

星間有機物と生命の起源

横浜国立大学大学院工学研究院
小林 憲正

1. はじめに：化学進化の古典的シナリオ

地球上の生物はどのようにして誕生したのだろうか？19世紀中頃、重大、かつ相矛盾する2つの生物学上発見があった。一つは Pasteur による生物の自然発生の否定、もう一つは Darwin による生物進化説である。生物はより下等な生物から進化したとする、最も下等な生物はどのようにして誕生したのか？ここに「生命の起源」は自然科学の課題となつた。

1920年代になり、Oparin と Haldane は、生命に必要な物質のもとは原始地球大気の反応生成物がとけ込んだ「原始スープ」中で、単純な化合物から、もっと複雑かつ組織化された化合物へ進化し、やがて生命となった、とする「化学進化仮説」を発表した。ただし、当時は化学進化には極めて長い時間が必要で、実験的検証は困難とみなされていた。

1950年代、Miller は、原始大気はメタン・アンモニア・水素・水などからなる強還元的なものとする説に従い、原始大気中の化学反応を調べることを試みた。メタン・アンモニア・水素・水の混合気体中で、雷を模した火花放電を行ったところ、グリシン、アラニンなどのアミノ酸をはじめ種々の有機物が生成していることを見いだした[1]。つまり、タンパク質の構成要素であるアミノ酸が、単純な分子から「無生物的に（生物の働きを借りることなく）」生成することが示されたのである。この実験以降、主として強還元型の模擬原始大気を用い、熱・紫外線・放射線など種々のエネルギーを用いた生体分子の無生物合成実験がなされた。そして、どのエネルギーを用いても、アミノ酸が容易に生成することが示された。

これらの実験結果や、反応経路の解析などにより、Fig. 1 に示すようなシナリオ（以後、「古典的シナリオ」と呼ぶ）が提案された。

2. 新たな原始地球モデル下での有機物の生成

しかし、1970年代以降、この古典的シナリオは大きな問題に直面した。新しい惑星生成論からは、原始太陽系星雲中に生じた微惑星の衝突合体により地球が生成し、衝突により発生したガスが原始地球大気となつたとされる。その組成は一酸化炭素・窒素・水を中心とするものであった。一酸化炭素は光反応などにより徐々に二酸化炭素に変化していく

（多くの本に、衝突脱ガスにより二酸化炭素を主とする大気が生じたと書いてあるが、これは誤りである）。つまり、原始地球大気は

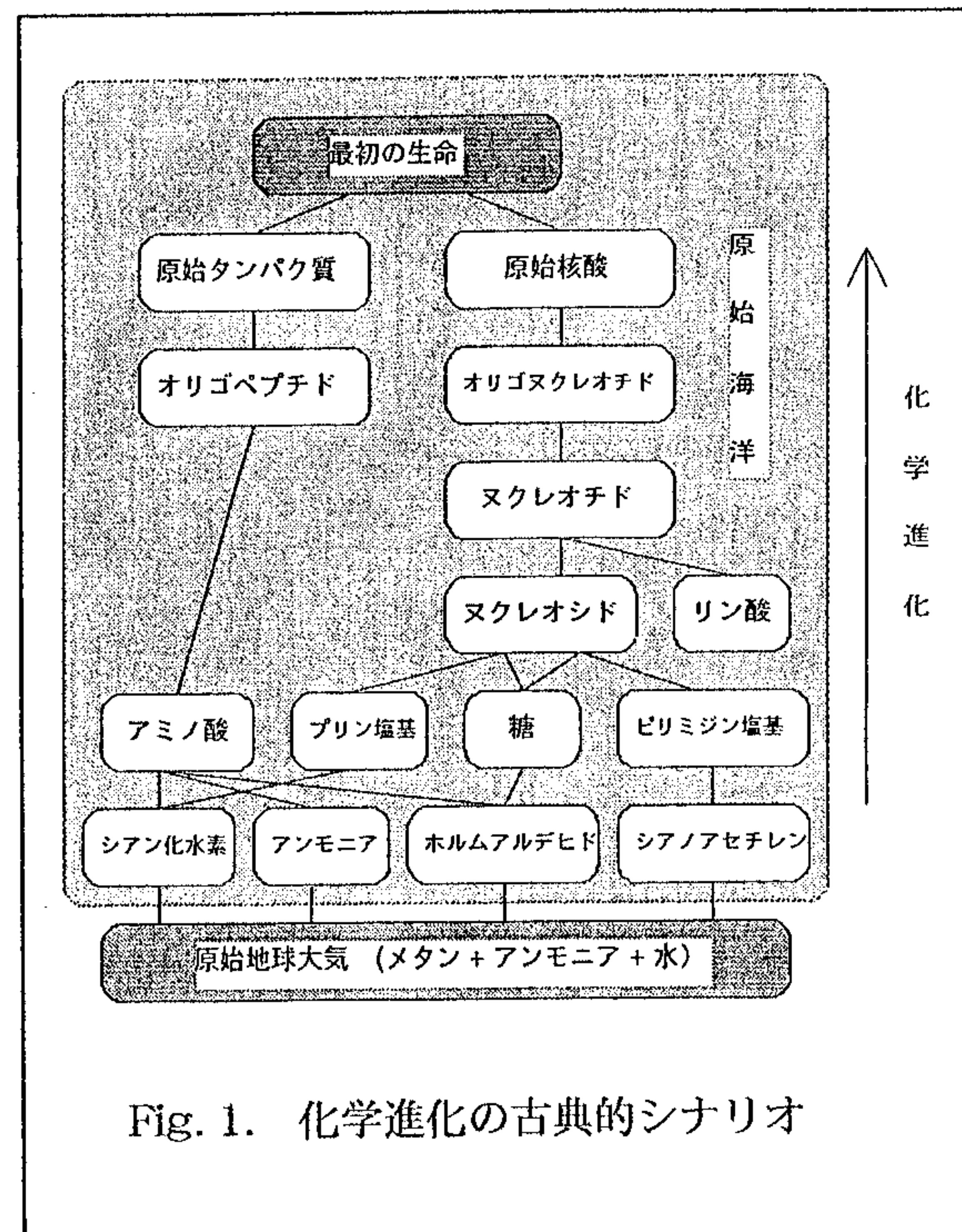


Fig. 1. 化学進化の古典的シナリオ

二酸化炭素・一酸化炭素・窒素・水を含む弱還元型のものと考えられる[2]。この種の混合気体からは、放電や近紫外線など、従来、化学進化の主要なエネルギーとみなされていたエネルギーではアミノ酸などの含窒素有機物の生成が極めて困難である。つまり、古典的シナリオの前提が崩れてしまうわけである。

われわれは、二酸化炭素・一酸化炭素・窒素・水の混合物に宇宙線を模した高速粒子を照射した。生成物を加水分解すると種々のアミノ酸[3]や核酸塩基のウラシル[4]が生成することが確認できた。つまり、宇宙線の寄与を考慮すれば、原始地球大気からも生体有機物の生成は可能である。ただし、混合気体中の一酸化炭素の割合が極めて低い場合、生成するアミノ酸量も極微量となってしまう。ここで注目されたのが、地球外有機物である。

3. 生命の材料としての地球外有機物

1960年代以降、各国による宇宙観測や探査機による惑星探査が本格化し、地球外にも様々な有機物が存在することが知られるようになった。1969年にオーストラリアに落下した Murchison 頃石は炭素を多く含む「炭素質コンドライト」であり、その有機物は詳細に調べられた。その抽出液からは、数十種類のアミノ酸などが検出された[5]。また、一部のアミノ酸は L-体が D-体よりも多く存在することが確認された[6]。また、1986年のハレー彗星の接近時、探査機 Vega および Giotto に搭載された質量分析計で彗星から吹き出した塵の分析が行われ、彗星中にも多様な有機物が含まれることが示された[7]。彗星のもとになったのは星雲中で一酸化炭素・メタノール・アンモニア・水などが塵上に氷結した「星間塵」と考えられる (Fig. 2)。

われわれは、Fig. 3 のような装置により星間塵を模した氷を作り、これに陽子線や紫外線を照射し、その生成物を加水分解するとアミノ酸が得られた[8]。炭素源にメタノールを用い、固相と気相でのエネルギー収率を比較したが、大きな違いは存在しなかった[9]。つまり、星間塵のような低温の固相環境でも生体有機物の生成は十分に可能である。

星間環境で生成した有機物は、星間塵が集まって小天体となるまでは、星間紫外線などの照射により変成を受けると考えられる。この過程で、アミノ酸などの生体有機物の不斉創成が起きた可能性が議論されている[10]。例えば、超新星爆発により生じた中性子星

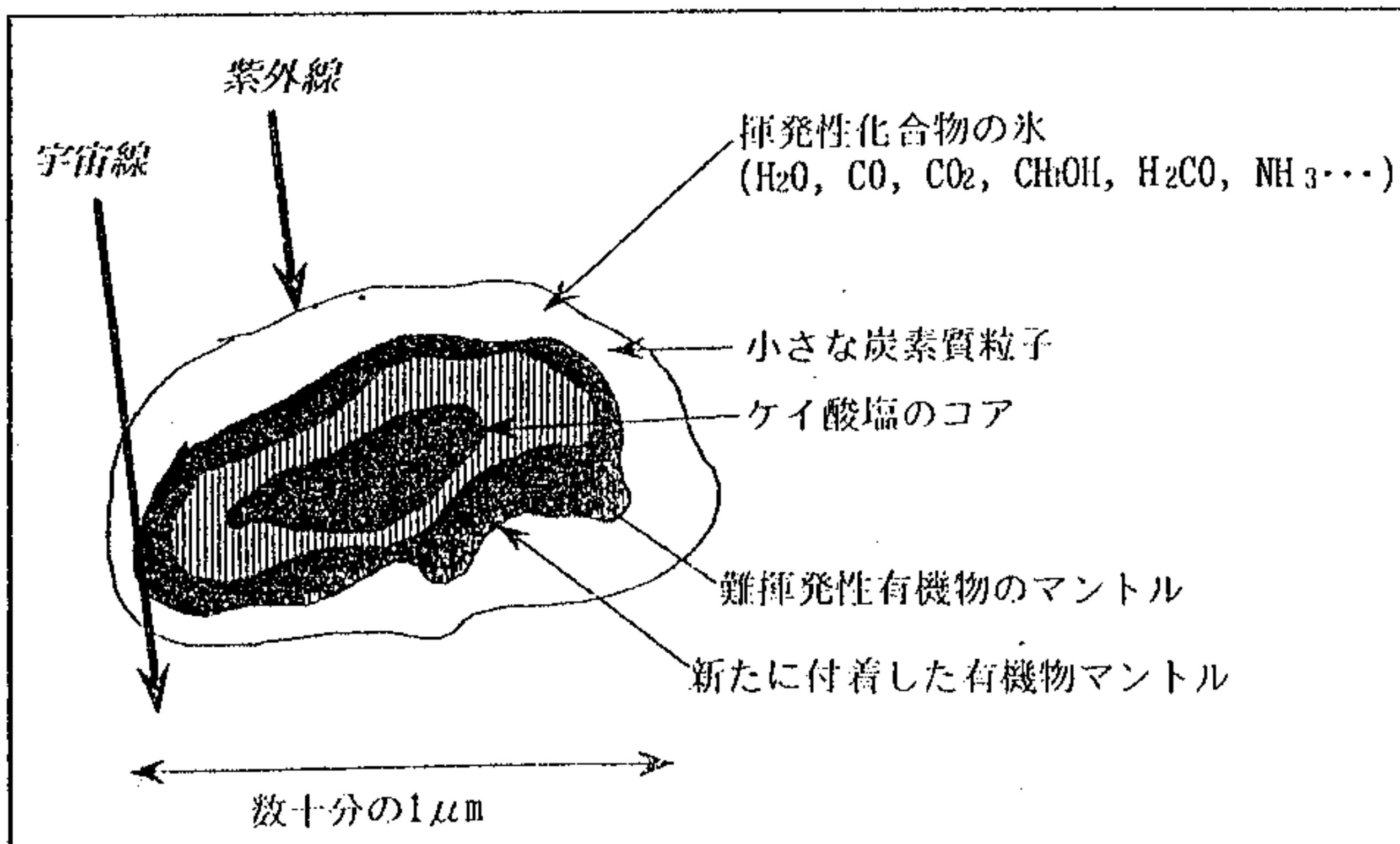


Fig. 2. 星間分子雲中の有機物生成
星間塵表面に一酸化炭素・アンモニア・水などが凍結し、これに宇宙線・紫外線などの照射により有機物が生成する(Cottin et al., 1999 を改変)。

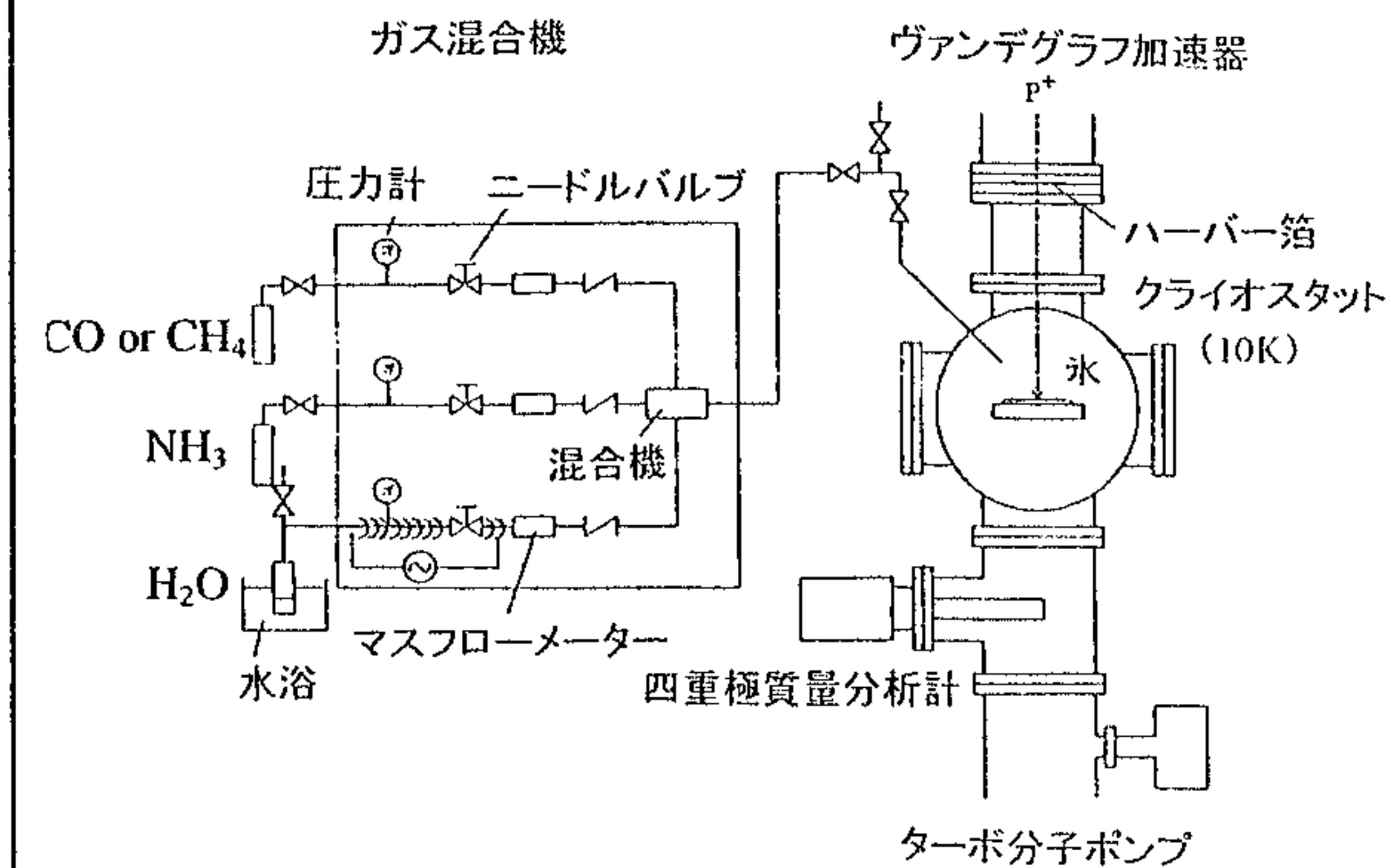


Fig. 3. 模擬星間塵環境下での陽子線照射実験

からシンクロトロン放射される円偏光が星間有機物に照射された場合(Fig. 4), アミノ酸の一方の対掌体を選択的に分解する可能性が示唆されていた。われわれは, Murchison 隕石中で大きなエナンチオ過剰が観察されたイソバリン(Ival)の水溶液をターゲットとして, これに NTT 放射光施設のシンクロトロンからの紫外線領域連続光を利用し, 左円偏光, 右円偏光, および直線偏光を照射した。照射生成物は光学活性カラム(SUMICHLAR OA-5000)を用いた HPLC 法で分離, 定量した。その結果, 右円偏光を 9×10^{19} eV 照射した時, 1.12 % の L-Ival のエナンチオ過剰が, 同様に左円偏光を照射した時には, 1.75 % の D-Ival のエナンチオ過剰が得られたが, 直線偏光を照射した時には, 有意のエナンチオ過剰は観察されなかった[9]。このことは, 地球上で生体分子の不斉の起源が, 宇宙空間での円偏光照射による可能性を支持するものである。

39 億年くらい前まで, 地球には多数の隕石・彗星が衝突した。これらが持ち込んだ有機物は地球の最初の生命の材料の有力な候補となった。

4. 生命の起源の新たなシナリオの構築をめざして

現在の地球生命は, タンパク質の触媒能と核酸の自己増殖能により成り立っている。この 2 種の機能性高分子のどちらが先に生成したのか? これは生命の起源における大きな論争点であった。

1980 年代, 触媒活性を持つ RNA (リボザイム) を発見により, RNA が核酸本来の自己増殖能に加え, タンパク質のみが担うと考えられていた触媒能を併せ持つことが示された。そして, RNA のみからなるシステムが最初の生命であった, とする「RNA ワールド」説が提唱され, 特に分子生物学者から大きな支持を集めている[11]。しかし, 一部の核酸塩基を除き, 糖やヌクレオシドの無生物的生成が可能かどうかもまだわかっていない[12]。

一方, アミノ酸はいろいろな環境で容易に生成するし, 加熱などにより, 特定の条件下では縮重合することが, 「タンパク質ワールド」の利点とされてきた。しかし, 模擬原始大気実験生成物中, あるいは隕石などの地球外物質中にペプチドが存在する証拠はまだ得られていない。さらに, 遊離アミノ酸は宇宙や地球環境下で極めて不安定である。

つまり, 原始海洋中に蓄積した生体モノマーが縮重合して生体ポリマーが生成するという「古典的シナリオ」の化学進化的基盤は弱く, 原始地球上にいきなり無生物的にタンパク質ワールドや RNA ワールドが成立したとは考えにくい。

では, 「古典的シナリオ」に代わるどのようなシナリオが考えられるだろうか。そのヒントは地球外有機物である。彗星や隕石中に見られる有機物は非常に複雑な構造を有する, いわゆる「複雑な有機物」である。また, 模擬原始大気に高速粒子を照射した時の生成物は, 主として分子量 1000 前後の複雑な分子の混合物である[13]。し

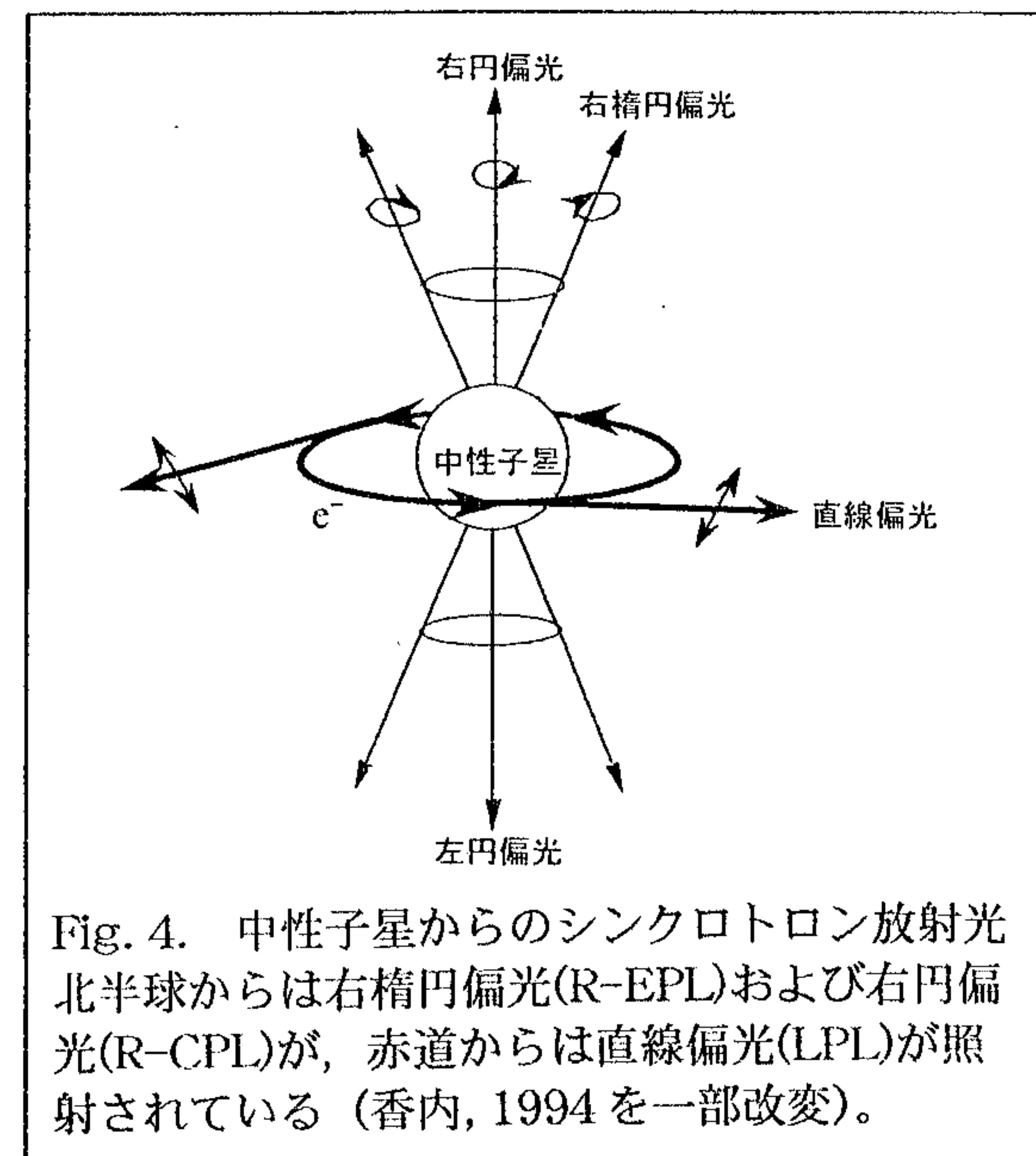


Fig. 4. 中性子星からのシンクロトロン放射光
北半球からは右楕円偏光(R-EPL)および右円偏光(R-CPL)が、赤道からは直線偏光(LPL)が照射されている (香内, 1994 を一部改変)。

かし、これが水に溶け、加水分解されると、アミノ酸、核酸塩基、さらには触媒活性（エスチル加水分解活性など）を有する分子などが生じることが確認された。

以上の知見から、次のような化学進化の新たなシナリオが提案できる (Fig. 5)。一酸化炭素・窒素などの単純な分子が原始大気や星間塵中で、宇宙線などから高いエネルギーを受け、励起された後、急冷されると、大きな内部エネルギーを持つ「複雑な有機物」が生じる。これは雑多な分子の混合物であり、いってみれば宇宙の「がらくた」(garbage)である。これが原始海洋中で徐々に分解することにより種々の機能性分子を生み出していく。加水分解反応は水溶液中でも自発的に進むし、そのエネルギーにより他の反応の縮合剤ともなる。この過程で、例えは「複雑な有機物」に働く自己と同一分子を切り出す分子（自己触媒分子）があれば、その分子はがらくた分子の供給が続く限り増殖していくはずである。一般の有機物は水溶液中では不安定で、進化の次のステップに進む前に分解しまう。自己増殖分子のみが選択的に残されて行き、次の進化のステップに進むことが可能となる。

がらくたの中から、機能性分子が選択的に増殖し始めた「がらくたの世界」(Garbage world)は生命誕生の第一段階と考えてられる。そのようながらくたの中にはタンパク質や核酸の部品も含まれていた。「がらくたの世界」はそのような部品を取り込み、機能を進化させ、タンパク質ワールドや RNA ワールドに移行し、ついには「最後の共通の祖先（コモノート）」の誕生に至った。

このシナリオの検証のためには、実験室での模擬実験をさらに精力的に行う必要があるが、それとともに、「化学進化の化石」や「第二の生命システム」の発見が期待される。

5. 「化学進化の化石」や「第二の生命システム」を探して

現在、私たちが知っている生物は共通のアミノ酸、共通の核酸塩基、共通の遺伝暗号を用いている。つまり、すべての既知の地球生物は1つのコモノートから進化したものだけである。なぜ、どのようにして、現在の生物システムができたのか？他種の生物システムはないのか？そもそも「生命」とは何か？われわれと異なる祖先から進化してきた生物、すなわち「第二の生命システム」が手に入れば、このような謎の解明は大幅に進むであろう。

火星は早くから地球以外で生命の存在する可能性の最も高い天体として注目されてきたが、1977年 のヴァイキング計画の生命探査で生命の証拠が得られず、関心は下火になっていた。しかし、1996年、NASA の D.McKay らのチームが火星から飛来

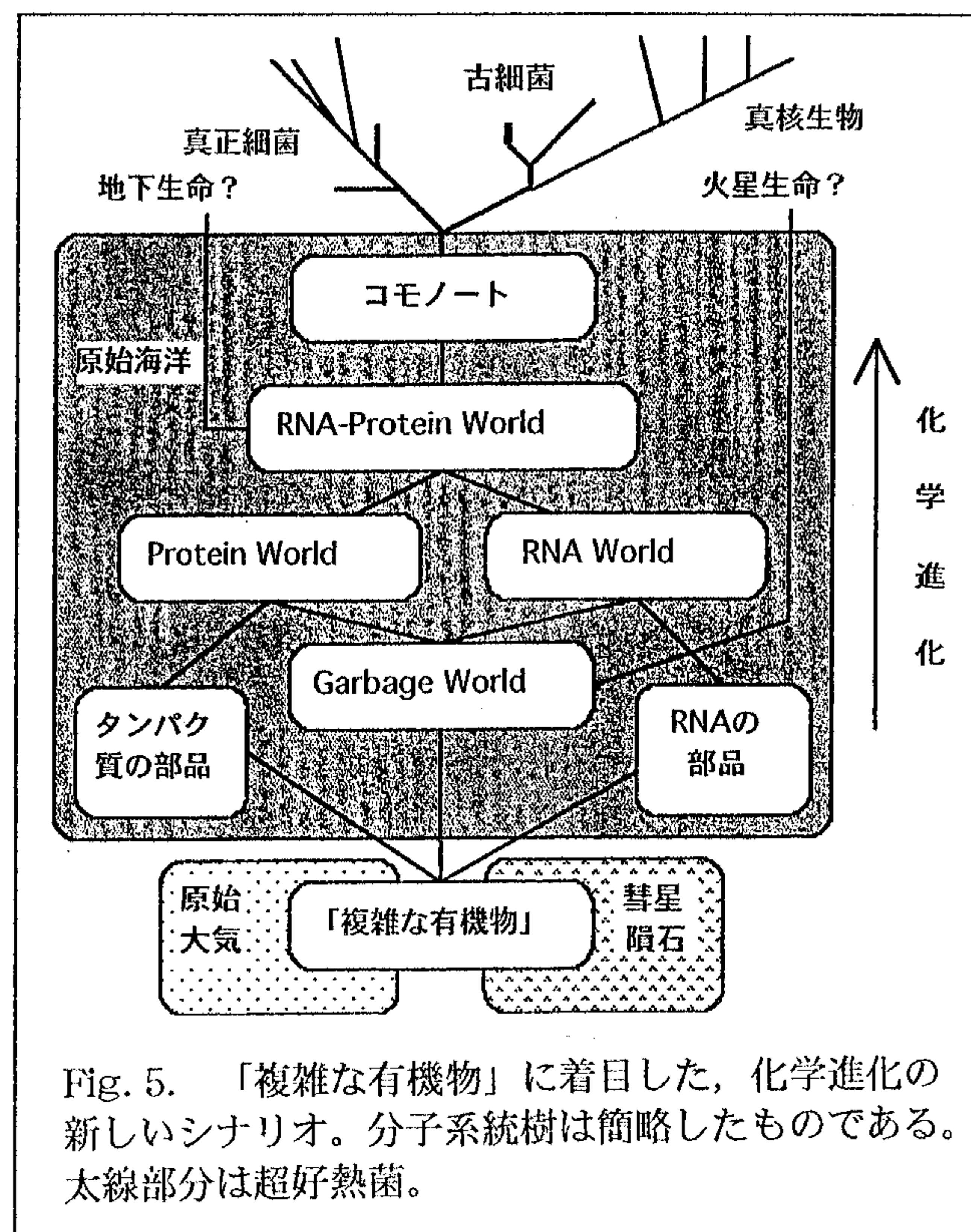


Fig. 5. 「複雑な有機物」に着目した、化学進化の新しいシナリオ。分子系統樹は簡略したものである。太線部分は超好熱菌。

した隕石 ALH 84001 中に火星の過去の生命の痕跡を発見したという報告[14]により、火星の生命の可能性が見直されている。また、NASA の Voyager 探査機および Galileo 探査機による観測により、木星の衛星のエウロパは氷の表層の下に、液体の水が存在する可能性が極めて高いことがわかった。「現在も生存している生物」という観点からは火星よりもむしろエウロパの方に可能性が高いとも考えられる。また、エウロパの生命の可能性は、太陽系の Habitable zone (生命の棲息可能範囲) の議論にも影響を与える。従来、太陽系における Habitable zone は地球軌道周辺のみ、あるいはせいぜい火星軌道付近まで、とされてきたが、エウロパに液体の水が存在するとなると、木星軌道へまで拡張できることになり、太陽系外の生命の存在しうる惑星探しにも大きな影響を与えるだろう。

一方、火星にもし生命が誕生しなかった場合でも、惑星環境下での有機物の進化はある程度、進んでいたはずである。そのような「化学進化の化石」が地下凍土に眠っているかもしれない。さらに、土星の衛星のタイタンは、窒素とメタンを主とする大気を持ち、その中の反応により、tholin と呼ばれる高分子物質[15]を含む、様々な有機物が存在することが示唆されており、その解析のため、現在、Cassini-Huygens 計画が進行中である。

今後の室内模擬実験と、これらの惑星探査や天文観測などから、これまでの生命の起源のシナリオは大幅に書き換えられていく可能性が高いと考えられる。

- 1) S. L. Miller, *Science*, 117, 528 (1953).
- 2) J. F. Kasting, *Origins Life Evol. Biosphere*, 20, 199 (1992).
- 3) K. Kobayashi, T. Kaneko, T. Saito, T. Oshima, *Origins Life Evol. Biosphere*, 28, 155 (1998).
- 4) K. Kobayashi and T. Tsuji, *Chem. Lett.*, 1997, 903.
- 5) K. A. Kvenvolden, D. P. Glavin and J. L. Bada, in "Perspectives in Amino Acid and Protein Geochemistry," ed. by G. A. Goodfriend *et al.*, Oxford Univ. Press, Oxford (2000), pp.7-14.
- 6) J. R. Cronin and S. Pizzarello, *Science*, 275, 951 (1997).
- 7) J. Kissel and F. R. Krueger, *Nature*, 326, 755 (1987).
- 8) T. Kasamatsu, T. Kaneko, T. Saito, K. Kobayashi, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 70, 1021 (1997).
- 9) "宇宙環境下での紫外線による有機物の生成と分解," 小林憲正, 高野淑識, 金子竹男, 高橋淳一, S. Pizzarello, J. R. Cronin, 橋本博文, 杉田精司, 中川和道, 大島泰郎, 山下雅道, *Space Util. Res.*, in press.
- 10) 星間塵環境における有機物生成," 高野淑識, 小林憲正, 静電気学会誌, 25, 32 (2000).
- 11) W. Gilbert, *Nature*, 319, 618 (1986).
- 12) K. Kobayashi, *Viva Origino*, 16, 88 (1988).
- 13) K. Kobayashi, T. Kaneko, T. Saito, *Adv. Space Res.*, 24, 461 (1999).
- 14) D. S. McKay, *et al.*, *Science*, 273, 924 (1996).
- 15) B. N. Khare, E. L. O. Bakes, D. Cruikshank and C. P. McKay, *Adv. Space Res.*, 27, 299 (2001).