

# 電磁気観測

内出 崇彦  
永田 広平  
渡邊 いづみ

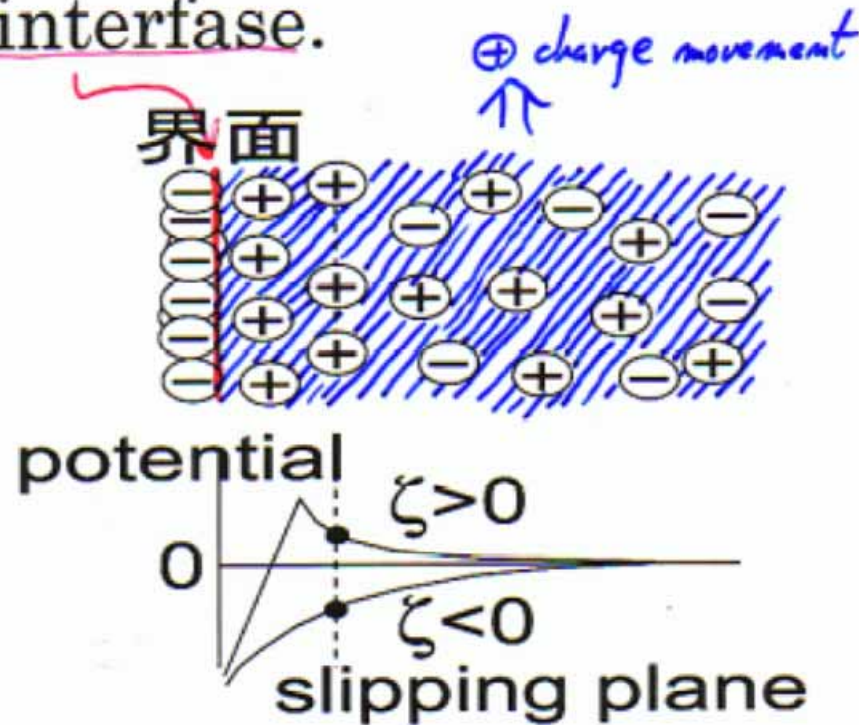
# 実習の目的

- 地電位差の計測による自然電位マッピング
- MT法を用いた電気伝導度(比抵抗)の計測
- 電流源となる地下水の分布、流動速度の推定



# 界面動電現象

- (normally minus) Charges are bound to the liquid-solid interface.



$\zeta$  (Zeta-Potential)  $> 0$ : - charge motion

$\zeta$  (Zeta-Potential)  $< 0$ : + charge motion

# 地下水の流動による電流と電位

・点電流源を考えた場合，半無限均質媒質中では，

$$\phi = \frac{i}{2\pi\sigma_r} \frac{1}{r} \quad \cdots (1)$$

$$i = \frac{\varepsilon\zeta}{Fk} j \quad \cdots (2)$$

$\phi$  : 電位ポテンシャル  
 $i$  : 電流密度  
 $j$  : 流速密度  
 $\sigma_r$  : 電気伝導度  
 $\varepsilon$  : 水の誘電率  
 $\zeta$  : Zeta-Potential  
 $F$  : formation factor  
 $k$  : permeability

(1)のような電位分布となる( $r$ は電流源からの距離[m]) .

・測定された電位分布から電流源の位置を推定し，電気伝導度  $\sigma_r$ [S/m]を推定したうえで，電流源  $i$  の大きさを見積もる .

・(2)の関係式から，(1)で求められた電流を担う地下水の流動速度  $j$  を推定する .



# MT (magneto telluric) 法

$\sigma$  : 電気伝導度[S/m]

$\rho$  : ( $= 1/\sigma$ ) 比抵抗[ $\Omega \cdot m$ ]

$\epsilon_0$  : (真空の) 誘電率 ( $8.854 \times 10^{-12}$ [F/m])

$\mu_0$  : (真空の) 透磁率 ( $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])

## マクスウェル方程式

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu\mathbf{H} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \sigma\mathbf{E} \end{cases}$$

$$\Delta \mathbf{E} = i\omega\mu\sigma\mathbf{E}$$

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = i\omega\mu\sigma E_x$$

$$\mathbf{H} = -\frac{\nabla \times \mathbf{E}}{i\omega\mu}$$

$$E_x(z) = E_x(0) \cdot e^{-\sqrt{i\omega\mu\sigma}z}$$

$$H_y(z) = -\frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x(z)}{\partial z} = E_x(0) \sqrt{\frac{\sigma}{i\omega\mu}} e^{-\sqrt{i\omega\mu\sigma}z}$$

## インピーダンス

$$Z_{xy}(z) = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma}}$$

## 見かけ比抵抗

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2$$



# MT法の探査深度

マクスウェル方程式より

$$\begin{aligned} E_x(z) &= E_x(0) \cdot e^{-\sqrt{i\omega\mu\sigma}z} \\ &= E_x(0) \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}z} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}zi} \end{aligned}$$

振幅が地表に対して1/eとなる深さ: 浸透深さ (skin depth)

$$d_{skin} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{\sqrt{10T\rho}}{2\pi} \text{ [km]} \left( \begin{array}{l} = 1/ \\ \mu : (\text{真空の}) \text{透磁率} (4 \times 10^{-7} [\text{H/m}]) \\ : 2 \quad / \text{T} \end{array} \right)$$



# 自然電位の計測


- ・2つのCu-CuSO<sub>4</sub>aq電極A,Bを用意し,電極固有の性質によって生じる電極電位差を測定しておく.
- ・A(テスター)→B(テスター)→A(テスター)→・・・  
という要領で,尺取虫的(約50m間隔)に電位差を測定し,GPSで位置を記録する.
- ・最後に,最初の点に戻る.電位差を積算し,地電位分布を計算するとともに,閉合誤差(元の点に戻ったときの電位)を知る.





# 比抵抗の計測

宮崎県えびの市のVLF局から送信されている22.2kHzの電磁場を観測し、見かけ比抵抗を測定した。



電極

磁場コイル



# 観測点分布

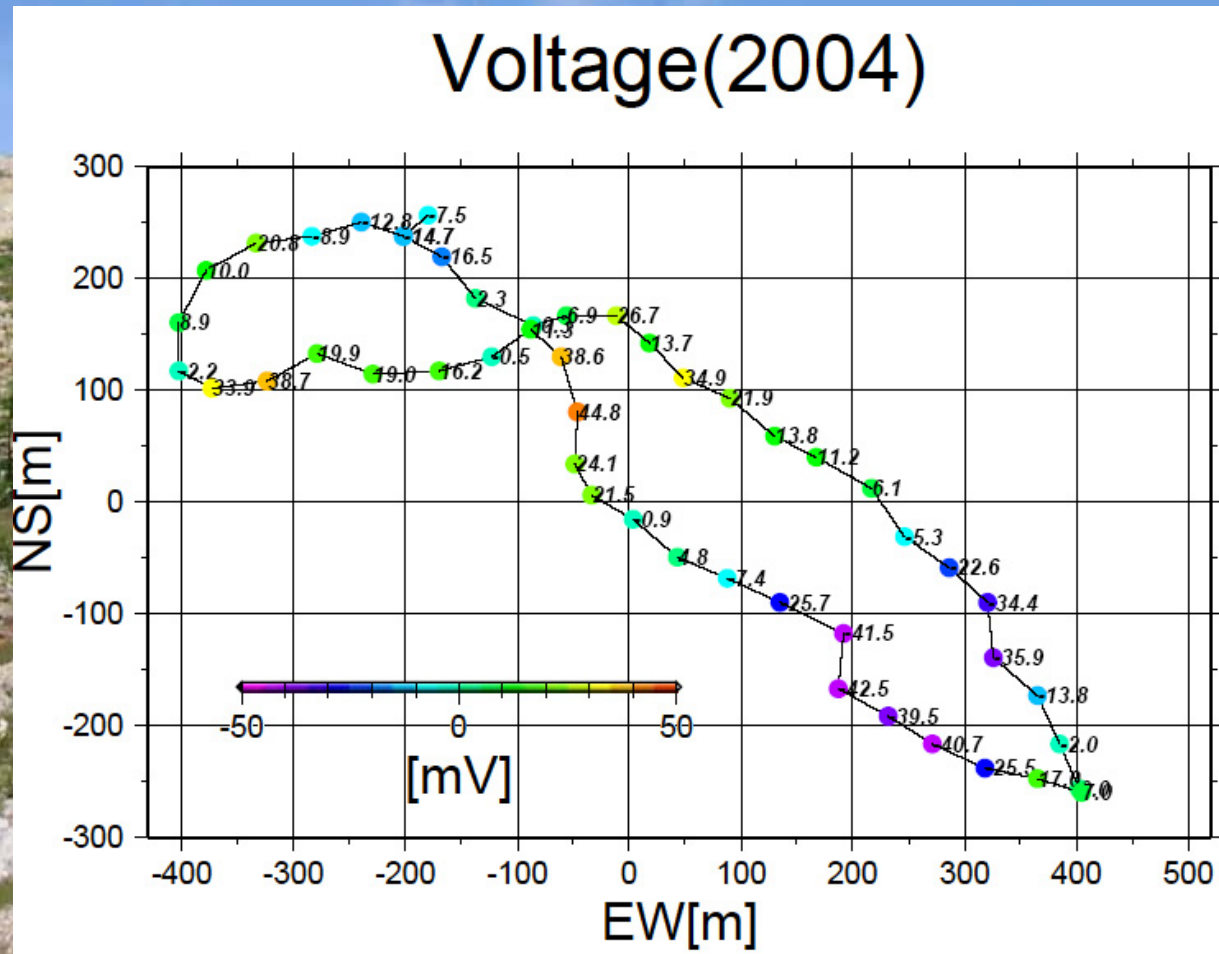
- 2001年測線
- 2004年測線(観測点数47)
- ◆ 比抵抗測定点





# 観測データ

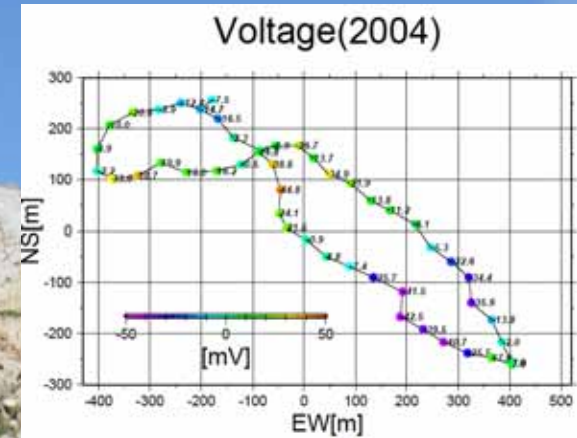
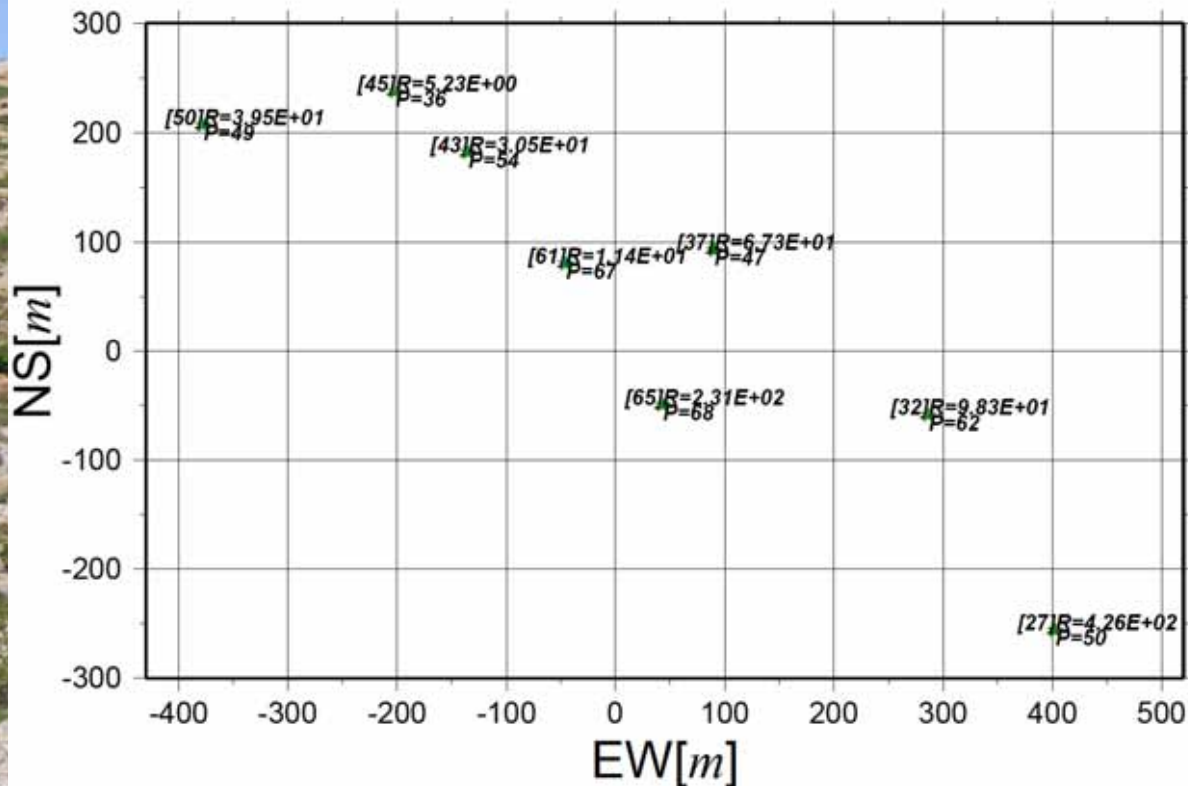
## 自然電位





# 観測データ 比抵抗

## Specific resistance(2004)

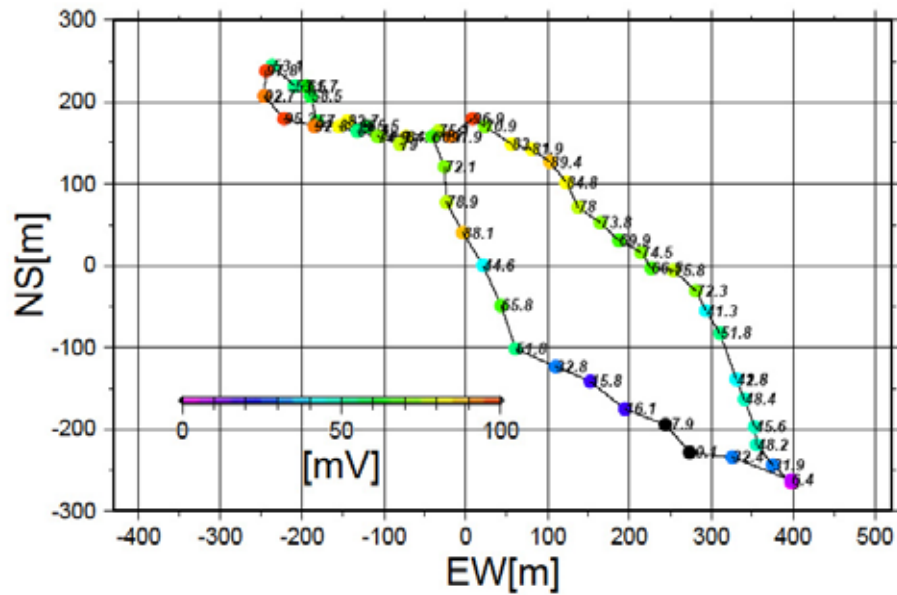




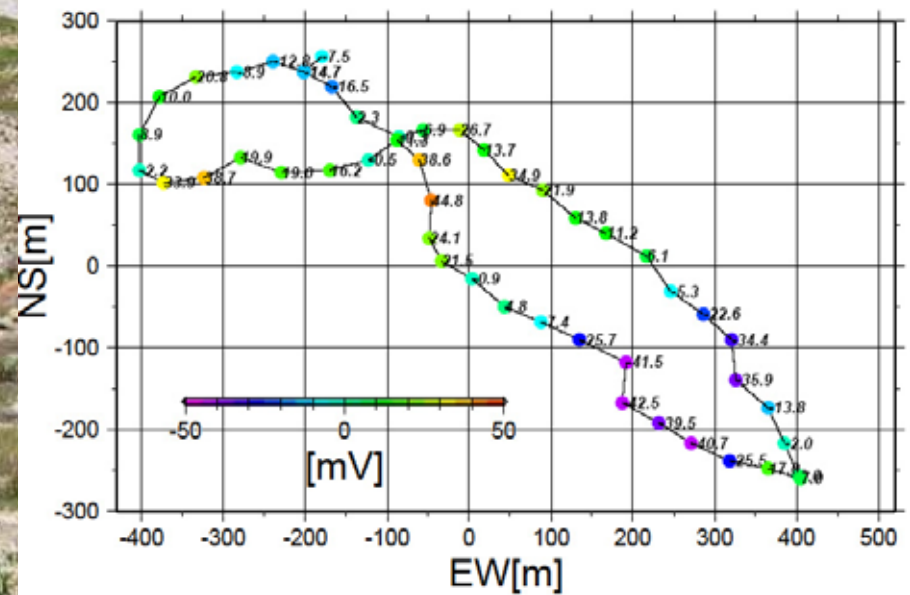
# 観測データ

## 自然電位(2001年との比較)

### Voltage(2001)

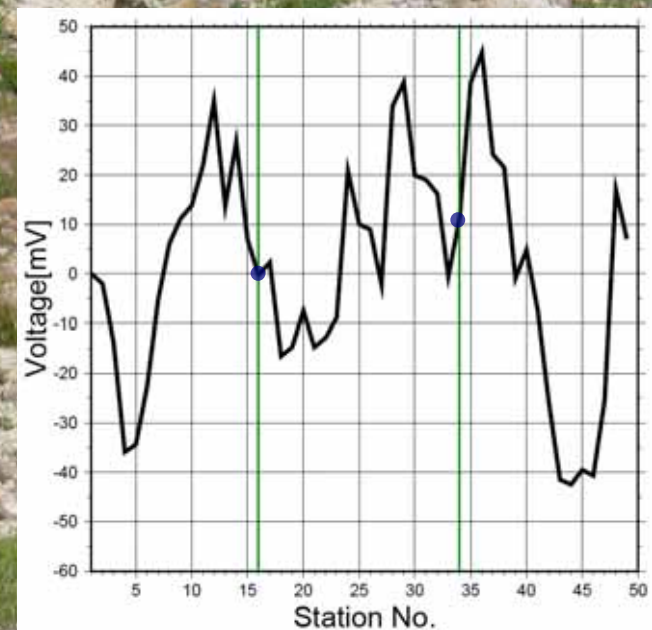
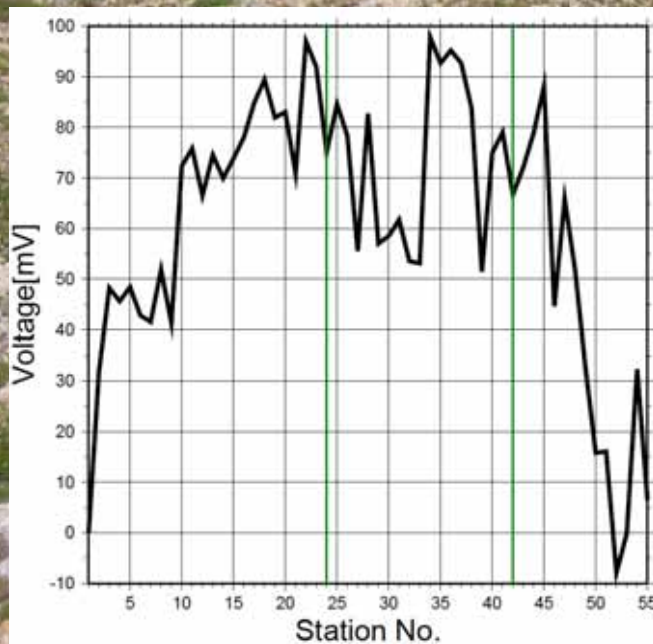
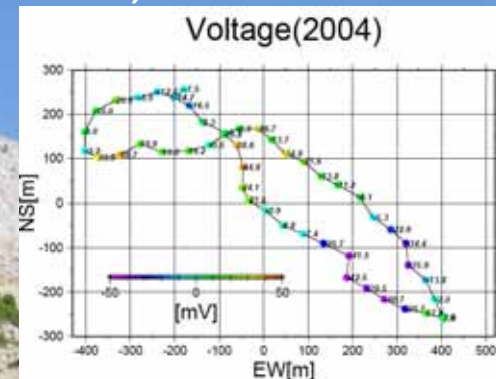
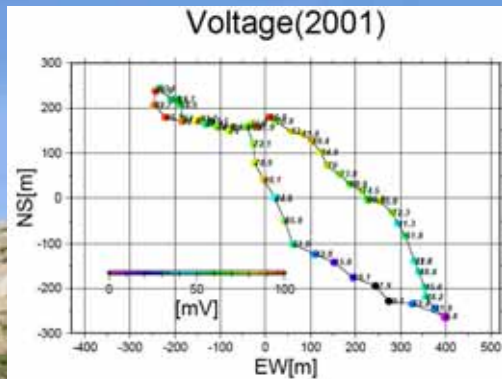


### Voltage(2004)



# 観測データ

## 自然電位(2001年との比較)





# 解析

- 点電流源を仮定して、その位置と電流の大きさを推定する。
  - 半無限均質媒質における電位の式を用いる。
  - 電気伝導度は、複数の比抵抗の測定から適切な値(0.006 S/m)を決定する。

MT法の探査深度は43m
- 推定された点電流源に基づいて、地下の流体の移動について考察する。



# 解析

- モデル

- 半無限均質媒質の式  $\phi_l = \frac{1}{2\pi\sigma_r} \frac{1}{r_l} i + V_0$

- モデルパラメータ

- 点電流源の位置  $(x,y,z)$ 、電流の大きさ  $i$ 、電位のシフト  $V_0$

- 最小二乗解

- 各観測点での理論値と観測値の差の二乗和  $\sum_l (\phi_l^{\text{syn}} - \phi_l^{\text{obs}})^2$  が最小になる解を求める。

- に対して非線型      グリッドサーチ

- 点電流源の位置  $(x,y,z)$

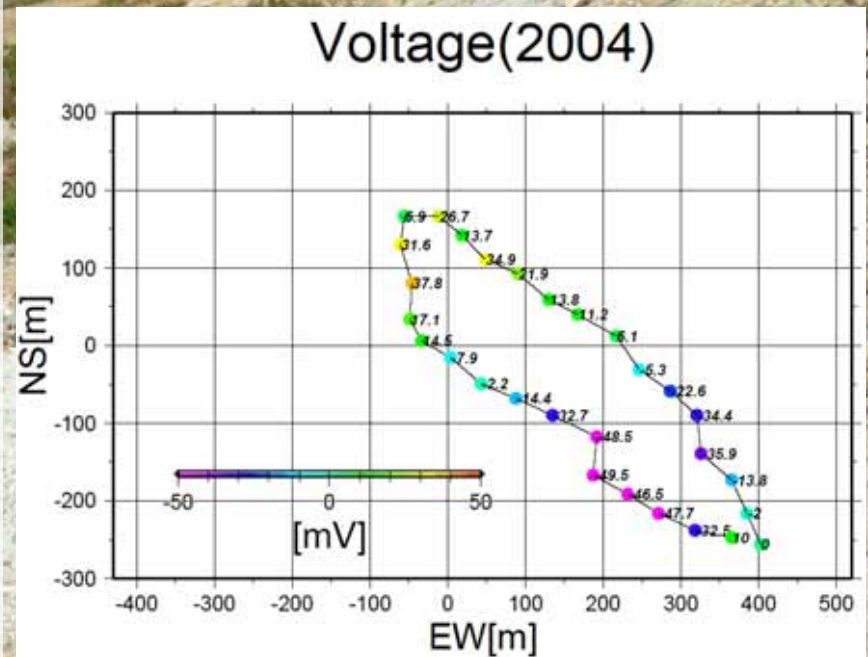
- に対して線型      線型インバージョン

- 電流の大きさ  $i$ 、電位のシフト  $V_0$



# 解析

- 解析範囲
  - 水平方向
    - 右図の全範囲
    - 10mおき
  - 鉛直方向
    - 標高1850m ~ 2000m
    - 10mおき
- データ
  - カルデラ外のデータのみ使用する。
    - 閉合誤差
      - カルデラ内: 11mV
      - カルデラ外: 4mV
    - 自然電位の変化の空間スケールが十分大きい。



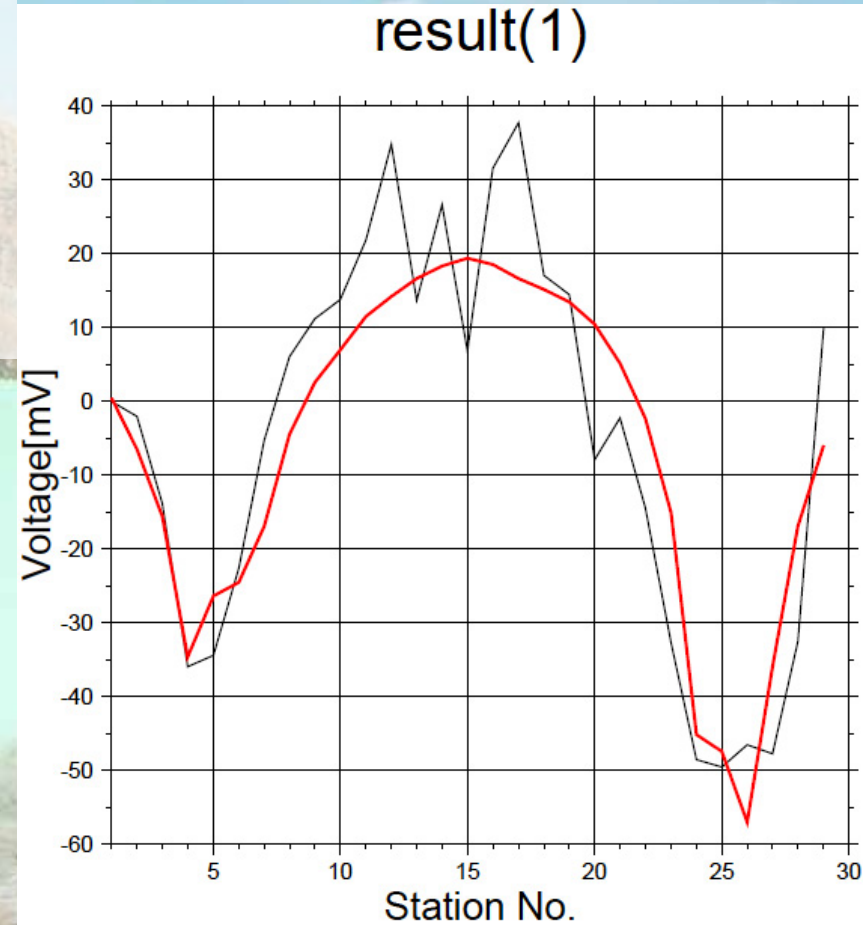
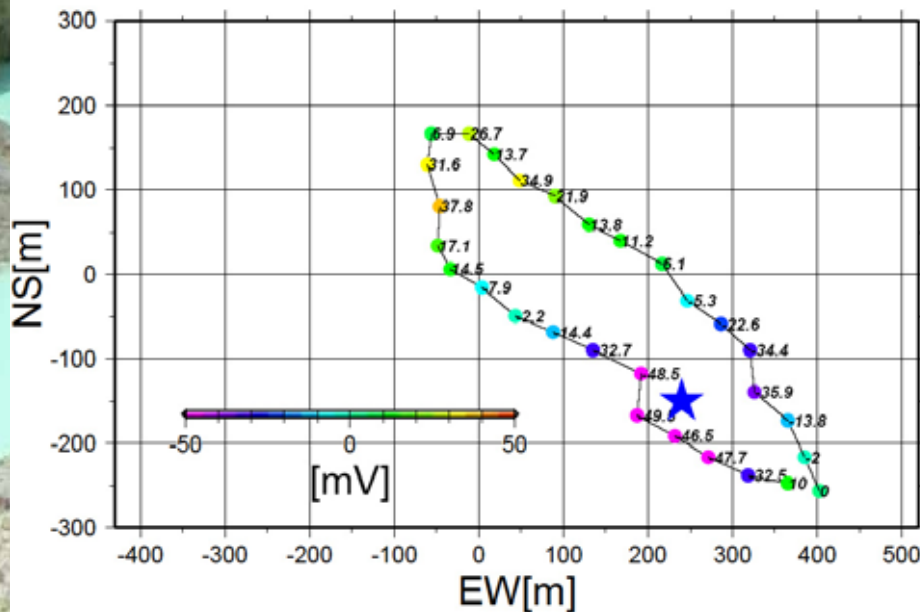
# 解析

- 結果

位置(240m, -150m, 1900m)

$i = -0.26 \text{ A}$

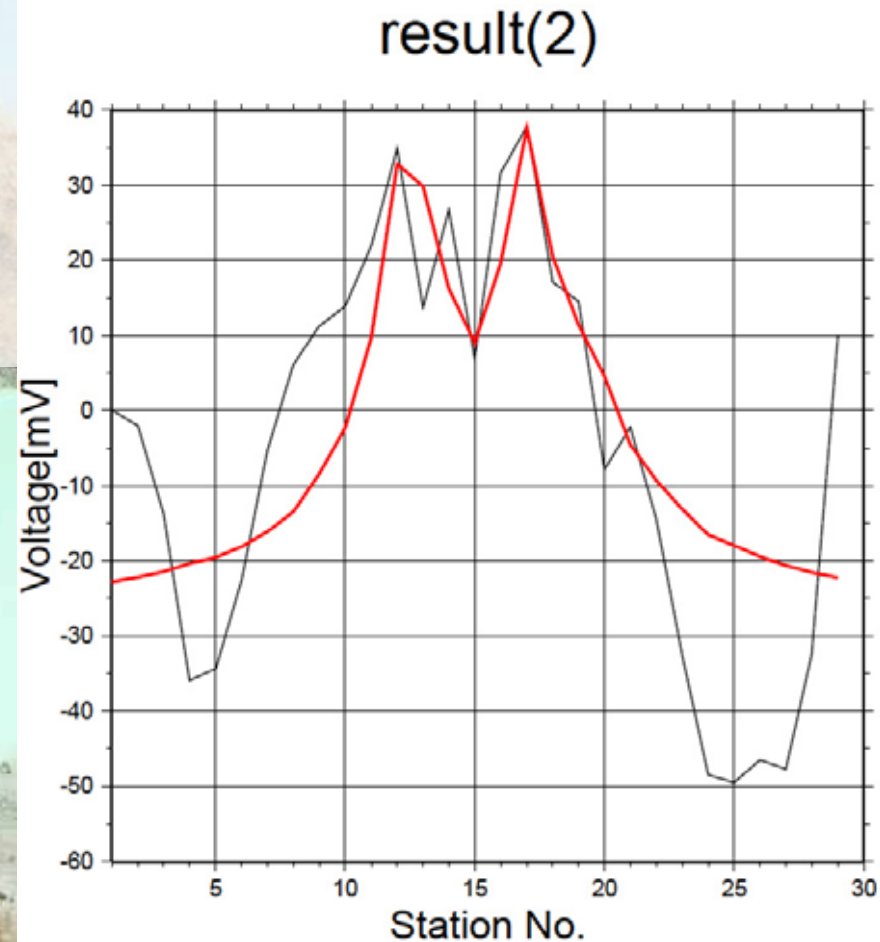
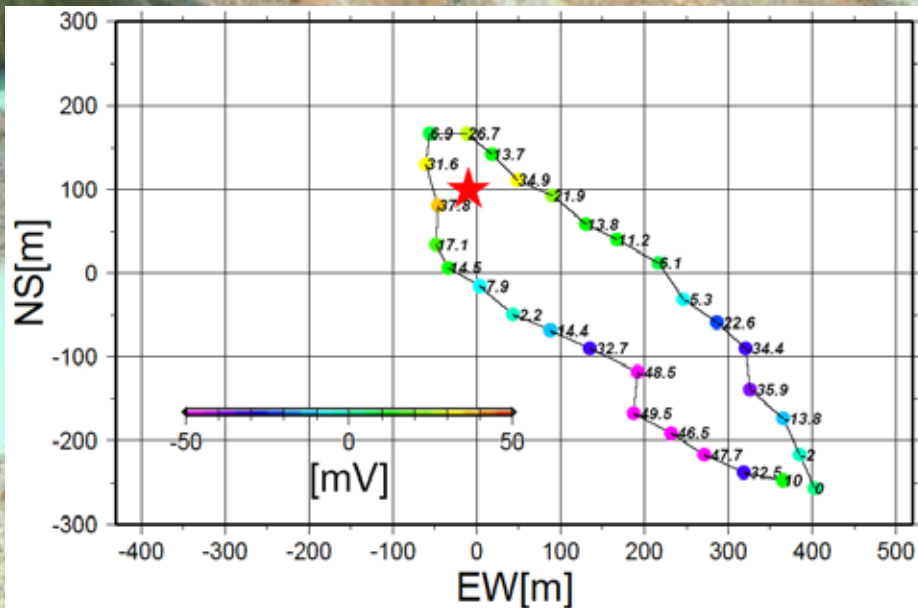
$V_0 = 35 \text{ mV}$





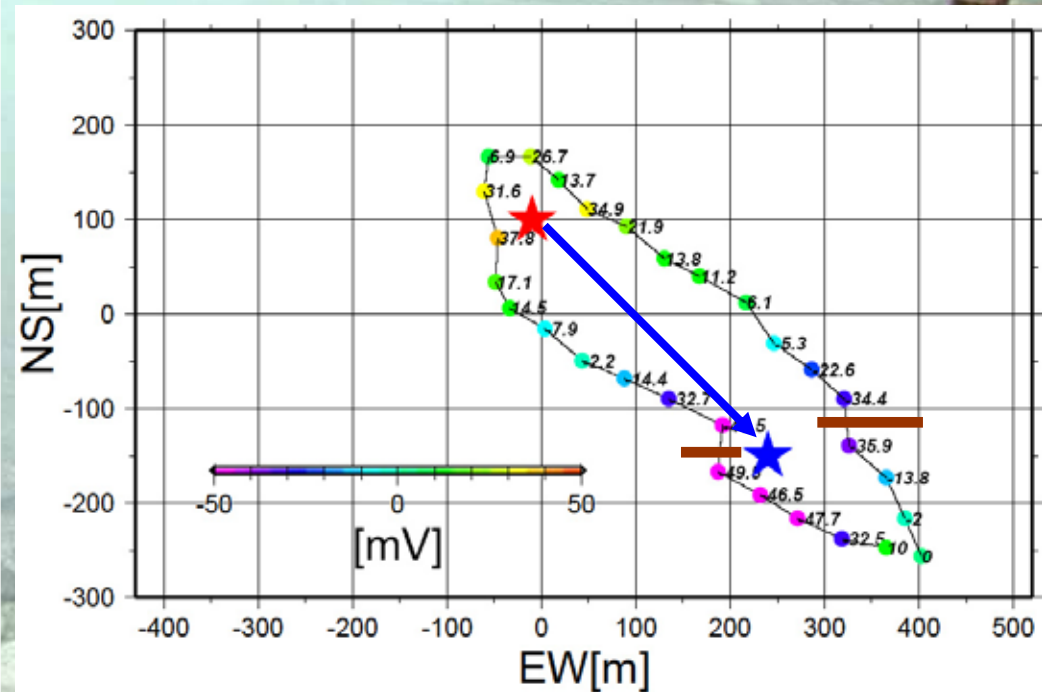
# 解析

- 結果( $i > 0$ )  
位置( - 10m, 100m, 1980m)  
 $i = 0.15 \text{ A}$   
 $V_0 = -30 \text{ mV}$



# 考察

- 下の方に負の点電流源を置くと、その付近の自然電位の落ち込みが説明できる。
- 上の方に正の点電流源を置くと、その付近の自然電位の盛り上がりが見られる。
- 山の上から下へ、負の電荷が運ばれているのを見ている？



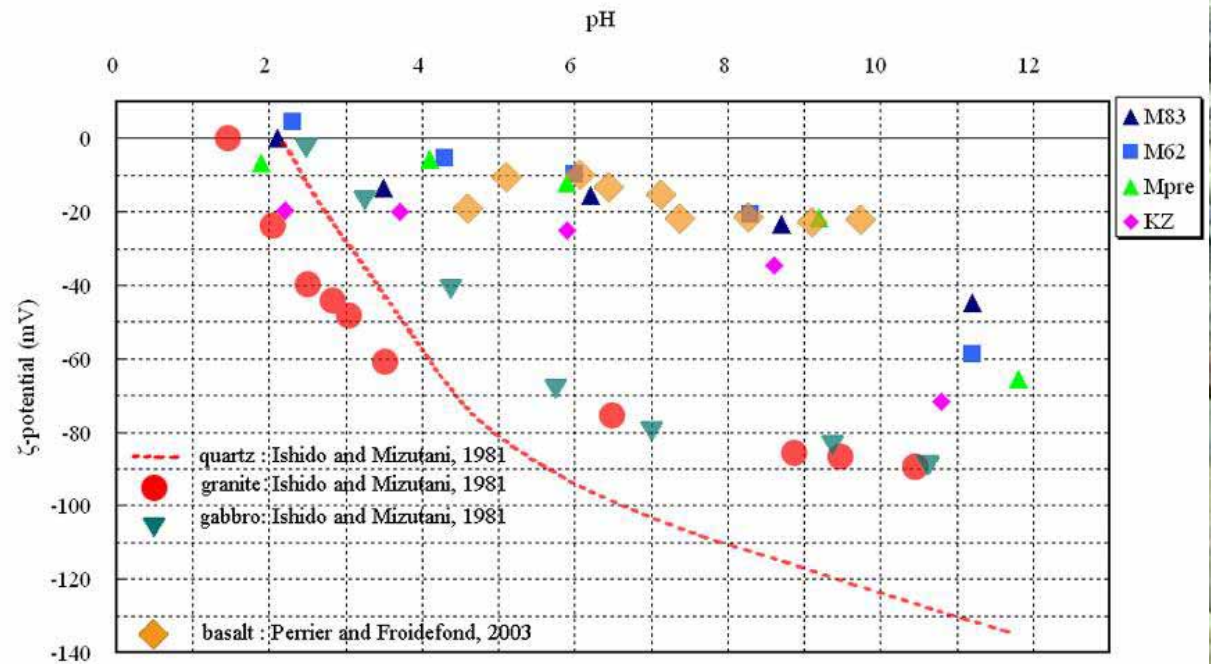


# 考察

界面導電現象

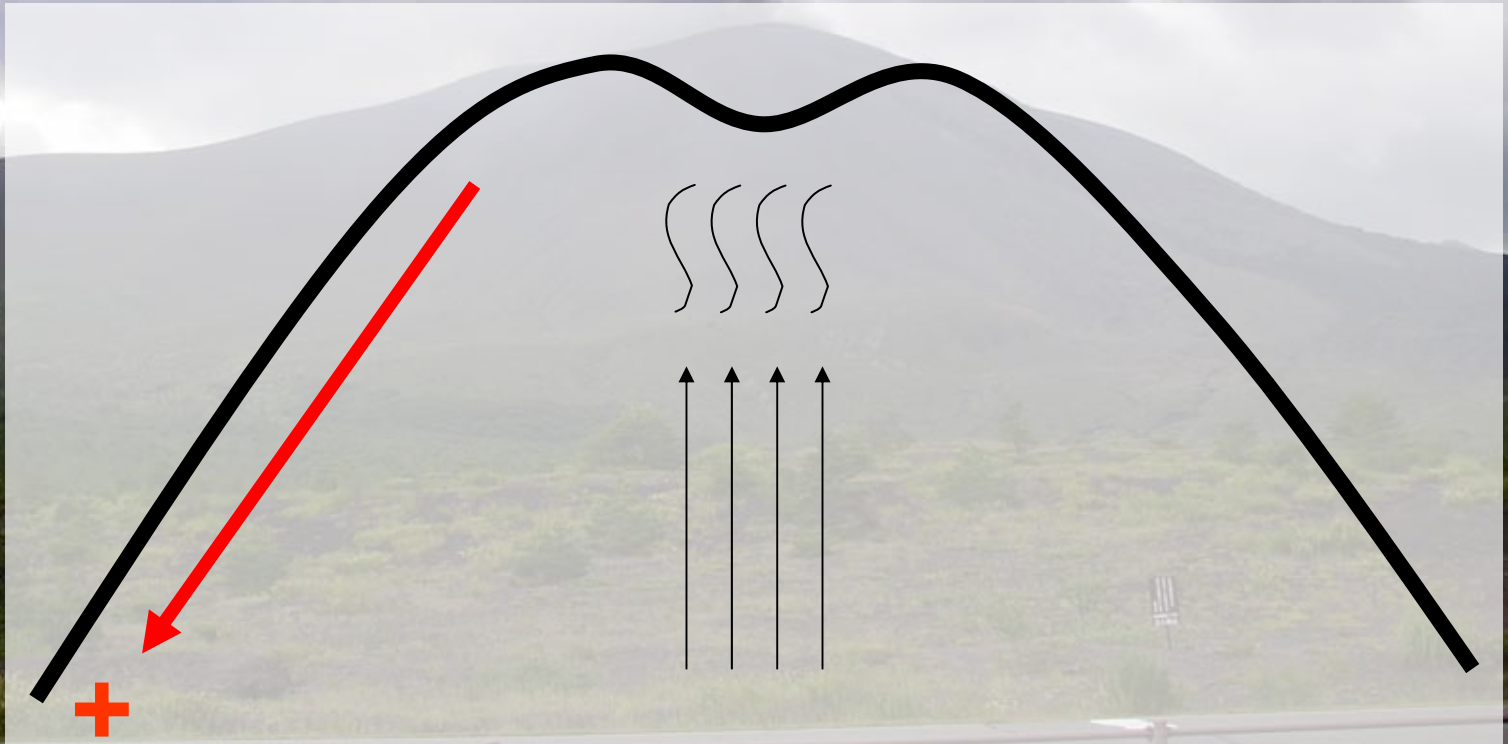
$$i = \frac{\varepsilon \zeta}{Fk} j$$

ゼータ電位のpH依存性



# 考察

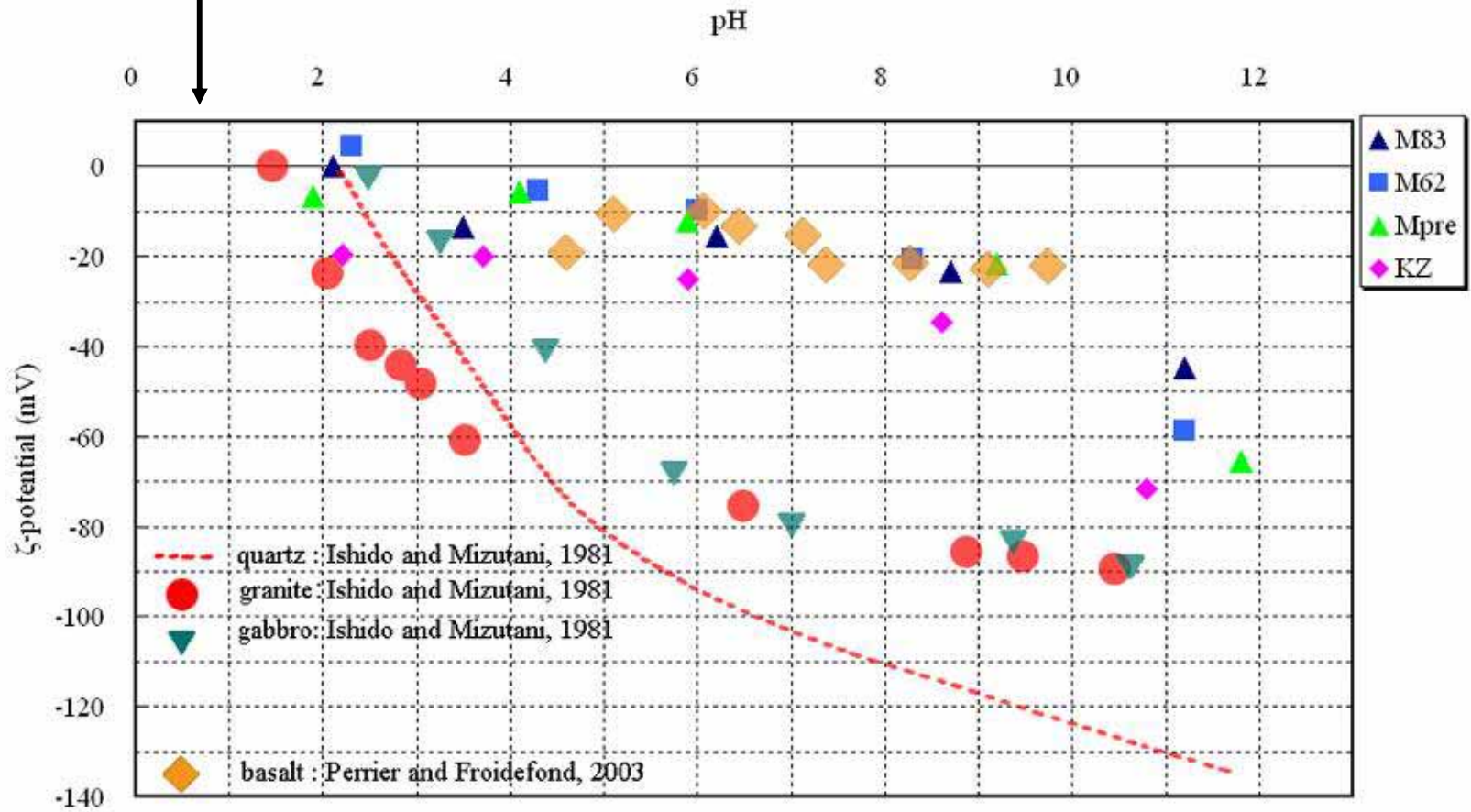
- 通常の場合





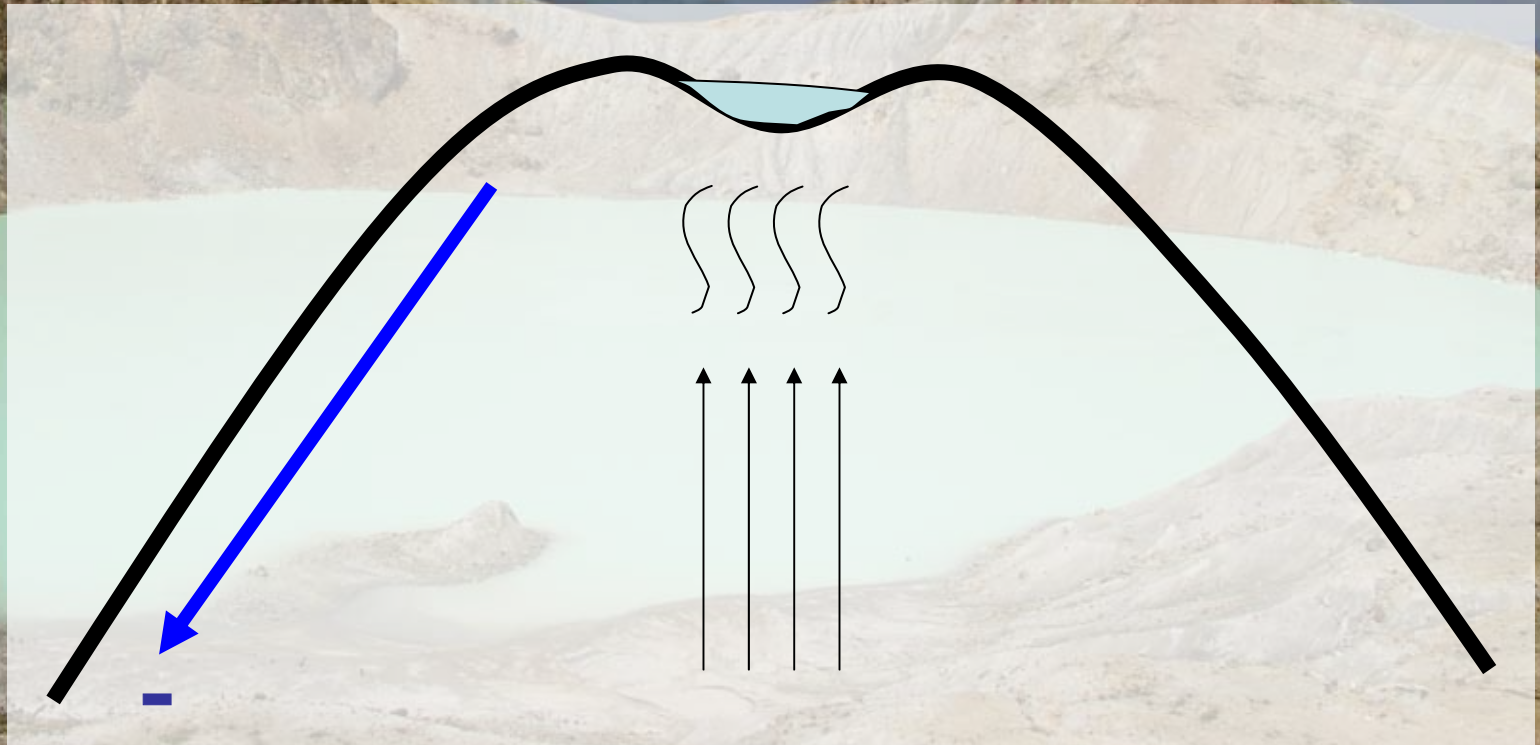
# 考察

湯釜  
(pH=0.8)



# 考察

- 草津白根山 湯釜(pH=0.8)の場合





# 考察

$$i = \frac{\varepsilon \zeta}{Fk} j$$

水の誘電率 :  $\varepsilon \sim 3 \times 10^{-10} \text{ F/m}$

ゼータ電位 :  $\zeta \sim 3 \times 10^{-2} \text{ V}$

Formation Factor :  $F = \frac{R_{\text{rock}}}{R_{\text{water}}} \sim 5 \times 10^2$

透水率 :  $k = 2 \times 10^{-13} \text{ m}^2$  (砂 ~ 砂岩の値)

を用いると、 $i \sim 0.2 \text{ A}$ のとき、 $j \sim 2 \text{ m}^3/\text{s}$

この  $j$  は(直観的に)大きすぎる。

各パラメータの推定値の誤差が大きいため、これをもって今回の観測および解析が不確かであるとは言えない。

# まとめ

- 草津白根山湯釜付近の自然電位と比抵抗を測定した。その測定データに基づいて、地下の流体の移動を推定した。
- 草津白根山湯釜の水は特に強い酸性のため、ゼータ電位が正になっている。ゼータ電位が正である水が山の上から下へ流れていることは、今回の観測と解析からも推定できた。





End