

コンパクトディスクを使った簡易分光器の製作

川野元 聡

〈国立天文台天文データセンター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kawanomoto.satoshi@nao.ac.jp

国立天文台天文学データ解析計算センターでは、2005年度の国立天文台特別公開にあたりいくつかの企画を出展した。工作コーナーと題してコンパクトディスクを使った簡易分光器の製作を行い、幸いにも好評をいただいたのでここに報告する。

1. はじめに

2005年10月15日、国立天文台三鷹では恒例の天文台特別公開が行われた。天文学データ解析計算センター（当時）でも例年どおり銀河探し・天文シミュレーション・工作コーナーなどの企画を出展した。特別公開のお客様は毎年いらっしゃる方も多く、企画する側としても誇りにかけて去年と同じものを出すわけにはいかない。勢い、毎年夏には企画案について頭を悩ませることになるのだが、それも楽しみの一部ではある。2005年度は筆者が出した「CD-ROMを使った簡易分光器作り」が工作コーナーのテーマとして採用され、図1のような工作を行ったが、そこそこ好評をいただいた。もしかすると教材などに使いたいという要望もあるかもしれないと大それたことを考え、この場を借りてその詳細について記録しておくものである。完成品の紹介というよりは企画段階での設計思想や基本的な式、設計時の試行錯誤、企画を進める際に気がついた点の記録として読んでいただければ幸いである。

この記事の中で小さな長さの単位がよくでてくるので、念のためここでまとめておくと、

1 mm (ミリメートル) = 1,000 分の 1 メートル

1 μm (マイクロメートル) = 1,000 分の 1 mm

1 nm (ナノメートル) = 1,000 分の 1 μm

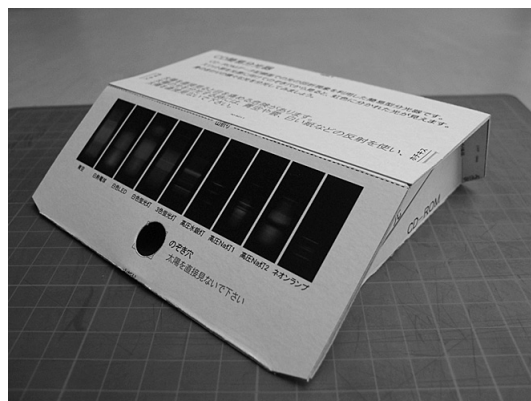


図1 簡易分光器（完成品）。

である。

2. 回折格子

本誌の「天球儀」カテゴリに投稿するうえで、数式を使うことは禁止されているのだが、CD-ROMを回折格子として使った分光器の記事を書くうえでこれだけは出さざるをえない。回折格子による分光の式である。

$$a (\sin \alpha - \sin \beta) = \pm m \lambda$$

ただし a : 回折格子溝間隔, α : 入射角, β : 出射角, m : 次数, λ : 観測波長, である。

最も単純な回折格子は、多数のスリット（間隙）が平行かつ等間隔に並んだものである。図2左にスリットに直交する面で切ったときの断面図を示

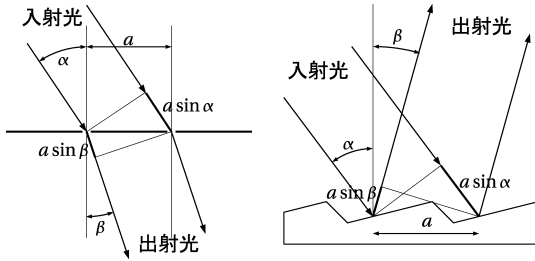


図2 左：透過型回折格子模式図，右：反射型回折格子模式図。

す。回折格子の面に角度 α で入ってきた光は、狭いスリットを通過した後で角度 β で出ていく。このとき隣り合うスリットで、光の通過する長さは $a(\sin\alpha - \sin\beta)$ だけ違っている。この長さが光の波長の整数倍 $\pm m\lambda$ に等しいとき、通過した光は強め合う。白色の光はさまざまな波長の光の混合でできているため、白色光を回折格子に通すと、さまざまな波長の光はその波長に応じた異なる方向に回折される。結果として、回折格子は光を波長によって分ける分光素子として働く。そして得られる虹色の光の並びはスペクトルと呼ばれ、天文学においては光源の情報を得るための重要な道具として使われている。

回折格子の式を波長 λ を固定しておき、入射角 α を変化させたときに射出角 β がどう変化するかをみると、 $d\beta/d\alpha = \cos\alpha/\cos\beta$ と書ける。これは回折格子を通過する前と後で光束の幅が変化する割合を示すが、分散方向に像がどれだけ伸び縮みするかの割合でもある。また、 α を固定し、 λ を変化させたときの β の変化は $d\beta/d\lambda = \pm m/(a \cos\alpha)$ と書け、これは角分散と呼ばれている。波長のことなる光がどれだけ違う方向に出ていくかという、直観的にもわかりやすい量である。

図2右は反射型の回折格子の断面図を示したものである。図2左を回折格子の面で下半分を上に戻した形になっている。もちろんこの場合にも回折の式は全く同じである。回折格子の式では、参考書によっては角度を測る方向が異なり、

符号が変化する場合があるのでその点には注意のこと。

さて、CD-ROMのデータ記録面を見ると反射光が虹色に見えることはよく知られているが、これはCD-ROMの構造が先に述べた回折格子の構造に非常に近いため、CD-ROMが分光素子として働いているためである。CD-ROMの記録面の物理的構造は規格によって定められているが、回折格子として重要な記録ピット列の半径方向の間隔は $1.6\mu\text{m}$ となっている。人間の目に見える光の波長はおよそ $0.4\mu\text{m}$ から $0.7\mu\text{m}$ 程度なので、波長の3倍程度の間隔で記録ピット列が並んでいることになる。これを回折の式に代入して概算すると、垂直に入射した光は 20° ほどの回折角でCD-ROMの面からでてくることがわかる。

もちろんこのままでも白色光が多数の色の光からなっていることなど光の性質の基本的な部分に対する興味はひけるが、CD-ROM単体ではさまざまな入射光が混ざりあってしまっていて光源と分光された光との対応がつきにくかったり、円形の構造をしていることで像がゆがんだりして、当然のことながら科学の道具としては完成されていない。国立天文台の企画として成立する完成度と、誰でも作れる簡便さを併せもつ簡易分光器の設計が、特別公開の企画としては必要であった。

余談だが、設計以前の構想段階では、DVDを分散素子に使う案もあった。DVDはピット列の間隔が $0.74\mu\text{m}$ とCD-ROMよりも狭く、それゆえにより大きな分散をとることができる。計算センターでは毎年の企画を持ち帰っても楽しめるようにデータ化してCD-Rで配布していた。これを分散素子としても使う予定であったが、いきなりDVD-Rに切り替えるのは次期尚早として見送られた。また、DVD-Rは波長 $0.65\mu\text{m}$ のレーザー光でデータを読み書きするため、分散素子として使うとちょうど使用波長の部分だけ吸収を受けて暗くなっているのがわかる。教育的ではあるのだが、混乱を招くとも考えられたので今回はやはり

見送りとなった。

3. 設 計

天文台特別公開で工作企画を行う場合、通常の工作に比べるといくつかの制限がある。全年齢対応の内容とする。作業時間は30分以内に収める。素材は紙・厚紙を主体とする。危険防止のためにカッターを使用しない。のりは乾燥時間がかかるためなるべく使わずに済ませる。……などなど。これらを満たしつつ簡易分光器として十分な性能が出るような設計を考えねばならない。

3.1 試作1号

最初の試作をする上で押さえるべきなのは、分光器の3要素（分光器に入る光を制限する－入射スリット・波長に応じた回折角をつける－分散素子・光を受ける－受光素子＝今回は肉眼なので覗き穴）を備えた紙箱をどう作るかという点であった。まずは簡単のために入射光と出射光で方向が直角になるような配置を考えた。これは回折格子の式で、 $\alpha + \beta$ が 90° になっていることに相当する。可視光線の波長として、人間の目の感度の最も高い $0.55 \mu\text{m}$ で計算すると、 α が約 60° 、 β が約 30° となる。この数値で設計したものが図3の試作1号である。分光器の基本的な性能は出ているが（むしろ意外に高性能）、実際に工作企画として見た場合の問題点がいくつか見つかった。最大の問題はその厚みである。過去の特別公開において、作った工作物を持ち運ぶのに難渋する方を何人も見かけているので、袋を用意するなり、もっとかさばらないようにするなどの対策が必要だと感じられた。また、試作品を計算センターの構成員に試用してもらったところ、のぞき方がわかりにくいという感想が得られた。のぞく方向と直角に光を入れるというのは直観的ではないということだろう。これは反射型の回折格子を使う上では宿命ではあるが、さらに、内面反射の問題や、カッターを使わずに鋭く狭いスリットをどう作るかということも実際の工作においては問題となる

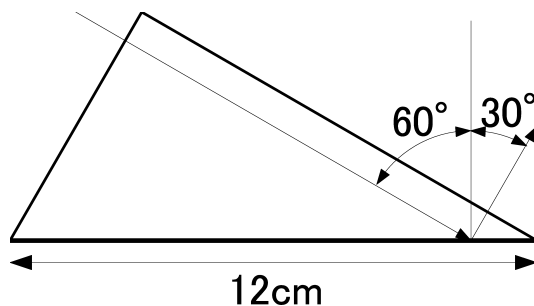


図3 試作1号断面図（光路図）。

ことも予想された。実際の使用時には中に納めるCD-Rは計算センターの企画内容のはいったものになる予定なので、完成した後にも開閉が可能な構造にする必要もあった。このことに関していえば、CD-Rを細かく切って使うことも今回の場合は不可能である。

3.2 試作2号

試作1号においては、入射角を大きくとり、出射角を小さく取っていた。回折格子の式からは、回折の角度のことだけを考えるなら、 $\alpha + \beta$ が等しい場合に大きいほうと小さいほうどちらを α にとるかは自由度がある。試験的に小さいほうの角を α にとった試作品を作ってみた。結論だけ述べるとこれは工作としては失敗作であった。回折格子の倍率 ($\cos \alpha / \cos \beta$) を考慮すると、入射スリットをかなり遠くに置かなければ人間の目がピントを合わせることができなくなることがわかる。逆にいえば試作1号がコンパクトに作れるのは $\cos \alpha / \cos \beta$ が小さく、スリットが実効的には遠くにあるように見えることが効いていることになる。逆の配置では工作物は非常に大きくなり、展示物の見学中に持ち運べるものではなくなった。ただ、教育的には比較対象として使える可能性はあるだろう。

3.3 試作6号

試作3号から試作5号まではDVD-Rを使ったものなのでこの記事では省略する。試作1号のかさばる点を解消するため、入射光と出射光のなす

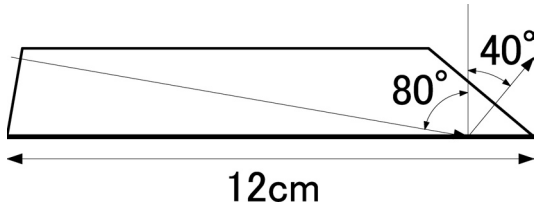


図4 試作6号断面図（光路図）。

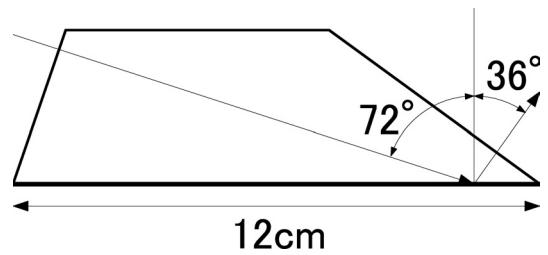


図5 最終試作品断面図（光路図）。

角を大きくとり、全体を薄く作る方針を立てた。

図4に試作6号の断面図を示す。ここでは $\alpha + \beta$ を120度、 α を 80° 、 β を 40° にとった。このような箱を作ろうとする場合、展開図は長方形の両側に耳のように台形の部分がくっつくのが最も都合が良い。のりしろに相当する部分は外向きにすればのりではなくステープラーを使うことができ、作業は大幅に簡略化できる。この辺りで完成形かと展開図を見ながら考えていたが、実際の工作をする上でもう一段階手間を減らすことができるアイデアがひらめいた。

3.4 試作最終形態

試作6号の展開図に必要な大きさは265 mm × 180 mmである。ご存じのとおりA4の紙の大きさは297 mm × 210 mmなので、もう少し設計を変更すれば展開図の外周をA4の紙に合わせることができ、工作の時に切断する長さを減らすことができる。350 g/m²程度の厚紙をはさみで加工するので、特に子供にとっては少しでも切断長を短くすることが重要だと考えた。用紙の大きさから逆算して最適な回折角を決定すると、 $\alpha + \beta$ は 108° 、 α と β はそれぞれ 72° と 36° となる。このとき箱の厚みは35 mm、展開するとステープラ用の余白を含めて全幅210 mmとなってちょうどA4用紙の幅に一致する。長さ方向は箱のふたの差し込み部分の長さで吸収できるため、こちらも297 mmに合わせることができた。実際に必要な外形の加工はA4の大きさの紙から四隅を切り取るだけで済むようになった。最終形態を図5に示す。

この配置において、スリット幅が0.2 mmの場

合、波長分解能 $R = \lambda / \Delta\lambda$ はおよそ500と見積もられる。これはナトリウムのD線を波長589.6 nmのD1と波長589.0 nmのD2に分離するには足りないが、水銀の波長579 nmと577 nmの輝線を分離することは十分に可能である。白色蛍光灯をこの分光器で見たところ、黄緑色の領域に明瞭に2本の輝線を確認できた。

3.5 穴開け

特別公開での特殊事情だが、カッターを使わない方針が立ててある。のぞき穴やスリット部分の穴をどうやって開けるかは悩ましい点であったが、結局は事前に穴を開けておくという方法に落ち着いた。径6 mmと12 mmの2種類の穴開けポンチ（皮革加工用）を準備して穴を開けた。この方法だと丸穴ができるが、もちろん穴の形に大きな意味はないのでカッターなどを使う場合には四角穴でも問題はない。

3.6 入射スリット部

カッターを使わないことで、もう一つ問題になるのが入射スリット部分である。長さ5 mmから10 mm、幅0.2 mmないし0.5 mmほどの細長い穴を厚紙に開けるのだが、普通にカッターを使っても難しい部分である。当初は短冊状に切った黒い紙を狭い隙間を残して貼り合わせることを計画していたが、ラベルライター（テプラなど）でスリットを印刷してそれを大きめの穴に貼り付けるという案を試作品の試用段階で出していただいた。試験の結果、全面黒に中央に1ドット幅で白い部分を作った外字を登録し、透明テープに黒色で印刷すれば実用上十分なコントラストを得るこ

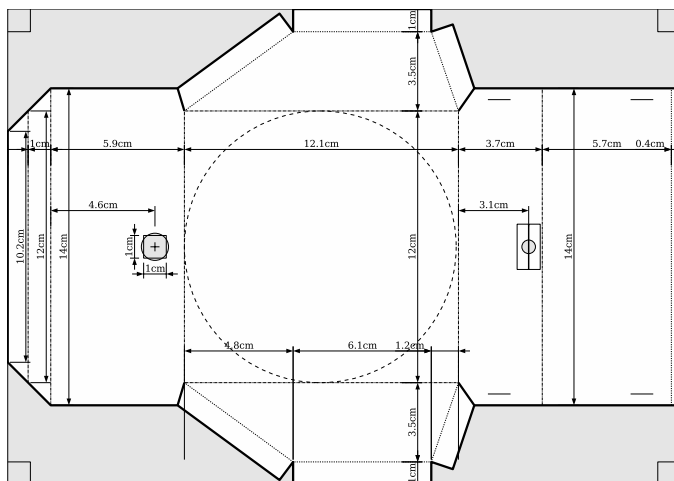


図6 最終版展開図.

とができることがわかり、スリット部の加工は大幅に簡略化された。スリットの品質が一定にできることも利点である。

図6に最終的な展開図を示しておく。CD-ROMの納まる面は折り曲げ角度のきつい左右方向で紙の厚さを考慮し、121mmにしてある。

4. 光 源

分光器の設計はできたが、工作コーナーの作品としては、これがどのようなものであるかが端的にわかるような外観が必要であると考えた。これについては企画の初期から、実際にこの分光器で見えるスペクトルをデジタルカメラで撮影し、スペクトルの例として分光器ののぞき穴の周辺に印刷しておくというアイデアをもっていた。カメラを使って撮影すると、目でみるよりも分解能が低いデータしか得られなかったので、実際に使った写真はDVDを使った高分散版の分光器を使って撮っている。

また、水素・ヘリウムなどの高圧放電管を工作コーナーの場所に準備するというアイデアもあったが、代理店に在庫がないということで断念した。また、多数の人が同時に見ることを考えると一般的な光源のほうが好都合ではある。特別公開

当日は白熱電球と電球色の蛍光灯を卓上に設置しておき、完成した分光器で見比べてもらうという形にしたが、見ためでは区別できない二つの電球が分光器を通して見ると全く違うというのはそれなりに楽しんでもらえたと思うが、どうだろうか。

身の周りの光源については、分光器本体の写真だけではなく、簡単な解説を付けた説明書を併せて配り、持ち帰った後の使用に対するフォローとした。以下、解説に取り上げた光源を列举しておく。青空（太陽）、白熱電球、白色発光ダイオード、高圧水銀灯、白色蛍光灯、3波長型蛍光灯、高圧ナトリウム灯、ネオン管の8種類、高圧ナトリウム灯については圧力の異なる二つを入れたため全部で9種類の光源について解説付きの写真を配布した。残念ながらこの中には低圧ナトリウム灯が含まれていない。ほぼ単色の光源としてよく知られている低圧ナトリウム灯だが、意外に国立天文台三鷹キャンパス近辺では身近には見当たらない。高圧ナトリウム灯との比較は非常に興味深いテーマであるだけに残念であるが、後で自分で試せないのではしかたない。

取り上げた光源の中で個人的に特に興味深いと感じられたものは、まずは太陽光に見られる無数

の吸収線が挙げられる。数が多過ぎて同定が困難なほどの線群は分光学を専門とする筆者にとっては感動的でした。また、高圧ナトリウム灯は輝線中心に自己吸収をもつが、実際に橙色に真っ黒な吸収が入ったスペクトルを自分の目で見る機会というのは恥ずかしながら初めてであった。夜間に街灯の下でデジタルカメラを構える筆者は、他人の目にはかなり怪しく映ったのではないかと思われるが、本人は結構楽しくデータを集めることができた。

5. 印刷

試作の段階ではいわゆる工作用紙を使って作っていたが、授業ならともかく、特別公開当日に工作用紙に寸法どりをしてもらって一人30分どころの騒ぎではなくなる。どうしても印刷済みの厚紙を用意しておかねばならない。A4の厚紙は手配可能だが、普通のプリンターでは最も厚くても0.2mm程度の紙までしか印刷できない。かといって薄い紙では光が透過してしまうので、遮光処理が面倒になる。今回は幸い手ざし印刷で厚紙印刷可能なカラーレーザープリンターがあったのでそれを使って印刷できたが、最悪の場合には普通のコピー用紙に印刷して厚紙と貼り合わせることも覚悟していた。企画として多数枚必要な場合には外部に印刷を手配することも視野に入れておくことはここから得られる教訓である。

さらに、今回は紙工作とCD-Rを組み合わせるため、わずかの大きさの誤差が問題となる。実際、最初の印刷ではわずかに小さめに出力され、CD-Rがきつなくなってしまっていた。急遽新しく用紙を手配し、失敗した紙には裏面に印刷をして乗り切ったが、特に手に入りにくい素材を使う場合には寸法確認を確実にすることも、あとから考えれば当たり前だが、大事な教訓となった。

6. まとめ

2005年度国立天文台特別公開の計算センター工作コーナー企画を、「コンパクトディスクを使った簡易分光器の製作」と題してここに記してきたが、身近にある素材を使って、手軽に分光にふれることができることが伝わっただろうか。分光データは撮像データに比べて直観的ではないこともあり、特に一般向けにその面白さを伝えることは簡単ではない。特別公開当日には数百セットの工作物を配布したが、そのなかの何割か、何パーセントかでも分光というものに興味をもってもらえればありがたい話である。また、この記事を参考にして何らかの教育活動が行われたなら、もはや予想外の出来事である。

今回製作した分光器の型紙などをpdfファイルにしたものをウェブにて公開する。興味のある方は以下のURLを参照していただきたい。

<http://www.cc.nao.ac.jp/cc/openhouse/2005/CDSpectroscope.zip>

最後になったが、この企画に関して多くの助言・協力をいただいた計算センターの皆様、同様の企画を行い参考意見をいただいた光赤外研究部の皆様、発表の場を与えていただいた天文月報編集委員会の皆様にはこの場を借りて感謝の意を表させていただきます。

Handmade Compact Disc Spectroscope

Satoshi KAWANOMOTO

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Astronomy data center held some programs for the open house day of 2005, and a program of handmade compact disc spectroscope in craft corner received a favorable review. We report a summary of the program and the product in this article.