

太田断層における自然電位測定 —測定値の信頼性について—

坂中伸也・西谷忠師・筒井智樹・佐藤久美子・山下幹也・小林勝幸・根典子・今野美貴子

秋田大学工学資源学部地球資源学科

Self-Potential Measurements at the Ota Fault, Akita, Northeast of Japan —A Reliability of Obtained Data—

S. Sakanaka, T. Nishitani, T. Tsutsui,
K. Sato, M. Yamashita, K. Kobayashi, N. Kon, and M. Konno

*Institute of Applied Earth Sciences,
Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, Japan*

1. はじめに

火山や活断層の活動や構造を調べるための一つの方法として、自然電位 (Self-Potential (SP)) 測定が近年注目されている。この観点における自然電位の原因としては、地下水の流動が地表における電位異常として現れる界面動電現象が重視され、その分布や時間変化が調べられている。一般に、火山では 100mV 以上、時には 1V を超えるような自然電位異常が観測されるが、活断層帯においてはその大きさは数 10mV 程度であることが多い。実際に自然電位を測定すると、数 m、あるいは数 10cm 電極を移動したり、少し時間をおいたりするとその値が変化する経験をするところがある。火山における自然電位異常のように自然電位の値そのものの変化が大きい場所ならば問題ないが、自然電位異常の小さな場所でその異常を議論する場合、測定値の誤差やばらつきに注意する必要があるように思われる。この稿では、まず、自然電位の分布のばらつきの程度を調べることに主眼を置いて、秋田県南東部の太田断層を横切る測線での自然電位の往復測定を行った。

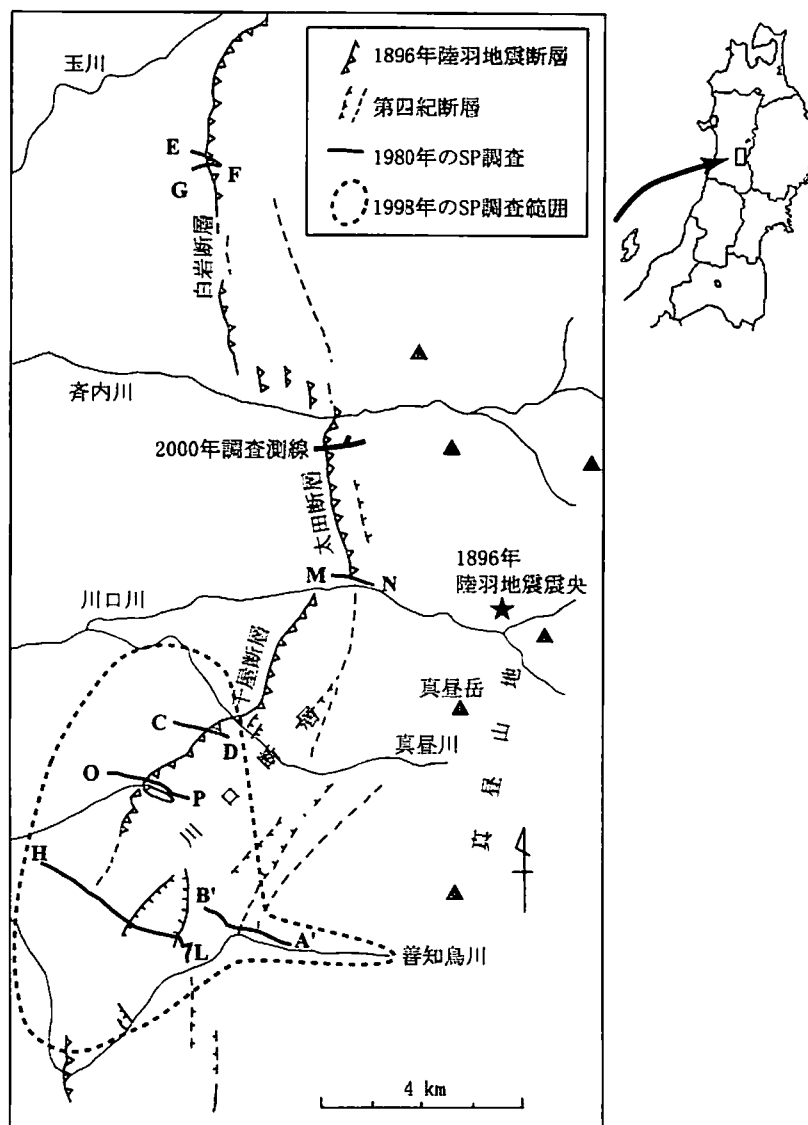
2. 横手盆地東縁断層帯

秋田県南西部にある横手盆地と奥羽山脈の境界には、横手盆地東縁断層帯が発達している。これらの断層はいずれも南北方向から北北東—南南西方向の走行をもつ低角逆断層である。1896 (明治 29) 年の陸羽地震の際、横手盆地東縁の北部に、地震断層として千屋断層、太田断層、白岩断層が現れた (第 1 図)。この地震によって、さらに北側に生保内断層、真昼山地 (奥羽山脈の一部) をはさんで東側にも川舟断層を生じた。奥羽山脈の西側に現れた地震断層を一括して千屋断層とも、また、奥羽山脈の西側に分布する断層群を総称して千屋断層系とも呼ばれている。なお、横手盆地東縁断層帯のうち、陸羽地震の際に現れた断層とその周辺の断層群のことを白岩・六郷断層群という。白岩・六郷断層群では、断層線が時代とともに横手盆地側に移動していることが知られ、周辺のトレンチ調査とボーリング調査により、その活動周期は約 3500 年と推定されている (千屋断層研究グループ, 1986; 活断層研究会, 1991)。

今回自然電位の調査を行った太田断層はほぼ斉内川と川口川にはさまれた長さ約 3km の部分を指し、陸羽地震の際の東側隆起の最大量は約 2.5m であった。1996 年の春、自転車道路が山麓線に沿って建設され、秋田県仙北郡太田町金井伝では工事に伴って、太田断層の変位の様子がよくわかる断層露頭が現れた。この露頭の観察より、太田断層は地表付近で 15 ~ 35° の東傾斜をもち、走行は N20°E ~ N25°E であった (宮内ほか, 1997; 佐藤, 2001)。今回の自然電位測定はこの露頭付近を横切る金井伝沢に沿って行った。なお、1896 年陸羽地震の際に最大の変位を生じた千屋断層では、上下変位量約 3.5m、水平短縮量は約 3m またはそれ以上で、地表付近の東傾斜は 20 ~ 45° であった (松田ほか, 1980)。

3. CA グループによるこれまでの自然電位調査

白岩・六郷断層群周辺では、日本の CA グループ (Conductivity Anomaly 研究会) が 1980 年 (水谷・鍋谷, 1981 ;



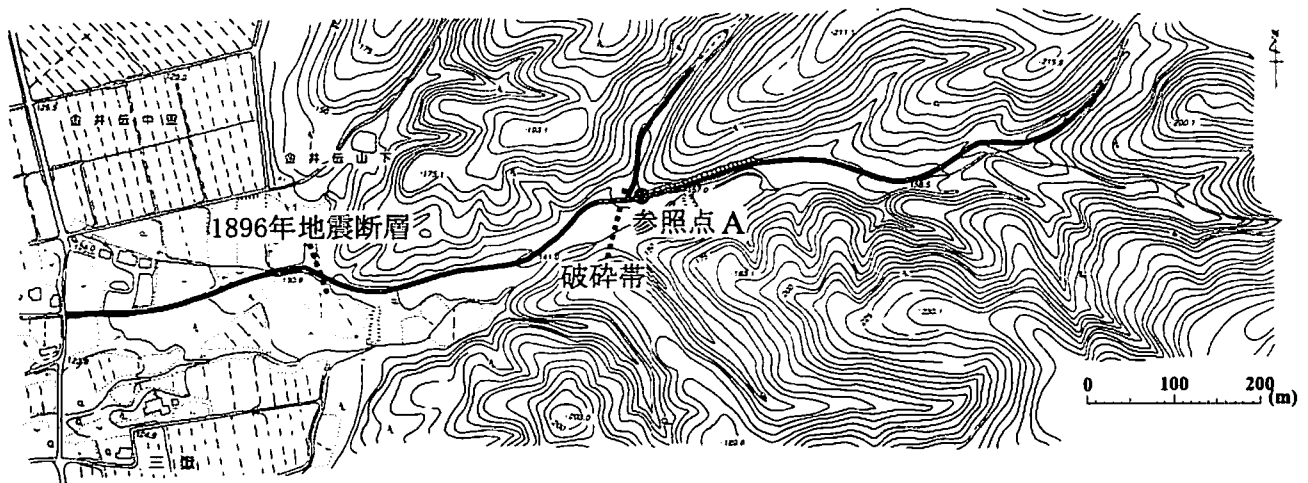
第1図 横手盆地東縁に現れた陸羽地震（1896年）の地震断層および自然電位の調査測線。（松田ほか（1980）をもとに加筆）

Murakami et al., 1984) と 1998 年（村上ほか, 1999）の 2 度にわたって自然電位の測定を行っている。1980 年の自然電位測定の測線は第 1 図に示したように、A'-B'、C-D、E-F-G、H-L、M-N、O-P の各測線で行われた。各測線で、数 10mV 程度の正の異常が断層線の東側、すなわち逆断層の上盤側で認められた。この自然電位分布は、断層面に沿って地下水が湧き出し、地表面近くで周囲に浸透することや、断層面に自然電位のソースを仮定するなどの界面動電現象による説明が試みられている。

1998 年の自然電位調査は千屋断層周辺で総延長距離 60km にわたって行われた。調査地域は第 1 図の破線で囲んだ部分で示した。1998 年の調査においても 1980 年の調査とよく似た傾向の自然電位分布が得られ、顕著な自然電位分布の時間変化は見つかっていない。このことから、測定で得られた自然電位分布は断層周辺の地質や地下水の流れに対応する定常的なものであるといえる。

4. 自然電位測定の概要

今回、太田断層において、地震断層を横切る東西約 1.3km の測線に沿った自然電位往復測定を 2000 年 9 月 23 日、11 月 10 日の 2 日間にわたり行った。測線は第 1 図に「2000 年調査測線」と記した位置にあり、その拡大図を第 2 図に示した。1896 年陸羽地震の地震断層と、新たに地質調査により発見された破碎帯（佐藤, 2001）の測線付近の位置を破線で示してある。この破碎帯は最も新しい地表直下の地層に及んでおらず、現在の活断層線より奥羽山脈側に位



第2図 太田断層を横切る自然電位測定の測線。長さ約1.3kmの東西測線と、長さ約0.3kmの枝分かれした南北測線を示す。参照点Aの位置、1896年陸羽地震の地震断層、地質調査で判明した破碎帯の測線付近の位置を示した。

置しており、過去に活動していた断層の1つであると考えられる。この破碎帯の露頭では、その走行、傾斜は、それぞれ、 $N20^{\circ}E$ 、 $34^{\circ}irc$ であった（佐藤，2001）。

自然電位測定の方法は、1つの電極を基点に固定し、他の1つの電極のみを移動させてゆく「全電位法」を今回は採用した。比較的短い50～100mの導線を用い、2つの電極を交互に移動させてゆく「尺取り法（かえるとび法）」と比べ、誤差の累積を抑えることができるのが利点である。電極として、高さ約10cm、直径6～8cmの素焼きの壺を用いた銅-硫酸銅の非分極電極を用い、入力抵抗約100M Ω のデジタルテスターで0.1mVの単位まで読み取った。測定は測線上10m毎に行った。測線上の地面にコンクリート釘に短い塩化ビニルのひもをつけた目印を10m毎に打ち込み、往復測定においても同じ場所で測定できるようにした。9月23日の調査ではもともと地面に適度な湿り気があったが、電極と地面との接地抵抗をよくするために電極と地面との間に水を注いだところもあった。水を注ぐとテスターに表示された値がドリフトする傾向があったが、そのまま1分程度時間をおいてから値を読み取った。11月10日については雨が降っていたため、水を注いでおらず読み取り値も安定していた。

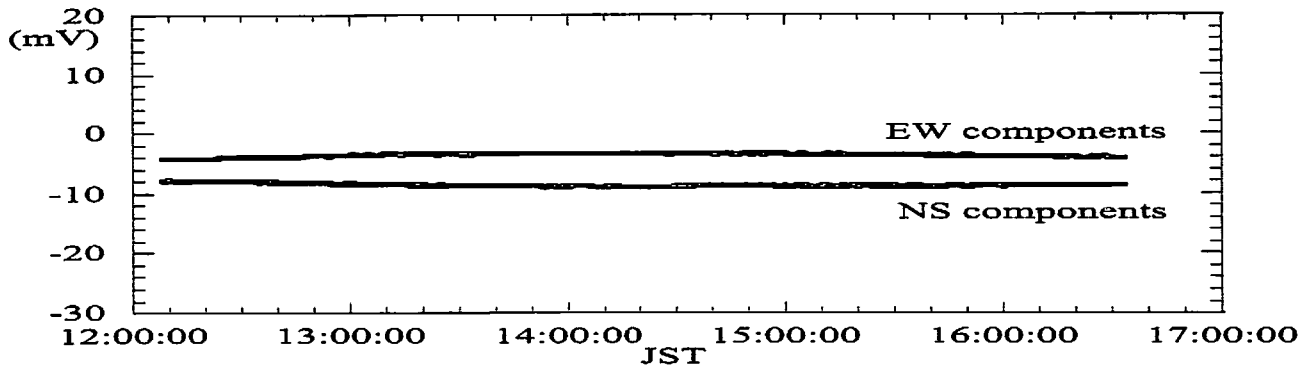
4.1 2000年9月23日の自然電位測定

電極のドリフトや地電流の日変化の影響をチェックするために、東西測線のほぼ中央部を参照点Aとし、東西、南北にそれぞれ10mの測線を十字に設けて電位差の時間変化をモニターした。参照点Aの位置は第2図に示す。モニター用の電極には移動測定に用いたものと同様の銅-硫酸銅電極を用いた。比較のために長さ約80cm、直径約1.5cmのステンレス棒の電極を用いて同様に時間変化をモニターした。データロガーとして白山工業㈱製のLS8000を用い、20Hzサンプリングで電極間の電位差を収録した。銅-硫酸銅電極についての時間変化を第3図に、ステンレス棒の電極についての時間変化を第4図に示す。データを間引いて1分毎の値として図示してある。

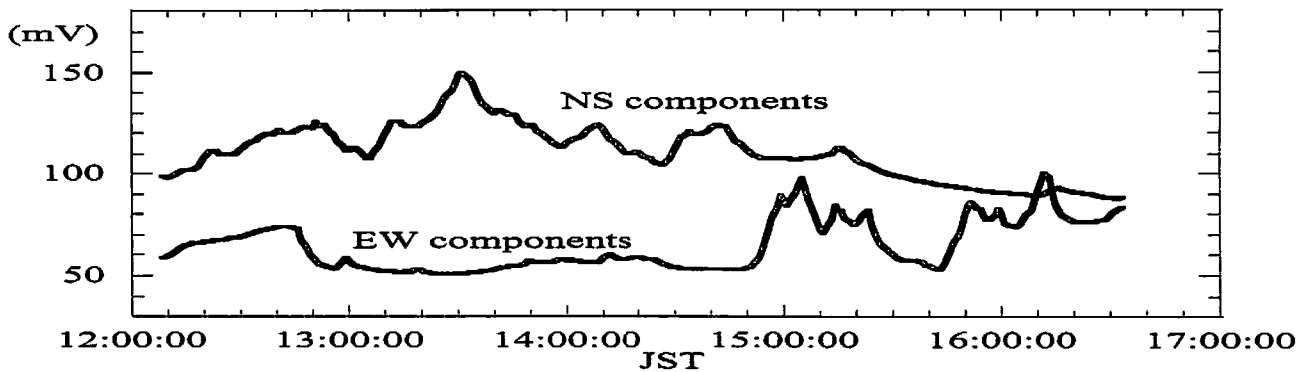
東西測線上を移動測定している間、銅-硫酸銅電極を用いたときの参照点における時間変化は1mV程度であった。時間変化については十分安定していると見なせ、移動測定における時間変化の補正は必要ないと判断した。なお、ステンレス棒を用いたときの時間変化については、時間変化が大きく、おそらくステンレス棒表面の電荷の振る舞いに原因があると考えられるが、複雑でよくわからない。

東西測線について、参照点Aを全電位法による自然電位測定の基点とし、そこから両側の測線の端に向かって往復測定を行った。基準電極と移動電極の間を100mあたり15 Ω 程度の電気抵抗をもつ被覆導線をつなぎ、その導線の間にデジタルテスターをつないだ。2000年9月23日に得られた自然電位分布を示した第5図には、往路について“1st survey”，復路については“2nd survey”，として示した。各測定点ではデジタルテスターを用いて1回だけ値を読み取っている。

往路と復路での自然電位の差の平均は、参照点Aの東側で2.6mV、西側で10.1mVであった。東側では往路と復路で得られた自然電位は極めてよく一致しているのに対し、西側では電位測定の基点が固定されているのにも関わらず、往路と復路とでオフセットがあるように見える。特に西側の復路の測定では、電極と地面の間に水を注いで土を



第3図 参照点 A における東西、南北それぞれ電極間隔 10m の電位差時間変化。銅-硫酸銅電極の場合。



第4図 参照点 A における東西、南北それぞれ電極間隔 10m の電位差時間変化。ステンレス棒を電極として用いた場合。

こね、接地抵抗を低減する努力を入念に行った。東側の測線の往路では水を用いた測定点もあったが、復路では水を全く使わなかった。Corwin and Hoover (1979) でも触れられているが、この場合、過剰の水が自然電位の測定値にオフセットを与えたようである。このオフセットは時間が経てばもとに戻るが、接地抵抗をよくするために水を用いる場合でも、各測定点において同じ条件で測定する必要があるのがわかる。

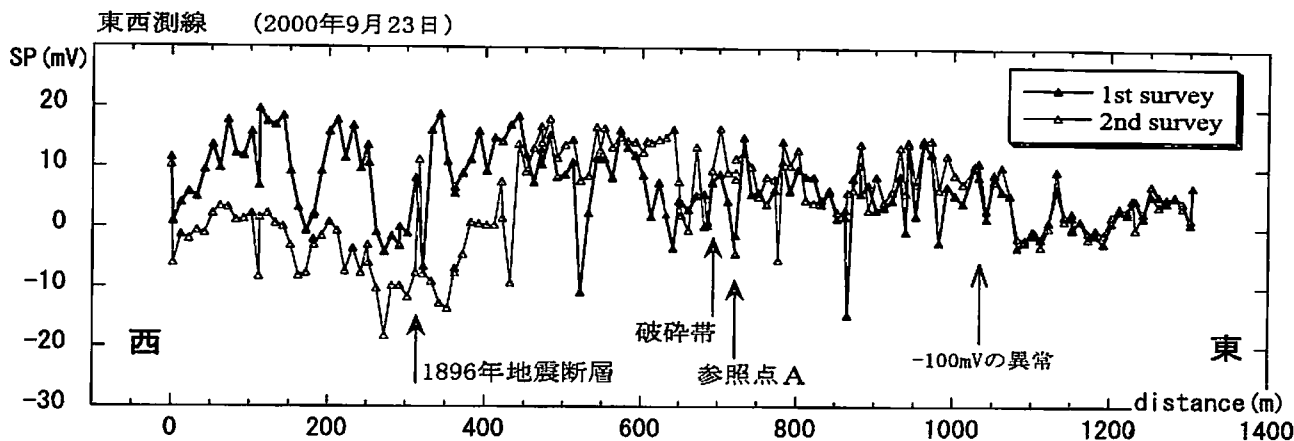
なお、グラフからは除外したが、測線の西端から 1.1km ほどのところに、局地的な -100mV 程度の異常があった。異常があるのは測線上数 m の範囲で、往路、復路とも検出され、2000 年 11 月 10 日の測定の際にも同じ場所に現れた。原因については精査していないが、測定を行っている未舗装道路の下に、鉄の塊などが埋まっており、異常な地電流を生じているのかも知れない。

4.2 2000 年 11 月 10 日の自然電位測定

太田断層を横切る東西測線の西端を測定の基点とし、東に向かって移動しながらの測定 (1st survey)、並びに東端を測定の基点とし、西に向かって移動しながらの測定 (2nd survey) を行った。この日は参照点を設けるなど連続測定は行わなかった。ここでは導線として ETFE (ethylene-tetrafluoroethylene copolymer) で被覆された軽量のラッピング線を用いた。この導線の電気抵抗は 100m あたり 30Ω 程度である。各測定点で電極をすぐ横に埋め替えながら、3 回以上測定を行い、値がばらつきが最も少ない 3 つの測定値の平均を、その測定点における値とし、その標準偏差も計算した。また、北の沢へ枝分かれした長さ約 0.3km の南北測線についても、第 2 図に示した参照点 A を基点として自然電位測定を同様な方法で行った。測定結果を第 6 図に示す。

測定値の標準偏差の平均は、東西測線の 1st survey で 0.89mV 、2nd survey で 0.51mV 。南北測線では 1.10mV であった。南北測線では水平方向に数 10cm 電極を移動するとやや値がばらつきやすい傾向があった。また、これもグラフには示していないが、南北測線上で参照点 A から 100 ~ 120m の地点で -100mV を超える局地的な異常がある。

南北測線では沢の奥に進むに従って電位が 20mV 程度上昇する。この原因は明らかではないが、古い破碎帯の延長線上にあることから、何か関係があるのかも知れない。



第5図 太田断層を横切る東西測線における2000年9月23日の自然電位測定値。銅-硫酸銅電極を使用。参照点Aを電位の基準、測線の西端を距離の基準とした。

5 自然電位データの平滑化

まず、11月10日の東西測線で測定された自然電位分布について、1st surveyで得られたものと、2nd surveyで得られたものの平均をとり、その平均値とそれぞれの値からの差についてRMS残差 (Root-Mean-Square residual) を求めた。その値は2.4mVであった。同じ日に、同じ測定点で自然電位の往復測定をした場合、得られたデータの信頼性は、個々の測定点で得られている誤差の伝播をも考慮に入れると3mV程度ということになる。9月23日の測定では、電極の接地をよくするために使った水の影響があるのでここでは用いないが、別の日に行った測定値との差を調べることによって、定常的な地下の情報をデータがどの程度反映しているかということがもう少し見えてくるものと思われる。

測定されたままの自然電位のデータはばらつきがあって見にくいので、3点移動平均を繰り返し施して平滑化した。移動平均のデータの端の点については、端の点の重みを2倍にして1つ内側の点との平均をとり、それを移動平均のための新たな値とした。

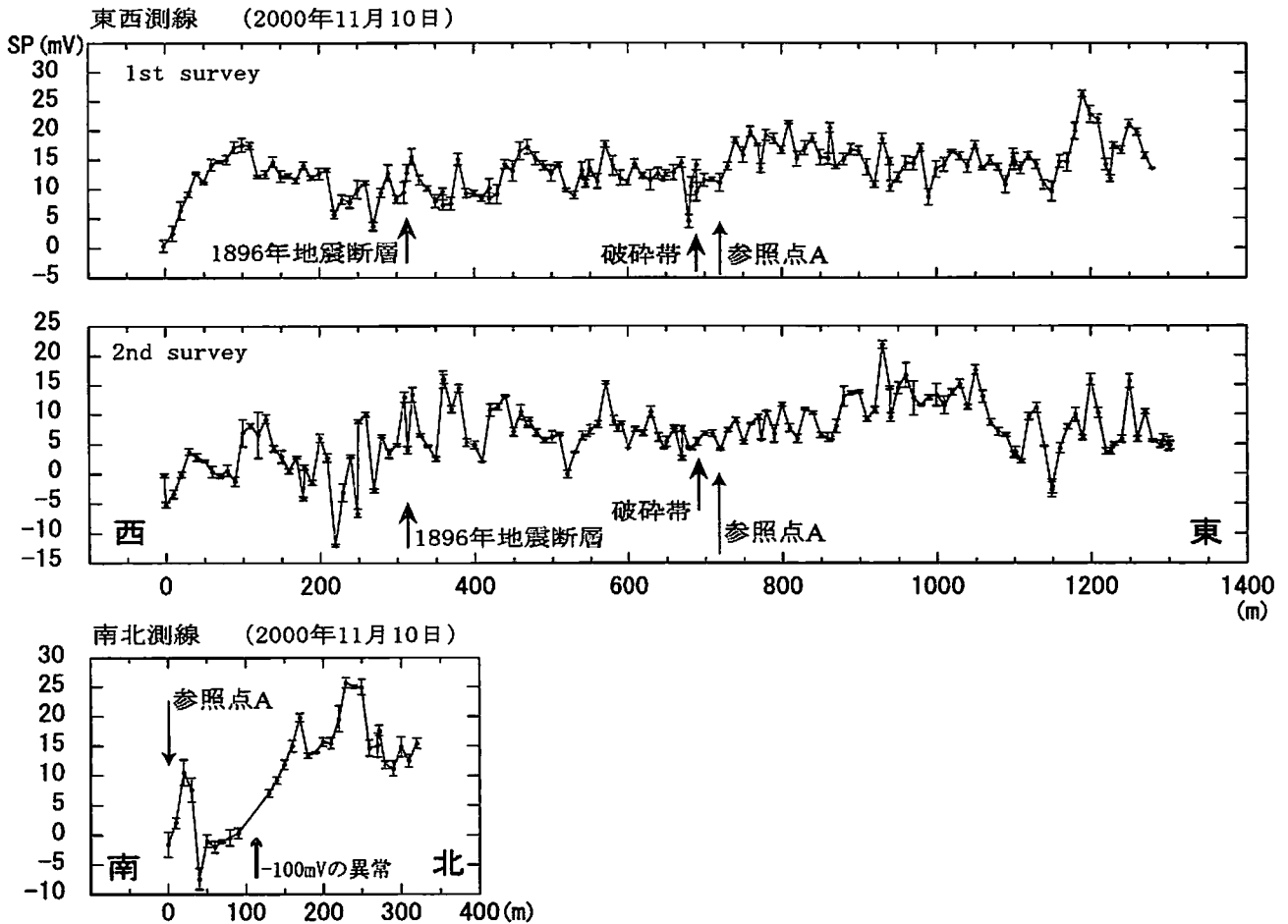
平滑化の程度を上で考えた誤差を考慮して決めることにする。11月10日の1st surveyと2nd surveyの平均値について、ここではもとの値とのRMS残差が2.4mVを超えるところで移動平均を打ち切ることにした。移動平均を始める前の値と移動平均後の値を第7図(a)に示した。ここでは3点移動平均を8回繰り返し、RMS残差は2.4mVであった。

第7図(a)の平滑を施した東西測線の自然電位分布を見ると、その変化の幅は10mV程度と小さめである。誤差の程度が3mVであることを考えるとこの自然電位の異常は有意であるが、測線上で20mVを超えるような目立った異常はここでは認められない。

11月10日に得られた南北測線のデータについても、同じ日の東西測線のデータと同等の信頼性があるものとして、同様にRMS残差が2.4mVを超えるまで平滑化を行った。結果を第7図(b)に示す。移動平均は3回、RMS残差は2.7mVであった。

次に、9月23日に東西測線の“1st survey”で得られた自然電位分布について、データの信頼性については11月10日に得られたものと同等であるかどうか不明であるが、同様にRMS残差が2.4mVを超えるまでという条件で平滑化を行った。結果を第7図(c)に示す。移動平均は1回、RMS残差は3.2mVであった。9月23日には1つの測定点で1回だけの測定によって測定値を得たため、11月10日に得られたものよりもともと大きな誤差が含まれていたためにたった1回の移動平均操作により、大きく平滑されたものと思われる。参考までに、11月10日のデータに施したものと回数数の8回の移動平均を9月23日のデータに対して行った結果を第7図(d)に示す。RMS残差は4.0mVである。

9月23日のデータには電極に注いだ水の影響など、11月10日のものと比べてより多くの誤差を含んでいると考えられる。第7図の(a)と(d)とを比べると、自然電位の山や谷が一致しているものとそうでないものがある。一致しているものについては、そこに電位異常があることを確認することができるが、そうでないものはその異常が本当のもの



第6図 太田断層を横切る東西測線、および北に分岐した南北測線における2000年11月10日の自然電位測定値。銅-硫酸銅電極を使用。東西測線においては測線西端、南北測線においては参照点Aを電位の基準とした。エラーバーは各測定点における3つの測定値の標準偏差。

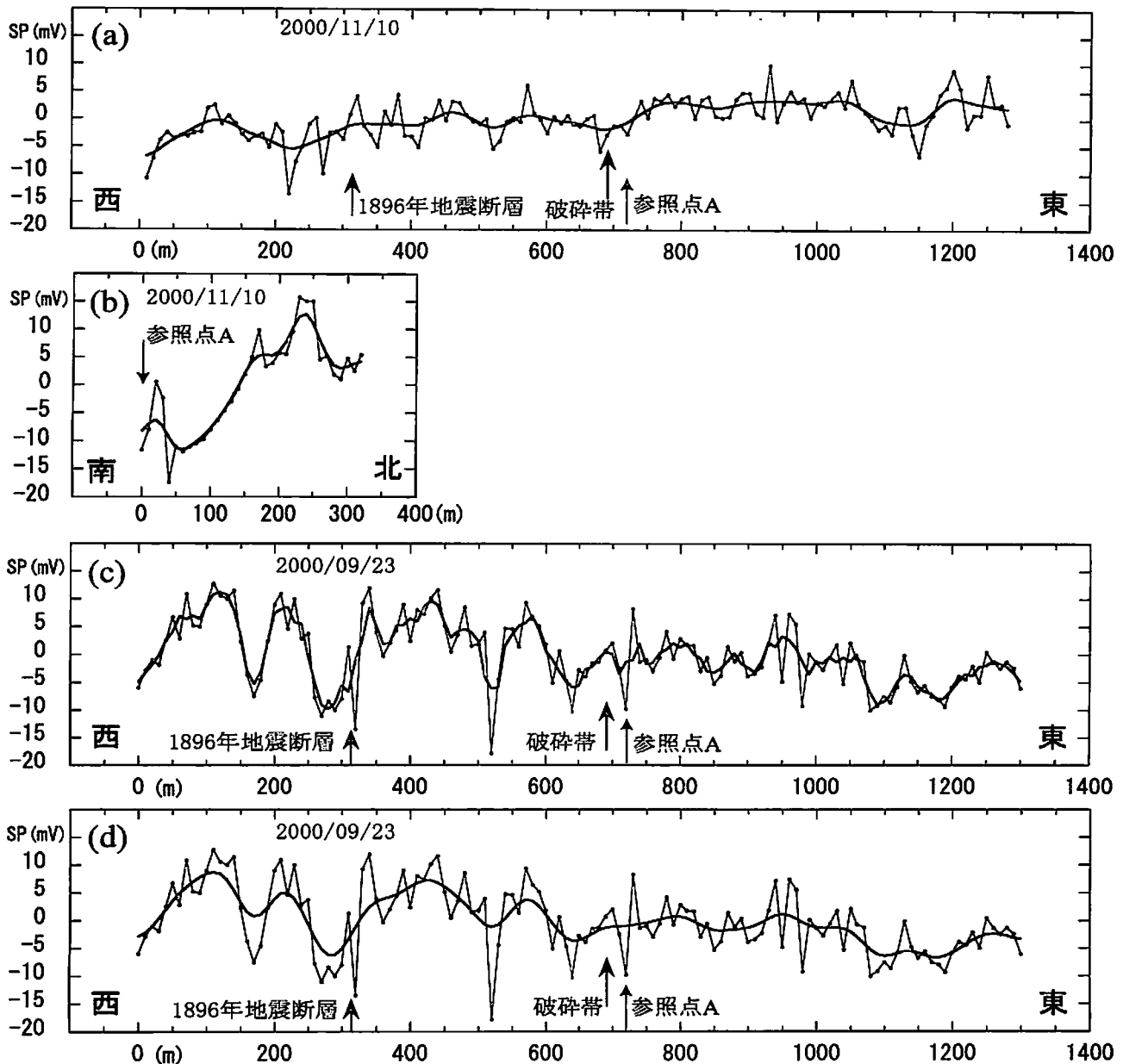
のかどうか検討する必要がある。

6 考察

白岩・六郷断層群における1980年、1998年の自然電位測定では、断層線の東側に20～30mVの正の異常が認められる、という結果が得られている。太田断層の南端近くにおいても、1980年に1kmほどの測線M-N（第1図参照）上で断層を横切って自然電位の測定がなされている。その結果を第8図に示す。断層近傍では自然電位のばらつきが大きいが、断層の東側で、西側とくらべて20mV程度電位が高くなっていた。第7図(a)を見ると断層線、破碎帯の上盤側で小規模な電位の高まりがあるようにも見える。しかし1980年の測線M-Nに見られるほど明瞭な異常ではない。

1998年の千屋断層における自然電位測定の結果では、断層線から東に1～2kmの範囲に正の異常が分布している。また、南北走行の断層線の中央部を横切る測線においては断層線の東側の異常が明瞭でなく、断層線の南北の両端に近い部分を横切る測線のみで東側に正の異常が見られるという。これらの自然電位の分布が活断層の構造や活動とどのような関係があるのかは不明だが、太田断層にもこのような分布が存在する可能性がある。これらのような自然電位の分布に注目するのならば、太田断層においても、奥羽山脈側にもっと測線を延ばしたり、断層の南北の端に近い測線で測定する必要があるだろう。

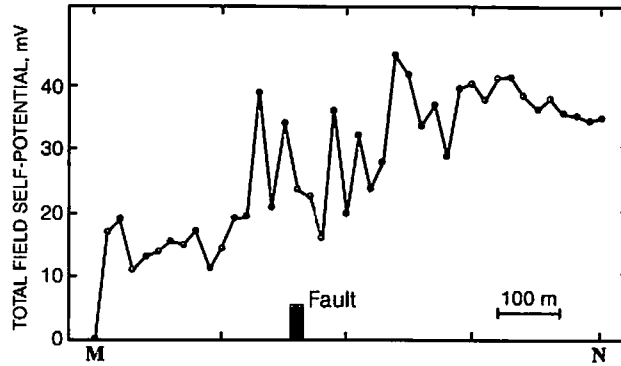
また、自然電位分布においては一般に“地形効果”と呼ばれる標高と自然電位との逆相関関係がしばしば見出される。今回測定した太田断層における測線や、千屋断層周辺における自然電位分布には地形効果が見られない。地形効果は、地下水が重力によって岩石の空隙中を高所から低所に流れることが原因と考えられており、その電位と標高の比例係



第7図 (a) 2000年11月10日に東西測線で測定された自然電位の平均値とそれを平滑化したもの。移動平均8回，RMS 残差2.4mV。(b) 2000年11月10日の南北測線の自然電位。移動平均3回，RMS 残差2.7mV。(c) 2000年9月23日の東西測線の自然電位。移動平均1回，RMS 残差3.2mV。(d) 2000年9月23日の東西測線の自然電位。移動平均8回，RMS 残差4.0mV。(a)～(d)について，その平均値が0になるようにグラフを上下に移動させて図示している。

数は観測例によると $-0.1 \sim -10 \text{ mV/m}$ の範囲にある。今回測定した太田断層の東西測線の西端と東端の標高差は約50mであるので，地形効果が現れてもおかしくはない。地形効果がない，ということは，地下水の流れがなんらかの形で断層の構造に支配されている可能性がある。

我々のグループは，太田断層の本報告における測線において，反射法（佐藤 2001；山下，2001）や屈折法（小林，2001）などの地震探査，電気探査（今野，2001），VLF-MT（根，2001），並びに地質調査（佐藤，2001）を行っている。反射法地震探査においては，第2図で示した1896年地震断層や地質調査で見つかった破碎帯のほかにも地下の推定断層をいくつか指摘している（小林，2001；佐藤，2001）。自然電位に特に関係する比抵抗分布も得られており，これらの結果を参考に，自然電位分布の意味を改めて検討中である。



第8図 太田断層南端付近を横切る測線 M-N に沿った自然電位分布。1980 年の測定値。Murakami et al. (1984) より。

7 結び

本研究では1つの測線における自然電位の往復測定により、その測定値の信頼性を確かめることを目的とした。ここでは同じ日に、同じ測点での往復測定という限られた条件であるが、その測定値の誤差は3mV程度であることを示した。この値は自然電位の値の信頼性は5mV程度であるという今まで報告されてきた値に近い。測定値の信頼性を確かめるにはまだ不十分な部分があるが、得られた自然電位から地下の構造や活動を調べるためには、第7図(a)に示したような自然電位分布をその出発点にできるということが言える。得られた自然電位についての解釈は別稿にゆずりたい。

参考文献

- 活断層研究会 編, 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 437p, 1991.
- 小林勝幸, 太田断層周辺での屈折法地震探査による伏在断層の推定, 秋田大学鉱山学部資源・素材工学科学士論文, 2001.
- 根典子, 40kHz 周波数を用いた VLF-MT 法の実用化の可能性について, 秋田大学鉱山学部資源・素材工学科学士論文, 2001.
- 今野美貴子, 電気探査解析法の検討と断層構造への適用, 秋田大学鉱山学部資源・素材工学科学士論文, 2001.
- 佐藤久美子, 反射法地震探査と地質調査から見た太田断層の浅部構造, 秋田大学大学院鉱山学研究科博士前期課程資源・素材工学専攻平成12年度修士論文, 2001.
- 千屋断層研究グループ, 千屋断層(秋田県)の完新世の活動と断層先端部の形態—千畑町小森での発掘調査—, 地震研究所彙報, **61**, 339-402, 1986.
- 松田時彦・山崎晴雄・中田高・今泉俊文, 1896年陸羽地震の地震断層, 地震研究所彙報, **55**, 795-855, 1980.
- 水谷仁・鍋谷祐夫, 断層に伴う自然電位異常, 文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果 No.A-56-2「地球電磁気学的手法による断層活動度の研究」研究代表者・乗富一雄, 77-84, 1981.
- 宮内崇裕・今泉俊文・原口強・阿部真郎・八木浩司・稲庭智子, 1896年陸羽地震断層中部(太田断層)の露頭とその3次元表現, 活断層研究, **16**, 1-6, 1997.
- 村上英記・西谷忠師・領木邦浩・北村保夫・村上賢持・富澤一郎・石井直人・大志万直人・中川渥・矢部征・住友則彦・山崎健一・村上貴久・松村史樹・立花憲司・橋本恵一・三品正明・笹井洋一・歌田久司・小河勉・上嶋誠・小菅正裕・佐鯉央教・福本隆史, 千屋断層における SP 測定—序報—, CONDUCTIVITY ANOMALY 研究会 1999 年論文集, 21-28, 1999.
- 山下幹也, 太田断層及びその周辺における地震波反射面の3次元分布と内部構造の研究, 秋田大学大学院鉱山学研究科博士前期課程資源・素材工学専攻平成12年度修士論文, 2001.
- Corwin, R. F., and D. B. Hoover, The self-potential method in geothermal exploration, *Geophysics*, **44**, 226-245, 1979.
- Murakami, H., H. Mizutani, and S. Nabetani, Self-potential anomalies associated with an active fault, *J. Geomag. Geoelectr.*, **36**, 351-376, 1984.