

Readout

HORIBA Technical Reports

特集 血液をはかる

July 1991 ■ No.3

回転形干渉計の機構と制御

Mechanism and Control of the Rotary
Interferometer

佐竹 司・境 行男・右近寿一郎

Tsukasa SATAKE, Yukio SAKAI, Juichiro UKON

(Pages 75-84)

株式会社 堀場製作所

回転形干渉計の機構と制御

Mechanism and Control of the Rotary Interferometer

佐竹 司, 境 行男, 右近寿一郎

Tsukasa Satake, Yukio Sakai, Juichiro Ukon

要 旨

フーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR) に使用される新しい干渉計として従来にはなかった光路差発生方式である回転形干渉計を開発した。干渉計の駆動用アクチュエータとして圧電アクチュエータを使用し、その制御系には ILQ 法を適用して最適サーボ系を構成した。

ここでは回転形干渉計の構造と制御系の詳細について言及し、回転形干渉計が使用された FT-200 によるサンプルの測定例を紹介する。

Abstract

Horiba has developed a new rotary interferometer, for use in our Model FT-200 Fourier-Transform Infrared Spectrometer (FT-IR). The rotary interferometer generates an optical path difference by rotating two pairs of parallel mirrors, a configuration not available in conventional equipment. The interferometer is driven by a piezoelectric actuator with the optimal servo system using the inverse linear quadratic method (ILQ). This paper explains the configuration of both the rotary interferometer and the servo system of the FT-200, with spectral data.

1. はじめに

フーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR) は振動分光法による物質の解析に大きな役割を果たしている。FT-IR は従来の分散形赤外分光光度計に比べてさまざまな特徴があり、測定の高感度化、高速化とともに多岐にわたる測定法の広がりを見せた。FT-IR では同時に多色光を測定するため、マイケルソン干渉計と呼ばれる直交二光束干渉計を搭載し、一方の鏡を一定速度で走査して測定波長ごとに周波数変調して検出する。しかしその反面、干渉計の可動鏡に求められる精度は移動中の傾きが 1 秒以下と小さく、また定速性も 1 % 以下ときびしい。そのため分解能の低い干渉計においても低価格化をはかることは難しかった。

このたび当社では、干渉計を従来の可動鏡を直動させる方式から鏡の回転動作により測定光を変調する回転形干渉計を開発し、これを搭載した FT-200 形フーリエ変換赤外分光光度計を発売した。回転形干渉計は、2 組の平面鏡が回

転するだけで光路差を生じ赤外光を変調しているため、従来形の直動ベアリングにある速度変動や鏡の移動中に生じる傾きが著しく小さくなり、低コストで製作できるという特長をもっている。ここでは回転形干渉計の機構と制御についてその特長とともに報告する。

2. フーリエ変換赤外分光光度計での干渉計の役割¹⁾

フーリエ変換赤外分光光度計では従来、マイケルソン形直交二光束干渉計が赤外光の変調に利用されている。ここではまず FT-IR における干渉計の役割について述べる。

FT-IR で利用されているマイケルソン形干渉計は、**図 1**にあるように光源から射出した光束がコリメートされてビームスプリッタに入射される。その光束はビームスプリッタによって可動鏡と固定鏡に向かう二光束に分けられ、それぞれ反射してきた光束が再びビームスプリッタ上でひとつの光束となり干渉する。ビームスプリッタは KBr のプレートに Ge の薄膜がコーティングされたものであり、入射光束の1/2を反射し、1/2を透過する。ビームスプリッタと向かい合って配置されたコンベンセータでは、二分割された光束が KBr の波長分散を同じだけ受けるように補正される。ビームスプリッタ上で干渉した光束は、集光され検出器へ導入される。

ここで可動鏡が一定速度で移動したとき、干渉計から射出される光束がどうなるか単色光の場合で見てみる。**(図 2)**

単色光の光源を平行光として強度 $I(\nu)$ の光を干渉計に入射し、可動鏡を平行に移動する。可動鏡と固定鏡との光路差 δ がゼロのときは、各鏡から反射してビームスプリッタ上で重なり位相がそろうために強く干渉する。可動鏡が波長 λ の1/4移動し、光路差が波長 λ の1/2になると位相は逆位相となるため打ち消されてしまう。さらに、可動鏡が1/2 λ 移動し光路差が波長 λ となると、再び強く干渉する。

可動鏡がさらに移動すると、光路差 δ が波長 λ の整数倍となるたびに光の位相がそろうため、強く干渉する信号 $I(\delta)$ が測定され、その強度変化は余弦関数で表すことができる。

$$I(\delta) = 0.5 \cdot I(\nu) \left\{ 1 + \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \right\}$$

$$= 0.5 \cdot I(\nu) \left\{ 1 + \cos 2\pi \nu \delta \right\}$$

$$\text{ここで } \nu \text{ (cm}^{-1}\text{)} = 1 / \lambda \text{ (cm)}$$

この式から、変化する成分のみを表した測定信号は

$$I(\delta) = 0.5 \cdot I(\nu) \cos 2\pi \nu \delta \quad \dots\dots\dots (1)$$

となり、これをインターフェログラムと呼ぶ。

単色光のインターフェログラムの周期は式(1)からわかるように、干渉計へ入射する光の波長に依存するので、検出器で測定した赤外光の周波数を解析すれば光の波長を求めることができる。

さらに連続光源を使用することを考えると、光学系の波長依存性、検出器の波長依存性や周波数特性、アンプ系の周波数特性が測定値に影響する。これらを合わせて装置の特性とし、測定されるスペクトルを $B(\nu)$ とすると、式(1)はつぎのようになる。

$$I(\delta) = B(\nu) \cos 2\pi \nu \delta \quad \dots\dots\dots (2)$$

FT-IR では連続光(分光スペクトルが連続した分布となるもの)が干渉計に入射し、変調されてインターフェログラムとなる。単色光を干渉計に入射し

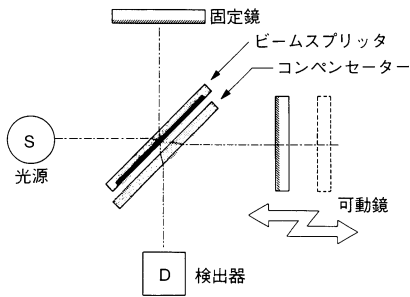


図 1 マイケルソン干渉計の構成図
Schematic representation of Michelson interferometer

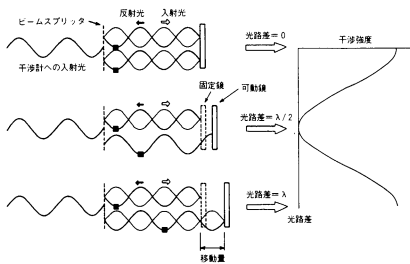


図 2 可動鏡の移動と干渉強度の変化
Motion of moving mirror and interference intensity

て得られるインターフェログラムは余弦信号となるが、連続光では波長の異なる光が干渉し合うため、図3にあるような複雑なインターフェログラムが測定される。

スペクトル線が増え、密に詰まって連続光になったとき、インターフェログラム $I(\delta)$ は

$$I(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\nu) \cos 2\pi \nu \delta \cdot d\nu \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表される。この式でスペクトル $B(\nu)$ とインターフェログラム $I(\nu)$ はフーリエ余弦変換の関係にあるので、これをフーリエ余弦変換するとスペクトルを求める式となる。

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\delta) \cos 2\pi \nu \delta \cdot d\delta \quad \dots\dots\dots (4)$$

実際にこれらの式からスペクトル $B(\nu)$ を求めるためには、光路差 δ を $-\infty \sim +\infty$ にわたって無限に小さなサンプリング間隔で変化させてインターフェログラムを測定することが必要になる。しかし、実際には限られた範囲でインターフェログラムはサンプリングされ、これが式(5)の関係でスペクトルの分解能 $\Delta\nu$ をきめる。

$$\Delta\nu = \delta_{\text{MAX}}^{-1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

すなわち可動鏡の移動範囲を長く取り、サンプリング範囲を広く測定すればするほど、高分解能のスペクトルを得ることができる。また、サンプリングの間隔がスペクトルの測定範囲をきめる。

3. 回転形干渉計の光学系

従来の直交二光束干渉計では、光路差を生み出すために鏡を平行に移動する。その移動中の平行度は1秒以下であることを必要とする。このため、平面鏡を平行に移動するタイプでは、そのリンク機構に高精度の加工部品を必要とし構造も複雑になり、そのため直進移動による機構系の誤差の影響をインターフェログラムが受けやすくなる。

一方、回転運動により光路差を生み出したとき、回転軸の保持はただの2箇所だけとなり、構造が簡単で高性能な干渉計となる。

FT-200ではこれまでに見られなかった新型の回転形干渉計を採用している。この干渉計はビームスプリッターと二組の平行に向かい合った回転鏡と二組の固定鏡から構成されている。2枚の平行に向かい合った鏡を回転すると光路差が生じ、FT-IRの干渉計として利用できることが知られている。²⁾ まず、2枚の鏡の回転で生じる光路長の変化について考えてみる。(図4)

2枚の平面鏡が平行に向かい合うとき、これに入射する光線とこれから射出する光線はかならず平行になる。いま1番目の鏡による反射光線が鏡の左回転 θ で -2θ 偏向され2番目の鏡に入射するとき、2番目の鏡も θ 回転しており、そこからの光線の反射角は 2θ 偏向しキャンセルされる。すなわち入射光と反射光の平行は保たれ光軸だけが変移する。

平行に配置された鏡 M_1 , M_2 に入射角 α で光線を入射し、反射する位置をそれぞれ点 a , b とすると、回転まえの点 a から固定鏡までの距離は

$$L_a = L_0 + L_4$$

となる。鏡 M_1 , M_2 が左へ θ 回転して鏡 M_1 からの反射光が左へ -2θ 偏向し、鏡 M_1 での反射点が a' 、鏡 M_2 での反射点が b' になったとき、点 a から固定鏡までの距離は

$$L_b = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$$

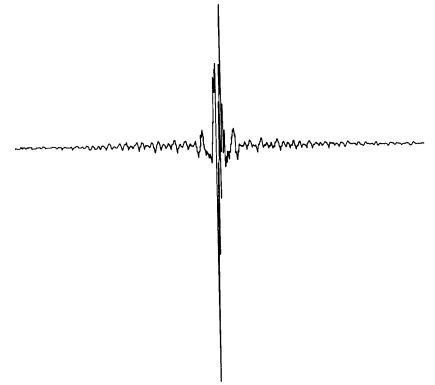
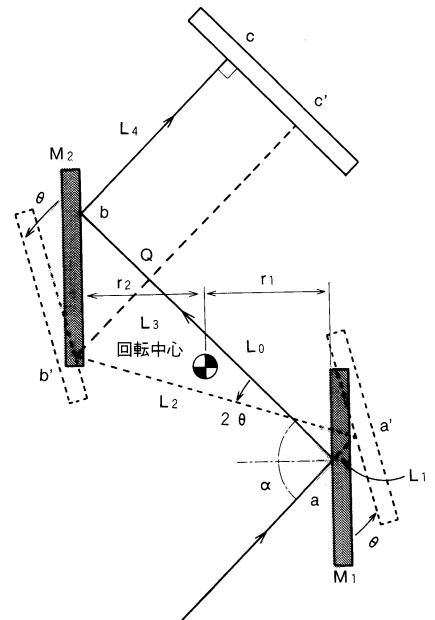


図3 連続光源でのインターフェログラム
Interferogram of polychromatic light source



- 記号の説明
 α : 入射光束の鏡 M_1 への入射角
 θ : 鏡 M_1 , M_2 の回転角
 r_1 : 回転中心から鏡 M_1 への距離
 r_2 : 回転中心から鏡 M_2 への距離
 L_0 : 点 a から点 b への距離
 L_1 : 点 a から点 a' への距離
 L_2 : 点 a' から点 b' への距離
 L_3 : 点 b' から点 Q への距離
 L_4 : 点 b (Q) から点 c (c') への距離

図4 2枚の鏡の回転による光路長の変化
Changes in optical path difference as the result of the rotation of the pair of mirrors

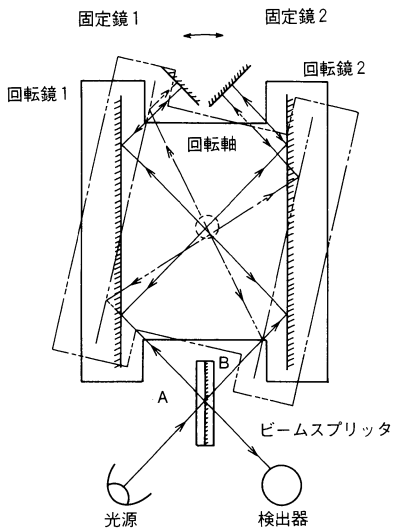


図5 回転干渉計の光学系
Schematic representation of rotary interferometer

で表され、明らかに $L_b > L_a$ となる。光路差 ΔL は

$$\Delta L = (L_1 + L_2 + L_3) - L_0 = \frac{r_1 + r_2}{\cos(\alpha - \theta)} \left(1 + \frac{\sin 2\theta}{\sin(\pi - 2\alpha)} \right) - \frac{r_1 + r_2}{\cos \alpha} \quad (5)$$

で表され、鏡 M_1, M_2 が左回転したとき光路長は長くなり、右回転したとき短くなる。

固定鏡を光軸に対して直角に配置すると、鏡 M_1, M_2 に入射した光束は同じ光路を通って戻り、光路差の変化は2倍となる。回転干渉計では、図5にあるようにこの2枚の鏡 M_1, M_2 をビームスプリッタに対して対称に配置しているため、ビームスプリッタからの反射光の光路長が鏡の回転によって長くなる時透過光の光路長は短くなり、そのために光路差の変化は4倍となってわずかな回転角で高い分解能が得られる。図6にその一例を示す。ここで2枚の鏡の距離は110mmとし、インターフェログラムを片側サンプリングすると、 2 cm^{-1} の分解能（光路差5mm）を得るためには、回転角で約 0.6° 、 0.2 cm^{-1} の分解能（光路差50mm）でも約 6° の回転角でよいことがわかる。

また、回転鏡はお互いに平行に配置されているため、たとえ回転軸が回転中に変位しても回転鏡への入射光束と出ていく光束とは必ず平行となり、走査中の機械的な誤差によるインターフェログラムへのノイズの重畳は発生しない。さらに入射光束と反射光束は回転鏡間の同じ空間を通過しており、空気の擾乱の影響を同じように受けてお互いにキャンセルしあう。

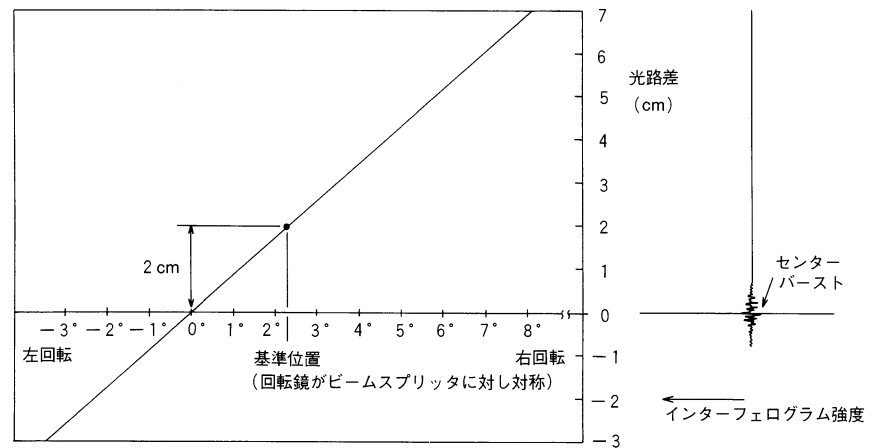


図6 回転角と光路差、インターフェログラムの関係
Angle of rotation, optical path difference, and interferogram

4. 干渉計の制御系設計³⁾

4.1 干渉計の制御

インターフェログラムにおいて、光路差の変化率（移動鏡の速度）が一定でないと、検出器およびアンプの周波数特性により信号の遅れが変化するため、信号のサンプリングに誤差が生じる。このため得られたスペクトルにおいてノイズ成分となり S/N 比が悪化するために、干渉計の鏡の回転は一定速度に制御する必要がある。

今回干渉計の制御系を設計するにあたり大阪大学藤井隆雄助教授（現九州工業大学教授）のご指導により開発をおこない、藤井教授より提案されている LQ 制御系の設計法である ILQ (Inverse Linear Quadratic) 法⁴⁾に基づいて最適サーボ系を構成し良好な制御結果を得た。

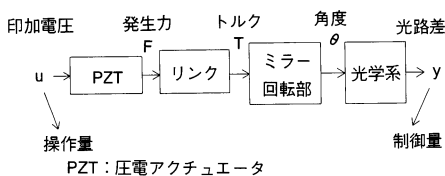


図7 制御対象の概略図
Controlled system

4.2 制御対象

本システムの制御対象は、図7に示すように光路差を得るための光学系とミラーの回転部、これを駆動する圧電アクチュエータ (PZT) 及び力を伝達するリンク機構とからなる。リンク機構の構造を図8に示す。

圧電アクチュエータはPZT系圧電セラミックスを使用し、圧電効果により印加電圧（電界）に比例したひずみが得られることを利用したものであり、小形で高出力、高速応答を特徴としている。このアクチュエータが発生した力をリンク機構により回転ミラー部に伝達し、そのトルクにより回転させて光路差を得ている。

図9に線形モデルで近似した制御対象のブロック図を示す。実際には圧電アクチュエータの印加電圧一変位特性はヒステリシスのある非線形特性であるが、ILQ法のロバスト性によりここでは線形モデルとして扱っている。

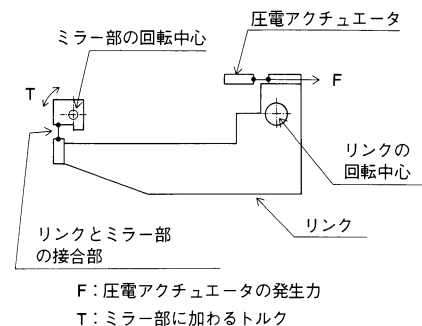


図8 リンクの構造
Structure of the link mechanism

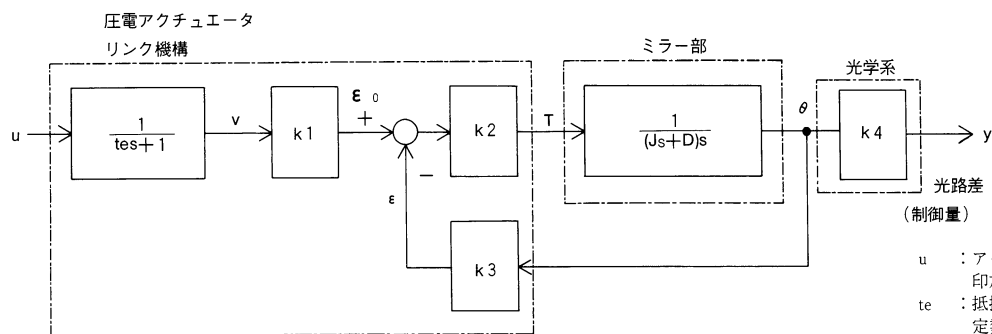


図9 制御対象のブロック図
Block diagram of the controlled system

- u : アクチュエータと電流制限用直列抵抗への印加電圧（操作量）
- te : 抵抗とアクチュエータの静電容量による時定数
- v : アクチュエータに印加される電圧
- ϵ_0 : アクチュエータの無負荷時の歪
- ϵ : アクチュエータの負荷時の歪
- T : ミラー部への伝達トルク
- J : ミラー部の慣性モーメント
- D : ミラー部の粘性係数
- θ : ミラー部の回転角度
- y : 干渉計の光路差（制御量）

ここで状態変数を

$$X = [\theta \quad \dot{\theta} \quad v]$$

と選ぶとシステムは次式で表わせる。

$$\dot{X} = AX + Bu$$

$$y = CX$$

ただし、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

$$C = [C_1 \quad 0 \quad 0]$$

ここで、

$$\begin{aligned} a_{21} &= -k_2 k_3 / J, & a_{22} &= -D/J \\ a_{23} &= -k_1 k_2 / J, & a_{33} &= -b_3 = -1/te \\ c_1 &= k_4 \end{aligned}$$

5. FT-IR への利用

回転形干渉計を FT-IR に利用した FT-200 の外観を 図13 に、内部の光学系および信号処理系を 図14 に示す。



図13 FT-200

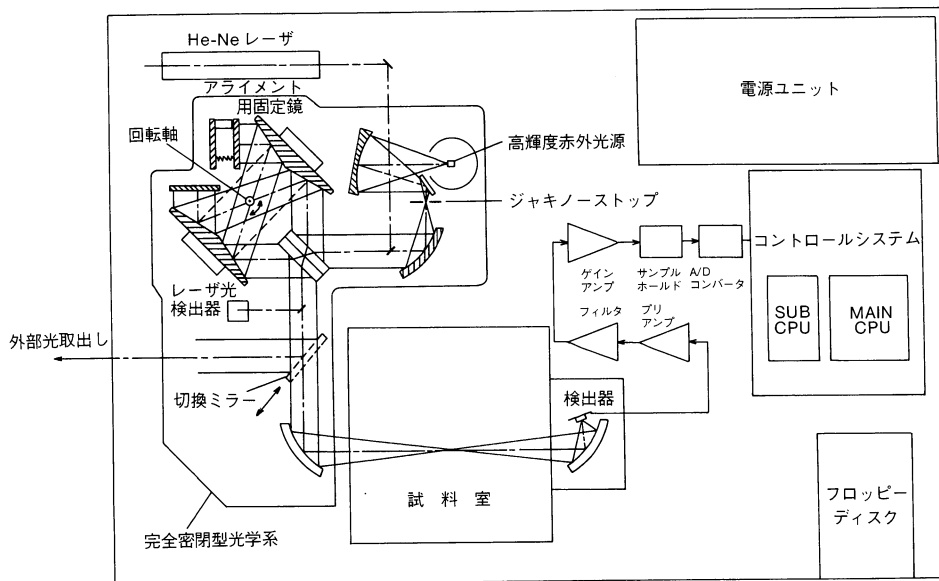


図14 FT-200の構成
Internal configuration of the FT-200

高輝度赤外光源からの赤外光は、ジャキノーストップに集光され放物面鏡で平行光に変換して回転形干渉計に入射する。干渉計で変調を受けた赤外光は、試料室中央で集光されたあと、TGS (triglycine sulfate) 焦電検出器へ導かれる。ここで、ジャキノーストップは干渉計に入る斜め入射光を制限し、測定スペクトルの波数シフトを防ぐために使用される。形状は一般に円形であり、その大きさは測定分解能、観測する最大波数値および光源の光を平行光に変換するのに用いられるコリメータ鏡の焦点距離で決まる。FT-200では 2 mm ϕ としている。

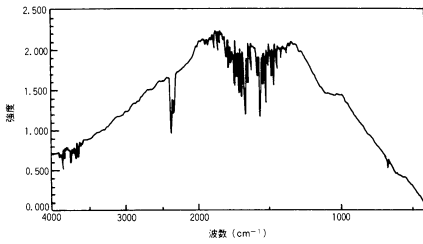


図15-1 リファレンススペクトル
Power spectrum

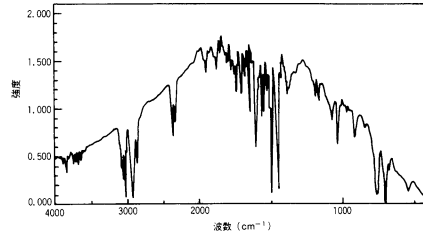


図15-2 サンプルスペクトル
Power spectrum with sample

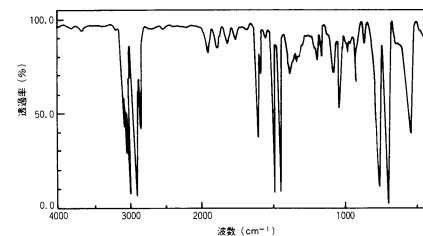


図15-3 透過率スペクトル
Transmission spectrum

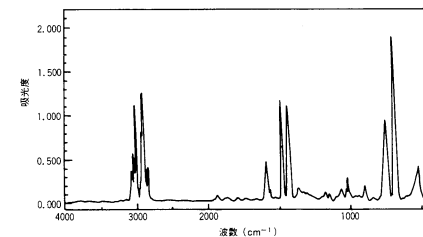


図15-4 吸収度スペクトル
Absorbance spectrum

図15 測定の流れ
Measurement sequence

He-Ne レーザー光は赤外光と同じ光路を通り干渉計で変調されレーザー光検出器へ導かれる。レーザー光は単色光であるから、図2で表されるように検出器出力波形は正弦波となる。干渉計制御はこの正弦波の波長が一定となるように動作をおこなう。レーザー光検出器からの出力はTGS検出器が受けた赤外光を、干渉計のスキャンにしたがって一定間隔でサンプリングするためのトリガー信号としても用いられる。TGS検出器からの信号はAD変換されCPUへデジタル化されたインターフェログラムとして導かれ、CPUはフーリエ変換を行い赤外線スペクトルとしてデータを表示する。

図15はFT-IRにおける一般的な測定の流れを示す。FT-200はシングルビーム形分光器であるので、サンプルを測定する前にリファレンススペクトルをとることが必要である。図15-1は大気AIRをリファレンスとしたときのスペクトルであり赤外光源の強度分布を表す。図15-2は試料室にサンプルを置いて測定したときのスペクトルである。サンプルによる吸収がリファレンススペクトルに重畳している。図15-3はサンプルの透過率スペクトルを示し、リファレンススペクトルとサンプルスペクトルの割算結果として得られる。サンプルの同定には透過率スペクトルまたは図15-4に示す吸収度スペクトルが使われる。

FT-IRは分散形IRに比べ光学系が明るいという特徴をもっている。FT-200では試料室中央での赤外光の光束径を6mmφに設定している。図16はサンプルの大きさが3mmφと1mmφでのフェナセチンの透過率スペクトルを示す。透過率がわずか1%程度でもサンプルの吸収が明確に現れている。

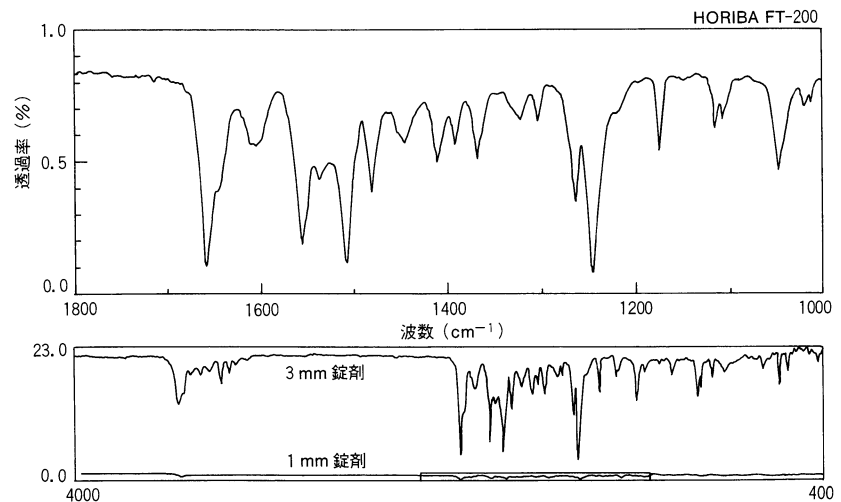


図16 KBr錠剤法による測定例
Transmission spectrum of phenacetin using the KBr pellet method

図17は全反射吸収 (Attenuated Total Reflectance: ATR) 法で測定された試料表面分析の例を示す。ATR法とは屈折率の大きな赤外線透過材料 (KRS-5, ZnSe 等) でできたプリズムにサンプルを接触させ、赤外光をプリズム内面で全反射させるように入射させると、接触面で赤外光がサンプルに若干もぐりこむ性質を利用するものである。サブミクロン～数ミクロンの厚みの表面分析に適している。包装用フィルムを測定した結果、表面はポリプロピレン、裏面はエチレン/ビニルアセテイト共重合体である事を示している。

FT-200に使用されているCPUには測定作業をプログラムし自動測定する機能がある。図18は2液性エポキシ樹脂系接着剤の硬化反応を調べた結果を示す。図19はエポキシ環の特性吸収帯である914cm⁻¹の吸収度変化を調べた結果であり、硬化反応は約15分で終了し始めることを示している。

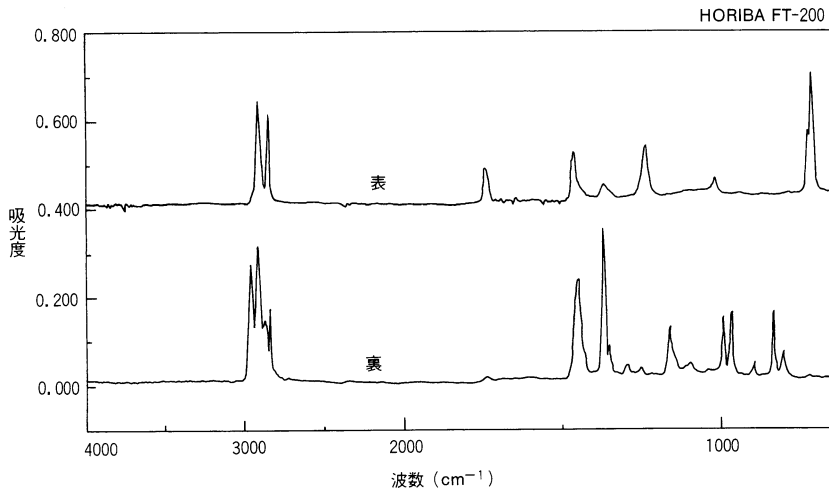


図17 ATR法による測定例
ATR spectra of polymer

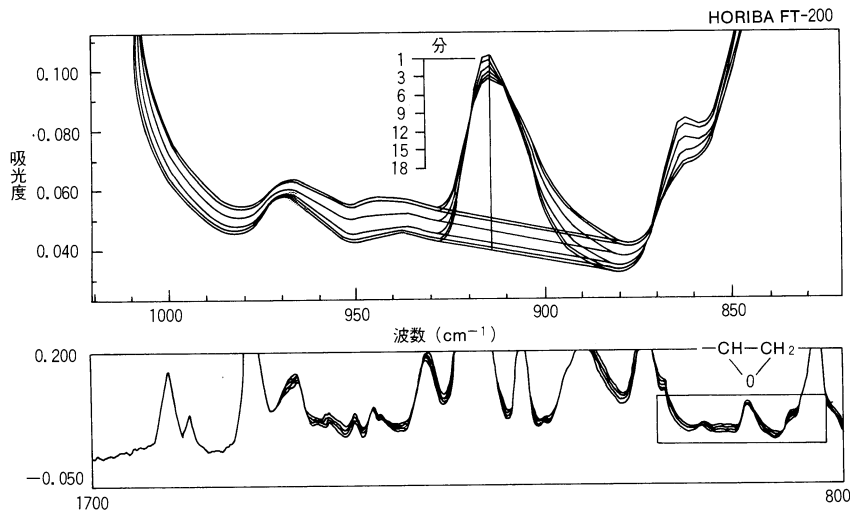


図18 エポキシ樹脂系接着剤の硬化反応の測定例
Absorbance spectra of epoxy adhesive curing process

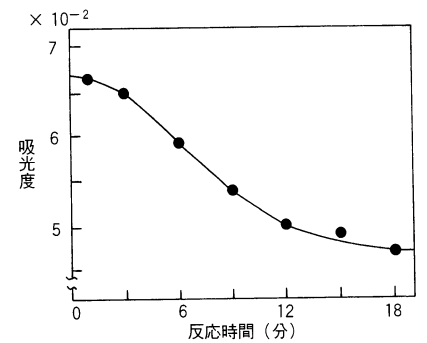


図19 エポキシ環の吸光度変化
Variation of absorbance of epoxy ring

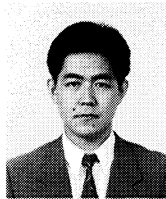
6. まとめ

FT-IRとして最も一般的である直交型マイケルソン干渉計に替えて、今回回転形干渉計を開発しFT-200に搭載した。回転形干渉計は簡単な構造でありながら干渉計の最も大切な性能であるスキャンにともなうチルトが原理的にないこと、および干渉計の制御系をILQ法を用いて最適サーボ系として構成したために優れた速度安定性が得られたこと、などによりFT-IRとして優れた製品にまとめることができた。

コンピュータの発達に伴いFT-IRが市場で急速に普及されコストパフォーマンスに優れた製品が望まれている現在、FT-200は市場要求に充分こたえ得ると考えている。今後は回転形干渉計のもっているポテンシャルを発揮する製品バリエーションを増やしていきたい。

引用文献

- 1) P.R.Griffiths,J.A.de Haseth "Fourier Transform Infrared Spectrometry" Chemical Analysis Vol.83 John Wiley (1986)
- 2) Sternberg et al "A Newtype of Michelson Interference Spectrometer" J.Sci.Instru..Vol.41,p.225-226 (1964)
- 3) 境行男, 河原林成行, 周藤賢治, 辻野太郎, 藤井隆雄 "ILQ 法によるフーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR) の制御系設計" 計測自動制御学会第29回学術講演会予稿集, Vol.1. 東京 (1990) p.137-138.
- 4) 藤井隆雄, 下村卓 "ILQ 最適サーボ系設計法の一般化" システム制御情報学会論文誌 .Vol.1, No.6, p.194-203 (1988)



佐竹 司
Tsukasa Satake

開発1部 主任
1959年7月17日生
関西大学工学部機械工学科



境 行男
Yukio Sakai

開発1部 主任
1956年1月22日生
武蔵工業大学大学院
工学研究科電気工学専攻



右近寿一郎
Juichiro Ukon

開発1部 課長
1953年2月22日生
関西大学大学院
工学研究科応用化学専攻

