

岡山高分散エシエル分光器 HIDES

泉 浦 秀 行

〈国立天文台岡山天体物理観測所 〒719-0232 岡山県浅口郡鴨方町本庄 3037-5〉

e-mail: izumiura@oao.nao.ac.jp

国立天文台岡山天体物理観測所（以後「岡山観測所」あるいは単に「観測所」または「岡山」と呼ぶ）における高分散分光観測環境の再整備運動が始まってから7年が経過しようとしている（観測所の概要については <http://www.oao.nao.ac.jp> を参照されたい）。この運動は1996年度に188 cm 望遠鏡クーデ焦点まわりの比較光源ユニットと天体捕捉導入・ガイド系を遠隔化、高精度化することから始まった。そして1997年度には高分散エシエル分光器（HIDES）本体の建設へと続いた。1999年にHIDESはファーストライトを迎え、2000年から共同利用へと提供された。その後さらにクーデ室の改造を経て、ヨードセル、光量モニタ、イメージローテータ等の製作、装備が進められた。また「すばる時代」に入り、岡山における研究のスタイルもプロジェクト観測の実施や時間軸重点の研究へと急速にシフトしてきた。HIDESの共同利用開始から3年、運用もようやく軌道に乗り、世界一線級のデータも出て来るようになってきた。そんな折に天文月報への紹介記事のお誘いをお受けすることとなった。本稿では、大望遠鏡時代にHIDESが作られるに至った背景から説き起こし、建設にまつわるエピソードを交えながら、すばる時代の岡山でささやかな装置開発に取り組んだ名も無き集団の活動を紹介してみたい。

1. HIDES 前夜

そもそも岡山天体物理観測所の188 cm 望遠鏡にHIDESを建設するという計画が実践に移されたのは、海部宣男氏（現国立天文台長）により岡山会議なるものが招集され、岡山観測所の長期的な運用計画が議論され、赤外線汎用観測装置、可視高分散分光器、可視高分散分光器の三装置の整備計画が打ち立てられたことに遡ると聞かされている。その一番目として山下卓也氏を中心に近赤外線多目的観測装置OASIS¹⁾が検討・製作された。OASISは国内の多方面の研究者を近赤外線観測へといざなうようになった。OASISの成功は早くも10年ほど前の事になろうとしているが、まだ皆さんの記憶の中にも留まっていることと思う（OASISは2003年1月の時

点で現役を引退し、次期赤外線観測装置の開発が始まっている）。そしてOASISに続く岡山天体物理観測所の第二の主力観測装置として建設が進められたのが高分散エシエル分光器（HIDES）である。

この装置計画が策定されるまで、日本の高分散分光観測を支えてきた岡山188 cm 望遠鏡のクーデ焦点では、開所当時に購入されたHilger-Watts社製クーデ分光器（以後「Hilger-Watts製分光器」または「クーデ分光器」と呼ぶ）が活躍してきた。このクーデ分光器は写真乾板を検出器としたオーソドックスな回折格子分光器であり、比波長分解能（ $\lambda/\Delta\lambda$ 、以後単に「分解能」とする）50,000という高分散能まで実現可能で、その素性の良さ、使い勝手の良さから、長年にわたり使い込まれてきた^{*}。このクーデ分光器の利用の歴史は、まさにそれま

^{*}岡山天体物理観測所40周年記念誌 (<http://www.oao.nao.ac.jp/pub/commemoration40/com40pdf/index.htm>) を参照されたい。

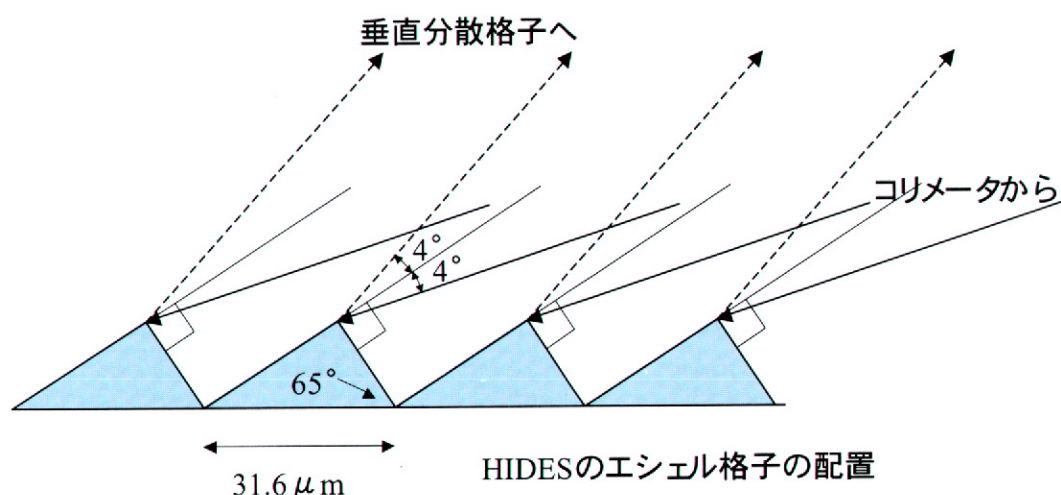


図1：エシェル格子の模式的な断面図と光の入射経路

での日本の光学天文学における中、高分散分光学の歴史といっても過言ではない。しかし、1980年代からの急激な CCD（電荷結合素子）時代の到来とともに、クーデ分光器にもとうとう限界がやってきた。大きな面積が簡単に得られ比較的粒子も細かい乾板に合わせて作られていたクーデ分光器には、まだ発達途上でピクセル数が少なく、しかもピクセルサイズも大きい初期の CCD は、効率良く観測を進めるには小さすぎて、なおかつ粗すぎた。写真乾板から CCD への移行は感度の大幅な上昇と引き換えに、一度に撮れる波長域を著しく狭くし、しかも到達できる分解能まで下げてしまったのである。

1980年代後半に日本国内で高分散分光観測が一時的に不可能となってしまった状況に至り、研究者の間で何とかしなければという機運が徐々に高まって行った。そして田中 済氏が幾つかの場合について進めた概念設計を叩き台に、岡山ユーザズミーティングや各種研究会の場で検討が重ねられ、クーデ焦点に大きな改造を加えないまま新しいエシェル分光器を作り込む案へと収束して行った。それが結局は先に触れた岡山会議の観測装置整備計画へと結実したと言える。作るべき観測装置の案はまとまった。しかしいつも最後に行き当たる問題が一

つ残った。いったい誰が実際に作るのか？ すばる時代にあって岡山に赴き装置開発に取り組む者（物好き）がいるのか？ そこに手を挙げたうちの一人が筆者であった。たとえ山の枯れ木であっても、手を挙げる者が出たことで計画に説得力が加わり、翌年の 1997 年春、国立天文台内で HIDES 建設に関わる主要部分の経費配分がなされることとなった。こうして HIDES の建設は始まった。

2. 高分散エシェル分光器 HIDES

「HIDES」は **H**igh **D**ispersion **E**chelle **S**pectrograph（高分散エシェル分光器）の頭文字をつなげて作った名前である。可視域（ここではおおよそ 3600 ~ 9000 Å の波長域を指す）を高分解能で分光観測するための装置である。HIDES の仕様などについては <http://www.oao.nao.ac.jp/support/instruments/hides/> を参照されたい。HIDES の最大の特徴はその名の通り、望遠鏡で集められた光を波長に応じて少しずつ違う方向へ振り分けるための分散素子に、エシェル格子と呼ばれるやや特殊な、断面が階段状をした刻みの粗い溝を持つ回折格子を利用している点にある（図1）。エシェル格子は、たとえば、神社の長い石の階段をピカピカに光らせて、

それをそのまま一段の高さがアルミホイルの厚み ($\sim 15 \mu\text{m}$) になるくらいまでぎゅっと縮小したようなものである。エシエル格子を用いると、広い波長範囲に渡ってブレイズ波長 (回折効率の高い波長) が存在するため、広い波長域を一度に高い効率で観測できる。また、波長に応じた光の分かれ方 (分散度) が大きく、分光器の入り口スリットを広く開けても高分解能が達成できる。このようにエシエル分光器はいいことづくめののだが、2次元的に大きな検出器 (高価) が必要で、データ処理にも通常の回折格子分光器とは違った特別な処理 (複雑) が必要となり、実用のためにはそれなりの道具立てを用意しなければならない。

エシエル分光器自体は決して特段に新しい概念の装置ではない。実際に天体用の観測装置に利用された歴史は長く、HIDES 以前に幾つものエシエル分光器が存在していた。我が国でも、HIDES から遡ること 30 年以上前、早くも 1963 年には大沢清輝氏により世界的に見ても早い時期にエシエル分光器が立案され、日本光学工業 (株) (現 (株) ニコン) の設計・製作によりクーデ焦点に設置された (岡山観測所にはもう一つ、太陽クーデ望遠鏡用の巨大なエシエル分光器がある)。しかし、一般にエシエル分光器がその威力をフルに発揮することができるようになるのは、得られたスペクトルを効率良く処理、解析することのできる測定器 (または検出器) と計算機、ソフトウェアのセットが十分に発展してからのことである。最近になりエシエル分光器が夜間の天体観測で世界の潮流となったのは、それら技術の発達による感度の上昇ならびにデータ処理の簡易化・高速化が実現されたことが大きな要因と考えられる。また、エシエル分光器では光学部品が必然的に大きく、実際の製造や各種の処理が難しいこと (従って高価なこと) も普及に時間がかかった要因と考えられる。今や高分散エシエル分光器は岡山 188 cm 鏡のような中型望遠鏡から、すばる望遠鏡、ESO (ヨーロッパ南天天文台) VLT (巨大望遠鏡)、ケック望遠鏡

のような大望遠鏡に至るまで、世界中の望遠鏡に装備され、日々観測に使われている。このようにエシエル分光器は、原理的に可能で概念的に新しくはないが、現実の問題としては困難が多く、実用的になるまでには関連技術の進展を待たねばならないものの一つであった。

2.1. 設計上の特徴

既に述べたように HIDES の最大の特徴は主分散素子に階段状の断面を持つエシエル格子を用いることである。そこから生じる利点、つまり、同時に広い波長域を高い効率と分解能で観測可能な特徴を最大限生かすため、HIDES はさらに以下の設計上の特徴を備えている。

まず、「高分解能で広波長域」を実現するために、大型 CCD の採用を設計の前提とした。広い波長域を細かくサンプリングするには、たくさんの画素が必要になるという必然的な要求である。そのような CCD は概念設計の段階ではまだ世の中に出回っていなかったが、そこは地上観測装置のメリットが十分に生かされた。つまり、地上観測装置なら、計画立案の段階では未熟な要素技術であっても、実際の製作時さらには稼動後までの発達を見越した設計が可能である。HIDES では 2000×4000 画素 (800 万画素) のクラス的大型 CCD (以後 $2K \times 4K$ CCD と呼ぶ) を想定し、それを用いた世界で最初の分光器となることを目指した (残念ながら HIDES よりも 1 年ほど先に ESO の FEROS²⁾ と名づけられた分光器が $2K \times 4K$ CCD を利用したエシエル分光器として世界で最初に稼動した)。また、最終的には CCD を 2 個並べて使うところまで想定している。HIDES の具体的製作に入った頃はちょうど世界的に見て高性能な $2K \times 4K$ CCD が入手可能となり始めた時期であった。当時 $2K \times 4K$ の大型 CCD は 4 つの供給元がありそれぞれに長短があった。ひとしきり悩んだ筆者は、結局、CCD 面の平面性、取り扱いの容易さ、予算との兼ね合いなどから、僅かな欠陥ピクセル

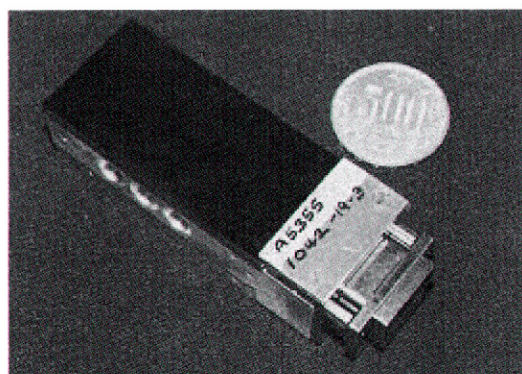


図2：EEV42-80 2K × 4K CCD 素子。隣に置いてあるのは大きさの比較のための 500 円硬貨。

のため価格の抑えられた英国の EEV 社（現 E2V 技術社）の CCD に決めた（図2）。この決定には、すばる望遠鏡の高分散分光器 HDS（以後「すばる HDS」）³⁾ のプロジェクトリーダー野口邦男氏から時折頂いた CCD に関する情報が大変参考になった。当時すばる望遠鏡の観測装置用に、試験用も含め多数の 2K × 4K CCD が国立天文台で用意されつつあった。HIDES の CCD を決める時、すばる望遠鏡の装置で既に利用が決まっていたのは米国 SITe 社と MIT-LL（マサチューセッツ工科大学リンカーン

研究所）のものだった。EEV の採用を決めていた装置はまだ無く、仲間がいない点で不安が残ったが、一方で、もしすばる望遠鏡用の高品質な EEV の CCD が最後まで残れば、HIDES 用に拝借できるかもしれないという微かな期待もあった。結局 EEV の CCD はその後すぐ HDS に採用され、HIDES でお借りするという皮算用はご破算になった。

次に、「高い効率」と大型 CCD を両立させるため、スペクトル像を CCD 上に結ばせるカメラ光学系（以後、単に「カメラ」と呼ぶ）として、光路中に CCD を置く必要のないレンズ系を選択した。広い画角と小さい口径比が必要な分光器カメラとしてよく使われる、カタディオプトリック系のカメラ（たとえばシュミットカメラ）では、広い波長カヴァレッジと高波長分解能を同時に実現するため CCD を大型化すると、光束に影を作らないようにするための設計上の困難が増す。特に種々の制約から単色の平行光束の径が 100 mm しかない HIDES の場合には、60 mm 近い大きさを持つ CCD は深刻な問題となる。HIDES のレンズ系カメラの選択は、光学部品の配置を単純にし、CCD とそれを入れる真空容器の大きさと形状を比較的自由に

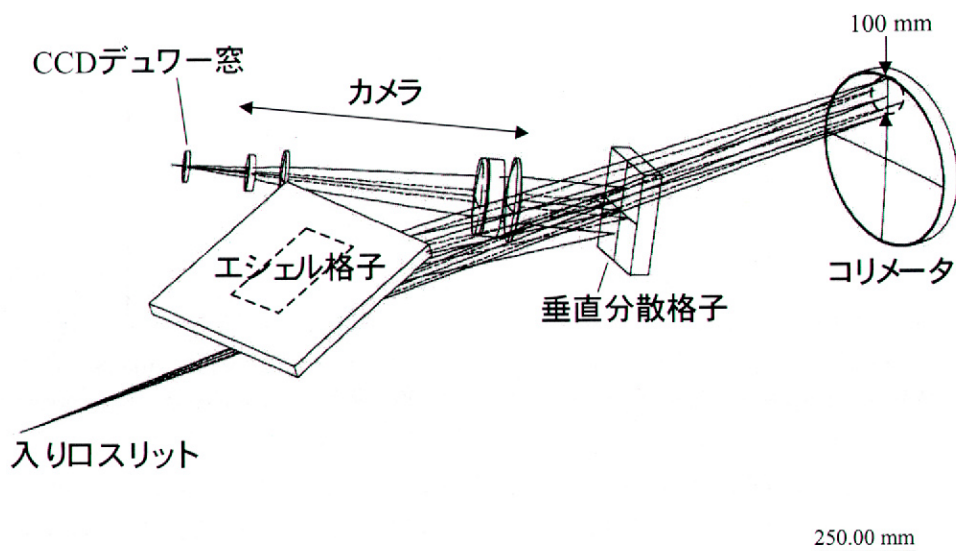


図3：HIDES の光路図。エシェル格子とコリメータ鏡は実際より大きく描かれている

設定することを可能とした(図3)。実際のカメ
 ラは、分解能 10 万以上を達成する高分散分光器の
 カメラとしては、ESO VLT の UVES (紫外・可視
 エシェル分光器)⁴⁾よりも早期の稼動を達成し、我
 が国はもとより世界でも最初に稼動した大型レン
 ズ系カメラとなった。このカメラ光学系には次のよ
 うな厳しい条件が課されていた。

- ・大型 CCD にあわせた平坦な焦点像面
- ・観測波長域内で波長に依存しない焦点像面位置
- ・直径 60 mm の像面内で 15 μ m 以下の結像性能
 (ただし波長により像高の異なる倍率の色収差
 を許す)

一般にカメラの結像性能が高いほど CCD 上で
 より鮮明なスペクトル像が得られ、結果として波
 長方向の細かい模様が見え、高い比波長分解能が
 得られる。この結像性能は、恒星分光によく用い
 られる分解能 50,000 程度の観測のためにはかなり
 のオーバースペックであった。しかし、筆者の頭の中
 にはそれまでの経験から、分解能 100,000 を確実に
 達成しなければ低温度星の質量放出現象の研究
 において新しい展開は無いとの強い思いがあった。
 そのため、十分に高い結像性能の実現を追求した。
 このような光学系の実現は技術的に自明ではなく、
 我々に経験が無いという点では冒険であった。し
 かし幸運に助けられ、リスクを負って製作を引き
 受けてくれる光学会社が見つかり、実現に漕ぎ着
 けることができた。そして、この結像性能への執着
 は後に星周域起源の C_2 分子ガス吸収線群の発見
 (この号の記事を参照されたい)へとつながった。
 今やレンズ系カメラは ESO VLT の UVES や Hobby-
 Eberly Telescope の HRS⁵⁾など、大望遠鏡の高分散
 分光器に積極的に使われるようになっており、高
 分散分光器の標準的な装備の一つとなりつつある。
 我々はその潮流の前の方にいた。

2.2. 実際の建設

HIDES 建設のため体を使う最初の仕事は、観測
 所の人たちと協力しながら、クーデ室に新しい観

測装置を作り込む場所を確保することであった。
 岡山天体物理観測所には、その 40 年近くにわたる
 光学天文学の遺産が、そのまま残されていた。ま
 ず、活躍する日を見ぬままに佇んでいる旧エシェ
 ル分光器を、多少のためらいを感じつつも解体・
 撤去し、HIDES を組み込むスペースを確保した。
 旧エシェル分光器のために導入された、約 30° 傾
 いた厚さ 3 cm ほどある鉄板が HIDES の定盤であ
 る。Hilger-Watts 製分光器に後から取り付けられ
 た様々な実験器具類もすべて撤去した。また、組立
 調整や実験のスペース確保のため、クーデ室隣の
 計算機室(通称 FACOM 部屋)の古い計算機類も
 一掃した。こんなことをしていいのだろうかという
 気持ちを抑えながらの作業の連続であった。

次に進めねばならなかったのは、クーデ室内の
 各部の寸法測定であった。寒いクーデ室の中で
 Hilger-Watts 製分光器の下に潜り、約 30° 傾いた
 鉄板の上で窮屈な姿勢で測定を進めるのはたい
 へん難儀であった。何を測定するにも測定器の取
 り付け方から工夫する必要があった。何と言っ
 ても約 30° 傾いているので、測定者そのものが滑り
 落ちて行く。クーデ分光器があるためうまく手の
 届かない場所もあった。このような訳で、自分の
 採寸が本当に正しいか常に不安で、安心を得よう
 と何度も測定を繰り返すことになった。そうして



図4: HIDES 定盤上に書き込まれた罫書き線。細い正
 確な線の上に、分かりやすいように太い線が重ね
 書きしてある。指定位置に穴を開けタップを立て
 ているところ。

独自の調整治具を作成し、約 30° 傾いた鉄板の上に光学素子の来るべき位置を慎重に罫書いて行った(図4)。この作業の過程で Hilger-Watts 製分光器の載っているコンクリートピアが僅かだが邪魔になることが分かり、乗本祐慈さんにピアの角を5 cm ほど削ってもらった。このような作業はなかなか非力な自分にはできるものではない。

2.3. いくつかの幸運

HIDES では、1997 年に計画が実際に動き出してから共同利用に入るまでの建設期間をかなり短くすることができた。それを可能にしたのは、もちろん関係者の努力が第一であったが、いくつかの幸運にも助けられたと筆者は考えている。それらがもしなければ、早期に観測を始めることは難しかったであろう。そして、その後の HIDES の運命も大きく異なったに違いない。以下それらを幾つか紹介してみる。

2.3.1. 垂直分散回折格子

エシエル格子では、異なる回折次数、異なる波長を持つ光が同時に回折条件を満たし同じ方向に進む。この次数の重なりを解くために、エシエル格子の分散方向とは垂直な方向にも分散をかける素子が必要である。この垂直分散素子は分光器ごとに異なり、プリズムの場合もあれば平面回折格子のこともある。HIDES ではこの垂直分散素子に、観測効率とのトレードオフで取り扱いの容易さと価格の安さから一般的な平面回折格子を利用した(垂直分散回折格子)。それでも当初は一枚買うだけの予算しかなかったため、赤領域は一次回折光、青領域は二次回折光で観測する予定であった。その場合、どちらの波長域でもフィルターを入れ、赤領域なら二次の青い光を、青領域なら一次の赤い光をカットする必要がある。特に青領域で赤い一次光を遮るのは難しく、フィルターによる効率の低下も懸念された。ところが、ちょっとした手違いにより垂直分散回折格子が格安で購入できるこ

とになり、一気に青領域用と赤領域用の二枚を揃えることが可能となった。これでどちらの波長域も一次回折光で観測できる。これは幸運であった。二枚購入できることが分かり、回折格子のカタログを見直し、あれこれ悩んで二つを決めた。決め終わったところでハタと気がついたのだが、面白いことに、それはすばる HDS の垂直分散回折格子の選択と同じであった。

2.3.2. 人材の補強

HIDES の計画が動き出した時点で、CCD 検出器周りを取り仕切る人材が岡山観測所にはなかった。手つかずの CCD カメラ部に適当な人材がその先も見当たらなければ、筆者がスクラッチから始めるしかない状況であった。全体の統括やカメラ部の設計・製作を進めながら、並行して素人の筆者が CCD カメラを開発するとなると、HIDES のファーストライトまでには、さらに2、3年の時間が必要なことは間違いなかった。ところが、当時所長の前原英夫さんの粘り強い努力などもあり人が採れ、東大の木曾観測所で PtSi 素子を使った近赤外線カメラ KONIC を開発した柳澤顕史さんが1997年に岡山観測所にやってきた。かくして HIDES の困難はまた一つ解消された。その後の柳澤さんの活躍は多くの人の知るところである。これにより HIDES の CCD 検出器部は時宜を逸することなく前進して行った。

2.3.3. 機械制御系の蓄積

観測装置の制御系ならびにユーザーインターフェースを処理するソフトウェア群は、観測装置の必要不可欠な部品と考えられる。HIDES の計画が動き出した時点で、岡山観測所には既にその面での蓄積が存在していた。特に、すばる望遠鏡の微光天体撮像分光器 FOCAS に向け、清水康廣さんが駆動系制御用のワンチップマイコン制御ボードの開発を進め、吉田道利さんがそれに合わせたユーザーインターフェース部分を開発していた。HIDES の

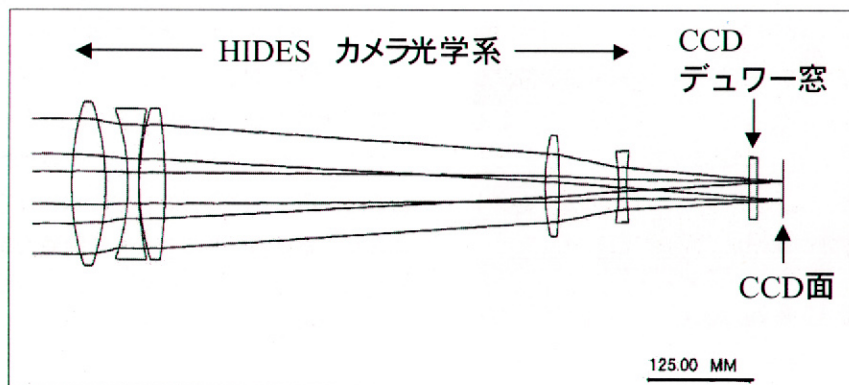


図5：カメラ光学系の断面図。5枚の球面レンズの組み合わせからなる。

制御系にはそれらの蓄積が生かされ、観測所で独自の開発が効率よく進んでいった。

2.4. 最大の難関：カメラ光学系製作

2.4.1. 設計の詰め

HIDESはそのすべての命運を大口径のレンズ系カメラに託していた。この大型カメラが単純な光学系配置を可能にし、さもなければ直面したであろう数々の困難な課題を消し去っている。しかし大口径の高精度レンズ系カメラの製作が実は困難な課題なのである。その困難をできるだけ小さくするため、さまざまな天文学的要請を取捨選択して、ギリギリまでカメラの仕様を詰めるのが筆者の課題であった。

カメラ製作のコストとリスクを下げるには口径を小さくすることが最も有効である。そのため、筆者はまず光学素子の配置を可能な範囲でギリギリまで近づけるように配慮した上で、手計算で第一レンズ上のフットプリント（光束の通る部分）を求めて適切な口径を探った。そして観測予定の波長域 $3600\text{--}9000\text{ \AA}$ の範囲で光束にケラレの出ない口径は 215 mm という結論に達した。この予備解析をもとに関連研究者とともに詳しい検討を進め、製作上の困難を十分に加味して最終的に有効径を

200 mm に決定した。これなら主に観測の行われるであろう $7000\text{ \AA}$ から短い波長域では、光束のケラレなしに全波長域のスペクトルを取得することができる。また、それより長い波長域であっても、スペクトルのごく一部でせいぜい 5% 程度の僅かなケラレが生じるだけで、実用上は十分に我慢できる範囲である。こうしてカメラの仕様が固まっていた。その後、実際に製作を引き受けてくれた光学会社「(株)ジェネシア」により要求仕様を満たすカメラが、球面だけで構成された5枚のレンズ系として見事に設計された(図5)。さらに現実の観測を考慮した入念な最終調整が進められ、いよいよ実物の製作へと進んだ。思えばこのジェネシア光学会社に出会えたことも、大きな幸運の一つと勘定することができる。特殊ガラス硝材の手配、レンズの荒削り、設計値への仕上げ研磨と、カメラ製作は順調に進んでいった。厳しい結像性能を満たすHIDESのカメラであるが、実のところ、レンズ研磨の腕利きの職人さんからみると、要求された研磨精度そのものは特に挑戦的な値というわけでもなかったらしい。又聞きしたところによると職人さんからは「ふーん、そんなんでもいいの」という類の反応が返ってきたとのこと。その職人さんはもっと凄い精度の面を日々磨いているのに違いない。



図6：筆者の机の上に飾られている、割れた第三レンズの片割れ。

2.4.2. 割れた第三レンズ

カメラ設計の詰めが終わり実際の製作段階に入ると、こちらとしては特になすべきこともなく、ジェネシアとは時々電話で進捗状況を確認する程度に連絡を取り合っていた。そんなある日のこと、普段とは違う沈んだ声で重大な事実が告げられた。「実は第三レンズがコートの際で割れました、真っ二つに」。それより径の大きい第一、第二レンズのコートは既に無事終了していたので、誰にとっても驚きだった。いかに予備のガラス材が用意してあるとはいえ、向こうもこちらも心中穏やかではない。向こうでは原因を明らかにするため必死の検討が続いたらしい。何せ入手に時間のかかるガラスを使っている。しかし、ここでいくらこちらが騒いでも何も始まらない。原因を究明し対処策を建策するだけの力がこちらにはない。現場の人たちの最善の努力を見守るだけである。こちらがそう納得してしまえば、あとはもう気長に待つしかない。そこで筆者は先方をお願いして、二つに割れた第三レンズの片方を、割れた面をきれいに擦り上げてもらった上で、記念の置物として頂くことにした。それは今も筆者の机の上に飾られ、大切な思い出となっている(図6)。その後この危機は無事解決され、第三レンズの製作とコートは問題なく終了した。そして大口径レンズの製作に関するノウハウがまた一つ蓄積され、将来への貴重な一歩となった。

2.4.3. すばらしい反射防止コーティングの第四、五レンズ

観測装置の観測性能を左右する重要な要素の一つにゴースト(偽信号)と散乱光がある。本信号のそばに怪しげな偽の信号が写っていると、思いもよらぬ「発見」をしてしまう危険がある。また、内面反射した光が中途半端なピンぼけ像となって、取り除くこともできず、本信号をかき消してしまうこともある。HIDESのカメラは5枚のレンズからなり10面の境界面がある。事前の注意を怠れば、困った結果にもなりかねない。そこでジェネシアとゴースト解析を進め、第四レンズと第五レンズの計4面に多層膜反射防止コートを実施することで満足の行く結果が得られることが確認された。400 nmから800 nmの範囲で常に反射率1%以下という厳しい要求が設定され、実際それは実現された。聞くところによると、満足できるコーティングを達成するため、蒸着装置のパラメータ出しでレンズと同じ材質のガラスのテストピース100片を使い果たしたということである。何の変哲もなく見えるHIDESの第四、第五レンズには、実はそのように大変な努力が集積されている。その甲斐もあって、レンズ境界面における内面反射によるゴースト像や散乱光は極めて低いレベルに仕上がっている。このような紆余曲折を経てHIDESの高性能カメラは仕上がった。

2.5. 手作り分光器 HIDES

ジェネシアによりカメラ光学系の製作が着々と進んで行く間、観測所では所員たちが協力して機械駆動系、制御系、CCDカメラなどの設計と製作に当たり、ほとんど手作りの分光器が組み上がって行った。観測所の工場で作れる小物はほとんど所員の手になるものである。観測所では加工できない大物の部品は、図面を近くの機械製作所に持ち込んで製作をお願いした。筆者もパソコンCADソフトに向かい、カメラの保持機構や支持台などの大物の図面を引いて持って行ったものである。

また、入り口スリットや CCD の設置角など重要な数値については筆者が手計算で確認し、それを小矢野久さんの担当する機械部分の設計などに反映させてもらった。勿論ソフトウェアに関しても、すべてが関係者の手作りであった。これは岡山観測所の望遠鏡ならびに観測装置群の大きな特徴であって、望遠鏡、天体導入・ガイド系、装置駆動系、その他すべての制御ソフトが観測所員と関連研究者の手で開発されているのである。このほか、所員の間で HIDES 全体の理解を進め、作業分担を確認し、進捗状況を知らせ合うため、所内で HIDES 検討会なるものを毎週開くようにした。岡山観測所のような小さな所帯では、誰もがかなり小なり関わっていることがとても大切であった。

3. HIDES の稼動

HIDES は 1999 年 4 月初頭、雲間を突いて天体からの光を初めて記録した。天体は K 型巨星のアークトゥールス。その時のスリット幅 $100\ \mu\text{m}$ は分解能 10 万以上を意味する。得られたスペクトル画像をトレースしてみると、約 30 年前ウィルソン山天文台の 100 インチ望遠鏡で作られたスペクトルアトラス⁶⁾とまったく同じものが得られていることが分かった。少なくともウィルソン山天文台のクーデ分光器のレベルに到達していることが実感された。勿論、天体の光を入れる以前に波長校正用の Th-Ar (トリウム-アルゴン) ランプの輝線スペクトルの写り具合から、分解能 10 万が達成されていることは既に明らかであった。しかし、実際の天体スペクトルにおいて天文学先進国で出版さ

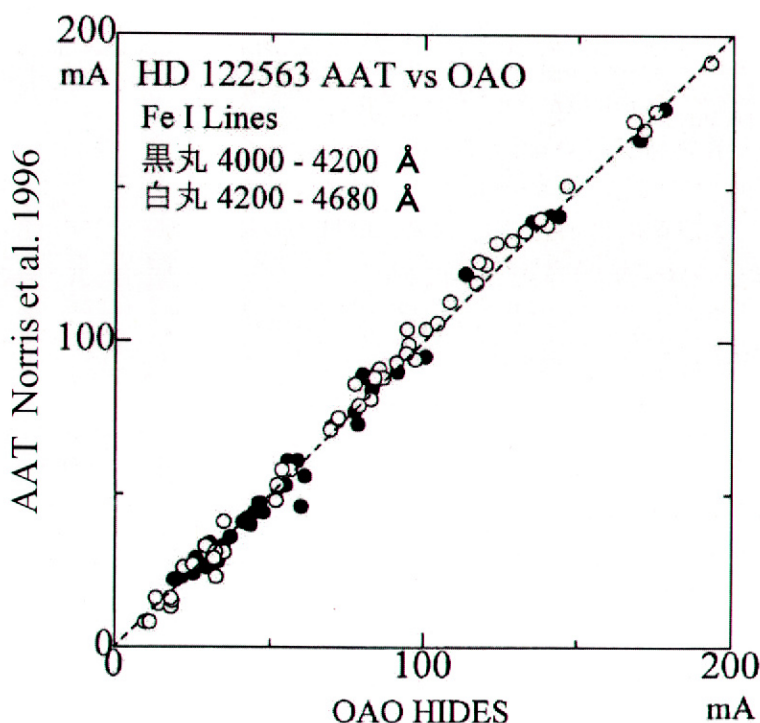


図 7: HIDES と Anglo-Australian-Telescope の分光器で測定された吸収線等価幅の比較。

れたスペクトルアトラスと同じものが得られたことを目の当たりにすると、やはり大いに元気づけられるのであった。HIDES は現在、スリット幅を $100\ \mu\text{m}$ ($0.39''$) に設定した時に分解能 11 万を達成している。さらに小さなピクセルサイズを持つ CCD カメラを使ってテストしたところ、スリット幅 $50\ \mu\text{m}$ ($0.19''$) に対して光軸上で分解能 16 万を達成していることを確認した。これはコリメータ鏡から CCD まで、すべての分光器光学系を含めた総合スポットサイズが実際に $15\ \mu\text{m}$ 以下であることを示している。HIDES のカメラ光学系が設計通りの高い能力を有していることが確認された。

とにもかくにも天体スペクトルを取得することができた。しかし定常的に運用していくには多くの問題点が見つかった。それらを一つ一つ解決しながらどんどん改良を加え、5 月下旬の本格的な試験観測へと突入した。さっそく高分散分光観測の経験豊かな定金晃三氏や平田龍幸氏といった古強者

たち（ゴメンナサイ）により、よく研究された天体のスペクトルが調べられ、吸収線強度（等価幅）の文献値⁷⁾との比較が進められた。その結果、世界の一線で活躍している分光器で得られた値とよく一致していることが明らかになった（図7）。少なくとも等価幅のレベルでは、研究上実用レベルに達していることが確認されたのである。

見つけた問題点の中ですぐに解決できず、その後の長きにわたり頭を悩ませ続けたのは、クーデ室内の温度安定性であった。HIDES ではすべての光学素子を一つの安定した定盤の上に載せることができなかったため、予想されたことではあるが、CCD 上のスペクトル像位置がクーデ室の温度変化に対して敏感に反応した。これは精密な視線速度測定などにおいて深刻な問題となる。岡田隆史さんにクーデ室の壁を改造してもらい、いろいろと試行錯誤を重ねて、ようやく1晩を通して100分の3℃以内の温度変動、CCD上で0.1ピクセル（視線速度にして150 m/s）以下のスペクトル像移動という安定性の実現まで漕ぎ着けた。これによりデータの信頼性が一段高まるとともに、観測中の安心感が飛躍的に増大した。現在進められているほとんどの研究課題にとっては、実用上何ら問題ない水準に到達している。

ところで、実際に観測を始めてすぐに気がついたのであるが、今までどこからともなく聞かされていたほどには188 cm望遠鏡のシーイングは悪くはなかった。半値全幅で言えば、たいていは1.5"前後である。8月は特に良く1"前後の日が続く。意外と思われるかもしれないが12月でも1"を切る日が何日もあり、季節を問わず1週間観測していれば、1回（残念だが丸一日とは言えない）はサブアーセカンドの時に会うというのが筆者の得た印象である。ちなみにこれまでに会った最高は2001年4月上旬の0.57"であるが、この状態はほんの30分くらいしか続かなかった。

引き続き観測所員と関連研究者の努力は続けられ、HIDESの周辺はハード、ソフトともに徐々に



図8：HIDESの入り口スリット前に取り付けられたコードセル（手前）とイメージローテータ（奥）

整備されて行き、2000年前期からどうにか共同利用観測の開始に漕ぎ着けた。2000年後期からはHIDESを用いたプロジェクト観測（竹田洋一氏の記事参照）も始まった。共同利用に公開された分解能10万を達成できる可視天体分光器HIDES. 2K×4K CCDを一つだけ載せた今でも1100 Åの波長域を一度に撮ることができる。これまでのクーデ分光器に比べれば分解能、帯域幅、感度で圧倒的に優れた観測性能を持ち合わせている。国内で分解能10万のスペクトルをいろいろな天体に向けて撮れるようになったことは大きな変革であった。海外の同様の分光器と比べても遜色なく、より優れたところのあることも、実際の観測を通して徐々に明らかになって行った。

このように基本的に高い能力を持った HIDES であるが、その能力をフルに利用するため、関連研究者との協力によりさらに幾つかの付加装置を装備した(図8)。その筆頭は、神戸栄治氏らの努力により実現された専用ヨードセルの導入である⁸⁾。ヨードセルを用いた恒星の視線速度精密測定については、本号の竹田洋一氏の記事、4月号の佐藤文衛君の記事などに譲るが、この付加装置により HIDES の天文学的対象が格段に広がったことは間違いない。一方、空間的に広がった天体を観測対象に組み込むため、関連研究者と協力してイメージローテータの製作にも入った。イメージローテータについては、以前から東北大学・田村眞一氏の惑星状星雲研究グループが強い興味を示しており、実際に院生の磯貝瑞希君を巻き込んで概念設計が進められることになった。それをもとに面白いものの好きの渡辺悦二さんがせっせと図面を引いてくださり、イメージローテータは比較的短時間でクーデ焦点に組み上がった。それを動かすための指令値を計算するプログラムは、当時研究員だった田実晃人さんが作成した。そのプログラムをどんな場合にも正しく追尾が行われるようオートガイドに組み込む面倒な作業を進めたのは増田盛治さんであった。ただ、イメージローテータを組み込むには既存のクーデ室は狭すぎたので、またしてもクーデ室の工事が必要であった。そして現在、大学院生の大塚雅昭君が、そのイメージローテータを使って惑星状星雲の2次元的な高分解能分光観測を進め、興味深い結果を出しつつある。

さて、HIDES の作りこみが一段落つき試験観測も進んでくると、いくらか心の余裕が筆者に出て来た。そこで HIDES の観測環境改善の一環として、予算の配慮を頂いて 188 cm 望遠鏡の第三鏡(第一平面鏡)の更新を進めた。口径 38 cm の第三鏡はセルも含めて 35 kg もあったが、驚いたことに望遠鏡のクーデ焦点とカセグレン焦点を切り替えるたびに毎回人力で交換していた。この鏡は単に重いだけでなく持ち運びにくく、しかも取り付けのた

め不自然な姿勢を取らなければならなかった。そのため腰を痛めやすい危険な作業で、非力な筆者ばかりでなく屈強な所員たちにさえも、あまり気乗りのしない作業であった。実際、筆者はこの作業で腰を痛め、全快まで2年の月日を要した。腰を痛めたその瞬間に筆者の中で、何でこれが今まで放置されてきたのかという驚きがそのまま憤りに変わり、渡辺悦二さんと協力してセルと鏡の軽量化を進めることとなった。現在、すぐに利用可能な軽量化の技術はいくつか存在する。米国 HEXTEK 社の軽量化鏡が良さそうであったが、残念ながら予算的に手が出なかった。結局、価格が安く扱いも容易な信越石英(株)の合成石英ガラス発泡体鏡を選択した。結果、格安で $(1/20)\lambda$ の精度の平面鏡を手に入れることができた。鏡が軽くなるのでセルも合わせて鉄からアルミへ移行した。アルミにした分熱膨張係数が大きくなることは分かっていたが、想定される利用状況では大きな問題は生じないと判断した。結果として第三鏡の交換は誰もが楽しく進められる作業へと変貌した。

4. 今後

今や HIDES は1階の静かな観測室から遠隔操作で、すべての観測を一人で快適に実行できるところまでたどり着いた。40年の長きにわたり重責を果たしてきた Hilger-Watts 製分光器にはどうもご苦労様と言いたい。HIDES の実現により、国内研究者はエシエル分光器と大型 CCD で高分解能分光観測を直接体験することが可能となった。その経験があれば、世界中のどのエシエル分光器でも観測やデータ処理で困ることは無い。すばる時代の岡山については、その将来に関し厳しい議論がなされた時期もあったが、現状を鑑みるに、今しばらくは 188 cm 望遠鏡と HIDES が研究ならびに教育の場として使われていく必要があるように見受けられる。その HIDES は、今のところは順調にデータを生み出しているが、今のままではいずれ近いうちに活力は低下して行くだろう。今後も活力を維持し、研

究と教育の場でありつづけるためには、ファイバーフィードやイメージスライサなどの実現によりさらに感度を上げ、もう少し暗い天体まで観測できるようにすることが必要であろう。岡山観測所としてはさらに4~5 m口径相当の分光観測用望遠鏡とそれにふさわしい分光器の実現なども強く望まれるところである。その際には、HIDES では取り組めなかった瞳移行 (white pupil) 型の光学配置を採用したモダンな分光器としたいものである。

5. おわりに

私事で恐縮だが、HIDES の建設を通して筆者は分光器について一から学ぶことができ、たいへんよい勉強ができたと思っている。その過程でこれからの観測装置の製作には、光学部品に関する自前の技術を持ち合わせる事が非常に重要であることを痛感した。特に、大口径の光学面に反射防止コーティングや高反射率面を実現する技術は、今後ますます重要になってくるとされる。一方で筆者はすばる HDS の建設に加わることで、プロジェクトというものの進め方を、門前の小僧よろしく多少なりとも学ぶ機会を得た。これらの経験や思いをもとに、より広い視野で物事を捉え、天文学の発展に微力ながら努力していきたいと考えている。

HIDES 建設開始から6年、流れ過ぎようとしている歳月は筆者の髪にまじる白いものの増加に現れてきた。今振り返って見ると、HIDES の建設は単なる分光器作りに限られたものではなく、観測所員を挙げてのいわば新しい観測所創り (とでもいうべきもの) であったように思う (まだ過去形にするのは早すぎるのだが)。10年以上前にすばる時代の岡山を見据えた将来計画を立て、それを実際に手配した当時の人々の決断は、今このような結果となって現れた。果たして当時の人々の期待に応えたものになっているのだろうか?

謝 辞

CCD カメラの開発に当たっては、Messia, Mfront

開発グループの方々にお世話になりました。HIDES 建設に関わる予算執行上の手続きなどでは事務官の方々に大変お世話になりました。お蔭様でこうして HIDES は順調にデータを生み出していることをこの場を借りてご報告いたします。最後に、この記事の執筆を勧めてくださった天文月報編集部の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Okumura S., Nishihara E., Watanabe E., Mori A., Kataza H., Yamashita Y., 2000, PASJ 52, 931
- 2) Kaufer A., Stahl O., Tubbesing S., Norregaard P., Avila G., Francois P., Pasquini L., Pizzella A., 2000, SPIE 4008, p.459
- 3) Noguchi K., Aoki W., Kawanomoto S., Ando H., Honda S., Izumiura H., Kambe E., Okita K., Sadakane K., Sato B., Tajitsu A., Takada-Hidai M., Tanaka W., Watanabe E., Yoshida M., 2002, PASJ 54, 855
- 4) Dekker H., D'Odorico S., Kaufer A., Delabre B., Kotzlowski H., 2000, SPIE 4008, p.534
- 5) Tull R. G., 1998, SPIE 3355, p.387
- 6) Griffin R. F., 1968, A photometric atlas of the spectrum of Arcturus, Cambridge Philosophical Society, Bene't Street, Cambridge, England
- 7) Norris J. E., Ryan S. G., Beers T. C., 1996, ApJS 107, 391
- 8) Kambe E., Sato B., Takeda Y., Ando H., Noguchi K., Aoki W., Izumiura H., Wada S., Masuda S., Okada N., Shimizu Y., Watanabe E., Yoshida M., Honda S., Kawanomoto S., 2002, PASJ 54, 865

Okayama High Dispersion Echelle Spectrograph: HIDES

Hideyuki IZUMIURA

Okayama Astrophysical Observatory, NAOJ,
Kamogata, Okayama 719-0232

Abstract: This article describes a construction story of HIDES, a new high dispersion echelle spectrograph for the coude focus of the 188cm reflector at Okayama Astrophysical Observatory, NAOJ. HIDES provides the maximum resolving power of 110,000 and the instantaneous wavelength coverage of 1100 Å using a single EEV42-80 CCD. It is open for common-use observations at Okayama.