

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06221

研究課題名(和文) 岩石強度の時間変化メカニズムに対する水の影響の解明

研究課題名(英文) Effect of water on the mechanism of time-dependent rock strength

研究代表者

増田 幸治 (MASUDA, KOJI)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・副研究部門長

研究者番号：30344104

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：岩石強度変化メカニズムに対する水の影響を解明するため、高温高圧下及び種々の水蒸気圧下や真空雰囲気環境下で、岩石の摩擦強度を測定した。長期的な岩石強度変化プロセスにおいて、水が関与する化学作用(応力腐食作用)がプロセスの本質を担っているという作業仮説を実験的に検証した。岩石強度の時間変化(岩石強度弱化やヒーリング過程)メカニズムに対する水の影響に関しては、摩擦面の真の接触部分(アスペリティ)における、微小破壊がその本質で、強度の時間変化メカニズムとしては、ゆっくり進行する応力腐食反応が重要であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The strengths of crustal faults are lower than those determined from laboratory measurements. Because long-term changes of rock strength cannot be directly monitored, so an explanation for fault weakening remains an unsolved problem. We showed laboratory evidence that supports the concept that long-term weakening of the rock strength is caused by microfracturing at asperity contacts, which is a result of crack growth at subcritical stress levels. We conducted a series of rock tests under the high-temperature and high-pressure conditions to accelerate reaction processes so that they were observable at laboratory time-scales. Our results suggest that long-term weakening of rock strength is related to chemical reactions that take place in the presence of water. The fluids underground has an important influence on time-dependent rock strength.

研究分野：地盤工学

キーワード：岩石力学 岩石強度 摩擦強度 応力腐食 アスペリティ

1. 研究開始当初の背景

本研究課題の申請時における背景・動機は以下のとおり。

岩石の強度は、歪速度によって変化し、また岩石のクリープ破壊現象にみられるように、時間に依存する。地震学の分野では、断層の摩擦強度は、実験室内で測定されている岩石の摩擦強度に比べて弱いことが地質学的・地球物理学的観測より知られている。これらは岩石の物性、特に破壊強度や摩擦強度が時間に依存することを示している、このような岩石の時間依存の性質を理解することは、岩盤の長期安定性評価や地震発生メカニズム解明にとって重要である。

2. 研究の目的

本研究課題の申請時における当初の研究目的は以下のとおり。

岩石強度変化メカニズムに対する水の影響を解明するため、高温高压下及び種々の水蒸気圧下や真空雰囲気環境下で、岩石の摩擦強度を測定する。長期的な岩石強度変化プロセスにおいて、水が関与する化学作用（応力腐食作用）がプロセスの本質を担っているという作業仮説を実験的に検証し、岩石強度の長期的変化メカニズムを解明する。

具体的な目的は下記の2点。

(1) 自然界でゆっくり進行する現象を観察可能な速度で再現するために、実際の地下深部環境よりも高温の状態での岩石の摩擦強度を測定し、水が関与する強度弱化メカニズムを明らかにする。

(2) 種々の水蒸気圧下及び真空環境下での摩擦強度測定実験を行い、岩石強度弱化やヒーリング過程における水の関与メカニズムを解明する。

3. 研究の方法

(1) 自然界でゆっくり進行する現象を観察可能な速度で再現するために、高压でかつ実際の深部環境よりも高温の状態での岩石の摩擦強度に対する水の影響を測定する。

(2) 種々の水蒸気圧下及び真空環境下での摩擦強度測定を行い、水の関与を定量的に検証する。

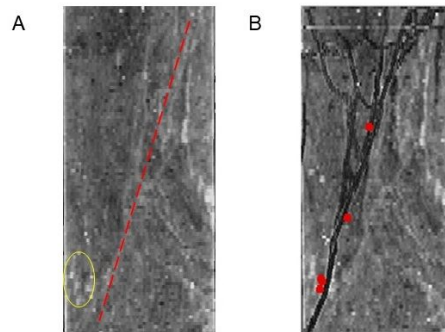
本課題(3年計画)は初年度途中の2015年10月21日に追加採択された。初年度終盤より開始したため、申請時当初の研究計画にあった設備の設計製作やデータ測定のための実験は、準備期間が十分確保できなかったため、研究計画の3年目で成果をとりまとめるために、既存の設備を使用し、既存の未解析データも使用することで当初の目的であった検討を実施した。さらに既存のデータの再検討も含めることによって、実験データの不足を補い、岩石物性の時間依存性に関するメカニズムの考察や研究を進める上で行った

技術開発についてもとりまとめた。

4. 研究成果

(1) 岩石の摩擦強度に対する水の影響を明らかにするために、封圧下での圧縮実験に関する既存のデータについて検討した。特に、あらかじめ破断面の形成位置が予想できる岩石試料を使うことで、形成された断層面の摩擦を測定する際、条件が異なった複数回の実験の結果を比較検討できるように工夫した実験のデータを使用した。その結果、有効圧が同じでも、水のある場合とない場合では摩擦強度とその温度依存性が異なることを確認した。これは物理的效果とは別の、水が関与する化学反応による効果(化学的效果)が働いていることを示唆するものである。さらに水がある状態では温度が上昇するにしたがって、断層面の摩擦強度が低下することがわかった。断層面の接触部分での微小破壊が化学反応に関係しているとする、その反応速度は温度に依存するので、今回の結果はプロセスの時間スケールを短縮した観察したことに相当し、断層面の強度変化において化学反応が関与するプロセスが重要であるということを示唆している。

(2) 破断面の強度回復に関する実験・データ解析・考察を行った。過去に活動したとされる既存断層面を含む岩石試料を使った、封圧下での圧縮変形破壊実験を行った。新たに形成される断層面は既存面の位置に依存するが、その開始点を詳しく観察すると、既存面とは異なった場所から破壊が発生していることを見出した。これは、既存の断層面の強度が、破壊前の Intact な状態とほぼ同じレベルまで回復していることを示唆しており、このような破壊回復を繰り返すことが地表で見られる、幅をもった断層帯が形成されるメカニズムであると考えられる。この成果は、査読誌(国際誌)に公表した。



岩石試料の CT 画像。a. 実験前の試料。赤い破線は既存の断層面、黄色の部分に不均質な構造がある。b. 実験後の試料。初期の AE 震源(赤○)と最終的には破断面の関係。

(Masuda, 2015)

(3) 岩石強度の時間変化メカニズムに対する水の影響について、水が関与する応力腐食作用が岩石物性の時間変化の本質であるという作業仮説を検証するためのモデル構築を継続しつつ、その応用や課題遂行の過程で開発した実験技術についてとりまとめた。

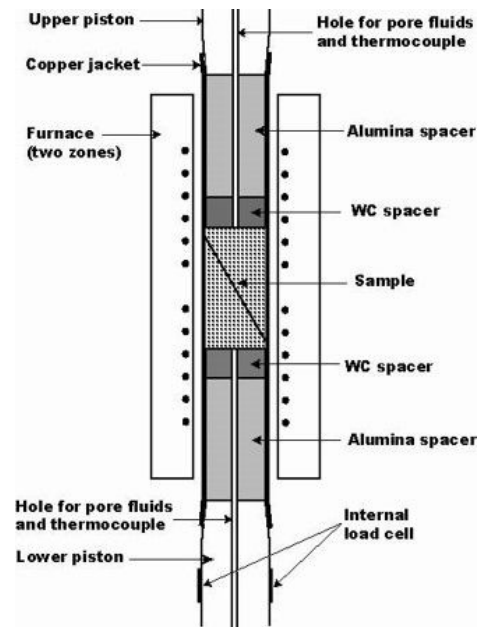
応用例としては、誘発地震（注水等の人為的行為によって発生する地震）のリスク低減は重要課題である。現在開発されている地熱貯留層は比較的低温・低圧領域であるため脆性的な力学挙動を示し、誘発地震を引き起こすが、超臨界地熱貯留層では高温・高圧環境下のために、岩盤が延性的な力学挙動を示し、誘発地震の問題はないと考えられてきた。しかし、地下10km程度の地殻深部においても、微小地震が発生していることが観測されている。実際の開発前に、超臨界状態にある岩体内で発生する地震現象を理解しておくためには、室内実験による検証が有用な手段となる。地殻深部環境において、間隙流体によって誘発された地震のメカニズムや観測可能性を検証することが重要課題のひとつである。この成果は、地球惑星科学連合大会での招待講演で発表した。

(4) 課題遂行の過程で開発・使用した実験技術に関して、高圧ガスを使った高温高圧下での岩石変形実験技術を独自開発した。地下深部で起こっている現象を加速化して検証できる技術の開発についてまとめた。自然界で進行する現象の時間スケールは長く、人間の時間スケールでは観測事実が得られない。そこで、プロセスを再現する場合の壁となる環境条件（温度・圧力）の違いに着目し、熱力学的考察を基に、プロセスをスピードアップするための高温実験技術を開発した。水の状態を制御して実際の地下環境よりさらに高温状態を実現（温度と時間の trade-off）した。この開発過程について、産業技術総合研究所が発行する論文誌「シンセシオロジー」(日本語および英語版)に公表した。



ガス圧式高温高圧実験装置。地下深部で起こっている現象を加速化して検証できる。
(産業技術総合研究所 地質調査総合センター)

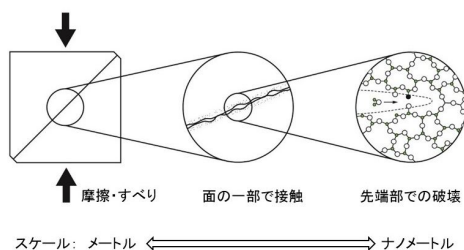
(5) 岩石強度の時間変化メカニズムに対する水の影響について、水の存在が2種類の地殻岩石構成鉱物の摩擦過程に与える影響の評価を行った。地震発生領域の深度やその範囲は、地殻構成物質の摩擦強度で説明されている。地震の発生しない安定領域と地震が発生する不安定領域の境界深度は、温度や水の存在によって影響される物質の摩擦強度に支配されている。例えば、構成鉱物として石英が含まれると摩擦特性が安定化する効果が実験によって観測されている。そこで、それぞれの構成鉱物の摩擦特性の影響や地震発生に及ぼすメカニズムを考察するために、地殻主要構成鉱物である石英と長石の摩擦特性を高温高圧下で測定した。細粒の石英ガウジおよび長石ガウジを試料として使用し、Dry および Wet 環境下で、速度ステップ試験を行った。温度範囲は室温～600 とした。その結果、水が存在する環境下では、石英・長石ともに地震すべりが発生する不安定領域に相当する温度範囲が存在するが、石英の方がその温度領域が狭いことがわかった。これらの結果は、個々の構成鉱物の摩擦特性および水の存在が、地震発生領域を決める重要な役割をはたしていることを示している。



摩擦強度の測定。Saw cut した円筒形のセラミックスブロックに試料を挟んで、高温高圧下で摩擦強度を測定する。装置外部から試料に直接水を注入できるようになっている。
(産業技術総合研究所 地質調査総合センター)

(6) 本研究課題の結果や既存データを総合すると、岩石強度の時間変化（岩石強度弱体化やヒーリング過程）メカニズムに対する水の影響に関しては、摩擦面の真の接触部分（アスペリティ）における、微小破壊がその本質で、強度の時間変化にメカニズムとしては、

ゆっくり進行する応力腐食反応であることを示唆している。モデルとして応力腐食メカニズムが有効であることが明らかになった。



メートル～センチメートルの空間スケールで見ると、摩擦は面のずれで理解できる。しかし、ミリメートル以下の小さな空間スケールで見ると、摩擦面は完全な平面で接しているのではなく、その一部で接触している。接触している突起部ではミクロな破壊が起こっている。この接触部での破壊現象こそが摩擦現象の本質であるといえる。ナノスケールで見ると、接触部先端でのミクロな破壊は水が関係する化学反応によってゆっくり進展している。
(増田, 2016)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

増田幸治, 高温高压岩石変形実験技術の開発: 千年スケールで進行する地質現象の加速化と検証, *Synthesiology* (シンセシオロジー), 査読有, Vol. 9, No. 2, 97-107, 2016.

Koji Masuda, Development of rock deformation techniques under high-pressure and high-temperature conditions, Evaluation of long-term geological processes by a compressed timescale process model [Translation from *Synthesiology*, Vol.9 No.2, pp.97-107 (2016)], *Synthesiology* English edition, 査読無, Vol. 9, No. 2, 99-111, 2016.

増田幸治, 高压下での物性, 海洋底科学の基礎, 査読無, p276-278, 日本地質学会「海洋底科学の基礎」編集委員会編, 389p., 共立出版, 2016.

Koji Masuda, Laboratory evidence of strength recovery of a healed fault: Implications for a mechanism responsible for creating wide fault zones, *Earth, Planets and Space*, 査読

有, 67:204,
DOI: 10.1186/s40623-015-0377-x, 2015.

[学会発表](計4件)

増田幸治, 地殻構成鉱物の摩擦特性と地震発生領域の分布範囲, 日本地震学会2017年秋季大会, 2017.

Koji Masuda, Effect of frictional properties of minerals in the crust on the depth of seismic faulting, IAG- IASPEI, International Association of Geodesy (IAG) and International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI), 2017.

増田幸治, 超臨界地熱貯留層における誘発地震発生現象理解のための実験的アプローチ(招待講演), 日本地球惑星科学連合2016年大会, 2016.

Koji Masuda, Laboratory evidence of strength recovery of healed faults, American Geophysical Union 2015 Fall Meeting, 2015.

[その他]

ホームページ等

<https://staff.aist.go.jp/koji.masuda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 幸治 (MASUDA Koji)

産業技術総合研究所・活断層・火山研究部門・副研究部門長

研究者番号: 30344104