

# 海上流出油の結末

ITOPF技術資料

2





# 序

海中に流出した油は、多くの物理的・化学的变化を受けるが、その中には海面から油が除去される結果になる変化もあれば、逆に油が持続する結果となる変化もある。流出油が海洋環境の中でどのような結末を迎えるかは、流出量、流出当初の油の物理的・化学的特性、気候と海の支配的な条件、油が海に留まるか又は海岸に打ち上げられるかといった要因に左右される。

これらの要因がどのような経過で油の性質、組成、挙動を変えていくのか、また、これらの要因がどのように相互作用してそれらを変えていくのかを理解することは、油流出対応のあらゆる面で不可欠である。例えば、油が自然に消失して脆弱な資源のある場所まで到達せず、浄化作業は不要であると確信を持って予測できる場合もある。積極的対応が求められる場合は、油の種類と予想される挙動によって、最も効果的であると考えられる対応方法が決まる。

本技術資料では、流出油に働く様々な自然作用、つまり「風化」という総称で知られている変化の複合的効果を説明する。油が海洋環境中で持続するか否かを定める要因を、対応作業への影響と共に検討する。海洋環境中に流出した油の結末は、対応のあらゆる面に重要な影響を及ぼす。したがって、本資料は、この技術資料シリーズの他の資料と併せて読む必要がある。

## 油の性状

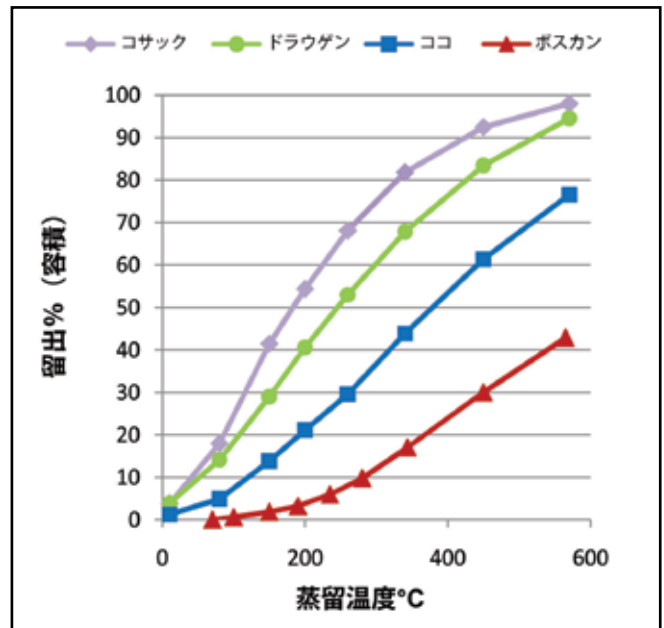
原油はその生産地により物理的・化学的性状が大きく異なる。一方、多くの精製品は、どの原油から製造されたかにかかわらず、明確に定まった性状を持つ傾向がある。中間燃料油及び重油も、精製工程の残留分が軽質の精製品に様々な割合で含まれており、性状は非常に多様である。

海上に流出した油の挙動と持続性に影響を及ぼす主な物理性状は、比重、蒸留特性、蒸気圧、粘度、流動点である。これらはいずれも揮発成分の割合、アスファルテン、レジン、ワックスの含有量など、化学的組成によって決まる。

**油の比重**つまり相対密度は、純水と比較した場合の密度であり、純水の比重は1である。通常、海水の比重は約1.025で、大半の油は海水より密度が小さい。つまり軽い。原油と石油製品の比重を表すためにAPI比重（米国石油協会比重尺度）が一般的に使用されており、次の式で表される。

$$°API = \frac{141.5}{\text{比重}} - 131.5$$

油が浮くかどうかの判断の他に、油の他の性状についても比重から一般的な手がかりが得られる。例えば、比重が小さい（API比重が大きい）油は、揮発成分を多く含み粘度が低い傾向がある。

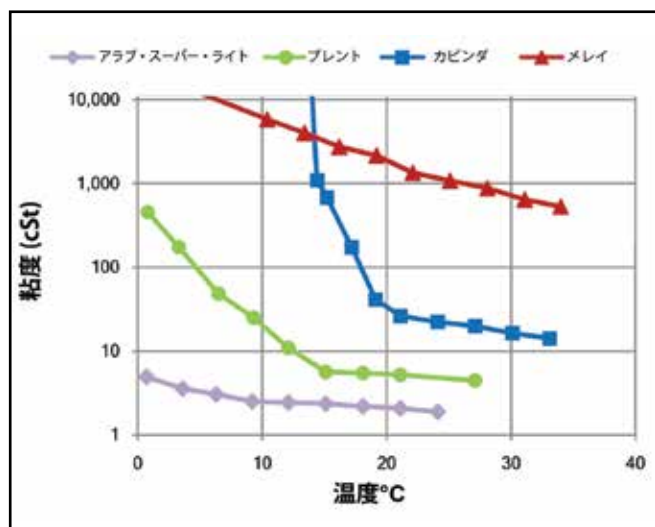


▲ 図1：4種類の原油の蒸留曲線図に示した。最高温度を超過しても残存する油は、主として残留油である。原油評価書によるデータ。

油の**蒸留特性**は揮発性を表している。蒸留工程において、油の温度を上昇させると、様々な成分が次々とそれぞれの沸点に到達して蒸発する。次に、温度を下げるとそれが凝縮する。蒸留特性は、特定の温度範囲の中で留出する成分の試料油に対する割合として表される（図1）。一部の油は、瀝青、ワックス、又はアスファルト残留分を含有している。これらは高温でも容易に留出せず、海洋環境において長期間持続することが予想される（例：図1のボスカン原油）。

	グループ 1	グループ 2	グループ 3	グループ 4
	アラビアン・スーパー・ライト	ブレント	カビンダ	メレイ
産地	サウジアラビア	英国	アンゴラ	ベネズエラ
API比重	50.7	37.9	32.5	17.3
15°Cでの比重	0.79	0.83	0.86	0.96
ワックス含有量	12%	不明	10.4%	10%
アスファルテン	7%	0.5	0.16	9%
流動点	-39°C	-3°C	12°C	-21°C

▲ 表1：4種類の代表的な原油の物理特性 色によるグループ分けは、表2（8ページ）の分類に対応している。



▲ 図2：表1に示した4種類の原油の粘度/温度関係

蒸気圧も油の揮発性指標の一つである。通常、100°F (37.8°C) で測定したリード蒸気圧が用いられる。蒸気圧が3kPa (23mmHg) より大きければ、大抵の条件下で蒸発が起きると考えられる。100kPa (790mmHg) を超えると、その物質は気体としての挙動を示す。例えば、ガソリンの蒸気圧は40～80kPa (300～600mmHg) である。コサック原油はリード蒸気圧が44kPaで、低温で留出する成分の割合が大きく、揮発性が非常に高い。一方、ボスカン原油はリード蒸気圧がわずかに1.7kPaで、揮発性はコサック原油よりもかなり低い。

油の**粘度**は流動抵抗である。高粘度油は低粘度油より流動しにくい。すべての油は温度が下がれば粘度が高くなる（つまり流動しにくくなる）が、中には組成の影響を大きく受けるものもある。図2に4種類の原油の温度－粘度関係を示す。本資料では動粘度\* の単位としてセンチストークス (cSt = mm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>) を用いる。

**流動点**は油が流動する最低温度であり、含有するワックス及びアスファルテン量の関数である。油を**冷却**すると、曇り点と呼ばれる温度に達したときにワックス成分が結晶構造を形成し始める。結晶の形成によって油の流動がますます阻害される。さらに温度を下げると流動点に



▲ 図3：流動点以下の温度の海に流出した油は、半固体の断片を形成する。この写真は、28°Cの海水中の流動点+33°Cのナイール・ブレンド原油を示す。このような油は持続性が高く、長距離を移動する可能性がある。

達すると流動しなくなり、油は液体から半固体に変化する（図3）。この挙動の例が図2のカビンダ原油で示されている。この原油は30°C以下に冷却すると粘度が徐々に上がり始めるが、20°Cの曇り点以下になると急激に粘度を増し始め、流動点 (12°C) に達すると流動しないほど粘度が高くなる。

## 風化の過程

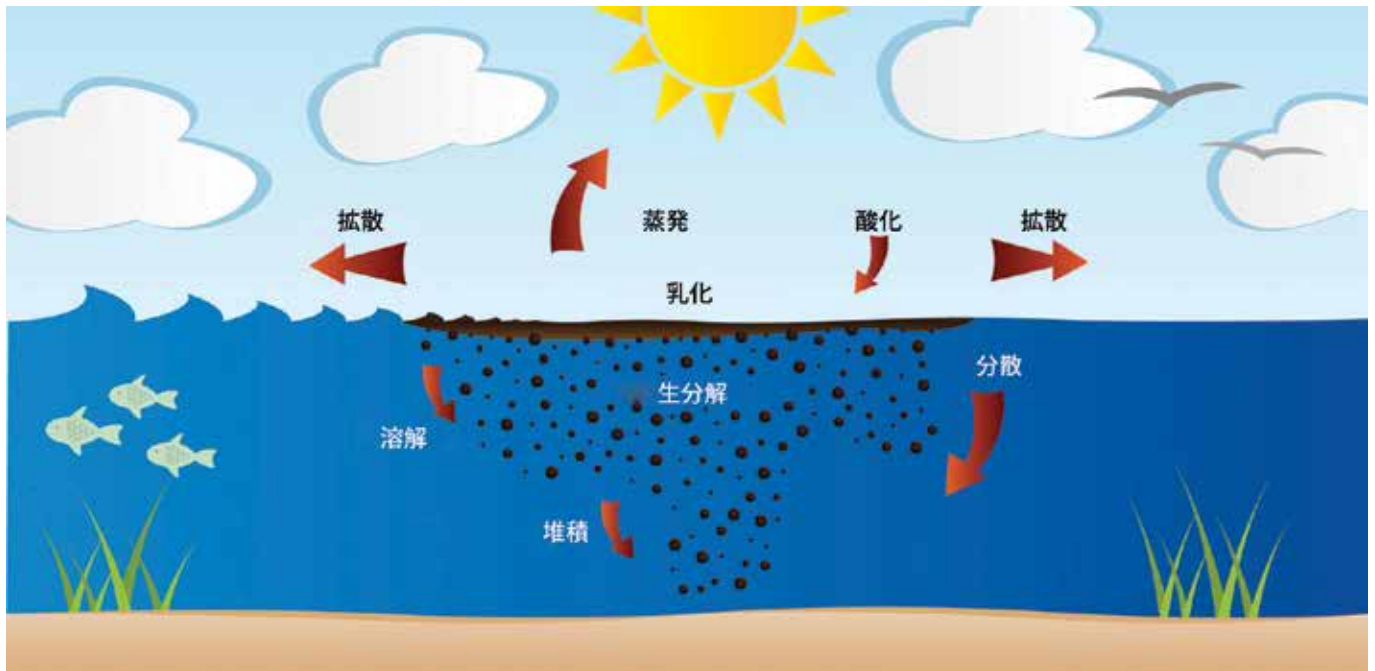
以下の各項目で論じる個々の過程は、複合的に作用して流出油の風化をもたらす（図4）。しかし、各過程の相対的重要性は時間と共に変化する。この様子を穏やかな海洋条件における代表的な中質原油の流出を例として図6に示す。これらのプロセスの他に、別資料「海上流出油の空中監視」で説明されているように、油膜は風と海流の方向に漂流する。

## 拡散

油は流出直後から海面上で拡散を始める。拡散の速度は油の粘度と流出量に大きく左右される。流動性の高い低粘度の油は、高粘度の油に比べ拡散速度が非常に速い。液体状の油は、最初はまとまりのある油膜として拡散するが、間もなく分裂を始める。油が拡散して厚さが減少するにつれて、外観は、黒又は暗褐色の厚さのある油の断片から外縁部に玉虫色と銀色のぎらつきのある油膜に変わる（図5）。半固体つまり粘度の高い油は、薄い層となって拡散するのではなく、幾つかの断片に分解する。その断片は別々に移動し、時には数センチの厚さを持つ場合もある。外洋では、風の循環パターンによって油が幅の狭い帯つまり「畝」となる傾向がある。これは風向に沿って長く伸びる。そして、時間が経過するにつれて、油膜の移動の決定に関して油の性状が重要でなくなる。

\* 動粘度＝絶対粘度÷密度。絶対粘度の測定には、センチポワズ (cP)、又はSI系のミリパスカル/秒 (mPa s) を単位として用いる。





▲ 図4：海上の油に作用する風化過程。油が海岸に漂着した場合には、これらの過程の一部は起らない。

油の拡散又は断片化の速度は、波、乱流、潮流、海流の影響も受ける。これらの複合力が強いほど、拡散又は断片化の進行が早くなる。油がわずか数時間で数平方キロメートルもの広さに拡散したり数日間で数百平方キロメートルにまで拡散したりと、多くの例がある。流出油が低粘度油で量も少ない場合を除けば、拡散は一様ではなく、油層の厚さは1ミクロン未満から数ミリメートル、あるいはそれ以上まで多様である。

## 蒸発

油の揮発性が高い成分は、大気中へと蒸発する。蒸発率は気温と風速によって決まる。一般的に、沸点が200°C未満の成分は、穏やかな気象条件において24時間以内に蒸発する。油の蒸留特性から明らかなように、低沸点成分の割合が大きいほど蒸発の度合いが大きい。例えば、図1において、コサック原油は55%が沸点200°C未満の成分

で構成され、ボスカン原油ではこのような成分がわずか4%である。

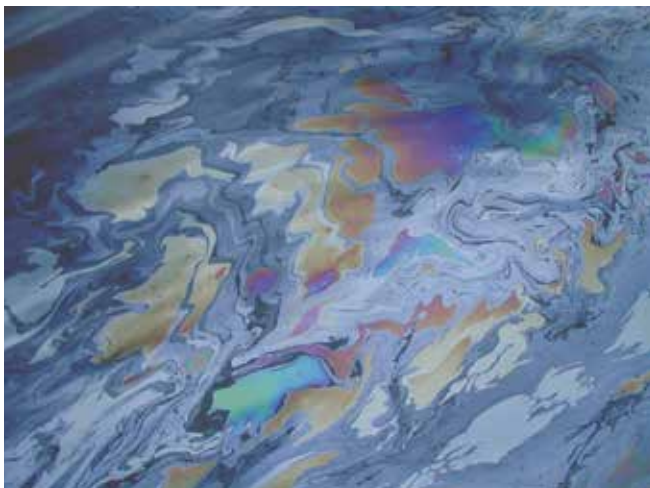
流出の初期における拡散速度も蒸発率に影響を及ぼす。油の表面積が大きいほど軽質成分が蒸発しやすいためである。波がやや高い海面で風速が大きく気温が高い場合も、蒸発が促進される。

蒸発後に残る油の残留分は、密度と粘度が増しているため、その後の風化過程と浄化方法に影響を与える。

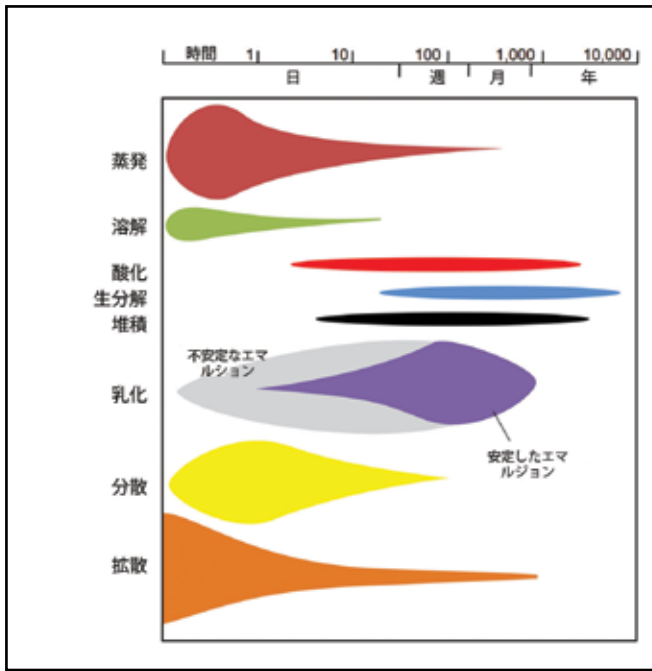
灯油やガソリン等の精製品の流出では、わずか数時間で完全に蒸発する場合がある。また、コサック原油等の軽質原油は、1日目に容積の50%以上が蒸発する場合がある。そのような極度に揮発性の高い油が閉ざされた領域に流出した場合、火災と爆発のリスクや人の健康上の危険が生じる場合がある。対照的に、重油はほとんど蒸発しないため、爆発リスクは最小限度に抑えられる。それでも、重油は火災を起こす危険性がある。静穏な条件下で溜まっている油の中でゴミに点火すると、ゴミが激しい重油火災を持続させる灯芯になる可能性がある。

## 分散

分散速度は油の性質と海の状態によって大きく異なり、低粘度油が碎波の海に流出した場合に最も早く分散が進む。海面に波と乱流があると、油膜の全部又は一部が様々な大きさの油滴に分解され、水中の上部の層に混ざり込む。比較的小さな油滴は水中を浮遊するが、より大きな油滴は海面に戻って他の油滴と融合して油膜を再形成するか、非常に薄い膜となって拡散する。直径約70μmより小さい油滴は、海面へ上昇する速度が海の乱流と釣り合うため、水中に浮遊した状態で留まる。この分散した油は、より大量の海水と混ざり、結果として油の濃度



▲ 図5：中質又は軽質の油が妨げられずに拡散すると、最終的に非常に薄い油膜が形成される。この油膜は、玉虫色（虹色）および銀色のきらつきを呈するが、急速に消失する。



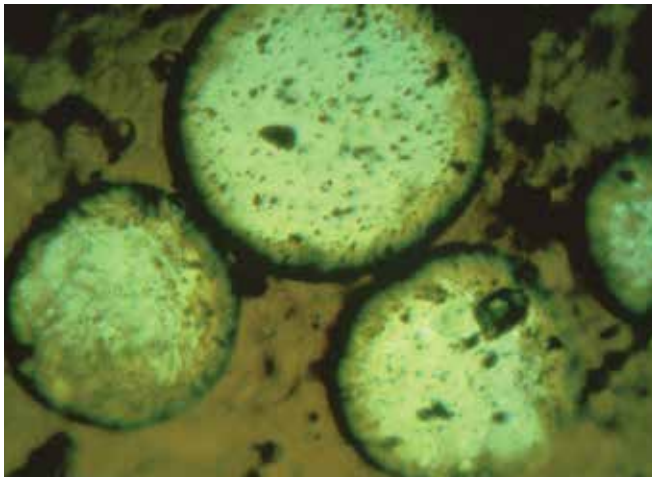
▲ 図6：典型的なグループ2と3の原油が流出した場合の結末を表す概略図。時間の経過に伴う各風化プロセスの相対的重要性の変化を示す。帯の幅がその過程の重要性を示す（SINTEF提供の図をもとに作成）。

が急速かつ大幅に低下する。油が分散して表面積が大きくなると、生分解、溶解、堆積等の過程も促進される。

流体の状態を維持して他の風化過程によって阻害されずに拡散する油は、穏やかな海洋条件において数日以内に完全に分散する場合がある。油処理剤の使用によって、この自然に起こる過程の進行を加速することができる。逆に、高粘度油は水面上で厚い断片を形成する傾向があり、こうなると油処理剤を使用しても分散する傾向をほとんど示さない。

## 乳化

多くの油は水を取り込んで油中水型エマルジョンを形成する。これにより、汚染物質の容積が最大で5倍に増え



▲ 図7：油中水型エマルジョンの超拡大図（×1,000）。油に囲まれた個々の水滴を示す。

る場合がある。エマルジョンが最も形成されやすい油は、流出したときにニッケルとバナジウムの合計濃度が15ppmを超えるか、アスファルテン含有率が0.5%を超える油である。これらの化合物の存在と、一般的な場合でビューホート風力3（風速3～5m/秒、すなわち7～10ノット）を超える海の状態によって、エマルジョンの形成速度が決まる。重油等の高粘度油は、高流動性油と比較すると水を取り込む速度が遅くなる傾向がある。エマルジョンの形成が進むにつれて、波の中で油が動いて油の中に取り込まれた水滴が小さくなり（図7）、エマルジョンの粘度が次第に大きくなる。同時に、アスファルテン化合物が油から分離して水滴を覆うことにより、エマルジョンの安定性が増す。取り込まれた水の量が増えると、エマルジョンの密度が海水の密度に近づくが、固体粒子が添加されない限り、海水の密度を超えることはない。安定したエマルジョンは水分含有率が70～80%にまで達する場合がある。また、多くの場合は半固体になり、濃い赤と茶色、橙黄色、又は黄色を示す（図8）。このようなエマルジョンは持続性が高く、乳化した状態をいつまでも維持する場合がある。安定性の低いエマルジョンは、穏やかな天候条件で、あるいは海岸に打ち上げられると、日光によって暖められて油と水に分離する場合がある。

油中水型エマルジョンの形成は、他の風化の進行速度を遅くし、軽質及び中質原油が海面及び海岸線で持続する最大の原因になる。安定した油中水型エマルジョンは高粘度油と同様の挙動を示すが、組成の違いのために効果的な対応方法の選択に影響を与える。

## 溶解

油が溶解する速度と程度は、組成、拡散、水温、乱流、分散度によって異なる。原油の重質分は海水にはほとんど溶けない。一方、軽質分、特にベンゼンやトルエン等の芳香族炭化水素は、多少溶解する。しかし、これらの化合物は最も揮発性が高いものでもあり、蒸発によって急速に失われるが、一般的には溶解の10～1,000倍の速度で蒸発する。その結果、海水に



▲ 図8：典型的な赤又は茶色のエマルジョン化した重油の回収。分析により、エマルジョンの水分含有量は50%にも達することが分かった。



溶解した炭化水素の濃度が1ppmを超えることは稀であり、海面からの油の除去に対する溶解の影響はあまり大きくない。

## 光酸化

炭化水素は酸素と反応して、溶解性の物質又は持続性のタールを生成することがある。酸化は日光によって促進される。酸化は流出期間中常に行われるが、酸化が流出油の消失に及ぼす効果は、他の風化過程の効果に比べると小さい。強い日光の下でさえ、薄い油膜の分解は緩慢にしか進まず、通常1日に0.1%未満である。非常に粘度の高い油の厚い層又は油中水型エマルジョンは、分解するのではなく、むしろ酸化して持続性の残留物に変化する傾向がある。高分子化合物の形成によって表面保護層が作られるためである。これは海岸に漂着したタールボールで見ることができる。通常、タールボールは酸化した油と堆積物粒子による固い外殻と、柔らかく風化の進んでいない内容物とで構成されている。

## 堆積と沈降

分散した油滴は、堆積物粒子と水中に浮遊する有機物との相互作用で十分に密度を増し、ゆっくりと海底に沈降する。浅い沿岸域及び河口や入り江の水域には、しばしば浮遊固形物が存在し、分散した油滴と結合する場合がある。それによって、油を含んだ粒子の堆積に適した条件が作られる。汽水域では、河川からの淡水が海水の塩分濃度を下げて水の比重が下がるため、浮遊性の油滴が沈降する場合がある。油はプランクトン様生物に摂取される場合もある。摂取された油は排泄物の固まりの中に混ざって排出され、海底に沈む。嵐の間に油が多数の浮遊固形物と共に運び去られ、海底に沈む場合も稀にある。同様に、風に吹かれた砂が浮遊油の上部に溜まって油が沈む場合もある。

大半の油は比重が低いため、より高密度の物質との相互作用で付着しない限り浮遊し続ける。しかし、一部の重質原油、大半の重油、油中水型エマルジョンは、海水に近い比重を持つため、堆積物とのわずかな相互作用でも十分に沈降の原因となり得る。ごく一部の残渣油は海水より大きな比重 (>1.025) を持つため、流出すると沈降する。

火災後に沈降する油がある。火災によって比較的軽い成分が失われるうえに、火災に伴って高温が発生することによって重質の熱分解物質が生成するためである。これは、現場での意図的な燃焼が対応方法として検討されている場合には、考慮すべき問題である。

荒海では、高密度油が水をかぶって長時間海面の直下に留まっている場合があり、上空からの油の監視が非常に難しくなる。この現象は油の沈降と混同される場合もあるが、海況が落ち着くと、油は再浮上する。

堆積は海洋環境に流出した油の蓄積をもたらす主要な長期的過程の一つである。しかし、海岸近くの浅い水域



▲ 図9：沈降した重油の人力による回収。

において主として海岸線との相互作用によって生じる場合を除けば、大量の油の沈降が見られることは稀である(図9)。

## 海岸線との相互作用

漂着油と海岸線との相互作用は、主に海岸線が受けるエネルギーの大きさと海岸線の基層の性質によって決まる。

堆積物との相互作用によって油が沈降するのは、ほとんどの場合、砂浜に油が漂着した結果である。露出した砂浜では、堆積物の蓄積(増大)と浸食の季節的循環によって油層の埋没と露出が繰り返される。露出の少ない砂浜でも、漂着した油が風に吹かれた砂によって覆われる場合がある。砂と混ざり合った油は、潮の干満や嵐によって外浜水域に引き戻されたときに沈降する。また、砂と油の混合物が砂浜から外浜水域へ洗い流され、粗い砂粒子が離されて、油が海面に再び浮くようになるという反復循環が起きることも少なくない。この油は再び浜に漂着して砂と混じり合い、この循環が繰り返される。砂浜から発せられるぎらつきは、この過程が生じていることを示している場合がある。

海岸の非常に細かい(<4ミクロン) 鉱物粒子(細粒)と油の相互作用によって、鉱物又は粘土と油の凝集物が形成される。油の粘度によっては、水の十分な運動があれば油滴が形成され、静電気的作用によって細粒が付着する場合がある。油滴の周囲に細粒が付着すると、油滴同士が合体してより大きな油滴になることができず、油滴が砂や小石等のより大きな堆積物基層に付着することもできない。こうしてできた安定した凝集物は、ほぼ中立的浮遊性を有して十分に小さいため、潮の干満や嵐の結果として海水が砂浜を洗うときに、乱流によって水中に引き込まれてそのまま浮遊する。このような凝集物はやがて海岸流に乗って広く分散し、いずれは遮浪(低エネルギー)海岸から油の多くが除去されることになる。遮浪海岸は、堆積物の浸食などの他の過程が生じるには波の作用と海流が弱すぎる場所である。

遮浪海岸には泥状堆積物と湿地が多く見られる。多くの状況において、油はこれらの細かい堆積物中に浸透せず、表面に留まる。しかし、「生物擾乱」つまり穿孔動物による堆積物の再加工によって、低粘度の油が虫食い穴、植物の茎等を伝って下降し、堆積物中にわずかに浸透する場合もある。また、激しい嵐の際に、細かい泥の粒子が水中で浮遊して油と混ざり合うことにより、油が細粒堆積物の中に取り込まれる場合もある。穏やかな条件になると、泥が安定して油は堆積物の中に閉じ込められる。このような遮浪地域では、堆積物は長期間乱されずに留まる場合がある。堆積物の中は酸素レベルが低いため、生分解はほとんど起きない。

遮浪性の砂利又は小石の海岸では、浄化作業で除去されなかった高粘度油が「アスファルト舗装」のような状態を形成する場合がある。これは主として表面の油層が酸化した結果である(図10)。浮遊油は、このような開放性の基層に比較的容易に浸透した後、基層自体によって保護されて、海やその他の風化過程によって除去されることがなくなる。この「アスファルト舗装」の状態は、平穩に保たれれば数十年間持続することがある。

## 生分解

海水には油の化合物を代謝できる多様な海洋微生物が含まれている。バクテリア、カビ、イースト、菌類、単細胞藻類、原生動物等の海洋微生物は、油を炭素源としてエネルギーを作るための材料として利用することができる。これらの生物は世界の海洋に広く分布しているが、油が自然に湧き出している場所、あるいは慢性的に汚染されている沿岸水域に特に多い。慢性的に汚染されている水域は、概して都市中心部に近く、産業廃水や未処理の下水が流入している。

生分解の速度と程度に影響を及ぼす主な要因は、油の特性、酸素と栄養分の有無(主として窒素とリンの化合



▲ 図10：実験の一環として、原油の流出後、汚染された海岸の一部地域がそのまま放置された。この油の断片は約1㎡であり、15年以上経過後もアスファルト舗装の状態が残っている。

物)、温度である。炭化水素が分解されると多くの中間化合物が生成されるが、生分解の最終生成物は二酸化炭素と水である。

この過程に関与する微生物は、その種類毎に分解する炭化水素のグループが決まっている。したがって、分解が継続するためには多様な種類の微生物と一緒に又は連続的に作用する必要がある。分解が進むにつれて、複雑な微生物の共同体が生成される。海岸から離れた外洋では、生分解に必要な微生物の存在は比較的少数であるが、油があると急速に増殖し、栄養素又は酸素が不足してそれ以上進行できなくなるまで分解が続く。さらに、微生物は原油に含まれる化合物の多くを分解することができるが、一部の大型で複雑な分子は分解耐性がある。このような残留物に含まれる化合物は、油に黒い色を与えるものが多い。

生分解の速度を速めるための市販製品があるが、このような物質の効果には疑問がある。特に沿岸水域では栄養素の供給不足は考えられず、酸素濃度や海水温を上昇させるためにできる事はほとんどないからである。

微生物は海中に生息し、海水から酸素と必須の栄養素を取り入れる。したがって、生分解は油水界面でのみ起こる。海上では、自然分散又は化学分散のいずれの結果であるにしろ、油滴の形成によって生物学的活動が行われる境界領域が増え、したがって生分解が促進される。一方、海岸線の厚い層あるいは高潮線より上に漂着した油は、表面積が小さく、海水との接触が非常に限定される。このような条件下では、生分解の進行は極めて緩慢になる。したがって、油は除去されない限り長い年月留まることになる。

生分解に影響を与える様々な要因のために、油が除去される速度を予測することは困難である。大量に蓄積した油が生分解によって除去されないことは明らかであるものの、生分解は潮や風による海水の動きが頻繁に生ずる海岸線から油の最後の痕跡を自然に消し去る長期的なメカニズムの一つである。

## 複合的過程

これまでに説明してきた過程の複合的効果を図13に示す。油流出の直後からすべての過程が進行し始める。しかし、図6に示すように、各過程の相対的な重要性は時間と共に変化する。拡散、蒸発、分散、乳化、溶解は、流出の初期段階において最も重要であり、光酸化、堆積、生分解は、油の最終結末を決める長期のプロセスである。分散と乳化は競合する過程である。分散は海面から油を取り除くが、乳化は汚染物質の量を増やして持続させる。油が分散するか乳化するかを決定する要因には、排出条件(流出の速度と量、海面排出か海中排出か等)、環境条件(温度、海面の状態、海流等)、油の物理的・化学的性状等がある。



## グループ1の油

- A: API比重 > 45 (比重 < 0.8)  
 B: 流動点 °C  
 C: 粘度 @ 10~20 C: 3 CSt 未満  
 D: 200°C未満での留出%: 50%超  
 E: 370°C超での沸騰%: 20 ないし 0%

	A	B	C	D	E
Asgard	49	-28	2 @ 10°C	58	14
Arabian Super Light	51	-39	2 @ 20°C		
Cossack	48	-18	2 @ 20°C	51	18
Curlew	47	-13	2 @ 20°C	57	17
F3 Condensate	54	<-63	1 @ 10°C	81	0
Gippsland	52	-13	1.5 @ 20°C	63	8
Hidra	52	-62	2.5 @ 10°C	60	11
Terengganu condensate	73	-36	0.5 @ 20°C	>95	0
Wollybutt	49	-53	2 @ 20°C	55	4
ガソリン	58		0.5 @ 15°C	100	0
灯油	45	-55	2 @ 15°C	50	0
ナフサ	55		0.5 @ 15°C	100	0

## グループ2の油

- A: API比重 35 ~ 45 (比重 0.8~0.85)  
 B: 流動点 °C  
 C: 粘度 @ 10~20°C: 4 Cst ~ 半固体  
 D: 200°C未満での留出%: 20 ~ 50%  
 E: 370°C超での留出%: 15 ~ 50%

### 低流動点 <6°C

	A	B	C	D	E
Arabian Extra Light	38	-30	3 @ 15°C	26	39
Azeri	37	-3	8 @ 20°C	29	46
Brent	38	-3	7 @ 10°C	37	33
Draugen	40	-15	4 @ 20°C	37	32
Dukhan	41	-49	9 @ 15°C	36	33
Liverpool Bay	45	-21	4 @ 20°C	42	28
Sokol (Sakhalin)	37	-27	4 @ 20°C	45	21
Rio Negro	35	-5	23 @ 10°C	29	41
Umm Shaif	37	-24	10 @ 10°C	34	31
Zakum	40	-24	6 @ 10°C	36	33
Marine Gas oil (MGO)	37	-3	5 @ 15°C		

### 高流動点 >5°C

	A	B	C	D	E
Amna	36	19	半固体	25	30
Beatrice	38	18	32 @ 15°C	25	35
Bintulu	37	19	半固体	24	34
Escravos	34	10	9 @ 15°C	35	15
Sarir	38	24	半固体	24	39
Statfjord	40	6	7 @ 10°C	38	32

注：HPP油は、周囲温度がその流動点より高い場合に限り、グループ2の挙動を示す。この流動点以下ではグループ4として扱う。

▲ 表2：API比重（米国石油協会比重）に従って分類した油の例。各グループの色は、表1及び図1、2、12、13と共通している。一般的に、グループ番号が大きいほど流出時の持続性が大きい。

## グループ3の油

- A: API比重 17.5~35 (比重 0.85~0.95)  
 B: 流動点 °C  
 C: 粘度 @ 10~20°C: 8 CSt ~ 半固体  
 D: 200°C未満での留出%: 10 ~ 35%  
 E: 370°C超での留出%: 30 ~ 65%

### 低流動点 <6°C

	A	B	C	D	E
Alaska North Slope	28	-18	32 @ 15°C	32	41
Arabian Heavy	28	-40	55 @ 15°C	21	56
Arabian Medium	30	-21	25 @ 15°C	22	51
Arabian Light	33	-40	14 @ 15°C	25	45
Bonny Light	35	-11	25 @ 15°C	26	30
Iranian Heavy	31	-36	25 @ 15°C	24	48
Iranian Light	34	-32	15 @ 15°C	26	43
Khafji	28	-57	80 @ 15°C	21	55
Sirri	33	-12	18 @ 10°C	32	38
Thunder Horse	35	-27	10 @ 10°C	32	39
Tia Juana Light	32	-42	500 @ 15°C	24	45
Troll	33	-9	14 @ 10°C	24	35
IFO 180	18-20	10-30	1,500-3,000 @ 15°C		-

### 高流動点 >5°C

	A	B	C	D	E
Cabinda	33	12	半固体	18	56
Coco	32	21	半固体	21	46
Gamba	31	23	半固体	11	54
Mandji	30	9	70 @ 15°C	21	53
Minas	35	18	半固体	15	58

注：HPP油は、周囲温度がその流動点より高い場合に限り、グループ3の挙動を示す。この流動点以下ではグループ4として扱う。

## グループ4の油

- A: API比重 <17.5 (比重 >0.95) 又は  
 B: 流動点 >30°C  
 C: 粘度 @ 10~20°C: 1500 CSt ~ 半固体  
 D: 200°C 未満での留出%: 25%未満  
 E: 370°C 超での留出%: 30% 超

	A	B	C	D	E
Bachaquero 17	16	-29	5,000 @ 15°C	10	60
Boscan	10	15	半固体	4	80
Cinta	33	43	半固体	10	54
Handil	33	35	半固体	23	33
Merey	17	-21	7,000 @ 15°C	7	70
Nile Blend	34	33	半固体	13	59
Pilon	14	-3	半固体	2	92
Shengli	24	21	半固体	9	70
Taching	31	35	半固体	12	49
Tia Juana Pesado	12	-1	半固体	3	78
Widuri	33	46	半固体	7	70
IFO 380	11-15	10-30	5,000-30,000 @ 15°C		





▲ 図11：損傷したバージから流出後、海底に沈んだ超重質重油。API比重は4、比重に換算すると1.04である。海水の比重は1.025である（画像提供：NOAA）。

海上で油膜が持続している間の油の特性変化を予測するには、様々な風化過程がどのように相互作用するかについての理解が重要である。油の特性が時間と共にどのように変わりうるかを予測することによって、流出油がどの程度持続するかを評価し、最適の対応方法を判断することが可能になる。最適の方法を判断するには、多くの場合、揮発性と低粘度のために海面から急速に消失する非持続性の油と、比較的ゆっくりと分散し、通常は浄化対応が必要になる持続性の油とを区別する。非持続性の油としては、ガソリン、ナフサ、灯油等がある。一方、大半の原油、中間燃料油と重油、瀝青は、持続性油として分類される\*。

もう一つの分類法では、一般的に輸送されている油をAPI比重によって4つのグループに分類する（表2）。この分類の目的は、海上に流出した場合に同様の挙動が予想される油を同じグループにまとめることである。一般的な規則として、油のAPI比重が大きいほど（比重が小さいほど）油の持続性は小さくなる。しかし、明らかに軽い油の中に、ワックスの存在によって重い油のような挙動を示すものがあることを認識しなければならない。ワックス含有量が約10%を超える油は流動点が高いため、周囲温度が低いと半固体又は高粘度の液体になり、自然の風化過程の進行が緩慢になる。

比重が1より大きくAPI比重が10未満の油を第5のグループに分類する場合もある。このような油は、特に汽水中で沈降し、LAPIO（低API比重油）とも呼ばれる。この範疇には、非常に重い重油と残渣スラリーオイルが含まれる（図11）。

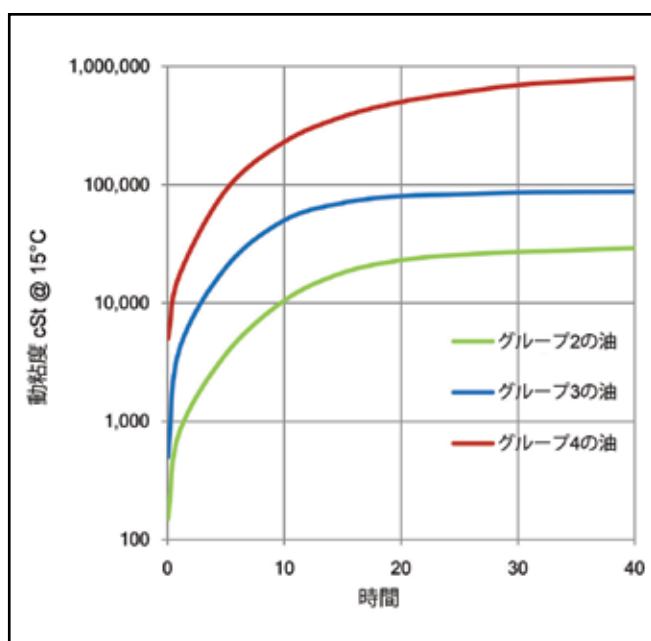
\* タンカーの油流出による国際責任補償制度では、持続性油と非持続性油とが区別されており、非持続性油は、ASTM Method D 86/78又はその改訂によって試験を行った場合に次の要件を満たす炭化水素留分で構成されるものとして定義されている。(a) 容積比率で少なくとも50%が340℃で留出すること、かつ (b) 少なくとも95%が370℃で留出すること。

図12は、グループ2～4について、流出後、時間の経過に伴い蒸発と乳化によって粘度が上昇する一般的な例を表している。この図から、乳化が粘度の上昇に最も大きな影響を及ぼすことが分かる。

図13は、4つの油グループの自然除去の速度を表す概略図であり、油中水型エマルジョンの形成が時間と共に汚染物質の容積に及ぼす影響も考慮している。この図は現場での観察に基づいて作成されたもので、油の物理性状によって持続性がどのように異なるかを感じ取ってもらうことを目的としている。個々の原油の正確な挙動は、性状と流出時の状況によって異なる。気象条件と気候条件は、特に油膜の持続性に及ぼす影響が大きい。例えば、グループ3の油は、非常に荒れた気象条件においては、むしろグループ2の油に一般的に見られる時間規模で消失する場合がある。逆に、寒冷で穏やかな条件下では、グループ4に近い持続性を示す場合もある。グループ4の油は、多くの船が船用燃料として積載している重油を含み、概して粘度が高く、持続性も高い。したがって、浄化が最も厄介な油の一つである。このグループの油は持続性が高いため長距離にわたって海上を移動する可能性があり、広範囲な汚染を引き起こす恐れがある。

## コンピュータモデル

流出油の移動又は軌跡を予測する多数のコンピュータモデルを利用できる。その中には、風化予測機能を備え、一定の条件下で流出油の経時変化を予測するものもある。これらのモデルは、様々な油の物理的・化学的特性のデータベース、油の挙動についての科学的研究と観察の結果を利用している。しかし、風化過程の複雑さと油膜の移動の不確実性のため、全体的な結末を正確に予測することは未だに実現困難である。



▲ 図12：静穏ないし荒天の海域における、一般的な粘度の典型的増大速度。グループ1の油の粘度は、海洋環境では100cStを超えることはないので、この図には示されていない。

したがって、風化と軌跡のモデルの基礎となる前提を理解し、予測結果を利用するにはそれらを考慮することが重要である。例えば、対応作業においては、油の実際の分布と挙動を観察することでモデル予測を検証すべきである。一方、これらのモデルは、監視活動をどこに集中させるべきか及び特定の油の予想される結末と挙動について、有益な手がかりを与えてくれる。また、これらのモデルは、訓練や緊急時対応計画の策定過程において最適な浄化方法を評価する場合にも有用である。

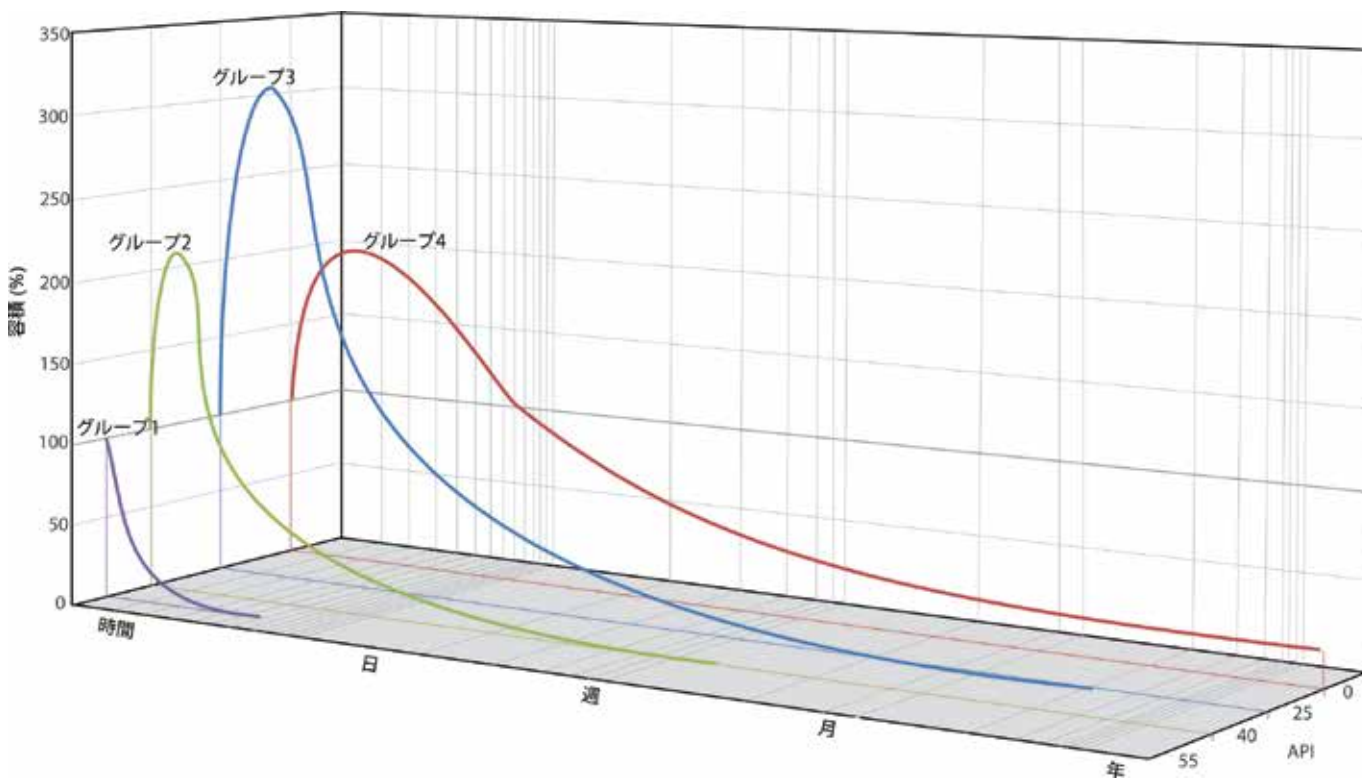
## 浄化と緊急時対応計画策定への影響

特に荒れた海況においては、油が急速に拡散し断片化する傾向が、あらゆる対応方法の制約となるため、過小評価してはならない。例えば、船に搭載した油回収システムは、概して走査幅が数メートルに過ぎず、油が拡散して数キロメートルにわたって散乱した後では大量の油を回収することができない。低粘度油の場合、わずか数時間でこのような状態になることがある。海上の油回収作業では、ほとんどの場合に大きな油膜の一部分しか除去できないが、その主な理由の一つが油のこのような傾向である。

油膜の移動と風化による油の性質の変化によって、油膜の消失を監視する以外に何らかの対応が必要か否かが決

まる場合がある。積極的対応が求められる場合、風化過程に適した浄化方法を選択し、実施後に再評価し、対応の進捗と条件の変化に応じて判断を変えなければならない。例えば、海上で散布された油処理剤は、油の拡散と粘度の上昇に伴って効果が減少する。油の特性によっては、粘度が 10,000 cSt に近づくにつれて多くの油処理剤の効果は著しく減少する。また、粘度がこの値を大きく上回ると、ほとんどの油処理剤がまったく効果を発揮しなくなる。油の粘度は非常に短時間で上昇する場合があるため、油処理剤を使用できる時間は非常に短い。そのため、油処理剤を使用する際には、絶えず監視し、効果がなくなった時点で散布作業を停止するべきである（図14）。

同様に、機械的回収システムを展開する場合には、油の風化の進行、粘度の上昇、エマルジョンの形成に応じて、使用する油回収機とポンプのタイプを変更する必要がある場合がある。例えば、親油性の（油を惹きつける）ディスク式油回収機は、油がディスクに付着する性質を利用して回収する（図15）。しかし、エマルジョンは、「ずり減粘」流体として作用するので、例えば回転するディスクによってねじり運動が与えられると、エマルジョンの中の水滴がすべて一方向に整列し、粘度が減少する。その結果、エマルジョンはディスクに付着するのではなくスライスされる。渦巻ポンプでも同じ現象が生じる。ポンプの羽根車が回転しても、エマルジョンが効率的に移動しない場合がある。このため、エマルジョンの移送には容積式ポンプが推奨される。



▲ 図13：表1及び2に示した各グループの典型的な油について、海面に残存する油と油中水型エマルジョンの量を、当初の流出量(100%)に対する比率で示す。曲線は、各グループの推定「平均」挙動を示す。しかし、特定の原油の挙動は、その性状と流出時の環境条件によって、一般的なパターンと異なる場合がある。





▲ 図14：油の粘度が高いため油処理剤の散布が失敗に終わった例。油の周囲にある典型的な白い羽毛状の油処理剤に注意。



▲ 図15：流出後間もない軽質原油中に投入されて有効に稼働しているディスク式油回収機。しかし、この油が著しく乳化すると、エマルジョンがディスクに付着しないため、回収作業の効果が減少する。

様々な油に起りそうな結末と挙動、及びそれが浄化作業に与える制約を理解することが、効果的な緊急時対応計画を策定するための基本である。さらに、1年を通じて支配的な風と海流についての情報が、油の最も蓋然性の高い動き及び特定の場所で影響を受ける可能性のある脆弱な資源を知る手がかりとなる。取扱・輸送される油種についてのデータによって、油膜の予想残存期間と浄化対応が必要になる可能性がある油の量と性質とを予測できる場合がある。また、これらの情報は、適切な浄化方法と資機材を選定する際にも役に立つ。

油槽所、海上荷役ブイ等の固定施設では、取り扱われる油種に限られていて、しかも支配的な気象条件や海況が良くわかっている場合があり、かなり正確な予測が可能になる。これにより、効果的な緊急時対応計画の策定が容易になり、適切な対応の手配を行うことができる。航行中の多くの船舶による海上交通密度の高い地域や広範囲の油種が取り扱われている地域では、計画ですべての不測の事態を想定することはできない。したがって、対応が必要な場合に最適な方法を使用できるようにするために、できるだけ早期に流出油の種類と挙動を確定することが一層重要になる。

## 要点

- 油は一旦流出すると風化が始まり、その物理的・化学的特性が時間と共に変化する。
- 拡散、蒸発、分散、乳化は、流出の初期段階において重要であり、光酸化、堆積、生分解は、油の最終的結末を決める長期的な過程である。
- これらの過程が進行する速度は、気象条件、並びに比重、揮発性、粘度、流動点等の油の特性によって決まる。
- 蒸発と分散は海面から油を取り除くが、乳化は油の持続性を高め、汚染物質の容量を増やす。
- 海岸との相互作用の結果として、粘土と油の凝集物が形成されて油が除去される場合と、遮浪性の地域で油が細粒堆積物に入り込むか、あるいは粗い砂利や小石の浜に油が混ざり込んでアスファルト舗装のような状態が形成されることで、油の持続性が高まる場合がある。
- 高密度であるために流出時に沈降する残渣油もわずかながら存在する。ただし、大半の油は浮遊し、より密度の高い堆積物と混ざった場合に限り沈降することがある。
- 油の予想される結末と挙動を理解することにより、最適な対応方法を選ぶことができる。

## 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。



### ITOPF Ltd

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

Tel: +44 (0)20 7566 6999

Fax: +44 (0)20 7566 6950

24時間受付: +44 (0)20 7566 6998

Eメール: [central@itopf.org](mailto:central@itopf.org)

Web: [www.itopf.org](http://www.itopf.org)



## 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](mailto:pajosr@sekiren.gr.jp)