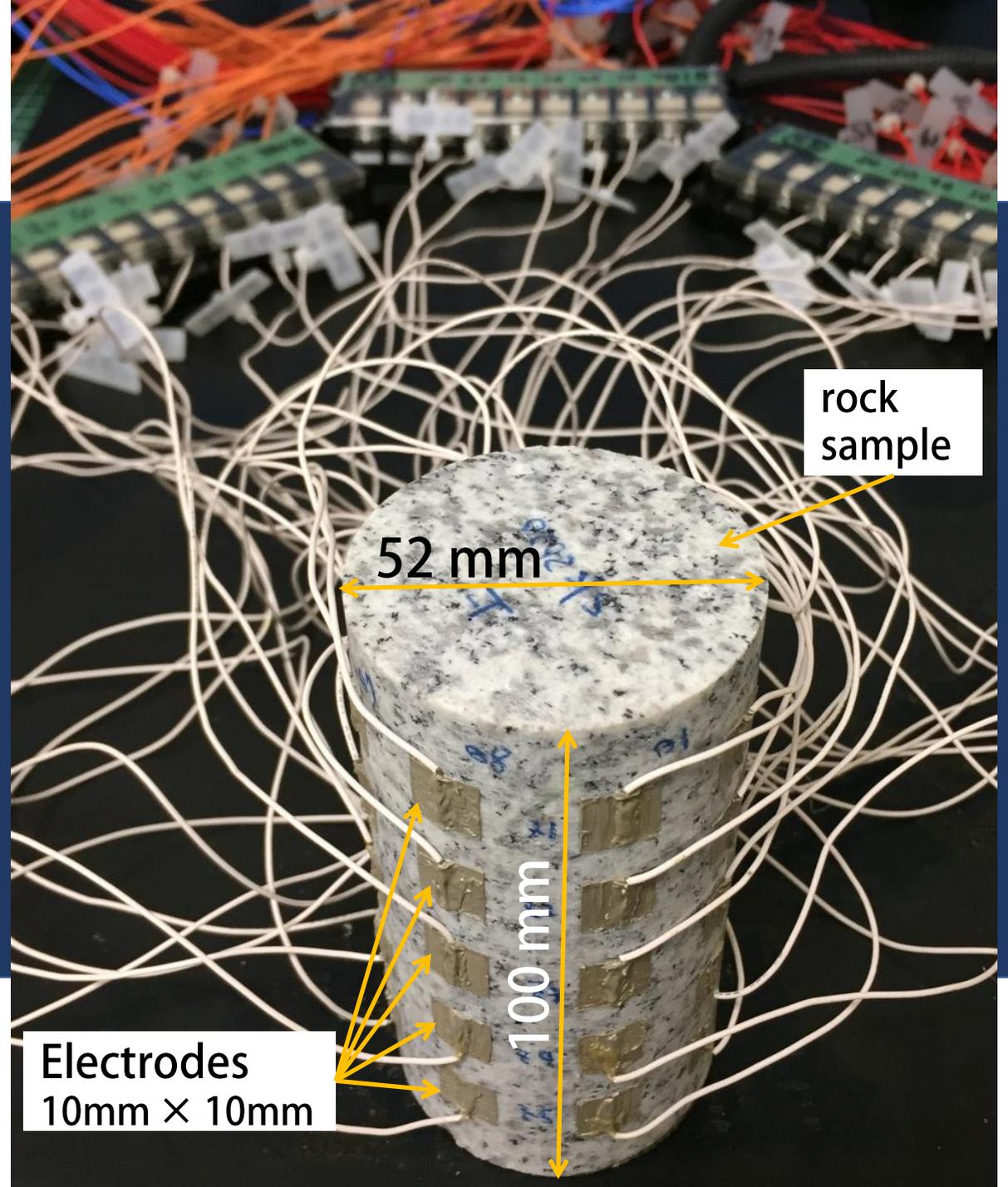


A procedure for
stable electrical measurements
on a rock sample
against high contact resistance
as a prerequisite for electrical
tomography

Takeshi Suzuki
Ryokei Yoshimura
Ken'ichi Yamazaki
Naoto Oshiman



以下の論文について紹介します

Suzuki et al. *Earth, Planets and Space* (2021) 73:123
<https://doi.org/10.1186/s40623-021-01446-9>

 Earth, Planets and Space

本発表では一部の図の表記は本発表用に分かりやすい形にします
背景についても、本発表用にいくつかの文献も追加して、内容を説明します

TECHNICAL REPORT

Open Access

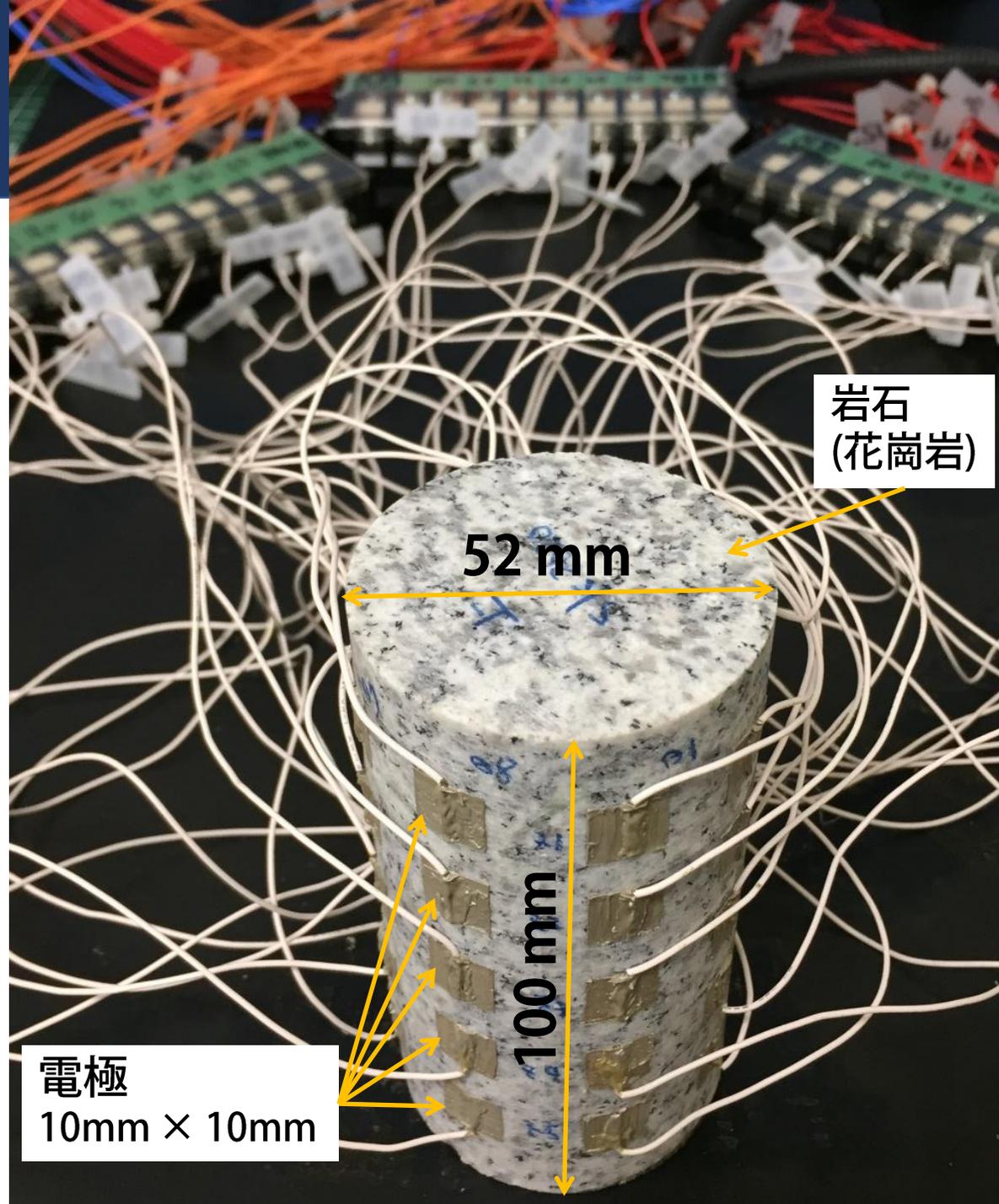
A procedure for stable electrical measurements on a rock sample against high contact resistance as a prerequisite for electrical tomography



Takeshi Suzuki^{1*} , Ryohei Yoshimura² , Ken'ichi Yamazaki³  and Naoto Oshiman²

概要

- ◆ 岩石の電気トモグラフィーにむけた多電極電気測定手法を構築
- ◆ 得られる比抵抗値の確からしさは高比抵抗・低比抵抗の導電性プラスチックに対する測定で確認
- ◆ 測定で得られる電位分布の確からしさは40個の電極からなるアレイ測定で確認



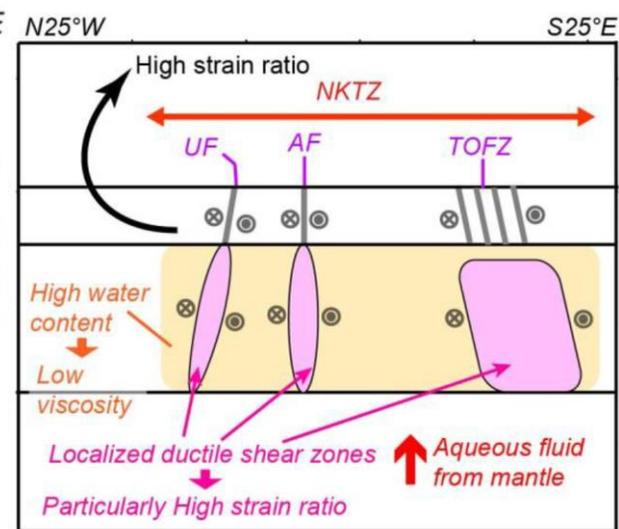
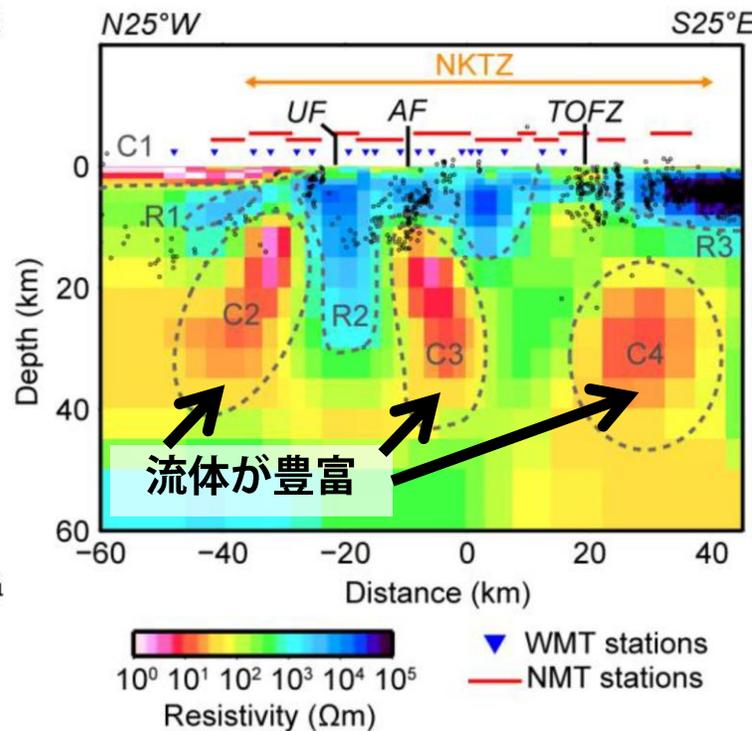
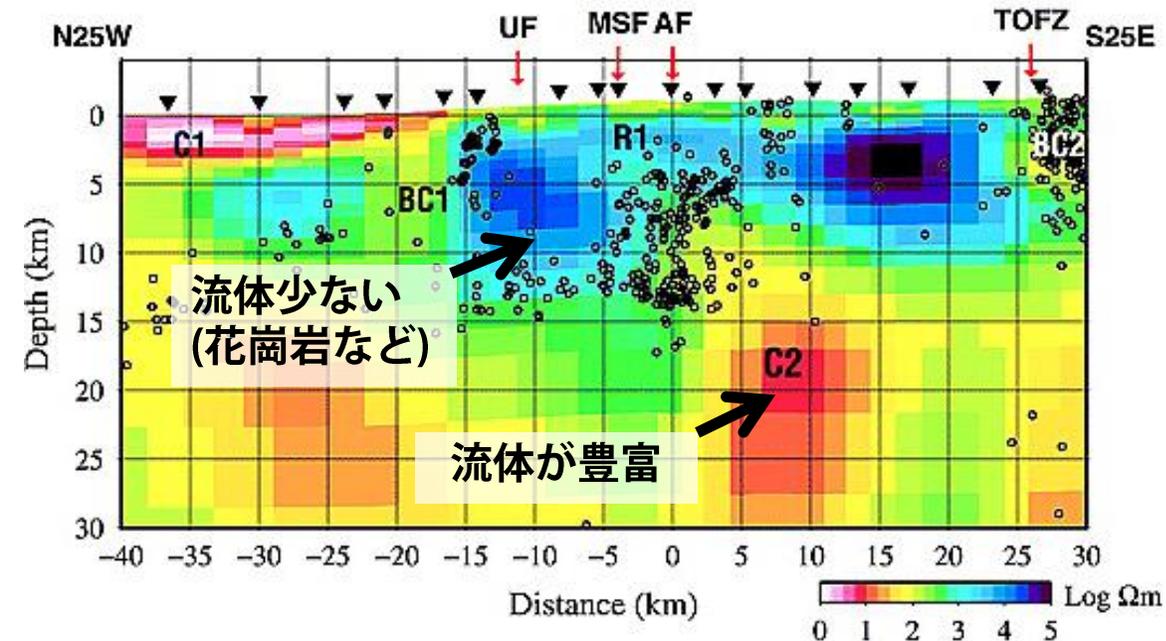
Introduction

地下比抵抗構造探査と岩石の比抵抗測定

地震発生域：跡津川断層

Yoshimura et al. (2009)
に加筆

Usui et al. (2021)に加筆

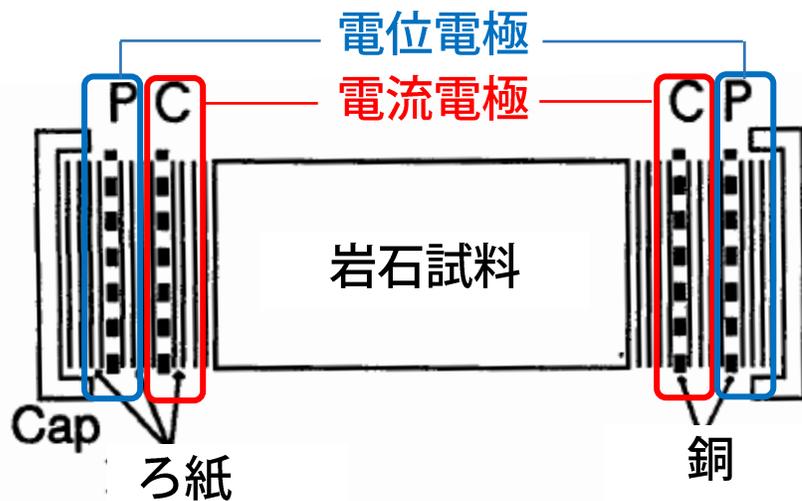


推定された比抵抗構造を解釈…
最も基礎的な情報：岩石の比抵抗

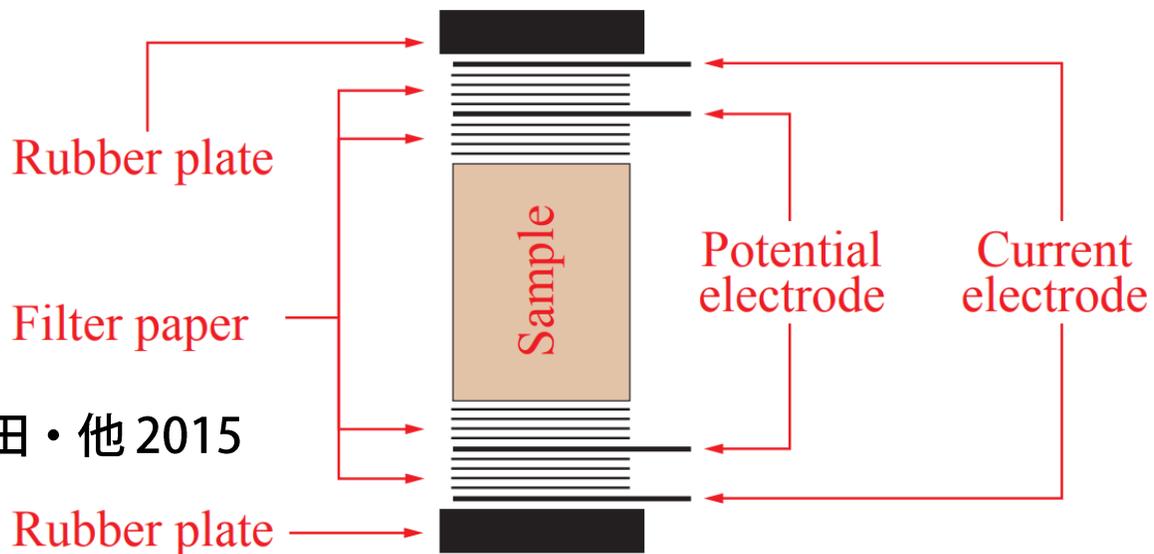
広く行われているバルク比抵抗測定

バルク比抵抗

試料全体の平均的比抵抗



千葉・熊田(1994)に加筆



畠田・他 2015

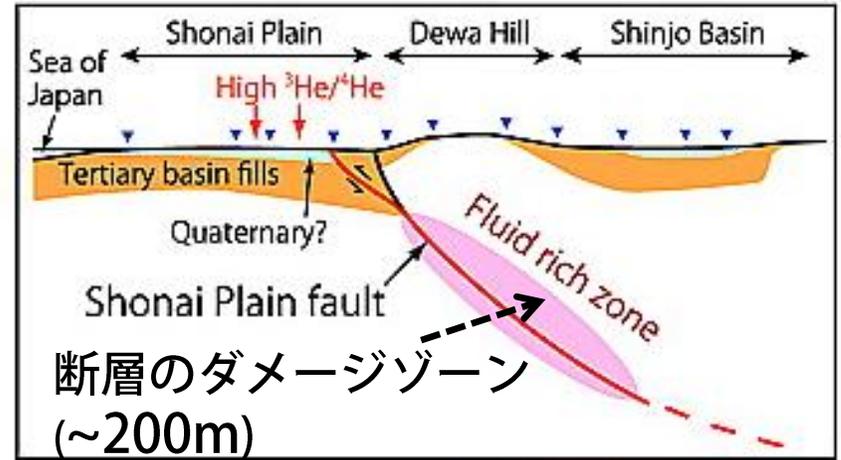
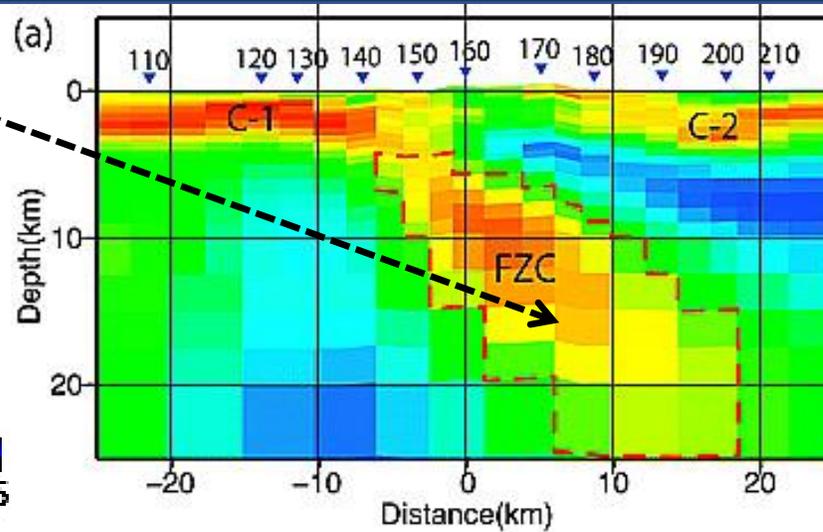


比抵抗 $\rho = \frac{RA}{l}$ 断面面積
長さ

岩石試料の内部構造を調べる意義

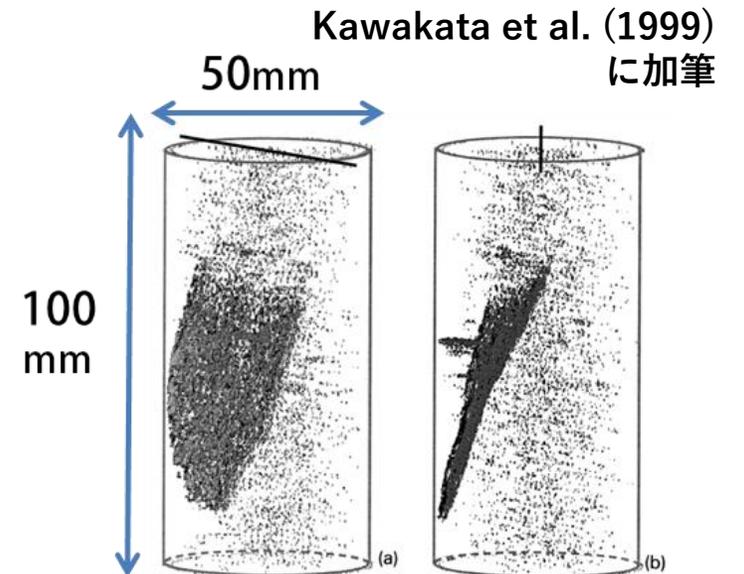
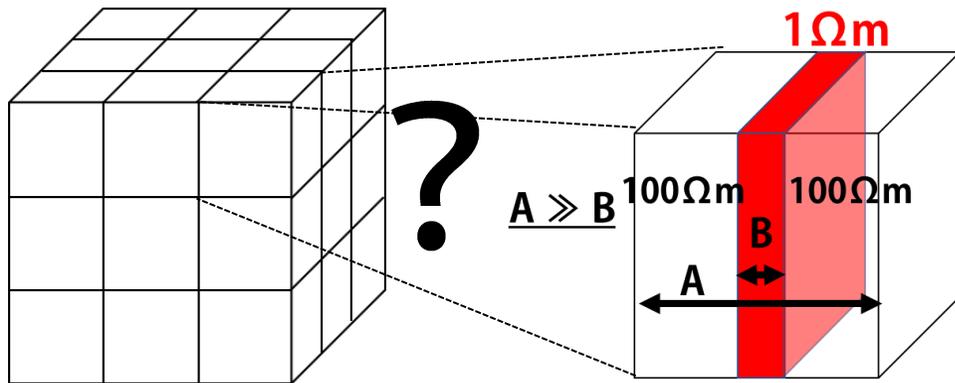
kmスケールの解像度

Ichihara et al. (2011)
(山形県
省内断層周辺域)



(Mitchell and Faulkner, 2009)

1Ωm? 10Ωm? 小さなスケールを
100ΩM? 複合的に反映?



従来測定限界 克服すべき課題

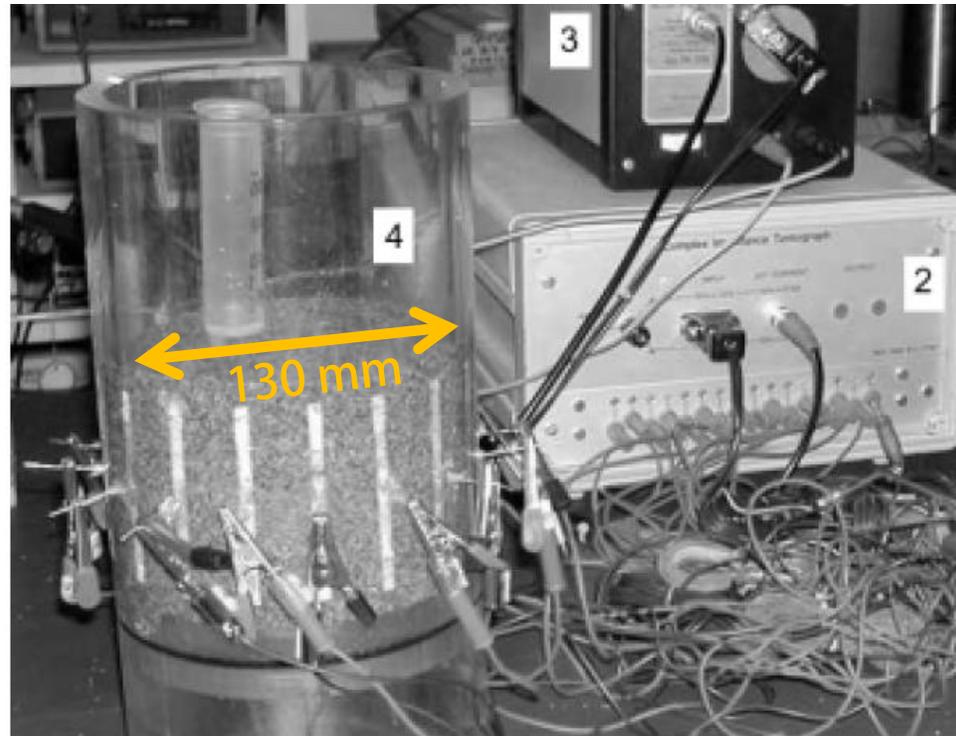
現状、水で満たされていないなら
小さい試料しか測れない

大きい試料は
試料抵抗を大きくする

多点計測での小さな電極は
接触抵抗を大きくする

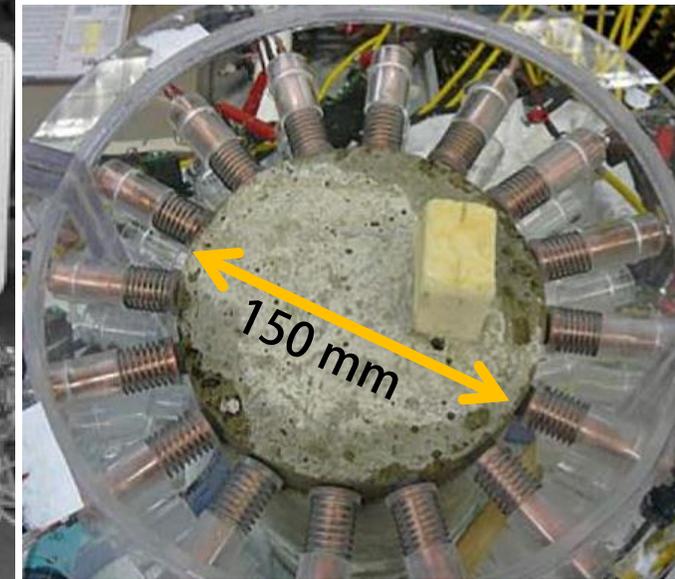


克服しないと
比抵抗構造推定できない



[地球物理] 砂と泥 空隙率40%
水分飽和 Borsic et al. (2005)に加筆

[先行研究]



[土木工学] コンクリート
Karhunen et al. (2010)に加筆

高接触抵抗・高試料抵抗の岩石試料へ適用可能な多点電気測定手法を開発
顕著な乾燥岩石でテスト

Requirements and Proposed measurement procedure

電流印加・電圧測定 2端子法と4端子法

$$V = I R$$

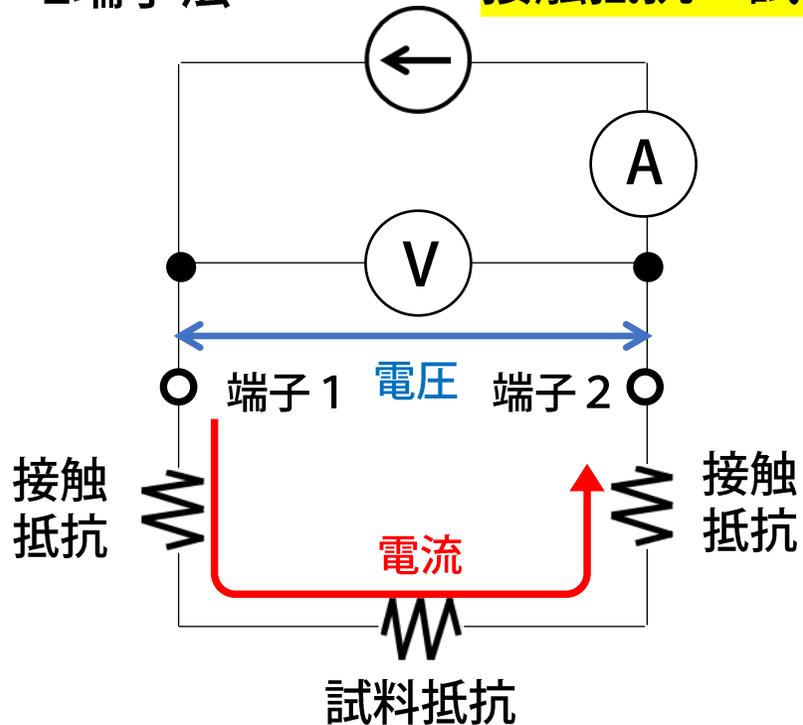
電圧 電流 抵抗

比抵抗 $\rho = \frac{RA}{l}$

断面面積
長さ

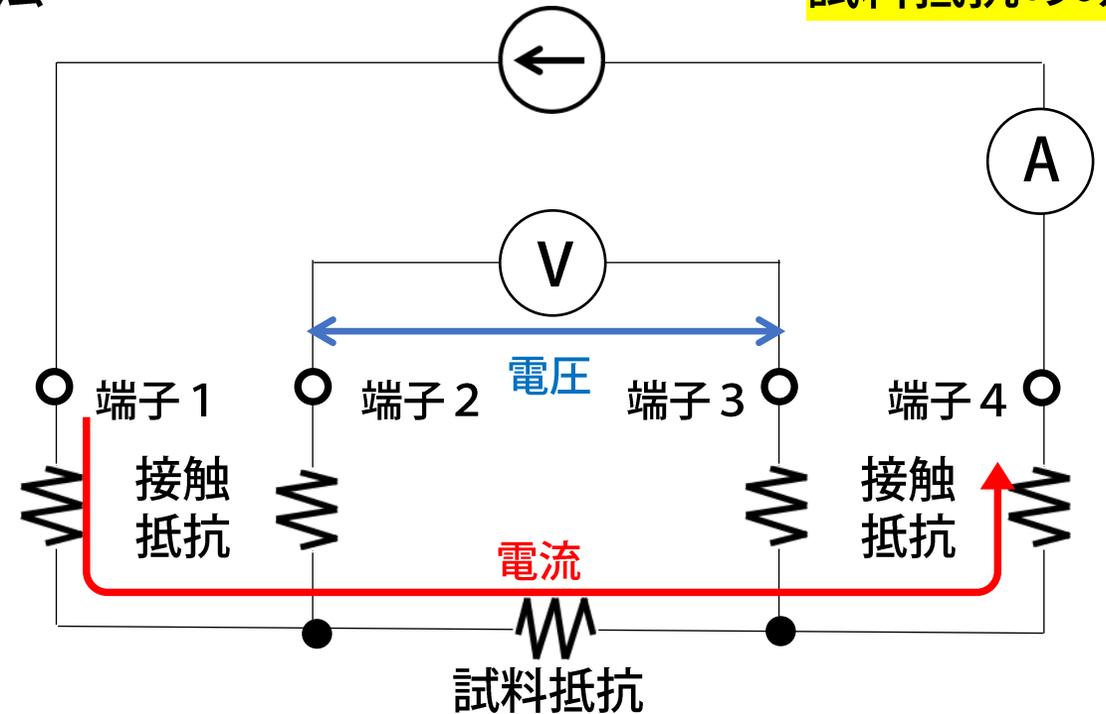
2端子法

接触抵抗 + 試料抵抗



4端子法

試料抵抗のみ



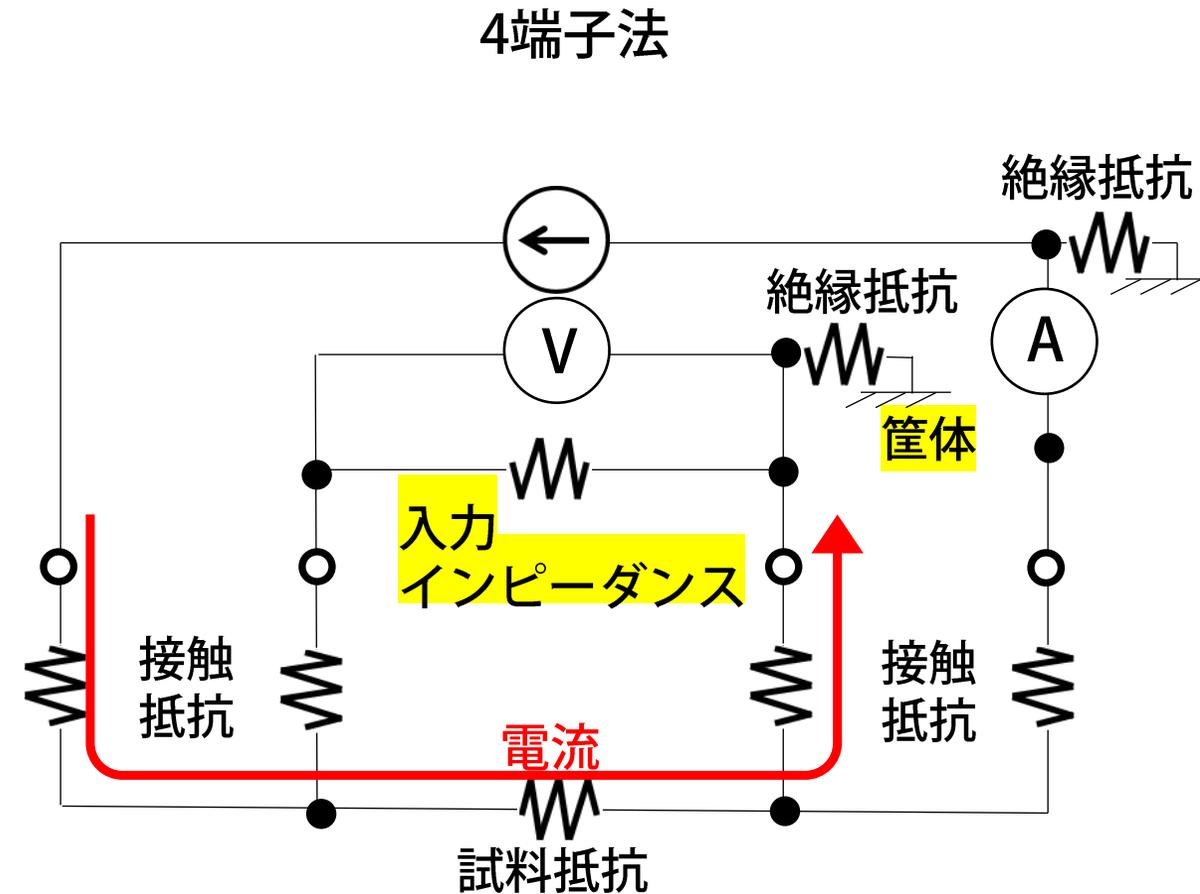
※電圧計は内部抵抗が大きくて電流が流れないことが前提

負端子からの電流流入

- ◆ 先行研究 (例えば、Fuji-ta et al., 2004)
マルチメータ：入力インピーダンスは10GΩ程度
入力インピーダンスが大きくなると
電圧計に電流流れる
- ◆ 本研究
入力インピーダンス200 TΩ以上のエレクトロメータ

それでも絶縁抵抗が接触抵抗より
小さいと筐体へ

追加で測定上の工夫がいる



手法：負端子からの漏洩電流の防止策・差動測定

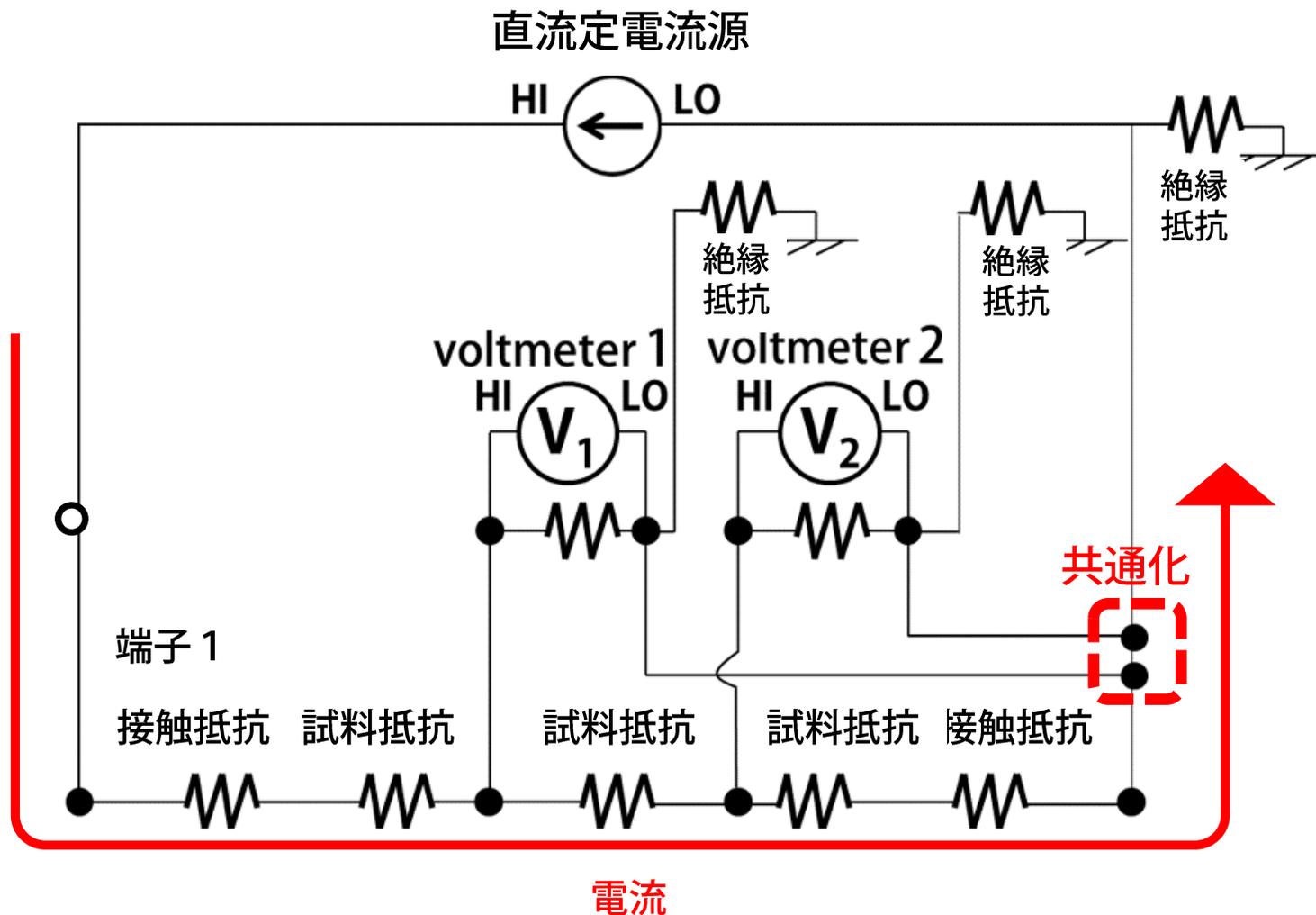
負極端子を共通化した
差動測定(2台の電圧計)

V_1 の計測電位 - V_2 の計測電位
= 試料抵抗間の電位差

加えてノイズ対策・漏洩電流対策

筐体・アースを分離

ガード測定、ゴムシート使用

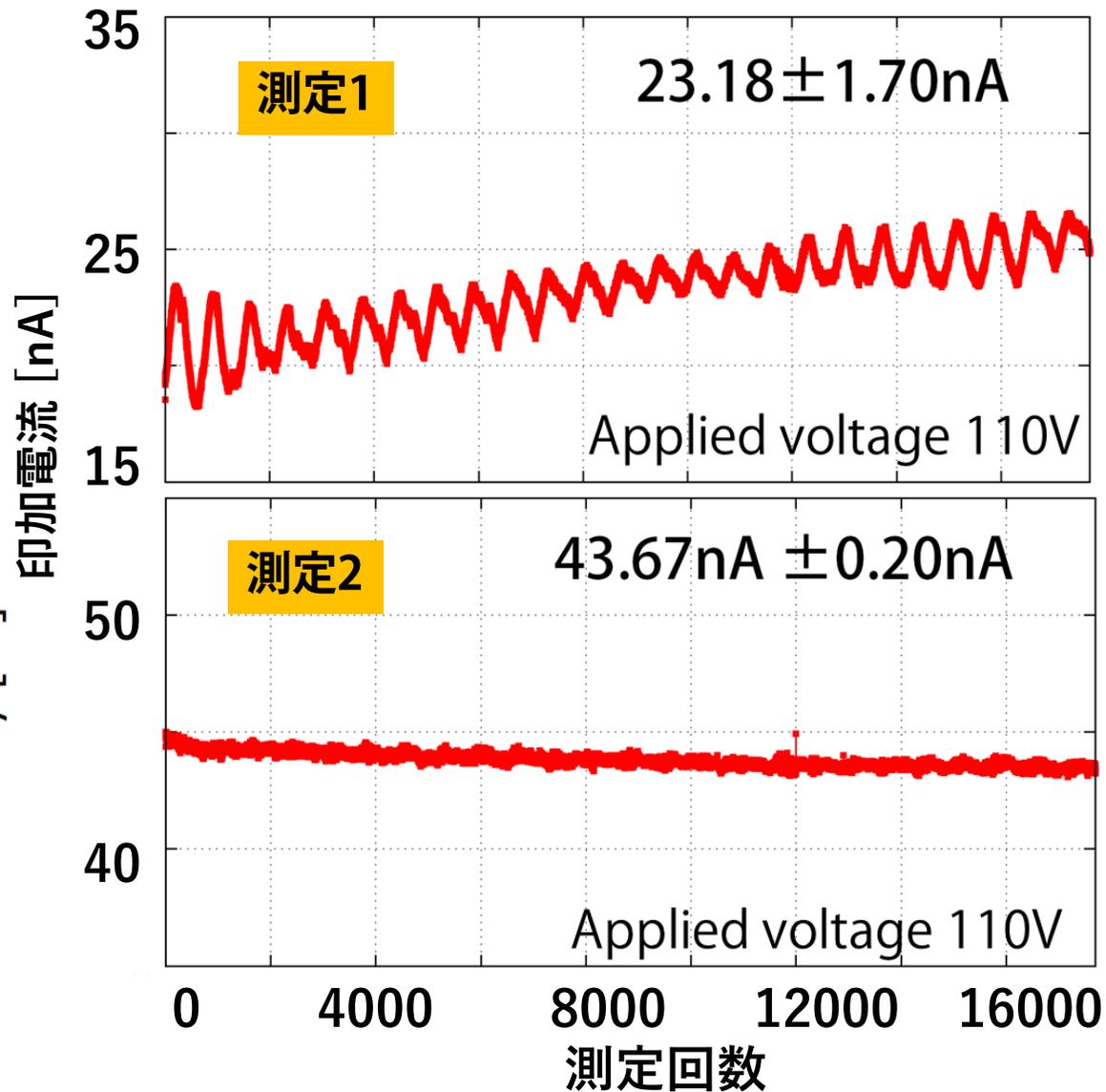
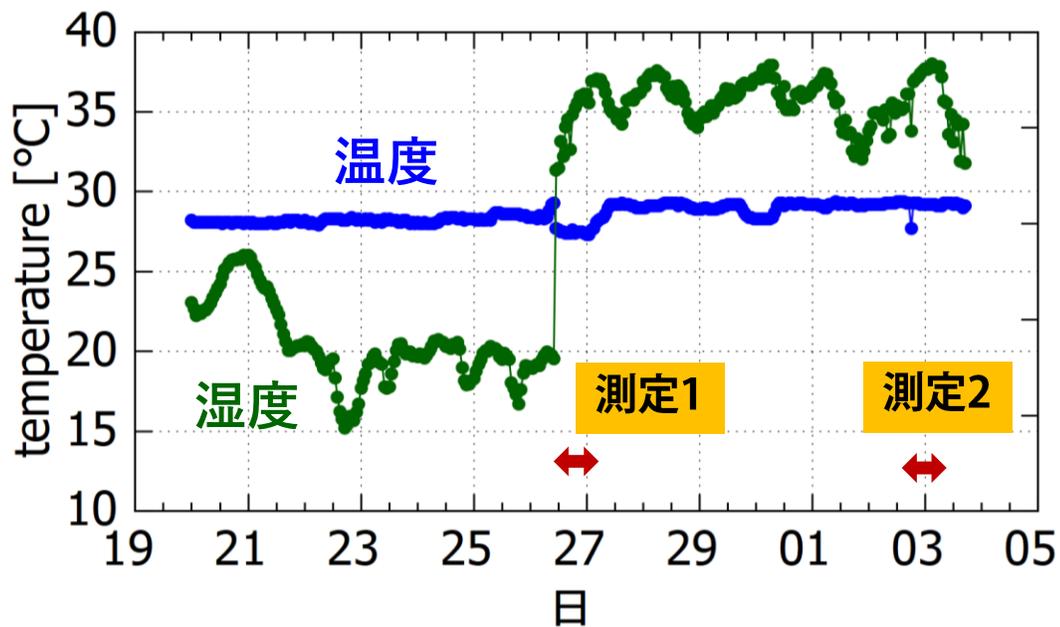


更なる問題点

冬になると夏より不安定 なぜ？

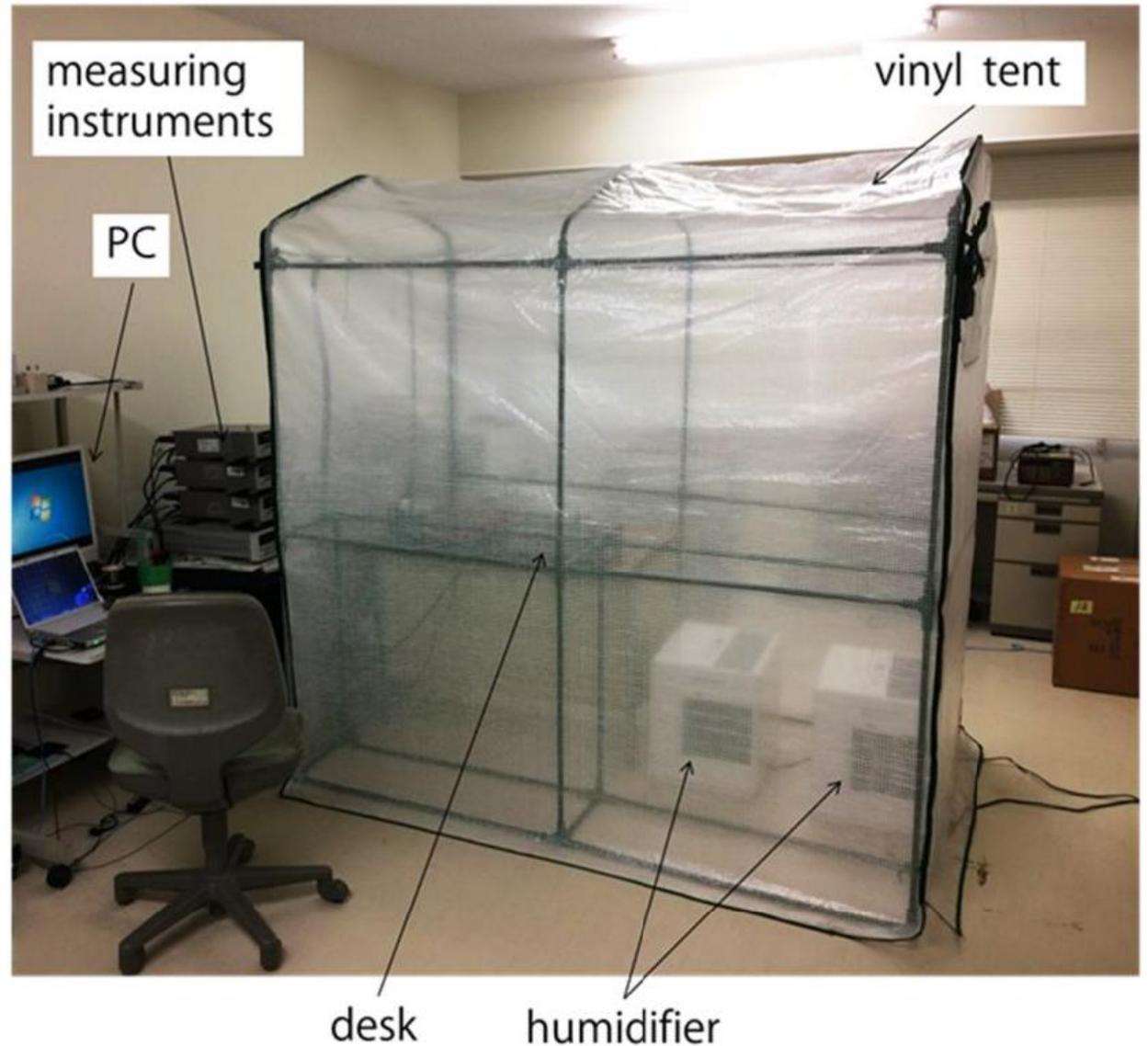
湿度と2極間抵抗の間に関係が！

試料抵抗と接触抵抗が湿度に対し変化していた！



方法の提案：温度・湿度環境の制御

- ◆ 加湿器・除湿器・エアコンで
温度・湿度管理
- ◆ 温湿度計による温度・湿度記録
- ◆ 実験室の環境擾乱低減
 - スイッチングユニットによる電極への配線自動切り替え
 - 測定器の遠隔制御プログラム

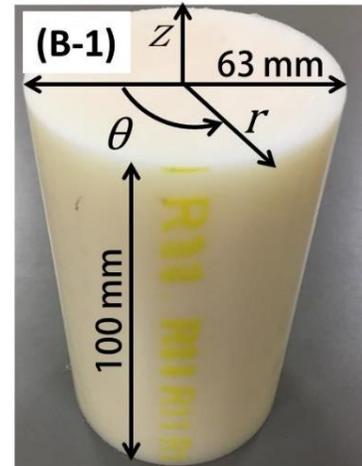
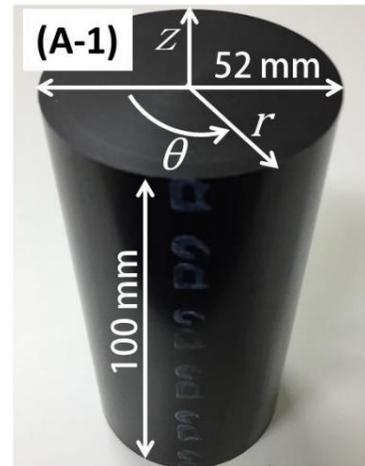
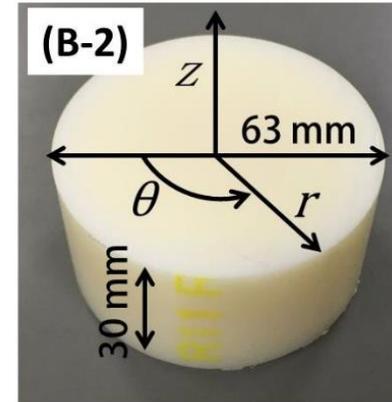
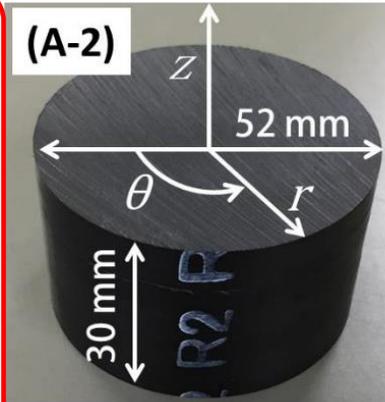
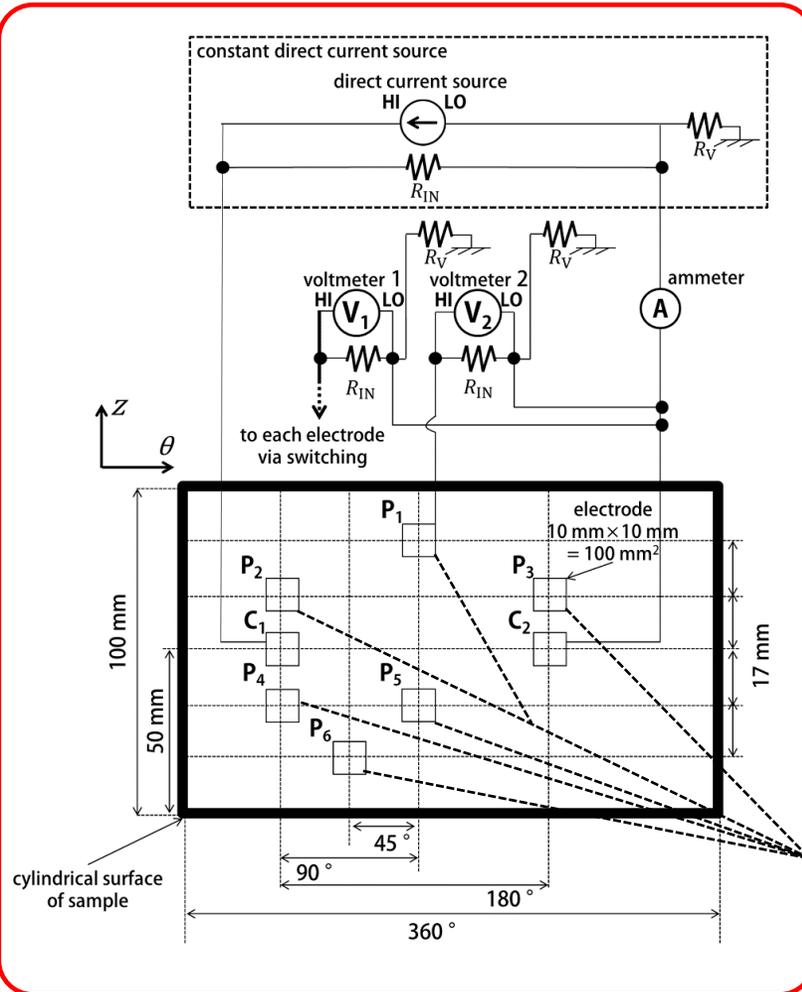


Stability and validity of measurements

確度の評価方法

同一ロットの円棒試料をカット…ディスクと円筒

低比抵抗 (黒) MC501CD R2 公称値: $10^0 \sim 10^2 \Omega\text{m}$
 高比抵抗 (白) MC500AS R11 公称値: $10^8 \sim 10^{10} \Omega\text{m}$

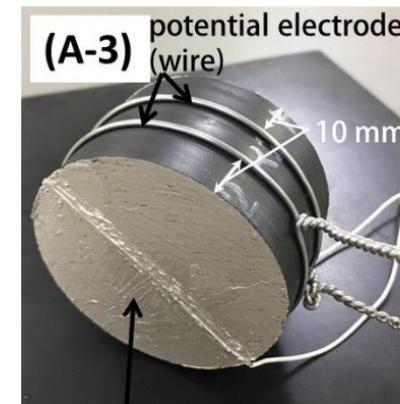


◆ バルク比抵抗測定

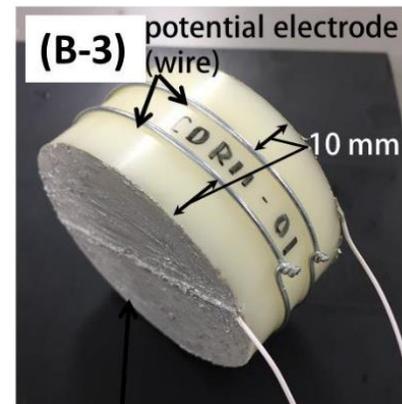
◆ 本手法

推定値
一致する?

電位電極配置に関係ない?



current electrode
(conductive epoxy adhesive)

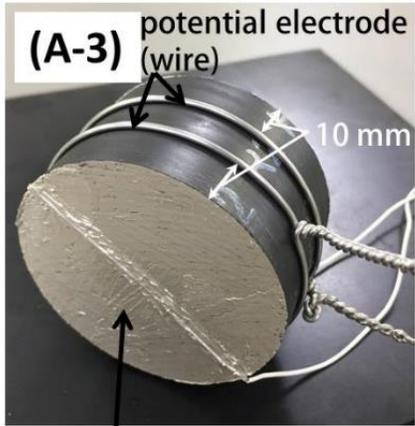


current electrode
(conductive epoxy adhesive)

比抵抗推定値の比較

低比抵抗

公称値： $10^0 \sim 10^2 \Omega\text{m}$



current electrode

バルク比抵抗測定
の推定値

2.48 Ωm

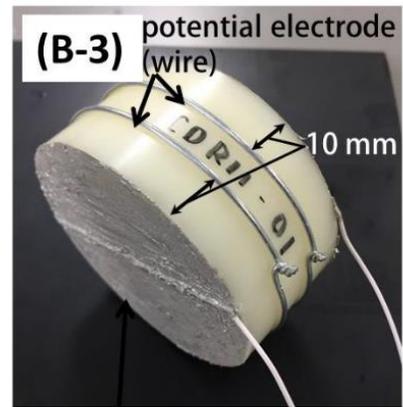
最大差30%

本手法の推定値

電極ペア	推定比抵抗 (Ωm)
P ₂ -P ₃ 電極ペアに非依存	3.56
P ₅ -P ₃ 電極ペアに非依存	3.38
P ₄ -P ₁ ←→	3.56
P ₄ -P ₆	3.54

高比抵抗

公称値： $10^8 \sim 10^{10} \Omega\text{m}$



current electrode

バルク比抵抗測定
の推定値

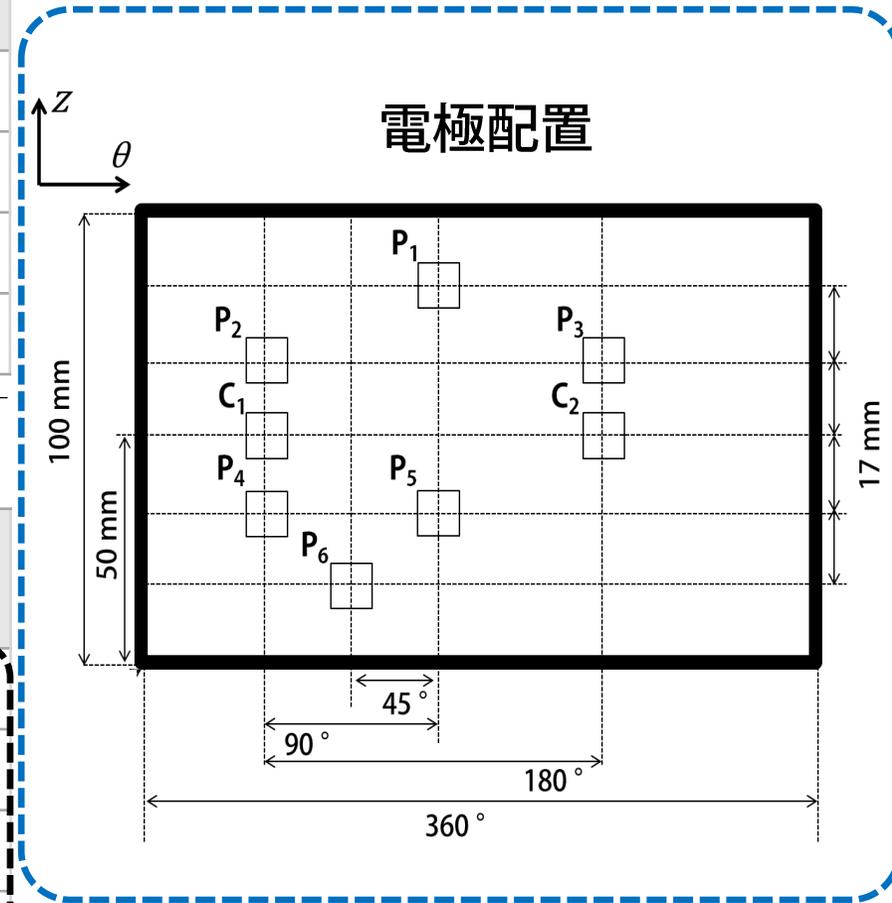
$1.50 \times 10^7 \Omega\text{m}$

最大差16%

本手法の推定値

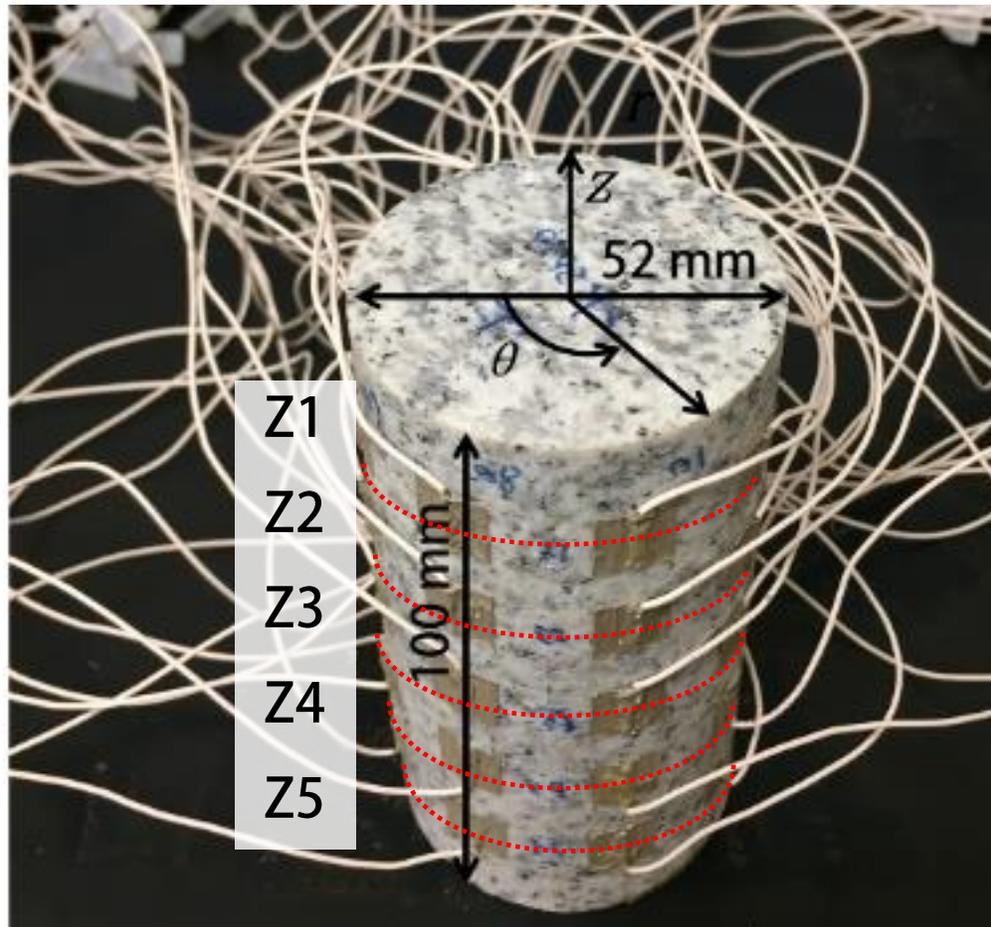
電極ペア	推定比抵抗 (Ωm)
P ₂ -P ₃ 電極ペアに非依存	1.35×10^7
P ₅ -P ₃ 電極ペアに非依存	1.28×10^7
P ₄ -P ₁ ←→	1.33×10^7
P ₄ -P ₆	1.26×10^7

岩石比抵抗値の確度

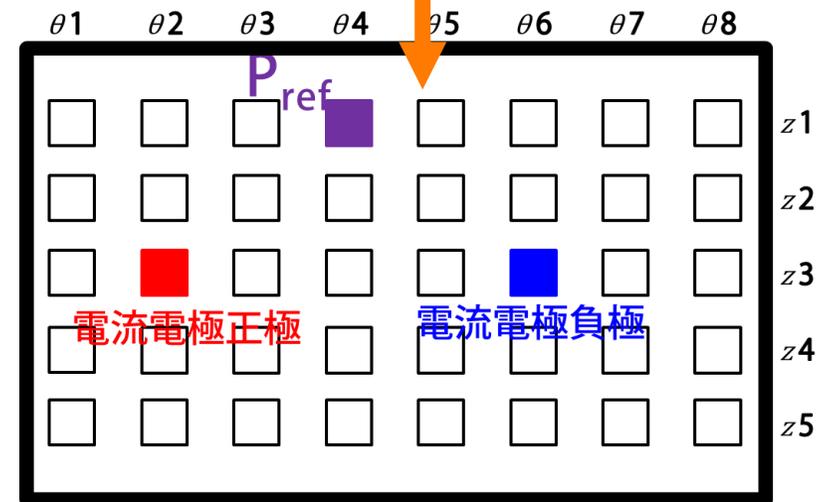
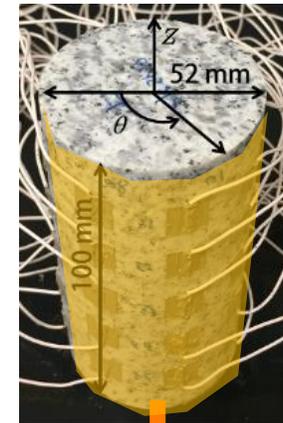


Electrical measurements using an electrode array

測定手順とレイアウト(側面)



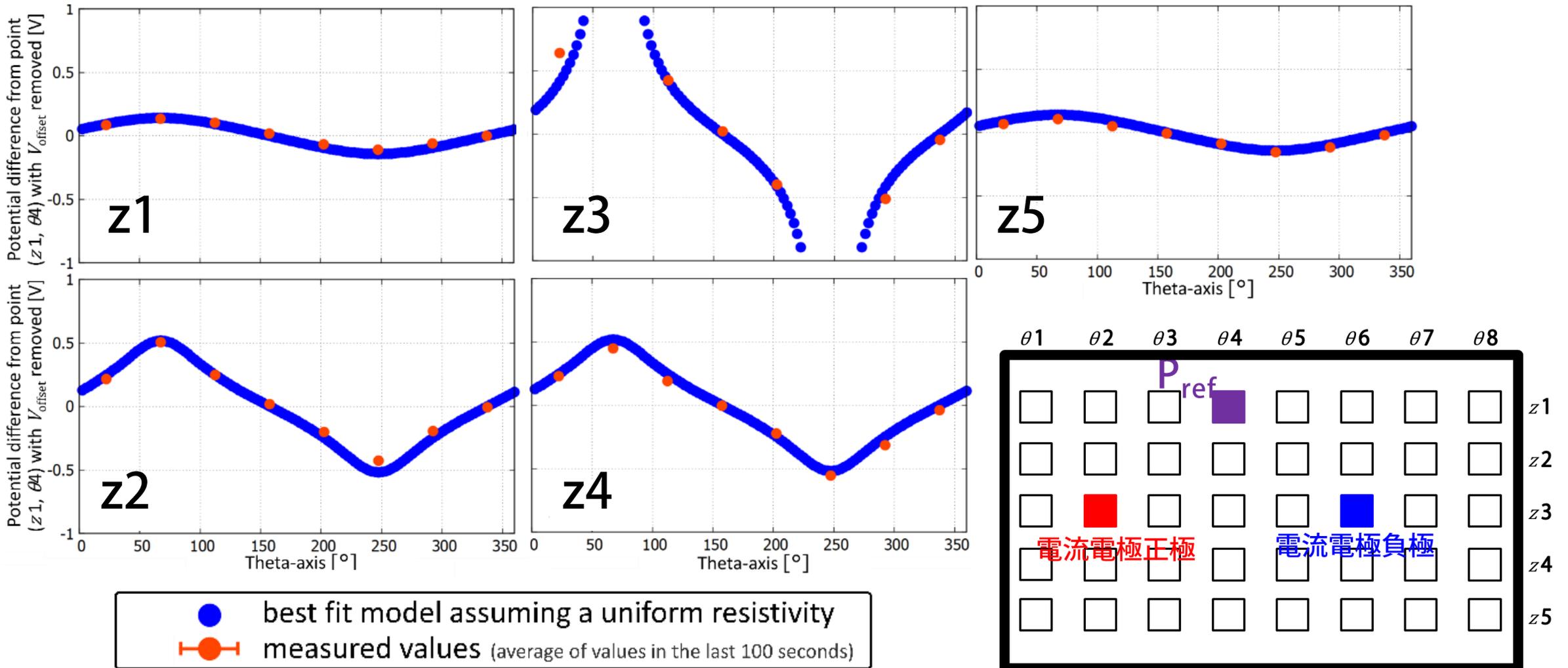
無垢な花崗岩 (電極40個)



- ◆ 電流は長期間(30000秒)印加
- ◆ 基準点(P_{ref})からの電位差を測定(各600秒)

計測値とモデル計算値の比較

(無垢な岩石：100 nA 21.7 g/m³)

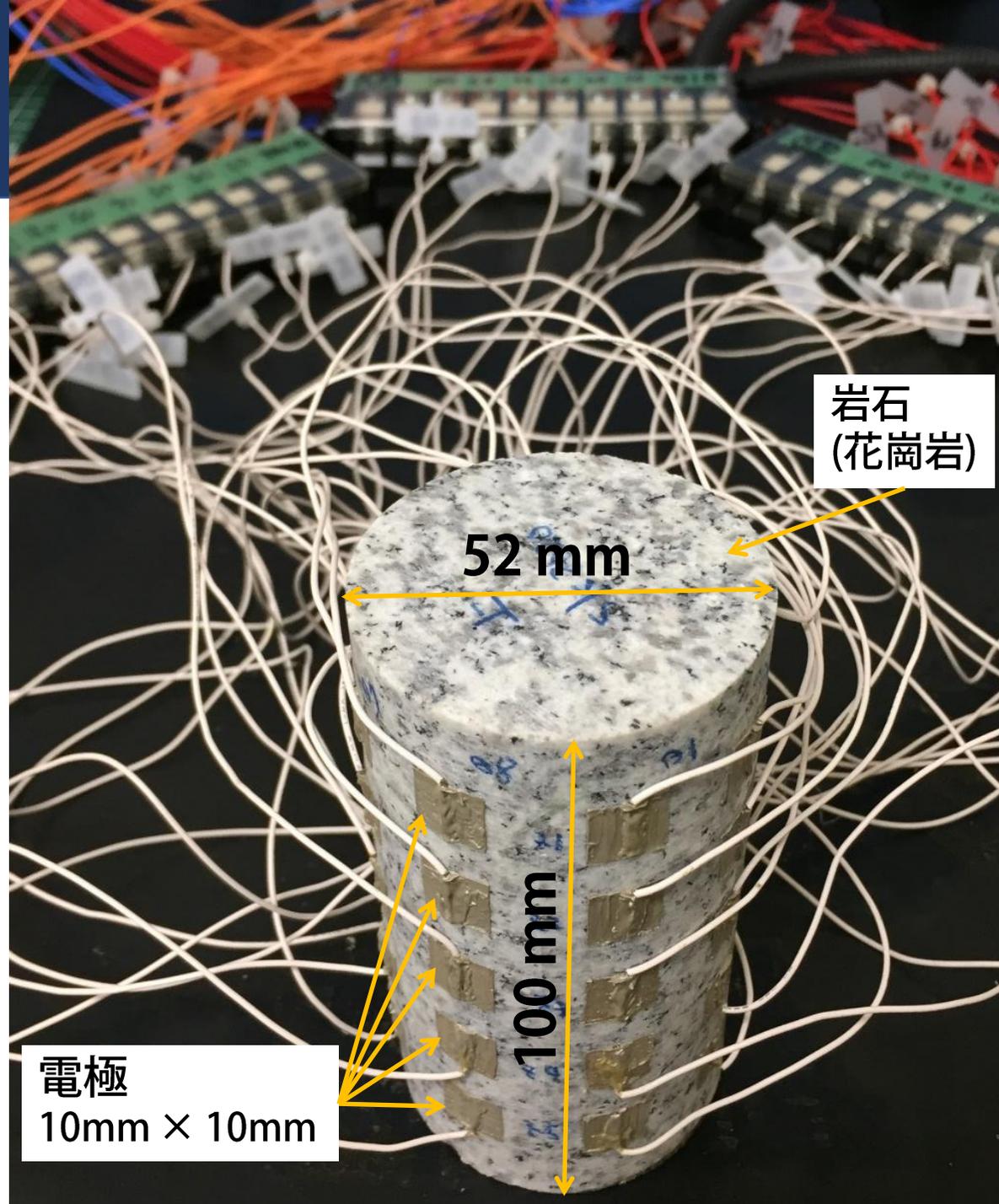


モデル計算値は計測値をよく再現 RMS 52mV

まとめ

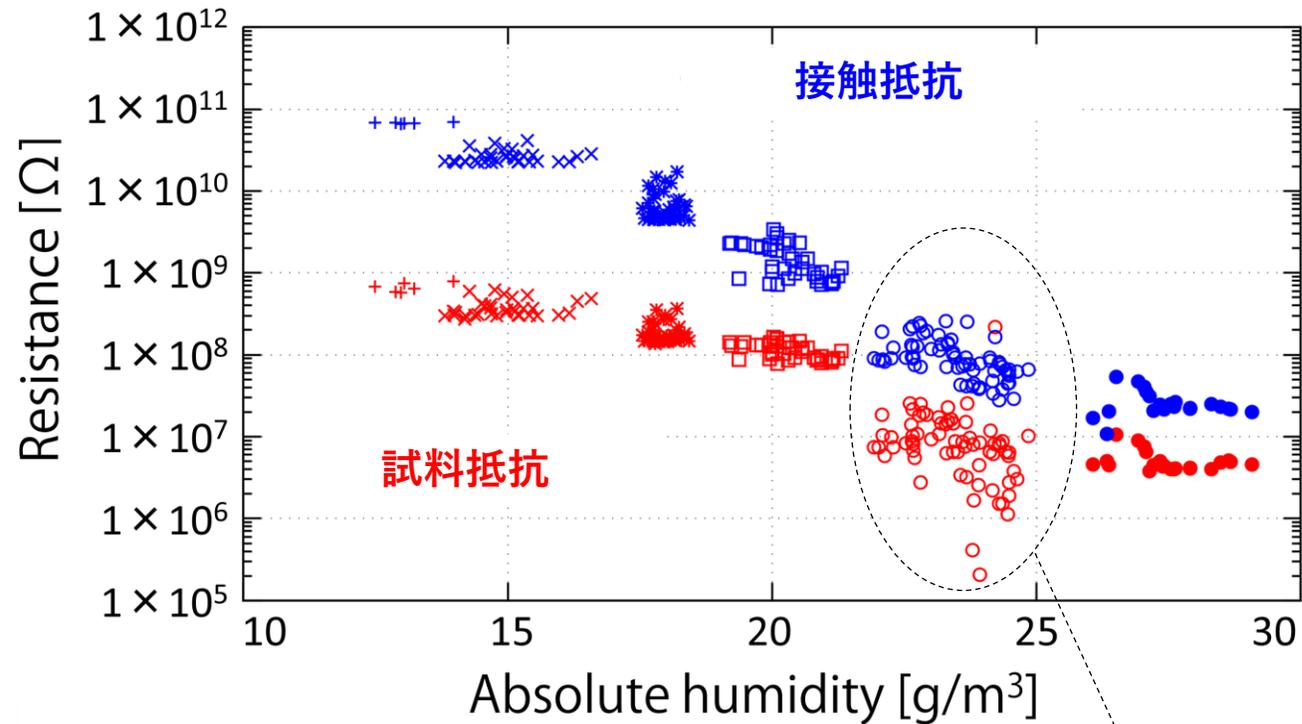
概要

- ◆ 岩石の電気トモグラフィーにむけた多電極電気測定手法を構築
- ◆ 得られる比抵抗値の妥当性は高比抵抗・低比抵抗の導電性プラスチックへのバルク比抵抗値と比較して確認
- ◆ 40個の電極アレイによる測定に適用し、測定値と数値計算値との一致を確認



補助

試料抵抗と接触抵抗の分離結果と推定された比抵抗



Humidity setting

40%	+
50%	×
60%	*
70%	□
80%	○
90%	●

40-80% : 1 nA (G Ω への規定電流)
 90% : 1 μ A (M Ω への規定電流)

S/N比が悪い

湿度	平均値と標準偏差	
	絶対湿度 (g/m^3)	比抵抗 (Ωm)
40	11.9 \pm 0.6	(1.0 \pm 0.1) \times 10 ⁷
50	15.0 \pm 0.6	(5.7 \pm 1.4) \times 10 ⁶
60	17.9 \pm 0.3	(2.7 \pm 0.6) \times 10 ⁶
70	20.3 \pm 0.5	(1.7 \pm 0.4) \times 10 ⁶
80	23.6 \pm 0.7	(1.4 \pm 1.0) \times 10 ⁵
90	27.5 \pm 0.8	(7.6 \pm 2.0) \times 10 ⁴

比抵抗の推定手順

i: 電極のナンバー

モデル計算値と
計測値の
オフセット

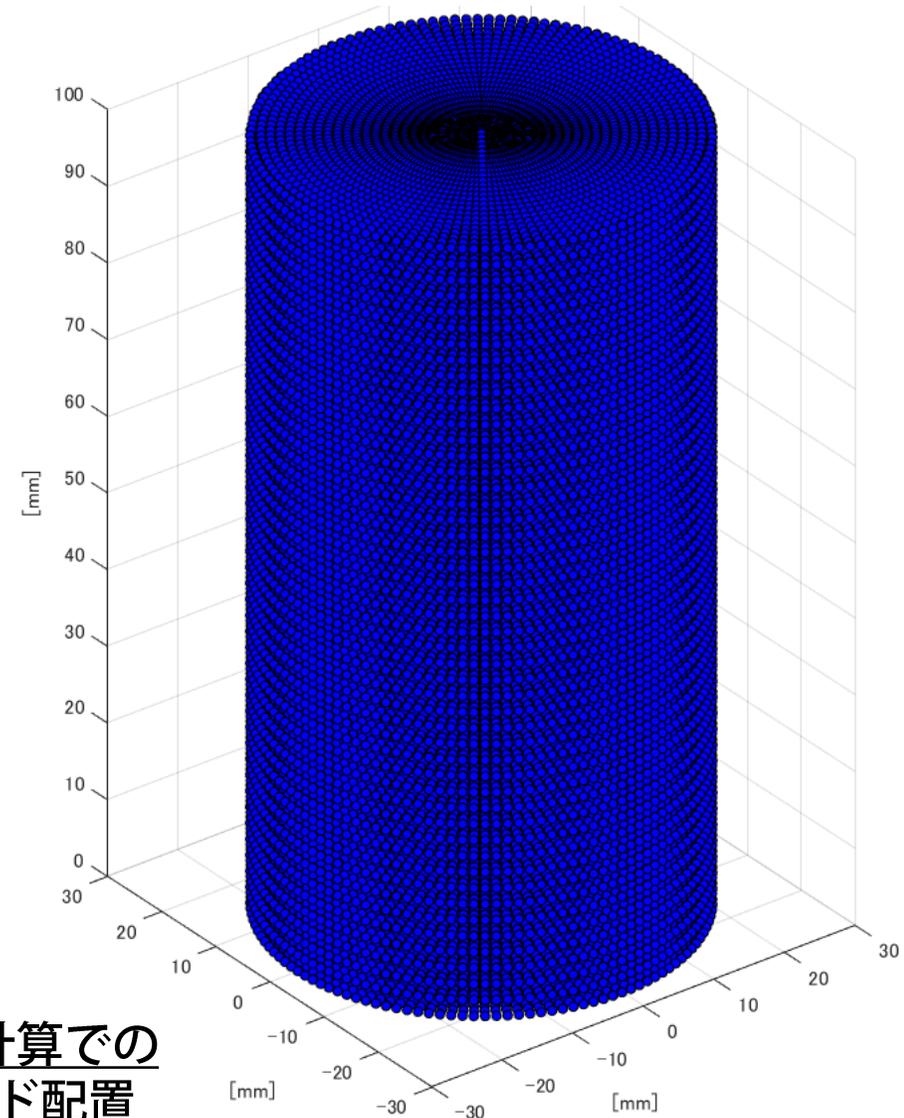
$$V_{Pi} - V_{Pref} = \underline{\rho_{\text{sample}}} K(P_i, P_{\text{ref}}) I + \underline{V_{\text{offset}}}$$

※($K(P_i, P_{\text{ref}})$ はモデル計算で決定)

最小二乗法で ρ_{sample} V_{offset} を決定

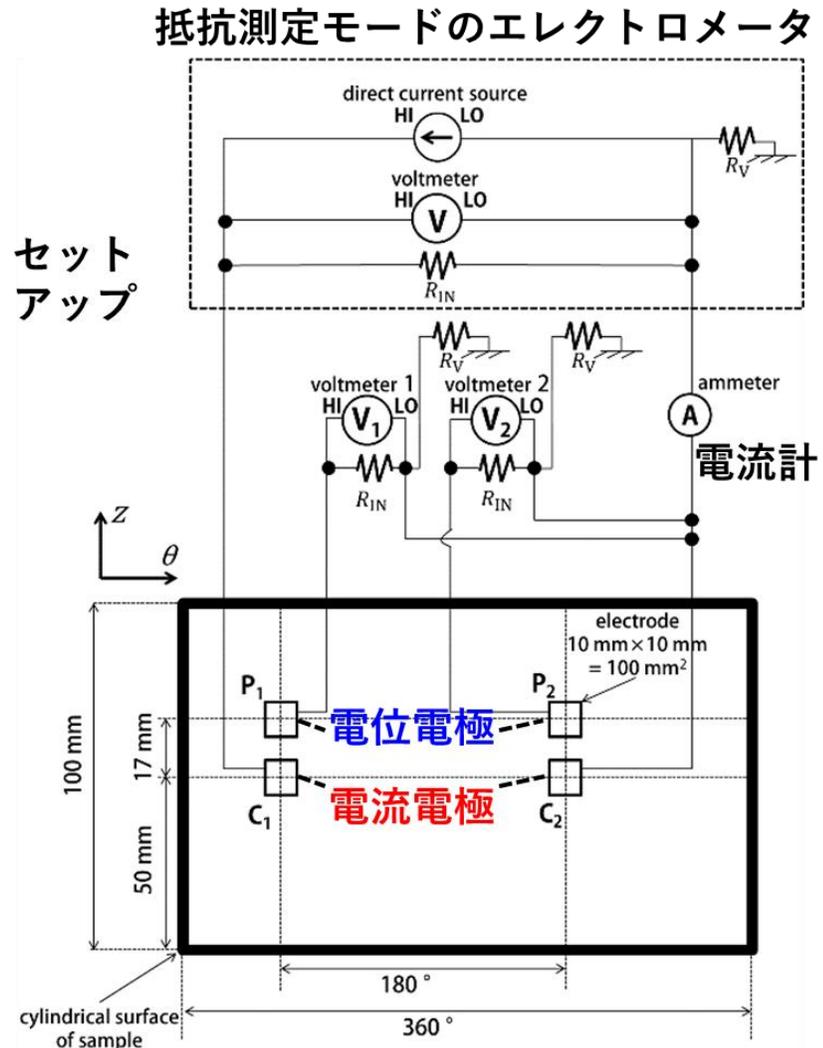
$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\underbrace{(V_i - V_{\text{Pref}})}_{\text{測定値}} - \underbrace{V_{\text{offset}}}_{\text{測定値}}}{\underbrace{\rho_{\text{sample}} K(P_i, P_{\text{ref}})}_{\text{測定値}}} I \right]^2}$$

最適モデル計算値と測定値を比較



モデル計算での
グリッド配置

比抵抗の推定手順



i : 電極のナンバー

モデル計算値と
計測値の
オフセット

$$V_{Pi} - V_{Pref} = \underline{\rho_{sample}} K(P_i, P_{ref}) I + \underline{V_{offset}}$$

※($K(P_i, P_{ref})$ はモデル計算で決定)

最小二乗法で ρ_{sample} V_{offset} を決定

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\{(V_i - V_{Pref}) - V_{offset}\}}{\text{測定値}} - \frac{\rho_{sample} K(P_i, P_{ref}) I}{\text{測定値}} \right]^2}$$

最適モデル計算値と測定値を比較