

衝突盆地のクレータカウントにもとづいた初期の衝突史

諸田智克 (名古屋大学大学院環境学研究科)

後期重爆撃の有無は、月科学における最重要未解決問題である。アポロ試料中のインパクトメルト岩の放射年代は 38~40 億年に集中しており、このことから一部の月科学者は 39 億年前に天体衝突が活発な時期があったと考えてきた [e.g., Tera et al., 1974]. これを後期重爆撃期仮説と呼んでいる。一方、この説に反対する月研究者も少なくない。アポロ試料は Imbrium や Serenitatis といった比較的若い (~39 億年) 特定の衝突盆地からの放出物に汚染されているために様な年代を示しているだけ、という主張である。このように、後期重爆撃は仮説の域を出ていないにも関わらず、これまで太陽系規模の天体の軌道進化の枠組みの中でその原因は議論されてきた。例えば Gomes et al. [2005] は巨大惑星の移動と関連づけて後期重爆撃期の原因を説明している。それによると、巨大惑星は互いの重力と外縁領域に存在していた微惑星との角運動量の交換により軌道を少しずつ変化させ、太陽系形成から約 7 億年後に木星と土星が 2:1 の共鳴軌道に入ったことをきっかけに、土星、天王星、海王星の軌道が急激に外側に移動し、それに伴って小惑星帯と外縁天体の軌道が乱され、その多くは内部太陽系にもたらされ、これが後期重爆撃期の原因になったとしている。このシナリオは Nice モデルと呼ばれ、現在観測されるエッジワース・カイパーベルトの軌道や天王星、海王星の軌道要素、形成の時間スケールの問題をうまく解決できるモデルとして認知されつつある。このように今や後期重爆撃仮説は太陽系形成の描像を左右する問題であり、月科学における解決すべき最優先課題の一つと言える。

我々は後期重爆撃仮説を検証するために、地形カメラ画像を用いて、月の高地にある 11 個の衝突盆地においてクレータカウンティングを行ってきた。しかし残念ながらクレータ数密度を使って推定される盆地の年代から、直接的に後期重爆撃期の存否を検証することはできない。何故なら、クレータ密度から絶対年代に変換するためのクレータ年代学モデルがそもそも衝突史を仮定しているためである。そこで我々は得られた衝突盆地のクレータ数密度と月隕石の放射年代の比較を行い、後期重爆撃を支持しているクレータ年代学関数 (Stöffler & Ryder モデル) [Stöffler & Ryder, 2001] と支持していない関数 (Neukum モデル) [Neukum, 1983] でどちらが整合的かを調べることで検証を試みた。

月隕石の中には、KREEP 成分 (KREEP は K, 希土類元素, P を合わせた化学組成を表わす) と FeO 量が極端に低いものが見つかっている [e.g., Takeda et al., 2006]. リモートセンシングデータから見積もられる月表面の元素分布との比較から [e.g., Kobayashi et al., 2010], それらの月隕石は月の裏側北半球を占めている高地領域からきたと考えられている。それらの月隕石中の斜長岩岩石片の Ar-Ar 年代は 41-44 億年という、アポロ試料に比べて平均的に古い年代を示している [Nyquist et al., 2011]. 特にその中で 42.6 億年の Ar-Ar 年代は、Dhofar 489 の Mg リッチ斜長岩クラストと、それとペアだと考えられている Dhofar 908 のマトリックスの両方で観測されており、この年代は月裏側で起きた大衝突を反映していると考えられる [Nyquist et al., 2011].

月裏側北半球にある衝突盆地のサイズ分布に標準サイズ分布 [Neukum, 1983] をフィッティングして得られる直径 1km でのクレータ密度は 0.1-0.35 km² であった。もし月隕石中の斜長岩片で測定された 41-44 億年の放射年代が月裏側の衝突盆地の形成によってリセットされたものであるなら [Nyquist et al., 2011],

その年代の月面では $0.1\text{--}0.35\text{ km}^2$ のクレータ密度を持つはずである。図 1 は Neukum [1983] と Stöffler & Ryder [2001] のクレータ年代学関数の比較を示している。これを見ると、後期重爆撃を支持していない Neukum 関数 (線 (a)) が、月隕石の年代範囲と衝突盆地上のクレータ密度範囲の重複領域を通過しており、今回の観測と整合的であることがわかる。一方、後期重爆撃を支持している Stöffler & Ryder 関数は重複領域から大きく外れている。これらの結果から、後期重爆撃期は無かった、またはあったとしても、規模の小さいものであったと考えるのが妥当である。後者の解釈では、38 億年に衝突頻度のピークがあったが 40 億年前には一時的に頻度が低かった時期がなければならない (図 1 の線 (c))。この場合、重爆撃期間の集積質量の上限は、 20 km/s の衝突速度を仮定してクレータスケールリング則から算出される各衝突盆地をつくった天体の質量の総和から、 $\sim 1.8 \times 10^{21}\text{ g}$ と見積もられる。一方、Nice モデルで予測される月への集積量は彗星が $(8.4 \pm 0.3) \times 10^{21}\text{ g}$ 、小惑星が $(3\text{--}8) \times 10^{21}\text{ g}$ であり [Gomes et al., 2005]、我々の見積りはこれよりも十分に小さい。以上の結果は、月の大部分の衝突盆地が 39 億年前に形成されたとする従来の後期重爆撃仮説を否定するものではあるが、より小規模の衝突率の増加や Nice モデルで提案されているような巨大惑星軌道の移動が起こった可能性を完全に否定するものではない。更なる検証にはクレータ年代学そのものの改善が必要である。

<参考文献> Gomes R. et al., 2005 Nature 435, 466. Kobayashi, S. et al., 2010b, 41st LPSC, Abstract#1795. Nyquist, L.E. et al., 2011, 42nd LPSC, Abstract#2368. Takeda, H. et al., 2006, Earth Planet. Sci. Lett. 247, 171. Tera, F. et al., 1974, Earth Planet. Sci. Lett. 22, 1. Stöffler, D. and Ryder, G., 2001, Space Sci. Rev. 96, 9.

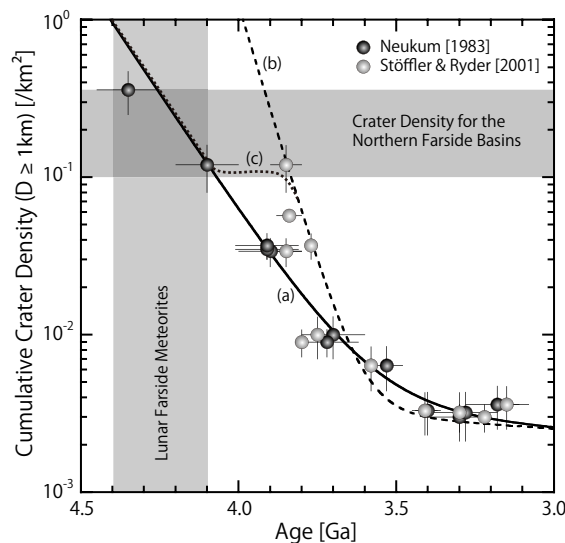


図 1. クレータ年代学関数の比較。プロット点はアポロ・ルナ岩石試料の放射年代測定から得られた絶対年代と試料採取地域のクレータ数密度の関係を表わしている。線(a), (b)は Neukum [1983]と Stöffler & Ryder [2001]のそれぞれのプロット点に対して、指数関数と一次関数を組み合わせてフィッティングしてえられた年代学関数である。グレーの領域は、月裏側から来たと考えられる月隕石中の斜長岩の Ar-Ar 年代と、裏側の衝突盆地のクレータ密度の範囲を示す。線(c)は Stöffler & Ryder [2001] の年代の解釈が正しいとした時に、観測される衝突盆地のクレータ密度と月隕石の放射年代の領域を通るように引き直した線を示している。