

粘度測定のおしり

<ビスコメータを使っていたいただくために>



目次

はじめに.....	1
粘性とは.....	2
粘度とは.....	3
粘度の単位：パスカル秒.....	6
動粘度の単位：平方メートル毎秒.....	7
ニュートン流体と非ニュートン流体.....	8
見かけの粘度.....	12
温度が変わると粘度が変わる.....	13
時間がたつと粘度が変わる.....	14
粘度計にはどんな種類があるか.....	15
換算.....	20
ビスコメータ.....	21
測定例.....	22

粘度測定のおしおりに

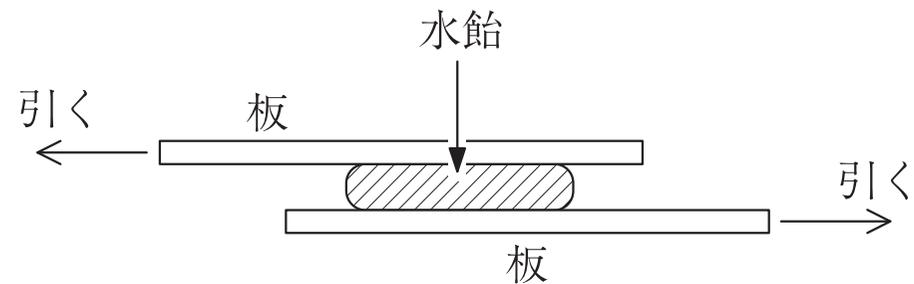
はじめに

ビスコメータをお使いいただく前に、粘性とはどういうことか、ビスコメータの示すパスカル秒という単位はどのようにして決められたものか、粘性にはいろいろな種類があること、ビスコメータの他にどんな粘度計が使われているか、それらとビスコメータの比較など、粘度測定に関する一般的な事項を解説します。

粘性とは

第1図のように、2枚の板の間に水飴を入れ、板を引いてずらそうとするには力が必要です。これは水飴に**粘性**があるからです。濃い水飴は薄い水飴より大きな力が必要です。濃い水飴の方が薄い水飴より**粘い**または**粘度が高い**と言います。

粘い性質すなわち粘性とは、流体の内部で、互いに接している部分に相対速度があるとき、運動に抵抗が働いて、速度の速いほうは、それに接する遅いほうを加速し、遅いほうは速いほうを減速させようとする性質です。



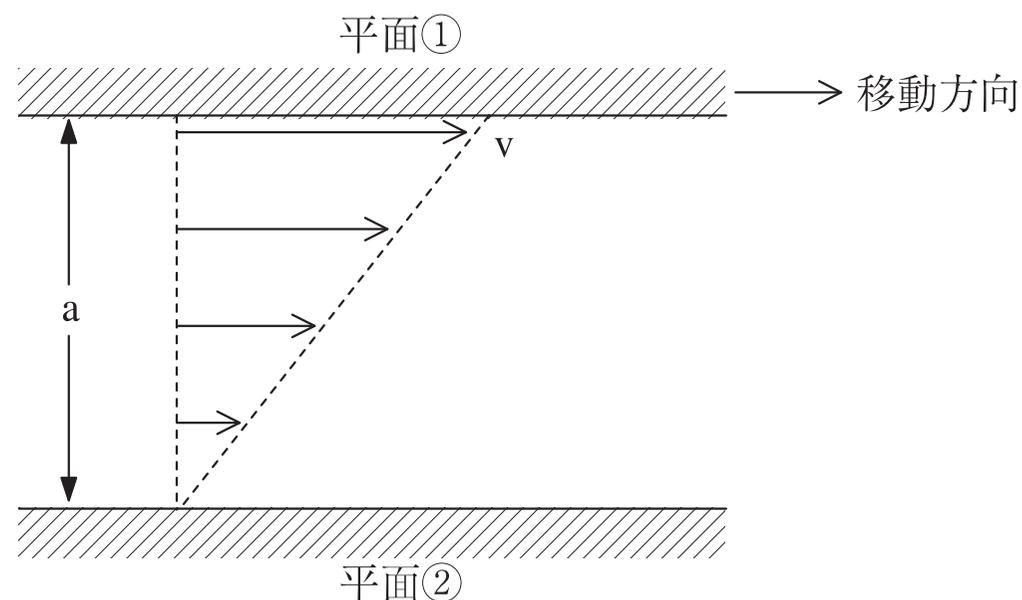
第1図

粘度とは

粘いとか、さらさらしているということを数値で表わしたものが**粘度**です。粘度はどのように決められるかを説明します。

第2図のように、平行な2枚の平面板の間に液体が満されていて、平面②は静止し、平面①が矢印の方向に一定速度 v で動いているとします。

2平面間の距離 a は常に一定で、平面に接している部分の液体は面に粘着して面と一緒に動くとするれば、液体の各部の速度は、平面①では v 、平面②では 0 になります。



第2図

さらに、速度があまり大きくなく、渦のできない範囲では液体は面と平行に層状に流れ、速度は平面②からの距離に比例して大きくなるので、第2図の点線のような速度分布になります。

距離 a の間で速度が 0 から v まで変化するので、単位距離あたりの速度の変化を D とすれば、以下の式となります。

$$D = \frac{v}{a} \quad \text{単位は } S^{-1}$$

D は速度の勾配を表わす量で、 D が大きいほど速度の変化は大きいことを示します。 D を**ずり速度** (shear rate) と言います。

前に述べたように、流体内に速度の勾配があるとき、速度の速い部分はそれに接する遅い部分の流体を加速させようとする力（または速度の遅い部分の流体はそれに接する速い部分の流体を減速させようとする力）、つまり粘性による力が生じます。この力 F は、ずり速度 D に比例し、また速度の異なる2つの層が互いに接する面積 A に比例します。式にすると、以下のようになります。

$$F = \eta AD$$

この式の比例定数 η を**粘度**（または**粘性係数**）と言います。またこの式を**ニュートンの法則**と呼びます。

ずり速度 D と接触面積 A が一定だと、粘度 η が大きい液体ほど接触面に作用する力が大きくなります。すなわち η の大きい液体ほど粘いからその η の値で液体の粘さの程度を数量的に表わせます。

粘度の単位： パスカル秒

粘度の単位には**パスカル秒**を使います。単位記号は Pa·s です。粘度が 1 デシパスカル秒の液体では、距離 1 cm あたりの速度の変化量が 1 cm/s であるような速度の勾配、つまり $D=1 \text{ s}^{-1}$ のずり速度のとき、単位面積 1 cm^2 あたりに作用する力が 10^{-5} N になります。粘度 10 デシパスカル秒の液体では、同じ状態で作用する力が 10 倍になります。

1 デシパスカル秒の 1/100 を 1 ミリパスカル秒 (mPa·s) と言います。

$$100 \text{ mPa}\cdot\text{s} = 1 \text{ dPa}\cdot\text{s}$$

実例をあげると、水の粘度が約 1 mPa·s (20°C)、菜種油は約 1 dPa·s (15°C) です。

動粘度の単位： 平方メートル毎秒

粘度 η をその液体の密度 ρ で割った値 $V (= \eta / \rho)$ を**動粘度**と言います。単位は**平方メートル毎秒**、単位記号は m^2/s です。毛細管粘度計（たとえばオストワルド粘度計）や短管粘度計（たとえばフォードカップ）で測定される量は動粘度（平方メートル毎秒）です。動粘度から粘度（パスカル秒）を求めるには、別に密度を測定して動粘度との積を計算します。

$$\eta = \rho V$$

1 平方センチメートル毎秒の 1/100 を 1 平方ミリメートル毎秒 (mm^2/s) と言います。

$$100 \text{ mm}^2/\text{s} = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$$

ニュートン流体と非ニュートン流体

ニュートンの法則の式

$$F = \eta AD \quad (1)$$

式(1)の力 F は面積 A に作用するので、単位面積あたりの力を τ として書き直すと、式(2)となります。

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

この τ をずり応力と言います。

τ を使って式(1)を書き直せば式(3)または式(4)となります。

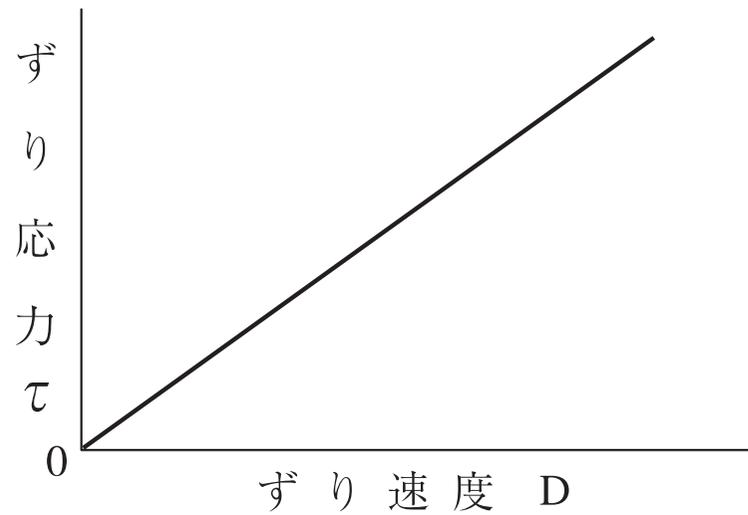
$$\tau = \eta D \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\tau}{D} \quad (4)$$

また、言葉で表すと以下のようになります。

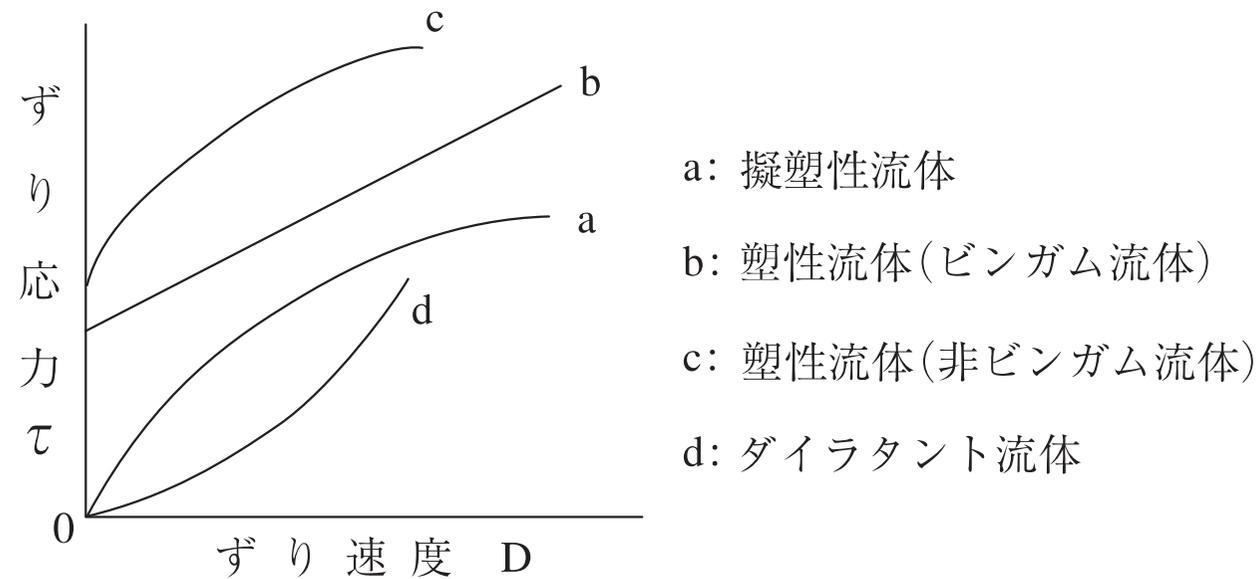
$$\text{粘度} = \frac{\text{ずり応力}}{\text{ずり速度}}$$

式(3)の関係をグラフに描くと第3図のようになります。このように τ と D の関係が直線になる流体を**ニュートン流体**と呼びます。直線の傾斜が大きいほど粘度が高くなります。



第3図

粘度の高い流体の中には、式(3)のような τ と D の直線関係が成り立たない流体、つまりニュートンの法則に従わない流体がたくさんあります。これらを総称して**非ニュートン流体**と言います。第4図にいろいろな非ニュートン流体の名称および τ と D の関係を示します。



第4図

(a) は擬塑性流体と言いい、ずり速度 D が大きくなると粘度が下がります。(b) は塑性流体 (ビンガム流体) と言いい、ずり応力がある値以上に大きくなないと、流動を始めない流体です。流動を始めれば τ と D は直線関係になります。流動を始めるときの τ の値を降伏値と言います。

(c) は (b) と似ていますが、 τ と D が直線関係にならない流体で、塑性流体 (非ビンガム流体) と言います。

(d) は τ と D の関係が (a) と逆になっている流体で、ダイラタント流体と言います。第 4 図の曲線を **流動曲線** と言います。

見かけの粘度

粘度計には後で述べるように非常に多くの種類があります。粘度計が異なれば、ずり速度も異なります。

ニュートン流体ではずり速度が異なっても粘度は変化しないので、異なる種類の粘度計で測定しても同じ値になります。

ところが、非ニュートン流体では第4図のように、ずり応力とずり速度が比例しないので粘度はずり速度により変化します。したがって粘度計の種類や測定方法により、粘度が異なることになります。これを**見かけの粘度**と言います。特定の粘度計に対する見かけの粘度、とか、あるずり速度に対する見かけの粘度、と言います。ずり速度が異なる時の見かけの粘度の変化は流体によりいろいろですから、2つの流体の見かけの粘度が、あるずり速度で測定したときに同じであっても、異なるずり速度で再度測定すると全く異なる場合があります。すなわち、非ニュートン流体では粘度計により異なる粘度が示されます。

このことは、22 ページ以降の測定例でもう一度説明しています。

温度が変わると粘度が変わる

水、水銀、グリセリンの温度による粘度の変化を下表に示します。水銀はあまり変化していませんが、水はかなり温度で変わり、グリセリンは相当大きく変化します。極端な例では温度が1℃下がれば粘度が数倍になる流体もあります。

粘度を測定するときは必ず温度も測定してください。

温度による粘度の変化

温度	水	水銀	グリセリン
0℃	0.018 dPa·s	0.017 dPa·s	121 dPa·s
20℃	0.010 dPa·s	0.016 dPa·s	15 dPa·s
100℃	0.0028 dPa·s	0.012 dPa·s	

時間がたつと粘度が変わる

かくはん
攪拌するとしだいに粘度が低くなり、しばらく放置するとまたもとに戻るような流体もあります。このような流体をチクソトロピー性流体と言います。

かくはん
逆に攪拌により粘度が高くなり、放置すると元に戻る流体もあります。そのほか
かくはん
攪拌すると粘度が低くなり、そのまま元に戻らない流体(熟成)などもあります。

このような特殊な流体では一定の粘度は測定できませんが、ビスコメータは粘度直読式なので、粘度が変化していく様子を刻々測定できます。

粘度計にはどんな種類があるか

粘度計には非常に多くの種類があります。一般によく使われているものを原理別に分類すると、次のようになります。

毛細管粘度計

原理 ガラスの毛細管中に試料を流し、一定量の流れる時間を測定します。

- 特徴
- (1) 精度が良い
 - (2) 測定範囲は通常数千 mm^2/s 以下
 - (3) 動粘度 (mm^2/s) が直接求められる

- 例
- オストワルド
 - ウベローデ
 - 逆流形 (キャノンフェンスケ)

短管粘度計

原理 容器の底に短管の流出孔を備え、一定量流出する時間を測定します。

- 特徴 (1) 構造、使用法とも簡単
(2) 測定範囲 数 mm^2/s ～数千 mm^2/s
(3) 換算表によって動粘度を求める

例 レッドウッド
セイボルト
エングラ
フォードカップ

落体粘度計

原理 ガラス管内に試料を入れ、その中を球または円柱が落下する時間を測定します。

- 特徴 (1) 球を小さくすれば、10 $\text{dPa}\cdot\text{s}$ 以上でも測定が可能
(2) 別に密度の測定が必要

例 ラワーチェック

転落球粘度計

原理 傾斜したガラス管内に試料を入れ、その中で球が転がり落ちる時間を測定します。

特徴 (1) 数千 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以下の精密測定が可能
(2) 別に密度の測定が必要

例 ヘプラー

気泡粘度計

原理 試験管中に一定量の空気を残して試料を封じ、転倒させて気泡の上昇する速度を標準管と比較します。

特徴 (1) 操作が簡単
(2) 大体の粘度の見当をつけるのに便利

共軸二重円筒形回転粘度計

原理 内筒と外筒の間に試料を入れ、一方の円筒を一定速度で回転させたとき、他方の円筒に働くトルクを測定します。

特徴 (1) 10 dPa·s 以上の測定に便利
(2) 非ニュートン流体の流動が調べられる

例 ストーマー
グリーン
マクミケール
ユニバーサルレオメータ

単一円筒形回転粘度計

原理 試料中で円筒を一定速度で回転させたときのトルクを測定します。

特徴 (1) 数 10 mPa·s 以上の測定に便利
(2) 手に持って測定できるので、タンク中の試料を汲み出す必要がない

例 B 型粘度計
ビスコメータ

コーンプレート粘度計

原理 円錐と平板の間に試料を入れ、一方を回転させたときに他方の受けるトルクを測定します。

- 特徴
- (1) 精度が高い
 - (2) 高粘度の測定に便利
 - (3) 非ニュートン流体の流動が調べられる

その他

他に、振動粘度計、平行板粘度計、浮子粘度計などがあります。

換算

非ニュートン流体では粘度計の種類が異なる場合は換算できません。ニュートン流体では、短管粘度計で測定される流出時間と動粘度との換算表があります。たとえば3平方センチメートル毎秒に相当する各種短管粘度計の値は次のようになります。

$$\begin{aligned}
 3 \text{ 平方センチメートル毎秒} &= \text{約 } 1400 \text{ セイボルト秒} \\
 &= \text{約 } 1200 \text{ レッドウッド秒} \\
 &= \text{約 } 80 \text{ フォードカップ秒} \\
 &= \text{約 } 40 \text{ エングラー度}
 \end{aligned}$$

平方メートル毎秒の値にその液体の密度をかけるとパスカル秒になります。

ビスコメータの1号ロータは、3 dPa·s 以上の粘度が測定できるので、おおよそ上記の換算値以上の流体が測定できます。

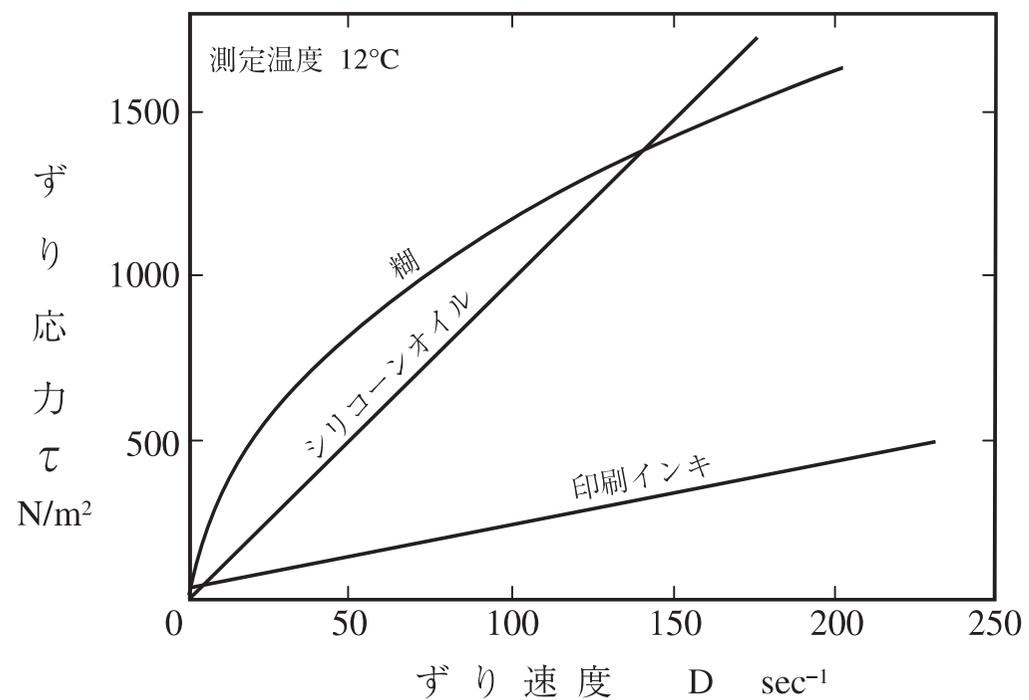
ビスコメータ

ビスコメータは単一円筒形回転粘度計で、分類は B 型粘度計と同じですが、現場での使用に最も適するように、測定値表示がデシパスカル秒またはミリパスカル秒で、回転数切替装置がありません。

ずり速度は 1 号ロータのとき約 13 s^{-1} 、2 号ロータのときは約 4 s^{-1} です。したがってロータを変えると粘度が異なる場合があります。この場合はその液体は非ニュートン流体であり、ずり速度が異なるため見かけの粘度が変化したので、ビスコメータの故障ではありません。

測定例

前述したように、粘度の高い液体の多くは、非ニュートン流体です。非ニュートン流体の流動曲線をコーンプレート粘度計で測定した例を第5図に示します。



第5図 流動曲線

糊や印刷インキのような塑性流体は、ずり応力 τ がある値 f (降伏値) に達するまでは流動が起きないので、ずり速度 D は 0 です。ずり応力が f より大きくなると流動が起き、 τ が増すと D は急に大きくなります。

シリコンオイルの $\tau - D$ はほぼ直線で、ニュートン流体とみなせます。

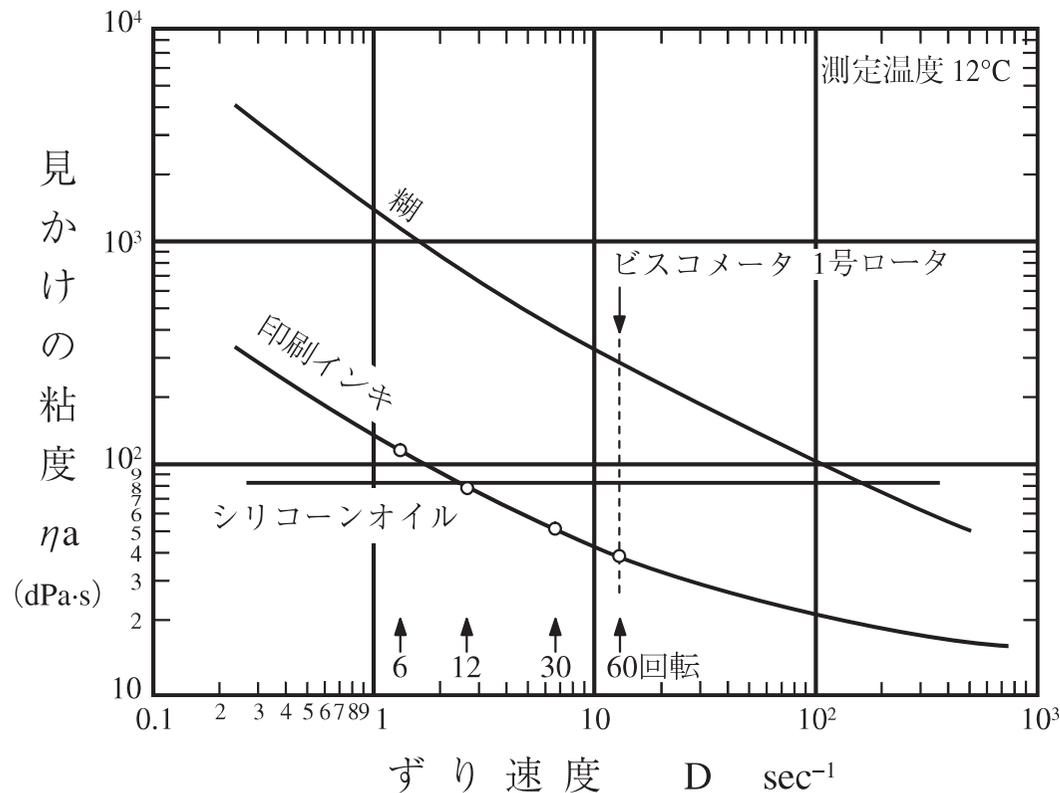
流動曲線上の各点のずり応力 τ とずり速度 D との比が見かけの粘度 η_a です。 η_a はずり速度 D により、第 6 図のように変化します。

第 6 図でシリコンオイルはニュートン流体とみなせるので、見かけの粘度は D により変わらず一定ですが、非ニュートン流体の糊や印刷インキでは D が大きくなると、見かけの粘度 η_a は小さくなります。

ところで、ずり速度 D は粘度計により異なります。たとえば、毛細管粘度計では流体の流れる時間と毛細管の寸法により D が決まり、回転粘度計ではロータの回転数と形状により D が決まります。

次ページで、ビスコメータで 1 号ロータを使用した場合と、B 型粘度計で回転数を 6~60 回転まで変えた場合について比較します。

第6図で、B型粘度計の回転数を60回転で測定した印刷インキの見かけの粘度は43 dPa·sで、6回転のときでの見かけの粘度130 dPa·sの約1/3になります。ビスコメータの1号ロータは62.5回転なので、B型粘度計の回転数が60回転の場合とほぼ同じ見かけの粘度となります。



第6図 せんり速度による粘度の変化

シリコンオイルは B 型粘度計の回転数により見かけの粘度は変わりません。ビスコメータの 1 号ロータでは見かけの粘度が印刷インキの約 2 倍になるシリコンオイルも、B 型粘度計の回転数が 12 回転では印刷インキと同じ見かけの粘度を示します。

家庭で使う試料の粘度をビスコメータで測定した例を示します。

ビスコメータによる測定例(温度 23℃)

商品名	粘度	ビスコメータ	ロータ
ニュートン流体			
ひまし油	6 dPa·s	VT-06	3号
水あめ	1000 dPa·s	VT-06	2号
非ニュートン流体			
コンデンスミルク	16 dPa·s	VT-06	1号
チョコレートシロップ	25 dPa·s	VT-06	1号
トマトケチャップ	43 dPa·s	VT-06	1号
純粹はちみつ	76 dPa·s	VT-06	1号
歯磨き粉	320 dPa·s	VT-06	2号
でんぷんのり	310 dPa·s	VT-06	2号



リオン株式会社

<https://www.rion.co.jp/>

本社／営業部

東京都国分寺市東元町 3 丁目 20 番 41 号

〒 185-8533 TEL (042) 359-7887 (代表)

FAX (042) 359-7458

サービス窓口

リオンサービスセンター株式会社

東京都八王子市兵衛 2 丁目 22 番 2 号

〒 192-0918 TEL (042) 632-1122

FAX (042) 632-1140

西日本営業所

大阪市北区梅田 2 丁目 5 番 5 号 横山ビル 6F

〒 530-0001 TEL (06) 6346-3671 FAX (06) 6346-3673

東海営業所

名古屋市中区丸の内 2 丁目 3 番 23 号 和波ビル

〒 460-0002 TEL (052) 232-0470 FAX (052) 232-0458

九州リオン(株)

福岡市博多区冷泉町 5 番 18 号

〒 812-0039 TEL (092) 281-5366 FAX (092) 291-2847