

回転振動粘度計の減衰率新計測法

佐藤智明・小口幸成・高石吉登

機械工学科

New Measurement Method of the Decrements for the Oscillating-Body Viscometers

Tomoaki Sato, Kosei Oguchi and Yoshinori Takaishi

Abstract

Oscillating-body viscometers have extensively been used to measure the viscosity of fluids because of their simple design and high precision. However, the assembly for measuring oscillating-decrements has always been very large, and the conventional methods have been unable to measure the continuous amplitude data. We have developed a new method for detecting the decrements for the oscillating-body viscometers using polarizers. An oscillating-cylinder viscometer with polarizer-system has been designed, and then tested by measuring the liquid viscosity of acetone, methanol and water. The preliminary results show that the new method is applicable for obtaining the continuous amplitude data. The paper also concludes that a viscometer with the new method proposed can be assembled more compactly.

Key Words: Fluid, Measurement, Viscosity, Viscometer, Polarizer

1. 緒 言

流体の基本的な物性の一つである粘度は、これまで様々な物質について研究され、利用されてきた。そしてその測定法については、液体、気体あるいはニュートン流体、非ニュートン流体など被測定物の性質に応じて様々な方法が開発されている。その中に、試料流体中に細線によって吊された回転振動体の減衰率を計測して粘度を算出する回転振動法がある。この測定法は絶対測定が可能であるということ、また粘度既知の物質をあらかじめ計測し装置定数等を決定することで、密度のデータを必要とせずに粘度測定が可能であるということなどから液体、気体を問わず使用されてきた。振動体には球、円筒、カップ¹⁾、円盤^{2,3,4)}などが被測定物の性質に応じて使い分けられる。とくに物性の状態が極めて不安定な臨界点近傍の粘度測定では、振動体に円盤を用い流体との接触面を水平にすることで、重力による密度分布の影響を少なくした回転振動円盤法が有力視されている。

しかしこれまでの回転振動法を用いた実験装置では振動角度の連続したデータを計測するこ

とが不可能であり、減衰率の測定が非常に困難であった。また装置の特質上、装置全体が大型になる難点を持っていた。そこで本研究では振動角度の連続測定を可能にし、さらに装置の小型化に貢献できる新しい回転振動減衰率計測法を開発したのでここに報告する。

2. 従来の減衰率測定法^{1,2,3,4)}

従来一般に使われてきた減衰率測定法を Fig.1 に示す。この方法ではレーザー光源などの単一の光源から発せられた光を振動体に取り付けた鏡に照射し、その反射光を試料容器外部へ導きスクリーンに投影させる。そして、その光点の移動する振幅をスケールで直接読むか、あるいはスクリーン上に設けたセンサーを通過した時間を計測することによって間接的に振幅を算出する。しかし、この方法では、振動角度の連続した計測は不可能である。また、試料容器の外部へ光を導く途中ガラス窓を通過する際に屈折の影響を受けて測定精度を損なう可能性がある。さらに、外部にスクリーンを設けなければいけないことから装置全体が非常に大型となり、アライメントの上でも困難を要するなどの問題点

があった。

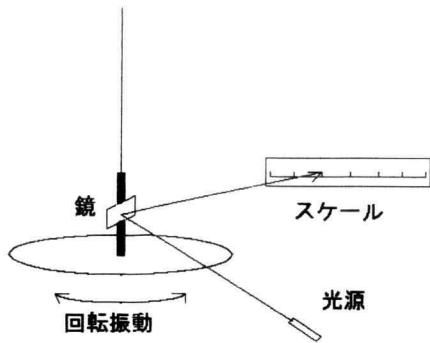
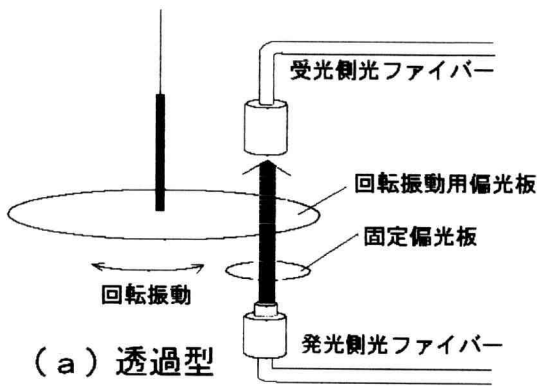
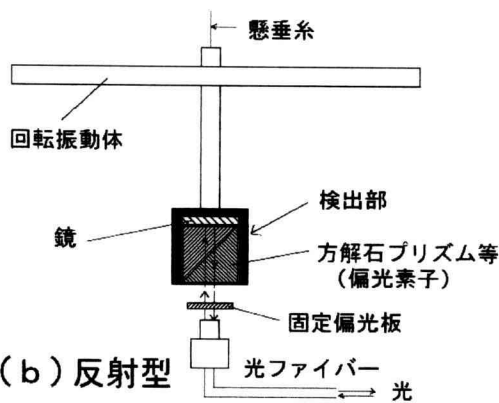


Fig.1 従来の減衰率計測法



(a) 透過型



(b) 反射型

Fig.2 偏光計測法

3. 偏光計測法

本研究では前節の問題を解決するために偏光円盤を用いた減衰率新計測法を考案した。本計測法は2枚の偏光板を透過する光量はその2枚の相対ずれ角に応じて変化する性質を利用する。本研究では光量検出部に次の2つの構造を提案する。第1は Fig.2(a) のように回転振動体自体に偏光円盤を用い光を透過させ、その透過光量を計測する透過型である。第2は Fig.2(b) のよ

うに回転振動体に本体とは別に偏光素子を取り付け、その偏光面に垂直方向から偏光を照射し、偏光素子を通過後、検出部奥に設けた鏡に反射された光の光量を測定する反射型である。いずれの場合も振動体の回転角度によって変化する透過光量（あるいは反射光量）を電圧変化として検出し、その電圧変化の時系列データを解析することによって回転振動体の連続した角度データを得ることができる。以下に計測原理を述べる。

3.1 偏光計測法の原理

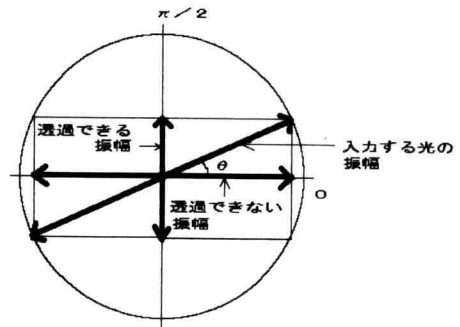


Fig.3 偏光の振幅の増減とずれ角

Fig.3 に示すように基準点を最小透過光量の位置にし、それからの偏光のずれ角を θ ($\theta = \pi/2$ のとき最大透過光量となる) とするとき、2枚の偏光板を透過する光量 E は最大透過光量を E_M とするとマルスの法則⁹⁾より次式で表せる。

$$E = E_M \sin^2(\theta) \tag{1}$$

回転減衰振動する偏光円盤の透過光量 E は以下のようなになる。

まず減衰振動は、

$$\theta = a \cdot \exp\left(\frac{\Delta}{T} t\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \tag{2}$$

で表せられる。ただし、

- a : 初期振幅
- t : 時間
- T : 周期
- R : 1 周期経過後の減衰比
- Δ : 対数減衰率 ($\Delta = \log R$)

ここで、式(2)を式(1)に代入すると、Eは次式になる。

$$E = E_M \sin^2 \left\{ a \cdot \exp \left(\frac{\Delta}{T} t \right) \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \right\} \quad (3)$$

さらに振動の中心を b とすると、Eは次式によって表わせられる。

$$E = E_M \sin^2 \left\{ a \cdot \exp \left(\frac{\Delta}{T} t \right) \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) + b \right\} \quad (4)$$

3. 2 減衰率の解析

実際に計測されるデータは式(4)で表される Fig.4 のような非線形の理論曲線になる。

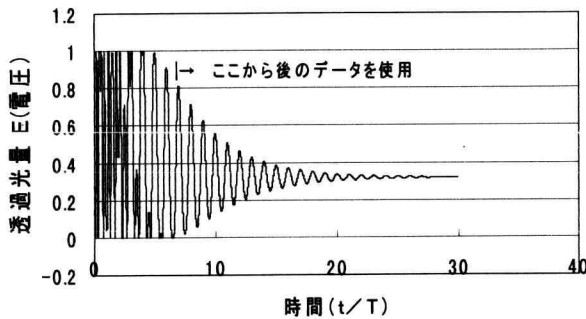


Fig.4 光量(電圧)データの理論曲線

しかし回転角 θ が $\pi/2$ 以上と 0 以下では透過光量の増減が逆転してしまいこのデータから直接減衰率を求めるのは困難である。そこで、使用するデータ範囲を Fig.4 に矢印で示したように、 $0 < \theta < \pi/2$ 、すなわち $0 < E < E_M$ の範囲に振動が収まるようになった後のデータに限定して (b は $\pi/4$ 付近にあるのが望ましい)、透過光量変化として得られるこの電圧データを用い、次のようにして回転位置のデータを得る。

式(1)より

$$\frac{E}{E_M} = \sin^2 \theta \quad (5)$$

式(5)より θ を求めると、

$$\theta = \frac{\cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{E}{E_M} \right)}{2} \quad (6)$$

ここで E_M は全入力データ中最大の値を用いる。Fig.4 で矢印で示した位置より後の全データについて式(6)による変換を行うと、Fig.5 に示すように振幅の増減が直接わかる回転位置データが得られる。

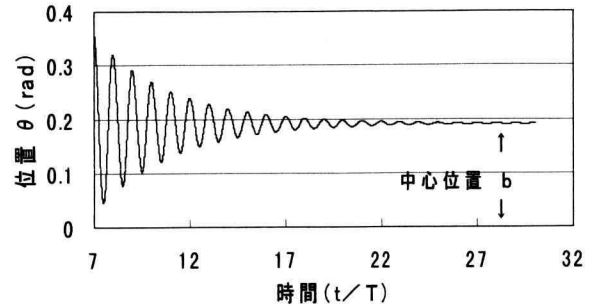


Fig.5 位置データ

また、減衰率の確定はこの連続したデータを使って様々な解析方法によって可能であるが、適当な解析方法は今後の検討に託すこととする。

今回行った次節の液体の粘度計測では簡易的に次のようにして減衰率を算出した。

まずはじめに光量データより振動の終了した時点の値を振動の中心 b とする。この b 点を中心に振動が行われるものとして、Fig.5 より Fig.6 のように純粋な振幅データを得る。

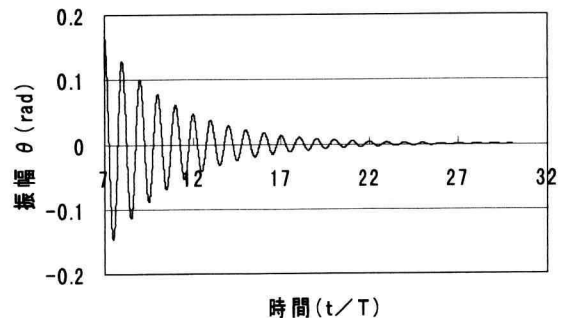


Fig.6 振幅データ

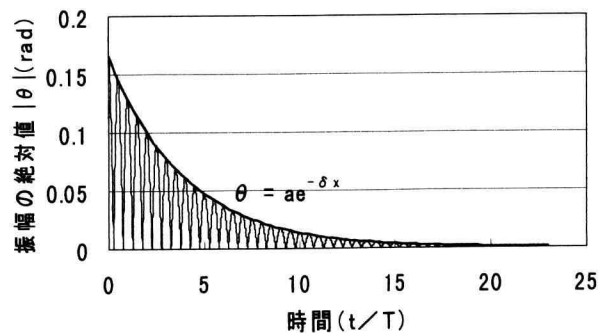


Fig.7 振幅の絶対値データ

次に振幅データの絶対値をとり、マイナスの振幅を反転させ、Fig.7を得る。振幅の頂点の値だけを用いて最小二乗法によって次式の指数近似曲線を求め、その指数の係数の値として減衰率 δ を求める。

$$\theta = a \cdot e^{-\delta x} \quad (7)$$

3.3 粘度の算出

対数減衰率 Δ ($\Delta = \delta \cdot T$) から粘度を算出する方法は回転振動体の形状に応じて様々なが使われている。一般に流体の粘度と減衰率との関係は次式で与えられる。

$$\eta = K \left(\frac{\Delta}{T} - \frac{\Delta_0}{T_0} \right) \quad (8)$$

ここで、 Δ_0 , T_0 はそれぞれ真空中の対数減衰率および周期である。また K は装置定数で振動体の形状により以下のような式が提案されている。

(a) Maxwell 型 (狭い固定板間に挟まれた振動円盤)

$$K = \frac{4Id}{R^4} \quad (9)$$

ここで、 I は振動体の慣性モーメント、 R は円盤の半径、 d は試料が挟まれる振動円盤と固定板間の隙間である。

(b) 円筒型

$$K = \frac{I}{2\pi h} \left(\frac{R_1^2 - R_2^2}{R_1^2 R_2^2} \right) \quad (10)$$

ここで、 h は振動円筒の高さ、 R_1 は振動円筒の半径、 R_2 は円筒試料容器の内側半径である。

4. 偏光計測法を用いた液体の粘度測定実験

偏光計測法の有効性を確認するために本法を採用した実験装置を製作し、円筒法による液体の粘度測定を行った。

4.1 実験装置

本実験装置の概要を Fig.8 に示す。Fig.9 に回転振動部の外観を写真で示す。

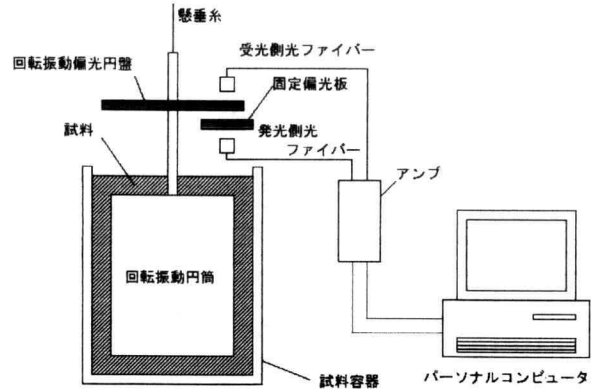


Fig.8 実験装置の概要

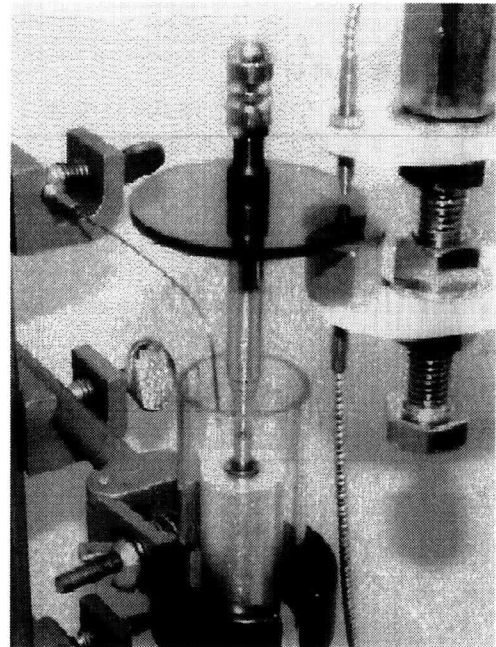


Fig.9 回転振動部外観

円筒の上端部へ軸を伸ばしその部分に偏光円盤を取り付ける。試料容器に試料を円筒部が全て隠れるまで入れる。上部の偏光円盤部は大気中に置き、その円盤を挟む形で発光側光ファイバーと固定偏光板、そして受光側光ファイバーを設置する。受光された光量変化は電圧変化として検出され、アンプ、AD変換ボードを介してパーソナルコンピュータに読み込まれる。

4.2 実験方法

被測定物には水、メタノールそしてアセトンの3種類を用い、それぞれについて減衰率を計測する。水とアセトンについて文献値⁶⁾からの粘度の値を用い、次に示すように式(8)を変形した粘度 η と減衰率 δ の関係式(11)を求め、これを本装置の検定式とする。

式(8)において、

$$\frac{\Delta}{T} = \delta \quad \text{とし,} \quad \frac{\Delta_0}{T_0} \quad \text{を定数 } B \text{ とすれば,}$$

$$\eta = A \cdot \delta - B \quad (A, B \text{ は装置定数}) \quad (11)$$

と見なすことができる。

粘度が水とアセトンの間にあるメタノールの減衰率値から検定式を用い粘度の値を算出し、その値とメタノールの文献値⁶⁾とを比較することで、測定精度を確認した。

4. 3 実験結果

実験結果を次に示す。Fig.10,11 および 12 にそれぞれアセトン、メタノールおよび水の振幅データを示す。Fig.13,14 および 15 にはそれぞれの流体について任意に決めたある振幅の頂点から、正の振幅と負の振幅の頂点の絶対値を示す。それぞれを交互に 10 周期まで使い、その絶対値データを近似する減衰曲線を実線で示した。

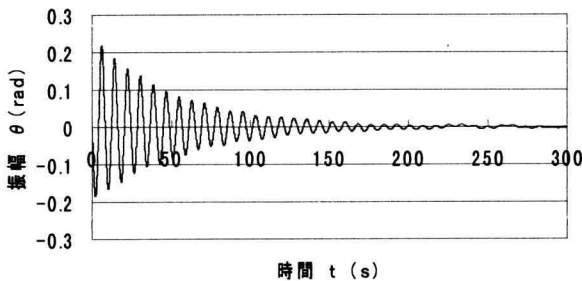


Fig.10 アセトンの振幅データ

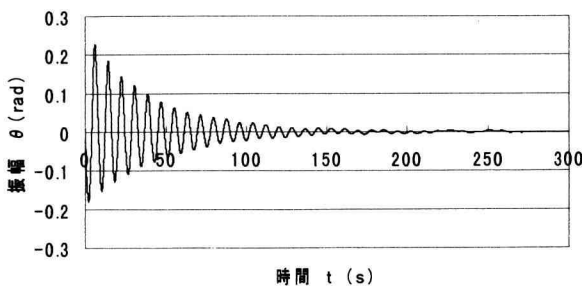


Fig.11 メタノールの振幅データ

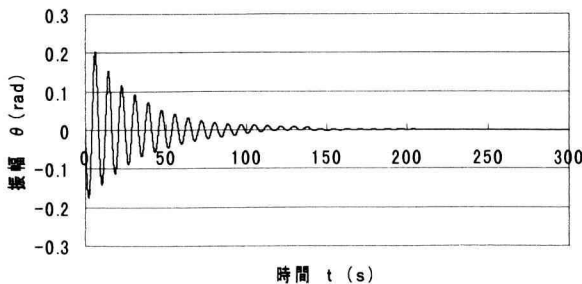


Fig.12 水の振幅データ

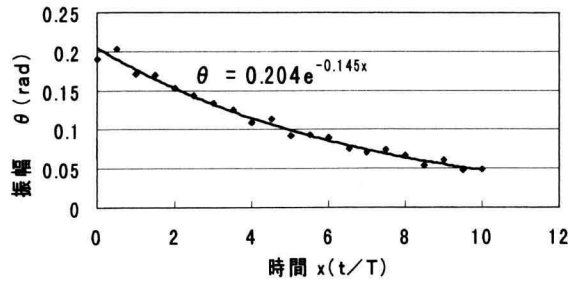


Fig.13 アセトンの減衰曲線

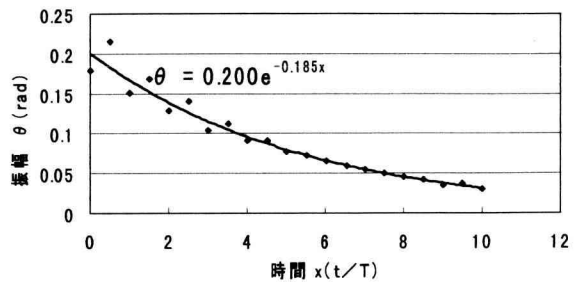


Fig.14 メタノールの減衰曲線

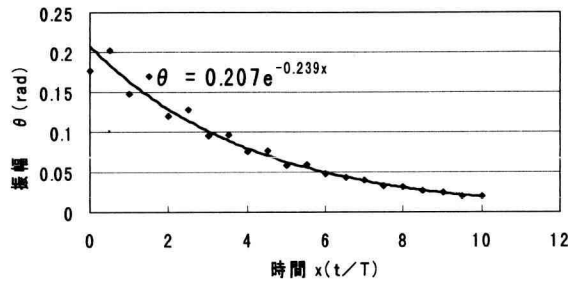


Fig.15 水の減衰曲線

4. 4 検討

Fig.10,11 および 12 については、アセトン、メタノールおよび水と順に粘度が高くなるに従って、振動の消滅が早くなっていることが分かる。さらに Fig.13,14 および 15 については振動の前半では交互にプロットされた正の振幅と負の振幅で振幅が異なる値を示している。近似曲線はちょうどその中間の位置に存在する。その差は時間の経過とともに少なくなり、後半ではほぼ等しく減衰している。このことは振動のはじめの方と後の方で振動の中心が変化していることを意味する。これは一般的に、振動の初期状態では振動をはじめた側と反対の側に振動の中心が移動することが知られており⁷⁾、この現象がデータに現れていると考えられる。本実験では最小二乗法を用いて近似曲線を作成しているので、減衰率の算出に対してはこの影響は相殺されるため小さくなると考えられる。そこであえて初期の方の振動データも解析に用いることにした。

Table 1 に各流体の指数近似曲線の減衰率 δ の値を示し、文献値⁶⁾から換算した粘度を示した。

アセトンと水のデータから Fig.16 のように式 (11) の形の検定式を作成し、その式からメタノールの粘度を算出した。その値を実験値として Table 2 においてメタノールの文献値⁶⁾と比較した。

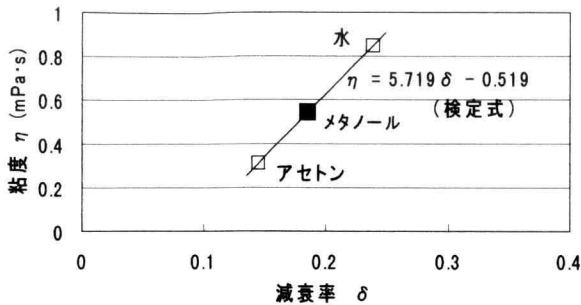


Fig.16 粘度と減衰率の比較

Table 2 に示すように本実験の実験値は文献値⁶⁾に対して-1%という偏差で一致した。簡易実験装置のため加工精度が粗悪であるにも関わらず、十分満足のいくの精度で計測が行われた。

Table 1.各物質の粘度と減衰率の比較

物質	Acetone	Methanol	Water
温度 (°C)	24.8	26.8	24.8
減衰率	0.145	0.185	0.239
粘度 (mPa·s)	0.3106	0.5445	0.8481

Table 2.メタノールの文献値と実験値の比較

	文献値	実験値	偏差 (%)
粘度 (mPa·s)	0.5445	0.539	-1.01

5. 結 言

本研究において、回転振動法による粘度の測定装置に使用可能な偏光板を用いた減衰率新計測法を考案し、減衰振動の連続的な振幅計測を可能にする方法を検証した。粘度既知の物質の粘度を測定してこの新計測法の有効性を確認した。また新計測法によって、装置の小型化にも貢献できることがわかった。

参考文献

- 1) Kestin,J.,Three Papers on The Theory of the Oscillating Cup Viscometer,Brown Univ.Report,AF-891/4 (1954) .
- 2) Azpeitia,A.G. and Newell,G.F.,Theory of Oscillation Type Viscometer IV .AThick,Disk,BrownUniv.Report, AF-891/9 (1954) .
- 3) 高橋 (満),横山,高橋 (信),R22-R152a 非共沸混合気体の粘性率,日本冷凍協会論文集 ,Vol.4,No.3, (1987) ,p.25.
- 4) Macwood,G.E,The Theory of The Measurement of Viscosity and Slip of Fluids By The Oscillating Disk Method, Physica V,no.5, (1938) ,p.374.
- 5) 小出昭一郎,物理学,裳華房,(1983) ,p231.
- 6) 国立天文台編,理科年表,丸善,(1991) ,p447.
- 7) Kestin,J. and Wakeham,W.A.,Transport Properties of Fluids:Thermal Conductivity,Viscosity,and Diffusion Coefficient,Purdue Research Foundation, (1988) ,p80.