

レーザー誘起表面波法による広範な粘性率変化に適用できる新たな測定方法に関する研究 (パルス CO₂ レーザーを用いた実験装置の開発)

80021841 木戸良彦 指導教員 長坂雄次 教授

1. 目的および背景

食品工業において食品の熱物性値の重要性が認識されはじめている。特に食品の粘性率は、工程の設計・制御・品質の評価の際に必要とされている。しかし、食品の粘性率は、その特徴として製造プロセスで大きく変化する場合 (1~1000mPa·s) が多く、従来の計測技術ではその要求を満足できないのが現状である。

そこで本研究の目的は、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レーザー計測技術を新たに測定原理から開発することである。

2. 測定原理

液体表面にはリップロンと呼ばれる分子揺らぎによる微細な表面波が存在し、この波の挙動を解析することにより、液体の粘性率と表面張力を求めることができる。しかし、この表面波は高粘性の液面上では過減衰を起こし波として存在しないため、原理的に粘性率の測定は困難となってしまう。そこで本研究では、このリップロンと同程度の波長と振幅の波をレーザー加熱により強制的に発生させ、その挙動を観察することで試料の粘性率を測定する。

本研究で用いたレーザー誘起表面波法では、加熱用レーザーを用いて試料表面に過渡回折格子を形成することで微細な表面波を発生させている。等強度の2光束に分割した加熱用レーザーは、試料表面で交差するように照射する。その照射部分には、2光束干渉により空間的に周期的な温度分布が形成される。その温度分布に対応して液面が熱膨張し、表面に凹凸が発生する。加熱終了後、この凹凸が元の状態に戻ろうとすることにより波が発生する。

この波の挙動を検知するために観察光を入射させると、発生した波が回折格子の役割をするため反射光の回折光を得る。この1次回折光の信号光強度 I は、波の振幅 u_z の2乗に比例する。

$$I(t) \propto u_z(t)^2 \quad (1)$$

レーザー誘起表面波は、自然発生のリップロンと異なり液面を加熱することにより表面波を発生するので、非等温場の影響を考慮する必要がある。しかし研究の初期段階では、この影響は小さいと予想し、測定装置を開発し、実験を行なった。

3. 測定装置

本研究の目的は食品の粘性率の測定であるため、加熱光源にはその主成分である水が吸収する赤外波長域で発振するCO₂ レーザーを用いている。またレーザー誘起表面波法で安定して信号を検知するためには 10 μ s 以下の加熱時間で高出力な加熱レーザーが必要と判断された。

そこで新たに上記の条件を満たすパルス幅 50ns 出力 65mJ のパルス CO₂ レーザー (EDINBURGH INSTRUMENTS 社製、MTL-3) を加熱光源として導入し、測定装置を全く新たに開

発し、安定して信号を検知する実験法を確立した。

Fig.1 に測定装置を示す。中心波長 10.6 μ m のパルス CO₂ レーザーは、M1 により上方に振り上げられ、ビームスプリッターによって等強度の2光束に分割される。その後 M2, 3, 4 を介して試料表面で交差するように照射される。観察用レーザーは He-Ne レーザー (波長 632.8nm, 出力 15mW) を用いている。観察光を試料上方より入射し、得られた1次回折光は 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を経て、コンピュータに取り込まれる。

4. 測定結果および考察

Fig.2,3 に実験結果を示す。低粘性試料としてトルエン (約 0.5mPa·s)、高粘性試料としてグリセリン (約 950mPa·s) を用いている。低粘性試料では、発生した表面波が振動しながら減衰していく様子が観察され、高粘性試料では過減衰する様子が観察された。レーザー誘起表面波法において、両者はそれぞれ光学系の設定を変更することなく同一な実験系で信号を再現性良く検知できることが明らかになった。

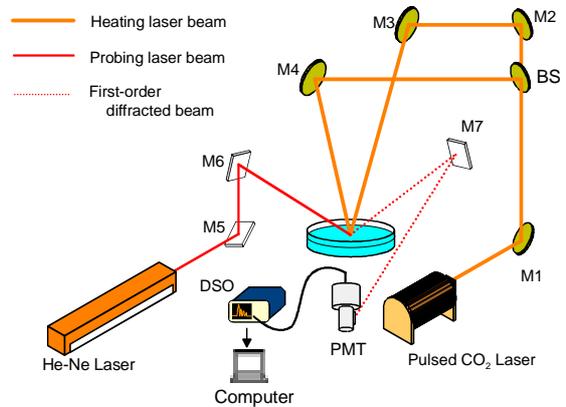


Fig.1 測定装置

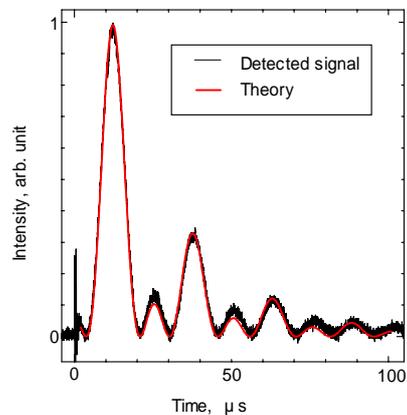


Fig.2 トルエンの実験結果と理論波形 ($\eta \approx 0.5\text{mPa}\cdot\text{s}$, 干渉縞間隔 $\Lambda = 50.0\mu\text{s}$)

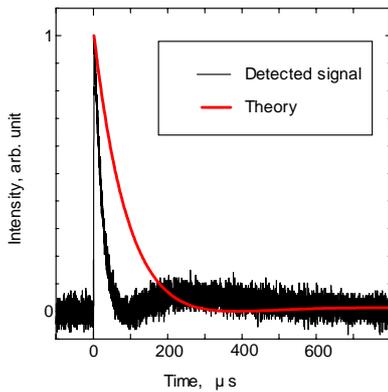


Fig.3 グリセリンの実験結果と理論波形
($\eta \approx 950 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 干渉縞間隔 $\Lambda = 50.0 \mu\text{m}$)

4.1 非等温場の影響 (表面張力の温度依存性) について

Fig.2 のトルエンの信号波形は,当初予想されていたリブロンのような単純な減衰振動をしていない.非等温場の影響を考慮するため,寺嶋ら¹⁾によって最近導かれた理論を本実験系に適用してみた.このモデルでは,温度勾配による表面張力差が起こす波が重なっていると考え,振幅 u_z は Navier-Stokes の式,連続の式および熱伝導方程式から導かれる.式の形は非常に複雑なためここでは省略するが, u_z は以下のような関数で表される.

$$u_z = f\left(C_p, I_e, k, t, V_L, \alpha, \beta, \eta, \lambda, \rho, \sigma, \frac{\partial \sigma}{\partial T}\right) \quad (2)$$

C_p : 比熱 [kJ/(kg·K)], I_e : レーザーエネルギー [J/m²],
 k : 波数 [m⁻¹], t : 時間 [s], V_L : 試料中の音速 [m/s],
 α : 吸収係数 [m⁻¹], β : 体積膨張率 [K⁻¹], η : 粘性率 [Pa·s],
 λ : 熱伝導率 [W/(m·K)], ρ : 密度 [kg/m³], σ : 表面張力 [N/m],
 $\partial \sigma / \partial T$: 表面張力の温度依存性 [kg/(s²·K)]

Fig.2 の理論波形の計算には,レーザーエネルギーと波数については実験と同条件にし,他のパラメーターは文献値²⁾を用いた.理論波形を実験波形の最大のピークで正規化すると,非常に良く一致した.

Fig.3 に示したように高粘性試料については,理論波形と実験波形とも過減衰はしているが,低粘性試料のような一致は見られなく,その要因の検討が必要である.

4.2 レーザー誘起表面波の発生メカニズム

トルエンの振幅の時間変化の計算結果を Fig.4 に示す.実線がトルエンの理論的な振幅の時間変化である.この図から分かるように低粘性試料におけるレーザー誘起表面波は nm オーダーの振幅の波であり,振幅の時間変化は単純な減衰振動ではない.

Fig.4 の については $\partial \sigma / \partial T = 0$ として計算したものである.この挙動は,等温場モデルによるリブロンの挙動と一致している.については,体積熱膨張率 $\beta \neq 0$ として計算したものである.プロットはその と の和である.

Fig.4 より,低粘性におけるレーザー誘起表面波の発生メカニズムは,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.つまり加熱によって熱膨張し液面が上昇すると同時に,表面張力差によって液面が引き下げられるため,2つの波の重ね合わせが発生しているのである.温度勾配による表面張力差が起

こす波の研究において,このようなマイクロスケールでの波の物理的イメージは,本研究で初めて明確にされた.

しかし, Fig.5 より高粘性試料の場合において理論波形(吸収係数 $\alpha = 10 \text{ m}^{-1}$ として計算)は,熱膨張が支配的であり,表面張力の温度依存性はほとんど影響しないことが分かった.

5. 結論

- パルス CO₂ レーザーを用いた測定装置を新たに開発し,安定して信号を検知できる実験法を確立した.
- 低粘性から高粘性 (0.5~1000 mPa·s) にわたる試料で信号を検知でき,レーザー誘起表面波法が広範な粘性率変化に適用できる可能性を示した.
- レーザー誘起表面波の発生メカニズムにおいて,熱膨張と表面張力の温度依存性の2つが大きく寄与していることが明らかになった.

6. 今後の課題

- 現段階では,信号に含まれる粘性率,表面張力,表面張力の温度依存性の情報をそれぞれ分離して求めることができない.これは数値逆ラプラス変換により振幅を求めているためである.今後,解析手法を検討する必要がある.
- 高粘性試料については,理論波形と一致しない点が多くその要因について検討する.

参考文献

- 1) M. Terazima, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **60**-12 (1999) 9100.
- 2) 日本機械学会編,“流体の熱物性値集”,(1983).

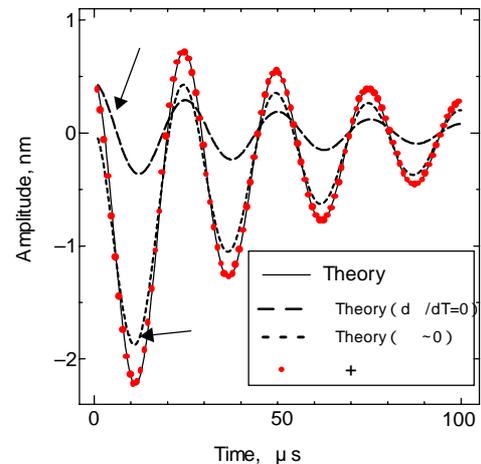


Fig.4 トルエンの振幅の時間変化

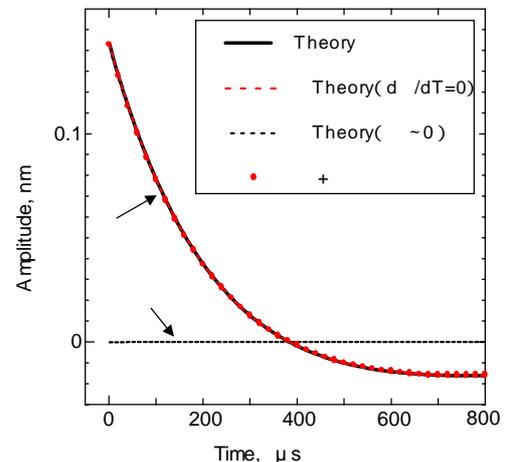


Fig.5 グリセリンの振幅の時間変化