

真空紫外光電子分光法における尿素分子からの放出電子角度分布測定 Angular distributions of photoelectrons from urea molecule in VUV photoelectron spectroscopy

星野正光^{1,*}, 足立純一²

¹ 上智大学理工学部, 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

² 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

Masamitsu HOSHINO^{1,*} and Junichi ADACHI³

¹ Faculty of Science and Technology, Sophia University, 7-1 Kioicho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8554, Japan

² Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

1 はじめに

近年の光学技術の進歩により、慢性腎不全患者に対する透析治療において透析排液中の尿素濃度を連続的に測定し、リアルタイムで透析の治療効率の評価が可能となり[1]、より幅広い入射光エネルギー範囲における生体関連分子の内部状態に関する分光学的研究が注目されている。今回の標的である尿素分子に関する分光研究は古くから行われ、真空紫外領域における先行研究は、結晶に対する離散準位間の光吸収実験[2]、孤立した尿素を標的とした連続状態への電子状態を反映した光電子分光実験[3,4]がある。特に、後者は He ランプ (波長 585 Å) を用い、CNDO 量子化学計算と比較したことでイオン化状態に関する基礎データが得られている。

そこで本研究では、KEK-PF におけるシンクロトロン放射光と高分解能電子分光装置 SCIENTA R4000 を組み合わせ、上智大学で新たに開発した固体試料加熱ノズルを用いることで固体粉末試料である尿素を効率よく加熱気化し、気相中における高分解能光電子スペクトルを幅広い入射エネルギー範囲で測定した。さらに、光の偏光ベクトルを分光器の方向に対して水平と垂直に変化させて測定を行うことで、放出電子の角度分布に対する非対称パラメータを新たに得ることに成功した。

2 実験

実験は、フォトンファクトリー-BL-20A と BL-28B において光エネルギー 19 – 120 eV の範囲で行われた。光電子スペクトル測定は、偏向電磁石を用いた BL-20A では、偏光面に対して水平に設置された高分解能電子分光装置 SCIENTA R4000 (Scienta Omicron 社) を用い、入射エネルギー 19 eV – 40 eV の範囲に対して行われ、アンジュレーターラインである BL-28B では、入射光の偏光面を分光器の方向に対して水平と垂直に変化させて、30 eV – 120 eV の範囲で測定した。測定における全エネルギー分解能の確認や入射

光、及び電子分光器の運動エネルギーの較正には、Ar 原子の $3s^23p^6 \ ^1S_0 \rightarrow 3s3p^6np \ ^1P_1$ 共鳴線[5]、および $^2P_{3/2}$ と $^2P_{1/2}$ 光電子[6]を用いた。

気相尿素分子の生成には、上智大学で新たに開発した抵抗加熱法による固体試料加熱ノズル[7]を用いた。加熱ノズルの下方からは Ar をキャリアガスとして導入することができ、Ar の光電子スペクトルを同時に測定することで、分光器の運動エネルギー較正ができることに加え、BL-28B における測定では、非対称パラメータが既知である Ar 原子の光電子非対称パラメータを同時に確認することも可能である。

3 結果および考察

図 1 に、ノズル温度が約 100°C、入射光子エネルギー 100 eV において測定された尿素分子からの光電子スペクトルを、電子分光器の方向に対して水平偏光と垂直偏光の両方について示した。

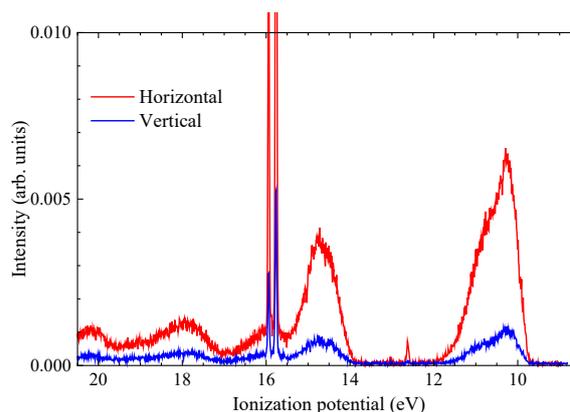


図 1: BL-28B において測定された温度約 100°C、入射光子エネルギー 100 eV における光電子スペクトルの入射光偏光度依存性。

イオン化ポテンシャル 16 eV 近傍の 2 つのピークはキャリアガスとして導入された Ar の光電子スペクトル

ルである。図 1 において得られた光電子スペクトルに観測されるブロードな 5 つの構造は、先行研究の He 共鳴線を用いた波長 585 Å (21.22 eV)の結果[3,4]を非常によく再現しており、本研究で新たに開発した試料加熱セルの正常な動作を確認できた[7]。

また、入射光の偏光方向に対するスペクトル強度から、それぞれの構造に対するピーク強度を求め、光電子の非対称パラメータ $\beta(E)$ の定義式

$$\beta(E) = \frac{2I(0^\circ) - 2I(90^\circ)}{I(0^\circ) + 2I(90^\circ)} \cdots (1)$$

を用いることで、実験的な非対称パラメータを導出した。ここで、 $I(0^\circ)$ が検出器に対する水平偏光の強度を、 $I(90^\circ)$ が垂直偏光の強度を表す。

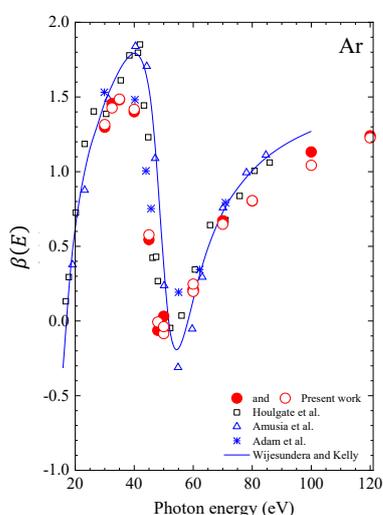


図 2: キャリアガスとして同時に測定された Ar 原子の非対称パラメータと先行研究との比較[8]

図 2 に、キャリアガスとして試料と同時に導入された Ar に対し、式(1)より導出された非対称パラメータ $\beta(E)$ の入射光子エネルギー依存性を示した。図 2 より、先行研究[8]との比較から、測定誤差の範囲内で比較的良い一致を示しており、本測定で得られた尿素分子の非対称パラメータ $\beta(E)$ の妥当性を確認できた。

図 2 と同様に、式(1)を用いて本研究から得られた尿素分子の光電離に伴う光電子非対称パラメータ $\beta(E)$ の入射光エネルギー依存性を図 3 に示した。図 3 は、図 1 の光電子スペクトルにおいてイオン化ポテンシャル範囲が約 9.7 eV から 12 eV の第 1 ピークに対する強度から得られた $\beta(E)$ を示している。図 3 に示した第 1 ピークに対する $\beta(E)$ は広い入射光エネルギー範囲に対して 1.0 前後の値を示しており、入射光子エネルギー依存性は比較的小さく、入射エネルギーの増加とともにわずかな $\beta(E)$ の増加が初めて確認された。これは、どの入射エネルギーでも光の偏光方向に対して、おおよそ水平方向に光電子が放

出されることを示している。今後は、理論計算との比較を通じて、電子の放出角度分布について考察すると同時に、他のピーク構造についても解析する予定である。

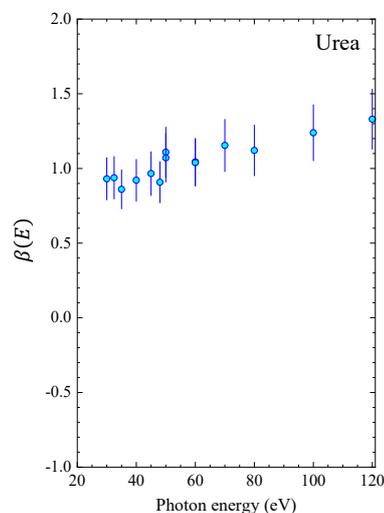


図 3: イオン化ポテンシャル約 9.7 eV から 12 eV の範囲の第 1 ピークに対する非対称パラメータの入射光エネルギー依存性

4 まとめ

今回、KEK-PF の BL-20A と BL-28B における幅広いエネルギー範囲の真空紫外光を用い、新たに開発された抵抗加熱による試料加熱セル、および高分解能電子分光装置 SCIENTA R4000 を組み合わせることで、気相尿素分子の高分解能光電子スペクトルの入射波長依存性、さらに検出器方向に対する水平偏光と垂直偏光の測定にはじめて成功した。今回得られた光電子スペクトルは、HeI 共鳴線を用いた先行研究の結果をよく再現したことに加え、幅広い入射光エネルギー範囲と光電子角度分布を測定することができた。

参考文献

- [1] 島本佳昌ら, 生体医工学 55, 252 (2017).
- [2] B. F. Campbell and L. B. Clark, J. Am. Chem. Soc. 111, 8131 (1989).
- [3] J. L. Meeks et al., J. Am. Chem. Soc. 97, 3905 (1975).
- [4] D. Dougherty et al., J. Am. Chem. Soc. 98, 3815 (1976).
- [5] R. P. Madden D. L. Ederer, and K. Codling, Phys. Rev. 177, 136 (1969).
- [6] https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/levels_form.html (2024/2/28)
- [7] M. Hoshino et al., "VUV Photoelectron Spectroscopy of Urea Molecules", PF Activity report 2023.
- [8] W. Wijesundera and H. P. Kelly, Phys. Rev. A 39, 634 (1989) and references therein.

* masami-h@sophia.ac.jp