

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.52 No.4 December 2013

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 52 卷 第 4 号 (Vol. 52, No. 4) , 2013 年 12 月 (December 2013)

目 次 (CONTENTS)

1. 干潟・砂浜海岸の生物生態／地形動態に果たす地盤環境の役割 —多種多様な生物住環境診断チャートと安定地形の最適設計—佐々真志, 渡部要一, 梁順普, 桑江朝比呂 3 (Role of Geoenvironment in the Benthic Ecology and Morphodynamics of Intertidal Flats and Beaches -Ecohabitat Chart and Optimal Design of Dynamically Stable Sandbars-Shinji SASSA, Yoichi WATABE, Soonbo YANG, Tomohiro KUWAE)
2. 静的圧入締固め工法の液状化抑制効果に関する研究高野大樹, 西村聡, 森川嘉之, 高橋英紀 45 (The effect of compaction grouting as a countermeasure against liquefactionDaiki TAKANO, Satoshi NISHIMURA, Yoshiyuki MORIKAWA, Hidenori TAKAHASHI)
3. W/O エマルジョンを形成した水-重油系の流動特性と管摩擦損失の制御手法に関する研究藤田勇, 松崎義孝 75 (Rheological Behavior of W/O Emulsion of Water-Heavy Oil System and Friction Loss Reduction Methods for its Flow in a PipeIsamu FUJITA, Yoshitaka MATSUZAKI)

W/O エマルジョンを形成した水-重油系の流動特性と 管摩擦損失の制御手法に関する研究

藤田 勇*
松崎 義孝**

要 旨

流出油は海水と混合され、W/O型エマルジョンを形成することで、非常に流動性の乏しい非ニュートン流体へと特性を変化させるため、油回収過程並びにその後の移送過程において障害となる。特に管路を用いた輸送において過大な圧力損失を生じる問題は深刻である。本稿ではそうした問題の解決に向けてエマルジョン化した油の管内輸送を扱う。はじめに、エマルジョン化油の管摩擦損失実験を実施し、その結果をエマルジョンのレオロジー特性を考慮した管摩擦損失の式として整理する。次に管摩擦損失を低減する手法として注水による潤滑方法を検討する。CAF (Core Annular Flow) モデルを仮定し、摩擦損失比を注水率の関数で整理する手法を提案する。モデルにもとづき最適な注水量について考察する。続いて、薬剤によるエマルジョン分解に関して基礎実験を行い、エマルジョン分解速度の支配要因について検討し、強制攪拌装置を用いたインラインエマルジョン分解装置について論じる。さらに攪拌装置を用いない薬剤添加による摩擦損失低減手法を扱う。加えて、注水法および薬剤添加法の実用化例を紹介する。

キーワード：流出油，W/O エマルジョン，レオロジー，摩擦損失，管路，注水，CAF，薬剤，
エマルジョン分解

* 沿岸環境研究領域 混相流体研究チーム 新技術研究開発領域 油濁対策研究チーム (併任) リーダー
** 沿岸環境研究領域 混相流体研究チーム 新技術研究開発領域 油濁対策研究チーム (併任) 研究官

Rheological Behavior of W/O Emulsion of Water-Heavy Oil System and Friction Loss Reduction Methods for its Flow in a Pipe

Isamu FUJITA*
Yoshitaka MATSUZAKI**

Synopsis

Spilled oil takes sea water as small droplets inside it and forms W/O emulsion due to mixing effect of turbulence of ocean wave. The resultant W/O emulsion has very high viscosity and changes its rheological behavior to cause various difficulties encountered in oil spill response fields such as clogging of pipe line due to too much friction. This paper mainly focuses on pipeline flow of W/O emulsion made of C heavy oil and water to resolve the high-viscosity problem. Firstly, experimental measurements of friction loss of W/O emulsion in a pipe are given and a prediction formula considering the W/O emulsion's rheological character is proposed. Secondary, water injection is experimentally studied for reducing the friction loss. A simple physical model is proposed to predict the friction loss based on a CAF model. The optimum water injection rate is discussed. Thirdly, emulsion breaking using chemical agents is studied. Fundamental experiments are conducted to know the key factor to promote emulsion breaking and also inline agitator is tested for enhancing emulsion breaking. Fourthly, chemical agent injection system without agitator is experimentally studied for reducing the friction loss and compared to the water injection system. Finally, some practical implementations of the water injection and chemical agent injection are shown.

Key Words: Spilled oil, W/O emulsion, Rheology, Friction loss, Pipeline, Water injection, CAF,
Chemical agents, Emulsion breaking

* Head, Multiphase Flow Group, Coastal and Estuarine Environment Field
** Researcher, Multiphase Flow Group, Coastal and Estuarine Environment Field
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5065 Fax : +81-46-844-0575 E-mail:fujita@pari.go.jp

目 次

要 旨	75
1. まえがき	79
2. 流出油のエマルジョン化と流動特性	79
2.1 流出油の風化	79
2.2 エマルジョン化油の流動特性と管摩擦損失	80
3. 注水による管摩擦損失の低減	83
3.1 実験装置と手法	83
3.2 実験結果	85
3.3 注水効果の整理式の提案	86
3.4 注水量の最適化	88
4. エマルジョン分解	88
4.1 回転式粘度計を用いた実験	89
4.2 インラインエマルジョン分解装置	92
5. 薬剤注入による摩擦損失低減	96
5.1 実験装置と方法	97
5.2 実験結果と考察	98
6. 油回収機, 回収船への応用	101
7. まとめ	102
参考文献	103

1. まえがき

近年タンカーからの油流出事故は減少傾向にある。図-1に示すITOPFの統計¹⁾に拠れば、1970年代において流出量が700tを越える比較的規模の大きい油流出事故の発生件数は年平均25.2件であったのに対し、2000年代に入ってから年平均3.6件である。流出量ベースで見ても1970年代の年平均油流出量は314,200tであるのに対し、2000年代は年平均24,000tである。我が国においてもナホトカ号事故（約6,400kl流出）が発生した1997年以降、幸いにして船舶からの大規模な油流出事故を経験していない。しかしながら大規模油流出事故の発生リスクは、世界的には2007年の韓国におけるHebei Spirit号の原油流出にも見るように、依然として存在している。更にタンカー以外からの油流出として2010年のメキシコ湾原油流出事故²⁾は未だ記憶に新しい。

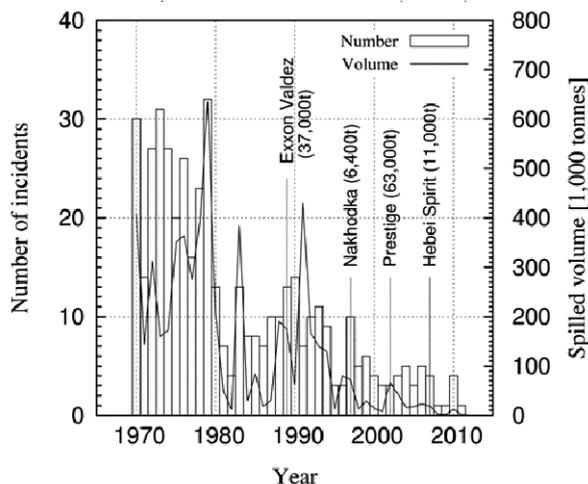


図-1 タンカーからの油流出事故

加えて、2011年に発生した東日本大震災においては、各所で石油タンクが被災し、相当量の油が流出した。震災による流出油は津波火災の要因として考えられ³⁾、また底泥への油の沈殿などが報告されており⁴⁾、平常時の油流出とは異なる様相を示す油流出のリスクを明らかにした。

海上に流出した油は波浪により海水と混合されW/O型エマルジョンを形成し非常に高粘度の液体となる。このような流出油のレオロジー的な物性変化は油濁防除活動の諸相において多くの困難をもたらす。海面上に浮遊する油を回収するスキミング作業時に加えて、回収油を陸揚げする際にも容易にはパイプライン輸送ができないなど、高粘度油の扱いは極めて難しいものとなっている。1997年に発生したNakhodka号による油流出事故においては、大型油回収船「清龍丸」により洋上での油回収が行われた。回収

した油は寄港先においてパイプラインにより陸上げしているが、回収タンク内の油は極度に高粘度化していたため、通常の方法ではタンク内から油を取り出し輸送することが難しかった。流動性を向上させるため、タンク内へ蒸気を注入し加熱するバルクヒーティングの手法を用いた。大型油回収船の回収油タンク容量は1,000m³を超えており、熱源の確保の為に、蒸気ボイラーなど大規模な陸上支援を必要とした。しかしながら大規模油流出事故といった突発的な事態において常にそのような陸上支援が得られる保証はなく、そのような支援がなくても任意の港において高粘度の回収油を陸揚げできるシステムは強く求められるところである。問題の本質は高粘度油のパイプライン輸送における管摩擦損失が過大であることにあり、摩擦損失を低減する手法が求められる。本稿では、こうした問題の解決に向けて、エマルジョン化油の管内輸送における摩擦損失低減に向けて著者等が行った研究開発について述べる。まず次章においてW/Oエマルジョンを形成した重油のレオロジー特性とエマルジョン単体の管摩擦損失特性を明らかにする。次に管内摩擦損失の低減手法として第3章において、水添加による潤滑手法を検討する。更に第4章において、界面活性剤によるエマルジョン分解を扱い、第5章で、界面活性剤添加による管内摩擦損失の低減手法について論じる。第6章では実際の油回収船への応用を紹介する。

2. 流出油のエマルジョン化と流動特性

2.1 流出油の風化

海上に流出した油は時間の経過とともに、図-2に示すように、蒸発、自然分散、溶解、沈降、生物分解及びエマルジョンの形成などの風化作用を受け、それに伴って物理的な性状を変化させる。各変化の進行状況は油種や気象海象条件に強く依存する。その中で、洋上での油回収の効率や分散処理の効率は、エマルジョン化の影響を強く受ける。エマルジョン化では、主として波浪などの攪拌作用により、写真-1に示す様に、海水が小さな液滴として油の中に分散した状態（W/O Emulsion）で取り込まれる。写真において明るく見える部分が水であり、暗い部分が油の相である。図-3は石油連盟がネット上で公開している流出油の性状変化データベース⁵⁾をもとに作成した冬期の荒れた海でのC重油と代表的な原油であるArabian lightの風化を示した図であるが、時間の経過とともにエマルジョン化が進行し、油の中に取り込まれる水の量が増加し膨潤するとともに、粘度が飛躍的に増大することが分かる。

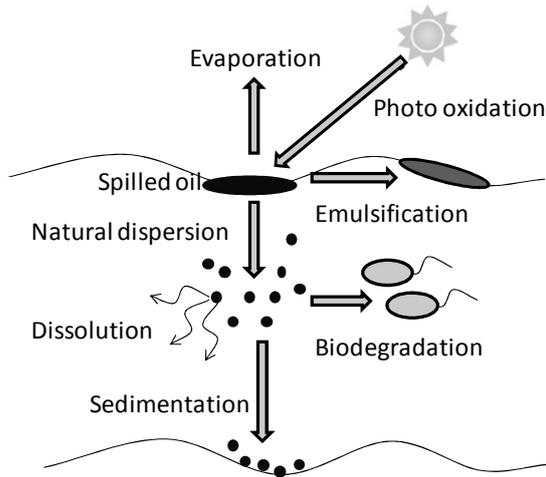


図-2 流出油の風化

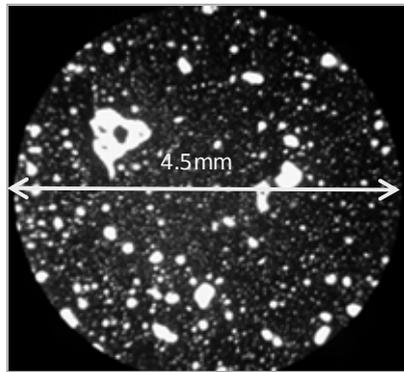


写真-1 W/Oエマルジョンの顕微鏡写真

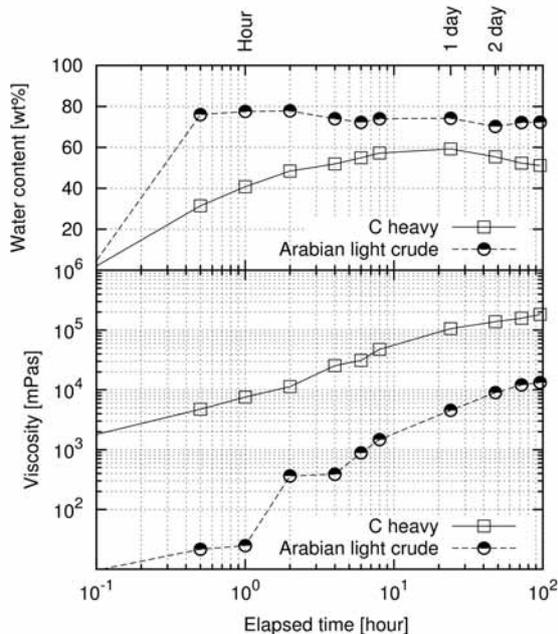


図-3 エマルジョン化の進行と粘度の上昇

1997年に日本海で発生したナホトカ号による油流出事故においても、流出油は1,000,000mPa.sを超すエマルジョンを形成したため、回収や移送は困難を極めるものであった。多くの油回収機、油回収船では配管による回収油の輸送行程が含まれるため、そうした機器における高粘度油への対応が求められる。

粘度の影響は油回収のみではなく、油処理剤による分散処理においても障害となる。一般的に油処理剤による分散処理では、エマルジョン化により高粘度化した油に対しては効果が小さくなる。目安として、通常型の油処理剤の適用範囲が2,000cSt以下、高粘度油用のD1128型の油処理剤の適用範囲が100,000cSt以下とされている⁶⁾。

2.2 エマルジョン化油の流動特性と管摩擦損失

前節においては、エマルジョンを形成した油は粘度が増大すると書いたが、厳密にはエマルジョン化によりニュートン流体から非ニュートン流体へとレオロジー的な変化が生じる。しかしこのことは、油濁対策を実践する業界においてもしっかりと認識されていない。流出油の回収装置など管路を用いて輸送するシーンが多々あるが、エマルジョン化した油の基本的な流動特性を把握することは基本的かつ必須である。ここではエマルジョン化したC重油のレオロジー特性と管摩擦損失について検討する。

実際にエマルジョン化油を用意し、実験を行うことでレオロジー特性と管摩擦損失を調べた。試験油の調製においては、市販のC重油に対して等量の水を配合し、200Lのドラム缶において1.5kWの攪拌機で数時間、自由水が無くなるまで攪拌した。原料C重油と調製したエマルジョン化油の粘性特性を写真-2に示す回転式粘度計(Brookfield DV-III)により測定した。結果を図-4に示す。横軸が粘度計のずり速度で、縦軸が剪断応力を表し、ずり速度を変化させた場合に生じる剪断応力を示している。ニュートン流体の場合にはずり速度と剪断応力は比例関係にあり、測定データは傾きが1の直線上に乗る。一方、非ニュートン流体の場合、例えばダイラタント流体では傾きは1より大きく、逆に擬塑性流体では傾きは1より小さくなる。傾きが1より小さい場合には、ずり速度が大きくなるに従って見かけ上粘度が低下し、流動し易くなることを意味する。図-4に示す実測例では原料C重油は傾きが1の線上に良く乗っており、粘度は約8,000mPa.sで一定であるが、調製したエマルジョンでは、剪断応力はずり速度に比例せず、傾きが1より小さい直線で表される。構成式として

$$\tau = \tau_r \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_r} \right)^{1-m} \quad (1)$$

を仮定すると、ニュートン流体からのずれを表す指数 m として 0.13 が得られた。ここで τ は剪断応力、 ε はずれ速度、サフィックスの r は基準状態を表す。このようにニュートンの粘性法則に当てはまらない流体を管路で輸送した場合に発生する管内壁での摩擦損失はニュートン流体のそれとは異なるものとなる。水平直管内で発生するエマルジョン化油と C 重油の管摩擦損失を図-5 に示す。横軸は単位時間当たりの流量であり、縦軸は管長 1m 当たりで発生する圧力損失である。使用した管は SGP 管 4 種類で、管内径は $\phi 12.7\text{mm}$ (15A)、 $\phi 21.6\text{mm}$ (20A)、 $\phi 27.6\text{mm}$ (25A) 及び $\phi 35.7\text{mm}$ (32A) である。

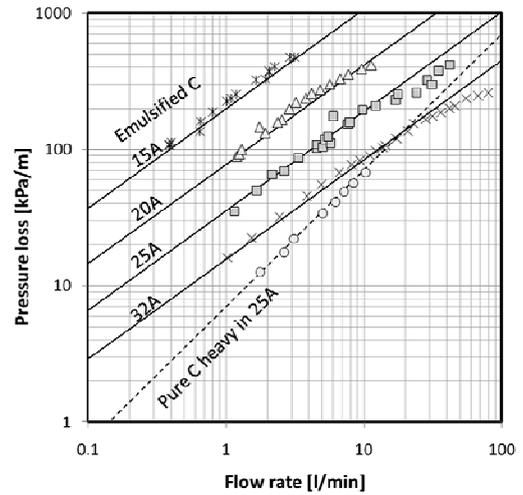


図-5 W/Oエマルジョンの管内摩擦損失



写真-2 回転式粘度計

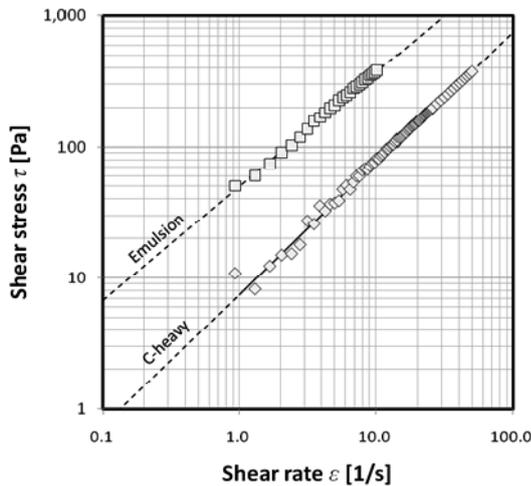


図-4 W/OエマルジョンとC重油の粘度特性

図-5 の両対数グラフにおいて、生の C 重油は傾きが 1 の直線に乗り、層流における摩擦損失の式 $64/Re$ が当てはまる。一方でエマルジョン化した油の摩擦損失は流量の増加に対して傾きは 1 より小さくなり擬塑性流体の性質が現れていることがわかる。重油エマルジョンの管路の単位長あたりの管摩擦損失 ΔP を

$$\Delta P = \frac{\lambda}{d} \rho U_{avg}^2 \quad (2)$$

の形で整理する。ここで、 U_{avg} は管内平均流速、 ρ は密度、 d は管直径、 λ は摩擦損失係数である。エマルジョン化油の粘度特性を(1)式で仮定すると円管内の層流の剪断力は、管内の流速分布 U を用いて、

$$\tau = \tau_r \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r} \right)^{1-m} = \frac{\tau_r}{\varepsilon_r^{1-m}} \left(\frac{dU}{dr} \right)^{1-m} \quad (3)$$

と表すことができる。定常流においては剪断力と圧力損失が釣り合っている、即ち

$$\left(\pi^2 \right) \Delta P = (2\pi r) \tau \quad (4)$$

なので、

$$\Delta P = \frac{2\tau}{r} \propto \frac{1}{r} \left(\frac{dU}{dr} \right)^{1-m} = const. \quad (5)$$

となり、管内の流速変化 $\frac{dU}{dr}$ は r^{1-m} に比例する。従って、管内の流速分布は管中心部の流速を u_0 とすると、

$$U(r) = u_0 \left\{ 1 - \left(\frac{r}{r_w} \right)^{\frac{2-m}{1-m}} \right\} \quad (6)$$

と積分できる。これを(3)式に代入することで、壁面剪断

力として,

$$\tau_w = \frac{\tau_r}{\varepsilon_r^{1-m}} \left(\frac{dU}{dr} \right)^{1-m} = \frac{\tau_r}{\varepsilon_r^{1-m}} \left(\frac{4-3m}{1-m} \right)^{1-m} \left(\frac{U_{avg}}{r_w} \right)^{1-m} \quad (7)$$

が得られる. ここで U_{avg} は,

$$U_{avg} = \frac{1}{\pi r_w^2} \int U(r) 2\pi r dr = \left(\frac{2-m}{4-3m} \right) u_0 \quad (8)$$

で与えられる. 管摩擦損失と壁面剪断力は(5)式より,

$$\Delta P = \frac{2\tau_w}{r_w} \quad (9)$$

の関係にあるので, 摩擦損失係数 λ は,

$$\lambda = \left(\frac{4-3m}{4-4m} \right)^{1-m} \frac{64}{Re'} \quad (10)$$

となる. ここで, Re' は擬塑性流体における等価的なレイノルズ数として,

$$Re' = Re \left(\frac{U_{avg}}{\varepsilon_r d} \right)^m \quad (11)$$

で定義している. レイノルズ数 Re は基準状態における粘度を用いて定義したものである. $\tau_r=50,000\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\varepsilon_r=1.0\text{s}^{-1}$, $m=0.27$ を仮定して実験結果を整理したものを図-6に示す. 測定値は生のC重油も含めてマイナス乗の線に乗っており, 整理式が妥当なことがわかる. ただし, ここでの m は(1)式に示した m と同じものであるから, 粘度計により計測した値 ($m=0.13$) と本来一致しなければならない. しかしここでは約2倍の違いが生じていた. 原因としては, 粘度計と管内流での, ずり速度の違いが考えられる. ここまでは m が定数であると仮定したが, 実際のエマルジョン化油では m の値はずり速度自体にも依存している.

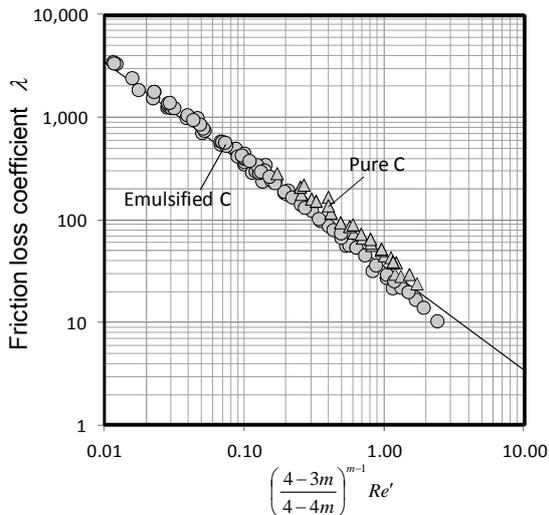


図-6 W/Oエマルジョンの摩擦損失係数

図-7は回転式粘度計による測定値の差分から $1-m$ を計算したものであり, ずり速度の増加に伴い, $1-m$ が減少, 即ち m が増加していくことがわかる. 実験で使用したB型粘度計でのエマルジョン化油の測定では, 装置のトルク制限から, ずり速度は 20s^{-1} 以下であるのに対し, 管内流動でのずり速度は, 管内平均流速を管の半径で除した値を代表ずり速度とすると, $1\sim 90\text{s}^{-1}$ の範囲であり, 平均的には回転式粘度計による測定範囲より大きい. m を固定値とした上記の扱いにおいて管内流の方が m の値が大きくなることは定性的には合理的である. 更に, 管内流の摩擦損失を表した図-4においても流量の大きなところで実験値は理論線より下側にずれる傾向が見られ, これは m がずり速度に対し正の相関をもって増大していることを意味しており, 回転式粘度計による測定と傾向が一致している.

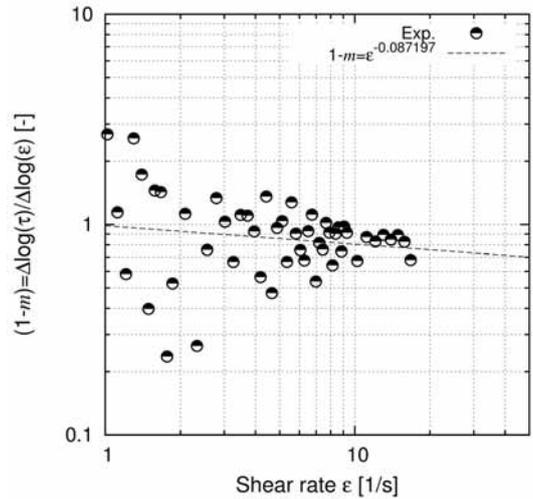


図-7 $1-m$ のずり速度依存性

次に指数 m が含水率にどの程度依存するのかを調べた. 含水率の異なる (0%, 20%, 33%, 50% 及び 60%) のエマルジョン化油を用いて 40A の管路内での圧力損失を計測した. 結果を図-8に示す. 含水率が大きくなるに従って回帰線の傾きが小さくなる, すなわち $1-m$ が小さくなることが分かる. 含水率との関係を図-9に示す.

図-8においてAで示す部分に興味深い現象が観察されている. 含水率が比較的小さい場合には見られないが含水率が大きい場合, 管内流速を上げていくと, あるところで急に圧力損失が小さくことがある. 剪断変形が大ききところではC重油と水で形成されたW/Oエマルジョンは不安定で, 自己崩壊による相分離を起こしていることが想像される. 解放された自由水は管壁内面に膜あるいは環状相を形成し, この部分で剪断変形を受け持つようになる. 水は粘度が小さいので摩擦損失が減少するのである. どの様な組

成のエマルジョンがどの程度のずり速度で自己崩壊を起こすかはまだ分かっていない. 実用上はいきなり自己崩壊を起こすような管路流速を与えることはできないので, どのような流速でも摩擦損失が過大にならないように摩擦損失を小さくする工夫が必要になる. 次章以降において積極的な摩擦損失低減の手法について提案する.

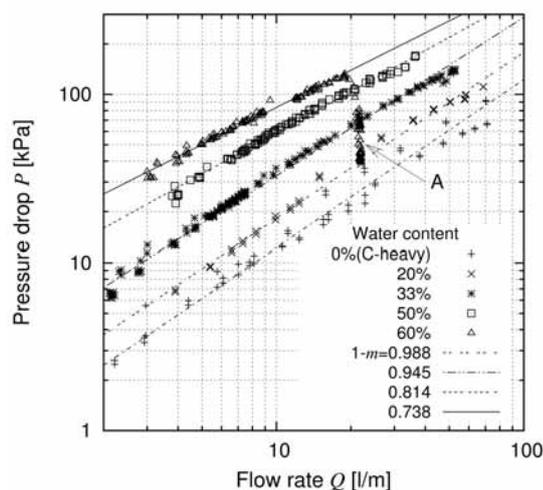


図-8 含水率の異なるエマルジョンの管摩擦損失

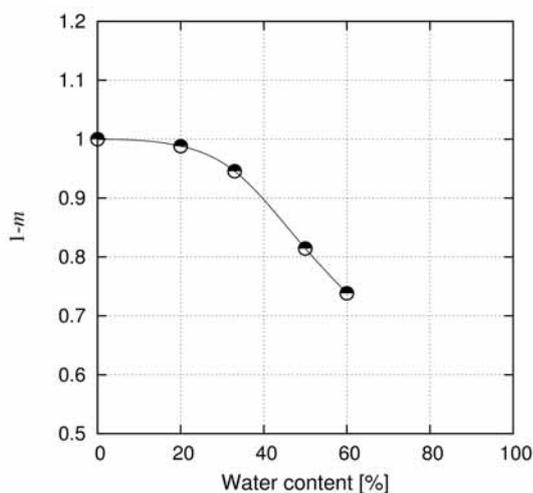


図-9 流動性指数(m)の含水率依存性

3. 注水による管摩擦損失の低減

エマルジョン化した油を管路により移送する場合には摩擦損失を低減することが必要になる. 少量の水を添加す

ると図-10に示すような油のコアの周りを水が環状に取り巻いたCAF (Core Annular Flow) が形成され, 粘度の小さい環状水が剪断変形を主として受け持つので管摩擦損失を低減することができる. 油-水系におけるCAFの形成は古くから知られており⁷⁾, その後石油産業界で, 高粘度油の生産井における潤滑方法として提案されている⁸⁾. 更に流出油回収移送時への応用を目的とした研究も行われている^{9,10)}. 著者等も, 油回収船への応用を念頭にエマルジョン化した油を用いて, 実験による検討を行った¹¹⁾.

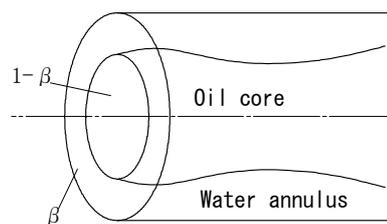


図-10 CAF(Core Annular Flow)の模式図

3.1 実験装置と手法

油-水系の管内液-液混相流の圧力損失計測を行う実験装置を構成した. 実験装置の概要を図-11に示す. 図中(a)で示す容量約 1m^3 のタンクに試験用のエマルジョン化油約600lと水約300lを入れる. 試験油はチューブポンプ(b)によりタンクより吸い出されてテストセクションに送り込まれる. チューブポンプはインバータ(c)による回転数制御により流量調整を行う. チューブポンプは容積式のポンプであり回転数と流量の間にはほぼリニアな関係があることから, あらかじめポンプ回転数と流量の関係を求め, 実験中はポンプ回転数より流量を算出した. 水はタンク下部より遠心ポンプ(d)を用いてチューブポンプ吸引口手前に注入される. 水の流量はテーパ管式流量計(e)により計測した. 圧力測定は二カ所 P_1 及び P_2 において行った. 計測にはブルドン管圧力計と歪みゲージ式圧力変換器(f)を用いた. 圧力変換器からの信号はストレインアンプにより増幅し, デジタルストレージオシログラフによりD/A変換し記録した. 実験中の温度管理は特にには行わず, 室温状態で行った. 試験油の温度は 10°C から 20°C の範囲であった. テストセクションとしては図-11に示す内径38mmのポリ塩化ビニール製のサクシオンホース(約40m)の他にも, 内径76.5mmのサクシオンホース及び内径49.5mmのSGP鋼管(50A)を用いた.

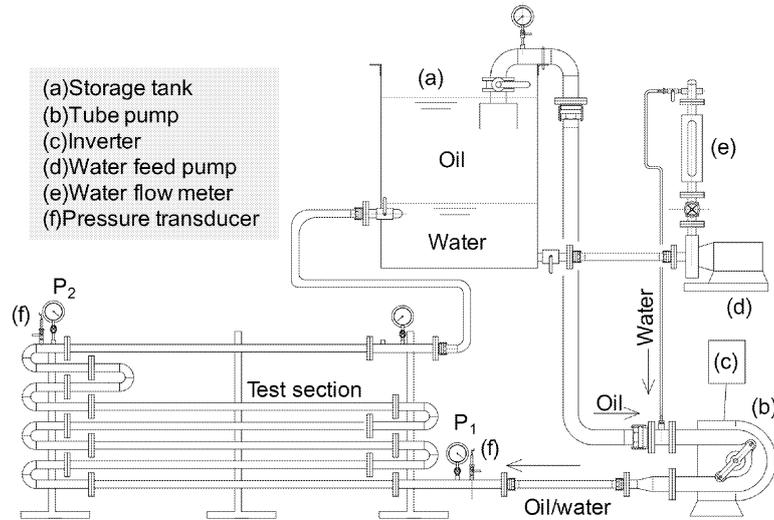


図-11 CAF 実験装置

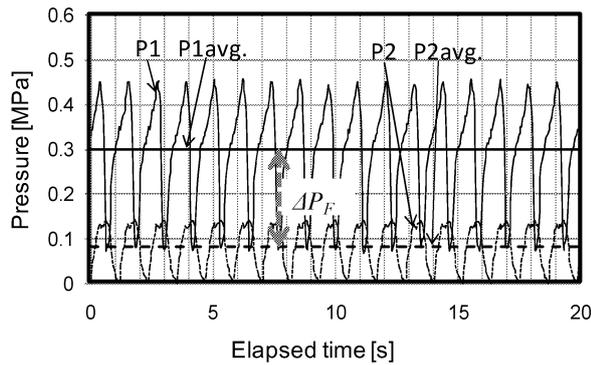


図-12 圧力損失の測定例

実験で用いたチューブポンプは円周上に巻いた弾性チューブをローラでしごく形式のものであり、動作が周期性を有している。測定される圧力にも図-12に示す様な脈動が現れる。そのため本研究では20秒間に渡る平均を数値的に求めてその後の解析に用いた。

実験には市販のC重油と水道水を混合して調製したW/Oエマルジョンを使用した。調製したエマルジョン中の水分量はカールフィッシャー滴定により計測した。含水量は67.55%であった。試験油の粘度特性については回転式粘度計を用いて測定した。20℃におけるずり速度 $\dot{\epsilon}$ と剪断応力 τ の測定値を図-13に示す。前述した様に、エマルジョン化したC重油は擬塑性流体であり、粘度を一意に定めることはできないが、代表値としてずり速度 1.0 s^{-1} における値を考えると $39,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 程度となる。また代表粘度は温

度にも依存する。10℃から20℃の間で3点における測定結果を図-14に示す。図はずり速度 1.0 s^{-1} における粘度であり、図中の線はAndradeの式

$$\ln\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right) = C\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \quad (12)$$

で回帰したものである。パイプライン輸送実験は10℃から20℃の範囲で行ったので、低温側での実験粘度は概ね $180,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 程度である。

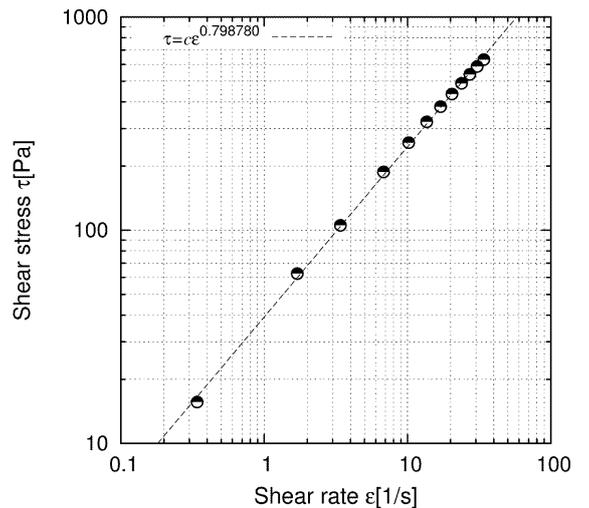


図-13 試験に使用したエマルジョンの粘度特性

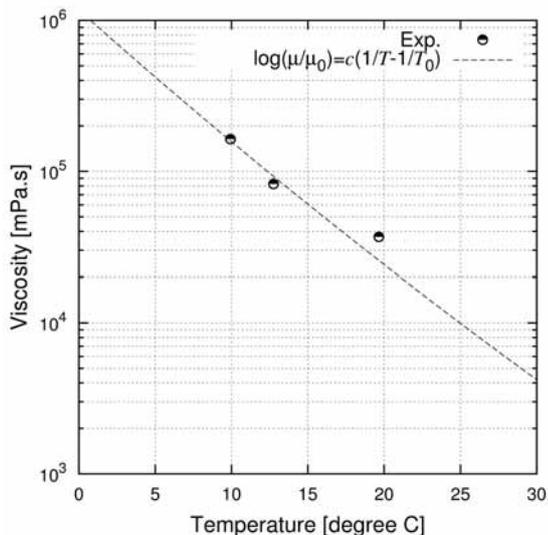


図-14 エマルジョン化油粘度の温度依存性

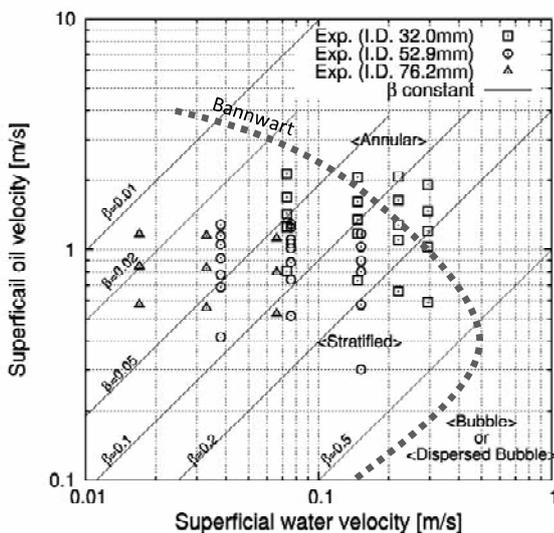


図-15 実験条件

実験条件を図-15に示す。横軸は添加水の見かけの流速、縦軸は油の見かけの流速である。管内部における実際の流速は、混相流体の場合、管断面に占める各相の割合を考慮する必要があるが、見かけの流速とは各相の流量を管の断面積で除したものとして一般的に定義される。破線はBannwart¹²⁾による流動様式の整理であり、流動様式の境界を表している。Annularは環状流、Stratifiedは層状流、BubbleおよびDispersed bubbleは気泡流を意味する。ただしBannwart等の実験はエマルジョン化油ではなく、粘度が488mPa.s、比重925.5kg/m³の原油と水を内径2.84cmの水平管に流した場合のものであり、この実験とは条件が異

なっている。ここでは参考の為に図に示している。 β は注水率で、総流量に占める水の割合として

$$\beta = \frac{Q_w}{Q_c + Q_w} \quad (13)$$

で定義した。ここで Q_w は添加した水の流量であり、 Q_c は油の流量である。実験は、水の見かけの流速で概ね0.02~0.3m/sの範囲、油の見かけの流速で概ね0.3~2.0m/sの範囲で、注水率は0.015~0.3の範囲で実施した。

3.2 実験結果

テストセクションに内径38mmのサクシオンホースを用いた場合の P_1 と P_2 間の差圧の測定結果を図-16に示す。各データ系列は注水量を5, 10, 15, 20 l/minと一定とし油の流量を変えた場合を示している。加えて水のみを流した場合をxで、油のみを流した場合を+の記号で示している。図中の線は水及び油の単相流に関する管摩擦損失に関する整理式

$$P_2 - P_1 = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho}{2} U^2 \quad (14)$$

を用いた計算値であり、摩擦係数 λ は、水に関しては乱流域を表現するBlasiusの式

$$\lambda = 0.3164 Re^{-\frac{1}{4}} \quad (15)$$

を、油に関しては(7)及び(9)式より U^{1-m} で回帰したものを示している。今回の実験ではテストセクションが曲がり管を含んでいることから管路長に関しては、 P_1 から P_2 までの距離をそのまま管路長とはせず、水単相流における圧力損失測定値より(14)式を用いて逆算し、その平均値を等価管長とした。注水を行った場合の圧力損失は水単相、油単相時の中間の値を示す。注水量が多い程圧力損失が小さくなるのがわかる。管径が異なる場合の圧力損失に関しても同様の傾向がみられた。図-17は内径52.9mmの鋼管(SGP50A)を用いた場合の圧力損失の測定値である。

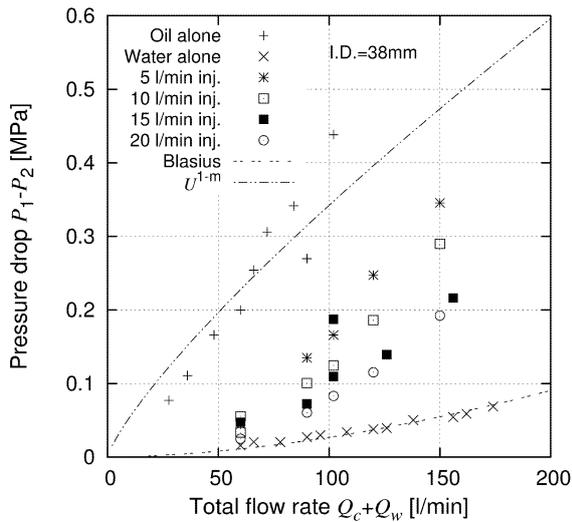


図-16 圧力損失の実験結果
(内径38mm 塩化ビニル管)

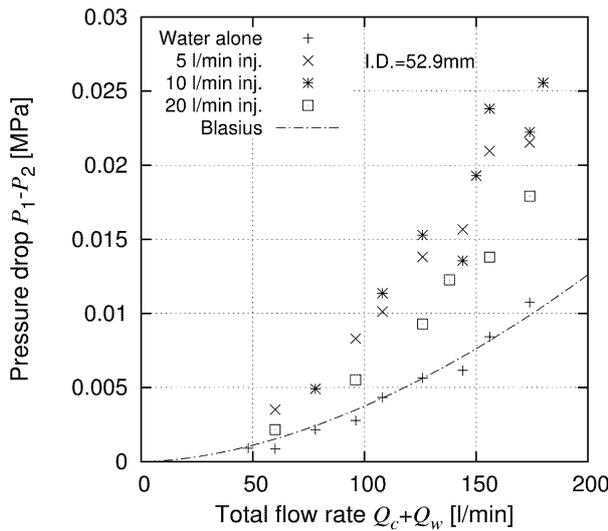


図-17 圧力損失の実験結果
(内径 52.9mm 鋼管)

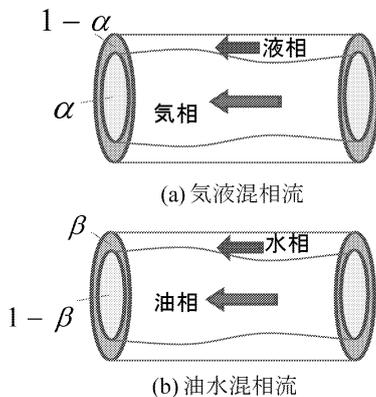


図-18 CAF 整理モデル

3.3 注水効果の整理式の提案

実験結果から注水による摩擦損失の低減効果を現す整理式を提案する。実験では管内の流動様式は観察してはいないが、図-15において Bannwart に従えば、実験範囲の流れは、層状流あるいは環状流領域にあると考えられる。層状流領域では油相の偏在はあるものの、二つの領域を理想化して考えるならば、管断面中心部に連続的のコアとして油相が存在し、その周囲を環状に水相が取り巻く CAF (Core Annular Flow) が形成されていると仮定する。Lottes 等は、気液混相流の環状流における摩擦損失を液単相の摩擦損失 ΔP_W と気液混相流の摩擦損失 ΔP_F の比の形で、

$$\frac{\Delta P_F}{\Delta P_W} = (1-\alpha)^n \quad (16)$$

という式を提案している¹³⁾。ここで α は図-18(a)に示す様にボイド率で、管断面に占める気相の割合を示している。 $1-\alpha$ は液ホールドアップと呼ばれ、管断面に占める液相の割合を示すものである。 ΔP_W は液単相が管断面全てを満たして流れる場合の摩擦損失であり、 ΔP_F は気液混相状態で流れた場合の摩擦損失である。このモデルは気液系におけるもので、ここで扱う液液系とは異なるが、管摩擦損失は直接にはコア相ではなくて壁面に接している相の壁面剪断力に依存するので、同じ環状流としての整理が可能であると考えられる。そこで本研究では図-18(b)に示すように $1-\alpha$ の液ホールドアップの部分に注水率 β で読み替えて、

$$\frac{\Delta P_F}{\Delta P_W} = \beta^n \quad (17)$$

という摩擦損失比のモデルを導入した。ここで ΔP_W は水のみが管内を流れる場合の管摩擦損失であり、乱流の場合は(15)式などで与えられる。 ΔP_F は油と水が同時に流れた場合の管摩擦損失液ホールドアップに相当する部分を注水率で置き換えるためには、厳密には水相と油相の速度の違い、すなわちスリップ比を考慮する必要があるが、油水系の場合には気液系程には各相間のスリップ比は大きくないものと仮定している。

n を実験値から求める。注水率と摩擦損失比の相関を図-19に示す。本研究では注水率 0.02~0.3 の範囲で実験を行ったが、指数 n を 2.15 と仮定した場合、(16)式が実験データを比較的良く表現できていることが分かる。また参考として上田等による実験結果¹³⁾の一部を図中に \times で示した。注水率の大ききところでも(17)式が妥当であることがわかる。

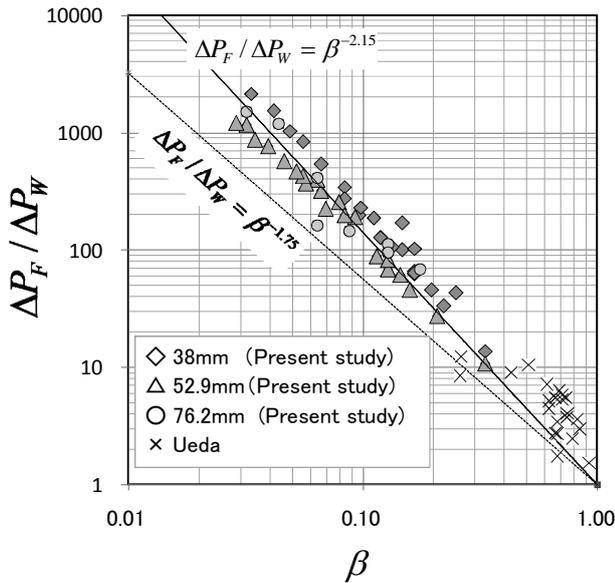


図-19 摩擦損失比と注水率の相関

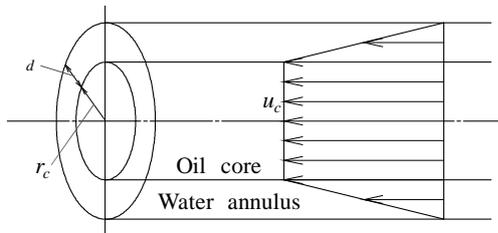


図-20 理想化したCAF

n の値は、特別な場合には理論的に導くことができる。油の粘度が小さく、仮想的に油が水と同じ物性を持っている場合を考える。この場合は水単相流と同様の圧力損失特性が得られるはずで混相流の圧力損失として Blasius 式 (15) を用いることができる。管中心部の流れとそれを取り巻く環状部分の流れを仮想的に分割し、CAF と見立てて計算すると n の値として 1.75 が得られる。次に油相の粘度が非常に大きい場合、ひとつの理想化として、油相が完全な剛体として管中央に円柱コアを形成すると考える。図-20 に示すような流れの構造が形成されていると仮定し、更に注水率が小さい場合、環状の水相は、管壁近傍の曲率を無視すれば、狭隘な間隙を有する二平板間のクエット流と見なせるはずである。この場合、

$$\beta = \frac{Q_w}{Q_c + Q_w} \approx \frac{Q_w}{Q_c} \approx \frac{d}{r_c} \quad (18)$$

と近似できるので、油水混相流の摩擦損失は、環状部の剪断変形と円周長さの積に比例するので、

$$\Delta P_f \propto \frac{u_c}{d} (2\pi r_c) \propto u_c \beta^{-1} \quad (19)$$

となる。一方水単相の摩擦損失は β が小さい場合は層流になると考えて、

$$\Delta P_w \propto \frac{1}{Re} \left(\frac{Q_w}{\pi r_c^2} \right)^2 \propto u_c \beta \quad (20)$$

とする。摩擦損失比は

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta P_w} \propto \frac{u_c \beta^{-1}}{u_c \beta} = \beta^{-2} \quad (21)$$

と評価できる。このことは、注水率が小さい場合には、摩擦損失比の注水率への依存性が -2 の冪であることを示している。気液二相流において (16) 式を提案した Lottes も $n=2$ を用いている¹³⁾。気液系における他の研究においては常圧の空気-水系の測定から $n=1.4 \sim 2.25$ が得られたという報告や、垂直管の気液二相流の測定では $n=1.75$ が良く成立するという報告もある¹⁴⁾。本研究で得られた $n=2.15$ はこうした気液二相流の結果と大きく異なっておらず妥当な範囲であると思われる。(17) 式で表される整理モデルにおいては、油相の粘度は陽な形では現れてこない。CAF が形成されている限りにおいては、油相は剪断変形をほとんど受けることなく、管摩擦はほとんど水の環状相内の剪断変形で決まると考えられるから一応は妥当な結果だと考えられる。

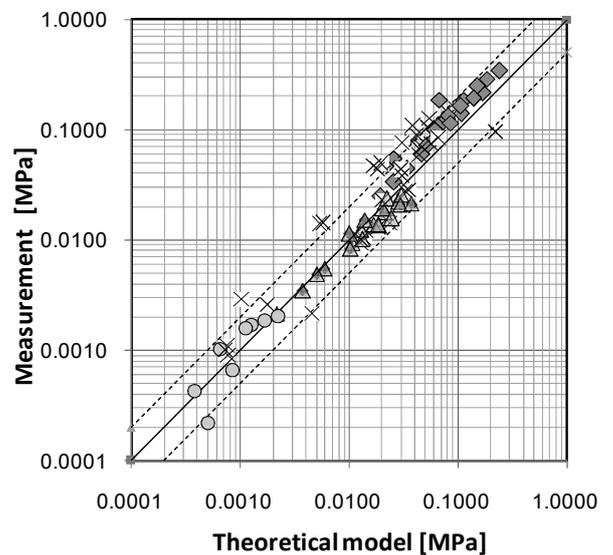


図-21 整理式と実験値の比較

しかし厳密には油の粘度の影響もあるはずであり、それは流動様式の遷移条件や、形成された CAF のコア相と環状相の界面の波立ち具合などに影響を与える。それらは整理式上では n の値の変化として現れてくるものと予想される。今回の実験ではそのような細かい検討までは行っていない

ないので今後の課題と言える。ではあるが、今回の実験は重油エマルジョンとして実際の流出油に近い粘度特性を有するものに対して得られたものであり、実用的な価値は大きいと考える。

圧力損失に関する(17)式と実験値との比較を図-21に示す。◇, △, ○は本研究で行った実験との比較であり, ×は上田の実験との比較である。整理式と実験値との間で広い範囲で比較的良好な相関が認められる。

3.4 注水量の最適化

上述の様に高粘度油の管内油送において少量の水を添加することで摩擦損失を低減できることがわかった。また水添加時の圧力損失は摩擦損失比形で注水率の指数乗として(17)式の様に表示することができることを述べた。実用上の課題は摩擦損失を減少させ、油をより効率良くパイプライン輸送することである。すなわち要求される油量を輸送するのにどの程度の量の注水を行うのが適しているかという問いへの答えが求められる。一定量の油に対して注水量を変化させた場合の摩擦損失の変化を図-22に示す。注水量の増加に伴って摩擦損失比が減少する一方で、注水量自体の増加により ΔP_w は増大する。そのためトータルとしての摩擦損失 ΔP_F は図に示す様に、ある注水量において最小値を持つことになる。管直径及び油の見かけの管内流速を変えて摩擦損失について計算した例を図-23に示す。管として50A及び80A、見かけの油流速として1m/s及び2m/sとしている。いずれのケースにおいても10~20%を注水した場合に摩擦損失が最小値を示すことがわかる。例として油に対して10%の注水を行った場合について100mのパイプライン輸送時に発生する摩擦損失を図-24に示す。

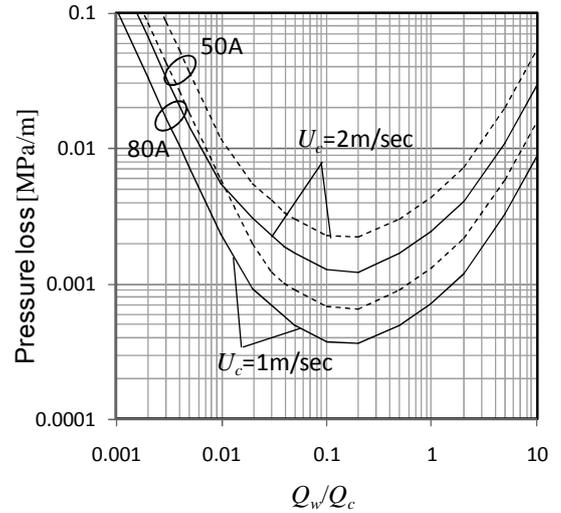


図-23 最適注水量

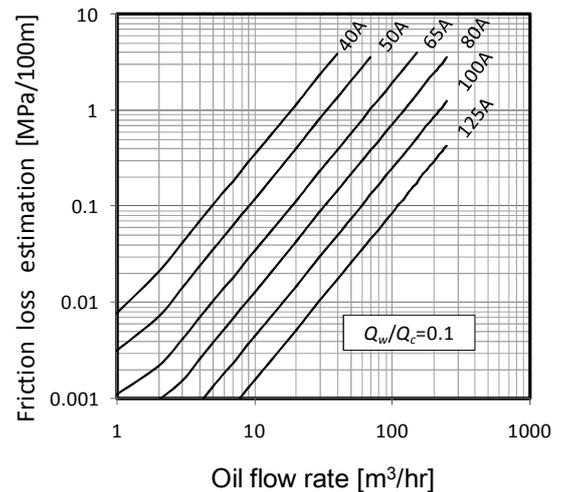


図-24 100m 輸送における圧力損失

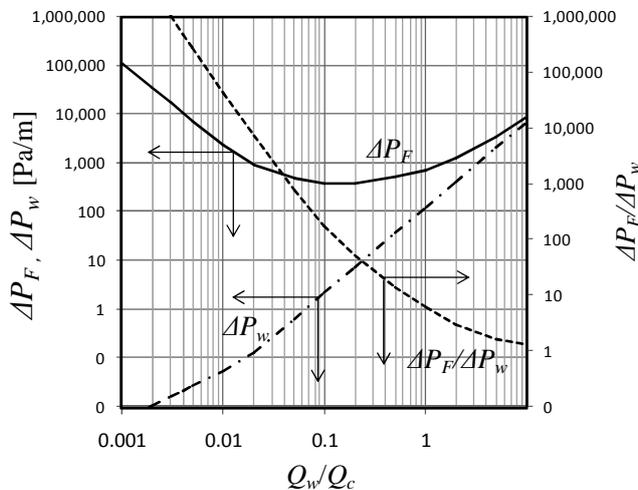


図-22 注水量と摩擦損失の関係

4. エマルジョン分解

前章においてはエマルジョン化した油の管内輸送における注水による潤滑手法を述べた。この手法は安価な水を加えることで実現でき、簡便で現場における有用性が高い。しかし一方で、摩擦損失が大きいのはそもそも W/O 型エマルジョンが作られるからであり、これを分解して油水相分離ができるれば、注水潤滑同様に管摩擦損失を小さくすることができると思えることも可能である。実際、米国などでは Demulsifier (あるいはエマルジョンブレイカー) と呼ばれるエマルジョン分解用の薬剤が油水分離の促進剤などとして油濁対応において検討されている¹⁵⁾。こ

では高粘度エマルジョン化油の粘性制御を目的として、薬剤を用いたエマルジョン分解について検討する。

4.1 回転式粘度計を用いた実験

界面活性剤を添加することによる重油エマルジョンの分解過程における支配因子を明らかにすることを目的として実験を行った¹⁶⁾。界面活性剤の種類と濃度、温度、及びずり速度の影響について検討した。エマルジョンの分解スピード、すなわち含水率の変化を直接且つ動的に測定することは難しいため、粘度を一つの指標と考え、円筒型スピンドルを持つ回転式粘度計を用いて粘度の時間的変化を追跡することによって、反応の進行を推定する方法をとった。

(1) 実験手法

実験は写真-2 に示した回転式粘度計を用いて図-25 に模式的に示す手法で行った。供試油を粘度計の測定カラムに充填し所定の温度になるまで待った後、スピンドルを設定した回転数で回転した。あるタイミングにおいて界面活性剤を少量添加し、スピンドルの回転に要するトルクの時系列を記録した。供試油にはC重油と水道水を混合し攪拌機により2時間程度攪拌して調製したW/Oエマルジョン化油を使用した(粘度 $55,000\text{mPa}\cdot\text{s}@1.0\text{s}^{-1}$)。調製したエマルジョン中の水分量はカールフィッシャー法により測定した。含水量は58%であった。

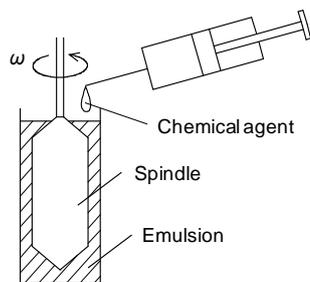


図-25 回転式粘度計を用いたエマルジョン分解実験

実験パラメータとしては、界面活性剤の種類、界面活性剤濃度、粘度計の回転数(ずり速度)ならびに温度等を制御した。使用した界面活性剤の種類を表-1に示す。(a),(b)は石田等の特許¹⁷⁾を参考に選定した。(d)はエマルジョンブレーカの一例である¹⁵⁾。(c)は(d)と同じ成分を含む薬剤として選定した。(e)は国内で認可を受けている油処理剤の代表として選定、(f)は、成分はメーカーによって明らか

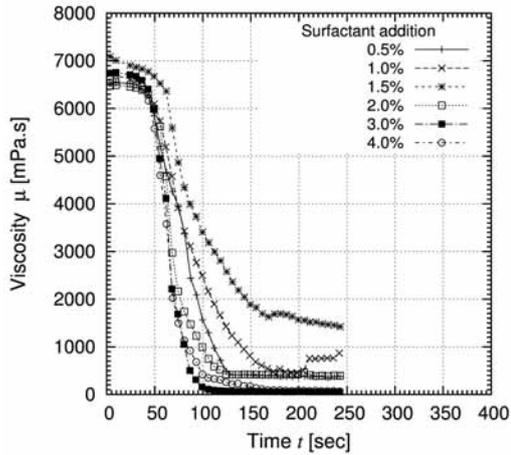
にはされていないが、Surface washing agentとして用いられるものであり、流出油対策用の薬剤として米国のEPAにおいて毒性等の試験がなされたものである。(g)の灯油は溶媒の効果をj知るために参考として加えた。

表-1 使用した薬剤

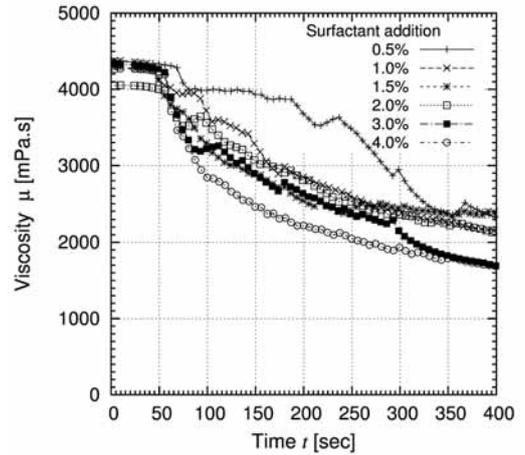
#	Products name	Ingredients or full name	Description
a	MYL-10	PEG-10 laurate	HLB 12.5
b	SL-10	Sorbitan laurate	HLB 8.6
c	OTP-75	Diethylhexyl sodium sulfosuccinate	
d	DRIMAX 1235	Sodium diisooctyl sulfosuccinate / propylene glycol/water	Demulsifier
e	NEOS	Unkown	Oil dispersant
f	SC-1000	Confidential	Surface washing agent
g	Kerosine		Light fuel oil

(2) 実験結果と考察

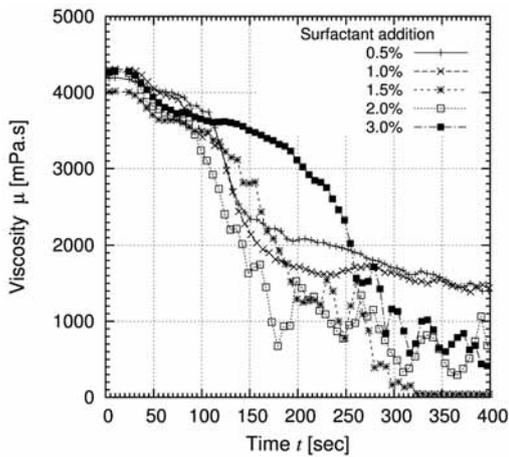
薬剤の種類と濃度の違いによる粘度の時間変化を図-26に示す。(a)のモノラウリン酸ポリエチレングリコールと(f)の洗浄剤については薬剤添加後急激な粘度低下が認められた。(b)のモノラウリン酸ソルビタンや(c)のスルホコハク酸ジエチルヘキシルナトリウムでは粘度変化のばらつきが(a)および(b)に比べて大きく且つ緩慢であるものの、粘度の低下が観察された。(d)のエマルジョンブレーカについては、粘度の低下は緩慢であり、濃度の影響は顕著に見られなかった。但し濃度による違いは顕著には認められなかった。(e)の油処理剤の場合には添加量が少ない場合は大きな粘度低下は観察されなかったが、10%を越える濃度で添加した場合には急激な粘度の低下が観察された。(g)は灯油を添加した場合だが、添加濃度が小さい場合の粘度低下は緩慢であったが20%の添加では顕著な粘度の低下が観察された。灯油の場合には界面活性というよりも油性溶媒による溶解に伴う効果を表すものと考えられる。(d)、(e)及び(f)はメーカーによる製品で、エマルジョン分解に寄与すると考えられる界面活性成分をどの程度含有しているかは不明であるので、議論の材料にし難い面がある。(a)のモノラウリン酸ポリエチレングリコール添加のケースについてみると、余り添加濃度の影響は出ておらず、ある程度の量の界面活性剤が存在すれば、それ以上の界面活性剤は必要がないことを示していると考えられる。



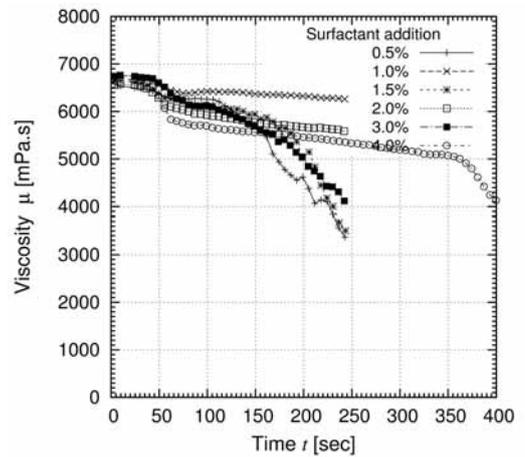
(Shear rate:50.2[1/s], Temperature:40°C)
(a) PEG-10 laurate



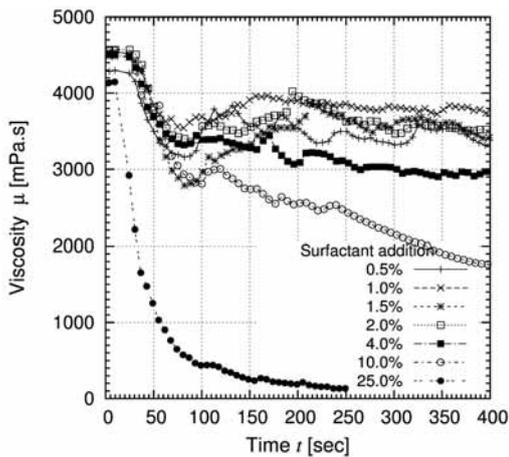
(Shear rate:83.7[1/s], Temperature:40°C)
(b) Sorbitan laurate



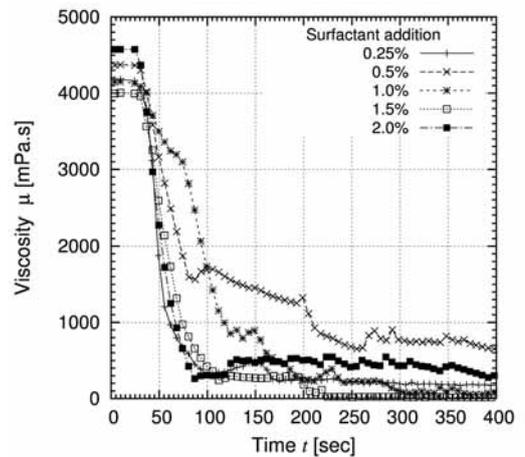
(Shear rate:83.7[1/s], Temperature:40°C)
(c) Diethylhexyl sodium sulfosuccinate



(Shear rate:50.2[1/s], Temperature:35°C)
(d) Demulsifier

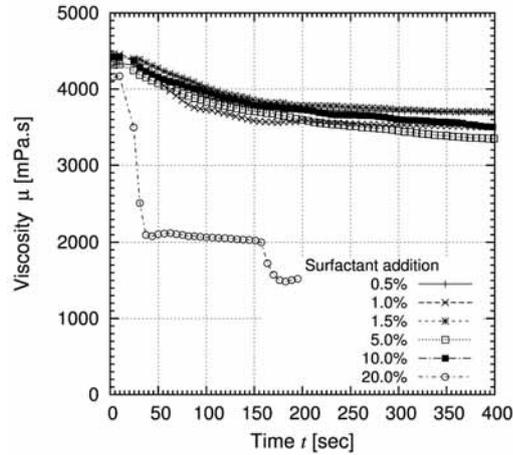


(Shear rate:83.7[1/s], Temperature:40°C)
(e) Oil dispersant



(Shear rate:83.7[1/s], Temperature:40°C)
(f) Surface wash agent

図-26 界面活性剤の種類と添加濃度によるエマルジョン分解の違い (次頁に続く)



(Shear rate:83.7[1/s], Temperature:40°C)

(g) Kerosine

図-26 界面活性剤の種類と添加濃度によるエマルジョン分解の違い

次に温度の影響を検討する。図-27 にモノラウリル酸ポリエチレングリコールを用いた結果の一例を示す。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 20,25,30,40°C の 4 通りで実験した。温度が異なると初期状態の粘度が異なるため、初期粘度により規格化した粘度を表している。多少のばらつきは認められるものの、いずれの温度においてもほぼ同じような時間スケールで粘度低下を発現していることがわかる。粘度自体は(12)式に示した様に温度依存性を強く持つ一方でエマルジョンの分解反応の温度依存性は顕著ではないことが分かる。

次に、ずり速度の影響を考える。ずり速度を変化させて、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-28 に洗浄剤(t)を用いた場合を例として示す。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が大きくなるに伴って、粘度低下に要する時間は短くなる。解析のモデルとして、粘度 μ の時間変化を一次反応、すなわち

$$t_0 \frac{d\mu}{dt} + \mu = 0 \quad (22)$$

と仮定する。この場合(22)式は容易に積分できて、

$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \quad (23)$$

となる。(23)式からわかるように 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。図

-28 の線は、実験値に(23)式を当てはめたものである。

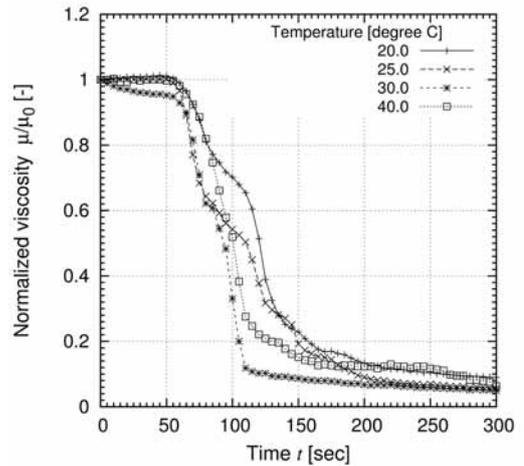


図-27 エマルジョン分解の温度依存性

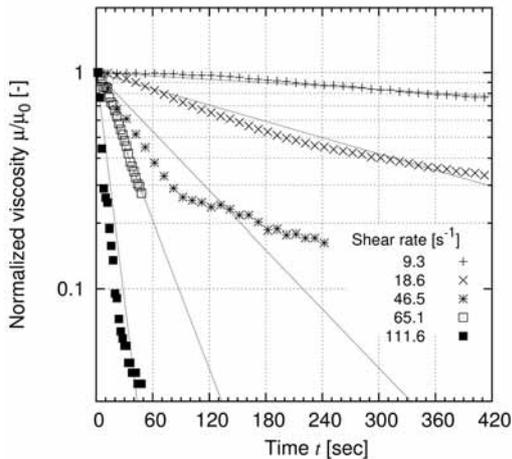


図-28 エマルジョン分解のずり速度依存性

エマルジョン分解速度の目安である t_0 のずり速度依存性を検討する. t_0 とずり速度 ε との関係を

$$t_0 = t_0(\varepsilon) = c\varepsilon^{-q} \quad (24)$$

と仮定して冪指数 q がどのような値になるか調べる. 図-28 に示した回帰線に関して t_0 と ε の関係を両対数グラフにプロットしたものを図-29 に示す. q として 2.093 が得られる. 他の薬剤についての指数を表-2 に示す. いずれのケースにおいてもおよそ 2 前後の値が得られた. 測定の誤差等を考慮すると, t_0 はずり速度 ε の自乗に逆比例していると考えられる. この観察結果は, 界面活性剤によるエマルジョンブレイクの進行が散逸エネルギー(攪拌エネルギー)に比例していることを示している. 実験に使用した粘度計の構造を模式化したものとして, 図-30 に示す狭隘な間隙を有する二平面に挟まれた空間内の Couette 流(下面は固定, 上面は速度 V で移動)を想定する. このような系における粘性剪断力は間隙に挟まれた流体の粘度を μ として

$$\tau = \mu\varepsilon = \mu \frac{V}{d} \quad (25)$$

と表すことができる. 単位面積当たりで散逸されるエネルギー E は剪断応力に速度を掛けたものであり,

$$E = \tau \cdot V = \mu \frac{V^2}{d} = \mu d \varepsilon^2 \quad (26)$$

と表される. 式から明らかな様に散逸エネルギーはずり速度の自乗に比例している. エマルジョンの分解速度を t_0 の逆数として考えると(24)式と(26)式, 及び表-2 の結果から,

$$\frac{1}{t_0} \propto \varepsilon^2 \propto E \quad (27)$$

であることが分かる. 以上のように界面活性剤によるエマ

ルジョン分解においては, ずり速度が反応の速さを決める支配的な要素であると言える.

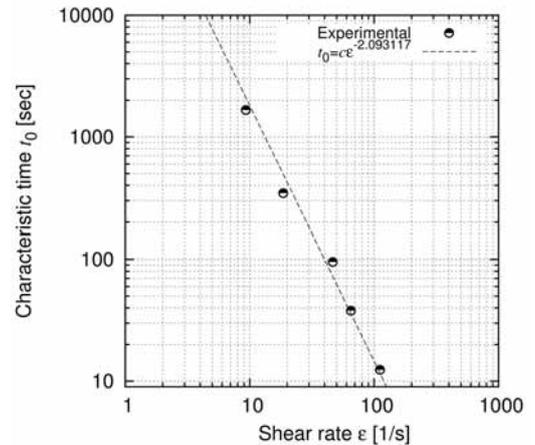


図-29 エマルジョン分解時定数のずり速度依存性

表-2 エマルジョン分解時定数のずり速度依存性

Case	Agents	Index q
a	MYL-10	2.004
c	OTP-75	2.039
d	DRIMAX1235	2.183
f	SC-1000	2.093

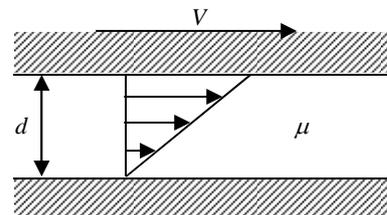


図-30 Couette 流モデル

4.2 インラインエマルジョン分解装置

4.1 で述べた様に, エマルジョン分解は大きなずり速度を与えることで促進されることがわかった. 油回収機によりエマルジョン化油を回収する際に, 同時にエマルジョン分解を行うことができれば, 高粘度に伴う問題を解決できる可能性が高い. そこで回転二重円筒式(Taylor-Couette式)攪拌装置を試作し, 図-31 に示す構成で, 重油エマルジョンの連続分解試験を行った¹⁵⁾. 攪拌装置部分の写真を写真-3 に示す. 実験系は油圧シリンダーにより駆動するエマルジョン供給装置, 界面活性剤を供給する定量ポンプ及び反応容器より構成される. 反応容器は円筒形であり, 内部に回転子が配置されている. 外筒と回転子の間は狭隘な間隙を形成しており, 上部油圧モータにより回転子が回

転し、回転子と外筒との相対速度に対応する剪断変形を与えることができる構造となっている。エマルジョンは間隙を流れる間に強い剪断流中に置かれることになり、界面活性剤の効果によりエマルジョンが分解される。回転子の直径は47mm、間隙は1mm、回転子の長さは100mmである。実験ではエマルジョン流量 170ml/min、界面活性剤流量 6.8ml/min とし、内部回転子の回転数を 10,100,200rpm と変化させた。観察によると、界面活性剤を添加せずに回転子を回転させた場合には、エマルジョンの供給に非常に大きな圧力を要する一方、界面活性剤添加時の押し込み圧力はさほど大きくなかった。エマルジョンの分解に伴う粘性の低下の効果であると思われる。実際、処理直後のエマルジョンは処理前に比べて明らかに粘性の低い様子を呈していた。但し油水相の分離は顕著には観察されなかった。そのため処理された試料を遠心分離器にかけて目視観察を行った。界面活性剤としてスルホコハク酸ジエチルヘキシルナトリウム (OPT-75) を用いた試験の遠心分離後の試料を写真-4 に示す。左端が処理前のエマルジョンを遠心分離器に掛けたもので、油水相の分離は見られなかった。相分離は遠心分離によるものでは無いことがわかる。一方界面活性剤を添加した場合にはいずれの回転速度においても油水の分離が顕著に観察された。写真-5 は表-1 の(f) に示す洗浄剤を用いた場合であるが、写真の(b)は界面活性剤を添加しただけで、攪拌を行わずに、遠心分離したものを示している。界面活性剤を添加しただけでも多少のエマルジョンブレイクは起きるが、ずりを与えた物と比較するとその度合いはかなり小さいと言える。分離水相にはかなりの油分が分散し、懸濁の様相を呈してことが分る。分離された油相の粘度特性を図-32 に示す。処理前後で粘度がおおよそ 1/10 に減少していることがわかる。

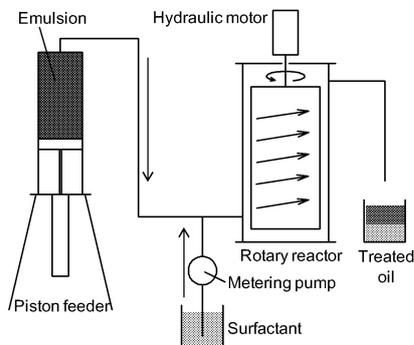


図-31 Taylor-Couette 型エマルジョン分解実験概要

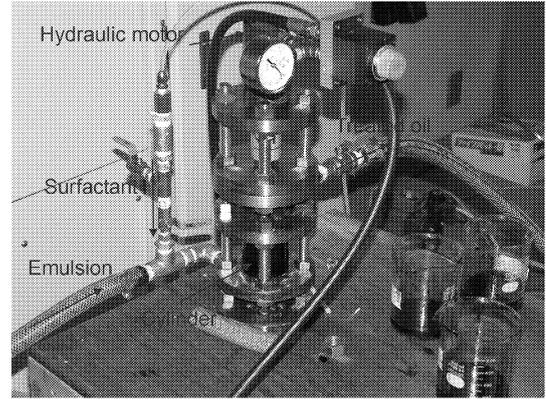
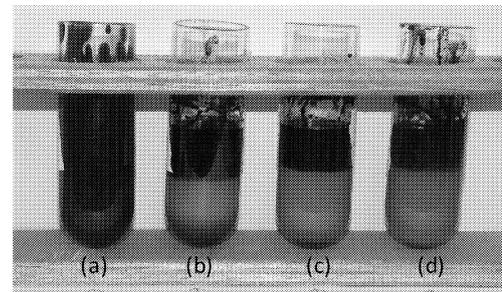
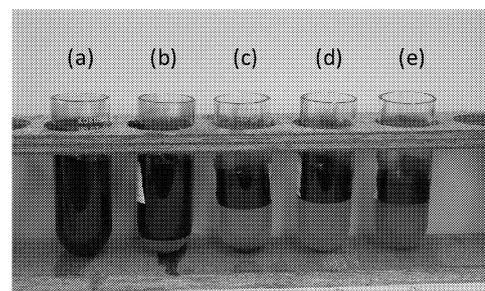


写真-3 Taylor-Couette 型攪拌装置



(a) Without surfactant nor agitation
(b) With surfactant and agitated at 10rpm
(c) With surfactant and agitated at 100rpm
(d) With surfactant and agitated at 200rpm
Additive : Diethylhexyl sodium sulfosuccinate

写真-4 インライン攪拌機によるエマルジョン分解
(スルホコハク酸ジエチルヘキシルナトリウム)



(a) Without surfactant nor agitation
(b) With surfactant but no agitation
(c) With surfactant and agitated at 10rpm
(d) With surfactant and agitated at 100rpm
(e) With surfactant and agitated at 200rpm
Additive : Surface wash agent

写真-5 インライン攪拌機によるエマルジョン分解
(洗浄剤)

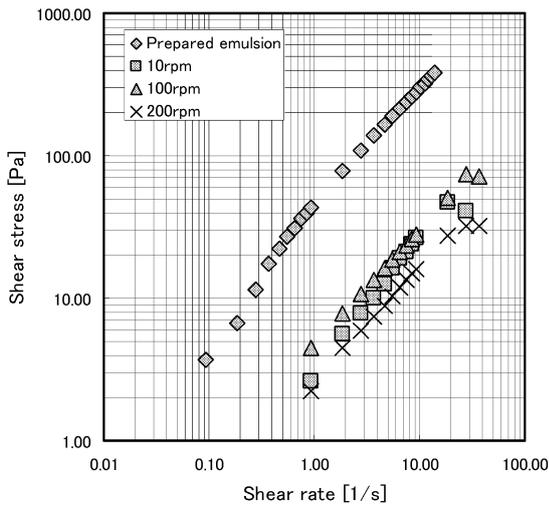


図-32 エマルジョン分解後の油の粘度特性
(添加剤：表-1(f))

表-3 薬剤の希釈

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

水での希釈が可能であったが、(b)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。

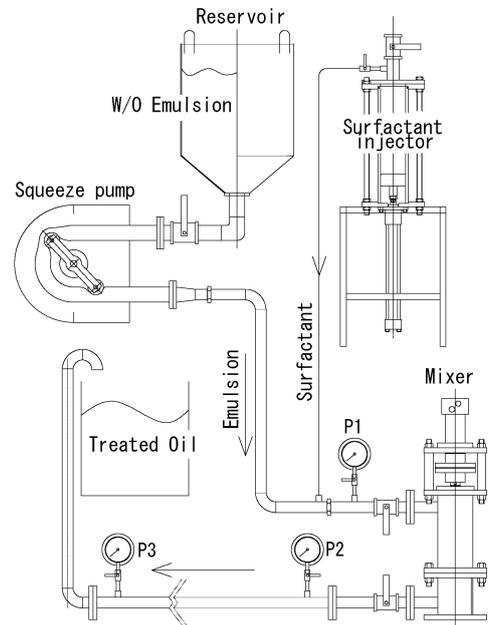


図-33 エマルジョン分解後の油の粘度特性

次に管内輸送における摩擦損失が薬剤添加によりリアルタイムで減少するかどうかを調べる実験を図-33に示す装置を用いて実施した¹⁸⁾。試験油は油槽よりチューブポンプにより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-34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。添加剤は表-1 の(a),(b),(c),(e),(f)及び(g)を使用した。(a),(b)及び(c)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-3に示す。(c)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。(a)と(c)については、エタノール希釈後、更に

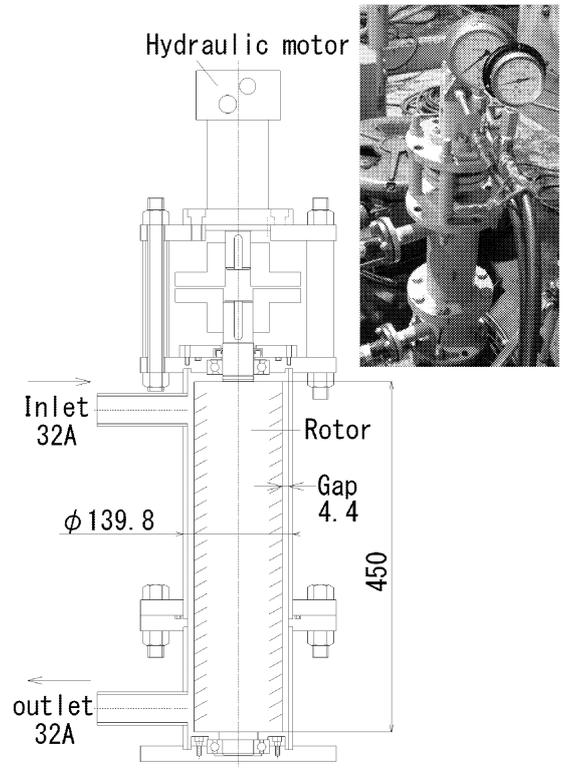
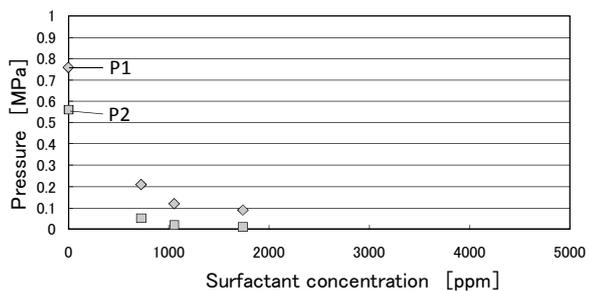
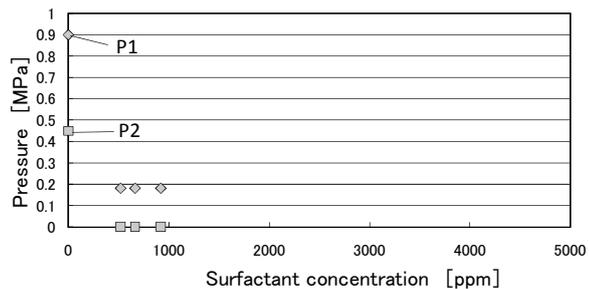


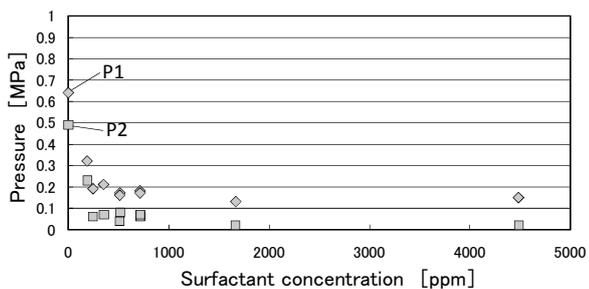
図-34 攪拌装置の構造と外観



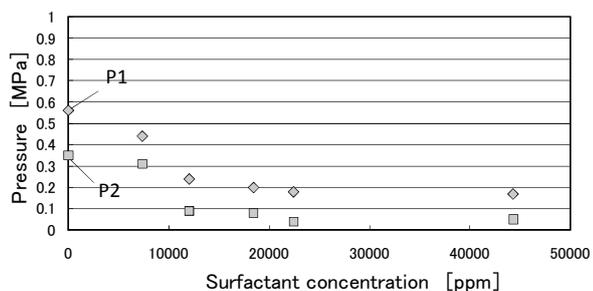
(a) MYL-10 添加時の圧力



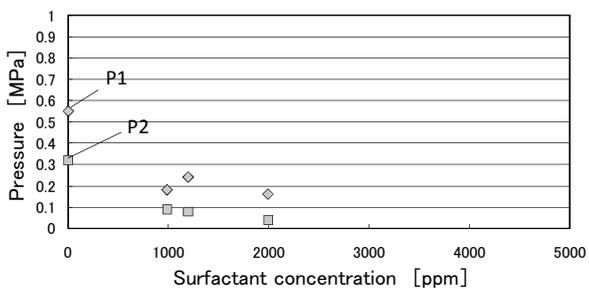
(b) SL-10 添加時の圧力



(c) OTP-75 添加時の圧力



(e) 油処理剤添加時の圧力



(f) 洗浄剤添加時の圧力

図-35 薬剤添加時の圧力損失

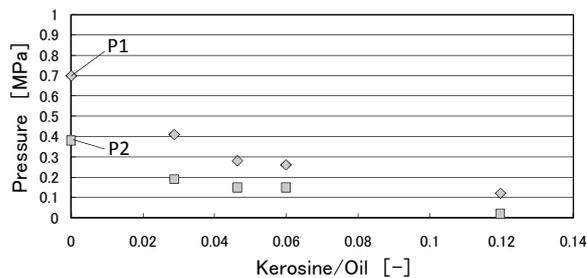


図-36 灯油を添加時の圧力 (攪拌有)

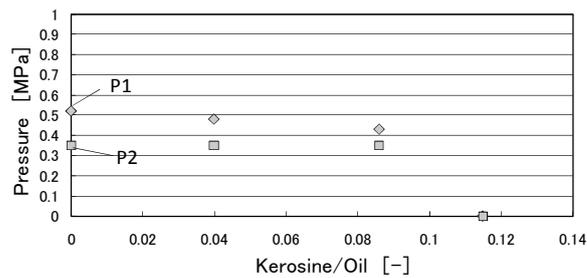


図-37 灯油を添加時の圧力 (攪拌無)

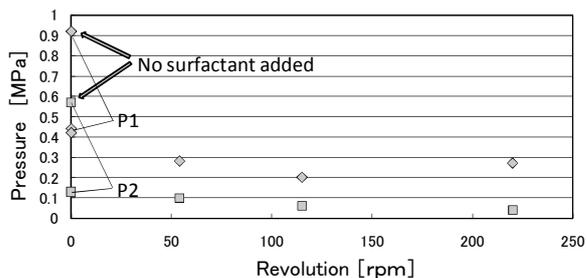


図-38 攪拌機の回転と圧力の関係

MYL-10 を用いた場合の圧力の変化を図-35(a)に示す。油の流量は 6.5l/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-35(b)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-35(c)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-35(e)に示す。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。

図-35(f)は表面洗浄用の薬剤を用いた場合であるが、この場合には1000ppm程度の薬剤添加で圧力を小さくすることができた。

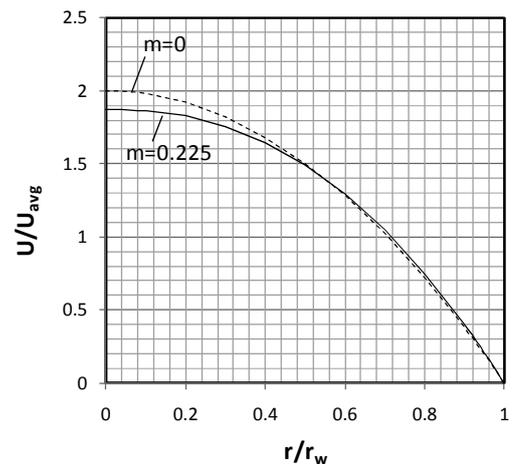
次に界面活性成分を有した薬剤にかわり溶媒としての効果がある灯油を添加した場合の結果を図-36に示す。灯油を添加した場合、界面活性剤のように少量の添加により劇的に圧力が減少するものではなく、添加量に従って徐々に圧力の減少が観察された。図-37は、図-36同様灯油を添加しているが、攪拌機を通していない場合である。この場合、灯油の添加割合が0.09程度までは顕著な圧力の低下が現れず、添加割合が0.11を超えたところで急激な圧力の低下が観察された。このことより図-36における添加割合0.12での圧力減少は攪拌機による効果ではないと言える。

4.1節で述べた様に、エマルジョン分解自体には攪拌の影響が大きい。管路内で発生する摩擦損失に対する攪拌の影響について考える。界面活性剤を添加して攪拌機の回転数を変化させた実験の結果を図-38に示す。使用薬剤は(c)であり添加濃度は166ppmである。この場合、攪拌を行わないケースでも圧力損失の減少が観察された。このように攪拌しない場合でもある程度圧力が下がるのは、攪拌機を用いた場合には油相全体に渡って分解が進むのに対して、攪拌しない場合でも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。

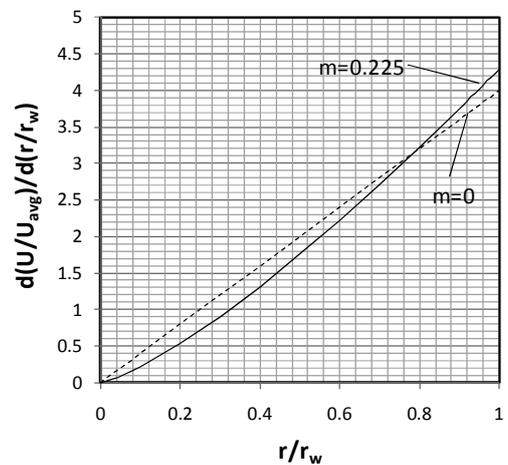
5. 薬剤注入による摩擦損失低減

前章では、薬剤を添加し攪拌エネルギーを与えることで、W/Oエマルジョンを分解することができ、管摩擦損失を低減できることを述べた。エマルジョン化した油相全体の分解を行うことを目的とした場合には強制攪拌装置が必要になると考えられる一方で、管摩擦損失を低減するだけであれば、管壁近傍の局所的なエマルジョン分解により目的が達せられる可能性があることを示した。図-39はニュートン流体と擬塑性流体($m=0.225$)の円管内の層流の速度分布と剪断力分布を示したものであるが、図の(a)に示す様に速度勾配は管壁に近くなる程急であり、更に図の(b)に示すように剪断変形も管壁に近い程大きくなる。加えてその値はニュートン流体に比べてエマルジョン化した油のような擬塑性流体の方が大きい。その為、エマルジョン分解効果を持つ薬剤をエマルジョンの管内流に少量添加すると、管壁近傍の剪断変形の大きな領域で自然にエマル

ジョンが分解して、管摩擦損失が小さくなることが期待される。このような期待から、水平直管内の高粘度エマルジョン化油の流れに対して、少量の界面活性剤を枝管より単純に注入する実験系を構成し、管摩擦損失の効果を定量的に測定した¹⁹⁾。



(a) 流速分布



(b) 剪断変形分布

図-39 円管内における擬塑性流体の流動

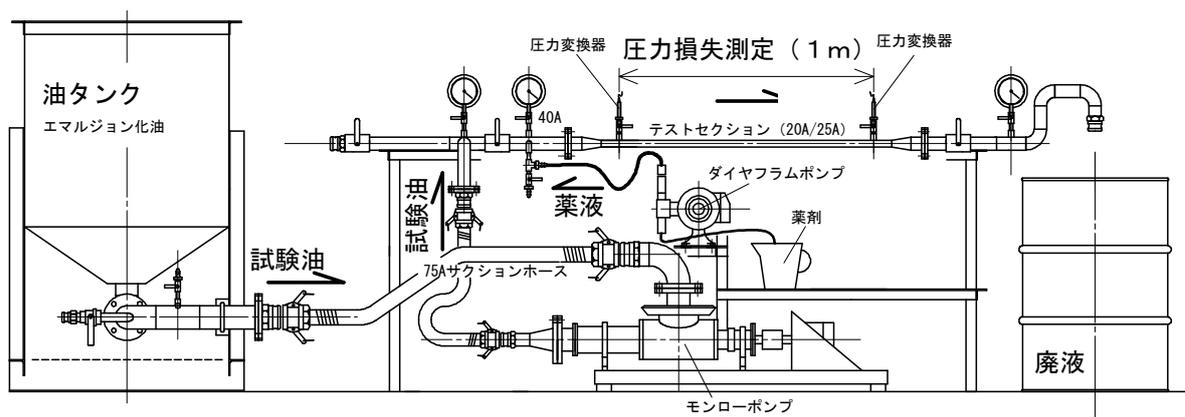


図-40 実験装置の構成

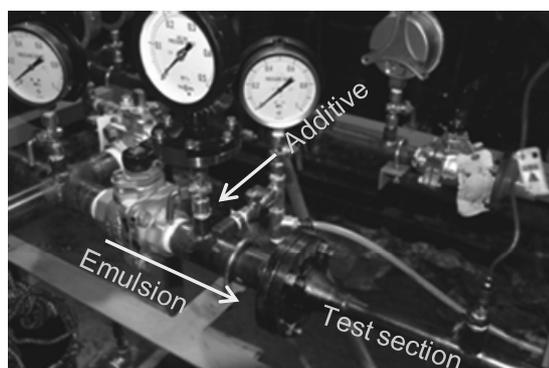


写真-6 薬剤注入部

においては薬液用のダイヤフラムポンプのダイヤル値(薬剤注入量)を一定にし、油の流量を変化させた。使用したエマルジョン化油は図-4に示したものと同一である。使用した薬剤をと実験条件を表-4に示す。界面活性剤と油処理剤の実験に加えて、ケース10,11として薬剤の代わりに水を加える注水潤滑試験も比較対象として実施した。

表-4 実験条件

Case	Additive	Pipe	Oil flow rate [l/min]	Injection rate [l/min]	Additive Concentration [%]
1	c-2*	20A	0.68-13.92	0.03	0.21-4
2	b*	20A	0.95-37.7	0.05	0.13-5.2
3	e**	20A	2.74-37.0	0.05	0.14-1.8
4	e	20A	1.86-39.8	0.1	0.25-5.3
5	e	20A	2.88-13.2	0.18	1.36-6.25
6	e	20A	1.86-21.4	0.28	1.3-15.0
7	e	20A	1.73-33.8	0.51	1.5-29.5
8	e	25A	0.98-17.3	0.1	0.57-10.2
9	S-7***	20A	1.89-24.5	0.1	0.36-4.76
10	water	20A	1.74-10.8	0.1	0.92-5.7
11	water	20A	2.14-59.5	0.69	1.2-32

* defined in Table 3

**defined in Table 1

***self-mixing dispersant

5.1 実験装置と方法

実験装置の概要を図-40に示す。試験油を管内に流すためのポンプには容積型ポンプの一種であるモンローポンプを使用した。油の流量は、モンローポンプの回転数をタコメータにより計測し、あらかじめ校正した相関式に基づき算出した。薬剤の注入にはダイヤフラム式の薬注ポンプを使用した。注入は40Aの配管路に内径3mmの枝管を介して一カ所から行った(写真-6)。

圧力損失測定部は水平の直管とし、管にはSGP管15A,20A,25A及び32Aを用意した。圧力損失測定部には1mの間隔において2カ所、圧力測定用に歪みゲージ式の圧力変換器を配置した。圧力変換器の信号はアンプを介した後、約30ms毎にA/D変換を行い、コンピュータにデジタル値で記録した。測定値の例を図-41に示す。3章で述べた注水実験ではチューブポンプを用いたことで大きな脈動が発生していたが、ここでの実験では一軸モンローポンプを用いたので、安定した圧力が計測された。薬剤を注入する実験

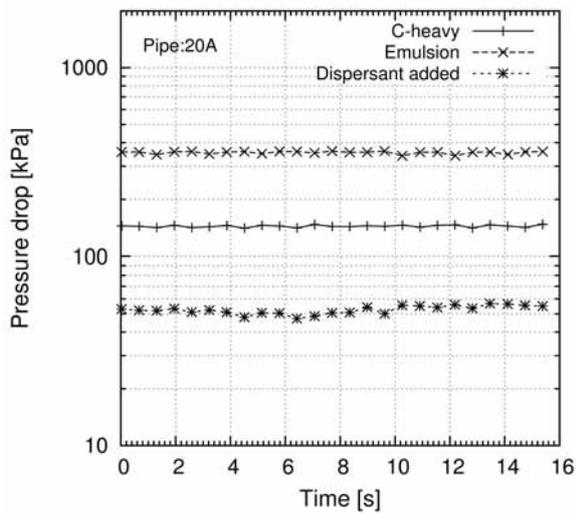


図-41 円管内における圧力測定値の例

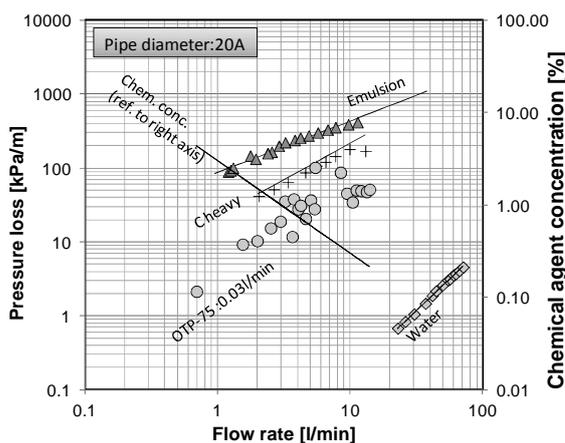
5.2 実験結果と考察

C重油と水 W/O 型エマルジョンの管内流に界面活性剤を添加すると、発生する摩擦損失が小さくなる。表-4 の Case 1~9 の結果を図-42 に示す。実験では薬剤の添加量を一定に保ち、試験油の流量を徐々に増やして計測したため薬剤の添加量は一定ではないので、各図の右側に薬剤

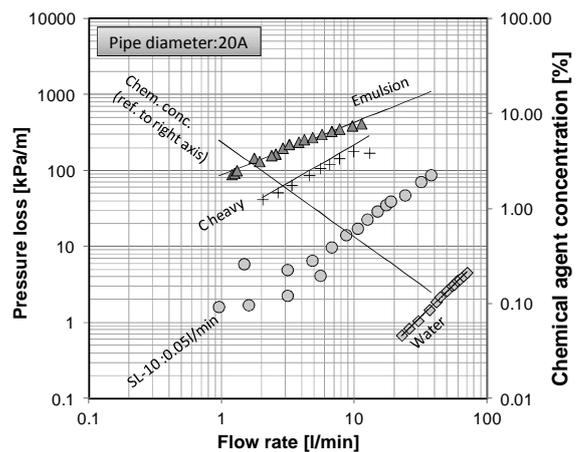
濃度を示している。図の(a)は界面活性剤であるスルホコハク酸ジエチルヘキシルナトリウムを添加した場合で、(b)はモノラウリル酸ソルビタンを加えた場合である。いずれのケースでもエマルジョン化油に対して摩擦損失の減少が観察された。(c)~(g)は薬剤として一般型の油処理剤を用いて、薬剤の添加量を変えた場合の実験結果である。界面活性剤の代わりに市販品の油処理剤を添加しても摩擦損失を減少させることが可能なことがわかる。(h)は管路直径を変えた場合であり、(i)は一般型油処理剤に替えて自己攪拌型油処理剤を用いた場合である。

薬剤注入により摩擦損失がどの程度低減されるかを表すため、薬剤注入時の圧力損失をエマルジョン化油の圧力損失で除した値を摩擦損失低減率と定義する。横軸を薬剤注入量、縦軸を摩擦損失低減率として整理したものを図-43 に示す。注入量と低減率の関係は薬剤の希釈率にも依存するため、一元的な記述は難しいが、市販の油処理剤については 1%程度の添加で、圧力損失を 1/10 あるいはそれ以上に低減できることがわかる。

前章では機械的な攪拌装置を用いたエマルジョン分解を扱ったが、本章の実験により、敢えて機械的な攪拌を行わなくても、薬剤を注入することにより相応に摩擦損失を低減できることがわかった。

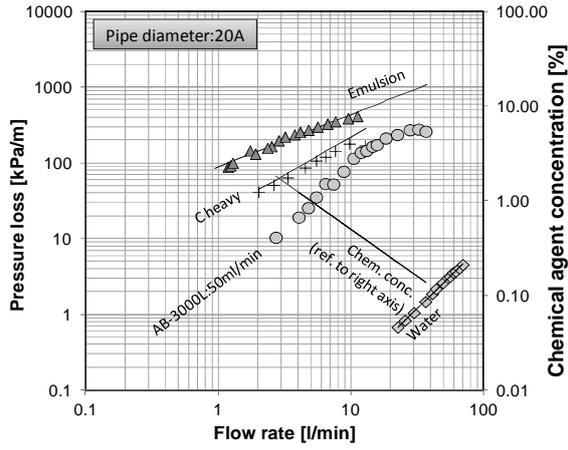


(a) Case 1

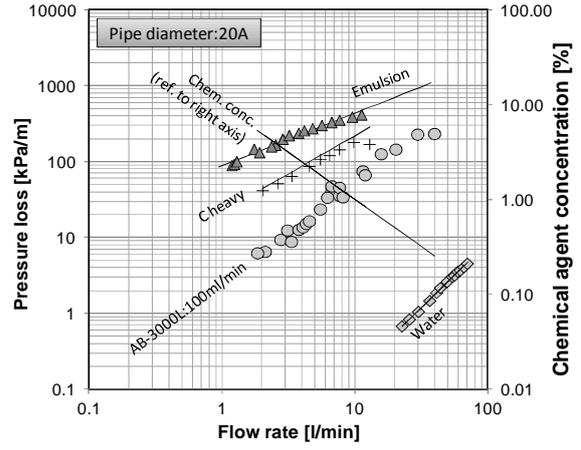


(b) Case 2

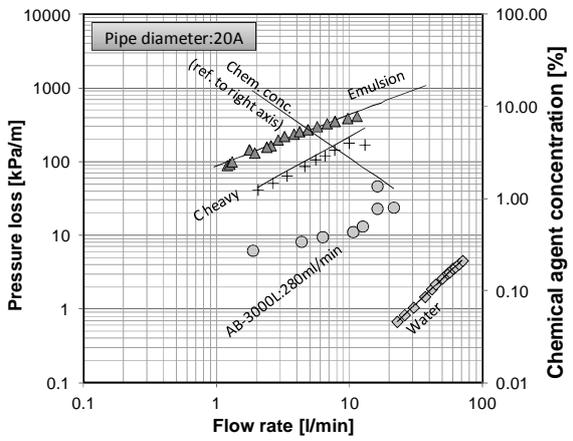
図-42 円管内における圧力測定値の例 (次頁に続く)



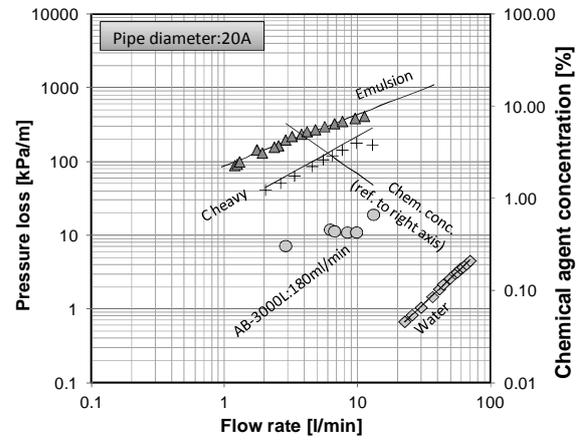
(c) Case 3



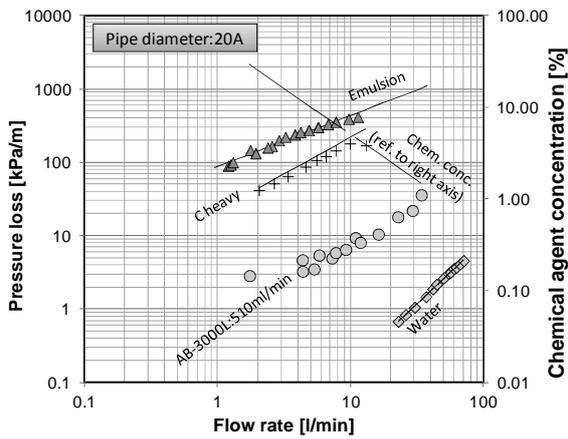
(d) Case 4



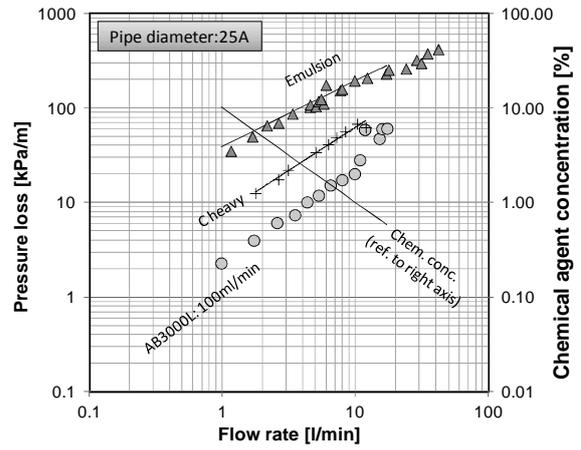
(e) Case 5



(f) Case 6

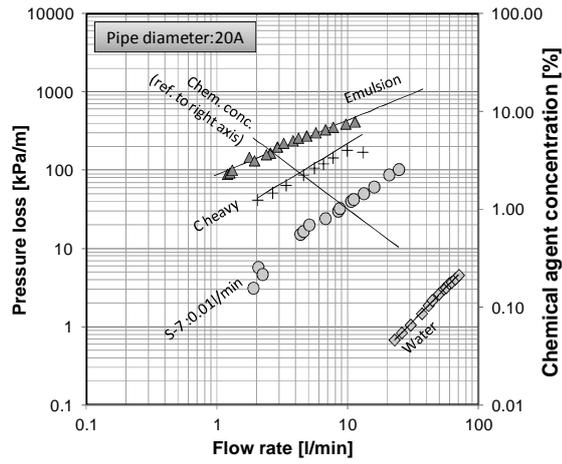


(g) Case 7



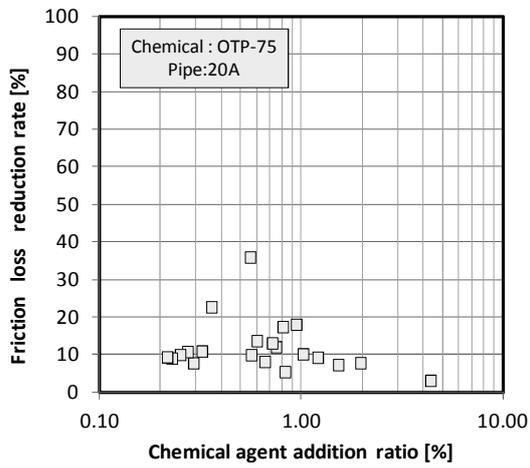
(h) Case 8

図-42 円管内における圧力測定値の例 (次頁に続く)

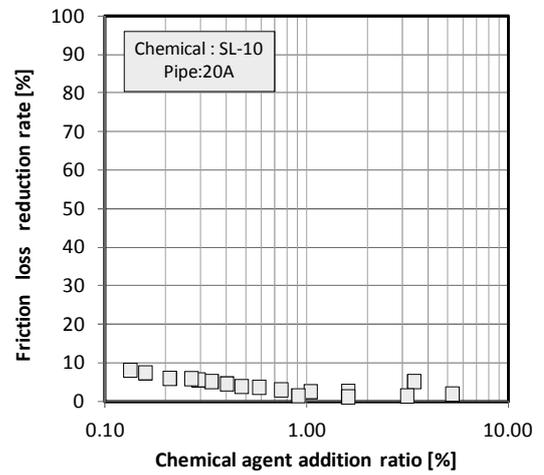


(i) Case 9

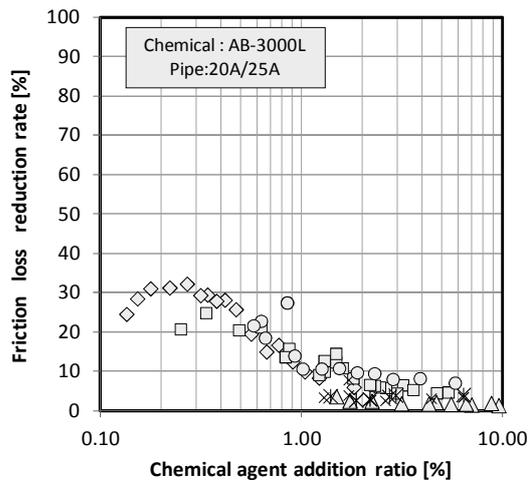
図-42 円管内における圧力測定値の例



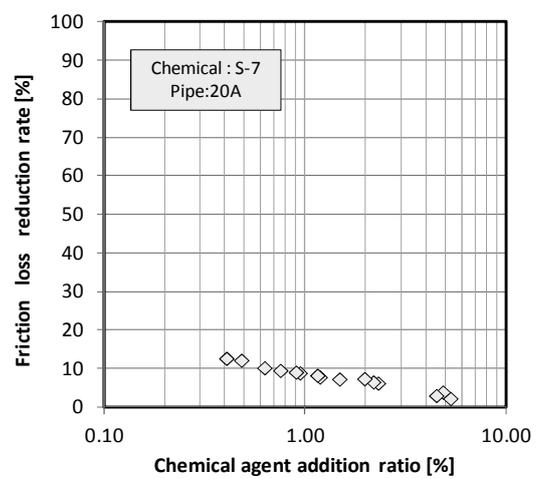
(a) OTP-75



(b) SL-10



(c) Normal oil dispersant



(d) Self-mixing oil dispersant (S-7)

図-43 薬剤添加による摩擦損失の低減率

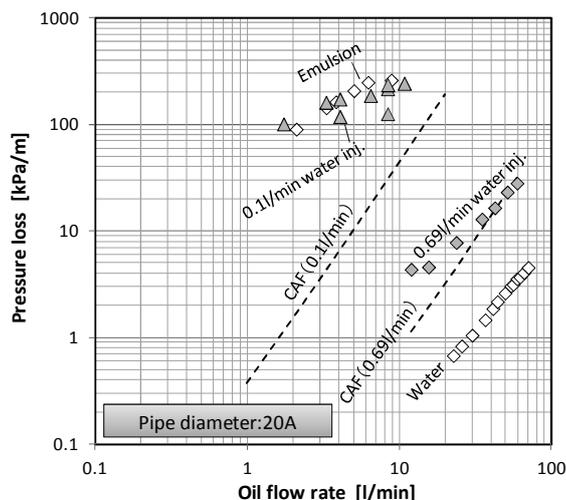


図-44 注水における圧力損失

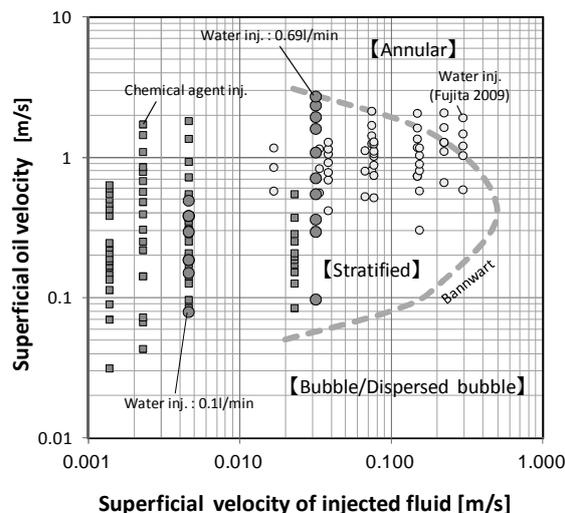


図-45 注入条件の比較

3章において注水による潤滑を扱ったが、薬剤添加と注水による効果の違いを検証する。同一の実験装置において、薬剤に代わって水を注入する実験を行った。実験条件は二通り、100ml/min注入と690ml/min注入（表-4のCase 10,11）とした。実験結果を図-44に示す。図中の破線はCAFの理論が予測する各注水量における圧力損失値である。実験による測定値は、注水量が690ml/minと大きい場合には、相応の圧力損失低減効果が得られるとともに、理論の予測値とも比較的合っている。一方、注水量が100ml/minと小さい場合には、元のエマルジョンと同程度の圧力損失を示し、期待する圧力損失の低減効果は得られなかった。この違いはCAFが発生する条件に依存していることが予想される。図-45同様に実験条件を流動様式線図にプロットすると図-45を得る。ここで行った注水実験の条件を●、薬剤注入実験の条件を■、3章で扱った注水実験において圧力損失低減効果が認められたケースを○で示した。流動様式線図上で見た場合には二つの注水条件は大きく異なっている。注水量が690ml/minのケースは以前の実験条件とも重なっており、CAFの形成により圧力損失が低下したと解釈できる。一方、注水量が100ml/minと小さいケースは、線図上では流動様式が明らかにされていない領域であるが、ここではCAFが形成されていないと考えられる。一方、水の代わりに薬剤を注入した場合には、注水方式ではCAFが形成されないと思われる少添加領域でも、薬剤の界面活性効果により壁面近傍においてエマルジョンが分解することでCAFが形成されていることが考えられる。

6. 油回収機、回収船への応用

前章で述べた管摩擦損失の低減手法は実際の油回収船における装備として活用されている。注水による方法は大型油回収船「白山」における回収油の船外排送システムの一部として機関排熱を利用したタンク内バルクヒーティングと組み合わせて実用化されている²⁰。一方、薬剤添加による方法は、浮遊堰式油回収機を搭載した油回収船の支援装置として実用化されている。ここでは薬剤添加法の実装について紹介する。浮遊堰式油回収装置の構造を図-46に示す。

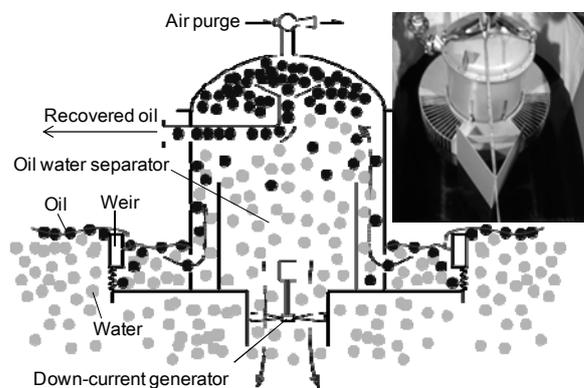


図-46 浮遊堰式油回収装置

この装置の大きな特徴はいわゆる堰式の油回収装置に釣り鐘状の油水分離器を組み合わせた点である。油水分離器内部では重力分離により油を容器の上方に集め、下部からはプロペラにより自由水を強制排水する。このような仕組みにより、自由水をほとんど含まない高濃度の油回収を実現している²⁾。反面、高粘度のエマルジョン油を回収した場合、管路閉塞を起こし易い弱点を持つ。その為、管路内の摩擦損失を低減させる必要があり、**図-47** に示す薬剤注入システムを増設することで問題の解決を図ることとなった。システムでは油回収ポンプの吸い込み圧力に応じて薬剤注入量を調整するフィードバック制御を行っている。薬剤注入装置の外観を**写真-7** に示す。**写真-8** に示す国土交通省近畿地方整備局の新造環境整備船「クリーン はりま」の油回収装置でも採用されている。

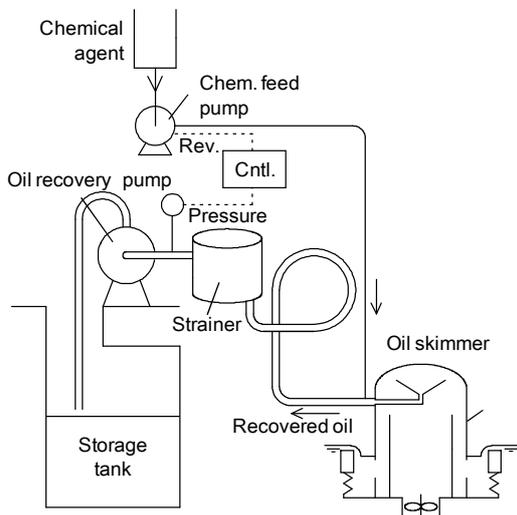


図-47 薬剤注入装置



写真-7 薬剤注入装置



写真-8 環境整備船「クリーン はりま」

7. まとめ

流出油は海水と混合され、W/O型エマルジョンを形成することで、非常に粘度の高い（正確には必ず変形を起こし難い）非ニュートン流体へと特性を変化させるため、油回収過程並びにその後の移送過程において障害となる。特に管路を用いた輸送において過大な圧力損失を生じる問題は深刻である。本稿ではそうした問題の解決に向けてエマルジョン化した油の管内輸送を扱った。

エマルジョン化油のレオロジー特性を考慮した管摩擦損失の式を提示に始まり、管摩擦損失を低減する手法として注水によりCAFを発生させる潤滑方法を検討した。摩擦損失比を注水率の関数で表すモデルを提案し、実験結果との良い一致をみることができた。更に最適な注水量について考察した。

薬剤によるエマルジョン分解に関して、基礎実験及び、強制攪拌装置を用いたインラインエマルジョン分解装置について論じた。更に攪拌装置を用いない薬剤添加によっても摩擦損失を大きく低減できることを実験的に明らかにした。

更に研究成果は、実際の油回収船における管路抵抗の低減手法実用化されているので、実装例を紹介した。

本稿で述べた要素技術は、摩擦損失の低減以外の応用の可能性を含んでいる。例えば、4.1節で述べたエマルジョン分解の素過程を検討した実験からは、分解速度と攪拌エネルギーの関係が得られている。こうした知見は油処理剤による分散処理の促進技術を考える上でのベースになっており、著者等も応用に関する研究を鋭意進めているところである。本稿で述べた研究成果が活用され、油回収を含めた油濁対応技術が高度し、油流出事故における環境被害が低減されることを願って結びとする。

(2013年8月9日受付)

参考文献

- 1) Keisha Huijter, Trends in Oil Spills from Tanker Ships 1995-2004, 28th Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar, 7-9, June 2005, Calgary, Canada (2005).
- 2) National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, Deep water-The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling-Report to the President, Jan. (2011).
- 3) 篠原雅彦,尾川義雄,松島早苗 : 東日本大震災における気仙沼の火災, 日本火災学会研究発表会概要集,pp.22-23 (2012).
- 4) 中村真由子, 中村宏, 山川紘, 尾長幸夫 : 東日本大震災による気仙沼湾海底泥の油分汚染状況について, 環境技術学会研究発表大会及び特別講演会予稿集, vol.12, pp30-31 (2012).
- 5) 石油連盟, 流出油の性状変化データベース, <http://www.pcs.gr.jp/doc/keijihenka/jdatabase.html>
- 6) 海上災害防止センター, 油流出事故対応防除マニュアル, p.40 (2000).
- 7) Charles M. et al., The Horizontal Pipeline Flow of Equal Density Oil-Water Mixture, Can. J. Chem. Eng., Vol.39(1), 27-36 (1961).
- 8) Prada V. et al., Modeling of Vertical Core Annular flows and Application to Heavy Oil Production, ETCE2000 & OMAE2000 Joint conference, CD-ROM, February 14-17, New Orleans (2000).
- 9) 上田浩一, 山之内博 : 流出油回収移送時の高粘性油の摩擦抵抗, 第73回マリンエンジニアリング学術講演会, pp.103-104, 2005.
- 10) Asakura K. et al., Pressure Loss of Water-Oil Core Annular Flow, Proc. of Jpn. Soc. Mech. Eng. (Fluid Eng.), September 9-10, 483-486 (2000).
- 11) 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)
- 12) Bannwart A.C. et al., Flow Patterns in Heavy Crude Oil-Water Flow, J. Energy Resource Technology, Vol. 126(3), 184-189 (2004).
- 13) Lottes, P. A. and Flinn W. S., A method of analysis of natural circulation boiling systems, Nucl. Sci. Eng., Vol.1, 420 (1956).
- 14) 上田辰洋 : 気液二相流-流れと熱伝達, 養賢堂, pp.34-35 (1981).
- 15) I. Buist, A. Guarino, A. Lewis and J. Mullin, Examining the Fate of Emulsion Breakers used for Decanting, Proceedings of Int. Oil Spill Conference 2005, pp.171-175 (2005).
- 16) 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 (CD-ROM), vol.19, 論文番号69 (2006).
- 17) 石田啓, 政田浩光 : (水/重質油型乳濁物質) 及び (重質油/水型乳濁物質) の混合物の油水分離方法、油水分離装置及び油水分離用界面活性剤, 特許出願番号 2003-323283, 2003
- 18) 藤田勇,藤咲秀可,松崎義孝 : 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, 海洋開発論文集, vol.26,pp.945-950 (2010).
- 19) 藤田勇・松崎義孝・白石哲也 : 高粘度エマルジョン化油の管内流動制御, 土木学会論文集B3 (海洋開発), vol.27, No.2, P I_1027-I_1032 (2011).
- 20) 北原厚生・柿崎 慶治 : 浚渫兼油回収船「白山」回収油 船外排送高度化技術の開発, http://www.hrr.mlit.go.jp/library/kenkyukai/H21/0729/29_ino2/06_niigatagicyou.pdf
- 21) Fujita I. et al., A New Weir Skimmer Test for an Oil Recovery Vessel Dr.Kaiyo, conference publication of OCEANS 2008 (CD-ROM), April 8-11, 1-5 (2008)

港湾空港技術研究所報告 第52巻第4号

2013.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社ワコー

Copyright © (2013) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Role of Geoenvironment in the Benthic Ecology and Morphodynamics of Intertidal Flats and Beaches -Ecohabitat Chart and Optimal Design of Dynamically Stable Sandbars-Shinji SASSA, Yoichi WATABE, Soonbo YANG, Tomohiro KUWAE	3
2. The effect of compaction grouting as a countermeasure against liquefactionDaiki TAKANO, Satoshi NISHIMURA, Yoshiyuki MORIKAWA, Hidenori TAKAHASHI	45
3. Rheological Behavior of W/O Emulsion of Water-Heavy Oil System and Friction Loss Reduction Methods for its Flow in a Pipe Isamu FUJITA, Yoshitaka MATSUZAKI	75