

油分濃度計の開発に関する基礎研究

落合政昭*・杠好秋**・塚原茂司**

Fundamental Studies on Oil Content Meters

By

Masa-aki OCHIAI, Yoshiaki UZURIHA and Shigeji TSUKAHARA

Abstract

Nowadays, the marine pollution caused by discharged oil from ships has become one of the most serious problems in the world.

According to the recommendation by IMCO relating to the marine pollution prevention, fundamental studies on oil content meters have been performed at Ship Research Institute.

Under the conditions of the oil content in water from 0.8 to 40% and of the fluid temperature from room temperature to 50 deg C, four methods to measure the oil content have been applied.

They are,

- (1) the electric conductivity,
- (2) the fluid viscosity,
- (3) the acoustic velocity,
- (4) the attenuation coefficient of the supersonic wave.

As a result of this study, it is evident that the four method showed good correlation between oil content and the changing rate of each physical values. Among them, the third method showed the highest potentiality for actual use, and the agreement between experiment and homogeneous theory is good.

1. ま え が き

近年、わが国では多様な環境汚染が指摘され、その対策が緊急なる国民的課題として求められている。船舶からの廃油による海洋汚染もその一つであり、かつそれは、汚染範囲が世界的規模であるという特徴をもつ。したがって、それに対する対策として、IMCO勧告なる国際的基準による廃油投棄規制案が示されている。しかしながら、上記勧告の実施にあたり、いくつかの技術的問題が障害として残されており、廃油投棄の状況を管理、監視するに足る油分濃度計の開発もその一つである。

現在市販されている船用油分濃度計の大部分は、低

* 東海支所

** 機関性能部 原稿受付：昭和49年11月11日

濃度用(100 ppm以下)で、試料を希釈することにより10倍程度まで測定可能とするものである。しかしながら、最近の汚染物規制の傾向は、濃度規制から総量規制へと移行しつつあり、わが国の現行法でも、オイルタンカーのスロップタンクからの廃油に対しては総量規制である。そのためには、広範囲の油分濃度をカバーし時間おくれのない油分濃度計が必要である。現在その種の油分濃度計の開発は遅れている。その原因として、これまでに需要がなかったこととあいまって、含油水の諸性質に関する基礎的実験値の蓄積が不足していたことが指摘される。

以上の観点から、当研究所では主として高油分濃度含油水を対象として導電性、流動性、音響的性質等、物理的性質に関する基礎的実験値の蓄積の一端を担うために昭和47、48年度に実験を実施した。以下にその

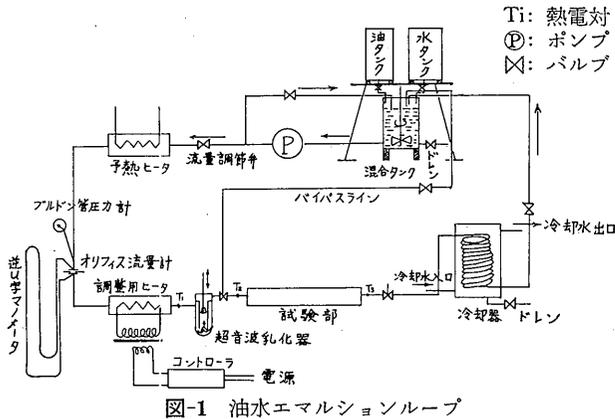


図-1 油水エマルションループ

結果を報告する。

2. 実験

2.1 実験装置

含油水の物理的性質を調べるためには、測定中に生じ得るいろいろな条件の変動をさげ、測定の実現性を良くする必要があります。そのためには含油水の濃度、温度、流量油粒径を可能な範囲で一定にし、測定部に供給する必要があります。以上の目的で「油水エマルションループ」を製作した。図-1 にそのフローチャートを示す。

混合タンク中では、かくはん機 (約 20 rpm) で油と水とを混合する。含油水は渦巻きポンプでさらにかくはんされ、加圧される。流量はオリフィス流量計およびマンメータにより測定される。なお今回対象とした含油水の比重は 0.96 以上であったので、マンメータの水頭に及ぼす比重差の影響は無視した。予熱器は 2kVA の電気ヒータであり、含油水を予熱する。調整用加熱器は 2kVA の電気ヒータでオン・オフ制御され、測定部の温度を一定に保つ。超音波乳化器 (超音波工業 K.K. 製 USH-150 N 25 型) で、エマルション化された含油水は測定部、冷却器を経て混合タンクへ戻る。

本ループは、表-1 に示す実験パラメータの範囲で、安定なエマルションが測定部に供給された。一回の測

表-1 実験範囲

温度	室温~50°C
流量	0~1.5 l/min
油分濃度	0~30% (A重油, 灯油) 0~2% (C重油)

定時間は10分以下であり、その間の温度変動は $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 、油分濃度の変動は相対誤差 $\pm 5\%$ 以下であった。

図-2 に油分濃度の経時変化の一例を示す。すなわち、まず水だけを循環させる。次に混合タンクに一定量の油分を入れ、その直後からループ末端で含油水を採取する。図-2 は採取した時刻と、油分油度との関係である。図から混合後40分以上経過すればほぼ一定の油分濃度のエマルションが得られることがわかる。

図-3 に、前図と同様に混合直後からの各時刻におけるA重油とC重油のエマルションの油粒の顕微鏡写真 ($\times 400$, $\times 100$) を示す。A重油エマルションは本ループでは、混合後1時間以内には直径 20μ 程度の大粒子が数多く見られるが、1時間以後には全粒子が直径 10μ 以下になった。C重油エマルションの粒径も1時間程度で一定になったが、A重油の場合より大きく、直径 40μ 程度の粒子が多かった。灯油エマルションの油粒径は400倍の顕微鏡では確認できなかった。すなわち、本ループでは粘度の低い油ほど微粒化でき、粘度の高い油のエマルションほど粗いエマルションになったものと考えられる。

2.2 油分濃度測定法

油分濃度の測定法について述べる。A重油とC重油のエマルションに対しては比色法¹⁾を用いた。すなわち流動中のエマルションをマイクロインジェクタ等で計量採取する。採取した試料中の油分を四塩化炭素中に抽出し、抽出液を適当な濃度に四塩化炭素で希釈する。なお、今回の実験では試薬一級の四塩化炭素を使った。次に吸光度計 (島津製作所製 Spectronic 20) で 3400\AA の光線に対する希釈液の透過率を測定する。一方、あらかじめ検量線と呼ばれる透過率と四塩化炭素中の油分濃度 (体積濃度) との関係を示すグラフを

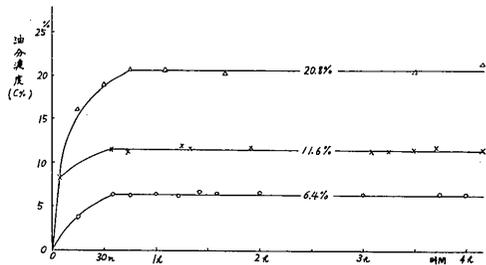


図-2 油分濃度の経時変化 (A重油エマルション)

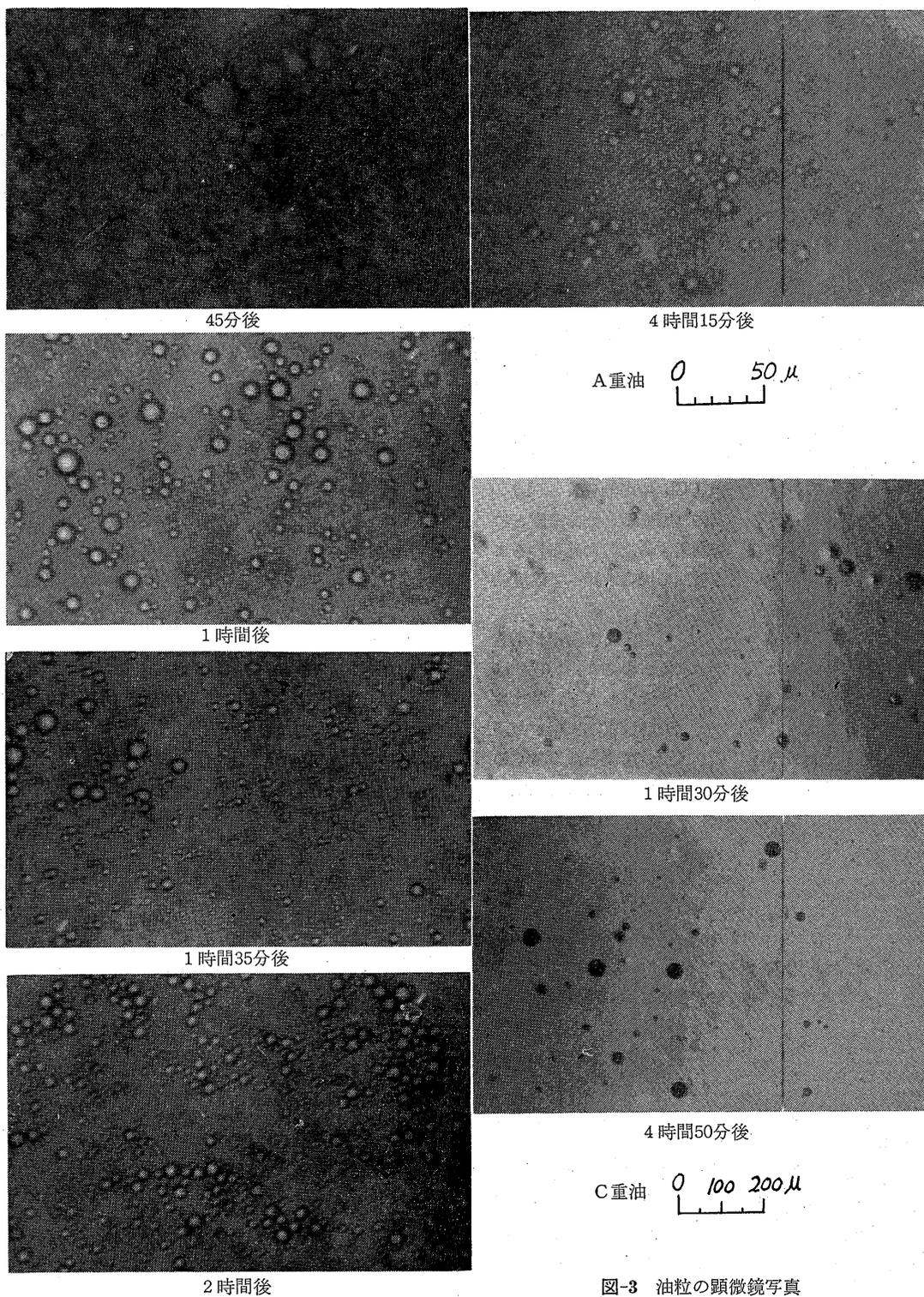


図-3 油粒の顕微鏡写真

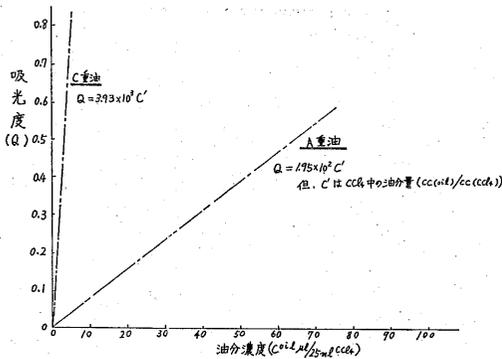


図-4 検量線

用意し、測定した透過率、検量線、希釈度から油分濃度を算出する。

図-4 に検量線を示す。図中の吸光度 (Q) は透過率 (T%) と次の関係がある。

$$Q = 2.0 - \log_{10} T \propto (CCl_4 \text{ 中の油分}) \quad (1)$$

したがって油分濃度の算出には吸光度と油分濃度とに比例関係が成立する範囲を利用する。図に見られるように、A重油の検量線はC重油の場合と比べて濃度変化に対する吸光度の変化が小さい。

灯油の場合は灯油の可視光線に対する吸収率が小さいため、吸光度の変化割合は一段と小さく、比色法は灯油エマルションの油分濃度測定法として適当でない。そのため灯油に対しては赤外線吸収法を用いた。赤外線吸収法は四塩化炭素中の油分濃度と、 3.4μ の赤外線に対する吸収率との間の比例関係を測定原理とするもので、比色法と同様に採取、計量、抽出、希釈の過程を経た試料を用いる。一方、あらかじめ標準液 (180 ppm) を用意し、試料、標準液双方の赤外線吸収量の比較から濃度を求めるものである。

(使用機器：堀場製作所製、OCMA 型 H 311640-01)

2.3 対象油の諸性質

取り扱いの容易さと、比較的に平均的性質を持つ石油類であることから、本実験の対象とする油分をA重油とした。なお、比較対照のため、より高粘性油であるC重油と、より低粘性、軽質油である灯油についてもそれぞれの含油水の性質を調べた。以下に使用した各部分の物性値の実測値を示す。

a) 比重：7°Cにおける各油の比重を比重ビンで測定し、その結果を表-2に示す。一般に、石油類の比重は0~50°Cの範囲ではほぼ直線状に変化する²⁾。同表に15°C換算の比重も併示する。

b) 粘度：レッドウッド No. 1 法で動粘性係数を (170)

表-2 油の比重

油種	測定値 (7°C)	換算値 (15°C)
灯油	0.792	0.787
A重油	0.851	0.846
C重油	0.952	0.947

表-3 油の動粘性係数

油種	測定値
灯油	29.0レッドウッド秒 = $1.8 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ (37.8°C)
A重油	37.8 = $4.9 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ (37.8°C)
C重油	421.1 = $1.2 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ (55°C)

測定した。表-3に示す。石油類の温度と粘度との一般的な関係²⁾から類推すると、動粘性係数は20°Cでは大略

灯油： $3 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$

A重油： $8 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$

C重油： $9 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$

程度であろう。

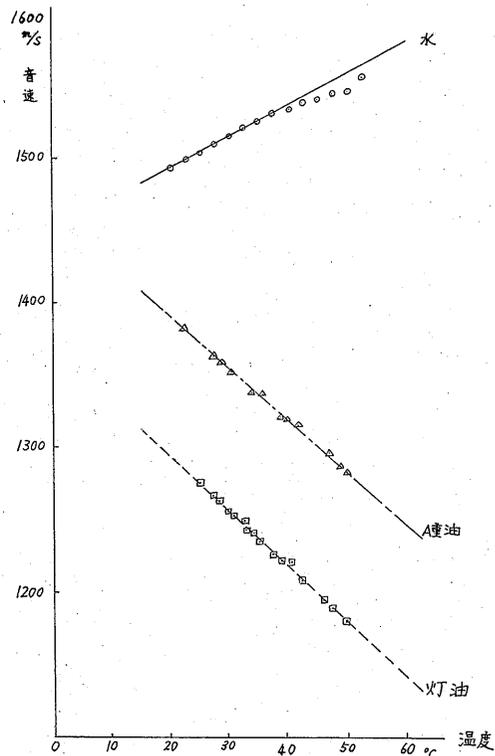


図-5 音速の温度変化

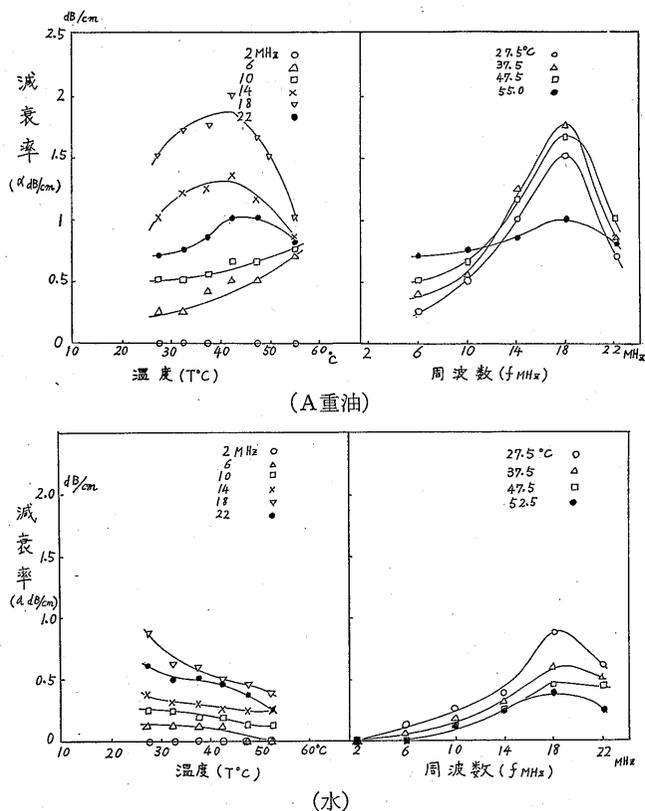


図-6 音圧減衰—温度・周波数

c) 音速: 水およびA重油, 灯油の音速の温度による変化を 図-5 に示す。測定法はシングアランド法で後述のエマルジョンの場合と同じである。20~50°Cの範囲では, 水の音速は温度上昇とともに直線的に増加するのに対して, 油類の音速は逆に減少する。減少割合はA重油と灯油とは, ほぼ同様である。C重油については音圧の減衰が大きいため, この測定法は適用できなかった。

d) 音圧減衰: 図-6 に A 重油と水の音圧減衰と温度, 周波数との関係を示す。測定法はパルス法で後述のエマルジョンの場合と同じである。22 MHz の場合を除くと, 減衰率はほぼ周波数 (f) の増加とともに増加する。このことは, 一般に流体の減衰率と周波数との間によく現われる現象である³⁾。本実験範囲では水の減衰率は, 2~22 MHz の超音波に対して温度上昇にしたがって減少するが, A 重油の減衰率は超音波の周波数によって異なる。10 MHz 以下の超音波の減衰率は温度の増加にともなって増大するが, 14 MHz 以上では 27.5~52.5°C の間に peak が存在する。

媒質自身によるエネルギーの吸収の原因は大別して粘性によるもの, 熱伝導によるもの, 分子の吸収によるもの (流体の分子の音波による並進運動と分子内の振動) の三つになる。いま x 方向の平面波を考えると吸収がある場合の音圧は

$$P_e = P_{e0} e^{-\alpha x} \quad (2)$$

という形に書くことができる。ただし α は減衰係数 (attenuation coefficient)。

流体の粘性や熱伝導による減衰はあまり大きいものではなく理論的に

$$\alpha_0 = \frac{\omega^2}{2\rho a^2} \left(\frac{4\eta}{3} + \frac{\lambda(\kappa-1)}{C_p} \right) \quad (3)$$

ただし a : 流体の音速 ρ : 流体の密度
 ω : 角振動数 η : 粘性係数
 C_p : 定圧比熱 λ : 熱伝導率
 κ : 比熱比

で与えられる³⁾。

(3) 式が定性的に広い範囲で使われるとすると, 減衰率は周波数が増加すれば (3) 式中の ω^2 が大きくな

り、 α は大きくなる。一方、温度による影響は音速の変化にあらわれると考えられる。((3)式中の各物性値 $\rho, \eta, \lambda, \kappa, C_D$ にも含まれるが、これらは音速の効果にくらべればそれほど大きいとは考えられない。)音速の温度による変化は 図-5 でみられるように、水では温度の上昇とともに増大するが、A重油では減少する。したがって減衰係数は水の場合、温度の上昇により減少し、A重油の場合は増大する。以上の定性的説明は 図-6 の周波数と温度による減衰係数の変化によく合致する。(ただし、上記の説明では 14MHz 以上で 27.5~52.5°C の間に peak が存在するのは説明できない。)

3. 含油水の導電性

3.1 実験方法

測定部を 図-7 に示す。アクリル樹脂製パイプの両端はフランジ止めで、油水エマルションループに取り付ける。導電率測定用セル(東亜電波 K.K. 製 CG 201 PL)の電極間の抵抗を交流ブリッジ(安藤電機 K.K. 製 LCR-4 型)で測定した。なお、電源、アース等からのノイズを防ぐため外部発振器(1KHz)およびブリ

ッジ内蔵のフィルタを使った。

実験手順を示す。まずループを充分に洗浄してから希薄食塩水(塩分濃度 1~2%)を循環させる。20分以上所定の温度で循環させてから、希薄食塩水の電気抵抗をループおよびビーカー中で測定した。その結果を 図-8 に示す。各種エマルションの一連の実験において希薄食塩水の基準濃度は異なるが、それぞれはほぼ平行であり、ほとんど同じ温度依存性を持つ。なお、

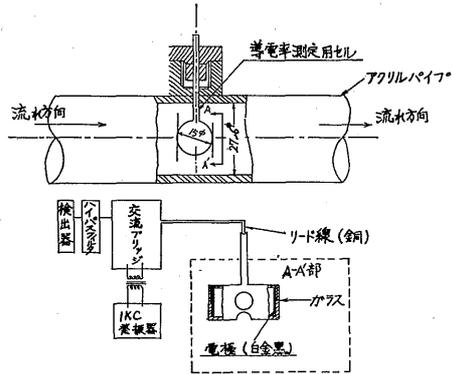


図-7 導電率測定部

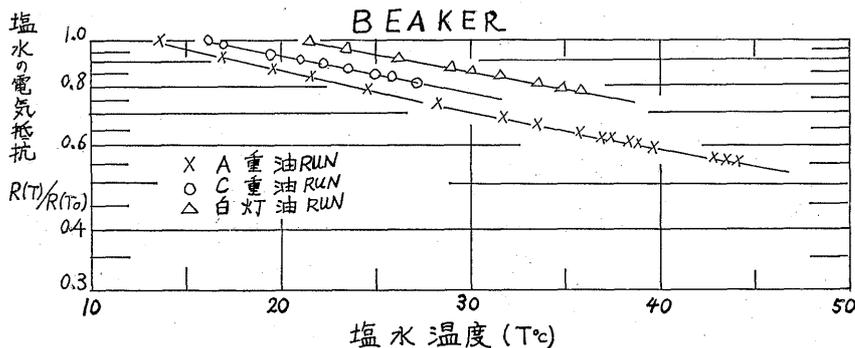
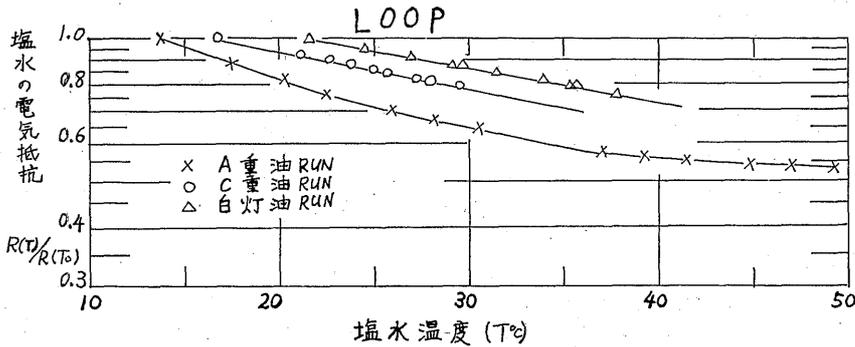


図-8 塩水の電気抵抗

表-4 実験範囲

	油分濃度	温度
A重油 RUN	0~9.7%	20~40°C
C重油 RUN	0~1.3%	20~40°C
灯油 RUN	0~7.6%	20~40°C

図中の実線は近似式であり、以下油分濃度0%の時の導電率(σ_0)は近似式より求めた。次に所定量の油分を混合タンクへ入れ、所定の温度でバイパスラインを通して1時間以上循環させる。その間に測定部をループから取りはずして洗浄しておく。次に測定部を取り付けて、コックを切り換えエマルションを測定部へ流し、3分後上記の方法で電気抵抗を測定する。同時にループ末端でエマルションを採取し、ピーカ中で電気抵抗を測定するとともにマイクロインジェクタで計量、採取して油分濃度測定用試料とした。次に再び油分を追加して前と同様な手続きで計測を行い、順次実験をすすめる。実験パラメータの範囲を表-4に示す。

3.2 結果および考察

図-9にエマルションの相対導電率($(\sigma_0 - \sigma_e)/\sigma_0$)と、油分濃度($c\%$)の関係を示す。ここで σ_0 は食塩水の、 σ_e はエマルションの各導電率($1/\Omega m$)である。図中の実線はMaxwellの式として知られる式⁴⁾で、次式で示される。

$$\frac{\sigma_0 - \sigma_e}{\sigma_0} = \frac{3 \cdot c}{2 + c} \quad (4)$$

ただし、(4)式において油の導電率は0とした。(4)

式は媒質中に分散体が様に分布しているような混合物の、物性値と濃度との関係をよく表わすことが知られている。図-9で、A重油と灯油のエマルションの場合とでは有意な差は見られない。しかしながら、C重油エマルションの相対導電率は他の場合よりかなり大きい。換言すれば、C重油エマルションの電気抵抗は他のエマルションより大きい。濃度の実験範囲の上限はエマルションの安定性で制限された。すなわち、表-4に示した以上に濃厚なエマルションの電気抵抗は、指示値が不安定でブリッジのバランスがとれなかった。この時、テストセクションを観察すると、大きな油粒(0.5mm程度)が測定部中に浮遊しているのが認められた。C重油エマルションでは、他の場合と比べてC重油の粘性が大きいためと思われる。そのため十分に乳化できなかったが、希薄なエマルションの場合でも、粒径が大きいため、すぐ浮上したり電極や管壁を汚したりする。表-4に示したように油分濃度2%以上の安定したC重油エマルションを実際に作れなかったし、またそれ以下の希薄なエマルションの電気抵抗の時に電極の汚染がみられた。以上がC重油エマルションの電気抵抗が他のエマルションの場合よりも大きかった理由であろう。図-9に見るように、ピーカ中での測定値はループでの電気抵抗より低く、ループでの測定値は(4)式と大体一致する。電極を洗浄しなかった場合の測定値は(4)式よりはるかに大きな値になり、再現性がなかったが、そのときには電極の汚れがはなはだしかった。次にピーカ中での油水エマルションの測定値について検討する。静止エマルシ

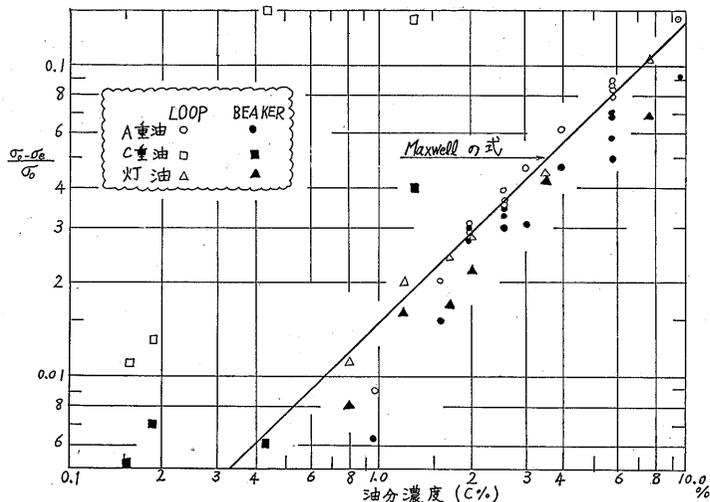


図-9 導電率と油分濃度

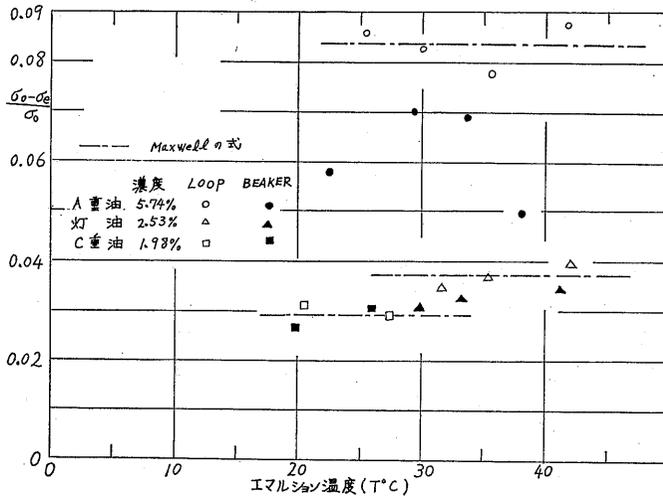


図-10 導電率とエマルジョン温度

ン中での油粒の浮上速度 v_0 は、油粒を剛体球で Stokes の式で表わしうる粘性抵抗のみが働き、かつ粒子間の相互作用がないものと仮定すると、次式で示される。

$$v_0 = \frac{2a^2(\gamma_0 - \gamma)}{9\eta_0} \quad (5)$$

ここで a , γ は油類の半径, 比重量であり, γ_0 , η_0 は媒質の比重量と粘度である。いま, 食塩水—A 重油エマルジョンの場合, 各物性値は大略次のようになる。

$$\gamma = 850 \text{ kg/m}^3, \gamma_0 = 1020 \text{ kg/m}^3, \eta_0 = 1 \times 10^{-4} \text{ kgs/m}^2$$

したがって、直径 20μ 程度の粒子の浮上速度は

$$v_0 = \frac{2 \times (10 \times 10^{-6})^2 \times (1020 - 850)}{9 \times 10^{-4}} \approx 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

ピーカ中での測定部の中心位置は底から 1 cm 程度の高さであるから、 $t = 1 \times 10^{-2} / 4 \times 10^{-5} = 250 \text{ sec} \approx 4 \text{ min}$ すなわち、採取後 4 分後には直径 20μ 以上の油粒の大部分が測定部より上方へ浮上してしまう。測定は採取後 3 分程度で行われたが、より大粒径の粒子は測定

部に存在しなくなる。つまり結果としてピーカ中では、流動中のエマルジョンより希薄なエマルジョンの電気抵抗を測定したことになる。これがピーカでの測定値がループでの測定値より低い理由であろう。図-10 に A 重油エマルジョンの温度と相対導電率の関係を示す。温度変化はほとんど相対導電率に対して影響しなかった。水、油類の粘性、表面張力等はかなり強く温度に依存する物性値だから、エマルジョンの粒径が温度変化につれて変化することが予測された。しかしながら、本実験範囲では粒径が十分に小さく、粒径変化が相対導電率に及ぼす影響が現われ得なかったものと思われる。

4. 含油水の流動抵抗

4.1 実験方法

測定部を図-11 に示す。外側の管の内径は 16.1 mm, 内側の丸棒の外径は 13.5 mm, 10.3 mm, 6.8 mm の

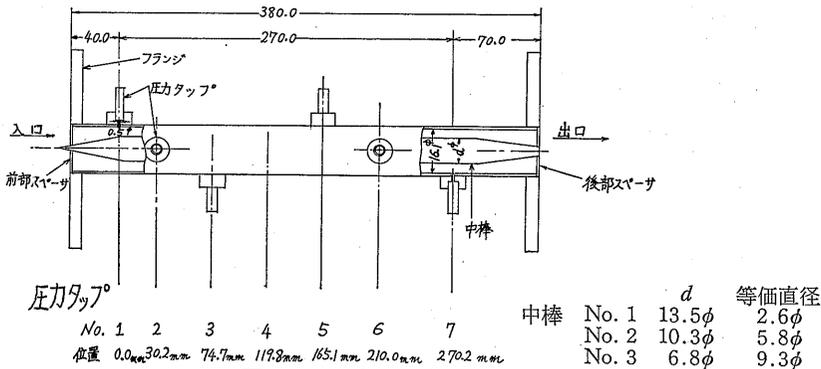


図-11 圧力損失測定用試験部

三種であり、管、丸棒ともアクリル樹脂製である。それぞれの丸棒を使った時の流路の等価直径は 2.6, 5.8, 9.3 mm である。丸棒は前後のフランジ部のスペーサで支持した。圧力タップは 0.5 mmφ キリ穴で、その部分の管内面はサンドペーパーで軽く磨いた。圧力タップの位置は図示した通りであり、軸方向にそれぞれ時計方向に 90° ずつ回転した位置にある。なお、以上の寸法は実験完了後に試験部を解体して測定したものである。各圧力タップでの静圧は逆U字形マンオメータで測定した。流量は丸型オリフィスおよびマンオメータで測定した。オリフィスの検定曲線を図-12 に示す。図示されたように、油分濃度約 10% のエマルションのオリフィス係数は水と比べて 2% ほど大きい。今回の実験精度内であり差は無視できる。圧力損失測定と同時に混合タンクへの戻りのラインの末端でエマルションを採取し、油分濃度測定用試料とした。実験パラメータの範囲を表-5 に示す。

4.2 結果および考察

図-13 に水力直径 2.6 mm の時の流れ方向の静圧分布の一例を示す。温度、レイノルズ数、油分濃度をパラメータとした。No. 4 の圧力タップでの測定値はやや直線からはなれるが、 $X/D > 20$ である No. 3 以後の静圧分布はほぼ直線状で十分に発達した流れとみられる。ここで、 X は No. 1 からの距離であり、 D は

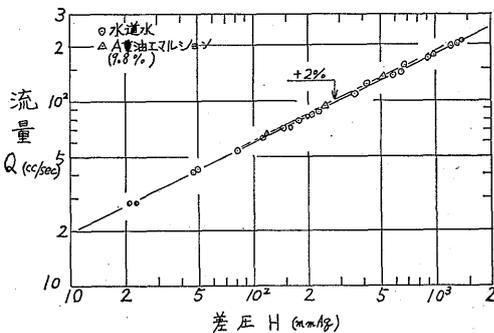


図-12 オリフィス検定曲線

表-5 流動抵抗測定 (実験パラメータ)

油種	油分濃度	温度
A 重油	0~40%	20~50°C
C 重油	0~0.5%	20~50°C
灯油	0~20%	20~50°C

レイノルズ数 2.5 × 10³ ~ 1.5 × 10⁴
 水力直径 2.6 mm, 5.8 mm, 9.3 mm

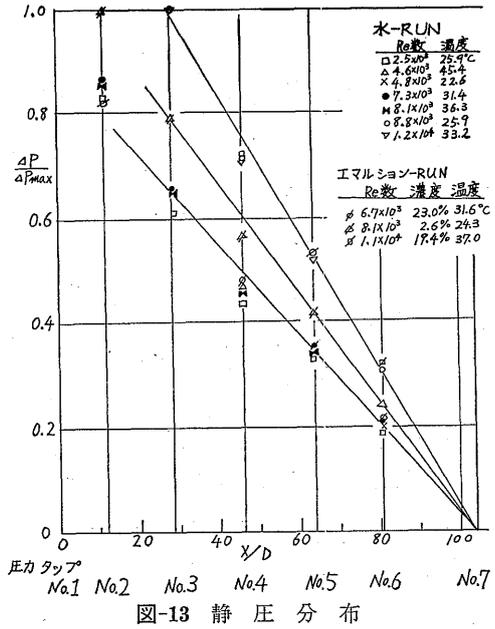
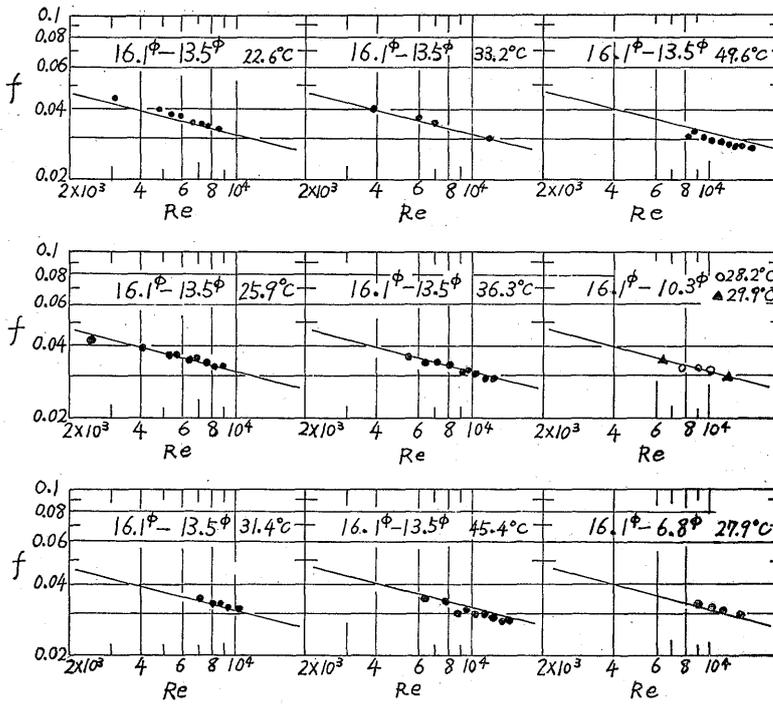
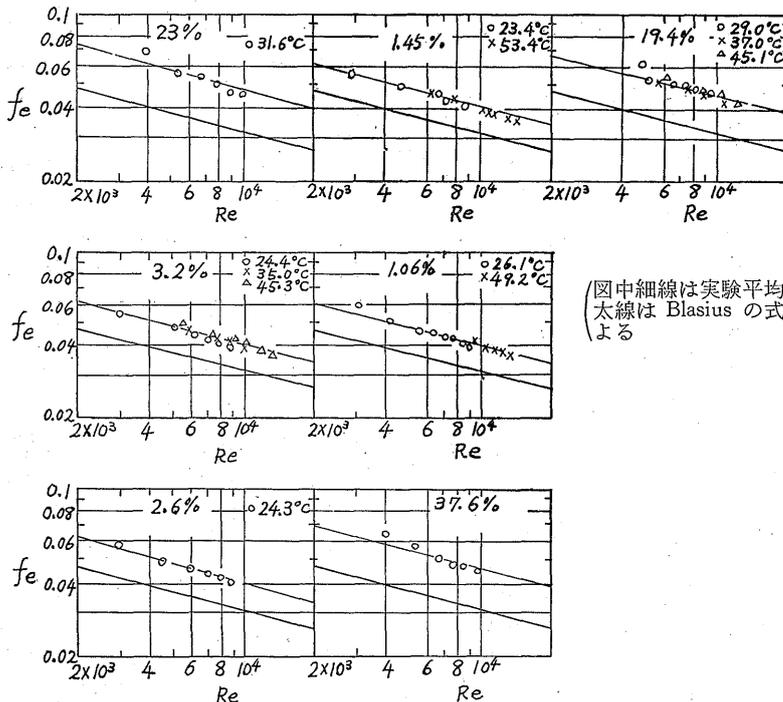


図-13 静圧分布

流路の水力直径である。ただし $Re = 2.5 \times 10^3$ の場合は、直線からはなれていることからわかるように、流れが遷移領域のため十分に発達しなかったものと思われる。エマルションの場合も水道水の場合もほぼ同様である。以下の整理は、各テストセクションについて $X/D > 20$ になるように No. 3—No. 7 ($D = 2.6$ mm), No. 5—No. 7 ($D = 5.8$ mm), No. 6—No. 7 ($D = 9.3$ mm) 間の圧力勾配から圧力損失係数を算出した。図-14 に水道水を流した時の圧力損失係数 (f) とレイノルズ数 (Re) の関係を示す。なお図中の実線は Blasius の式すなわち $f = 0.3164 \times Re^{-0.25}$ を示す。実験パラメータは温度: 20~50°C, レイノルズ数: $2.5 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^4$ である。本実験範囲内では、実測値はほぼ、Blasius の式に一致しており、圧力損失測定法が妥当であったと考えられる。図-15 に A 重油エマルションの圧力損失係数 (f_e) とレイノルズ数の間の関係を示す。ただし、レイノルズ数中の動粘性係数は水の物性値を使った。すなわち、等温、同水量の水が流れた時のレイノルズ数である。図中の実線は Blasius の式であり、水が流れた時の圧力損失係数は水の場合より 30~60% 程度大きいことがわかる。図-16 に油分濃度 (c) と相対圧力損失係数 $((f_e - f_0)/f_0)$ との関係を示す。ここで、 f_0 は上記の Re を使って Blasius の式から算出される圧力損失係数で、エマルションと等温、同流量の水が流れた時の圧力損失係数に相当する。



(图中実線は Blasius の式より求めた曲線)
 図-14 測定部の管摩擦係数 (水の場合)



(图中細線は実験平均線
 太線は Blasius の式による)

図-15 エマルションの管摩擦係数 (A重油)

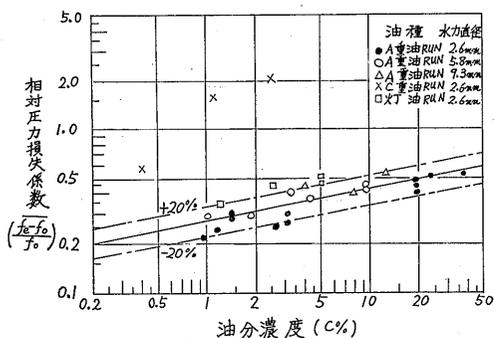


図-16 相対圧力損失係数と油分濃度

f_e はエマルションの圧力損失係数で実測値である。 $\{(f_e - f_0)/f_0\}$ はある温度、油分濃度について流量を変えた時の $\{(f_e - f_0)/f_0\}$ の平均値である。灯油、A 重油のエマルションでは、表-5 に示す範囲では水力直径、油種に影響されず、次式で示される図中の実線に $\pm 20\%$ の精度で一致した。

$$\frac{f_e - f_0}{f_0} = 0.275 \times c^{0.2} \quad (6)$$

なお、詳細に図を眺めると、A 重油より灯油の方がやや相対圧力損失係数が大きく、等価直径が大きいほど相対圧力損失係数が大きいことがわかる。しかしながら、その差はわずかであり、実験値のばらつきも大きいことから明確には断言できない。C 重油エマルションの相対圧力損失係数は他と比べてきわだって大きい。C 重油の粘性が大きいこと、十分にエマルション化できなかったことなどが原因として考えられるが、十分な検討はなされていない。

5. 含油水の音速

5.1 実験方法

図-17 に測定部を示す。測定部は音速測定器(超音波工業 K.K. 製シングアランドユニット UVM-2-5) と試験水槽から成る。試験水槽はアクリル樹脂製であり、これを油水エマルションループに取り付け、下方からエマルションを流入させ、オーバーフローさせるものである。音速測定器の送受信端が水槽中にセットされた。送受信端間の距離はマイクロメータで測定できる。音速測定器はシングアランド方式によるものでブロック線図を図-18 に示す。測定原理を簡単に説明する。すなわち、送信端からエマルション中に超音波パルス(2MHz) が送られ、受信端に到達する。受信して

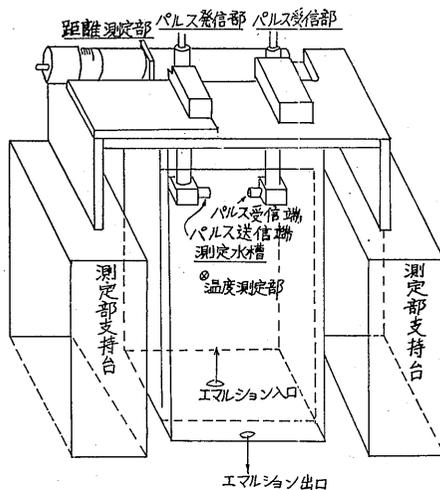


図-17 音速測定部

一定時間(おくれ時間)後に、パルス波高を送信パルスと同じ高さまで増幅して再び送信する。以上を 10^3 回くりかえした時の平均所要時間を求める。次に送受信端間の距離を変えて、同様に所要時間を求め距離の差と時間の差とから音速を算出する方法で、有効桁数4桁の精度が得られる。その時、おくれ時間、測定器内で信号が伝わるのに要する時間等は所要時間の差をとることでキャンセルできる。ただし、その際実際に受信されるパルスは図-19 に示すようにいくつかの peak から成っているし、信号とノイズとを区別する必要から、受信時刻を決定するためあるレベルを設定し、そのレベルに達した時刻を信号が到達した時刻とする。そのレベル(トリガーレベル)は、図示したように第一の peak と第二の peak との中間の高さに設定し、レベル、パルス波高等の変動が所要時間に及ぼす影響を小さくする。また多重回転反射波が完全

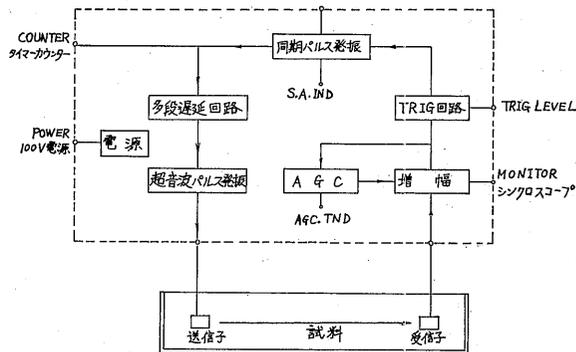


図-18 シングアランドユニット (UVM-2 型)

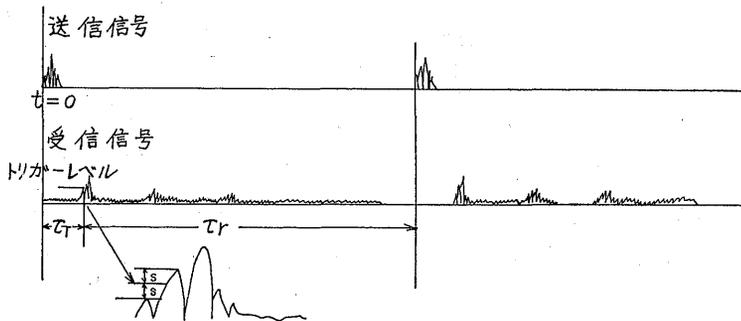


図-19 超音波パルス信号

表-6 音圧減衰率測定 (実験パラメータ)

油種	油分濃度	温度
A 重油	0~30%	室温~50°C
C 重油	0~0.5%	室温~50°C
灯油	0~20%	室温~50°C

周波数 2, 6, 10, 14, 18, 22 MHz

にノイズレベルになる前に次のパルスが発信されると所要時間を測定する際の誤差の原因になるので、時間おくれ回路を使って反射波が減衰するまで一定のおくれ時間をおいてから次のパルスを送信する。次に実験手順を示す。前出の他の実験と同様に所定の油分濃度、温度のエマルジョンを試験水槽に流入させる。水槽中で温度を測定する。水槽は底部での波が表面に達しない程度に充分深い。また表面に浮上した油がたまらないように流量を大きくした。音速測定と同時に水槽から油分濃度測定用試料を計量、採取する。実験パラメータの範囲を表-6 に示す。

5.2 結果と考察

図-20 に温度をパラメータとして、A重油と灯油のエマルジョンの音速と濃度の関係を示す。エマルジョンの音速は、本実験の範囲では油分濃度の増加につれて減少することが示されている。減少の割合は温度油種によって異なる。図中の実線は灯油のエマルジョンの32.5°Cと、A重油のエマルジョンの30.0°C、47.5°Cにおける homogeneous モデルによる音速の推定式である。すなわち、エマルジョンの油分濃度を c とすると、比重量 $\gamma_e = \gamma_w \times (1-c) + \gamma_{oil} \times c$ なる homogeneous な流体と考える。ここで γ_w, γ_{oil} はそれぞれ水と油の比重量である。するとエマルジョンの音速 a_e は通常の homogeneous な流体の音速と同様に、次のように示すことができる。

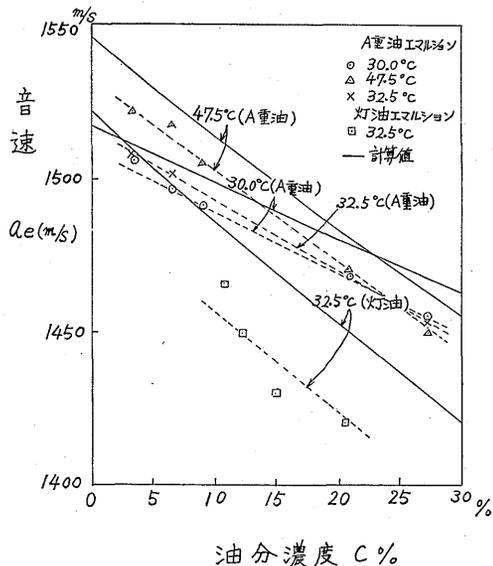


図-20 エマルジョンの音速と油分濃度

$$\begin{aligned}
 a_e &= \sqrt{\frac{gdP}{d\gamma_e}} = \sqrt{\frac{gdP}{(1-c)d\gamma_w + cd\gamma_{oil}}} \\
 &= 1 / \sqrt{(1-c) \left(g \frac{dP}{d\gamma_w} \right) + c \left(g \frac{dP}{d\gamma_{oil}} \right)} \\
 &= 1 / \sqrt{(1-c) a_w^2 + c a_{oil}^2} \\
 &= a_{oil} / \sqrt{c + \beta^2(1-c)} \quad (7)
 \end{aligned}$$

ただし、 $\beta = a_{oil} / a_w$

ここで a_{oil}, a_w はそれぞれ油、水の音速である。図-20 において、A重油の各温度におけるエマルジョンの音速は、homogeneous モデルより 1% ほど低い値を示している。灯油のエマルジョンの音速と homogeneous モデルとのへだたりはA重油エマルジョンの場合より大きく、2% 程度であった。しかしながら両方の場合において、homogeneous モデルは大体の傾向を

よく表わしている。特に、A重油エマルションの場合、油分濃度 20% 強のあたりで 30°C の時の音速と、47.5°C の時の音速が同程度になり、それ以上濃厚なエマルションでは、30°C の時の音速のほうが 47.5°C の時の音速より大きくなることなどは、モデルによる理論値と実験値とが良く一致している。

(7) 式より、 $\beta < 1$ だから

$$\frac{da_e}{dc} = -\frac{a_{oil}}{2}(1-\beta^2)\{c+\beta^2(1-c)\}^{-3/2} < 0$$

となり、音速は油分濃度に対して単調減少になる。このことも実験結果とよく一致している。

図-21 に、油分濃度をパラメータとしてA重油、C重油、灯油の三種のエマルションの音速と温度の関係を示す。参考として水の音速をあわせ示す。濃度の希薄なエマルションの音速は、水の音速と同様に温度の上昇とともに増加する。特に、C重油エマルションの 0.103% の場合は水の音速とほとんど同じ温度依存性を示す。一方、A重油エマルションで、油分濃度が約 20% の時の音速は、温度が変化してもほとんど一定であり、約 27% の時の音速は温度が上昇すると逆に減少する。これは 図-5 にみられるように、水と石油類の音速の温度による変化の様相が逆の傾向を示すためであろう。すなわち、希薄なエマルションは水に似た性質を示し、濃厚なエマルションは油に似た性質を示すためであろう。以上のことを homogeneous モデルを使って検討する。

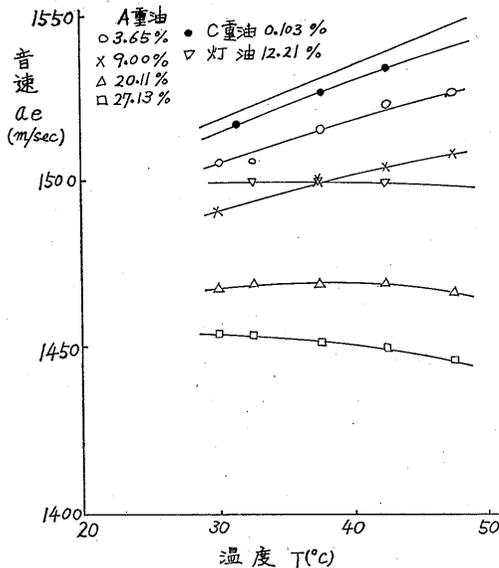


図-21 エマルションの音速と温度

(7) 式より

$$da_e = \frac{\{c+(1-c)\beta^2 da_{oil} - a_0(1-c)\beta d\beta\}}{\{c+(1-c)\beta^2\}^{3/2}}$$

一方、 $\beta = a_{oil}/a_w$ だから

$$a_{oil}\beta d\beta = \beta \frac{a_{oil}a_w da_{oil} - a_{oil}^2 da_w}{a_w^2} = \beta^2 da_{oil} - \beta^3 da_w$$

したがって

$$\frac{da_e}{dT} = \frac{c \frac{da_{oil}}{dT} + \beta^3(1-c) \frac{da_w}{dT}}{\{c+(1-c)\beta^2\}^{3/2}} \quad (8)$$

となる。(8)式で $da_e/dT=0$ なる条件を求めると

$$c = \frac{\beta^3 \frac{da_w}{dT}}{\beta^3 \frac{da_w}{dT} - \frac{da_{oil}}{dT}}$$

となる。ここで、図-5 中の実線で水とA重油の音速を近似すると、

$$\frac{da_{oil}}{dT} = -3.6 \text{ m/s}^\circ\text{C} \quad \frac{da_w}{dT} = 2.2 \text{ m/s}^\circ\text{C}$$

$$\beta = a_{oil}/a_w = 0.858 \quad (\text{at } 40^\circ\text{C})$$

となり

$$c = \frac{0.858^3 \times 2.2}{0.858^3 \times 2.2 + 3.6} = 0.266$$

すなわち、大略 27% 以上の油分濃度のエマルションの音速は、温度が上昇すると逆に減少することになり実験結果と大体一致する。

以上に述べたように、エマルションの音速は、ほぼ homogeneous モデルで説明できる。これはA重油・灯油等の比重、音速などの物性値が水の物性値と同程度の大きさであるため、熱的、流力的に平衡がくずれ難いためであろうと考えられる。

6. 含油水の音圧減衰率

6.1 実験方法

測定部は音圧減衰率測定器(超音波工業 K.K. 製 US スペクトロメータ UAC-5 型)と試験水槽とから成る。試験水槽は 図-17 に示されたもので、音速測定の時と同じものである。同様に、水槽中に超音波パルス送受信端がセットされ、双方の間の距離はマイクロメータで測定できる。音圧減衰率測定器は単一パルス法によるものであり、ブロック線図を 図-22 に示す。測定原理を簡単に述べる。すなわち、所定の周波数の超音波パルスがエマルション中に送られて受信端に達する。受信された信号はシンクロスコープ(岩崎通信 K.K.

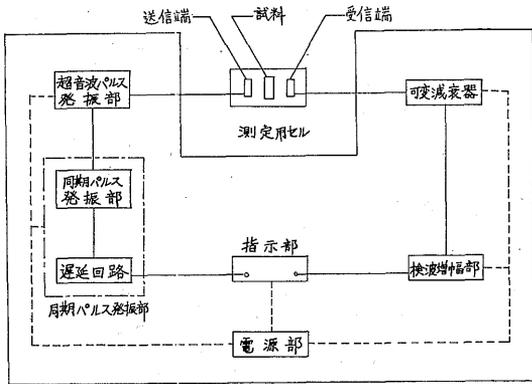


図-22 US スペクトロメータ (UAC-5 型)

製 SS-5050) で観測し、受信波の最初のパルス波高を測定する。次に送受信端間の距離を変えて同様に最初の受信波の波高を測定する。さらに減衰器を調節して前回の波高と同じ高さにする。その時の減衰器の目盛りの差と距離の差とから減衰率を測定する。本測定法は二度のデータを差し引くことによって、送受信端とエマルションとの界面での散乱による音圧減衰をキャンセルできる点が優れている。実験手順は音速測定の場合と同様である。測定は全て二回行い平均値を採用した。しかし二回の測定値が 1 dB/4 cm より大きい時はさらに測定回数を重ねた。実験パラメータの範囲を表-6 に示す。

6.2 結果と考察

図-23 に、油分を混合した直後からの A 重油エマルションの音圧減衰率と経過時間との関係を示す。6, 10MHz で油分濃度 6.32% と 11.49% の場合である。図で見られるように、混合後 120 分以上経過する

と音圧減衰率はほぼ一定になる。図-2 では、混合直後から40分程度で油分濃度が定常状態になるが音圧減衰率は油分濃度とともに油粒径に対しても敏感に変化するため、油粒が音圧減衰率測定上一定とみなされるまで微細になるには、さらに長い時間を必要とすることを示している。これは減衰率が定常に達した後にエマルションの温度を変化させると、減衰率も変化するし、元の温度に戻した時の減衰率の再現性も良いことから明らかである。

図-24 の 6, 10, 18 MHz 三種類の超音波について、油分濃度 3.65%, 11.49%, 20.61% の A 重油エマルションでの音圧減衰率と温度の関係を示す。低周波の超音波 (6 MHz) に対しては、油分濃度が高くなるほど温度上昇に伴う減衰率の増加が大きくなる。一方、10, 18 MHz の場合は油分濃度 11.49% の時に温度上昇による減衰率変化が最大であるがその時 10 MHz と 18 MHz とでは減衰率の温度による変化の方向は逆である。より油分濃度が増すと減衰率は温度によってほとんど変化しなくなる。

図-25 に 32.5°C, 42.5°C の時の油分濃度 3.65%, 11.49%, 20.61%, 27.13% の A 重油エマルションでの音圧減衰率と周波数の関係を示す。本実験範囲では、音圧減衰率はある周波数で最大値になる。最大値になる時の周波数は油分濃度が高くなるにつれて低い値に移行する。最大値を与える周波数より低い周波数の超音波の音圧減衰率は、油分濃度の増加とともに増加するが、それ以上の周波数の超音波の音圧減衰率は、油分濃度との間に一定の関係はみられない。なお、今実験での油粒径は 20μ 以下である。一方、超音波の波長は約 750μ~60μ の範囲である。最大値を与える

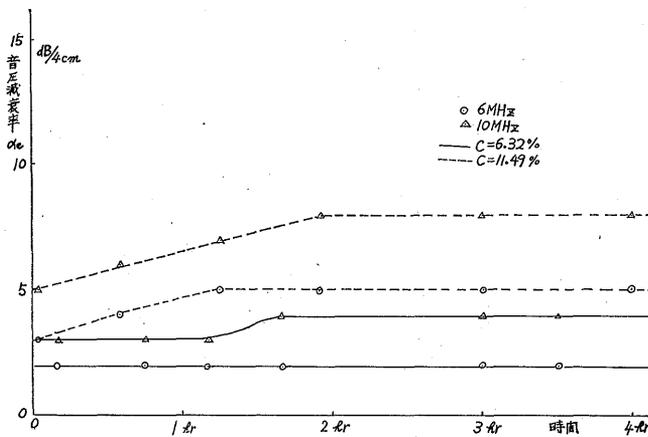


図-23 音圧減衰率の経時変化

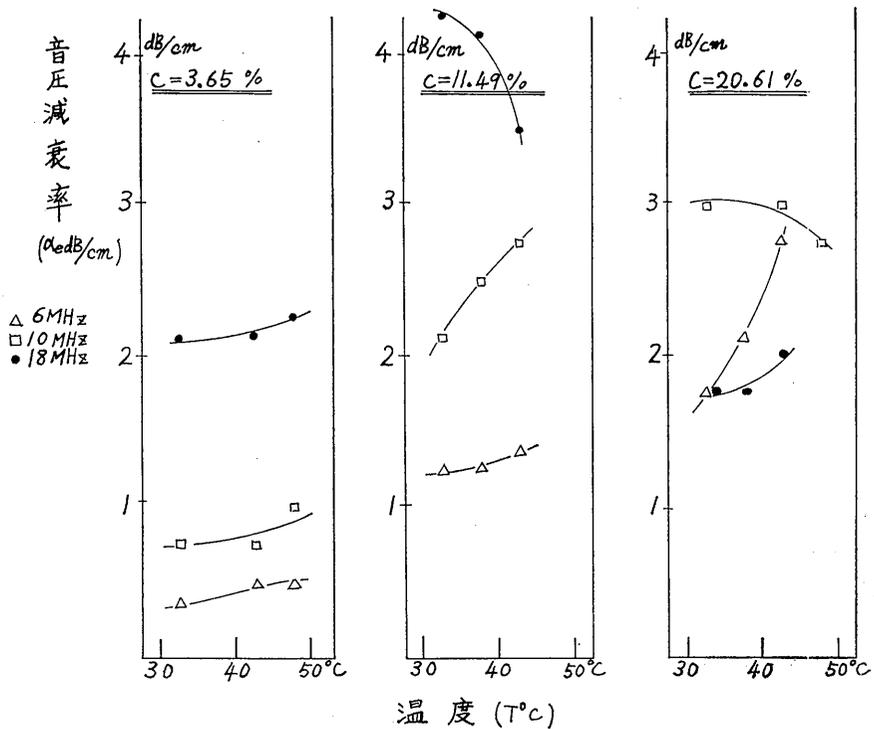


図-24 エマルションの音圧減衰率と温度

周波数は 14MHz 以上であり、波長は約 100μ 以下程度である。

図-26 に 32.5°C, 42.5°C の時の 2, 6, 10MHz の周波数の超音波のA重油エマルションでの音圧減衰率と油分濃度の関係を示す。図に示されたように音圧減

衰率は油分濃度の増加につれて単調に増加する。油分濃度 0~10% 程度の範囲では音圧減衰率と油分濃度は直線関係にあるが、それ以上濃厚なエマルションでは、飽和に達したように音圧減衰率の油分濃度に対する増加率は減少する。

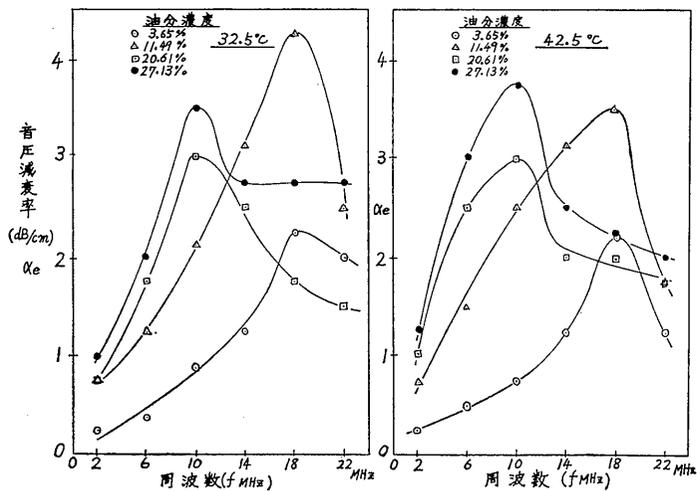


図-25 エマルションの音圧減衰率と超音波の周波数

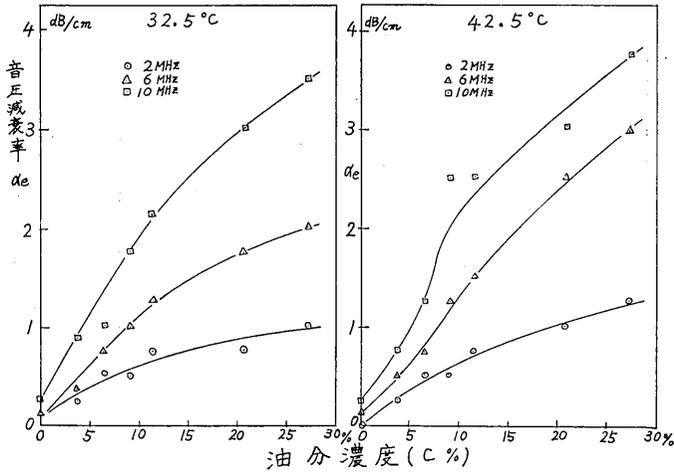


図-26 エマルションの音圧減衰率と油分濃度 (2~10MHz)

さて、水の音圧減衰率 (α_0) とエマルションの音圧減衰率 (α_e) との関係を明らかにするために、相対音圧減衰率として $(\alpha_e - \alpha_0) / \alpha_0$ を定義する。

図-27 に、32.5°C、42.5°C の A 重油エマルションの相対音圧減衰率と油分濃度との関係を示す。図中の折れ線は、32.5°C のグラフと 42.5°C のグラフとで同じものであり、両方の温度において、ほぼ ±10% の精度で実験値と一致する。相対音圧減衰率は温度、周波数に関係なく一つの傾向を持つことがわかる。ただし、2 MHz の場合の水の音圧減衰率は値が小さいために測定できなかったため、32.5°C、油分濃度 27.13% の時、6 MHz、10 MHz の場合と同様に、 $(\alpha_e - \alpha_0) / \alpha_0 = 14$ となるように $\alpha_0 = 0.071 \text{ dB/cm}$ と

し、42.5°C でも値が変わらないものとした。

図-28 に、14、18、22 MHz の超音波の 32.5°C、42.5°C の A 重油エマルションに対する音圧減衰率と油分濃度との関係を示す。図に見られるように比較的低い周波数の場合 (図-25) とは異なり、油分濃度の増加につれて音圧減衰率は単調には増加しない。特に濃厚なエマルション (油分濃度 20% 以上) では、むしろ希薄なエマルション (油分濃度 10% 以下) での音圧減衰率より低い減衰率が測定された。

図-29 に、2、6、10、14、18、22 MHz の超音波の、32.5°C の A 重油エマルションにおける相対音圧減衰率と油分濃度との関係を示す。油分濃度 12% 以下の範囲では、22 MHz の場合を除いて周波数により顕著

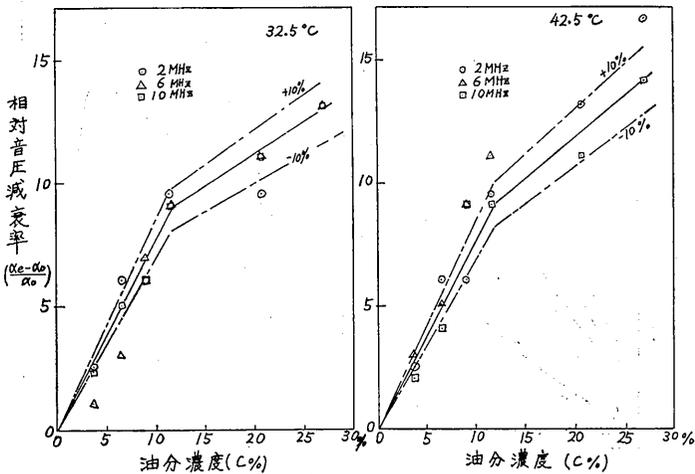


図-27 相対音圧減衰率と油分濃度

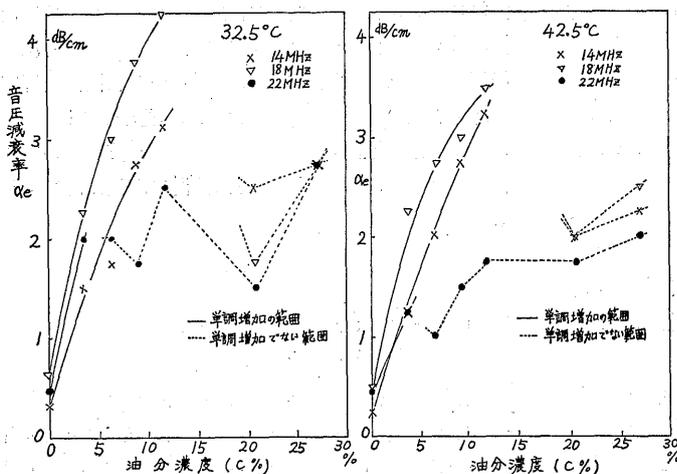


図-28 エマルションの音圧減衰率と油分濃度 (14~22MHz)

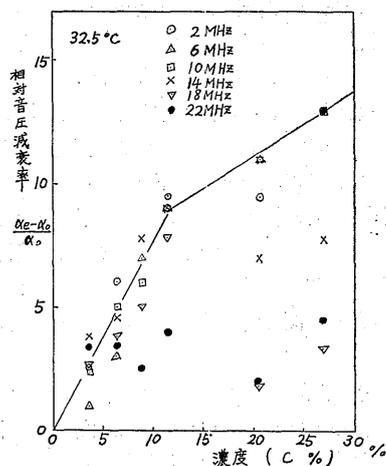


図-29 相対音圧減衰率と油分濃度

な違いは見られない。しかしながら、油分濃度 20% 以上では、2, 6, 10MHz の相対音圧減衰率の油分濃度に対する増加率も減少してはいるが、14, 18MHz の場合は油分濃度が増加するとかえって相対音圧減衰率は減少してしまう。22MHz の場合は油分濃度 10% 以下でも似たような傾向が見られる。

図-30 に、2, 6, 10, 18MHz, 32.5°C の時の音圧減衰率と油分濃度との関係を、A重油と灯油のエマルションの場合を併せ示す。2, 6MHz の超音波の音圧減衰率は、A重油のエマルションにおいても灯油の場合でも大体の傾向は似ている。しかしながら、10MHz の場合、A重油エマルションでは油分濃度が増加すれば音圧減衰率は単調に増加するが、灯油エマルション

では異なる。また 18MHz の場合、灯油エマルションの音圧減衰率が特に小さいのが特徴的である。一般に粉体などの混合物の音圧減衰率は次式で示されることが知られている⁵⁾。

$$\alpha = Af + Bf^4$$

すなわち粘性、熱伝導等での減衰を示す第一項と、粒子による散乱を示す第二項との和で表わされる。しかしながら、含油水の場合は、上記の如く周波数 (f) による減衰率の変化は一様ではなかった。測定法、流動条件等、今後の検討が必要である。

6. むすび

高油分濃度含油水の電気抵抗、流動抵抗、音速、音

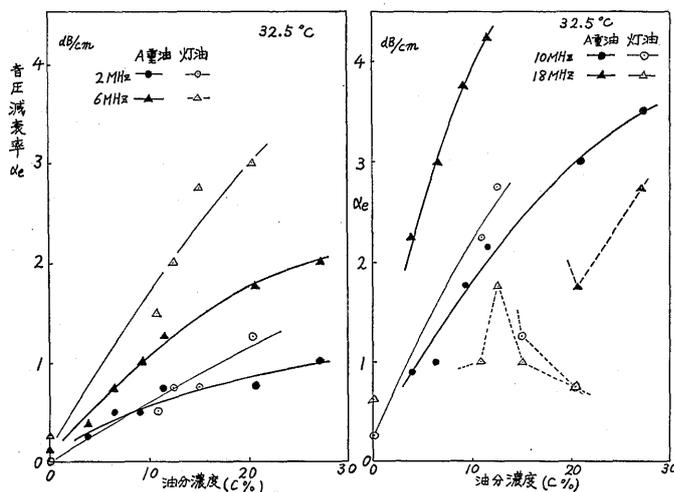


図-30 エマルションの音圧減衰率と油分濃度 (A重油・灯油)

