

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249139

研究課題名(和文)熱・水・応力・化学連成場の岩盤透水・力学特性の解明と連成数値シミュレータの開発

研究課題名(英文)Elucidation of hydraulic and mechanical properties under THMC coupled conditions and development of THMC coupled simulator

研究代表者

安原 英明 (YASUHARA, HIDEAKI)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：70432797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、拘束圧・温度・化学条件を制御した岩石不連続面・実部の透水・力学試験を実施し、応力・温度・化学条件に依存する鉱物溶解・沈殿現象による岩石の透水・力学特性の経時変化を定量的に評価した。次に、得られる実験結果を再現できる現象論的解析モデルを構築すると共にモデルの有用性を検討した。最終的に、構築される解析モデルを数値シミュレータに組み込み、熱・水・応力・化学連成シミュレータを開発し、高レベル放射性廃棄物処分施設ニアフィールドの長期性能評価への適用性を検討した。

研究成果の概要(英文)：In this study, flow-through experiments and mechanical experiments using rock samples under prescribed pressure, temperature, and pH conditions were conducted to examine the evolution of the physical properties of rocks. Then, a conceptual models were developed to replicate the experimental measurements. Finally, a coupled THMC numerical model was developed to examine the long-term change in permeability of the porous sedimentary rocks that are assumed to be composed purely of quartz. Subsequently, by simulating the burial of high-level radioactive wastes in the deep subsurface, namely, by applying the simulated confining pressure and temperature conditions, the long-term evolution of the rock permeability was predicted.

研究分野：岩盤力学

キーワード：岩石不連続面 透水特性 THMC連成シミュレータ

## 1. 研究開始当初の背景

高レベル放射性廃棄物等のエネルギー生成後の副産物を深地層下の岩盤内に隔離し、長期に渡りその性能を保証するためには、対象となる岩盤の力学・水理学・物質輸送特性を詳細に把握する必要がある。例えば、高レベル放射性廃棄物処分施設ニアフィールドの長期性能評価を行う場合、処分施設は深部環境に建設されるため応力レベルは高く、また廃棄体からの発熱により周辺岩盤の温度は上昇する。その結果、岩石構成鉱物の溶解・沈殿現象等の地化学作用が卓越し、岩盤の力学・水理学特性に大きな影響を及ぼすことが予想される。しかしながら、応力・温度に依存する地化学作用を包含する岩石-水の相互作用現象に起因する岩盤の力学・水理学特性の経時評価については、これまで十分な成果が挙がっていないのが現状である。実験的な検討として、拘束圧を作用させない条件下で、熱水や塩水に岩石材料を浸潤させ、力学（変形性・強度）および水理学（透水挙動）特性の経時変化を長期にわたり観察・考察した研究（例えば、Suzuki et al., *Engineering Geology*, 1995; Backstrom et al., *GeoProc2006*, 2006）があるが、それらは経時変化のメカニズムを物理的なモデルで定量化しておらず、想定される物理現象を定性的に考察しているに過ぎない。さらに、地質・地熱の研究分野では、拘束圧や熱水の存在する深部地質環境下における岩石構成鉱物（特に、石英）の溶解・沈殿現象を定量評価し、水理学特性（間隙率の変化）に及ぼす影響を検討した事例（例えば、Dewers and Hajash, *JGR*, 1995; Elias and Hajash, *geology*, 1992）があるが、これらの多くは、様々な境界条件下での室内実験結果から経験則を導出しているに過ぎない。また、理論的な検討としては、温度、pH、イオン強度等に依存する種々の鉱物の溶解・沈殿に起因する透水特性変化を時系列で評価するモデルが構築されており、FRACHEM（Durst, 2002）や TOUREACT（Xu and Pruess, *Am. J. Sci*, 2001）等の THC（温度・水・化学）連成数値シミュレータも開発され、実問題に適用されている。しかしながら、これらの解析モデルや数値シミュレータは、岩石実部及び不連続面空隙内の溶解・沈殿現象についてしか考慮しておらず、圧力溶解現象（例えば、Raj, *JGR*, 1982）等の粒子接触部での化学現象を考慮していない（作用する応力が増加すれば、鉱物溶解は加速することが知られているが、現在の汎用シミュレータではそのような影響を表現できない）。また、このような地化学作用に起因する岩盤の変形強度特性および透水特性の変化を“精度良く”評価が可能なモデルが存在していないのが現状である。

地化学現象による岩盤の力学・水理学特性の変化を時系列で記述する精度の高いモデ

ルが存在しないのは、実験室レベルでの評価データが圧倒的に不足していることに起因している。精度の高い THMC（温度・水・応力・化学）連成シミュレータを開発するため、延いては高レベル放射性廃棄物処分施設ニアフィールドの長期性能評価を行うためには、温度・応力に依存する鉱物溶解・沈殿現象等の地化学作用に起因する岩盤の力学・水理学特性の経時変化を実験的に観察し、データを収集することが不可避である。その結果として、背後に存在するメカニズムを解明することができ、精度の高いモデルを構築することに繋がると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、熱・水・応力・化学連成作用による変形強度特性および透水特性の経時変化に起因するメカニズムを解明し、様々な境界条件下で透水特性を長期予測できる連成モデルを構築することを目標とした。申請者はこれまで、拘束圧（5～10 MPa）及び温度（20～90 °C）を制御した透水実験を実施し、結晶質岩石単一不連続面の透水特性の変化を評価してきた。さらに、温度・応力に依存する鉱物の溶解・沈殿機構を記述できる現象論的モデルを構築し、実験結果の再現解析を行っている（安原他, *土論 C*, 2009; Yasuhara et al., *Applied Geochemistry*, 2011）。本申請では、結晶質岩（花崗岩）および堆積岩（珪質泥岩）に着目し、拘束圧・温度・化学条件を制御した透水・力学試験を実施し、花崗岩不連続面および泥岩実部・不連続面の透水性および変形強度特性の経時変化を観察するとともに、現解析モデル（Yasuhara, H. et al., *Applied Geochemistry*, 2011）の拡張を行う。透水・変形強度特性の変化は、拘束圧・温度による作用応力の変化に起因するものと、地化学作用（圧力溶解、沈殿現象等）を介した岩石構造骨格の変性に起因するものに大別できる。前者は、短期間で収束すると考えられるが、後者はより長期間の時間を必要とすると予想される。そこで、様々な境界条件（拘束圧：0～20 MPa、温度：20～150 °C、化学条件：pH 7～13、試験時間：数時間～数ヶ月）で透水・力学試験をし、それぞれの影響を定量的に評価する。さらに、試験前後の岩石供試体を用いて、マイクロフォーカス X 線 CT および走査型電子顕微鏡・エネルギー分散型 X 線分析装置（SEM-EDX）により微視的構造の変化および鉱物組成の変化を観察する。現在の解析モデルは、構造（幾何学形状）の微視的变化を表現することが可能で、かつ鉱物組成の変化を再現することが可能であるので、観察結果との比較検証を行うことができる。その結果として、現解析モデルの改良・拡張が行える。

拘束圧・温度による化学作用を介した、岩石と水との相互作用（透水・力学特性の経時

変化)を実験室レベルで再現できるモデルを構築した後は、実地盤の現象を予測評価するためのアップスケールが必要である。そこで本研究では、熱・水・応力連成解析を行うことのできる連成数値シミュレータを適用する。本研究により構築される解析モデルを構成則化し、熱・水・応力連成シミュレータと連成させれば、熱・水・応力・化学相互作用を一貫して評価できる連成シミュレータを構築することが可能である。

### 3. 研究の方法

本研究では、(1)拘束圧・温度・化学条件を制御した岩石不連続面・実部の透水・力学試験を実施し、応力・温度・化学条件に依存する鉱物溶解・沈殿現象による岩石の透水・力学特性の経時変化を定量的に評価する。次に、得られる実験結果を再現できる(2)現象論的解析モデルを構築すると共にモデルの有用性を検討する。最終的に、構築される解析モデルを数値シミュレータに組み込み、(3)熱・水・応力・化学連成シミュレータを開発し、種々の工学的課題(例えば、高レベル放射性廃棄物処分施設ニアフィールドの長期性能評価)への適用性を検討する。

<研究スケジュール概略>

・H26 年度：透水・力学試験装置改良(予備実験)、連成シミュレータのプラットフォーム検討

・H27 年度：本実験開始、解析モデルの評価・拡張および連成シミュレータへの実装検証

・H28 年度：実験継続、解析モデルの拡張および連成シミュレータ開発

・H29 年度：実験継続、連成シミュレータ開発および有用性検討

### 4. 研究成果

#### (1)拘束圧・温度・化学条件を制御した岩石不連続面・実部の透水・力学試験

本研究では、単一不連続面を有する花崗岩を対象とし、温度・拘束圧を制御した透水試験を実施し、透過率の経時変化を観察した。特に本研究では、透過率増加の原因とされる不連続面の自由表面における溶解を抑制するために、透過水として鉱物飽和水を用いた循環透水試験を行った。

また、透過率の変化に影響を及ぼす鉱物の溶解・沈殿等の化学作用を、ICP 発光分光分析で評価した。さらに、透水試験前後の供試体を用いて、走査型電子顕微鏡観察を行うことで二次鉱物の有無を確認した。そして、透水試験前後の供試体に対して不連続面形状測定を行うことで、透水試験の影響による不連続面形状変化を精査した。最後に、既往研究と本研究で実施した実験結果について考察を行った。以下に本研究で得られた知見と今後の展望について述べる。

超純水を用いた透水試験(E-15)では、約100時間後には1オーダー程度透過率が減少した。温度を上昇させると一時的に透過率が増加したが、その後は単調に減少した。また、鉱物飽和水を用いた循環透水試験(E-16)では、実験開始直後に大幅な減少を確認したものの、その後は緩やかに単調減少した。既往研究の結果と比較すると、E-15については透過率の変化率は概ね一致していたことから、再現性を確認できたと考えられる。また、E-16は同じ境界条件の試験よりも透過率が減少していることが確認された。これは、透過水のSiO<sub>2</sub>濃度を過飽和としたことにより、供試体不連続面における自由表面溶解が抑制され、さらに二次鉱物や沈殿作用が生じたためであると考えられる。本来岩は高温、高pHである程透過率が減少するといわれているが、室温、高pH条件では透過率がほぼ減少していない。このメカニズムの解明は今後の課題である。

物質濃度評価結果により、E-15ではSi、Al、Ca、Naの濃度が比較的高く、温度上昇によって濃度も上昇する傾向にあることが確認された。

微視構造観察により、二次鉱物の有無を観察した。E-15、E-16ともに、二次鉱物の生成や沈殿が透水試験前と比較して多く見られた。しかし、本研究で観察された鉱物に関しては、二次鉱物の種類を同定することはできず、今後の課題である。

次に、岩石不連続面の变形特性・透水特性評価を目的として、傾斜平滑不連続面を有する泥岩90℃条件(H-S01)、泥岩25℃条件(H-S02)、泥岩90℃条件(H-S05)の供試体を用いて、持続載荷せん断透水試験を実施した。温度条件は、高レベル放射性廃棄物を地層処分する際の廃棄体からの発熱温度を想定した90℃と、室温条件25℃の2種類を設定し、拘束圧(側圧および軸圧)は、地層処分地の応力状態を想定した3.0MPaに設定した。泥岩90℃条件(H-S01)、泥岩25℃条件(H-S02)の実験結果の比較により、温度の違いによる变形特性の経時変化を精査した。持続載荷せん断透水試験の結果より、拘束圧保持および透水により泥岩不連続面の剛性の増加を確認した。また、温度条件の違いでは、泥岩90℃条件(H-S01)と泥岩25℃条件(H-S02)の比較により、泥岩90℃条件(H-S01)では、拘束圧保持30日目で剛性の増加を確認し、泥岩25℃条件(H-S02)では、拘束圧保持60日目で剛性の増加を確認した。これより、温度が高い90℃の方が剛性の増加速度・増加値が大きいことが確認した。また、拘束圧保持30日目で剛性の増加を確認した泥岩90℃条件でのより詳細な剛性の増加時間を知るために、泥岩90℃条件(H-S05)で短期間の拘束圧保持による載荷試験を実施し、拘束圧保持16日

目で剛性の増加を確認した。岩種による違いでは、ペレア砂岩 90 °C 条件 (BS-S05) と泥岩 90 °C 条件 (H-S01) の比較により、泥岩 90 °C 条件 (H-S01) のほうが剛性の増加速度・増加値が大きいことを確認した。この要因としては、ペレア砂岩よりも幌延泥岩が拘束圧保持および透水の影響を受けやすいことが推測される。今後は、持続荷せん断透水試験を様々な条件下でより長期間実施し、岩石不連続面の变形特性・透水特性の実験データを蓄積することにより、剛性回復現象に起因するメカニズムの解明が課題である。

## (2)現象論的解析モデルを構築

本研究では、岩石不連続面の变形特性を再現する剛性回復モデルの構築を行った。本研究で検討する剛性回復モデルでは、本研究で行った長期間のせん断変位固定による岩盤不連続面の強度増加を再現した。まず、既存の THMC 連成解析モデルを用いて、岩石不連続面の变形特性の再現を試みた。解析モデルを用いて本研究で得られた泥岩 25 °C 条件 (H-S02) の透水試験結果の再現解析を行った結果、本透水試験結果泥岩 25 °C 条件 (H-S02) を精度よく再現できることが確認できた。これにより、解析結果で得られる不連続面の接触率経時変化は、本透水試験結果泥岩 25 °C 条件 (H-S02) の岩盤不連続面でのクリープ変形による実接触面積の増加を模擬的に再現していると考えられる。摩擦の凝着説では、摩擦強度は、接触面の実接触面積に、実接触単位面積当たりのせん断強度を乗じたものになる。これにより、不連続面の強度増加は、経時変化とともに実接触面積が増加することが要因と考えられる。そこで、本モデルでは Dieterich が示した対数線形モデルに、解析結果で得られた不連続面接触率の経時変化を組み合わせた剛性回復モデルを構築し、本研究で行った長期間のせん断変位固定による岩盤不連続面の強度増加の再現を試みた。剛性回復モデルにより本研究で実施した泥岩 90 °C 条件 (H-S01) 泥岩 25 °C 条件 (H-S02) の岩石不連続面の变形特性を再現した。その結果、泥岩 25 °C 条件 (H-S02) では、拘束圧保持 30 日目からの強度増加発現を再現できており、0-210 日目まで精度よく経時変化による強度増加を再現できた。泥岩 90 °C 条件 (H-S01) は、拘束圧保持 30 日目以降は精度よく経時変化による強度増加を再現できているが、拘束圧保持 30 日目以前では実験値を過大評価した。これは、剛性回復モデルによる不連続面接触率増加速度が本実験の泥岩 90 °C 条件 (H-S01, H-S05) での不連続面接触率増加速度よりも速いことが考えられる。したがって、高温条件下の不連続面接触率増加速度についての、より詳細な考慮が必要となると思われる。

## (3)熱・水・応力・化学連成シミュレータの

## 開発

本研究では、汎用性と再現性を兼ね備えた THMC 連成解析モデルの開発を目的とし、THMC 連成解析モデルの構築、構築したモデルの妥当性・有用性検証、実問題への適用という 3 つのステップで研究を実施した。本研究で得られた知見を以下に示す。

まず、筆者が過去に構築した連成解析モデルに、種々の改良を施し、モデルの高度化を行った。具体的には、既往モデルでは考慮されていなかった水-応力、熱-応力間の連成現象を記述可能な構成則を新たに導入した。その結果、THMC 連成相互作用の精緻化を行え、また、複数の岩石構成鉱物に関する地化学反応を考慮することで、より柔軟に実環境条件に対応可能な連成解析モデルに改善することができた。続いて、岩石内不連続面で生じる圧力溶解現象を新たにモデルに実装することで、地化学現象が岩盤水理学特性に与える影響をより詳細に評価可能なモデルへの拡張に成功した。

次に、構築した THMC 連成解析モデルを用いて、岩石実部・不連続面における鉱物溶解現象の影響を評価した既往実験の再現解析を行い、構築した解析モデルの妥当性を検証した。その結果、空隙率変化、物質濃度変化、共に精度よく実験値を再現することができた。特に、空隙率変化に関しては、いずれの拘束圧条件においても、高い精度で空隙率の減少挙動を再現した。このことから、本モデルは鉱物溶解現象に伴う岩石実部における水理学特性変化を高い精度で予測可能であることが確認できた。

さらに、構築した連成解析モデルに北海道幌延地域の地下環境条件を実装し、高レベル放射性廃棄物地層処分における廃棄体周辺岩盤の長期透水特性変化を評価した。その結果、不連続面における圧力溶解の影響により、EDZ (空洞掘削損傷領域) において、廃棄体設置後 1 年以内に初期値から 2 オーダー程度透水性が低下した後、定常値に収束するという結果が得られた。また、不連続面の透水性が定常値に一旦収束した後、岩石実部における圧力溶解によって再び岩盤の透水性が減少していく挙動が観察された。

本研究で開発した THMC 連成解析モデルは、不連続面における地化学現象 (鉱物溶解・沈殿現象) を考慮し、不連続性岩盤の水理学特性変化を評価可能なモデルとなっている。しかし、不連続面モデルには dual porosity モデルを適用しているため、計算領域内で仮想的に不連続面を表現している状況である。したがって、不連続面における地化学現象及び水理学特性変化をより精緻に評価するためには、亀裂ネットワークモデルのように解析領域内に陽な形式で不連続面を表現する必要があると思われる。今後は、上記の形式を取り入れることで、空洞掘削等による岩盤中の力学的ダメージ (亀裂発生・進展等) が他の連成作用に与える影響を評価可能な解析

モデルに改良する予定である。また、放射性廃棄物地層処分問題だけでなく、CO<sub>2</sub>地中貯留や地熱 EGS 発電、シェールガス・オイル回収、メタンハイドレート回収などの様々な THMC 連成問題に適用可能な解析モデルへの拡張を目指す。

#### 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 5 件)

Mamoru Kikumoto, Vu Pham Quang Nguyen, Hideaki Yasuhara, Kiyoshi Kishida (2017), Constitutive model for soft rocks considering structural healing and decay, Computers and Geotechnics, 91, 93-103.

木下尚樹, 安原英明 (2017), 温度・拘束圧・持続載荷期間に依存する堆積岩不連続面の変形・透水特性, Journal of MMIJ, 133, 53-57.

Hideaki Yasuhara, Naoki Kinoshita, Sho Ogata, Dae-Sung Cheon, and Kiyoshi Kishida (2016), Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical modeling by incorporating pressure solution for estimating the evolution of rock permeability, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 86, 104-114, doi: 10.1016/j.ijrmms.2016.030015.

岸田 潔, 津田 直弥, 矢野 隆夫, 安原英明 (2016), 加温条件下での岩石不連続面のせん断応力回復に関する実験的研究, 地盤工学ジャーナル, 11, 11-20.

安原英明, 緒方奨, 木下尚樹, 岸田潔 (2015), 圧力溶解現象を考慮した数値解析モデルによる岩盤の長期透水特性評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), 71, 292-300.

[学会発表](計 11 件)

Kishida, K., Matsumoto, K., Yano, ST., Nakashima, S., Yasuhara, H. (2017), Evaluation of cutoff time on slide-hold-slide process of single rock joint in consideration of the heating influence, Proc. 51st US Symp. on Rock Mechs./Geomechs, San Francisco, CA, June, pp. ARMA2017-000696.

Ogata, S., Kinoshita, N., Yasuhara, H., Kishida, K. (2017), Numerical modeling of coupled THMC processes for predicting fluid flow and transport behavior within fractured rocks, Proc. 51st US Symp. on Rock Mechs./Geomechs, San Francisco, CA, June, pp. ARMA2017-000321.

Nakashima, S., Sakamoto, T., Yasuhara, H., Kishida, K. (2017), Observation and quantification of fracture aperture in

granite core using X-ray tomography and edge detection technique, Proc. 51st US Symp. on Rock Mechs./Geomechs, San Francisco, CA, June, pp. ARMA2017-000247.

Shinji SAKAI, Takao YANO, Hideaki YASUHARA, Masato OHNO and Kiyoshi KISHIDA (2016), Estimation on SHS process strength recovery through rock specimen included artificial cutting plane, Proc. The Twenty-Ninth KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, December 3-5, 2016, Hong Kong, China, pp. pp.263-266.

Yasuhara, H., Kinoshita, N. and Kishida, K. (2016), Predictions of rock permeability by THMC model considering pressure solution, Proc. 50th US Symp. on Rock Mechs./Geomechs, Houston, TX, June, pp. ARMA2016-000202.

Vu, P. Q. N., Kikumoto, M., Yasuhara, H. and Kishida, K. (2016), Critical State Modeling of Sedimentary Rock Incorporating Healing and Decay of Rock Structure, Proc. 50th US Symp. on Rock Mechs./Geomechs, Houston, TX, June, pp. ARMA2016-000115.

Hideaki Yasuhara, Naoki Kinoshita, Dae-Sung Cheon, and Kiyoshi Kishida (2016), Permeability Experiment in a Single Granite Fracture under Different Stress, Temperature, and pH Conditions, Proc. 2016 Korea-Japan Symposium on Rock Mechanics Engineering, Daejeon, Korea, May 19-20, 2016, pp. 38-41.

Hideaki YASUHARA and Kiyoshi KISHIDA (2015), Coupled THMC model to predict long-term evolution of rock permeability, Proc. The Twenty-Eight KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, November 16-18, 2015, Bangkok, Thailand, pp. KU-GTE-06.

Tomohiro ISHIKAWA, Hideki YASUHARA, Yosuke HIGO and Kiyoshi KISHIDA (2015), Permeability of a single fracture in granite under the confining pressure and extraction of fracture structure using microfocus X-ray CT, Proc. The Twenty-Eight KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, November 16-18, 2015, Bangkok, Thailand, pp. KU-GTE-03.

Kishida, K., Ishikawa, T. and Higo, Y., Sawada, A., Yasuhara, H. (2015), Measurements of fracture aperture in granite core using microfocus X-ray CT and fluid flow simulation, Proc. 49th US Symp. on Rock Mechs./Geomechs, San Francisco, CA, June, pp. ARMA 15-0485.

H. Yasuhara, N. Kinoshita, S. Nakashima, and K. Kishida (2015), CHEMICALLY- AND MECHANICALLY-DRIVEN ALTERATION OF PERMEABILITY IN FRACTURED ROCKS UNDER DIFFERENT STRESS, TEMPERATURE, AND PH

CONDITIONS, Proc. the 13<sup>th</sup> International Congress of Rock Mechanics, ISRM Congress 2015, Montreal, Canada, May 10-13, pp. Paper 508.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cee.ehime-u.ac.jp/~rock/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安原 英明 (YASUHARA, Hideaki)  
愛媛大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：70432797

### (2) 研究分担者

岸田 潔 (KISHIDA, Kiyoshi)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：20243066

小山 倫史 (KOYAMA, Tomofumi)  
関西大学・社会安全学部・准教授  
研究者番号：20467450

安原 英明 (YASUHARA, Hideaki)  
横浜国立大学・大学院都市イノベーション  
研究院・准教授  
研究者番号：90508342