

## 走査型 3DXRD 顕微鏡法の開発

P38

Development of Scanning Three-dimensional X-ray Diffraction Microscopy

林 雄二郎 y-hayashi@mosk.tytlabs.co.jp

(株)豊田中央研究所

### 1. 背景

金属材料は古くより私たちの社会の近代化を支えてきた成熟した材料であるが、荷重を支える構造材料として長年にわたって過酷環境下で使用されることが多く、小さな損傷が重大な事故を引き起こす恐れがあるため、今でも疲労・損傷メカニズムの解明と寿命予測の技術進歩は私たちの社会の安全・安心に直結することは言うまでもない。金属はセラミクスや樹脂と比べて構造材料としての機械特性や耐久性は高いものの、むしろそのために高荷重を受け持つ骨格としてデザインされるため金属材料の長期信頼性・耐久性の重要性が軽減されることはない。現在の工業用金属材料は既に膨大な時間とコストをかけて耐久性の基準を満たすことで実用化されてきた。それでもなお、今日においても耐久性評価、疲労・損傷メカニズム解析、高耐久化には多大な時間とコストを要している。製品の耐久性を決めている弱点が一旦克服されると、次にやってくる高性能化・低コスト化の要求により使用条件の過酷化や低コスト材料への代替が起こり、新たな弱点が必ず現れるためである。また、内燃機関自動車から電気自動車のように社会インフラの大転換が起こると、新たな条件化における材料・部品の寿命データを蓄積し直す必要が出てくる。

このように材料・部品の信頼性評価は製造業における研究開発コストの大きな割合を占めており、従来の試験的寿命データ蓄積型からコンピュータによる寿命予測型への転換による製品開発効率化が製造業にもたらす経済的影響力は計り知れないものがある。実用金属材料の疲労・損傷という複雑現象を産業ツールとして現実的な時間内でシミュレートするには、現象のモデリングを行い材料・部品のいわゆるデジタルツインを構築する必要がある。疲労・損傷を再現・予測するデジタルツインの構築には (a) 結晶方位情報を含めた微視組織、(b) 応力・塑性ひずみ等の力学情報、(c) ポイド・き裂等の形態情報を表す実験データの取得が成功の鍵を握っている。電子線後方散乱回折 (EBSD) 顕微鏡法はこれらの情報が得られる顕微鏡法として爆発的に普及し、今や金属材料の評価に欠かせない手法となっている。しかし、EBSD 法では表面観察に限られ 3 次元情報が得られないというモデリングにおいて決定的な欠点がある。シリアルセクションングにより 3 次元データは得られるものの、疲労・損傷過程を追って 3 次元的な変化を追跡観察することはできない。

### 2. 走査型 3DXRD 顕微鏡の開発

材料内部の 3 次元データ取得は明らかに放射光の使命である。金属材料においては X 線回折顕微鏡法の進展が著しく、中でも筆者らが注目しているのが 3 次元 X 線回折 (3DXRD) 顕微鏡法である。3DXRD 法は多結晶試料の回転結晶法と回折像のイメージングを組み合わせた方法であり、原理的には粒界ネットワークスケールにおける (a) 及び (b) の情報が非破壊 3 次元で得られる。高エネルギー放射光 X 線を用いることで表面近傍に限らずミリメートルサイズのバルク試料内部の 3 次元データが得られることが特徴である。しかし、回転結晶法の一つであるため結晶粒数が多いと、または、モザイク度が大きいと解析が困難になるため、粗大粒試料を使った報告例がほとんどであり、工業用金属材料のバルク試料への適用は困難であった。

この問題を解決するため筆者らは走査型 3DXRD 顕微鏡法を考案した。この方法では結晶粒数が多くモザイク度が大きい多結晶試料においても、放射光マイクロビームとコニカルスリットを用いて異なる結晶粒からの回折斑点のオーバーラップを低減することで方位・応力の解析を可能にする。筆者らは高エネルギー放射光マイクロビームを形成することのできる大型放射光施設 SPring-8 に専用ビームライン (BL33XU 豊田ビームライン) を建設し走査型 3DXRD 顕微鏡装置を構築した。これを用いて塑性変形させた冷間圧延鋼板 (1mm 厚) の内部の 3 次元非破壊方位・応力マッピングに成功した。これにより低炭素鋼の疲労・損傷過程における (a) 及び (b) の 3 次元データを得ることが可能となった。広く実用に供されている低炭素鋼の疲労・損傷モデリングが大きく進展するものと期待できる。今後は、炭素鋼や二相鋼、非鉄金属等にも広く適用拡大を図っていきたい。

#### [参考文献]

- [1] Y. Hayashi *et al.*, *Science* **366**, 1492-1496 (2019).
- [2] Y. Hayashi *et al.*, *J. Appl. Cryst.* **48**, 1094-1101 (2015).
- [3] 林雄二郎ら, *放射光* (日本放射光学会誌) Vol. 31, No. 4, 257-265 (2018).

#### [関連 WEB]

- [1] <https://www.tytlabs.co.jp/company/facilities.html>
- [2] [http://www.spring8.or.jp/wkg/BL33XU/instrument/lang/INS-0000001504/instrument\\_summary\\_view](http://www.spring8.or.jp/wkg/BL33XU/instrument/lang/INS-0000001504/instrument_summary_view)