反射屈折回折散乱

向井　正*・向井苑生*

はじめに

最近大学の講義では光学（特に幾何光学）はあまりやらない．高校の教科書でも鏡やレンズの話はなくなって，光学は波や原子物理の章に分割吸収されている．教える内容が増えたためなのか，それとも余り重要ではないと（誰かに）判断されたためなのかよくわからないが，光学は授業科目としては比重の小さなものとなった．このために“どうしてお空は青いの？”“どうして虹ができるの？”といった“どうして……？”という新鮮な驚きを伴う問いかけから始まるおもしろい物理は少なくなってきた．

これからお話しすることは幾何光学に基づいている．幾何光学は上に述べた青空・虹の他に“水の入った丼鉢に差し込んだ割バシはなぜ曲ってみえるのか？”“水たまりの油膜はどうして色付くのか？”……，思いつくだけでも数多い日常的な疑問と結びついている．

まず幾何光学によくでてくる reflection, refraction, diffraction という発音しにくいよく似た言葉の意味から説明を始めよう．百聞は一見にしかず．図1が説明のほとんどを尽くしている．あえて蛇足を付け加えればこの図では入射光・反射光・屈折光のすべては光線として扱われているが，これは光の波長に比べて物質がずっと大きいという仮定の下で正しい．

さて入射光束の拡がり（測定する側の視野と考えてもよい）に比べて物質の端がはるか遠くにあれば，光線のまわり込み；回折（diffraction）は考えなくてもよい．このとき物質を照らす光の一部は反射（reflection）し，残りは屈折（refraction）して物質に入り込む．微視的にみれば物質の構成分子又はそれに付随する電子雲が入射光によって揺り動かされ，その結果入射光と同じ位相の2次的な光が物質から放出され（反射光），他は構成分子を隣から隣へと伝わりつつ物質内部に拡がっていく（屈折光）（というような難しい説明は今後やらない）．反射と屈折は伴って生じることが多いので以下では一組として扱う．入射光線と反射屈折光線とのなす角度や後者の輻射強度（偏光量も含めて）は，物質の光学定数が決まればスネルの法則とフレネルの法則によって正確に記述できる．（ここまでを幾何光学と呼ぶことが多い）

物質が小さくなってその端が入射光束内に入ってくる

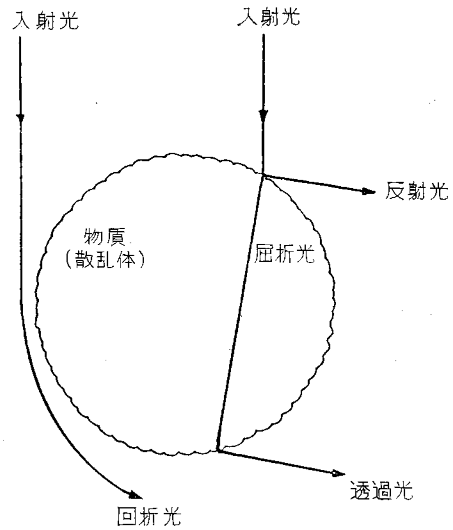

図 1

と回折（diffraction）を考えねばならない．回折の様子は物質の光学定数や表面状態には影響されないで，物質の形と大きさとに左右される．物質をもっと小さくしてみよう．そうすると回折光の強さが増えだして，やがて反射・屈折光の強さと同じ位になり，両者は区別できなくなる．この場合両者をまとめて散乱（scattering）と呼ぶ．詳しい研究を行なった人の名を採って，物質の大きさが入射光の波長程度に小さくなった場合をミー（Mie）散乱，物質が波長に比べてずっと小さくなるとレイリー（Rayleigh）散乱と呼ぶ．もちろんこれらの場合には入射光を光線として扱うことはできない．

各々の散乱理論は数学的に完備していて厳密な解を与えてくれる．我々はこれらを用いて“月の表面からの太陽反射光は幾何光学で説明できる”し，“空が青くみえるのは地球大気上層の分子による太陽光のレイリー散乱のためです”と解説できる．また“黄道光の一部である後日照は惑星間塵による太陽光の後方散乱によるもので，これはミー散乱から予測できます”といったりする．

しかしこれらの理論に基いて完全な解を求めるには大事な約束を守らねばならない．ミー散乱を例に採ると，散乱体（たとえば塵）はなめらかな表面をした球形でなければならない（円筒でもよい）．散乱を扱う仲間うちではミー理論を使いましたというと，ああ球形を仮定したんだなということが判るので，“どうして塵は球なん

* 金沢工大　Tadashi Mukai, Sonoyo Mukai: Reflection, refraction, diffraction—scattering

ですか？”というような答えられないことは礼儀として問わない．それでもここ 20 年近くは球近似の散乱理論は数多くの現象を説明してきた．

しかし最近様子が変わってきた．大気上層で採集された塵はぶどうの房のようにみえる．また宇宙線照射のために塵表面はなめらかな状態を保てないだろうともいわれだした．それなのに塵をなめらかな球として扱ったままでいいのだろうか．「否，より現実に即した形状の塵も扱えるような光の散乱理論を創るべきだ」というのが現在の受けとめ方である．それではどんな試みが行なわれているのか．長い前置きになったが我々の取り組みを少しお話ししてみたい．

不規則形状粒子による光の散乱

岡山県の鷲羽山は夕日のきれいな所だが，特に瀬戸内海に映る残照は美しい．じっと見ていると光がちらちらと踊るようにみえる．もし海が全くの凪状態で鏡のようだったら光はダンスをしない．さざ波が反射光の方向を微妙に変えているのだ．かっこよく言えばこの現象が我々の考え方の出発点となった．塵（入射光の波長に比べてかなり大きいことが必要）の表面にある凹凸をさざ波として扱い，反射・屈折光の角度分布を計算してみようと思いたった．

あらい表面をした円筒

最初は簡単のために無限に長い円筒を扱う．光源はずっと遠方にあるとして光はこの円筒の軸に対して垂直な方向からやってくると考えよう（図 2）．円筒の直径が光の波長に比べて十分大きいと仮定すると，光は光線として扱える．円筒表面には軸に平行な長い無数の溝が刻んであるとする（あらい表面と呼ぶ）．こうすると反射屈折は入射光と円筒の断面とを共に含む平面内だけで生じるので問題が扱いやすい．

溝は円筒の直径に比べて浅いから，円筒の断面は円周に近い形をしている．この円周上では溝の側面が基準円周に対して様々の傾きを持った小さな鏡のような役割をする．ここでもまた個々の鏡の大きさが光の波長に比べて大きいとすれば，鏡による光の反射・屈折は幾何光学に従う（図3参照）．

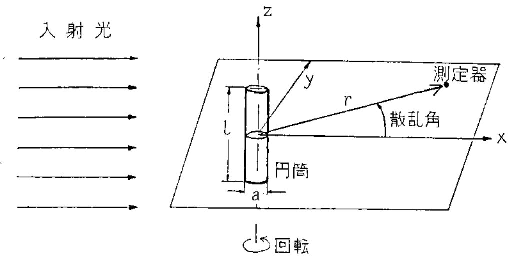

図 2

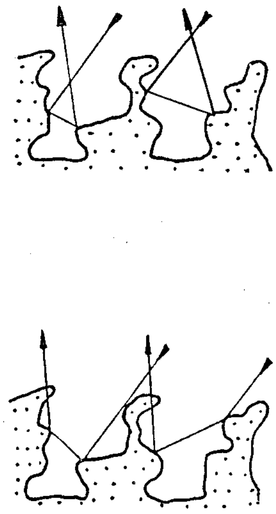

図 3

あらい表面での反射屈折の特徴はその強度の角度分布に著しく現われる．判りやすいように，点光源から出た光がなめらかな円筒表面で反射される場合を考えよう（しばらく屈折は考えない）．この時円筒から離れた点状の観測者には円筒の一点しか光ってみえない（鏡と同じ）．ところが円筒表面に凹凸があれば，適当な傾き角を持った様々の凹凸面（溝の側面）からの反射光が観測者にやってくるので，円筒上にはいくつもの点光源がみえる．もしこの円筒がその軸を中心に回っっていたとすると，なめらかな円筒ではやはり一点しか光らないが，表面に凹凸が有れば円筒を取り囲む光の輪ができる．

見方を変えて点光源と空間に固定した座標系からみた円筒断面の円周上の一点（反射点）とを共に止めて考える．この時なめらかな円筒による反射点からの光（反射光）は，ある特定の方向にしか進まない．ところがもし表面に確率的な傾き分布を持った凹凸があれば，円筒の回転によって空間に固定した反射点には様々の異なった傾き角を持つ鏡が確率的に現われることになり，光は反射点からどの方向へも進むことができる．いいかえれば，表面の凹凸によって反射光の方向に拡がりができ，その強度もならされる（図 4 参照）．この傾向は表面の凹凸のために反射光が再び反射される，多重反射によって更に増幅される．屈折光については円筒の他の場所か

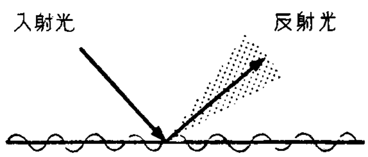

図 4

ら再び円筒外に出ていく光（透過光）として別に扱う．ただ物質が光に対して大きな吸収係数を示す場合（黒っぽい不透明なもの）には屈折光は考えなくてもよい．

鏡（円筒物質）の光学定数と傾き角の分布関数（海の波ではこの分布がガウス型になるという測定を我々は引用した）を与えると，反射・屈折光の散乱角分布（散乱角の定義は図2に示す）が求まり，これに円筒による回折光を重ね合わせると散乱光の測定と比べることができる．先に触れたように回折は物質表面の浅い凹凸に余り影響されないので，なめらかな表面の円筒による回折光の値を使う．

さて測定が問題である．困ったことに我々は測定のための装置を持たないし，文献を漁っても前例がない．こういう思いつきのような方法は実測値と比べて修正を加えつつ完成していく必要がある．助けの神は意外なところからやってきた．

西ドイツのルール地方（Ruhr; r の巻き舌は所詮我々には発音不可能．ウァーで通じるがルールではダメ）というのは昔は炭鉱地帯として有名で，ルール川に沿ったルール工業地帯という名は地理の教科書に登場した．戦後の西ドイツ経済の復興に貢献したこの辺りも，石炭産業の斜陽化につれて活気をなくしていった．

1965 年，ルール地帯のほぼ中央に位置するヴォッフォムという町にルール大学が創られたのは，どうやらこの地に再び活力をという願いかららしい．この大学にはギーゼ教授達の不規則形状塵による光の散乱を測定するグループがある．その一員であるツェールーのマイクロ波を用いた散乱測定は有名である．これは入射光の波長と散乱体の大きさとの比が同じならば，散乱はよく似た振舞いを示すという相似則を利用したもので，可視光が宇宙に漂う塵（ミクロンサイズ）を照らす様子を，数センチメートルの散乱体にマイクロ波をあてることによって室内で再現した．ここで使われた手作りの散乱体（後述する球形に近いもので図7（＝表紙）はその一例）は子供の粘土細工のように凹凸でざらざらした表面をしている．

このグループの若い学生アンドーフが我々の欲しい測定をやっていた．彼はマイクロ波の代わりにレーザー光を光源に使い，タングステンの針金（直径 6～170 ミクロン）を散乱体として用いた．まず針金をあらい表面の金属板ではさんで，しごくようにひっぱる．すると針金の表面に軸に沿った溝ができる．この針金（あらい表面をした円筒）をその軸を中心に回転させつつ，軸に垂直な方向からレーザー光（He･Ne レーザー）をあてる．この時，測定器を散乱体の周りにゆっくり移動させると，ほぼ 180 度にわたる散乱角領域についての散乱光強度が得られる（図5参照）．

彼の結果をみると，なめらかな表面をした円筒から予想される値（図の黒丸）に比べて，測定値（実線）には散乱角の大きい部分に明らかな差異がでている．即ち測

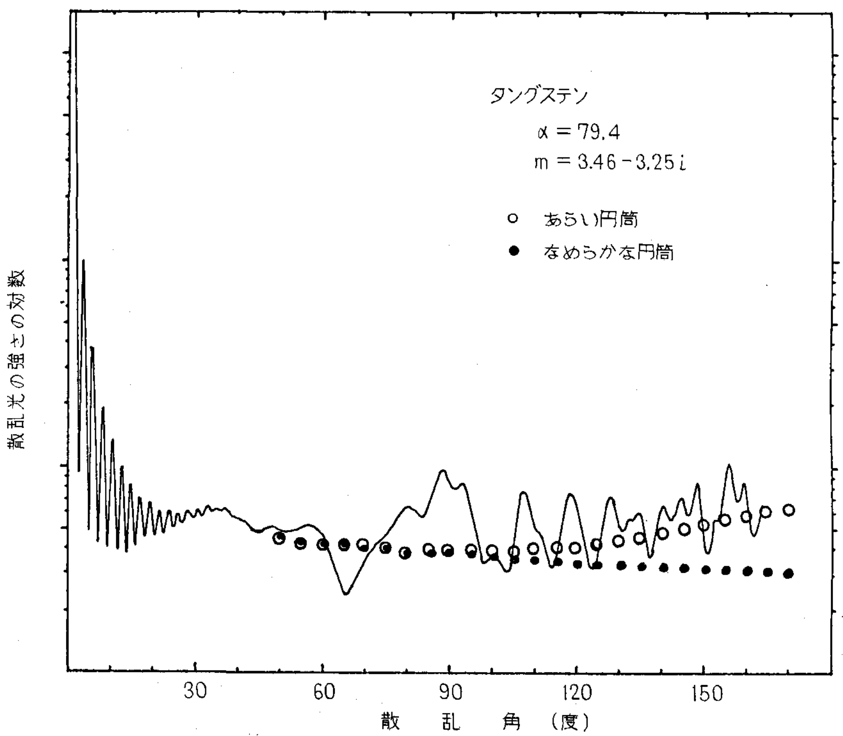

図 5　あらい円筒による光の散乱．実線はアンドーフの測定値．○と●はそれぞれの円筒に対する計算値．α は $2\pi\times$(円筒断面の半径)/(波長)で，光学定数 m の実数部は屈折率，虚数部は吸収率を表わす．

定では予想よりも強い散乱光が入射光の方向に戻ることになる（これを後方散乱の立ち上がりという）．散乱角度の小さい部分は，ほとんどが回折光からの寄与である．そしてこの寄与は散乱角が大きくなるにつれて急速に落ち込む．このため図にみられる測定値と予想値との差異は反射・屈折光が原因と考えてよい．大ざっぱに言えば，あらい表面をした円筒による散乱光の強さは，後方散乱の立ち上がりによって散乱角度の違いによる差が小さくなったようにみえる．我々の計算（白丸）がよく測定を説明しているが，これは表面の凹凸によって反射光があらゆる方向に万遍無く振り分けられるという予想が的中していたことになる．

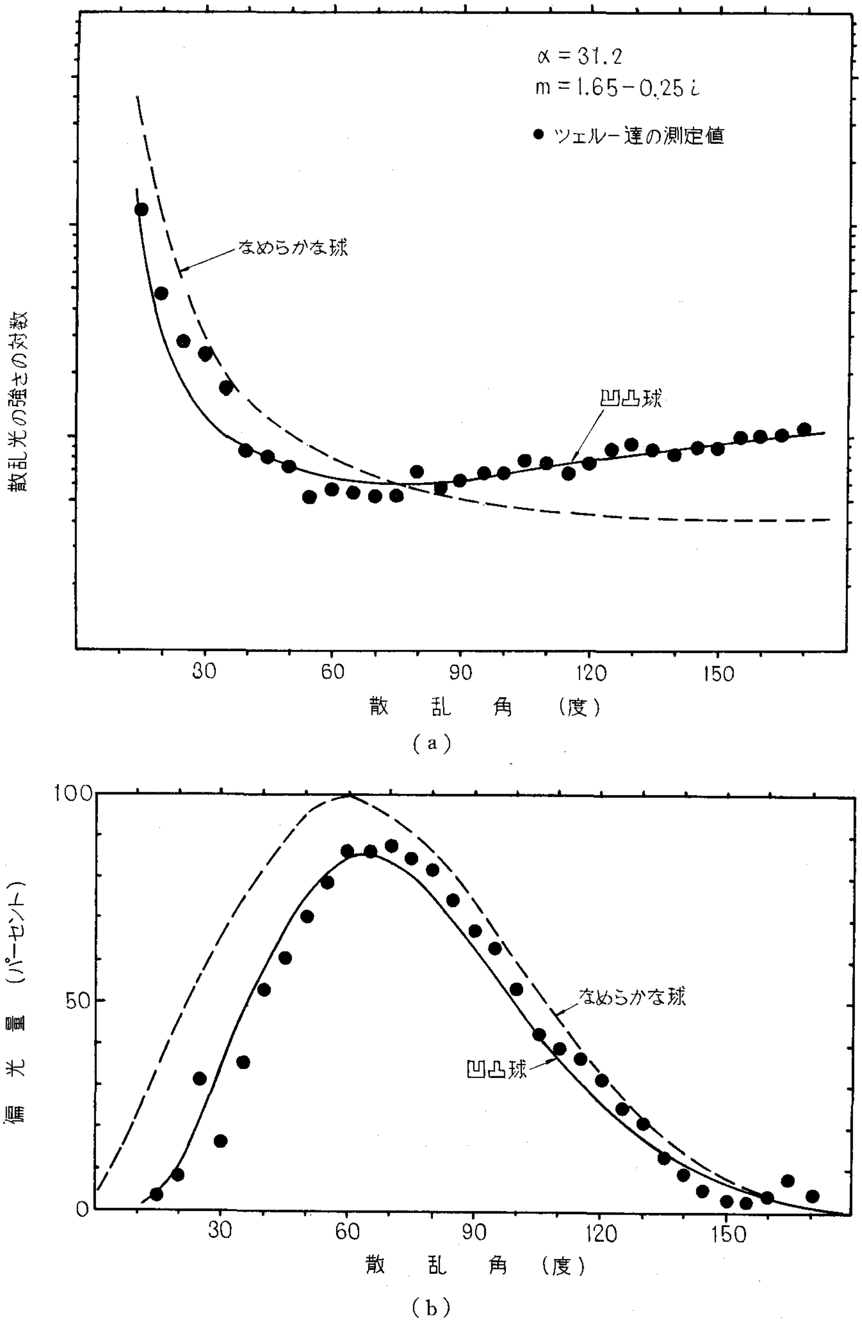

図 6 (a), (b)　凹凸球による光の散乱．黒丸はツェルー達の測定値．α は $2\pi\times$(凹凸球の平均半径)/(波長)．

ここまではうまくいったのだが，我々の扱いでは屈折した光が散乱光に戻ること（透過光）を考えていなかった．前述したように吸収の大きな物質（タングステンは十分大きい）ではこれでよいのだが，ガラスのような透明なものでは具合が悪い．透過光も扱えるように我々の計算方法を改良するためには，透過光の測定結果が欲しい．そこでアンドーフにタングステンの次はガラス繊維を試料にしようともちかけた．ところが彼はもう高校の先生になることに決めていて，装置は解体し，使える部品はグループの他のメンバーがめいめい自分用に使ってしまったという．仕方がない．円筒では天文解析には応用しにくいし，やはり球を扱わざるを得ないなあと覚悟を決めて，さてどうする…….

凹　凸　球

天文には輻射輸達論という分野がある．エディントン・チャンドラセカール……と昔はそうそうたる大家が活躍したものだが，今は少し影が薄い．数学屋が天文に入ってくるよりも，物理屋が“首つっこんで，足入れて，とうとう身体まですっぽり”となることが多くなったためだろう．それはさておき，輸達論は多重散乱を扱う．これによると，一回の散乱パターンが決まれば複数回の散乱が繰り返された後の様子（たとえば空間固定座標系からみた最終的な散乱光の角度分布など）の見当がつく．

凹凸をもった球の表面に入射した光は表面上で何度も反射・屈折を繰り返す．先の円筒の場合では反射屈折の繰り返しがすべて入射光と円筒断面とを共に含む平面内だけで生じていたが，球になるとそうはいかない．凹凸面の傾きが2次元的になるので，反射光はどの方向にも進むことができる．このため計算は球座標で行なわねばならない．反射・屈折の一回一回の過程を取り出してみると，入射光と反射・屈折光との間の関係（いいかえると輻射強度と偏光量がどのようにつながっているか)は，入射角と物質の光学定数の2つを変数とした関数で一般的に与えられる．この関数の形を多重散乱における一回散乱のパターンとみなしてやると，凹凸球の表面での反射・屈折光の振舞いが多重散乱方程式で取り扱える．これが我々のひねり出した方策であった．

球表面の凹凸具合が全くデタラメ・不規則であれば，その凹凸さを確率的に扱うことができる．このことは凹凸面で生じる光の入射と反射・屈折という過程の繰り返しもまた確率過程として表わされることを意味する．解の存在性や一意性などという話には目をつむって，ひたすら多重散乱方程式を解いてみる．その結果は図6をみてもらいたい．ここでは図7（＝表紙）のようなかなりコンパクトな凹凸球にマイクロ波をあてたツェルー達の測定結果（黒丸）と，なめらかな球（破線）及び我々の凹凸球（実線）とについてのそれぞれの計算値が与えてある．測定結果をながめると，なめらかな球の計算値に比べて凹凸球による散乱では散乱光の強さが後方で立ち上がることと，偏光量がやや小さくなることが特徴である．

我々の計算値が後方散乱の立ち上がりをうまく説明している．これは円筒の場合と同じように，凹凸による反射光の分散（表面での反射の繰り返しによる反射方向の拡がりも含めて）のためであろう．一般に反射を繰り返す毎に偏光量は小さくなる．計算では1回だけ反射した光，2回反射光……と順次加えていくのだが，高次反射光には凹凸の影によって遮られる効果（影効果）を取り入れた．そうすると我々の計算値は測定された偏光量ともよく一致する．もちろん凹凸さをいかに現実に即した確率分布で与えるかとか，かなり大きな塵でないとこの方法が適用できないといった問題は残っているが，散乱体表面の凹凸が散乱光をその散乱角に対して分散平滑化することは確からしい．

おわりに

なにやら我々だけが不規則形状塵の光学散乱を扱っているような話し振りになったが，光学関係の雑誌をみてもらえれば判るように，毎号新しい試みが報告されている．不規則さについても各人各様に考えており，ここで扱ったような球（円筒）にわずかの修正を加えるやり方の他に，球自身を大きく歪ませた場合（たとえば回転楕円体）を扱っている人もいる．測定グループも残念ながら国内では未だ生まれていないが国外には数多い．更にこうした散乱過程の扱いは天文分野だけではなく，生物・医学分野（赤血球や白血球による短輻射線の散乱）でも関心が持たれているし，地球物理では上層大気のエアロゾルの形状をレーザー光による散乱測定から検討したりしている．まだまだどんな展開になるか見当がつかない——暗中模索五里霧中．

☆

☆　☆