

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月20日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360377

研究課題名（和文） 傾斜計を用いた二酸化炭素地下貯留の高精度モニタリング法

研究課題名（英文） High-precision method for monitoring underground storage of carbon dioxide with tiltmeter

研究代表者

松木 浩二（MATSUKI KOJI）

東北大学・大学院環境科学研究科・名誉教授

研究者番号：10108475

研究成果の概要（和文）：本研究では、地下深部に貯留された二酸化炭素の流動を地表傾斜計により高精度でモニタリングする方法を開発するため、まず、深度が2,000mまでに相当する封圧と間隙水圧を再現できる三軸圧縮試験装置を設計・製作して岩石の多孔質弾性定数の有効応力依存性を明らかにし、次に、深度2,000mまでの楕円体状流体流動の逆解析に関する理論的研究を行い、傾斜量に含まれるノイズが大きい場合でも地下の流体流動を精度よく評価できる方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：In this study, to develop a high-precision method for monitoring underground flow of carbon dioxide stored at great depth with tiltmeter, firstly we clarified the dependence of the poroelastic constants on the effective confining pressure by using a triaxial testing system that was designed and constructed to reproduce the conditions up to a depth of 2,000 m. Next, performing a theoretical study on the inverse analysis of underground fluid flow in an ellipsoidal region, we proposed an inverse method for accurately determining the region of fluid flow from data containing large noises.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2011年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：環境科学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：二酸化炭素地下貯留、流体流動、地表傾斜量、高精度モニタリング、逆解析、多孔質弾性体、弾性定数、圧力容器

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素(CO₂)などの温室効果ガスの大気への排出抑制は将来の地球環境を保全し人類の持続可能な発展を支えるために不可欠である。近年、このための技術としてCO₂等を地下深部に貯留する方法が注目されている。この方法は化石燃料に依存しないエネ

ルギーが開発されるまでの過渡的方法と位置付けられ、かつ石油・天然ガスの既存技術で実施可能とされている。しかし、CO₂等の地下貯留では、単に生産すればよい石油・天然ガスの開発と異なり、地下のCO₂等が長年に渡って安定に貯留されていることを保証する必要がある。例えば、キャップロック中

の断層活動に伴って CO₂ 等が断層を通じて漏れいし始めた場合、それを検知してできるだけ早く対策をとる必要がある。しかし、一般に、現象が地下深部で生ずるほどそれを検知することが困難になり、研究開始当初ではこのための有力な方法が見当たらなかった。このことから、信頼性の高い高精度な流体流動検知法の開発が重要になってきている。

2. 研究の目的

本研究では、地下深部に貯留された CO₂ の流動を地表傾斜計により高精度でモニタリングする方法の開発を行う。すなわち、まず、実験装置を設計・製作して多孔質弾性理論における岩石の弾性定数を実験的に明らかにしたうえで、これまでの方法について CO₂ 流動を検知できる限界深度等を明らかにした後、ノイズの影響を小さくできる高精度な地下深部流体流動評価法を開発して提案する。

3. 研究の方法

本研究は二つの方法からなる。一つは実験的研究であり、地下深部 2,000m までの封圧と間隙水圧を模擬できる実験装置を作製して実際に岩石の多孔質弾性定数を測定し、これらの多孔質弾性定数の封圧や間隙水圧依存性を明らかにする。他の一つは、理論的研究であり、まず地下における流体流動と地表傾斜量の理論的關係からそもそも地表傾斜量から地下の流体流動を検知できるかどうかを明らかにした後、ノイズが混入した地表傾斜量の計算値を用いて精度よく地下の流体流動場を逆解析する方法を開発するとともにこれまでに報告者らが開発してきた従来法との比較を行う。

4. 研究成果

(1) 岩石の多孔質弾性定数に関する実験的研究

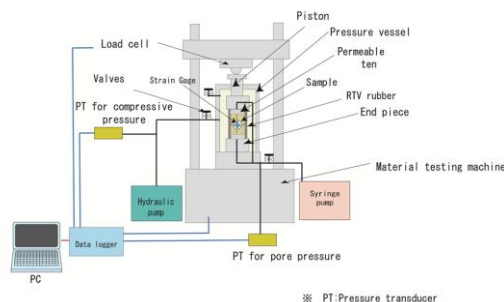
① 実験装置および供試体

本研究で開発した実験装置は、地下 2,000m までの封圧と間隙水圧を模擬できる装置であり、概要を 1-1 図に示す。本実験システムは主に、供試体に軸荷重を加えるための材料試験機（インストロン 8562、100kN）、供試体に封圧を加えるための三軸圧力容器（耐圧 50MPa、SUS F304 製、本研究で設計・製作）、封圧を制御する油圧ポンプ（理研精機、GMP-07-300）と手動油圧ポンプ（理研精機、P4）、供試体内の間隙圧を制御するシリンジポンプ（TELEDYNE、シリンジポンプ 500D 型）、シリンジポンプと圧力容器の間の流体の出入りを制御し排水・非排水状態を実現するバルブおよび軸圧、封圧等を記録するデータロガー（共和電業、UCAM-60B）で構成される。

供試体は来待砂岩を用いて作製した、長さ

62mm、直径 29mm の円柱供試体である。室温（20℃）、大気圧下および乾燥した本供試体の有効空隙率は約 20%、一軸圧縮試験より決定した Young 率および Poisson 比はそれぞれ約 11GPa および約 0.2 である。

供試体は、縦ひずみと横ひずみを測定するためのひずみゲージを貼りつけた後、熱収縮シリコンチューブで被覆し、圧力容器中央部に設置する。供試体の両端に設置されているエンドピースには、間隙水用の細孔が設けてあり、供試体との接触面に放射状および同心円状の浅溝が設けられている。間隙水はこのエンドピースを通じて、予め真空脱気した供試体に注入される。



1-1 図 実験装置

② 実験方法

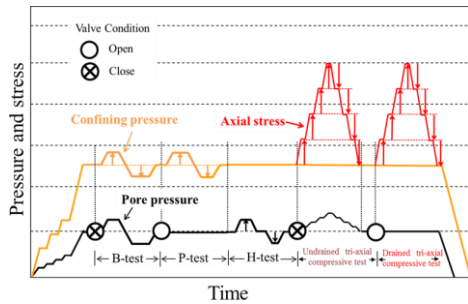
室温（20℃）において非排水・等方圧縮条件下における B-test、排水・等方圧縮条件下における P-test と H-test、非排水と排水条件下における三軸圧縮試験を行った（1-2 図）。

B-test では、ストップバルブを閉じた状態で封圧 p_c を変化させた場合の間隙圧 p_p および体積ひずみ ε_v の変化を測定し、Skempton の B 値と非排水体積弾性率 K_u を決定する。P-test では、ストップバルブを開けた状態で封圧を変化させた場合の体積ひずみの変化を測定し、排水体積弾性率 K を決定する。H-test では、ストップバルブを開けた状態で間隙圧を変化させた場合の体積ひずみの変化を測定し、パラメータ H （poroelastic expansion coefficient の逆数）を決定した後、パラメータ R （unconstrained specific storage の逆数）および Biot-Willis 係数 α を決定する。非排水および非排水三軸圧縮試験では、それぞれストップバルブを閉じた状態および開けた状態で軸応力を変化させた場合の縦ひずみおよび横ひずみの変化を測定し、排水および非排水 Young 率（ E および E_u ）と、排水および非排水 Poisson 比（ ν および ν_u ）を決定した後、排水および非排水せん断剛性率（ G および G_u ）を決定する。

各パラメータの定義式を以下にまとめる。

$$B = \frac{\Delta p_p}{\Delta p_c}, \quad K_u = \frac{\Delta p_c}{\Delta \varepsilon_v}, \quad K = \frac{\Delta p_c}{\Delta \varepsilon_v},$$

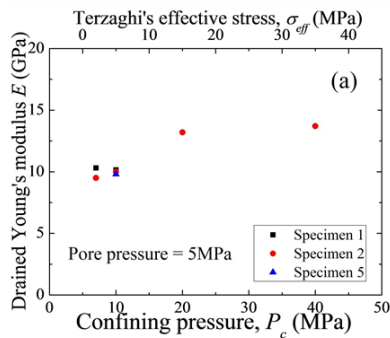
$$H = -\frac{\Delta p_p}{\Delta \varepsilon_v}, \quad B = \frac{R}{H}, \quad \alpha = \frac{K}{H}$$



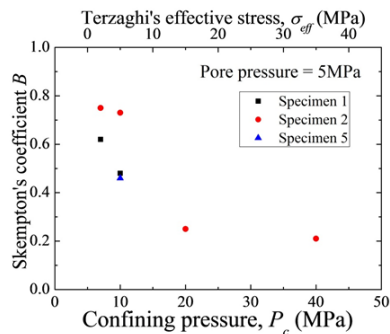
1-2 図 実験手順の概要

③実験結果と考察

封圧依存性を評価するため、間隙圧を 5MPa に固定し、封圧（有効応力）を 7MPa から 40MPa（2MPa から 35MPa）まで増加させたところ、 E 、 E_u 、 ν 、 ν_u 、 K 、 K_u および H は、封圧の増加に対して非線形的に増加し（例えば 1-3 図）、 B は封圧（有効応力）の増加に対して非線形的に減少した（1-4 図）。



1-3 図 排水 Young 率と封圧の関係



1-4 図 Skempton の B 値と封圧の関係

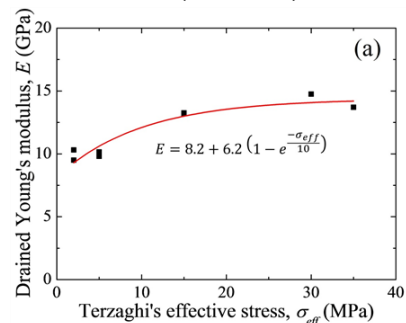
すなわち、封圧（有効封圧）が約 15MPa（10MPa）までは封圧（有効応力）依存性が大きく、それ以上では封圧（有効応力）依存性が小さかった。これは、封圧（有効応力）が増加すると、砂岩を構成する鉱物粒子間の空隙の減少、鉱物粒子同士の接触面積の増加が生じ、空隙率の小さな花崗岩のような力学的特性に近づいていくが、一方で、鉱物粒子同士の接触面積の増加が生じると、鉱物粒子間の空隙の減少が生じにくくなっていくためであると言える。また、 G 、 G_u 、 R および α に

関しては、計算に用いた多孔質弾性パラメータの封圧（有効封圧）依存性に応じて、上記と同様に封圧（有効封圧）の増加に対して非線形的に増加（ G 、 G_u および α ）あるいはほぼ一定（ R ）という変化を示した。

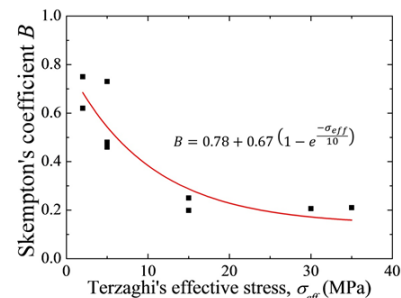
さらに間隙圧依存性を評価するため、封圧を 40MPa に固定し、間隙圧を 5MPa から 25MPa まで増加（有効応力を 35MPa から 15MPa まで減少）させたところ、どの多孔質弾性パラメータも顕著な変化はなかった。間隙圧を一定にし、封圧を変化させた場合にも、同様の有効封圧条件下では多孔質弾性パラメータの変化が顕著ではなかったことから、多孔質弾性パラメータの封圧および間隙圧依存性は個別に取り扱う必要はなく、有効応力依存性で整理できると言える。

多孔質弾性パラメータは有効応力の関数であるということが示された。また、有効応力に対してほぼ一定値を示した R を除き、多孔質弾性パラメータは一般的に、有効応力の増加とともにある応力レベル（本研究ではおよそ 10MPa）までは顕著に増加あるいは減少するが、それ以上の応力レベルでは増加あるいは減少が顕著でなくなるという変化を示した。つまり、多孔質弾性パラメータを y とすると、多孔質弾性パラメータは一般的に、以下のような有効応力 σ_{eff} の関数を用いて記述できる（例えば 1-5 図および 1-6 図）。ここで、 a および b は多孔質弾性パラメータによって異なる定数である。

$$y = a + b \left(1 - e^{-\frac{\sigma_{eff}}{10}} \right)$$



1-5 図 排水 Young 率と有効応力の関係

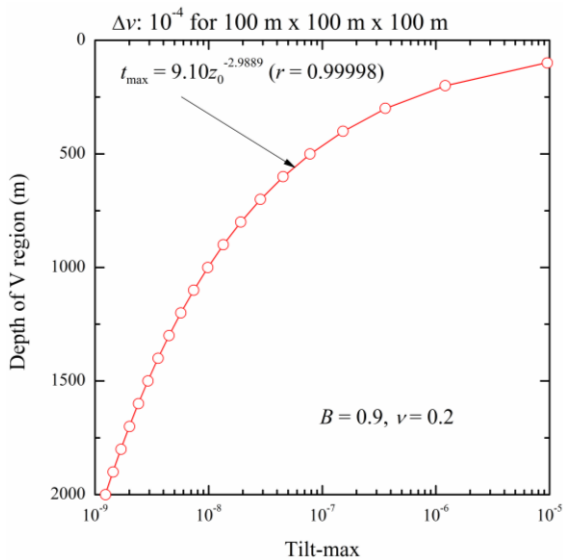


1-6 図 Skempton の B 値と有効応力の関係

(2) 地下流体流動場の逆解析に関する理論的研究

① 流体流動場と地表面傾斜量の理論的關係

そもそもある規模の流体流動が地下で生じた場合にどの程度の地表面傾斜量が生ずるかを知らるために、等方均一半無限多孔質弾性体内である規模の流体流動が生じた場合の最大地表面傾斜量と流体流動深度の關係を求めた。2-1 図は、一辺が 100m の立方体岩石内で岩体に対して 0.01% の流体体積変化が一様に生じた場合の中心深度と最大地表面傾斜量の關係である。ただし、片対数表示してある。高精度傾斜計の分解能は 10^{-9} radian であるから、このような規模の流体流動であれば、理論的には 2,000m までの流体流動を検知できることがわかる。当然、流体流動の規模や大きさがこれより小さくなれば原理的に地表面傾斜量からは地下の流体流動を捉えることができない。また、原理的に検知可能な場合であっても、不可避免的に含まれるノイズの影響により検知できなくなることも考えられる。

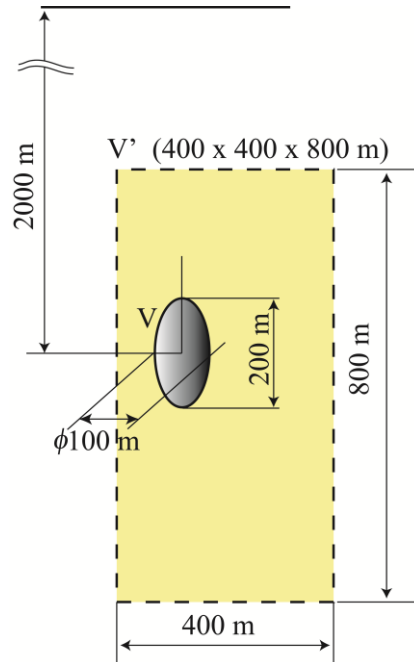


2-1 図 流体流動場の中心深度と最大傾斜量の關係

② 二次要素を用いた従来法の結果に及ぼすノイズの影響

ここでは、一例として、2-2 図に示すように、大きさとして高さが 200 m、半径が 50 m の直立回転楕円体 (V 領域) の中心深度が 2000 m の場合について、流体体積 Δv が楕円体の中心からほぼ距離に線形に減少し、楕円体の表面で 0 になる場合を想定し、理論的に求めた地表 25 点の傾斜量を用いて、二次要素を用いた従来法での逆解析を行い、傾斜データにノイズが含まれない場合と最大傾斜量の 10% のノイズがランダムに含まれる場合の比較を行った。ただし、解析領域 (V' 領域) とし

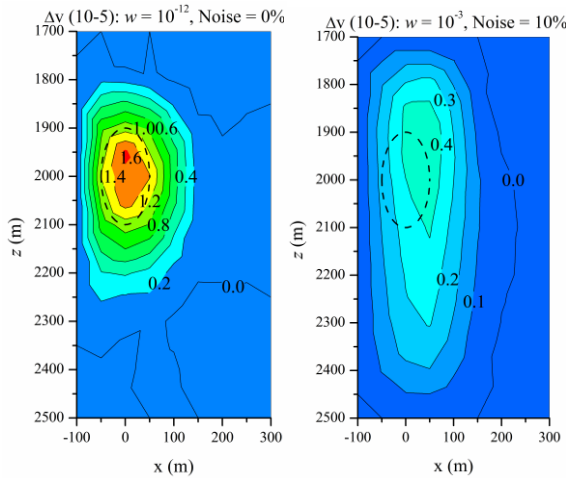
ては高さも横幅も実際の楕円体領域の 4 倍の直方体を仮定 (過大評価+) し、しかも実際の流動領域の中心と解析対象領域の中心がずれている場合についてこの領域を $4 \times 4 \times 8$ の要素に分割した。なお、この領域の表面における Δv は 0 であるため、与えた 25 点の地表面傾斜量に対し求める Δv の未知量は 303 である。



2-2 図 想定した流体流動場 (回転楕円体の V 領域) と逆解析における解析領域 (V' 領域)

2-3 図は、得られた逆解析結果 (流体流動場の中心を通る鉛直断面における流体の体積変化 Δv の等高線分布、単位 10^{-5}) であり、左側はノイズが含まれない場合、右は 10% のノイズを含む場合である。なお、これらの図中の破線は実際の流体流動場 (回転楕円体 V 領域) を示している。ノイズが無い場合には、実際の流動場の中心をかなり正確に評価し、かつ流体流動場の形状もやや歪んでいるもののある程度正確に評価していることがわかる。ただし、流体流動場の大きさを過大評価する傾向があり、これは地下深部になるほど著しい。これに対し、地表面傾斜量に最大値の 10% のノイズが含まれるだけで、流体流動の中心位置や形状の評価が極めて不正確になる。これは、本研究で用いた逆解析法の本質的性質による。即ち、未知量 (303) に比べて与えた既知量 (50) が圧倒的に少ないため、流体流動の滑らかさを拘束して解を求めざるを得ないことによる。流体流動が地下深部で生ずるほど測定される地表傾斜量が小さくなり、相対的にノイズが大きくなることは避けられない。従って、 CO_2 等の地下貯

留のように流体流動が地下深部で生ずる場合に流体流動を正確に評価するためには、ノイズに強い逆解析法の開発が必要である。なお、本研究で仮定したように地表面傾斜を 25 もの点で測定できるのは社会的に重要な場合に限られると考えられる。



2-3 図 ノイズが含まれない場合 (左) と最大傾斜量の 10% のノイズを含む場合の流体体積変化 (Δv) 解析結果

③ 新しい高精度逆解析法

ノイズは、通常、大きさも方向もランダムであるから、未知量と既知量の関係が逆転すれば、未知量より多くのデータを用いることによりノイズに強い解が得られる。そこで、本研究では、二次要素を用いた従来法の有する流体流動場の形状を限定しないという自由度をあきらめ、少ないパラメータで流体流動場の形状を特徴づけることを考える。均一岩体のある点から流体を注入したり引き抜いたりする場合を想定すると、流体流動場を楕円体で近似できる。そこで、まず、岩石の単位体積当たりの流体の体積変化 Δv の分布を次式で近似する。

$$\Delta v = a(1-r')^n \quad (2-1)$$

ただし、 a は定数で流動場の中心における最大値、 n は流動の空間分布の急激さを表す定数、 r' は流動中心からの Δv の等高面 (相似な楕円体表面) の距離である。

流体流動場を楕円体で近似すると、決定すべき未知パラメータは、流動場の中心位置 \mathbf{x}_0 (x_0, y_0, z_0)、大きさ (x_m, y_m, z_m)、流動場が傾いているとして軸の方向 (ϕ, θ, α) ならびにすでに述べた分布の形状を表す a と n の計 11 個になる。このように、例えば、前節で述べた 25 点の地表面傾斜量測定でもノイズに強い逆解析法の十分なデータになる可能性がある。このように、流体流動場を楕円体で近似した場合の地表面傾斜量の基本式は次式で与えられる。

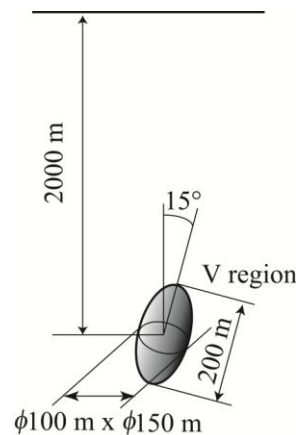
$$t_i(\mathbf{x}) = -\frac{B(1+\nu)}{\pi} x_m y_m z_m \int_{V'} a(1-r')^n T_i^{*m} r'^2 \sin \phi' dr' d\phi' d\theta',$$

$$\text{where } \mathbf{s} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{L}^t(\phi, \theta, \alpha) \mathbf{x}''(x_m, y_m, z_m, r', \phi', \theta').$$

(2-2)

ただし、 $t_i(\mathbf{x})$ は地表の点 \mathbf{x} における i 方向の傾斜量、 B と ν は、岩体の Skempton 係数と非排水ポアソン比、 \mathbf{L} は回転楕円体の軸方向に取った局所座標と全体座標の変換マトリクスである。したがって、最小二乗法の原理に基づいて上式から得られる誤差の二乗和を未知パラメータで偏微分することにより与えた地表面傾斜量から流体流動場を特徴づけるパラメータを決定できる。ただし、傾斜データは最小で 11 個必要であり、ノイズの影響を考えるとこれより多いほどよいことは当然である。なお、本理論的研究全体を通じて、 $B = 0.9$ 、 $\nu = 0.2$ と仮定した。

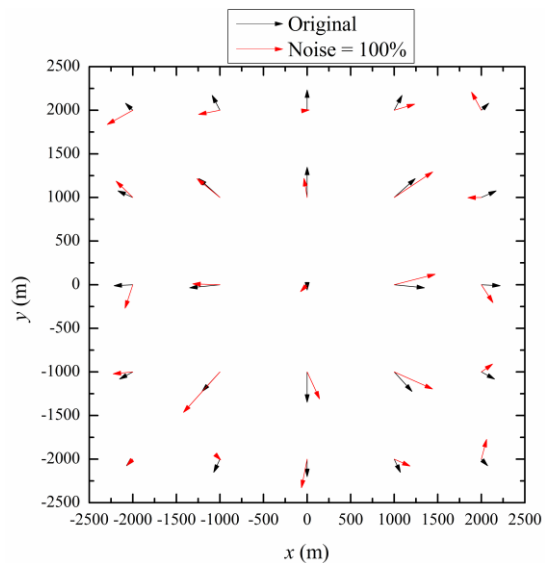
新しい逆解析法を用いて、2-4 図に示す流体流動場について、ノイズを含む 25 点の地表面傾斜量データによる逆解析を行った。流体流動場は中心深度が 2000 m、長軸が鉛直軸から 15 度傾斜し、軸方向の長さが 100 m、150 m、200 m の場合である。この V 領域に、中心からの等高面の距離に線形に減少する分布を用いて地表面傾斜量を計算した後、これに最大値の 100% までのノイズをランダムに与えた。2-5 図は、ノイズが含まれていない傾斜ベクトル (黒矢印) と最大値の 100% の大きさも方向もランダムなノイズ加えたもの (赤矢印) を比較したものである。



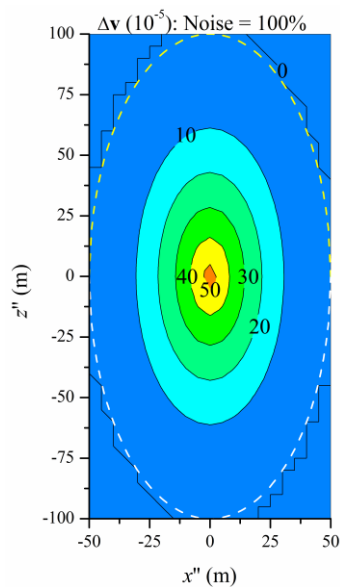
2-4 図 想定した回転楕円体状流体流動場

得られた結果を 2-6 図に示す。流体流動場の長軸方向にとった局所座標での Δv の等高線分布 (鉛直断面、単位 10^{-5}) であり、白の破線は与えた流体流動場の形状を示している。本研究で開発した方法により、最大値の 100% までのノイズを含んだ傾斜データを

用いてもかなり正確に流体流動場を評価できることがわかる。これは、流体流動場を楕円体で近似することにより逆解析で決めるべきパラメータの数を少なくしたことの効果である。



2-5 図 ノイズを含まない傾斜データ（黒矢印）と最大値の100%までのノイズをランダムに含む傾斜データ（赤矢印）



2-6 図 最大値の100%までのノイズを含むデータを用いて得られた局所座標における逆解析結果

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① 木村かおり、松木浩二、大山卓也、竹内竜史、竹内真司、地下水流動に伴う地表面傾斜量に及ぼす岩体の不均一性と地表面形状の影響、Journal of MMIJ、査読あり、126 巻、2010 年、660-667、https://www.jstage.jst.go.jp/browse/journalofmmij/126/12/_contents

〔学会発表〕（計2件）

- ① 白井祐人、渡邊則昭、木崎彰久、坂口清敏、封圧下における水飽和来待砂岩の多孔質弾性パラメータ、資源・素材学会春季大会、2013年3月30日、津田沼
- ② 松木浩二、地表面傾斜量の逆解析による地下水流動評価、GEEE 研究発表会、2011年3月11日、仙台

6. 研究組織

(1)研究代表者

松木 浩二（MATSUKI KOJI）

東北大学・大学院環境科学研究科・名誉教授

研究者番号：10108475

(2)研究分担者

坂口 清敏（SAKAGUCHI KIYOTOSHI）

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授

研究者番号：50261590

木崎 彰久（KIZAKI AKIHISA）

東北大学・大学院環境科学研究科・助教

研究者番号：60344686