

モノクロメータに光を入れる

Getting Light into a Monochromator

このセクションでは、モノクロメータに光を入れる方法と、どのくらいの光を取り出せるかについて簡単にご紹介します。オリエル光源からオリエルモノクロメータへのカップリングを重点的にご説明しますが、どの光源についても、光を集め、分析を行う場合には同じ一般的な原理が当てはまります。特に、ここでご説明するすべての集光原理はモノクロメータの他に分光器にも適用することができます。このセクション全体で、両方の装置についてモノクロメータという用語を使用します。

P1508で幾何学的拡がりについての説明をし、ここでは、幾何学的拡がりは $G = A\Omega$ として定義します。Aはシステムのイメージ面のイメージ領域であり、 Ω はそれに付随する立体角です。また、光学システム内のどのコンポーネントでも、最も幾何学的拡がりが低いコンポーネントにより、システムのスループットが制限されることにも注目します。多くの分光システムで、モノクロメータは幾何学的拡がりが最も低いコンポーネントです。モノクロメータの幾何学的拡がりは、スリット領域と受け入れ立体角の積です。弊社の77200および77700 1/4 mモノクロメータは、より小型の1/8 mモノクロメータおよび分光器に比べて大きな幾何学的拡がりを有しています。

お使いのモノクロメータを選択したら、その幾何学的拡がりを大きくする方法はありませんので、光源と検出器のカップリングについて考える必要があります。ここでは、最適化可能な入射オプティクスがシステムのスループットを制限しないことを確実にする方法について、いくつかご紹介いたします。

モノクロメータと光源を連結して用い、単色励起ビームを作る場合、迷光を考慮する必要はほとんどありません。多くの場合その目的はシステムにできるだけ多くの光を入れることで、形状にはこだわらないからです。しかし、出射側に検出器を配置する場合、特にオリエルの InstaSpec™ CCDなどの大面積検出器では、迷光については十分に検討する必要があります。そのため、モノクロメータの入射側で幾何学的拡がりを制限し、システムのSN比を改善させる場合があります。弊社の77400および77700モデルには、これに対応する内部バッフルが搭載されています。

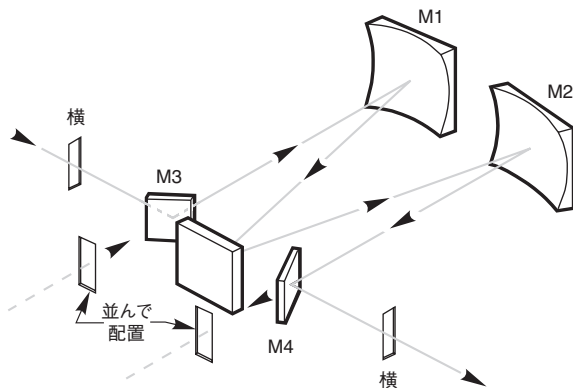


図1：77200 1/4 mモノクロメータのオプティクス。

受け入れコーンとモノクロメータオプティクス

図1はNewportの77200 1/4 mモノクロメータのオプティクスを示します。弊社の77250 1/8 m、77700 MS257™、およびCornerstone™ 装置も、同様のレイアウトです。図2は、図1に示すモノクロメータへの入射方法を光学的に示したものです。

図1および図2から、モノクロメータには受け入れピラミッド角が存在することが容易にわかります。これは多くの場合Fナンバーで表されます。内部オプティクスの位置と寸法がこのピラミッドを決定します。図2で示すとおり、光学的にはスリット後部の回折格子のイメージで表されます。この回折格子のイメージの方向でスリットを通過する光だけが有効です。

通常、このピラミッドは受け入れ円錐角として扱います。円錐の頂点がスリットの中心であり、Fナンバーは四角形の回折格子のイメージにおける同等な円が決定します。「同等な円」とは、対応する四角形と同じ面積の円を指します。この定義により、内接円または外接円のいずれかを使用する場合よりも、Fナンバーの近似をより正確に定義することができます。

これに基づいて、77200 1/4 mの受け入れ円錐角は半角で6.4°です。77250 1/8 mの半角は7.7°であり、MS257™ では7.4°です。コーナーストーン130および260モノクロメータの半角の受け入れ円錐角も、同様に7.7°と7.4°です。

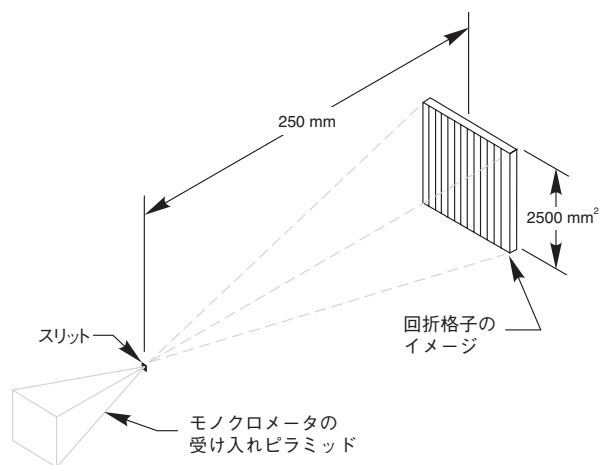


図2：77200のスリット、第1ミラーおよび回折格子を光学的に表したものです。

表1：さまざまなFナンバーの装置における半角と立体角

F/#	$\theta_{1/2}$ (度)	Ω (ステラジアン)
2.0	14.48	0.200
2.2	13.14	0.164
2.4	12.02	0.138
2.6	11.09	0.117
2.8	10.29	0.101
3.0	9.59	0.088
3.2	8.99	0.077
3.4	8.46	0.068
3.6	7.98	0.061
3.8	7.56	0.055
4.0	7.18	0.049
4.2	6.84	0.045
4.4	6.52	0.041
4.6	6.24	0.037
4.8	5.98	0.034
5.0	5.74	0.031

モノクロメータのFナンバーの関連性

P1508で、Fナンバーの概念をご説明しました。通常、Fナンバーが低いと、集光力またはスループットが高くなります。これは、集光した光、または光束FがFナンバーの二乗に反比例するという、以下に示す概念のようになります。

$$\phi \propto \frac{1}{(F/\#)^2}$$

先述の幾何学的拡がり、Fナンバーよりも基本的な考えであることを示しました。弊社の77250および77200モノクロメータは、幾何学的拡がりがFナンバーよりも優れた測定基準であることを示す良い例を提示します。77250の有効Fナンバーは3.7であり、77200ではF/4.4です。Fナンバーと集光した光の関係に基づくと、77250の方が高いスループットがあると予想できます。 $(4.4/3.7)^2 = 1.42$ 倍です。しかし、所与の帯域幅を維持するため、77200のスリットは77250のスリットの2倍の幅があります。スリットの高さの違いを無視すると、幾何学的拡がりを加味すると、広帯域光源の場合、77200のスループットは77250よりも1.38倍大きくなります。

Fナンバーは、スリット領域が同一のモノクロメータを比較するときだけに使用できる基準です。

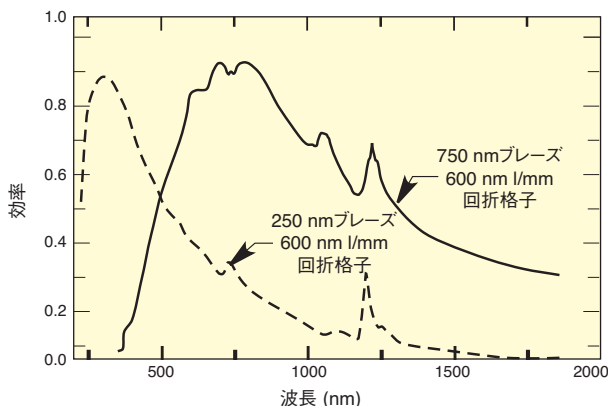


図3：2つの600 nm/mm回折格子の効率。

入口側のスリットは出口側のスリットでイメージングされる

光は回折格子に当たると分散し、各波長は理論的にその波長に適した角度で回折格子から離れます。正しい角度で回折格子を離れ、出口側のスリットを通過するのは一部の波長です。

波長の分散効果は、モノクロメータの光学システムの重要な結果を評価するため、無視できません。つまり、オプティクスが入口側のスリットを出口側のスリットに向けてイメージングを行います（分光器の場合、検出器に向けて）。回折格子の角度が小さいと、多くの場合効率的な1:1のイメージングとなりますが、これは装置ごとに異なります。MS257™はシステム全体で110%の倍率があります。これには重要な意味があります。モノクロメータの出力を小型検出器または出口側のスリットの光ファイバに入れようと試みている場合、出現したビームのサイズと位置が極めて重要になります。出力のサイズと位置の多くは、入射スリットの照射によって決定されます。

特定のモノクロメータの最適化

最も高いスループットを得るためには、最も効率的な回折格子を選択し、モノクロメータのスリットサイズを最適化する必要があります。

回折格子

目的の波長で最も効率的な回折格子を選択してください。回折格子のブレイズが良いガイドとなります。広いスペクトル領域を対象とする場合、他のシステムの効率の悪さを補うような回折格子を選択します。図3は弊社で扱っている回折格子の内、2種類の相対的な効率を示しています。750 nmにブレイズを付けた回折格子は、500 nm以上で明らかに良好な性質がある一方、250 nmブレイズの回折格子は、紫外領域に優れた性質があります。

スリット幅

通常、スリット幅は必要なバンドパスまたはスペクトル分解能に到達するように選択します。スループットを最適化するため、できるだけ幅の広いスリットを使用し、同時に他のシステム要件をも満たします。スリット幅を大きくすることにより得られる効果は、次の条件次第です。

- スリット面での光源のイメージ
- 光源のスペクトル

入射スリットにおける光源のイメージが大きく、均等であれば、両方のスリット幅を倍にすることで、約4倍の照射輝度をモノクロメータに入れることができます（スペクトル分布が平坦な広帯域光源の場合）。スペクトル特性が強いと、この「利得」は根本的に変わります。

図4は、スリット幅に対する7250 1/8 mモノクロメータを通過するパワーの変動の測定値です。波長は500 nmで、6333 100 W QTHランプを光源としました。F/1.5の集光レンズを使用して光を集め、ビームはF/4.5のモノクロメータで集光しました。スリットでの光源のイメージの測定値は6.9 x 12.6 mmであり、スリットの最も幅の広い部分を超えています。

両方のスリット幅を2倍にすると、スリット幅を超えて、モノクロメータの光源の2倍のパワーが得られます。

多くの光源において、入射スリットのイメージは一定ではなく、不規則です。また、スペクトル線構造を有しています。両方のスリット幅を2倍にすると、パワーは2から4倍になります。

スリットのサイズが、そのスリットにおける光源のイメージよりも大きければ、入射スリットを開いてもモノクロメータのパワーには影響がありません。この場合、出射側のスリット幅を2倍にしても、広帯域光源では、パワーは約2倍になるだけです。

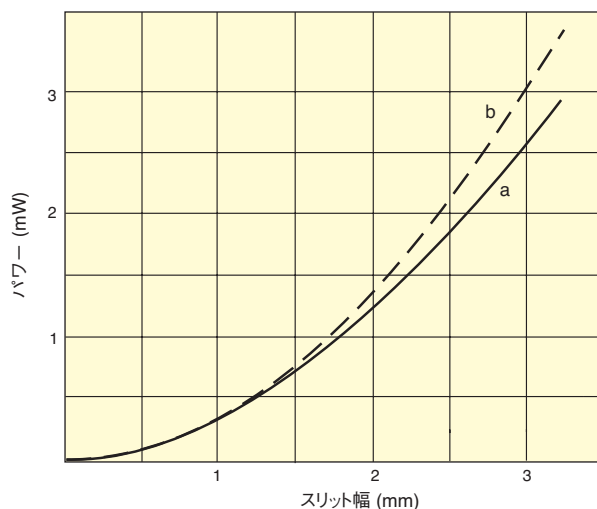


図4 (a) : 77250モノクロメータのスリット幅に対するパワー測定値の変動。波長500 nmで、500 nmプレースの回折格子を使用しました。シリーズQハウジングに実装した6333 100 W QTHランプから出た光を、焦点距離150 mmのレンズで入射スリットに集光しました。曲線(b)は、スリット幅を二乗したときのパワー変動の理想的な関係を示しています。

スリット高さ

スリット面の光源のイメージが長い場合、できるだけ長いスリットを使用します。長いスリットは、スリットでの光源のイメージが長い場合、より大きなスルーポットを得ることができます。モデル6269 kW キセノンランプからの光をF/1で集め、F/5でイメージングすると、スリットでのアーカイイメージの高さは約16 mmとなります。77200の固定スリットの高さは18 mmであり、77200を通過するパワーは、Multiple Slit Wheel (複数のスリット付ホイール) 上の12 mmのスリットよりも30%増加します。

上記の説明では、出射光における入射スリットのイメージングについて言及しました。出射光を小型のサンプル、検出器または光ファイバ上に当てるのであれば、引用した12 mmや18 mmよりも短いスリットが有益かもしれません。これらの場合、出口側のスリットの有効領域に一致する、入口側のスリット領域における入射光束に特に気を付けなければなりません。長いスリットにメリットがあるとは限りません。また、システムに迷光を追加するおそれもあります。

まとめ

- 最も効率的な回折格子を選択する
- できるだけ幅の広いスリットを使用する
- 実用上最も長いスリットを使用する
- 出射スリットの有効領域で最も多くの放射輝度が得られるように入射スリットに光を当てる

光源の寸法が、スリットの寸法に必ず一致するようにしてください。これを実現するため、モノクロメータの側面を回転させる必要があるかもしれません。

放射素子のサイズ

主な放射素子のサイズは、入射オプティクスを選択する際に重要になります。アークランプの素子の大きさはP183を参照してください。QTHランプの場合、P221を参照してください。2つの極端な事例を簡単に説明し、中間的な事例についてはある程度の長さでご説明します。

事例I - 放射領域が大きい場合

大きな均等な光を発振する光源は、受け入れ円錐角の底部を満たします (図2を参照)。入射オプティクスはモノクロメータを通る放射輝度を増加させることはありません。また、放射領域が円錐角の底部を満たし続けている限り、モノクロメータを放射領域に近づけたり遠ざけたりしても、放射輝度は増加しません。高い放射輝度を得るには、できるだけ大きなスリットを使用します。広帯域光源で、所定の帯域幅の場合、77200に長さ1.8 mmのスリットを使用すると、77200 1/4 mモノクロメータのスルーポットは77250の4.2倍となります。

事例II - 「点光源」 (またはレーザー)

理論的な点光源は存在しませんが、非常に小型の光ファイバ光源、ピンホールイメージおよびレーザー光源 (またはレーザー誘発放射) は、点光源に近い放射輝度があります。点光源の近似では、放射光源の拡大したイメージはスリット幅未満である必要があります。

点光源に必要なことは、Fナンバーの小さいオプティクスを使用して光源になるべく多くの光を集め、それをモノクロメータのFナンバーと同じFナンバーのスリット開きに集光することだけです。

例

直径6 μm のシングルモードファイバからF/2で集光し、F/10のスリットで再イメージングすると、5倍に拡大することができ、結果的にスリット上に約30 μm のイメージが得られます (回折やレンズの収差を無視した場合)。スリット幅が1.56 mmの場合 (5 nmバンドパス、77700および1200 μm の回折格子)、点光源の近似は有効です。F/4で集光しても、モノクロメータを通過する放射輝度は増加しませんが、入射スポットが小さくなるので、分解能がわずかに向上します。

技術メモ

高パワービームにおける特別な検討事項

高次散乱や複数の波動混合の結果など、高パワービームで低レベルの放射輝度を検出しようと試みている場合、回折格子やスリットを損傷しないように気を付けてください。代表的なビームの直径は数mmですので、球面レンズとシリンドリカルレンズを組み合わせることでスリット上に集光し、スリットに沿ってビームを広げ、回折格子を満たすことができます。事前分散プリズムまたはノッチフィルタを使用するとスペクトルの識別がしやすくなり、モノクロメータに入るパワーを減らすことができます。

警告

1. 実際のイメージサイズは、光収差および分散効果が原因で、単純な計算で予想したものよりはるかに大きい場合があります。
2. 光が入射スリットを満たさない場合、バンドパスは分散およびスリットサイズでは決定されず、入射スポットサイズと出射側のスリット幅の畳み込みによって決定されます。
3. 高いFナンバーの光を操作すると、光が回折格子を満たさなくなり、分解能の向上につながりますが、過度な場合は分解能が損なわれます。
4. 高いFナンバーの光を高出力レーザーで操作すると、回折格子のダメージにつながるおそれがあります。

事例III - 放射素子および同等寸法のスリット

寸法

放射光源とスリットサイズの寸法は、多くの場合同等です。Newportの高強度アークランプの寸法は、0.25 mm x 0.25 mmから3.0 mm x 2.6 mmです。小型の高輝度タングステンハロゲンフィラメント（P221参照）の寸法は、1.7 mm x 0.65 mmから6 mm x 16 mmです。77250 1/8 mモノクロメータにおける10 nmバンドパス（1200 l/mmの回折格子付）のスリット寸法は、1.56 mm x 12 mmです。

非干渉性（つまり、レーザーではない）放射からの集光ビームによって生じる蛍光領域も、mm単位の寸法です。

モノクロメータ、回折格子およびスリットがすべて先ほど提案した通りに最適化されていると仮定するところから始めます。2つのルールを挙げ、それに対する広範囲なコメントを行い、その後2つの例を提示します。

最も効果的なカップリングを行うための2つのルール：

1. **モノクロメータの受け入れ円錐角を必ず満たすこと。**
2. **ルール1を順守しつつ、スリットになるべく多くの光を通過させること。**

問題は、2つのルールがお互いに結びついていて、多くの光学システムで満足できるということです。我々の議論の多くは、放射光源からの光を集め、コリメートする集光レンズおよびフォーカシングレンズという2つの光システムを取扱います。図5のような2つのレンズシステムを使用すると、コリメートしたアームの長さをお使いのセットアップにあわせて設定できるので、設計の実装を簡素化できます。

単独のレンズシステムは、この2つのルールを満足するには十分ではありません。また、次に挙げる関連性がより複雑になります。

- 光源からレンズまでの距離と集光の関係
- 光源からレンズまで、レンズからスリットまでの距離と光源の拡大の関係
- レンズからスリットまでの距離と集光Fナンバーの関係

また、光源から光を効率的に集光するには、直径の大きいオプティクスを使用する必要があります。Newportのモノクロメータ用イルミネータは、単独光学ソリューションの効果的な実装を実証しています。

技術メモ

PhotoMax™

PhotoMax™ランプハウジングはルール1と2を満たすように設計されています。楕円形反射板が光を非常に効果的に集め、スリットに集光します。低パワーアーク光源またはその他の小規模な放射素子を使用する場合、適切なPhotoMaxを使用することで他のどの集光レンズのシステムよりも多くの光をモノクロメータに入れることができます（注：放射システムが小型であることが必須条件です。つまり、ギャップが約1.5 mm未満のアーク光源）。オプティクスを選定する必要がないので、PhotoMaxシステムについてここでは詳しくご紹介します。

ルール1

受け入れ円錐角を満たすということは、スリット上のビームを正しいFナンバーで集光することを意味します。正しいFナンバーとは、77250、77400および77700ではF/4、77200ではF/4.4です。これらのFナンバーで集光すると、垂直方向および水平方向の直径に沿って回折格子の領域を超えて満たし、端部には光が当たらないようになります。低いFナンバーで集光すると、回折格子に当たらず、モノクロメータ内を反射する迷光となり、光は失われます。高いFナンバーで集光すると光はすべて回折格子に当たりますが、スリット上の放射素子のイメージは必要以上に大きくなり、システムの効率が損なわれます。

モノクロメータの入射光に引用したFナンバーは、レンズの焦点距離をビームの直径で割ったものであることを忘れないでください。このFナンバーは、レンズのFナンバーよりも大きくなります。これは、通常、ビームがレンズの開口径全体を完全に満たすことはないからです。

ルール2

図5は代表的な光学システムを示しています。フィラメントから出た光をレンズ1が集め、レンズ2がモノクロメータのスリットに集光します。スリット上のフィラメントの倍率 (m) は、Fナンバーの割合により与えられます。

$$m = (F_2/\#)/(F_1/\#)$$

ビームは「コリメートされている」ので、ビームの直径はほぼ一定であり、そのため倍率は焦点距離の割合 (f_2/f_1) でも与えられます。

弊社の集光レンズが作るビームの直径は、33 mm、48 mmおよび69 mmです。ビームの直径が大きくなると、大きい、より高価なレンズが必要になります。500 Wの定格出力を有するランプには33 mmのビームを使い、500 W~1 kWのランプには48 mmを使用します。弊社のAspherabs®は、どのランプでも69 mmの低収差ビームを発生させます。

ビーム直径を定義すると、レンズ2を固定することができます。直径33 mmのビームで、77200モノクロメータに必要なFナンバーがF/4.5であれば、レンズ2に必要な開口径は少なくとも33 mmで、焦点距離は $33 \times 4.4 = 145.2$ mmとなります。シンプルなレンズ形状の中でも、平凸レンズは収差が最も低いので、直径1.5インチまたは2インチで、焦点距離が150 mmの平凸レンズであれば、レンズ2として使用できます。

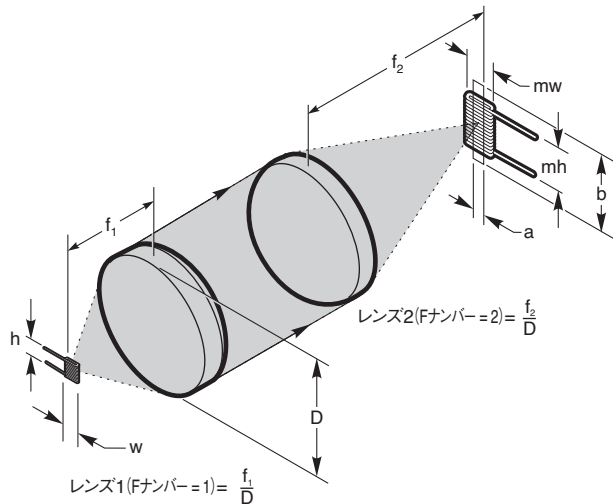


図5：集光レンズと第2フォーカシングレンズのシステム。

集光レンズ

図5をベースとしたシンプルなモデルは、レンズ1にFナンバーの低いレンズを選択することの重要性を示し、光源の適切な方向を示すために非常に便利です。

サイズ「 $w \times h$ 」の、均一な長方形の放射素子を仮定します。レンズ2は固定しています。拡大を可能にするには、レンズ1のFナンバーは $(F/\#_2)/m$ とする必要があります。ここで「 m 」は放射素子のスリットに対する倍率です。

有効なスリット寸法は「 $a \times b$ 」です。これらの値はバンドパスと検出器のサイズなどの制約により決まります。

スリット面での光源の拡大イメージの寸法は、「 $mw \times mh$ 」です。通常、このイメージはスリット寸法よりも大きいので、口径食による損失があります。口径食による損失は、光源の形状、スリットの形状そして倍率に依存します。ここでは単純にパラメータ V を使用してこの影響を定量化します。光源のイメージがスリットよりも小さい場合、 V は1であり、損失がないことを示します。しかし、光源のイメージがスリットを完全に超えて満たす場合、 V はスリット領域と拡大光源領域の割合となります。

$$V = (a \times b) / (mw \times mh)$$

スリットに入るパワーは、次の式に比例します。

$$\frac{m^2}{(F/\#_2)^2} \times V$$

第1項は、集光が $1/(F/\#_1)^2$ に比例することを反映しています。第2項は、口径食による損失です。

図6はスリットを通る相対パワーに対する倍率の代表的なグラフです。ここには3つの領域があります。倍率が非常に低いと、 $V = 1$ ですが、集光されるパワーはほんのわずかです。集光されるパワーは m^2 に応じて増加し、モノクロメータに入るパワーについても同じ関係になります。

倍率 m^1 では、放射素子のイメージの幅がスリット幅に届き、 V は $1/m$ に応じて減少します。この領域では、次の式が成り立ちます。

$$V^* = a/mw$$

従って、上記のパワーの関係性は、集光した放射輝度が m に従って増加することを可能にします。

m_2 では、拡大した光源イメージがスリットの高さを満たします。 m が m_2 より大きいと、 V は前ページの完全な定義に従います。この m_2 との反比例関係は、集光した放射輝度における直接的な m^2 の増加を相殺し、モノクロメータに入るパワーが $(a \times b) / (w \times h)$ に比例して一定になります（これらは光源と装置のパラメータであり、オプティクスを選定による影響はありません）。

* この V に関する式は先ほどの定義に従いますが、この場合スリットの有効高さ（ b ）は mh と同一です。この2つの項は相殺され、 $V = a/mw$ が残ります。

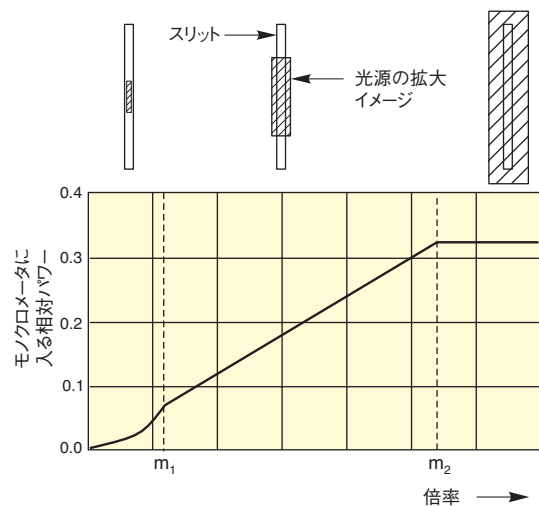


図6：均一な長方形の光源から出てスリットに入る光の相対パワー。このとき、スリットに当たる光源の倍率は変化します。上図では、3つの異なる m の領域を示しています。

図6は集光レンズのレンズを選定するときに役立ちます。可能な限り最高性能を達成するために必要なFナンバーを理解することができます。

$F/\#_2$ はモノクロメータの受け入れ円錐角を満たすようにすでに選択されています。集光レンズの $F/\#$ 、 $F/\#_1$ は次の式で与えられます。

$$F/\#_1 = (F/\#_2)/m$$

$F/\#_2$ がわかっているので、倍率図上の利用可能な集光レンズをすぐに見つけることができます。図7は、 $F/4$ の6332 50 W QTHランプの光がモノクロメータに入る場合の倍率図を示しています。

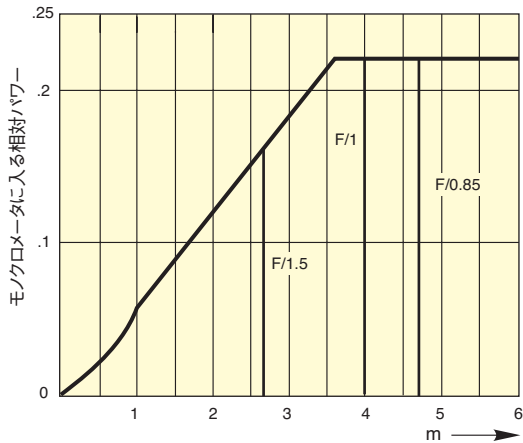


図7：6332.50 W QTHランプで、F/4で集光したときに1.56 mm x 12 mmのモノクロメータのスリットに入る相対パワー。F/1の集光レンズはF/1.5よりも良好ですが、F/0.85はF/1と同等です。

どのランプを使用するか

このレンズの集光とリフォーカシング手法に対する理想的な放射光源は、スリットと同じ形状の高放射素子です。放射素子の大きさは、スリットの寸法を m で割ったもの以上でなければなりません。Orientalのミラーおよび集光レンズの場合、この割合の実用的な最大値は5です。

放射光源は、目的の波長の放射輝度と、拡大したイメージが有効スリット領域内に合致する量に基づいて選択する必要があります。

例

77200 1/4 mモノクロメータを備えたモデル6253 150 Wキセノンランプから得られる可視光の光（帯域幅2 nm）用のオプティクスを選択します。

最も効率的な回折格子は、350 nmブレード付のモデル77233 1200 l/mmの回折格子です。帯域幅2 nmでのモノクロメータのスリット幅は0.63 mmです。これに最も近い固定スリットは0.6 mm ($a = 0.6$)です。有効スリット高さを12 mm ($b = 12$)と仮定します。通常、アークランプは垂直にマウントするので、アークはモノクロメータのスリット（通常は垂直方向）に対して適切な方向で配置します。アークの寸法は0.5 mm (w) x 2.2 mm (h)です。

ルール1を満たすには、F/4.4のフォーカシングレンズが必要です。

1.5インチシリーズの付属品で動作するという事は、ビームの直径は33 mmであるという意味であり、従ってフォーカシングレンズの焦点距離はおおよそ150 mmとする必要があります。


集光レンズを選択する際には、 m に対するスリットを通る相対パワーを示す図6のような図表により、F/0.85の鑄造非球面集光レンズがF/1よりも良い結果を生むことがわかります。事実、F/0.85のレンズにより、ほぼ最大に近い性能を実現できます。

従って、次のようなオプションが考えられます。

レンズ1：66919研究用光源に備え付けのF/0.85集光レンズ。

レンズ2：焦点距離150 mmのガラス製平凸第2フォーカシングレンズ（モデル40570）。

Pyrex® F/0.85集光レンズの透過率は350 nm未満では低下しますのでご注意ください。従って、紫外光の場合、66907光源のF/1集光レンズと焦点距離150 mmのフューズドシリカ製平凸レンズ（モデル41570）、そして250 nmブレード付の1200 l/mm回折格子の組み合わせが最適といえます。

 詳細は当社のWebサイトを参照してください。