

## 要旨

最新の珪酸塩の衝撃蒸発実験結果を用いて、隕石重爆撃期の原始火星大気進化を検討した。その結果、(1)惑星形成最終期に火星大気は脱ガス大気に入れ替わること、(2)巨大惑星移動で励起される高速度衝突によって、過渡的に分子酸素に富む大気が形成される可能性があること、が明らかとなった。我々の予測は、現在の火星大気の希ガス組成&量、最古の火星隕石に残された酸素同位体異常と調和的である。

## はじめに

惑星形成最終期において天体衝突は主要構成要素である珪酸塩でさえ蒸発させるほどのエネルギーを供給する[e.g., 1, 2]。そのような高速度衝突は地球史上の様々な大事件で重要な役割を果たしてきたと考えられている[e.g., 3-6]。今回は最新の Impact flux model [7]を使って、このような惑星形成末期の天体衝突が火星大気に与えた影響を検討する。このモデルによれば、45-41 億年前まではいわゆる Accretion tail と呼ばれる天体群が降り注ぎ、41 億年前を境に巨大惑星移動によって、力学的に励起された天体群が $\sim 30$  km/s に及ぶ超高速度で衝突すると予想されている。

天体衝突が起こると地表で高温高压の珪酸塩蒸気が発生する。これを衝突蒸気雲と呼ぶ。今回注目しているのは(1)衝突蒸気雲の膨張運動による火星大気の散逸、(2)衝突蒸気雲中で起こる化学反応からの最終生成気体組成である。これらを調べる上で最も重要なパラメータは衝突で生成されるエントロピーである。蒸気雲の膨張運動は断熱的に起こるので、エントロピーが決定されると、相図上での断熱開放経路が決定される [e.g., 8]。このことから膨張する蒸気雲の最終的な運動量と、その内部における化学反応生成物を熱力学的な演算で推定することができる。しかし、宇宙速度で衝撃圧縮された珪酸塩のエントロピー増加量が不明であるために、相図上での断熱解放経路はよくわかっていなかった。この問題を解決するため、筆者を含む研究グループは超高強度レーザーを用いた珪酸塩の衝撃圧縮実験に取り組んできた [9, 10]。その結果 $\sim 30$  km/s の天体衝突時の橄欖石のエントロピー増加量を決定することに成功した [11]。この2

年ほどの間で主要珪酸塩鉱物に対するレーザーショックデータが急激に充実し始めており [12-15]、実験データに基づいた $>10$  km/s の天体衝突で引き起こされる惑星科学上の事件について議論ができるようになってきている。

## 形成末期の火星大気全圧、希ガス組成

形成末期の火星に対してモンテカルロ法を用いた確率論的な大気進化モデルを組み立てた。衝突天体のサイズ及び速度分布には小惑星帯からの天体群を想定した分布 [16, 17] を用いた。大気の減少要因として(1)衝突蒸気雲による大気の剥ぎ取り [11]、(2)水素の流体力学的散逸 (Energy-limited escape [18])、(3)衝突放出物の炭酸塩化による  $\text{CO}_2$  の除去 [19] を、大気の増加要因として衝突天体中の揮発性成分供給を考慮した。多成分 1 Box モデルを採用し、主要揮発性成分 ( $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ne}$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{Kr}$ ,  $\text{Xe}$ ) の量の時間進化を解いた。ここでのポイントは重い希ガスを火星大気から効率よく取り除く過程は衝突による大気剥ぎ取りしか存在しないことである。衝突天体の累積質量が火星隕石中の親鉄性元素量から推定されている  $2 \times 10^{21}$  kg [17] に達するまで、繰り返し計算を行った。大気平均分子量は一回の衝突ごとに更新し、スケールハイトが変化する効果も計算に取り入れた。ただし、大気温度の変化は考慮していない。初期大気は近年の惑星大気獲得理論 [20] から推定される太陽組成気体 (いわゆる“一次大気”) であると仮定した。また今回は火星環境では水は即座に凝結するとして系から取り除いている。しかし衝突天体がもたらす揮発性成分の主成分であるため、この取扱いが妥当であるかどうか評価する必要がある。これは今後の課題である。衝突放出物の炭酸塩化による  $\text{CO}_2$  の除去効率をフリーパラメータとして与え、いくつかのモンテカルロ計算を実施した。

以下にこのモデルから得られた結果をまとめる。(1)衝突天体が極度に乾燥している場合 (揮発性成分を含まない場合)、火星大気は全て失われてしまうこと、(2)炭酸塩化による除去効率が 20-30 %程度あれば、炭素質隕石のような揮発性成分の豊富な天体群の衝突であっても、大気質量は現在の火星大気質量程度に保たれる可能性があること、(3)大気質量が平衡状態に達しても、初期太陽組成大気成分

の散逸は進行し続け、火星大気は”二次大気”に完全に入れ替わること。(4)火星大気中のXeは炭素質隕石起源で説明できる可能性があること、がわかった。その後の彗星の後期流入[21]、IDPの連続的な流入[22]なども考えると、このモデルで現在の火星大気中の希ガス存在度を説明できる。

### >30km/s 衝突による酸素の大量放出

ここからはいわゆる”後期隕石重爆撃”による火星大気への影響を議論する。この時期の天体衝突の総質量はアポロ試料と月のクレータサイズ分布の対応づけから推定されている[23]が、火星大気の総量に影響を与えるには少ない。ここでは近年予測されている、後期隕石重爆撃期に衝突速度が上昇する効果[7, 24]が衝突蒸気雲からの最終生成物組成に与える影響を考える。衝突直後の極限状態と減温減圧され火星大気に放出されるとき熱力学状態は、断熱過程ならばエントロピーで対応づけることができる。理想気体で近似できる低圧条件であれば公開されている熱化学平衡計算コードを用いて最終生成物組成を推定することが可能である。我々が得た珪酸塩鉱物の圧力-エントロピー平面上での Hugoniot 曲線[11]は、このような化学平衡計算に衝突速度という新しい軸を与えることを可能にする。今回は温度 1800-3000 K、圧力  $10^{-5} - 10$  atm の範囲で炭素質隕石組成を用いて熱化学平衡計算を行い、断熱開放経路を衝突速度の関数として決定した。衝突蒸気雲中の反応速度特徴時間と膨張による冷却特徴時間を比較した先行研究[25]によれば、気相化学反応の典型的凍結温度は~2000 K である。そこで断熱開放中に相図上で 1900 K を横切る圧力と、そのときの化学組成を求め、凍結温度での気相化学種、すなわち衝突蒸気雲内で生成され、大気中に放出される気体種を衝突速度の関数として決定した。その結果、分子酸素や OH ラジカルの生成量が衝突速度に非常に強く依存し、>30 km/s の高速度衝突の場合は衝突天体質量に対して 1 wt% に及ぶ  $O_2$  が放出されることがわかった。これは衝突速度が上昇すると、エントロピーが増加し、断熱開放経路が相対的に高温低圧になることによって、珪酸塩が凝縮せず、遊離酸素を放出することによる。

例えば、原始火星に月面上の最大クレータである南極エイトケン盆地を作った規模の衝突天体が火星に衝突すると、現在の火星大気

に匹敵する質量の  $O_2$  が供給される。現在の火星に対する光化学モデル[26]によれば、生成された  $O_2$  の光化学寿命はおよそ 4 万年である。このような過渡的に酸素に富んだ大気は最古の火星隕石に含まれる炭酸塩の酸素同位体分析から予想されている過去のオゾン層の存在[27]と調和的である。

### 参考文献:

- [1] Ahrens & O'keefe, *The Moon*, **4**, 214-249, (1972).
- [2] Kurosawa et al., *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L23203, doi:10.1029/2010GL045330, (2010).
- [3] Pahlevan & Stevenson, *EPSL*, **262**, 238-249, (2007).
- [4] Mukhin et al., *Nature*, **340**, 46-49, (1989).
- [5] Melosh & Vickery, *Nature*, **338**, 487-489, (1989).
- [6] Lisse et al., *ApJ*, **701**, 2019-2032, (2009).
- [7] Morbidelli et al., *EPSL*, **355-356**, 144-151 (2012).
- [8] Melosh, *MAPS*, **42**, 2079-2098, (2007).
- [9] Kurosawa et al., *17<sup>th</sup> SCCM*, 855-858, (2012a).
- [10] Kurosawa et al., *JGR*, **117**, E04007, doi:10.1029/2011JE004031, 2012b.
- [11] Kurosawa et al., *to be submitted*.
- [12] Hicks et al., *Phys. Plasmas*, **12**, 082702, (2005).
- [13] Hicks et al., *PRL*, **97**, 025502, (2006).
- [14] Spaulding et al., *PRL*, **108**, 065701, (2012).
- [15] McWilliams et al., *Science*, **338**, 1330-1333, (2012).
- [16] Ito and Malhotra, *AdSR*, **38**, 696-706, (2006).
- [17] Bottke et al., *Science*, **330**, 1527-1530, (2010).
- [18] Zahnle et al., *Icarus*, **74**, 62-97, (1998).
- [19] Kurosawa, *in prep.*
- [20] Ikoma and Genda, *ApJ*, **648**, 696-706, (2006).
- [21] Gomes et al., *Nature*, **435**, 466-469, (2005).
- [22] Flynn, *JGR*, **102**, 9175, (1997).
- [23] Ryder, *JGR*, **107**, 5022, (2002).
- [24] Marchi et al., *EPSL*, **325-326**, 27-38, (2012).
- [25] Gerasimov et al., *Earth, Moon and Planets*, **80**, 209-259, (1998).
- [26] Nair et al., *Icarus*, **111**, 124-150, (1994).
- [27] Farquhar et al., *Science*, **280**, 1580-1582, 1998.

※図はスライドを参照して頂きたい。