

配管内の摩擦損失低減技術の開発

界面活性剤による空調配管系の摩擦損失低減

小野島 一 奥田 章子
小宮 英孝 川地 武

Development of Drag Reduction Technology for Piping Networks

Pressure Loss Reduction in HVAC piping by Surfactants

Hajime Onojima Akiko Okuda
Hidetaka Komiya Takeshi Kawachi

Abstract

Some surfactants can reduce pressure losses in piping networks by viscoelastic effects. These solutions can reduce pumping energy by acting as a drag reducer. This report considers the energy conservation effect of drag reduction technology using surfactants especially in district cooling systems. The viscoelastic characteristics of surfactant solutions were analyzed and practical scale experiments were performed on a circulating test rig. Local pressure losses in the piping network, including bends, valves and branches, were also evaluated. For drainage of the surfactant solutions, case evaluations showed that absorption by active carbon was most practical. Additionally, an economic analysis was performed on the model district heating and cooling system. The results showed that drag reduction surfactants are very effective for energy conservation.

概要

配管内を流れる水にある種の界面活性剤を混入すると、その動粘性特性により配管系の摩擦損失が大幅に減少することが知られている。このような界面活性剤を摩擦低減材として利用すれば熱搬送動力の削減により省エネルギーをはかることができる。本研究では使用される摩擦低減材の動粘性特性に関する検討を行った上、特に地域冷房用の冷水配管系に適用することを目的として、実スケールに近い実験を行って摩擦損失低減効果を定量的に把握し、この省エネルギー性について考察した。また、配管系の局部損失についても実験を行い、それぞれについて摩擦低減材を利用した場合の局部損失の変化について考察した。界面活性剤水溶液を廃棄する場合の処理手法について検討し、活性炭による吸着法が優れていることがわかった。加えて、摩擦低減材の経済性の検討を行い、その優位性が確認できた。

1. はじめに

配管内を流れる水にある種の高分子物質や界面活性剤を投入すると、摩擦損失が低減する現象（トムズ効果）が発生することが知られている。高分子物質の場合は、ポンプ等で分子が破壊され、摩擦損失低減効果が持続しないことがあるが、界面活性剤ではそのようなことはなく、効果が安定している。界面活性剤水溶液は30から80%の高い摩擦損失低減効果を示すので、空調配管の熱搬送媒体として利用すればポンプ動力の削減により省エネルギーを計ることができる¹⁾。

近年の大規模再開発プロジェクトでは、しばしば地域冷暖房システムが導入されている。地域冷暖房システムでは一般空調に比べて配管が長く、熱搬送動力に大きなエネルギーを要する場合が多い。地域冷暖房ではその運転コストが熱コストに直接関係し、システムを運営する

熱供給業者にとっては、熱搬送コストをいかに押さえ、経済的な運転を行うのが重要な課題である。

また一般に冷房熱源である冷水に関しては、蒸気が利用できる温熱に比べ配管が大きくなる傾向にあり、さらに最近のオフィスビルではOA化に伴う内部発熱負荷の増大により冷房需要が高まりつつある。従って、熱搬送コストの低減には冷水の搬送動力削減が重要である。

既設のシステムに対しても、界面活性剤を用いた摩擦低減材は大きな設備投資を行うことなく、熱搬送動力を低減できるうえ、配管の改修を行うことなく熱搬送流量を増強することも可能となる。このような点から見て、配管の摩擦損失を低減することによる省エネルギー効果は地域冷暖房のような大規模システムで効果が高いと考えられる。

しかしながら、今までの研究では配管径10～25mmの小口径配管で行われた実験室レベルの結果であり、実際に

利用される数十mm～数百mmの配管に関するデータは少ない。また、界面活性剤による摩擦低減材は直管部の摩擦損失低減には大きく寄与するが、局部損失には殆ど効果がないとされている²⁾。しかし、その実験データは未整備で実際の地域冷暖房システムの設計に用いるには不足であり、局部損失要素について実際に損失特性の実験を行い、基礎的なデータを収集することが必要である。

本報では粘弾性を示す界面活性剤水溶液を地域冷暖房システムに代表される大型の空調システムの冷熱媒へ適用し、配管内摩擦損失を低減させることで熱搬送動力コストを削減することを目的とした、摩擦損失低減材を用いた省エネルギー型空調システムに関する開発検討について報告する。

まず、界面活性剤の特性について摩擦損失低減が発生する原理ならびに動的特性に注目した実験結果を述べる。

今回想定される実配管により近いサイズの循環系配管実験設備を構築し、実際に摩擦損失低減効果の測定を行うこととした。特に地域冷暖房システムにおいて数多く用いられる局部損失要素である、曲がり(エルボ)、分岐(分流及び直流)、仕切弁(ゲート弁)、逆止弁(チャッキ弁)について検討するものとした。

また、この技術の実用化に当たり問題となる摩擦低減材廃液の排出処理問題に関する考察を行ったうえ、フィジビリティスタディとして地域冷暖房システムを想定した経済的評価を行うこととした。

2. 界面活性剤による摩擦損失低減の原理

界面活性剤による摩擦損失低減の原理は、明確に解明されていないのが現状であるが、一般的には、次のように推定されている。原理のモデルをFig. 1に示す。ある流速域で流動する摩擦低減材溶液中において、界面活性剤分子は、親水基を外側に疎水基を内側に向けて球状に集合し、より安定な分子構造形態である球状ミセルを形成する。更に、球状ミセルが立体的に配列した棒状ミセル、棒状ミセル同士が絡み合った紐状ミセル等のミセル構造体が発達していくと、ある粘弾性特性を発現し、流体の乱流渦を抑制する。今までの実験例を見ると、高流速域

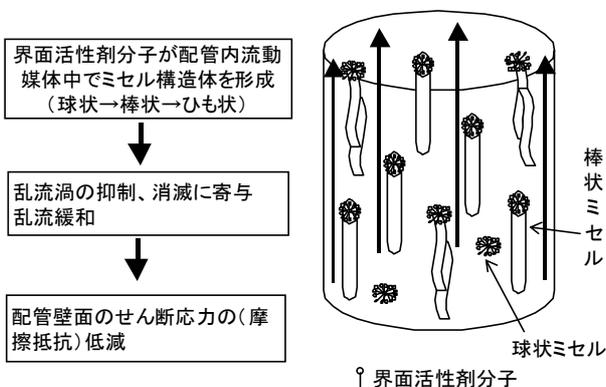


Fig. 1 界面活性剤による摩擦損失低減モデル
Drag Reduction Model by Surfactant Solutions

で摩擦低減効果が失われる。これは、高流速域で棒状ミセル同士の絡み合いが起きにくいことや状況によって棒状ミセルが崩壊することに起因すると考えられている。

3. 界面活性剤水溶液の動的基礎物性

3.1 試験溶液

基礎物性試験に用いた物質は、界面活性剤として、今までに薄井ら³⁾の研究より低温時の特性が良いと知られている陽イオン性界面活性剤のライオン(株)社製エソカードO/12(塩化オレイルビスヒドロキシメチルエチルアンモニウム(C₁₈H₃₅N(CH₃)(C₂H₄OH)₂Cl))、対イオン剤としてサリチル酸ナトリウム、防錆材として実際の地域冷暖房において投入実績のあるクリサワーI-108である。基礎物性試験以降の実験においても界面活性剤及び対イオン剤は同じ物質を用いた。溶液濃度は、界面活性剤が500, 750, 1000ppm, 対イオン剤が界面活性剤と等mol, 1.5倍mol, 防錆材が650ppm添加有り、無しの各組み合わせとし、試験溶液を調整した。

3.2 試験項目と試験結果

(1) 表面張力, CMC (臨界ミセル濃度)

表面張力測定によって界面活性剤の表面活性度が評価でき、溶液濃度と表面張力との関係からミセルを生成し始める濃度CMC (Critical Micelle Concentration) を求めることができる。ここでは、界面活性剤の特性を把握すると共に、対イオン剤や防錆材が共存した際のミセルの生成しやすさ、ミセル安定性、などを評価した。測定

Table 1 各摩擦低減材の臨界ミセル濃度
CMC of Drag Reducers

溶液の種類 (添加物質と濃度)	CMC (mmol/dm ³)	表面張力 (mN/m)
+ 対イ等mol	0.078	33.01
+ 対イ1.5倍mol	0.05	35.11
+ 対イ等mol + 防錆材	0.143	31.3
+ 対イ1.5倍mol + 防錆材	0.07	33.85

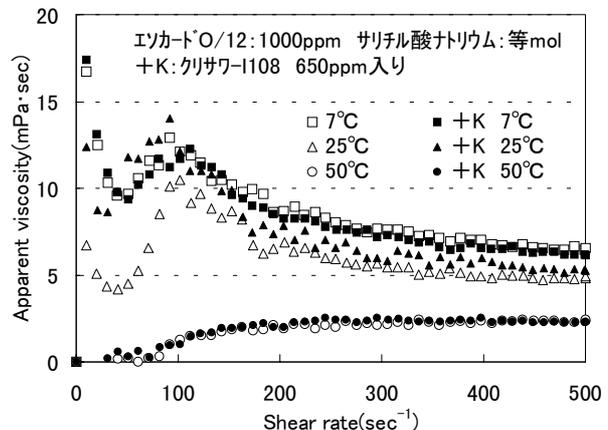


Fig. 2 動粘度測定結果例

Example of Viscoelastic Effect Experiments

はKRUSS製全自動表面張力計を使用して行った。

Table 1に對イオン濃度及び防錆材濃度に対するCMCの測定結果を示す。對イオン濃度の高い方がCMCが低いことがわかる。これは、對イオン濃度が増加することによって、ミセルが静電的に安定化され、ミセルの生成が促進されるためと考えられる。

界面活性剤に防錆材を添加した系は、防錆材無添加と比較してCMCが上昇している。これは、防錆材の亜硝酸イオンに起因するマイナス電荷の増加あるいは防錆材中の有機成分の存在がミセルの形成及びミセルの安定化を多少妨害する方向に作用した可能性が考えられる。しかし、実機の地冷システムやビルなどにおける界面活性剤の投入濃度は、数百ppm～千ppmオ・ダ - (1.2～2.5mmol/dm³程度)が現実的で、実際には、CMCの10倍以上高い濃度域(上記)で摩擦低減材溶液が使用されるため、防錆材が共存しても充分ミセルは形成されると判断される。

(2) 粘弾性、動粘度

摩擦低減材の粘弾性特性が摩擦低減を引き起こすひとつの要因とも言われており、ここでは、せん断力を付加した際の粘度特性や濃度、温度の違いによる粘度挙動を調査した。また、防錆材の添加の影響も確認した。

測定は、HAAKE製 Rheo Stress RS-75を使用し、0～300秒でずり速度が500sec⁻¹になるよう回転数を上昇させた。

界面活性剤溶液及び防錆材添加溶液について、粘弾性を測定したところ、10⁻² Paであった。一般的に高粘弾性溶液と呼ばれる溶液(10⁻¹～10² Paオ・ダ -)と比較すると、摩擦低減材溶液の粘弾性は、低いレベルであった。

界面活性剤を1000ppm、對イオン剤を等mol混合した溶液の動粘度測定結果をFig. 2に示す。図中の低ずり速度域(～200 sec⁻¹程度)では、動粘性に温度の影響が顕著に現れており、低温ほど粘度が高い。これは、低温ほど分子運動が非活性化されることがひとつの原因と考えられる。また、7、25の溶液では、ずり速度が上昇始めると急激にみかけの粘度が上昇し、次いで低下、上昇し、再度最大値を取って徐々に低下しているが、50の溶液には最大値が現れない。7、25の溶液に見られるこのような動粘度の挙動は、せん断力によってミセルの絡み合いが誘起されたために生じたと考えられる。つまり、摩擦低減材の動粘性特性は温度に依存する。したがって、高温において摩擦低減材による摩擦損失低減効果が低下あるいは消失すると推定される。

高ずり速度域では、いずれの溶液もニュートン流動体と同様な挙動をとり、一定となった粘度は、水(1mPa・sec)より高く、界面活性剤濃度の高い方が高い傾向にあった。

次に動粘性特性の発現に対する防錆材の影響を検証した。防錆材を添加すると、防錆材無添加の溶液の平均10%、最大20%程度の粘度の低下が見られた。ただし、それ以上の著しい低下は認められず、防錆材添加による動粘性特性の発現への影響は、比較的小さいと判断される。

ずり速度50, 100, 200, 500 sec⁻¹を300秒ずつ保持させ

て、段階的にずり速度を上昇させる方法で測定しても、ほぼ類似する結果が得られた。

(3) 光散乱法によるミセル状態

大塚電子製DL-700 - Arを使用して各溶液の静的光散乱強度を測定し、45°方向の散乱強度と135°方向の散乱強度との比からミセル状態を評価した。ただし、今回の測定においては、前処理として、溶液にせん断力をかけて分子やミセル等の分子集合体の配向を揃えることは行っていない。また、光の波長は走査していない。

各溶液の45°と135°方向の散乱強度の比を求めた結果、界面活性剤濃度、對イオン濃度が高いほど、棒状ミセルへの移行がより促進される傾向が見られた。ここで、棒状ミセルへの移行が起きやすいほど、棒状ミセル同士の絡み合いが促進されるので、動粘度も上昇すると推定される。一方、動粘性試験の結果、高ずり速度域で一定となる粘度の値は、對イオン濃度と無関係で、主に界面活性剤濃度に因った。つまり、高ずり速度域では棒状ミセルが崩壊した可能性が考えられ、界面活性剤の分子同士の何らかの相互作用(棒状ミセル以外の分子集合体の形成など)が粘度に影響したと推定される。

以上の基礎物性試験の結果、実機の地冷システムやビルに投入する場合の濃度域にある摩擦低減材溶液中でミセル構造体の形成及び発達を確認された。また、動粘性試験で、ずり速度によって異なる粘度挙動が認められ、この現象からミセル構造体の絡み合いや崩壊が起きていることが示唆された。

4. 摩擦損失低減効果の把握

4.1 実験装置

配管材についてはできるだけ実スケールに近く、実験の容易さ、コストなどを勘案し、配管用炭素鋼鋼管(白ガス管JIS G-3452-88)80A(外径89.1mm、管厚4.2mm)を用いることにした。局部損失要素としては実設備に用いられる既製品の80Aとし、曲がり部にはねじ込み式可鍛鉄製管継手(JIS B-2301-95)80Aエルボ、分岐部にね



Photo 1 実験装置全景
Test Rig Apparatus

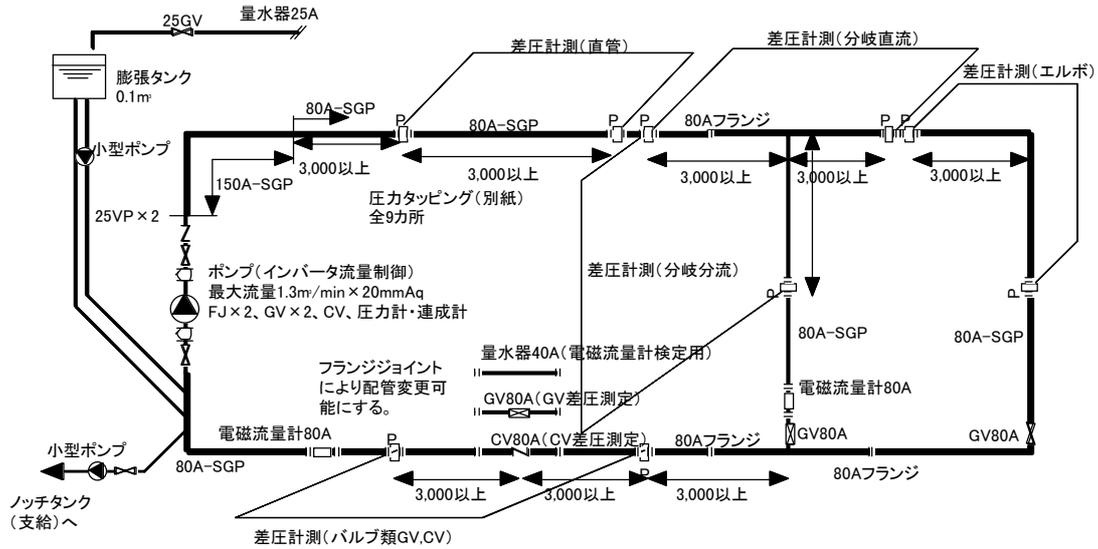


Fig. 3 配管実験装置系統図

Schematic Network of Test Rig

じ込み式可鍛鉄製管継手 (JIS B-2301-95) 80Aチーズを用いた。ゲート弁には青銅弁 (JIS B-2011-94) 80A5K仕切弁, 逆止弁には青銅弁 (JIS B-2011-94) 80A 10K逆止弁を用いた。配管系統は循環型とし, インバータにより回転数制御が可能なラインポンプ (最大流量は1.3m³/min, 最大流速を3.5m/sec) を用いた。Photo 1に実験装置の写真を示す。Fig. 3に配管実験装置の系統図を示す。

実験におけるパラメータとしては, 配管流速, 分岐流量比, 弁開度を想定した。循環水温については界面活性剤水溶液の動粘性に大きく影響を与えるが, このサイズの大きな実験装置では水温を制御することは非常に困難なため, 今回の実験では室温レベルでの成りゆきとし, 実験を出来るだけ同じ条件で行うこととし, 温度をパラメータとした実験は行わないことにした。

4.2 直管における実験結果

まず, 当初性能を確認するために, 界面活性剤を投入しない清水のみの場合について実験を行った。直管においては一般に次に示すダルシー・ワイズバッハの式で清水の圧力損失を求めることができる⁴⁾。

$$R_s = \lambda \frac{l}{d} \frac{U^2}{2} \rho \quad \text{-----(1)}$$

- Rs: 直管の圧力損失 [Pa/m]
- U: 流速 [m/sec]
- λ: 管摩擦係数 [-]
- l: 管の長さ [m]
- ρ: 流体密度 [kg/m³]
- d: 管径 [m]

ここで, 管摩擦係数λを求めるには, 次式に示すムーディの式が良く用いられる。

$$\lambda = 0.0055 \left\{ 1 + \left(20000 \frac{\epsilon}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right\} \quad \text{-----(2)}$$

- ε: 管壁等価粗さ [m]

Re: レイノルズ数 [-]

レイノルズ数は次式で表される。

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad \text{-----(3)}$$

ν: 動粘性係数 [m²/sec]

(1),(2)及び(3)式を利用して直管における摩擦損失について実験を行った。Fig. 4に80A直管における実験結果を示す。これら清水における実験結果を基に界面活性剤エソカードO/12と対イオン剤サルチル酸ナトリウムを投入した場合の圧力損失性状を確認した。界面活性剤1000ppm, 対イオン剤を界面活性剤と等モル量投入した場合の結果を以下に示す。参考のために, 清水時の理論値との比較を示した。清水時に比べ界面活性剤を投入した場合は, レイノルズ数が15000程度まで非常に大きな圧力損失の低減効果が見られる。しかし, それよりレイノルズ数が大きくなると低減効果は小さくなり, 清水時の値に近くなっていくことがわかる。これらの性状は今までに小

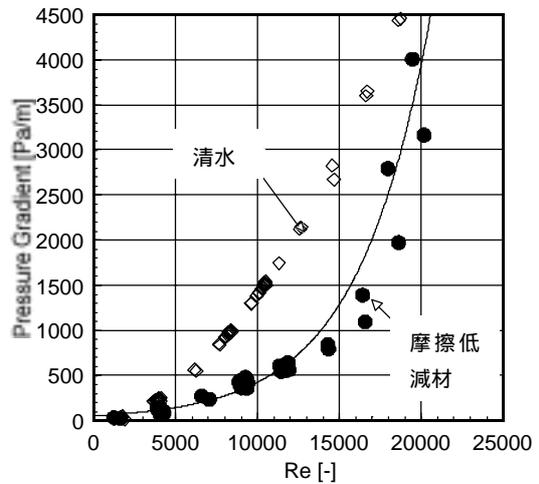


Fig. 4 80A直管における摩擦損失実験結果
Results of Pressure Losses on 80A Straight Pipe

口径の配管系で実験された結果と同じ傾向にある。

図中に示した線は摩擦低減材を用いた場合の単位圧力損失の実験値を最小二乗法を用いて統計的にカーブフィットさせたものであり、図中に近似式も示した。

4.3 局部損失における実験結果

一般に局部損失の流動特性は(4)式に示す局部損失係数 ζ で表現できる⁴⁾。

$$R_p = \zeta \frac{U^2}{2} \rho \quad \text{-----(4)}$$

R_p : 局部抵抗による圧力損失 [Pa]

ζ : 局部損失係数 [-]

局部損失部前後の差圧 R は局部抵抗による圧力損失 R_p と圧力測定部間の距離 L の直管部での圧力損失 R_s との合計と考えることができる。

$$R = R_s + R_p \quad \text{-----(5)}$$

R_s : 圧力測定部間の直管における圧力損失 [Pa]

(5)式により局部抵抗前後の圧力損失を測定し、直管部での圧力損失分をFig. 4の予測式より求めて、局部抵抗による圧力損失とした。

Fig. 5にエルボにおける局部損失係数とレイノルズ数との関係を示す。局部損失係数は清水時と同様にある流速以上ではほぼ一定値になるが、水よりも摩擦低減材を用いた場合の方が大きな値が得られ、エルボでは摩擦低減材が損失を増加させる結果が得られた。Fig. 6にゲート弁、Fig. 7に逆止弁における局部損失係数とレイノルズ数との関係を示す。ゲート弁においては摩擦低減材によって局部損失係数も減少している。逆止弁においては局部損失係数は清水とほぼ同様となり、摩擦低減材の影響が小さいことがわかる。Fig. 8に分岐直流部、Fig. 9に分岐分流部の局部損失係数とレイノルズ数、分岐流量比との関係を示す。どちらもエルボの場合と同様に摩擦低減材によって局部損失係数が増加している。

一般に局部損失に対しては界面活性剤による摩擦低減効果は小さいと言われていたが、ここで得られた結果では一部の管付属物において、ある流速域以上では清水よりも大きくなる結果となり、既往の研究²⁾とは結果が異なっている。

4.4 考察

局部損失においては管付属物で流れが曲げられたり乱されたりした後、新たに発達した乱流になるまでの助走区間において剥離や渦などの損失が存在する。すなわち管付属物における損失はエルボやバルブなどで直接流れを乱されるための損失と、その後発達した乱流になるまでの助走区間における損失との合計であると考えられる。管付属物までの直管ではある圧力勾配に従って圧力は減少していく。管付属物においては、直接流れを阻害されるためにその前後では急速に圧力は減少し、その後、発

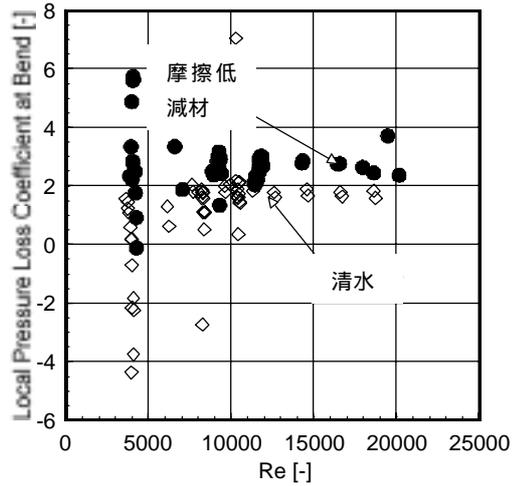


Fig. 5 レイノルズ数とエルボの局部損失との関係
Re and Local Pressure Loss Coefficient at Bend

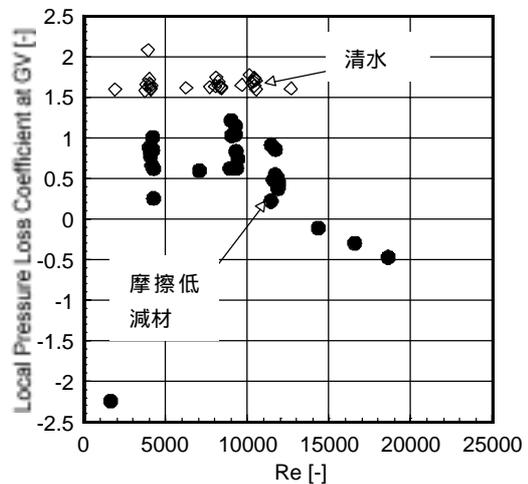


Fig. 6 ゲート弁におけるレイノルズ数と局部損失係数との関係
Re and Local Pressure Loss Coefficient at Gate Valve

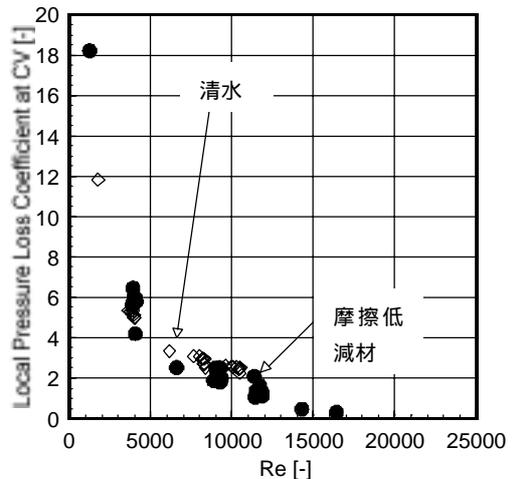


Fig. 7 逆止弁におけるレイノルズ数と局部損失係数との関係
Re and Local Pressure Loss Coefficient at Check Valve

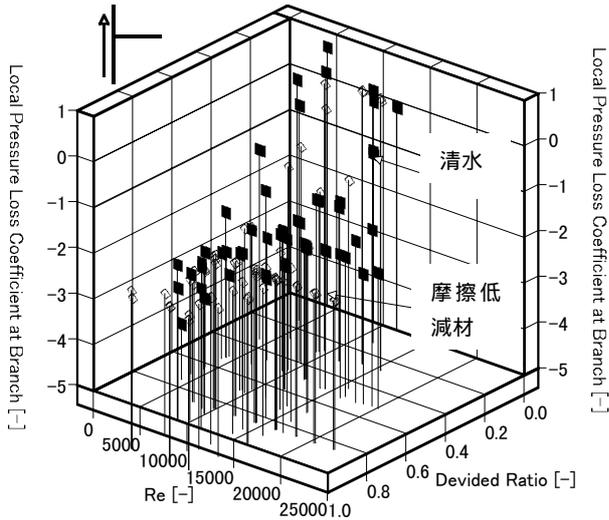


Fig. 8 分岐直流部におけるレイノルズ数,分岐流量比と局部損失係数との関係

Re and Local Pressure Loss Coefficient at Branch

達した乱流になるまでの助走区間では剥離や偏流により直管部より大きな圧力勾配になり、徐々に直管での圧力勾配に収束していく。

今回の実験では管付属部前後の差圧を測定し、その差圧から直管部の圧力損失を除いて局部損失を求めているが、摩擦低減材を利用した場合に、直接流れを曲げられることによる抵抗に加えて、局部損失後の乱流発達部においても水と同じ様に剥離などの抵抗に関して界面活性剤の影響を考慮する必要がある。特に今回得られた実験結果では、局部損失係数がエルボでは清水より増大、ゲート弁では減少し、逆止弁ではほぼ同等と結果に大きな差異がある。これらの局部損失部では乱流発達部も含めてかなり複雑な現象が起きていると考えられる。

実際のプラントにおいても同様な現象が発生するとすればエルボや分岐、バルブなどの管付属物における流速設定を適切に行うか、できるだけ流れを乱さないエルボなどの開発が必要になる。

5. 摩擦低減材の廃液の処理法

ここでは、摩擦低減材廃液の処理法について検討し、実際に実験廃液を処理した結果を述べる。

対象を地域冷暖房のような空調システムと想定した場合、廃液は、冷凍機メンテナンス時等に5~10m³程度発生し、その発生頻度は単発的と考えられる。廃液の性状は、COD(化学的酸素要求量)が約1000ppm, BOD(生物学的酸素要求量)がCODの約1.5倍(約1500ppm), pHは8前後と想定される。

廃液を処理後、下水道に放流する場合、当該廃液が下水道基準を満足していない項目はBOD(600ppm以下)である。BODは、CODの約1.5倍であるので、下水道の放流基準を満足するためには、CODを約400ppm以下に低減すれば良い。ここでは、摩擦低減材やその他の添加剤の濃度や安全率を考慮して、CODの処理目標値を約200ppm以

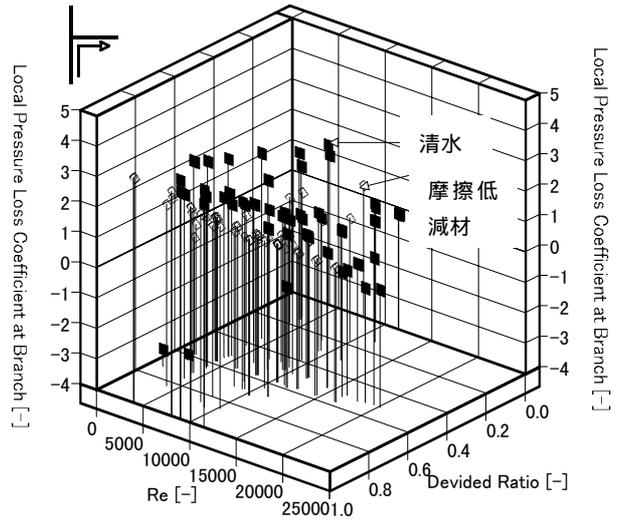


Fig. 9 分岐分流部におけるレイノルズ数,分岐流量比と局部損失係数との関係

Re and Local Pressure Loss Coefficient at Branch

下に設定する。

5.1 一般的なCODの処理方法と当該廃液への適用性

CODを処理する一般的な方法を調査し⁶⁾、当該廃液を現場において短時間で処理する際の適用性について検討した。結果をTable 4に示す。

生物学的分解は、微生物の訓養が必要で、その立ち上げに2~4週間かかるため、適用が難しい。オゾンによる酸化分解は、性能が明確でなく、オゾン発生装置が必要となり、設備的にも適さない。過酸化水素等の薬品による酸化分解は、薬品の取り扱いや管理面、設備的に適さない。凝集沈殿法は、適用できないことはないが、当該廃液が比較的少量であることを考慮すると、特別な設備を必要とせず、容易に安価で処理できる活性炭吸着法の方が適用性が高い。以上より、当該廃液の処理には、廃液量、処理性能や時間、費用、難易度、設備面等において、活性炭吸着法が最適と考えられる。

Table 4 一般的なCOD処理方法と当該廃液への適用性
COD Treatment Methods and Applicability

一般的なCOD処理方法	効果的な処理分子量	適用可能な有機物特性	処理機構	適用性	
凝集沈殿	> 数千	疎水性 凹凸状	凝集 水酸化物生成	×	
活性炭吸着	< 数千	疎水性、 同族高分子	吸着		
生物学的分解	< 数千	親水性、 易生分解性	生物吸着 生分解	×	
化学的分解	オゾン	> 数千	水溶性 不飽和結合	酸化分解 低分子化	×
	次亜塩素酸 過酸化水素	< 数千	水溶性	酸化分解	×

5.2 活性炭吸着法による処理結果

当該実験の摩擦低減材廃液を活性炭吸着法で処理するにあたり、活性炭のCOD吸着能、沈降速度、スラッジポリュ-ム等を明らかにする必要がある。そこで、まず、これらを室内実験で求めた。なお、活性炭は種類によって性能が異なるので、あらかじめ粒状、粉末状の計3種類の活性炭について吸着能を測定し、最も高性能を示した粉末状活性炭を採用して以下の全ての実験を行った。

Fig. 10は、摩擦低減材廃液に各量の活性炭を添加し、吸着反応が平衡に達するよう一晩静置後、廃液のCODを測定した結果を示している。これより、活性炭添加量が増加するに伴い、処理後の廃液のCODが低減しており、活性炭添加量によって活性炭吸着能が異なることがわかった。COD処理目標値を200ppm以下にすると、活性炭添加量は10g/l程度となる。また、活性炭の沈降速度は、0.2m/h程度であり、凝集剤の添加は不要と判断した。さらに、一晩放置後のスラッジポリュ-ムは、廃液量の約10%であった。

以上の室内実験結果をふまえて決定した摩擦低減材廃液の処理フロ-をFig. 11に示す。活性炭の混合・攪拌及び放置時間は、いずれも約半日～1日、活性炭添加量は約10g/l(10kg/m³)とした。このフロ-に沿って、プラント実験装置から排出された廃液約2.1m³を処理した。結果をFig. 10に併記する。これより、CODは約1000ppmから180ppmに低下し、下水道の放流基準を満足した。また、処理水の粘性は低下し、泡立ちも消失していた。以上より、摩擦低減材廃液を活性炭吸着法によって下水道に直接放流可能になるまで処理できることを確認した。

6. 経済的効果と最適設計

今回、摩擦低減材の経済的効果を把握するために、地域冷暖房システムを想定してフィージビリティスタディーを行った。試設計に際して設定したモデル地域をFig. 12に示す。延床面積合計は386,800m²であり、地域冷暖房供給地域規模としては中規模である。プラント内配管を含めた配管総延長は2,730mであり、地域導管は直埋設二重管による4管式とした。冷暖房給湯負荷については各建物の冷熱及び温熱のピーク負荷、年間負荷は各々の用途毎の熱負荷原単位及び全負荷相当運転時間⁹⁾から求めることとした。

Table 5に示す4ケースにより、イニシャルコスト、エネルギーコストを比較検討することとした。CASE 1は通常の界面活性剤を混入しない地域冷暖房モデルを想定している。界面活性剤を混入するCASE 2~4のうち、摩擦低減効果によるポンプ動力低減効果によりエネルギーコスト削減を狙ったモデルをCASE 2、配管口径を最大限縮小しイニシャルコスト低減を狙ったモデルをCASE 3とし、その中間をCASE 4とした。配管設計に際しては、CASE 1においては配管内流速を通常地域冷暖房設計で採用されている値の「ピーク日で3.0m/s以下」

となるようにした。CASE 2ではCASE 1と同じサイズの配管を用い、摩擦低減材による動力削減を最大限利用するモデルとした。

また、CASE 3においては、年間における界面活性剤の効果を確認する本研究の主旨から、ピーク日ではなく各月代表日で3.0m/s以下となるようにした。CASE 4はCASE 1,2とCASE 3の配管口径の間を取る形とした。圧力損失計算に際してはスケールアップ則により直管部の摩擦損失低減係数を各配管口径、流速毎に求めた。また局部抵抗は実験によって得られた局部抵抗係数を用いて計算し

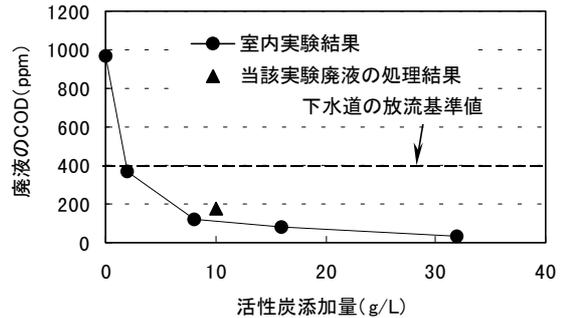


Fig. 10 活性炭添加量と廃液のCOD
Added Active Carbon Amount and COD

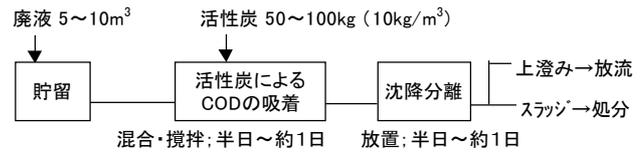


Fig. 11 活性炭による廃液の処理フロ-
Treatment Flow by Active Carbon

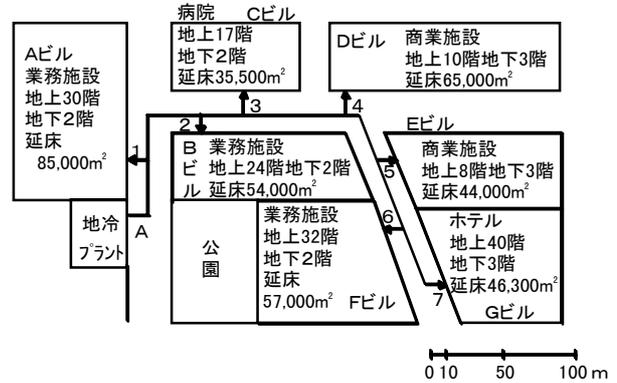


Fig. 12 計算モデル
Simulation Model Plan
Table 5 計算ケース

Simulation Model Cases

名称	名称	界面活性剤	配管口径	ポンプ動力
CASE 1	通常地域冷暖房モデル	なし	通常設計	通常
CASE 2	動力低減モデル	あり	通常設計	最大限低減
CASE 3	配管最大縮小モデル	あり	最大限縮小して設計	通常と同じ
CASE 4	配管部分縮小モデル	あり	部分縮小	部分低減

ている。ポンプ運転は二次ポンプのうちの1台はインバータ運転, 他はON/OFF運転を行うものとした。

熱源システムは設計ピーク負荷からガス焚温水発生器を選定した。モデル地域におけるピーク負荷より熱源仕様を決定した。

Fig. 13に各ケースにおけるイニシャルコストを示す。各項目とも見積ベースの工事費となっている。熱源機機工事費には搬入据付費, 基礎工事, 防振工事, 断熱工事, 試運転調整費が含まれ, また地域導管工事費には土工費, 配管工費, 運搬費, レントゲン検査費が含まれている。これにより摩擦低減材による効果で配管が縮小され, 全コストの半分以上を占める地域導管工事が減少していることがわかる。

算出されたポンプエネルギー消費量によりポンプエネルギーコスト(電力料金)を算出した。電気適用契約種別は関西電力の高圧電力Bとし, 力率は100%と仮定した。算出結果に基づき, イニシャルコストと毎年のエネルギーコストの金利等を考慮しない単純積上げ支出をFig. 14に示す。

界面活性剤を入れるケース(CASE 2, 3, 4)は通常の地域冷暖房のケース(CASE 1)に比べ, 経済性の面における優位性が確認できた。イニシャルコスト低減を優先させるか, ランニングコスト低減を優先させるかは各地域冷暖房のケースによって異なると思われるが, 本モデルケースにおいては9年目に配管部分縮小モデル(CASE 4)が配管最大縮小モデル(CASE 3)より積み上げ支出が小さくなり最も優位なモデルとなった。20年以上にわたる長期の償却を視野に入れた場合は動力低減モデル(CASE 2)が最も優位になることもわかった。

7. まとめ

界面活性剤を用いた摩擦損失低減材について, 摩擦損失低減性能の実験を行った。その結果, 摩擦低減材は実スケールに近い直管部において30~50%の摩擦損失低減が確認されたが, エルボ, パルプなどの局部損失ではその効果が無い, または損失が大きくなる結果が得られた。

この技術を実施に適用する場合に問題となると思われる排水処理の手法について検討し, 活性炭吸着によって排水処理が可能であることを示した。

その結果を基に地域冷暖房システムを想定して経済性評価を行った。経済性評価の結果, 摩擦低減材による省エネルギー効果が確認でき, その最適設計としては配管を縮小してイニシャルコストを押さえながら, 運転費を削減する摩擦損失効果を得る設計が有効であることがわかった。

本研究は神戸大学工学部, 大阪ガス株式会社応用研究所, ライオン株式会社化成成品研究所との共同研究であり, その一部は平成11年度新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)新規産業創造型提案公募事業に採択さ

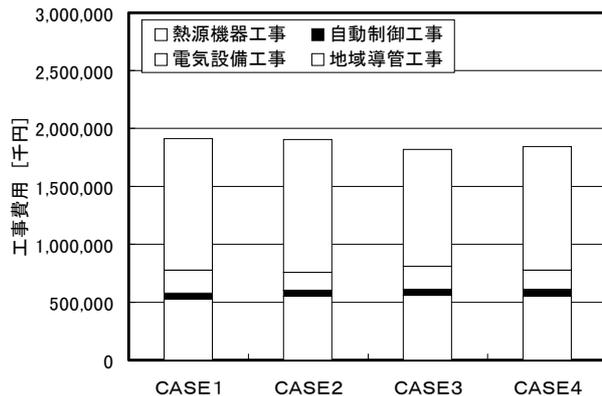


Fig. 13 イニシャルコストの比較
Comparison of Initial Cost

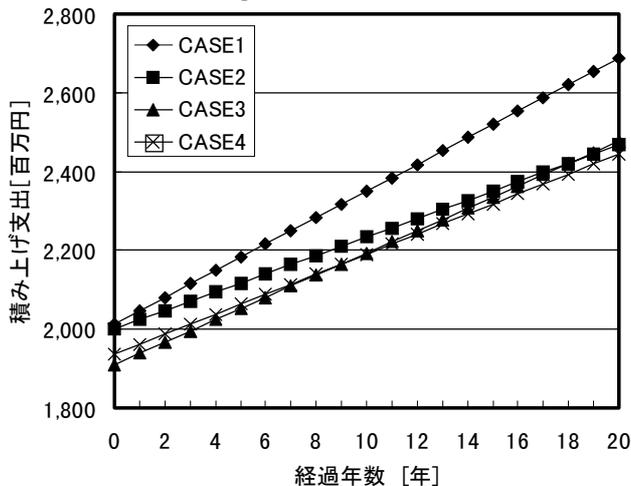


Fig. 14 単純積み上げ支出の経過比較
Comparison of Total Investment

れて実施されたものである。

参考文献

- 1) Bewersdorff H. -W., et al.: The Behavior of Drag-Reducing Cationic Surfactant Solutions, Colloid & Polymer Science, Vol. 266, pp941-953 (1988)
- 2) 八塩, 他: 熱媒搬送動力削減のための配管摩擦抵抗低減技術に関する研究(その5), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, Vol. 1, pp289-292 (1996)
- 3) Usui H., et al.: Effects of Surfactant Molecular Structure on Turbulent Drag Reduction, Journal of Chemical Engineering Japan, Vol. 24, No.1, pp134-137 (1998)
- 4) (社)日本機化学会編: 管路・ダクトの流体抵抗, 第1版 (1979)
- 5) (社)日本地域冷暖房協会編: 地域冷暖房技術手引書, 第3版 (1997)
- 6) 炭田, 他: 地中連続壁工事における廃棄泥水処理後の分離水のCOD除去, 基礎工, p87~91 (1991)