

# 産総研地下水等総合観測井ボーリングコアを用いた コア変形法 (DCDA) による応力評価について (速報)

船戸明雄<sup>1</sup>・木口 努<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 深田地質研究所

<sup>2</sup> 産業技術総合研究所

Stress evaluation by the diametrical core deformation analysis (DCDA)  
using drilling cores from AIST observation stations (A prompt report)

FUNATO Akio<sup>1</sup>, KIGUCHI Tsutomu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fukada Geological Institute

<sup>2</sup> AIST, Geological Survey of Japan

要旨：2011年の東北地方太平洋沖地震後、南海トラフ地震に対する世間の関心が高まってきた。産総研は南海トラフ沿いの地殻活動のモニタリングの高度化のため、四国・紀伊半島・東海地域周辺で地下水等総合観測点の整備を進めている。著者らは、2006年から2013年にかけて整備された16か所の地下水等総合観測点のボーリングコアにコア変形法 (DCDA) を適用し、四国・紀伊半島・東海地域周辺の原位置の地殻応力状態を把握すべく本研究に着手した。本研究はまだ緒についたばかりで来年度以降も継続する計画である。本報では、本研究の背景、対象コアの選定と測定方法、今後の方針、測定結果の一例を紹介する。紀北海山観測点では地表からの深度190～560mの間の5深度のうちDCDAによる主応力差が大きな深度はボアホールブレイクアウトの発生箇所と一致した。また、DCDAによる最大主応力方向はほぼ東西方向を示し、ボアホールブレイクアウトから求めた応力方向と整合的であった。

キーワード：コア変形法、南海トラフ、地殻応力、ボアホールブレイクアウト

Abstract: Since the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, public interest in Nankai Trough megathrust earthquakes has increased. AIST has been establishing observation sites in and around Shikoku, the Kii Peninsula, and the Tokai region for monitoring crustal activity along the Nankai Trough. In order to understand the in-situ crustal stress state in and around these regions, the authors have embarked on this study to apply DCDA to drilling cores from 16 observation sites established between 2006 and 2013. This study has just begun and is planned to continue beyond next year. This report introduces the background of this research, the selection of target cores and measurement methods, the future direction of this research, and an example of DCDA results. At the Kihoku-Miyama observation site, among the five depths between 190 and 560m from the surface, the depths where the differential stress was high by DCDA coincided with the locations where borehole breakout had occurred. In addition, the direction of maximum principal stress by DCDA was roughly east-west, which was consistent with the stress direction obtained from borehole breakout.

Keywords: diametrical core deformation analysis, DCDA, Nankai Trough, crustal stress, borehole breakout

## 1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震後の2013年、政府の地震調査委員会により南海トラフで今後30年以内にマグニチュード8～9級の巨大地震が発生する確率が70～80%と公表されたことを受けて、南海トラフ地震に対する世間の関心が高まってきた。そんな折、本年8月8日に日向灘でマグニチュード7.1の地震が発生し、気象庁が南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）を発表したことで南海トラフ地震に対する緊張が一気に高まり、社会生活にも少なからぬ影響が表れている。8月15日の気象庁発表「南海トラフ地震関連解説情報（第7号）」でこの注意は解除されたが、その説明ではひずみ観測データに関して「地震後に通常みられる変化以外は今のところ観測されておらず（中略）プレート境界の固着状況に特段の変化を示すような地震活動や地殻変動は観測されていない」としている。このように南海トラフ地震に関する気象庁発表においてはひずみの観測データが非常に重要な役割を果たしていると思われる。

上記の気象庁発表では、産総研の観測点のひずみデータも使用された。産総研では、南海トラフ巨大地震の短期・中期予測研究のために、南海トラフ沿いの地殻活動のモニタリングの高度化を目的として地下水等総合観測点の構築を進めている。2006年から2013年までに四国・紀伊半島・東海地域周辺で16か所の観測点を整備し（図1）、地下水やひずみ・傾斜・地震動の観測を行っている（小泉，2013）。ひずみデータは2020年より気象庁とリアルタイムで共有され、「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」や南海トラフ地震臨時情報の発出にも利用されている。産総研は2021年度以降も新たな観測点の整備を進め、2023年度から九州にも観測点を整備している。こ

れらの観測点では、深度の異なる3つの孔井（30m、200m、600mが標準）を掘削し、基本的に地表付近から最深の深度までコアを取得した。また、水圧破碎法やボアホールブレイクアウト法による応力評価も行われている（木口・桑原，2021）。

著者らは、2022年に産総研が新たに整備した日高川和佐観測点の12本のコア（深度585～600m）にコア変形法（DCDA）を予察的に適用した（船戸・木口，2023）。その結果、水平最大主応力方位はほぼ東西で、既存の応力測定結果や地震のメカニズム解による方位と一致した。また、DCDAの結果は比較的ばらつきも小さく安定したような傾向を示していた。このことを契機に、産総研のコア倉庫に保管されている既存16か所の観測点のコアにDCDAを適用して四国・紀伊半島・東海地域周辺の原位置の地殻応力状態を把握するため、本研究に着手した。

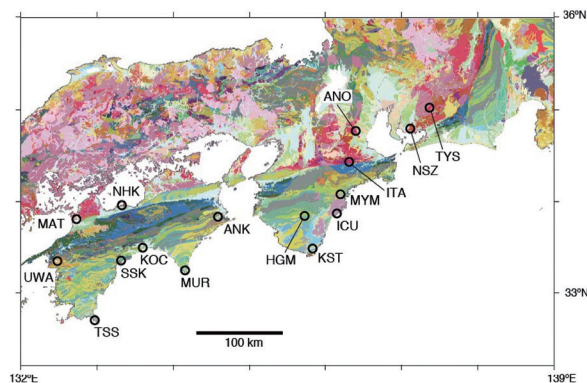


図1 産総研が2013年までに整備した地下水等総合観測点配置図（木口・桑原，2021）。

## 2. 産総研地下水等総合観測点のボーリングコア

既存の16観測点においては深度の異なる三つの孔井が掘削されているが、そのうち最も深い孔1のコア採取深度等を表1にとりまとめた。同表のsite記号、観測点名、主な岩種は木口・桑原（2021）より記載順も含めて引用した。コア採取深度と孔壁イメージ検層は木口ほか

(2014), 木口ほか (2020) によった. 各観測点の地質概要 (報告書), コア写真, ボーリング柱状図及び孔壁画像は産総研の「地質調査総合センター研究資料集」に公開されている. 孔壁画像には抽出した亀裂の形状がサインカーブとして描かれている.

各観測点の孔1ではHQ (孔径約98mm, コア径約56mmまたは約63mm) またはPQ (孔径約123mm, コア径約84mm) のコアリングが行われている. 同じHQでもコア径が異なるのは, 掘削に用いられたコアバレルやビットの違いによる. 松阪飯高のように600mの深度までHQでコアリングしている箇所と, 豊田神殿のように570~580mまでHQでコアリングし, 拡孔後最深部の20~30mをPQでコアリングしている箇所がある. PQコアリングでは土佐清水松尾と室戸岬に定方位コアリングの記載がある (木口ほか, 2014).

これらのボーリングコアは産総研のコア倉庫に保管され, 収納棚の番号, 観測点, 深度の一覧表に整理されている. なお, 一部の観測点については部分的にコアが廃棄された深度がある.

表1 16観測点の孔1のコア採取深度等一覧.

Site	観測点名	コア採取深度 (m)		孔壁イメージ 検層	主な岩種
		HQ	PQ		
TYS	豊田神殿	20~580	579~600	BTV	トータル岩
NSZ	西尾善明	200~570	570~600	BHTV	片麻岩/花崗岩
ANO	津安濃	200~570	570~600	BHTV	花崗閃緑岩
ITA	松阪飯高	0~600	—	BHTV	トータル岩/結晶片岩
MYM	紀北海山	30~580	580~600	BHTV	花崗斑岩
ICU	熊野磯崎	0~580	580~600	BHTV	花崗斑岩/凝灰岩
KST	串本津荷	0~600	—	BHTV	黒色泥岩
HGM	田辺本宮	0~349	349~376	BHTV	頁岩/砂岩
ANK	阿南桑野	17~600	—	BHTV	砂岩/頁岩
MUR	室戸岬	65~580	580~600	BHTV	含礫泥岩
KOC	高知五台山	120~600	—	BHTV	砂岩/泥岩/チャート
NHK	新居浜黒島	200~570	—	BHTV	花崗閃緑岩/ホルンフェルス
SSK	須崎大谷	200~570	570~600	BHTV	頁岩/砂岩
TSS	土佐清水松尾	0~578	578~600	BTV	花崗岩類/閃緑岩類
MAT	松山南江戸	0~600	—	BHTV	花崗閃緑岩
UWA	西予宇和	0~600	—	BHTV	砂岩/粘板岩/チャート

最終深度から1~3mの余掘りを行っている箇所もある BHTV:ボアホールテレビューア  
BTV:ボアホールカメラ

### 3. 測定対象コアの選定と準備

16観測点の孔1のコアは総延長が10,000m近くに及ぶため, 全てのコアを測定することは現実的ではない. そこで以下のような方針で測定対象コアを選定し, 測定計画を立案した.

#### 3.1 測定対象コア箱の選定

まず, 第一段階として全16観測点の深度600mまでの応力状態の概観を把握するため, 各観測点について200m, 300m, 400m, 500m, 600mの5深度を測定対象とし, 各深度において3本のコアを測定することを基本とした. あらかじめ, コア写真, 柱状図, 孔壁イメージ画像を参照して対象深度付近のコア箱を1箱 (HQコアは5m/箱, PQコアは2~3m/箱) 選定した. その際, 潜在亀裂のないインタクトで, 完全な円柱部が30cm以上の長さのコアを3本以上含むことを第一条件とし, コアの方位を決定するためにコア写真と孔壁イメージ画像から特定できそうな亀裂を含んでいることを付帯条件とした. コアの中にはほかの目的で抜き出して使用されている場合があったり, コア写真では見えない亀裂があったりするので, コア箱を搬出する際にはふたを開けてコアの状況を確認し, 前記の条件を満たさない場合には必要に応じてほかのコア箱に変更した.

第二段階では, 第一段階の測定結果を踏まえて16観測点の中から興味深い応力状態を示す観測点を数箇所選定し, 各観測点のコアを5m程度の間隔で連続的に測定する計画である. 観測点の選定に当たっては, 第一段階の測定結果に加えてコアの方位の決め易さを重視する.

#### 3.2 コアの選定と準備

第一段階で選定したコア箱は約80箱となった.

これらを一挙に搬送しても保管場所や取扱に難渋するので、2観測点の10箱ずつ産総研のコア倉庫から深田研へ搬送し、同所で測定後、それらを返却する際に次の2観測点10箱を搬送することとした。第二段階では約160箱を想定しているが、20箱ずつ搬送する予定である。

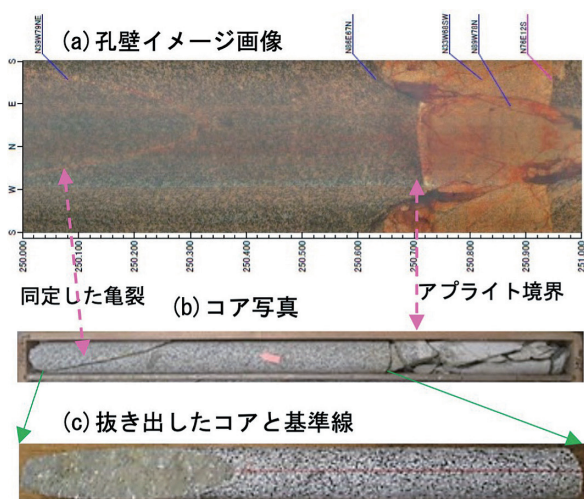


図2 孔壁イメージ画像との対比によるコアの方位決定（豊田神殿 250～251m）。

コア箱に納められたコアは1mごとに切断され、自然の亀裂や人工的な破断面などで分離しているため、これらの切断面や分離面を丹念に繋いで同一方位に並べ、孔壁イメージ画像と照らし合わせて同一方位に並べ、孔壁イメージ画像と照らし合わせて同定した亀裂の最深部（傾斜方位）に合わせてコアの側面に赤基線を引き、直径測定時の回転角の基準とした（図2）。参照する亀裂は孔壁イメージ画像が明瞭であること、傾斜が高角であること、複数の亀裂から同定できることなどから基線方位の確実度を、确实、やや确实、不确实、不定の4段階に評価した。

直径測定の対象コアはばらつきを考慮し1箱から原則として3本を選定した。それぞれのコアについて1cmピッチで30断面の測定データを取得することを基本とし、完全な円筒部が30cm以上あるコアを選定した。選定したコアの側面を濡

れウエスで丹念に拭いて汚れやほこりを除去した後、基線上に直径測定位置の目盛りを1cm刻みで記した。直径測定前にキムワイプでコア表面を再度クリーニングした。

#### 4. コアの直径測定

##### 4.1 コア変形法（DCDA）の原理

コア変形法（DCDA）は、応力解放に伴うボーリングコアの弾性的な変形から原位置の岩盤応力を評価する方法で、原理は図3に示すように、岩石コアの最大直径の方向から最大主応力の方向を、最大、最小直径の差から次式で主応力差を求めるものである（船戸・伊藤，2013；Funato and Ito, 2017）。

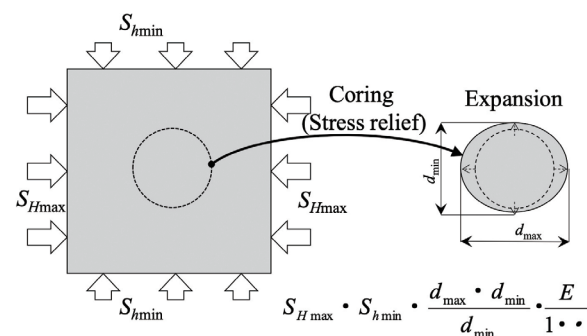


図3 コア変形法（DCDA）の原理。

ここに、

$S_{Hmax}$ ,  $S_{Hmin}$  : 最大, 最小主応力

$d_{max}$ ,  $d_{min}$  : 最大, 最小直径

$E$ ,  $\nu$  : ヤング率, ポアソン比

である。

##### 4.2 直径測定方法

応力解放によるコアの変形は非常にわずかなので、直径分布を精密に測定するため、図4に示すようにコアを2本のローラーの上に置いて一

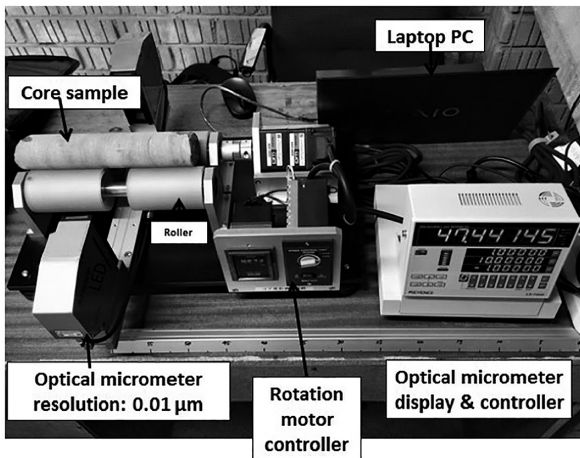


図4 コア直径測定装置 (可搬型).

定速度で回転させながら寸法測定器の出力を PC で収録する方法で直径測定を行った. 深度方向に 1 cm 間隔で測定断面を設け, 各断面においてコアを 1 回転させる間に 2° 間隔で直径データを取り込むようコアの回転速度とデータのサンプリング間隔を調整した. 方位の基準は前記のコア表面に引いた赤基線とし, 上から見て時計回りに測定を行った.

なお, 図4の装置で測定可能なコアの最大直径は 64 mm なので, PQ コアを測定する場合は寸法測定器を上下 2 台組み合わせ合わせた図5の装置を用いた. この装置では最大直径 200 mm のコアまで測定可能である.

#### 4.3 直径測定結果

コアの直径測定結果の一例を図6に示す. 同図 (a) ~ (c) のグラフは各測定断面における方位角 (基線から時計回りで表示) と直径の関係を 10 断面まとめて重ね書きしたものである. 最大直径の方位  $\alpha$  はおよそ 45 - 225° で, 最大, 最小直径の差  $\Delta d$  も 0.08 mm 程度でほぼ等しい.

各断面において得られたコアの直径分布から, 方位  $\theta$  と直径  $d_\theta$  の関係を最小二乗法で次式に近似して最大直径  $d_{\max}$  と最小直径  $d_{\min}$  及び  $d_{\max}$  の

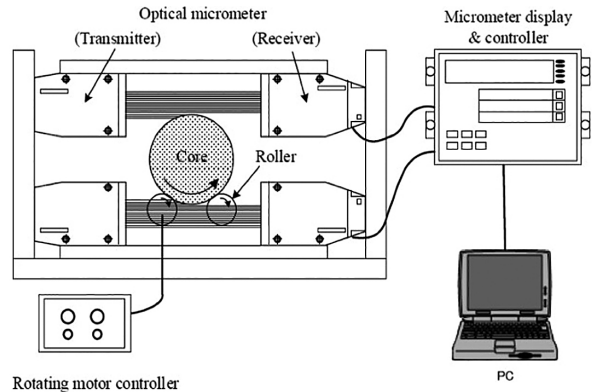


図5 大型コア用の測定装置の概略図 (船戸・伊藤, 2013).

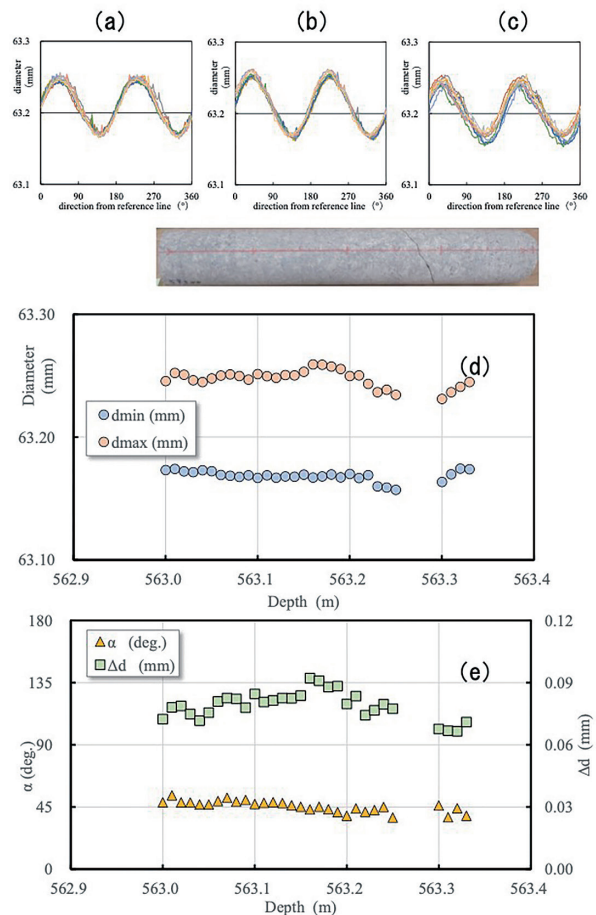


図6 直径測定結果の一例 (紀北海山観測点 563.00 ~ 563.33m).

方位  $\alpha$  の最適解を求めた. その結果を図6(d), (e) に示す.

$$d_\theta = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} + \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2} \cos 2(\theta - \alpha) \quad (2)$$

563.26 ~ 563.29m の間は亀裂でコアが分離しているため測定できていないが、全体にわたって  $d_{max}$ ,  $d_{min}$  及びその差  $\Delta d$  はほぼ一定である。また  $d_{max}$  の方位  $\alpha$  もほぼ一定でコアが一様に変形していることがうかがえる。

#### 4.4 応力の深度分布

応力評価の一例として紀北海山観測点の 5 深度 15 本のコアの測定結果を図 7 に示す。この孔井の地質は熊野酸性岩類の花崗斑岩で (木口・桑原, 2021), 測定対象深度のコアはいずれも棒状, 堅硬で表面は滑らかであった。図 7 (a) の主応力差  $\Delta S$  は式 (1) により求めたが, ヤング率  $E$  とポアソン比  $\nu$  はそれぞれ 50 GPa, 0.15 と仮定している。同図のプロット記号の横線は標準偏差の範囲を, 破線は岩石の密度を  $2.6 \text{ g/cm}^3$  とした時の被り圧  $S_v$  を表す。 $\Delta S$  は深度 190m 付近と 430m 付近は  $S_v$  と同等かやや小さめであるがその他の深度では  $S_v$  よりかなり大きい値を示している。これらの  $\Delta S$  が大きい深度は, 木口ほか (2020) による孔壁イメージ画像のボアホールブレイクアウトの発生区間に一致又は近接している。ボアホールブレイクアウトは大きな主応力差によって最小主応力方向の孔壁が破壊する現象なので DCDA による  $\Delta S$  が大きいことと整合している。

図 7 (b) は最大主応力方位  $\alpha$  の深度分布で, 記号の種類は 3.2 に記した方位決定の確実度, 横線は標準偏差の範囲を示している。方位が確実なものに限れば  $\alpha \approx 90^\circ$ , 即ち最大主応力はほぼ東西となっている。これは, 孔壁イメージ画像のボアホールブレイクアウトなどから Satoh et al. (2013) が求めた結果と整合している。

また, 最深部の 560m 付近では  $\alpha$  がやや北寄りの  $45 \sim 70^\circ$  を示しているが, 木口ほか (2020) による孔壁イメージ画像と比べると (図 8), 510

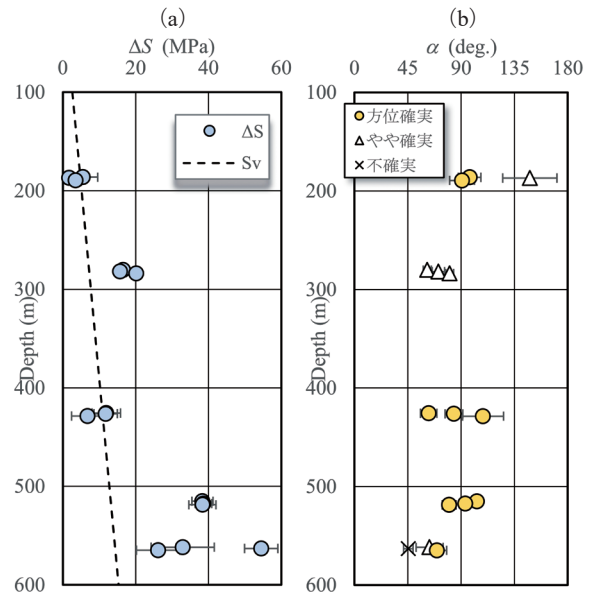


図 7 応力の深度分布の一例 (紀北海山観測点)。

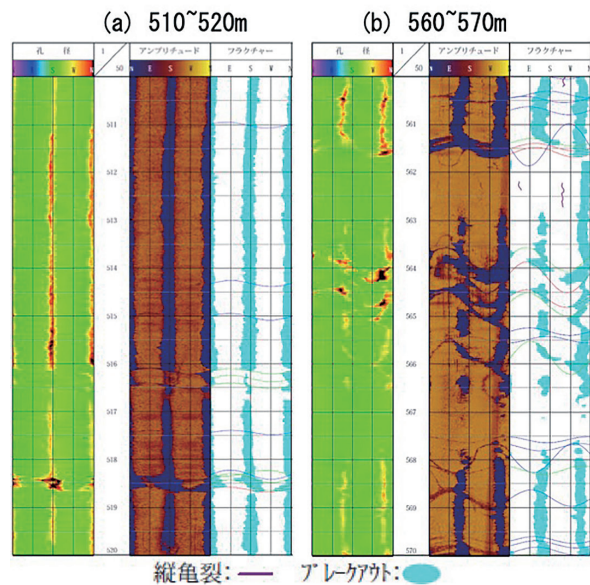


図 8 紀北海山観測点の孔壁イメージ画像 (木口ほか, 2020)。

~ 520m のブレイクアウトがほぼ N-S であるのに対して 560 ~ 570m では NNW-SSE であることと調和的である。

#### 5. おわりに

産総研は南海トラフ沿いの地殻活動のモニタリングの高度化のため, 四国・紀伊半島・東

海地域周辺で地下水等総合観測点の整備を進めている。そのうち、2006年から2013年にかけて整備された16か所の観測点のボーリングコアは産総研の倉庫に保管されてきた。著者らはこれらのコアにDCDAを適用し、四国・紀伊半島・東海地域周辺の原位置の地殻応力状態を把握すべく本研究に着手した。本研究はまだ緒についたばかりで来年度以降も継続する計画である。

本報では、本研究の背景、対象コアの選定と測定方法、今後の方針等について述べるとともに、これまでに得られた結果の興味深い一例を紹介した。

## 文献

- 船戸明雄・伊藤高敏 (2013) : 岩盤応力評価のためのコア変形法 (DCDA). *Journal of MMIJ*, **129**, 577–584.
- Funato, A. and Ito, T. (2017): A New Method of Diametrical Core Deformation Analysis for In-Situ Stress Measurements. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **91**, 112–118.
- 船戸明雄・木口 努 (2023) : 産総研日高川和佐観測点ボーリングコアを用いたコア変形法 (DCDA) による応力評価. 2023年度資源・素材関係学協会合同秋季大会.
- 木口 努・桑原保人・小泉尚嗣・塚本 斉・板場智史・佐藤 努・佐藤隆司・関 陽児・梅田康弘・北川有一・重松紀生・高橋 誠 (2014) : 南海トラフ巨大地震予測のための地下水等総合観測点の孔井における物理検層資料. 地質調査総合センター研究資料集, **598**.
- 木口 努・松本則夫・北川有一・重松紀生・板場智史・塚本 斉・佐藤 努 (2020) : 産総研地下水等総合観測点の孔井における孔壁画像資料. 地質調査総合センター研究資料集, **704**.
- 木口 努・桑原保人 (2021) : 地下透水性亀裂の方向の支配要因:産総研地下水等総合観測井 (愛知県・紀伊半島～四国) の16地点の孔井内測定データからの考察. 活断層・古地震研究報告, **20**, 1–78.
- 気象庁 (2024), 南海トラフ地震臨時情報 (巨大地震注意)について (令和6年8月8日19時45分), [https://www.jma.go.jp/jma/press/2408/08e/NT\\_202408081945sv.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/press/2408/08e/NT_202408081945sv.pdf), (2024年9月13日参照).
- 気象庁 (2024), 南海トラフ地震関連解説情報 (第7号), [https://www.data.jma.go.jp/eew/data/nreq/rinji/202408151702\\_rinji.html](https://www.data.jma.go.jp/eew/data/nreq/rinji/202408151702_rinji.html), (2024年9月13日参照).
- 小泉尚嗣 (2013) : 地下水観測による地震予知研究—地下水位変化から地殻変動を推定することによる地震予測—. シンセシオロジー, **6**, 24–33.
- Satoh, T., Kitagawa, Y., Shigematsu, N., Takahashi, M., Tsukamoto, H., Kiguchi, T., Itaba, S., Umeda, Y., Sato, T., Seki, Y. and Koizumi, N. (2013): Shallow crustal stress around Shikoku and Kii Region, SW Japan, inferred from hydraulic fracturing tests and borehole wall observations. *Proceedings of The 6th International Symposium on In-Situ Rock Stress*, 661–666.