

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24年 6月 4日現在

機関番号： 10101
 研究種目： 基盤研究 (B)
 研究期間： 2009～2011
 課題番号： 21404017
 研究課題名 (和文) オマーンに湧出する高アルカリ泉から学ぶアルカリ環境の地球・生物資源科学
 研究課題名 (英文) Geo- and bio-resource science and technology learnt from the processes in hyperalkaline springs at Oman
 研究代表者 佐藤 努 (SATO TSUTOMU)
 北海道大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号： 10313636

研究成果の概要 (和文)：

オマーンの子岳地帯に多数湧出する高アルカリ泉 (pH11-12 程度) において、高アルカリ環境で未解決な課題を有する様々なディシプリン研究者が集結し、高アルカリ泉を作り出す地質学的条件とその地球科学・地球工学的インパクトの解明、高アルカリ環境に適応した微生物群集や動物種のスクリーニングとその適応機構の解明、自然が作り出したコンクリートの長期挙動とその生成に学ぶ二酸化炭素貯留法の解明等を目的した調査・研究を進めた。その結果、以下の内容が明らかとなった；1) 高アルカリ泉を作り出す地殻-マントル境界に発達したマントル延性剪断帯の構造とその発達、②高アルカリ環境における炭酸塩鉱物の生成とその速度式、③高アルカリ環境において生成する炭酸塩鉱物、特にアラゴナイトによって無機陰イオンの移行遅延、および前駆物質であるモノハイドロカルサイトの存在と特性の重要性、④高アルカリ温泉水の δD 値は、これまで報告されている地表水として世界でも最も高い値を示し、高アルカリ泉の性状は超塩基性岩-水反応を反映した水質であったこと、⑤高アルカリ泉からの新規微生物遺伝子や炭酸塩形成候補菌の分離・同定、⑥高アルカリ泉の周囲に3種の淡水魚と1種の無尾両生類の棲息確認とアルカリ温泉水への適応機能、⑦高アルカリ泉周辺で生成している天然コンクリートの高強度コンクリートに匹敵するほどの高い一軸圧縮強度。

研究成果の概要 (英文)：

Study on geo- and bio-resource science and technology learnt from the processes in hyperalkaline springs at Oman was conducted by geologists, geochemists, biologists, engineers to understand geological condition and geo-scientific impact of hyperalkaline springs, adaptation mechanism of microorganisms and fish for hyperalkaline condition, long-term stability of natural concrete and effective storage of CO_2 in geological strata. From the results of this study, the following points were cleared: 1) petrology and structure of geology for production of hyperalkaline springs, 2) kinetics of carbonate formation at the hyperalkaline springs, 3) role of the aragonite and monohydro-calcite on anion migration in groundwater, 4) the highest δD value of hyperalkaline water, 5) existence of new microorganisms and their genes, 6) existence and adaptation to hyperalkaline water of freshwater fishes and frog, 7) strength and long term stability of natural concrete at Oman.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,000,000円	2,700,000円	11,700,000円
2010年度	4,300,000円	1,290,000円	5,590,000円
2011年度	600,000円	180,000円	780,000円
2012年度	0円	0円	0円
2013年度	0円	0円	0円
総計	13,900,000円	4,170,000円	18,070,000円

研究分野：地球工学

科研費の分科・細目：地球・資源システム工学

キーワード：オマーン、高アルカリ、蛇紋岩化作用、生物生態工学、資源開発工学

1. 研究開始当初の背景

地球表層環境に存在する一般的な地下水・地表水は、様々な緩衝作用により pH 5 から 9 の範囲に収まっている。しかし、その地球表層環境にも pH の極限環境状態にある空間が存在する。例えば、鉛、銅、亜鉛などの硫化物を採掘している鉱山では、極端に低い pH の酸性鉱山廃水 (Acid Mine Drainage: AMD) が発見され、地球上で最も低い pH の廃水は米国カリフォルニア州にある Iron Mountain 鉱山から流出する AMD の pH -3.6 である (Nordstrom et al., 2000)。一方、高アルカリ側では、北ヨルダンのマカリンで pH 12.9 の地下水の湧出が認められている (Linklater, et al., 1996)。Nordstrom et al. (2000) がレビューしているように、AMD の環境問題がかなりクローズアップされてきたこともあり、強酸性環境の地球化学、微生物学、生理学に関する理解はかなり進んできた。しかし、それに対して、pH 11 を超える高アルカリ環境での理解はほとんど進んでいない。

工学的には、様々な状況で「高アルカリ環境における工学技術」が大きな関心を集めている。路盤材など土木工学的に利用された鉄鋼スラグや廃棄あるいは二次利用されるフライアッシュは、天然水との相互作用によって周辺が高アルカリ環境となり、その環境における有害物質の挙動を理解することが緊急課題となっている。また、使用済み燃料の再処理工程で発生する放射性廃棄物の地層処分では、固化体やグラウト等に大量のセメント材料が使用されるために処分場が高アルカリ環境になり、その環境における他のバリア材料への影響評価や物質移動様式、微生物活性の理解が急務とされている。さらに、国際的に注目を集めている二酸化炭素の地層貯留でも、貯留岩体のオプションとしてアルカリ岩体への期待が大きい。一方、生物工学的には、高アルカリ条件に耐え得るタンパク質、生体膜脂質および化学浸透圧形成能、高アルカリ環境下での ATP 合成システム、Ca 代謝ホルモンの塩基配列やアミノ酸配列の理解は、高アルカリ条件での生物工業的利用や骨粗鬆症等の治療薬への応用として社会的な期待も大きい。

2. 研究の目的

オマーン の山岳地帯に多数湧出する高アルカリ泉 (pH11-12 程度) において、高アルカリ環境で未解決な課題を有する様々なデ

ィシプリンの研究者が集結し、①高アルカリ泉を作り出す地質学的条件とその地球科学・地球工学的インパクトの解明、②高アルカリ環境における地球化学的諸現象 (沈殿、吸着、表面錯体、固液分配等) の解明、③高アルカリ環境に適応した微生物群集や動物種のスクリーニングとその適応機構の解明、④自然が作り出したコンクリートの長期挙動とその生成に学ぶ二酸化炭素貯留法の解明を目的とした調査・研究を進める。また、得られた知見を統合し、高アルカリ環境で問題となる様々な工学的課題の解決や、自然から学ぶ新しいインターディシプリン型工学手法の創成を目指す。

3. 研究の方法

本研究の方法を以下にまとめるが、詳細は月刊地球の特集号 (オマーンに湧出する高アルカリ泉から学ぶアルカリ環境の地球・生物資源科学) を参照いただきたい。

21 年度は、12 月から 1 月にかけて、研究代表者、研究分担者、連携研究者とそれぞれの研究室に所属するポスドク・大学院生が参加する現地調査を行った。また、この現地調査では、参加者全員が周辺の地質や地球化学を学ぶための巡検を行い、高アルカリ泉湧出のバックグラウンドとなる地質環境についての理解を深めるとともに、フィールドサイエンスの重要性を認識することとなった。巡検に引き続いて各グループに分かれて調査を行い、アルカリ泉周辺の岩石、水、沈殿物 (おそらく微生物を含む)、動物の採集を行い、より詳細な分析が必要な試料については適切な処理を施した後に日本に持ち帰り、グループ毎に専門的な見地から分析を行った。また、8 月に北海道大学で、具体的な調査計画立案と相互理解、および現地研究者や関係者との協力関係の構築を計画するためのワークショップを開催した。

22 年度も 12 月から 1 月にかけて、研究代表者、研究分担者、連携研究者とそれぞれの研究室に所属するポスドク・大学院生が参加する現地調査を行った。本年度もアルカリ泉周辺の岩石、水、沈殿物、動物の採集を行い、より詳細な分析が必要な試料については適切な処理を施した後に日本に持ち帰って分析を行った。9 月には広島大学にて中間報告会を行った。本報告会はオープンな形式で実施し、多くの広島大学の学部生や大学院生も参加していただいた。23 年度は、現地調査を実施しなかったため、21 年度、22 年度に

実施した調査で日本に持ち帰った試料の分析や室内実験を行った。これらの成果については、8月に北海道大学で開催されたワークショップで報告・議論した。

4. 研究成果

本研究の成果は以下にまとめるが、詳細を月刊地球の特集号（オマーンに湧出する高アルカリ泉から学ぶアルカリ環境の地球・生物資源科学）としてまとめた。研究成果の詳細は本特集号を参照いただきたい。成果を要約すると以下ようになる。①高アルカリ泉を作り出す地殻-マントル境界に発達したマントル延性剪断帯の構造とその発達が明らかとなった、②高アルカリ環境における炭酸塩鉱物の生成とその速度式を導き、調査地で観察された生成量を再現することに成功した、③高アルカリ環境において生成する炭酸塩鉱物、特にアラゴナイトやヒドロタルサイトによって無機陰イオンの移行が遅延されることが明らかとなった、④アラゴナイトによる陰イオンの移行遅延には、その前駆物質であるモノヒドロカルサイトの存在と特性が重要であり、そのアルカリ環境で生成するCa-CO₃-Mg系準安定についてまとめた、⑤高アルカリ温泉水の同位体分析を行ったところ、 δD 値はこれまで報告されている地表水として、世界でも最も高い値を示し、高アルカリ泉の性状は超塩基性岩-水反応を反映した水質であった、⑥高アルカリ泉から新規微生物遺伝子や炭酸塩形成候補菌の分離・同定に成功し、その詳細を明らかにした、⑦高アルカリ泉の周囲に3種の淡水魚と1種の無尾両生類の棲息を確認し、アルカリ温泉水への適応機能について明らかにした、⑧高アルカリ泉周辺で生成している天然コンクリートの一軸圧縮強度は、高強度コンクリートに匹敵するほど高い強度を有していた。

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22件）

- ①佐藤努、低温蛇紋岩化作用から学ぶ高アルカリ環境の地球・生物資源科学、月刊地球、査読無、390号 Vol. 34、2012、125-129
- ②宮下純夫、足立佳子、オマーンオフィオライトをめぐる地質学的研究の現状と問題点、月刊地球、査読無、390号 Vol. 34、2012、130-135
- ③道林克禎、大原達也、海洋地殻-マントル境界に発達した延性剪断帯と加水による軟化作用、月刊地球、査読無、390号 Vol. 34、2012、136-141
- ④上田晃、柴田知之・Marie Python・芳川雅子・佐藤努、オマーン北部地域の地下水・河川水の同位体研究、月刊地球、査読無、390

号 Vol. 34、2012、142-147

- ⑤鈴木雅一、安楽総太郎、佐藤努、Reginald Victor.、高アルカリ環境に棲む魚類-生理・生態とその生物学的意義-、月刊地球、査読無、390号 Vol. 34、2012、147-153
- ⑥砂村倫成、堀本健太、高アルカリ蛇紋岩温泉水中の微生物生態とその生物地球学的意義、月刊地球、査読無、390号 Vol. 34、2012、154-158
- ⑦中井亮佑、長沼毅、高アルカリ泉に棲む炭酸塩形成微生物群集とその生物地球学的意義、月刊地球、査読無、390号 Vol. 34、2012、159-163
- ⑧松原勇武、星野純、安楽総太郎、佐藤努、米田哲朗、高アルカリ泉周辺で生成する二次生成物の鉱物学とその反応速度論、月刊地球、査読無、390号 Vol. 34、2012、163-167
- ⑨西山理沙、宗本隆志、福土圭介、アルカリ環境で生成するCa-CO₃-Mg系準安定相とその地球化学的意義、月刊地球、査読無、390号 Vol. 34、2012、168-172
- ⑩安楽総太郎、松原勇武、星野純、佐藤努、米田哲朗、アルカリ環境で生成する鉱物による陰イオンの吸着とその長期挙動、月刊地球、査読無、390号 Vol. 34、2012、173-179
- ⑪杉山隆文、高アルカリ泉周辺で生成する天然コンクリート構造物の物性と長期挙動のナチュラルアナログ、月刊地球、査読無、390号 Vol. 34、2012、180-185
- ⑫ Kamei, A. Fukushi, K Takagi, T. and Tsukamoto, H.、Chemical overprinting of magmatism by weathering: A practical method for evaluating the degree of chemical weathering granitoids.、Applied Geochemistry、査読有、27巻、2012、796-805
- ⑬道林克禎、大原達也、海洋地殻-マントル境界に発達した延性剪断帯と加水による軟化作用、地球、査読無、34、2012、136-141
- ⑭福土圭介、注目の論文 南・東南アジアの大規模地下水ヒ素汚染、月刊化学、査読無、66巻、2011、66-67
- ⑮ Ryosuke Nakai, Takashi Abe, Tomoya Baba, Satoshi Imura, Hiroshi Kagoshima, Hiroshi Kanda, Atsuko Kanekiyo, Yuji Kohara, Akiko Koi, Keiko Nakamura, Takanori Narita, Hironori Niki, Katsuhiko Yanagihara, Takeshi Naganuma、Microflorae of aquatic moss pillars in a freshwater lake, East Antarctica, based on fatty acid and 16S rRNA gene analyses、Polar Biology、査読有、35、2012、425-433
- ⑯ Yagi, S. Fukushi, K.、Phosphate sorption on monohydrocalcite.、Journal of Mineralogical and Petrological Sciences、査読有、106、2011、109-113
- ⑰ Fukushi, K.、Munemoto, T. Sakai, M. and Yagi, S.、Monohydrocalcite: A promising

remediation material for hazardous anions.、査読有、12、2011、064702

⑱矢部太章、福土圭介・伊藤弘志・窪田宗弘・榎谷優輔、水溶液中における酸化マグネシウムの変質挙動、粘土科学、査読有、49、2011、135-140

⑲Kanematsu, M. Kanematsu, M. Young T.M. Fukushi, K. Sverjensky, D. Green, P.G. and Darby, J.L.、Quantification of the effects of organic and carbonate buffers on arsenate and phosphate adsorption on a goethite-based granular porous adsorbent.、Environmental Science and Technology、査読有、45、2011、561-658

⑳福土圭介、先進的表面錯体モデリングによる酸化物への陰イオン吸着挙動の予測、地球科学、査読有、45、2011、147-157

21、中井亮佑、長沼毅、第6章 辺境の微生物、シリーズ現代の生態学 第11巻 微生物の生態学、査読無、2011、85-97

22、Ryosuke Nakai、Takashi Abe, Haruko Takeyama, Takeshi Naganuma、Metagenomic analysis of 0.2- μ m-passable microorganisms in deep-sea hydrothermal fluid、Marine Biotechnology、査読有、13、2011、900-908

〔学会発表〕(計25件)

①Isamu Matsubara, Jun Hoshino, Sohtarō Anraku, Tsutomu Sato, Yoneda Tetsuro、Mineralogy and Geochemical Reaction Modeling of the Precipitates at Hyperalkaline Springs in Oman、International Conference on the Geology of the Arabian Plate and the Oman Mountains、2012年1月7-9日、Sultan Qaboos University (オマーン)

②Yamazaki, S. and Miyashita, S.、Formation of incipient oceanic island arc crust within oceanic crustal sequence: Geology and geochemistry of the late intrusive rocks in the northern Oman ophiolite、International Conference on the Geology of the Arabian Plate and the Oman Mountains、2012年1月7-9日、Sultan Qaboos University (オマーン)

③Kusano, Y., Adachi, Y., Miyashita, S. and Umino, S.、Lava accretion processes around mid-ocean-ridges: Volcanic stratigraphy in the Wadi Fizh area, northern Oman ophiolite、International Conference on the Geology of the Arabian Plate and the Oman Mountains、2012年1月7-9日、Sultan Qaboos University (オマーン)

④Miyashita, S., Nogawa, Y., Adachi, Y. and Tomatsu, T.、Magma system along

fast-spreading ridges: Evidence from the upper gabbro units in the northern Oman Ophiolite、International Conference on the Geology of the Arabian Plate and the Oman Mountains、2012年1月7-9日、Sultan Qaboos University (オマーン)

⑤Adachi, Y., Hashimoto, T., Miyashita, S.、Petrogenesis of regional variation of the Moho transition zone in the northern Oman ophiolite、International Conference on the Geology of the Arabian Plate and the Oman Mountains、2012年1月7-9日、Sultan Qaboos University (オマーン)

⑥Tsuchiya, N., Shibata, T., Yoshikawa, M., Adachi, Y. and Miyashita, S.、Petrogenesis of the Lasail plutonic complex, northern Oman ophiolite, Oman、International Conference on the Geology of the Arabian Plate and the Oman Mountains、2012年1月7-9日、Sultan Qaboos University (オマーン)

⑦Kaneko, R., Sanpei, T., Adachi, Y. and Miyashita, S.、Role of mantle pyroxenites on the genesis of ocean island basalts、International Conference on the Geology of the Arabian Plate and the Oman Mountains、2012年1月7-9日、Sultan Qaboos University (オマーン)

⑧Michibayashi, K. and Oohara, T.、Olivine microstructures and temporal evolution of fabric in a hydrated ductile shear zone at the mantle-crust boundary, Oman. EOS Trans. Abstract T52B-07、2011 Fall Meeting, AGU、2011年12月4-9、Moscone Convention Center (USA)

⑨Nakai, R., Naganuma, T., Kagoshima, H., Niki, H., Kohara, Y., Imura, S., Kanda, H., Yanagihara, K., Baba, T., and Abe, T.、Unsuspected eukaryotic diversity of aquatic moss pillars inhabiting a freshwater lake in East Antarctica, based on 18S rRNA gene analysis、XXXIII Symposium on Polar Biology、2011年11月18日、国立極地研究所(立川市)

⑩道林克禎・大原達也、オマーンに学ぶデタッチメント断層発達プロセス、InterRidge-Japan 研究集会「海底拡大系の総合研究」、2011年11月1-2日、東京大学大気海洋研究所(千葉県柏市)

⑪鈴木雅二、佐藤脩示、ビクター・レジナルド、安楽総太郎、荒木誉之、佐藤努、田中滋康、オマーンの抗アルカリ環境に見られる魚類の形態・生理・生態、日本動物学会第82回大会、2011年9月21日、大雪クリスタルホール(旭川市)

⑫松原勇武、星野純、長谷川甫、安楽総太郎、佐藤努、米田哲朗、カルシウム炭酸塩多形生

成の反応速度論的考察-オマーンに湧出する高アルカリ泉周辺に産する沈殿物を例として、第55回粘土科学討論会、2011年9月14-16日、鹿児島大学 郡元キャンパス（鹿児島市）

⑬安楽総太郎、星野 純、松原勇武、福土圭介、佐藤努、米田哲朗、カルシウム炭酸塩鉱物によるヨウ素の取り込みとその長期安定性、第55回粘土科学討論会、2011年9月14-16日、鹿児島大学 郡元キャンパス（鹿児島市）

⑭上田晃・柴田知之・Marie Python・芳川雅子・佐藤努、オマーン北部地域地下水・河川水の同位体研究、日本地球化学会年会、2011年9月14-16日、北海道大学（札幌市）

⑮西山理沙・宗本隆志・福土圭介、モノハイドロカルサイトの生成条件、日本鉱物科学会2011年年会合同学術大会、2011年9月9-11日、茨城大学（水戸市）

⑯山崎秀策・宮下純夫、海洋性島弧地殻の初期形成プロセス：オマーンオフィオライトにおける後期貫入岩体類の地球化学、日本地質学会第118年学術大会、2011年9月9-11日、茨城大学（水戸市）

⑰土谷信高・足立佳子・宮下純夫・柴田知之・芳川雅子、オマーンオフィオライト北部の後期火成岩類の岩石化学的性質とその成因、日本地質学会第118年学術大会、2011年9月9-11日、茨城大学（水戸市）

⑱金子 龍・三瓶 崇・足立佳子・宮下純夫、オマーンオフィオライト北部における大規模ウェールライト岩体の発見、日本地質学会第118年学術大会、2011年9月9-11日、茨城大学（水戸市）

⑲草野有紀・足立佳子・宮下純夫・海野進、海嶺セグメント内部における溶岩層の系統的变化オマーンオフィオライトの例、日本地質学会第118年学術大会、2011年9月9-11日、茨城大学（水戸市）

⑳Nakai, R., Naganuma, T., Kagoshima, H., Niki, H., Kohara, Y., Imura, S., Kanda, H., Yanagihara, K., Baba, T., and Abe, T., Potential microbial contribution to nitrogen cycling in an Antarctic moss pillar, International Conference on Polar and Alpine Microbiology 2011, 2011年9月4日-8日、Jamnikarjeva 101（スロベニア）
21、Tsuchiya, N., Murakami, G., Shibata, T., Yoshikawa, M., Adachi, Y., Miyashita, S., Petrology of the Lasail plutonic complex, northern Oman Ophiolite, Oman, VII Hutton Symposium on Granites and Related Rocks, 2011年7月4-9日、Avila Polytechnic School（Spain）

22、松原勇武、星野純、長谷川甫、安楽総太郎、佐藤努、米田哲朗、オマーンに湧出する高アルカリ泉周辺に産する沈殿物の鉱物学と地球化学反応モデリング-高アルカリ環

境下におけるヨウ素移行遅延を目指して一、資源素材学会 北海道支部、2011年6月13日、登別グランドホテル（登別市）

23、土谷信高・村上源太郎・足立佳子・宮下純夫、オマーンオフィオライト中の海嶺期および衝上開始期の珪長質岩の特徴とその成因、日本地球惑星科学連合学会2011年大会、2011年5月22-27日、幕張メッセ（千葉市）

24、土谷信高・村上源太郎・足立佳子・宮下純夫、オマーンオフィオライト中の海嶺期および衝上開始期の珪長質岩の特徴とその成因、日本地球惑星科学連合学会2011年大会、2011年5月22-27日、幕張メッセ（千葉市）

25、鈴木雅一、佐藤脩、オマーンの高アルカリ環境に生息する魚類の形態・生理・生態、日本地球惑星科学連合学会2011年大会、2011年5月22-27日、幕張メッセ（千葉市）

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 努 (SATO TSUTOMU)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：10313636

(2) 研究分担者

道林 克禎
(MICHIBAYASHI KATSUYOSHI)
静岡大学・理学部・准教授
研究者番号：20270978
長沼 毅 (NAGANUMA TAKESHI)
広島大学・生物圏科学研究科・准教授
研究者番号：70263738
鈴木 雅一 (SUZUKI MASAKAZU)
静岡大学・理学部・准教授
研究者番号：60280913
上田 晃 (UEDA AKIRA)
富山大学・理学部・教授
研究者番号：90456799

(3) 連携研究者

杉山 隆文 (SUGIYAMA TAKAFUMI)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：70261865
宮下 純夫 (MIYASHITA SUMIO)
新潟大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号：60200169

砂村 倫成 (SUNAMURA MICHINARI)
東京大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：90360867
福士 圭介 (FUKUSHI KEISUKE)
金沢大学・環日本海域環境研究センター・
助教
研究者番号：90444207
田中 滋康 (TANAKA SHIGEYASU)
鈴岡大学・創造科学技術大学院・教授
研究者番号：90146233