

入射スリットを通過するパワー

収集したパワーの、大部分がモノクロメータのスリット面に向けて反射されます。反射効率は約88%です。スリット面とミラーの距離は24 cmなので、光源イメージと光源サイズとの比率は次の式で求められます。

$$24/13.3 = 1.8$$

光源の大きさは1.6 mm x 3.3 mmなので、イメージのサイズは2.9 mm x 5.9 mmとなります。イメージが一定であると仮定すると、スリットを通過する割合を単純な幾何学的計算で求めることができます。

$$\frac{1.56}{2.90} = 0.54$$

1.56/2.90の因数は、例1と同様に開口効率を求めています。そこで、スリットを透過するパワーは、次の式で求めることができます。

$$0.88 \times 0.54 \times 4 \text{ mW} = 1.9 \text{ mW}$$

モノクロメータを通過するパワー

7340ミラーからの光は、モノクロメータの回折格子から、はみ出さず入射されます。回折格子が30mm角で、モノクロメータの焦点距離が125 mm、ミラーとの距離が上記の場合、幾何学的計算から82%の光が回折格子に照射されることがわかります。回折効率は波長500 nmのとき約0.6であり、4枚のミラー表面それぞれの反射率は約0.88なので、合計透過率は次のように導くことができます。

$$0.82 \times 0.65 \times 0.88^4 = 0.32$$

Overfillは、ミラーからの光が回折格子全体に十分に行き渡るという意味と解釈しました。出力パワーの計算値は、 $0.32 \times 1.9 \text{ mW} = 0.61 \text{ mW}$ で、実際の測定値は0.5 mWでした。この誤差の原因の一部は、計算全体で近似法を使用したことによるものです。モノクロメータから出る光はピラミッドのように6.8度の半角で広がります。

WEB 詳細は当社のWebサイトを参照してください。

FT-IR分光法紹介

Introduction to FT-IR Spectroscopy

FTIR スペクトロメータはNIRからFIRまでの広帯域なスペクトルを捉える計測装置です。分散測定器（回折格子のモノクロメータや分光器）と異なり、FTIRスペクトロメータはすべての波長を同時に収集します。この機能は多重化利得またはフェルゲット利得と呼ばれます。

FTIRスペクトロメータはFTIRと呼ばれる場合がほとんどです。厳密に言うとFTIR（フーリエ変換赤外線）は赤外スペクトルを得るための方法です。まず干渉計を使用してサンプル信号のインターフェログラムを収集し、次にそのインターフェログラムにフーリエ変換（FT）を行ってスペクトルを得ることを指します。FTIRスペクトロメータはインターフェログラムを収集し、デジタル処理してフーリエ変換を行い、そのスペクトルを表示します。

FT-IRスペクトロメータを使用する理由

次に該当する項目がある場合、分散測定器ではなくFTIRを選択してください。

- 赤外領域が研究対象
- 高いスペクトル分解能が必要
- 弱い信号が研究対象
- 迅速なスペクトル測定と高S/N比が必要
- 高いスペクトル精度が必要

FTIRにはこれらのカテゴリーを得意とする強い理論的理由があります。お客様のアプリケーションでこれら潜在的な長所をどの程度実現できるかは、装置の設計と測定条件に大きく依存します。

FT-IRスペクトロメータの動作方法

マイケルソン干渉計

一般的に、FTIRは図1に示すようにマイケルソン干渉計をベースにしています。この干渉計は、ビームスプリッタ、固定ミラー、前後方向に極めて精密に移動するミラーで構成されます。ビームスプリッタは特殊な材料で作られており、照射光の半分を透過させ、残りの半分を反射します。光源から出射された照射光はビームスプリッタにぶつかり、2つのビームに分かれます。片方のビームはビームスプリッタを透過して固定ミラーに向かい、他方はビームスプリッタで反射して可動ミラーに向かいます。固定ミラーと可動ミラーは照射光を反射してビームスプリッタに戻します。この反射された光の半分が再びビームスプリッタを透過し、残りの半分が反射されます。その結果、一方のビームは検出器に向けて通過し、他方のビームは光源に戻ることであります。

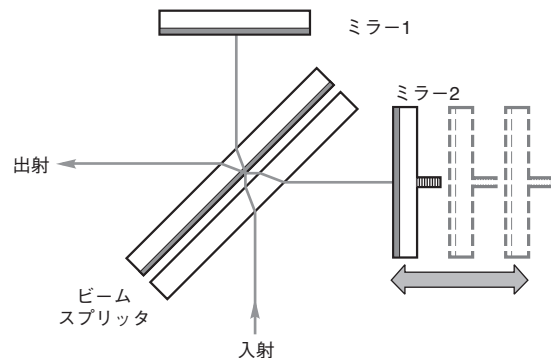


図1：汎用マイケルソン干渉計の概略図。

OPDおよびZPDとは

光路差 (OPD) とは、干渉計の2本のアームを通して移動する2つのビームの光路の差を指します。(波長の整数倍のところでは明線、光路差が波長の半整数倍のところでは暗線になります。) OPDは可動ミラーが移動した物理的距離 (2、4などの乗数で乗算したもので、使用した反射素子の数の関数) に干渉計のアームを満たす媒質 (空気、充填システムの窒素など) の屈折率nに掛けた数に等しくなります。FTIRの生データは、たくさん (信号、OPD) の対の値で構成されています。

ビームスプリッタからの固定ミラーおよび可動ミラーの距離が等しいとき、FTIRの自然なリファレンスポイントが生まれます。この状態が、光路差がゼロの位置、ZPD (zero path difference) と呼ばれます。可動ミラーの変位ΔはZPDから測定します。図2では、可動ミラーから反射したビームが固定ミラーから反射したビームよりも2Δ多く移動しています。光路差とミラー変位との関係は、次の式のようにになります。

$$OPD = 2\Delta n$$

インターフェログラム

インターフェログラムはFTIRスペクトロメータにより取得できる信号フォーマットの名称です。単一波長の光だけが存在する場合に考えられる単一正弦曲線に比べて非常に複雑な信号であることが一般的です。図3は2波長光源の光路を示し、図4は広帯域光源のインターフェログラムを示します。図4の中心部の大きなスパイクはセンターバーストであり、広帯域光源の特徴です。ZPDは全ての波長で同位相になっています。従って、これらはすべて最大時の集計であり、システムの検出器は極めて強力な信号を生成します。

光路差 (OPD) が大きくなるにつれ、異なる波長がさまざまな場所でピークの読み込みを発生させます。広帯域信号の場合、同時にピークに達成することは二度とありません。従って、センターバーストから離れるにつれて、インターフェログラムは振幅が減少した複雑な外観の振動信号となります。

インターフェログラムのX軸は光路差を表します。それぞれの個別スペクトル成分は、その波長に周波数が反比例するこの単一正弦信号に寄与します。ここで、スペクトル測定単位を定義します。波数 (cm⁻¹) はnで表されます。波数は特定の波長におけるcm当たりの完全な波の数を表します (通常は真空中、つまり屈折率n=1の場合)。スペクトルを波数で定義すると、エネルギー準位と直接関連付けられるという長所があります。スペクトルの位置4,000 cm⁻¹におけるスペクトル特性は、2,000 cm⁻¹でのスペクトルシグネチャの遷移エネルギーの2倍で分けられた2つの原子レベルの間の遷移を表します。

表1に、対応する波長、波数、周波数およびエネルギー値のサンプルを一覧にしています。

表1: 異なる測定単位の対応値

ν (cm ⁻¹)	λ (μ m)	f (10 ¹² Hz)	E (eV)
200	50	5.996	0.02479
500	20	14.99	0.06199
1000	10	29.98	0.12398
2000	5	59.96	0.24797
5000	2	149.9	0.61922
10,000	1	299.8	1.23984

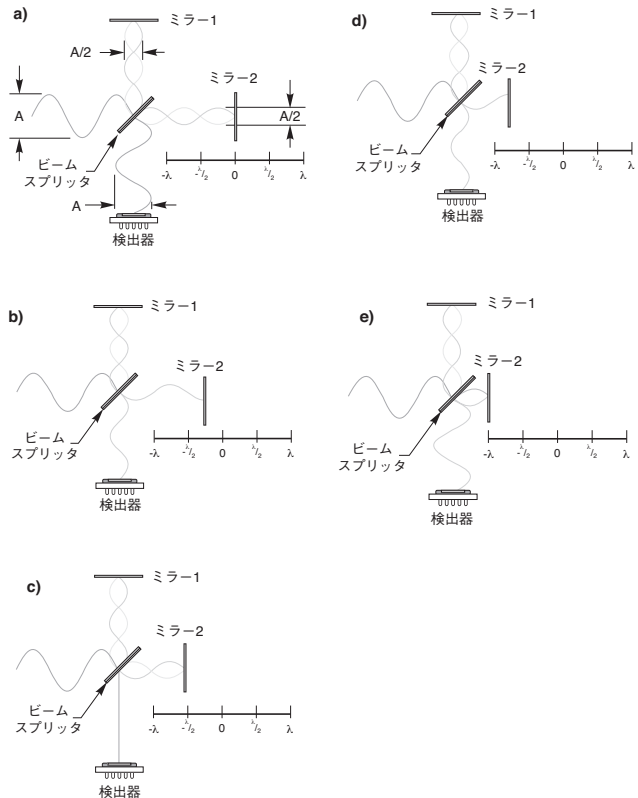


図2: ZPD条件からOPD=λにスキャンする場合の波とその位相、入射光、出射光および干渉計の2つのアームの概略図。
(a) OPD=0の場合。(b) 1/4 OPDの場合。(c) 1/2 OPDの場合。
(d) 3/4 OPDの場合。(e) 1 OPDの場合。

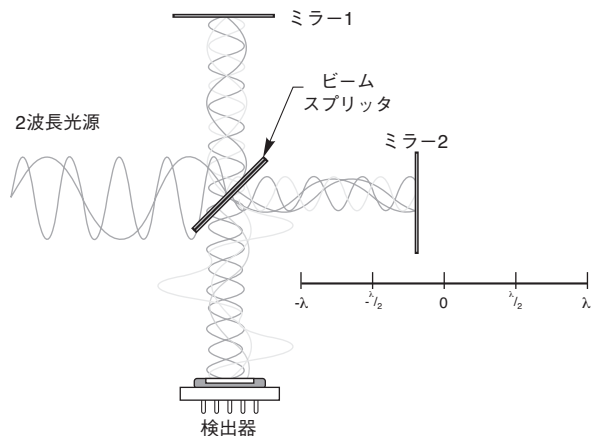


図3: 2波長光源の場合。

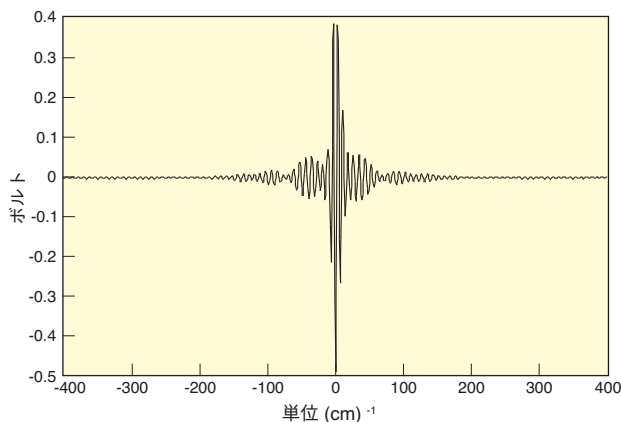


図4：広帯域光源のインターフェログラム。

フーリエ変換アルゴリズム

インターフェログラムを収集すると、スペクトル（発振、吸収、透過など）に変換する必要があります。この変換プロセスは、高速フーリエ変換アルゴリズムを使用して行います。この方法は、1965年にJ.W. CooleyとJ.W. Tukeyによって発見され、その後コンピュータの演算能力が飛躍的に向上し、値段も手頃になったため、FT-IR型装置の市場での存在感を高める事となりました。

スペクトル計算には数多くの手順が必要となります。装置の欠陥や基本的なスキャン限界は、位相補正およびアポディゼーション手順を行うことで調節する必要があります。これらの電子的、光学的な欠陥は、さまざまなスペクトル成分の時間的遅延や位相遅延を引き起こし、解釈を誤らせることがあります。アポディゼーションはスペクトル漏れを補正するために使用します。スペクトル漏れは、スキャン限界でスキャンを打ち切ることにより、スペクトル特性が人工的に生じることを指します（急激な遷移をフーリエ変換すると、非常に広帯域なスペクトルが発生します）。分解限界は、達成可能なOPD（光路差）を単純に逆数にしたものです。

FT-IRは高い分解能力があります。そのため、弊社のMIR 8025™などの2 cmのOPDに対応する装置は、0.5cm⁻¹の分解能を達成できます。表2は波数表示の分解能と、分散分光法で慣習となっているナノメートル単位表示の分解能の関係を示します。

表2：波数とナノメートルで表した分解能の値

波長 (μm)	分解能 (cm ⁻¹)	分解能 (nm)
0.2	1	0.004
0.5	1	0.025
1	1	0.1
2	1	0.4
5	1	1.0
10	1	10
20	1	40

分散型装置に対するFT-IR型装置の利点

次に、分散スペクトロメータに対するFT-IR型装置の重要な利点についてご説明しますが、まず2つの装置の比較を行います。

表3：FT-IRおよび分散スペクトロメータの比較

	MIR 8025™ FT-IR	Cornerstone™ 260 1/4 m 回折格子モノクロメータ
波長範囲	700 nm - 28 μm	180 nm - 24 μm
最大分解能	0.024 nm @ 700 nm	0.15 nm
エタンデュー@1μm、0.15nm分解能	0.38	0.001

多重（フェルゲット）利点

分散スペクトロメータでは、波数は回折格子をスキャンすると同時に連続的に観察されます。FT-IRスペクトロメータでは、すべての光の波数が一度に観察されます。分散スペクトロメータおよびFT-IRスペクトロメータを使用し、同一条件下でスペクトルを収集した場合（測定時間、分解能、光源、検出器、光学スルーブット、光学効率がすべて同一の場合）、FT-IRスペクトルのS/N比は分散IRのスペクトルのS/N比よりもÅM（ÅMは分解素子の数）倍大きくなります。つまり、分散スペクトロメータで30分間測定した場合に得られる分解能2 cm⁻¹の800~8000cm⁻¹のスペクトルは、他のパラメータが同一であるという条件の下で、FT-IRスペクトロメータでは同じS/N比が1秒間で収集できるということを意味します。

分光器に付属のアレイ検出器（PDAおよびCCD）にも多くの利点があります。しかし、これらの種類はシステムでの最適なスペクトル範囲でFT-IRよりもかなり短い傾向がある為、この2つの手法はほとんど相補的なものとなっています。

スルーブットの長所

FT-IR型装置は、分解能を達成するためのスリット（従来の意味での）が必要ありません。従って、FT-IRでは分散型装置よりも高いスルーブットが得られます。これはJacquinot Advantageと呼ばれます。実際にはFT-IRシステムにもスリットに似たりミットが存在しますが、これはどのレベルの分解能についても、干渉計の2つのアームで最低限のビームのコリメーションを達成する必要があるからです。ここから使用可能な検出器の最大直径を導き、結像光学系の法則により、有用な入射開口径を定義します。

高分解能

スペクトル分解能はスペクトロメータが狭い間隔に並んだスペクトル特性をいかに良く見分けることができるかを示す尺度です。2 cm⁻¹のスペクトル分解能では、2 cm⁻¹離れたスペクトルのみを見分けることができます。FT-IRでは、到達可能なOPDの最大値がスペクトル分解能を決定します。0.5 cmより離れた距離から、2000 cm⁻¹および2002 cm⁻¹の光のインターフェログラムをお互いに見分けることができます。

FT-IR型装置は波長制限が短い

コリメートした単一波長光源は、正弦曲線形状のインターフェログラムを検出器の中で作製します。光の強度がインターフェログラムのある最大値から次の最大値に移るとき、干渉計の2つ光路差は、入射光のちょうど1波長分変化します。

入射光の波長を決定するには、インターフェログラムの周波数 f_i または周期 $t_i = 1/f_i$ をオシロスコープなどで測定します。その後、次の式から波長を求めることができます。

$$\lambda_i = V_0 * t_i = V_0 / f_i \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 V_0 は光路差の変化速度です (V_0 は走査ミラーの速度に直接関係します。MIR 8025™では、 V_0 は走査ミラーの光速の4倍です。 $V_0 = 4nV_m$)。

一方で、重要な問題点が存在します。速度 V_m 定数を常に一定に保ち、さらに高い精度で速度を把握する必要があります。速度の値を誤ると、式(1)に従って波長尺度がずれてしまいます。 V_m の変動には他の影響もあります。つまり、 V_m の変動は純粋な正弦波からのインターフェログラムの偏差として表われるため、正弦曲線の混合と見なされます。すなわち、入射光に2つ以上の波長があることとなります。この性質は、「スペクトルアーチファクト」と呼ばれる現象を発生させます。

干渉分光法的に精密な駆動部の製造は極めて高額となるため、FTIRの設計者は干渉計内部に基準光源を付け加え、駆動性能の問題を解決しました。He-Neレーザーは、非常に高精度と安定で知られており、どのような状況でも大きく変化しない波長を発振します。He-Neレーザービームは信号路と平行に干渉計を通り、別の検出器で独自のインターフェログラムを発生させます。この信号は干渉計変位（光路差）の極めて精密な測定に使用されます。

He-NeレーザーがベースのFTIRには次の式が成り立ちます。

$$\lambda_i = \lambda_r * (f_r / f_i) \dots \dots \dots (2)$$

下付きのrはHe-Neの参照光を示します。

これで、厳しい速度公差を設けずにスペクトルを計算できるようになりました。

これは理論的な事例に過ぎませんので、次に参照インターフェログラムがMIR 8025™では実際にどのように使用されるかを見てみましょう。

He-Neレーザーの干渉ビームからの信号を検出器で監視すると、正弦曲線信号が観察されます。その平均値はビームが分割されず、干渉が発生する場合に見られる値と同様です。正弦曲線はこの値の周囲で正や負の正弦曲線となります。平均信号はゼロレベルと呼ばれます。高精度の電子回路は、He-Neレーザーの参照正弦曲線がゼロレベルと交差すると、電圧パルスを発生させます。正のゼロ交差のみを使用すると、回路が参照インターフェログラムの1サイクルにつきパルスを1回発生します。あるいは、すべてのゼロ交差を使用すると、このインターフェログラムの1サイクルにつきパルスを2回発生します。後者は多くの場合オーバーサンプリングと呼ばれます。これらのパルスはA/Dコンバータを起動し、メインのインターフェログラムを瞬時にサンプリングします。

ナイキストの定理と呼ばれる原理があります。この定理は、正弦曲線特有の周波数の少なくとも2倍の高さの周波数でサンプリングした場合、正弦曲線を離散状態から元の状態に完全に再現できると言い換えることもできます。この定理を上記の式に適用すると、 (f_r / f_i) の最小値が2なので、 λ_r の最小値は参照レーザーの波長の2倍となることがすぐにわかります。

$$\lambda_{min} = 633 \text{ nm} * 2 = 1.266 \mu\text{m}$$

オーバーサンプリングの場合、参照レーザーの波長は事実上半分になりますので、次の式が成り立ちます。

$$\lambda_{min} = (633 \text{ nm} / 2) * 2 = 633 \text{ nm}$$

実際には、理論限界に近づくともFFT演算が困難になります。そのため、オーバーサンプリングなしでは波長限界を1.4 μm とし、オーバーサンプリングありでは波長限界を700 nmとしています。

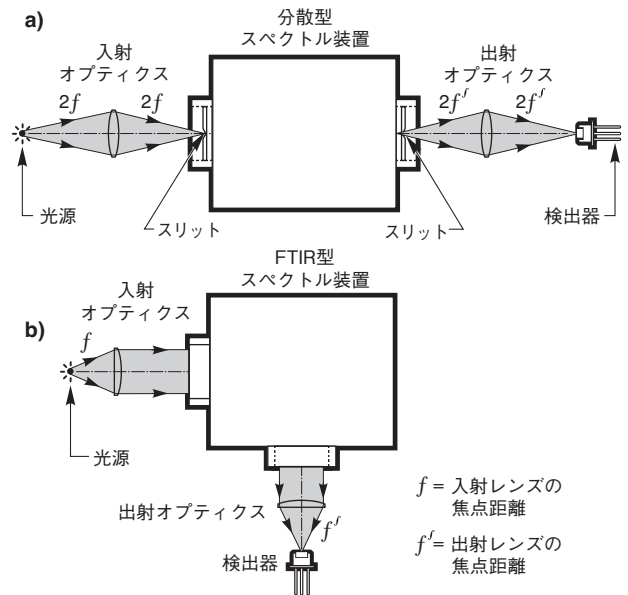


図5：分散型スペクトル装置およびFTIR型スペクトル装置の略図

レーザー

光源

主観

光学測定

光学インクス

分光機器

分解能と拡がり角の関係

FTIRの動作原理は、分散型装置の動作原理とは全く異なります。この比較的新しいアプローチの多くの側面は、分散技術に慣れていた我々にとって波数とう聞きなれない単位から始まる為、直感では分かり難いものです。

図5は分散型モノクロメータおよびFTIRスペクトロメータに付随する外部光学系の代表的な光学レイアウトを示します。FTIRの主な光学特性は、装置の内部に集光素子がなく、平行ビームを処理するという事です。入射スリットから出射スリットに至る分散型装置は、主なスペクトル特性が入射スリットの照射方法や、出射スリットから出た光の収集方法にあまり左右されないという意味で、自己完結型の装置です。外部光学系で光を操作しても、感度を増減させ、迷光や収差を増減させるだけです。

これはFTIRでは異なります。装置を適切に機能させるために、外部の光学系にはFTIRの内部部品と同じぐらい重要な役割があります。図6は単純化した走査型マイケルソン干渉計を光源と検出器をあわせて、より大きな尺度で示しています。最初の仮定として、光源は(単一波長の)点光源とします。従って、干渉計に入るビーム(光線1-1')は完全な平行ビームとなります。干渉計を出たビームは検出器の表面上の点に集光されます。走査ミラーの動きに合わせて、検出器がインターフェログラム(干渉計内の2種類のビームの間の一連の構築的・破壊的相互作用)を記録します。走査ミラーの移動量が大きいほど、インターフェログラムが長く、達成可能なスペクトル分解能が高くなります。

現実には、点光源も純粋な平行ビームも存在しません。有限な大きさの光源が干渉計内で扇形の平行ビームを発生させます。

この扇形の周縁部のビーム(2-2')を図6に示します。このビームは検出器の中心からいくらか離れた場所で集光されます。正確に言うと、光源が円形の場合、リング形状に集光されます。ビーム1-1'と2-2'では干渉条件が異なるので、先ほどの単純な図式はさらに複雑さを増しています。

ZPDでは、ビーム1-1'と2-2'の両方が構築型の干渉条件であり、検出器全体が高レベルの強度を感知します。しかし、走査ミラーがZPDから離れると、次の構築型の干渉はビーム1-1'よりもビーム2-2'の方が早く発生します。この結果、検出器のさまざま場所で干渉パターン異なる位相を検知するようになります。中心部が最も高強度で、その周囲を最も強度が小さいリングが取り囲み、その周囲を再び高強度のリングが取り囲みます。

走査ミラーがさらに動くところのリングパターンは狭くなるので、検出器は平均強度レベルを検知することになり、コレレートされた入射光に対して記録された個別の干渉像が不鮮明になります。これを元に戻すには、リングパターンが最も狭いとき、言い換えるとOPDが最大値のときに検出器で1本の縞模様を検出するように調整する必要があります。

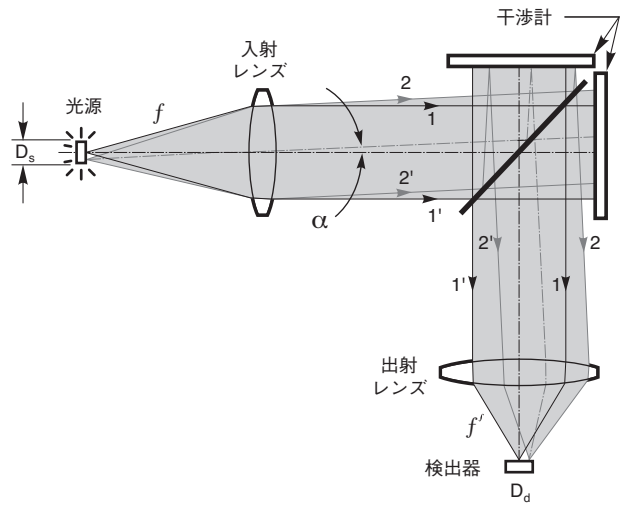


図6：走査型マイケルソン干渉計。

FT-IR型装置の外部光学系

一般的な検討事項

FTIR用外部光学系の役割は、光を集め、コレレートするだけではなく、分解能の公式に従って、システム特定の許容角を提供することでもあります。

$$\alpha_{\max} = \sqrt{\Delta\sigma/\sigma_{\max}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

α_{\max} = 最大拡がり半角 (ラジアン単位)

σ_{\max} = スペクトルの最大波数

$\Delta\sigma$ = スペクトル分解能

FTIR補助光学系の計算を行うためには、まず基本的な光学知識を再度見直す必要があります。

レンズで集められ、焦点に照射された光、またはレンズの焦点面に配置された光源から発振された光を考えてみます。光源から集められた、あるいは焦点に向かう円錐光線の立体角は、次の式で求められます。

$$\Omega = A_L/f^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

A_L = 収集/集光レンズの領域

f = レンズの焦点距離

fと A_L のどちらも同じ単位 (m, m²またはmm, mm²など) で表されます。焦点距離の代わりにFナンバーを使用することもできます。

$$\Omega = \pi/(4(F/\#)^2) \text{ sr} \dots\dots\dots (5)$$

レーザー

光源

モーション

光学測定

光学系

分光機器

そこで、F/4レンズは0.05 srの立体角を収集し、F/1レンズは0.79 srを収集します。よく知られた2次元図では、拡がり角を使用します。拡がり角は、次の式で立体角に関連付けられます。

$$\alpha^2 = \Omega/\pi \text{ radians}^2 \dots\dots\dots(6)$$

立体角と立体角から発生した面でのイメージ領域の積は、光学範囲、幾何学範囲、エタンデュなどさまざまな名称で呼ばれています（多くの場合、エタンデュの代わりにスループットという用語が使用されます）。エタンデュは光学システムの「放射容量」を決定します。オプティクスの基本法則は、どの光学システムも、すべての光学変換を通じて一定である光学範囲/エタンデュ/スループットにより特徴付けることができます。

$$G = A \cdot \Omega = \text{一定} \dots\dots\dots(7)$$

図7のA領域は“検出器”の領域ですのでご注意ください。これは、すべての光学システムはGの値を設定する、または制限する要因は検出器の仕様に関連しています。それがどの部分であり、できる限り改善する部分を把握することは有益です。システムの他の部分でG値を増加させるよう取り組むことは時間の無駄ですが、実際によく行われていることでもあります。

次に、MIR 8025™のエタンデュを検討します。一般的な方法として、必要な分解能を得るために許容可能な最大エタンデュを計算するところから始めます。光源や検出器を含む装置のエタンデュがその値よりも大きければ、エタンデュを制限しなければなりません。

MIR 8025™のエタンデュの分解能の上限を決定します。MIR 8025™の開口径は1.25インチ（31.75 mm）です。内部を伝搬するビームの最大許容拡がり角も、スペクトルおよび必要な分解能の最大波数に従って決定できます。ここから、式(6)を用いて扇形の光線の最大立体角を得ることができます。従って、干渉計のエタンデュは次の式から求めることができます。

$$G_{\text{intfr}} = 2.5 \cdot 10^3 \cdot [\Delta\sigma] / [\sigma_{\text{max}}] \text{mm}^2 \text{ sr} \dots\dots\dots(8)$$

2 μmよりも長波長のスペクトルを集める場合は、次の式が成り立ちます。

$$\sigma_{\text{max}} = 5,000 \text{ cm}^{-1}, \text{ and } \Delta\sigma = 0.5 \text{ cm}^{-1},$$

$$G_{\text{intfr}} = 0.25 \text{ mm}^2 \text{ sr}$$

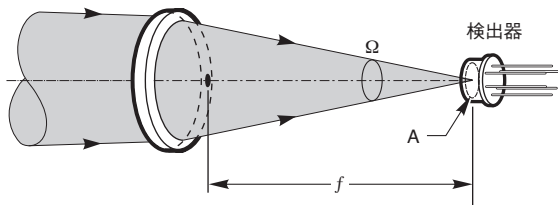


図7：検出器と光学システム。

検出器のオプティクス

ここで、検出器側の補助オプティクスから検討してみてください。許容受け入れ角が完全に光で満たされていると仮定します。上述の例で挙げた条件を継続し、この光を集め、できる限り小さな検出器に絞ることを目的とします（小さな検出素子ほど雑音特性が向上します）。このため、F/# = 1の非常に高速なレンズを使用します。次に、焦点スポットでの立体角は、式(5)から次のように求められます。

$$\Omega = 0.79 \text{ sr}$$

検出器の有効直径は、次の式で求められます。

$$D = 2x \sqrt{0.25/(\pi \cdot 0.79)} \dots\dots\dots(9)$$

or

$$D = 0.6 \text{ mm}$$

すなわち表4は、さまざまな分解能と波長範囲で有効なその他の検出器の直径を示しています。光源側にも同様の関係が成り立ちます。高分解能に最適化したシステムでは、低分解能の時よりも多くの放射線を励起する機会を失います。

この状況では何ができるでしょうか？各分解能で異なる検出器を使用する余裕はありません。一般的な使用の場合、十分に高い（けれども必ずしも最高ではない）分解能に対応する検出器を1台選択することになります。分解能4 cm⁻¹は凝縮位相に適応できるので、人気のある選択肢です。後でさらに高い分解能が必要になったときなど、不測の事態に対応する方法がいくつかあります。ひとつは、検出器の前方のオプティクスの焦点距離を長くすることです。焦点距離が長いということは、高いFナンバー、低いスループット、高い許容分解能を意味します。また、当然ながら放射損失も発生します。

もうひとつは、開口部（Jacquinot Stop）を使用して有効な光源サイズを減少させることでFナンバーを増やす方法です。これは検出器のスポットサイズを減少させます。

光源のオプティクス

一般的に、オプティクスを配置した光源は、干渉計に必要なエタンデュよりも大きなエタンデュを備えたビームを発振します。通常、望ましい分解能または検出器のサイズおよびオプティクスにより、装置のエタンデュが制限されることがわかっています。

表4：F/1時の検出器の最大直径(mm) に対する最短波長および分解能

$\lambda / \Delta\sigma$	0.5	1	2	4	8
0.7	0.4	0.5	0.75	1.1	1.5
2	0.6	0.9	1.3	1.8	2.5
4	0.9	1.3	1.8	2.5	3.6

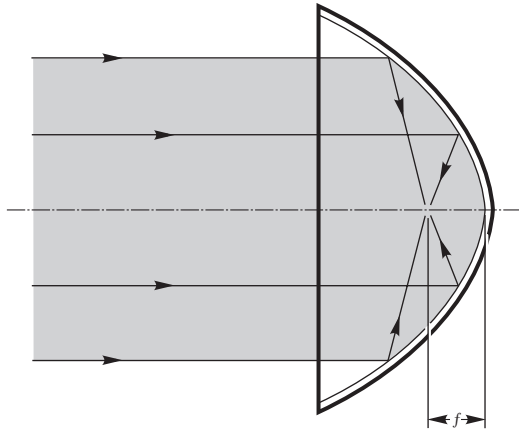


図8：放物線の焦点に配置した点光源からの光。

FT-IR用光学素子のさらなる検討

放物ミラー

ほとんどのFT-IR型装置は軸外し放物ミラーを使用して干渉計の外の光をコリメートし、集光します。これらの金めっきミラーは0.7~10ミクロンまでの非常に広帯域で98%以上反射し、25ミクロンまではこの反射率の範囲を保ちます（金めっきミラーは、0.6ミクロン未満の波長では反射鏡に適していないことを念頭に置いてください。この場合、反射率は40%未満にまで急激に低下します）。分散がないことも、一般的なミラーの重要な特性です。単色収差はありますが、色収差がないため、どの波長でも焦点は同じ場所になります。

放物ミラーは小型光源からの光をコリメートするには最適な装置であり、逆に言えばコリメートされた放射ビームを狭い範囲に集光する場合にも適しています。ただし、この目的以外の用途はありません。大きな対象物のイメージングには使用できません。

放物線の焦点に配置した点光源からの光（図8）は反射された後に理想的な平行ビームに変換されます。その結果、平行ビームが集光されて小さな焦点に集光されます。放物線上のどの断面でもこの現象が起こりますので、放物面ミラーの軸外し断面を切断して利便性を高めることもできます（図9を参照）。

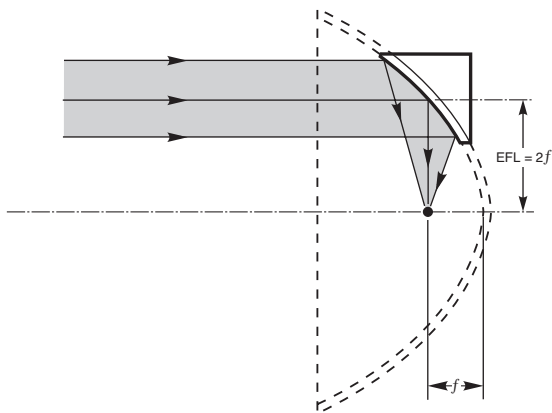


図9：軸外し放物ミラーの断面図。

図9に示す配置では、主軸に平行な光線が開口部の中心にぶつかり、90°回転して焦点に向かうので、90°軸外しミラーと呼ばれます。開口部中央の放物面上の点から焦点までの距離は有効焦点距離（EFL）と呼ばれ、放物線の焦点距離のちょうど2倍です。

$$EFL = 2f \dots \dots \dots (10)$$

軸外し放物ミラーのFナンバーは、実質的にF/1未満という非常に低い値を達成できます。点光源の代わりに有限サイズの光源を放物線の焦点に配置した場合、反射ビームは理想的な平行光にはならず、光源の角度サイズに従って、角度拡がりが発生します。その上、大きな収差に悩まされることとなりますので、入射する平行ビームは、点ではなく不鮮明な点に集光されることとなります。

ビームの拡がり角が、どのようにして放物線の焦点で不鮮明な点に変換されるかを分析することは重要です。光学設計ソフトウェアパッケージを使用して、F/1放物ミラーを出射側に置いたMIR 8025™の光学図式を作成しました。ミラーの有効焦点距離は20 mmです。システムを通じてさまざまな拡がり角を持つ光線を追跡し、焦点サイズを観察しました。

図10は、干渉計を通して伝搬する角度拡がり角とビームの焦点直径のグラフです。

式(3)からわかった干渉計での角度拡がり角の上限は、最小 $\lambda\alpha$ (0.5 cm^{-1}) および最大 α ($14,000 \text{ cm}^{-1}$) では0.006ラジアンでした。グラフから、この値に対応する焦点の直径は約0.5 mmであるとわかります（前ページでの式で同じ値を計算したときの概略の試算では、0.4 mmでした）。ビームの拡がり角が増えるにつれ、焦点の直径も拡大しますが、1.5~2 mmの間で上限に達します。これは、高い角度の光線は干渉計自体にブロックされ、放物線に到達できないためです。干渉計を通過できる光の角度の最大値は0.06~0.07ラジアンです。これは図10の曲線が平坦になり始める領域にちょうど一致します。

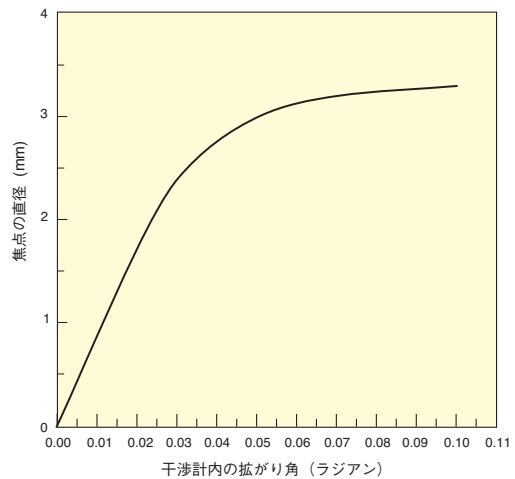


図10：焦点の直径と拡がり角。

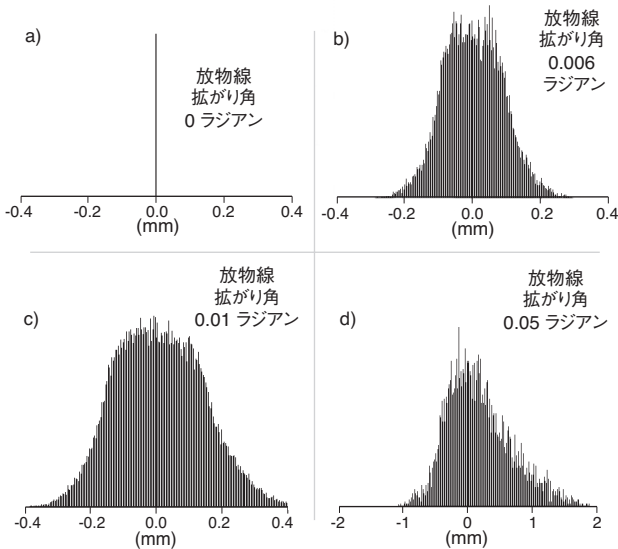


図11：軸外し反射鏡の焦点面におけるエネルギー分布。

図11は、さまざまな拡がり角のビームを使用した場合の軸外し反射鏡の焦点面におけるエネルギー分布を示しています。放物線の“視野”が拡大するにつれ、収差の影響が大きくなることがわかります。

レンズ

FTIR分光法における軸外し放物ミラーは、万能で幅広い利用方法がありますが、調整が大変困難であるという短所があります。各反射光はビームを90°回転させますので、システムが大きくなる場合があります。Fナンバーが低い、つまり視野が大きい（エタンデュが高い）場合、大幅な収差が問題となります。

多くのアプリケーション、特に近赤外分野では、レンズが適している場合があります。図12はCaF₂レンズの焦点におけるエネルギー分布を示しています。このCaF₂レンズの焦点距離とFナンバーは、先ほど検討した放物ミラーと同様です。

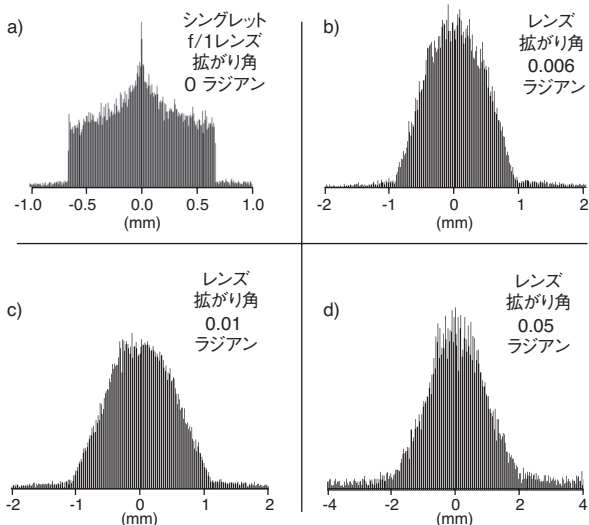


図12：CaF₂レンズの焦点面におけるエネルギー分布。

レンズを使用する場合は、レンズの材料を考慮する必要があります。CaF₂のビームスプリッターが適用できる場合、どの波長帯でもCaF₂レンズをご使用いただくことを推奨します。近赤外に近い3 μmまではフューズドシリカのレンズでも問題ありませんが、「IRグレード」ではないレンズでは、水の吸収帯による損失が考えられます。しかし、フューズドシリカのレンズはCaF₂レンズよりも安価です。中赤外には多様な材料が使用できますので、通常は性能、価格、耐久性、複屈折性などを考慮して選択します。材料によっては吸湿性が大きな問題になります。NaCl（塩化ナトリウム）ウィンドウおよびKBr（臭化カリウム）はその代表的な材料です。可視光では透明になる材料もあります。これは可視領域で調整を試みている場合は長所となりますが、フィルタとして作用することを希望する場合は、短所となります。

レンズの製造に好んで使用される頑丈で透明な材料は、ZnSe（ジnkセレンアイド）です。しかし、屈折率が高いため、反射率を比較的高いレベルである30%にまで押し上げます。反射防止コーティングが有効ですが、追加の費用がかかり、スペクトル領域が縮小します。

次の問題は、レンズ材料の分散です。波長帯が限られたアプリケーションにレンズが適していることは確実です。たとえばInGaAs（インジウムガリウムヒ化物）検出器の感度領域は800~1700 nmです。レンズを使用しても大きな問題は発生しませんが、弊社のラボではフューズドシリカのレンズで分散が見られました。これはつまり、レンズを軸方向に動かして長波長または短波長の信号に最適化できるということです。波長領域が大きい場合、焦点距離の最も短い場所に検出器を配置する必要があります。これは言い換えると、最も短波長で最小スポットサイズが得られる位置であり、そこは一般的にシステム効率が最も低い場所であるからです。

このように、干渉計用の補助光学系を慎重に選定し、調整する必要があることがわかります。コンポーネントの選択を誤ると、分解能が足りなかったり、システムのスループットを不必要に制限したりすることとなります。

WEB 詳細は当社のWebサイトを参照してください。