方向には系統的な変化はない。跡津川断層・西天生観測点の卓越方向は、データの欠測期間を挟むものの、経年変化には同様に、図7に示す方向から系統的な変化は認められない。

跡津川断層、阿寺断層、黒菱山断層の各観測点は断層の破碎帯に位置している。断層破碎帯は、地層が破碎されており、また含水率も高いので電気比抵抗の低い領域となる（物理探査学会, 1989など）。本研究の観測点付近で実施した電磁気探査（Ohshiman et al., 1987; 中山ほか, 1991; 加藤, 1993）は、これらの断層破碎帯が低い電気比抵抗であることを確認している。さらに、破碎帯に近いほど比抵抗は低くなっており、断層に直交する比抵抗の勾配も確認された。

Fig. 9. Temporary variation of the principal direction in the induced electric fields at the lightning. Data at the Kurobishiyama station from June 1991 to October 1994.

破碎帯の低い比抵抗領域の周囲における電位分布をモデル実験により調べた。図10は、カーボン紙上に電気抵抗の低い領域（conductor）を短冊状に作り電位分布を調べた結果である。低い電気抵抗領域は、調査を多く実施した跡津川断層の破碎帯の走向を想定しており、電流の向きは南北の磁場変動で誘導される電流を考えている。

カーボン紙上の等電位線は、低抵抗領域の長軸方向に勾配が緩く短軸方向に急になっている。この等電位線の歪みの結果、短冊に直交する測線の電位差は長軸走向の測線に比べて大きい。低比抵抗領域に直交する測線で地電位差が大きい傾向は電流方向や短冊の位置と関係しない。このような電位分布を誘導する機構が断層破碎帯の近傍で働き、落雷の誘導電流による地電位差の分布は断層の走向方向に大きくなると考える。

Fig. 10. Schematic model for the principal direction of electric fields.

3. 3 濃尾地震断層系の根尾谷観測点の結果

1891年の濃尾地震の際に濃尾地震断層系が一群として出現した（岡田，1987；岡田ほか，1992）。この断層系が走る岐阜県本巣郡の観測点（根尾谷観測点）において1991年9月より地電位観測を行っている。観測点は、図11に示すように雁行配列をしている根尾谷断層と梅原断層に挟まれた重複部に位置しており、根尾谷断層から500m、梅原断層から約1.5kmの距離にある。図12は、1993年3月20日の落雷時に認めた地電位変動を示している。顕著な卓越方向がNW－SE方向に存在する。

Fig. 11. Location of Neodani station and the Neodani and Umehara active faults (Okada, 1987).

Fig. 12. Principal direction of electric fields at Neodani station at the time of lightning on March 20, 1993.

図 13 は、同観測点において1992年10月から1995年7月の期間に、落雷時に認められた37個の地電位変動の卓越方向の経年変化を示している。卓越方向は、断層走向に近い方向から、約3年間で30度近く真北方向に系統的に移動している。

この観測点における地電位変動の卓越方向が、跡津川断層、黒菱山断層や阿寺断層で認められた断層走向に直交する傾向と異なるのは、雁行する断層の重複部という複雑な地下構造（電気比抵抗の構造）のためと考えられる。卓越方向が経年変動しており、断層走向の直交方向に移動していることは、雁行配列に対応する地下の電気比抵抗の構造が観測点近傍で新たに生じている可能性を示唆している。

Fig. 13. Temporary variation of the principal direction in the induced electric fields at the lightning. Data at the Neodani station from October 1992 to July 1995.

3. 4 焼岳観測点の結果

岐阜県と長野県境にそびえる焼岳は有史以来、噴火を繰り返している活火山であり、1960年代にも山腹噴火や小爆発と群発地震を起していた。1980年代に入って、山頂付近の微小地震活動が示されている（和田ほか、1991）。

焼岳山頂から北北西に約3.5km離れた中尾地区では、1988年より、地電位、地温、蒸気温度と地磁気の常時観測が行われている（酒井ほか、1991）。この中尾観測点で得られた1992年1月から3年間の地電位記録を解析した。

図14は、1994年9月17日の落雷時に、観測された地電位変動を示す。地電位変動にはNNW-SSEの卓越方向が存在し、卓越方向は観測点から見た焼岳の山頂方向とほぼ一致している。同様な卓越方向は他の落雷時の地電位記録でも認められている。

Fig. 14. Principal direction of electric fields at Nakao station observed at the time of lightning on September 17, 1994.

焼岳には、山頂から麓の中尾地区にかけて帯状に延びる地熱地帯がある（建設省、1991）。地熱活動の活発な地域では自然電位は高く、熱水流動による流動電位で説明される（石土、1981など）。中尾観測点の南北と東西測線における平常時の地電位（自然電位）から合成された地電位方向は山頂方向を向いており、落雷時に誘導される地電位変動の方向とほぼ一致している。地熱活動による流動電位（自然電位）の分布に対応した比抵抗構造が存在し、落雷時の地電位変動の卓越方向を誘導していると考えられる。

中尾観測点で得られた落雷時の地電位変動について、1992年1月から3年間に認めた45個の卓越方向の経年変化を調べた（図15）。卓越方向はN5°W～N30°Wの範囲にあり系統的な変化は見られない。この結果は、調査期間に焼岳火山麓の中尾観測点では、地下の電気比抵抗の構造に大きな変化が起きていないことを示すと考える。

Fig. 15. Temporary variation of the principal direction in the induced electric fields at the lightning. Data at Nakao station from January 1992 to January 1995.

4. まとめ

本稿では磁気嵐と落雷に誘導される地電位変動を、中部日本の活断層と活火山の周辺で調べた。落雷時の地電位変動には、磁気嵐に誘導される地電位変動と同様、観測点に固有な卓越する方向が存在した。データ数も多い落雷時の地電位変動に注目して卓越方向の調査を行った。

跡津川断層や阿寺断層、黒菱山断層の断層上で観測された卓越方向は、断層走向に直交する方向を示した。焼岳活火山の麓で観測された卓越方向は山頂方向を向いた。卓越方向は、観測点周辺の電気比抵抗の特異性に影響されており、断層では断層破碎帯の比抵抗構造に、焼岳火山では火山体の地熱活動による比抵抗構造に起因すると解釈した。

落雷時に観測された地電位変動の卓越方向の経年変化を調べた。焼岳や黒菱山断層、跡津川断層における卓越方向は、数年間で殆ど変動は無かった。根尾谷断層・梅原断層の重複地域に位置する根尾谷観測点では、卓越方向が3年間で約30°北へ移動していた。根尾谷観測点における経年変化は、二つの断層に挟まれた地下構造の変化との関連が考えられるので、今後、電磁気探査等で検討する必要がある。

本研究により、地殻変動の観測を目的とした地電位観測では、絶対値の変動だけでなく、落雷などに伴う誘導地電位の卓越方向も重要な情報となることが示された。研究をさらに進めるには、本論文で調査できなかった落雷地点や電流値の情報が必要と考える。

地下の電気比抵抗の異方性が、雷雲と大地間の放電現象に及ぼす影響にも興味を持たれる。落雷時の地電位の研究は、大気電気学と地球電磁気学の両分野からアプローチが望まれる対象である。

謝辞

磁気嵐の時の地磁気データは、気象庁柿岡地磁気観測所から頂いた。跡津川断層の地電位観測では、京都大学防災研究所上宝観測所にお世話になった。根尾谷観測点の観測では、帝国建設コンサルタンツの鷲見武富氏に御協力頂いた。以上の皆様に感謝申し上げる。

参考文献

- 物理探査学会, 図解物理探査, pp. 239, 1989.
- 石戸経士, 地熱水対流に伴う流動電位—地熱地域における自然電位異常の1つのメカニズムとして—, 日本地熱学会誌, 3, 87-100, 1981.
- 加藤剛之, 人工地震・雷放電時に認められた電磁気現象, 富山大学修士論文, pp64, 1993.
- 建設省北陸地方建設局, Sabo Now, pp. 45, 1991.
- 中山武, 酒井英男, 小林剛, 加藤正明, 三雲健, 跡津川断層と阿寺断層における電磁気観測, 京都大学防災研究所年報, 34 B-1, 355-367, 1991.
- Nagao, T., S. Uyeda, Y. Asai and Y. Kono, Anomalous changes in geoelectric potential preceding four earthquakes in Japan, in "A critical review of VAN, ed. Sir J. Lighthill", World Scientific, 292-300, 1996.
- Ohshiman, N., Y. Honkura, K. Kuge and H. Sakai, Electric and magnetic anomalies at the Atotsugawa fault and their implications for fault activity, J. Geomag. Geoelectr., 39, 143-158, 1987.

- 岡田篤正, 濃尾地震断層系根尾谷断層(巡検資料), 活断層研究, 4, 71-90, 1987.
- 岡田篤正, 渡辺満久, 安藤雅孝, 佃為成, 平野信一, 濃尾断層系から発生した古地震の考察—梅原断層のトレンチ調査—, 地学雑誌, 101, 1-18, 1992.
- 力武常次, 地球電磁気学, PP.472, 1972.
- 酒井英男, 平井徹, 澤田豊明, 中山武, 和田博夫, 三雲健, 焼岳における電磁気観測, 京都大学防災研究所年報, 34 B-1, 343-354, 1991.
- 酒井英男, 小林剛, 加藤隆司, 広岡公夫, 澤田豊明, 中山武, 鷲見武富, 雷と大地の電磁気現象—誘導地電位の卓越方向と落雷に伴う残留磁化—, 防災科学技術研究所研究資料, 166, 1-13, 1995.
- 上田誠也, 地電流による地震予知, 固体物理, 25, 120-134, 1990.
- Varotsos, P., I. Alexopoulos and M. Lazaridis, Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals, II, Tectonophysics, 224, 1-37, 1993.
- 和田博夫, 三雲健, 小泉誠, 飛騨地方北部及び富山湾・能登半島周辺の最近の地震活動, 京都大学防災研究所年報, 33 B-1, 57-74, 1991.

(Received November 1, 1996; revised May 14, 1997;
accepted May 19, 1997.)