

偏光ラマン分光法の基本原理

キーワード

ラマン、ラマン偏光、分光分析

はじめに

偏光ラマン分光法は、サンプル固有の分子構造に関する重要な情報が得られ、結晶、配向ポリマー、カーボンナノチューブなど高次構造の配向を調べるための効果的なメソッドとしても機能します。一般的にラマン分光法のポイント分析は、固体や液体に対して行われます。ここで取り上げる偏光ラマン測定データは、Thermo Scientific™ DXR™2xiイメージング顕微ラマンおよびThermo Scientific™ DXR™2顕微レーザーラマンを用いて取得したものです。DXR2顕微レーザーラマン (図1) などの顕微レーザーラマンでは、偏光ラマンポイント分析を行うことができ、ミクロンオーダーの試料に対して用いられます。また、DXR2xiイメージング顕微ラマンのような高速ラマンイメージングシステムを用いると、偏光ラマン分析をより広い範囲に適用して、サブミクロンの空間分解能で偏光ラマンイメージング測定を行うことができます。このアプリケーションノートでは、偏光ラマン測定の基本原理、等方性材料と異方性材料の両方の偏光ラマン分析結果を紹介します。

分光分析装置は、光と物体の相互作用を測定します。光は、通常の環境下では、伝播する際に自由に回転する電磁ベクトルから成ります。光が物体に衝突すると、さまざまな電磁分極状態の全てを合わせた相互作用が起こります。光は偏光光学を通り抜けると偏光ビームに変化し、電磁ベクトルが一軸または平面に沿って伝播します。これは直線偏光として知られ、自由回転または偏光解消光とは対照的なものです。材料に直線偏光を照射すると、材料が偏光軸に対してどのように配向しているかによって、偏光解消光を照射した場合と異なる相互作用を示します。それが配向の差であり、それにより有益な追加情報を得ることができるのです。

例えば、異なる結晶多形の化合物をそれぞれ偏光解消光で測定した場合のスペクトルは同じであっても、直線偏光で分析した場合のスペクトルは、特定の結晶構造を示唆するものとして識別できる可能性があります。偏光測定は、延伸したポリマーフィルム、ドーピングしたシリコン構造、または鋳物などの材料に加わっている力を明らかにするためにも使われています。



図1. Thermo Scientific DXR2およびDXR2xi顕微レーザーラマン。

偏光測定では一般的に、サンプルに直線偏光を照射します。あるスペクトルを一軸の偏光として収集し、2番目のスペクトルを、最初の軸に対して直交するように回転した直線偏光として収集します。これらの測定には、平行と直交、垂直と水平、XとY、0度と90度など、さまざまな用語が用いられますが、全て同じことを意味します。偏光測定についての詳細は非常に複雑です (付録参照)。そこで、このアプリケーションノートでは基本的な測定についてのみ説明します。

ラマン分光法は、励起に用いられるレーザーがもともと直線偏光であるため、偏光測定には理想的な技術です。以下で述べるように、もともと偏光であることが利点となり得る一方、レーザー偏光を考慮しておかないとラマンの結果を読み誤る可能性があります。このため、汎用型装置ではレーザー光を意図的に偏光解消し、サンプルの配向に関わらず一貫した結果を得られるようにしています。偏光解消したレーザーを用いるスペクトルは、偏光解消ラマンスペクトルと呼ばれます。DXR2およびDXR2xi顕微レーザーラマンのような高度なラマン装置では、偏光解消ラマン測定および偏光ラマン測定のいずれもソフトウェア上で簡単に設定することができます。

ポルトの表式 (Porto Notation)

偏光測定を実施する際には、偏光条件の記録を残し、結果を一貫して解釈できるようにしておくことが重要です。ポルトの表式は、サンプルの配向を、入射光の偏光とサンプル照射後にラマン散乱光が出て行く側の検光子の方向に関して記録する手段として開発されました¹。この表記法は、以下の4種の文字で構成されます²。

a (b) c) d

- a = 入射レーザーの伝播方向
- b = 入射レーザーの偏光方向
- c = ラマン散乱の偏光方向
- d = ラマン散乱の伝播方向

カッコの外側の文字は、レーザービーム入射路と外へ向かうラマン散乱の光路の伝播方向を規定します。内側の文字は、2種の光路の偏光方向を示します。

DXR2およびDXR2xi顕微レーザーラマンは、180度後方散乱設定で使用します。その場合、顕微鏡の対物レンズでサンプルに当てるレーザーを絞り、ラマン散乱も対物レンズを通じて収集します。伝播の方向は異なりますが、軸は同じです。方向が反対であることは、上線で示されます。図2には、DXR2顕微レーザーラマン偏光軸のサンプルでの方向と、非配向サンプルに対応するポルトの表式をまとめています。

直交座標 (図2、右) は、レーザー励起およびサンプル照射後の検光子の両方に対する偏光について、Thermo Scientific™ OMNIC™xi (および分散型ラマン分析用のOFDR OMNIC™またはOMNIC™) ソフトウェアで選択する方向軸を示します。

顕微鏡対物レンズから入ってきたレーザー励起は、z軸に沿って伝播します。ラマン散乱は、同じ顕微鏡対物レンズを用いて同じz軸で収集されますが、方向は反対になります。これは180度後方散乱設定として知られるもので、反対方向であることを示すために慣習的にz軸表記に上線を加えます (\bar{z})。

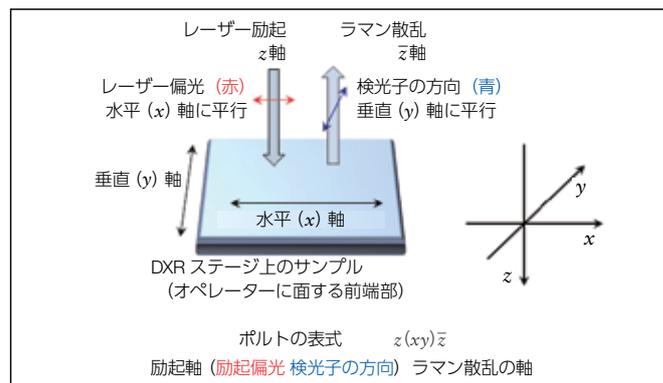


図2. DXR2xi顕微レーザーラマン偏光軸のサンプルでの方向と、非配向サンプルに対応するポルトの表式。

装置に面するステージの前端に平行 (左右) となる偏光軸は、水平軸またはx軸、もしくは0度となります。垂直またはy軸、もしくは90度となる偏光軸は、水平x軸に直交し、装置に向かって前後方向のステージの端に対して平行です。

実験

全ての実験はDXR2顕微レーザーラマンまたはDXR2xiイメージング顕微ラマンのいずれかを用いて実施しました。各装置には、455、532、633、785 nmのレーザー励起を用いることができる全自動偏光オプションを装着しました。このオプションを用いると、次の複数の異なるモードで装置を操作できます。

- 1) 偏光解消ラマン: 円偏光をサンプルに送達し、それにより生じる散乱光を取得、検出。
- 2) 偏光ラマン: 垂直または水平のいずれかの方向でサンプルに対する直線偏光をソフトウェアで選択、サンプル照射後の検光子は励起偏光に対し平行または直交のいずれかに設定可能。
- 3) 角度分解偏光ラマン: 直線偏光をサンプルに照射し、検光子をユーザー任意の0~180度の角度に設定。

結果および考察

等方性および異方性サンプル

全ての材料に偏光配向があるわけではありません。そのサンプルの特性（ラマンスペクトルなど）として、「配向」がないことを「等方性」と呼びます。例として、液体、粉末、不規則に配向したポリマーなどがあります。これらのサンプルは配向がない一方、偏光とは相互作用することがあり、ラマン散乱光の偏光が入射レーザー偏光に対して回転する原因にもなります。

これに対して、結晶や延伸したフィルムなどのサンプルは配向を示すことが多く、「異方性」と呼ばれます。配向したサンプルまたは異方性サンプルは、対称性の軸または光軸を有しています。入射レーザー偏光に対してこの軸の方向を合わせると、全く異なるスペクトルが得られることがあります。

等方性サンプルについては、以下の2種の偏光観測だけで十分です。

1) レーザー偏光軸に平行した検光子

$z(xx)\bar{z}$ または $z(yy)\bar{z}$

および

2) レーザー偏光に直交する検光子

$z(xy)\bar{z}$ または $z(yx)\bar{z}$

これで十分とされる理由を理解するために、上に示したポルトの表式から考え得る4種の偏光方向について考えてみます。最初の2文字は、入射レーザー偏光を示します。サンプルに対し、 $z(x)$ は $z(y)$ と同じに見えます。最後の文字、 \bar{z} は収集軸であり、変化しません。内側の文字が (xx) または (yy) のように同じである限り、問題はありませぬ。偏光の相互作用が両者で同じとなるため、スペクトルは同じになります。

同じ理論が、レーザー偏光子と検光子が交差する2番目の場合にも当てはまります。内側の文字が (xy) または (yx) のように直交する限り、等方性サンプルではスペクトルは同じになります。

2種の偏光観測で十分である場合においては、水平をH、垂直をVで表す慣習的な表記法が使われることもあります。つまり、HHは入射レーザー偏光の方向が水平であり、検光子（ラマン散乱用）の方向も水平であることを意味します。HVは、検光子の方向が垂直（入射レーザーに直交）であることを意味します。この種の表記法には数多くのバリエーション（H_HとH_V、0度と90度、平行と直交など）がありますが、これらは全て同じことを意味しています。つまり、任意かつ直交性の偏光軸を有する等方性サンプルである、ということです。

配向した異方性サンプル（結晶、延伸したフィルム、線維など）については、サンプルの軸の方向が装置の偏光軸とどのような関係にあるかを記録することが重要です。慣習的には、ポルトの表式には装置の座標系ではなく、サンプルの座標系を用います。これにより、別の研究者が別の装置を用いても、配向サンプルの方向を一致させて、同じ偏光結果を測定することができま

す。サンプルの軸を特定できなかつたり、サンプルの特性が不明である場合には、サンプルの配向を記録するために、サンプルの顕微鏡写真を残しておいた方がよいと思われます。回転式のサンプルホルダーは、装置の偏光軸に対してサンプルの既知の軸の向きを容易に合わせられるという点で有用です。

顕微レーザーラマンで分析可能な分極率テンソルは以下の4種のみです。

$z(xx)\bar{z}$ レーザーはx軸に対して平行に偏光、検光子をx軸偏光を通るように設定

$z(yy)\bar{z}$ レーザーはy軸に対して平行に偏光、検光子をy軸偏光を通るように設定

$z(xy)\bar{z}$ レーザーはx軸に対して平行に偏光、検光子をy軸偏光を通るように設定

$z(yx)\bar{z}$ レーザーはy軸に対して平行に偏光、検光子をx軸偏光を通るように設定

異方性サンプルまたは未知のサンプルについては、これら4種の測定を全て行うことを推奨します。また、偏光解消（非偏光）スペクトルも測定し、そのサンプルについて完全に記録することも有益です。

等方性サンプルに対するラマン偏光

ラマン偏光測定の古典的な例は四塩化炭素 (CCl_4) です。 CCl_4 は、ラマンシフトの459、314、218 cm^{-1} にバンドがある等方性の液体です。459 cm^{-1} のバンドは完全対称性振動モードA₁によるもので、完全偏光と呼ばれます。これは、入射光と同じ偏光方向でラマン散乱を放射することを意味します。検光子とレーザー偏光の方向を一致させたときに、最大ラマン散乱が観察されます。検光子が交差すると、直線偏光ラマン散乱の強度は消滅します。交差した強度を、方向を一致させたときの強度で割った比は偏光解消比 (ρ) と呼ばれ、それが0に近づきます。

459 cm^{-1} バンドとは異なり、314 cm^{-1} および218 cm^{-1} のバンドは偏光にそれほど感受性がありません。314 cm^{-1} のバンドは非完全対称性振動モードE₂によるものです。このモードは対称性散乱テンソルを有し、偏光解消と呼ばれます。218 cm^{-1} のバンドも偏光解消されます。

偏光解消したバンドは、 $z(xy)z/z(xx)z$ 比が0.75となります。この情報は、サンプルスペクトルの中でどのバンドが偏光解消したかの判断に用いることができます。例えば、交差（直交）した偏光スペクトルと、方向が一致している（平行）偏光スペクトルとを比較したときにピーク高さが変化する場合、ピーク高さ比の計算により偏光解消ピークであることが確認できます。その値が約0.75（±実験誤差）である場合には、そのピークは偏光解消しています。

図3に、四塩化炭素の4種の偏光ラマンスペクトルから偏光解消比を計算する方法を示します。この比は、測定の一つの組み合わせ、つまり (yx/yy) または (xy/xx) から得ることができる一方、両方を測定して平均を用いるのも良い方法です。これにより、装置間の不可避の変動要因による偏光光学部品起因のバイアスを最小化できます。

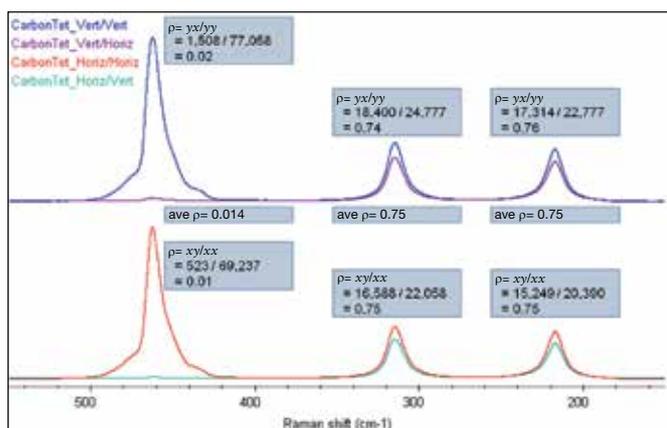


図3. DXR2xiイメージング顕微ラマンを用いて785 nmレーザーで収集したCCl₄のスペクトルの偏光解消比 (ρ) の計算例。値はベースライン補正ピークエリアの測定値。

異方性固体に対するラマン偏光

分光解析の課題の一つは、対象サンプルの特性に関連するスペクトルの特徴を明確にすることです。偏光ラマン分光法は、この種のアプリケーションに特に有用なものとなり得ます。例えば、スペクトルピークの偏光解消比は、特定のサンプル形態の指標となる場合があります。これは、偏光解消したラマンスペクトル単独では明らかにできません。

ラマン偏光のアプリケーションを考えると、サンプルの配向の重要さが分かります。レーザー偏光を既知のサンプルの特定の結晶軸に合わせるにせよ、対称性が不明であるサンプルを探索するにせよ、記録を残すことが望ましいです。こうすることで、サンプル間の結果や、他の試験結果を比較することが容易になります。この目的において、DXR2顕微レーザーラマンのビデオカメラで撮影したサンプル観察画像を残しておくことも良い方法です。

LiNbO₃の例

四塩化炭素を用いた等方性ラマン偏光の良い例を前述しましたが、ここでは、既知の結晶学的対称性を有する異方性サンプルの例として、ニオブ酸リチウム (LiNbO₃) を用います。

LiNbO₃は、3回対称の六方晶系結晶構造を有し、その光軸またはc軸に沿って成長します。慣習により、直交座標系を用いて、光学c軸に平行なz軸を有するLiNbO₃結晶について説明します。この縦軸は、図4に示します³。

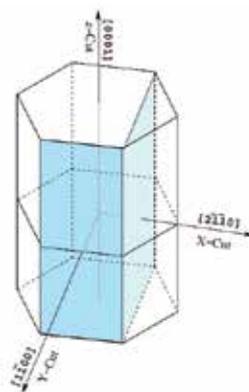


図4. 各軸に直交するようにカットした平面表面を示すLiNbO₃結晶の直交座標系 (左) およびLiNbO₃を異なる方向に置いたスライドガラス (右)。

LiNbO₃は、偏光測定用に以下の方法で調製できます: LiNbO₃を結晶のx軸に直交するようにカットします。これをXカットと呼びます。この表面の平面 (図4の薄青色) は、三方晶系または六方晶系を個々に表す $[1\bar{1}00]$ または $[2\bar{1}\bar{1}0]$ として知られるものです。図4に示すように、スライド上に置いたサンプルの長辺が結晶z軸で、短辺が結晶y軸です。結晶x軸は表面に直交し、入射レーザー光に平行となります。

異なる装置から得られた結果を一貫したメカニズムで示すために、配向固体サンプルにポルトの表式を用いることが重要です。液体のような等方性サンプルについて解析するときは、装置をポルトの表式に合わせたことを思い出してください。配向サンプルについては、慣習的にポルトの表式での結晶軸の直交座標を用います。

LiNbO₃の例では、ポルトの表式の外側の文字 (入射光と散乱光) が結晶x軸に平行です。内側の文字は、結晶軸から見た偏光の方向を示します。チップの長辺をサンプルステージの前後方向に置き、レーザー偏光を垂直に設定した場合、内側の最初の文字はZとなり、入射偏光の方向が結晶z軸に一致していることを示します。内側の2番目の文字にYが入ると、それは検光子が結晶y軸方向にある、または入射光の偏光に対して直交していることを意味します。

$x(z\bar{y})\bar{x}$

x カットされたLiNbO₃サンプルの方向が連続的に装置の x と y の両軸に沿っているとき、レーザーと検光子の位置について4種の組み合わせで、それぞれの方向について測定した場合、8種の偏光LiNbO₃スペクトルが取得されます(図5)。

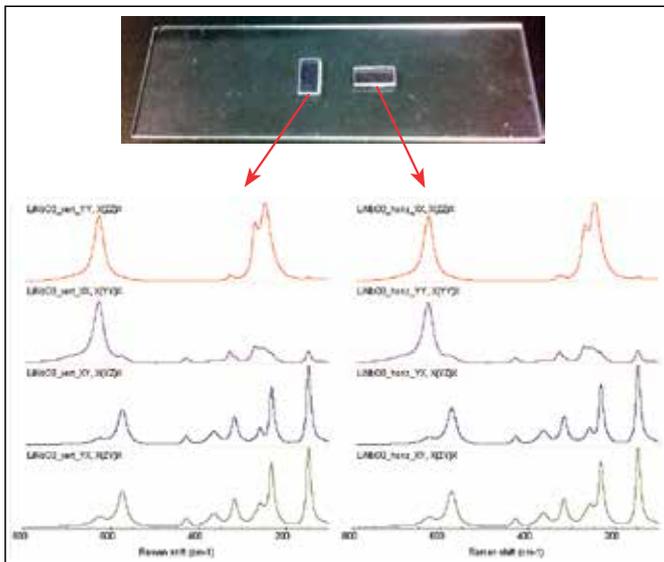


図5. スライド上に垂直(左側)および水平(右側)に置かれたLiNbO₃サンプルの偏光ラマンスペクトルと、それぞれのポルトの表式。

偏光子の設定はスペクトル収集情報に保存されます。サンプル名に付け加えられた $_{xy}$ の表式は、レーザー偏光子と検光子のそれぞれに対する装置の偏光設定を示します。

物理的配向と偏光光学設定が異なっていても、ポルトの表式が同じであるスペクトルは同一であることに留意してください。ポルトの表式とサンプルの軸とを関連付けることで、この種の比較を行うための一般的な基準を確立します。

同じ縦軸スケールとオフセットでスペクトルがプロットされている場合(図6)、CCl₄で行ったように、偏光解消ピークを視覚的に探すことが可能となります。

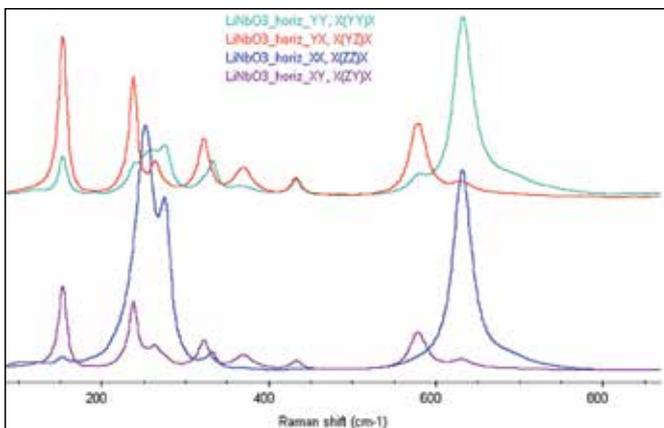


図6. 交差偏光の組み合わせでプロットしたLiNbO₃スペクトル。比較のため、全てのスペクトルについて y 軸スケールとオフセットは同じものとしている。スペクトルは全範囲で測定(50~3,300 cm⁻¹ラマンシフト)。観察されたバンドのみ明示。

さまざまな偏光により多くのスペクトル特性が得られ、全てのバンドに偏光に対する感受性があることが容易に分かります。この場合、既知のサンプルを使用し、結晶軸を装置の偏光軸に対して特定の方向に合わせたため、バンドを特定のラマン分極率テンソルに割り付けることができます(付録参照)。

未知のサンプルの場合、同じスペクトル測定の設定で測定し比較できます。結晶対称性の詳細は分からないこともありますが、サンプルの配向が一貫しているならば、スペクトルの差をサンプルの特性と相互に関連付けることができます。

結論

このアプリケーションノートでは、ラマン偏光測定の基本原理について説明しました。ポルトの表式は、入射光の偏光と、外向きのサンプル照射後検光子の方向に関するサンプルの配向を記録する手段として導入したもので、それによりラマン偏光測定の一貫性のある解釈が可能となります。ここでは、偏光ラマンポイント測定の結果を、特に等方性サンプル(CCl₄)と異方性サンプル(LiNbO₃)について示しました。ラマン偏光測定によって振動の性質が明らかとなり、これらのバンドを割り当てる際に有益な情報が得られます。アプリケーションノート「偏光ラマン分光法を用いたアイソタクティックポリプロピレンフィルムの分子配向の観察」では、測定の範囲をポイント測定からラマン偏光イメージングに拡張する予定です。

付録

ここからは、ラマン偏光についてさらに詳細に説明します。ここに記載されている内容を理解するためにその他資料や書籍なども参考にしてください。

ラマン偏光

図7に示す基準の三次元軸を用いて、サンプルに入射する光の配向を説明できます。

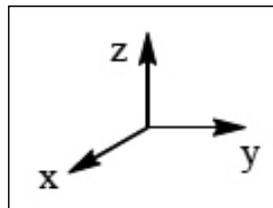


図7. 顕微レーザーラマン偏光の基準となる軸。

光線は、3本の軸それぞれに沿った3種の電気ベクトル成分である E_x 、 E_y 、 E_z に分解できます。この光線による誘起双極子を説明するために、類似のベクトルである P_x 、 P_y 、 P_z を用いることができます。これら2種のベクトルは、分極率テンソル⁴と呼ばれる3×3マトリックスで表されます。

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} & \alpha_{xz} \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} & \alpha_{yz} \\ \alpha_{zx} & \alpha_{zy} & \alpha_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (\text{方程式 1})$$

表式 α_{xx} は、 x 軸に偏光した入射光に対する分極性成分と、 x 軸に沿った分子偏光です。

このマトリックスは、 P_x 、 P_y 、および P_z に対する方程式に展開することができます。

$$P_x = \alpha_{xx}E_x + \alpha_{xy}E_y + \alpha_{xz}E_z$$

$$P_y = \alpha_{yx}E_x + \alpha_{yy}E_y + \alpha_{yz}E_z \quad (\text{方程式2})$$

$$P_z = \alpha_{zx}E_x + \alpha_{zy}E_y + \alpha_{zz}E_z$$

これらの方程式から、3種全ての電気ベクトルに依存する1方向の誘起双極子を知ることができます。これが、ラマン分光装置での偏光測定が少々複雑になる理由です。

振動双極子は、それ自体と同じ軸にある光を散乱させることはできません。その理由は、観察を z 軸、つまり $E_z=0$ に沿って行っており、 P_x および P_y により散乱した光のみを取得しているためです。したがって、上述の方程式は以下のように減らすことができます。

$$P_x = \alpha_{xx}E_x + \alpha_{xy}E_y \quad (\text{方程式3})$$

$$P_y = \alpha_{yx}E_x + \alpha_{yy}E_y \quad (\text{方程式4})$$

光の強さは誘起双極子の二乗と比例します。 x 軸と y 軸に沿った電気ベクトルにより励起した散乱光の強度は以下ようになります。

$$I_x = \alpha_{xx}^2 E_x^2 + \alpha_{xx}\alpha_{xy}E_xE_y + \alpha_{xy}\alpha_{xx}E_yE_x + \alpha_{xy}^2 E_y^2 \quad (\text{方程式5})$$

$$I_y = \alpha_{yx}^2 E_x^2 + \alpha_{yx}\alpha_{yy}E_xE_y + \alpha_{yy}\alpha_{yx}E_yE_x + \alpha_{yy}^2 E_y^2 \quad (\text{方程式6})$$

一軸に沿って直線偏光したレーザーを使用するときは、他の文字はゼロになります。例えば、レーザーが y 軸に沿って偏光している場合は、以下ようになります。

$$E_z = 0, E_x = 0, \text{ and } E_y \neq 0$$

方程式5と6はポルトの表式と併せて以下のように減らせます。

$$I_x = \alpha_{xy}^2 E_y^2 \quad z(yx)\bar{z} \quad (\text{ポルトの表式}) \quad (\text{方程式7})$$

$$I_y = \alpha_{yy}^2 E_y^2 \quad z(yy)\bar{z} \quad (\text{方程式8})$$

入射レーザー偏光が x 軸に対して反転した場合、 $E_z=0$ 、 $E_y=0$ 、および $E_x \neq 0$ となり、以下の方程式が得られます。

$$I_x = \alpha_{xx}^2 E_x^2 \quad z(xx)\bar{z} \quad (\text{方程式9})$$

$$I_y = \alpha_{yx}^2 E_x^2 \quad z(xy)\bar{z} \quad (\text{方程式10})$$

顕微レーザーラマンシステムで利用可能な幾何学的測定法は4種類あります。これらの方程式は、分子が空間に固定されている硬いサンプルに適用します。

脱分極比

二つの軸に沿って測定されたスペクトルバンド強度の比は、脱分極比と呼ばれます。慣習的に、この比は直交する偏光強度を平行する強度で割ったものです。

y 軸に沿って偏光したレーザー光については、脱分極比の方程式は以下となります。

$$\rho = \frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}} = \frac{I_x}{I_y} = \frac{\alpha_{xy}^2 E_y^2}{\alpha_{yy}^2 E_y^2} \quad (\text{方程式11})$$

ρ の理論値の第一の概算は以下となります。

$$\rho = \frac{3\beta^2}{45\alpha^2 + 4\beta^2} \quad (\text{方程式12})$$

α は球面の分極率 (spherical polarizability) として知られ、 β は第一の異方性 (first anisotropy) と呼ばれます⁵。球面の分極率は分極率テンソルの対角成分 (diagonal terms) に等しく、以下の値となります。

$$\alpha = \frac{1}{3}(\alpha_{xx} + \alpha_{yy} + \alpha_{zz}) \quad (\text{方程式13})$$

第一の異方性は非対角成分 (off diagonal term) から算出され、以下の値となります。

$$(\text{方程式14})$$

$$\beta = \sqrt{(\alpha_{xx} - \alpha_{yy})^2 + (\alpha_{yy} - \alpha_{zz})^2 + (\alpha_{zz} - \alpha_{xx})^2 + 6(\alpha_{xy}^2 + \alpha_{yz}^2 + \alpha_{zx}^2)}$$

ラマンバンドに対する脱分極比を測定すると、 α と β の値に関する情報が得られます。ここから、ラマンバンドにより生じた振動の対称性に関する情報を推測できます。

例えば、変性した (完全に対称ではない) 振動モードでは、 $\alpha = 0$ および $\beta \neq 0$ という値が得られます。これにより、脱分極比3/4という値が得られます。

完全に対称で、立方体または二十面体対称であるモードについては、値は $\beta=0$ であり、比の値は0となります。他のモードでは、 α が0ではない値 ($\alpha \neq 0$) となる対称性を示します。これにより、ゼロと3/4との脱分極比が得られます^{4,6}。

等方性材料

等方性材料とは、基準となる固定された実験用構造に対して、サンプル分子が絶えずタンプリングしている気体または液体のことです。この状況では、分極率の平均値 α を測定します。脱分極比の方程式は方程式12と同じですが、以下で計算される平均分極率は除きます。

$$\rho = \frac{3\beta^2}{45\alpha^2 + 4\beta^2} \quad (\text{方程式15})$$

参考文献

1. Damen, T. C.; Porto, S.P.S.; Tell, B. *Phys. Rev.*, 1966, 142, 570.
2. Bilbao Crystallographic Server, <http://www.cryst.ehu.es> .
3. Sanna, *phy rev B* 2010 v81 p214116, “Lithium niobate X-cut, Y-cut, and Z-cut surfaces from ab initio theory” .
4. Hendra, P.; Jones, C.; Warnes, G. “The vibrational behaviour of molecules” , in *Fourier Transform Raman Spectroscopy Instrumentation and Chemical Applications*; Ellis Horwood Ltd.: Chichester, England, 1991.
5. Diem, M. “Raman Spectroscopy – Polarizability” , in *Modern Vibrational Spectroscopy and Micro-Spectroscopy*, John Wiley & Sons, Ltd: Chichester, UK, 2015, chapter 4.2.
6. Gilson, T. R.; Hendra, P. J. “Raman intensities and depolarization ratios” , in *Laser Raman Spectroscopy*; Wiley-Interscience: New York, 1970.

研究用にも使用できません。診断用には使用いただけません。
 © 2016, 2022 Thermo Fisher Scientific Inc. All rights reserved.
 All trademarks are the property of Thermo Fisher Scientific and its subsidiaries unless otherwise specified.
 実際の価格は、弊社販売代理店までお問い合わせください。
 価格、製品の仕様、外観、記載内容は予告なしに変更する場合がありますのであらかじめご了承ください。
 標準販売条件はこちらをご覧ください。thermofisher.com/jp-tc FTIR041-B2209CE

サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社

分析機器に関するお問い合わせはこちら

TEL : 0120-753-670 FAX : 0120-753-671

Analyze.jp@thermofisher.com

facebook.com/ThermoFisherJapan

@ThermoFisherJP

thermofisher.com