

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 14 日現在

機関番号：22701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24619005

研究課題名(和文)精密コロナ放電と質量分析を用いたバイオモニタリングシステムの構築のための基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental study for development of biomonitoring system using accurate corona discharges and mass spectrometry

研究代表者

関本 奏子 (Sekimoto, Kanako)

横浜市立大学・生命ナノシステム科学研究科・助教

研究者番号：40583399

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：生体分子のその場分析技術の開発はオミクス計測科学分野の重要な課題であるが、未知試料の同定に及ぶ手法の確立には至っていない。本研究では、様々な気相酸性度を持つ負の反応イオンの大気圧下での制御生成が可能な「精密コロナ放電」と質量分析を結合し、動植物の分泌する分子および構成分子を各々の物性に応じて選択的にその場分析できる“シンプルなバイオモニタリングシステム”を構築した。本システムでは、試料の分子量と構造に関する情報が同時に得られ、その場分析における未知化合物の同定に極めて有効である。

研究成果の概要(英文)：One of the most interesting topics in omics is the development of in situ analysis techniques for biomolecules. In this study, a biomonitoring system that makes it possible to ionize low molecular weight biomolecules selectively and in situ has been developed using accurate corona discharges and mass spectrometry. The accurate corona discharges lead to the regular formation of atmospheric negative ions with various different gas-phase acidities, which serve as reactant ions to ionize gas-phase analytes via ion-molecule reactions. The system developed here can provide the information about both molecular weight and structure of a given analyte, which contributes towards the application to unknown compound analysis.

研究分野：質量分析

キーワード：コロナ放電 質量分析 大気イオン 負イオン プロトン親和力 アミノ酸 ペチュニア

1. 研究開始当初の背景

生物の生きている状態は生体分子の構造や機能に依存するため、環境の変化にตอบสนองして生じる生体分子の実時間モニタリングシステムの開発は、オミクス計測科学分野の重要な課題となっている。この背景を受け近年、微量分析化学の分野では、通常大気環境（アンビエント）下に存在する動植物の表面に付着または分泌される有機化合物を、試料調製無しでその場分析することを目的とした「アンビエント質量分析（Ambient Mass Spectrometry: Ambient MS）法」が開発されている。この手法では、試料分子をレーザーやスプレー、加熱によって気相へ脱離させた後、主にエレクトロスプレー法または大気圧イオン化（Atmospheric pressure chemical ionization: APCI）法を用いてイオン化し、質量分析する。APCI法の原理に基づいた Ambient MS、すなわち、リアルタイム直接分析（Direct Analysis in Real Time: DART）法や大気圧固体試料分析プローブ（Atmospheric-pressure Solids Analysis Probe: ASAP）法では、イオン源として直流の大気圧コロナ放電が利用されている。コロナ放電は大気由来のイオン（大気イオン）を大量に発生させることが可能で、それらイオンと気化された試料がイオン分子反応を起こし、試料は効率良くイオン化される。正極性コロナではどのような放電条件でも、大気イオンとして主にオキシニウムイオン H_3O^+ が生成し、 H_2O よりもプロトン親和力が高い試料を一様にプロトン化させる。一方、負極性コロナ内で生成する負の大気イオン種は多種で、その生成量は放電条件によって大きく異なる。種々の負の大気イオンの生成と放電条件の関係は、100年以上続いてきた過去の研究でも明らかにされておらず、負の大気イオンの生成を制御できる放電デバイスは確立されていない。そのため、負極性コロナで試料をイオン化した際に限られるマススペクトルの解析は極めて困難で、同定不可能なピーク数も多い。よって、コロナ放電を用いた既存の Ambient MS は、正イオン化（プロトン化）に限り実用化されている。

研究代表者は本研究開始以前まで、大気圧下での負極性コロナ放電の基礎研究を行ってきた。ここでは、大気成分（ N_2 、 O_2 、 CO_2 、 H_2O ）をそのまま利用して、電極配置とコロナ直流電圧によって電子の運動エネルギーを精密調整するだけで、様々な気相酸性度を持つ負の大気イオン（ NO_3^- 、 NO_2^- 、 HCO_3^- 、 O_2^- 等）の生成を制御可能な精密コロナ放電システムを確立してきた。次いで、各種負の大気イオン R^- は、放電場に気化供給されるアミノ酸等の生体分子を、分子固有の物理化学的性質（例えば官能基）によって選択的にイオン化する「反応イオン」として作用することを見出した。有機化合物の選択的イオン化を大気そのものの中で行うことが可能な本放電システムは、構造情報を取得できる“その

場モニタリングシステム”の開発に利用し得るという着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者のこれまでの研究で確立した精密コロナ放電システムと質量分析を結合し、動植物の分泌する分子および構成分子を各々の物性に依りて選択的にその場分析できる“バイオモニタリングシステム”の構築を最終目的とし、以下の基礎的な研究項目を遂行した。

- (1) 大気圧下での精密コロナ放電による反応イオンの発生制御と質量分析計の接続
- (2) 大気反応イオンと生体分子の選択的反応に関する基礎研究
- (3) “バイオモニタリングシステム”の実用化に向けた評価研究

(1)では、精密コロナ放電イオン源の構築、および質量分析計への実装を目的とした。(2)では、系統的に集積した物性の異なる有機化合物と大気反応イオンとの反応に関する研究を行い、生体分子の物性とイオン化反応の関係を明確化することを目的とした。(3)では、動植物に由来する生体分子のその場分析の実施を目的とした。

3. 研究の方法

上記(1)～(3)の研究において、マススペクトルの取得には、TSQ7000 三連四重極型質量分析計（Thermo Fisher Scientific 社製）を用いた。精密コロナ放電システムのニードル電極には、先端形状が放物面として近似されるニードル（微針、志賀昆蟲普及社、東京）を使用した。本ニードルの先端曲率半径は約 $1\mu m$ であった。放電実験は、実験室大気雰囲気中（室温 $25^\circ C$ 、相対湿度 $50 - 70\%$ ）で行った。本研究で使用した有機化合物は、和光純薬工業株式会社（大阪）、東京化成工業株式会社（東京）、およびシグマアルドリッチジャパン（東京）から購入した。(3)では植物試料として、花卉で内生する揮発性（香氣）成分が同定・定量されているペチュニア雑種（*Petunia mitchell*）の生花を用いた。本生花の花弁周辺に存在する香氣成分を、シリカモノリス捕集剤（MonoTrap RGPS TD、ジーエルサイエンス）によって2日間捕集することで、香氣成分試料を作成した。

4. 研究成果

- (1) 大気圧下での精密コロナ放電による反応イオンの発生制御と質量分析計の接続

本研究では、平板電極上のオリフィスに対

するニードル電極の角度 θ およびコロナ直流電圧 V を可変 ($0 \leq \theta \leq 90^\circ, 0 \leq V \leq -5.0 \text{ kV}$) とする精密コロナ放電イオン源を構築し、質量分析計に実装した。図 1 には、本実験システムの概略図を示す。本システムでは、オリフィスに向かう電気力線上で生成したイオンがオリフィス内に導入され、質量分析される。角度 θ と電圧 V を変化させると、オリフィスに到達する電気力線の起点のニードル位置の電界強度が変化する。 V の値が大きくなるほど、また、 θ が 90° からゼロに近づくほど、電界強度は高くなる。使用する実験条件 (V, θ) に応じて、異なる負の大気イオンが観測された。例として、 (V, θ) = (-3.5 kV, 0) と (-1.9 kV, 90°) の時に得られる負の大気イオンマスペクトルを図 2 に示す。 (V, θ) = (-3.5 kV, 0) の場合、すなわちニードル最先端の高電界領域から発生する電気力線がオリフィスに到達する場合、 $\text{NO}_3^-(\text{HNO}_3)_n$ ($n = 1, 2; m/z$ 125, 188) が主に観測された (図 2a)。一方、ニードル最先端周辺の低電界領域から発生する電気力線がオリフィスに到達する場合 ($(V, \theta) = (-1.9 \text{ kV}, 90^\circ)$)、 O_2^- を核とした水クラスター $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$ (m/z 32 + 18n) が主に観測された (図 2b)。

(2) 大気反応イオンと生体分子の選択的反応に関する基礎研究

各種負の大気イオンは、放電場に気化供給される有機化合物をイオン化させる「反応イオン」として作用した。図 3 には、 α -アミノ

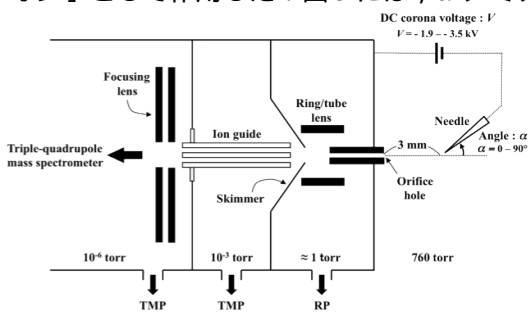


図 1. 精密コロナ放電システムを搭載した質量分析計の概略図。

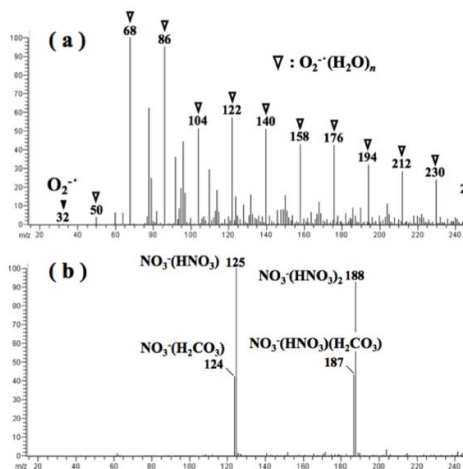


図 2. 負の大気イオンマスペクトル。

- (a) 高電界条件 (V, θ) = (-3.5 kV, 0)
 (b) 低電界条件 (V, θ) = (-1.9 kV, 90°)

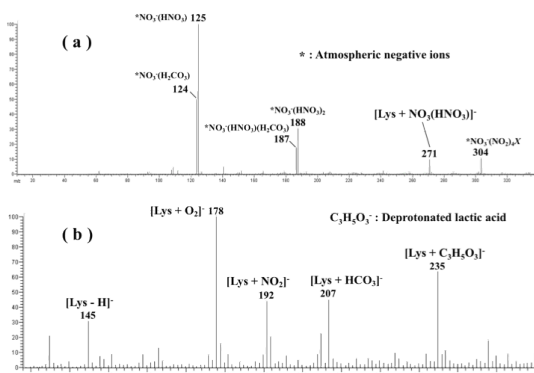


図 3. L-リジンの負イオンマスペクトル。

- (a) 高電界条件 (V, θ) = (-3.5 kV, 0)
 (b) 低電界条件 (V, θ) = (-1.9 kV, 90°)

酸の 1 つである L-リジン (Lys; M_r 146) を急速加熱 (200 °C) して気化させ、高電界 (V, θ) = (-3.5 kV, 0) および低電界条件 (-1.9 kV, 90°) で負イオン化した時に得られたマスペクトルを示す。高電界と低電界条件では、図 2a と b にそれぞれ見られる主要な大気イオンの付加体、すなわち $[\text{Lys} + \text{NO}_3(\text{HNO}_3)]^-$ (m/z 271) と (図 3a), $[\text{Lys} + \text{O}_2]^-$ (m/z 178), $[\text{Lys} + \text{NO}_2]^-$ (m/z 192), $[\text{Lys} + \text{HCO}_3]^-$ (m/z 207), $[\text{Lys} + \text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3]^-$ (m/z 235) が観測された (図 3b)。よって、大気イオン R^- は以下の反応 (R1) を介して、試料 M を付加体 $[\text{M} + \text{R}]^-$ としてイオン化すると考えられる。



また、低電界条件でのみ、試料 (Lys) の脱プロトン分子 $[\text{Lys} - \text{H}]^-$ (m/z 145) が観測された (図 3b)。この現象は、 $[\text{Lys} - \text{H}]^-$ と付加体 $[\text{Lys} + \text{R}]^-$ を生成する各種大気イオン R^- のプロトン親和力 (proton affinity; PA) に基づいて説明される。低電界条件における R^- の PA, すなわち $\Delta H^\circ (\text{R}^- (= \text{O}_2^-, \text{NO}_2^-, \text{HCO}_3^-) + \text{H}^+ \text{RH}) = 1477.0 \pm 2.9, 1423.4 \pm 0.84, < 1551.0 \pm 9.2 \text{ kJ mol}^{-1}$ はいずれも、 $[\text{Lys} - \text{H}]^-$ の PA ($1412.0 \pm 13.0 \text{ kJ mol}^{-1}$) よりも高い。一方、高電界条件の R^- , すなわち $\text{NO}_3^-(\text{HNO}_3)$ の PA は 1358 kJ mol^{-1} 以下であり、 $[\text{Lys} - \text{H}]^-$ の PA よりも低い。つまり、大気イオン R^- が M からプロトン H^+ を引き抜き、 $[\text{M} - \text{H}]^-$ が生成すると示唆される (R2)。



各種大気イオン R^- と有機化合物 M の付加体形成反応 (R2) の進行、すなわち、付加体 $[\text{M} + \text{R}]^-$ が生成するか否かは、M の持つ物理化学的性質 (例えば官能基) によって異なる。例えば、フェノール性ヒドロキシル基を有するフェノールは O_2^- および NO_3^- と付加体を形成するのに対し、アルコール性ヒドロキシル基を有する 2-フェニルエタノールは O_2^- のみと反応する。芳香族カルボン酸の 1 つである安息香酸は O_2^- と HCO_3^- と反応するが、脂肪族カルボン酸である 3-フェニルプロピオン酸は O_2^- と HCO_3^- の他、 NO_2^- や $\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3^-$ と

の付加体を形成する。アミノ基を有するアニリンとフェニルエチルアミンでは、フェニルエチルアミンと NO_3^- (HNO_3) の付加体のみが観測される。このように、試料の官能基に対してイオン化反応の選択性が存在することは、未知試料を測定した際、その官能基の構造を推定し得ることを意味する。すなわち、分子量情報に加え、物性や構造に関する情報を得られる本放電システムは、アンビエント質量分析における未知試料の同定に極めて有効であることが示唆された。

(3) “バイオモニタリングシステム”の 実用化に向けた評価研究

本研究では、「3. 研究の方法」に記載した *P. mitchell* 由来の香気成分試料を加熱し、揮発した成分を低電界条件でイオン化した。低電界条件では、負の大気イオン O_2^- とのイオン分子反応により、試料の脱プロトン分子 $[\text{M}-\text{H}]^-$ または O_2^- 付加体 $[\text{M}+\text{O}_2]^-$ が主に生成する。香気成分に由来する負イオンとして、 m/z 151 と 184 のピークが観測された。これらのイオン種を同定するために衝突有機解離 (CID) 法を行ったところ、 m/z 151 をプリカーサーイオンとした CID スペクトルでは CH_3 (15 Da) の脱離が、 m/z 184 をプリカーサーイオンとした場合では、 HO_2 (33 Da) と CH_3 (15 Da) の連続した脱離が観測された。これらの結果から *P. mitchell* の主な香気成分は、152 Da の中性種 (Q) であることが示唆された。すなわち、 m/z 151 は Q の脱プロトン分子 $[\text{Q}-\text{H}]^-$ 、 m/z 184 は大気イオン O_2^- の付加体 $[\text{Q}+\text{O}_2]^-$ と同定された。中性種 Q を同定するに当たり、ペチュニアの主な内生香気成分として知られるイソオイゲノール (J.C. Verdonk *et al.*, *The Plant Cell*, 17, 1612-1624, 2005) に着目した。イソオイゲノール (IEN; $\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_2$; 164 Da) を精密コロナ放電イオン化法で測定すると、IEN の脱プロトン分子 $[\text{IEN}-\text{H}]^-$ (m/z 163) および O_2^- 付加体 $[\text{IEN}+\text{O}_2]^-$ (m/z 196) が観測された他、*P. mitchell* の香気成分の測定時に検出された m/z 151 と 184 が観測された。ここで m/z 151 の精密質量測定結果から、152 Da の中性種 Q はバニリン (VL; $\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_3$) と同定された。IEN はオゾン酸化を経て VL に変化することが知られている。以上の結果から、ペチュニアの内生香気成分 IEN は、大気中に放出された後に VL に変化していることが示唆された。本研究により、精密コロナ放電システムは、植物の内生香気成分と大気中に放出された後に生成する成分の関係を明確にし得る技術であることが実証された。

(4) 精密コロナ放電を用いたアンビエント 質量分析の高感度化

(1) ~ (3) の研究の途上、精密コロナ放電と既存の Ambient MS を組み合わせると、高感度測定が可能になることを見出した。例えば、APCI 法を基にした Ambient MS の 1 つ

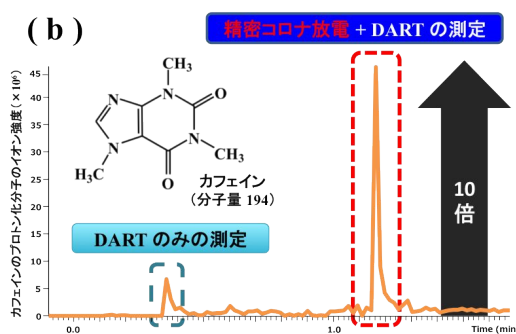
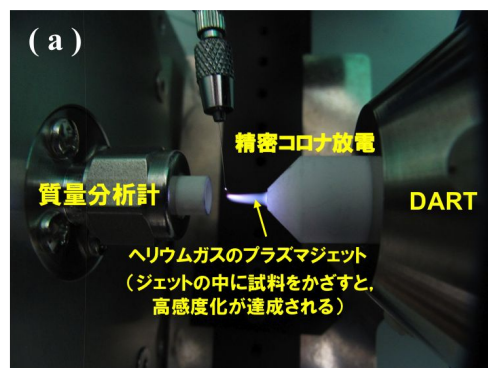


図 4. (a) 精密コロナ放電と DART を組合せた時の測定の様子
(b) カフェイン (10 ng/mL) の DART 測定結果

である DART 法に精密コロナ放電を組み合わせると、試料のイオン化部には大量の励起ヘリウムによるプラズマジェットが発生する (図 4a)。このジェット内に試料をかざしてイオン化したところ、ジェットが発生しない条件 (すなわち DART 法のみ) と比較して、正負両イオンモードにおいて 10 倍以上 (試料によっては 1000 倍以上) の高感度測定が達成された (図 4b)。この高感度化は、DART 法でイオン化されなかった中性の気体状試料分子を、精密コロナ放電で生成した大気イオンを利用してイオン化させていることに由来すると示唆された。Ambient MS の高感度化技術の開発は近年多く行われているが、どれも装置を大型化する必要があり、高価である。ニードルの設置のみで高感度化を達成する本技術は、コンパクトかつ低コストで稼働する高感度 Ambient MS の開発への応用が期待される。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文) (計 11 件) 4 以外全て査読有り。

1. **K. Sekimoto**, M. Sakakura, T. Kawamukai, H. Hike, T. Shiota, F. Usui, Y. Bando and M. Takayama, Ionization characteristics of amino acids in direct analysis in real time mass spectrometry, *Analyst* Vol. 139, pp. 2589-2599 (2014). DOI: 10.1039/c3an02193a
2. **K. Sekimoto**, N. Matsuda and M. Takayama, Formation of benzyl carbanion in collision-induced dissociation of deprotonated phenylalanine homologues, *Mass Spectrometry*, Vol. 3, pp. A0027 (2014).

- DOI: 10.5702/massspectrometry.A0027
3. S. Inomata, Y. Fujitani, A. Fushimi, H. Tanimoto, **K. Sekimoto** and H. Yamada, Field measurement of nitromethane from automotive emissions at a busy intersection using proton-transfer-reaction mass spectrometry, *Atmospheric Environment*, Vol. 96, pp. 301-309 (2014). DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.07.058
 4. **園本 妻子**, コロナが拓く新技術, *ケミカルエンジニアリング*, Vol. 59, pp. 46-53 (2014).
 5. 廣川 淳, 猪俣 敏, 高橋 けんし, 坂本 陽介, 谷本 浩志, **園本 妻子**, 二次有機エアロゾル生成過程研究への質量分析法の応用, *エアロゾル研究*, Vol. 29(S1), pp. 18-26 (2014). DOI: 10.11203/jar.29.s18
 6. **園本 妻子**, 高山 光男, 大気圧コロナ放電イオン化質量分析法による負の大気イオン水クラスター生成の研究, *分析化学*, Vol. 62, pp. 955-963 (2013). DOI: 10.2116/bunsekikagaku.62.955
 7. **K. Sekimoto**, S. Inomata, H. Tanimoto, A. Fushimi, Y. Fujitani, K. Sato and H. Yamada, Characterization of nitromethane emission from automotive exhaust, *Atmospheric Environment*, Vol. 81, pp. 523-531 (2013). DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.09.031
 8. **K. Sekimoto**, N. Matsuda and M. Takayama, Collision-induced dissociation study of the adduct ions produced in NO₃⁻-free area of atmospheric pressure negative corona discharges under ambient air conditions. *Mass Spectrometry*, Vol. 2, pp. A0020 (2013). DOI: 10.5702/massspectrometry.A0020
 9. S. Inomata, H. Tanimoto, Y. Fujitani, **K. Sekimoto**, K. Sato, A. Fushimi, H. Yamada, S. Hori, Y. Kumazawa, A. Shimono and H. Hikida, On-line measurements of gaseous nitro-organic compounds in diesel vehicle exhaust by proton-transfer-reaction mass spectrometry, *Atmospheric Environment*, Vol. 73, pp. 195-203 (2013). DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.03.035
 10. **K. Sekimoto** and M. Takayama, Collision-induced dissociation analysis of negative atmospheric ion adducts in atmospheric pressure corona discharge ionization mass spectrometry, *Journal of The American Society for Mass Spectrometry*, Vol. 24, pp. 780-788 (2013). DOI: 10.1007/s13361-013-0576-2
 11. **K. Sekimoto** and M. Takayama, Surface analysis of traces stained with discharge on plane electrode in atmospheric pressure negative corona, *Journal of Electrostatics*, Vol. 70, pp. 363-373 (2012). DOI: 10.1016/j.elstat.2012.05.004

{ 学会発表 } (計 14 件)

【国際会議】

12. **K. Sekimoto** and M. Takayama, Ionization characteristics of amino acids in direct analysis in real time mass spectrometry using atmospheric pressure helium plasma, *20th Symposium on Application of Plasma Processes*, Oral presentation (Tatranska Lomunica, Slovakia, January, 2015).
13. **K. Sekimoto**, N. Matsuda and M. Takayama, Formation of benzyl carbanion in collision-induced dissociation of deprotonated phenylalanine homologues, *20th International Mass Spectrometry Conference*, Poster presentation (Geneva, Switzerland, August, 2014).
14. **K. Sekimoto**, M. Sakakura, T. Kawamukai, H. Hike, T. Shiota, F. Usui, Y. Bando and M. Takayama, Ionization mechanism of amino acids in direct analysis in real time-mass spectrometry (DART-MS), *The 5th Asia Oceania Mass Spectrometry Conference*, **Invited oral presentation** (Beijing, China, July, 2014).
15. **K. Sekimoto**, M. Sakakura, T. Kawamukai, H. Hike, T. Shiota, F. Usui, Y. Bando and M. Takayama, Ionization characteristics of amino acids in direct analysis in real time-mass spectrometry (DART-MS), *The 62th ASMS Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics*, Poster presentation (Baltimore, MD, USA, June, 2014).
16. **K. Sekimoto** and M. Takayama, Mass spectrometric analysis of negative ion formation in atmospheric pressure corona discharges with point-to-plane electrodes, *5th International Conference on Plasma Medicine*, Poster presentation (Nara, Japan, May, 2014).
17. **K. Sekimoto**, R. Gonda and M. Takayama, Effects of ionic and neutral species on *E. coli* inactivation in atmospheric pressure corona discharges, *The 21th International Symposium on Plasma Chemistry*, Poster presentation (Cairns, Australia, August, 2013).
18. **K. Sekimoto** and M. Takayama, Collision-induced dissociation study of negative atmospheric ion adducts in atmospheric pressure corona discharge ionization mass spectrometry, *The 4th Asia Oceania Mass Spectrometry Conference*, **Invited oral presentation** (Taipei, Taiwan, July, 2013).
19. **K. Sekimoto** and M. Takayama, Molecular mass determination using collision-induced dissociation of negative atmospheric ion adducts generated in ambient corona discharges, *The 61th ASMS*

Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics, Poster presentation (Minneapolis, MN, USA, June, 2013).

20. **K. Sekimoto** and M. Takayama, Ionization of organic compounds using negative atmospheric ions formed in atmospheric pressure corona discharges, *19th Symposium on Application of Plasma Processes*, Oral presentation (Vratna, Slovakia, January, 2013). **Jan D Skalny's Award (the Best Oral Presentation Award) を受賞**.
21. **K. Sekimoto** and M. Takayama, Specific analyte ionization using negative atmospheric ions formed in atmospheric pressure corona discharges, *19th International Mass Spectrometry Conference*, Poster presentation (Kyoto, Japan, September, 2012).
22. **K. Sekimoto** and M. Takayama, Hydrogen cyanide formation in atmospheric pressure DC corona discharges, *The 21th Europhysics Conference on the Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases*, Poster presentation (Viana do Castelo, Portugal, July, 2012).
23. **K. Sekimoto** and M. Takayama, Application of negative atmospheric ions formed in corona discharges to specific analyte ionization under ambient conditions, *The 60th ASMS Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics*, **Invited oral presentation** (Vancouver, Canada, May, 2012).

【国内学会】

24. **関本 奏子**, 坂倉 幹始, 川向 孝知, 比毛 浩, 塩田 晃久, 碓井 史彦, 板東 泰彦, 高山 光男, リアルタイム直接分析 (DART) 法におけるアミノ酸のイオン化メカニズム, *第62回質量分析総合討論会*, 口頭発表 (大阪, 2014年5月).
25. **関本 奏子**, 高山 光男, 負極性コロナ放電内のNO₃⁻フリー領域におけるイオン化メカニズム, *第61回質量分析総合討論会*, 口頭発表 (つくば, 2013年9月).

【図書】(計1件)

26. **関本 奏子**, 高山 光男, 第5章「イオン化法3: アンピエントイオン化法」, 現代質量分析学, 高山 光男 他編, 化学同人 (京都), pp. 63-73 (2013).

【産業財産権】

出願状況 (計1件)

27. 名称: イオン化装置及び質量分析装置
発明者: 関本 奏子, 高山 光男, 奥村 大輔
権利者: 株式会社島津製作所, 公立大学法人横浜市立大学

種類: 特許

番号: PCT/JP2013/071025

出願年月日: 2013年8月2日

国内外の別: 外国

【その他】

ホームページ

28. アンピエントイオン化質量分析における世界最小のイオン源が販売開始
<http://www.yokohama-cu.ac.jp/univ/pr/press/140610.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関本 奏子 (SEKIMOTO KANAKO)

横浜市立大学・生命ナノシステム科学研究科・助教

研究者番号: 40583399