

The Role of Comets/Asteroids for the Early Earth Chemistry

Taiki Suzuki

Astrobiology Center,

2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588, JAPAN

E-mail: taiki.suzuki@nao.ac.jp

(Received: August, 1, 2019 Accepted: October, 1, 2019)

Abstract

There was huge progress in the studies of interstellar chemistry both in the formation processes of molecules and the survey observations of them. In the meteorites, detections of complex organic molecules including amino acids and nucleus basis suggest the possibility of their incorporation into the first chemical evolution toward the first life on the primordial Earth.

Such molecules would have delivered to the early Earth by the interstellar dust particles, comets, and asteroids. The previous simulations of the cometary bombardment suggested that some kinds of amino acids may survive the high-temperature environment and are supplied to the early Earth without the thermal pyrolysis (Pierazzo & Chyba 1999)^[1]. Based on these results, Ehrenfreund (2002)^[2] estimated that the amount of organic molecules delivered from the Universe to the early Earth was 1000 times higher than those produced by the terrestrial formation mechanisms such as the lightning if 10% of organic molecules survive during the impacts.

Therefore the surviving rate of molecules after the comets/asteroids bombardment is a key to connect the chemistry in the Universe and on the early Earth. Many works are left in this research. For example, in the previous simulations, the effect of the impact obliqueness was considered using the results of other works. This computation method is not good enough, and the surviving rate of molecules should be re-investigated with the latest simulations. Besides, even if organic molecules are decomposed during the impact, new important organic molecules might have been built after cooling of the materials. The outgassing process from the comets/asteroids is also intriguing since the terrestrial energy sources would synthesize the organic molecules if CH₄ or CO were supplied from the impact body to the ancient atmosphere. The understanding of the comets/asteroids bombardment would be a key to reveal the first chemical evolution of materials toward the first life.

Key words: organic molecules, chemical evolution, comets, asteroids

隕石/彗星がもたらした初期地球化学進化への影響

鈴木大輝

アストロバイオロジーセンター

taiki.suzuki@nao.ac.jp

宇宙の化学進化と隕石で検出される生命関連分子

当記事では生命起源における隕石/彗星衝突と分子生存の研究の重要性を俯瞰する。近年、星形成領域の化学進化の理解は大きく進んだ。次の世代の星の誕生現場とされる暗黒星雲の中では気相中、あるいは塵の上で化学反応が進む。10 K程度の極めて低温暗黒星雲の段階でも反応障壁の低い発熱反応が進行する。その後、星が誕生して周囲の塵の温度が数十Kまで上昇すれば、ラジカル熱運動でさらに複雑な分子が生成されてゆく。電波望遠鏡を用いることで、実際に暗黒星雲や星形成領域に存在する有機分子を探索することができる。アンモニア (NH₃) やメタノール (CH₃OH) のような単純な分子は古くから検出されていたが、近年の高精度な電波観測の研究によりさらに複雑な分子が存在することが判明した。例えばプロペナル(CH₂CHCHO)、プロパナル(CH₃CH₂CHO)のようなアルデヒド類や、糖類の仲間であるグリコールアルデヒド(CH₂OHCHO)、さらにキラリティを持つプロピレンオキサイド (CH₃CHCH₂O) が検出されている(Hollis et al. 2004a; Hollis et al. 2004b; McGuire et al. 2016)^{[3][4][5]}。

彗星や隕石で検出される有機分子はこのような化学進化の名残と考えられている。ロゼッタミッションでは67P彗星から揮発した成分を分析し、最も簡単な構造のアミノ酸であるグリシンが検出された (Altwegg et al. 2016)^[6]。精密な測定が可能な隕石の成分解析では70種類以上のアミノ酸に加えグアニン、ウラシルなどの一部の核酸塩基、さらに糖類も検出されている(Pierazzo et al. 2016; Pearce et al. 2015など)^{[7][8]}。太陽系を育んだ分子雲の中で多様な生命関連分子が生成されれば、このような天体により初期地球にもたらされた可能性がある。

初期地球の物質運搬の重要性

原始太陽系で生成された分子は Interstellar Dust

Particles (IDPs)とよばれる微小な塵や隕石/彗星により初期の地球に運搬されたと考えられる。小さな隕石/彗星も大気摩擦により減速されて地上に飛来し、分子の供給源となったであろう。半径が 100 m を超えるより大きな隕石/彗星は物質の運搬量が多いため、その重要性が期待される。一方でこのような大きな天体は大気摩擦による減速が効かず、衝突時には断熱圧縮的に内部が数千から数万 K まで過熱されることから、Anders (1989)^[9]はむしろ IDP による運搬の重要性を強調した。しかしその後のシミュレーションにより、巨大彗星や隕石による運搬の可能性も見直された。Blank & Miller (1997)^[10] は彗星衝突時に圧力が非常に高くなることで分子の分解速度が抑制される効果を指摘した。Pierazzo & Chyba (1999)^[11] は海洋に彗星が衝突した際に斜めに衝突する効果を加味し、一部のアミノ酸が生存すると主張した。

このような結果を踏まえ、Ehrenfreund (2002)^[2]は紫外線や放電といった初期地球のエネルギー源による有機分子生成量と IDP や隕石/彗星による宇宙から持ち込み量 (kg year^{-1}) を比較し、仮に隕石/彗星の運搬で 10% の有機分子が生存するとすれば、宇宙からの持ち込み量は初期地球での生成量よりもおよそ 1000 倍優位であると主張した。ただし、この推定は依然大きな不定性を伴うことに注意が必要である。例えば Pierazzo & Chyba (1999)^[11] は当時の計算機精度の限界のためか、入射角の効果を定性的に補正するといった現代からすれば不十分な方法を用いている。星間化学の知見を初期地球の化学進化に結び付けるためにも、現代の計算機でシミュレーション結果を再度検証し、宇宙からの物質運搬の寄与をより正確に示すことが求められる。

その他の関連研究

同時に隕石/彗星衝突時に副次的にもたらされる化学進化の研究も重要である。仮に有機分子が衝突時の熱で分解されてしまったとしても、冷却後に再結合して複雑な有機分子が再生成する可能性がある (Martins et al. 2013)^[11]。また、衝突した隕石/彗星により初期地球にもたらされる気体成分の研究も期待される。初期地球の大気組成は地球内部からの脱ガスにより形成されたとすれば CO_2 であったと考えられてきたが (Trail et al. 2009 など)^[12]、脱ガスだけでは現在の地球の Kr の量が説明できないといった問題点もあり、隕石/彗星衝突時に内部から生じたガスが初期地球の大気組成に影響を与えた可能性が指摘されている (Holland et al. 2009)^[13]。この場合、衝突時の圧力やエントロピーの条件により CO や CH_4 がもたらされた可能性がある (Kuwahara & Sugita 2015)^[14]。 CO_2 が主成分の大気では地上での有機分子生成は困難であるが、 CH_4 を含む還元的大気ではミラーの実験で提唱されているように放電で多様な生体分子が生成可能である。 CO が豊富であれば高エネルギーな宇宙線を利用して様々な有機分子が生成される (Miyakawa et al. 2002)^[15]。こ

のように、星間空間で生成された分子はそのまま生き残るのか、あるいは熱分解されるとしても冷却されたのちにどのような有機分子、あるいはどのような気体が生成されるのかは、生命起源に至る有機分子の化学進化の初期条件を考える上で非常に興味のある問題である。宇宙から初期地球へ続く一連の流れを理解するためにも、今後の実験や理論計算による研究が期待される。

参考文献

1. Pierazzo, E., & Chyba, C. F. 1999, *Meteoritics & Planetary Science* 34, 909-918
2. Ehrenfreund 2002, *Reports on Progress in Physics*, 65, 1427-1487
3. Hollis, J. M., et al. 2004a, *Astrophysical Journal*, 610, L21-24
4. Hollis, J. M., et al. 2004b, *Astrophysical Journal*, 613, L45
5. McGuire, B. A., et al. 2016, *Science*, 352, 1449-1452
6. Altwegg, K., et al. 2016, *Science Advances*, 2, id=e1600285
7. Pierazzo, S., et al. 2006, *Meteorites and the Early Solar System II*, D. S. Lauretta and H. Y. McSween Jr. (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 943 pp., p.625-651
8. Pearce, B. K. D., & Pudritz, R. R. 2015, *Astrophysical Journal*, 807, 85-95
9. Anders, E. 1989, *Nature*, 342, 255-257
10. Blank, J. G., & Miller, G. H. 1997, 21st international Symposium on Shock Waves, Issue 21, 1205-1210
11. Martines, Z., et al. 2013, *Nature geoscience*, 6, 1045-1049
12. Trail, D., et al. 2011, *Nature*, 480, 79-82
13. Holland, G., et al. 2009, *Science* 326, 1522-1526
14. Kuwahara, H. & Sugita, S. 2015, *Icarus*, 257, 290-301
15. Miyakawa, S., et al. 2002, *PNAS*, 99, 14628-14638