

高エネルギー密度物質準安定相生成と凍結機構解明

Study of Creation and Freezing Mechanisms of
High Energy Density Solid States

兒玉 了祐 (KODAMA RYOSUKE)

大阪大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

独自のレーザー圧縮・ダイナミック診断技術を開発し、テラパスカル以上の圧力で地上に存在していない高エネルギー密度のダイヤモンド状態を生成しその物性を明らかにする。

また非平衡・超高压状態で実現できる高エネルギー密度新物質の準安定相凍結機構を明らかにし、安定な高エネルギー密度ダイヤモンドを探索する。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：高エネルギー密度、パワーレーザー、高压物性

1. 研究開始当初の背景

高出力レーザーによる高エネルギー密度科学は、プラズマ物理、宇宙物理、量子ビーム工学、光学、惑星物理、高压物性物理など様々な分野に関連する科学である。この学際性を生かした、新たな学術の創生や学術融合による新しい科学技術創出の可能性をもっている。そのような中で、高出力レーザーで得られる超高压状態は、通常温度が高くプラズマ状態もしくは非定常な物質相として捉えられていた。国内外ではほとんどが惑星内物質など重力で決定されるエントロピー以上の温度状態でしかこれまで、研究がなされていなかった。

しかし、我々が開発したレーザーによる動的圧縮技術は、テラパスカルを超える超高压の状態にありながら比較的低温の固体相である物質状態を生成できる段階にきている。さらに独自の非平衡動的圧縮技術や試料回収技術により超高压で生成された新たな物質相を凍結し取り出すことができるようになってきている。

2. 研究の目的

高出力レーザーでテラパスカル以上の圧力を実現し、地上に存在していない高エネルギー密度のダイヤモンド状態を生成しその物性を明らかにする。このために世界的競争力を持った独自のレーザー圧縮・ダイナミック診断技術を組み合わせ技術を開発する。さらに高エネルギー密度状態として取り出

しに成功している金属シリコンをもとに、非平衡・超高压状態で実現できる高エネルギー密度新物質の準安定相凍結機構を明らかにし、安定な高エネルギー密度ダイヤモンドを取り出す手法を探索することを目的とする。

3. 研究の方法

高出力レーザーでテラパスカル以上の圧力でダイヤモンドを圧縮し、高エネルギー密度状態の固相 (BC8) 炭素を実現する。そのために動的圧縮技術、ダイナミック診断技術の最適化を行う。また高エネルギー密度状態として取り出しに成功している金属シリコンをもとに動的圧縮が誘起する物質相転移-圧力解放-準安定相凍結ダイナミクスをその場診断する。さらに回収試料の詳細な材料分析を行い、ダイナミック診断結果と総合的な解析を行うことで、非平衡高エネルギー密度新物質生成と準安定相凍結の機構を明らかにする。

このために、診断・圧縮・評価・解析の専門家による組織的連携体制で本研究計画を実施する。またこれまで開発してきた動的圧縮技術、ダイナミック診断技術及び高エネルギー密度物質生成に関する研究成果をもとに、新たな超高压発生技術開発と高エネルギー密度ダイヤモンドの生成を行う。さらに高压物質の材料評価および相転移物理の解明を行うことで、高エネルギー密度状態の物質の凍結機構の解明と新材料の可能性を評価する。

4. これまでの成果

高エネルギー密度ダイヤモンド生成実験：

ダイヤモンドを固体状態でテラパスカル以上に圧縮し新物質状態を生成することを目指した a) 超高压発生制御技術の開発、その場観測としての b) ダイナミック診断技術の開発、さらにはこれらを利用した c) テラパスカル領域の新物質相の生成を実施した。

a) 超高压発生制御技術の開発

波形整形パルスレーザーによる圧力時間波形制御によるテラパスカル域準等エントロピー圧縮、レーザー圧縮用静圧縮セルの開発と応用を実施した。

b) ダイナミック診断技術の開発

レーザー圧縮のその場観察を目的に、診断用ビームラインの整備、サブテラパスカル域での新しい超高压観測窓材の発見、レーザープラズマを利用した X 線診断技術の開発と応用を行った。

c) テラパスカル領域の新物質相の生成

レーザー衝撃波を制御しテラパスカルの圧力を発生すると同時にその場観測を実施することで液体金属炭素状態を実験的に明らかにした。さらに衝撃波インピーダンスを利用しテラパスカルで 8000K 以下を実現し BC8 構造炭素の状態を初めて実現した。

高エネルギー密度新材料物質生成機構解明：

超高压圧縮した物質の高圧相凍結を解明し新しい材料の可能性を検討するために高圧相凍結実績ある Si を用いた a) 相転移その場観測、b) 高圧相凍結 Si の材料分析、さらにはモデル構築のための c) 欠陥のダイナミクス診断を実施した。

a) 相転移その場観測

シリコンの多結晶化が進展する 100 ギガパスカルの超高压領域において、固体の半導体-金属転位がピコ秒スケールで起こることを初めて確認した。その場 X 線回折構造解析を行い、過圧縮弾性状態を経て動的降伏圧力を超えた瞬間に多結晶化が進展する様子が直接的に観察された。

b) 高圧相凍結 Si の材料分析

フェムト秒レーザーを照射した単結晶シリコンの結晶構造を X 線解析し高圧相構造と、圧力解放過程に現れる構造が存在することがわかった。また透過電子顕微鏡で高圧相構造はナノメートルオーダーのグレインサイズで存在し、また高密度の積層欠陥に囲まれて存在することがわかった。

c) 欠陥のダイナミクス診断

高圧力印加による格子欠陥は、高圧相への転移の起点および除荷過程での高圧相凍結において重要な役割を担い得るものと予想される。電子顕微鏡法を用いて、金属中の個々の微小格子欠陥の挙動を抽出する方法を開発し、ナノスケール欠陥の挙動や点欠陥の挙動など新たな知見を得ることに成功した。

5. 今後の計画

これまで開発してきた多様な圧縮法により固体状態でテラパスカルを超える超高压状態を炭素で実現し試料を回収する。回収試料の詳細な分析により高エネルギー密度ダイヤモンド準安定相の可能性を探る。またマイクロダイナミック診断用レーザー電子ビーム透過顕微システムをそれまで構築したダイナミック診断システムに付加する。これにより高エネルギー密度物質生成素過程や金属シリコンなどの準安定相凍結解明に資するデータを取得する。

さらに新たに利用が可能となった X 線自由電子レーザーおよびそれと同期したパワーレーザーを利用し超高压縮・圧力開放および冷却過程下での構造変化をフェムト秒の時間分解で観測する。これらにより、テラパスカルで実現する BC8 構造炭素（スーパーダイヤモンド）の大気圧への取り出しの可能性を探る。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

- 1) 「赤外速度干渉計によるシリコン中を伝搬する衝撃波面直接観測」, 横山尚也, (他 11 名), *J. Plasma and Fusion Research* **88**, 249-250 (2012).
- 2) “Formation of High-Density Dislocations and Hardening in Femtosecond-Laser-Shocked Si”, M. Tsujino, (他 9 名), *Appl. Phys. Exp.* **5**, 022703-1-3 (2012).
- 3) 「光を使った高エネルギー密度科学の展開」兒玉了祐, *日本物理学会誌* **67**, 156-163 (2012)
- 4) “Direct Observation of the Coalescence Process between Nanoscale Dislocation Loops with Different Burgers Vectors”, K. Arakawa, T. Amino, and H. Mori, *Acta Materialia* **59**, 141-145 (2011).
- 5) “Structure dependence of metallization density in solid atomic hydrogen using dynamical mean field theory”, K. Shibata, T. Ohashi, T. Ogawa and R. Kodama, *Phys. Rev. B* **82**, 195123-1-5 (2010)
- 6) “Significant static pressure increase in a precompression cell target for laser-driven dynamic compression experiments”, T. Kimura, (他 11 名) *Physics of Plasmas* **17**, 054502-054505 (2010).
- 7) 兒玉了祐, 財団法人井上科学振興財団井上學術賞(2010 年度)
- 8) 兒玉了祐 他, 社団法人レーザー学会進歩賞(2011 年度)