

DVD分光器の回折条件¹⁾

若林文高

国立科学博物館理工学研究所 〒169-0073 東京都新宿区百人町3-23-1

The Diffraction Condition of a DVD Spectroscope

Fumitaka WAKABAYASHI

Department of Science and Engineering, National Science Museum, Tokyo
3-23-1 Hyakunin-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 169-0073, Japan
e-mail: f-waka@kahaku.go.jp

Abstract The diffraction condition of a DVD spectroscope which was recently proposed by WAKABAYASHI and HAMADA (2006. *J. Chem. Educ.*, **83** (1)) has been formulated and some simulation results are presented. This simple and inexpensive spectroscope that is made with a sheet of cardboard or an empty box and a digital versatile disk (DVD) gives high-resolution visible spectra. The incident angle of light has been formulated from its structural parameters. Using this formulation, one can calculate the diffraction angle of a certain wavelength light. This formulation can be applied to reflective grating spectroscopes with a similar structure such as CD spectroscopes, and facilitate the design of the spectroscopes. This formulation can be also used to estimate the grating density of a reflective grating.

Key words: digital versatile disk, diffraction grating, simple spectroscope, visible spectrum, diffraction condition

1. はじめに

教育分野で使われる分光器として、従来からブリズムを利用した市販の直視分光器やレプリカグレーティング（線密度600本/mm~1000本/mm）を利用した簡易分光器（以下、“簡易分光器”と称す）が利用されているが、近年、音楽やコンピュータなどの記録媒体であるコンパクトディスク（CD）を“反射型回折格子”として利用したCD分光器が次第に用いられるようになってきている^{2),3)}。

直視分光器は、水銀の2本の黄色の輝線（波長577 nmと579 nm）を分離できる分解能をもち、かつ明るいスペクトルを観察できるが、1台が3~4万円と教育現場などで多数揃えるのは難しい。また、焦点とスリット幅を調整する必要があり、使用には若干の習熟が必要である。一方、簡易分光器では、1000本/mmのものを利用すると水銀の

黄色の輝線を分離するのに十分な分解能を得られるが、一般的な600本/mmのものを用いると十分な分解能が得られない。また、レプリカグレーティングを専門業者から購入する必要がある。スペクトルも比較的暗い。CD分光器は、身近な材料のみを使って簡単にきれいなスペクトルを見られるという利点があるが、CDの線密度は625本/mmであり、十分な分解能を得られない。簡易分光器やCD分光器は、製作するときにスリット幅を規定すれば、その後の調整は不要である。

最近、WAKABAYASHIらにより報告されたDVD分光器は、CD分光器と同様にデジタル・バーサタイル・ディスク（DVD）を反射型回折格子として用いた分光器で、DVDの線密度が約1350本/mmであることを利用して水銀の黄色の輝線を分離できる十分な分解能をもつものを安価にかつ容易に作ることができる^{4),5)}。また、観測されるスペクトルも明るく、調整も不要であるという利点をもつ。

したがって、生徒一人一人がもつことができる“高性能簡易分光器”として利用されることが期待される。回折格子による回折条件は、回折格子の線密度と入射角がわかれば簡単な式で表されるが、CD分光器やDVD分光器では、入射角はその構造から計算する必要があり、これまでに検討されていない。

そこで、本稿では、WAKABAYASHIらによって報告されたDVD分光器の回折条件を検討し、どの波長の光がどの方向に観測されるか、あるいは、DVDの差込角によって、その観測方向がどのように変化するかを定式化し、そのシミュレーション結果を示した。この方法は、CD分光器など、反射型回折格子を用いた他の分光器にも適用できる。このシミュレーションは、分光器を設計する指針となり、また、未知の反射型回折格子の線密度を推定するのに適用できるなど、応用範囲が広い。

2. DVD分光器

DVD分光器は様々な形状のものが考えられるが、製作が容易で高分解能のものが得られる典型的な例として図1の形状がWAKABAYASHIらにより報告されている^{4),5)}。DVDは記録面を上にしてDVD差込口から差し込み、その先端が観察窓手前の箱の角にあたるようにして固定する。光をスリットから分光器内に導入し、DVD表面で反射した光を観察窓から見ると、高分解のスペクトルが容易に観察できる。同様な構造で差込口の高さを変えるだけで、CD分光器としても利用できる。

このDVD分光器を用いて観測したスペクトルの例を図2に示す^{4),5)}。白色蛍光灯のスペクトルをデジタルカメラで撮影した。白色蛍光灯の発光による連続スペクトル（虹色のバックグラウンド）と、蛍光灯内部の水銀蒸気の発光による輝線が観測される。この輝線は、水銀の原子スペクトルである。577 nm, 579 nmの黄色の輝線が明瞭に分離されている（図2b）。この2本の輝線の波長差は2 nmと小さく、レプリカグレーティング（600本/mm）を利用した簡易分光器やCD分光器では一次の回折光では分離できない。DVD分光器がCD分光器と比べて分解能が高いのは、DVDのトラック間の幅が $0.74\ \mu\text{m}$ と、CDの $1.6\ \mu\text{m}$ の1/2以下であることに起因する。回折格子の性能を示す溝数に換算すると、DVDは約1,350本/mm、CDは625本/mm

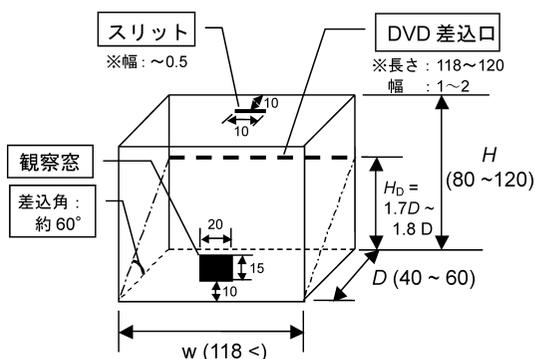


図1. 典型的なDVD分光器の外観。差込口の高さ H_0 を $1.2D$ とすると“CD分光器”として利用できる

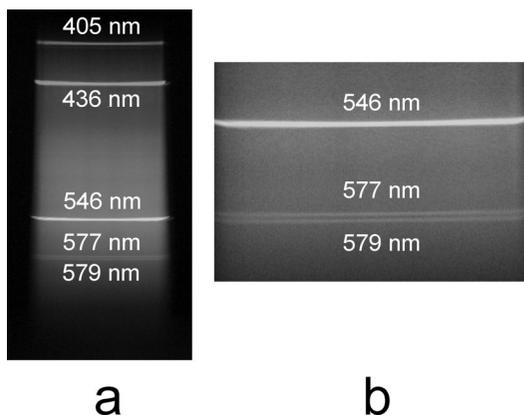


図2. DVD分光器（図1）で観測した白色蛍光灯の可視スペクトル
a. 全体、b. 578 nm付近の拡大図。

mmとなり、汎用型の研究用紫外可視分光光度計に使用されている回折格子の溝数が約1,000本/mmであることを考えると、DVDを用いて高い分解能が得られることが裏付けられる。

3. 反射型回折格子の回折条件一般式

DVD分光器やCD分光器ではDVD, CDが反射型回折格子として機能しているので、反射型回折格子の回折条件を簡単に記述する。図3のように、波長 λ の単色光が入射角 θ_1 で溝間隔 d の反射型回折格子に入射し、 n 次の回折光が反射角 θ_2 の方向に観測されるとすると、次のような関係式が成り立つ⁶⁾。

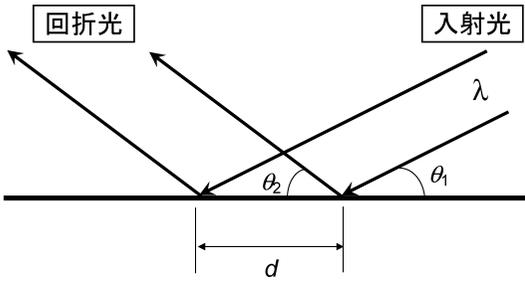


図3. 反射型回折格子

$$n\lambda = d(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (n : \text{整数}) \dots\dots$$

したがって、 n 次の回折光の反射角 θ_2 は、次式で表される。

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\cos \theta_1 - \frac{n\lambda}{d} \right) \quad (n : \text{整数}) \dots\dots$$

白色光が入射した場合は、式に従って波長により回折光の観測される方向が異なり、分光されることになる。

4. DVD分光器の回折条件式

以上のように、DVD分光器などの反射型回折格子を用いた分光器では、入射角 θ_1 がわかれば、式からどの方向にどの波長の光が回折されるかを計算できる。そこで、図1の形状の分光器の入射角 θ_1 を求める式を導く。なお、この算出は、CD分光器など反射型回折格子を用いた分光器一般に適用できる。

図1の分光器の断面図を図4に示す。この図において、次のように定義する。

- H : 分光器の高さ
- h : 観測窓の中心線（視線：EBC）の分光器底面からの高さ
- r : スリットの位置
- θ : 反射型回折格子（DVDやCDなど）の差込角度
- θ_1 : 観測光の入射角
- D : 分光器の奥行⁷⁾
- H_D : DVD差込口またはCD差込口の底面からの高さ。 $H_D = D \tan \theta$ 。

まず、図4のように、スリット(A)がB点をはさんで観測窓(C)と反対側にあるとき、すなわち、

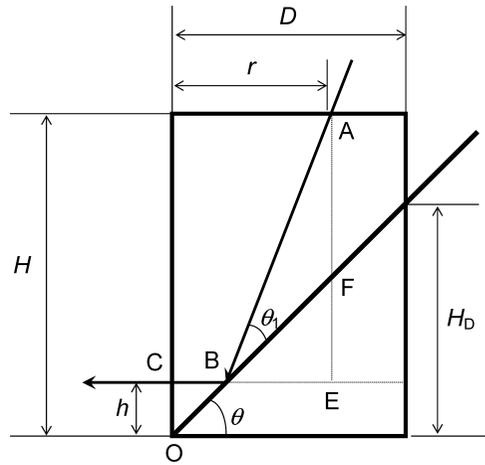


図4. DVD (CD) 分光器断面図。A点がスリットの中心位置、C点が観測窓の中心位置、OBFがDVD (CD)。

$r > \overline{BC} = \frac{h}{\tan \theta}$ のときを考える。

このとき、

$$\overline{BE} = r - \frac{h}{\tan \theta}$$

$\overline{AE} = H - h$ であるから、 $\angle ABE$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \angle ABE &= \tan^{-1} \frac{\overline{AE}}{\overline{BE}} = \tan^{-1} \left(\frac{H-h}{r - \frac{h}{\tan \theta}} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{(H-h) \tan \theta}{r \tan \theta - h} \right) \end{aligned}$$

$$\therefore \theta_1 = \angle ABE - \angle FBE = \tan^{-1} \left(\frac{(H-h) \tan \theta}{r \tan \theta - h} \right) - \theta$$

したがって、 $r > \frac{h}{\tan \theta}$ の場合、入射角 θ_1 は次式で表される。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{(H-h) \tan \theta}{r \tan \theta - h} \right) - \theta \dots\dots$$

スリットがB点の直上にくる場合、すなわち、 $r = \frac{h}{\tan \theta}$ のときは、 $\angle ABE = 90^\circ$ であるから⁸⁾、

$$\theta_1 = 90^\circ - \theta \dots\dots$$

$r < \frac{h}{\tan \theta}$ のとき，すなわち，スリットがB点より観測窓側にくる場合は同様にして，

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{(H-h) \tan \theta}{r \tan \theta - h} \right) - \theta + 180^\circ \dots\dots$$

となる．

以上のように，入射角 θ_1 は，スリットの位置関係により，式で表される．

この θ_1 を式に代入することにより，波長 λ の光の n 次の回折光の反射角 θ_2 が求められる．

ところで，図4からわかるように $\theta_2 = \theta$ になるとき，回折光が視線方向にくる．この波長を中心波長 λ_c とする．式に $\theta_2 = \theta$ と代入して， n 次の回折光の中心波長は次式で表されることがわかる．

$$\lambda_c = \frac{d}{n} (\cos \theta_1 - \cos \theta) \dots\dots\dots$$

視線方向にくる回折光の波長 λ_c は，この式に，又は式から求めた θ_1 を代入することにより求められる．

5. 結果と考察

前項で導出した式から，表計算ソフトを用いて分光器のパラメータ (H, h, r, θ) を変化させたときの入射角および n 次回折光の反射角をシミュレーションできる．また，ある波長の光の回折光が視線方向（観測窓の中心線）からどの角度に観測できるかを求められる．このような解析から，DVD分光器やCD分光器を製作するときの指針が得られる．

ここでは，DVD分光器，CD分光器の典型的なシミュレーション結果を示す．

5-1. DVD分光器のシミュレーション

本稿では，DVD分光器について2例示す．ひとつは，図1に示した典型例で， $H=90$ mm, $h=17.5$ mm, $r=30$ mm, $D=40$ mm の場合である．計算結果の一部を表1に示した．表では，DVD差边角 θ の値に対する入射角 θ_1 ，一次回折光における視線方向の中心波長 λ_c ，波長400 nm（紫），700 nm（赤）の可視光の反射角 $\theta_2(400)$ ， $\theta_2(700)$ ，および視線方向からの角度 $\alpha(400)$ ， $\alpha(700)$ を示した⁹⁾．ここで“視線方向からの角度”と称したのは図5に示す α

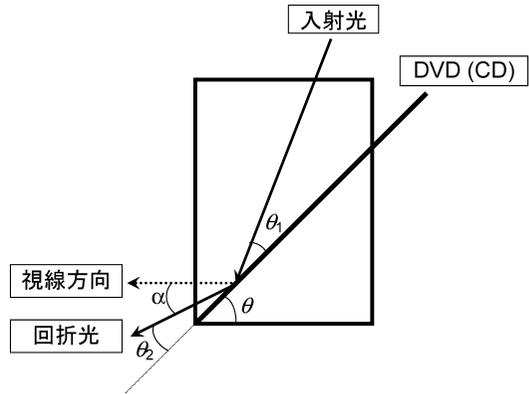


図5. 観測角 α の定義および他の角 θ , θ_1 , θ_2 との位置関係． α は，回折光が視線方向より下に向かうときに正，視線方向より上に向かうときに負とする．

で，“測定角”と呼ぶことにする． α が正のとき，回折光が視線方向から見上げる方向に観測され， α が負のとき視線方向からから見下ろす方向に観測される．また，著者らによる別途実験により，DVD分光器では，入射角が 10° から 30° のときに十分な分解能が得られることがわかって^{1),10)}．その範囲を薄い網掛けで示した．また，入射角が負となる領域は，入射光がDVDの裏側から入射することになり分光器として機能しないので濃い網掛けで示した．この表では，実際に分光器を作るときに参考になるように，DVDの差込口の高さ $H_D (=D \tan \theta)$ を含めた．

この場合，DVDの差边角が 49° から 63° で十分な高分解能が得られている．また，差边角が 72° 以上は分光器として機能しないことがわかる．文献4, 5で典型的な例としている $\theta=60^\circ$ の場合は，中心波長が346 nmで紫外光領域になっている．可視光は， α が $-4.7^\circ \sim -28.8^\circ$ の範囲で観測されることがわかる．すなわち，可視光スペクトルは，視線より下方向に観測される．中心波長 λ_c のDVD差边角 θ 依存性を図6に示した．ここでは，分光器として機能しない 72° 以上の領域は点線で示した．また，400 nm, 700 nmの一次回折光が観測される方向のDVD差边角 θ 依存性を図7に示した．差边角を増すにつれて観測される方向が視線方向に近づき，さらに視線より上方向に観測されるようになることがわかる．また，波長の短い領域が上側に，波長の長い領域が下側に観測されることが確認される．

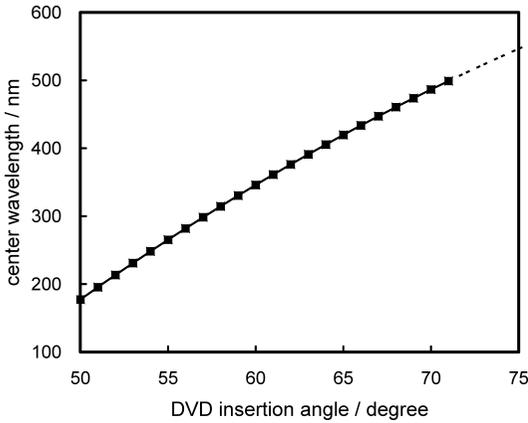


図 6. $H=90$ mm, $h=17.5$ mm, $D=40$ mm, $r=30$ mm, $d=0.74$ μm の場合の中心波長 λ_c の差込角 (θ) 依存性．分光器として機能しない範囲は、点線で表した．

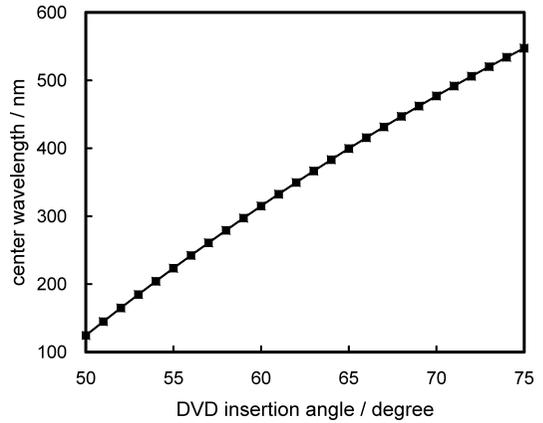


図 8. $H=90$ mm, $h=17.5$ mm, $D=40$ mm, $r=20$ mm, $d=0.74$ μm の場合の中心波長 λ_c の差込角 (θ) 依存性．

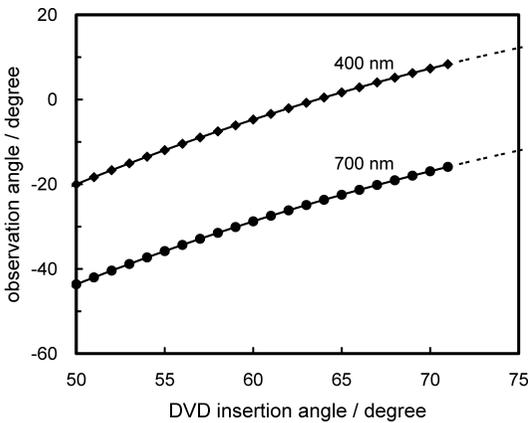


図 7. $H=90$ mm, $h=17.5$ mm, $D=40$ mm, $r=30$ mm, $d=0.74$ μm の場合の波長 400 nm, 700 nm の回折光の観測角 $\alpha(400)$ および $\alpha(700)$ の差込角 (θ) 依存性．分光器として機能しない範囲は、点線で表した．

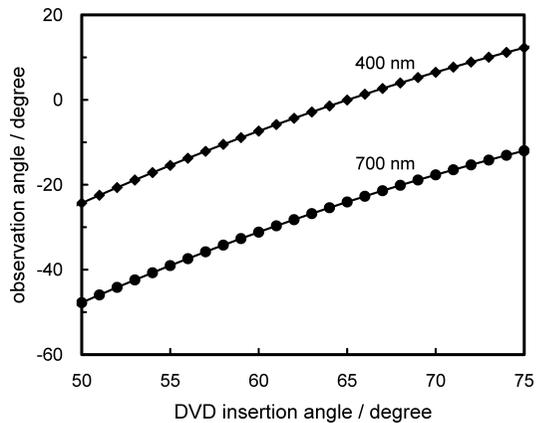


図 9. $H=90$ mm, $h=17.5$ mm, $D=40$ mm, $r=20$ mm, $d=0.74$ μm の場合の波長 400 nm, 700 nm の回折光の観測角 $\alpha(400)$ および $\alpha(700)$ の差込角 (θ) 依存性．

肉眼で観測するときは、表 1 に示したパラメータで $\theta=60^\circ$ のとき観測しやすく、また高分解能が得られる．しかし、可視光領域が視線方向より下に観測されるため、デジタルカメラなどでスペクトル写真を撮影するときは、レンズを斜め下に向ける必要があり撮影しにくい．そこで、できるだけスペクトルが視線方向に観測され、かつ十分な分解能が得られる条件を探索した．表 1 に示したパラメータでは、図 7 から可視光が視線方向に入ってくる DVD 差込角は 70° 近くである．これは

分光器として機能するぎりぎりの限界に近い．また、この領域では入射角 θ_1 が 10° 以下となり、十分な分解能が得られないことが予想される．

そこで、スリットを $r=20$ mm とした場合について検討した．その結果を表 2、図 8, 9 に示す． H , h , D は表 1 の場合と同じである． $\theta=68^\circ$ 付近でスペクトルの観測される方向が視線方向に近づき、また、十分な分解能を持つ領域にあることがわかる．この条件で分光器を製作したところ、実際に写真撮影が容易になり、かつ水銀の 577, 579 nm の輝線を分離して観測できた．このように本稿で示したシミュレーションは、DVD 分光器の設計に実

表1. DVD分光器の回折条件：入射角，中心波長，反射角，測定角のDVD差込角依存性 ($H=90$ mm, $h=17.5$ mm, $D=40$ mm, $r=30$ mm, $d=0.74$ μ mの場合)。

水銀の黄色の輝線を分離できる分解能を有する範囲 ($10^\circ \leq \theta_1 \leq 30^\circ$) を薄い網掛けで，分光器として機能しない範囲 ($\theta_1 < 0^\circ$) を濃い網掛けで示した。また，この条件で用いられる通常の差込角の位置を点線で示した。

| 差込角(°) θ | 入射角(°) θ_1 | 差込口 (mm) H_d | 中心波長 (nm) λ_c | 反射角(°) | | 測定角(°) | |
|--------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| | | | | $\theta_2(400)$ | $\theta_2(700)$ | $\alpha(400)$ | $\alpha(700)$ |
| 45 | 35.2 | 40.0 | 81 | 74.0 | 97.4 | -29.0 | -52.4 |
| 46 | 33.8 | 41.4 | 101 | 73.1 | 96.6 | -27.1 | -50.6 |
| 47 | 32.3 | 42.9 | 121 | 72.3 | 95.8 | -25.3 | -48.8 |
| 48 | 30.9 | 44.4 | 140 | 71.5 | 95.0 | -23.5 | -47.0 |
| 49 | 29.5 | 46.0 | 159 | 70.7 | 94.3 | -21.7 | -45.3 |
| 50 | 28.1 | 47.7 | 177 | 70.0 | 93.6 | -20.0 | -43.6 |
| 51 | 26.7 | 49.4 | 195 | 69.3 | 93.0 | -18.3 | -42.0 |
| 52 | 25.3 | 51.2 | 213 | 68.7 | 92.4 | -16.7 | -40.4 |
| 53 | 23.9 | 53.1 | 231 | 68.1 | 91.8 | -15.1 | -38.8 |
| 54 | 22.6 | 55.1 | 248 | 67.5 | 91.3 | -13.5 | -37.3 |
| 55 | 21.2 | 57.1 | 265 | 67.0 | 90.8 | -12.0 | -35.8 |
| 56 | 19.9 | 59.3 | 282 | 66.4 | 90.3 | -10.4 | -34.3 |
| 57 | 18.6 | 61.6 | 298 | 66.0 | 89.9 | -9.0 | -32.9 |
| 58 | 17.3 | 64.0 | 315 | 65.5 | 89.5 | -7.5 | -31.5 |
| 59 | 16.0 | 66.6 | 330 | 65.1 | 89.1 | -6.1 | -30.1 |
| 60 | 14.7 | 69.3 | 346 | 64.7 | 88.8 | -4.7 | -28.8 |
| ----- | | | | | | | |
| 61 | 13.4 | 72.2 | 361 | 64.4 | 88.5 | -3.4 | -27.5 |
| 62 | 12.1 | 75.2 | 376 | 64.1 | 88.2 | -2.1 | -26.2 |
| 63 | 10.8 | 78.5 | 391 | 63.8 | 87.9 | -0.8 | -24.9 |
| 64 | 9.5 | 82.0 | 405 | 63.5 | 87.7 | 0.5 | -23.7 |
| 65 | 8.2 | 85.8 | 420 | 63.3 | 87.5 | 1.7 | -22.5 |
| 66 | 7.0 | 89.8 | 434 | 63.1 | 87.3 | 2.9 | -21.3 |
| 67 | 5.7 | 94.2 | 447 | 63.0 | 87.2 | 4.0 | -20.2 |
| 68 | 4.4 | 99.0 | 461 | 62.8 | 87.1 | 5.2 | -19.1 |
| 69 | 3.2 | 104.2 | 474 | 62.7 | 87.0 | 6.3 | -18.0 |
| 70 | 1.9 | 109.9 | 486 | 62.7 | 86.9 | 7.3 | -16.9 |
| 71 | 0.7 | 116.2 | 499 | 62.7 | 86.9 | 8.3 | -15.9 |
| 72 | -0.5 | 123.1 | 511 | 62.7 | 86.9 | 9.3 | -14.9 |
| 73 | -1.8 | 130.8 | 523 | 62.7 | 86.9 | 10.3 | -13.9 |
| 74 | -3.0 | 139.5 | 535 | 62.7 | 87.0 | 11.3 | -13.0 |
| 75 | -4.2 | 149.3 | 546 | 62.8 | 87.1 | 12.2 | -12.1 |
| 76 | -5.5 | 160.4 | 558 | 62.9 | 87.2 | 13.1 | -11.2 |
| 77 | -6.7 | 173.3 | 568 | 63.1 | 87.3 | 13.9 | -10.3 |
| 78 | -7.9 | 188.2 | 579 | 63.3 | 87.4 | 14.7 | -9.4 |
| 79 | -9.1 | 205.8 | 589 | 63.5 | 87.6 | 15.5 | -8.6 |
| 80 | -10.4 | 226.9 | 599 | 63.7 | 87.8 | 16.3 | -7.8 |

表2. DVD分光器の回折条件：入射角，中心波長，反射角，測定角のDVD差込角依存性（ $H=90$ mm, $h=17.5$ mm, $D=40$ mm, $r=20$ mm, $d=0.74$ μm の場合）

水銀の黄色の輝線を分離できる分解能を有する範囲（ $10^\circ \leq \theta_1 \leq 30^\circ$ ）を薄い網掛けで，分光器として機能しない範囲（ $\theta_1 < 0^\circ$ ）を濃い網掛けで示した．また，この条件で用いられる通常の差込角の位置を点線で示した．

| 差込角 ($^\circ$) θ | 入射角 ($^\circ$) θ_1 | 差込口 (mm) H_d | 中心波長 (nm) λ_c | 反射角 ($^\circ$) | | 測定角 ($^\circ$) | |
|------------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|------------------|---------------|
| | | | | $\theta_2(400)$ | $\theta_2(700)$ | $\alpha(400)$ | $\alpha(700)$ |
| 45 | 43.0 | 40.0 | 18 | 79.0 | 102.4 | -34.0 | -57.4 |
| 46 | 41.6 | 41.4 | 40 | 78.0 | 101.4 | -32.0 | -55.4 |
| 47 | 40.1 | 42.9 | 61 | 77.0 | 100.4 | -30.0 | -53.4 |
| 48 | 38.7 | 44.4 | 83 | 76.1 | 99.5 | -28.1 | -51.5 |
| 49 | 37.2 | 46.0 | 104 | 75.2 | 98.6 | -26.2 | -49.6 |
| 50 | 35.8 | 47.7 | 124 | 74.3 | 97.8 | -24.3 | -47.8 |
| 51 | 34.4 | 49.4 | 145 | 73.5 | 96.9 | -22.5 | -45.9 |
| 52 | 33.0 | 51.2 | 165 | 72.7 | 96.2 | -20.7 | -44.2 |
| 53 | 31.6 | 53.1 | 185 | 71.9 | 95.4 | -18.9 | -42.4 |
| 54 | 30.3 | 55.1 | 204 | 71.1 | 94.7 | -17.1 | -40.7 |
| 55 | 28.9 | 57.1 | 223 | 70.4 | 94.0 | -15.4 | -39.0 |
| 56 | 27.6 | 59.3 | 242 | 69.8 | 93.4 | -13.8 | -37.4 |
| 57 | 26.2 | 61.6 | 261 | 69.1 | 92.8 | -12.1 | -35.8 |
| 58 | 24.9 | 64.0 | 279 | 68.5 | 92.2 | -10.5 | -34.2 |
| 59 | 23.5 | 66.6 | 297 | 67.9 | 91.7 | -8.9 | -32.7 |
| 60 | 22.2 | 69.3 | 315 | 67.3 | 91.2 | -7.3 | -31.2 |
| 61 | 20.9 | 72.2 | 332 | 66.8 | 90.7 | -5.8 | -29.7 |
| 62 | 19.6 | 75.2 | 350 | 66.3 | 90.2 | -4.3 | -28.2 |
| 63 | 18.3 | 78.5 | 367 | 65.9 | 89.8 | -2.9 | -26.8 |
| 64 | 17.0 | 82.0 | 383 | 65.4 | 89.4 | -1.4 | -25.4 |
| 65 | 15.7 | 85.8 | 400 | 65.0 | 89.0 | 0.0 | -24.0 |
| 66 | 14.4 | 89.8 | 416 | 64.7 | 88.7 | 1.3 | -22.7 |
| 67 | 13.2 | 94.2 | 431 | 64.3 | 88.4 | 2.7 | -21.4 |
| 68 | 11.9 | 99.0 | 447 | 64.0 | 88.1 | 4.0 | -20.1 |
| 69 | 10.6 | 104.2 | 462 | 63.7 | 87.9 | 5.3 | -18.9 |
| 70 | 9.4 | 109.9 | 477 | 63.5 | 87.7 | 6.5 | -17.7 |
| 71 | 8.1 | 116.2 | 492 | 63.3 | 87.5 | 7.7 | -16.5 |
| 72 | 6.8 | 123.1 | 506 | 63.1 | 87.3 | 8.9 | -15.3 |
| 73 | 5.6 | 130.8 | 520 | 63.0 | 87.2 | 10.0 | -14.2 |
| 74 | 4.3 | 139.5 | 534 | 62.8 | 87.1 | 11.2 | -13.1 |
| 75 | 3.1 | 149.3 | 547 | 62.7 | 87.0 | 12.3 | -12.0 |
| 76 | 1.8 | 160.4 | 561 | 62.7 | 86.9 | 13.3 | -10.9 |
| 77 | 0.6 | 173.3 | 573 | 62.7 | 86.9 | 14.3 | -9.9 |
| 78 | -0.7 | 188.2 | 586 | 62.7 | 86.9 | 15.3 | -8.9 |
| 79 | -1.9 | 205.8 | 598 | 62.7 | 86.9 | 16.3 | -7.9 |
| 80 | -3.1 | 226.9 | 610 | 62.7 | 87.0 | 17.3 | -7.0 |

表3. CD分光器の回折条件：入射角，中心波長，反射角，測定角のCD差込角依存性（ $H=90$ mm, $h=17.5$ mm, $D=40$ mm, $r=30$ mm, $d=1.6$ μ m の場合）
 分光器として機能しない範囲（ $\theta_1 < 0^\circ$ ）を濃い網掛けで示した．また，この条件で用いられる通常の差込角の位置を点線で示した．

| 差込角 ($^\circ$) θ | 入射角 ($^\circ$) θ_1 | 差込口 (mm) H_d | 中心波長 (nm) λ_c | 反射角 ($^\circ$) | | 測定角 ($^\circ$) | |
|------------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|------------------|---------------|
| | | | | $\theta_2(400)$ | $\theta_2(700)$ | $\alpha(400)$ | $\alpha(700)$ |
| 45 | 35.2 | 40.0 | 176 | 55.5 | 67.7 | -10.5 | -22.7 |
| 46 | 33.8 | 41.4 | 219 | 54.5 | 66.8 | -8.5 | -20.8 |
| 47 | 32.3 | 42.9 | 261 | 53.5 | 65.9 | -6.5 | -18.9 |
| 48 | 30.9 | 44.4 | 303 | 52.5 | 65.1 | -4.5 | -17.1 |
| 49 | 29.5 | 46.0 | 343 | 51.6 | 64.3 | -2.6 | -15.3 |
| 50 | 28.1 | 47.7 | 383 | 50.8 | 63.6 | -0.8 | -13.6 |
| ----- | | | | | | | |
| 51 | 26.7 | 49.4 | 423 | 49.9 | 62.9 | 1.1 | -11.9 |
| 52 | 25.3 | 51.2 | 461 | 49.2 | 62.2 | 2.8 | -10.2 |
| 53 | 23.9 | 53.1 | 499 | 48.4 | 61.5 | 4.6 | -8.5 |
| 54 | 22.6 | 55.1 | 537 | 47.7 | 60.9 | 6.3 | -6.9 |
| 55 | 21.2 | 57.1 | 574 | 47.0 | 60.4 | 8.0 | -5.4 |
| 56 | 19.9 | 59.3 | 610 | 46.4 | 59.8 | 9.6 | -3.8 |
| 57 | 18.6 | 61.6 | 645 | 45.7 | 59.3 | 11.3 | -2.3 |
| 58 | 17.3 | 64.0 | 680 | 45.2 | 58.8 | 12.8 | -0.8 |
| 59 | 16.0 | 66.6 | 714 | 44.6 | 58.4 | 14.4 | 0.6 |
| 60 | 14.7 | 69.3 | 748 | 44.2 | 58.0 | 15.8 | 2.0 |
| 61 | 13.4 | 72.2 | 781 | 43.7 | 57.6 | 17.3 | 3.4 |
| 62 | 12.1 | 75.2 | 813 | 43.3 | 57.3 | 18.7 | 4.7 |
| 63 | 10.8 | 78.5 | 845 | 42.9 | 57.0 | 20.1 | 6.0 |
| 64 | 9.5 | 82.0 | 877 | 42.6 | 56.7 | 21.4 | 7.3 |
| 65 | 8.2 | 85.8 | 907 | 42.3 | 56.5 | 22.7 | 8.5 |
| 66 | 7.0 | 89.8 | 937 | 42.0 | 56.3 | 24.0 | 9.7 |
| 67 | 5.7 | 94.2 | 967 | 41.8 | 56.1 | 25.2 | 10.9 |
| 68 | 4.4 | 99.0 | 996 | 41.7 | 56.0 | 26.3 | 12.0 |
| 69 | 3.2 | 104.2 | 1024 | 41.5 | 55.9 | 27.5 | 13.1 |
| 70 | 1.9 | 109.9 | 1052 | 41.5 | 55.8 | 28.5 | 14.2 |
| 71 | 0.7 | 116.2 | 1079 | 41.4 | 55.8 | 29.6 | 15.2 |
| 72 | -0.5 | 123.1 | 1106 | 41.4 | 55.8 | 30.6 | 16.2 |
| 73 | -1.8 | 130.8 | 1131 | 41.5 | 55.8 | 31.5 | 17.2 |
| 74 | -3.0 | 139.5 | 1157 | 41.5 | 55.9 | 32.5 | 18.1 |
| 75 | -4.2 | 149.3 | 1182 | 41.6 | 56.0 | 33.4 | 19.0 |
| 76 | -5.5 | 160.4 | 1206 | 41.8 | 56.1 | 34.2 | 19.9 |
| 77 | -6.7 | 173.3 | 1229 | 42.0 | 56.2 | 35.0 | 20.8 |
| 78 | -7.9 | 188.2 | 1252 | 42.2 | 56.4 | 35.8 | 21.6 |
| 79 | -9.1 | 205.8 | 1274 | 42.5 | 56.6 | 36.5 | 22.4 |
| 80 | -10.4 | 226.9 | 1296 | 42.8 | 56.9 | 37.2 | 23.1 |

際に指針を与えることがわかる．なお， $\theta=68^\circ$ のとき，表2に示されるように，DVDの差込口の高さ H_D が分光器の高さ H を超えるが，差込口を分光器の上面（図4で点Aがある面）に設けるか，分光器の奥行 D を小さくして， $H_D < H$ となるようにすればよい．なお， D の値はシミュレーション結果に影響しない．

5-2. CD分光器のシミュレーション

回折格子の溝間隔 d 以外は表1と同じ条件で， $d=1.6\ \mu\text{m}$ とした場合のシミュレーション結果を表3に示す．WAKABAYASHIらはディスクの差込位置を変えるだけでDVD分光器，CD分光器の双方に使えることを報告している^{4),5)}．そこでは，CD分光器として使用する場合は， $\theta=50^\circ$ に相当する差込位置を推奨している．表3からわかるように，このときの中心波長は383 nmである．また，400 nm~700 nm領域は視線方向から下向きに $0.8^\circ\sim 13.6^\circ$ の角度に観測される．

この表から，DVD分光器のときの差込角である $\theta=60^\circ$ でCDを利用した場合，400 nm~700 nm領域が，視線より上方向に $15.8^\circ\sim 2.0^\circ$ の角度に観測されることがわかる． $n=2$ として二次の回折光について計算すると， $\theta=60^\circ$ のとき，可視光は視線方向から下向きに $2.1^\circ\sim 24.7^\circ$ の角度に観測されることがわかる．これは，DVD分光器で一次回折光が観測される位置に相当する．以上のことをまとめると，本来DVDを差し込む位置にCDを差し込むと，上方向に一次回折光が観測され，二次回折光が正面少し下方向に観測される．実際に試してみると，この計算結果が支持される．このとき，二次回折光では，一次回折光より暗くなるが，水銀の黄色の輝線をかうじて分離できた．すなわち，CDでも二次回折光を観測することにより，十分な分解能が得ることができるとは，「DVD分光器」として作成し，CDを差込口に入れても，二次回折光を観察すると十分な性能を持つ分光器となる．

以上のように，5.で導出した入射角 θ_1 を求める式～と，反射型回折格子の回折条件の一般式を用いることにより，DVD分光器，CD分光器に関する様々なシミュレーションができ，これら分光器の設計，および観測されたスペクトルの解析にあたって有用であることが示された．

6. おわりに

DVD分光器は身近な材料のみを用いて製作できる安価で高性能な分光器であり，教育分野などでの活用が期待される．その設計は，従来“トライ・アンド・エラー”で行われることが多かったが，本稿のような解析を行うことにより，より系統的に設計できる．又，この解析を通して，DVDを使ってなぜ光が分かれるのか，どのように分かれるのかを説明し，さらに学習者が自ら計算し考えることができる．さらに，本稿で求めた条件式を使用することにより，ある波長の光がどの角度に観測されるかを検討して回折格子の線密度を求めることができる．

本稿で示した回折条件は，DVD分光器，CD分光器に限らず，反射型回折格子を利用した分光器一般に適用でき，様々なシミュレーションを行うのに有用であると考えられる．

7. 謝 辞

本研究の一部は，文部科学省科学研究費・特定領域研究「新世紀型理数科系教育の展開研究」（課題番号17011078）により行った．

CD分光器，DVD分光器の共同開発者である当館旧学習部・濱田浄人氏（現在，広報・サービス部）に感謝する．CD分光器による吸収スペクトル観測の可能性や科学教育分野でも海外に発信することの重要性を説きCD分光器の可能性を広げていただいたお茶の水女子大学名誉教授・故曾根興三博士に感謝する．このCD分光器の可能性の拡大が，本DVD分光器の開発につながった．

文献および注

- 1) 本稿の一部は，特許公開2005-156359で示した．
- 2) 若林文高・濱田浄人，1996．コンパクトディスク(CD)を使った簡易分光器．化学と教育，44 (10): 676.
- 3) WAKABAYASHI, F., K. HAMADA & K. SONE, 1998. CD-ROM Spectroscope: A Simple and Inexpensive Tool for Classroom Demonstrations on Chemical Spectroscopy. *J. Chem. Educ.*, **75** (12): 1569-1570.
- 4) WAKABAYASHI, F. & K. HAMADA, 2006. A DVD Spectroscope: A Simple, High-Resolution Classroom Spectroscope. *J. Chem. Educ.*, **83** (1): in press.
- 5) 若林文高・濱田浄人，2005．DVDを使ってスペク

トルを観察してみよう．現代化学，2005年4月号：50-53．

- 6) 「入射角」や「反射角」は，通常は反射面の法線方向からの角度で定義するが，本稿では議論を簡素化するために反射面からの角度で定義する．
- 7) 分光器の奥行 D は，入射角の計算には関係しないが，分光器の設計に関係するので定義しておく．
- 8) 関数として“アークコタンジェント(\cot^{-1})”を用いると式と統合できるが，表計算ソフトに装備されていないことが多いので，基本的な“アークタンジェント(\tan^{-1})”を用いて定式化した．ただし，スリットがB点の直上にくるのはごく限られた場合であるので，通常は，式，式のみを考慮すれば良い．
- 9) 可視光の波長領域は個人により異なるが，理科年表（国立天文台編，丸善発行）では380 nm～770 nmとされている．本稿では，肉眼が十分な感度を持ち観測が容易な400 nm～700 nmの領域について検討する．
- 10) 本稿では，水銀の577 nm, 579 nmの輝線を分離できる分解能とする．