【論文】

小型落針式粘度計を用いた粘度測定における 不確かさの評価

Evaluation of Uncertainty in Viscosity Measurement Using Compact-Sized Falling Needle Rheometer

松永直之* 鈴木貴雅* 荒木貞夫* 田村栄二** 川村公人*** 山本秀樹*
Naoyuki Matsunaga, Takamasa Suzuki, Sadao Araki, Eiji Tamura, Kimito Kawamura,
and Hideki Yamamoto

本研究室では、血液やイオン液体などの流動特性を解析するために落体式粘度計の一種である小型落針式粘度計(FNR)の開発を行ってきた。本研究では、FNRを用いた粘度測定における不確かさを評価した。密度の異なる8本のニードル($\rho_s = 1030\text{--}1505\text{ kg/m}^3$)を用いた校正における不確かさを評価した結果、最も大きな不確かさの要因はニードルと試料の密度差($\rho_s - \rho_f$)であった。粘度測定の不確かさを減少させるためにはニードルの質量を高精度に測定することが必要であることがわかった。 $\rho_s - \rho_f$ が 610 kg/m^3 では、FNRを用いた未知試料の粘度測定における拡張不確かさは0.90%(包含係数=2)以下であることを確認した。

In our laboratory, a compact-sized falling needle rheometer (FNR) which is type of a falling body viscometer has been developed in order to analyze the flow property such as blood, ionic liquid and others. In the present study, uncertainty in viscosity measurement using FNR was evaluated. As a result of evaluation of uncertainty in calibration using 8 needles with different densities ($\rho_s = 1030\text{--}1505\text{ kg/m}^3$), factor of the largest uncertainty is a density difference between needle and sample ($\rho_s - \rho_f$). It was found that it is required to measure the mass of a needle correctly in order to decrease viscometric uncertainty. It was confirmed that the expanded uncertainty in viscosity measurement of unknown samples using FNR is less than 0.90 % (coverage factor = 2) at 610 kg/m^3 of $\rho_s - \rho_f$.

[**Keywords:** falling needle rheometer, viscosity measurement, uncertainty, flow property]

1. 緒言

流体の流動特性は化学工業や食品工業などの工業分野において主に必要とされる物性である。近年では、工業分野だけでなく医療分野においても、血液の粘性と様々な病気の関係を解明するため、血液の流動特性が必要とされている[1-4]。工業分野における流体の粘度は主に細管粘度計や回転粘度計によって測定されている。しかし、

血液は体外に出てから約3分後に凝固し始める性質を持つため、迅速に測定を行う必要がある。また、人に対する一回の採血量は限られているため、少量の試料で測定が可能な装置が望まれる。しかし、一般的な粘度計の中には、少量の試料を用いて迅速に粘度測定が可能な装置が少ない。最近では、極少量の試料を用いて粘度測定が可能なMEMS粘性センサーの開発が行われている[5]。しかしながら、MEMS粘度センサーを用いて求められた15%グリセロール溶液の粘度は市販の粘度計で計測された粘度と比較して-0.07~5.72%の差が生じている。そのため、医療分野における血液粘度の標準的な測定法は未だ確立されていない。さらに、最近研究が盛んに行われているイオン液体のような高価な物質の流動特性の解析のためにも、少量の試料で測定可能な装置の開発が望まれている。

本研究室では、約 4 cm^3 の測定試料を用いて迅速(3分以内)に流体の流動特性の解析が可能な小型落針式粘度計(Falling Needle Rheometer, FNR)の装置開発を行ってきた

* 関西大学環境都市工学部, 〒564-0073 大阪府吹田市山手町 3-3-35. Department of Chemical, Energy and Environmental Engineering, Kansai University, 3-3-35 Yamate-cho, Suita, Osaka 564-0073. E-mail: yhideki@kansai-u.ac.jp

** 日鉄住金テクノロジー株式会社 計測・検査事業部, 〒660-8660 兵庫県尼崎市東向島西之町 1. Instrumentation and Inspection System Division, Nippon Steel & Sumikin Technology Co., Ltd., 1, Higashimukojimanishino-cho, Amagasaki, Hyogo 660-8660

*** アサヒグループホールディングス株式会社 豊かさ創造研究所, 〒302-0106 茨城県守谷市緑 1-1-21. Research & Development Laboratories for Sustainable Value Creation, Asahi Group Holdings, Ltd., 1-1-21, Midori, Moriya, Ibaraki 302-0106

[6]. FNR は Park ら[7,8]によって考案された Falling Needle Viscometer を小型化し、改良した装置である。これまでに FNR を用いて主に血液の流動特性の解析を行ってきた[9]. 信頼性のあるデータの蓄積のために、装置性能の評価は必要不可欠である。最近では、様々な粘度計の測定精度を評価する目的で、不確かさが用いられている[10-12]. 不確かさは確率を用いて測定値からどの程度の範囲内に真の値があるかを表す尺度であり、粘度計などの物性値測定装置の信頼性を評価するためには必要不可欠と言える。しかし、落体式粘度計の一種である落針式粘度計に対する不確かさの評価を行った報告は未だ存在しない。本研究では、標準物質を用いた FNR の校正における不確かさの要因を決定した。流体の流動曲線を作成するために必要な密度の異なる 8 本のニードルを用いた校正における不確かさを算出した。さらに、校正した FNR を用いた粘度測定における不確かさの評価を行った。

2. 実験装置

FNR の装置概略図および写真を Fig. 1 に示す。装置は二重円筒のセルが鉛直に設置されており、内径 8 mm、高さ 90 mm の測定セル内に約 4 cm³ の試料が充填される。測定セル内にニードルを自由落下させ、測定した落下速度から流動解析を行う。セルとセルカバーの間の環状流路に恒温水を流すことで、試料の温度を制御することが

Fig. 1 Schematic diagram and photograph of experimental apparatus

可能である。落下ニードルのセンサー間の通過時間を計測するため、セルカバーの外側には金属の通過を検知する磁気センサーが設置されている。測定時間を短縮するため、装置下部にはニードル回収用セルが設置されている。装置上部には、ニードルが円管中央を落下するようにピンホールを空けたランチャーが設置されている。

ニードルは両端に半球部を持つ長さ 20 mm、直径 2 mm の円柱型で、内部に封入する金属量を変化させることで密度調節が可能である。ニードル内部の下側に金属を封入することで、重心を低く保ち、落下挙動の安定化を図っている。

3. 解析理論

FNR を用いた流動解析は以下で示す落針式粘度計の解析理論に基づいている。

半径 R の円管容器内を半径 kR 、長さ L の円柱型ニードルが自由落下する場合を考える。解析を行う上で次のような仮定を行った。(1)ニードルは終末速度で自由落下している。(2)ニードルおよび円管内壁面と流体の間に滑りがない。(3)流体は非圧縮性である。(4)管内流動は層流である。(1)から(4)の仮定に基づいたニードルの落下運動の概念図を Fig. 2 に示す。

Fig. 2 (a) Flow model and (b) velocity distributions of sample fluid in the fluid vessel of FNR

内半径 r 、外半径 $r+dr$ 、長さ L の微小円柱殻を仮定する。仮定した微小円柱殻に作用する力学的関係は上下面に圧力 P_1 および P_2 、円柱内壁面および外壁面に剪断応力 τ および $\tau+dr$ である。これらの力の釣り合いから(1)式が導かれる。

$$\frac{1}{r} \frac{d(r\tau)}{dr} = \frac{(P_1 - P_2)}{L} \quad (1)$$

ニードルには上下面の圧力 P_1 および P_2 、重力および浮力が働き、ニードル壁面では上向きの剪断応力 τ が働いているため、ニードルに働く力の釣り合いから(2)式が得られる。ただし、 $\Delta P = P_1 - P_2$ ($\Delta P < 0$) とする

$$(\rho_s - \rho_f)g\pi(kR)^2 L + \pi(kR)^2 \Delta P = 2\pi kRL\tau_{(r=kR)} \quad (2)$$

ニードル壁面と円管内壁面の間の環状流路を移動する流体量は(3)式で表される。

$$Q = \pi(kR)^2 U_i \quad (3)$$

速度分布は境界条件として(4)式で表される。

$$\begin{cases} u_{(r=kR)} = -U_i \\ u_{(r=R)} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

導出した(1)-(4)式が流動解析の基礎式となる。(1)-(4)式に対応する流体の構成方程式を連立させることによって、ニードル表面における剪断応力と剪断速度の解析が可能となる。(1)-(4)式にニュートン流体の構成方程式 $\tau = \mu\gamma$ を適用し、解析した結果を(5)-(8)式に示す。ニュートン流体の粘度 μ は(5)式で表される。(5)式中の G はニードルとセルの半径比 k およびセル半径 R によって決まる装置固有の値であり、(6)式で表される。

$$\mu = \frac{(\rho_s - \rho_f)g}{GU_i} \quad (5)$$

$$G = -\frac{2(k^2 + 1)}{(kR)^2 \{(k^2 + 1) \ln k + 1 - k^2\}} \quad (6)$$

ニードルの表面 $r = kR$ における剪断速度 γ および剪断応力 τ をそれぞれ(7)式および(8)式に示す。

$$\gamma_{(r=kR)} = \frac{du}{dr} = \frac{(k^2 - 1)U_i}{kR \{(k^2 + 1) \ln k + 1 - k^2\}} \quad (7)$$

$$\tau_{(r=kR)} = \frac{(\rho_s - \rho_f)g(1 - k^2)kR}{2(k^2 + 1)} \quad (8)$$

Table 1 Densities of falling needles used in this experiment

Needle No.	Density $\times 10^{-3}$ [kg/m ³]
1	1.030
2	1.096
3	1.165
4	1.229
5	1.304
6	1.366
7	1.434
8	1.505

4. 不確かさの評価方法

FNR は上記で示した解析理論を基に粘度計校正用標準液を用いてニードルごとに校正を行うことで正確な流体の流動解析方法をとっている[13]。校正試料には粘度計校正用標準液 JS 5 (日本グリース㈱)を用いた。校正証明書に記載されている 20.00℃における JS 5 の校正値は 4.0566 mPa・s である。試料温度を 20.0℃とし、密度の異なる No.1-8 のニードルを各 10 回ずつ試料中に落下させ、落下速度を測定した。使用したニードルの密度を Table 1 に示す。ニードルは No. が大きくなるにつれて密度が大きくなるように作製した。

粘度の算出式である(5)式を整理すると、校正によってニードル定数 G を求める(9)式を導くことができる。

$$G = \frac{(\rho_s - \rho_f)g}{\mu_{SRM} U_i} \quad (9)$$

(9)式からニードル落下速度 U_i 、ニードルと試料の密度差 $(\rho_s - \rho_f)$ および校正に用いた標準物質の粘度 μ_{SRM} が不確かさの要因であると考えられる。FNR は装置の校正を行った同じ場所での測定を想定しているため重力加速度 g は不確かさの要因とはならない。したがって、考慮する不確かさの要因をニードル落下速度 $u(U_i)$ 、ニードルと試料の密度差 $u(\rho_s - \rho_f)$ 、試料温度 $u(T)$ および標準物質 $u(\mu_{SRM})$ の 4 つに大別して評価した。各要因の不確かさの二乗和の平方根で表される合成相対標準不確かさ $u_c(G)/G$ を(10)式で算出した。

$$\frac{u_c(G)}{G} = \sqrt{\left(\frac{u(U_i)}{U_i}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s - \rho_f}\right)^2 + (u(T) \cdot \delta_v)^2 + \left(\frac{u(\mu_{SRM})}{\mu_{SRM}}\right)^2} \quad (10)$$

各要因の不確かさを相対標準不確かさとして表すことで、不確かさの大きさを比較して評価することができる。具体的不確かさの評価プロセスを示すため、次の 5.1 および 5.2 節においては No.1 ニードルの不確かさの算出を例に行う。

5. 不確かさ評価の結果および考察

5.1 ニードル落下速度の不確かさ

ニードル落下速度の測定における不確かさの要因として、ニードル落下中に起こる円管中心軸からのずれや温度のばらつきなどが考えられる。これらの要因の不確か

さを落下速度の繰り返し測定により求めた。落下速度の10回の繰り返し測定で得られた標準偏差から標準不確かさは 2.2×10^{-4} m/sと算出した。また、センサーの通過時間の最小表示分解能が 1×10^{-4} sであるため、落下速度の標準不確かさは 2.6×10^{-5} m/sと算出した。以上の標準不確かさを合成した結果、ニードル落下速度による粘度の相対標準不確かさとして0.21 %が得られた。

5.2 ニードルと試料の密度差の不確かさ

ニードルの密度は測定したニードルの質量および体積から算出した。ニードルの質量は電子天秤(SARTORIUS ME235P)を用いて測定した。電子天秤の性能仕様から、繰り返し測定 of 標準不確かさ 0.015 mg が得られた。また、直線性偏差を示す ± 0.15 mg から標準不確かさは0.087 mgと算出した。電子天秤の最小表示分解能は0.01 mgであることから標準不確かさは 2.9×10^{-3} mgと算出した。これらの不確かさを合成し、質量測定におけるニードル密度の標準不確かさを 1.5 kg/m^3 と算出した。ニードルの体積はマイクロメータ(株式会社ミツトヨ M110-25)を用いて測定した。ニードルの両端は半球であると仮定し体積を算出した。マイクロメータの性能仕様で示されている測定 of 拡張不確かさ $1.1 \text{ }\mu\text{m}$ より標準不確かさを 5.5×10^{-4} mmと算出した。また、最小表示分解能が 1×10^{-3} mmであることから、標準不確かさを 2.9×10^{-4} mmと算出した。以上のマイクロメータにおける不確かさがニードル体積に及ぼす標準不確かさを $2.6 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ と算出した。体積測定の不確かさをニードル密度の標準不確かさとして算出すると 0.46 kg/m^3 で表される。質量測定および体積測定における不確かさを合成し、ニードル密度の標準不確かさは 1.6 kg/m^3 と算出した。試料密度は校正証明書に記載されている値を用いたため、校正証明書からJS 5の密度標準不確かさとして $2.0 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3$ が得られた。

以上のニードルおよび試料密度の標準不確かさを合成した結果、ニードルと試料の密度差による粘度の相対標準

不確かさとして0.71 %が得られた。

5.3 試料温度の不確かさ

温度制御範囲 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ の不確かさについては、温度変化によって落下速度が変わることから、落下速度の繰り返し測定による不確かさに含まれると考えられる。したがって、ここでは使用した温度計の不確かさを評価する。試料の温度測定には白金測温抵抗体(株式会社チノー R003-3)を備えたデジタル温度計(Automatic Systems Laboratories Ltd. F201)を用いた。温度計のJCSS校正証明書に記載されている拡張不確かさは 0.009°C (包含係数 = 2)であったため、温度計の標準不確かさは 0.005°C と算出した。デジタル温度計の最小表示分解能は 0.001°C であるため、標準不確かさは $2.9 \times 10^{-4}^\circ\text{C}$ と算出した。

以上の標準不確かさを合成した結果、試料温度の標準不確かさとして 0.0053°C が得られた。JS 5の 20.0°C における粘度の相対温度係数は $2.72 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ であるため、粘度の相対標準不確かさは0.015 %と算出した。

5.4 標準物質の不確かさ

使用したJS 5の校正証明書に記載されている拡張不確かさ $0.0028 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (包含係数 = 2)より、粘度の相対標準不確かさは0.035 %と算出した。

5.5 校正における不確かさの決定

上記の5.1-5.4節に示したNo.1ニードルを用いた場合の不確かさ評価の結果をTable 2に示す。相対標準不確かさの比較から、最大の不確かさ要因は密度差であることがわかった。試料温度および標準物質の不確かさは落下速度および密度差の不確かさに比べて無視できるほど小さな値を示した。

5.1 および 5.2 節に示した方法と同様に密度の異なるNo.2-8のニードル($\rho_s = 1096\text{-}1505 \text{ kg/m}^3$)を用いた場合の不確かさを算出した。ここで、異なるニードルを用いた場合においても、試料温度および標準物質の不確かさは同

Table 2 Evaluation of uncertainty in calibration using No.1 needle

Factor of uncertainty	Symbol	Value	Standard uncertainty	Relative standard uncertainty [%]
Falling velocity	$u(U_f)$	0.1073 m/s	2.2×10^{-4} m/s	0.21
Density difference	$u(\rho_s - \rho_f)$	220 kg/m^3	1.6 kg/m^3	0.71
Temperature	$u(T)$	20.0°C	0.0053°C	0.015
Standard reference material	$u(\mu_{SRM})$	$4.0566 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	$0.0014 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	0.035
Calibration	$u_c(G)$	$4.96 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$	$3.7 \times 10^4 \text{ m}^{-2}$	0.74

6. 粘度測定における不確かさ

一であると見なすことができる。ニードルと試料の密度差に対する落下速度、密度差および合成不確かさの関係を Fig. 3 に示す。落下速度の不確かさは密度差に依存せず、0.2 %に近い値を示した。密度差の不確かさは密度差が小さくなるにつれて増大する傾向を示した。相対標準不確かさは密度差の標準不確かさ(1.6 kg/m³)を密度差で割ることで算出している。そのため、密度差が小さくなるほど、密度差の相対標準不確かさは大きくなる。5.2 節の評価結果から、ニードル密度の不確かさは電子天秤精度に最も大きく影響されるため、より高精度にニードルの質量を測定することで校正の不確かさを減少させることが可能であると考えられる。合成相対標準不確かさについても同様に、密度差が小さくなるにつれて不確かさが増大する傾向を示した。また、ニードルと試料の密度差が 600 kg/m³ 以上においては、合成相対標準不確かさは一定値に収束する傾向を示した。合成相対標準不確かさは校正における不確かさを表しているため、ニードルと試料の密度差が 600 kg/m³ 以上の平均値を用いて、校正における不確かさを 0.31 %と決定した。

Fig. 3 Relative standard uncertainty calculated for No.1-8 needles

不確かさ評価の結果から、FNR を用いて高精度に粘度測定を行うためにはニードルと試料の密度差を 600 kg/m³ 以上にすることがわかった。ここでは、校正した FNR を用いた未知試料の粘度測定における不確かさを評価した。測定試料として、校正を行った標準液とは粘度の異なる粘度計校正用標準液 JS 10 を用いた。測定には、ニードルと試料の密度差($\rho_s - \rho_f = 610 \text{ kg/m}^3$)を考慮し、No.7 ニードル($\rho_s = 1434 \text{ kg/m}^3$)を選定した。試料温度は 20.0℃とし、ニードル落下速度を 10 回測定した。粘度測定における相対標準不確かさ $u_m(\mu)/\mu$ を(11)式で算出した。

$$\frac{u_m(\mu)}{\mu} = \sqrt{\left(\frac{u(U_f)}{U_f}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s - \rho_f}\right)^2 + (u(T) \cdot \delta_v)^2 + \left(\frac{u_c(G)}{G}\right)^2} \quad (11)$$

ここで、 $u_c(\mu)/\mu$ は No.7 ニードルを用いた校正における相対標準不確かさを表している。試料密度の不確かさは測定に用いた振動式密度計(Anton Paar Ltd. DMA 4500 M)の性能仕様から算出した。その他の要因における不確かさの評価方法は校正の際に行った評価方法と同様である。

算出した各要因の相対標準不確かさおよび粘度測定における相対標準不確かさを Table 3 に示す。粘度測定における相対標準不確かさとして 0.45 %が得られた。また、相対標準不確かさに包含係数 = 2 を掛けることで、相対拡張不確かさとして 0.90 %が得られた。したがって、ニードルと試料の密度差を 610 kg/m³ とすることで、FNR を用いて拡張不確かさ 0.90 %以下で高精度に粘度測定が可能である。また、測定した JS 10 の校正証明書に記載されている値は 8.3705 mPa・s であるため、測定値との相対誤差は 0.72%となった。相対誤差は拡張不確かさ 0.90 %以下を示したことから、不確かさ評価の妥当性が確認できた。今回は未知試料として標準液を用いたが、標準液以外の試料の粘度測定においても試料密度を考慮すれば、同様

Table 3 Evaluation of uncertainty in measurement using No.7 needle

Factor of uncertainty	Symbol	Value	Standard uncertainty	Relative standard uncertainty [%]
Falling velocity	$u(U_f)$	0.1450 m/s	$2.4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	0.17
Density difference	$u(\rho_s - \rho_f)$	610 kg/m ³	1.6 kg/m ³	0.27
Temperature	$u(T)$	20.0 °C	0.0053 °C	0.018
Calibration by JS 5	$u_c(G)$	$4.96 \times 10^6 \text{ m}^2$	$1.5 \times 10^4 \text{ m}^2$	0.031
Viscosity measurement	$u_m(\mu)$	8.31 mPa・s	0.037 mPa・s	0.45

の不確かさでの測定が可能であると考えられる。また、未知試料の測定における不確かさを厳密に評価する場合、粘度と温度の関係を正確に把握する必要がある。しかし、試料温度の不確かさは他の要因の不確かさに比べて無視できるほど小さいため、未知試料の粘度温度依存性が測定した粘度の不確かさに及ぼす影響は小さいと考えられる。

7. 結言

本研究では、FNR を用いた粘度測定における不確かさを評価した。考慮する不確かさの要因を、ニードル落下速度、ニードルと試料の密度差、試料温度および標準物質の 4 つに大別し、粘度に対する相対標準不確かさを算出した。密度の異なるニードル($\rho_s = 1030\text{--}1505 \text{ kg/m}^3$)に対して不確かさを評価した結果、最も大きな不確かさの要因はニードルと試料の密度差($\rho_s - \rho_f$)であった。不確かさを減少させるためには、より高精度なニードルの質量測定を行う必要があるということがわかった。校正した FNR を用いて未知試料を測定する場合、ニードルと試料の密度差を 610 kg/m^3 とすることで、拡張不確かさ 0.90 % 以下で高精度に粘度測定が可能であった。

NOMENCLATURE

R	: container radius, m
k	: ratio of container to needle diameter
kR	: needle radius, m
L	: total needle length, m
P_1	: pressure of the upper end of a minute circular cylinder, Pa
P_2	: pressure of the lower end of a minute circular cylinder, Pa
π	: circular constant
g	: gravitational acceleration, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
Q	: net flow rate of fluid pushed aside by the needle, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
u	: velocity in the system length direction, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
U_t	: terminal velocity of a falling needle, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
ρ_s	: needle density, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_f	: fluid density, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
μ	: viscosity, Pa·s
G	: geometric needle constant, m^{-2}
γ	: shear rate, s^{-1}
τ	: shear stress, Pa
$u(U_t)$	: standard uncertainty of terminal velocity of a falling needle, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$u(\rho_s - \rho_f)$	: standard uncertainty of density difference between needle and sample, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$u(T)$	: standard uncertainty of temperature of sample, $^{\circ}\text{C}$
$u(\mu_{SRM})$	: standard uncertainty of a standard reference material, Pa·s
$u_c(G)$	: combined standard uncertainty in calibration, m^{-2}
T	: temperature of sample, $^{\circ}\text{C}$
δ_v	: temperature coefficient of viscosity, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
$u_m(\mu)$	: combined standard uncertainty in viscosity measurement, Pa·s

参考文献

- [1] E.W. Merrill; "Rheology of Blood", *Physiol. Rev.* **49** (1969) 863.
- [2] M.F. Kiani, A.G. Hudez; "A Semiempirical Model of Apparent Blood-Viscosity as a Function of Vessel Diameter and Discharge Hematocrit", *Biorheology*, **28** (1991) 65-73.
- [3] H. Hartert; "Flow Properties of Blood and Other Biological Systems", Pergamon Press, Oxford, (1960) 186-192.
- [4] P. Gaetgens; "Flow of Blood through Narrow Capillaries - Rheological Mechanisms Determining Capillary Hematocrit and Apparent Viscosity", *Biorheology*, **17** (1980) 183-189.
- [5] O. Cakmak, C. Elbuen, E. Ermek, A. Mostafazadeh, I. Baris, B. E. Alaca, I. H. Kavakli, H. Urey, "Microcantilever based disposable viscosity sensor for serum and blood plasma measurements", *Methods*, **63** (2013) 225-232.
- [6] 山本秀樹, 芝田隼次; 「指数法則流体中を自由落下する円柱型ニードルを用いた流動特性の解析法」, *化学工学論文集*, **25** (1999) 803-811.
- [7] N. A. Park, T. F. Irvine Jr.; "Measurement of rheological fluid properties with the Falling Needle Viscometer", *Rev. Sci. Instrum.*, **59** (1988) 2051-2058.
- [8] I. Kim, T. F. Irvine Jr., N. A. Park; "Experimental study of the velocity field around a falling needle viscometer", *Rev. Sci. Instrum.*, **65** (1994) 224-228.
- [9] H. Yamamoto, K. Kawamura, K. Omura, S. Tokudome; "Development of a Compact-Sized Falling Needle Rheometer for Measurement of Flow Properties of Fresh Human Blood", *Int. J. Thermophys.*, **31** (2010) 2361-2379.
- [10] M. Brizard, M. Megharfi, C. Verdier; "Absolute falling-ball viscometer : evaluation of measurement uncertainty", *Metrologia*, **42** (2005) 298-303.
- [11] 菜嶋健司, 藤田佳孝; 「回転粘度計による高精度粘度測定」, *熱物性*, **23** (2009) 148-153.
- [12] Y. Fujita, Y. Kurano, K. Fujii; "Evaluation of uncertainty in viscosity measurements by capillary master viscometer", *Metrologia*, **46** (2009) 237-248.
- [13] 山本秀樹, 木下剛志, 岡村直樹, 村山憲弘, 芝田隼次; 第 24 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (2003) 273-275.

[Received Jan. 30, 2014, Accepted Aug. 8, 2014]