

高粘度液体の管内空気輸送における 圧力損失特性

PRESSURE DROP OF TWO PHASE FLOW OF HIGHLY VISCOUS LIQUID AND AIR INSIDE PIPE

藤田勇¹・吉江宗生²・佐藤栄治³・水谷雅裕⁴・佐野正佳⁵

Isamu FUJITA, Muneeo YOSHIE, Eiji SATO, Masahiro MIZUTANI and Masayoshi SANO

¹会員 工博 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

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

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

⁴会員 工学 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 (〒760-0017高松市番町1-6-1)

⁵会員 工準学 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 (〒760-0017高松市番町1-6-1)

Characteristics of two phase flow composed of air and viscous liquid in pipes were investigated. Pressure drop in horizontal pipes was measured for some working fluid pairs such as viscous oil/air or viscous polymer/air. Test results showed good agreement with the Lockhart-Martinelli equation in a range of viscosity up to several thousand cP. It was found that water added to the two phase flow drastically decreases the pressure loss. In addition to the pressure drop measurements, suction experiments using several types of suction inlets were carried out and a basic design concept for the shape of the inlet was obtained.

Key Words : Two phase flow, Oil recovery, Air suction, Lockhart-Martinelli, Pressure drop, Viscosity

1. 導言

平成9年1月に発生したロシア船籍タンカー「ナホトカ号」の重油流出事故では大規模な被害がもたらされた。また、平成14年度においても3月には島根県壱岐沖において沈没したベリーズ船籍の貨物船「A I G E」からの油流出や7月には鹿児島県の志布志湾においてパナマ船籍の貨物船「コーペンチャー」が座礁、燃料用のC重油625klが流出した。更に11月にはスペイン沖海域におけるバハマ船籍タンカー「プレステージ」の沈没により1万t以上の重油が流出し環境に甚大な被害を与えるなど、我々の生活は常に流出油による海洋、海岸の汚染の危険と隣り合わせである¹⁾。こうした流出油による汚染からわが国の豊かな海洋ならびに沿岸の環境を保護するためには、流出油除去に関する効果的且つ効率的な技術の開発が重要である。

流出油の回収においては、流出油の粘度が問題になる。一般的に海洋に流出した重油は波浪などの影響により海水と混合されることでエマルジョン化し、24時間程度経過した時点で数十万cP程度(およそ水の数十万倍の粘度)の超高粘度の流体となるこ

とが知られており、ネット状のもので絡めとる方法などが用いられている²⁾。

一方、流体として吸引除去する方法としては、ナホトカ号事故の際には、強力吸引車による流出油の吸引除去が成果をあげたという報告がある³⁾。強力吸引車は吸引管内部に秒速数十メートルの空気流を発生させ、液体やスラリー、或いは粉体などを吸引搬送するものであるが、エマルジョン化油といった高粘度の液体を吸引する場合の管内流動特性などは不明な点が多い。こうした装置あるいは原理をより積極的かつシステムティックに油回収に利用する為には、流体力学的な理解が不可欠である。本研究では、重油或いはエマルジョン化油を主な対象とし、高粘度液体と空気の管内気液二相流の流動特性の解明を試みる。初段階として気液比の大きい主に環状流領域における油-水系水平管内気液二相流圧力損失についての実験を行った。実験では液相成分として水を加えた場合の圧力損失の低減効果についても計測した。加えて高粘度油の吸引に適した吸引口部の形状を探るために数種類の吸引口に関して油吸引実験を行った。

2. 実験

(1) 水平管内輸送実験

水平管内圧力損失測定の実験装置の概略を図-1に示す。空気流は①で示すルーツブロアにより負圧吸引により発生した。空気流量は③で示す差圧式流量計によって計測した。④は流量計及びルーツブロアに油が混入するのを防ぐための気液分離器であり、⑤は油回収用のタンクである。供試油は⑧で示す油タンクより⑨で示すモノポンプによりテストセクションに供給した。モノポンプは⑩のインバータにより周波数制御を行い、ポンプ回転数は光学式タコメータ⑪で計測し、流量を算出した。供試油と空気は⑦に示す部分で混合され、⑥で示すテストセクション内に導いた。テストセクションは透明なアクリル水平管とし、内径は40mmとした。テストセクション内の圧力損失は⑭で示す差圧変換器により計測した。管内部の流動様式を観察する為に、⑬に示す高速度ビデオカメラ（(株)ナック製MEMRECAM）によるビデオ撮影を行った。合わせて γ 線式の密度計(⑮)によりテストセクション内部のホールドアップ測定を試みた。供試油に加えて更に水を添加した際の特性を測る為に、⑦の空気取り入れ口に水道水のラインを施設した。水の流量はテーバ管式流量計により計測した。供試流体としてはC重油及びエマルジョン化したC重油を用いた。更に高速度ビデオカメラによる流動様式の観察用としては、外部から管内部が透過できるように、無色透明な高分子液体であるポリブテンを用いた。

空気流量範囲はおおよそ $1\text{m}^3/\text{min} \sim 3.5\text{m}^3/\text{min}$ とした。図-2はAlvesによって与えられた水平管内気液

の流動様式を観察する為に、⑬に示す高速度ビデオカメラによるビデオ撮影を行った。合わせて γ 線式の密度計(⑮)によりテストセクション内部のホールドアップ測定を試みた。供試油に加えて更に水を添加した際の特性を測る為に、⑦の空気取り入れ口に水道水のラインを施設した。水の流量はテーバ管式流量計により計測した。供試流体としてはC重油及びエマルジョン化したC重油を用いた。更に高速度ビデオカメラによる流動様式の観察用としては、外部から管内部が透過できるように、無色透明な高分子液体であるポリブテンを用いた。

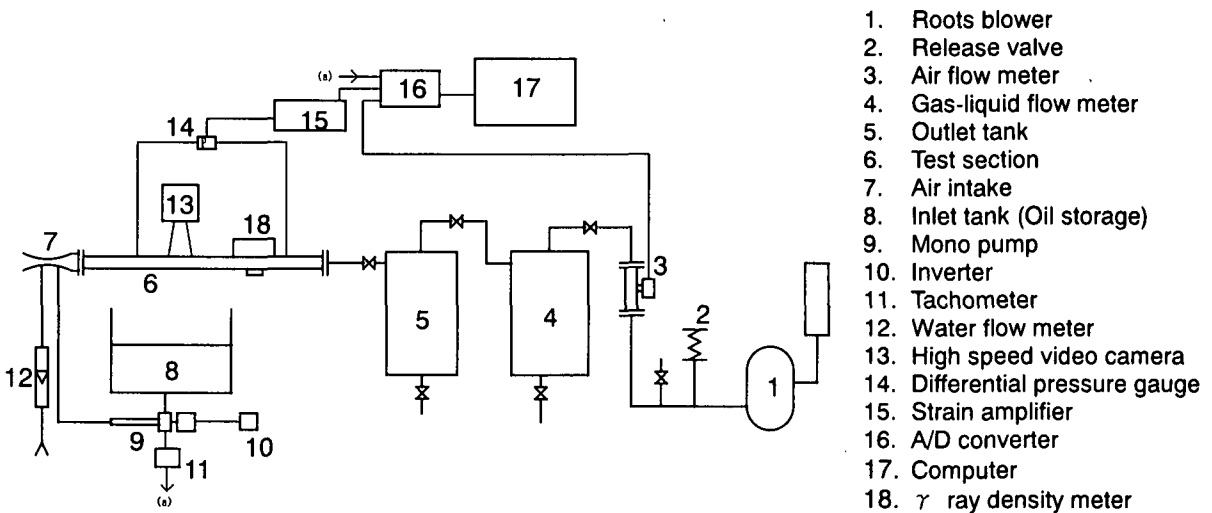


図-1. 水平管内圧力損失測定実験装置

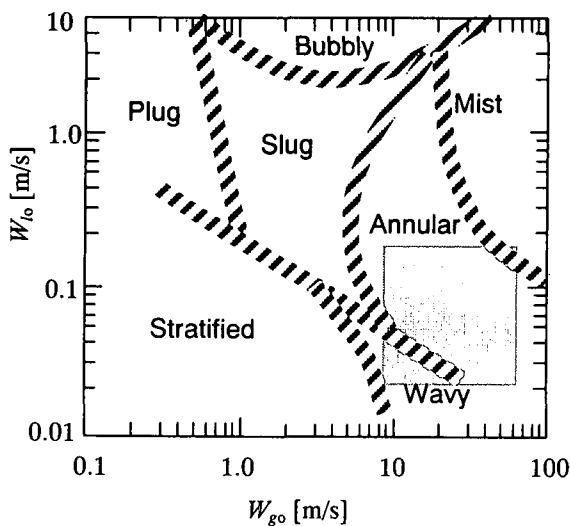


図-2. 流動様式線図

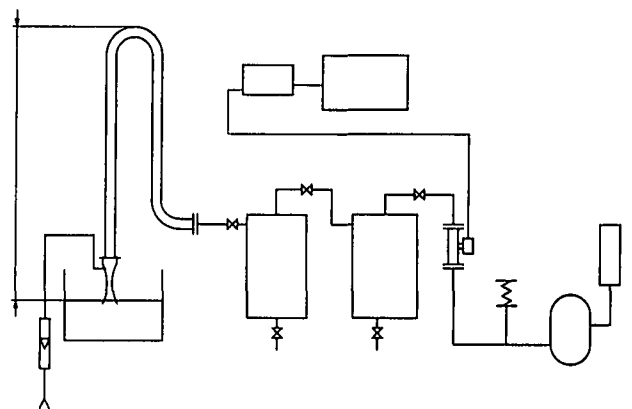


図-3. 油吸引実験装置

二相流の流動様式線図⁴⁾であり、横軸は見かけの気体流速、縦軸は見かけの液体流速である。各流動様式の境界は Baker によるものである。今回の実験条件をこの線図上に表すと、おおよそ網掛けの領域となる。条件設定は、空気流速に関しては強力吸引車などの管内空気流速と空気による粉粒体輸送を参考にした。また液相流速に関しては、粉粒体の真空式輸送を参考にし、粉粒体と空気の質量混合比がおおよそ10以下に設定している例が多いこと⁵⁾から決定した。

計測は管内の流動が安定したと思われる定常状態において行い、10ms 間隔で5秒間サンプリングし、平均処理を行った上で、その後のデータ整理に用いた。

(2) 吸引実験

海面上に漂流している流出油を吸引除去するのに適した吸引口部の形状を明らかにする目的で図-3に示す吸引実験を行った。重油等の供試液体を溜めたタンクより垂直管を介して単位時間に吸引できる液体の量を測定した。垂直管部の立ち上がりは油回収船の乾舷を考慮して2.3mとした。管径は40Aとした。吸引口形状は図-4に示す4種類について試験を行った。(a)は単純に垂直管を液面近くに近づけるタイプのものであり、(b)はスリット部より液を吸引するタイプである。(c)は吸引口を水平にし、水平部におけるスラッキングを利用して液の吸引を図るものである。(d)は吸引口部の流路を細く絞ることで負圧を発生させることで、液の吸引を行うタイプである。

3. 結果と考察

(1) 水平管内輸送実験

管内流動特性を解析する上では、内部を流れる液体のレオロジー特性を把握しておく必要がある。今回は供試験液体として、C-重油、水/C-重油のエマルジョン、及び透明疑似油としてポリブテンを用いている。管内輸送実験に先立ってそれらのレオロジー特性を計測した。結果を図-5に示す。図は剪断応力と速度の関係を両対数グラフにプロットしたものであり、グラフの傾きから各液体のレオロジー的な特性を判断できる。図中には水溶液系の増粘剤として用いられるカルボマー水溶液の特性も参考に表示してある。C重油およびポリブテンでは、傾きがおおよそ1であり、ニュートン流体であることが解る。エマルジョン化したC重油に関しては若干傾きが1より大きく、塑性的な性質を持つようであるが、おおむねニュートン流体として扱える範囲にあるように思われる。一方当初管内流動の可視化に使用することを検討していたカルボマー水溶液に関しては図から解るように、傾きが1より遙かに大きく、塑性流体的な挙動を示すため使用を避け、管内流動

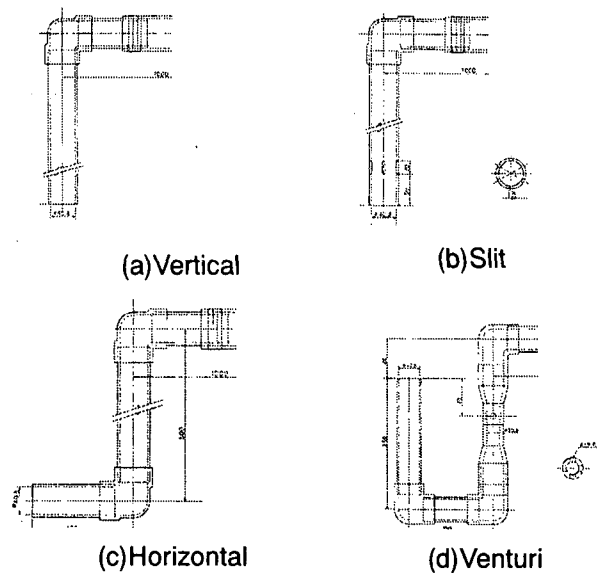


図-4. 吸引口形状

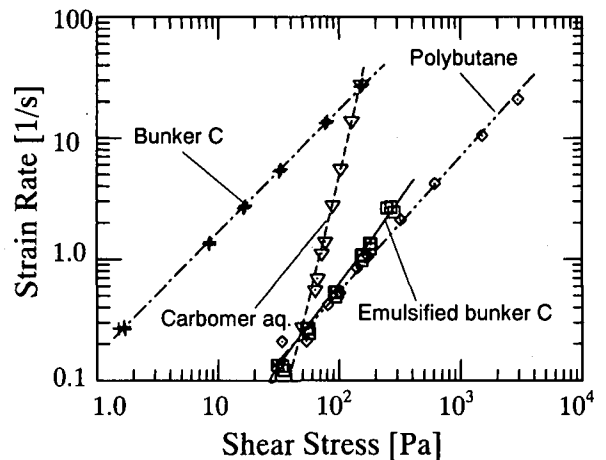


図-5. 供試液体のレオロジー特性

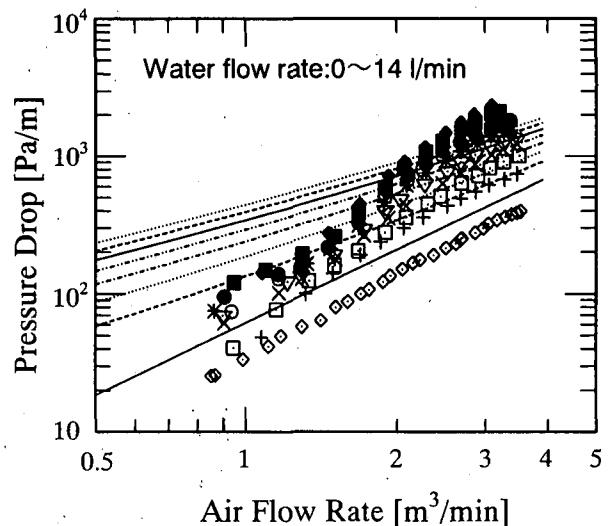


図-6. 水-空気水平管内気液二相流の圧力損失

の可視化にはポリブテンを用いることとした。
 図-6 に供試液体として水を用いた場合の水平管内
 圧力損失特性を示す。空気流量は $0.9\sim 4\text{m}^3/\text{min}$ 、水
 流量 $0\sim 14\text{ l/min}$ の範囲で実験を行った結果である。
 図中の線は Lockhart-Martinelli による気液二相流の
 管摩擦損失の相関式（以下 LM 式）であり⁶⁾、以下の
 ように定義している。即ち管内に気体単相が流れた
 場合の圧力損失を $(\Delta P/\Delta z)_G$ 、液単相が流れた場合の
 圧力損失を $(\Delta P/\Delta z)_L$ とした場合、混相流の圧力損失
 を単相流の圧力損失との比で

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_F = \left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_L \Phi_L^2 = \left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_G \Phi_G^2 \quad (1)$$

と表し、パラメータ Φ_L 、 Φ_G をただひとつの変数

$$X = \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_L / \left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_G} \quad (2)$$

の関数として表現する。関数の形はいくつか知られて
 おり、一般的に

$$\Phi_L^2 = \frac{\Delta P_F}{\Delta P_L} = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (3)$$

の形が用いられることが多い。図から解るように計
 測値と理論値では多少の違いが生じている。原因の
 一つとしては、空気吸引口近傍に差圧計への圧力導
 管が取り付けられていたため、この領域では流れが
 十分に発達しておらず、純粋な発達流の壁面摩擦力
 のみではなく、加速損失等を含んだ圧力損失が計測
 されたためだと考えられる。しかし計測と理論式は
 オーダー的にはおおよそ合致した値を示しているこ
 とが解る。

図-7 は供試験液体として粘度がおよそ 3000cP の C
 重油を用いた場合の水平管内気液二相流の圧力損失
 測定結果である。水-空気の場合と比較して液体の粘
 度が高いため一桁大きい圧力損失を示している。LM
 式との比較では水の場合と同様の偏倚を生じている
 がオーダーとしては良く合っているように思われる。
 図-8 はポリブテン（粘度 2800cP）の場合であり、比
 較的 LM 式と良く一致している。LM 式は本来左程
 高い粘度の液体を想定はしていないが、今回の実験
 結果は、粘度数千程度の液体に大して LM 式が十分
 使用できることを示しているように思われる。

図-9 はポリブテンの流量を 1.07 l/min に固定し、水
 の添加量を変えた場合の圧力損失の変化を示してい
 る。横軸はポリブテンと水の体積比である。通常粘
 度が等しい液体を混合した場合には、圧力損失は両
 者の総和と流量の増加に伴って増加することが予想さ
 れるが、今回のように高粘度流体と低粘度流体を混
 合する場合には、図の様に低粘度流体の割合が増加
 するに従って、圧力損失が小さくなること解る。

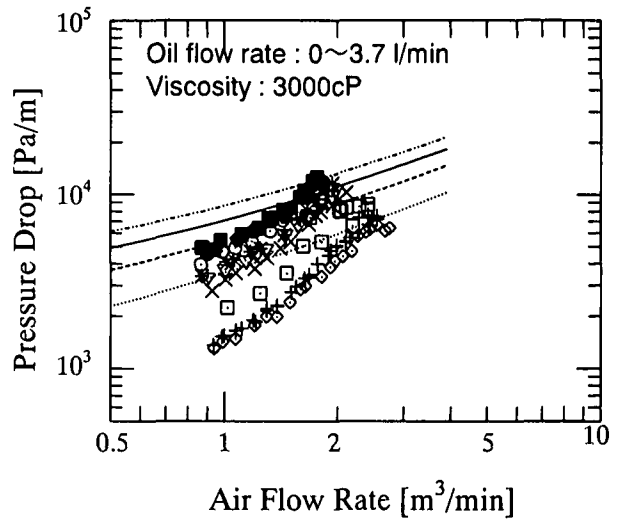


図-7. C 重油-空気水平管内気液二相流の圧力損失

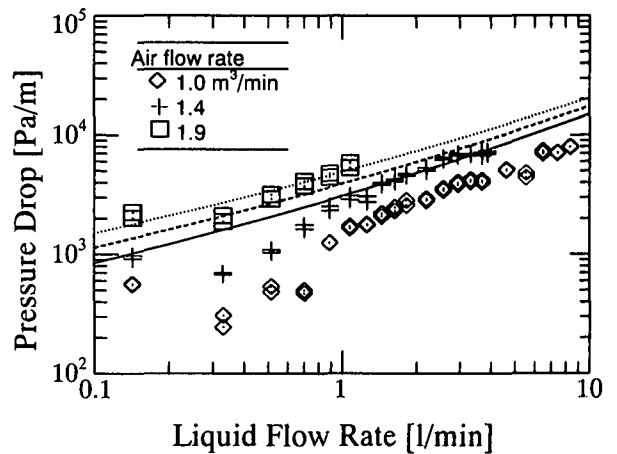


図-8. ポリブテン-空気水平管内
 気液二相流の圧力損失

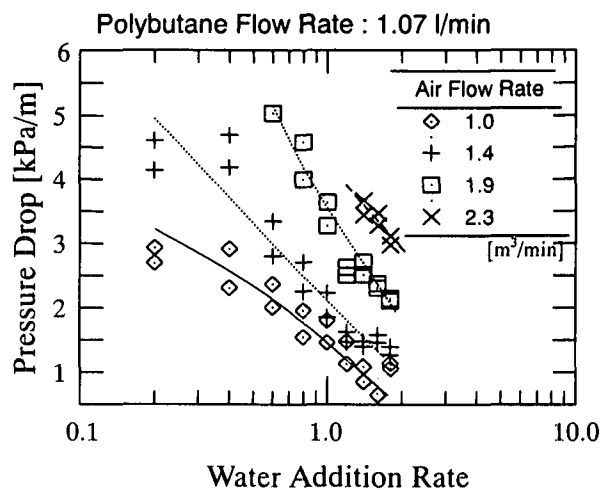


図-9. 水添加による圧力損失の低減効果

理由としては、管内壁と高粘度流体の間に低粘度流体が入ることで、大きな剪断変形を高粘度流体ではなく低粘度流体が受け持つことになり、そのため壁面剪断力が小さくなると想像される。図-10 は γ 線式の密度計によるホールドアップの測定値である。ただし今回用いた管内密度計は本来液单相用のものであり気液二相流の計測においては必ずしも正しい値を示すとは言えない。従って図はホールドアップに関して定性的な傾向を表す目安である。図から解るように水の量の増加に伴って、ホールドアップは減少している。即ち液相の気相に対する相対速度は増加しており、水の添加に伴って管壁と混合液体相との間の滑りが良くなっていることが解る。高速度ビデオカメラによる管内流動の観察においても、管内を移動する液体のスラグの速度は水を添加した場合の方がしない場合に比べて速かった。

更に高粘度液体の場合の水添加による効果を図-11 に示す。図は空気流量を $1.7\text{m}^3/\text{min}$ で一定にし、粘度 42240cP のポリブテン流量を変化させた場合の実験結果である。図中口で示した水を添加しない場合の圧力損失は非常に大きい一方、一定量の水 ($12\text{l}/\text{min}$) を添加した場合には、LM 式で粘度 500cP とした線上に測定値が分布する結果となった。この例に関していえば、水を添加することにより、4万 cP 程度の高粘度液体の粘度を実質的に 500cP まで低減できたことになる。

このように今回の実験を通して、単体では空気搬送困難な高粘度の流体であっても、水などの低粘度の流体と混ぜることにより実質的な粘度を低減することができ、管内空気搬送が可能になることが解った。次段階としては、異なる粘度の液体を混ぜた場合の混相流の圧力損失に関する予測式が求められるが、それには、二液の混合比や気液比、更には管径を変えた実験を行う必要があり、今後の課題であると考えている。

(2) 吸引実験

吸引実験は図-3 に示す装置を用いて図-4 に示す 4 種類の吸引口に関して実験を行った。実験結果を表

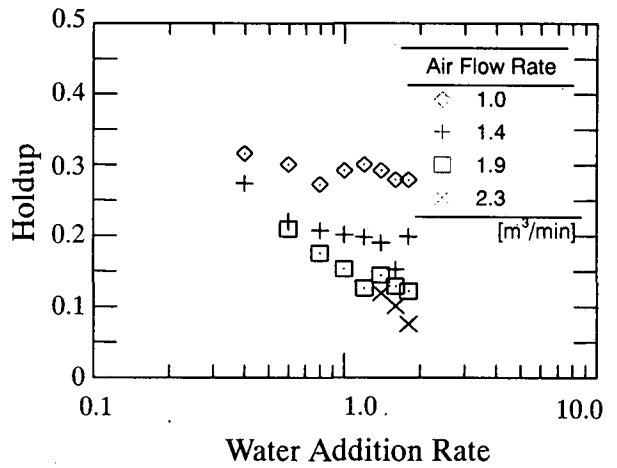


図-10. 水添加によるホールドアップ変化

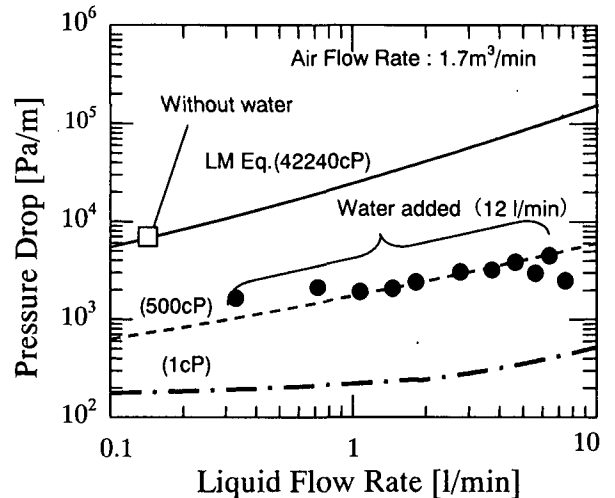


図-11. 高粘度ポリブテンの圧力損失特性

-1 に示す。吸引条件の項目で水 (5m 水平管付) とあるのは図-3 で垂直管の代わりに水平管を取り付けた場合である。その他垂直管を付けた場合と付けない場合についても吸引実験を行っている。水/油エマルジョンの粘度は約 16 万 cP のものを用いており、吸引時には吸い口近傍に適量の水散布を行っている。この実験は、吸い口と液面との位置関係を実験者が適宜調整しながら行ったもので、必ずしも定量的な結果であるとは言えない面もあるが、吸引口の

表-1. 吸引実験結果

Type of Suction Inlet	Fluid/Condition		
	Water (with 5m horizontal pipe)	Emulsified bunker C (without vertical pipe)	Emulsified bunker C (with 2.3m vertical pipe)
(a) Vertical	4.2	2.1	1.97
(b) Slit	3.7	0.45	0.25
(c) Horizontal	3.0	1.2	1.3
(d) Venturi	1.4	0.91	0.4

m^3/hr

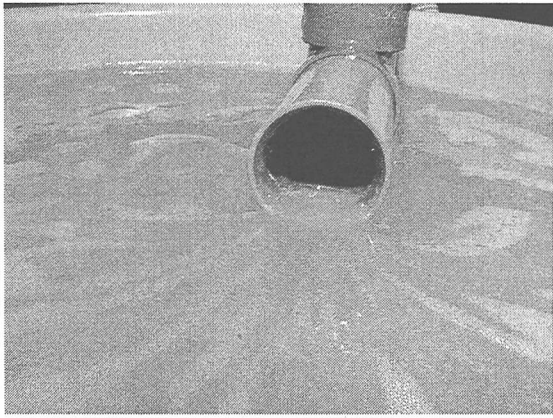


図-12. 水平管式吸引口の高粘度液吸引状況

基本的な特性の判断材料にはなり得るものである。結果は、流体の種類を問わずもっともシンプルな形状の垂直管端面の開口部より吸引するタイプが一番良い性能を示した。しかしながら垂直管の場合、作業者が吸引口を液面に付いたり離したりを繰り返し、間歇的に液を吸う動作を行わないと、高粘度油の吸引は難しといった作業上の問題点があることがわかった。次に管の壁面にスリット状に設けた穴より吸引するタイプ(b)では、水のように低粘度の液体では、良好な吸引特性を示す一方、高粘度の流体の吸引に関しては性能の低下が著しいことがわかった。狭いスリットからの吸引は水のような低粘度流体では有効であってもエマルジョン化油のような高粘度流体の場合には壁面との摩擦が大きく、有効性に欠けると思われる。次に(c)の水平管タイプについては図-12に示すように水平管部の直径の下半分程度を液に没する形で吸引を行った。水の吸引に関しては3番目の性能であったが、高粘度の液体では、垂直管タイプに次ぐ性能を示した。この方式では、他のタイプのように開口部に発生する負圧によって液体を吸い寄せて吸引するというよりも、高速空気流によるエントレインメントにより液体を吸引しており、垂直タイプのように能動的に吸引口を上下させる必要がなく安定した吸引動作が得られた。作業者が吸引口を直接扱うことができない大型の装置や海面上の危険を伴う環境ではこのような形状を基本に設計するのが良いように思われる。最後に(d)のベンチュリタイプであるが、水の吸引では絞り部に設けた吸引孔

のサイズが小さく余り良い性能を示さなかった。反面、高粘度流体の吸引ではスリットタイプよりは優れた性能を示した。これは絞りの効果で吸引孔部分に発生する負圧がスリットタイプより大きいことによる効果であると想像されるが、やはり吸引孔の開口面積が小さいため垂直管や水平管式に比べると、吸引性能は劣るものであった。以上の結果を簡単にまとめると、液を吸引する開口部は大きい方が良く、また負圧による吸引よりも、気流によるエントレインメントを活用するタイプの方が安定した吸引ができることがわかった。

4. 結言

高粘度液体の管中空気搬送実験及び吸引実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 粘度数千 cP 程度の液体と空気の管内気液二相流の圧力損失に関しては、Lockhart-Martinelliの方法で予測可能である。
- (2) 高粘度の油に水を添加することで、管内気液二相流の圧力損失を大幅に低減することができる。
- (3) いくつかの基本的な形状の吸引口を用いて吸引実験を行い、高粘度液を吸引するのに適した吸引口形状に関する基礎的設計指針が得られた。

参考文献

- 1) Merv Fingas : The Basics of OIL SPILL CLEANUP Second Edition, Lewis Publishers, pp.10-14, 2001.
- 2) 吉江宗生他:エマルジョン化高粘度油に対応したネット式スキマーの開発, Techno Ocean 2000, Proceedings vol. II, pp.207-210, 2000.
- 3) 海上災害防止センター編:流出油事故対応防除マニュアル, pp.32-35, 2000
- 4) 例えば 赤川浩爾:気液二相流, コロナ社, pp.13, 1974.
- 5) 例えば上滝具貞, 西岡富士夫: 粉粒体の空気輸送, 日刊工業新聞, pp.4-5, 1961
- 6) 例えば機械学会編:管路ダクトの流体抵抗, pp.181-184, 1979.