

フィールドフロー フラクショネーション

板橋 大輔

1 序 論

生体高分子やゴムなどの高分子材料、金属ナノ粒子やカーボンナノチューブ等のナノ材料は、いずれも分子量やサイズに分布を持っており、その平均値や分布幅を知ることが、各産業分野において重要なニーズである。これらの分子量分布やサイズ分布を評価する手法として、光散乱法や電子顕微鏡を用いた分析が挙げられるが、実際の測定試料は複数の群の分布を持っていたり、その分布幅が広範であったりするため、確からしい分析を行うことが困難である場合がしばしばある。そのため、これら評価の前段階に、高速液体クロマトグラフィー (high performance chromatography, HPLC) やサイズ排除クロマトグラフィー (size exclusion chromatography, SEC) 等の分級法を用いて、サイズ分級した後に分析を行う手法が従来用いられている。しかし、これらの分級法では分離カラムに固定相を使用するため、分析対象の試料ごとに様々な測定上の課題がある。

例えば、高分子試料では試料の分子内に存在するイオン性官能基が SEC カラムの固定相と相互作用し、理論通りの保持時間で溶出しえない場合や、SEC カラム内で分子鎖の切断が起こる場合もある。このような試料は SEC カラムでの正確な分離が困難であり、分子量分布を求めることができない。また、ナノ材料に対しては分離に用いる SEC カラムで分級可能なサイズ範囲の狭さ (数 nm~100 nm 程度) から、広範なサイズ分布を有するナノ材料のサイズ分布測定には適さない。

これらの課題に対し、流動場分離法 (field flow fractionation, FFF) は分離層に固定相を有さず、試料の持つ拡散係数の違いによって分離を行う分級法であり、広範囲のサイズ範囲 (数 nm~100 μm) の試料の分析に対応できることから、上述のような課題を克服することができる。

本稿では、各種 FFF 法の原理と特徴を解説し、各分野における最新の解析適用事例について紹介する。

2 FFF 法の原理と特徴

2.1 概説

FFF 法は 1966 年に J. C. Giddings によって開発された分離分析法¹⁾であり、精密な流れの制御が重要となる。報告された当初は研究開始の段階であり、実用化には程遠い状況であったが、1995 年に初の汎用型 FFF が開発された。その後、装置開発が日進月歩で進められ、現在では Postnova 社、Wyatt Technology 社、島津製作所から取り扱いが簡便な汎用型 FFF 装置が販売されており、近年普及が進んでいる。この手法はもともと分子量が 1000 万を超えるような超高分子の分子量分画に使用されてきたが、フラクションコレクターに接続して、分級後の試料を回収するだけではなく、現在では光散乱 (light scattering, LS) 検出器や紫外・可視分光 (ultraviolet-visible absorption spectrometer, UV-vis) 検出器、示差屈折率 (refractive index detector, RI) 検出器、誘導結合プラズマ質量分析装置 (inductively coupled plasma-mass spectrometer, ICP-MS) 等、様々な検出器を組み合わせることができる。それゆえ、FFF 法の用途は生体、有機高分子だけではなく、金属ナノ粒子やカーボンナノチューブ等のナノ材料の分離分析へとかなり広範なものとなっている。

FFF 法では試料のサイズに依存した自己拡散現象と、その拡散方向とは逆の方向から外部の力 (分離場) を与えることによって、サイズ分離を行う。この時に外部から加える分離場には、流れ、遠心力、熱勾配、電場、磁場、重力場等様々な種類があり、各 FFF 法の特徴と適用可能な分析対象試料の違い等について表 1 にまとめた。本稿ではその中でも代表的な 2 種類の手法 (流れ、遠心力) について原理と特徴を解説する。

2.2 各 FFF 法の種類と特徴

2.2.1 非対称流れ流動場分離法

非対称流れ流動場分離法 (asymmetrical flow field-flow fractionation, AF4) は、液の流れによって分離場 (流れ場) を形成し、試料のサイズ分離を行う FFF 法であり、最も一般的に利用されている。AF4 法では図 1 に示す

表 1 各 FFF 法の特徴および分析対象試料^{2)~7)}

FFF の種類	AF4	CF3	ThFFF ²⁾	EAF4 ³⁾	MgFFF ⁴⁾⁵⁾	GrFFF ⁶⁾⁷⁾
分級原理	流れ場	遠心力	熱勾配	電場, 流れ場	磁場	重力場
分級因子	サイズ, 分子量	サイズ, 分子量, 密度	熱拡散係数	サイズ, ゼータ電位	磁化率	サイズ, 密度
対象試料	高分子, コロイド, 粒子, タンパク質, 細胞等		主にポリマー	帯電試料	磁性粒子	細胞, マイクロ粒子
適用可能範囲 (分子量, 粒子径)	500~10 ¹² Da 1 nm~100 μm (ナノサイズへの適用が多い)	10 nm~20 μm (試料の材質と密度に依存)	10 kDa~20 MDa	AF4 に準拠	~数 100 nm	1~100 μm
市販装置	○	○	○	○	×	○

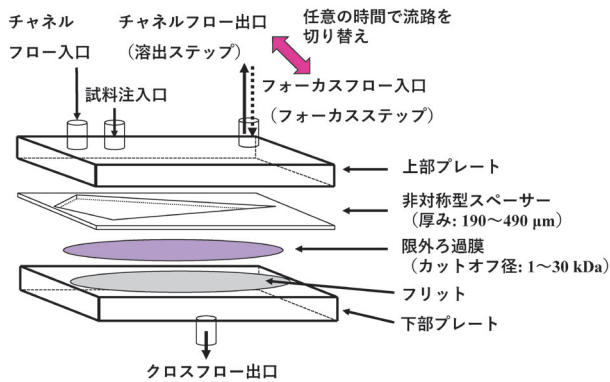


図 1 AF4 分離チャンネルの概略図

分離チャンネルと呼ばれる分離層を用い、その内部で水平方向の流れ（チャンネルフロー、フォーカスフロー）と垂直方向の流れ（クロスフロー）を組み合わせ、流れ場を形成する。分離チャンネルは上下二つのプレートの間に数百 μm の厚みを持つスペーサーを挟むことによって、試料を分離する層を形成している。下部のプレートは浸透性のある多孔質のフリット構造を有し、試料がプレートの外に通じないように限外ろ過膜を下部プレートの上（分離層内部）に設置している。この構造によって、試料を損失することなく、クロスフローの液のみが系外に排出される。

次に、AF4 法での試料のサイズ分離の原理を図 2 に示す。AF4 法におけるサイズ分離は大別して、①試料注入、②フォーカス、③リラクゼーション、④溶出の四つのステップから構成される。

まず最初に試料注入ステップで、試料を分離チャンネルに注入すると、試料は層内でランダムな自己拡散を起こして試料注入ポートを中心に一定の拡がりを持って分布するようになる。次に、フォーカスステップでは AF4 法による試料のサイズ分離の準備を行う。図 2 (a) に示したチャンネルフロー（図中の左から右への流れ）、フォーカスフロー（図中の右から左への流れ）に加え、クロスフロー（図中の下方向への流れ）を用いて、左右両方向ならびに下方向への流れを与えることで、試料を一定の位置（フォーカスポイント）に集める。この

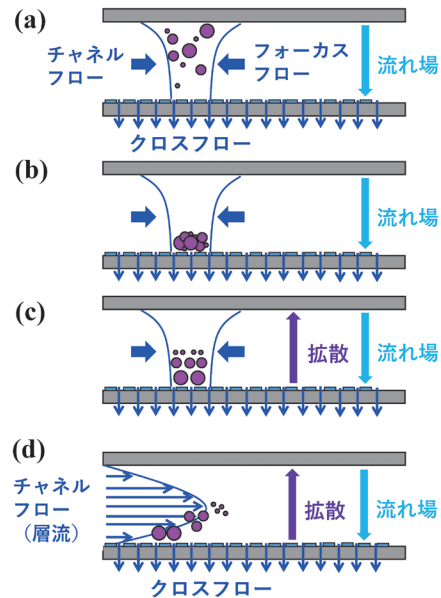


図 2 AF4 法におけるサイズ分離機構

(a) 試料注入ステップ, (b) フォーカスステップ, (c) リラクゼーションステップ, (d) 溶出ステップ。

フォーカスポイントでは水平方向だけではなく垂直方向の力もかかるため、下部プレート上の限外ろ過膜に試料が沈降していく（図 2 (b)）。続くリラクゼーションステップでは、クロスフローを減少させて流れ場を弱めると、試料が沈降した際にフォーカスポイント付近で生じた試料の濃度勾配に逆らって、より希薄な濃度の方向に試料は拡散しようとする。ここで、これらナノ～サブミクロンサイズの試料は、式 (1) に示す Stokes-Einstein の式に従った拡散係数を有しており、液中でサイズに依存したブラウン運動をしている。

$$R_h = \frac{kT}{6\pi\eta D} \dots\dots\dots (1)$$

R_h : 流体力学的半径, η : 溶媒粘度, k : Boltzmann 定数, T : 絶対温度, D : 拡散係数

つまりこの時、サイズの小さな試料ほど拡散係数が大きく、より強く拡散するため、限外ろ過膜から遠く離れ

た位置まで拡散するが、サイズの大きな試料では拡散係数が小さく、拡散があまり起こらないため、限外ろ過膜の近くに留まったままとなる (図 2 (c)). このようにして分離チャンネル内で垂直方向に試料のサイズに依存した分離が行われる. その後、溶出ステップにおいて、フォーカスフローを止めて流路を切り替え、分離チャンネルの出口の方向にチャンネルフローを流し出すことによって、サイズ分離した粒子をそれぞれ検出する (図 2 (d)). この時、分離チャンネルの厚みを 1 mm 以下とすると、チャンネルフローは層流となる. そのため、分離チャンネルの深さ方向の中心部ほど流速が速くなり、分離チャンネルの中心部近くに拡散したサイズの小さな試料から順に溶出させることができる. なお、リラクゼーションステップで試料が拡散する最大距離は下部プレートから垂直方向に約 10 μm であり、分離チャンネルの下部領域のみで拡散が起こる. そのため、最大流速となる中心部を超えて上部に試料が拡散することはない、試料の拡散係数 (すなわち流体力学的半径) の違いのみによって、適切なサイズ分離が達成される.

ここで、AF4 法における試料の溶出時間 (保持時間) は式 (2) のように定義されている⁸⁾.

$$t_r = \frac{w^2}{6D} \ln \left(1 + \frac{V_c}{V_0} \right) \dots\dots\dots (2)$$

t_r : 保持時間, w : 分離チャンネルスパーサー厚み,
 V_c : クロスフロー流量, V_0 : チャンネルフロー流量

式 (2) に式 (1) を代入すると、式 (3) が得られる.

$$t_r = \frac{w^2 R_h \pi \eta}{kT} \ln \left(1 + \frac{V_c}{V_0} \right) \dots\dots\dots (3)$$

この式から、流体力学的半径が小さくなるほど、AF4 法における保持時間が小さくなるのが分かる. また、 w, V_c, V_0, η, T の変数のうち、 w, V_c, V_0 は AF4 装置に固有の変数であり、これらを変更することで試料の保持時間を任意に変更し、サイズ分解能を制御することができるため、測定試料に応じてユーザーの任意で調整可能である. 以上のように、同様に試料のサイズで分離する SEC とは異なり、AF4 法は分離層に固定相を持たず、試料の流体力学的半径のみに依存した分離が可能であり、装置に固有の変数を任意に変更することで、幅広いサイズ範囲の試料を分離分析することができる手法である.

2・2・2 遠心流動場分離法

遠心流動場分離法 (centrifugal field-flow fractionation, CF3) は遠心力による分離場 (遠心場) を利用した分離を行う手法であり、近年ナノ材料の分級技術として注目されている. CF3 法では AF4 法とは異なり、分離は対

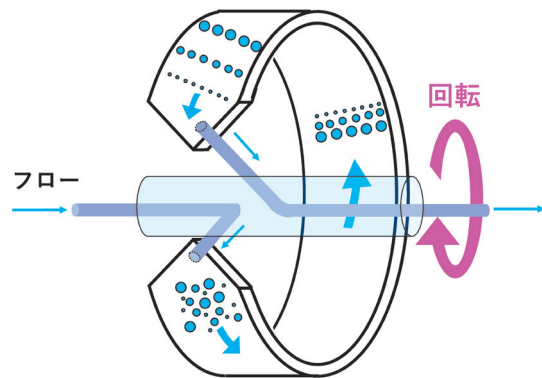


図 3 CF3 分離チャンネルの概略図

象試料のサイズだけではなく、対象試料の密度にも依存した分離がなされる. 図 3 に CF3 分離チャンネルの概略図を示す. CF3 法では円環状のチャンネルを高速で回転させることで発生した遠心力を使って、試料の分離が行われる.

次に、CF3 法における試料の分離の原理を図 4 に示す. CF3 法における分離は大別して、①試料注入、②リラクゼーション、③溶出の三つのステップから構成される.

初めに試料注入ステップでは試料を分離チャンネルに注入する前に、あらかじめ一定の回転数 (初期回転数) で回転させておき、その後、回転する分離チャンネルへ試料を導入する. 次にリラクゼーションステップでは、回転を継続しながらチャンネル内の送液を停止して、分離チャンネル内の流れを止める. この状態で一定時間が経過すると、試料は沈降して分離チャンネルの下部壁面付近に集まっていく (図 4 (a)). 試料の密度が一定の場合、試料の自己拡散力と遠心力のバランスが試料のサイズのみに依存して異なるため、大きなサイズの試料は壁面側に留まり、小さなサイズの試料は流路の中央側に拡散していく. その後、送液を再開すると、分離チャンネル内の流れは層流となるため、中心部ほど流速が速くなり、AF4

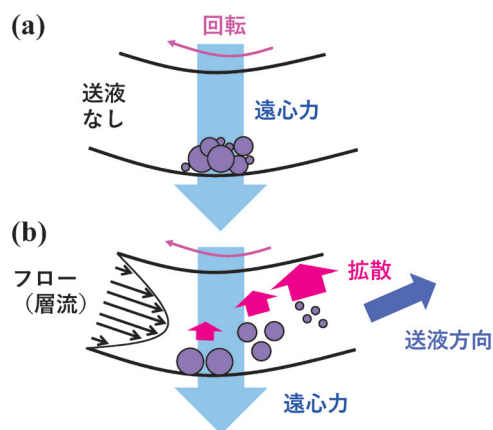


図 4 CF3 法におけるサイズ分離機構 (断面図)

(a) 試料注入ステップ, (b) リラクゼーションステップおよび溶出ステップ.

法と同様に小さなサイズの試料から順番に溶出する (図 4 (b)).

ここで、CF3 法における試料の保持時間は式 (4) のように定義されている。なお、 G は後述するが、初期回転数で調整可能なパラメータである。

$$t_r = \frac{\pi \Delta \rho \omega G d^3 V_{c0}}{36 k T V} \dots\dots\dots (4)$$

$$G = (2\pi \times RPS)^2 r \dots\dots\dots (5)$$

$\Delta \rho$: 試料とキャリアー溶液の密度差, d : 試料の直径, V_{c0} : 分離チャンネル体積, V : チャンネル流量, G : 初期重力場, RPS : 角速度, r : 遠心回転軸からの距離。

これらの式から、CF3 法では試料のサイズと密度に依存した分離がなされることが分かる。特にサイズに関しては試料の直径の三乗に比例して保持時間が変化するため、原理的に AF4 法よりも高い分解能を達成可能な点が利点である。

この他、電場と流れ場を利用する EAF4³⁾ や熱勾配場を利用する ThFFF⁹⁾ 等も市販装置が開発され、各分野で利用されている。

2.3 FFF 法における分離条件の最適化

各 FFF 法で試料を分離分析する際、それぞれの試料に適した分離条件で分離を行うことが重要となる。各パラメータが分離に及ぼす影響に関する理論は既に確立されており、以下に分離条件の検討の際に必要なパラメータについて述べる。

まず初めに FFF 法では試料の溶出時間に影響を与える指標として、保持力パラメータ (retention parameter, λ) と呼ばれる試料の保持のされやすさを表す指標がある。ここで AF4 法、CF3 法における λ は以下の式 (6) および (7) で示される。

(AF4 法)

$$\lambda = \frac{k T V_0}{3 \pi \eta V_c \omega^2 d} \dots\dots\dots (6)$$

(CF3 法)

$$\lambda = \frac{6 k T}{\pi d^3 G \omega \Delta \rho} \dots\dots\dots (7)$$

この λ から、どの物理化学パラメータが分離に影響するかを知ることができ、AF4 法では試料の直径、CF3 法では試料の直径の三乗と密度に反比例して大きくなること分かる。この λ が大きいほど、分離チャンネル内に保持されにくくなり、速い時間で溶出する。FFF 法では試料の溶出時間 t_r と void (保持されずに最初に溶出する画分) の溶出時間 t_0 の比として定義され

る保持レベル (retention level, R_L) が十分に大きい、つまり両者の画分のピークが十分に離れるように分離条件を設定する必要がある。 R_L は以下の式 (8) で計算することができる¹⁰⁾。

$$R_L = \frac{t_r}{t_0} = \frac{1}{6 \lambda (\coth(1/2\lambda) - 2\lambda)} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、AF4 法の場合、厳密には式 (6) には従わないものの、実用上は非常に優れた近似であり、 $R_L \geq 7.2$ で 1% 以内、 $R_L \geq 3.3$ で 5% 以内、 $R_L \geq 2.3$ で 10% 以内の誤差であることが報告されている¹¹⁾。また、 λ が十分に小さい (AF4 法: $\lambda < 0.03$, CF3 法: $\lambda < 0.02$) 場合、以下の近似式 (9) を用いて、5% 以内の誤差で近似解を得られる。

$$R_L = \frac{t_r}{t_0} \cong \frac{1}{6 \lambda} \dots\dots\dots (9)$$

いずれの FFF でも、 $R_L > 5$ となるようにすることが推奨¹²⁾ されており、このパラメータから未知試料の適切な分離条件をある程度推測することができる。

以上のことから、AF4 法ではチャンネルフロー流量およびクロスフロー流量、スペーサー厚み、CF3 法では初期回転数を適切な値に設定し、 R_L をこの範囲内に収まるように調整することで、良好な分離を達成することができる。

2.4 分離した試料のサイズ計測方法

FFF 法はあくまでも分離・分級法であり、分離を行っただけでは、そのサイズを計測することはできない。そこで適切な検出器を用いて、正確にサイズを計測することが必要となる。サイズの計測方法は大きく分けて、①光散乱法による直接計測法、②サイズ既知の標準粒子を用いて作成した校正曲線を用いる間接計測法の 2 種類が存在する。

前者については、高分子の分子量、サイズ測定に関しては静的光散乱法 (static light scattering, SLS) が主に用いられ、ナノ材料のサイズ測定には動的光散乱法 (dynamic light scattering, DLS) 法が用いられることが多い。詳細な計測原理については本稿では割愛するが、これまでに詳しく解説された文献があるので、必要に応じて参照されたい¹³⁾¹⁴⁾。

また後者の方法では、複数のサイズ既知の標準粒子をあらかじめ FFF 法で測定し、各サイズの粒子の保持時間を求めておく。その後、粒子サイズと FFF 法で得られた保持時間の相関関係を求め、校正曲線を作成する。図 5 に校正曲線の例¹⁵⁾ を示す。最後に未知試料の FFF 測定を行い、得られた保持時間を前述の校正曲線を用いて、サイズに変換することで計測を行う。

前者の光散乱計測法では、直接試料のサイズを測定で

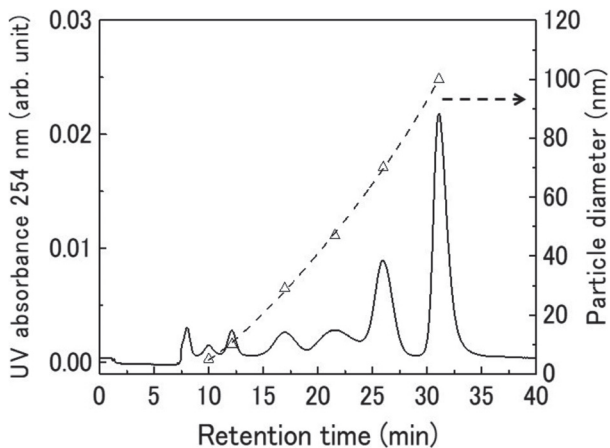


図5 標準粒子を用いたAF4法における較正曲線の例¹⁵⁾

きという利点がある反面、光散乱法の検出感度があまり良くないため、試料が微量もしくはそのサイズが微小となった場合には適用することが難しい。それに対して、後者の間接計測法では、UV検出器やICP-MSを用いれば、より高感度な試料の測定ができる反面、適切な標準粒子が必要となること、バンドブロードニング（ピークの広帯域化）の影響を受けるため、実測した粒子径分布の補正を行う必要がある。バンドブロードニング効果の補正方法については報告例があるので、参照されたい¹⁵⁾¹⁶⁾。

3 各分野におけるFFF分析の適用事例

まず、金属ナノ粒子に対しては、FFFの検出器にLSやICP-MS等の複数の検出器を直列で接続し、サイズ分布やその個数濃度を定量分析することが一般的に行われている。例えば、A. Sánchez-Cachero¹⁷⁾らは、自然環境中での白金ナノ粒子(PtNPs)の動態を調べるために、腐食酸(HA)とサイズが既知のPtNPsを混合し、そのサイズ分布の経時変化をAF4-ICP-MSで調査した。その結果、HA共存下ではPtNPsの凝集を抑制し、分散安定性が向上することを報告している。このように自然環境中でのナノ粒子の安定性をモニタリングするのにもAF4法は有用であることが分かる。

また、著者¹⁵⁾¹⁸⁾らは鉄鋼材料中に含まれる金属ナノ粒子(ナノ析出物)の試料代表性のあるサイズ分布を測定するために、AF4-ICP-MS法の適用を報告している。非水溶媒を用いた電気分解によって、鉄マトリックスを選択的に溶解して、分散液中にナノ析出物を抽出し、そのサイズ分布や個数濃度をAF4-ICP-MS法で測定した。鉄鋼材料の熱処理によって、ナノ析出物の個数濃度がどの程度変化するのかを定量的に解析している。

さらに、近年ではAF4法とCF3法を接続して、材料の分級能力を向上させる取り組みが報告されている。H. Kato¹⁹⁾らはAF4装置の後段にCF3装置を接続したHyphenated FFF(AF4-CF3)を用いて、ポリスチレン

ラテックス(PSL)粒子(平均サイズ:70 nmおよび309 nm)とシリカ粒子(平均サイズ:280 nm)を混合した試料を分離分析した。AF4法のみでは、PSL 70 nmはサイズの違いによって分離がなされるものの、PSL 309 nmとシリカ280 nmの粒子径が近く、これらが分離されずに一つのピークとして観測された。その一方で、AF4-CF3法ではPSL 70 nm, PSL 309 nm, シリカ280 nmをそれぞれ十分な分解能で分離することができている。AF4法とCF3法を組み合わせることで、サイズと密度の二種類のパラメータで二次元的な分離が可能となる。このように異なる分級原理を有するFFFを上手く組み合わせることで、分離・分級の適用範囲は大きく広げられると期待できる。

この他、ナノ材料²⁰⁾、環境、食品²¹⁾、化粧品²²⁾等の各分野における適用例は数多く報告されており、非常に有用な分離分析手法となっている。

4 結 言

本稿では代表的なFFF法の基礎原理と特徴、使用時の注意点について解説し、各分野における適用事例を数例紹介した。FFF法は広範なサイズ範囲の試料の分析に対応でき、分離層に固定相を持たないことから、分離層内部との試料間の相互作用が少なく、様々な分野に適用できるという利点を有する。現在では、国際標準規格(技術仕様書)¹²⁾が発行され、FFF法を利用する上での注意点や実施する上でのポイント、結果の不確かさの発生要因等が解説されているため、新規ユーザーの技術的なハードルは10年前よりも確実に下がってきている。そのため、今後より多くの技術者がFFF法を活用し、この分野の知見を深めていくことで、本技術のさらなる発展が期待される。

文 献

- 1) J. C. Giddings : *Sep. Sci.*, **1**, 123 (1966).
- 2) G. Greyling, H. Pasch : "Thermal Field-Flow Fractionation of Polymers", Edited by I. Alig, H. Pasch, H. Schönherr, p. 13 (2019), (Springer Nature, Cham).
- 3) C. Johann, S. Elsenberg, H. Schuch, U. Rösch : *Anal. Chem.*, **87**, 4292 (2015).
- 4) A. H. Latham, R. S. Freitas, P. Schiffer, M. E. Williams : *Anal. Chem.*, **77**, 5055 (2005).
- 5) P. S. Williams, F. Carpino, M. Zborowski : *Mol. Pharm.*, **6**, 1290 (2009).
- 6) B. Roda, P. Reschiglian, A. Zattoni, P. L. Tazzari, M. Buzzi, F. Ricci, A. Bontadini : *Anal. Bioanal. Chem.*, **392**, 137 (2008).
- 7) R. Chantiwas, R. Beckett, J. Jakmunee, I.D. McKelvie, K. Grudpan : *Talanta*, **58**, 1375 (2002).
- 8) K.-G. Wahlund, J. C. Giddings : *Anal. Chem.*, **59**, 1332 (1987).
- 9) Z. Viktor, H. Pasch : *Anal. Chim. Acta*, **1107**, 225 (2020).
- 10) K.-G. Wahlund, L. Nilsson : "Field-Flow Fractionation in Biopolymer Analysis", Edited by S. Kim, R. Williams, K. D. Caldwell, p. 6 (2012), (Springer-Verlag, Wien, New York).

- 11) B. Wittgren, K.-G. Wahlund, H. Derand, B. Wesslen : *Macromolecules*, **29**, 268 (1996).
- 12) ISO/TS 21362:2018, Nanotechnologies — Analysis of nano-objects using asymmetrical-flow and centrifugal field-flow fractionation (2018).
- 13) 渡邊一輝 : ぶんせき (*Bunseki*), **2014**, 208.
- 14) 高橋かより : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **68**, 733 (2019).
- 15) D. Itabashi, R. Murao, S. Taniguchi, K. Mizukami, H. Takagi, M. Kimura : *ISIJ Int.*, **60**, 979 (2020).
- 16) H. Kato, A. Nakamura, K. Takahashi, S. Kinugasa : *Nanomaterials*, **2**, 15 (2012).
- 17) A. Sánchez-Cachero, S. López-Sanz, N. R. Fariñas, Á. Ríos, R. del C. R. Martín-Doimeadios : *Talanta*, **222**, 121513 (2021).
- 18) D. Itabashi, K. Mizukami : *ISIJ Int.*, **62**, 860 (2022).
- 19) H. Kato and A. Nakamura : *Anal. Methods*, **6**, 3215 (2014).
- 20) S. Faucher, G. Charron, E. Lützen, P. L. Coustumer, D. Schaumlöffel, Y. Sivry, G. Lespes : *Anal. Chim. Acta*, **1028**, 104 (2018).
- 21) Y. Li, Y. Yang, Y. Zou, L. Shu, N. Han, Y. Yang : *Food Chem.*, **374**, 131748 (2022).
- 22) A. Samontha, J. Shiowatana, A. Siripinyanond : *Anal. Bioanal. Chem.*, **399**, 973 (2011).



板橋 大輔 (Daisuke ITABASHI)

日本製鉄株式会社 技術開発本部 (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1). 東京農工大学大学院生物システム応用科学府博士後期課程修了. 博士 (工学). 《現在の研究テーマ》鉄鋼材料中の微量元素分析法の開発. 《趣味》マラソン.
E-mail : itabashi.53b.daisuke@jp.nipponsteel.com

日本分析化学会の機関月刊誌『ぶんせき』の再録集 vol. 2 が出版されました！ 初学者必見！ 正しく分析するための 241 ページです。

本書は書籍化の第二弾として、「入門講座」から分析試料の取り扱いや前処理に関する記事、合計 36 本を再録しました。『ぶんせき』では、分析化学の初学者から専門家まで幅広い会員に向けて、多くの有用な情報を提供し続けています。これまで掲載された記事には、分析化学諸分野の入門的な概説や分析操作の基礎といった、いつの時代でも必要となる手ほどきや現役の研究者・技術者の実体験など、分析のノウハウが詰まっています。

本書は下記の二章だてとなっています。

(1 章 分析における試料前処理の基礎知識)

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 土壌中重金属分析のための前処理法 2. 岩石試料の分析のための前処理法 3. プラスチック試料の分析のための前処理法 4. 金属試料分析のための前処理 5. 分析試料としての水産生物の特徴と取り扱い 6. 食品分析のための前処理法 7. Dried blood spot 法による血液試料の前処理 8. 生体試料のための前処理法 (液-液抽出) 9. 生体試料のための前処理法 (固相抽出) 10. 環境水試料の分析のための前処理法 | <ol style="list-style-type: none"> 11. 大気中揮発性有機化合物分析のための前処理 12. 放射性核種分析のための前処理法 13. 脂質分析のための前処理法 14. 糖鎖分析のための試料前処理 15. イムノアッセイのための前処理法 16. 加速器質量分析における超高感度核種分析のための試料前処理法 17. 生元素安定同位体比分析のための試料前処理法 18. セラミックス試料分析のための前処理法 |
|--|---|

(2 章 分析試料の正しい取り扱いかた)

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 生体 (血液) 2. 生体 (毛髪) 3. 金属 (非鉄金属) 4. 金属 (鉄鋼) 5. 食品 (酒類) 6. 医薬品 (原薬・中間体・原料) 7. 海水 (微量金属) 8. 考古資料 9. 海底下の試料 (地球深部の堆積物および岩石) | <ol style="list-style-type: none"> 10. 岩石 11. 食品 (農産物の残留農薬) 12. ガラス 13. 環境 (陸水) 14. 温泉付随ガス 15. 透過電子顕微鏡観察の試料調整 16. 環境 (ダイオキシン類) 17. 高分子材料 18. 沈降粒子 |
|--|--|

なお、『ぶんせき』掲載時から数年が経過しているため、記事の中には執筆者の所属も含め、部分的に現在の状況とは異なる内容を含むものがあるかもしれません。本書では、各記事の『ぶんせき』掲載年を明記することで、再録にともなう本文改稿を割愛しました。これらの点については、執筆者および読者の方々にご了承いただきたく、お願い申し上げます。

本シリーズが化学分析の虎の巻として多くの方に活用されることを願ってやみません。