

海岸に漂着した重油の回収に関する実験的研究

加藤 史訓*・佐藤 慎司**・片田 雅文***

1. はじめに

1997 年 1 月 2 日に沈没したロシア船籍タンカー「ナホトカ号」から流出した C 重油は、山形県から島根県に至る日本海沿岸に漂着した。重油が漂着した海岸では、地方自治体や地元住民、ボランティア等により、多大な人力を投入して漂着油の回収が行われた。

岡市・辰巳 (1975) によれば、ナホトカ号事故を上回る重油が流出した 1974 年の三菱石油水島製油所の事故では、海岸での回収はひしゃく等を用いた人海戦術によるものが大きかった。また、Exxon (1990) によれば、1989 年の米国アラスカ州で起きたタンカーからの原油流出事故では、シャベルや吸着材等による人力回収、冷水や温水による洗浄、バイオレメディエーションが海岸環境の回復のため広く行われた。ナホトカ号の重油が漂着した海岸は漁業や観光など人間生活の場となっているところが少なくないので、生物への悪影響を回避しつつ早急に漂着油を回収することが求められた。このため、温水による洗浄やバイオレメディエーションは局所的な実施が求められることになり、水島製油所の事故時と同様に人手によるものが大きくなった。

海上保安庁 (1996) によると、国内の油流出事故は毎年 500 件前後発生している。流出した油がひとたび海岸に漂着すれば潮間帯の生物や海岸利用に大きな影響を及ぼすため、漂着油を効率的に回収する技術が求められている。そこで、本研究では、海岸に漂着した重油の回収技術についてナホトカ号事故時の事例を参考にして整理するとともに、より効率的な漂着油回収技術を室内実験により検討した。

2. 回収技術の整理

海岸への重油の漂着は、潮間帯の生物に大きな影響を与える。また、海岸に漂着した重油は砂礫の隙間に入り込むので、その回収は沖合に比べて困難ことが多い。よって、海上に流出した重油の回収は海岸に漂着する前

に沖合で行うのが原則である。しかし、沖合での回収は作業船の能力や海象条件に大きく影響されるため、漂流していた重油の一部が海岸に接近することは十分予想される。そこで、海岸での重油漂着対策についても検討する必要がある。

海岸での重油回収方法については、ナホトカ号事故後に各府県の対策本部等でまとめられている (重油回収技術対策連絡会, 1997; 兵庫県ロシアタンカー重油流出事故対策本部, 1997)。それらを参考にして、海岸での漂着対策を漂着前後に分けて整理したのが図-1 である。

漂着前の対策としては、オイルフェンスの設置や油吸着材等を用いた船からの回収による漂着の防止、むしろ油吸着材の前浜への敷き詰めがある。砕波帯より岸側での対策は砕波により十分な効果が得られないことが多いが、内湾に面した波が穏やかな海岸では十分な効果を発揮することが可能である。なお、月野 (1997) は、水深 10 m 以浅の海域では、油処理剤で処理した油が海底付近まで分布するおそれがあるので、その使用を避けた方がよいとしている。

漂着後の対策は、漂着した重油の量により異なる。漂着油が汀線付近を厚く覆う場合、底質の大きさに関わらずポンプやひしゃく等により重油を汲み取ることがまず必要である。一方、それほど漂着量が多くない場合、またポンプ等による一次回収が終わった時点では、底質に

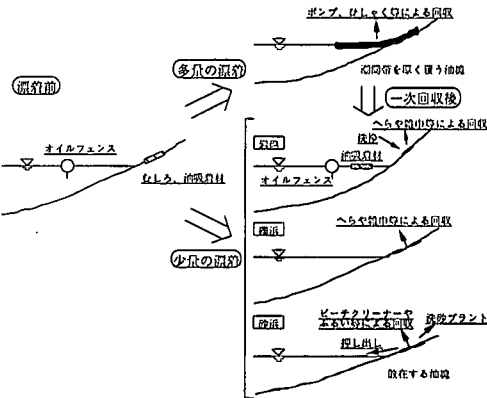


図-1 海岸での漂着対策

* 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室研究員
** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室室長
*** (財)リバーフロント整備センター研究第三部主任研究員

応じた回収を行う必要があり、それでも除去できなかった部分については自然の分解に委ねることになる。

岩礁の場合、岩の表面に付いた油を掻き取るか洗い流すのが一般的である。掻き取りはへらや雑巾などを使って人力で行われる。一方、洗い流しは温水もしくは海水を高圧で吹き付けて、洗い流された油分をオイルフェンスと油吸着材により回収する方法である。児玉（1997）は福井県三国町の岩場で高圧・高温洗浄機を用いて洗浄実験を行った結果、圧力 100 kgf/cm² (9.8 MPa)、水温 30°C および 80°C で 1 分間噴射することによりほぼ完全に付着した重油を除去できると報告している。ただし、高温・高圧の噴射水の影響だけでなく、洗い流された重油の生物への影響が懸念されるため、洗い流しは限定的な実施が求められた。

礫浜の場合、洗い流しは礫間の空隙の深部に油分を含む洗浄水を侵入させることになる。そのため、へらや雑巾などによる回収が中心であった。岩礁や砂浜に比べると、回収方法が限られており、人力に頼るところが多かった。

砂浜の場合、振動により砂と油粒を分離できるように改造されたビーチクリーナーや人力によるふるい分けにより、表面の油粒はある程度回収が可能である。また、かなりの費用がかかるものの、ジェットポンプにより油を分離する洗砂プラントを用いれば、砂中の油分をほとんど除去することができる。さらに、洗い出された油の回収対策が必要であるが、前浜の砂をブルドーザー等の重機で汀線に押し出すことにより、波で砂中の油分を分離することができる。しかし、加藤・佐藤（1997）は砂浜の深さ 1 m 以上の地中で油分が検出されたことを報告している。このような地中の油の回収には重機による掘削が必要である。

以上のことから、海岸での重油漂着対策の課題として以下のような事項を挙げることができる。

- (1) 礫浜での効率的な回収方法
- (2) 砂浜での地中の油分の効率的な回収方法

そこで、本研究では (1) についてはミキサーによる礫の洗浄を、(2) については液状化による砂中油分の分離を室内実験により検討した。また、夏季の高温時や降雨時に砂浜上の油塊が溶けてその周辺に拡散することが懸念される。そこで、高温時や降雨時の砂浜上の油分の挙動についても室内実験により検討した。

3. ミキサーによる礫の洗浄実験

油が漂着した礫浜では、高波の遡上点付近に油が付着した礫が多く見られるものの、汀線付近の礫には油の付着が見られない。これは打ち寄せる波により汀線付近の礫が洗浄されたためと考えられる。この作用を利用して

油が付着した礫を汀線付近に移動して波により洗浄する方法は効率的であるが、礫に付着していた油分が海に再流出するため、周辺環境への悪影響が懸念される。そこで、現場でコンクリートを混ぜるための小型ミキサーの中に油の付着した礫と水を入れて攪拌して、礫に付着した重油が除去できるかどうか検討した。

実験に用いた礫は、福井県三国町の礫浜で 1997 年 9 月 30 日および 11 月 1 日に採取した。写真-1 のようにその表面は黒く、重油がべったりと付着していた。体積が 30~650 cm³ の 5 つの礫について付着している油分を測定したところ、平均で礫 1 g 当たり 2.17 mg であった。

この方法の有効性を確かめるため、冷水より重油が溶け出しやすいと考えられる 50°C の湯 40 l と重油が付着した礫 20 kg をミキサーに入れて 30 分間攪拌して洗浄状況を調べた。実験に用いたミキサーの容量は 500 l、回転数は約 30 回/分であった。攪拌時間を 30 分間と短時間に設定したのは、重油漂着現場で礫を大量に洗浄することを想定しているからである。写真-2 のように、洗浄後の礫はくぼみに油が残っているものの、礫本来の色がわかる程度まで油が除去されていた。その油付着量は平均で礫 1 g 当たり 0.49 mg で、洗浄前の 23% であった。この方法により、礫に付着した油のかかなりの部分を短時間に除去できることがわかった。



写真-1 洗浄前の礫



写真-2 洗浄後の礫

しかし、重油漂着現場に大量の温水を用意することは困難である。そこで、洗浄能力が落ちる 20°C の水に油吸着材や金属ボールを加えて攪拌することにより、温水による攪拌と同等の洗浄能力を確保できるかどうかを調べた。使用した油吸着材は製品 1g 当たり C 重油 42.9g を吸収する（メーカー資料）もので、油が吸着しやすいようにほぐして用いた。また、金属ボールは攪拌中に礫のくぼみに衝突して、くぼみに付着した油を剥がれやすくすることをねらったもので、直径 1cm 、重さ 4g である。なお、使用した油吸着材は焼却時に有毒ガスが発生しないので、油回収後は焼却処理が可能である。

図-2 は、礫 20kg 、金属ボール 5kg の条件で、油吸着材と水の量を変えて洗浄した後の礫の油付着量を、礫 1g 当たりへ換算した結果である。水量に関わらず、油吸着材が 0.065kg 以上では油付着量は温水のみによる洗浄より少なく、その量は油吸着材の量が増えてもほとんど変わっていない。このことから、油吸着材は礫 20kg に対し 0.065kg が適量と考えられる。この量は油吸着材 1g 当たり C 重油 0.67g と製品の性能を大幅に下回っているが、重油が付着してから 8 か月以上放置された礫の洗浄の困難さを示しているものと考えられる。また、油吸着材が 0.01kg の場合、水が 20l より 40l の方が 20% ほど

油付着量が少なかったが、油吸着材が 0.065kg 以上では水量が 20l でも 40l でも油付着量はほとんど変わらなかった。

金属ボールの添加の効果を確かめるため、水量 40l 、油吸着材 0.125kg と 0.25kg の 2 条件で、金属ボールの量を変えて洗浄実験を行った。図-3 のように、油吸着材が 0.125kg および 0.25kg の条件では、金属ボールの添加はほとんど効果がなかった。

以上のことから、重油が付着した礫を 20°C の水と油吸着材とともにミキサーで攪拌することにより、80% 以上の油分を除去できることがわかった。水や油吸着材の適量は、礫 20kg に対しそれぞれ 20l と 0.065kg であり、もとの礫に付着していた油 1g 当たりへ換算するとそれぞれ 0.46l と 1.5g であった。

4. 液状化による砂浜油分の除去実験

砂浜の地中の油塊は、掘削しないと発見および回収ができない。しかし、ポンプなどにより水を注入して砂浜を局部的に液状化させれば、砂中に埋もれた油分が表層に浮き上がってくると予想される。そこで、砂地盤の液状化による砂層中油分の分離現象を確かめるため室内実験を行った。

実験装置は直径 30cm 、高さ 100cm のアクリル製の筒に中央粒径 0.51mm の砂を詰め、ポンプを用いて水と空気を筒の底面付近から注入するものである。筒の側面の上縁には、表層に染み出てきた水を排水するための穴が空いている。水および空気の注入量は毎分それぞれ約 9l 、 $2\sim 3\text{l}$ である。

実験条件は表-1 のとおりである。水の注入時間は礫の洗浄実験と同じく短時間にする必要があるので、ケース 1 では 10 分間、ケース 2 では 30 分間とした。両ケースとも、石川県加賀市塩屋海岸で 1997 年 9 月 30 日に採取した油混じりの砂を用いて、厚さ 5cm の油層を筒中に設けた。その油層は砂 1kg 当たり 38g の油分を含んでおり、油の総量は両ケースとも 190g である。

図-4 は実験前後の油分量を示している。実験前後の油分の収支を計算すると、ケース 1 で 51.2g 、ケース 2 で 47.9g の油分が減少しているが、減少分は筒や注入装置に付着したり、受水槽に流れ出た砂の中に含まれているものと考えられる。そのような減少分を差し引いて考えると、受水槽や筒内の残留水及び深さ $14\sim 15\text{cm}$ まで

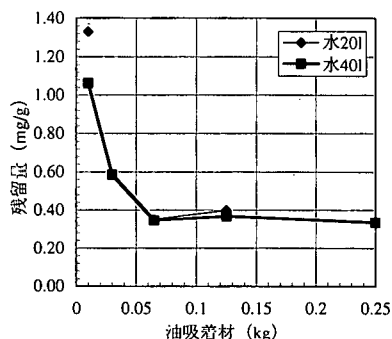


図-2 油吸着材と油残留量の関係

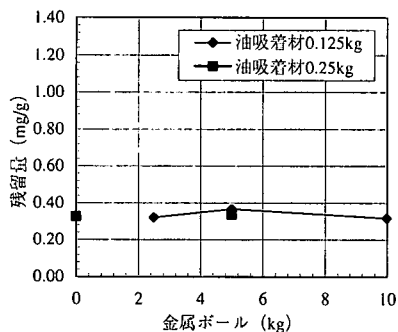


図-3 金属ボール量と油残留量の関係

表-1 実験条件

ケース	油層の位置	注入時間
1	深さ 35~40 cm	10 分間
2	深さ 75~80 cm	30 分間

の表層付近に、ケース 1 で油分の 87%, ケース 2 で 74% が実験後に存在していた。したがって、砂地盤の局所的な液状化を実施した後で表層の砂層を処理すれば、砂中の油分のかなりの部分を除去できることがわかる。また、ケース 2 はケース 1 より 3 倍も注入時間が長かったにも関わらず、残留水や表層付近の油分が少なかった。これは油層の位置の違いによるものと考えられるが、水の注入が 10 分間あるいは 30 分間で十分かどうかはこの結果からはわからない。

図-5 は実験前後の油分濃度を示している。油分濃度は表層がもっとも高いが、最下層も若干高めである。深さ 14~15 cm までの表層を除去しても、数 100 mg/kg の油分が砂中に残ることがわかる。油分がとりわけ鉛直下方に拡散しないよう、十分深い地中から鉛直上方に向けて高压で水を注入するなど、現場での施工を工夫する必要がある。

また、実験後の筒内や受水槽の水面には油膜が見られた。両ケースにおいて、筒内や受水槽の表層水 2 l を採取して油分濃度を測定したところ、いずれも 11,000~16,000 mg/l と非常に高かった。現地での施工にあたっては、注入水が確実に回収できるよう工夫する必要がある。

以上のことから、水の注入方法や注入水の回収方法にさらなる検討が必要なものの、砂浜を液状化させることにより埋もれた油塊を表層に集めることができることが確かめられた。

5. 高温時の油の挙動実験

砂浜の表面は夏季の日中には 60°C 程度まで熱くなるため、砂浜上の油塊が溶けてその周辺に拡散することが懸念される。そこで、そのような高温時の油塊の挙動を室内実験で調べた。

図-6 のように、実験装置は、幅 50 cm、奥行 50 cm、高さ 100 cm のアクリル製の容器に、高さ 50 cm まで中央粒径 0.51 mm の砂を敷き詰め、その表層もしくは砂中に油混じりの砂を層状に敷き詰め、電灯により表面を熱するものである。油混じりの砂は 1997 年 2 月 26 日に福井県三国町浜地海岸で採取し、冷暗倉庫に置かれた密封容器で約 8 か月間保存していたものである。その中央粒径は 1.23 mm で、油分は砂 1 kg 当たり 20 g 含まれている。なお、実験装置は 20°C に保たれた恒温室に置かれている。

実験は 4 ケース行った。ケース 1 では表層 5 cm を油層とし、表面を 60°C に保った。ケース 2 では、ケース 1 と同じ油層位置、温度設定のもとで、電動式の水撒き装置を用いて 10 mm/15 min. の散水を 1 日目、3 日目、5 日目にそれぞれ 2 回ずつ、計 6 回行った。ケース 3 では、

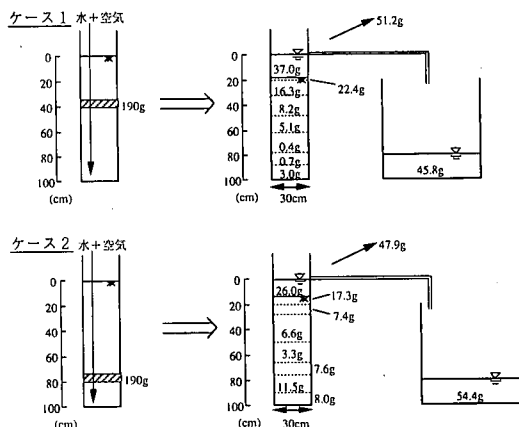


図-4 液状化前後の油分量

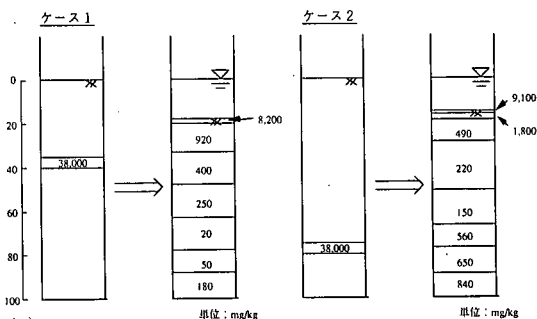


図-5 液状化前後の油分濃度

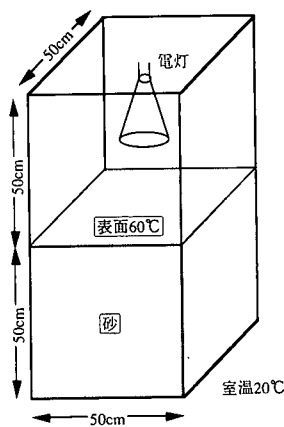


図-6 実験装置

ケース 1 と同じ油層位置で装置全体を 20°C に保った。ケース 4 では、深さ 25~30 cm を油層とし、装置全体を 20°C に保った。いずれのケースも試験体作成後 1 週間設定温度を保った後、容器中央部分を開削して深度別に砂中の油分濃度の測定を行った。

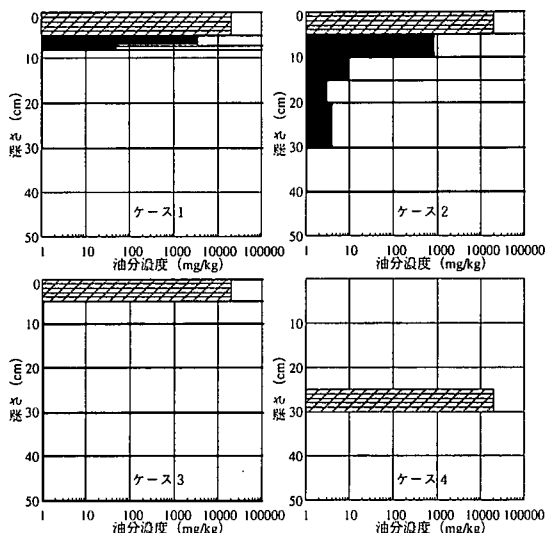


図-7 砂層中の油分濃度

図-7は各ケースにおける油分濃度の鉛直分布を示している。図中の斜線でハッチされた部分は初期の油層の油分濃度を、黒塗りの部分は実験後の砂中の油分濃度を示している。ケース1では、油層の下端から2 cm までの層で3,500 mg/kg、その下から1 cmの層で50 mg/kgの油分が検出された。それより下では油分が検出されなかったことから、油分は3 cm程度浸透していたことになる。散水を追加したケース2では、油層の下端から5 cmまでの層で850 mg/kgの油分が検出され、深さ20~30 cmの層でも4 mg/kgの油分が検出された。これは、高温により軟らかくなった油が浸透してきた水に洗い流されたためと考えられる。一方、ケース3および4では油の浸透は確認されなかった。

以上のことから、表面温度が60°Cになると表面付近の油分が下方に3 cm程度浸透すること、それに降水が加

わると最大25 cm程度浸透すること、またその影響は表面付近に限られることがわかった。

6. おわりに

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 重油が付着した礫を水と油吸着材とともにミキサーで攪拌することにより、80%以上の油分を除去できる。
- 2) 水と空気を注入して砂中を液状化させることにより、砂中の油分のかなりの部分を表層に集めることができる。
- 3) 砂浜の表面温度を一週間60°Cに保つと、砂浜上の油塊から約3 cm油分が鉛直下方に浸透し、さらに降水があると深さ30 cmまで浸透する。

室内実験で有効性が確かめられたこれらの回収技術は現地実験によりさらに検討する必要がある。また、漂着油の生物や海岸利用への影響を定量的に評価することにより、それらの経時変化を考慮した漂着油の回収目標についても検討していきたい。

参考文献

- 岡市友利・辰巳修三編 (1975): 瀬戸内海の重油汚染, 182 p.
 海上保安庁 (1996): 海上保安白書, p. 109.
 加藤史訓・佐藤慎司 (1998): 重油漂着の海岸域への影響調査, 海洋開発論文集, Vol. 14, pp. 447-452.
 児玉 忠 (1997): 岩場に漂着した重油の除去実験, 福井県対策・建設技術研究所年報地域技術, 第10号, pp. 116-117.
 重油回収技術対策連絡会 (1997): 重油回収にかかる技術対策および技術情報について (報告書), 24 p.
 月野良久 (1997): 流出油防除資機材の現状と問題点, 第16回海洋工学パネル概要集, pp. 30-127.
 兵庫県ロシアタンカー重油流出事故対策本部 (1997): 海岸漂着油の回収マニュアル, 12 p.
 Exxon (1990): Valdez Oil Spill Technology 1989 Operations, 100 p.