

衝撃破壊の瞬間、材料に何が起こるのか ～破壊の一瞬をX線で観測する～

SATテクノロジー・ショーケース2020

■ はじめに

多くの金属材料は細かい金属結晶が集合した多結晶状態になっており(図1)、材料の機械的特性は金属結晶のサイズや状態によって決まります。材料に高い圧力の衝撃波を加えると衝撃圧力に耐えられなくなり、材料は破壊されます。衝撃波内では、まず元に戻ることができる変形(弾性変形(脚注1))が起こり、元に戻れる限界を超えた変形(塑性変形(脚注2))を経て破壊に至ります。

自治医科大学とKEK物質構造科学研究所の一柳光平博士を中心とする共同研究グループは、衝撃破壊の瞬間を実際に観測するために、純アルミニウム箔内の金属組織の衝撃破壊による微細化に注目しました。KEKの放射光実験施設 フォトンファクトリー・アドバンスリング(PF-AR)を用いて、金属内に伝搬する衝撃波によってナノ秒(1ナノ秒=1億分の1秒)の間に進行する金属組織の微細化を直接観測することに成功しました。

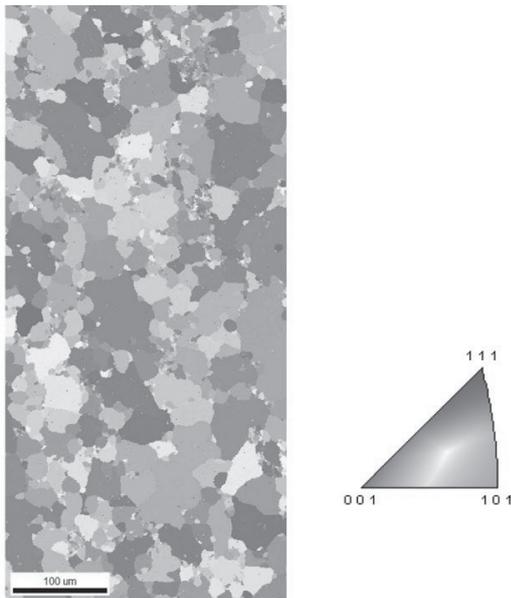


図1 衝撃破壊前の純アルミニウム箔の金属組織図。色は結晶格子軸の向きの分布に対応しており、多くの結晶粒の集合体をカラーマッピングで表示している。

■ 研究内容と成果

1. 衝撃破壊とは？

形あるものは必ず壊れる。これは自然の摂理ですが、最も短い時間で起こる破壊が衝撃波による衝撃破壊です。衝撃波は、高速衝突・爆発・火山噴火・雷・隕石・超音速飛行中の飛行機などによって発生することが知られていて、特に高圧の衝撃波は1キロメートル毎秒以上の高速で物質に伝搬し、材料内部を不均一に後戻りできない状態に破壊します。

現代社会で安全な生活を送るためには衝撃破壊の正確な計測が必要となります。しかし、衝撃波は音速で伝搬するため、破壊は一瞬のうちに起き、不均一かつ非常に複雑です。衝撃波内の破壊現象についての評価は難しく、衝撃破壊前と後の物質を見比べて想像するしかありませんでした。

2. どのような実験を行ったのか？

KEKの放射光実験施設PF-ARビームラインNW14Aの、原子サイズの波長かつ100ピコ秒の時間幅を持つパルス状のX線を使った時間分解X線回折(脚注3)を用いると、純アルミニウム箔の金属組織の微細化過程を精密に調べることができます。研究グループは、この測定法と、ナノ秒のパルス幅を持つ高強度レーザーを組み合わせた実験を考案しました(図2)。

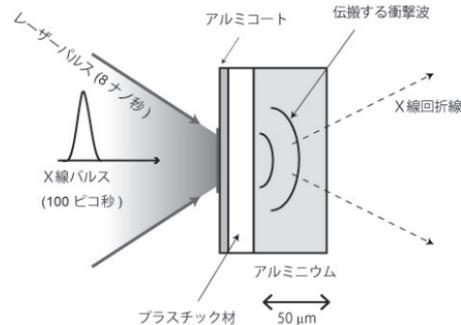


図2 材料の衝撃波伝搬下における時間分解X線回折測定の概略図。アルミコートとプラスチック材を置くことで、試料の純アルミニウム箔は吹き飛ばされずに衝撃波のみを受ける。

代表発表者 **足立 伸一(あだち しんいち)**
所属 **高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所**

問合せ先 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
TEL: 029-879-6022 FAX: 029-864-3202
shinichi.adachi@kek.jp

■キーワード: (1) 衝撃破壊
(2) 時間分解 X 線計測
(3) レーザーピーニング

■共同研究者:
一柳光平(自治医科大学、KEK)、高木壮大(筑波大学)、野澤俊介、深谷亮、木村正雄(KEK)、川合伸明(熊本大学)、中村一隆(東工大)、Klaus-Dieter Liss(テクニオン-イスラエル工科大学)

3. 得られた実験成果は？

高強度パルスレーザーをたった1回、試料に集光照射するだけで、試料表面のコート材を吹き飛ばし、5万気圧以上の高圧衝撃波を発生させることができます。測定ではまず、破壊前の試料のX線回折像(図3左側)を撮影します。高強度パルスレーザー照射1回の8ナノ秒間に、100ピコ秒間のX線パルスを一回だけ照射し、衝撃波が伝搬する間に衝撃破壊中の試料のX線回折像(図3右側)を撮影します。試料を替え、X線パルス照射のタイミングを3ナノ秒ずつずらして繰り返し測定を続け、計100組の回折像を得ました。破壊前と破壊中の回折像の各回折点を照らし合わせると、金属結晶が微細化していることはもちろん、金属原子の配置が粒子内でどれだけずれているか(不均一歪み)がわかります。

X線回折像の解析の結果、マイクロメートルサイズだった金属の結晶粒は衝撃破壊によりナノメートルサイズまで細分化し(図4)、さらに極めて小さくなった各金属結晶内部で結晶の不均一性(結晶内の原子位置のずれ)が瞬間的に増大していることがわかりました。

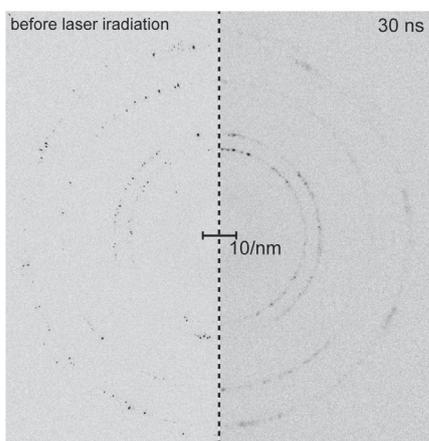


図3 衝撃破壊前後のX線回折像。(左側) 破壊前: 回折点が非連続で、結晶粒が大きいことを表す。(右側) 破壊後: 回折点が連続で、衝撃破壊により結晶粒が小さくなっていることを示す。

■ その波及効果

極めて短い時間にかかる現象の瞬間を捉える新しい測定技術が、材料科学の発展に寄与することは言うまでもありません。衝撃波が引き起こす高速破壊現象による金属組織の微細化過程を理解することは、これまで極めて困難であった衝撃破壊の評価を可能にするだけでなく、レーザーピーニング(脚注4)などに代表される衝撃波を利用した組織微細化加工に応用できると期待できます。

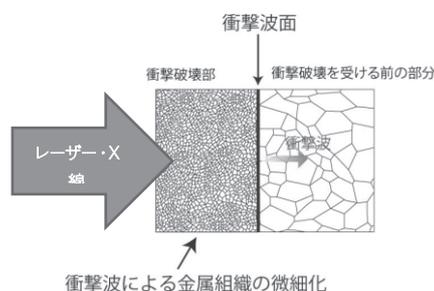


図4 高圧の衝撃波による金属組織の微細化過程

■ 用語解説

1. 弾性変形: 力を受けた固体に生じた変形が、力を取り除けば元に戻る変形。
2. 塑性変形: 力を加えて変形させたとき、永久変形を生じる変形。力を取り除いた後にも歪みが残る。
3. 時間分解X線回折: ある瞬間の原子の構造情報を得るための手法の一つ。今回の実験では、材料が変形する瞬間に短パルスX線を当てX線回折データを収集した。
4. レーザーピーニング: 短い時間幅のレーザーを照射したときの局所的な衝撃圧縮により材料表面に圧縮の残留応力を付与し、表面を加工硬化する技術。

■ 論文情報

タイトル: Microstructural deformation process of shock-compressed polycrystalline aluminum

雑誌名: Scientific Reports

著者名: K. Ichiyangi, S. Takagi, N. Kawai, R. Fukaya, S. Nozawa, K. G. Nakamura, K. D. Liss, M. Kimura, and S. Adachi. DOI: 10.1038/s41598-019-43876-2