界面活性剤による抵抗減少効果の空調設備への応用*

佐伯 隆^{*1}, 徳原 慶二^{*2}
松村 敏男^{*3}, 山本 修一^{*1}Application of Surfactant Drag Reduction for Practical
Air Conditioning SystemsTakashi SAEKI, Keiji TOKUHARA^{*4},
Toshio MATSUMURA and Shuichi YAMAMOTO^{**}Shunan Regional Industries Promotion Center, 2-118-24 Kokai, Tokuyama-shi, Yamaguchi, 745-0813 Japan

Many researches of drag reduction caused by cationic surfactants have been reported in recent years. However, there are few papers about the application of drag reduction for practical air conditioning systems. In this study, the effects of corrosion inhibitors on the drag reduction caused by a cationic surfactant, Ethoquad O/12, were experimentally investigated. Suitable corrosion inhibitors were proposed and significant change of rheological properties of surfactant solutions with the corrosion inhibitors was also indicated. Such drag-reducing additive was used for a practical air conditioning system, and the energy saving rates was experimentally obtained. Other ten examples of drag reduction adopted for practical systems were also presented in this paper.

Key Words: Drag Reduction, Surfactant, Energy Saving, Air Conditioning System, Pipe Flow

1. 緒 言

界面活性剤による抵抗減少効果 (Drag Reduction, DR 効果と呼ぶ) は流体輸送の省エネルギー化という観点から注目を浴びてきた。使用される界面活性剤は対イオンの存在下で棒状ミセルを形成し、これが流れに作用することによって DR 効果が発現すると考えられる。ミセルの凝集体構造はポンプや細管内において高い剪断力を受けると破壊されるが、剪断力が小さくなると構造を再生する可逆的な性質を持っており、これが高分子系の DR 効果と異なる特長といえる。界面活性剤による DR 効果はビル空調設備や地域冷暖房を中心とした循環系への応用が期待されてきた。これまで塩化ステアリルトリメチルアンモニウム (STAC)、塩化セチルトリメチルアンモニウム (CTAC)、塩化オレイルビスヒドロキシエチルメチルアンモニウムのようなカチオン系界面活性剤を使用して多くの研究が行われ、次式で定義される抗力減少率 DR% で 50 % 以上の効果が確認されている^{(1)~(6)}。

$$DR\% = \frac{f_{\text{water}} - f_{\text{surfactant}}}{f_{\text{water}}} \times 100 \quad (1)$$

ここで f_{water} , $f_{\text{surfactant}}$ はそれぞれ水を流したとき、界面活性剤溶液を流したときの Fanning の摩擦係数である。

界面活性剤と対イオンを添加するだけでこのように

高い DR 効果を示すにもかかわらず、現在までのところ空調設備への応用はそれほど進んでいないのが実状であり、この理由として以下の事項が挙げられる。

- 1) 空調設備の循環水は防錆剤が添加される場合が多いが、防錆剤が DR 効果に及ぼす影響については報告がほとんどない。
- 2) DR 効果に関する各種のスケールアップ実験が行われ、スケールアップ則なども提案されている⁽⁷⁾。しかし界面活性剤による DR 効果は形成されるミセルの構造に著しく依存する。即ち、界面活性剤の濃度、温度、せん断力などが DR 効果に影響し、流れの状態がレイノルズ数のみでは整理できない。よって複雑な配管系を有する空調設備の DR 効果を事前に見積もるには至っていない。
- 3) アナロジー論より DR 効果が起こると伝熱低下も起こると予想され、空調能力の低下が懸念される。

本研究は上記 1), 2) の問題点を実験によって明らかにしようとするものである。1) について、本研究では防錆効果があると考えられる 3 種類の試薬を選定し、DR 効果に及ぼす影響を実験的に明らかにする。2) について、本研究では複数の空調設備に界面活性剤を添加し、省エネメトリットを実測することで、DR 効果の実機適用の優位性を判断することとした。更に 3) についても、実機試験によって得られた知見より若干の検討を加えた。

* 原稿受付 2001 年 9 月 9 日。

^{*1} 山口大学工学部 (☎ 755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)。

^{*2} 正員, (財) 周南地域地場産業振興センター (☎ 745-0813 徳山市鼓海 2-118-24)。

^{*3} エルエスピー協同組合 (☎ 745-0025 徳山市築港町 6-10)。

E-mail: tokuk@mint.ocn.ne.jp

2. 実験装置および方法

2.1 抵抗減少剤に及ぼす防錆剤の影響

抵抗減少剤 使用した界面活性剤は塩化オレイルビスヒドロキシエチルメチルアンモニウム（商品名：エソカード O/12, ライオン(株)）である。対イオンとしてサリチル酸ナトリウムを使用し、両者の重量比が 5 : 3 となるように添加した⁽⁸⁾。図 1 にエソカード O/12 の分子構造を示す。

Fig.1 Molecular structure of Ethoquad O/12

防錆剤 市販の防錆剤には亜硝酸ナトリウム、リン酸三ナトリウム、モリブデン酸ナトリウムをそれぞれ主成分とした 3 種類があり、これに分散剤やスケール防止剤など複数の試薬が混合されているが、詳細は社外秘である。ここで防錆に直接作用するのは上に挙げたナトリウム化合物であることから、本実験ではこれらの純粋試薬を防錆剤として用いた。添加濃度は市販の防錆剤の推奨添加濃度から推算し、亜硝酸ナトリウムは 300 mg/l、リン酸三ナトリウムは 15 mg/l、モリブデン酸ナトリウムは 150 mg/l とした。

DR 効果の測定 実験室における DR 効果の測定装置を図 2 に示す。

Fig.2 Experimental apparatus

流体は高架タンクからポンプによって DR 効果の測定区間を通り、再び高架タンクに戻る循環系を流れる。ポンプに取り付けたインバータの設定周波数をコントロールすることによって流量を変化させた。内径 50 mm、長さ 500 mm の平滑部の後段に内径 20 mm、タップ間距離

1600 mm の直管部を設け、タップ間の圧力差を差圧センサー（P55D, Validyne Engineering Co. 製）で測定した。また流量は電磁流量計（IFM-4080K, 東京計装(株) 製）で測定した。流体温度はヒートポンプによって低温実験では 7~10 °C に、高温実験では 50~52 °C に調節した。

ここで抵抗減少流れのレイノルズ数を定義する際には、界面活性剤水溶液の粘度を水と同様にする場合と非ニュートン性を考慮する場合とがある。後者は流体の粘度特性を広いせん断速度域で測定し、管内のせん断速度分布に対応した管内半径方向の粘度分布を考慮する。実験で用いたエソカード O/12 の粘度は shear thinning 性を示すうえ、低せん断域ではせん断誘起状態（shear induced state ; SIS と呼ぶ）に転移する粘度の急激な上昇現象を示す特徴があり、単純に水の粘度を使用する前者の方法に比べ、厳密性は増す。しかしこの方法には以下のような問題点が指摘されている⁽⁹⁾。

- 1) 界面活性剤水溶液の粘度特性はせん断速度に依存し、濃度や温度依存性も含めて複雑な関数となる。また水溶液が粘弾性流体であることより、粘度測定装置の幾何学的条件の影響を受けることがある⁽⁹⁾。
- 2) LDV 計測より、レイノルズ数が 10,000 以上の場合について、抵抗減少流れにはニュートン流体とは全く異なる渦構造が存在することが指摘されている⁽¹⁰⁾。さらに著者らは以下に示す問題点を追加する。

3) 循環装置に入れられた界面活性剤のうち、10~20% 程度（装置形状に依存）が管壁に吸着するため⁽¹¹⁾、流体中の界面活性剤濃度が低下する。また吸着量は温度にも依存すると考えられる。このためデータ整理の際には個々の実験条件に対応する粘度データが常に必要となり、更に 1) と関連してその測定は容易ではない。Ohlendorf ら⁽⁹⁾は溶媒である水の粘度でレイノルズ数を計算し、水と比較して抵抗減少の程度を議論する方法が一般的であろうとしている。このように抵抗減少流れのレイノルズ数の定義については統一した見解が得られておらず、本研究では Ohlendorf らが採用した方法に従うこととした。測定された圧力差より摩擦係数を計算し、(1) 式により DR% を求めた。

防錆評価（重量減測定法）⁽¹²⁾ 500 ml のビーカー内で試験片（鉄片と銅片を使用、表面積を A 、重量を w_1 とする）を試験溶液に浸漬させ、ホットマグネティックスターラで液温 55 °C を維持し、ある程度の水流を与えながら D 日間おいた（ $D=12$ とした）。その後、試験片を秤量（重量を w_2 とする）し、次式より腐食速度（MDD ; mg/dm²/day）を算出した。

$$\text{MDD} = \frac{w_1 - w_2}{D \times A} \quad (2)$$

2・2 実設備における DR 効果の評価

山口県徳山市にある徳山競艇場の管理棟(2階建,約2000 m²)を試験設備とした。設備の概略を図3に示す。保有水量は5 m³で15kWのポンプ(吐出量:1260 l/min, 揚程:40 m)が1台設置されている。循環水は120 RT(1 RT = 3,320 kcal/hr = 3859 J/s)の吸収式冷温水発生機を通り,ヘッダー(図中のH1)に流れる。ポンプからH1までの管内径は150 mmであり,レイノルズ数は約200,000(平均流速=1.2 m/s)となる。H1からは内径80 mmの2本の配管(2系統)に分かれ,それぞれ機械室から各施設に循環水を輸送する。各施設では内径50~25 mmの配管に徐々に枝分かれし,その末端に大小41台のファンコイルユニットと2台の空気調和機(AHU)が接続されている。空気調和機は送風機ダクトの往路の温度を監視し,これに基づいて図中の三方弁が自動開閉してAHUに流れ込む循環水量を制御している。循環水は再び内径80 mmの2本の配管によって機械室まで輸送され,ヘッダーH2に接続される。

本実験では循環ポンプにインバーター(15kW)を設置して循環水量を制御できるようにし,さらに積算電力計を取り付け,ポンプの消費電力を測定した。そして既存の電磁流量計からの信号,インバーターの設定周波数,および循環水温度,外気温,湿度を記録するシステムを構築した。空調システムの循環水に界面活性剤(エソカード O/12; 500 mg/l),対イオン(サリチル酸ナトリウム; 300 mg/l),および防錆剤(モリブデン酸ナトリウム=150 mg/l)を添加し,DR 効果の実機での検証を行った。

Fig.3 Flow diagram of an air conditioning system evaluated in this study

3. 結果と考察

3・1 抵抗減少剤に及ぼす防錆剤の影響

DR 効果の測定結果 図2の装置で測定した低温域におけるエソカード O/12 とサリチル酸ナトリウムの濃度の影響を図4に示す。

Fig.4 Effect of concentration of Ethoquad O/12 on the surfactant drag reduction

図中の●は水のみを流したときの結果で,Blasius の式に±1.5 %の範囲で一致している。抵抗減少剤の添加によって摩擦係数は低下するが,高レイノルズ数になると Blasius の式に従うようになる。これは高い剪断応力によってミセルの凝集体構造が破壊されたためと考えられる。また DR 効果が失われるレイノルズ数は界面活性剤の濃度増加と共に大きくなっている。

図5はエソカード O/12 の濃度を 500 mg/l

としたときの低温,室温,高温域の測定結果を示したものである。図より DR%の最大値は低温域で約 55 %であり,レイノルズ数が 25,000 以上になると DR 効果が失われることが判る。これは内径 20 mm の管を使用した本装置において,対応する管内平均流速が 1.7 m/s 以上となる。一般に配管設計においては経済流速の観点から流速が 1~1.5 m/s 程度になるように設計されており,一方,熱交換器の伝熱管においては 2 m/s 以上の流速になるように設計されている。よって流体輸送中に DR 効果によって省エネルギー化を図り,一方,熱交換器内部ではミセルの破壊によって DR 効果は失われるけれども,アナロジック的挙動を示す伝熱減少効果を抑えるシステムが可能となる。温度の増加と共に最大 DR% は増加し,流速が 2 m/s 以上の領域でも DR 効果が保持されている。本実験と

は異なるカチオン系界面活性剤を使用した Ohlendorf ら⁽⁹⁾も同様の傾向を報告しており,更に温度上昇に伴って棒状ミセルが短くなる結果を示しているが, DR 効果が増加する理由については説明されていない。

Fig.5 Temperature effect of Ethoquad O/12 solution on drag reduction

低温域において亜硝酸ナトリウム,リン酸三ナトリウム,モリブデン酸ナトリウムを防錆剤として添加したときの DR 効果への影響を図 6 に示した。これより防錆剤によって DR 効果が阻害されることは無いと言える。ここでモリブデン酸ナトリウムでは DR% の最大値が増加し, DR 効果が失われる流速も増加する傾向がある。図には示していないがモリブデン酸ナトリウムの添加量を増すほどその傾向は顕著であった。亜硝酸ナトリウムもその程度はモリブデン酸ナトリウムほど大きくないが, DR 効果が失われる流速が増加する傾向が見られた。

先に著者ら⁽¹³⁾は抵抗減少流れを乱流遷移に見られる流体塊が間欠的に現れる流れとして捉えた。これは界面活性剤水溶液は低せん断域(管中心領域)では粘度が高く,高せん断域(壁付近)では低粘度を示す shear thinning 流体であること,さらに抵抗減少流れでは半径方向の乱れ強度が著しく小さいという実験結果より導いたものである。ここで本実験においてモリブデン酸ナトリウムを添加した抵抗減少剤水溶液の粘度をコーン・プレート型粘度計(IR-200,岩本製作所製)で測定し,結果を図 7 に示した。これより防錆剤の添加によって低せん断域での粘度が低下し,せん断誘起状態(SIS)に移行するせん断速度が 1 オーダー以上大きくなったことが判る。また無添加時に見られたような顕著な SIS ではなく,緩やかな粘度上昇が観察された。一般に層流においては流体の粘度低下が流体輸送抵抗の低減に結びつくが,

Fig.6 Effect of sodium nitrite (300 mg/l), sodium phosphate (15 mg/l), and sodium molybdate (150 mg/l) on drag reduction caused by 500 mg/l Ethoquad O/12 at lower temperature range

Fig.7 Flow equilibrium curves of drag reducing additive with and without sodium molybdate.

乱流では運動量輸送が分子的運動量輸送に卓越するため,図 6 の結果は粘度低下のみでは説明できない。しかし現段階では DR 流れにおける層流,乱流の定義および両者に及ぼす粘度の影響も明確ではない。一方で,図 6 に示したように DR 効果には数%の変化しか見られない場合でも,流れている水溶液の物性が図 7 のように大きく変化していることは注目され,粘弾性特性も含めて⁽⁴⁾,⁽¹⁴⁾, DR 効果のメカニズムを考える必要がある。さらに電気化学的見地から,防錆剤を添加したことが棒状ミセルの形成過程や強度に影響することが考えられる。即ち,モリブデン酸ナトリウムと他の 2 つのナトリウム塩につ

いて、水中での挙動の違いが指摘できる。亜硝酸ナトリウムとリン酸ナトリウムは水に溶解して電離し、カチオン系界面活性剤と対イオンの相互関係に少なからず影響する。一方、モリブデン酸ナトリウムは水中ではポリモリブデン酸イオンによる複合ポリマーを形成する。しかしこの違いが DR 効果に及ぼす影響については、棒状ミセルの構造(形状、サイズ)変化の観察が必要である。いずれにしても本実験で選定した3種類の試薬は DR 効果に対して負には作用しないことが実験的に確かめられた。

図8はB社によって市販されている防錆剤A(主成分はモリブデン酸塩系)が DR 効果に及ぼす影響を示したものである。防錆剤の添加量の増加と共に、DR 効果が阻害されていくことが判る。同様に同社のリン酸塩系、及び亜硝酸塩系の防錆剤についても実験を行ったが、いずれも DR 効果を完全に阻害した。図6の結果から指摘されたように、ナトリウム化合物自体は DR 効果を阻害しなかった。市販品中の他の成分に原因があると考えられる。しかし、市販の防錆剤の含有物やその量は社外秘であり、問題物質を特定するには至らなかった。但し、メーカーからの情報として市販の防錆剤には配管内のスケール析出を防止する目的でアニオン系の分散剤が添加されることが多く(抵抗減少剤はカチオン系)、これが界面活性剤のミセル生成に影響を与えたものと考えられる。このように市販の防錆剤が既に添加されている設備に抵抗減少剤を添加するときは注意が必要である。

Fig.8 Effect of a commercially available corrosion inhibitor, 'A', on drag reduction at lower temperature range

防錆剤としての評価 上述の結果より、3種のナトリウム化合物は抵抗減少剤と併用して差し支えないことが

示された。しかしこのうちリン酸ナトリウムについては排水の富栄養化が懸念される。そこで提案する防錆剤の候補として残りの2種を選び、防錆効果を評価した。表1は水道水、抵抗減少剤(エソカード O/12=500 mg/l、サリチル酸ナトリウム=300 mg/l)及び2種の防錆剤を添加した水溶液の MDD 値を示したものである。一般に鉄は MDD が 10 以下、銅は 2 以下が腐食抑制効果に優れていると言われている。表より本実験で選定した試薬(②、③)は十分な防錆効果を示すことが判る。

Table 1 Results of corrosion tests

	tap water	(MDD; mg/dm ² /day)		
		①	②	③
iron	92.1	4.4	0.3	0.4
copper	0.9	1.9	0.8	0.6

- ① drag reducing additive without corrosion inhibitors
 ② ① + 300 mg/l sodium nitrite
 ③ ① + 150 mg/l sodium molybdate

以上より、本実験で使用した抵抗減少剤と併用できる防錆剤が提案された。これより空調設備に DR 効果を適用する場合には、予め循環水の水質分析をし、DR 効果を阻害する成分を含んでいる場合は、循環水の入替えや希釈を行った後に、DR 効果を阻害しない防錆剤とともに抵抗減少剤を添加する方法が提案される。また実設備では循環水の排出(主としてポンプのシール水)やブローによって抵抗減少剤の濃度も変化していくため、安定した DR 効果を得るためには定期的な水質分析と濃度管理を行う必要があることが指摘される。

3・2 実設備における DR 効果の評価

前述したように徳山競艇場の設備では空気調和機によって空調設備の負荷変動を制御している。これにより系内を循環する流量が変動するため、実験では空気調和機の前段の三方弁を強制的に全閉状態に固定した(負荷変動に関わらず一定流量となる)。抵抗減少剤を添加する前に循環ポンプに設置したインバーターの設定周波数を段階的に変化させ、系内を流れる流量を測定した。次に循環水中のエソカード O/12 の濃度が 500 mg/l となるように抵抗減少剤を添加し、同様の測定を行った。暖房運転における結果を図9に示す。図より抵抗減少剤の添加で循環流量が 1241 l/min から 1360 l/min に増加したことが判る(8.8%の増加)。また抵抗減少剤を添加すると、インバーターの設定周波数を 54 Hz まで減少して同一の流量になることが判る。実際に 54 Hz の連続運転を行

Fig.9 Relationship between the flow rate and the frequency of the inverter.

い、積算電力計による測定結果から、電力削減量は約 20 %と求められた。

ここで本設備は内径 80 mm の 2 系統の配管によって循環水が機械室から各施設に輸送される。この区間の直管部は 256 m であり、仮に経済流速 (=1.2 m/s とする。このとき $Re=96000$) で流れるように設計されているとすると、 4.1×10^4 Pa の圧力損失となる。抵抗減少剤を添加し、 $DR\%=60\%$ の効果があったとすると、この区間の圧力勾配は 1.7×10^4 Pa となり 2.5×10^4 Pa の低減となる。これを揚程で表すと 2.5 m となり、ポンプの全揚程 (=40 m) の 6.25 %となる。このように冷温水の発生場所と末端の空調設備の位置関係は DR 効果のメリットに大きく左右する。一方、施設内の配管は拡大縮小部やエルボ、バルブなどの管付属物を含み、さらに熱交換器内部では流速が 2 m/s 以上に設計されることを考慮すると、ここでの DR 効果を机上で見積もることは簡単ではない。著者ら⁽¹⁾は先に直管部のみで DR 効果が起こり、管付属物内では起こらないという大胆な仮定の元で DR 効果のメリットを予測する方法を提案している。ところが小野島ら⁽¹⁶⁾は本研究と同種の抵抗減少剤を使用した管内流実験から、エルボにおいては局部損失係数が水よりも増大し、ゲート弁では減少、逆止弁ではほぼ同等、との結果を報告している。しかしこの結果は直径 80 mm の配管による実験で得られたものであり、管径の影響については明確ではない。今後とも管付属物における DR 効果の定量的な実験、もしくは予測方法の開発を進展させ、詳細なメリットの試算が可能となるようにする必要がある。

このような状況下で、本研究は様々な設備について抵抗減少剤を実際に添加して、省エネメリットを実測する

ことで、DR 効果の実機適用の優位性を判断することとした。これまで行った約 50 件の実証試験のうち、代表的なものを表 2 に示した。デパートは 4～5 階建てのもの、またホテルは宿泊人数が 100 人以上の施設で、保有水量は 5～50 m³ の規模である。これらの実績データは稼働中の客先の設備を使用しており、配管系統、特に配管延長や圧力損失、各部の流速などに関するデータはあまり取ることができない。大まかには DR 効果による省エネルギー効果は全ポンプ動力を 2 割程度低減でき、インバータ制御を組み合わせると 4～5 割の低減ができている。

ここで、一般に DR 効果の起きている系ではアナログ的に伝熱減少効果も起きていると予想される。研究者らは単管による伝熱実験から抵抗減少流れではアナロジー則は成り立たず、伝熱減少効果の方が大きいという結果を得ている⁽¹⁾。これに対し、冷温水発生機内での流速は 2 m/s 以上であると言われており、さらに流路の形状も単管のように単純ではないために、界面活性剤のミセル構造が破壊されていることも考えられる。仮に 70～80 % の伝熱減少効果が実機においても起きているならば、循環水が設定温度に到達しなかったり、消費されるガス量が増加するなどの現象が見られるはずである。この場合、例えばポンプ所要動力が低減できたとしても、空調設備全体としてみると省エネルギーになっていない場合もありうることになる。

そこで前述の徳山競艇場の空調設備を使用して、抵抗減少剤を添加する前後に対して、発生冷水温度、冷温水発生機のガス消費量と循環ポンプの所要動力の推移を約 2 週間の運転期間中に測定し、結果を図 10 に示した。これより抵抗減少剤を添加する前の 6 日間の運転状況と添加後の 9 日間を比較すると、明らかにポンプの所要動力は低減しているが、ガス消費量の変化は見られないことが判る。また抵抗減少剤を添加したことによって発生冷水温度が設定値を逸脱するという事はなかった。この実験の期間中、天候や外気温の影響、循環系の入口と出口の温度差の変化も測定したが、抵抗減少剤を添加したことによる伝熱減少効果の影響は確認されなかった。伝熱の問題はこれからもデータを蓄積する必要があるが、これまでの実機への適用例を見るかぎりでは、トラブルは起こっていない。

4. 結 言

界面活性剤水溶液による DR 効果の実機への適用を検討した。実際の空調設備においては防錆剤の添加が不可欠であり、本研究では DR 効果に影響を与えない 3 種

Fig.10 Gas consumption of the refrigerating machine and power consumption of the pump before and after the addition of Ethoquad O/12

類の防錆剤を実験的に評価した。いずれも DR 効果に負の影響はなく、環境問題を考慮して亜硝酸ナトリウムとモリブデン酸ナトリウムが併用可能な防錆剤として選定された。更に抵抗減少剤と防錆剤を実際の空調設備に添加し、循環ポンプの所要動力の省エネルギー化について、定量的な評価を行った。現在までに約 50 件の実設備に DR 効果を適用してきたが、大きなトラブルもなく最低でも 2 割の省エネルギー効果は生み出している。

本研究は平成 12 年度山口県中小企業連携組織調査開発等支援事業の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Usui, H., 他 1 名, J. Chem. Eng. Japan, **26**(1993), 103-106.
- (2) Sato, K., 他 2 名, Thermal Science & Engineering, **7** (1999), 41.
- (3) 稲葉英夫・春木直人, 機論, **63**-608, B(1997), 208.
- (4) Lu, B., ほか 3 名, J. Non-Newtonian Fluid Mech., **71**(1997), 59-72.
- (5) Warholic, M. D., ほか 2 名, J. Fluid Mech., **388**(1999), 1-20.
- (6) 三原一伸, 金島正治, 省エネルギー, **51**(1999), 33-37.
- (7) 薄井洋基, NEDO 平成 11 年度提案公募事業成果報告書予稿集, 98E 省 06-009(2000).
- (8) Chou, L. C., ほか 2 名, 'Drag Reduction in Fluid Flows', R. H. J. Sellin and R. T. Moses, eds., p.141-148, Ellis Horwood Ltd. Press, West Sussex, England(1989).
- (9) Ohlendorf, D., 他 2 名, Rheol. Acta, **25**(1986), 468-486.
- (10) Bewersdorff, H. W. 他 1 名, Proc. Fifth Symp. on Turbulent Shear Flows, Ithaca, New York(1985), 9.41-9.46.
- (11) 佐伯 隆, 他 3 名, 日本機械学会流体部門講演論文集, 1006(2000).
- (12) JIS K 0100.
- (13) Saeki, T., 他 4 名, J. of the Society of Rheol. Japan, **28** (2000) 35-40.
- (14) Savins, J. C., Rheol. Acta, **6**(1967), 323-330.
- (15) 薄井洋基, 他 3 名, 化学工学論文集, **21**(1995), 248-256.
- (16) 小野島一, 他 1 名, 配管技術, **43**(2001), 13-19.

Table 2 Practical air conditioning systems evaluated in this study

No.	facility	type of refrigerating machine, capacity	pump capacity	operation time	water capacity	energy saving rate
1	public facility (home)	Absorption*, 90 RT**×1	5.5 kW×1, 1.5 kW×2	8,760 hr/year	3 m³	38.60%
2	factory (1)	Absorption, 360 RT×2 & Turbo***, 400 RT×1	45 kW×3	4,380 hr/year	25 m³	21%
3	factory (2)	Absorption, 160 RT×2	22 kW×2	2,100 hr/year	10 m³	27.40%
4	department store (1)	Absorption, 450 RT×2 & Turbo, 400 RT×1	22 kW×3	3,850 hr/year	30 m³	32.80%
5	department store (2)	Absorption, 400 RT×1, 315 RT×1	37 kW×1	4,420 hr/year	7 m³	29.4%
6	department store (3)	Absorption, 600 RT×1, 150 RT×1	55 kW×1, 22 kW×2, 18.5 kW×2,	2,640 hr/year	15 m³	54%
7	hotel (1)	Absorption, 300 RT ×3	7.5 kW×2, 11 kW×2	8,760 hr/year	50 m³	41.20%
8	hotel (2)	Absorption, 125 RT ×1	15 kW×1	8,000 hr/year	10 m³	48%
9	hotel (3)	Absorption, 100 RT ×3	11 kW×1, 7.5 kW×1	2,000 hr/year	15 m³	48%

* Absorption chilled/hot water generating machine

** 1RT= 3,320 kcal/hr

*** Turbo chilled/hot water generating machine