

## 液晶を用いた光の位相変調の検出とそのレーザー超音波法への応用

東京理科大学 理学部第二部化学科 佐々木健夫

レーザー超音波法は、非接触で物体の形状や内部構造を調べる方法の一つである (図 1)。製品の検査や、鉄橋やトンネル、パイプラインなどインフラの診断を簡便に行うことができるため、小型で高性能なレーザー超音波測定器が求められている。

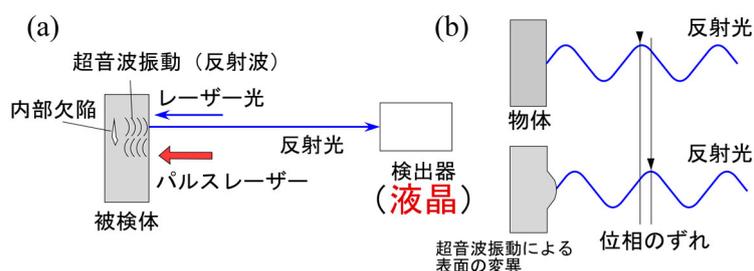


図 1 (a) レーザー超音波法 (b) 振動による物体の表面変位と反射光の位相変化

レーザー超音波法では、先ず物体にパルスレーザーを照射して表面に超音波振動を発生させる。その超音波は物体中を伝搬し、反対面や内部欠陥で反射されて表面に戻ってくる。その超音波振動を別のレーザー光で検出し、パルスレーザー照射から超音波振動検出までの時間を計測する。そうすれば、物体の厚さや内部欠陥の有無を知ることができる。物体に接触することなく測定ができるので、用途が広い。レーザー超音波法では、光を用いて超音波振動を正確に検出することが重要である。しかし、物体からの反射光で振動を読み出す場合、反射光の強弱ではなく位相が変化するだけなので検出が難しい (図 1(b))。光の位相変化の新しい検出方法として、フォトリフレクティブ効果が期待されている。これは瞬間的にホログラムを形成する現象である。ホログラムは光の干渉によって形成されるものなので、光の位相の変化に敏感である。我々は液晶の特性を利用することで高速かつ大きなフォトリフレクティブ効果を示す材料を開発した。このフォトリフレクティブ液晶をレーザー超音波計測に応用することを試みた。これまでの研究において、申請者らは液晶を用いて高感度かつ高精度なレーザー超音波計測ができることを世界で初めて実証した (Opt. Mater. Express 13, 728-738 (2023)、特願 2021-123643)。本研究では、液晶をセンサーに用いたこの計測システムの高性能化を目指した。フォトリフレクティブ効果とは、光導電性と電気光学効果を示す透明媒質中でレーザー光を干渉させると屈折率格子 (ホログラム) が形成される現象である。液晶におけるフォトリフレクティブ効果の発現機構を図 2 に示す。光導電性化合物を混合した液晶中でレーザー光を干渉させると、干渉縞の明るい部分で光導電性化合物が

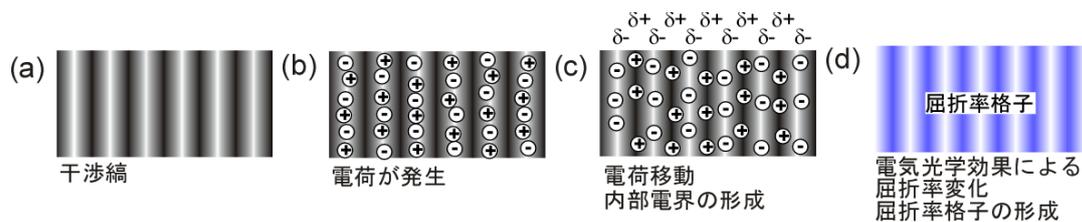


図2 フォトリフラクティブ効果のメカニズム

光を吸収し、正負の電荷が発生する。負電荷（電子）は液晶中で動きにくい、正電荷（正孔）は媒質全体に拡散する。その結果、干涉縞の明るい部分が負に、暗い部分が正に帯電する。そして、明るい部分と暗い部分の間に電場（内部電界）が形成される。この内部電界により電気光学効果が生じ、屈折率が変化し回折格子（ホログラム）が形成される。このとき、干涉縞の最も明るい部分では屈折率が変化せず、最も明るい部分と最も暗い部分の間で屈折率が変化するため、干涉縞と位相がずれた屈折率格子が形成される（図 2(c)、(d)）。図 3(a)に示すように、光化学反応を利用した一般的なホログラムの場合、ホログラムを透過す

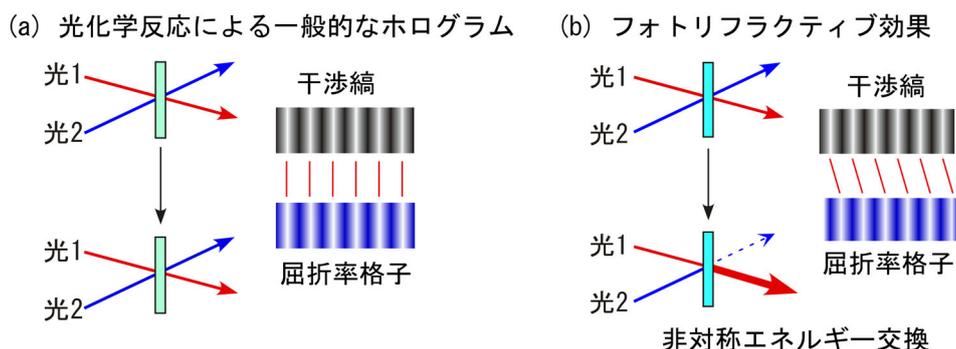


図3 屈折率格子による光の回折

(a)光化学反応による格子、(b)フォトトリフラクティブ効果による非対称エネルギー交換

るレーザー光の強度は変化しない。しかし、フォトトリフラクティブ効果による回折格子では、干涉する 2 本のレーザー光のうち、一方のレーザー光の透過強度が増大し、他方のレーザー光の透過強度は減衰する（図 3(b)）。これを非対称エネルギー交換と呼ぶ。干涉縞と屈折率格子の位相のずれによってもたらされる現象である。もし、一方のレーザーの位相が変化すると、非対称なエネルギー交換が変化し、光の増幅減衰が変化することになる。したがって、これを光の位相変化のセンサーとして利用することができる（図 4）。被検体に向けて定常光レーザーを照射し、その反射光を PR-flex 液晶素子に入射して参照光と干涉させ非対称エネルギー交換させておく。被検体にさらにパルスレーザーを照射して超音波を発生させる。超音波は被検体内部を伝わり表面に現れる。この超音波振動によって定常光レーザー反射光の位相が変動し、非対称エネルギー交換が変化する。この変化を調べることで被検体

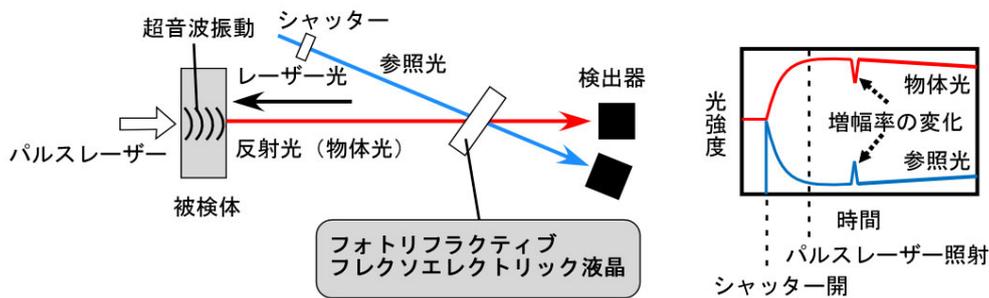


図4 干渉縞の変動によるフォトリフラクティブ非対称エネルギー交換の変化  
非対称エネルギー交換は干渉縞と屈折率格子が微妙にずれていることによって生じている。そのため、レーザー光の位相が変化すると非対称エネルギー交換による光強度に変動が生じる。

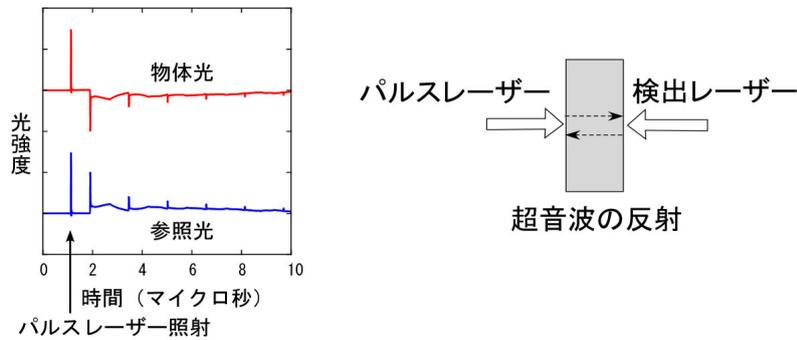


図5 実際の測定結果の例

超音波シグナルがノイズフリーで明瞭に計測されている。

の厚さのリモート計測や内部構造の非接触検査が可能になる。物体としてアルミ板を使用した場合の実施例は図5のようになる。これはPR-flex液晶を用いて超音波振動をとらえた世界で初めての例である。また、アルミ板の形状や内部の空洞を計測することができる(図6)。

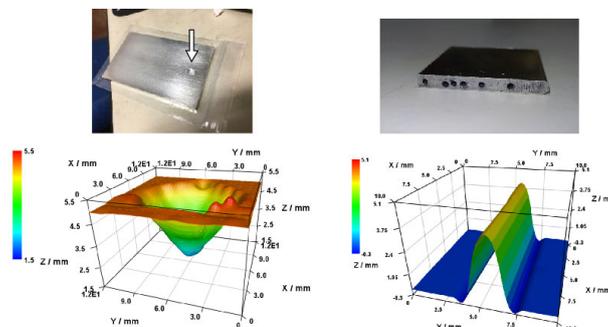


図6 液晶を用いたレーザー超音波法によるアルミ板の形状および内部空洞の計測

さらに、さまざまな金属、プラスチック板、石材などを用い、その厚さや形状、内部構造の計測が可能であることを示した。あらかじめ厚さのわかっている板材を被検体として測定すれば、その材質中での音速を知ることができる。図3は、様々な物質中での音速を計測した結果を文献値と比較している。温度の影響などもあるが、測定値は文献値とほぼ一致した。

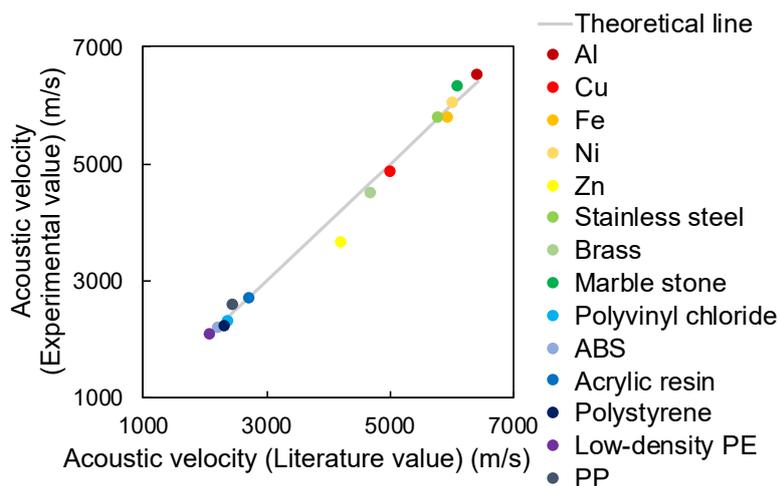


図7 様々な物体中の音速を、本研究での計測値と文献値とを比較した結果

さらに、素材によっては、超音波振動の検出ピークに幅が出ることが分かった。これはその材質中で音速に幅があるという結果であり、その素材が均一ではなく音速の速い部分と遅い部分があることを示している。

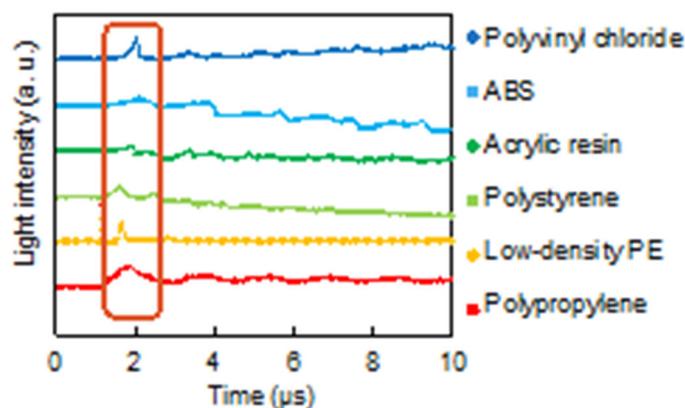


図8 様々な素材での超音波シグナルの比較

特にポリプロピレンなどでは幅広いシグナルになっており、これはポリプロピレン中に結晶化部分とアモルファス部分が混在していることを反映していると考えられる。このよう

な結果を利用することで、被検体の形状や内部構造だけでなく、材質に関する知見を得ることも可能であると期待される。

### 今後の開発目標

液晶を用いたレーザー超音波法が、ノイズが少なく、検出系の小型化が可能である。これまでの検討で明らかになった性能から、液晶レーザー超音波法は実用化につながる可能性が高いと判断される。ただし、複合技術からなる装置になるため、開発にはいくつもの専門分野からの協力が必要となる。ハンディ型計測装置のためには、光ファイバーを用いた光学系が適していると考えられる。実用化を目指し協力企業を探すためには、現在の液晶レーザー超音波システムでどのような計測ができるのかを示していくことが必要と思われる。

### 特許申請

2023年11月にJSTから国際特許化のための支援金を得ることができたので、“FLEXOELECTRIC LIQUID CRYSTAL COMPOSITION, LIQUID CRYSTAL ELEMENT, LASER INSPECTION SYSTEM, AND METHOD FOR ANALYZING TEST SUBJECT”という特許をアメリカ、カナダ、イギリスに出願準備中。

### 学会発表

- ・高分子学会年次大会（高崎）2023年5月
- ・液晶学会討論会（東京）2023年9月（招待講演）
- ・JST 新技術説明会（オンライン）2023年9月
- ・SPIE Photonics West（サンフランシスコ）2024年1月
- ・SPIE Photonics Europe（ストラスブール、仏）2024年4月（招待講演）
- ・高分子学会年次大会（仙台）2024年6月
- ・Photorefractive Photonics and Beyond 2024（マドリード、スペイン）2024年7月
- ・International Liquid Crystal Conference 2024（リオ、ブラジル）2024年7月（基調講演）
- ・SPIE Optics+Photonics（サンディエゴ）2024年8月（基調講演）
- ・SPIE Photonics West（サンフランシスコ）2025年1月（招待講演）

### 謝辞

本研究を行うにあたり、一般財団法人日本産業科学研究所から助成を頂きましたことに深く感謝を申し上げます。この助成金によって研究を進展させることができました。

本研究の成果を産業科学の発展に生かせるよう、実用化を目指してさらに研究に邁進する所存です。