



Title	レーザー衝撃圧縮によるダイヤモンドの弾塑性変形ダイナミクスに関する研究
Author(s)	片桐, 健登
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/88053
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (片 桐 健 登)

論文題名

レーザー衝撃圧縮によるダイヤモンドの弾塑性変形ダイナミクスに関する研究

論文内容の要旨

本論文では、高強度レーザー照射により誘起された衝撃波を用いてダイヤモンドを衝撃圧縮し、高時間分解能をもつ速度干渉計とフェムト秒パルスX線によるその場観察を行うことで、衝撃圧縮下のダイヤモンドの変形ダイナミクスを明らかにした。

第1章は諸論であり、高圧力科学の発展と現状について、高圧力生成技術とその最高到達圧力の変遷を中心に説明した。また、高強度材料が衝撃圧縮下で示す弾塑性変形の応答に関するこれまでの知見と、そのような知見に基づいて行った本研究の目的と意義について述べた。

第2章では、静的圧縮法と動的圧縮法の原理およびそれらの応用範囲を比較しながら、代表的な動的圧縮法の一つである高強度レーザーを用いた衝撃圧縮法について説明した。また、レーザー衝撃圧縮実験で広く用いられる可視光レーザーを用いた速度干渉計による圧縮波の速度計測手法と、それにより得られるユゴニオの決定方法について説明した。さらに、X線自由電子レーザーを用いたその場X線計測技術とそのレーザー衝撃圧縮実験への応用手法について述べた。

第3章では、ナノメートルサイズの結晶により構成された多結晶ダイヤモンドの衝撃圧縮特性(ユゴニオ)を、可視光レーザーによる衝撃波速度と自由表面速度の計測から明らかにした結果について述べた。顕著な配向性を示さないナノ多結晶ダイヤモンドを用いることで、単結晶ダイヤモンドに観察される衝撃圧縮方向に対する結晶軸方向の依存性を排除した。得られたナノ多結晶ダイヤモンドのユゴニオを、先行研究で行われた単結晶ダイヤモンドのデータと比較することで、ナノ多結晶ダイヤモンドが衝撃圧縮に対して有意に高い強度を示すことを実験的に明らかにした。また、得られた結果がナノ多結晶の粒界において欠陥の伝搬を阻害することでバルクとしての強度を保つ、粒界強化の効果によるものであることを考察した。

第4章では、衝撃圧縮下のナノ多結晶ダイヤモンドの格子のひずみ量を、X線自由電子レーザーを用いたその場X線回折計測法によって3次的に計測した結果について述べた。これにより、衝撃圧縮を受けたナノ多結晶ダイヤモンドは、そのユゴニオ弾性限界を超えて塑性変形する圧力域においても強度を示し、異方性のある変形を経験することを明らかにした。さらに707 GPaの高圧力下においてもナノ多結晶ダイヤモンドが相転移をしないことを明らかにし、ダイヤモンドが極めて高い構造安定性を持つことを実験的に示した。

第5章では、衝撃圧縮下の単結晶ダイヤモンドの変形ダイナミクスを、X線自由電子レーザーを用いたその場X線ラジオグラフィにより観察した実験結果について述べた。これにより、ダイヤモンド内部を弾性波と塑性波の2つの衝撃波が伝搬する様子と、塑性波裏面で試料内部に面欠陥が誘起される様子が観察された。なお、第3章と第4章の結果より、単結晶ダイヤモンドとナノ多結晶ダイヤモンドの弾塑性変形ダイナミクスの違いは欠陥の伝搬を阻害する効果によるものと考察されることから、第5章と第6章ではその欠陥の伝搬の効果を観察する目的で単結晶ダイヤモンドを用いた。

第6章では、衝撃圧縮下の単結晶ダイヤモンドのその場光学特性を計測した結果について述べた。最大550 GPaまでの衝撃圧力下における単結晶ダイヤモンドの透明度と屈折率の変化を、波長532 nmのプロープ光を用いた速度干渉計により計測した。観察された衝撃圧縮下のダイヤモンドの屈折率の密度依存性は、静的圧縮実験で観察された結果と大きく異なる傾向を示すことを明らかにした。この結果から、変形の異方性がダイヤモンドの光学特性に大きく依存する可能性について述べた。このようなダイヤモンドの透明度と屈折率の情報は、衝撃圧縮実験における光学計測の窓材としてダイヤモンドを利用する際に必要であることを説明した。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果を総括した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (片 桐 健 登)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	兒玉 了祐
	副 査	教授	上田 良夫
	副 査	教授	蔵満 康浩
	副 査	准教授	尾崎 典雅
	副 査	教授	奥地 拓生 (京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻)
	副 査	教授	吉村 政志
	副 査	教授	村上 匡且
	副 査	教授	白神 宏之

論文審査の結果の要旨

本論文は、レーザー誘起衝撃波による高ひずみ速度圧縮下において、高強度の物質が受ける変形のダイナミクスを実験的アプローチに基づいて明らかにすることを目的としている。衝撃圧縮下の物質の弾塑性変形過程と、そこでの変形異方性や強度に関する格子レベルの知見は、衝撃ダイナミクスの根幹に関わる重要な情報である。しかしながらダイヤモンドのような高強度材料を降伏させるほどの応力を加える手法は限られており、またその高速な変形を時間分解して直接観察することは極めて困難なことから、まだ十分な情報が得られてこなかった。本論文では、高強度レーザーを用いた衝撃圧縮法によりダイヤモンドを弾塑性変形させ、その高速な変形のプロセスを高時間分解能の速度干渉計測法および X 線回折計測法を用いたその場観察の結果から明らかにしている。特にダイヤモンドの初期構造に着目し、メゾスケールの初期構造を持つナノ多結晶ダイヤモンドを試料とすることで、単結晶試料で生じる強い面方位依存性を排除し、圧縮の一軸性とひずみの異方性との関係について明瞭に示している。さらに、衝撃圧縮下のナノ多結晶ダイヤモンドの強度を実験結果から定量的に評価し、単結晶ダイヤモンドと比較することで、ナノ多結晶試料において欠陥の伝搬が阻害される結晶粒界強化が顕在化することを初めて示した。

本論文は以下の 7 章で構成されている。第 1 章は諸論であり、本研究の背景として高圧力科学の発展と現状、および高エネルギー密度科学との関連について概説し、また高強度材料が衝撃圧縮下で示す弾塑性変形の応答に関する本論文の目的と意義について述べている。第 2 章では、レーザー衝撃圧縮下の物質の応答とその計測技術について述べている。静的圧縮技術との相違点を取り上げながら動的圧縮技術の特徴を明確にし、また衝撃圧縮下の物質の状態を決定する計測法について説明している。第 3 章では、ナノ多結晶における粒界強化効果がダイヤモンドの衝撃圧縮特性に与える影響について評価している。ナノ多結晶ダイヤモンドのユゴニオ (衝撃圧縮特性) を計測して単結晶ダイヤモンドの圧縮性と比較することで、ナノ多結晶粒界における強化効果が、高ひずみ速度変形下のダイヤモンドで強く発現することを明らかにしている。第 4 章では、ナノ多結晶ダイヤモンドの弾塑性変形下における 3 次元ひずみ量と強度をその場 X 線回折計測法の結果から定量的に評価している。脆性材料に分類されるダイヤモンドが、衝撃圧縮の高ひずみ速度下では延性的に振る舞い、塑性変形下でも強度を保つことを明らかにしている。第 5 章では、X 線自由電子レーザーを用いたその場 X 線ラジオグラフィによって衝撃変形ダイナミクスを可視化した結果について述べている。単結晶ダイヤモンド内部を独立した弾性波と塑性波の構造をもった衝撃波が伝搬する様子や、塑性波の背後で衝撃変形に誘起された欠陥が伝搬する様子などを、実空間の画像として直接観察することが可能であることを示した。第 6 章では、衝撃圧縮下の単結晶ダイヤモンドの光学特性について報告している。単結晶ダイヤモンドを<100>方向に圧縮した際の透明性と屈折率を評価し、そのような光学特性が変形の一軸性によって変化することを明らかにしている。第 7 章は結論であり、本研究で得られた成果を総括している。

本論文の成果の本質は、100 万気圧をゆうに超える超高圧の衝撃波面背後において物質が均質・定常な状態に達するという流体力学的近似のための描像から、材料の強度や構造に依って顕著に逸脱するケースを実験的定量的に実証したことにある。高強度の材料がどのように強度を失って流体的な振る舞いのシステムへと連続的に“転移”していくのかを可視化したことは、地球惑星科学や高エネルギー密度科学分野で一般的な流体コードで採用されている物質モデルや状態方程式、計算結果などに直接影響し波及しうる。一方たとえ低圧の領域であっても、これまで統一的な基準で評価が難しかったセラミックス材料の強度を、物理的な定義に則って定量的に決定できる手法として技術的な可能性も有する。

以上のように、本論文はレーザー衝撃圧縮によるダイヤモンドの弾塑性変形ダイナミクスに関する重要な研究成果について報告しており、衝撃圧縮物理に必要な基礎的な知見であるだけでなく、高圧力科学や高エネルギー密度科学、地球惑星科学といった幅広い分野においても重要な成果である。本論文は博士論文として価値あるものと認める。