

エシエルグレーティングを用いた高分散分光器

勝 沼 淳

High Dispersion Spectrographs Employing Echelle-Gratings

Atsushi KATSUNUMA

High Dispersion Spectrograph (HDS) is the high-dispersion spectrograph installed on the Nasmyth-platform of Subaru telescope, which has a capability for the high-dispersive spectroscopic observation through wide wavelength range, employing echelle-grating and crossdisperser-grating. In this article, after proslution, the short-history of the development of HDS is reviewed. Next, some explanations about the optical system of HDS are described, briefly. Lastly, recent important results obtained from the observations by HDS are introduced.

Key words: echelle-grating, crossdisperser, spectrograph, HDS, Subaru

すばる望遠鏡光学ナスミス焦点には高分散分光器 (high dispersion spectrograph; HDS) が常設されていて、2000年のファーストライト以来、紫外から近赤外域までの高分散分光観測を受け持っている。8~10メートル級望遠鏡に搭載されている各種高分散分光器については、HDSも含めて技術報告がなされ^{1,2)}、また近年は教科書でも解説されるようになった³⁻⁵⁾。

天体観測用高分散分光器には、波長分散素子としてエシエルグレーティングが用いられる。エシエルグレーティングは等間隔直線溝反射型平面グレーティングの一種で、入射角度、回折角度をともに大きく取ったときにブレイズが合い、高分散能を高い回折効率のもとで引き出せる。また、通常のものに比べて溝ピッチが粗く、きわめて高次の回折光を扱うので、広い波長範囲にわたって異なる回折次数光束が重なり合って射出される。これをクロスディスペルザーで分解すれば、一度に広帯域高分散能分光計測ができる。

1. 高分散分光器 (HDS) 開発小史

HDS 光学系は、スリット、コリメーター、エシエルグレーティング、クロスディスペルザー、カメラから構成されている。図1に光学系全体像を示す。HDSではエシエル

グレーティングの直後にクロスディスペルザーが配置されているが、間に投影光学系を配置し、エシエルグレーティング像をクロスディスペルザー上に形成してクロスディスペルザー面積やカメラサイズを節約する瞳移行 (white pupil) 型もある。1980年代後半ごろ国立天文台にて最初に検討されたのはこの形式で、短波長用 (青) と長波長用 (赤) の2系統をナスミス台上に併設し、それぞれカメラ交換で中分散と高分散の切り替えができるように構想された^{5,7,8)}。しかし、高分散モードでのスリット幅設定が0.22秒視野からすばる望遠鏡平均星像の0.43秒視野へと拡大されることになり、分光器設計も根本的に見直す必要が生じ、この案は破棄された。1990年代前半からは検討作業にニコンが加わり、鏡と屈折レンズを併用した新瞳移行型が検討された。この案では、エシエルグレーティング像をクロスディスペルザー上に縮小投影することによって、クロスディスペルザー以降の光学系の小型化が図られ、幅6m、奥行き5mに青赤2系統が収められていることに特徴があった。青用では波長300nmから扱うため光学ガラスが使えず、蛍石と石英ガラスでレンズ構成したが、色消しのため純水液体レンズを前提としたり、光路が複雑だったりなど、装置安定性への懸念要素が多かった。そのため、1994年後半になって、Keck望遠鏡高分散分光器 HIRES^{2,6)}

(株)ニコンコアテクノロジーセンター (〒140-8601 東京都品川区西大井1-6-3) E-mail: katsunuma.atsushi@nikon.co.jp

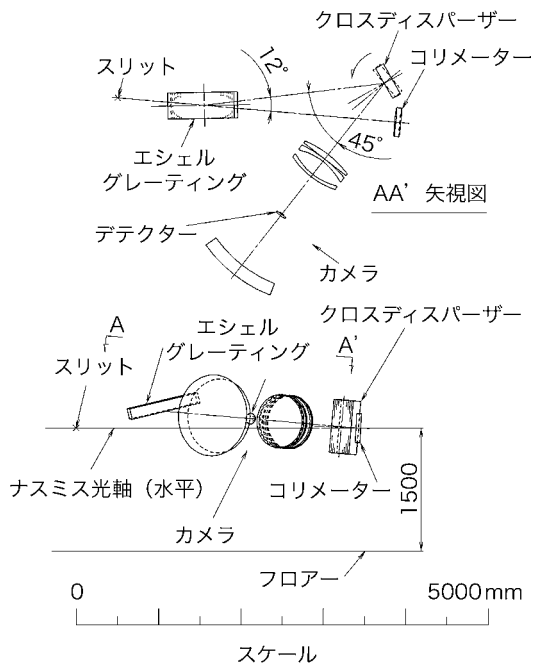


図1 高分散分光器 (HDS) 光学系.

で採用されたような非瞳移行型大型カタディオプトリックカメラ方式で設計をやり直すことになった。しかし、大型カタディオプトリックカメラ方式では、6 m 四方6トン以内というナスミス台の制限を守れそうにないことから、青赤2系列併置方式をあきらめ、1系統ですべての波長域をカバーすることになった。

2. HDS 光学系

スリットは最大長さ 30 mm (1分視野) でハルトマンプレートにより開口長を変更できる。幅も可変であるが、標準幅は 0.43 秒視野相当の 0.2 mm である。スリットで反射された星像を望遠鏡のスリットモニターで撮像することで、日周運動追尾に利用できる。

コリメーターは焦点距離 3397 mm, $F/12.5$ の光束を受ける軸外放物面鏡で、青領域 (波長 300~600 nm), 赤領域 (波長 400 nm 以上) 用の 2 枚の切り替え式となっている。ともに同一形状のアルミコート鏡だが、それぞれオーバーコートで青領域、赤領域に最適化させてある。

エシェールグレーティングとクロスディスペルザーグレーティングは入手できる最大のものでも面積が足りないので、同じマスター由来のものを 2 枚並べて固定し、1 枚の低膨張材上にレプリカしたモザイクグレーティング方式とした。2 枚のグレーティングのアラインメントはグレーティングメーカーにて干渉計を用いて行われた⁹⁾。3 軸まわり角度誤差でアラインメント精度を規定してあり、いずれも 1 秒の仕様に対して 0.1~0.5 秒の精度で仕上がって

る。なお、波動光学的限界分解能をねらうためには、3 軸まわり角度誤差 0.1 秒以下、溝ピッチ方向およびグレーティング面法線方向のずれ 20 nm 以下というさらに厳しい精度を要するが、このようなスーパーモザイクグレーティングはまだ実現化されていない。

エシェールグレーティングは、溝ピッチ 1/31.6 mm, ブレーズ角度 71.54 度, 850 mm×320 mm, クロスディスペルザーは青用が溝ピッチ 1/400 mm, ブレーズ角度 4.7 度, 赤用は溝ピッチ 1/250 mm, ブレーズ角度 5 度, ともに 650 mm×420 mm で、波長帯に応じて青赤を切り替える。すべてアルミ蒸着グレーティングである。スリット全長観測時にはクロスディスペルザーは使わずバンドパスフィルターで観測次数を切り出す。クロスディスペルザーを使用しないときには、クロスディスペルザーと同一形状の平面鏡に切り替える。透過型グレーティングクロスディスペルザーはケースバイケースであり得るが、プリズムやグリズムは屈折率が温度に応じて変化するので、高い安定性が求められる精密分光器への適用は慎重を要するだろう。

カメラは焦点距離が青赤モードで 771 mm, 後述の近赤外モードで 761 mm である。形は HIRES の Super Duper カメラと似ているが、全長を短く抑えるためにやむを得ず補正レンズを 1 枚追加して 3 枚構成とした。しかしその結果 Super Duper より優れた結像性能を得ることに成功した。カメラはレンズ面、鏡面すべて球面だが、波長 300~1100 nm で諸収差が良好に補正されている。例えば全視野角 6 度, 焦点距離 500 mm 程度, $F/1$ という仕様の独立カメラとして設計すれば、紫外から近赤外にわたって優れた結像性能をもたせることができる。

レンズ材料は紫外透過率を考慮してすべて石英ガラスとした。補正レンズの直径は ϕ 650 mm もあり、連続溶解の光学ガラスでは調達困難な大きさだが、幸い石英ガラスでは工業的に量産されているものから切り出すことができた。鏡は直径 ϕ 900 mm で低膨張材ハニカム構造の軽量化鏡を採用した。ディテクターデューワーはカメラ光学系内部に設置され、像平坦化レンズをデューワーの封止窓として兼用する。撮像素子は 1 画素 15 μ m 角 4096×4096 画素として設計された。波長 300~1100 nm 用として実際に使用された CCD は 13.5 μ m 角画素のもので、4096×2048 画素のものを 2 個モザイク配列している。波長 1000~2000 nm の近赤外域では近赤外用のものにデューワーごと入れ替える構想である。近赤外用デューワーには近赤外用に最適設計された像平坦化レンズが窓として使われる。なお、3 枚構成の補正レンズは像平坦化レンズによって発生するコマ収差の補正にも寄与している。CCD は S/N 比を向上させるために冷

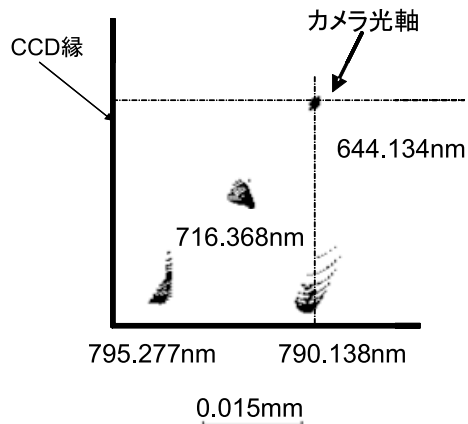


図2 HDS スポットダイアグラムの一例.

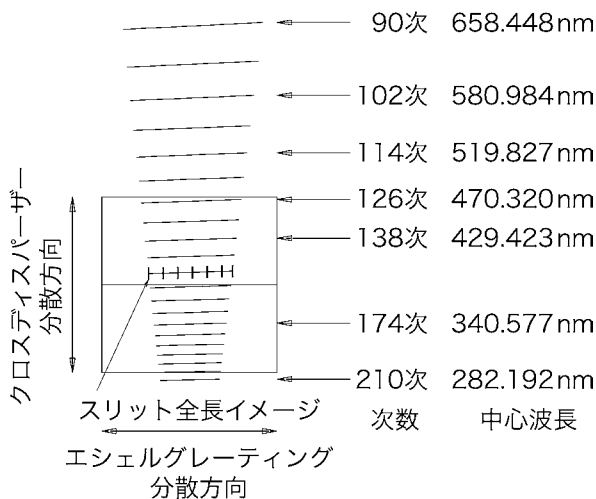


図3 青用クロスディスペルザーイメージフォーマットの例.

却される。HDS 全系の結像性能の一例をスポットダイアグラムで図2に示す。なお、図下部のスケールはスポットダイアグラムにのみ適用される。

$\lambda_F = \lambda/m$ で表される波長幅 λ_F をフリースペクトラルレンジという。クロスディスペルザーによって分解された各次数光の撮像範囲は、ブレイズ波長を中心としたフリースペクトラルレンジとなる。図3にHDSイメージフォーマットの一例を示す。次数が切り替わる付近の回折効率はピークの40%程度となる。

3. エシエルグレーティングの回折効率

エシエルグレーティングの溝ピッチは、扱う電磁波波長よりかなり大きいので比較的偏光特性が出にくい、全くないわけではない^{6,10}。メーカーのウェブサイトには偏光成分別回折効率実測値が掲載されている。回折効率の基本的性質については、スカラー理論のほうが見通しを得やすい。溝反射面エッジに欠損がない条件において、溝反射面と同一反射物質の鏡の反射率で正規化した近似的相対回折効率は、図4において、

$\alpha < \beta$ の場合、 $\cos\beta/\cos\alpha$ (溝構造でけられることによる低下)

$\alpha > \beta$ の場合、 $\cos\alpha/\cos\beta$ (隣接次数へのエネルギー分配による低下)

となり^{3,11}、いずれの場合も $\alpha = \beta$ のリトロから離れるほど回折効率が低下することに注意する。なお急峻なブレイズ角度ゆえ、新たなルーリングの際は予定ブレイズ角度から1~2度ずれる可能性がある。さらにブレイズ角度に場所むらが出ることにも注意したほうがよい。

4. 分光器光学パラメーター

設計に際して出発点となるパラメーターは、スリット幅 w_1 、スリット像幅 w_2 と波長分解能 R_λ である。HDSでは、 w_1 は望遠鏡星像サイズに合わせて設定され0.2mm、 w_2 は撮像素子3個分幅で45 μ m、そして R_λ (後述) は10万以上である。グレーティング入射光線と回折光線との間にはグレーティング方程式である式(1)が成り立ち、これから必要なパラメーターが導出される。

$$m\lambda = p\cos\gamma(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (1)$$

ただし、 m は回折次数、 λ は波長、 p は溝ピッチである。 α 、 β 、 γ は図5を参照のこと。逆線分散値やコリメーター焦点距離 f_1 、カメラの焦点距離 f_2 と w_1 、 w_2 、 R_λ との関係などについては、教科書^{4,5} に解説されているので、そちらを参照してほしい。以下、補足的なコメントをする。

高分散分光器の波長分解能は w_2 内に分布する波長半値幅 $\Delta\lambda$ を使って $R_\lambda = \lambda/\Delta\lambda$ (波動光学的最大波長分解能とは異なる) と定義される。 $\alpha = \beta = \theta_b$ (θ_b はエシエルグ

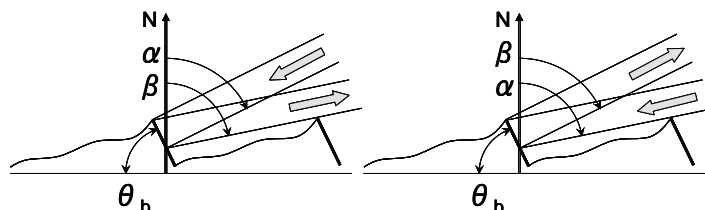


図4 エシエルグレーティング溝断面と入射回折光束.

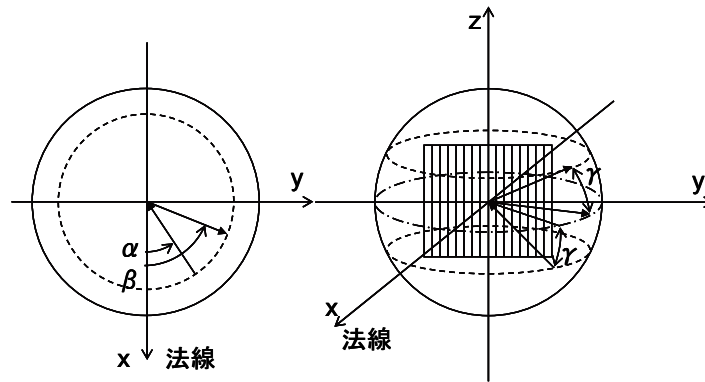
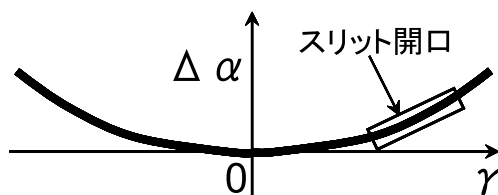


図5 α , β , γ の説明図. α , β は法線起点で反時計回り符号正.



縦軸が波長分散方向で負方向が短波長方向

図6 スリット傾き.

レーティングブレード角度)のオンブレード・リトロ条件では, $R_\lambda = (2f_1/w_1)\tan\theta_b = (2f_2/w_2)\tan\theta_b$ となるので, $\tan\theta_b$ (R で表す)が波長分解能の指標としてよく使われている. 所定の R_λ , w_1 に対して分光器をなるべく小さく(安く)するには, なるべく大きな R を選ぶことが有効である.

HDSでは図1に示すように, 入射光軸と回折光軸がエシェルグレーティング主断面と角度6度をなしているが, これが原因となってスリット像が波長分散方向に対して傾かないよう, スリットのほうを光軸回りに傾けている. 式(1)にて波長 λ , β を固定し, $\gamma=0$ のとき $\alpha=\alpha_0$, $\gamma\neq 0$ のとき $\alpha=\alpha_0+\Delta\alpha$ とすると, $\gamma\ll 1$ かつ $\Delta\alpha\ll 1$ を使って,

$$\Delta\alpha \cong m\lambda\gamma^2 / (2p\cos\alpha_0) \quad (2)$$

を得る. HDSの場合は図6に示すように放物線該当部分接線に長手方向を合わせてスリットを設置している. 式(2)を γ で微分すると,

$$d\Delta\alpha/d\gamma \cong m\lambda\gamma / (p\cos\alpha_0) \quad (3)$$

となる. 特に $\alpha=\beta=\theta_b$ の条件下では,

$$\alpha_0 = \sin^{-1}((1-\gamma^2)\sin\theta_b) \quad (4)$$

となるので, 式(4)を式(3)に代入して得られる傾き

(HDSでは水平から30.7度)でスリットを設置する.

5. HDSによる観測成果

文献12)および国立天文台からのすばる望遠鏡観測成果プレスリリース*1,*2を参考にしながら, HDSの最近の観測成果について紹介する.

高分散分光器による重要な観測対象として天体の元素分析がある. ビッグバン直後の宇宙に存在した元素は水素(H)とヘリウム(He)だけであったが, ビッグバンから数億年たって最初の天体として大質量星が形成され, この第一世代大質量星によってC, O, Feなどの重い元素が生まれ出されたと考えられている. 第一世代大質量星は誕生から数百万年後には超新星爆発を起こして消滅してしまったが, 爆発によって飛び散った重元素を含んだガスから生まれ出された小質量星が, いまだ存在していると考えられている. このような星は金属欠乏星とよばれ, これらを探し出してその化学組成を分析することが元素の起源を解明するうえで重要であり, 8~10メートル級望遠鏡高分散分光器の登場で観測研究が本格化した. これらはおもに銀河系ハロー構造を構成する星のなかに多数見つかっている. HE1327-2326は, ハンブルク大学とESOの探査で金属欠乏星の候補としてリストアップされ, 2005年にHDSによる高分散分光観測によって現在のところ最も鉄組成の低い星ということが判明した天体である. これまでに重元素を全く含まない星, つまり初代星として誕生した小質量星は見つかっていないが, HE1327-2326はこれに最も迫るもので, その化学組成は初代の大質量星がどのような天体だったのか考察するヒントを与えている.

*1 国立天文台 (2005) 観測成果:すばる望遠鏡, 最も重元素の少ない星を発見—第一世代星の元素合成に迫る— http://naoj.org/Pressrelease/2005/04/13/j_index.html

*2 国立天文台 (2009) 観測成果:すばる望遠鏡, 主星の自転に逆行する太陽系外惑星を発見 http://naoj.org/Pressrelease/2009/11/04/j_index.html

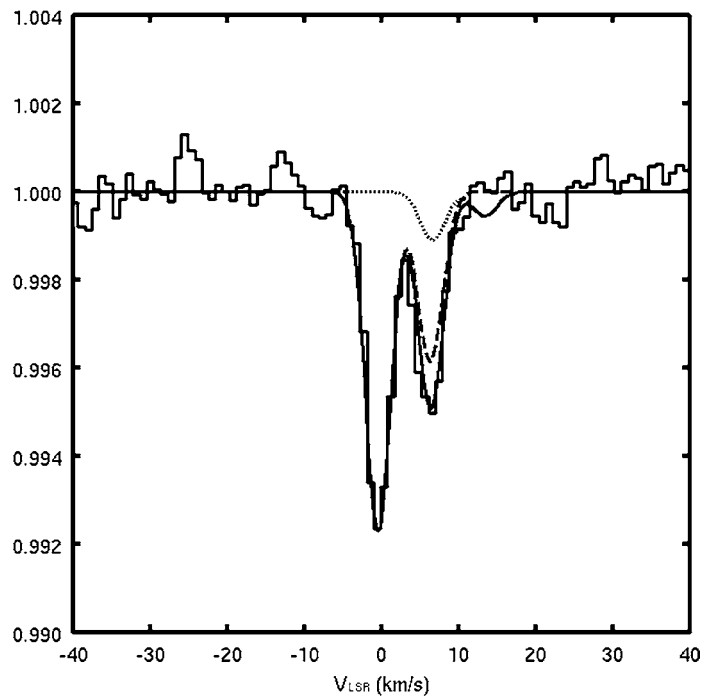


図7 へびつかい座ゼータ星 (zeta Oph) 方向星間物質中の Li スペクトル線。(国立天文台川野元氏による)

宇宙初期に始まった物質進化の歴史は現在の宇宙の組成につながっており、元素ごとにその詳細が調べられつつある。そのなかで、リチウム同位体測定 (図7参照) には高分散分光観測の役割がよくみてとれる (この話題は国立天文台青木和光氏からの情報提供による)。Li の安定同位体は2つあり、太陽系では 6Li が7.5%ほどで、残りが 7Li である。 6Li はおそらくすべて宇宙線による重い元素 (酸素や炭素など) の破碎反応によって星間物質中で作られるとみられるのに対し、 7Li は宇宙線破碎のほかに星や超新星での合成が寄与していると思われる。明るい星を背景光として手前にある星間物質中の Li による吸収スペクトルを解析することにより、太陽系以外での Li 同位体比を測定し、Li を含めた軽元素合成過程を調べる努力が行われてきている。

3番目に軽い元素である Li は同位体によるスペクトル線のずれが比較的大きいが、それでも速度にして 7 km/s 程度、観測に用いる 6708Å のスペクトル線では 0.15Å 程度であり、これを分離して観測するのは容易ではない。しかも悪いことに、Li のスペクトル線は強度が $2:1$ の二重線として現れ、 7Li の弱い線のほう (波長の長いほう) に 6Li の強い線がほぼ重なるという配置になっている。図7は波長分解能 10^4 で観測された、へびつかい座ゼータ星 (zeta Oph) の方向の星間物質中の Li スペクトル線で、見えている2本の吸収線は、 7Li の二重線に 6Li の強い線が重なって

いる様子である (6Li の弱い線のほうは見えていない)。HDS を用いてこれまでよりも遠い (距離約 5000 光年) 星を背景光とした Li 同位体比の測定が行われ、太陽のごく近くに限定されていた測定がより広範囲に広げられてきている。その結果、Li 同位体比は調べられた範囲で均一に近い値 (6Li が 12 パーセント程度) となっていることが示された。しかし、そのなかで太陽系組成では 6Li の割合が低い (上述) ことは興味深い。

高分散分光器が活躍している最近の観測トピックスとしては、太陽系外惑星の軌道の研究があげられる。惑星の重力のために中心の恒星が揺さぶられる効果を測定することにより、これまでに多数の太陽系外惑星の存在が確認されているが、その惑星軌道の詳しい研究の結果、恒星自転に対して逆向きに公転している惑星が存在することが、HDS を使った観測によって 2008 年に初めて発見された (HAT-P-7 恒星)。これは惑星系の進化過程の解明に関する重要な発見である。恒星自転によって地球に向かってくる部分では、ドップラー効果により視線速度分だけスペクトルが短波長側にシフトし、地球から遠ざかる部分では逆に同じ分だけ長波長側にシフトする。地球から見て惑星系が主星上を横切るようなトランジット惑星系では、惑星が主星のどちら側を隠しているかでスペクトルシフトの方向が変化することになる (ロシター効果とよばれる)。太陽系のように主星自転と惑星公転が同じ方向である通常の天体

の場合は、惑星が主星上を横切る際に観測される波長シフトは、長波長シフト→短波長シフトの順になるが、逆回転の場合は短波長シフト→長波長シフトの順になる。ロシター効果を検出するためには数 m/s の視線速度変化を検出しなければならず、高い波長分解能で多数のスペクトル線を観測し、データを統計的に処理することが必要である。精度を上げるためには高い S/N 比も必要となるので、大望遠鏡の高分散分光器でなければできない観測分野といえる。

筆者は HDS 光学系設計を担当したが、国立天文台の山下泰正先生、安藤裕康先生、田中済先生（これらの先生方はすでに定年退官された）、野口邦男先生ほか多数の先生方からのご指導を受けた。また本稿の HDS 観測成果紹介部分は、国立天文台の青木和光先生からのご教示、同川野元聡先生からの図のご提供に基づいて、筆者の責任において記述した。先生方には深く感謝の意を表する。

文 献

- 1) K. Noguchi, H. Ando, H. Izumiura, S. Kawanomoto, W. Tanaka and W. Aoki: "High dispersion spectrograph (HDS) for Subaru telescope," Proc. SPIE, **3355** (1998) 354-362.
- 2) S. S. Vogt, S. L. Allen, B. C. Bigelow, L. Bresee, W. E. Brown,

- T. Cantrall, A. Conrad, M. Couture, C. Delaney, H. W. Epps, D. Hilyard, D. F. Hilyard, E. Horn, N. Jern, D. Kanto, M. J. Keane, R. I. Kibrick, J. W. Lewis, J. Osborne, G. H. Pardeilhan, T. Pfister, T. Ricketts, L. B. Robinson, R. J. Stover, D. Tucker, J. M. Ward and M. Wei: "HIRES: The high resolution echelle spectrometer on the Keck ten-meter telescope," Proc. SPIE, **2198** (1994) 362-375.
- 3) D. J. Schroeder: *Astronomical Optics*, 2nd ed. (Academic Press, San Diego, 2006) pp. 323-341.
- 4) D. J. Schroeder: *Astronomical Optics*, 2nd ed. (Academic Press, San Diego, 2006) pp. 384-396.
- 5) 山下泰正: 反射望遠鏡 (東京大学出版会, 1990) pp. 220-247.
- 6) E. G. Loewen and E. Povov: *Diffraction Gratings and Applications* (Marcel Dekker, New York, 1997) pp.191-251.
- 7) 山下泰正, 沖田喜一: "腫移行型高分散エシエル分光器", 国立天文台報, **1** (1990) 23-28.
- 8) K. Nariai and Y. Yamashita: "F/1 camera for a spectrograph," Publ. Astron. Soc. Jpn., **39** (1987) 505-516.
- 9) T. Blasiak and S. Zheleznyak: "History and construction of large mosaic diffraction gratings," Proc. SPIE, **4485** (2002) 370-377.
- 10) E. Loewen, D. Maystre, E. Povov and L. Tsonev: "Echelles: Scalar, electromagnetic, and real-groove properties," Appl. Opt., **34** (1995) 1707-1727.
- 11) M. Bottema: "Echelle efficiencies: Theory and experiment; comment," Appl. Opt., **20** (1981) 528-530.
- 12) 青木和光: "高分散分光観測で探る初期宇宙の元素合成", 天文月報, **100** (2007) 615-622.

(2010年7月12日受理)