

## 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 6月 6日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2012

課題番号：20246128

研究課題名（和文）二酸化炭素処理とエネルギー資源再生を両立させる持続型炭素循環システムの最適化技術

研究課題名（英文）Sustainable Carbon Cycle for Mitigating Carbon Dioxide Emission and Regenerating Energy Resources

研究代表者

佐藤 光三 (SATO KOZO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：60322038

研究成果の概要（和文）：二酸化炭素回収・貯留によって地中貯留された二酸化炭素をメタンに変換、エネルギー資源として利用する「持続型炭素循環システム」の構築を目指し、システムの要素技術の研究を行った。具体的には、地下貯留層のCO<sub>2</sub>変換・メタン生産バイオリクター化を目的に、地下微生物群の生態系・ガス生産活性を調査し、さらに微生物による電気化学的メタン生成反応を利用する新規CO<sub>2</sub>利用・変換技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：The main goal of this research is to establish a biotechnological system to reduce CO<sub>2</sub> into methane, the principle component of natural gas, within the CO<sub>2</sub> geological storage reservoirs. To this end, we first studied the ecosystems and methanogenic potentials of subsurface microorganisms. Then, we developed a new CO<sub>2</sub>-utilization/conversion technology by using the microbial electromethanogenic reaction.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	16,600,000	4,980,000	21,580,000
2009年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2012年度	2,900,000	870,000	3,770,000
総計	33,300,000	9,990,000	43,290,000

研究分野：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：再生可能資源・エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

産業革命以降、人類は地下深く埋もれていた化石資源を掘り出して利用してきた。化石資源から得られるエネルギーは技術と文明を飛躍的に発展させ、現在の社会を維持するために不可欠なものとなっている。しかし、化石資源の可採埋蔵量は無限ではなく、将来的な供給の不安定化が懸念されている。そして、化石資源の大量燃焼によって発生した二

酸化炭素は地球温暖化をはじめとする気候変動の主因となり、人類社会の未来を脅かしている。

これら化石資源枯渇と気候変動の問題は、今世紀の科学・工学の二大課題である。これに対し、難開発鉱床や非在来型資源の開発、再生可能エネルギー技術の導入促進、またエネルギーポートフォリオの多様化等、エネルギー資源パラダイム転換の試みが世界的に

行われている。また、気候変動緩和のために、CO<sub>2</sub>の排出量を削減する取り組みが国際的に行われている。その中で、二酸化炭素回収・貯留（Carbon dioxide Capture and Storage: CCS）は、大規模発生源（火力発電所など）からCO<sub>2</sub>を分離回収し、大気中へ排出する代わりに地下へ貯留する手法で、現在の技術でも実行が可能な対策として有望視されている。しかし、法的、社会的さらに経済的な制約等からCCS導入の拡充は遅れている。

## 2. 研究の目的

本研究は、CCS実施によって地中貯留されたCO<sub>2</sub>をメタンへと変換、エネルギー資源として利用する「持続型炭素循環システム」の構築を全体構想としている。持続型炭素循環システムは、地中貯留されたCO<sub>2</sub>を原料としてメタンを生産する複合技術系で、温暖化対策技術であるCCSにエネルギー資源生産・貯留の付加的価値を創出するものである。

メタン生成古細菌（メタン菌）と総称される一群の微生物は、CO<sub>2</sub>をメタン、天然ガスの主成分、に変換する能力を持っている。本システムでは、このメタン菌を利用し、CCSによって貯留されたCO<sub>2</sub>を地下貯留層内でメタンへと変換、エネルギー資源として再回収する技術を根幹としている。回収したメタンを燃焼させてエネルギーを採取し、さらに再び発生したCO<sub>2</sub>をCCS地中貯留する事で、循環速度の速い閉輪的(CO<sub>2</sub>の大気中への放出を経由しない)人工「炭素循環」系の構築を図る。

メタン菌は地球上のあらゆる嫌気的環境に広く分布している事が確認されており、地中からも検出されている。さらに水溶性ガス田の何割かはメタン菌の活性によって形成されたと考えられている点から、メタン菌を利用した地下での大規模なメタン生産技術という構想は、自然現象に範を持つ合理性があるといえる。しかし、CO<sub>2</sub>地中貯留層におけるメタン菌の技術利用には、以下の点を実験検証する必要がある。高温・高圧で、利用できる栄養分に乏しい地層中にCO<sub>2</sub>が貯留された環境下で、微生物はメタンを生産する代謝能力を保持し得るだろうか？メタン生産が可能としても、その生産速度を利用可能なレベルに保持・賦活化する技術が必要となる。また、地下貯留されたCO<sub>2</sub>をメタンへと還元する還元力源（通常は水素）はどのように供給するのか？

そこで本研究では、これら「CCS貯留層内のメタン生産の効率化」、「メタン菌への還元力源供給技術の考究」、さらに持続型炭素循環システムを最も効率的に稼働させる為の「地下貯留層内での微生物挙動シミュレーションの開発」を加えた三つを主要な研究課題と定め、以下の研究を行った。

## 3. 研究の方法

メタン菌 *Methanothermobacter thermautotrophicus* ΔH株をモデル微生物種として解析を行った。*M. thermautotrophicus* ΔH株は至適生育温度が65°Cの好熱菌であり、油・ガス田の地下貯留層を含む地下環境での近縁種の広い分布が確認されている。また、枯渇した油・ガス田は深部塩水層と共にCCSにおけるCO<sub>2</sub>の貯留層として想定されている。そこで、油田を「持続型炭素循環システム」の地下貯留層の研究モデルとして、油田地下貯留層から採取した地層水も微生物源として解析に供した。それら微生物株、または地層水を、地下貯留層内と同様の高温・高圧、貧栄養条件、またCCS貯留層内の環境を模擬するために高濃度のCO<sub>2</sub>の添加、CO<sub>2</sub>の溶解による地層水のpH低下等、CCS貯留層内の環境を模擬した条件下で培養を行い、メタン生産活性を主な指標として微生物活性を検証した。

微生物の電気化学的培養には、一槽型、または二槽型の電気化学的培養セルを用いた。バイアル瓶を培養槽本体として用い、カソードとアノード電極を挿入し、さらに両電極が直接接触することを防ぐためナイロンフィルター（一槽型）またはイオン交換膜（二槽型）を極間に挿入した。電極はカーボンペーパー、カーボンクロス、またはカーボンフェルトを用いた。それぞれの電極の上端近くに穴を穿ちチタニウムワイヤーと接続した。前培養した微生物を培養セルに植菌後、培養セルをブチルゴム栓とストッパーで密閉し、気相部をN<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> (80:20)混合ガスで置換加圧した。その後培養セル上部から突出したチタニウムワイヤーを直流電源装置に接続し、電圧を印加しながら55°Cで静置培養（電圧印加培養）した。

貯留層内の多孔質媒体中での菌体の輸送と媒体粒子への停留挙動の解析では、媒体粒子としてガラスビーズを用いたコアフラッド試験を行った。菌体付着に好適な条件下において、異なる2種類の媒体粒子径（150～212 μm, 212～300 μm）を用いて試験を行い、多孔質媒体粒子の違いによる菌体輸送および停留挙動の比較を行い、その機構を明らかにした。

## 4. 研究成果

(1) 栄養分添加による地下微生物のメタン生産の賦活化：*M. thermautotrophicus* ΔH株と油田貯留層から採取した地層水内の微生物群を高温・高圧、貧栄養、また高濃度CO<sub>2</sub>添加、CO<sub>2</sub>の溶解による地層水のpH低下等、CCS貯留層内の環境を模擬した条件下でそれぞれ培養実験を行った。その結果、CCS貯留層内の環境を模擬した実験条件下でも、微生物群が（メタン生産速度は低下する場合があるが）メタン生産能を保持している事が示され

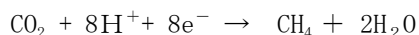
た。

さらに、地下微生物によるメタン生産の速度を向上させる手段として、栄養分の添加による微生物の代謝賦活化を試みた。地層水サンプルに複合栄養分である酵母エキスを添加しメタン生産への影響を解析した。栄養分を添加した培養サンプルでは、栄養分を添加していない培養サンプルと比べ、メタン生成量が著しく大きくなった。これは添加した栄養分が、天然の地層水中に不足している栄養素を補って、地下微生物のメタン生産に関わる代謝を賦活化した事を示唆している。同様に、*M. thermotrophicus* ΔH 株を地層水と同成分の培地で培養したところ、P 源、N 源またはミネラル分の添加により、メタン生成活性が顕著に向上することが示された。

これら栄養分の添加による地下微生物系への影響を調査するために、培養系内に存在する微生物種を決定した。検出されたメタン菌種は全て CO<sub>2</sub> をメタンに変換できるタイプの水素資化性メタン菌種であった事から、「持続型炭素循環システム」における地下微生物による CO<sub>2</sub> のメタン変換が栄養分添加によって賦活化できる事が示唆された。

以上の研究から、「持続型炭素循環システム」における CCS 貯留層の研究モデルとした油田の貯留層において、水素資化性メタン菌種を含む地下微生物が生息している事、またそれら地下微生物がメタン生産能を持つ事を確認した。さらに、CO<sub>2</sub> 貯留層を模した環境条件下でも、メタンの原料となる物質 (CO<sub>2</sub> と水素、あるいは有機物) が存在する限り、地下微生物によるメタン生産が実際に可能であり、メタン生産活性が栄養分の添加により促進される事を示した。これらは、「持続型炭素循環システム」の中心である「CCS 貯留層内でのメタン生産」コンセプトの地下微生物を用いた実験による実証であり、一つ目の研究課題「地下貯留層内でのメタン生産の効率化」の達成に結びつく知見である。

(2) メタン菌への還元力源供給法の考究：近年、メタン菌に「電気化学的に還元力源を供給する」事によりメタンが生産される反応が新たに発見された。この電気化学的メタン生産反応は、メタン菌が CO<sub>2</sub> をメタンへと変換する時に、分子状水素 (H<sub>2</sub>) を利用する代わりに、プロトン (H<sup>+</sup>) と電子 (e<sup>-</sup>) を利用してメタンを生産する反応である：



本研究項目では、この電気化学的メタン生産反応の持続型炭素循環システムへの技術利用を全体構想に、電気化学的メタン生成反応の地下貯留層内での利用・高効率化のための基盤情報を確立した。

萌芽的技術シーズである電気化学的メタン生産を「二酸化炭素回収・貯留によって地中貯留された CO<sub>2</sub> をメタンへと変換して利用する」システムの中核として技術化するための開発基盤の確立を目的として、以下の研究を行った。

まず、電気化学的メタン生成反応を地下の CCS 貯留層に適用、地下に電極の役目を果たす反応装置を構築、貯留層内のメタン菌にプロトン (H<sup>+</sup>) と電子 (e<sup>-</sup>) を供給し、CO<sub>2</sub> をメタンに効率的に変換する技術構想を基に、この技術構想の実効性の実験室レベルでの検証を行った。既往研究では、これまで電気化学的メタン生産技術を含む微生物的電気化学反応を利用した技術群を主に地上の環境でのみ検証しており、地下での応用を想定した研究はこれまで殆ど成されていない。また、地上環境中に生息する微生物群、至適生育温度が 37°C 付近の中温性メタン菌に関してのみ、電気化学的メタン生産の活性が確認されている。そこで本研究項目では、地下貯留層中での電気化学的メタン生産の技術利用を目指し、好熱性のメタン菌株と地下貯留層から採取した微生物群が実際に電気化学的メタン生産活性を持つ事を実験実証した。

*M. thermotrophicus* ΔH 株を水素を添加していない電気化学的培養セル内で電圧を印可しながら培養、メタンガスの生産を解析した。その結果、このメタン菌が地上に生息するメタン菌と同等以上の電気化学的メタン生産活性があることが示された。これは、高温性メタン菌が電気化学的メタン生産活性を持つ事の初めての実証であった。さらに、培養セル内に多孔質媒体としてガラスビーズを充填した場合でも、メタン菌による電気化学的メタン生産が見られたことから、地層内を模した多孔質媒体中でも電気化学的メタン生産が可能であることが示唆されている。

同様に、地層水由来の微生物群を電圧を印可しながら培養、メタンガス生産量を測定した。培養終了時、電圧印可培養したサンプルは、電圧を印可していないコントロールに比べ、顕著に高い量のメタンガスを生産した。電圧非印可コントロールでも低いメタン生産が観察されたが、これは前培養 (水素を添加) からの水素の持ち込みによる残存活性か、水素資化性以外のメタン生産活性のためと考えられる。この水素の非存在下での電圧印可に依存したメタン生産から、電気化学的メタン生成活性が地下貯留層由来の微生物群にも保持されている事が初めて示された。これら結果から、地下貯留層中で電気化学的メタン生産反応を利用して CO<sub>2</sub> をメタンに変換する技術の実効性が示唆された。

さらに電気化学的メタン生産の基礎研究として、特に高い活性を示した地層水由来の

微生物群に関して詳細な解析を行い、当該反応の微生物的・電気化学的機構の解明を進めた。地層水由来の微生物群を一槽型培養セルで電圧印可培養した。fed-batch形式で培地交換を繰り返し、電極(カソード)上における電気化学的メタン生産活性の高い微生物の集積を行った。電圧を印加したセルと印加しなかったセルを比較すると、電圧印可セルではメタン生成量が顕著に高かった。また、メタン生産速度は印可電圧に依存して向上した。この時、流れた電子の電気量のうちメタン生成に利用された割合を表す効率(電流-メタン変換効率)を計算したところ、ほぼ100%であった。さらに、この微生物系による電気化学的メタン生産速度は既往研究中で最も高い活性を示した。以上の結果から、高い電気化学的メタン生産活性を持つバイオカソードの形成が示唆された。これは、好熱性の微生物種では初めての知見である。

この高効率の電気化学的メタン生産反応に関わる地下微生物種を特定するため、カソード上の微生物群の群集構造を解析した。電極から検出された古細菌のうち、メタン菌は全てが *Methanobacteria* 綱に属する種であった。特に、水素資化性のメタン菌である *M. thermoautotrophicus* の優占化が観察された。細菌に関しては、*Firmicute* 門に属する種の優占化がみられた。特に、好熱性の電子放出細菌である *Thermincola* 種の細菌の優占化が観察された。

電気化学的メタン生産活性を持つ微生物群の電気化学的特性を Cyclic Voltammetry により解析した。その結果、高効率の電気化学的メタン生産活性を持つ地下微生物種ではカソードで顕著な電流が発生しており、電極表面上における反応には、微生物の触媒としての関与が確認された。また、電圧に依存した複数の反応経路の存在が示唆された。さらに、メタン菌単体による反応の電気化学的特性と比較した結果、反応の律速段階である電極からメタン菌への電子伝達に「電子放出性細菌」と呼ばれる一群の細菌種が触媒として関与している可能性が示唆された。

そこで、特に地下貯留層での利用を前提とした電気化学的メタン生産の微生物触媒として、既往知見の少ない高温環境(油ガス田の貯留層等)に由来する微生物サンプル群を対象に電子放出性細菌を探索した。その結果、多種の高温環境由来のサンプルで電気化学的活性が検出され、地下貯留層を含む高温嫌気環境における電子放出菌の遍在性と電気化学的メタン生産の地下での技術利用可能性がさらに示唆された。同時に、新規の好熱性微生物触媒(電子放出菌)を複数種発見した。

以上の事から、地下貯留層の常在性微生物群から初めて電気化学的メタン生産活性を

持つ微生物系を集積し、それが既往研究中で最も高い反応活性を持つ事を示した。さらにこの好熱性微生物系による反応の特性・機構を解析し、電気化学的メタン生産を利用したCO<sub>2</sub>変換・利用技術開発の基盤情報となる成果を得た。

(3) 地下貯留層内での微生物挙動シミュレーションの開発:本研究課題では、持続型炭素循環システム、また微生物的原油増進回収(Microbial Enhanced Oil Recovery; MEOR)技術等、地下貯留槽内での微生物利用技術の最適化を目指し、地下貯留層内での微生物挙動シミュレーションの開発を目的とした研究を行った。

地下貯留層に微生物を圧入し、利用する技術(MEOR、バイオオーグメンテーション等)が注目されている。「持続型炭素循環システム」でも、貯留層内の微生物群が重要な役割を果たすと想定されている。これら技術に関して、的確なフィールドオペレーション実施のためには、貯留層内の多孔質媒体中での菌体の輸送と媒体粒子への停留挙動を実験およびモデリングから明らかにすることが重要である。

微生物を用いたコアフラッド実験と流動シミュレーターを用いた実験結果の解析を行うことにより、イオン強度と吸着・脱着の関係を実験的に求めてモデル化し、これをもとにイオン強度を反映したシミュレーションモデルの有用性を示した。コアフラッド実験では、異なるイオン強度条件下でガラスビーズコアに微生物細胞を圧入し、差圧・流量・圧入菌体濃度および流出菌体濃度を測定する実験を常圧で行い、イオン強度の流出菌体濃度へ影響、浸透率低下などを評価した。微生物攻法シミュレーターを用いた実験結果の解析では、シミュレーターを用いて吸着・脱着に関するパラメータを変数としてコア圧入実験の結果をマッチングさせた。各パラメータをイオン強度の関数として表し、さらにこれら関数を微生物攻法シミュレーターに組み込んで改良されたシミュレーターを用い、圧入水のイオン強度を反映させたシミュレーションの必要性を示した。

また、多孔質媒体内での菌体の停留分布について、従来モデルでは予測できない結果が得られている。さらに、従来モデルから逸脱する結果の原因として菌体付着に不適な条件における第二エネルギー極小由来の媒体粒子への菌体付着、目詰まり、不均質性、細胞外ポリマーの存在が報告された。そして、媒体粒子径はそれらの影響の大小を決める条件の一つであるとされている。一方、貯留層への微生物の圧入を考慮すると、菌体付着に適する条件下における菌体輸送および停留挙動を理解することも必要である。そこで

菌体の媒体粒子への付着に好適な条件下において、異なる媒体粒子径を持つ粒子を充填したコアに対して微生物菌体の圧入フラッド試験を行い、多孔質媒体粒子径の菌体輸送および停留挙動に対する影響を解析した。その結果、停留影響因子は媒体粒子表面積の大きさであり、媒体粒子表面に停留した菌体の占有面積が増加するにつれ、停留量が減少している可能性が示唆された。また、コアカラム内では菌体溶液の圧入が進むにつれ圧入端から菌体が優先的に停留し、ある程度圧入すると停留分布が均一になるという停留機構が起こっている事が示唆された。さらに、これら結果に基づいて停留速度式を改善し、各媒体粒子径における実験結果と計算結果の傾向の良好な合致が得られた。

これら研究成果から、「持続型炭素循環システム」構築の技術基盤となる知見が得られ、さらなる新技術開発への発展性が示された。「持続型炭素循環システム」においてCO<sub>2</sub>のメタンへの還元反応を行うメタン菌が実際に地下貯留層に生息している事、さらに二酸化炭素貯留層内の環境条件下でもメタン生成能を保持し得る事が示された。また、「持続型炭素循環システム」におけるメタン菌への還元力源供給手法として、「電気化学的メタン生産の技術化利用」に関してそれぞれ基礎的研究を行った。地下に常在する微生物群が高い電気化学的メタン生産活性を持っている事が示され、貯留層内のメタン菌に電気化学的に還元力を供給する手法の有望性が示唆された。さらに、地下貯留層内での微生物挙動シミュレーションの開発では、微生物の多孔質媒体内での移動に焦点を絞り、貯留層への微生物や（微生物の増殖を促す）栄養源の圧入を伴う技術のシミュレーションモデル改良が行われた。今後は、微生物学的アプローチと工学的アプローチにより、電気化学的メタン生産速度向上と地下での反応装置の開発を計画している。さらに、シミュレーションモデル構築により、電気化学的メタン生産の実用化へ向けた最適化を図る。

##### 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7件）

- ① Q. Fu, H. Kobayashi, Y. Kuramochi, J. Xu, T. Wakayama, H. Maeda and K. Sato (2013) “Bioelectrochemical analyses of a thermophilic biocathode catalyzing sustainable hydrogen production.” Int J Hydrogen Energ, in press.

- DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.04.116.
- ② H. Kobayashi†, N. Saito†, Q. Fu† († contributed equally), H. Kawaguchi, J. Vilcaez, T. Wakayama, H. Maeda and K. Sato (2013) “Electrochemical and microbial analysis of the bio-electrodes of the electromethanogenic reactor.” J Biosci Bioeng, in press. 査読有り.  
DOI: 10.1016/j.jbiosc.2013.01.001.
- ③ K. Sato, H. Kawaguchi and H. Kobayashi (2013) “Bio-electrochemical conversion of carbon dioxide to methane in geological storage reservoirs.” Energ Convers Manage 66:343-50. 査読有り.  
DOI: 10.1016/j.enconman.2012.12.008.
- ④ Q. Fu, H. Kobayashi, H. Kawaguchi, J. Vilcaez, T. Wakayama, H. Maeda and K. Sato (2012) “Electrochemical and phylogenetic analyses of current-generating microorganisms in a thermophilic microbial fuel cell.” J Biosci Bioeng, 115:268-71. 査読有り.  
DOI: 10.1016/j.jbiosc.2012.10.007.
- ⑤ H. Kobayashi, K. Endo, S. Sakata, D. Mayumi, H. Kawaguchi, M. Ikarashi, Y. Miyagawa, H. Maeda and K. Sato (2012) “Phylogenetic diversity of microbial communities associated with the crude oil and formation water phases of the produced fluid from a high-temperature biodegraded petroleum reservoir.” J Biosci Bioeng 113:204-10. 査読有り.  
DOI: 10.1016/j.jbiosc.2011.09.015,
- ⑥ H. Kobayashi, H. Kawaguchi, K. Endo, D. Mayumi, S. Sakata, M. Ikarashi, Y. Miyagawa, H. Maeda and K. Sato (2012) “Analysis of methane production by microorganisms indigenous to a depleted oil reservoir for application in Microbial Enhanced Oil Recovery.” J Biosci Bioeng 113:84-7. 査読有り.  
DOI: 10.1016/j.jbiosc.2011.09.003.
- ⑦ H. Kawaguchi, T. Sakuma, Y. Nakata, H. Kobayashi, K. Endo and K. Sato (2010) “Methane production by Methanothermobacter thermotrophicus to recover energy from carbon dioxide sequestered in geological reservoirs.” J Biosci Bioeng 110:106-8. 査読有り.  
DOI: 10.1016/j.jbiosc.2010.01.008.

〔学会発表〕(計 34 件)

- ① Q. Fu, H. Kobayashi, H. Kawaguchi, J. Vilcáez, K. Sato. “Identification of new microbial mediators for electromethanogenic reduction of geologically-stored carbon dioxide.” 11th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-11), Kyoto, Japan, 2012/11/22 (査読により口頭発表に選出)
- ② M. Hara, Y. Onaka, H. Kobayashi, Q. Fu, H. Kawaguchi, J. Vilcáez, K. Sato. “Mechanism of electromethanogenic reduction of CO<sub>2</sub> by a thermophilic methanogen.” 11th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-11), Kyoto, Japan, 2012/11/21
- ③ Y. Kuramochi, Q. Fu, H. Kobayashi, M. Ikarashi, T. Wakayama, H. Kawaguchi, J. Vilcáez, H. Maeda, K. Sato. “Electromethanogenic CO<sub>2</sub> conversion by subsurface-reservoir microorganisms.” 11th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-11), Kyoto, Japan, 2012/11/20
- ④ Q. Fu, H. Kobayashi, Y. Kuramochi, J. Xu, K. Sato. “Bioelectrochemical analyses of a thermophilic biocathode catalyzing sustainable hydrogen production.” The 2012 Asian Biohydrogen and Bioproducts Symposium, 重慶, 中国, 2012/11/9-12 (査読により口頭発表に選出. Merit Award 受賞)
- ⑤ 齋藤 直輝、付 乾、川口 秀夫、ハビエル ビルカエス、小林 肇、佐藤 光三. “メタン生成的条件下における電気化学的メタン生成活性を持つ微生物群の解析.” 日本微生物生態学会第 27 回大会, 京都, 2011/10/8-10
- ⑥ 大中 温、付 乾、川口 秀夫、ハビエル ビルカエス、小林 肇、佐藤 光三. “メタン菌による電気化学的メタン生成反応の解析と数値モデル化.” 日本微生物生態学会第 27 回大会, 京都, 2011/10/8-10
- ⑦ 小林 肇、川口 秀夫、佐藤 光三、眞弓 大介、坂田 将、五十嵐 雅之、宮川 喜洋、前田 治男. “地下油田内微生物によるメタン生産.” 第 2 回メタンハイドレート総合シンポジウム, 東京, 2010/12/2
- ⑧ 小林 肇、遠藤 啓太、坂田 将、眞弓 大介、川口 秀夫、五十嵐 雅之、宮川 喜洋、前田 治男、佐藤 光三. “Study to enhance methanogenesis by subsurface microorganisms within petroleum reservoirs.” 日本微生物生態学会第 26

回大会, 筑波, 2010/11/24-26

- ⑨ H. Maeda, Y. Miyagawa, M. Ikarashi, D. Mayumi, H. Mochimaru, H. Yoshioka, S. Sakata, H. Kobayashi, H. Kawaguchi, and K. Sato. “Research for microbial conversion of residual oil into methane in depleted oil fields to develop new EOR process.” Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, 2010/11/1-4
- ⑩ H. Kawaguchi, Y. Nakata, K. Endo, T. Sakuma and K. Sato. “Development of microbial processes capable of converting stored CO<sub>2</sub> into methane for recovering energy in depleted oil reservoir.” 7<sup>th</sup> International Symposium for Subsurface Microbiology, Shizuoka, Japan, 2008/11/16-21.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 地中貯留二酸化炭素のメタン変換回収システム及び地中貯留二酸化炭素のメタン変換回収方法

発明者: 佐藤光三、小林肇

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2011-013976

出願年月日: 2011 年 1 月 26 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

「地中で再資源化」毎日新聞夕刊 (2009/5/22)、12 面記事

ホームページ

<http://gpre.geosys.t.u-tokyo.ac.jp/sato/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 光三 (SATO KOZO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 60322038

(2) 研究分担者

増田 昌敬 (MASUDA YOSHIHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号: 50190369

川口 秀夫 (KAWAGUCHI HIDEO)

東京大学・大学院工学系研究科・特任助教

研究者番号: 50463873