

各アプリケーションに対するZeiss分光器の有用性

株式会社 スペクトラ・コープ
東京都中野区中央4-4-5 第一小林ビル
TEL 03-5328-2858 FAX 03-5328-2859

1. はじめに

昨今では測光の需要が高まっています。

主だった例をあげますと、フィルムや液体サンプルなどの反射・透過率、膜厚計測、果物などの食品の非破壊測定、LEDや有機ELの光度・輝度、とその幅広さは他に類を見ません。またそれを検出する為の分光器も各種、世に出ています。

ここでは特にCarl Zeiss社の分光器の設計概念、理論・特徴と言ったものをご説明し、各種アプリケーションへの有用性をご説明するものとします。

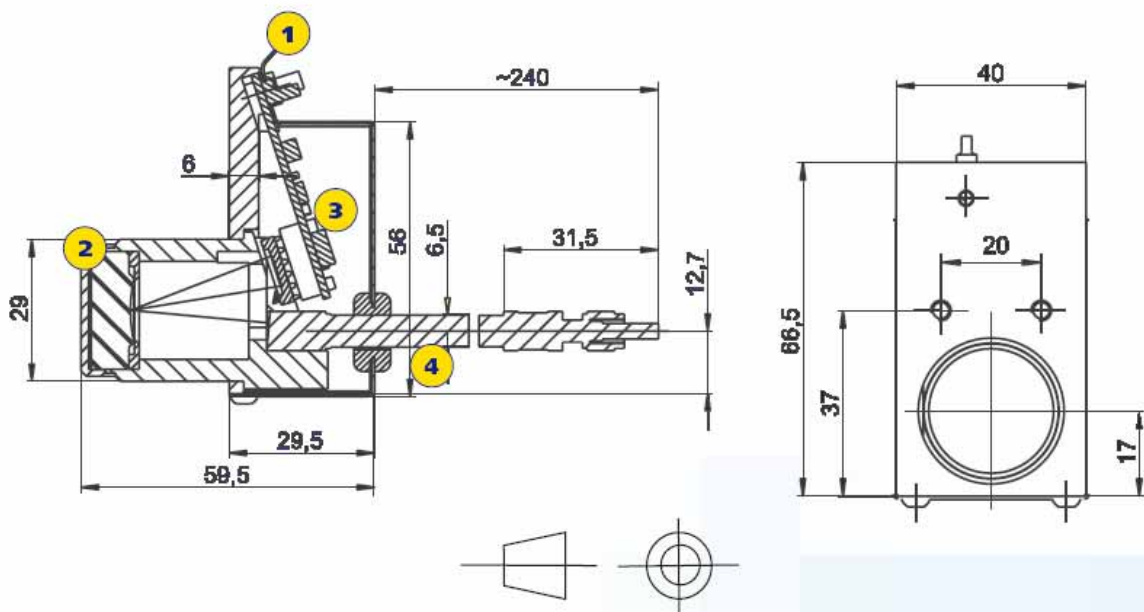
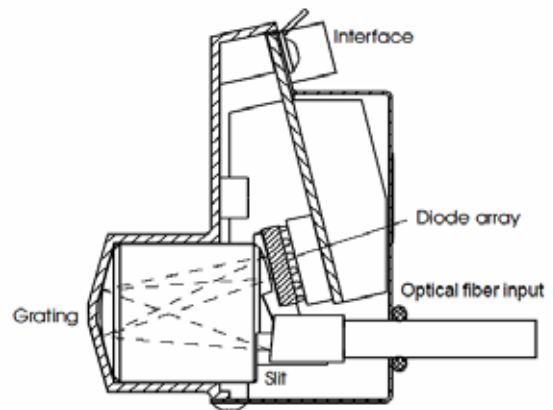
通常のスเปクトロメータ(分光器:スペクトルの強度測定)ないしは、モノクロメータ(単色光計:多波長を含む白色光源からの必要な波長のピックアップ)は、そのほとんどにおいて、回折媒体(プリズム・グレーティングなど)、入射・出射スリット、そして平行ビームを作り上げる為の光学部品(ミラーなど)によって構成され、波長データの記録においては、出射スリットの後ろに配置された光検出器が、グレーティングや出射スリットが可動している間に、入射した光を連続的に検出を行います。

分光器内各部の可動にはメカニカルな動き(コンピュータコントロールを含む)が前提とされ、時間を要することは勿論、それ自体が光測定上、トラブルになることでさえ多々あります。

多くのアプリケーションにおいて、特に各種産業分野において、測定時間を短縮し、外的要因に影響を受けない構造を持つ分光器は、以上に挙げた問題点をクリアすると言えます。

2. 分光器構成及び基本仕様

分光光学系の主要部分は凹面回折格子と一次元(機種によっては二次元)フォトダイオードアレイで構成されています。受光部分はSMAカップリングによるバンドルファイバー、またスリット機構を設けないクロスセクションコンバータとなっております。



3. 概念

分光デバイスの大きさというのは、グレーティングのマウント、入射スリット、検出器、そしてイメージングミラーなどによって物理的に決まります。

物理的には、高分解能な検出を求める場合の焦点距離が大きくなることも問題となります。

分光器本体(可視光領域対象モデル)はUBK7(ガラス)製でできており、ガラスの曲率がついた底面にグレーティングが直に刻まれています。(他のモデルでは反射型グレーティングを採用)

従って、グレーティングが動いたり、ガスや塵によって汚れる心配は全くありません。

また、小さいグレーティングの使用により、光学的に密集された光を効率良く回折できます。

3-1 回折格子(グレーティング)

凹面回折格子は平面回折格子と異なり、凹面鏡などの結像素子を用いずに分光光学系を構成できるという利点があります。

この為、各種分析機器をはじめ、広い分野で用いられます。

グレーティング自体が、出射スリットを兼ねているフォトダイオードアレイに光のイメージを結像します。

グレーティング上の刻線数の多様性と曲率がかかった刻線の採用により、コマ収差や非点収差(図1)を修正し、焦点カーブをフラットにします。

これにより、フラットな構造のフォトダイオードアレイが最適に光検出できる焦点カーブを確保します。

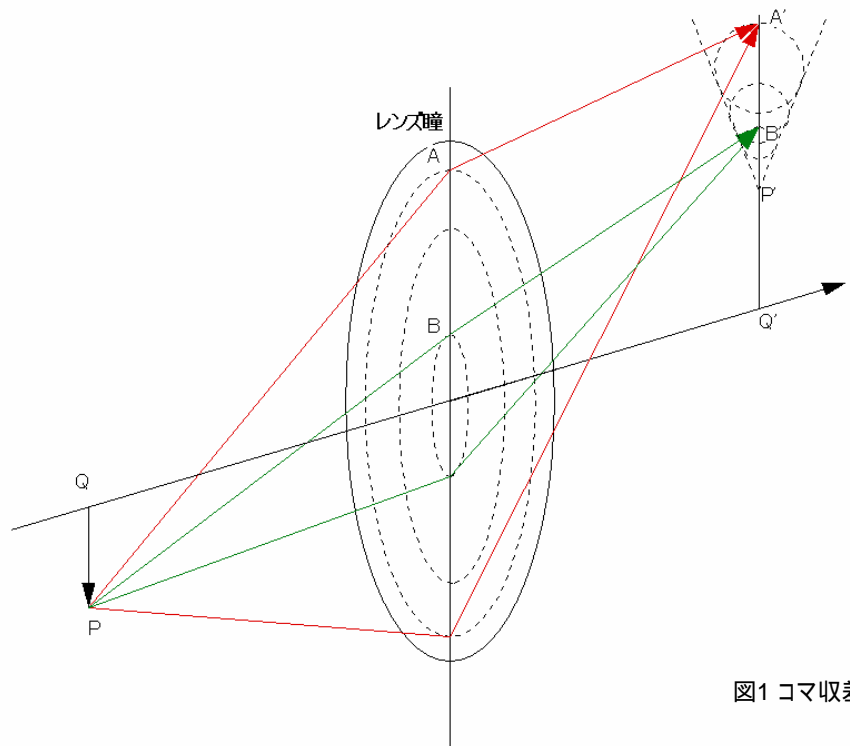


図1 コマ収差

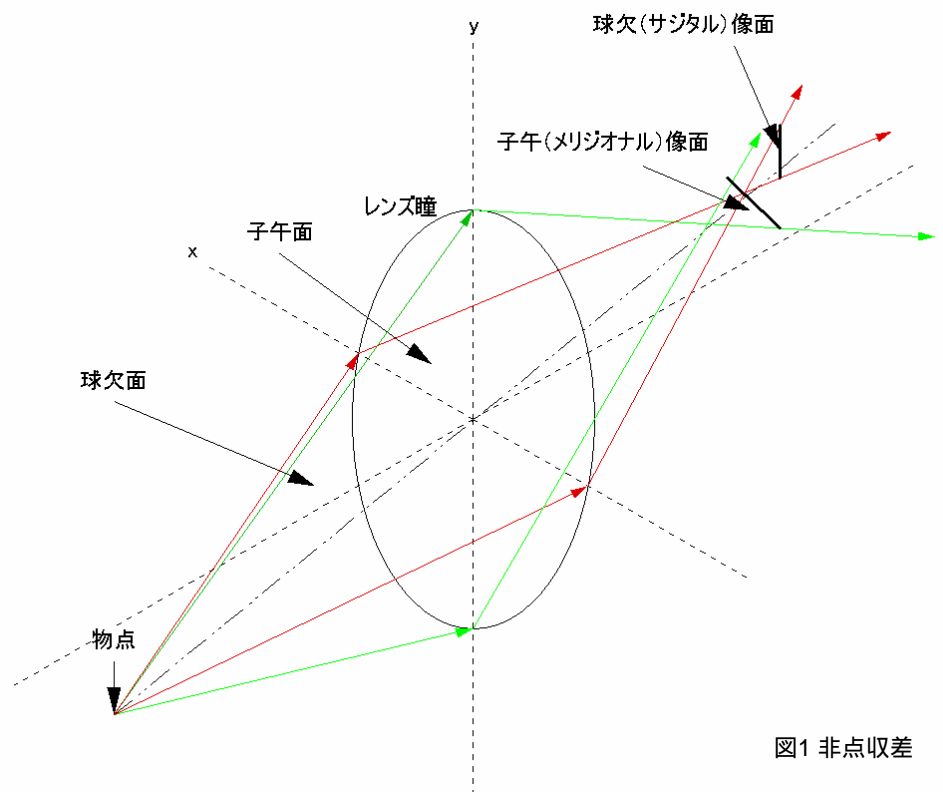


図1 非点収差

この収差補正済み凹面回折格子(グレーティング)の高い精度での設計により、ファイバースリット部から入射した像を、そのままフラットフィールドの受光素子へと結像することが可能となります。
 これが、理論に乗らない設計を行っている、像が糸巻き形や樽型へとゆがんでしまう原因となります(図3)。

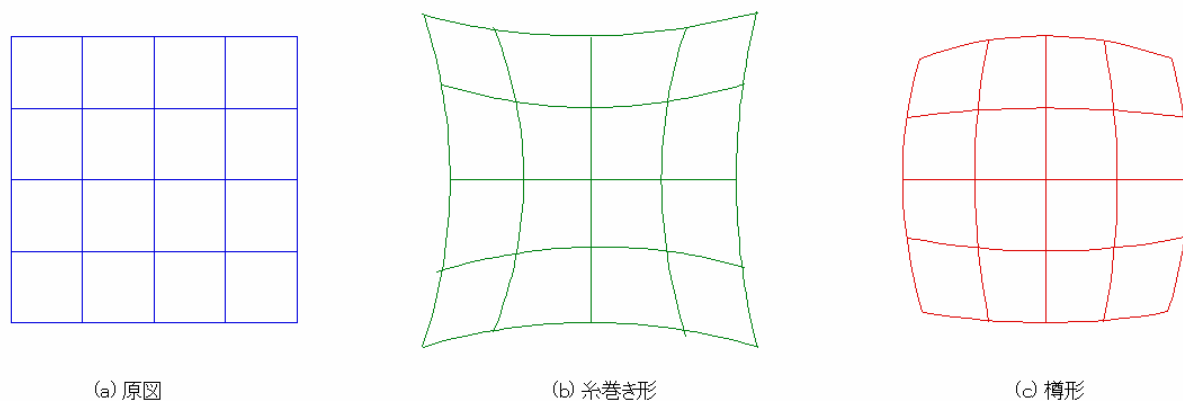


図3 結像の歪み

3-2. 格子溝はレーザーの2光束干渉法を利用したホログラフィック露光法により、光の精度で製作されています。しかし、この手法では格子溝がサイン波の形状になってしまう(図4)と言ったデメリットもあります。これを解消するために、Zeissではイオンビームエッチング法(図5)によりブレード加工をしています。よって、各種のブレード角(ブレード波長)をもつブレードホログラフィックグレーティングを作成することが出来るのです。これにより高い効率で強度を稼ぐことが可能となります。

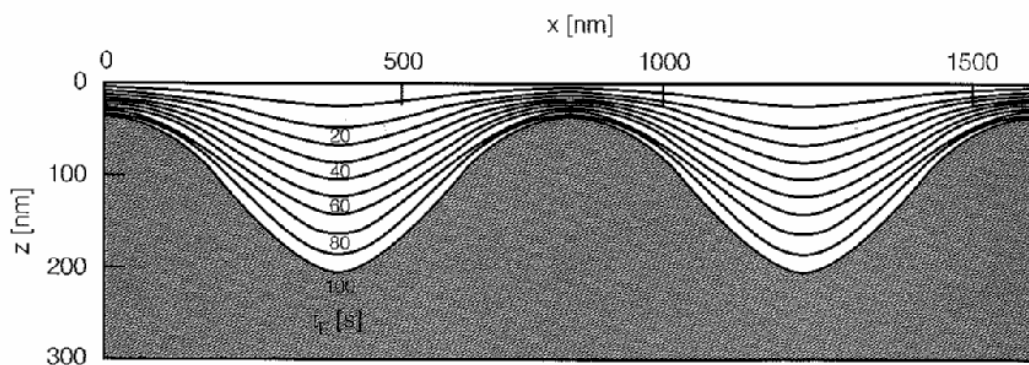


図4 ホログラフィック露光法

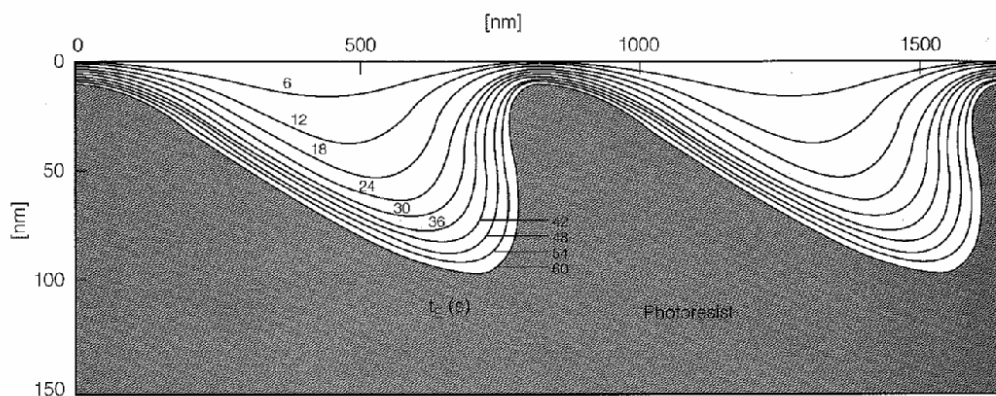


図5 イオンエッチング

3-3. 波長精度

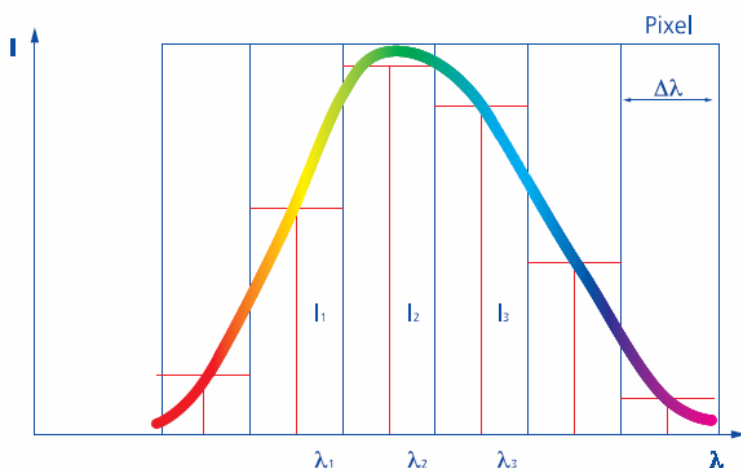
言うに及ばず、分光器は如何に波長を正確に捉えるかが重要になってきます。
 検出素子を固定化することにより、Carl Zeiss製分光器の分解能は可動部分を伴った通常の分光器と違い、
 検出素子内の基線の中心線に対して、二つの左右に隣接した基線を確実に識別します。

二つの左右に隣接した基線が固定化された検出素子上で識別される場合、スペクトルの中心線が山の
 頂点の部分 I_2 に二つの隣接した線が (I_1, I_3) 存在します(図6)
 それらの三つの線は光強度として

$$I_2 \leq 0.81 \times I_1(I_3)$$

という関係であれば分割され、波長()
 というのは実質二つの素子上の二本の線で表されます。
 したがって、波長を三素子にまたがって読み取ることで、スペクトル自体の重心を求めることができます。

これがCarl Zeiss 製分光器の信頼できる波長分解能の理由です。



Parabola – equation

$$I(\lambda) = a \cdot \lambda^2 + b \cdot \lambda + c$$

coefficients

$$a = (I_3 + I_1 - 2I_2) / 2\Delta\lambda^2$$

$$b = (I_3 - I_1) / 2\Delta\lambda - 2a \cdot \lambda^2$$

$$c = I_2 - a \cdot \lambda_2^2 - b \cdot \lambda_2$$

Maximum at $\lambda_{\max} = -b/2a$

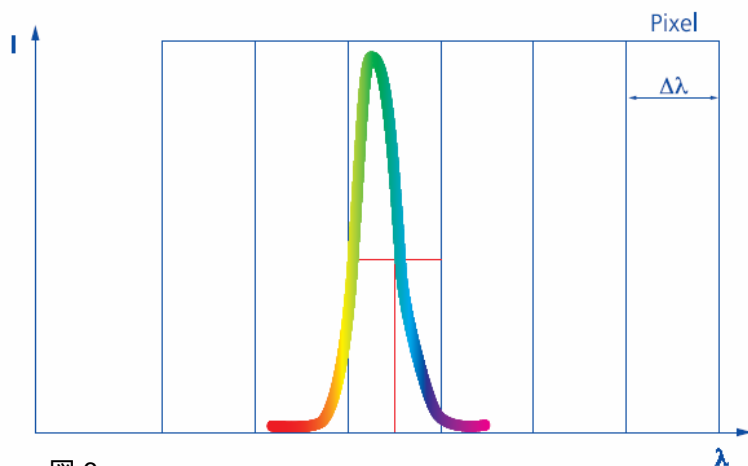
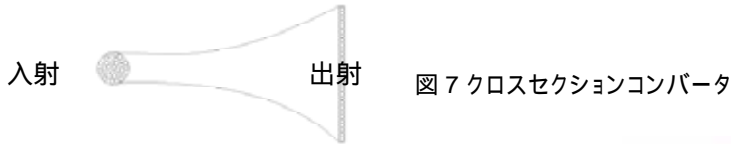


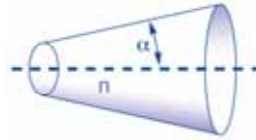
図 6

4. ファイバー入射機構

Carl Zeiss製分光器は基本的にSMAカップリングによるファイバー入射機構を採用しています。ファイバーはクロスセクションコンバータ方式になっており、一般的な分光器で使われているような入射光をスリットで切り分けるものより、入射光全てを無駄なく分光することができます。



また、石英製のファイバーのNA=0.22となっており (Fナンバーに変換するとF=2) 回折格子のFナンバーと一致しております。その為、1:1の光学系を実現しており、非常に明るい分光器であると言えます。



$$G = F \cdot \Omega \cdot n^2$$

$$\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \alpha)$$

$$\alpha = \arcsin NA$$

ファイバー入射にする利点は他にもあります。回折格子を使う以上、どうしても避けられない問題に偏光特性がありますが、ファイバー入射を行うことにより、内部反射を繰り返し、偏光がスクランブルされて、解消されていきます。実際に実験したところ、偏光角による強度のピーク・バレーで0.2%以下の影響に留める事が出来ました(図8)



図 8 偏光特性

5. フォトダイオードアレイ

クロスセクションコンバータによるスリット機構から入射したイメージ(高さ×幅)と1:1で対応する(図9)サイズになっており、また、表面に二次光カットフィルターをコートしてあります。間に余計な機構を(遮光板など)を介さないで、迷光を抑える働きももっています。また、そのダイナミックレンジは14bitと広く、S/N比で言って5000:1(モデルによっては10000:1)という高い精度を誇っています。

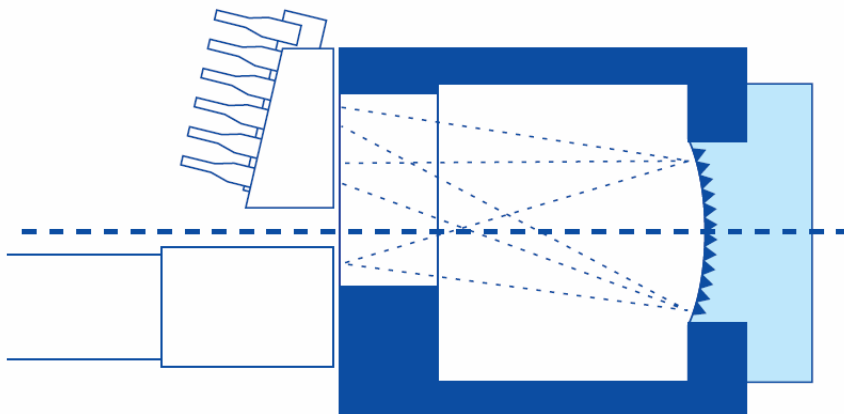


図 9 1:1光学系

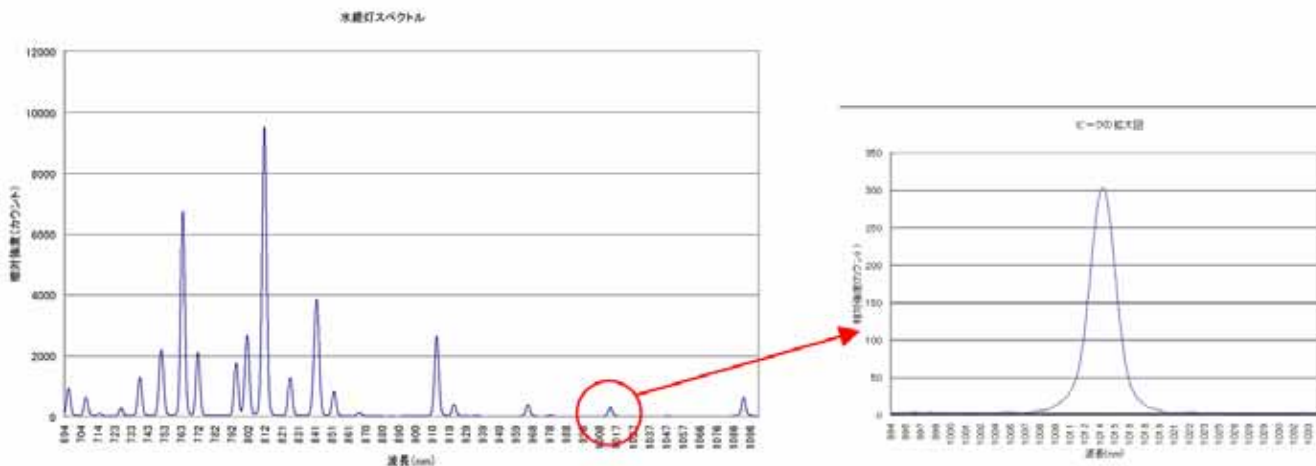
6. 証明

以上のご説明の証明、並びに分光器の評価方法として、いかにスペクトルの左右対称性(シンメトリー)を実現するかというものがありません。

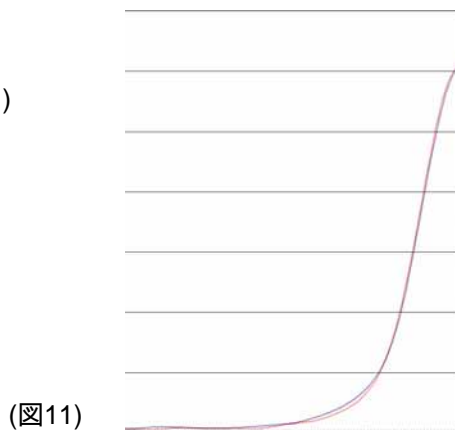
これが満足している分光器こそ「理論に乗った分光器」であると言えます。

今回テストに使用した分光器はCarl Zeiss 社製MCS-NIRになります。

水銀灯の基線を測定したときに、分光器の有効波長範囲内の全基線を0.3nm以下にとらえており、またひとつのピークを拡大したときに、その確かな対象性が確認頂けるかと思えます(図10)



また、拡大図のスペクトルをピークで分割し、左右反転させて重ね合わせると、その左右対称性がよりご理解頂けると思えます(図11)



まとめ

Carl Zeiss社製の分光器の有用性は高いものであると言えますが、実用化の段になりますと、その他の問題点に直面することが多々あります。

それは光を計測するという特殊性に起因するものであり、これらを如何にして解消するかには分光器を含めた総合的な「計測装置」としての性能に直接的に関わってきます。

超小型分光器によるアプリケーション(光学膜厚測定、反射/透過率測定、そして液体濃度測定など)は、最近では分光技術仕様が関心を集めており、弊社の超小型分光器のサイズや高い信頼性を知られた方々は、この装置化というテーマで真剣に検討しており、それに基づく問題点を弊社としても測定データ検証と、今までの経験で解決策を提案しております。

分光器自身に、本日お話したような優れた特徴はありますが、これは入り口にしかすぎません。実用代を考えたときに、今までお気づきにならなかったような問題点が出てくることもあります。

それらの光を使用する開発に弊社の営業/技術スタッフを含め、共同開発の感覚で協力していきます。これが、スペクトラ・コープという社名の由来となっており、分光技術を広く多くの方に的確に使用して頂くというのが会社としての理念です。