

多点同時レーザー照射による亀裂形成の異なる時定数のダイナミクス

(京都大学) ○坂倉 政明, 福田 直晃, 下間 靖彦, 三浦 清貴

Dynamics of crack generation inside a LiF single crystal by multiple-spot laser irradiation

(Kyoto Univ.) ○Masaaki Sakakura, Naoaki Fukuda, Yasuhiko Shimotsuma, Kiyotaka Miura

【背景】 岩塩型構造のフッ化リチウム(LiF)

単結晶内部にフェムト秒レーザーパルスを集光照射すると、焦点のみで起こる非線形イオン化による構造変化と同時に $\langle 100 \rangle$ 方向に4つの亀裂が生じる(図1(a))。これらの亀裂の方向はLiF単結晶のへき開面によって決まるが、時間分解応力分布の観測によって亀裂伸展過程を詳細に調べると、レーザー誘起応力波による異方性応力分布が方向性のある亀裂伸展の原因であることが明らかになった(図1(b))。我々は、レーザー誘起応力波が亀裂伸展の原因であるという知見に基づいて、多点同時レーザー照射で生じる応力波干渉によってLiF単結晶内部の亀裂形成制御を試みてきた。しかし、多点同時レーザー照射では応力波誘起の亀裂伸展だけでなく、より遅い時間スケールの亀裂伸展過程があることが明らかになった。

【実験】(多点同時レーザー照射) 波長 800 nm、パルス幅 100 fs のレーザーパルスを空間光変調器によって変調した後、50 倍

(NA = 0.80) の対物レンズでLiF単結晶内部に集光照射し、焦点面で形成された複数の集光スポットで同時に光励起を引き起こした。レーザーパルスの入射方向は結晶の(001)面に垂直で、結晶の[100]方位と底辺が平行である二等辺三角形(頂角 θ)の3つの頂点に集光点を形成した(図2(a))。(時間分解観測) 位相変調前のフェムト秒レーザーパルスをビームスプリッターで分岐し、BBO結晶に通すことで得た第二高調波を光学遅延した後、励起光と反対方向から光励起領域を照明し、励起光の集光用の対物レンズで拡大された透過光を CCD カメラに結像することで光励起後の瞬間的な亀裂の画像を取得した。

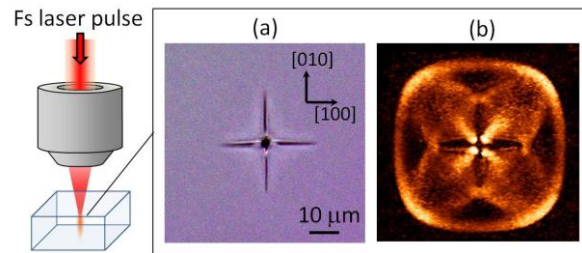


図1. LiF単結晶内部のフェムト秒レーザー照射. (a)レーザー照射後の亀裂の光学顕微鏡写真. (b)光励起後4ナノ秒での複屈折の分布.

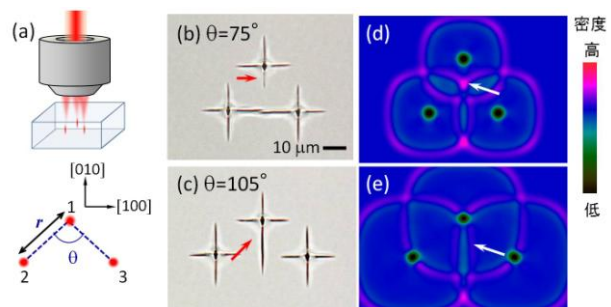


図2 (a) LiF単結晶内部の多点同時レーザー照射と集光点分布. (b), (c): LiF単結晶内部の3点に同時にフェムト秒レーザーパルスを集光した時に生じた亀裂の透過顕微鏡写真. 矢印は長さが顕著に異なる亀裂を示す. (d), (e): それぞれ(b), (c)と同じ分布の集光点で発生した熱応力による緩和過程を弾性力学計算して得た過渡密度分布. (d)が光励起後2.6ナノ秒、(e)が3.6ナノ秒.

【結果と考察】

(多点同時照射による亀裂形成) 図 2(b), (c)に LiF 単結晶内部の 3 点にフェムト秒レーザーパルスと同時に集光照射した後に生じた亀裂の顕微鏡写真を示す。頂角 θ が 75° では、頂点の光励起点から下方向への亀裂が他の亀裂に比べて短くなる(図 2(b))のに対して、頂角 θ が 105° では同じ位置の亀裂が長くなった(図 2(c))。多点同時レーザー照射によって特定の亀裂の長さが異なったことは、レーザー誘起応力波の干渉が亀裂伸展に影響したことを示唆している。そこで、応力波干渉を弾性力学計算によってシミュレーションした。応力波干渉による光励起後の過渡密度分布を図 2(d), (e)に示す。 $\theta=75^\circ$ では、光励起後 2.6 ナノ秒に応力波干渉によって頂点の集光点から下向きの亀裂の先端に圧縮領域が生じた(図 2(d)の矢印)。この亀裂先端での圧縮が亀裂の伸展を阻害したと考えられる。一方、 $\theta=105^\circ$ では、光励起後 3.6 ナノ秒に応力波干渉によって頂点の集光点から下方向に低密度領域が現れた(図 2(e)の矢印)。この低密度領域形成により亀裂に沿って引張応力がかかり、1 点照射に比べて亀裂が長くなったと考えられる。しかし、後で示すように時間分解観測によって後者の解釈が正しくないことが明らかになった。

(亀裂伸展の時間分解観測) $\theta=75^\circ$ および $\theta=105^\circ$ で他の亀裂と長さの異なった亀裂に注目して、亀裂伸展過程の時間分解観測を行った。 $\theta=75^\circ$ での亀裂伸展過程を図 3(a)に示す。上方向の亀裂の伸展は約 4 ナノ秒まで続いたのに対して、下方向の亀裂の伸展は 3 ナノ秒までに止まった。この観測結果は、応力波干渉のシミュレーションによる「光励起後 2.6 ナノ秒に下方向の亀裂の先端が圧縮されて亀裂の伸展が阻害される」(図 2(d))という解釈に矛盾しない。

一方、 $\theta=105^\circ$ での時間分解観測では(図 3(b))、光励起後 10 ナノ秒まで上方向と下方向の亀裂の伸展速度はほぼ同じであり、10 ナノ秒以降に下方向の亀裂のみでさらなる伸展が起こることが明らかになった。図 2(e)に示した応力波干渉のシミュレーションからは「光励起後 3.6 ナノ秒に下方向の亀裂に沿った低密度領域が現れることで亀裂の伸展が促進する」と解釈されたが、時間分解観測からは、応力波干渉によって低密度領域が現れる 3 ナノ秒と 4 ナノ秒の間に顕著な亀裂伸展の違いが見られなかった。したがって、 $\theta=105^\circ$ で頂点の集光点から下向きの亀裂が長くなった原因は応力波干渉ではないと考えられる。10 ナノ秒以降の遅い亀裂伸展には光励起領域での熱応力の緩和過程が関わっていると考えられるが、それを明らかにするためには 10 ナノ秒以降のダイナミクスを観測し、熱応力が亀裂に及ぼす影響や熱緩和過程に伴う応力分布の変化を明らかにする必要がある。

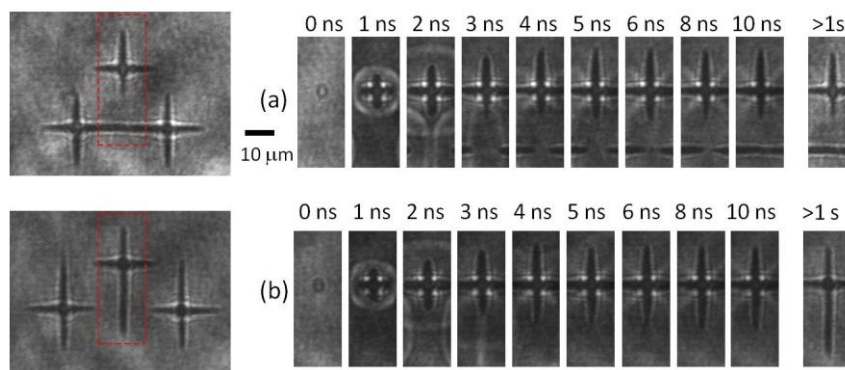


図 3. (a) $\theta=75^\circ$ 、(b) $\theta=105^\circ$ の照射点分布での亀裂伸展の時間分解観測。左写真の赤い点線の領域を右の時間分解画像に示した。

(参考文献)

- 応力ダイナミクス: *Optics Express*, (2011) 19, 17780-17789; *Jpn. J. Appl. Phys.*, (2012) 51, 126602
- 多点同時レーザー照射: *Opt. Express*, (2013) 21, 26921; *Appl. Phys. A*, (2014) 114, 261.