

琉球大学学術リポジトリ

細管粘度計による液体の粘度の測定

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学教育学部 公開日: 2007-07-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 清水, 洋一, 許田, 恵 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/998

細管粘度計による液体の粘度の測定

清水 洋一*¹・許田 恵*²

Measurements of Viscosity of Liquids by Glass Capillary Viscometers

Yoichi SHIMIZU・Kei KYODA

(Received Oct. 31, 1995)

Summary

Glass capillary viscometers have been used for measuring kinematic viscosity of liquids. The principle of the measurement is based on the Hagen-Poiseuille Law. The reliability of the measuring device has been tested using distilled water as a standard reference material. Then the kinematic viscosity of three kinds of spindle oils (spindle oil #2, spindle oil #5 and spindle oil #10) were measured. The results are represented by the following formulas over the temperature range from 30°C to 50 °C ;

$$\text{for spindle oil \#2, } \mu = 3.166 \times 10^{-2} \times 10^{(385.7 / (t + 176.2))}$$

$$\text{for spindle oil \#5, } \mu = 5.752 \times 10^{-2} \times 10^{(308.8 / (t + 131.1))}$$

$$\text{for spindle oil \#10, } \mu = 8.053 \times 10^{-2} \times 10^{(281.0 / (t + 100.5))}$$

Where μ is viscosity [mPa · s] and t is temperature [°C]. The accuracy of the measurements is less than one percent.

1. 緒言

流体の混合平均温度の測定法⁽¹⁾に関し、混合室の混合特性に及ぼす粘度の影響を実験的に明らかにするため、これまで用いてきた水に代わる供試流体が必要である。供試流体を選択する際、常温・常圧において取扱いが容易で、物性値が既に確立された単純物質を用いたいと適当な物質は少ない。その中で、シリコンオイル、エチレングリコール等が考えられた。シリコンオイルは最適な物質であり採用したいがかなり高価である。エチレングリコールは吸湿性が強く、一連の実験を通じて物性を一定に保つのが難しい。これらのことを検討する中で結局、石油製品の一つである3種類のスピンドル油(スピノックスS2,スピノックスS5及びスピノックスS10,以下それぞれスピンドル油#2,スピンドル油#5及びスピンドル油#10と呼ぶ)を供試流体として使用することにした。

しかし、スピンドル油は潤滑剤としての用途が主で、信頼できる密度、比熱、粘度、熱伝導率などの物性値データは少ない。更に、油類のような混合物質では同じ銘柄でも物性値は一定していないとみなしたほうがよい。

そこで本研究では、スピンドル油の物性値の内、粘度について測定装置を製作した。そして、物性値が正確に得られている水を標準試料として用い、細管粘度計による粘度の測定精度を明かにし、スピンドル油の粘度と温度との関係を求めた。また、粘度の近似式の作成方法についても検討を行った。

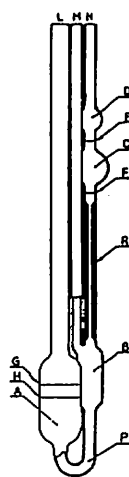
記号

- A : 流体によって決まる定数 (式(5), (6))
B : 流体によって決まる定数 (式(5), (6))
C : 流体によって決まる定数 (式(6))
g : 重力の加速度 [m / s²]

* 1 琉球大学教育学部技術教育科

* 2 糸満市立西崎中学校

- h : 平均有効液柱高さ [m]
- K_1 : 粘度計定数 $= \pi r^4 gh / 8(L + nr) V$ [m^2/s^2]
- K_2 : 粘度計係数 $= mV / 8\pi(L + nr)$ [m^3]
- L : 細管長さ [m]
- m : 運動エネルギー係数 [-]
- n : 管端補正係数 [-]
- r : 細管半径 [m]
- t : 温度 [°C]
- T : 絶対温度 [K]
- V : 測時球の体積 [m^3]
- μ : 粘度 [$Pa \cdot s$]
- ν : 動粘度 [m^2/s]
- ρ : 密度 [kg/m^3]
- τ : 時間 [s]



- A 下部試料だめ球
- B 懸垂液面球
- C 測時球
- D 上部試料だめ球
- E及びF 測時標線
- G及びH 試料採取標線
- L 保持器取付管
- M 下部通気管
- N 上部通気管
- P 連絡管
- R 毛管

図1 ウベローデ粘度計 (JIS K 2283 より抜粋)

2. 測定原理

動粘度の測定には、ピペット形細管粘度計の一つであるウベローデ粘度計を用いた。JIS K 2839には動粘度の測定範囲に応じて16種類のウベローデ粘度計が規定されている。図1及び表1にそれぞれウベローデ粘度計の概形、及び測定に用いた6種類のウベローデ粘度計のJIS規格を示す。

ウベローデ粘度計は、硬質ガラスで作られていて、一定体積の流体を粘度計内に入れ、液体の液柱差によって一定体積の液体が細管中を自由落下するのに要する時間 τ を測定し、ハーゲン・ポアズイユの法則を応用した次式⁽²⁾から動粘度または粘度(試料の密度が既知の場合)を求める。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \dots (1)$$

$$= \frac{\pi r^4 gh}{8(L+nr)V} \tau - \frac{mV}{8\pi(L+nr)} \cdot \frac{1}{\tau} \quad \dots (2)$$

$$= K_1 \tau - K_2 / \tau \quad \dots (3)$$

ここに、 ν は動粘度 [m^2/s]、 μ は粘度 [$Pa \cdot s$]、 ρ は試料の密度 [kg/m^3]、 r 及び L はそれぞれ細管部半径及び細管長さ [m]、 h は平均有効液柱高さ [m]、 V は測時球の体積 [m^3]、 g は重力の加速度 [m/s^2]、 m は運動エネルギー係数 [-]、 n は管端補正係数 [-]、 K_1 は粘度計定数で、 $K_1 = \pi r^4 gh / 8(L + nr) V$ [m^2/s^2]、 K_2 は粘度計係数で、 $K_2 = mV / 8\pi(L + nr)$ [m^3]である。

表1 測定に用いたウベローデ粘度計のJIS規格

粘度計番号	粘度計定数 (概略値) [ml/s^2]	動粘度 測定範囲 [ml/s]	細管部内径 $2r$ [mm] ($\pm 2\%$)	測時球容積 V [ml] ($\pm 5\%$)	液柱高さ h [mm] ($\pm 10\%$)	細管長さ L [mm] ($\pm 10\%$)
0	0.001	0.3~1	0.24	1.0	120	90
0A	0.003	0.6~3	0.36	2.0	120	90
0B	0.005	1~5	0.46	3.0	120	90
1	0.01	2~10	0.58	4.0	120	90
1A	0.03	6~30	0.78	4.0	120	90
1B	0.05	10~50	0.88	4.0	120	90

式(3)の第2項は運動エネルギー補正項であるが、流出時間をそれぞれの粘度計について規定された最小流出時間(表2参照)以上にすると、測定精度上、無視できる小さな値となる。その場合には、式(3)は次式で表せる。

$$\nu = K_1 \tau \quad \dots (4)$$

ここに、 K_1 は粘度計定数である。

市販の粘度計には概略粘度計定数ではなく、粘度計1本ごとに粘度計校正用標準液(JIS Z 8809準拠)を用いて社内検定した粘度計定数(実測定数)が明記されている。表2に測定に用いた6種類のウベローデ粘度計の仕様を示す。

表2 ウベローデ粘度計の仕様

粘度計番号	粘度計定数 [ml/s^2]	動粘度測定範囲 [ml/s]	最小流出時間 [s]
0	0.000905	0.3~1	470
0A	0.00316	0.6~3	380
0B	0.00488	1~5	370
1	0.0107	2~10	300
1A	0.0307	6~30	200
1B	0.0494	10~50	200

3. 測定装置及び測定方法

図2に動粘度測定装置の概略を示す。粘度計内の供試流体の温度を一定に保ち、粘度計を外部から透視できる様に、アクリル樹脂製の恒温水槽(380mm(W)×180mm(D)×300mm(H))を用いた。粘度計は粘度計ホルダ(塩化ビニル樹脂製)で固定し、細管が鉛直になるように恒温槽の蓋(アクリル樹脂製)に取り付ける。なお、粘度計は一度に6本設置することができる。

恒温水槽内の温度を30, 35, 40, 45及び50℃に保ち、水(蒸留水)、スピンドル油#2, #5及び#10の動粘度の測定を行った。

水槽内の温度は素線径0.1mmの銅-コンスタンタン熱電対により測定した。熱電対の熱起電力はデジタルボルトメータ(分解能0.1μV)及びペンレコーダ(最小レンジ5μV/cm)で測定した。

図3に粘度計内の供試流体(水を使用)の温度が定常状態に達するまでの時間的溫度変化の例を示す。最初、供試流体温度(25℃)と恒温水槽内の温度(40.6±0.025℃で一定)との温度差は約15℃である。これらの温度差が0.025℃(恒温水槽内の温度変動と同程度)以下になるまで約10分である。恒温水槽内の温度が定常状態に達し、20分以上経過した後粘度の測定を行った。

粘度は温度の変化による影響が大きいため、精密な測定には恒温水槽が必要である。液体の場合、温度上昇により粘度は減少する。水では常温付近で1℃の変化で粘度は2.5%, 石油類では2~10%

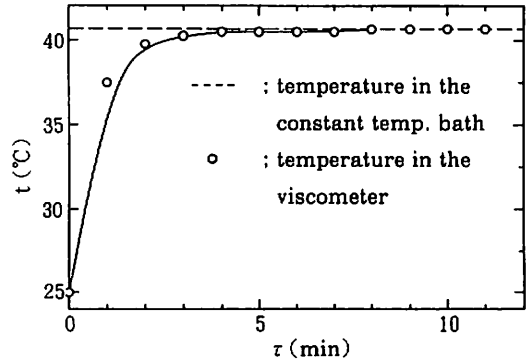


図3 粘度計内の試料温度が定常状態に達するまでの時間

変化するものもある⁽⁴⁾。恒温水槽内の温度変動は、設定温度が30~50℃の範囲の場合、定常状態において±0.025℃(デジタルボルトメータで±1μV)以下であった。これが動粘度の測定結果に及ぼす影響は水の場合約0.07%, スピンドル油の場合約0.1%である^{(3),(8)}。

普通の液体では、1atm(101.3kPa)付近において、1atmの圧力増加による粘度変化は0.1~0.3%程度である⁽⁴⁾。したがって、大気圧の変化による粘度の変化は無視できる。

粘度計の鉛直からの傾きは1°以内であった。これが動粘度の測定結果に及ぼす影響は式(2)より0.02%程度と見積られる。

4. 粘度の近似式

水及びスピンドル油の動粘度の測定データを整理し考察するさいに必要な粘度の近似式の作成方法について述べる。近似式の作成に当たってデータはInternational Critical Tables⁽⁵⁾(以下I. C. T.と略記する), Schmidtの蒸気表⁽⁷⁾, 流体の熱物性値集⁽⁶⁾, 伝熱工学資料⁽³⁾を基にした。

流体の粘度 μ は分子構造に敏感であるので、一般性のある理論式や経験的推算方法は存在しない。粘度の温度による変化は、温度変化のせまい場合には、次のAndradeの式で表せる⁽⁶⁾。

$$\log \mu = A + B/T \quad \dots (5)$$

ここで、A, Bは液体によって決まる定数、Tは絶対温度である。2温度における μ の値が知られているときは、A, Bを決定して他の温度に

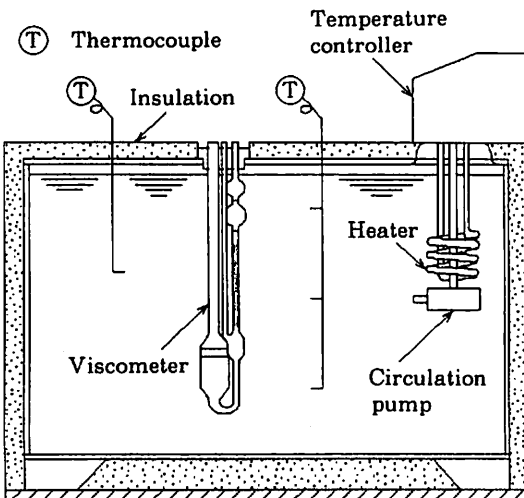


図2 動粘度測定装置の概略

おける値が推算できる。

また3温度における μ の値が知られている場合には、粘度は次の Sutherland の式で表される⁷⁾。

$$\mu = A \times 10^{(B / (T - C))} \dots (6)$$

ここで、A、B及びCは液体によって決まる定数、Tは絶対温度である。

式(6)を適用し、I. C. T. の数表の20℃、40℃、60℃における水の粘度の値を用いて定数を決定すると、次式が得られる。

$$\mu_w = 4.1 \times 10^{-2} \times 10^{(178 / (t - 138))} \dots (7)$$

$$\mu_w \text{ [mPa} \cdot \text{s]}, t \text{ [}^\circ\text{C]}$$

表3に式(7)と文献値との比較を示す。

同様に、Schmidt の蒸気表の20℃、40℃、60℃の点で定数を決定すると、次式が得られる。

$$\mu_w = 2.38 \times 10^{-2} \times 10^{(250 / (t - 134))} \dots (8-a)$$

$$\mu_w \text{ [mPa} \cdot \text{s]}, t \text{ [}^\circ\text{C]}$$

表4に式(8-a)と文献値との比較を示す。

参考までに、Schmidt の蒸気表の40℃、120℃、220℃の点で定数を決定すると、次式が得られる。

$$\mu_w = 2.4 \times 10^{-2} \times 10^{(251 / (t - 135))} \dots (8-b)$$

$$\mu_w \text{ [mPa} \cdot \text{s]}, t \text{ [}^\circ\text{C]}$$

表5に式(8-b)と文献値との比較を示す。

表3、表4及び表5に示すように、式(7)、式(8-a)及び式(8-b)はそれぞれ $\pm 0.1\%$ (10℃においてのみ+0.9%)、 $\pm 0.1\%$ (10℃においてのみ-0.3%)及び $\pm 0.6\%$ 以内の精度で文献値と数式の値は一致している。式(8-b)はSchmidtの蒸気表を広い温度範囲で近似式を作成しているため、式(8-a)に比して本動粘度測定温度範囲において近似式の精度が若干悪い。水の動粘度の測定値との比較には20~60℃の温度範囲で $\pm 0.1\%$ の精度をもつ式(7)を用いる。

表6にI. C. T. の数表とSchmidtの蒸気表との数値の比較を示す。本動粘度測定範囲で両文献値間で0.4~1.5%の違いがある。

細管粘度計によって直接測定されるのは動粘度であるので(式(1)~(3)参照)、次章の水の動粘度の測定精度を検討するために、水の密度が必要である。水の密度 ρ_w の近似式は次式で表わされる⁷⁾。

$$\rho_w = 10^3 / (1 + 8.7 \times 10^{-6} \times t^{1.86}) \dots (9)$$

$$\rho_w \text{ [kg/m}^3\text{]}, t \text{ [}^\circ\text{C]}$$

この式はSchmidtの蒸気表に基づいている。式

(9)は10~60℃の範囲で蒸気表の値とは0.04%以内の精度をもっている。

式(1)より、水の動粘度 ν_w は次式で表される。

$$\nu_w = \mu_w / \rho_w \dots (10)$$

ここに、 μ_w は式(7)から求めた水の粘度、 ρ_w は式(9)から求めた水の密度である。

式(10)は $\pm 0.15\%$ 以内の精度をもっている。

表3 文献値1と式(7)との比較

流体温度 t [°C]	文献値1 [mPa·s]	式(7) [mPa·s]	誤差 [%]
10	1.310	1.3221	0.92
20	1.009	1.0079	-0.11
30	0.800	0.7992	-0.10
40	0.654	0.6539	-0.02
50	0.549	0.5487	-0.05
60	0.470	0.4702	0.05

表4 文献値2と式(8-a)との比較

流体温度 t [°C]	文献値2 [mPa·s]	式(8-a) [mPa·s]	誤差 [%]
10	1.300	1.2962	-0.29
20	1.000	0.9999	-0.01
30	0.797	0.7961	-0.11
40	0.651	0.6507	-0.05
50	0.544	0.5436	-0.08
60	0.463	0.4626	0.08

表5 文献値2と式(8-b)との比較

流体温度 t [°C]	文献値2 [mPa·s]	式(8-b) [mPa·s]	誤差 [%]
10	1.300	1.2920	-0.62
20	1.000	0.9990	-0.10
30	0.797	0.7969	-0.01
40	0.651	0.6524	0.21
50	0.544	0.5457	0.32
60	0.463	0.4649	0.42
120	0.230	0.2315	0.65
220	0.122	0.1223	0.21

表6 文献値1と文献値2との比較

流体温度 t [°C]	文献値1 [mPa·s]	文献値2 [mPa·s]	誤差 [%]
10	1.310	1.300	0.77
20	1.009	1.000	0.90
30	0.800	0.797	0.38
40	0.654	0.651	0.46
50	0.549	0.544	0.92
60	0.470	0.463	1.51

(表3~表6において、文献値1はI. C. T.、文献値2はSchmidtの蒸気表からの値。)

5. 動粘度の測定結果及び考察

5.1 水の動粘度の測定結果及び考察

水の動粘度の測定に適した粘度計は粘度計番号 0 及び 0A の 2 種類であるが、これら以外の 4 種類の粘度計、粘度計番号 0B, 1, 1A 及び 1B についても水の動粘度の測定を試みた。

表7-a 及び b に粘度計番号 0, 0A, 0B, 1, 1A 及び 1B の 6 種類の粘度計による水の動粘度の測定結果を示す。測定値はそれぞれの粘度計の粘度計定数に流出時間の測定値を掛けて求めたものである (式(4)及び表 2 参照)。

図 4 は、上記 6 種類の粘度計で測定した動粘度と温度の関係を示したものである。0 及び 0A による測定値は式(10)から求めた値とほぼ一致しているが、測定流出時間が 13 秒～160 秒の 0B, 1, 1A 及び 1B による測定値は、それぞれ最大約 2%, 5%, 10% 及び 20%, 式(10)から求めた値より大きい。

粘度計 0, 0A 以外の粘度計による測定値が高め

に出る原因は、測定流出時間が短いこと、即ち、式(2) (または式(3)) の第 2 項 (運動エネルギー補正項) の影響によるものである。

図 5 は表 1 に示す各粘度計の r, V, h, L の値及び $m=1.12, n=0.69^{(2)}$ を式(2)に代入して求めた K_1, K_2 を用いて、縦軸に $K_1\tau / (K_1\tau - K_2/\tau)$ 、横軸に流出時間 τ をとって示したものである。流出時間が短くなるにつれて、運動エネルギー補正項 (K_2/τ) の影響が大きくなる。粘度計定数の小さい粘度計程その影響が大きい。粘度計メーカーが決定した粘度計 0, 0A, 0B 及び 1 の最小流出時間 (表 2 参照) は運動エネルギー補正項の影響が約 0.2% 以下になるように決定され

表7-a 水の動粘度の測定結果(粘度計0, 0A, 0B)

液体温度 t (°C)	粘度計 0		粘度計 0A		粘度計 0B	
	測定時間 τ (s)	$K_1\tau$ (md/s)	測定時間 τ (s)	$K_1\tau$ (md/s)	測定時間 τ (s)	$K_1\tau$ (md/s)
30.10	889.6	0.8051	253.3	0.8004	165.3	0.8067
30.10	883.8	0.7998	253.8	0.8020	165.9	0.8096
35.10	799.2	0.7233	228.8	0.7230	149.4	0.7291
35.10	796.2	0.7206	229.3	0.7246	149.7	0.7305
40.20	724.8	0.6559	208.1	0.6576	135.9	0.6632
40.20	727.6	0.6585	207.5	0.6557	136.1	0.6642
45.42	662.5	0.5996	190.1	0.6007	124.7	0.6085
45.42	659.8	0.5971	189.6	0.5991	124.3	0.6066
50.66	605.8	0.5483	174.4	0.5511	114.5	0.5588
50.66	607.6	0.5499	174.2	0.5505	114.3	0.5578

表7-b 水の動粘度の測定結果(粘度計1, 1A, 1B)

液体温度 t (°C)	粘度計 1		粘度計 1A		粘度計 1B	
	測定時間 τ (s)	$K_1\tau$ (md/s)	測定時間 τ (s)	$K_1\tau$ (md/s)	測定時間 τ (s)	$K_1\tau$ (md/s)
30.10	76.1	0.8143	27.5	0.8443	17.4	0.8596
30.10	75.7	0.8100	-	-	-	-
35.10	68.8	0.7362	-	-	-	-
35.20	69.2	0.7404	25.2	0.7736	16.1	0.7953
40.20	62.0	0.6634	-	-	-	-
40.30	63.0	0.6741	23.2	0.7122	15.0	0.7410
45.42	57.8	0.6185	21.5	0.6601	14.1	0.6965
45.44	57.8	0.6185	21.7	0.6682	13.7	0.6768
50.66	53.7	0.5746	20.0	0.6140	13.3	0.6570
50.68	53.4	0.5714	20.3	0.6232	13.3	0.6570

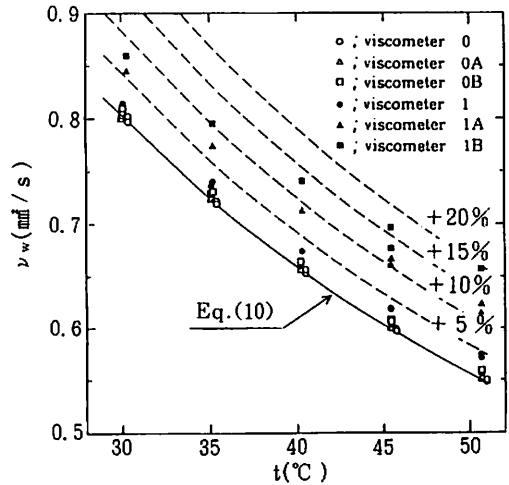


図 4 水の動粘度の測定結果

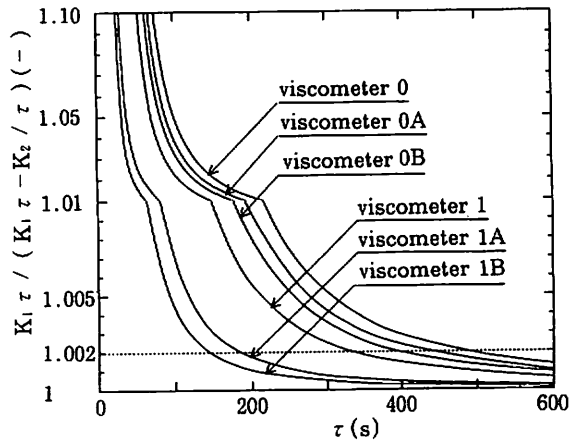


図 5 運動エネルギー補正項 (K_2/τ) の影響 (このグラフは縦軸の 1~1.01 のスケールを、1.01~1.10 のその 10 倍に拡大してある)

ているものと思われる。また、1A、1B等の粘度計はJISの動粘度試験方法(JIS K 2283)には最小流出時間が200秒以上になる様に規定されているが、この場合も運動エネルギー補正項の影響が0.2%以下になるように決められていると思われる。流出時間が100~200秒以下になると運動エネルギー補正項を無視した場合の影響は急激に大きくなる。

粘度計メーカーによって決定された各粘度計定数は流出時間を十分長くって決定されたものである。このとき運動エネルギーは測定精度上無視できる。しかし、流出時間が多少短くても精度を損なわずに測定が可能であれば、むしろ運動エネルギーの補正を行うほうがより実用的である。

運動エネルギーの補正項を含む式(3)($\nu = K_1 \tau - K_2 / \tau$)について、30及び50℃における測定した流出時間 τ (表7-a, b参照)と、これらの温度における動粘度の値を式(10)で与えて、各粘度計の K_1 、 K_2 を決定すると水の動粘度 ν_w は次式で表される。

$$\text{粘度計0} : \nu_w = 0.0009061 \tau - 0.04142 / \tau \dots (11-a)$$

$$\text{粘度計0A} : \nu_w = 0.003162 \tau - 0.2959 / \tau \dots (11-b)$$

$$\text{粘度計0B} : \nu_w = 0.004879 \tau - 0.9855 / \tau \dots (11-c)$$

$$\text{粘度計1} : \nu_w = 0.01079 \tau - 1.447 / \tau \dots (11-d)$$

$$\text{粘度計1A} : \nu_w = 0.03135 \tau - 1.764 / \tau \dots (11-e)$$

$$\text{粘度計1B} : \nu_w = 0.05224 \tau - 1.934 / \tau \dots (11-f)$$

ν_w [mm²/s], τ [s]

図6は各々の粘度計を用いて測定した流出時間をそれぞれ式(11-a)~(11-f)に代入して求めた動粘度の値 ν_{meas} と、測定した試料温度を用いて式(10)から求めた ν_{ref} について、 $\nu_{\text{meas}} / \nu_{\text{ref}}$ と温度との関係を示したものである。

データが若干ばらついているが、動粘度の測定値 ν_{meas} と式(10)から求めた動粘度 ν_{ref} は $\pm 0.5\%$ 以内の誤差で一致する。本来、水用ではない粘度計(粘度計0B、1、1A及び1B)を用いて動粘度の測定を行っても、運動エネルギーの補正

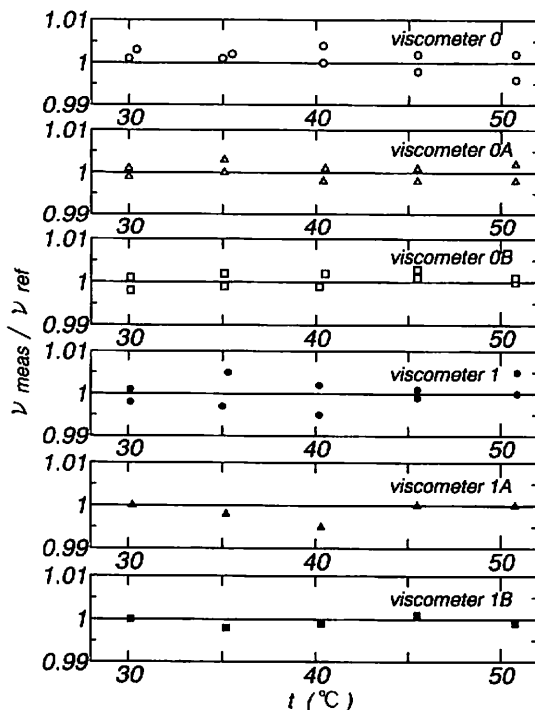


図6 $\nu_{\text{meas}} / \nu_{\text{ref}}$ と温度との関係

を行うことにより、0.5%以内の誤差で測定できる。

5.2 スピンドル油の動粘度の測定結果及び考察

スピンドル油#2、#5及び#10の動粘度をそれぞれ粘度計0B、1及び1Aを用いて30~50℃の温度範囲で測定した。表8に測定結果を示す。測定値は各粘度計定数に測定流出時間を掛けて求めたものである。

図7にスピンドル油の動粘度の測定結果を示す。同図には伝熱工学資料(文献[3])からのスピンドル油の値(図中破線)とスピンドル油の製

表8 スピンドル油の動粘度の測定結果

流体温度 t (°C)	スピンドル油#2 (粘度計0B)		スピンドル油#5 (粘度計1)		スピンドル油#10 (粘度計1A)	
	測定時間 τ (s)	$K_1 \tau$ (mm ² /s)	測定時間 τ (s)	$K_1 \tau$ (mm ² /s)	測定時間 τ (s)	$K_1 \tau$ (mm ² /s)
30.55	577.0	2.816	526.3	5.631	434.6	13.342
35.10	530.0	2.586	467.4	5.001	368.9	11.325
40.20	480.4	2.344	413.9	4.429	312.1	9.581
45.30	439.7	2.146	369.7	3.956	266.1	8.169
50.38	402.7	1.965	330.6	3.537	230.7	7.082

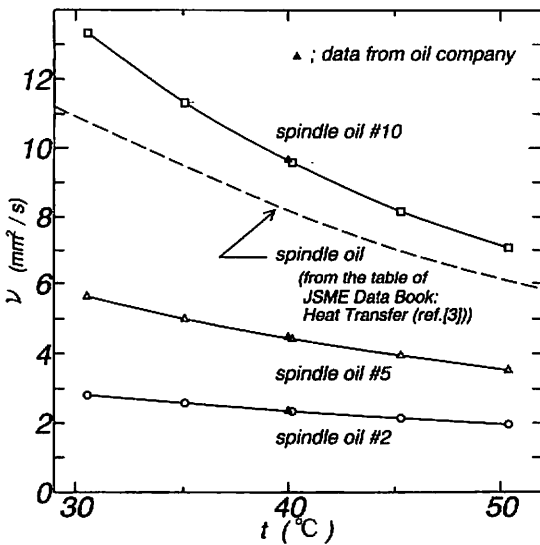


図7 スピンドル油の動粘度の測定結果

造メーカーからの値（図中▲印）を示してある。

40℃におけるメーカー値は測定値（図中○, △, □印）とよい一致を示す。伝熱工学資料からの値はスピンドル油#5と#10との間にあり、何れの測定値とも約50%の差異がある。スピンドル油のような混合物質では、物性値は一定していないことが分かる。

いずれのスピンドル油も使用粘度計の最小流出時間以上で測定できたので、温度及び流出時間の測定誤差、粘度計の鉛直度等を考慮すると、動粘度の測定誤差は大きく見積っても1%以内である。

5・3 スピンドル油の粘度の近似式

スピンドル油製造メーカーの動粘度の測定値（表9）及び粘度計で測定した動粘度の値から粘度の式を作成するには、スピンドル油の密度が必要である（式(1)参照）。そこで、比重計によりスピンドル油の密度を測定した（付録参照）。スピンドル油の密度ρの近似式は次式で表される。

表9 スピンドル油の動粘度のメーカー値(単位; mm²/s)

温度 [°C]	40	100
スピンドル油#2 (スピノックスS2)	2.36	1.05
スピンドル油#5 (スピノックスS5)	4.48	1.62
スピンドル油#10 (スピノックスS10)	9.66	2.60

$$\begin{aligned} \text{スピンドル油\#2;} & \rho = 845, 1 - 0, 663t \dots (A-1) \\ \text{スピンドル油\#5;} & \rho = 852, 5 - 0, 663t \dots (A-2) \\ \text{スピンドル油\#10;} & \rho = 862, 6 - 0, 663t \dots (A-3) \\ & \rho \text{ [kg/m}^3\text{], } t \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned}$$

スピンドル油メーカーからの資料には40℃, 100℃の2つの温度についてしか動粘度の値が示されていない（表9参照）。これら2つの温度における動粘度の値から、密度の式（A-1）～（A-3）及び式(1)の関係を用いて粘度を求め、Andradeの式（式(5)）を適用すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \text{スピンドル油\#2;} & \mu = 9, 22 \times 10^{-3} \\ & \times 10^{(726, 9 / (t + 273, 15))} \dots (12-a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{スピンドル油\#5;} & \mu = 4, 88 \times 10^{-3} \\ & \times 10^{(901, 8 / (t + 273, 15))} \dots (12-b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{スピンドル油\#10;} & \mu = 1, 70 \times 10^{-3} \\ & \times 10^{(1151, 5 / (t + 273, 15))} \dots (12-c) \end{aligned}$$

$$\mu \text{ [mPa} \cdot \text{s], } t \text{ [}^\circ\text{C]}$$

表10に式(12-a), (12-b)及び(12-c)とメーカー値との比較を示す。

式(12-a), (12-b)及び(12-c)から求めた値はいずれも0.1%以内の誤差でメーカーの値と一致する。

次に動粘度の測定値について、同様にして粘度を求め、Sutherlandの式（式(6)）を適用し、30℃, 40℃, 50℃の3点で定数を決定すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \text{スピンドル油\#2;} & \mu = 3, 166 \times 10^{-2} \\ & \times 10^{(386, 7 / (t - 176, 2))} \dots (13-a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{スピンドル油\#5;} & \mu = 5, 752 \times 10^{-2} \\ & \times 10^{(308, 8 / (t + 131, 1))} \dots (13-b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{スピンドル油\#10;} & \mu = 8, 053 \times 10^{-2} \\ & \times 10^{(281, 0 / (t + 100, 5))} \dots (13-c) \end{aligned}$$

$$\mu \text{ [mPa} \cdot \text{s], } t \text{ [}^\circ\text{C]}$$

表11に式(13-a), (13-b)及び(13-c)と測定値と

表10 式(12-a,b,c)とメーカー値との比較

供試流体	流体温度 t [°C]	メーカー値 [mPa·s]	式(12-a) 式(12-b) 式(12-c)	誤差 [%]
スピンドル油 #2	40	1.932	1.9317	0.02
	100	0.818	0.8179	0.01
スピンドル油 #5	40	3.700	3.7007	-0.02
	100	1.274	1.2742	-0.01
スピンドル油 #10	40	8.077	8.0740	0.04
	100	2.070	2.0693	0.03

の比較を示す。式(13-a), (13-b)及び(13-c)から求めた値はいずれも±0.5%以内の精度で測定値と一致する。

図8は測定値を Sutherland の式を用いて作成した近似式(13-a), (13-b)及び(13-c)を, それぞれメーカーからの値を Andrade の式を用いて作成した近似式(12-a), (12-b)及び(12-c)で割った値を縦軸に, 横軸に温度をとって示したものである。

温度が40℃の場合, 式(12)と式(13)とは1%以下の誤差で一致するが, 測定した30℃~50℃の温度範囲では±2~5%程度の差異がある。測定値は1%以内の精度があるので, メーカーの値を

Andrade の式を用いて作成した近似式は十分な精度をもっているとは言えない。

6. 結論

細管粘度計を用いた動粘度測定装置を製作し, 物性値が正確に得られている水により動粘度の測定精度を明らかにした。それに基づきスピンドル油 # 2, # 5 及び # 10 の動粘度を30~50℃の温度範囲において1%以内の精度で測定できた。これは熱伝達の実験の整理に利用する物性値として十分な精度である。

粘度に関する式を作成する過程を詳しく説明した。スピンドル油について, 測定値とメーカー値とは40℃において±1%以内の誤差で一致したが, メーカー値2点を用いて作成した近似式(Andradeの式)から求めた値は, 測定した30~50℃の温度範囲で±2~5%程度の誤差を生じた。精度のよい近似式(Sutherlandの式)を適用するには, 物性値データまたは測定値は3点以上必要である。

粘度計に規定された最小流出時間以上であれば, 本測定装置の場合には, 1%以内の誤差で動粘度を測定することができる。

また, 最小流出時間以下であっても運動エネルギーの補正を行うことにより精度を損なわずに測定可能であり, 粘度計1本当りの測定範囲を広くとれるので, 使用する粘度計の種類を減らすことができる。ただし, 適当な標準試料を用いて粘度計の粘度計定数及び粘度計係数を再校正する必要がある。

表11 式(13-a,b,c)と測定値との比較

供試流体	流体温度 t [°C]	測定値 [mPa·s]	式(13-a) 式(13-b) 式(13-c)	誤差 [%]
スピンドル油 # 2	30.55	2.323	2.3230	0.00
	35.10	2.125	2.1178	0.34
	40.20	1.918	1.9180	0.00
	45.30	1.794	1.7451	0.22
	50.38	1.595	1.5951	0.01
スピンドル油 # 5	30.55	4.686	4.6786	0.16
	35.10	4.147	4.1478	-0.02
	40.20	3.657	3.6518	0.14
	45.30	3.254	3.2388	0.47
	50.38	3.897	2.8932	0.13
スピンドル油 # 10	30.55	11.238	11.2459	-0.07
	35.10	9.506	9.5111	0.05
	40.20	8.009	8.0000	-0.11
	45.30	6.802	6.8117	0.14
	50.38	5.872	5.8663	-0.10

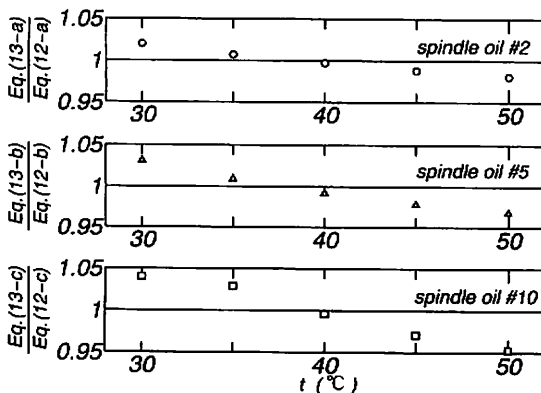


図8 Andradeの式(式12-a,b,c)とSutherlandの式(式(13-a,b,c)との比較

謝辞

図面の作成に協力して頂いた大学院生の比志島芳彦君に感謝します。なお, 図面の作成にはフリーソフトウェア, Ngraph ver. 5.31を用いた。

付録 比重計によるスピンドル油の密度の測定

先ず, 物性値が正確に得られているトルエンを標準試料として, 比重計による密度の測定精度を明らかにし, その後スピンドル油 # 2, # 5 及び # 10 の密度の測定を行った。

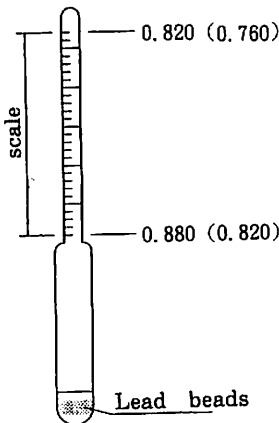
A・1 測定装置及び測定方法

密度の測定には比重計(浮きばかり)を用いた。比重計は、浮力の原理を使って液体の比重を測定するものである。それは附図1に示すように鉛玉を入れたガラス製円筒の上部が棒状に伸びたものである。附表1に比重計の仕様を示す。トルエン、スピンドル油#2、#5及び#10の測定には、比重計No.1を用いた。なお、スピンドル油#2の測定には比重計No.2も用いた。

試料及び比重計の入ったガラス製シリンダをアクリル樹脂製の恒温水槽内に静置する。試料の温度が定常状態に達した後、比重計の目盛り(最小0.001 g/cm³)を読み取った。

A・2 スピンドル油の密度の測定結果

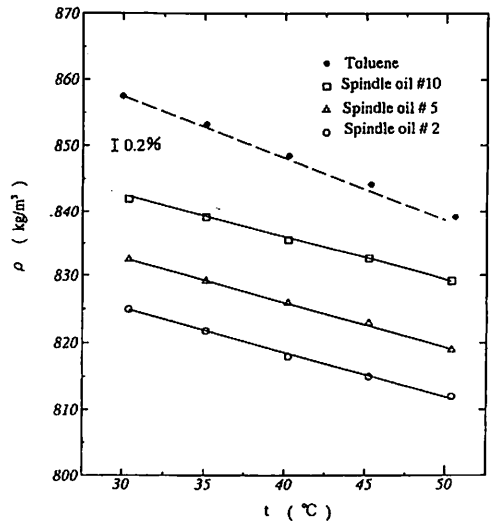
附図2に比重計による測定値を密度に換算した結果を示す。トルエンの測定値は文献[3]からの値(図中の破線)と0.1%以下の誤差で一致している。スピンドル油#2、#5及び#10の密度は測定した30℃~50℃の温度範囲でそれぞれ次式で表される。



附図1 比重計

附表1 比重計の仕様

比重計番号	有効目盛範囲	最小目盛
No.1	0.820~0.880	0.001
No.2	0.760~0.820	0.001



附図2 スピンドル油の密度の測定結果

スピンドル油#2; $\rho = 845.1 - 0.663t$. . . (A-1)
 スピンドル油#5; $\rho = 852.5 - 0.663t$. . . (A-2)
 スピンドル油#10; $\rho = 862.6 - 0.663t$. . . (A-3)
 ここに、 ρ は密度[kg/m³]、 t は温度[℃]である。

文献

- (1) 藤井 哲・ほか2名, 日本機械学会論文集(B編), 53巻, 第486号, 560.
- (2) 西川 兼康・他3名, 伝熱工学の進展, Vol. 2, (1974), 137, 養賢堂.
- (3) 日本機械学会, 伝熱工学資料, (1989), 326, 丸善.
- (4) 倉瀬 公男・ほか, 工業計測法ハンドブック, (1976), 398, 朝倉書店.
- (5) International Critical Tables, McGraw-Hill, (1930).
- (6) 化学工学会, 化学工学便覧, (1991), 91, 丸善.
- (7) 藤井 哲・ほか2名, 九州大学生産科学研究報告, 第66号, (1977), 81.
- (8) 日本機械学会, 流体の熱物性値集, (1988), 216, 日本機械学会.