

- 【1. 日本側拠点機関名】立命館大学
- 【2. 日本側協力機関名】本文参照
- 【3. 研究課題名】南アフリカとインドの国際科学地震掘削計画を軸にした研究交流
- 【4. 研究分野】地球科学
- 【5. 実施期間】平成 29 年 4 月～令和 2 年 3 月 3 年間
- 【6. 交流相手国との中核的な国際研究交流拠点形成】

国際陸上科学掘削プログラム(ICDP)は、1996年にドイツ・アメリカ・中国がユネスコと連携して立ち上げられた国際研究支援機関である。現在は、日本を含む参加各国が協賛金を拠出している。これまでに採択された46の掘削計画のうちの2つが、インドと南アフリカ(以下南ア)の大深度地震発生帯掘削計画である。南アの掘削計画は、日本が主導する4例目のICDP計画である。しかしICDPは掘削予算しか支援しないため、本課題が主導し、アメリカ国立科学財団(NSF)やドイツ研究振興協会(DFG)などとも連携して研究活動を推進した。本課題によって、南ア掘削計画の主導国として、計8ヶ国の国際研究交流の中核的な役割を果たすことができ、先行するインドの掘削計画とも知見と経験を共有することもできた。

#### 【7. 次世代の中核を担う若手研究者の育成】

本課題の背景・目的および成果は、それぞれ、【8】および【9】に述べる通りである。成果は、地震学・地質学・地球化学・岩盤工学・地球微生物学の研究者、延べ37(79)名が、延べ693(1475)人・日を費やして得られたものである(括弧内は日本・南ア・米国・ドイツの他の関連予算によって投じられた人的資源の数値である)。3つの南ア金鉱山会社と関連コンサル会社と協力した。参加国(主な機関)は、日本(大学は立命館・東北・大阪・京都・高知、研究所は深田地質研・防災科研・産業科学技術研等)、南ア(Witwatersrand大・CSIR・CGS)、インド工科大と地球物理研、イスラエル(Tel Aviv大)、スイス(連邦工科大)、米国(Princeton・Stanford・New Hampshire大)、ドイツ(地球科学研・Berlin自由大)、西オーストラリア大である。これらの中で、日本人の助教1名(令和2年度文科省若手研究者賞)・院生11名(1名はPDに昇任)、南アの若手講師(准教授に昇任)・PD(講師に昇任)・院生6名、スイスの助教1名・院生2名、アメリカの院生3名、インドの院生1名、ドイツのPD1名の、多くは南アで2ヶ月以上活動した。非常に重要な局面で重要な役割を果たし、14編の修士論文にまとめられた。また、今後、3編の博士論文にまとめられる見込みである。この3年間は若手らにとって貴重であった。

#### 【8. 研究の背景・目的等】

これまでに、日本、台湾、中国、ニュージーランドなどの大地震で、断層滑りが海底付近や地表付近まで達していた場合、その断層の海底付近や地表付近は、掘削調査されている。しかし、調査できたのは、岩石化していない堆積層内の断層か、そうでない場合でも、地表に近すぎて風化の影響が否めず、また、固着が弱い深さ範囲だけであった。地震発生場、すなわち、中小の地震がいつも発生しうる場所、あるいは大地震が起こり始めることができる場所は、より大深度である。地震発生場の下限は、温度がある限度を達する深さである。そこでは岩盤がもはや歪エネルギーを貯めることができなくなる。また、もしそこに、マントル物質(大陸や海底の下の、密度がより大きい物質)があり、熱水と反応すると、断層を非常に弱くする物質ができ、地震発生条件に大きく影響すると推定されている。ところが、地表や海底からより大深度まで掘削を到達させるのは困難である。さらに、特に地震発生場の場合は、岩盤のストレスが断層帯の強度に近い。このため、孔を掘

削した瞬間に、ストレスが孔壁に集中し、孔壁が砕けて壊れ、孔がすぐに閉塞してしまいやすい。これを避け、掘削を成功させる確率を上げるためには、水よりも密度が大きい泥水で孔の崩壊を防ぎ、孔底全体や孔内に崩れ落ちた岩片を数 mm 以下の破片（カッティングス）に砕き、泥水とともに孔口で回収する以外にはない。アメリカの横ずれプレート境界では、この掘削方法で地震発生場への到達を試みた。しかし、実際の位置が掘削前に予想した位置と大きく異なり、地震発生場へ到達することができなかった。このため、ICDP Science Plan (2014-2019)には、地震発生場は残された重要な研究課題であると記されていた。2014 年に、南アの金鉱山で、M5.5 の地震(断層が活動した範囲の大きさは 2016 年熊本地震の約 1/10)が発生した。その本震と余震は、金鉱山の地下 2~3 km に設置された 46 の坑内地震計(従来型)によって、断層の地下 3~7 km の範囲が活動したことが、詳細に描き出されていた(次頁の図)。この地震の発生場の母岩は、二十数億年前に堆積し、大陸の底よりもさらに深いマントル起源の火成活動の熱変成作用を受け、完全に固結した岩石であった。我々はこの岩石から従来の断層掘削調査とは異なる知見の取得に期待ができると着目し、その採掘計画を実施すべく、2015 年に ICDP の支援を取り付けることに成功した。しかし、ICDP は掘削費用しか支援できないため、計画立案を主導した日本の研究者チームを重要な局面で南アの掘削現場や回収試料の分析現場に派遣させる予算の支援を得る必要があった。また、先行していた、インドでのダム貯水誘発地震発生地帯の掘削調査計画の知見と経験の共有を受けるべく、インドの研究者を参加研究者に加え、本研究を遂行した。

#### 【9. 成果・今後の抱負等】

我々は、孔がつぶれにくい向きに掘削するために、地下 2.9 km に理想的な場所を見つけることができた(図；写真左上)。2017 年 6 月から、3 本の孔の掘削に成功し、M5.5 地震の余震発生帯の上縁部とその付近から、総延長 1.6 km の円柱試料(写真右下)を回収し、孔内の物性情報を得ること(孔内物理検層)ができた。金鉱脈探査のための 3D 反射法探査データと突き合わせ、金鉱山の地下 2~3 km の坑道や採掘現場で実地調査・記録された地質データと比較することもできた。円柱試料から非破壊で岩盤応力を多数測定できる新しい技術によって、応力の空間変化を詳細に把握することもできた。孔内物理検層や、高知コアセンターでの非破壊分析、鉱物・化学分析・摩擦実験の結果も得られ、それらを総合的に解釈した。その結果、M5.5 の地震発生場は、マントル起源のマグマが薄い板状に貫入し、非天水起源の水によって変質し弱くなった構造であることや、これらの影響によって応力が不均質に分布し、余震の空間分布を規定している可能性が明らかになった。水は、地表付近や他の大深度金鉱山のものと同成分が大きく異なり、非常に古く、溶存有機物は非生物起源のものであった。地球誕生初期でも地下大深度で微生物が涵養できた証拠かも知れない。

Post-drilling workshop の開催予算を ICDP と立命館大学などに申請している。成果を取りまとめ世界に発信し、更に推進させるべき計画を練りたい。



図：M5.5 地震の余震発生帯上縁部を地下 2.9 km から掘削調査。写真左上：掘削マシン，写真右上：掘削回収した総延長 1.6 km の円柱試料の一部，写真下：研究チーム(前列中央が代表者)。