

# カルフォルニア州オーウェンズバレーにおける自然電位繰り返し測定

坂中伸也 (秋田大工学資源).

M. J. S. Johnston(USGS), 笹井洋一 (東京都総務局), 田中良和, 宇津木充 (京大阿蘇),  
西田泰典 (北大理), J. F. Delarue, P. Yvetot(仏クレルモ・フェラン地球物理観測所)

## Repeated Self-Potential Survey in Owens Valley in California

Shin'ya Sakanaka<sup>1)</sup>.

Malcolm J. S. Johnston<sup>2)</sup>, Yoichi Sasai<sup>3)</sup>, Yoshikazu Tanaka<sup>4)</sup>, Mitsuru Utsugi<sup>4)</sup>,  
Yasunori Nishida<sup>5)</sup>, Jean-François Delarue<sup>6)</sup> and Paul Yvetot<sup>6)</sup>

1) *Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University*

2) *United States Geological Survey*

3) *The Disaster Prevention Division, Tokyo Metropolitan Government*

4) *Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University*

5) *Graduate School of Science, Hokkaido University*

6) *Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand*

### 1. はじめに

米国カリフォルニア州ロングバレーカルデラ周辺において、1998年より日米仏の研究者による電磁気共同観測が始められた。磁場、電場、自然電位を常時モニターもしくは繰り返し測定することにより、火山活動による電磁場発生機構をさぐるのが全体としての目的である。

### 2. ロングバレーカルデラと周辺における共同観測

ロングバレーカルデラはカリフォルニア州西部に位置する(第1図)。カルデラの大きさは南北17km, 東西32kmであり、カルデラ底の標高は約2400m, カルデラ壁には4000m近い峰々が並ぶ。

ロングバレーカルデラは76万年前に流紋岩質マグマの活動により形成され、その際南東部に溶結凝灰岩であるBishop tuffが堆積した。その後、カルデラ底西部を中心に中央火口丘群の隆起や玄武岩溶岩の流出により現在の地形が形成されてきた。600年前にはInyo Domesがカルデラ底西端付近に南北に連なるように出現している。

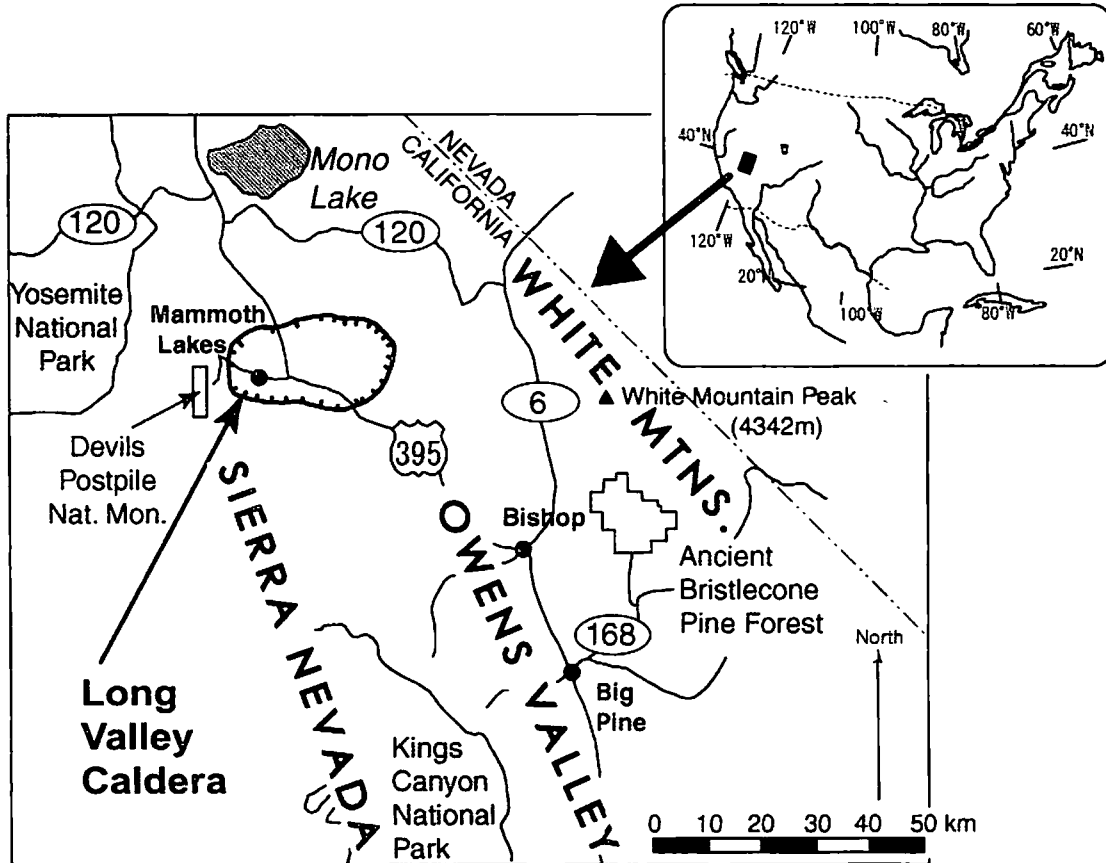
1980年にはM6級の地震がカルデラ底の南西部で連発し、地震活動に伴って火口丘が25cm隆起したのが測定された。1982年はじめにはカルデラ内のCasa Diabloで新たな噴気活動が始まった。その後もカルデラ内及び周辺で地震活動や地殻変動の活発化がたびたび起きている。

我々の共同観測の重要な柱の一つがプロトン磁力計による全磁力連続観測である。現在までカルデラ壁の内側に10台、カルデラ壁の外側のDevils Postpileに1台の計11台の磁力計を設置した。米国地質調査所が設置した既存の観測壕に磁力計の収録部を設置し、全磁力10分値を衛星テレメータでメンロパーク(米国地質調査所)に送信している。また、収録部に装着されたロムに全磁力1分値を記録し、夏季に現地に訪れた際にデータを回収している。

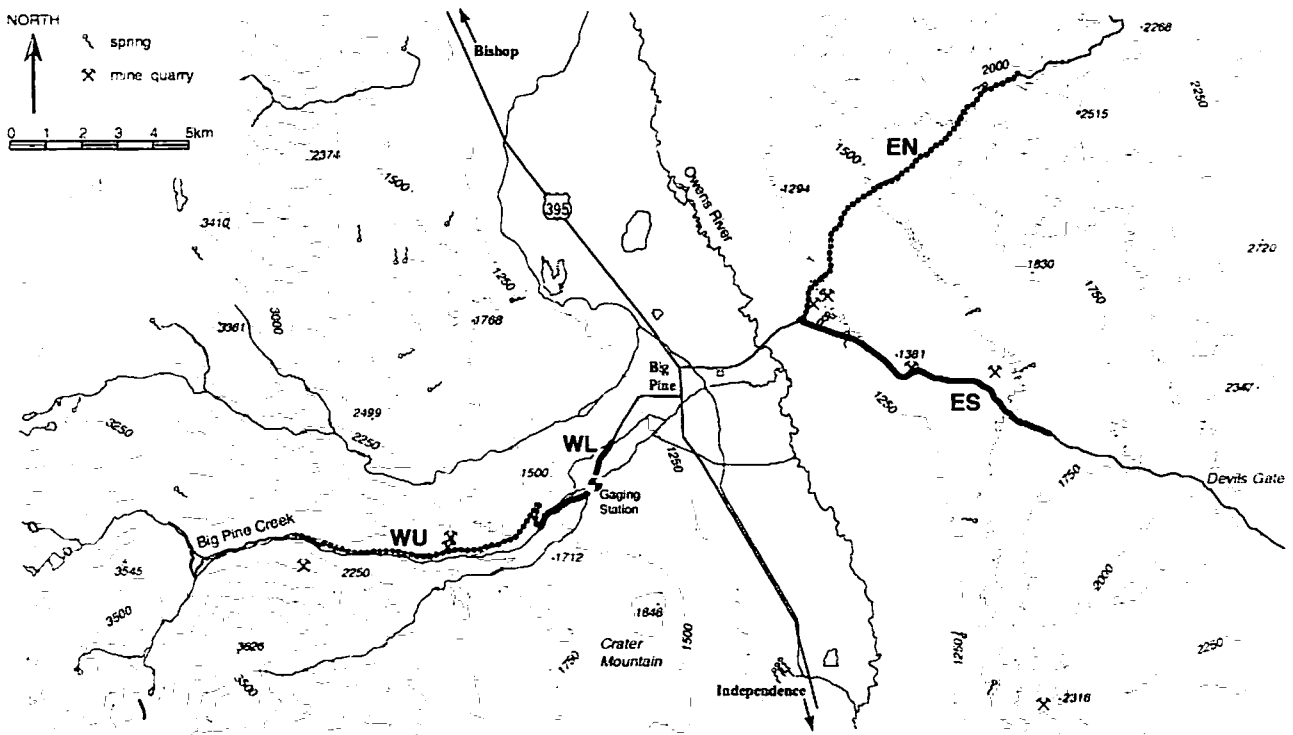
得られた全磁力データについて橋本他(2003)が、全磁力の年周変化は温度に関係すること、温度データをもとに全磁力データが補正可能であることを示し、補正されたデータをもとに1999年に起きたM<sub>w</sub>7.1のHector Mine地震に伴う磁場変化の有無を検討している。

また、カルデラ内のValentineにおいて地電位の連続測定を行うとともに、カルデラ内やカルデラ壁のいくつかの測線に沿って自然電位分布を測定した。カルデラ内ではAnderson and Johnson(1976)による自然電位分布の報告があるが、今回測定された自然電位分布は彼らが報告したものと傾向が違うことが判明しつつある。

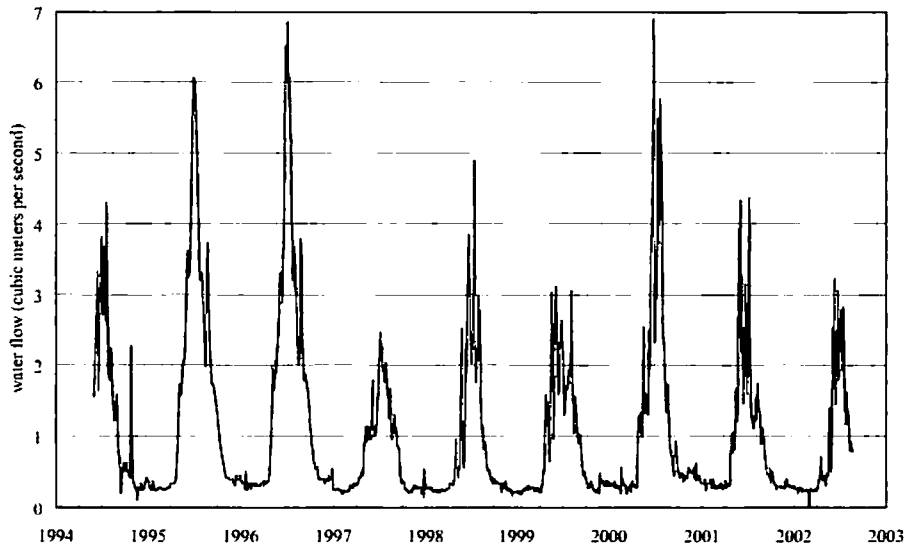
当初、カルデラ内での自然電位の測定において標高による自然電位変化を見積もることに困難を感じた。そのため、カルデラ周辺域でかつ現在火山活動のない地域で



第1図 ロングバレーカルデラ (Long Valley Caldera) 及びオーウェンズバレー (Owens Valley) の位置



第2図 繰り返し自然電位測定のための測線 WU (太点線), WL (太線), EN (太点線), ES (太線)。測線 WL 近傍に Big Pine Creek の流水量を測定する施設 (Gaging Station) がある



第3図 Big Pine Creek の流水量。毎年5月、6月に流量が最大になる。

自然電位を測定し、カルデラ内での測定値を補正することを計画した。測定地域として選ばれたのがオーウェンズバレーであり、ロングバレーカルデラとの位置関係は第1図に示した。測定を続けるうち、当初の目的以外にいくつかのことが明らかになったため、本稿ではこのオーウェンズバレーでの自然電位測定結果について述べる。

### 3. オーウェンズバレーと周辺の地形・地質・気候

オーウェンズバレーはロングバレーカルデラより南西方向に延びる。オーウェンズバレーの西側には Sierra Nevada が 4000m 級の山々を連ね、東側にはややなだらかな White Mountains とその南に続く Inyo Mountains がオーウェンズバレーに平行に走っている。オーウェンズバレーと東西両側の山脈の境界には活断層が存在するが、オーウェンズバレーはこれらの活断層が山脈を隆起させるのに伴って形成されたものである。1872年に起こった M8 級の Lone Pine 地震（別名 Owens Valley 地震）でも Sierra Nevada を隆起させるように比高 7.5m もの断層崖が生じた。

オーウェンズバレー内にも Crator Mountain などの単成火山の火砕丘がいくつか存在するが、数十万年前に活動を停止しており、火山活動の兆候は今のところ見られない。

自然電位の測定はロングバレーカルデラから 70km ほど離れた Big Pine という町の周辺で行った。その自然電位の測線の位置を第2図に示す。

Big Pine の西側斜面の地質は、Sierra Nevada から供

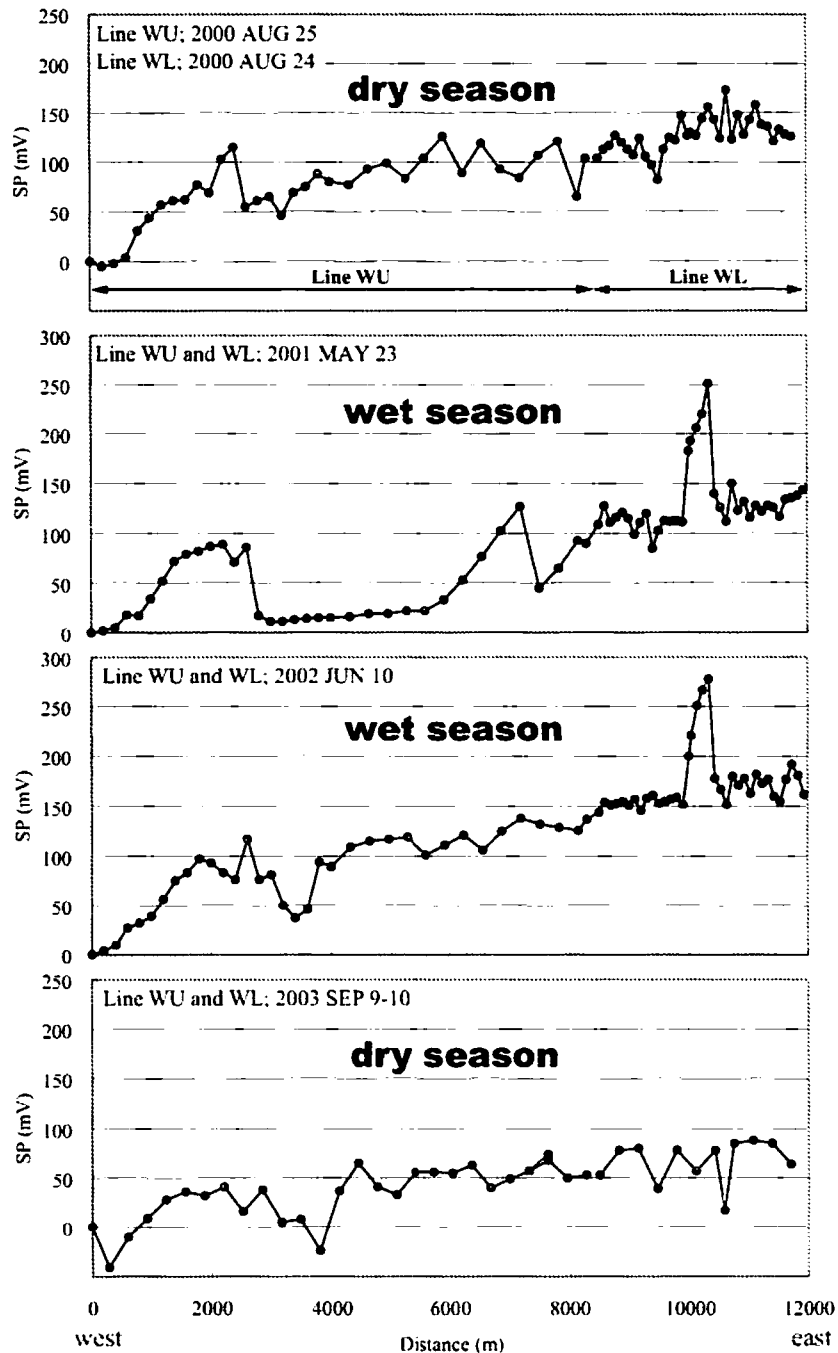
給される花崗岩の巨礫を含む氷河堆積物で代表される。オーウェンズバレー周辺の気候は乾燥しているが、西側斜面は Sierra Nevada の万年氷河からの雪解け水で比較的湿潤である。

Sierra Nevada から Big Pine Creek が Big Pine の町に流れ下り、Owens River に注いでいる。Big Pine Creek には流水量をモニターする施設があり、1日毎の流水量のデータが 80 年分蓄積されている。1994 年以來の流水量の変動を第3図に示す。毎年5月から7月にかけて流水量が極大となり、年によっては  $6\text{m}^3/\text{sec}$  を超える流水量がある。一方で8月から翌年の4月にかけては流水量が減り、 $0.3\text{m}^3/\text{sec}$  以下になってしまう。以下では、5月と6月を wet season、それ以外の季節を dry season と呼ぶことにする。

Big Pine の東側斜面は変成岩や湖成層が分布するが、西側斜面と比べると乾燥の度合いが高い。東側の山脈を越えるとほとんど砂漠に近い気候へと移ってゆく。東側斜面にも溪谷が刻まれているが、年間を通して水は流れていない。

以上のような西側斜面と東側斜面の状況を踏まえ、Big Pine 周辺での自然電位測定によって確かめるべき項目を以下の2点に絞った。

1. 西側斜面において、河川水の流量に対応した自然電位の季節変化が存在するか。
2. 西側斜面（湿潤）と東側斜面（乾燥）で、地形効果の係数（自然電位/標高差）に違いがあるか。



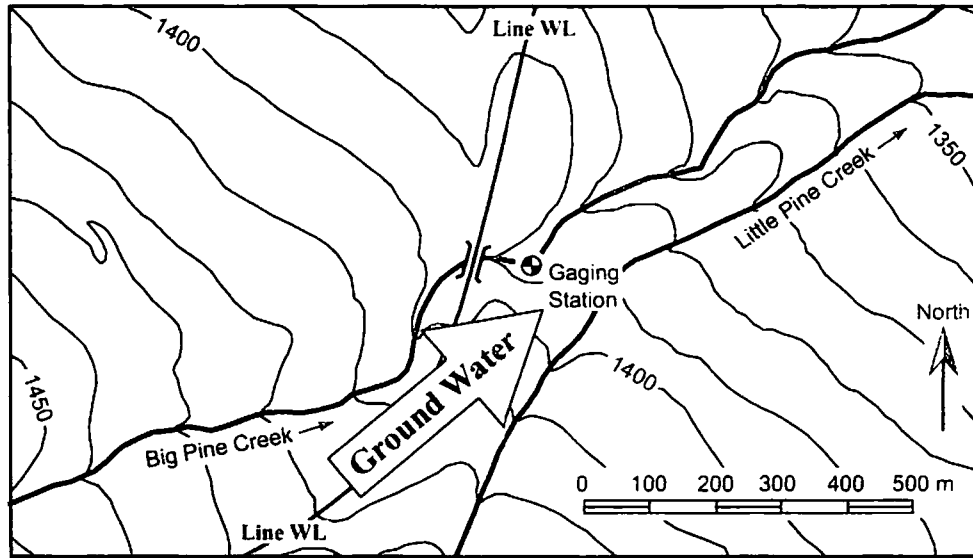
第4図 測線 WU, WL における SP 分布

#### 4. 自然電位の繰り返し測定の結果と考察

Big Pine の東西両斜面に測線を決め、測線名それぞれ WU (West-Upper), WL (West-Lower), EN (East-North), ES (East-South) とした。それぞれの測線で、1999 年 8 月 (dry season), 2000 年 8 月 (dry season), 2001 年 5 月 (wet season), 2002 年 6 月 (wet season), 2003 年 9 月 (dry season) に自然電位測定を行った。1999 年 8 月の時点では、測線 WL, ES でのみ測定を行って

いる。

測線 WU の総延長距離は約 5500m, 測線 WL の総延長距離は 3000m 余りであり、測線 WU と測線 WL は Big Pine Creek 沿いの道の上流から下流へと連なっており、合わせて 12000m 近くの測線となる。測線 EN の総延長距離は 12000m 以上、測線 ES の総延長距離は 5500m ほどである。測線 WU, WL, EN, ES 全て舗装道路に沿い、測定は道路わきに深さ 20cm 程度の穴を掘って行った。



第5図 Wet season に電位異常が現れる付近（流量測定場所付近）の拡大図。

電極配置として、基点側の電極を埋めたままにし、もう一方の電極だけを移動させてゆく全電位法を用いた。2km以上の長いエナメル線などを用い、測線上で50mから320m毎にデジタルテスター（入力インピーダンス10MΩ程度）で測定値を読んだ。用いた電極は鉛-塩化鉛電極であった。土が乾燥しているため、布や吸水性のよい紙に水を染み込ませ、電極と土の間に敷いた。デジタルテスターに表示される電位の読み値が一方方向にどんどん移動することも多かったが、1分程待つて安定しないときでもその時点での値を採用した。

#### 4.1 測線 WU, WL

第4図に西側斜面の測線 WU, WL での自然電位を合わせて示した。西端の基点を電位の基準にとって示した。図中で最も顕著なものは、測線距離 10000m から 10500m 付近に見られる wet season のみ現れる 130~140mV にも及ぶ正の電位異常である。第4図には示していないが、測線 WL については dry season の 1999年8月にも測定を行っている。このときも wet season にのみ現れると考えられる電位異常はない。

測線上でみた電位異常の形は左右対称ではなく、東側で急激に異常がなくなる。この電位異常が現れる付近を拡大したものを第5図に示した。この異常が現れている位置はたまたま流量をモニターしている施設に近い。

Big Pine Creek が流れ下り、測線 WL と交差する付近で、Big Pine Creek は北東側に湾曲している。Big Pine Creek と測線 WL の交差する場所には橋があるが、この橋の手前で wet season の異常が急激になくなる。

自然電位の原因を界面動電効果による流動電位であると考えたとき、電位異常は地表の流水ではなく、土中の微小な空隙中を流れる地下水にのみ関係する。Big Pine Creek に沿う地下浅部の流水路はこの付近で湾曲せず直進すると考えるのが自然であるので、地下水の流れは橋よりも西側（南西側）で測線 WL と交差することになる。この考え方は、電位異常が現れる位置が橋を境とした西側であることと矛盾しない。第3図に示した流量変動はあくまで Big Pine Creek を流れる地表水を示したものであるが、地表を流れる流量に比例して地下を流れる流量が多くなると考えてよいだろう。もしくは、地下水量の増大に伴って測線 WL 下の地下水面が上昇し、地表で捉えられる電位異常の感度が高るとも考えられる。また、電位異常の現れる付近で南方から Little Pine Creek が接近してくるが、Little Pine Creek に伴う地下水の流れも電位異常を増幅させている可能性がある。

測線 WU, WL について、例えば第4図でいう測線距離 2000~3000m 付近や 7000m 付近でも毎年違った電位異常があるように見える。これらの異常は測線距離 10000~10500m に見られるはつきりとした異常よりもやや振幅は小さいが、異常の大きさとしては無視しがたい。しかし、これらの異常は wet season にのみ現れているわけでもなく、電位異常の位置で特別な地形的または地質的な特徴が明確なわけでもない。Big Pine Creek に流れ込む地表では見えない地下水の支流がいくつか存在し、時期によってその流量が変化するのかもしれない。現時点ではこれらの時間的・空間的に不規則にあらわれる電位

異常についてはうまく説明できない。

なお、測線 WL の南方に 5, 60 万年前に形成された火砕丘があり、その東麓に Lone Pine 地震のときにできた断層崖が横切っている。この断層崖は測線 WL よりもオーウェンズバレー側にあるため、この測線上に活断層は存在しない。

#### 4.2 測線 EN

測線 EN についての測定結果を第 6 図に示した。電位の基準は 2000 年、2001 年に測定したときの測線の東端（第 6 図で測線距離 0m）にとった。2003 年の測定についてはそのときの測線の東端（第 6 図で測線距離 4820m）とした。

2000 年 8 月の測定結果によれば、測線距離 0m から 6000m 付近まで自然電位の値はほぼ一定であったが、その西側で急に 100mV に及ぶ正の異常が現れた。この異常が現れた部分は、山地からオーウェンズバレーの扇状地に出たところであった。

オーウェンズバレーと東西両側の山地との境界に活断層が存在することを述べたが、活断層に沿って泉が湧き出している場所が点々と連なっている。この地域は乾燥気候のため人の腰ほどの背丈の草木しか生えないが、泉の周辺の限られた範囲で樹木が育ち、樹木の緑の連なりを追えば活断層の位置がわかる。

測線 ES 周辺はたまたま泉がないが、活断層が存在するであろうと考えられる部分を第 6 図の斜線部分で示した。2000 年 8 月に現れた正の電位異常は、地表には水の湧出は認められないものの、断層面に沿った地下水の湧昇を示しているものと推定した。

その後、2001 年、2002 年、2003 年に再測し、この正の電位異常が常に測定値に再現されるかどうか確かめた。しかし、第 6 図にあるように、その後の測定では正の電位異常ははっきりしない。ただ、最初の測定と 2 回目以降の測定の間には異常が現れた付近で道路工事があり、最初に測定した状況が再現されなくなった。原理的には自然電位により活断層の位置が特定可能であるが、現時点では自然電位により活断層の位置を特定できたとはいえない状況である。

なお、オーウェンズバレーの東側斜面については、溪谷の底に一年中水が流れていないことから、季節による自然電位の違いはないと予想される。現に測線 EN、ES 上では季節により現れたり現れなかったりする電位異常は確認できない。

#### 4.3 測線 ES

測線 ES について、電位の基準を測線の東端にとって第 7 図に示した。

1999 年から 2003 年まで毎年測定され、それぞれ局所的には振幅 50mV 以下の電位異常が測線上のところどころに見られる。電位異常が現れる位置は似通っているが、測定時期によってその振幅が違ふ。それぞれの異常は測線上の地表面の状態や地形、地下水の状態を示していると思われる。

#### 5. 地形効果係数について

一般に自然電位は標高が高くなるにつれ減少し、標高が低くなるにつれ増大する。これは自然電位の地形効果とよばれ、標高による自然電位の変化率は地域によって異なる。固体表面とイオンを含む流体との電位差であるゼータ電位 ( $\zeta$ -potential) が負であるとき、地下水の上流側で負、上流側で正の電位異常が生じることをもとに、地形効果は界面動電現象による流動電位で説明されている。

オーウェンズバレーの東西両斜面の測線はほぼ標高変化に沿っている。よって、第 4 図、第 6 図、第 7 図の横軸を標高に読みかえれば地形効果の標高による変化率を比べることができる。それぞれの測線において、測定時期による自然電位曲線の全体的な傾きに変化はないように見える。

それぞれの測線で具体的に地形効果係数を示す。西斜面は測線 WU の西端から WL の東端までの標高差は約 1000m であり、その係数は、測線 WU で  $-0.10 \sim -0.40$  mV/m、測線 WL で  $-0.09 \sim -0.13$  mV/m であった。

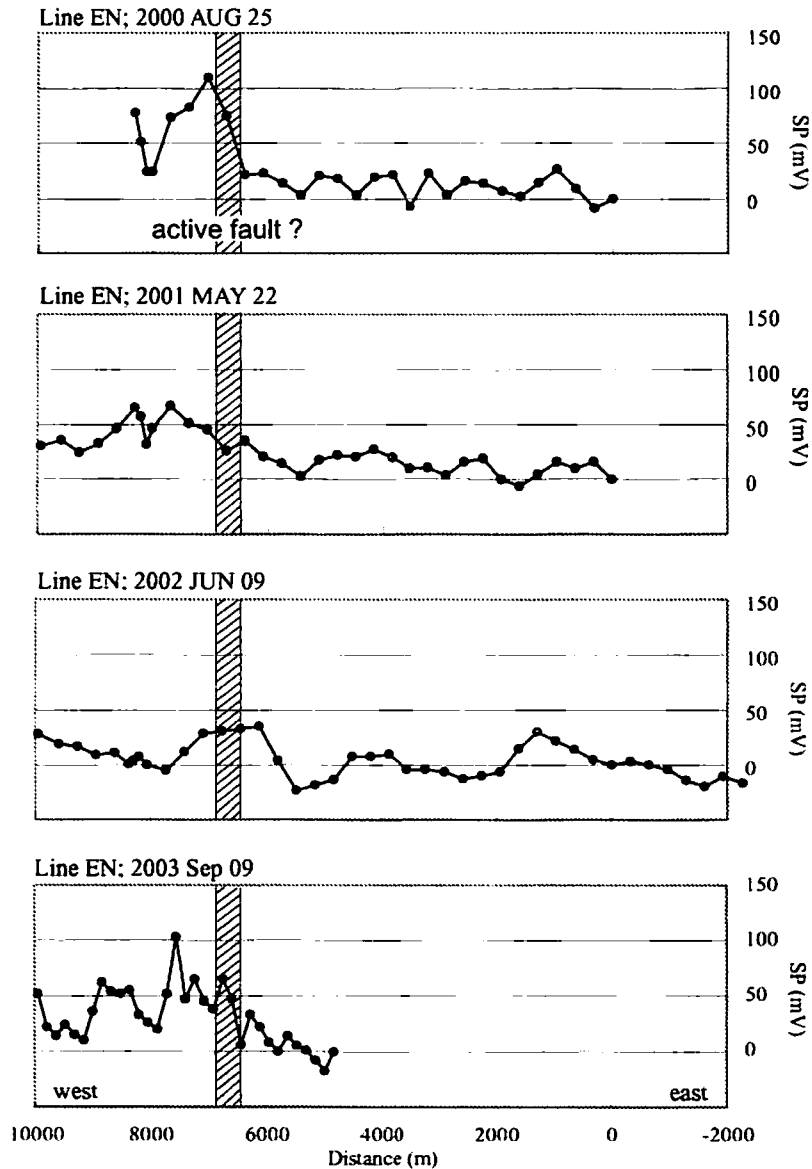
東斜面については、測線 EN の両端での標高差は約 700m、測線 ES は約 350m である。自然電位の地形効果係数は、測線 EN で  $-0.02 \sim -0.09$  mV/m、測線 WL で  $-0.06 \sim -0.19$  mV/m である。

以上のそれぞれの測線における地形効果の係数を見比べ、東西両斜面で係数に差はないと判断した。また、測線 WU、WL においても係数の季節的な変化はない。

例えば石戸・菊地 (1987) によれば、流動電位は、

$$\phi = C_1 \cdot \zeta \cdot P + C_2 (C_1, C_2 : \text{定数}) \quad (1)$$

で表される。ここで  $\zeta$  はゼータ電位、 $P$  は流体圧、 $C_1$  は水の誘電率や粘性率、液体や界面の電気伝導度に関係する。この式より、 $\zeta$  電位、流体圧が変化しなければ、流動電位は変化しないことになる。オーウェンズバレーの西斜面で、斜面を流れる流量に季節変化はあっても、流体圧は静水圧のまま一定だとすれば、自然電位の地形効果



第6図 測線 EN における SP 分布。

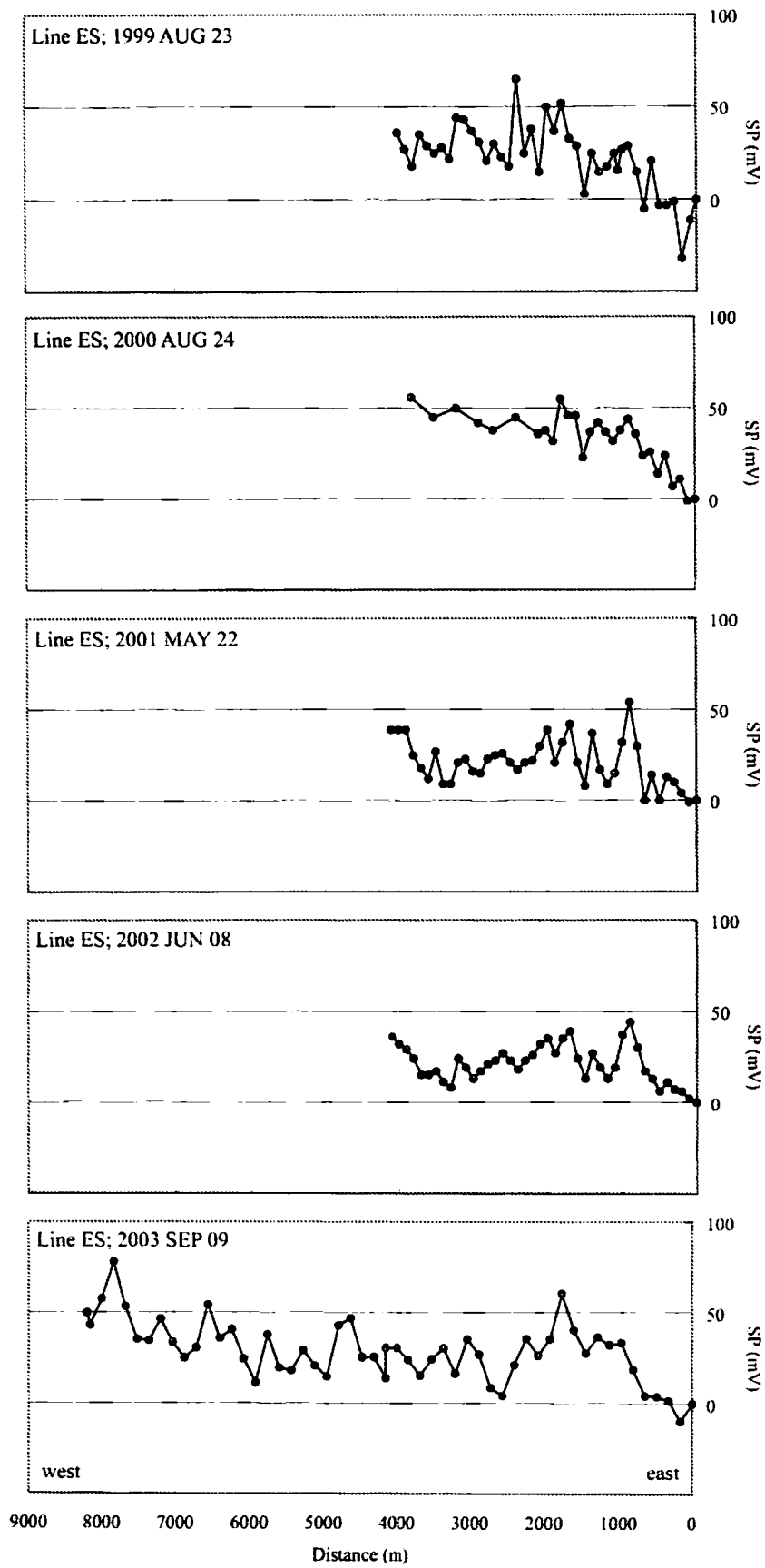
係数が一定なのは説明可能であろう。ただ、wet season のみに現れる電位異常は、地下の流量が増大するのに伴い、流路を拡大、変更、または水位の上昇によって生じるものと考えられる。

## 7. まとめ

1. オーウェンズバレーの西側斜面では、季節による河川水の流量変化に対応した電位異常が現れる場所がある。
2. 比較的湿潤で地下水量も多いと考えられるオーウェンズバレーの西側斜面と、比較的乾燥した東側斜面とで、自然電位の地形効果係数の違いはない。各測線において地形効果係数の季節変化もない。

## 参考文献

- 石戸経士・菊地恒夫, 探査シリーズ No.21 自然電位法, 地熱エネルギー, **12**, 425-443, 1987.
- 橋本武志・田中良和・Malcolm J. S. Johnston・宇津木充・笹井洋一・坂中伸也, ロングバレー-カルデラ地域の地磁気全磁力差に見られる年周変化について, 京都大学防災研究所年報, 第46号B, 765-777, 2003.
- Anderson, L. A. and G. R. Johnson. Application of the self-potential method to geothermal exploration in Long Valley, California. *J. Geophys. Res.*, **81**, 1527-1532, 1976.



第7図 測線 ES における SP 分布。