

スマートデバイスと濃縮技術を用いる 先端の簡易比色分析法

比色法は、高価な分析装置の導入・維持が困難な場面において有用な手法であるが、精度・感度において課題が残されている。一方、スマートフォン等に代表されるスマートデバイスは、国内外問わず、我々の生活の中で広く汎用されている。また、煩雑な手法である濃縮技術も研究され迅速簡便化しつつある。本稿では、これまでに研究・開発されてきたスマートデバイスと濃縮技術による簡易かつ高性能な比色法について紹介する。

間 中 淳

1 はじめに

機器分析法はエレクトロニクス技術の向上による高感度化、高精度化、自動化に伴い、その性能が著しく向上し、現在の研究開発や産業を支える分析技術の基盤となっている。しかしながら、資金、時間、人材に制約がある途上国、中小企業、個人商店において、ラボベースで使用される高価な分析装置の導入・維持は困難であり、測定現場であつかうことのできる簡易かつ迅速な分析法に対するニーズは高い。

一方、代表的な簡易法の一つである比色法は呈色試薬で発色させ色調の変化から濃度を判定する手法である。この手法は、専用の測定装置を使用せず目視で濃度を測定できることから、簡易性、コストパフォーマンスに優れている手法であり、実験室レベルのみならず、職場の健康診断における尿検査やプールの水質検査等をはじめ様々な分野において現場分析法として広く利用されている。しかしながら、微妙な色の変化を目視で判定することから、同じ試料でも測定者によって分析結果が異なりやすく分析結果の信頼性が低いことが課題であった。また、感度が低く低濃度の試料の測定が難しく、特に環境分析の分野においては設定されている厳しい基準値の濃度の測定においてその性能が十分追いついていない。これまでに、簡易型の分光光度計が開発・市販されており分析精度の面は改善することは可能であるが、装置の導入により分析コストが著しく高騰することから、比色法がもつ高い経済性とのトレードオフとなる。そのため、高い感度・精度を有しつつ、簡易性・経済性を持つ手法の開発が重要となる。

一方でスマートフォンやタブレット端末等に代表されるスマートデバイスは、小型の端末に通話、メール、

ネットワーク、撮影、動画をはじめ様々な機能が集積しており、また、アプリケーションソフトウェアによりその性能を自由にカスタマイズすることができることから、現在、国内外において一般市民レベルで広く汎用され、我々の生活の一部として欠かせないものとなっている。そのため、分光光度計を導入するのではなく、既に所有しているスマートデバイスを比色法の測定装置として用いることで、簡易性・経済性を維持しつつその分析精度を高めることが可能となる。

また、溶媒抽出や蒸発濃縮をはじめ濃縮技術は分析化学の分野において分析感度や選択性を高める手法として広く利用されてきている。特に、固相抽出、膜濃縮、相分離濃縮は簡易な濃縮技術として有用である。

そこで、本稿では、比色法の課題である精度と感度を改善する有効な手法として、これまでに研究・開発されたスマートデバイスと簡易濃縮技術を用いた手法の原理・特徴・応用例を紹介する。

2 スマートデバイスを用いた簡易分析法

本稿ではまずスマートデバイスを用いた一般的な測定方法の原理・特徴・課題に関して概説する。スマートデバイスを測定装置とする手法は近年、多数研究・報告されてきており、民間企業からも市販されている。通常これまでのスマートデバイスを用いる手法としては、端末のカメラを検出器として、発色した箇所を撮影し、その色情報（RGB等）・色強度から定量する手法¹⁾が一般的である（図1）。また、上原らは撮影した色情報を演算

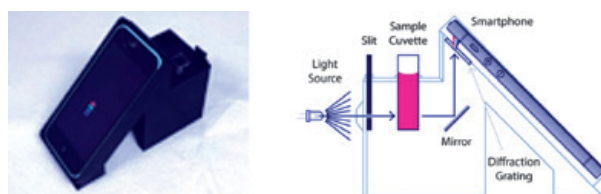


図1 一般的なスマートデバイス検出器のイメージ

することで、吸収スペクトルの情報に変換し、スマートデバイスを吸光度計として使用できる技術も報告している²⁾。さらに、最近では無料のスマートフォンアプリである Spotxel[®] Reader を用いることで、主に臨床分析の分野で用いられているマイクロプレート分析の検出も可能となり、多検体同時分析も可能となっている³⁾。また、ウシオ電機株式会社からは、分光器は別途用意し、装置とスマートデバイスを通信させ、スマートデバイスでデータ処理・解析を行う形のものも市販されている。このようにアプリケーションソフトウェアにより、スマートデバイスが様々な高性能な検出装置として使用することができる。しかしながら、これまでのスマートデバイスの撮影機能を利用した手法は小さな端末を比色計として利用できる簡易性はあるものの、測定（カメラで撮影）する際の目的物との距離、角度、照度等の撮影条件によって測定結果が大きく変動することから、精度ある結果を得るためには、スマートデバイス以外にも光源や暗室等の機械的な装置が必要となり、結果として全体的な測定系が大きくなることが課題であった。そのため、より簡易性を高めるためには、測定環境に依存しない手法を開発することが重要になると思われる。そこで、本稿では、上述の測定環境に依存しない簡易な手法として、1) 画面光を光源とする簡易アタッチメントを用いる手法、2) 比色版と一緒に測定する手法、3) 人工知能サーバーを利用する手法、4) 自己触媒反応の特性を利用する手法を紹介する。

2.1 画面光を光源とする簡易アタッチメントの開発

著者らは、3D プリンターを用いて、図2に示すように試料とカメラの位置を固定し、外光の影響を遮断するだけでなく端末の画面光を光源として取り込む形のア

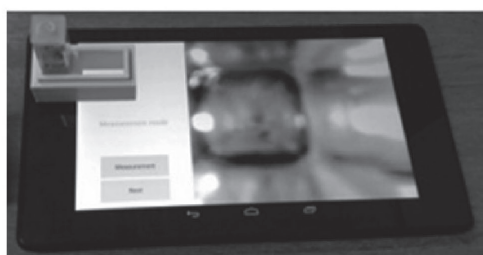
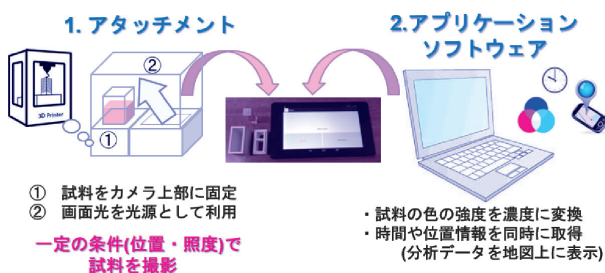


図2 画面光を利用した測定法

タッチメントを作成することで、測定系を大幅に小さくすることを可能とした。

また、アプリケーションソフトウェアの面においても色情報からの定量のみならず、端末のGPSや地図機能を利用することで、分析結果のマッピング機能を有する手法を開発した⁴⁾⁵⁾。これにより、スマートデバイス端末をただの検出器としてだけでなく、いつ、どこで測定した情報かを得られる分析結果のトレースアビリティが得られる現場分析法を構築することができた。端末をただの簡易な光学検出器としてだけでなく、画面光やGPSや地図機能等スマートデバイスの機能を最大限に引き出すことがより優れた簡易法へつながることが明らかとなった事例である。

2.2 比色板を一色に測定する手法

上述の手法は、従来のスマートデバイスを用いる手法に比べ大幅に測定系が簡易化できたものの、スマートデバイス以外にアタッチメントを必要としており、理想的にはスマートデバイス単体で測定ができるとより簡易性が高くなると思われる。そこで、著者らは東洋濾紙株式会社との共同研究により、スマートデバイスのみで行える次亜塩素酸の測定方法⁶⁾を開発した。その概要を図3に示す。この手法は発色させた試料を比色板と一緒に測定することで、標準色と試料色が同一の照度条件で測定できることから、測定照度の影響が軽減することができる。また、比色板の四隅に添付されているArUroコードにより、任意の撮影位置においても端末で比色板と試験紙の位置を認識できるため測定位置を厳密に固定する必要もなくなった。そのため、発色した試験紙を比色板をカメラの前にかざすだけで、自動的に精度の良い測定

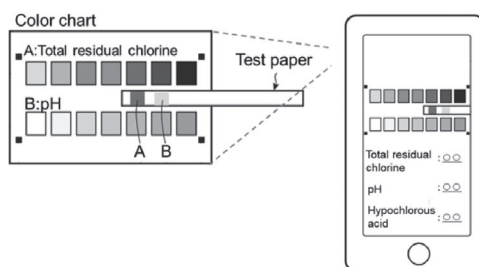


図3 比色板と測定する次亜塩素酸の定量法

が可能となった。

また、次亜塩素酸は塩素系殺菌剤の中でも殺菌効果の高い成分であり、殺菌力の評価として次亜塩素酸の濃度の定量が重要となる。しかしながら、市販の試験紙では次亜塩素酸の直接比色測定はできず、直接測定できるのはpHと総残留塩素であり、これらの結果から次亜塩素酸を計算して求める必要があった。この手法では、試験紙のpHと総残留塩素を同時に比色測定してその結果から、次亜塩素酸の濃度を自動的に演算して求めることが可能となっており、一回の測定で3項目の定量が可能となった。コロナウイルスやインフルエンザ等の感染症防止において、殺菌剤の殺菌力を評価するニーズの高まりに本法の成果が貢献できるものと思われる。

さらに市販の簡易比色分析キットであるパックテストを市販している株式会社共立理化学研究所でも、目視定量による読み取り精度の問題を解消するため、これまで専用の測定装置であるデジタルパックテストを開発、販売してきていたが、スマートフォンのカメラ機能を活用した計測技術に着目し、2020年4月よりiPhone®専用でパックテスト数値化アプリ「スマートパックテスト」を開発し⁷⁾無償で配信している。

2.3 人工知能を利用する手法

さらに、古山らは人工知能による濃度判定を行うシステム開発を報告している(図4)⁸⁾。発色の同定から濃度判定に人工知能技術を利用することで、外光対策の器具や検量線用の比色板等が不要となった。また、個々の端末にアプリを導入するのではなく、ネットワーク上に構築した人工知能サーバーを用いて測定することから、個々のデバイスにインストールするアプリの負荷を軽減し機種による性能の依存性を排除することが可能となる。実際に市販のパックテストCODを用いて本システムを試したところ、0~8ppmの範囲における2ppm刻みの測定において正しい認識率が96%であった。また、屋内、屋外での測定結果を教師データとして使用することで、

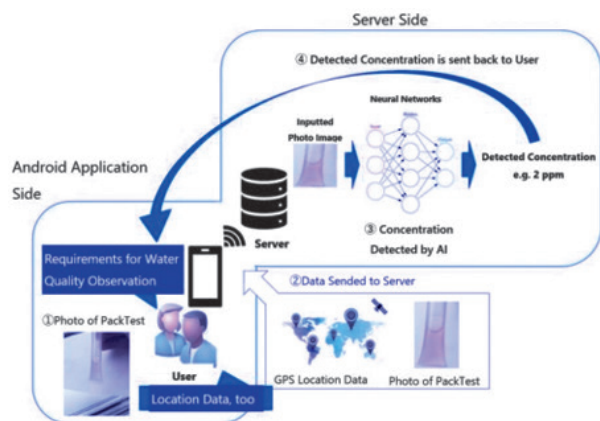


図4 人工知能による比色分析法

外光の影響に関係なく測定することができている。

この手法では比色板の存在も不要となり、試料をスマートデバイスで撮影するだけで、定量が可能となっている。人工知能は多くの教師データを学習させることでより性能が向上していくことから、今後注目される技術であると思われる。

2.4 自己触媒反応を併用する手法

また、アタッチメント等の器具、アプリや人工知能等のシステム面だけでなく、定量に使用される化学反応系を工夫することによっても簡易性の向上が可能である例について紹介する。反応の生成物が自身の反応の触媒となり、反応の進行とともに反応速度が指数関数的に増加する自己触媒反応は、反応開始から一定の誘導期間の後急激な化学変化(変色)を示し、これまでに自己触媒反応を用いる目視分析法⁹⁾¹⁰⁾が報告されている。この手法は変色までの時間(誘導期間)をストップウォッチで測定することで、濃度を計測することができる。時間は人間が測定できる単純な物理量であることから、簡易かつ高感度・高精度な目視分析が可能となる。著者らはこれまでに亜硫酸塩-過酸化水素系自己触媒反応を標識酵素ペルオキシダーゼの目視計測法とペルオキシダーゼを標識とするエンザイムイムノアッセイに応用し各種抗原物質の高選択的な目視分析法を報告している¹⁰⁾。

また、著者らは反応開始と終了における急激な変色を検知し誘導期間を測定した後、試料濃度を自動計算する専用のアプリを開発し、亜硫酸塩-過酸化水素系自己触媒反応による鉄(II)イオンの濃度測定を行った(図5)¹¹⁾。

その結果、撮影画面の前での試薬添加のみの操作で、誘導期間の測定から濃度の算出までを自動に行うことができた。この手法はこれまでの比色法の検出は色強度の微妙な変化を検知するものと異なり、急激な2色の変色(青から黄色)するまでの時間のみを検知するだけで

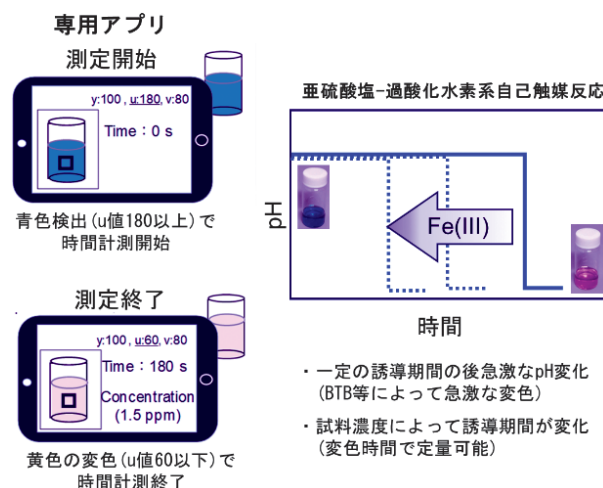


図5 自己触媒反応による定量法用アプリ

あるため、装置からの距離、照度等の撮影条件に依存せず、専用の暗室や固定器具や比色板を使用せずにスマートデバイスのみで安定した分析結果が得ることができ、この結果は単に測定環境フリーな測定が可能になっただけでなく、このような化学増幅反応とスマートデバイス計測との融合により新たな高性能簡易分析法の創出につながる可能性を示唆するものと思われる。

3 簡易濃縮技術による比色法の高感度化

上述のようにスマートデバイスを測定装置にすることで、コストパフォーマンスの良い高精度な比色法が可能にすることができる。しかしながら、分析感度の点においては、低濃度領域では色強度が低いものを検出することから原理的に課題が残されたままである。一方、分析化学の分野では、これまで溶媒抽出や蒸発濃縮等の濃縮技術による分析の高感度化が行われてきた。しかしながら、これらの手法は長時間の煩雑な操作であるため、簡易分析としての有用性は見られなかった。一方で濃縮法も日々研究されており、近年では、迅速かつ簡便に目的物質を濃縮できるような手法も開発されており、簡易かつ高感度な比色法としての利用が多く検討されている。本稿では、これら簡易濃縮技術による高感度比色法の研究・開発例として1) 固相担体を用いる手法、2) 膜濃縮を用いる手法、3) 相分離濃縮を用いる手法を紹介する。

3.1 固相担体を用いる手法

試料を一度固相担体に吸着させた後、少量の溶離液で溶出させることで、試料を濃縮する固相抽出法は従来の溶媒抽出や蒸発濃縮のように多量の有機溶剤や長時間の振り混ぜ・加熱操作を必要としないため、環境汚染物質をはじめ様々な試料における高感度分析法の前処理法として広く利用されるようになり、上述で紹介した市販の比色試験キットであるバックテストにおいても鉛やヒ素等の一部項目において利用され、厳しい環境基準値をクリアすることができる前処理法になるに至っている¹²⁾。また、著者らは、イオン交換樹脂と簡易グートツァイト法キットとスマートデバイスを用いて石こう中に含まれるヒ素の簡易分析法を報告している(図6)¹³⁾。この手法は純水に懸濁させた石こう試料にイオン交換樹脂を混合させ、数分振り混ぜると石膏が溶解し、石こう中にあるヒ素が水溶液中に溶出する。ヒ素が溶出した試料水に対して簡易グートツァイト法キットで気化させたヒ素を試験紙に吸着後に発色させ、発色した試験紙の色強度をスマートデバイスで測定するものである。通常固相を用いる手法は目的物を吸着濃縮する固相抽出法が主であるが、この手法では妨害物である石こうを取り除く目的で利用しているため、趣旨が異なっているが、固相を利用する手法として紹介している。廃石こうボードは建築廃

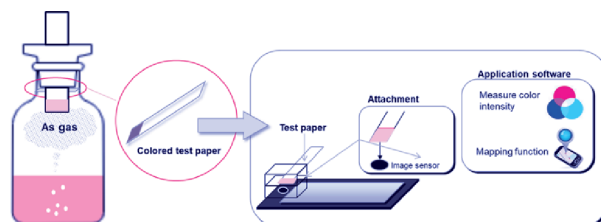
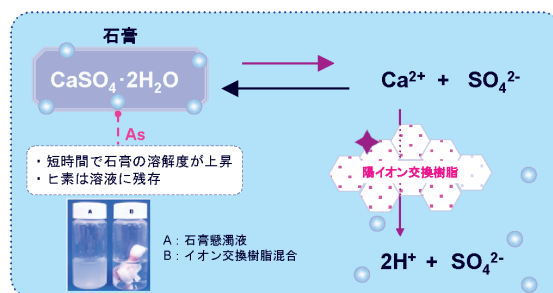


図6 イオン交換樹脂とグートツァイト法による石こう中のヒ素のスマートデバイス測定法

材として大量に廃棄されていることが問題となっているが、その再利用法として地質改良剤としての利用が主となっている。しかしながら、不純物としてヒ素が含まれるものがあることが再利用する際の問題となっている。そのため、廃石こうボードの再利用を行う現場では、運び込まれる大量の廃石こうボードに対してヒ素含有の有無の判定・選別を迅速に行うことが課題であったが、このような迅速なヒ素判定の技術は廃石こうボードの再利用の分野に貢献できるものと思われる。

これら固相単体を用いる手法では、共存物質を分離してから高感度に発色させることから、選択性も向上し、より実試料の測定に適した手法となった。しかしながら、固相を用いる手法はカラムのコンディショニングから吸着・脱離操作を行う必要があり、高感度化を達成できても操作項目が増えるために簡易性を犠牲にしていることが否めない。

3.2 膜分離を用いる手法

通常の比色法は均一の溶液状態で行うものであるが、試料を発色させた後、発色体を不溶性の沈殿に変化させ、目的物をフィルター上にろ過・濃縮し、ろ紙上に濃縮された沈殿物の色調の変化で比色法を行うことで、そのまま均一溶液で行う手法に比べて感度が上昇することが知られており、フィルター濃縮による高感度比色法の研究が多数報告されている。村井らは、マンガンイオンを発色体の沈殿物に変化させ膜濃縮させることでマンガンイオンの比色分析法の高感度化に成功している¹⁴⁾。また、高橋らは発色させた試料をナノサイズの沈殿物にし、膜表面に沈殿物を高効率に集積させることで、更なる高感度化した比色法を報告している¹⁵⁾。市販のバック

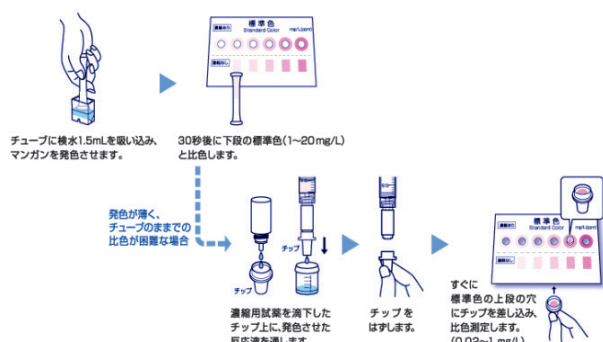


図7 膜濃縮を利用した高感度パックテスト

テストにおいてもマンガンや六価クロム等一部の測定項目の商品ではこれらの膜濃縮を利用することで環境基準値をクリアする手法に達している。膜濃縮が用いられているマンガンイオンの高感度パックテスト法に関する概要を図7に示す。こちらの手法も濃縮操作が加わっているものの、前述の固相抽出法を用いる手法に比べて濃縮操作が単純になっており、簡易性を有しつつ高感度化が達成できているものと思われる。また、比色板に通常の測定法用と膜濃縮法用の標準色と一緒に記載されており低濃度から高濃度まで測定できる簡易キットとしても有用であると思われる。

3.3 相分離を用いた濃縮法

一方、均一液液抽出法は均一溶液からの相分離現象を用いて生成した微小体積の析出相に目的物質を分離・濃縮する手法である。この手法はこれまでの溶媒抽出のような激しい振盪操作を必要とせず、高い抽出率と濃縮倍率を有する濃縮が可能であることから、他の濃縮法と比べ高い濃縮効率が得られ高感度分析が可能となる利点を有している。これまでに、フッ素系界面活性剤を用いる相分離現象をはじめ種々のタイプの手法が報告され^{16)~18)}、超高感度分析のための各機器分析法の前段濃縮法として利用されてきた。著者らは、水/2-プロパノール/クロロホルム系の3成分系均一液液抽出法により生成する析出相に六価クロムのジフェニルカルバジド錯体が高効率で濃縮されることを見だし、六価クロムの高感度比色法を開発している。また、前述のスマートデバイス計測法を併用した手法も報告しており¹⁹⁾、スマートデバイスに取り込んだ濃縮相の画像の色強度によ



図8 3成分系均一液液抽出法とスマートデバイスによる六価クロムの高感度簡易分析

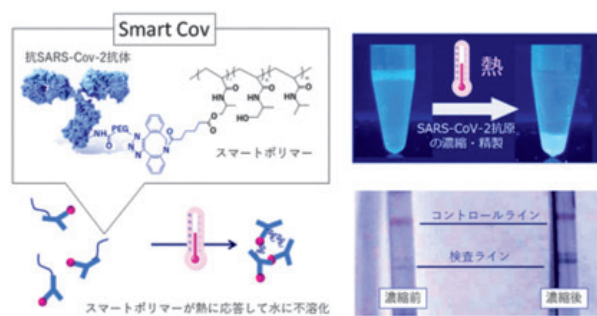


図9 温度応答性ポリマーによるコロナウイルスの濃縮および高感度抗原検査法への応用

り六価クロムの環境基準値である 0.05 ppm を超える 0.01 ppm の検出が可能となった。この結果から簡易濃縮技術とスマートデバイス計測を併用することで精度も感度も高い比色分析可能となることが分かった。

また、温度応答性ポリマーの一つであるポリ(N-イソプロピルアクリルアミド) (PNIPAM) は冷水に可溶であるが、下限臨界溶液温度 (lower critical solution temperature, LCST) 以上になると相分離し不溶性のゲルが生成することが知られており、加温するだけで目的物質を分離濃縮することが可能となる。荏原らは、この PNIPAM の相分離現象を用いてコロナウイルス等の抗原物質の濃縮およびイムノクロマトグラフィーの高感度化に関する研究を報告している²⁰⁾。これにより、コストが低いが高感度も低い抗原検査が高価格で高性能の PCR 検査と同等の感度となり、現在までにエジプト等の途上国での検査技術としての応用が検討されている。

一方、著者らもイムノクロマトグラフィーのポジティブラインの発色強度が試料濃度によって変化し、スマートデバイスによる色強度を測定することで、発色強度と試料濃度に定量性があることを報告しており²¹⁾、上述の PNIPAM による濃縮とスマートデバイスによる計測を併用することで、より高感度かつ高精度な抗原検査が可能になることが期待できている。

4 おわりに

本稿では、比色法の課題である測定精度と感度の低さを改善するため、スマートデバイスと簡易濃縮技術の有用性に関して概説した。身の回りの端末であるスマートデバイスを用いることで、分光光度計のような測定装置の導入が不要となり、高精度な測定が可能となる。また、様々な工夫・取組により端末の性能を最大限に活用することで、測定環境の影響を除去できるだけでなく分析結果のトレースアビリティの確保もでき、現場分析法としてさらに有用な手法となりうる。さらに人工知能や自己触媒反応の特性を利用することでより簡易性が高くなることから、今後さらなる発展が期待できる。また、種々の簡易濃縮技術を用いることで発色強度が容易

に高くなり高感度な比色分析が可能となる。そのため、情報処理技術と化学濃縮技術の融合が高精度・高感度な簡易分析法の開発へつながるものと思われる。

文 献

- 1) E. K. Grasse, M. H. Torcasio, Adam W. Smith : *J. Chem. Educ.*, **93**, 146 (2016).
- 2) 稲川有徳, 上原伸夫 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **69**, 693 (2020).
- 3) N. Qin, Z. Liu, L. Zhao, M. Bao, X. Mei, D. Li : *Anal. Sci.*, **39**, 139 (2023).
- 4) 間中淳, 横田優貴, 中村尊, 古山彰一, 袋布昌幹, 入江光輝 : 砂漠研究, **27-1**, 55 (2017).
- 5) 間中淳, 古山彰一, 里田誠 : 光学測定装置, 特開 2017-032418 (2017.2.9).
- 6) 間中淳, 柴田慶之, 武内義弥, 古川奉史, 袋布昌幹, 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **72**, 45 (2022).
- 7) 海田学 : ぶんせき (*Bunseki*), **2023**, 408.
- 8) 古山, 藤島政樹, 竹内克輝, 永井孝, 奥村浩 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **68**, 491 (2019).
- 9) M. Endo, S. Abe, Y. Deguchi, T. Yotsuyanagi : *Talanta*, **47**, 349 (1998).
- 10) A. Manaka, S. Igarashi : *Analytical Letters*, **36**, 135 (2003).
- 11) 間中淳, 鍋木かおり, 古山彰一, 袋布昌幹, 入江光輝 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **71**, 217 (2022).
- 12) 村井景太, ぶんせき (*Bunseki*), **2021**, 173
- 13) M. Tafu, J. Nakamura, M. Tanii, S. Takamatsu, A. Manaka : *Materials*, **15**, 2446 (2022).
- 14) 村居景太, 本多宏子, 奥村浩, 岡内完治 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **60**, 507 (2011).
- 15) K. Takano, T. Yoshida, Y. Wakui, Y. Takahashi : *Anal. Sci.*, **39**, 729 (2023).
- 16) 五十嵐淑朗, 押手茂克 : ぶんせき (*Bunseki*), **1997**, 702.
- 17) S. Igarashi, T. Yotsuyanagi : *Microchimica Acta*, **106**, 37 (1992).
- 18) S. Igarashi, T. Yotsuyanagi : *ISEC'90, Proc. Symp. Sol. Extra.*, 1725 (1992).
- 19) 間中淳, 横田優貴, 加藤健, 柴田慶之, 袋布昌幹, 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **68**, 411 (2019).
- 20) A. Nabil, E. Yoshihara, K. Hironaka, A. A. Hassan, G. Shiha, M. Ebara : *Compu. Struct. Biotechnol. J.*, **19**, 609 (2021).
- 21) 岩瀬芹菜, 間中淳, 柴田慶之 : 第6回関東磐越地区化学技術フォーラム講演要旨集, p. 14 (2020).



間中 淳 (MANAKA Atsushi)

富山高等専門学校物質化学工学科 (〒939-8630 富山県富山市本郷町 13). 茨城大学大学院理工学研究科物質科学専攻修了。博士 (工学)。《現在の研究テーマ》高性能かつ簡易な分析法の開発。《趣味》温泉・岩盤浴巡り。

E-mail : manaka@nc-toyama.ac.jp

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〉

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. 土壤中重金属分析のための前処理法 | 11. 大気中揮発性有機化合物分析のための前処理 |
| 2. 岩石試料の分析のための前処理法 | 12. 放射性核種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 | 13. 脂質分析のための前処理法 |
| 4. 金属試料分析のための前処理 | 14. 糖鎖分析のための試料前処理 |
| 5. 分析試料としての水産生物の特徴と取り扱い | 15. イムノアッセイのための前処理法 |
| 6. 食品分析のための前処理法 | 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 |
| 7. Dried blood spot 法による血液試料の前処理 | 17. 生元素安定同位体比分析のための試料前処理法 |
| 8. 生体試料のための前処理法 (液-液抽出) | 18. セラミックス試料分析のための前処理法 |
| 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 | |

〈2 章 分析試料の正しい取り扱いかた〉

- | | |
|---------------------------|--------------------|
| 1. 生体 (血液) | 10. 岩石 |
| 2. 生体 (毛髪) | 11. 食品 (農産物の残留農薬) |
| 3. 金属 (非鉄金属) | 12. ガラス |
| 4. 金属 (鉄鋼) | 13. 環境 (陸水) |
| 5. 食品 (酒類) | 14. 温泉付随ガス |
| 6. 医薬品 (原薬・中間体・原料) | 15. 透過電子顕微鏡観察の試料調整 |
| 7. 海水 (微量金属) | 16. 環境 (ダイオキシン類) |
| 8. 考古資料 | 17. 高分子材料 |
| 9. 海底下の試料 (地球深部の堆積物および岩石) | 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。