

平田 岳 史 氏

(Takafumi HIRATA)
(東京大学大学院理学系研究科 教授)

1962年6月17日兵庫県に生まれる。1981年兵庫県立柏原高等学校卒業、1985年東京理科大学理学部化学科卒業。1990年東京大学大学院理学系研究科化学専門課程博士課程を修了、「ICP質量分析計によるRe-Os年代測定法の開発」により理学博士。1990年通商産業省工業技術院地質調査所通商産業技官、1993年東京工業大学理学部助手、1998年助教授、2007年同准教授、2009年京都大学大学院理学系研究科教授、2016年東京大学大学院理学系研究科教授。1989年英国アランデートメモリアル賞、1995年日本地球化学会奨励賞、2019年日本地球化学会賞、2019年日本分析化学会「分析化学」論文賞。



【業 績】

プラズマ質量分析に基づく地球メタロミクス学の創成

平田岳史氏は、地球や太陽系の形成・進化過程の解明を目的に、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)を用いた微量元素の定量分析および同位体分析を続けてきた。独自の加熱気化導入法(ETV法)の開発やイオン検出器の改良による同位体分析精度の向上、レーザーアブレーション法(LA)を用いた高精度定量分析および元素イメージング法の開発、さらには金属ナノ粒子の高感度・高速計測法の開発など、開発内容は多岐にわたる。その応用分野は地球化学にとどまらず、環境化学、生命化学などに広がっており、それぞれの分野で候補者が開発した分析手法が広く活用されている。以下に同君の主な業績を紹介する。

1. 高精度同位体分析技術とその年代測学への応用^{1)~7)}

同君は、LiからTlまでの元素の精密同位体分析を行い、新たな質量差別効果の補正法を提案した。これにより誰もが精密同位体を研究に活用できるようになった。同君は、本法を隕鉄中の微量Geの同位体分析に応用し、隕石の形成過程を議論し、さらに生命化学分野への応用として、ヒト赤血球に含まれる鉄に対し精密同位体分析を行った。その結果、赤血球に含まれる⁵⁶Fe/⁵⁴Fe同位体比が、土壌あるいは食物中の鉄の同位体比よりも有意に低い値を持つことや、同位体比に性差(男女間で同位体比が異なる)があることを見いだしている。現在、同君らの研究グループでは、鉄、亜鉛に加え、生体試料中のCa、Ni、Cu、Zn、Sr、Moの同位体分析を続けており、濃度変化だけでは捉えることができない元素代謝変化を、同位体組成を用いて捉える試みを続けている。

2. 局所分析およびイメージング分析^{8)~16)}

同君はLA-ICP-MS法を用いて世界で初めてU-Pb年代測定法の実用化に成功するとともに、その後もレーザー波長の短波長化や超短パルス化、レーザーアブレーション機構の解明、イオン検出器の開発等を通じて年代精度の向上、分析空間分解能の改善に取り組んできた。最近では、複数の放射年代測定法を実用化し、地質学での未解明問題であった大陸地殻成長過程の解明や、ホモ・エレクトス・エレクトス(ジャワ原人)の進化に正確な年代制約を付すことに成功している。こうした装置改良および年代計算法の改良を通じて、同君は日本の地質学の年代学的研究を支援している。

同君はまた、LA-ICP-MS法のさらなる応用展開を目的に、ガルバノ光学系を用いた高速多点アブレーション法を開発した。この高速多点アブレーションにより、分析元素の希釈や内標準元素の添加、さらには標準添加法による定量分析が可能になるなど、固体試料分析においても溶液分析と同等の操作性

を実現している。さらに同君は元素イメージング技術の開発でも成果をあげており、これまでにラット脳や肝臓組織試料などの生体試料において、主成分の炭素からサブppmレベルの微量元素まで、8桁におよぶ濃度範囲の元素を同時にイメージング分析することに成功している。さらに同君は、エネルギーを低く抑えるアブレーション(ソフト・アブレーション)により、元素イメージング分析の定量性を大幅に向上することにも成功した。ここで開発した定量的元素イメージング技術は、今後、地球化学、材料化学、環境化学、生命化学等の分野で広く活用される標準的なイメージング分析法になるものと期待できる。

3. 金属ナノ粒子の化学組成・同位体組成分析^{17)~19)}

同君は、高感度な磁場型ICP質量分析計に高時間分解能イオン検出系を組み合わせることで、信号のSN比を大幅に改善し、直径5から400nmの金属ナノ粒子の1粒子での検出に成功している。このサイズレンジは天然に存在するナノ粒子を網羅している。最近是个々のナノ粒子から化学組成・同位体組成情報を引き出すことにも成功しており、機能性新材料の品質評価や、環境中のナノ粒子、例えばPM_{0.1}の起源同定解析への応用が期待される。

さらに同君はレーザーアブレーション試料導入法を組み合わせることで、固体試料中でのナノ粒子の分布情報(ナノ粒子イメージング分析)を引き出すことに成功している。これまでに植物の細胞組織や動物の腎臓組織切片に対してナノ粒子のイメージング分析を行い、ナノ粒子のサイズや材質による挙動の違いを可視化している。同君らは、1度の分析でナノ粒子のサイズ情報や試料中での位置情報、さらには存在形態(粒子状か溶存イオン状か)を同時に引き出す「3要素同時イメージング技術(Triad Imaging Technique)」を開発し、生体内でのナノ粒子の動態や代謝機構の解析に応用している。

このように平田岳史氏は、学術研究を目的とした最先端計測技術の開発を進めるとともに、開発した計測技術の他分野への応用展開、さらに若手研究者の育成にも積極的に取り組んでおり、分析化学の発展に貢献するところ顕著なものがある。

(東京薬科大学生命科学部分子生命科学科 梅村知也)

文 献

- 1) *Analyst*, **121**, 1407 ('96).
- 2) *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**, 4439 ('97).
- 3) *Anal. Sci.*, **20**, 617 ('04).
- 4) *Metalomics*, **9**, 1745 ('17).
- 5) *Analyst*, **142**, 4265 ('17).
- 6) *Anal. Sci.*, **34**, 645 ('18).
- 7) *ibid.*, **35**, 793 ('19).
- 8) *ibid.*, **24**, 345 ('08).
- 9) *Anal. Chem.*, **79**, 147 ('07).
- 10) *Geost. Geonanal. Res.*, **38**, 409 ('14).
- 11) *J. Anal. At. Spectrom.*, **32**, 88 ('17).
- 12) *ibid.*, **32**, 686 ('17).
- 13) *Geology*, **33**, 485 ('05).
- 14) *Science*, **367**, 210 ('20).
- 15) *Anal. Chem.*, **83**, 8892 ('11).
- 16) *J. Anal. Atom. Spectrom.*, **34**, 1794 ('19).
- 17) *Anal. Chem.*, **91**, 4544 ('19).
- 18) *Analyst*, **144**, 4935 ('19).
- 19) *Anal. Chem.*, **91**, 10197 ('19).

早 下 隆 士 氏

(Takashi HAYASHITA)
上智大学理工学部 教授

1958年3月6日宮崎県に生まれる。1980年九州大学工学部合成化学科卒業、1985年同大学院工学研究科合成化学専攻博士後期課程修了、工学博士（九州大学）。同年神奈川大学工学部助手、1989年米国テキサス工科大学博士研究員、1992年佐賀大学理工学部助教授、1997年東北大学大学院理学研究科助教授、2005年上智大学理工学部教授、2011年上智大学理工学部長、2014～2017年上智大学学長、現在に至る。1993年本学会奨励賞、2003年シクロデキストリン学会奨励賞、2007年日本イオン交換学会学術賞、2014年シクロデキストリン学会学術賞、2014年日本イオン交換学会学術賞。2018年本学会副会長、2019年本学会関東支部長、日本イオン交換学会会長、2020年ホスト・ゲスト・超分子化学研究会会長、シクロデキストリン学会会長。

【業 績】

ナノ空間包接場およびナノ構造体を用いる超分子分析試薬の開発

早下隆士氏は、超分子複合体が示す特異な分子認識機能に着目した超分子分析試薬の開発を進めてきた。特にナノ空間包接場を有する水溶性の環状オリゴ糖であるシクロデキストリン(CD)の包接能を使って、分子認識プローブのCD空洞内の組織構造変化に基づく分析試薬開発で顕著な業績を残している。さらに同氏は、CD複合体の超分子キラリティーに基づく新しい分析試薬の開発やナノ構造体を用いる細菌識別技術の開発など独創的な研究を進めている。以下に同氏の主な業績を紹介する。

1. 超分子 CD 複合体を用いるイオンおよび分子認識^{1)~12)}

同氏は、ピレン蛍光団を有する水に不溶のクラウンエーテル型蛍光プローブをCD内に包接させ水中に可溶化することで、水中でカリウムイオンを高感度に検出できる分析試薬の開発に成功した。これはCDの持つナノ空間包接場が分子フラスコとして機能し、空洞内で二つのプローブがカリウムイオンを挟み込んだ二量体を形成しピレンのダイマー蛍光が起こる新しい応答原理である。更に同氏は、この原理を発展させ、認識部位にジピコリルアミンの亜鉛(II)錯体を用いたピレン型蛍光プローブを開発した。このプローブのCD複合体は、水中でピロリン酸イオンに選択的に応答し、ダイマー蛍光による検出が可能となる。また、ジピコリルアミン銅(II)錯体をCDに化学修飾した修飾CDを設計することで、金属錯体部位でアデノシントリリン酸(ATP)のリン酸基を、CD空洞内でアデノシン部位を多点認識させ、優れたATP選択性を示す比色試薬および蛍光試薬の開発に成功している。また同氏は、フェニルボロン酸を認識部位に有するアゾプローブとのCD複合体が、水中でグルコースを認識し、CD空洞内でのアゾプローブの二量体形成により比色検出できることを見いだした。同様にフェニルボロン酸とアントラセンやピレンを直接アミド基で結合させた蛍光プローブのCD複合体が、ガラクトースやグルコースに選択的なダイマー蛍光による高感度検出が可能となることを明らかにしている。

2. 超分子 CD 複合体が示す超分子キラリティー^{13)~15)}

同氏はクラウンエーテル部位とジピコリルアミン部位を持つ新規のジトピック型アゾプローブを開発した。このプローブ単独ではキラリティーを示さないが、水中でプローブ二分子をキラリタな空洞を有するCDに包接させることで、誘起円二色性活性が得られる。このCD複合体では、基質であるカリウムイオン、亜鉛(II)イオン、および炭酸イオンのすべての要素が揃った時のみ、CD内でプローブ分子のねじれ構造が誘起され分

裂型のコットン効果が現れる。したがって超分子複合体の一つの構成要素を取り除くと、この複合体は取り除いたイオンに対し高い選択性を示す分析試薬となる。興味深いことに、同じ認識サイトを用いたジトピック型プローブのスペーサー長を変えると、水中において重金属イオン選択性が亜鉛(II)イオンから銅(II)イオンへ劇的に変化し、アニオン選択性も炭酸イオンから水酸化イオンへと変化する。また適度なスペーサー長のプローブを用いたCD複合体では、亜鉛(II)イオンおよび銅(II)イオンの両方を認識できるようになるが、そのねじれ方向が完全に反転する特異的な超分子キラリティーを示すことを明らかにしている。

3. ナノ構造体を用いる細菌認識^{16)~20)}

同氏は、フェニルボロン酸やジピコリルアミン金属錯体の糖およびリン酸誘導体認識機能を利用した、細菌識別機能を有するナノ構造体の開発に成功している。蛍光シリカナノ粒子の表面に、ジピコリルアミンを有するクマリン蛍光団を導入したナノ構造体を設計した。このナノ構造体単独では、黄色ブドウ球菌などの細菌と全く応答を示さないが、これを銅(II)錯体に変換したナノ構造体では、細菌と結合して目視で会合体の沈殿生成が確認できることを見いだした。同様に、球状の樹木状高分子であるポリアミドアミン dendrimer の表面に複数のフェニルボロン酸を導入したフェニルボロン酸型 dendrimer 複合体では、グラム陽性菌である黄色ブドウ球菌とグラム陰性菌である大腸菌を選択的に識別し、グラム陽性菌のみに応答して会合体の沈殿が起こることを明らかにした。様々なグラム陽性菌のみが数分内で会合沈殿を起こすことから、新しい細菌識別法として期待できる技術である。

以上のように、早下隆士氏は、CD複合体を用いたナノ空間包接場での様々な分子認識機能の発現を見いだすとともに、ナノ構造体を用いる細菌識別技術の開発など、分析試薬の設計に超分子の概念を導入した独創的な研究を展開している。これらの業績は、分析化学の発展に貢献するところ大である。

〔九州工業大学 竹中繁織〕

文 献

- 1) *J. Am. Chem. Soc.*, **121**, 2319 ('99).
- 2) *Anal. Chem.*, **73**, 1530 ('01).
- 3) *Supramol. Chem.*, **17**, 141 ('05).
- 4) *Chem. Commun.*, **45**, 1709 ('09).
- 5) *Anal. Sci.*, **28**, 121 ('12).
- 6) *Chem. Lett.*, **43**, 228 ('14).
- 7) *Anal. Sci.*, **30**, 1045 ('14).
- 8) *J. Org. Chem.*, **82**, 976 ('17).
- 9) *Molecules*, **23**, 635 ('18).
- 10) *Front. Chem.*, **7**, 806 ('19).
- 11) *Front. Chem. Sci. Eng.*, **14**, 53 ('20).
- 12) *RSC Adv.*, **10**, 15299 ('20).
- 13) *Chem. Commun.*, **50**, 10059 ('14).
- 14) *Chem. Pharm. Bull.*, **65**, 318 ('17).
- 15) *Chem. Commun.*, **54**, 12690 ('18).
- 16) *New J. Chem.*, **39**, 2620 ('15).
- 17) *Chem. Lett.*, **45**, 749 ('16).
- 18) *Langmuir*, **32**, 10761 ('16).
- 19) *Anal. Sci.*, **34**, 1125 ('18).
- 20) *Anal. Chem.*, **91**, 3929 ('19).

長谷川 健 氏

(Takeshi HASEGAWA)
(京都大学化学研究所 教授)

1966年1月新潟県柏崎市生まれ。1993年京都大学大学院理学研究科化学専攻博士後期課程中退、同年、神戸薬科大学助手。1995年7月京都大学博士(理学)。2002年神戸薬科大学講師、2003年日本大学生産工学部応用分子化学科助教授、2004年JST さきがけ「構造機能と計測分析」(兼任)、2006年東京工業大学理工学研究科助教授(翌年准教授)、2011年3月京都大学化学研究所教授、現在に至る。1999年日本薬学会近畿支部奨励賞、2001年日本分析化学会奨励賞および日本分光学会論文賞、2005年堀場雅夫賞、2007年山崎貞一賞、2009年米国応用分光学会 Craver Award、2015年日本化学会学術賞および米国応用分光学会フェロー。

【業 績】

多角入射分解分光法の開発と実用化

長谷川健君は、一貫して機能性薄膜中の分子集合構造の可視化を可能にする分析手法の開発を、振動分光学に基づいて進めてきた。一連の研究の中でも、2002年に独自に創案した“多角入射分解分光法(Multiple-Angle Incidence Resolution Spectrometry; MAIRS)”は特に有名で、2007年以降に2社からの製品化を実現し、応用物理、高分子化学やバイオ分野など広い分野で産学を超えた普及が着実に進んでいる。以下に、同君のこれまでの研究業績について述べる。

1. 赤外外部反射法による定量的な薄膜構造解析法の構築

非金属基板上での反射測定(外部反射法)で得られる薄膜スペクトルの表面選択律は、1993年ころはまだ分光の専門家にすら理解されていない状況で、正や負の吸光度が入り混じる独特のスペクトルは、難解なスペクトルと思われていた。長谷川君は、この状況を定量的に解決することを目指し、電磁場理論を整理することで定量的な表面選択律の確立に成功した¹⁾。

ただし、この頃の解析は数値解析によるもので、のちにすべて解析的な式によりまとめ、薄膜分光全体の統一的理解に達した²⁾。

2. 多変量解析の徹底理解に基づいた新しい微量成分分析法

ケモメトリックスによるスペクトル解析は、1990年代まで多変量解析の文化をそのまま利用していた。すなわち、スペクトルと濃度の定量的な結びつきが“相関行列”という物理的な意味が曖昧なまま定式化され、日本の分析化学や分光学で広まらない一因となっていた。

長谷川君は、主成分分析(PCA)の研究を端緒に、分光学における多変量解析の考え方を、多次元空間の中のベクトルを用いて一から整理し直し、多くの分析化学者が受け入れやすい理解の筋道を打ち立てた。その結果、PCAには“混合物試料の微量成分のスペクトルを単独に抜き出す能力がある”ことを理論的に初めて見いだした³⁾。Factor Analytical Resolution of Minute Species (FARMS)と名付けたこの方法を、実際の系にも適用し、水/シリコン界面での微量の“界面水”のスペクトルをバルク水のスペクトルから分離することにも成功した⁴⁾。

3. MAIRS法の創出と実用化

薄膜中の分子配向を官能基ごとに解析するには、透過法および反射吸収(RA)法の相補的な表面選択律を使えばよいことは古くから知られている。しかし、透過およびRAスペクトルの縦軸は大きくかけ離れていて、これを克服しない限り定量的な分子配向解析はできない。また、そもそも解析に必要な光学

定数は配向に依存するため、透過とRA法の組合せによる分子配向の定量解析法が実用化することはないと考えた。

この難題を克服するため、多変量解析を導入することを考えた。入射光の電場が基板表面に平行な面内(in-plane; IP)測定と、基板表面に垂直(out-of-plane; OP)な測定は、各々0°および90°入射測定に相当する。この二つのスペクトルを斜入射測定から、多変量解析による外挿的スペクトル分解で求めるのがMAIRS法である。とくにOP測定は、仮想的な縦波長を考える図式で直接には測定できないが、回帰計算を使うと“まるで実測できたかのように結果が出る”というアイデアで、これを実験で成功させた⁵⁾。また、p偏光のみを測定に使うことで、解析精度が大きく向上することを見いだした⁶⁾。これはpMAIRS法として現在ではMAIRS法の主流となっている。

一方、分子配向解析の実用性に鑑み、定量的精度の向上に取り組んだ。これには、IPとOPスペクトルの縦軸を共通化させる必要があり、そのための標準試料の開発も行った。具体的には、パーフルオロアルキル鎖を含む液体(無配向)の高分子化合物を用い、フォノンの表面モードを利用することで適切な入射角の組を特定した⁷⁾。さらに、薄膜試料の屈折率も考慮することで、有効数字3桁という高い解析精度を実現した⁸⁾。これらの要素技術は、すべて長谷川君の研究室単独で開発したものである。これらの成果は、Thermo Fisher Scientific および日本分光の2社から製品化された装置に組み込まれ、誰でも簡単に測定できる実用化を達成した。

MAIRS法は、薄膜を鍵とするデバイスやセンサ分野、さらには医用応用などで幅広い展開が始まっており、現在、もっとも成果をあげているのは有機薄膜半導体である⁹⁾。官能基単位で配向が決まることに加えて、斜入射X線回折(GIXD)と対等かつ相補的な手法である¹⁰⁾¹¹⁾。さらに各化学種の量の追跡が可能になり、反応解析もできるようになった¹²⁾。また、紫外可視分光と組み合わせ、プラズモン¹³⁾やDavydov分裂の解析¹⁴⁾もできるようになった。

以上、長谷川健君の多角入射分解分光法の開発と実用化の研究は、分析化学の発展に貢献するところが顕著なものがある。

(東京工業大学理学院 岡田哲男)

文 献

- 1) *Langmuir*, **11**, 1236 ('95).
- 2) *Quantitative Infrared Spectroscopy for Understanding of a Condensed Matter*, ('17) (Springer).
- 3) *Anal. Chem.*, **71**, 3085 ('99).
- 4) *J. Phys. Chem. B*, **105**, 12056 ('01).
- 5) *J. Phys. Chem. B*, **106**, 4112 ('02).
- 6) *Anal. Chem.*, **79**, 4385 ('07).
- 7) *Appl. Spectrosc.*, **71**, 901 ('17).
- 8) *Appl. Spectrosc.*, **71**, 1242 ('17).
- 9) *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **93**, 1127 ('20).
- 10) *Chem. Eur. J.*, **22**, 16539 ('16).
- 11) *J. Phys. Chem. C*, **122**, 4540 ('18).
- 12) *J. Phys. Chem. A*, **124**, 2714 ('20).
- 13) *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **13**, 9691 ('11).
- 14) *Sci. Rep.*, **9**, 579 ('19).

鈴木 敏之 氏

(Toshiyuki SUZUKI
(国研)水産研究・教育機構水産技術研究所応用・
開発部門水産物応用開発部長)

1965 年静岡県生まれ。1988 年北海道大学水産学部水産化学科卒、1993 年同大学院水産化学専攻博士課程修了(博士)。1993 年農林水産省に入省し、東北区水産研究所、中央水産研究所を経て、2020 年より現職。2009~2019 年厚生労働省薬事食品衛生審議会食品衛生分科会委員、2013 年~現在、内閣府食品安全委員会(かび毒・自然毒専門調査会)専門委員、2016~2017 年(一財)日本規格協会定量核磁気共鳴分光法通則(qNMR 通則)検討委員、2019 年フグ処理者の認定基準に関する検討会委員、2014 年~現在、東京海洋大学、北里大学連携大学院教授、日本水産学会、日本分析化学会会員、趣味は写真、温泉、ワイン、ビール、筆記用具コレクション、ピアノ。



【業 績】

下痢性貝毒の機器分析法開発と普及

鈴木敏之君は、LC/MS による下痢性・脂溶性貝毒の一斉分析法の開発、規制対象毒のリスク評価、さらに貝毒標準物質の製造技術を開発し、貝毒検査公定法への機器分析法の導入に多大な貢献をした。下痢性貝毒は、複雑な化学構造や多数の類縁体の存在により、機器分析法による検査が困難であった。それ故、1981 年に旧厚生省通知「下痢性貝毒検査法について」で定められた公定法が、2017 年まで実に 36 年間使用され続けてきた。従来の公定法であるマウス毒性試験は、遊離脂肪酸などによる偽陽性により、本来は安全な二枚貝が出荷できないなどの問題があった。さらに、多数の動物の命を犠牲に検査を実施するという倫理的問題も指摘されてきた。機器分析法に移行したことにより、正確な貝毒検査が可能となり、偽陽性による出荷規制が激減し、主要二枚貝生産地の二枚貝の水揚量が著しく増加した。一連の研究成果は、分析法の開発と規制対象物質の適切なリスク評価により、消費者と生産者の双方に利益がもたらされた好例として、消費者や二枚貝生産者、動物愛護団体さらに関連行政部局から高く評価されている。以下、同君の主な業績について説明する。

1. 下痢性・脂溶性貝毒一斉分析法の開発^{1)~17)}

鈴木敏之君は、下痢性・脂溶性貝毒の LC/MS、LC/MS/MS による一斉分析法を開発した。一連の研究で同君が提案した MS/MS フラグメントイオンを複雑な下痢性・脂溶性貝毒の化学構造に帰属させた MS/MS フラグメンテーションダイアグラムは、関連毒の同定や化学構造の解析に広く利用されている。また、同君が公表した基礎的分析条件は、わが国の下痢性貝毒公定法など、多くの国の機器分析公定法の分析条件として採用されている。さらに、開発した分析法を用いて、二枚貝における毒代謝動態を検討し、有毒藻類が生産する一部の主要脂溶性貝毒が二枚貝に取り込まれた後、速やかに無毒代謝物に変換されることを発見した。この発見により、規制対象毒の絞り込みが可能となり、動物検査法から機器分析法への移行が加速した。同君の一連の研究成果は、現在の下痢性・脂溶性貝毒の監視体制の確立に多大な貢献をした。

2. 下痢性貝毒オカダ酸群標準物質の製造技術開発

下痢性貝毒オカダ酸群を生産する有毒渦鞭毛藻の中から高毒生産能株を発見し¹⁸⁾、その大量培養技術および効率的な毒精製技術を開発¹⁹⁾したことにより、下痢性貝毒標準物質原料を大量に製造できるようになった。さらに、下痢性貝毒オカダ酸群に

ついて、定量 NMR 法(qNMR)の外標準法による正確な定量技術を開発した結果²⁰⁾、標準物質の定量が可能となった。これらの技術により製造した高純度下痢性貝毒を国立研究開発法人産業技術総合研究所に提供し、わが国初のオカダ酸群認証標準物質を製造して頒布した。さらに、これらの標準物質を利用して、下痢性貝毒技能検定試験をわが国で初めて実施し、国内貝毒検査機関の分析値の標準化に貢献した²¹⁾²²⁾。

3. 下痢性貝毒オカダ酸群の毒性等価係数の決定²³⁾

2. で開発した認証標準物質(オカダ酸、ジノフィシトキシン 1)を国際共同試験に提供し、オカダ酸に対するジノフィシトキシン 1 の毒性等価係数を初めて決定した。

4. 下痢性・脂溶性貝毒機器分析法の普及活動

下痢性貝毒の公定法として、機器分析法が採用されることを予想することが困難であった 1995 年から、都道府県や民間の検査機関の研究者や検査者を対象に、毎年継続的に貝毒分析研修会を開催し、機器分析法やその他の分析法の普及に貢献した。この研修会の受講者は延べ 300 人を超えており、わが国の貝毒機器分析法やその他の非動物検査法の普及や技術水準の向上に大いに貢献した。この研修会は現在も継続して実施している。また、多くの書籍等²⁴⁾に総説等を発表し、海洋生物毒の分析法の普及に貢献している。

以上、鈴木敏之君は、下痢性貝毒の機器分析法開発と普及に関して顕著な業績を上げ、分析化学の発展に貢献するところ顕著なものがある。さらに、同君の業績は分析化学の産業界への貢献への好例であり高く評価されている。

(武蔵野大学薬学部 川原正博)

文 献

- 1) *J. Chromatogr. A*, **815**, 155 ('98). 2) *Toxicon*, **37**, 187 ('99). 3) *J. Chromatogr. A*, **874**, 199 ('00). 4) *Toxicon*, **39**, 507 ('01). 5) *J. Chromatogr. A*, **992**, 141 ('03). 6) *Rapid Comm. Mass Spectrom.*, **18**, 1131 ('04). 7) *Fish. Sci.*, **71**, 1370 ('05). 8) *Chem. Res. Toxicol.*, **19**, 310 ('06). 9) *J. Chromatogr. A*, **1142**, 172 ('07). 10) *Toxicon*, **51**, 707 ('08). 11) *Harmful Algae*, **8**, 233 ('09). 12) *Anal. Sci.*, **27**, 571 ('11). 13) *Harmful algae*, **20**, 81 ('12). 14) 食品衛生学雑誌, **54**, 265 ('13). 15) *J. AOAC Int.*, **97**, 391 ('13). 16) *Food Add. Contam. Part A*, **30**, 1358 ('13). 17) *Curr. Opin. Food Sci.*, **12**, 37 ('17), 18) 特許 JP2019198235-下痢性貝毒ジノフィシトキシン 1 (DTX1) 高生産能を有する有毒渦鞭毛藻 *Prorocentrum* 株, 19) *HARMFUL ALGAE PROCEEDINGS OF THE 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMFUL ALGAE*, pp.34-39, ('15), 20) *Toxins*, **8**, 294 ('16). doi:10.3390/toxins8100294, 21) *Food Chem.*, **252**, 366 ('18). 22) *Food Chem.*, **298**, 125011 ('19). 23) *Cell Physiol. Biochem.*, **49**, 743 ('18). 24) *Comprehensive Analytical Chemistry*, **78**, 137 ('17).

岡 本 幸 雄 氏

(Yukio OKAMOTO)
東洋大学 名誉教授

1940年10月福井県福井市に生まれる。1971年名古屋大学大学院工学研究科博士課程応用物理学専攻修了，工学博士，同大学工学部助手。1973年日立製作所中央研究所入，主任研究員。1991年東洋大学工学部電気電子工学科教授，1998～2002年同大学大学院工学研究科委員長，2000～2009年同大学評議員・理事，2011年同大学名誉教授。1993年倉田記念学術振興会倉田奨励金受賞。2004年応用物理学会プラズマエレクトロニクス賞受賞。2009年電気学会論文賞受賞。応用物理学会フェロー表彰。2018年日本真空学会賞受賞。1996～2002年日本分析化学会関東支部幹事・常任幹事・代議員。2001～2005年電気学会関東支部協議員・埼玉支所長。2003～2018年日本真空学会理事・評議員・協議員。趣味は将棋，ゴルフ。

【業 績】

高性能大気圧マイクロ波誘導プラズマ生成技術と極微量元素分析装置の開発

岡本幸雄君は，日立製作所中央研究所に入社後，1987年秋からプラズマ発光分光分析技術の研究開発を開始し，1991年に東洋大学に転職した後も今日まで継続してこの基礎と応用技術の研究開発を行ってきた。この間，窒素 (N_2) やヘリウム (He) ガスを用いて強靱なドーナツ形状のプラズマを生成するための独創的なマイクロ波 (2.45 GHz) ランチャー (世界的呼称: Okamoto Cavity) を創出した^{1)~3)}。そして，これを用いた大気圧窒素マイクロ波誘導プラズマ質量分析装置 (N_2 -MIP-MS) を試作し⁴⁾⁵⁾，その製品化 (日立 P-7000 型) を達成した⁶⁾。さらに，先駆的な高性能の He-MIP も研究開発し³⁾⁷⁾⁸⁾，He-MIP-OES (発光分光分析装置) に関する新たな開発研究⁹⁾¹⁰⁾を展開し多くの業績を挙げてきた。これらの成果は，現在普及しているアルゴン高周波誘導結合プラズマ (Ar-ICP) を用いた OES と MS の本質的な問題点を原理的に解決できることから，これらの更なる発展に寄与するものとして注目されている。次に，同君の主な業績を簡潔に紹介する。

1. 高性能大気圧マイクロ波誘導プラズマ (MIP) の創出

Ar-ICP-OES と Ar-ICP-MS の共通のウィークポイントは，試料の励起・イオン化源として Ar-ICP を用いているために，Ar よりイオン化電圧の高いハロゲン元素などの非金属元素を直接効率的に励起・イオン化できなく，さらに，Ar に起因した質量スペクトルも複雑で妨害イオンを多数発生することにある。

同君は，この本質的な問題を解決する最も単純な方法として，従来のプラズマ生成用ガス Ar を， N_2 や He に交換する方法を研究開発した²⁾³⁾⁷⁾⁸⁾¹¹⁾¹²⁾。具体的には，従来の高周波 (27 MHz) 電力を用いて N_2 や He のプラズマを効率よく生成することは原理的に困難なことから，安価な電子レンジ用のマイクロ波 (2.45 GHz) を用いて，これらのプラズマを効率よく生成できる表面波モード¹³⁾の単純な扁平導波管タイプのマイクロ波ランチャーを研究開発した (国内外の特許取得¹⁾: Okamoto Cavity²⁾³⁾⁷⁾⁸⁾。この Cavity を用いると，電界強度の径分布から原理的に容易に ICP のような分析に最適なドーナツ形状で強靱な種々のプラズマ (He, O_2 , N_2 , Ar, Air など) を大電力領域 (≤ 1.5 kW) でも安定に生成・維持でき，従来の 2.45 GHz 用 Beenakker Cavity (供給電力 ≤ 200 W, 非ドーナツ形状) ではできなかった，溶液試料も直接高感度で分析できるようになった²⁾³⁾⁸⁾。

2. 強靱なドーナツ形状 N_2 -MIP を用いた MS の製品化

N_2 -MIP-MS の主なバックグラウンドスペクトルは $^{14}N^{16}O^+$ ， $^{14}N^+$ および $^{16}O^+$ で，Ar に起因する $^{39}Ar^+$ ， ^{40}Ar ， $^{40}Ar^{12}C^+$ ， $^{40}Ar^{16}O^+$ および $^{40}Ar_2^+$ などは検出されず，極微量の K, Ca, Cr, Fe, Se などを $^{39}K^+$ ， $^{40}Ca^+$ ， $^{52}Cr^+$ ， $^{56}Fe^+$ ， $^{80}Se^+$ などとして直接高感度で検出することに世界で初めて成功した (検出限界

5 ppt 以下)⁵⁾。そして，日立製作所で N_2 -MIP-MS を世界で初めて製品化し (P-7000 型)⁶⁾¹⁴⁾¹⁵⁾，Si ウェハ-汚染元素など半導体プロセス分野の分析評価や $^{80}Se^+$ の同位体の研究分野などで用いられた。

3. 大電力ドーナツ形状 He-MIP の創出とその発光分光分析特性と He-MIP-OES への展開

上記のような研究成果を基に，さらにハロゲン元素の直接高感度分析を目的として，イオン化電圧の最も高い He ガスを用いた He-MIP-OES の研究開発を展開した。 N_2 用の Okamoto Cavity のインピーダンスを He プラズマと整合するように電界方向の寸法を最適化するなどを行い，大電力 (2.45 GHz, ≤ 1.5 kW) でも強靱なドーナツ形状の大気圧 He-MIP を安定に生成・維持できるように世界で初めて成功した³⁾⁷⁾⁸⁾。そして，この He-MIP を用いた OES を構築し，プラズマの電子密度と励起温度のマイクロ波電力などの依存性 (電子密度: 10^{14} 個/cm³，励起温度 (高エネルギー部): 8000 K) などを明らかにした。そして，Ar-ICP-OES ではできなかった，溶液のハロゲン元素 (F, Cl, Br) などを直接高感度で検出できるようにした (検出限界: F (685.6 nm): 60 ppb, Cl (479.5 nm): 100 ppb など)³⁾⁸⁾。

同君等は，この He-MIP-OES の試料導入に熱加水分解器を結合させた新規分析システムを構築し，製鐵過程で生じるスラグ中のフッ素化合物の同定・定量化に成功した¹⁰⁾。この方法は，固体試料を熱加水分解して発生したガス成分を直接 He-MIP-OES に導入するもので，前処理と検出を一体化した迅速・簡便で高感度な分析システムとして注目されている。

さらに，この He-MIP-OES は，機能性材料の微粒子 (数 μm 以下) の組成などを高感度で測定する技術にも応用した⁹⁾。微粒子を純水中に分散させて溶液試料とし，霧化して He-MIP に導入すると効率よく励起・イオン化できた。この時の各粒子からの発光パルス信号を，原理実験用として 2 台の分光器に等分割して伝送し，各々に設定した波長で信号を時間分解して検出すると，これらのパルス信号の同期性から微粒子の組成が，波長から元素が，数から粒子数が，振幅から粒子の大きさが同時に求められることを実証した。

以上のように，岡本幸雄君の独創的な高性能大気圧マイクロ波誘導プラズマの生成技術と極微量元素分析装置の開発は，分析化学の発展に貢献するところ顕著なものがある。

〔産業技術総合研究所 津越敬寿〕

文 献

- 1) 日本特許登録番号 2781585 ('99), USA No.4933650. 2) *Anal. Sci.*, **7**, 283 ('91). 3) *IEEF Trans.*, **FM-127**, 5, 272 ('07). 4) 日本特許登録番号 2804913 ('99), USA No. 4963735. 5) *J. Anal. At. Spectrom.*, **9**, 745 ('94). 6) 日立評論, **9**, 61 ('91). 7) *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, L338 ('99). 8) 電気学会論文誌 **A-132**, 580 ('12). 9) 分析化学, **62**, 339 ('13). 10) *Anal. Sci.*, **34**, 675 ('18). 11) *HITACHI Scientific Instrument News*, **37**, 3 ('95). 12) *Appl. Spectrosc.*, **51**, 1496 ('97). 13) 鉄と鋼, **93**, 46 ('07). 14) '91 *European Winter Conf. on Plasma Spectrochemistry*, 22 ('91), (Germany). 15) HITACHI N_2 -MIP-MS P-7000, catalogue.

中 田 靖 氏

(Yasushi NAKATA)
(㈱堀場テクノサービス)

1960 年京都市に生まれる。1987 年京都府立大学大学院農学研究科修士課程を卒業後、(㈱堀場製作所)に入社。開発部門でフーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR) の装置開発を担当。2003 年分析センターに移り、赤外分光、ラマン分光、蛍光分光の依頼分析を担当する傍ら、分析技術開発を行う。2013 年開発部門にて分光製品を担当後、2016 年産官学連携推進室を経て、2020 年 1 月より(㈱堀場テクノサービス)に異動し現職。2003 年大阪大学大学院にて博士 (理学) の学位を取得。2016 年衛生工学衛生管理者資格取得。日本分析化学会近畿支部幹事および日本分光学会関西支部幹事。趣味は、ハイキング、楽器演奏。

【業 績】

共鳴ラマン分光法による単層カーボンナノチューブ解析法の開発

中田靖君は、(㈱堀場製作所)に入社以来、開発および分析部門において、同社分析装置である FTIR、ラマン分光装置、蛍光分光装置といった分光分析技術の応用開発に取り組んだ。その間、大阪大学において高分子溶液物性について研究し、動的光散乱法を用いた環状アミロスの溶液中拡散係数の分子量依存性と分子形態との関係を研究した。また、日本分析化学会をはじめとする学会活動、関連文献執筆、各種団体セミナーを通じて開発製品分析技術の普及に貢献している。特に単層カーボンナノチューブ解析法の開発における業績は顕著で、その開発手法は、実際に同社受託分析業務にて活用されている。以下に同君の主な業績について紹介する。

1. 単層カーボンナノチューブの分散技術の開発と凝集度判別

単層カーボンナノチューブ (SWCNT) 構造異性体の光吸収による共鳴特性は理論計算によって片浦プロットと呼ばれる各構造異性体のバンドギャップとチューブ直径の関係図に示されている。しかし、大きな比表面積を持つ SWCNT は、バルクでは互いに束状に凝集し、その分光スペクトルは、含有する構造異性体の平均となり、個々の異性体のバンドは複雑に重なり合う。このことが SWCNT の分光的な解析を困難にしていた。

カルボキシメチルセルロース (CMC) をはじめとするある種の多糖高分子は SWCNT の良い分散剤として知られている。分光分析の前処理である SWCNT 分散液の精製に、従来は超遠心法が主に用いられてきたが、同君らは、少量であればフィルター法により簡易的に精製できることを提案¹⁾し、近赤外発光分析装置用標準試料フィルムを開発した。また、同分散液を石英やシリコン結晶の基板上にスピコートした薄膜からは原子間力顕微鏡観察により孤立した SWCNT が確認され、孤立した 1 本の SWCNT の共鳴ラマンスペクトルが観測されることを見いだした。同薄膜には凝集した SWCNT も観察され、この部位では、SWCNT 分子間の相互作用により、理論計算の共鳴条件に従わないラマンバンドが観測されることから、同君らはこのラマンバンドを用いる凝集度評価手法の開発にも展開した²⁾。

2. 基板上孤立 SWCNT の共鳴ラマンスペクトルの測定

CMC 分散により基板上薄膜として調製された孤立チューブをマッピング測定することにより大量の SWCNT のラマンスペクトルを収集することができる。同君らは、主成分解析法を使って成分スペクトルを自動的に抽出することで、孤立 SWCNT のラマンバンドを効率よく帰属する手法を提案し

た³⁾⁴⁾。

基板上の SWCNT 薄膜より検出された半導体性孤立チューブの複数の構造異性体のラマンバンドとその構造の関係は界面活性剤ドデシル硫酸ナトリウム (SDS) 分散の測定結果と良い相関を示したことを見いだした。これを基に、同君らは CMC 分散時のチューブ直径とラマンシフトの関係式を求めた⁵⁾。

同君らはさらに、SWCNT の光学特性を示す上述の片浦プロットから、励起レーザー波長 532 nm, 633 nm, および 785 nm で励起すれば、1.4 eV から 2.5 eV までのバンドギャップを持つ金属性 SWCNT のラマンスペクトルを測定することができると考え、この 3 波長のレーザーを用いて本試料のマッピング測定を行った。孤立 SWCNT の存在が確認できた測定点の数から、チューブ直径 1.1 nm から 1.7 nm までの構造の異なる 18 種類の金属性 SWCNT 異性体について、その頻度分布を求めることができることを明らかにした⁶⁾。

3. アンチストークス・ストークスラマン散乱による分類

同君らは、界面活性剤 SDS 分散の SWCNT 溶液を石英基板上にスピコーティングした薄膜をマッピング測定し、取得したストークス側とアンチストークス側の両方の共鳴ラマンスペクトルを使ってクラスタリング解析による分類を試みた。スペクトルベクトル間の余弦角を類似度とすることで、バンド強度が弱いスペクトルでも正確に分類でき、また、アンチストークスのみで共鳴するチューブがあることから、本手法を用い共鳴条件の識別も可能であることを示した⁷⁾。

4. 識別マーカインクへの応用

SWCNT は他のカーボン材料と基本構造は同じであるが、チューブ構造特有の共鳴ラマンバンドを持つことから、複数の構造異性体の成分比率によって多様なインクが作成できる。そのインクは、他の黒色インク文字上でもラマン分光法で明瞭に識別できることから、SWCNT 分散黒色インクは秘匿性の高いインクとして利用できることを提案した⁸⁾。

以上、中田 靖君の共鳴ラマン分光法による単層カーボンナノチューブ解析法の開発を中心とする業績は分析化学の発展に貢献するところ顕著なものがあり、分析技術の普及に極めて優れた貢献をなすものである。

〔京都大学産官学連携本部 加納健司〕

文 献

- 1) US Patent App. 11/680499 ('08).
- 2) 特開 2010-107382 (2010). US Patent 8102524 (2012).
- 3) 特許 04435299 (2010).
- 4) 特許 04484780 (2010).
- 5) *The 20th International Conference of Raman Spectroscopy* ('06).
- 6) *The 22nd International Conference of Raman Spectroscopy*, 1267, 576 ('10).
- 7) 応用物理学会 ('05).
- 8) 日本法科学技術学会 ('17).

西島喜明氏

(Yoshiaki NISHIJIMA)
横浜国立大学大学院工学研究院准教授

1981年11月北海道釧路市に生まれる。2004年北海道大学理学部化学科卒業、同大学大学院理学研究科化学専攻入学、2006年博士課程前期修了、同大学情報科学研究科生命人間情報科学専攻入学、2009年博士課程後期修了。在学中は喜多村昇教授（現名誉教授）、三澤弘明教授（現特任教授）の指導を受け、2009年に「微粒子集積型微小構造の光学的性質に関する研究」で博士（情報科学）の学位を取得（北海道大学）。現在は、横浜国立大学にて中赤外プラズモニクス材料の開発とセンサーやエネルギー応用に関する研究に取り組んでいる。趣味は写真と料理。



【業 績】

高感度気体センシング技術のための中赤外プラズモニクスデバイスの構築

西島喜明氏は、中赤外プラズモン材料の光学特性を巧みに駆使して、プラズモン増強効果を利用した各種デバイスを構築し、気体分子の高感度検出に応用することに成功した。また、高効率なプラズモニック合金材料を見いだすなど、重要な周辺技術を構築した。以下に同氏の主要な研究業績を記す。

1. メタルホールアレイによる表面増強赤外吸収の発現と中赤外気体センサーへの適応

空気中の微量物質を超高感度で検出するセンシング技術は、工場の監視や医療、空港や港湾のセキュリティチェックなど安心安全技術の確立など多方面への展開が期待されている。現在、気体のセンシングに、NDIR（Non dispersive infrared）法に基づく赤外光センサーが広く用いられている。赤外吸収係数は、紫外・可視領域の光吸収係数と比較すると1/100以下の大きさであり、part per million（ppm）レベルの高感度分析を実現するためには、100 cm以上の光路長を必要とするなど、センサーデバイスが大型化する欠点があった。西島氏はこれらの課題を解決するために、赤外プラズモニクスによる表面増強赤外吸収に着目した。透過型のプラズモン共鳴材料であるメタルホールアレイ（MHA）構造体を利用し、MHA表面に存在する分子に光を入射すると、プラズモン共鳴波長で、特定の赤外吸収スペクトルの吸光度を選択的に増強できることを見いだした¹⁾。この成果をもとに中赤外気体センサーを構築した。MHAは透過型のプラズモン材料であり、NDIRの窓材として用いることで、赤外吸収の吸収係数を増強できる。これにより、ターゲットガス種を選択的に計測できるNDIRシステムを構築した。プラズモン増強により従来の1/20以下の光路長で10倍以上の高感度化を実現した²⁾。さらにガスセルの内壁に反射・散乱型のプラズモン材料を使うことにより、多重増強によって100倍近い増強が得られることを世界で初めて示すことに成功した³⁾。実験的・理論的な検証からは、金属表面から数10 μm内に存在する分子のシグナルが増強されるため、光路長を数10 μmとしてもppbレベルの極低濃度が検出できるセンサーとなることを実証した。

2. プラズモン光熱変換機構の解明と、中赤外気体センサーに向けた光源・検出デバイスの構築に関する研究

金属-誘電体-金属ナノ構造（MIM構造）で構成したプラズモン光吸収構造（光吸収メタ表面）は、Kirchhoffの熱放射の法則に基づいて光熱変換を実現できる。すなわち、光吸収性のナノ構造体を加熱すると、熱放射を制御して共鳴波長に対応した特定の波長の光のみを放射することができる。また、共鳴波長の光を吸収すると発熱することにより、ポロメーターとして

光吸収できる。西島氏は、この構造体を網羅的に探索し、95%を超える光吸収体（完全吸収構造体）を実現した⁴⁾⁵⁾。さらに、これらの構造体の光熱変換実証実験を通し、効率の良い光熱変換が行われていることを実証した。すなわち、構造体を300℃程度まで加熱すると、共鳴に対応した光放射が効率よく発生し、逆に赤外光を入射すると、光吸収が大きい構造体ほど、良く発熱し、赤外光を検出できることを明らかにした⁶⁾。これらのナノ材料体は、従来の赤外LEDや赤外検出器と比較しても非常に効率が良く、また、MEMS技術と組み合わせることにより、小型・低消費電力化も容易に実現できる。中赤外領域のプラズモニクス材料は構造サイズが数100 nmから数μm程度であり、既存の半導体微細加工技術、特に縮小露光を用いた高速露光システムやMEMSプロセスなどと非常に相性が良い。したがって将来的な社会実装の際に大面積加工なども容易に行うことができる。例えば西島君らは8インチシリコンウェハ全面に均一な構造を作製するなど、そのプロセスの有用性についても実証した。

3. プラズモニクスに関する新奇合金材料の開発に関する研究

プラズモニクス分野において、一般的に使用される金属材料は、金・銀・銅・白金などのいわゆる貴金属元素に限定される。このような課題点を克服するために、西島氏は、新奇プラズモニック合金材料を開発した。プラズモン共鳴は自由電子の運動に起因する現象であり、誘電率を実験的に決定できれば、プラズモン特性を評価することができる。透過・反射スペクトル計測から、複素誘電率などの光学的性質を実験的に評価する手法で、実に38の組成にも及ぶ金・銀・銅の3元系合金で複素誘電率を世界で初めて決定し、ドルーデモデルに基づく材料解析を行った^{7)~9)}。その結果いくつかの組成で純粋な金を超越する、巨大な電場増強効果を得られる組成を見いだすことに成功した。

以上のように、西島喜明氏は、プラズモニクスを利用したデバイスの開発やそれを利用した気体センサーの開発、新奇プラズモン材料の開発など、プラズモニクスを利用した高感度センサーを構築するための基盤となる独創的な研究を展開して顕著な成果をあげており、今後の分析化学の発展に貢献するところが大きい。

〔北海道大学大学院工学研究院応用化学部門 渡慶次 学〕

文 献

- 1) *Optical Materials Express*, **2**, 1367 (‘12).
- 2) *Optical Materials Express*, **3**, 968 (‘13).
- 3) *Sensors and Materials*, **29**, 1269 (‘17).
- 4) *ACS Applied Nano Materials*, **1**, 3557 (‘18).
- 5) *Micromachines*, **11**, 437, (‘20).
- 6) *Scientific Reports*, **9**, 8284 (‘19).
- 7) *Optical Materials Express*, **2**, 1226 (‘12).
- 8) *Applied Physics A*, **117**, 641 (‘14).
- 9) *Scientific Reports*, **2**, 25010 (‘16).

蛭田 勇 樹 氏

(Yuki HIRUTA
慶應義塾大学理工学部 専任講師)

1985年7月神奈川県に生まれる。2008年慶應義塾大学理工学部応用化学科卒業、2010年慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻前期博士課程修了、2013年同後期博士課程修了。在学中は鈴木孝治教授の指導を受け、「有機・無機ハイブリッド材料を用いた蛍光検出型オプティカル pH センサー」で博士（工学）の学位を得る。2010年慶應義塾大学大学院理工学研究科助教（有期・研究奨励）、2011年日本学術振興会特別研究員（DC2）、2013年慶應義塾大学薬学部助教を経て、2017年4月より現職。現在は蛍光・生物発光プローブの開発とバイオイメージングへの応用展開を進めている。趣味は、旅行、ランニング、スキー。



【業 績】

精密分子設計に基づくバイオイメージングプローブの開発と応用

蛭田勇樹氏は、生きた細胞、動物を非侵襲にリアルタイムかつ高い空間分解能で、画像情報として捕らえる蛍光・生物発光イメージングに着目し、特定の条件下で目的物質のみに強く発光する、もしくは波長（色）が変化する蛍光・生物発光プローブを開発してきた。同氏は、低分子から高分子までを用いた精密分子設計に基づき開発したプローブを細胞イメージングに応用している。以下に、主な研究成果を紹介する。

1. 低分子プローブ

同氏は、特定のイオンに選択的応答を示すイオノフォアを蛍光色素に組み込むことで、高感度かつ選択的に目的のイオンを認識して応答する蛍光プローブを開発してきた^{1)~6)}。特に、自家蛍光や生体組織による吸収、散乱が少ない近赤外領域に蛍光を持つプローブに注目し開発を進めてきた^{4)~6)}。近赤外蛍光プローブは、可視光域に蛍光を持つ様々なプローブとのマルチカラーイメージングが可能である。このような近赤外蛍光プローブの利点を活かし、細胞内マグネシウムイオンと関連シグナルとの同時イメージングを行なった⁶⁾。近赤外蛍光色素として Si-ローダミン、マグネシウムイオンキレート部位としてベータジケトンリガンドを導入した KMG-501 を開発した。近赤外領域においてマグネシウムイオンに対して選択的に Turn-ON 型の PeT 応答を示した。KMG-501 による細胞質マグネシウムイオンイメージングに加え、ミトコンドリアの膜電位蛍光プローブの TMRE、ATP 蛍光プローブの ATeam との併用により、脱分極剤である FCCP 刺激した際の海馬ニューロン細胞のマルチカラーイメージングを可能とした。本研究は、細胞イベントにおけるマグネシウムイオンの役割を解明していくためのプラットフォーム技術となり、疾患のメカニズム解明や新たな生命現象の発見に貢献することが期待される。

近年、蛍光イメージングに加えて、生物発光イメージングが生体現象を可視化する技術として注目されている。生物発光は、酵素基質反応であり、励起光不要のためバックグラウンドが低く高感度な分析が可能であるため、生体内物質の挙動解明のためのトレーサーとして用いられている。同氏は、生物発光系の中でも最も明るい発光系を示す Furimazine (FMZ) /

NanoLuc 発光系に注目し、これまで基質である FMZ が不安定であり長時間の分析が難しいという課題を、基質の改変により解決した。新規 FMZ 誘導体を開発することで、既存の FMZ よりも 10 倍以上の長時間生物発光イメージングを 1 細胞レベルで達成した。

2. 高分子プローブ

同氏は、医療分野への応用を視野に入れて、刺激応答性ポリマーを基盤とした生体可視化ポリマープローブの開発を行ってきた。がん細胞などの病態細胞は正常細胞と比べ、細胞内の反応の活性が高く、正常細胞より熱生成（発熱）が大きいことが知られている。がん細胞では正常細胞とは異なったエネルギー代謝がされており、熱発生率が高いほどがんの悪性度が高く、生存率が低くなるということが報告されている。また、固形がん周囲の pH が正常組織と比べて低 pH であることが知られている。これらの違いを認識することができれば、病態細胞のイメージングや病態細胞のターゲティングへの応用が期待される。このような背景から、同氏は、温度応答性高分子である Poly(*N*-isopropylacrylamide) を基本骨格とした温度や pH といった刺激に応答する高分子を設計・合成し、高分子の末端に蛍光色素を結合させた蛍光ポリマープローブを開発してきた^{7)~9)}。この蛍光プローブは、細胞がおかれた温度、pH を認識して細胞への取り込みが変化し細胞を蛍光させるため、低 pH 環境にある固形がん選択的なイメージングへの応用が期待される。また、蛍光イメージングに加え、抗がん剤の選択的なデリバリー技術も開発しており¹⁰⁾、「治療」と「診断」を同時に行うセラノスティクスに研究を展開させている。

このように、同氏は、精密分子設計により独創的な蛍光・生物発光プローブを開発し、それらを細胞イメージングに応用してきた。これらの業績は、今後の分析化学の発展に貢献するところ大である。

〔九州工業大学大学院工学研究院 竹中繁織〕

文 献

- 1) *Analyst*, **134**, 2314 (09).
- 2) *Anal. Sci.*, **26**, 297 (10).
- 3) *RSC Adv.*, **3**, 6499 (13).
- 4) *Org. Lett.*, **17**, 3022 (15).
- 5) *Dyes Pigm.*, **181**, 108611 (20).
- 6) *Anal. Chem.*, **92**, 966 (20).
- 7) *ACS Macro Lett.*, **3**, 282 (14).
- 8) *Sens. Actuators B*, **207**, 724 (15).
- 9) *Colloids Surf. B*, **153**, 2 (17).
- 10) *RSC Adv.*, **7**, 29540 (17).

小崎 大輔 氏

(Daisuke KOZAKI)
(高知大学教育研究部 (理工学部) 講師)

1984年2月愛知県春日町に生まれる。2007年中部大学応用生物学部卒業。2009年広島大学大学院国際協力研究科博士前期課程修了。2012年同大学大学院国際協力研究科博士後期課程修了。在学中は田中一彦教授の指導を受け、2012年に「イオンクロマトグラフィーを用いる簡便な水質モニタリング法の開発」というタイトルにて博士(工学)の学位を得る。2011年より日本学術振興会特別研究員(DC2)を経て、2013年6月よりFaculty of Industrial Science and Technology, University Malaysia Pahangの講師としてマレーシアへ赴任。2016年7月に帰国後、2017年4月より現職。現在は、複合分離型イオンクロマトグラフィーを用いた環境、食品、農業分野における効率的反応解析法の開発に取り組んでいる。趣味は都内の銭湯巡り。



【業績】

複合分離機構型イオンクロマトグラフィーを用いた多成分同時分離定量法の開発と応用

小崎大輔君はこれまでに“分離原理を複合的に発現させる一連のイオンクロマトグラフィー(IC)”の開発に携わってきた。その中で、化学、生物学などにおいて重要度の高い『鍵』となる反応に着目し、それらの効率的な解析を目的に、複合分離機構型(Multi-Functional Separation Mode: MFSモード)ICの開発と環境、食品、農業分野における応用研究を行ってきた。同君の主な研究業績の内、本稿では以下の2項に焦点を絞って紹介する。

1. MFS-ICを用いた水圏環境中の微生物反応解析^{1)~7)}

一般的にイオン排除分離は弱酸の分離に適した分離モードであり、スルホ基の修飾された樹脂固定相と強酸性の移動相を用いる。しかしながら、固定相のスルホ基は一般的に完全解離状態であることから、強酸性の陰イオン(SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻)は完全排除される一方、1価及び2価陽イオンの分離に関しては、静電的吸着強度に大きな差があり、同時分離は困難であった。

小崎君らのグループでは、カルボキシル基が修飾された樹脂固定相と酸性の有機酸移動相を用いることにより、カルボキシル基の解離を移動相のpHにより制御し、強酸及び弱酸性の陰イオンの分離を陰イオン排除作用により達成している。また、スルホ基ほど強い静電的吸着を示さないカルボキシル基により、1価及び2価陽イオンの分離も陽イオン交換作用により達成している。

同君は上記のMFS-ICの分析対象が水圏環境における微生物反応において重要な鍵となるイオン類(SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺)を含むことに着目し、溶存酸素量(DO)の測定を併用した水圏微生物の反応解析を日本国内及び東南アジア諸国(インドネシア及びマレーシア)において実施している。具体的な解析対象反応としては、DO値に依存して切り替わる有機物の好氣的/嫌氣的分解反応、硝化反応、脱窒素反応及び硫酸還元反応などである。反応解析の結果、水圏微生物反応の効率の評価が可能であり、主要な汚染地域の特定が可能であったことに加え、解析結果からDO値を予測することも可能であることを明らかにしている。

2. MFS-ICを用いた酵母の発酵に関する反応解析^{8)~10)}

小崎君は、近年、発酵食品分野において、新規酵母の開発が活発に行われ、それらの総合的な発酵特性評価が非常に重要になってきていることに着目し、酵母の発酵に関連する反応解析のためのMFS-ICの開発を行っている。具体的には、アル

コール醸造において、単行複発酵により醸造されるビールを対象とし、醸造過程において重要な主要イオン類(無機陽/陰イオン類、有機陰イオン類)及びエタノールの同時定量法の開発を行っている。本MFS-ICは上記の第1項で紹介した手法における移動相を疎水的な有機酸であるフタル酸に変更し、カルボキシル基の解離に加え、疎水性相互作用を制御することにより、陰イオン排除、陽イオン交換及び疎水性相互作用分離機構を発現させている。その結果、ビール中の主要な6種類の有機酸(ピルビン酸、クエン酸、リンゴ酸、乳酸、酢酸、コハク酸)、5種類の無機陰イオン(SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, リン酸およびケイ酸イオン)、5種類の陽イオン(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)及びエタノールが同時に分離定量可能なMFS-ICの構築を達成している。上記の分析対象成分は、発酵過程において重要な鍵となる『アルコール発酵』の発酵物質であるピルビン酸と最終生成物であるエタノール、『クエン酸回路』において生成される種々な有機酸及び酵母の活性を示すリン酸イオンを含んでおり、単行複発酵において鍵となる反応に加え、酵母の活性評価が可能となる。

また、同君は『アルコール発酵』と『クエン酸回路』だけでなく、醸造過程において重要なもう一つの反応である『解糖系』についての解析も可能にする、無機/有機陰イオン類、エタノール及び糖の同時分離のためのMFS-ICの開発にも着手している。本MFS-ICはスルホ基及びカルボキシル基が修飾された多孔性樹脂固定相と疎水的な有機酸であるフタル酸を移動相に用い、陰イオン排除作用及び疎水性相互作用により無機及び有機陰イオン類を、低分子量サイズ排除作用及び疎水性相互作用によりエタノール及び糖類の同時分離を達成している。

上述の両MFS-ICは既に高知県内の酒造との共同研究において、日本酒醸造における発酵最適化のための手法として試験的に導入されており、透析膜によるオンライン前処理を組み合わせ、醸造の進行に伴ったグルコース、エタノール及び有機酸類の濃度推移が明瞭にモニタリング可能であり、同時に酵母の活性評価も可能であることを明らかにしている。

以上のように、小崎大輔君が体系化を進める複合分離機構型ICは、化学及び生物学などにおいて非常に重要度の高い反応の効率的な解析を可能にする分析手法であり、既に環境、食品、農業分野における試験的導入に至っているなど、今後の分析化学の発展に大きく寄与するものと期待される。

(名古屋工業大学大学院工学研究科 大谷 肇)

文 献

- 1) *Anal. Chim. Acta*, **619**, 110 ('08), 2) *分析化学*, **57**, 651 ('08), 3) *Anal. Sci.*, **27**, 499 ('11), 4) *Anal. Sci.*, **28**, 845 ('12), 5) *Anal. Sci.*, **29**, 121 ('13), 6) *Water*, **6**, 1945 ('14), 7) *Sustainability*, **11**, 3813 ('19), 8) *Anal. Sci.*, **27**, 505 ('11), 9) *Food Chem.*, **240**, 386 ('18), 10) *Food Chem.*, **274**, 679 ('19).

鈴木 哲仁 氏

(Tetsuhito SUZUKI
京都大学大学院農学研究科 助教)



1987年5月愛知県名古屋市に生まれる。2010年京都大学農学部地域環境工学科卒業、2012年同大学大学院農学研究科地域環境科学専攻修士課程修了。同年より日本学術振興会特別研究員(DC1)を経て、2013年に同大学農学研究科助教、現在に至る。在学中は近藤直教授、小川雄一准教授の指導を受け、「多様なサイズの対象物に対する金属メッシュのセンサ応用に関する研究」で博士(農学)の学位を取得。現在は、農畜水産物のセンシング技術の創成を目指し、テラヘルツ領域から紫外領域の分光ならびにセンサ開発に取り組んでいる。趣味は、音楽鑑賞と弦楽器演奏。

【業 績】

金属周期構造を用いたテラヘルツ帯センサの開発と食の安全に資する光分析分野への展開

鈴木哲仁君はこれまで、テラヘルツ帯を中心とした様々な帯域で動作する金属周期構造(金属メッシュ)を用いたセンサ応用の研究、ならびに農畜水産物の散乱や蛍光などの光学的特性を利用した品質評価に関する研究を進めてきた。主な研究成果を、以下の3点にまとめる。

1. 金属周期構造のサイズ制御と食品簡易検査への応用

網目状の金属薄膜から成る金属メッシュは、周期的にならんだ開口と入射光との相互作用により共鳴が生じ、異常透過と呼ばれる特異な透過特性が見られる。金属周期構造のピッチと同程度の波長の光を入射した際に、金属表面や開口部に電界が強く局在し、この部分に誘電体が付着するとその複素屈折率変化に応じて周波数特性がシフトするため、非標識センサとしての利用が可能となる。Niなどの安価な金属でも周期構造により共鳴を励起でき、さらにその周期サイズ次第で様々な帯域で共鳴が生じるため、安価でディスプレイ可能なセンサを実現できる。そこで同君は、金属メッシュの周期構造サイズとセンサの検出感度との関係を明らかにしてきた¹⁾²⁾。電磁界解析により、周期構造の寸法スケールを小さくすると、それに比例して動作する共鳴波長は短く(周波数は高く)なり、開口部の電界はより表面近くの狭い領域に強く局在するため、より小さい対象物を感度よく検出できる。実験的にも、センサ表面にSiO₂膜やタンパク質で薄層を成膜して透過測定を行った比較した結果、メッシュ構造が細かいほどシフト量も増加し、より高感度に定量できることが確かめられた。すなわち金属メッシュセンサでは、検出対象のサイズに合わせて、センサの周期構造サイズや周波数(波長)帯を設計することができ、汎用性が高いセンサとして用いることができることを明らかにした。実際に動作帯域が中赤外からテラヘルツ帯(波長: 3 μm~3 mm)にいたる様々なサイズの周期構造を作成し、タンパク質や細菌、花粉など、食や環境の安全に関わる様々な検査対象をセンシングすることに成功している。

2. 多孔質高分子膜との複合型金属メッシュによる機能的なセンシングへの応用

短波長で動作する目の細かいメッシュ構造を用いれば、微小物質を高感度に検出できる一方で、波長の長いテラヘルツ帯はメンブレンフィルタなどの多孔質高分子膜を透過しやすい性質を持つ。同君は、多孔質高分子膜と金属メッシュを組み合わせたセンシングを提案し、下記の通り、機能性を賦与したセンシ

ングに成功した³⁾。メンブレンフィルタのサイズ分級能を利用して、大腸菌を透過したPTFE製メンブレン表面に金属メッシュを密着させて計測したところ、最小検出菌数は 1.5×10^5 cells/mm²、乾燥重量で45 ng/mm²となり、十分に実用が期待できる感度であることが確認できた。メンブレンフィルタは汎用用途のほか、ウェスタンブロットなどの分析の基材にも広く用いられており、これらを非標識で簡便かつ迅速に検出できると期待される。また、強く電界が局在する開口内部を満たすように検出対象をより多く固定できれば感度が向上するものと期待できる。そこで、エポキシ系ポリマーモノリス基材から成る多孔質高分子を開口内部に充填し、対象を固定する足場として利用することで、感度を向上させられることを明らかにした⁴⁾。ピオチン-ストレプトアビジン反応の定量により感度の比較を行ったところ、金属メッシュ単体に反応層を形成して定量した場合と比べて8.5倍の感度向上が確認できた。また卵アルゲンを用いてタンパク質の定量にも有用であることを示し、金属メッシュとポリマーの融合により機能的なセンシングを実現できることを明らかにした。

3. 農産物・食品の光学特性に基づいた分光計測への新展開

将来的に各種光技術を利用して農畜水産物や食品の検査技術の構築を目指すにあたり、これら対象物の光学的な特性の理解が欠かせない。同君は、紫外から可視、近赤外、中赤外、テラヘルツ、ミリ波に至るまで、幅広い帯域で実際に農畜水産物や食品を分光分析し、吸収や散乱、蛍光の特性を活かした新たな品質や鮮度の分析手法を提案してきた。例えば、テラヘルツ帯における農薬成分の分光分析⁵⁾、テラヘルツ波の透過・回折特性を利用した粉末食品中の異物検出⁶⁾、近赤外光の光散乱特性を利用した食品の凝固性評価⁷⁾、蛍光特性を利用した農畜水産物の熟度ならびに鮮度の評価⁸⁾など、農畜水産物や食品の特性を利用した多岐にわたる分析が挙げられる。

以上のように鈴木哲仁君は、金属メッシュの周期構造のサイズ制御やポリマーとの融合により高感度で機能的なセンシングを実現するとともに、農産物・食品の分光分析により新たな品質評価を提案してきた。このような新奇なセンシングの発展は、食の安心・安全のための光分析の可能性を広げ、今後の分析化学の発展に大きく寄与するものである。

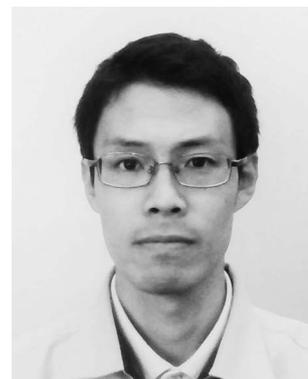
[中央大学理工学部応用化学科 上野祐子]

文 献

- 1) T.SICE, **49**, 54 ('13). 2) *IEEE Sens. J.*, **13**, 4972 ('13). 3) 農業食料工学会誌, **76**, 208 ('14). 4) *JJSLSM*, **39**, 335 ('19). 5) *EAEF*, **4**, 90 ('11). 6) 農業食料工学会誌, **81**, 159 ('19). 7) *EAEF*, **11**, 38 ('18). 8) *J. Food Eng.*, **287**, 110111 ('20).

米田 哲 弥 氏

(Tetsuya YONEDA
 (株)島津製作所分析計測事業部
 X線/表面ビジネスユニット・主任)



1985年大阪府に生まれる。2009年大阪大学工学部卒業、2011年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。在学中は河田聡教授、井上康志教授、Prabhat Verma教授の指導を受け、先端増強ラマン散乱や非線形光学について研究。2011年(株)島津製作所入社、分析計測事業部X線/表面ビジネスユニット配属。配属当初からX線分析装置の開発を担当。2017年から同社基盤技術研究所にて新規の蛍光X線分析装置の研究開発に参画し、その後、X線/表面ビジネスユニットにて同蛍光X線分析装置の製品化開発に従事。2018年米国開催のデンバーX線会議にてベストポスター賞受賞。2019年から表面化学分析技術国際標準化委員会のX線表面分析 (ISO/TC 201 SC 10) WG委員。趣味は、読書とサッカー観戦。

【業 績】

高精度蛍光X線分析装置の開発と電池材料解析への応用研究

米田哲弥君は、勤務する島津製作所においてX線分析装置や要素技術の研究開発を行ってきた。入社当初より研究開発をけん引した経験を活かし、状態分析を実現する蛍光X線分析装置「Xspecia™」の製品化に成功した。同装置によるリチウムイオン電池用正極材料の分析を実現し、さらにその装置の普及に取り組んでいる。同君の主要な業績を以下に記す。

1. 同時多波長分散型蛍光X線分析装置 (PS-WDXRF) の開発

リチウムイオン電池 (Lithium-ion battery, LIB) の開発過程ではLIBの各構成要素の反応機構や劣化原因の解明のため、様々な状態分析手法が用いられる。他の高機能材料の開発を含め、産業界では状態分析の簡便化が求められており、蛍光X線分析はその一翼を担うものとして期待されている。実際、エネルギー分解能に特化した蛍光X線分析装置を用いることで、数百meV以下のピークエネルギーのシフトとして、化学状態の違いを識別できることが報告されているが^{1)~4)}、一般の状態分析手法としては地位確立の途上にある。これは、一般的な蛍光X線分析装置が定量分析や定性分析を用途に設計され、状態分析に必要なエネルギー分解能と繰返し再現性を有さないためである。先の数百meVという値は分光結晶の熱膨張の影響に埋もれるほどわずかなシフトであり、機械的位置再現性や温度安定性の向上などが不可欠である。

同君らは簡便な状態分析の実現を目的に、新たな蛍光X線分析装置を開発した⁵⁾⁶⁾。本装置はX線管球、スリット、分光結晶、1次元アレキ検出器というシンプルな構成の波長分散型蛍光X線分析装置でありながら、走査機構なく蛍光X線スペクトルの取得を実現するものである。これは、スリットを通過したX線のうち平板結晶でのブラッグ条件を満たすX線のみが1次元アレキ検出器にて計数されるためである。検出器の各素子には対応するエネルギーのX線のみが入射するため、走査機構を排した分光系でスペクトルを取得できる。同君らは、Mn, Co, Niの3元素のK線を含む、約6keVから8keVまでを取得対象のエネルギー領域として装置を設計し、CoとNiのK α 線がそれぞれK α_1 とK α_2 に分離できるエネルギー分解能を実現した。

同君らの開発した装置は、機械的誤差要因のない構成と高精度な装置内温調やその他外乱抑制に基づき、高いエネルギー同定精度を有する。実際に状態の異なるマンガン酸化物において、Mn K $\beta_{1,3}$ 線のピークエネルギーの違いを十分なエネルギー同定精度で識別できることを報告している。なお、得られたピー

クエネルギー同定精度0.1eV以下という値に対し、検出スペクトルのFWHMは6eV程度である。これは、十分なカウント数によりデータの統計誤差(量子ノイズ)を抑制することで、高精度なピーク位置検出が可能であることを示している。

2. リチウムイオン電池への同装置の応用

同君らは、国立研究開発法人産業技術総合研究所と共同で、上記開発装置を実際のリチウムイオン電池 (LIB) の正極材の評価に応用し、その有効性について確認した⁵⁾⁶⁾。充放電状態の異なるLIBを準備し、正極材のみを取り出した後、洗浄して、その正極材をラミネートしたものを同蛍光X線装置での測定試料とした。LIB用正極活物質として代表的な三元系活物質NCM523を選定し、MnK β , CoK α およびNiK α の3スペクトルを同時に取得できるという装置の特長を活かし、3元素同時の状態分析を行った。LIBの充放電に伴う各元素の酸化状態の変化幅から、コバルトよりもニッケルがLIBの電荷補償に大きく寄与していること、さらにマンガンが電荷補償に寄与していないことが確認できた。このように各元素の電荷補償への寄与を確かめることは、高価なコバルトの使用量抑制につながり、LIBの原価低減といった材料設計の指針作りに役立つ。また、これらの結果は放射光施設でのXANES測定の先行事例とも傾向が一致しており^{7)~10)}、同君らが開発した本装置は蛍光X線分析の新たな可能性を切り拓いたと言える。これらの成果は米国開催のデンバーX線会議でもベストポスター賞を受賞するなど、学術的にも高く評価されている。簡便な状態分析の実現により、研究開発用途での分析手法としてだけでなく、品質管理の新たな指標としても期待されている。

以上のように、米田哲弥君は状態分析を実現する蛍光X線分析装置の研究開発に取り組み、装置安定化を含む要素技術の確立や各所との技術連携に基づき、「Xspecia™」の製品化に成功している。これらの研究開発成果は、産業応用を見据えた分析技術であり、今後装置の普及と共に分析技術の発展に大きく貢献することが期待できる。

(東京理科大学理学部化学科 宮村一夫)

文 献

- 1) *J. Spectroscopic Soc. Japan*, **18**, 235 ('69).
- 2) 蛍光X線分析の実際, p.24 ('05), (朝倉書店).
- 3) *Phys. Rev. Lett.*, **65**, 2193 ('90).
- 4) *X-ray Spectrom.*, **28**, 470 ('99).
- 5) *X-Ray Spectrom.*, **46**, 330 ('17).
- 6) *Advances in X-ray Analysis*, **62**, 118 ('18).
- 7) *Anal. Chem.*, **92**, 758 ('20).
- 8) *J. Appl. Phys.*, **120**, 142125 ('16).
- 9) *J. Appl. Phys.*, **97**, 113523 ('05).
- 10) *J. Surf. Anal.*, **25**, 90 ('18).
- 11) *The TRC News*, **201705-03**, 1 ('17).

Xspeciaは、株式会社島津製作所の商標です。

桜井 健次 氏

(Kenji SAKURAI)
元 (国)物質・材料研究機構 上席研究員

1959年三重県生まれ。1983年東京大学工学部工業化学科卒業。1988年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(工学博士)。同年科学技術庁金属材料技術研究所入所, 2001年省庁改組により物質・材料研究機構, 2020年3月定年退職。1993~1994年英国ウォーリック大学客員研究員, 2003~2011年チェコ共和国チャールズ大学数学物理学部特任教授, 2004~2020年筑波大学大学院数理物質科学研究科物質・材料工学専攻教授を兼務。編著書として「新版 X線放射率法入門」(講談社, 2018), 「リファレンスフリー蛍光 X線分析入門」(講談社, 2019)。コンピュータプログラミング歴は約40年, なお現役, 実験機器制御やデータ解析のソフトウェアほぼ全部を自作。趣味は味噌, 梅干し, ジャムづくり。現在は田舎で隠遁生活を満喫。

【業 績】

新しい X線イメージング技術の開拓

桜井健次氏は, 物質・材料の研究開発を専門とする国立機関に永年所属し, 主に近未来の材料開発に資する分析・計測の新技术・新装置の研究に従事してきた。高エネルギー加速器研究機構や SPring-8 で, その高い輝度や平行性, 単色性, 直線偏光性等を活用した高度な X線分析の技術開発に携わる一方, 日々, シンチレータ結晶やアモルファス合金, 機能性ポリマー薄膜の作成と構造・機能評価にかかわる研究を行ってきた。その過程で, 同一条件で作成された多数の試料の間に見られる個性の違いが, 試料全体を代表する平均的な化学組成や原子レベルの構造というよりも, むしろ不均一さの差異がかかわっていることに気づくことが多くあった。そこで, 部分と全体の関係を画像化するイメージング技術に特に注力するようになった。X線イメージングのなかでも, 透過 X線のラジオグラフィは既に便利な可視化ツールになっているが, そのほかの X線分析技術ではイメージング機能にまだ不十分点が多く残っている。独自の研究により, これまでイメージング自体がなかった X線・中性子反射率にイメージング機能を実現するための新しい原理や方法を発明し, また, 蛍光 X線・XAFS・X線回折について, これまで難しかった動画・スナップショットでの画像化を可能にする新技术を発明した。以下にその業績について記す。

1. 埋もれた薄膜界面の可視化 (X線・中性子反射率イメージングの発明と実用化)^{1)~8)}

固体薄膜の積層構造は, 断面試料の電子顕微鏡観察により検討されることが多い。これと等価な情報を非破壊的に高効率に取得するには X線放射率法がよく用いられる。種々の機能の顕著な差は, 全体から見ればわずかな面積・体積になる特定部位の構造の差異によって生まれる場合があり, 広面積で見た構造はどれも似通って見え, ピンポイントで狭い領域を狙う時は全体を把握して行う必要がある。機能と構造の関係を議論するには, こうした試料内での不均一さに注意を払う必要があるが, 電子顕微鏡も X線放射率法も十分ではなかった。

同氏は, コンピュータ・トモグラフィ(多数収集した透過画像から断層像を数学的処理で得る方法)と類似したアルゴリズムを用い, X線放射投影から, 埋もれた層・界面を実空間の分布像を取得する新しいイメージング技術を世界に先駆け開発した。2010年代前半に最初の成果¹⁾を発表し, 2010年代後半には更に空間分解能の高い技術²⁾や低出力の空冷 X線管で使用できる機器³⁾を開発した。さらに観察領域の任意の地点の X線放射率プロファイルを抽出することも可能にし, マイクロ・ナノビームを利用することなく, 特定の地点の薄膜構造の解析を可能とした⁴⁾⁵⁾。このアイデアにより, これまでイメージング機能の付与がほぼ不可能と思われていた中性子反射率にまで拡張して適用されたことは画期的であり^{6)~8)}, アプローチの難し

かった薄膜界面の未解決問題が, この新技术により解明が進むと期待される。

2. 化学組成・結晶構造等の動画・スナップショット(蛍光 X線・XAFS・X線回折イメージング)^{9)~28)}

現状の化学組成分析や結晶構造解析の多くは, 試料の均一さを仮定することが多いが, その一方で不均一さや分布が主たる興味関心もしくは検証の対象となる場合がある。注目している視野の化学組成や結晶構造をスナップショットもしくは, 変化を含めて動画撮像したい場合がある。既に確立されている微小 X線ビームを XY 走査する方法でも画像は得られるが, 開始点と終了点があり, 時間差が生じるため, スナップショットや動画撮像は難しかった。

同氏は, 1990年代後半から 21世紀初頭にかけて, 試料上の広い視野に X線を照射し, そこから出てくる蛍光 X線や回折 X線を 2次元検出器で撮像する方法の開発に取り組み⁹⁾, 放射光を用いた高速動画¹⁰⁾¹¹⁾やモノクロメータ走査に対応した XAFS イメージング¹²⁾¹³⁾を達成し, 1枚の基板上に多数の試料を作りこんだコンビナトリアル・ライブラリの迅速解析への応用^{14)~16)}における有用性を明らかにした。さらに XAFS イメージングとほとんど同じ配置で, 着目するエネルギーを X線吸収端から格子面間隔に対応するブラッグエネルギーに変更するだけで, 多結晶を対象とする X線回折イメージング¹⁷⁾¹⁸⁾への展開を行った。その後, 特に 2010年代後期からは, カメラの中で X線が作りだした電荷が一つの画素に格納されず, 複数画素に散逸するために元の電荷量の総量がわからなくなる問題(チャージシェアリング)の解決方法の研究に取り組み, 市販されている可視光用の CMOS カメラ¹⁹⁾, CCD カメラ²⁰⁾などで多元素同時イメージングを行えることを示した。X線管²¹⁾でも放射光²²⁾でも多元素同時の動画イメージングを達成し, さらに X線定在波法の画像化への拡張²³⁾, 偏光を利用したイメージング²⁴⁾²⁵⁾へも発展させた。スナップショットや動画の X線イメージングを可能にし, それも安価で入手しやすいセンサーによって実現する道筋を確立したことで, 新しい応用分野が広がることを期待される²⁶⁾。

〔産業技術総合研究所 津越敬寿〕

文 献

- 1) *Anal. Chem.*, **83**, 7600 (11). 2) *J. Appl. Phys.*, **120**, 115301 (16).
- 3) *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 093709 (16). 4) *J. Appl. Cryst.*, **50**, 712 (17).
- 5) 放射光, **30**, 211 (17). 6) *Physica*, **B551**, 426 (18). 7) 波紋, **28**, 187 (18). 8) *Scientific Reports*, **9**, 571 (19). 9) *Spectrochim. Acta*, **B54**, 1497 (99). 10) *Anal. Chem.*, **75**, 355 (03). 11) ぶんせき, **2003**, 644.
- 12) *Nanotechnology*, **15**, S428 (04). 13) *J. Synchrotron Rad.*, **11**, 209 (04). 14) 応用物理, **73**, 754 (04). 15) *Chemistry Letters*, **34**, 872 (05). 16) *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 2608 (06). 17) *Anal. Chem.*, **82**, 3519 (10). 18) 分析化学, **59**, 499 (10). 19) *Scientific Reports*, **7**, 45472 (17). 20) *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, 063703 (17). 21) *ACS Omega*, **2**, 4363 (17). 22) *J. Synchrotron Rad.*, **26**, 230 (19). 23) *Physical Review Materials*, **3**, 023802 (19). 24) *J. Anal. At. Spectrom.*, **34**, 2273 (19). 25) *Rev. Sci. Instrum.*, **90**, 113704 (19). 26) ぶんせき, **2019**, 228.

永井 秀典 氏

(Hidenori NAGAI)
(国研)産業技術総合研究所・研究グループ長

1974年愛知県生まれ。2001年北陸先端科学技術大学院大学材料科学研究科機能科学専攻博士後期課程修了。博士(材料科学)。2002年独立行政法人(現国立研究開発法人)産業技術総合研究所入所。1998年よりマイクロ流体デバイスを用いたバイオ分析技術の開発に従事。2015年に成果の一つである高速リアルタイム PCR 技術の普及を目指し、産総研ベンチャーの(株)ジェイタスを創業するとともに取締役 CTO を兼務。2017年同社の杏林製薬(株)への事業譲渡に伴い同職を退任。現在大阪大学との連携ラボ(産総研・阪大 PhotoBio-OIL)にて恩師である民谷栄一ラボ長の下、マイクロ流体デバイスの高度化に努めている。趣味は、ドライブ、スノーボード。



【業 績】

マイクロ流体チップによるリアルタイムポリメラーゼ連鎖反応(PCR)法の高度化

永井秀典君は1998年以来、微細加工技術を用いたバイオ分析デバイスの小型集積化や高速化といった高性能化に関する研究開発に従事してきた。2001年には、第3世代のPCRと呼ばれるデジタルPCR法の一方式を発明し、同原理に基づく製品も実現している。さらに、2010年以降に従事したマイクロ流体チップデバイスを用いたリアルタイムPCR法の高速化技術は、発明から装置開発まで中心的な役割を担い、世界最速のPCR法を実現している。また、同技術の速やかな社会実装を目指し、ベンチャー創業によるビジネス化にも取り組み、のちに同ベンチャーのM&Aを通じて製薬企業の新規事業として承継され、現在ではCOVID-19の検査法の一つとして保険適用を受けて感染症検査の現場への導入が始まっている。このようにオリジナルのコンセプトにより、リアルタイムPCR法の限界を超える高性能装置の開発を主導したのはまさに同君である。以下に同君の主な業績について記す。

1. 高速リアルタイムPCR技術の開発

リアルタイムPCR法は、COVID-19の検査法として利用されていることから現在最も注目度の高い分析法の一つといえる。試料中に僅かに存在する数分子のDNAをサーマルサイクルにより指数的に増幅させ検出する極めて強力な分子生物学的手法であるが、迅速検査の観点では長い分析時間が大きな課題となっていた。そのため、PCR法が発明されてから間もない1990年頃より、サーマルサイクルを高速化する研究が進められてきた¹⁾²⁾。なかでもDr. Wittwerらの開発したキャピラリーチューブを用いるサーマルサイクラーのLightCyclerは実用性にも優れ、現在最もポピュラーな高速リアルタイムPCR装置であるが、それでも40サイクルのサーマルサイクルに30分以上を要し、さらなる高速化が求められている。

同君は、PCR法に必要な複数のヒーターと接触させたマイクロ流体チップ内にて、各ヒーター上を繰り返し試料が往復送液されるタイプのサーマルサイクルを開発した。特に、マイクロプロアを用いた微小流体の正確な位置制御技術を新たに開発することで、検出限界を損なうことなく50サイクルのサーマルサイクルを世界最速の7分まで短縮できることを明らかにした³⁾。さらに、SARS-CoV-2の様なRNAウイルスに対しても、同一のマイクロ流体チップ内にて1分間の逆転写反応(RT)とリアルタイムPCR法を連続して実施するOne-step RT-qPCR法を開発し、既存のリアルタイムPCR装置と同等の50コピー/反応以下からの検出を15分以内まで短縮することに成功している。本技術に基づく高速リアルタイムPCR

装置については、速やかな社会実装を目指して、同君も参画したベンチャーを通じて“Gene Sensor on a Chip”を意味するGeneSoCと名付け製品化し、現在は杏林製薬社へ事業譲渡に伴い承継され、本年にはCOVID-19のPCR検査法として保険適用も始まり、迅速リアルタイムPCR装置としての医療機関への導入が進められている。

2. マイクロウェルアレイを用いたデジタルPCR法の開発

リアルタイムPCR法に続く第3世代のPCR技術であるデジタルPCR法は、既存のリアルタイムPCR法において困難であった対称遺伝子の絶対定量や希少遺伝子の検出を実現した。この原理は、大多数の極微小サイズの反応場に試料液を細分化することで、一分子や一細胞レベルに分離し、個々の反応場においてリアルタイムPCRを行う手法である。

同君は、2001年にデジタルPCR法の1方式である大規模集積化したマイクロウェルアレイにより細胞懸濁液を分割するアプローチを考案することで、従来は多様な細胞の集団から平均化されて取り出されていたPCRの分析結果を、単一細胞レベルで個別に分離して取り出すデジタルPCRの原理を報告した⁴⁾。具体的には、半導体微細加工技術により、数十 μm サイズまで微小化した反応場を、数万個集積化したマイクロウェルアレイを作製し、リアルタイムPCR試薬と混合した細胞懸濁液を、各ウェル中に1個以下になる割合でマイクロウェルアレイへ分散させ密封した後にリアルタイムPCRを実行することにより、標的遺伝子を含む単一細胞を1千個以上レベルで絶対定量できることを実証した。現在では、微小バルブを集積化したマイクロ流体チップや、多数の微量液滴をもちいて分割するデジタルPCR装置も市販化されているが、同君のマイクロウェルアレイを用いた方式についても、発案から10年以上を経て同じく実用化されている。

COVID-19の検査ニーズの高まりによって、リアルタイムPCR法に基づく検査法は、今後ますます医療現場へと広がっていくものと考えられ、特に、高速リアルタイムPCR技術については、クリニックや救命救急等における感染症診断の中心的役割を担っていくものと考えられる。リアルタイムPCR法の高性能化に資する原理の発明と装置開発を主導した永井秀典君の業績はバイオ分析分野における分析化学の新たな展開に大きく寄与するものであり、我が国の分析機器や医療機器開発の発展に多大な貢献をもたらすと期待される。

[埼玉工業大学先端科学研究所 丹羽 修]

文 献

- 1) *BioTechniques*, **10**, 76 ('91).
- 2) *Nucleic Acids Res.*, **28**, e77 ('06).
- 3) *Anal. Bioanal. Chem.*, **408**, 5641 ('16).
- 4) *Anal. Chem.*, **73**, 1043 ('01).

佐藤 香枝 氏

(Kae SATO
日本女子大学理学部物質生物科学科 教授)



1970 年 4 月東京都に生まれる。1993 年日本女子大学家政学部家政理学科 I 部化学系卒業、1999 年東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了。同年「HPLC およびキャピラリー電気泳動法を用いた糖分析法の研究」により博士(農学)取得。同年国立がんセンター研究所リサーチレジデント、2002 年理化学研究所基礎科学特別研究員を経て、2004 年東京大学大学院工学系研究科助手、2007 年より同講師、2009 年日本女子大学理学部物質生物科学科准教授、2018 年より同教授。現在はマイクロ・ナノデバイスを用いたバイオ分析化学の研究として、新規 DNA 分析法の開発、血管組織モデルの開発に取り組んでいる。趣味はヴィオラ演奏、料理、旅行。

【業 績】

マイクロ・ナノデバイスのバイオ分析化学への応用

佐藤香枝氏は、Micro Total Analysis Systems (microTAS) の技術で構築した心血管系モデルの開発とそのバイオアッセイへの応用および DNA 分析法の開発に関する研究に従事し、生命科学とマイクロ分析化学の融合分野の先駆けとなる成果を挙げた。2019 年に Micro Total Analysis Systems 国際会議の Executive Technical Program Committee に就任している。以下に、同氏の主要な研究業績を記す。

1. マイクロデバイスを用いた心血管モデルの構築

マイクロデバイスとヒト初代細胞を用いて心血管モデルを構築する実験を世界に先駆けて 15 年前に始め、マイクロ流路内に血管の細胞を管腔状に培養し、炎症時の白血球の浸潤の様子を再現¹⁾、血管拡張因子を計測²⁾した。この研究は組織チップ開発の黎明期に行われたもので、独創性が高く、新分野を拓く研究であったものと思われる。

さらに、多孔質膜の両面に細胞を培養するデバイスを作製し、そのデバイスに血管内皮細胞とリンパ管内皮細胞を培養し、血流を模擬する力学的刺激の負荷、さらに血管透過性能の解析という個々の技術を新たに開発し、血管・リンパ管の透過・吸収試験を世界で初めてマイクロデバイス内で実証した³⁾。また、国立感染症研究所との連携により抗ハブ毒血清試験へ応用することも実現した。この方法は、動物実験なしに血管の生理を評価する新たなバイオアッセイ技術であり、がんや生活習慣病などの治療法開発の支援技術となることが期待できる。

また、血管が心臓の拍動で受ける力学的刺激に着目した研究を行っている。細胞を伸展させるデバイスを開発し、動脈が塞がって血圧が上昇する難病である肺高血圧症のモデルを岡山医療センターとの連携により開発した⁴⁾⁵⁾。このデバイスは力学的刺激で悪化する病態の治療薬開発に貢献できる可能性がある。さらに、都立医学総合研究所との連携により、再生医療の技術では作れない血液細胞の分化モデルの実験にも着手し、ES 細胞から血液細胞への分化と力学的刺激の関係を調べ、血液細胞を作る技術開発を行っている⁶⁾。これは化学刺激のみでは生体外に構築できない生命現象について、力学的刺激を与えることで実現する試みといえる。

2. マイクロ・ナノ粒子、マイクロデバイスを用いた DNA 分析法の開発

ゲノム解析技術の発展により次世代医療の道が拓かれた現在、今後の個別化医療の実現のためには、高精度かつ、さらに迅速、高感度、簡単に分析できる技術開発が重要である。簡便な分析法として、金ナノ粒子を用いた方法を開発した。金ナノ

粒子に修飾された一本鎖 DNA が同じ長さの相補鎖と二本鎖を組むと、速やかに分散安定性を失い凝集する現象を見出している⁷⁾。この原理は、一塩基の違いを明瞭に見分けるといふ、優れた特徴を備えた新原理に基づくものであることを証明し、遺伝子の一塩基の違いを調べる方法へと発展させた。数多く報告されている金ナノ粒子を使った DNA 分析の中で、合成 DNA による原理検証のみならず、大腸癌細胞の判定にも成功している⁸⁾。一方、ポリスチレン微粒子でも同様の現象が起こることも示し一般性を拡張した⁹⁾。現在、この現象は DNA 分析に留まらず様々な物質のセンサーへ応用されており、だれもが再現できるような金ナノ粒子と DNA の複合体の作製プロトコルを確立し、DNA の配列や長さがどのように凝集に影響するかを詳細に調べ、設計の指針を見いだした佐藤君の研究がその発展の鍵になったものと推察される¹⁰⁾。

マイクロ血管デバイスのように少量しか細胞がない場合には、既存のいかなる技術を用いても、遺伝子発現解析を自在に行うことは困難である。その問題を解決するために、DNA の一分子検出を実現する遺伝子増幅技術である Padlock rolling circle amplification (RCA) 法の発展のための技術開発に取り組んだ。粒子をマイクロデバイスに充填し、試料 DNA を粒子上へ濃縮してから RCA 検出する方法により、既存の方法より検出効率が 100 倍向上した¹¹⁾。このことは、生命科学研究への貢献のみならず、医療の場でも採血量と試薬量を劇的に減らすことにもつながる可能性がある。これは粒子上で RCA を行った最初の報告であり、現在では RCA を利用する多くの研究者が粒子を用いている。一方、細胞の形状を保ったまま、RCA 法を用いて DNA や mRNA を検出する方法の改良にも取り組んでいる。操作の煩雑さを改善するために、マイクロ化学技術と連携し、連続的に試薬をデバイスへ注入できる自動送液装置を開発した¹²⁾。形態観察と遺伝子分析の組み合わせは強力な武器となり、将来生命科学分野の発展に貢献する技術になることが期待される。

以上のように、佐藤香枝氏は、マイクロ・ナノデバイスを用いたバイオ分析分野研究者として、国際的に高く評価される成果を挙げている。今後の分析化学の発展と女性研究者の地位向上に大きく寄与し、長寿高齢化社会における社会的要請に応える研究がさらに発展するものと期待している。

[慶應義塾大学薬学部 金澤秀子]

文 献

- 1) *Anal. Sci.*, **23**, 261 ('07). 2) *Lab Chip*, **10**, 1937 ('10). 3) *PLoS ONE*, **10**, e0137301 ('15). 4) *Anal. Sci.*, **32**, 1217 ('16). 5) *Inventions*, **4**, 1 ('19). 6) *Micromachines*, **11**, 305 ('20). 7) *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 8102 ('03). 8) *Nucleic Acids Res.*, **33**, e4 ('05). 9) *Anal. Sci.*, **20**, 893 ('04). 10) *Analyst*, **144**, 5580 ('19). 11) *Lab Chip*, **10**, 1262 ('10). 12) *Anal. Sci.*, **30**, 1107 ('14).

高原 晃 里 氏

(Hikari TAKAHARA
(株)リガク X 線機器事業部 研究員)



1971 年大阪府枚方市に生まれる。1995 年神戸大学大学院 (前期) 理学研究科修了。産業技術総合研究所, (株)テクノスを経て, 2009 年より(株)リガク大阪工場に勤務。現在はアプリケーションラボラトリーにて, 蛍光 X 線分析の技術応用に従事。2014 年に兵庫県立大学大学院 (後期) 工学研究科を修了。「グロー放電発光分析法によるリチウムイオン二次電池電極の元素分布分析」により博士 (工学)。2017 年に日本分析化学会近畿支部より, 近畿分析化学技術研究奨励賞を受賞。趣味は写真。モノクロフィルムで身近な風景を撮影し, 自宅暗室にて銀塩プリントを楽しむ。

【業 績】

固体表面の直接迅速分析法の開発と材料分析への応用

高原晃里君は, 蛍光 X 線分析やグロー放電発光分析の開発を通じて, 半導体やリチウムイオン電池といった先端の工業材料における固体表面の直接迅速分析法の研究に従事してきた。また表面化学分析技術国際標準化委員会の X 線表面分析委員会 (ISO/TC201/SC10 (旧 WG2)) に所属し, 全反射蛍光 X 線分析法の国際標準化に取り組んできた。以下に同君の主な研究業績を記す。

1. リチウムイオン電池材料の分析法の開発 — 正極材料のその場状態分析

高原君は 1998 年から 6 年間, 産業技術総合研究所に研究員として在籍し, その場 (*In-situ*, *In-operando*) での分光分析や全固体電池など, 現在その重要性が認識されている分野に先駆けて取り組んだ。リチウムイオン電池用正極材料の高エネルギー・低コスト化に関する研究プロジェクトでは, 実用化されている高価なコバルト酸リチウムに代わる, 鉄を用いた安価な代替材料を検討した。高電位で作動する鉄置換リチウムマンガンスピネルや, 鉄-チタン系の新規材料を合成し, それらの電池特性評価や, 粉末 X 線回折 (XRD) や X 線吸収微細構造 (XAFS) 解析, メスバウアー分光等を用いた構造・電子状態解析を行った。電池の充放電過程における 3 価/4 価の鉄の酸化還元反応が低コスト・高エネルギー正極の材料開発の要点であったため, 鉄の化学状態や結晶構造変化を明らかにする必要があった。しかし従来の分析法では, 電池から電極を取り出さなければならず, その時に不安定な 4 価の鉄が状態緩和してしまうことが問題となった。さらに電池作動を停止するだけでも状態緩和がおこりうるということがわかった。電池から電極を取り出さずに作動状態で分析できるように, 分析線の透過可能な測定用の電池セルとそれを用いた測定方法開発した。この方法を用いて, これまで明確にされていなかった充放電時の鉄の 3 価/4 価の部分的な酸化・還元を報告した¹⁾。鉄が電池特性に関与することを示したことにより, 高エネルギー化のための材料設計の指針決定に大きく貢献した。

2. グロー放電発光分析法の電極分析への応用 — 化学スパッタリングによる炭素負極の深さ方向分析

2009 年から約 5 年間, (株)リガクでグロー放電発光分析 (GD-OES) 法によるリチウムイオン電池のアプリケーション開発に取り組んだ。リチウムイオン電池の炭素負極に生成する絶縁性の不動態被膜は電池性能の劣化に大きく関与する。GD-OES 法を用いて炭素負極の深さ方向分布分析を行い, 不動態被膜が電極表面や内部でどのように分布するかを明らかにすることを

目標とした。GD-OES 法は試料をアルゴンイオンスパッタリングしながら発光分析を行う深さ方向分析の手法であるが, 炭素のスパッタリング速度が極めて遅いため, これまで炭素負極の測定はできなかった。高原君はアルゴンガスに少量の水素や酸素を添加することにより化学的に炭素のスパッタリング速度を向上させる方法を開発し, 炭素負極全体のデプスプロファイルの取得に成功した²⁾。一方で緩やかなスパッタリング速度で分析することにより, 電極表層の詳細な深さ方向分析が可能であることを示した。劣化した実電池の炭素負極を分析し, 不動態被膜は電極の深部 (奥側) より表面側に多く生成しており, 電極表面にはフッ化リチウムが多く, 電解液界面側に正極材料由来のマンガンの炭酸塩や酸化物が堆積していることを示した。

3. 全反射蛍光 X 線分析法を利用したシリコンウエハーの表面汚染分析・環境分析

全反射蛍光 X 線 (TXRF) 法はシリコンウエハー表面の高感度分析に用いられており, 半導体分野の新材料, 新機能開発に伴い, 分析法の開発や評価も重要な課題となる。表面化学分析技術国際標準化委員会 (ISO/TC201) で, 高感度でマッピング可能な前処理手法として Vapor Phase Treatment (VPT) 法の標準化に取り組んだ。高原君はその基礎検討を行い, VPT の効果は湿度によって向上させることができることを実証した。国際ラウンドロビンテストでは機関や処理条件によるばらつきが認められるが, そのばらつきは VPT 後にシリコンウエハー表面で形成される様々な形状の堆積物に起因することを明らかにし, 標準化への課題を示した³⁾。近年 TXRF 法は飲料水や環境水などの分析へ適用されているが, 廃水のような高マトリックスの溶液では分析値に誤差が生じる。X 線の吸収や散乱線強度による誤差の補正方法を研究し, 分析法の標準化を目指している。

高原晃里君は, 日本分析化学会および電気化学会に所属し, 年数件の学会発表や論文発表を継続して行ってきた。企業人と研究者の両方の視点から新しい分析方法やアプリケーションを探索する姿勢は, 分析業界だけでなくさまざまな工業界からも評価されている。全反射蛍光 X 線分析法の国際会議では研究者向けのワークショップの講師や招待講演を行うなど, 国内外で分析法の普及に取り組んでいる。

(東京電機大学工学部 保倉明子)

文 献

1) *J. Electrochem. Soc.*, **148**, A730 ('01). 2) *J. Anal. At. Spectrom.*, **29**, 95 ('14). 3) *Spectrochim. Acta B*, **90**, 72 ('13).