

SACLA を用いた衝撃圧縮の研究

～超高圧・超高エネルギー密度における物質の振る舞い～

尾崎典雅

大阪大学大学院工学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

■ 物理学

衝撃圧縮の方法は、極限環境における物質の振る舞いを明らかにするために用いられてきた。とりわけレーザー衝撃圧縮下で生成される超高圧高温の極限物質状態は、高エネルギー密度科学、惑星科学、凝縮物性物理学、物質材料科学およびそれらの応用分野において重要な興味の対象となる。X線自由電子レーザー（XFEL）は、超高速で運動する動的超圧下の物質の構造を直接決定すると共に、その状態変化や反応速度を明らかにするための強力なツールである。本稿では、ハイパワーレーザーとXFELを結合した我々独自の実験プラットフォームとそこで得られた衝撃圧縮に関わる素過程の超高速観察の結果について紹介したいと思う。

1. はじめに

極限科学とは、通常は見ることのできない物質の振る舞いを探る学術である。超高圧は超高温や強磁場と並び、この学際的な分野の代表的なアプローチとされている。超高圧の実験や計算の結果から、惑星内部に存在するような物質の状態を解明したり、材料としての特性や機能を見出すためのヒントを得ることができる。高圧力下の物質を研究対象とする分野はさまざま、最近では生物学や薬学の分野での応用も活発になっている。

超高圧発生の方法は、ダイヤモンドアンビルセルや油圧プレス器を用いた静的圧縮法と、軽ガス銃などに代表される動的圧縮法に大きく分けられる。本稿では、動的圧縮法の中でもハイパワーのレーザーを用いた超高圧研究について概説するとともに、SACLA-XFELを用いて得られた最近の成果について紹介したいと思う。時間的にも空間的にもエネルギーを集中できるレーザー衝撃圧縮の方法では、従来技術の限界を超える、テラパスカル（TPa = 10 Mbar, 1千万気圧）域の極超高圧も比較的容易に生成することができる。動的超高圧の状態では、物質が常温常圧の音速を遙かに超えた速度で運動している。超高速で運動する物質の構造を、原子レベルで、止まっているかのように観察するために、極短パルスの高輝度X線源である“SACLA”が決定的な役割を果たす。ハイパワーレーザーで生成される条件は、超高圧と同時に超高温の複合極限環境といえ、地球内部はもちろん巨大なガス惑星のみならず恒星内部の“高エネルギー密度”の状態を知るための研究も精力的に進められている。パルスレーザーの方法が主役を演じてきた“高エネルギー密度科学”と呼ばれる比較的新しい分野と、従来の極限科学との融合は、物質における圧力と温度の領域の拡張と同時に、速度論的な検討を促進している。このような研究の舞台の創出にもまたSACLA

が重大な役割を果たしている。

2. 動的超高圧の極限状態とレーザーショック

動的圧縮で最も典型的な衝撃圧縮では、時間的にも空間的にも鋭い立ち上がりで断熱不可逆に圧縮が進行する（Fig. 1）。その圧縮過程の不連続性から強いせん断力が働き、原子や分子配列の乱れによりエントロピーが増大し、それに伴って熱が発生する¹⁾。したがって準静的・可逆な静的超高圧法に比べ、同じ圧力であっても異なる状態が生成されることになる。

衝撃圧縮の方法が物質研究に威力を発揮する理由は、質量（比重）と距離と時間というきわめて基本的な物理量の測定と、質量、運動量、エネルギーに関するきわめて基本的な保存則に基づく単純な以下の代数式(1)-(3)から、体積、圧力、エネルギーの絶対値が得られるからである。凝縮媒体中において、衝撃波面が十分に急峻（不連続）で、波面背後の状態が定常であるとみなせれば、衝撃波面前後

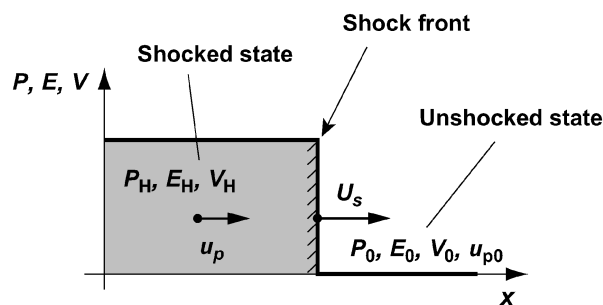


Fig. 1 Schematic of shock compression. The P , E , V , U_s , and u_p are pressure, specific internal energy, specific volume, shock velocity, and particle velocity, respectively, where the subscripts 0 and H denote the states of material ahead and behind the shock front, respectively.

の状態量と衝撃波速度 U_s および粒子速度（物質速度） u_p の間で、以下の3つの関係式が得られる；

$$V_0/V_1 = U_s/(U_s - u_p), \quad (1)$$

$$P_1 - P_0 = U_s u_p / V_0, \quad (2)$$

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2} (P_1 + P_0) (V_0 - V_1), \quad (3)$$

ここで P , V , E はそれぞれ圧力, 比体積, 比内部エネルギーを表し, 添字の0と1はそれぞれ衝撃波面の前後の状態を表している。通常, 衝撃波面の前方は静止状態である ($u_p = 0$)。これらの式をランキン・ユゴニオ (Rankine-Hugoniot) 関係式と呼ぶ¹⁾。3つの独立な関係式に5つの独立な変数が登場することから, 実験によってふたつの変数を決定することで, 他の未知数を一意に決定可能となる。通常は, 先に述べたように, 距離と時間を次元にもつ速度 (U_s と u_p) を実験で決定することが多い。すなわち衝撃圧縮によるユゴニオ状態とは明確に状態量の定義が可能であり, 高エネルギー密度の極限環境における物質の振る舞いを知る上で全ての基礎となる。

物質にレーザー光を十分な強度 (エネルギー密度) で集光照射すると, その表面が加熱されプラズマが形成される。ひとたびプラズマが形成されると, 波長によって決まる臨界密度の近傍でレーザー光の強い吸収が起き, プラズマ中の電子が急激に加熱される。ここで加熱された電子の熱伝導によってプラズマ化していない物質へとエネルギーが輸送される。レーザー照射による電子の加熱が続く限り, 物質からは順次プラズマが噴出し続ける (レーザーアブレーション) ことになる。高温になって蒸発した (プラズマ化した) 物質が吹き出す速度は固体の音速に比べて十分に速く, 固体内部にはこのアブレーションの反作用として, 非線形な圧力の波面すなわち衝撃波が形成され伝搬する。

3. SACLA 同期高出力レーザーの実験プラットフォーム

X線自由電子レーザーと高出力/高強度のパルスレーザーを組み合わせた研究計画は, 米カリフォルニア, SLAC 国立加速器研究所の LCLS (Linac Coherent Light Source)²⁾ と, 日本の播磨, 理化学研究所放射光科学研究センターの SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)³⁾, そしていよいよ稼働した独ハンブルグの European XFEL⁴⁾ で精力的に展開されている。筆者が学生としてこの分野の研究に飛び込んだ頃, 20年ほど前になるが, ミーティングで先生方が「いつかは, やっぱりX線回折をやりたいよね」と冗談交りに仰っていたことを思い出す。その言葉には, 自在にできるようになるか? というニュアンスが多分に含まれていたように

思われる。レーザープラズマX線を駆使した多大な労力を要する実験の進展を経て^{5,6)}, 現在では驚くべきことに, XFEL とハイパワーレーザーを組み合わせたポンププローブ方式の衝撃圧縮実験により, 動的超高压研究者にとって長年の夢であったミクロな構造のその場実時間観察が当たり前に語られるようになっている。

我々の研究グループは2015年頃から, ナノ秒ロングパルスレーザーを SACLA とカップルさせた動的超高压実験プラットフォームでの活動を進めてきた。本実験プラットフォームは, 理化学研究所播磨事業所の相互利用実験施設内に展開されており, SACLA のビームライン3 (BL3) で発生した XFEL パルスを用いることができる⁷⁾。システムの構成は大まかに, ロングパルスレーザー (Fig. 2(a)), XFEL 集光のための Kirkpatrick-Baez (KB) ミラーチャンバー^{8,9)}, ターゲットチャンバー, 圧力・温度を独立にその場リアルタイム計測するための光学計測システム (VISAR など), から構成される。ターゲットチャンバーには, ロングパルスレーザー集光系, 試料駆動系, 試料位置合わせ用光学監視系, 回折 X 線検出用大面積 2 次元検出器が内部に組み込まれている (Fig. 2(b))。この実験チャンバーは独自のプロトタイプのものから, ごく最近になってレーザー衝撃圧縮の研究がよりやり易くなるようにリニューアルされた。チャンバー内部の回折計部を Fig. 2(c) に示す。詳細は最新の文献¹⁰⁾ に譲るが, 試料に対する SACLA-XFEL の入射角をサークルステージで任意に変えながらも, VISAR などの相補的計測の光学系がその角度変化を追従できるような工夫がなされている。ロングパルスレーザーショット後にはターゲット (試料) は破壊されるので, ターゲットマウントに設置されたステージの並進駆動機構によりショットごとに新しい試料が供給される。試料で回折された X 線は, 真空チャンバー内のフラットパネル 2 次元検出器¹⁰⁾, あるいは真空窓のカプトン箔を経てチャンバー外に配置された Dual MPCCD (MultiPort Charged Coupled Device)¹¹⁾ で検出される。フラットパネル検出器は, Fig. 2(c) で示した回折角 θ において約 10° から 110° 以上までをシングルショットでカバーし, 角度分解能はおおよそ 0.1° 程度 (0.01 \AA 程度の格子間距離に相当) であった。一方 Dual MPCCD は, 検出面が小さいことからシングルショットでカバーする 2θ 角度範囲は 10° 程度と小さいが, 回折計の回転ステージで検出器自体を回転移動させることにより, 絶対値は最大 70° までをカバーする。フラットパネルに対して試料-検出器間の距離が3倍以上となっているため, 角度分解能は 0.01° (同 0.002 \AA) であった。

4. SACLA を用いたレーザー衝撃圧縮実験

4.1 衝撃解放過程における破断破壊の超高速観察

高出力レーザーによる衝撃圧縮の方法は, 秒速 10 km を

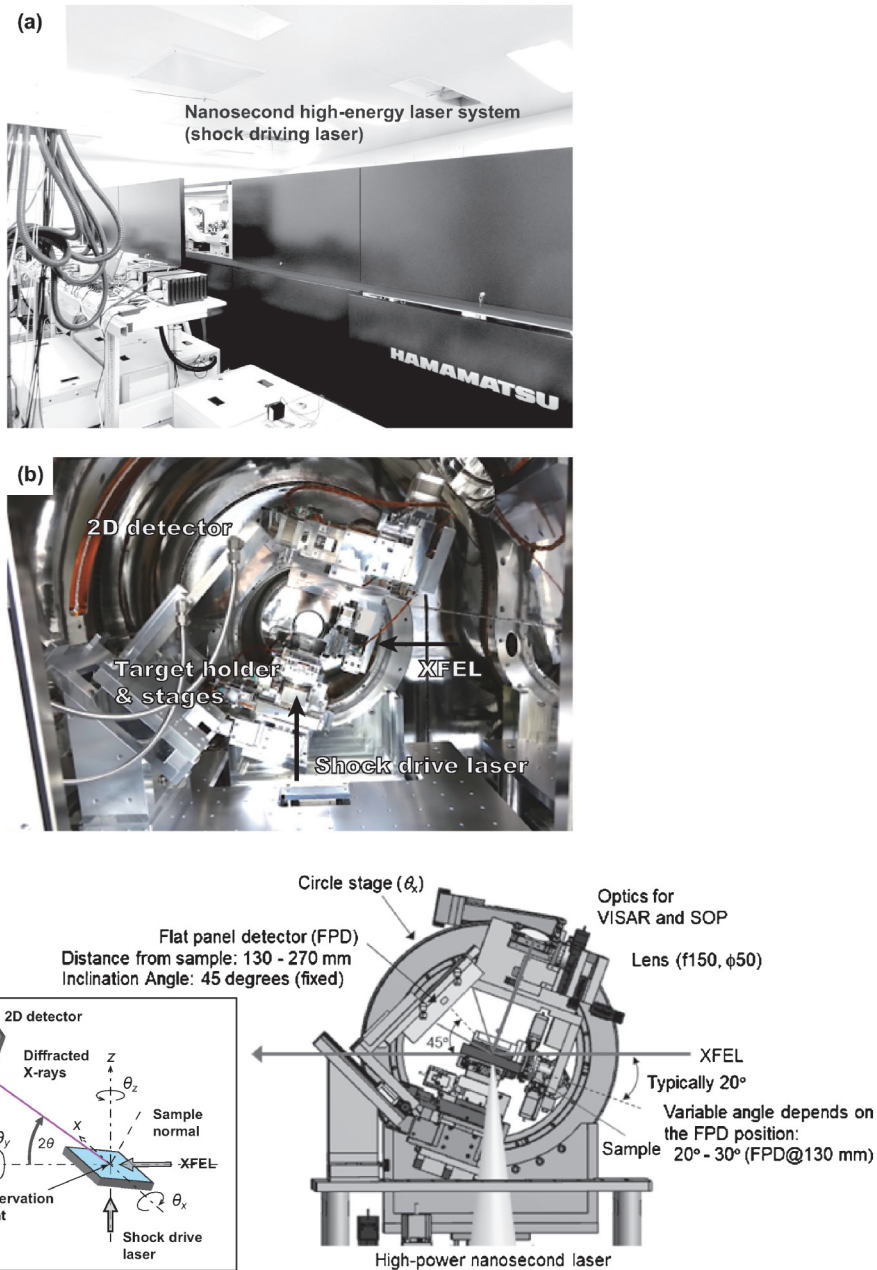


Fig. 2 (Color online) (a) Nanosecond high-energy laser system coupled with SACLA. (b) Photo of the inside of target chamber. (c) Schematic of an X-ray diffraction measurement configuration. The sample, X-ray detector, and VISAR/SOP optics are mounted on the circle stage. The inset shows the sample stage axes.

も超える超高速の衝突環境を模擬することにも相当している。音速を超える速度の飛翔体の衝突が起こると、高強度の衝撃波が被衝突物の内部に駆動され、衝撃応力に対応して物質は大きく変形する。単位時間あたりの変形率である“ひずみ速度”が 10^9 s^{-1} を超えるような、レーザー駆動の極限応力場は、我々の日常に頻りに現れるわけではないが、航空機や船舶、工業プラントやライフライン設備、宇宙ステーションなど、ひとたび問題が発生すると甚大で深刻な被害が予想される構造物や建設物、およびそれを構成する材料において検討されるべきである。

ここでは、高硬度・高融点の金属であるタンタルを用いた高ひずみ速度衝撃圧縮環境における破断破壊現象の可視化実験¹²⁾について紹介する。圧縮の状態を伝える衝撃波面が材料の自由表面（衝突面と逆側）に達すると、圧縮の状態を元に戻そうとして衝撃波とは進行方向が反対の急峻な引張波が形成され伝搬する。この試料裏面から伝搬する引張波の波頭と、衝撃圧縮パルスの終端が試料内部で出会うと、材料が急激に両側から引っ張られる状態となり機械力学的特性に応じて破断的破壊（スポール破壊）が生じる。

実験の様子を **Fig. 3(a)** に示す。厚さ $5 \mu\text{m}$ のタンタル箔

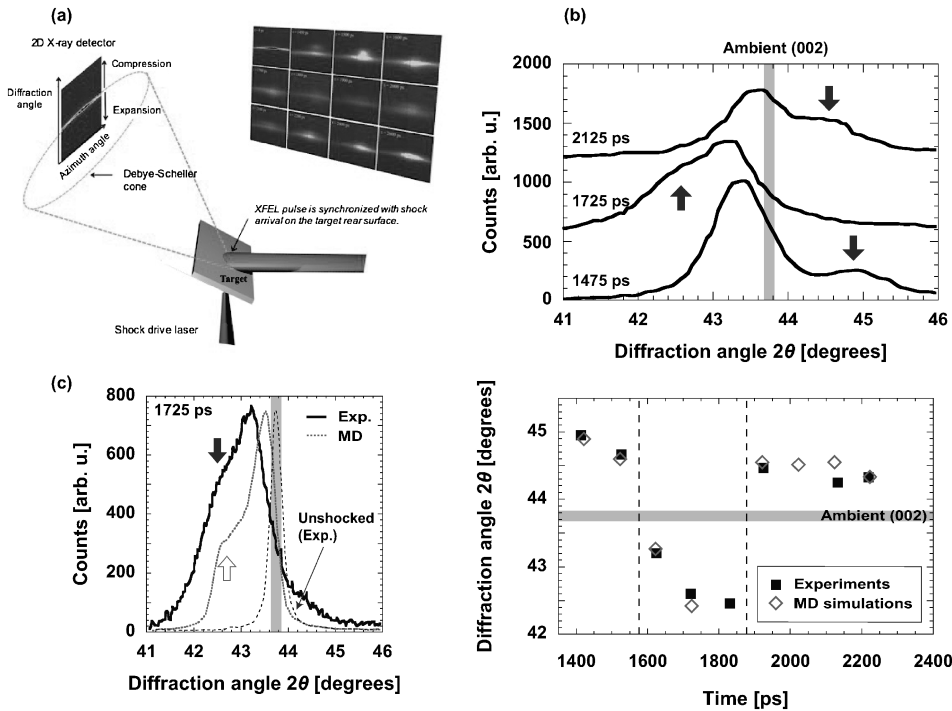


Fig. 3 (a) Schematic of the pump-probe laser shock experiments. The experimental XRD profiles were extracted from the XRD pattern recorded on the two-dimensional detector (MPCCD) as shown in (a). (b) Observation of the lattice stretching at $t = 1725$ ps in the (002) plane of Ta; Observation of the compression wave at $t = 2125$ ps due to the relaxation of the tension after spallation. Molecular Dynamics simulation modeling the experiment and direct comparison with experimental data; (c) Comparison of the diffraction signal obtained in the experiment and simulated by the MD just before spallation, at $t = 1725$ ps. The filled and open arrows indicate the position of the shifted-diffraction peaks. (d) Direct comparison between the position of the maximum of the different diffraction peaks in the experiment and in the simulation.

に、 2.5×10^{12} W/cm² 程度のエネルギー密度でレーザーを集光照射すると、約20万気圧の衝撃圧力パルスが伝播し、単位時間あたりに格子 c 軸方向 bcc[002] が8桁以上 ($\sim 3 \times 10^8$ s⁻¹) ひずむ“超高ひずみ速度場”が実現されていることが明らかとなった。10 keVのSACLA X線のタンタルに対する侵入深さはせいぜい1 μ m程度であるので、試料の自由表面ごく表層における格子状態の変化を観察していることになる。すなわちこれは、レーザーで駆動された圧縮や引張りの波面の切り立ち具合を示しているとも言える。**Fig. 3(b)**では、この衝撃波面が試料裏面に達した“瞬間”におけるXFEL超高速X線回折パターンの時間進展を示す。レーザー照射後 $t = 1475$ psでは、試料内部を衝撃波面が伝播している最中であることから、標準状態のbcc(002)ピークに比べて高角側の、格子の圧縮応力状態を表す信号が得られている(図中に矢印で示した)。衝撃波面が試料の裏面に到達すると格子の膨張が始まり、 $t = 1725$ psのプロファイルにあるように低角側の格子の膨張(引張りの応力状態)を表す信号が得られている。さらに時間が進むと、 $t = 2125$ psのプロファイルに示すように、レーザー照射は既に終了しているにもかかわらず圧縮の信号が再び現れた。これは前述のように、ふたつの引張波が自由表面付近で出会った際の最大引張り応力の条件下

で、材料が突然破断したことによると考えられている。急激に引っ張られて突然破断したバネの端面が元の状態に戻ろうとしている様子が可視化されており、“スプールショック”と呼ばれる新たな圧縮波が、破断した破片の中を伝播していくことが明らかになった。スプール破壊ではサブミクロンサイズの大量の破片が生成され、内部での波の往復にしたがう加減速を繰り返しながらそれらが飛翔していくことがわかった。

Fig. 3(c)の破線は、類似のレーザー条件における、 $t = 1725$ psに相当した分子動力学計算の結果に対して得られるX線回折パターンである。実験の結果(実線)と比較すると、両プロファイルの完全な一致は困難であるものの、どのような状態の格子が存在するかについては矛盾の無い結果が得られていることがわかる。ピーク分離解析をして抽出した、膨張側にシフトした成分のピーク位置(回折角)は、実験と計算で非常に良い一致を示した。**Fig. 3(d)**に、このシフトした成分におけるピーク回折角の時間変化をまとめて示した。実験と計算の結果は非常によく一致しており、超高速破壊時に圧縮から膨張(引張)、そして再び圧縮に転じる格子の応力状態の変遷が非常によく可視化されている。破壊ダイナミクスのフェムト秒格子レベル観察が可能となったことはもちろん、これまで不可能で

あった大規模計算との直接比較が可能になったことは重要な意味を持っている。これにより、極限環境下の材料の振る舞いがより正しく理解され、新材料や新素材の設計に生かされるものと期待される。宇宙構造物や航空機などの安全性向上や新高耐力材料の開発促進に繋がるような、人と社会の安心と安全に資する貴重な知見が様々な材料で得られはじめています。

4.2 レーザー衝撃圧縮による異常格子状態の生成

物質に応力を加えた際に生じる弾性的なひずみの異方性は、物質とひずみ速度に依存する。レーザー衝撃圧縮の歪み速度は 10^8 s^{-1} 以上と非常に速いため^{13,14}、極めて高い、特異な異方性を持つ変形を起こせる可能性がある。平面衝撃波による固体の圧縮状態は、圧力が十分高い場合には一次元流体の圧縮に近似されるが、最近では、物質の降伏応力の数倍程度までの領域で、圧縮波の波頭に過度の一軸ひずみ圧縮の状態が現れることが明らかにされてきた。そのような結晶格子の状態をここでは異常格子状態と呼ぶこととする。この異常格子状態が物質の変形のダイナミクスやシーケンス、相転移のメカニズムなどにどのように影響するのかはまだ明らかにされていない。

異常格子状態が直接実証された例として、良く配向した層状物質である高配向性熱分解グラファイト (Highly Oriented Pyrolytic Graphite: HOPG) を試料に用いた SACLA-XFEL 実験について紹介する。レーザー衝撃圧縮された HOPG の過弾性圧縮の異常格子状態および相転移を、その場観察した際の X 線回折パターンを Fig. 4 に示す。実験セットアップや実験条件は前述のタンタルの場合とほぼ同じであるが、矢印で示した初期状態の HOPG Graphite (002) 面からのピークが検出できるように SACLA-XFEL の試料に対する入射角度 θ_x を調節した。これにより、駆動された衝撃波面とグラファイト面は原理的には平行な配置となる。同じく矢印で示した圧縮された HOPG, Compressed-graphite (002) 面からの回折ピーク

への回折角の変化から、ブラッグの式に基づいて少なくとも 25% を超える一軸圧縮、すなわち層間のみの圧縮が実現されていることがわかった。またこの際の応力は 30 GPa を超えると推定されている。

そして配向性が極めて良い、モザイクスプレッド (グラファイト 002 面の配向度) が 0.5° 未満の HOPG 試料に対してこのような強い一軸圧縮を行った場合には、ロンズデーライト (六方晶ダイヤモンド, Lonsdalite)¹⁵ に相当する回折ピーク (100) と (002) が同時に現れた。これらのピークもスポット状に現れていることから、生成されたロンズデーライトの配向性には、初期の HOPG の高い配向性が反映されていることが示唆される。また衝撃波面の立ち上がりはピコ秒レベルであることから、ここでの HOPG—ロンズデーライト相転移は、原子の大きな拡散を伴わないいわゆる無拡散相転移であると考えられる。定性的には、一軸方向に高速で (過度に) グラファイト層間距離が縮められる際に、グラファイト層が十分にすべるほどの時間は無いため、層間を結ぶ sp^3 共有結合を形成するように結晶格子中の各原子が移動するロンズデーライトへの相転移と、それに伴う応力の緩和が起こるといった物質ダイナミクスが提唱される。

無拡散相転移の特徴のひとつとして、相転移前に隣に位置していた原子が、相転移後も隣に位置する“原子の 1 対 1 対応”がある。HOPG からロンズデーライトへの相転移でも、このような関係が成立しうる。X 線回折のデータにおいて、複数のスポット状の信号が 2 次元ディテクターの同じ方位角に現れるならば、対応する格子面は全て同じ面方位であると考えられる。この実験で特に明瞭に観察された回折ピークは、HOPG (002) 面と、ロンズデーライトの (100) 面および (002) 面に対応するもので、いずれも同じ方位角に確認された。ここで、ロンズデーライトの (100) 面と (002) 面は構造上直角に交わることから、異なる 2 つのメカニズムによる無拡散相転移が発生したことを示唆している。過去に行われたグラファイトからロンズデーライトへの相転移に関する研究では、グラファイト (002)//ロンズデーライト (100) の関係を持つ Khaliulin らが提唱した相転移メカニズム¹⁶ を支持する実験結果がいくつか報告されてきた^{17,18}。しかしながら 2013 年には、グラファイト (002)//ロンズデーライト (002) の関係を持つ相転移が発生しうるという MD シミュレーション結果が Pineau により発表されている¹⁹。このシミュレーションでは一軸方向の圧縮を瞬間的に印加することを前提としており、これは、レーザー衝撃圧縮特有の高いひずみ速度の実験において HOPG (002)//ロンズデーライト (002) の関係を示す信号が得られていることと整合的であった。

4.3 極超高压の物質の理解を目指して

最後に、最も最近の結果に触れて本稿を締めたいと思う。冒頭で述べたように、レーザー衝撃圧縮の最大の魅力

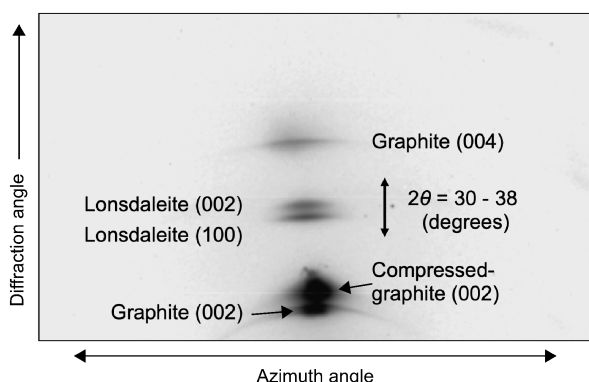


Fig. 4 Two-dimensional XFEL diffraction pattern of laser-shock compressed HOPG. The strong peaks from uncompressed and compressed HOPG (002) plane are presented by arrows. Two clear peaks from synthesized lonsdaleite were also recorded.

のひとつは、何よりも1000万気圧という超高压状態を実験室で実現できるということである。この時、衝撃波面はほぼ全ての物質において気体の圧縮時のような単一構造となり、ひずみ速度もいよいよ 10^9 s^{-1} を超えた状態となる。最近、SACLA同期ナノ秒レーザーのパルス当たりの出力が50 Jを超えはじめ、地上で最も硬い炭素の結晶状態、すなわちダイヤモンドの極超高压高温の安定領域を直接調べる試みが進められている。

Fig. 5にいくつかの予測に基づく極超高压までの炭素の相図を示す²⁰⁻²⁴。通常、衝撃圧縮による圧力の上昇と共にユゴニオ圧縮曲線(点線)に沿って温度も上昇する。ダイヤモンドの場合は、600–700 GPa, 8,000–9,000 Kの領域から圧力-温度関係に大きな不連続が現れると報告されている²⁵。これは強固な結合のダイヤモンド結晶が有する融解潜熱に起因している。この圧力領域は、米サンディア国立研究所のZピンチ装置を用いた実験で決定されたユゴニオにおいて、微妙な密度変化が確認された圧力領域とほぼ一致する²⁶。いずれにせよダイヤモンドは、“サブテラパスカル–サブ eV”の圧力温度の領域まで相転移のない安定な相であることは確かなようである。しかしながら固液の境界のみならずポストダイヤモンド相(BC8構造?)境界などは、図の実線で示されるように、最新の第一原理計算をもってしても未だ決定されておらず、ユゴニオ衝撃圧縮曲線上で実際にどのような構造および状態となるのかを直接解明することが望まれている。

最近筆者らは、ナノ多結晶ダイヤモンド(Nano-Polycrystalline Diamond, NPD²⁷)を試料に用いて、ユゴニオ圧縮曲線に沿った印加応力に応じてダイヤモンドが弾性変形状態から塑性変形状態へと転じていく様を直接調べることに成功した。NPDは単結晶ダイヤモンドと同等の密度や透光性をもちながら、結晶粒界効果によりダイアモン

ド単結晶よりも硬いと予測されている材料である。SACLA-XFELを用いたその場X線回折観察の結果から、1) 弾性圧縮領域(図中の“elastic”)では、方位角方向に変形のない歪んだデバイシェラーリングが観察され、高い一軸性が確認されると共に、最大 2θ 回折角の値から約200 GPaもの超高压力まで弾性的変形が認められる; 2) それ以上の圧力領域(elastic-plastic)では、1)で観察されたものとは別の、等方的な圧縮状態を意味する真円に近いデバイシェラーリングが同時に現れはじめ、先行する弾性波と速度の異なる塑性波が同時に伝搬し、弾性から塑性の状態へと過渡的に変化していく; 3) 約680 GPa以上の領域(plastic)では、ほぼ真円に相当するデバイシェラーリングのみが観察され、塑性波が先行する弾性波に追いつき、いわゆる理想的な単一構造の衝撃波が形成される、ことなどが明らかとなった。この結果は、サブテラパスカルの極超高压領域まで、印加応力に依存して物質の状態が変化していく様子を格子レベルで観察可能であることを実証している。

今後は、レーザー装置自体の高出力化や安定化などはもちろんだが、均一で高エネルギー密度の集光条件を実現する集光システムを開発導入することで、ダイヤモンドの衝撃融解前後の格子の状態を明らかにする予定である。さらには、レーザーパルス波形を制御することでポストダイヤモンド²⁸と呼ばれる新たな炭素の多型を発見する試みも具体性を帯びてきている。ダイヤモンドの衝撃融解が調べられるということは、ほぼ全ての絶縁体や半導体について超高压高温の相関係が調べられることも意味する。日本が強みを有する極限科学と地球惑星科学の融合展開として、超高压高温の液体金属の構造解明²⁹や、(月形成に関わるとされるような)超高速衝突環境で生成される岩石物質の液体構造解明³⁰なども視野に入ってくるものと思われる。

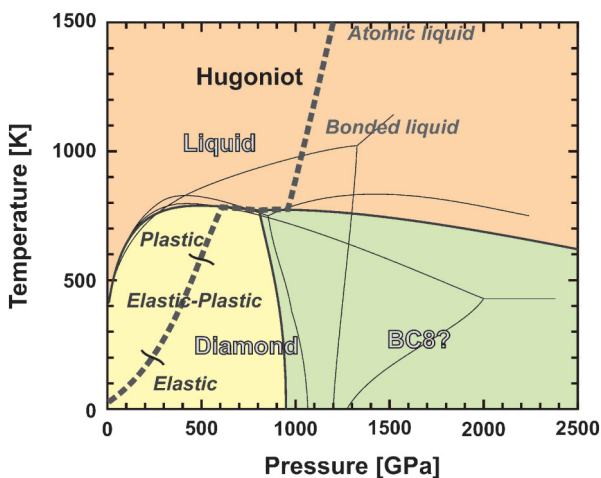


Fig. 5 (Color online) Pressure–temperature phase diagram for high-energy density carbon. Dotted line, a possible Hugoniot model; Solid lines, phase boundaries predicted by *ab-initio* calculations²⁰⁻²⁴.

5. おわりに

ハイパワーレーザーによる衝撃圧縮の方法と高輝度X線光源SACLA-XFELの融合は、これまで知ることのできなかった物質の姿や振る舞いを明らかにすることを可能にしている。物質科学においては、テラパスカルやフェムト秒といったパラメータレンジは全く新しい領域であり、新たな構造や材料、新たな物性や物理の発見が期待されるフロンティアと言える。高度に制御されたレーザー衝撃圧縮の超高压法により、ショック物理はもとより、Warm Dense Matter 物理、凝縮物質科学、地球惑星科学などに関連した研究をさらに一段高いレベルに押し上げることができる。また、レーザーで制御された超高压高温の極限環境の応用も広がりつつあることから、レーザー加工・プロセスなどの産業応用に密接した研究でのSACLA-XFELの利用が始まっている。ここで述べた研究プラットフォームでのその場実時間観察は、将来の繰り返し性能などの向

上に伴って、情報科学と連携した新たな学術の創成やイノベーションの創出にも貢献すると期待されている。

謝辞

紹介した研究成果は、多くの共同研究者および学生の皆との共同研究により得られたものです。ここに改めて謝意を表します。実験データは、XFEL SACLAでの公募研究（課題番号 2016B8084, 2017B8051, 2018A8036, 2018B8069）において取得されています。また研究は、日本学術振興会の先端拠点研究事業プログラム「X線自由電子レーザーとパワーレーザーによる極限物質科学国際アライアンス」、文部科学省委託事業「X線自由電子レーザー重点戦略研究課題」（課題番号 12005014）、「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」（課題番号 JPMXS0118067246）の助成を受けて進められました。

参考文献

- 1) Y. B. Zel'dovich and Y. P. Raizer: *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena* (Academic Press, New York, 1966).
- 2) C. Bostedt, J. D. Bozek, P. H. Bucksbaum: *et al.*: *J. Phys. B* **46**, 164003 (2013).
- 3) T. Ishikawa *et al.*: *Nature Photon.* **6**, 540 (2012).
- 4) U. Zaera, G. Gode and M. Nakatsutsumi: *Synchro. Rad. News* **29**, 24 (2016).
- 5) D. H. Kalantar, J. F. Belak, G. W. Collins *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **95**, 075502 (2005).
- 6) A. Denoed, N. Ozaki, A. Benuzzi-Mounaix *et al.*: *PNAS* **113**, 7745 (2016).
- 7) K. Tono *et al.*: *New J. Phys.* **15**, 083035 (2013).
- 8) T. Pikuz, A. Faenov, T. Matsuoka *et al.*: *Sci. Rep.* **5**, 17713 (2015).
- 9) H. Yumoto *et al.*: *Nature Photon.* **7**, 43 (2013).
- 10) Y. Inubushi, T. Yabuuchi, T. Togashi *et al.*: *App. Sci. (to be published)*.
- 11) T. Kameshima *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 033110 (2014).
- 12) B. Albertazzi, N. Ozaki, V. Zhakhovsky *et al.*: *Sci. Adv.* **3**, e1602705 (2017).
- 13) A. Loveridge-Smith, A. Allen, J. Belak *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **86**, 2349 (2001).
- 14) D. Milathianaki, S. Boutet, G. J. Williams *et al.*: *Science* **342**, 220 (2013).
- 15) R. B. Aust and H. G. Drickamer: *Science* **140**, 817 (1963).
- 16) R. Z. Khaliullin, H. Eshet, T. D. Kuhne *et al.*: *Nat. Mater.* **10**, 693 (2011).
- 17) T. Yagi and W. Utsumi: *Phys. Rev. B* **46**, 6031 (1992).
- 18) S. J. Turneaure, S. M. Sharma, T. J. Volz *et al.*: *Sci. Adv.* **3**, eao3561 (2017).
- 19) N. Pineau: *J. Phys. Chem. C* **17**, 12778 (2013).
- 20) F. P. Bundy, W. A. Bassett, M. S. Weathers *et al.*: *Carbon* **34**, 141 (1996).
- 21) M. P. Grumbach and R. M. Martin: *Phys. Rev. B* **54**, 15730 (1996).
- 22) X. Wang, S. Scandolo and R. Car: *Phys. Rev. Lett.* **95**, 185701 (2005).
- 23) A. A. Correa, S. A. Bonev and G. Galli: *PNAS* **103**, 1204 (2006).
- 24) L. X. Benedict *et al.*: *Phys. Rev. B* **89**, 224109 (2014).
- 25) J. H. Eggert *et al.*: *Nature Phys.* **6**, 40 (2010).
- 26) M. D. Knudson *et al.*: *Science* **322**, 1822 (2008).
- 27) T. Irifune, A. Kurio, S. Sakamoto, T. Inoue and H. Sumiya: *Nature* **421**, 599 (2003).
- 28) W. F. Libby: *Phys. Rev.* **130**, 548 (1963).
- 29) N. Ozaki, W. J. Nellis, T. Mashimo *et al.*, *Sci. Rep.* **6**, 26000 (2016).
- 30) T. Sekine, N. Ozaki, K. Miyanishi *et al.*: *Sci. Adv.* **2**, e1600157 (2016).

著者紹介



尾崎典雅

大阪大学大学院工学研究科 准教授

E-mail: norimasa.ozaki@eie.eng.osaka-u.ac.jp

専門：衝撃超高压，極限科学，高エネルギー密度科学

【略歴】

2002年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了，博士（工学）。2014年より現職。

Shock compression experiments using SACLA-XFEL

—Behavior of materials at ultrahigh pressures and ultrahigh energy densities—

Norimasa OZAKI Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka
565-0871

Abstract Shock compression is used to investigate the behaviors of material under extreme conditions. In particular, the states in the high-pressure and high-temperature, extreme conditions created by laser-driven shock is of great interest in the area of high-energy density science, planetary science, condensed matter physics, material science, and those applications. X-ray free electron laser (XFEL) is a vital tool for directly observing the structure of such fast-moving material and for understanding the kinetics under the conditions. In this review, our experimental platform coupling the SACLA-XFEL with a high-energy laser is presented, as well as the recent achievements on the ultrafast observations of material deformation, phase transition, and fracture.