

# 斜め衝突による C<sub>2</sub> 蒸発過程の時間分解分光/撮像観測

\*羽村 太雅<sup>1)</sup>, 黒澤 耕介<sup>1)</sup>, 長谷川 直<sup>2)</sup>, 松井 孝典<sup>3)</sup>, 杉田 精司<sup>1, 2, 3)</sup>

1. 東大・新領域, 2. ISAS/JAXA, 3. 千葉工大PERC

E-mail: [tiger@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp](mailto:tiger@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp)

## 1. 背景

無生物原始地球への生命前駆物質供給過程は、大気中での化学合成、宇宙からの持ち込み、天体衝突による合成の3種類に分類される<sup>1)</sup>。本研究では、その中で時間的・空間的に有機物の濃度が高くなりやすい天体衝突による生命前駆物質合成過程に着目する。実験的な先行研究によれば、隕石中にもともと含まれていた炭素は、衝突角度によらず結果的に分解されてしまう<sup>2,3)</sup>。ところが N<sub>2</sub> 雰囲気中でのプラスチック弾丸を用いた低角度衝突実験によれば、弾丸の破碎と空力加熱によって弾丸中の還元炭素と大気中の窒素から CN 効率よく生成されることが判明している<sup>4)</sup>。またレーザー照射によって原始地球模擬大気中に局所的に CN を生成した実験によれば、生じた CN は H<sub>2</sub>O と反応し効率よく HCN に変換される(0.1~2%, P<sub>CO<sub>2</sub></sub>=0~400 mbar)<sup>5)</sup>。これらの研究結果は、大気中での低角度衝突が、一度は分解された隕石内有機物を生命前駆物質として再合成することを示唆する。この場合、最終生成物の組成及び量は破碎された天体を受ける空力加熱、航跡流中での化学反応に支配されるが、生命前駆物質のひとつである HCN 生成総量は推定できておらず、その推定に必要な衝突後の弾丸破片群の速度、破片表面からの蒸発率、天体成分と周辺大気の混合比、航跡流中での温度変化といった物理・化学過程は未だ明らかにされていない。本研究では第一歩として、大気中での低角度衝突実験を行い、弾丸破片群の速度及び、破片表面温度を実測し、実測破片表面からの蒸発率を推定した。

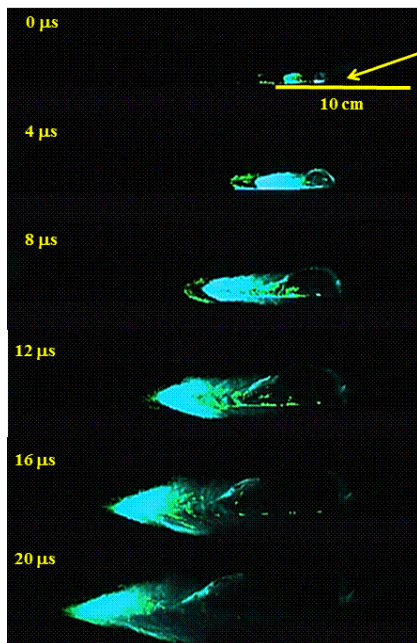


図 1. バンドパスフィルタを用いて観測した自発光する蒸気雲の運動 (505~515 nm : C<sub>2</sub> の分子発光に相当)。弾丸衝突後の経過時間を図中に示した。

## 2. 実験

実験には宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いた。以下に実験条件を整理する。弾丸及び標的にはポリカーボネイト球(直径 7 mm)、銅板(2.5 cm × 5 cm × 10 cm)を用いた。衝突速度、角度、周辺雰囲気(窒素)圧力はそれぞれ 4.8~6.5 km/s、水平から 30°、30 hPa である。衝突後、破碎されながら空力加熱を受け、衝突方向下流側に飛行する衝突蒸気雲と、その内部の弾丸破片群を、側面から異なる波長域のバンドパスフィルタを装着した 2 台の高速度カメラ(Frame rate : 2 μs/frame)で、上方から時間分解分光計で発光分光観測した。2 枚のバンドパスフィルタの透過波長域は図 3 に示した。それぞれ黒体放射・C<sub>2</sub> 分子発光に対応している。観測波長域及び時間/波長分解能(FWHM)はそれぞれ 360~542 nm , 2 μs/0.8 nm である。

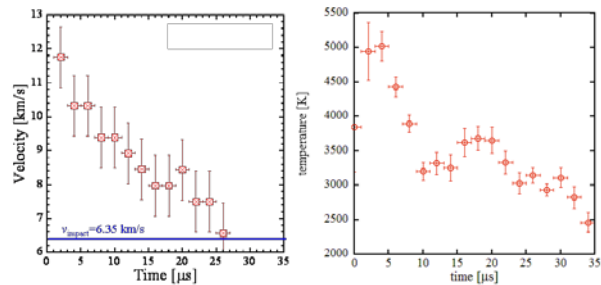


図 2. (左) 蒸気雲先端速度の時間変化。弾丸速度は図中に示した(6.35 km/s)。エラーバーは撮影間隔(横軸)とカメラの装置関数によるもの(縦軸)を示した。(右) 黒体温度の時間変化観測。横軸のエラーバーは積分時間を表し、縦軸のエラーは bootstrap 法を用いて見積もった。

## 3. 結果

高速撮像の結果から弾丸破片群の速度を、分光観測の結果から微粒子表面の温度をそれぞれ計測した。以下に計測及び解析の詳細を述べる。

高速撮像で得た蒸気雲及び内部の弾丸破片群の時間変化を、図 1 に示した。いずれもバンドパスフィルタを用いて観測した、自発光する蒸気雲及び弾丸破片群の運動を表す。弾丸衝突後の経過時間を図中に示した。衝突後の弾丸破片群は、その先端角度及び視線方向の断面積をほぼ一定に保ちながら、衝突面に平行に飛行していくことが確認された。この結果から、弾丸破片群全体が先端速度で運動しているものとして以後の解析を行ったことに注意しておく。図 2(左)には先端速度の時間変化を示した。衝突速度の 1.8~1.9 倍まで急激に加速された後、減速していることがわかる。弾丸速度は図中に示した(6.35 km/s)。エラーバーは撮影間隔(横軸)とカメラの装置関数によるもの(縦軸)である。

弾丸破片群が分光器の視野に入って 8 μs~10 μs 後のスペクトルを図 3 に示す。発光スペクトルは黒体放射と、主に CN・C<sub>2</sub> の分子発光からなる。観測

波長域に炭素・窒素の原子発光輝線<sup>6)</sup>は存在するが、今回の実験では観測されなかった。連続スペクトルは微粒子表面からの黒体放射由来と考えられる<sup>7)</sup>ので、Planck関数でfittingを行い、微粒子表面温度の時間変化を求めた(図2右)。横軸のエラーバーは積分時間を表し、縦軸のエラーはbootstrap法を用いて見積もった。

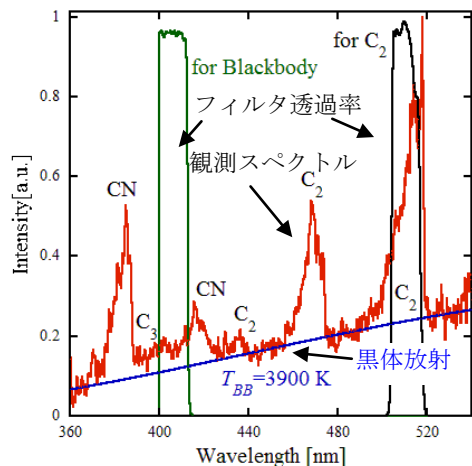


図3. 観測されたスペクトルとバンドパスフィルタの透過率。フィルタの透過波長域はそれぞれ黒体放射とC<sub>2</sub>分子発光に対応。分光撮像観測に相当する。黒体放射温度は最小二乗法で求めた。

#### 4. 議論

得られた速度及び温度から微粒子表面での熱収支を解き(i.e., 空力加熱量( $\nu$ )=蒸発による熱散逸量( $T, \Delta H, \Delta S$ )), ポリカーボネイト弾丸の蒸発によるエンタルピー/エントロピー変化量( $\Delta H, \Delta S$ )を推定し、蒸発様式を決定する。空力加熱量の計算には、微粒子サイズに応じて自由分子流と連続流の違いを考慮した。観測時間内に蒸発様式が変化することは考えにくいので、各時刻における微粒子表面での熱収支を同時に満たす $\Delta H$ を決定した。結果の一例を図5に示す。図中のプロットは速度と温度の実測値、実線は $\Delta H$ を変化させた時の計算結果を表している。ポリカーボネイトの蒸発時のエントロピー変化量に関する文献値は存在しない(cf. 下限値は80 J/K/kg)<sup>8)</sup>ので $\Delta S$ を変化させた場合の $\Delta H$ の取りうる範囲を系統的に解析した結果を図6に示す。蒸発様式として熱分解( $\Delta H < 165$  kJ/mol<sup>9)</sup>)と周辺大気による微粒子表面原子の剥ぎ取り(スパッタリング)(300 kJ/mol  $< \Delta H < 460$  kJ/mol<sup>10)</sup>: 先行研究<sup>7)</sup>で採用)を比較すると、今回の結果は先行研究で提案された原子剥ぎ取り(スパッタリング)<sup>7)</sup>ではなく、熱分解を支持する。この場合、( $\Delta H, \Delta S$ )が取り得る範囲は図6で青い長方形のハッチをかけた領域である。したがって、今回観測された黒体放射スペクトルの主たる発光は、衝突時及び周辺大気からの動圧によって平均自由行程と同程度まで破碎された微粒子が自由分子流領域において、その運動エネルギーを熱エネルギーに変換したものであると推定される。このとき蒸発率は0.23~1.0  $\mu\text{m}/\mu\text{s}$  (衝突後1~33  $\mu\text{s}$ )となり、先行研究<sup>7)</sup>で想定されていたよりも4~5倍大きな値を示す。この違いは時間分解撮像/分光観測

によって初めて仮定を置くことなく $\Delta H$ を実験的に制約した結果、先行研究の半分以下の値を得たことに起因する。蒸発率が高いということはすなわち、化学反応場である衝突蒸気雲(気相)中へ、より高い供給率で衝突天体中に含まれる炭素化合物がC<sub>2</sub>分子として供給されることを示唆している。C<sub>2</sub>分子は大気中の窒素と化学反応してCN分子を生成する材料物質であり、本研究の結果は、生体分子材料物質合成反応の材料物質の、破碎弾丸破片(固相)から化学反応場である蒸気雲(気相)への供給率を推定した。

#### 5. まとめ

以上より、1. 斜め衝突蒸気雲が水平に弾丸より圧倒的に速く一体となって移動すること、2. 微細破片は熱分解で蒸発すること、3. 蒸発率は今まで考えられていたより4~5倍高いこと、を高速撮像と時間分解分光の組み合わせによって初めて明らかにした。

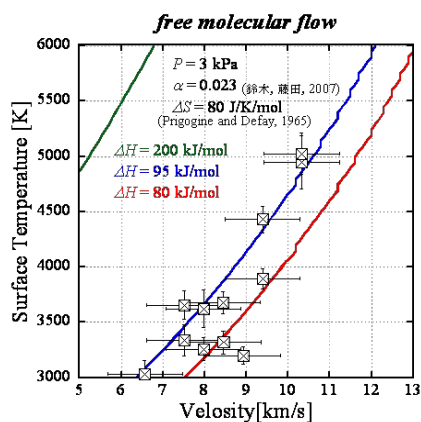


図5. 速度と温度の関係。図中のプロットは実測値、実線は $\Delta H$ を変化させた時の速度と温度の関係

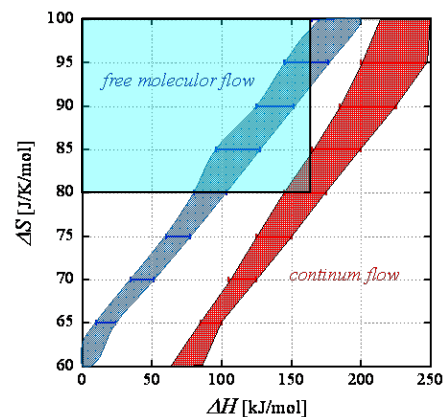


図6. 実測された速度・温度を用いて制約した $\Delta S, \Delta H$ の取りうる範囲

#### 参考文献

1. Chyba and Sagan (1992), *Nature*, **355**, 125; 2. Mukhin *et al.* (1989), *Nature*, **340**, 46; 3. Sugita and Schultz (2003a), *JGR*, **108**, 5051; 4. Sugita and Schultz (2009), *GRL*, **36**, L20204; 5. Kurosawa *et al.* (2009), *JTHT*, **23**, 463; 6. Wiese and Martin (1968), *NSRDS*, 359; 7. Sugita and Schultz (2003b), *JGR*, **108**, 5052; 8. Prigogine and Defay (1965), *Chemical Thermodynamics*, 543 pp., Copp, Clark, Mississauga, Ont., Canada; 9. Davis & Golden (1970), *RMC*, **4**, 49; 10. Morrison and Boyd (1973), *Organic Chemistry*, 1258, 11. 鈴木, 藤田, (2007), JAXA-RR-06-024