

仙台市天文台ナスミス式分光器 SNS の基本設計

加藤 賢一（岡山理科大学）

1. はじめに

市民天文台として 1955 年に仙台市の中心市街地の西端・西公園の中に開所した仙台市天文台は 50 年余の活動を経て、2007 年 11 月、閉所となった。建物の老朽化や地下鉄の延伸計画により西公園にそのまま居続けることができなくなったためである。折しも政府・地方自治体とも財政難に苛まれている中で公共施設の運営に指定管理者制度が取り入れられるなど、公共施設の在り方に大きな変更が迫られる中であった。天文台存続の道を選択した仙台市は困難な財政状況の中でそれを達成しなければならず、そこで選択したのが PFI（Private Finance Initiative）方式による建設と運営法であった。これは公共施設の整備・運営を、従来のように自治体が直接行うのではなく、民間に委ねる方式で、仙台市天文台の場合は伊藤忠商事をはじめ 6 社から構成される企業体である仙台天文サービスが建設から運営まで行い、仙台市はその後 30 年間に亘って運営費を支払い、終了後、市は無償で施設の譲渡を受けるという斬新な方式であった。

以前の極めて牧歌的な、余りにも牧歌的な時代の仙台市天文台を知っている者の一人とすると、正直、何とも窮屈な感じを覚えたが、公共施設の存続自体が問題となる中でこのこと、今となれば最善の手法だったのかなという気もする。

建物、設備の建設、整備には NTT ファシリティーズが当たることになり、2006 年夏、筆者は同社より 1.3m 鏡に装着する分光器について相談を受けた。仙台市天文台には分光解析の経験者がいなかったこともあり、分光器の設計から製作後の運用まで全般にわたってコンサルタントを務めることになった。

仙台市天文台ナスミス式分光器のことであり、同天文台関係者に知って戴ければ良いようなことをここで紹介するのは、既に、本研究会で同分光器の性能について紹介があり、今回の発表はそれを補完するものであることと、施設・設備を作る上で留意すべき教訓が多少含まれているからであり、他意のないことを了解いただき、紙面を汚すことをお許し願いたい。

2. 初めの経過

最初に相談を受けた 2006 年夏時点で、望遠鏡の製作を担当した京都の N 製作所の図面にナスミス分光器を装着することが載

っており、同社が分光器を提案したようだった。2007 年 1 月に N 製作所を訪れ、製作について相談したところ、担当の N 氏は望遠鏡本体の製作に時間も気も取られていて、とても分光器まで考える余裕がないようだった。天文台の開所に間に合うか、心配だった。

この時には当方の基本設計ができており、スリット部を何種類か用意し、一つは開口の大きなスロットとし、グレーティング部に平面鏡を置いて撮像もできるようにしてはどうかと考えていた。光路に障害物がないかなどをチェックするにも使えるはず、と期待してのことであつたが、実現には至らなかった。

3. シーイングサイズとカメラの選択

仙台の空はシーイングが良くないことは承知していたが、K 氏から 10"から 3"角と聞いてびっくり！ 10"ものスリット幅を CCD 面上の 3 ピクセル（通常は 2 ピクセル）に映しこむには F0.4 ほどのカメラが必要になる。10"角を焦点距離 13m の鏡で結像すると 0.63mm になるので、これをスリット幅に設定する。それを CCD 画素 3 個（0.027mm）に収めるためには 0.04 倍に縮小しなければならない（グレーティング面での反射では角度がついているので実際はこんなに小さくなくても良いが、単純化のためここでは無視）。これをコリメータとカメラの組み合わせで実現すると、カメラの焦点距離を 10cm にとればコリメータは 250cm となる。コリメータの F 数は主鏡と同じ 10 だから、その光束は直径 25cm になり、カメラの口径も同じく、最低 25cm 必要になるのでカメラの F 数は 0.4 である。コリメータは何とかできても、口径 25cm、F0.4 のカメラはご免被りたい。10"は早々に諦めてもらうことにした。

3"ではカメラは F1.4、2"なら F2.1 なので何とかなるかも知れない。パーツの中で最も費用がかかりそうなのがカメラと思われたので、F1.4 の 3"か、F2.1 の 2"か、これには大いに迷った。性能的には 3"としたいところだが、経費面を考えて基本設計ではシーイングサイズを 2"と設定し、構想を進めることにした。実機では F1.57 のカメラになったので 3"としても良かったのだが、それは後の話。まさか、カメラを独自に製作することになるとは、その時は想定できなかった。

こうしてシーイングサイズが 2"で、スリット幅が 0.13mm となると、画素 3 個（0.027mm）へは 0.21 倍の縮小で良いから、カメラの焦点距離が 10cm で、コリメータ長 50cm である。すると光

束径は 5cm だからグレーティングやカメラ径は 6~7cm もあれば良からう。カメラは F1.67~1.4 になるが、これくらいなら市販のレンズが何とか利用できそうだし、1m 四方のナスミス台にも乗りそうだった。

4. 分解能

これでカメラ系については解決の見通しがついたので、分解能の番である。要件として与えられた分解能 5000 を達成するには、5000A で 1A を分解できなければならない。そのためには、1A を CCD 画素 3 個 (0.027mm) に収めたい。つまり、CCD 上 1mm あたり 37A の分散度にした。

ここで登場するのが、昨年の池田さん (2016) の講演でも紹介された回折格子の式①と分散の表式②である。

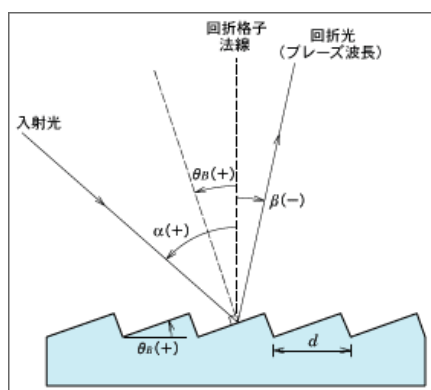


図 1. 入射光と回折光の角度

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta) \quad ①$$

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta} \quad ②$$

ここで m は次数、d は格子間隔である。

1800 本/mm (ブレイズ角 27°、ブレイズ波長 5000A) のグレーティングの場合、入射光も出射光も同じく 27°という単純なケースでは②式から角分散度が 0.012°/A となる。5000A の光に着目すると、直進してきた 5000A 光に対し、5001A 光は 0.012° (0.00020 ラジアン) 傾いてやってくるということである。グレーティングとカメラ (焦点距離 10cm) までの距離が 20m ならばレンズ面に達した時は 5000A 光と 0.04mm ずれていて、レンズの公式に従って出射側 20cm のところに像を結ぶはずである。が、CCD が結像するはずの場所の手前 10cm の焦点位置にあるため、ここに当たってしまう。そこでは 5000A 光と 5001A 光では 0.02mm ずれているので分光像ができる。そのずれは画素 2 個分に相当する。悪くはないが、スリット像との整合性がもう一つで

ある。0.027mm にしたければ、カメラの焦点距離を 1.35 倍に延ばすべし、である。カメラの焦点距離は 135mm である。

さて、そうするとコリメータを 68cm に長くしなければならない。光束径は 6.8cm になり、傾きを考慮するとグレーティングは 10cm 程度になる。カメラ径に 8cm は要るだろうから、F1.7 ほどだが、こうしたレンズは入手できるだろうか。

5. 光学仕様第 3 版

以上のような試行錯誤をくり返し、仕様を固めていった。迷いに迷って 2016 年 10 月 25 日付で光学仕様第 3 版を作成した。

今となっては慎重過ぎたと思うが、ここではシーイングサイズが 2"、コリメータ長 500mm、カメラ f は 135mm を選択した。グレーティングやカメラ径を 7cm 以下に抑えたかったからである。グレーティングは 1800 本を 2 つ、600 本を 1 つ、そして平面鏡を追加した。スリットは 0.12mm (2"相当)、0.7mm (10"相当)、ダイアフラムを 3 種、内一つは大きな四角の穴で、平面鏡と組み合わせで撮像が可能な仕様だった。

上記のとおりコリメータ長 500mm ではカメラとの整合性がもう一つなのだが、ナスミス台の大きさやグレーティングの大きさが気になり、680mm を見送った。果たしてこれは賢明な選択だったのか、今でも気にかかる。

6. カメラについて

カメラの選択に悩んだことを記したが、もう一つ悩みがあった。それは分光器用に市販のカメラレンズを使うことの是非である。コリメータで平行光線となった光束がグレーティングで反射すると波長によって反射角度が異なり、放射状になってカメラに入り、分光される。つまり、グレーティングから光が放たれるような形になる。それもカメラのごく近くの位置で、である。市販のカメラレンズは対象が結構遠方にあることを想定して設計されていて、近くの対象物をうまく撮影するのはマクロレンズである。つまり、分光器用のカメラレンズはマクロレンズ的でなければならぬのではないかと。となると、市販のカメラレンズで良いかが問題になる。

こうした心配があったものの、経費削減のため市販品を使うように仕様第 3 版には書いたが、結局は独自に製作となり、この問題は解決した。

7. 実機の製作

実機の製作が始まった。仕様書通りに作れるか、それは実際に図面が引けるか、工作可能か、素材は調達可能か、それに筐体

サイズ、経費や納期は、といった諸要素が絡んできて、予断を許さない。また、制御系も入れなければならないし、できるだけ経費や納期を抑えるため「作りやすいようにお願いします」ということで依頼することになった。

具体的に設計にかかってみると様々な問題が出てきた。部材の厚さやパーツの入るスペース等々の話から、カメラ部を移動させて合焦はしたくないとか、グレーティングの取り付け角度や、光学系の効率等々であった。その中に分解能 5000 が達成されないおそれがあることがあった。利用できるグレーティングの制約のためである。

この時は、撮像モードは諦めないといけなくなっていた。それはカメラが分光用に特化されていて、色収差の除去が難しいことや合焦のためカメラ位置を動かすと光路にかかることなどが分かったからである。そこで、スリット部を簡略化することに同意したのだが、大きな 0.7mm スリットがあるものと思っていたので、分解能向上のため思い切って 1.2"スリット（画素 2 ピクセル相当）という狭いスリットも追加し、分解能 5000 以上を確実に達成しようと目論んだ。

カメラは ED レンズを用いた最大径 12cm、全長 22cm、焦点距離 8 群 8 枚のもの（光学上は口径 100.5mm、焦点距離 158mm）を製作することで対応した。仕様書ではコリメータを反射系で考えていたが、これもレンズ系となった。製作と同時に収差の計算も行われ、許容範囲に収まっていることが確かめられた。

こうして光学系と制御部が筐体に収まり、外部に制御系のコンピュータシステムがついてナスミス台に載ったのが 2007 年 12 月上旬のことだった。ナスミス台いっばいのサイズであり、過不足なく収まったというところであった。

その後、調整や全体の制御用ソフトが制作され、解析用ソフトも揃ったのが 2008 年 5 月で、開所式に間に合わせることもできた。

8. 効率の問題、他

実機の性能については溝口さん（2016）の報告のとおり、設計値あるいはそれを上回る数値が出ており、また実際、スペクトル線解析をしてみても確かめられている。それは良しとして、テスト観測を行ってみると、思ったより露光時間がかかる。その後、光路に邪魔があることが判明し、それが原因かと思ったら、それでもなお設計値より効率が悪いようである。光路の途中に入っているイメージローテーターで光量損失が起こっているのではないかという指摘もあるが、明確な原因は未だに不明なままである。スリット幅 2"も手伝っているに違いない。当面の解決策は、分解能を多少落としてでも、スリット幅 3"にすることだろうか。

望遠鏡のポインティングもトラッキングも良く、常時、通電状態であり、いつでも使えるという贅沢な分光器である。惜しむらくは、カメラの特性上、十分な露光時間が取れないことや効率に難があることだが、それでもキレの良いイメージを与えてくれる高性能の分光器である。経費も当初予定を大幅に上回ったのではなかろうか。その点では NTT ファシリティーズの K 氏の頑張りが大きいし、その他、多くの方々の知恵と労力の詰まった装置である。製作されて 10 年、経年劣化があるので、大事にしないで大いに使って戴きたいと関係者の 1 人として願っている。

参考文献

- 池田 優二 2016、第 21 回天体スペクトル研究会、3
溝口小扶里 2016、第 21 回天体スペクトル研究会、68