

アラスカ州ボーフォート海における油流出対応体制

ニック・W・グローバー
最高石油評議会
危機管理チームリーダー
UAE、アブダビ

デービッド・ディキンス
DF ディキンス・アソシエイツ
米国、カリフォルニア

本稿は 1996 年に米国アラスカ州バルディーズで開催された「油濁事故の予防措置と準備」をテーマとする国際会議、ならびに 1999 年に米国ワシントン州シアトルで開催された国際油濁会議において共著として発表された原文を転載したものである。

要旨

1989 年に手つかずの自然が残るアラスカ州プリンス・ウィリアム湾でエクソンバルディーズ号油流出事故が起き、この事故への対応として発布された法律や規制をきっかけに、世界の油流出事故対策業界は急激な拡大を遂げてきた。多くの石油の探査・生産・輸送会社が、法の準拠義務を果たすために、遭遇が予想される石油のタイプに対する機材の適性、機材が稼働する環境、対応方法を十分考慮せずに、大量の機材を購入した。このような対応策は判断力のなさや管理の誤りが原因ではなく、むしろ十分な関連データや経験なしに法規制が実施された結果と言える。だが、規制による圧力が増し、石油・ガス業界内で環境に対する意識が高まった結果、変革を求めるビジネス環境が生まれた。

アラスカ州ノーススロープでの油流出対応体制の進展は、海と氷の様々な困難な状態で、海洋・陸上での掘削および生産業務に携わってきた 30 年近い実務経験に基づく変革のモデルという意味を持つ。現在のノーススロープ対応行動計画は、こうした経験や現場での真剣な訓練、関連する研究開発プロジェクトによる研究と実地調査を基盤としている。

1.0 序論

最初のアラスカ州ノーススロープ油流出対応組織は 1979 年、ブルドーベイに ABSORB (アラスカ・ボーフォート海油流出対応団体の頭文字) という名称で設立された。その目的はアラスカ州ボーフォート海での海洋石油探査ベンチャーのサポートだった。1983 年、ABSORB はアラスカ・クリーン・シーズ (ACS) として再編成され、次のような組織としての目標が定められた (Shafer, 1990)。

- 1) 同海域に関する油流出対応技術の開発。
- 2) 入手可能な最高の対応機材および材料の適切な目録の作成。
- 3) 高度な即応性を備えた機材と材料の保守点検。
- 4) メンバー企業およびそれらの下請企業の社員に対する流出対応訓練の提供。

振り返ってみると、この組織は当初の数件の北極海油流出研究開発プロジェクトにおいて積極的な役割を果たしたことになるのだが、この組織のそもそもの目的は海洋石油探査をサポートするための対応機材の目録作成と保守点検だった。1989年の時点では、ACSは海洋油田採掘事業者に対して油流出に直接対応する要員を提供しておらず、当時急増していた陸上の探査・生産事業者に対する支援も全く行っていなかった。ノーススロープ油流出対応協力組織としてのACSがその使命を拡大し、海上と陸上両方の業務に対して対応要員の提供と事故対策管理を始めたのは1990年のことだった。ACSが実務面で果たす役割に加え、州と連邦政府がアラスカ油流出緊急対応計画を集中的に調査し始めたことがきっかけとなり、アラスカ州ノーススロープに関する対応準備体制の整備が進んだ。

本稿の主な目的は、油の運命と挙動に極低温が与える影響をまとめ、北極地方の環境条件全般にわたり効果的に利用できる対応準備、流出対応戦略、方策、機材について解説することである。

2.0 氷に覆われた海水中での油の経時変化と挙動

極寒条件下での油の経時変化と挙動を包括的に理解することは、効果的な油流出対応戦略ならびに方策を開発する上で決定的重要性を持つ。また、このことは、ノーススロープでの実用的で目的に合った油流出対応機材のリストの作成においても鍵となった。氷の下、内部、またはその上での流出油の物理的分布と状態は、年間のいかなる時期においても最も効果的な対応戦略を決定し、流出と戦う作業に最適な機材の目録を作る上で、重要な役割を果たす。

氷の中の油を処理する戦略とテクニックについては、米国、カナダ、ノルウェーで何年にもわたる集中的な研究が行われてきた。最も重要な科学的情報は、1976年に始まったボーフォート海の海洋石油探査に対して承認を得ることを目的としてカナダが実施した一連のフィールド調査によって得られた。これらのフィールド調査やアラスカにおける他の調査、そして最近のノルウェーにおける調査で、定着氷や割れた積氷などを含む多様な状態の氷で、ガスのある場合とない場合につき、新しい原油と乳化した原油の動きが調べられた（たとえば McMin, 1972; Norcor, 1975; Buist and Dickins, 1981; Nelson and Allen, 1982; S. L. Ross, 1987; Vefsnmo and Johannessen, 1994）。Dickins and Fleet (1992) は、分析研究、タンクと溜め池を使う試験、偶然の流出、海上流出実験など、氷の中の油の経時変化と挙動に関してこれまでに知られているあらゆる参考文献を包括的にまとめた。

氷に覆われた水中の油の経時変化と挙動は、いくつかの重要なプロセスによって支配される。その一部を図2-1に示した（Bobra and Fingas, 1986を参考にした）。以下はそれらの説明である。

- **拡散**。北極海域での初夏から夏の終わりまでの間、流出油は温帯海域（たとえばメキシコ湾）よりも拡散が少なく、また、やや濃い状態のままとどまる傾向がある。これはひとつには低温海域における油の粘度の高さが原因だが、主な原因は割れた氷と砕け氷の存在である。氷量が多いと（5/10を超える）、油の拡散は浮氷と浮氷のすき間に限られる傾向がある。氷量の関数として油の拡散を予測するモデルがいくつか提唱されている。これらは主にカナダ東海岸沖でのフィールド

試験の結果に基づいている (Ross and Dickins, 1987)。一般に、安定した定着氷の下に流出した油は、流出源から数百フィート以上には拡散しないが、これは海流速度と予想される氷下の貯油容量 (後述の「氷の貯油所」を参照) に基づいている。ポーフォート海沿岸で予測される最大氷下海流速度はきわめて遅い。堡礁島群の中で 1996 年 3 月に行った調査では、5 日の間、氷の下には全く流れが検出されなかった (Intec, 1996a)。極端な例では、固氷アイスカバー下に存在する海流が、少しでも油の移動を開始し、維持するために最低限必要な毎秒 0.5 フィート (ft/sec) という下限値をはるかに下回るものと予測される (Cox and Schultz, 1980)。

- 水上または氷上の油では、揮発性成分の**蒸発**が起きる。油膜の蒸発速度は風速、油膜の厚み、周辺気温の影響を受ける。ノーススロープで採取した油を実験室でテストしたところ、最初 48 時間内の初期蒸発損失体積は 16 ~ 30% (テストした油により、この間で上下する) と予測された (Buist, 1994)。
- **分散**とは、小さい油滴が波と乱流によって海面下に押しやられ、水柱の中に浮遊した状態になるプロセスである。分散速度は海の状態、油の粘度、界面張力、油の乳化しやすさに大きく依存する。油のエマルジョンの中に安定した水が形成されると、通常、油膜の自然な分散は止まる。
- 成長中の氷の下で流出油が取り込まれると、すべての風化プロセスが止まる (Buist and Dickins, 1981; Norcor, 1975; Allen and Nelson, 1981)。これが暗に意味することは重大である。対応班が油を氷の下または内部に閉じ込められた層から海面にポンプで汲み上げるか、またはそれを燃やそうとした場合、そこで扱うことになるのは、たとえ流出発生から数カ月を経ている、ほとんど新しい原油である。
- **氷の貯油所**。当年の氷の厚さに見られる自然な変異により、流出油を狭い範囲の氷の下に十分封じ込めることができる莫大な天然の「貯油所」が生じる。ウェストドック付近で晩冬に行った調査では、氷下の貯油容量が平方マイルあたり 100 万バレルもの規模に上ると推定された (Kovacs et al., 1981)。このことは、何らかの理由によって冬の中頃に氷の下で流出が起きた場合、開放水面で等量の流出が起きた場合と比べ、氷が比較的狭い範囲に自然に封じ込められることを意味する。
- 春になると、溶ける氷の中を油の**垂直移動**が始まる (Norcor, 1975; Buist and Dickins, 1981)。それは早ければ 5 月の最後の週に始まり、解氷時期を通じて続き、油は氷の内側や下で閉じ込められていた場所から海面に自然に上昇する。流出事故により前の冬の間氷の内部に閉じ込められた油の場合、このプロセスのタイミング次第で、それを適切に処理する対応戦略が決まる。

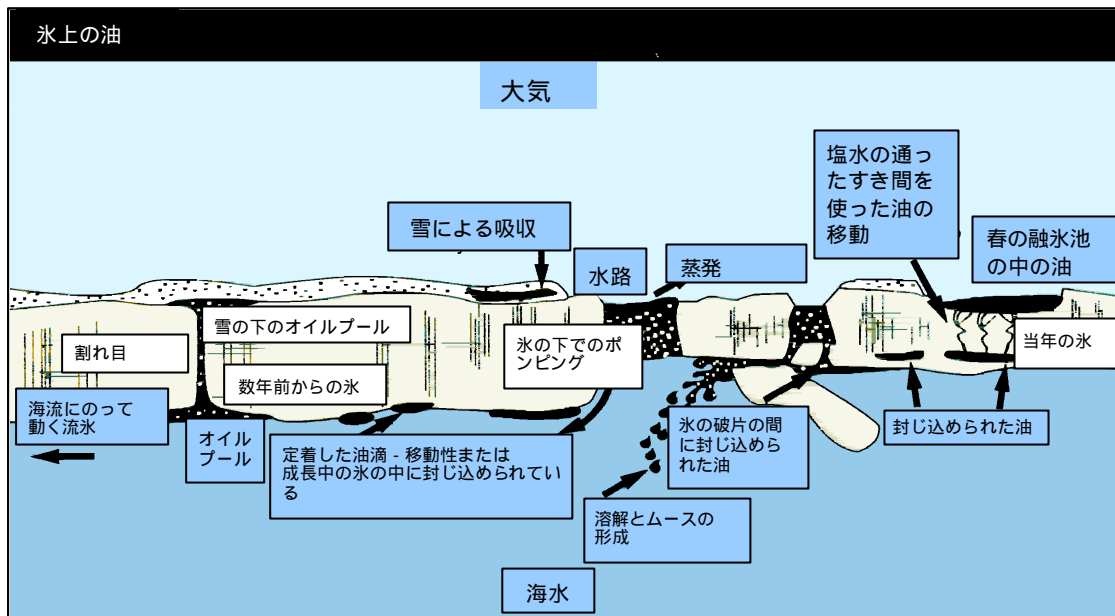


図 2-1
油と氷のプロセスの図解

3.0 油の動きに及ぼす季節的影響

極寒地での油流出への対応では、油の経時変化と挙動のプロセスを理解することに加え、作業を行う海域での氷と雪の季節的な状態により油がどのような動きを示すかという点を包括的に理解する必要がある。以下のセクションでは、アラスカ州ノーススロープの氷の季節が油の動きに与える影響として予測されるものを取り上げる。

3.1 冬に固い流氷の下で起きる油流出

アラスカ州ノーススロープの沿岸海域には、毎年連続 7 カ月間、固いアイスカバーが存在する。固いアイスカバーの下で流出した油の動きは、多数のフィールド研究、実験室での研究、分析研究のテーマになってきた。1974～5 年と 1980 年にカナダ領のポーフォート海で 2 件の最大規模のフィールド実験が行われた (Norcor 1975; Dickins and Buist, 1981)。Norcor のプロジェクトでは、厚みが 17～70 インチの氷の下で合計 330 バレルの 2 種類の原油を 8 回に分けて流出させた。Dome Petroleum が資金を提供し、ABSORB が支援した実験 (Dickins and Buist, 1981) では、定着氷の下に圧縮空気とブルドーベイの原油を注入することにより、海中での噴出のシミュレーションを試みた。Dome 実験での放出のうち 1 回はほぼ油のみで、それを Norcor の結果と合わせて使うことにより、解氷直前までの冬と春の条件における油と氷の相互の影響を正確に説明できる。季節を次のように分けると考えやすい。

- 冬の氷の汚染と油の封じ込め (10 月から 4 月)
- 春の油の移動と海面への出現 (4 月から 7 月)

3.1.1 冬の氷の汚染と油の混入

海面に浮いた固いアイスカバーの下の水中に放出された油は、上昇して氷床の底にプール状またはレンズ状に集まる。ストークスの法則に基づき試算すると、直径 0.4 インチで密度 0.850 g/ml の油滴の最終上昇速度は海水中で約 0.75 ft/sec である。ノーススロープの堡礁島における普通の氷下海流速度は 0.5 ft/sec を超えそうもない。このため、油のほとんど全部が、放出の垂直中心からほんの数フィート以内の海面下で氷と接触する。

ボーフォート海の沿岸海域では、冬の氷下の海流によって流出油を海面下で氷と最初に接触した地点よりも遠くには拡散させることはない。いくつかの研究例で示された経験的データから、変形していない当年の海水で普通に見られる粗さの程度では、油が定位置に閉じ込められることがわかっている。氷の底に沿ってできた油のレンズまたはプールの移動を開始し、維持するために必要な海流速度のしきい値は約 0.7 ft/sec である。これはアラスカ州ノーススロープ石油探査開発に関係する沿岸海域で測定される最高海流速度をかなり上回る (Cammaert, 1980; Norcor 1975; Rosenegger, 1975)。

氷下の油によって汚染される面積を自然に制限するように働く 2 つの物理要因がある。それは積雪の変動性に関する自然な陥没と、油層の周囲と下での新たな氷の発達による油の急速な取り込みである。海面で雪が吹き寄せられるパターンに従い、氷は自然に起伏のある底面を作る。研究者らは氷下の地形の地図を作り、油が封じ込められる潜在性を計算することにより、アイスカバーの容量を調べた (たとえば Kovacs et al., 1981)。その結果から、堡礁島群内のプルドーベイ海域における当年の定着氷における典型的な氷下の封じ込め容量は、12 月の厚さ 25 インチの氷での平方フィートあたり 0.012 バレル (bbls/ft²) から 4 月の厚さ 60 インチの氷での 0.026 bbls/ft² まで (平方マイルあたり約 100 万バレルに相当する) であることがわかった。自然な封じ込め能力は氷の厚さと共に増加するため、図 3-1 に示したように、任意の流出量を封じ込めるために必要な面積は冬を通じて一貫して減少し続ける。

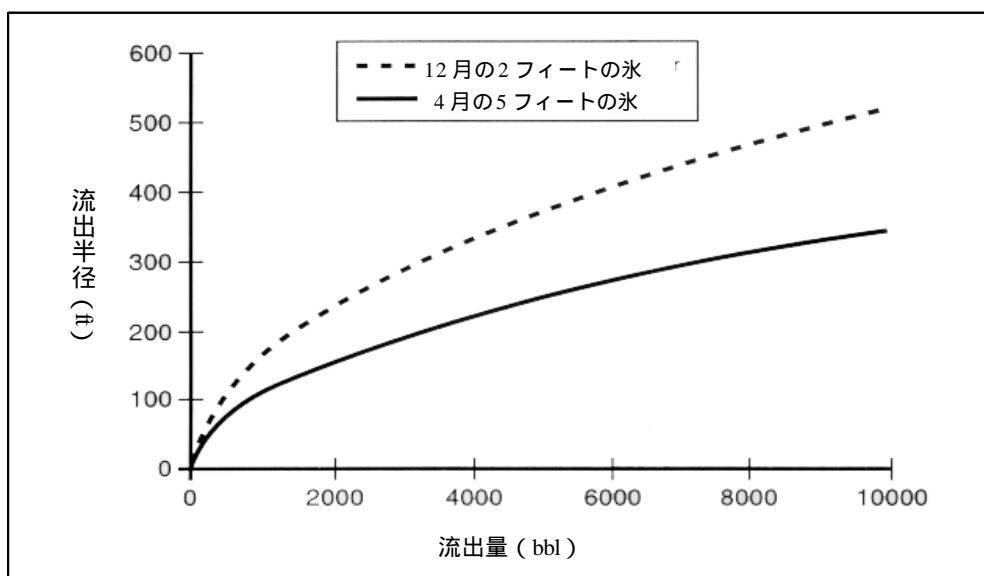


図 3-1

定着氷の下で流出した任意の流出量に対する予測流出半径 (Dickins, 1985)

これら封じ込め容量を考慮すると、4月に氷の下のノーススター海中パイプライン流出源から10,000バレルの油が流出したとしても、直径約320フィート内に自然に封じ込められるはずである。氷の厚みに見られる自然な変化は、水面下での放出による油の拡散を制限する最も重要な物理特性である。小規模な漏出の場合は、流出油の外縁で起きる新しい氷の先端の形成も、非常に滑らかな氷の場合に拡散をさらに抑制する働きを持つ。

一度にまとめて放出した場合は、新しい氷が18~72時間以内に(12月から4月下旬までのどの時期かにより、その間で上下する)油層を完全に内部に封じ込める(Dickins and Buist, 1981)。5月1日以降に氷の下で流出した油は、氷層の季節的な温度上昇が原因で、封じ込まれないこともある。

長期にわたり油の漏出がある場合は、新しい油が継続的に流入するため、氷がすぐに油のポケットの直下に硬い層として成長することが妨げられる。油と水の界面の水中に存在する氷の結晶はおそらく取り込まれて雪泥と油の混合液を形成し、流出源が見つからないまま放置される時期が長引くと、それは次第に厚くなる。同時に、汚染海域の周辺で発達する新しい氷が次第に油を封じ込めてゆく。冬の大半については最終的な結果として、周辺の氷が成長する中で、液状の油と雪泥の柱が深く伸びてゆく。4月から6月までの期間にまたがる長期的な漏出の場合は、氷の成長速度が遅くなるため汚染海域が拡大する。この状況での閉じ込められた油の最終的な形状は、真冬の長期的漏出と似たものになると考えられるが、ただし、油のポケットは逆円錐台の形を取り、最も深いところで最大直径になり、新しい氷の成長が衰えるに従い円錐の角度が大きくなる。流出源が発見され、流れが止まると、数日以内に油の下で新しい氷の形成が始まる(12月から4月)。

3.1.2 春の油の移動と海面への出現

冬の初めから中頃の季節に氷の下か内部に放出された油は封じ込められ、冬の終わり頃まで閉じ込められたままの状態が続く。その頃に氷床が次第に温まることにより、垂直移動のプロセスが始まる。

垂直移動の速度は氷内部の塩水の排水度(内部温度の関数)、オイルプールの厚み、油の粘度に依存する。氷床の温度が下がり、急速に成長する11月から2月の期間には、油が入り込めるようなすき間はほとんどできない。この時期の油の垂直移動は、氷と水の界面に氷の結晶が作る穴あき構造の層を通して起きる最初の数インチの侵入に限られる。

内部の氷の温度は普通、2月末に最低温度に達する。4月から5月にかけて氷の温度が次第に上昇するにつれ、柱状の氷の結晶の間に閉じ込められた塩水が氷から排水され、そこに残った垂直のすき間を通り、最終的に油が氷上まで上昇する。氷上への自然な油の出現を示す最初の証拠が観察されるのは5月の半ばから終わりだが、気温によっては6月第1週まで遅れることもある。ある実験では、5月21日に6フィートの氷の下で油を放出したところ、1時間で氷の表面まで到達した(Norcor, 1975)。

毎日の気温が氷点以上を維持するようになると、油の移動速度は急速に上昇する。上記の同じ実験で、元々氷内部に閉じ込められていた油の最大50パーセントが、6月10日から6月20日の間に

氷の表面に現れた。氷上の融氷池での油膜の厚みは、1週間で0.04インチから0.4インチ以上に増加した。

表面から下へと進む自然な融氷は、封じ込められた油の露出と競争的なプロセスになる。油流出時点で氷が成長中だったレベルまで融氷が到達すると、そこにある油が露出する。凝縮した濃い油の層が氷中に封じ込められている状況では、ほとんどの場合、表面からの融氷がそこに到達する前に、大部分の油が自然な移動によって表面まで上昇する。

油が氷の表面に到達すると、それは融氷池の中にとどまるか、または溶けつつある氷の上で水が排水された後に点々と残る。氷上の黒い油によって吸収される熱が、表面の融氷をさらに促進する役割を果たし、中に油が存在するプールができる。風がそれぞれのプールの縁に油を集め厚い層を作る働きをする。このように集中した油は効果的に回収することができる。あるいは季節的条件により、機械的回収作業を実施しようとする対応要員の安全性に危険が生じる場合は、現場で燃やすこともできる（セクション4.3の現場燃焼に関する考察を参照）。

アイスカバーの最終的な解氷と崩壊の時点で氷の中または上に残っている油は、薄く光沢のある油膜としてゆっくり水中に放出される。

3.2 冬に氷と雪の上で拡散する油

氷の上での油の放出によって汚染された場所は、風速、表面の起伏、放出海域の積雪量など、その場所に特有ないくつかの要因によって影響を受ける。また、個々の放出に伴う他の要因は、汚染海域全体に対してさらに大きな潜在的影響力を持つ。たとえば高圧パイプラインからの放出では、タンクの破裂による放出と比べ、汚染がより広い面積に拡散する可能性が高い。同様に、高圧パイプラインの破損で、油が地面に放出される場合の方が、大気中に高く放出される場合と比べ、影響を受ける総面積は小さくなる。これは後者の場合、風の状態によっては汚染が数マイルも拡散する可能性があるためである。

雪中での油の拡散の動きを予測するプロセス解析のための方程式がいくつかある（Belore and Buist, 1988）。雪上に流出した油に伴う主な動きの要因は次のようにまとめることができる（Wotherspoon, 1992を参考に）。

- 雪中での油の蒸発速度は開放水面上の油膜と比べてかなり遅い。
- 雪と混合した油は乳化しにくい。
- 一度点火してしまうと、油を雪の中で燃やしても水中で燃やしても、目に見える違いはない。

2000年の油と氷の国際会議で実施されたデモは、表面の雪の層に吸収された油または氷上に乗った油を、機械的手段を使い、あるいは溜めておいて燃やすという方法で、いかに回収できるかを効果的に実証した。油で汚染された雪を火山状に積み上げ、その山の中央に深いへこみをつける。点火装置を使い、汚染した雪の山の中央に強力な熱源を作ることにより、含浸した油が中央の水たまりに向けて放出され、それはそこで消費され、油の量が燃焼を支えるには不十分になるまで、燃焼を維持する役割を果たす。

3.3 晩春 / 初秋の氷が割れた疎氷条件での油流出

割れた氷の下に流出した油は海面に上昇し、個々の浮氷の間にできた割れ目が開口部に集まるか、または浮氷自体の真下に閉じ込められる。表面で流出した油も同様に、氷の表面に付着するか、または風で氷の縁に集められ、強風で氷が割れて漂流し始める場合を除き、最終的には氷の表面で凍結して定着する。春の疎氷時期の初期には、浮氷の下に放出された油は、減りつつある氷の間を通過して自然に移動し、数時間以内に氷の表面に現れる（春の油の移動プロセスに関する前述の考察を参照）。春の疎氷条件下で放出された油は、浮氷の間の開口部に封じ込められ、周辺の氷の縁を覆い、氷上の融氷池の中に浮く。春の解氷が続くにつれ、汚染面積は拡大する。秋に新たに形成されるバンケーキ状またはシート状の氷の内部または下に閉じ込められた油の場合は、すでに論じたように、油の下に新しい氷が急速に発達し、急速な封じ込めが起きるものと思われる。浮氷の間に閉じ込められた油がどうなるかは、氷量、気温、局所的な風の影響に強く依存する。

凍結期中は、氷床の形成前に海面に存在する凍結途中のグリースアイスと雪泥に油が連行される可能性が最も高い。この時期には、しばしば烈風が新たに形成中の氷を割って分散させ、その結果、次の凍結サイクル（その時点の大気と水の温度によって数時間後のこともあれば数日後のこともある）で取り込まれるまで、油は一時的に開放水面に拡散する。年間のこの時期における氷の漂流速度は大きく変動するが、10月には平均で1日5海里という速度が予測され、これは11月に氷が厚くなり、定着氷となって安定するにつれて低下する。

解氷時期には、氷量は時間ごとに、また、短い距離の間でも、大きく変動する。氷量が多い状態では（5/10を超える）、油の拡散は有効に妨げられ、氷によって封じ込められる。アイスカバーが緩くなるにつれ、浮氷が離れるようになり、より広い開口部に移動できる油の量が増える。最終的に、氷量が3/10未満まで下がると、海面上の油は事実上、開放水面での流出の動きをするようになり、風によって個々の浮氷に一時的に閉じ込められた局所的な油のパッチができる。個々の浮氷の表面に存在する油は、風と沿岸海流に従い動く氷と共に移動する。

4.0 プランニングと対応戦略

ノーススロープ掘削・生産事業における20年を超える実務経験をもとに、氷の中での油流出に対する対応のプランニングと戦略が開発された。本稿で考察するテクニックはすでに実証され、現実の流出状況で応用されている。以下のセクションでは次の項目について解説する。

- 氷と開放水面のさまざまな状態における油流出の偵察並びに監視の方法と応用可能性
- 効果的な対応作業の実施と、最善の浄化戦略を決定するための計画・実行に対してさまざまな氷の状態が与える影響
- さまざまな油と氷の条件の中で、対応オプションとしての現場燃焼の効果的な利用
- 氷の条件に基づく季節的対応戦略のまとめ

4.1 偵察と監視

偵察と監視には、現在のノーススロープ生産施設およびパイプラインと結びついた流出源からポーフォート海への流出油を発見し、地図を作り、追跡するために利用可能なテクニックとシステムが必要である。

4.1.1 偵察並びに監視システム

いかなる油流出においても最初に実施しなければならない対策の 1 つが、最初の汚染の規模を決定することであり、また、水が移動する氷への流出の場合は、油の移動につれて継続的に油の位置を確認し、追跡することである。南の地域、北極油田試掘、実験室内での研究における経験を通じ、開放水面と氷への油流出を発見し、追跡するための多数のシステムと特殊機材が開発されている (Wotherspoon, 1992 にまとめられている)。ACS でよく使う方法として、次のようなテクニックと機材を組み合わせる。

- **衛星追跡ブイ** は風、海面の海流、氷の動きに対応した油膜の動きの追跡できるように設計されている。新しい衛星利用測位システム (GPS) を使い、これら「スリックトラッカー」は、150 フィートを超える精度で、司令センター内のコンピュータにリアルタイムで位置を報告することができる (Costanzo, 1994)。ACS では現在 Trimble Sliktrak ブイと Metocean 衛星アイスビーコンの両方も備えている。Metocean ビーコンはほぼあらゆる状態の氷の下に配備でき、最初の放出から何カ月間も位置信号を報告することができる。
- **無線追跡ブイ** は衛星追跡システムと設計も利用法も似ているが、ブイに内蔵した小型無線送信機からバースト信号を発信する。この信号は臨機的に利用する船舶、固定翼または回転翼の航空機に搭載できる受信機を使って追跡する。ノーススロープについては ACS で Orion 無線追跡ブイを備えている。
- **航空偵察** は観測員の目視と、静止画と動画のカメラ、赤外線と紫外線のセンサー、レーザー蛍光センサー、レーダーを使って実施する。訓練を受けた目視観測員を使い、情報の裏付けのためにさらに高度なリモートセンサーも使う (氷の上の沈泥、水面に映った雲の影、風によってできた斑点部分など、自然の「油膜のように見える」対象を識別し、油膜の厚い部分と薄い部分のいずれの位置も描けるようにするため)。

光学的方法 (静止画と動画のカメラ) は、ある程度の光量がある状態で流出全体の位置と油膜の境界を記録するために便利である。ただし、これらの方法では油膜の厚みを示すことはできず、光量が低い状態ではわかりにくいことがある。

赤外線 (IR) システムは、油と水の温度差を通じて海上の油膜を記録するために非常に効果的である。UV システムはそれよりも高価で、主に油膜の厚い部分と薄い部分を区別するために IR と併用される。

プロジェクト海域の海面上で観察された油膜の地図を作製するために、ACS では多様なヘリコプターと固定翼航空機を即座に利用できる。ノーススロープに置かれている ARCO Twin Otter には広範囲赤外線（FLIR）熱画像システムが搭載されている。これはジャイロスタビライザーを備えたマイクロプロセッサ・ベースのシステムで、最新のデジタル画像処理機能をもっている。機上搭載コンピュータ・システムはデジタル情報を処理し、それらの画像を他の船舶搭載装置で同時に収集した環境データおよび GPS 情報と組み合わせることができる。図 4-1 の画像はノーススロープの 2 つの原油貯蔵タンクを示している。左の図は 2 つのタンクを示し、そのうち右のタンクは満杯なので、こちらの画像の方が明るい。右の図は左の画像でのもう片方のタンクを示したもので、タンクに約 25%まで溜まっていることがはっきりわかる。これらに加え、米沿岸警備隊が広い海域にわたる大規模な流出を偵察するために、特殊 UV/IR および航空機搭載側面監視用レーダーを搭載した航空機を運用している（Aireye と呼ばれる）。

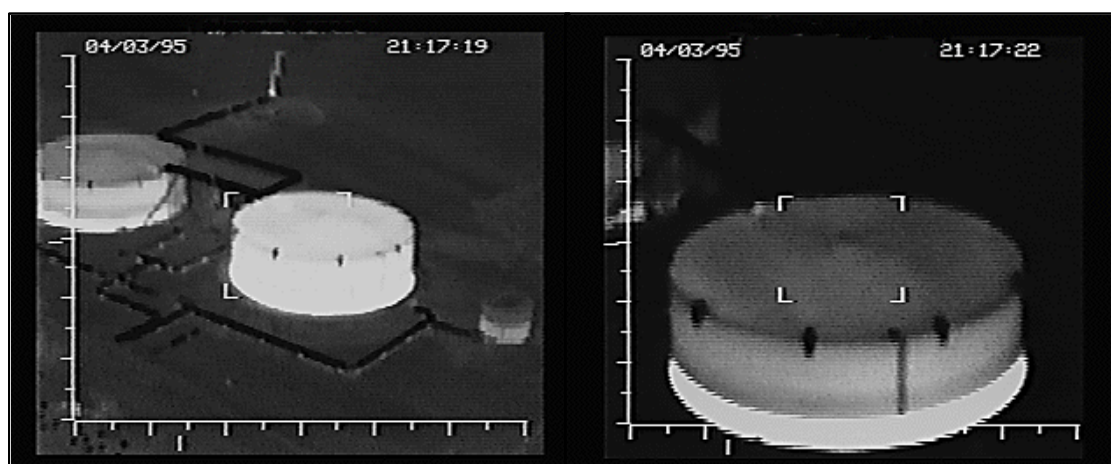


図 4-1
原油貯蔵タンクの赤外線写真（出典：ARCO Aviation, 1995）

- **携帯 GPS 装置**は流出箇所の位置と範囲を記録するために、ノーススロープで広く利用されている。ACS では、ノーススロープで操業中の各油田に Garmin 45 携帯 GPS 装置を備えている。対応要員はこれらの装置の使い方に関する訓練を受けており、日常の作業に頻繁に使われている。過去の流出事故では、GPS データと調査要員を併用し、厳しい冬の条件下で汚染海域の輪郭を確認することができた。
- **移動式流速計**を利用でき、夏と冬両方の条件における海流の速度と方向の決定に使われてきた。流速計で集めた情報は、正確なコンピュータ・モデリングを行うためにきわめて重要である。
- **水中照明器具**について調査し、フィールド試験を実施した結果、氷下の油を確認するために非常に効果的であることがわかった。NSSRT が使っているシステムでは、長いハンドルの先に高輝度石英ハロゲンランプ照明器具が取り付けられている。氷に開けた穴を通してこの器具を下ろし、水中で照明を点灯する。表面を覆った雪をどけると、この照明によって油が蓄積した部分を明瞭に確認できる。

4.1.2 北極の氷の季節における偵察

流氷の氷量が 5/10 よりも少ない時は、発見と地図作製のプロセスは基本的には開放水面で行う場合と同じである。氷量が 6/10 を超えると、小さな開口部とすき間の中にある油を目視で発見することは困難になる。10 月、11 月になると、氷晶化した氷、動く薄い氷、日照の減少により、これらの問題が増大する。これらの条件下で油の追跡と地図作製を行うには、いくつかの可能な取り組み方がある。レーザー蛍光センサーや IR センサーなどの実験的な航空機搭載システムは、浮氷の上やそれらの間にある油を発見する潜在能力を持つことがわかっている。衛星ビーコンは航空機への配備が可能で、航空機が氷の上に着地する必要がない。1996 年 4 月現在、日照、雲量、霧とは無関係に、海上の氷の状態を調べるために衛星による日々の偵察が可能になっている (Canadian Radarsat)。この衛星は小さな油膜を直接検出するほどの解像度は備えていないが、追跡ブイと併用すれば、油の周辺の氷の状態を示す明瞭な写真を撮影できる。

氷床が安定して厚くなると、いくつかの方法を使って海上流出箇所付近に近づくことができるようになる。偵察および調査チームはノーススロープ全域で、小型の 1~2 人乗り全地形型車輜 (ATV) (つまり雪上車、四駆車、ARGO 無限軌道車) を利用できる。12 月にさらに氷が厚くなると、ヘリコプターで着地できるようになり、油を目視で確認できる。氷が安定し、堡礁島とつながった状態になると、流出油は氷の内部や下に閉じ込められるか、または沿岸での噴出事故の場合は、島を囲む氷の上で雪と混合した状態になる。

氷上の油を発見するための主なテクニックは、目視による観察か光学カメラである。冬の間、氷上の油は吹き寄せた雪で覆われることがあり、その場合は汚染海域と疑われる部分の地図作製を行うには、氷の表面までシャベルで雪を掘り、放射状のトレンチか格子模様の溝を作る必要がある。このプロセスでトレンチの壁の部分を目視すれば、雪の汚染度が明瞭にわかる。

5 月から 6 月上旬にかけては、氷上の油の地図作製に光学と目視の方法が効果を上げる。油を含む雪は 5 月下旬には熱の吸収量が多くなるため、周辺の雪よりも溶け方が速い。融氷が進むにつれ、氷上の堆積物 (特に川が氾濫を起こす地域では) や崩れかかった氷の表面に特徴的な明暗の様子は、風化した油と混同しやすくなる。油を含む氷は周辺の氷よりも溶け方がやや速くなる傾向があるため、その違いが油の位置と範囲を示す視覚的な手がかりになる (Norcor, 1975; Dickins and Buist, 1981)。

成長サイクルの最後に氷の下か内部に閉じ込められたままになった油は、4 月に氷床が温まるにつれて動き始める。油が閉じ込められていることがわかっている海域については、定期的なコア・サンプリングで氷の内部での油の垂直移動速度を監視できる (4 月に週 1 度の割合で開始し、5 月半ばまでには毎日おこなわれるようになる)。同時に、収集したサンプルを実験室で分析することによって、氷上に露出した油の風化度を監視できる。

4.2 浄化戦略に対して氷の状態が与える影響

ノーススロープ油田周辺では、年間を通じて何らかの形の氷と遭遇する。沿岸施設やパイプラインの河川横断部分から海洋への流出に対する対策の選択に影響を与える全要因の中でも特に、氷と気象の状態は実施可能な戦略と最終結果を決定する主要因である。重要な氷の状態の例としては、厚み、安定性、支持力、氷量などがある。

氷の厚みは、機材の使用と流出箇所との間で氷上を移動するための接近方法と負荷支持力を決定する。位置と1年の時期によっては、海氷はトレンチャー、エンドダンプ、バックホー、ディッチウィッチ、そして氷の中からポンプで汲み出した液状油の一時的貯蔵や輸送のためのブラダーなどの重機を支えることができる。図4-2は氷の厚みと荷重能力の相関関係を示した図である。

通常の冬では、12月下旬から4月下旬までは、流出油回収作業のために氷の道を使うか、または敷設することができる。普通は5月上旬までに氷の表面がもろくなり、氷の道を利用可能な状態に維持することはできなくなる。氷床自体は通常6月上旬まで、流出箇所自体で重機を支えるために十分な程度の安定性と厚みを維持する。この時期に問題となるのは、海岸から現場までの往復手段である。6月上旬から解氷までの氷上作業は、その日その日の状態に左右され、作業班の安全性を確保するには、ヘリコプターかホバークラフト（ACV）での継続的な支援の必要性が生じることもある。

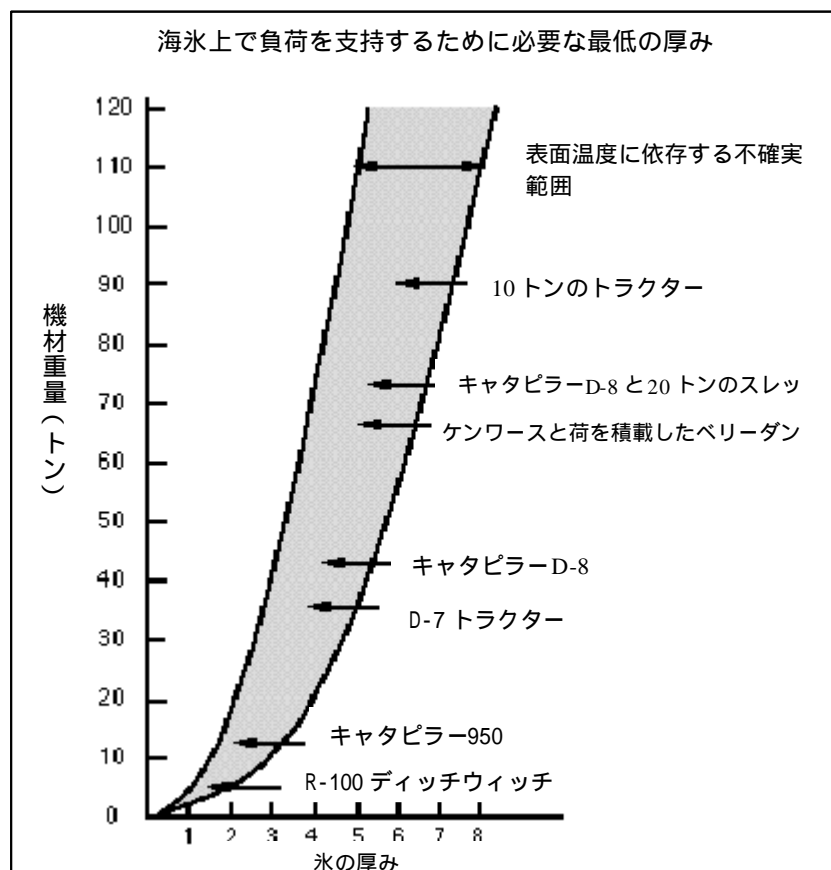


図4-2

海氷の負荷支持力 (出典：ACS Technical Manual)

凍結または解氷への移行期には、海上流出箇所まで限られた負荷の要員と機材を運ぶために、ヘリコプター、ACV、エアポートを使うことができる。ACS はブルドーベいのウェストドックに格納された高速のタービン動力 ACV を利用する契約を結んでいる。この ACV の貨物積載量は 30 トンで、作業班がブルドーベいに到着してから 4 時間以内に稼働できる。

錨氷とは定着氷の一部が厚くなり、浅い海の海底まで届いた状態を指す。この状態は 2 月中旬以降、海岸と堡礁島の間でよく発生する。調査海域全域では、たとえ冬でも風が水位に多大な影響を与える。西から吹く強風は水位を 1~2 フィート上昇させ、冬の中頃に一時的に氷床を海底から引き上げる (Coastal Frontiers in Intec, 1996a)。3 月以降は、シンプソン・ラゲーンの氷の大半が海底にしっかりと定着し、氷と海底の界面には凍結した堆積物の層ができる。図 4-3 は典型的な北極海氷の移行状態を示す断面図である。ブルドーベいの沿岸海域では、錨氷が 2~5 マイル沖合まで広がり、堡礁島に接している点が注目される。この「錨氷」が暗に意味するのは、氷の内部か下に封入された油が浸透した堆積物を回収するために、作業班は氷の上から下まで完全にトレンチを掘る必要があるかもしれないということである。1996 年 4 月に BPXA が行ったトレンチを掘る試験で、この作業が実行可能であることが実証された。

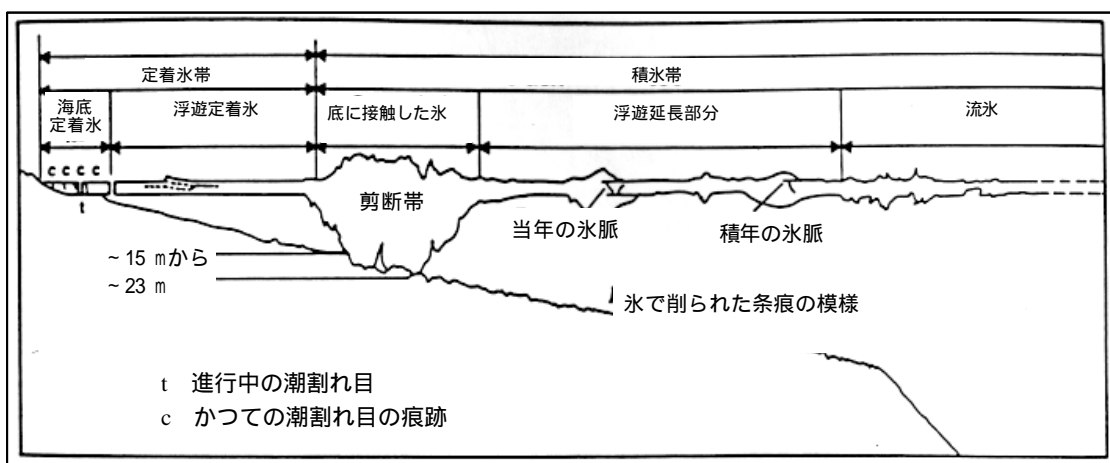


図 4-3
典型的な北極海氷の断面図

氷の安定性は厚みと密接に結びついており、強風によって大きな氷が動く可能性に関係してくる。油流出対応作業で最も注意しなければならない期間は 10 月から 12 月の凍結期と 6 月と 7 月の解氷期である。10 月から 11 月の間、氷の厚みは 2 フィート未満で、主に東北東の持続的な強風により簡単に割れる (Vaudrey - internal project memorandum, May 1996)。12 月下旬までに、当年の氷の厚みが約 3 フィートに達すると、氷は比較的安定し、6 月下旬まではその状態が続く。ただし例外もあり、1989 年 2 月には、90~100 ノットの南西風により、定着氷の大部分が堡礁島群の内部から 20~30 マイル沖に動いた (Vaudrey, 1996)。

春の融氷で氷が崩れやすくなると、連続的なアイスカバーからほぼ開放水面に移行する間に、短期的に不安定な期間が訪れる。通常、氷は 6 月中旬から下旬に沿岸の浅海のその場で溶ける。さら

に沖合では、定着氷が不安定になり、7月上旬には風によって誘発される解氷が起きやすくなる (Vaudrey, 1996)。

これら「不安定な」期間の対応作業では、強風が24時間以上続いた場合、氷の中または上に閉じ込められた油が10マイル以上も移動する可能性もある。油の位置は、衛星利用測位システム (GPS) のビーコンを配備し、衛星に情報を送ることにより、ほぼリアルタイムで正確に追跡できる。凍結後と解氷前に割れた氷が流動する状態では、HeLiを使ったヘリコプター支援燃焼作業が最も効果的な対応戦略と考えられる。

氷量とは海面の氷で覆われた面積を指し、水を10とした場合の氷の割合を表す。従来の開放水面での油回収システムをもっと深い水位で使える範囲だけでなく、氷による自然な封じ込めの効果によって拡散を抑え、直接的な現場燃焼を行える範囲も、氷量によって決まる (S. L. Ross and D. F. Dickens, 1987)。浄化戦略の選択が流氷によって最も強く影響される期間は、堡礁島付近で解氷が起きる平均日である7月4日 (±2週間) から、氷量が3/10以下に減少する平均日である7月22日 (±7日) までである。3/10という値は、流氷で作業が無理にならない状態で従来のオイルフェンスやスキマーを配備できる上限として、一般に受け入れられている値であり、重要な意味を持つ (S. L. Ross, 1983; Shell et al., 1983)。

7月上旬の最初の解氷からおよそ7月中旬までの2週間は、アイスカバーが7/10から9/10の量にとどまり、ヘリコプターからの航空点火による自然燃焼を行うに十分な値を保つ。3/10から6/10の間の氷量は流出油の浄化で最大の問題である。従来のオイルフェンスは流氷によってつぶされたり、流氷が上に乗ったり、損傷を受けたりすることがある。同時に、自然に油を封じ込め、耐火性オイルフェンスなしで現場燃焼を行うために十分なほど厚いパッチを形成するほどの量の氷はない。ありがたいことに、この問題の多い氷量は長くは続かない。氷量は普通、解氷期間中の1週間以内に5/10から3/10に下がる (Vaudrey, 1996)。

氷が洪水のように溢れる期間には特殊な状況が発生し、10日間から2週間にわたり油の動きが変化し、浄化作業が複雑になる。5月下旬から6月中旬まで、ACS作業区域内の沿岸海域のかなりの部分が、Sagavanirktok川、Putuligayuk川、Kuparuk川からの春の氾濫に巻き込まれる (Vaudrey, 1996)。図4-4は春の氾濫が起きる地域を表したものである。この時期には海上での接近が難しくなるだけでなく、氷を通して海面に現れる油が、海面で自由に拡散できるようになる可能性がある。5~10日間の短期間で、氾濫した水は氷に自然にあいた穴を通して排水される (海底にストルーデル・スコアー (洗掘痕) (strudel scours) と呼ばれる窪みができることもある)。氷上の油の封じ込めも回収も行われない場合、氷上で排水が進む間に油の一部が氷の下で再び分散することがある。氾濫水の排水が進むにつれ、海水は海底から上昇して急速に溶けるため、沿岸では沖合の海域よりも1カ月以上前に開放水面が現れる。

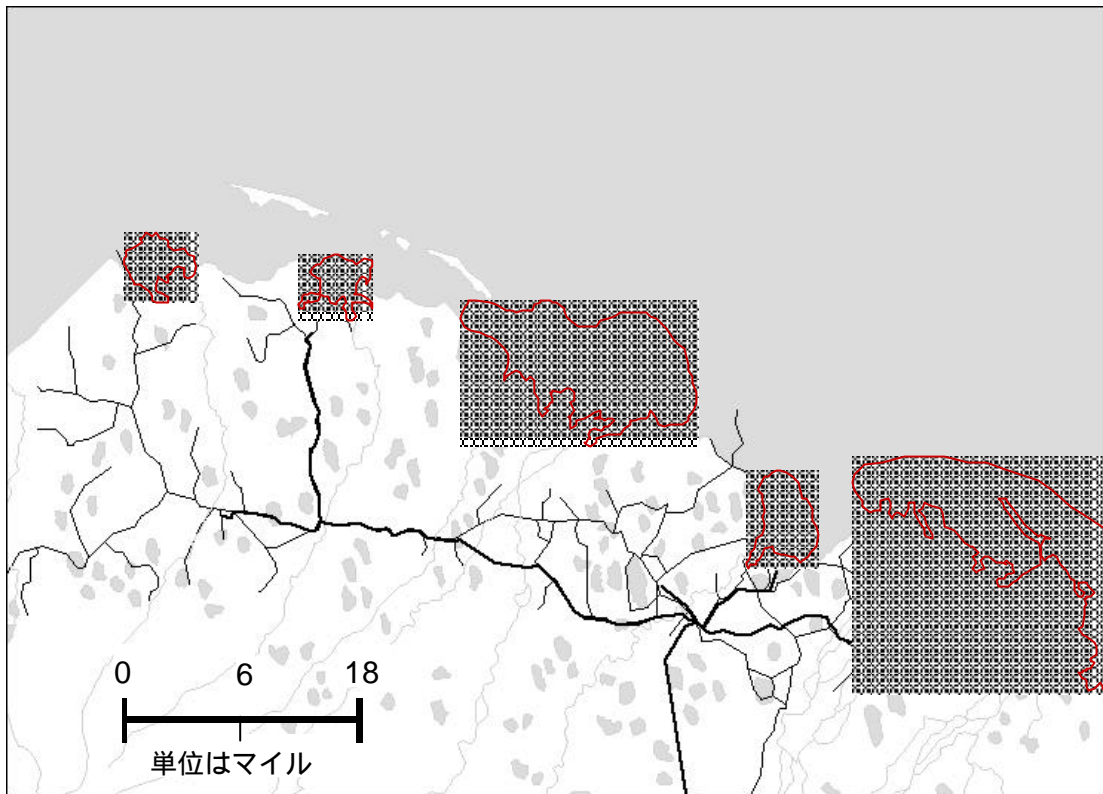


図 4-4

ノーススロープ油田近辺の春の河川氾濫地域

4.3 対応オプションとしての現場燃焼

海の状態が穏やかあるいは中程度で、氷量が3/10未満の場合は、新しい原油と乳化した原油のいずれについても、機械的回収が主な対応手段と考えられている。固氷の上への流出についても、対応活動は陸上での流出と非常によく似ているため、やはり機械的回収が主な対応オプションと考えられている。機械的回収の実際の効率、スキマーの設計、油の粘度、流動点、乳化度に依存して大きく変動する。環境条件も機械的回収作業の効率を決定する上で重要な役割を果たす。凍結期と解氷期など、場合によっては、環境条件次第で機械的な封じ込めと回収の利用が制限される。現場燃焼に関する最近の展開と、残留効果に関する理解が増したことにより、現場燃焼を利用できる機会が広がり、アラスカ州では現実的な対応オプションとして受け入れが進んだ。

耐火性オイルフェンスを使い開放水面で行う現場燃焼では、幅広い条件下で（新しい油からやや乳化した油まで、海の深さは3~5フィート未満、風速20ノット未満）水中から油をほぼ完全に除去できる可能性がある。燃焼は有効性が証明された対応テクニックと考えられており、状況にもよるが、機械的回収法と併用することにより、全体的な油の除去率を大幅に引き上げることができる。実際の対応作業における現場燃焼の使用に関する要請・評価・許可の手続きを整備するために、包括的なガイドラインが用意されている（Alaska Regional Response Team, May 1994）。

アラスカ州、アラバマ州、ノルウェー、カナダ東海岸で実施された多様なテストと現場試験では、試験用の溜め池、氷上への原油流出実験、公海で実際の油を使って行う試験が行われ、現場燃焼に

ついて 95～98 パーセントという範囲の効率を実証した (Buist et al., 1994 にまとめられている)。油と水の乳化率最大 50 パーセント、風はより強く、溶けかかった氷にあいたすき間に油が存在するという厳しい条件を想定した試験でも、60～80 パーセントという高い除去率を達成した。エクソンバルディーズ号事故への対応では、耐火性オイルフェンスの使用に成功し、75 分間でおよそ 360 バレルの原油を除去した (Allen, 1991)。英国での最近の 2 例でも、深さ 5 フィートの海で風速 15 ノットという悪条件の中で、港湾耐火性オイルフェンスを使い、燃焼に成功した (Allen pers. comm. June 1996)。

1993 年に米国とカナダの科学者らによって行われた海上での大規模燃焼の広範な科学的測定では、煙の吸引あるいは煙に伴う有毒化合物のいずれについても、適切なガイドラインと安全距離を守りさえすれば、現場燃焼には人体への重大な危険性もその他の環境への危険性もないことが決定的に実証された (Fingas et al., 1995)。規制当局と現地住民にとって懸念される 3 種類の排出物がある。

- **煙に含まれる燃焼粉塵。** 測定結果から、燃焼の風下 1,000 フィート以内では、地面での濃度が人の健康に関する許容値よりも低いことが判明した。また、ブルーム内の濃度は、数マイル以内で大気汚染許容限度の範囲内だった (Buist, pers. comm. September 1996)。
- **揮発性有機化合物。** 燃焼地点から 1,500 フィートも高い地点でも、通常のバックグラウンドよりもレベルは高かったが、それらやや高いレベルでさえ、油膜を海上に残した場合よりも燃焼した方が値は低かった。
- **多環式芳香族炭化水素 (PAH)。** 大規模な油燃焼について広範囲なモニタリングを行った結果、現場燃焼はむしろ PAH を除去し、ススに含まれる PAH 量は元の油よりも低いことがわかった。水の分析結果も同様で、ニューファウンドランドで行った試験では、未燃焼の油膜ですでに検出された影響以上には、現場燃焼は下の水柱に対して悪影響を与えないことが判明した (Daykin et al., 1994)。

海面に存在するほとんど全部の油を除去することに加え、燃焼では貯蔵と処分の必要性がない。黒い飴状の残留物が少量残る (通常、元の油の体積の 1～10 パーセント)。残留物は氷の表面から手で回収し、シャベルと熊手を使ってドラム缶かポータブルタンクに集める (Norcor, 1975; Dickins and Buist, 1981)。燃焼後に残留物が海中に沈むのではないかという懸念が表明され、この問題は現在調査中である。融水池の中や氷の縁に風で集められたものなど、自然に封じ込められた油膜からの残留物は沈まないと考えられている (Buist et al., 1995; Trudel et al., 1996)。海上での流出油の燃焼に関する情報については、Buist et al. (1994) が包括的なまとめと評価を行っている。

アラスカ州ノーススロープでは現在、14,000 フィート以上の耐火性オイルフェンスと、オイルフェンス内の油、割れた氷の間に閉じ込められた油、氷上の融水池の中にある油に上空から点火するためのヘリトーチ (図 4-5) 6 基を備えている。

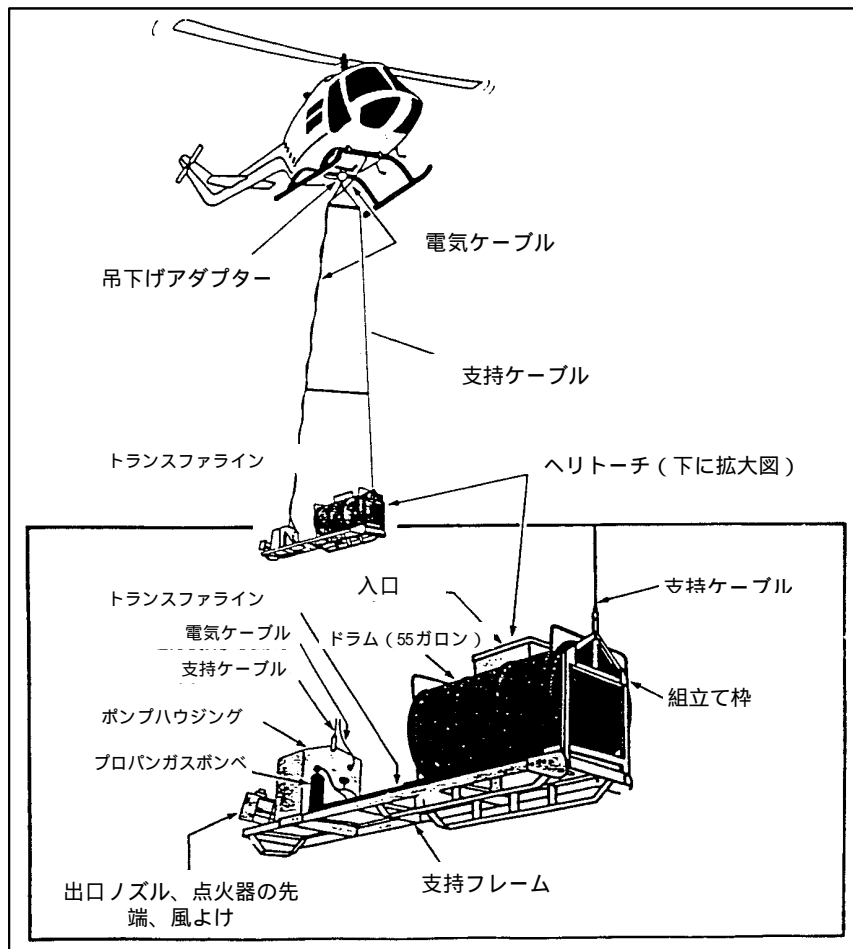


図4-5
ヘリトーチ点火システム

まとめると、海上の開放水面または割れた氷について予測される除去効果はきわめて変わりやすいもので、タイミング、気象と海の状態、乳化度、油膜の状態など、多数の要因に依存する。過去の対応作業では、機械的システムを使って5～15パーセント以上の結果を達成した例は少ない（自然のプロセスを除く）。準備体制と機器の整備を進めることにより、これらの値を改善できる。

Gulf Canada（1990）は、海上の噴出地点の風下で機械による回収と燃焼を組み合わせれば、理想条件下で油を最高80パーセントまで除去できると試算した。環境要因（視界、波、氷、対応所要時間）を最終分析に取り入れると、予測される除去効果は30～40パーセントに下がった。ノーススロープでは対応準備体制が整っていること、また、現場燃焼が対応オプションとして受け入れられるようになってきたことを考慮すると、作業班はそれと同等あるいはさらに良好な数値を達成する可能性がある。

4.4 季節的対応テクニック

以下のセクションでは、過去の流出に関する経験（事故と実験の両方）と氷の中での油について予測される経時変化と挙動に関する知識に基づき、氷と開放水面のさまざまな組合せでの流出油の取扱いに関する戦略とテクニックを説明する。

4.4.1 秋と初冬の対応（10月から12月）

10月から11月の秋に、新しく若い氷の下または間に流出した大量の油を回収するための機械的オプションは限られている。Foxtailと呼ばれるロープモップ式のスキマーを対応のためのバージか船の横にクレーンで吊るし、浮氷の間の水と雪泥の中に閉じ込められた局所的な油のパッチを回収することができる。これは氷が多い状態で、氷の間のすき間と開口部から油を回収できる数少ないスキマーの1つである（Counterspil, 1992）。それに加え、ノーススロープでは37のポータブル・ロープモップ・スキマーを備えており、必要に応じて利用できる。沿岸の油の濃度が高い海域や開放水面の水路では、他のポータブル・スキマーも使える。たとえばバキューム、ドラム、ディスクというタイプのスキマーがある。岩屑や氷を扱うための機械的システムをスキマーが備えていれば、氷が成長しつつある状態でも、堰式スキマーを使うことができる。最初の凍結から1~2週間以内に、もっと厚く、凝縮した氷が現れ、スキマーを使う作業は妨げられるものと思われる。

氷が成長する季節の当初は、流出対応船の多くが作業可能である。ジェット推進式の船の場合、砕け氷と雪泥が厚くなり、ジェット・システムの露出した機械部分とぶつかるようになると、作業が不可能になる。船外機付きの船の場合も、厚さを増す氷が船の低い部分にある水取り入れ口をふさぎ始めると、作業に使えなくなる。最も長く持続的に使えるのは、スクリュウ駆動式の船にタグボートとバージを付けて使うシステムである。

凍結条件下で最も効果的な持続性のある戦略では、現場燃焼を使い、氷で自然に封じ込め、ヘリコプターで離れた場所から点火する。砕け氷と雪泥のある状態とない状態で、氷のすき間に閉じ込められた油を燃やす試験が実施され、この方法の実行可能性が示されている（Brown and Goodman, 1987; SL Ross and D. F. Dickins, 1987）。条件にもよるが、90パーセント以上の除去効率は容易に達成できる。20パーセントまで油を風化させても、結果には有意な影響を与えなかった。氷の成長が続くにつれ、油の拡散と運搬プロセスは衰え、最後には止まる。最終的には、油は新たに形成される氷の中に取り込まれる。

油が浸透した氷は10月に短い距離を移動した後（数千フィート）、定着氷となる。この間、油は氷の中に有効に閉じ込められ、対応チームが到達できるようになるまで拡散が抑えられる。凍結の初期段階では、新しい定着氷の縁により、海岸線は油から守られる。

流出現場から油を含む氷が離れる様子を監視するために、流出源に衛星追跡ビーコンを配備する。その後、元の流出現場からやや離れた定着氷の部分にこの氷が取り込まれると、ヘリコプター、ATV、ACVを使って要員と機材を現場に運び、従来の冬期対応手順に従って作業を行うことができる。このタイプの作業では気温、遠隔地、暗さという条件があるため、要員の安全確保に一層の注

意を払う必要がある。当初の対応機材に加え、要員のシェルター、携帯照明器具、携帯ヒーター、トイレ設備なども必要になる。

汚染海域は氷上の油を目視で観察して発見し、また、格子状に穴を開け、氷の下の油の蓄積を見つめる。水中照明器具を使い、汚染の範囲をマークし、記録する。完全な輪郭を線引きするために、汚染が判明している箇所から放射状に追加の穴を開ける必要性が生じることもある。携帯用 GPS 装置を使い、氷の上と下両方のプールの正確な位置を記録する。

季節の初めでも、定着氷の上での回収作業は、油が表面まで上がってくれば、遠隔地での陸上流出対応活動と非常によく似ている。対応チームは、トレンチを掘り、細長いスロットを作り、氷の下にあるオイルプールまで穴を掘る。氷上の油はバームを付けた回収トレンチに集める。スキマーは油をポータブルタンクに回収するか、または 500 ガロンの小型の空輸可能なブラダーに回収し、それをヘリコプターで岸に運ぶ。定着氷の氷床から切り取った氷のブロックを使い、氷上での輸送が可能になるまで、油を封じ込めるための貯油所を作ることもできる。図 4-6 は固い氷の上での典型的な回収作業を図示したものである。ロジスティクス上の制約により、主な回収オプションとして現場燃焼が使われることもある。作業現場まで十分な機材を集めることが懸念される場合、または回収した油を許容時間内に岸まで輸送できない場合は、燃焼が最も効果的なオプションであろう。機械的であれ現場燃焼であれ、あらゆる回収作業において、最後の後始末の作業で現場を徹底的に浄化する。

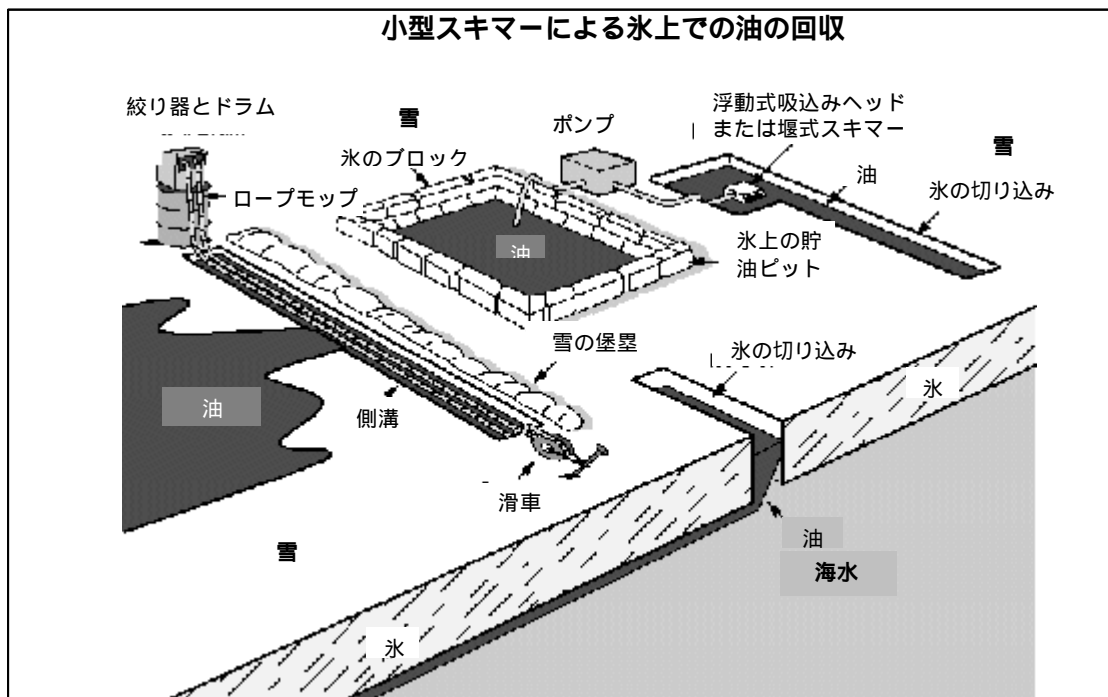


図 4-6
典型的な固い氷上での回収作業

4.4.2 真冬の対応（1月から4月）

現在の技術力は、固い氷の上に流出した油を十分浄化できる能力を持つと考えられている。最初の発見という点ではさらなる困難が予想されるものの、冬期海洋石油探査プロジェクトでも、氷の下に流出した油に関しても同様に良い結果が予測されている（MMS, 1996）。

12月下旬までに、通常、定着氷は堡礁島までのパイプラインの全長に沿って安定する（Vaudrey, 1996）。この時期から5月下旬まで、海洋石油探査または沿岸生産施設のいずれかによる流出の浄化作業では、アイスカバーをトラック、ブラダー、ポータブル・トレンチャーなどの機材を支える頑丈な作業プラットフォームとして使うことができる。位置にもよるが、この期間の氷上作業は数年にまたがって行われることがある。たとえば沿岸海域のアイスカバーはしばしば11月まで軽い乗物を支えることができ、また、堡礁島近辺の氷が6月下旬まで（もろくなっているが）かなりの負荷と作業要員を支えることができる年も多い。安定した冬の氷により現場に近づきやすくなるが、冬の北極地方の状態によっては、浄化作業の実行可能性が左右されることもある。極低温は重機その他の油圧システムの作業にとって危険である。要員の安全を保ち、油圧式機材の故障によるさらなる汚染の危険性を低下させるために、ノーススロープでは重機を使うあらゆる作業について-45°Fという温度制限を設けている。

真冬に氷床の内部に閉じ込められた油の蓄積箇所がわかっている場合は、直接ポンプで汲み上げ、氷上道路を使って運ぶことで、流出油をほぼ完全に除去できる。氷の下のプールには、それよりも大型の機材を使う。汚染した氷を排除するために、オイルプールを露出させる前に、氷の上層を取り除くことができる。重機とバキュームトラックをオイルプールのある場所で直接使えるよう、氷上に道路とパッドを敷設することができる。バキュームトラックは300バレルの断熱タンカーに油を直接回収し、廃棄物処理施設に輸送する。極端に寒い期間には、回収を促進するためにオイルプールでスチームワンドを使う必要性が生じることもある。さらに、回収・輸送期間中に内部のタンクの温度を維持するために、沿岸施設からバキュームタンクに200~300ガロンの湯を入れる必要が生じることもある。

氷上道路によるメリットがない場合でも、この計画は十分に実行可能である。たとえば4台のRollagon運搬ブラダーを1日20時間使えば、岸から10マイルの距離にある現場から15日で20,000バレルの輸送が可能である。この試算では、車両の平均速度を5mph、所要時間を1時間と想定している。さらに大型のトラックをもっと状態の良い氷上道路で使うか、または高速のACVを使えば、スピードと負荷量の向上により、生産性を5倍に引き上げることが可能である。また、より多くの機材をより長期的に使うか、または現場燃焼を行うことにより、さらに大量の処理が可能になる。6月の最終的な浄化作業では、融氷池の油を選択的に燃やした後、残留物を手で回収する。海洋環境に入る可能性がある残留油は（すべての機械的回収と蒸発が終わった後）、当初の流出量の10パーセント未満と推定されている。

冬の廃棄物処理オプションとして現場燃焼と岸への除去という2種類のどちらを選択し、どのように使うかは（図4-7）、その時期と海の深さによって決まる。封入された油の層の範囲がわかったら、次に回収する油の層を露出させるために掘削が溝掘りを行う。融雪装置を現場が岸辺に設置し、汚染した雪と氷を溶かす。回収した油は指定された廃水圧入井までトラックで運び、そこに再び注

入るか、または指定した生産施設までトラックで運んで再処理する。冬の終わりには、解氷前に回収した油を岸まで運ぶ時間がなくなることも考えられ、現場燃焼の方が適切かもしれない。

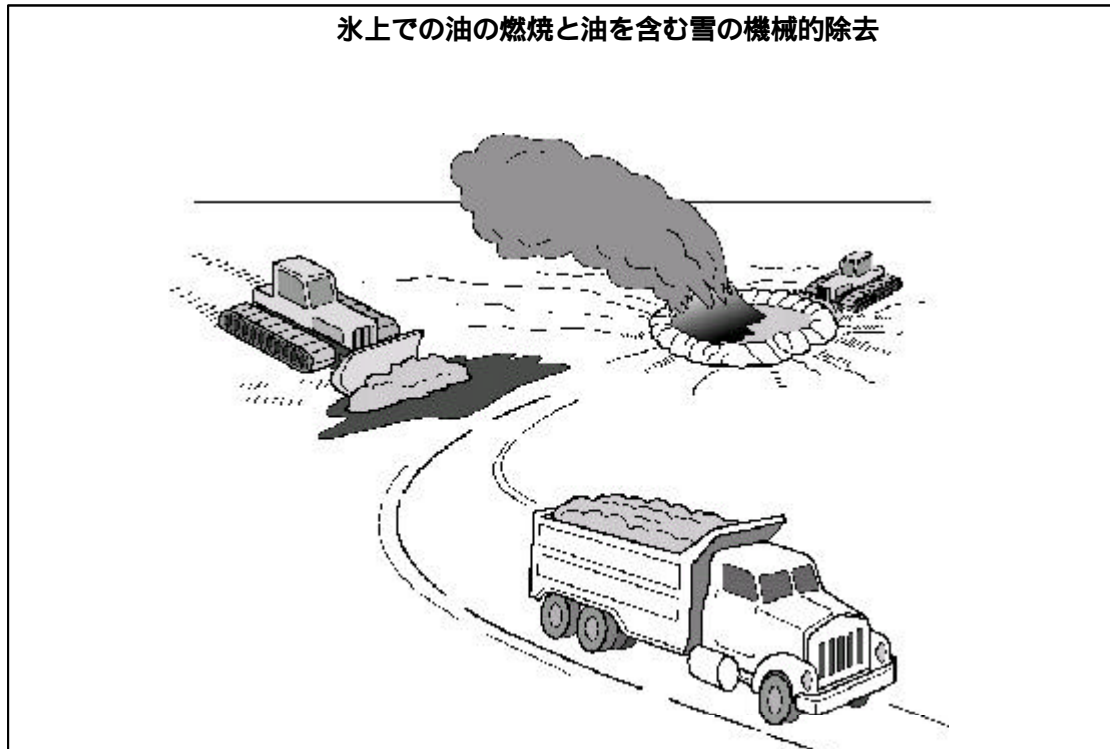


図4-7
冬の油流出における廃棄物処理作業

オイルプールを封入した錨氷の場合、対応班はトレンチを掘り、非常に浅い海（0~4 フィート）の氷のブロックと破片全部を除去できる。3 月以降は、多くの場所で乾いたトレンチ内での作業が可能になることもある。ただし、まだ氷と海底の界面に凍結した土壌の薄い層が存在することがある。この氷状の土壌層を貫通し、堆積物の中に蓄積した油を放出する必要があるかもしれない。海底またはトレンチから回収した油を含む物質は、岸までトラックで運んで一時的に貯蔵し、最終的に処分することができる。

沿岸生産施設または冬期海洋石油探査プロジェクトのいずれかで真冬に起きる噴出かパイプラインの破裂により、かなりの面積が汚染される可能性がある。予測される油のプルームの高さと油滴のサイズを考慮すると、その氷上領域の大半では、燃焼を成功させるには油の濃度が充分でないことが考えられる。その例外は、（1）氷上の対応作業で油井がうまく制御できず、数日以上にわたり流出が続いた場合、そして（2）島の2~3,000 フィート以内の範囲で、弱風が続いた期間の10日以上にわたり、最高4 mmの油が蓄積した場合である。油が厚く蓄積した油井近くからの拡散を制限するには、安全性を考慮した上で可能な限り近い箇所に雪の堡壘を設置する必要がある（図4-8）。その際、東北東と西南西を優先する（優勢な風向と合わせる）。

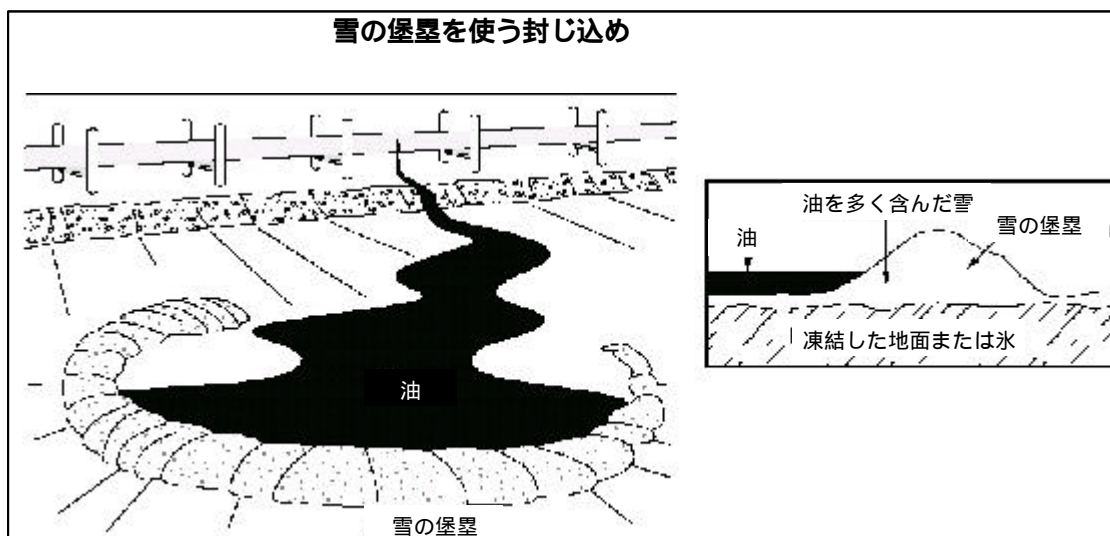


図 4-8

冬期の流出油封じ込めのための雪の堡壘

汚染がひどい領域では、氷上の物質をかきわけ、氷の最上層（2～4 インチ）を除去する作業は重機を使って行う。汚染が軽い領域では、回収する固体の全量を少なくするために、手で回収する作業が行われる。ノーススロープで過去に行われた冬期の対応作業では、目に見える限りのいかなる微量の原油も、この方法で非常に効果的に回収できることが証明されている。

氷が重機を支えられるだけの安定した状態と強度を維持する限り、浄化作業は運搬作業になる。油を回収するには、汚染した雪をかき、氷上から除去する必要がある。油の風化が進みすぎていなければ、回収後に陸上施設で再処理できる。それ以外の場合は、汚染した雪と氷を溶かし、認められた廃水圧入井を通じて再注入できる。

氷脈や石状の氷がでこぼこしている場合も、油の浄化は実行可能だが、多くの労力が必要になる。カナダにおける海上でのフレア型バーナーの不具合では、掘削設備のそばのでこぼした氷に小規模な流出が起きた。この場合は、トーチで局所的に溶かし、手で削り取り、それと油を含む氷の除去を組み合わせ、全体として高い回収率を達成できた。

6.4.3 春の対応作業（5月から6月）

表面の氷が最初に溶け始めてから定着氷が最終的に崩れるまでの期間は、自然に氷上に現れる油が、または冬期浄化作業の後に表面に残った油を現場燃焼させるために最適な時期である。ただし、この期間は重機を伴って容易に現場に近づける最後の時期でもある。

現場燃焼は、氷上道路が使えなくなる 5月下旬から 6 月にかけて、固いアイスカバーから油を除去するための効率的かつ効果的な方法である。これまでの試験では、氷上の油を数週間風化させた後でも、うまく点火し、燃焼できることが実証されている。油が風で集められ、小さなオイルプールができるため、それがいない場合よりもはるかに薄い油膜を燃焼できる (Dickins and Buist, 1981)。新しい原油では、点火を起こすために約 0.04 インチの厚みが必要であり、風化した原油では、0.1～0.2 インチの範囲なら容易に点火する。油の風化は以前考えられていたほど重大ではない。

ノルウェーで進行中の SINTEF(科学産業研究事業団)による研究では、効率は低下するものの、最高 40 パーセントまで乳化した(油の中に水が混在)新しい原油を有効に燃焼できることを実証した(Guenette and Sveum, 1995)。ACS はアラスカ流出危険油田の油と海水のエマルジョンに焦点を絞り、ここ数年間、同様の研究を実施してきた。これらの研究の中で、エマルジョンの点火を促進するさまざまな乳化破壊剤とゲル化混合燃料を使い、ベンチテストを実施した。研究室での実験の結果、有望と判断されたテクニックを小規模と中規模の試験で再評価したところ、SINTEF の研究と同様の結果が得られた(Buist et. al., 1994)。

アラスカその他各地での研究から、ヘリコプターが広い面積にわたる複数のオイルプールに点火するためにきわめて効果的な機材であることが証明された(Allen, 1987)。ヘリコプターの下に吊り下げたヘリコプターは安全かつ効率的である。承認された手持ちの点火装置も、ヘリコプターで輸送された現場作業班が孤立したオイルプールに点火するために使える。多数の大規模ならびに中規模の実験で、約 97 パーセントの燃焼効率を達成している。

実際に応用する際は、燃焼させるにはオイルプールに含まれる油の割合が小さく、数が多すぎて(プールのサイズについては表 5-1 を参照)、また、油がすべて十分厚い油膜の形で存在するとは限らないため、値はそれよりも低くなる傾向がある。一般的には、50 平方フィートを超えるプール中に存在する油の 80 パーセントを燃焼することが現実的と考えられ、これは氷上に露出した油の全量の 68 パーセントに相当する(Norcor, 1975; Buist and Dickins, 1981, Gulf Canada, 1990)。燃焼残留物または未燃焼の氷上の薄い油膜を手で回収することにより、全体的な回収効果が最大 10 パーセント上昇する可能性がある。それに加え、自然な蒸発により、燃焼前に表面の融氷池にある油の 30 パーセントが除去される。最終的な解氷時点までに、すべての浄化作業と自然プロセスの後で残る残留油の量を現実的に推定すると、10~20 パーセントになる。適切な安全対策を講じ、ヘリコプターか水陸両用車両を用意した状態では、氷上での作業を解氷から数日間は続けることができる。

燃焼後に残った少量の残留油(通常、燃焼の対象となる油の 2~3 パーセント)は、氷上で作業班が手で回収し、ヘリコプターにバケツを積んで岸に運ぶ。

6 月中旬に沿岸で、7 月上旬になると堡礁島周辺でも解氷が始まると、前述のように、対応オプションは氷量に依存するようになる。その数週間、条件が許す範囲に合わせて短期間ずつ、さまざまな戦略を組み合わせた対応作業が必要になる。たとえば少から中程度の氷量では、喫水の浅いバargeからオイルフェンスとスキマーを操作し、氷が多い場合は、浮氷の間に閉じ込められた濃い油を現場燃焼し、島に付着して残った氷屑からは手とポンプを使って浄化作業を行い、さらに、影響を受けた可能性があるあらゆる海岸線または砂利パッド表面の浄化も行う。

沖合いでは7月中旬、沿岸では6月中旬までに氷量が 3/10 未満まで減少すると、対応作業は氷による制約を受けることが少なくなり、従来の開放水面での機械的封じ込めと回収のテクニックに頼ることができるようになる(図 4-9)。

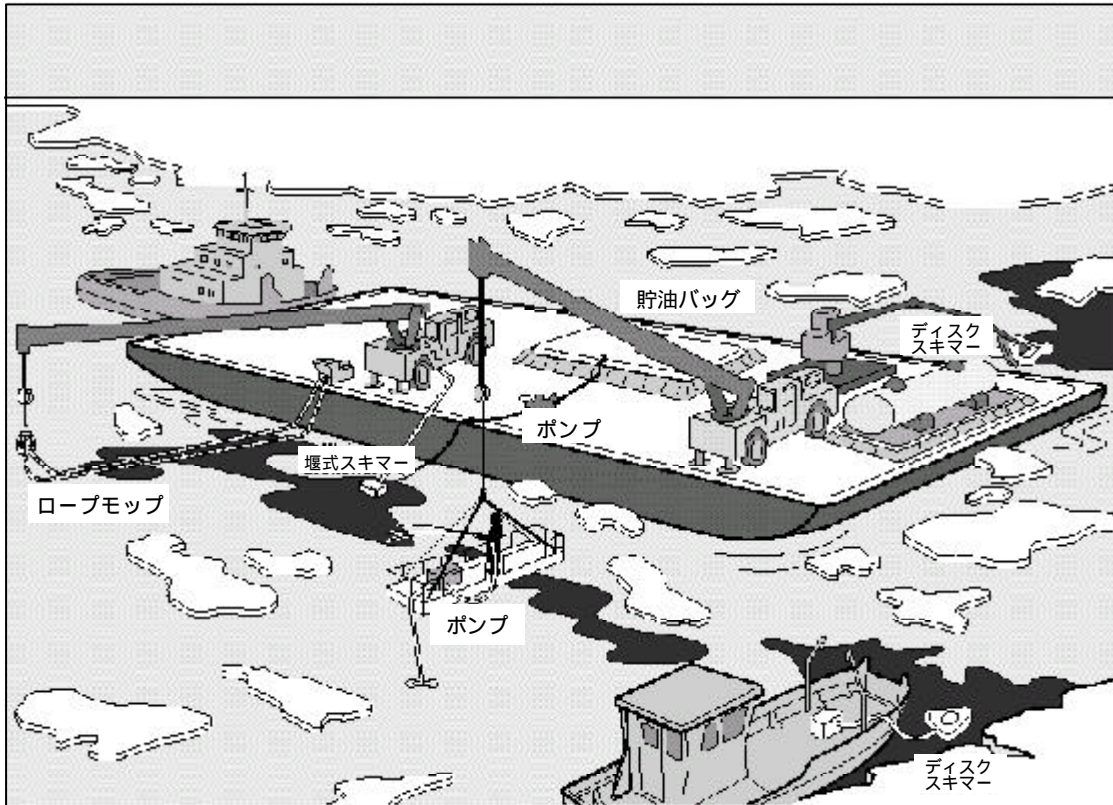


図 4.9

疎氷域での機械的封じ込めおよび回収作業

5.0 まとめ：ポーフォート海における油と氷の流出に対する対応

以上をまとめると、実際の流出、訓練、現場での流出実験、タンク試験、分析研究によって得られた知識から、ノースロープ油田に隣接するポーフォート海で予想される沿岸と沖合いでの多様な条件に対処する実際的な対応戦略ならびにオプションが発展してきた。今日の北極地方油流出緊急対策計画では、さまざまな流出状況に対処するために複数の対策オプションをあげている。氷中での現場燃焼と開放水面での耐火性オイルフェンスは、効果が証明されたテクニックであり、最新の封じ込め・回収機材を使った機械的回収も同様である。

流出への対応では、季節によってさまざまな難点と利点がある。凍結期と解氷期には、流氷の存在と、現場に近づきにくくなることにより、可能な対応オプションが限られ、回収効果が大幅に低下する傾向がある。真冬には長期的に暗く寒い日が続くが、アイスカバーが安定し、それが自然に油を比較的狭い範囲に封じ込めるだけでなく、油の回収と輸送のための安全な作業用プラットフォームにもなる。夏の開放水面期間には、使い慣れた回収テクニックを使えるという利点があるが、風と波の変動が大きく、非常によく動く対象を相手にしなければならないという難題がある。

1年の7~8カ月間、ポーフォート海では氷が油流出への対応を助けてくれる。固い氷は冬のかなりの期間（沿岸に安定したアイスカバーが存在する期間と対応して最高 230 日）、自然に氷を封じ込め、動けないようにする。固い定着氷により、対応チームは必要な資材を運ぶことができ、また、

流出油のかなりの部分を回収できる確率が高い冬期対応計画を立案できる。同時に、夏の環境条件も、多くの南の地域と比べ、海上での浄化にはるかに有利である。たとえば解氷期の割れた氷により、油の拡散が制限され、油が厚いパッチ状になるため、ヘリトーチでの現場燃焼に最適である。また、開放水面期間中、全般的に風浪階級は低から中程度であり、オイルフェンスと機械的回収システムの有効性が上昇する。

詳細な感度評価、沿岸の分類、コンピュータ追跡モデル、対応チームメンバーの定期訓練で裏付けられた対応プランニングは、年間のどの時期でも、組織的でタイムリーな対応の基礎になる。この基礎を補強する手段として、アラスカ州内の他の流出対応組織および対応請負業者との間に業務上の関係を築く活動を続けている。北極地方の環境における油流出の影響を軽減することを目的とした新規または強化した対応方法、システム、機材の研究開発に対し、ノーススロープ事業者が支援と参加を継続してゆく中で、さらなる改善の達成が可能である。

最近、実務経験と研究を通じ、北極地方の海上油流出対応について多くのことがわかってきた。効果的な油流出浄化作業の実施に関して、北極地方の海上はさまざまな点で、氷のない水域の多くと比べて有利な環境と言える。これはこの地方での流出浄化が簡単な作業だという意味ではなく、また氷に覆われた海での流出の影響は無視できるという意味でもない。だが、正しく理解しさえすれば、自然な氷の環境が持つ多くの側面を、海上浄化作業に役立たせることができる。

5.0 参考文献

- Alaska Regional Response Team. *In-situ Burn Guidelines for Alaska*. App. 2, Annex F to the Unified Plan, May 1994.
- Allen, Alan A., Test and Evaluation of the Helitorch for the Ignition of Oil Slicks. in *proceedings of the 10th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar*, Edmonton. 1987.
- _____. Comparison of Response Options for Offshore Spills. in *proceedings of the 11th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar*, Vancouver. 1988.
- _____. Controlled Burning of Crude Oil on Water Following the Grounding of the Exxon Valdez. *Proceedings International Oil Spill Conference*, San Diego, 1991.
- Allen, A. A. and W. G. Nelson. "Oil Spill Countermeasures in Landfast Sea Ice." *Proceedings, 1981 Oil Spill Conference: Prevention, Behavior, Control, Clean-up*: American Petroleum Institute, Atlanta, 1981.
- Belore, R.C. and I.A. Buist. Modeling of Oil Spills in Snow. *Proceedings of the Eleventh Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar*, pp 9-29. 1988.
- Bobra, A.M., and M.F. Fingas. The Behavior and Fate of Arctic Oil Spills. *Water Science Technology*, Vol. 18 No. 2, pp 13-23, 1986.
- Brown, H.M. and R.H. Goodman. *In Situ Burning of Oil in Experimental Ice Leads*. Esso Resources Canada Ltd., Calgary. Environmental Studies Revolving Funds, Report No. 64, Ottawa. 1987.
- Buist, I.A.. *Spill Related Properties of Fresh and Weathered Alaskan Crude Oils*. Alaska Clean Seas, 1994
- Buist, I.A., S.L. Ross, B.K. Trudel, E. Taylor, A.A. Allen and A.B. Nordvik. *The Science, Technology and Effects of Controlled Burning of Oil Spills at Sea*. Marine Spill Response Corporation, Washington, D.C. 1994.
- Cammaert A.B., *Oil and Gas Under Ice Laboratory Study for Canadian Marine Drilling Limited and Environment Canada*, 1980.
- Cox, J.C. and L.A. Schultz. The Transport and Behaviour of Oil Spilled Under Ice. *Proceedings of the Third Arctic Marine Oilspill Program Technical Seminar*, Environment Canada, Ottawa, pp 45-61. 1980.
- Costanzo, D. Trimble/Orion GPS Oil Spill Tracking Buoy Initial Field Trials. In: *Proceedings 17th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar*, Vancouver. 1994.
- Counterspil Research Inc. *Evaluation of the Foxtail Skimmer in Broken Ice*. prepared for Canadian Petroleum Association, Alaska Clean Seas, Canadian Coast Guard, CISPRI, Environment Canada, MSRC. Technical Report Number 92-01 produced by Canadian Petroleum Association, Calgary. January 1992.
- Counterspil Research Inc. *State of the Art Review: Oil-in-Ice Recovery*. Technical Report Number 92-02 produced by Canadian Petroleum Association, Calgary. May 1992.
- Daykin, M., A. Tang, G. Sergy, D. Aurand, Z. Wang and G. Shigenaka Aquatic Toxicity Resulting from In Situ Burning of Oil-on-Water. In : *proceedings seventeenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Vancouver 1994*.
- Dickins, D. and I. Buist. *Oil and Gas Under Sea Ice*. prepared by Dome Petroleum Ltd. for COOSRA, Report CV-1, Volumes I and II. , 1981.
- D F Dickins Associates Ltd., and Fleet Technology Limited. *Behaviour of Spilled oil at Sea (BOSS): Oil-in-Ice Fate and Behaviour* ; report submitted to Environment Canada, U. S. Minerals Management Service and American Petroleum Institute. 1992 (DRAFT)
- Fingas, Merv and Brian Mansfield, "Oil Spills and Oil Spill Cleanup; *Spill Technology Newsletter*, Volume 19(4), Environment Canada, 1994.
- Guenette, C.C. and P. Sveum. In-situ Burning of Uncontained Crude Oil and Emulsions. *Proceedings 18th Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar*, Edmonton. 1995.

- Gulf Canada Resources Limited. *Kulluk Drilling Program 1990-1992*. submission to the Environmental Impact Review Board, Calgary, Alberta May 1990.
- INTEC; *Design Basis*; Northstar Development Project Preliminary Engineering, prepared for BP Exploration (Alaska), Inc., Anchorage, Alaska; INTEC Project No. H-660.2 Technical Note TN340, Preliminary Draft dated June 13, 1996.
- Kovacs, A., R.M. Morey, D.F. Cundy, and G. Decoff. Pooling of Oil Under Sea Ice. *Proceedings, POAC 81: Sixth International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, Quebec, pp 912-922. 1981.
- McMinn, LTJG T.J. Crude Oil Behavior on Arctic Winter Ice: Final Report. *Office of Research and Development, United States Coast Guard, Project 734108, Wash. D.C., NTIS Publication No. AP-754, 261 p*, 1972.
- Minerals Management Service. *Beaufort Sea Planning Area Oil and Gas Lease Sale 144: Final Environmental Impact Statement*; U. S. Department of the Interior, , Alaska OCS Region, OCS EIS/EA MMS 96-0012; May 1996.
- Nelson, W.G. and A.A. Allen. The Physical Interaction and Cleanup of Crude Oil with Slush and Solid First Year Ice. *Proceedings of the Fifth Arctic Marine Oil Spill Program Technical Seminar*, pp 37-59. 1982.
- NORCOR Engineering and Research Ltd. *The Interaction of Crude Oil with Arctic Sea Ice*. Prepared for the Beaufort Sea Project, Department of the Environment, Victoria, Beaufort Sea Technical Report No. 27. 1975.
- North Slope Operators Mutual Aid Agreement for Spill Response, among BPXA, ARCO and Alyeska, February, 1996
- Oil industry task group (Shell, Sohio, Exxon, Amoco). *Oil Spill Response in the Arctic—Part 1: An Assessment of Containment Recovery and Disposal Techniques*. Anchorage, April 1984.
- Oil industry task group (Shell, Sohio, Exxon, Amoco). *Oil Spill Response in the Arctic—Part 2: Field Demonstrations in Broken Ice*. Anchorage, April 1984.
- Oil industry task group (Shell, Sohio, Exxon, Amoco). *Oil Spill Response in the Arctic—Part 3: Technical Documentation*. Anchorage, April 1984.
- Rosenegger, L.W. *The Movement of Oil Under Sea Ice*. Prepared by Imperial Oil Limited for the Beaufort Sea Project, Department of the Environment Canada, Victoria, Beaufort Sea Technical Report No. 28. 1975.
- Shafer, R.V.. *Oilspill Response Under Breakup Conditions*. Alaska Clean Seas Training Manual, 1990.
- Shell et al., 1983 see entry under Oil Industry Task Group in Bibliography.
- S.L. Ross Environmental Research Limited. *Evaluation of Industry's Oil Spill Countermeasures Capability in Broken Ice Conditions in the Alaskan Beaufort Sea*. Prepared for Alaska Department of Environmental Conservation. 1983.
- S.L. Ross Environmental Research Limited and DF Dickins Associates Ltd. *Field Research Spills to Investigate the Physical and Chemical Fate of Oil in Pack Ice*. Environmental Studies Revolving Funds, Report No. 062, Ottawa, 1987
- Vaudrey, K.D. *Design Basis Ice Criteria for the Northstar Development*. prepared for BP Exploration (Alaska) Inc., Anchorage by Vaudrey & Associates Inc., San Luis Obispo, California. April 1996.
- Vefsnmo, S. and B.O. Johannessen. Experimental Oil Spill in the Barents Sea - Drift and Spread of Oil in Broken Ice. In: *Proceedings 17th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar*, Vancouver. 1994.
- University of Alaska. *Alaska Regional Profiles, Arctic Region*. Arctic Environmental Information and Data Center, 1975
- Wotherspoon & Associates. Detection of Oil in Ice & Burning of Oil Spills in Winter Conditions: State of the Art Review. prepared for PROSCARAC Inc., Calgary, Alberta. March 1992.