全地球規模変動の引き金としての天体衝突

金沢大学理学部地学科* 古 本 宗 充

Impacts of Extraterrestrial Bodies as Triggers for Global Tectonics

Muneyoshi FURUMOTO

Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kanazawa University,
Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 920-11, Japan

(Received April 12, 1994; Accepted October 4, 1994)

The episodicity of impacts on the Moon, which must take place also on the Earth, appears to be accompanied by orogenic episodes on the Earth. Seven of eleven episodes of major impacts in the Precambrian era were followed by orogenic events with a time lag of about 100 Myr. A possible scenario explaining the coincidence is as follows. A shock wave from a major impact might have caused the spinel-post-spinel transformation in megaliths accumulated around the 670 km discontinuity and/or huge melting in the upper mantle. The gravitational instabilities of the megaliths or the melted parts brought about down-welling or up-welling superplumes, respectively. Then rapid mantle convections induced by the superplumes produced global tectonics such as a formation or breakup of a supercontinent.

Key words: Global tectonics, Orogeny, Plume tectonics, Meteorite impact.

§1. はじめに

地球進化は一本調子ではなく、様々な規模の現象が固有のリズムをもって現れながら、積みかさなってきた。例えば GASTIL (1960) は岩石の年代分布から、過去 20 数億年間に約 4 億年間隔で、大陸の形成に関わるような大規模な火成活動があったことを示した。このような間欠的な変動の理由はまだ定かでないが、約 4 億年という長い間隔と規模の大きさは、その原因に大きな制約を与える。すなわちマントル対流のパターンや速度に間欠的な大変動が起こり、地表での現象としてのプレート運動の変化などをとおして、このような大変動が発生したと考えるのが妥当である。

ではこのようなマントル対流の間欠的な大変動はなぜ起きるのであろうか？ これまでのほとんどの研究では、こうした変動は地球内部の自発的現象として説明されてきた。しかしながら、大きな天体との衝突により、地球上の変動が引き起こされた可能性もある [例えば GLIKSON (1993), GREEN (1972), GRIEVE (1980), STOTHERS (1992)]. 天体との衝突により多量のエネルギーが地

球に与えられるのであるから、それにより様々な現象がおこっても不思議ではない (そもそも地球の存在自体が天体の衝突によっているのである)。

本報告の目的は、マントル対流の変動という地球の最大規模のレベルでの変動といえども、天体との衝突によって引き金が引かれた可能性を指摘することにある。以下、火成活動の年代データおよびクレータの衝突頻度の年代変化のデータに基づいて、先カンブリア時代の約 30 数億年間に、10 回程間欠的に発生した全地球規模の変動の引き金として天体衝突が働いた可能性を指摘する。そしてクレータ形成と地球のダイナミクスに基づき、どのようにして天体衝突が引き金として作用できるかということを示す。

§2. 岩石の年代頻度とクレータ年代頻度の相関

Fig. 1 は、古い火成岩について報告された年代の分布を、年代の関数として図示したものである [CONDIE (1989)]. この図に示されたデータは、ジルコンの U-Pb 法により年代決定がされたものだけをまとめたものであり、岩石の初生年代値分布であると考えられる。これらのデータは地表の均質なサンプリングによるものではな

* 〒920-11 金沢市角間町

Fig. 1. Distribution of U-Pb zircon ages from Precambrian igneous rocks as a function of age [CONDIE (1989)]. Thick line indicates an average value and the dotted lines represent one standard deviation σ on either side of the average. The standard deviation is calculated on the assumption that the distribution is Poisson's distribution.

Fig. 2. Frequency distribution of crater formation on the Moon as a function of age. Numbers of craters larger than 8km in diameter in specified areas are plotted as a function of the formation age [BALDWIN (1985)]. Thick line indicates average value and the dotted lines represent one standard deviation σ on either side of the average. The standard deviation is calculated on the assumption that the distribution is Poisson's distribution. The value for the age older than 3.8 Gyr is omitted for the calculation.

いが、様々な地域のデータをまとめたものであり、この図に見られるピークは全地球規模の変動に対応していると考え、18億年前や、27億年前付近にみられる大きいピークを含み、数億年間隔でピークが現れている。最近のピークは、7億年付近のピークを除き GASTIL

(1960) のものと一致している。このピークに付いては後で触れる。この図からも明らかなように、約4億年間隔の間欠的な火成活動は、38億年前にまで追跡できる現象である。

次に天体衝突の頻度が、過去38億年間どのように変

Fig. 3. Comparison of the frequency curves of the crater and the rock formation dates. The curve of the rock dates is plotted by logarithmic scale at the ages older by 0.1 Gyr than that estimated.

Table 1. Peak positions of age distributions of craters and rocks.

Peak number	Crater (Ga)	Rock (Ga)
1	3.8	3.7
2	3.6	3.5
3	3.4 (small)	—
4	3.2	3.0 (small)
5	2.8	2.7
6	2.6	—
7	2.2 (small)	2.2
8	1.9	1.8
9	1.5	1.4
10	1.1	0.9
11	0.6	0.5

化したかについてみる。現在地球上で知られている衝突クレータは高々130個程度であり[GRIEVE (1991)], 衝突頻度の変化を調べるには不十分である。一方月においては、過去38億年間の衝突の記録が殆どすべて残されていると考えられている。Fig. 2に示したのは、クレータ年代学に基づき決定された、主として月の海の地域にある直径8 km以上のクレータの年代-頻度分布である[BALDWIN (1985)]。この場合の大きな特徴も、数億年間で衝突頻度が変化していることである。地球と月は太陽系内ではほぼ同一の場所にいるわけであるから、月への衝突が多くなった時期には地球でも同様に多くなったと考えられる。すなわちFig. 2に示した衝突頻度の時間変動についての特徴は、地球上への衝突の記録と同じであると見なしてもよいであろう。

Fig. 1とFig. 2を見比べてみると、クレータ形成率の変動が、火成岩形成の変動の場合と同様のピーク間隔をもっているというだけでなく、両者のピーク位置もよく対応していることが分かる。特に火成岩の年代分布とクレータの年代分布のピークに1億年程度のずれ(前者が若い)があるとする、両者のピークは非常に良い一致を示す。

この一致をよりわかりやすくするため、Fig. 3に両者の年代のずれを考慮して、両データが同一の時間軸上に示してある。図中実線がクレータの年代分布を、破線が岩石の年代分布を表している。またこの図では、岩石年代のピークの極端さを押さえるために、岩石サンプル数の対数を縦軸にとってある。

特に30-10億年前の範囲で両者のピークはよく一致している。38-30億年前では若干ピークの対応が悪いが、それでも変化の様子は大局的には合っている。岩石の年代決定数が、古くなればなるほど少なくなっている傾向があることを考慮すれば、よく合っているといえよう。

ところで、特にクレータのデータに顕著であるが、サンプル数が少なく、個々のピークの有意性に疑問がもたれる可能性がある。確かにFig. 2で明らかのように、平均値から標準偏差 σ 以上離れたピーク数は7しかなく、 2σ 以上のものはほとんど無い。しかしながらここで行うおうとしているのは、個々のピークが有意であるということを示すことではない。小さなピークを含めて、2つの現象のピーク位置の相関が有意に高いことを示すことである。2種類のデータの総てのピークを調べたとき、もし両者の対応が非常によく、偶然とはみなせ

ないならば、両者のピークの相関と共に、ほとんどのピークが有意であると考えられる。

両データから単純にすべてのピーク位置を読みとった値が Table 1 にまとめている。38 億年前から 6 億年までの間に、クレータの形成年代分布にピークがあったのは 11 回である。このうち、クレータ形成が先行するとして、1 億年以内の差で両者のピークが一致するのは 7 回である。ただしピーク番号 11 番は、CONDIE (1989) のデータでは 7 億年程度の年代にピークをもつが、この表では 5 億年としてある。その理由は、Fig. 1 で 7 億年がピークになっているのは、それより新しい時代の岩石の年代決定数が少ないことにことによっている、見かけ上のものであるからである。GASTIL (1960) によれば、この付近の火成活動のピークはもっと若く、5 億年付近にあるので、この値を採用してある。

この 11 回の出現のうち 7 回が 1 億年差で一致するというのを、偶然とするのは難しい。例えばクレータの発生頻度が 3 億年に一度くらいの率で高くなっているとする。任意の時間幅、例えばそれと独立に与えられた岩石年代のピーク直前 1 億年間に、クレータのピークが出現する確率は $1/3$ である。よって 11 回の試行のうち、7 回が与えられた時間幅に出現する確率は

$${}_{11}C_7(1/3)^7(2/3)^4=0.03$$

となる。このような小さな確率は、両者に因果関係があるということを強く要請する。

また、外部からの影響である天体との衝突が、地球の変動に 1 億年先行するという点も、具体的機構は別として、少なくとも因果関係を考えた場合、妥当な前後関係であるといえる。

さらにつけ加えるならば、38 億年よりも古い岩石がほとんど報告されていないことも、天体衝突の激しい時期と関係している。月の海をつくった巨大天体衝突は約 38 億年前に起きている。このとき地球上でも、同様に巨大なクレータをつくる衝突が多数起きたはずである。この巨大衝突により、当時の地殻が破壊されたり、溶融したりして、それ以前の地質構造がほとんど消し去られてしまったと考えられる [GREEN (1972)]。

以上のような観点から、私はクレータ形成率と地球の大変動の間に因果関係がある、つまり天体との衝突が全地球規模の変動の引き金となった可能性を主張する。

§3. 引き金としての衝突

ではこのようなことが実際に起こり得る物理的過程として、いかなる機構があり得るかについて考えてみることにする。最初に、どの程度の規模の天体衝突があったかについて見てみることにする。

クレータのサイズ-頻度分布は、次の式で表される。

$$\text{Log } N=a-b \text{ Log } D \quad (1)$$

ここで a と b は常数、 D はクレータの直径、そして N は直径 D 以上のクレータの総数である。 b の値は 2 程度である [BALDWIN (1985), MELOSH (1989)]。この分布は衝突する天体のサイズ分布からきていと考えられる。このことは衝突数が多ければ、それだけ大規模な衝突が起きる可能性をも述べている。つまり上で述べた数億年間隔での衝突頻度の上昇は、頻度だけでなく、大規模衝突が起こりやすくなったと見なすことができる。

月のデータを地球の場合にひきなおすには、地球と月の重力加速度や表面積の差等の衝突数を増加させる要因と、大気、地質そして地表付近での重力加速度の差などのクレータ形成に関係する要因を考慮する必要がある。また地球の重力による散乱で、月への衝突率が変わるなど、地球-月システムとしての効果もある。しかしながらここでは簡単のために、このような要因を無視して、第一近似として単位面積当りのクレータ形成率には月と地球で差がないと仮定する。そうすると衝突数の差は標的の領域の表面積の差となる。

Fig. 2 は、ほぼ月の海の領域、面積 $6 \times 10^6 \text{ km}^2$ の領域に形成されたクレータに基づいている。一方地球の表面積は上記の面積の 80 倍 ($5 \times 10^8 \text{ km}^2$) である。よって地球上につくられるクレータの数は月の海のクレータの 80 倍であると考えられる。(1) 式から、80 倍クレータ数が多いと、期待される最大サイズは $80^{1/2}=9$ 倍程度になる。衝突頻度が高いときの、月の海における最大のクレータサイズは 100 km 程度である。以上のことより、衝突頻度が高い時期に地球上に形成された最大クレータの大きさは、直径 1000 km 程度だったとしても不思議ではないことになる。

こうした見積もりにはいくつかの問題点が指摘される。その最も重大なものは、このような大きさのクレータの存在が確認されていないことである。ただし未確認の一つの理由として、海洋に衝突した可能性が大きいことが挙げられる。大陸の成長を考慮すると、今議論している時代での平均的な大陸と海洋の面積比は 2:8 程度であろう。よって全部で 10 回の衝突を考えたとしても、大陸に衝突する期待値は 2 回程度である。古い時代の痕跡が読みづらくなっていると考えれば、陸上でまだ確認されていないのも不思議ではない。一方海洋への衝突の記録は、プレート運動によって消えているものと考えられる。また地球上で直径 300 km 程度のクレータが最近になって発見された [SHARPTON *et al.* (1993)] ことを考慮すれば、我々の地球上のクレータに対する知識はまだまだかなり不完全なものであると推定される。

以上のようにいくつかの不確定要素を含むが、これ以降、数億年間隔で直径 1000 km のクレータが出来たとして話を進めることにする。少なくとも天体衝突により地球変動を引き起こす必要があるという前提に立てば、かなり大きなクレータ形成が必要だからである。このサイズのクレータに対応した衝突天体の直径は、衝突実験などによる衝突物体とそれによるクレータの直径比がおおよそ 1:20 という結果 [MELOSH (1989)] を当てはめれば、50 km 程度と見積もられる。

この程度の規模になると、衝突エネルギーも相当な量にはなるが、それでもマントル対流全体のパターンを直接的に変化させるにはまだ不十分であると考えられる。よって限られた領域のマントルを刺激して、最終的に全マントルの対流パターンを変化させる機構でなければならない。逆にいえば、マントル対流の中で比較的狭い領域が重要な役割を果たしている部分があり、それを刺激することができれば、引き金となり得ると考えられる。

私は、2 種類の領域がこうした特異領域の候補となると考える。その一つは、沈み込むプレートがマントルの 670 km 不連続層付近に停滞した後、再度雪崩のように下降を始める場所である。もう一つは、スーパープルーム [LARSON (1991)] と呼ばれる巨大上昇プルームである。以下この 2 種類の領域について、その特徴とともに、いかにして天体衝突がこうした領域を発生させるかについて、簡単に説明する。

最近の高圧実験に基づいた考察 [RINGWOOD and IRIFUNE (1988)] や、計算機シミュレーションによるマントル対流の研究 [HONDA *et al.* (1993), WEINSTEIN (1993)] は、マントル遷移層におけるマントル構成鉱物の相転移の様子がマントル対流に大きな影響を及ぼすことを示している。特にスピネルからポストスピネルへの相転移は、冷たいプレートが 670 km 不連続層を突破して下降することを妨げている。そのため沈み込んだプレートは不連続層付近で停滞し蓄積し、周りのマントルに比べて低温で巨大な岩体、megolith [RINGWOOD (1982)]、を形成する。こうした状態のプレート物質が、670 km 不連続層付近に大量に存在することは、マントルの地震波トモグラフィーによって示されている [FUKAO *et al.* (1994)]。

もしこうした蓄積領域の真上付近に大衝突が起これば、その際に発生した衝撃波は、蓄積したプレート物質の相転移に大きな影響を及ぼす可能性がある。そしてプレート物質の急激な沈降をうながす可能性がある。

発生した衝撃波の特徴はおおよそ以下のように見積もられる。衝撃波の継続時間は、衝突した天体の直径を De 、衝突速度を v として、 $De/2v$ のオーダーである

[MELOSH (1989)]。 $De=50$ km で、衝突速度を 20 km/sec 程度とすれば、衝撃波の継続時間は数秒程度と予想される。一方衝撃波の実験によれば、同様の衝突により、遷移層付近では数 GPa の圧力変化を生じる [AHRENS and O'KEEFE (1977)]。また圧力変化だけではなく、衝撃波の通過に際して、大きな温度上昇も予想される。数 GPa という衝撃波の圧力により、マントル物質は 100–200 度の温度上昇が予想される [AHRENS *et al.* (1982)]。

一旦急激な下降が始まると、マントル全体が激しい対流状態になり、地表では速いプレート運動を引き起こすことになる。こうした現象はマントル対流の数値シミュレーションでも確認されている [HONDA *et al.* (1993), WEINSTEIN (1993)]。蓄積層は大陸プレートの下にあり、その下降によって引き起こされたマントル対流は、散らばっていた大陸を合体させる方向に向かわせる [MARUYAMA (1994)]。この衝突・合体に伴い、多くの岩体が形成されたと考えられる。ただし上でも述べたように大陸付近で衝突が発生した場合は少ないと考えられるので、実際にはこの機構が働いた例はすくなくとも知れない。

天体の衝突、つまり引き金が引かれてから、大陸の衝突が起こり造山活動が始まるまでにある程度の時間差が必要である。それが 1 億年程度の時間と考えれば、クレータ形成のピークと岩石の年代のピークとの時間差を説明することができる。

一方上で述べた大規模下降流の発生とは逆に、マントル内に大規模上昇流が発生する可能性もある。第二の可能性は、こうしたスーパープルームが隕石の衝突により引き起こされることである。

天体の衝突によりクレータが形成された場合、クレータの底部では衝突のエネルギーにより岩石の溶融が起こる。衝撃波の通過により高温になることで岩石が溶融するだけではない。クレータ形成により地表付近の岩石が取り除かれることによる脱圧により、マントルが溶融する。

クレータの直径と深さの比は、直径が 15 km より小さなクレータでは 5:1 程度である。現在月などでみられる大きなクレータの場合、その比はもっと小さくなっている。しかしながら、大クレータで見かけ上浅くなっているのは、形成後下部の物質が盛り上がってきたことなどによると考えられる。つまり大きなクレータでもその形成時は、小さなクレータと同様のスケーリングに従う可能性がある。

よって今考えているような規模のクレータでは、できた時点での深さが少なくとも 100 km を越えると予想される。すなわち、直径数百 km の範囲にわたって厚さ

100 km 以上の岩石が地表から取り除かれることになる。その結果数 GPa 程度の脱圧が起こることになる。この急激な脱圧により、マントル物質の融点が下がる。その結果、最上部マントルを中心に岩石の大規模な溶融が発生する。この融けたマントルは地表に押し出されるとともに、それに連れてより下部のマントル部分の脱圧や、上昇を促すと期待される。そして最終的にコア・マントル境界から地表まで貫くスーパープリュームに進化する可能性がある。一旦こうした上昇流が発生すれば、それは反流としての大規模下降流を伴うはずである。そして第一のシナリオと同様に、マントル対流を加速し、大陸の衝突・合体を促すことになる。

§4. 結 論

本報告内で紹介した各種のデータは、天体衝突が地球の大変動の引き金となることに関して、調和的なものである。地球史に見られる間欠的な大変動の発生の様子をまとめると以下ようになる。太陽系の形成以来、地球に4億年程度の間隔のリズムをもって天体衝突が激しくなった時期があり、その最盛期には直径1000 km にもおよぶようなクレータが形成された。こうしたクレータ形成に伴い、マントル内で急激な下降流もしくは上昇流の場が発生し、マントル対流のパターン変化や加速を促し、大規模な造山運動を引き起こした。

もちろんこのようなシナリオを論じる前に、検討しなければならない事項も多い。その最大のものは、月のクレータの年代決定の精度である。ここで利用したBALDWIN (1985) による月のクレータの年代決定は、クレータ年代学に基づいており、年代の決定精度は非常に悪い可能性がある。しかしながら現時点ではまだ有効な検証手段が無い。何らかの方法でこうしたデータの精度を確かめる必要がある。一方の地球のデータ、すなわち岩石のデータも、全地球規模の変動を論じるために必要なサンプリングという観点からはまだ不十分である。ただしこちらは現在の年代測定技術の進歩や、研究面からの要請により、早急に解決されるものであることは間違いない。またここで挙げたようなシナリオを検証すべき様々な地球科学的研究や調査も今後一層進むであろう。

クレータ年代を筆頭として、このような様々なデータの集積により、本論文で述べたようなシナリオの妥当性が証明されれば、従来の地球観からもう一つ上のレベルから、地球の営みを理解することが出来るようになる。

謝 辞

研究をすすめるにあたり、長尾年恭、寅丸敦志両博士に有益な議論をしていただいたことを感謝します。

文 献

- AHRENS, T. J., G. LYZENGA and A. MITCHELL, 1982, Temperatures induced by shock waves in minerals; application to geophysics, in "High-pressure research in geophysics", ed. by S. AKIMOTO and M. MANGHNANI, Reidel, Dordrecht, 579-594.
- AHRENS, T. J. and J. D. O'KEEFE, 1977, Equations of state and impact-induced shock-wave attenuation on the moon, in "Impact and explosion cratering", ed. by D. J. RODDY, R. O. PEPIN and R. B. MERRILL, Pergamon Press, New York, 639-656.
- BALDWIN, R. B., 1985, Relative and absolute ages of the individual craters and the rate of infalls on the Moon in the post-Imbrium period, *Icarus*, **61**, 63-91.
- CONDIE, K. C., 1989, Plate tectonics and crustal evolution, Pergamon Press, New York, 476 pp.
- FUKAO, Y., S. MARUYAMA, M. OBAYASHI and H. INOUE, 1994, Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography, *J. Geol. Soc. Japan*, **100**, 4-23.
- GASTIL G., 1960, The distribution of mineral dates in time and space, *Am. J. Sci.*, **258**, 1-35.
- GLIKSON, A. Y., 1993, Asteroids and early Precambrian crustal evolution, *Earth Sci. Rev.*, **35**, 285-319.
- GREEN, D. H., 1972, Archean greenstone belts may include equivalents of lunar mare? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **15**, 263-270.
- GRIEVE, R. A. F., 1980, Impact bombardment and its role in proto-continental growth on the early earth, *Precambrian Res.*, **10**, 217-247.
- GRIEVE, R. A. F., 1991, Terrestrial impacts: The record in the rock, *Meteoritics*, **26**, 175-194.
- HONDA, S., D. A. YUEN, S. BALACHANDAR and D. REUTELER, 1993, Three-dimensional instabilities of mantle convection with multiple phase transformations, *Science*, **259**, 1308-1311.
- LARSON, R. L., 1991, Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume, *Geology*, **19**, 547-550.
- MARUYAMA, S., 1994, Plume Tectonics, *J. Geol. Soc. Japan*, **100**, 24-49.
- MELOSH, H. J., 1989, Impact cratering, Oxford Univ. Press, New York, 245 pp.
- RINGWOOD, A. E., 1982, Phase transformations and differentiation in subducted lithosphere; implications for mantle dynamics, basalt petrogenesis, and crustal evolution, *J. Geol.*, **90**, 611-643.
- RINGWOOD, A. E. and T. IRIFUNE, 1988, Nature of the 650 km discontinuity; implications for mantle dynamics, *Nature*, **331**, 131-136.
- SHARPTON, V. L., K. BURKE, A. CAMARGO-ZANAGUERA, S. A. HALL, S. D. LEE, L. E. MARIN, G. SUAREZ-REYNOSO, J. M. QUEZADA-MUNETON, P. D. SPUDIS and J. FUCUGAUCHI, 1993, Chicxulub multiring impact basin: size and other characteristics derived from

- gravity analysis, *Science*, **261**, 1564–1567.
- STOTHERS, R. B., 1992, Impacts and tectonism in Earth and Moon history of the past 3800 million years, *Earth Moon Planets*, **59**, 145–152.
- WEINSTEIN, S. A., 1993, Catastrophic overturn of the Earth's mantle driven by multiple phase changes and internal heat generation, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 101–104.