

高出力レーザーを使った弾丸飛翔体加速 および衝突実験：秒速10kmを越える衝突

門野 敏彦¹, 重森 啓介¹, 境家 達弘², 弘中 陽一郎¹, 佐野 孝好¹,
大谷 一人¹, 藤原 隆史¹, 持山 智浩¹, 藤岡 慎介¹, 黒澤 耕介³,
城下 明之¹, 宮西 宏併⁴, 尾崎 典雅⁴, 兒玉 了祐⁴, 関根 康人³,
杉田 精司³, 松井 孝典³, 橘 省吾⁵, 大野 宗祐⁶, 荒川 政彦⁷,
竹内 拓⁸, 中村 昭子⁸

2008年12月22日受領, 2009年1月22日受理.

(要旨) 大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの高出力レーザーを使ってマクロサイズ(0.1mm以上)の弾丸飛翔体を加速する実験を行っている. これまでに直径0.1~0.3mmの弾丸飛翔体が秒速10~60kmに加速されている. この高速度に加速された弾丸飛翔体を使って金属どうしの衝突実験を行い, クレーター, 放出破片による二次クレーター, 衝突により発生したガスからの輝線, などを観測した. 惑星科学への応用を念頭に置いた, 珪酸塩物質の衝突発光観測, 岩石ターゲットを使ったクレーター形成実験, エアロジェルによる岩石放出破片の捕獲, などの実験も並行して進行中である.

1. はじめに

惑星集積過程末期には, 小天体が惑星や衛星の表面に頻繁に秒速10km以上の速度で衝突しており, これが惑星表層環境に大きな影響を与えていたはずである. しかし, このような高速度での天体衝突現象が惑星表層環境に具体的にどのような影響を与えていたのかは, よく分かっていない. このような研究の遅れの主な原因として, 秒速10km以上の衝突速度におけるマクロサイズ(0.1mm以上)の弾丸飛翔体の衝突実験が非常に困難であり, 実証的な実験研究がほとんどなされてこなかった点があげられる.

現在, 高強度レーザーを用いて弾丸飛翔体の加速実験を行い, 秒速10km以上の速度でマクロサイズの弾

丸飛翔体が衝突する際に生成されるクレーター, 飛散する破片の解析, 発生するガスの分光測定・質量分析, を行うことを目指している [1]. 今回は, 弾丸飛翔体加速実験の結果, 金属板に出来たクレーター, 飛散したエジェクタ, フッ化リチウム(LiF)窓に衝突した際に発せられた自発光を分光した結果を報告する. また, 惑星科学への応用に向けて現在進行中の分光実験, クレーター・破片回収実験の状況と, 今後の展望も併せて報告する.

2. 実験

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターのGXII-HIPERレーザー(エネルギー:0.7-5kJ, パルス幅:10-20ns, 波長:1054 nm)を直径0.1-0.4mmのガラスまたはアルミニウム(Al)製の弾丸飛翔体(形状は球または円柱)に照射し加速する. レーザーは初め弾丸飛翔体表面の非常に薄い部分に吸収される. レーザー強度が大きいため表面は蒸発してプラズマになる. レーザーの後半はこのプラズマに吸収され, 非常に高温・高

1. 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
2. 大阪大学理学研究科
3. 東京大学新領域創成科学研究科
4. 大阪大学工学研究科
5. 東京大学理学研究科
6. 岡山大学地球物質科学研究センター
7. 名古屋大学環境学研究所
8. 神戸大学理学研究科

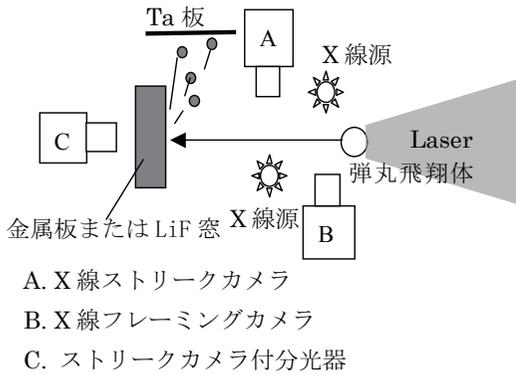


図1：実験概略図。弾丸飛翔体の飛行過程はX線ストリーク及びフレーミングカメラにより観測する。弾丸飛翔体は銅板またはLiF窓に衝突する。LiF窓の場合はストリークカメラ付分光器で衝突自発光を分光する。銅板は回収してクレーターなどを観察する。銅板の横に二次ターゲット(Ta板)を設置し、エジェクタの衝突痕を観察する。

圧のプラズマが形成される。この高圧のプラズマによって弾丸飛翔体は加速される。弾丸飛翔体の速度はX線の影絵およびレーザー照射による自発光プラズマを基にして主にX線ストリークカメラによる画像から求める。さらに、X線フレーミングカメラによる計測も行い、速度算出の補助、および飛行中の弾丸飛翔体の形状に関する情報も取得した(図1：実験概略図)。

弾丸飛翔体は金属板または透明なLiF板に衝突する。弾丸飛翔体が衝突する金属板から10cmほど離れた所にタンタル(Ta)板を二次ターゲットとして配置し、衝突の際に放出されるエジェクタを二次的に衝突させた。また、LiF板に衝突した際の自発光をストリークカメラ付きの分光器により高速時間分解分光計測を行った。

3. 結果

図2(a)-(c)は直径96 μm のAl弾丸飛翔体の実験結果で、(a)がフレーミング画像、(b)がストリーク画像、(c)が弾丸飛翔体位置と時間のプロットである。(a)、(b)ともにレーザーは右から照射されている。フレーミング画像の一コマ目と二コマ目の間隔は3.0ns、二コマ目と三コマ目の間隔は3.4nsである。(a)でも自発光が見え、その左側が影になっている。弾丸飛翔体はほぼ元のサイズを保って飛んでいるように見える。(c)の実線はストリーク画像から読み取った自発光の位置、破線は弾丸飛翔体の照射されていない側の位置を表している。このショットではX線光源の位置が悪く、照射されていない側の位置は $\sim 5\text{ns}$ までしか測定できなかった。水平な細線はフレーミング画像から読み取った弾丸飛翔体の全体の幅である。これらからわかるように、ストリークとフレーミングのそれぞれの測定に矛盾はない。実線から、このショットでは弾丸飛翔体は最終的に秒速60kmにまで加速されているが、フレーミングカメラでの測定時にはまだ秒速20kmほどにしか加速されていないことがわかる。

弾丸飛翔体の種類、サイズ、レーザーエネルギー、レーザーパルス幅、を変えて実験を行って得られた弾丸飛翔体速度 v を図3に示してある。横軸は弾丸飛翔体の質量 m で規格化したレーザーエネルギー E である。ストリークカメラおよびフレーミングカメラによる速度が記してある。両者の違いは図2で示したショッ

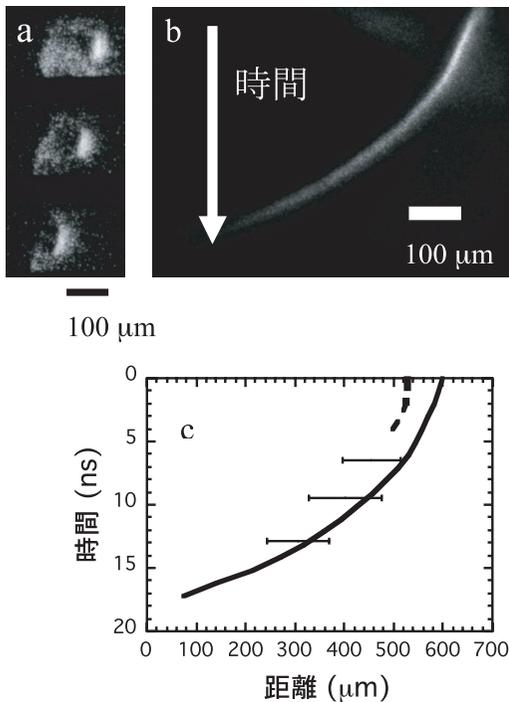


図2：直径96 μm のAl弾丸飛翔体の加速。(a)フレーミング画像。各コマ間隔はそれぞれ3.0と3.4 nsである。(b)同じショットのストリーク画像。(c)ストリーク画像(実線(レーザー照射側)と破線(反対側))及びフレーミング画像(細線(弾丸飛翔体の幅))から読み取った弾丸飛翔体の位置と時間の関係。実線から最終的には秒速60 kmに達していることがわかる。

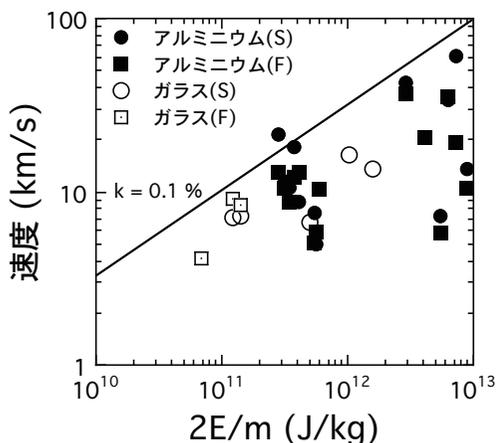


図3：弾丸飛翔体質量で規格化したレーザーエネルギーに対する弾丸飛翔体速度。S:ストリーク画像とF:フレーミング画像、それぞれから求めた速度をプロットしている。規格化エネルギーが増えると速度は増しているがばらつきは大きい。実線で表した包絡線はエネルギー効率 $k \sim 0.1\%$ である。

トの場合を除いて一般的に小さい。規格化エネルギーが大きくなると得られる速度は大きくなる傾向があるが、全てのデータが系統的に大きくなっているわけではなく、ばらついている。kをエネルギー効率(運動エネルギー/レーザーエネルギー $= (mv^2/2)/E$)とすると、速度の上限(包絡線)は $v = (2kE/m)^{1/2}$ になっているように見える。図3に示した実線の場合のkは $\sim 0.1\%$ であった。ばらつきの原因の一つは、レーザーの照射精度(弾丸飛翔体に対するビームの照射位置のばらつき)であると考えている。

4. 議論

4.1 クレーター

図2に示したショットでは、弾丸飛翔体の先に厚さ1mmの銅板ターゲットを設置した。ショット後銅板を回収し、出来たクレーターを観察した(図4a)。弾丸飛翔体サイズは $\sim 0.1\text{mm}$ であるが、直径2mm程度のクレーターが形成されている。矢印で指されたクレーターの底部分のSEM画像が図4bである。溶融したような痕跡(矢印で示した)が見られる。元素分析からこの痕跡の成分は銅であった。このとき銅板の裏面はスポレーションが起こっていた(図4c)。

大きな問題点として、しばしば弾丸飛翔体が破壊さ

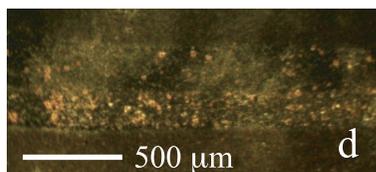
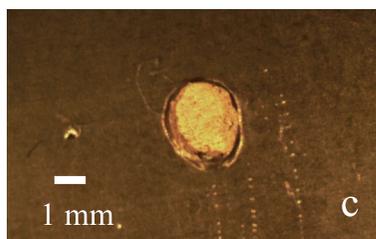
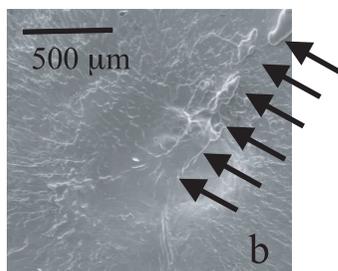
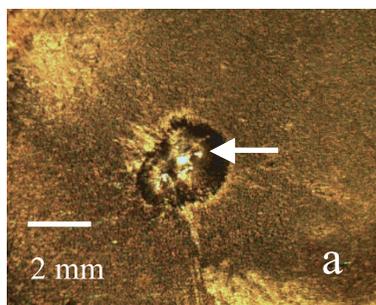


図4：a. 図2で示したショットで厚さ1 mmの銅板ターゲットに形成されたクレーター。b. (a)の矢印で指されたクレーター底部分の拡大SEM画像。溶融した痕跡が見られる。元素分析の結果、成分は銅ターゲットであった。c. (a)の裏面にできたスポレーションによる痕跡。d. (a)で示されたクレーターから放出されたエジェクタの衝突によって形成された二次ターゲット(Ta板)に残されたクレーター。

れて、小クレーターが多数出来ていることがよくある。レーザーを直接弾丸飛翔体に照射しているため弾丸飛翔体が高圧のプラズマに直接接しており、その結果弾丸飛翔体内部に高いストレスが生じていることが原因と思われる。そのため、現在、別に設置した燃料にレーザーを照射し、その燃焼ガスによる間接的な(より緩やかな)加速方法の検討・試験を行っている。

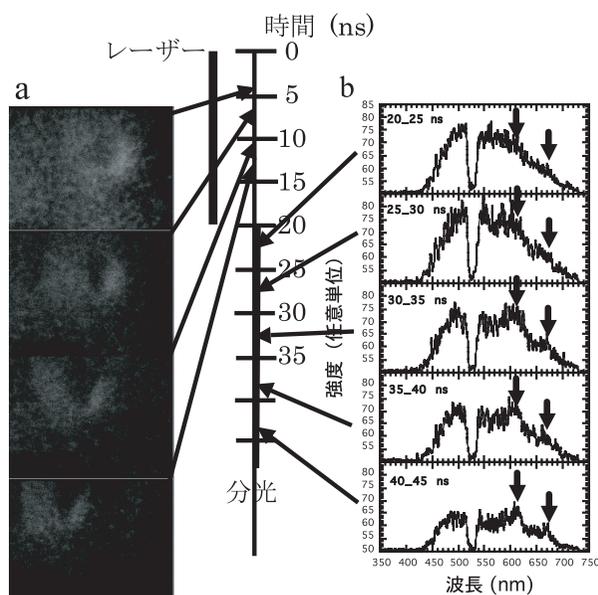


図5：ショット#31492のレーザー照射(実線)，フレーミングカメラ測定，分光測定のタイミングと，フレーミング画像(a)および自発光スペクトルの時間変化(b)。フレーミング画像から推定した速度と，その時刻での位置，LiF窓までの距離から，弾丸飛翔体はレーザー照射開始からおよそ25 ns後にLiF窓に衝突したと予想される。自発光スペクトルにはレーザー照射によって発生したアブレーションプラズマからの光の寄与も含まれている。LiF窓の輝線がある610および670 nm付近に着目すると，25-30 ns以降では610と670 nm付近に輝線が現れているように見える。

4.2 破片

図2のショットでは，銅板ターゲットの横(弾丸飛翔体の飛翔方向に対して垂直に130mm離れたところ)に二次ターゲットとしてTa板を設置した。図4dは回収したTa板に残されたエジェクタによるクレーターである。直径数十マイクロン以下の非常に小さいクレーターも無数に確認されている。

4.3 LiFターゲットへの衝突による自発光分光

Al円柱(直径と長さ=0.1mm)を弾丸飛翔体，LiFをターゲットとして用いたショット(#31492)の結果を図5に示す。弾丸飛翔体がやや斜めに飛んだため，残念ながらストリークカメラでは加速データが取れなかった。フレーミング画像から弾丸飛翔体速度秒速20.3km(レーザー照射方向の速度)が算出された。弾丸飛翔体の初期位置からLiF窓までの距離は500 μm なので，LiF窓に衝突する時刻はレーザー照射開始から \sim 25ns後と推定される。このショットでのストリーク分光器の観測時刻はレーザー照射開始後20ns - 48nsな

ので，弾丸飛翔体は観測時間内にLiF窓に衝突しているはずである(図5)。レーザー照射開始から20ns後(つまりレーザー照射終了直後)から5ns毎のスペクトルも図5に示されている。スペクトルにはレーザー照射によって発生したアブレーションプラズマからの光の寄与も含まれている。530nm付近の吸収はフィルターによるものである。リチウム気体の輝線がある610と670nm付近に注目すると(矢印で示した)， \sim 25 nsまでの間は輝線が見られないが30ns以降は輝線が現れる(特に610nm)。衝突時刻直後からリチウム気体の輝線が現れることは，衝突によりLiFが蒸発したことを示唆している。

LiFはAlとの衝突の場合，衝突速度が秒速10kmを越えないと蒸発しないとされており，今回の観測結果は，このことと矛盾しない。ターゲット物質を岩石や鈹物に置き換えることにより，地球・惑星を構成する主要物質が衝突により蒸発し，その結果起こる現象を実験室内で再現することが出来る。

5. 惑星科学への応用:現状と今後

これまで述べてきた弾丸飛翔体の加速実験と並行して、惑星科学への応用を念頭に置いた各種の測定が行われている。ここで現状と今後の展望を簡単に示すことにする。

5.1 分光・ガス測定 (主に東京大と岡山大のグループ)

地球の脱出速度以上で隕石物質が高速衝突する際に発生する衝突蒸気の分光測定・質量分析を目的とする。現在金属(Ta)シート状飛翔体を秒速10kmに加速した実験で、衝撃加熱温度と断熱膨張後の珪酸塩蒸気の分光観測に成功している。また、吸入管の導入により衝突によって発生した硫酸塩岩からの脱ガス気体の検出にも成功している。

今後は、時間分解型質量分析器と四重極質量分析器を設置して、超高速衝突によって発生するガスの質量分析実験、および高速分光装置(ICCD分光計、ストリーク分光計、ストリーク輝度計)を用いて、惑星構成物質として重要な主要珪酸塩鉱物(SiO_2 , Mg_2SiO_4 , $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$)に対して地球脱出速度での衝突で生じた高温珪酸塩ガスの分光計測を行い、衝撃条件下での温度と断熱開放過程での温度・電子密度の両方を衝突速度の関数として計測し定圧比熱および衝突加熱によるエントロピー増加量を求める。これにより、惑星間衝突による珪酸塩岩の蒸発効率を実証的に推定するデータベースを構築する。一方の脱ガス気体の質量分析計測からは、K/P(Cretaceous/Paleogene境界(~65.5 Ma)、慣習的にはK/Tが用いられる)衝突事件の解析に重要な硫酸塩岩の衝突蒸発によって発生するガス中の SO_2/SO_3 比を計測できる見込みである。

5.2 クレーター回収(主に名古屋大のグループ)

太陽系天体の衝突過程を解析する上で最も重要な衝突クレーターのスケールリング則を、地球脱出速度を超える領域にまで拡張することを目的とする。実際に惑星・衛星表面にできたクレーターは衝突速度が秒速10kmを遙かに超えた速度で衝突しているものが大多数である。衝突速度が秒速10kmを超えると固体衝突は質的に異なる現象が現れると理論的に言われており、衝突破壊に加えて天体表層の溶融や蒸発が起こる。しかしながら、これまでのスケール則は地球の脱出速度

に遙かに及ばない速度までのデータをもとに構築されてきた。そこで、レーザーを使った超高速での衝突実験により、弾丸飛翔体を衝突させた後、標的を回収してクレーター形状を解析する。これまで直径0.2~0.3mmのAl球を秒速10km程度に加速して玄武岩、硫酸塩岩に衝突クレーターを形成する実験を行っており、クレーターが確認されている。また、衝突クレーターから放出される破片のその場観察のために高速カメラによる撮影を試みた結果、衝突後1msから10msの間に自発光して飛翔する衝突破片が観察できることがわかった。今後はより超高速での衝突実験を行い、衝突蒸発・融解の痕跡、クレーター形状、破壊の様子の系統的変化を明らかにする。

5.3 放出破片回収(主に神戸大のグループ)

惑星系形成過程を観測的に研究するにあたって重要なプローブとなるサブミクロン~ミリメートルサイズの塵について、観測量を支配する諸特性(サイズ分布や構造、組成)を決定する主要な要因のひとつに固体どうしの衝突による塵生成過程があげられる。レーザーを使った超高速での衝突実験の第一の目的は、従来の二段式軽ガス銃などによる加速方法では達成できない~秒速10kmを越える衝突速度領域での脆性物質の破壊過程を再現し、二次ターゲット(エアロジェルおよびAl箔)に残された放出破片貫入痕の解析およびエアロジェルによって回収された破片そのものから破片のサイズ分布および構造や組成の測定・同定、さらに放出速度についての情報を得ることである。これにより、(1)観測データの解釈に必要な衝突破壊起源の塵モデル(サイズ分布、構造、組成)を提示、(2)隕石、惑星間塵の起源に関する衝突放出時の物質変性度や物質量の解明、(3)固体の高速衝突破壊の数値シミュレーションとの詳細な比較による衝突破壊の物理素過程についての理解、(4)中心星まわりの塵円盤の力学シミュレーションへのインプットパラメータへの制約、を与えることを目指している。

また、K/P隕石衝突事件では、衝突地点であるユカタン半島のチチュルブクレーターの周辺を始めとして、全世界中のK/P境界層に、直径数mm以下の“スフェルール”と呼ばれる球状の凝縮物が発見されている [例えば2]。これらスフェルールは、高温の衝突蒸気雲中で難揮発性成分が凝縮したことにより生成したと考

えられているが、これまでは衝突蒸気雲からの高温凝縮物を衝突実験により生成することが困難であった。レーザーを使った秒速10km以上の高速衝突実験では衝突蒸気雲の形成が可能であり、今後はエアロジェルを用いて、生成した凝縮物を回収することも目指していく。回収された凝縮物に対し、サブマイクロメートルスケールでの元素分布や形状を調べ、さらに地質記録にのこるスフェルールにも同様な分析を行い、結果を対比することで衝突蒸気雲の物理・化学に対し地質的・室内実験の側面からも制約を与えていきたい。

これまでに数百マイクロメートルサイズのガラスやAl弾丸飛翔体が岩石に衝突した際に放出される破片をAl箔やエアロジェルを使って検出・捕獲することに成功している。また、破片によってAl箔にできた貫通痕を解析することにより、破片のサイズ分布が得られている。今後はこれまでの実験結果を踏まえてエアロジェルやAl箔などの二次ターゲットの配置の最適化を図り、パラメータを変えた実験を行って破片のサイズ分布や速度、組成の情報を得るとともに、上で述べたような地球惑星科学への応用を行う。

6. まとめ

阪大レーザー研の高出力レーザーを使ってマイクロメートルサイズの弾丸飛翔体を加速する実験を行っている。弾丸飛翔体の破壊や速度の再現性などいくつかの問題点は残っているが、これまでに直径0.1~0.3mmの弾丸飛翔体が秒速10~60kmに加速されている。この高速度に加速された弾丸飛翔体を使って衝突実験を行い、クレーター、放出破片による二次クレーター、衝突により発生したガスからの輝線、などが観測されている。並行して惑星科学への応用を念頭に置いた、珪酸塩物質の衝突発光観測、岩石ターゲットを使ったクレーター形成実験、エアロジェルによる岩石放出破片の捕獲、などの実験も進行中である。

謝辞

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターターゲット部、レーザー一部、計測部、に感謝いたします。また、匿名の査読者からは有益なコメントをいただき感謝いたします。本研究は大阪大学レーザーエネルギー

学研究センターの共同利用・共同研究のもとに実施されました。

文献

- [1] Kadono, T. et al., 2008, In the Proc Fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2007), J. Phys. Conf. Ser. 112, 042014.
- [2] Kyte, F. T. and Bostwick, J. A., 2008, EPJL 132, 113-127