

# 冥王代における後期重爆撃による大陸の破壊と溶融

芝池 諭人 (東京工業大学大学院 理工学研究科)

## Abstract

冥王代の岩体は発見されていないが、花崗岩があった証拠となるジルコン結晶が発見されている。そのため、冥王代には既に大陸地殻がありその後消失したと考えられている。消失の理由として、冥王代末期の天体衝突の集中「後期重爆撃」による破壊や溶融がよく挙げられるが、定量的な推定はあまりなされていない。本研究ではこれを解析的に計算する式を導出し、後期重爆撃による冥王代の大陸地殻消失が困難であることを明らかにした。具体的には、衝突天体のサイズ分布を累乗近似し、そのベキ指数  $\alpha$  を変化させながら大陸地殻の破壊量および溶融量を推定した。さらに、後期重爆撃を典型的な三つのモデル (Cataclysm, Soft-Cataclysm, Non-Cataclysm) で表し、破壊及び溶融する体積の推移を大陸成長曲線と比較した。

## 1 Introduction

地球上で発見されている最古の岩体は 38 億年前のものであり、冥王代にできた岩体はいない見つかっていない。しかし近年、44 億年前の放射性年代を持つジルコン結晶 ( $ZrSiO_4$ ) が発見され (Wilde et al., 2001)、冥王代には既にある程度大陸地殻があったが、その後消失したと考えられるようになった。なぜならジルコンは、花崗岩つまり大陸地殻から形成されるからである。この大陸地殻消失の理由として、冥王代末期の天体衝突の集中「後期重爆撃 (LHB)」による破壊や溶融、あるいは大陸地殻そのものの沈み込みが挙げられる。本研究では、LHB による地殻への影響を推定し、LHB が消失の理由足りうるか議論する。

LHB はその規模もタイミングも正確にはわかっておらず、いくつかの説がある。月面の巨大衝突盆地と衝突溶融物からは、39 億年前に大きな衝突数のピークを持つ (Cataclysm モデルと呼ぶ) と推測される (Tera et al., 1974 など)。一方で、小さなクレーターの数密度曲線と太陽系形成モデルに従った数値シミュレーションの比較からは、LHB は 41 億年前に緩やかなピークを持つと推測されている (Soft-Cataclysm モデル, Morbidelli et al., 2012 など)。さらには、これらのクレーターは冥王代末期 (41-39 億年前) 以後に限定されるため、それ以前は実際はより多く衝突しており、冥王代末期にピークは無かったとする説 (Non-Cataclysm モデル) もある (Hatmann, 1975 など)。

## 2 Overview

本研究では後期重爆撃の冥王代大陸への影響として、個々の衝突により破壊あるいは溶融する地殻の体積と面積を、衝突天体のサイズ分布に従って積分した値を解析的に推定する。個々の衝突による影響は、例えば破壊される体積  $V_{\text{dest}}$  は

$$V_{\text{dest}} = 0.0949 \frac{\rho_p}{\rho_t} v^{1.3} g^{-0.66} \sin^{1.3} \theta m^{0.78} \quad (1)$$

と表せる (Abramov et al., 2012)。ここではトランジェントクレーターの体積を破壊される体積とした。 $\rho_p, \rho_t$  はそれぞれ衝突天体及び大陸地殻の密度、 $v, \theta$  は衝突速度及び角度、 $m$  は衝突天体質量、 $g$  は重力加速度である。(1) 式は衝突実験や数値シミュレーションから得られるスケーリング則であり、破壊面積  $S_{\text{dest}}$ 、溶融体積  $V_{\text{melt}}$  及び面積  $S_{\text{melt}}$  も同様に式で表せる (Abramov et al., 2012)。もし地殻が溶融すれば、その放射性年代は衝突時の年代にリセットされたと考えられる。これらは全て衝突天体質量  $m$  に依存し、それぞれ  $m$  の 0.78, 1.53, 1.67 乗に比例する。 $\epsilon_m$  はランキン-ユゴニオの式の比内部エネルギーである。

$$S_{\text{dest}} = 1.48 \rho_p^{\frac{0.44}{3}} \rho_p^{-\frac{2}{3}} v^{0.88} g^{-0.44} m^{0.52} \quad (2)$$

$$V_{\text{melt}} = \frac{0.42}{\rho_t} \left( \frac{v^2}{\epsilon_m} \right)^{\frac{3}{2} \times 0.56} \sin^{1.3} \theta m \quad (3)$$

$$S_{\text{melt}} = 1.08 \rho_t^{-\frac{2}{3}} \left( \frac{v^2}{\epsilon_m} \right)^{0.56} \sin^{\frac{2.6}{3}} \theta m^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

次に衝突天体のサイズ分布を考える。後期重爆撃期に衝突した天体はその多くがメインベルト小惑星帯由来と考えられているが、その根拠として月面のクレーターサイズ分布と現在の小惑星帯のサイズ分布の一致が挙げられる (Strom et al., 2005)。小惑星帯のサイズ分布は累乗近似が可能で、およそ以下の (5) 式に従う (Dohnay, 1969)。このとき、累積数  $N_{\text{sfd}}$  は質量が  $m$  より大きい小惑星の数である。本研究では、小惑星と考えられている衝突天体のサイズ分布を累乗近似し、このべき指数  $\alpha$  をパラメータとして変化させる。なお、現在の小惑星帯は  $\alpha = 1.6$  で近似できる。

$$\frac{dN_{\text{sfd}}}{dt} = Am^{-\alpha} \quad (5)$$

この (5) 式に従って  $V_{\text{dest}}, S_{\text{dest}}, V_{\text{melt}}$  及び  $S_{\text{melt}}$  を地球に衝突する最小質量  $\mu_e$  から最大質量  $m_{\text{max}}$  まで  $m$  で積分すれば、LHB 全体の大陸地殻に与える影響、 $V_{\text{dest,T}}, S_{\text{dest,T}}, V_{\text{melt,T}}$  及び  $S_{\text{melt,T}}$  が推定できる。それぞれ  $m$  の  $1.78 - \alpha, 1.53 - \alpha, 2 - \alpha, 1.67 - \alpha$  乗に比例するため、これらの値が 0 より小さい時  $m$  の小さい方に依存、0 より大きい時  $m$  の大きい方に依存する。なお、面積についてはこの後クレーター同士の重複を補正する。一方体積は、重複を考慮できないばかりか依存度の高い大きな衝突において地殻より深くまで破壊/溶融することになるため、かなり過大評価となっている可能性がある。

累積数  $N_{\text{sfd}}$  と最大質量  $m_{\text{max}}$  には以下の関係がある (Zahnle and Sleep, 1997)。

$$N_{\text{sfd}}(> m_{\text{max}}) = \frac{A}{\alpha - 1} m_{\text{max}}^{1-\alpha} \approx 1 \quad (6)$$

一方で地球に衝突する最小質量は、現在の地球の大気圏で燃え尽きない最小の質量  $\mu_e = 1 \times 10^{11.5} \text{g}$  とする (Bland and Artemieva, 2003)。また、月と地球に衝突した天体のサイズ分布は相似関係にあり、月よりも地球の方が 23 倍衝突しやすい。よって比例定数  $A_m$  と  $A_e$  は

$$A_e = 23A_m \quad (7)$$

の関係を持ち、月に残る LHB の痕跡から地球に衝突した量を推定できる。

### 3 Method and Results 1

$\alpha$  を変化させた時の破壊/溶融量を推定する。まず、(i)LHB 期に地球に衝突した総質量を与えた場合を考える。累積数  $N_{\text{sfd}}$  に対して総質量  $M_T$  は

$$M_T = \int_{\mu_e}^{m_{\text{max}}} \frac{dN_{\text{sfd}}}{dt} m dm = \frac{Am_{\text{max}}^{2-\alpha}}{2-\alpha} \left\{ 1 - \left( \frac{\mu_e}{m_{\text{max}}} \right)^{2-\alpha} \right\} \quad (8)$$

$$\approx \frac{Am_{\text{max}}^{2-\alpha}}{2-\alpha} \quad (9)$$

この関係と式 (6) より、総質量から地球に衝突した天体のサイズ分布と破壊/溶融量を推定する。例えば、総溶融体積  $V_{\text{melt,T}}$  は

$$V_{\text{melt,T}} = \int_{\mu_e}^{m_{\text{max}}} \frac{dN_{\text{sfd}}}{dt} V_{\text{melt}} dm = \frac{0.42}{\rho_t} \left( \frac{v^2}{\epsilon_m} \right)^{0.84} \sin^{1.3} \theta M_T \quad (10)$$

と  $M_T$  に比例することがわかる。また、総溶融面積  $S_{\text{melt,T}}$  は

$$S_{\text{melt,T}} = \int_{\mu_e}^{m_{\text{max}}} \frac{dN_{\text{sfd}}}{dt} S_{\text{melt}} dm \propto \frac{(2-\alpha)^{\alpha-1} (\alpha-1)^{2-\alpha}}{\frac{5}{3}-\alpha} \times \left\{ \left( \frac{2-\alpha}{\alpha-1} M_T \right)^{\frac{5}{3}-\alpha} - \mu_e^{\frac{5}{3}-\alpha} \right\} M_T^{\alpha-1} \quad (11)$$

と  $\alpha$  と  $M_T$  によって表せる。 $V_{\text{dest,T}}$  及び  $S_{\text{dest,T}}$  についても同様である。

これらの式を使って破壊/溶融体積及び面積を推定した。総質量は  $2 \times 10^{23} \text{g}$  と考えられている (Gomes et al., 2005 など)。また、他の推定では  $1.5 \times 10^{23} \text{g}$  とされている (Levison et al., 2001, Jorgensen et al., 2009)。これらの値を  $M_T$  に代入して、各体積及び面積を求めた。なお、衝突速度は  $v = 20 \text{km/s}$ 、衝突角度は最も確率の高い  $\theta = 45^\circ$ 、密度は  $\rho_p = \rho_t = 2.7 \text{g/cm}^3$  とした。このとき破壊/溶融体積は図 1、破壊/溶融面積は図 2 となる。また、冥王代末期の大陸地殻体積はおよそ現在の 12% であり (McCulloch and Bennett, 1994)、現在の大陸地殻は約  $7.18 \times 10^9 \text{km}^3$  である

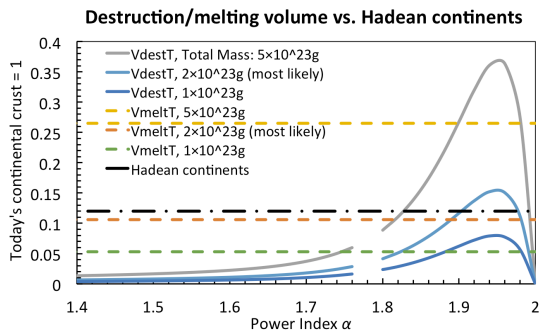


図 1: 破壊/溶融体積と冥王代の大陸の比較

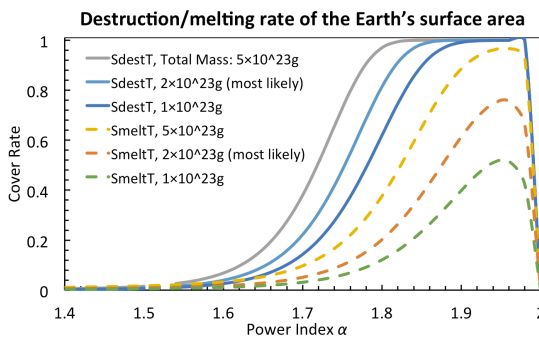


図 2: 破壊/溶融領域が地球表面を占める割合

(Cogley, 1984)。図 1 を見ると、総質量  $2 \times 10^{23} \text{g}$  のとき、溶融体積は冥王代の大陸の体積と同程度であることがわかる。破壊体積は  $\alpha < 1.9$  のとき、冥王代大陸を上回る。一方で図 2 を見ると、例えば小惑星のサイズ分布 ( $\alpha = 1.6$ ) では、地球表面の 1 割以下しかカバーできないことがわかる。 $\alpha > 1.8$  のとき、ようやく破壊領域が地球表面を覆う。まとめれば、総質量を与えた時、溶融体積は冥王代大陸を上回るが、面積は地球表面を覆うことができないとわかる。

次に、(ii)LHB 期の月への最大衝突を考える。LHB の期間に月に衝突した最大の衝突は Imbrium 盆地として現在まで残っている。この直径から式 (2) 等を用いて衝突天体の質量  $m_{\max,m}$  を推定すると、 $m_{\max,m} = 1.0 \times 10^{21} \text{g}$  を得る。この値から破壊/溶融量を推定した (詳細は省く)。

最後に、(iii) 月面のクレーター数密度から考える。

LHB 以降のクレーター数密度は以下の式で与えられる (Morbidelli et al., 2012)。このとき時間  $t$  の単位は Gyr(Ga) であり、 $N_{20}$  は 1km 四方の直径 20km 以上のクレーター数を表す。

$$\frac{dN_{20}}{dt} = 2.7 \times 10^{-16} \exp(6.93t) + 5.9 \times 10^{-7} \quad (12)$$

式 (12) を 41 億年前以降  $t$  で積分すれば LHB の規模がわかる。この積分値を用いて破壊/溶融量を推定した (詳細は省く)。

(i)(ii)(iii) の結果をまとめると表 1 を得る。表 1 は、冥王代の大陸をほとんど破壊あるいは溶融できる  $\alpha$  の範囲を示した。表 1 を見れば、(i)(ii)(iii) どの場合

表 1: 冥王代大陸を消失可能な  $\alpha$  の範囲

	$V_{\text{dest},T}$	$V_{\text{melt},T}$	$S_{\text{dest},T}$	$S_{\text{melt},T}$
(i)	$\alpha > 1.9$	any $\alpha$	$\alpha > 1.8$	$\alpha > 1.9$
(ii)	$\alpha > 1.9$	any $\alpha$	$\alpha > 1.8$	$\alpha > 1.9$
(iii)	$\alpha < 1.5$	$\alpha < 1.6$	$\alpha < 1.3$	$\alpha < 1.4$

でも、ほとんどの  $\alpha$  で冥王代大陸を消失させることは困難であるとわかる。もし LHB のサイズ分布が現在の小惑星帯と同じ、つまり  $\alpha = 1.6$  であったなら、総溶融体積のみが条件を満たす。しかしその場合も面積は不十分である。またこの設定は、地殻の温度分布シミュレーションによる先行研究 Abramov et al. (2013) の設定に対応し、その推定結果 (地球表面の 5-10% が溶融) とよく一致する。

## 4 Method and Results 2

$\alpha$  を 1.6 に固定して破壊/溶融体積の時間推移と大陸成長曲線を比較する。一億年毎の  $V_{\text{dest},T}$  及び  $V_{\text{melt},T}$  を三つの典型的な LHB モデル Cataclysm, Soft-Cataclysm, Non-Cataclysm に沿って計算する。Soft-Cataclysm モデルは、式 (12) に 41 億年前以降従うとした。このとき LHB(以降) に月に衝突する総質量はおよそ  $2 \times 10^{21} \text{g}$  となる。式 (12) は、Morbidelli et al. (2012) において月に衝突した総質量を  $2 \times 10^{21} \text{g}$  として得られた式である。同論文ではさらに、月の強親鉄性元素量から 45 億年前以降の衝突総質量が  $3.5 \times 10^{22} \text{g}$  と推定されるため、45-41 億年前に

$3.3 \times 10^{22} \text{g}$  が月に衝突したと仮定し、LHB 以前のクレーター数密度 (指数関数的に減少する) を推定している。ここではこの推定結果を使用する。一方 Cataclysm モデルは、Imbrium 盆地から推定される衝突量を 39-38 億年前に集中して衝突させた。このとき月への総質量はやはり約  $2 \times 10^{21} \text{g}$  となる。よって 45-39 億年前の衝突数の推移は Soft-Cataclysm モデルと等しいとした。Non-Cataclysm では Soft-Cataclysm モデルをそのまま 41 億年前以前に外挿した。

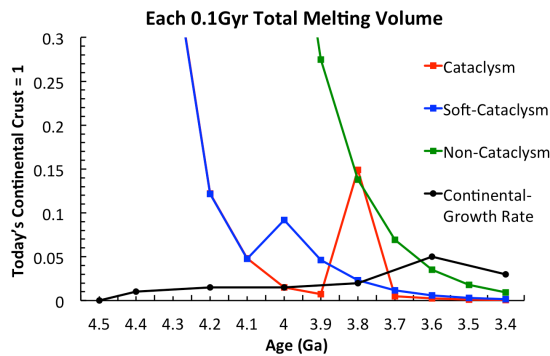


図 3: 破壊/溶融体積の推移と大陸成長

図 3 は総溶融体積  $V_{\text{melt},T}$  の推移である。どのモデルであっても、常に溶融体積が新たにできる大陸体積を上回っていることがわかる。つまり、新たにできる大陸ができたそばから溶融していく可能性がある。

## 5 Discussion and Conclusion

Result1 からは、LHB によって冥王代大陸と同程度の体積を溶融できる可能性が示唆された。しかし、ほとんどの  $\alpha$  で破壊/溶融領域により地球表面のわずかな部分しか覆うことができない。一方で時間推移 (Result2) を見ると、大陸をできたそばから溶融 (あるいは破壊) していく可能性が示唆された。もし冥王代の大陸地殻が一カ所に集中していれば、そこに巨大な天体が衝突し、まとめて溶融した可能性が体積の推定結果から示唆される。この場合、大陸地殻が厚いことで溶融 (あるいは破壊) 体積の過大評価を減らすこともできる。しかし、太古代の大陸地殻は島弧の様に地球上に散在していると言う主張もあ

り (Yamamoto et al., 2009)、冥王代も同様であるかもしれない。もしこれが正しければ、破壊/溶融領域によって地球表面を覆うことができないため、全ての大陸地殻を破壊/溶融することは難しい。つまり、特定の場合を除けば、LHB によって冥王代大陸を消失させることは困難である。これは、冥王代大陸が大陸地殻であるにも関わらずマントルへと沈み込んだ可能性を示唆する。

## Reference

- [1] Wilde, S.A., Valley, J.W., Peck, W.H., Graham, C.M., 2001. Nature 409, 175-178.
- [2] Tera, F., Papanastassiou, D.A., Wasserburg, G.J., 1974. Earth Planet. Sci. Lett. 22, 1-21
- [3] Morbidelli, A., Marchi, S., Bottke, W.F., Kring, D.A., 2012. Earth Planet. Sci. Lett. 355-356, 144-151.
- [4] Hartmann, W.K., 1975. Icarus 24 181-187
- [5] Abramov, O., Kring, D.A., Mojzsis, S.J., 2013. Chemie der Erde 73 227-248.
- [6] Abramov, O., Wong, S.M., Kring, D.A., 2012. Icarus 218, 906-916.
- [7] Strom, R.G., Malhotra, R., Ito, T., Yoshida, F., Kring, D.A., 2005. Science 309, 1847-1850.
- [8] Dohnay, J.S., 1969. J. Geophys. Res. 74, 2531-2554.
- [9] Zahnle, K.J., Sleep, N.H., 1997. Springer-Verlag, New York, pp. 175-208.
- [10] Bland, P. A., Artemieva, N. A., 2003. nature 424, 288-291
- [11] Gomes, R., Levison, H.F., Tsiganis, K., Morbidelli, A., 2005. Nature 435, 466-469.
- [12] Jørgensen, U.G., Appel, P.W.U., Hatsukawa, Y., Frei, R., Toh, Y., Oshima, M., 2009. Icarus 204, 368-380.
- [13] McCulloch, M.T., Bennett, V.C., 1994. Geochimica Cosmochimica Acta 58, 4717-4738.
- [14] Cogley, J.G., 1984. Reviews of Geophysics and Space Physics 22, 101-122.
- [15] Yamamoto, S., Senshu, H., Rino, S., Omori, S., Maruyama, S., 2009. Gondwana Research 15, 443-453.