

京都大学	博士（工学）	氏名	杉本 達洋
論文題目	<p>Anelastic Strain Recovery Method for In-situ Stress Measurements: A novel analysis procedure based on Bayesian statistical modeling and application to active fault drilling (非弾性ひずみ回復測定法による原位置応力測定の高度化研究：ベイズ統計モデリングに基づく新規解析手法の構築と活断層掘削への適用)</p>		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>資源工学や構造地質学などの地球工学と地球科学の諸分野において、地殻内の原位置応力は重要なパラメータの一つとなる。種々の地殻応力測定手法が提案されているが、その中で掘削コア試料を用いた方法（コア法と略す）は、低コストと測定の簡便さの面で他の方法より優れており、その適用実績が蓄積されている。コア法の一つである非弾性ひずみ回復法（Anelastic Strain Recovery Method, ASR 法と略す）は大深度掘削に適用可能な三次元応力測定法であり、近年の陸上掘削および海洋掘削において様々な成果を挙げている。一方、同手法のほとんどの適用例は堆積岩に対してであり、適用可能な岩種の範囲については未だ十分に検討されていない。また、既存 ASR 法の解析手法では非弾性ひずみのコンプライアンスに関する仮定を置く必要があり、その妥当性も十分に検証されていない。そこで、本研究では ASR 法の持つこれら課題の解決を研究の主目的とした。本論文は 8 章からなり、その概要は以下の通りである。</p> <p>第 1 章では、序論として研究目的および研究背景について述べた。</p> <p>第 2 章では、多岐に渡る既存の地殻応力測定手法のレビューを行い、ASR 法の位置づけや他の手法と比べての長所・短所を取りまとめた。</p> <p>第 3 章では、ASR 法の基本原理、仮説、理論式を概述したうえで、先行研究で用いられてきた既存の解析手法を詳述し、問題点の抽出を行った。一般に、掘削直後の岩石コア試料には地殻応力の解放により、瞬時に完了する弾性ひずみ回復の後に、数日から数週間かけて非弾性ひずみ回復が徐々に進行する。ASR 法は、この非弾性ひずみはコア試料を地上に回収した後に測定することが可能であることを利用して、解放前の応力状態を測定するものである。同 ASR 法は、比較的明確な理論的根拠を持ち、原位置測定手法などの実施困難な大深度への適用性が高い三次元応力測定手法であり、複雑な応力場を持つフィールドでも適切に応力測定が実施できることが期待されている。</p> <p>第 4 章では、ASR 法などのコア法を用いる際にコア試料の原位置方位情報を決定するコアの定方位化について述べた。岩石残留磁化、特に自然残留磁化を用いた定方位化は、これまでも様々な研究で用いられ多くの成果が得られているが、その定方位化においては、結果に対する客観的な品質評価が行えないという問題点が挙げられる。この解決策として、本研究では一つのコア試料から切り出した 8 個の小試料の残留磁化測定を行うことで、定方位化の信頼性評価を行う方法を提案した。本章では、岩石残留磁化を用いた定方位化の原理を説明し、小試料の成形方法について詳述したのち、国際深海科学掘削計画（IODP）の第 370 次研究航海により、高知県室戸岬沖で採取された半遠洋性堆積物掘削コア試料に対して本手法を適用した結果を報告した。また、コアの定方位化に及ぼす、掘削による二次的残留磁化の影響を検討した上で、データ品質評価の手法を提案した。</p> <p>第 5 章では、ASR 法に対する新規解析手法の提案を行った。当該応力測定法の問題点の一つは、測定結果の不確かさの評価（Uncertainty Quantification）が難しいことである。ベイズ統計モデリングでは、ASR 測定以外の情報を活用することで、測定デー</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	杉本 達洋
<p>タが少ない場合でも不確かさの評価が可能となる。このため、一般に測定データが少ない傾向にある地球惑星科学や岩石力学などの分野でもその有効性が確認されている。しかし、応力測定に対して不確かさ評価の適用を検討した先行研究は見当たらない。そこで、ベイズ統計モデリングによる不確かさの評価が可能となる ASR 法の解析手法を新規提案して、その構築を行った。新規構築した解析手法の妥当性の検証を、擬似的に作成した ASR データを用いて行った結果、応力テンソルの対角成分は非対角成分に比べ不確かさが大きくなることが分かった。また、感度分析を用いて、推定パラメータごとに不確かさが異なる原因を考察した。</p> <p>第 6 章では、この新規解析手法を実データへ適用した。用いた ASR データは兵庫県南部地震の震源断層である野島断層近傍で採取された 8 試料から実測されたものである。解は収束し、各パラメータの不確かさも推定された。不確かさは、擬似データ解析で予測されたように、応力の対角成分の推定誤差が非対角成分より大きく推定された。また、ASR コア試料が採取された同一掘削孔においてボアホールブレイクアウト解析が、隣接掘削孔において水圧破砕法による応力測定がそれぞれ実施されていた。それらの結果を本研究で得られた最大水平主応力方向の結果と比較すると、方位に関しては 3 手法全てでおおむね同様な傾向が得られた。また、水圧破砕法で得られた最小水平主応力値と本研究で得られた結果においても調和的であることが判明した。よって、この新規解析手法は実データへの適用が可能であることが示された。</p> <p>第 7 章では、ASR 法の火山地域産出の岩石への適用を兼ねて、2016 年熊本地震の主震源断層である布田川断層近傍において、火砕流堆積物や安山岩を含む岩石に対する応力測定を行った。震源断層の破壊メカニズムやすべり挙動を考える上で、その震源域の応力状態は非常に重要なパラメータとなる。本研究では、布田川断層を貫通した掘削孔の深部から採取した 6 試料を用いて地震後の原位置応力測定に成功した。その結果、布田川断層近傍では地震後における鉛直応力が最大主応力となる正断層型の応力状態が支配的であることが明らかとなった。これは、地震時の横ずれ型の断層運動により、地震発生前は水平面内にあったと推察される最大主応力の値が著しく低下したことを示唆する。地震後の応力状態が正断層型であるという結果は、水圧破砕法や発震機構解を用いて求められた当該地域における応力測定の結果と調和的であった。さらに、最小水平主応力の方向は布田川断層の走向とほぼ直交しており、断層面上に横ずれすべりを引き起こす水平せん断応力が小さいことが判明した。</p> <p>最後に、第 8 章では、結論として本研究で実施した内容や得られた知見を取りまとめた。初の提案となる本研究のアプローチにより、ASR 法の解析にベイズ統計モデリングを導入し、応力測定の精度を定量的に評価することが可能となり、測定結果の信頼性向上に大きく寄与することができた。また、砂岩・泥岩などの堆積岩に限らず、より広い範囲の岩種に ASR 法が適用可能であることを示した。本研究で得られた成果は地下資源などに関する地球工学と地球科学の広い分野の研究および実務に寄与するものと期待される。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

地下深部に賦存する石油等のエネルギー資源を安全で効率よく開発するために、あるいは、地震断層の破壊やすべり挙動を理解するために、地殻応力状態を知ることが不可欠である。しかし、地殻応力は地殻活動、地質構造、地形、岩石物性などの多くの要素に左右され、顕著な時空間変化を有すると共に、正確な測定が難しく測定精度の評価も困難という問題がある。地殻応力の測定手法として、様々なものが開発されてきた。それぞれに長所と短所があるものの、完璧な手法が未だに存在しないのが現状である。その中で、岩石の掘削コア試料を用いた非弾性ひずみ回復法 (Anelastic Strain Recovery Method, ASR 法) は確かな測定原理に基づき、簡便かつ安価という特徴を有し、近年、成功した適用例が積み重ねられ、有望視されるようになってきた。しかし、この ASR 法においても、結果の信頼性評価が困難であるのみならず、仮定に基づいて測定結果の解析をしなければならないという問題があった。本研究では、この有望な ASR 法の更なる高度化を目指し、実験と理論の両面から上記の問題の解決に取り組んだ。主な成果は次の 3 点に要約される。

- (1) 岩石の掘削コア試料から測定された非弾性ひずみ回復である ASR の時系列データに、これまで当該分野に全くなかったアイデアとして、ベイズ統計モデルを導入した応力解析手法を考案した。擬似データを用いた検証実験などを通して解析コードを開発し、当該解析手法の確立に成功した。この新解析手法により、非弾性ひずみ回復コンプライアンスの仮定が不要となると共に、応力解析結果の不確かさの評価も可能となった。淡路島で行われた野島断層掘削の ASR 測定データにこの手法を適用し、その有効性を確認した。
- (2) ASR 法の火山地域への適用を兼ねて、阿蘇カルデラ近くで発生した 2016 年熊本地震の主震源断層である布田川断層掘削のコア試料を用い、断層近傍の応力測定を実施した。その結果、地震後において鉛直応力が最大主応力となる正断層型の応力状態が支配的であるという結果が得られた。これは、地震時の横ずれ型の断層運動により、地震前は水平面内にあったと推察される最大主応力が著しく低下したことを示唆する。
- (3) コア法を用いて主応力の方向を決定するためには、コア試料の原位置における方位情報が必須となる。本研究では、岩石の自然残留磁化を用いた定方位化に注目し、推定結果に対する客観的な品質評価が行える測定のプロトコルを開発した。海洋掘削で得られた堆積軟岩試料に適用し、当該プロトコルの有用性を実証した。

以上のように、本研究では斬新な解析手法を考案して ASR 地殻応力計測法の高度化を行った。この新手法は従来法と比べ、その有効性と優位性が実証され、地球工学と地球科学の諸分野に対する貢献が期待でき、当該分野に対し、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 3 年 2 月 17 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。