

初期地球における局所還元環境とアミノ酸生成の可能性

古川善博

東北大学大学院理学研究科地球惑星物質科学科

宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3, 980-8578

Fax: 022-795-6660

E-mail: furukwa@ganko.tohoku.ac.jp

(Received July 31, 2007 Accepted September 5, 2007)

Abstract

Sources of prebiotic amino acids on the early Earth can be classified into those having extraterrestrial origin and those that have formed on Earth. The extraterrestrial origin via carbonaceous chondrites is widely accepted as a major source of prebiotic amino acids, because many of these carbonaceous chondrites actually contain amino acids. Besides this, formation of prebiotic amino acids on the early Earth can also be another possible source. Although the atmosphere of the early Earth was thought to be only slightly oxidative, wherein amino acids could hardly be synthesized, some recent experimental and theoretical studies have suggested the existence of locally and transitionally reducing atmospheres that are generated by the impact of ordinary chondrites onto the early oceans. Such a reducing environment has the possibility to generate prebiotic organic materials.

Keywords: amino acids, prebiotic synthesis, carbonaceous chondrite, post-impact plume

1. はじめに

アミノ酸は、生命誕生前の地球(初期地球)において、化学進化のための重要な物質として注目され、初期地球の環境を模擬した数多くの合成研究が行われてきた。S. L. Millerによる還元的大気を模擬した放電によるアミノ酸合成実験の成功を初めとする多くの研究により、メタンやアンモニアのような還元的な炭素源と窒素源を用いれば、放電、熱、あるいは紫外線などの様々なエネルギーによりアミノ酸の合成は可能であることが明らかになった[1, 2]。またこれと同時に、二酸化炭素と窒素を含む弱酸化的気体を原料とするアミノ酸の合成実験も試みられたが、その成功例は陽子線をエネルギー源とした報告に限られている[3]。このことは、初期地球大気が弱酸化的であった場合にはアミノ酸の生成は非常に困難であったことを示している。このように初期地球においてアミノ酸が生成したかどうかは、当時の地球の大気の性質に大きく依存するので、このことを十分に考慮しなければならない。

地球は約 46 億年前に微惑星の集積により形成された。激しい集積により地球は一旦熔融し、核、マントル、および地殻という層構造が形成され、その表層にはマグマの海(マグマオーシャン)が存在していたと考えられている[4]。この当時の地球は、岩石が熔融するほどの高温であったため、アミノ酸、カルボン酸、あるいはヒドロキシ酸などのほとんどの有機分子は存在し得なかった。また地球の大気は、地球を

構成した微惑星に含まれる揮発性物質が脱ガスすることにより形成されたと推定されるが、マグマオーシャン後の地球からは軽いガスである水素が散逸しやすく、その後の大気は二酸化炭素と窒素を主成分とする弱酸化的な大気になったと考えられている[5]。したがって、この初期地球大気からはアミノ酸などの有機分子生成は非常に困難であったことになる。その後、地球表層は徐々に放熱し、やがて水蒸気が凝縮して海洋が形成された。オーストラリアのジャックヒルから発見された堆積岩に含まれるジルコンの酸素同位体比は、約 40 億年前には既に海洋が存在していたことを示唆している[6]。また、グリーンランドのイスア地域からは、海に溶岩が侵入して形成された 38 億年前の枕状溶岩が見つかる[7]。この時代には、アミノ酸などの生体を構成する有機分子が地球上に安定に存在し得る温度になっただろう。しかも、グリーンランドのイスア地域に産出する約 38 億年前の変堆積岩に含まれるグラファイトは生命の痕跡を示唆する軽い同位体比をもっている。これが、現在のところ最古の生命の痕跡と考えられているので、遅くとも 38 億年前には生命が誕生し、アミノ酸を含む化学進化もこの間に完了したはずである[8]。

2. 地球外アミノ酸の飛来

40-38 億年前の地球には現在と比べてはるかに多量の隕石が地表に降り注いでいたと考えられている[9]。また、オーストラリアで発見された炭素質隕石である Murchison 隕石からは多種のアミノ酸が検出され、しかもその光学異性体のうち僅かではあるが L 体が過剰に含まれることが明らかになった[10]。このことから、アミノ酸は初期地球で合成されたのではなく、隕石や彗星とともに地球に飛来したという説が現れた[10]。その後も多くの炭素質隕石からタンパク質構成アミノ酸のうち半数程度の種類が見つかる[11]。これらの研究により、炭素質隕石からアミノ酸の供給があったという考えは現在では広く受け入れられている。しかし、これらのアミノ酸が初期地球に衝突した際にどの程度分解されずに残るのかという問題は未だ議論の余地が残されている[12, 13]。

一方、隕石以外の地球外から飛来する物質である彗星は、メタンやアンモニアを含む氷から形成されていると考えられている。しかも彗星を模擬した物質に紫外線を照射することにより、アミノ酸やその他の有機分子が生成することが実験的に明らかになった[14]。このことから、彗星も地球への有機物供給源の候補として考えられている。しかしながら、マグマオーシャン後に地球に多くの彗星が落下したとい

う証拠はまだ見つかってはいない。

炭素質隕石中にアミノ酸が存在することと、彗星の模擬実験によりアミノ酸が生成するという事実から、20種類のタンパク質構成アミノ酸のうち少なくとも半数程度は炭素質隕石や彗星から初期地球上にもたらされた可能性がある[11]。しかし同時に、それ以外を起源とするアミノ酸、すなわち地球上で生成したアミノ酸が存在した可能性も否定できない。

3. 衝突蒸気雲の役割

これまで、初期地球の大気は弱酸化的でそれらを模擬した実験ではアミノ酸の生成は困難であることから、初期地球のアミノ酸が地球由来である可能性は低いと考えられてきた。しかし一方で、当時の平均的な地球大気の組成からのアミノ酸合成は確かに困難ではあるが、局所的であれば還元的な環境が存在していた可能性もある。そのような場を形成する現象として隕石の海洋衝突により形成される衝突蒸気雲が注目されている[15, 16, 20]。衝突蒸気雲とは隕石が海面や地表に衝突して生じる隕石と地球物質の蒸発物、溶融物、および破砕物からなる雲であり、その中では様々な反応が期待される。地球で発見される隕石の80%以上は金属鉄を~20%程度含む普通隕石である[17, 18]。鉄は酸化されやすい物質であるため、この種の隕石が地球へ飛来する際に海水や弱酸化的な地球大気を還元し、蒸気雲内に局所還元的な環境をつくり出した可能性がある。実際に、鉄と水を含む試料に1 km/s程度の衝突で発生する衝撃を与えると水が超臨界流体となり一瞬で鉄を酸化してしまうことが実験で示されている[19]。また、鉄と水に加えて当時の地球大気を構成する窒素を含む試料における衝突実験の場合は、アミノ酸生成に不可欠なアンモニアが生成することも確認された[20]。一方、有機物の炭素源としては隕石に含まれるグラファイトなどの無機炭素や大気中の二酸化炭素などが候補である。この環境を模擬した実験で有機分子が生成したという報告はまだないが、衝突蒸気雲はアミノ酸などの有機分子が生成した環境として、非常に期待される。

このように、前生物的な有機分子はそのすべてが地球外からもたらされたのではなく、地球上の局所的な還元的環境で生成した可能性がある。しかも、隕石の海洋衝突を模擬した前述した実験では粘土鉱物の生成も示唆された[19]。粘土鉱物は有機物の吸着性やアミノ酸のペプチド化に優れていることから[21]、隕石の海洋衝突という現象は有機分子とその化学進化を促進する触媒である鉱物を同時に生成し化学進化に大いに寄与した可能性がある。

謝辞

本稿を書くにあたり、ご助言頂いた中沢弘基博士（物質材料研究機構）、日頃から議論して頂いている掛川武準教授（東北大）、関根利守博士（物質材料研究機構）には深く感謝致します。査読者の川村邦男博士（大阪府立大）に感謝致します。

引用文献

1. Miller, S. L. and Urey, H. C. Organic Compound Synthesis on the Primitive Earth, *science* 130, 245-251

(1959).
 2. 化学進化, 原田馨, 69-89, 共立出版 (1969).
 3. Kobayashi, K., Tsuchiya, M., Oshima, T. and Yanagawa, H. Abiotic synthesis of amino acids and imidazole by proton irradiation of simulated primitive earth atmosphere. *Origins of Life and Evol. Biosphere* 20, 99-109 (1990).
 4. Zahnle K., Kasting J. F. and Pollack J. B. Evolution of a steam atmosphere during Earth's accretion. *Icarus* 74, 62-97 (1988).
 5. Kasting, J. F. Bolide impacts and the oxidation of carbon in the Earth's early atmosphere, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 20, 199-231(1989).
 6. Wilde, S.A., Valley, J.W. Peck, W.H. and Graham, C.M. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago, *Nature* 409, 175-178 (2001).
 7. Nutman, A.P., McGregor, V.R, Friend, C.R.L., Bennett, V.C., and Kinny, P.D. The Itsaq gneiss complex of southern West Greenland; the world's most extensive record of early crustal evolution (3900-3600 Ma). *Precambrian Reserch* 78, 1-39 (1996).
 8. Rosing, M.T. C-13-depleted carbon microparticles in >3700-Ma sea-floor sedimentary rocks from west Greenland. *Science* 283, 674-676 (1999).
 9. Valley, J.W., Peck, W.H., King, E.M. and Wilde, S.A. A cool early Earth, *Geology* 30, 351-354 (2002).
 10. Pizzarello S. and Cronin J. R. Non racemic amino acids in the Murchison and Murray meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, 329-338 (2000).
 11. Botta, O., Glavin, D. P., Kminek, G. and Bada, J. L. Relative amino acid concentrations as a signature for parent body processes of carbonaceous chondrites. *Origins of Life and Evol. Biosphere* 32, 143-163 (2002).
 12. Basiuk, V.A. and Navarro-Gonzalez, R. Pyrolytic behavior of amino acids and nucleic acid bases: Implications for their survival during extraterrestrial delivery, *Icarus* 134, 269-278 (1998).
 13. Peterson, E., Horz, F. and Chang, S. Modification of amino acids at shock pressure of 3.5 to 32 GPa. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 3937-3950 (1997).
 14. Muñoz Garo, G. M., Meierhenrich, U. J., Schutte, W. A., Barbier, B., Arcones Segovia, A., Rosenbauer, H., Thiemann, W. H.-P., Brack, A. and Greenberg, J. M. Amino acids from ultraviolet irradiation of interstellar ice analogues. *Nature* 416, 403-406 (2002).
 15. 中沢弘基, 生命の起源地球が書いたシナリオ, 113-160, 新日本出版社 (2006).
 16. Sekine, Y., Sugita, S., Kadono, T. and Matui, T. Methane production by large iron meteorite impacts on early Earth, *J. Geophys. Res.* 108, 6,1-6,11, (2003).
 17. Wasson, J.T. and Kallemeyn, G.W. Compositions of chondrites, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* A325, 535-544 (1988).
 18. Norton, O.R. Summary of meteorites by classification, in *The Cambridge Encyclopedia of Meteorite*, Norton, O.R. Eds. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2002), pp. 331-430.
 19. Furukawa, Y., Nakazawa, H., Sekine, T. and Kakegawa T. Formation of ultrafine particles from impact-generated supercritical water. *Earth and Planet. Science Lett.* 238, 543-549 (2007).
 20. Nakazawa, H., Sekine, T., Kakegawa, T. and Nakazawa, S. High yield shock synthesis of ammonia from iron, water and nitrogen available on the Earth, *Earth and Planet. Science Lett.* 235, 356-360 (2005).

Viva Origino 35 (2007) 98 - 100

21. Ferris, J. P., Hill, A. J., Liu, R. and Orgel, L. Synthesis of long prebiotic oligomers on mineral surfaces, Nature 381, 59-61 (1996).