

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04958

研究課題名（和文）既存コアとコア変形法による東北・北海道の地殻応力マップの生成と地熱開発への応用

研究課題名（英文）distribution mapping of rock stress in the northern area of japan estimated by the core deformation method and drilled cores and its application to geothermal development

研究代表者

伊藤 高敏（Ito, Takatoshi）

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：00184664

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：地熱井で採取されたコアを多数入手して、その断面形状とヤング率を調べた。その結果、変形量とヤング率は深度によって大きくばらついた。ただし、両者は反比例の関係にあり、それから求めた地殻応力差はおよそ一定となった。これらの結果は、コア変形法の原理と合致し、通常の掘削で得られたコアでも同法で地殻応力評価が可能であることを示す良い実例となった。さらに、鉛直井と傾斜井など、向きの異なる坑井のコアを組み合わせることで水平面内地殻応力の絶対値が得られる可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地殻応力は、地震・火山現象のみならず、例えば地熱流体の流動に大きく影響する。しかし、従来の地殻応力測定法は高価なため、ピンポイントにデータが限られていた。一方、様々な目的で過去に掘削された坑井が各地に多数存在する。そこで得られたコアと本研究で明らかにした地殻応力評価法を組み合わせれば、従来得られなかった地殻応力の面的な分布が明らかとなり、地震・火山現象や地熱流体の流動の理解が大きく前進すると期待される。

研究成果の概要（英文）：We sampled a number of rock cores obtained from geothermal wells, and measured their cross-sectional shapes and Young's modulus E. It was found that the diametrical difference in core diameter and E varied in a wide range with the depth at which the core was drilled. However, those two values were inversely proportional so that the stress difference estimated by the core deformation method was to be nearly constant. The result indicates that the core deformation method can be applied to the cores obtained by a general way of drilling in order for stress estimation. Furthermore, it was found that absolute magnitudes of horizontal stresses can be estimated from the stress differences estimated on the cores obtained from vertical and inclined boreholes.

研究分野：エネルギー資源開発に関わる地下岩体の力学挙動の評価ならびに大深度を対象にした地殻応力測定法の開発

キーワード：地殻応力

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

地殻応力は地下深部岩体の力学を支配する最大因子である。このことは、地殻応力が高々深さ数 km 程度で岩石の圧縮強度 (100MPa 程度) の規模に達することからも容易に想像できる。その大きさと方向を正しく把握することは、地震や火山噴火などの災害を伴う地殻活動の理解と対策はもとより、近年、力学的アプローチの重要性が増している石油・天然ガスや地熱などのエネルギー資源開発にも不可欠である。後者における力学の重要性は、それに特化したジオメカニクス (Geo-mechanics) (例えば Zoback, 2007) という新しい学問分野が形成されて急速に普及拡大していることに良く現れている。その地殻応力を測定する従来の方法 (水圧破碎法、応力解放法など) では、地表からボーリングした坑井の対象深度で何らかの力学試験 (原位置試験) を行い、その応答から地殻応力を求める。しかし、km 級のボーリングに十億円単位、地殻応力の測定自体にも 1 千万円単位の高額な費用を要することから、地殻応力の情報はスポット的で数も少ないため、その特徴、特に大きさの面的な広がり方は良くわかっていないのが現状であった。

### 2. 研究の目的

我々が最近提案した、新しい原理に基づく地殻応力の測定法としてコア変形法がある (Funato and Ito, 2017)。この方法では、既存のボーリング技術で採取された円柱状の岩石試料 (コア) を使って地殻応力を求める。課題の多い原位置試験を要しないのみならず、コアさえ残っていれば坑井も不要で、時間が経過しても適用できるという画期的な特長がある。また、いずれの地下開発でも対象深度の地質状態を把握することは必須であり、それを目的としてコアがほぼルーチ的に採取される。これらの点に着目して本研究では、地熱発電を初めとする地下開発でこれまで採取された、様々な場所のコアを広く入手しないし借用し、それにコア変形法を適用して地殻応力を求める。そして、それらの結果を地殻応力のマップにまとめて、大きさや向き、それらの深度および水平方向の広がりなどを調べられることを明らかにする。

一方、台風の強大化と大災害のように地球温暖化の影響が多くの人々に実害として現れるようになっており、その対策として再生可能エネルギーの導入拡大は必須である。この点において日本には、再生可能エネルギーの 1 つで資源量が世界第 3 位の地熱がある。しかし、発電量は合計でも未だに 50 万 kw 強と国内総発電量の 1% にも満たない。利用が停滞している大きな要因は、成否の鍵となる熱水・蒸気の生産性を事前に把握するのが難しく、大きなコストを掛けて調査・開発を始めるまでわからないことである。この懸案の課題が地殻応力で解決できる可能性が高い。これは、地殻応力のせん断成分が大きい岩体ほど、隙間のある割れ目が増加して熱対流が促進されるため、熱水・蒸気生産性が大きくなっていると考えられるためである。しかし、その生産性と地殻応力の関係が過去に調べられたことはかつてない。これは、地殻応力の重要性が地熱開発で認識されていなかったことに加え、そもそも km 級の深度かつ高温という極限環境にある岩体の地殻応力を測定すること自体ができなかったためである。これに対して先述のコア変形法は、コアさえあれば良く、コアがあった場所の温度は無関係である。そこで、上記の要領で得た地殻応力情報の応用として、それを熱水・蒸気生産の実績と照らし合わせることで、地殻応力が熱水・蒸気生産性との関係を検討する。

### 3. 研究の方法

コアは、円筒の縁に刃をつけた道具 (コアビット) を回転させて切り取られるので、その断面は一般に円形と考えられているが、実際には極わずかに歪んだ楕円形をしている。これは、地殻応力で生じた圧縮ひずみが解放されて膨張し、かつ、切り取り前のコア断面内に作用していた最大および最小の地殻応力  $S_{\max}$  および  $S_{\min}$  の大きさに応じて膨張量に差が生じるためである。この原理に従えば、コアの最大および最小直径  $d_{\max}$  および  $d_{\min}$  から地殻応力の大きさが式 (1) で求められる。

$$\frac{E}{1 + \nu} \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\min}} = S_{\max} - S_{\min} (= \tau_{\max}) \quad (1)$$

さらには、コアが定方位ならば、 $d_{\max}$  から  $S_{\max}$  の方位がわかる。ただし、同式からわかるように、コア直径から求まるのは  $S_{\max}$  と  $S_{\min}$  の差であり、それぞれの大きさを求めるには後述のように別の観測データが必要となる。ただし、その差の半分がせん断応力の最大値  $\tau_{\max}$  となるので、熱対流の経路形成を支配している因子をコアから直接評価できることになる。

式 (1) の  $E$  および  $\nu$  はそれぞれ岩石のヤング率とポアソン比である。岩石の  $\nu$  は一般に 0.2 前後の値であり、多少変化しても式 (1) による地殻応力差 ( $S_{\max} - S_{\min}$ ) の評価結果はあまり変わらない。これに対して  $E$  は岩種によって桁違いに変化し、同じ割合で評価結果も大きく変化する。このため、コアごとに  $E$  を実測することが必要となる。そこで、我々が独自に開発した簡易型ヤング率測定装置を用いる。この装置では、コアを整形することなく周圧を直接負荷できる。そして、コアにひずみゲージを張り付けて測定される周方向ひずみと周圧の関係からヤング率を求めることができる。

一方、地熱資源ポテンシャルの評価を目的とするボーリング調査が東北・北海道で2017年から継続して実施されている。そこではヒートホールと呼ばれる調査井を深度1000mまで掘削して全深度のコアが採取されており、その坑井数は既に10本を越えている。そこで調査を担う組織と交渉してコアを入手し、上記の測定を行って地殻応力の評価を行う。

#### 4. 研究成果

東八幡平の地熱地帯に掘削された2つの坑井(HM3およびHM4井)で採取されたコアにコア変形法を適用して地殻応力の評価を行った。この結果、HM3では直径差およびヤング率が共にコアによって桁違いに変化していた(図1a, b)。ただし、両者は逆相関、つまり、硬いコアでは変形が小さく、軟らかいコアでは変形が大きかった。一方、HM4では直径差およびヤング率が共にそれぞれ一定に近かった。これらの結果は、コア変形法の原理に合致する。また、コアの直径差とヤング率から差応力を評価した結果(図1c)、HM3の結果は深度によらず零に近く、それに比べてHM4の結果は大きかった。両者の差は、HM3が鉛直井なのに対して、HM4が傾斜井であることが原因と推察された。これらの結果から、地殻応力が水平面内で一様であり、その鉛直成分が岩体の自重相当で既知と仮定すれば、HM4井に直交する面内の応力差が水平面成分の関数となる。さらに、その応力差がHM4井のコアで評価した地殻応力差に等しいという関係から地殻応力の水平面成分を求められる。その結果、高傾斜の断層が滑りやすい応力状態となり、評価対象地域が地熱地帯であることと整合していることがわかった。これらの結果は、通常の掘削で得られたコアでもコア変形法で地殻応力評価が可能であることを示す良い実例となった。これを踏まえて、本研究の手法を他の坑井で得られたコアに適用し、地殻応力の平面分布を今後明らかにしていく予定である。

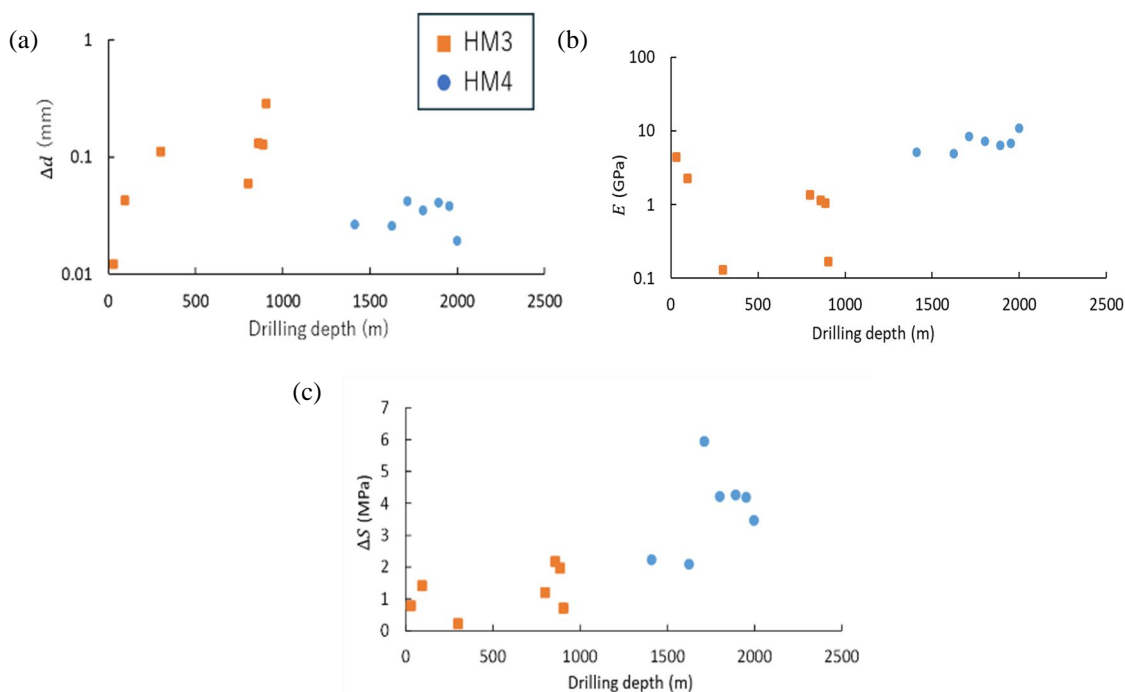


図1 各コアの(a)直径差 $\Delta d$ および(b)ヤング率 $E$ と(c)地殻応力差 $\Delta S$ の評価結果

#### 参考文献

- Funato, A. and Ito, T., A New Method of Diametrical Core Deformation Analysis for In-situ Stress Measurements, *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci.*, 91, (2017), 112–118.  
 Zoback, M.D., *Reservoir Geomechanics*, Cambridge Univ. Press, (2007).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大島広策・伊藤高敏（東北大），長田和義（地熱エンジニアリング）
2. 発表標題 地熱調査井のコアを利用した地殻応力評価
3. 学会等名 石油技術協会春季講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
スイス	スイス連邦工科大学チューリッヒ校		