

イオンクロマトグラフィー

—基礎と応用—

野々村 誠, 竹内 豊 英

1 はじめに

イオンクロマトグラフィー (IC) は, Small 博士らによって考案されてから 30 年以上が経過し, 現在では各種イオン種の高感度迅速分離計測を可能とする方法として広く認知されている。本進歩総説では, 2001 年以降に論文誌等に発表された IC の基礎技術の進展ならびに応用研究を紹介し, IC に関する研究の進展状況や利用状況を報告する。

2 成書, 総説, 国際会議, 特集について

IC に関する国際会議 (IICS) は毎年秋に開催され, 特集号が *Journal of Chromatography A* から毎年発刊されている。最近では 920 巻 (2001 年), 956 巻 (2002 年), 997 巻 (2003 年), 1039 巻 (2004 年), 1085 巻 (2005 年), 1118 巻 (2006 年) が特集号となっている。2004 年 12 月に, IC 研究懇談会主催の第 1 回日中韓合同 IC シンポジウムが日本で開催され, 2006 年 11 月に第 2 回 IC シンポジウムが中国の杭州で開催された。これらの特集号の論文や予稿集から IC に関する基礎研究や応用研究の最前線を見ることができる。この間に IC に関する成書¹⁾²⁾が出版されているほか, 総説^{3)~10)}や総合論文^{11)~13)}も多く発表されている。本誌に IC に関する進歩総説^{14)~17)}, 工業用水誌に IC の装置や応用についての特集号 (551 号, 554~556 号, 558~559 号), IC の公定分析法への応用¹⁸⁾が掲載されているので参考にされたい。

3 IC の基礎技術

3.1 検出

IC では, 電気伝導度 (Cond) 検出器や紫外吸光度 (UV) 検出器が多く用いられているが, 定性能力に優れる質量分析計 (MS) を検出器とする報告が多くなってきている。サプレッサーを用いると溶離液の塩が水または酸に変換されるため, 各種の MS に直接溶出液を

導入することができる。IC と各種 MS とを直結することにより高感度で選択的な検出が可能となる。エレクトロスプレーイオン化質量分析計 (ESIMS)¹⁹⁾²⁰⁾, 大気圧化学イオン化質量分析計 (APCIMS)²¹⁾²²⁾あるいは誘導結合プラズマ質量分析計 (ICPMS)²³⁾²⁴⁾を検出器とした報告が多く見られる。例えば, ESIMS との結合によりリン元素を含む陰イオン¹⁹⁾, 飲料水中の臭素酸イオン²⁰⁾や過塩素酸イオンなどのオキシハロゲン化物イオンやハロ酢酸イオンの微量定量に活用されている。APCIMS との結合により, クロロフェノールの同定, また ICPMS との結合によりセレン²³⁾やヒ素²⁴⁾などのスペシエーションが可能となる。

誘導結合プラズマ発光分析装置を検出器として, リン酸, 亜リン酸, 次亜リン酸およびメチルホスホン酸の高感度高選択的検出が報告されている²⁵⁾。

IC と水素化物発生法と組み合わせることにより, アンチモンの無機体および有機体の原子蛍光検出によるスペシエーションが報告されており, 0.04~0.09 µg/L の検出限界が達成されている²⁶⁾。同様に, セレンについても水素化物発生/原子蛍光検出によるスペシエーションが試みられ, 1~5 µg/L の検出限界が達成されている²⁷⁾。

微細加工により使い捨てタイプの金電極が作製され, アルカリ条件下でアミノ酸のパルスドアンペロメトリー定量が報告されている²⁸⁾。この場合, 従来のように電極の研磨やコンディショニングが不要となり, 検出感度, 直線性および再現性が従来の電極と同程度もしくは良い結果が得られるとしている。また, 使い捨てタイプの銀電極が作製され, 硫化物イオンについて 1 ppb, シアン化物イオンについて 2 ppb, 臭化物イオン, チオ硫酸イオンおよびヨウ化物イオンについて 5 ppb, チオシアン酸イオンについて 10 ppb の検出限界が達成されている²⁹⁾。

このほか, 非接触型電気伝導度検出³⁰⁾, 原子力発電の冷却水中のヨウ素を含む化学種の放射能検出³¹⁾, 硫酸キニーネの蛍光のクエンチングを利用したハロゲン化物イオンの間接蛍光検出³²⁾などが特殊な検出法として

挙げられる。

3・2 モノリス型固定相

粒子充填型カラムに代わる一体型のモノリス型固定相が注目されている。モノリス型固定相は、ポリマー系とシリカ系に大別でき、粒子充填型カラムと比較して透過性が高い点がある特徴である⁹⁾¹⁰⁾。特にシリカ系モノリス型固定相は、低いカラム圧力損失で高い性能を達成できることから注目されている。これまで逆相モノリス型カラム (ODS) のみが市販されていることから、ODS に各種界面活性剤を塗布した固定相が調製され、用いられている。

セチルトリメチルアンモニウムイオン³³⁾、ジドデシルジメチルアンモニウムイオン^{34)~36)}、セチルピリジニウムイオン³⁷⁾などを疎水性相互作用により塗布したカラムにより陰イオンの分離定量がなされている。これらの固定相は物理的に修飾されているだけであるため、化学結合型固定相と比較して長期安定性に欠ける。これに対し、ポリオキシエチレンを ODS に塗布した上にセチルトリメチルアンモニウムイオンを塗布すると固定相の安定性が改善されることが報告されている³⁸⁾。

同様に、ドデシルスルホン酸のような陰イオン性界面活性剤を ODS に塗布すると、陽イオンの分離定量に用いることができる^{39)~42)}。カルボキシベタインなどのツピッターイオンを塗布した固定相の利用も検討されている⁴³⁾。

このほか、シリカゲルにセチルトリメチルアンモニウムイオンを修飾したキャピラリー IC による海水中臭化物イオンの迅速分離⁴⁴⁾が報告されている。また、リシンを化学結合したカラムが調製され、無機陰イオンの迅速定量に応用されている⁴⁵⁾。

フューズドシリカキャピラリー内にメタクリル酸ブチル、エチレンジメタクリレートおよび2-アクリルアミド-2-メチル-1-プロパンスルホン酸を共重合したモノリス型陰イオン性ポリマーに第四級アンモニウム基を有するラテックス粒子を塗布することにより陰イオン交換キャピラリーカラムが作製され、糖⁴⁶⁾や陰イオンの迅速分離⁴⁷⁾に適用されている。また、グリシジルメタクリレートとエチレンジメタクリレートのモノリス型共重合体がフューズドシリカキャピラリー内に合成され、陽イオンの分離に用いられている⁴⁸⁾。

3・3 新しい手法

(1) 酸度・アルカリ度の測定

IC による水素イオン濃度の定量が試みられている。カルボキシル基を有する陽イオン交換体を固定相に、リン酸水素二ナトリウム水溶液を移動相として用いることにより、 pK_a が 4.3 未満の酸の酸度を測定できることが報告されている。間接伝導度検出により水素イオンの検

出限界 78 μM としている⁴⁹⁾。また、モノリス型 ODS カラムにドデシル硫酸リチウムを塗布し、0.10 mM ドデシル硫酸リチウムおよび 60 mM 塩化リチウムを含む酸性水溶液 (pH 3.95) を移動相として用いることによっても水素イオンと 1 価陽イオンの分離定量が可能で、水素イオンについて 6.2 μM の検出限界が報告されている⁴¹⁾。2 mM エチレンジアミンおよび 0.1 mM ドデシル硫酸リチウム水溶液 (pH 6.0) を移動相として用いれば、水素イオン、マグネシウムイオンおよびカルシウムイオンが 4 分以内に分離定量が可能で、水素イオンについて 1 μM の検出限界が報告されている⁴²⁾。

一方、ODS カラムにドデシル硫酸リチウムを塗布し、0.1 mM 硫酸および 50 mM 塩化リチウムを含む弱酸性水溶液を移動相として用いることによってアルカリ度が測定できることが報告されている⁵⁰⁾。

(2) ベイカントクロマトグラフィー

ベイカントクロマトグラフィーは分析対象成分を含んだ移動相を用いることにより、試料溶液と移動相溶液中の対象成分の濃度差に基づいて発現する負ピークのシグナル (面積) から目的成分の定量を行う方法である。これまでイオン排除クロマトグラフィーにおいて広く検討されてきており、有機酸⁵¹⁾、芳香族カルボン酸⁵²⁾、ハロ酢酸⁵³⁾、脂肪族アミン⁵⁴⁾、無機酸⁵⁵⁾などの分離定量のための条件検討がなされている。

(3) 陰陽両イオンの同時分離

陰陽両イオンの同時分離定量は、分析の簡易化、迅速化につながるものとして様々なアプローチがなされている⁵⁶⁾。陽イオン交換カラムを用いたイオン排除と陽イオン交換分離を同時に利用する方法が有力な方法として注目されているが、粒子径 3 μm の高性能弱酸性陽イオン交換カラムを用いることによって、汎用陰イオン 3 種および陽イオン 5 種を 5 分以内に達成している⁵⁷⁾。

スイッチングバルブを介して陰陽イオン交換カラムを直列に連結し、一方の符号の試料イオンをトラップしている間に他方の符号の試料イオン交換分離を達成し、引き続きトラップされた試料イオンの分離を行う方法が報告されている⁵⁸⁾⁵⁹⁾。この方法はピークパーキング法と呼ばれ、同一の移動相を用いて陰イオン交換分離および陽イオン交換分離を達成する。例えば 5-スルホサリチル酸を用いることで汎用陰イオン 3 種および陽イオン 5 種の分離検出を達成している⁵⁹⁾。

(4) ポストカラム反応

ポストカラム反応は、IC においても選択的検出や高感度検出を可能とする。無機溶存態窒素 (硝酸イオン、亜硝酸イオン、アンモニウムイオン) の同時定量では、硝酸イオンと亜硝酸イオンを陰イオン交換分離し UV 検出器で定量するとともに、陰イオン交換カラムに保持のないアンモニウムイオンはポストカラムでネスラー試薬と反応後 425 nm で検出する方法⁶⁰⁾や、オルトフタル

表 1 水質分析

試料	化学種	システム	溶離液	分離カラム	検出器	文献
飲料水	TOCl, TOBr, TOI	熱分解, サプレッサー IC	8 mM Na ₂ CO ₃ +1 mM NaHCO ₃ I : 35 mM NaOH	IonPac AS14 IonPac AS16	Cond	68
飲料水 ボトル水	IO ₃ ⁻ , BrO ₃ ⁻	ポストカラム IC	10 mM Na ₂ CO ₃	TSKgel IC-Anion SW	UV (235 nm, 265 nm)	69
飲料水 ボトル水	BrO ₃ ⁻ 消毒副生成物	サブレッサー IC Dionex ICS2000	10~45 mM KOH (グラジエント)	IonPac AG19/AS19	Cond	70
飲料水	陰イオン 消毒副生成物	サブレッサー IC	3.5~9 mM Na ₂ CO ₃	Novosep A-2 IonPac AS9-HC	Cond	71
飲料水	ClO ₄ ⁻	サブレッサー IC	75~80 mM NaOH	IonPac AG11HC/AS16	Cond	72
飲料水 試薬水	ClO ₄ ⁻	ノンサブレッサー IC Waters2690LC	200 mM メチルアミン	IonPac AS21	MS (四重極) Waters	73
飲料水	ClO ₄ ⁻	逆相 MPIC Dionex DX600	5 mM KOH+0.5 M 18-クラウン-6	IonPac NG1/NS1 濃縮カラム: IonPac AG4A	Cond	74
飲料水 排水	ClO ₄ ⁻	IC-ESIMS メトローム MIC-2	30 mM NaOH+30% メタノール	MetroSep ASUPP-5	ESIMS Agilent 1100 LC	75
水道水	残留塩素	サブレッサー IC Dionex DX-500	3~40 mM KOH (グラジエント) 10 mM KOH(アイソクラティック)	IonPac AG17/AS17	Cond	77
飲料水 環境水	リン酸, 亜リン酸, 次亜リン酸, MPA	IC-ICPAES Dionex DX300	3 mM Na ₂ CO ₃	IonPac AG10/AS9	ICPAES (177.4 nm)	25
水道水 河川水	NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻	イオン対 IC 島津 LC-9A	2 mM TBA+20 mM リン酸塩+ 10% CH ₃ CN	Develosil C30-UG-5 野村化学	UV (210 nm)	78
飲料水	アクリルアミド	イオン排除 IC	アクリロニトリル+ギ酸	IonPac CE-AS1	MS	79
環境水 河川, 沼	陰イオン (IO ₃ ⁻ , BrO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , I ⁻ , SCN ⁻)	マイクロカラム IC	40 mM NaCl	フューズドシリカ (TSKgel IC-Anion SW 充填)	UV (210 nm)	80
飲料水	ハロゲンイオン (Cl ⁻ , Br ⁻ , I ⁻)	マイクロカラム IC	20 mM Na ₂ SO ₄ +0.2 mM 硫酸 キニーネ+1 mM H ₂ SO ₄	フューズドシリカ (TSKgel IC-Anion SW 充填)	FL (Ex:332 nm, Em:448 nm)	32
環境水	陽イオン/陰イオン	ノンサブレッサー IC	5 mM 酒石酸	TSKgel SuperIC-Cation TSKgel IC-Anion SW	Cond	58
飲料水 河川水	陽イオン/陰イオン	ノンサブレッサー IC	1.75 mM 5-スルホサリチル酸	TSKgel SuperIC-Cation TSKgel IC-Anion DW _{XL}	Cond	59
環境水 飲料水	陽イオン/陰イオン	イオン交換/吸 光度検出 IC	1 mM 硫酸+0.1 mM L-ヒスチジン	TSKgel SuperIC-Cation TSKgel IC-Anion SW	Cond UV (210 nm)	81
環境水 飲料水, 排水	無機陽イオン, アン モニウムイオン	サブレッサー IC	電解生成メタンスルホン酸	IonPac CG16/CS16	Cond	82
環境水	炭酸水素イオン	サブレッサー IC	電解生成 KOH	IonPac AG17/AS17	Cond	83
水	陰イオン, 有機酸 ポリリン酸	サブレッサー IC Dionex DX500	電解生成 KOH (グラジエント)	IonPac AS11, AS11HC, AS15	Cond	84
河川, 湖	全無機炭素 (TIC)	サブレッサー IC	電解生成 KOH	IonPac AS17	Cond	85
河川水 地下水	アスコルビン酸, 陰 イオン (NO ₂ ⁻ , SO ₃ ²⁻ , I ⁻ , S ₂ O ₃ ²⁻)	ポストカラム LC 検出 IC	4 μM BTA+1.8 mM Na ₂ CO ₃ +1.7 mM NaHCO ₃	IonPac AG4A/AS4A	FL (Ex:256 nm, Em:354 nm)	86
地下水	硫黄含有ヒ素化合物	IC-ICPMS Dionex DX300	0.0175 mM NaOH+0.1 mM NaOH (グラジエント)	IonPac AG16/AS16	ICPMS Perkin Elmer	87
天然水 土壌	メチル水銀, 水銀	IC-CVAFS	1.5% チオウレア+8% 塩酸+10% 酢酸	IonPac CG4A	CVAFS	62
水	Cu ²⁺ , Co ²⁺	IC分離, FIA-CL	50 mM シュウ酸+90 mM LiOH	IonPac CG5A/CS5A	CL	88
水	全酸度	ノンサブレッサー IC Shimadzu LC10A	20 mM K ₂ HPO ₄	TSKgel CM-5PW	Cond	49
温泉水	酸度, 2 価陽イオン	ノンサブレッサー IC Shimadzu LC10A	水	HDPC 被覆 ODS カラム	Cond	89

表1 水質分析 (つづき)

試料	化学種	システム	溶離液	分離カラム	検出器	文献
水, アルカリ溶液	OH ⁻	ノンサプレッサー IC 東ソー HPLC システム	10 mM Na ₂ SO ₄ (pH 8.2)	POE/CTA 被覆 ODS カラム	Cond	38
水	無機陰イオン IO ₃ ⁻ , BrO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , Br ⁻ , NO ₃ ⁻ , I ⁻	静電 IC, Shimadzu LC10A	10 mM NaCl + 5 mM CaCl ₂ + 3.33 mM CeCl ₃	HDPC 被覆 ODS カラム	UV (210 nm)	90
環境水	脂肪酸カルボン酸, 有機酸	ノンサプレッサー IEC	水	TSKgel OApak-A	Cond	91
水	脂肪酸カルボン酸	バイカント IEC 東ソー 8020	シュウ酸, ギ酸, 酢酸, プロピオン酸, 酪酸, 吉草酸の混合溶液	TSKgel OApak-A	Cond	51
水	脂肪酸カルボン酸	イオン排除 IC Shimadzu LC10A	1 mM 安息香酸 - 10 mM β-シクロデキストリン	TSKgel OApak-A	Cond	92
環境水	陽イオン/陰イオン	イオン排除/陽イオン IC 東ソー IC2000	15 mM 酒石酸 + 2.5 mM 18-クラウン-6	TSKgel SuperIC-A/C TSKgel OApak-A	Cond	57
ボイラー水	ヒドラジン	イオン排除 IC 東ソー 8020	水	TSKgel DEAE-5PW + TSKgel SAX + TSKgel SCX	Cond	64
水 光触媒評価	イオン性窒素化合物	イオン排除/陽イオン IC 東ソー 8020	6 mM 酒石酸 + 3 mM 18-クラウン-6	TSKgel SuperIC-A/C	Cond	93
稲葉原料水	陰イオン/陽イオン	イオン排除/陽イオン IC 東ソー 2001	7 mM 酒石酸 + 3.5 mM 18-クラウン-6	TSKgel SuperIC-A/C	Cond	94
稲葉原料水	リン酸, ケイ酸	紫外吸収イオン排除 IC 東ソー 8020	溶離液: 水 or 1 mM H ₂ SO ₄ 反応液: 10 mM Na ₂ MoO ₄ + 25 mM H ₂ SO ₄	TSKgel SuperIC-A/C	UV (370 nm)	95
発電所用水	微量陰イオン, 有機酸	サプレッサー IC	電解生成 KOH NaOH + NaClO ₄ + メタノール	IonPac AG17/AS17 QS-A2 SC カラム	Cond	96
嫌気性消化処理水	脂肪酸カルボン酸	イオン排除 IC Shimadzu LC6A	1~2 mM 安息香酸	TSKgel OApak-A TSKgel SuperIC-A/C	Cond	97
排水	金属シアノ錯体	紫外吸収 IC	NaOH + NaCN + メタノール NaOH + NaClO ₄ + メタノール	QS-A1 SC カラム QS-A2 SC カラム	UV (215 nm)	98
海水	ヨウ化物イオン	紫外吸収 IC	0.05 M NaClO ₄ + 0.3 M NaCl + 5 mM Na ₃ PO ₄ (pH 6.0)	CTA 被覆 TSKgel ODS-80Ts	UV (226 nm)	99
海水	NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻	紫外吸収 IC	0.5 M NaCl	CTA 被覆 TSKgel ODS-80Ts	UV (225 nm)	33
海水	ヨウ化物イオン	静電 IC	0.2 mM NaClO ₄ + 0.3 mM 両イオン界面活性剤ミセル	両イオン界面活性剤被覆 ODS	UV (210 nm)	100
海水	NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻	静電 IC Shimadzu LC10AT	20 mM HCl	両イオン界面活性剤被覆 ODS	UV (210 nm) Cond	101
海水	アルカリ度	ノンサプレッサー IC Shimadzu LC10AT	50 mM LiCl + 0.1 mM H ₂ SO ₄ 50 mM 硫酸	Li-DS 被覆 ODS	Cond	50
海水, 河川水	ケイ酸イオン	イオン排除 IC	水	TSKgel SuperIC-A/C + TSKgel SCX + TSKgel SAX	Cond	102
海水	全窒素	K ₂ S ₂ O ₈ 分解 紫外吸収 IC	0.2 M NaCl	TSKgel DEAE-5PW	UV (210 nm)	103
温泉水	ポリチオン酸, チオ硫酸イオン	ポストカラム-紫外吸収 IC	3 mM TPAOH + 6 mM 酢酸 + 20% CH ₃ CN	TSKgel ODS-Ts	UV (350 nm)	104
温泉水	硫化物, 亜硫酸, 硫酸, チオ硫酸イオン	ポストカラム-紫外吸収 IC	15 mM TPAOH + 6% CH ₃ CN	Lichro CART ODS 関東化学製	UV (S ²⁻ , SO ₃ ²⁻ , S ₂ O ₃ ²⁻) Cond (SO ₄ ²⁻)	105
チオ硫酸浸漬液	ポリチオン酸, チオ硫酸イオン	イオン干渉 IC	3 mM TBAOH + 2.5 mM Na ₂ CO ₃ + CH ₃ CN (15~26%)	IonPac NS1-5 μ Dionex	Cond UV	106

Cond: 電気伝導度検出器, UV: 紫外吸光度検出器, ICPAES: 誘導結合プラズマ発光分析装置, ICPMS: 誘導結合プラズマ質量分析計, FL: 蛍光検出器, CL: 化学発光検出器, ESIMS: エレクトロスプレーイオン化質量分析計, CTA: セチルトリメチルアンモニウム, TPAOH: テトラプロピルアンモニウムヒドロキシド, TBAOH: テトラブチルアンモニウムヒドロキシド

アルデヒドとの反応後蛍光検出（励起波長 410 nm, 蛍光波長 470 nm）する方法⁶¹⁾などが報告されている。

ポストカラム反応で水素化物を発生させることにより、アンチモン²⁶⁾やセレン²⁷⁾の原子蛍光検出が報告されている。また水銀の冷原子発生後、原子蛍光検出器⁶²⁾や ICPMS⁶³⁾と結合し、選択的高感度検出を達成している。

サブレッサーの原理を利用することで、高感度化を図ることができる。例えば、試料としてのヒドラジンは、二段のポストカラム反応で硫酸に変換することにより 26.8 倍の電気伝導度強度となり、高感度化が達成される⁶⁴⁾。

パラジウムは PdCl_4^{2-} として陰イオン交換分離され、ポストカラムでヨウ化カリウムとの反応により PdI_4^{2-} に変換され、407 nm で検出できることが報告されている⁶⁵⁾。

(5) 前処理・濃縮

プレカラムを利用した前処理や濃縮は、目的成分の選択的濃縮やマトリックス成分の除去に有用である。IC において、クリプタンドを結合した担体による過塩素酸イオンの選択濃縮⁶⁶⁾や二酸化チタンを用いた糖リン酸やヌクレオチドの選択的濃縮⁶⁷⁾などが報告されている。

4 応用研究

4.1 水質分析

IC による水質分析への応用例を表 1 に示す。表では、試料、化学種、システム、使用している溶離液、分離カラム、検出器およびその出典に分類している。

IC は、飲料水中の低濃度の陽イオン、陰イオンの分析に用いられているが、最近では特に全有機ハロゲン化合物 (TOX)⁶⁸⁾、消毒副生成物 (BrO_3^- , IO_3^-)^{69)~71)}、乳幼児の甲状腺ホルモンの生成に関与する過塩素酸イオン (ClO_4^-) を分析した報告が多い^{72)~76)}。飲料水中の ClO_4^- の分析方法は、EPA Methods 314 および 331 で規定されている⁷²⁾⁷³⁾。また、IC による飲料水中の残留塩素⁷⁷⁾、リン化合物²⁵⁾、 NO_2^- 、 NO_3^- ⁷⁸⁾、アクリルアミド⁷⁹⁾などの報告がある。

環境水（河川水、湖沼水、地下水）中の陰イオン³²⁾⁸⁰⁾、陽イオンと陰イオンの同時定量^{57)~59)81)}、陽イオン⁸²⁾、炭酸水素イオン⁸³⁾、陰イオン、有機酸⁸⁴⁾、全無機炭素⁸⁵⁾、アスコルビン酸、陰イオン⁸⁶⁾、硫黄含有ヒ素化合物⁸⁷⁾、水銀化合物⁶²⁾などがある。水試料での分析例としては、 Cu^{2+} 、 Co^{2+} ⁸⁸⁾、ノンサブレッサー IC による酸度、アルカリ度⁴⁹⁾⁸⁹⁾および OH^- の分析³⁸⁾、静電 IC による陰イオン⁹⁰⁾、脂肪酸カルボン酸⁵¹⁾⁹¹⁾⁹²⁾、ボイラー水中のヒドラジン⁶⁴⁾、光触媒の性能評価用の窒素化合物⁹³⁾、釉薬原料水中の陰/陽イオン、リン酸、ケイ酸⁹⁴⁾⁹⁵⁾、発電所用水中の微量陽イオン、有機酸⁹⁶⁾、嫌気性消化処理液中の脂肪酸カルボン酸⁹⁷⁾、排水中の

金属シアノ錯イオン⁹⁸⁾などの報告がある。

マトリックス濃度が高い海水中の低濃度成分の分析も報告されている。海水中の I^- ⁹⁹⁾¹⁰⁰⁾、 NO_2^- 、 NO_3^- ³³⁾¹⁰¹⁾、アルカリ度⁵⁰⁾、ケイ酸¹⁰²⁾、全窒素¹⁰³⁾などがある。また、温泉水¹⁰⁴⁾¹⁰⁵⁾やチオ硫酸浸漬液¹⁰⁶⁾中のポリチオン酸、硫化物などの硫黄含有化合物の分析が報告されている。

4.2 大気、酸性雨、排ガス分析

IC による大気、酸性雨、排ガス分析への応用例を表 2 に示す。

500°C で炭化した多孔性炭素をガラス管に詰め、大気中のアンモニアを吸着した後、3 mM 硝酸で抽出し、3 mM 硝酸を溶離液としてノンサブレッサー IC で定量している¹⁰⁷⁾。大気中の芳香族ジイソシアネートを 3.5% 塩酸と 4.4% 酢酸吸収液に捕集し、逡過後、5~27% アセトニトリルと 35 mM 硫酸の溶離液、陽イオン交換カラムを用いてグラジエント溶離を行い、電流検出器で測定している¹⁰⁸⁾。白金 (Pt) およびパラジウム (Pd) は、塩化物と安定な錯体を作り、陰イオン交換体に保持されることを利用して、都市道路ダストや大気粒子 (PM10) をフィルターで捕集した後、逡紙を電子レンジ中で王水に溶かし、硝酸とシュウ酸の溶離液で Pt および Pd の錯陰イオンを分離し、ICPMS で測定している¹⁰⁹⁾。水を溶離液、両イオン界面活性剤 (TDPC) を被覆した ODS カラム、Cond 検出器を用いた静電 IC で、エアロゾルや水中の無機酸を定量している¹¹⁰⁾。また、40 mM 塩化リチウム溶離液、リチウムドデシル硫酸塩を被覆した ODS カラム、Cond 検出器を用いたノンサブレッサー IC で酸性雨中の H^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ を測定している¹¹¹⁾。スルホサリチル酸とクラウンエーテルの溶離液、弱酸性陽イオン交換カラム、Cond 検出器を用いたイオン排除/陽イオン交換型 IC で酸性雨中の陰イオンと陽イオンをポータブルな IC 装置で同時定量する方法を開発している¹¹²⁾。テトラメチルアンモニウムヒドロキシド溶離液、弱塩基性陰イオン交換カラム、Cond 検出器で雨水および河川水中の NH_4^+ を定量し¹¹³⁾、イオン排除 IC で雨水および飲料水中の CO_2 を分析している¹¹⁴⁾。HCHO を 3% H_2O_2 と 50 mM KOH で HCOOH に酸化した後、電解生成した KOH 溶離液、陰イオン交換カラム、Cond 検出器で HCOO^- を分析している。この方法で室内空気、排ガス中の HCHO および有機酸（ギ酸、酢酸）の分析にも応用している¹¹⁾。KOH を溶離液としたサブレッサー IC では、バックグラウンドが水になり、 CO_3^{2-} のピークが出現することを利用して、陰イオン交換カラム、Cond 検出器を用いて、排ガス中の CO_2 と酸性成分（陰イオン）を同時分析している¹¹⁵⁾。IC で水中の残留塩素を定量する方法⁷⁷⁾を排ガス中の塩素の分析に応用している¹¹⁶⁾。

表2 大気・酸性雨・排ガス分析

試料	化学種	システム	溶離液	分離カラム	検出器	文献
大気	アンモニア	ノンサプレッサー IC メトローム IC792	3 mM 硝酸	Shodex Y-421	Cond	107
大気排水	芳香族ジイソシアネート 芳香族アミン	陽イオン交換 IC	5~27% CH ₃ CN + 35 mM 硫酸	IonPac CG12/CS12	Amp	108
都市道路ダスト 大気粒子	Pt, Pd	IC-ICPMS	塩酸, 硝酸, 過塩素酸を含むシュウ酸溶液 カラムの種類により異なる	IonPac AG4A-SC, AG10, AG11, AG15, AG16	ICPMS	109
エアロゾル, 水	無機酸 (HCl, HNO ₃ , HClO ₄ , H ₂ SO ₄ , H ₃ PO ₄)	静電 IC Shimadzu LC-10AT	水	TDPC 被覆 ODS	Cond	110
酸性雨	H ⁺ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺	ノンサプレッサー IC Shimadzu LC-10AT	40 mM LiCl (pH 4.18)	Li-DS 被覆 ODS	Cond	111
酸性雨	陰イオン/陽イオン	ポータブルイオン排除/陽イオン IC	1.5 mM スルホサリチル酸 + 6 mM 18-クラウン-6 (pH 2.6)	TSKgel OApak-A	Cond	112
雨水, 河川水	NH ₄ ⁺	イオン排除 IC	0.05 mM TMAOH (pH 9.1)	TSKgel DEAE-5PW	Cond	113
雨水, 飲料水	溶解性 CO ₂	イオン排除 IC	水	TSKgel SuperIC-A/C TSKgel OApak-A	Cond	114
室内空気, 排ガス, 建材	HCHO, 有機酸	サプレッサー IC Dionex DX500	1~35 mM KOH (グラジエント)	IonPac AG17/AS17	Cond	11
排ガス	CO ₂ , 酸性成分	サプレッサー IC Dionex DX500	10~25 mM KOH (グラジエント)	IonPac AG17/AS17	Cond	115
排ガス	塩素	サプレッサー IC Dionex DX500	3~40 mM KOH (グラジエント) 10 mM KOH (アイソクラティック)	IonPac AG17/AS17 IonPac AG17/AS17	Cond Cond	116

Cond: 電気伝導度検出器, ICPMS: 誘導結合プラズマ質量分析計, Amp: 電流検出器, TMAOH: テトラメチルアンモニウムヒドロキシド, TDPC: *n*-テトラデシルホスホコリン (両イオン界面活性剤)

4.3 原材料, 生体試料, 食品

ICによる原材料, 生体試料, 食品への応用例を表3に示す。

絶縁油中のPCBを金属ナトリウムで分解した後, 水でCl⁻を抽出し, 過剰のNa⁺を陽イオン交換樹脂で吸着除去してアルカリのピークを減少させ, Cl⁻を通常のサプレッサー ICのCond検出器で分析している¹¹⁷⁾。JIS K 2541で定められている燃焼管式空気法で燃料油中の硫黄(S)分をSO₂に酸化し, 0.3% H₂O₂水に吸収した後, サプレッサー ICでSO₄²⁻を分析し, 低濃度の硫黄分を定量している¹¹⁸⁾。半導体用の試薬(リン酸, H₂O₂, 硝酸, フッ化水素酸)中の低濃度の陰イオン^{119)~122)}およびハードディスクドライブ表面の付着物の陰イオン¹²³⁾をKOH溶離液, 陰イオン交換カラム, Cond検出器を用いたサプレッサー ICで定量している。また, 銅めっき液中の光沢剤をイオン対 ICで¹²⁴⁾, 有機物中のヨウ素を紫外吸収イオン対 ICで分析している¹²⁵⁾。

生体試料として, 尿, 血清中の陽イオンをノンサプレッサー ICで分析している¹²⁶⁾。

牛乳中のClO₄⁻およびI⁻をサプレッサー ICで⁷⁶⁾, ワイン, 酒中の脂肪族カルボン酸をイオン排除 ICで分

析し¹²⁷⁾, 食酢中の有機酸, 無機酸をノンサプレッサー IC¹²⁸⁾で定量している。

野菜中の硝酸塩をサプレッサー ICで¹²⁹⁾, 植物抽出液中の糖リン酸をPAD, CondおよびMS検出器を用いて分析している⁶⁷⁾¹³⁰⁾。

5 おわりに

ICは, サプレッサー技術, 分離カラムならびに検出技術の進歩により低濃度のイオン性化学種の高感度分離定量を可能とする最も信頼性の高い分析技術に成長した。例えば, 飲料水の安全を保証するためのICの役割は今後ますます重要となるであろう^{6)~8)}。

ICのさらなる高性能化を進めるために, 分離カラムの開発に関する研究が引き続き推進されるであろう。特に, 新規モノリス型固定相の開発⁹⁾¹⁰⁾や充填剤の微粒子化による分離の迅速化に関する研究が進展するものと期待される。

ICにおいても分離カラムのダウンサイジングが期待されている⁵⁾。このためにキャピラリーカラムにマッチングしたサプレッサーの開発および電気伝導度検出器フローセルの開発が急務である。非接触型電気伝導度検出器は後者の候補の一つとなるであろう。

表3 原材料・生体試料・食品分析

試料	化学種	システム	溶離液	分離カラム	検出器	文献
絶縁油	PCB	Na分解, サプレッサー IC Dionex DX500	2.7 mM Na ₂ CO ₃ +0.3 mM NaHCO ₃	IonPac AG12A/AS12A	Cond	117
燃料油	硫黄	燃焼, サプレッサー IC Dionex DX500	2.7 mM Na ₂ CO ₃ +0.3 mM NaHCO ₃ 10~35 mM KOH	IonPac AG12A/AS12A IonPac AG17/AS17	Cond	118
半導体用リン酸	低濃度陰イオン (Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻)	サプレッサー IC	KOH (グラジエント)	IonPac AG11HC/AS11	Cond	119
半導体用過酸化水素	低濃度陰イオン (F ⁻ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , Br ⁻ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻)	白金分解, サプレッサー IC Dionex DX500	10~40 mM KOH (グラジエント)	IonPac AG15/AS15	Cond	120
半導体用硝酸	低濃度陰イオン (Cl ⁻)	サプレッサー IC Dionex DX500	15~30 mM KOH (グラジエント)	IonPac Cryptand A-1 IonPac Cryptand prototype	Cond	121
半導体用フッ化水素	低濃度陰イオン (Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻)	イオン排除/サプレッサー IC Dionex DX500	10~40 mM KOH (グラジエント)	IonPac IEC-AS1 IonPac AS18	Cond	122
ハードディスクドライブ表面付着物	陰イオン, 有機酸	サプレッサー IC Dionex DX600	0.3~40 mM KOH (グラジエント)	IonPac AG17/AS17 濃縮カラム: IonPac TAC LP-1	Cond	123
銅めっき液	光沢剤 (SPS)	イオン対 IC	メタノール-硫酸-水	C18 カラム		124
有機化合物	ヨウ素	紫外吸収イオン対 IC	2 mM TBA+硫酸+20 mM リン酸緩衝液+15% CH ₃ CN	Wacopac Nav C30-5 和光純薬製	UV (230 nm)	125
生体液 (尿, 血清)	無機陽イオン (Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺)	ノンサプレッサー IC Shimadzu LC-10A	1 mM HNO ₃ +5 mM 両イオン界面活性剤	TSKgel IC-Cation	Cond	126
牛乳	ClO ₄ ⁻ , I ⁻	サプレッサー IC	ClO ₄ ⁻ : 100 mM NaOH I ⁻ : 135 mM NaOH	IonPac AG16/AS16 濃縮カラム: IonPac TAC LP-1	Cond	76
ワイン, 酒	カルボン酸	イオン排除 IC Shimadzu LC10AD	0.85 mM 安息香酸+10% メタノール (pH 3.89)	TSKgel Oapac-A	Cond APCIMS	127
食酢	有機酸, 無機酸	ノンサプレッサー IC 東亜 DKK 5000	2 mM 安息香酸-1.2 mM トリスアミノメタン	CTA 被覆カーボンカラム Carbon IC BI-01	Cond	128
野菜	硝酸塩	サプレッサー IC メトローム MIC	2 mM Na ₂ CO ₃ +0.3 mM NaHCO ₃	IonPac AG12A/AS12A	Cond	129
植物抽出液 <i>Arabidopsis thaliana</i>	糖リン酸	HPAEC-PAD Dionex DX500	75 mM NaOH 75 mM NaOH+0.5 M CH ₃ COONa	CarboPac PA1 (Guard)/PA1 TiO ₂ 充填カラム	PAD	67
植物抽出液 <i>Arabidopsis thaliana</i>	糖リン酸	IC-ESI-MS-MS Dionex ICS2000	5~50 mM KOH (グラジエント)	IonPac AG11HC/AS11HC	Cond MS	130

Cond: 電気伝導度検出器, UV: 紫外吸光度検出器, MS: 質量分析計, PAD: パルス電流検出器, APCIMS: 大気圧化学イオン化質量分析計, TBA: テトラブチルアンモニウム, CTA: セチルトリメチルアンモニウム

ICは、いろいろな分野の実試料の分析に応用されているが、今後も多くの公定分析法に採用されていくことが期待される。これにより、分析精度の確保とICの普及に貢献していくものと考えられる。

ICの近未来の進展を願いつつ、本稿が、ICの研究者、利用者ならびに読者の皆様にわずかでもお役に立てば幸いである。

文 献

- 岡田哲男, 山本 敦, 井上嘉則: “クロマトグラフィーによるイオン性化学種の分離分析”, (2002), (エヌ・ティイー・エス).
- J. Weiss: “Handbook of Ion Chromatography, 3rd Edition”, (2004), (John Wiley & Sons).
- P. Haddad: *Anal. Chem.*, **73**, 266A (2001).
- Y. Liu, K. Srinivasan, C. Pohl, N. Avdalovic: *J. Biochem. Biophys. Meth.*, **60**, 205 (2004).
- P. Kuban, P. K. Dasgupta: *J. Sep. Sci.*, **27**, 1441 (2004).
- D. P. Hautman, D. J. Munch, C. Frebis, H. P. Wagner, B. V. Pepich: *J. Chromatogr. A*, **920**, 221 (2001).
- P. E. Jackson: *Trends Anal. Chem.*, **20**, 320 (2001).
- P. E. Jackson, K. Chassaniol: *J. Environ. Monit.*, **4**, 10 (2002).
- B. Paull, P. N. Nesterenko: *Trends Anal. Chem.*, **24**, 295 (2005).
- P. R. Haddad: *Anal. Bioanal. Chem.*, **379**, 341 (2004).

- 11) 野々村 誠：分析化学, **54**, 191 (2005).
- 12) 三浦恭之：分析化学, **54**, 651 (2005).
- 13) 田中一彦：分析化学, **55**, 275 (2006).
- 14) 及川紀久雄, 今泉範子, 野々村 誠：ぶんせき, **1994**, 111.
- 15) 井上嘉則, 熊谷浩樹, 鈴木義仁：ぶんせき, **1997**, 302.
- 16) 野々村 誠：ぶんせき, **1998**, 856.
- 17) 古月文志：ぶんせき, **2004**, 153.
- 18) 野々村 誠：環境と測定技術, **28**(8), 15 (2001).
- 19) M. M. Ivey, K. L. Foster: *J. Chromatogr. A*, **1098**, 95 (2005)
- 20) S. Cavalli, S. Polesello, S. Valsecchi: *J. Chromatogr. A*, **1085**, 42 (2005).
- 21) M. Jin, Y. Yang: *Anal. Chim. Acta*, **566**, 193 (2006).
- 22) M. Jin, Y. Zhu: *J. Chromatogr. A*, **1118**, 111 (2006).
- 23) D. Wallschlaeger, R. Roehl: *J. Anal. Atom. Spectrom.*, **16**, 922 (2001).
- 24) N. P. Vela, D. T. Heitkemper: *J. AOAC Int.*, **87**, 244 (2004).
- 25) S. C. Morton, D. Glindemann, X. Wang, X. Niu, M. Edwards: *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 4369 (2005).
- 26) R. Miravet, J. F. Lopez-Sanchez, R. Rubio: *J. Chromatogr. A*, **1052**, 121 (2004).
- 27) L. Liang, S. Mo, P. Zhang, Y. Cai, S. Mou, G. Jiang, M. Wen: *J. Chromatogr. A*, **1118**, 139 (2006).
- 28) J. Cheng, P. Jandik, N. Avdalovic: *Anal. Chem.*, **75**, 572 (2003).
- 29) J. Cheng, P. Jandik, N. Avdalovic: *Anal. Chim. Acta*, **536**, 267 (2005).
- 30) P. Kuban, M. A. Mueri, P. C. Hauser: *Analyst*, **129**, 82 (2004).
- 31) D. Schumann, R. Grasser, R. Dressler, H. Bruchertseifer: *Radiochim. Acta*, **93**, 619 (2005).
- 32) T. Takeuchi, J. Sumida: *Anal. Sci.*, **20**, 983 (2004).
- 33) K. Ito, Y. Takayama, N. Makabe, R. Mitsui, T. Hirokawa: *J. Chromatogr. A*, **1083**, 63 (2005).
- 34) D. Connolly, D. Victory, B. Paull: *J. Sep. Sci.*, **27**, 912 (2004).
- 35) P. Hatsis, C. A. Lucy: *Anal. Chem.*, **75**, 995 (2003).
- 36) S. Pelletier, C. A. Lucy: *J. Chromatogr. A*, **1118**, 12 (2006).
- 37) J. Li, Y. Zhu, Y. Guo: *J. Chromatogr. A*, **1118**, 46 (2006).
- 38) Q. Xu, M. Mori, K. Tanaka, M. Ikedo, W. Hu, P. R. Haddad: *J. Chromatogr. A*, **1041**, 95 (2004).
- 39) Q. Xu, M. Mori, K. Tanaka, W. Hu, P. R. Haddad: *J. Chromatogr. A*, **1026**, 191 (2004).
- 40) Q. Xu, K. Tanaka, M. Mori, M. I. H. Helaleh, W. Hu, K. Hasebe, H. Toada: *J. Chromatogr. A*, **997**, 183 (2003).
- 41) Q. Xu, K. Tanaka, M. Mori, M. I. H. Helaleh, H. Toada, W. Hu, K. Hasebe: *Chromatographia*, **57**, 19 (2003).
- 42) Q. Xu, M. Mori, K. Tanaka, M. Ikedo, W. Hu: *J. Chromatogr. A*, **1026**, 191 (2004).
- 43) C. O. Riordain, P. Nesterenko, B. Paull: *J. Chromatogr. A*, **1070**, 71 (2005).
- 44) A. Suzuki, L. W. Lim, T. Hiroi, T. Takeuchi: *Talanta*, **70**, 190 (2006).
- 45) E. Sugrue, P. N. Nesterenko, B. Paull: *J. Chromatogr. A*, **1075**, 167 (2005).
- 46) E. F. Hilder, F. Svec, J. M. J. Frechet: *J. Chromatogr. A*, **1053**, 101 (2004).
- 47) P. Zakaria, J. P. Hutchinson, N. Avdalovic, Y. Liu, P. R. Haddad: *Anal. Chem.*, **77**, 417 (2005).
- 48) Y. Ueki, T. Umemura, J. Li, T. Odake, K. Tsunoda: *Anal. Chem.*, **76**, 7007 (2004).
- 49) W. Hu, K. Hasebe, K. Tanaka: *Anal. Sci.*, **18**, 1383 (2002).
- 50) W. Hu, P. R. Haddad, K. Hasebe, K. Tanaka: *Analyst*, **126**, 555 (2001).
- 51) K. Tanaka, M.-Y. Ding, M. I. H. Helaleh, Hi. Taoda, H. Takahashi, W. Hu, K. Hasebe, P. R. Haddad, J. S. Fritz, C. Sarzanini: *J. Chromatogr. A*, **956**, 209 (2002).
- 52) M. I. H. Helaleh, K. Tanaka, M. Mori, Q. Xu, H. Taoda, M.-Y. Ding, W. Hu, K. Hasebe, P. R. Haddad: *J. Chromatogr. A*, **997**, 139 (2003).
- 53) M. I. H. Helaleh, K. Tanaka, M. Mori, Q. Xu, H. Taoda, M.-Y. Ding, W. Hu, K. Hasebe, P. R. Haddad: *J. Chromatogr. A*, **997**, 133 (2003).
- 54) M. Mori, M. I. H. Helaleh, Q. Xu, W. Hu, M. Ikedo, M.-Y. Ding, H. Taoda, K. Tanaka: *J. Chromatogr. A*, **1039**, 129 (2004).
- 55) M. Mori, H. Itabashi, M. I. H. Helaleh, K. Kaczmarek, B. Glod, T. Kowalska, Q. Xu, M. Ikedo, W. Hu, K. Tanaka: *J. Chromatogr. A*, **1118**, 41 (2006).
- 56) P. N. Nesterenko: *Trends Anal. Chem.*, **20**, 311 (2001).
- 57) M. Mori, K. Tanaka, M. I. H. Helaleh, Q. Xu, M. Ikedo, Y. Ogura, S. Sato, W. Hu, K. Hasebe, P. R. Haddad: *J. Chromatogr. A*, **997**, 219 (2003).
- 58) M. Amin, L. W. Lim, T. Takeuchi: *Anal. Bioanal. Chem.*, **381**, 1426 (2005).
- 59) M. Amin, L. W. Lim, T. Takeuchi: *Anal. Bioanal. Chem.*, **384**, 839 (2006).
- 60) P. Niedzielski, I. Kurzyca, J. Sienkiewicz: *Anal. Chim. Acta*, **577**, 220 (2006).
- 61) Y. Kitamaki, J.-Y. Jin, T. Takeuchi: *J. Chromatogr. A*, **1003**, 197 (2003).
- 62) C. W. Shade, R. J. M. Hudson: *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 4974 (2005).
- 63) Q. Tu, W. Johnson Jr., B. Buckley: *J. Anal. Atom. Spectrom.*, **18**, 696 (2003).
- 64) M. Mori, K. Tanaka, Q. Xu, M. Ikedo, H. Taoda, W. Hu: *J. Chromatogr. A*, **1039**, 135 (2004).
- 65) M. C. Bruzzoniti, C. Mucchino, E. Tarasco, C. Sarzanini: *J. Chromatogr. A*, **1007**, 93 (2003).
- 66) H. P. Wagner, B. V. Pepich, C. Pohl, D. Later, R. Joyce, K. Srinivasan, D. Thomas, A. Woodruff, B. DeBorba, D. J. Munch: *J. Chromatogr. A*, **1118**, 85 (2006).
- 67) Y. Sekiguchi, N. Mitsuhashi, Y. Inoue, H. Yagisawa, T. Mimura: *J. Chromatogr. A*, **1039**, 71 (2004).
- 68) G. Hau, D. A. Reckhow: *Anal. Bioanal. Chem.*, **384**, 495 (2006).
- 69) Y. Kitamaki, T. Takeuchi: *Anal. Sci.*, **20**, 1399 (2004).
- 70) B. M. DeBorta, J. S. Rohrer, C. A. Pohl, C. Saini: *J. Chromatogr. A*, **1085**, 23 (2005).
- 71) R. Bose, R. S-Nordhaus, A. Sonaike, D. S. Sethi: *J. Chromatogr. A*, **1039**, 45 (2004).
- 72) H. P. Wagner, F. X. Suarez, B. V. Pepich, D. P. Hautman, D. J. Munch: *J. Chromatogr. A*, **1039**, 97 (2004).
- 73) S. C. Wendelken, L. E. Vanatta, D. E. Coleman, D. J. Munch: *J. Chromatogr. A*, **1118**, 94 (2006).
- 74) J. D. Lamb, D. Simpson, B. D. Jensen, J. S. Gardner, Q. P. Peterson: *J. Chromatogr. A*, **1118**, 100 (2006).
- 75) J. Mathew, J. Gandhi, J. Hedrick: *J. Chromatogr. A*, **1085**,

- 54 (2005).
- 76) A. B. Kirk, P. K. Martinelango, K. Tian, A. Dutta, E. E. Smith, P. K. Dasgupta : *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 2011 (2005).
- 77) 李 卉, 野々村 誠, 伊藤紀子 : 分析化学, **52**, 819 (2003).
- 78) 平木 登, 磯崎昭徳, 長島 潜 : 分析化学, **51**, 877 (2002).
- 79) S. Cavalli, S. Polesello, G. Sacconi : *J. Chromatogr. A*, **1039**, 155 (2004).
- 80) L. W. Lim, Ji-Ye Jin, T. Takeuchi : *Anal. Sci.*, **19**, 447 (2003).
- 81) J. B. AbdKarim, Ji-Ye Jin, T. Takeuchi : *J. Chromatogr. A*, **995**, 153 (2003).
- 82) D. H. Thomas, M. Rey, P. E. Jackson : *J. Chromatogr. A*, **956**, 181 (2002).
- 83) D. A. Martens, K. L. Loeffelmann : *J. Chromatogr. A*, **1039**, 33 (2004).
- 84) 関口陽子, 鈴木隆弘, 渡辺一夫 : *PDA J. of GMP and Valid. in Japan*, **5**(2), 96 (2005).
- 85) S. Polesello, G. Tartari, P. Giacomotti, R. Mesello, S. Cavalli : *J. Chromatogr. A*, **1118**, 56 (2006).
- 86) Y. Miura, M. Hatakeyama, T. Hosino, P. R. Haddad : *J. Chromatogr. A*, **956**, 77 (2002).
- 87) S. Stauder, B. Raue, F. Sacher : *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 5933 (2005).
- 88) C. Lu, Jin-MingLin, C. W. Huie, M. Yamada : *Anal. Sci.*, **19**, 557 (2003).
- 89) W. Hu, K. Hasebe, A. Iles, K. Tanaka, J. S. Fritz : *J. Chromatogr. A*, **956**, 139 (2002).
- 90) W. Hu, K. Tanaka, K. Hasebe : *Anal. Sci.*, **18**, 1183 (2002).
- 91) H. Fan, M. Ding, K. Tanaka, W. Hu : *Anal. Sci.*, **21**, 121 (2005).
- 92) T. Tanaka, M. Mori, Q. Xu, M. I. H. Helaleh, M. Ikedo, H. Taoda, W. Hu, K. Hasebe, P. R. Haddad, J. S. Fritz : *J. Chromatogr. A*, **997**, 127 (2003).
- 93) M. Mori, H. Taoda, H. Itabashi, M. Ikedo, K. Tanaka : *Acta Chromatographica*, **16**, 28 (2006).
- 94) 池戸みかる, 森 勝紳, Q. Xu, 峠田博史, 佐藤真治, 古月文志, 田中一彦 : 分析化学, **52**, 1173 (2003).
- 95) M. Ikedo, M. Mori, K. Kurachi, W. Hu, K. Tanaka : *Anal. Sci.*, **22**, 117 (2006).
- 96) Z. Lu, Y. Liu, V. Barreto, C. Pohl, N. Avdalovic, R. Joyce, B. Newton : *J. Chromatogr. A*, **956**, 129 (2002).
- 97) K. Ito, Y. Takayama, M. Ikedo, M. Mori, H. Taoda, Q. Xu, W. Hu, H. Sunahara, T. Hayashi, S. Sato, T. Hirokawa, K. Tanaka : *J. Chromatogr. A*, **1039**, 141 (2004).
- 98) S. V. Karmarkar : *J. Chromatogr. A*, **956**, 229 (2002).
- 99) K. Ito, T. Hirokawa : *Anal. Sci.*, **17**, 579 (2001).
- 100) W. Hu, Pei-Jie Yang, K. Hasebe, P. R. Haddad, K. Tanaka : *J. Chromatogr. A*, **956**, 103 (2002).
- 101) W. Hu, K. Hasebe, Ming-Yu Ding, K. Tanaka : *Fresenius J. Anal. Chem.*, **371**, 1109 (2001).
- 102) 森 勝紳, 田中一彦, 峠田博史, 池戸みかる, 古月文志 : 分析化学, **53**, 1481 (2004).
- 103) 橋田 剛, 横山幸男, 佐藤寿邦 : 分析化学, **53**, 1455 (2004).
- 104) Y. Miura, M. Watanabe : *J. Chromatogr. A*, **920**, 163 (2001).
- 105) Y. Miura, Y. Matsushita, P. R. Haddad : *J. Chromatogr. A*, **1085**, 47 (2005).
- 106) J. W. O'Reilly, M. J. Shaw, G. W. Dicoski, A. C. Grosse, Y. Miura, P. R. Haddad : *Analyst*, **127**, 906 (2002).
- 107) T. Asada, K. Oikawa, K. Kawata, T. Iyobe, A. Yamada : *Anal. Sci.*, **20**, 125 (2004).
- 108) Y. Zhu, M. Wang, H. Du, F. Wang, S. Mou, P. R. Haddad : *J. Chromatogr. A*, **956**, 215 (2002).
- 109) M. C. Bruzzoniti, S. Cavalli, A. Mangia, C. Mucchino, C. Sarzanini, E. Tarasco : *J. Chromatogr. A*, **997**, 51 (2003).
- 110) W. Hu, K. Hasebe, K. Tanaka, J. S. Fritz, S. Inoue, M. Ozeki : *Fresenius J. Anal. Chem.*, **370**, 399 (2001).
- 111) W. Hu, K. Hasebe, A. Iles, K. Tanaka : *Analyst*, **126**, 821 (2001).
- 112) K. Tanaka, K. Ohta, P. R. Haddad, J. S. Fritz, A. Miyahara, W. Hu, K. Hasebe, Kwang-Pill Lee, C. Sarzanini : *J. Chromatogr. A*, **920**, 239 (2001).
- 113) M. Mori, K. Tanaka, M. I. H. Helaleh, Q. Xu, M. Ikedo, Y. Ogura, S. Sato, W. Hu, K. Hasebe : *J. Chromatogr. A*, **997**, 191 (2003).
- 114) M. Mori, M. Ikedo, W. Hu, M. I. H. Helaleh, Q. Xu, H. Itabashi, K. Tanaka : *J. Chromatogr. A*, **1092**, 250 (2005).
- 115) M. Nonomura : *Anal. Sci.*, **20**, 219 (2004).
- 116) 野々村 誠, 李 卉 : 環境と測定技術, **32**(9), 20 (2005).
- 117) 栗田恵子, 野々村 誠, 阪口 慶, 佐伯愛子, 竹田良子 : 分析化学, **54**, 855 (2005).
- 118) 野々村 誠, 小山秀美, 伊藤洋昭 : 環境と測定技術, **31**(5) 60 (2004).
- 119) F. S. Stover : *J. Chromatogr. A*, **956**, 121 (2002).
- 120) L. E. Vanatta, D. E. Coleman : *J. Chromatogr. A*, **956**, 23 (2002).
- 121) L. E. Vanatta, A. Woodruff, D. E. Coleman : *J. Chromatogr. A*, **1085**, 33 (2005).
- 122) K. Vermeiren : *J. Chromatogr. A*, **1085**, 66 (2005).
- 123) E. Kaiser, J. Rohrer, F. Campbell : *J. Chromatogr. A*, **997**, 259 (2003).
- 124) R. Palmans, S. Claes, L. E. Vanatta, D. E. Coleman : *J. Chromatogr. A*, **1085**, 147 (2005).
- 125) 平木 登, 磯崎昭徳, 長島 潜 : 分析化学, **54**, 143 (2005).
- 126) W. Hu, H. Matsukami, A. Iles, K. Hasebe, K. Hasebe, S. Cao, K. Tanaka : *Fresenius J. Anal. Chem.*, **370**, 426 (2001).



野々村 誠 (Makoto NONOMURA)

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター研究開発第Ⅱ部資源環境グループ (〒115-8586 東京都北区西が丘3-13-10)。東京理科大学大学院工学研究科修士課程修了。工学博士 (東京都立大学)。《現在の研究テーマ》環境分析, イオンクロマトグラフィーの応用。《主な著書》“分析化学便覧”(分担執筆)(丸善)。《趣味》スポーツ観戦, 旅行。
E-mail : nonomura.makoto@iri-tokyo.jp



竹内豊英 (Toyohide TAKEUCHI)

岐阜大学工学部応用化学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)。名古屋大学大学院工学研究科修士課程前期課程修了。工学博士 (名古屋大学)。《現在の研究テーマ》液体クロマトグラフィーの高性能化。《趣味》スポーツ。
E-mail : takeuchi@apchem.gifu-u.ac.jp

- 127) M. I. H. Helaleh, K. Tanaka, H. Taoda, W. Hu, K. Hasebe, P. R. Haddad: *J. Chromatogr. A*, **956**, 201 (2002).
- 128) 吉川賢治, 岡村美穂, 井口美紀, 櫻川昭雄: 分析化学, **54**, 1215 (2005).

- 129) 小野里雅貴, 川田邦明, 杉崎千恵, 浅田隆志, 及川紀久雄: 分析化学, **54**, 979 (2005).
- 130) Y. Sekiguchi, N. Mitsunashi, T. Kokaji, H. Miyakoda, T. Mimura: *J. Chromatogr. A*, **1085**, 131 (2005).

新刊紹介

食品分析法の妥当性確認ハンドブック

編集委員長: 永田忠博

編集委員: 後藤哲久・丹野憲二・安井明美・湯川剛一郎

店頭に並ぶ色鮮やかな食品群は食欲をそそり、楽しい食卓を連想させ、購買意欲をかきたてる。しかし、それらが安全である保証はいかに担保されているのであろうか。食料を自給できない我が国にとって、食品分析の信頼性確保は国民の生命に直結する重要な課題である。本書は、試験所が異なっても信頼度の点で「妥当性が確認された」分析法を用いれば同じ結果が得られるとの視点に立ち、いかに分析法の「妥当性確認」を行うかについて、知識、要件、手順を詳細にまとめたものである。

全七章の構成で、最初の二章は分析法全体に共通する「妥当性」の要件が述べられており、第1章「分析の信頼性確保」では主にバリデーションについて、第2章「ラボの信頼性確保」では分析の品質管理、試験所認定、サンプリングについてまとめられている。続く第3章以降は、「化学分析法の妥当性確認」、「微生物検査法の妥当性確認」、「遺伝子組換え体(GMO)分析法の妥当性確認」、「表示検証のための妥当性確認」、「残留農薬分析法」と様々な分析法について期待され、いずれも各分野の専門家によって執筆されている。ちなみに、「表示検証」とは「品種判別」や「産地判別」を意味している。

各章とも緻密な文章構成で、総勢33名にも及ぶ執筆者が書いているにもかかわらず、その差異はあまり感じられない。A4判で300ページにもなる大著であるが、表現全体に統一が図られており、これは、第1章冒頭に「本書で用いられる用語の定義」があることからもうかがわれる。また、章末には記載の根拠とした文献が示されており、原典を調べることも可能である。全体に正確、丁寧な記述が見て取れ、編集者の並々ならぬ熱意と責任の重さが感じられる。なお、コラム“BOX”が章間にあって関連する内容でありながら、息抜きの存在となっているのは心憎い気配りである。本書は、試験所の必携書として食品分析に携わる実験者、研究者に大いに役立つと思われる。

(ISBN 978-4-916164-83-4・A4判・300ページ・25,000円+税・2007年刊・サイエンスフォーラム)

早わかり マイクロ化学チップ

北森武彦 著

本書は2006年11月に第1版が刊行されたばかりの最新刊である。前書きにも記載されているが、本書はいわゆるエレクトロニクスなどにおけるマイクロチップのことでなく、マイクロ化学チップの入門書である。しかし、マイクロ化学チップはマイクロチップ同様、小さい、速い、高性能をもって人類の生活全般:健康診断や医療、食品分析、環境計測、物質合成な

どに化学的に貢献するツールである。ただコンパクトだけでなく、まさに化学版マイクロチップである。マイクロ化学チップの研究開発は、ここ十年間ほどで急速な進展を見せている。分析化学での利用の始まりから、この短い期間でどれだけ多岐にわたる利用へと発展しているかを知ることができ、驚嘆に値する。本書の前半では、まずマイクロ化学チップとは何であるか、これまでにどのようなものが作製され、その仕組みがどのようなものであるかなどについて述べている。次いで、マイクロ化学チップがこれまでの我々の生活にどのような変化をもたらすのか、どのような新しい産業を創成することができるのか、特にマイクロ・ナノ領域における新しい学術展開などについて解説し、最後にマイクロ化学チップの現状と未来に向けての展望、戦略について述べている。本書は、理科系の読者のみならず一般の読者でも理解できるように、平易な言葉を使いながらマイクロ化学チップについて解説している。しかし、理科系の読者にとっても、マイクロ化学チップの研究を始める前に一読しておくといよい本である。

(ISBN 4-621-07761-9・四六判・152ページ・1,700円+税・2006年刊・丸善)

確率論的リスク解析

——基礎と方法——

T. ベッドフォード・R. クック 著

金野秀敏 訳

近年、「リスク」という語が巷を賑わしている。スペースシャトルに代表される航空宇宙分野、原子炉の安全性などの原子力分野、化学物質の製造と保管などの化学プロセス分野、橋や船舶などの巨大構造物を構築する建築分野といった自然科学領域はもとより、情報や金融などの社会・経済分野においても、リスクをいかに評価するか、というリスク解析が盛んである。しかし、リスクの定義はいったい何で、定量的にリスクを解析するとはどうすることなのか、なかなか理解しがたいのが現状ではなからうか。本書は、実用・応用指向の定量的リスク解析の書として4部から構成されている。まず第I部ではリスク解析の歴史を概観し、リスク解析のための情報源について紹介している。第II部では不確定性を定量的に扱うための確率論や統計的推定の基礎が簡潔にまとめられている。特に前半では、「不確定性とは何か?」を詳細に吟味・分類して不確定性とその出現要因を記述している。第III部では基本的な事故結果予想系統図や事故発生系統図を簡単な例題より学ぶ。また、様々なリスク解析の手法が紹介されている。第IV部では意思決定の理論、不確定性解析やプロジェクトリスク管理などの新しい応用解析の方法が紹介されている。複雑な事象からその負の可能性を推し量るのは容易ではないが、その数学的基礎を解説した本書は、データから何が言えるかを日々思索している分析化学者にとっても興味深い一冊と言える。

(ISBN 4-431-71074-4・A5判・438ページ・5,800円+税・2006年刊・シュプリンガー・ジャパン)