

要旨

初期金星大気からの水蒸気を除去する新たな機構として隕石重爆撃期に発生する Impact ejecta の酸化 & H_2 の流体力学的散逸を提案する。 π スケーリング則と Maxwell の Z モデルを用いて、隕石重爆撃期に発生する細粒 ejecta の量を評価し、その酸化によって大気中から除去され得る酸素の量を評価した。その結果、化学量論的に許される範囲で効率よく岩石の酸化が起これば、1-2 地球海洋質量程度の水蒸気を大気から除去できることがわかった。

はじめに

金星の水はどこへ行ったのか？これは惑星形成論に残された重要問題の一つである。自然に考えれば、金星もその成長過程で大気水圏に地球と同程度の水蒸気を獲得すると考えられるが[e.g., 1]、現在の金星大気水圏に確認されている水蒸気量は $\sim 10^{-4}$ 地球海洋質量(以下 TO)にすぎない[e.g., 2]。地球と金星を分ける大きな違いは軌道長半径の違いである。わずかな違いであるが、惑星形成末期の太陽入射を考慮すると金星の H_2O は凝縮できず、水蒸気大気になっていたと推測される[1, 3]。水蒸気大気は原始太陽の強い紫外線にさらされると光解離を起こし H_2 と O に分解する。生成した H_2 は強い紫外線によって駆動される流体力学的散逸で、容易に宇宙空間に失われる[4]。すなわち「金星の水はどこへ行ったのか？」という問いは「残った酸素(O and/or O_2)はどこへ行ったのか？」という課題に帰着する。

大きく分けてこれまでに以下 3 通りの酸素除去機構が提案されてきた。(1) H_2 の流体力学的散逸に引きづられて O も散逸[4, 5]、(2)地表面の酸化[6, 7]、(3)太陽風による連れ去り[8]である。ところがそれぞれに問題点があり、未だに決着がついたとはいえない。そこで本研究では(2)のアイデアを拡張し、問題解決を図る。地表面の酸化で $\sim 1TO$ 相当の酸素を除去するには ~ 100 km の地殻を酸化($2FeO+O \rightarrow Fe_2O_3$)する必要があるが、そのためには、金星が現在の地球と同程度のテクトニクス活動度で現在に至るまで地表面を更新し続けなければならない[7]。本研究では地表面更新の駆動力に天体衝突を提案する。 H_2 の流体力学的散逸が起こる時期と隕石重爆撃期は重なっている。

この時期に頻発した天体衝突は金星表面の岩石を粉々に粉砕し、上空へ運んだはずである。この過程は原始地球の二酸化炭素除去機構としても提案されている[8]が、金星に適用した例はない。本研究では金星への隕石重爆撃期に生成された細粒の Impact ejecta がどの程度の酸素を除去できるか定量的に評価することを目的とする。

Impact ejecta による酸素除去

まず最初に個々の天体衝突で上空に放出される細粒の Impact ejecta 質量を求める。ここでいう”細粒”は Hugoniot 弾性限界(HEL: $\sim 5GPa$)を超える衝撃圧を受け構成粒子サイズ($\sim \mu m$)まで粉砕された岩石を指す。 π スケーリング則[e.g., 9]と Maxwell の Z モデル[e.g., 9]を用いて掘削領域質量を、数値流体計算から得られた粒子速度の減衰率[e.g., 10]から HEL を超える領域の質量をそれぞれ求めた。その結果、直径が 20 km を超える天体の衝突では掘削領域のほぼ全域が HEL を超える衝撃圧を受けること、直径 20-2000 km の天体衝突が起こった場合、衝突天体質量の 10-100 倍に相当する金星地表が細粒の ejecta として大気中に放出されることがわかった。

次に金星岩石の酸素除去効率を検討する。現在の金星表面岩石には ~ 9 wt%の FeO が存在していることが Venera, Vega の金星探査によってわかっている[e.g., 6]。本研究では金星岩石が深部までこの鉄量を含んでいると仮定する。化学量論的に許される酸素除去効率は 6.4-9.5 g/kg である(不定性は酸化反応の進行具合による)。

確率論的隕石重爆撃モデル

前節で得られた結果を、モンテカルロ法を用いた確率論モデルに組み込む。本研究では金星にも地球と同規模($1-4 \times 10^{22}$ kg)の”Late veneer”があったと仮定していることを注意しておく。このモデルでは天体質量分布[11]からランダムに一つ天体を選び出し、その都度 Impact ejecta の量及び対応する酸素除去量を計算する。累積衝突天体質量が Late veer 質量を超えるまで計算を繰り返し、累積酸素除去量を求める。

ここで一つ複雑な点は多重衝突の取り扱いである。一度酸化された岩石にはもう酸素除去能力はないはずなので、累積放出物質量に

先ほどの酸素除去効率を乗じただけでは、累積酸素除去量を大幅に過大評価することになる。本研究では”衝突誘起対流”[12]の考え方を応用する。掘削されたクレータ地形は重力的に不安定なので、深部の物質が盛り上がりアイソスタシーを回復する。このとき掘削質量と同質量の新鮮な地下物質が地表に現れることになる。すなわち酸化された ejecta の表層への再分配を陽に扱う必要はなく、”累積酸化可能岩石質量”は”累積の掘削された新鮮な岩石質量”で近似することができると期待できる。そこで先ほどのモデルではある深度における掘削率を逐一記録する。

計算結果 -累積酸素除去量-

モデル計算の結果、(1)隕石重爆撃期に生じる累積過渡クレータ面積は金星表面積の数10倍に達すること、(2)今回変化させた範囲では累積衝突天体質量によらず、~70 kmの深さまでは完全に掘削され、金星大気中に放出されること、がわかった。(1)の結果は金星表面が十分に耕されることを意味し、毎回の衝突時の ejecta 再分配を扱わない本モデルの妥当性を補助するものである。累積衝突天体質量を変化させて合計500回の計算を行ったところ、Late veneer 質量が $>2.2 \times 10^{22}$ kg であれば、~1TO 相当の酸素が除去された可能性があることがわかった。

議論 1-地球の場合-

今回提案した H₂O 除去機構は原始地球では働かないのだろうか？Late veneer の累積衝突天体質量と質量分布の推定が正しければ、隕石重爆撃期には >20 km の天体が~50 万回衝突してきたはずである。厚さ数 km の海洋は容易に貫通し、金星の場合と同じような細粒の ejecta を生成していたはずである。この ejecta が海水と効率よく反応していたならば、地球も金星と同様に 1 TO 相当の海水を失ったのかもしれない。この問題を解決するためには原始惑星環境における、H₂O(水蒸気 and 液体)と岩石の間の化学反応実験を行う必要があるだろう。

議論 2-大気全圧進化への寄与-

今回得られた結果は隕石重爆撃期の惑星大気全圧進化を考える上で重要である。大規模な天体の衝突後には数10気圧相当の H₂O や CO₂ が大気から除去される可能性もあり、大規模な環境変動の引き金となったのかもしれ

ない。また Late veneer の天体群が、炭素質隕石のように揮発性成分を豊富に含んでいると数10気圧の H₂O や CO₂ が供給されてしまう計算になることから、Late veneer 天体群は極度に乾燥していなければならないとする先行研究がある[13]。しかし Impact ejecta によって同時に H₂O/CO₂ が除去されるのであれば、そういった特別な天体群を考える必要はないのかもしれない。

参考文献

- [1] Matsui & Abe, *Nature*, **322**, 526-528, 1986.
- [2] Lewis & Grinspoon, *Science*, **249**, 1273-1275, 1990.
- [3] Liu, *EPSL*, **227**, 179-184, 2007.
- [4] Kasting & Pollack, *Icarus*, **53**, 479-508, 1983.
- [5] 佐々木 & 阿部, *遊星人*, **17**, 11-122, 2008.
- [6] Fegley, *The Encyclopedia & Paleoclimatology and Ancient Environments*, 2004.
- [7] Gillmann et al., *EPSL*, **286**, 503-513, 2009.
- [8] Sleep & Zahnle, *JGR*, **106**, 1373-1399, 2001.
- [9] Melosh, *Impact Cratering*, 1989.
- [10] Pierazzo et al., *Icarus*, **127**, 408-423, 1997.
- [11] Bottke et al., *Science*, **330**, 1527, 2010.
- [12] Senshu et al., *JGR*, **107**, 5118, doi:10.1029/2001JE001819, 2002.
- [13] de Niem et al., *Icarus*, **221**, 495-507, 2012.