谷川清隆 訳

Comets and the Origin and Evolution of life (eds. P.J. Thomas, C.F. Chyba, C.P. McKay), Springer, Berlin, 1996

彗星上の生命
Life in comets

C. P. McKay

要約

初期の地球の地質学記録の中に生命の証拠がある. これは生命の進化が速かったか, 生命が外部からもたらされたか, を意味する. 外から来たとすれば, 彗星が生命の運搬役として考えられる. 放射性元素による熱によって液体の水が中心核にたまれば, 彗星で生命が誕生し得る. 生命が太陽系外の星間有機分子から生じ, 未知の機構で太陽系に運ばれたなら, 彗星は運び屋としても貯蔵庫としても理想的である. そこで, 彗星がこの役割を果たしたとすれば, 彗星には地球上の生命と同じ生命があるはずであるし, 彗星から生じた惑星間空間の塵にもあるはずである. ハレー彗星探査機で彗星物質の有機分析がすこし行なわれたが, アミノ酸は検出されなかった. 遠くからのスペクトル解析では, このような目的にはまったく不十分である.

11.1 序 (地球上の生命の出現)

生命は地球が出来上がってすぐ現れる. 35 億年前にはすでに光合成を行なう微生物の community のはっきりした証拠がある (Schopf 1993). もっと遡って, 38 億年前には光合成を示唆するデータがある. この証拠は沈殿有機物質の形を取っており, 炭素の同位体ははっきりと生物からのもの (biogenic) である兆候を示す (Schidlowski, 1988). 40 億年から 35 億年の間の証拠が見つからないのは, 沈殿物からなる岩が見つからないからである. 地球上の環境が生命に都合がわるいはずなのに生命が生じたことは不思議である. というのは 38 億年前までは, まだ地球に小天体が衝突していたからである (降着期). 大衝突で高温になっている (Maher and Stevenson, 1988; Sleep et al., 1989). 超巨大衝突が起これば, 有機分子も破壊されてしまう. 図 11.1 には初期の地球史を載せた.

彗星は 2 通りの仕方で生命の起源と関係し得る. まず彗星は生命の出現以前に生命に都合のよい環境を作るのに貢献したかもしれない. 彗星が降着することによって, 生命に必要な水, 一酸化炭素, 窒素やそのほかの compounds が用意され得る (Chyba, 1987; Delsemme, 1992). 加えて, 彗星により, 生命に都合のよい材料有機物質が用意された可能性がある (Oró, 1961; Clark, 1988; Kueger and Kissel, 1989). 第二の関係はもっと直接的である. 生命は彗星によって地球に運ばれたという説がある (Hoyle and Wickramshinghe, 1979; Wallis et al., 1992). この説は地質学的に短い時間の間に地球上で生命を発生される必要を回避し, かわりに生命が彗星上で発生したか, ほかの場所 (おそらく太陽系外) で生じた生命を彗星が運んだとする (Hoyle and Wickramshinghe, 1981).

図 11.1

この章では彗星が生命を有する可能性について論じる. この説の本質は地球上の生命が彗星から来たとするところにあるから, 彗星の生命について考えるときには地球上の生命の性質を使うのが論理的である. 地球上の生命の最大の特徴は液体の水を必要とする点である. 液体の水は地球上の生命の環境として必須の条件である (Kushner, 1981). また生命の起源にも必須である (Davies and McKay, 1995). 純粋の氷の中で生き続けたり, 代謝 (metabolic) エネルギーを使って氷から水を抜き出す生物は知られていない (Kushner, 1981, p.242). 雪や氷河の中で繁殖する生物は存在するが, これらは液体の水がある程度存在するときのみに繁殖する (たとえば, Hoham, 1975; Hoham et al., 1983; Wharton et al., 1985 参照). これらの生物は液体の水の passive recipients である.

11.2 彗星上での生命の誕生

いまのところ地球上の生命のみが研究の対象として手にはいる生命である. 他の惑星上では見つかっていないし, 実験室でも作れない. だから生命の起源の問題は地球上の生命の起源の問題を中心としている. Davies and McKay(1995) は地球上の生命起源論を広く概観した. 生命の起源論の相関図を図 11.2 に示した. Davies and McKay(1995) の結論によれば, すべての生命起源論は液体の水を要請している.

標準理論とも呼ばれるべき生命起源論は生命が地球上で誕生したとし, 今日の生命と似た有機物質を成分として出発したとする. また最初の生命は heterotrophic であり, すでに存在する有機物質を消費してエネルギーを得るとする. 生命以前の有機物質は地球上で Miller-Urey 反応 (Miller,1992) で生じるか, 隕石, 塵粒子や彗星によって地球にもたらされる (たとえば Anders, 1989; Chyba et al., 1990 を見よ).

図 11.2

しかしこれに代わる理論も存在する. その理論はエネルギー源として生命以前の有機物質を必要としない (図 11.2 参照). また最初の生物が非有機体からなるという説もある. 最後に, 地球自身の上での生命の誕生を要請せずに, どこからか運ばれて来たとする説もある. この場合, 地球上での生命の誕生 (図 11.2 で「地球における生命の誕生」分枝) に関する示唆の範囲はどこで生命が誕生しようと適用可能である. 彗星は誕生地の候補である. だから彗星上での生命の起源の可能性を考えるにあたって, 地球上での生命の起源に関して提案されている考えはすべて参考になる.

生命が彗星上で誕生したのなら, 発生地は彗星形成直後の深部であろう. 多くの著者 (Irvine et al., 1981; Wallis, 1981; Prialnik et al., 1987; Podolak and Prialnik, この本) によれば, 短寿命の放射性元素, とくに ^{26}Al, の放出する熱によって, 大きな彗星は地質学的な長さの時間にわたって液体の水からなる中心核を保持し得る. 最新の評価はこの本の Podolak and Prialnik の部分にまとめられている. かれらの結論によると, 液体水の核を持ちはしないが, 不確定性は大きい. この警告を心に留めておこう.

生命の彗星起源に関するいままでの議論 (Bar-Nun et al., 1981; Marcus and Olsen, 1991) は標準理論 (有機物質を消費する heterotrophs の有機起源) に焦点を当てた. Bar-Nun et al.(1981) は彗星上で生命誕生にいたる有機物の複雑化に関する反対意見を述べた. 大気がないし, 水が

とびとびにあるし, 表面が硬いので, 彗星の表面は生命起源にとってはふさわしくないとした. 低温であるし, 近日点通過のたびに表面が削り取られるので, 複雑な有機分子の形成に不利である. 放射能による液体中心核での生命の起源に関しては, Bar-Nun et al.(1981) は放射能がどんな生物をも破壊し, また生物を繁殖不可能にすると述べている. 広範囲にわたる Marcus and Olsen(1991) の論文では, 彗星上の生命の可能性を論じた. 生命起源の標準理論を非常にうまくまとめた. その際, 生命の RNA フェーズの概念を含めることにより理論を更新した. かれらは生命の彗星起源が可能かどうかは判断しなかった.

生命起源のその他の理論に移ろう. 光合成する有機器官としての生命の起源説は, Bar-Nun et al.(1981) が述べたように彗星表面の苛酷な条件に直面する. 表面は太陽の放射を受ける唯一の場所であるから, この説は, 彗星上での生命起源を好まない. 代わりに, 化学エネルギーを利用する化学合成系として生命が発生したのなら, 彗星の表面である必要はない. 液体中心核があれば都合よい. そのエネルギー源は? エネルギー源として可能なのは, 火星の表面直下でおこると示唆されている反応である. たとえば, $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2\ H_2O$(Boston et al., 1992). 生命起源の黄鉄鉱 (pyrite) モデル (Wächtershäuser, 1992) は CO_2 から biomass を作るのに必要なエネルギー源として反応 FeS+ $H_2S \rightarrow FeS_2$+H_2O を考える. ここで注意しておくが, 深海の hydrothermal vents においては化学合成は生命の起源にふさわしくない. これは彗星であろうとほかの場所であろうと同じである. なぜなら, この反応は表面での植物による光合成から得られた O_2 を使っての H_2S の酸化だからである.

生命が彗星に起源を持つなら, 生命は複数の彗星で何度も生命が発生した可能性がある. この場合, 各彗星上の生命体の性質はかなり違ったものに成り得る. たとえば, L-アミノ酸の代わりに D-アミノ酸を使ったり, 少し異なる genetic sequence を使ったり. 地球上の生命の系統発生の研究によれば, 地球上にはただひとつの型しかない (Woese, 1987). 地球上の生命形態 (lifeform) はすべて関係しており, このことは共通の祖先を持つことを意味する. これはただひとつの彗星上で生命が発生したことと適合的であり, 複数の彗星上での生命起源と折り合いをつけるのは難しい.

11.3 生命の運び屋としての彗星

パンスペルミア理論は太陽系外で生命が誕生したとする説と適合的である. この場合, 原始太陽系星雲がおそらく休眠する胞子 (dormant vaible) が有機分子の星間粒子が混在していた. 生命体と有機物質のほとんどは太陽系の降着および形成にともなう加熱により分離した. しかし太陽系の最外縁で生き残った星間有機物質の証拠がある (Allamandola et al., 1987; Simonelli et al., 1989; Ott, 1993). ここでは温度は上がらない. 生命体はここでも生き延び, 彗星, 小惑星, 巨大惑星やその衛星となる物質に取り込まれた. 小惑星が高温を経験し, また水による変成を経た直接証拠がある (Shocj and Schule, 1990; Tingle et al., 1992). またこれらの天体中の生命体が破壊された可能性もある. 彗星の場合はこのような加熱の歴史がない.

パンスペルミア理論の最も不確かな点は, 宇宙の中を 10^8 年もの長きにわたって微生物が生き延びる能力があるかどうかである. この問題は最近復活した (Davies, 1988; Secker et al., 1994). 新しいデータが exposure 実験で得られた (Horneck et al., 1994). その結果によれば, このような長期間でもバクテリアが生き延びることは否定できない. また地球上で永久凍土中に -10° で

3 百万年閉じ込められて生き残った微生物が調べられたし (Gilichinsky et al., 1992), 温帯のこはくに 2 千 5 百万年閉じ込められたものが調べられた (Cano and Borucki, 1995). Melosh(1985, 1988) が示したとおり, 天体衝突によって微生物が舞上がって惑星の表面から太陽をまわる軌道に乗り得る. 太陽系を飛び出して行く可能性についてはまだ調べられていない. 生命が太陽系外で生じたなら, どの彗星にいる生命体も同一であるはずである.

表 11.1

注意すべきことは, 地球に到達する小惑星や彗星の破片に生命を見つけることが難しいことである. なぜなら, 地球上の生命体が地球外物体上の生命から進化したとすれば, 両者は似ているはずだからである. たとえば, 隕石からは, 地球上と同じく L-アミノ酸だけが見つかることが期待される. ただ, このようなサンプルは汚染されてわからなくなってしまうだろう (たとえば Engel et al., 1990 参照). さらに, Marcus and Olsen(1991) によれば, 以前に起きた天体衝突で地球の生命圏から地球外に巻き上げられた生命体で彗星もすでに汚染されているかもしれない. 細心の実験によってのみ, 火星や彗星や隕石などの地球外物質上の生命が地球上の生命と同一であることを決定できる.

ハレー彗星の元素組成 (氷の分を除いて) を典型的なバクテリアのものと比較したのが表 11.1 である. 主た biogenic 元素 C, H, N, および O が align していることは注目すべきである. しかし Kissel and Krueger(1987; また Marcus and Olsen, 1991 も参照) が指摘しているとおり, ハレー彗星の解析は塵の本体 (bulk of grains) を構成するバクテリアの biomass とは適合的でない. すなわち, P, Na, K, 砂糖, およびとくにアミノ酸が十分な量観測されない. 有機分析でアミノ酸がなかった (Kissel and Krueger, 1987) ことは謎である. 隕石にアミノ酸の consentration があり, K/T 境界の粘土層にもあるのにである (Steel, 1992; Oberbeck and Aggarwal, 1992).

ハレー彗星の有機分析は不確かである. 遭遇速度が $70kms^{-1}$ と大き過ぎて, このような衝突で生じた破片からもとの分子を再構成することが難しいからである. purine と pyrimidine がハレー彗星に見つかったとの報告 (issel and Krueger, 1987) は興味深い.

Hoyle and Wickramasinghe(1979) はスペクトル比較を通じて, バクテリア, 藻類 (algae), あるいはさらにビールスまでが彗星や星間媒質中にあると結論した. Hoover et al.(1986) は同じ技術を使って彗星, オイロパ, および星間空間に珪藻 (diatom) が存在するとした. (Hoover et al.(1986) は, 珪藻が好気性真核細胞生物 (aerobic eukaryotes) であって 1 億年前に地球でのみ進化した事実にくじけない. 実に, かれらはこの生物が地球外から突然地球に到着したと考える. 珪藻をともなう彗星がなぜもっと以前に地球に着陸しなかったかをかれらは問題にしない.) スペクトルが生物起源の物質に訴えるとよく合うことははっきりしている. しかしスペクトルの幅はひろく, 記述不可能な様相を呈しており, 生物起源であると一意的に決めつけることはできない (Davies et al., 1984; Chyba and Sagan, 1987).

地球上の生命進化の遺伝の研究 contained in the vast genome of life は彗星での生命起源に反対であり, 別の惑星系でのはるか昔の生命起源に賛成である (?) 地球上の全生命のリボゾーム RNA の比較に基づく系統樹の示すところによれば, 共通の祖先に最も似た生物は好熱性の sulfur metabolic 生物である (Woese, 1987). これの意味するのは, 生命の起源は高温で硫黄の多い環境で起きることである. 彗星起源説とは相容れない. 別の考えとしては, 隕石衝突により海が沸騰して, 高温で硫黄の多い環境が作られ, そこで生き延びることのできた生物のみがいま存在するという, 生物学的なカタストロフが起きたのかもしれない (Sleep et al., 1989). もうひとつの説は, 単なる偶然という考えである. ゲノムを調べれば生命の起源の鍵が得られる. Eigen et al.(1989) の議論によると, 遺伝コードは地球の年齢以下 (38 ± 6 億年) である. これは生命の地球起源説と適合的である.

結論

彗星が地球生命の起源に果たしたはずの役割について広範囲にわたる活発な議論が行なわれている. この議論で一番面白く推測的な部分は, 生命を発生させたにせよ, 保持しただけにせよ, 彗星上での生命の問題である. この問題はいまのデータからは決着を着けられず, どの意見もあらかじめ不可能とは云えない. この問題を解くには, 彗星の生物学的および化学的解析を待つ必要がある.

参考文献

Allamandolla, L.J., S.A. Sandford, and B. Wopenka(1987). Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbons and carbon in interplanetary dust particles and meteorites. *Science* **237**, 56-59.

Anders, E.(1989). Prebiotic organic matter from comets abd asteroids. *Nature* **342**, 255-257.

Bar-Nun, A., A. Lazcano-Araujo, and J. Oró(1981). Could life have evolved in cometary nuclei? *Origins Life* **11**, 387-394.

Boston, P.J., M.V. Ivanov, and C.P. McKay(1992). On the possibility of chemosynthetic ecosystems in subsurface habitants on Mars. *Icarus* **95**, 300-308.

Cano, R.J. and M.K. Borucki(1995). Revival and identification of bacterial spores in 25- to 40-million-year-old Dominican amber. *Science* **268**, 1060-1064.

Chyba, C.F.(1987). The cometary contribution to the oceans of primitive Earth. *Nature* **330**, 632-635.

Chyba, C. and C. Sagan(1987). Cometary organics but no evidence for bacteria. *Nature* **329**, 208.

Chyba, C.F., P.J. Thomas, L. Brookshaw, and C. Sagan(1990). Cometary delivery of organic molecules to the early Earth. *Science* **249**, 366-373.

Clark, B.C.(1988). Primeval procreative comet pond. *Origins Life Evol. Biosphere* **18**, 209-238.

Davies, R.E.(1988). Panspermia: Unlikely, unsupported, but just possible. *Acta Astronaut.* **17**, 129-135.

Davies, R.E. and R.H. Koch(1991). All the observed universe has contributed to life. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* B **334**, 391-403.

Davies, R.E., A.M. Delluva, and R.H. Koch(1984). Investigations of claims for interstellar organisms and complex organic molecules. *Nature* **311**, 748-750.

Davis, W.L. and C.P. McKay(1995). The origin of life: A survey of thories and application to Mars. submitted.

Delsemme, A.H.(1992). Cometary origin of carbon, nitrogen and water on the Earth. *Origins Life Evol. Biosphere* **21**, 279-298.

Eigen, M., Lindemann, B.F., Tietze, M., Winkler-Oswatitsch, R., Dress, A., and von Haeseler, A.(1989). How old is the genetic code? Statistical geometry provides an answer. *Science* **244**, 673-679.

Gilichinsky, D.A., E.A. Vorobyoba, L.G. Orokhina, D.G. Fyordorov-Dayvdov, and N.R. Chaikovskaya (1992). Long-term preservation of microbial ecosystems in permafrost. *Adv. Space Res.* **12**(4), 255-263.

Hoham, R.W., J.E. Mullet, and S.C. Roemer(1983). The life history and ecology of the snow alga *Chlomonas polyptera* Comb. nov. (Chlorophyta, Volvocales), *Canadian J. Botany* **61**, 2416-2429.

Hoham, R.W.(1975). Optimum temperature and temperature ranges for growth of snow algae, *Arctic and Alpine Res.* **7**, 13-24.

Hoover, R.B., F. Hoyle, N.C. Wickramasinghe, M.J. Hoover, and S. Al-Mufti(1986). Diatoms on Earth, comets, Europa and in interstellar space. *Earth, Moon, Planets* **35**, 19-45.

Horneck, G., Brucker, H., and Reitz, G.(1994). Long-term survival of bacterial spores in space. *Adv. Space Sci.* **14**(10), 41-45.

Hoyle, F. and C. Wickramasinghe(1981). On the nature of interstellar grains. *Astrophys. Space Sci.* **66**, 77-90.

Hoyle, F. and C. Wickramasinghe(1979). Comets - a vehcle for panspermia. In *Comets and the Origin of Life* (C. Ponnamperuma, Ed.), pp.227-239, Reidel, Dordrecht, Holland.

Irvine, W.M., S.B. Leschine, and F.P. Schloerb(1980). Thermal history, chemical composition and relationship of comets to the origin of life. *Nature* **283**, 748-749.

Jessberger, E.K., A. Christofordis, and J. Kissel(1988). Aspects of the major element composition of Halley's dust. *Nature* **332**, 691-695.

Kissel, J. and F.R. Krueger(1987). The organic component in the dust from comet Halley as measured by the PUMA mass spectrometer on board Vega 1. *Nature* **326**, 755-760.

Krueger, F.R. and J. Kissel(1989). Biogenesis by cometary grains - Thermodynamic aspects of self-organization. *Origins Life Evol. Biosphere* **19**, 87-93.

Kushner, D(1981). Extreme environments: Are there any limits to life? In *Comets and the Origin of Life* (C. Ponnamperuma, Ed.), Reidel, Dordrecht, Holland, pp. 241-248.

Maher, K.A. and D.J. Stevenson(1988). Impact frustration of the origin of life. *Nature* **331**, 612-614.

Marcus, J.N. and M.A. Olsen(1991). Biological implications of organic compounds in comets. In *Comets and the Post-Halley Era* Vol. I (R.L. Newburn, Jr., ed.), Kluwer, Netherlands, pp. 439-462.

Melosh, H.J.(1985). Ejection of rock fragments from planetary bodies. *Geology* **13**, 144-148.

Melosh, H.J.(1988). The rock road to panspermia. *Nature* **332**, 687-688.

Miller, S.L.(1992). The prebiotic synthesis of organic compounds as a step toward the origin of life. In *Major Events in the History of Life* (J.W. Schopf, ed.), Jones and Bartlett, Boston, MA., pp. 1-28.

Oberbeck, V.R. and H. Aggarwal(1992). Comet impacts and chemical evolution on the bonbarded Earth. *Origins Life Evol. Biosphere* **21**, 317-338.

Oró, J.(1961). Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth. *Nature* **190**, 389-390.

Ott, U.(1993). Interstellar grains in meteorites. *Nature* **364**, 25-33.

Prialnik, D., A. Bar-Nun, and M. Podolak(1987). Radiogenic heating of comets by ^{26}Al and implications for their time of formation. *Astrophys. J.* **319**, 993-1002.

Podolak, M. and D. Prialnik(1996). ^{26}Al and liquid water environments in comets. This book.

Schidlowski, M.(1988). A 3,800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks. *Nature* **333**, 313-318.

Schopf, J.W.(1993). Microfossils of the early Archean apex chert: new evidence for the antiquity of life. *Science* **260**, 640-646.

Secker, J., J. Lepock, and P. Wesson(1994). Damage due to ultraviolet and ionizing radiation during the ejection of shielded micro-organism from the vicinity of $1M_{\odot}$ main sequence and red giant stars. *Astrophys. Space Sci.* **219**, 1-28.

Simonelli, D., J.B. Pollak, C.P. McKay, R.T. Reynolds, and A.L. Summers(1989). The carbon budget in the outer solar system. *Icarus* **82**, 1-35.

Shock, E.L. and M.D. Schulte(1990). Amino-acid synthesis in carbonaceous meteorites by aqueous alteration of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Nature* **343**, 728-731.

Sleep, N.H., Zahnle, K.J., Kasting, J.F., and Morowitz, H.J.(1989). Annihilation of exosystems by large asteroid impacts on the early Earth. *Nature* **342**, 139-142.

Steel, D.(1992). Cometary supply of terrestrial organics: Lessons from K/T and the present epoch. *Origins Life Evol. Biosphere* **21**, 2339-2357.

Tingle, T.N., J.A. Tyburczy, T.J. Ahrens, and C.H. Becker(1992). The fate of organic matter during planetary accretion: Preliminary studies of the organic chemistry of experimantally shocked Murchison meteorite. *Origin Life Evol. Biosphere* **21**, 383-397.

Wächterhäuse, G.(1988). Before enzymes and templates: Theory of surface methabolism. *Microbiological Reviews* **52**, 452-484.

Wallis, M.K.(1980). Radiogenic melting of primordial comet interiors. *Nature* **284**, 431-433.

Wallis, M.K., F. Hoyle, and C. Wickramasinghe(1992). Cometary habitats for primitive life. *Adv. Space res.* **12**(4), 281-285.

Wharton, R.A., Jr., C.P. McKay, G.M. Simmons, Jr., and B.C. Parker(1985). Cryoconite holes on galaciers. *BioScience* **35**, 499-503.

Woese, C.R.(1987). Bacterial evolution. *Microbiol. Rev.* **51**, 221-271.