



# 序文

油流出は酸素の物理的遮断および毒性の両作用によって海洋環境に重大な影響を与える可能性がある。影響の重大性は一般的に、流出油の量および種類、周囲の条件、そして影響を受けた生物およびその生息環境の油に対する脆弱性によって決まる。

本資料では、船からの油流出とその結果必要となる防除活動が海洋動植物とそれらの生息環境にどのような影響を与えるかについて述べる。特に、長年さまざまな研究のテーマになってきた油と生物系の複雑な相互作用の考察に注目する。漁業や養殖業、そしてさまざまな社会・経済活動に対する油の具体的な影響については別のITOPF技術資料で考察している。

## 概要

油流出は海洋環境に対して幅広い影響を及ぼす危険があり、メディアでは海洋動植物の存続にとって悲観的な予測を伴う「環境災害」として描かれることが多い。大規模事故の場合、環境に与える短期的影響は深刻である。生態系の損傷と汚染された海岸線近くに住む人々の苦痛は甚大であり、生計に影響を与え、生活の質を損なう場合がある(図1)。流出後に油にまみれた鳥たちの映像が流れることによって、海洋資源の損失は避けられず、広範かつ永久的な環境被害が起きたという認識が広まる。通常油流出に対しては緊迫し感情的な反応が起こるため、油流出の影響とそれに続く回復の実態についてバランスの取れた見解を得るのは難しい場合がある。

油流出の影響については数十年にわたり研究され、科学論文や技術論文で実証されている。その結果、油汚染による影響は十分に把握されており、発生した事故による被害の規模や期間について大まかに示すことができるほどである。典型的な油流出の影響に関する科学的評価は、発生する被害は生物の個体レベルでは深刻な場合があるものの、個体群としてはより回復が早いことを明らかにしている。時がたてば自然の回復プロセスは損傷を修復し、システムの機能を正常に戻すことができる。防除作業がきちんと行われれば、油の除去は回復のプロセスを助け、回復措置が注意深く行われれば、それを促進することもある。長期的被害の事例は少数ではあるが記録に残されているものがある。しかし、ほとんどの場合、大規模な油流出が起きた後でも被害を受けた生息環境と巻き込まれた海洋生物は数シーズンの間に広く回復すると期待してよい。

## 油流出による被害の構成要素

油は以下の1つもしくは複数の構成要素によって環境に影響を及ぼすといえる。

- 生理的機能に影響を及ぼす酸素の物理的遮断
- 致死もしくは致死に近い影響を引き起こすか、あるいは細胞機能を低下させる化学毒性

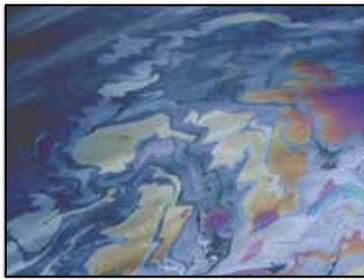


▲ 図1: 漁村に隣接する海岸線に漂着した油。

- 生態系の変化で、主に群落からの主要な生物の喪失と日和見種による生息環境の乗っ取り
- 生息環境もしくは棲み処の喪失、その結果として生じる生態学的に重要な種の消失などの間接的な影響

油流出による影響の特質および持続期間はさまざまな要因によって決まる。流出油の量と種類、海洋環境における流出油の動き方、周囲の条件および物理的特性の観点から見た油の流出場所、そして特に季節やその季節に特有な気象条件に関するタイミングなどである。その他の重要な要因としては、被害を受けた環境の生物学上の構成、構成種の生態的な重要性および油汚染に対する脆弱性がある。また、適切な防除技術の選択と作業の効果的な遂行も油流出による影響に大きな意味を持つ。

油流出により影響を受ける可能性は、汚染物質が自然のプロセスによって希釈もしくは分散する速度によっても異なる。それによって被害エリアの地理的範囲が特定され、影響を受けやすい環境資源が高濃度の油もしくはその有毒成分に長期間さらされるかどうかが決まる。同様に重要なのが油汚染に対する生物の脆弱性と感受性の度合いである。脆弱な生物は、海洋環境における位置付けからすると一般的に海面や水際に生息してい



▲ 図2: 海洋生物に対する一般的な影響は、毒性(特に軽質油や石油製品)から窒息状態(中間燃料油(IFO)および重質燃料油(HFO)や風化した残渣)まで幅広い。

るため、油に接触する確率が高い。感受性が高い生物は油もしくはその化学成分にさらされると敏感に影響を受ける。短期間の暴露ならば、感受性が低い生物の方が耐えられる可能性が高い。多くの国々で作成されている海岸線の地図では、異なる生息環境に感受性に応じた指標が割り振られている。そのように作成された地図は感受性の地図帳でもあり、例えば、マングローブ林や塩性湿地は高指数が付与されており、一方、砂浜は通常低指数と特徴付けられている。

被害範囲を判定する上で、流出油の特性は重要である(図2)。重質燃料油(HFO)などの持続性が高い油が大量に流出し、海岸線の潮間帯が油に覆われると、広域にわたり被害が発生する可能性がある。しかし、油の化学成分は生物学的利用能が低いため、HFO(またはその他の低水溶性の高粘性油)が有毒な影響を及ぼす可能性は低い。「アスファルト舗装」(高度に風化した油と砂利の集合体)に含まれる油は、海岸線での持続時間にかかわらず同じように生物学的利用能が低いが、生息地改変による間接的な被害はあるかもしれない。

対照的に、灯油やその他の軽質油の化学成分は生物学的利用能がより高いため、毒性による被害が起こりやすい。だが、軽質油は蒸発および分散によって素早く消散するため、感受性の高い資源が流出現場から十分に遠く離れていれば、全体としては被害が少なくすむ可能性がある。その一方で、例えば水の入れ替えがあまり起きない浅いラグーンなどの泥質堆積物や閉鎖性水域に、汚染物質が閉じ込められているような希釈が遅い状況では、影響は大きく長く続くことが予想される。死亡には至らない暴露レベルであっても、有毒成分によって摂食または生殖の障害などが起こり、致死に近い影響につながりかねない。

海洋環境は非常に複雑であり、種の構成、個体数、空間的・時間的分布の自然変動は海洋環境が正常に機能していることを示す基本的特徴である。この環境の中で変化する生息環境に対する海洋動植物の自然回復力はさまざまである。生物の環境ストレスへの自然適応は、繁殖戦略と結び付くことにより、環境条件の日内変動および季節変動に対処するための重要な構成要素を提供する。動植物によってはこの固有の回復力があるため、油汚染にある程度は耐えられるのである。とはい

え、油流出だけが海洋の生息環境にかかる人為的負荷ではない。まん延する自然資源の乱獲および慢性的な都市汚染や産業公害も海洋生態系内の変動に大きく関わる。激しい自然変動を背景に、繁殖成功率、生産性または生物多様性の減少などの油流出によって生じた微小な被害を感知するのは難しい。

## 海洋環境の回復

海洋環境が苛酷な変動から正常な状態に戻る復元力は、その複雑さと回復力との相関関係による。ハリケーンや津波などの非常に破壊的な自然現象からの回復は、甚大な数の死を含む激しい混乱の後でも生態系は時間をかけて復元できることを立証している。生態系の回復の定義および回復の時点については多くの議論が存在するものの、生態系には自然変動があるため流出前と全く同じ状態に戻すのは不可能であるということは広く認められている。それよりむしろ多くの回復の定義では、生息環境に特有の動植物の群落の回復および生物の多様性・生産性における正常な機能の回復を重視している。

この原則は、1967年にイングランド沖で起きたトリー・キャニオン号のタンカー油流出事故で不適切な防除作業が行われた経験に由来する。この事故対応では岩礁海岸に有毒な洗浄剤が使われ、それによって大きな被害もたらされた。事故前に存在していた特定の種のきめ細かな分布は様変わりし、変動の影響は20年以上にわたり長引いたが、生態系全体の機能や生物多様性、生産性は1~2年の間に復元された。上記の回復の定義によれば、岩礁海岸の群落は2年の間に回復したと言えるだろう。しかし、群落を構成する生物の年齢分布を考察すると、この定義の限界が分かる。事故前には若い生物から成熟した生物まであらゆる年齢の生物が存在していたが、新しく回復した植物や動物は狭い年齢幅の中におさまっており、その結果、初期に形成された群落は事故前に比べ堅固さに欠けていた。

同様に、もしマングローブの群生が油流出または熱帯暴風雨などの自然現象の影響によって被害を受けたとしても、時間が経てば、周辺から被害エリアに到来した若い植物によって再度コロニーが形成される。しかし、このように置き換えられた植物た

ちはすべて同じくらいの年齢であり、木々が成熟するまでは以前と完全に同じように環境に貢献することはできない。こうした観察の結果、影響と被害を対比して考えるようになり、場合によっては、生態系が汚染の被害から回復した後もなお、それほど重要でない影響(生態系の正常な機能という観点から見て)が見つげ出される可能性は残る。

回復構成要素は捕食やその他の死亡原因の重圧に対処するために進化してきた。例えば、海洋生物にとって最も重要な繁殖戦略の1つは放卵であり、膨大な数の卵や幼生がプランクトンで満ちた水の中に放出され、海流によって広く分布することになる。ほとんどの場合、100万個に数個の割合の個体しか成体期まで生き残ることができない。この高い生殖能力は幼年期個体の過剰生産を引き起こし、それによって、新しいエリアでのコロニー形成および流出によって被害を受けたエリアへの補充のためだけでなく、集団から失われた個体の置換のためにも十分な量の貯蔵庫が確保される。それに対して、長い年月の間性的成熟に達せず、数体しか子孫を産めない長寿命種は、汚染事故の影響から回復するのにより時間がかかる可能性が高い。

以下の表1に示しているとおおり、ほとんどの場合、回復には通常数回の季節サイクルを要し、多くの生息環境においては1~3年ほどかかる中で、マングローブは明らかな例外である。

## 海洋環境

多様な環境で船からの油流出が引き起こすさまざまな種類の被害について以下で考察する。

### 沖合および沿岸水域

ほとんどの油は海面を浮遊し、波や風、海流によって広域に拡がる。粘度の低い油の場合、特に砕け散る波によって油が素早く薄められる場所では、水面から数メートルの範囲の水中で自然に分散することがある。もし油の流出が長期にわたり継続した場合、水中の上層に分散した油の濃度は流出時点の濃度に近い状態で維持されているかもしれない。それでも、水中深くもしくは海底にいる種に対する流出油の影響は低い。しかし、沈没船、超重質油(即ちAPI度が低い\*)の流出、

生息環境	回復にかかる期間
プランクトン	数週間ないし数か月
砂浜	1~2年
開放岩礁海岸	1~3年
遮蔽岩礁海岸	1~5年
塩性湿地	3~5年
マングローブ	10年以上

▲ 表1: 生息環境ごとに油汚染から回復までにかかる期間を示す。期間は流出油の量および種類を含む多数の要因によって決まる。ここでは回復は生息環境が正常に機能回復した時点と定義されている。

もしくは石油火災の後に残ったタール状残渣によって被害が生じる可能性はある。

## プランクトン

海洋の遠洋域は、バクテリア、植物(植物性プランクトン)および動物(動物性プランクトン)から成る無数の単純な浮遊生物を育てている。その中には魚や無脊椎動物の卵や幼生があり、一部はいずれ海底に沈んだり、海岸線に落ち着いたりする。プランクトンの死亡率は必然的に極めて高く、その主な理由は捕食だが、環境状況の変化や生存が維持できない領域に運ばれることによって死亡する。その一方で、特に栄養が豊富に供給される好ましい状況ではプランクトンは最盛期を迎え、とりわけ春の温暖な気候の中で個体数は劇的に増加する。一旦栄養の流入が低下するか栄養を摂取しつくと、個体数は急減し、死んだ生物は生分解され、海底に沈む。こうした極端な状況に対応するため、短い世代時間の中で大量産生するように生態系は進化した。結果として、プランクトンは通常空間的および時間的に極めてまばらな分布を示し、すべての海洋群落において最も変動しやすい種の1つだと考えられている。

浮遊生物が油にさらされることによる脆弱性については十分に立証されており、影響は広範囲に及ぶ可能性があると思われる。しかし、幼年期個体に通常大規模に起きる過剰産生は、油流出の影響を受けていない周辺海域からの補充に対する緩衝となり、卵期および幼生期の個体の損失を十分に補うことができる。そのため、油流出後に成体個体数の著しい低下は観測されていない。

## 魚

幼若期の魚は水中の比較的低い濃度の油から影響を受けやすいにもかかわらず、成魚ははるかに耐性が強く、野生種のレベルでは影響はめったに検出されない。自由遊泳している魚は積極的に油を避けると考えられている。例外的に特定の種の年級の減少が記録されているが、大量死はまれである。死亡例は、嵐によって水中に分散した油が局所的に非常に高濃度になった場合、相当量の軽質油が海岸線に砕け散る波に放出された場合、または河川に流出した場合と関連している。商業的に開発された魚類資源や養殖された水産物に対する油流出の影響については別紙ITOPF資料「漁業および養殖業に対する油汚染の影響」でより詳しく考察している。

## 海鳥

海鳥は開放水域に住む生き物の中で最も被害を受けやすく、大規模事故が起きると多数の海鳥が死ぬ可能性がある。ウミガモ、ウミスズメおよび海面に群れを成して浮かぶその他の種は特に危険にさらされている。しかし、海鳥集団における著しく高い死亡率は、食料源もしくは生息環境の喪失または嵐などの油とは無関係の原因によって起こる場合もある。死因を突き止め、その死が特定の出来事に起因するものかどうかを識別するために、死後研究が必要になるかもしれない。

\* 米国石油協会比重。



▲ 図3: 油で汚れたケープペンギン(学名: *Spheniscus demersus*)を囲っているところ。

鳥に対する油の最も明らかな影響は羽毛の汚損である。羽毛は肌との間に暖かい空気を閉じ込める役割があり、それによって浮力と断熱効果が得られる。油で汚れると、羽毛や断熱性のある綿羽の保護層の繊細な構造が破壊され、海水が直接肌に触れることになる。その結果、鳥の体温が奪われ、最終的に低体温症によって死ぬ可能性が出てくる。寒冷地では鳥の羽毛に小さな油汚れが1か所付くだけで死を招くのに十分な場合がある。多くの鳥の種は肌の下に脂肪層を持っており、それは第2の断熱層およびエネルギーの蓄積の両方の役割を果たす。鳥が自分の体を温めようとすると、この蓄えは急速に消費される可能性がある。また、寒さや極度の疲労、浮力の喪失に苦しんでいる鳥は溺死することがある。さらに、油で汚れた羽毛は、鳥が食料を探したり捕食者から逃げたりするのに必要な飛び立つ能力や飛行能力を低下させる。

鳥は自然な本能から羽繕いをし、自分をきれいにしようとするが、一旦油で汚れてしまうと、羽繕いをすることによって体のきれいな場所まで油を広げてしまう可能性がある。また、油が体内に取り込まれる可能性が非常に大きく、その場合、肺の鬱血、腸または肺からの出血、肺炎および肝臓・腎臓障害などの深刻な影響を及ぼす危険性がある。巣に戻ると、油が鳥の羽毛から雛の羽毛や孵化する前の卵に移ることもあり得る。卵の油汚染は、卵の殻の薄化や孵化の失敗、発達異常などを引き起こしかねない。

流出油の量と海鳥に予想される影響の間には明らかな関連はない。繁殖期もしくは海鳥の大群が集まる場所で起きる流出は小規模なものでも、それ以外の時期もしくは環境で起きる大規模な流出事故よりも有害であることが判明している。種によっては、産卵の個数や繁殖の回数を増やしたり、若い鳥たちを早めに繁殖グループに加えたりすることによってコロニーの減少に対応する。こうしたプロセスは回復の助けになるが、回復には数年かかることがあり、また、食料供給や環境の生息可能性その他の要因によっても左右される。一般的に短期的・中期的な被害は記録されているが、上記の回復メカニズムは個体



▲ 図4: ペンギンは他の鳥の種よりも洗浄の効果がある。この写真では、イフトビペンギン(学名: *Eudyptes moseleyi*)たちがリハビリ訓練を受けている。

群レベルが受ける長期的影響を効果的に防いでいるのかもしれない。しかし、状況によっては油流出が周辺のコロニーを永久に衰退に向かわせる危険性がある。

油で汚れた鳥の洗浄やリハビリを試みることはできるが、多くの種では通常、手当を受けた鳥のごく一部しか洗浄工程を生き残れない。野生に戻された鳥が自然界で生き残り、繁殖に成功する割合はさらに少ない。多くの場合、ペンギンは例外であり、一般的に他の多くの種より耐性がある。適切に取り扱えば、大多数のペンギンは洗浄工程を生き残り、繁殖個体群に再び加われる可能性が高い(図3と図4)。しかし、このペンギンの場合でさえ、洗浄された鳥の繁殖成功率は油汚染から完全に逃れた鳥の繁殖成功率よりも低いことが分かっている。それでもなお、鳥洗浄の適正手順の開発や普及は結果を改善する役に立っている。

## 海洋哺乳類および海生爬虫類

クジラやイルカその他のクジラ類は、呼吸のため浮上もしくは海面上に飛び上がる際に浮遊油に汚染される危険性がある。油は鼻腔組織や目に損傷を与えると考えられている。しかし、記録されている死亡例の解剖結果によれば、ほとんどの場合、死亡原因は油以外である。草食海牛類(マナティーやジュゴン)など、熱帯に生育する大型の海洋哺乳類も影響を受けやすいと考えられるものの、油汚染による被害の報告はめったにない。しかし、アシカやアザラシ、カワウソその他の岸に上がり海岸で時間を過ごすことのある海洋哺乳類は、油の影響を受け、苦しむ確率が高い。毛皮によって体温調節を行う種は油の影響を最も受けやすく、もし毛皮が油に覆われ、もつれた場合、季節によっては低体温症もしくは過熱によって死に至る可能性がある(図5)。

浮遊油は亀や海イグアナ、ウミヘビなどの海生爬虫類の生命を脅かす可能性がある。特に営巣時期の亀は影響を受けやすい。もし砂浜に油が打ち上げられたり、防除作業中に巣が破壊されたりした場合、卵や孵化したての幼体が失われる可能性が



▲ 図5:油は、このアザラシの赤ちゃん(ミナミアメリカオットセイ、学名:Arctocephalus australis)のように、哺乳類の生命維持に必要な生理的機能を維持する能力に悪影響を及ぼすことがある。

ある。成体は粘膜の炎症に侵され、それによって感染症にかかりやすくなる危険がある。しかしながら、油に汚染された亀を洗浄して海に帰すことに成功した例は数多くある(図6)。ウミガメのすべての種は人間の活動によって命を脅かされるか存続の危機にさらされている。故意でない混獲、食料としてや亀甲を狙った意図的な捕獲、そして生息環境の喪失が主なものである。

## 浅瀬の海岸

浅瀬での被害はほとんどの場合、強い波の作用によって油が水中に混入するか、岸に近過ぎる場所で油処理剤を不適切に使用することによって起こる。多くの場合、浅瀬には、例えば潮の干満により、海水の油濃度を有害レベルにならないよう希釈する十分な能力がある。その一方で、浅瀬に軽い石油精製品または軽質原油が分散し、油の有毒成分の濃度が高くなった場所で、海底に住む(底生性の)動物や堆積物に生息する動物が死んだ例がある。

## 海草

温帯海域および熱帯海域ではさまざまな種の海草が存在する。海草は他の多くの生物を保護しながら多様に富んだ生産性の高い生態系を支えている。藻場は水流を弱めるため堆積物が増える。その一方で、根の構造が海底を固定することで沿岸地帯を浸食から守っている。浮遊油は悪影響を及ぼすことなく藻場の上を通り過ぎる可能性が高い。しかし、油もしくはその有毒成分が海草の生育する浅瀬の海水にかなりの高濃度で混入した場合、海草や海草に関連した生物は影響を受けるかもしれない。海草の近くで行う防除作業は、船舶のプロペラやオイルフェンスのアンカーによって植物がちぎれたり引き抜かれたりする可能性があるため、注意して実施する必要がある。

## サンゴ

サンゴ礁は極めて豊かで多様な海洋生態系を提供し、生産性が高く、開放海岸線の沿岸を保護してくれる。サンゴは非常に感受性の高い生物なので、油に汚染されると回復に長い時間がかかる。分散した油はサンゴ礁に被害をもたらす危険が最も



▲ 図6:洗浄されている若いタイマイ(学名:Eretmochelys imbricate)(写真提供:USCG)。

大きい。この危険性は、波が砕け、乱流が増すことにより流出油が自然に分散される場合と、油処理剤が使われる場合に最も高くなる。サンゴそのものに加え、その生息環境に依存する群落も油に対して感受性が高い。それゆえに、サンゴ礁の近くでは油処理剤を使用してはいけない。めったにないが、大潮の時にサンゴ礁が干上がることがあり、そのような場合には、浮遊油によってサンゴが窒息死する危険性がある。

油汚染よりも船舶の座礁の方がサンゴ礁に損害を与える原因である場合が多い。その他の人為的影響もサンゴにストレスを引き起こすことがある。例えば、魚の乱獲または破壊的漁業慣行、森林破壊や沿岸の建設プロジェクトによる富栄養化および堆積物の増加などが考えられる。

## 海岸線

海岸線は他のどの海洋環境よりも油の影響にさらされる。しかし、岸に生息する多くの動植物は生まれながらに耐性がある。なぜなら、海岸では潮周期だけでなく、打ち付ける波や乾燥風、極端な温度、降雨による塩分濃度の変動その他の重度のストレスに周期的にさらされるので、それに耐えられようにならざるを得ないからである。この耐性のおかげで海岸線に生息する生物の多くは油流出の影響に抵抗し回復する能力も備えている。

## 岩礁海岸および砂浜

岩礁海岸および砂浜は波浪や潮流によって洗い流されている結果、油流出の影響に対して最も耐性があるということになる(図7)。この洗掘効果によって通常自然で迅速な自己洗浄が可能になる。温帯気候で岩礁海岸に起きる被害の典型的な例は、海生巻貝の中枢種であるセイヨウカサガイ(学名:Patella vulgata)の一時的喪失である。「中枢種」とは、その生物量に比し不釣り合いな支配的影響力を生態系に及ぼす植物または動物を言い、中枢種の除去は生態系に劇的な変化をもたらす可能性がある。岩肌の微細藻類を食しているカサガイは藻類の増殖と他の動物の定着を妨げる。カサガイの喪失は一般的に、この機に便乗した緑藻類の急激な増殖

につながる(図7の差し込み図)。時間と共にこの藻類増殖は他の藻類種に取って替われ、その後岩肌にかサガイが再度コロニーを形成する空間ができるにつれ、徐々に生態系の均衡が回復する。熱帯および亜熱帯の砂浜では、スナガニ属(学名:Ocyropses)がかサガイと同じような環境に適した位置を占めており、海岸線が油で汚染された時の一般的な特徴は高い死亡率である。それにもかかわらず、海岸線が洗浄されてから数週間の内にスナガニ属は再び海辺に以前と同じ数のコロニーを形成していることが多い。

## 軟質堆積海岸

入り江など波の作用から遮蔽されているエリアに見られる細砂や泥は、生物学的生産性が高い傾向がある(図8)。多くの場合、渡り鳥および堆積物中に住む二枚貝などが在来無脊椎動物の大きな個体群の生息環境となり、種によっては成育場ともなる。

細粒堆積物は他の底質ほど簡単に油の影響を受けないものの、嵐によって攪拌された堆積物と油が混合したりゴカイのような虫の穴や空洞のある植物の茎を通じて油が浸透したりすることがある。細粒堆積物に浸透する汚染物質は多年にわたり残る可能性があり、長期的な影響を及ぼす危険性を高める。

## 塩性湿地

軟質堆積海岸の上縁はほとんどの場合、木本多年生植物、多肉一年生植物、草から成る塩性湿地植生に占められている。塩

性湿地は通常温帯の気候に伴うものであるが、亜寒帯から熱帯まで世界中で見られる。熱帯の海岸では、塩性湿地はマングローブと結び付いていることが多く、それぞれ潮間帯の上部と下部を占める。種の組成はかなりの程度まで塩分濃度によって決まる。例えば、入り江の上流で見られる塩分濃度が低い海域または汽水域では、湿地植生は葦原に取って代わられる。湿地から運ばれた植物の有機堆積物も入り江や沿岸海域の食物網に貢献する。多くの塩性湿地は鳥、特に渡り鳥の種の生息環境として重要であるため、「特に水鳥の生息地として国際的に重要な湿地に関する条約(ラムサール条約)」に基づき特別に保全する湿地として登録されている。

塩性湿地に対する油流出の影響は、流出時期が植物の成長期に関連するかどうかにより異なる。温暖な地域または寒冷地では湿地は冬場に休眠状態になるが、一方、地中海では真夏の暑い時期に成長が遅くなる。1回の出来事による影響は一時的なものにとどまる可能性が高いが、度重なり常在する油汚染または強引な防除活動(踏みつけ、重機の使用、汚染された底質の除去など)によって、何年にもわたる長期的な被害が生じる恐れがある。追加被害の危険を冒すことなく塩性湿地を洗浄することは難しい。そのため、湿地を自然浄化させるため、そのままにしておくよう推奨されることが多い。しかし、もし草木の燃焼または刈り取りを検討するのであれば、草木が枝枯れした後に実施するべきである。植物の根または球根が深刻な油汚染もしくは防除作業中の過度な締固めによって損傷していなければ、一般的には季節の経過と共に再生することが期待できるだろう。



▲ 図7: 岩礁海岸線は一般的に風や波にさらされているため、迅速に自浄作用が働く可能性がある。かさガイを含む生物相は油による被害を受けるかもしれない。生物相の大量死は、それがなければ餌になることで抑制されていた日和見植物(藻類や海藻)の大量発生につながりかねない。長い時間をかけて種は回復し、均衡が取り戻される。



▲ 図8: 軟質堆積物は、動きの少ない遮蔽された海岸線に沿って見られることが多く、通常生物学的生産性が高い。こうした場所の防除作業は被害を広め、悪化させる可能性があるため、油で汚染された湿地の回復を自然に任せることも検討されるべきだ。断面例が示しているように、油が底質に浸透した場合、何年も残留することがある。

## マングローブ

マングローブは、熱帯および亜熱帯の遮蔽海域の辺縁に生息する耐塩性の森林である。マングローブの群生は、カニや牡蠣その他の無脊椎動物に貴重な生息環境を提供するだけでなく、魚やエビの重要な育成場にもなる。さらに、複雑な根の構造が堆積物を捉えて固定するため、海岸線の浸食を抑え、隣接した藻場やサンゴ礁に陸成層が堆積するのを最小限に抑える。

マングローブの生息場所を見れば、マングローブが油流出による被害を非常に受けやすいことが分かる。また、マングローブは油による汚染に極めて感受性が高いとも考えられており、その理由はマングローブが生育する底質によるところが大きい。マングローブは通常、密度の高い嫌気性の泥質堆積物の中に生育しており、気根に付いている小さい気孔（皮目）から供給される酸素に頼っている（図9）。油が根系に激しく侵食すれば、この酸素供給を妨げ、マングローブを死に至らしめる可能性がある。しかし、比較的自由に水の交換が可能となる隙間の多い好気性堆積物では根系は海水から酸素を取り込むため、油による窒息作用に対して高い耐性を持っている。この第2の構成要素では、油の有毒成分、中でも軽い石油精製品に含まれるものがとりわけ植物の塩類バランスを維持するシステムの働きを妨げるため、塩水に対するマングローブの耐性に影響を及ぼす。これまでの経験では、重質油による窒息作用でマングローブが失われるよりも、いくつかの洗浄剤を含む軽質製品の侵食によってマングローブが枯死する可能性の方が高く、それによって局所的に森林を喪失する場合がある。

マングローブの生態系内に生息する生物は、油の直接的な影響と長期的には生息環境の喪失の両方から打撃を受ける可能性がある。マングローブの複雑な生態系が自然に回復するには長い時間がかかるため、復元対策はそのような生息環境の回復プロセスを実際に早める力を持つものが望ましい。

## 長期的な被害

効果的な防除作業には通常、大量の油汚染の除去、汚染被害の地理的範囲の縮小と期間の短縮、そして自然回復の促進がある。しかし、防除の手法が強引だと追加被害が生じる可能性があるため、自然回復のプロセスの方が望ましい場合もある。油の毒性は時間をかけいくつもの要因によって減少することで、汚染された底質は生物の新たな成長を支えられるようになる（図10）。例えば、油は雨や潮流によって洗い流され、油の風化につれ揮発性物質の部分は蒸発し、より毒性の低い残渣油が残される。

海洋環境はこのように力強い自然回復能力を持っているため、油流出の被害は通常局所的かつ一時的であり、長期的な被害が文書に残されている例は少ない。しかし、ある特定の状況下では被害が持続することがあり、生態系の損傷は一般的に予想されるよりも長く続く可能性がある。重大な被害の長期化につながりやすい状況は油の持続性と関連しており、特に油が堆積物の中に閉じ込められ通常の風化プロセスから守られている場合に起きる。そうした例としては、湿地、磯浜、沿岸海域などに見られる遮蔽された生息環境で、特に油流出と嵐が同時



▲ 図9: マングローブは油の影響を非常に受けやすい。支柱根または呼吸根(底質から垂直に伸びている呼吸構造)が油に覆われると皮目(気孔)が塞がり、ガス交換が妨げられることにより窒息状態につながる危険性がある。

に発生した場合が想定される。湿地では浸水した高潮と結びついた乱流によって、細粒堆積物が浮遊し、自然に分散した油と接触する可能性が高い。一旦嵐が弱まれば、堆積物に取り込まれた油は湿地の底に沈む。細粒堆積物に取り込まれた油が沿岸水域に沈殿する場合も同様である。どちらの場合も、嫌気条件は油のあらゆる分解を遅くする。礫浜では、油と砂利の混合物の風化はアスファルト舗装の形成につながることもあり、それはしばらくの間続く可能性がある。超重質油または燃焼残渣などの海水よりも密度が高い油の生成物は海底に沈み、不確定な期間そのままの状態に残され、局所的に底生生物を窒息状態に置くかもしれない。

## 油流出の事後調査

トリー・キャニオン号の事故以来、大規模な事故が起きるとほとんどすべての場合、その後、油汚染の影響に関する調査研究が行われてきた。その結果、現在では油流出によって環境が受ける可能性のある影響について非常に豊富な知識が蓄えられている。このように既に十分な知識があるため、油流出が起きるたびに事後調査の実施を検討する必要はなく、適切でもない。しかし、事故の特別な状況から発生した影響の範囲、性質および期間を具体的に特定するためには、流出事後調査が必要となる場合がある。油汚染の影響の大部分は十分に把握され、予測可能なため、考えられる影響を幅広く列挙し調査するよりも、明白な被害の数量化に重点を置いた調査が重要である。海洋環境が示す変動幅の大きさから言えることは、広範囲にわたる潜在的影響についての調査は決定的な結果につながらない可能性が非常に高いということである。

汚染物質の化学分析に使用可能な技術は絶えず進化している。油の潜在的に毒性のある成分の濃度は、今では1兆分の1 (ppt, ng/kg,  $1 \times 10^{-12}$ ) のレベルまで計ることができる。被害評価調査の最も重要な目的の1つは、特に慢性的に汚染された環境で、観測された被害の経路およびその原因である特定の油汚染物質の定性的同定の2つを立証することである。これは通常ガスクロマトグラフィー質量分析法 (GC-MS) を用いて行われる。

バイオマーカーは、原油や石油製品に含まれる多環芳香族炭化水素 (PAH) に対する暴露について動物たちを検査するために日常的に用いられている。例えば、EROD (Ethoxyresorufin-O-deethylase) 活性の測定は、肝組織の酵素量を、代謝および毒素の排出に関わるものだけでなく、ガン性腫瘍の成長に関わるものについても検知する。この技術は精度が高く、体内負荷量が検出できないレベルでもPAH暴露を示すことができるため、被害の危険性を早期に警告することができる。しかし、この酵素の活性レベルの変動は、油とは関係ないが類似した有毒物質の存在など他のストレス要因も示す。また、活性レベルは動物の年齢や生殖状態とともに体温の変化も反映する。そのため、調査に当たってはこうした混乱を招く可能性がある要因を考慮することが重要である。

調査の優先度はいくつかの要因によって決められる。第一の要因は、何を基準に影響を判定するのかである。流出前のデータがある場合はそれを参照するのか、被害エリア外の参照地点に生息する同等の種、群落または生態系と比較するのか、それと



図10a: 湿地に立ち入った過度の洗浄作業は油による被害に損害を上乗せした。



図10b: 洗浄から7週間後の湿地には新しい成長の兆しが見られる。



図10c: 22か月後、日和見種ではあるが、湿地の全面が緑に覆われた。



図10d: 3年後、湿地は完全に種の多様性を取り戻した。

▲ 図10: 被害を受けた湿地の自然回復。

も、海鳥または貝類の死亡率などのはっきりした被害を示す特徴によって被害の回復を監視するのである。プランクトンは調査の対象には向いていない。臨床検査も現場調査も油に暴露したことによる死亡と致死に近い影響を立証しているが、プランクトンの変動幅が非常に大きいため、流出前と流出後の状況比較は信頼度が低い。その他の考慮すべき要因には、被害エリアの地理的範囲、汚染の程度とそれに関連する暴露レベル（濃度および期間）、そして被害を受けた資源の重要度（希少性や生態学上の機能など）がある。最終的には、調査の実施が現実的に実行可能かどうかについて検討する必要がある。実行可能性は、財政支援、調査現場へのアクセスという単純な問題、または調査期間中の現場に混乱が生じる危険性に関連することがある。流出事後調査の計画および実施に関する詳しいガイダンスは、別紙資料「海上流出油のサンプリングと監視」で参照できる。

## 回復 (Restoration)、復元 (Reinstatement) および修復 (Remediation)

回復は復元もしくは修復とも言うが、被害を受けた環境を自然回復のプロセスに任せるだけよりも早く正常に機能する状態に戻すために行う措置の実施プロセスを意味する。これらの用語が環境被害との関連で用いられる場合、多くは同じ意味である。しかし、米国と欧州連合の環境法を1992年に採択された油濁損害補償の国際制度である民事責任条約および基金条約 (CLC & FC) と比較すると、用語の解釈が異なる場合がある。1992 Fund Claims Manual<sup>(\*\*\*)</sup>に記載されているガイダンスによると、国際制度において、復元 (reinstatement) 措置には他の天然資源にも経済資源にも悪影響を及ぼすことなく自然回復を大いに促進できる現実的な見込みがなくてはならない。また、復元措置は損害の範囲および期間、そして得られる可能性が高い利益に見合うものでもなければならぬ。損害は海洋環境の機能障害と考えられており、ここで言う機能障害は油流出によって生じた機能異常または生物群集における生物の不在とされている。

1990年米国油濁法 (OPA90) に基づき公布された米国の法令も自然回復を回復 (restoration) の極めて重要な構成要素として認めている。一次的回復と補完的回復という2つの概念を導入している。補完的回復は環境の回復期間中に「喪失」した環境のもつ機能を補おうとするものである。一方、一次的回復は復元の速度を速めるために最小限の手を加える行動をいい、国際制度の下では復元に相当する。2004年EU環境責任指令 (ELD) にも、修復 (remediation) という観点からこうした概念が含まれている。しかし、国際制度は補完的回復または修復という概念を認めていない。

策を講じなければ回復が比較的遅い状況では特に、防除作業の後に、被害を受けた資源を回復し自然回復を推進するため、積極的な措置をさらに講じることが妥当な場合がある。油流出後のそのような着手方法の例としては、塩性湿地の改

\*\*<sup>\*</sup> <http://www.iopcfund.org/publications.htm>

植またはマングローブの植林がある(図11)。一旦新しい植物が根付けば、他の種類の生物が戻り、その一帯が浸食される危険性は最小限に抑えられる。

動物相にとって有意義な復元戦略を設計することは、はるかに大変な課題である。被害を受けた生息環境を保護するとともに生態系の回復を促進するには、例えば、人間の立ち入りや活動を制限する、漁業規制の設置によってイカナゴやツノメドリのような希少な食料源の捕獲競争を減らす、または亀が利用する砂浜を営巣期間中は閉鎖するなどの方法が可能である。場合によっては、油に汚染されていない近隣の場所に生息する自然繁殖個体群を例えば捕食動物を制御することによって保護することが、被害エリアで再びコロニーを形成するための貯蔵庫とする目的から正当化される場合がある。しかし、隣接する個体群が汚染エリアに再びコロニーを形成する能力は、生物学、生態学および環境の視点から見た多くの複雑な要因に左右される可能性が高い。

実際には、海洋環境が複雑であることから、生態系の被害を人工的に修復できる範囲には限界があると言える。ほとんどの場



▲ 図11:1本1本の苗木の植樹から形成された格子状のマングローブ地域。

合、自然回復の方が相対的に速く、復元措置の結果が自然回復より速いことは極めてまれである。

## 重要なポイント

- 海洋環境には非常に複雑な生態系が幅広く存在しており、個体数および多様性の大きな変動は生態系が正常に機能している特徴の1つである。
- 海洋環境は油流出だけでなく自然現象によって引き起こされる激しい変動からも自然に回復する力強い能力を持っている。
- 油流出による環境被害の主要な構成要素は窒息作用と毒性であるが、被害の重度は、流出した油の種類や油が分散する速さと油汚染の影響を受けやすい資源が存在している場所との相関に大きく左右される。
- 最も脆弱な生物は海面または海岸線に生息する生物である。
- 塩性湿地やマングローブは海岸線の生息環境の中で最も油に対する感受性が高い。
- 海鳥は特に危険にさらされている。種によっては、特にペンギンのように洗浄にうまく適応するものもいるが、その他の種は洗浄後に野生に戻してもあまり長く生き延びることができず、また繁殖に成功することが難しいものもいる。
- 短期的には重大な被害が発生することがあるが、被害が長引くことは大規模事故の後でもまれである。長期的被害が観測された例は地理的に離れ、油が蓄積したままでいられる条件のある場所に限られている。
- 対応作業の効果的な計画および実施によって被害を緩和するとともに油の除去による回復への第一歩を踏み出すことになる。
- よく設計された復元措置は時に自然回復プロセスを促進することがある。

## ITOPF技術資料

- 1 海上流出油の空中監視
- 2 海上流出油の結末
- 3 油汚染対応におけるオイルフェンスの使用
- 4 流出油処理における油処理剤の使用
- 5 油汚染対応における油回収機の使用
- 6 海岸線における油の確認
- 7 海岸線における油の清掃
- 8 油流出対応における油吸着材の使用
- 9 油とゴミの処分
- 10 油流出対応における統率、指揮、管理
- 11 漁業及び養殖業に対する油汚染の影響
- 12 社会・経済活動に対する油汚染の影響
- 13 環境に対する油汚染の影響
- 14 海上流出油のサンプリングと監視
- 15 油汚染に関する求償の準備と請求
- 16 海上油流出に対する緊急時対応計画の策定
- 17 海上の化学物質事故への対応



ITOPFは、油や化学物質、その他危険物質の海洋流出に対する効果的な対応の推進を目的として、世界中の船主や保険業者のために設立された非営利団体です。技術サービスには、緊急時対応、清掃技術におけるアドバイス、公害損害評価、流出油対応計画に対するサポートならびにトレーニングの項目が含まれます。ITOPFは海洋油汚染における総合的な情報ソースで、本資料はITOPFの技術スタッフの経験に基づく文書シリーズの一部です。本資料内の情報はITOPFから事前に許可を受けた場合にのみ複製可能です。詳細は下記までご連絡ください。



### THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION LIMITED

1 Oliver's Yard, 55 City Road, London EC1Y 1HQ, United Kingdom

Tel: +44 (0)20 7566 6999 Eメール: central@itopf.com

Fax: +44 (0)20 7566 6950 Web: www.itopf.com

24時間受付: +44 (0)7623 984 606



石油連盟

<http://www.paj.gr.jp/>

〒100-0004東京都千代田区大手町1-3-2 (経団連会館)

Tel: 03-5218-2306 (油濁対策室) Fax: 03-5218-2320

Eメール: pajosr@sekiren.gr.jp