

レーザー誘起表面波を用いた広範囲粘性率センシングシステムに関する研究

Development of a New Sensing Technique Applicable to Wide Range of Viscosity by a Laser Induced Capillary Wave

80221766 大場孝浩(Takahiro Oba) Supervisor 長坂雄次(Yuji Nagasaka)

1. 結論

食品の粘性率は、生産段階における工程の設計・制御や品質管理の際に必要なとされる重要な熱物性値である。しかしながら、従来の計測技術では、食品製造の特徴ともいえる大きく変化する粘性率をインプロセスかつ非接触で測定するという要求を満足するに至っていない。そこで本研究は、粘性率を非接触で高速に測定し、かつ幅広い粘性率変化にも適用可能なセンシングシステムを測定原理から新たに開発することを目的としている。

2. 測定原理

液体表面の非常に微細な表面波の挙動を解析することにより、液体の粘性率 η を求めることができる^[1]。そこで、本研究では波長 μm オーダー、振幅数 nm の波をレーザー加熱により強制的に発生させ、観察することで試料の粘性率を測定する。Fig. 1 に示すように、2 光束干渉させた空間的に周期的な強度分布をもつレーザー加熱により液面は熱膨張し、表面に微細な凹凸が発生する。加熱終了後、この凹凸が元の状態に戻ろうと振動・減衰しレーザー誘起表面波となる。このレーザー誘起表面波モデルにおいて振幅 u_z は(1)~(3)式を、仮定①~⑤の下で解くことにより求めることができる。

<Navier-Stokes の式>

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nu \nabla^2 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - V_L \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = -\beta V_L^2 \nabla T \quad (1)$$

<連続の式>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2)$$

<熱伝導方程式>

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) - \lambda \nabla^2 T = I_0 \alpha [1 + \cos(kx)] \exp(\alpha z) \delta(t) \quad (3)$$

<仮定>

- ①波長 λ に比べて振幅が十分小さい
- ②液深くでは運動は生じない
- ③液体に加わる垂直応力は表面張力のみである
- ④液体にせん断応力は働かない
- ⑤気相への熱伝導は無視できる

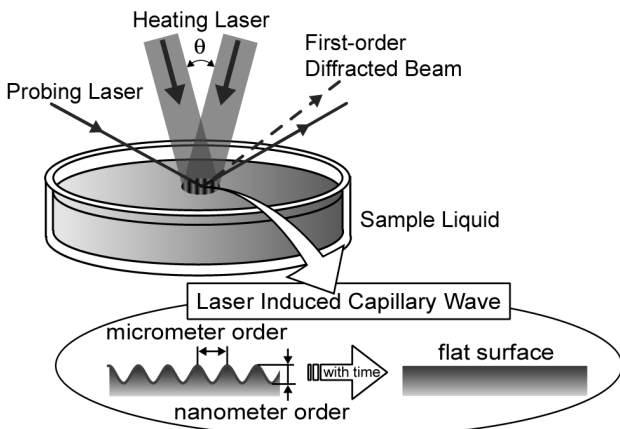


Fig. 1 The principle of the laser induced capillary wave method. The laser induced capillary wave has micrometer order wavelength and nanometer order amplitude.

特に、④の仮定として(4)式を用いる寺嶋ら^[2]によって最近導かれた理論を適用することで、温度分布の影響として表面張力 σ の温度依存性の効果を考慮している。

$$\eta \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

なお、本測定法では、発生した波に観察光を入射することで得られる回折光を利用して、波の挙動を検知している。ここで、波の形状を回折格子とした反射による1次回折光の信号光強度 I は、(5)式のように波の振幅 u_z の2乗に比例する。

$$I(t) \propto u_z(t)^2 \quad (5)$$

3. レーザー誘起表面波のメカニズムおよび粘性率算出法

前節の理論式を用いて振幅の時間変化を計算した一例として、低粘性試料トルエン、高粘性試料グリセリンの計算結果を Fig. 2 に示す。プロットがレーザー誘起表面波の挙動であり、 nm オーダーの振幅を持っていることが分かる。Fig. 2 の①は、 $d\sigma/dT=0$ を仮定して計算したものであり、その時間変化は単純な減衰振動を示した。②については、体積熱膨張率 $\beta \sim 0$ として計算したものである。トルエンにおいて細い破線はその①と②の和である。これより、低粘性試料におけるレーザー誘起表面波の発生メカニズムには、レーザーエネルギーの吸収による熱膨張と表面張力の温度依存性の影響が支配的であることが分かる。一方、高粘性試料の場合では熱膨張が支配的であり、表面張力の温度依存性による影響がほとんどないことがグリセリンでの計算結果より分かる。また、粘性率が大きくなるに従い粘性率と表面張力に起因した波の減衰が遅くなるため、熱伝導による影響が大きくなるが、約 $10^1 \sim 10^3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の範囲では以下の(6)式を用いて信号の時定数 τ より粘性率を求めることが可能である^[3]。

$$\eta = \pi \sigma \tau / \Lambda \quad (6)$$

4. 実験装置

Fig. 3 に測定装置を示す。本測定法において安定した信号を検知するには $10 \mu\text{s}$ 以下の加熱時間で高出力な加熱レーザーが必要であり、本研究ではパルス幅 50 ns 、出力 65 mJ のパルス CO_2 レーザーを加熱光源として用いている。中心波長 $10.6 \mu\text{m}$ のレーザー光は、 $\lambda/2$ 波長板(WP)および偏光ビームスプリッター(TFP)からなるシステムにより強度が変更された後、垂直定盤上に固定された3次元の光学系、ミラー(M1)により上方に振り上げられる。その後、ビームスプリッター

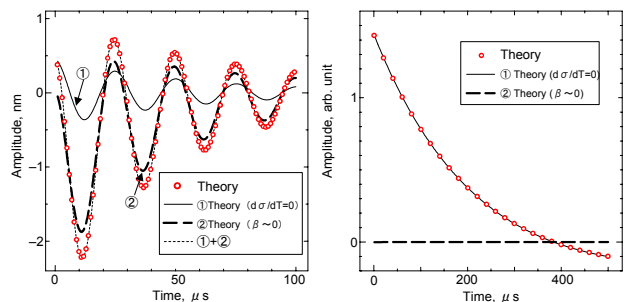


Fig. 2 The theoretical calculations of amplitude of laser induced capillary wave for low viscous liquid (toluene: viscosity $0.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) and high viscous liquid (glycerol: viscosity $1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) versus time.

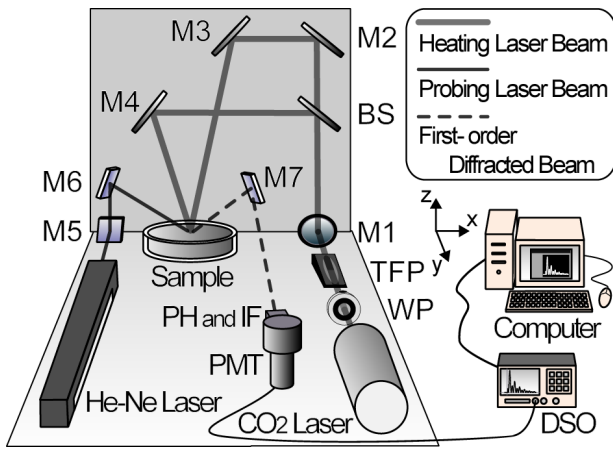


Fig. 3 The experimental apparatus of laser induced capillary wave method by using pulsed CO₂ laser.

(BS)によって等強度の2光束に分割され、M2, 3, 4を介して試料表面で交差するように照射される。観察用レーザーにはHe-Neレーザー(波長632.8 nm, 出力15 mW)を用いている。観察光を試料上方より入射することで得られる1次回折光はピンホール(PH)、バンドパスフィルタ(IF)を介し光電子増倍管(PMT)に導かれる。PMTにより検知された信号はデジタルオシロスコープ(DSO)を経て、コンピューターに取り込まれる。

5. 測定結果および検討

まず、低粘性試料の一例としてトルエン(約0.5 mPa·s)、同じく高粘性試料として粘度計校正用標準液 JS14000(約7600 mPa·s)の実験結果をFig. 4に示す。なお、いずれの波形もそれぞれの最大値で正規化している。低粘性試料では発生した表面波が減衰振動する様子が、高粘性試料では過減衰の様子が観察された。これまでに、低から高粘性まで(10⁻¹~10⁴ mPa·s)の幅広い粘性率を有する複数の測定試料より信号を検知することができ、それぞれにおいて理論波形と非常によく一致する結果が得られた^[4]。

次に、現段階で粘性率の算出が可能な範囲にある試料の測定結果をFig. 5に示す。高粘性試料では熱伝導、低粘性試料では表面張力の温度依存性に起因した影響のため(6)式の適用による不確かさが増す、あるいは適用が困難ではあるが、10¹~10³ mPa·sの各粘性率範囲で文献による参照値と測定結果はいずれもほぼ一致する結果が得られた。なお、JS1000の参照値と測定値の差の要因は熱伝導による影響であると考え

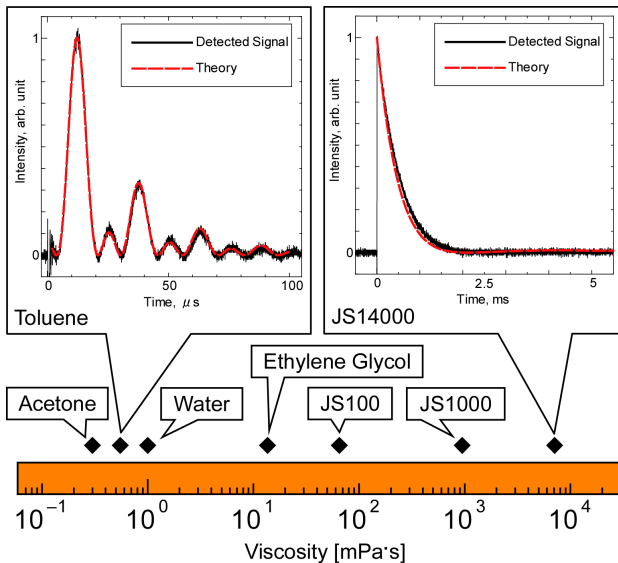


Fig. 4 Comparisons of the detected signal with the theoretical calculation for toluene ($\Lambda = 50 \mu\text{m}$) and for JS14000 ($\Lambda = 60 \mu\text{m}$) at room temperature.

られるが、干渉縞間隔を大きくすることで熱伝導の影響を緩和することは可能である。

そして、JS100を用いた温度変化に伴う粘性率の時間変化についての測定結果をFig. 6に示す。本測定法により時間経過による粘性率の変化を温度計測のように動的に捉えることができた。以上の結果により、本測定法が幅広い粘性率変化のインプロセスセンシングに適用可能であることを十分に示すことができた。

6. 結論

- ◆ 加熱光強度可変システムにより水、有機溶媒、油類など様々な物質から安定して信号を検知可能となった。
- ◆ レーザー誘起表面波について検討を行い、そのメカニズムを明らかにし、粘性率算出が可能であることを示した。
- ◆ 広い粘性率範囲(10⁻¹~10⁴ mPa·s)の試料より理論と一致する信号波形を得ることができ、特定の範囲(10¹~10³ mPa·s)ではあるが粘性率測定も可能となった。また、粘性率変化の動的測定を行い、本測定法が広範囲粘性率センシングシステムとして有用であることを示した。

参考文献

- [1] T. Nishio and Y. Nagasaka, *Int. J. Thermophys.*, **16**, (1995), 1087.
- [2] K. Yasumoto, N. Hirota and M. Terazima, *Phys. Rev. B*, **60**, (1999), 9100.
- [3] T. Oba and Y. Nagasaka, *Proc. 24th Jpn. Symp. Thermophys. Prop.*, (2003), 279. (in Japanese)
- [4] T. Oba, Y. Kido and Y. Nagasaka, *Proc. 15th Symp. Thermophys. Prop.*, Boulder, USA, (2003), 304.

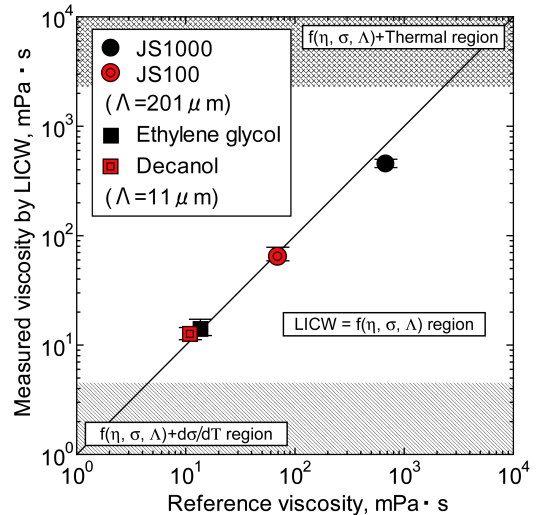


Fig. 5 Measurement for wide range of viscosity by LICW.

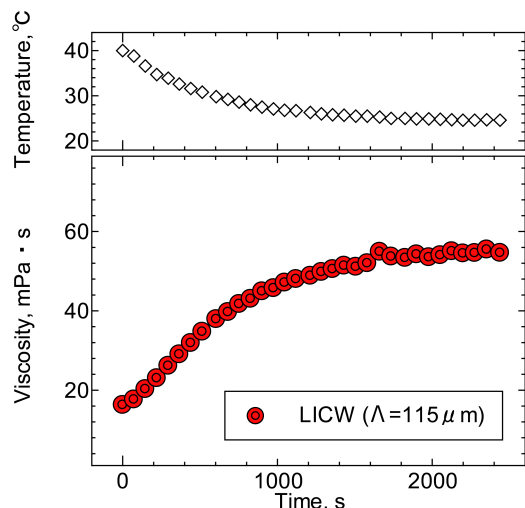


Fig. 6 Measurement for time-dependent viscosity (JS100) by LICW.