

誘導ブリュアン散乱による液体の音速の測定

Hypersonic Velocity Measurements in Liquids by Means of Stimulated Brillouin Scattering

鳥飼 安生・根岸 勝雄・山崎 正之

Yasuo TORIKAI, Katsuo NEGISHI and Masayuki YAMAZAKI

1. ま え が き

液体中の超音波の伝搬速度は超音波干渉計法、またはパルス法で測定されるのが普通であるが、超音波の周波数を高くしていくと、前者では音波長が短くなりすぎて測定精度が低下し、後者でも数百メガサイクル以上では超音波の減衰が大きくなるため測定不能となる。このような超高周波での音速の測定法としてブリュアン散乱および誘導ブリュアン散乱の方法がある。筆者らは誘導ブリュアン散乱の方法による音速測定を行なっているが、これまでにエタノールの水溶液における音速の分散を見いだした。本報告では、この方法で液体の音速を測定する場合の測定精度について検討し、エタノールの水溶液についての測定結果を示した。

2. 測定の原理と装置

Brillouin は 1922 年に超音波による光の散乱について理論的研究を行ない、光は超音波の周波数に等しい周波数だけドップラ効果による変化を受け、ブラグ反射の条件に従う方向に散乱されるべきことを示した。光の周波数変化を Δf 、光の波長を λ_0 、試料の屈折率を n 、散乱角を θ 、音速を v_s とすれば

$$\Delta f = \frac{2nv_s}{\lambda_0} \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

である。このように波動的に考えずに、フォトンとフォノンが相互作用をするとき、エネルギーと運動量の保存則が成立すると考えても同じ結果が得られる。この原理によっていわゆる熱的弾性波の速度が測定されてきたが、光源としてガスレーザが使えるようになってから、測定精度が向上した。この場合には散乱光はきわめて微弱であるが、入射光としてルビーレーザの Q スイッチで得られる強力な光を用いると光と音がパラメトリックに結合して音波が誘起され、その分だけエネルギーの低い（すなわち振動数の下がった）コヒレントで強い散乱光を生ずる。これが誘導ブリュアン散乱¹⁾であるが、このときにも(1)式が成立する。

誘導散乱は $\theta=180^\circ$ すなわち後方散乱の場合が最も容易に起こるので、図1のような配置で測定を行なった。光源は日本電子 KK 製の回転プリズム式 Q スイッチレーザで、直径 10 mm 長さ 100 mm のルビーと石英のモードセレクトラを用い、出力ピークは 10 MW 以上、パルスの半値幅は約 30 ns である。

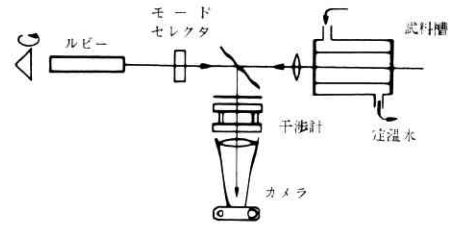


図 1 誘導ブリュアン散乱装置

レーザ光は焦点距離 4.5 または 5.5 cm のレンズで試料槽内に集光させる。試料槽は内径 2 cm、長さ 10 cm であるが、温度制御のために、外側に定温水を流す。後方散乱光はルビーに戻って増幅され再び同じ過程を繰り返す。光の一部をビームスプリッターで取り出し、フアブリペロ干渉計と 500 mm レンズをつけたカメラによって、そのスペクトルを撮影する。撮影にはさくらフィルム赤外 750 を用いた。

3. 測定精度について

写真フィルム上に得られる干涉輪の直径を測定し、干渉計定数から散乱光の周波数変化を求める。これが誘起された超音波の周波数であり、図1のような後方散乱の場合には、その波長が試料中の光波長の 1/2 に等しいことから音速が求められる。すなわち(1)式において $\theta=180^\circ$ とすれば

$$v_s = \lambda_0 \Delta f / 2n \quad (2)$$

である。これらの各項の測定精度について検討する。

(1) 干涉輪の直径 他の項に比して測定誤差が大きく、音速の相対精度は主としてこの精度できる。図2に干涉写真の一部を示す。間隔に比して線幅が太いために、結果に多少のばらつきが出る。1枚の写真から得られる測定値の標準偏差はブリュアン周波数にして約 1

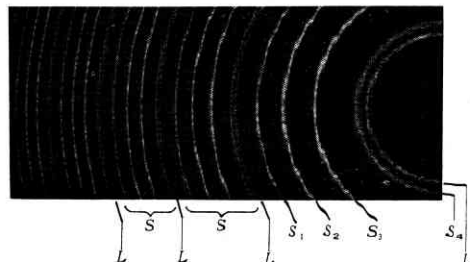


図 2 誘導ブリュアン散乱光のフアブリペロ干渉図形。
L: レーザ光, S: 散乱光。試料は 50% のエタノール水溶液。

研究速報

%, 平均値の中央誤差は 0.2~0.3% である。

(2) 干渉計定数 これは干渉計の反射面間隔できまるが、音速の絶対精度は主としてこの定数の精度によると思われる。測定に用いたスペーサはインバー製で 5 mm と 6 mm のものであるが、その長さがそのまま反射面の実効間隔になるとはかぎらない。それは、反射膜がかなり厚いこと、および、スペーサを適当に押しつぶして反射面の平行調整をする機構であることなどによる。

既知波長の光の干渉図形から実効間隔を求めるためには、撮影レンズの焦点距離が必要となるが、500 mm レンズのレーザ光に対する焦点距離を高精度で測定するのはかなりめんどうである。

このような理由で、音速既知の液体についての測定から干渉計の実効定数を決定することにした。標準液体としては、6 GC まで音速分散のない水²⁾を用いた。こうして相隣る干渉輪の直径の自乗の差と光の周波数変化との間の比例定数を決定しておけば、これはスペーサの長さにまったく無関係となり、どのスペーサに対しても同一の定数が使える。

(3) 試料の屈折率 改良アツベ屈折計によって D 線についての屈折率と平均分散を測定した。これから簡単な分散式を用いてレーザ光 (6943 Å) に対する屈折率を計算した。試料に異常分散がなければ 0.1% 以内の精度で求められる。

(4) レーザのモード間隔 Brewer³⁾ はトルエンの誘導ブリュアン散乱を光ビート法によって測定したが、本来温度とともに滑らかに変化するべきはずのブリュアンビート周波数の実測値にレーザのモード間隔に相当する 300 Mc の不連続変化が現われた。これは、後方散乱光がルビーに戻って増幅される場合、ルビーは受動的な光増幅器として動作するのでなく、散乱光の周波数がレーザの発振モードに引き込まれるためであるとして説明される。このような現象があると、誘導ブリュアン散乱によって測定された音速はまったく無意味となる。われわれの装置ではモード間隔は 200 Mc であるが、これまでの測定結果にはこのような傾向はまったく認められなかった。これは装置の相違によるものと考えられる。

4. エタノール水溶液の音速

図 3 に測定結果を示す。実線は Jacobson, Larionov⁴⁾ によるメガサイクル帯での音速である。エタノール濃度 30 wt% まではメガサイクル帯超音波と同じ値が得られたが、50 から 80 wt% の範囲で約 40 m/s の音速分散が測定された。40 wt% では誘導散乱が起こらなかったが、これは他の濃度よりも音の吸収が大きいことを意味している。これらのことから、エタノール水溶液の緩和周波数は 40 wt% 付近では濃度とともに急に低下して

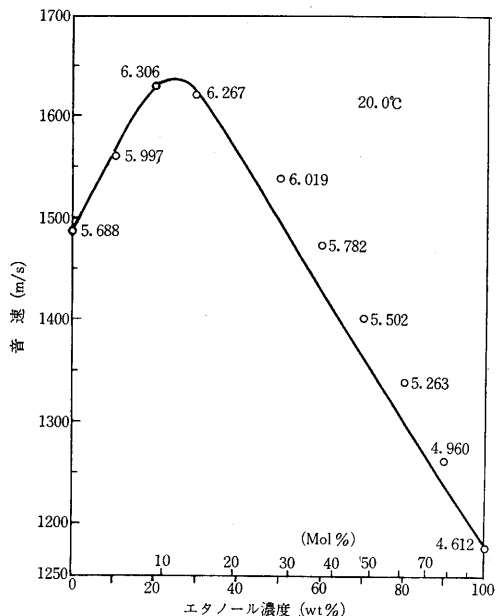


図 3 エタノール水溶液の音速。丸印が測定値で数字はブリュアン周波数(GC), 実線は超音波の音速。

おり、40 wt% での緩和周波数は 20°C において約 6 GC であることが結論される。従来、この系については、125 Mc 程度の緩和周波数が知られており、重合した水分子とアルコール分子の再配列による緩和機構が考えられてきたが⁵⁾、6 GC の緩和機構についてはまだよくわからない。

5. むすび

誘導ブリュアン散乱を用いて液体の音速を求める方法と、エタノール水溶液における音速分散の測定例について述べた。誘導ブリュアン散乱によって誘起される音波のエネルギー密度はこの実験のようにレーザ光を集束した場合にはきわめて強大となり、この方法で得られた音速が小振幅での音速と同じかどうかについては多少の疑問もある。この点を明らかにするためにはレーザ光を集束しないで誘導散乱を起こさせる方法および非誘導のブリュアン散乱の方法による結果と比較することが必要となる。なお、この実験中にしばしば試料槽窓ガラスの破損が起こり、これは測定を続けるためには困ったことであったが、誘導ブリュアン散乱に伴う破壊現象として別な興味がある。(1967年6月26日受理)

文 献

- 1) 誘導ブリュアン散乱についての文献はきわめて多いが次のものに良くまとめられている。
宅間, 伊東: 日本物理学会誌 21 p. 782 (1966).
- 2) R. Y. Chiao, P. A. Fleury: Physics of Quantum Electronics (McGraw-Hill, N. Y.,) p. 241 (1966).
- 3) R. G. Brewer: Appl. Phys. Letters 9 p.51 (1966).
- 4) 実吉, 菊池, 能本編: 超音波技術便覧 (日刊工業新聞社), p. 1256~7 (1966).
- 5) O. Nomoto: J. Phys. Soc. Japan 11 p. 827 (1956).