

# レーザー銃実験と衝突脱ガスの新しい描像

大野 宗祐<sup>1</sup>, 門野 敏彦<sup>2</sup>, 河原木 皓<sup>3</sup>, 石橋 高<sup>4</sup>, 黒澤 耕介<sup>3</sup>,  
関根 康人<sup>3</sup>, 杉田 精司<sup>3</sup>, 中村 栄三<sup>1</sup>, 松井 孝典<sup>3</sup>

(要旨) 衝突脱ガス現象は大気の形成やその後の表層環境の進化に大きな影響を与えたと考えられている。我々は、反射衝撃波や封圧の影響を受けずに衝突脱ガス生成気体を回収できる、レーザー銃を用いた衝突脱ガス実験の新しい手法を開発した。炭酸塩岩、硫酸塩岩へ適用した結果、多くの先行研究よりも弱い衝撃波、特に圧縮状態での脱ガスに必要な衝撃圧と比べると数分の一程度と非常に低い衝撃圧で衝突脱ガスが開始することがわかった。これは、比較的低い衝撃圧の条件では圧力解放過程での脱ガス反応が重要であること、天然の衝突でも衝撃圧縮された後圧力が低圧まで開放される領域ではこれまで考えられてきたよりも衝突脱ガスが起こりやすいことを示唆する。

## 1. 衝突脱ガス

本稿で取り扱う「衝突脱ガス現象」とは、超高速度天体衝突の際、衝突した／された天体内部の揮発性物質が気体として放出される現象のことを指す。天体衝突の際には、衝突してきた天体の持っていた運動エネルギーにより、高温・高圧状態が発生する。このとき、岩石等の固体中に含まれる揮発性成分が気体として放出される。この衝突脱ガス現象は地球型惑星の大気の起源に非常に重要な役割を果たしたと考えられている[e.g., 1]。一方で、炭酸塩、硫酸塩などからの衝突脱ガス現象は、例えばK/T事件など表層環境や生命の進化を大きく左右したと考えられている[e.g., 2]。

衝突脱ガスに関する実験的な研究は数多く行われてきているが、脱ガス過程の物理的・化学的プロセスの詳細は未だわかっていない。その原因は主に実験手法の問題であるといえる。衝突脱ガス実験の先行研究は、大きく二種類に分けることができる。一つは衝撃回収実験で、衝突銃を用いて標的試料を衝撃圧縮し、その後回収・分析するという手法である。一般的な衝撃回収実験では、衝撃圧縮後の試料回収のため金属性の試料容器を用いる。ところが、この金属性試料容器は、

反射衝撃波を発生し温度圧力条件を天然の衝突と異なる条件にしてしまう、あるいは機密性が高く脱ガス生成気体が外に逃げられず脱ガス反応を妨げる、などの問題の原因となる。一方、衝撃圧縮を主に光学的手法でリアルタイムで観測するという手法も存在する。しかし、この手法も特に少量の脱ガスに対する感度が良くない、生成ガスの化学組成や脱ガス固体残渣を回収して分析することが困難である、などの問題点がある。

本稿では、それらの先行研究の問題点を踏まえた上で我々が行っている、レーザー銃と質量分析計を用いた衝突脱ガス実験について紹介する。

## 2. レーザー銃を用いた衝突脱ガス実験

### 2.1 手法のメリット

レーザー銃は、飛翔体の加速にレーザーを用いた銃であり、例えば二段式軽ガス銃などのように火薬やガンデブリ等が発生・混入することはない。そのため、試料容器等を使用することなく開放系での脱ガス気体の回収・分析が可能である。また、今回我々はその特性を活かし、真空チェンバーに四重極質量分析計(QMS)を直接接続して脱ガス気体を分析するシ

1. 岡山大・地球研  
2. 阪大・レーザー研  
3. 東大・新領域  
4. 東大・地球惑星

システムを構築した。これにより，従来困難であった微量の衝突脱ガスを検出することが可能となる。本研究では，東京大学新領域創成科学研究科松井研究室のレーザー銃とQMSを用い，方解石( $\text{CaCO}_3$ )と硬石膏( $\text{CaSO}_4$ )の衝突脱ガスを観測した。QMSを使った衝突脱ガス生成気体の分析は，氷標的に対してはすでに行われており，その有効性はすでに示されている[3]。それにレーザー銃を組み合わせることで，より高い衝撃圧の必要な岩石からの衝突脱ガス実験に適用することを目指した。

## 2.2 方解石(炭酸カルシウム)，硬石膏(硫酸カルシウム)の衝突脱ガス

本稿では方解石と硬石膏の衝突脱ガス実験について報告する。方解石をはじめとした炭酸塩岩，硬石膏をはじめとした硫酸塩岩の衝突脱ガスが重要である理由の一つは，脱ガス生成気体の地球惑星科学上の重要性である。炭酸塩岩からの衝突脱ガスでは二酸化炭素，あるいは一酸化炭素が生成すると考えられている[e.g., 4]。衝突脱ガスによる炭酸塩岩からの二酸化炭素の放出は，大気中の二酸化炭素濃度を変化させ温室効果を引き起こし，全地球的な気温上昇をもたらす(K/T事件など)と言われている。さらに最新の研究によれば，一酸化炭素が放出された場合には，二酸化炭素が放出された場合よりもさらに急激な気温上昇が引き起こされる可能性がある[5]。一方，硫酸塩岩の衝突脱ガスが起こると主に三酸化硫黄のガスが大気中に放出されると考えられており，全地球的な酸性雨など急激な環境変動を引き起こし，K/T大量絶滅との関連の可能性も指摘されている[e.g., 2]。また，炭酸塩岩・硫酸塩岩の衝突脱ガスの重要性として，地質記録との比較を行うのが容易であるということが挙げられる。ドイツのリースクレーター，カナダのホートンクレーター，メキシコのチチュルブクレーターなど，地球上の炭酸塩岩あるいは硫酸塩岩の多い地点に衝突クレーターが数多く見つかっている。これらの衝突クレーター付近では，天体衝突で衝撃を受けた炭酸塩岩が広く分布していることが知られており，詳細な分析も行われている[6]。衝突脱ガスの物理・化学過程を議論する際には室内実験だけでなく実際の大きなスケールの衝突現象との比較・検証が鍵となると考えられ，地球上の実際の衝突クレーターにおける情報が得やすい炭酸塩岩，硫酸塩

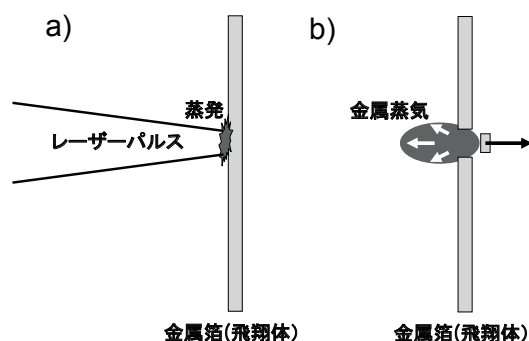


図1: レーザー銃の原理の模式図

岩の衝突脱ガスに関する研究は，衝突脱ガス現象の一般的な理解へ向けて非常に重要なステップであると考えている。さらに，方解石と硬石膏は組成も単純で常温の空气中で安定であること，生成ガスの分析が比較的容易であることなど，我々が今回新たに開発した手法の最初の適用例として技術的にも好都合な対象物質である。

## 2.3 レーザー銃の原理

図1にレーザー銃の簡単な原理と構造を示す。レーザー銃では，レーザーアブレーションを飛翔体加速の原動力として用いる。標的試料の前に飛翔体(本研究では金属箔)を設置し，飛翔体に向けてパルスレーザーを照射する(図1(a))。すると飛翔体の一部がレーザーアブレーションにより高温の蒸気となり，飛翔体を標的試料の向きへ押しだし，加速する(図1(b))。レーザーアブレーションでは非常に高温の蒸気を生成することが可能であり，その場合飛翔体加速に用いる蒸気の膨張速度も大きくなるので，大きな衝突速度を実現することができる[7]。また，火薬等の混入が無いので試料容器等を用いることなく生成ガスの回収が可能である。

## 2.4 実験システムの概要と実験手順

図2に本研究の実験システムの概略図を示す。本研究では，超高真空( $\sim 10^{-9}$  mbar)まで到達可能な真空チェンバーを製作し，その内部に，標的試料(ここでは方解石，あるいは硬石膏)と飛翔体用の金属箔を設置した。真空チェンバーには，レーザー導入用のビューポート，ガス分析用のQMS(四重極質量分析計)，ヘリウムガス導入管を取り付けてある。本稿で紹介す

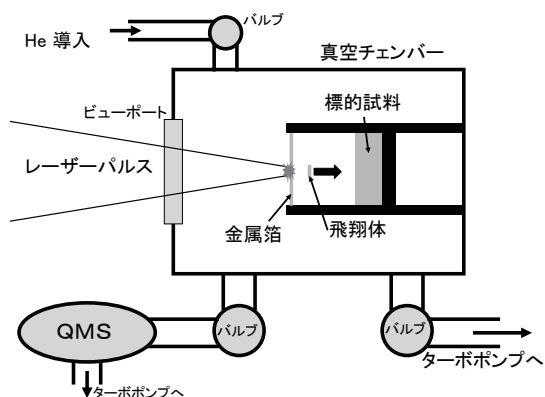


図2：実験システムの概略図

る実験データの取得手順は以下の通りである。

- 1) 標的試料と金属箔を真空チェンバー内部に設置する。
- 2) ターボ分子ポンプで真空チェンバー内を超高真空に引く。
- 3) チェンバー内にヘリウムガス( $\sim 10^{-3}$  mbar)を導入後、QMSとの間のバルブのみ開ける。
- 4) レーザーパルスを照射し、衝突脱ガス生成気体とヘリウムガスの混合物の化学組成をQMSを用い測定する。チェンバー内にあらかじめ導入したヘリウムガスの量を測定しておくことで、ヘリウムガスと脱ガス生成気体との量比(QMSで測定)から脱ガス生成気体の発生量を見積もることができる[8]。

## 2.5 実験条件

本稿では標的試料として方解石、硬石膏(ともに天然単結晶)を用い、衝突脱ガスの指標として生成した二酸化炭素、硫酸化合物の量を測定した結果を紹介する。実験条件の一覧を表1に示す。飛翔体の大きさを決めるレーザーのビーム径は $800\ \mu\text{m}$ に、レーザーの

パルスエネルギーは約40ジュールに固定した。飛翔体用金属箔は金箔、銅箔の二種類を用いた。金の飛翔体の厚さは $2.5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ の二種類、銅の飛翔体の厚さは $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ のそれぞれ二種類を用いた。4種類の密度・厚さの異なる飛翔体金属箔を用いることにより、レーザー出力のダイナミックレンジ以上の幅で衝突速度・衝撃圧力を変えた条件を実現できる。各ショットについてレーザーパルスエネルギーを測定し、あらかじめ実験的に求めたレーザーパルスエネルギーと衝突速度との関係を表す経験式を用いることで衝突速度を決定した[8]。衝撃圧力は次元インピーダンスマッチング法[9]を用い計算した。

## 3. 実験結果

### 3.1 時系列データと脱ガス率

図3に方解石を標的試料としたショットのQMSの時系列測定データの一例を示す。 $\text{CO}_2^+$ に対応する質量数44のカウント数が、衝突直後に約2桁増加していることが分かる。ショット前のカウントはチェンバー内壁等へ吸着している二酸化炭素の成分であるが、これに比べて十分な量の脱ガス生成気体が観測されたことが分かる。これらの時系列データをもとに、衝突脱ガスで生成した気体の量を求めた。

脱ガス生成気体の量は、その他の条件が同じであれば飛翔体の質量(もしくは体積)が増加するとともに多くなるはずである。そのため、ここでは脱ガス率をもとにどの程度衝突脱ガスが起こったのかを議論することとする。本研究では、脱ガス率=(脱ガス生成気体のモル数)/(飛翔体体積分に相当する標的試料のモル

表1：実験条件一覧

| 標的試料 | 飛翔体 | 飛翔体厚 ( $\mu\text{m}$ ) | レーザーエネルギー (J)    | 衝突速度 (km/s)     | 衝撃圧 (GPa)   |
|------|-----|------------------------|------------------|-----------------|-------------|
| 方解石  | 銅   | 5                      | $35.83 \pm 2.63$ | $3.77 \pm 0.44$ | $54 \pm 9$  |
| 方解石  | 銅   | 10                     | $38.65 \pm 2.75$ | $2.75 \pm 0.33$ | $35 \pm 6$  |
| 方解石  | 銅   | 10                     | $37.02 \pm 2.68$ | $2.69 \pm 0.26$ | $34 \pm 5$  |
| 方解石  | 金   | 2.5                    | $43.98 \pm 2.99$ | $4.03 \pm 0.48$ | $71 \pm 13$ |
| 方解石  | 金   | 10                     | $40.72 \pm 2.85$ | $1.91 \pm 0.15$ | $25 \pm 3$  |
| 硬石膏  | 銅   | 5                      | $31.68 \pm 2.46$ | $3.55 \pm 0.27$ | $54 \pm 7$  |
| 硬石膏  | 銅   | 10                     | $31.98 \pm 2.47$ | $2.50 \pm 0.18$ | $33 \pm 3$  |
| 硬石膏  | 金   | 2.5                    | $35.97 \pm 2.64$ | $3.63 \pm 0.28$ | $68 \pm 8$  |
| 硬石膏  | 金   | 10                     | $31.98 \pm 2.47$ | $1.69 \pm 0.19$ | $23 \pm 2$  |

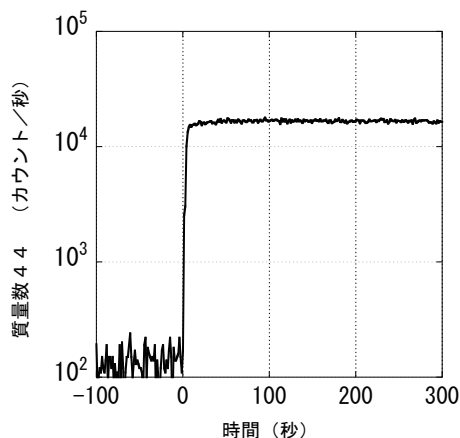


図3：QMSの時系列データの出力結果の例。ここでは、残存ガスに比べ有意な量の脱ガス生成気体(検出できていることをわかりやすくするため、感度補正やヘリウムとの比を取る前の生データを示す。

数)と定義する。図4に方解石、硬石膏それぞれについて、様々な衝撃圧の実験条件での脱ガス率の変化を示す。

### 3.2 脱ガスの開始する衝撃圧，完了する衝撃圧

方解石の脱ガス率(図4(a))を見ると、衝撃圧が約25GPaのショットでは脱ガス率は0.2前後と小さいものの、有意な量の脱ガス生成気体(二酸化炭素)が検出された。これはすなわち、25GPa以下の衝撃圧の条件で方解石の衝突脱ガスが起こりはじめることを意味する。また、衝撃圧が34GPa以上の衝撃圧の4回のショットでは方解石の脱ガス率はどのショットでも約1で、誤差の範囲内ではほぼ一定値を示した。これは、衝撃圧が34GPa前後で方解石の衝突脱ガスがほぼ完全に起こる

ということを示唆すると考えられる。一方、硬石膏の脱ガス率(図4b)では、衝撃圧が23GPaのショットでは有意な量の硫黄酸化物の脱ガスは検出されなかったが、約33GPaのショットでは脱ガス率は小さいが有意な量の硫黄酸化物が検出された。つまり、本研究の実験条件では硬石膏の脱ガス開始の衝撃圧は23GPa以上33GPa以下であることがわかった。しかし、硬石膏の実験データでは最も高い衝撃圧の条件でも脱ガス率は1前後の値に到達せず、方解石の実験結果のように脱ガス率がほぼ一定になるという傾向も見られなかった。これに関しては、硬石膏が完全脱ガスする衝撃圧まで今回の実験条件では到達しなかった、或いは生成した硫黄酸化物のガスがチャンバ内壁等に吸着してしまった影響が現れてしまった、等の理由が考えられる。今回の硬石膏の実験データからは、脱ガス開始の衝撃圧に重要な制約を得ることはできたが、完全脱ガスが起こる条件についてはさらなる追実験が必要であると考えている。

## 4. 惑星科学上の重要性

### 4.1 先行研究の値との比較

本研究で得られた衝突脱ガスを引き起こすために必要な衝撃圧の値は、方解石、硬石膏のどちらについても先行研究で得られた値より小さい傾向にある。方解石の衝突脱ガスは、衝撃回収実験による衝撃圧の閾値の見積りがLange and Ahrens [10] (脱ガス開始衝撃圧～10GPa、脱ガス完了衝撃圧～70GPa)やMartinez et

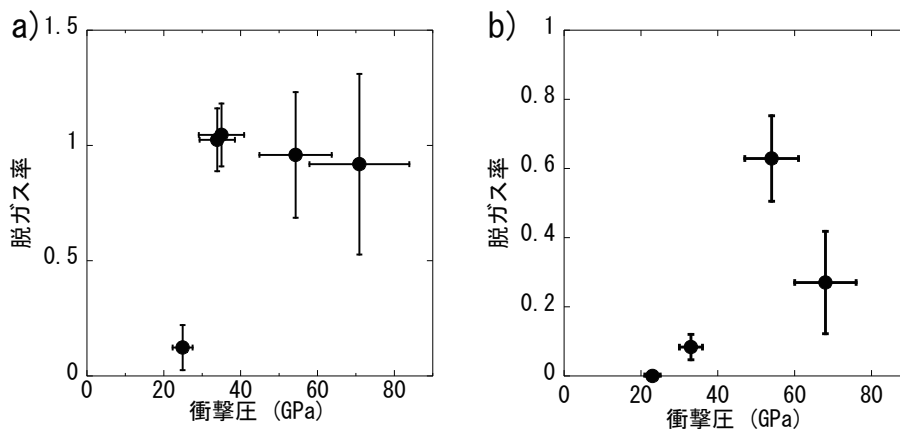


図4：(a) 方解石の脱ガス率。(b) 硬石膏の脱ガス率

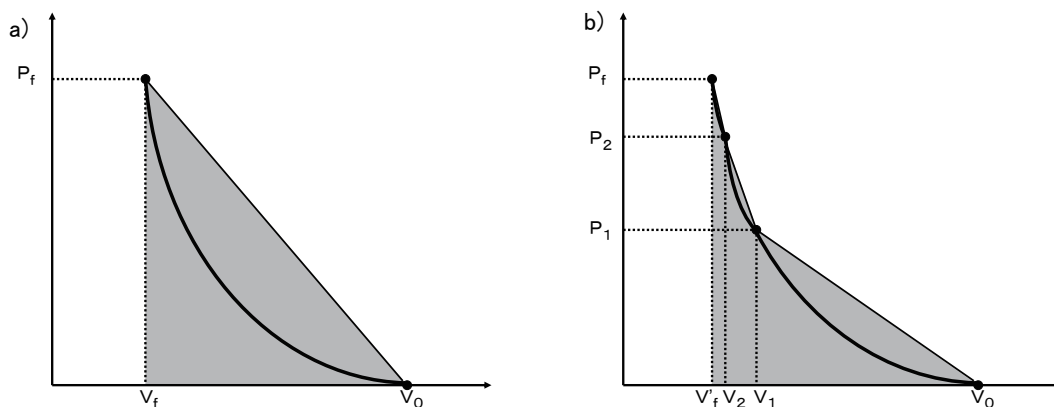


図5： 衝撃圧縮の模式図(P-V図)。横軸は比体積，縦軸は圧力で，曲線はユゴニオ曲線を表す。a)の一回の衝撃波通過での圧縮の例では，最終到達衝撃圧 $P_f$ に到達するまでに増加する内部エネルギーは，なされた仕事量(=灰色の三角形の面積)で表される。一方，b)の3回の衝撃波通過での圧縮の例では，三回の衝撃波通過で増加する内部エネルギーは図の灰色部分の面積で表される。図のように圧縮回数が増えると，灰色の部分のうちユゴニオ曲線より上の部分の面積が減り，最終到達衝撃圧が同じでも内部エネルギーの増加と温度の上昇は少なくなる。

al. [11](脱ガス開始衝撃圧30～35GPa，脱ガス完了衝撃圧～45GPa)などによってなされている。また，近年のドロマイトの衝撃回収実験でも60GPaまでほとんど脱ガスが起こらないことが報告されている[12]。先行研究のデータには大きなばらつきがあるものの，Lange and Ahrens [10]による脱ガス開始衝撃圧の推定値以外は，本研究の見積もりよりも大きな値である。一方，硬石膏についても衝撃回収実験が行われており，64GPaまでの条件ではほとんど脱ガスは起こらないことが報告されており[13]，これも本研究の結果と比べ脱ガスが起こりにくい傾向にある。衝撃回収実験の先行研究で脱ガス衝撃圧の閾値が大きな値を示しているのは，衝撃回収実験で通常使用される試料回収容器の影響だと考えられる。試料回収容器を使用した衝撃回収実験では，標的試料よりも衝撃インピーダンスの高いステンレスなど金属製の容器が通常用いられるため，容器の壁面からの反射衝撃波の影響が無視できない。また，脱ガスが圧力解放過程で起こる場合には，十分なスペースを確保しておかないと気体を発生する分解反応は進まない。これらの点は例えばMartinez et al. [11]などでも議論されているが，以下ではレーザー銃を用いた衝突脱ガス実験の結果を踏まえたうえで，この二つの点についてもう少し踏み込んだ議論をしたい。

## 4.2 衝撃波による圧縮の回数と衝撃温度

衝撃回収実験では，高インピーダンスな金属を用いた試料容器を用い，容器内壁で衝撃波を繰り返し反射させることで，標的試料内部の最終到達衝撃圧力を稼ぐ手法がよく用いられる。例えば，硬石膏を用いたSkala et al. [13]の衝撃回収実験では，最終到達衝撃圧が最も高い(約64GPa)ショットでも，衝突速度は秒速1.5 kmであり，最初の衝撃波による到達圧力は約22GPaにすぎない。一方，本研究の手法や一般的な天然の衝突現象では，一回の衝撃波の通過ではほぼ最終到達衝撃圧力・衝撃温度が決定される。ここで重要な点は，衝撃圧縮が一回の衝撃波の通過のみで起こるか複数回の衝撃圧縮の繰り返して起こるかによって，最終的に到達する温度圧力条件が全く異なるという点である(参考：図5)。一般に，複数回の衝撃波の通過の繰り返して圧縮する場合，二回目以降の衝撃圧縮の際の温度上昇が非常に小さいため，一度の衝撃圧縮の場合と比べ圧力は上昇しやすいが温度は上昇しにくい。そのため，ある最終衝撃圧に複数回の衝撃波通過での圧縮で到達した場合，衝撃波一回で同じ衝撃圧を達成した場合と比較して，最終到達衝撃温度はかなり低くなる。例えばIvanov et al. [14]によれば，方解石を85GPaまで衝撃圧縮する場合，一回の衝撃波通過で圧縮すると2700 Kの衝撃温度であるが，衝撃波の反射を繰り返して圧縮した場合には1198 Kに過ぎない(一回目41GPa



まで圧縮した際の衝撃温度は1128K，その後の反射衝撃波による温度上昇はわずか70K）。この大きな到達温度の差は衝突脱ガスの効率に非常に強い影響を及ぼすと予想できる。

本研究の手法では，標的試料と比べ圧倒的に小さい飛翔体の衝突という条件なので，標的試料の側面からの反射衝撃波や希薄波の影響をほぼ全く受けない，非常に制御された衝撃圧縮・解放のプロセスを実現可能である。また，天然の衝突現象ではほとんどの場合一回の衝撃圧縮に近い条件であろうと予想できるので，反射衝撃波の影響を受けない本研究の手法は，この点に関して天然により近い条件での衝突脱ガスの模擬が可能であるという大きなメリットを持つ。

### 4.3 解放過程での脱ガス

一方で，衝撃波通過の回数の違いに起因する衝撃温度の違いだけで，先行研究との違いを完全に説明することも難しい。これまで室内実験において，衝撃圧縮の際の脱ガス反応に伴う粒子速度の変化の観測例がいくつか報告されており，衝撃圧縮された状態で分解が起こるために必要な衝撃圧力は，方解石は54GPa（脱ガス開始）～103GPa（完全脱ガス）[15]，硬石膏は81GPa（脱ガス開始）～155GPa（完全脱ガス）[16]などが見積もられた値である。また相図とユゴニオ曲線との比較からも，方解石が圧縮状態で脱ガスするために90GPaから100GPa程度の衝撃圧が必要である[11,17]。試料容器を用いた衝撃回収実験と違い，これらの研究では本研究と同じ衝撃圧縮が一回の場合について議論しているが，見積もられた値は本研究の実験結果の値の2倍から5倍程度で，明らかに大きな値を示している。

これは，本研究の条件では衝突脱ガスが圧縮過程ではなくその後の圧力解放過程で起こっていることに起因していると考えられる。温度圧力条件がユゴニオ曲線上に載っている圧縮過程では分解領域に到達していない場合でも，その後の圧力解放過程で圧力が下がると分解領域に到達する可能性がある。圧力解放過程での衝突脱ガスが重要なことは先行研究でも指摘されており，特に脱ガス率を決める閾値付近では圧力解放過程での脱ガス反応が重要である。圧力開放過程で完全脱ガスを起こすためには非常に大きな自由空間が必要であることが指摘されている[17]。Ivanov and Deutsch [17] の見積もりの例では，方解石が完全に分

解した場合と全く分解しない場合で，一気圧では2500倍の体積の差が生じる。試料容器を用いた衝撃回収実験でこの大きさの内部空間を確保することは非常に難しい。一方，レーザー銃を用いた本研究の手法では，真空チェンバー内で比較的小さな飛翔体を衝突させるので，自由空間の体積は飛翔体体積の $10^7 \sim 10^8$ 倍程度と十分な大きさを確保でき，周囲の封圧が脱ガス効率に影響を与えない条件での衝突脱ガスの観測が可能である。

### 4.4 実際の衝突現象の際の脱ガス領域

本研究の結果は，特に衝突脱ガスが起こるかどうかの閾値に近い場合，周囲に大きな自由空間のある開放系の領域では脱ガスが効率的に起こることを示唆する。逆に周囲に空間の無い密封された領域では脱ガス反応は比較的起こりにくい。つまり，最高到達衝撃圧の大きさのほかに封圧や周囲の空間の大きさも脱ガス率を左右する。これを実際の惑星スケールでの天然の衝突現象に適用すると，クレーター形成の際にイジェクタとして放出される惑星表面に近い領域では，開放系に近い状況が実現されやすいため脱ガスは効率的に起こる。また，衝突してくる小天体の物質も衝突後飛散する部分も多く脱ガスが比較的起こりやすいと考えられる。逆にクレーター形成時に外に放出されずクレーターの内側へ圧縮される領域では脱ガスは比較的起こりにくい。これまで行われてきた天体衝突の流体計算に基づく衝突脱ガス量の推定の研究等では，封圧の影響については詳細な検討は未だなされていない。しかし，本研究の結果も示唆しているように，圧力解放過程での脱ガスが効果的に起こる場合と圧縮過程での分解・脱ガスのみを考慮する場合では衝突脱ガスに必要な衝撃圧の閾値が2倍から5倍程度違うと考えられる。そのため，具体的な惑星科学上の諸問題へ適用する際にも，先行研究よりさらに一歩踏み込んだ議論が必要となるだろう。

### 4.5 脱ガス量(KTの場合)

最後に，方解石（炭酸塩岩），硬石膏（硫酸塩岩）の衝突脱ガスについて新たな実験結果が得られたので，これらの物質の衝突脱ガスが大きな役割を果たしたと言われているK/T事件の際の環境変動について議論をしたい。K/T衝突の衝突地点はメキシコのチチ

ュルブクレーターと推定されており、周囲の表層付近には炭酸塩岩や硫酸塩岩に富む堆積岩が分布していたことが分かっている。K / T事件の場合は表層付近の堆積層からの衝突脱ガスが重要となるので、本研究で得られた開放系での衝突脱ガスに必要な衝撃圧の値が比較的良い近似となると考えられる。すなわち、これまで考えられていたよりも衝突脱ガスの閾値は小さな値が適用できる。脱ガス生成気体の量は衝突脱ガスの衝撃圧の閾値に非常に強く依存する。例えばいくつかの先行研究の炭酸塩岩からの二酸化炭素脱ガス量の見積もりを比較すると、閾値が30GPaの場合は220Gt[18]、20GPaの場合は880 Gt[19]、10GPaの場合は10,000Gt[20]となり、脱ガスに必要な衝撃圧が減少すると脱ガス生成気体の量は急激に増大することがわかる(すべて衝突天体の大きさを10 kmと仮定した場合)。炭酸塩岩からの脱ガス生成気体(二酸化炭素、一酸化炭素)の量が多くなれば、衝突後にはより強い温室効果、より急激な温度上昇が想定される[e.g., 5]。また、同様に硫酸塩岩からの脱ガス生成気体(三酸化硫黄)の量が多くなれば、より多くの硫酸が生成され酸性雨による海洋の酸性化等の非常に厳しい環境変動が起こると考えられる[e.g., 21]。

## 5. まとめと将来展望

本稿では、レーザー銃をと質量分析計を用いたガス分析を組み合わせた衝突脱ガスの新しい手法を紹介した。これまで難しかった開放系での衝突脱ガス成分の回収・分析実験と低衝撃圧の条件で圧力解放過程での脱ガスの観測に成功した。このことは、圧力の解放の起こり方が脱ガス率を左右するということを意味するものであり、さらに、先行研究では圧縮過程での衝撃圧をほぼ唯一のパラメータとして表現されてきた衝突脱ガスの効率に関する議論に一石を投じるものである。

## 謝 辞

研究を進めるにあたり、山下勝行博士、丸山誠史博士をはじめ岡山大学地球物質科学研究センターの皆様には大変お世話になりました。また、査読者には的確かつ親切な御指摘をいただきました。篤く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Matsui, T., and Abe, Y., 1986, *Nature*, 319, 303.
- [2] Ohno, S. et al., 2004, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 218, 347.
- [3] Sugi, N. et al., 1998, *GRL*, 25, 837.
- [4] Boslough, M.B. et al., 1982, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 61, 166.
- [5] Kawaragi, K., et al., 2008, 投稿中
- [6] Osinski, G. R., Spray, J. G., 2001, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 194, 17.
- [7] Kadono, T. et al., 2001, *Laser Part. Beams*, 19, 623.
- [8] Ohno, S. et al., 2008, 投稿中
- [9] Melosh, H.J., 1989, *Impact Cratering: A Geologic Process*.
- [10] Lange, M.A. and Ahrens, T.J., 1986, *Earth Planet. Sci. Lett.* 77, 409.
- [11] Martinez, I. et al., 1995, *J. Geophys. Res.*, 100(B8), 15465.
- [12] Skála, R. et al., 2002, *GSA Spec. Pap.* 356, 571.
- [13] Skala, R. et al., 2005, *GSA Spec. Pap.* 384, 413.
- [14] Ivanov, B.A. et al., *GSA Spec. Pap.* 356, 587.
- [15] Yang, W., et al., 1996, *LPSC XXVII*, 1473.
- [16] Yang, W., and Ahrens, T.J., 1998, *Earth Planet. Sci. Lett.* 156, 125.
- [17] Ivanov B.A., and Deutsch, A., 2002, *Phys. Earth Planet. Int.* 129, 131.
- [18] Ivanov, B.A., et al., 1996, *GSA Spec. Pap.* 307, 125.
- [19] Pierazzo, E., et al., 1998, *J. Geophys. Res.* 103, 28607.
- [20] Takata, T. and Ahrens, T.J., 1994, *LPI Contribution* 825, 125.
- [21] Ohno, S. et al., 2006, *LPSC XXXVII*, 1699.