

令和元年6月7日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06925

研究課題名(和文) 低濃度塩水石油増進回収法のナノスケールメカニズムの解明とその効率化

研究課題名(英文) Nano-scale study on mechanisms of low-salinity enhanced oil recovery toward high-efficiency production design

研究代表者

Liang Yunfeng (Liang, Yunfeng)

東京大学・人工物工学研究センター・特任准教授

研究者番号：70565522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では塩濃度を変化させたときの鉱物表面上における油の吸着構造を探り、低濃度塩水による石油増進回収法(EOR)メカニズムを分子レベルから明らかにすることを目的としてX線CTR散乱法測定、分子動力学シミュレーション、濡れ性測定を行った。その結果、粘土鉱物を多く含む砂岩貯留層の場合、高pH条件で酸性油と鉱物の間にカチオン架橋構造を形成することによって酸性油が吸着し、特に二価のCa<sup>2+</sup>イオンが本質的な役割を果たすことがわかった。一方、炭酸塩貯留層の場合、低pH条件で方解石表面に酸性原油が強く吸着し、一価のNa<sup>+</sup>が重要な役割を果たしていることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低濃度塩水による石油増進回収法(EOR)は従来の化学薬剤を用いるEORに比べて環境負荷が小さく経済的であることから、適用例が増えている。しかし、その油回収率を向上させるメカニズムは十分に解明されておらず、油田によってはその効果がほとんど見られない場合もある。実験やシミュレーションを含む分子スケールの研究を行うことによって、我々は低塩分濃度水攻法によるEORメカニズムに関する新しい理論を提供することができた。

研究成果の概要(英文)：Enhanced oil recovery (EOR) with low concentration brine is increasing its application because it has less environmental impact and is more economical than EOR using conventional chemical agents. However, the mechanism that improves the oil recovery rate has not been fully elucidated. So, in this research, it aims at investigating the adsorption structure of oil on the mineral surface when changing salt concentration, and clarifying the EOR mechanism by low concentration brine from molecular level. We have performed X-Ray crystal truncation rod experiment, molecular dynamics simulations, and wettability measurement. In the case of clay mineral such as in sandstone reservoir, it is found that divalent Ca<sup>2+</sup> ions play an essential role by forming cation bridging structure between acidic oil and minerals at high pH condition. In the case of calcite such as in carbonate reservoir, it is found that adsorption is stronger at low pH condition. The monovalent Na<sup>+</sup> is found to be more important.

研究分野：工学・総合工学(地球・資源システム工学)

キーワード：石油増進回収法 低濃度塩水 ナノスケール 分子動力学 X-Ray CTR 界面の吸着構造 資源開発 界面科学

## 1. 研究開始当初の背景

次世代に向けたエネルギーの安定供給を確保するため、石油の回収率を向上させる EOR の重要性は年々高まっている。近年、低濃度塩水を貯留岩に圧入することで、従来の地層水あるいは海水を圧入する方法（水攻法）よりもさらに回収率を向上させる技術が注目されている。従来の水攻法から低濃度塩水による水攻法に切り替えることによって油回収率がさらに 33% 向上した例も報告されている。これは、化学薬剤を用いる EOR と同等あるいはそれ以上の効果であり、化学薬剤を用いないため環境負荷が小さく経済的である。しかし、圧入水中の塩の有無、種類、濃度によって石油回収率が顕著に変化することが確認されており、その油回収率を向上させるメカニズムは十分に解明されていない。したがって、低濃度塩水による EOR のメカニズムの基礎的な理解が、この技術の向上と普及、さらにはエネルギーの安定供給と石油開発事業の低環境負荷化につながる。近年、この低濃度塩水の EOR 効果のメカニズムとして鉱物表面からの粘土微粒子の除去や貯留岩の鉱物表面の濡れ性変化が考えられている。濡れ性の変化については、低濃度塩水によるイオン交換により、原油中に存在する極性分子の鉱物表面への吸着が弱まることが考えられている [1-3]。例えば、表面の陽電荷が硫酸イオンで還元された炭酸塩鉱物の表面にカルシウムイオンが吸着し、カルボキシル基を有する油性分子と反応して錯体を形成しているところに低濃度塩水中のマグネシウムイオンが来ると、カルシウムイオンは炭酸塩岩鉱物の表面から酸性油分と共に置換され、炭酸塩岩表面で濡れ性の変化を引き起こされる。しかし、このような濡れ性の変化について、科学的で明確な分子レベルからの説明は未だなされていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、塩濃度を変化させたときの鉱物と塩水及び油の固液界面における吸着構造の変化を実験と理論計算により調べることで、低濃度塩水による EOR のメカニズムを明らかにすることを目的としている。具体的には、塩濃度を変化させて次の測定および計算を実施する。(A) 放射光施設 SPring-8 にて X 線 CTR 散乱法を用いて塩濃度の変化による岩石鉱物の固液界面における水分子およびオレイン酸やステアリン酸など有機化合物の吸着構造の変化を明らかにする。(B) 岩石鉱物表面上の原油の接触角の差をそれぞれ光学顕微鏡および AFM によって調べる。(C) 分子動力学 (MD) 計算及び第一原理計算により、実験結果に対する分子レベルでの検証と考察を行い、鉱物表面の吸着構造が塩濃度によりどのように変化するかについて明らかにする。

## 3. 研究の方法

低濃度塩水による EOR のメカニズムを理解するため、塩濃度を変化させたときの鉱物と塩水及び油の固液界面における吸着構造の変化を明らかにするため、以下 3 つの研究項目において実験と理論計算を実施した。

研究項目(A)「X 線 CTR 散乱法の実験と解析」では、鉱物表面に分布しているイオンが変化したときの油分子と鉱物の相互作用を観察する実験を行った。良好な分解能を得るために、X 線 CTR 散乱法測定は SPring-8 の BL19B2 ビームラインを利用し、特定のイオンが分布するステアリン酸 / 白雲母の界面に対して測定を実施した。白雲母表面の分布イオンには  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  を用いた。測定で得られた X 線の散乱強度曲線の最適モデルから、各系での電子密度プロファイルを求めた。

研究項目(B)「分子動力学 (MD) シミュレーションによる検討」では、陽イオン交換鉱物表面 (白雲母のへき開面) と酸性油分子を含む NaCl 水溶液との界面系を設定し、その系での MD シミュレーションを行った。界面からの平均力ポテンシャル分布を計算することにより、鉱物表面に存在する  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  などのカチオンとカルボキシル基との結合の強さを定量的に把握した。また、典型的な陽イオン交換可能な鉱物ではないが、方解石表面についても 4 つの異なる陽イオン ( $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、および  $Ca^{2+}$ ) の吸着自由エネルギーを計算した。

研究項目(C)「岩石鉱物表面における油の接触角の測定」では、当初は AFM (原子間力顕微鏡) を用いた接触角の測定実験を計画していたが、デジタルカメラを用いた接触角の測定実験に変更した。これは、この方法で十分な測定精度が得られると考えたためである。

## 4. 研究成果

## 4.1 X 線 CTR 散乱法の実験と解析

まず、分子動力学シミュレーション結果と合わせて、我々が実施した油 (シクロヘキサン) - 水 - 鉱物 (白雲母) の系での X 線 CTR 散乱法データの解釈を実施した。その結果、オンゲストロームの分解能でシクロヘキサンの吸着構造を白雲母表面に近接する 4~6 のピークを持つ電子密度の振動として捉えることができた。この電子密度の振動構造は、シクロヘキサン分子が扁平な球状であることに起因していると考えられる。また、X 線 CTR 散乱法実験と分子動力学シミュレーションを組み合わせることにより、原子スケールの 2 次元固体状水膜が、水飽和したシクロヘキサン - 白雲母界面に存在し、その水薄膜の厚さは 1.0 nm 程度であると推定された。次に、白雲母表面に分布する陽イオンの影響を検討するために陽イオンを  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  の 3 種類として X 線 CTR 散乱法測定を行った。以下ではこれらの陽イオンを分布さ

せた白雲母をそれぞれ K-, Ca-, Mg-muscovite と呼ぶ。図-1 に、測定で得られた CTR 信号データを示す。横軸は散乱角度の関数  $Q$  で、式(1)で定義される。ここで  $\lambda$  は X 線波長で、本実験の X 線エネルギー (20 kwV) では  $0.619 \text{ \AA}$  となる。縦軸は構造因子の絶対値で、この値は散乱強度の平方根から導かれる。

$$Q = |Q| = 4\pi/\lambda \sin(2\theta/2) \quad (1)$$

Bragg の法則  $d = 2d \sin \theta$  から、CTR 信号の強い部分は白雲母結晶構造に起因することが分かる。CTR 信号にそれ以外の振動が見られないことから、白雲母表面でステアリン酸は単分子膜を形成していないことが示唆される。図-2 に、K-, Ca-, Mg-muscovite システムのモデルフィッティング結果を示す。縦軸は電子密度を、横軸は白雲母表面からの距離を  $\text{\AA}$  スケールで示している。なお、横軸原点は白雲母最表面の酸素原子としている。それぞれのフィッティングにおける  $\chi^2$  値は、K-, Ca-, Mg-muscovite モデルでそれぞれ 2.44、3.51、22.0 となった。得られた電子密度分布はいずれの系でも表面近傍で電子密度の変動が確認できる。先行実験が存在する K-, Ca-muscovite システムについて、表面最近傍の電子密度ピーク位置と報告されている白雲母-カチオン間の距離を表-1 に示す。両者がよく一致することから、K-, Ca-muscovite システムについて、一つ目のピークはカチオンの分布を示唆していると考えられる。また、2 価カチオンの Ca-, Mg-muscovite システムの一つ目のピーク位置 (それぞれ  $2.51 \text{ \AA}$ 、 $2.84 \text{ \AA}$ ) の傾向は、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  の水和半径 (それぞれ  $2.53 \text{ \AA}$ 、 $3.00 \text{ \AA}$ ) の傾向と一致する。このことから、Mg-muscovite システムにおいても表面最近傍のピークがカチオンの分布を示していると考えられる。また、これらのシステムではカチオンは部分的に水和しており、さらに表面への吸着傾向は水和力の強弱が関係していることが考えられる。同じ有機物でカルボキシル基を有するフミン酸の吸着構造モデルとの比較から、ステアリン酸の吸着範囲の推定をおこなった。その結果、全ての実験システムで吸着範囲は  $15 \text{ \AA}$  程度となった。この結果は、ステアリン酸の全長が  $24.7 \text{ \AA}$  であり、傾斜して吸着している可能性を考えれば妥当な推定と言える。しかし、吸着範囲の推定については更なる検討が必要である。電子密度分布を比較すると、K-, Ca-muscovite システムは表面近傍でピークが立ち、なだらかに電子密度が落ち着く一方で、Mg-muscovite システムは鋭いピークが表面近傍で立っている。この違いは、Mg-muscovite システムでは表面近傍の原子が顕著に層状に構造化していることを示しており、ステアリン酸の吸着構造が異なることを示唆している。

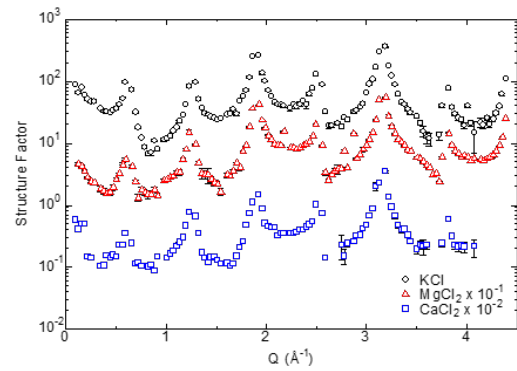


図-1 CTR 信号 . Mg-muscovite システムと Ca-muscovite システムはそれぞれ  $10^{-1}$ 、 $10^{-2}$  値をずらして表示している

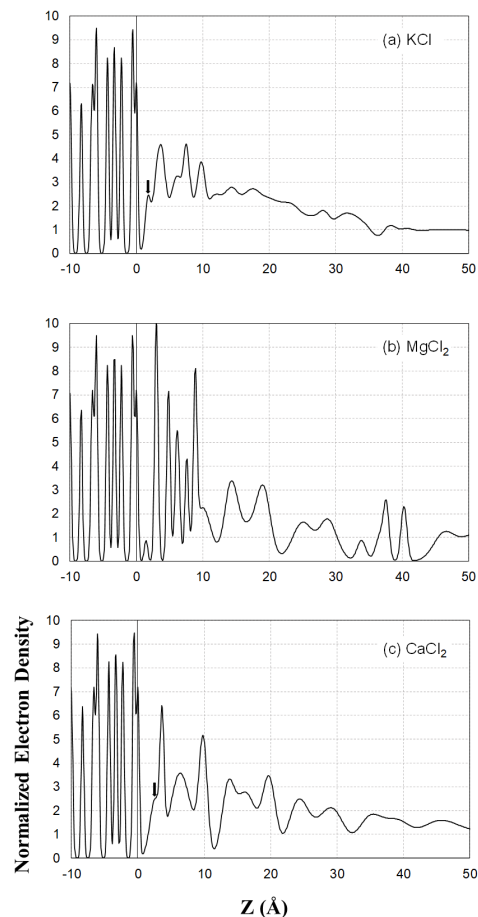


図-2 KCl、MgCl<sub>2</sub>、CaCl<sub>2</sub> 処理した白雲母基板表面近傍の電子密度分布  
横軸は白雲母基板表面の酸素原子からの距離を表し、縦軸は n-デカンの電子密度で正規化した値を示している。

表-1 測定ピーク位置と先行実験のカチオン距離の比較 (Unit:  $\text{\AA}$ )

システム	ピーク位置	カチオン位置
K-muscovite	1.69	1.67
Ca-muscovite	2.51	2.53

## 4.2 分子動力学シミュレーションによる検討

### 4.2.1 白雲母劈開面

まず、白雲母劈開面と酸性油分子を含む NaCl 水溶液 (0.99 mol/kg) の界面系を設定した。地層水の塩構成の変化を想定し、陽イオン ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ ) を劈開面に存在する  $\text{K}^+$  と交換した。それぞれの陽イオン交換状態は、当該陽イオンが地層水中に高濃度で存在する状態に対応している。本計算中に、水溶液中の  $\text{Na}^+$  と、劈開面の陽イオンの交換は起こらない。水溶液相にはカルボキシル基を有する酸性油分子 ( $\text{C}_9\text{H}_{19}\text{COOH}$ ) が一分子存在すると仮定し、カルボキシル基のプロトン化 ( $-\text{COOH}$ )・脱プロトン化 ( $-\text{COO}^-$ ) の両方の状態を検討した。なお、プロトン化の状態は低 pH で優勢で、脱プロトン化の状態は高 pH で優勢となる(酸解離定数 4.90 (Barrat, 1996))。上記のシミュレーションシステムを用いて、アンブレラサンプリング法による平均力ポテンシャル (PMF) の評価を行うことで、イオンが酸性油分子の吸着に与える影響を評価した。PMF は式 (2) で定義される：

$$\text{PMF}(D) = -k_B T \ln\{P(D)\} \quad (2)$$

ここで、 $D$  は白雲母劈開面と酸性油分子の距離、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は温度、 $P(D)$  は MD 計算中に距離  $D$  に酸性油分子を見出す確率である。アンブレラサンプリング法では、 $D$  を複数の領域に分割しそれぞれ MD 計算を行うことで、 $P(D)$  を広い領域に渡って取得する。本研究では、PMF から酸性油分子の吸着状態と水溶液バルク中でのエネルギーの差 ( $\Delta G$ ) を算出する。 $\Delta G$  が負であり、かつその絶対値が大きければ大きいほど、酸性油分子が鉱物表面で安定な構造を取っていることになる。本研究では PMF から得られる  $\Delta G$  を比較することで、各陽イオン交換状態における粘土鉱物表面における酸性油分子の安定性を評価した。温度・圧力はそれぞれ 298 K、0.1 MPa とした。

$\text{Ca}^{2+}$  が粘土鉱物表面で突出して酸性原油分子を安定化させることがわかる。加えて、 $\text{Ca}^{2+}$  交換状態での白雲母劈開面で酸性油分子が安定化した際の分子構造を取得すると、酸性油分子が  $\text{Ca}^{2+}$  によって架橋される構造を得ることができた(図-4)。本構造は、これまで示唆されてきた二価カチオンによる酸性油分子の吸着促進メカニズムと整合的である (RezaeiDoust et al., 2009)。その他のイオンでは、 $\text{Ca}^{2+}$  と同一周期 (第 4 周期) である  $\text{K}^+$  が  $\text{Ca}^{2+}$  と同様にイオンに対する直接的な架橋構造、第 3 周期に属する  $\text{Na}^+$  と  $\text{Mg}^{2+}$  では水分子を介した吸着構造を取ることが明らかとなった。このことは、吸着構造とイオン半径の関係を示している。プロトン化状態 (低 pH で優勢) では、それぞれの陽イオン交換状態に対する PMF の違いが消失した(図-3b)。加えて、脱プロトン化状態で見られたような PMF の極小値が存在しないことがわ

かった。このことは、プロトン化状態では、どのような陽イオン交換状態に対しても酸性油分子が鉱物表面では不安定で、吸着しないことを示している。

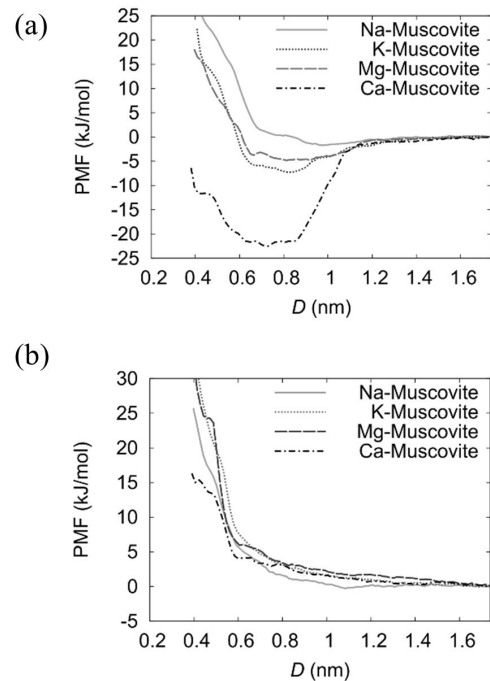


図-3 PMF 計算結果:a 脱プロトン化状態 ( $-\text{COO}^-$ )  
b プロトン化状態 ( $-\text{COOH}$ )

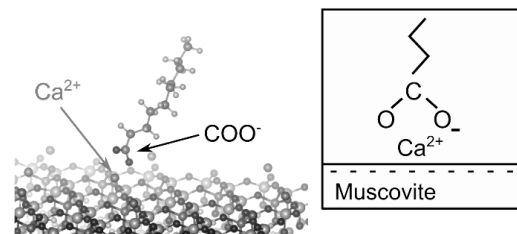


図-4 酸性油分子の  $\text{Ca}^{2+}$  交換状態の表面に対する安定吸着構造のスナップショットとその模式図

### 4.2.2 方解石表面

次に、水溶液と接触する方解石表面 (104 面) 上のカチオン ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  および  $\text{Ca}^{2+}$ ) と酸性油分子、ステアリン酸 ( $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ ) およびステアリン酸イオン ( $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO}^-$ ) の安定性を自由エネルギー計算と平衡計算を実施することにより評価した。陽イオンの自由エネルギー計算結果から、 $\text{Na}^+$  および  $\text{K}^+$  は方解石表面に吸着され、 $\text{Mg}^{2+}$  および  $\text{Ca}^{2+}$  は吸着されないことがわかった。この原子価による吸着挙動の違いは、水和自由エネルギーから導かれる。二価カチオンは、一価カチオンより大きな水和自由エネルギーを有するため、より大きな水和殻

を形成する。このため、二価カチオンと方解石表面との直接相互作用が妨げられ、二価カチオンは方解石表面から離れたままになる。酸性油分子の自由エネルギー計算結果から、ステアリン酸が直接吸着と間接吸着の異なる2つの方法で方解石表面に吸着されることがわかった。方解石表面への直接吸着は間接吸着よりも大きい吸着自由エネルギーを示した。間接吸着の場合、カルボキシル基の酸素原子と方解石表面の間に水分子があり、方解石表面にカチオンが吸着しているか否かにかかわらず、ステアリン酸イオンが吸着した。さらに、方解石表面上の一価陽イオン(Na<sup>+</sup>またはK<sup>+</sup>)はステアリン酸イオンの吸着をより強く安定にすることが示唆された。酸性オイル分子の吸着自由エネルギーの比較から、方解石表面にNa<sup>+</sup>があるとき、ステアリン酸イオンが最も強く吸着されることが示唆された。また、水溶液中の一価カチオンは、方解石表面にイオン化された酸性オイル分子を吸着することによって、二価カチオンよりも重要な役割を果たすと考えられる。

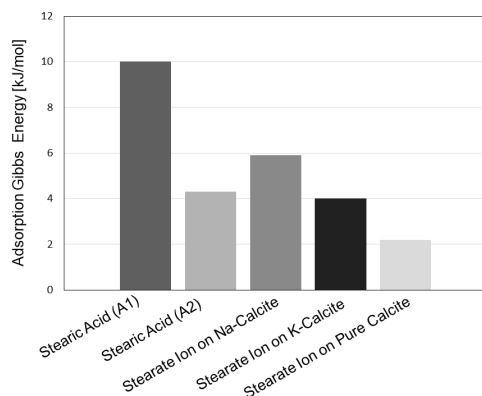


図-5 酸性油分子の自由エネルギー計算の計算結果

#### 4.3 岩石鉱物表面における油の接触角の測定

劈開した白雲母表面を超純水で洗い流した後、0.1 Mに調整したKCl<sub>aq</sub>、MgCl<sub>2aq</sub>、NaCl<sub>aq</sub>、CaCl<sub>2aq</sub> それぞれに漬け置きして白雲母の表面にそれぞれのカチオンを分布させた。その後、漬け置きした水溶液を500 μMのステアリン酸を含むデカン(以下、ステアリン酸デカン)に置換する作業(フラッディング1)で白雲母表面にステアリン酸を吸着させ、次に、そのステアリン酸デカンを1000 ppm、10000 ppm、35000 ppmに調整したNaCl<sub>aq</sub>に置換する作業(フラッディング2)でそのステアリン酸を脱着させた。上記作業の劈開後、フラッディング1後、フラッディング2後に接触角測定を行った。劈開後はデカン、500 μMステアリン酸デカン、5 mMステアリン酸デカンの3種類の油中に白雲母を入れ、その表面に蒸留水を2 μL滴下した時の水滴の接触角を測定し、フラッディング1後は500 μMステアリン酸デカン中で、フラッディング2後はデカン中で、それぞれ同様に接触角を測

定した。接触角測定の結果を表2に示す。表2【a】より劈開後の接触角はステアリン酸の有無で大きく変化することがわかる。また、ステアリン酸の濃度が大きくなっても接触角は大きく変化しなかった。これより白雲母に吸着するステアリン酸濃度は500 μMで十分であり、濃度を大きくしても白雲母に吸着する量が変わらないと考えられる。また表2【b】より、フラッディング1後の接触角はマグネシウムイオンの場合が最も大きく、ステアリン酸を最もよく吸着していると考えられる。また、カリウムイオンとナトリウムイオンとでは接触角はほぼ同じであった。表2【a】の500 μMステアリン酸デカンの値と表2【b】を比較すると2価カチオンはより大きく、1価カチオンはより小さくなった。これより、2価カチオンはステアリン酸をより多く吸着させるが1価カチオンは吸着量が劈開後と比べて少し減っていることが分かる。さらに、表2【b】と表2【c】よりそれぞれのカチオンでフラッディング2前後の接触角の差を比べるとKClは低濃度なほど、MgCl<sub>2</sub>は今回の濃度全てで、CaCl<sub>2</sub>は10000 ppmで大きく変化し、ステアリン酸の脱着に特に効果があることが分かった。一方、NaClはこの濃度範囲では効果があまりないことが分かった。以上より、鉱物表面のカチオンの種類によって低塩分濃度水攻法の効果が大きく変わることが分かった。

表2 接触角測定結果  
【a】劈開後

	デカン	500 μMステアリン酸デカン	5 mMステアリン酸デカン
接触角(°)	27.37	47.19	44.96

【b】フラッディング1後

	KCl	MgCl <sub>2</sub>	NaCl	CaCl <sub>2</sub>
接触角(°)	40.7	104.69	39.42	51.16

【c】フラッディング2後

接触角(°)	KCl	MgCl <sub>2</sub>	NaCl	CaCl <sub>2</sub>
1000 ppm	19.43	29.8	37.82	33.32
10000 ppm	22.13	25.54	37.39	25.59
35000 ppm	32.45	28.98	33.53	38.41

#### <参考文献>

1. T. Hassenkam, A. C. Mitchell, C. S. Pedersen, L. L. Skovbjerg, N. Bovet, and S. L. S. Stipp, *Colloids & Surf. A* **403**, 79 (2012).
2. G.-Q. Tang and N. R. Morrow, *J. Petroleum Sci. & Eng.* **24**, 99 (1999).
3. P. Zhang, M. T. Tweheyo, and T. Austad, *Colloids & Surfaces A* **301**, 199 (2007).

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

1. K. Kobayashi, Y. Liang, S. Murata, T. Matsuoka, S. Takahashi, K. Amano, N. Nishi, and T. Sakka, Stability evaluation of cation bridging on a muscovite surface to describe ion-specific wettability alteration. *J. Phys. Chem. C* **121**, 9273-9281 (2017).
2. Y. Liang, S. Tsuji, J. Jia, T. Tsuji, and T. Matsuoka, Modelling the CO<sub>2</sub>-water-mineral wettability and CO<sub>2</sub> mineralization for carbon geo-sequestration. *Accounts of Chemical Research* **50**, 1530-1540 (2017).
3. M. Iwase, S. Sugiyama, Y. Liang, Y. Masuda, M. Morimoto, T. Matsuoka, E. S. Boek, R. Ueda, and K. Nakagawa, Development of digital oil for heavy crude oil: Molecular model and molecular dynamics simulations. *Energy & Fuels* **32**, 2781-2792 (2018).
4. S. Sugiyama, Y. Liang, S. Murata, T. Matsuoka, M. Morimoto, T. Ohata, M. Nakano, and E. S. Boek, Construction, validation, and application of digital oil: Investigation of asphaltene association towards asphaltene precipitation risk. *SPE Journal* **23**, 952-968 (2018).
5. 岩瀬本明, 梁云峰, 増田昌敬, 森本正人, 松岡俊文, 上田良, 中川和則. 石油増進回収への適用を考えた重質原油のデジタルオイルの開発. *石油技術協会誌* **83**, 418-419 (2018).

[学会発表](計 9 件)

1. M. Iwase, S. Sugiyama, Y. Liang, Y. Masuda, M. Morimoto, T. Matsuoka, E. S. Boek, T. Ohata, and R. Ueda, Development of Digital Oil for an Extra Heavy Oil for Investigation of Enhanced Oil Recovery. The 18th International Conference on Petroleum Phase Behavior and Fouling (PetroPhase2017), Le Havre (Normandie, France), on June 11 - 15, 2017.
2. Y. Hyotani, K. Kobayashi, Y. Liang, S. Murata, Y. Masuda, and S. Takahashi, Effect of Cations on Adsorption of Oil Molecule onto Calcite Surface: Toward Improved Description of Low-Salinity EOR. The 38th annual workshop and symposium, International Energy Agency, Enhanced Oil Recovery, Riviera Maya, Mexico, on September 26-30, 2017.
3. R. Muramatsu, Y. Tateyama, S. Murata, Y. Liang, Y. Masuda, S. Takahashi, and T. Matsuoka, Influence of Cation on Adsorption Structure of Oil-Mineral Interface for Enhanced Oil Recovery. The 4th International Symposium on "Application of NanoGeosciences in Petroleum Engineering (NanoGeoscience2017)", the University of Tokyo (Kashiwa Campus, Kashiwa, Japan), on November 20-21, 2017.
4. K. Kobayashi, Y. Liang, S. Murata, T. Matsuoka, S. Takahashi, K.-I. Amano, N. Nishi, T. Sakka, Low Salinity Water Injection from View Point of Crude Oil-Brine-Mineral Interaction. The 4th International Symposium on "Application of NanoGeosciences in Petroleum Engineering (NanoGeoscience2017)", the University of Tokyo (Kashiwa Campus, Kashiwa, Japan), on November 20-21, 2017.
5. M. Iwase, S. Sugiyama, Y. Liang, Y. Masuda, M. Morimoto, T. Matsuoka, E. S. Boek, R. Ueda, and K. Nakagawa, Development of Digital Oil for Heavy Crude Oil: Molecular Model and Molecular Dynamics Simulations. The 4th International Symposium on "Application of NanoGeosciences in Petroleum Engineering (NanoGeoscience2017)", the University of Tokyo (Kashiwa Campus, Kashiwa, Japan), on November 20-21, 2017.
6. J. Mizuhara, K. Kobayashi, Y. Liang, and Y. Masuda, Molecular Dynamics Study on Wettability Alteration of Minerals for Low Salinity EOR. Goldschmidt2018 Conference, Boston, 12-17 August, 2018.
7. 岩瀬本明, 杉山俊平, Yunfeng Liang, 増田昌敬, 森本正人, 松岡俊文, 大畑朋也, 上田良, EORの数値解析的検討を目的とした重質油に対するデジタルオイルの適用, 平成29年石油技術協会春季講演会, 東京都, 2017年6月.
8. 井上陽太, 村松玲奈, 村田澄彦, 低塩分濃度水攻法における鉱物表面の濡れ性変化に及ぼすカチオンと塩濃度の効果. 平成30年度石油技術協会春季講演会, 新潟市, 2018年6月.
9. 岩瀬本明, 梁云峰, 増田昌敬, 森本正人, 松岡俊文, 上田良, 中川和則. 石油増進回収への適用を考えた重質原油のデジタルオイルの開発. 平成30年度石油技術協会春季講演会, 新潟市, 2018年6月.

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名	松岡俊文	村田澄彦	増田昌敬
所属研究機関名	京都大学	京都大学	東京大学
部局名	イナフラステムマ社' MIT研究拠点エント	工学系研究科	工学系研究科
職名	研究員	准教授	教授
研究者番号(8桁)	10303851	30273478	50190369