

界面活性剤添加による重油エマルジョンの 管内摩擦損失の低減

FRICITION LOSS REDUCTION IN PIPE LINE FLOW OF EMULSIFIED HEAVY OIL BY SURFACE ACTIVE AGENTS

藤田勇¹・藤咲秀可²・松崎義孝³

Isamu FUJITA, Hideyoshi FUJISAKU, Yoshitaka MATSUZAKI

¹正会員 博(工) 港湾空港技術研究所 油濁対策/混相流体研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²港湾空港技術研究所 油濁対策研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 修(工) 港湾空港技術研究所 混相流体研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

This paper presents friction loss reduction in pipe line flow of emulsified heavy oil by adding surface active agents. When heavy oil spills on the sea, it often forms W/O (water in oil) emulsion and has very high viscosity. This rheological change may cause heavy load to pump or clog pipe when the oil is transferred in the pipe line. To overcome these difficulties, some friction loss reduction method is required. An injection of small amount of surface active agent promotes emulsion breaking which reduces friction loss in the pipe line flow of the oil. Effect of surface active agent on friction loss reduction was experimentally studied. In the experiments, a compulsory inline mixer was employed to promote emulsion breaking. This paper gives experimental results and discussion about the mechanism of friction loss reduction as well as comparison to water injection method. It turned out that the injection of surface active agent is one of the good options to reduce the friction loss of heavy oil emulsion in the pipe line flow.

Key Words : Oil spill, W/O emulsion, friction loss, pipe line, surface active agent

1. はじめに

海上において重質油が流出すると、波浪などの混合作用により海水が小さな水滴となり油の相内に分散したW/O(Water in oil)型のエマルジョンを形成することが多い。形成されたエマルジョンは流出油と比較して非常に高い粘度を示すようになる。流出油の回収作業においては、多くの場合管路を用いて回収油を移動あるいは輸送する工程が含まれている。対象とする油が高粘度エマルジョン化油の場合、管路内で発生する摩擦損失が非常に大きく、管路が閉塞状態になる、あるいはポンプに過大な負荷を与えるなどのトラブルにつながることもある。このような問題の発生を避けるためには、高粘度エマルジョン化油の管路輸送において、発生する摩擦損失を低減する必要がある。摩擦損失低減のための手法としては加熱により粘度を下げる、あるいは注水により潤滑を行うなどの方法があるが、界面活性剤を添加するのも一つの方法である。熱源を必要としない、回収油に占める自由水の割合を増やさないといった点から界面活性剤の添加は手法として優れたものである。

一度形成されたW/Oエマルジョンはかなり安定し

ており自然状態では他の状態への遷移はほとんど見られない。しかしながら、適当な界面活性剤を添加することで、W/O型からO/W(Oil in water)型エマルジョン、あるいは油水分離状態へと変化させることができる。海上流出油の分散処理において散布される油処理剤にはそうした界面活性成分が含まれている。高粘度エマルジョン化油の管内流に対して、このような油水混合物の状態遷移を起こす界面活性剤を添加した場合、管内流全体あるいは部分的にW/Oエマルジョンが壊され管壁との間の摩擦が低減される可能性がある。本研究ではC重油と水を混合して作ったエマルジョン化油に対して界面活性剤あるいは油処理剤を添加した場合の管路の圧力測定実験を実施した。実験では界面活性剤と油の攪拌のためにインライン混合装置を用いた。

2. 実験手法

(1) 強制混合装置を用いた実験

図-1に強制混合装置を用いた実験装置を示す。試験油は油槽よりチューブポンプにより強制攪拌装置へ送り込まれる。攪拌装置から出た油は内径35.7mmの鋼製の直管を通りドラム缶へと排出され

る。圧力測定は、ブルドン管を用いてP1, P2, P3の三点で行った。攪拌装置の構造を図-2に示す。内径130.8mmの円管内に塩化ビニル製のローターが配置されている。ローターと円管内壁とのギャップは4.4mmである。ローターは、油圧モーターにより回転する。油の入口と出口の距離は450mmである。薬剤の添加には油圧シリンダーで駆動するピストン式の薬剤添加装置を用いた。

実験に用いた試験油は、市販のC重油と水道水を混ぜたものである。なお配合割合は、C重油:水=1:1とした。

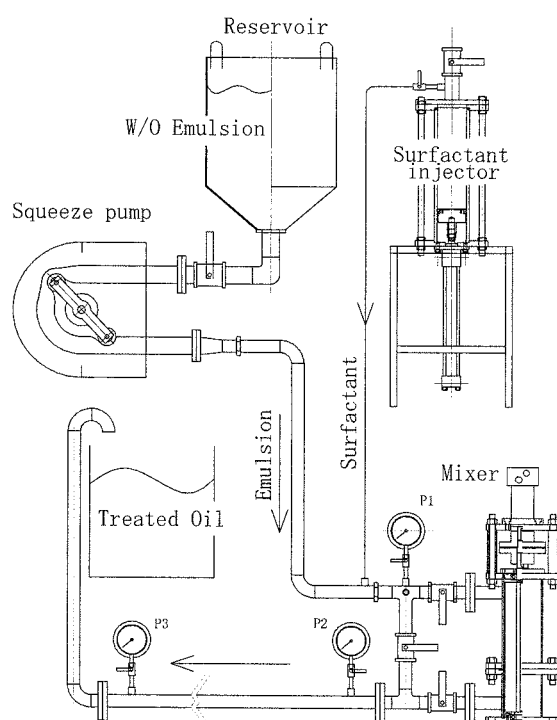


図-1 強制攪拌による圧力損失低減実験

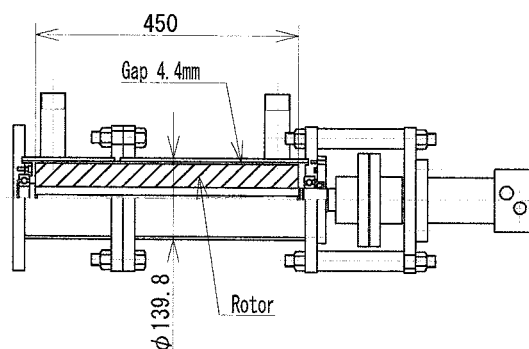


図-2 攪拌装置の構造

(2) 使用薬剤

本研究で使用した薬剤を表-1に示す。薬剤1~3は界面活性剤単体である。薬剤1, 2は石田等による特許¹⁾を参考にエマルジョン分解に効果がある薬剤として選定した。一方、薬剤3の選択には海外における研究例²⁾を参考にした。薬剤4は、国内で広く使われている通常型油処理剤の代表として選択した。薬剤5は米国EPAにおいて油濁対応時の利用を考慮して毒性等が評価された洗剤の一つである。薬剤6は溶媒の効果を見る為のものである。

表-1 使用した薬剤

#	Product name	Ingredients or full name	Description
1	MYL-10	PEG-10 laurate	HLB 12.5
2	SL-10	Sorbitan laurate	HLB 8.6
3	OTP-75	Diethylhexyl sodium sulfosuccinate	
4	AB-3000L	Unknown	Oil dispersant
5	SC-1000	Unknown	Surface wash agent
6	Kerosine		Light fuel oil

薬剤1~3の界面活性剤は、低温において固化する傾向を持つため、実験で用いる際にはエタノールと水を用いて希釈したものを用いた。調合割合を表-2に示す。OTP-75に関しては、希釈の効果を調べる為に、3通りの希釈割合の薬剤を調製した。MYL-10, OTP-75については、いったんエタノールで希釈した後には、水での希釈が可能であったが、SL-10においては、水を加えると白濁するためにエタノールのみで希釈した。

表-2 薬剤の希釈

#	Product name	Dilution ratio	Surfactant	Ethanol	Water
1	MYL-10	5	1	1	8
2	SL-10	6	1	5	0
3-1	OTP-75	5	1	1	3
3-2		11.7	3	8	24
3-3		50	1	6	43

3. 実験結果と考察

(1) 試験油の粘度特性

実験で用いた試験油は、C重油と水を混合したエマルジョンである。B型粘度計を用いて測定した粘度特性を図-3に示す。ニュートン流体の場合には剪断変形(ϵ)と剪断応力(τ)の関係は比例関係になるが、C重油と水の混合によりできたW/Oエマルジョンは擬塑性流体的な特性を示す。本実験で使用した試料では剪断力は剪断変形の0.77乗に比例するものであった。

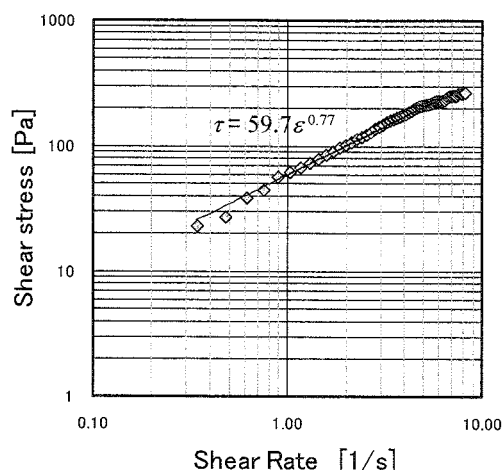


図-3 試験油の粘度特性

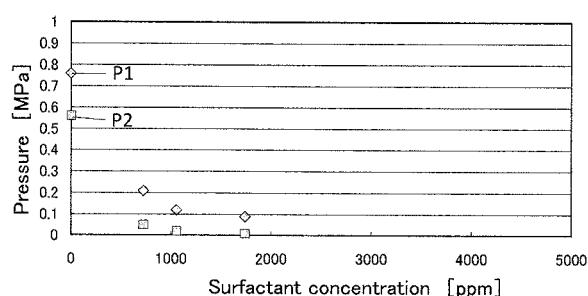


図-4 MYL-10添加時の圧力

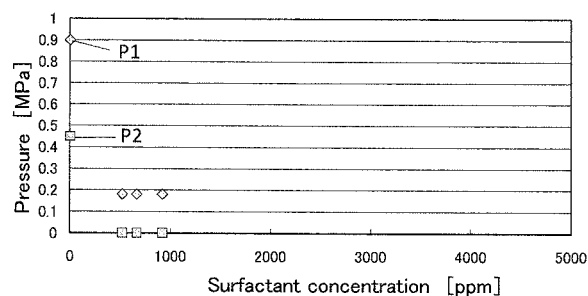


図-5 SL-10添加時の圧力

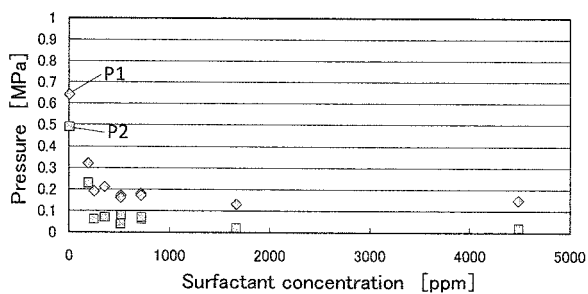


図-6 OTP-75添加時の圧力

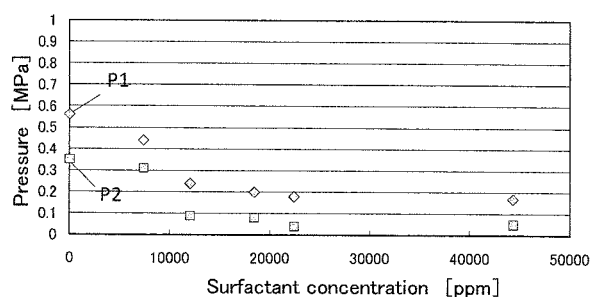


図-7 油処理剤添加時の圧力

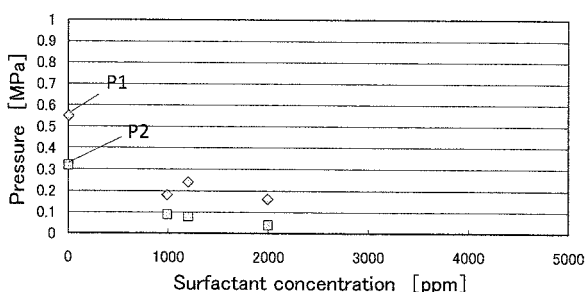


図-8 洗浄剤添加時の圧力

(2) 薬剤の添加による圧力損失低減

MYL-10を用いた場合の圧力の変化を図-4に示す。油の流量は6.5 l/minで一定であり、攪拌機の回転数は190rpmから200rpmであった。P1は攪拌機の入口側の圧力であり、P2は攪拌機出口の圧力である。薬剤を添加しない場合（グラフの一番左）は、P1が0.78MPa、P2が0.56MPaと非常に高い圧力を示した。それに対して薬剤を添加した場合、約700ppm添加でP1は0.2MPa、P2は0.05MPa、さらに添加量が増えて1700ppm前後の添加においてはP1が0.09MPa、P2が0.01MPaにまで圧力の減少が観察された。図-5は、SL-10を添加した場合である。この場合1000ppm以下の少量の薬剤添加によりP1は0.9MPaから0.2MPa以下に、P2は0.45MPaからブルドン管では測定できないレベルにまで圧力の低下が認められた。図-6は、OTP-75の場合であるが、数百ppmの添加で圧力が低下し、それ以上の添加ではほぼ一定した値を示した。

界面活性剤単体に代わって油処理剤を添加した場合の圧力を図-7に示す。今回用いた市販の油処理剤の場合、製品中に含まれる界面活性剤成分の濃度などが不明であるため、前の3ケースと直接的には比較できないが、ある程度の量を添加することで圧力損失を減らすことができることがわかる。同様のことは洗浄剤を添加した場合にも起きる。例えば図-8はSC-1000という表面洗浄用の薬剤を用いた場合であるが、この時も約1000ppm程度の薬剤添加で圧力を小さくすることができた。

次に界面活性成分を有した薬剤にかわり溶媒としての効果がある灯油を添加した場合の結果を図-9に示す。灯油を添加した場合、界面活性剤のように

少量の添加により劇的に圧力が減少するものではなく、ある程度の量を加えることで、初めて圧力の減少が観察された。

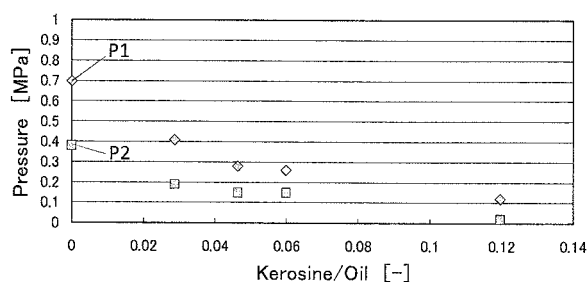


図-9 灯油を添加時の圧力（攪拌有）

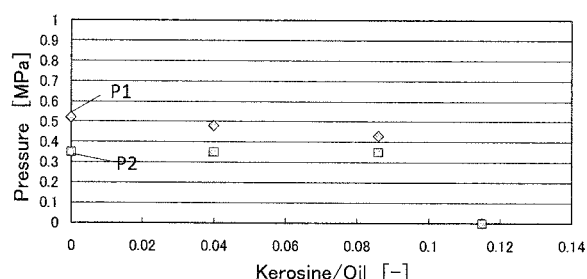


図-10 灯油を添加時の圧力（攪拌無）

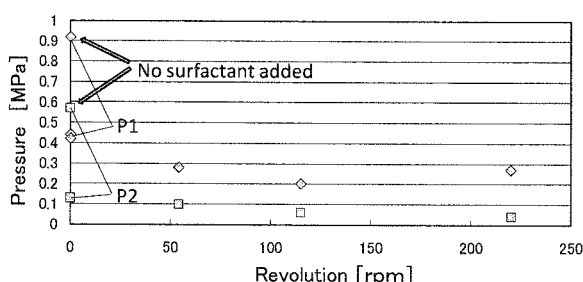


図-11 攪拌機の回転と圧力の関係

図-10では、図-9同様灯油を添加しているが、攪拌機を通さない場合である。この場合、灯油の添加割合が0.09程度までは顕著な圧力の低下が現れず、添加割合が0.11を超えたところで急激な圧力の低下が観察された。一方界面活性剤を添加して攪拌機の回転数を変えた場合の実験（図-11：OPT-75 166ppm添加）では、攪拌を行わない場合でも圧力損失の減少が観察された。この点については灯油を添加した場合との差が顕著であり、両者の圧力損失低減のメカニズムに違いがあることがうかがわれる。灯油の多量添加の場合には、エマルジョン化油と灯油がCAF(Core annular Flow)を形成している可能性が考えられる。CAFに関してはエマルジョン化油—水系に関する研究がある³⁾。CAFでは粘度の高いエマルジョン化油が管中心部にコア相を形成し、その周囲を環状に水の相が取り巻く流れとなっている。

CAFが形成されると高粘度の油と管壁が接触しなくなるため、大きな圧力損失が発生しなくなる。図-10の灯油添加量が0.11前後で水に替わり灯油が環状相を形成したために圧力低下が起きたものと推測される。一方、界面活性剤の添加量は非常に小さく一つの独立した相として環状相を形成するとは考えにくい面がある。非常に少量の添加でも圧力損失が減る理由としては、油相内に閉じこめられている分散水を界面活性剤が開放し（エマルジョンを分解し）、開放された水が管壁との潤滑相を形成している可能性が考えられる。攪拌機を用いた場合には油相全体に渡って分解が進み、図-11の様に攪拌しない場合でもある程度圧力が下がるのは管壁近傍において界面活性剤によるエマルジョンの分解が起きるためだと推測される。

著者等の研究⁴⁾によると、界面活性剤による重油/水系のW/Oエマルジョンの分解速度を支配する因子の一つにずり速度があることがわかっている。エマルジョンの分解に伴う粘度低下の時間スケールは、ズリ速度の自乗、すなわち攪拌エネルギー、あるいは散逸エネルギーに比例する。攪拌機を配管の途中に挿入し、攪拌エネルギーを積極的に与えるのが今回の実験であり、実際、図-4～8に見るように圧力損失の低下が観察された。一方で、図-11の左端に見るように攪拌を陽に与えなくても圧力損失の低下が観察されるのは、管内流自体が管壁近傍に大きな剪断領域を持っていることに起因するためと考えられる。高粘度油では、管内流が乱流へ遷移しておらず、層流状態で流れると推測される。ニュートン流体の場合、管内の速度分布は管中心部に頂点を持つ放物線となり、剪断変形は管壁部において最大値が発生する。非ニュートン流体の場合には若干異なるが、図-3に示した粘度特性を持つ流体の場合、粘度特性を

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{1-m} \quad (1)$$

と仮定すると、解析的に速度分布と剪断変形の分布を求めることができる。ここで、 τ は剪断応力、 ε は剪断歪、 m はニュートン流体からの偏倚を表す指数である。図-3に示した粘度特性を有する流体の場合指数 m は0.225である。図-12に管内速度分布、図-13に剪断変形の分布を示す。 $m=0$ はニュートン流体の場合である。擬塑性流体の特性を持つエマルジョン化油の方が、流速分布は平たい形状をしており、また管壁において発生する最大の剪断変形は、ニュートン流体の場合には4であるのに対し、 m が0.225のエマルジョンの場合には4.3程度あり、ニュートン流体よりも大きいことがわかる。このように界面活性剤によりエマルジョンを分解して管摩擦損失を低減する上ではエマルジョン化油は管壁近傍に強い剪断領域を有しており、却って好都合であるということもできる。

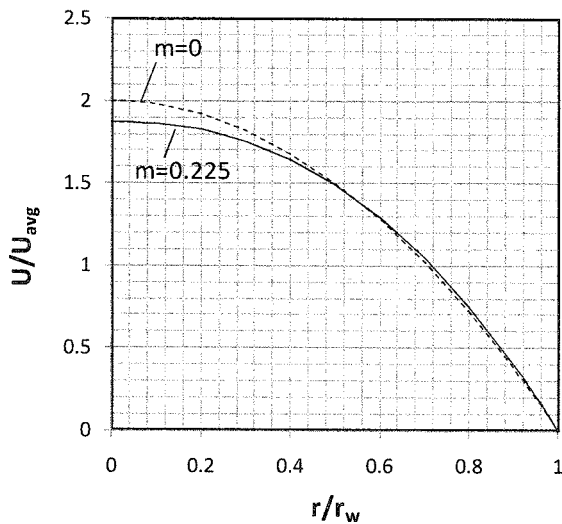


図-12 エマルジョン化油の管内流速分布

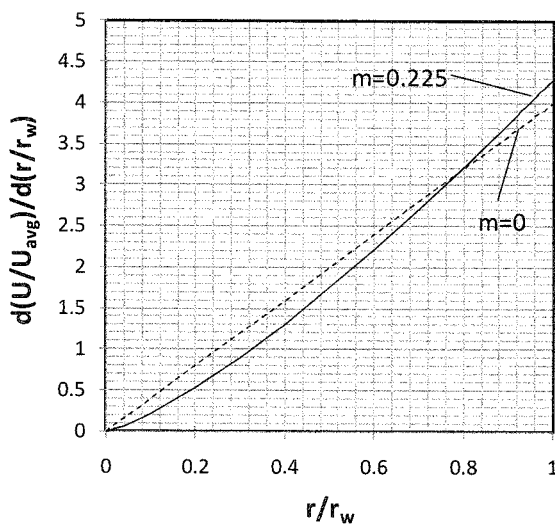


図-13 エマルジョン化油の管内剪断変形分布

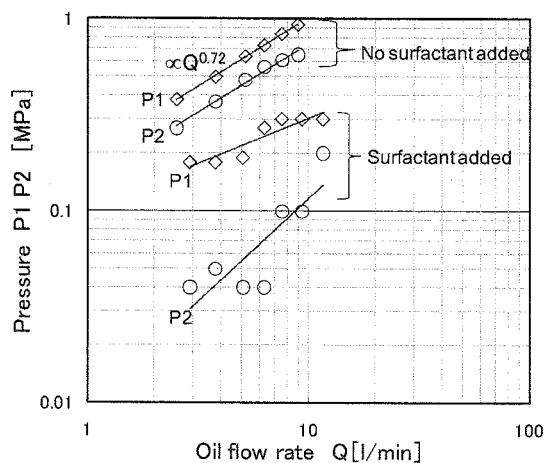


図-14 圧力損失と油流量の関係

油の流量を変化させた場合の圧力の測定値を図-14に示す．界面活性剤はOTP-75（50倍希釈）を0.053l/min添加した場合のものである．図には界面活性剤を添加しない場合を合わせて示した．界面活性剤を添加しない場合，P1，P2の油流量 Q への依存性は，

$$P \propto Q^n \quad (2)$$

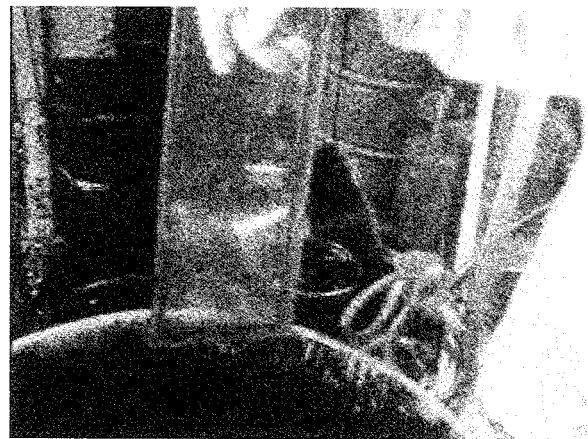
と仮定すると，P1，P2とも $n=0.72$ が得られた．一方，式(1)で示される粘度特性を有する流体の層流流れに関しては理論的に直管における摩擦損失 ΔP が，

$$\Delta P \propto U_{\text{avg}}^{1-m} \quad (3)$$

であることが導かれる．これを式(2)と比較すると， $n=1-m$ になるが，今回実験に用いた油は $m=0.225$ であり，予想される n は0.77である．図-14における $n=0.72$ と概ね近い値を示している．界面活性剤を添加した場合の圧力については，無添加に比べて圧力が小さくなっていることがわかるものの，ブルドン管圧力計を目視で読んだことに起因する計測誤差等もあり，油流量との相関という意味でははっきりした傾向は掴めなかった．界面活性剤を添加した場合の圧力損失の予測式等の定量的な記述は今後の課題として残される部分である．

(3) 薬剤添加後のエマルジョン化油

薬剤を添加して攪拌装置を通った油は，固体表面への付着性において興味深い性質を持つようになる．図-1の装置により界面活性剤を添加された油にアクリル板を浸けて引き上げた時の様子を図-15に示す．油から引き上げられたアクリル板表面にほとんど油が付着していないことがわかる．通常固体表面へのエマルジョン化油の付着性は非常に良くそのため油回収船の回収油槽の事後清掃は非常に大変なものになるのが一般的であるが，界面活性剤を添加することで固体表面への油の付着性を抑制できる可能性があることがわかる．

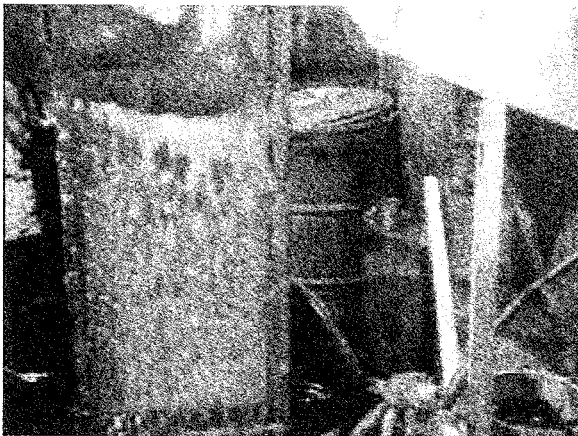


(a) 浸油前

図-15 界面活性剤により処理されたエマルジョン化油の固体表面への付着性



(b) 浸油中



(c) 浸油後

図-15 界面活性剤により処理されたエマルジョン化油の
固体表面への付着性 (続き)

4. まとめ

C重油と水から形成されるW/O型エマルジョンの管内で発生する圧力損失を低減する手法について検討した。少量の界面活性剤を添加が圧力損失の低減に効果的であることを見いだした。実験では強制攪拌装置を用いた場合を主に検討したが、強制攪拌を行わずに界面活性剤のみを添加しても圧力損失が低減される可能性があることがわかった。

謝辞：本研究の一部は平成20年度に国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所からの委託研究として行われたことを記し、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 特許出願番号 2003-323283.
- 2) Ian Buist et al.: Decanting tests at Ohmsett with and without emulsion breakers, *International Oil Spill Conference 2005*, CD-ROM, 2005.
- 3) 藤田勇, 竹崎健二, 松崎義孝, 加藤由朗, 柿崎慶治: 注水による重油エマルジョンの管内摩擦損失の低減に関する研究, *海洋開発論文集*, Vol.25, pp.1023-1028, 2009.
- 4) 藤田勇, 吉江宗生, 竹崎健二: 流出油エマルジョン分解に関する研究, *海洋工学シンポジウム*, Vol.19th, CD-ROM, 2006.