総 説

フーリエ変換赤外分光法

田 中 誠 之

東京大学工学部工業化学科（東京都文京区本郷 7-3-1）

Fourier Transform Infrared Spectroscopy

Shigeyuki TANAKA

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Engineering,
University of Tokyo (7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo)

1 はじめに

赤外分光法は、30数年前、機器分析法のれい（黎）明期に登場し、有機化合物の分析法としてすでに定評があるが、近年、測定方式の異なるフーリエ変換赤外分光法（Fourier Transform Infrared Spectroscopy, 略称 FTIR 法）が新たに発展して注目を浴びている。この方法は後述のように、従来のものに比し各種の優れた点があるので、最近の機器分析の分野の最前線では、なくてはならないものの一つとして活躍しており、すでにわが国だけでも輸入品、国産品あわせて 100 台以上の装置が稼働している。さらに極く最近では高価な大型の装置以外に、低価格の簡易型装置が開発され、市販されるようになり、今や FTIR 装置汎用時代に入ったといえよう。本稿では、FTIR 法の概略と応用に関する最近の話題につき解説する。

2 FTIR 法の原理と特徴

2.1 原理¹⁾

FTIR 法とは、簡単に言えば、干渉計を利用してインターフェログラムを測定し、それを装置内蔵のコンピュータでフーリエ変換して通常の赤外スペクトルを得る方法である。この原理は、はるか昔の前世紀末にはすでに判明していたが、instrumentation の発展が遅れ、高性能の信頼できる現在の方式の装置が市販されたのは約 10 年前のことである。

FTIR 装置は大別して、マイケルソン干渉計を心臓部に有する光学系部とコンピュータを中心とする信号処理系より構成されている。図-1 にその光学系の一例を示す。光源 S から出た赤外光は平行光線となり干渉部へ入る。干渉計はビームスプリッター BS と固定鏡 M、可動鏡 M' よりなる。入射光はビームスプリ

ッターにより 2 光束に分けられ、それが再び合成されて検出器へ送られる。可動鏡を一定距離、一定速度で動かすと、両方の鏡で反射された光に光路差ができるので、その光路差に従って両光束の合成波は干渉をうけるが、これを検出器 D で検出すると干渉曲線（インターフェログラム）が得られる。これをフーリエ変換すると単光束方式の赤外スペクトルとなる。図-2 にポリスチレンを全領域 1 s で測定したとき及びブランクのスペクトルな

図-1 FTIR 装置光学系原理図

フーリエ変換スペクトル例

(a) ブランク, (b) ポリスチレン, (c) b/a の計算スペクトル

図-2 FTIR スペクトル測定例

らびにその比を算出した通常の複光束方式のスペクトルを示す。

2.2 特徴

FTIR 法の主要な利点は、多重度の利点 (Fellgett's advantage) と光量利用率の利点 (Jacquinot's advantage) である。

FTIR 法では、まず短い測定時間内に全波数領域のデータが得られる。すなわち、従来の装置が、光源から各波数の赤外線が連続的に出ているにもかかわらず、ある瞬間には特定波数の赤外線のみを測定し、ほかの波数の赤外線は全部むだにすてているのに比べ、FTIR 法では全波数領域の総合情報を同時に測定し、あとで計算により各波数成分に対する情報に分解するため、時間あたりの測定効率が非常によい。これが多重度の利点である。たとえば、測定範囲を $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 、分解能を 1 cm^{-1} とし、従来法で 1 cm^{-1} 測定する時間に FTIR 法ではちょうど全領域が測定できるとすれば、はるかに迅速な測定ができるばかりでなく、従来法での測定時間内に 3600 回の積算ができることになり、S/N は $\sqrt{3600}$ 、すなわち 60 倍と飛躍的に増大する。図-3 に、1 回の測定では全く不明であった極微量の一酸化炭素が 4096 回の積算で明りように検出できた例を示す。

図-3 一酸化炭素スペクトルにおける積算の効果

次に、検出器が受ける光のエネルギーは光学的スループットで決定される。スループットは光源の面積と利用できる立体角の積であるが、FTIR 装置と従来の分散型装置とを比較したとき、この積は前者がスリットを使っていない分だけ数十倍から 100 倍程度大きい。これが光量利用率の利点である。ただし、この利点は、検出器に達するエネルギーが普通の試料の場合よりかなり弱い、いわゆる暗い試料を対象としたときはじめて発揮されるもので、一般の試料の場合には、ただちに両方の利点の効率の積とはならない。

さらに、スペクトルの横軸関係では、レーザー光による精密測定をしているので波数精度が高く、分解能を上げやすいこと、また測定領域を遠赤外部まで容易にひろげ得ることなどの利点がある。

その他実用的な面での FTIR 法の特徴は、秒単位の

迅速測定で全波数領域のスペクトル情報が得られるのでガスクロマトグラフィー (GC) や高速液体クロマトグラフィー (LC) などの分離分析法とオンライン接続することにより溶離成分の分析が容易であること、内臓のコンピュータにより積算、加減乗除、データの貯蔵、スケール拡大など各種の演算が容易にできることなど、従来の装置では不可能もしくは容易ではなかった応用が多様にできることがあげられる。

なお、ある分析法を語るとき常に忘れてならないことは、その周辺の分析法もしくは測定方法との関連であるということの思い起こす必要がある。FTIR 法をまず赤外法の中で従来の分散型分光法と比較すると、そのすぐれた点を利用して従来の方式では到底不可能であったような複雑、高度な問題が解決可能となった反面、従来の方式でも充分解決し得る問題も多数あり、中にはむしろその方が良好な結果が期待し得るようなものもある。従って問題の内容を選別し、複雑、高度な問題に対処する以外は無批判に高価な装置にたよることなく、従来通り分散型装置の利用も当然考慮すべきである。

また、FTIR 法が、最近新しく現れた他の機器分析法と比較したとき非常に有利であるのは、すでに 30 数年の実績の上に打ち立てられた新方式である点である。今まで得られたことのなかった微弱な信号もしくは迅速測定データを解析する立場に立ったとき、全く新しい種類の機器分析法であれば、そのスペクトルを解読する方法を考察することが大変な仕事になるが、FTIR 法では従来のデータとの比較照合で簡単に結論を出し得る場合が多い。この点が FTIR 法が最近盛んに利用されている一因であるが、問題を処理する際、常に考慮すべきことは、本法はあくまで機器分析法の一つにすぎないのであって、万能ではないという点である。すなわち、赤外法は、原子団の知見が簡単に得られ、有機化合物の同定も可能で、また定量的取り扱いも容易であり、これらの方面では非常に有効に利用できるが、多成分系混合試料の場合にはそのままでは無力である。従って、その祭は GC または LC などの利用が第一に考えられるべきであるし、場合によっては、GC-IR、LC-IR など、もしくは GC-MS (質量分析) による必要も起こるであろう。また問題によっては、 ^1H または ^{13}C 核磁気共鳴法、質量分析法、ラマン分光法、ESCA など周辺の他の機器分析法の方がより簡単に解決できる場合もあり得る。従って、各機器法の長所短所をあらかじめよく理解しておき、他に迅速簡単に処理できる機器法があるならば、当然その機器法を利用すべきであるし、また併用により解決が容易になるのであれば複数の機器法の利用も考慮すべきである。

3 応用例と最近の話題

3.1 表面分析への応用

FTIR 装置が市販されてまず応用されたのは、従来の装置では検出不可能であった 2 種のスペクトルのわずかな差をクローズアップして新しい知見を得ることで、特に高分子を中心に多数の測定例が報告され、利用された。しかし、この差スペクトル法はすでに常識化し、また最近では従来型の装置でも多くのものが測定可能なように改良されてきている。

現在注目されているのは 各種材料表面の FTIR 分析である。各種工業の進展に伴い、機能性工業材料の開発が進められているが、そのバルクとしての評価法はほぼ確立したものの、性能の向上のためには表面の解析が必要である。表面の分析方法にはオージェ電子分光法、二次イオン質量分析法、X線光電子分光法などがすでに開発されているが、これらはおおむね高真空状態での測定を必要とし、また得られる情報は元素組成が主であり、分子構造に関する知見を得るには充分でない。そこで従来赤外スペクトル法の長所に高感度、高精度、しかも高度のデータ処理能力を持つ FTIR 法と特殊な表面分析手法とを組み合わせ、その要請にこたえようという試みが色々報告されている。以下に我々の研究例を中心に数例を紹介する。

3.1.1 FTIR-ATR 法

有機材料表面を分析するには ATR 法 (Attenuated Total Reflection, 全反射吸収法) が以前より利用されている。この方法は、KRS-5 など測定波数域で透明でしかも屈折率が試料より高い媒質を用い、これを試料表面に密着し、全反射条件で反射スペクトルを測定すると赤外スペクトルとほとんど一致するスペクトルが得られるもので、高性能の FTIR 法と組み合わせることにより従来得られなかった各種の知見が得られた。

まず、高分子表面に何らかの処理をした高分子二層膜の表面層及び下地第 2 層のスペクトルをそれぞれ分離して測定することが望まれていたが、従来の ATR 法では表面層の厚さが赤外光のもぐり込みの深さ (ほぼ使用波長程度) 以上でないと、下地第 2 層のスペクトルも加成されて解析が困難であった。そこで、それに対して入射角度をかえてもぐり込みの深さの異なる 2 種の ATR スペクトルを測定し、FTIR 装置の計算能力を利用し、各層のスペクトル分離を試みたところ、たとえば 図-4 のような結果²⁾ が得られた。すなわち、ポリビニルアルコール膜の表面にポリウレタン系粘着材が約 5 μm の厚さで存在する系の例では、入射角を 45° と 60° にしたときのデータ (図-4 a, b) をとり、1730 cm^{-1} を第 1 層、840 cm^{-1} を第 2 層に基づく計算用吸収帯として二元一次方程式を解く方式により表面層及び下地層のスペクトルを求めたところ、図-4 c, d のような結果が得られ、ほぼ標準スペクトル (図-4 e, f) と一致したものが得ら

a. 入射角 45° でのスペクトル, b. 入射角 60° でのスペクトル, c. 第 2 層の計算 スペクトル, d. 表面層の計算 スペクトル, e. ポリビニルアルコール膜の透過 スペクトル, f. 粘着剤の透過 スペクトル, 図中の矢印は $\log 1/R$ (R 反射率) を示す。

図-4 粘着剤塗布ポリビニルアルコール膜の ATR スペクトル

れた。また粘着剤層が 0.5 μm の場合でも、得られたスペクトルはかなり異なっているも計算結果はほぼ同様な結果が得られた。従ってこのような方式で測定、計算を行えば、従来不可能であった表面処理高分子膜の表面層と下地層のスペクトル分離が可能となった。

次に、高分子材料表面層の挙動の解明例として、高分子材料表面に吸着したタンパク質の解析³⁾ があげられる。最近生体適合性材料の一分野として抗血栓性材料表面の評価が注目されているが、従来はラベル化タンパク質で検討する程度で充分な方法がなかった。そこで FTIR-ATR 法がとりあげられ、測定法の工夫や多数回の積算などにより、初めて高分子材料表面上のアルブミン、 γ -グロブリンなどのスペクトルの検出、その定量的評価、さらに競争吸着、交換吸着などの動的解析まで可能となった。

3.1.2 FTIR-RAS 法

金属表面に有機物層がある場合には、RAS 法 (Reflection Absorption Spectroscopy, 高感度反射法) が有用である。これは、試料へ大きな入射角で赤外光をあて反射スペクトルを測定すると、高感度なスペクトルが得られる方法で、これと高性能の FTIR 法を組み合わせることにより、さらに高度の分析が可能となるであろう

という予測のもとに次の研究が行われた。まず従来の不明確な点を明らかにするため金属平面でのスペクトル測定を行い、FTIR-RAS 法での測定限度（平均厚さで約 2~10 nm）、定量性（平均厚さ約 10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下の直線性）を検討した後、金属粗面の場合にも果たして測定可能か否かの実験を行ったところ、粗面アルミニウム（平均二乗あらさ約 1 μm ）表面上の有機高分子及びアルミニウム表面に酸化アルミニウム層を粗面状態で薄く形成させた表面上の有機高分子についてスペクトル測定が可能であることが判明した。また、これらの表面上でも、有機高分子の量とピーク強度の係に定量性が存在することが明らかとなり、一般の金属工業材料表面への適用も有望であると判断された。そこで応用例としていわゆる PS 版（Presensitized Offset Printing Plate）上の感光性樹脂の光化学反応の追跡が行われたところ、興味ある結果が得られた。感光性樹脂にはポジ型及びネガ型を用い、それぞれ露光前後でスペクトル変化を検討したが、一例を 図-5 に示す。露光後に減少したジアゾ樹

図-5 PS 版上ジアゾ樹脂の露光によるスペクトル変化

脂の 1580, 1110 cm^{-1} は露光によって脱離するベンゼン核と共役した $\text{C}=\text{N}$ の伸縮振動と $\text{C}=\text{N}=\text{N}$ 累積二重結合の対称伸縮振動によるピークである。次に光化学反応率とピーク強度の係が求められ、これより実用感度付近での光化学反応率、露光量と感光性樹脂の膜厚量の係などが明らかにされたが、図-6 にあるように、露光エネルギーとピーク強度の係から、従来の分析法では 70 mJ/cm^2 程度以下の露光エネルギー密度では残膜がゼロと判定されていたものが、本測定結果により実は 3 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度残存していたことが明らかとなった。そ

図-6 PS 版上ジアゾ樹脂型感光性樹脂の特性曲線

こでこれと長期印刷中の地汚れの係が追求され、現像後の残膜量が 5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下の印刷版では 10 万枚以上印刷しても地汚れは発生しなかったが、それ以上の印刷版では 3 万枚程度の印刷で地汚れが発生することが判明し、この結果により従来不明であった地汚れの係が解明された。なお、本法によれば単分子層の検出も可能である⁵⁾。

3.1.3 赤外発光スペクトル法

表面の解析法の一つに赤外発光スペクトル法がある。FTIR 法による発光スペクトル測定が室温よりそれ程違わない温度の試料に対し有効であることは、以前から知られているが、検出すべき信号が非常に微弱な上、試料層が厚い場合には自己吸収の問題があり、必ずしも汎用されていない。我々は試料加熱用付属装置を試作し、金属板上 nm オーダーの薄層有機物の測定⁶⁾を試み、アルミニウム表面ポリ酢酸ビニルの場合、厚さ 10~80 nm 間で試料厚と発光強度の間に直線係があること、高感度化を試み、5 nm のポリ酢酸ビニルを 80 $^{\circ}\text{C}$ で検出できることを示した。図-7 に 1 μm の厚みのポリ酢酸ビ

(a) 透過スペクトル (薄膜) (b) 発光スペクトル (厚さ 1 μm , 80 $^{\circ}\text{C}$)

図-7 ポリ酢酸ビニルの発光スペクトルと透過スペクトル

ニルの発光スペクトルが透過スペクトルとよく類似していることを示す。特殊なものとしては、干渉計を 77 K に冷却して背景信号を低下させ、銅表面上単分子層の *p*-ニトロ安息香酸の室温でのスペクトル測定をした例⁷⁾があり、また触媒表面の化学吸着の解析⁸⁾なども行われている。この方法によれば下地金属は平板である必要はないので、今後各種工業材料への応用が可能と考えられる。

3.1.4 FTIR-PAS 法

物質が光を吸収したとき、発光や光化学反応等に寄与しない大部分のエネルギーは最終的に熱に変換される。したがって物質に断続光を照射すると物質内に周期的な温度変化を生じるので、これを圧力変化として検出する方法が PAS (Photoacoustic Spectroscopy, 光音響分光法) である。この方法は古くから行われていたが、約 10 年前に可視部で固体試料に対する測定法としてあらためて注目を浴び、赤外部特に FTIR との組み合わせで FTIR-PAS 法⁹⁾として考えられたのはごく最近である。この方法によれば試料の前処理をほとんど必要とせず、試料の形状を問わず測定ができ、前述の各方法より表面分析用としてさらに適用範囲が広い点が特徴的である。

図-8 本綿(A)及びナイロン(B)のFTIR-PASスペクトル

図-8 に布地の測定例¹⁰⁾を示す。その他各種プラスチック、添加剤含有ゴム、有機半導体、粉末試料などのスペクトル測定も報告され、また、表面の化学変化が *in situ* で追跡された例もある。

3.1.5 他の表面分析法との併用による解析

以上は各方法単独で表面の知見を得た例を述べたが、複雑かつ困難な問題に対しては当然他の機器法との併用が必要となってくる。まだそれほど顕著な応用例は見られないが、一例をあげると XPS (X線光電子分光法) と組み合わせた報告¹¹⁾がある。この研究ではアラキジン酸カドミウムをガラス板の上に単分子層から 9 分子層まで累積させたものが、XPS と FTIR-ATR 法で測定された。図-9 はそのうちの FTIR-ATR 法のデータで、

(a) KBr 錠剤法による透過スペクトル

(b) 単分子層及び多分子層の ATR スペクトル

図-9 アラキジン酸カドミウムの FTIR スペクトル

試料の ATR スペクトルからガラス板のブランクを差し引くと KBr 錠剤法で測定したものと変わらないものが得られたが、単分子層ではガラス表面とカルボキシレート原子団が強い相互作用をしていることが認められた。XPS の方からは Cd, C, Si, O などのスペクトルが議論され、累積層の厚さと得られた強度の間の関係と赤外法の結果とが比較考察されている。

3.2 GC-FTIR と LC-FTIR

前述のように FTIR 法では秒単位でのスペクトル測定が可能であるので、GC や LC と直結してオンライン分析が行える。特に GC-FTIR 法は日常分析法として利用されている。また分離された気体のスペクトルの検索も簡単にできるようになり、高価ではあるが、市販データ処理方式による検索をすれば 7000 前後の化合物について 1.5 min 程度で完了するといわれている。これらの技術は極く最近飛躍的に進歩したもので、わが国ではまだ必ずしも多くの場所で利用されているとはいえないが、米国では使用されている FTIR 装置の半数以上に何らかの GC-FTIR 用付属装置がつけられているといわれる。

図-10¹²⁾ に GC-FTIR 装置の概念図の 1 例を示す。バックドカラムもしくはキャピラリーカラムで分離された各留分はライトパイプのガスセルを通過しながらインターフェログラムを測定され、次々に記憶され、また赤外スペクトルに変換される。これらをもとにして、たとえば原子団別のクロマトグラム(マルチグラム)を画くことも可能であるし、さらに、必要なピークについては、あとで簡単にデータ検索もできるようになっている。

実例としては、水中の α -クロロアセトアニリドのオ

図-10 GC-FTIR 装置の概念図

オンライン分析¹³⁾を説明する。環境分析において水中の微量有機物の検出と定量は重要でしかも困難な領域の一つであるが、水中のプロパクロール、アラクロール、ブタクロールなどの農薬を対象として GC-FTIR が適用された。まず塩化メチレンで抽出して 3000 倍に濃縮した後トルエン-メタノール混合溶媒として市販の GC-FTIR 装置で分析された。4 μg の同族体混合物につき特定な 5 領域を指定してその波数域の赤外吸収の時間変化、いわゆるケミグラム (前出マルチグラムの別称) を画かせたものが 図-11 である。これは GC-MS の場合のマス

図-11 α -クロロアセトアニリド誘導体混合物のケミグラム

フラグメントグラフィーと同じ意味を持ち、この装置では同時に 5 波数領域まで選べるようになっている。これよりたとえば成分 5 (第二級アミド) のみ他の成分 (第三級アミド) と違い、C=O によるアミド I バンドの位置が高波数側にシフトしていることがわかるし、1505~1485 cm^{-1} に強いアミド II バンドを有することもわかる。また実験後の結果を調べ、精密に検討する必要のある所についてはその部分の赤外スペクトルをコンピューターからとり出すこともできる。図-12 にコンピューターか

(a) プロパクロール: N -イソプロピル (クロロアセト) アニリド
(b) 2,6-ジエチル (クロロアセト) アニリド

図-12 GC-FTIR による分離成分の IR スペクトル例

らとり出した成分 1 と成分 5 のスペクトル例を示す。このようにしてアセトアニリド類であれば各成分 1 μg 存在すれば良好な赤外スペクトルが得られ、結局 ppb レベルの分析が可能であった。なお、これにさらに質量分析法を接続した GC-FTIR-MS 法による試料の総合解析法の研究¹⁴⁾も進められている。

LC-FTIR では赤外域に透明な移動相がないことなど各種の困難があり、GC-FTIR よりはまだはるかに未完成の段階であるが、GC-MS に比し LC-MS が一段と多くの問題をかかえていることを考慮すると今後大いに期待される領域である。分画された留分を KCl 粉末上におとし、溶媒をとばして拡散反射法で測定すると ng オーダーの検出¹⁵⁾が可能であるといわれている。

3.3 その他の応用

FTIR 法が出現してからまだそれ程時間がたっていないが、応用例は枚挙にいとまがなく、2 年ごとに紹介される *Analytical Chemistry* 誌の Annual Review¹⁶⁾にも全部を網羅できない状態である。

応用例が最も多いのは高分子分析関係で前述の表面関係のほか、アミン触媒でのエポキシ重合機構の解明への利用、ポリエチレン及びポリプロピレン表面の特性づけとバルク特性と結晶化度もしくは分子配向との比較への応用、各種の高分子の熱分解挙動の解析など広い範囲にわたって多くの報告がある。ゴムの分析への応用に関しては紹介記事¹⁷⁾が出ている。

触媒表面分析への応用も多数見受けられるが、解説¹⁸⁾が別に出ているので参照されたい。

次に水溶液関係は、赤外法では最も苦手としている領域で、FTIR 法が発展するまでは ATR 法により細々

A 水, B 0.25 M 水溶液, C 差スペクトル
D 差スペクトル拡大図 (CH 伸縮振動領域)
E 差スペクトル拡大図 (COO⁻伸縮振動領域)

図-13 ヘキサン酸ナトリウム水溶液の FTIR スペクトル (12 μ m BaF₂ セル)

と研究されている程度であったが、最近では、生体組織関係など水分がないと事情が変わってしまう対象に対し、含水状態のまま測定し、水の吸収を差し引いて議論することがよく行われている。図-13 は表面活性剤水溶液の例としてヘキサン酸ナトリウムの水溶液のスペクトル¹⁹⁾を示す。図-13 B の実測スペクトルより A の水のスペクトルを差し引くと C のように溶質のみのスペクトルが得られる。各種の濃度で測定した結果が図-13 D 及び E のようになるが、CH₃ 及び CH₂ の逆対称伸縮振動 (図-13 D) と COO⁻ の逆対称及び対称伸縮振動 (図-13 の E) の 4 吸収の吸収波数及びバンド幅が濃度に対してどのように変化するかを精密に検討した結果、この水溶液の場合ミセル形成に 3 段階あり、0.75 M 以下の濃度では溶液は単分散状態であること、0.75 M 付近で逐次会合と対イオン結合が始まること、1.75 M 付近で不均一会合状態から均一ミセル状態へ移ることが説明された。

その他、環境分析へも前述の水中の微量成分分析への応用例以外、浮遊遊技んの成分分析、プラント近傍の大気汚染のモニター、自動車排気ガスの分析など多数の例が報告されているし、またシリコンウエハ中の極微量の Si-O、Si-C 結合の同時定量などの半導体関係への応用、石炭液化関連の研究への利用、さらには法医学への応用など高度の知見を得る必要があるあらゆる分野で応用が見られる。

4 終わりに

以上、FTIR 法に関し、その概要と応用に関する最近の話題につき、簡単に説明したが、FTIR 法は従来の IR 法では到底望めなかった高度の知見を得るのに好適な方法であり、今後もますます広い範囲で利用されて行くものと思われる。また、測定装置も分化して、現在よりさらに高性能なものが目指される一方、簡易型装置はますます簡素化され、いずれ将来はポータブル装置として今とは質的に異なる利用ができるまでに発展することになるであろう。

そしてそれら装置の進展に応じて FTIR 法の応用は一段と盛んになり、適用領域も一層ひろがることになりうし、また周辺の新しい方式と組み合わせて新たな魅力のある方法が展開されるものと期待され、この分野は今後も眼をはなせないものと考えられる。

(昭和 58 年 5 月 20 日受理)

文 献

- 1) 詳細は、たとえば 田中誠之、寺前紀夫；化学の領域、増刊、139 “赤外・ラマン・振動” p. 1 (1983) などを参照されたい。
- 2) 松井とも子、田中誠之、高分子論文集、37, 179 (1980)
- 3) たとえば 松井とも子、片岡一則、岡野光夫、桜井靖久、田中誠之、高分子論文集、39, 229 (1982)；日化、1982, 1241 など。
- 4) たとえば 松井とも子、下村正樹、山本 毅、北村竹司、田中誠之、日化、1981, 150；山本 毅、北村竹司、下村正樹、松井とも子、田中誠之、日化、1982, 727 など
- 5) D.L. Allara, J.D. Swalen, *J. Phys. Chem.*, **86**, 2700 (1982)
- 6) 松井とも子、谷 一夫、大橋茂夫、田中誠之、分光研究、31, 360 (1982)
- 7) D.L. Allara, D. Teicher, J.F. Durana, *Chem. Phys. Lett.*, **84**, 20 (1981)
- 8) M. Primet, P. Fouilloux, B. Imelik, *J. Catal.*, **61**, 553 (1980)
- 9) 寺前紀夫、田中誠之、表面、20, 305 (1982)
- 10) Norio Teramae, Shigeyuki Tanaka, *Spectrosc. Lett.*, **14**, 687 (1981)
- 11) T. Ohnishi, A. Ishitani, H. Ishida, N. Yamamoto, H. Tsubomura, *J. Phys. Chem.*, **82**, 1989 (1978)
- 12) 榎野清作、日本学術振興会炭化水素化学第 116 委員会第 2 分科会特別講演要旨、1983 年 1 月
- 13) J.W. Worley, M.L. Rueppel, F.L. Rupel, *Anal. Chem.*, **52**, 1845 (1980)
- 14) たとえば C.L. Wilkins, G.N. Giss, R.L. White, G.M. Brissey, E.C. Onyiriuka, *Anal. Chem.*, **54**, 2260 (1982) など
- 15) M.P. Full, P.R. Griffiths, *Appl. Spectrosc.*, **34**, 533 (1980)
- 16) たとえば R.S. McDonald, *Anal. Chem.*, **54**, 1250 (1982) など
- 17) 小林雅通、日本ゴム協会誌、54, 425 (1982)
- 18) 大西孝治、ぶんせき、1982, 630
- 19) J. Umemura, D.G. Cameron, H.H. Mantsch, *J. Phys. Chem.*, **84**, 2272 (1980)