

機関番号： 17401
 研究種目： 基盤研究(B)
 研究期間： 2008 ~ 2010
 課題番号： 20360408
 研究課題名(和文) 超長期にわたる地下水流動予測のための水理構造の高精度モデリング
 研究課題名(英文) Precise Modeling of Hydraulic Structures of Geologic Media for Predicting Long-Term Groundwater Flow
 研究代表者
 小池 克明 (KOIKE KATSUAKI)
 熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
 研究者番号： 80205294

研究成果の概要(和文)：岩体の透水性を支配する亀裂の3次元分布を、位置と方位を考慮してシミュレーションできる手法、およびボーリング孔や岩盤から得られた透水係数データの空間分布を高精度で推定できる手法を開発した。これら2種類の空間分布を統合することで、透水性が高いゾーンと亀裂分布形態との関連性などを明らかにできた。さらに、これらのモデルから地下水流動をシミュレーションできるようになり、地下水の流れと断層分布や化学成分濃度分布との関係が明らかになったとともに、地形変化を考慮した超長期の地下水流れの予測も可能となった。

研究成果の概要(英文)：Two precise spatial modeling methods for rock fracture distributions with incorporation of location and orientation, which control the permeability of geologic media, and for hydraulic conductivity distribution with different scales from rock sample to whole rock body were developed. By integrating these two spatial models, several important characteristics such as a relationship between the high permeable zones and the configuration of rock fractures were clarified. These models were also able to be combined with a numerical simulation of groundwater flow efficiently. As the result, the effect of faults on the groundwater flow and the mechanism of chemical concentration changes with the flow were estimated by the simulation. In addition, prediction of long-term groundwater flow in consideration of the topographic changes by the erosion could be implemented through the tools constructed by this study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	10,000,000	3,000,000	13,000,000

研究分野： 地圏情報工学

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： 透水係数, 亀裂, 地質構造, 岩石物性, 水質, 空間モデリング, 地球統計学, 花崗岩体

1. 研究開始当初の背景

“水は地下のどこをどれだけの時間を掛けてどこまで流れるのか？” この解明は地

球・資源システム工学における最重要課題の1つであり、世界的に地下流体、特に地下水の探査や流動形態の把握が広く研究されて

いる。地下水は目に見えず、単に標高が高い方から低い方に向けて流れているわけではない。断層を挟んで地下水位の時間的変化が全く異なることもある。このような複雑な透水現象を、地球スケールに対して極々限られた範囲（地表やボーリング）からのデータに基づいて推定・解釈される。

透水現象の理解の深化、透水構造の推定の高精度化は、全世界に共通してますます重要で、急務の課題となっている。背景には、世界各地での地下水汚染の顕在化、高レベル放射性廃棄物の地層処分、CO₂の地中貯留、生活圏の山岳域への拡張に伴う斜面災害の増加、などがあげられる。特に地層処分は、最も地下の理解を要する問題といえる。なぜならば、数万年という工学的尺度では超長期にわたっての透水現象を予測することが不可欠となるからである。

地質体の透水性を支配する因子は「地質的不連続性」であり、亀裂と総称される。超長期の透水現象の把握には、亀裂の3次元分布とともに、「透水係数」という水の流れやすさを支配する最も重要な物性の空間分布を高精度で推定し、これらを統合することが重要である。

2. 研究の目的

超長期にわたる透水現象の予測において、値の大小が複雑に分布する透水係数の不均質性をいかに妥当に推定できるかが、予測精度を支配する鍵となる。透水係数の値の類似性から岩体はおおよそ地表付近の風化が進んだ部分（風化部）、断層や亀裂の多い部分（亀裂部）、巨視的な亀裂が少なくマイクロクラックのみが卓越する部分（健岩部）の3つに区分できる。

本研究では結晶質岩石を代表する花崗岩で主に覆われた地域を対象とし、各区分の透水係数を数多く測定する。しかし、坑道やボーリングの位置の制約等から、岩体全体から密にデータが得られるわけではない。そこで、空間的相関構造を考慮した高度な数理モデルによって、これらの位置や値の不均質性が大きい透水係数データを有機的に統合し、花崗岩体における地表から深度1 kmまでの広範囲の水利構造を高い空間分解能で明らかにすることが第一の目的である。

さらに、1 万年以上の時間スケールを対象とし、この期間での河川勾配の変化と侵食による地形変化を計算するとともに、これに伴う地下水流動の変化パターンを明らかにする手法の開発を第二の目的とする。

3. 研究の方法

岐阜県の土岐花崗岩体（約20 km×20 km）は日本原子力研究開発機構が、瑞浪超深地層研究所計画をはじめとした深地層の科学的

研究を進めている東濃地域の一部であり、深度500～1,000 m程度の深層ボーリング調査が十数地点で実施され、我が国で最も深部地質環境に関する情報が得られているフィールドの1つである。

そこで、土岐花崗岩体を研究サイトとして選び、水利構造の全体像を解明することを目的とし、野外測定、試料分析、データ解析を実施する。さらに、超長期にわたる河川勾配の変化と侵食による地形変化を計算するとともに、これに伴う地下水流動の変化パターンを明らかにする手法を開発する。

(1) 地表の風化部での透水係数測定：花崗岩体の区間縦波（P波）速度と透水係数を数多く測定し、風化の程度とこれら物性との関係を求める。

(2) 岩体内の亀裂部・健岩部での透水係数測定：対象岩体の坑道や立坑を利用し、(1)と同様に、多くの亀裂部でP波速度と透水係数を測定する。亀裂が少ない部分でも同様に測定を実施する。また、風化の程度が小さい健岩部をボーリングコアから収集し、これらも測定の対象とする。

(3) 透水係数データの統合と高精度空間分布モデルの作成：データの位置や値の不均質性が特に大きい透水係数データを有機的に統合し、地表から深度1 kmまでの広範囲の水利構造を高い空間分解能で明らかにする。ここではボーリング検層によるP波速度の空間分布を利用し、これと(1)・(2)による[P波速度-透水係数]の相関式を組み合わせることで、透水係数の空間分布精度を向上させる。

(4) 地下水の水質と亀裂周辺の鉱物の分析：地表、坑道、立坑における多くの湧水地点から地下水を採取し、主要化学成分濃度を測定する。また、ボーリングコアの亀裂周辺に広がるハロー部の主要構成鉱物、および亀裂を充填する鉱物を同定する。これから、降雨による地表降下流体が岩体内をどのように移動したのか、というパスと移動メカニズムを明らかにする。

(5) 地下水の定常・非定常流れの定式化：地下水位観測井データを用いて、地下水位の変動メカニズムの解明と数理モデルの作成（すなわち定常的な地下水流れと時空間的変動の定式化）を行う。

(6) 超長期の地下水流動シミュレーションプログラムの開発：定常・非定常流れの定式化、地形変化シミュレーションを統合し、超長期地下水流動シミュレーションプログラムを開発する。その応用として、現在から将来にわたる種々の気候変化モデルを設定する。各モデルに対して、対象地域である土岐花崗岩体の地形と岩体内の地下水流動形態がどのように変化し、これに伴って地表に湧出する地下水のパス・量・

化学組成・地点がどのような時間的変化を示すのか、を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 地球統計学を応用した研究代表者らによる 3 次元亀裂分布シミュレーション法 GEOFRAC を改良し、傾斜の緩い亀裂の推定精度を向上させたところ、緩い亀裂面ゾーンは標高 0 m と -500 m 付近に 2 枚あり、南側に傾斜していること、および急傾斜で数 km の亀裂面が月吉断層付近で複数枚分布していることなどが推測できるようになった (図 1)。

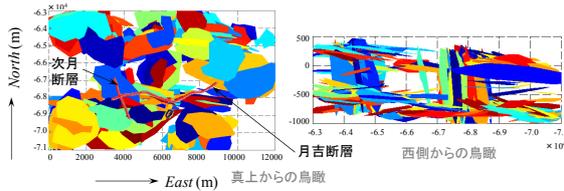


図 1 シミュレーション亀裂の分布

(2) 連続性の良いシミュレーション亀裂と 10 m 数値地形モデルからのリニアメントを重ね合わせた結果、リニアメント付近に長い亀裂が存在することが推定でき、リニアメントの卓越方向沿いに長い亀裂が分布していると解釈できた。また、月吉断層付近では、屈曲する断層とリニアメントの方向が調和的であった。

これら (1) (2) の成果に対して (社) 資源・素材学会より第 35 回論文賞 (平成 21 年度) が授与されたので、亀裂分布モデリング手法に関してオリジナリティの高い成果が得られたと評価できる。

(3) 解析で得られた各スケールの亀裂走向、傾斜、密度を比較した。単位面積当たりの累積頻度分布と亀裂長さの関係を求めると、メディアン長以上の範囲においてべき乗則で近似できることがわかった。密度分布のセミバリオグラムとメディアン長は正の相関、シルとメディアン長は負の相関があることが明らかになった。これらの関係から任意のスケールで亀裂分布がシミュレートできるようになる (図 2)。

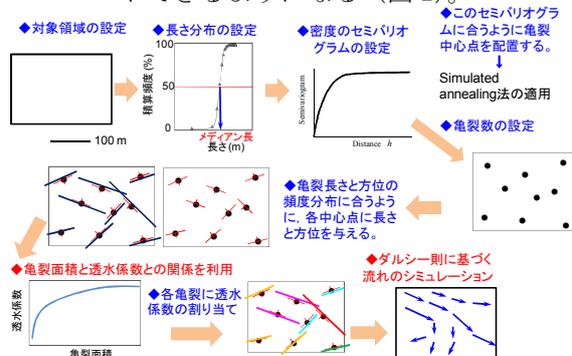


図 2 任意のスケールでの亀裂分布と透水性のモデリング法

(4) 透水係数のデータ点近傍を通るシミュレーション亀裂を抽出し、亀裂面積と透水係数の値を比較したところ正の相関性が見出されたため (図 3)、この回帰式からシミュレートされた亀裂面に透水係数を与え、サンプルデータを増やした。これにより、対象地域の透水係数分布をクリギングによって推定することが可能となった。

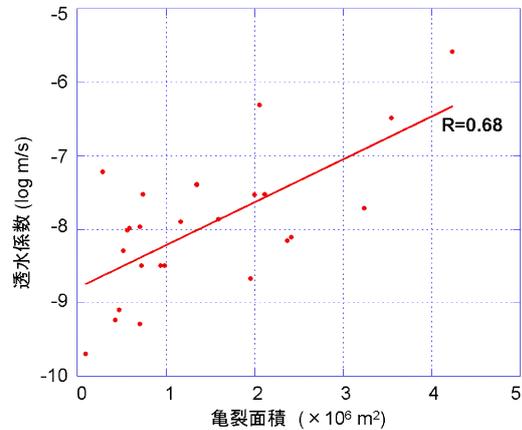


図 3 透水係数と亀裂面積の関係

(5) 推定された透水係数は亀裂面の面積が $0.5 \times 10^5 \text{ m}^2$ までは急昇し、その約 5 倍の面積まで微増傾向を示すことがわかった。また、北東側よりも北西側走向の透水係数が大きく、最小と最大方向では 3 倍ほど異なることを抽出できた。透水係数の大きな方向は、本地域の最大主圧縮応力軸、および領域東部に分布する活断層 (阿寺断層) の方向と調和的であった。

(6) 深度方向の透水係数の変化を求めたところ、当地域のリニアメントは水質を区分するようなブロック境界として機能し、透水性の増減とは関連がないように考えられた。また、透水係数の代表値は全領域、次月断層、月吉断層付近の順に減少することがわかり、断層は遮水性の機能を有していることが推測された。

これら (1) ~ (6) の成果などに対して岩の力学連合会より平成 21 年度フロンティア賞が授与されたので、透水係数の不均質構造の解明に関してオリジナリティの高い成果が得られたと評価できる。

(7) コアサンプルを用いた室内実験では、亀裂面に近いほど浸透率が急増するとともに、浸透率の異方性が顕著に現れ、リニアメントの卓越方向と調和した (図 4)。よって、岩石サンプル内にも微小クラックが巨視的な卓越亀裂の方向に存在し、水の流れを支配していると考えられる。

岩石コア中に水を流すという透水実験を行い、X 線 CT スキャンによってコア内部の透水現象を可視化したところ、微小クラ

ックの密集部が水の選択的な流れを形成していることが確かめられた。

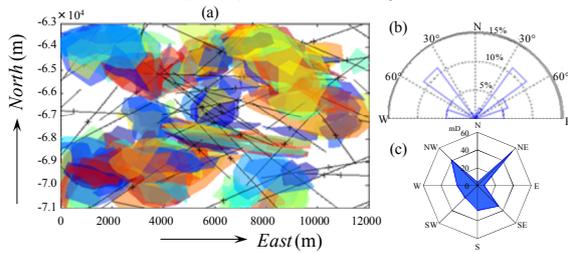


図 4 (a) リニアメント分布と長いシミュレーション亀裂との重ね合わせ, (b) リニアメントの方位分布, (c) コアを用いた浸透率の測定値と方位

(8) 深度 200 m と 300 m 坑道での浸透率の現位置測定結果, 測点から最も近い亀裂が長ければ浸透率が増加し, 距離が近いと浸透率は急増するという傾向が概ね見出せた。よって, 長い亀裂周辺には微小クラックが多く存在し, 透水性の高いゾーンを形成していると考えられる。

(9) 以上の広域スケール (岩体規模) と局所スケール (岩盤や岩石試料規模) の透水係数を統合した透水係数分布モデルを作成し, MODFLOW を用いて地下水流動の定常解析を行った。計算によって得られた水頭分布は地形と対応し, 実測の水理水頭とも概ね調和したので, シミュレーション結果の妥当性が確かめられ, 降雨による地表降下流体のパスと移動メカニズムの一部を明らかにできた。

(10) 結果の一つである地下水流動モデルからは, 月吉断層に対応する位置で浅部から深部に向かう流量が多いこと, 南部から北部に向かう流れが遮断されていることなどが明らかになった。これらの特徴から, 月吉断層は水平方向の流れに対して遮水性の機能を有すると推測できた (図 5)。

また, 月吉断層以北での地下水溶存イオン濃度の分布は, 天水を起源とする一般的な花崗岩体への流入水の水質変化の特徴とほぼ同じであることがわかった。一方, 月吉断層以南では, 特に深部で Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- 濃度が極端に高くなっている。これから, 対象領域内には起源が異なる 2 つの地下水系が存在すると考えられ, この推察は月吉断層が遮水性の機能を有するという上記の特徴を考慮すれば妥当といえる。

(11) 河川による侵食に伴う地形変化を取り入れ, (9) によるシミュレーションモデルによれば地下水流動のパスや量が時空間的にどのように変化するかを推定できるようになった。これは超長期の地下水流動変化に有効に適用できる。

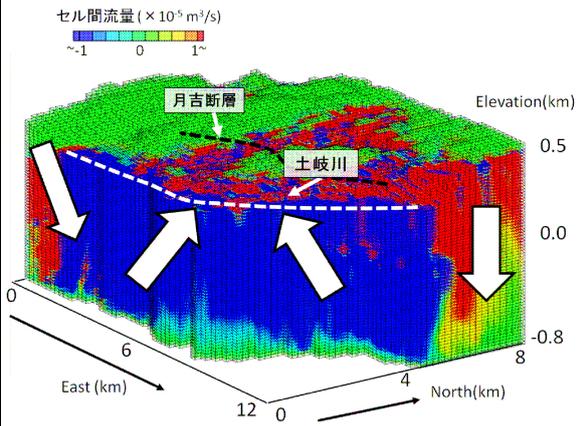


図 5 計算されたセル間流量, および推定される地下水流動形態

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 20 件)

- ① Katsuaki Koike, Spatial modeling techniques for characterizing geomaterials: Deterministic vs. stochastic modeling for single-variable and multivariate analyses, *Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 査読有, vol. 36, no. 2, 2011, pp. 209-226.
- ② Irwan Iskandar, Katsuaki Koike, Distinguishing potential sources of arsenic released to groundwater around a fault zone containing a mine site, *Environmental Earth Sciences*, 査読有, vol. 63, no. 3, 2011, pp. 595-608.
- ③ Katsuaki Koike, Chunxue Liu, Alaa Masoud, Arata Kurihara, Kenji Amano, Characterization of large-scale groundwater environment in a granite site by spatial modeling of fracture and hydrogeologic distributions, *Proceedings of 11th International Symposium on Mineral Exploration (ISME-XI)*, 査読有, 2010, pp. 123-128.
- ④ Kaoru Koide, Katsuaki Koike, Identifying groundwater- and slope movement-induced vegetation conditions in a landslide prone area using remotely sensed data, *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2010*, 査読有, 2011, pp. 123-128.
- ⑤ Ling Wang, Katsuaki Koike, Geostatistical approach to spatial heterogeneity of vegetation cover around fracture zones, *Proceedings of*

- International Symposium on Earth Science and Technology 2010*, 査読有, 2010, pp. 479-484.
- ⑥佐藤晃, 田中克也, 塩手隆志, X線 CT 法による多孔質岩石内 CO₂ 残留ガストラップ現象の分析, *Journal of MMIJ*, vol.126, no. 12, 2011, pp. 640-646.
- ⑦佐藤晃, 米村拓峰, 佐々和樹, X線 CT 法による多孔質岩石亀裂内および岩石マトリクスへの移流・拡散現象の分析, *Journal of MMIJ*, 査読有, vol.126, no.12, 2010, pp. 647-653.
- ⑧ Hisafumi Asaue, Taiki Kubo, Tohru Yoshinaga, Katsuaki Koike, Characterization of temporal change of deep resistivity around geothermal reservoir using magnetotelluric survey, *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, 査読有, 2010, Paper No.1365 (5 p).
- ⑨ Hisafumi Aasue, Taiki Kubo, Masahito Sasahara, Tohru Yoshinaga, Katsuaki Koike, Three-dimensional geological structure modeling for groundwater system elucidation in a wide area using MT method, *Proceedings of 11th International Symposium on Mineral Exploration (ISME-XI)*, 査読有, 2010, pp. 130-133.
- ⑩ Koike Katsuaki, Chunxue Liu, Alaa Masoud, Kenji Amano, Arata Kurihara, Large-scale modeling of 3D fracture distributions for hydrogeological characterization, *Proceedings of the International Association of Mathematical Geology (IAMG09)*, 査読有, 2009, CD-Rom (pfd¥Katsuaki_Koike Full Paper¥).
- ⑪ Ling Wan, Alaa Masoud, Katsuaki Koike, Characterization of fracture distributions and vegetation changes around the 2008 Sichuan Earthquake epicenter (China) by satellite remote sensing, *Proceedings of the International Symposium on Earth Science and Technology 2009*, 査読有, 2009, pp. 391-396.
- ⑫ Mst. Mahmuda Parvin, Naoyuki Tadakuma, Katsuaki Koike, The effects of precipitation and earthquake on groundwater level changes: a geostatistical modeling, *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2009*, 査読有, pp. 431-436.
- ⑬ 佐藤晃, 有水拓人, 米村拓峰, 澤田淳, X線 CT 法による亀裂内トレーサー移行プロセスの可視化と分析, *Journal of MMIJ*, vol.125, nos.4-5, 査読有, 2009, pp.146-155.
- ⑭ 佐藤晃, 有水拓人, 田中克也, 塩手隆志, X線 CT 法による多孔質岩石内 CO₂ 流動および貯留現象の分析, *Journal of MMIJ*, vol.125, no. 8, 査読有, 2009, pp. 437-444.
- ⑮ Akira Sato, Quantification of physical properties of the transitional phenomena in rock from X-ray CT image data, *Advances in Computed Tomography for Geomaterials GeoX2010*, 査読有, 2009, pp. 213-221.
- ⑯ 麻植久史, 宮越昭暢, 富森さとし, 丸井敦尚, 電気探査法と地下水観測による沿岸域の塩淡境界面の季節変動解明, *Journal of MMIJ*, 査読有, vol.125, nos. 6-7, 2009, pp. 363-368.
- ⑰ 小池克明, 劉春学, 天野健治, 栗原新, 広域的な地質構造・物性分布の空間モデル作成と有効性の検証: 東濃地域における亀裂分布を主としたケーススタディ, *Journal of MMIJ*, 査読有, vol.124, no.12, 2008, pp. 700-709.
- ⑱ 栗原新, 天野健治, 劉春学, 小池克明, 花崗岩体上部に発達する低角度亀裂の空間分布特性と地質学的解釈—瑞浪超深地層研究所周辺の土岐花崗岩からの知見—, *Journal of MMIJ*, 査読有, vol.124, no.12, 2008, pp. 710-718.
- ⑲ Irwan Iskandar, Katsuaki Koike, Modeling of groundwater pathway in a fault zone by space-time analysis of arsenic concentration, *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology*, 査読有, 2008, pp. 409-416.
- ⑳ 米村拓峰, 佐藤晃, X線 CT 法による亀裂内およびマトリクス内部の移流・拡散現象の可視化, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 査読有, 2008, Paper No. 8 (CD-Rom).

[学会発表] (計 24 件)

- ① 小池克明, 花崗岩体における広域的な亀裂分布と水理構造のモデリング, 資源・素材 2010 (福岡), 2010 年 9 月 15 日, 福岡市九州大学伊都キャンパス.
- ② 浜田拓良, 透気試験による浸透率と岩石物性・亀裂構造との関連性, 資源・素材 2010 (福岡), 2010 年 9 月 13 日, 福岡市九州大学伊都キャンパス.
- ③ 小池克明, 花崗岩体の広域的水理構造のモデリングと亀裂分布からの考察, GEOINFORUM-2010, 2010 年 6 月 22 日, 東京都産総研臨海副都心センター別館バイオ・IT 融合研究棟.

- ④多田隈直幸, 広域的な地圏環境の空間モデリングー地下水位と地温分布に注目したケーススタディー, GEOINFORUM-2010, 2010年6月22日, 東京都産総研臨海副都心センター別館バイオ・IT融合研究棟.
- ⑤久保大樹, 亀裂分布のマルチスケールモデリングと水理構造解析への応用, (社)資源・素材学会九州支部平成22年春季例会, 2010年6月11日, 熊本市熊本大学工学部.
- ⑥鶴田忠彦, 地質構造の空間モデリング手法の開発ー瑞浪超深地層研究所における取り組みー, (社)資源・素材学会春季大会, 2010年4月1日, 東京都東京大学生産研.
- ⑦小池克明, 衛星リモートセンシングによる地下の地質構造と物性の探査, (社)資源・素材学会春季大会, 2010年4月1日, 東京都東京大学生産研究所.
- ⑧鑑頭正, 多変量解析を用いたボーリング孔での断層の区間判定と岩盤区分, 資源・素材2009(札幌), 2009年9月8日, 札幌市北海道大学.
- ⑨小池克明, 浅部地質情報からの深部構造・物性の推定, 資源・素材2009(札幌), 2009年9月8日, 札幌市北海道大学.
- ⑩Katsuaki Koike, Large-scale modeling of 3D fracture distributions for hydrogeological characterization of the geologic media, International Association of Mathematical Geology (IAMG09), 2009年8月26日, スタンフォード大学(CA, アメリカ).
- ⑪ Katsuaki Koike, Spatial modeling techniques for structures and properties of geomaterials and their contributions to earth and environmental Sciences, 2009' Mathematical Geosciences & Geoinformatics Conference of China, 2009年6月28日, 中山大学(広州, 中国).
- ⑫小池克明, 地質体での亀裂分布と透水性のマルチスケールモデリングに関する一試案, GEOINFORUM-2009, 2009年6月25日, 那覇市沖縄県青年会館.
- ⑬小池克明, 亀裂分布のマルチスケールモデリングと透水性構造解析への応用, (社)資源・素材学会春季大会, 2009年3月28日, 千葉市千葉工大.
- ⑭麻植久史, 布田川ー日奈久断層帯における地下深部の比抵抗構造と震源分布の関連性, 熊本自然災害研究会研究発表会, 2008年11月20日, 熊本市水前寺共済会館.
- ⑮Katsuaki Koike, Multi-scale modeling of rock fracture distributions for characterizing hydraulic properties, 33rd International Geological Congress

(IGC) - Oslo, Norway, session MAG-05, 2008年8月7日, オスロ・コンベンションセンター.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小池 克明 (KOIKE KATSUAKI)
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号: 80205294

(2) 研究分担者

佐藤 晃 (SATO AKIRA)
熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 40305008

麻植 久史 (ASAUE HISAFUMI)
熊本大学・大学院自然科学研究科・助教
研究者番号: 70462843

天野 健治
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
地層処分研究開発部・研究員
研究者番号: 40421680

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

劉 春学 (LIU CHUNXUE)
雲南財經大学(中国)都市管理・資源環境
学部・教授

アラール マスウド (ALAA MASOUD)
タンタ大学(エジプト)理学部地質学科・
准教授