

レーザー衝撃圧縮による超高ひずみ速度変形メカニズムの研究

川合伸明

熊本大学 パルスパワー科学研究所

緒言

物質の弾性-塑性転移応力を表す降伏強度は、顕著なひずみ速度依存性を示し、ひずみ速度が 10^5 /s 以上にも達する衝撃圧縮下においては、静的な材料試験で得られる値の数倍も大きくなる。実際、金属材料では数百 MPa、無機材料では十数 GPa の降伏強度を示すことも珍しくない。この超高ひずみ速度変形における降伏強度の著しい上昇は、塑性変形を支配する転位の移動速度より、応力・ひずみを伝える衝撃波の伝播速度が速いことが原因であるとされている[1]。つまり、転位の運動は、急激な応力場変化に対する時間緩和現象として降伏強度に影響を及ぼしていることになる。このような応力緩和機構としての塑性変形ダイナミクスを検証するためには、km/s オーダーの衝撃波速度で伝播する格子ひずみの時間変化過程を理解する必要がある。これまでは、分子動力学法などを用いた数値シミュレーションにより検討[2]が進められてきた。しかし、近年、実験技術の発展により、実験的なアプローチも展開され始めている[3]。

以上の背景から、本研究では、格子ひずみの変化過程を実験的に測定することにより、衝撃波の伝播により生じる高応力・超高ひずみ速度変形下での塑性変形機構を評価・解明することを目的としている。本稿では、CaF₂ 単結晶に対して実施した、放射光パルス X 線とテーブルトップ型ハイパワーレーザーとを組み合わせた、ポンプ・プローブ型レーザー誘起衝撃圧縮下ナノ秒時間分解 X 線回折実験の結果について報告する。尚、単結晶試料の入手性、リファレンスとなる単結晶バルク体の衝撃圧縮データの存在[4]などから、CaF₂ を本実験の試料として選定している。

実験方法

本実験における時間分解 X 線回折実験は、高エネルギー加速研究機構 (KEK) の放射光施設である PF-AR の NW14A ビームライン[5]で行った。NW14A では X 線パルスセレクターと X 線シャッターにより放射光 X 線 1 パルス (パルス幅 100 ps) を取り出すことが可能となっている。NW14A に設置される装置は、電子バンチの蓄積リング周回周波数を基準に制御され、ポンプ光となるパルスレーザーと X 線パルスとのディレイ調整は 100 ps 以下のジッターで任意に設定可能となっている。X 線のエネルギー値およびエネルギー幅も調整可能であり、本研究では 16

keV にピークを持つエネルギー幅 $dE/E=15\%$ の白色 X 線を用いた。X 線照射サイズは $0.45 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$ であり、透過ラウエ回折像を 2 次元 CCD により取得した。レーザー誘起衝撃波発生用のポンプ光には、レーザー強度 1 J/pulse, パルス幅 10 ns, 波長 1064 nm の Nd:YAG レーザーおよび、レーザー強度 16 J/pulse, パルス幅 12 ns, 波長 1064 nm の Nd:ガラスレーザーを用いた。レーザーの集光径は X 線照射サイズより大きい $500 \mu\text{m}$ とした。試料として (100) および (111) にそって切り出された CaF₂ 単結晶 (以後それぞれ CaF₂[100]、CaF₂[111] と表記) を用いた。試料サイズは 5-mm 角, 厚さ 0.05 mm である。1 J/pulse のレーザー照射時には、資料の照射面側に $6\text{-}\mu\text{m}$ 厚の Al を、16 J/pulse のレーザー照射時には、 $25\text{-}\mu\text{m}$ 厚の PET フィルムを接着し、アブレーターとして用いた。各アブレーターにレーザーを集光照射することによりアブレーションさせ、その反作用として衝撃波を試料内部に伝播させた。本実験では、厚み方向より十分に広い領域に平面衝撃波を伝播させることにより、マクロには 1 軸ひずみ圧縮状態が達成される条件とした。

結果と考察

Fig. 1 に本実験により取得された透過ラウエ回折像を示す。図中の (a), (b) はレーザー照射前の状態であり、(c), (d), (e), (f) はレーザー照射後 4 ns の状態で取得された回折像である。また、(c), (d) におけるレーザー強度は 1 J/pulse であり、(e), (f) では 16 J/pulse である。CaF₂[100]、CaF₂[111] いずれの試料においても、レーザー強度が 1 J/pulse の条件においては、 2θ 方向 (径方向) 高角度側 (外側) に新たな回折点が現れていることが分かる。本実験で行った白色 X 線によるラウエ回折では、結晶構造に異方的なひずみが生じた時に回折点が移動する。(c), (d) に見られるように全ての回折点が一樣に高角度側にシフトしている状態は、結晶構造が一軸方向に縮んでいることに相当する。このことから、この衝撃圧縮条件では、結晶格子というミクロの状態でも一軸ひずみ状態が達成されており、応力・ひずみ緩和の生じていない弾性変形領域の格子応答を観測した結果であるといえる。一方、(e), (f) においては、全ての回折点がシフトとブロードニングが混在している状態となっている様子が分かる。加えて、シフトの方向が回折点により異なっている様子も観察できる。これらの結果から、16 J/pulse の照射条件における衝撃圧縮状態では、マクロには一軸ひずみ状態ではあっても、結晶格子レベルではもはや一軸ひずみを維持

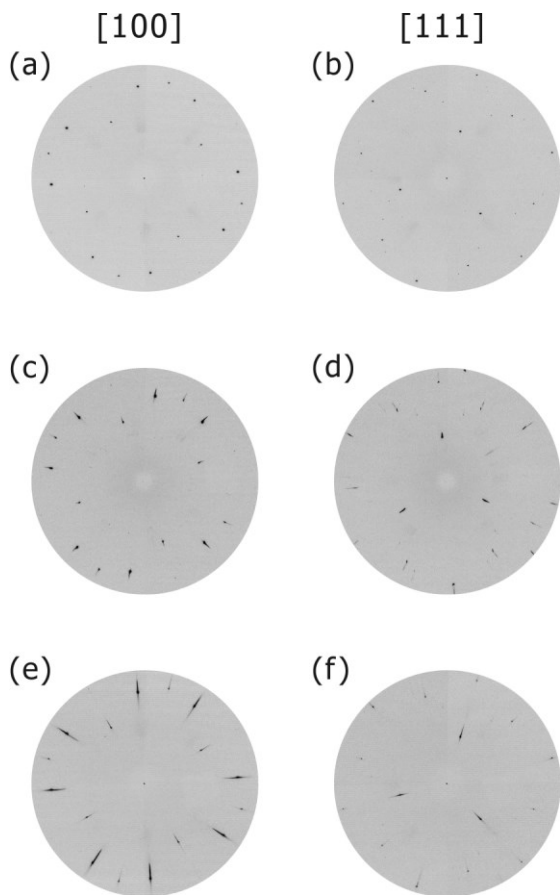


Fig. 1. Two-dimensional Laue diffraction patterns of CaF_2 [100]-oriented crystal ((a), (c), (e)) and CaF_2 [111]-oriented crystal ((b), (d), (f)). (a) and (b) are patterns obtained before laser irradiation. (c), (d) and (e), (f) are obtained at about 4 ns after irradiation of 1 J/pulse and 16 J/pulse laser, respectively.

することができず、結晶子の回転や不均一変形により応力・ひずみ緩和が生じている、つまり降伏後の塑性ひずみが生じている状態の格子応答を観測した結果であると考えられる。

本実験により、衝撃圧縮下における降伏前後の状態における格子応答の様子を、X線回折により観測することに成功した。しかし、本測定は透過法であるがゆえに、回折画像は衝撃波伝播方向のひずみ分布状態が重畳したものとなっている。今後は、レーザー速度干渉計を用いた衝撃波プロファイル計測を実施することにより、衝撃波伝播方向におけるマクロなひずみ分布状態の情報を取得し、今回折画像と比較することにより、格子ひずみの衝撃波伝播方向における空間分布ならびに、その時間発展を明らかにしていく予定である。また、塑性変形領域においては、各回折点のシフト方向の違いから、結晶の回転やすべりの方向を明らかにし、結晶方向と衝撃波伝播方向の関係も含めた、塑性変形のメカニズム解明に繋げていきたいと考えている。

謝辞

KEK, PF-AR, NW14A ビームラインでの時間分解 X 線回折実験の実施にあたり、自治医科大学の柳光平氏、KEK 物質構造科学研究所の足立伸一氏、

野澤俊介氏、深谷亮氏、船守展正氏、東京工業大学フロンティア材料研究所の中村一隆氏、筑波大学の興野純氏、高木壮大氏に協力を頂いた。

参考文献

- [1] M. A. Meyers, *Dynamic Behavior of Materials* (Wiley, New York, 1994).
- [2] B. L. Holian et al., *Science* **280**, 2085 (1998).
- [3] D. Milathianaki et al., *Science* **342**, 220 (2013).
- [4] T. Sekine and T. Kobayashi, *Phys. Chem. Minerals* **38**, 305 (2011).
- [5] K. Ichianagi et al., *Appl. Phys. Lett.* **91**, 231918 (2007).