講 演
 Lecture

海洋石油・天然ガス開発と環境対策－授業と研究の紹介*

栗 原 正 典^{**†}

(Received September 24, 2015 ; accepted November 9, 2015)

Offshore oil and gas development in harmony with environment – Introduction of classes and research in university

Masanori Kurihara

Abstract : In the department of resources and environmental engineering of Waseda University, we are performing several classes and research work dealing with oil/gas exploration and development. Although it is difficult to conduct research work targeting the offshore oil/gas development in the university because of its giant scale, we are striving to give lectures on the fundamentals of the technologies applied to offshore oil/gas development taking environmental protection into consideration. This paper introduces the classes and research work for offshore oil/gas development and environmental issues conducted mainly in Waseda University.

About 20 classes deal with the topics related to oil/gas development in the undergraduate and graduate courses. Lectures on offshore oil/gas development are given in three of these classes including one in the international course, where the history of offshore development, offshore production systems including offshore platforms, case studies and environmental protection are explained. On the other hand, about 30 classes are provided for studying environmental issues. In one of these classes, environmentally friendly oil/gas development is introduced from the viewpoints of environmental impact aspects, environmental protection measures and HSE requirements in each project stage.

As for the research related to the environmental protection using petroleum engineering technologies, two programs are now being developed. One is a prototype numerical simulator predicting the bio-remediation of oil contamination in underground water. In this simulator, various reactions induced by microbes such as oil consumption associated with growth/decay of microbes, adsorption of microbes on rock surface and ionization are predicted. The other program is aiming at the optimization of the well locations and CO₂ injection rate so that the economics can be maximized in a CCS-EOR project, taking account of oil increment by CO₂ injection and CO₂ tax credit by storing CO₂ in a reservoir.

Keywords : offshore oil and gas, environment, university class, bio-remediation, CCS

1. はじめに

近年では、これまでのように比較的簡単に開発・生産が可能で、市場への搬出も容易な石油・天然ガス、いわゆるイージーオイル・ガスを発見・開発することが非常に困難になっており、我が国を含め、世界の石油開発会社は、イージーオイル・ガスよりも条件の厳しい石油・天然ガスの開発・生産に挑戦している。これらの例として、断層・フラクチャー・低浸透率のように地質構造の複雑な貯留

層、非在来型の石油・天然ガス、海洋、特に大水深や極地のような極限地域に存在する貯留層、高度な Improved Oil Recovery / Enhanced Oil Recovery (IOR/EOR) 技術や環境保全技術を要する貯留層に胚胎される石油・天然ガスが挙げられる。

筆者は大学で石油工学に関する教育・研究を行っているが、上記の現状を反映し、緻密な油層モデリング技術、IOR/EOR 技術、非在来型の石油・天然ガス開発技術などに関しては、実験やシミュレーションを通して、その改良・向上を試みている。しかしながら、海洋における石油・天然ガスの開発に関しては、環境問題も含め、対象とする相手が大きすぎ、大学の研究室では研究の対象とすることが困難であるのが実情である。ただし、上記のように、海洋石油・天然ガス開発は、今後の石油・天然ガス開発の中心的な役割を担うといっても過言ではないため、座学ではあ

* 平成 27 年 6 月 11 日、平成 27 年度石油技術協会春季講演会開発・生産部門シンポジウム「海洋開発の今～技術課題・HSE への取り組み～」で講演 This lecture was presented at the 2015 JAPT Development and Production Technology Symposium entitled “Technical and HSE Challenges for Offshore Field Development” held in Tokyo, Japan on June 11, 2015.

** 早稲田大学 Waseda University

† Corresponding author : E-Mail : kurihara.m@waseda.jp

るが、講義の一部で海洋石油・天然ガス開発に関する情報を学生に提供しようと試みている。

本稿では、大学における海洋石油・天然ガス開発に関する講義、および環境を扱う講義の概要を紹介する。さらには筆者の研究室で実施している「環境」に関する研究として、微生物による油汚染の浄化プロセスを再現するシミュレータの開発および Carbon-dioxide Capture and Storage (CCS)-EOR の最適化プログラムの開発を紹介する。

2. 大学での授業の紹介

筆者が所属する早稲田大学には、図1に示すように、10の学術院（会社では事業本部に相当）が存在する（<http://www.waseda.jp/>）。

これらの学術院の中の理工学術院を中心に、エネルギー、環境、資源に関連する研究が数多く実施されているが（図2）、石油・天然ガス開発やそれに伴う環境問題を具体的に教育・研究しているのは、筆者の所属する環境資源工学科のみである（栗原正典，2012）。

本章では環境資源工学科で実施されている石油・天然ガス開発に関連する授業、特に海洋石油開発やそれに伴う環境保全に関する授業を簡単に紹介する。

2.1 学科における石油・天然ガス開発および環境に関する授業

環境資源工学科では、石油工学を専門とする筆者と岩盤工学および石油生産工学を専門とする古井准教授、探査工学を専門とする斎藤教授に非常勤の講師の方々を加え、石油・天然ガス開発関連の講義・実験を実施している（<http://www.env.waseda.ac.jp/>）。現時点では学部生を対象として13、大学院生を対象として9の講義・実験が設置されているが、本年秋学期からは海外からの留学生を対象とした国

図1 早稲田大学組織図（抜粋）

図2 早稲田大学「エネルギー・環境・資源」研究者マップ

際コース（大学院）が開設され、そこでは英語による約10の講義が実施される予定である。また、石油・天然ガス開発とは直接には結びついてはいないが、間接的には石油・天然ガス開発における環境保全を考える上でも有益であろうと思われる講義・実験が30設置されている。

2.1.1 石油・天然ガス開発に関する授業

環境資源工学科における石油・天然ガス開発に関する授業の一覧を、表1に示す。基本的には学部2年生を対象に、石油・天然ガス開発に関する技術、例えば探査技術や油層・生産技術などを網羅的に講義し、学部の3年生を対象に、より細分化した分野、例えば油層シミュレーション

や岩盤力学などの基礎を講義する形式を採用している。大学院では、さらにこれらの教科の一部の応用編を教えている。また国際コースでは、主としてこれらの授業の一部を英語で提供している。ここでは、これらの授業から2例を選んで紹介する。

最初の例として、石油天然ガス・金属鉱物資源機構 殿（Japan Oil, Gas and Metals National Corporation : JOGMEC）のご好意により学部の2年生を対象として実施して頂いている「石油・天然ガス開発技術の最先端」なる授業の概要を紹介する。表2に本授業の各回（1.5時間）の講義タイトルを示すが、この表に示すように、本授業は、

表1 石油・天然ガス開発を学ぶ授業

学年	科 目	概 要
1年	環境資源工学の展望	環境資源工学科のそれぞれの分野にて勉強・研究する概要を講義する。
2年	開発環境工学概論	地下流体資源について、広くエネルギー問題と環境問題の観点から、探鉱・開発ならびに生産技術の概要、経済的側面などについて講義する。
	石油・天然ガス開発技術の最先端	石油・天然ガスのエネルギー資源としての将来の可能性、世界各国の石油戦略、石油・天然ガスの探査開発に関わる地質学、地球物理学、油層工学、掘削技術などの最先端の技術とその有機的な統合などについて講義する。
	地殻情報工学の基礎	物理探査技術の基礎となる物性や基本理論を講義する。また、石油・天然ガス、鉱物資源、地下水などの対象別に物理探査技術や調査例などを説明する。
	地殻情報工学概論	地下資源の確保ならびに地球環境保全から見た地殻構造解明の重要性について概説し、それにかかわる情報技術としての物理および化学を駆使した探査法を講義する。
3年	油層シミュレーション	油ガス層シミュレータ、数値解法の基礎を解説し、簡単なシミュレータの構築（プログラミング）を可能とさせる。さらには実践的な貯留層シミュレーション技術を講義する。
	油層工学の基礎	貯留層の性質、油・ガスの特性、貯留層内での油・ガスの流動機構、などを講義する。
	岩盤力学	岩石のような弾塑性体を対象として、将来このような材料を取り扱うときに必要な基礎概念および手法を基礎力学に立脚して講義する。
	数値岩盤工学	岩石のような弾性体構造物の応力・歪・変位の数値解析を行う。
	地圏物理探査工学	地球を取り巻く磁場、重力場、電磁場などの地球物理的な概説に続いて、ポテンシャル場やマクスウェルの式の説明を行う。また各種の物理探査手法の概説を行う。
	計数流体力学	環境や資源開発に関わる問題を解くために、流体力学がどのように適用されているかを具体的に講義する。
	環境資源工学実験 A・B	鉱物・石油資源の探査・開発・処理、廃棄物資源の処理・処分、およびそれら工程中で発生する環境問題の対策に関わる各種実験を行う。
4年	地震探査工学	石油・天然ガス探鉱には欠かすことのできない反射法地震探査を中心に取り扱い、データ取得からデータ処理、データ解釈にわたって講義を行う。
大学院	油層工学特論	油層工学の立場から、対象となる貯留層を正しく評価・把握する技術を講義するものであり、従来の技術のレビューに加え、近年注目を集めている地球統計学を応用したアプローチ、多成分系シミュレーションなどについても議論する。
	地質統計学	地質統計学を駆使した貯留層モデリングの基礎である種々のクリギング法と条件付シミュレーション法について講義すると共に、異なる種類のデータ分布も考慮した貯留層特性分布の推定法、アップスケーリング手法など、より信頼度の高い貯留層特性の把握のための最新手法を講義する。
	石油生産工学特論	境界要素法の基礎を講義し、二次元、三次元のプログラムを作成する能力をつけることを目的とする。
	数値岩盤工学特論	境界要素法を用いた弾性体構造物の応力・ひずみ・変位解析および流体の流動解析とそのプログラミング手法を講義する。
	探査工学特論	地震探査、電磁探査などの物理探査技術について講義する。
	応用地球物理学	地球を取り巻く磁場、電磁場、重力場などの理解と、それらを使う地下の調査技術について、4年生までの復習も含めながら講義する。
	地球物理情報工学	地下資源の調査、土木分野における基礎地盤調査など、地下の状況を非破壊で把握し、可視化し、解釈することによって地下の状態を評価するための学問を講義する。
	天然ガス工学	在来型資源である天然ガスの特性を熱力学に立脚して講義する。
	掘削工学特論	大深度、大水深で用いられる石油坑井掘削技術は、高温・高圧の非常に過酷な環境を克服し、人間の目で直接見るることのできない地中深くまで到達することを可能としている。高度なエンジニアリングによって成り立っている坑井掘削の仕組みを基礎から応用まで解説する。

表2 「石油・天然ガス開発技術の最先端」の講義項目

	講義タイトル
1	エネルギーと文明・経済
2	石油・天然ガスはどこに？（油ガス田の成立条件）
3	化石燃料と再生可能エネルギー
4	21世紀まで続く炭化水素の時代（石油埋蔵量論と天然ガス・非在来型資源）
5	地下5000メートルを透視する（震探イメージング）
6	貯留層の評価技術（地下のキャラクタライゼーション）
7	過去を探り将来に役立てる（油層シミュレーションとEOR）
8	地下に眠る石油・天然ガスへのアクセス（掘削・仕上げ技術）
9	生産物から原油・天然ガスを選び分ける（生産処理設備）/ 環境調和型油ガス田開発技術
10	ガス田開発のための海洋構造物（浅海から深海へ）
11	メタンハイドレートの資源開発を目指して
12	天然ガスから液体燃料を造る（国産GTL技術）/ 重質油開発の現状
13	石油・天然ガス市場と産業構造
14	石油・天然ガス開発技術に関する総合討論 or 学力考查
15	学力考查等

石油・天然ガス開発に関する一連の技術的な流れ（油ガス田の成立から生産設備まで）に加え、エネルギー概論や石油・天然ガス市場に関する講義を複数の講師の方々がオムニバス形式で進めていくものである。さらには、授業の最終段階で、希望者は新潟の石油・天然ガス開発の現場見学に参加することができる。

環境資源工学科には毎年70名くらいの学生が入学するが、入学時にはほとんどの学生がなんとなく「環境」に関する勉強や研究を志していると言っても過言ではない。つまり、石油・天然ガスを含めた資源開発を志して入学してくる学生は数名に過ぎない。学生は2年生になってこの授業に出合うことになるが、現場見学を含め、この授業を通して石油・天然ガス開発という分野の存在を認識し、「石油ファン」になる学生が十数名誕生することとなる。石油開発業界への優秀な学生の輩出を目指している筆者にとっては、非常にありがたい授業の1つである。この授業では、春季講演会のテーマである「海洋開発」や「環境」についても触れているが、講義時間が短いため、概要を伝えるに止まっている。

もう1つの例は、本年9月に開設される国際コースで最初に実施する予定の“Fundamentals of Petroleum Engineering”である。これは表3に示すように講義形式の授業で、地質から生産まで、さらにはケーススタディを網羅しており、石油・天然ガス開発を専門としていない学生に対しても、石油工学の基礎を伝えることができると期待している。

2.1.2 環境に関する授業

環境資源工学科では、学科名が示すように、環境に関する授業が多数提供されているが、石油・天然ガス開発に伴う環境に関しては、石油・天然ガス開発関連の授業の一部

表3 “Fundamentals of Petroleum Engineering”の講義項目

1	Introduction of major themes: Practice vs. theory in petroleum engineering; engineering vs. science; roles, responsibilities and accountabilities; reservoir management concepts; safety and human factors; communicating with non-petroleum engineers?
2	Geology and Geophysics introduction. Integration of G&G with petroleum engineering. Engineering vs. science. History of the oil industry – part 1.
3	Geology and Geophysics and petroleum engineering in practice. Introducing systems and oil production life cycle concepts. Conventional oil vs. shale oil and gas. History of the oil industry - part 2.
4	Appraisal drilling. Safety issues and human factors. Logging and coring practice. Assignment 1 Commencement.
5	Analysis of cores and logs. Introducing reservoir management. Working in teams – part 1.
6	Building the geological model. Managing subsurface uncertainty. Working in teams – part 2.
7	Reserves estimation and flow rates. Introduction to reservoir simulation. Development planning. Overview of petroleum economics – FID.
8	Structures (onshore and offshore), geotechnics and facilities. Project management issues - part 1. Assignment 1 due.
9	Drilling (including drilling procedures and drilling fluids) and subsurface engineering (completions). Safety engineering – blowout prevention. Assignment 2 Commencement.
10	Initial reservoir performance. Production engineering design - introduction. Project management issues – part 2.
11	Production engineering issues – sand control; stimulation; flow assurance; water management; PWRI; oilfield chemistry.
12	Reservoir performance analysis – volumetric; decline curve; material balance and simulation. Secondary recovery approaches.
13	Engineering more complex and difficult fields – low permeability; tight oil and gas fields; poorly delineated fields; HTHP reservoirs; high CO ₂ fields and deep water. Assignment 2 due.
14	Mature field reviews. Reducing costs. Tertiary recovery approaches. New Technology and R&D. Field Abandonment.
15	Feedback on student assignments. Review.

として紹介していることが多い。表4に、石油・天然ガス開発と直接は関係のない一般的な環境関連の講義・実験の一覧を示す。一口に「環境」と言っても取扱う分野は広いようで、化学的、物理的な側面から環境破壊や環境保全の基礎を教えるもの、安全や生態系の側面からの講義、さらには資源リサイクリング、環境リスク、環境経済を扱うものも含まれている。また、現在マスコミなどで大きく取り上げられているPM2.5、富士山頂での越境汚染調査、福島県での環境調査などについても紹介している。

いずれの授業も「環境資源」工学科で発信しているものであるため、「大気圏、生物圏、水圏、土壌圏、岩石圏の全てが環境であり、その中で人間が利用可能なもの全てが

表 4 環境を学ぶ授業

学年	科 目	概 要
1 年	環境資源工学の展望	環境資源工学科のそれぞれの分野にて勉強・研究する概要を講義する。
2 年	環境保全工学概論	環境中に浮遊する有害汚染物質から人を守るために必要な基礎知識を身につけるための講義と、人類にとって必要不可欠な大気環境、水環境、森林を保全するために必要な基礎知識の講義を行う。
	資源循環工学概論	資源・環境問題の現状把握、その根本的原因解決に技術がいかに貢献できるかを講義する。特に分離工学の重要性を述べ、その概論と要素技術の紹介を行う。
	環境機器分析	環境分析に使用されている機器分析技術の原理とその実際について講義する。
	地殻情報工学概論	地下資源の確保ならびに地球環境保全から見た地殻構造解明の重要性、また情報技術としての物理および化学を駆使した探査法を講義する。
	環境資源経済論	水資源を中心とした我が国の環境・資源に関わる社会・経済的な動きについて、ミクロ経済学をベースに講義する。
3 年	環境地質学	実例を示しながら、時系列的なものの見方を含んだ地質科学的な取組の習得を目指し講義する。
	資源リサイクリング	本来あるべき資源循環の姿を述べ、その応用例について講義する。後半では、学生が調査した結果を発表し、資源延命と環境調和の観点から議論を行う。
	資源分離工学	各種廃棄物資源および鉱物資源からの有価成分の回収および有害成分の除去のための成分分離（特に選別）技術について講義する。
	粉体制御工学	粉体を構成する粒子の大きさ・形状・その他の基礎物性について、その定義と測定法を講義する。
	環境界面工学	固液界面における帯電をはじめとする物理化学的な現象や、種々の無機有害元素の収着現象などについて講義する。
	大気環境工学	大気環境に関連した問題が発生した時に、その情報を正確に判断できることを目標とし講義する。
	作業環境工学	作業環境の正確な現状把握に対応した工学的な手法で、有害物質から作業を守る知識および技術を身につけることを目標にして講義する。
	環境地球化学	気圏と水圏における環境汚染物質の分布と移動に関する支配原理を定量的に理解することを目的とし講義する。
	環境水質工学	水質汚濁問題を中心に現状と対策について学ぶ。また、閉鎖性水域の水質浄化、水処理を通じて、おのおのの微生物生態系、生物学的、物理化学的な汚濁負荷軽減のための技術、単位操作およびそのメカニズムなどについて講義する。
	環境リスク解析	環境に関わるリスク解析の意義や限界を考えながら、主に化学物質による環境リスクを解析する上で必要な知識、手法を示し、さまざまな環境リスクの状況を具体的に分析する。
	同位体環境学	安定同位体という自然環境についた元素の指紋を利用して、圏内や圏相互の元素の挙動を追跡し、環境全体の安全性を評価するトレーサビリティ診断法について紹介する。
4 年	環境資源工学実験 A・B	鉱物・石油資源の探査・開発・処理、廃棄物資源の処理・処分、およびそれら工程中で発生する環境問題の対策に関わる各種実験を行う。
	廃棄物管理工学	廃棄の実態、およびライフサイクルアセスメントの手法を活用した廃棄物管理に関する技術を学ぶ。
大学院	海洋地球環境学	近年の地球温暖化・海洋酸性化、および今後の深海鉱物資源開発による環境負荷、人類が誕生して発展した地球環境に関して講義する。
	水質化学特論	地球上の水分布と水循環、天然水の化学組成とその支配原理、大気・水質・土壌汚染の実態と汚染機構の理解を深める。
	環境安全工学	化学物質の管理について学び、リスクマネジメントに必要な作業環境測定および曝露濃度測定について学ぶ。
	生態環境学	人類活動はどこまで地球環境を変化させたのか？人間活動は地球の中でどこまで許容されるのか？地球規模の変化は自然環境にどのような影響を及ぼすか？人類が地球上で生存していくためにはどうすべきか？について考える。
	環境界面工学特論	各種無機物質を取り上げ、固液界面におけるそれらの挙動を把握するための理論を学ぶ。
	資源分離工学特論	資源循環型社会に不可欠の各種成分分離技術、特に固相分離技術に関する基礎理論を講義する。
	地圏環境工学	人間と自然の関わり合いの歴史に基づいて、今後の両者の共生への道筋を探る。
	資源分離シミュレーション	金属資源の濃縮に不可欠である粉砕・物理選別操作に有効である粉体シミュレーションや、廃水処理・土壌浄化における金属イオンの挙動の把握に重要な役割を果たす化学平衡計算を中心としたシミュレーションを講義する。
	地球環境の変遷と資源	人類の活動増大が地球規模での環境変化や地球上の諸現象に与える影響、また一方で、人類の活動を発展させるための資源の確保、この相反する方向を統一的に解決し、人類社会の発展を維持する方法を講義する。
	土壌浄化工学	土壌汚染による土地の汚染を回復・軽減させる工学的な処置法を講義する。
大学院	環境微生物学	微生物についての基礎的な特徴、地球上に生息する微生物についての知識を深める。そして微生物が地球環境の恒常性を保つ上でどのように機能しているのかについて多角的に講義する。

資源である。そのため資源を開発することにより環境のバランスが崩れるが、その評価、保全が重要である」との基本理念に基づいている。

2.2 海洋石油・天然ガス開発と環境対策に関する授業

2.2.1 海洋石油・天然ガス開発に関する授業

筆者は東海大学海洋学部で非常勤講師をしており、ここでは3年生を対象とした海洋資源学なる科目の一部を担当している。この科目は熱水鉱床などを含む海洋資源の開発について5名の教員が教えるものであるが、この中で筆者は3回の講義（4.5時間）を担当し、海洋石油開発やメタンハイドレートの開発・生産などを教えている。これに相当する教科は早稲田大学では提供されていないが、学部2年生を対象とした開発環境工学概論にその一部を取り入れている。

筆者が担当する海洋石油開発に関する部分では、主として前半で海洋石油開発の種々の形態を紹介し、後半で海洋石油開発に伴う環境影響と対策を紹介している。以下に本講義の概要を紹介する。

(1) 海洋油ガス田開発の変遷

海洋石油・天然ガス開発の歴史およびメキシコ湾や北海におけるプラットフォームの変遷の紹介。

(2) 海洋生産システムの種類と機能

固定式、着定式、浮遊式のプラットフォームなどの紹介およびプラットフォーム各部位の機能とコストの説明。各種プラットフォームの特徴と坑井数や水深による適用基準の解説。

(3) 最先端プラットフォーム

図3 アンゴラにおける多点式係留のFPSOと海底仕上げの例

図4 余剰ガス、随伴水、掘削屑・マッドの処理

表5 海洋掘削時の環境影響と対策

作業	影響	対策例
掘削リグの設置関連船舶の航行	海生生物への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ 海域の海生生物の調査と対策策定 ・ 情報公開 ・ 適切な排他海域の設定 ・ 船舶航行計画の策定 ・ 公平な報償の検討
	漁業・一般船舶航行制限	
掘削作業	掘削屑・泥水・廃水・廃棄物の排出	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低毒性泥水の使用（油系泥水の使用抑制） ・ 排出基準の順守 ・ 廃棄物の回収と陸上処理 ・ 海域の海生生物の調査と対策策定（影響の少ない時期に作業など）
	水質汚濁	
	底質汚濁	
	海生生物への影響	
(油流出事故)	土壌汚染	<ul style="list-style-type: none"> ・ 漏洩検知、暴噴防止装置（Blow Out Preventer：BOP） ・ 保守／管理 ・ 油流出事故対応計画の策定 ・ 安全対策、作業員の教育
	動植物・生態系への影響	
	労働者の死傷	
坑井テスト	原油の漏洩	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原油の回収、漏洩防止 ・ 高性能フレア装置の使用による無煙化、低NOx化
	随伴ガスのフレア燃焼	

大水深プラットフォームであるコンプライアントタワー、テンションレグプラットフォーム、スパー、および耐氷型プラットフォームであるクック入江やサハリンIIプロジェクトのプラットフォームなどの紹介。

(4) 海洋油ガス田の開発事例

最先端プラットフォームや Floating Production, Storage and Offloading system (FPSO) および海底仕上げの事例を、図3に示したアンゴラにおける多点式係留のFPSOと海底仕上げの例を含めて複数紹介。

(5) 環境影響と対策

海洋掘削、海洋設備建設・設置、海洋出荷（タンカー・パイプライン）設備建設、生産、海洋生産設備撤去の各段階における各種作業が環境に及ぼす影響とその対策例を紹介（表5は掘削時の例）。

(6) 石油・天然ガス開発における環境対策

海洋に限らず、石油・天然ガス開発全般における環境対策であるゼロエミッション、すなわち図4に示す余剰ガス、随伴水、掘削屑・泥水の処理技術とCCSに代表される石油開発技術の環境保全への応用の解説。

2.2.2 環境対策に関する講義

前項で述べたように、石油・天然ガス開発に関する授業でも環境対策に触れるものもあるが、ここでは逆に、

Likelihood	Consequences				
	Insignificant	Minor	Moderate	Major	Catastrophic
Almost certain	L	M	E	E	E
Likely	L	M	H	E	E
Moderate	L	M	H	E	E
Unlikely	L	L	M	H	E
Rare	L	L	M	H	H

図5 リスク分析・評価

環境に特化した授業の中で石油・天然ガス開発における環境問題・対策を解説しているものを紹介する。環境資源工学科では、既に開設されている社会環境工学科（旧土木工学科）の国際コースにおいて、“Earth and Environmental Science” という教科を講義している。この教科は環境資源工学科で教育・研究を行っている環境関係の分野を網羅的に土木関係の留学生に紹介するものであり、大気や土壌汚染などを含む環境問題を複数の教員が講義している。

筆者はこの教科において、“Oil and Gas Development in Harmony with Environment” というタイトルで、石油・天然ガス開発と環境問題について2コマ（3時間）の講義を行っている。この講義は2部構成で、第1部では石油・天然ガス開発における環境問題とその対策について、第2部では石油・天然ガス開発技術を利用した環境保全、すなわち CCS や CO₂-EOR、核廃棄物の地下埋設などについて紹介しているが、ここでは第1部についてのみ記載する。

第1部では石油・天然ガスの開発、特に探鉱・開発・生産・廃鉱の各段階における作業を紹介した後に、“E&P Project and Environmental Aspect”, “Environmental Protection Measures”, “HSE Requirements” に関する講義を行っている。“E&P Project and Environmental Aspect”ではまず、石油・天然ガス開発の各段階における環境汚染の可能性、自然環境への影響、社会生活への影響、健康と安全への影響、事故の可能性を解説する。さらに個々の事例に対する環境影響評価手法やリスク分析（図5）などについても言及している。

“Environmental Protection Measures” では、石油・天然ガス開発の各段階における環境保全への努力、すなわち汚染防止（ゼロエミッションや廃棄物処理、など）、Health, Safety and Environment（HSE）の保護に向けたより広い取り組み（景観や文化遺産の保護、パイプラインルートを選択、事故への対応、など）を紹介している。さらに“HSE Requirements”では、メジャーに代表される石油開発会社におけるHSEに関する規制、銀行などから資金融資を受ける際に要求されるHSEの規準などを、主に International Finance Corporation（IFC）や世界銀行の規準を参考に講義している。

3. 環境に関する研究の紹介

特に海洋における石油・天然ガス開発を意識しているわけではないが、筆者の研究室では環境問題を対象とした研究も行っている。ここではこれらの研究の中から、微生物による油汚染の浄化プロセスを再現するシミュレータの開発および CCS-EOR の最適化プログラムの開発を紹介する。

3.1 微生物を利用した油汚染の浄化プロセスを再現するシミュレータの開発

3.1.1 バイオレメディエーション

地盤や海洋における油汚染の浄化には、油処理剤が使用されることが多い。この場合、比較的速やかに油汚染を取り除けるが、処理剤に含まれる有機溶剤や界面活性剤の影響により、場合によっては生物への被害を大きくすることがある。そこで、微生物の機能を活用して海洋、土壌、地下水などの環境中の汚染物質を分解、無害化するバイオレメディエーションという技術が注目されている（千田佑・井上千弘，1998）。

3.1.2 シミュレータの設計

図6に示すように地下水中に漏洩した油およびガスが存在し、この油を複数の微生物が分解すると仮定して、微生物による油の分解反応およびその周辺の反応と地下における流体流動を記述した数値シミュレータを設計した。以下に、このシミュレータの設計に際して想定した種々の現象とそれを記述した支配方程式や構成式を示す。なお、式中の記号については後述の「記号の説明」を参照されたい。

(1) 3相流動

$$\begin{aligned}
 & \nabla \cdot \left[\frac{\vec{k}^* k_r^w}{\mu^w} \rho^w w_i \nabla (p^w - \gamma^w \nabla D) \right] \\
 & + \nabla \cdot \left[\frac{\vec{k}^* k_r^o}{\mu^o} \rho^o x_i \nabla (p^w + P_c^{ow} - \gamma^o \nabla D) \right] \\
 & + \nabla \cdot \left[\frac{\vec{k}^* k_r^g}{\mu^g} \rho^g y_i \nabla (p^w + P_c^{ow} + P_c^{og} - \gamma^g \nabla D) \right] + \tilde{q}_i + \tilde{R}_i \\
 & = \frac{\partial}{\partial t} [\phi^* (S^w \rho^w w_i + S^o \rho^o x_i + S^g \rho^g y_i) + A_i], \\
 & i = 1, 2, \dots, n_c
 \end{aligned} \tag{1}$$

(2) 飽和率の制約

$$S^w + S^o + S^g = 1 \tag{2}$$

(3) 平衡定数とフラッシュ計算

平衡定数

$$K_i^{wo} = \frac{x_i^*}{w_i^*}$$

$$K_i^{wg} = \frac{y_i^*}{w_i^*}$$

図6 微生物による油浄化挙動予測シミュレータの概念

$$K_i^{og} = \frac{y_i^*}{x_i^*} = \frac{K_i^{wo}}{K_i^{og}} \quad (3)$$

相成分モル分率

$$\begin{aligned} x_i^* &= \frac{z_i^*}{[1 + G^*(K_i^{og} - 1) + W^*(1/K_i^{wo} - 1)]} \\ y_i^* &= \frac{K_i^{og} z_i^*}{[1 + G^*(K_i^{og} - 1) + W^*(1/K_i^{wo} - 1)]} \\ w_i^* &= \frac{z_i^*}{K_i^{wo} [1 + G^*(K_i^{og} - 1) + W^*(1/K_i^{wo} - 1)]} \end{aligned} \quad (4)$$

フラッシュ計算

$$\begin{aligned} F^{og} &= \sum_i (y_i^* - x_i^*) \\ &= \sum_i \frac{z_i^* (K_i^{og} - 1)}{[1 + G^*(K_i^{og} - 1) + W^*(1/K_i^{wo} - 1)]} = 0 \\ F^{wo} &= \sum_i (y_i^* - w_i^*) \\ &= \sum_i \frac{z_i^* (K_i^{wo} - 1)}{K_i^{wo} [1 + G^*(K_i^{og} - 1) + W^*(1/K_i^{wo} - 1)]} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

(4) 微生物の吸着と浸透率低下

微生物の吸着量

岩石表面への微生物の吸着量は、次式で表されるラングミュアの（単層）吸着等温式により推定した。

$$\begin{aligned} \omega_m &= \frac{\omega_{m,max} B_m N_m}{1 + \sum_j B_j N_j} \\ N_m &= \phi S^w \rho^w w_m + A_m \\ A_{m,max} &= (1 - \phi) \bar{\rho}^R \omega_{m,max} \\ A_m &= \min[(1 - \phi) \bar{\rho}^R \omega_m, N_m] \end{aligned} \quad (6)$$

浸透率低下

微生物の岩石表面への吸着によって孔隙率が減少するが、それに伴い、浸透率はカルマン・コゼニーの式に従って孔隙率の関数として減少すると仮定した。

$$k^* = K_z \frac{(\phi^*)^3}{(1 - \phi^*)^2} \quad (7)$$

(5) 微生物の増殖・死滅

増殖速度（油が存在する場合）

岩石表面に吸着している微生物と孔隙中に浮遊している微生物では増殖速度が異なると仮定し、以下の Moser の式（菅井裕一ほか，2004）の改良版を適用した。

$$\bar{R}_m = \alpha_1 A_m + \alpha_2 \phi^* S^w \rho^w w_m \text{ for } N_o > 0 \text{ and } A_m < A_{m,max}$$

$$\alpha_1 = \frac{\zeta_1 (N_o)^{a_1}}{(K_{s1} + (N_o)^{a_1})} \min \left[\left(\frac{pH}{pH_c} \right)^{b_1}, 1 \right],$$

$$\alpha_2 = \frac{\zeta_2 (N_o)^{a_2}}{(K_{s2} + (N_o)^{a_2})} \min \left[\left(\frac{pH}{pH_c} \right)^{b_2}, 1 \right]$$

$$\bar{R}_m = \alpha_2 \phi^* S^w \rho^w w_m \text{ for } N_o > 0 \text{ and } A_m \leq A_{m,max} \quad (8)$$

死滅速度（油が存在しない場合）

$$\begin{aligned} \bar{R}_m &= -\beta_1 \max \left[\left(\frac{pH_c}{pH} \right)^{c_1}, 1 \right] A_m \\ &\quad - \beta_2 \max \left[\left(\frac{pH_c}{pH} \right)^{c_1}, 1 \right] \phi^* S^w \rho^w w_m \text{ for } N_o = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

(6) 化学反応

油の分解反応や電解質の電離反応をどのように仮定するかによってシミュレータで解くべき化学反応式は異なる。図6に示した例では、油相は軽質炭化水素成分（Light Hydrocarbon：LHC）と重質炭化水素成分（Heavy Hydrocarbon：HHC）から成り、油の分解に伴い、有機物（Organic Matter-1：OM-1 および Organic Matter-2：OM-2）が生成されるとしているが、以下では最も単純な例として、ヘキサンに相当する油が微生物によって二酸化炭素と水素に分解し、それによって微生物の増殖を促進すると仮定したものを紹介する。これらの化学反応については異論もあるかと思うが、あくまでも紹介例としてお認めいただきたい。

油分解

電離

反応速度

$$r = \kappa \eta \tilde{R}_m \left[1 - \left(\frac{Q}{K_{eq}} \right) \right]$$

$$\tilde{R}_o = -r - \tilde{R}_{coil}$$

$$\tilde{R}_{H_2O} = -12r$$

$$\tilde{R}_{CO_2} = 6r$$

$$\tilde{R}_{H_2} = 19r \quad (12)$$

栄養源(油)の消費速度

$$\tilde{R}_{coil} = \delta_1 \tilde{R}_m + \delta_2 (A_m + S^w \rho^w w_m)$$

(7) 相特性

$$\rho^w = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} (M_i w_i)}{\sum_{i=1}^{n_c} (V_i^w w_i)}$$

$$\rho^o = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} (M_i x_i)}{\sum_{i=1}^{n_c} (V_i^o x_i)} \quad (13)$$

ガス相密度

$$\rho^g = p/RTZ$$

$$\rho^g = \rho^g \sum_{i=1}^{n_c} (M_i y_i) \quad (14)$$

pH

$$pH = -\log(C_{H^+}) \quad (15)$$

3.1.3 簡易シミュレータの構築

筆者の研究室の学生の1人が、上記で設計したシミュレータの構築を将来的な目標とし、卒業研究で上記の一部の機能を有するシミュレータを構築した(臼井翔, 2012)。このシミュレータでは水相、油相、気相の3相を取り扱うが、各相の流動は考慮していない0次元モデル(タンクモデル)を対象としている。また、相挙動については前項に述べたような複雑なフラッシュ計算は行わず、簡易的に二酸化炭素の水への溶解度を圧力の関数として計算しているのみである(Yih-Bor Chang ほか, 1996)。また油相は単一成分とし、その他の成分としては水相中の水、微生物、二酸化炭素と電解質、気相中の水素と二酸化炭素のみと仮定し、流体特性は単純に容積係数とZ-ファクターより推定している。ただし、これら以外の物性、すなわち、微生物の岩石表面への吸着や増殖・死滅速度、油の分解速度などに関しては、前項に示した式に基づいて計算している。図7にこのシミュレータの計算過程を示した流れ図を載せるが、シミュレータで計算しているのは、各成分の物質質量、圧力、孔隙率、微生物の吸着量である。

3.1.4 簡易シミュレーション

上記で構築した簡易シミュレータを用いて、タンク中の水に含まれる油(ヘキサン)を微生物によって分解する過

図7 簡易シミュレータの流れ

程を、3つのケースを想定してシミュレートした。表6にケース1で設定した各種パラメータの値を示す。ケース2では微生物の増殖速度がケース1の2倍であると、また、ケース3では初期の油量がケース1の2倍であると仮定した。

図8(a)にケース1で計算された油量と微生物量を、図8(b)に水相のpHを示す。栄養源としての油を分解することで微生物は指数関数的に増殖するが、全ての油が分解(消費)された時点で微生物は死滅し始める。また油の分解に伴って二酸化炭素が発生し、その一部が水に溶解して炭酸イオンや重炭酸イオンになるため、pHは油が分解している間は減少し続ける。

また、図9および図10にケース2およびケース3における物質質量の計算値を示すが、微生物の増殖速度が2倍になればその他の反応速度も2倍になること、油量が2倍になれば微生物の増殖量や生成物量が2倍になることが正しく計算されている。簡易シミュレータでの計算は単純ではあるが、本項で紹介したシミュレータは、将来的に構築す

表6 簡易シミュレーションで設定した各種パラメータの値

初期モル数 [mol]	微生物	0.001
	油 (C ₆ H ₁₄)	3.0
	水	70
	水相中の二酸化炭素	0
	気相中の二酸化炭素	0
分子量 [g/mol]	水素	0
	油 (C ₆ H ₁₄)	86.18
	水	18.0158
	二酸化炭素	44.01
密度 [g/m ³]	水素	2.0158
	水	0.99900×10 ⁶
比重 [-]	空気	1222.67
	油 (C ₆ H ₁₄)	0.68819
比重 [air = 1]	二酸化炭素	1.529
	水素	0.070
初期圧力 [atm]		10
温度 [°C]		20
孔隙率 φ [-]		0.4
岩石の質量密度 ρ^R [kg/m ³]		2.7×10 ³
岩石マトリクス単位体積あたりの最大吸着 ω_{max} [mol/kg]		1.0×10 ⁻⁴
吸着微生物 増殖割合 ζ_1 [1/hour]		4.0×10 ⁻³
浮遊微生物 増殖割合 ζ_2 [1/hour]		2.5×10 ⁻³
微生物死滅割合 $\beta_1 = \beta_2$ [1/hour]		1.0×10 ⁻⁴
微生物増殖に伴う油消費速度係数 $\delta_1 = \delta_2$ [-]		40
化学反応速度定数 κ [-]		5.0
微生物増殖速度-化学反応速度関連定数 η [-]		3.0
係数	$a_1 = a_2$	1.0
	$b_1 = b_2$	1.1
	c_1	1.15
	c_2	1.25
パラメータ B [1/mol]		5.0
定数 $K_{s1} = K_{s2}$ [mol/m ³]		4.0×10 ⁻²

る計画である微生物を用いた油の汚染除去や微生物攻法の挙動予測シミュレータの要素プログラムとして活用できるものである。

3.2 CCS-EOR の最適化プログラムの開発

地球温暖化防止に向けて CO₂ を削減する手法として CCS が注目されているが、火力発電所や工場などの排出ガスから CO₂ を分離するコストが高額であるため、分離した CO₂ を帯水層ではなく油層に圧入し、油の増産を図ることで経済的なインセンティブを高めようとする CCS-EOR が試みられている。この手法では、CCS による CO₂ の排出権取引および CO₂ 税による収入に加え、油の増産による収入も期待できる。

そこで本研究では、CCS-EOR において最も経済効果が高くなるように、CO₂ の圧入計画を最適化するプログラム

図12 CCS-EOR 最適化計算プロセス

を開発しているが、現在進行中であるためにまだ結果は出ていない。そのため、構想のみを以下に紹介する。

このプログラムでは、CCS-EOR における CO₂ の圧入量や坑井配置を最適化する (H. R. Jahangiri および D. Zhang, 2011)。具体的には、仮想油層モデルとして有名な PUNQ-S3 に、現在 CCS-EOR が実施されているカナダのワイバーン油田の流体特性を適用した油層モデルを構築し (図 11)、このモデルに CCS-EOR を適用すると想定して、市販の多成分系シミュレータによって油層挙動を計算する。その結果を参照して、累計油生産量や累計 CO₂ 貯留量の計算結果から、プロジェクトの正味現在価値を次式によって計算する。開発中のプログラムは、この正味現在価値を最大化するようにラテン超方格法などによって CO₂ の圧入量と坑井配置の最適化を試みている (図 12)。

$$NPV = \sum_{t=1}^{t_{max}} \frac{C_t}{(1+d)^t} - C_o \quad (16)$$

$$C = (FOPT \times \$/\text{bbl}) - (FGIT \times \$/\text{Ton}) \\ - (FWIT \times \$/\text{wat}) - (FWPT \times \$/\text{dwat}) \\ + (FCO2STR \times \$\text{Tax}/\text{Ton}) \quad (17)$$

(a) 油量と微生物量

(b) 水相の pH

図 8 ケース 1 の計算結果例

図 9 ケース 2 の計算結果例

4. おわりに

上記のように、海洋や環境をテーマとした教育・研究は、扱う規模の大きさから、大学での取り組みが容易ではない。一方で、これらのテーマの重要性は近年ますます増加している。学生の理解を深めるためにも、また、現実的な状況・環境に則した研究を行う上でも、現場見学、共同研究、試料提供など、企業のご協力・ご支援を願ってやまない。

図 10 ケース 3 の計算結果例

図 11 PUNQ-S3 を利用した仮想油層モデル

SI 単位換算係数

atm	×	1.01325	E + 05	=	Pa
BBL	×	1.589874	E - 01	=	m ³
cP	×	1.0*	E - 03	=	Pa・s
mD	×	9.86923	E - 16	=	m ²

*は正確な値

記号の説明

以下に、本文中で参照されている数式などに登場する記号をまとめて説明する。なお、単位の説明で使用している L , M , t , T は、それぞれ長さ、質量、時間、温度を表す。

a = 係数

A = 貯留層かさ体積当たりの吸着量 (mol/L³)

a_1, a_2 = Moser の式の指数

b = 係数

B = Langmuir Isotherm パラメータ (1/mol)

b_1, b_2 = Moser の式の指数

C = コスト (\$)

c_1, c_2 = Moser の式の指数

C_{H^+} = 水素イオン濃度 (mol/l)

d = 割引率 (1/year)

D = 深度 (L)

F = フラッシュ (Rachford-Rice) 式

$FOPT$ = 累計油生産量 (bbl)

$FGIT$ = 累計ガス圧入量 (ton)
 $FWIT$ = 累計水圧入量 (bbl)
 $FWPT$ = 累計水生産量 (bbl)
 $FCO2STR$ = 累計 CO_2 貯留量 (ton)
 G = ガス相モル分率
 k = 絶対浸透率 (L^2)
 K = 平衡定数
 K_{eq} = 化学平衡定数
 k_r = 相対浸透率
 K_s = 基質飽和定数 (mol/L^3)
 K_z = コゼニー係数 (L^2)
 M = 分子量 (M/mol)
 N = 貯留岩かさ体積当たりの総モル数 (mol)
 n_c = 成分数
 NPV = 正味現在価値 (\$)
 p = 相圧力 (M/Lt^2)
 P_c = 毛細管圧力 (M/Lt^2)
 pH = pH
 Q = 活量積
 $\tilde{q}$ = 貯留層かさ体積当たりの圧入レート (mol/tL^3)
 r = 貯留層かさ体積当たりの化学反応速度 (mol/tL^3)
 R = 理想気体定数 (ML^2/t^2Tmol)
 $\tilde{R}$ = 化学反応あるいは増殖による貯留層かさ体積当たりの成分生成レート (mol/tL^3)
 S = 相飽和率
 t = 時間 (t)
 T = 温度 (T)
 Tax = 炭素税
 V = 成分モル容積 (L^3/mol)
 w = 水相成分モル分率
 W = 水相モル分率
 x = 油相成分モル分率
 y = ガス相成分モル分率
 z = 成分総モル分率
 Z = ガス圧縮率
 α = 微生物増殖速度係数 (1/t)
 β = 微生物死滅速度係数 (1/t)
 γ = 流体密度 (M/L^3t), 水素生成菌の増殖に伴う水成分消費レート係数, 微生物吸着係数 (1/L)
 δ = 微生物の増殖に伴う油消費レート係数
 ζ = 微生物増殖速度係数 (1/t)
 η = 微生物増殖速度 - 化学反応速度関連定数
 κ = 化学反応速度定数
 μ = 相粘度 (M/Lt)
 ρ = モル密度 (mol/L^3)

$\hat{\rho}$ = 質量密度 (M/L^3)
 ϕ = 孔隙率
 ω = 岩石マトリクス単位質量当たりの吸着量 (mol/M)

上付き添え字

g = ガス相
 o = 油相
 R = 岩石マトリクス
 w = 水相
 $*$ = 吸着量による補正值

下付き添え字

0 = 初期
 c = 臨界
 CO_2 = 二酸化炭素成分
 $coil$ = 油消費
 H_2 = 水素成分
 H_2O = 水成分
 i = 成分番号
 j = 成分番号
 m = 微生物
 max = 最大
 o = 油成分

参 考 文 献

- Chang, Y. B., Coats, B.K. and Nolen, J.S., 1996: A Compositional Model for CO_2 Floods Including CO_2 Solubility in Water, Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, SPE 35164.
 千田 佑, 井上 千弘, 1998: 海洋油汚染の微生物処理 その 1, 石技誌, **63**(4), 315-318.
<http://www.env.waseda.ac.jp/> (cited 2015/06/11)
<http://www.waseda.jp/> (cited 2015/06/11)
 Jahangiri, H.R. and Zhang, D., 2011: Optimization of the net present value of carbon dioxide sequestration and enhanced oil recovery, OTC 21985.
 栗原正典, 2012: 早稲田大学における石油・天然ガス開発関連の教育・研究, ICEP ニュース, **77**(4), 22-32
 菅井裕一, 洪 承燮, 千田 佑, 榎本兵治, 2004: 水溶性ポリマー生産微生物を用いた MEOR のための数値モデルの構築, 石技誌, **69**(3), 261-271.
 臼井翔, 2012: 微生物を用いた地下水油汚染浄化の挙動予測シミュレータの開発, 早稲田大学創造理工学部環境資源工学科卒業論文.