

蒸気エジェクタによる油濁除去技術

STEAM-DRIVEN EJECTOR FOR OIL SPILL RESPONSE

藤田勇¹・吉江宗生²・斉藤幸博³

Isamu FUJITA, Munuo YOSHIE and Yukihiro SAITO

¹正会員 博士(工学) (独)港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 (独)港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工学 (独)港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

Application of steam jet suction device to oil spill response is presented. Suction and ejection performance of the steam-driven jet pump as well as its other benefits such as breaking emulsion or an application to a beach cleaning device were experimentally examined. This paper also includes some basic topics related to the process of the emulsion breaking by surface active agents. The main conclusions are: (1) A steam-jet pump is basically suitable to recover and transfer high viscosity spilled oil. (2) A steam-jet pump is also available for reforming the nature of the spilled oil. Emulsion breaking was observed to a considerable extent even without chemical agent. (3) A steam-jet pump can be applied to a beach cleaning equipment. The steam-driven jet pump can separate oil from oiled sand very rapidly. The steam-driven jet pump will play an important role to respond to the high viscous emulsified oil pollution.

Key Words : steam ejector, oil spill response, emulsion breaking, beach cleaning

1. 導言

海上流出油による海洋ならびに沿岸の環境汚染は未だ今日的な問題である。海上に油が流出した場合、波による海水との混合によりエマルジョンを形成する。その度合いは油の性状や海象条件により異なるものの、C重油のような重質油の場合、時として百万mPa.sといった非常に高い粘度を有するエマルジョンを形成し、回収処理を極めて困難なものとしているケースが見られる。海上流出油の回収装置や資器材は数多く研究開発され、また市場に出回っている¹⁾。反面いずれのものも流出油の性状や海象条件に性能が大きく左右される。さらに流出油が海岸線に漂着した場合、除去洗浄作業は人力に頼らざるを得ないというのが現状である。流出油汚染から豊かな自然環境を守るためには今後とも環境被害をできるだけ小さくできる、より効率的な流出油回収処理技術の開発が重要である。著者等が考えるところでは流出油回収処理を困難にしている最も大きな原因の一つとして上でも述べたエマルジョンの形成が挙げられる。微小な水滴が油塊の中に取り込まれること(W/O型エマルジョンの形成)により高粘度化した流出油は流体としての取り扱いを困難にしている。このような流出油特有の性状を現

場において制御することができれば、回収の効率は改善されるはずである。回収油を管内輸送する際の摩擦の低減方法としては注水による潤滑がこれまでも用いられており²⁾、また水自体を作動流体とするジェットポンプによる油回収技術も開発されつつある³⁾。さらに空気流による流出油の吸引搬送においても注水による流動性の制御が効果的であることがわかっている^{4,5,6)}。このような技術開発の流れは混相流の利用という枠組みで捉えることができる。そのような視点から眺めると、上で述べた流動性の制御は液-液混相流、気-液混相流という違いはあるにせよ、いずれも“断熱”混相流の応用であるということに気がつく。一方混相流に関する学問分野は必ずしもそうとは言い切れないが、例えばボイラ等熱機関内の流動現象を対象として発展したという側面があり伝熱を伴う場合が多い。してみると単純な連想ではあるが、次に熱流体を用いて流出油回収を行うとどうなるだろうかという疑問は至極自然であり且つ興味深いものでもある。著者らはそのような着想から、作動流体として水蒸気を用いた油回収処理技術についての検討を行っている^{7,8)}。予想として水蒸気を用いることの利点は

i) エジェクタ等の使用により、機構的に簡便な方法により流出油の吸引が可能である。水蒸気はエジェク

タ内で凝縮するため、空気エジェクタなどと比べて効率が良い。

- ii) 仕事に加えて熱の供給ができるため、回収した流出油の温度上昇による粘度の低下が図れる。
- iii) エマルジョンブレイク等、流出油のレオロジー的な変化が期待できる。

等があげられる。以下で順次その可能性等を見ていくことにする。

2. 実験装置

実験装置の概要を図-1に示す。実験では貫流型蒸気ボイラにより発生した約0.98MPaの飽和蒸気を使用した。蒸気は渦流式流量計により流量測定した後、減圧弁により所定の圧力に減圧し蒸気エジェクタに供給した。実験で使用した蒸気エジェクタの断面を図-2に示す。図で左側より流入した高圧の蒸気は先細末広の形状を持つプライマリーノズル内で超臨界膨張を行い、低圧の超音速流を形成する。ミキシングセクション内では超音速の蒸気流と吸引された二次流れが混合される。使用したプライマリーノズルは喉部直径が5mm、出口末広部の直径が8mmのものである。エジェクタからの排出流はサイクロン式のセパレータに導かれ、気体成分は上方より大気中に排出し、液相あるいは固相成分はサイクロン下部に設置した容器に導いた。吸引実験は、水、空気、油あるいは砂スラリー等に対して行った。空気、水の場合には

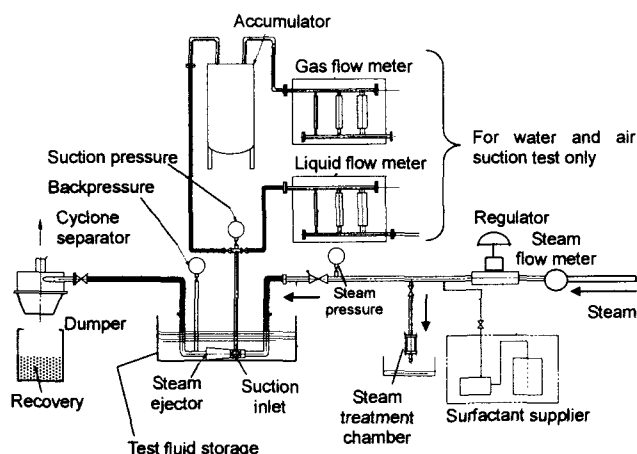


図-1 実験装置概要

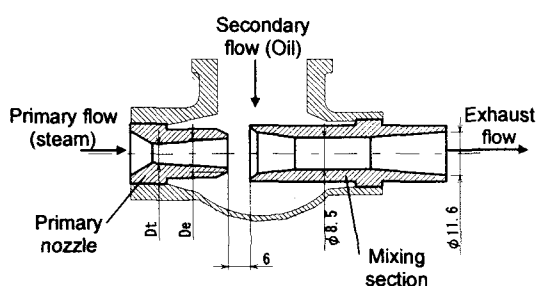


図-2 蒸気エジェクタ断面

流量計を介してエジェクタに吸引した。その他のものは容器内に貯めた状態でエジェクタの吸引口をその中に漬ける形で実験を行った。吸引装置の外に蒸気による燻蒸の効果調べる目的で透明ガラス管による燻蒸容器を設けた。また界面活性剤の効果調べるために、定量ポンプによる薬液注入系を付加した。

3. 結果と考察

(1) 吸引特性

二次流れの無い、すなわち吸引口締め切り状態において発生する吸引圧力と蒸気消費量を図-3及び図-4に示す。図中の線は完全流体の等エントロピー流れを表す理論線であり、衝撃波を伴わない超臨界膨張を記述している。図中の式で p は圧力、 G は質量流量、 V は密度、 M はマッハ数、 κ は比熱比で水の場合1.3である。 A は流路断面積で、添え字の0は定み点状態を、また*は臨界状態を示す。実験値と理論値は蒸気圧力が0.2MPa以上で比較的良好一致を見せる。大雑把ではあるが背圧を大気

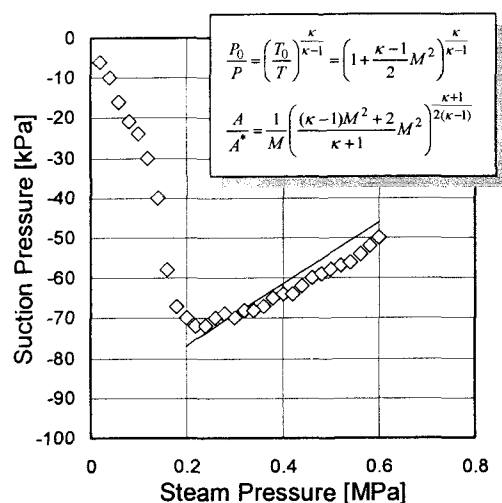


図-3 蒸気エジェクタ吸引負圧（二次流れ無し）

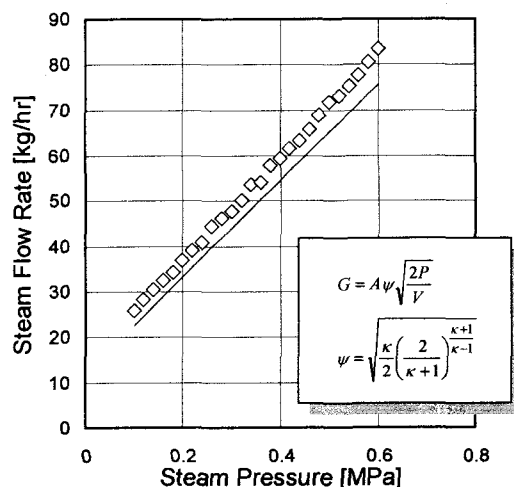


図-4 蒸気エジェクタにおける蒸気消費量（二次流れ無し）

圧とし、蒸気の臨界膨張圧力比 (P^*/P_0) が0.545であることを考えれば、一次圧がおおよそ0.2MPa以上で超臨界膨張状態となるので理論線が0.2MPa以上のところで実験値と一致するのは妥当である。また飽和水蒸気の断熱膨張過程は湿り域で行われ、0.2MPaの飽和蒸気が-70kPaまで膨張した場合の湿り度はおおよそ0.1程度になるが、その影響は大きくないようである。

図-5に液体の吸引試験結果を示す。蒸気の様に凝縮性を伴う流体を一次流体（作動流体）としたエジェクタにおいては、エジェクタ内部における二次流体（被吸引流体）との混合過程で蒸気は凝縮し、密度は1/1000以下になる。このため、一次流体の持つ混合管出口での運動量は入り口に比べて非常に小さいものとなり、空気など相変化の無い流体を一次流体として使用するジェットポンプに比べて効率的である。実験では10L/min前後を境として、V字型の吸引圧力-流量特性が得られた。流量が小さい不完全凝縮の領域では吸引量の増加に伴って負圧が大きくなる。一方吸引流量の大きい完全凝縮の範囲では流量増加に伴って吸引負圧は小さくなる。こうした特性は混合管での運動量の変化から説明できる。不完全凝縮領域では二次流れの増加に伴い蒸気の凝縮量が増え、

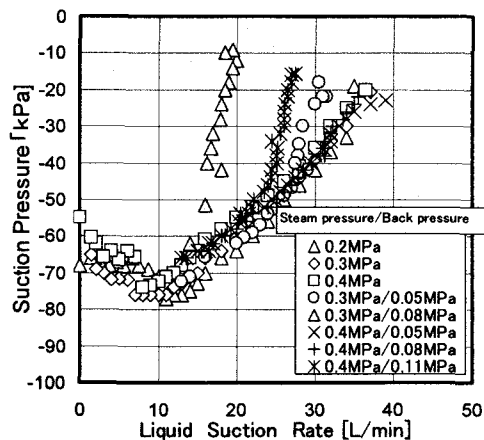


図-5 蒸気エジェクタ吸引特性
(液体吸引)

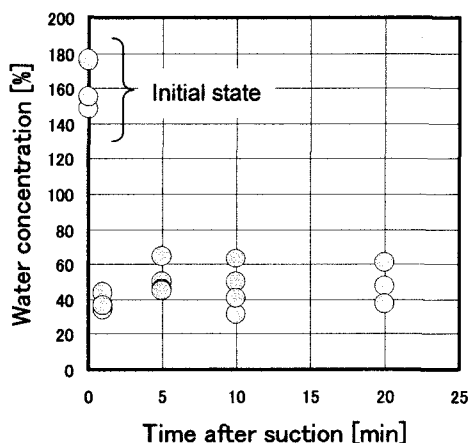


図-6 蒸気エジェクタによるエマルジョンブレイク
(処理後高温養生)

混合管部から出て行く流れの運動量は減少し、その反動として吸引負圧は大きくなる。一方完全凝縮の領域ではそのようなことは無く、流量の増加に伴って吸引圧は小さくなる。エジェクタ背圧が大きくなると吸引量が小さくなる傾向があるが、駆動蒸気圧を上げると吸引量の減少は小さくなる。高粘度のエマルジョン化油を吸引したが、顕著な背圧の上昇は見られず、スムーズな吸引並びに排出が行なわれた。

エジェクタから排出される流体の温度は不完全凝縮領域では、ほぼ水の飽和温度、すなわち背圧が大気圧の場合、水の沸点である100°Cを示す。完全凝縮領域では蒸気と吸引液体の熱量バランスで温度が決まる。この例では流量が20L/min程度の場合温度上昇は40~50°C前後となる。従来の断熱系の油回収においては、管内摩擦損失を減らすために注水により潤滑をはかる等の手法がとられていたが、蒸気エジェクタの場合には温度上昇による粘度低下の効果が大きく、あえて余分な水を加える必要はない。このように蒸気の使用により流出油の持つ高粘度という問題点を克服することができる。

(2) エマルジョンブレイク

前節では蒸気エジェクタの吸引特性について論じた。ここでは蒸気エジェクタ吸引に伴うエマルジョン化油の物性の変化について述べる。特に注目すべきは油相内に含まれている水の量、つまり含水率の変化である。流出油回収現場においてエマルジョンを解消し、真の油分のみを回収することができれば、同じ容量の回収槽を用いてより多くの油を回収することが可能となる。蒸気エジェクタ吸引の前後におけるエマルジョン化油中の水分量の変化をカールフィッシャー滴定により測定した。結果を図-6に示す。横軸は吸引処理後の高温養生時間であり、この間油温は60-70°Cを保っていた。吸引前で160%程度あった含水率はエジェクタ吸引処理直後に40-50%まで低下し、その後の高温静置状態では大きな変化は見られなかった。このように単に高温状態に静置しておく

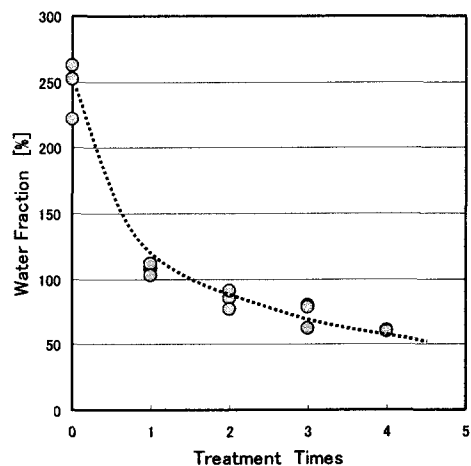


図-7 蒸気エジェクタによるエマルジョンブレイク
(繰り返し処理)

だけではエマルジョンは解消しないようであり、エマルジョンブレイクには、エジェクタ内部での非常に強いせん断流れが関係している可能性が暗示される。エジェクタ吸引を繰り返し行った場合には図-7に示す様に順次含水率が低下していく様子が観察された。

次にエマルジョンブレイクの促進のためには、どのような条件が必要なのかを知るために、以下のような簡単な実験を行った。円筒型スピンドルを持つ回転式粘度計により粘度の連続計測を行い、あるタイミングで界面活性剤を添加し、その後のエマルジョンブレイクの進行割合について調べた。界面活性剤にはPEG-10 laurateを用いた。実験パラメータとしては界面活性剤濃度、ずり速度粘度ならびに温度を制御した。

図-8に界面活性剤濃度による粘度の時間変化を示す。温度は50℃、ずり速度は186[1/sec]である。活性剤濃度が1.16%の場合の粘度の低下が緩やかであるのに対して、濃度が1.93%、2.35%、3.11%の場合にはいずれにおいても

もほぼ同様且つ急速な粘度の低下が見られた。このことは界面活性剤の濃度に関してある臨界値が存在して、臨界値以上では効果が飽和することを示している。

次に温度の影響を見る。図-9に結果の一例を示す。界面活性剤濃度は1.7-1.9wt%で、ずり速度は186[1/sec]である。温度は20、25、30並びに40℃の4通りで実験した。温度が異なるため初期状態で示す粘度は異なるが、界面活性剤を添加してからの経過時間でみた粘度の低下割合としてはいずれの温度においてもさしたる違いは見受けられない。

一方、ずり速度の影響は顕著である。ずり速度を5-80[1/sec]の範囲で変化させて、界面活性剤添加後のエマルジョン化油の粘度変化を測定した。図-10にその結果を示す。エマルジョン化油は非ニュートン流体であり異なるずり速度において異なる粘度を示す。そのため、図では各ずり速度における粘度の初期値を用いて規格化した値を示した。図から明らかなようにずり速度の増大に伴って、粘度の低下率は顕著に増大する。粘度 μ の時間

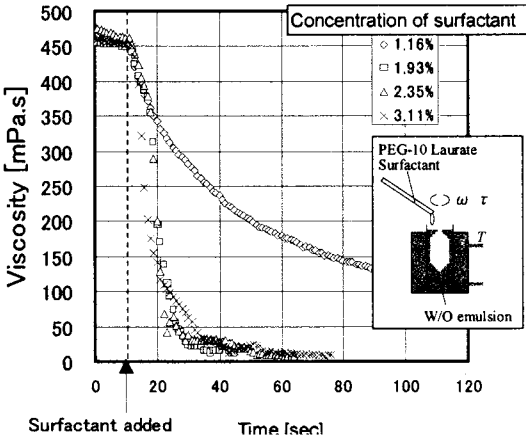


図-8 界面活性剤によるエマルジョンブレイク (界面活性剤濃度依存性)

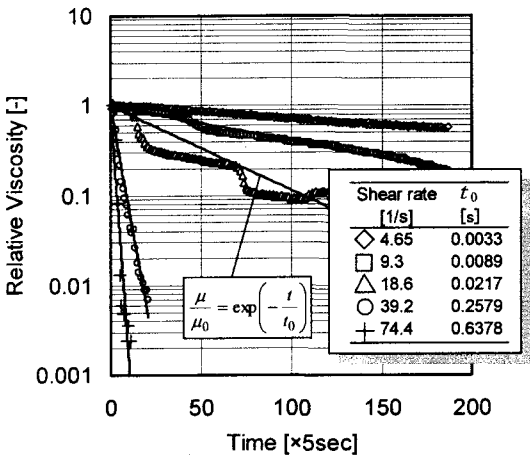


図-10 界面活性剤によるエマルジョンブレイク (ずり速度依存性)

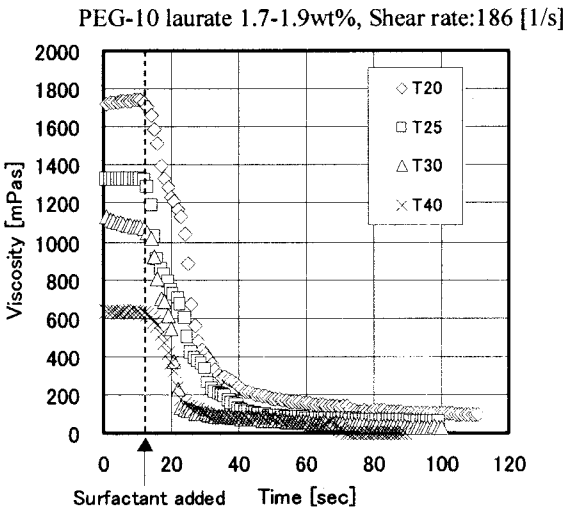


図-9 界面活性剤によるエマルジョンブレイク (温度依存性)

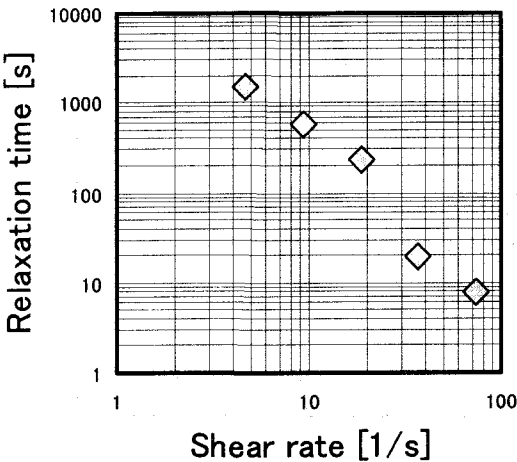


図-11 エマルジョン分解速度

変化を一次反応，すなわち

$$t_0 \frac{d\mu}{dt} + \mu = 0$$

と仮定して各データにフィッティングすると，比較的良い一致を見る．ここで t_0 は時定数であり，粘度が初期値に対して $1/e$ になるまでの時間を示している． t_0 のずり速度依存性を図-11に示す．このケースではエマルジョンブレイクの速度はずり速度のほぼ自乗に比例していた．このように界面活性剤によるエマルジョンブレイクにおいては温度よりもずり速度が反応の速さを決める支配的な要素であることがわかる．

界面活性剤の添加によるエマルジョンブレイクは界面化学的な過程であり，そのままでは先に見た蒸気エジェクタ吸引によるエマルジョンブレイクに適用することはできないが，何らかの示唆あるいは共通点は含んでいるものと思われる．図-6で見たように，蒸気エジェクタ吸引処理における含水率の低下はもっぱら吸引において起きており，その後の高温養生においては含水率の変化は無かった．また図-7に示すようにエジェクタ吸引を繰り返すことにより含水率は低下していく．エジェクタ内部で超音速蒸気流と吸引されたエマルジョン化油の間に非常に強いせん断流れが存在しているはずであり，これは界面活性剤によるエマルジョンブレイクにおける大きなずり速度に対応しているように思われる．

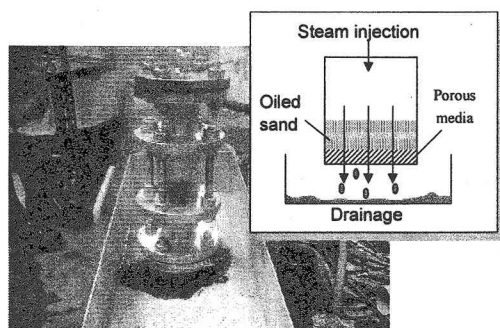


図-12 蒸気燻蒸による油汚染砂の洗浄

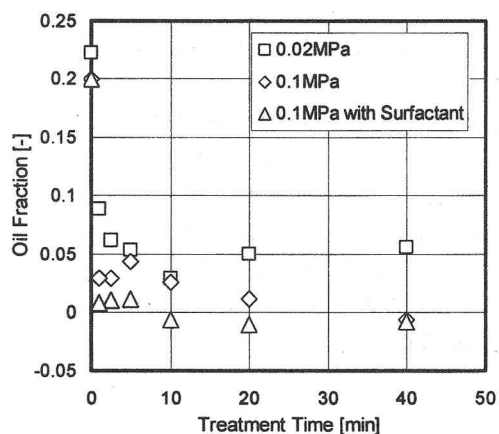


図-13 蒸気燻蒸による油分離速度

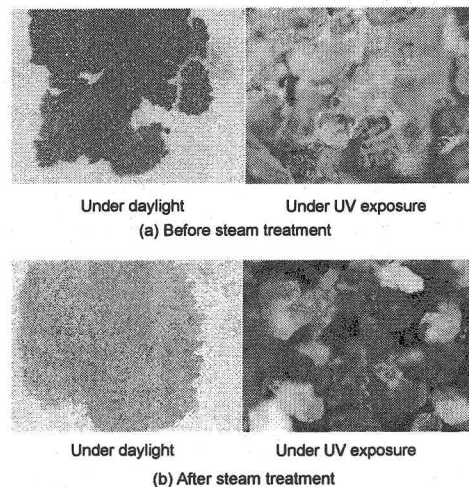


図-14 蒸気燻蒸による砂の洗浄効果の観察

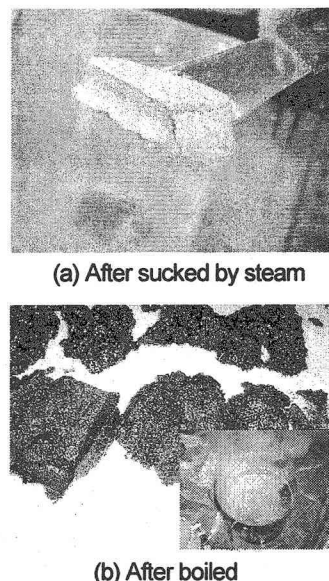


図-15 蒸気エジェクタ並びに沸騰処理による油汚染砂の洗浄

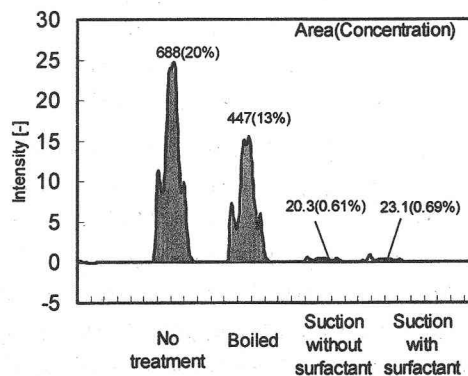


図-16 薄層クロマトグラフによる残留油分の計測

(3) 油汚染砂の洗浄

次に蒸気の利用法として油汚染砂からの油分離の実験を行なった。予備的な検討として、蒸気による燻蒸によりどの程度汚染砂から油の分離ができるかを実験した。原理を図-12に示す。容器の中に油で汚染された砂を入れ、上方より蒸気を吹き込む。容器の底部は多孔質体でできており、蒸気、凝縮水ならびに油は底から抜けて排出される。実験結果の一例を図-13に示す。横軸は燻蒸時間であり、縦軸は残留油量である。油量の計測は乾燥炉において水分を蒸発させた状態での重量変化から算出している。図で負の値が出ているのは計測上の誤差であるが、おおむね燻蒸前には20-23%程度であった油分が燻蒸により比較的短い時間で0-5%程度に減少していることがわかる。蒸気圧力はキャリアガスの量として考えることができる。この実験では蒸気圧が0.02MPaの時は、0.1MPaの時と比べて分離性能が劣っていた。"with surfactant"とあるのはGemtek社製の界面活性剤SC-1000を蒸気中に添加した場合であるが、界面活性剤が無い場合と余り大きな違いは見られない。図-14に処理前後の砂の写真を示す。目視観察では重油により黒かった色がとれており、手触りも本来の砂のものに戻っていた。右側の写真は紫外線蛍光顕微鏡によるものであるが、砂粒子間に介在していた油が処理後に減少している様子が観察された。このように蒸気を用いることで、重油により汚染された砂から比較的短時間に油を除去できることがわかる。

次に汚染砂の蒸気エジェクタによる吸引処理を試みた。エジェクタ吸引口部に矩形状のホッパーを配置し、コンクリート打設時に用いるバイブレータにより加振し油汚染砂を流動化してエジェクタ吸引を補助した。実験に用いた砂の平均的な粒径はおおよそ100 μ m程度である。処理前後における砂の目視観察を図-15(a)に示す。見た目には油を含んでいないようであった。比較対照として図-15(b)に示すように熱のみを与えた場合の油分離実験を行なった。熱交換器を設けた容器に汚染砂と水を加え、10分程度の間沸騰させた。この場合見た目にも油の分離状況は芳しくなかった。残留油分を薄層クロマトグラフ(TLC)で測定した。残留油分の抽出にはn-hexaneを用いた。結果を図-16に示す。処理前の砂の油分が20%、沸騰加熱処理による砂の含油量が13%であるのに対し、エジェクタ処理による砂の含油量は1%を下回っていた。汚染砂からの油分離が単なる熱の作用ではないことが分かる。エジェクタ処理では界面活性剤(SC-1000)を添加した場合としない場合を実験したが、両者に顕著な違いはなかった。このようにエジェクタ吸引により、油汚染砂からの油分離を比較的簡便かつ急速に行うことができることがわかった。何故そのようになるのか詳細な過程は不明だが、先の燻蒸実験の結果と合わせて考えて蒸気の凝縮あるいはエジェクタ内の強いせん断力が作用している可能性が示唆される。

ナホトカ号事故の際、砂浜の油汚染は深刻な問題に

なった⁹⁾。本稿で述べたように蒸気の利用により、現場において簡易に汚染砂から油分離を行なうことができれば、環境の修復が迅速に図られ、被害を小さく抑えることができるものと考えられる。

4. 結論

本稿では、流出油回収あるいは処理における水蒸気の利用という着想の有効性について実験的検討を行った。その結果以下の結論を得た。

- (i) 蒸気エジェクタは流出油の吸引除去に有用である。
蒸気エジェクタはポンプ仕事と加熱を同時に行うことができ、エマルジョン化油の持つ高粘度性を克服することが可能である。
- (ii) 蒸気エジェクタによりエマルジョンを分解できる。
実験ではエマルジョン化油を蒸気エジェクタ処理することで、エマルジョン化率を160%から50%程度まで減らすことができた。
- (iii) 蒸気エジェクタは油汚染砂の洗浄にも有効である。
実験ではC重油で汚染された砂を蒸気エジェクタ処理することで、残留油分を20%から1%前後まで低減することができた。

今後は更なる検討を行い、実用化への道筋を見出していきたい。なお本研究の一部は環境省廃棄物処理等科学研究費補助金を得て行なわれたものである。ここに記してお礼申し上げる。

参考文献

- 1) World catalog of oil spill response products—seventh edition, ISSN 1076-4666, 1999.
- 2) FRAMO TransRec User Forum, June 2003.
- 3) M.Tatsuguchi et al., Development of a handy oil skimmer, Oceans'04/MTS/IEEE/Technocean'04, CD-ROM, 2004.
- 4) 藤田他: 高粘度液体の管内空気輸送における圧力損失特性, pp.821-826, 海洋開発論文集, Vol.19, 2003.
- 5) 藤田他: 真空吸引式油回収装置の研究, pp.1247-1252, 海洋開発論文集, Vol.20, 2004.
- 6) I.Fujita et al., An onboard Vacuum Suction spilled Oil Recovery System, Oceans'04/MTS/IEEE/Technocean'04, CD-ROM, 2004.
- 7) 藤田他: 混相流による流出油回収に関する研究, 第18回海洋工学シンポジウム, CD-ROM, 2005.
- 8) I.Fujita et al., Steam jet pump for oil recovery and reformation, International oil spill conference 2005, 2005.
- 9) 海洋工学研究所編: 重油汚染・明日のために—「ナホトカ」は日本を変えられるか, pp.120-121, ISBN4-90549-02-0, 1998.