

メキシコ湾 Deepwater Horizon 油流出事故 —海洋生態系への影響—

中根 徹

1. はじめに

2010年4月20日、メキシコ湾で発生した Deepwater Horizon (ディープウォーター・ホライズン。以下「DWH」という) の事故から2年半以上の歳月が過ぎた。推定490万バレル (78万KL) に達する油の流出量は史上2番目であり、湾岸戦争の約2分の1、1989年に米国プリンス・ウィリアム湾で発生した「エクソン・バルディーズ号」座礁事故による流出量の約19倍である。

前稿 (中根, 2011) では、DWH事故で流出した原油の量と行方について概説したが、油が海洋生物、海洋哺乳類、海洋生態系および漁業活動に及ぼす影響については記載しなかった。現時点 (2012年12月) においても、事故に伴う海洋生態系と社会経済への影響の全貌は、将来に残された懸念も含めて把握されていない。

DWH事故後に各分野の科学論文、技術報告書が数多く公表され (NOAA, 2012)、報道記事も膨大であるが、流出した油が海洋生態系や社会経済に及ぼした影響を体系的にとりまとめた資料は少ない。

Abbriano et al. (2011) は、流出油の生分解に関与したメキシコ湾の固有細菌の役割、動植物プランクトンなどへの影響を事故対応の経過とともに時系列的にとりまとめている。高次栄養段階の海洋生物と野生生物に対する流出油の影響は、環境保護団体の全米野生生物連盟 (NWF: National Wildlife Federation^{注1)}) が沿岸の塩性湿地とメキシコ湾の重要種であるハンドウイルカ、大西洋クロマグロ、エビ類、ウミガメ類、カッシュクペリカンおよび深海サンゴについて2年後の現況とともに報告している (NWF, 2012)。米国の NGO 海洋保護センター (Ocean

Conservancy^{注2)}) は、表層油膜の拡散範囲、漁場の閉鎖水域とともに魚類、海洋哺乳類、深海サンゴなどへの影響をマップで表示するとともに、海洋生物への影響、修復方法などをホームページで公開している (Ocean Conservancy, 2012a, b)。

漁業への影響は、2011年2月17日に米国議会に提出された報告書 (CRS Report for Congress^{注3)} (Upton, 2011)) で記載されたほか、カナダのブリティッシュ・コロンビア大学漁業センターで構築されている「Sea Around Us プロジェクト」の漁獲量と生産額のデータベースをもとに、McCrea-Strub et al. (2011) と Sumaila et al. (2012) が経済的損失を推計している。

本稿では、DWH事故の影響に関するこれらの文献、各種報告書および報道記事などから流出油がメキシコ湾の海洋生態系と漁業に及ぼした影響について紹介する。

注1: National Wildlife Federation (全米野生生物連盟)

1936年に設立された米国最大の自然環境保護団体である。絶滅の危機にある野生動物や国立公園内の生物、湿地帯、森林伐採の保護など広範囲にわたって活動している。年間予算は115億円、会員は600万人を超える。

注2: Ocean Conservancy (海洋保護センター)

1972年に海洋生物に関する環境教育センターとして設立された非営利・会員制の自然保護団体である。その後、海洋生物とその生息地および沿岸域の海洋自然保護と調査研究、漁場保全、国際海岸クリーンアップと活動領域を広げている。約10億円の年間事業費を自ら調達し、登録ボランティアは90万人を超える。

注3: CRS Report for Congress (議会研究サービスレポート)

米国議会での審議や法案作成の参考となることを目的として作成される報告書である。全米科学者連盟 (FAS: Federation of American Scientists) 等の機関のホームページで公表される。

2. メキシコ湾の概要

メキシコ湾は北緯19°～30°に位置し、亜熱帯から熱帯海域にまたがる東西約1,600 km、南北約900 kmの大規模海洋生態系 (LME: Large Marine Ecosystem) である。最大水深は4,384 m、水域面積は約154万km²で日本海 (面積約130万km²) を2割ほど大きくした広さである ((財) 国際エメックスセンター, 2003)。黒潮とともに世界最大の海流として知られているメキシコ湾流 (ガルフストリーム) は、ここを起源としている。

メキシコ湾の沿岸域は白い砂浜のほか、塩性湿地、マングローブ林、ミシシッピ川を代表とする河口デルタが発達し、水産有用種を含む海洋生物の重要な保育場と索餌場となっている。

メキシコ湾は米国の主要な石油源のひとつでもあり、4,000以上の海洋石油掘削リグからは米国内で使用される石油の約4分の1が産出される。メキシコ湾では海底から油が自然に漏出している場所が最大350ヶ所分布し、炭化水素の酸化能力を有する固有の微生物群集が存在するといわれている (Abbriano et al., 2011, Kvenvolden and Cooper, 2003)。

3. 海洋生態系への影響

3.1 低次生態系への影響

油流出事故が起きると、油にまみれた野生生物の画像や映像がマスメディアを通して報道される。しかし、海洋生態系の基盤となる植物プランクトンを中心とする低次生態系に対する油の影響は見過ごされがちである。本節では流出油に対するメキシコ湾の海洋微生物、植物プランクトンおよび動物プランクトンなどの応答をレビューしたAbbriano et al. (2011) を参考として、最新の知見を加えてとりまとめた。

3.1.1 2010年4月20日

(1) 流出油の化学成分

DWH石油掘削リグの爆発・沈没直後から、海底の井戸から噴出したLouisiana Sweet^(注4)原油が海表面に油膜として出現しはじめ、1ヵ月で75,000km²の海面を覆った。この原油の化学組成は複雑で、単純な脂肪族

炭化水素類 (SAHs: Simple Aliphatic Hydrocarbons)、多環式芳香族炭化水素類 (PAHs: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) などの芳香族炭化水素類、樹脂およびアスファルテンで構成される不均質な混合物であった (Abbriano et al., 2011)。

油は蒸発、分散、乳化、溶解など様々な物理・化学的過程で変質しながら海流で輸送される (Ramseur, 2010)。この変質過程は「風化 (Weathering)」と呼ばれるが、水中からの油の主な消失経路は蒸発 (油の揮発性成分) である。水中への溶解に伴う油の消失は、蒸発、乳化と比較すると小さいが、原油の水溶性画分 (WSF: Water Soluble Fraction) には低分子量のSAHs、PAHsなど水生生物に有毒な成分が含まれている。原油中のWSF濃度は油の種類と等級で変動し、分解中の原油で高い濃度を示す傾向がある (NRC, 2003; Head et al., 2006)。DWH事故では、水深1,000 mと400 m付近で高濃度のWSF成分が検知された。水中での絶対濃度は不明であるが、DWH事故後にWSF成分の一部が真光層に入り込んだ可能性もある (Camilli et al., 2010)。

(2) 微生物群集

海洋に流出した油は物理・化学的過程のほか、細菌による生分解で変質し水中から消失していく。生分解は溶解と同様に経時的にはゆっくりと進行する過程であるが、DWH事故ではメキシコ湾に現存する多様な細菌群集が多量の油の分解に貢献したといわれている。

原油には多様な化学成分が含まれるが、海洋環境中には各成分の分解に特化した細菌が存在し、各細菌の代謝に伴い原油に含まれる化学成分の組成と濃度が経時的に変化する (Dutta and Harayama, 2000; Head et al., 2006)。油汚染の事故後に認められる細菌群集の遷移は一般的な現象として認められており、海洋の油流出ではSAHsの消費者からはじまり、PAHs、そしてメタンの消費者が登場するケースが多い。このような細菌群集の遷移は温度、栄養塩濃度、塩分および圧力などの環境条件に依存することが知られている (NRC, 2003; Valentine et al., 2010)。

(3) 植物プランクトン群集

多様な有機化合物で構成される原油は、特定の細菌の増殖には有利であるが、油とその化学成分は流出地

注4: 硫黄分が多い (0.5%以上) 原油は「すっぱい (sour)」, 硫黄分が少ない原油は「甘い (sweet)」と呼ばれる。

点近傍の植物プランクトンにマイナスの影響を及ぼす可能性がある。第一に、浮力を有する厚い油膜は、光合成と植物プランクトンの成長に必須な光の透過と大気/海洋のガス交換を阻害する (Gonzalez et al., 2009)。さらに、油に含まれる有毒な PAHs も植物プランクトンの増殖に影響を及ぼす (Abbrìano et al., 2011)。Suchanek (1993) は 2002 年 11 月にスペインのガリシア地方沖合で発生したタンカー「プレステージ号」事故による油汚染をメソコスムで再現し、外洋性と沿岸性の植物プランクトンに対する原油中の WSF の影響を検討した。その結果、光合成活性とクロロフィル *a* 濃度の低下が認められたほか、PAHs に対する微小 (ナノ・ピコ) プランクトンと珪藻プランクトンの感受性が異なることから、油の化学成分の差異あるいは経時変化によって植物プランクトンの群集組成が変化する可能性を示唆した。

(4) 動物プランクトン群集

植物プランクトンと同様に、動物プランクトンは油に含まれる化学成分に対して敏感である場合が多い。植食性の橈脚類は流出油と直接接触すると死亡率が増加し、摂餌と再生産が低下する (Suchanek, 1993)。これは、植物プランクトンに対する捕食圧の低下を意味し、結果的に植物プランクトンのブルームを発生させる可能性もある (Abbrìano et al., 2011)。

油に対する動物プランクトンの耐性は種によって差があり、油の濃度の増加に伴って死亡率も高くなるが、メキシコ湾の動物プランクトン群集を使った実験では死亡率は油の暴露濃度よりも暴露時間に依存する傾向があると報告されている (Lee and Nicol, 1977)。橈脚類の *Eurytemora affinis* と *Temora longicornis* を用いた最近の実験研究では、これらの動物プランクトンは油滴を感知して忌避行動をとることもあり (Seuront, 2010)、油に対する直接的な接触と死亡の可能性は低いと考えられている。

3. 1. 2 2010年5月15日～7月12日

(1) 化学分散剤の適用

油流出事故で海表面に散布される化学分散剤は界面活性剤と溶剤を含み、油と水の界面張力を低下させることによって、波の運動で形成される油滴の大きさを小さくし、エマルジョンの形成 (乳化) を防ぐ。さ

らに微生物による分解を速めて水中からの油の除去を促進し (Venosa and Holder, 2007)、油の海岸への漂着を防除することによって脆弱な沿岸環境を保護する目的で使用される。

DWH事故では2010年5月15日～7月12日にかけて、約210万ガロン (7,950 KL) の化学分散剤 (Corexit 9500 と Corexit 9527) が散布され、その 1/3 (77 万ガロン) は水深約 1,500 m のウエルヘッド (抗口装置) に注入された (Kujawinski et al., 2011)。これは海表面における分散剤の適用と同様に、ウエルヘッドからの油とガスの放出に伴う乱流の力を借りて油滴のサイズが小さくなる効果を狙うもので、油が浮上する前に小さな油滴に分散させて海表面での油の回収作業を軽減する目論見もあった (Atlas and Hazen, 2011)。

しかし、深海域での分散剤の適用は過去に例がなく、DWH事故で始めて試みられた。もちろん、使用した分散剤に含まれる化学成分が深海の環境下でどのように変化し、生態系にどのような影響を及ぼすかはわかっていなかった。Kujawinski et al. (2011) は、液体クロマトグラフィー・タンデム質量分析法 (LC/MS/MS) を用いて、分散剤に含まれる陰イオン界面活性剤 DOSS (diisooctylsulfosuccinate) を同定・定量し、DOSS が水深 1,000 ~ 1,200 m で形成された炭化水素のブルーム内に隔離され、海表面に散布された分散剤とは混合しなかったこと、当該深度における DOSS の濃度分布が保存的な輸送と希釈で説明でき、分散剤の散布後の 64 日後においても井戸から最高 300 km 離れた深海域に残存していたことを示した。このことから、Kujawinski et al. (2011) は分散剤の注入が深海における炭化水素のブルーム形成の一要因であったと推論している。

(2) 微生物群集

細菌に対する化学分散剤の毒性は様々で、既存研究でも増殖の促進と抑制の双方の影響を示唆しているが、分散剤が油の生分解を促進することは認められている (Abbrìano et al., 2011)。

Hazen et al. (2010) は、メキシコ湾における 2010 年 5 月 25 日～6 月 2 日の調査航海で、深海の微生物特性を把握することを目的として海水試料を採集し、拡散した炭化水素のブルームが既知の油分解細菌の近

縁種である深海固有の γ -プロテオバクテリアの増殖を刺激したことを明らかにした。5月下旬にはSAH分解細菌（特にオケアノスピリルム目：Oceanospirillales）がブルーム外の試料中で総細菌数のわずか5%であったのに対して、ブルーム中の試料では90%以上優占するまで増加した。

オケアノスピリルム目のブルーム後、6月下旬にSAHsとPAHsの既知の分解細菌 *Cycloclasticus* 属の別 γ -プロテオバクテリアが増加した (Valentine et al., 2010)。SAHsの分解に伴う細菌の呼吸速度は $-1 \mu\text{M O}_2 \text{d}^{-1}$ で、ブルームに伴う低酸素異常（アノマリー）の70%までが分解に伴う呼吸で説明された。細菌の呼吸を考慮した酸素消費モデルから、ウエルヘッドを中心とした半径約100 km圏内で貧酸素水塊が発生すると予測されたが (Adcroft et al., 2010)、酸素濃度の低下は観測されたものの低酸素水塊が出現した証拠は得られなかった (Kessler et al., 2011)。

Hazen et al. (2010) は、発生源からの距離に伴う炭化水素類の組成変化と現場試料からの分離株を用いた培養実験の結果から、深海の現場水温 5°C でも炭化水素の生分解速度が予想以上に速いこと、深海には酸素を大きく消費せずに炭化水素を分解する固有のバイオレメディエーション能力が存在することを示した。

(3) プランクトン食物網

細菌による生分解によって、化学的に分散した油が食物網に取り込まれる可能性も指摘された (Abbriano et al., 2011)。Graham et al. (2010) は、小型の懸濁物（植物プランクトンを含む）とメソ動物プランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ 値が油流出後に低下し、原油の $\delta^{13}\text{C}$ 値に近づく傾向があったと報告した。この同位体の低下は、プランクトン食物網を通した油中の化学成分の取り込みと移動を意味する。このように食物網をベースとした炭化水素の生物蓄積は、高次栄養段階の生物に対する暴露リスクを増加させることになる。

原油そのものよりも、原油とCorexit（化学分散剤）の混合物のほうが有毒であることが、植物プランクトン（4種の油の混合物；Hsiao et al., 1978）と稚仔魚（No. 2燃料油のWSF；Middaugh and Whiting, 1995）で報告されている。メキシコ湾に固有のエビ類、カキ

類およびカニ類など、数種の無脊椎動物の幼生段階を対象とした急性毒性試験でも、メキシコ湾の原油とCorexitの混合物が原油単独のWSFと同程度の毒性を有することが認められている (Fucik et al., 1994)。

3. 1. 3 2010年7月15日～9月19日

(1) 井戸の完全封鎖

事故から3ヵ月後、井戸に新たな栓が取り付けられ油の流出は停止した。さらに暴噴を停止するためのリーフ井戸の掘削が続けられ、9月19日にはセメントで井戸が完全に封鎖された。その後の追跡調査では、もともと自然の油漏出が多いメキシコ湾では (Kvenvolden and Cooper, 2003)、浮遊生態系は油汚染から回復する力が強いことを明らかにした (Abbriano et al., 2011)。

(2) 微生物群集

細菌の群集構造の変化は比較的短期間で認められ、優占種はオケアノスピリルム目（SAHs分解細菌）から *Cycloclasticus* 属（PAHs分解細菌）へと変化した。その後、 CH_4 を CO_2 に酸化するメタン酸化細菌が増殖し、8月下旬には放出された油に含まれるほぼすべてのメタンが水中から除去された (Kessler et al., 2011)。前述したように、この急速なメタン酸化に伴う細菌の呼吸によって、深層域が貧酸素化すると懸念されたが、Kessler et al. (2011) による観測では、溶存酸素濃度は低いものの、漁場環境として懸念される酸素濃度 $< 63 \mu\text{M}$ (Camilli et al., 2010) の約3倍であった。

(3) プランクトン群集

井戸の封鎖後の植物プランクトンに対する油の影響についても、Abbriano et al. (2011) は群集構造の変化と捕食圧の低下に伴う生物量の増加の可能性 (Teal and Howarth, 1984) を指摘している。同様に、動物プランクトンは世代時間が短いこと、多産性であること、さらに影響を受けていない水域からの新規加入によって、油の影響を受けた水域では生物量は急速に回復すると考えられている (Abbriano et al., 2011)。

このように、動植物プランクトンはDWH事故で流出した油の直接的な影響に対して回復力があると考えられているが、一方で、油に含まれる化学成分が食物網を介して高次の栄養段階生物に蓄積され、時間遅れを

伴う長期的影響を生じる可能性も指摘されている。Mitra et al. (2012) は、2010年8月と9月に北部メキシコ湾で採集したメソ動物プランクトン (> 200 μm) にDWH事故の油に由来するPAHが蓄積された証拠を報告した。前述したように、Graham et al. (2010) も動物プランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ 同位体の低下から、油中の炭素が炭化水素を消費する原核生物以上の2つの栄養段階生物に取り込まれ、プランクトン食物網に入ったことを報告している。これらの報告は、DWH事故に由来する炭素と化学成分が高次栄養段階に移動したことを示唆するものである。

3. 2 海洋生物などへの影響

3. 2. 1 大西洋クロマグロ (Atlantic Bluefin Tuna)

高度回遊性魚類のマグロ類は、公海域のみならず各国の排他的経済水域 (EEZ) 内を移動する。そのため一国だけで資源を管理することは困難であり、各地域の漁業管理委員会による包括的な管理が必要とされている。大西洋クロマグロ (ホンマグロ) については、西経45度線で西大西洋 (大西洋クロマグロ西系群) と東大西洋・地中海 (大西洋クロマグロ東系群) に区分して、大西洋まぐろ類保存国際委員会 (ICCAT) が管理している。西系群と東系群では産卵場所が異なり、東系群は地中海、西系群はメキシコ湾が産卵場となっている (水産庁・水産総合研究センター, 2012)。

メキシコ湾における産卵時期は3～6月で、産卵場所は大陸斜面北部に広く分布する (Teo et al., 2007、Muhling et al., 2010)。クロマグロは海面付近で産卵し、漂流する油膜や化学分散剤が卵や稚仔魚に及ぼす影響も懸念された (Abbriano et al., 2011)。Teo and Block (2010) は、キハダ (Yellowfin tuna: *Thunnus albacares*) 漁での混獲、電子タグによるバイオロギングのデータを解析し、クロマグロはメキシコ湾内の水温がやや低い2海域に来遊し、そのピークは4～5月であったと述べている。この研究はDWH事故以前に実施され、論文の発表は事故後の5月28日であったが、産卵海域が湾の北東側に拡散した油膜の分布域と重なったこと、事故が産卵の最盛期に起きたことから注目を集めた。

マグロ類は、刺身や寿司ネタなどの用途として、我

が国にとっても重要な漁業資源である。DWH事故直前の2010年3月には、野生動植物の国際取引を規制するワシントン条約締約国会議で大西洋クロマグロの禁輸案が採決され、日本などの反対で否決された経緯もあり (藤田, 2010)、我が国でも本種に対する関心が高い時期に事故が起きた。このため、日本のマスメディアもDWH事故によるクロマグロ資源への影響を懸念する報道が続いた (例えば、「原油流出、クロマグロの産卵海域を直撃—メキシコ湾」; 朝日新聞, 2010年5月31日)。

Muhling et al. (2012) は、DWH事故で拡散した油膜の範囲を衛星画像から抽出し、モデルから推定した大西洋クロマグロの産卵場と表層油膜の重なりを検討し、油に覆われた湾北部の海域では卵と稚仔魚が影響を受けた可能性があるが、それらの出現量は別の海域、特にメキシコ湾の西側で高かったことを報告した。さらに予備的な予測として、表層油膜に覆われた大西洋クロマグロの産卵場は10%未満、湾北部の汚染海域に存在した稚仔魚は週単位で12%未満であると述べている。

実は流出1ヵ月後に、米国海洋漁業局 (NMFS: National Marine Fisheries Service) 高度回遊性魚種管理部門が、稚仔魚の死亡率を20～30%と仮定してクロマグロ資源に対する影響の予備的な解析を実施している (fishnewseu.com., 2012)。この時点ではデータが不十分であったが、NMFSは将来のクロマグロ資源量への影響は、この死亡率でも「無視できる」と結論づけた。Muhling et al. (2012) による新たな調査結果は、米国クロマグロ協会 (ABTA: American Bluefin Tuna Association) と漁業関係者にとって大西洋クロマグロに関する良報として受けとめられている (fishnewseu.com., 2012)。

3. 2. 2 ウミガメ類

ウミガメは何世紀にもわたり食料、装飾品または商業取引の対象として利用されてきた。さらに、乱獲、汚染あるいは漁業用の網に引っ掛かるなどの事故による溺死や生息地の消失などの脅威にさらされている (WWFジャパン, 2009)。世界に現存するウミガメ7種は、すべてワシントン条約 (絶滅の恐れのある野生動植物の種の国際取引に関する条約: CITES) の附

属書Iにリストアップされ、国際的な保護が必要な種となっている。

メキシコ湾にはアカウミガメ、アオウミガメ、タイマイ、ケンブヒメウミガメおよびオサガメの5種のウミガメが生息し、アカウミガメとケンブヒメウミガメが最も一般的な種として知られている (McDaniel et al., 2000)。これらの種は国際自然保護連合 (IUCN) のレッドリスト2000年版でも絶滅危惧種とされ、特にタイマイとケンブヒメウミガメは最も絶滅の恐れの高い「近絶滅種 (CR)」に指定されている。個体群は過去の記録よりも激減し、その要因として底曳網や延縄による混獲 (偶発的な捕獲)、海洋投棄物 (ゴミ)、沿岸の生息地 (砂浜) の喪失、卵の採取と油流出などがあげられている (WWFジャパン, 2009)。

NOAA (2011) の最終的な集計では、DWH 事故後の2010年4月30日から2011年2月15日までに回収されたウミガメは1,146匹 (死亡609、生存537) で、その内訳はケンブヒメウミガメが809匹 (死亡481、生存328)、アオウミガメが201匹 (死亡29、生存172)、アカウミガメ88匹 (死亡67、生存21) などとなっている。全米野生生物連盟 (NWF) によれば、油の流出がピークとなった2010年5~6月のウミガメの漂着数は、同時期における過去の平均値の7倍以上に達した。流出初期は漁業活動が増加してウミガメの漂着数が増加する原因となったが、流出油の対策による漁場の閉鎖後には、漁業活動が要因となるウミガメの漂着数は減少したと考えられている。

一方で、事故後にミシシッピ州沖合で発見されたウミガメの大量死は、DWH 事故に伴う油流出や化学分散剤によるものではなく、トロール船のエビ漁が原因となった可能性があると米国海洋大気局 (NOAA)、Brian Stacy 博士 (爬虫類専門の獣医病理学者) が述べている (Dewan, 2010)。博士は回収されたウミガメ417匹を調査し、肺や気管から沈殿物が見つかったという検死結果から、網にかかって溺死した可能性が高いという。

メキシコ湾では、1980年代前半にウミガメの主な死亡原因がトロール船によるエビ漁であると確認されて以来、混獲されたウミガメなどが網から逃げられるようなウミガメ除去装置 (TEDs: Turtle Excluder

Devices) がアメリカ国際海洋漁業サービス (U.S. National Marine Fishers Services) によって開発されている (WWFジャパン, 2009)。

3. 2. 3 ハンドウイルカ (Bottlenose Dolphin)

メキシコ湾に生息するハンドウイルカの個体数は約44,000頭と推定されている。本種は保護対象種ではあるが、遊魚 (レジャー・フィッシング) やエビ漁などの漁業操業で偶発的に捕獲されて、傷ついたり死亡したりすることもある。以前はPCBなどの化学物質の影響で健康被害が認められたり、厳冬時の「低温ショック」、赤潮プランクトンの生体毒素などが原因となって死亡する可能性も指摘されている (NWF, 2012)。

DWH 事故の影響域では、油の流出が始まってから523頭 (95%が死亡) のイルカが海岸に漂着した。これは同時期における過去の平均 (120頭) の4倍以上であった。また、2011年の1~3月に漂着した134頭のイルカのうち約半数は赤ちゃんイルカで、その割合は通常の5倍となった。しかし、油流出の影響で漂着したと報告された個体数は、北部メキシコ湾で死亡が確認された50頭の海洋哺乳類のうち、わずか1頭であった (NWF, 2012)。

イルカが油に曝されると健康状態が悪化し、疾病や低温ショックなどに対してより敏感になる。2011年の夏に、顕著な油汚染を被ったルイジアナ州バラタリア湾で32頭のハンドウイルカの健康状態が検査された。その結果、約半数の個体が貧血、低血糖、ホルモンの異常低下などの症状を示した (NWF, 2012)。

さらに検査したイルカのうち1頭は、2012年1月にバラタリア湾のグランド・アイル島で死亡しているのが見つかった。NOAAの主任研究員は、原油流出の影響と断定はできないという。しかし、大西洋沿岸や他の地域に生息し、2010年の原油流出の影響を受けなかったイルカ個体群ではこのような兆候はみられなかったと述べている (National Geographic News, 2012a)。一方、Williams et al. (2011) は北部メキシコ湾における14種のクジラ目について、出現量、生残率などの既存データを解析し、実際に死亡した個体が漂着死体として回収される比率はわずか2% (0~6.2%の範囲) であると予測した。したがって、海岸

に回収された漂着死体の情報のみで実際の死亡数を推定すると過少評価となる可能性がある」と指摘している (Williams et al., 2011)。

3. 2. 4 深海サンゴ

メキシコ湾の海底には、装飾品として利用されるクロサンゴなど、多様な深海サンゴが生息している。今回のDWH事故では、海面上での深刻な被害が報道される通常の油流出事故とは異なり、海底に生息する深海サンゴにも影響を及ぼした可能性があった (NWF, 2012)。

White et al. (2012) は、井戸が封鎖されてから3～4ヵ月後 (10月15日と11月1日) に、ROVによる深海サンゴ群集の調査を実施した。流出前の2009年9月に調査したサイトを含め、井戸から20 km以上離れたすべてのサイトでは健全なサンゴ群集が観察され、事故前後の変化は認められなかった。しかし、井戸から南西に11 km離れた1サイトでは、程度の差はあるものの組織の損傷、骨片の拡大、粘液の過剰生産、退色した共生クモヒトデ類の出現および褐色の綿状物質 (フロック) の付着などの様々なストレスの徴候がみられた。さらにフロックから分離された石油のバイオマーカであるホパノイドの分析結果から、この綿状物質がDWH事故の井戸の油を含んでいるという強い証拠が得られている。このサイトは井戸から拡散した炭化水素プルームの通り道にあり、最近になって損傷・死亡したと考えられるサンゴの存在は、油が深海生態系に影響を与えたという動かぬ証拠となった。White et al. (2012) の調査結果は、流出量、流出水深および深海生態系への影響という点から、DWH事故が前例のない特徴を有していることを示している。

しかし、1ヵ月後の12月8～12日に実施された深海潜水艇Alvin号による潜行調査では、一部のサンゴで回復の兆しが認められている (White et al., 2012)。「1ヵ月後に戻ってみると、茶色い毛のようなものに厚く覆われていた部分のサンゴは死んでいたが、さほど厚く覆われていなかった部分は、回復の兆しを見せていた。このサンゴ群が今後回復するかどうか、回復する場合どのようにして回復するのかは、現時点では不明だ」とWhite氏は述べている (National Geographic News, 2012b)。

4. 陸域生態系への影響

4. 1 塩性湿地 (Salt Marsh)

メキシコ湾沿岸は経済的に重要で、漁業と観光業によって年間100億ドル以上の収益を生み出している。この地域では最も一般的な生態系のひとつである塩性湿地は、これらの価値ある生態系サービスを維持するうえで極めて重要である (Silliman et al., 2012)。特にルイジアナ州は、ミシシッピ川や他の河川によって形成される広大な沿岸湿地帯を有し、そこには魚類や野生動物が豊富に生息することから「スポーツマンズ・パラダイス」とも呼ばれている。しかし、ルイジアナ州の沿岸湿地の約3分の1は20世紀に破壊された。21世紀に入っても湿地の消失は続き、現在までに失われた湿地の累積面積は約1,900平方マイル (4,921 km²) といわれている。消失の主な原因は、河川の洪水調節、浚渫工事、堤防構築と水路開削、および石油・天然ガス生産に起因する地盤沈下などである。さらに近年のハリケーン・リタとハリケーン・カトリーナは217平方マイル (562 km²) の湿地を消失させた。DWH事故は、すでに人為的改変による湿地の消失で瀕死状態のミシシッピ川デルタの沿岸生態系を襲った (NWF, 2012)。

(1) 微生物群集

海洋細菌と同様にDWH事故では多くの研究者によって、油に汚染された沿岸湿地帯における微生物群集の動態が調査された。

Beazley et al. (2012) は、アラバマ州の塩生湿地において油の漂着前後に微生物群集と堆積物中の炭化水素濃度を調査した。全炭化水素濃度は2010年6月と7月に最も高く、2010年9月には減少した。マイクロアレイ解析から、塩生湿地に現存する炭化水素分解微生物の群集構造と機能が調査期間中に大きく変化したことが明らかになった。炭化水素の存在下では炭化水素を分解するプロテオバクテリア、バクテロイデス門 (Bacteroidetes) および放線菌綱 (Actinobacteria) などが比較的多く出現したが、炭化水素が検出限界未満になると菌数は減少した (Beazley et al., 2012)。

Urakawa et al. (2012) は、フロリダ州パナマシティに漂着したタールボールを採集して油に対する従属

栄養細菌（アンモニア酸化細菌など）と古細菌の毒性試験を実施し、古細菌 *Nitrosopumilus maritimus* の油に対する感受性が高いことを示した。この結果は油に含まれる炭化水素の分解を促進する細菌群集が存在する一方で、古細菌などの微生物は油流出の被害を受けたことを示唆する。浦川博士は、「今回の研究の重要な発見は、原油流出が海洋生物と食物網全体に被害を与えただけでなく、地球生命の大動脈の1つである窒素循環にも悪影響を及ぼしていたことだ」と述べている (National Geographic News, 2012c)。

(2) 湿地植物群落

DWH 事故で流出した油は約1,050マイル (1,690 km) の浜辺と湿地帯を汚染した。被害規模は汚染の状況によって大きく変化するが、湿地帯では油による汚染よりもその清掃作業が逆に被害を大きくする可能性もあり、湿地の植物を枯死させ、それが土地の浸食を加速させる原因にもなる (NWF, 2012)。

Silliman et al. (2012) は、ルイジアナ州バラタリア湾の塩性湿地において、油汚染の状況とその後の植物群落の回復について、現場観察と実験結果から報告している。前述したようにルイジアナ州の沿岸湿地は現在でも侵食・消失が続き、DWH事故による油汚染で植物群落が枯死し、湿地の侵食を加速させるのではないかと懸念された。油の被覆範囲は主に湿地の海側端に集中したが、18ヵ月後には大部分の植物群落が以前の状態に回復した。一方で、湿地の陸側上部の群落は油汚染の影響で枯死し、湿地の侵食を速める可能性が示唆された。Silliman et al. (2012) は、油による湿地植物の枯死のメカニズムは直接的な毒性ではなく呼吸と光合成の阻害に起因すること、油の分解速度と植物の成長速度が速いメキシコ湾のような温暖な気候条件では、湿地が油汚染に対して本質的に強い（すなわち回復可能である）ことを強調している。

4. 2 カッシュョクペリカン (Brown Pelican)

ナショナル・ジオグラフィック 2010年10月号 (日本語版) の表紙には、「原油流出一壊れる生態系」という表題とともに一羽の茶色のペリカンが掲載されている。写真解説には「米国ルイジアナ州にあるフォートジャクソンの施設に保護された油まみれのカッシュョクペリカン」と記され、流出油が沿岸域を生

息場とする水鳥にも甚大な被害をもたらしたことを伝えている。

カッシュョクペリカンは、魚を捕獲する時の空中から海中へダイブする摂餌行動や、足の水かきで卵を覆う独特の抱卵方法（卵が割れるリスクが高い）で有名な野鳥である。本種は20世紀前半には断熱性、疎水性を有する羽毛（ダウン）を採取するための捕獲、1950年代にはDDT汚染で卵の殻が薄くなることによる孵化率の低下で個体数が激減した。1970年には絶滅危惧種のリストに掲載されることとなり、カッシュョクペリカンを「州の鳥」としているルイジアナ州でも一度絶滅している。1972年に北米でDDTが使用禁止となり、大西洋沿岸の個体群をルイジアナ州に移殖する努力が実り、個体数はその後回復し、2009年には絶滅危惧種リストから除外されたという経緯がある。その時点で、テキサス州とルイジアナ州の個体群は約12,000組と推定されたが、近年の強力なハリケーンの襲来で営巣地となる島が破壊されている (NWF, 2012)。

米国魚類野生生物局 (U.S. FWS: Fish and Wildlife Service, 2011) によると、DWH事故の対応期間中に救出・回収された鳥類は、2011年5月までに7,258羽に達している。カッシュョクペリカンは826羽で、577羽が死亡（あるいは後日死亡）していた。回収されたペリカンの40%は明らかに油にまみれていたが、29%は油の付着は認められなかった。なお、最も多く回収された野鳥はワライカモメ (Laughing Gull) で、2,981羽 (2,415羽が死亡) であった。流出した油は営巣地として利用している島のマングローブ林を汚染したことから、ペリカンの餌料となる魚類に対する油の影響についても引き続き調査されている (NWF, 2012)。

5. 漁業と遊魚への影響

5. 1 漁業と遊魚の現状

(1) 漁業

アラスカ州を除くと、メキシコ湾は米国最大の水産物供給源となっている (Upton, 2011)。McCrea-Strub et al. (2011) によれば、メキシコ湾全域における2000～2005年の総漁獲量と総生産額は、年間平均でそれぞれ約85万トン、13.8億ドル (US\$, 以下同様) で、

その大部分が米国EEZ内（それぞれ77%と74%）から水揚げされ、メキシコEEZ内（それぞれ22%と26%）がこれに続いている。総漁獲量の内訳は、ガルフ・メンハーデン（ニシン科：*Brevoortia patronus*）が52%と卓越し、その他アメリカガキ（*Crassostrea virginica*）が13%、ブラウンシュリンプ（*Farfantepenaeus aztecus*）が5%、ホワイトシュリンプ（*Litopenaeus setiferus*）が4%、アオガニ（ワタリガニの一種：*Callinectes sapidus*）が4%であった。生産額は、需要と魚価が高いブラウンシュリンプとホワイトシュリンプで高く、メキシコ湾LME内の年総漁獲量のそれぞれ17%、16%、次いでアオガニが15%、ガルフ・メンハーデンが12%、アメリカガキが8%となっている。

DWH事故の議会報告（Upton, 2011）で事故前の漁業の現状として引用された2008年の漁業統計では、メキシコ湾の総生産量は57.8万トン、総生産額は6.97億ドルであった。水産関連の加工業、卸売業および小売業を含めると、メキシコ湾に面する各州の水産業はパートタイムを含め21.3万人の雇用者、55億ドルの所得を維持している。魚種別の生産額でみると、前述したようにエビ類が最も多く3.66億ドル、ガルフ・メンハーデンが0.64億ドル、カキ類が0.6億ドル、アオガニが0.39億ドルとなっている（Upton, 2011）。

(2) 遊魚

遊魚（レジャー・フィッシング）はチャーター船、釣具店、レストランおよびホテルなどの業種を支え、地域経済に大きく貢献している。2008年におけるメキシコ湾内での遊魚者数は訪問者と滞在者あわせて570万人で、2,400万件の釣行があった。遊魚者がターゲットとしている主な魚種には、フエダイ類（snapper）、ニベ類（drum）、タイ科（sheepshead）とサワラ類（Spanish mackerel）がある（Upton, 2011）。

遊魚による利用者の支出と漁業収益を直接比較することはできないが、これらの数字はメキシコ湾沿岸のコミュニティにおける漁業と遊魚の経済活動の大きさを物語っている。

5. 2 油流出に伴う経済的評価の例

油流出事故の経済的影響を分析した事例は過去にも多数ある。Sumaila et al. (2012) から再引用すると、Cohen (1995) は1989年の「エクソン・バル

ディーズ号」事故に伴い発生する1990年と1991年の社会的費用を、油流出の有無による実際の漁獲量の収益差から推定した。García-Negro et al. (2009) は2002年の「プレステージ号」事故で影響を受けたスペインの海岸線の経済的影響について事故前後の漁獲量から調査した。McDoweのグループは「エクソン・バルディーズ号」事故がアラスカの観光業に及ぼした経済的影響を定量化するためのビジネス調査を実施した（Anonymous, 1990）。

Advanced Resources Internationalによる研究では、流出事故をタンカー、パイプラインおよび海洋プラットフォームの3タイプに区分し、流出油1ガロン（1ガロン=3.785L）あたりの清掃、油の損失、環境と資源に対する損傷を、それぞれ260ドル、1.71ドルおよび9.91~19.81ドルと推定し、多くの油流出事故の経済的影響を評価した（Anonymous, 1993）。タンカー事故における清掃費用と環境に対する損害額は事故によって変動するが、アラスカで発生した「エクソン・バルディーズ号」のように、流出事故が防除支援基地から遠方で脆弱な沿岸環境で発生する場合には損害額が特に大きくなる可能性がある。一方で、海洋石油施設では各種の防除対策が実施されていることから、油流出事故が発生する確率も小さく損害額もタンカー事故より小さい。しかし、湿地やサンゴ礁のような脆弱な沿岸地域の近傍で大規模な暴噴事故が発生した場合には、自然環境と社会経済に対する損害が極めて大きくなる可能性がある（例えば、1979年Ixtoc I事故；1969年Union Platform A事故）。メキシコ湾で起きたDWH暴噴事故は、残念なことにその最悪のケースになった（Sumaila et al., 2012）。

5. 3 DWH事故に伴う経済的評価

DWH事故に伴う油流出は、漁場の閉鎖、水産物の安全性に対する消費者の懸念によって、メキシコ湾の漁業に甚大な経済的被害をもたらした。水産資源に対する中・長期的な影響として、魚介類の産卵や初期生活史段階の発達と成長に必要な生息場の荒廃も懸念された（Upton, 2011）。

5. 3. 1 漁場の閉鎖と再開

漁場の閉鎖と再開は、一般国民の安全の確保と、遊魚者および漁業者の漁獲機会の提供とのトレードオ

フを考慮しなければならなかった。公衆衛生に対する懸念に加えて、油に汚染された製品を市場で売買することはメキシコ湾の水産物に対する信頼性を落とすことになる。一方で、漁場の閉鎖は漁業者と遊魚者を直接束縛し、漁場の再開が遅れれば水産業界全体の損害額が大きくなる (Upton, 2011)。

2010年5月2日、DWHの爆発・炎上から12日後に、米国海洋大気局 (NOAA) は漁業者と遊魚者に対してメキシコ湾の6,817平方マイル (17,656 km²) の操業禁止水域を設定した。ルイジアナ州、ミシシッピ州、アラバマ州およびフロリダ州の水域の一部を巻き込んだ漁場閉鎖の目的は、水産物の安全性の保護と消費者の信頼性の確保である。漁場閉鎖はピーク時には、操業禁止水域は88,522平方マイル (229,272 km²:日本の面積の約60%) で、メキシコ湾における米国EEZ水域の約37%となった。油流出期間における各州の閉鎖水域の最大割合は、アラバマ州が40%、フロリダ州が2%、ルイジアナ州が55%、およびミシシッピ州が95%であった。ウェルヘッドからの油の流出は7月に停止し、ルイジアナ州の大部分の水域、ならびにミシシッピ州、アラバマ州およびフロリダ州の全水域で漁場が再開された。2011年1月24日時点では、漁業と遊魚に対する閉鎖水域はウェルヘッド直近の連邦水域内の1,041平方マイル (2,696 km²) である (Upton, 2011)。

5. 3. 2 議会報告による漁獲量の初期評価

DWH事故から10ヵ月後の2011年2月17日、漁場閉鎖に伴うメキシコ湾沿岸州の漁獲量の変化について、前年 (2009年) と比較した結果が米国議会に報告された (Upton, 2011)。

漁場閉鎖で影響を受けた水域には、エビ類、ガルフ・メンハーデンおよびカキ類などの水産有用種の豊かな漁場が存在する。水産物の漁獲量は多くの要因で変動するが、2009 (1~12月) 年と比較すると、2010年のエビ類 (全種) の湾内での漁獲量は3,560万ポンド (1.6万トン:27%) 減少した。州別にみると、エビ類の漁獲量はルイジアナ州で32%、ミシシッピ州で60%、アラバマ州で56%およびテキサス州で約15%減少したが、フロリダ州西海岸では約15%の増加であった。ルイジアナ州におけるガルフ・メンハーデンの漁

獲量も1億7,100万ポンド (7.8万トン:17%) 減少した (Upton, 2011)。

5. 3. 3 生産額による影響評価

McCrea-Strub et al. (2011) はDWH事故による影響を予備的に検討することを目的として、2010年7月までの操業禁止水域における流出前の年間の漁獲量と生産額の空間データベースを整備した。データ作成に使用したデータベースは、「Sea Around Usプロジェクト」のもとでブリティッシュ・コロンビア大学 (カナダ) 漁業センターで構築されているものである。メキシコ湾LMEにおける最近の傾向を把握するために、2000~2005年の漁獲量と生産額が緯度0.5°×経度0.5°の格子に配分された。経済的損失の解析にあたっては、格子内に配分された年間平均の総漁獲量と生産額について、メキシコ湾の6海域 (米国EEZの操業禁止水域とそれ以外の海域、メキシコEEZ、キューバEEZおよびEEZ外の公海2海域) で集計している。さらに、米国EEZ内における水産有用種5種 (ブラウンシュリンプ、ホワイトシュリンプ、アオガニ、ガルフ・メンハーデン、アメリカガキについて、2005~2010年の漁獲量と生産高を海域ごとに算出している (McCrea-Strub et al., 2011)。

2010年6月22日に、メキシコ湾LMEの総面積の約10%、米国EEZの約24%が操業禁止水域となったが、この水域内での総漁獲量はメキシコ湾LME内で報告された2000~2005年の年間平均値のそれぞれ約17%、生産額は約18%であった。

米国EEZ内でみると、操業禁止水域の総漁獲量と総生産額は年間平均値でそれぞれ22%、24%を占め、これは少なくとも年間2.47億ドル (約200億円) の経済的損失となった可能性があるとして報告された (McCrea-Strub et al., 2011)。

閉鎖された米国漁場内でみると、漁獲量の大部分はガルフ・メンハーデンであったが、生産額ではブラウンシュリンプとホワイトシュリンプが最も多く、メキシコ湾内における米国の年間合計の12%、続いてアオガニが4%、ガルフ・メンハーデンが3%、アメリカガキが1%であった。エビ類、カニ類など経済的価値のある魚種には底生生物が多い。これらは移動可能な魚類と比較して油に汚染された生息場に暴露される

可能性が高く、その結果として初期死亡率が増加し、回復時間も長くなると考えられている (McCrea-Strub et al., 2011)。

この評価では、油の影響が空間的には米国EEZの操業禁止水域内であると限定し、その影響期間もわずか1年間と仮定している。McCrea-Strub et al. (2011) は、メキシコ湾LMEの流動場はダイナミックで、大規模な炭化水素の水中ブルームの存在 (Camilli et al., 2010) は、流出油の影響が海表面から深層域に拡大している可能性を指摘している。

5. 3. 4 水産業全般に対する経済的影響

カナダのブリティッシュ・コロンビア大学漁業センターのSumaila et al. (2012) は、DWH事故に伴う油流出が米国メキシコ湾の漁業と遊魚 (レジャー・フィッシング) および養殖業に及ぼす経済的影響を、市場における魚介類のバリュー・チェーン (価値連鎖) での潜在的な損失額を算出することで推定した。

この研究ではメキシコ湾の水産有用種の潜在的な市場回復時間 (すなわち、影響を受けた魚種の魚価が流出以前の水準に戻るために要する時間) を考慮している。生態系の回復時間と市場の回復時間は異なる。特に甲殻類や軟体動物など底生魚介類をとりまく生態系の回復には数十年が必要となる場合もある。一方、市場の回復時間は流出後の漁業閉鎖の期間、水産物の安全性に関する一般国民の認識、および汚染の度合い (水産物の視覚的、味覚的、嗅覚的な影響) に依存する (Sumaila et al., 2012)。

推定結果では、油流出事故による今後7年間の現状価値からの損失額は、総収益37億ドル、総利益19億ドル、賃金12億ドルおよび経済的影響87億ドルに達するとされた。漁業と遊魚の損失額が最も大きく、それぞれ総額で、収益損失は16億ドルと19億ドル、利益損失は8億ドルと11億ドル、経済的損失は49億ドルと35億ドルであった (Sumaila et al., 2012)。漁業、遊魚および養殖業の各部門における推計結果の詳細は以下のとおりである。

(1) 漁業

DWH事故によって、今後7年間に漁業部門で失われる総収益の現在価値は5～27億ドルの範囲である。総利益、賃金と経済的影響全体の損失額の予想額は

それぞれ、3～14億ドル、1～8億ドルおよび15～84億ドルである。最大の損失額は魚価の高いエビ類などの甲殻類を漁業対象とする漁業関係者で生じ、推定された経済的影響全体の約85%である。さらに、米国メキシコ湾地域の水産業にかかわる5,250～8,758の雇用 (jobs) が失われる可能性がある。

(2) 遊魚

遊魚部門における現状価値の損失は総収益で14～24億ドル、総利益で7～13億ドル、賃金で5～8億ドル、経済的影響全体として25～42億ドルである。州別ではフロリダ州とルイジアナ州で影響が大きかったが、フロリダ州における予測損失が大部分を占めた。また、遊魚部門では1.1～1.8万の雇用が失われる可能性がある。

(3) 養殖業

フロリダ州、アラバマ州およびルイジアナ州の3州における養殖業について、総収益で0.94～1.57億ドル、総利益で0.44～0.73億ドル、賃金で0.19～0.31億ドルおよび経済的影響全体として2.93～4.88億ドルの損失が推定された。本部門では210以上の雇用 (フルタイムとパートタイム) を失う可能性がある。全体的に経済的損失の多くはカキ養殖で発生する。

なお、カキ養殖業では油による直接的影響のほか、ルイジアナ州河口域で実施した油の侵入防止策がかえって被害で大きくしたと報告されている (Upton, 2011)。ルイジアナ州では油が州の河口域に漂着しないように、通常より大量の淡水をミシシッピ川から河口域に放流した。この作戦は一時的には油を沖合に留めることに成功したが、淡水の放出はカキ養殖場の塩分をカキ類の耐性レベル以下に低下させ、カキ類の死亡率を大きく増加させるという予想外の結末となった。

6. 自然資源損害評価

2012年11月15日、ホルダー米司法長官はDWH事故の責任当事者であるBPが約45億ドル (約3,600億円) の罰金を支払うことで合意したと発表した。これは米当局による罰金としては史上最高額になるという (日本経済新聞, 2012年11月16日)。報道によれば、刑事上の罰金40億ドルは、米連邦議会への妨害

行為や水質浄化法、渡り鳥条約法などへの違反行為に対するものである。BPはこれまでに381億ドルの事故関連費用を決算計上してきたが、15日の合意でさらに38.5億ドルの追加費用が発生するほか、今後、連邦政府や地方政府、民間事業者などとの民事訴訟、すなわち自然資源損害評価 (NRDA: Natural Resources Damage Assessment) のプロセスに基づく賠償額が要求される。

油流出の責任を定める1990年の米国油濁法 (OPA 90: Oil Pollution Act) の重要な考え方は、「汚染者負担原則」(PPP: Polluter Pays Principle) である。OPA 90では油汚染による被害を受けた個人と企業は、その経済的損害を「責任当事者」(この場合BP) に要求できる (Upton, 2011)。所有者の存在しない自然資源 (動植物と生態系) についても、油流出事故で影響を受けた連邦および州政府、インディアン種族の代表者などの「自然資源受託者」^{注5)} は、自然資源損害評価プロセスによって流出に伴う損害賠償の範囲を定量化し、修復計画を立案・監視する責務を有し、事故の責任当事者に対して、補償を求めなければならない。しかし、DWH事故では490万バレルという大量の油が深海底から流出し、一部は沿岸にも漂着している。油の流出に伴う生態系の損害評価に関する全米研究評議会 (NRC: National Research Council) の中間報告 (NRC, 2012) では、このような大規模にわたる被害状況を把握し、負の影響を受けた地域の修復計画を策定するためには、「生態系サービス」の損失リスクを含めた新たな評価手法が必要であると提案している。

2012年4月18日に、連邦と州の自然資源受託者は「ディープウォーター・ホライゾン油流出事故第1段階初期修復計画と環境評価」を発表した。この「第1段階初期修復計画」では、メキシコ湾沿岸4州で損傷した砂丘、湿地、カキ礁などの自然資源とその生態系サービスを長期的に修復することを目的とした8つの計画が選定された (Deepwater Horizon Natural Resource

Trustees, 2011)。NRCによるDWH事故に伴う生態系の損害評価の最終報告書は2013年春頃に発表される予定である (NRC, 2012)。傷ついたメキシコ湾の沿岸生態系の損害額がどのように評価され、どのように修復されるのか、今後も見守っていきたい。

7. おわりに

海岸・港湾・市街地を襲う大津波、押し流される船・車・航空機・家、呆然と立ちすくむ人々の映像がTVで繰り返し放映されていた。日常とはかけ離れた、夢とも現実とも区別がつかない光景を、我々は言葉もなく目で追うしかなかった。黒い濁流に巻き込まれる巨大な石油タンク、暗闇の海で何かが光り、燃えながら移動していた。不思議な光景だった。

平成23年3月は、前報「Deepwater Horizon油流出事故—過去の流出事故との比較—」(中根, 2011) を執筆していた時期であった。3月11日の東日本大震災で記憶に焼きついた映像が、気仙沼湾で流された石油タンクを撮影したものと知らされたのは、1年以上も後のことである。佐々木 (2012) によれば、気仙沼湾では沿岸の大型石油タンク22基が津波で破壊され、1万KL以上の重油など (A重油7,500KL、軽油1,900KL、ガソリン1,500KL、灯油500KL) が流出した。これは1997年の島根県沖でのタンカー「ナホトカ号」事故による油流出量 (約6,240KL) のほぼ2倍である。油が漂着した一部の砂浜はボランティアの力で油の回収と清掃が実施されたようだが、残りの油の行方はどうなったのだろうか。特に重油が土砂とともに海底に埋もれた状態であれば、有毒な石油の揮発性成分がいつか海洋生物、さらには漁業、養殖業に影響を及ぼすのではないかと懸念する。佐々木 (2012) が述べているように、被災直後の現場には「2万人を超える犠牲者と行方不明者、生活基盤の崩壊の前に“油どころではない”」という現実があった。メキシコ湾DWH事故は人災であったが、東日本大震災という自然災害がもたらした油流出に対処することも、地球の財産である石油の恩恵を享受し続けている人間社会の責務であると考えられる。流出した油の行方を追跡・把握し、将来の海洋生態系への影響の有無を科学的に予測評価する (日本海洋学会生態系サブワーキンググループ,

注5: DWH事故における自然資源受託者は、アラバマ州、フロリダ州、ルイジアナ州およびミシシッピ州の関係部局、NOAA (米国商務省)、土地管理局、国立公園局および魚類野生動物局 (米国内務省) である。

2011) とともに、自然の回復力が望めない生態系は人の力で修復する努力も必要ではないだろうか。

引用文献

- Abbriano, R. M., Carranza, M. M., Hogle, S. L., Levin, R. A., Netburn, A. N., Seto, K. L., Snyder, S. M., SIO280 and Franks, P. J. S. 2011. Deepwater Horizon oil spill: A review of the planktonic response. *Oceanography*, 24 (3): 294–301.
- Adcroft, A., Hallberg, R., Dunne, J. P., Samuels, B. L., Galt, J. A., Barker, C. H. and Payton, D. 2010. Simulations of underwater plumes of dissolved oil in the Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, 37, L18605, doi:10.1029/2010GL044689.
- Anonymous. 1990. An assessment of the impact of the Exxon Valdez oil spill on the Alaska Tourism industry: Phase I, initial assessment. McDowe Group, Inc. A report to Preston, Thorgrimson, Shidler, Gates and Ellis, Seattle, Wash. (Sumaila et al., 2012 からの再引用)
- Anonymous. 1993. Economic impacts of oil spills: spill unit costs for tankers, pipelines, refineries, and offshore facilities. A report by Advanced Resources International, Inc. to US Department of Energy, Office of Domestic and International Energy Policy, Washington, D.C. (Sumaila et al., 2012 からの再引用)
- 朝日新聞社. 2010. 油流出、クロマグロの産卵海域を直撃、メキシコ湾. asahi.com ホームページ (発行日: 2010年5月31日), <http://www.asahi.com/eco/TKY201005310172.html>.
- Atlas, R. M. and Hazen, T. C. 2011. Oil Biodegradation and Bioremediation: A Tale of the Two Worst Spills in U.S. History. *Environmental Science and Technology*, 45 (16) : 6709–6715.
- Beazley, M. J., Martinez, R. J., Rajan, S., Powell, J., Piceno, Y. M., Tom, L. M., Andersen, G. L., Hazen, T. C., Van Nostrand, J. D., Zhou, J., Mortazavi, B. and Sobocky, P. A. 2012. Microbial Community Analysis of a Coastal Salt Marsh Affected by the Deepwater Horizon Oil Spill. *PLoS ONE*, 7 (7) : e41305. doi:10.1371/journal.pone.0041305.
- Camilli, R., Reddy, C. M., Yoerger, D., Van Mooy, B. A. S., Jakuba, M. V., Kinsey, J. C., McIntyre, C. P., Sylva, S. P. and Maloney, J. V. 2010. Tracking hydrocarbon plume transport and biodegradation at Deepwater Horizon. *Science*, 330: 201–204.
- Cohen, M. J. 1995. Technological disasters and natural resource damage assessment: an evaluation of the Exxon Valdez Oil Spill. *Land Economics*, 71 (1) : 65–82. (Sumaila et al., 2012 からの再引用)
- Deepwater Horizon Natural Resource Trustees. 2011. Deepwater Horizon Oil Spill Draft Phase I Early Restoration Plan and Environmental Assessment, 148pp.
- Dewan, S. 2010. Turtle Deaths Called Result of Shrimping, Not Oil Spill. *The New York Times*. NYTimes.com ホームページ (発行日: 2010年6月25日), <http://www.nytimes.com/2010/06/26/science/earth/26turtle.html>.
- Dutta, T. and Harayama, S. 2000. Fate of crude oil by the combination of photooxidation and biodegradation. *Environmental Science and Technology*, 34: 1500–1505. (Abbriano et al., 2011 からの再引用)
- fishnewseu.com. 2012. Encouraging news for west Atlantic bluefin. fishnewseu.com. ホームページ (最終アクセス日: 2012年2月23日), http://www.fishnewseu.com/index.php?option=com_content&view=article&id=7661.
- Fucik, K. W., Carr, K. A. and Balcom, B. J. 1994. Dispersed Oil Toxicity Tests with Biological Species Indigenous to the Gulf of Mexico. OCS Study MMS 94-0021, 97 pp.
- 藤田 香. 2010. ワシントン条約は日本の勝利か—マグロ資源管理の無策を露呈. *日経エコロジー* (2010年5月号), p. 15.
- García-Negro, M. C., Villasante, S., Carballo-Penela, A. and Rodríguez-Rodríguez, G. 2009. Estimating the economic impact of the Prestige oil spill on the Death Coast (NW Spain) fisheries. *Marine Policy*, 33 (1) : 8–23. doi:10.1016/j.marpol.2008.03.011. (Sumaila et al., 2012 からの再引用)
- Gonzalez, J., Figueiras, F. G., Aranguren-Gassis, M., Crespo, B. G., Fernandez, E., Moran, X. A. G. and Nieto-Cid, M. 2009. Effect of a simulated oil spill on natural assemblages of marine phytoplankton enclosed in microcosms. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 83: 265–276. (Abbriano et al., 2011 からの再引用)
- Graham, W. M., Condon, R. H., Carmichael, R. H., D' Ambra, I., Patterson, H. K., Linn, L. J. and Hernandez Jr., F. J. 2010. Oil carbon entered the coastal planktonic food web during the Deepwater Horizon oil spill. *Environmental Research Letters*, 5 (4) : 045301. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/5/4/045301>.
- Hazen, T. C., Dubinsky, E., DeSantis, T., Andersen, G., Piceno, Y., Singh, N., Jansson, J., Probst, A., Borglin, S., Fortney, J., Stringfellow, W., Bill, M., Conrad, M., Tom, L., Chavarria, K., Alusi, T., Lamendella, R., Joyner, D., Spier, C., Baelum J., Auer, M., Zemla, M., Chakraborty, R., Sonenthal, E., D'haeseleer, P., Holman, H. Y., Osman, S., Lu, Z. M., van Nostrand, J., Deng, Y., Zhou, J. Z. and Mason, O. U. 2010. Deep-sea oil plume enriches Indigenous oil-degrading bacteria. *Science*, 330: 204–208.
- Head, I. M., Jones, D. and Røling, W. M. 2006. Marine microorganisms make a meal of oil. *Nature Reviews Microbiology*, 4: 173–182. (Abbriano et al., 2011 からの再引用)
- Hsiao, S. I. C., Kittle, D. W. and Foy, M. G. 1978. Effects of crude oils and the oil dispersant Corexit on primary production of arctic marine phytoplankton and seaweed. *Environmental Pollution*, 15: 209–221.
- Kessler, J. D., Valentine, D. L., Redmond, M. C., Du, M., Chan, E. W., Mendes, S.D., Quiroz, E. W., Villanueva, C. J., Shusta, S. S., Werra, L. M., Yvon-Lewis, S. A. and Weber, T. C. 2011. A persistent oxygen anomaly reveals the fate of spilled methane in the deep Gulf of Mexico. *Science*, 331: 312–315.
- (財) 国際エメックスセンター. 2003. 3. メキシコ湾. *世界閉鎖性海域環境ガイドブック*, pp. 15–18.
- Kujawinski, E. B., Soule, M. C. K., Valentine, D. L., Boysen, A. K., Longnecker, K. and Redmond, M. C. 2011. Fate of dispersants associated with the Deepwater Horizon oil spill. *Environmental Science and Technology*, 45: 1298–1306.
- Kvenvolden, K. A. and Cooper, C. K. 2003. Natural seepage of crude oil into the marine environment. *Geo-Marine Letters*, 23: 140–146.
- Lee, W. Y. and Nicol, J. A. C. 1977. The effects of the water-soluble fractions of No. 2 fuel oil on the survival and behaviour of coastal and oceanic zooplankton. *Environmental Pollution*, 12: 279–292. (Abbriano et al., 2011 からの再引用)
- McCrea-Strub, A., Kleisner, K., Sumaila, U. R., Swartz, W., Watson, R., Zeller, D. and Pauly, D. 2011. Potential Impact of the Deepwater Horizon Oil Spill on Commercial Fisheries in the Gulf of Mexico. *Fisheries*, 32: 332–336.
- McDaniel, C. J., Crowder, L. B. and Priddy, J. A. 2000. Spatial dynamics of sea turtle abundance and shrimping intensity in the U.S. Gulf of Mexico. *Conservation Ecology*, 4 (1) : 15.
- Middaugh, D. P. and Whiting, D. D. 1995. Responses of embryonic and larval inland silversides, *Menidia beryllina*, to No. 2 fuel oil and oil dispersants in seawater. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 29: 535–539.
- Mitra, S., Kimmel, D. G., Snyder, J., Scalise, S., McGlaughon, B. D., Roman, M. R., Jahn, G. L., Pierson, J. J., Brandt, S. B., Montoya, J. P., Rosenbauer, R. J., Lorenson, T. L., Wong, F. L. and Campbell, P. L. 2012. Macondo-1 well oil-derived polycyclic aromatic hydrocarbons in mesozooplankton from the northern Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters* 39, L01605, doi:10.1029/2011GL049505.
- Muhling, B. A., Lamkin, J. T. and Roffer, M. A. 2010. Predicting the occurrence of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) larvae in the northern Gulf of Mexico: Building a classification model from archival data. *Fisheries Oceanography*, 19: 526–539.

- Muhling, B. A., Roffer, M. A., Lamkin, J. T., Ingram, G. W. Jr., Upton, M. A., Gawlikowski, G., Muller-Karger, F., Habtes, S. and Richards, W. J. 2012. Overlap between Atlantic bluefin tuna spawning grounds and observed Deepwater Horizon surface oil in the northern Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 64 (4): 679–687.
- 中根徹. 2011. メキシコ湾Deepwater Horizon 油流出事故-過去の流出事故との比較-. 2011年日本海洋生物研究所年報, 20–30.
- National Geographic News. 2012a. イルカに“重病”の兆候、原油流出2年. ナショナルジオグラフィックニュース・ホームページ (発行日: 2012年4月23日), http://www.nationalgeographic.co.jp/news/news_article.php?file_id=2012042306.
- National Geographic News. 2012b. 深海のサンゴにも被害、原油流出2年. ナショナルジオグラフィックニュース・ホームページ (発行日: 2012年4月23日), http://www.nationalgeographic.co.jp/news/news_article.php?file_id=2012042307.
- National Geographic News. 2012c. 微生物へのダメージ、原油流出2年. ナショナルジオグラフィックニュース・ホームページ (発行日: 2012年4月23日), http://www.nationalgeographic.co.jp/news/news_article.php?file_id=2012042308
- 日本海洋学会生態系サブワーキンググループ. 2011. 東日本大震災による海洋生態系影響の実態把握と今後の対応策の検討 (提言). 日本海洋学会ニュースレター, 1 (3) : 1–4. (発行日: 2011年10月15日)
- 日本経済新聞. 2012. 英BP、メキシコ湾流出事故の罰金3600億円支払い、米当局と合意、過失認める. 日本経済新聞ホームページ (発行日: 2012年11月16日), http://www.nikkei.com/article/DGXNASGM15092_W2A111C1000000/
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2011. Sea Turtles and the Gulf of Mexico Oil Spill, Office of Protected Resources - NOAA Fisheries. NOAAホームページ (最終更新日: 2011年8月15日), <http://www.nmfs.noaa.gov/pr/health/oilspill/turtles.htm>.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) . 2012. Deepwater Horizon: A Preliminary Bibliography of Published Research and Expert Commentary. Compiled by Chris Belter. NOAA Central Library. NOAAホームページ (最終更新日: 2012年10月2日), <http://www.lib.noaa.gov/researchtools/subjectguides/dwh.html>.
- NRC (National Research Council) . 2003. Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. The National Academies Press, 280 pp. (Abbrano et al., 2011からの再引用)
- NRC (National Research Council) . 2012. Approaches for Ecosystem Services Valuation for the Gulf of Mexico After the Deepwater Horizon Oil Spill: Interim Report, 150 pp.
- NWF (National Wildlife Federation) . 2012. New NWF Report: A Degraded Gulf of Mexico Wildlife and Wetlands Two Years into the Gulf Oil Disaster, 12 pp.
- Ocean Conservancy. 2012a. Oil Disaster Impacts in the Gulf of Mexico. A map of known and potential impacts of the BP Deepwater Horizon oil disaster. Ocean Conservancy ホームページ (最終アクセス日: 2012年10月9日), <http://www.oceanconservancy.org/places/gulf-of-mexico/oil-disaster-impacts-in-the.html>.
- Ocean Conservancy. 2012b. Known and Potential Impacts of the BP Deepwater Horizon Oil Disaster. Ocean Conservancy ホームページ (最終アクセス日: 2012年10月9日), <http://www.oceanconservancy.org/places/gulf-of-mexico/gulf-of-mexico-oil-impacts.pdf>.
- Ramseur, J. L. 2010. Deepwater Horizon Oil Spill: The Fate of the Oil. CRS Report for Congress no. R41531, 20 pp.
- 佐々木邦昭. 2012. 東日本大震災 (平成23年3月11日) に伴う油濁について (気仙沼と大船渡の油濁を考える) メッセージ海と渚 (2012年1月) . 1: 5–13. 財団法人 海と渚環境美化・油濁対策機構.
- Seuront, L. 2010. Zooplankton avoidance behaviour as a response to point sources of hydrocarbon-contaminated water. *Marine and Freshwater Research*, 61: 263–270. (Abbrano et al., 2011からの再引用)
- Silliman B. R., van de Koppel, J., McCoy, M. W., Diller, J., Kasozi, G. N., Earl, K., Adams, P. N. and Zimmermand, A. R. 2012. Degradation and resilience in Louisiana salt marshes after the BP-Deepwater Horizon oil spill. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109 (28) : 11234–11239.
- Suchanek, T. H. 1993. Oil impacts on marine invertebrate populations and communities. *American Zoologist*, 33: 510–523. (Abbrano et al., 2011からの再引用)
- 水産庁・水産総合研究センター. 2012. 平成23年度国際漁業資源の現況. 水産総合研究センター・ホームページ (最終アクセス日: 2012年11月15日), <http://kokushi.job.affrc.go.jp/index-2.html>.
- Sumaila, U. R., Cisneros-Montemayor, A. M., Dyck, A., Huang, L., Cheung, W., Jacquet, J., Kleisner, K., Lam, V., McCrea-Strub, A., Swartz, W., Watson, R., Zeller, D. and Pauly, D. 2012. Impact of the Deepwater Horizon well blowout on the economics of US Gulf fisheries. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 69: 499–510.
- Teal, J. M. and R. W. Howarth. 1984. Oil spill studies: A review of ecological effects. *Environmental Management*, 8: 27–44.
- Teo, S. L. H., Boustany, A. M. and Block, B. A. 2007. Oceanographic preferences of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds. *Marine Biology*, 152: 1105–1119.
- Teo S. L. H., Block B. A. 2010. Comparative Influence of Ocean Conditions on Yellowfin and Atlantic Bluefin Tuna Catch from Longlines in the Gulf of Mexico. *PLoS ONE*, 5 (5) : e10756. doi:10.1371/journal.pone.0010756.
- Upton, H. F. 2011. The Deepwater Horizon Oil Spill and the Gulf of Mexico Fishing Industry. Congressional Research Service, 14 pp.
- Urakawa, H., Garcia, J. C., Barreto, P. D., Molina, G. A. and Barreto, J. C. 2012. A sensitive crude oil bioassay indicates that oil spills potentially induce a change of major nitrifying prokaryotes from the Archaea to the Bacteria. *Environmental Pollution*, 164: 42–45.
- U. S. FWS (Fish and Wildlife Service) . 2011. Bird Impact Data and Consolidated Wildlife Reports. Deepwater Horizon Bird Impact Data from the DOI - ERDC NRDA Database. 12 May 2011. 米国魚類野生生物局ホームページ (最終更新日: 2011年3月12日), <http://www.fws.gov/home/dhoilspill/pdfs/Bird%20Data%20Species%20Spreadsheet%2005122011.pdf>.
- Valentine, D. L., Kessler, J. D., Redmond, M. C., Mendes, S. D., Heintz, M. B., Farwell, C. Hu, L., Kinnaman, F. S., Yvon-Lewis, S., Du, M., Chan, E. W., Tigreros, F. G. and Villanueva, C. J. 2010. Propane respiration jump starts microbial response to a deep oil spill. *Science*, 330: 208–211.
- Venosa, A. D. and Holder, E. L. 2007. Biodegradability of dispersed crude oil at two different temperatures. *Marine Pollution Bulletin*, 54: 545–553. (Abbrano et al., 2011からの再引用)
- White, H. K., Hsing, p., Cho, W., Shank, T. M., Cordes, E. E., Quattrini, A. M., Nelson, R. K., Camilli, R., Demopoulos, A. W. J., German, C. R., Brooks, J. M., Roberts, H. H., Shedd, W., Reddy, C. M. and Fisher, C. R. 2012. Impact of the Deepwater Horizon oil spill on a deep-water coral community in the Gulf of Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. doi: 10.1073/pnas.1118029109.
- Williams, R., Gero, S., Bejder, L., Calambokidis, J., Kraus, S. D., Lusseau, D., Read, A. J. and Robbins, J. 2011. Underestimating the damage: Interpreting cetacean carcass recoveries in the context of the Deepwater Horizon/BP incident. *Conservation Letters*, 4 (3) : 228–233.
- WWF ジャパン (2009) ウミガメについて. 2000 A WWF Species Status Report より, WWF ジャパンホームページ (最終更新日: 2009年9月14日), <http://www.wwf.or.jp/activities/wildlife/cat1014/cat1066/>