

高速 4DX 線 CT によるソフトマテリアル観察

(東北大国際放射光、東北大多元研、東大物工) ○矢代 航

1972 年に Hounsfield らによって発表された X 線 CT (X-ray Computed Tomography) は、被写体内部を非破壊、かつ高空間分解能で三次元的に可視化できる。X 線 CT では、X 線画像検出器により、被写体の投影像を様々な方向から撮影するが、近年の X 線画像検出器の高速化、X 線イメージング技術の進歩、さらには圧縮センシング[1-3]をはじめとするデータサイエンス技術の発展により、シンクロトロン放射光源を用いれば、ミリ秒オーダーの時間分解能が実現できるようになっている[4-14]。

図 1 は筆者らが最近開拓してきた 4D (3D+時間) 領域を模式的に示している[14]。時間分解能ミリ秒オーダー、空間分解能数 $10\ \mu\text{m}$ の領域はこれまで未開拓のブルーオーシャンであった。図中には、生物および機械の運動観察に適した空間分解能・時間分解能(ニーズ)も帯状に示しており、上記の未開拓領域が、学術・産業応用上、極めて重要であることが分かる。本講演では、筆者らが最近開発したミリ秒オーダー時間分解能の、試料高速回転 X 線 CT[4-8]、シンクロトロン放射光ビームのマルチビーム化による試料回転なし X 線 CT[9-13]の現状について紹介する。

図 2 は試料高速回転 CT の例で、タイヤゴムの引張破壊の瞬間を $10\ \text{ms}$ の時間分解能で捉えた結果である[7-8]。数 10 秒オーダーの時間分解能で 4DX 線 CT 撮影するためにゆっくり引っ張った場合には、引張によって試料内部に発生するボイドが球形に近くなったが[15]、 $10\ \text{ms}$ の時間分解能

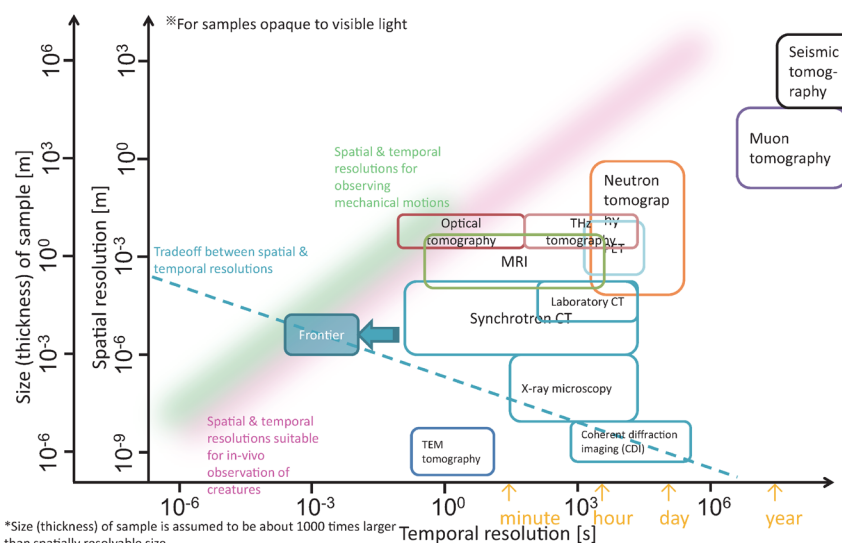


図 1: 不透明な試料内部を三次元的に非破壊で観察する計測方法の時間分解能・空間分解能の概略図。観察対象のサイズ(厚さ)は空間分解能のおおむね 1,000 倍と仮定してある[14]。

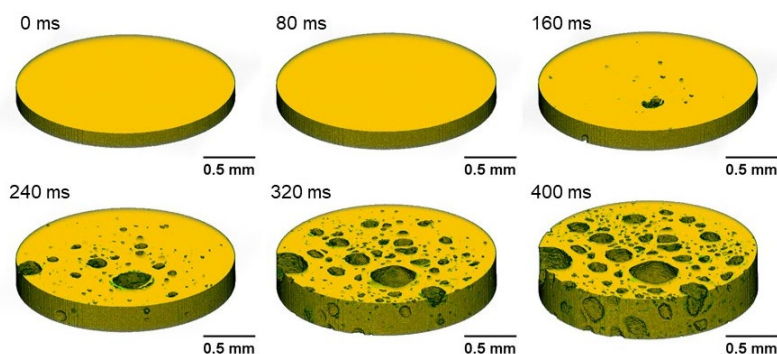


図 2: 時間分解能 $10\ \text{ms}$ (空間分解能 $5\ \mu\text{m}$) で撮影したタイヤゴム引張破壊過程の X 線 CT 再構成結果 (6 コマ抜粋) [7,8]。

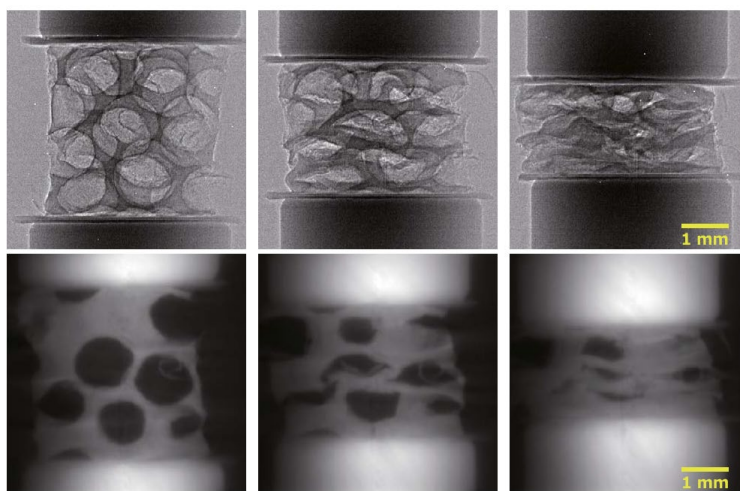


図 3: 多孔性複合材料の圧縮プロセスの観察。(上) X 線投影像。(下) 4DX 線 CT 再構成結果から求めた断面像[16]。

では、ボイドの形状の球形からのずれが大きいことが分かる。引張を途中で止めた後にもボイドの成長がみられたことから、図 2 は非平衡系における緩和時間の空間分布を捉えているとも解釈できる。この方法は、多孔性複合材料の圧縮破壊プロセスの 4D 観察にも最近応用され、フィラー層と樹脂層の引張破壊がフィラー機能の劣化に寄与していることが示された[16]。

図 4 はシンクロトロン放射光ビームのマルチビーム化による試料回転なし 4DX 線の原理実証で、時間分解能は 0.5 ms である。図 2、図 3 の試料高速回転法は、遠心力により

試料が変形してしまったり、流動性のある試料には適用できなかったり、試料まわりの環境制御や生きた生物への適用が困難であったり、といった問題があるため、1 ms 以上の高時間分解能の 4DX 線 CT では、このマルチビーム法が今後主流になっていくと考えられる。

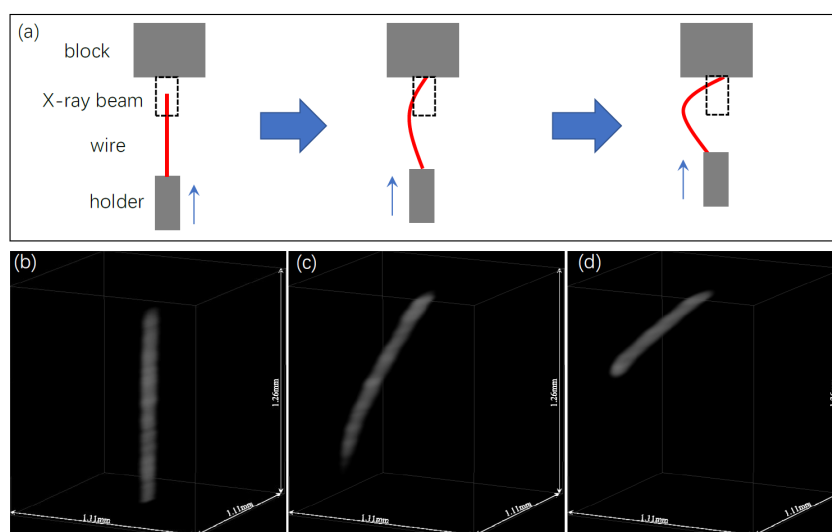


図 4: 直径 50 μm タングステンワイヤーを曲げた際の 4DX 線 CT のスナップショット (時間分解能: 0.5 ms)。(a)実験の模式図。(b)、(c)、(d)は、それぞれ時刻 0.25 秒、1 秒、1.5 秒のスナップショット[12]。

- [1] https://ja.wikipedia.org/wiki/圧縮センシング#cite_note-4.
- [2] M. Li, H. Yang, and H. Kudo, Phys. Med. Biol. 47, 2599 (2002).
- [3] D. L. Donoho, IEEE Trans. Inf. Theory 52, 1289 (2006).
- [4] W. Yashiro *et al.*, Appl. Phys. Express 10, 052501 (2017).
- [5] W. Yashiro *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 56, 112503 (2017).
- [6] W. Yashiro *et al.*, Appl. Phys. Express 11, 122501 (2018).
- [7] R. Mashita *et al.*, J. Synchrotron Rad. 28, 322 (2021).
- [8] <https://youtu.be/4D2RLSmY0kg>
- [9] Voegeli V., *et al.*, Optica, 7, 514 (2020).
- [10] W. Yashiro *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. 2380, 012121 (2022).
- [11] W. Voegeli *et al.*, J. Phys.: Conf. 2380, 012063 (2022).
- [12] X. Liang *et al.*, Appl. Phys. Express 16, 072001 (2023).
- [13] W. Voegeli *et al.*, Appl. Phys. Express 16, 072007 (2023).
- [14] W. Yashiro *et al.*, Appl. Sci. 11, 8868 (2021).
- [15] R. Mashita *et al.*, Sci. Rep. 13, 5805 (2023).
- [16] T. Kawanishi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 62, 108002 (2023).