

2018年9月25日  
地球観測実習発表会 @地震研講義室

# 電磁気観測

- MT法による富士山の比抵抗構造の推定 -

佐々木 肯太 西條 祥

指導：上嶋誠 先生 小山崇夫 先生

**1. Introduction**

2. Observation

3. Analysis

4. Discussion

## 本実習の目的

- MT法の原理を学ぶ。
- 観測の手順、機械の使用法を正しく理解し、現地で電磁場観測を行う。
- 適当な方法で、データ処理・解析を行う。
- 解析結果を検討し、実際の地学的現象と結びつけて考察する。

# 1. Introduction (2/4)

## MT法 (Magneto-Telluric)

電場と磁場を測定する電磁探査法。  
電離層や磁気圏を起源とする電磁場変動を地表で観測。

電場－磁場間の応答関数から得られる見かけ比抵抗、  
位相に合うように大地の比抵抗構造を決定する。



地下構造の検討

- ・ 水の存在
- ・ 岩石の種類
- ・ 温度



# 1. Introduction (3/4)

## 電場・磁場と見かけ比抵抗

一様

マクスウェル方程式

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = -\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{j} \end{cases} \longrightarrow \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = i\omega\mu\sigma E_x$$

ベクトル公式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} &\rightarrow i\omega \\ \mathbf{j} &= \sigma \mathbf{E} \\ \epsilon &\ll \sigma \end{aligned}$$

インピーダンス (応答関数)

$$Z_{xy} \equiv \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} e^{\frac{\pi}{4}i} = \sqrt{\frac{2\pi\rho\mu}{T}} e^{\frac{\pi}{4}i}$$

見かけ比抵抗

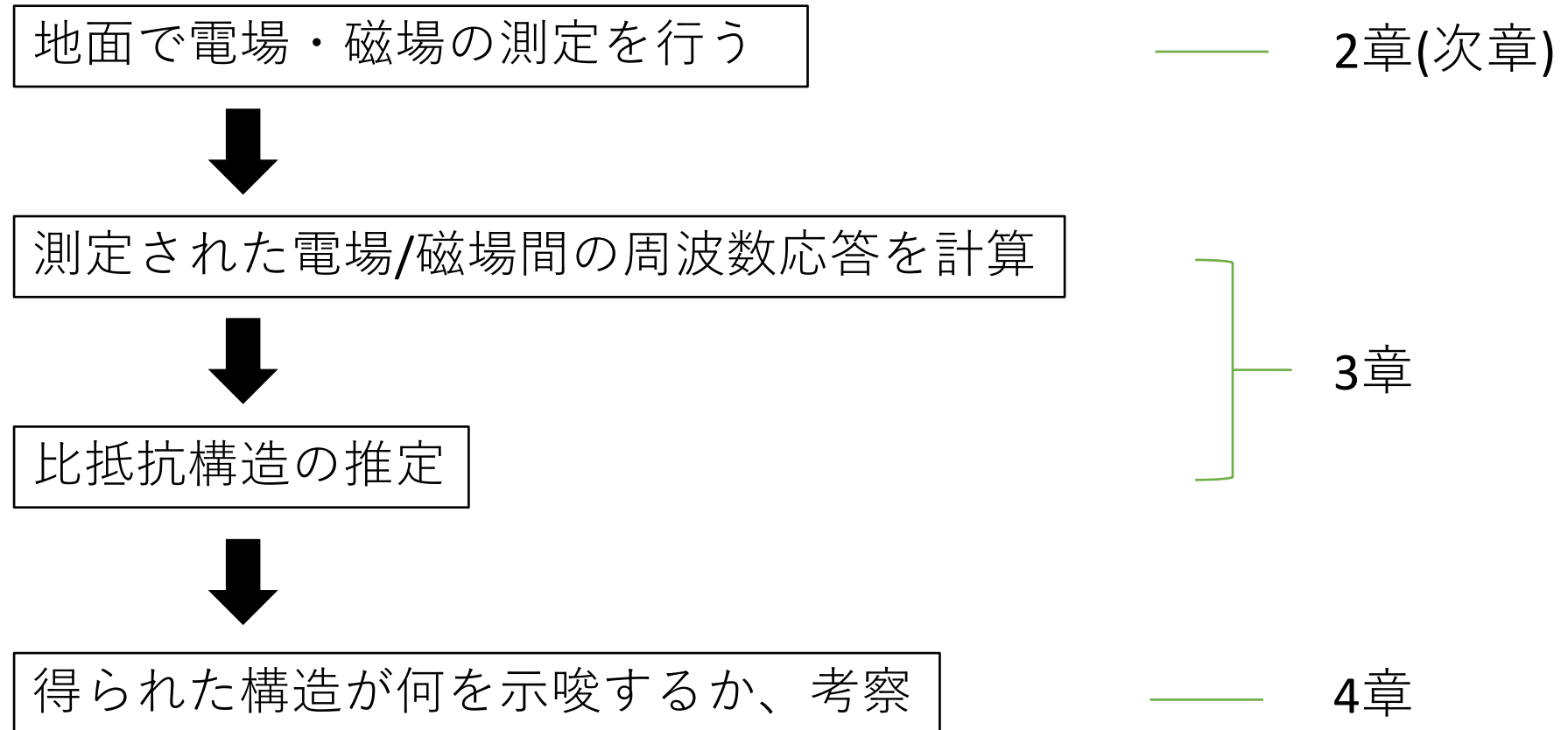
$$\rho_a = \frac{|Z_{xy}|^2 T}{2\pi\mu}$$

$\sigma$  : 電気伝導率  
 $\rho = \frac{1}{\sigma}$  : 比抵抗



説明するような層構造を推定  
(詳細は3章解析partで)

## 全体の流れ



1. Introduction

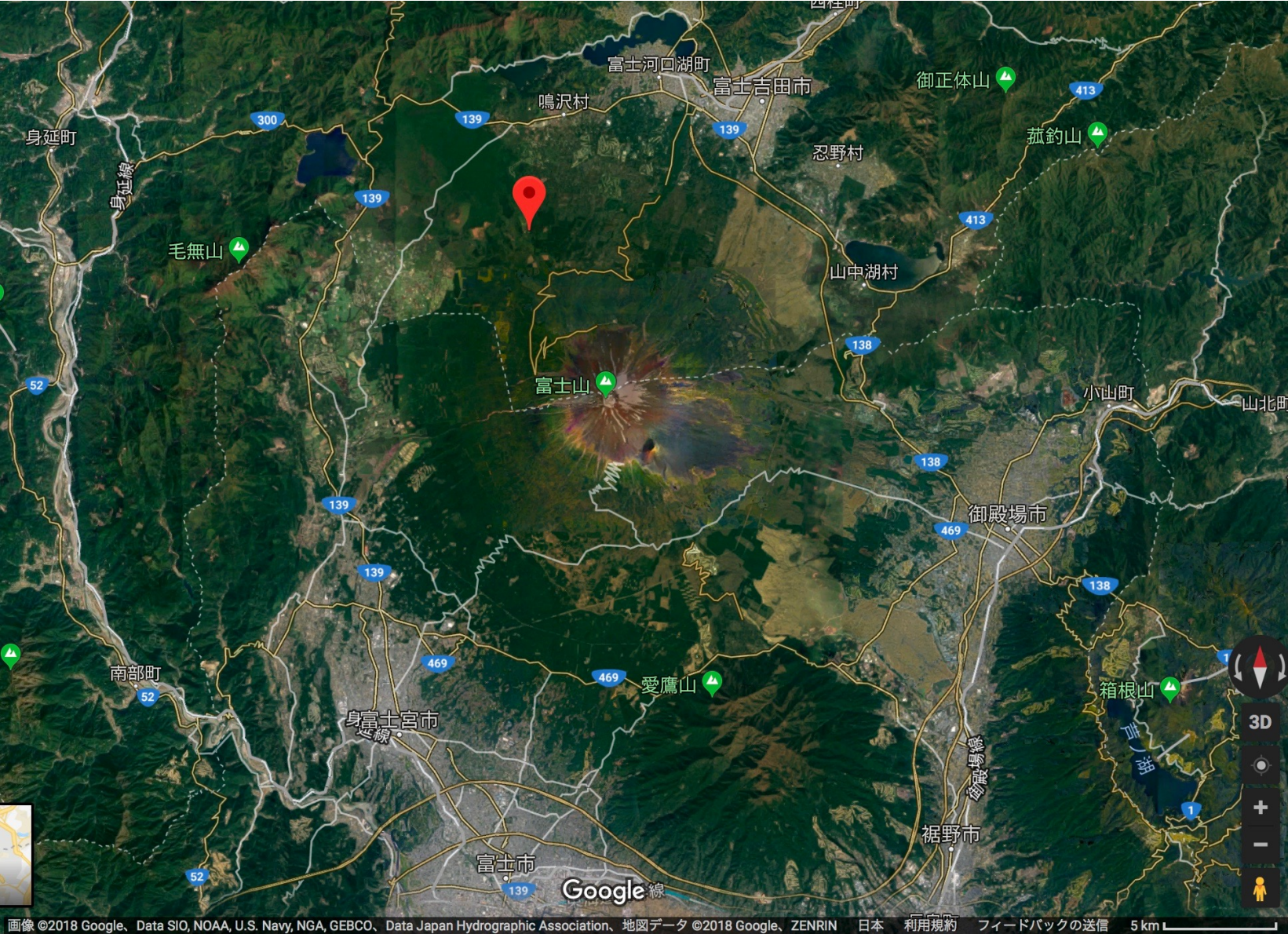
**2. Observation**

3. Analysis

4. Discussion

# 2. Observation (1/5)

## 観測地の広域図





## 2. Observation (2/5)

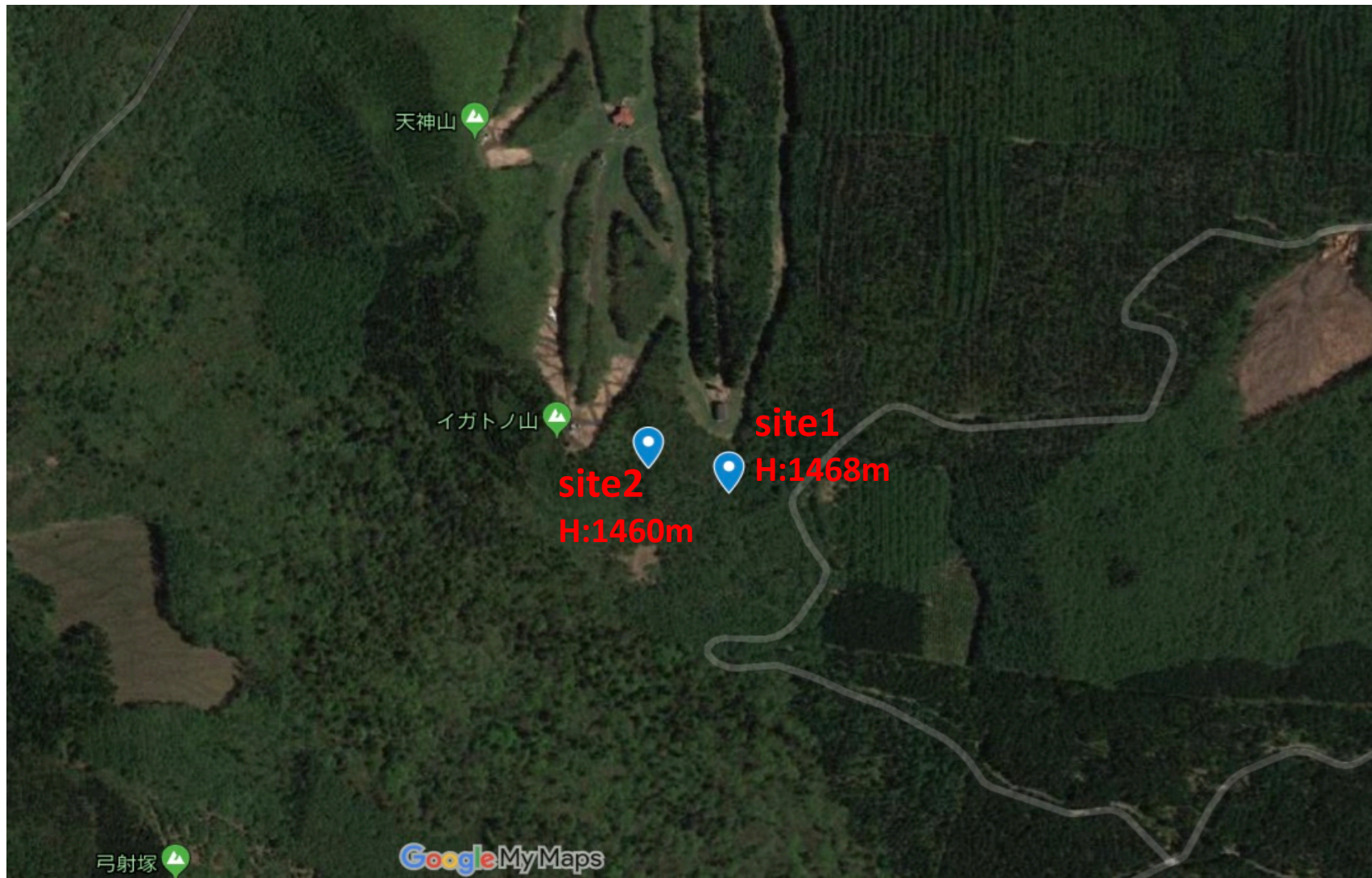
観測期間：2018年8月3日～8月5日

観測点

site1: 35° 25'52.2N 138° 41' 20.7E

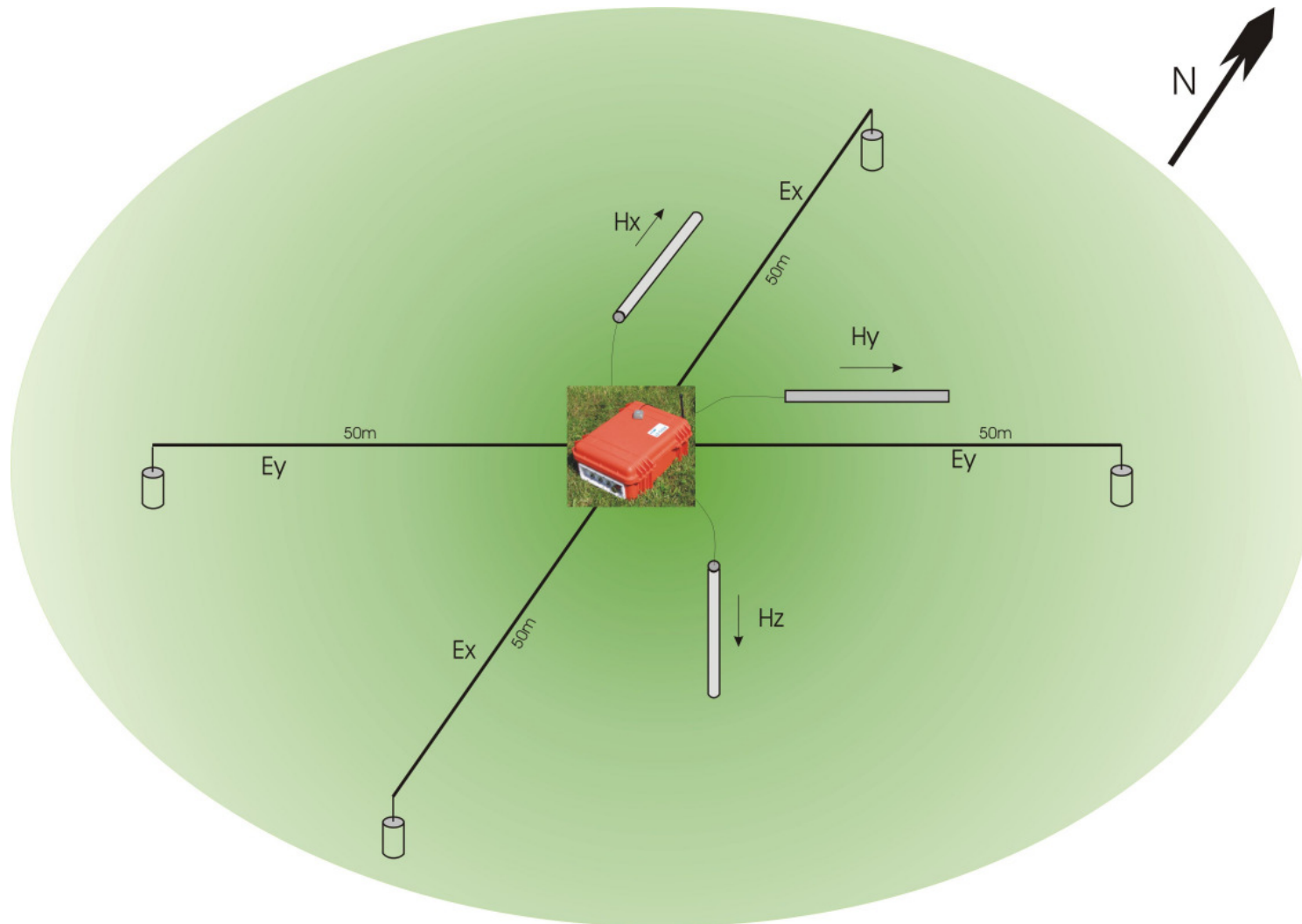
site2: 35° 25'53.3N 138° 41' 16.5E

2点間距離: 110m



## 2. Observation (3/5)

### 各観測機器の配置 (模式図)





## 2. Observation (4/5)

### 電極・コイルの設置





## 2. Observation (5/5)

ロガーに接続





1. Introduction

2. Observation

**3. Analysis**

4. Discussion

### 3. Analysis (1/12)

## 取得したデータ

測定期間

(ノイズを避けるため深夜帯の測定)

1024Hz: 8/4 AM1:00-AM5:00, 8/5 AM1:00-AM5:00

32Hz: 8/4 AM0:00-AM6:00, 8/5 AM0:00-AM6:00

8/3

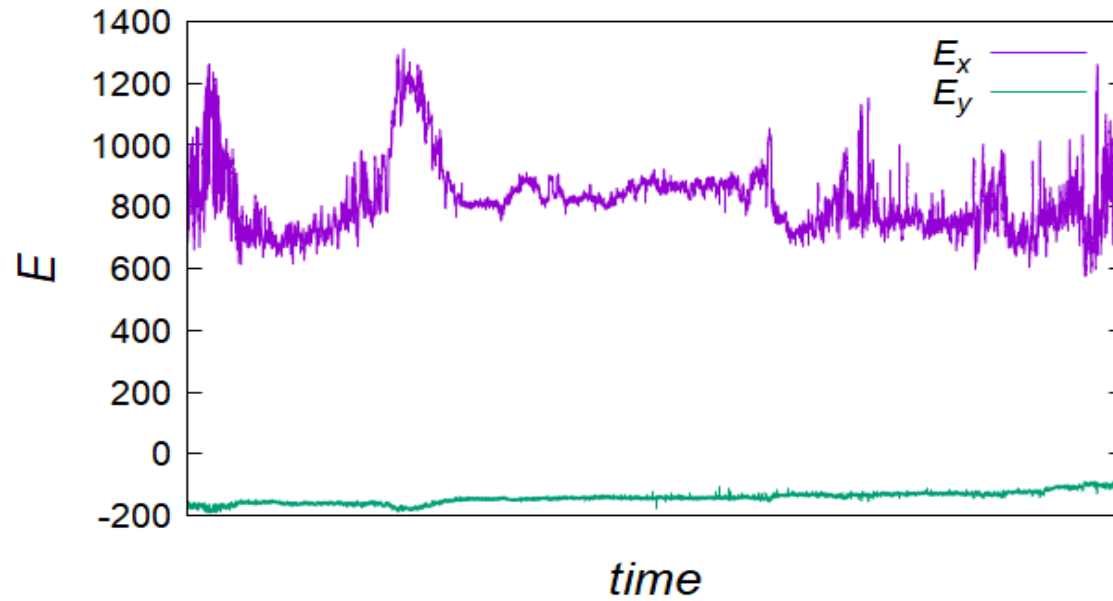
8/4

Remote Referenceとして山形の観測データを用いる

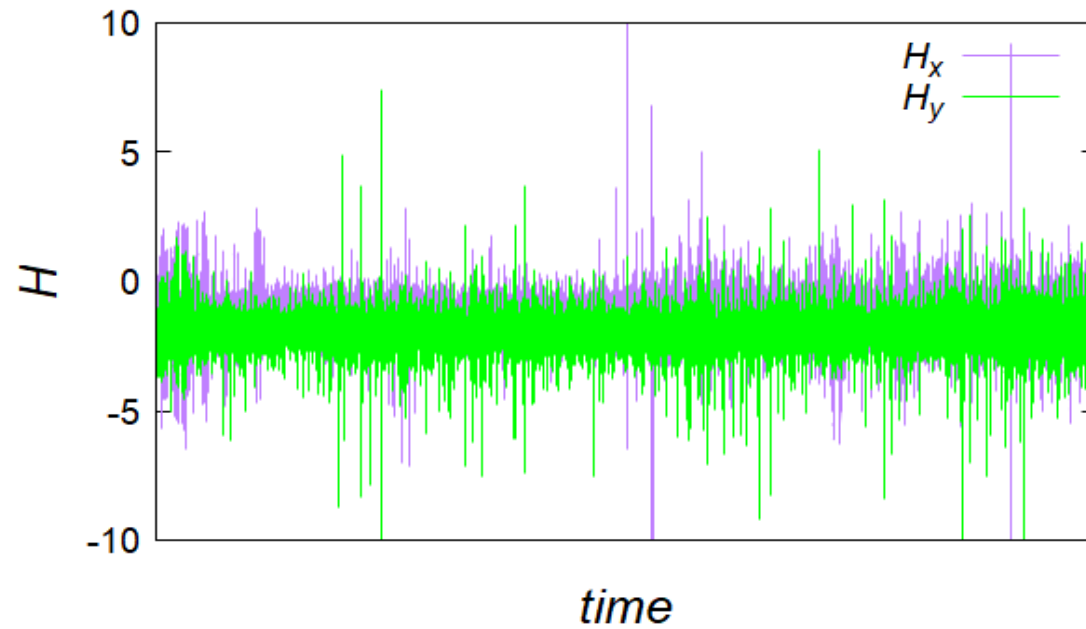
※ 山形の観測点にてコイルが逆向きに接続されるエラー  
(解析に問題なし)

### 3. Analysis (2/12)

site1 電場



site1 磁場



#### 電磁場間応答関数の計算

電場 $E$ と磁場 $H$ の時系列データ → 応答関数 $Z$

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

BIRRPを用いて計算

#### 見かけ比抵抗、位相

$$Z = \frac{Z_{xy} - Z_{yx}}{2} \quad \text{として}$$

※ 逆位相を考慮しての平均

見かけ比抵抗	$\rho_a = \frac{ Z ^2 T}{2\pi\mu}$
--------	------------------------------------

位相	$\phi = \arg(Z)$
----	------------------

← 仮定した地下構造モデルと比較・検討

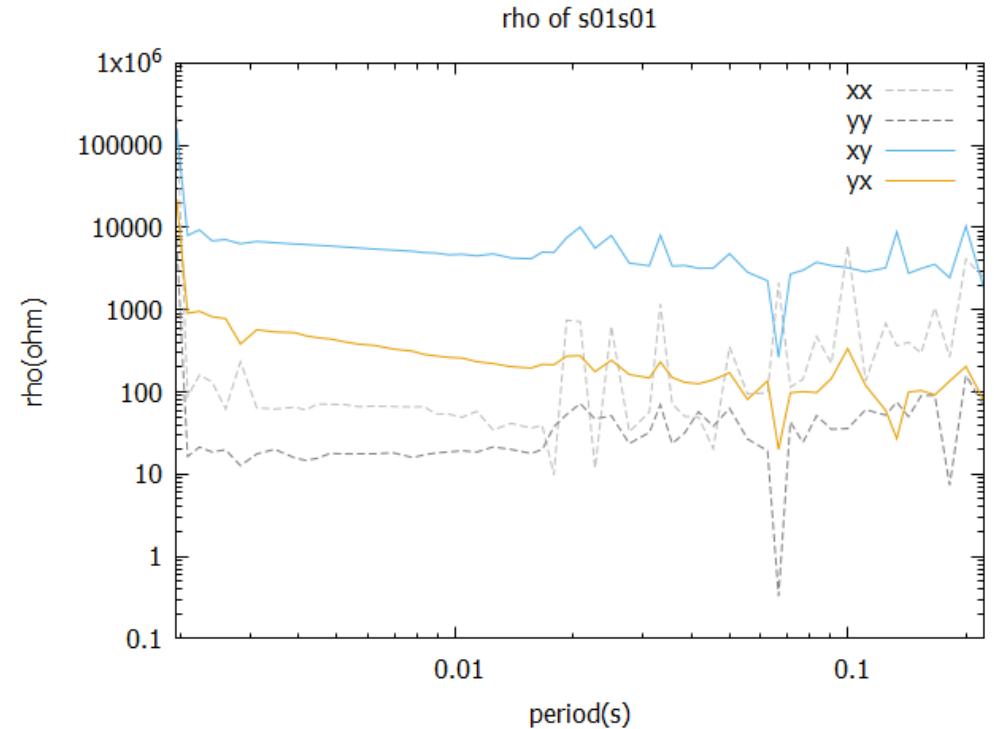


## site1 解析

出力：s01電場 入力：s01磁場 (ref: ymg磁場)

$$\begin{pmatrix} E_x^{s1} \\ E_y^{s1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx}^{s1} & Z_{xy}^{s1} \\ Z_{yx}^{s1} & Z_{yy}^{s1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x^{s1} \\ H_y^{s1} \end{pmatrix}$$

インピーダンス



#### site2 解析 (予定)

出力：s02電場 入力：s01磁場

$$\begin{pmatrix} E_x^{s2} \\ E_y^{s2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx}^{21} & Z_{xy}^{21} \\ Z_{yx}^{21} & Z_{yy}^{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x^{s1} \\ H_y^{s1} \end{pmatrix}$$

- s02 は Eのみ測定
- 同日の s01 のH との応答関数を求める

しかし...

**s01 の 8/4 の磁場データが取れていなかった！**

### 3. Analysis (6/12)

#### site2 解析 (実際)

山形のデータを経由し、8/4の  $E^{s2}$  , 8/3の  $H^{s1}$  間の応答関数  $Z^{21}$  を計算

※電場・磁場が8/3, 4で同じと仮定

1. 出：s02電場 入：ymg磁場 (8/4)

$$E^{s2} = Z^{2y} H^{ymg}$$

2. 出：s01磁場 入：ymg磁場 (8/3)

$$H^{s1} = Z_H H^{ymg}$$

$$\therefore E^{s2} = Z^{2y} Z_H^{-1} H^{s1}$$

応答関数

$$Z^{21} = Z^{2y} Z_H^{-1}$$

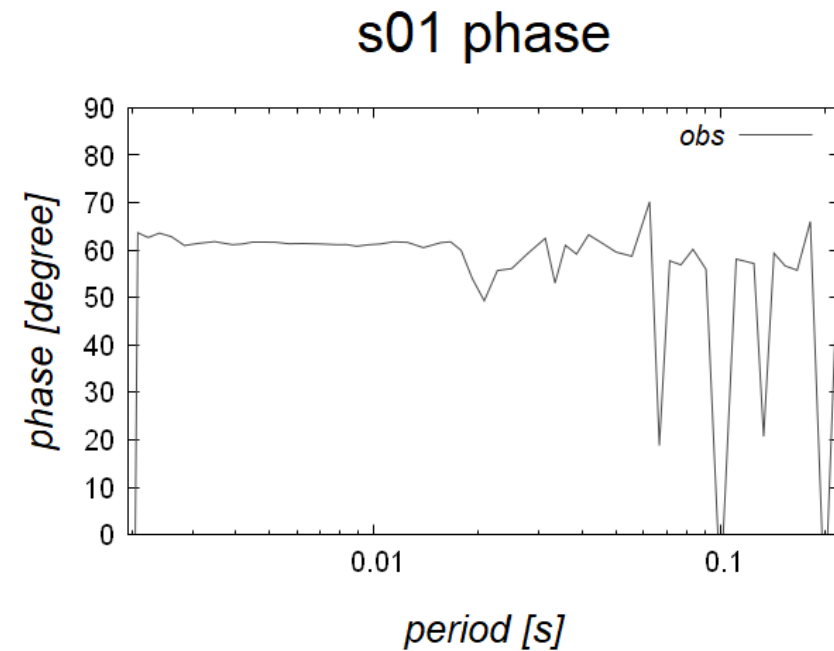
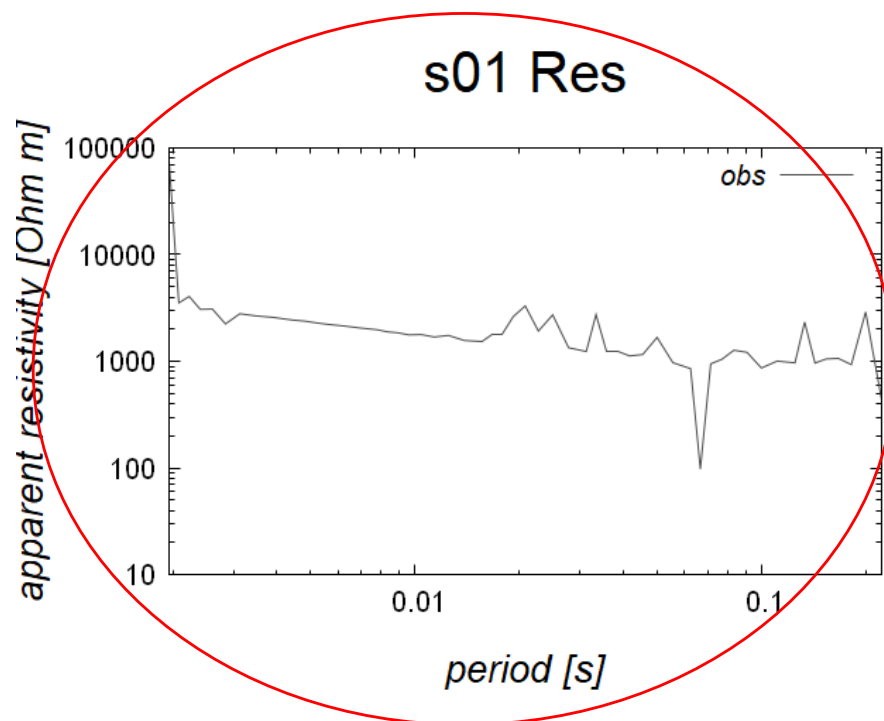
## 構造推定

地表で観測された

・ 見かけ比抵抗

・ 位相

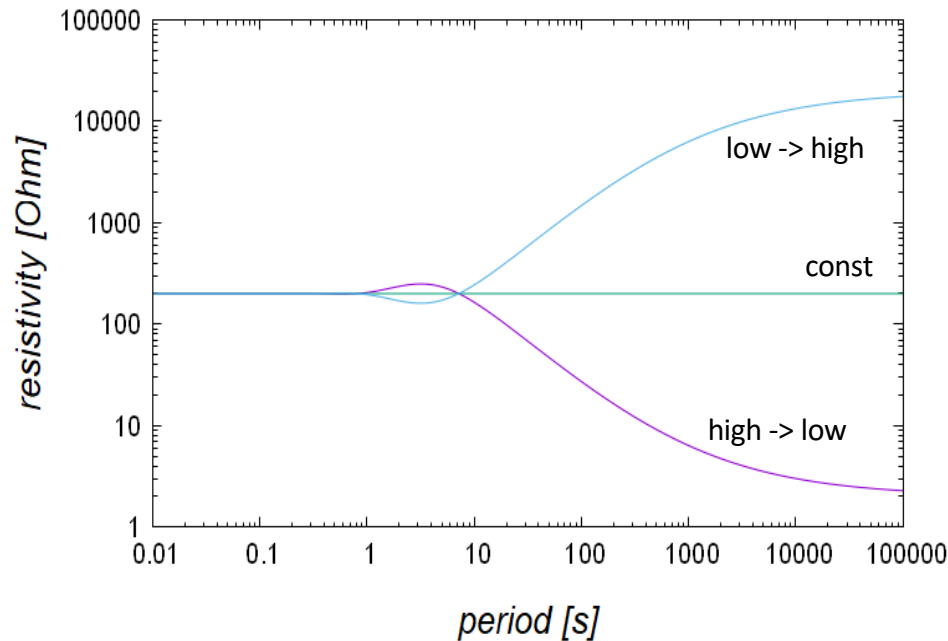
と合うような構造を推定する



### 3. Analysis (8/12)

#### 2層モデル：各層で異なる比抵抗

2layer model



200 -> 2  
200 -> 200  
200 -> 20000

- $E, H$ から見かけ比抵抗 $\rho_a$ を求められる
- 多層モデルでは $\rho_a$ に周期依存性

インピーダンス (応答関数)

(参考)

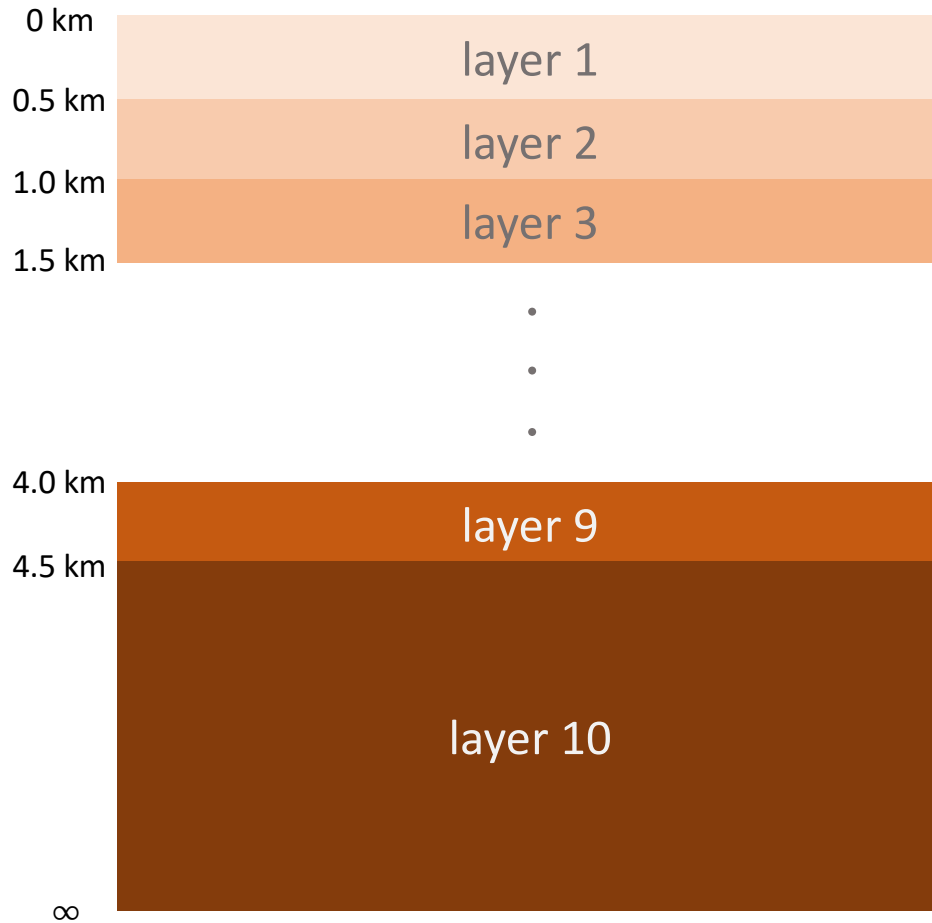
$$Z_{xy} \equiv \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} e^{\frac{\pi}{4}i} = \sqrt{\frac{2\pi\rho\mu}{T}} e^{\frac{\pi}{4}i}$$

見かけ比抵抗

$$\rho_a = \frac{|Z_{xy}|^2 T}{2\pi\mu}$$

### 3. Analysis (9/12)

#### 仮定する構造モデル



1次元(深さ方向のみ)  
地下5 km  
10層モデル

参考

$$d_{skin} = \frac{\sqrt{10T\rho}}{2\pi}$$
$$\sim \frac{\sqrt{10 \times 0.1 \times 1000}}{2\pi}$$
$$\sim 5 \text{ [km]}$$

$d_{skin}$  : 浸透深さ [km],  $T$  : 周期 [s],  $\rho$  : 比抵抗 [ $\Omega\text{m}$ ]

### 3. Analysis (10/12)

#### 手法 : Grid search method

layer 1 ~10 に対し、  
比抵抗値

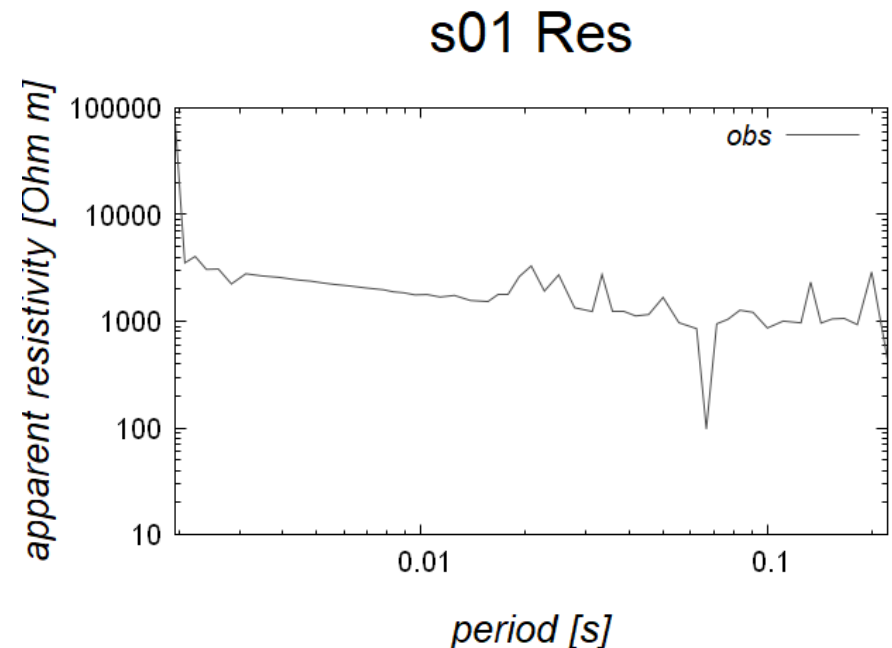
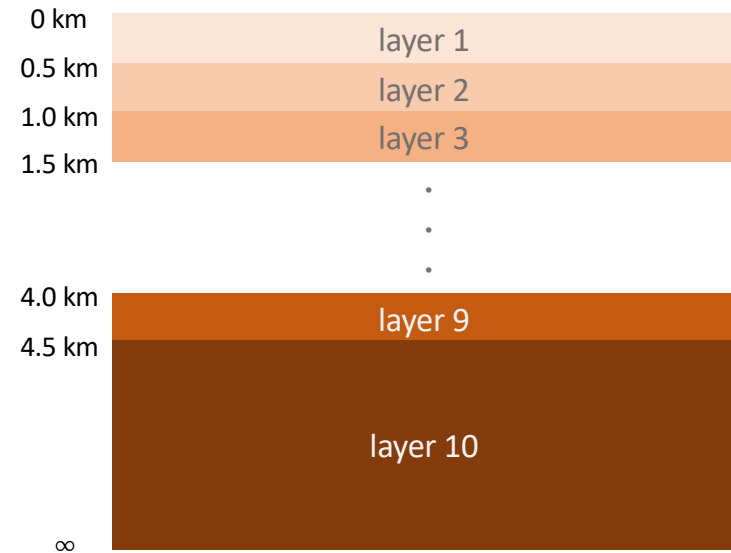
200, 600,  
2000, 6000, 20000 [ $\Omega$  m]

を仮定し  
評価関数  $f$  を最小化する組み合わせ

$$f = \sum_T (\log[\rho_a^{obs}] - \log[\rho_a^{model}])^2 |_{T=t}$$

≡ 右のグラフに fit

Note: 短周期で値が大きすぎるものをカット

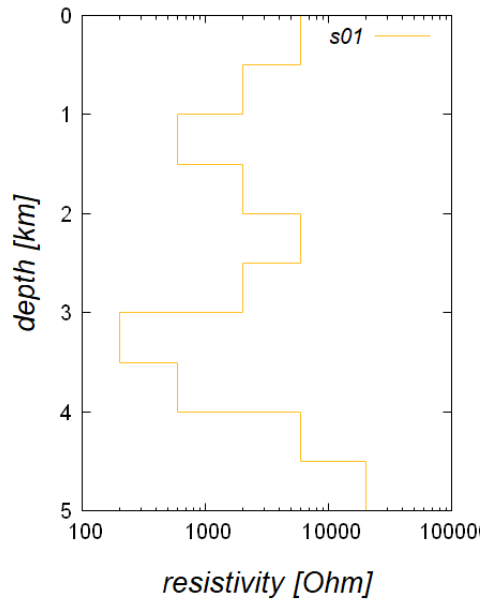




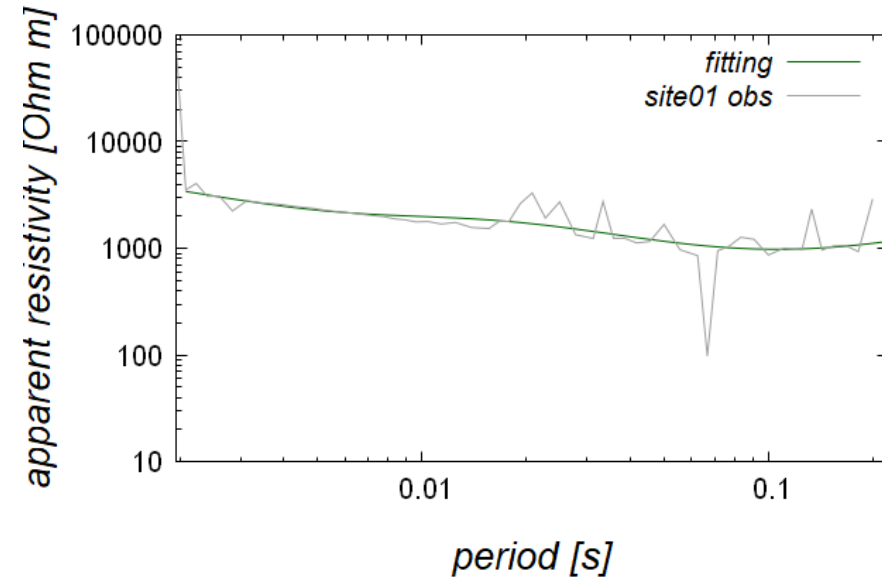
# 3. Analysis (11/12)

## Result

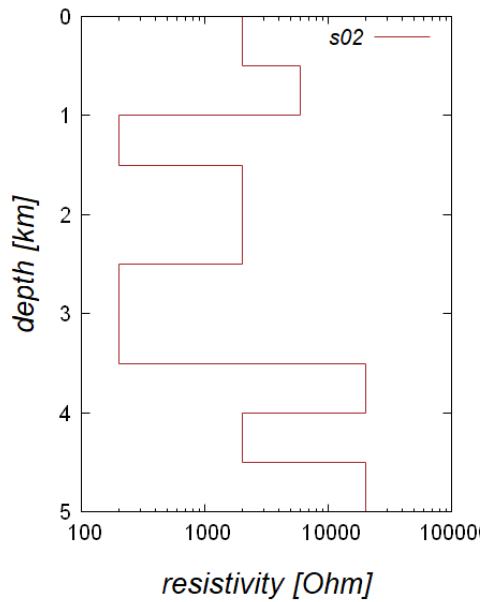
### Site01 structure



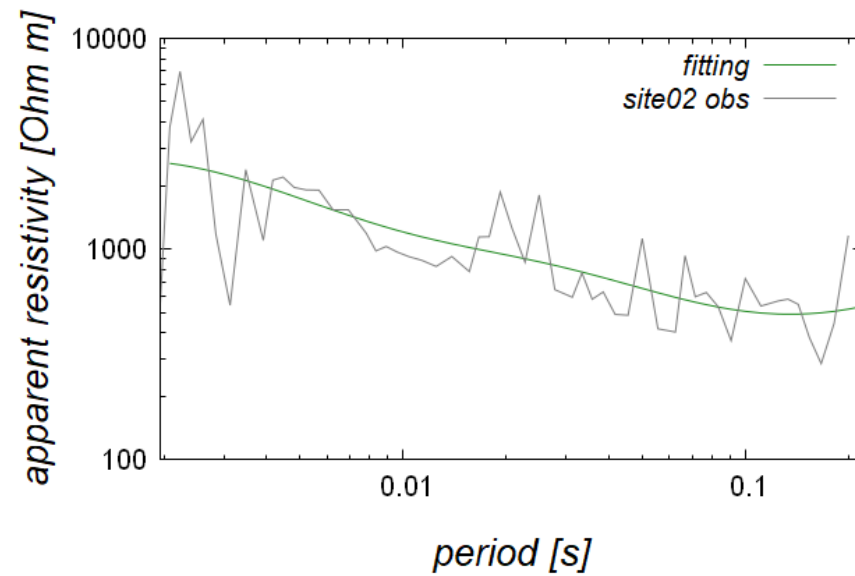
### s01 Res



### Site2 structure



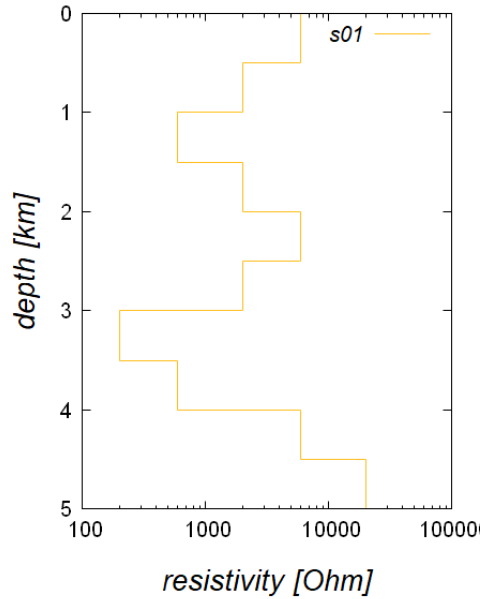
### s02 Res



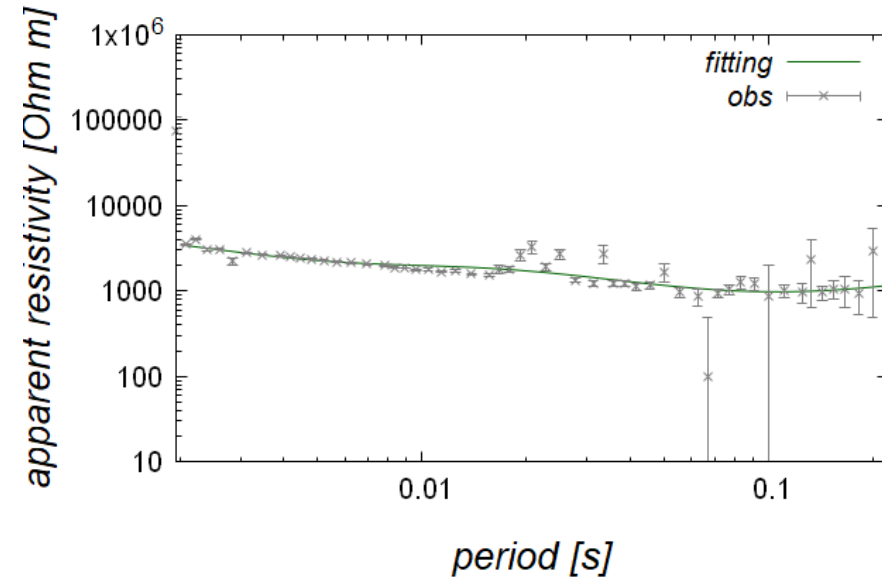
# 3. Analysis (11/12)

## Result

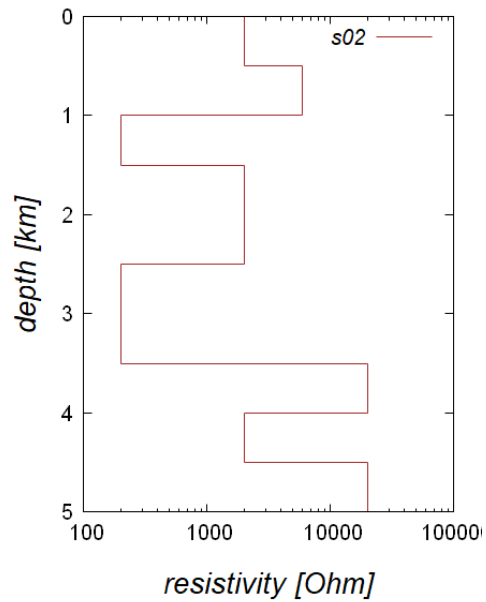
### Site01 structure



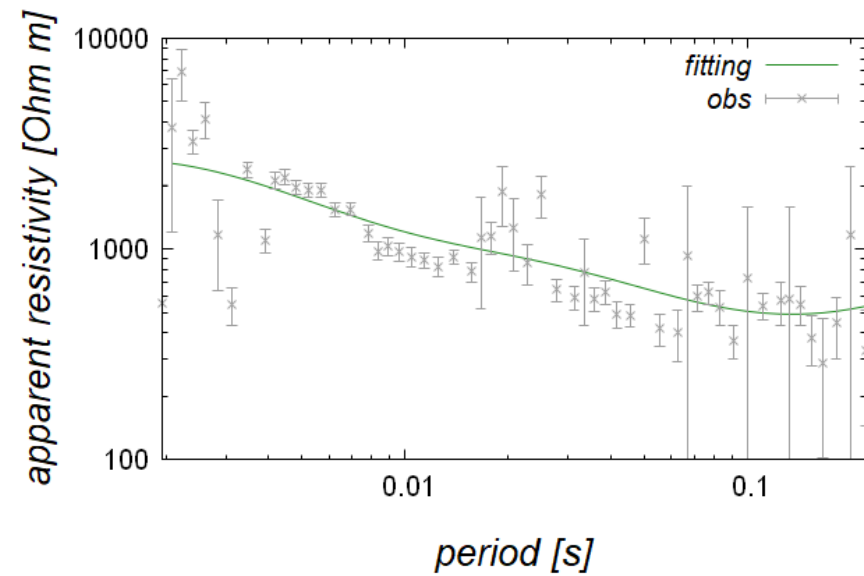
### s01 Res



### Site2 structure



### s02 Res

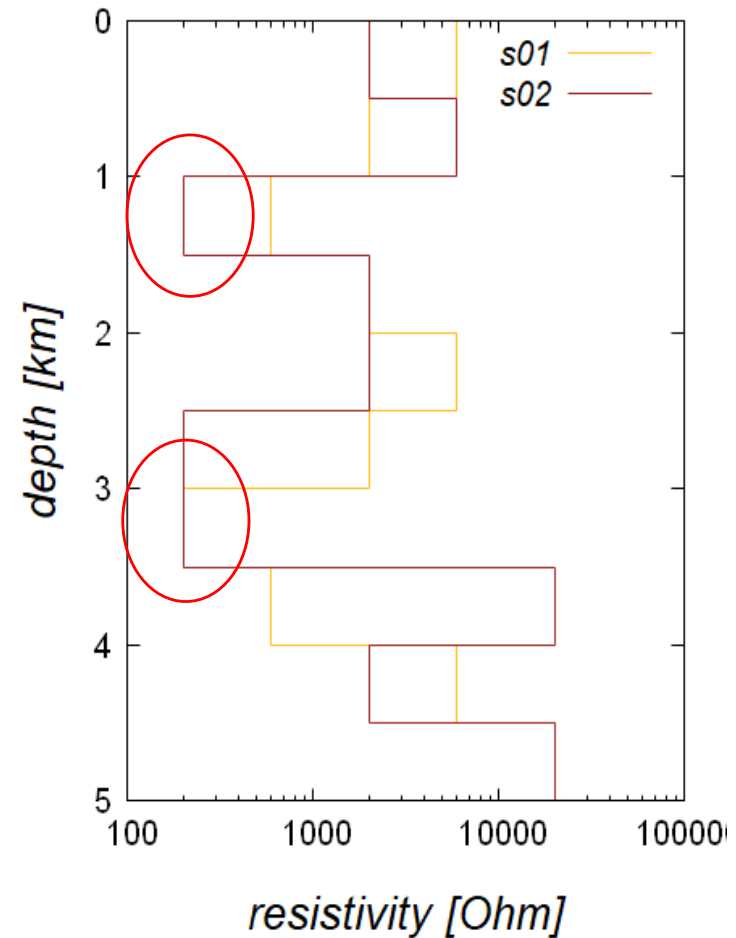


### 3. Analysis (12/12)

## Result

	site1	site2
depth[km]	res[ $\Omega$ m]	res[ $\Omega$ m]
0	6000	2000
0.5	2000	6000
1	600	200
1.5	2000	2000
2	6000	2000
2.5	2000	200
3	200	200
3.5	600	6000
4	6000	20000
4.5~	20000	20000

## Site1,2 structure



site1,2ともに、1~1.5km、3km前後に低比抵抗層

1. Introduction

2. Observation

3. Analysis

**4. Discussion**

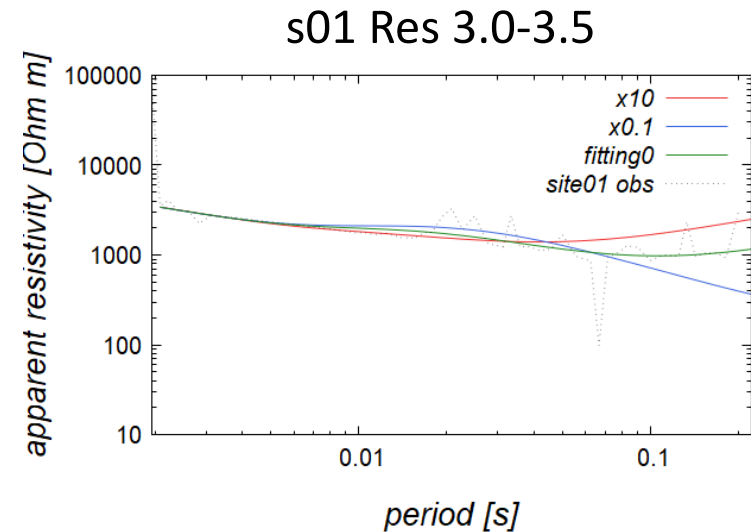
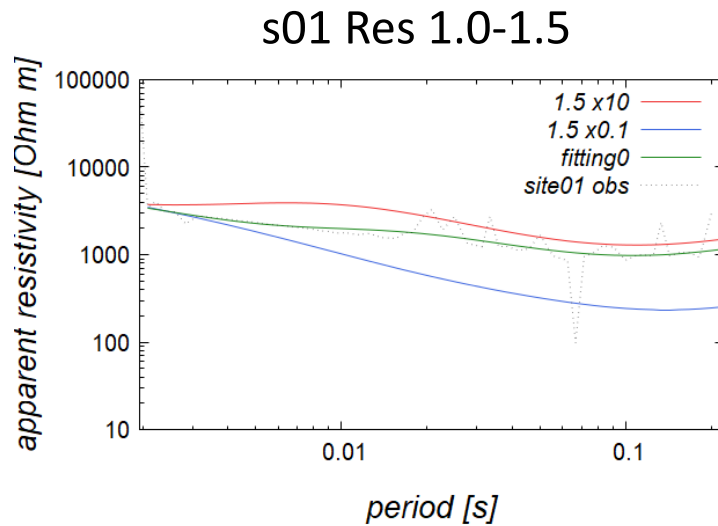
## 4. Discussion (1/6)

地上見かけ比抵抗の、地下構造モデルに対する感度

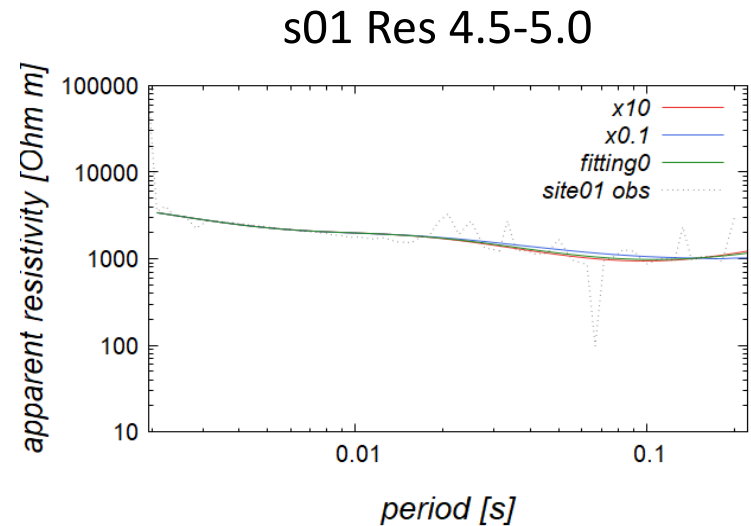
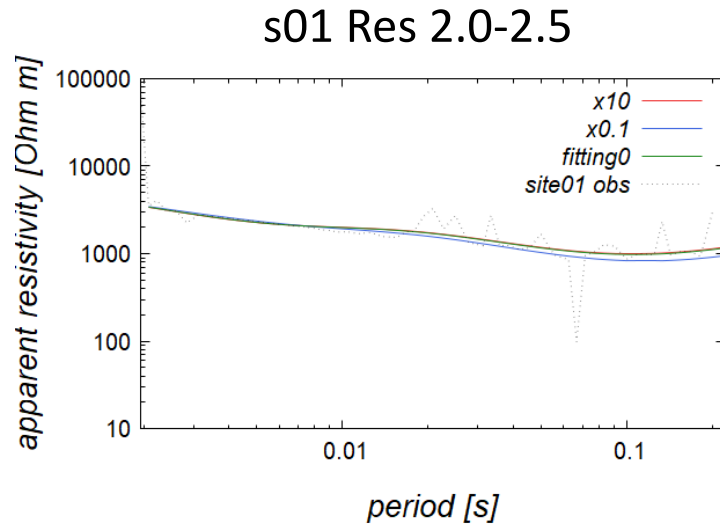


比抵抗構造の確からしさ

感度：大



感度：小





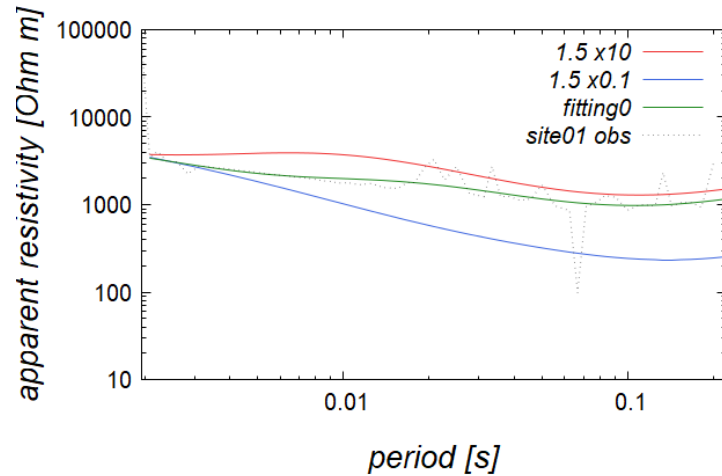
# 4. Discussion (2/6)

感度：大

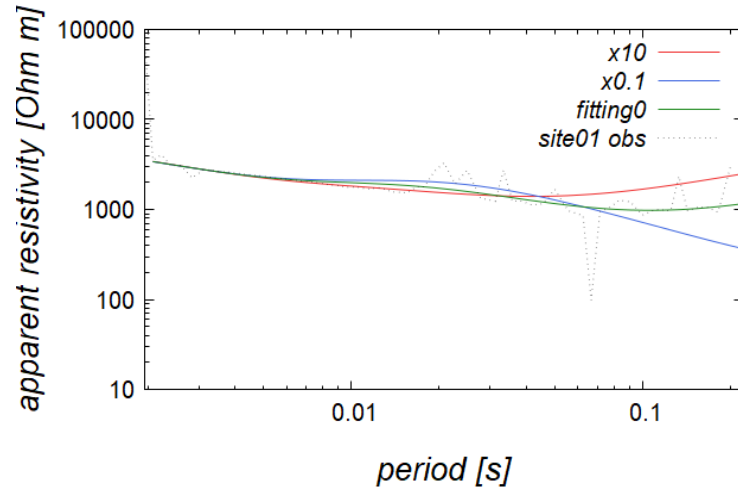
抵抗値が低い区間で高感度

→ よく定まる

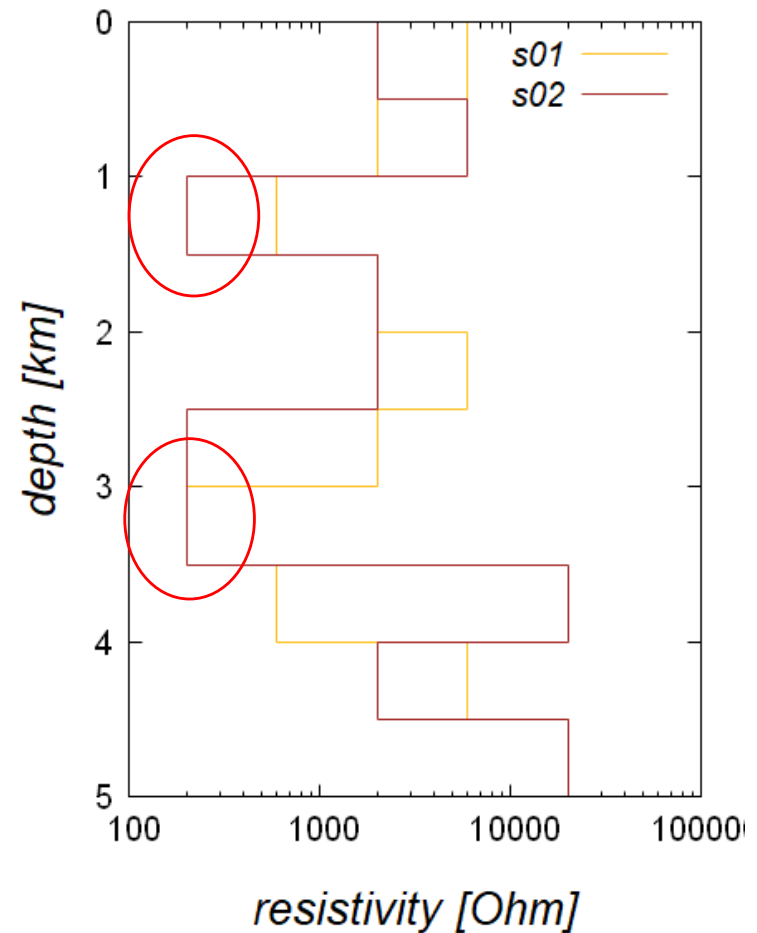
s01 Res 1.0-1.5



s01 Res 3.0-3.5



Site1,2 structure



## 4. Discussion (3/6)

### 地震波速度構造との対比



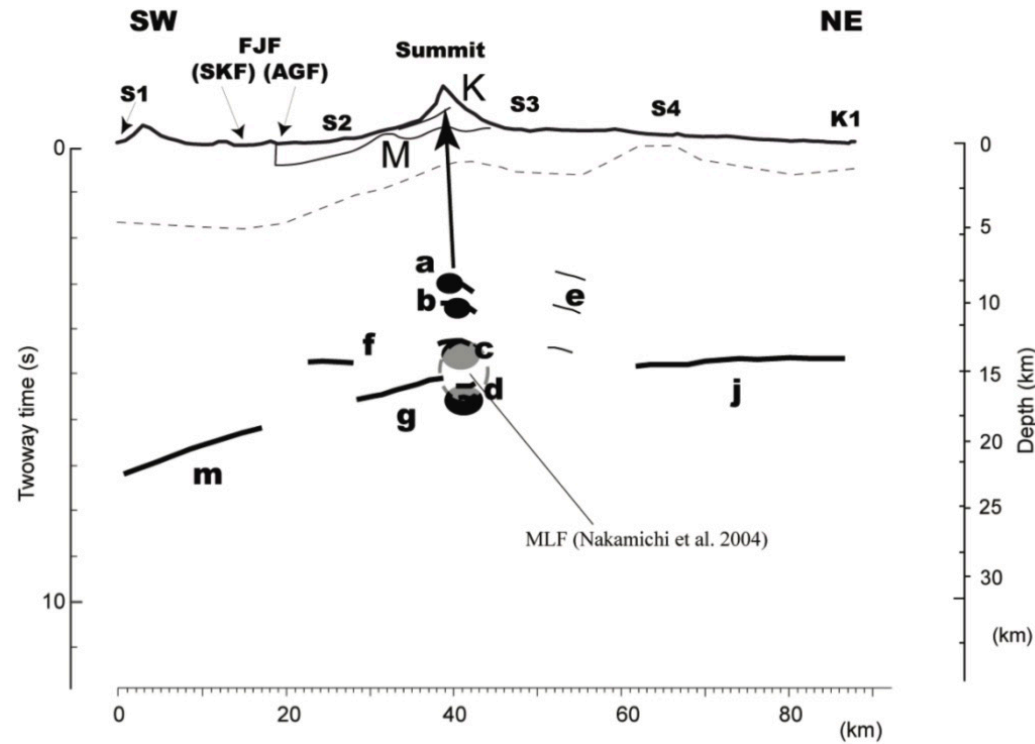
NE

SW

山頂付近を横切る南西-北東の断面

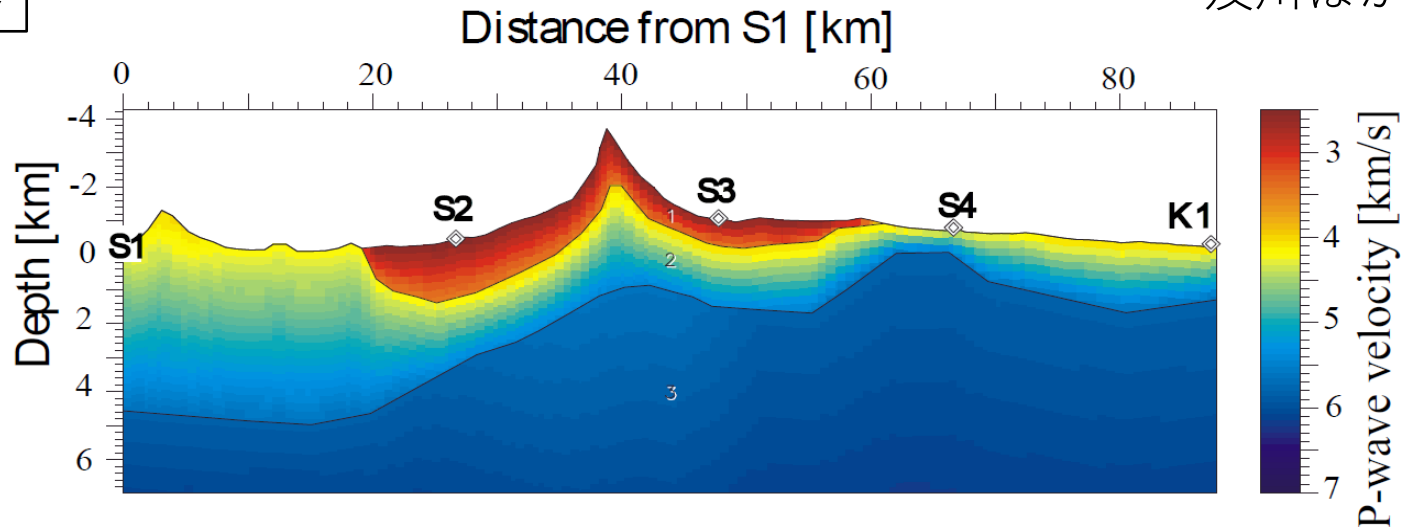
# 4. Discussion (4/6)

反射面



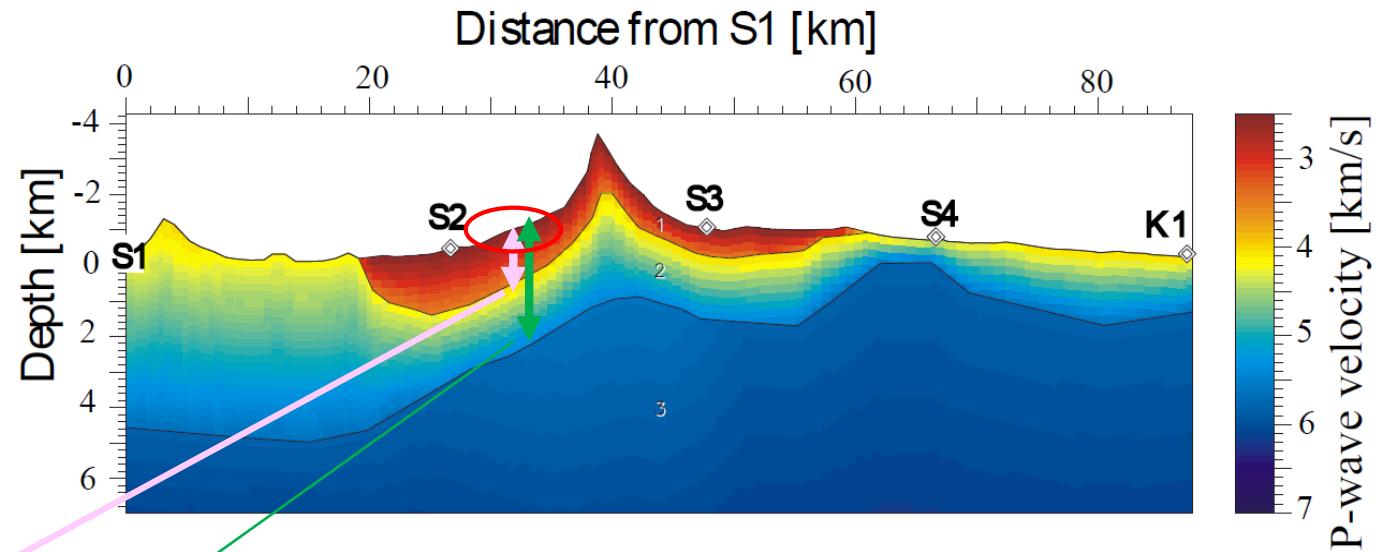
筒井ほか(2007)

P波速度

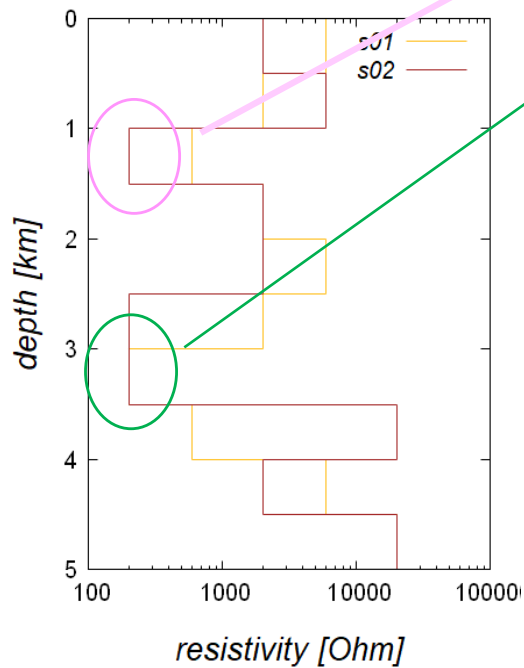


及川ほか(2007: 私信)

# 4. Discussion (5/6)



Site1,2 structure



深さ1~1.5km、3 km付近の低比抵抗帯に対応

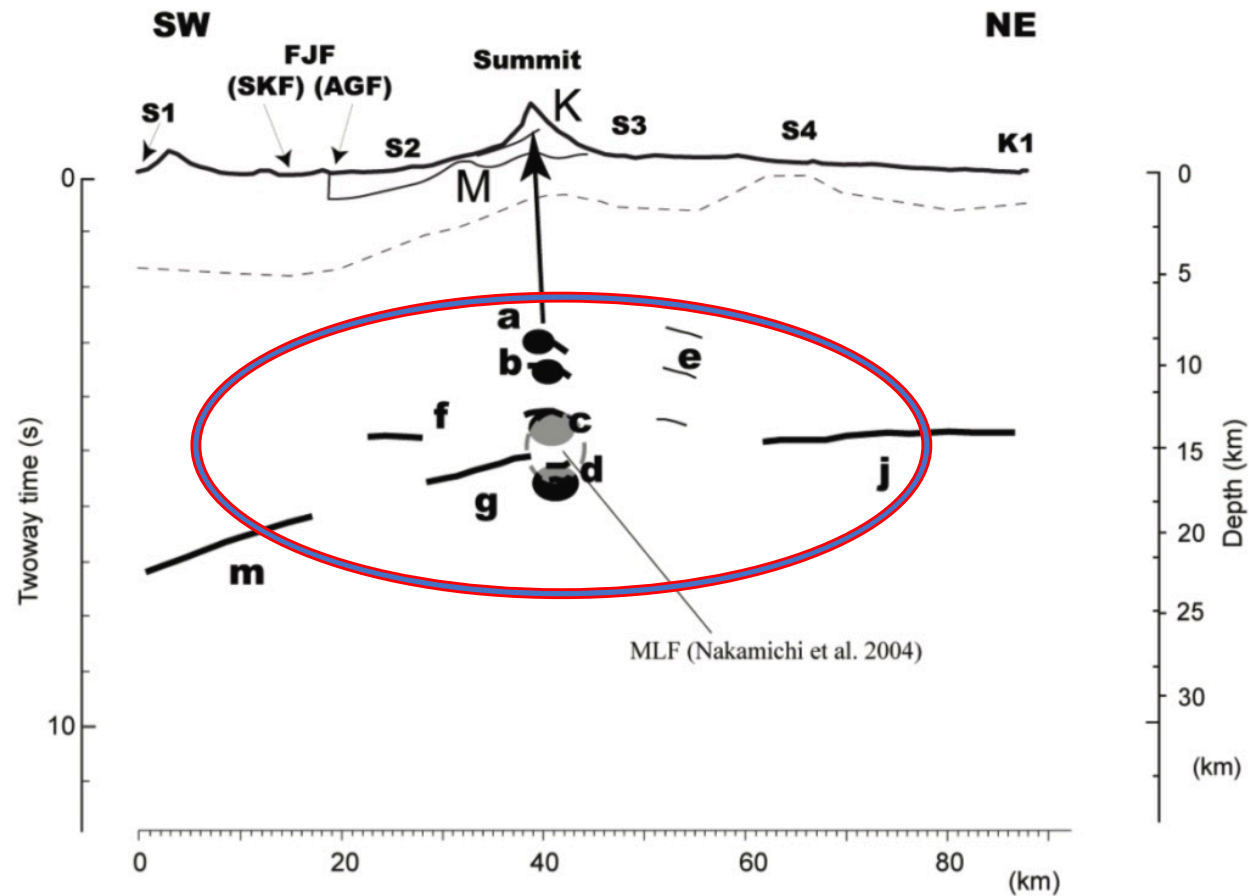


低比抵抗と速度境界の相関があることが示唆される。

水がたまっている？

## 4. Discussion (6/6)

より長周期データが取れば、深い部分を見ることのできる可能性





# Summary

- 実際に富士山北西部での野外観測を行い、電場磁場の時系列データを得ることができた。
- 得られたデータから周波数応答関数を計算し、見かけ比抵抗と位相を求めた。
- データがうまく取れていなかった場合でも、使えるデータをいかに組み合わせるか検討し、解析を行った。
- 地下5kmまでの10層モデルを仮定し、比抵抗構造を推定した。感度による検証も行った。
- 推定した比抵抗構造と、地震波速度構造との間に相関らしきものが見られたが、その原因の詳細は不明であり、今後の検討が望まれる。