

# FTIR

## TALK LETTER

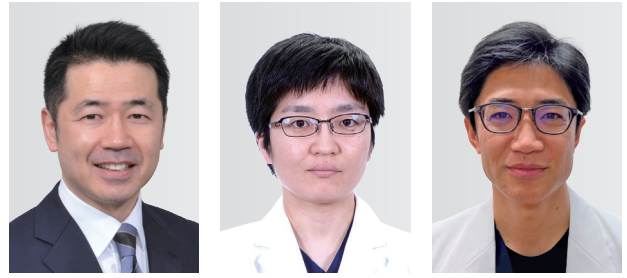
Vol. 46  
June 2026



青もみじが美しい季節。鮮やかな和傘の赤が雅な風情を誘う。

- マイクロプラスチックの人体への影響と研究 …… P. 2
- 赤外・赤外ラマン分光による粒子解析機能 …… P. 6
- 赤外スペクトル解析のポイント –アミド編– …… P. 10
- IR発売から70周年 …… P. 16

# マイクロプラスチックの 人体への影響と研究



長崎大学大学院医歯薬学総合研究科 外科学講座腫瘍外科学分野  
松本 桂太郎、山下 真理子、小畑 智裕

## 1. マイクロプラスチックについて

プラスチックによる直接的な海洋環境破壊に加え、食物連鎖等を通じた間接的な人間への健康被害が世界的に懸念されている。特にアジアでは海洋のプラスチック汚染が深刻であり、本邦においても、ビニール製レジ袋の使用規制をはじめ、プラスチック生成量の抑制や回収を目指す取り組みが始まるなど、国民的な関心も非常に高い。プラスチックは日光の紫外線と海洋の波などの物理的な力により崩壊・細片化して、マイクロプラスチックやナノプラスチックを生成する(図1)(以下、マイクロプラスチック・ナノプラスチックをMPとする)。

MPには一次MPと二次MPがあり、製造の時点で5 mm

以下であるもの(例えば洗顔料等に含まれるマイクロビーズ)は一次MP、環境に放出されたプラスチック製品が紫外線や熱などの物理的な力により破碎、細片化したものや合成繊維の服の洗濯時に発生する繊維などは二次MPと分類される。マイクロプラスチック(microplastics: MPs)は一般に5 mm以下のプラスチック粒子を指し、近年は海洋汚染だけでなく、空気中粒子として吸入される経路(inhalation exposure)が問題視されるようになった。とくに数十 $\mu\text{m}$ 以下、さらに数 $\mu\text{m}$ ~サブ $\mu\text{m}$ 粒子は、上気道だけでなく末梢肺・肺胞領域に沈着しうるため、呼吸器疾患との関連が強く疑われている。

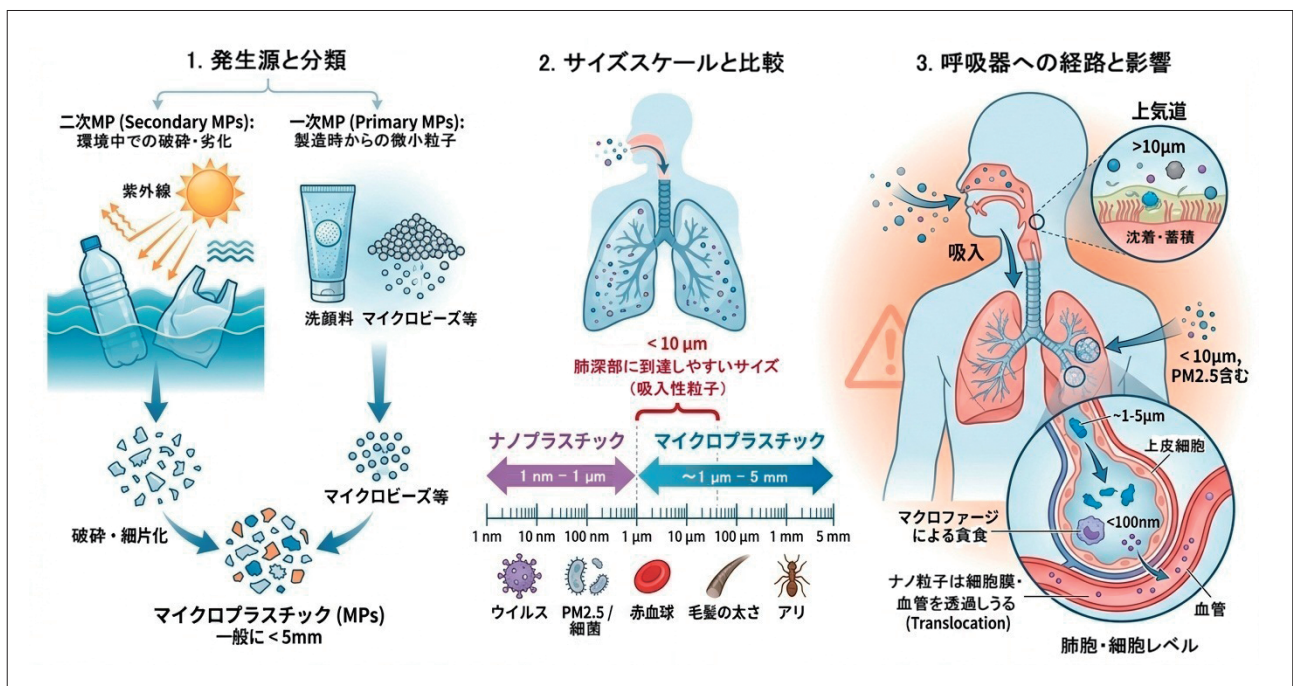


図1 マイクロプラスチックの発生源、サイズ分類と呼吸器への影響

## 2. マイクロプラスチックと呼吸器疾患

呼吸器領域で注目される疾患群は大きく2つである。

### ① 炎症性肺疾患

ひとつは炎症性肺疾患（COPD、喘息、慢性気道炎症、間質性肺疾患）で、MPは粒子刺激として上皮障害、マクロファージ応答、炎症性サイトカイン（IL-6等）誘導を引き起こし、酸化ストレスを増幅させるため、既存疾患の増悪因子である可能性がある。呼吸器障害とMPの関連機序として酸化ストレスと炎症が最も強く考えられている。

### ② 肺癌

もう一つは、肺癌である。現段階ではMPが肺癌の直接原因であると断言できる疫学的証明はなされていないが、慢性炎症・酸化ストレス・線維化微小環境を介して発癌促進因子（tumor promoter）として働く可能性が指摘されている。とくに肺は外界曝露臓器であり、PM2.5などの環境因子が肺癌と関連することを踏まえると、MPも同様に「環境修飾因子」として研究対象になっている。

### ③ 研究の発展

マイクロプラスチック研究は、①環境中の存在量評価（海水・土壌・大気）から始まったが、2020年代以降は、②体内検出（血液、胎盤、肺など）、③毒性学（炎症・線維化・免疫異常）、④疾患との関連（疫学・臨床）へと急速に広がりを見せている。特に呼吸器領域では、ヒト肺組織でMPを検出した報告が注目を集め、Jennerらは $\mu$ FTIRを用いてMPを同定し、吸入→肺沈着の経路が証明された（ただし検出下限は約3 $\mu$ m）。近年は顕微ラマン、 $\mu$ FTIR、熱分解GC-MS（Py-GC-MS）など複数技術を組み合わせ、検体からの定性・定量を試みられている。動物モデルを用いた研究では、PS（ポリスチレン）など代表ポリマーを気道投与し、酸化ストレスとWnt/ $\beta$ -catenin活性化を介した肺線維化が報告され、呼吸器病態の分子機序の研究が進行している。

## 3. 生体内マイクロプラスチック検出における技術的課題

MPsの生体影響を評価する上で最大の障壁となっているのが、生体試料からの検出と同定の難しさである。現在主流の分析法には、ナイルレッドなどの蛍光染色法や、フーリエ変換赤外分光法（FT-IR）、ラマン分光法があるが、以下の課題が存在する。

### ① 偽陽性の問題

ナイルレッド染色は簡便だが、脂質などの有機物にも反応するため、生体組織内ではMPsと生体成分の区別が困難な場合がある（図2）。

### ② 探索の非効率性

顕微ラマン分光法はポリマーの化学的同定に優れるが、広大な肺組織スライスの中から数 $\mu$ mの粒子を探索するには膨大な時間を要し、臨床検体のスクリーニングには不向きである。

### ③ 組織処理による脱落

既存の病理標本作成プロセスにおいて、疎水性のMPsが組織から脱落してしまう現象が頻発する。

これらの技術的課題を克服し、肺内MPsの局在と種類を正確に特定する手法の確立が、病態解明への第一歩となる。加えて、コンタミネーション対策とブランク管理が不可欠である。

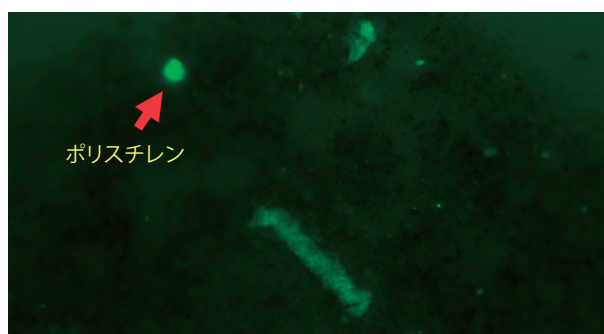


図2 Nile red 染色を行い、蛍光顕微鏡でマイクロプラスチックを同定。

## 4. 長崎大学における研究アプローチ

我々長崎大学腫瘍外科の研究グループは、呼吸器内科および福岡工業大学（永淵研究室）と連携し、ヒト臨床検体およびマウスモデルを用いた多角的なアプローチでこの課題に挑んでいる。

### ① ヒト肺検体におけるMPsの検出実績

当グループでは、肺癌手術時の切除肺や気管支肺胞洗浄液（BAL）の余剰検体を用いた解析を先行して進めている。福岡工業大学との共同研究により、顕微ラマン分光光度計を用いてヒト肺組織内からポリスチレン（PS）、ポリプロピレン（PP）、ポリエチレン（PE）などのMPsを検出することに成功した<sup>[1]</sup>。これは、大気中のMPsが実際にヒトの肺深部に到達・蓄積していることを示す直接的な証拠であり、我々の研究の出発点となっている。本研究は、他の研究同様に、マイクロプラスチックの定量と疾患の間の関連性を証明するには十分である。しかし、前述の課題が存在している。

### ② マウス投与実験における課題と克服

ヒトで確認された現象を検証し、病態メカニズムに迫るため、我々はマウスを用いたMPs経気道投与実験を行っている。初期の実験では、蛍光標識のないポリスチレンビーズ（3 μmおよび6 μm）をマウス気管内に投与し、一般的なホルマリン固定・パラフィン包埋（FFPE）による病理標本作成を試みた。しかし、ヘマトキシリン・エオジン（HE）染色を行った標本を顕微鏡で観察したところ、組織内に存在するはずのMPsが消失しているという問題に直面した。

詳細な検討の結果、パラフィン包埋や染色の過程で使用されるキシレンやアルコールなどの有機溶媒によって、疎水性であるポリスチレンが溶解、あるいは組織から物理的に脱落していることが判明した。顕微鏡下では、MPsが存在したと思われる球状の空洞（void）のみが確認され、これではMPsが周囲の細胞にどのような影響を与えているかを直接証明することができない。これは、従来の病理学的手法をそのままMPs研究に適用することの限界を示唆している。

#### ● 解決策1：蛍光標識MPsと凍結切片の採用

脱脂・脱水を伴うパラフィン包埋プロセスを回避するため、未固定あるいは短時間固定後の肺組織から凍結切片を作成する手法に切り替えた。さらに、視認性を高めるために蛍光色素を含有させたポリスチレン微粒子を使用した。これにより、DAPIによる核染色と重ね合わせることで、

気道および肺泡領域にMPsが確実に局在している様子を蛍光顕微鏡下で可視化することに成功した（図3）。

#### ● 解決策2：経気道投与手技の確立

初期の実験では、MPsが確実に肺深部に届いているか不明瞭なケースがあった。そこで、喉頭鏡とガイドワイヤーを用いた気管挿管下での投与方法を確立した。これにより、サーフロー針を用いてMPs懸濁液を確実に気管内へ送達し、肺全体に分布させることが可能となった。実際、この手法を用いたマウス肺の肉眼観察において、蛍光ビーズが肺全体に分布していることが確認されている。これらの改良により、我々はMPsが肺組織内に物理的に留まり、マクロファージによる貪食像や、周囲組織への炎症細胞浸潤を引き起こしている可能性を示唆する像を捉えることに成功しつつある。

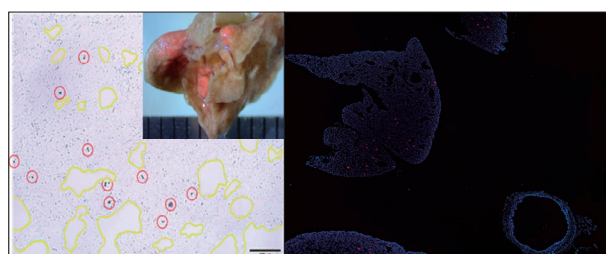


図3 マウスへ3 μm 蛍光ポリスチレンを経気道的に投与し、肉眼的に肺への分布、蓄積が確認された。

### ③ 新規イメージング確立

生体組織内でのMPsの挙動をより詳細に、かつ効率的に解析するため、我々は株式会社島津製作所との共同研究により、新たな分析ワークフローを構築した。これは、レーザー顕微鏡による高速スクリーニングと赤外ラマン顕微鏡による精密同定を組み合わせた画期的な手法である。

#### ● 3D測定レーザー顕微鏡（OLS5100）による広域探索

従来の顕微鏡やFT-IRイメージングでは、広範囲の組織切片から数μmの粒子を見つけ出すことは大変困難な作業であり、極めて非効率であった。今回導入したOLS5100は、405 nmの短波長レーザーを用い、サブミクロンの分解能で広範囲のカラー画像と高さ（3D）情報を取得できる。

我々の共同実験では、MPsを投与したマウス肺の未染色切片に対し、OLS5100を用いて広範囲スキャンを行った。その結果、生体組織とは異なる球状の形状と、レーザーに対する特異的な反射輝度を持つ粒子を、低倍率の広視野画像から瞬時に特定することに成功した。このスクリーニン

グ工程により、解析すべきターゲット位置（座標）を絞り込むことが可能となり、解析時間を劇的に短縮できることが実証された。

#### ● 赤外ラマン顕微鏡（AIRsight）による確定診断

OLS5100で特定された座標に対し、赤外ラマン顕微鏡（AIRsight）を用いた点分析を行う。AIRsightは、物質固有の分子振動情報を得ることで、その粒子がポリスチレンであるか、あるいは生体由来のタンパク質・脂質であるかを明確に区別できる。実際に、OLS5100で観察された直径3 μm程度の球状物質に対し、AIRsightでラマンスペクトルを取得したところ、ポリスチレン特有のピーク（1001 cm<sup>-1</sup>付近のベンゼン環呼吸振動など）が明瞭に検出され、周囲の肺組織（タンパク質由来のピーク）と明確に判別された。

この広範囲探索＋微小領域同定のコンビネーションは、微細なMPsの探索効率を飛躍的に向上させるだけでなく、形状情報（3D）と化学情報（スペクトル）の両面からエビデンスを得ることで、偽陽性を排除した信頼性の高いデータ取得を可能にする。これは、今後の大規模な臨床検体解析における標準的手法となり得る強力なツールである。

## 5. 今後の研究の方向性と課題

我々のこれまでの研究により、ヒトおよびマウスの肺組織内にMPsが物理的に存在し、留まることが確認された。また、その観察には凍結切片などの特殊な工夫が必要であることも明らかになった。研究のフェーズは、そこに在るかの確認から、それが何を引き起こすかの解明へと移行している。今後は以下の3点を主軸に研究を展開する。

### ① 疾患モデルマウスを用いた増悪因子の特定

健常マウスへの投与だけでなく、肺気腫（COPD）、肺線維症（プレオマイシン誘導）、気管支喘息（卵白アルブミン誘導）などの既存疾患モデルマウスに対し、環境中濃度を模したMPsを経気道投与する実験を行う。我々の予備実験（マッソン・トリクローム染色やCOL-I染色）では、MPs投与群において線維化が強い傾向が見られている。今後は、MPsのサイズ（ナノ vs マイクロ）や材質の違いが、炎症性サイトカイン（IL-1β, TNF-α等）産生や、線維化マーカー（α-SMA, Col-1）の発現にどのような差異をもたらすかを、定量的かつ統計的に評価する。また、MPs単独の影響だけでなく、喫煙やアレルゲン暴露と組み合わせられた際の複合汚染リスクを明らかにする。

### ② 分子メカニズムの解明

MPsが肺上皮細胞やマクロファージに取り込まれた後、どのようなシグナル伝達経路が活性化されるのかを解明するため、RNA-seqを用いた網羅的遺伝子発現解析を行う。我々の予備検討では、MPs投与により特定の炎症経路や細胞死に関わるパスウェイが変動する可能性が示唆されている。特に、酸化ストレス応答、細胞老化、および組織修復不全に関わる遺伝子群に注目し、MPsが慢性炎症や発癌のトリガーとなる分子機構を特定する。

### ③ 臨床検体解析の拡大とデータベース化

長崎大学病院の豊富な臨床検体（肺癌切除検体、BAL液）を活用し、より大規模なMPs蓄積調査を行う。島津製作所と確立した高速スクリーニング技術を活用し、患者の居住環境（都市部 vs 郊外）、職業歴、喫煙歴などの臨床背景と、肺内MPsの蓄積量・種類の相関を解析する。特に、肺癌患者の腫瘍近傍にMPsが多く蓄積しているかという問いは、発癌リスク評価において極めて重要であり、重点的に取り組む。

## 6. 結語

マイクロプラスチック汚染は、もはや海洋だけの問題ではなく、呼吸器系臓器を脅かす重要な課題である。長崎大学のチームは、独自の凍結切片によるMPs保存技術や確実な気管内投与モデル、そして島津製作所との連携によるレーザー・ラマン融合解析技術を武器に、世界に先駆けて肺内MPsの病態生理学的意義を解明しようとしている。

検出のフェーズを超え、MPsが細胞・組織に与える機能的・器質的障害の本質に迫ること。その知見を基に、プラスチック汚染による健康被害の予防ガイドライン策定や、新規治療戦略の創出に貢献すること。これが我々の目指す最終的なゴールである。環境科学、医学、そして工学技術が融合したこのプロジェクトは、SDGsの観点からも社会的意義の極めて高い挑戦である。

### 参考文献

- [1] Tokito T, Kido T, Nagafuchi O, et al. Microplastics in Human Bronchoalveolar Lavage Fluid. *Respirology*, 30: 1141-1152, 2025.

# 赤外・赤外ラマン分光による粒子解析機能

分析計測事業部 スペクトロビジネスユニット

藤原 直也

## 1. はじめに

近年、マイクロプラスチックは世界的に関心が高まっています。マイクロプラスチックとは、物理的・化学的・生物的作用によって細かく砕かれた、直径5 mm以下のプラスチック粒子です。生物が摂取して体内に蓄積することで、生態系全体への影響が懸念されており、様々な研究が行われています。マイクロプラスチックの研究の中で、分布実態の把握には、プラスチック粒子の解析が欠かせません。島津製作所では、マイクロプラスチック解析を効率化する赤外・赤外ラマン解析用オプションソフトウェアとして、2025年8月に粒子解析オプションソフトウェアと高速マッピングオプ

ションソフトウェアをリリース\*しました。

そこで、今回はオプションソフトウェアの粒子解析機能と高速マッピング機能について説明します。

※ 粒子解析オプションソフトウェア、高速マッピングオプションソフトウェアはどちらもAMsolutionのオプションソフトウェアです。AMsolutionは赤外顕微鏡「AIMsight」と「AIM-9000」、および赤外ラマン顕微鏡「AIRsight」を制御し、データを解析するソフトウェアです。

## 2. 粒子解析機能について

### ① 粒子解析機能とは

一般的に河川や海洋で採集した水に含まれるマイクロプラスチックを分析する場合、分析者は任意の量の水をフィルターで濾過し、粒子が捕集されたフィルターを赤外顕微鏡等で分析します。解析の際には、粒子の成分の同定や粒子サイズの算出などを行い、統計情報を解析します。

粒子解析機能では、AMsolutionで取得したマッピングデータに対して解析を実行すると、事前に登録した成分リストに従い粒子を自動で検出し、検出した粒子の特徴量を計算します。特徴量は、長径、短径、最大フェレー径、最小フェレー径、面積、質量\*、体積\*です。計算された特徴量は、統計解析され、棒グラフやヒストグラムとして結果が表示されます。

マイクロプラスチックの解析のほかに、成分リストを切り替えることで異物解析に適用することも可能です。

2-②節では粒子解析機能の操作方法について説明します。

※ 質量と体積は、以下の論文にある理論式（(1)式  $[\log_{10}(M) = b \cdot \log_{10}(S) + a]$ ）に基づき計算されます。この理論式はマイクロプラスチックのみを対象としています。

なお、質量の妥当性について当社は保証できません。

Tomoya Kataoka, Yota Iga, Rifqi Ahmad Baihaqi, et al. Geometric relationship between the projected surface area and mass of a plastic particle. Water Research. 2024;261:122061.

粒子の質量や体積の情報は、毒性の解析をする際に有用な情報といわれています。

## ② 粒子解析機能の操作方法

粒子解析機能は、赤外マッピングデータにもラマンマッピングデータにも対応しています。AMsolutionの解析ソフトウェアで赤外/ラマンマッピングデータを読み込むと粒子

解析タブが表示され、クリックして粒子解析画面を表示させます (図1)。

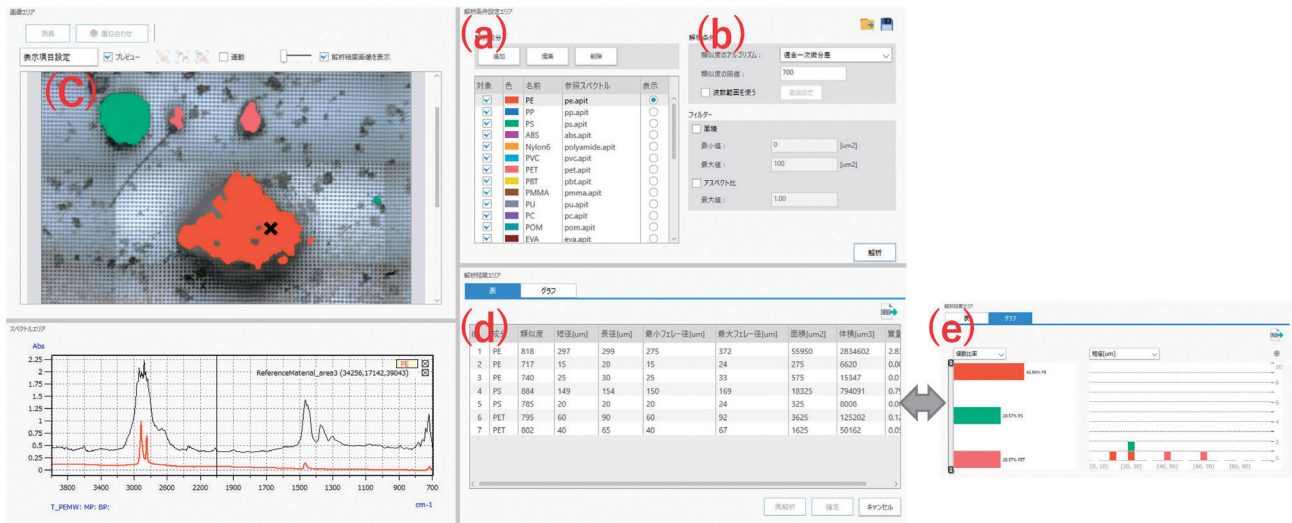


図1 粒子解析画面

粒子解析機能では粒子を検出するために、参照スペクトルとの類似度を計算します。そのため、解析の前に参照スペクトルの登録が必要です。解析したい成分の参照スペクトルを図1 (a) の成分リストに登録します。また、マイクロプラスチック解析用と異物解析用のプリセットパラメータが用意されているため、解析に用いることが可能です。

参照スペクトルの登録が完了しましたら、図1 (b) で解析パラメータの設定を行います。解析パラメータは、アル

ゴリズムの種類、しきい値、解析波数範囲の3つです。解析波数範囲については、図2をご覧ください。図2のスペクトルはPTFEフィルター上のマイクロプラスチックを測定したスペクトルで、黄色の領域はPTFEフィルターのピークの残差です。このようなピークは解析結果に悪影響を及ぼすため、該当範囲を解析対象外とすることで、より精度の高い解析を行うことができます。

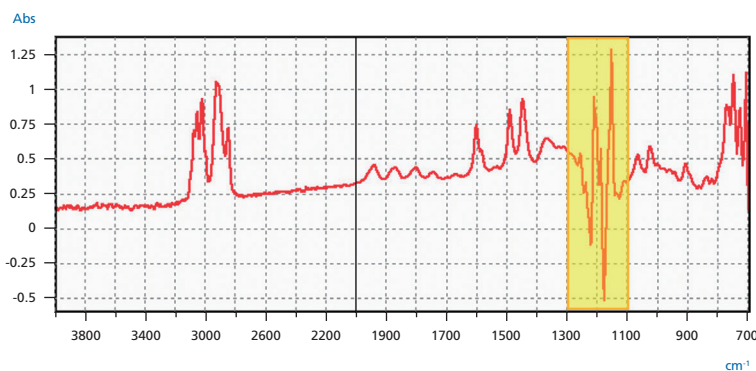


図2 PTFEフィルター上のマイクロプラスチックのスペクトル

参照スペクトルの登録と解析パラメータを設定後、解析ボタンをクリックすると解析処理が実行されます。解析が完了すると、図1 (c) に検出した粒子が表示されます。また、検出した粒子の特徴量が算出され、解析結果エリア (図1 (d)) に表示されます。算出する特徴量は、長径、短径、最

大フェレー径、最小フェレー径、面積、質量、体積です。解析結果エリアの「グラフ」タブをクリックすると、統計解析結果を表示することができます (図1 (e) 参照)。

粒子解析の結果はファイルに保存できるほか、レポート出力やCSV形式での出力にも対応しています。

### 3. 高速マッピング機能について

#### ① 高速マッピング機能とは

フィルターに捕集したマイクロプラスチックを測定する場合、解析対象のマイクロプラスチックはフィルター上に点在することが多く、多くの測定点では測定対象物のない背景領域を測定することになります(図3参照)。背景領域を測定対象物のある注目領域と同じ積算回数で測定すると、マッピングのために長時間の測定が必要となります。そこで、高速マッピング機能を用いることで、積算1回目に取得

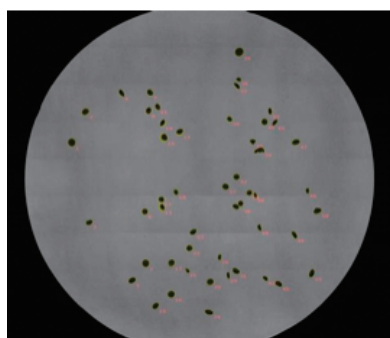


図3 フィルターに捕集されたマイクロプラスチック

したスペクトルを解析し、背景領域であるか注目領域であるかを判断します(図4参照)。背景領域と判断した場合、すぐに次の測定点の測定を開始するため、高速化につながります。また、サンプル領域では指定した回数の積算回数で測定を行うため、注目領域のスペクトルの質を保つことができます。

3-②節では高速マッピング機能の操作方法を説明します。

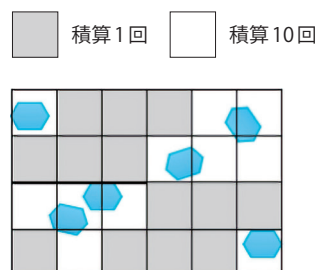


図4 高速マッピングのイメージ図  
(積算回数10回で測定した場合)

#### ② 高速マッピング機能の操作方法

高速マッピングを行う場合、測定ボタンの上側に位置する「高速マッピングを実行する」にチェックを入れます(図

5参照)。測定点の登録などのその他の操作は通常のマッピング測定と同様です。

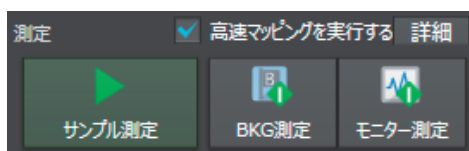


図5 高速マッピングのチェックボックス

チェックを入れると、詳細ボタンが有効になります。詳細ボタンを押すと高速マッピングの設定画面(図6)が表示され、表示された画面で高速マッピングに必要なパラメータを設定します。高速マッピングに必要なパラメータは、ノイズレベル、しきい値、除外波数範囲です。高速マッピングでは、背景領域であるかの判断はピーク検出を使用します。

ピーク検出のアルゴリズムは、解析ソフトウェアにすでに搭載済みの機能であるピーク検出機能と同じです。

パラメータ選定の前に、注目領域の代表点と背景領域の代表点をそれぞれポイント測定し、取得したスペクトルを比較すると適切なパラメータを設定することができます。



図6 高速マッピングの詳細設定画面

パラメータの設定が完了したらOKボタンをクリックし設定画面を閉じた後、測定ボタンをクリックすると、測定が開始します。

背景領域であると判断した領域を確かめるには、解析ソ

フトウェアで確認してください。測定点のスペクトルをグラフに表示するとグラフの凡例にスペクトル名称が表示されます。名称の先頭にSKIP\_と印字されているスペクトルは、背景領域と判断されたスペクトルです。

#### 4. まとめ

今回は、マイクロプラスチックの解析や異物解析を行うことができる粒子解析機能と、スペクトルの質を保ちながら従来よりも高速に測定ができる高速マッピング機能を紹介しました。また、弊社発行のアプリケーションニュース<sup>[1]、[2]</sup>では、粒子解析機能と高速マッピングの活用例もご紹介しておりますので、ぜひご覧ください。

#### 参考文献

- [1] 祖父江和樹、フィルター上に捕集したマイクロプラスチック(100 μm 未満)の高速測定と解析の効率化ー高速マッピングプログラムと粒子解析プログラムの活用ー、島津アプリケーションニュース01-00994
- [2] 丹下祥之、リサイクルプラスチック中に埋没した微小異物の分析、島津アプリケーションニュース01-01001

# 赤外スペクトル解析のポイント

## —アミド編—

分析計測事業部 Solutions COE

西倉 瀬里

### 1. はじめに

前号 (FTIR TALK LETTER Vol. 45) では、C=O 伸縮振動以外の赤外吸収ピークを活用したカルボニルの分類方法を解説しました。また、応用編として、FAME (脂肪酸メチルエステル)

の赤外スペクトルを紹介しました。今回は、アミドの分類方法、応用編としてナイロン識別方法を紹介します。

### 2. アミドの分類

アミド基は、カルボニル基 (C=O) にアミノ基 (-NH<sub>2</sub>) が結合した官能基です。そのため、アミド化合物の赤外スペクトルは N-H 伸縮振動に由来する 3350 ~ 3100 cm<sup>-1</sup> のピーク、1650 cm<sup>-1</sup> 付近にみられる C=O 伸縮振動に由来するアミド I、それよりも少し低波数側に現れる N-H 変角

振動と C-N 伸縮振動に由来するアミド II のピークから容易に判断ができます (図 1)。その他のアミド基の主なピークとして、1260 cm<sup>-1</sup> 付近のアミド III、940 cm<sup>-1</sup> 付近のアミド IV<sup>[1]</sup> が挙げられます。

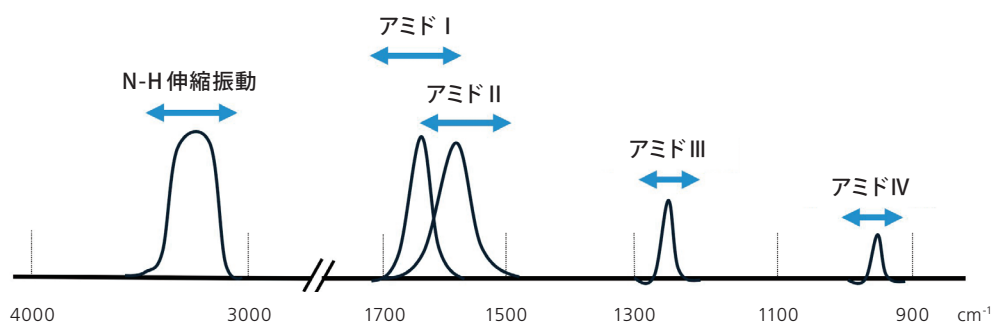


図1 アミド基に由来する主なピーク位置

図2にアミド基を持つ化合物の赤外スペクトルの主なピーク位置と分類方法の例を示します。アミドは、窒素原子と結合する水素原子の数によって1級～3級に分類さ

れています。これらの分類による赤外スペクトルの違いは、3350～3100 cm<sup>-1</sup>のピークやアミドⅠ、アミドⅡのピークに表れます。

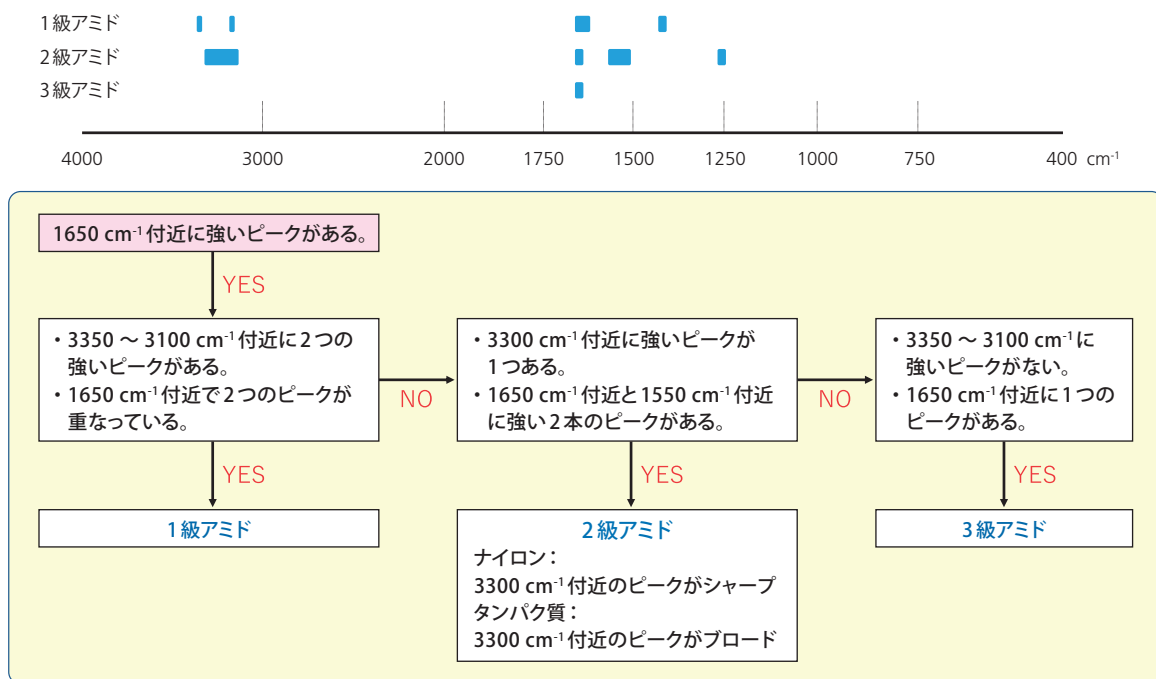


図2 アミド基を持つ化合物の赤外スペクトルの主なピーク位置と分類方法の例

### ① 1級アミド、2級アミド、3級アミドの違い

図3に1級アミドであるブチルアミドの赤外スペクトルと代表的なピークの帰属を示します。1級アミドは窒素原子に対し2つの水素原子をもち、2個のN-H伸縮振動による吸収帯を

示すため3350 cm<sup>-1</sup>と3200 cm<sup>-1</sup>付近に2本のピークが現れます。また、アミドⅡ吸収帯はNH<sub>2</sub>変角振動によって1600 cm<sup>-1</sup>にアミドⅠのピークと重なるように存在します。

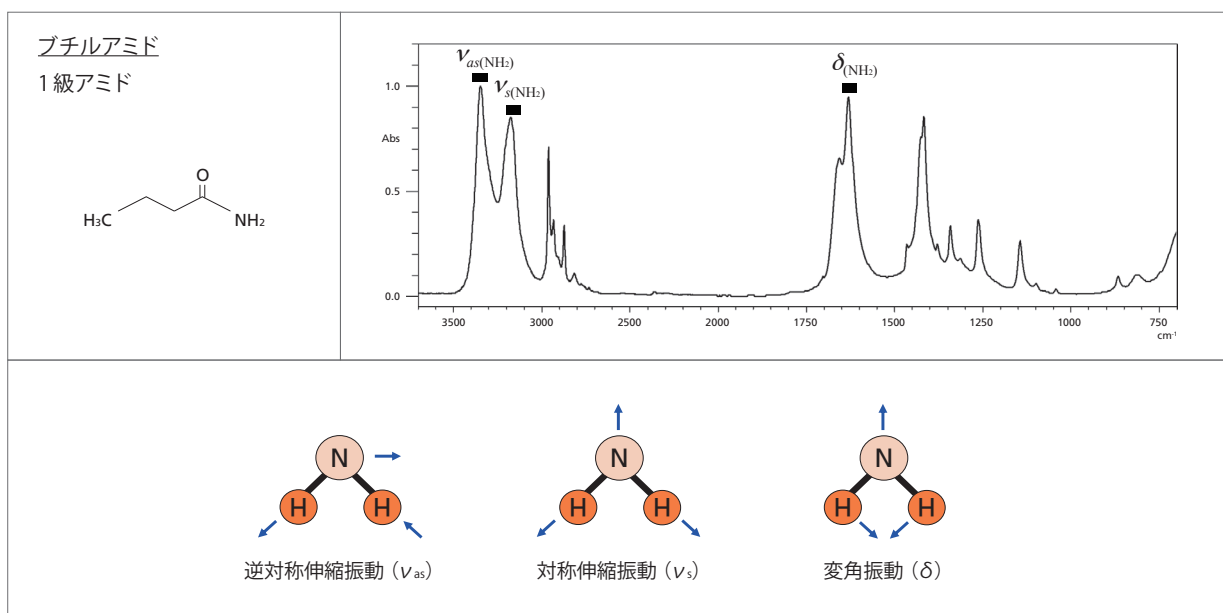


図3 ブチルアミドの赤外スペクトルの例

一方で2級アミドは窒素原子に対して1つの水素原子を持つため、N-H伸縮振動のピークは3300 cm<sup>-1</sup>付近に1つ現れます。また、アミドIIはC-N-H基のN-Hの変角振動にC-Nの伸縮振動が混合してアミドIとは分離している

1550 cm<sup>-1</sup>付近にピークが現れます。図4に2級アミドであるN,N'-エチレンジスステアロアミドの赤外スペクトルとN-H基に由来するピークの帰属を示します。

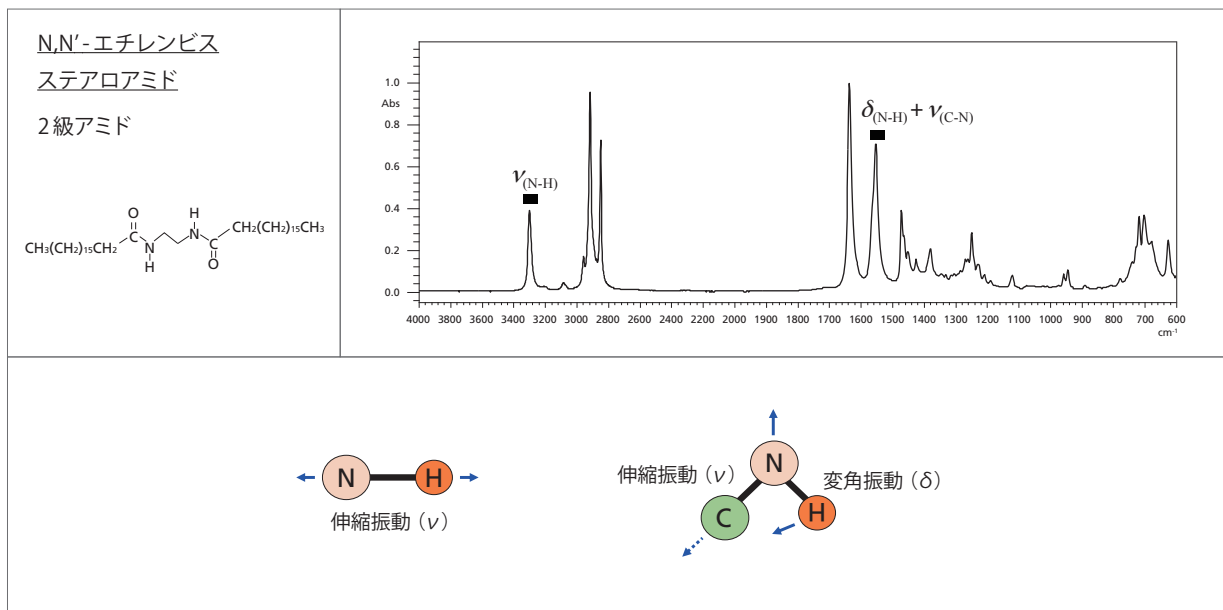


図4 ポリアミドの赤外スペクトルとN-H基に由来するピークの帰属

図5に3級アミドであるジメチルホルムアミドの赤外スペクトルを示します。3級アミドはN-H基を持たないため、3350~3100 cm<sup>-1</sup>のピークが見られません。また、アミド

IIのピークも見られないため、アミドIの1650 cm<sup>-1</sup>にピークが1つのピークが現れます。

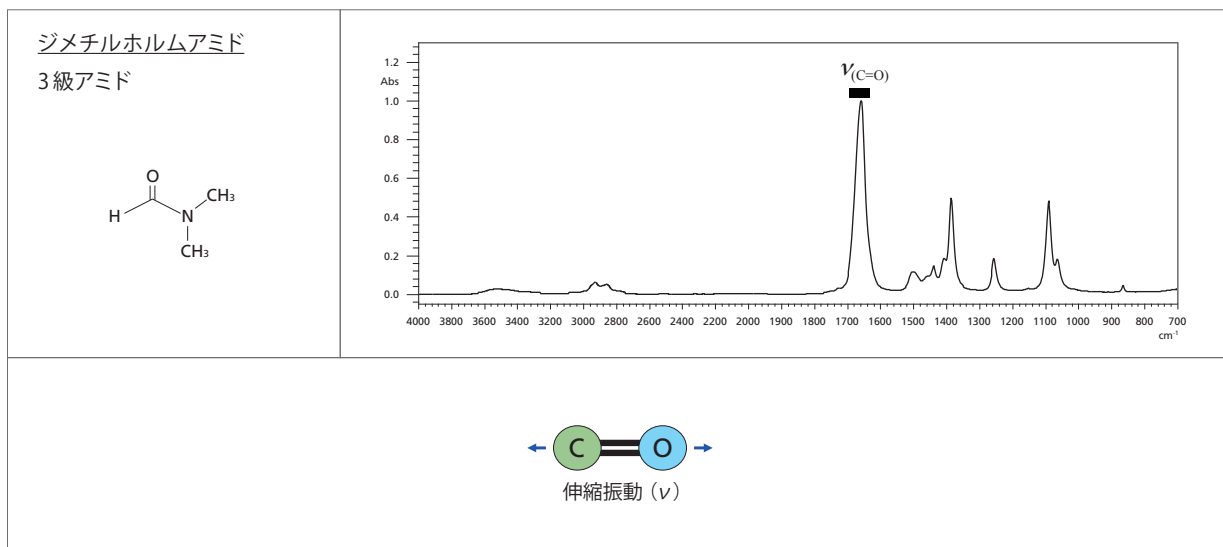


図5 ジメチルホルムアミドの赤外スペクトルとC=O基に由来するピークの帰属

## ② タンパク質の見分け方

図6にタンパク質の例として、毛髪の赤外スペクトルを示します。毛髪は、18種類のアミノ酸から成るケラチンというタンパク質で構成されています。タンパク質はアミノ酸同士がペプチド結合する際に、カルボン酸 (-COOH) とアミノ基 (-NH<sub>2</sub>) がアミド基を形成するため、2級アミドの一種と捉えることができます。毛髪の赤外スペクトルでは、2級アミドの特徴である3300 cm<sup>-1</sup>付近のN-H伸縮振動に帰属する1本のピーク

クや、アミドⅠ、アミドⅡ吸収帯にピークがあることが分かります。また、タンパク質は水分を持つため、特徴としてOH基に由来するピークが見られます。3300 cm<sup>-1</sup>付近のピークが、アミド基に由来するN-H伸縮振動の吸収にOH伸縮振動の吸収が重なったブロードなピークであればタンパク質であると判別することができます。

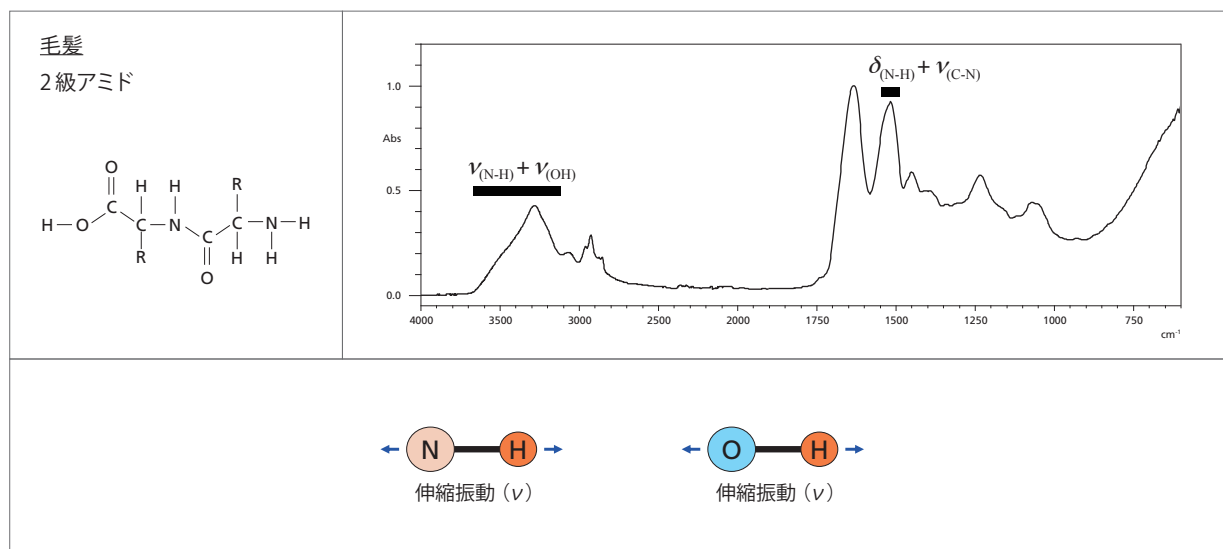


図6 タンパク質の赤外スペクトルと3300 cm<sup>-1</sup>付近のピークを起因する振動

## 3. ナイロンの識別

ポリアミドの一種であるナイロンは、強度、耐熱性・耐薬品性の高さから幅広い用途で利用されています。ナイロンは、もともとポリアミド66を合成繊維として初めて開発したデュポン社の商標でしたが、一般的に用いられる名称となっ

ています。ナイロンは種類が多く、それぞれ融点や吸水率などの物性に違いがあります(表1)。分子構造がわずかに異なることから、ナイロンの種類を簡易的に識別する際に、FTIRが使われることがあります。

表1 代表的なナイロンの種類と物性<sup>[2]</sup>

種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	融点 (°C)	吸水率 (%)
ナイロン6	1.14	215 ~ 225	1.3 ~ 1.9
ナイロン66	1.14	255 ~ 265	1.1 ~ 1.5
ナイロン11	1.04 ~ 1.05	184 ~ 187	0.3
ナイロン12	1.01 ~ 1.02	176 ~ 180	0.25

### ① ナイロンの種類による赤外スペクトルの特徴

ナイロンは2級アミドであり、図7に示すナイロンの赤外スペクトルはいずれも2級アミドの特徴を示します。ナイロンの名前の右側に書かれている数字は、アミド基間の炭素原子の数を表しています。ナイロン11はバイオベースの原料から生産され、ナイロン12は石油由来の原料から生産される違い

がある一方で、分子構造としてはどちらもアミド基に対するCHの割合が高いという特徴があります。赤外スペクトルでは、ナイロン6やナイロン66に比べてCHの吸収帯である2800 cm<sup>-1</sup>付近で強いピークを示すため、容易に識別が可能です。

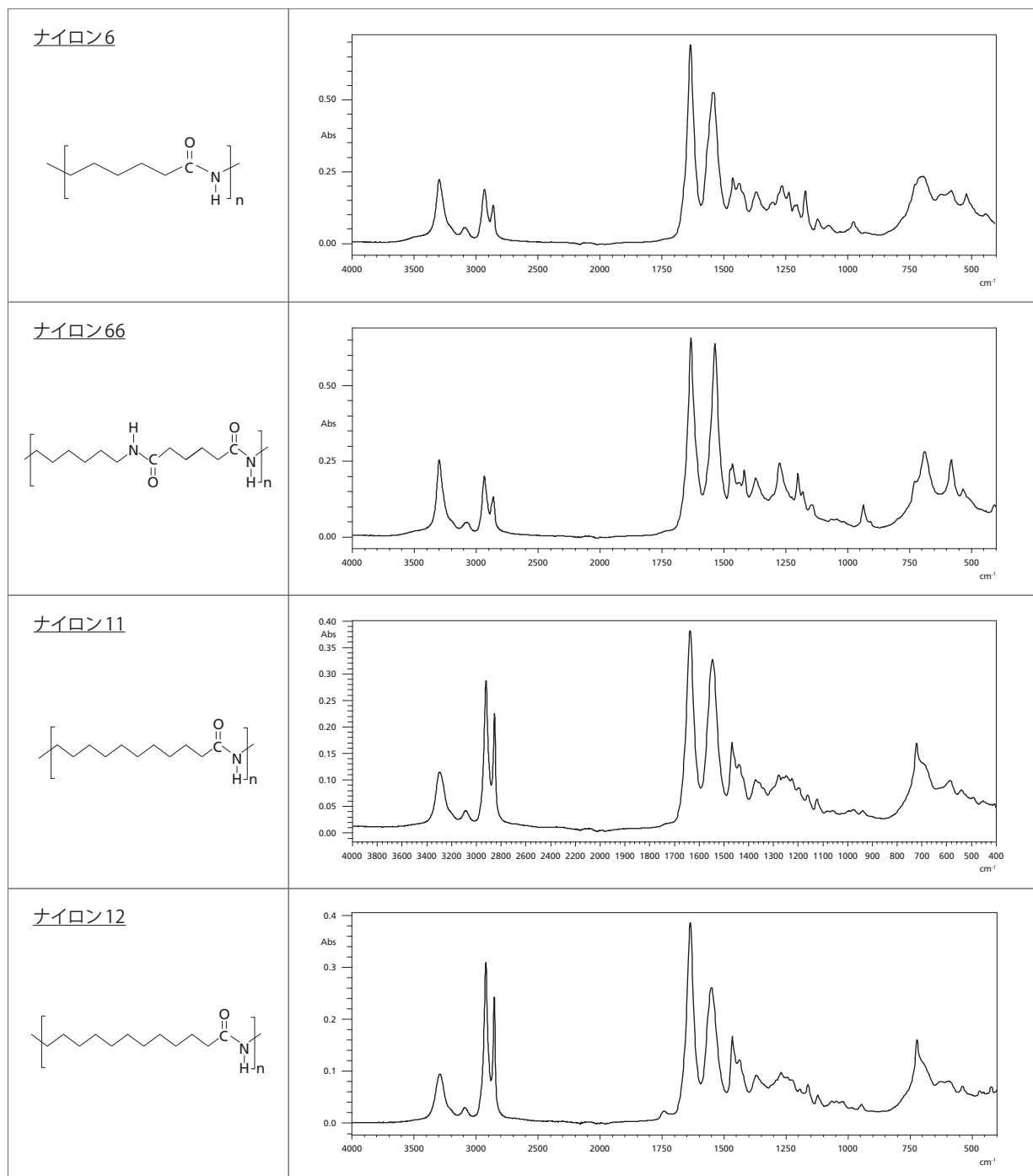


図7 代表的なナイロンの赤外スペクトル

## ② ナイロン6とナイロン66の見分け方

図8にナイロン6とナイロン66の850～1050 cm<sup>-1</sup>の赤外スペクトルとそれぞれの結晶構造を示します。ナイロン6とナイロン66は結晶構造の違いで見分けることができます。ナイロン6の結晶構造は主にα型とγ型があります。α型は主鎖の進行方向が逆向きになる逆平行型の結晶構造で、ナイロン6では分子鎖が伸びた状態ですべてのアミド基で水素結合ができます。一方でγ型は主鎖の進行方向が同じ向きで平行型の結晶構造をとるため、アミド基の水素結合をするためにね

じれた結晶構造になります。α型の結晶構造に由来するピークは960 cm<sup>-1</sup>と930 cm<sup>-1</sup>、γ型に由来するピークは973 cm<sup>-1</sup>に現れます<sup>[3]</sup>。図8の赤外スペクトルは、γ型の結晶構造に帰属するピークが強く出ているため、γ型が優勢の結晶構造をしているということが分かりました。一方ナイロン66は分子鎖が規則的に並ぶ結晶構造をしており、結晶質相におけるトランス配座のC-C結合に帰属する936 cm<sup>-1</sup>のピークによって識別することが可能です<sup>[4]</sup>。

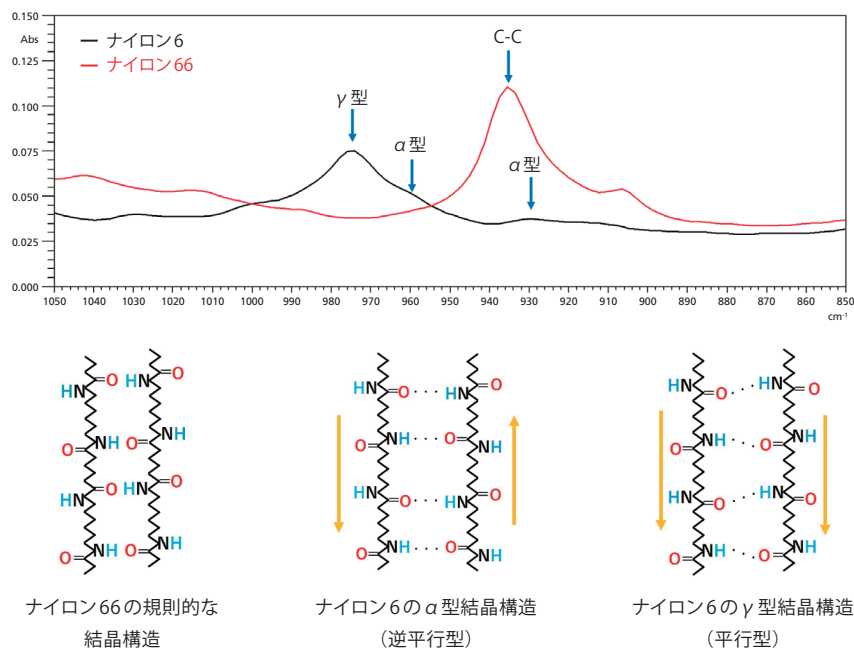


図8 1050～850 cm<sup>-1</sup>のナイロン6とナイロン66の赤外スペクトルと結晶構造

## 4. まとめ

今回は、アミドの分類方法について解説しました。

- 3350～3100 cm<sup>-1</sup>と1650 cm<sup>-1</sup>付近のピークに着目することで、1級アミド、2級アミド、3級アミドを分類できます。
- 2級アミドの中で、3300 cm<sup>-1</sup>のピークの形状に着目することでタンパク質を判別することができます。
- ナイロン11、ナイロン12とナイロン6、ナイロン66は2800 cm<sup>-1</sup>付近のピーク強度で識別できます。
- ナイロン6とナイロン66は1000～900 cm<sup>-1</sup>の結晶構造に基づくピークの違いによる識別が可能です。

今回は、アミドと同じくアミノ基を有するアミンについて取り上げ、赤外スペクトルの解析法を紹介します。

## 参考文献

- [1] C. Zhou et al., Polymer 190, 122231 (2020) .
- [2] 日本分析化学会,「高分子ハンドブック」,紀伊屋書店 (2020)
- [3] N. Vasanthan and D. R. Salem, J. polym. sci., B, Polym. phys. 39, 536 (2001)
- [4] N. Vasanthan and D. R. Salem, J. polym. sci., B, Polym. phys. 38, 516 (1999)

# IR 70<sup>th</sup> ANNIVERSARY

## AR-275

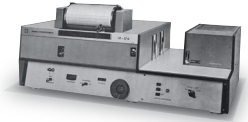
ダブルビーム自記赤外分光光度計を発売



1956

## IR-27G

赤外分光光度計に回折格子を搭載し、メンテナンス性を大幅に向上



1965

## IR-435

データプロセッサを内蔵し、パラレルラインプリンタを赤外分光光度計に採用



1981

## FTIR-4000

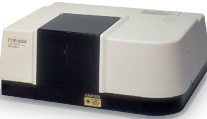
分散型より光量の利用率を大幅に高めたフーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR)



1984

## FTIR-8100

大幅な小型化と低価格化と同時に、多機能・高性能化を実現



1990

## IRPrestige-21

当時最高レベルのS/N 40,000:1以上に除湿機構を搭載したハイエンドFTIR



2002

## IRAffinity-1

従来機比 約20%の小型化を実現し、異物解析プログラムを搭載



2008

## IRTracer-100

S/N 60,000:1の高感度、0.25 cm<sup>-1</sup>の高分解測定を実現



2013

## IRSpirit

A3サイズ以下、重さ8.5 kgの小型高性能FTIR



2017

## IRXross

ミドルクラスのサイズでありながら、ハイエンドクラス並のS/Nを実現



2022

## AIRsight

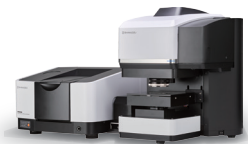
赤外分光法とラマン分光法を融合したオンリーワンの赤外ラマン顕微鏡



2022

## AIMsight

広視野カメラを搭載し、簡単に見る⇒測る⇒判るを実現した赤外顕微鏡



2023

## IRSpirit-X

10年保証による信頼性と、すぐに使える操作性を両立した小型高性能FTIR



2023

2026

本文書に記載されている会社名、製品名、サービスマークおよびロゴは、各社の商標および登録商標です。なお、本文中では「TM」、「®」を明記していない場合があります。

株式会社 島津製作所

分析計測事業部  
604-8511 京都市中京区西ノ京桑原町1

製品情報



価格お問合せ

