

イオンクロマトグラフィー —分析技術の基礎と応用—

竹内 政樹

1 はじめに

1975年にSmallらが“Novel ion exchange chromatographic method using conductivity detection.”と題した論文を発表して以来、イオンクロマトグラフィー (ion chromatography, IC) は飛躍的な進歩を成し遂げ、今日では種々イオンの多成分同時分析法として広範囲な分野に普及している。無機陰イオンと陽イオンが主な測定対象であるが、有機酸やアミンなどの測定も可能である。本進歩総説では、2018年から2020年までの3年間に論文発表されたICの基礎/応用技術の進歩について紹介する。本誌には、ICの進歩総説が既に6報^{1)~6)}掲載されているので、そちらも参考にしていきたい。

2 ICの総合論文・総説

ICに関する総合論文がいくつか発表されている。リン酸、 α -ヒドロキシ酸、ジアリルアミン-マレイン酸共重合体をそれぞれ修飾したジルコニアあるいは未修飾のジルコニアを固定相としたときの無機イオンの保持挙動⁷⁾、夾雑成分(マトリックス)を除去・低減することができるインライン中和、インラインダイアリシス、インラインマトリックス除去などの前処理法⁸⁾、ICとキャピラリー電気泳動法(capillary electrophoresis, CE)による海水中の微量ヨウ素(ヨウ化物, ヨウ素酸イオン)の測定⁹⁾に関する進歩が掲載されている。また、置換型IC、荷電化粒子検出器、電荷検出器、有機物の炭素量をとらえる検出器など、標準物質による校正を必要としないユニバーサル検出法に関する総説¹⁰⁾や溶離液の生成と精製、化学的あるいは電気透析による溶離液バックグラウンドの低減、溶離液pHの調整、緩衝液の生成など、イオン交換膜を用いたIC技術を幅広く網羅した総説¹¹⁾も報告されている。

3 ICの基礎技術

ICシステムは、溶離液を送る送液ポンプ、試料導入部、目的イオンを分離する分離カラム、溶離液の導電性 Ion Chromatography —Fundamentals and Applications of Analytical Techniques—

イオンを除去するサブレッサー、分離されたイオン種を検出する検出部及びデータ処理部で構成され、必要に応じてこれらの要素が組み合わさった計測システムとなる。本節では、溶離液発生装置、分離カラム、サブレッサー及び検出器の進展と利用状況について紹介する。

3.1 溶離液発生装置

一般的に、ICの溶離液は分析するときその都度調製する。一方、溶離液をインラインで純水から自動調製することで、手間が省けるだけでなく、正確で高純度な溶離液が供給可能となる。バックグラウンドの低減による検出感度の向上やグラジエント分析が容易に行えるなどの利点もある。しかし、市販されている2相型の溶離液発生装置は、調製時に発生する水素ガスが溶離液ラインに流れるため、発生装置の下流に高圧デガッサーを取り付けて水素ガスを除去する必要がある。デガッサーを必要としないガスフリーの溶離液発生装置として、陽イオン交換膜、陰イオン交換膜及びバイポーラー膜などで溶離液ラインを隔てた3相型の水酸化カリウム発生装置¹²⁾と炭酸カリウム発生装置¹³⁾、内容積が僅か210 nLの中空キャピラリーICに適した3相型水酸化カリウム発生装置¹⁴⁾、2相型でガスフリーではないが口径の小さな分離カラムに適した水酸化カリウム発生装置¹⁵⁾が報告されている。これらの溶離液発生装置はいずれも電気透析を利用したものであるが、シリコーンラバー膜あるいはテフロンAF膜で隔てた溶離液ラインに二酸化炭素を高圧浸透させることにより、炭酸溶離液が自動調製可能な発生装置¹⁶⁾も報告されている。溶離液発生装置に超純水をインライン供給することでバックグラウンドが低減され、長時間連続分析時における安定性が維持される¹⁷⁾ことも報告されている。

3.2 分離カラム

多くの研究で市販のICカラムが用いられているが、新たな官能基を結合させた分離カラムの開発も行われている。ワンステップのエポキシ-アミン重合法により、直鎖状の第四級アンモニウム塩型高分子電解質を共有結合させた陰イオン交換カラムによる陰イオン(フッ化

物、塩化物、亜硝酸、臭化物、硝酸、硫酸、リン酸イオン)の分離¹⁸⁾、チオール-エン反応を用いて、アリルメタクリレート-ジビニルベンゼンあるいはエチルビニルベンゼン-ジビニルベンゼン粒子にシステアミン/システインを結合させた陰イオン交換カラムによる陰イオン(フッ化物、酢酸、ギ酸、亜塩素酸、塩化物イオン)の分離¹⁹⁾、ポリグリシジルメタクリレート-ジビニルベンゼン粒子にジメチルアミノエチルメタクリレートメチルクロリドを結合させた陰イオン交換カラムによる陰イオン(フッ化物、塩化物、亜硝酸、リン酸水素、臭化物、硝酸、硫酸イオン)の分離²⁰⁾、ポリ1-ビニルイミダゾール-エチレンジメタクリレートのモノリス型キャピラリーカラムによる陰イオン(ヨウ素酸、臭素酸、亜硝酸、臭化物、硝酸、ヨウ化物イオン)の分離²¹⁾が報告されている。このほかに、シリカゲルに硝酸銀を結合させた銀カラムによるセスキテルペン位置異性体の分離²²⁾、亜鉛シクレンレゾルシナレンキャピタンドカラムによる過レニウム酸イオンの分離²³⁾が報告されている。また、2.5 μm の粒子を充てんしたカラムを70 MPaで稼働させたICと4 μm の粒子を充てんしたカラムを35 MPaの最高圧力で稼働させた従来型ICの比較²⁴⁾において、前者は分離効率を低下させることなく、約2倍迅速に陰イオン(フッ化物、硫酸、チオ硫酸、ヨウ化物、チオシアン酸イオン)を分離・検出できることを報告している。

市販のICカラムの分離条件を検討することで、新たな分離機構を見いだす研究も行われている。陰イオン交換樹脂が充てんされたガードカラムに酸性溶離液(酒石酸、リンゴ酸)を適用した無機陰イオン(フッ化物、リン酸二水素、塩化物、亜硝酸、硝酸、硫酸イオン)の分離²⁵⁾、イオン交換基をもたないジオール修飾シリカカラムに酸性溶離液(酒石酸、リンゴ酸)を適用した無機陰イオン(亜硝酸、リン酸二水素、塩化物、硝酸、フッ化物、硫酸イオン)の分離²⁶⁾、残存シラノール基を有する逆相系C18シリカカラム(エンドキャップ未処理カラム)を用いることで、無機陰イオン(ヨウ素酸、臭素酸、臭化物、亜硝酸、硝酸、ヨウ化物イオン)の分離²⁷⁾が報告されている。クリプタンド型カラムを用いた研究²⁸⁾では、イオン交換平衡と錯体形成平衡を考慮することで、無機陰イオン(塩化物、臭素酸、亜硝酸、臭化物、硝酸、硫酸、リン酸水素イオン)、カルボン酸(ギ酸、酢酸、乳酸、プロピオン酸、ピルビン酸、シュウ酸、マロン酸、コハク酸、アジピン酸、ピメリン酸、フマル酸、マレイン酸、酒石酸、クエン酸イオン)、トリフルオロ酢酸、ブロモクロロ酢酸、安息香酸イオン、フタル酸イオンの保持挙動を予測できることが示されている。

3.3 サプレッサー

サプレッサーは、溶離液のバックグラウンド電気伝導度を低減し、目的イオンの検出感度を高めるICの特徴的なモジュールである。新規サプレッサーとして、バイポーラー膜を用いた電解再生サプレッサー²⁹⁾が報告されている。陽イオン交換膜の代わりにバイポーラー膜と陰イオン交換膜を用いていること以外は、市販の電解再生サプレッサーと同様でサンドイッチ構造となっている。一般的に、バックグラウンドレベルの増加とともにノイズレベルも増加する。そのため、電解サプレッサーを用いた炭酸系溶離液のノイズレベルは水酸化物系溶離液よりも高くなる。炭酸系溶離液のノイズレベルの低減には、3電極型の電解再生サプレッサーが有用である³⁰⁾と報告されている。

3.4 検出器

多くの研究で電気伝導度検出器(conductivity detector, CD)が用いられている。環境水(湖沼水、河川水、下水処理水)中の微量メチルホスホン酸の定量³¹⁾、水道水及び湧き水に含まれる除草剤(グリホサート)とその主要代謝物(アミノメチルホスホン酸)及び陰イオン(フッ化物、亜塩素酸、臭素酸、塩化物、亜硝酸、硝酸、硫酸、リン酸イオン)の同時定量³²⁾、食品(肉製品、乳製品、海産食品)中のポリリン酸イオンの定量³³⁾、稲(葉、茎、根)及び土壤に含まれる微量栄養素(ホウ酸、塩化物、モリブデン酸イオン)の同時定量³⁴⁾、室内空气中ガス状及び粒子状物質に含まれる呼吸器疾患関連のイオン性化合物(酢酸、ギ酸、塩化物、亜硝酸、硝酸、硫酸、安息香酸、フタル酸イオン)の定量³⁵⁾、都市部及び海岸域の大気エアロゾルに含まれるアミン(メチルアミン、ジメチルアミン、トリメチルアミン、エチルアミン、ジエチルアミン、プロピルアミン、ブチルアミン、エタノールアミン、トリエタノールアミン)と無機イオン(ナトリウム、アンモニウム、カリウム、マグネシウム、カルシウムイオン)の同時定量³⁶⁾、都市部の大気エアロゾルに含まれるジカルボン酸(シュウ酸、マロン酸、コハク酸、グルタル酸、アジピン酸、ピメリン酸、アゼライン酸、マレイン酸)の定量³⁷⁾、などにIC-CDが用いられている。また、デュアルキャピラリーIC-CDにより、南極氷床コア中の陽イオン(ナトリウム、カリウム、ルビジウム、セシウム、マグネシウム、カルシウム、ストロンチウム、バリウムイオン)及び陰イオン(フッ化物、メタンスルホン酸、塩化物、硫酸、臭化物、硝酸イオン)の同時定量³⁸⁾が達成されている。

CDはほとんどのイオン種を検出することができるが、その選択性と検出感度を向上させるためにICに質量分析計(mass spectrometer, MS)を接続した手法も数多く報告されている。MSの併用により、ICで保持

時間が等しい多成分を質量/電荷比で分離・検出することが可能となる。小麦粉中の食品添加物(臭素酸イオン)の定量³⁹⁾、2-ブチノイン酸試薬に含まれる微量な不純物(酢酸、プロピオン酸、ギ酸、酪酸、クロトン酸、吉草酸、プロピオール酸、ブチン酸、ペンチン酸)の定量⁴⁰⁾、食肉製品中の親水性食品添加物(塩化物、リン酸、乳酸、酢酸、ギ酸、ソルビン酸、亜硝酸、硝酸、硫酸、リンゴ酸、コハク酸、シュウ酸、フマル酸、ピロリン酸)の定量⁴¹⁾にIC-MSが用いられ、有機酸、糖及びリン酸イオンを含む44種の陰イオン性代謝物の網羅的プロファイリング⁴²⁾にキャピラリーIC-MSが使用されている。表層水に含まれる殺虫剤成分(グリホサート、グルホシネート)とその主要代謝物(アミノメチルホスホン酸、3-ヒドロキシメチルホスフィノイルプロピオン酸)の定量⁴³⁾、飲料水中のハロ酢酸(モノクロロ酢酸、モノプロモ酢酸、ジクロロ酢酸、プロモクロロ酢酸、ジプロモ酢酸、トリクロロ酢酸、プロモジクロロ酢酸、ジプロモクロロ酢酸、トリプロモ酢酸)、臭素酸イオン及びダラポンの定量⁴⁴⁾、堆積物中のイノシトール六リン酸塩の定量⁴⁵⁾、果物(リンゴ、種なし白ブドウ、レモン)、野菜(トマト、アボカド)及び穀物(小麦)に含まれるホセチル及びホスホン酸の定量⁴⁶⁾、果物(パイナップル、メロン)及び野菜(エンドウ豆、トウガラシ)に含まれる高極性陰イオン性農薬(塩素酸、エテフォン、ホセチルアルミニウム、グルホシネート、グリホサート、*N*-アセチルアミノメチルホスホン酸、*N*-アセチルグリホサート、過塩素酸、ホスホン酸)の定量⁴⁷⁾、炭酸飲料及びビールに含まれる2-アセチル-4(5)-1,2,3,4-テトラヒドロキシブチル-イミダゾールの定量⁴⁸⁾、大気エアロゾル中のレボグルコサンとその異性体の定量⁴⁹⁾には、ICに2台のMSを接続したIC-MS/MSが用いられ、ヘキソースリン酸(ガラクトース-1-リン酸、フルクトース-1-リン酸、ガラクトース-6-リン酸、グルコース-6-リン酸、フルクトース-6-リン酸、マンノース-6-リン酸)の分離⁵⁰⁾にキャピラリーIC-MS/MSが使用されている。低エネルギーの爆発物や銃弾残渣などのイオン性エネルギー物質の法医学的プロファイリング⁵¹⁾、飲料水中のハロ酢酸(モノクロロ酢酸、モノプロモ酢酸、ジクロロ酢酸、プロモクロロ酢酸、ジプロモ酢酸、トリクロロ酢酸、プロモジクロロ酢酸、ジプロモクロロ酢酸、トリプロモ酢酸)、臭素酸イオン及びダラポンの定量⁵²⁾、土壌(耕地、草地、森林地帯)中のイノシトール六リン酸の定量⁵³⁾、大腸菌に含まれるグアノシン5'-二リン酸3'-二リン酸及びグアノシン5'-三リン酸3'-二リン酸の定量⁵⁴⁾には、質量分解能が数万を超える高分解能質量分析計(high-resolution mass spectrometer, HRMS)を併用したIC-HRMSが使用されている。米中のヒ素の定量⁵⁵⁾、米中の六価クロムの定量⁵⁶⁾、プルトニウム、ウラン、ネオ

ジウム及びガドリニウムの分離⁵⁷⁾では、ICに誘導結合プラズマ質量分析計(inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS)を接続したIC-ICP-MSが用いられ、ヒ素化合物(アルセノコリン、アルセノペタイン、ジメチルアルシン酸、フェニルアルソン酸、ヒ素)の定量⁵⁸⁾では、ICとCE-MSを組み合わせたIC-CE-MSが使用されている。

IC-CDやMS以外の検出法として、IC-パルスドアンペロメトリック検出法による溜池水中の除草剤(アミノメチルホスホン酸、グルホシネート、グリホサート)の定量⁵⁹⁾、飲料水に含まれるシアン化物イオンの定量⁶⁰⁾、生体試料(尿、唾液、母乳)中の微量シアンの定量⁶¹⁾、電気伝導度/紫外吸光度検出法による液体肥料中の無機イオン性栄養塩類(カリウム、アンモニウム、硝酸、亜硝酸、リン酸水素、塩化物、硫酸イオン)の定量⁶²⁾、IC-DCアンペロメトリック検出法を用いた高濃度のアンモニア存在下におけるヒドラジンの定量⁶³⁾が報告されている。

ICの新たな検出セルとして、3Dプリンタで造形されたものが報告されている。ポリジェット方式の3Dプリンタで造形されたラジアルフローセルによる尿あるいはコーヒー抽出試料中の過酸化水素の化学発光検出⁶⁴⁾では、スパイラルフローセルを用いた場合に比べて、検出信号の強度がピーク高さ比で約60%、ピーク面積比で約90%の増大を達成している。ポリメチルメタクリレートの2層構造で設計されたZ字型セル(分析窓:紫外線透過性溶融シリカガラス)、235 nm発光ダイオード及びフォトダイオードで構成される小型の紫外吸光度検出器⁶⁵⁾は、市販品に比べて低コストであり、低迷光かつ広ダイナミックレンジを達成している。さらに、この検出器と3Dプリンタを用いて作製した送液ポンプなどで構成される小型・軽量のICシステム⁶⁶⁾による生活排水中陰イオン(亜硝酸、硝酸イオン)の定量が報告されている。

4 ICの応用技術

抽出、精製、希釈及び濃縮などの試料の前処理は、ICシステムの維持管理から測定精度や感度を向上させるうえで不可欠な操作である。また、ポストカラム部における処理も検出感度、選択性の改善に有効な手法となる。本節では、試料の前処理及びポストカラム処理の進展について紹介する。

4.1 前処理

バッチ式での試料の前処理とともにインラインで自動化された前処理法が数多く報告されている。食塩中の陽イオン(カリウム、マグネシウム、カルシウムイオン)及び陰イオン(フッ化物、臭化物、硫酸イオン)の定量⁶⁷⁾では、純水による希釈のみでナトリウムイオンと

塩化物イオンによる妨害を受けることなく再現性の良い定量結果を得ている。水不混和性有機溶媒（酢酸エチル、メチルエチルケトン、メチルイソブチルケトン、ジエチルエーテル）中の陰イオン（フッ化物、塩化物、亜硝酸、臭化物、硝酸、リン酸、硫酸イオン）の定量⁶⁸⁾では、試料を濃縮カラムに注入後、純水を通液して濃縮カラム中の水不混和性有機溶媒を洗い出し、続いて溶離液を流して捕捉されている目的イオンを溶出している。高濃度水酸化ナトリウム溶液中の陰イオン（塩化物、塩素酸、硫酸イオン）の定量⁶⁹⁾では、強酸性陽イオン交換樹脂を充てんしたインライン中和デバイスに試料を通液してナトリウムイオンを除去してから、通過した目的イオンを濃縮カラムに濃縮している。重金属試薬（塩化コバルト六水和物、酢酸亜鉛二水和物）中の陰イオン（塩化物、塩素酸、硫酸イオン）の定量⁷⁰⁾では、陽イオン交換樹脂を充てんしたインライン金属除去デバイスを用いることにより、塩化コバルト六水和物から臭化物イオン、硝酸イオン、硫酸イオンの検出を達成している。バイオディーゼル中の陰イオン（酢酸、塩化物、硝酸、リン酸、硫酸イオン）の定量⁷¹⁾では、逆相クロマトメンブレン抽出と呼ばれる手法が用いられている。この抽出法は、自作の疎水性テフロンと親水性ガラス繊維からなる多孔質セルに、純水と試料を順々に通液することで試料の水層のみを多孔質セルに保持させる。続いて純水を通液して目的イオンを含んだ親水性エマルジョンを溶出させ、下流の親水性膜を通過させて目的イオンを精製している。食品（バナナの皮、オレンジ、レモン、リンゴ、ナシ、モモ、サクランボ、マンゴー、スイカ、牛乳）中の植物成長調整剤（1-ナフチルアセトアミド、1-ナフタレン酢酸）の定量⁷²⁾では、QuEChtERS（キャッチャーズ）法による前処理が行われている。QuEChtERS法とは、塩類や精製用の充てん剤を試料とともに攪拌・遠心分離する分散固相抽出の一つであり、その名称には、Quick（迅速）、Easy（簡単）、Cheap（安価）、Effective（効率的）、Rugged（堅牢性）、Safe（安全）の頭文字が使われている。植物油中の酢酸イオンとギ酸イオンの定量⁷³⁾では、Doehlert デザインという多変量解析を用いて抽出要素（試料量、抽出時間、水酸化カリウム抽出液濃度、温度）の最適化が行われている。電子機器（パソコン用マウスのシェル、ケーブル）に含まれる臭素系難燃剤（ポリ臭化ジフェニルエーテル、ポリ臭化ビフェニル、テトラプロモビスフェノールA、ヘキサプロモシクロドデカン）の全臭素定量⁷⁴⁾では、超音波支援抽出と銅触媒を用いる還元的脱臭素化処理が施されている。市販のフロースルー透析用プローブを用いた陰イオン（フッ化物、塩化物、亜硝酸、臭化物、硝酸、硫酸塩、リン酸イオン）の回収⁷⁵⁾では、ストップフロー法を用いることで高い回収率が達成されている。

2台のICシステムを組み合わせた2次元イオンクロマトグラフィー（2D-IC）は、第1システムで不要なマトリックス成分を除去し、必要な成分のみを第2システムに導入することにより、高濃度マトリックスによる干渉を取り除き、第2システムで理想的な分離・検出を行う手法である。海水中の微量アンモニウムイオンの定量⁷⁶⁾、ミネラルウォーターに含まれる陽イオン（リチウム、ナトリウム、アンモニウム、カリウム、マグネシウム、カルシウムイオン）と陰イオン（フッ化物、塩化物、亜硝酸、硫酸、臭化物、硝酸、リン酸イオン）の同時定量⁷⁷⁾、弱酸（フッ化水素酸、ギ酸、酢酸、プロピオン酸、酪酸、吉草酸、カプロン酸、乳酸、コハク酸、アジピン酸、リンゴ酸、酒石酸、フマル酸、サリチル酸、クエン酸）及び過酸化水素に含まれる微量不純物（塩化物、臭化物、硝酸、リン酸水素イオン）の定量⁷⁸⁾、硫酸ナトリウム試薬に含まれる微量な不純物（亜硝酸、硝酸イオン）の定量⁷⁹⁾に2D-ICが使用されている。また、超高速液体クロマトグラフィー（ultra-high performance liquid chromatography, UHPLC）とICを組み合わせたUHPLC-ICが葉酸錠剤中の葉酸と無機陰イオン（フッ化物、塩化物、亜硝酸、硫酸、硝酸イオン）の同時定量⁸⁰⁾に用いられている。

ICに燃焼前処理を組み合わせた燃焼イオンクロマトグラフィー（combustion ion chromatography, CIC）が報告されている。CICは、試料を高温で燃焼することで目的成分を気化して吸収液に捕集し、生成したイオンをICで分離・検出する手法である。炭化ケイ素粉末中のフッ素の定量⁸¹⁾、河川水中の吸着性有機ハロゲン（吸着性有機塩素、臭素、ヨウ素）の定量⁸²⁾、環境水（地表水、生活排水、工場排水、地下水）中の吸着性有機フッ素の定量⁸³⁾にCICが適用されている。

4.2 ポストカラム処理

目的成分を分離カラムで分離後のポストカラム部における一般的な処理として、ポストカラム誘導体化法が挙げられる。この手法では、分離カラムからの溶出液に目的成分と反応する誘導体化試薬を加えて、生成した化合物を検出する。本法による海水中のケイ酸イオンの定量⁸⁴⁾では、目的成分をイオン排除ICで分離したのち、モリブデンイエロー法を適用して発色させ、吸光光度検出を行っている。海水中の無機態窒素（亜硝酸、硝酸、アンモニウムイオン）の同時定量⁸⁵⁾では、亜硝酸イオンと硝酸イオンをIC-紫外吸光光度検出で分離・定量したのち、ポストカラム部でアンモニウムイオンをガス拡散法により回収して*o*-フタル酸アルデヒド蛍光検出法で定量している。電気透析を利用した溶存イオン抽出デバイスにより、ポストカラム部で陰イオン（フッ化物、塩化物、硫酸、臭化物、硝酸イオン）をインライン濃縮する手法⁸⁶⁾も報告されている。

5 おわりに

本稿では、過去3年間に発表された論文をもとにIC技術の進歩と利用状況について紹介した。近年のIC技術の発展とともに測定対象成分は拡大しており、ICは今後ますます広範囲な分野でイオン性成分の分離・検出に利用されることが期待される。

文 献

- 1) 及川紀久雄, 小泉範子, 野々村誠: *ぶんせき*, **1994**, 111.
- 2) 井上嘉則, 熊谷浩樹, 鈴木義仁: *ぶんせき*, **1997**, 302.
- 3) 野々村誠: *ぶんせき*, **1998**, 856.
- 4) 古月文志: *ぶんせき*, **2004**, 153.
- 5) 野々村誠, 竹内豊英: *ぶんせき*, **2007**, 192.
- 6) 竹内豊英: *ぶんせき*, **2014**, 169.
- 7) 森 勝伸, 増野友重, 金井朝子, 小崎大輔: *分析化学*, **68**, 241 (2019).
- 8) 鈴木清一, 山本喬久, 小林泰之, 井上嘉則: *分析化学*, **68**, 163 (2019).
- 9) 伊藤一明, 竹田一彦, 廣川 健: *分析化学*, **68**, 227 (2019).
- 10) 大平慎一, 戸田 敬: *分析化学*, **68**, 153 (2019).
- 11) P. K. Dasgupta, F. Maleki: *Talanta*, **204**, 89 (2019).
- 12) Y. Lu, L. Zhou, B. Yang, S. Huang, F. Zhang: *Anal. Chem.*, **90**, 12840 (2018).
- 13) Y. Lu, S. Lin, F. Zhang, Y. Sun, B. Yang: *J. Chromatogr. A*, **1622**, 461095 (2020).
- 14) B. Chouhan, C. P. Shelor, W. Huang, Y. Chen, P. K. Dasgupta: *Anal. Chem.*, **92**, 5561 (2020).
- 15) S. Huang, M. Gao, F. Zhang, Y. Lu, B. Yang: *J. Chromatogr. A*, **1596**, 54 (2019).
- 16) P. Sricharoen, N. Limchoowong, C. P. Shelor, P. K. Dasgupta: *Anal. Chem.*, **91**, 3636 (2019).
- 17) 黒木祥文, 山本喬久: *分析化学*, **68**, 259 (2019).
- 18) K. Zhang, C. Lou, Y. Zhu, M. Zhi, X. Zeng, D. Shou: *Talanta*, **194**, 485 (2019).
- 19) K. Zhang, C. Lou, Y. Zhu, M. Zhi, X. Zeng: *Talanta*, **184**, 491 (2018).
- 20) Z. Yang, M. Gao, Z. Li, F. Zhang, S. Zhang, B. Yang: *J. Chromatogr. A*, **1596**, 79 (2019).
- 21) S.-L. Lin, M.-R. Fuh: *Talanta*, **194**, 73 (2019).
- 22) Y. Yang, Y. Zhang, C. Wei, J. Li, W. Sun: *Talanta*, **187**, 252 (2018).
- 23) W. N. Chan, J. P. Warren, S. P. Krieger, B. L. Vestal, R. G. Harrison: *J. Chromatogr. A*, **1631**, 461588 (2020).
- 24) S. Wouters, J. L. Dores-Sousa, Y. Liu, C. A. Pohl, S. Eeltink: *Anal. Chem.*, **91**, 13824 (2019).
- 25) S. Yoshii, M. Mori, D. Kozaki, T. Hosokawa, H. Itabashi: *Anal. Sci.*, **35**, 1117 (2019).
- 26) 吉井咲夢, 小崎大輔, 細川堯志, 板橋英之, 森 勝伸: *分析化学*, **68**, 201 (2019).
- 27) 山根謙吾, 保元貴圭, 堀岡祐太, 竹田一彦, 伊藤一明: *分析化学*, **67**, 51 (2018).
- 28) D. Lukács, K. Horváth, P. Hajós: *J. Chromatogr. A*, **1621**, 461066 (2020).
- 29) L. Zhao, Y. Lu, F. Zhang, B. Yang: *J. Chromatogr. A*, **1603**, 422 (2019).
- 30) K. Srinivasan, B. K. Omphroy, R. Lin, C. A. Pohl: *Talanta*, **188**, 152 (2018).
- 31) 辻 一真, 丸尾雅啓, 小畑 元: *分析化学*, **68**, 275 (2019).
- 32) S. Dovidauskas, I. A. Okada, F. R. dos Santos: *J. Chromatogr. A*, **1632**, 461603 (2020).
- 33) M. Iammarino, N. Haouet, A. Di Taranto, G. Berardi, F. Benedetti, S. Di Bella, A. E. Chiaravalle: *Food Chem.*, **325**, 126937 (2020).
- 34) V. G. Mishra, M. K. Das, D. J. Shah, S. Jeyakumar, B. S. Tomar, K. L. Ramakumar: *J. Chromatogr. A*, **1532**, 144 (2018).
- 35) 南澤宏瑚, 吉川賢治, 松村年郎, 櫻川昭雄: *分析化学*, **68**, 657 (2019).
- 36) H. Feng, X. Ye, Y. Liu, Z. Wang, T. Gao, A. Cheng, X. Wang, J. Chen: *J. Chromatogr. A*, **1624**, 461234 (2020).
- 37) L. Čapka, P. Mikuška, K. Krůmal: *Atmos. Environ.*, **222**, 117178 (2020).
- 38) E. S. Rodriguez, C. Plummer, M. Nation, A. Moy, M. Curran, P. R. Haddad, B. Paull: *Anal. Chim. Acta*, **1063**, 167 (2019).
- 39) M. Aggrawal, J. S. Rohrer: *J. Chromatogr. A*, **1615**, 460765 (2020).
- 40) T. A. Corry, B. A. Jackson, A. D. Ray: *J. Chromatogr. A*, **1604**, 460470 (2019).
- 41) 李 卉, 鈴木隆弘, 三浦聡子: *分析化学*, **68**, 207 (2019).
- 42) A. Hirayama, S. Tabata, R. Kudo, M. Hasebe, K. Suzuki, M. Tomita, T. Soga: *J. Chromatogr. A*, **1619**, 460914 (2020).
- 43) R. B. Geerdink, M. Hassing, N. Ayarza, C. Bruggink, M. Wielheesen, J. Claassen, O. J. Epema: *Anal. Chim. Acta*, **1133**, 66 (2020).
- 44) X. Zhang, C. Saini, C. Pohl, Y. Liu: *J. Chromatogr. A*, **1621**, 461052 (2020).
- 45) C. Recknagel, P. Thelin, M. Abraham, D. Schulz-Bull, P. J. R. Sjoberg: *Talanta*, **188**, 192 (2018).
- 46) A. Bauer, J. Luetjohann, S. Rohn, J. Kuballa, E. Jantzen: *J. Agric. Food Chem.*, **66**, 346 (2018).
- 47) L. M. Melton, M. J. Taylor, E. E. Flynn: *Food Chem.*, **298**, 125028 (2019).
- 48) C. Wu, L. Wang, H. Li, S. Yu: *Food Chem.*, **292**, 260 (2019).
- 49) E. Sanz Rodriguez, M. M. G. Perron, M. Strzelec, B. C. Proemse, A. R. Bowie, B. Paull: *J. Chromatogr. A*, **1610**, 460557 (2020).
- 50) M. H. Stafsnes, L. M. Rost, P. Bruheim: *J. Chromatogr. B*, **1083**, 278 (2018).
- 51) M. D. Gallidabino, R. C. Irlam, M. C. Salt, M. O'Donnell, M. S. Beardah, L. P. Barron: *Anal. Chim. Acta*, **1072**, 1 (2019).
- 52) B. Huang, J. Rohrer: *J. Chromatogr. A*, **1630**, 461538 (2020).
- 53) C. A. McIntyre, J. J. L. Arkell, C. J. Arthur, P. G. Lawrence, C. P. Butts, C. E. M. Lloyd, P. J. Johnes, R. P. Evershed: *Talanta*, **210**, 120188 (2020).
- 54) C. Patacq, N. Chaudet, F. Letisse: *Anal. Chem.*, **90**, 10715 (2018).
- 55) S. H. Son, W. B. Lee, D. Kim, Y. Lee, S. H. Nam: *Food Chem.*, **270**, 353 (2019).
- 56) B.-H. Chen, S.-J. Jiang, A. C. Sahayam: *Food Chem.*, **324**, 126698 (2020).
- 57) N. N. Wanna, K. Van Hoecke, A. Dobney, M. Vasile, T.

- Cardinaels, F. Vanhaecke : *J. Chromatogr. A*, **1617**, 460839 (2020).
- 58) A. Beutner, S. K. Piendl, S. Wert, F.-M. Matysik : *Anal. Bioanal. Chem.*, **410**, 6321 (2018).
- 59) 鈴木清一, 山本喬久, 小林泰之, 井上嘉則 : 分析化学, **68**, 179 (2019).
- 60) A. K. Meher, N. Labhsetwar, A. Bansiwala : *Food Chem.*, **240**, 131 (2018).
- 61) E. Jaszczak, K. Koziol, B. Kiełbratowska, Ż. Polkowska : *J. Chromatogr. B*, **1110-1111**, 36 (2019).
- 62) 小崎大輔, 谷畑壮磨, 森 勝伸, 田中一彦, 山本 敦 : 分析化学, **68**, 253 (2019).
- 63) A. N. Koreshkova, V. Gupta, A. Peristy, P. N. Nesterenko, T. Rodemann, B. Paull : *Talanta*, **205**, 120081 (2019).
- 64) V. Gupta, P. Mahbub, P. N. Nesterenko, B. Paull : *Anal. Chim. Acta*, **1005**, 81 (2018).
- 65) E. Murray, P. Roche, K. Harrington, M. McCaul, B. Moore, A. Morrin, D. Diamond, B. Paull : *J. Chromatogr. A*, **1603**, 8 (2019).
- 66) E. Murray, P. Roche, M. Briet, B. Moore, A. Morrin, D. Diamond, B. Paull : *Talanta*, **216**, 120955 (2020).
- 67) 今井隆太郎, 吉川賢治, 遠山岳史, 長嶋 潜 : 分析化学, **68**, 195 (2019).
- 68) 山本喬久, 鈴木清一, 小澤満美, 小林泰之, 井上嘉則 : 分析化学, **67**, 461 (2018).
- 69) 鈴木清一, 山本喬久, 小林泰之, 井上嘉則, 吉川賢治, 遠山岳史 : 分析化学, **69**, 305 (2020).
- 70) 鈴木清一, 山本喬久, 小林泰之, 井上嘉則, 吉川賢治, 遠山岳史 : 分析化学, **69**, 291 (2020).
- 71) A. Shishov, E. Stolarova, L. Moskvina, A. Bulatov : *Anal. Chim. Acta*, **1087**, 62 (2019).
- 72) N. Muhammad, Q. Subhani, F. Wang, C. Lou, J. Liu, Y. Zhu : *Food Chem.*, **241**, 308 (2018).
- 73) A. F. Campos, R. J. Cassella : *Food Chem.*, **269**, 252 (2018).
- 74) P. Dai, D. Hou, S. Guo, L. Zhu, M. Lei, H. Tang : *Anal. Chim. Acta*, **1082**, 49 (2019).
- 75) I. Markeviciute, W. Frenzel : *Talanta*, **186**, 576 (2018).
- 76) 福永真優, 鈴木清一, 山本喬久, 吉川賢治, 遠山岳史 : 分析化学, **68**, 865 (2019).
- 77) Y. Fa, Y. Yu, F. Li, F. Du, X. Liang, H. Liu : *J. Chromatogr. A*, **1554**, 123 (2018).
- 78) M. Ye, P. N. Nesterenko, Z. Yan, P. Xie, M. Chen : *J. Chromatogr. A*, **1588**, 169 (2019).
- 79) F. Akter, S. Saito, Y. Tasaki-Handa, M. Shibukawa : *Anal. Sci.*, **34**, 369 (2018).
- 80) F. Wang, M. Cao, N. Wang, N. Muhammad, S. Wu, Y. Zhu : *Food Chem.*, **239**, 62 (2018).
- 81) 南 秀明, 山梨真生, 塩見昌平, 丸岡智樹 : 分析化学, **68**, 265 (2019).
- 82) A. Kinani, H. Salhi, S. Bouchonnet, S. Kinani : *J. Chromatogr. A*, **1539**, 41 (2018).
- 83) E. von Abercron, S. Falk, T. Stahl, S. Georgii, G. Hamscher, H. Brunn, F. Schmitz : *Sci. Total Environ.*, **673**, 384 (2019).
- 84) C. Cheong, Y. Yamauchi, T. Miura : *Anal. Sci.*, **34**, 477 (2018).
- 85) 小田純士郎, 林 宜明, 朝田悠太, 巽 健太, 樋口慶郎, 伊藤一明 : 分析化学, **68**, 189 (2019).
- 86) S.-I. Ohira, T. Sakaki, R. Miyachi, A. Otsubo, A. Umemoto, Y. Kuwahara, K. Toda : *Talanta*, **216**, 120989 (2020).



竹内政樹 (Masaki TAKEUCHI)

徳島大学大学院医歯薬学研究部 (〒770-8505 徳島県徳島市庄町1丁目78-1)。神奈川大学大学院工学研究科応用化学専攻博士後期課程修了。博士 (工学)。《現在の研究テーマ》流れ系を用いる分離・濃縮法の開発。《主な著書》“わかりやすい機器分析学 [第4版]”, (分担執筆), (廣川書店)。《趣味》剣道, 野球。
E-mail : masaki.takeuchi@tokushima-u.ac.jp