

衝撃波面形成過程と新化学反応プロセス

— 結晶格子の変化をピコ秒で見る —

近藤建一（東工大・応用セラミックス研究所 教授）

●高速度現象の記録法

高速走行中の新幹線は、遠くから見れば止まって見えますし、写真撮影することができます。しかし、近くで撮影しようとする、シャッターを高速で開閉してフィルムに露光される時間を短くし、像の動きを少なくしてボケを防ぐこととなります。また、1枚の写真では、動いているのか止まっているのか分かりませんから、連続して多数回の撮影を行うと、すなわち時間分解撮影を行えば動きを記録することができます。それには、シャッターだけでなくフィルムも高速で移動することが必要になりますが、速く動かすために強い力で引っ張ると切れてしまいます。そこで、超高速の現象を捉えるためには、プリズム鏡などを高速で回して像をフィルムの位置へ移動させたり、電子的な像に転像して記録したりする、いわゆる駒撮りカメラを使います。

ところが、全く異なる考え方による方法もあります。一般に、露光時間が短くなると、暗くなってフィルムに記録するのが困難になりますから、明るいフラッシュ光源が必要となります。記録されるのはフラッシュが発光している間だけとなるので、フラッシュ光源の発光時間を短くし、繰り返し発光させると、1枚のフィルムに動きが重なって記録される、いわゆるストロボ撮影が可能となります。もし、フラッシュ光源をX線（X線パルス）にすると、X線は物質への透過力が強いので、物体内部の断層影絵写真を撮ることができ、高速で変化している物体内部を調べるのに便利なツールになります。

また、結晶を構成している原子の並ぶ間隔に近い波長のX線は、原子によって散乱されるX線が干渉し合い、回折と呼ばれる干渉縞を作るようになります。したがって、レーザー光線のように単色化された（波長が揃った）X線を物質に当てて、結晶格子の並び方を調べることが物質科学では良く行われています。同じことは時間幅の短いパルスX線でも起こりますから、原子の並び方（結晶格子）が変化する様子をストロボ写真的に調べることができるはずですが。

本研究では、ピコ秒（1ps, 1兆分の1秒）台の時間幅をもつ強力なX線パルスを発生させ、種々の外部刺激に対して結晶格子が超高速で応答・変化する様子を記録する装置を開発し、レーザーによって固体中に衝撃波が発生し進展する様子を原子の相対運動として測定することに初めて成功しました。

●レーザーでX線をつくる

フェムト秒（1fs, 1000兆分の1秒）領域の極短パルスレーザー光を集光して金属に照射すると、単位面積当たりのパワー（パワー密度）が 10^{17}W/cm^2 レベルに達し、光の強い電場に金属中の電子が揺さ

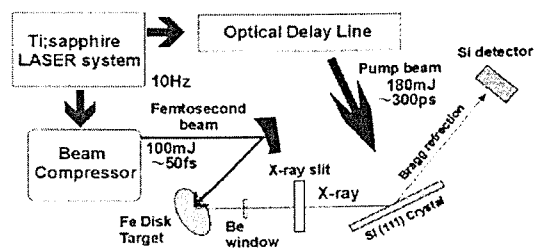


図1 ポンプ・プローブ型ピコ秒時間分解X線回折システム

ぶられて高温(高速電子)になり、その電子と原子核との衝突によってプラズマが生成される段階的加熱現象が起こります。高速電子は金属と衝突して連続的スペクトルのX線を放射する(制動放射)だけでなく、金属中の内殻電子を励起して線スペクトルの特性X線を強く放射することが分かりました。この極端パルスレーザーと物質との相互作用は、強光子場科学や高強度場物理と呼ばれる未知の科学領域に踏み込んだものであり、いくつもの新しい現象が見出されました。ここでは、この特性X線パルスを用います。

●ピコ秒ストロボX線回折

このレーザーを1部分岐して、光励起やレーザーアブレーションの反作用を利用した衝撃高圧パルスの発生を行うための励起(ポンプ)光として用いると、X線をプローブ光とするいわゆるポンプ・プローブ型の時間分解X線回折実験(図1)や時間分解型影絵写真撮影実験を行うことができます。時間変化は光が走る距離を変えて行います。図2は、シリコン単結晶の一端に300 psに伸張したポンプレーザーを照射し、誘起された結晶の歪みを回折X線の角度と強度の変化として60 ps毎に記録した、時間分解X線回折図(X線回折のストロボ写真に相当)です。

各時刻の回折パターンを動力学回折理論で解析すると、最高2.5万気圧程度の弾性的衝撃圧力パルスがレーザーによって発生し、結晶中を音速で進展している過程やその後の膨張過程を知ることができました。つまり、結晶中を伝わっている強い音波の中身をストップモーションとして逐次見ることができた訳です。

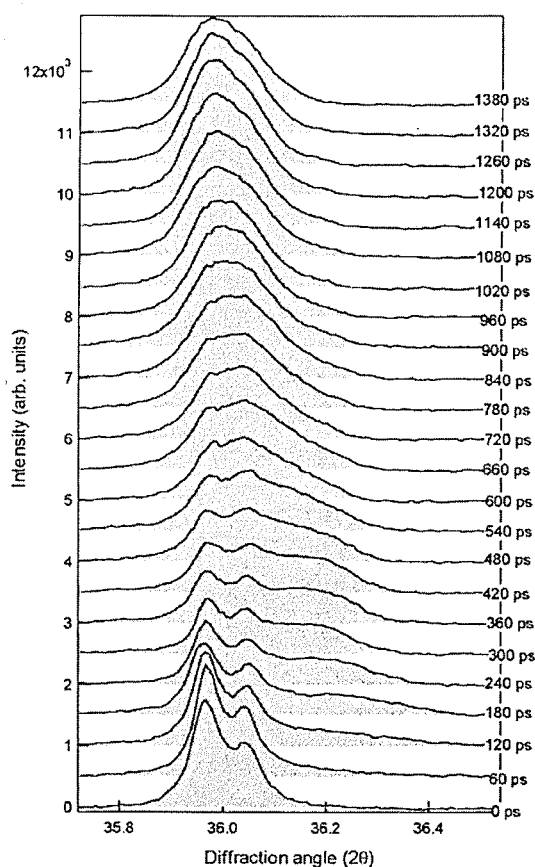


図2 レーザー照射直後から60ps毎のシリコン結晶からのX線回折パターン。

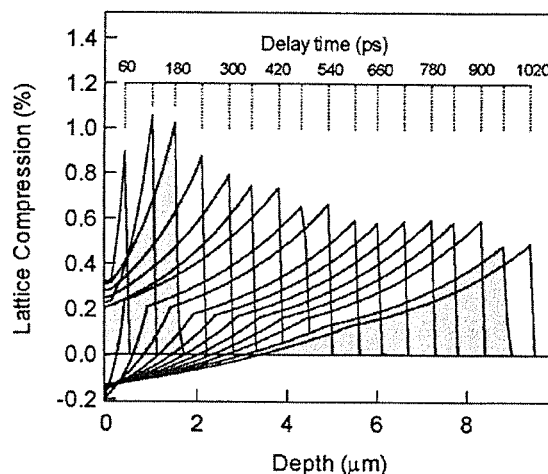


図3 シリコン単結晶中を進展している衝撃波の各時刻における波形。深さ方向へ波形が変化しながら伝わっている様子が分かる。