

入門講座

物理分析入門—初めて使う人のために—11

赤外吸収分光法の原理と活用事例

Principle of Infrared Absorption Spectroscopy and Its Application

藤岡裕二

新日鐵住金株式会社 先端技術研究所
主幹研究員

Yuji Fujioka

1 はじめに

赤外線は、波長が約780nm～1mmの領域の電磁波であり¹⁾、この領域のうち、780nm～2.5 μmは近赤外域、2.5～25 μmは中赤外域、25 μm～1mmは遠赤外域と呼ばれている²⁾。赤外吸収分光法 (Infrared Absorption Spectroscopy ; IR) は、中赤外域に相当する2.5～25 μm (IRでは、波長の代わりに波数が用いられ、波数領域では4000～400cm⁻¹) の光を試料に照射し、透過してきた光を分光・検出して、波数毎の透過率 (吸収スペクトル) から、試料成分の同定や定量を行う手法である。物質中の分子の振動エネルギーが、赤外線の光子エネルギー程度であるため、IRスペクトルは振動スペクトルとも呼ばれている。

IRスペクトルを得るためには、赤外線を分光する必要があり、IR法開発当初、分光には岩塩 (NaCl) のプリズムが用いられていたが、その後回折格子が主流となり、さらに1980年以降は、干渉計を使ったフーリエ変換赤外分光法 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy ; FT-IR)³⁻⁵⁾ が急速に発展した。

IRは非破壊分析法であり、固体、液体、溶液、気体試料の測定が可能で、通常の吸収スペクトルは数分程度で測定できるため、有機物や一部無機物の分析に広く用いられている。

IRの成書⁴⁻⁸⁾ は多数発行されているが、本稿では「初めて使う人」に参考になるよう原理、測定方法と活用事例を紹介する。

2 原理⁹⁾

分子を構成する原子と原子の結合は、伸縮するばねのようなものと考えられる。図1に示したように、A、B二つの原子で構成される二原子分子を考える。この分子のx方向の運動エネルギーEは次式で示される。

$$E = 1/2(m_A \dot{x}_A^2) + 1/2(m_B \dot{x}_B^2) \dots \dots \dots (1)$$

ここでm_A、m_Bは原子の質量、 \dot{x}_A 、 \dot{x}_B はそれぞれの原子のx方向の速度を表わすものとする。一方、この分子の位置エネルギーVは、次式で表わされる。

$$V = 1/2k(\Delta r)^2 \dots \dots \dots (2)$$

ここでΔrは二つの原子の間の距離 (r) の変化量であり、比例定数kは力の定数と呼ばれる。

$$\Delta \dot{r} = \dot{x}_A - \dot{x}_B \dots \dots \dots (3)$$

の関係式を使うと、(1) 式は次のように変形される。

$$\begin{aligned} E &= 1/2\{(m_A \dot{x}_A + m_B \dot{x}_B)^2 / (m_A + m_B)\} + \\ &1/2\{(m_A m_B) / (m_A + m_B)\}(\dot{x}_A - \dot{x}_B)^2 \\ &= 1/2\{(m_A m_B) / (m_A + m_B)\}(\Delta \dot{r})^2 \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

右辺第1項を0にしたのは、これが分子全体の移動エネルギーであり、振動とは無関係であるからである。

(2) 式と (3) 式は、調和振動の位置エネルギーと運動エネルギーを表わす式である。従って、この系の振動数νは (5) で表わされ、振動数を波数で表わせばν (6) のようになる。

$$\nu = \{1/(2\pi)\} (k/\mu)^{1/2} \dots \dots \dots (5)$$

$$\nu = \{1/(2\pi c)\} (k/\mu)^{1/2} \dots \dots \dots (6)$$

ここでμは換算質量と呼ばれ、次式で示される。また、cは光速度である。

$$\mu = (m_A m_B) / (m_A + m_B) \dots \dots \dots (7)$$



図1 分子振動のモデル

この様な数式を見ると、原理は非常に難しく感じられるが、具体的にこの式を用いてCa(OH)₂のHをDに置換した時の同位体シフトを計算してみる。Ca(OH)₂のO-H伸縮振動は、3643cm⁻¹に観測される。O-Hのμ_{O-H}は0.948で、ν_{O-H}ν_{O-H}=3643cm⁻¹とμ_{O-H}=0.948からCa(OH)₂のO-Hのkを求め、このkとO-Dのμ_{O-D}=1.789からν_{O-D}を算出すると、2652cm⁻¹となる。実際にCa(OD)₂のIRスペクトルを測定すると、O-Dは2686cm⁻¹に観測され¹⁰⁾、計算値とほぼ一致する(計算値と実測値との差は、O-HとO-Dのkの差と思われる)。すなわち、IRスペクトルは力の定数kを測定する分析法である。

一方、n個の原子で構成される多原子分子では、3n-6通り(直線分子では3n-5通り)の基準振動が存在し、全ての吸収を理論的に解析することは困難である。従って、赤外吸収スペクトルの定性的な解析は、各種の特性吸収図表^{11,12)}を用いて骨格構造や原子団を判断し、あるいは、スペクトルデータ集(データベース)と対比したりして行われている。

3 装置

図2に回折格子型赤外分光光度計、図3にフーリエ変換赤外分光光度計の光学系を示す。回折格子型赤外分光光度計は複光束(double beam)型、フーリエ変換赤外分光光度計は単光束(single beam)型である。IRスペクトルの測定に用いられる赤外分光光度計は、(1)光源、(2)分光器、(3)試料室、(4)検出器、(5)信号処理(データ処理)系によって構成される。各々の詳細は成書^{8,13)}を参考にされたい。

3.1 光源¹⁴⁾

IRは、多くの場合吸収スペクトル測定を目的とするため、連続光源でなければならない。光源に用いられる物質は、物質の放射率が高いことと、放射率は温度が高いほど強くなるため、融点が高く、高温で安定な物質が好ましい。さらに、

4000~400cm⁻¹の中赤外域は、SiO₂等ガラス成分の吸収が強く、ガラス管などに封入したものは使用できない。一般的に使用されているIR用の光源には、炭化ケイ素に多少の不純物を添加して高温焼結したもの、ネルンスト発熱体、ニクロム線やセラミック光源などが用いられている。なお、ガラスの吸収が影響しない波長3μm以下の近赤外線にはタングステンランプ、150~300μmの遠赤外線には、高圧水銀灯が光源として用いられている。

3.2 分光器¹⁵⁾

IR法開発当初は、分光素子として岩塩のプリズムが使用されていたため、古いスペクトルデータ集では、横軸が波長(μm)で表記されている。プリズムは、波長によって材料の屈折率が異なることを利用して分光する素子である。プリズムは、その中を光が通過して分光されるため、プリズム材料の透過率の波長依存性が重要である。岩塩(NaCl)は、中赤外域における透過波長範囲が比較的広いが、潮解性があるため、装置の設置環境に制約があった。

1960年代からプリズムが回折格子に置き変わり、さらにIR法が普及した。反射型の回折格子は、ガラス基板に多数の溝を刻み、金属で表面を蒸着して反射率を高めたものである。回折格子に入射された光は、溝によって回折し、回折光が重なって光が強くなる入射角が、波長によって異なることを利用した分光素子である。回折格子は、金属の反射を利用

表1 電磁波の分類と光の特性

電磁波の分類	光の分類	波長	波数 (cm ⁻¹)	振動数 (GHz)	エネルギー (J)	
放射線	γ線					
	X線	真空紫外	10 nm	1.0 × 10 ⁶	3.0 × 10 ⁷	2.0 × 10 ⁻¹⁷
光	紫外線		200 nm	5.0 × 10 ⁴	1.5 × 10 ⁶	1.0 × 10 ⁻¹⁸
	可視光線	紫外	380 nm	2.6 × 10 ⁴	7.9 × 10 ⁵	5.2 × 10 ⁻¹⁹
	赤外線	可視光	780 nm	1.3 × 10 ⁴	3.8 × 10 ⁵	2.6 × 10 ⁻¹⁹
サブミリ波	ミリ波	近赤外	2.5 μm	4.0 × 10 ³	1.2 × 10 ⁵	8.0 × 10 ⁻²⁰
	センチ波	中赤外	25 μm	4.0 × 10 ²	1.2 × 10 ⁴	8.0 × 10 ⁻²¹
	極超短波	遠赤外	1 mm	10	1.0 × 10 ²	2.0 × 10 ⁻²²
	超短波					
	短波					
波	中波					
	長波					
	超長波					

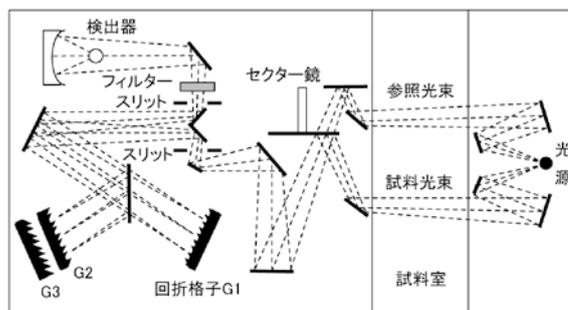


図2 回折格子型赤外分光光度計の光学系の一例

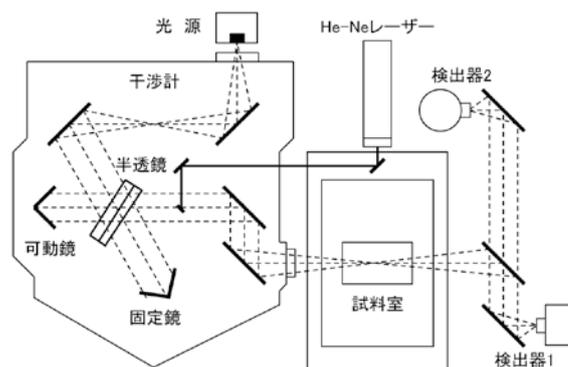


図3 フーリエ変換赤外分光光度計の光学系の一例

するため、適用できる波長範囲が広い。また、回折格子は潮解性が無いため、装置の設置環境に制約が緩くなった。さらに、回折格子は回転することによって波長を走査するが、回転方法を工夫することによって、スペクトルを波数に対して等間隔に記録できるようになった。この頃から、スペクトルの横軸の表記が波数 (cm^{-1}) となった。

1980年以降は、FT-IRが急速に発展した。FT-IRは、干渉計を使ってインターフェログラムを測定し、これをフーリエ変換してスペクトルを得る方法である。フーリエ変換という数学操作を利用するため、コンピュータの発展・普及もFT-IRの発展と関連している。FT-IRでは、スペクトルデータはデジタルデータで取り込まれるため、スペクトルの縦軸、横軸の変換、ピーク強度・ピーク面積の読み取りや、スペクトルの四則演算などが容易に行える。

3.3 検出器¹⁶⁾

赤外分光光度計に用いられる検出器は、熱型検出素子と量子型検出素子の二つに大別される。

熱型検出素子は、赤外線のエネルギを熱として検出する素子である。プリズムや回折格子を使った分光器では、サーモカップル・サーモパイルなどが用いられてきたが、FT-IRが発展した1980年頃より、焦電極型の硫酸三グリシン単結晶 (Triglycine Sulphate : TGS, 改良型はDTGS) が検出素子として多用されるようになった。熱型検出素子は、感度に波長依存性が無く、素子を冷却する必要もないが、応答速度が遅く、感度は量子型検出素子ほど高くない。

量子型検出素子は、光導電効果や光起電効果などを利用して赤外線を検出する素子である。量子型検出素子は、応答速度が速く、感度も高いが、感度に波長依存性があり、測定する波長範囲によって、素子を選択する必要がある。また、量子型検出素子は、一般に冷却が必要である。量子型検出素

子の中で、検出できる波長範囲が比較的広いのは、HgCdTe (Mercury・Cadmium・Tellurium : MCT) 検出器で、液体窒素温度 (-196°C) で $2\sim 16\ \mu\text{m}$ ($5000\sim 625\text{cm}^{-1}$) の範囲で使用される。

3.4 光学材料

赤外分光光度計、および測定のためのアクセサリ、測定セルなどには、いろいろな赤外線透過材、反射材が用いられている。

3.4.1 赤外線透過材

赤外線透過材は、使用目的にあった化学的、物理的性質を持つ材料を選択する必要がある。表2に主な赤外線透過材料の諸性質を示す。熔融石英やサファイアなどの酸化物は、 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 程度 (近赤外域) までは使用できるが、さらに長波長側では、吸収が強いため使用できない。中赤外域では、一般的にはKBr、NaCl、KClなどアルカリハライド、特にKBrがよく用いられる。KBrは中赤外域の透過波長範囲が広く、単一面透過率も高いが、潮解性があるのが欠点である。Ge、Siなどは水に強いが、屈折率が高いために表面の反射損失が大きい (単一面透過率が低い)。また、KRS-5、KRS-6はTlI/TlBrの混晶で、毒性が強い (タリウム)。表2には、見かけの弾性率も示したが、これは材料の強度の目安となるもので、真空セルのように圧力差が生じるときの材料の厚さを計算する時に参考になる。

3.4.2 赤外線反射材

赤外分光光度計、および測定のためのアクセサリには、平面ミラー、曲面ミラー、回折格子などが反射材料として用いられている。通常のミラーは、ガラス基板に金属を蒸着したものが多く、最近ではプラスチックを基板に用いるこ

表2 主な赤外線透過材料の諸性質

材 料	10 μm における屈折率	単一面透過率 (%)	透過波長範囲 (μm) ¹⁾	20 $^{\circ}\text{C}$ の溶解度 (g/100g-H ₂ O)	融点または軟化点 ($^{\circ}\text{C}$)	見掛けの弾性限界 (kg/cm ²)
BaF ₂	1.4	97.2 (4 μm) ²⁾	0.15~15.0	0.162	1280	274.2
CaF ₂	1.41 ³⁾	97.1 (4 μm)	0.13~12.0	1.51×10^{-3}	1360	372.63
KCl	1.46	96.5 (10 μm)	0.21~30.0	34.7	776	23.2
NaCl	1.49	96.1 (10 μm)	0.21~26.0	35.8	801	24.61
KBr	1.53	95.6 (10 μm)	0.23~40.0	65.2	730	11.25
CsI	1.74	92.7 (10 μm)	0.24~70.0	44	621	56.95
AgCl	1.99	89.0 (10 μm)	0.4 ~25.0	不溶	457.7	265.2
KRS-6	2.17	86.4 (10 μm)	0.41~34.0	0.32	423.5	214.2
KRS-5	2.37	83.5 (10 μm)	0.5 ~40.0	0.05	414.5	265.2
ZnSe	2.4	83.0 (10 μm)	0.5 ~22.0	不溶	1700	562.46
Si	3.4	70.2 (10 μm)	1.2 ~15.0	不溶	1420	
Ge	4	64.0 (10 μm)	1.8 ~23.0	不溶	936	

1) 透過波長範囲は、3mm厚の材料。

2) BaF₂の単一面透過率は、BaF₂の吸収を考慮しない理想値。

3) CaF₂の屈折率は、4 μm における屈折率

ともあり、軽量化が図られている。赤外線は、紫外線や可視光線の領域に比べて波長が長いので、基板の面精度はそれほど高くなくても良い。表3に主な金属材料の反射率を示す。中赤外域ではAuが最も反射率が高いが、Al蒸着ミラーも良く用いられている。誘電体多層膜を使って反射率/透過率をコントロールしたものもあるが、これは、特性が波長に依存するため、分光分析には使いにくい。

4 測定方法

4.1 透過測定法

IRスペクトルの吸収は、透過率または吸光度で表示される。波数 ν 、強度 I_0 の光が濃度 c 、厚さ t の試料を透過した後の光の強度を I とすると、吸光度 A は次式 (Lambert-Beerの式) で表わされる。

$$A = -\log(I/I_0) = \epsilon ct \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 ϵ はモル吸光係数、 (I/I_0) は透過率 T である。 A は c および t に比例するので、定量分析に用いられるが、(8)式は測定方法そのものを示している。すなわち、 T を求めることは、 I_0 と I の比率を求めることである。

図4にIRスペクトル (透過率) の測定方法を示す。装置は、図3に示したFT-IRを使用した。検出器はTGSである。図4(a) は、試料室に試料がないときのシングルビームスペクトルで、波数に対するエネルギーで示される (I_0)。このスペクトルには、光源や検出器、分光器の光学系の特性や状態が反映されている。(b) は、ポリスチレンフィルム透過光のシングルビームスペクトルである (I)。このスペクトルは、(a) のスペクトルにポリスチレンの吸収が重なっている。(c) は、(a) / (b) を百分率で表わしたもので、これがポリスチレンのIRスペクトルである (T)。

図5に各種透過測定方法を示した。

(1) 透過法：適度な厚さのフィルム状試料は、そのまま測定

表3 主な金属材料の赤外線反射率

金属材料	反射率
Ag	98.93 % (@12 μ m)
Al	98.20 % (@12 μ m)
Au	99.09 % (@12 μ m)
Cu	98.90 % (@12.25 μ m)
Fe	76.13 % (@ 2.16 μ m)
Ni	95.00 % (@12.5 μ m)
Sn	36.77 % (@12 μ m)
Zn	94.65 % (@10 μ m)

できる。

- (2) 液膜法A：液状試料は、KBr等窓板に塗布して液膜を形成し、測定する。膜厚は、塗布量によって調整する。固体粉末試料も流動パラフィンに分散させて、ペースト状試料として測定することもできる。
- (3) 液膜法B：液状試料でも粘性が低く、液だれしてしまう試料は、2枚の窓板に挟み、測定する。窓板を押さえる力を加減することによって、膜厚を調整する。
- (4) 液体セル法：液膜法Bの2枚の窓板間に一定の厚さのスペーサーを挟み、光路長を固定して測定する方法。溶液試料に対し、定量分析を行う時によく用いられる。溶液試料を流通させるようにすれば、液体クロマトグラフの検出器としても使用できる。

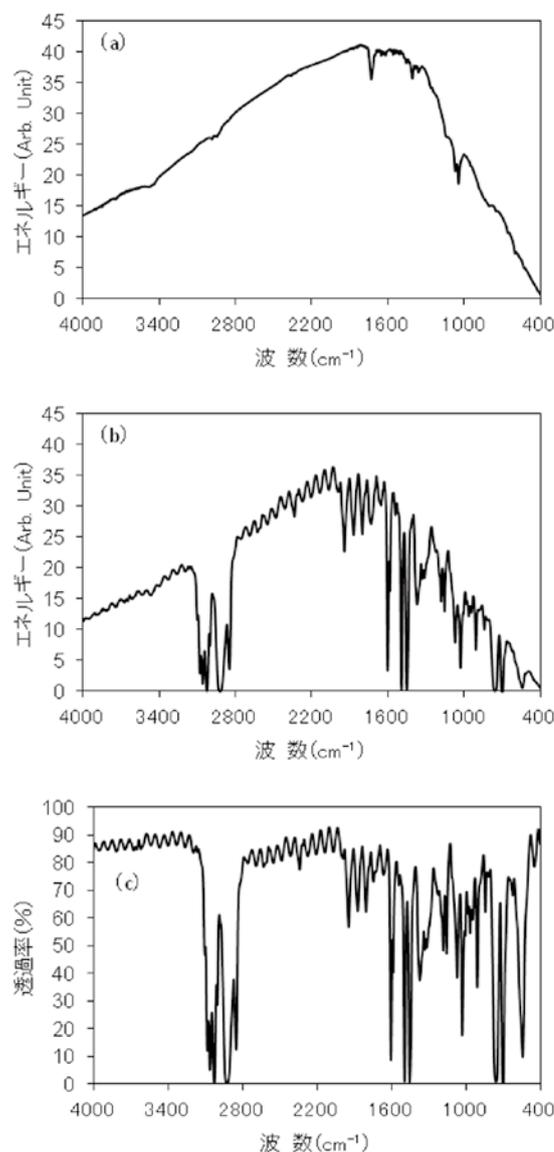


図4 IRスペクトル (透過率) の測定方法 (ポリスチレンフィルム)
 (a) 試料がないときのシングルビームスペクトル (I_0)
 (b) ポリスチレンフィルム透過光のシングルビームスペクトル (I)
 (c) ポリスチレンフィルムのIRスペクトル (I_0/I)

- (5) 気体セル法：溶液セルの気密性を高め、気体試料を測定する方法。液体セルよりも一般的に光路長が長い。さらにセル内に多重反射鏡を設置した長光路セルも市販されている。
- (6) KBr錠剤法：固体試料に対して用いる方法。微粉の固体試料をKBrとよく混合して加圧・成型し、錠剤を作製して測定する。試料とKBrの混合割合は、13mm φの錠剤を作製する場合、固体試料 1mg に対して300mgのKBrを基本とし、試料の吸収の強さによって調整する。

4.2 反射測定法

図6に鋼板表面を例とした反射測定法の原理を示す。入射角 θ で鋼板表面の試料に入射した光は、試料内部に屈折して入り込み、試料/鋼板界面で反射して試料表面から出射（反射光）する。この反射光を分光すれば反射スペクトルが得られるが、入射光は試料内部を通過するので、反射スペクトルは試料の吸収スペクトルと同じ意味を持つ。ただし、屈折率は波長によって異なるので、スペクトルの強度は透過率とは若干異なっている。

反射測定法には、図6で示した（正）反射測定法の他に、反射測定法の入射角を大きくとり、偏光を利用した高感度反射（Reflection Absorption Spectroscopy ; RAS）法、高屈折

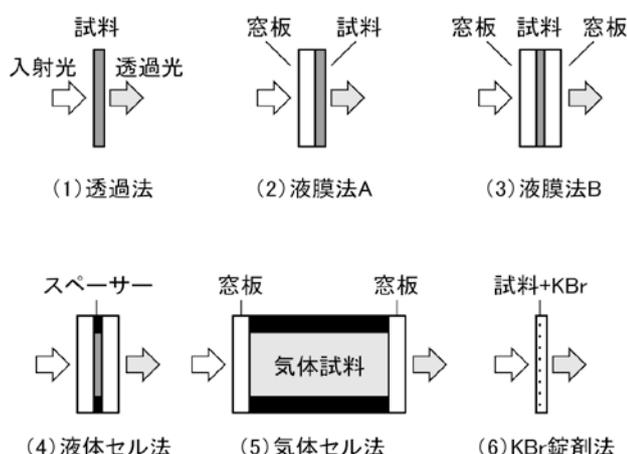


図5 各種透過測定方法

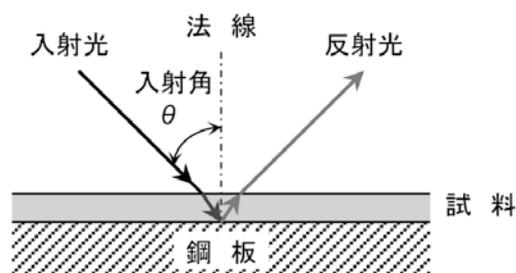


図6 反射測定法の原理

率プリズムを利用した全反射（Attenuated Total Reflection ; ATR）法、粉体などの粒子表面を対象とした拡散反射（Diffuse Reflectance ; DR）法などがある。

RAS法は、反射率の高い平滑な金属表面上の吸着種や有機薄膜等の測定に有効な測定法であり、金属表面上の分子の状態によっては、高い表面感度を得られている⁴⁻⁷⁾。

ATR法は、屈折率 n_1 が大きいプリズムから屈折率 n_2 が小さい試料に入射角 θ で光が入射する（ $n_1 > n_2$ ）とき、臨界角 $\theta_c = \sin^{-1}(n_1/n_2)$ より大きな入射角では、入射光が全反射することを利用する。図7にATR法の測定概念を示すが、全反射を微視的にみると、入射光はプリズムと試料の界面で反射するわけではなく、次式で表わされるもぐりこみ深さ（ d_p ）だけ試料側に入り込んでから反射するため、試料に吸収があれば、その情報が反射光に反映される。

$$d_p = \lambda / \{2\pi(n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2)\}^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 θ は入射角、 λ は波長である。この式からわかるように、 θ が大きくなるほど、また n_1 が大きくなるほど d_p は小さくなる。このことを利用し、 θ と n_1 を変えて測定することによって、試料表面の深さ方向の分析も行われている。

図8にATR法によって測定したIRスペクトルの例を示す。厚さ1mmの亚克力板を透過法で測定すると、試料の吸収が強い波数領域の透過率はほぼ0%となり、スペクトルの解析は困難である。一方、ATR法では、もぐりこみ深さ分の吸収となるため、同定可能なスペクトルが得られる。

DR法は、粉体試料に入射した光のうち、粒子内部に屈折して進入した光が粉体試料内で屈折透過、散乱、表面反射を繰り返しながら拡散されてゆく光を集光して分光する方法で、粉体や繊維、触媒などの分析に用いられている。

5 活用事例

5.1 無機物のIRスペクトル

IRスペクトルのデータベースは有機物が圧倒的に多く、

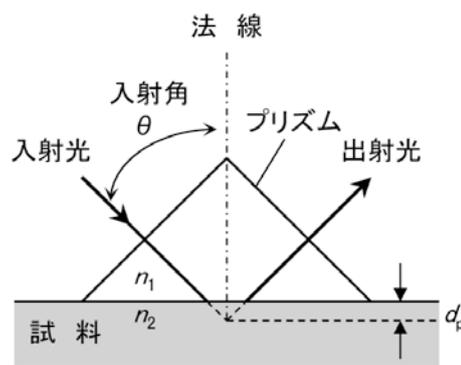


図7 ATR法の測定概念

鉄鋼業でも表面処理被膜や油類の分析によく用いられている¹⁷⁾。一方、IR法は無機物に対しても有効な分析手法である。図9に鉄鉱石のIRスペクトル例を示す。(a) Ore Aでは、 α -Fe₂O₃、 α -FeOOHおよびカオリンが検出されている。カオリンは鉄鉱石中でよく見かける粘土鉱物であり、鉄鉱石によっては数%程度含まれていることもある。(b) Ore Bは、Ore Aより α -FeOOH含有量が多く、また、石灰石も検出されている。カオリン相当の吸収ピークは、(a)のカオリンとは若干形状が異なっており、アルミノケイ酸塩の1種と予想される。

α -FeOOHは、鋼材の腐食初期にも生成するオキシ水酸化鉄で、 α -FeOOHの分析は、鋼材の腐食の研究にも役立っている。

5.2 高温IR分析

製鉄プロセスは高温プロセスであり、原材料の加熱に伴う性状把握は非常に重要である。IR分析も、原理に則って装置や測定方法の工夫をすれば、加熱しながらIRスペクトルを測定することも可能である。

図10に窒素気流中で600℃まで加熱した時の石炭のIRスペクトルの変化を示す。装置構成および測定条件は、文献と同じである¹⁸⁾。このスペクトルより、石炭は、400℃付近から熱分解が始まるが、分解は脂肪族側鎖の部分の切断が主体で、芳香族C-Hの吸収ピーク強度は、600℃でもほとんど変わらないことがわかる。また、石炭に含まれる粘土鉱物のカオ

リンも400℃付近から脱水反応が起こっていることもわかる。

図11には、不定形耐火物の高温IRスペクトルを示した。不定形耐火物は、基本的には無機酸化物であるが、一部水和して水酸化物が生成するケースがあり、水酸化物が生成すると膨潤し、成形体に変形することがある¹⁹⁾。図11に示した不定形耐火物は、水和による変形が起こったものである。図11において、3750~3000cm⁻¹に水酸基に基づく吸収が観測されるが、3692cm⁻¹の吸収以外は300℃付近で消失しており、ピークパターンと脱水温度から、これらはAl(OH)₃と予想される。3692cm⁻¹の吸収は、ピークの波数と脱水温度からMg(OH)₂と推定される。MgOが水和してMg(OH)₂を生成すると、体積が約2倍に膨張することが知られており、試料の不定形耐火物の変形は、MgOの水和が原因と考えられる。

以上のように、IR測定も工夫をすれば、いろいろな用途に適用できる。

6 おわりに

「初めて使う人」を念頭に、赤外吸収分光法(IR)の原理と活用事例を紹介した。IR分析に要する試料量は、KBr錠剤法で1mg程度、透過法は μ mオーダーの膜厚が測定に適しており、少量で十分である。通常のスเปクトル測定は数分でできることから、未知試料を分析する場合、最初にIRスペクトルを測定してみるとよい。有機物と無機物の判断は容易で、有

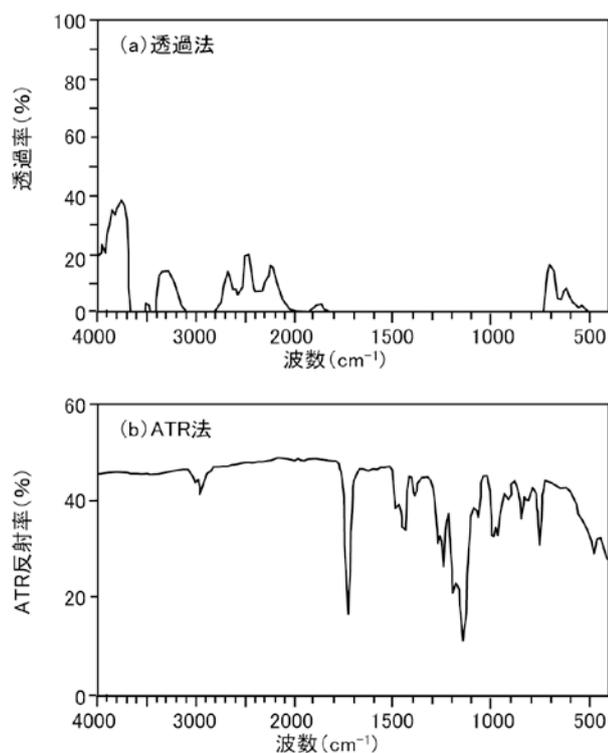


図8 アクリル板(厚さ1mm)のIRスペクトル
(a) 透過法、(b) ATR法(ATRプリズム: KRS-5、入射角: 45°)

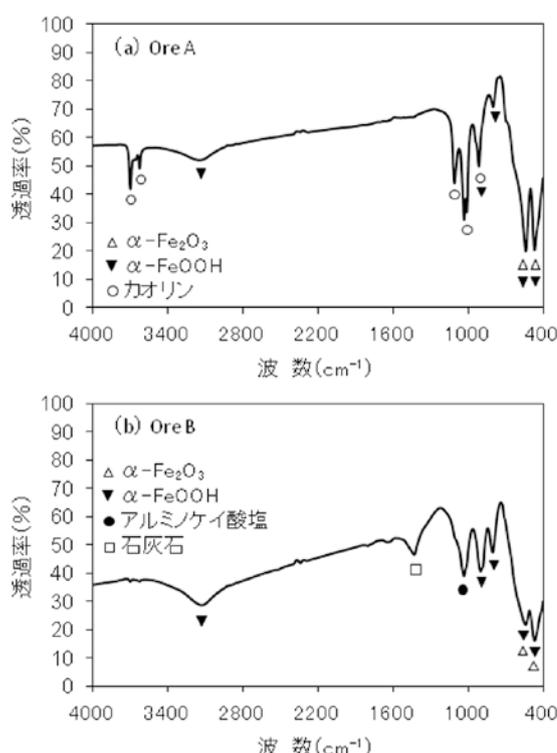


図9 鉄鉱石のIRスペクトル例
測定法: KBr錠剤法 試料量: 2.0mg/300mg-KBr

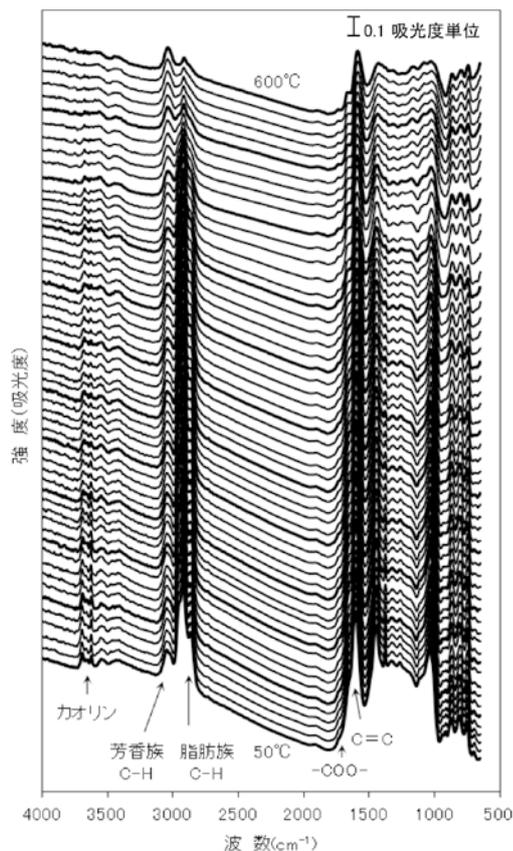


図10 石炭の高温IRスペクトル例
測定法：透過法、窒素気流中50°C～600°C、10°C/minで昇温

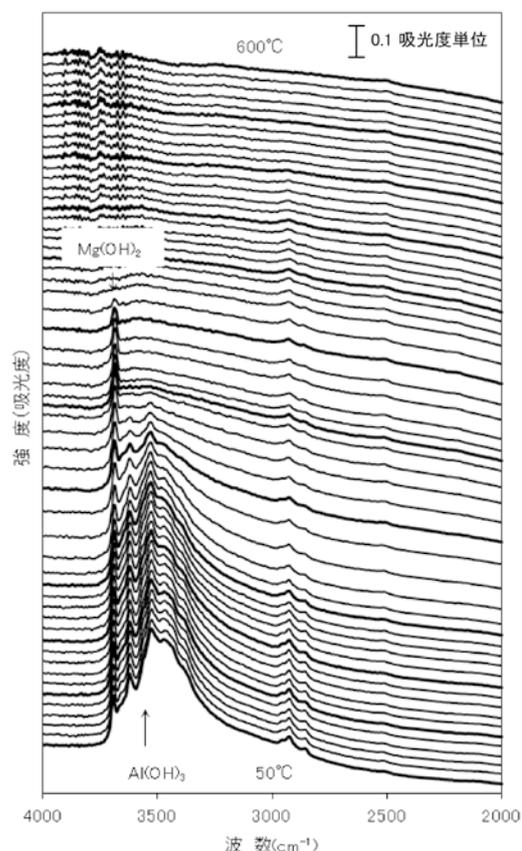


図11 不定形耐火物の高温IRスペクトル
測定法：透過法、窒素気流中50°C～600°C、10°C/minで昇温

機物であれば官能基、無機物では原子団の推定ができる。

IRは気体、液体、溶液、固体試料に適用可能で、反射法を用いれば表面分析もできる。また、顕微IR法を用いることによって、微小領域のIRスペクトルを得ることもできる。さらに、顕微IRでは、複数の検出素子を1列に配置したリニアアレイ検出器が開発され、IRイメージングも可能となった²⁰⁾。IR法は、今後も鉄鋼分野で大いに活用される分析法である。

参考文献

- 1) 化学便覧 基礎編 改訂5版, 日本化学会編, 丸善, (2004)
- 2) 第5版 実験化学講座 9 物質の構造 I 分光 上-, 日本化学会編, 丸善, (2005)
- 3) 豆塚廣章: 続 入門鉄鋼分析技術, 日本鉄鋼協会, (2007) 123.
- 4) フーリエ変換赤外分光法, 平石次郎編, 学会出版センター, (1985)
- 5) FT-IR法の基礎と実際 (第2版), 田隅三生編著, 東京化学同人, (1994)
- 6) 錦田晃一, 岩本令吉: 赤外法による材料分析, 講談社サイエンティフィック, (1986)
- 7) 末高治編著: 表面赤外及びラマン分光, アイピーシー, (1990)
- 8) 第4版 実験化学講座6 分光 I, 日本化学会編, 丸善, (1991)
- 9) 水島三一郎, 島内武彦: 赤外線吸収とラマン効果, 共立出版, (1985)
- 10) 藤岡裕二, 相本道宏, 西藤将之: CAMP-ISIJ, 22(2009), 683.
- 11) 田中誠之編著: 有機化合物の構造決定法, 産業図書, (1980)
- 12) 中西香爾, P. H. Solomon, 古舘信生: 赤外線吸収スペクトル 定性と演習 [演習編] (改訂版: 第23版), 南江堂, (1988)
- 13) 工藤恵栄: 分光の基礎と方法, オーム社, (1985)
- 14) 池田照樹, 久米英浩: ぶんせき, 1999 (1999) 10, 804.
- 15) 池田照樹: ぶんせき, 1999 (1999) 12, 994.
- 16) 久米英浩: ぶんせき, 1999 (1999) 11, 904.
- 17) 例えば, 増原憲一, 森浩治, 興石謙二, 佐々木隆: 鉄と鋼, 81 (1995) 11, 1085.
- 18) 藤岡裕二, 西藤将之, 齋藤公児, 加藤健次: 鉄と鋼, 88 (2002) 9, 507.
- 19) 藤岡裕二, 金橋康二, 齋藤公児, 齋藤吉俊, 後藤潔: 鉄と鋼, 93 (2007) 2, 150.
- 20) 大西晃宏: ぶんせき, 2013 (2013) 2, 87.

(2013年11月21日受付)