

回折格子に関する最初の論文が提出されたのは、米国の独立戦争が終わったころということなので、すでに200年以上の歴史をもつことになります。今では、光に携わる多くの方が、「技術的にすでに成熟した最もポピュラーな分光素子」として気にも留めず利用しています。しかし識者以外には、実用上「知る必要があることなのにあまり知らない」ままの方が少なくないようです。特に、物理光学的な見地からの、つまり回折格子の効率や分光特性についての知識が不十分なせいか、「光の振る舞い」に対する誤解が少なくありません。

そこで老婆心ながら、使用上の注意を喚起するべく、具体的に回折格子の正しい考え方を提示することが本稿の目的です。研究の最前線に触れるような高邁なものではなく、多少の偏見を伴う些末な内容となることをご容赦ください。

ここから本題に入ります。回折格子の振る舞いを正しく理解するには、その範疇を波長 λ と格子周期 Λ との比により分類し、それらの違いを認識することが必要です。 Λ/λ が $1/10$ 以下の場合を有効屈折率領域、 $1/10 \sim 1$ をサブ波長領域、 $1 \sim 10$ をresonance domain（日本語では定まった言い方がないので、本稿では共鳴領域と呼びます）、そして 10 以上をスカラー領域と呼びます。それぞれの領域によって、光学特性や計算方法が大きく異なります。

表1 共鳴領域とスカラー領域との差異。

波長/格子間隔	共鳴領域 $1 < \Lambda/\lambda < 10$	スカラー領域 $10 < \Lambda/\lambda$
計算法	厳密結合波解析、FEM、FDTD、フーリエ展開法、積分方程式法など	スカラー回折理論とその亜流
設計難易度	比較的難しい	簡単
光の概念	エバネセント波を含む電磁場	(少数の)平面波
効率、分解能	定式化できない数値的に求められる	定式化できる
アノマリー	存在する	存在しない(予見できない)
ブレイズ概念	厳密には存在しない	存在する

λ : 波長, Λ : 格子間隔, FEM: Finite element method (有限要素法), FDTD: Finite difference time domain method (有限差分時間領域法)。

これらの中で、0次光以外にも回折波が出現し、本来の回折格子として作用するのは共鳴領域とスカラー領域の2つです。両者の違いを明確に理解し意識することが、回折格子の正しい使い方の助けとなります。

それでは、共鳴領域とスカラー領域、何が一体どう異なるのでしょうか？両者の実用上の具体的な違いを表1にまとめてみました。これに従い、回折格子に対する「誤解や意外に知らないこと」を説明することにします。

① 分解能は「回折次数×溝総数」

スカラー領域では回折効率が定式化できるので、これからある定義に従って上の分解能が定式化されます。しかし、共鳴領域では厳密解法を適用し、きちんと計算しないと回折効率が求められません。また、数値でしか与えられません。回折効率のスペクトルが定式化できないため、分解能の定式化は不可能なのです。

よって上の定式が成立するのは、厳密にはスカラー領域だけです。共鳴領域でも「目安」としては使えますが、すべての回折格子に該当するものと信じている人が少なくないようです。

② アノマリーの存在とその素性

共鳴領域ではときおり、回折スペクトルに鋭いピークや落ち込みが現れます。これをアノマリーと呼び、さまざまな原因で出現するのですが、意外に知られていないようです。ちなみに、スカラー理論では、その存在は予見できません。アノマリーはやっかいな曲者で、注意が必要です。

ここで、その素性を知らなかったばかりに、恐ろしい目にあったという実話をひとつ。ある人がある回折格子の回折効率を測定して、特定の条件ではきわめて強く反射することを見いだしました。もちろん、正体はアノマリーなのですが、彼はこの回折格子を良好なデバイスだと盲信して、光学特性の仕様に「この入射条件のとき回折効率はこれこれ」という項目を設けてしまったのです。ところがアノマリーというのは大体共鳴的なもので、わずかな溝本数の変化、わずかな入射条件の変化等に対してきわめて敏感です。つまりわずかな製造誤差によって光学特性が大きくふらつくため、その後彼は歩留まりのあまりの悪さに大いに苦しめられたとのこと。

③ ブレイズ格子のピーク波長は傾斜角で決まる

「波長、入射角度、回折次数、および溝本数が決まると回折角度が決まる。このとき入射角度と回折角度が鏡面反射となるような格子の傾斜角、すなわちブレイズ角を設定すると最大効率を得られる。」

多くの光学の教科書には、反射型ブレイズ格子に関してこのように記述されています。また透過型では、入射波と回折波がスネルの法則を満たすようにブレイズ角が設定されます。

ところで「鏡面反射」や「スネルの法則」という概念は、本質的に平面波の場合に対してのみ成立するものです。入射光が平面波で、界面の大きさが波長よりも十分大きいのなら「鏡面反射」し、「スネルの法則」が成立します。スカラー領域では、これらが周期的に配列したものに相当しますから「ブレイズ格子」の概念がよく当てはまるわけです。一方、界面のサイズを波長と同程度まで小さくすると、もはや「面」というより「散乱体」といったほうが適切でしょう。つまり共鳴領域では、回折光は平面波ではなく「場」として捉えなければなりません。回折効率の計算ではよく平面波展開を行います。この平面波はエバネセント波も含む電磁場を精度よく記述するための直交基底の取りかたのひとつにすぎません。共鳴領域では、従来の「ブレイズ格子」の概念は消失します。

回折スペクトルを実際に計算してみると、幾何学的に決まるブレイズ角と、所望のピーク波長を与えるそれとの差は、スカラー領域から共鳴領域に向かうにつれ、どんどんと広がっていきます。共鳴領域では、従来の定義に従ってブレイズ格子の断面形状を設計しても、うまくいかないというわけです。

他にも認識不足の事例は少なくないのですが、ここでとめます。微細加工技術もどんどん進展していますから、共鳴領域の素子が今後ますます重要となるでしょう。そうすると回折格子の系統的な理解、特に共鳴領域に対する理解が必要となりますが、十分周知されているわけではないようです。これには下記のようないくつかの原因が考えられます。

① 共鳴領域はとっつきにくい

スカラー領域での光学特性は比較的簡単に求められますが、共鳴領域では厳密解法が適用され、数値解析の素養が少なからず求められます。慣れ親しむにはある程度の計算の蓄積が必要なため、とっつきにくいところが多々あります。

② 一般向けのよい教科書がない

非専門家向けで、共鳴領域に正面から触れてある教科書は多くありません。ほとんど聖典化したBornの「光学の原理」でも、回折格子に関してはスカラー領域の回折理論と、わずかながら有効屈折率領域の構造的複屈折について記されているにすぎ

ません。

ここで、共鳴領域に関する教科書、reviewを挙げておきましょう。文献1)が最も代表的な教科書ですが、初版からすでに20年経っています。2)は回折格子に関する古今東西の報告から選んだ論文集です。3)には、さまざまな流派の解析手法がコンパクトにまとめられており、計算法を概観するのに役立ちます。

③ みんなが知らないからそのままですんでいる

企業で回折格子を用いた装置の光学系を設計するときに、実は幾何光学だけで済ませてしまう場合が一般的です。そして天下一のブレイズ格子を用います(スカラー理論だけの考慮と同義)。所望の回折効率を満たすような断面形状の設計が求められるのは、むしろ特殊な場合です。良いのか悪いのかわからなくとも、どこも同じような仕様ならばそれが標準的となりますから、知らないままですんでしまうというわけです。

回折格子は光学素子の中でも、とりわけ光学特性が複雑で、計算とドンピシャリと合うような精度のよい製造が難しい素子です。スカラー理論が精度よく成立する領域以外では高度な設計技術が確立しているわけでもなく、職人の名人芸による研磨が超高精度を実現するレンズのように人の手が入る余地がありません。技術が「落ち着いて」いるものの、決して「成熟」しているわけではないのです。そして、これほど古くからあるのに、これほど非専門家の方々が誤解(特に共鳴領域)している素子はほかに見当たらないように思われます。

回折格子を実験で使うときや注文するとき、装置に組み込もうとするときには、じっくりと回折格子を再度吟味されてはいかががでしょう。可能なはずが実は不可能であったり、不可能だと思ったことが実は可能であったりすることが少なくないはずで

この記事に対するご意見は、optics@kobe-u.ac.jp, itoh@bk.tsukuba.ac.jpまでお願いします。

文 献

- 1) R. Petit (ed.): *Electromagnetic Theory of Gratings* (Springer-Verlag, Berlin, 1980)
- 2) D. Maystre (ed.): *Diffraction Gratings* (SPIE, Washington, 1993)
- 3) 松田豊稔, 奥野洋一: “周期回折格子の電磁気解析”, 光学, 27 (1998) 626-631.