

■1 群 (信号・システム) - 10 編 (超音波信号処理)

3 章 光と超音波

■1 群 - 10 編 - 3 章

3-1 光と超音波の基礎

(執筆者：酒井啓司) [2009年8月受領]

音波は媒質の歪の波であり、その伝搬に伴って媒質の誘電率は変調を受ける。一般に媒質の歪テンソル (2 階) と光周波数域における誘電率テンソル (2 階) の一次の変化を関係付ける光弾性率テンソルは 4 階となるが、ここでは簡単のために等方性媒質中の音波にのみ注目し、特に縦波による単純圧縮変形により誘起される屈折率変化は変形に比例するものとする。このとき媒質に入射した光は音波による屈折率の空間分布のために屈折・反射などの変調を受ける。これらの現象は光と音波のビーム幅で決まる両者の相互作用長、及び両者の波長との関係において次のように分類される。

なお固体中を伝搬する横波は媒質の圧縮変形を伴わないが、伝搬方向及びそれに直交する方向を主軸とする屈折率の一軸変調を誘起する。このため横波は光の偏光方向を回転させる散乱 (偏光解消散乱) の測定により、縦波と区別して測定することができる。

3-1-1 Bragg 反射

Bragg 反射は音波及び光のビーム幅が両者の波長に比べて十分に大きく、光と音波という二つの波動どうしが無限大の作用長で相互作用するという理想的な条件下における音波による光の散乱現象である。図 3・1(a)のように波長 Λ の音波面に対し媒質中での波長 λ の光が角度 θ で入射するとき、

$$2\Lambda\sin\theta=\lambda$$

なるブラッグ条件を満たす角度方向には各波面からの反射光の位相がそろって強い反射 (ブラッグ反射) を起こす。この条件は、光と音波の散乱過程における運動量保存則であるとも考えることができる (図 3・1)。一般に波動の運動量は、その波長を λ として \hbar/λ で与えられる。図のように入射光及び反射光の運動量ベクトルを \mathbf{k}_i , \mathbf{k}_r 、音波の運動量ベクトルを \mathbf{K} として $|\mathbf{k}_i|=|\mathbf{k}_r|=\hbar/\lambda$ 、 $|\mathbf{K}|=\hbar/\Lambda$ であり、その保存則は $\mathbf{k}_r=\mathbf{k}_i+\mathbf{K}$ で与えられ、これはブラッグ条件と一致する。

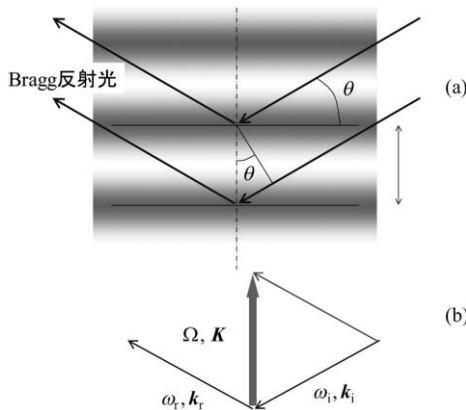


図 3・1

一方、音波は一定の位相速度で伝搬しているために、この反射により光の周波数のドップラーシフトが生ずる。角周波数 ω の波動のエネルギーは $\hbar\omega$ であり、散乱過程におけるエネルギー保存則、

$$\hbar\omega_s = \hbar\omega_i \pm \hbar\Omega$$

より、ブラッグ反射光の周波数はちょうど音波周波数だけシフトすることが分かる。

3-1-2 ラマンナス回折

次に音波と光の相互作用領域が無限大とみなせない場合を考える。すなわち図3・1において音波の幅を L としたとき、 $L\tan\theta < \Lambda$ であれば光は音波面を複数回横切ることができない。この条件は、先程のブラッグ条件を用い $\theta \ll 1$ を考慮すると $L\lambda \ll 2\Lambda^2$ と表される。このとき光は近似的に音波面に沿って進むと考えられるため、音波は光に対して位相回折格子として働く。この様子を図3・2に示す。位相変調の大きさは、音波による屈折率変調の大きさを δn としたとき $v=2\pi L\delta n/\lambda$ となり、これをラマン-ナスパラメータと呼ぶ。このラマン-ナス回折により $\sin\theta_m = \Lambda m/2\lambda$ を満たす方向 θ_m に、 m 次の回折光が見れる。このとき m 次回折光の強度は、入射光強度を I_0 として $I_m = J_m^2 I_0$ で与えられる。ここで J_m は m 次のベッセル関数である。

ブラッグ反射とラマン-ナス回折の境界はあいまいであり、 $L\lambda \approx 2\Lambda^2$ の領域では両者の特徴をもつ光回折現象が起きる。

3-1-3 光偏向

入射光のビーム幅が音波長に比べて十分に小さい場合は、光は音波によるほぼ一般的な屈折率勾配によりその進行方向を曲げる。音波の進行に伴い光の屈曲角が周期的に変化する現象を、音波による光の偏向と呼ぶ。この様子を図3・3に示す。

光の触れ角は屈折率勾配に比例するため、これを測定することにより、音波の振幅の絶対値を知ることができる。

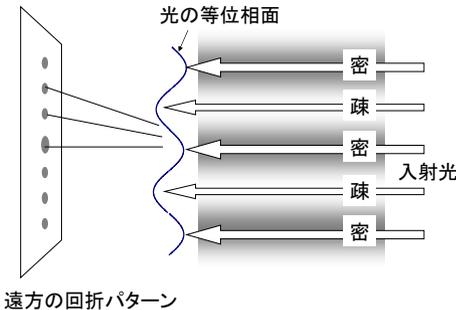


図 3・2

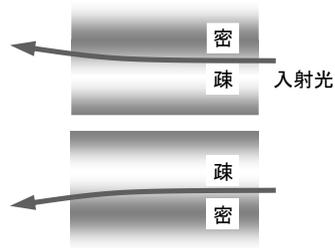


図 3・3

■1 群 - 10 編 - 3 章

3-2 光による音波の検出

(執筆者：酒井啓司) [2009 年 8 月 受領]

超音波は媒質中を伝搬する周期的な歪の波である。体積変形やずり変形に伴って生ずる屈折率変調を介して超音波は光と相互作用する。この結果、ラマン-ナズ回折やブラッグ反射、光偏向、複屈折などの現象が現れる。

ここでは特に、この超音波と光の様々な相互作用を利用して超音波の伝搬を調べる方法について記す。光による超音波測定は透明試料にしか適用できないという欠点はあるものの、音場を乱すことなく音波の測定が可能であるという利点がある。光によって検出可能な超音波周波数の上限は音波長が媒質中の光波長の $1/2$ となる周波数で決まり、液体においては数 GHz、固体では数十 GHz である。

3-2-1 ブラッグ反射法

前述のブラッグ反射光強度は、音波の強度すなわち音圧振幅の 2 乗に比例する。このため光の入射位置を掃引しながらブラッグ反射光強度を測定することによって音波の強度分布を非破壊的に測定することができる。

ブラッグ反射法のブロック図を図 3・4 に示す。試料中に平面音波を励起し、これにレーザ光を入射するとブラッグ条件を満たす入射角度において光はブラッグ反射される。反射光をフォトダイオードで検出し、ロックインアンプを音波の伝搬方向に移動しながら反射光強度を測定する。超音波音源には PZT、水晶などを使用する、水晶の高調波共振を用いることで数 MHz～数十 MHz の周波数域での音波吸収測定が可能である。

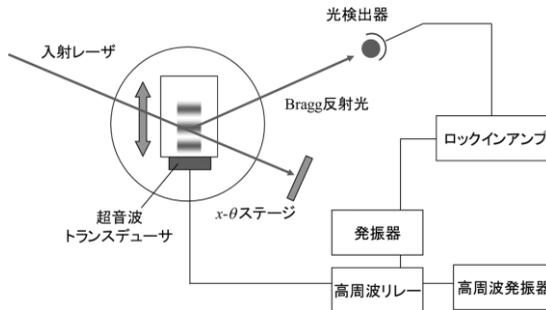


図 3・4

ブラッグ反射の効率は光の入射角に対して敏感なので、セルは回転テーブル上に固定して入射角の微調整を行う。更にセルのあおりに対しても微調整が行えると便利である。またセルを平行移動させるためのステージは、十分に精密なものを用いる。

入射音波に強度変調をかけ、信号をロックインアンプで受信することにより、微弱なブラッグ反射光の検出が可能である。光源には数 mW～数十 mW 程度の出力をもつレーザを用い

る。原理的にはブラッグ角を測定することにより音速が得られる。測定精度を高めるためには音波長に比べ十分幅の広い光ビームをプローブとして用いる必要があるが、実際には音波の減衰長より光ビーム幅が小さくなければならないという実験的な制約があり、一般にその測定精度は十分でない。

3-2-2 HRB (high resolution bragg reflection : 高分解能ブラッグ反射) 法

音波による光のブラッグ反射を利用して、UHF帯の超音波音速・吸収を測定する方法であるが、その原理は前項で述べたブラッグ反射法とは全く異なる。単一周波数で励振された平面音波が媒質中を減衰しながら伝搬するとき、波数はスペクトル分布をもつ。これをブラッグ反射光強度の角度分布から求め、そこから音速・吸収を調べる方法で100 MHzから2 GHzを越える高周波域での測定が可能である。測定精度はブラッグ反射光の角度分解能、主に使用するレーザー光の平行度によって決まり、音速については0.1%以上、吸収については5%以上の高い精度が実現できる。

一般に音波吸収を示す媒質中を伝搬する音波の振幅は、伝搬距離とともに指数関数的に減衰する。その波形をフーリエ変換して波数領域で表すと、スペクトルは音波波数にピークをもち半値全幅が減衰距離の逆数となるローレンツ曲線となる。したがって音波の波数スペクトルが得られれば、そのピーク位置から音波長を、またピーク幅から吸収を求めることができる。

図3・5にHRB法のブロック図を示す。100 MHz以上の高周波音波は、音波吸収の小さいサファイアなどのバッファロッドの端面にスパッタリング法により形成したZnOなどの圧電半導体膜を音波励振子として用いる。

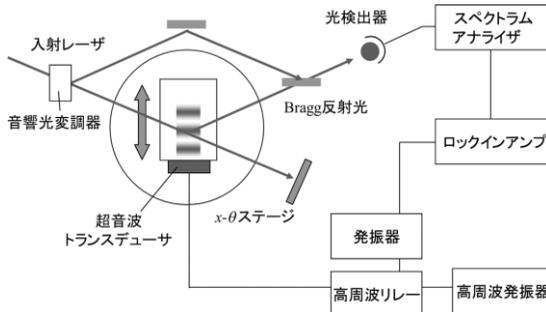


図 3・5

光源としては出力100 mW以上の単色性の良いアルゴンイオンレーザーなどを用いる。ブラッグ反射セルの試料中にはバッファロッドの振動子の形成されていない側の端面が突き出しており、この面から液体試料中に超音波が放射される。

ブラッグ反射光の検出には光ヘテロダイン法を用いる。信号光とこれとわずかに周波数の異なる参照光をフォトダイオードなどの受光素子上で重畳すると、素子の2乗検波特性によりそれらの差周波数成分をもつ光電流成分が現れる。音響光学変調器によってレーザー光を強

い 0 次回折光と 1 mW 程度の 1 次回折光に分け、それぞれを入射光、参照光として用いる。測定はスペクトラムアナライザを用いてロッド中の共振モードを観察する方法が容易で有効である。

3-2-3 ブリュアン散乱法

物質中には、熱揺動によって常に密度のゆらぎが起きている。この密度ゆらぎには広い波数帯域にわたる成分が含まれている。誘起された密度ゆらぎは音波（熱フォノン）となって伝搬する。これを光散乱法によって測定することにより、広い周波数帯域にわたる音波の伝搬を測定することができる。この熱フォノンによる光の散乱現象はブリュアン散乱と呼ばれる。ブリュアン散乱測定は、一般的には人工的に音波を励振することが困難な高周波域において、重要な音波測定手段である。

(1) ブリュアン散乱法の原理

媒質中を進む光は様々な波長をもつ熱フォノンによって散漫散乱される。この際その散乱角と散乱に寄与したフォノンの波長、及び真空中の光の波長はブラッグ条件で関係づけられるので、散乱角を選択することによって測定するフォノンの波長を決めることができる。散乱光は伝搬するフォノンによって散乱されるためにドップラーシフトを受け、ちょうどフォノン周波数だけ光の周波数がシフトする。

また散乱光の周波数は寿命の逆数に比例した広がりをもつことになる。したがって散乱光のスペクトルを測定し、周波数のシフトと広がりを調べることによって、フォノンの周波数と寿命を求めることができる。

(a) ファブリペロー干渉計を用いたブリュアン散乱測定

図 3・6(a)にファブリペロー分光器を用いたブリュアン散乱測定装置の例を示す。光源としては数十 mW 以上の出力をもち、かつ単一周波数化されたレーザが望ましく、シングルモードのアルゴンイオンレーザや YAG レーザなどが多く用いられる。分光に用いるファブリペロー干渉計は反射率が高く光吸収の小さい 2 枚のミラーを平行に配したものである。ミラーに垂直に光が入射するときミラー間で多重反射が起こり、波長の半整数倍がミラー間隔 4 に一致する光のみが分光器を透過する。ミラー間隔を掃引することによって透過する光の波長を変化させ、散乱光のスペクトルを得る。周波数の掃引には圧電素子を用いてミラー間隔を変化させて行うものと、固定長のエタロン板を気密槽内に置き、内部のガス圧を変化させることによって気体の屈折率を走引し実効的にエタロン間の光路長を変化させるものがある。

(b) 光ビート分光によるブリュアン散乱測定従

従来のファブリペロー分光系によるブリュアン散乱測定では、数十 MHz 程度がその限界である。これに対し、光ビート分光法を用いて非常に高い周波数分解能でのブリュアン散乱測定を実現する手法が開発されている。図 3・6(b)に光ビート分光法によるブリュアン散乱測定装置を示す。光源としては単一周波数化されたアルゴンイオンレーザや cw-YAG レーザなど単色性がよく、100 mW 以上の出力を有するものを用いる。レーザ光はビームスプリッタにより入射光とローカル光に分割され、それらは試料内部で再び交差する。散乱角はこの交差角として精度よく決めることができる。熱フォノンによる散乱は散漫散乱であるが、そのうちローカル光と同一経路を進む光がローカル光とともに受光素子の光電面に集光され、光

ビート信号をつくる。

光ビート信号のパワースペクトルはスペクトラムアナライザなどの電子機器により容易に調べることができる。光ビート信号の強度は極めて小さいので、入射光を光チョッパーで強度変調しロックインアンプを用いて信号を検出する。

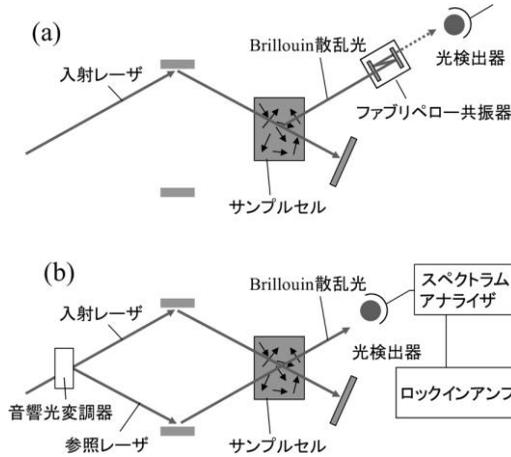


図 3・6

3-2-4 光偏向法

音波を横切るレーザ光のビーム径が音波長より小さい場合、光は音波による屈折率勾配により進路を曲げられる。これを光偏向という。光のふれ角、すなわち偏向角は微小振幅音波については音波振幅に比例するので、ナイフエッジ法などを用いて偏向角測定を行うことにより、超音波波形のリアルタイム測定が可能である。レーザ光を数 μm 程度のスポットに集光することは十分可能であり、これにより数十 MHz 程度の音波の波形測定を行うことができる。超音波振動子からの距離を変えながら得られる超音波の位相と減衰をプロットすることで、音速と音波減衰が求められる。

この方法は連続波超音波のみならず、パルス音波の測定にも用いることができる。通常水晶振動子などでパルス音波を励振した場合、音波には振動子の高調波成分が含まれる。高調波成分を含むパルスのバースト波形をスペクトラムアナライザなどによって周波数分析することにより、数 MHz 数十 MHz の帯域における吸収スペクトルを瞬時に調べることも可能である。

図 3・7 に光偏向法のブロック図を示す。光源は出力 1 mW 程度のごく微弱なレーザで十分であるが、できるだけ集光して媒質中のビーム径を小さくし短波長の音波も検出できるように、空間的な干渉性の良い He-Ne レーザなどが用いられる。集光されたレーザは試料内で音波面を垂直に横切り、進路が曲げられる。ナイフエッジによって光のふれ角を光強度に変換し、波形をオシロスコープで観察する。セルを超音波の伝搬方向に掃引し、距離に対する位相と振幅の変化から位相速度と吸収が求められる。

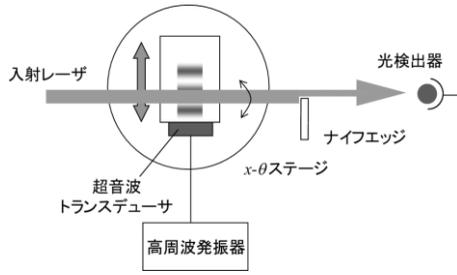


図 3・7

■1 群 - 10 編 - 3 章

3-3 音場の可視化

(執筆著：山本 健) [2009 年 3 月 受領]

計算機シミュレーションによる画像化ではなく、物理的及び化学的作用を用いた音場の観察手法について説明する。可視化実験として代表的なものが、衝撃波研究の先駆者であるマッハ (Mach) が行った弾丸によって発生した衝撃波の可視化である。瞬間撮影法として確立され、衝撃波や圧縮性流れなどに関する「瞬間」かつ「見えない」現象を見る可視化技術の発展の道が拓けた。以後、観測現象に対して最適な物理的効果 (回折, 偏光及び干渉など) や化学的効果を利用した様々な手法が提案されてきた。ここでは、超音波の可視化手法と得られた可視化像について説明する。

3-3-1 シュリーレン法

シュリーレン法の光学系を図 3・8 に示す¹⁾。通常、光源には高輝度の超高圧水銀灯や短時間発光が可能なキセノンランプなどの白色光が用いられる。レンズ L1 及びスリット (またはピンホール) によって得られた点光源を、レンズ L2 を用いて平行光線とする。レンズ L3 の焦点面にナイフエッジを置き、カメラや肉眼で観察する。測定部において音波による密度変化が生ずると、それに起因した屈折率変化によって光線は偏向し焦点から外れる。その光をカメラで測定することにより、密度変化に対応した像を観測することができる。代表的な効果として、数 MHz 数十 MHz 域ではラマン-ナス (Raman-Nath) 回折、数十 MHz 以上で見られるブラッグ (Bragg) 反射などがある²⁾。光の波長及び幅、または音の幅によっても介在する効果が異なってくる。超音波の励起と光源の発光の遅延時間を制御することにより任意の時間の超音波を観測できる。図 3・9 に周波数 10 MHz のバースト超音波(a)、スリットによって回折する像(b)及び液面と下面にある金属板によって反射を繰り返す様子(c)を示す。

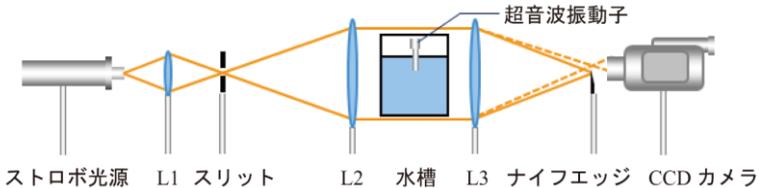


図 3・8 シュリーレン法の光学系

3-3-2 フレネル回折法

シュリーレン法においてナイフエッジを用いずに、0 次光だけを遮断 (例えばスライドガラス上の黒点を挿入) すると、すべての方向に同等な感度を得られる。しかし、超音波の周波数が数百 kHz~数 MHz 域では光の偏向角が小さいために、0 次光だけの遮断は困難である。そこで、ナイフエッジなどを用いずフレネル (Fresnel) 回折による音場の後方に生ずる強度格子を観測することにより音の波面まで可視化することができる³⁾。図 3・9(d)は、直径 10 mm の超音波振動子から出射された周波数 1 MHz の超音波である。カメラの焦点を音場の後方に

合わせることにより、フレネル回折による強度格子を観測している。すべての伝搬方向に同感度で可視化できているが、多少コントラストに欠ける手法である。

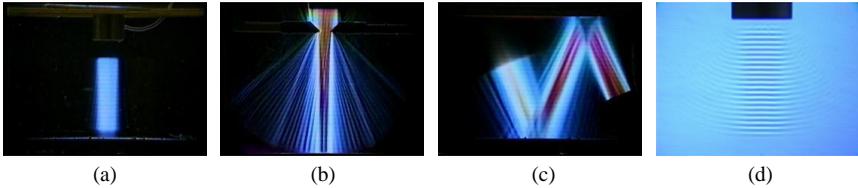


図 3・9 シュリーレン法とフレネル回折法による超音波の可視化像

3-3-3 光弾性法

透明な固体中（ガラス、アクリルやゲルなど）を伝搬する超音波の可視化では、回折の効果は非常に小さいために偏光を用いる光弾性法が適している⁴⁾。音波によって生ずる複屈折によって光の偏光面が回転するので、その回転した光だけを観測する。光弾性法は、図 3・8 の L2 及び L3 の間に直交した 2 枚の偏光板を挿入した光学系である。1/4 波長板を組み合わせると円偏光が得られるために、固体中のすべての方向に伝搬する縦波及び横波が観測できる。図 3・10(a)の像は、ガラス/水/ガラス構造体を伝搬する周波数 1 MHz のガイド波である。(b)は 620 kHz, (c)は 670 kHz で振動する直径 30 mm のガラス円柱の振動モードである。

3-3-4 ルミノール法

ソノルミネッセンスを用いると水中の音場が 3 次的に可視化できる^{1, 2)}。図 3・10(d)は、ルミノールのアルカリ水溶液を入れたビーカー内の周波数 100 kHz の音場の可視化像である。しかし、超音波キャビテーションによる酸化作用の分布を表わしているために、正確な音圧分布とは異なる。

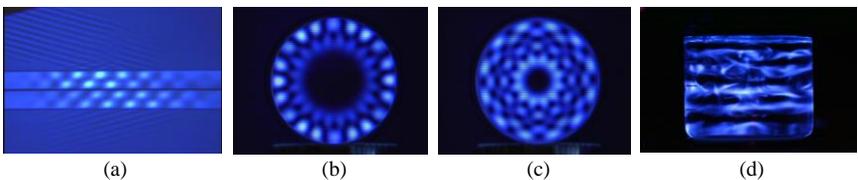


図 3・10 光弾性法とルミノール法による超音波の可視化像

■参考文献

- 1) 根岸勝男・高木堅志郎, “超音波技術,” 東京大学出版会, PP.76-107, 1984.
- 2) 超音波便覧編集委員会編, “超音波便覧,” 丸善, PP.172-177, 1999.
- 3) K. Yamamoto, “Optical visualization of ultrasonic waves propagating in a fluid waveguide,” *Acoust. Sci. & Tech.*, vol.26, no.4, pp.378-380, 2005.
- 4) P-K. Choi, E. Jyounouti, K. Yamamoto and K. Takagi, “Visualization of shear waves radiated from pseudocapillary mode on agarose gel by stroboscopic photoelasticity technique,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.40, no.5B, pp.3526-3527, 2001.

■1群 - 10編 - 3章

3-4 光音響デバイス

(執筆著：中村健太郎) [2010年9月受領]

超音波により光を操作するデバイスが光音響デバイスである。バルク波を用いるもの、表面波を用いるものなどがあり、様々な光機能素子としての応用がある。

3-4-1 音響光学効果と超音波伝搬による光の回折

超音波は媒質の歪みが伝わる波動であり、この歪みに伴って媒質の光学的な屈折率が変化する。これを音響光学効果と呼ぶ。図 3・11 のように二酸化テルルなどに圧電素子を貼り付けて周波数 f_a 、音速 c の超音波を伝搬させると、超音波波長 cf_a をピッチとする屈折率格子が形成され、光の回折が起こる。光波長を λ とすると、Bragg 条件 $2cf_a \sin \theta_b = \lambda$ を満たす角度で光が回折し、その強度は超音波強度による。また、回折光の周波数は f_a だけずれたものとなる。以上が Bragg 回折である。一方、超音波波長が長い場合などは図 3・12 の Raman-Nath 回折となる。この場合、超音波強度により高次回折光も発生する。なお、図 3・11、図 3・12 では超音波伝搬媒質と空気との境界での光の屈折は省略して描いてある。

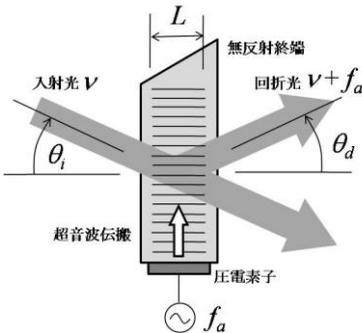


図 3・10 Bragg 回折

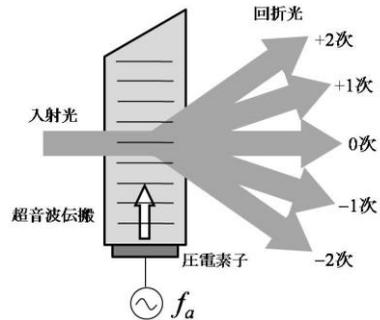


図 3・11 Raman-Nath 回折

3-4-2 各種光音響デバイス

超音波のオン・オフにより前項で述べた格子が発生・消滅するので、光スイッチとして動作する。光変調器としての応用もある。また、超音波周波数に応じて回折角が変わることは光スキャナや実時間のスペクトラムアナライザとして応用できる。回折光の周波数がずれる現象は、光ヘテロダイン干渉計に欠かせない周波数シフタとして精密測長、速度計測などに利用される。一方、弾性表面波素子と光導波路を組み合わせれば、波長可変フィルタ、光モード変換器などの光機能デバイスをコンパクトに実現することができる。この場合、基板上で弾性表面波と光を同一方向に伝搬させるコリニア構成とすることも多い。

■参考文献

- 1) 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会編，“弾性波デバイス，”オーム社，pp.418-429, 2004.