

ロケット，人工衛星搭載用回折格子分光器

波岡 武*・原田達男**・野田英行***

1. 緒 言

ロケットや人工衛星に搭載する分光器は、保守が不可能であり、衝撃や各種の特異な環境に耐えなければならない。したがって、こうした分光器機には信頼性が最も重要な因子となる。信頼性を高める最善の方法は、分光器の構造をできるだけ単純かつ堅牢なもの、すなわち可動部分を全くなくすか、あるいは最小限にとどめることである。一方、分光器に要求される波長（エネルギー）分解能・スループット・ S/N 等が十分に保証されるものであり、さらに多波長同時測定、時間・空間分解測定が可能なるものが望ましい。このような諸条件をみたす分光器の実現は、新しいタイプの回折格子や検出器の出現によって、今や夢ではなくなりつつある。

可動部分の全くないものとしては、まず分光写真器タイプのものが考えられる。この場合、等間隔直線溝を有する普通の凹面回折格子を用いると、一般にローランド円に沿って検出器を設置することになる。1次元アレー検出器を用いようとすると、ピンボケになるだけでなく、直入射型以外では検出器への入射光が受光面と相当大きな角をなし検出器を有効に使えなくなる。この問題は、ある波長範囲にわたって焦点面が平面となるような特殊な回折格子を用いることによって解決できる。

可動部分を最小限におさえたものとしては、定偏角モノクロメーターが考えられる。このタイプでは、入射スリットが固定で、回折格子の回転のみで波長走査が行われ、構造は比較的単純なうえ、射出光の方向が波長によらず一定であり、質量の移動がないので波長走査によ

って搭載機の姿勢に影響を与える恐れがない。また、ローランド円上に一次元アレー検出器を置く場合と同程度の分解能でよければ、この場合にも多波長同時測定が可能で、回折格子の回転で測定波長範囲が変更できる。定偏角モノクロメーターを採用する場合に生じる問題点は、ロケットや衛星の寸法・形状、観測目的等からくる諸制約下で所要の性能を持ったものが常に設計できるかということである。このこともまた、特殊な回折格子を用いることによって解決しうる可能性がある。

平面焦点面を有する分光器や定偏角モノクロメーターのほか、ステイグマティックな分光器^{1,2)}、円錐回折を利用したオフ・プレーン型斜入射モノクロメーター^{3,4)}等種々の興味ある分光器があるが、ここでは前2者についてのみ論ずることとする。

2. フラット・フィールド分光器

不等間隔曲線溝を有するホログラフィック回折格子⁵⁾や収差補正機械刻線回折格子⁶⁾の水平焦点面はローランド円を特殊ケースとするレムニスケートとなる。適切な仕方では格子溝間隔を変化させたり、溝を曲げたりすると、焦点面の一部をほとんど平面にすることが可能である。このような結像特性を有する回折格子を使用した分光器をフラットフィールド分光器という。ここでは、格子溝をどのようなパターンにすればよいかという回折格子設計法⁶⁻⁸⁾の問題に立入ることはやめにして、例としてトroidal・ホログラフィック回折格子と収差補正機械刻線凹面回折格子を用いた斜入射型フラット・フィールド分光器をとりあげ、その結像特性や分解能について述べ

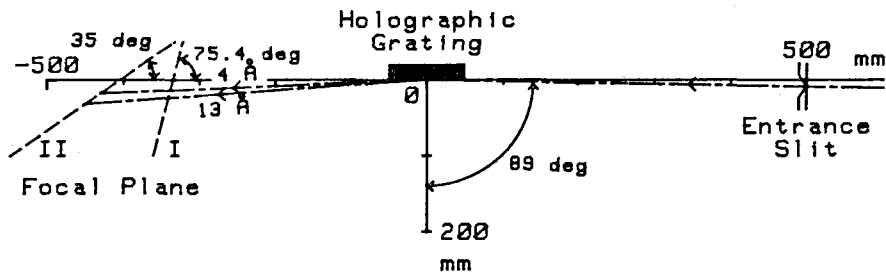


図1 トroidal・ホログラフィック回折格子を用いた斜入射型フラット・フィールド分光器。

* 東北大学科学計測研 Takeshi Namioka ** 日立製作所 Tatsuo Harada *** 筑波大物工 Hideyuki Noda
Grating Spectrometers for Use with Rockets and Satellites.

ることとする。

A. トロイダル・ホログラフィック回折格子を用いた斜入射型フラット・フィールド分光器

入射角 89° で $4\sim 13\text{ \AA}$ の波長範囲の +1 次のスペクトルを、分解能 20 以上でとることを目的として設計されたプラズマ診断用フラット・フィールド分光器の光学系を図1に示す。設計にあたって、幅 10.3mm および 24.1mm の2種類の検出器を想定した。これらの検出器位置は図中 I, II で示してある。使用する回折格子は主曲率半径 30m (図の面内) および 16.22mm (紙面に垂直な面内) のトロイダル面に格子溝を記録したホログラフィック回折格子で、公称刻線密度 1800本/mm, 刻線面積 100(幅)×10(高さ)mm² のものである。回折格子のプランクは円筒面を機械的に変形させてトロイダル面にしたものである。入射スリットと格子面の中心との距離を 500mm, 入射スリットの高さを 3mm とし、 $4\sim 13\text{ \AA}$ の回折光に対し所要の平面焦点面が設定でき、かつ高い波長分解能・空間分解能が得られるよう非線形最適化法を使って記録用レーザー点光源の位置を決定した。この設計によれば、焦点面の中心での入射角は I の場合 14.6° , II の場合 54.9° となり、格子面の中心から焦点面の中心までの距離は I の場合 334.8mm, II の場合 404.6mm となる。

このようにして設計したトロイダル・ホログラフィック回折格子分光器で得られる波長 4, 7, 10, 13 \AA のスペクトル像のスポット・ダイアグラムとライン・プロフィールを図 2, 3 に示す。図 2, 3 はそれぞれ検出器位

置 I, II に対応している。各ライン・プロフィールの半値幅 $\Delta\lambda$ から推定した分解能 $\lambda/\Delta\lambda$ の値を図中に記入してあるが、I, II の何れの場合も設計条件をはるかに上まわる値となっていることがわかる。II の場合には I に比し非点収差がやや大きく残っているが、分解能は大きい。

B. 可変ピッチ機械刻線凹面回折格子を用いた斜入射型フラット・フィールド分光器

フラット・フィールド分光器のもう一つの例として、可変ピッチ直線溝を有する機械刻線凹面回折格子を用いた場合について述べる⁵⁾。入射角 87° で $50\sim 250\text{ \AA}$ の波長範囲の +1 次のスペクトルをとることを目的として設計したフラット・フィールド分光器の光学系を図4に示す。設計にあたって、曲率半径 6m, 公称刻線密度 1200本/mm, 刻線面積 50(幅)×18(高さ)mm² の凹面回折格子を使用するものとし、入射スリットと格子面の中心との距離を 252mm に設定した。格子溝間隔の変え方をきめる3つのパラメーター b_2, b_3, b_4 のうち、焦点面の形に関係したパラメーター b_2 の値を -16 から -28 まで変えてゆくと、それに応じて水平焦点面の形は図中に示したように変化してゆく。図中矢印のついた斜めの実線は波長 50, 100, 150, 200, 250 \AA の回折主光線を示したもので、これらの回折主光線に対し $b_2 = -20$ のときの焦点面が最も平らになっていることがわかる。この焦点面の法線と 150 \AA の回折主光線のなす角は約 11.3° で、垂直入射に近い。また、格子面の中心から焦点面の中心までの距離も約 255mm と、通常のローランド円配

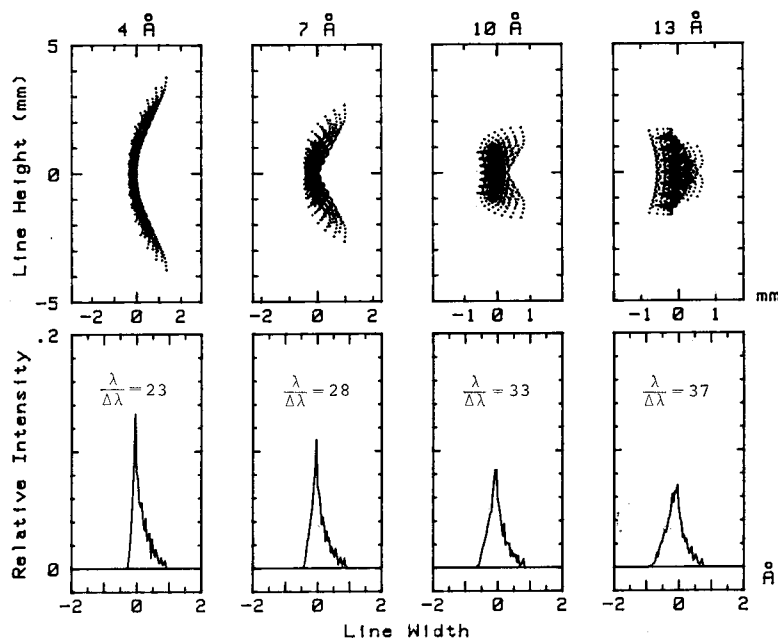


図2 図1の検出器位置 I におけるスペクトル像のスポットダイアグラムとプロフィール。

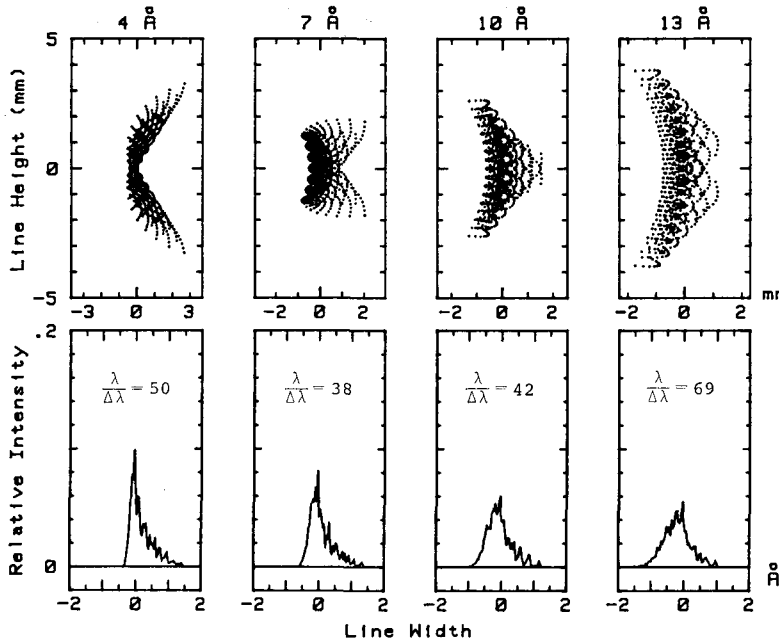


図 3 図 1 の検出器位置 II におけるスペクトル像のスポット・ダイアグラムとプロファイル。

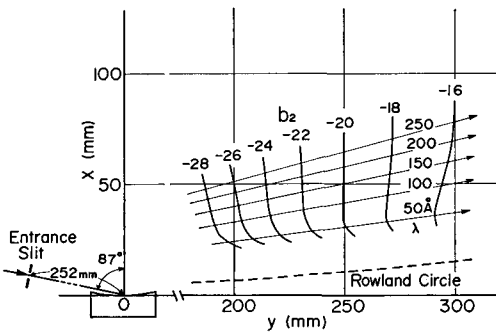


図 4 可変ピッチ機械刻線凹面回折格子を用いた斜入射型フラット・フィールド分光器。

置に比べ非常にコンパクトになる。 b_2 として -20 をとり、さらに波長 100 \AA のスペクトル像の高次のコマ収差が 0 になるように他の刻線パラメーター b_3, b_4 を定めると、所要の焦点面をもつために必要な回折格子の刻線の仕方がきまる。この場合、格子溝間隔は格子面の一端で $0.71 \mu\text{m}$ であったものが、 50mm 離れた他端では $1.00 \mu\text{m}$ になる。このように大きな溝間隔変化をつけることは、ホログラフィックな方法では困難である。

この可変ピッチ凹面回折格子を用いたフラット・フィールド分光器の結像特性を評価するため、この分光器で得られるスペクトル像を光線追跡で求めた。得られた結果のうち、波長 $50, 100, 150, 200 \text{ \AA}$ のスペクトル像を図 5 に示す。図から明らかなように、非常に鮮鋭なスペクトル像を一平面上に作りうる事がわかる。 50 \AA の像の幅がやや広がっているのは、その波長位置で焦点面

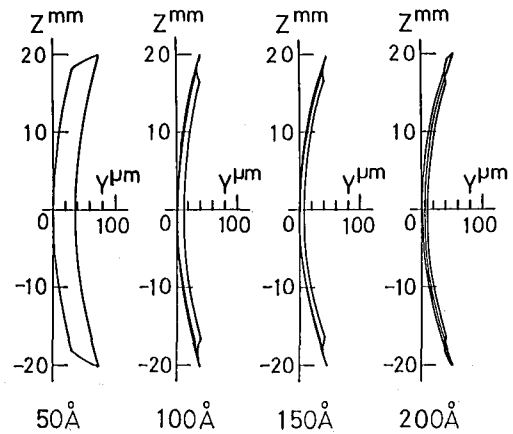


図 5 図 4 の分光器の観測平面上に生じるスペクトル像。

がわずかに曲がっていることによる。

この例では溝間隔を変化させただけで、曲線溝や非球面ブランクを考慮しなかったため、非点収差が大きく現われている。この非点収差を補正するためにトロイダル・ブランクを用いると、非点収差の低減と引替えに分解能の減少は避けられない。したがって、目的に応じて適当に妥協する必要がある。

3. 定偏角モノクロメーター

数年前までは、定偏角モノクロメーターといえば瀬谷一波岡型に限られていたが、この事態は可変ピッチ曲線溝を有するホログラフィックおよび機械刻線回折格子の

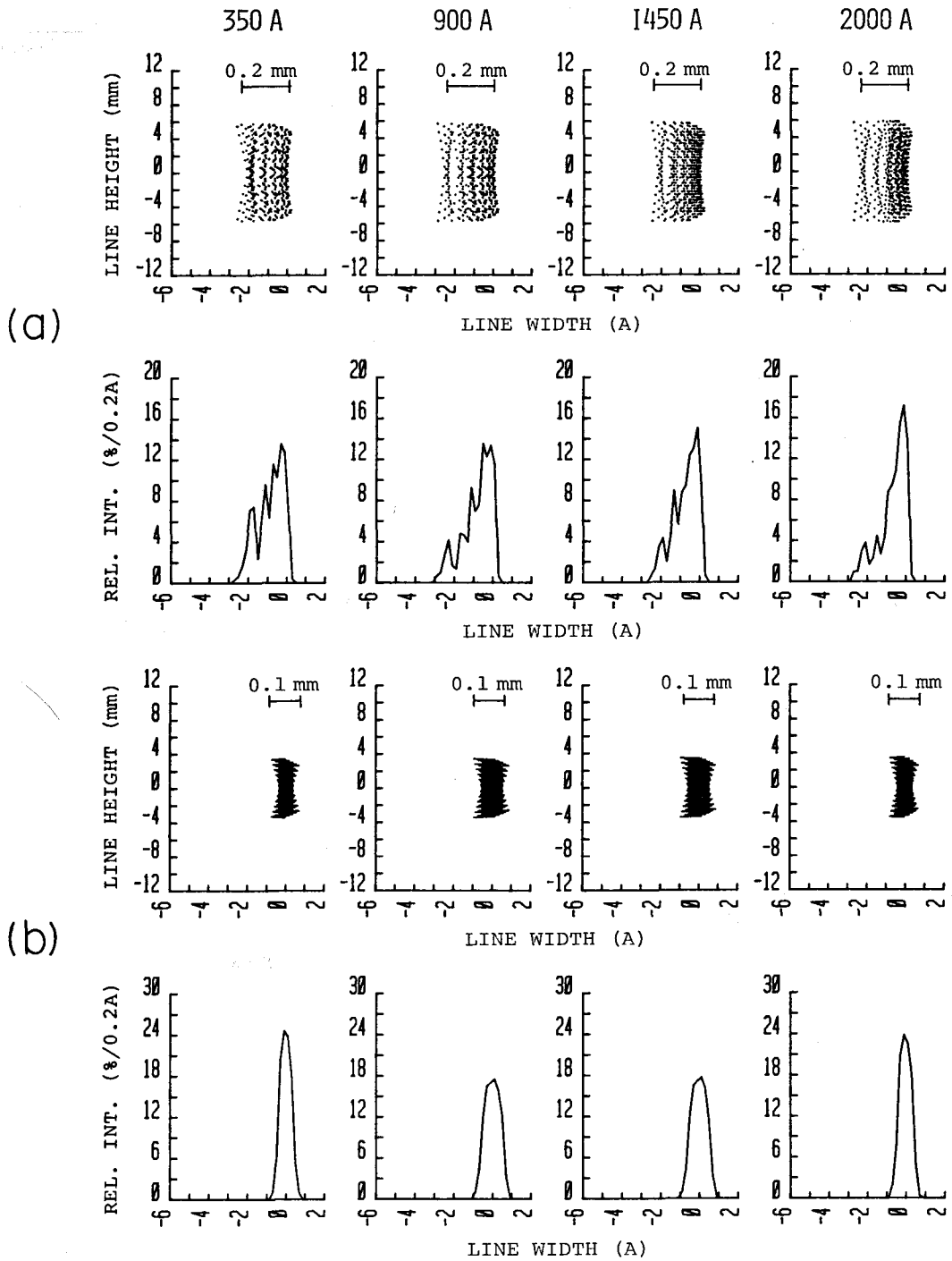


図 6 14° 定偏角モノクロメーターで得られるスペクトル像。(a) 通常型凹面回折格子使用, (b) 凹面ホログラフィック回折格子使用。

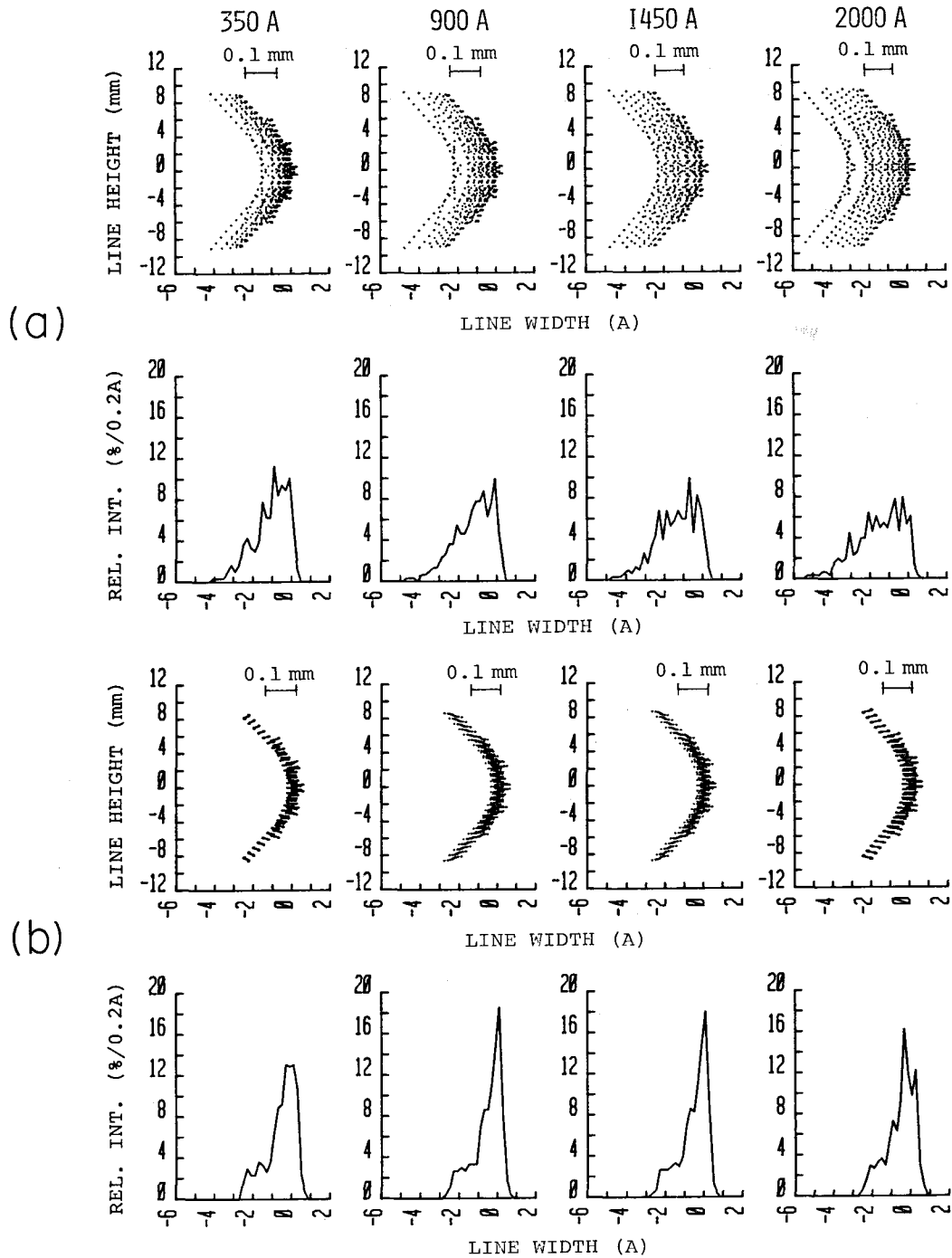


図7 50°定偏角モノクロメーターで得られるスペクトル像。(a)通常型凹面回折格子使用,(b)収差補正型機械刻線凹面回折格子使用。

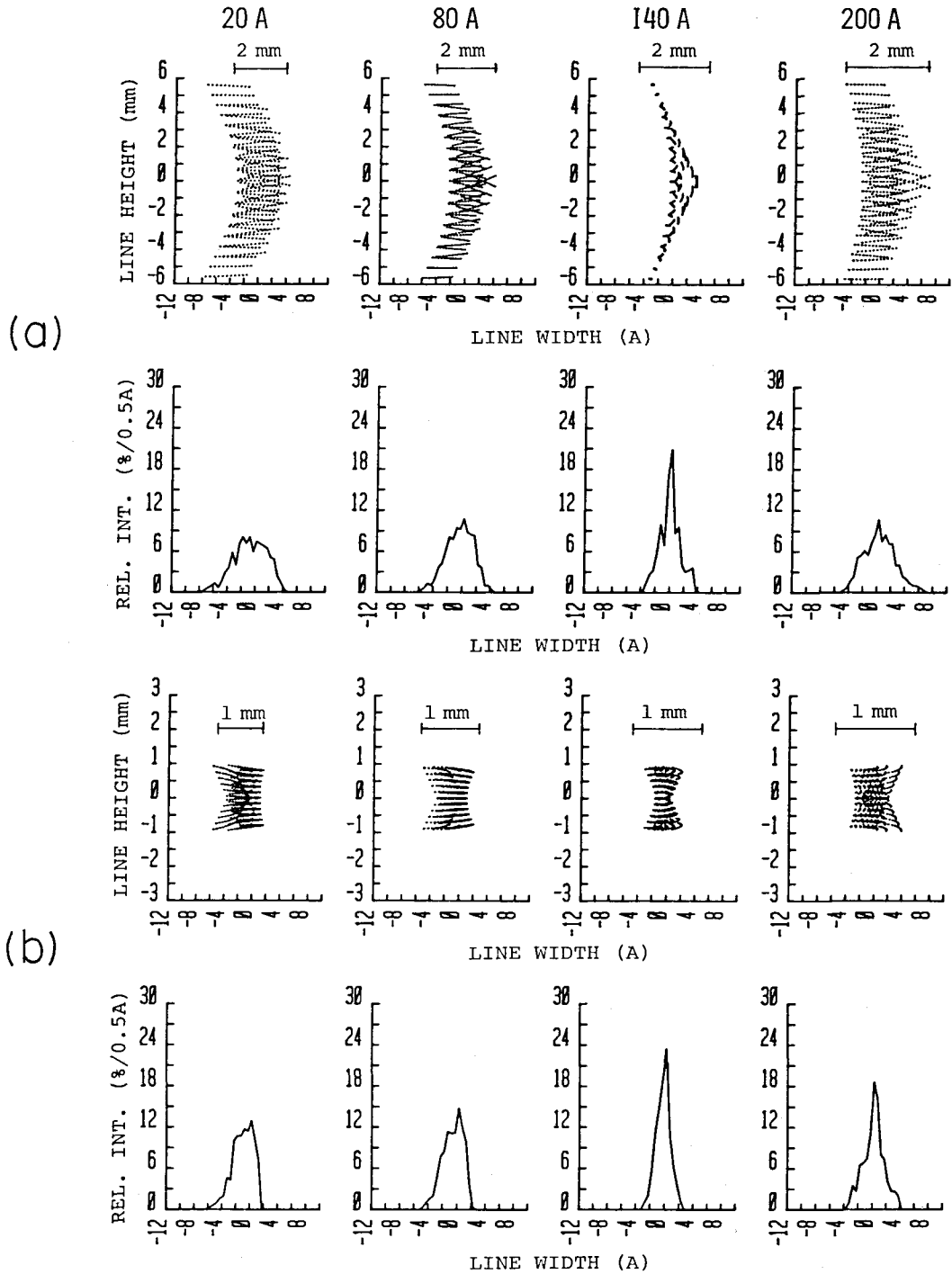


図 8 172° 定偏角モノクロメーターで得られるスペクトル像。(a) 通常型トロイダル回折格子使用、(b) トロイダル・ホログラフィック回折格子使用。

出現によって一変しつつある。しかし、どのような偏角に対しても良好な結像特性を有する定偏角モノクロメーターは実現可能であろうか。以下、この点についていくつかの設計例をあげながら考察することにする。

設計にあたって使用した条件を表 I に示す。表中の記号 R および ρ はそれぞれトロイダル回折格子の、分散面内およびそれに垂直な面内での曲率半径である ($R=\rho$ は凹面回折格子を示す)。この条件下で設計されたモノクロメーター 1~3 の入射アーム長を表 II に、得られるスペクトル像のスポット・ダイアグラムとライン・プロフィールをそれぞれ図 6~8 に示す。これらの図や表中には、比較のために等間隔直線溝を有する通常型回折格子を用いた場合も示してある。

図 6~8 で、上の 2 列 [(a)] は通常型回折格子を、下の 2 列 [(b)] は不等間隔直線または曲線溝を有する収差補正型回折格子をモノクロメーターに設置した場合のものである。横軸はすべて、回折主光線による像点からの波長のずれ (\AA 単位) で表わしてあるが、出射スリット上にできる実際のスペクトル像の拡がりの大きさを示すために、各スポット・ダイアグラムの上部に寸法を記入

表 I. 定偏角モノクロメーターの設計条件

モノクロメーター	1	2	3
偏角 (度)	14	50	172
回折格子の種類*	CHG	CMG	THG
R (mm)	500	500	5000
ρ (mm)	500	500	28
刻線密度 (本/mm)	1200	1200	450
刻線幅 (mm)	50	50	30
刻線長 (mm)	30	30	10
スリット長 (mm)	6	6	6
走査波長範囲 (\AA)	300~ 2000	300~ 2000	20~ 200
使用次数	-1	-1	+1

* CHG: 凹面ホログラフィック回折格子, CMG: 機械刻線凹面回折格子, THG: トロイダル・ホログラフィック回折格子.

表 II. 定偏角モノクロメーターのアーム長

モノクロメーター	使用回折格子	入射側アーム長 (mm)	出射側アーム長 (mm)
1	通常型凹面	397.6	662.0
1	凹面ホログラフィック	496.8	497.4
2	通常型凹面	438.1	469.8
2	収差補正機械刻線凹面	454.0	453.6
3	通常型トロイダル	521.2	509.5
3	トロイダル・ホログラフィック	913.1	260.1

した。ライン・プロフィールの縦軸は相対強度で、括弧内に指定されているバンド幅 (\AA 単位) 内に全スポット数の何%が入っているかを示している。プロフィール中には細かな凹凸を示すものがあるが、これはスポット数が 605 個と少いため、数を多くとれば滑らかな形になる。

これらの図からみられるように、分解能の点で幾分の差はあるが、どのような偏角に対しても使用可能なモノクロメーターが実現できることがわかる。また、収差補正型の方が通常型の回折格子より良好な結像特性を示すが、目的によっては、特に斜入射領域で、通常型回折格子を用いても相当実用性のある定偏角モノクロメーターが設計できる。

このほか、ここでは触れなかったが、入射アームの長さには制約がある場合でも、収差補正型回折格子を用いることによって、分解能の点である程度妥協できれば、常に実用性のある定偏角モノクロメーターが設計可能であることを付け加えておく。

文 献

- 1) T. Harada, S. Moriyama and T. Kita, Jpn. J. Appl. Phys., **14**, Suppl. 14-1, 175 (1974).
- 2) H. Noda, T. Namioka and M. Seya, J. Opt. Soc. Am., **64**, 1031 (1974).
- 3) W. Werner and H. Visser, Appl. Opt., **20**, 487 (1981).
- 4) R. Petit et al., *Electromagnetic theory of Gratings*, ed. R. Petit (Springer, 1980), pp. 85, 209.
- 5) T. Harada and T. Kita, Appl. Opt., **19**, 3987 (1980).
- 6) 波岡 武, 東北大学科研報告 **29**, 65 (1980).
- 7) T. Namioka and S. Morozumi, *Ext. Abstr. VI Intern. Conf. Vacuum UV Radiation Physics* (Charlottesville, U.S.A., June 1980), Vol. III, p. III-18.
- 8) 野田英行, 応用物理 **50**, 印刷中

☆ ☆ ☆