



光波が屈折率の低い物質中から高い物質へぶつかり反射する場合何故位相のずれがおこるのでしょうか？

そもそも光の屈折は何故おこるのでしょうか？

そしてもうひとつ。

気柱における定常波の発生について、開口端で何故音波の反射がおこるのでしょうか？

開口端補正なるものがでるのも何故でしょうか？



色々なことを質問されていますので、ふたつに分けてお答えします。

[光の反射と屈折について]

光の反射や屈折を考える前に、光が物質中を進む状態を微視的な視点で説明してみます。

光の波(電磁波)がどうしてもどこまでも前へ前へと伝わるのかを考えると、結構不思議なことが起こっています。

電場の時間的な変化は磁場を発生し、磁場の時間的な変化は電場を発生します。

電磁波はこのような電場と磁場が互いに対になった状態で振動しながらどこまでも伝わって行くので、我々は何十億光年の彼方の星を見ることが出来るわけです。

一方、光が大気中を進む場合を考えてみて下さい。大気には、窒素や酸素や水蒸気などの分子がたくさん分布しています。

これらの分子に光の振動電場が作用すると、分子に含まれる電子の分布が偏心し(分極)、それが時間的に振動します。

電子は電荷を持っていますから、その周りに電場が発生します。したがって分極が振動すると、その周りに発生する電場も時間的に変化します。

この振動する電場によって新しい電磁波(光)が様々な方向に広がって行きます。つまり光は分子によって散乱されます。

しかし後で示すようにたくさんの分子から散乱された光は、互いに干渉して、強めあったり弱めあったりします。

なお、このとき分子から発生する電磁波の振動数は最初に入射した光と全く同じですが、位相は遅れるのが一般的です(通常は入射光と逆の位相です)。

このように大気中の分子は光を散乱していますが、はるか遠くにある山を私たちは見ることができます。

どうしてでしょうか。大気中の分子は、光の波長(数千オングストローム)のサイズの中にたくさん分布しています。

ひとつひとつの分子が同じように光を散乱すると、その間の干渉を考えなくてはなりません。

結論から先に言うと、散乱された波は散乱されなかった光と一緒に、前方に全く同じ波を発生します。このよう

にして、どこまでもどこまでも直進します。たとえとして、東名高速道路を東京から名古屋まで何台もの車でドライブすることを考えてみて下さい。そのときルールを決めておきます。

ひとつのルールは、スピードは時速100kmと決めておきます。もうひとつのルールはどこか1箇所だけサービスエリアで30分休んでも良いことにしておきますが、その場所はどこでも良いことにしておきます。その結果、どの車も別々のサービスエリアで休憩したにもかかわらず同じ時刻に名古屋に着きます。

1回も休まなかった車は30分早くつきます。これが波だったらどうなるでしょうか？干渉を考えなくてはなりません。

つまり途中で散乱された波は位相が遅れて届きますが、どれも同じだけ位相が遅れて到達します。この波と散乱されなかった波とが一緒になって、新しい波が合成されます。これを繰り返しながら、波は位相が少しずつ遅れながら前へ前へと進んで行きます。この位相の遅れの効果を屈折率という概念でうまく表現することができます。

波の位相の等しいところが進む速度(位相速度)が遅くなると、波の山と山(あるいは谷と谷)の間の距離が近づくと、波長が短くなります。

そこで、真空中の波長と媒質中の波長の比を屈折率として与え波の状態を考えて行くわけです。

それでは、後ろに散乱された波はどうなるのでしょうか？

再び、高速道路の例で説明すると、東京を出発した車はどこかのインターチェンジでも良いから今度は東京にUターンするようにします。

すると、遠くのインターチェンジでUターンした車と近くのインターチェンジでUターンした車とは、帰ってくる時刻がバラバラです。これを波で考えて下さい。

色々な位相の波が届くと、互いに打ち消しあって消えてしまいます。つまり一様な媒質中では後ろに波は発生しません。

次に、空気の場合に戻って霧がかかっている場合を考えてみましょう。

空気中の水蒸気が凝集して水滴になった場合は、最初の均一な分布からずれています。

その場合は、散乱された光は後ろにも発生します。高速道路の例で言えば、どこかで事故があつて通行止めになり、みんなそこでUターンして来ると同じ時刻に東京へもどります。

これを波で考えると、強めあうことになりますから、後ろに波が発生することになります。

ガラスの表面で光が反射するのはそのためです。元々は散乱光ですので、位相も180度ずれています。

次に、屈折について考えてみましょう。

海岸に打ち寄せる波は、いつも海岸に平行です。しかし、遠洋では波の進む方向は海岸に平行ではありません。

これは、海岸に近づくにつれて海底が上昇して浅くなってくると、水の波の速度が遅くなります。

そのため、遠洋では海岸に対して斜めに進んでいる波であっても、先に海岸に近づいた波の山は速度が遅くなり、その間に、海岸から遠くにある波は速く海岸に近づいてきます。

その結果、波面は海岸に平行に近づきます。つまり、波の進む方向が変化します。

光がガラスに斜めに入射した場合も同様に、進む方向(屈折角)がガラス面に垂直な方向に変化します。

このようなガラスにあたった光が反射したり屈折したりする現象は、電磁気学という学問でより一般的に理解することができます。

電磁気学では、正の孤立した電荷があるとそこから電場(あるいは電気力線)が必ずわき出すというガウスの法則というのが知られています。

負の孤立した電荷では逆に吸い込まれます。一方、物質に電場がかかると原子や分子を構成するプラスとマイナスの電荷の中心が互いに逆向きにずれて、分極が発生します。

この分極によって電場が発生しますが、その向きはかけた電場と逆の方向です。

例えば、コンデンサーの間に物質(誘電体)を挿入した場合を考えてみてください。

分極によって、物質中の電場は、誘電率が大きい物質ほど小さくなります。

ガラスに垂直に光が入射した場合も同様に、ガラスの外の電場よりもガラスのすぐ内側の電場の方が小さくなります。

しかし、どこにも孤立した電荷はありませんのでこのままでは電場が不連続になってしまいます。

ガラスの表面には分極は発生しますが、孤立した電荷は発生しませんのでガウスの法則に反することになります。

しかし、ガラスの表面では入射光の電場と逆向きの電場が分極によって発生します。その位相は入射光と180度ずれています(つまり入射光と反対の向き)。これが反射光になります。したがって、ガラスの外側で入射光と反射光の電場を足しあわせるとガラスのすぐ内側の電場と同じ大きさになります。

このようにして、ガラスの内側と外側で電場が同じ(連続)にすることができます。

光は電磁波ですので磁場についても同様に考えなくてはなりません。

その結果、ガラスの屈折率を  $n$  とすると真空中に置かれたガラスに垂直に入射する光に対する反射光の電場の比  $r$  は

$$r = (1 - n)/(1 + n)$$

であたえられ、屈折率が1より大きい物質に光が入射するときは、負の値になっています。

反射率(入射光と反射光の光の強さの比)はその絶対値の二乗で与えられます。

また電磁気学の基本法則であるマックスウェル方程式から、電磁波が媒質中を伝わって行く方程式(波動方程式)を導くことができます。

すると真空中の光の速度  $c$  に対する媒質中の光の進む速度  $v$  (正確には位相速度)の値、 $v/c$ 、は比誘電率の平方根の逆数に等しいことが導かれます。

この値は屈折率の逆数に等しいので、屈折率は比誘電率の平方根とは一致することになります。

#### [開口端での音波の反射]

気柱を伝わる音波が開口端に近づくと、光の反射と同様に、音波も反射します。

つまり、気柱のパイプが突然とぎれたり、太さが変わって環境が変わると波の性質として、やはり反射が起こります。

パイプなどの閉じ込められた空間を音波が伝わる時には、パイプの壁が波に対して与える条件を考えなくてはなりません。

例えば、パイプの壁の内側では壁に垂直な方向の空気振動は起こりませんので、振幅がゼロにならなくてはなりません(ただし、圧力はゼロにはなりません)。一方、壁に平行な方向の運動はほぼ自由です。

まったく同じ太さのパイプが続いている場合は、ガラス中を光が前にだけ進むのと同じ原理で、壁で押し返された波はパイプの前方にだけ進みます。

一方、後ろに散乱された波は干渉して消えてしまいます。

しかし、パイプの太さが太くなったり細くなったりすると、後方に波が発生(反射)することになります。

もしパイプが完全に閉じている場合は、そこでの空気振動はゼロになり完全反射します。

しかし、パイプが開放状態の場合も部分的に反射します。これは壁で閉じ込められている圧力が開口端から先では開放されて、その付近での音波の散乱がなくなります。

その結果、開口端の手前で散乱された音波が干渉し後ろ側では完全に消えなくなるからです。

しかしパイプの中心部分は壁と距離がありますので、パイプの端と反射が起こる場所との位置関係は太さの程度の範囲ではっきりしません。

つまりパイプの壁がとぎれたところだけで反射波がでるといのは変です。その分を若干補正して考えた方が良いことがわかんと思います。

また同じ太さのパイプでは波長が短くなると、開口端では次第に反射が起こりにくくなることも想像できます。

たとえば大きく開けられた窓に向かって放たれた音は、そのまま外に出て行きます。

木管楽器の場合は、開口端や途中の穴の位置で波の反射が起こります。

その結果、マウスピースに装着されたリードの振動と特定の振動数で共鳴するわけです。ふさぐ穴の位置を変えれば共鳴振動数も変化するわけです。

もし高い音域で楽器を演奏したい場合は、開口端での反射が高い音域でも起こるようにするために、パイプの内径を細くする必要があります。

また高音域だけでなく低音域でも楽器を演奏したい場合は、朝顔型の開口端にして広い音域で反射が起こるようにする必要があります。

ホルンやトランペットなどの金管楽器でも同様です。これには、やわらかな音にする効果もあります。