





図 2 2.1 nm の波長の軟 X 線で計測した細胞像。下段左が軟 X 線の吸収率、下段右が位相シフトによるイメージング結果。軟 X 線吸収像中の点線で囲った領域(a,b,c)を、下部にそれぞれ拡大して示している。

図 2 に軟 X 線で観察した細胞の画像の代表例を示す。タイコグラフィ法では試料の X 線に対する吸収率だけでなく、位相のシフト量も定量的に求めることが可能である。こうした吸収や位相のイメージングによって、核小体やミトコンドリア、小胞体と想定されるさまざまな細胞内の構造を高分解能に捉えることに成功した。また、軟 X 線の各波長でのイメージング結果に、透過像と位相像に大きな違いがあることが分かった。X 線領域において位相像は感度の高い計測を行うことができるため、細胞のような透過性の高い試料を計測する場合の本軟 X 線顕微鏡の大きな長所になる。

今回の細胞試料のイメージングは、炭素や窒素、酸素とよく反応する軟 X 線の波長域を跨いで計測を行っており、今後軟 X 線の吸収分光分析と組み合わせることで、細胞中の元素分布だけでなく、タンパク質や脂質、核酸、糖といったさまざまな分子の分布をラベルフリーで捉えることが可能になる。こうした元素選択的な高分解能イメージング技術は、現在広く利用されている可視光蛍光顕微鏡では捉えることの難しい低分子などの分析に力を発揮するものと期待される。

また、軟 X 線顕微鏡は物質中の電子状態を調べることによって物性研究にも力を発揮する。今後、装置の改良による 10 nm 分解能の実現も目指しており、本軟 X 線顕微鏡の特性と合わせて、スピントロニクスなどを活用した次世代デバイスの動作環境下で評価などにも取り組んでいく計画である。

#### [参考文献]

- [1] X. Zhu, A. P. Hitchcock, D. A. Bazylinski, P. Denes, J. Joseph, U. Lins, S. Marchesini, H. W. Shiu, T. Tyliczszak, and D. A. Shapiro, "Measuring spectroscopy and magnetism of extracted and intracellular magnetosomes using soft X-ray ptychography," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 113, E8219–E8227 (2016).
- [2] T. Sun, G. Sun, F. Yu, Y. Mao, R. Tai, X. Zhang, G. Shao, Z. Wang, J. Wang, and J. Zhou, "Soft X-ray ptychography chemical imaging of degradation in a composite surface-reconstructed Li-rich cathode," *ACS Nano* 15, 1475–1485 (2021).
- [3] B. Rösner, S. Finizio, F. Koch, F. Döring, V. A. Guzenko, M. Langer, E. Kirk, B. Watts, M. Meyer, J. Loroña Ornelas, A. Späth, S. Stanescu, S. Swaraj, R. Belkhou, T. Ishikawa, T. F. Keller, B. Gross, M. Poggio, R. H. Fink, J. Raabe, A. Kleibert, and C. David, "Soft X-ray microscopy with 7 nm resolution," *Optica* 7, 1602 (2020).
- [4] T. Kimura, Y. Takeo, K. Sakurai, N. Furuya, S. Egawa, G. Yamaguchi, Y. Matsuzawa, T. Kume, H. Mimura, M. Shimura, H. Ohashi, I. Matsuda, and Y. Harada, "Soft X-ray ptychography system using a Wolter mirror for achromatic illumination optics," *Opt. Express* 30, 26220 (2022).
- [5] F. Pfeiffer, "X-ray ptychography," *Nat. Photonics* 12, 9–17 (2018).