

レーザー衝撃エネルギーを利用した高圧非平衡物質の創製



研究ノート

佐野 智 一*

Synthesis of high-pressure nonequilibrium materials using laser-driven shock energy

Key Words : laser, shock, high pressure, nonequilibrium material

1. はじめに

非平衡物質は室温常圧下では通常存在せず、安定物質に外部から高いエネルギーを与えその高いエネルギー状態を凍結することによって生み出すことが出来る。馴染み深い例はダイヤモンドであり、ダイヤモンドは炭素の高圧相である。自然界に存在するダイヤモンドは地中深くに存在しその成因は未だ謎が多いが、人工的にはグラファイトを高温高圧にすることによってダイヤモンドを作製することが可能である。炭素の場合、炭素の低压相であるグラファイトと高圧相であるダイヤモンドの間に高いエネルギーバリアがあるため、いったんダイヤモンドに変態した後そのバリアを超えるエネルギーを与えない限りダイヤモンドはグラファイトに変態しない。それでは、低压相と高圧相の間に高いエネルギーバリアが無い物質の低压相を圧縮し高圧相転移させ、その状態からエネルギーを急激に減少させるとどうなるであろうか？この疑問が、筆者がタイトルに示すテーマに取り組み始めたきっかけである。

多くの物質に高圧相が存在するが、多くの高圧相は高温高圧下でのみ存在し、圧力解放後低压相に戻る。その圧縮法としては、準静的な静水圧縮法と動的な衝撃圧縮法があり、これらの除荷過程の時間オーダーは、静水圧縮法に対しては準静的であり、衝

撃圧縮法に対してはナノ秒以上のオーダーである。すなわち、従来の高圧発生法に対する除荷方法は時間的に長く、急峻ではない。では、急峻な除荷方法は何かあるかというところ、それは減衰の速い衝撃波である。減衰の速い衝撃波はどのようにしたら作れるか？この問いには後で答える。

本研究は2001年から始めた。当時の教授の先生にフェムト秒レーザーを購入して戴き、材料の物質加工に対するフェムト秒レーザーの優位性を示す研究データを出していた。しかし、ナノ秒レーザーなど異なるスペックのレーザーと比較しての優位性は示せても、フェムト秒レーザー特有の加工現象を見出すことが出来ていなかった。フェムト秒レーザー特有の現象を探しているうちに思いついたのが、上述した減衰の速い衝撃波である。

非平衡物質は、安定物質にはない機能を示すことがあり、その物性を評価することは興味深い。本手法は、物質にもよると思うが比較的簡便に高圧相を作製することが出来るため、非平衡物質創製という観点で新しい手法になるのではないかと考えている。2章でレーザー衝撃波について簡単に説明し、3章でその適用例をいくつか示す。

2. レーザー駆動衝撃波

高強度レーザーを物質表面に照射すると、物質は瞬時にプラズマ化し、爆発的に除去される。この現象をレーザーアブレーションと言い、このアブレーションにおける物質除去時の反跳力によって物質表面に衝撃波が駆動され、物質内部を伝播し、瞬間的に高温高圧状態が達成される。

高強度レーザーは2種類に大別することが出来る、一つはパルス幅がナノ秒オーダーでパルスエネルギーが強大なナノ秒レーザーであり、もう一つはパルスエネルギーは小さいがパルス幅がフェムト秒オー



* Tomokazu SANO

1973年10月生

1999年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了

現在、大阪大学、大学院工学研究科、マテリアル生産科学専攻、学内講師、工学(博士)、レーザー加工学、材料加工学

TEL 06-6879-7538

FAX 06-6879-7570

E-mail : sano@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

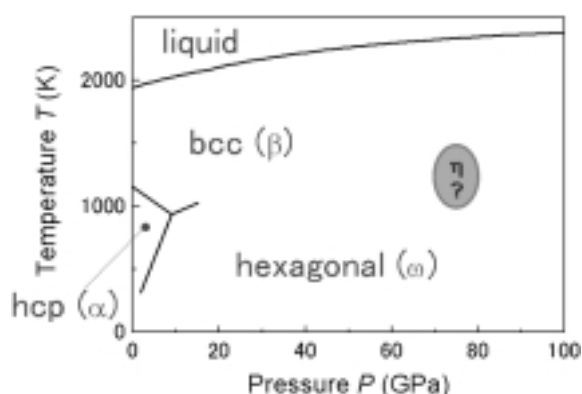


図1 チタンの圧力 温度平衡状態図

ダーのフェムト秒レーザーである。これらはいずれも高強度を得ることが出来るが、アブレーション過程には決定的な相違点がある。それは、アブレーション時に発生するプラズマとレーザーパルスとの相互作用の有無である。ナノ秒レーザーの場合、レーザーパルスはプラズマと相互作用し、プラズマ膨張による衝撃負荷があり、駆動される衝撃波のパルス幅は長くなり、定常衝撃波となる。一方フェムト秒レーザーの場合、プラズマの放出はフェムト秒レーザーパルスの入射完了後に起こるため、フェムト秒レーザーパルスとプラズマとの相互作用はなく、駆動される衝撃波のパルス幅は短くなる。

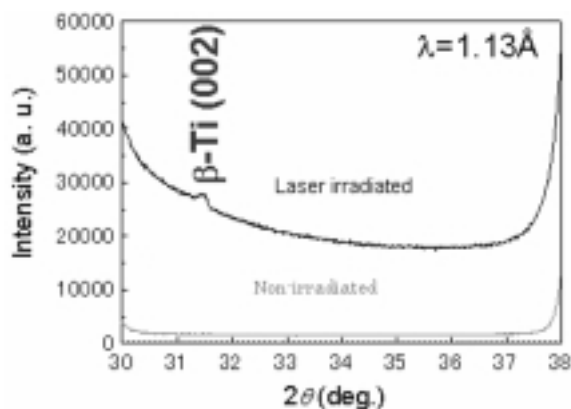


図2 フェムト秒レーザー照射・未照射試料の放射光 X線回折パターン

筆者は、後者のパルス幅の短い衝撃波を駆動できるフェムト秒レーザーに着目した。波長800nm, パルス幅100fsのレーザーパルスをスポットサイズ50 μm程度に集光し、空气中で物質に照射した。用いたビーム強度分布はガウシアンに近いため、駆動される衝撃波は球面衝撃波となり、衝撃波頭の直後を

希薄波が追隨する。すなわち、定常衝撃波と比較して圧力減衰の速い衝撃波となる。従って、いったん誘起された高圧相が、速い圧力減衰のために凍結されるのではないかと期待した。

次章では、純チタンと純鉄の高圧相の凍結・合成例を簡単に示す。紙面の都合上、詳細は引用文献を参照して戴きたい。

3. 高圧相合成

3.1 チタン^{1,2)}

チタンの圧力 温度平衡状態図を図1に示す。フェムト秒レーザーを多結晶チタン(純度99.9%)に照射し、照射後の試料の結晶構造を電子線回折法と放射光X線回折法によって解析した。図2に示す通り、放射光X線回折測定の結果、高温高圧相である相が存在することが示された。相の存在は、電子線回折測定からも示された。相以外に、高圧相である相の存在も確認された。また、存在が議論されている新しい相と考えられるdistorted-bcc構造の存在が確認された。EBSDによる結晶方位解析マッピング結果から、これらの新しく誘起された相は照射部表面近傍にのみ存在することが分かった。

3.1 鉄^{3,4)}

鉄の圧力 温度平衡状態図を図3に示す。フェムト秒レーザーを多結晶鉄(純度99.99%)に照射し、照射後の試料の結晶構造を電子線回折法及び放射光X線回折法によって解析した結果、従来の衝撃圧縮法では凍結不可能である高圧相の相が凍結されることが確認された。また、fcc構造も凍結されていることが確認された。衝撃誘起相転移は衝撃波

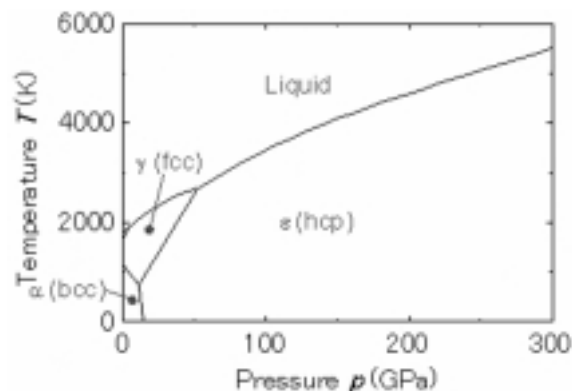


図3 鉄の圧力 温度平衡状態図

頭内部で起こる為、衝撃誘起相転移を理解する為には衝撃波頭内部の熱力学状態を知る必要がある。そこで、衝撃波頭内部の温度を計算した⁵⁾。その結果、衝撃圧縮そのものによって相は誘起されるがfcc構造は誘起されず、 α 相転移の中間介在相として誘起されることが示唆された。

X. 終わりに

フェムト秒レーザー駆動衝撃波によって単体金属の高圧相が誘起され、凍結されることが示された。本手法は金属だけでなくあらゆる固体材料に適用できるため、高圧非平衡物質創製という新しい学問分野及び産業分野を開拓する有力なツールになり得ると期待している。

本手法による高圧相の誘起、凍結機構は未解明であるため、今後フェムト秒レーザーポンプ・プローブ法による時間分解ラマン分光あるいはX線回折などによって機構解明を行う予定である。また現在、高強度ナノ秒レーザーを用いた実験を、阪大工学研究科の他専攻の教員との共同研究によって、阪大レーザー研の激光XII号を用いて行いつつある。この共同研究では物質状態の計測と試料回収を同時に行う予定である。レーザーのパルス幅の違いが高圧非平衡相凍結にどのように効いてくるのか、これらの2種類のパルス幅の大きく異なるレーザーを用いることによって明らかにするつもりである。

レーザー衝撃エネルギーを利用した高圧非平衡物質創製法は、原理的にあらゆる固体物質に適用できる。本報ではチタンと鉄の例しか示していないが、その他の物質に対する検討も現在行っており、その

有効性は確認している。本手法が非平衡物質創製法として、今後さらに発展するよう精進していく所存である。

謝 辞

ここで記した研究内容は、多くの共同研究者の方々の御協力によって成り立っている。まず、所属研究室でいつも議論して戴きアドバイスを戴いている廣瀬明夫教授、阪大レーザー研での実験でお世話になっている兒玉了祐教授、尾崎典雅助手(いずれも阪大院工)、SPRING-8のBL13XUでのX線構造解析実験でお世話になっているビームライン管理者である坂田修身主幹研究員、衝撃現象に関して様々なアドバイスを戴いている熊本大学の真下茂助教授、その他多数の共同研究者の皆様がこの場をお借りして謝意を表す。

参考文献

- 1) Sano et al., J. Appl. Phys. (to be submitted)
- 2) 山本, 佐野ら, 第12回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム (Mate2006) 予稿集, 505 (2006).
- 3) Sano et al., Appl. Phys. Lett. 83, 3498 (2003).
- 4) Sano et al., Appl. Surf. Sci. 247, 571 (2005).
- 5) Sano et al., J. Appl. Phys. 90, 3754 (2001)., J. Appl. Phys. 90, 5576 (2001).