【論文】

近赤外レーザー誘起表面波を用いた 粘性率・表面張力測定法の開発 —表面加熱と体積加熱における試料の表面張力温度依存性 がもたらす系統的不確かさの理論解析とデカノール水 溶液を用いた表面張力温度依存性の影響の実験検証—

Development of Measurement Technique for Viscosity and Surface Tension with Near-infrared Laser-Induced Capillary Wave -Theoretical Analysis of Uncertainties caused by the Temperature Dependence of Surface Tension and Experimental Verification of the Effect on the Temperature Dependence of Surface Tension with Decanol Aqueous Solution between Surface Heating and Volume Heating-

滝口 広樹* 長坂 雄次**
Hiroki Takiguchi and Yuji Nagasaka

レーザー誘起表面波法は、従来にない非接触・超高速（マイクロ秒）・極微量（マイクロリットル）で粘性率を測定可能な光学的測定技術である。本研究では体積加熱理論[1]をもとに、本測定法を用いた実用的な粘性率センシング装置の開発を目指しており、本論文では、表面張力温度依存性に着目し、表面加熱および体積加熱における測定上の系統的不確かさの理論解析を行った。また、表面張力温度依存性が極小値を示すデカノール水溶液の比較測定によって、表面加熱方式より体積加熱方式が実用的であることの有意性を検討したので報告する。

Laser-induced capillary wave (LiCW) using pulsed infrared heating laser is a non-contact and optical viscosity measurement technique to measure food and biological liquid sample viscosity with only a microliter-order sample volume and measurement time of the millisecond-order. In the previous study, to develop a practical viscosity sensing apparatus with LiCW, we proposed the method with volume heating[1]. This paper focuses the effect on the temperature dependence of surface tension, we theoretically calculated the uncertainties of surface heating and volume heating in the case of toluene on the viscosity and surface tension measurement. In addition, in order to verify the advantage of volume heating compared with surface heating, we experimentally demonstrated the measurement of decanol aqueous solution which shows the minimum value of surface tension at room temperature.

[**Keywords:** Viscosity, Laser-induced capillary wave, Surface tension, Decanol aqueous solution, Surface heating and volume heating]

1. はじめに

* 慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻,
〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1.
School of Integrated Design Engineering, Graduate School of
Science and Technology, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi,
Yokohama 223-8522.
FAX: 045-566-1720 E-mail: takiguchi@naga.sd.keio.ac.jp

** 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科, 〒223-8522
横浜市港北区日吉 3-14-1.
Dept. of System Design Engineering, Fac. of Science and
Technology, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Yokohama
223-8522.
FAX: 045-566-1720 E-mail: nagasaka@sd.keio.ac.jp

著者らは、キャピラリー法や Wilhelmy 法などに代表される従来の古典的粘性率・表面張力測定法に代わる全く新しい原理のレーザー誘起表面波（Laser-induced Capillary Wave）法の開発を行っている。これまで CO₂ レーザーを加熱源とした原理検証[2-4]を行い、液状食品や血液を対象として、本測定法の特徴を活かした様々な実験室レベルでの成果を得てきた[5-7]。その一方、本測

定法を実用的な粘性率センシング装置にするためには、①従来法に及ばない測定不確かさ（ $\sim \pm 10\%$ ）、②従来のCO₂ レーザーを加熱源とする表面加熱では過度な温度上昇が生じる課題の解決が必要であった。以上の問題点を解決するために、これまで液体試料の温度上昇が小さく減衰挙動に關係する熱物性値の不確かさの低減が見込める、YAG レーザーを加熱源とする体積加熱を用いた測定理論と装置を開発した[1]。また、従来のCO₂ レーザーを加熱源とする表面加熱の場合との、試料の温度上昇および表面波振幅の定量的な比較を示し、水や有機溶媒などのニュートン流体の測定を行った[1]。

文献 1 では、減衰過程での温度変化に起因して、表面張力が変化する影響を表面加熱と体積加熱における理論波形の比較により、定性的に考察した。一方、本論文は、文献 1 を補完するために、表面張力温度依存性についての理論解析を行い、粘性率および表面張力の測定値に与える系統的な不確かさを新たに定量的に明らかにした。また、実験的にも、常温で表面張力が極小値を示すデカノール水溶液を用いることで、新たに体積加熱が測定上もたらす利点について検証した。

2. 測定原理および測定装置

2.1 レーザー誘起表面波法の測定原理

レーザー誘起表面波（Laser-induced Capillary Wave; LiCW）法の原理図を Fig. 1 に示す。等強度で二光束に分割した赤外加熱光を液体表面で干渉させると、空間的に周期的な強度分布が形成され、このパターンに従い加熱される。このとき熱膨張が液面で起こり、波長 μm 、振幅 nm オーダーのレーザー誘起表面波（LiCW）が誘起される。表面波の振幅は、液体の変位 $z(x, z, t)$ であり、Navier-Stokes の式(1)、連続の式(2)および熱伝導方程式(3)の3式を連立し、ラプラス空間上で解析解を導く。

$$\frac{\partial^2 z(x, z, t)}{\partial t^2} - \nu \nabla^2 \frac{\partial z(x, z, t)}{\partial t} - V_L^2 \nabla^2 z(x, z, t) = -\beta V_L^2 \nabla T \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \frac{\partial z(x, z, t)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) - \lambda \nabla^2 T = I_h \alpha [1 + \cos(kx)] \exp(\alpha z) \delta(t) \quad (3)$$

式(1)における圧力項は、音波の理論に基づく。流体にかかる圧力は、左辺第三項のように密度と音速に比例し、

Fig. 1 Principle of laser-induced capillary wave method and two different types of liquid heating; (a) generation of capillary wave and detection of signal, (b) volume heating in mm-order absorption length, (c) surface heating in μm -order absorption length.

右辺のように熱膨張を考慮した式で表される。本研究で従来用いてきた遠赤外波長の場合には、水や有機溶媒に対する吸収長が μm オーダーとなり、表面加熱として理論的に扱うことができる[2-4, 8]。これに対して、近赤外波長の場合には、加熱エネルギーが液体表面付近だけでなく、深さ方向に対して mm オーダーの吸収長で吸収され、熱伝導方程式の境界条件を式(4)のように設定することで体積加熱を理論的に表現し、従来の表面加熱理論と区別して導出している[1]。

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z \geq 0 \text{ and } z = -\infty \quad (4)$$

体積加熱における表面波振幅のラプラス空間上での解析解 $Z(x, z, t)$ は、

$$Z = \frac{\beta I_0}{\lambda k^2} \frac{b_1}{(b_2^2 - b_1^2)} \left\{ \frac{-b_1 b_3}{1 + b_3} \cdot \frac{e^{b_1 k z}}{b_4^2 - b_1^2} - (b_3 C_1 e^{b_3 k z} + b_4 C_2 e^{b_4 k z}) \right\} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} 2b_3 + d_1b_5 & 2b_4^2 + b_5(b_4^2 + d_1b_4 - 1) \\ 1 + b_3^2 & 2b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_2d_3 - b_5 \\ -2 \frac{b_5b_1}{1+b_5} \frac{1}{b_4^2 - b_1^2} - \frac{k}{\beta\rho V_L^2} \frac{\partial\sigma}{\partial T} b_5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$b_1 = \alpha/k \quad (7)$$

$$b_2 = (1 + s/ak^2)^{1/2} \quad (8)$$

$$b_3 = (1 + s/\nu k^2)^{1/2} \quad (9)$$

$$b_4 = \left[1 + \frac{s^2}{(V_L^2 + s\nu)k^2} \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$b_5 = V_L^2/s\nu \quad (11)$$

$$d_1 = \frac{\sigma k}{\rho V_L^2} \quad (12)$$

$$d_2 = \frac{b_1b_5}{(1+b_5)(b_4^2 - b_1^2)} \quad (13)$$

$$d_3 = d_1b_5 + 2b_1 + b_2b_5 - \frac{b_5}{b_1} \quad (14)$$

と表される．式(5)から式(14)を数値逆ラプラス変換[9]することで，時間空間における表面波振幅 $z(x, z, t)$ の挙動を記述することができる．実験で得られる信号波形から粘性率および表面張力を算出する逆問題解析手法は，シンプレックス法[10]を用いている．

2.2 測定装置

2.2.1 CO₂ レーザー（波長 10.6 μm）を用いた装置

本研究では，はじめに CO₂ レーザーを加熱源とする装置を開発した[2-5]．装置図を Fig. 2 に示す．原理検証を目的とし，十分な強度の信号を取得するために，水や有機溶媒に対して相対的によく吸収し染料を必要としない遠赤外波長 10.6 μm を選定した．加熱光源として，パルス幅 50 ns，波長 10.6 μm，固定出力 65 mJ，ビーム径 6 mm のパルス CO₂ レーザー (EDINBURGH INSTRUMENTS, MTL-3) を用いている．加熱光強度の調整は，1/2 波長板 (WP) と偏光ビームスプリッター (PBS) からなる強度可変システムで行い，無偏光ビームスプリッター (NPBS) により等強度の二光束に分割する．ミラー (M2～M4)

Fig. 2 Experimental apparatus with CO₂ laser.

を経て試料表面で交差させるよう照射し，気液界面にレーザー誘起表面波を誘起する．観察光源には，波長 633 nm，出力 15 mW，ビーム径 1 mm の He-Ne レーザー (NEC, GTG5600) を用いている．表面波が反射型回折格子の役割を果たすことで得られる一次回折光は，ミラー (M9) によって，ピンホールおよびバンドパスフィルターを介した光電子増倍管 (PMT) に導かれる．PMT で検出した信号は，電圧信号としてオシロスコープに取り込み，PC で記録とデータ解析を行う．本研究では，本装置を用いて， $10^{-1} \sim 10^5$ mPa・s までの広範な粘性範囲の測定に適用できることを確認した[2-4]．

2.2.2 YAG レーザー（波長 1064 nm）を用いた装置

本測定法を実用粘性率センシング装置にする上で，特に血液などの生体試料やたんぱく質の熱変性が生じる液状食品への応用のためには，CO₂ レーザーを加熱源とする表面加熱の過度な温度上昇が欠点であった．そこで，相対的に 1/1000 に温度上昇を抑制可能な YAG レーザーを加熱源とする装置を開発した[1]．体積加熱を実現する YAG レーザーを適用した装置の概略図を Fig. 3 に示す．加熱光には，パルス幅 6 ns，波長 1064 nm，可変出力 0 ～ 200 mJ，ビーム径 5 mm のパルス YAG レーザー (Litron,

Fig. 3 Experimental apparatus with YAG laser.

Nano L 200-10) を用いている。また、観察光には、波長 641 nm, 出力 100 mW, ビーム径 1 mm の赤色半導体レーザー (Coherent, CUBE640-100C) を用いている。観察光路は、CO₂ レーザーを用いた装置と同じ機構を採用している。加熱光路は、加熱波長が従来の CO₂ レーザーの約 1/10 であることに起因して、二光束の交差角が小さくなることを利用し、ミラー (M4) から同一ミラー内を通る光学系と変更した。

次章では、試料の表面張力温度依存性が測定上もたらす系統的不確かさの理論解析を行った。

3. 表面加熱と体積加熱の比較

3.1 表面波の減衰挙動と熱物性値の関係

本節は、文献 1 にて定性的考察を行った表面張力温度依存性の影響が減衰挙動にどのように起因するかを、より詳細に解説する。トルエン ($\eta=0.552 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ [11], $\sigma=27.9 \text{ mN/m}$ [12]) における、表面加熱と体積加熱それぞれの場合の表面波振幅の理論波形を Fig. 4 に示す。図中の下には、減衰挙動のどの部分に熱物性値が影響しているかを示しており、また表面加熱および体積加熱の熱膨張による波の振幅の変化過程を Thermal expansion と記載してある。

表面加熱における減衰挙動と熱物性値との関係は、粘性率と表面張力温度依存性は減衰に、表面張力は振動に感度が存在することがわかっている[4]。水や有機溶媒などの液体試料の場合、表面張力は負の温度依存性を示す[12]ため、減衰挙動におけるみかけの表面張力は、時間経

Fig. 4 Comparison between theoretical curves of volume heating with surface heating for toluene ($\lambda=70 \text{ } \mu\text{m}$).

過に伴い温度緩和され大きくなる。そのため、表面波の振幅はみかけ上小さくなる。以上の理由で、表面張力温度依存性が静止液面に対して上下非対称な挙動を与える。

これに対して体積加熱の場合には、表面加熱に比べ、1000 倍以上の吸収長によって加熱されるため、相対的に大きな熱膨張が生じる。従って、正方向の 1 番目の山が熱膨張過程であると考えられ、熱膨張が $10 \text{ } \mu\text{s}$ 程度生じている。このときの試料の温度上昇は、mK オーダーとなり[1]、結果的に表面張力温度依存性の減衰挙動への影響は無視でき、静止液面に対して上下対称な挙動となる。

3.2 表面張力温度依存性の測定値への系統的不確かさの定量的評価

本節では、改めて表面張力温度依存性に着眼し、粘性率と表面張力の測定における、試料の表面張力温度依存

Fig. 5 Effect of measured viscosity on the temperature dependence of surface tension between volume heating with surface heating ($\Lambda=70 \mu\text{m}$).

Fig. 6 Effect of measured surface tension on the temperature dependence of surface tension between volume heating with surface heating ($\Lambda=70 \mu\text{m}$).

性がもたらす系統的な不確かさを解析的に導出した。

トルエンを試料として行った解析方法を以下に解説する。はじめに、表面張力温度依存性 $d\sigma/dT$ を文献値[12] から i 倍変化させた値を代入し、表面波の理論波形を計算した。粘性率 η と表面張力 σ の 2 パラメータによってこの理論波形のカーブフィッティングを行い、解析値 η_i および σ_i を求める。両方の過程において、固定する物性値は文献値[12]を代入した。文献値と異なる表面張力温度依存性を代入することによって、理論波形の挙動に変化が生じる場合、解析では表面張力温度依存性を文献値[12]で固定するため、フィッティングパラメータである粘性率お

よび表面張力の解析値が変化する。従って、表面張力温度依存性に関して、文献値[12]を代入して得られる解析値 η_i および σ_i と i 倍変化させた値を代入して得られる解析値と η_i と σ_i との偏差を計算することで、測定における表面張力温度依存性の系統的な不確かさを明らかにした。表面加熱および体積加熱の解析結果をそれぞれ Fig. 5 と Fig. 6 に示す。表面加熱の場合、粘性率にして偏差 $\pm 10 \%$ 、表面張力においては $\pm 1 \%$ の変化を与えている。それに対して、体積加熱の場合、粘性率では偏差 $\pm 0.1 \%$ 、表面張力にして $\pm 0.5 \%$ となる。以上より、表面張力温度依存性の測定値への感度は、特に粘性率に大きく現れ、体積加熱

Case 1 表面加熱が有利な試料

CO₂ レーザー (波長 $10.6 \mu\text{m}$) 装置

信号検知可

大きな駆動力 (温度上昇 10-100 K)

■ 高粘性 (100-100000 mPa · s)

例) 水飴, 潤滑油

■ 高温・高圧環境下

例) 高温融体, コリウム

Case 2 体積加熱が有利な試料

YAG レーザー (波長 1064 nm) 装置

信号検知可

駆動力の抑制 (温度上昇 mK オーダー)

・ サンプル熱変性の防止が可能

・ フィッティングパラメータの減少

■ 非変性・非破壊条件下

例) 血液: 赤血球破壊の防止

食品: たんぱく質の熱変性の抑制

■ 低粘性 (0.1-100 mPa · s)

表面張力温度依存性の系統的な不確かさが
(表面加熱に比べて) 小さい

Fig. 7 Comparison of the advantages between volume heating with surface heating in the case of measurement of unknown physical property samples.

では無視できることが定量的に明らかになった。これは表面加熱の場合、Fig. 4 のように粘性率と同じ減衰挙動の減衰率に感度が存在することに起因しており、文献値とは異なる表面張力温度依存性によって生じるズレを粘性率で補正することで偏差が生じる。

3.3 表面加熱と体積加熱の比較のまとめ

文献1および本報3.1節および3.2節のまとめの位置づけで、本測定法を実用粘性率測定技術として応用する上での表面加熱と体積加熱の長所を Fig. 7 にまとめた。文献1では、新たに体積加熱方式を提案し、mK オーダーの試料の温度上昇をもって、ナノメートルスケールの表面波が誘起できることを示し、ニュートン流体を用いて文献値と $\pm 5\%$ 以内の偏差で測定できることを確認した。以上の成果より、血液や食品などのたんぱく質を含む試料に対しては、非変性・非破壊条件下での測定が必要であり、その上で体積加熱が有利であることがわかった。また、本章で示した、表面張力温度依存性における減衰挙動との関連性の解説、さらに測定における系統的不確かさが体積加熱の方が小さくなることから、粘性率・表面張力計測技術として体積加熱方式が有用であることが明らかになった。その一方、 $10^2 \sim 10^5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ の高粘性試料の場合には、表面加熱を駆動力とする温度上昇が表面波形成には必要であり、体積加熱に比べて広範な粘性領域の測定が可能である。表面加熱方式による高粘性かつ非接触での測定は、たとえば高温高压下での測定が求められるコリウムや高温融体[11]のその場測定への応用に適している。

以上より、試料の粘性率範囲、構成成分（変性、破壊、侵襲などのおそれ）、測定環境（温度・圧力）に応じて、表面加熱および体積加熱それぞれに図に示したような長所があり、これらを指標として加熱方式を採用することによって、本測定法を実用計測技術として利用することができる。

4. デカノール水溶液の測定検証

本章では、常温下で極小値を示す特異な表面張力温度依存性を持つアルコール水溶液を対象とし、表面加熱の温度上昇に起因した欠点が顕著に現れる対象に対して、体積加熱がもたらす長所について検討した。

測定試料として、相対的に低温の 22°C で表面張力が極

Fig. 8 Comparison between detected signals with theoretical curves of decanol aqueous solution (mol concentration@ 15°C ; $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$) by changing sample temperature with surface heating ($A=90 \mu\text{m}$).

Fig. 9 Detected signals and fitting curves of decanol aqueous solution (mol concentration@ 15°C ; $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$) by changing sample temperature with volume heating ($A=90 \mu\text{m}$).

小値を示すデカノール水溶液[13]を選定した。試料調整の際、超純水を用いて1-デカノールを濃度 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ で 15°C に保った状態で攪拌混合した。測定点は、表面張力温度依存性が負、0、正となる 10°C 、 22°C 、 50°C において表面加熱と体積加熱それぞれで比較測定した。なお、測温は熱電対により $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の不確かさで行った。

Fig. 10 Measurement results for surface tension with volume heating ($\lambda=90\ \mu\text{m}$).

表面加熱における各測定点での信号波形および理論波形を Fig. 8 で比較した。なお、理論波形の記述に関して、表面張力と表面張力温度依存性は文献[13]を参照し、その他の代入する値は、水の熱物性値[12]を用いた。

表面加熱理論[4, 8]では、表面張力温度依存性が正または負をとる場合、理論波形に示すように振幅が大小を繰り返し、ほぼ 0 と見なせる場合は体積加熱の場合と挙動が類似する。それに対して実験で得られた信号波形は、各測定点で異なる表面張力温度依存性の影響を反映した挙動を検知したものの、理論波形とは全く異なる傾向となった。試料の表面張力温度依存性の影響が挙動に反映されれば、時間経過とともに温度減衰に伴い表面張力が上昇し振幅が小さくなるはずである。しかし測定試料は、濃度希釈のため殆ど水と見なすことができ、表面加熱の場合、非常に吸収係数が大きい故に 10 K 以上の温度上昇が生じる。従って、減衰過程における温度変化も大きくなるため、表面張力温度依存性のみを反映した信号を得るのが原理上難しい。そのため、理論によるカーブフィッティングが不可能であった。

一方、体積加熱における各測定点での信号波形ならびにフィッティングカーブを Fig. 9 に示す。体積加熱の場合は、3 章の測定値への系統的な不確かさ解析で明らかになったように、表面張力温度依存性の影響は無視できる。従って、図のように各測定点で粘性率と表面張力のみに起因した、単調な減衰振動信号が取得できた。さらに、表面張力の測定結果および文献値[13]を Fig. 10 に示す。図中のプロットとエラーバーは、同実験条件で 16 パルス

の平均処理信号波形を 10 回取得して算出される平均値と標準偏差を表している。図より、体積加熱の場合には表面加熱とは異なり、試料特有の極小値を持つ表面張力温度依存性が検知でき、文献値[13]と同様の傾向になることを確認した。また、測定値の絶対値は、文献値[13]と 30 % 程度の偏差が生じており、その要因として測定法の違い、各測定法における不確かさおよび試料の濃度や均一性の問題が挙げられる。しかし、表面張力の温度依存性の傾向は、文献値[13]と概ね一致しており、体積加熱方式による測定の実用性を示すことができたと言える。以上より、本測定法の実用化という観点においての体積加熱方式の有用性を示した。

5. 結 論

本研究は、レーザー誘起表面波を用いた光学的粘性率測定技術の開発を目的とし、本論文では、本測定法の実用化に向けて、表面張力温度依存性が測定上もたらす系統的な不確かさの理論解析と、デカノール水溶液を用いた実験検証を行った。以下に結論を示す。

1. 表面張力温度依存性がもたらす系統的な不確かさを粘性率および表面張力に対して理論的に解析し、体積加熱では粘性率にして偏差 $\pm 0.1\%$ 以内、表面張力にして $\pm 0.5\%$ 以内となり、従来の表面加熱に比べて定量的に小さくなることを示した。
2. 常温で表面張力温度依存性が極小値を示すデカノール水溶液の比較測定を行い、表面加熱では温度上昇に起因した表面張力温度依存性の影響により、理論と実験で表面波の挙動の傾向が異なり測定不可となる一方、体積加熱では表面張力の温度依存性が検知できたことから、体積加熱方式の有用性を示した。

[謝辞]

本研究の経費の一部は、日本学術振興会科学研究補助金基盤研究(S)(No. 24226006)、特別研究員奨励費(No. 26・5819)によるものであることを記し、謝意を表す。

NOMENCLATURE

- c_p : isobaric heat capacity, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 I : intensity of the first-order diffracted beam, W/m^2
 I_h : heating energy density, J/m^2
 k : wave number, $1/\text{m}$
 T : absolute temperature, K

V_L : sound speed, m/s
 z : displacement, m
 Z : displacement in Laplace space, m
 α : absorption coefficient, 1/m
 β : thermal expansion coefficient, 1/K
 δ : delta function, -
 η : viscosity, Pa · s
 λ : thermal conductivity, W/(m · K)
 Λ : fringe spacing, m
 ν : kinematic viscosity, m²/s
 ρ : density, kg/m³
 σ : surface tension, N/m

adsorption at air-solution interface .2. experimental determination of heat of reversible adsorption of some alcohols”, *J. Colloid Interface Sci.*, **42-2** (1973) 320-327.

[Received Jun. 9, 2014, Accepted Nov. 12, 2014]

参考文献

- [1] 滝口広樹, 長坂雄次 ; 「近赤外レーザー誘起表面波法による粘性率および表面張力測定法の開発」, 日本機械学会論文集 B 編, **79-800** (2013) 209-219.
- [2] T. Oba, Y. Kido and Y. Nagasaka, “Development of laser-induced capillary wave method for viscosity measurement using pulsed carbon dioxide laser”, *Int. J. Thermophys.*, **25-5** (2004) 1461-1474.
- [3] 大場孝浩, 藪井謙, 長坂雄次 ; 「レーザー誘起表面波法を用いた新しい粘性率測定法(広い粘性率範囲に適用可能な測定原理および装置の開発)」, 日本機械学会論文集 B 編, **72-714** (2006) 428-433.
- [4] 岩島裕美, 藪井謙, 長坂雄次 ; 「レーザー誘起表面波法による粘性率および表面張力測定の研究(逆問題解析手法の開発)」, 日本機械学会論文集 B 編, **73-733** (2007) 1892-1898.
- [5] H. Iwashima and Y. Nagasaka, “Experimental study on in-situ viscosity measurement of milk fermenting to yogurt by laser-induced capillary wave method”, *High Temp.-High Press.*, **37-1** (2008) 51-60.
- [6] 村本祐一, 高橋直広, 鎌田奈緒子, 長坂雄次 ; 「マイクロリットル血液粘性率の高速センシング法の開発」, 日本機械学会論文集 B 編, **76-768** (2010) 170-176.
- [7] Y. Muramoto and Y. Nagasaka, “High-speed sensing of microliter-order whole-blood viscosity using laser-induced capillary wave”, *J. Biorheology*, **25-1** (2011) 43-51.
- [8] K. Yasumoto, N. Horita and M. Terazima, “Surface and molecular dynamics at gas-liquid interfaces probed by interface-sensitive forced light scattering in the time domain”, *Phys. Rev., Series B*, **60-12** (1999) 9100-9115.
- [9] 細野敏夫 ; 「BASIC による高速逆ラプラス変換」, (1984), 共立出版.
- [10] 佐野郁郎 ; 「最小 2 乗法とその理論と実際」, (1997) 126-128, 山海堂.
- [11] 日本熱物性学会 ; 「新編熱物性ハンドブック」, (2008) 養賢堂.
- [12] 日本化学会 ; 「化学便覧基礎編」, (1993) 丸善.
- [13] R. Vochen, G. Petre, “Study of heat of reversible