

## 光偏向法による広帯域超音波測定

崔 博坤、谷本亮介

明治大学理工学部物理学科

214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1

E-mail: pkchoi@isc.meiji.ac.jp

あらまし： 超音波による光偏向現象を利用した広帯域超音波計測を、液体の非線形性パラメータの測定とゼラチンゲル中の広帯域吸収測定に応用した。音波長に比べて細いレーザービームを波面に平行に伝搬させると、レーザは偏向し、その偏向角から音圧の時間微分に比例した信号が得られる。この検出法の広帯域特性を生かして、2種類の実験を行った。波形ひずみから水、エタノールの非線形性パラメータを求めた。さらに広帯域超音波パルスの伝搬距離依存性からゼラチンソル・ゲル中の吸収を5-35 MHzで測定することができた。

キーワード：光偏向、超音波吸収、非線形性パラメータ、ゼラチンゲル、水、エタノール

## Broadband Measurements of Ultrasonic Waves Using Optical Beam Deflection

Pak-Kon CHOI and Ryosuke TANIMOTO

*Dept. of Physics, Meiji University*

*Tama-ku, Kawasaki, 214-8571 Japan, email: pkchoi@isc.meiji.ac.jp*

**Abstract:** A technique of optical beam deflection by ultrasonic waves was developed in order to measure acoustic nonlinearity parameters  $B/A$  and ultrasonic absorption in liquids. Laser beam is deflected by ultrasonic waves under the condition that sound wavelength is larger than the laser beam waist. The deflection angle was detected with a high-speed photodiode having double elements, yielding a time derivative of pressure amplitude of the ultrasonic waves. Two kinds of experiments were performed using this technique. The distorted waveforms of finite amplitude ultrasonic waves of 6.65 MHz were observed. Nonlinearity parameters were obtained from the fundamental and second-harmonic wave amplitudes in water and ethanol. Secondly, A broadband ultrasonic pulse was observed as a function of propagation distance. Spectral analysis of the pulsed waveform enabled absorption measurements in the 5-35 MHz range in gelatin sols and gels.

**Key words:** optical beam deflection, ultrasonic absorption, acoustic nonlinearity parameter, gelatin gel, water, ethanol

## 1. はじめに

Hiedemannら<sup>1,2)</sup>は超音波の波長より光ビームの幅が狭い場合の音響-光学相互作用を調べた。ラマン-ナス光回折(光ビーム幅が波長より広い場合)では分離した回折光が観測されるのに対し、この場合は広がった回折光が観測された。この光偏向現象を用いて彼らは波形ひずみを測定しているが、レーザー発明以前であったため定量的な測定は困難であった。その後、Choi<sup>3)</sup>はこの光偏向法を利用して位相も含めて広帯域超音波測定が可能であることを示した。

本報告では、光偏向法の広帯域検出特性を活かした2種類の実験結果について述べる。はじめは、水、エタノールの非線形性パラメータの測定結果についてである。波形ひずみの基本波、第2高調波成分を検出することにより非線形性パラメータが求められる。次は、ゼラチンゾル・ゲル中の広帯域吸収測定である。超音波パルスを伝搬距離を変えながら観測することで、パルスに含まれる5-35 MHzの水晶高調波成分での吸収係数を測ることができた。観測された緩和現象について解析した。

## 2. 非線形性パラメータの測定

### 2.1 光偏向法

波長 $\lambda$ の超音波の波面に平行になるようレーザー光を入射させる状況を考える。レーザービーム径が $\lambda$ より十分小さいとき、空間的に分布する屈折率変化の中を光が通過することになるので、レーザー光は偏向する。偏向角 $\theta$ が小さいとき、 $\theta$ は音場の幅 $L$ と屈折率の空間微分に比例している<sup>1)</sup>。屈折率は空間的だけでなく時間的にも変化するので、 $\theta$ も超音波と同じ周波数で変化する。屈折率の変化は音圧の変化に比例しているため、偏向角 $\theta$ の時間変化を測定すれば、超音波の音圧微分波形に比例した信号が得られることになる。 $\theta$

は次式で近似的に与えられる。

$$\theta \approx L \frac{\partial n}{\partial x} \propto L \frac{\partial p}{\partial x} \propto L \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

もし、媒質の非線形が原因で波形がひずんでいればその程度を知ることができる。ラマン-ナス回折と異なり、位相情報を得られるのが光偏向法の特徴といえる。

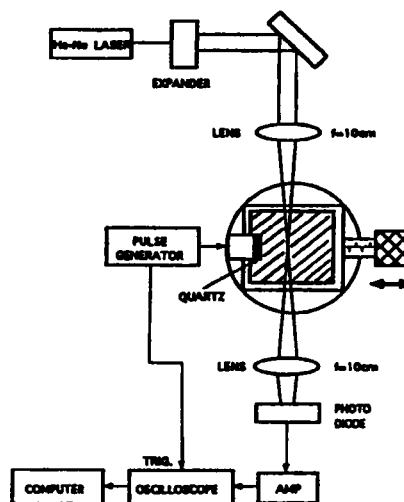


Fig. 1. Block diagram of the apparatus.

図1は装置のブロック図である<sup>3)</sup>。基本周波数2.2MHzのPZT振動子を用いて3倍の6.6MHzで測定を行った。振動子から20-30波のバースト波を励起し、音波が反射する面にテフロン製ブロックを入れて定在波ができるのを防いだ。水中で6.6MHzの音波の波長は約0.2mmなので、それよりもレーザー径を小さくするためレンズでHe-Neレーザー光を絞る。超音波によって偏向された光の角度は高速型の二分割光ダイオードで検出した。その後、オシロで波形を観測し、スペクトル解析する。

### 2.2 波形ひずみ

非線形性による波形歪みをスペクトル解析し、基本波成分の音圧振幅 $P_1(x)$ と2次高調波成分(13.3MHz)の音圧振幅 $P_2(x)$ の大きさを

調べると $B/A$ の値を求めることが可能である。理論によると、それらの関係は次式で与えられる。

$$\frac{B}{A} = \frac{2\rho_0 c_0^3}{\pi f} \cdot \frac{P_2(x)}{xP_1(0)^2} - 2 \quad (2)$$

ここで $x$ は伝搬距離、 $f$ は周波数、 $c_0$ は音速である。 $P_2(x)$ を直接測定するのは難しいので $P_1(0) \equiv P_1(x)$ と仮定し、(2)式右辺のまん中の項を

$$\frac{1}{P_1(0)} \times \frac{P_2(x)}{xP_1(x)}$$

と分割して二つの項を別々に測定することにする。 $P_2(x)/xP_1(x)$ の項は伝搬距離を変えてスペクトラム解析で得られる二つの成分の比を測ればよい。前者の $1/P_1(0)$ は音圧の絶対値を求めねばならないので、偏向法で測定することはできない。そこでラマン・ナス光回折を利用すると、 $P_1(0)$ を求めることができる。ゼロ次光の回折強度からラマンナスパラメータ

$$v = 2\pi L \delta n / \lambda \quad (3)$$

が求まるので、屈折率変化と音圧の関係式

$$\delta n = \frac{(n_0 - 1)(n_0^2 + 1.4n_0 + 0.4)}{(n_0^2 + 0.8n_0 + 1)\rho_0 c_0^2} P \quad (4)$$

を使って音圧 $P$ を求めることができる。

### 2.3 結果

光偏向法で検出した超音波波形の例を図2に示す。エタノール中に音圧0.4気圧、6.6 MHzの超音波を伝搬させたとき、伝搬距離5cmのところの波形である。非線形の影響でかなりひずんでいることがわかる。

ひずんだ波形の基本波と2次高調波成分の関係を調べると、図3のようになる。横軸は振動子からの伝搬距離、縦軸は各成分の音圧の相対値である。距離とともに、基本波成分 $P_1$ は一定であるのに対し、2次高調波成分 $P_2$

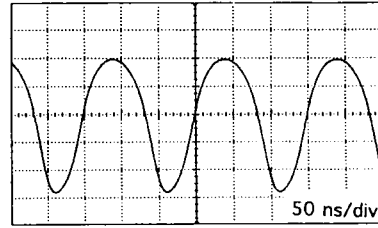


Fig. 2 Oscilloscope tracing of waveform distortion observed for ethyl alcohol. The sound pressure amplitude was  $0.442 \times 10^5$  Pa, and the propagation distance was 4 cm.

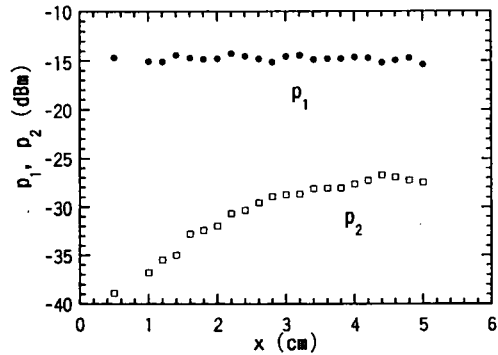


Fig. 3 The amplitudes of the fundamental and second harmonic components measured as a function of the propagation distance for ethyl alcohol.

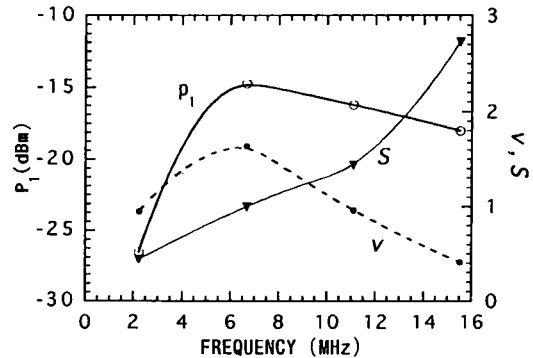


Fig. 4 The frequency dependence of the fundamental wave amplitude  $p_1$  (the open circles) measured using the optical beam deflection method, the Raman-Nath parameter  $v$  (the closed circles) at constant applied voltage, and the sensitivity correction factor  $S$  normalized to the value at 6.65 MHz. Since the frequency dependence of  $p_1$  is affected by that of the transducer efficiency, the ratio of  $p_1/v$  yields the true frequency dependence of the sensitivity of the present method.

は徐々に増加していることがわかる。 $P_1$ が一定であることは6.6MHzでは吸収の影響が無視でき、 $P_1(0) \doteq P_1(x)$ の仮定が正しいことを示している。また、(2)式によると $P_2(x)$ は $x$ に比例するので、図3で得られた $P_2(x)$ の増加が確かに媒質の非線形によるものであることがわかる。 $P_1(x)$ と $P_2(x)$ の比を図3から求めるためにはもう一つ問題がある。それは、光偏向法では感度の周波数特性がフラットでないことである。高周波数ほど感度が良いので、それを補正して比を求めねばならない。

補正の方法を以下に述べる。基本周波数2.22MHzの振動子を使い、3倍(6.65 MHz)、5倍(11.1 MHz)、7倍(15.5 MHz)の周波数でそれぞれ15Vの電圧をかけ、光偏向信号を検出する。それが図4の $p_1$ (○印)である。これには振動子の周波数特性が含まれているので、それを評価するため同じ周波数、電圧でラマン・ナスパラメータ $\nu$ を測定する(●印)。 $p_1$ を $\nu$ で割ったものが真の検出周波数特性 $S$ を与える(▼印)。第2高調波(13.3 MHz)の6.65 MHzに対する比は水で1.96、エタノールで1.97であった。

以上の結果から、水とエタノールで測定した $B/A$ を距離の関数としてプロットすると図5のようになる。 $x=0$ に外挿した値から水では $B/A=5.3$ 、エタノールでは $B/A=10.3$ が得られた。文献値は30℃でそれぞれ5.2、10.6<sup>4)</sup>であるから、満足すべき結果といえる。

### 3. ゼラチンソル・ゲルの超音波吸収測定

#### 3.1 実験

本実験では、基本周波数1MHzの水晶振動子をDCパルスで励起して高調波成分を多く含んだ超音波パルスを伝搬させる。超音波により偏向されたレーザビームは広帯域の2分割ホトダイオードで検出され、オシロスコープ(2GHz sampling)で観測する。さらにパソコン上でそのスペクトルを調べる。伝搬距離

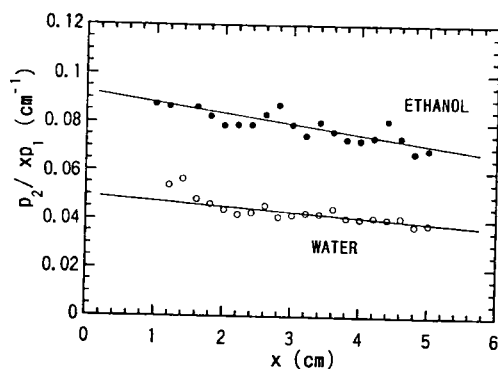


Fig. 5 The values of  $p_2/xp_1$ , obtained as a function of the propagation distance for water and ethyl alcohol. The values extrapolated to  $x \rightarrow 0$  was used to calculate  $B/A$ .

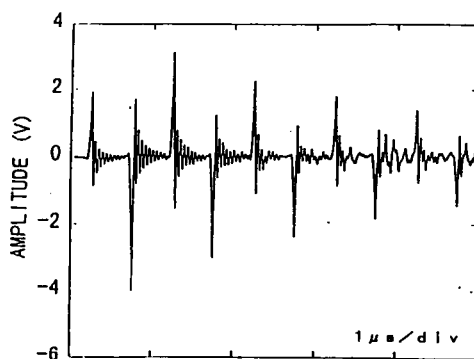


Fig. 6. Oscilloscope tracing of pulsed signal detected with the optical beam deflection method. 1-MHz quartz transducer was excited by DC electric pulse.

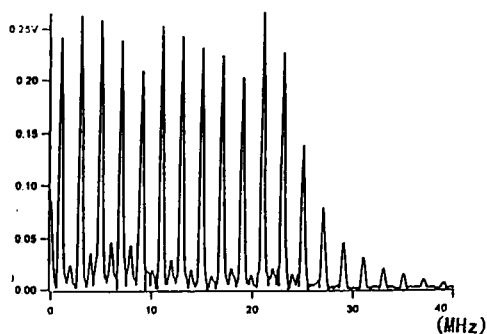


Fig. 7. The spectrum of the pulsed signal shown in Fig. 6. Many odd harmonics of 1-MHz are included in the spectrum.

を変えながら各高調波スペクトル成分の変化を調べることで、5~35MHzの吸収を一度に求めることができた。5MHz以下の検出も十分できるが、5cm程度の距離変化では音波振幅があまり変わらないので吸収は測定できなかった。

ゼラチンはSigma社、タイプG2500のものを用いた。ゼラチンパウダーを蒸留水に入れ、60℃に約1時間保って溶解したものを試料とする。測定濃度は5wt%である。このときのゲル化温度は約25℃である。測定温度は15, 20, 30, 40℃の4点で、まずゾル状態の40℃からはじめ、次に30℃ (ゾル)、20℃ (ゲル)、15℃ (ゲル) と温度を下げながら実験を行った。

### 3.2 吸収スペクトル

図6,7はオシロスコープ上に観測された波形とそのスペクトルを示している。水晶振動子の基本周波数は1MHzであるので、1μs毎に大きなピークの繰り返しがあり、それに多くの高調波成分が重なっている。図6はエコーパルス列ではなく全体で一つのパルスを表していることに注意してほしい。図7から39次成分まで出ているのがわかる。ただ、検出感度は20MHz近くまでは周波数に比例して高くなっており、それ以上ではビーム径が入りより十分小さいという偏向の条件が怪しくなってくるので感度は下がるであろう。

吸収を求めるためには、図7のスペクトルの全てのピーク値を伝搬距離を変えながら記録し、その傾きから吸収係数 $\alpha$ が得られる。その結果を図8に示す。0.2~3 MHzまでのデータはプラノ・コンケーブ共鳴法で測定したものである<sup>5)</sup>。ゲル化した後の15,20℃の吸収値はゾルでの値より大きく、傾きも異なっていることが見てとれる。

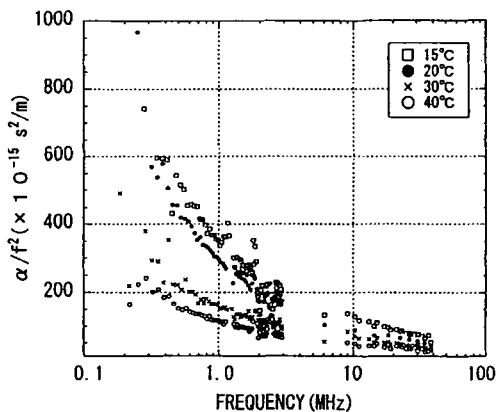


Fig. 8. Absorption ( $\alpha/f^2$ ) vs. frequency observed in gelatin sols (30 and 40°C) and gels (15 and 20°C).

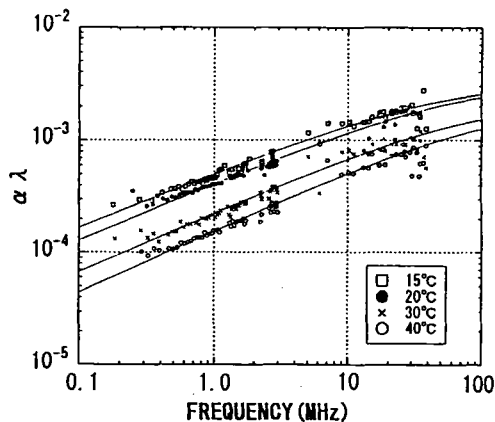


Fig. 9. Absorption per wavelength vs. frequency in gelatin sols (30 and 40°C) and gels (15 and 20°C). The solid lines represent the relaxation curves fitted assuming the Cole-Cole type distribution of relaxation times. The relaxation parameters were determined and summarized in Table 1.

表1. ゼラチンゲル・ゾルの緩和パラメータ

温度(℃)	緩和周波数	緩和強度	$\beta$
15	190 MHz	$4.3 \times 10^{-3}$	0.50
20	243 MHz	$4.0 \times 10^{-3}$	0.52
30	412 MHz	$2.6 \times 10^{-3}$	0.54
40	512 MHz	$2.2 \times 10^{-3}$	0.56

### 3.3. 緩和現象の解析

図8の結果から単一緩和でないことはあきらかである。そこで緩和時間分布関数のなかで最も一般的なCole-Cole分布関数を仮定し、fittingを試みた。

$\alpha/f^2$ よりも波長あたりの吸収  $\alpha\lambda$  で解析した方がパラメータを決めやすい。中心緩和時間を  $\tau$ 、緩和時間分布の幅を  $\beta$ 、緩和強度を  $\varepsilon$  とすると、

$$\alpha\lambda = \frac{\pi\varepsilon \sin(\pi\beta/2)}{(\omega\tau)^\beta + 2\cos(\pi\beta/2) + (\omega\tau)^{-\beta}} \quad (5)$$

と表される。図9に(5)式の緩和曲線をfittingした結果、また得られたパラメータを表1に示す。古典吸収分として水の吸収を差し引いてある。低温でゲル化するとともに分布が広がり、緩和周波数は低周波側にシフトする。また、緩和強度は大きくなることがわかる。

多くの希薄高分子溶液では高分子鎖normal modesのコンフォメーション変化による緩和が1MHz以下で観測されている。6)ゲルではネットワーク形成のため高分子鎖の自由な運動は抑制されるから、この緩和機構は今回はあたらぬ。また、より高周波で観測されている局所的な分子鎖の回転運動も、ゾルからゲルへ転移する際の大きな吸収変化を説明できない。

緩和機構は、ゼラチン分子と溶媒である水

との水和反応で説明できる。ゲル化に伴い、ゼラチン分子はランダムコイルからヘリックス状態に徐々に変化するが、ヘリックスの割合の指標となる旋光度と超音波吸収は相似的な変化をする。7)ヘリックスが増加するにつれて水和水の量が増え、水和水と自由水との交換時間に相当する緩和時間は遅くなる。Gellan gum-waterゲル8)で同様にゲル化により誘電緩和時間が遅くなるのが観測されていることもこの機構を支持している。

### References

- 1) M.A.Breazeale and E.A.Hiedemann, *J.Acoust.Soc.Am.*, **30**,751(1958).
- 2) L.E.Hargrove, K.L.Zankel and E.A.Hiedemann, *J.Acoust.Soc.Am.*, **31**,1366(1959).
- 3) P.-K.Choi, *J.Acoust.Soc.Jpn.(E)***13**,4(1992).
- 4) R.T.Beyer, The parameter  $B/A$  in *Nonlinear Acoustics*, M.F.Hamilton, D.T.Blackstock, Eds. (Academic, San Diego, 1998)p.34.
- 5) 山本晃央, 崔博坤, 日本音響学会誌 **53**,4(1997).
- 6) 野村浩康ほか, "液体および溶液の音波物性" (名古屋大学出版会, 1994) 第8章.
- 7) J.R.Emery, J.Y.Chatellier, and D.Durand, *J.Physique* **47**,921(1986).
- 8) S.Mashimo, N.Shinyashiki and Y.Matsumura, *Carbohydrate Polymers*, **30**,141(1996).