谷川清隆 訳

Protostars and Planets IV, University of Arizona, 2000.

惑星の居住可能性と生命の起源
Planetary habitability and the origin of life

C. F. Chyba and D.P. Whitmire and R. Reynolds

要約

遠隔探査に有用な生命の一般的定義は捕らえどころがないことがわかった. 現実問題として, 生命の探索は, われわれの知っている生命の探索になる. それは液体水中の有機分子に基づく. 太陽系では有機体はありふれているから, 液体水は系外生命探索の焦点になる. 近年, 地表下深くの生命圏が発見された. ここでは地表とまったく条件が異なる. 生命が地下条件で誕生したかどうかは未解決問題である. けれども, それが可能であるとすると, 火星やオイロパにあるのではないかと思われている深地底の液体水環境が地球外生命にとってもっともらしい場所である. 地球外の居住可能性環境として挙げられるもっとも保守的な要請は, 地下ではなく, 地表に液体水が存在することである. 「星周居住可能ゾーン」とは, 星または星系のまわりの空間体積であって, そこでは地球型の惑星が地表に液体水を維持できるところである. このようなゾーンは星の光度の変化に連れて変わるけれども, 太陽質量の 0.1 から 1.5 倍の星の場合には, 何十億年も続く居住可能ゾーンがある. したがって, 居住可能性についての保守的な定義からしても, 他の星のまわりに生命のための場所がたくさんあり得る. 地下の生命環境は生物学の可能性をさらに広げる.

I. 居住可能性と生命

A. 誰にとっての居住可能性か?

惑星「居住可能性」はもともと人間に適した条件として考えられた (Dole, 1964). この言葉はそれ以来, 緩められ, 世界表面での液体水の安定性に必要な条件となってきた (正確な定義に関しては以下の III 節参照). 地球地下生命圏の解明 (II 節) 以前には, これが単純なミクロ生命にとって必要な条件とみなされてきた. もちろん, ある世界が居住可能かどうかは, 誰がまたは何がそこに住んでいるかにも依存する. たとえば, 森林にとくに都合のよい条件に興味があるなら (Heath, 1996), 別の要請があてあまるはずである.

地球上では, 多細胞生命が現れる前に約 30 億年間生命が存在した. 多細胞生命の誕生は地球大気に分子酸素の濃度が増大したことによる. 地球上の多細胞生命は真核細胞 (eukariote) からなる. すなわち, 核やその他の内部細胞小器官 (organelle) を持つ細胞を基にしている. ある真核細胞は単細胞であるが, 地球生命のほかの 2 つの広大な領域 – バクテリアと archea – は単細胞原核生命 (prokariote) であって, 核を持たない細胞である. 自由分子酸素を使って, 真核細胞は原核細胞に比べて 18 倍のエネルギーを, 炭水化物 (carbonhydrate) 分子を代謝する (metabolize) ことにより引き出す (Day, 1984). この意味で, 大気中に自由酸素が増えるまでは, 多細胞生命にとって地球は居住可能でなかった.

自由酸素を多量に含む地球大気の形成のためには, 累代 (aeon, eon) にわたるバクテリアの光合成による酸素生成が必要であった. 同様に, 還元溜め (reductant sinks) の酸化 (oxidation) や大量の有機炭素が堆積することも必要であった (DesMarais, 1994, 1996). ほかの世界ではこの過程が地球に比べてはるかに短期間で進んだと考えることもできる (McKay, 1996). その場合, 真核細胞がもっと早く増大する. たとえそうであったとしも, ある瞬間には, 単細胞有機体の住む世界の方が多細胞有機体の住む世界よりもはるかに多いだろう. だからもっとも広い意味で有用な「居住可能性」の定義は, もっとも単純な有機体に当てはまるものであろう. けれども生命と非生命をどうやって区別するか?

B. 生命の定義

満足すべき一般の生命の定義はとらえどころがない (Chyba and McDonald, 1995). ある科学哲学者は, 完全な定義は不可能であるとも言ってる (Küppers, 1990). このような悲観主義にいたる原因は, 歴史的にほとんどの定義が失敗に終ったことによる. Sagan(1970) は生命の生理学的, 代謝的, 生物化学的, 遺伝学的, また熱力学的定義を概観した. けれども, かれが指摘したとおり, どの定義も問題に直面する. 必ず反例がある. すなわち, 定義には当てはまるが, それが生きていることは認めたくならないようなものがあったり, 明かに生きている有機体でありながら, 定義によって排除されるものがある. 特定の反例が「重要でない」と主張することは十分でない. そのような主張は提案された見せかけの (ostensible) 定義に加えて他の判定規準を暗に援用することになる.

たとえば生命の代謝的定義を考えてみよう. 代謝的定義は「生体系を, はっきりした境界を持ち, 環境と物質を絶えず交換するけれども, ある期間その一般的性質を変えない対象物として」記述する (Sagan, 1970). ところが火はこの性質を満たす. 実際, 炎を維持する化学反応, 有機物と分子酸素の結合は真核細胞有機物に燃料を与える代謝反応に似ている.

ダーウインの定義. 「ダーウイン的定義」と呼ばれる生命の作業用定義がある. これは生命の起源業界では受け入れられつつある (Chyba and McDonald, 1995). 緻密な定義 (Joyce, 1994) によると,「生命は自己維持化学系であって, ダーウイン進化を行なうことができる」この定義の核心は, ダーウイン的進化にこだわったことにある. すなわち, 自己複製 (self–reproduction), 遺伝子変異 (genetic variation), 自然選択である. この定義の強いところは, 研究室内での実験の対象物を昇華させたことにある. それは分子進化に向けられたものであるが, 自己複製し, 自然選択によって進化する RNA やほかの分子系を作り出そうとするじっけんである (von Kiedrowski, 1986; Joyce, 1993; Breaker and Joyce, 1994). 「生命の起源はダーウイン的進化の起源と同じである」という見方が普通になりつつある. ひとたびダーウイン的進化が確立されれば, 生命のさまざまな性質は自然選択をとおして生じた可能性がある.

研究室での実験にどれほど有効であろうと, ダーウイン的定義は遠隔探査を問題にすると, 深刻な欠点が見えて来る (Kleischaker, 1990; Chyba and McDnald, 1995). ある系がダーウイン的進化を行ない得ることを示すまでにどれほど待つべきなのか? ダーウイン的定義は, 研究室内の用途には都合がいいが, 宇宙船による探査の場合には, もっと荒っぽい操作的かつ有用な定義に道をゆずるべきである.

バイキングの生物学パッケージからの学習

生命の定義に関する論争は研究室実験と宇宙探査実験で絡み合っている. バイキング生物学パッケージで行なわれた 3 個の実験について考えてみよう (Klein et al., 1976; Klein, 1978;

Horowitz, 1986). この実験では, 火星の生命は代謝によって認識できるはずだという仮定に基づいて生命検出の広い判定規準を確立した. たとえば, Labelled release(LR) 実験では, 実験の際に用意された有機物 (a brew of organics) を摂取して, それらのどれかを炭素を含む気体へと代謝する有機体を捜した (Levin and Straat, 1981a).

生物学パッケージ, とくに LR 実験の結果はじれったい (tantalizing) ものであった. ある側面では生命を真似るものがあった. 実は, バイキング生物学チームの主任によると, 「2 つのバイキング着陸機からのほかの情報がなければ, このデータは生物学の推定証拠と解釈されたであろう」(Klein, 1978). しかし, 生物学的解釈は正式には生物学パッケージに属さない器具によって根もとを切り取られた. バイキングのガスクロマトグラフ–質量分析器 (GCMS) は有機分子を捜したが, ppm(炭素をひとつまたは 2 つ含む化合物 (compound)) ないし ppb(3 つ以上の炭素を含む化合物) レベルでひとつも見つけなかったし, 隕石落下流量から期待されるものさえ見つからなかった (Biemann et al., 1977). Levin and Straat(1981b) は, 南極のある土壌サンプルはバイキングの GCMS レベルの有機物を含まないけれども LR 実験の生物学的反応をもたらす, と議論し, 火星上の状況に似た低レベルの微生物 (microbial) の存在を示唆している. とはいうものの, 有機物がないことおよびバイキング生物学実験の結果から, 火星の大気によって作り出される酸化物 (オキシダント) によって有機物が破壊されてしまったと広く受け入れられている (Hunten, 1979).

生命検出実験として GCMS を使うことは, 生物学パッケージ実験とは異なる見通しで火星上の生命探索手法であった. 後者は生命の代謝的定義に基づいているが, GCMS はもっと狭く生物化学的な定義に基づく生命探索を可能にする. 生命探索実験として見れば, GCMS は地球以外の生命が有機分子を基にしていることを仮定する. すなわち, 有機物がなければ生命なし, である. (逆は真でない. 単に有機物があるだけでは生命の存在を意味しない. それどころか, 太陽系内や星間媒質中では有機物は普通に存在する分子である (Cruikshank, 1997; Pendleton and Chiar, 1997).)

バイキング経験から習ったことの第一は, 異なる見通しによる生命の探索の価値である. 第二は生物学的実験の解釈にあたって化学的また地質学的な文脈が重要なことである. 第三は, 否定的な結果を得た場合にも有用な情報を引き出すように生命探索実験を選定することの価値である.

バイキング実験から外挿すると, 遠隔探査の場合には, 生命の生物化学的定義がほかのどの定義よりも勝っているように見える. 競合する有機 biomarker がない以上, 生物学的に示唆的なほかの実験結果は不信の眼で見られたり不採用になったりしやすい. この一般的な結論の例外のひとつが顕微鏡的探索 (Lederberg, 1960, 1965) から出て来る可能性がある. それによると, 自分自身で推進したり再生したりして疑いようもなく生きて何かをしているものを映像化する. いずれにしろ, また詳細な生物学的情報がない段階では, forward contamination の可能性を排除することが大切である.

II. われわれの知っている生命

宇宙時代の夜明け以来, 生命の遠隔探査のいろいろな技術が議論されてきた (たとえば, Lederberg, 1960, 1965). しかし, 20 世紀も終りが近づいているこのときにおいても, われわれの知っている生命にとって中心的な要請を強調することが最良のことであろう. すなわち, エネルギー源, 有機分子, および液体水である. 地球上の生命の起源のためには, 十分なエネルギーが地球

からも太陽からも得られる (Miller and Urey, 1959; Chyba and Sagan, 1992, 1997). また, 太陽系内および太陽系を越えたほかの世界でも似たようなエネルギーが得られるであろう. 有機物は普遍的ではないにしても, 太陽系内に普通に存在する. しかし sin qua non..., また見つけることの難しい唯一の要請が液体の水である.

A. 何故水か?

必要な有機物や太陽光その他のエネルギーが大量にあるとはいえ, 地球上の生命にとって液体水は必要欠くべからさるものである (Mazur, 1980; Kushner, 1981; Horowitz, 1986). これはまた南極の乾燥した谷からの学習である. ここは地球上で最悪の砂漠であって, 特別の保護された生息地を除いてミクロ有機体がまったく存在しない場所を含んでいる (McKay, 1986; Campbell and Claridge, 1987). ただし, この主張は近代的な DNA 増幅技術ではなく, 伝統的な microbial culture 法に大きく依存するものではある (Visniac, 1993). 作業的な観点からすると, 地球を越えての生命探索は液体水の探索から始まる. 液体水のあるところ, そこは少なくともわれわれの知っている生命が存在する可能性のある場所である. (もちろん, 地球外の生命は「われわれの知っているもの」とはまったく異なっている可能性もある. ただし, その場合, どこを捜すべきかという判定規準を用意することは困難である.) III 節で見るように, 液体水を要請することは, 居住可能性の通常の定義にとって鍵となる.

生命は何故液体水に依存するのか? 細胞生命は, 分子を融かし化学反応を起こすような内部媒質を必要とする. 水は「普遍溶媒」と呼ばれる. 極性溶質 (イオン化溶質, polar solute) と水素結合を形成する能力を水が持っているからである (Blum, 1962). ほかにも比較的よいイオン化溶媒が 2,3 存在する. たとえば液体アンモニア (Barrow and Tipler, 1986) がそれである. 水は凍ってしまうが, アンモニアは液体であるような寒冷な世界では, 地球上で水が果たす役割をアンモニアが生命のために果たすかもしれない. しかし, 溶媒としてアンモニアを使用する生物化学では, 水を使う地球上に比べて反応ははるかに遅い. というのは化学反応の典型的なアーレニウス指数関数的依存性は温度に依存するからである. 液体炭化水素を溶媒として用いるエキゾティックな生物学 (土星の衛星タイタン上で?) を考えることは自由である. しかし, 炭化水素は極性分子ではないから, このような生物化学は地上の生命はあまりかけ離れていて, そのような憶測でさえ抑えることができない.??

水が地球上の生命にとって基本的であることは, 酵素 (enzyme) の 3 次元形への影響の面からも言える. 酵素は化学反応を触媒する (catalyze) 蛋白質 (protein) であり, すべての蛋白質と同様, アミノ酸がつながってできている. アミノ酸は極性または非極性の原子の側鎖を持つ. 溶液中では, 酵素からなるアミノ酸列内の異なるアミノ酸, 側鎖の極性にしたがって, まわりの水分子によって押され, 曲げられる. したがって水は, 酵素が特別な 3 次元形を取ってその触媒作用を果たすためには不可欠である.

最後に, 液体水はいくつか重要な大局的効果を持つ. たとえば, 水はきわめて大きな比熱を持つので, 地球の海洋は気候を穏やかにする重要な機能を持つ. 氷は浮く. だから湖や海洋は表面から凍り, 毎年解凍を繰り返す. (固体アンモニアはたまたま液体アンモニアに浮かない (Wald, 1964; Barrow and Topler, 1986).) このような大局的効果は疑いもなく, 水に覆われた惑星上で進化したわれわれ自身のような被造物にとって心地よいものである. ただ, これらのうちどれかが生命の起源にとっての要請であるかどうかは判断できない. これは上で議論した液体水のミクロな性質と対照をなす. このことは, 液体水を基礎にする生命が宇宙化学的にもっとも自然な存在であることを示唆する. もちろん, 単一の例から外挿したこの結論は最終

的には間違いであることになるかもしれない (たとえば Feinberg and Shapiro, 1980). しかし, これはわれわれに出発点を与えてくれるし, 保守的な疑問を投げかける. すなわち, 液体アンモニアは炭化水素に基礎を置く生命は可能か? たとえば, 生命の液体水判定規準は, 最悪でも生物学の見通しを過小評価するだけである.

B. 太陽系における液体水と居住可能性

地球は居住性 (III 節参照) に関する伝統的な定義が依って立つ世界の例となっている. 地球の液体水は地表で安定であり, 初期地球以来安定であったであろう (短期の凍結期を除いて (Hoffman et al., 1998)). 一方, 火星の場合, かつて液体水持っていたけれども, いまでは乾燥し凍った砂漠になってしまった世界であろう (Carr, 1981; McKay and Stoker, 1989; Goldspiel and Squyres, 1991). 今日火星に生命が存在するなら, 液体水が残っている表面または地下の特別な場所 (niche) に退却しているであろう (Boston, 1992).

木星の衛星オイロパは表面の氷の何キロメートルも下に, 地球の海洋と同じほどの液体水を隠し持っている可能性がある. オイロパ上の地下の海洋の地質学的証拠は示唆的であるけれども決定的ではない (Pappalardo et al., 1998). しかしガリレオ宇宙船の磁気メーター実験 (Khurana et al., 1998) からのデータとこの仮説は合う. この実験結果はまた木星の月・カリストに地下の塩海洋の存在を導く (Khurana et al., 1998). もしかすると, 地下の液体水は大氷衛星に普遍的な様相かもしれない. 計画中の 2003 年のオイロパ周回ミッション (Johnson et al., 1999) やそれに続く可能性のある着陸ミッション (Chyba et al., 1999) によってオイロパに海洋があるかどうか決められ, 生命の兆候の探索が始まるだろう.

水星サイズの土星の衛星・タイタン上に熱水活動を起こす場所はあり得るか? タイタンには窒素–メタン大気の中で紫外線および荷電粒子過程によって造られた有機分子が豊富にある (Sagan et al., 1992). 熱水地が存在するなら, タイタンは, 前生命化学のきわめて重要な候補であるだけでなく, 系外生物学にとっても重要である. 実現されつつあるカッシーニ/ホイヘンスミッションが, タイタンの広範囲にわたるかすんだ層の下にあるものが何であるか語ってくれるだろう (Matson, 1997; Lebreton, 1997).

太陽系にはほかにも液体水がかつて存在したか, 現在存在し得る環境がある. とくに, 大きな小惑星や彗星は太陽系の歴史の最初の 1 億年もでに, 地下深く液体水を保持していた可能性がある. このタイムスケールが興味深いのは, 地球上で生命の起源のために必要な時間と同じ程度だからである (Sleep et al., 1989). しかし, この小惑星または彗星上に, 初期の液体水期間に発生したと推定される生命がその後の 45 億年にそれらを構成する鉱物中での放射性壊変に耐え, 凍って自己を修復できない有機体内に蓄積される放射性損害にもかかわらず生き残っていることは考えられない (Clarke et al., 1998).

C. 地底の生命

表面で安定な液体水のある世界でのみ生命が可能であるなら, わが太陽系で生命に都合のよい環境は地球しかない. しかし, 最近の 20 年, 地球表面の明らかな証拠に加えて地球の「地下深い生命圏」が存在することが明らかにされた (Gold, 1992). 地下の生命圏の全質量の見積もり (Whitman et al., 1998) によれば, 地表の生物質量 ($\sim 8 \times 10^{17}$g, そのうち $\sim 10^{15}$g が海洋に住む) に匹敵する. これは伝統的な描像からはなはだ隔たっている.

表面生物圏の質量の大部分は多細胞真核有機体 (ほとんどが木) であり, 自由酸素に依存している (Hayes et al., 1983). 地下に潜っていくと, 真核細胞は酸素レベルが減るに連れて急速に

減少し, 原核細胞の世界に入っていく (Nealson, 1997a, 1997b). 広がった地下生命圏が意味するのは, 真核細胞が地球生命質量の大部分ではないことである. 有機体の最大の生産は表面生命圏によって維持されていると思われるが, 表面生命圏は地下に比べて何桁も大きな自由エネルギー (太陽光) が得られるからである. 地底生命圏が系外生命の存在とからむことからくる決定的な質問は, 地底の生態系が表面生命と条件からどの程度独立であるか, である. 1995 年に Stevens and McKinley(1995) は, ワシントン州のコロンビア河流域で地下 1.5km から採取したサンプルの中に methanogenic microbe を発見した. この有機体は, 玄武岩および地上水 (ground water) の風化によって得られた水素の二酸化炭素による酸化によってエネルギーを得ているようだ. これが正しければ, 表面の光合成とは全く独立に地底の microbial 生命が存在することの証拠になる. 最終的には光合成によって作り出される自由酸素を必要としない. これまでに光合成で造られた有機物 (これも最終的には表面の光合成に依存する) も電子の供給として必要としない. 非酸素の水と岩との相互作用によって生み出された水素がこの役割を果たすように見える. これが正しければ, 太陽はなくてもよい. 地表の生命圏もなくてもよい. また少なくとも地底の液体水領域を維持する地熱勾配があれば, これらの microbe は繁栄し続ける.

しかし, アイダホ州の Snake river から取った玄武岩と水との相互作用からは H_2 生成が見られなかったというその後の実験結果 (Andeson et al., 1998) は, Stevens and McKinley(1995) による最初の実験からの結論に矛盾する. これが示唆するのは, Stevens and McKinley の methanogen が実は, 最終的には表面由来の有機物から燃料を得ていることである. ただ, 地底奥深くで発生する還元ガス (Gold, 1992) が microbe に燃料を供給することは排除できないが. したがって, 地底生命圏が地表の光合成からどの程度独立であるかは, 未解決の決定的問題として残った. 今日までのところ, 地底生命圏のサンプルを採取し始めたところであり (Nealson, 197a, 1997b; Whitman et al, 1998), そこでの有機体や代謝の多様性に関して全体的な理解には到底達していない.

地表の光合成とはまったく独立に地球生命が存在または存在し得るなら, 火星のような世界において地底生命圏が存在する可能性は大きく広がるであろう. 初期の温和な時代に火星に生命が発生するなら (McKay and Stoker, 1989), その前駆体が熱水活動の盛んな地底の場所にある可能性がある.

D. 地底で生命が発生し得るか?

前節では, かつて世界の表面に発生した生命が地底に拡大していって, そこで表面条件とはまったく独立な生態系に進化することができるか, を問うた. もっと基本的な問題は, 太陽とは無関係に地底に生命は発生し得るか? それが不可能なら, たとえば, 生命の起源が太陽光から得られる豊富なエネルギーを要請するなら, 温和な表面 (地球のような) を持つ世界, あるいはかつて温和であった世界 (火星のような) だけが広がった生態系を維持し得るであろう. しかし生命の起源が地底でも起こり得たなら, 地底に液体水を持つどの世界も地球のような生命 (少なくとも原核細胞) の候補地になり得る. とくに, オイローパのような世界は現在の生命圏の有力な候補である.

若い割れ目を通しての弱い太陽光はオイローパの生物学を駆動できる (Reynolds et al., 1983, 1987; Oró et al., 1992). 太陽光のエネルギー流量は, この割れ目において, オイローパの中心核からの平均エネルギー流量より数桁大きいはずなので, たとえ生命がオイローパの地底で発生しても, それを刺激して割れ目や氷の薄い場所へ進化させるに十分な強力なエネルギーが得られる.

生命起源の場所としての熱水口. 海底の温泉における熱水生態系が発見されると (Corliss et al., 1979), ただちに熱水口が初期地球の生命の起源地として提案された (Corliss et al., 1979). 大洋底の熱水口は生命起源の, 魅力的な場所である. というのは, 鉱物の形で化学的還元力が強く (Wachtershauser, 1998a, 1998b; Holm, 1992), また最大規模の隕石衝突を除いて衝突から保護されている (Maher and Stevenson, 1988; Oberbeck and Fogleman, 1989; Sleep et al., 1989). 噴出口の高温環境が合成を許すか (Shock, 1990, 1992; Hennet et al., 1992), あるいは前駆有機ポリマーを熱分解するか (Miller and Bada, 1988), に関する論争 が続いている. しかし, 前生命的な興味深い反応の酵素として噴出口で集められた鉄やニッケルの硫化物鉱物を使う実質的な実験的進展が始まった.

Wachtershauser(1998a, 1998b, 1990) の提唱によると, 初期地球において前駆水に解けた (aqueous dissolved)CO_2 が鉄や硫化ニッケル鉱物の表面の有機複合体 (compounds) へ還元されることによって有機体の合成が行なわれた可能性がある. この還元のためのエネルギーは, たとえば, FeS と硫化水素 (H_2S) から黄鉄鉱 (pyrite, FeS_2) の exergonic formation によって供給されたかもしれない. 負に帯電した有機酸が静電的に, 正に帯電した黄鉄鉱に縛りつけられ, 一種の「表面代謝」(surface metabolism) が進行するかもしれない. この仮説はいくつもの反論に直面している (de Duve and Miller, 1991; Chyba and McDonald, 1995) が, これに刺激されていくつもの実験が行なわれ結果を出している. たとえば, 金属鉄は, 温度 300 ないし 800C で液体水が存在するという条件の下で, 自身が酸化鉄になり, N_2 を還元してアンモニア (NH_3) を作る (Brandes et al., 1998). 一酸化炭素 (CO) と H_2S をニッケルと硫化鉄粒子の 100C の懸濁液中で混ぜると活性酢酸 (acetic acid) が合成される (Huber and Wächtershäuser, 1997). つまり, この環境は無機炭素を有機炭素に固定するための触媒の作用を行なう. アミノ酸合成はいまのところ示されていないが, この条件の下でアミノ酸があれば, 短いペプチド (peptide) が作れる. ペプチド合成の問題は生命の起源の基本問題であって, 前生命好環境の下でも, いままでは解を見つけることができなかった. 上記実験によっても, 地底での生命の起源を示すことからはほど遠いが, これらは上の仮説を動機とする現在進行中の研究プログラムを代表しており, かなりの成果が得られている.

隕石の証拠. 液体水を持っていたはずの古代火星を除いては唯一の地球外サンプルを提供するのがある種の隕石である. 炭素質コンドライト隕石内では, 地球以前の水変成の実質的証拠が, 鉱物学の観点 (Grimm and McSween, 1989) からも, そのアミノ酸や水酸 (hydroxy acid) プロファイルからも存在し, これらが液体水を要請する Strecker 合成によって形成したことが示唆されている (Peltzer et al., 1984; Cronin, 1989). 小惑星の熱史のモデルによれば, 大きな ($\sim$ 100km) 天体は, その内部に液体水を $\sim 10^8$ 年にわたって保持する可能性があるが, 一方, 有機化学的に最も詳しく調べられているマーチソン隕石は, もっと短い時間, おそらく $\sim 10^4$ 年間液体水内にあったらしい (Peltzer et al., 1984; Lerner, 1995).

炭素質コンドライトが興味深いのは, 地底の熱水環境で生命以前の有機合成例の代表だからである. その歴史の初期において, 炭素質コンドライトは, 2 分子合成に必要な有機モノマー (たとえばアミノ酸) の存在の下で液体水を内部に含むし, 触媒作用をする粘土鉱物表面を持っていた (?). しかしながら, ペプチドあるいはオリゴヌクレオチド (oligonucleotide) が非生物的に生成されたことはまだ報告されていない. Cronin(1976) はマーチソン隕石内に小さなペプチドを探したが, 隕石内の全 acid-labile アミノ酸前駆体のうち 9 モルパーセント以上はペプチドがないと結論した. つまり, 液体水, 前生命有機モノマー, および鉱物触媒がともにあって

も $\sim 10^4$ 年では生命の起源へ向かっての前進のためには短かすぎることを, マーチソン隕石は意味するのか? だとすれば, これは地底深くでの生命の起源への反対論となるのか, あるいはマーチソン隕石には決定的な材料が欠けていることを示すのか? われわれの収集物の中にほかの炭素質コンドライトがあって, マーチソン隕石より長い期間液体水を経験していないだろうか? それらはどんな特徴を示すのだろうか? これは惑星科学と前生命化学の接点に位置する重要な疑問である (Chyba and McDonald, 1995).

RNA 世界. 個々のアミノ酸からのペプチドの前生命的形成問題は, 地球生命起源仮説が直面する唯一のジレンマでは決してない. 第二の例として, 「**RNA** 世界」仮説 (Gilbert, 1986) を考えよう. リボ核酸 (RNA) のある列が触媒活動を示す (Zaug and Cech, 1986) ことが発見されて, 生命起源研究における「卵が先かにわとりが先か」問題への解が提唱された (Dyson, 1985). 問題とされてきたのは, 現代の器官において, デオキシリボ核酸 (DNA) は生物学的蛋白質を構成するアミノ酸列をコーディングして遺伝情報を運ぶが, 蛋白質は DNA の複製に必要である. いったいどちらが先なのか? RNA 世界仮説の示唆するところによると, 現在の DNA 蛋白質世界の以前, 初期地球上では, 遺伝情報溜め機能および触媒活動機能がともに RNA のみによって運ばれた.

重要な前進の一歩 (Joyce, 1991; Joyce and Orgel, 1993) はあったが, RNA 世界仮説はいくつもの困難に直面した (Joyce, 1989). まとめると, 前生命好環境の下で, RNA を構成する正しい成分を合成することは難しい. またこれらの成分を合わせて RNA を作ることは難しい. さらに, RNA が出来たとしても, 長期間熱分解に耐えることは難しい (Chyba and McDonald, 1995).

生命の起源に関する RNA 世界仮説やその他の仮説にまつわるたくさんの不確定性のために, 地球上の生命やそれに似た生命が発生するのかしないのか, そのための環境はどんなものかについて競合する結論を得ることはほぼ不可能である. このような不確定さを前にして, 基本的な判定規準, すなわち液体水の存在, に戻って地球外生命の探索を続けることが最善であろう.

E. 居住可能性の拡張見解

生命起源に必要な前駆的合成に関するあやふやな知識が与えられただけなので, 生命が一般に地底で誕生し得るのか, 世界の表面で誕生し得るのか, あるいは生命の持続のためには両方が必要なのか, 自信をもって答えることができない (Chyba, 1998). 最も保守的な道筋は, 表面液体水の存在する地球型世界を探すことである. この章の残りでは, このような環境の広がりと頻度を見積もることに専念する. 居住可能性をこのように制限しても他の星のまわりには多くの候補地があるなら, われわれが無視した残りによって, 可能な生物アリーナ (Sagan, 1996) は広がりこそすれ, 狭まることはない (?). しかしながら, 居住可能性に関する上記定義はあまりにも保守的過ぎるかもしれないことを心に留めておく必要がある. わが太陽系内の現実では, 地下に液体水を維持する任意の世界を見つめ続けるべきである. 太陽系を越えると, 居住可能であるとわれわれが認識しやすい世界はより保守的な定義を満たす世界であろう.

III. 星周居住可能ゾーン

A. 居住可能ゾーンの伝統的定義

星周居住可能ゾーン (HZ) とは,

(1) 単独星または多重星系のまわりの空間体積
(2) 地球型惑星があって液体水を表面に持つ.

地球型惑星とは,

(1) 質量と組成が地球に似ている.
(2) 表面に CO_2, H_2O, および N_2 を持つ. (Kasting et al., 1993; KWR と引用する.)
(3) 質量の下限あり ($> 0.1M_\oplus$). 気候を安定化する硅酸 (carbonate-silicate) の負のフィードバックサイクルを駆動するに十分な地質学的活動のため.

注意: (i) HZ は中心星の光度変化に伴って変化する.
(ii) 自転軸が傾き過ぎていてもだめ
(iii) 中心星まわりの公転と自転が同期していてもだめ.

B. 太陽の居住可能ゾーンの進化

主系列星としての太陽

(1) はじまりは $0.1\mathrm{L}_\odot$, 温度はいまより数百度低い.
(2) 自転は速かった.
(3) 磁場, 太陽風, X 線, および紫外線は強かった.
(4) 黒点も多かっただろう.
(5) 110 億年続く.
(5) この時期の終りには $2.2\mathrm{L}_\odot$

居住可能ゾーンの進化

(1) 太陽光流量 $S_1(T) = L(t)/r_1^2$, $S_2(T) = L(t)/r_2^2$, (現在地球のでは $1360\mathrm{W/m^{-2}}$)
(2) ここで r_1, r_2 は居住可能ゾーンの内径と外径 (単位は AU)
(3) L(t) は光度

r_1 についての条件

(1) $L_1 = 1.1, 1.4, 1.76$
(2) 金星は過去 10 億年, 表面に液体水がなかった.

r_2 についての条件

(1) $L_2 = 0.32, 0.36, 0.53$
(2) 初期の火星は HZ 内にあった (Pollack et al., 1987)
(3) 火星は $0.1\mathrm{M}_\oplus$ だから地球型ではない. 地球質量が火星のところにあれば話は違った.

C. 他の星のまわりの居住可能ゾーンの進化

考える範囲は $0.5 < M < 1.5M_\odot$

重い星

(1) 大きな居住可能ゾーン. しかし複雑な有機体の進化のためには短かすぎる寿命
(2) O 型星は寿命が $\sim 10^6$ 年

(3) $L \propto M^{4.75}$, $\tau_{ms} \propto M^{-3.75}$.
(4) 寿命 >2 億年 $\leftrightarrow M < 1.5M_{\odot}$

軽い星 (1) 寿命 > 宇宙年齢 $\leftrightarrow M < 0.5M_{\odot}$

IV. 居住可能ゾーン内での惑星集積

A. 単独星居住可能ゾーンでの惑星形成

Wetherill(1996) は質量 0.5 - 1.5 $M_{\odot}$ の星のまわりの地球型惑星の形成 (降着) 問題を数値的に調べた. 彼によると, 太陽系のものと大きく違わない星周円盤の場合, 出来上がる地球型惑星の数と分布は星の質量にはあまり依らず, しかも 1 AU のあたりに集中する. しかし, 居住可能ゾーンの場所は星の質量に強く依存し, 低質量の場合は 1 AU より内側にあり, 高質量星の場合地球型星の外側にある. つまり, 低質量星のまわりでは地球型惑星は寒過ぎるし, 高質量星のまわりでは地球型惑星は暑すぎる. 1 $M_{\odot}$ 星の場合, 居住可能ゾーン内にいつも $M > 1/3M_{\oplus}$ の惑星ができる. 太陽系のものと同じ星周円盤を仮定することに加えて, Wehterill のシミュレーションでは木星型惑星の存在を仮定した. 木星型惑星がなければ, 同じ面密度でも地球型惑星の質量の中央値は 2 $M_{\oplus}$ であった.

基本仮定, すなわち太陽系と同じ星周降着円盤としたことは, 一般にはあてはまらないだろう. たとえば, 円盤の質量分布は星の質量でスケーリングされ (KWR; WR), 低質量星のまわりでは地球型惑星は 1 AU より内側にでき, 高質量星のまわりでは 1 AU より外側にできるだろう. そのため惑星は居住可能ゾーン内にできやすいだろう. KWR の議論によると, 惑星形成距離は星の質量でスケーリングされることが示唆される. その上, 惑星間距離が対数的に分布する (すなわち, 距離の各桁に同じ数の惑星が並ぶ) ことを仮定する (これは太陽系の木星型惑星系でも, またいくつかの研究でも (Isaacman and Sagan, 1977; Lissauer 1995a, 1995b; Wetherill,1996) 示されている), 居住可能ゾーン内の惑星の数は星の質量に依らないことを WR が示した. この結論が正しければ, 銀河の居住可能惑星のほとんどは K 型星および高質量 M 型星のまわりにあるはずである.

しかし, これらの結果には不確定性がつきまとう. 1 AU 以内ずっと主星近くの木星型惑星, いわゆる「高温木星」('hot Jupier')(Marcy and Butler, 1998) の起源の問題を理解する必要がある. これらの天体があれこれの移住メカニズムで生じた (Weidenschilling and Marzari, 1996; Murray et al., 1998; Trilling et al., 1998) なら, 居住可能ゾーン内の地球型惑星形成へのこれらの移住のかかわりは, 理解すべき重要な事柄である.

B. 連星系の居住可能ゾーンでの惑星形成

Whitmire et al.(1998) は連星系の居住可能ゾーン内の地球型惑星形成を数値的に調べた. 太陽系の現行地球型惑星形成モデルを仮定して, 居住可能ゾーン内での惑星成長を伴星が邪魔する条件を彼らは調べた. 伴星の影響で,
(1) 暴走成長タイムスケール内に微惑星軌道が交差してしまう.
(2) 軌道交差の間に微惑星同士の相対速度が大きくなって, 降着するのではなく, 破壊的な衝突になる,
と, 惑星の暴走成長はできなくなる. 2 太陽質量の連星で, 微惑星が一方の星のまわり 1 AU を回っており, 連星の離心率が典型的な値 0.5 の場合, 惑星形成を邪魔しない連星間最小距離は $a_c = 32AU$ である. 連星の離心率 e_B, 伴星質量 m, 臨界破壊速度 U_c, および微惑星の平均位置

$\overline{a}$ がある範囲にわたるときの数値結果も得られている. これらパラメータと臨界軌道半長径との間の経験的関係式が次のように与えれられる.

$$a_c = 16(1-e_B)^{-1}(m/M_\odot)^{0.31}(\overline{a}/1AU)^{0.80}(100ms^{-1}/U_c)^{0.30}AU.$$

m を固定すると, e_B への依存性は一定近星点距離に対応する. 2 個の 1 $M_\odot$ 星の場合, この定数は 16 AU である. G 型矮星のバイアス補正後のサンプルからの軌道要素分布に基づくと (Duquennoy and Mayor, 1991), 太陽型星の連星の少なくとも 60 %は, 伴星の摂動効果だけからは居住可能性を否定し去ることはできない.

Whitmire et al.(1998) の発見によると, 新たに発見された巨大ガス惑星や褐色矮星を持つ 18 の系のうち 12 個は, 1 AU 以内に居住可能惑星を持つことが否定されている. ただしその際, 伴星はいまいるところで出来たと仮定されている. これらが主星から 1AU 以遠で形成し, 移住によってあるいは散乱によって内側に来たとすれば, これらの系の大部分は排除されるだろう. しかし, 観測星のたった ~ 5 %しか, 検出限界 ($\sim 3AU$ 未満) に巨大ガス惑星や褐色矮星を持たない (Marcy and Butler, 1988) ことに注意すべきである.

V. 居住可能ゾーン内での居住可能性

A. 自転軸の傾き

月がなければ地軸の傾きは $0 \sim 85°$ の範囲をカオス的に変動するだろう (Laskar et al., 1993). 月は火星サイズの惑星胚がストカスティックにかすめるように衝突してできたと信じられている. このタイプの衝突は惑星形成過程では普遍的ではない. 地球が大きな月を持つ唯一の惑星であるという事実がこの発想を支持する. 自転軸が大きく傾いている惑星上では極端な気候変動が起こるであろうから, 居住可能惑星の数は少ないだろうと Laskar et al. は考えている. 地軸の大きなカオス的変動は, ほかの惑星とくに木星の存在や地球の四重極モーメントの存在による.

自転軸の極端な傾きは惑星を居住不可能にするという主張をテストするために, Williams and Kasting(1997) はエネルギーバランス気候モデルを使って, 傾き 90° まで地球の気候をシミュレートした. 彼らによると, 地球の気候は局所的に厳しくなり, 季節変化が大きい. またそれにともなって温度は大陸の中緯度および高緯度で極端に変化し, ある種の生命にとっては有害である. このような変動が生命の起源や微生物にとって問題となるかというと, それほどでもない (Chyba, 1996a). 自転軸の変動への地球型惑星の応答は海陸分布や居住可能ゾーン内での位置に依存する. 中程度の大陸が数個あったり, 赤道帯に超大陸のある惑星は, 極地方に超大陸のある惑星より気候は安定である. 居住可能ゾーンの外縁近くの惑星の場合, 自転軸の高傾斜の影響は小さい. なぜなら, 炭酸塩–硅酸塩サイクルに応答して大気中に CO_2 が蓄積されるだろうから. CO_2 の濃い大気は熱を効率的に運ぶから, 季節変動や緯度方向の温度勾配の大きさを制限する. したがって, 系外地球型惑星は, たとえ自転軸が大きく変動してもかなりの割合で居住可能であろう.

B. 自転同期惑星

Dole(1964) は M 型矮星のまわりの居住可能惑星の自転は同期しているだろうと指摘した. この場合, 一方の半球は母星によって常に照らされ, もう一方の半球は永遠の闇に閉ざされる. 後期 K 型矮星の居住可能ゾーン内の惑星も自転同期している可能性がある (KWR). M 型矮星

は質量が $0.1 - 0.5\ M_\odot$ の範囲にあり, 宇宙でもっとも数が多い ($\sim 75\ \%$) と信じられている (Rodono, 1986). (しかし最近の観測によれば, 質量範囲 $0.1 - 0.3 M_\odot$) の M 型星は従来信じられていたより 1 桁以上数が少ない (Gould et al., 1997).) 自転同期すつ惑星の大気が放射対流平衡にあれば, 太陽側の温度は非常に高く, 夜側は寒過ぎて大気に重要成分は地表に凝縮してしまうだろう.

Joshi et al.(1997) は 3 次元気候モデルを使って, 居住可能ゾーン内の自転同期惑星上での大気崩壊の条件を調べた. 彼らの結果によると, CO_2 の分圧が炭素–硅酸塩サイクルによって制御されているなら, 惑星が夜側に液体水を維持ためには CO_2 が $1 - 1.5$ バールの表面圧力を最低でも持つ必要がある. 大気が崩壊しないための最小気圧は ~ 30mb である. だから, かれらの結論は, M 型星の居住可能ゾーン内の自転同期惑星は広い範囲の初期条件にわたって大気を維持することができ, ある種の条件の下では液体水も維持できるというものである.

C. 系外巨大惑星のまわりの居住可能ゾーン

太陽型星 16 Cyg B のまわりの木星型惑星は楕円軌道を回り, 居住可能ゾーンにある. 星 47 UMa には木星型惑星が円軌道で回っており, それは居住可能ゾーンの外縁にある. 木星型惑星自身は居住可能でないと思われるが (Chyba, 1997), これが居住可能な大衛星を持つかもしれれない. Williams et al.(1997) はこのような月の居住可能性の制約条件を調べた. かれらによると, 居住可能ゾーンにある木星型惑星や褐色矮星を回る岩石衛星が居住可能であるための条件は次の 2 つである.
(1) 大気を維持するために, 衛星の質量 $\geq 0.12 M_\oplus$;
(2) 母惑星の磁気圏からの高エネルギーイオンの流入をふせぐための十分強い磁場がある
長期の居住可能性のためには, 炭酸塩–硅酸塩サイクルが働く必要があり, したがって何らかの形の地質学的活動が必要である. これが放射性の熱で駆動されるためには $0.23 M_\oplus$ が質量の下限である. 月がイオのようにもっと遠くの衛星との共鳴軌道にあれば, 潮夕加熱によってプレートテクトニクスやそのほかの地質学的活動に必要なエネルギーが供給されるだろうから, 数十億年の時間にわたって表面に液体水が維持できるだろう.

VI. 結論**:** 生命のための拡大するアリーナ

実際上の問題として, 少なくとも現在のところ, 地球外生命の探索は, われわれの知っている生命, つまり液体水中で有機分子から作られた生命の探索である. 有機物は太陽系にも (Cruikshank, 1997), 星間空間にも (Pendleton and Chiar, 1997) 普遍的に存在するから, 液体水は地球外生命探索の焦点となっている.

最近はっきりしてきたように, 地球には地底生命圏が存在する (Gold, 1992; Whitman et al., 1998). いまのところ, 生命が地底で発生するかどうか未解決である. だから, 存在が推定される地底の液体水条件が火星やオイロパにも存在し, ここがわが太陽系やほかの系での生命発生の好都合な場所であり得る.

地球外居住可能環境としてもっと保守的かつ観測的にもっともらしい条件は, 地底の液体水ではなくて表面の液体水である. これを仮定して,「星周居住可能ゾーン」を, 星 (または星系) のまわりの空間体積のうち地球型惑星が液体水を維持できる部分と定義する. このゾーンは星の光度の変化につれて変わり得るが, 太陽質量の 0.1 倍から 1.5 倍の星のまわりには数十億年にわたって居住可能ゾーンが存在する. 居住可能性を保守的に定義しても, ほかの星のまわりに生命のための場所が多数あることが示唆される.

星のまわりの居住可能ゾーン内の惑星のスペクトルに酸素や水が検出されれば, 生命の重要な証拠であろう (Woolf and Angel, 1998). 酸素や水とともにメタンが存在すればもっと可能性が高まる. ただし, ガニメデもオイロパも大気中に分子酸素を持つ証拠があることに注意しよう (Spencer et al., 1995; Hall et al., 1995). 実際, オイロパは O_2 の薄い大気を持つ (Hall et al, 1995). この大気は木星磁気圏からの高エネルギー粒子による氷のスパッタリングによると考えられている (Sieger et al, 1998). 火星へのバイキングミッションで学習したとおり, 予期されていた確かな生物学の兆候は, 予期されなかった非生物学的過程に直面して, あいまいになってしまった.

とはいえ, 太陽系近傍の系外惑星上に生命が存在することを強く示唆する分光学的しるしを検出することが, 存在する技術あるいは近未来の技術の範囲内で出来ることがわかって興味深い (Woolf and Angel, 1998). 軌道赤外望遠鏡を干渉計として使ってこのような測定をしようという提案がなされている. 現在進行中の SETI 探索は, 地球外生命探索においてこれを補完する役割を果たす (Tarter and Michaud, 1990; Dick, 1996; Tarter, 1997). 地球外生物 (biology) を発見する確度を定量的に見積もるには, われらが知識はあまりにも貧弱であるが, 地底生命圏の発見, 太陽系内の地下液体水環境, 星周居住可能ゾーンがかつて考えられたよりは大きな範囲に広がっていることに関する認識, および系外惑星の発見等を結び合わせれば, 次の 10 年は天文学の歴史において, 地球外生物学的に約束された期間になるであろう.

参考文献

Anderson, R.T., Chapelle, F.H. and Lovley, D.R. 1998. Evidence against hydrogen-based microbial ecosystem in basalt aquifers, *Science* **281**, 976-977.

Barrow, J.D. and Tipler, F.J. 1986. *The Anthropic Cosmological Principle*(Oxford University Press, New York).

Bieman, K. Oro, J. Toumin, P. Orgel, L.E., Nier, A.O., Anderson, D.M., Simmonds, P.G. Flory, D., Diaz, A.V., Rushneck, D.R., Biller, J.E., and Lafleur, A.L. 1977. The search for organic substances and inorganic volatile compounds in the surface of Mars, *J. Geophys. Res.* **82**, 4641-4658

Blum, H.F. 1962. *Time's Arrow and Evolution*(Harper and Brothers, New York).

Bodenheimer, P. 1989. The impact of stellar evolution on planetary system development, *The Formation and Evolution of Planetary Systems*(H.A. Weaver and I. Danly eds.), Cambridge University Press, cambridge, pp.243-273.

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

Brandes, J.A., Boctor, N.Z., Cody, G.D., Cooper, B.A., Hazen, R.M., and Yoder, H.S. 1998. *Nature* **395**, 365-367.

Breaker, R.R. and Joyce, G.F. 1994. Emergence of a replicating species from an *in vitro* RNA evolution reaction, *Proc. natl Acad Sci. USA* **91**, 6093-6097.

Caldeira, K. and Kasting, J.F. 1992. Susceptibility of the early Earth to glaciation caused by carbon dioxide clouds, *Nature* **359**, 226-228.

Campbell, I.B. and Claridge, G.G.C. 1987. *Antarctica: Solis, Weathering Processes and Environment* (Elsevier, Amsterdam).

Carr, M.H., Belton, M.J.S., Chapman, C.R., Davies, M.E., Geissler, P., Greenberg, ., McEwen, A.S., Tufts, B.R., Greeley, R., Sullivan, R., head, J.W., Pappalardo, R.T., Klaasen, K.P., Johnson, T.V., kaufman, J., Senske, D., Moore, J., Neukum, G., Schubert, G., Burns, J.A., Thomas, P. and Veverka, J. 1998. Evidence for a subsurface ocean on Europa, *Nature* **391**, 363-365.

Chyba, C.F. 1996a. Catastrophic impacts and Drake equation, in *Astronomical and Biochamical origins and the Search for Life in the Universe*, eds. C.B. Cosmovici, S. Bowyer, and D. Werthimer(Editrice Compositori, Bologna), pp. 157-164.

Chyba, C.F. 1996b. Are comets necessary for a habitable zone?, in *Circumstellar habitable Zones*, Ed L.R. Doyle (Travis House Publications, Menlo Park, CA), pp. 277-281.

Chyba, C.F. 1997. Life on other moons, *Nature* **385**, 201.

Chyba, C.F. 1998. Buried Beginning, *Nature*(in press).

Chyba, C.F. and McDonald, G.D. 1995. The origin of life in the Solar System: Current issues, *Ann. Rev. Earth Planet Sci.* **23**, 215-249.

Chyba, C.F. and Sagan, C. 1992. Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic molecules: An inventory for the origins of life, *Nature* **355**, 125-132

Chyba, C.F. and Sagan, C. 1997. Comets as a source of prebiotic organic molecules for the early Earth, in *Comets and the origin and Evolution of Life*, Eds P.J. Thomas, C.F. Chyba, and C.P. Mckay(Springer, New York), pp. 147-173.

Chyba, C.F., McKinnon, W.B., Coustenis, A., Johnson, R.E., Kovach, R.L., Khurana, K., Lorenz, R., McCord, T.B., McDonald, G.D., Pappalardo, R.T., Race, M. and Thomson, R. 1999. Europa and Titan: Preliminary recommendations of the Campaign Strategy Working Group on Prebiotic Chemistry in the outer Solar System, *Lunar Planet Sci. Conf. 30*, submitted.

Clark, B.C., Baker, A.L., Cheng, A.F., Clemett, S.J., Mckay, D., McSween, H.Y., Pieters, C., Thomas, P. and Zolensky, M. 1998. survibal of life on asteroids, comets and other small bodies, *Orig. Life Evol. Biosph*, accepted for publication.

Corliss, J.B., Baross, J.A., and Hoffman, S.E. 1981. An hypothesis concerning the relationship between submarine hot spring and the origin of life, *Oceanologica Acta* SP, 59-69.

Corliss, J.B. Dymond, J., Gordon, L.I., Edmond, J.M., von Herzen, R.P. et al. 1979. Submarine thermal springs on the Galapagos rift, *Science* **203**, 1073-1083.

Cronin, J.R. 1976. Acid-labile amino acid precursors in the Murchison meteorite H: A search

for peptides and amino acyl amides, *Orig. Life Evol. Biosph* **7**, 343-348.

Cronin, J.R. 1989. origin of organic compounds in carbonaceous chondrites, *Adv. Space Res.* **9**, 59-64.

Cruikshank, D.P. 1997. Organic matter in the outer Solar System: From the meteorites to the Kuiper belt, in *From Stardust to Planetesimals*, eds Y.J. pedleton and A.G.G.M. Tielens, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, pp. 315-333.

Day, W. 1984. *Genesis on Planet Earth*, 2nd ed.(Yale University press, New haven).

de Duve, C. and Miller, S.L. 1991. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **88**, 10014-10017.

Des Marais, D.J. 1994. Tectonic control of the crustal organic carbon reservoir during the Precambrian, *Chem. Geol.*, 303-314.

Des Marais, D.J. 1996. Has life made its global environment more habitable?, in *Circumstellar Habitable Zones*, ed L.R. Doyle (Travis House Publications, Menlo Parl, CA), pp. 371-377.

Dick, S.J. 1964. *The Biological Universe*(Cambridge University Press, New York).

Dole, S.H. 1964. *Habitable Planets for Man*(Blaisdell Publishing Co., New York).

Duquennoy, A. and Mayor, M. 1991. Multiplicity among solar-type stars in the solar neighborhood. II Distribution of the orbital elements in an unbiased sample, *Astron. Astrophys.* **248**, 485-521.

Dyson, F. 1985. *Origin of Life*(Cambridge University Press).

Feinberg, G. and Shapiro, R. 1980. *Life Beyond Earth*(William Morrow and Co., New York).

Fleischaker, G.R. 1990. Origins of life: Am operational definition, *Orig. Life Evol. Biosph.* **20**, 127-137.

Forget, F. and Pierrehumbert, R.T. 1997. Warming early Mars with carbon dioxide clouds that scatter infrared radiation, *Science* **278**, 1273-1276.

Gilbert, W. 1986. The RNA world, *Nature* **319**, 618.

Gold, T. 1992. The deep, hot biosphere, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **89**, 6045-6049.

Goldspiel, J.M. and Squyres, S.W. 1991. Ancient aqueous sedimentation on Mars, *Icarus* **89**, 392-410.

Gould, A., Bachall, J.N. and Flynn, C. 1997. M dwarf from the Hubble space telescope star counts: The Groth strip, *Ap. J.* **482**, 913-918.

Graedel, T., Sackmann, I. and Boothroyd, A. 1991. Early solar mass loss: A potential solution to the weak Sun paradox, *GRL* **18**,m 1881-1884.

Grimm, R.E. and McSween, H.Y. 1989. Water and thermal evolution of carbnaceous chondrite bodies, *Icarus* **82**, 244-280.

Hall, D.T. Strobel, D.F., Feldman, P.D., McGrath, M.A., and Weaver, H.A. 1995.

Hart, M.H. 1979. Habitable zones around main sequence stars, *Icarus* **37**, 351-357.

Hayes, J.M., Kaplan, I.R. and Wedeking, K.W. 1983. Precambrian organic geochamistry: Preservation of the record, in *Earth's Earliest Biosphere*, ed. J.W. Schopf(Princeton University Press), pp. 93-134.

Heath, M. 1996. The forest-habitability of Earthlike planets, in *Circumstellar Habitable Zones*, ed. L.R. Doyle(Travis House Publications, Menlo Park, CA), pp. 445-457.

Hennet, R.J.C., Holm, N.G., and Engel, M.H. 1992. Abiotic synthesis of amino acids under hydrothermal conditions and the origin of life: A perpetual phenomenon?, *Naturwissenschaften* **79**, 361-365.

Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P., and Schrag, D.P. 1998. A neoproterozoic snowball Earth, *Science* **281**, 1342-1346.

Horowitz, N.H. 1986. *To Utopia and Back: The Search for Life in the Solar System*(W.H. Freeman and Co., New York).

Huang, S.-S. 1960. Life ouside the solar system, *Sci. Amer.* **202**, 55-63.

Huber, C. and Wachtershauser, G. 1997. *Science* **276**, 245.

Huber, C. and Wachtershauser, G. 1998. peptides by activation of amino acids with CO on (Ni,Fe)S Surfaces: Implications for the origin of life, *Science* **281**, 670-672.

Hunten, D.M. 1979. Possible Oxidant sources in the atmosphere and surface of Mars, *J. Mol. Evol.* **14**, 71-78.

Isaacman, R. and Sagan, C. 1977. Computer simulation of planetary accretion dynamics: Sensitivity to initial conditions, *Icarus* **31**, 510-533.

Johnson, T.V., Chyba, C., Klaasen, K.P., and Terrile, R.J. 1999. Outer Planets/ Solar probe Project: Europa orbiter, *Lunar Planet. Sci. Conf. 30*, submitted.

Joshi, M.M., Haberbe, R.M., and Reynolds, R.T. 1997 Simulations of the atmospheres of synchronously rotating terrestrial planets orbiting M dwarf: Conditions for atmospheric collapse and the implications for habitability, *Icarus* **129**, 450-465.

Joyce, G.F. 1989. RNA evolution and the origins of life, *Nature* **338**, 217-224.

Joyce, G.F. 1991. The rise and fall of the RNA world, *New Biol.* **3**, 399-407.

Joyce, G.F. 1993. Climbing Darwin's ladder, *Curr. Biol.* **3**, 703-704.

Joyce, G.F. 1994. The RNA world: Life before DNA and protein, in *Extraterrestrials–Where are they?*, eds. B. Zuckerman and M. Hart(Cambridge University Press, Cambridge, MA), pp. 139-151.

Joyce, G.F. and Orgel, L.E. 1993. Prospects for understanding the RNA world, in *The RNA Worlds*, eds. R.F. Gesteland and J.F. Atkins (Cold Spring Harbor Lab. Press, Cold Spring Harbor), pp. 1-25.

Kasting, J. 1988. Runaway and moist greenhouse atmosphere and the evolution of Earth and Venus, *Icarus* **74**, 472-494.

Kasting, J.F. 1989. Longterm stability of the Earth's climate, *Paleogeor. Paleoecol.* **75**, 83-95.

Kasting, J. 1991. CO_2 condensation and the climate of early Mars, *Icarus* **94**, 1-13.

Kasting, J.F., Whitmire, D.P., and reynolds, R.T. 1993. *Icarus* **101**, 108-128.

Khurana, K.K., Kivelson, M.G., Stevenson, D.J., Schubert, G., Russell, C.T., Walker, R.J., and Polanskey, C. 1998. Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto, *Nature* **395**, 777-780.

Klein, H.P. 1978. The Viking biological experiments on Mars, *Icarus* **34**, 666-674.

Klein, H.P., Horowitz, N.H., Oyama, V.I., Lederberg, J., Rich, A., Hubbard, J.S., Hobby, G.L., Dtraat, P.A., berdahl, B.J., Carle, G.C., Brown, F.S., and Johnson, R.D. 1978. The Viking biological investigation: Preliminary results, *Science* **194**, 99-105.

Kuppers, B. 1990. *Information and the origin of Life* (MIT Press, Cambridge, MA).

Kushner, D. 1981. Extreme environments: Are there any limits to life?, in *Comets and Origin of Life*, ed. C. Pannamperuma(Hingham, MA: Reidel), pp.241-248.

Laskar, J. and Robutel, P. 1993. The chaotic obliquity of the planets, *Nature* **361**, 608-614.

Lebreton, J. 1997. Huygens Titan atmospheric probe, in *Encyclopedia of Planetary Science*, eds. J.H. Shirley and R.W. Fairbridge(Chapman and Hall, New York), pp. 311-314.

Lederberg, J. 1960. Exobiology: Approaches to life beyond the Earth, *Science* **132**, 393-398.

Lederberg, J. 1965. Signs of life: Criterion-system of exobiology, *Nature* **207**, 9-13.

Lerner, N.R. 1995. Influence of Murchison or Allende minerals on hydrogen-deuterium exchange of amino acids, *Geochim. Cosmochim. Acta* **59**, 1623-1631.

Levin, G.V. and Straat, P.A. 1981a. A search for a non-biological explanation of the Viking Labeled Release Kife Detection Expreimant, *Icarus* **45**, 494-516.

Levin, G.V. and Straat, P.A. 1981b. Antarctic soli No. 726 and implications for the Viking Labeled Release Experiment, *J. Theor. Biol.* **91**, 41-45.

Lissauer, J.J. Urey Prize lecture: On the diversty of plausible planetary systems, 1995, *Icarus* **114**, 217-236.

Maher, K.A. and Stvenson, D.J. 1988. Impact frustration and the orogin of life, *Nature* **331**, 612-614.

Marcy, G.W. and Butler, R.P. 1998. Detection of extrasolar giant planets, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 57-97.

Matson, D.L. 1997. Cassini mission, in *Encyclopedia of Planetary Science*, eds. J.H. Shirley amnd R.H. Fairbridge(Chapman and Hall, New York), pp. 84-87.

Mazur, P. 1980. Limits to life at low temperatures and at reduced water contents and water activities, *Orig. Life Evol. Biosph.* **10**, 137-159.

McKay, C.P. 1986. Exobiology and future Mars missions: The search for Mars' earliest biosphere, *Adv. Space Res.* **6**, 269-285.

McKay, C.P. 1996. Time for intelligence on other planets, in *Circumstellar Habitable Zones*, ed. L.R. Doyle(Travis House Publications, Menlo park, CA), pp. 405-419.

McKay, C.P. and Stoker, C.R. 1989. The early environment and its evolution on Mars: Imlications for life, *Res. geophys.* **27**, 189-214.

Miller, S.L. and bada, J.L. 1988. Submarine hot springs and the origin of life, *Nature* **334**, 609-611.

Miller, S.L. and Urey, H.C. 1959. organic compound synthesis on the primitive earth, *Science* **130**, 245-251.

Murray, N., Hansen, B., Holman, M., and Tremaine, S. 1998. Migrating planets, *Science* **279**, 69-72.

Nealson, K.H. 1997a. Sediment Bacteria: Who7s there, what are they doing, and what's new?, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* **25**, 403-434.

Nealson, K.H. 1997b. The limits of life on Earth and searching for life on Mars, *J. Geophys. Res.* **102**, 23675-23686.

Oberbeck and Fogleman. 1989. Impacts and the origin of life, *Nature* **339**, 434.

Oro, J. Squyres, S.W., Reynolds, R.T., and Mills, T.M. 1992. Europa: Prospects for an ocean and exobiological implications, in *Exobiology in Solar System exploration*, eds. G.C. Carle, D.E. Schwartz, and J.L. Huntington(NASA SP-512), pp. 103-125.

Pappalardo, R.T. et al. 1999. Does Europa have a subsurface ocean? Evaluation of geological evidence, *J. Geophys. res.*, submitted.

Pelzer, E.T., Bada, J.L., Schlesinger, G., and Miller, S.L. 1984. The chemical conditions on the parent body of the murchison meteorite: Some comclusions based on amino, hydroxy and dicarboxylic acids, *Adv. Space res.* **4**, 69-74.

Pendleton, Y.P. and Chiar, J.E. 1997. The nature and evolution of interstellar organics, in *From Stardust to Planetesimals*, eds. Y.J. Pendleton and A.G.G.M. Tielens(Astronomical Society od the Pacific, San Francisco), pp. 179-200.

Pollack, J.B., Kasting, J.F., Richardson, S.M., and Poliakoff, K. 1987. The case for a wet warm climate on early Mars, *Icarus* **71**, 203-224.

Reynolds, R.T., Mckay, C.P., and Kasting, J.F. 1987. Europa, tidally heated oceans, and habitable zones around giant planets, *Adv. Space res.* **7**, 125-132.

Reynolds, R.T., Squyres, S.W., Colburn, D.S., and McKay, C.P. 1983. On the habitability of Europa, *Icarus* **56**, 246-254.

Rodono, M. 1986. *Astron. Astrophys.* **165**, 135.

Sackmann, I.-J., Boothroyd, A.I., and Kraemer, K.E. 1993. Our Sun. III Present and Future, *Ap. J.* **418**, 457-468.

Sagan, C. 1970. Life, in *Encyclopedia Britanica.*

Sagan, C. 1996. Circumstellar habitable zones: An introduction, in *Circumstellar habitable Zone*, ed. L.Doyle(Menlo Park, CA: Travis House Publishing), pp. 3-14.

Sagan, C. and Chyba, C. 1997. The early faint Sun paradox: Organic shielding of ultraviolet-labile greenhouse gases, *Science* **276**, 1217-1221.

Sagan, C., Thompson, W.R., and Khare, B.N. 1992. Titan: A laboratory for prebiological organic chemistry, *Acc. Chem. Tes.* **25**, 286-292.

Shock, E.L. 1990. Do amino acids equilibrate in hydrothermal fluids?, *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, 1185-1189.

Shock, E.L. 1992. Stability of peptides in high-temperature aqueous solutions, *Geochim. Cosmochim. Acta* **56**, 3481-3491.

Sieger, M.T., Simpson, W.C., and Orlando, T.M. 1998. Production of O_2 on icy satellites by electronic excitation of low-temperature water ice, *Nature* **394**, 554-556.

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

Solomon, S.C. and head, J.W. 1991. Fundamental issues in the geology and geophysics of Venus, *Science* **252**, 252-260.

Spencer, J.R., Calvin, W.M., and Person, M.J. 1995. Charge-coupled device spectra of the Galilean satellites: Molecular oxygen on Ganymede, *J. Geophy. Res.* **100**, 19049-19056.

Stevens, T.O. and McKinley, J.P. 1995. Lithotrophic microbial ecosystems in deep basalt aquifers, *Science* **270**, 450-453.

Tarter, J.C. 1997. Results from Project Phoenix: Looking up from Down Under, in *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe*, eds. C.B. Cosmoviti, S. Bowyer, and D. Werthimer (Editrice Compositori, Bologna).

Tarter, J.C. and Michaud, M.A. 1990. (eds.) *Acta Astronaut* **21**, 69-154.

Trilling, D.E., Benz, W., Guillot, T., Lunine, J.I., Hubbard, W.B., and Burrows, A. 1998. Orbital evolution and migration of giant planets: Modeling extrasolar planets, *Astrophys. J.* **500**, 428-439.

Vishniac, H.S. 1993. The microbiology of antarctic soils, in *Antarctic Microbiology*, ed. E.I. Friedman(Wiley-Liss), pp. 297-341.

von Kiedrowski, G. 1986. A self-replicating hexadeoxynucleotide, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **25**, 932-935.

Wachtershauser, G. 1988a. Pyrite formation, the first energy source for life: A hypothesis, *Syst. Appl. Microbiol* **10**, 207-210.

Wachtershauser, G. 1988b. Before enzymes and templates: Theory of surface metabolism, *Microbiol. rev.* **52**, 452-484.

Wachtershauser, G. 1990. The case for the chemoautotrophic origin of life in an iron-sulfur world, *Orig. Life Evol. Biosph.* **20**, 173-176.

Wald, G. 1984. the origin of life, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **52**, 595.

Walker, J.C.G., Hays, P.B., and Kasting, J.F. 1981. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature, *J. geophys. Res.* **86**, 9776-9782.

Weidenschilling, S.J. and Marzari, F. 1996. Gravitational scattering as a possible origin for giant planets at small stellar distances, *Nature* **384**, 619-621.

Wetherill, G.W. 1991. Occurrence of Earth-like bodies in planetary systems, *Science* **253**, 535-538.

Wetherill, G.W. 1996. The formation and habitability of extra-solar planets, *Icarus* **119**, 219-238.

Whitman, W.B., Coleman, D.C., and Wiebe, W.J. 1998. Prokaryotes: The unseen majority, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **95**, 6578-6585.

Whitmire, D.P., Doyle, L.R., Reynolds, R.T., and Matese, J.J. 1995. A slightly more massive young Sun as an explanation for warm temperature on early mars, *J. Geophys. Res.* **100**, 5457-5464.

Whitmire D.P. and Reynolds, R.T. 1996. Circumstellar habitable zones: Astrophysical considerations, in *Circumstellar habitable Zones*, Proceedings of the first international conference, ed. L.R. Doyle(Travis House Publications, Menlo Parl, CA), pp. 117-142.

Whimire, D.P., Matese, J.J., Criswell, L., and Mikkola, S. 1998. Habitable planet formation in binary star systems, *Icarus* **132**, 196-203.

Williams, D.W. and Kasting, J.F. 1997. Habitable plantes with high obliquity, *Icarus* **129**, 254-267.

Williams, D.W., Kasting, J.F., and Wade, R.A. 1997. Habitable moons around extrasolar giant planets, *Nature* **385**, 234-236.

Woolf, N. Angel, R. 1998. Astronomical searches for Earth-like planets and signs of life, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 507-537.

Zaug, A.J. and Cech, T.R. 1986. The intervening sequence RNA of *Tetrahymena* is an enzyme, *Science* **231**, 470-475.