

# リアクションセル-タンデム四重極型 ICP 質量分析法\*)

朱彦北, 有賀 智子, 中野 かずみ, 鹿籠 康行

\*) 本原稿執筆時において日本産業規格 (JIS) の改正作業が進行中で ICP-MS/MS が採用される見込みとなったが、現時点で ICP-MS/MS に対応する技術用語が制定されていない。近い将来、正式には異なる用語に置き換えられるかもしれないが、本総説の題目にはタンデム四重極型 ICP 質量分析計とした旨ご了承頂きたい。

本進歩総説は、執筆要領に従い、主に 2018 年から 2020 年 10 月までの約三年間にわたる進歩について記述した。

## 1 はじめに

誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) は、10000 K にも達する高温のイオン化源であるアルゴンプラズマと、分光分析に比べて高感度特性を持つ質量分析法とのメリットを活かして、高感度多元素迅速分析法として普及している。

ICP-MS 分析における検出感度と精度は、プラズマを構成するアルゴンや測定試料中の溶媒である水、酸、そして試料中のマトリックス成分など共存元素に由来する多原子イオンが与えるスペクトル干渉の影響を大きく受ける。スペクトル干渉の影響を抑えるためには目的イオンと干渉イオンのスペクトルを分離して検出する必要がある。質量分析計におけるスペクトルの分離は、磁場・電場二重収束型質量分析計とコリジョン・リアクションセルを装備した質量分析計が有効である。

二重集束型 ICP-MS は、高分解能型 ICP-MS とも呼ばれ、質量分析計の入射スリットと出射スリットの調整により高い質量分解能 ( $R=m/\Delta m=300\sim 10000$  程度) が得られるので、目的イオンと干渉イオンのわずかな質量/電荷比 ( $m/z$ ) の差に適した高い質量分解能に設定することで目的イオンのスペクトル干渉を受けない正確な分析が実現される。しかし、分解能の増加はイオンの透過率 (イオンソースから検出器までの到達率) の低下を伴うので、分解能は高くなるほど検出感度は低くなる。

コリジョン・リアクションセルを装備した ICP-MS

は、セル内におけるイオンとガスの衝突や反応特性を利用して干渉イオンの低減を行う。特にリアクションセル型 ICP-MS では、質量分析計の前に配置したリアクションセルに反応ガス (セルガス) を導入し、測定対象イオンあるいは干渉イオンとセルガスとの反応性の差を利用し、目的イオンと干渉イオンの  $m/z$  を異なる  $m/z$  に変える、あるいは干渉イオンを中性化させることで目的イオンのみの検出を可能にして、スペクトル干渉を受けない正確な検出が実現される。しかしながら、従来のリアクションセル型 ICP-MS では、目的元素イオンの  $m/z$  以外の  $m/z$  を有するイオン、すなわちプラズマによって生じたアルゴン起因の強大な多原子イオンや試料中の共存元素に由来した複雑な多原子イオン成分などがリアクションセル内に同時に進入するため、目的元素イオンと干渉イオン以外のイオンもセルガスと反応して副生成物を生じ、新たな干渉イオンが生じるケースが一般的であった。リアクションセル型 ICP-MS においてセル内に導入されるイオン種の選択性を向上させ、目的イオンと干渉イオンの確実な分離を実現させるために、リアクションセルの前後に質量分析計をタンデム配置させたタンデム四重極型 ICP-MS、すなわち ICP-MS/MS が開発され、2012 年に発表された。

## 2 ICP-MS/MS におけるスペクトル干渉分離の原理

ICP-MS/MS におけるスペクトル干渉の分離には「オンマス (on-mass) モード」と「マスシフト (mass-shift) モード」があり、その原理を図 1 に示した。

オンマスモードではセルガスと反応しない目的元素イオンを検出する場合に使用され、スペクトル干渉を与える干渉イオン (多原子イオンまたは同重体イオン) をセルガスとの反応によって除去する。図 1 に示したように目的元素イオンを  ${}^m\text{A}^+$ 、干渉イオンを  ${}^m\text{I}^+$ 、それぞれの  $m/z$  を  $m_1$  とすると、 $m/z$  値がともに  $m_1$  である  ${}^m\text{A}^+$  と  ${}^m\text{I}^+$  は、 $m_1$  に設定された前段の四重極質量分析計 (以降、QMS1) を通過してリアクションセル内に入る。

QMS1 を  $m_1$  に設定したことで、選択された  ${}^m\text{A}^+$  と

Tandem Quadrupole ICP-MS with Reaction Cell.

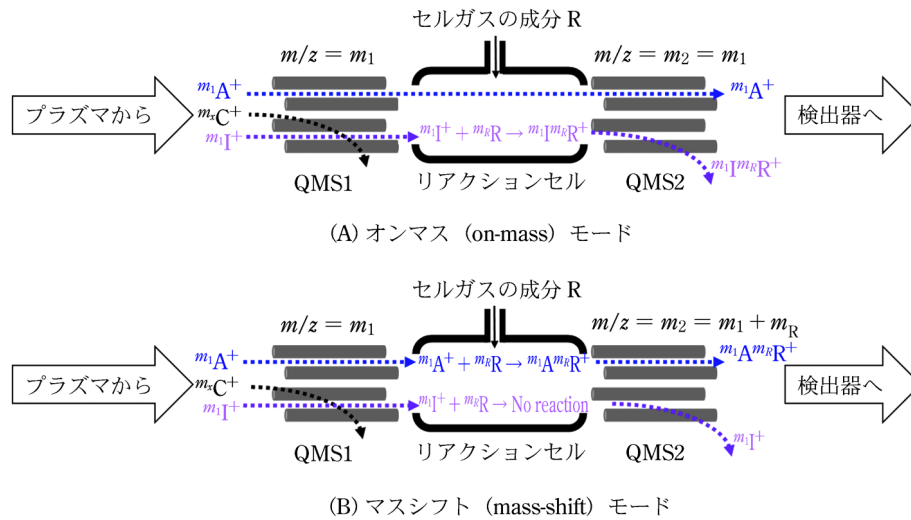


図1 ICP-MS/MSによるスペクトル干渉分離の原理

( $m_1A^+$ : 測定対象イオン,  $m_1I^+$ : 干渉イオン,  $m_xC^+$  ( $m_x \neq m_1$ ): 測定対象イオンと干渉イオン以外のイオン,  $m_1ImR^+$ ,  $m_1AmR^+$ : 反応生成物イオン)

$m_1I^+$  イオン以外のすべてのイオン種 ( $m_xC^+$ ) はセルの前で排除されるので、セル内での不要なプロダクトイオン生成は抑制され、セル内で生成する副生成物イオンによるスペクトル干渉は劇的に低減される。

セルガスと反応しない  $m_1A^+$  は  $m/z$  値を  $m_1 (=m_2)$  に保ったまま後段の四重極質量分析計 (以降、QMS2。オンマスモードでは  $m/z=m_2=m_1$ ) を通過して検出器に到達し、目的イオンの信号として検出される。

一方、セルガスとの反応性が高い  $m_1I^+$  はセルガスの成分  $R$  と反応した後、イオンの形を変えて  $m_1$  とは異なる  $m/z$  値の化学種  $m_1ImR^+$  ( $m/z \neq m_2$ ) に変化するか電荷を消失して  $m_1I^0$  となり QMS2 を通過できず検出器に到達できない。最終的に目的イオンはスペクトル干渉を受けずに測定できることになる。

マスシフトモードはセルガスと目的元素イオンが化学反応する場合に使用され、分析対象イオンをセルガスとの反応によって異なる  $m/z$  のイオンに変化させて干渉イオンと分離する。QMS1 は目的元素イオンの質量数  $m_1$  に、QMS2 はセルガスとの反応の生成物イオンの質量数  $m_2 (\neq m_1)$  に設定する。

$m_1A^+$  がセル内でセルガスの成分  $R$  と反応後、 $m/z$  値が  $m_2 (=m_1+m_R)$  である  $m_1AmR^+$  に変化して  $m/z$  値が  $m_2$  に設定された QMS2 を通過し、検出器に到達して目的イオンの信号として検出される。

一方、 $m_1I^+$  はセルガスと反応後、 $m_2$  とは異なる  $m/z$  値を持つイオンになるか、セルガスと反応せずに  $m_1$  のままで、 $m_2$  に設定された QMS2 を通過できずに検出されないため、スペクトル干渉を与えない。

リアクションセルの前に配置した QMS1 によりセル内に進入できるイオンの  $m/z$  値を制御できるようになったことで、ICP-MS/MS によれば、セル内におけ

るイオンとセルガスとのイオン-分子反応を容易にかつ確実に制御できるようになった。ICP-MS 分析におけるスペクトル干渉分離技術として非常に有効なので、多くの分野で急速に利用が拡大している。

### 3 近年の動向

#### 3.1 文献調査の範囲

本進歩総説では、米国 Clarivate Analytics 社によって運営されている Web of Science データベースに収録された文献を中心に調査した。また、調査対象とする文献は、出版日が 2018 以降で下記(i)と(ii)の両方を満たすことを条件とした。

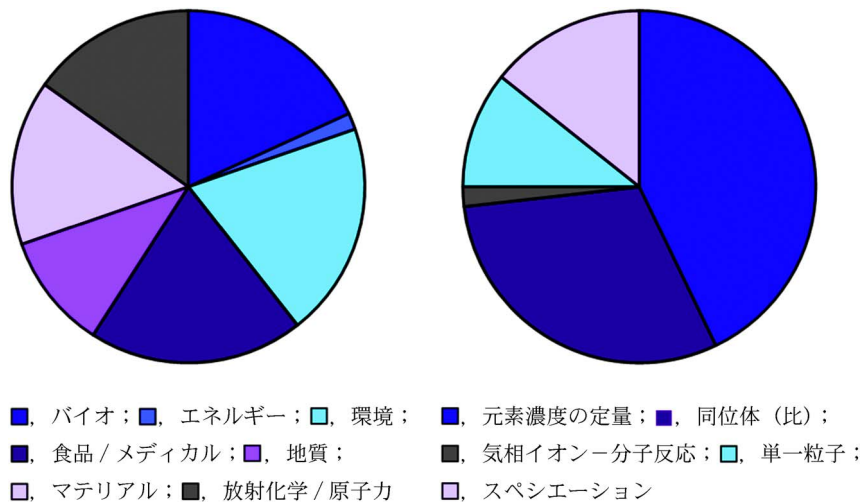
- (i) 「トピックス」に ICP-MS/MS, ICP-QQQ, ICP-QMS/QMS, のいずれかの単語を含む；
- (ii) 「トピックス」に reaction gas, reaction cell, collision gas, collision cell のいずれかの単語を含む。

その結果として、本進歩総説の主な対象として参考文献 1~58 を選択した。これらについて概説する。

#### 3.2 応用分野と研究対象

上記の選択した参考文献から得た応用分野と研究の対象毎の文献の分布を図 2 (A と B) に示した。

バイオ<sup>1)~12)</sup>、エネルギー<sup>13)</sup>、環境<sup>9)14)~25)</sup>、食品/メディカル<sup>10)~12)22)~24)26)~32)</sup>、地質<sup>25)33)~38)</sup>、マテリアル<sup>39)~48)</sup>、放射化学/原子力関連<sup>4)19)~21)49)~54)</sup> など幅広い分野をカバーし、図 2(A) に示したようにエネルギー分野以外の六分野はおおよそ均等に分布している。それらの研究対象は図 2(B) に示すように元素濃度の定量分析<sup>1)2)9)14)~18)22)26)~34)39)~44)49)</sup> にはじまり、気相イオン-分子反応の研究<sup>55)</sup>、同位体 (比) 分析<sup>3)4)19)~21)23)~25)35)~38)50)~54)</sup>、単一粒子分



(A) 応用分野の分布

(B) 研究対象の分布

図2 ICP-MS/MSに関する参考文献の応用分野と研究対象の分布

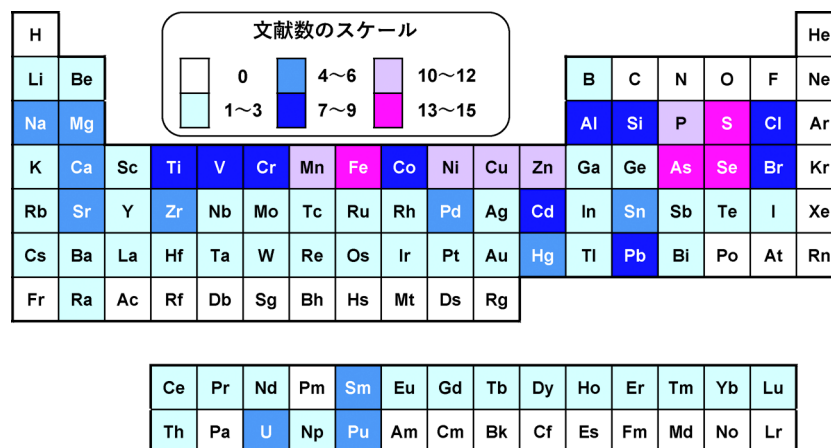


図3 ICP-MS/MSによる取り上げた元素ごとの文献数

析<sup>5)6)45)~48)</sup>, スペシエーション(化学形態別分析)<sup>7)8)10)~13)57)58)</sup>に分類できる。元素濃度と同位体(比)分析への応用は各三割程度で、スペシエーション分析と単一粒子分析は各一割強を占めていることが分かる。

また、従来の定量分析や同位体(比)分析など分析化学とは目的を異にし、ICP-MS/MSのリアクションセルを反応場として活用して気体中の触媒反応を調べる研究も報告されている<sup>55)</sup>。

膨大な数の文献を丁寧にまとめられた総説がいくつか報告されている。ICP-MSのリアクションセル/コリジョンセル技術に関する総説<sup>56)</sup>, ガスクロマトグラフィー(GC-)ICP-MSに関する総説<sup>57)</sup>, 高速液体クロマトグラフィー(HPLC-)ICP-MSに基づいた生体試料中の非金属元素の定量プロファイリング分析に関する総説<sup>58)</sup>においてもICP-MS/MSが紹介されている。本進歩総説の対象とした期間は短いのでぜひこれを一読されるようお勧めする。

### 3.3 評価対象となった目的元素

参考文献中の目的元素を図3の周期表中にまとめた。図3に示したように、P, S, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Seはいずれも10報以上の文献で報告されている。いずれもバイオをはじめ主要な分野で重要視されている元素であり、従来型のICP-MSでは本質的に測定困難だったP, Sや複雑なスペクトル干渉を受けやすく正確な定量が困難だったAs, Seなど、従来分析が困難だった元素の分析がICP-MS/MSの登場により検出感度の改善、同位体分析やスペシエーションなど広く可能性が開けた証であると考えられる。

### 3.4 使用されたセルガスの種類

ICP-MS/MSにおける最大の技術的特長は、セルガスとの反応特性の違いを利用して干渉スペクトルの分離・除去を可能にして高感度ではかれる点であり、目的元素と干渉イオンの組合せに対していかなるセルガスも適用するかは誰もが注目する点である。

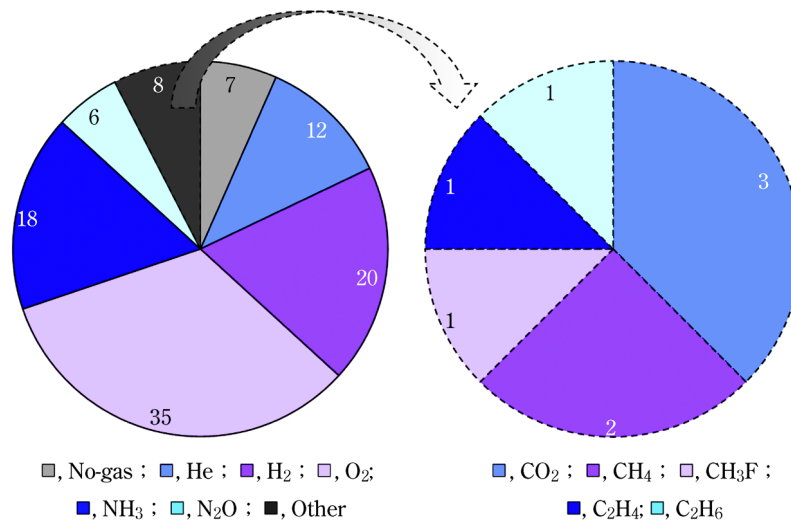


図4 ICP-MS/MSによる測定で使用されたセルガスごとの文献数

装置に標準設定されている He, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>などのガスのほか、最近の文献には N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>F, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>などをセルガスとして利用した研究報告も現れてきた。各種セルガスを用いた報告の数を図4に示した。

図4に示したように、No-gasや不活性ガスであるHeをコリジョンガスとして使用した測定報告も含まれているものの、H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>などの反応性ガスをセルガスとして利用した研究が八割ほどを占めている。

H<sub>2</sub>は特にアルゴン由来の多原子イオンの除去に有効であることから、既に従来型のリアクションセル技術でも多用されていたが、ICP-MS/MSによるH<sub>2</sub>をセルガスとして用いたマスシフトモードは、セル内で水素化物イオンが比較的生成しやすいSi, P, S, Cl, Brの測定に應用された<sup>59)</sup>。

特に、この三年間の報文ではO<sub>2</sub>をセルガスとして用いた研究報告が最も多かった。その主な理由は、図3に示すように測定の報告例が多いP, S, As, Seの分析における干渉イオンの除去にはO<sub>2</sub>との反応を利用したマスシフトモードが有効であったことが挙げられる。O<sub>2</sub>とNH<sub>3</sub>は多くの元素と反応して、入射イオンM<sup>+</sup>と異なる質量数を持つMO<sub>x</sub><sup>+</sup>やM(N<sub>x</sub>H<sub>y</sub>)<sup>+</sup>型の生成物イオンが得られるため、マスシフトモードでの測定に使用されることが多い。

O<sub>2</sub>とNH<sub>3</sub>について、参考文献59のデータに基づいて算出したセル内反応生成物イオンの元素ごとの生成率の最大値を図5に示した。生成率の値は図5(A)に示したように、P, S, Cl, Sc, Ti, V, As, Y, Nb, Ta, Th, Uおよびランタノイドの多くは高いMO<sub>x</sub><sup>+</sup>生成率(90%以上)が得られる。また、Br, Zr, Mo, Sb, Hf, W, Gdは50~89%程度のMO<sub>x</sub><sup>+</sup>生成率が得られる。そのためこれらの元素については、マスシフトモードにおける測定でも比較的高い分析感度が得られる。

M(N<sub>x</sub>H<sub>y</sub>)<sup>+</sup>の生成率については、図5(B)に示したよ

うに70%以上の生成率が得られる元素はなく、50%以上の生成率が得られたのはB, Hf, TaとThの4元素であった。As, Zr, La, W, Uは30~49%, Be, Si, P, Sc, Ti, V, Ge, Y, Nb, Ce, Gd, Tbは10~29%生成率が得られた。生成率の低下によって分析感度も低下するものの、これらの元素をマスシフトモードで分析することも可能である。

以上から反応率の低い元素についてはオンマスモードが、反応率の高い元素についてはマスシフトモードが適用できることが容易に理解できる。

図4に示したように、標準装備のセルガス以外に、N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>は複数の研究に利用されている。O<sub>2</sub>の代わりにN<sub>2</sub>Oを用いることによって、(Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Se)<sup>1)</sup>, Sr<sup>3)</sup>, Br<sup>8)</sup>, Ba<sup>20)</sup>, Ra<sup>25)37)</sup>, の酸化物イオンの生成率を大幅に向上させ、関連するスペクトル分離に大きな効果を示した。CO<sub>2</sub>は特にUとPuの同位体分析におけるスペクトル分離への利用が検討されている<sup>21)24)53)</sup>。U<sup>+</sup>を完全に酸化物イオン(UO<sup>+</sup>およびUO<sub>2</sub><sup>+</sup>)に変化させることによって、Pu<sup>+</sup>のオンマスモード測定においてスペクトルの完全な除去が可能であった。CH<sub>4</sub>を用いたOs<sup>+</sup>→OsCH<sub>2</sub><sup>+</sup>の反応を活用し、Re<sup>+</sup>とのスペクトル分離を効果的に行った例も報告されている<sup>35)</sup>。

### 3・5 ICP-MS/MSの応用例

本節では対象別に応用例を紹介する。

#### 3・5・1 元素の定量分析

ICP-MS/MSを含むICP-MSによる分析の主目的の一つは元素濃度の定量分析である。従来はスペクトル干渉が原因でICP-MSが「苦手元素」としていたP<sup>16)27)33)7)40)~43)</sup>, S<sup>16)27)33)37)40)~43)</sup>, Si<sup>16)27)37)41)43)</sup>, Cl<sup>27)37)43)</sup>, Br<sup>27)33)</sup>, I<sup>27)33)</sup>についても、複数の研究グループがICP-MS/MSを用いて定量分析を行った例が報告

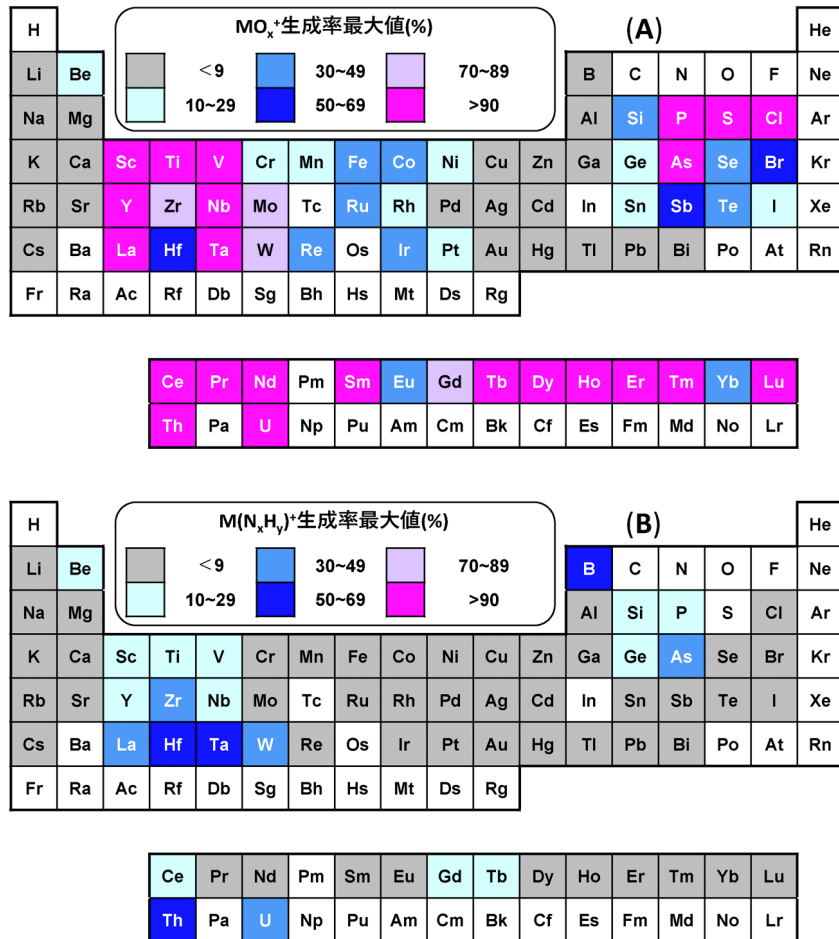


図5 O<sub>2</sub>とNH<sub>3</sub>を使用した際の生成物イオンの生成率最大値（参考文献59のデータに基づいて算出）

(MO<sub>x</sub><sup>+</sup>はMO<sup>+</sup>, MO<sub>2</sub><sup>+</sup>, MO<sub>3</sub><sup>+</sup>を含む；M(N<sub>x</sub>H<sub>y</sub>)<sup>+</sup>はM(NH)<sup>+</sup>, M(NH<sub>2</sub>)<sup>+</sup>, M(NH<sub>3</sub>)<sup>+</sup>, M(N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sup>+</sup>, M(N<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sup>+</sup>, M(N<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)<sup>+</sup>, M(N<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)<sup>+</sup>, M(N<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)<sup>+</sup>, M(N<sub>3</sub>H<sub>9</sub>)<sup>+</sup>を含む；生成率の最大値は、M<sup>+</sup>を含む信号強度の合計を100とした、M<sup>+</sup>以外の対象生成物の最大信号強度の相対値である。)

されている。これらの元素についてはO<sub>2</sub>を利用したマスシフトモードの測定が有効であった。また、No-gas, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>/Heをうまく組み合わせて、Si, Ca, Cd, P, S, As, Se, Ta, Sn, Sb, Ba, W, Na, Mg, Al, K, V, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Bi, Th, Uの29元素の定量分析を行った例も報告された<sup>40)</sup>。本総説で紹介している文献のほとんどは2018以降出版されたものだが、ここに2017出版の文献についても触れておく。小南と鈴木は、各種分析条件を最適化し、ICP-MS/MSを用いて67元素の定量分析を行った<sup>60)</sup>。

### 3.5.2 同位体（比）分析

同位体（比）分析は元素濃度の定量分析と同様に、ICP-MS/MSを用いた研究が急速に展開されている。特に同重体イオンによるスペクトル干渉を受けて測定が難しい地球化学的試料や、福島第一原子力発電所の事故に関連した放射性廃棄物試料などの分析のために注目を浴びている。装置の標準装備であるセルガスHe, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>を活用した報告例も多数あった

が<sup>4)19)23)36)38)50)~54)</sup>、スペクトル分離の効果を向上するために、N<sub>2</sub>O<sup>3)20)25)37)</sup>, CO<sub>2</sub><sup>21)24)53)</sup>, CH<sub>4</sub><sup>35)</sup>の活用についても検討されている。

N<sub>2</sub>Oを用いることによって、<sup>87</sup>Sr<sup>16</sup>O<sup>+</sup>, <sup>226</sup>Ra<sup>16</sup>O<sup>+</sup>, <sup>236</sup>U<sup>16</sup>O<sup>+</sup>の生成率が大幅に向上し、それぞれの干渉イオンである<sup>87</sup>Rb<sup>+</sup>, <sup>218</sup>Pb<sup>16</sup>O<sup>+</sup>, <sup>235</sup>U<sup>1</sup>H<sup>+</sup>との効果的な分離が実現された<sup>3)25)37)</sup>。さらに、<sup>135</sup>Cs<sup>+</sup>と<sup>137</sup>Cs<sup>+</sup>の分析においては、干渉イオンである<sup>135</sup>Ba<sup>+</sup>と<sup>137</sup>Ba<sup>+</sup>の酸化物イオン生成率をほぼ100%までに向上させ、スペクトル干渉を完全に解消し、高精度なCs同位体比分析が実現された<sup>20)</sup>。

CO<sub>2</sub>を活用したマスシフトモードによるUの同位体比分析においては感度向上の効果は見られなかったが<sup>21)</sup>, UH<sup>+</sup>→UO<sup>+</sup>への反応効率の向上によってPu<sup>+</sup>のオンマスモード分析におけるスペクトル干渉は効果的に抑制された。

### 3.5.3 単一粒子分析

ICP-MS/MSを用いてTi<sup>5)</sup>, (Nd, Eu, P)<sup>6)</sup>, Fe<sup>45)~48)</sup>,

(Au, Ag, Pt)<sup>47</sup>), (Cr, Al, Ni, Cu, Au, Pt)<sup>48</sup>)関連の単一粒子分析を行った例が報告されている。

H<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>を併用することによって、<sup>48</sup>Ca<sup>+</sup>→<sup>48</sup>Ca<sup>16</sup>O<sup>+</sup>の反応を抑制するとともに<sup>48</sup>Ti<sup>+</sup>→<sup>48</sup>Ti<sup>16</sup>O<sup>+</sup>の反応を促進させ、TiO<sub>2</sub>ナノ粒子分析の高感度化を実現できた。これによって、純水中および50 mg L<sup>-1</sup>の濃度のマトリックス中のTiO<sub>2</sub>ナノ粒子の粒子径検出限界をそれぞれ15 nmと21 nmまで向上させることに成功している<sup>5)</sup>。

H<sub>2</sub>を用いたオンマスモードICP-MS/MSはFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>ナノ粒子の分析に有効であった。二重集束ICP-MS(擬似中分解能モード)に比べると、時系列信号のピークはわずかな広がりが見られたが、ピークトップの信号強度は2倍程度向上した<sup>45)</sup>。

No-gasやHe, H<sub>2</sub>に比べ、NH<sub>3</sub>を用いたICP-MS/MSによるFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>ナノ粒子分析においては、マスシフトモードとオンマスモードのいずれにおいても時系列信号のピークの広がりや感度の低下が顕著に見られた<sup>47)</sup>。

### 3・5・4 スペシエーション分析

ICP-MS/MSをスペシエーション分析に用いた例は、主に従来のICP-MSが「苦手元素」とするS<sup>7(10)11)</sup>, Se<sup>7(10)11)</sup>, Br<sup>8)12)</sup>, Cl<sup>12)</sup>, Si<sup>13)</sup>を対象としていた。タンパク質やペプチド・ヒト血液細胞中のS化合物とSe化合物の分析には、O<sub>2</sub>を用いたマスシフトモードが有効であった<sup>7(10)11)</sup>。魚肉やヒト血漿中のBr化合物の分析には、N<sub>2</sub>Oを用いたマスシフトモード<sup>8)</sup>とH<sub>2</sub>を用いたオンマスモード<sup>12)</sup>が有効で、ヒト血漿中Cl化合物の分析にはH<sub>2</sub>を用いたマスシフトモード(例:<sup>35</sup>Cl<sup>+</sup>→<sup>35</sup>Cl<sup>1</sup>H<sup>2+</sup>)が有効であった<sup>12)</sup>。石油製品中のSi化合物の分析には、H<sub>2</sub>を用いたオンマスモードが有効であった<sup>13)</sup>。

また、GC-ICP-MS/MSに関する総説では、P, S, Si, Cl, Sn, Pb, Hg, As, Br, Ge化合物のスペシエーション分析が紹介されている<sup>57)</sup>。さらに、HPLC-ICP-MSによるS, Cl, P, Br, Se化合物のスペシエーション分析も紹介されている<sup>58)</sup>。

## 4 ま と め

本稿は、ICP-MS/MSの定義、原理、特長の解説とともに、2018年から2020年10月までの進歩についてまとめた。

ICP-MS/MSがスペクトル干渉の分離に対して有するメリットを生かして、バイオ、エネルギー、環境、食品/メディカル、地質、マテリアル、放射化学/原子力など幅広い分野の研究に活用されている。また、研究対象として元素濃度の定量分析、気相イオン-分子反応の研究、同位体(比)分析、単一粒子分析、スペシエーション分析などがカバーされている。

文献に報告された測定対象元素は77元素に達し、H,

C, N, O, F及び一部の放射性元素・希ガス類元素を除いた元素周期表上のほぼすべての元素がカバーされている。

セルガスとして、装置に標準装備されているHe, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>のほか、N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>F, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>などについても検討した例が報告されている。

また本稿ではICP-MS/MSの実際の応用例についても測定対象別に抜粋して紹介した。

## 5 今後の展望

セルガスとの反応を活用したICP-MS/MSは、従来のICP-MSが「苦手元素」としていたP, S, Si, Cl, Brなどの測定をも可能にし、周期表中のほとんどの元素の分析が可能となった。今後も様々な分野におけるICP-MS/MSの応用が期待できる。

一方、市販装置に標準装備されているセルガスであるHe, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>は多くの元素の分析に応用できるものの、十分な反応性が得られない元素も多数存在する。特に第7~14族の遷移金属の分析においては反応性が十分でないことから、マスシフトモードの生成物イオンの生成率向上のために、今後はさらに反応性の高いセルガスや混合ガスの活用が期待されるであろう。

## 文 献

- 1) L. Fu, H.-L. Xie, J.-H. Huang, L. Chen: *Anal. Chim. Acta*, **1112**, 1 (2020).
- 2) J. Shirataki, K. Fujisaki, K. Sakaguchi, N. Sato: *Anal. Sci.*, **34**, 735 (2018).
- 3) D. T. Murphy, C. M. Allen, O. Ghidan, A. Dickson, W.-P. Hu, E. Briggs, P. W. Holder, K. F. Armstrong: *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, **34**, e8604 (2020).
- 4) J. Tomita, E. Takeuchi: *Appl. Radiat. Isot.*, **150**, 103 (2019).
- 5) J. Wojcieszek, J. Jimenez-Lamana, L. Ruzik, M. Asztemborska, M. Jarosz, J. Szpunar: *Front. Environ. Sci.*, **8**, 100 (2020).
- 6) M. Corte-Rodriguez, E. Blanco-Gonzalez, J. Bettmer, M. Montes-Bayon: *Analytical Chemistry*, **91**, 15532 (2019).
- 7) J. M. Will, C. Erbacher, M. Sperling, U. Karst: *Metallomics*, in press (2020).
- 8) C. Zhang, X.-M. Li, A. Li, Y.-L. Chen, T.-T. Ma, X.-Q. Li, Y. Gao, Q.-H. Zhang: *Anal. Chim. Acta*, **1075**, 38 (2019).
- 9) S. Theiner, A. Schoeberl, S. Neumayer, G. Koellensperger: *J. Anal. At. Spectrom.*, **34**, 1272 (2019).
- 10) F. Gronbaek-Thorsen, S. Sturup, B. Gammelgaard, L. H. Moller: *J. Anal. At. Spectrom.*, **34**, 375 (2019).
- 11) N. Kroepfl, K. A. Francesconi, T. Schwerdtle, D. Kuehnelt: *J. Anal. At. Spectrom.*, **34**, 127 (2019).
- 12) S. Li, B. Klencsar, L. Balcaen, F. Cuyckens, F. Lynen, F. Vanhaecke: *J. Anal. At. Spectrom.*, **33**, 274 (2018).
- 13) R. Sanchez, F. Chainet, V. Souchon, S. Carbonneaux, C.-P. Lienemann, J.-L. Todoli: *J. Anal. At. Spectrom.*, **35**, 2387 (2020).
- 14) B. Lesniewska, Z. Arciszewska, A. Wawrzynczak, S. Jarmolinska, I. Nowak, B. Godlewska-Zylkiewicz: *Talan-*

- ta, **217**, 121004 (2020).
- 15) Y.-B. Zhu : *Talanta*, **209**, 120536 (2020).
- 16) Ari, P. E. Ari, E. O. Gaga : *Talanta*, **208**, 120350 (2020).
- 17) S. L. Jackson, J. Spence, D. J. Janssen, A. R. S. Ross, J. T. Cullen : *J. Anal. At. Spectrom.*, **33**, 304 (2018).
- 18) S. W. Smith, N. Hanks, P. A. Creed, K. Kovalcik, R. A. Wilson, K. Kubachka, J. A. Brisbin, J. L. Figueroa, J. T. Creed, JT : *J. Anal. At. Spectrom.*, **34**, 2094 (2019).
- 19) S. Xing, W.-C. Zhang, J.-X. Qiao, X.-L. Hou : *TALANTA*, **187**, 357 (2018).
- 20) L.-C. Zhu, X.-L. Hou, J.-X. Qiao : *Anal. Chem.*, **92**, 7884, (2020).
- 21) S. Diez-Fernandez, H. Jaegler, C. Bresson, F. Chartier, O. Evrard, A. Hubert, A. Nonell, F. Pointurier, H. Isnard : *Talanta*, **206**, 120221 (2020).
- 22) Y.-B. Zhu, K. Nakano, Y. Shikamori : *Anal. Sci.*, **34**, 681 (2018).
- 23) B. P. Jackson : *J. Anal. At. Spectrom.*, **33**, 897 (2018).
- 24) X.-L. Hou, W.-C. Zhang, Y.-Y. Wang : *Anal. Chem.*, **91**, 11553 (2019).
- 25) F. M. Waersted, K. A. Jensen, E. Reinoso-Maset, L. Skipperud : *Anal. Chem.*, **90**, 12246 (2018).
- 26) X.-Z. Zhou, H.-W. Liu : *Spectrosc. Spect. Anal.*, **38**, 3567 (2018).
- 27) L. Fu, H.-L. Xie, J.-H. Huang, L. Chen : *Biol. Trace Elem. Res.*, (2020). (doi:10.1007/s12011-020-02175-y)
- 28) L. Fu, S.-Y. Shi : *Food Chem.*, **299**, 125172 (2019).
- 29) H.-W. Liu, X.-D. Nie : *Spectrosc. Spect. Anal.*, **38**, 3923 (2018).
- 30) B. Jiang, J.-H. Huang : *Spectrosc. Spect. Anal.*, **38**, 2937 (2018).
- 31) L. Fu, H.-L. Xie, S.-Y. Shi : *Anal. Bioanal. Chem.*, **410**, 3769 (2018).
- 32) C. B. Williams, G. L. Donati : *J. Anal. At. Spectrom.*, **33**, 762 (2018).
- 33) N. D. Fletcher, B. T. Manard, S. C. Metzger, B. W. Ticknor, D. A. Bostick, C. R. Hexel : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **324**, 395 (2020).
- 34) Z.-P. Yang, S. E. Jackson, L. J. Cabri, P. Wee, H. P. Longerich, M. Pawlak : *J. Anal. At. Spectrom.*, **35**, 534 (2020).
- 35) K. J. Hogmalm, I. Dahlgren, I. Fridolfsson, T. Zack : *Miner. Depos.*, **54**, 821 (2019).
- 36) S. E. Gilbert, S. Glorie : *J. Anal. At. Spectrom.*, **35**, 1472 (2020).
- 37) H. Jaegler, A. Gourgiotis, P. Steier, R. Golser, O. Diez, C. Cazala, C : *Anal. Chem.*, **92**, 7869 (2020).
- 38) X.-M. Liu, S.-F. Dong, Y.-H. Yue, Q.-Y. Guan, Y.-L. Sun, S.-S. Chen, J.-Y. Zhang, Y.-B. Yang : *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, **34**, UNSP e8690 (2020).
- 39) L. Fu, S.-Y. Shi, J.-C. Ma : *Chin. J. Anal. Chem.*, **47**, 1382 (2019).
- 40) L. Fu, F.-X. Zhao, H.-Y. Wang, H.-Z. Wang, T. Chen, J.-H. Xu, B. Li, H.-L. Xie : *Spectrosc. Spect. Anal.*, **38**, 3572 (2018).
- 41) L. Fu, S.-Y. Shi, Y.-G. Tang, H.-Y. Wang : *Spectrosc. Spect. Anal.*, **38**, 2588 (2018).
- 42) L. Fu, S.-Y. Shi, X.-Q. Chen, H.-L. Xie : *Microchem. J.*, **139**, 236 (2018).
- 43) L. Fu, H.-L. Xie, S.-Y. Shi, X.-Q. Chen : *Spectrochim. Acta B*, **144**, 1 (2018).

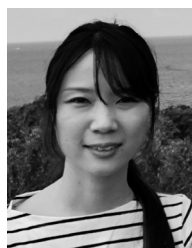
- 44) L. Fu, S.-Y. Shi, X.-Q. Chen : *Chin. J. Anal. Chem.*, **46**, 107 (2018).
- 45) Rua-Ibarz, E. Bolea-Fernandez, G. Pozo, X. Bominguez-Benetton, R. Vanhaecke, K. Tirez : *J. Anal. At. Spectrom.*, **35**, 2023 (2020).
- 46) J. Kruszewska, J. Sikorski, J. Samsonowicz-Gorski, M. Matczuk : *Anal. Bioanal. Chem.*, **412**, 8145 (2020).
- 47) E. Bolea-Fernandez, D. Leite, A. Rua-Ibarz, T. Liu, G. Woods, M. Aramendia, M. Resano, F. Vanhaecke : *Anal. Chim. Acta*, **1077**, 95 (2019).
- 48) C. Jones, E. Soffey, M. Kelinske : *SPECTROSCOPY*, **34**, 10 (2019).
- 49) T. Suzuki, T. Yamamura, C. Abe, K. Konashi, Y. Shikamori : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **318**, 221 (2018).
- 50) M. G. Miranda, B. Russell, P. Ivanov : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **316**, 831 (2018).
- 51) P. Petrov, B. Russell, D. N. Douglas, H. Goenaga-Infante : *Anal. Bioanal. Chem.*, **410**, 1029 (2018).
- 52) S. Xing, M.-Y. Luo, Y. Wu, D.-Q. Liu, X.-X. Dai : *J. Anal. At. Spectrom.*, **34**, 2027 (2019).

朱 彦北 (Yanbei ZHU)



国立研究開発法人産業技術総合研究所 (〒305-8563 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第3-9)。☆☆☆大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。《現在の研究テーマ》ICP-MSに基づく元素分析技術および関連認証標準物質の開発。《主な著書》Kazumi Inagaki, Yanbei Zhu, Tsutomu Miura, Koichi Chiba; “Coprecipitation in Trace Element Analysis” (Chapter), in book *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, (2009), (John Wiley & Sons, Ltd.). 《趣味》読書, ランニング, 散歩。  
E-mail : yb-zhu@aist.go.jp

有賀智子 (Tomoko ARIGA)



国立研究開発法人産業技術総合研究所 (〒305-8563 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第3-9)。☆☆☆大学院博士後期課程修了。博士 (農学)。《現在の研究テーマ》ICP-MSを用いた高感度元素分析手法の開発, および標準物質の開発。《趣味》ヨガ。  
E-mail : t-ariga@aist.go.jp

中野かずみ (Kazumi NAKANO)



アジレント・テクノロジー株式会社 (〒192-8510 東京都八王子市高倉町9-1)。《現在の研究テーマ》ICP-MS, ICP-MS/MSを用いた化学分析の高感度・高精度化。  
E-mail : kazumi\_nakano@agilent.com

鹿籠康行 (Yasuyuki SHIKAMORI)



アジレント・テクノロジー株式会社 (〒192-8510 東京都八王子市高倉町9-1)。《現在の研究テーマ》材料科学・放射化学におけるICP-MS/MS分析法の高感度化・高精度化。  
E-mail : yasuyuki\_shikamori@agilent.com

- 53) L.-Y.-D Tjong, S.-M. Tan : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **322**, 399 (2019).
- 54) P. E. Warwick, B. C. Russell, W. Croudace, Z. Zacharuskas : *J. Anal. At. Spectrom.*, **34**, 1810 (2019).
- 55) Q. He, J.-J. Wu, S.-C. Zhang, X. Fang, Z. Xing, C. Wei, X.-R. Zhang : *J. Anal. At. Spectrom.*, **33**, 563 (2018).
- 56) 山田憲幸, 高橋純一 : 分析化学, **67**, 249 (2018).
- 57) J. Carcia-Bellido, L. Freije-Carrelo, M. Moldovan, J. R. Encinar : *Trends Anal. Chem.*, **130**, 115963 (2020).
- 58) B. Klencsar, S.-W. Li, L. Balcaen, F. Vanhaecke : *Trends Anal. Chem.*, **104**, 118 (2018).
- 59) 杉山尚樹, 中野かずみ : Agilent テクニカルノート, 5991-4585JAJP (2014).
- 60) 小南晴之, 鈴木美成 : 分析化学, **66**, 825, (2017).

標準物質頒布のお知らせ

『有害金属成分化学分析用プラスチック認証標準物質 (Pb, Cd, Cr, Hg)』

JSAC 0601-2, JSAC 0602-2 (チップ状)  
頒布価格: 50 g 瓶入り各1本, 本会団体会員: 29,400 円, その他: 44,100 円。

『有害金属成分蛍光 X 線分析用プラスチック認証標準物質 (Pb, Cd, Cr) JSAC 0611~0615 (ディスク状)』

頒布価格: ディスク5枚入り1セット, 本会団体会員: 105,000 円, その他: 157,500 円。

『水銀成分蛍光 X 線分析用プラスチック認証標準物質 JSAC 0621~0625 (ディスク状)』

頒布価格: ディスク5枚入り1セット, 本会団体会員: 73,500 円, その他: 110,250 円。

『有害金属成分蛍光 X 線分析用プラスチック認証標準物質 (Pb, Cd, Cr, Hg)』

JSAC 0631, 0632 (ディスク状)  
頒布価格: ディスク状2枚入り1セット, 本会団体会員: 31,500 円, その他: 47,250 円。

『金属成分分析用土壌認証標準物質』

JSAC 0401 (添加), JSAC 0411 (無添加)  
頒布価格: 50 g 瓶入り各1本, 本会団体会員: 52,500 円, その他: 78,750 円。

『無機成分分析用土壌認証標準物質 (環境省告示 19 号 対応)』

JSAC 0402, JSAC 0403  
頒布価格: 50 g 瓶入り各1本, 本会団体会員: 52,500 円, その他: 78,750 円。

『無機成分分析用河川水認証標準物質』

JSAC 0301-1 (無添加), JSAC 0302 (添加)  
頒布価格: JSAC 0301-1, JSAC 0302 の1セット, 本会団体会員: 52,500 円, その他: 78,750 円。

『農薬成分分析用土壌認証標準物質 (シマジン, デイルドリン)』

JSAC 0441 (シマジン-高濃度), JSAC 0442 (シマジン-低濃度)  
頒布価格: 60 g 瓶入り各1本, 本会団体会員: 52,500 円, その他: 78,750 円。

『ダイオキシン類分析用フライアッシュ認証標準物質』

JSAC 0501 (高濃度), JSAC 0502 (低濃度)  
頒布価格: 50 g 瓶入り各1本, 本会団体会員: 105,000 円, その他: 157,500 円。

『ダイオキシン類分析用焼却炉ばいじん認証標準物質』

JSAC 0511, JSAC 0512  
頒布価格: 60 g 瓶入り各1本, 本会団体会員: 52,500 円, その他: 78,750 円。

『ダイオキシン類分析用土壌認証標準物質』

JSAC 0421 (低濃度), JSAC 0422 (高濃度)  
頒布価格: 60 g 瓶入り各1本, 本会団体会員:

105,000 円, その他: 157,500 円。

『ダイオキシン類・PCB 同族体分析用河川底質認証標準物質 JSAC 0431 (低濃度), JSAC 0432 (高濃度)』

頒布価格: 60 g 瓶入り各1本, 本会団体会員: 105,000 円, その他: 157,500 円。

『ダイオキシン類・PCB 同族体分析用海域底質認証標準物質 JSAC 0451 (低濃度), JSAC 0452 (高濃度)』

頒布価格: 60 g 瓶入り各1本, 本会団体会員: 105,000 円, その他: 157,500 円。

『ダイオキシン類分析用排水標準物質 JSAC 0311』

頒布価格: 3 L 入り褐色ガラス瓶2本1組1セット, 本会団体会員: 31,500 円, その他: 47,250 円。

『微量酸素分析用鉄鋼認証標準物質 JSAC 0111』

頒布価格: 瓶入り1個, 本会団体会員: 15,750 円, その他: 23,625 円。

『微量金蔵成分分析用アルミニウム認証標準物質』

JSAC 0121-B(ブロック状), JSAC 0121-C(チップ状)  
頒布価格: 各形状とも本会団体会員: 12,600 円, その他: 18,900 円。

『LSI 分析用二酸化ケイ素認証標準物質』

JAC 0011~0013  
頒布価格: 1セット, 本会団体会員: 157,500 円, その他: 210,000 円。

『LSI 分析用高純度アルミニウム認証標準物質』

JAC 0021~0023  
頒布価格: 1セット, 本会団体会員: 157,500 円, その他: 210,000 円。

『栄養成分等分析用粉乳管理試料 JSAC PT0711』

頒布価格: 50 g 瓶入り1本, 本会団体会員: 9,450 円, その他: 14,000 円

\* 詳細は下記申込先までお問い合わせください。また、上記以外の新規標準物質等については本誌お知らせ欄や本会 Web サイト (<http://www.jsac.or.jp>) をご覧ください。

申込方法 標準物質名 (製品番号も明記), 数量, 申込者氏名, 送付先 (郵便番号, 住所, 所属, 電話番号), 団体会員 (会員番号) ・その他の別, 料金, 請求書宛名を明記のうえ, 下記にお申し込みください。なお, 価格は消費税及び送料込みです。

申込先 〒141-0031 東京都品川区西五反田1-26-2 五反田サンハイツ304号 (公社)日本分析化学会社会貢献活動部門事務局 [電話: 03-3490-3351, FAX: 03-3490-3572, E-mail: shomu2@jsac.or.jp]