生命史研究の潮流

磯 崎 行 雄*

History of Life: trends in research

Yukio ISOZAKI *

Abstract

Current trends in research on history of life are briefly reviewed. Since the 1990s study on deep past focusing on early life on Earth and Mars has become popular. This trend often called astrobiology will be a main stream in earth science in this century because it involves the latest human issues, such as global environment, energy, food, world population, and search for habitable planets outside the solar system, in addition to conventional studies on the evolution of Earth and life. Studies on chemofossils of nanometric scale and on geochemical proxies for evaluating paleoenvironments will be the most important targets in this research field. Inevitable in Japan are overhaul of the current domestic-oriented atmosphere in the geological community and deployment of a new research style under a long-term scope.

Key words : history of life, paleontology, stratigraphy, astrobiology, chemofossil, geochemical proxy

キーワード : 生命史, 古生物学, 層序学, アストロバイオロジー, 化学化石, 地球化学的指標

I. はじめに

2005年夏に世界人口は65億人に達した。一方、世界中の旧石器時代の遺跡分布に基づく、その当時の世界人口は約500万人だったと推定される。たかだか600-700万年に過ぎない人類史の中でも最後の10万年前頃から、人間はなんと1000倍以上に増殖したことになる。現在の地球における有機物生産の大半を支える光合成総量には、地球の表面積や年間日射量などの制限から、明らかに上限がある。また大が小を食べるという食物連鎖のピラミッド構造からはいかなる生物も逃げられないので、この限られた地球上で特定の動物が無限に増殖することは通常起りえない。

い。人類異常繁殖の理由として、人類だけが農業・科学技術・医学という現世の他の生物には絶対できない3つの技を発達させたこと、あるいは他の生物に対して3つの大反則を犯したことが挙げられる(丸山・磯崎, 1998 参照)。言い換えれば、反則以前の500万人という数字こそが、いわば46億歳の地球生態系が許容する適正人口を示しており、一方で今日の人類の繁殖が如何に異常であるかを意味している。

そもそも人類史のほとんどは飢餓の歴史であった。それは、自然選択が機能しているという観点からは、地球生態系において最も自然な状態にあったと言えるだろう。しかし、人工的に有用な食物を栽培・貯蔵し、住環境を整備し、種々の病

* 東京大学大学院総合文化研究科宇宙地球科学教室

* Department of Earth Science and Astronomy, The University of Tokyo

気や怪我も克服して、生物体総重量 (biomass) としての人類はなんと 1000 倍以上に増えた訳である。さすがに 20 世紀後半になるとこの無制限な増殖にも限界が見えて、皆が慌てだした。21 世紀前半に世界の食料生産と人口増加のバランスが破綻する、というローマクラブの予測が 1975 年にたてられて久しい。21 世紀は再び「飢餓の世紀」になると断言する研究者もいる (Brown and Kane, 1994)。

日本だけに限ってみても、その食料のほとんどは輸入品で、既に自給能力を失ってしまっている。それにも関わらず、私達は何も意識せずにコンビニエンス・ストアで簡単に食物を手に入れているだろうか。24 時間オープンで好きな時に食物が買える店が 100 年前からあの近所の曲がり角にあって、きっと 100 年後もそこにあるはずだという錯覚を私達は持っていないだろうか。上述のように、このまま時間がたつと食料があふれる今の状態が長続きするはずがない。ほんの 50-60 年前まで日本にも餓死者がいたことを思い出すべきで、私達はこの一瞬の豊さにもっと感謝する必要がある。

このように 21 世紀あるいはそれ以後の人類の未来は多難と予想され、いま生命史研究が多方面で注目される理由がそこにある。未来を正確に予測し、様々な計画をたてる上で、地球の現状の把握が必要だが、そのためにはさらに現状に至った地球と生命の歴史を理解することが不可欠となるからである。本稿では、あくまで一人の地質学者の限られた視点からではあるが、地球生命史に関する研究動向を整理し、日本の研究者が今後何を目指すべきなのかを探る素材としたい。

II. 古生物学・層序学の盛衰

生命の歴史を解明するアプローチは多様である。その中には原始生命の合成実験や現世生物の遺伝子解析などの生化学的手法も含まれるが、最も古典的かつ基本的なものに、古生物学的そして層序学的研究がある。過去の地層から産する化石を分類・記載し、それらを含む地層の累重関係に基づき、各種生物の進化を実証していくという、

地道ではあるが最も確実な演繹的手法である。現在の生命史研究の世界的流れを読み解く前に、進化論の基礎となった古生物学と層序学の大まかな歴史を眺めておこう。

英国の W. Smith が化石層序学という手法を確立した 19 世紀初頭には、近代化推進のエネルギー源であった石炭の効率的採掘が焦眉の案件であった。物理学や化学より出遅れたとはいえ、地質学は人々の生活を向上させる最も新しい魅力的な学問として登場した (Winchester, 2001) (図 1)。それから約 200 年間、世界中の地質学者が野外調査に膨大なエネルギーと時間を費やして、現在私たちが手にする地質年代表を作成してきた。一方、その年代区分の大枠の把握と平行して、生物の形態が時間の経過と共に変化することがより確実視されるようになり、19 世紀中頃に C. Darwin が提唱した後、「生物進化」という考え方が定着し始めた。この進化論の発想の最大の根拠となったのが、化石とそれらを含む地層の累重順序であり、彼がそれらの知識を C. Lyell の著作から学んだということは広く知られている (図 1)。有名なビーグル号の航海での観察から海洋島とサンゴ礁の発達史を着想したことなどを考え合わせると、Darwin は十分に地質学者でもあったと言える。このように進化論が学問として登場した 19 世紀半ば以降、地質学、特にその中核部を占めていた古生物学と層序学は、生命史研究と表裏一体であった。

その後、地質時代区分は精密化され、最初から注目された肉眼で見える大型化石 (megafossil) に加え、20 世紀後半には各種顕微鏡の観察対象となる微化石 (microfossil, 10^{-6} m スケールまで) が地層の年代決定の主要な武器となった。ただし、長い間、古生物学や層序学者の主たる研究対象は、化石が多産する顕生代 (最近の約 5.4 億年) の地史および生命史であった。一方で、20 世紀半ばまでに地球の年齢が 45 億年以上に及ぶこと、すなわち顕生代以前にも約 40 億年という長大な時間 (先カンブリア時代) が存在したことが放射性年代測定から解明された。先カンブリア時代の地層からは化石の産出が極めて稀で、かつ

図 1 S. Winchester 著 “The map that changed the world” ハードカバー版の表紙（左），その和訳表紙（中），および C. Darwin が読んだものと同一 C. Lyell 著 “Principles of Geology” 全 3 巻（初版本）をもつ英国 Leicester 大学の B.F. Windley 教授（右）。

Fig. 1 Cover of “The Map that Changed the World” by S. Winchester (left), that of the Japanese translation (center), and the classic three volumes of “Principles of Geology” by C. Lyell (The first print set owned by Prof. B.F. Windley of Leicester Univ.) (right).

て Darwin は生命の起源や始原的生物の情報が欠如した暗黒時代と呼んだ。しかし，20 世紀後半になると，各国の地質調査が進展し，先カンブリア時代の地層から散点的ながらも化石が発見されるようになって，ようやく地球生命史の概要がおぼろげながら見えるようになった。

地球の歴史および生命の歴史という地球科学の中で最大のテーマを地層や化石を通して直接扱うため，古生物学や層序学はほぼ 150 年間という長い間，地質学の中心を占めていた。しかし 1960 年代半ばにプレートテクトニクスの理論が確立・総合化されると，その状況は一変した。新しい地球観のもと地球物理学的な視点との融合を通して，地質学的研究の重心が岩石学，地球化学，堆積学，構造地質学など，他の多彩な物質科学的研究へ移動した。その一方で，伝統的な古生物学や層序学の存在感は相対的に矮小化した。他の自然科学分野と同様に，地質学の研究センターは既に 20 世紀中頃までにヨーロッパからアメリカ合衆国へ移動していた。その米国における大学/研究所の規模あるいは研究者数の推移を眺めると，古生物学や層序学研究が黄金時代を迎えたのは

1950 年代であったこと，そしてその後は衰退傾向に転じたことが分る。このような長期低落傾向にあった生命史研究に再び大きな異変が起き始めたのは 1980 年からであった。そして 1990 年代後半からはさらに急展開が起きていると言って良いであろう。以下に，その契機となった出来事とその背景を紹介する。

III. 地球外現象と生命進化

1980 年にカリフォルニア大学バークレー校の Alvarez 親子らの研究チームによって，中生代/新生代境界（約 6500 万年前）での恐竜，アンモナイトなど中生代型生物の絶滅の原因が，巨大隕石衝突であったという仮説が提案された。この話題は，地質学分野はもとより大衆メディアまで巻き込んでの大きな騒動を引き起こした。この余りにも有名な話の内容については，既に多数の論文および一般科学読み物（Raup, 1986; Alvarez, 1997 など多数），さらにはハリウッドの娯楽映画の中でも流布しているので繰り返す必要はないだろう。しかし，あれからすでに四半世紀が過ぎた今の時点で，この仮説がもたらしたことについて

改めて強調されるべき科学史的意味があるように思われる。

20 世紀の地球科学史において最大の成果がプレートテクトニクス理論の確立であることに異論を唱える者は少ないだろう。しかし、Alvarez 達が提示してみせた「地球外で起きる現象と地球生命進化との因果関係」というパラダイムは、その後の研究方針やスタイルを決定付けたという意味において、実はプレートテクトニクス理論の確立には匹敵するくらい重要であったと筆者は考えている。それ以前にも「パンスペルミア説」や、「超新星爆発と大量絶滅」など、地球外現象と地球上での出来事に関連づけて説明しようという試みは少なからずあった。しかし Alvarez 達のように、具体的な物質的証拠を掲げて検証可能性のある議論を展開し、そして 10 年後にそれが実証されたという例はなかった。これによって 20 世紀末の地質学者の思考は、より大きな時空間へと解放されたと言って良いだろう。

1990 年にメキシコのユカタン半島で衝突クレーターが発見されるまで 10 年を要したものの、この仮説は自動的に一つの新しいパラダイムとして機能し始め、他の主要な大量絶滅事件についての洗い直しが始まった。皮肉なことに、大量絶滅と隕石衝突の因果関係が類似のデータによって実証された他の例は今のところ皆無であるが、この流れは確実に大量絶滅研究の隆盛を促した。かつて中生代/新生代境界事件に関して隕石衝突説の対抗馬であった異常火山活動説が、所を変えて史上最大規模の大量絶滅が起きた古生代/中生代境界（2 億 5000 万年前）事件において、近年広い支持を集めているのも興味深い。一方、より古い地球では隕石衝突がより頻繁に起きていたと考えられるので、「隕石衝突と生命圏の応答」というパラダイムは初期地球の研究において重要となるだろう。

1990 年代に生命史研究をさらに活性化させたのは、S.J. Gould により喧伝された「カンブリア紀の生命爆発」事件の意味付け、そして J.L. Kirschvink や P.F. Hoffman らによって展開された「全球凍結」事件の議論であった。これらにつ

いても既に複数の普及書（Gould, 1990; Walker, 2003 など）が出されているので内容は省略するが、いずれも従来さほど注目されていなかった時期に生命進化の方向を大きく変えた事件が起きたことが強調された。この 2 つの研究テーマも各々小パラダイムとして受け入れられて、その後多くの研究者がこの領域の研究に参加するようになった。しかしその本質は、古いタイプの生物の絶滅と新しいタイプの出現にあり、また固体地球と生物圏の相互作用という観点においても、実は上述の大量絶滅の問題の本質と全く共通であると筆者は考えている。

IV. 生命史研究の前線

もう一つ、1990 年代に生命史研究を大きく加速させた出来事があった。それはアメリカ合衆国の研究所である NASA が 1996 年に公表した「火星生命の発見」という話題であった。当時、研究資金難に喘いでいた NASA が苦肉の策として打ち上げたアドバルーンは結果として大きな効果をもたらした。南極に落下した火星起源隕石の中に原始的なバクテリア化石を発見したというニュースは、これまたマスコミにも取り上げられ、大きな話題となった。その後の検証によって、もともと提示された根拠のほとんどは否定され、また最近の火星探査機による現地調査でも、火星生命の確認は未だなされていない。しかし火星と地球の形成史を比較すると、生命が誕生した可能性は初期地球よりむしろ初期火星において高かったという見解（Kirschvink and Weiss, 2002）もあり（図 2）、火星に初期生命がいたとしても、その発生過程は初期地球のものと類似したものであったと推定される。その後、このような研究の流れは宇宙生物学（astrobiology）という分野として括られるようになった。それは単に地球外生物の研究を目指すだけではなく、初期地球の生命像をも探り、さらには地球型生物の生存可能領域（habitable zone）の探索という惑星科学との境界領域をも包含する広い分野に及んでいる。第二期 Clinton 政権がこのような流れを全面的にバックアップしたため、米国を中心に豊富な研究資金

図 2 生物進化と地球大気・火星大気の酸素分圧の経年変化の比較 (Kirschvink and Weiss, 2002).

下のグラフの縦軸は大気酸素分圧 (単位: 気圧, 対数表示), 横軸は年代 (単位は 10 億年). 火星大気 (赤の点線) は, 惑星形成直後には地球大気 (水色/青色の領域) よりも高い酸素分圧の大気を持っていた可能性が指摘され, 生命の発生確率も初期地球よりも高かったかもしれない. 詳細は地学雑誌 112 巻 2 号 187-196 参照.

Fig. 2 Biological evolution, compared with a schematic representation of the atmospheric partial pressure of oxygen in the Earth and Martian atmospheres, as a function of geologic time (Kirschvink and Weiss, 2002).

に誘導されるように多数の研究者が加わった (松井, 2003)。

地球で発生した原始生命はおそらくサイズも小さく, また構造も単純なバクテリアの祖先であったと推定される。岩石・地層中での保存条件・保存確率を考えると, その化石の発見は容易ではない。実際に 20 世紀後半においても, 先カンブリア時代の地層からの微化石の発見は稀で, 特に太古代初期 (35-40 億年前) の情報は 1980 年代まで待たねばならなかった。生物体としての形態を残す化石として記載された最古の例は西オースト

ラリア産の 35 億年前のバクテリア化石であるが, 最近それを疑問視する見解もあり, まだ議論が決着していない。

近年, 技術革新のおかげで顕微鏡観察の精度も向上し, 一方で, 微小試料/微小領域の化学分析法が急速に開発・整備されたため, 生物体を構成する有機高分子 (biomarker) や軽元素の安定同位体比などの測定を通して, 原始生命の情報が得られるようになった。生物としての形は持たないものの, このようなナノスケール (10^{-9} m) 物質として生命の存在を示す証拠を化学化石

(chemofossil) と呼ぶ。グリーンランド産の地層中に生物起源の有機炭素の存在が炭素同位体比から明らかにされ、少なくとも初期生命は 38 億年前には生息していたこと、おそらく最初の生物の出現は安定した海が形成された 40 億年前まで遡るであろうことが示された。特に 1990 年代には、より若い時代の地層からも、光合成バクテリア、藻類、アメーバなどの化石が次々に発見されている (Knoll, 2003 参照)。中には受精卵が分裂し始めたところの胚の化石まで含まれている。

1990 年代までの古環境/古気候に関する詳細な研究は、氷床の試料や海洋底の深海掘削コアの限界から、新生代からせいぜい白亜紀止まりであったが、2000 年代には、中生代/古生代はもとより、先カンブリア時代の地層にまで、同レベルの精密な解析が及ぶようになった。その背景には、上述のような生命史の古い部分についての大枠の把握と微小領域の化学分析技術の向上があった。また生命の進化が、非可逆的に進んできた地球の歴史と不可分であったことが改めて認識されたことも大きかった。大気組成変化特に段階的な酸素増加の歴史、海洋循環に関連する酸化還元条件や栄養塩供給の変化、海水準変動と関連する気温の変化などを、多様な地球化学的指標 (硫黄同位体比の質量非依存性分別、軽元素の安定同位体比、微量金属元素の濃集など) の測定および火山灰中のジルコンの高精度鉱物年代決定に基づいて復元しようという試みがなされている。このような広い意味での化学化石研究は今急成長中で、その対象が火星生命や地球の初期生命に限らず顕生代での大量絶滅を含むさまざまな生命進化史の出来事に及ぶため、21 世紀の生命史研究の中で中核を占める研究分野になりつつある。

一方で、生物学者による現世生物のゲノム解析の勢いは凄まじく、生物分類の体系も、最近 20 年の間にすっかり様変わりした。地球生物は単純なバクテリアから人間に至るまで、遺伝情報は DNA を介して子孫に伝達されている。その塩基配列の比較から、生物相互の類縁関係を解説していくと、各種生物の分岐の順序や各系統分岐後の凡その時間が推測できる。図 3 に示すのは、遺伝

子の塩基配列に基づき復元された系統樹の例である。まず遺伝子の多様性という観点からは、現在の生物界は圧倒的にバクテリアによって構成されていることがわかる。さらに、私達が通常目にする多細胞生物の枝がおかれている位置は、従来のイメージからは大きく逸脱している。特に後生動物 (いわゆる私達が通常思いつく動物) や植物は、その中でも実に小さな枝に過ぎないことが分る。また下図では動物の小枝は植物から大きく離れ、菌類 (キノコやカビ) のすぐ横に位置付けされている (Porter, 2004)。さらにこのような塩基配列から求めた分岐地図に、過去の化石 (微化石および化学化石) として実際に確認された各々の分類群の初出年代が記されており、各分類群の分岐順序や分岐時期が具体的に議論できるようになった。このように生物界全体の体系の理解も刻々と進んでおり、ここで紹介したこれらの最新の系統樹とても、数年後には大きく改定されていく可能性があると言う。

冒頭で述べたように、21 世紀に生きる人類にとって避けられない問題に、環境、エネルギー、食料、人口問題がある。これらはお互いに関連しており、詰まるところそのどれもが地球という惑星が持つ有限のサイズに起因している。今世界が生命史研究に注目するのは、まさに人類の存亡がそれにかかっていると多くの人が考えるからである。それを反映して、上述のアストロバイオロジー計画などアメリカ合衆国では国家単位の体制が整えられつつある。

その有り様は、アメリカ地質学会 (Geological Society of America, GSA) での講演プログラムのここ数年間の変遷を見ていると手に取るように分る。GSA では毎年 5000 を越える講演発表がなされる。1990 年代前半の GSA では生命史関係について少数のセッションしか開かれていなかった。それもしばしば多岐に発散した内容の講演が古生物学一般とか層序学一般という枠で一括されたものや、狭い地方に限定した地域層序についてのセッションが多かった。ところがここ数年間では、古生物学関係のセッションが急増し、表 1 に示す 2004 年の例のような多数の細分された

● = 2700 Million Years Ago

真核生物 Eucarya

図 3 最新の現世地球生物の系統樹.

上図：現世生物全体の遺伝子系統樹 (Knoll, 2003 を改変). 生物は、真正細菌、古細菌および真核生物の 3 つのグループ (ドメイン) に区分される. 黒点は、化石で確認された 27 億年前の時点での分岐位置を示す.
 下図：真核生物のみの詳細系統樹 (Porter, 2004). 分子及び生物組織の超構造のデータに基づく復元に、化石記録で確認された各グループの最古の存在時期が示されている. 系統の枝の点線や? 印は不確定であることを示す. 各年代値の信頼度は、文字が大きく太字のものほど高い.

Fig. 3 "Tree of Life" updated.

Top: Three main domains of life; Bacteria, Archaea, and Eucarya (modified from Knoll, 2003).

Bottom: A current view of eucaryote phylogeny (modified from Porter, 2004).

表 1 2004 年 GSA 年会で開かれた古生物学のセッション一覧。

Table 1 List of sessions of "Paleontology" in GSA 2004.

(Oral)	
Paleontology I	: Macroevolution from genotype to phenotype
Paleontology II	: Biogeography and history of life
Paleontology III	: Life and climate
Paleontology IV	: Mass extinctions and their consequences
Paleontology V	: Fossil gradients and ecological landscapes
Paleontology VI	: Quantitative and analytical morphology
Paleontology VII	: Organismal interactions and behavior
Paleontology VIII	: Processes of fossilization
Paleontology IX	: Perspectives on diversity
Paleontology X	: Early life
Paleontology XI	: Species concepts and phylogenetic relationships
Paleontology XII	: The ecologic context of taxonomic turnover
(Poster)	
Paleontology I	: Paleoecology
Paleontology II	: Biogeography / Biostratigraphy
Paleontology III	: Diversity, Extinction, Origination
Paleontology IV	: Phylogeny/Morphology

セッションが開かれている。その他に、「全球凍結」「火星生命」「大量絶滅」など、その時点での先端トピックスを取り上げるセッションが多数組まれている。1セッションが5-10の講演を含むとして、このリストを見るだけで相当数の発表がなされていることが分る。また2005年には、このような膨大な講演の集中を避けるためか、通常のGSA大会から生命史関係の部分だけを分離して、カナダ地質学会と合同で別の場所/時期に4日間の集会（Earth System Processes 2）が開かれた。そこでのセッション総数は52にのぼった。このように、今世界は生命史研究が花盛りという状況にある。

V. さて、日本では

最近気になることが2つある。ひとつは上述のような盛り上がりを見せている生命史研究の世界潮流の中で、日本人研究者が主要な国際学会で発表することが極めて少ないことである。昔に比べると海外渡航旅費は安価になり、海外での学会に参加する研究者数自体は大きく増えたはずであ

る。ところが地質学全体を扱う大きな国際学会、例えば先に紹介したGSAについて最近15年間を見る限り、日本人研究者の発表総数は10を越えた年がほとんどない。ましてや、生命史関係となるとその数は更に少なくなる。そこでの古生物学関係のセッション数は表1のように多数に及び、一方で、日本地質学会に5000人弱、日本古生物学会に約1200人、東京地学協会に800人余の会員がいるにも関わらず、である。日本ではあたかも世界の動向とは無関係に、粛々と研究が進んでいるということであろうか。

二つ目は2006年夏に中国北京にて開かれる予定の第二回国際古生物会議の予告サーキュラーである。そこに記された学会開催のための委員会名簿を見て少なからず驚いた。その名簿の大半を開催国の中国人研究者が占めるのは当然だが、その他にも外国の代表的研究者が多数名前を連ねている。しかしその中に日本人研究者は皆無であった。これは決して昨今噂される中国政府の「反日教育」の成果などではないだろう。日本の生命史研究が諸外国の研究者に、それも隣国に見えてい

ないということではないだろうか。

残念ながら、本稿で紹介した近年の生命史研究の主要テーマについて、日本人研究者による本質的な貢献はこれまでほとんどなかったと認めざるを得ない。巨大隕石衝突、全球凍結、火星生命などの新しいテーマの発掘や主要な仮説の提唱はほとんど欧米人研究者によってなされ、それを追隨する研究はあっても新しい考えの枠組みを日本から提案できた例はない。従って、世界で広く流通している学部学生向けの英文教科書に日本人の業績が紹介される例もほとんどない。国内においても、和文文献の多くが欧米の書籍の翻訳であるし、また日本人による書き下ろしでありながらも中身が海外の成果を紹介する二次情報のみに留まるものが多い。このような状況については速水(1998)が同様の指摘をしている。

しかし、実際には生命史研究の新しい動きが日本でも始まっている。日本の伝統的な地域地質学中心主義を乗り越えるべく1990年に東京工業大学の丸山茂徳が中心になって始めた「地球史プロジェクト」、それを発展させた「全地球史解説計画」はその例である。初期生命の生息環境等に関する研究視点などではNASAのアストロバイオロジー計画より遥かに先んじていた。永年の努力が実り、その成果が徐々に公表されつつある(丸山・磯崎, 1998; Nakashima *et al.*, 2001; 熊沢ほか, 2002)が、まだ世界を振り返らず段階にまで至っていないのかもしれない。

一般社会の退職ラッシュと同期して、間もなく日本の学界や大学において団塊世代の研究者の「大量絶滅」が始まろうとしている。大きな地質時代境界と同様に、これを機により進化した新しいタイプの研究者が一気に現れるかもしれない。次の世代を担う若い日本人研究者が活躍し、その成果が外国の教科書に紹介されるようになることを大いに期待する。

謝 辞

大島章一、笠原順三、新旧編集委員長からは、本誌

第1000号記念のお祝いの特集号に拙文を加える機会を頂いた。また松本達郎先生からは、本邦古生物学研究の国際化の現状について書くことを強くすすめられた。これらの方々に御礼申し上げる。

文 献

- Alvarez, W. (1997): *T. rex and the Crater of Doom*. Princeton Univ. Press. 邦訳: 月森左知訳 (1997): 絶滅のクレーター. 新評論.
- Brown, L.R. and Kane, H. (1994): *Full House: Reassessing the Earth's Population Carrying Capacity*. Norton. 邦訳: 小島慶三訳 (1995): 飢餓の世紀-食料不足と人口爆発が世界を襲う. ダイアモンド社.
- Gould, S.J. (1990): *Wonderful Life: Burgess Shale and the Nature of History*. Norton. 邦訳: 渡辺政隆訳 (1993): ワンダフルライフ-バージェス頁岩と生物進化の物語. 早川書房.
- 速水 格 (1998): 日本の古生物学. 速水 格・森 啓編: 古生物の総説・分類. 32-37, 朝倉書店.
- Kirschvink, J.L. and Weiss, B.P. (2002): Mars, Panspermia, and Origin of Life: Where did it All Begin? *Paleontologica electronica* 2. 邦訳: 磯崎行雄訳 (2003): 火星, パンスペルミア, そして生命の起源. 地学雑誌, **112**, 187-196.
- Knoll, A.H. (2003): *Life on a Young Planet: The First three Billion Years of Evolution on Earth*. Princeton Univ. Press. 邦訳: 斉藤隆央訳 (2005): 生命最初の30億年. 紀伊国屋書店.
- 熊沢峰夫・伊藤孝士・吉田茂生編 (2002): 全地球史解説. 東京大学出版会.
- 丸山茂徳・磯崎行雄 (1998): 生命と地球の歴史. 岩波新書, 543.
- 松井孝典 (2003): 宇宙人としての生き方-アストロバイオロジーへの招待- 岩波新書, 839.
- Nakashima, S., Maruyama, S., Brack, A. and Windley, B.F. eds. (2001): *Geochemistry and the Origin of Life*. Universal Academy Press.
- Porter, S.M. (2004): The fossil record of early eucaryotic diversification. *Paleontological Society Papers* **10**, 35-50.
- Raup, D.M. (1986): *The Nemesis Affair: A Story of the Death of Dinosaurs and the Ways of Science*. Norton. 邦訳: 渡辺政隆訳 (1990): ネメシス騒動-恐竜絶滅をめぐる物語と科学のあり方. 平河出版.
- Walker, G. (2003): *Snowball Earth*. Crown. 邦訳: 度会圭子訳 (2004): スノーボール・アース. 早川書房.
- Winchester, S. (2001): *The Map that Changed the World: William Smith and the Birth of Modern Geology*. Harper Collins. 邦訳: 野中邦子訳 (2004): 世界を変えた地図. 早川書房.

(2005年10月17日受付, 2005年11月7日受理)