

## 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 5月15日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760678

研究課題名（和文） CO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>資化菌を併用した新規EORの開発—CO<sub>2</sub>-MEOR  
のフィールド試験研究課題名（英文） Development of a novel EOR technique using CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>-degrading  
microorganisms

研究代表者

菅井 裕一（SUGAI YUICHI）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：70333862

研究成果の概要（和文）：

CO<sub>2</sub>を石油貯留層に圧入して採油増進を図る技術において、CO<sub>2</sub>とともにCO<sub>2</sub>を資化して増殖する微生物も油層に圧入し、採油増進に対するCO<sub>2</sub>と微生物の相乗効果を期待する採油増進技術を目的とした研究を行なった。CO<sub>2</sub>存在下において石油の粘度を半減させる微生物を国内の油田から分離し、この微生物を用いた採油増進技術を目的とした培養実験、室内採油増進実験ならびにフィールドスケールのシミュレーション研究の結果、同技術によって取り残し原油の約10%を増進回収可能であることが示された。

研究成果の概要（英文）：

Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) techniques involve the injection of bacteria and/or their nutrients into mature oil reservoirs. The mechanisms for additional oil recoveries by MEOR has been postulated as follows:

1. In situ-produced bio-gases such as carbon dioxide and methane result in increase of reservoir pressure and decrease of oil viscosity, therefore oil displacement is promoted.
2. In situ-produced bio-surfactants can decrease the interfacial tension between oil and water.
3. In situ-produced bio-polymers increase the water viscosity, which brings the improvement of the mobility ratio.
4. Bacterial degradation of heavier components of crude oil can decrease the viscosity of crude oil, which brings the improvement of oil mobility.

Since the cost of nutrients such as molasses, which has been used for a nutrient in MEOR, has been progressively increased recently because it becomes a raw material for the bio-ethanol. Therefore, a realistic MEOR technique should be established using thermophilic anaerobic oil-degrading bacteria (TAOB) which can utilize the remaining oil in mature oil reservoirs as their carbon source.

We isolated a novel talented TAOB from an oilfield in Japan. The isolated TAOB can grow in the brine supplemented with crude oil and degrade heavier components of crude oil selectively. Then, the oil viscosity can be reduced to 30-65% of its original viscosity. This TAOB can grow well at a temperature between 50 and 70°C, a salinity up to 3%, and a pressure up to 700 psi; therefore, this TAOB can be applied to MEOR in many oilfields.

The core flooding experiments were carried out to estimate the EOR effects of this TAOB. After the primary oil recovery, this TAOB had been injected into the core including residual oil and incubated for 2 weeks at 60°C. 1.3% of original oil in place (2.9% of residual oil) had been recovered additionally by the brine injection for the secondary oil recovery after the incubation. Both growth of the TAOB and degradation of heavier components of crude oil were observed; therefore, this TAOB are effective for EOR.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	500,000	100,000	600,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	940,000	4,240,000

研究分野：資源開発工学

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：EOR、石油、微生物、二酸化炭素、Petrotoga 属、粘度、シミュレーション、コア掃攻実験

1. 研究開始当初の背景

CO<sub>2</sub> Enhanced Oil Recovery (CO<sub>2</sub>-EOR) において CO<sub>2</sub> と油の接触面積が大きいほど採油増進効果が高いと考えられるが、通常は圧入された CO<sub>2</sub> が残留油の少ない高浸透率領域のみを選択的に流動し、低浸透率領域に取り残されている油と接触することなく生産井に到達してしまうため、期待された採油増進効果が得られない場合が多い。したがって、CO<sub>2</sub>-EOR の採油増進効果の向上には、浸透率の不均一性を改善し CO<sub>2</sub> と油の接触面積を拡大させることが重要である。一般に浸透率の不均一性を改善する場合にはポリマーの適用が検討されるが、ポリマーの代わりに微生物を圧入し、微生物細胞自身および微生物が生成するバイオポリマー/バイオフィルムなどの効果により、油層内の浸透率の不均一性を改善して CO<sub>2</sub>-EOR による採油増進効果を向上させる方法 (CO<sub>2</sub>-Microbial EOR, CO<sub>2</sub>-MEOR) を着想した。これによれば、ポリマーを用いる場合よりも低コストで同等の効果が期待できる。

2. 研究の目的

CO<sub>2</sub>-MEOR に用いられる微生物には、油層環境への適用性に加え CO<sub>2</sub> 濃度の高い環境への適応性が求められるので、CO<sub>2</sub>-EOR を実施している油田や CO<sub>2</sub> 濃度の高い油田などに生息する微生物を分析し、本研究で目的とする CO<sub>2</sub> 資化菌の生息状況とその属種を明らかにする。検出された CO<sub>2</sub> 資化菌を生菌として単離し、本 EOR を想定した砂岩コア内培養実験に供して、その増殖性やバイオポリマー/バイオフィルム生産性を評価して有望株をスクリーニングする。これらの有望株を、本 EOR で人為的に制御可能な条件 (CO<sub>2</sub> 濃度および CO<sub>2</sub> 以外に必要な栄養塩 (窒素源や微量必須元素など) の濃度など) を変化させて砂岩コア内培養実験に供し、その最適培養条件

を明らかにする。

これらの培養実験結果を用いて、有望株の増殖挙動および EOR に有効な機能性を数値モデル化し、これらの数値モデルを油層シミュレータに導入して、同有望株を用いた CO<sub>2</sub>-MEOR の数値シミュレータを開発する。有望株を用いた室内採油増進実験を行ない、同条件で実施した数値シミュレーション結果とのマッチングにより CO<sub>2</sub>-MEOR シミュレータを完成させる。同シミュレータの油層モデルをフィールドレベルに拡張して CO<sub>2</sub>-MEOR の数値実験を行ない、同 EOR の適用油層条件や、最適な実施方法などを明らかにする。

3. 研究の方法

以下のような手順に従って本研究を実施した。

(1) CO<sub>2</sub>-EOR 適用油層および CO<sub>2</sub> を高濃度で含む油層に生息する微生物の調査と CO<sub>2</sub> 資化菌の分離

(2) 分離された CO<sub>2</sub> 資化菌について、CO<sub>2</sub>-MEOR を想定した条件下での培養実験を行ない、その増殖性・機能性評価と、とくに CO<sub>2</sub>-MEOR に期待できる有望株のスクリーニング

(3) スクリーニングされた有望株の基礎的性状の調査と、その増殖性・機能性強化を目的とした最適培養条件の検討

(4) 有望株の培養実験結果から、その増殖挙動および機能性を数値モデル化する。増殖挙動については Monod の式を基本とし、基質として油層内に不足していると考えられる窒素源を用い、油層内環境に特有の温度ならびに塩濃度を影響項として導入した数値モデルの構築を図る。機能性については実験式を基本とし、有望株の増殖挙動と機能性とを関連付けて数値モデル化する。

(5) 有望株の増殖挙動ならびに機能性の数値モデルをブラックオイル型の油層シミュ

レータに導入し、CO<sub>2</sub>-MEOR シミュレータを構築する。同シミュレータにおいて流体相は水・油の2相で構成され、水相は油層水成分、微生物成分ならびに窒素源成分の3成分から成り、油相は微生物によって分解されていない油成分（未分解油成分）および分解された油成分（既分解油成分）の2成分から成る。微生物が窒素源とともに油層に圧入され、油層内において窒素源と未分解油を消費して増殖する。これにより窒素源と未分解油が減少し、既分解油が増加する。窒素源と未分解油が枯渇すると微生物の増殖は停止し、未分解油に対して既分解油の存在比が増加することにより、油の粘度が低下する。油粘度の低下により残留油飽和率が低下し、最終的に採油増進が得られる。

(6) ベレア砂岩コアを用いた室内採油増進実験を行ない、同実験と同条件の数値シミュレーションを行なって、両者の結果をマッチングさせ、最終的に有望株を用いたCO<sub>2</sub>-MEOR シミュレータを完成させる。

(7) CO<sub>2</sub>-MEOR シミュレータの油層モデルを2次元フィールドスケールに拡張し、フィールドスケールで同有望株を用いたCO<sub>2</sub>-MEOR の数値シミュレーション研究を行ない、温度や塩濃度などの油層条件の違いによる採油増進効果の変化や、窒素源の濃度およびその圧入量の違いによる影響などを検討し、最適な油層条件と実施条件を提案する。

#### 4. 研究成果

油田で採取した油層水をCO<sub>2</sub>存在下（CO<sub>2</sub>濃度10%および100%）で集積培養し、CO<sub>2</sub>資化性もしくはCO<sub>2</sub>の存在によって代謝が活性化する微生物のスクリーニングを行なった。その結果、CO<sub>2</sub>存在下において石油中の炭素数30超の比較的軽質なアルカン成分を選択的に分解して石油の粘度低下をもたらす微生物を分離することに成功した。同微生物を石油を重層した油層水中で培養すると、最高で石油粘度を初期粘度の約半分にまで低減させる機能性を有することを明らかにした。同微生物のCO<sub>2</sub>-MEOR適用性を評価するために、温度、塩濃度ならびに圧力などの油層条件の影響を検討した結果、温度は最高80℃まで、塩濃度は最高9%まで、圧力は最高7MPaまでにおいて増殖と石油の粘度低減が認められ、多くの油田に適用できる可能性が示された。

さらに、日本、中国、オマーンならびにインドネシアの油田で採取された油層水中の微生物を遺伝子工学的手法を用いて調査した結果、複数の油田から同種の微生物が優勢種として検出され、同微生物が世界中の多くの油層内に棲息していることが示唆された。とりわけ、高温低塩濃度油層からは普遍的に

*Petrotoga* 属の微生物が検出され、同微生物を用いたCO<sub>2</sub>-MEORの適用にあたって必要な油層条件を明らかにした。

AR80を用いた室内コア掃攻実験によれば、同微生物の油層内への圧入・培養による残留油が分解され粘度が低下し、残留油の約6%が増回収されることが示された。Monodの式を用いたAR80の増殖モデルの数式化や、室内コア掃攻実験結果とのヒストリ・マッチングを経て構築されたCO<sub>2</sub>-MEORシミュレータ上で、50m×50m×1mの水平二次元油層の対角ブロックに圧入井と生産井を設けた油層モデルを用いてAR80を用いたCO<sub>2</sub>-MEORの数値実験を行ない、その採油増進メカニズムを検討した。水攻法を実施した後の油層に対してAR80とCO<sub>2</sub>を1.0 Pore Volum (PV) 圧入し、10日間坑井をシャットインして油層内培養を行なった後、後押し水を3.0 PV 圧入して増回収を行なった。その結果、AR80の油層内培養により低粘度化した油が後押し水の前面に集積し、これが生産井に到達することによって油が増産されるCO<sub>2</sub>-MEORにおける増回収のメカニズムが明らかになった。圧入するCO<sub>2</sub>の濃度を変化させて数値実験を行なった結果、AR80による増回収効果を引き出す最適なCO<sub>2</sub>圧入量も明らかになった。また、油層温度や塩濃度によってAR80の増殖挙動が異なるため、AR80を用いたCO<sub>2</sub>-MEORの適用可能油層条件として、温度50~65℃、塩濃度3%以下が最もEOR効果を得られる油層条件であることを明らかにした。以上の結果から、AR80を用いたCO<sub>2</sub>-MEORはフィールドレベルでも効果をもたらす可能性が示された。

#### 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8件)

1. Isty A. PURWASENA, Yuichi SUGAI and Kyuro SASAKI, Utilization of Natural Reservoir Brine in Enrichment Culture Medium: An Alternative Approach for Isolation of Anaerobic Bacteria from an Oil Reservoir, *Petroleum Science and Technology*, 査読有, 掲載決定(2012年11月掲載予定)
2. Ryo WAKIZONO, Yuichi SUGAI, Kyuro SASAKI, Yasunori HIGUCHI and Noriyuki MURAOKA, Investigation of Indigenous Bacteria in Water-dissolved Natural Gas Fields for Preventing Microbial Clogging of Injection Wells, *Proc. of Society of Petroleum Engineers (SPE) Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, 査読無, SPE-145990-PP, 2011

3. Ryo MORI, Yuichi SUGAI, Kyuro SASAKI and Kazuhiro FUJIWARA, Evaluation of the Potential of Microbial Restoration of Natural Gas Deposit with CO<sub>2</sub> Sequestration by Investigating Indigenous Bacteria in a High CO<sub>2</sub> Content Oilfield, Proc. of Society of Petroleum Engineers (SPE) Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 査読無, SPE-145 898-PP, 2011
  4. Isty A. PURWASENA, Yuichi SUGAI and Kyuro SASAKI, Estimation of the Potential of an Oil-Viscosity-Reducing Bacterium *Petrotoga* sp. Isolated from an Oil Field for MEOR, Proc. of Society of Petroleum Engineers (SPE) Annual Technical Conference and Exhibition, 査読無, SPE-137568-PP, 2010
  5. 菅井裕一、佐々木久郎、新見敏也、藤原和弘、向谷司、鹿野早苗、服部嘉行、岡津弘明、枯渇油ガス田における CO<sub>2</sub> のメタン変換を目的とした地下微生物に関する基礎的検討、Journal of MMIJ、査読有、125 巻 12 号、pp.595-604、2009 年
  6. Isty A. PURWASENA, Yuichi SUGAI and Kyuro SASAKI, Estimation of the Potential of an Oil-Viscosity-Reducing Bacteria, *Petrotoga* sp., Isolated from an Oilfield for MEOR, Proc. of International Petroleum Technology Conference 2009 (IPTC2009), 査読無, IPTC-13861, 2009
- [学会発表] (計 25 件)
1. Ryo MORI, Yuichi SUGAI, Kyuro SASAKI and Kazuhiro FUJIWARA, Evaluation of the Potential of Microbial Restoration of Natural Gas Deposit with CO<sub>2</sub> Sequestration by Investigating Indigenous Bacteria in a High CO<sub>2</sub> Content Oilfield, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition 2011, 2011.9.22., Jakarta, Indonesia.
  2. Ryo WAKIZONO, Yuichi SUGAI, Kyuro SASAKI, Yasunori HIGUCHI and Noriyuki MURAOKA, Investigation of Indigenous Bacteria in Water-dissolved Natural Gas Fields for Preventing Microbial Clogging of Injection Wells, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition 2011, 2011.9.21., Jakarta, Indonesia.
  3. Isty A. Purwasena, Yuichi Sugai and Kyuro Sasaki, Estimation of the Possibility of MEOR Using a Strain Belonging to the Genus *Petrotoga* by Investigating Its Habitations in Several Oilfields, International Symposium on Applied Microbiology and Molecular Biology in Oil Systems, 2011.6.14., Calgary, Canada.
  4. 森亮、菅井裕一、佐々木久郎、藤原和弘、微生物による CO<sub>2</sub> の CH<sub>4</sub> 変換に関する基礎的研究、平成 23 年度石油技術協会春季講演会、2011 年 6 月 8 日、東京
  5. 脇園遼、菅井裕一、佐々木久郎、樋口康則、村岡典幸、水溶性天然ガスかん水の還元性におよぼす微生物の影響について、平成 23 年度石油技術協会春季講演会、2011 年 6 月 8 日、東京
  6. Isty A. PURWASENA, Yuichi SUGAI, and Kyuro SASAKI, Isolation and Cultivation of a New Strain *Petrotoga* sp. for MEOR, 16th Energy Institute's Reservoir Microbiology Forum, 2010.11.30., London, UK.
  7. Isty A. PURWASENA, Yuichi SUGAI, and Kyuro SASAKI, Estimation of the Potential of an Oil-Viscosity-Reducing Bacterium *Petrotoga* sp. Isolated from an Oil Field for MEOR, Society of Petroleum Engineers (SPE) Annual Technical Conference and Exhibition, 2010.9.21., Florence, Italy.
  8. 菅井裕一、佐々木久郎、藤原和弘、服部嘉行、太田垣寛、岡津弘明、枯渇油ガス田に貯留した CO<sub>2</sub> の微生物による CH<sub>4</sub> 変換に関する研究、資源・素材 2010 (福岡)、2010 年 9 月 13 日、福岡
  9. 脇園遼、菅井裕一、佐々木久郎、樋口康則、村岡典幸、水溶性天然ガスかん水の還元性向上を目的とした地下微生物に関する研究、資源・素材 2010 (福岡)、2010 年 9 月 13 日、福岡
  10. Yuichi SUGAI, Experimental and Numerical Evaluation of MEOR Using a Talented Water-soluble Polymer Producing Microorganism, *Clostridium* sp. TU-15A, BIT's 1st Annual World Congress of Petroleum Microbiology, 2010.7.28., Dalian, China.
  11. 脇園遼、菅井裕一、佐々木久郎、樋口康則、水溶性天然ガスかん水の還元性に関わる地下微生物の検討、平成 22 年度石油技術協会春季講演会、2010 年 6 月 9 日、福岡
  12. Isty A. Purwasena, Yuichi Sugai and Kyuro Sasaki, Evaluation of Reservoir Condition Effects on the Reduction of Oil Viscosity by a *Petrotoga* strain Isolated from an Oilfield for MEOR, 平成 22 年度石油技術協会春季講演会、2010 年 6 月 9 日、福岡
  13. 菅井裕一、佐々木久郎、新見敏也、藤原和弘、服部嘉行、太田垣寛、岡津弘明、地下貯留層における CO<sub>2</sub> の CH<sub>4</sub> 変換に有効な微生物の棲息挙動に関する検討、平成 22 年度石油技術協会春季講演会、2010 年 6 月 9 日、福岡
  14. 菅井裕一、脇園遼、佐々木久郎、樋口康則、水溶性天然ガスかん水の還元性に及ぼす微生物の影響、資源・素材学会春季

- 講演会、2010年3月30日、東京
15. Isty A. PURWASENA, Yuichi SUGAI and Kyuro SASAKI, Estimation of the Potential of an Oil-Viscosity-Reducing Bacteria, *Petrotoga* sp., Isolated from an Oilfield for MEOR, International Petroleum Technology Conference (IPTC2009), 2009.12.8., Doha, Qatar.
  16. 新見敏也、菅井裕一、佐々木 久郎、服部嘉行、向谷 司、藤原和弘、岡津弘明、地下微生物を利用した地中メタン再生技術に関する基礎的研究、石油技術協会春季講演会、2009年6月3日、東京
  17. 菅井裕一、岡麻知子、佐々木久郎、微生物EOR に有用な独立栄養細菌および原油資化性細菌のスクリーニング、石油技術協会春季講演会、2009年6月3日、東京

[図書] (計2件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

菅井 裕一 (Sugai Yuichi)  
九州大学・工学研究院・地球資源システム  
工学部門・助教  
研究者番号：70333862

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：