

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560804

研究課題名（和文）破壊後岩石の圧縮に伴う透水性変化に関する研究

研究課題名（英文）Variation of rock permeability during deformation and failure

研究代表者

藤井 義明（FUJII YOSHIAKI）

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70192309

研究成果の概要（和文）：変形・破壊に伴う支笏溶結凝灰岩、来待砂岩、稲田花崗岩の浸透率の変化とそのメカニズムを明らかにすることを目的として、浸透率を計測しながらいくつかの封圧と温度の下で三軸圧縮試験を行い、凝灰岩や高封圧下の砂岩において、破壊により浸透率が小さくなること、ならびに、高温下で地下水量が増えることを明らかにした。これらの知見は、将来、安全かつ低コストな地下空洞建設に役立つものと期待される。

研究成果の概要（英文）：Triaxial compression tests were carried out on Shikotsu welded tuff, Kimachi sandstone and Inada granite under several confining pressures and temperatures, aiming to clarify permeability variation and mechanisms of it. It was clarified that permeability decreased by failure for tuff and sandstone and that flow rate increased under high temperature. It would be expected that these findings will contribute for design and construction of safer underground openings with lower cost.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：岩石、変形、破壊、浸透率、封圧、温度

1. 研究開始当初の背景

高レベル放射性廃棄物の処分において、空洞掘削時には程度の差はあれ空洞周辺の岩盤が破壊する。岩盤が破壊した場合には、岩盤の透水性が増加し、処分空洞の安全性が損なわれると考えられる。たとえば、木山・石島（2000）は Westerly 花崗岩の透水性が三軸応力下の破壊に伴い増加することを示した（軸ひずみ 2% 程度までの圧縮）。しかしながら、従来から鉱山では、いったん破壊したはずの坑道周辺岩盤が地圧と

鋼柱による反力とを受けて、健全な岩盤と同程度の強度に復活することが知られている。また、釧路コールマインでみられた数 10 年前の旧坑が相当の遮蔽性の回復を見せていた事例がある（石島ら、2008a, b）。実験室レベルでも、Ngwenya et al.(2003)や申請者らの最近の研究（高田・藤井、2007）によれば、少なくとも砂岩の透水性は、破壊後の更なる圧縮により低下することが示されている。

もしかこの低下が一般的な傾向で、しかも、透

水性が、たとえば、インタクた供試体よりも小さくなるまで低下するならば、破壊した堆積岩は、十分変形すれば、インタクた岩盤と同様な程度に低い透水性を示すことになり、空洞周辺の緩みによる遮蔽性低下の対策を講ぜずとも良くなり、コスト低減を図ることができる。Ngwenyaはこの現象を、生成する断層ガウジの粒径低下と厚さ増大によるものと考察している。

一方、木下・安原(2008)は、三軸圧縮下で割裂により得た花崗岩破断面の透水試験を行い、透水性が時間とともに減少する現象を、圧力融解で説明した。

引用文献

- 石島洋二・藤井義明・市原義久・児玉淳一(2008a)、釧路コールマインに見られる旧坑の閉塞状況と閉塞機構、J. MMIJ, Vol. 124, Nos. 6/7, pp. 435-444
- 石島洋二・藤井義明・市原義久・木山保・高田迪彦・菅原隆之・熊倉聡(2008b)、原位置計測と坑内観察に基づく釧路コールマインにおける閉塞した空洞内の諸状態、J. MMIJ, Vol. 124, Nos. 6/7, pp. 445-451
- 木下尚樹・安原英明(2008)、高温下における花崗岩不連続面の透水性に関する実験的検討、資源・素材2008(仙台)、企画発表・一般発表(A)(B)講演資料, pp. 77-78
- 木山保・石島洋二(2000): Westerly 花崗岩の三軸圧縮試験における破壊前後の透水特性 - 透水特性の封圧依存に関する検討 - . 資源・素材学会北海道支部 平成12年度春季講演講演要旨集, pp.39-40
- Ngwenya B. T., Kwon, O., Elphick, S. C., Main, I. G. (2003): Permeability Evolution during Progressive Development of Deformation Bands in Porous Sandstones. Journal of Geophysical Research, Vol. 108, No.B7, 2343,
- 高田迪彦・藤井義明(2007)、三軸圧縮破壊させた砂岩の挙動と透水性、開発技術研究会講演要旨集, pp. 35-36

2. 研究の目的

破壊によって一旦増加した浸透率がその後の圧縮により低下する現象がある程度一般的にみられるか否か、また、ある程度一般的にみられるとした場合、そのメカニズムは何か明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

比較的軟弱な火山砕屑岩の例として支笏溶結凝灰岩、新第三紀の砕屑岩の例として来待砂岩、火成岩の例として稲田花崗岩について、三軸圧縮試験を行い、岩種毎に異なる、静水圧下からほぼ残留強度状態に達するまでの浸透率の変化挙動、ならびに、有効封圧(1 MPa ~ 15 MPa)と温度(295K と 353K)の影響について比較する。

同じ目的で行われた種々の既往の研究があるが、本研究の独自性は、三つの岩種について比較したこと、設定した封圧範囲をカバーする多数の試験を行ったこと、温度の影響も検討したことである。

なお、設定した最大有効封圧は使用した実験装置の制約により定められたが、特に、稲田花崗岩については小さいようにも思われる。しかし、単位重量を 27 kN/m^3 、鉛直応力をかぶり圧、水平応力を鉛直応力の $1/2$ と仮定すれば、15 MPa の有効応力は深度 880 m の鉛直有効応力、あるいは、深度 4400 m の水平有効応力に対応する。プレート地震等への応用を考えれば別だが、通常の工学的な地下構造物の多くが深度 1000 m 未満に建設されることを考えれば、最大有効封圧 15 MPa は小さすぎるともいえない。

また、設定温度の 295K と 353K については、使用した実験装置の制約(主にリングの耐熱性能による)と実技的な問題により定められたが、たとえば放射性廃棄物は温度が 353K 程度になるまで冷ました後に地層処分空洞に埋設されるので、地熱開発や理学的な応用を考えた場合には低温すぎるが、地層処分空洞周辺岩盤あるいはもっと低い最高温度の応用を考えるならば、十分に高温といえる。

4. 研究成果

(1) 凝灰岩の結果

軸応力は材料試験機(インストロン社製、5500R、機械式、250 kN)を用いて載荷し、封圧はダブルプランジャポンプとリリースバルブを用いて水で負荷した。軸方向荷重、クロスヘッド変位、水圧、軸ひずみ、横ひずみ、封圧をひずみアンプとデータロガーを介して、10秒に1回記録した。

間隙水圧はシリンジポンプ(ISCO 社製、500D型、最大容量 507 ml、最大圧力 25.8 MPa、最小流量 0.001 ml/min、最大流量 204 ml/min)により供試体下端に純水で負荷し、下流側(供試体上端)は大気圧開放とした。流量は別のパソコンに10秒に1回記録した。

実験室内の温度はエアコンを使って一定温度(295K)に制御した。またベッセルの周囲にヒーター(Acim Jouanin 社製、L6060C57A5、230 V、575 W)を取り付け、コントローラー(スリーハイ社製、THC-15、設定範囲 273 ~ 1272K)で供試体と供試体に流入する水の温度を制御した。

実験の手順は以下のようである。

- (1) 被覆された供試体を、超小型三軸ベッセルに挿入、試験装置にセットする(図1)。
- (2) 材料試験機により、軸圧を 1 MPa 増加させる。
- (3) 封圧ポンプにより、封圧を 1 MPa 増加させる。
- (4) 実験を行う軸圧、封圧になるまで(2)、(3)を繰り返す。
- (5) 供試体に 0.3 ml/min の流量で通水する。

(6) 下流側への通水を確認した後、24時間圧密する。

(7) 載荷速度 0.036 mm/min (10^{-5} s^{-1}) で軸ひずみ 10%まで供試体を変形・破壊させる。圧縮開始から終了までに要する時間は 167 min である。

浸透率は定流量を維持するのに必要な上流側水圧からダルシーの式を用いて求めた。上流側水圧は最大で 1 MPa 程度であり、有効応力は応力から平均的な間隙水圧として上流側水圧の 1/2 を減じて算出した。

封圧 1 MPa の場合 295K と 353K のどちらにおいてもピーク後に応力低下と残留強度状態がみられた。封圧 5 MPa の場合は 295K の時はややひずみ軟化、353K の時はほぼ完全降伏になっていた。10、15 MPa の場合はどちらの温度においてもひずみ硬化がみられた。

圧密後の浸透率は 15 MPa で小さく、これは特に 80 で顕著であった。破壊時の急激なひずみ変化の影響による浸透率計算値の多少の変動を除けば、どの封圧においても、圧縮により浸透率は減少した(図 2)。

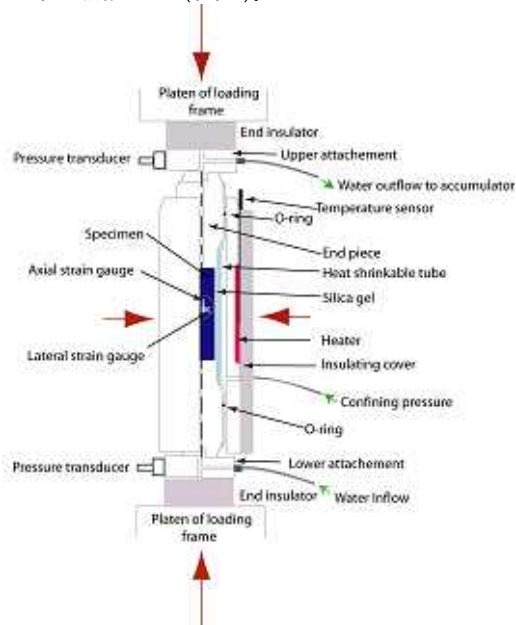


図 1 供試体のセッティング

圧縮後の浸透率は 295K では 1 MPa で大きく(図 3)、353K では封圧の影響ははっきりしない。295K と 353K を比べると 353K の方が 1 MPa でははっきりと、その他の封圧でもやや小さい。295K では封圧 1MPa のときに浸透率減少割合は小さく、5、10、15 MPa で大きい。353K では封圧の影響は明らかではない。

1 MPa では明瞭な破断面がみられたが、15 MPa では破断面はみられなかった。

(2) 来待砂岩の結果

実験方法は、圧縮を軸ひずみ 7%までにしたこと、浸透率の測定をトランジェントパルス法で行った以外は支笏溶結凝灰岩と同じである。

295K において、封圧 15 MPa の場合にほぼ完全降伏になったが、353K では、封圧が 11 MPa より大きい場合でひずみ硬化や完全降伏がみられた。

どの封圧においても、差応力が増えるにつれて浸透率は小さくなり、最大差応力前に最小値となった(図 5)。その後破壊に伴って浸透率は増加し、残留強度状態においてはほぼ横ばいになっている。

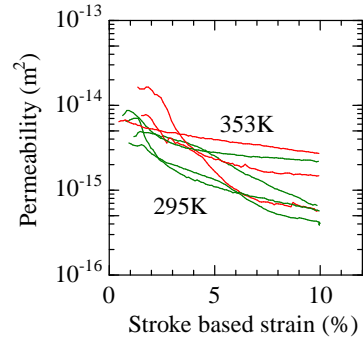


図 2 支笏溶結凝灰岩の圧縮に伴う浸透率の挙動の例(10 MPa)

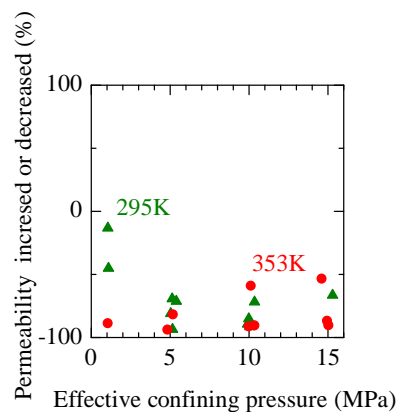


図 3 支笏溶結凝灰岩の破壊に伴う浸透率変化

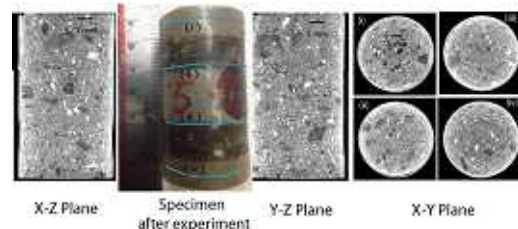


図 4 支笏溶結凝灰岩の CT 画像例(295K、15 MPa)

圧密後の浸透率は 295K の場合も 353K の場合も、有効封圧による差はほとんどなかったが、浸透率の最小値、及び破壊後の浸透率は、有効封圧が大きくなるにつれてやや小さくなった。破壊前の浸透率と比較した浸透率の最小値の

減少割合は、295Kの場合も353Kの場合も有効封圧が大きくなるにつれて大きくなった(図6)。破壊前の浸透率と比較した圧縮後の浸透率は、295Kの場合には有効封圧が9 MPa以下の場合には増加、有効封圧が11 MPa以上の場合には減少した。353Kの場合には有効封圧が1 MPaの場合には増加、有効封圧が3 MPa以上の場合には減少した。

1 MPa ではいくつかの副破断面を伴う主破断面がみられ、7 MPa では主破断面のみがみられ、15 MPa では破断面はみられなかった(図7)。

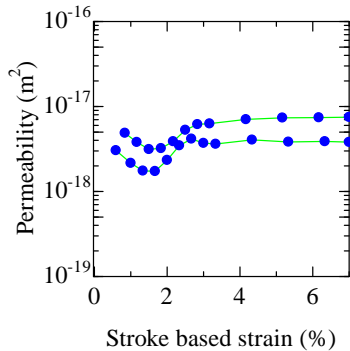


図5 来待砂岩の圧縮に伴う浸透率の挙動の例(295K, 9 MPa)

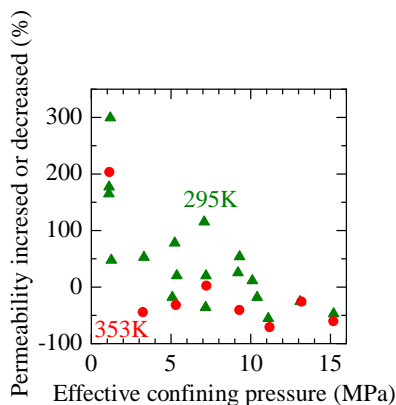


図6 来待砂岩の破壊に伴う浸透率変化

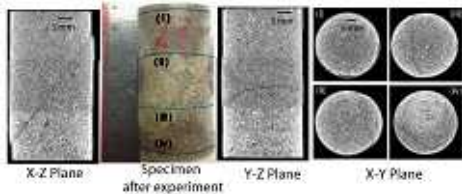


図7 来待砂岩のCT画像の例(295K, 7 MPa)

(3) 稲田花崗岩の結果

稲田花崗岩は295Kと353Kのどちらにおいても、封圧に関わらずぜい性的に破壊した。どの封圧においても、差応力が増えるにつれ

て浸透率は小さくなり、最大差応力前に最小値となった。その後破壊に伴って浸透率は増加し、残留強度状態においてはほぼ横ばいになった(図8)。

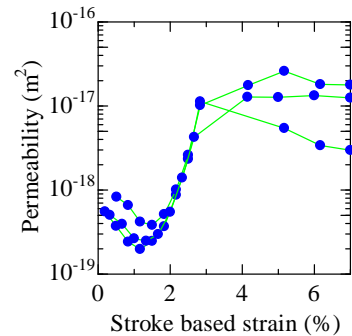


図8 稲田花崗岩の圧縮に伴う浸透率の挙動の例(295K, 3 MPa)

浸透率の最小値は、有効封圧が大きいほど小さかった。圧縮後の浸透率は有効封圧が9 MPaまでは有効封圧が大きくなるにつれ小さくなっているが、有効封圧が11 MPa以上ではやや増加した。また、どの場合も温度が高いほうが小さかった。ただし、373Kを超えた高温の履歴が与えられるとマイクロクラックが新たに発生することにより花崗岩の浸透率は増加する(斉藤ら、1987、林ら、1999)という研究結果もあるので、さらに高い温度における挙動については検討が必要である。

破壊前の浸透率と比較した浸透率の最小値の減少割合は、有効封圧が大きくなるにつれて大きくなった(図9)。温度の影響はみられなかった。破壊前の浸透率と比較した圧縮後の浸透率の増加割合は、有効封圧が9 MPaまでは有効封圧が大きくなるにつれ小さくなっているが、有効封圧が11 MPaからは大きくなるにつれ大きくなっており、この傾向は295Kで明瞭である。

1 MPaでは黒雲母から载荷軸に平行に伸びる無数の亀裂とともに副破断面を伴うやや厚い亀裂のネットワークが主破断面としてみられた。9 MPaでは黒雲母からの亀裂や副破断面はみられず、やや薄い主破断面のみがみられた(図10)。15 MPaでは副破断面がみられた。

(4) 成果のまとめ

変形・破壊に伴う支笏溶結凝灰岩・来待砂岩・稲田花崗岩の浸透率の変化とそのメカニズムを明らかにすることを目的として、浸透率を計測しながら三軸圧縮試験を行った。

支笏溶結凝灰岩の試験では以下のような知見が得られた。

変形・破壊前の浸透率は封圧が15 MPaの場合に小さく、これは特に353Kで顕著だった。

変形・破壊に伴い浸透率は低下した。

破壊後の浸透率は、295Kでは1 MPaで大きく、353Kでは封圧の影響ははっきりしなかった。

破壊後の浸透率は、295K と 353K を比べると 353K の方が 1 MPa でははっきりと、その他の封圧でもやや小さかった。

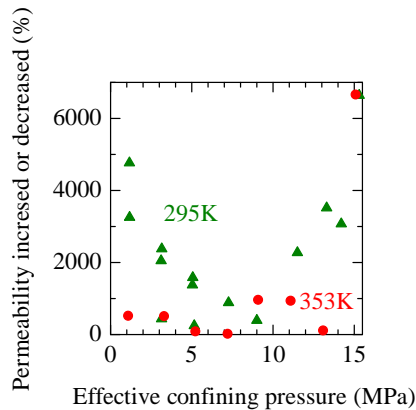


図9 稲田花崗岩の破壊に伴う浸透率変化

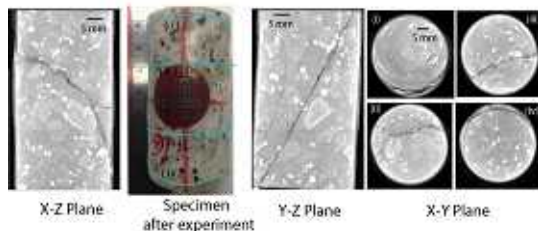


図10 稲田花崗岩の CT 画像の例(295K, 7 MPa)

来待砂岩の試験では以下のような知見が得られた。

変形・破壊前の浸透率に有効封圧による違いはほとんど見られなかった。

差応力が増えるにつれて浸透率は小さくなり、最大差応力前に最小値となった。その後破壊に伴って浸透率は増加し、残留強度状態においてはほぼ横ばいになった。

浸透率の最小値、及び破壊後の浸透率は、有効封圧が大きくなるにつれてやや小さくなった。また、破壊後の浸透率は 353K の時のほうが 295K の時よりも全体的に小さくなった。

破壊前の浸透率と比較した浸透率の最小値の減少割合は、295K の場合も 353K の場合も有効封圧が大きくなるにつれて大きくなった。

破壊前の浸透率と比較した圧縮後の浸透率は、295K の場合には有効封圧が 9 MPa 以下の場合には増加、有効封圧が 11 MPa 以上の場合には減少した。353K の場合には有効封圧が 1 MPa の場合には増加、有効封圧が 3 MPa 以上の場合には減少した。

稲田花崗岩の試験では以下のような知見が得られた。

変形・破壊前の浸透率は有効封圧が大きいほど小さく、浸透率の最小値も有効封圧が大き

いほど小さい。

差応力が増えるにつれて浸透率は小さくなり、最大差応力前に最小値となり、その後再び増加した。残留強度状態においては、浸透率はほぼ横ばいになった。

圧縮後の浸透率は有効封圧が 9 MPa までは有効封圧が大きくなるにつれて小さくなっているが、有効封圧が 11 MPa 以上ではやや大きかった。

変形・破壊前の浸透率、浸透率の最小値、圧縮後の浸透率は 295K の場合より 353K の時のほうが小さかった。

破壊前の浸透率と比較した浸透率の最小値の減少割合は、有効封圧が大きくなるにつれて大きくなった。温度の影響はみられなかった。

破壊前の浸透率と比較した圧縮後の浸透率の増加割合は、有効封圧が 9 MPa までは有効封圧が大きくなるにつれて小さくなったが、有効封圧が 11 MPa からは大きくなるにつれて大きくなった。353K の場合にも同じ傾向がみられるが、295K の方がその傾向がはっきりしていた。

(5)得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

凝灰岩における結果は、従来得られた多くの結果とは異なり、ユニークなものである。同様な結果は数えるほどしかないが、本研究は封圧や温度の影響を明らかにしている点で優れている。

砂岩や花崗岩の圧縮に伴う浸透率の変化挙動は従来多くの研究結果と類似しており、これは、本研究の実験方法が妥当であることを示す。破壊後の浸透率と封圧・温度の関係を系統的な実験による豊富なデータの下に示したのは本研究が初めてである。

本研究の全貌はまだ国際学会誌で公表されていないが、公表された場合には、類似の実験が数多く行われ、内外の研究者によってデータが蓄積されることが期待される。

(6)今後の展望

岩石と岩盤の浸透率の対応には注意が必要であるが、データを蓄積し、浸透率の挙動をひずみ等で定式化して FEM に組み込めば、合理的な空洞設計に資することが期待される。

引用文献

- 斉藤章・奥野哲夫(1987)、高温下における花崗岩質岩石の透水性に関する研究、土木学会第 42 回年次学術講演会、pp. 436-437
- 林為人・高橋学(1999)、高温履歴を有する稲田花崗岩の透水係数と等価管路モデルに基づく評価、応用地質 40 巻 1 号、pp. 25-35

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 3 件)

- 熊倉聡・石島洋二・藤井義明・児玉淳一(2012)、破壊後の圧密による岩石の透水性変化に関する研究、J. MMIJ, Vol. 128,

Nos. 4/5, pp. 163-172

Fujii, Y., Ishijima, Y., Ichihara, Y., Kiyama, T., Kumakura, S., Takada, M., Sugawara, T., Narita, T., Kodama, J., Sawada, M. and Nakata, E. (2011), Mechanical Properties of Abandoned and Closed Roadways in the Kushiro Coal Mine, Japan, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 48, No. 4, pp. 585-596

高田迪彦・藤井義明・児玉淳一(2011)、三軸圧縮破壊過程における岩石の透水性に封圧が及ぼす影響に関する研究、J. MMIJ, Vol. 127, No. 3, pp. 151-157

北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号:70241411

[学会発表] (計 4 件)

Alam, B. A.K.M., Niioka, M., Fujii, Y., Kodama, J. and Sugawara, T. (2012), Effect of Temperature and Confining Pressure on Permeability during Deformation and Failure of Shikotsu Welded Tuff, Proc. ARMS7, pp. 563-572, Seoul, South Korea, October 15-19, 2012, Oct. 16, 2012, COEX Convention Center, Seoul.

新岡将希・Alam, A.K.M.B.・菅原隆之・藤井義明(2012)、破壊後の圧縮に伴う支笏溶結凝灰岩の浸透率変化、資源・素材2012(秋田)企画発表・一般発表(A)(B)(C)講演資料、pp. 285-288、9/13、秋田大学、秋田市

Fujii, Y., Sugawara, T., Kodama, J., Ishijima, Y., Kiyama, T., Takada, M., Ishihara, Y., Kumakura, S., Narita, T., Sawada, M. and Nakata, E. (2011), Abandoned roadways aged up to 50 years observed in Kushiro Coal Mine, Japan, Harmonising Rock Engineering and the Environment (Proc. 12th. Int Congr. Rock Mech.), Qian & Zhou (eds), Taylor & Francis Group. London, pp 975-978 (FP-CH157 in CD-ROM), Oct., 18, China National Convention Center, Beijing, China.

新岡将希・藤井義明(2011)、圧縮下における支笏溶結凝灰岩の浸透率変化、資源素材学会北海道支部春季講演会講演要旨集、pp. 11-12, 6/10、登別グランドホテル、登別市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 義明 (FUJII YOSHIAKI)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号:70192309

(2) 研究分担者

児玉 淳一 (KODAMA JUN-ICHI)