

電圧による水の巨大な屈折率変化

はじめに

水面下の物体を斜めから見ると浮き上がって見えることは経験的にご存知と思いますが、これは光が屈折することによる効果です。例えば、お風呂場でおもちゃを浴槽の水面下に沈めて、水面ぎりぎりの高さから見るとおもちゃの上下方向の長さが短くなります。さて、どのくらい短くなるか計算してみましょう。長さAの物体を図1のように最高部が水面に一致するようにすべて水面下に沈めたとします。そこからL離れた場所で水面からHの高さから物体を見ると、

$$\begin{aligned} \sin \theta_1 &= n \sin \theta_2 \\ \sqrt{X^2 + H^2} \sin \theta_1 &= X \\ \sqrt{(L-X)^2 + A^2} \sin \theta_2 &= L-X \end{aligned} \quad (1)$$

が成り立ち、これはXの4次方程式になり解けます。水の屈折率 $n=1.33$ 、 $A=10\text{cm}$ 、 $H=10\text{cm}$ 、 $L=50\text{cm}$ を代入すると、 $X=39.4\text{cm}$ となり、見かけの長さは $\frac{L-X}{L}H=2.7\text{cm}$ と

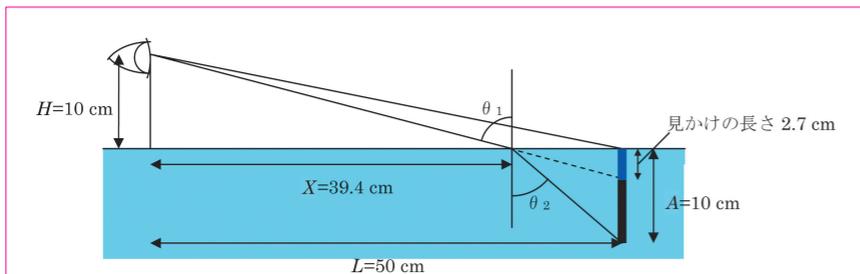


図1

理学部第一部 物理学科 准教授 徳永 英司

なります。目の高さを水面に近づければいくらか短くなり、 $H=5\text{cm}$ の高さから見ると、見かけの長さは 1.5cm です。子供の目の高さは低いので、浴槽の端で大きくなって一、小さくなって一と言いながらおもちゃを水面を境に上下させると劇的に長さが変わるので、子供を楽しませることができます。

ここで水の屈折率を1.33としましたが、我々は最近、水の屈折率が電圧を印加すると変化するという現象を発見しました¹⁾。図2はその現象をわかりやすく模式図にしたものです(実際の実験とは異なる)。水が空気との界面で屈折して方向が変化しているとき、界面付近の水に正(負)の電圧を印加するとそこでの水の屈折率(図の矢印は電場で、電場×距離が電圧になります)が減少(増加)して、屈折角が変化します。本稿ではこの現象の物理的メカニズムと意義について詳しく解説したいと思います。そのためには、まず屈折率の物理的起源について知らなければなりません。

屈折が関わる現象

物質には固有の屈折率があります。着色している(吸収がある)物質でも屈折率は測定できるのですが、ここでは透明な物質に限ると、真

空の屈折率は1、空気の屈折率は1.0003、ガラスは1.5前後、水は1.33です。屈折率 n_1 の物質と屈折率 n_2 の物質が平面を境界にして接しているとき、光が界面を通過すると、屈折の法則(Snellの法則)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2)$$

に従って光の向きが変化します。蜃気楼や虹は屈折が生み出す自然現象です。また、透明なガラスや水が目に見えるのは、空気と異なる屈折率のために光が表面で反射するからです。ダイヤモンドが輝くのは、2.42という大きな屈折率を持っているために、プリリアントカットにより表面から入射した光が底面から逃げることなくほとんど全反射され、表面から出てくるからです。ここで、全反射とは、

屈折率の大きい物質(n_2)から小さい物質(n_1)に光が出て行くとき、 $\sin \theta_2 > (n_1/n_2) \sin 90^\circ = n_1/n_2$ ($n_2 > n_1$)ならば、式を満たす θ_2 が存在せず、界面ですべて反射される現象です。空気中のダイヤモンドは $\theta_2=24.4^\circ$ を超える入射角で全反射されることとなります。

さて、この屈折という現象は我々の眼を楽しませるだけでなく、現代社会を快適に生活するために役立っています。レンズが光を集光できるのは、光が空気とガラスの界面で屈折することに基づいています。これによって顕微鏡下でミクロの世界を観測することができます。コンパクトディスクやDVDに高密度に音楽や画像のデータを記録したり、100nm以下の微細な回路パターンをもつ半導体素子を作製したりできるのは、光学レンズによる集光のおかげです。さらに、現代社会は光通信という大容量通信の恩恵を享受してい

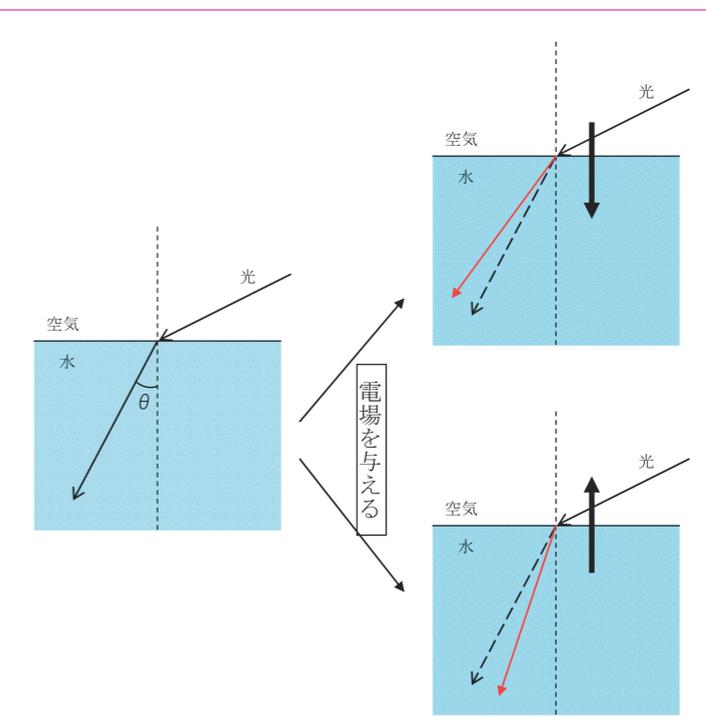


図2 ポッケルス効果について 電場(太い矢印)を加えると図のように曲がり方(屈折角 θ)が変化する。電場の向きを変えると逆向きに変化する。

ますが、光通信では透明な光ファイバーという細いガラス線の中に光を閉じ込めて光を送ります。ここで、光が閉じ込められる原理も屈折の法則(全反射)に基づいています。

屈折率の起源

このように身近で有用な屈折という現象ですが、なぜ生じるか考えたことがあるでしょうか? 高校物理では物質には固有の屈折率があり、物質中では光の速度が屈折率分の1になると習い、屈折の法則は光速の変化とホイヘンスの原理から導かれています。では、屈折率が1より大きいと、なぜ光の速度が遅くなるのでしょうか? そもそも1より大きい屈折率が生じる原因は何でしょうか?

これを理解する鍵は、光が波-電磁波-であることと、電磁波がその電場成分で電荷と相互作用することです。ホイヘンスの原理では、光が到着した場所の波面上のすべての点