報 文 3

平面回折格子モノクロメータの O.T.F. と像修整 — インコヒーレント結像の場合 —

金 森 仁 志・小 島 克 之

京都工芸繊維大学電気工学教室 京都市左京区松ヶ崎 (〒 606)

(1974 年 6 月 17 日受理)

Correction of Spectra Formed by a Plane-Grating Monochromator by Means
of Optical Transfer Functions—For Incoherent Images—

Hitoshi KANAMORI and Katuyuki KOZIMA

Department of Electrical Engineering, Kyoto Technical University
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606

(Received June, 17, 1974)

Optical transfer functions (O.T.F.'s) for the correction of spectral images formed by a simple plane-grating monochromator were determined by both of theoretical and experimental procedures; the ray-tracing method and a spectrogram of monochromatic rays were respectively used to determine line spread functions, and their Fourier transforms gave the the O.T.F.s. A spectrogram of the Na D-doublet poorly resolved was satisfactorily corrected by means of the both O.T.F.'s.

1. ま え が き

分光光学系でスペクトルを観測する場合に、光学系でぼけを生じて、正確なスペクトルを観測できない。光学系のぼけを修整する方法として、O.T.F. (Optical Transfer Function) を用いる方法がレンズ系等で用いられてきた。分光光学系にO.T.F. を適用して、スペクトルを修整することは Lohmann¹⁾ が提唱し、その後、片山・高橋^{2,3)} および後藤・両角^{4,5)} がおう面回折格子の O.T.F. を理論的に求めている。我々は非常に簡単な光学系で構成され、インコヒーレントに結像するモノクロメータの O.T.F. を、理論と実験の両方法で求めて、スペクトル (Na D線) の修整を行なった。

2. モノクロメータの構造と O.T.F.

スペクトルの観測に用いたモノクロメータの構造を

Fig. 1. Side-view of a monochromator.

Fig. 1 に示す。入口スリットから入った光は、平面回折格子 (1350 本/mm) で分光され、おう面鏡で集光され、円柱レンズで収差が補正されて、出口スリットの位置にスペクトルの像を結ぶ[†]。ここで入口、出口スリットの

[†] 本報文では、出口スリットを取外して、写真撮影をおこなった。

縦方向の中心線、回折格子の回転軸、および3本の光軸は同一平面内にある。

インコヒーレントに結像する場合は光の強度が重畳すると考えてよいので、出口スリットに結ばれたスペクトルの強度分布を $i(\lambda)^\dagger$ 、入射光本来のスペクトルの強度分布を $g(\lambda)$ 、単色光を入射したときのスペクトル（線像分布関数に相当する）の強度分布 $h(\lambda)$ とすると

$$i(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\lambda') h(\lambda' - \lambda) d\lambda' \quad (1)$$

なる関係がある。そこで $i(\lambda)$, $g(\lambda)$ および $h(\lambda)$ のフーリエ変換 ‡ をそれぞれ $I(\omega)$, $G(\omega)$, $H(\omega)$ とすると

$$I(\omega) = G(\omega) H(\omega). \quad (2)$$

となる。ここで、 $H(\omega)$ は光学系の O.T.F. である ‡‡ 。

そこで、本報文の目的は観測したスペクトルのフーリエ変換 $I(\omega)$ を O.T.F. $H(\omega)$ で割って $G(\omega)$ を求め、フーリエ逆変換 ‡‡‡ して本来のスペクトル $g(\lambda)$ を求めようとするものである。

2.1 理論的に求めた O.T.F.

理論的に $h(\lambda)$ を求めるのに、ray trace 法 $^{6-8)}$ を用いた。ここでは、直径3cmの円形回折格子を1mm×1mmの網目で区切り、それぞれの区分を代表する1点について、入口スリットから入った光線を追跡し、出口スリット面での光点分布を求めた。ただし、簡単のために、光線は全部入口スリット面の光軸上から放射されるものとした。今回は、修整しようとするスペクトルとして Na D 線を選んだので、その一方の波長(589.0 nm)の単色光について計算した。その結果を Fig. 2 に示す。単色光は本来1本の線になるべきであるが、光学系の収差によって、左の方に尾を引き、弓形に曲っている。この光学系は、分光器ではなく単色光源として設計されているので、このように分解能が悪いが、O.T.F. によるスペクトルの修整を試みるためにはむしろ都合のよい装置である。Fig. 2 の中央の部分を水平方向に走査して、高さ0.7mmの範囲に入る光点の数を数えて線像分布関数 $h(\lambda)$ を求めた。その結果を Fig. 3 に示す。同図の横軸の、スリット上の座標と波長との関係は主光線につ

いて計算で求めたものである。

この線像分布関数を0.01mm(0.06nmに相当)の間隔でサンプリングして、フーリエ変換し、O.T.F. を求めた結果を Fig. 4 に示す。ただし横軸はスリット上の座標に対する空間周波数であり、波長に対する空間周波数ではない。上に絶対値を、下に位相を示した。位相の高周波部分は、図では省略した。

2.2 実験的に求めた O.T.F.

自然幅やドブラー幅はこの光学系の収差によるほけに比べて無視できるので、観測される単色光のスペクトル像をフーリエ変換すれば、実験的に O.T.F.

Fig. 2.
Sport diagram of
589.0 nm rays.

Fig. 3. Line spread function theoretically
determined.

Fig. 4. O.T.F. theoretically determined.

† λ は波長であるが、本報文では波長に対応する出口スリットでの座標をとった。

‡ $I(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(\lambda) e^{-i\lambda\omega} d\lambda$, 等。

‡‡ 零周波数での絶対値を1に規格化して表示する。

‡‡‡ $g(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{i\lambda\omega} d\omega$, $G(-\omega) = G^*(\omega)$ 。

を求めることができる。Na D 線に近い波長として He の 587.6 nm の線を選んだ(この線の微細構造も無視できる)。そのスペクトル写真が Fig. 5 である。Fig. 2 とよく似た形をしており、左の方に尾を引き、弓形に曲が

Fig. 5. Spectrogram of the He-587.6 nm line.

Fig. 6. Line spread function experimentally determined.

Fig. 7. O.T.F. experimentally determined.

っている。この中央の部分、マイクロデンシトメータ (0.005 mm×0.35 mm のスリット) で水平方向に走査し、さらに写真の濃度を入射光量に変換して線像分布関数 (Fig. 6) を求めた。これを、理論的な場合と同じく 0.01 mm の間隔でサンプリングして、フーリエ変換し、実験的な O.T.F. を求めた。その結果を Fig. 7 に示す。

3. スペクトルの修整

Fig. 8 は出口スリットの位置にフィルムを置いて撮影した Na D 線のスペクトル写真である。これから前節と同様な方法で求めた強度分布曲線が Fig. 9 である。Na D 線の間隔は 0.597 nm であるが、この図ではピーク間隔がそれよりも狭く、0.507 nm になっている。また、Na D 線 589.0 nm と 589.6 nm の強度比は 2:1 であるが、この観測結果では逆になっている。この曲線を前と同様に 0.01 mm (0.06 nm に相当) の間隔でサンプリングしてフーリエ変換した曲線 $I(\omega)$ を Fig. 10 に示す。これを 2 節で決定した O.T.F. で割り $G(\omega)$ を求め、フーリエ逆変換してスペクトルを修理した。ただ

Fig. 8. Spectrogram of the Na-D doublet.

Fig. 9. Line profile of the Na-D doublet; uncorrected.

Fig. 10. Fourier transform of Fig. 9.

Fig. 11. Line profile of the Na-D doublet; corrected by the theoretical O.T.F.

し、Fig. 10 の高周波の振動部分には雑音が含まれているのでカットせねばならない。この場合、O.T.F. は両方とも途中で 0 になる所がないので、低周波数では $|G(\omega)| < 1$ である。そこで、 $|G(\omega)| = 1$ になる周波数 (約 20 mm^{-1}) より高いところをカットして逆変換を行なった。

理論的に求めた O.T.F. で修理した結果を Fig. 11 に、実験的に求めた O.T.F. で修整した結果を Fig. 12 示す。どちらも、D 線の 2 本の波長間隔が約 0.6 nm に修整されている。また 589.0 nm と 589.6 nm の強度比

Fig. 12. Line profile of the Na-D doublet; corrected by the experimental O.T.F..

がほぼ 2:1 となっており、正しい Na D 線の観測結果と一致している。

4. あとがき

Na D 線についての一例であるが、理論的および実験的に求めた O.T.F. を用いて、程度の悪いモノクロメータによるぼけたスペクトルを修整し、より精密な観測結果とほぼ一致したスペクトルを得ることができた。

なお、本研究の計算には京都大学大型計算機センターの計算機を使用した。

また、ray trace 法のプログラムは夏原真佐男氏 (現・松下電子) が作成されたものである。

文 献

- 1) A. Lohmann: *Optica Acta* **6**, 175 (1959).
- 2) T. Katayama and A. Takahashi: *Memoirs of the Defense Academy* **7**, 1055 (1967).
- 3) T. Katayama and A. Takahashi: *Japan, J. appl. Phys.* **9**, 1509 (1970).
- 4) K. Goto and S. Morozumi: *Appl. Optics* **10**, 764 (1971).
- 5) 両角修四郎, 後藤克也: *応用物理* **42**, 498 (1973).
- 6) W. Lukosz: *Optica Acta* **5**, 299 (1958).
- 7) K. Miyamoto: *J. Opt. Soc. Amer.* **49**, 35 (1959).
- 8) H. Yoshinaga, B. Okazaki and S. Tatsuoka: *J. Opt. Soc. Amer.* **50**, 437 (1960).