

地球と生命の共進化

——多細胞動物の出現とカンブリア爆発

小宮剛

地球と生命の進化の概略

地球は、およそ 45 億年前に微惑星集積、ジャイアントインパクト、マグマオーシャン、核形成や後期隕石重爆撃など多くの大イベントを経て劇的に誕生した。やがて、地球表面が冷えると海洋が誕生し、40 億年前にはすでにプレートテクトニクスが機能するようになる。そして、プレートテクトニクスの開始によって、大陸地殻の形成が始まり、19 億年前には超大陸が形成され、その後、大陸の離合集散が繰り返され、現在に至った。一方、39.5 億年前の地層から生命の痕跡が発見されていることから、生命もそれ以前（冥王代）には誕生し、35～25 億年前には酸素発生型の光合成生物が出現し、大酸化イベントの後、真核生物、多細胞生物、後生動物（多細胞動物）の出現を経て、人間を含む哺乳類が生まれた（図 1）。本稿では、最近の私たちの研究によって新たに分かった、最古の生命の痕跡や海洋組成と後生動物の共進化について紹介する。

最古の生命の痕跡

現在、地球に残された、また残る最古の岩石はカナダ・北西部のアスタ片麻岩体の苦鉄質岩で、およそ 42 億年前の年代を持つ。

しかし、この岩石や周囲の約 40 億年前の年代を持つ花崗岩質片麻岩はマグマが固化して生じた火成岩由来であるため、生命の痕跡を保持しない。一方、現存する最古の表成岩（溶岩や堆積岩）は、西グリーンランドのアキリア表成岩群で、最も古いものは 38.3 億年前の年代を持つ。特に、グリーンランドの主要都市であるヌークの北東約 150 キロにあるイスア表成岩帯は、後の時代の変成作用や変形作用の影響が比較的に弱いと見られ、初期地球の表層環境を研究するのに適しており、多くの研究がされてきた。現在、イスア表成岩帯の黒色頁岩中の炭質物が最古の生命の痕跡とされる。最近、私たちはカナダ・北東部ラブラドル地域のヌリアック表成岩類が 39.5 億年前以前に形成された最古の表成岩であることを発見した。そして、そのヌリアック表成岩類中の礫岩、泥質岩、炭酸塩岩から炭質物（グラファイト）を発見した（図 2）。

ところで、炭素には ^{12}C 、 ^{13}C と ^{14}C の三つの同位体が存在する。その ^{14}C は半減期が約 5700 年の短寿命放射性同位体であるため、地球史試料中には存在しないが、 ^{12}C と ^{13}C は安定同位体であり、親核種も存在しないため時間が経過しても、その同位体比は変化しない。 $\delta^{13}\text{C} \equiv \left\{ \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{試料}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{標準物質}}} - 1 \right\} \times 1000$ と定義すると、標準物質に対して ^{12}C が多い場合、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は負に、 ^{13}C が多い場合は正となる。現在、海水中の重炭酸イオンはおよそ 0‰ の値を持つので、海洋から沈積する炭酸塩は約 0‰ の値を持つ。また、流体包有物からの晶出や炭酸塩の分解など無機的に生じたグラファイトは、0～-15‰ と比較的高い炭素同位体値を持つ。一方、独立栄養生物は炭素固定の際に軽い同位体を選択的に同化することが知られている。そのため、独立栄養生物はその炭素固定回路に依存して、-20‰ 以下の低い値を持つ。ヌリアック表成岩類の堆積岩中のグラファイトは -5～-28.9‰ の炭素同位体値を持つ。特に、礫岩や泥

質岩中の多くのグラファイトは -20‰ 以下の低い炭素同位体値を持ち、-28.9‰ に達するものも存在する。さらに、その同位体比は炭素含有量とは負の相関、変成度とは正の相関が見られる。変成作用時の加熱に伴う有機物の分解によって、軽い同位体 (^{12}C) が選択的に失われることが知られているので、このグラファイトの初生的な $\delta^{13}\text{C}$ 値は -28.9‰ 以下であったと考えられる。スリアック表成岩中のグラファイトはこのように極めて低い $\delta^{13}\text{C}$ 値を持つことから生命由来であると考えられる。これまで 38.1 億年前の堆積岩中の炭質物が最古の生命の証拠とされてきたので、最近の私たちの発見はそれを 1 億年以上更新する。

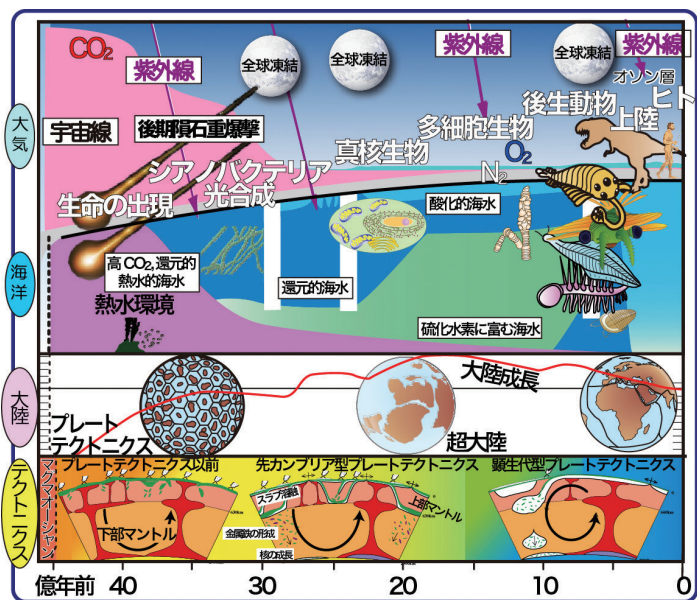


図1 地球と生命の共進化の概略図

海洋組成変動と後生動物の出現と多様化

生命進化において、生命の起源 (40 億年前以前) とともに後生動物 (多細胞動物) の出現と急激な多様化 (カンブリア爆発) は重要な問題である。一般に、多細胞化に必要なコラーゲンの合成や代謝に多くの酸素を必要とするため、酸素の増加が後生動物の出現と進化を引き起こしたと考えられている。しかし、最近の研究では動物が生息する海洋表層では、前期原生代 (24 億年前) には十分な酸素が存在していたことが示され、酸素の増加が最重要条件ではないことも示唆されている。加えて、一般に海洋酸素の増加は多くの

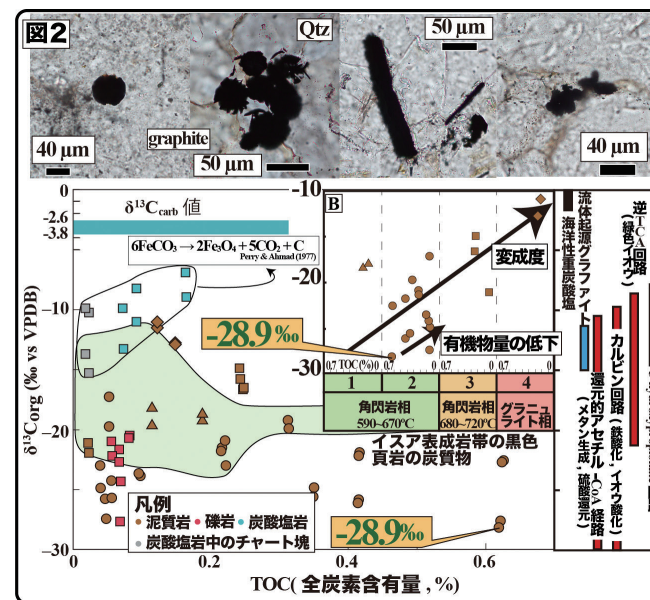


図2 現存する最古の生命の痕跡。39.5 億年前の堆積岩中の ^{12}C に富むグラファイト

生命必須元素（リンや鉄等）を枯渇させるため、必ずしも酸素の増加が動物出現にとって、有利とは限らない。これまでは、この時代の生物進化を後生動物の進化とひとくくりになされてきたが、私たちは後生動物の初期進化を、後生動物の出現期と、大型化・多様化（カンブリア大爆発）期の二段階に分けて、それぞれの時期の海洋中の生命必須元素濃度の推定を行い、環境変動と生命進化との関連を探った。

私たちは後生動物の出現からカンブリア大爆発までの海洋組成の変動を解読するために、堆積場の違い、化石の産出頻度や岩相の違

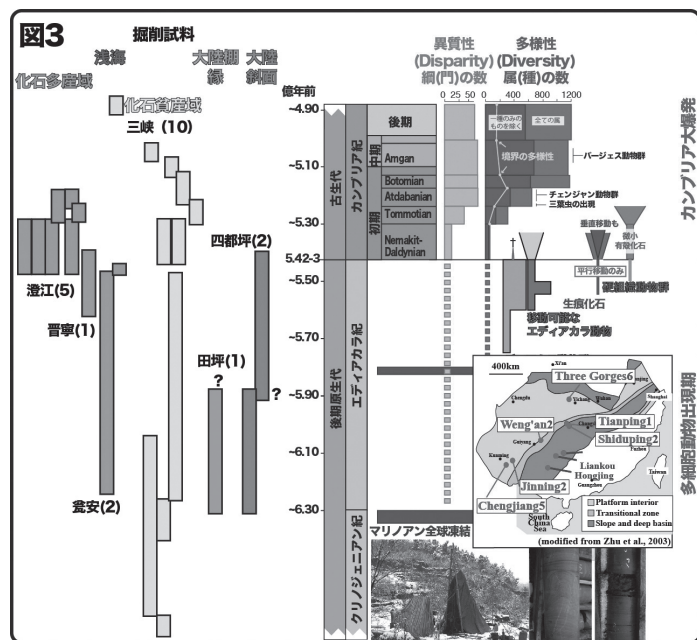


図3 南中国のエディアカラ紀～カンブリア紀の表層環境解読に向け、21カ所で掘削を行った。

いを考慮して、化石が多産する浅海域、化石は少ないが表層環境を解読するのに適する炭酸塩岩や黒色頁岩を多く含む浅海域、グローバルな海洋組成を読み解くのに適する大陸斜面の3つの堆積場の地層を、化石が多く産出し、当時連続的に地層が堆積した南中国の21カ所で、掘削した（図3）。

そして、当時の海洋組成変動を読み解くために、それらの岩石試料の多元素・多同位体分析を行なった（図4）。分析した元素・同位体は炭酸塩の炭素同位体比（ $\delta^{13}C_{carb}$ ）、酸素同位体比（ $\delta^{18}O \equiv \{^{18}O/^{16}O\}_{sample} / (^{18}O/^{16}O)_{standard} - 1\} \times 1000$ ）、ストロンチウム（Sr）同位体比（ $^{87}Sr/^{86}Sr$ ）、鉄（Fe）とマンガン（Mn）の含有量、希土類元素濃度（Ce異常）、カルシウム（Ca）同位体比（ $\delta^{44/42}Ca \equiv \{^{44}Ca/^{42}Ca\}_{sample} / (^{44}Ca/^{42}Ca)_{standard} - 1\} \times 1000$ ）とリン濃度、有機炭素の炭素同位体比（ $\delta^{13}C_{org}$ ）、有機窒素の窒素（N）同位体比（ $\delta^{15}N \equiv \{^{15}N/^{14}N\}_{sample} / (^{15}N/^{14}N)_{standard} - 1\} \times 1000$ ）、黒色頁岩のモリブデン（Mo）濃度とMo同位体比（ $^{98}Mo/^{95}Mo$ ）で、それぞれ、生物活動、海水温、大陸からの供給、海水の酸化還元、海水の酸化還元、Ca濃度、P濃度、生物活動、硝酸濃度及びMo濃度と酸化還元状態の指標となる。

一般に、氷期に氷床が発達すると氷床に軽い酸素同位体が濃集するため、海洋は重い酸素同位体に濃集し、炭酸塩の酸素同位体比（ $\delta^{18}O$ 値）は高くなる。地球表層が赤道域の海洋まで水に覆われた6.35億年前のマリノアン全球凍結後のエディアカラ紀からカンブリア紀にかけて、炭酸塩の $\delta^{18}O$ 値が大きく変動していることから、海洋表層の温度が繰り返り、急激に変動していたことが分かった。全球凍結後に $\delta^{18}O$ 値が非常に低くなることから、全球凍結後に地球表層は急激な温度上昇を経験し、その後、寒冷になり、5.5億年前頃再び極度の高温になったと考えられる。これまで、地質学的デー

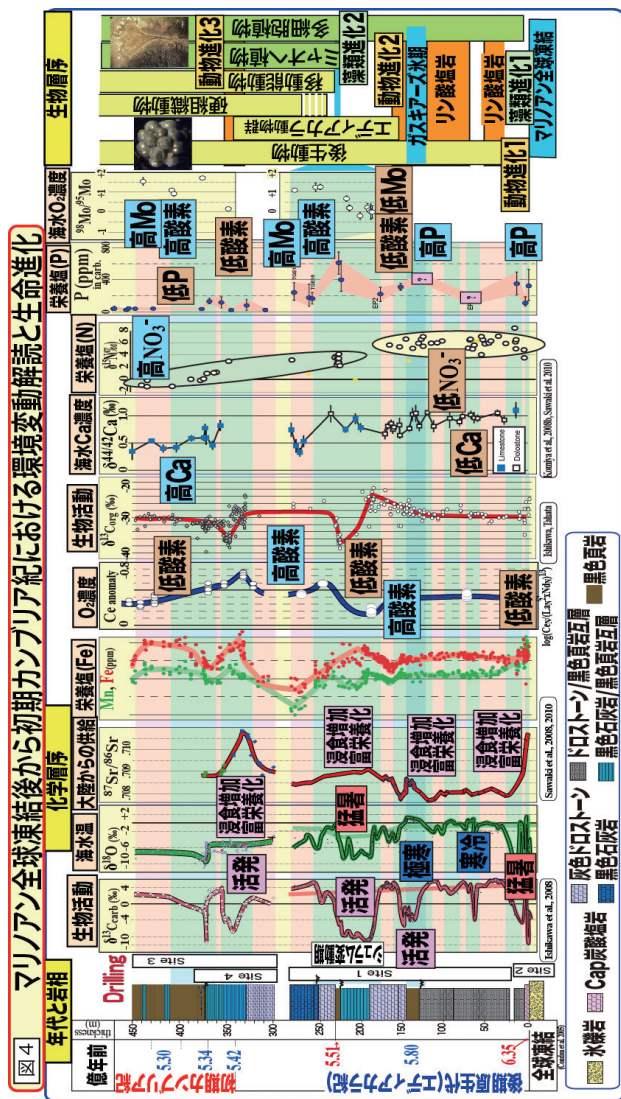


図4 エディアカラ紀～初期カンブリア紀の掘削試料の多元素・多同位体分析の結果と生命進化の対比。

タ（氷礫岩の存在）から5.8億年前にガスキアーズ氷期があったことが示唆されてきたが、炭酸塩の酸素同位体比もそれを支持する。

その表層環境変動に関連して、海水組成や生物活動も変動したことが分かった。炭酸塩の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は大陸からの供給量の指標である。大陸物質は高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を持つため、大陸からの供給量が増加した場合、海水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が高くなり、結果として海水から沈殿する炭酸塩の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が高くなる。さらに、大陸からの供給物質はリン、硝酸、Ca、鉄など多くの生命必須元素に富むので、生物の一次生産を増加させる。マリノアン全球凍結直後の超温暖期に、極めて特異的に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比が高くなるが、これは全球凍結後の超温暖化によって、風化が促進され大陸からの供給量が急激に増加したことによると思われる。また、5.8億年前のガスキアーズ氷期、5.5億年前頃のシュラム変動期、5.4億年前のエディアカラ紀-カンブリア紀境界においても、Sr同位体比が高くなるので、これらの時期に大陸からの流入が増加したと考えられる。それらすべての時期で炭酸塩の炭素同位体値($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$)が極端に低下しており、従属栄養生物の活動が活発になったことが示唆される。

一般に、希土類元素は3価のイオンとなるが、CeとEuは酸化還元状態に依存して異なる価数を持つ。前者は酸化的环境下では Ce^{3+} に比べて Ce^{4+} が卓越し、後者は地球内部のような極めて還元的环境下では Eu^{3+} に比べて Eu^{2+} に富む。 Ce^{4+} は水溶液中の溶解度が極めて低く、鉄やマンガンの氧化物などに吸着され、除去される。そのため、酸化的水溶液は他の希土類元素に比べてCeに乏しい。この状態はCeの負異常と呼ばれる。また、鉄やマンガンは還元的水溶液では Fe^{2+} や Mn^{2+} となるが、酸化的水溶液ではそれぞれ Fe^{3+} および Mn^{4+} となり、水溶液中の溶解度が著しく低下する。一方、Moは酸化的水溶液では溶解度の高い MoO_4^{2-} として存在するが、

還元的な海洋では MoS_4^{2-} となり、硫化物に取り込まれるため溶解度が著しく低下する。また、リンは水溶液中ではオキソ酸イオンを形成し、鉄やマンガン酸化物が沈澱しない水溶液中では酸化還元によらず水溶性に富むが、鉄やマンガン酸化物が晶出する酸化的な条件では、鉄やマンガンの水酸化物に吸着され除去される。結果的に、酸化的な海洋は負の Ce 異常値と高い Mo 濃度を持ち、一方、還元的な海洋は P, Fe, Mn に富み、Ce 異常に欠く。

全球凍結後の海洋は Ce 異常が小さく、Fe や Mn に富むため、還元的であったと考えられる。その後、5.8 億年前のガスキアーズ氷期後に一時的に酸化的になり、5.5 億年前のシュラム変動期の初期に再び還元的になるが、後期以降は酸化的になり、そして、エディアカラ紀一カンブリア紀境界で、再び還元的になり、その後酸化的になるといった変遷をたどった。Ca や硝酸はエディアカラ紀前期には乏しかったが、海洋が酸化的になったシュラム変動期頃から増加した。一方、リンや鉄、マンガンは海洋が還元的であったエディアカラ紀前期には富んでいたが、酸化的になったシュラム変動期に低下する。鉄やマンガンはその後増加するが、リンはエディアカラ紀一カンブリア紀境界で少し上昇するものの、低いままであったと推定される。

生物進化と比較すると、後生動物、エディアカラ動物群、移動能動物や硬組織動物などの出現期は、大陸物質の供給量が増加する時期と一致する。特に、後生動物の出現期は海洋が比較的還元的で、リンや鉄、マンガンに富んでいた時代に対応しており、しばしば言及される海洋が酸化的になったことが後生動物の出現を引き起こしたとする仮説とは一致しない。一方、エディアカラ動物群、移動能動物や硬組織動物の出現といった後生動物の大型化や多様化は酸化的な海洋で起きた。このように、後生動物の出現と多様化は異なる

条件で起きたことがわかった。

約 5.5 億年前に起きた炭酸塩炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 値) が異常に低くなるイベントはシュラム変動と言われ、エディアカラ紀の特異的な環境変動の 1 つである。その原因として、従属栄養生物の増加に伴う CO_2 の増加による温暖化などいくつかの説が挙げられているが、その原因はいまだ謎である。私たちの研究結果は、このシュラム変動期の後期に海洋の酸化や Ca 量、硝酸量や Mo 量の増加が起きたことを示す。この時代は、硬骨格動物や移動能動物、さらにはミャオヘ藻類と呼ばれる比較的高等かつ大型の多細胞藻類が産する。海洋酸素濃度と Ca 量の増加は、この時期に出現するカルシウムの生物鉱化作用による硬骨格生物の出現と調和的である。また、Mo は窒素固定に必須なニトロゲナーゼ酵素の中核元素である。海洋の酸化に伴う Mo の増加が窒素固定を促進し、海洋硝酸濃度を増加させ、それを必須とする酸素発生型光合成をする藻類の進化・大型化と繁栄をもたらし、さらに海洋中の酸素濃度を増加させるといった正のフィードバックを引き起こした。その結果、海洋中の硝酸濃度が増加する一方で、リンは酸素の増加による鉄やマンガン酸化物の堆積によって減少する。極端な海洋リン濃度の減少と硝酸濃度の上昇は、高いレッドフィールド数 (N/P 比) を有するバクテリアを生じさせる。結果、N/P 比の高い有機物質が海洋中に溶存し、それを摂取する動物は効率的に窒素を取り込むことが可能となり、豊富な筋組織やタンパク質を持ち、高い移動能力を有するようになったと考えられる。

ところで、このような生物進化と海洋組成の共進化は、一部の動物門のみならず、多くの門で同時発生的に起こる (図 5)。例えば、海綿動物は後生動物の中で最も下等であり、マリノアン全球凍結後に出現したとされているが、現生種では特徴的とされるケイ素や

炭酸塩の骨針を、初期の種は有しなかったことが化石の証拠から示唆されている。そして、シユラム変動期に軟体動物、節足動物や環形動物などの他の動物門とともに、硬骨格を有するようになる。また、シユラム変動期に節足動物、軟体動物やエディアカラ動物群に

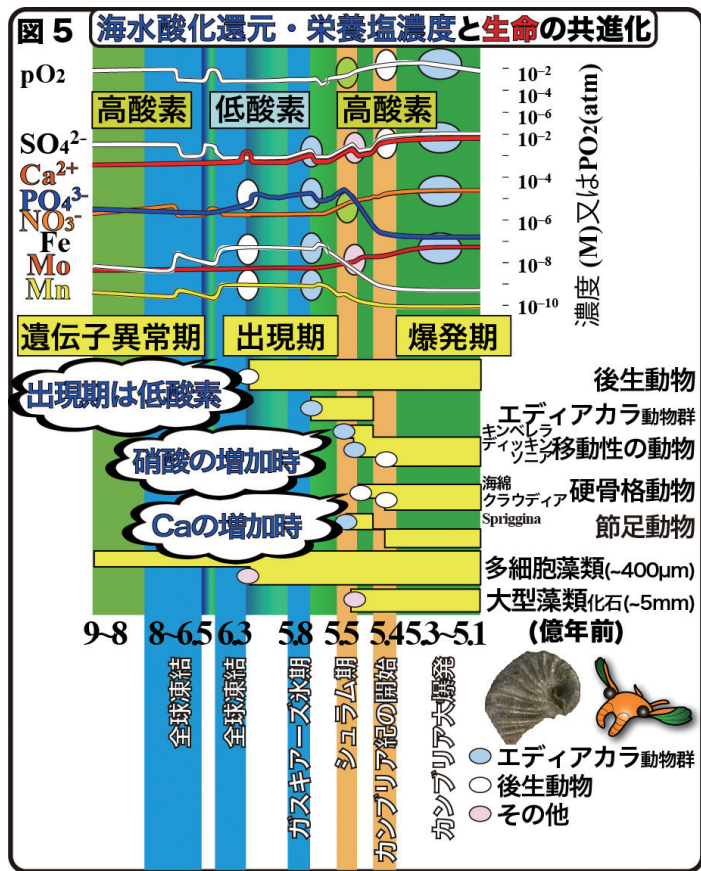


図5 9～5.1億年前の海洋中の生命必須元素濃度の経年変化、地質イベントと生命進化の対比。

移動能力を持つ種が出現する。このような環境と生物の密接かつ短期間での共進化は、それぞれの動物門の祖先生物が、化石に記録される以前に、すでに硬骨格を形成する生物鉱化作用や移動を可能とする遺伝子を有していたが、それらは発現されず、酸素濃度、Ca量や硝酸量の増加といった環境変化が起きた時に、その環境変化に呼応して、発現したことを示唆する。

これまでの多くの研究ではエディアカラ紀からカンブリア紀初期に起きた後生動物の進化をひとまとめにし、酸素の増加が後生動物の出現と多様性を引きおこしたと提唱してきた。しかし、私たちの最近の研究結果は後生動物の出現は、海洋が比較的酸素に乏しく、リンや鉄などに富んでいた時期に、多様化は酸素が増加し、海洋中に硝酸やCaなどが増加した時期に起きたことを示す。そして、海洋中のCa量や硝酸量が増加した時期に、多くの動物門で同時に生物鉱化作用や移動能力が獲得されるなど、地球表層環境と生物進化の共進化が見られる。その共進化は異なる動物門で共通に、かつ短期間に起こるため、そのための遺伝子は、その進化が起きるよりずっと以前から、それらの動物門で共有されていたと考えられる。

プロフィール

小宮剛 (こみや つよし)

1972年生まれ。東京工業大学理工学研究科応用物理学専攻博士課程修了。東京大学総合文化研究科准教授。

読書案内

◇丸山茂徳, 磯崎行雄『生命と地球の歴史』(岩波新書、1998年)

*内容は古く、新しい発見によって書き換えられてきたが、地球(特に固体地球)と生命の共進化を語るバイオニオ的な本。