

## SII-6

### 隕石衝突により衝撃変成された惑星深部物質の回収 Recovery Experiment and Shock Metamorphism of Laser-Shocked Minerals

境家 達弘<sup>1</sup>, 永木 恵太<sup>1</sup>, 近藤 忠<sup>1</sup>, 門野 敏彦<sup>2</sup>, 荒川 政彦<sup>3</sup>, 弘中 陽一郎<sup>4</sup>, 重森 啓介<sup>4</sup>  
T. Sakaiya<sup>1</sup>, K. Nagaki<sup>1</sup>, T. Kondo<sup>1</sup>, T. Kadono<sup>2</sup>, M. Arakawa<sup>3</sup>, Y. Hironaka<sup>4</sup>, K. Shigemori<sup>4</sup>

<sup>1</sup>阪大院理, <sup>2</sup>産医大, <sup>3</sup>神大院理, <sup>4</sup>阪大レーザー研  
<sup>1</sup>Osaka Univ., <sup>2</sup>UOEH, <sup>3</sup>Kobe Univ., <sup>4</sup>ILE

#### はじめに

隕石衝突現象は、 $\mu\text{m}$  サイズの星間塵が速度  $\text{cm/s} \sim \text{m/s}$  で衝突合体する現象から  $\text{km}$  サイズの微惑星が速度  $10 \text{ km/s}$  以上で衝突するような惑星形成過程やクレーター形成[1]などの現象を理解する上で大変重要である。実験室での隕石衝突模擬実験において衝突試料を回収し分析することは、天然の衝突現象(クレーターや隕石)を理解する上で重要である。これまで、ガス銃などを使って衝突実験が多数行われているが、衝突速度に制限があるため(水素ガス仕様の二段式軽ガス銃では最大  $9 \text{ km/s}$  程度)、 $10 \text{ km/s}$  以上の衝突実験は困難である。

衝突現象の中でも惑星への隕石衝突は  $10 \text{ km/s}$  を超える高速度衝突となるため、衝突地点の圧力・温度は数  $100 \text{ GPa}$ ・数  $1000 \text{ K}$  に達し、地表付近の物質は熔融や蒸発する。惑星衝突時の大規模なクレーター形成、惑星の熱進化、惑星大気環境への影響などを考察する上で、衝突時の熔融量や蒸発量を評価することは大変重要である。熔融量などを見積もる上で重要となるのは物質中で衝撃波がどのように伝播し、その圧力がどのように減衰していくかを評価することである。これまで、シミュレーションでは様々な衝突速度域で評価されており[2, 3]、実験では  $10 \text{ km/s}$  以下の衝突速度で評価されている[4]。

本研究では、圧力数  $100 \text{ GPa}$  の衝撃波の圧力減衰を調べるために、 $10 \text{ km/s}$  以上の高速度衝突を実現可能な大型レーザー装置を用いて[5]、超高压を経験した試料の回収手法を開発し、回収試料内部の衝撃変成状態から試料内部での衝撃波の圧力変化(圧力減衰率)を評価することを目的として実験を行った。

#### 回収実験

試料にはサンカルロス産のオリビン単結晶を用いた。オリビンはコンドライト隕石の主要構成物質であり、地球上部マントルの主要鉱物

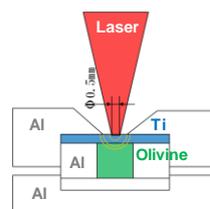


図 1. 回収セル断面図.

でもある。オリビン(Olivine)は一辺  $3 \text{ mm}$  の立方体に加工し、表面研磨し、アルミ(Al)製の回収セルに封入した(図 1)。試料がレーザー照射面から噴出することを防ぐために、試料表面にチタン(Ti)板を配置した。チタンは衝撃インピーダンスがオリビンに比較的近く、融点や強度が高い。チタン板の厚みは圧力条件(レーザーエネルギー)によって変化させた(表 1)。大型レーザー装置には大阪大学レーザーエネルギー学研究所(レーザー研)の激光 XII 号レーザー HIPER システムを用いた。レーザー集光径は  $0.5 \text{ mm}$  とした。試料中を伝播する衝撃波の初期圧力を評価するために、レーザー照射されたアルミ板( $50 \mu\text{m}$  厚)の飛行軌跡を X 線ストリークカメラで測定し、その飛行軌跡から加速度を求めた。得られた加速度から圧力を評価し、レーザーエネルギー値から衝撃波の圧力への変換効率を求め、各回収実験での圧力を評価した[6]。オリビン表面での圧力はインピーダンスマッチング法を使って求め、衝突相当速度はユゴニオデータを使って、その圧力での粒子速度から求めた(表 1)。回収試料の形状や組織の観察は光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡(SEM)を用い、相同定には電子後方散乱回折法(EBSD)や顕微ラマン分光法や X 線回折法を使った。

表 1. 実験条件.

No.	レーザーエネルギー(kJ)	チタン板厚(mm)	オリビン中の圧力(GPa)	衝突相当速度(km/s)
33772	1.3	0.4	130	8
33757	2.0	0.4	180	10
33756	4.3	0.6	290	14
34826	8.7	1.0	460	18

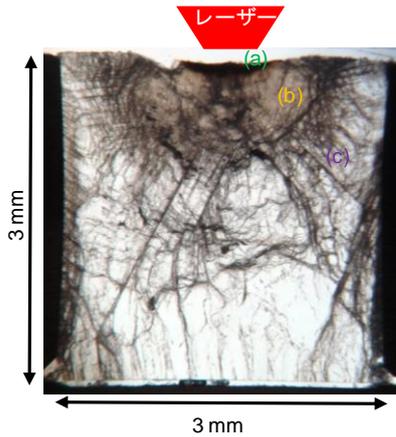


図2. #33757の試料断面薄片の光学顕微鏡透過画像。衝撃波は画像の上部から下部へと伝播。

### 実験結果

回収試料断面の透過画像から色が異なる3つの領域(a),(b),(c)が存在することがわかる(図2)。領域(a)と(b)の境界付近のEBSDの後方散乱電子像が図3である。領域(a)はEBSDで得られた画像に菊池パターンが明瞭に見られないことからアモルファス化していることが考えられる。この結果と初期圧力からオリビン表面付近は熔融状態にあったと考えられるので、熔融状態から急速に圧力、温度が低下したことで非晶質化したと考えられ、領域(a)を「熔融領域」と判定した。また領域(b)はクラックが細かく無秩序な方向に割れていることから、ユゴニオ弾性限界を超える圧力を被っておりオリビンが塑性的にふるまった「塑性領域」と判定した。領域(c)はクラックが大きく直線的に割れているので、ユゴニオ弾性限界以下の圧力を被り、弾性的にふるまった「弾性領域」と判定した。

### 考察

変成の違いから3つの各領域を「熔融領域」「塑性領域」「弾性領域」と判定した。また、SEMの反射電子像を画像解析し、試料表面からの距離に対するクラックの数密度の変化から、

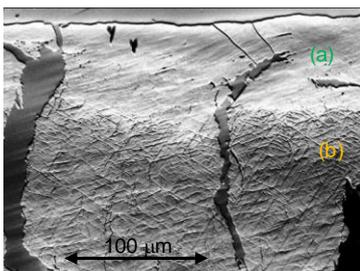


図3. #33757の試料断面薄片の領域(a),(b)境界付近のEBSDの後方散乱電子像。

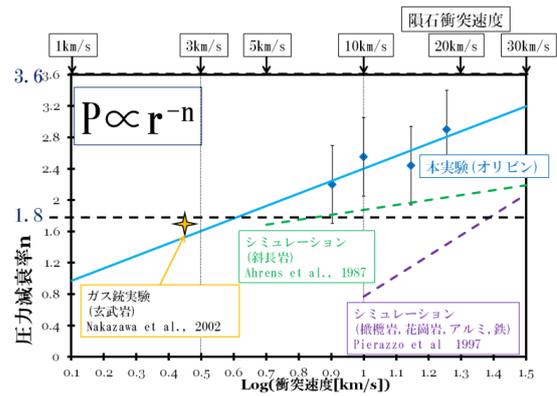


図4. 衝突速度に対する圧力減衰率の変化。

各領域の境界を決定した。2つの境界位置と初期圧力条件から評価した衝撃波速度と希薄波速度から見積もった等圧核の位置(衝撃波面に希薄波面が追いつく位置)の3点に対して、圧力Pを距離rのべき乗を取ることで各圧力条件における圧力減衰率nを求めた(図4)。

本実験とガス銃を使った衝突実験[4]を比較すると衝突速度が上昇することで減衰率が大きくなることが分かった[6]。また本実験結果は過去の実験結果と解析解から予測される低圧から高圧までの減衰率( $n = 1.8-3.6$ )[1,7]の間にあり、これらとも矛盾がない結果であった。また本実験結果の外挿は低圧での実験とも矛盾がないことが分かった。本実験結果はシミュレーション結果[2,3]より減衰率が大きいことから、シミュレーションによって推定される熔融量は実際(天然の衝突現象)よりも過大評価される可能性が示唆された。

### 謝辞

本研究はレーザー研の共同利用実験のもとで行った。本実験実施においてレーザー研のレーザー一部、プラズマ計測部の方々にご協力して頂いたことを感謝致します。本研究はJSPS科研費22740295の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] Melosh, H. J. *Impact Cratering* (A geologic process, 1989).
- [2] Ahrens, T. J. & O'Keefe, J. D. *Int. J. Impact Engng.* **5**, 13 (1987).
- [3] Pierazzo, E. *et al. Icarus* **127**, 408 (1997).
- [4] Nakazawa, S. *et al. Icarus* **156**, 539 (2002).
- [5] Kadono, T. *et al. J. Geophys. Res.* **115**, E04003 (2010).
- [6] Nagaki, K., Kadono, T., Sakaiya, T., Kondo, T. *et al. in preparation.*
- [7] Perret, W. R. & Bass, R. C. Sandia report SAND74-0252 (1975).