

海底下1000mの海洋プレート岩盤の異方性の特定

Determination of anisotropy of oceanic plateau rock mass 1000 m below the seabed

横浜国立大学 准教授 菊本統

(研究計画ないし研究手法の概略)

プレート境界の岩盤内における応力の履歴および状態は、巨大地震の発生過程を明らかにする上で非常に重要な情報である。しかし、超深度の岩盤内部の応力を直接計測することは事実上、困難である。一方で、堆積岩は堆積構造に由来した異方的な力学特性をもち、応力履歴に応じてさらに異方性が発達する履歴記憶材料であるため、大水深・大深度掘削調査(図1)で得られるプレート境界の岩盤の力学的異方性を特定できれば、その情報から岩盤がそれまでに受けた応力履歴を推定できる可能性がある。

岩石の力学的異方性については、古くから検討が行われてきた。例えば、結晶片岩のコアの超音波速度計測(赤井ら:土論, 1969)では鉱物粒子の配列の傾斜によってヤング率が最大3倍異なること、载荷方向を変えた堆積軟岩(戸室石)の三軸試験(Oka et al., *Soils Found.*, 2002)ではヤング率が約2倍異なることが指摘されている。このような異方性は、従来、様々な方向にサンプリングしたコアに対して多数回の試験を実施することで調べられてきた(例えば, Oka et al., S&F, 2002)が、コストや費用の観点で非効率である上、たとえ多数回の試験を実施しても異方性を正確に決定できるとは限らなかった。

大水深・大深度のプレート境界付近から採取した岩石試料は極めて貴重で、60~70mm程度の直径の鉛直ボーリング試料に限られるため、サンプリング方向を変えた供試体に対する多数回の载荷試験を必要とする従来法では力学的異方性の特定は難しかった。これに対して代表者らは、一つの供試体、一回の三軸試験により異方性の卓越方向とパラメータを特定する手法を開発し、手法の妥当性を理論と実験の両面から検証を進めてきた。この手法では、従来、軸方向にのみ変位するキャップ(もしくはペDESTAL)で载荷した三軸試験に対して、载荷軸に垂直な方向への自由な変位を許

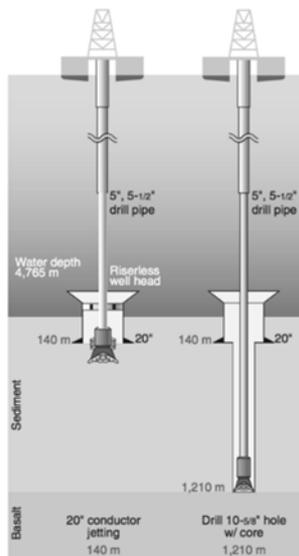


図1 大水深・大深度掘削調査 (Hinrichs et al. (2016))

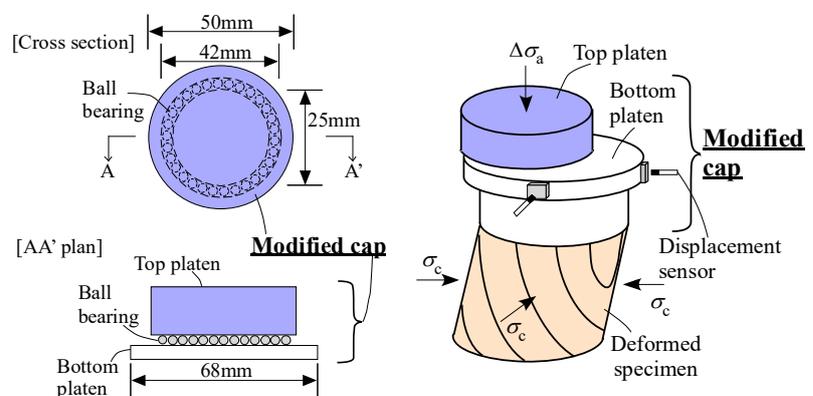


図2 スライダー機構を導入したキャップ構造と異方性を有する岩石供試体の応答例

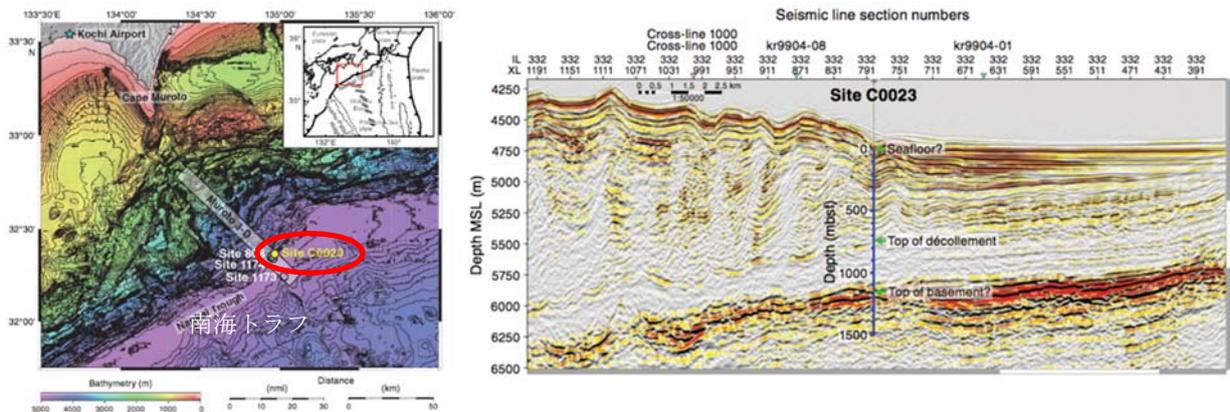


図3 室戸沖における海洋プレート岩石採取位置
(左図中の丸は試料採取位置、Hinrichs et al. (2016)に加筆)



図4 載荷前の岩石供試体と3成分ひずみゲージの貼付状況（120度間隔で3方向から）

すライダー式キャップ（図2）を搭載して三軸載荷し、岩石供試体の力学的異方性に応じた非軸対称な変形挙動を観察する。これを9チャンネルのひずみゲージにより計測し、解析することで異方性のパラメータを特定するものである。本研究では、代表者らが開発・検証を進めてきた一回の三軸試験による異方性の特定方法を用いて、室戸沖の海底面より1023mの深さ（図3）で採取された海洋プレートの岩石試料の異方性の特定を試みるとともに、特定した異方性のパラメータに基づいて岩石試料にプレート境界の沈み込み帯における過去の応力履歴が反映されているか議論した。

（実験調査によって得られた新しい知見）

南海トラフ沈み込み帯の海洋プレートの岩石試料は直径60～70mm、高さ約200 mmの円柱コアから2つの円柱供試体（図4）を切り出して、それぞれに対して代表者らが提案するライダー式キャップを用いて三軸試験を行った。試料の湿潤密度は $\rho_w = 2.188 \text{ g/cm}^3$ 、乾燥密度は $\rho_d = 1.853 \text{ g/cm}^3$ であった。試料側面には120度間隔で3成分のロゼットゲージを貼付（図5）し、計9成分の直ひずみを計測した。これらの計測値から微小ひずみテンソル成分を決定した。なお、軸方向に貼付した3成分は理論的には同一の成分であり、9成分のうち独立なひずみ成分は7成分である。対称テンソルである微小ひずみテンソルの独立な成分は6つであるため、計測データには最小二乗法を適用して最尤のひずみテンソル成分を求めた。ただし、試験においてひずみゲージの計測不良があった場合には、独立成分が6つ以上、確保される範囲でデータを棄却している。試験では、図6の左図に示すように、側

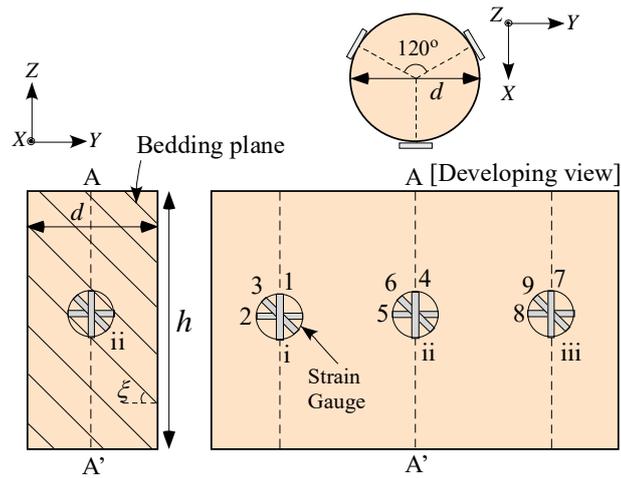


図5 ひずみゲージの貼付け位置と方向

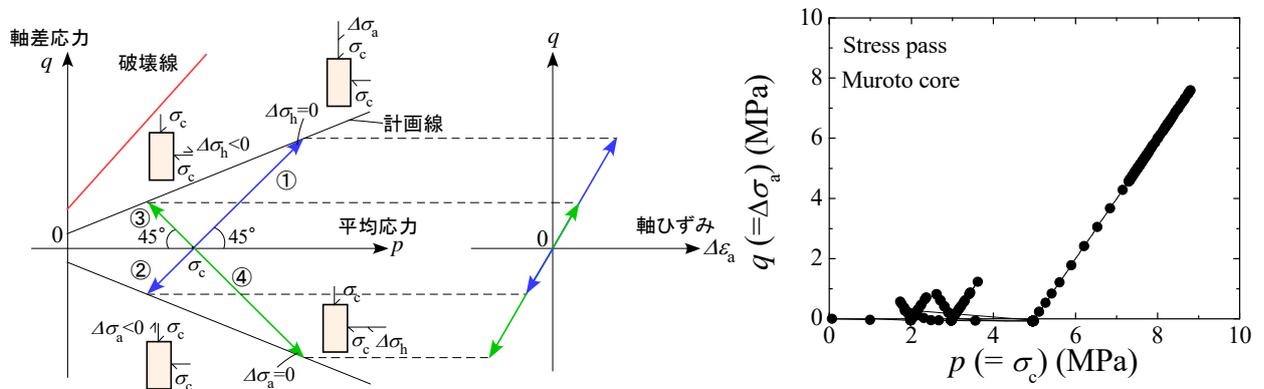


図6 供試体に与えた有効応力経路



図7 試験後の供試体のようす

圧一定条件での三軸圧縮・伸長方向および軸圧一定での三軸圧縮・伸長方向に所定の応力比に達するまで载荷する4種類の有効応力経路を与えた。試験は剛性の異方性の特定を目的としていることから、想定される破壊応力比よりも十分に小さい応力比の範囲で载荷を行った。図6の右図は実際の試験における有効応力経路である。試験は段階的に有効拘束圧を増加させて、 $\sigma_r = 2.0, 3.0, 5.0$ MPaで等方圧密時の変形特性を観察するとともに、三軸せん断を行った。なお、最終段階である $\sigma_r = 5.0$ MPaの側圧一定条件での三軸圧縮は破壊に至るまで実施した。

表1 9枚のひずみテンソルにより計測した等方圧縮時の直ひずみ増分

σ'_c (MPa)	t (min)	x^n (%) ($n = 1 \sim 9$)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.01	2.83	0.230	0.099	0.142	0.256	0.090	0.110	0.204	0.100	0.193
2.01	21.0	0.547	0.244	0.385	0.585	0.234	0.354	0.593	0.270	0.506
3.00	47.8	0.816	0.336	0.566	0.831	0.331	0.511	0.860	0.398	0.713
5.00	70.3	1.174	0.437	0.817	1.163	0.445	0.727	1.200	0.548	0.991

表2 計測結果をもとに算出したひずみテンソル成分（東、北、鉛直方向にXYZ軸を設定）

σ'_c (MPa)	t (hour)	ε_{ij} (%) ($i, j = X, Y, Z$)					
		XX	YY	ZZ	XY	ZY	ZX
1.01	2.83	0.098	0.085	0.225	0.001	0.035	0.029
2.01	21.0	0.265	0.235	0.576	0.015	0.053	0.062
3.00	47.8	0.379	0.331	0.836	0.036	0.073	0.067
5.00	70.3	0.514	0.451	1.185	0.064	0.102	0.069

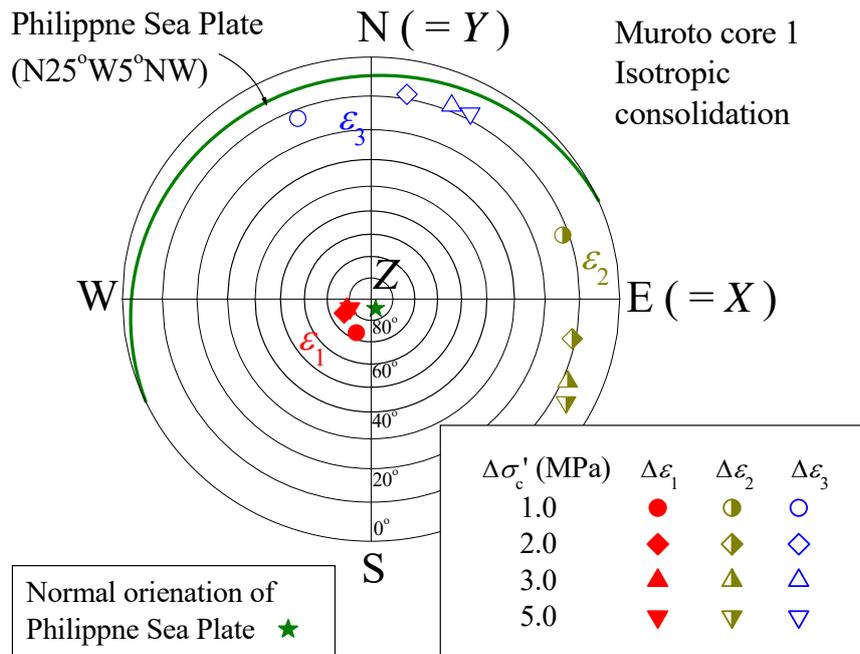


図8 ウルフネットに下半球投影した供試体の主ひずみ方向

9チャンネルのひずみゲージ（図5）により計測した直ひずみ増分の一例を表1に示す。これらの値から表2に示すように東、北、鉛直方向に設定した直交座標系でのひずみテンソル成分を算出した。表からは各拘束応力に対して拘束応力依存性をもちつつ、概ね類似した方向性をもったひずみ増分が得られていることが見て取れる。この結果から主ひずみ増分と主ひずみ増分方向を算出し、ウルフネットに下半球投影した結果が図8である。いずれの拘束応力においても主ひずみ方向は概ね一致しており、鉛直方向に最大主ひずみ、北向きに最小主ひずみ、東南東向きに中間主ひずみを生じる結果となった。すなわち、岩石試料は鉛直方向に相対的に柔らかく、北北東～北北西にかけて剛性が高い異方性が発達していることがわかる。図中には、フィリピン海プレートの傾斜方向を緑実線、

緑星でその法線方向も示している。図のように、異方性が卓越して剛性が最も高くなっている最小主応力方向とフィリピン海プレートの傾斜方向、すなわちプレート境界の沈み込み方向は概ね同じ傾向を示している。岩石をはじめとする地盤材料は一般的に、一度载荷を受けた方向には固くなるように異方性が発達する傾向があるが、以上の結果は岩石試料にプレート境界運動による過去の応力履歴が反映されていることが示唆された。

(発表論文)

Togashi, Kikumoto, Tani, Hosoda and Ogawa (2019) Influence of end restraints on strain responses of anisotropic tuff during triaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, under review.

Togashi, Kikumoto, Tani, Hosoda and Ogawa (2019) Non-axisymmetric and/or non-elementary response of anisotropic tuff in axisymmetric, elementary triaxial test, *Proc. 7th Int. Sym. on Deformation Characteristics of Geomaterials*, accepted.

Togashi, Kikumoto, Tani, Hosoda and Ogawa (2019) Deformation anisotropy of sedimentary rock sampled from oceanic plate below subduction zone, *Proc. 5th ISRM Young Scholars' Sym. on Rock Mechanics*, submitted.

Togashi, Kikumoto and Tani (2019) Determination of anisotropic deformability parameters of tuff by a single triaxial test, *Proc. 16th Asian Reg. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, accepted.

Togashi, Kikumoto, Tani, Hosoda and Ogawa (2019) Anisotropic deformation characteristics of soft mudstone via measuring full strain tensor components during triaxial compression, *ISRM 14th Conf. on Rock Mechanics*, submitted.