

2021年11月12日(金)

E会場

資源開発

[2E09-12] 資源開発(1)

座長:山田 淳也((株)INPEX)

13:00 ~ 14:30 E会場 (函館アリーナ スタジオA)

[2E09] 【招待】沈み込み帯と付加体のメタンフラックス ー持続可能な天然ガス資源ー

○鈴木 德行¹ (1. 北海道大学 理学研究院 地球惑星科学部門)

13:00 ~ 13:45

[2E10] 基礎試錐「日高トラフ」の掘削結果とその意義

○長原 薫¹、瀬能 修¹ (1. 石油資源開発株式会社)

13:45 ~ 14:00

[2E11] 日本国内26年ぶりのジャッキアップリグ使用に向けて

○山市 剛¹、峯岸 政人¹、森川 豪¹、前田 純二¹ (1. 三井石油開発株式会社)

14:00 ~ 14:15

[2E12] 炭酸塩岩における Low Salinity Waterflooding EORのメカニズム解明 - 静電反発説検証の事例紹介

○上谷 高明¹、竹谷 未来¹、海藤 ひろみ¹、Hao Xingjuan²、Yogarajah Elakneswaran² (1. 株式会社INPEX、2. 北海道大学)

14:15 ~ 14:30

資源開発

[2E13-17] 資源開発(2)

座長:中川 裕幸(石油資源開発(株))

14:45 ~ 16:00 E会場 (函館アリーナ スタジオA)

[2E13] A coupled geochemical model to predict oil recovery during low salinity waterflooding

○Yogarajah Elakneswaran¹ (1. Hokkaido University)

14:45 ~ 15:00

[2E14] 微生物による泡の生成作用を利用した石油増進回収 法に関する研究

○伊藤 美羽¹、菅井 裕一¹ (1. 九州大学)

15:00 ~ 15:15

[2E15] 粒子径の異なる SiO₂ナノ粒子分散液による濡れ性改 質作用の検討

○根岸 慶輔¹、阿部 一徳¹ (1. 秋田大学 大学院国際資源学研究科)

15:15 ~ 15:30

[2E16] 酸処理における二相ステンレス鋼チューブの選 択溶解の抑制

○水上 裕貴¹、安井 彩乃¹、平野 奨¹、砂場 敏行¹ (1. 株式会社INPEX)

15:30 ~ 15:45

[2E17] 炭酸塩岩貯留層酸処理におけるワームホール現象の 研究

○古井 健二¹、石渡 友章²、土屋 慶洋²、伊藤 義治² (1. 早稲田大学、2. 石油天然ガス・金属鉱物資源機構)

15:45 ~ 16:00

資源開発

[2E18-22] 資源開発(3)

座長:菅井 裕一(九州大学)

16:15 ~ 17:30 E会場 (函館アリーナ スタジオA)

[2E18] 天然ガス処理プロセスにおける水銀の分配予測技術

○山田 淳也¹、渋谷 健広¹、川崎 緑¹、大塚 町恵¹、小林 淳¹、辻 智也² (1. 株式会社 INPEX、2. マレーシア工科大学)

16:15 ~ 16:30

[2E19] Evaluation of crude oil emulsion type and stability by electrokinetic properties

○Hao Xingjuan¹、Afrin Sadia¹、Shimokawara Mai²、Kato Yoshitake²、Kitamura Ryuta²、Yogarajah Elakneswaran¹ (1. Hokkaido University、2. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC))

16:30 ~ 16:45

[2E20] INPEXの生物多様性保全の取組みについて

○川口 奈月¹、山本 汐音¹、野尻 渉¹、佐々木 直人¹ (1. 株式会社INPEX)

16:45 ~ 17:00

[2E21] 中国とインドのネットゼロへの道

○竹原 美佳¹ (1. 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構)

17:00 ~ 17:15

[2E22] 脱炭素化社会にむけて石油・天然ガス産業の気候変 動対応を考える

○伊原 賢¹ (1. 石油天然ガス・金属鉱物資源機構)

17:15 ~ 17:30

資源開発

[2E09-12] 資源開発(1)

座長:山田 淳也((株)INPEX)

2021年11月12日(金) 13:00 ～ 14:30 E会場 (函館アリーナ スタジオA)

[2E09] 【招待】沈み込み帯と付加体のメタンフラックス ―持続可能な天然ガス資源

○鈴木 徳行¹ (1. 北海道大学 理学院 地球惑星科学部門)

13:00 ～ 13:45

[2E10] 基礎試錐「日高トラフ」の掘削結果とその意義

○長原 薫¹、瀬能 修¹ (1. 石油資源開発株式会社)

13:45 ～ 14:00

[2E11] 日本国内26年ぶりのジャッキアップリグ使用に向けて

○山市 剛¹、峯岸 政人¹、森川 豪¹、前田 純二¹ (1. 三井石油開発株式会社)

14:00 ～ 14:15

[2E12] 炭酸塩岩における Low Salinity Waterflooding EORのメカニズム解明 - 静電反発説検証の事例紹介

○上谷 高明¹、竹谷 未来¹、海藤 ひろみ¹、Hao Xingjuan²、Yogarajah Elakneswaran² (1. 株式会社INPEX、2. 北海道大学)

14:15 ～ 14:30

沈み込み帯と付加体のメタンフラックス ー持続可能な天然ガス資源ー

（北海道大・理・地球惑星科学部門） すずき のりゆき 鈴木 德行

1. はじめに

日本の新第三系油ガス田は比較的短時間で形成されたと考えられているが、それでも 100 万年以上の地質時間をかけて炭化水素の生成・排出、二次移動、集積が行われている。中東や安定大陸の巨大油ガス田では 1 億年以上にわたって継続的な炭化水素の生成と集積が行われている場合がある。長い地質時間をかけて巨大な貯留構造が形成され、多量の油ガスが累積的に集積することで巨大油ガス田が形成されている。一方、日本の太平洋側に広がる前弧海盆には地下深部で生成したメタンが関係して形成されたガスハイドレート、泥火山、メタンブルームが広く認められている。また、千葉県、宮崎県の沿岸には水溶性ガス田が形成されている。これらのメタン関係事象は上述した従来の石油天然ガス鉱床と比較すると地質学的には比較的短時間に形成されたものである。

日本は世界でも有数の変動帯に位置しており、地下深部では顕著な速度で物質変化が進行している。物質の変化速度という視点から眺めると、変動帯は地下深部におけるメタンの生成や移動の速度（メタンフラックス）が最も大きな地域だといえよう。このような地下深部で生じている短期間でのメタンの生成と移動が日本の前弧海盆に特有な様々なメタン関連事象をもたらしているのではないだろうか。本講演では地下深部で生じている熱分解メタンや微生物起源メタンの短期間（1～100 年単位）における生成に焦点をあて、天然ガス資源の持続可能性について検討する。特に、これまでほとんど検討されてこなかった海洋プレートの滑り面であるデコルマン直下にあるアンダースラスト堆積物（underthrust sediments）をとりあげて比較検討する。日本海溝や南海トラフに沈み込む太平洋プレートやフィリピン海プレートのアンダースラスト堆積物は熱分解メタンの供給者のみならず、微生物起源メタンの生成に不可欠な H_2 （分子状水素）の供給者としても重要な役割を果たしていることを提起したい。

2. 地下深部でのメタン生成

ガスハイドレート、泥火山、水溶性ガス田から得られた天然ガスの組成や炭素・水素安定同位体組成から、これらのメタンにはメタン菌が生成した微生物

起源のものと、地下深部における堆積有機物の熱クラッキングによって生成した熱分解起源のものがある。東北日本と比較すると、西南日本の前弧海盆にガスハイドレート、泥火山が数多く認められているので^{1), 2)}、西南日本を例にメタンの生成場とそのフラックスについて考察する。図1にフィリピン海プレートの沈み込み帯にある南海トラフ前弧、熊野堆積盆の過去約 2.2Ma（220 万年）間の発達史を示した³⁾。図中の埋没や変形の方法と速度が短期間におけるメタンの生成速度と密接に関係している。図中の「現在」の断面図にある①～③は現在進行していると考

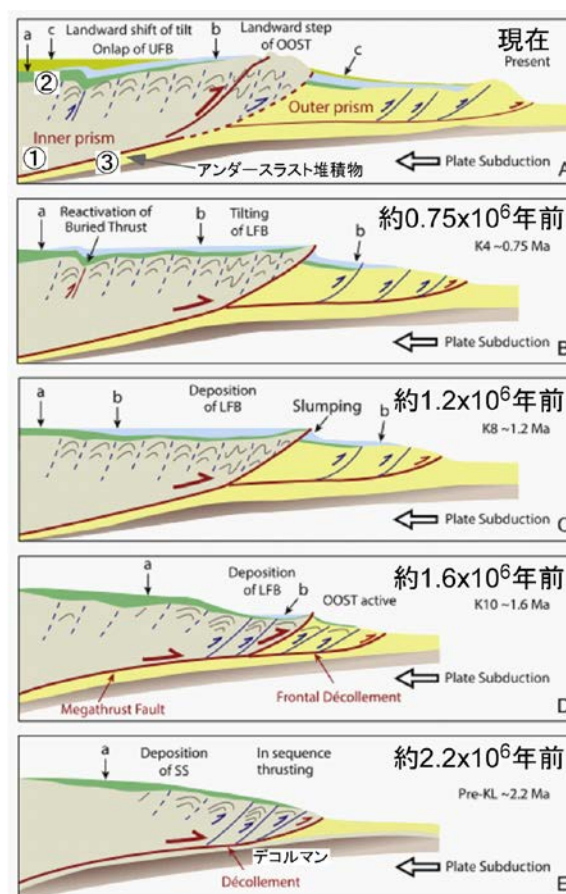


図1 南海トラフ前弧、熊野堆積盆の進化³⁾に現在の各種メタン生成の場を示した。①付加体深部の熱分解メタン生成帯、②メタン菌活性温度帯（25～45℃）、③デコルマン（プレート滑り面）直下のアンダースラスト堆積物。

えられるメタンの主な生成場である。

①は付加体深部にある堆積有機物の熱分解による熱分解メタン(ドライガス)生成帯。付加体の泥質岩は陸源有機物に比較的富み全有機炭素(TOC)濃度が低い。そのためオイルの生成や排出が少なくメタンの生成効率が高い。このような場合は熱分解メタンの生成速度は埋没速度(昇温速度)が大きいほど大きくなる。しかし、昇温しない場合(隆起や上方に移動する場合)は熱分解メタンの生成は停止する。そのため年単位では昇温域(多くの場合、沈降域)でのみメタン生成が行われている。

②はメタン菌が高い活性を示す温度帯(25～45℃)。微生物起源メタンはこのような温度帯で主に生成していると考えられている。従属栄養細菌とメタン菌のような独立栄養細菌からなる微生物生態系のもとで有用な堆積有機物が活用されメタンが生成している。究極的なメタン生成量が堆積有機物濃度に依存し、この温度帯(25～45℃)でメタン生成が究極量に達するのであれば、熱分解メタンの生成と同様に埋没速度(生成帯通過速度)が大きいほどメタン生成速度が大きくなる。外部からCO₂やH₂が供給され、メタン菌によるメタン生成が継続する場合には堆積有機物濃度から予想される究極量以上のメタン生成が期待できる。

③は海洋プレートの滑り面であるデコルマン直下のアンダースラスト堆積物中の熱分解メタン生成帯。アンダースラスト堆積物中の炭化水素生成が滑り面における過剰圧力の原因となり地震発生を誘発する可能性が指摘されている⁴⁾。しかし、TOC濃度が低く(0.5 wt%ほど)炭化水素ポテンシャルは低いと結論された⁴⁾。フィリッピン海プレートにともなうアンダースラスト堆積物は1000mほどの層厚で太平洋プレートはさらに薄い。そのため天然ガスの根源岩としてこれまで注目されてこなかった。後述するように、堆積盆の堆積物と比較すると海洋プレートの温度が低いいためアンダースラスト堆積物は深度に対する地温が低く、移動速度と昇温速度が大きいという特徴がある。また埋没と昇温が継続して行われているため常に有機物の熱分解が進行している。限られた領域における短時間でのメタン生成、メタンフラックスという視点から眺めると、以下に述べるようにアンダースラスト堆積物は優れた熱分解メタンの根源岩になり得る。

3. 沈み込み帯と付加体でのメタン生成速度

堆積盆での熱分解メタン生成(①):オイルの排出があるとメタンの生成量が減少するので、ここでは有機物に乏しい貧有機質泥岩(たとえば TOC=0.5 wt%)を考え、オイルの排出はないこととする。また、

埋没を継続し常に昇温しているとする。このとき、海底のある領域(たとえば 1km²)の海底下にあるメタン生成帯(ドライガス生成帯)で1年間に生成するメタン量はメタン生成帯を通過する堆積物の埋没量に依存している。いろいろなケロジェンタイプについて閉鎖系での熱分解実験が行われており海成の堆積有機物では TOC 重量に対して約 30 % (0.3 gCH₄/gTOC)がメタンに変化する⁵⁾。埋没速度を比較的大きく 1 mm/year (1 km/my)とすると、海底面に平行な 1 km²あたりのメタン生成速度は約 5.3 x 10³ m³/km²/year となる(見かけの比重を2.5とした)。

堆積盆での微生物起源メタンの生成(②):微生物起源メタン生成帯(地温 25～45℃)でのメタン生成が TOC 濃度に応じた究極量に達する場合、メタン生成速度は熱分解メタンの生成と同様に埋没速度が大きいほど大きくなる。TOC 濃度を 1.0 wt%, その約 10 %の炭素がメタンに変化するものとし(0.133 gCH₄/gTOC), 埋没速度を 1 mm/year とすると 1 km²あたりの微生物起源メタンの生成速度は熱分解起源メタンとおおよそ同程度(約 4.7 x 10³ m³/km²/year)となる(見かけの比重を2.5とした)。なお、比較的浅い深度でメタン生成が行われるので孔隙率が大きく見かけの比重はより小さいかもしれない。

アンダースラスト堆積物での熱分解メタン生成(③):太平洋プレートは 7～9 cm/year, フィリッピン海プレートは 3～7 cm/year の速度でそれぞれ日本海溝と南海トラフの深部へ沈み込んでいる。このような海洋プレートの沈み込みにもなつてアンダースラスト堆積物中で炭化水素が生成している。太平洋プレートとフィリッピン海プレートのアンダースラスト堆積物の沈み込み速度をそれぞれ 8 cm/year, 5 cm/year, 層厚をそれぞれ 500 m, 1000 m^{3),6)}, TOC 濃度をいずれも 0.5 wt%, TOC の熱分解メタンへの変化率を 30% (0.3 gCH₄/gTOC), 見かけの比重を 2.60 (孔隙率は極めて小さい)とすると、海溝に沿った幅 1 km での熱分解メタン生成速度は 2.2～2.7 x 10⁵ m³/km/year となる(オイルやウエットガスでの排出がないと仮定)。海底面に平行な単位面積あたりの生成速度はメタン生成帯の広がりと関係しており単純に比較できないが堆積盆での熱分解メタンや微生物起源メタンの生成速度と比較して十分に大きい。これは海洋プレートの沈み込み速度が堆積盆での埋没速度と比較して数十倍ほど大きいことに起因している。

4. アンダースラスト堆積物のメタン生成温度・深度
太平洋プレートとフィリッピン海プレートの沈み込み帯の温度構造が報告されている^{7),8),9)}。このような地下深部の温度構造を用いてアンダースラスト堆積物

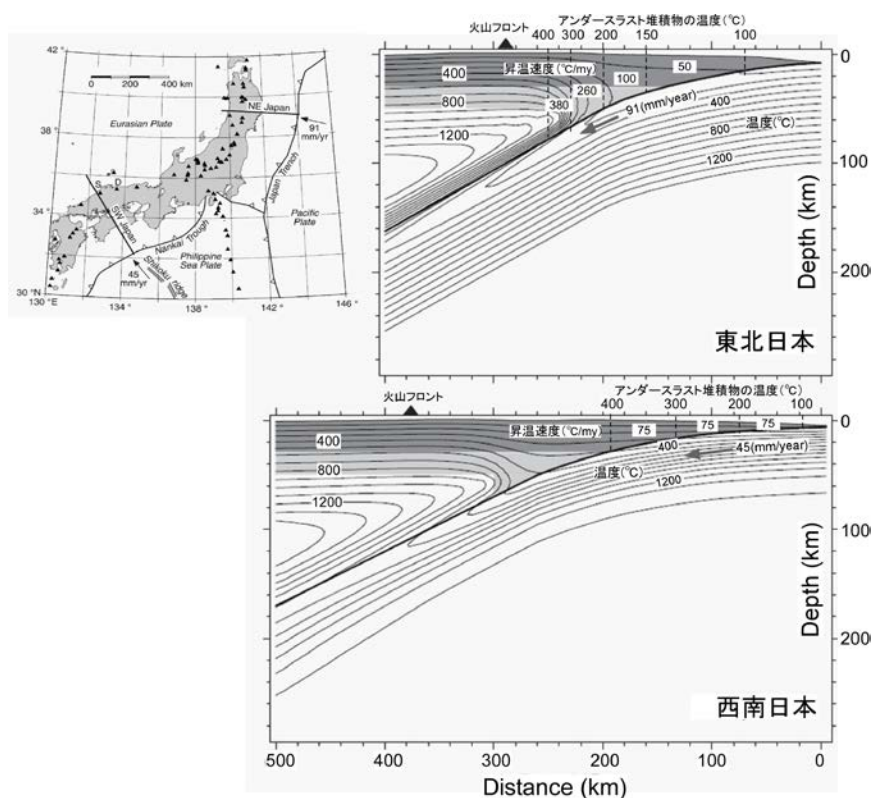


図2 太平洋プレートとフィリピン海プレートの温度構造⁷⁾。プレート沈み込みにともなう最上面の温度変化からアンダースラスト堆積物の昇温速度を見積もることができる。他の温度構造モデル^{8), 9)}や沈み込み速度に関する研究¹⁰⁾についても検討したがアンダースラスト堆積物の昇温速度は同程度であった。

中での炭化水素生成について検討することができる。図2は海洋プレートの温度構造⁷⁾とその移動速度からアンダースラスト堆積物の昇温速度を検討したものである。地温 100～400°Cの間では太平洋プレートでは温度上昇にともなう昇温速度が約 50°C/my から約 380°C/my へ増加しているが、フィリピン海プレートでは約 75°C/my であまり変化していない。このような熱史をもとにしてケロジェンからのオイル生成やオイルの熱クラッキングのタイミングを評価することができる。アンダースラスト堆積物の有機物タイプについては不明な点があるが、ここでは海成 (Type II) ケロジェンを想定して平行反応モデルの反応速度パラメーターを設定した^{11), 12), 13), 14)}。これらを用いてアンダースラスト堆積物中での炭化水素変化のタイミングを評価することができる。

図3にアンダースラスト堆積物の昇温速度がそれぞれ 50°C/my, 100°C/my, 200°C/my, 400°C/my の場合のケロジェンからオイル、オイルからガスへの変化のタイミングが示されている。オイル生成帯付近では昇温速度は同程度であるためいずれのアンダースラスト堆積物でも約 100°C付近からオイル生成を

開始し 170～180°C付近で終了している(図3)。オイルの熱クラッキングは 150°C付近から開始し次第にウエットガスの生成が顕著になる。オイルが熱クラッキングによってほぼ消失しメタン(ドライガス)が主体となるのは200°C以上である。200°C付近では両プレートの昇温速度が異なっているため熱クラッキングの終了温度がやや異なっており、昇温速度の大きい太平洋プレートでは約 220°C, 昇温速度の小さいフィリピン海プレートでは約 210°C付近であった(図3)。昇温速度のより小さい堆積盆での堆積有機物の熱分解と比較すると、アンダースラスト堆積物ではより高い温度で進行している。これらの温度帯とアンダースラスト堆積物の深度を対応させると、太平洋プレートではオイル生成帯が海面からの深度 20～35 km, ウェットガス帯(オイル帯とガス帯の間)が深度 35～50 km, メタン(ドライガス)帯が 50 km 以深となる。一方、フィリピン海プレートでは、オイル生成帯が深度 4～5 km, ウェットガス帯が深度 5～10 km, メタン(ドライガス)帯が 10 km 以深に対応している。海洋プレートは冷たく、熱平衡に達するのに時間を要するためアンダースラスト堆積物中でのオイル、ウ

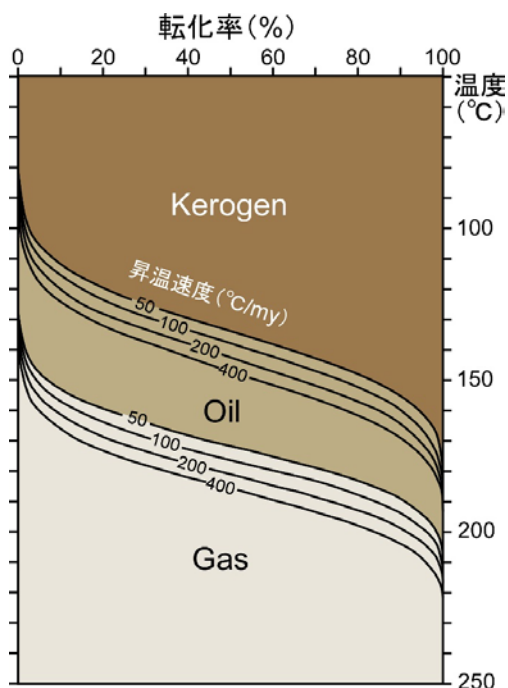


図3 アンダースラスト堆積物の昇温速度とオイル・ガス転化率の関係。平行反応モデルの活性化エネルギー(E)は正規分布、頻度因子(A)は共通とした。ケロジェン熱分解(Type II, 海成ケロジェンを想定): 平均 $E = 53.5$ (kcal/mol) = 223.6 (kJ/mol), $\sigma = 2.0$ (kcal/mol), $A = 1 \times 10^{14}$ (s⁻¹)。オイル熱クラッキング(Waples, 2000): 平均 $E = 59.0$ (kcal/mol) = 246.9 (kJ/mol), $\sigma = 1.5$ (kcal/mol), $A = 1.78 \times 10^{14}$ (s⁻¹)。

エットガス, ドライガスの生成は堆積盆と比較するとより深い深度で行われている。なお, フィリッピン海プレートは東海地方から九州地方へかけて沈み込み速度と昇温速度が大きくなる傾向があるので, 炭化水素生成やその熱クラッキングは西部ほどより高温, より深い深度で進行していることが予想される。

5. アンダースラスト堆積物からのメタン排出

沈み込み帯での流体移動について数多くの研究が行われている。流体包有物や断層帯の流体分析から, 付加体内の分岐断層等を通じて活発な流体移動が行われている。アンダースラスト堆積物の熱分解メタン生成帯よりもさらに深い深度で生成したプレートからの脱水流体(スラブ脱水流体)が地表に到達し温泉水(有馬型熱水など)を構成していることが知られている¹⁵⁾。遊離態メタンは無極性であり浮力により移動(二次移動)できるので水よりもはるかに移動性が高い。また, 溶存態で水とともに移動する場合もある。アンダースラスト堆積物から排出(一次

移動)されたメタンは海底下, あるいは陸上に十分に到達することが可能である。アンダースラスト堆積物中での炭化水素の生成は堆積盆と比較するとはるかに高压で著しく低い浸透率のもとで行われている。そのためオイル〜ウェットガス相での排出はほとんどなく, デコルマン付近での過剰圧力形成の一因となっているかもしれない⁴⁾。アンダースラスト堆積物からの熱分解ガスの排出機構には不明な点もあるが, 地震発生にともなう過剰圧力の開放や断裂の形成によって間欠的に主にメタンの排出が行われ二次移動に移行しているのではないかと考えられる。堆積盆ではウェットガス相での排出も行われており熱分解ガスはエタン(C₂)やプロパン(C₃)を含むことが多い。しかし, より高压下にあるアンダースラスト堆積物ではウェットガスの排出が少ないため排出された熱分解ガスはよりメタンに富んでいることが考えられる。そのため, 堆積盆の熱分解ガスと比較するとより C₁/(C₂+C₃)比が大きいことが予想される。

6. 泥火山, ガスハイドレート, 水溶性ガス田

アンダースラスト堆積物ではメタン帯においてメタンの排出が行われているとすると, 太平洋プレートとフィリッピン海プレートでは, それぞれ最上面が海面から50kmより深い深度帯と10kmより深い深度帯で熱分解メタンの排出が行われていると予想される。日本周辺における両プレート最上面の深度分布や温度分布をもとにアンダースラスト堆積物起源メタンの生成・排出域と泥火山, ガスハイドレート(BSR)の分布域を比較することができる。北海道, 東北日本では沿岸〜陸域にメタン帯が位置しているところが多く, 海域は下北半島沖〜日高沖西方と釧路沖に位置している。西南日本ではほとんどが海域にある。これは北海道周辺の日高沖西方や釧路沖や四国海盆, 近畿〜東海沖のガスハイドレート(BSR)の分布とよく一致している。また, 東北日本の太平洋側にガスハイドレート(BSR)がほとんど認められないことと関係しているかもしれない。西南日本の海底泥火山はガスハイドレート(BSR)より内陸側に分布する傾向があるが, これもアンダースラスト堆積物からのメタン生成・排出と関係しているのかもしれない。北海道の陸域にある新冠泥火山の位置とも調和的でその成因と密接に関係していることを示唆している。関東地域ではフィリッピン海プレートと太平洋プレートの両者のアンダースラスト堆積物のメタン帯が重複しているところがあり, それは千葉県茂原の水溶性ガス田とほぼ一致している。太平洋側に認められる水溶性ガス田(千葉, 宮崎, 沖縄など)の形成とも密接に関係していることを示唆しており, 検討を深めたい。

7. H₂(分子状水素)の生成と供給

堆積岩中で熱分解メタンが十分に生成されると有機物起源の過剰の水素ラジカルが H₂ を形成するようになる。四万十帯や三波川帯の 250°C 以上を経験した泥質岩の残留ガスでは H₂ のモル濃度はメタン以上である¹⁶⁾。これはアンダースラスト堆積物のメタン帯では H₂ も生成されていることを示唆している。また、水分存在のもとでケイ酸塩鉱物の破壊にともない水素ガスが生成することが知られている¹⁷⁾。アンダースラスト堆積物やその直上にある滑り面は重要な H₂ 生成帯でもある。このような H₂ は熱分解メタンとともに挙動していることが予想され、ガスハイドレートや水溶性ガス田の形成に際したメタン菌の活動に無視できない影響を与えている可能性がある。

8. おわりに

海洋プレートの沈み込みにとまなうアンダースラスト堆積物中では熱分解起源の炭化水素が常時生成している。生成したオイルやウエットガスがほとんど排出されず、主にメタンが排出されているとすると日本海溝や南海トラフのアンダースラスト堆積物では約 $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}/\text{year}$ の速度でメタンが生成されていると推定した。北海道から沖縄に至る海溝の全長を約 2800km とすると年間生成量は約 7 億 m^3 となる。これはこれまで全く想定されていなかったメタンである。図 1 に示されるように少なくとも過去 200 万年間以上にわたってメタン生成が継続しており、全海溝での累計生成量は約 $1.4 \times 10^{15} \text{ m}^3$ (1400 兆 m^3) 以上に達する。海溝幅 1km に限っても 200 万年間で約 5000 億 m^3 以上の累計生成量に達する。また、アンダースラスト堆積物は H₂ の供給者としても無視できない。メタン菌による生物起源メタンの生成のほか、地下深部の微生物生命圏を維持する上で重要な役割を果たしているのではないかと予想している。アンダースラスト堆積物中でのメタンや H₂ の生成は、現在の島弧－海溝系のもとで持続的に継続している。アンダースラスト堆積物中で生成したメタンや H₂ がどのように排出され移動しているのか、どのように滞留・集積しているのか、未だ不明な点が多々ある。これらの諸問題を解決していくことで、アンダースラスト堆積物起源ガスが持続可能な天然ガス資源として成立する時が訪れることを期待したい。

Petroleum Geology, **67**, 604-616 (2015).

- 4) Raimbourg, H., Thiéry, R., Vacelet M., Famin, V., Ramboz, C., Boussafir, M., Disnar, J.-R., and Yamaguchi, A. *Tectonophysics*, 721, 254-274, (2017).
- 5) Behar, F., Vandenbroucke, M., Teermann, S.C., Hatcher, P.G., Leblond, C., and Lerat, O., *Chemical Geology*, 126, 247-260(1995).
- 6) Kimura, G., Hina, S., Hamada, Y., Kameda, J., Tsuji, T., Kinoshita, M., and Yamaguchi, *Earth and Planetary Science Letters*, 339-340, 32-45, (2012).
- 7) Peacock, A.M. and Wang, K. *Science*, 286, 937, (1999).
- 8) Yoshioka, S., Suminokura, Y., Matsumoto, T., and Nakajima, J., *Tectonophysics* 608, 1094-1108, (2013).
- 9) Wada, I., He, J., Hasegawa, A., and Nakajima, J., *Earth and Planetary Science Letters* 426, 76-88(2015).
- 10) Loveless, J. P., and B. J. Meade, *Journal of Geophysical Research*, 115, B02410. (2010).
- 11) 鈴木徳行・松林英樹, 地質ニュース 487, 52-62, (1995).
- 12) Behar, F., Vandenbroucke, Y., Marquis, F., and Espitalié, J., *Organic Geochemistry* 26, 321-339(1997).
- 13) Peters. K.E., Burnham, A.K., and Walters, C.C., and Schenk, O., *Marine and Petroleum Geology*, 92, 979-986, (2018).
- 14) Waples, D.A., *Organic Geochemistry* 312, 553-575, (2000).
- 15) 大沢信二, 温泉科学, 68, 168-175, (2018).
- 16) Suzuki, N., Saito, H., and Hoshino, T., *International Journal of Coal Geology*, 173, 227-236(2017).
- 17) Kameda, J., Saruwatari, K., and Tanaka, H., *Geophysical Research Letters*, 30(20), 2063 (2003).

-
- 1) 林雅夫・稲盛隆穂・佐伯龍男・野口聡, 石技誌, 42(1) (2010).
 - 2) 浅田美穂, 地質学雑誌, 126, 3-16(2020).
 - 3) Moore, G.F., Boston, B.B., Strasser, M., Underwood, M.B., and Ratliff, R.A., *Marine and*

基礎試錐「日高トラフ」の掘削結果とその意義

(石油資源開発(株) 国内事業本部) ○長原 薫^{ながはら かおる}・瀬能 修^{せのう おさむ}

1. 緒言

石油資源開発株式会社は、経済産業省 資源エネルギー庁から基礎試錐事業を受託し、2019年4月から7月にかけて日高舟状海盆の大水深域に基礎試錐「日高トラフ」を掘削した¹⁾。同井の掘削対象は、基礎物理探査「日高舟状海盆 3D」および「日高舟状海盆西部 3D」に基づき解釈された「日高トラフ構造」であり、浅層での産出テストにより微生物起源ガスの胚胎を確認した²⁾。

2. 試錐概要

坑井位置は北海道日高地域の南沖合約 50 km(図-1)で、水深約 1,070 m、掘止深度は海底面下約 2,530 m である。これは目的層準を十分に探鉱できるよう、予定掘止深度から 600m 延長して掘り止めた。掘進中の兆候および検層結果等に基づいて、浅層ターゲットに対して産出テストを行い、一定量の天然ガス産出に成功した(図-2)。

掘削作業の全体工程は約 3 ヶ月に及んだが、関係各所の協力を得て安全に作業を完遂することが出来た。尚、掘削した坑井は必要な廃坑処置を施して埋め立てている。

3. 微生物起源ガスについて

地下には一定程度の深度まで多種の微生物が生息しており、地層中の有機物を分解している。最終的な過程ではメタン菌が二酸化炭素や酢酸を利用することによりメタンガスが生成される。そしてメタンガスの生成が地層水への溶解度をを超えて進行するとガス相が生じ、その浮力によって貯留構造まで移動してガスが集積する。

微生物起源ガスが生成する好適な条件は、生物活動の観点からは概ね 10℃～50℃の範囲であり、地温勾配が低いほど生成領域の範囲は広がる。微生物が利用できる有機物保存の観点からは百万年あたり概ね数百メートルの堆積速度であることが望ましい。

4. ガス発見の意義

北海道の日高地域沖合は低地温勾配で堆積速度が速く、微生物起源ガス生成の好適条件に合致している。日本近海においては微生物起源ガスの探鉱は緒についたばかりであり、今後同様の地質状況を有する日本の近海において大規模なガス鉱床が発見される可能性がある。

国産のメタンガスは二酸化炭素の排出が相対的に少ない発電原料として有望である他、将来的には水素やアンモニア原料としても期待できる。

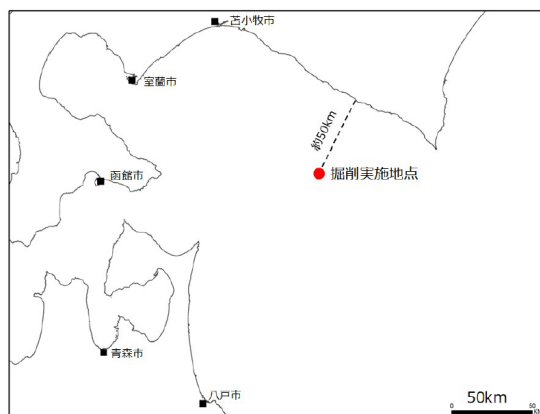


図-1：基礎試錐「日高トラフ」掘削位置



図-2：産出テストによるガス燃焼状況

- 1) 浜田康史, 2020：微生物起源ガス探鉱への期待。ペトロテック, 43, 801.
- 2) 南潤也・筑井秀昌・上田滋・田淵圭太・塩谷道, 2020：基礎試錐「日高トラフ」掘削作業について。石油技術協会春季講演会要旨集。

日本国内 26 年ぶりのジャッキアップリグ使用に向けて

(三井石油開発㈱) ○山^{やま}市^し 剛^{つよし}・峯岸^{みねがし} 政人^{まさひと}・森川^{もりかわ} 豪^{ごう}・前田^{まえだ}純二^{じゅんじ}

1. はじめに

当社は長年に亘り北海道沖合にて探鉱活動を継続しており、今年の夏に遠別町沖合約 30km の海域において試掘井「天北西方沖-1 号井（以下、TSO-1）」掘削作業を実施した。

当該海域の水深は 91m であり、ジャッキアップリグの使用が可能な深度であるため、事前調査として、対象海域において Geophysical site survey（以下、GP）及び Geotechnical site survey（以下、GT）を実施した。本発表では、夫々のサイトサーベイの調査概要とその結果について説明する。

2. サイトサーベイ（以下、SS）について

ここでいう SS とは海洋掘削作業を安全に遂行するために必要なデータを得ることを目的とした各種事前調査を指す。今般の調査では、IOGP のガイドラインに沿って、対象海域におけるシャローハザードや海底面の障害物の有無を調べる GP（2016/2020 年実施）、及び海底地盤の強度を調べる GT（2017 年実施）の 2 種類を実施した。GP では調査船に海底探査機器を艀装して、計画測線に沿った航走観測を実施した。GT では掘削船を動員して、リグ脚部設置地点と坑口位置において海底地質のコアリング及びスパッドカン貫入試験を実施した。

3. 調査結果と TSO-1 掘削作業について

GP で得られた浅部 2D と既存 3D 地震探査データを用いて、シャローハザード解析を実施したところ、対象構造周辺に掘削時の危険要因となる浅部ガスを示唆するアノマリーが広域に分布していることが判明した（図 1 参照）。そのため、アノマリー分布域への掘削を避けた位置に坑口位置を大きくずらし、対象となる断層ブロックへは探鉱対象層中部付近から入り込んで傾斜井を掘る坑井デザインとした。また、サイド

スキャンソナーから得られた海底面の画像からは、坑口位置周辺において漁具等の障害物は認められなかった。

GT では、JDC 社保有のジャッキアップリグ Hakuryu-11（以下、H-11）の使用を想定した場合、全脚部の貫入は海底下 5～6m の深度にある砂層が支えとなり、リグが安定すると見積もられた。以上の結果を基に、ジャッキアップリグの使用は可能であると判断した。

今般の TSO-1 掘削作業において、実際に H-11 を使用したところ、いずれの脚部も事前の想定通り海底下 5.7-5.8m の沈み込み後に安定した。また、計画した位置に掘削した結果、シャローガスに遭遇することなく、無事に予定の深度まで掘削することができた。

4. まとめ

日本国内では基礎試錐「子吉川沖」以来 26 年ぶりとなるジャッキアップリグを用いた海洋掘削作業を実施した。シャローハザードが広く分布するエリアであったものの、リスクを軽減するための最適な掘削位置を選定したことにより、安全に掘削オペレーションを完遂することができた。

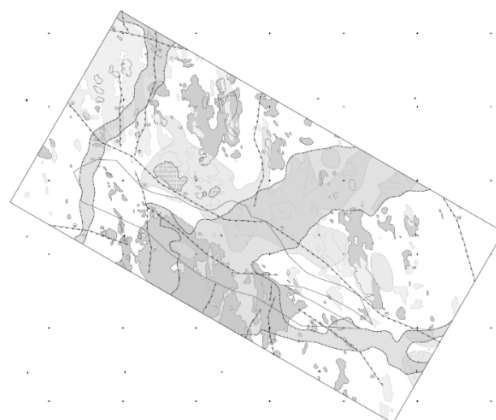


図 1：掘削地点周辺のアノマリーマップ

（灰色部は Shallow amplitude anomalies/Seabed pockmark/Shallow buried channels etc.）

炭酸塩岩における Low Salinity Waterflooding EOR のメカニズム解明 - 静電反発説検証の事例紹介

(株式会社 INPEX*・北海道大学**) ○上谷 高明*・竹谷 未来*・海藤 ひろみ*・Hao Xingjuan**・Yogarajah Elakneswaran**

1. 緒言

炭酸塩岩における Low Salinity Waterflooding (LSW) EOR は魅力的な開発手法の一つだが、その増油メカニズムは十分に理解されていない。我々の先行研究より、原油の全酸価が低い油層に対して、海水を単純希釈した低塩分濃度水の圧入では顕著な増油が期待できないことが判明した。そこで本研究では、低酸価原油油層に対して、どのような圧入水レシピが増油を導くか、特に原油と岩石表面の静電反発作用による脱離に着目して検証を行った。本発表では我々の研究内容の一部を紹介する。

2. 静電反発説について

一般に炭酸塩岩油層の初期濡れ性は親油性寄りが多い。その理由の一つとして、地層水中で負に帯電した原油が、正に帯電した岩石表面に引き寄せられる（静電吸着）ことが考えられる。

さて、水のイオン組成を工夫することで岩石の表面電位を正から負に反転させることが可能である。このとき生じる静電反発力によって、原油が岩石表面から脱離し、より親水性になる。この増油メカニズムが「静電反発説」であり、複数の研究者に支持されている。

3. 反発水のレシピ考案

我々は原油と岩石の静電反発力を最大化する水のレシピを探求するべく、以下の数値計算作業を行った。

- 1) 原油・水、および岩石・水の表面錯体モデルを構築し、ゼータ電位測定値に合わせてモデルのキャリブレーション実施。
- 2) 表面錯体モデルを用いて、原油・岩石間に作

用する反発力を最大化する水レシピを考案。

4. 室内実験

考案した水レシピを用いて原油回収コアフラッド試験を行い、静電反発説の検証を行うのが、我々の最終目標であるが、本発表ではその予察として実施した接触角測定試験について紹介する。

方解石単結晶を炭酸塩岩に見立て、その表面を丁寧に磨いた。その後、方解石単結晶を地層水、原油の順に高温（80℃）で浸し、油層での濡れ性に近づけた。方解石を取り出した後、各種水（地層水、海水、50 倍希釈海水、反発水）に浸し、原油を垂らしてその接触角測定を行い、濡れ性の違いを評価した。

5. 結果および考察

接触角測定の結果、地層水、海水、50 倍希釈海水での接触角に大きな違いは見受けられなかったが、反発水では接触角の明確な低下を確認した。方解石表面の濡れ性は、反発水によってより親水性にシフトした結果と考えられる。今後、Spontaneous Imbibition 試験やコアフラッド試験などを通じて、さらなる検証を進める予定である。

6. 参考文献

- 1) Uetani, T., Kaido, H., and Yonebayashi, H., SPE-203281-PA (2021).
- 2) Jackson, M, D., Al-Mahrouqi, D., and Vinogradov, J., *Scientific Reports* **6**, 37363 (2016).
- 3) Mahani, H., Keya, A., Berg, S., Bartels, W., Nasralla, R., and Rossen, W., *Energy & Fuels* **29**, 3, 1352-1367 (2015).

資源開発

[2E13-17] 資源開発(2)

座長:中川 裕幸(石油資源開発(株))

2021年11月12日(金) 14:45 ～ 16:00 E会場 (函館アリーナ スタジオA)

[2E13] A coupled geochemical model to predict oil recovery during low salinity waterflooding

○Yogarajah Elakneswaran¹ (1. Hokkaido University)

14:45 ～ 15:00

[2E14] 微生物による泡の生成作用を利用した石油増進回収法に関する研究

○伊藤 美羽¹、菅井 裕一¹ (1. 九州大学)

15:00 ～ 15:15

[2E15] 粒子径の異なる SiO₂ ナノ粒子分散液による濡れ性改質作用の検討

○根岸 慶輔¹、阿部 一徳¹ (1. 秋田大学 大学院国際資源学研究科)

15:15 ～ 15:30

[2E16] 酸処理における二相ステンレス鋼チューブの選択溶解の抑制

○水上 裕貴¹、安井 彩乃¹、平野 奨¹、砂場 敏行¹ (1. 株式会社INPEX)

15:30 ～ 15:45

[2E17] 炭酸塩岩貯留層酸処理におけるワームホール現象の研究

○古井 健二¹、石渡 友章²、土屋 慶洋²、伊藤 義治² (1. 早稲田大学、2. 石油天然ガス・金属鉱物資源機構)

15:45 ～ 16:00

A coupled geochemical model to predict oil recovery during low salinity waterflooding

(Hokkaido University) ○Yogarajah Elakneswaran

1. Introduction

The wettability alteration is the most prominent mechanism for a favorable effect of low salinity waterflooding (LSWF) in enhanced oil recovery (EOR). Numerous thermodynamic and numerical models have been developed to capture the wettability alteration mechanism in the prediction of oil recovery [1]. The characteristics of crude oil/brine and rock/brine interfaces significantly influence the interaction of the crude oil with rock surface and thus wettability alteration. In this study, the interface characteristics were coupled with a solute transport model to simulate low salinity water flooding in carbonate and sandstone reservoirs. The wettability alteration was determined based on the adsorption of crude oil sites on rock surface. And the relative permeability was modified by implementing the wettability alteration for the prediction of oil recovery.

2. Modelling approach

The ionic transport and two-phase flow of oil and water equations were solved in MATLAB® and coupled with IPhreeqc for geochemical calculations. A triple-layer surface complexation model was employed in IPhreeqc to predict electrokinetic properties of crude oil/brine and rock/brine, and the wettability alteration was calculated from the zeta potential and surface species concentration. The positive surface of calcite can attract the deprotonated -COOH in crude oil whereas the negative surface of kaolinite can adsorb calcium/magnesium adsorbed -COOH. At each time step, the wettability was calculated as the ratio of adsorbed crude oil on calcite or kaolinite surface to the initial value. In addition, the coupled model considers the dissolution and precipitation of minerals through thermodynamic phase-equilibrium module in IPhreeqc.

3. Results and Discussion

The coupled model allows to predict spatiotemporal variation of ionic profiles, surface and zeta potentials, minerals changes, and total disjoining pressure in addition to oil recovery in carbonate and sandstone reservoirs. The chemistry of injecting solution significantly influences the dissolution of minerals and

the surface chemistry of the interfaces and thus affecting oil recovery. The coupled model was validated and verified with the published experimental data for two-phase flow experiments. An example of verification for a tertiary core flooding in sandstone is shown in **Figures 1 and 2**. The sandstone core was injected by a high salinity water to produce reservoir condition before evaluating the effect of low salinity water [2]. The predicted effluent ion concentration reproduces well the experimental data (**Figure 1**). **Figure 2** compares the predicted oil recovery with experimental data. The findings of this study show the importance of interface characteristics on the adsorption of crude oil on rock surface and thus wettability alteration. The coupled model can be used to optimize the brine composition for oil recovery in sandstone and carbonate reservoirs.

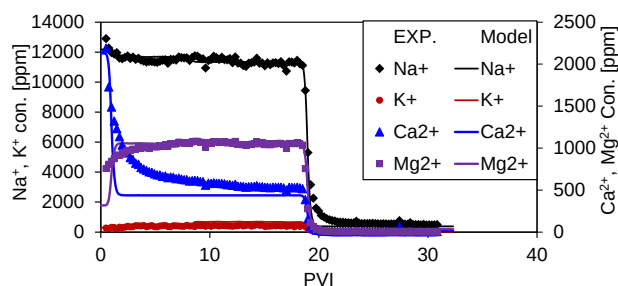


Figure 1. Comparison of simulated and measured [2] effluent concentration during core flooding in sandstone.

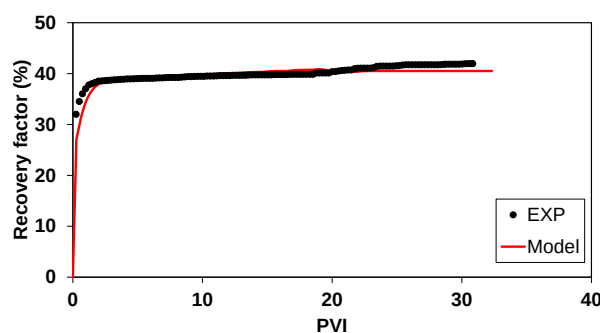


Figure 2. Comparison of simulated and measured [2] oil recovery in sandstone.

- 1) H. Sharma and K. Mohanty, Journal of Petroleum Science and Engineering 165 (2018) 1021–1039
- 2) R. Morishita et al., Energy Fuels 34 (2020) 5258–5266

微生物による泡の生成作用を利用した石油増進回収法に関する研究

いとう み う すがいゆういち
(九州大)○伊藤美羽・菅井裕一

1. 緒言

Pseudomonas aeruginosa は界面活性物質を生成するなど、微生物を用いた石油増進回収技術（Microbial Enhanced Oil Recovery, MEOR）に有用な微生物として検討例が多い。一般に *P. aeruginosa* は好気条件下で活発に増殖するため、酸素に乏しい地下油層内において活発に増殖させるための方法を検討する必要がある。本研究では、ナノバブル（以下、NB と称する）の形で酸素を油層内に供給し、*P. aeruginosa* の増殖および MEOR 有用物質の代謝の活性化について検討した。

2. 実験

酸素をバブリングして溶解させた水を市販の NB 製造器に導入して酸素 NB 水を調製した。これを孔径 $0.45\ \mu\text{m}$ のフィルターを用いて滅菌し、各種栄養塩類を添加して酸素 NB 培地とした。この培地を 100 ml 滅菌済みバイアル瓶に 50 ml 分注し、*P. aeruginosa* を接種後密閉して気相部を窒素で置換した。酸素 NB の効果を検討するための比較対照として二酸化炭素 NB 培地も同様に調整した。31.5℃で培養し、12 時間経過するごとに培養液の表面に生成される泡を観察するとともに、菌体濃度、ガス生成量、pH ならびにタンパク質濃度を測定した。また、*P. aeruginosa* が生成する泡の EOR 有用性を検討するために、珪砂（平均粒径約 $150\ \mu\text{m}$ ）を充填して作製したサンドバックの中に *P. aeruginosa* を植菌した酸素 NB 培地ならびに二酸化炭素 NB 培地を圧入して培養し、培養前後の浸透率の変化を測定した。

3. 結果と考察

図 1 に *P. aeruginosa* を 48～96 時間培養した培養液を示す。NB を含む培地において、培養開始から 48 時間経過後に培養液の表面に泡が観察され始め、60 時間経過後に最大の泡生成量が確認された。ガスおよびタンパク質も 48 時間経過後に検出され始め、以降増加する結果が得られており、泡の生成とタンパク質の生成に相関が認められたことから、泡はタンパク質とガスによって生成されたと推察された。酸素 NB 培地のみならず二酸化炭素 NB 培地においても泡の生成が認められたことから、NB 自体が *P. aeruginosa* の増殖および代謝に影響を及ぼしていることが示唆された。各種 NB を含む水および培地をゼータ電位測定に供したところ、二酸化炭素 NB は水中において負のゼータ電位であったのに対して、培地中においては正のゼータ電位であった。二酸化炭素 NB が培地中の陽イオンを

吸着して正の表面電位となり、負に帯電している微生物に微量必須元素を含む各種陽イオンを運搬する役割を担った可能性が推察された。二酸化炭素 NB 培地の方が酸素 NB 培地に比べてタンパク質およびガスの生成量が多く、泡の生成量也多かった。



図 1 酸素 NB 培地を用いた *P. aeruginosa* の培養によって培養液面に観察された泡（左から培養 48 時間、60 時間、72 時間、84 時間ならびに 96 時間の培養液）

サンドバックを用いた実験において、*P. aeruginosa* をサンドバック内で 2 日間培養した後の浸透率は、図 2 に示すように培養前の浸透率の 1/2～1/3 にまで低下しており、*P. aeruginosa* によってサンドバック内で生成した泡がサンドバック内の孔隙を閉塞し、浸透率を低下させたことが推察された。これは Foam EOR による石油増進回収メカニズムと類似しており、*P. aeruginosa* に油層内で泡を生成させて石油増進回収を図る MEOR の可能性が示唆された。

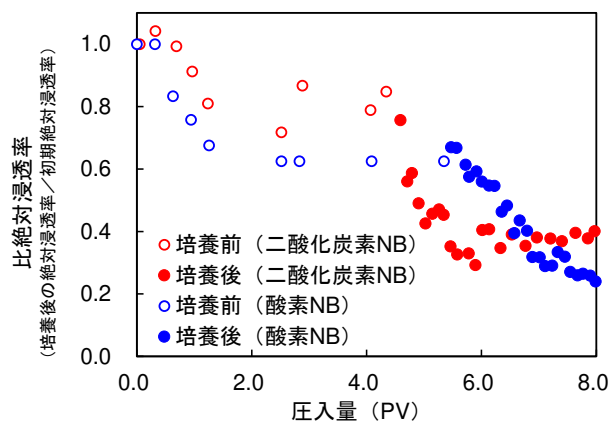


図 2 各種 NB 培地を用いた *P. aeruginosa* のサンドバック内培養の前後における比絶対浸透率（＝培養後の絶対浸透率／初期絶対浸透率）の変化

粒子径の異なる SiO₂ ナノ粒子分散液
による濡れ性改質作用の検討

(秋田大学大学院国際資源学研究科*) ○根岸慶輔*・阿部一徳*

1. 緒言

2010 年初頭より、ナノ粒子を用いた石油増進回収法 (Nano-EOR) の研究事例が増加し、最大 10% 程度の増油効果が確認されている。本 EOR 手法による既往研究では、界面張力の低下による置換効率の改善や分離圧による油脱離作用の促進など種々の増油機構が提案されているが、中でも岩石表面の濡れ性改質による影響は、多数の著者により報告されており、有力な説として考えられる。また、既往研究において、ナノ粒子の粒子径に着目した研究事例が少なく、その粒子径の違いは、油回収量に影響を与える可能性が高い。故に、本研究では、Nano-EOR の増油機構として、岩石表面の濡れ性改質に焦点を当て、SiO₂ ナノ粒子の粒子径の違いが濡れ性改質作用に与える影響を Amott 試験などの各種試験により、評価した。その後、掃攻試験を実施し、2 種の SiO₂ ナノ粒子分散液による増油効果を検証した。

2. 実験

2.1 試料

SiO₂ ナノ粒子分散液は NP-A (粒子径 : 30nm, 粘度 : 0.998cP (20℃)), NP-B (粒子径 : 100nm, 粘度 : 1.006cP (20℃)) の 2 種を用い、いずれも分散媒として 0.1wt%NaCl 溶液 (粘度 : 0.979cP (20℃)) を使用し、濃度 0.1wt% に調製した。水相に 4wt%NaCl 溶液を用い、油相には 2 種の原油 (Crude1 : 8cP (23℃), Crude2 : 70cP (23℃)) を用いた。岩石試料として、炭酸塩岩を用い、その

浸透率は 200-300mD 程度である。

2.2 手法

本研究では、Amott 試験を始めとした濡れ性評価を行った後、SiO₂ ナノ粒子による増油効果を検証するため、掃攻試験を実施した。Amott 試験は、Spontaneous Imbibition などの 4 つの工程に分類されるが、貯留層環境下を想定し、いずれの工程も 60℃ 条件で実施した。また、掃攻試験も同様に、コアホルダー温度 60℃、側圧 2,000psi で実施した。

3. 結果

表 1 に Amott 試験結果を示す。Spontaneous Imbibition 工程において、4wt%NaCl 溶液を用いた試料 No.1 は、WI の値が 0.01 であり、Neutral Wet の状態を示した。対して、塩分濃度を低下させ、0.1wt%NaCl とした No.2 及び SiO₂ ナノ粒子分散液を用いた No.3, No.4 は、WI の値が 1.0 に近く、いずれの試料も Water Wet の状態を示した。ただし、SiO₂ ナノ粒子を含んだ際に、より強い Water Wet の状態を示し、かつ、粒子径が小さい場合の方が、その傾向が顕著である。

油相を Crude2 (No.5, No.6) とし、SiO₂ ナノ粒子の粒子径の違いによる濡れ性改質作用を検証した際も同様に、粒子径が小さい SiO₂ ナノ粒子を用いた場合の方が、WI の値が高く、濡れ性改質作用が高いことが確認された。

掃攻試験においても、Crude1 及び Crude2 の両者に対し、粒子径が小さい NP-A を用いた際の方が高い増油効果が認められた。

表 1 Amott 試験結果

Rock Sample	Formation Water	Oil	Spontaneous Imbibition, Forced Imbibition (Water)	Spontaneous Drainage, Forced Drainage (Oil)	Wettability Index (WI)
No.1	4wt%NaCl	Crude1	4wt%NaCl	Crude1	0.01
No.2	4wt%NaCl	Crude1	0.1wt%NaCl	Crude1	0.54
No.3	4wt%NaCl	Crude1	0.1wt%NaCl+0.1wt%NP-A	Crude1	0.94
No.4	4wt%NaCl	Crude1	0.1wt%NaCl+0.1wt%NP-B	Crude1	0.87
No.5	4wt%NaCl	Crude2	0.1wt%NaCl+0.1wt%NP-A	Crude2	0.38
No.6	4wt%NaCl	Crude2	0.1wt%NaCl+0.1wt%NP-B	Crude2	0.14

酸処理における二相ステンレス鋼チュービングの 選択溶解の抑制

(INPEX) ○水^{みず}上^{かみ} 裕^{ひろ}貴^{たか}・安^{やす}井^い 彩^{あや}乃^の・平^{ひら}野^の 奨^{すむ}・砂^{すな}場^ば とし^{とし}ゆ^ゆき^き
敏^み行^{ゆき}

1. 緒言

石油・天然ガス開発において、坑井の生産性を改善する手法の1つとして坑井内に酸を注入する酸処理が行われる。酸処理では、チュービング管壁や仕上げ層をプラグするスケールや粒子の溶解および地層のフラクチャにより生産性向上を図ることができる一方で、酸流体として塩酸やフッ酸などの強酸を使用するため、チュービング等の鋼製材料の腐食が懸念される。そのため、酸流体に腐食抑制剤(CI)添加することで防食処理を行う。しかし、厳しい腐食環境で使用される二相ステンレス鋼(DSS)は、腐食抑制剤の使用下においても酸処理環境では選択溶解が発生してしまう。そこで、腐食抑制剤の助剤として銅化合物を添加することで、DSSの選択溶解の抑制を試みた。

2. 実験

22Cr DSS チュービング実管から切り出した試験片を使用して、浸漬腐食試験および電気化学測定を実施した。浸漬腐食試験は、 $2^T \times 10^W \times 50^L$ mmの試験片を60℃に加熱した7%塩酸中に1日間浸漬させ、浸漬前後の重量から腐食速度を算出した。塩酸中にインヒビターや種々の銅化合物を添加することでその効果を評価した。助剤が腐食反応へ与える影響を評価するため、電気化学測定を実施し、作用極に22Cr DSS、対極に白金、参照極にはAg/AgCl電極をそれぞれ用いた。溶液には0.1 mol/L塩酸を使用し、助剤の有無による腐食電位測定および電気化学インピーダンス測定の挙動変化を観察した。

3. 実験結果および考察

Figure 1に浸漬腐食試験前後の試験片の表面写真を示す。試験前は銀色であった試験片が、blankとCI添加のみの条件では試験後に灰色や黒色に変化しており、激しく腐食していることがわかる。一方、助剤としてCuIを添加すると、表面は銀色に保たれており金属光沢も確認された。Table 1に浸漬腐食試験により得られたCIのみ添加した場合とCIとCuIを添加した場合の防食率を示す。CIのみ添加した場合は約35%の防食率であったのに対し、CuIを助剤として添加することで防食率が飛躍的に向上し約99%となった。試験後の試験片に対してX線回折分析を行ったところ、blankやCI添加のみの条件ではフェライト相のスペクトルが消失していたのに対し、CuIを添加するとフェライト相のスペクトルが残存しており、CuIを添加することでフェライト相の選択溶解が抑制されたことを確認した。さらに断面観察からもフェライト相の選択溶解の抑

制を確認した。

Figure 2に腐食電位の時間変化を示す。CuIを添加しない場合、電位はなだらかに上昇し、これは鋼表面への不動態皮膜の形成を意味する。一方、CuIを添加すると、未添加条件よりも急激に電位が上昇した。これは不動態皮膜の耐食性が向上したことで、腐食反応が阻害されたためと考えられる。電気化学インピーダンス測定の挙動からも、CuI添加により不動態皮膜の耐食性が向上することを確認した。

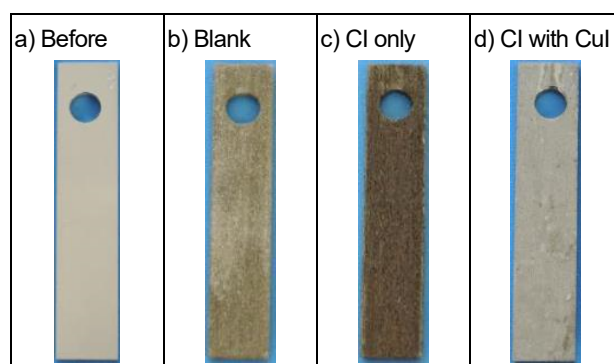


Figure 1 Sample surfaces before and after test in several chemical dose conditions.

Table 1 Difference of corrosion protection between CI with/without CuI conditions.

Condition	Corrosion Protection (%)
CI only	34.9
CI with CuI	98.8

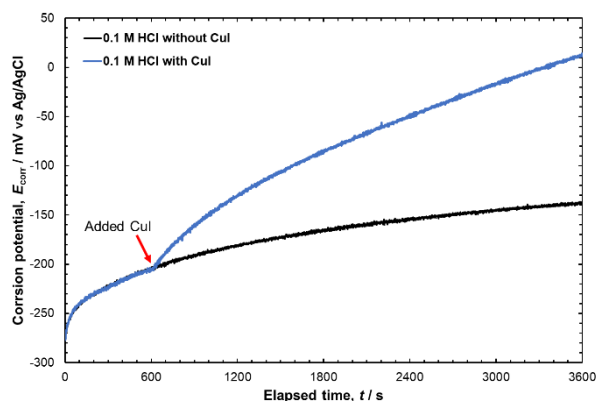


Figure 2 Corrosion potential behavior as a function of elapsed time.

炭酸塩岩貯留層酸処理におけるワームホール現象の研究

(早大*・JOGMEC**) ○古井 健二^{ふるい けんじ}・石渡 友章^{いしわたともあき}**・土屋 慶洋^{つちや よしひろ}**・伊藤 義治^{いとう よしはる}**

1. 緒言

炭酸塩岩貯留層でのマトリックス酸処理法では、高濃度の塩酸を圧入することで、ワームホールと呼ばれる高浸透率のネットワーク状流路が形成され、坑井の生産性が飛躍的に向上することが知られている。本研究では、炭酸塩岩貯留層におけるワームホール現象について、室内実験と数値解析の2つの側面からアプローチし、ワームホールの形成メカニズムの解明を目的としている。

2. 研究手法

2.1 トレーサーを用いたコア掃攻実験

Indiana Limestone, Austin Chalk, Edwards White の3種類の露頭サンプルについて、コア内の流動特性を把握することを目的とし、造影剤（3wt% NaI）を含有した塩水（KCl）を使用した水1相の流動試験を実施した。医療用X線CTスキャナによる流動時の撮影やイオン濃度分析により、ブレイクスルー時間や各コアに存在する選択的流路に関する分析を実施した。

2.2 酸処理コア掃攻実験

トレーサー試験を実施した炭酸塩岩コアサンプルについて、テキサス A&M 大学で、15wt%の塩酸を用いた酸処理実験を実施した。また、それぞれの岩種についてワームホール伸展効率曲線を作成し、コアサイズの変化によるワームホール伸展効率の変化を測定した。

2.3 数値解析モデルの開発

酸処理コア掃攻試験におけるワームホールの伸展を再現することを目的として、フェーズフィールド法を用いた数値シミュレータの開発を行った¹⁾。フェーズフィールド変数の時間発展方程式、酸の移流拡散方程式、孔隙流体流動方程式を有限差分法で離散化し、炭酸塩鉱物と塩酸の反応によるワームホールの発生・伸展を計算した。

3. 結果および考察

リアルタイム CT 画像撮影・トレーサー試験の結果より、Indiana Limestone、Austin Chalk、Edwards White コア内の3次元流体流動挙動のデータを取得した。酸処理コア掃攻実験を実施し、1.5"径、4.0"径コアのワームホール伸展効率曲線を作成し、コアサイズ効果の存在を確認した。図1に本研究で開発された数値解析モデルによるワームホール伸展解析の結果を示す。酸を高流量で圧入したケース b)において、複数のワームホールが発生し、最終的に一本の優勢なワームホールがコアを貫通する様子が再現できており、ワームホール伸展の酸圧入速度依存性を定性的に再現できることが確認できた。

a) Low injection rate b) High injection rate

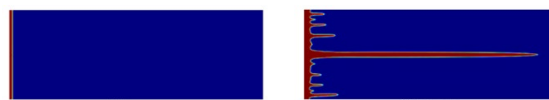


Fig. 1 Simulated wormhole growths at low (a) and high (b) injection rates (15wt% HCl, $\rho_{\text{mineral}}=2.71 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{acid}}=1.14 \text{ g/cm}^3$, $D=1 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\mu=1 \text{ cp}$)²⁾

- 1) Furui, K., Abe, T., Watanabe, T., Yoshioka, K. 2021. Phase-Field Modeling of Wormhole Formation and Growth in Carbonate Matrix Acidizing. Earth and Space Science Open Archive.
- 2) 阿部達朗・渡辺貴大・古井健二・伊藤義治・石渡友章・土屋慶洋, 酸処理におけるワームホール現象の実験的解析及び数値計算による研究、石油技術協会令和3年度春季講演会.

資源開発

[2E18-22] 資源開発(3)

座長:菅井 裕一(九州大学)

2021年11月12日(金) 16:15 ～ 17:30 E会場 (函館アリーナ スタジオA)

[2E18] 天然ガス処理プロセスにおける水銀の分配予測技術

○山田 淳也¹、渋谷 健広¹、川崎 緑¹、大塚 町恵¹、小林 淳¹、辻 智也²（1. 株式会社 INPEX、2. マレーシア工科大学）

16:15 ～ 16:30

[2E19] Evaluation of crude oil emulsion type and stability by electrokinetic properties

○Hao Xingjuan¹、Afrin Sadia¹、Shimokawara Mai²、Kato Yoshitake²、Kitamura Ryuta²、Yogarajah Elakneswaran¹（1. Hokkaido University、2. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)）

16:30 ～ 16:45

[2E20] INPEXの生物多様性保全の取組みについて

○川口 奈月¹、山本 汐音¹、野尻 渉¹、佐々木 直人¹（1. 株式会社INPEX）

16:45 ～ 17:00

[2E21] 中国とインドのネットゼロへの道

○竹原 美佳¹（1. 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構）

17:00 ～ 17:15

[2E22] 脱炭素化社会にむけて石油・天然ガス産業の気候変動対応を考える

○伊原 賢¹（1. 石油天然ガス・金属鉱物資源機構）

17:15 ～ 17:30

天然ガス処理プロセスにおける水銀の分配予測技術

(INPEX*・マレーシア工科大学**) ○山田 淳也*・渋谷 健広*・川崎 緑*
 ・大塚 町恵*・小林 淳*・辻 智也**

1. 緒言

坑井より産出する原油・天然ガスに含まれる微量水銀は生産プラントのみならず販売においても種々の問題を生じることから、水銀除去装置 (MRU: Mercury Removal Unit) の設置は不可欠となっている^{1,2)}。MRU の設計、運転には天然ガス成分およびガス処理用ケミカルに対する正確な水銀濃度の把握が必要であるが、現状では、そのデータは必ずしも十分ではない。当社では、ガスおよびケミカルに対する水銀溶解度を独自に測定し、そのデータに基づいて商用シミュレーター搭載されている状態方程式の調整を行ってきた。本講演では、その詳細と実プラントから得られた計測値と比較した結果を報告する。

2. 実験

当社において流通法により天然ガス成分となるメタン、エタンおよび二酸化炭素を 6 MPa まで加圧した際のガス中水銀濃度、および静置法によりガス処理用ケミカルとなるエチレングリコール単量体～3 量体 (MEG、DEG、TEG) および *N*-メチルジエタノールアミン (MDEA) の大気圧下の飽和水銀濃度を測定した。さらに、これらのデータを用いて次式の Peng-Robinson 状態方程式 (PR-EOS) の純物質引力定数 a および 2 成分間相互作用パラメーター k_{ij} (Binary Interaction Parameter: BIP) を調整した。

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2 + 2bv - b^2}$$

$$a = \sum_i \sum_j x_i x_j (1 - k_{ij}) (a_i a_j)^{1/2} \quad b = \sum_i x_i b_i$$

3. 実験結果および考察

Fig. 1 に 265.15-303.15 K のメタン中の水銀溶解度を示す³⁾。図より、これまで唯一の実測とされてきた Butala らのデータ⁴⁾と一致していることがわかる。エタン、二酸化炭素についても加圧により、モル分率は ppm から ppb レベルまで減少した。Fig. 2 に 303.1-333.2 K の MEG 中の水銀溶解度を示す⁵⁾。なお、測定では溶存酸素による元素状水銀の酸化を防ぐため、完全な窒素雰囲気下で試料調製および採取分析を行った。図より、モル分率はメタン中より小さく、ppm レベルには至っていない。また、高温において文献値と乖離し、低温では整合性が認められる。これは、文献値では元素状水銀が酸化し、生成した水銀イオンも定量したために見掛け上、溶解度が増大したと考えられる。なお、DEG、TEG および MDEA では、温度逆数に対する傾きが MEG と合致し、モル分率そのものは互いに分子を構成する主鎖の原子数の比となるこ

とがわかった。調整では水銀の引力定数 a は飽和蒸気圧から決定した独自の定数とし、水銀相の非相溶性を仮定した。一方、BIP は各構成 2 成分系について次式で調整して、Fig. 1 および Fig. 2 に示すような結果を得た。

$$k_{ij} = k_{ij}^{(0)} + k_{ij}^{(1)}T + k_{ij}^{(2)} / T$$

講演では調整後の商用シミュレーターを用いた水銀分配計算値と計測値との比較結果についても紹介する。

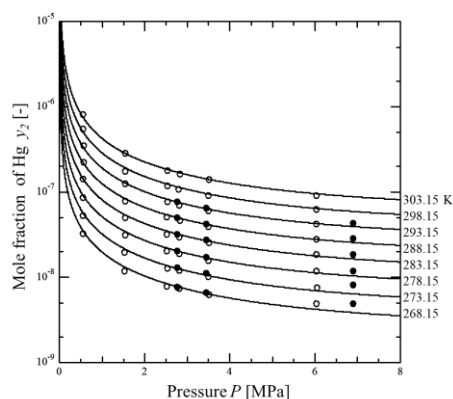


Fig. 1. 高圧メタン中水銀溶解度 ○ : Yamada et al.³⁾, ● : Butala et al.⁴⁾, — : PR-EOS による計算値

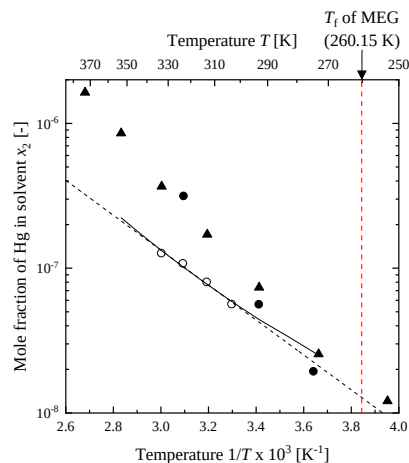


Fig. 2. MEG 中の水銀溶解度 ○ : Yamada et al.⁵⁾, ● : Gallup et al.⁶⁾, ▲ : Li et al.⁷⁾, — : PR-EOS による計算値

- 1) Kinney, G.T., *Oil Gas J.*, **73**, 192 (1975).
- 2) Salva, C., Gallup, D., SPE-138333 (2010).
- 3) Yamada, J. et al., *Fluid Phase Equilib.*, **506**, 112342 (2020).
- 4) Butala et al., GPA Research Report RR-224 (2016).
- 5) Yamada, J. et al., *J. Solution Chem.*, **50**, 968-982 (2021).
- 6) Gallup et al., *Fuel*, **196**, 178-184 (2017).
- 7) Li et al., *IOP Conf. Series Mater. Sci. Eng.*, **394**, 022060 (2018).

Evaluation of crude oil emulsion type and stability by electrokinetic properties

(Hokkaido University* · JOGMEC**) ○Xingjuan Hao* · Sadia Afrin* · Mai

Shimokawara** · Yoshitake Kato** · Ryuta Kitamura** · Yogarajah Elakneswaran*

1. Introduction

Crude oil emulsion is a major challenge in petroleum industry, which is formed in the production, transportation, processing and stockpile of crude oil. Emulsions are mainly divided into four types such as O/W, W/O, O/W/O, and W/O/W emulsions where W/O emulsion is considered as the main reason for emulsification problem. Most of the studies have focused on analyzing various factors to evaluate emulsion stability, but there is still a lack of clear understanding on the stability of crude oil emulsion and the influencing factors on it. Moreover, the fundamental mechanism on emulsion formation and stability is not properly studied. Therefore, in this study, the process of crude oil emulsion formation was observed, and the electrokinetic properties of crude oil in various brines were determined. Moreover, the influence of different factors on emulsion stability were evaluated. Finally, the mechanism for emulsion formation was explored.

2. Experiments

Two crude oils (A and B) with different total acid number/base number (TAN/TBN) ratios were selected. The emulsion was prepared at different pH with the ionic strength of 100 mM and the brines with the different cations. The adopted crude oil to brine ratio was 10%. The emulsion was stirred for 15 min with 30,000 rpm at room temperature. One set of samples was used for zeta potential measurement while the other set was allowed to rest for 24 h, and then the resolved water was separated by centrifugation. Thereafter, the volume and pH of resolved water were measured. In addition, the crude oil in different brines was homogenized for 5 s and then used for observing the emulsion formation

process by microscopy.

3. Results and Discussion

The stability of crude oil emulsion and its zeta potential were significantly affected by initial pH of brine (Fig.1.). The pH changes can result in the deprotonation of carboxyl (-COOH) and protonation of amidogen (-NH) from asphaltenes and resins, which contributes to the type changing in the process of emulsion formation. Crude oil emulsion formation with different types of transformation was observed in various conditions (Fig.2.). Under high stirring energy, W/O/W and O/W emulsions were formed first. Then they were transformed to W/O emulsion. The particles in W/O emulsion were smaller than that in W/O/W emulsion (Fig. 2.). The smaller particles are less likely to be destroyed, which suggests more stable emulsion. It is found that the interface reactions, electrokinetic properties, hydrogen bond, steric hindrance, and gravity forces influence the formation of emulsion type and its stability.

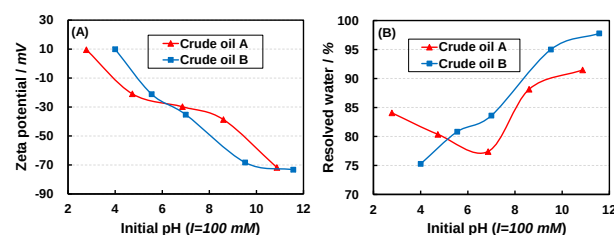


Fig.1. (A) Zeta potential and (B) Resolved water % as a function of Initial pH

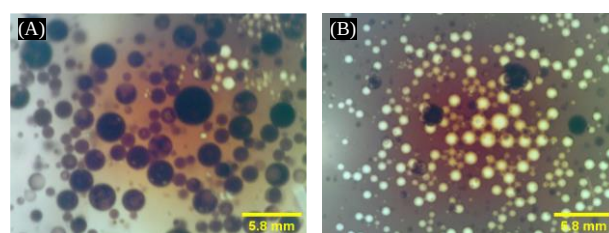


Fig.2. Change of emulsion type with time in pH 6 brine. (A) W/O/W at 20 s; (B) W/O at 30 s

INPEX の生物多様性保全の取組みについて

(INPEX) ○川口奈月^{かわぐちなつき}・山本汐音^{やまもとしおね}・野尻 渉^{のじり わたる}・佐々木直人^{ささき なおと}

1. はじめに

当社は、2012年にISO26000を参考に、ステークホルダーにとっても重要度の大きい5つのテーマをCSR重点テーマとして特定した。2015年には、主要プロジェクトの進捗に伴う事業活動が与える影響事象やステークホルダーの関心事項の変化などを踏まえてテーマの見直しを行い、6つのCSR重点テーマ(ガバナンス、コンプライアンス、HSE、地域社会、気候変動対応、従業員)を再設定した。さらに、持続可能な開発目標(SDGs)の観点を取り込み、“生物多様性の保全”など優先的に行うべきアクションを「重要課題」として特定した。2018年には国内外の事業における全社の環境分野の取り組みを統一感のあるものとし、かつそれらを可視化できるように、「コーポレート環境管理計画」を作成し、その中で“生物多様性の保全”を含む5つの環境目標を設定し、継続的に改善が成されるよう取り組んでいる。

2. 生物多様性の保全への当社の取組み

石油及び天然ガスの探鉱、開発、生産活動等のすべての事業活動は、生物多様性及び地域コミュニティが依存する自然環境及び社会環境に影響を与える可能性がある。潜在・実在の影響、関係性及びその結果として生じるリスクを管理することの必要性は重要な要因であり、事業のライフサイクル全体にわたって適切かつ全般的に検討する必要がある。

当社の生物多様性の保全へ取り組みは、国内外を問わず新規事業と既存事業と異なるアプローチで効果的に対応している。新規に開発する事業においては、事業活動が生物多様性に及ぼす影響を、環境・社会影響評価(ESIA: Environment and Social Impact Assessment)を通じて予測・評価し、ミチゲーション・ヒエラルキーに基づき、回避、低減、代償の対策を検討し、生物多様性への「負の影響」を低減するための対応策を策定し実行している。一方、すでに長い年月にわたり事業を展開している既存事業では、環境に対して負の影響を排除/低減した操業を続けてきており、生物多様

性に関する問題が生じていないと考えられるため、生物多様性に「正の影響」を創出するような取り組みを検討し実行している。地域貢献活動やボランティア活動といった地域に密着した活動を中心に展開し、着実に継続してきた。

3. 生物多様性の保全のさらなる推進に向けて

当社では、これまでも既にさまざまな取り組みを、コーポレート及び国内外の各オペレータープロジェクトにおいてそれぞれ計画・実施してきた。特に、オペレータープロジェクトでは、事業場の立地環境や事業活動の状況を考慮した取り組みを計画・実施している。しかし、一方で、コーポレートを中心とした全社的な生物多様性の保全に関する方針やコミットメントの下で、全社連携で取り組みを推進していく体制はまだ十分には整備されていないと考えており、現在そのコーポレート機能構築に向けて検討をすすめている。

また、当社は今年2月にインドネシアの Rimba Raya Biodiversity Reserve REDD+プロジェクトを支援すること発表した。同プロジェクトにおいて、オランウータン保護プログラムを推進するとともに、地域住民の生活向上等を目的として森林保全活動を行っており、森林保全活動によるCO2吸収によって継続的に国際的な認証を得たカーボンクレジットを創出している。今後とも貴重な生物多様性の保全や、地域社会の生活基盤向上に貢献する優良なプロジェクトの支援を推進していく。



プロジェクト地域に生息するオランウータン

今回は、当社においてオペレータープロジェクトを実施している国内外の5つの地域において過去に取り組んでいた、あるいは現在取り組んでいる生物多様性の保全の取り組みについて紹介する。

中国とインドのネットゼロへの道

((独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構)^{たけはら みか}○竹原 美佳

1. 背景

2019 年 9 月、国連気候行動サミットにおいて、2050 年排出実質ゼロ(カーボンニュートラル)を目指すイニシアチブ“Climate Ambition Alliance”が発足し、2021 年 7 月時点で 121 カ国 1 地域が参加している。G20 の主だった国は 2050 年までのカーボンニュートラルを表明している。

BP 統計によると、2020 年の世界のエネルギー活動に伴う CO₂ 排出のうち中国は首位(世界の排出の 33%)、インドは 3 位(同 7%)を占める。2 位の米国(同 14%)は 2021 年 1 月にパリ協定に復帰し、2030 年の排出削減目標を 2005 年比 50～52%と従来の 2 倍近く引上げ、各国・地域にも排出削減目標の強化を求めている。

中国は 2020 年 9 月の国連総会で 2060 年のカーボンニュートラルを表明したが、具体的なロードマップは出ていない。インドはカーボンニュートラルの時期について表明していない。エネルギー消費の 5 割以上を石炭に依存している中国とインドにとりネットゼロへの道は容易なものではない。

2. 検証

本稿では中国とインドのエネルギー需給構造、低炭素化に向けたエネルギー関連政策(指針)、さらに中国については大学や政府機関タスクフォースやシンクタンクによるネットゼロシナリオシナリオを検証し、中国とインドのネットゼロへの道について考察した。

中国とインドのいずれも排出削減について電源の非化石化(特に太陽光や風力)やクリーンコールへの転換を図っている。

中国の発電電力量に占める原子力・再エネの比率は 2020 年には 32%に増加した。また 2021 年 7 月に全国の排出権取引を開始した。

インドは 2020 年時点で電源の 25%が非化石化した。政府は 2030 年に発電設備容量の 4 割を非化石化する目標を設定している。

また両国ともに EV の普及拡大を進めている。中国は 2035 年までに新車販売の 50%以上を EV、残りをハイブリッドなどの「環境車両」とする方針を示している。国有石油企業の Sinopec は輸送燃料としての水素の開発利用と水素ステーションの増設を進めている。

インドは 2030 年に自家用車の 30%、商用車 70%、バス 40%の EV 化を目指すとしている。またオークション導入による安価な太陽光や風力発電でグリーン水素のコスト低下への期待が高まっている。民間の Reliance は 2035 年のカーボンニュートラルを表明、メジャーズとの提携を進めている。

3. 結語

中国、インドのいずれも太陽光・風力の設備容量増強や自動車の電動化など排出削減や再生可能エネルギー拡大の取り組みを積極的に進めている。また天然ガスを低炭素社会への移行エネルギーや再エネの調整電源として重視している。

一方両国は石炭に依存した産業構造の調整や雇用など経済と社会の安定に向けた対策に時間と費用が必要と認識している。中国とインドはネットゼロへの道を排出削減だけではなく、社会の安定、エネルギー安全保障、エネルギーを取り巻く環境の変化を考慮しながら慎重に進められると思われる。

2E22 脱炭素化社会にむけて石油・天然ガス産業の気候変動対応を考える

Considering climate change response of oil and natural gas industry toward decarbonized society

（石油天然ガス・金属鉱物資源機構）○伊原 賢（いはら まさる）

世界経済の脱炭素化という目標に反して、エネルギー関連のCO₂排出量は増加傾向にある。世界の動きはパリ協定を支持して設定された排出削減目標に沿っているが、産業革命以降の気温上昇を2℃以内に抑えるという協定の目標とは必ずしも一致していない。2℃以内に抑えるには、2030年時点で120億～130億tのCO₂追加削減が必要とされている（UNEP Emissions Gap Report 2019）。

この状況下で石油メジャーズの気候変動対応は、以下のように俯瞰できよう。

- ①石油メジャーズは、各社保有する優良アセットや強みを生かす戦略を保持しつつ、再エネ等低炭素技術への投資と併せて気候変動への取り組みを巧みにアピールし、いずれも実用的に対応している。欧州系もネットゼロと言いながら、実態は対象事業を限定（BPは上流のみ、Totalは欧州事業に限定）しており、優良な化石燃料資産を生かす戦略を展開している。
- ②各社、フレアやメタンの排出削減や省エネ電力利用等の低炭素化への取り組みのほか、CCS（Carbon Capture and Storage）やカーボンオフセット事業も展開している。植林によるカーボンニュートラル LNG も販売されているが LNG 市場に占めるシェアは10%程度である。大規模な温室効果ガス（Greenhouse Gas: GHG）削減には CCS が不可欠であり、各社単独又は共同で CCS 事業を強化している。事業展開には、CO₂削減量の算定や長期貯留性の評価・認証に伴う国際認証が成功の鍵となろう。
- ③天然ガス・LNG は需要が増加するシナリオで多くが一致する。優良資産を持つ企業はエネルギー供給コストの急上昇を避けるべく、移行期における低炭素エネルギー資源として重点化している（ExxonMobil, Total）。スポット価格の上昇には注意が必要だ。

水素エネルギーや再エネへの取り組みは以下がポイントとなろう。

- ①石油メジャーズでは化石燃料を生かし、CCS とセットにしたブルー水素や再エネ電力を利用したグリーン

水素等へ取り組むが、まだ実証段階である。欧州では化石燃料を起源とするブルー水素に対する否定的な意見も多く、欧州系は再エネへの投資と合わせてグリーン水素にも積極投資している。中東の国営石油会社はブルー水素の開発を進めているが、脱石油産業の観点からグリーン水素も追及する。ロシアやインドネシア等では CO₂ を排出するグレー水素から CCS 導入によるブルー水素までが検討されている。

- ②水素エネルギーについては、新たなビジネスとしても投資する企業と事業の低炭素化を主目的として投資する企業に二分される。いずれも事業で自家消費する低炭素化ツールとして再エネに投資しているが、総合エネルギー企業を目指す欧州系、脱石油産業を目指す中東の国営石油会社は再エネ供給のビジネスにも参入している。

一方、資源小国である日本にとって、脱炭素への道のりを妨げる要因は、コストである。産業構造転換も必要だろう。わが国にとって、原発再稼働や運転期間延長が進捗しないまま、石炭火力を減らし、洋上風力といった再エネを大幅に上積みすれば、エネルギーコストは上昇しよう。性急なあるいは誤ったカーボンプライシングは、脱炭素への誘導効果ではなくコスト高だけが、企業や国民にのしかかろう。「グリーンは成長のエンジンだ」といった総論で片付けられるほど、ことは単純ではない。この挑戦は社会構造改革でもあり、業務・家庭部門、運輸部門に広く及ぶことも視野に入れなければならない。

2050年カーボンニュートラルの実現可能性は水素を含めた技術革新とコストの低下次第であると思う。当該技術輸出に成長エンジンを託すならば、アジア途上国でも導入可能なコスト水準（たとえば20円/Nm³程度の安価な水素やゼロエミッション電源）を達成することが必要だろう。BECCS（Bio-Energy with CCS: CCS 付きバイオ燃料）と DACCS（Direct Air Carbon Capture and Storage: 大気から直接 CO₂ を捕捉し、地下に半永久的貯留）の大幅導入も言うまでもない。

了