

全地球史からみる地球環境

—— 生命の歴史から地球共生系を考える ——

山口 由二

The Evolution of Global Environment and Symbiosis Systems

Yuji Yamaguchi

はじめに

酸性雨，オゾン層の破壊，砂漠化，地球温暖化，地球環境問題が新聞紙面に登場しない日は少ない。人類の未来における最大の問題として，環境問題は存在する。地球環境問題の影響を受けるのは人類だけではない。地球上の全生物が影響を受ける。環境問題は，もはや人間だけの生存の問題として考えることに限界がきている。

近年地球をひとつの生物体としてとらえる考え方がある。J. ラブロックはその著書『ガイアの時代—地球生命圏の進化』の中で生物が地球全体の恒常性を保っていることから，地球全体でひとつの有機体と考えることを提唱している。それにたいして，リチャード・ドーキンスの『利己的な遺伝子』の中で，生物は遺伝子の乗り物に過ぎず，それぞれの遺伝子は自己複製という目的のみしかないという考え方で生物の適応戦略を説明している。まさに，ラブロックが「地球共生系」を提唱しているのにたいしてドーキンスはいわば「地球競争系」を提唱しており，全くの対極をなしている。この両者の生命体個々および相互に対する考え方はいずれも地球46億年の生命進化の過程を十分に説明しているのであろうか。

地球史的視点から：本論の目的

私たちの活動舞台である地球は，すでに46億年以上の歳月を経過して現在に至っている。この歳月の中で，さまざまな事件が起こり，時には地球生物の存亡にかかわるような大事件（たとえば恐竜の絶滅）が何度も起こった。そのような危機的状況を脱して，地球上の生命は現在まで生き残ってきたのである。また逆に，このような大事件の1つを抜かしても，現在の地球の生態系や，人類の存在はなかったであろう。

現在の地球とそこに住む数え切れない生物体，それらの形成する生態系を研究する際，46億年

の地球の歴史を通じて、それぞれがどのように変化しその結果として現在のよう形になったことを見ていくことは大変に重要なことである。

本論では全地球史を概観して、その歴史の中で、生命体と環境の関係、特に進化の過程を見ていき、現在の地球環境と生態系がどのように形成されてきたのかを考えてみたい。

地球の特性

太陽系の第3惑星として誕生した地球の特異性は水を持つということにある。表1は地球に近い太陽系の惑星、水星、金星、火星を地球と比較して見たのである。

表1 惑星比較

(理科年表2005年より)

	水 星	金 星	地 球	火 星
質量(kg)	3.3×10^{23}	4.87×10^{24}	5.98×10^{24}	6.42×10^{23}
直径(km)	4878	12104	12756	6787
平均の密度(kg/m ³)	5420	5250	5520	3940
脱出速度(m/sec)	4300	10400	11200	5000
平均距離(AU)	0.387	0.723	1	1.524
自転周期(地球日の長さ)	58.65	243	23.93	1.026
公転周期(地球日の長さ)	87.97	224.7	365.26	686.98
傾斜(軸の傾き)	0	178	23.4	25
軌道傾向(度)	7	3.39	0	1.85
軌道偏心(離心率)	0.206	0.007	0.017	0.093
平均表面温度(k)	452	726	281	210
最大表面温度(k)	700	773	310	293
最小表面温度(k)	100	228	260	133
視覚的な反射率(反射率)	0.12	0.59	0.39	0.15
大気成分(%)				
水素	3.2			
ヘリウム	5.9			
窒素	5.2	3.5	78	2.7
酸素	9.5		21	
水	3.4	0.01	1	0.006
アルゴン	7	0.007	0.93	1.6
二酸化炭素	3.6	96	0.035	95
気圧(/atm)	わずか	90	1	0.0062

地球の兄弟惑星といわれる火星、金星はいずれも、現在カンラン石や玄武岩の地表面を持つが大気や地表の状況は大きく異なっている。金星の場合、大気の主体は二酸化炭素であるが、90気圧というきわめて高圧で、平均気温は726K（摂氏453度）という高温状態にあり、生命の生息の可能性は極めて少ない。一方、火星は大気が地球の100分の1以下できわめて薄く、地表の平均気温は210K（摂氏-63度）ときわめて寒く、やはり生命生息の可能性は乏しい。このように、地球と大きく異なった環境になってしまった理由として、太陽からの距離が金星のように近すぎず、火星のように遠すぎなかったことが、温暖な環境を形成した理由のひとつと考えられる。また、地球が水の惑星といわれるように、地表面の3分の2以上が海洋で覆われていること、大気中に二酸化炭素が少なく、窒素と酸素が主体であることなどが、金星や火星と大きく異なっているためと考えられる。

西村（2002年）によれば地球が水の惑星になりえたのは、①地球の太陽からの距離、②水を留め置くのに十分な重力、を指摘している。特に距離は地球の軌道が5%内側でも、15%外側でも水は液体で存在できなかつたと述べている。地球が水の惑星であったことは、きわめて偶然であった。

46億年前の地球誕生

地球誕生当時から、温暖で湿潤な環境ではなかった。特に生命誕生のカギといわれる水は、地球の誕生当初（46億年前）から存在したわけではなかった。

地球の誕生は、今から46億年前といわれている（西村・磯崎、2002年）。同時に誕生したと考えられる月の岩石や隕石と理論に基づくあくまで想像であるが、原始太陽系星雲において隕石同士が衝突を繰り返し、微惑星となり、さらに微惑星同士が衝突して巨大化するとともに、その衝突エネルギーは惑星内に蓄えられた。そして現在の地球と同様の大きさに発展し、岩石は高温の中で溶解し、地球は溶けた溶岩（マグマ）に覆われた状態になった。次第に比重の大きい物質は地球中心部へ沈み込みこみ、マントル（カンラン石）と核（主に鉄：液体の外核、固体の内核）とに分離していった。その一方で、地球表面には比較的比重の低い物質（ゲンプ岩等）が集まり、やがて、隕石の衝突も少なくなると冷えて固まり、地殻を形成したと考えられる。

このような原始地球において大気と水はどのように発生したのであろうか。大気は微惑星に含まれていたものが、集合して地球の重力に捉えられたと考えられる。原始大気は、その96%が二酸化炭素で、そのほか、窒素、水蒸気が主成分であった。そのため、温室効果により、地表はかなりの高温であったと考えられる。徐々に地表の温度が下がるにしたがって、水蒸気は冷却・凝固し、雨となって地表に降り注ぎ、海洋が出現した。約40億年前に、核、マントル、地殻、海洋、大気といった、現在の地球の基礎となる構造が形成された。

海洋は、鉱物中のカルシウムのように水に溶解しやすい成分や空気中の二酸化炭素を溶かして

いった。そして、炭酸カルシウムとして海底に沈殿し、さらに多くの二酸化炭素が海洋中に溶解し、大気中の二酸化炭素を吸収し続けていった。

生物の出現

さてこのような原始地球においてどのように生命が誕生したのであろうか。

地球上のすべての生物が水を必要とするように、最初の生命は38億年前の原始の海の中で誕生したというのが定説である。化学的に考えると、水は最も優れた溶媒であるといえる。このさまざまな有機物を溶かし込んだ水、つまり有機物のスープの中でアミノ酸が構成され、膜構造がまずできて、その中に遺伝子が誕生したとき、生命が誕生したと考えられる。つまり、生命にとって複製するための遺伝子とそれを囲む細胞膜が生物構成の最小単位であるといえる。このような生物は、現在の私たちのような遺伝子を包む膜である核をもった多細胞生物ではなく、核のない単細胞の原核生物であった。

生命の発生は海洋ができて（40億年前）わずか2億年後のことであった。

生命の進化と酸素

最初に誕生した原始生物は深海底の火山の噴出孔付近の高圧・高温下でも生息できるイオウ酸化細菌のような細菌ではないかと考えられている。現在このような環境はきわめて劣悪な環境と思えるが、オゾン層がなく紫外線や宇宙線が降り注ぐ光の当たる地表や海面近くでは遺伝子が傷つけられ、生命は生き残ることはできなかったと考えられる。

進化の過程は極めてゆっくりしたものである。古細菌のように高温高圧下で生息するいわば日陰の生物から、生物が日向に出てきたのは、今から27億年まえのことである。この生物はシアノバクテリアと呼ばれ、光からエネルギーを得て、酸素を発生させること（光合成）ができた。

ちょうどこの頃（27億年前）、地球内部の構造が安定化し、地球は地磁気を持つようになった。この地磁気もより地球に降り注ぐ宇宙線を遮断するバンアレン帯が形成され、徐々に生命は水面近くに生息することが可能となった。また、同時（27億年前）に大陸地殻の急速な発達があり、安定した大規模な安定大陸が形成されその周辺には広範囲な浅海域（大陸棚）が形成された。この2条件によりシアノバクテリアはさらに生息域を広め増殖していった。シアノバクテリアの仲間にはオーストラリアなどに見られる藍藻類のストロマトライトとして現在まで生き残っている。このシアノバクテリアの発生により地球の環境は一変した。地球に酸素が徐々に溜まっていったのである。

最初、シアノバクテリアによって生産された酸素は海水中の鉄イオンと結びついて、酸化鉄となり大陸棚斜面に堆積していった。現在、地球上に存在する大規模な鉄鉱床（縞状鉄鉱床）のほ

とんどはこの時期（25～19億年前）に作られたものである。（川上（2002年）参照）

酸素のもたらした生命の危機と進化

さらに発生した酸素は、海中を脱して大気のなかに徐々に蓄積していった。19億年前以降、縞状鉄鉱床が堆積しなくなり、代わって陸源性の赤色砂岩（酸化鉄を含む）が広範囲に堆積するようになったことがこれを示している。酸素は、強い酸化作用をもっており、従来型の生物にとって、毒でしかなかった。そのためそれまでの多くの生物は危機に瀕することとなる。そこで生物は新たな進化を遂げる。もっとも保護しなければならない遺伝子をさらに膜で包み込む核として持つようになった。この核を持った細胞を真核細胞と呼び、真核細胞でできた生物を真核生物と呼ぶ。

単細胞の原核生物および真核生物は化石になりにくいいため明確な年代はわからないが、およそ真核生物は今から20億年前後に誕生したと考えられる。もちろん、私たち人類もこの真核生物の一種である。

また、積極的に酸素をもちいて有機物を酸化して、これまでよりも多くのエネルギー発生に利用する細菌が登場する。このような酸素を利用する細菌を好気性細菌と呼び、これまでの酸素を好まない細菌（嫌気性細菌）と区別している。さらに酸素消費する細菌や光合成を行う細菌を細胞内に寄生させる真核生物も現れた。酸素によりエネルギー獲得する細胞内の器官をミトコンドリアと呼び、ミトコンドリアは独自にRNAをもつことが、細胞内に寄生している証拠といえる。現在の動物細胞はミトコンドリアによってエネルギーを得ている。また、光合成細菌を取り込んで葉緑体として、光合成で得たエネルギーを利用する生物は現在の植物の祖先である。

このように、生物は酸素の増加という危機的な状態を、逆に利用して現在の酸素の豊富な環境に見事に適応した生物として大進化を遂げたわけである。

多細胞動物の出現

真核生物から多細胞生物に進化を遂げるのであるが、最近の研究で襟べん毛虫から10億年前ごろ多細胞動物が進化したと考えられる。多細胞動物の誕生もやはり、酸素の存在が重要であった。多細胞動物では細胞同士を結び付けているコラーゲンであり、その生合成には酸素が不可欠である。一般に生物は、大きくなればなるほど酸素消費量は多くなり、酸素濃度が上昇したからこそ、生物の大型化が可能になったと考えられる。

進化と絶滅

もっとも初期の多細胞動物としてエディアカラ動物群があり、いずれも扁平で左右対称の形態をしている。この動物群は6億年前のヴァランガー氷河期の終焉とともに突然現れ、1億年の繁栄の後、5億4千万年前の原生代・古生代（V-C）境界で忽然と姿を消す。

このような、大繁栄と大絶滅は表2のように6回繰り返される。

表2 これまでの大絶滅の歴史

- | |
|--------------------------------|
| 1. ベンド紀-カンブリア紀 |
| 2. オルドビス紀-シルル紀 |
| 3. デボン紀-石炭紀 |
| 4. ペルム紀-トリアス紀（P-T境界）（三葉虫・フズリナ） |
| 5. トリアス紀-ジュラ紀 |
| 6. 白亜紀-第三期（K-T境界）（アンモナイト・恐竜） |

※著者作成

大絶滅の原因は主に隕石説と地殻変動説とがある。このうち、隕石説は白亜紀末の大絶滅の理由として確実視されており、またペルム紀末の大絶滅では地殻変動による、有毒ガス、酸素欠乏、酸性雨、寒冷化が原因とされている。

このような大絶滅の局面の後には必ず、大進化の時代が訪れる。その例として原生代末のベンド紀の大絶滅の後に、カンブリア紀にはいり地表環境が整うとこれまでの生物相と入れ替わり、新しい生物層の下で爆発的進化（カンブリアン・エクスプロージョン）を遂げた。これは急速な環境の悪化の中で劣悪な環境でも耐えられる「特殊な災害時型生物群」が出現し、その後の環境の回復にともない、古いタイプの生物層の絶滅により空白となった環境空間に多様性の高い安定した生物群が定着するからと考えられる。

生物の多様性

磯崎（2002年）は「大絶滅という本来生物を殺すという現象が、その後の生物を多様化させ、結果として進化の加速装置として働いたという一見逆説的な意味を持つこと」を指摘している。

生物の多様性という意味でとらえるなら、大絶滅はその時点で、生物種を極端に減らし、多様性が一時的に失われるが、その後世紀では大絶滅以前に比べて、より種の多様化している。それはあたかも、樹木が嵐にあって、弱い枝が取りさらわれ、残った強い枝からよりしっかりした枝葉が萌芽するのに似ている。結果としてより嵐に強い樹形が形成されるのである。つまり現在の種の多様性は、過去に繰り返された大絶滅、絶滅期を減ることによって獲得されたということが

言える。

地球史の中で地球環境の変化と生命の進化の段階と絶滅の流れをまとめると表3のようになる。磯崎（2002年）は生命の進化の歴史を「急激な変化期と長い安定期の繰り返し」ととらえているが、進化はまさに連続ではなく段階的なものといえる。その契機となるのが大絶滅であるといえる。大絶滅というカオス期があって、その混沌の中で、新しい生命の息吹が復活するかのようである。

表3 進化と大絶滅

↓（海洋の誕生：有機物のスープ）：40億年前 生命（古細菌）の誕生
↓（安定大陸と大陸棚の出現，地磁気の発生；宇宙線から保護される）：27億年前 光合成細菌（シアノバクテリア）の出現
↓（酸素の発生）：27億年以降 遺伝子の保護のために真核細胞を持つ生物の出現
↓（酸素濃度の増加） 多細胞動物（エディアガラ生物群）の出現
↓大絶滅（V-C境界）原因：スノーボールアース地球全凍結か？：5.4億年前 古生代型動物群（三葉虫，フズリナなど）の出現：
↓大絶滅（P-T境界）原因：スパープルーム地殻大変動か？：2.5億年前 中生代（アンモナイト，恐竜）の出現
↓大絶滅（K-T境界）原因：チクサラブクレーター小天体の衝突：6500万年前 新生代（哺乳類の出現）

※著者作成

生物による環境の改変

生命は、生命誕生から今日まで進化の過程で、生物多様性を展開してきた。嫌気性の単細胞生物から始まった生物の進化は、光合成というエネルギー獲得能力を身につけた。光合成細菌の一種であるシアノバクテリアは酸素を放出し続けて、徐々に酸素の豊富な惑星へと地球は変わっていった。酸素濃度が高まると、この酸素を用いて、酸化作用により従来より高エネルギーを得る好気性の細菌が誕生した。さらに酸素からDNAを保護するために、核を持った真核細胞へと進化した。

現在地球の大気中に豊富に存在する酸素はごく一部の水の光分解を除くとほとんどは生物の光合成によりもたらされたものである。もし地球大気に酸素がなければ、私たちの元となる真核生物への進化や、さらにまた多細胞動物の大型化はなかったと考えられる。また、オゾン層は形成されず、紫外線の降り注ぐ陸上への生物の上陸は難しかったかもしれない。

つまり、生物は地球の環境を大きく改変し、その変化した環境に適応するようにさらに進化し

てきたのである。

生物進化での共生関係の成立

地球上の生物は、進化の過程の中でさまざまな種に分化してきたとともに、種間でさまざまな形式で共生関係を成立させてきた。そのことは生物進化の歴史において明らかである。

たとえば、

1. ミトコンドリアや葉緑体は私たちを含む真核生物に細胞内共生する（約20億年前から）。
2. 私たち従属栄養生物である動物は、独立栄養生物である植物（光合成細菌を含む）に、その出現時から共生している。（20億年以上前から）
3. サンゴ虫（腔腸動物）は体内に褐虫藻（渦べん毛虫）を共生させ、褐虫藻はサンゴの老廃物と二酸化炭素を利用して光合成を行い、栄養を得て、その栄養の一部をサンゴ虫にも与えている。（約4億年前から）
4. 草食動物や昆虫は消化器官にバクテリアを共生させ、セルロースやリグニンを分解させている。（約2億7000万年前から）
5. 被子植物は受粉において昆虫類（動物）に依存し、代わりに栄養物（蜜、花粉）を提供しており共生関係にある。（65百万年前から）

などの例が挙げられるが、これらの例はごく一部に過ぎない。すべての生物が何らかの共生関係を、生命史の中で成立させてきたと考えられる。これらの共生関係は複雑に入り組んでいる。他の生物と共生関係を成立させることなく、まったく独立して生息する生物は地球にないといっ

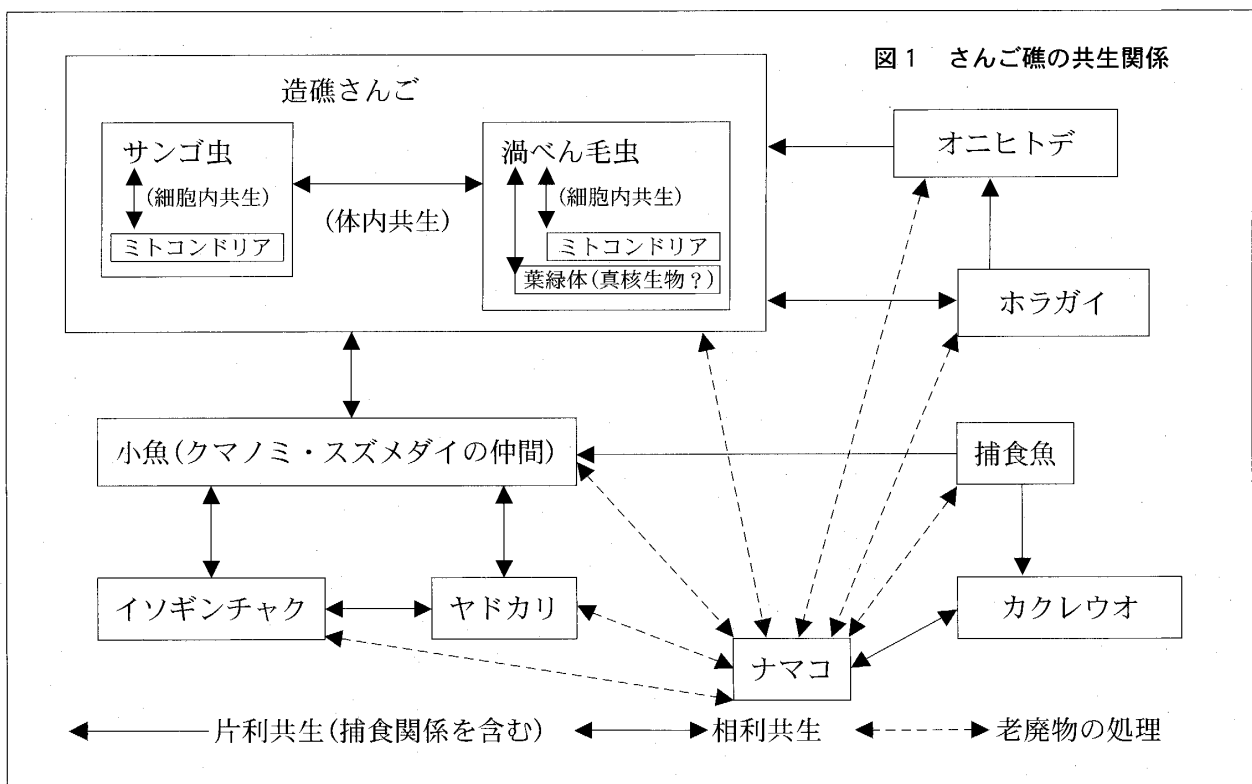
てよい。

さんご礁での共生関係

ここで、さんご礁を例にそこに棲む生物群の共生関係を図式化すると図1のようになる。図1はさんご礁に生息する生物の共生関係を片利関係（捕食関係を含む）、相利関係、老廃物処理の3種に分類してそれぞれの生物間で示した。捕食関係を共生的と考えるのは捕食者は非捕食者の存在なくして存立できないので、片利的共生と考えることとした。さんご礁は、複数種の造礁さんごにより形成している。まず、これらの造礁さんご同士も微妙な住み家分けの中で一体としてさんご礁を形成しているので共生関係にあるといえる。造礁さんごはイソギンチャクと同じ腔腸動物であるサンゴ虫が形づくっている。サンゴ虫は、渦虫藻（渦べん毛藻）を体内共生させ、酸素や栄養を受け取っている。渦虫藻は体内に葉緑体とミトコンドリアを持っている。葉緑体とミトコンドリアは先に述べたように細胞内共生である。特に渦虫藻の葉緑体は、3重の膜に包まれており（普通は2重膜）、かつて、葉緑体を持つ真核生物を細胞内共生させていた痕跡であると

考える研究者もいる。造礁サンゴは小さな隙間や水路が多く、スズメダイなどの小魚が捕食魚である大きな魚から逃げ込むために利用されている。クマノミとイソギンチャクとヤドカリの3者間には有名な相利的な共生関係が成立している。サンゴを食べるオニヒトデとそれを捕食するホラガイの3者の間にも食物連鎖を通じた共生関係が存在している。ナマコを隠れ家として利用するカクレウオとナマコにも共生関係は存在する。最終的に、すべての生物の老廃物は砂の中の微生物によって分解されるが、これらの砂の中から有機物を食べ、さんご礁をきれいに保っているのにはナマコの働きがきわめて大きいといわれている。

さんご礁内にはこのほかにも、きわめて多種多様な生物が存在し、複雑な生態系を形成している。多数の共生関係の中で、さまざまな環境変動に対して緩衝的に働いていると考えられる。



※著者作成

このような、さんご礁内で見られる共生関係は陸上の森林内の生物間、深海底のチムニーと呼ばれる熱水の噴出孔など、ニッチを作りながら生息している複数の生物種間にも同様に存在し、環境変動に対して、互いに緩衝的に作用していると考えられる。最終的には、この地球全体がそこに棲息する全生物種の間で共生のネットワークを形成して環境変動に対して、緩衝的に作用しているといえる。

さんご礁が、なぜ生物多様性が維持されてきたのだろうか。その理由として、

- ①さんご礁では環境が複雑化しており、生物種にとっても多様なニッチが形成されているのではないかと

②さんご礁の形成には数百年数千年単位の時間が経過しており、その間に多様なニッチが形成されてきたのではないか

③太陽光による、きわめて多くのエネルギーが供給されていることなどが考えられる。

また、地球上には、地域によってさんご礁のように生物多様性があり複雑な生態系を形成しているところと、そうでないところがある。一般に環境変動が激しいところほど、多くのニッチが形成され、生物種が生息できるのではないだろうか。このことは全地球的にも言え、生命38億年の進化と絶滅の歴史の中で生物種の多様性が増してきたことは、環境変動に対する、緩衝性を高めるとともに、地球生命体全体の絶滅確率を減らすように作用しているのではないだろうか？

地球は共生系か競争系か：まとめ

「競争」を英語でレース (race) というが、レース (race) には「類」・「種」という別の意味を持っている。競争も種も同じレース (race) であるのは種同士が競っていることからなのかというのは著者の勝手な解釈であるが、ダーウィンの生存競争の中で、「適者生存」というおきての下に、生命は進化して種の起源となったと考える。

ダーウィニズムは、これまでの生物学の主流であった。ドーキンスの「利己的な遺伝子論」もその延長線上にある。この考え方は、また資本主義 (競争社会) の現在の世の中では極めて受け入れやすい論理である。

それに対してラブロックの地球をひとつの生命体と考える発想は、新自由主義が隆盛を極める時代に社会主義の理想論を語っているようにも思え、違和感を覚える。しかし、大絶滅の中で進化してきた生命の歴史を概観すると、種の多様性は地球生命全体の生き残り戦略であり、種間の共生関係は地球生命全体の有機性・一体性を示している。

また、46億年の全地球史で地球が生命体によって常に変化し、そのことがさらに生命体を変化させてきたという生命と地球の相互作用 (川上 (2002年) 参照) を見ていくと、地球上の生命体そのものも地球の一部であり、地球自身が自己変化・自立更新的であったといえるのではないだろうか。

46億年の地球の歴史の中で、わずか300万年前に誕生した人類の存在は極めて些細な存在であることを実感する。三葉虫・アンモナイト・恐竜のように過去には隆盛を極めた生物が地球史上で極めて簡単に短期間のうちに絶滅していった様を見ていくと、人間もモータル (mortal) として絶滅は逃れ得ないものである。それだからこそ、ガイア (地球生命体) としての発想が、必要となってくるのではないか。

引用文献

西村祐二郎「地球の概観」、『基礎地球科学』, 1-19, 朝倉書店, 2002年

川上紳一「生命と地球の相互作用の歴史」、『全地球史解説』, 393-422, 東京大学出版会, 2002年

西村祐二郎, 磯崎行雄「地球の歴史」、『基礎地球科学』, 142-184, 朝倉書店, 2002年

磯崎行雄, 「大量絶滅と生命進化」, 『全地球史解説』, 449-497, 東京大学出版会, 2002年

参考文献

J. ラブロック著 スワミ・プレム・プラブダ 訳『ガイアの時代』, 工作舎, 1989年

リチャード・ドーキンス著, 日高俊隆ほか訳, 『利己的な遺伝子』, 紀伊國屋書店, 1991年熊澤峰

夫ほか『全地球史解説』, 東京大学出版会, 2002年

国立天文台編, 『理科年表』, 丸善, 2004年

西村祐二郎編著, 『基礎地球科学』, 朝倉書店, 2002年

(2005年9月24日受理)