

連載

シネマ天文楽【9】

水の惑星

福江 純（大阪教育大学）

1. 水惑星、地球

生物は体の中に海を抱えているという。生命は海で発生し、酸素を生み出した後で陸上に進出したのだが、その際に、体液として海を携えていったというのだ。実際、脊椎動物は、体重の7割から8割ぐらいが体液（水分）だ。しかも体液の元素組成で塩分の割合は海水のものと似ているそうである。たとえば、人体に含まれる元素を多い順に並べると、酸素、炭素、水素、窒素がまず多く、リン、イオウ、カリウム、ナトリウム、塩素、マグネシウム、鉄、と続く。有機物を作っている炭素と窒素を除けば、たしかに、大部分が水と塩分である。

さて、生命の存在にとって不可欠な水だが、惑星地球においては、水（海水）は個々の生命だけではなく地球全体の気候に対しても多大な影響を与えている。しばしば地球は“水惑星”だと言われる。地球表面の7割が水で覆われているためだ。地球上に存在する水分の約97%は海水で、残り3%のうち、2%は極氷や氷河、1%程度が、湖水・河川水・地下水である。大気中の雲や水蒸気は0.001%程度にすぎない。しかし、大気中の水分が非常に少ないとはいえ、海、陸、大気の間での水の循環が気候の緩和に大きな役割を果たしているのである。

すなわち、海から蒸発した水蒸気は、上空で凝結して雲となるが、蒸発するに際しては潜熱を吸収するので日射による加熱を緩和するし、凝結するに際しては潜熱を放出するので冷却を緩和する。そもそも水は岩石などより比熱が大きいので、海洋は陸地よりも暖まりにくく冷めにくく、海洋の存在は気候（温

度）の変化を小さくする。海洋の存在によって、地球の気候は非常に穏やかなものとなっているのである。

さらに海洋が地球の自転に対して与える影響も落とすことはできない。

月による潮汐作用によって、海の水は一日に2回大移動するわけだが、その際に、海洋と海洋底の間の摩擦によって、地球の自転は徐々に遅くなってきたのだ。言い換えれば、昔の一日は現在の一日よりも短かったのである。そして一年は365日よりもずっと多かったのである。

惑星の気象さらには惑星の自転にさえ影響を与える海洋だ。惑星の力学的な軌道運動に影響を与えないと言い切れるだろうか。また生命を生み育ててきた海洋のことだ。海洋自体が生命にならないと言い切れるだろうか。今回紹介する映画は、そのような話なのである。

2. 『惑星ソラリス』『ソラリス』

ポーランドのSF作家スタニスラフ・レムは、異種知性体と人類の邂逅というか、意志の“非”疎通を扱ったSFをいくつか書いている。そのレムの作品の一つ『ソラリスの陽のもとに』を原作とする映画が、『惑星ソラリス』『ソラリス』だ。

前者の『惑星ソラリス』は、監督アンドレイ・タルコフスキーが作った旧ソ連の名作映画で（1973年）、一方、後者『ソラリス』は、監督スティーブン・ソダーバーグ、製作ジェームズ・キャメロンという華々しい陣容で最近（2002年）リメイクされたものである（図1）。

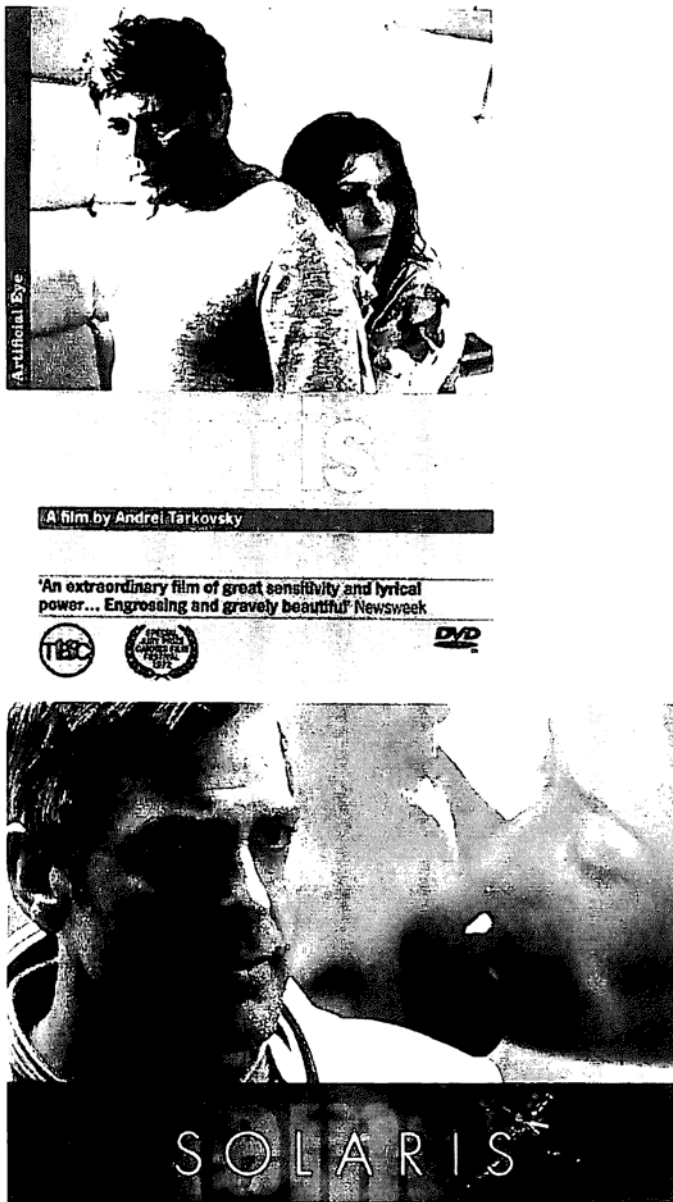


図1 『惑星ソラリス』(上)と『ソラリス』(下)
 (www.zone-sf.com/images/solaris.jpg と
<http://www.cinemaniamia.com.mx/wallpapers.htm>)

表面全体が海で覆われた惑星ソラリス。そのソラリスの軌道は、重力作用だけでは説明できない不可思議な変動を起こし続けていた。二重太陽をめぐるソラリスの軌道が崩壊しないように、惑星の厄災を免れるかのごとくに、安定な軌道を維持し続けているのだ。その軌道変化には、どうやら惑星を覆う海洋が関与していることが判明する。すなわち、海洋が移動することによって惑星の重心を変化させ、安定な軌道に乗せているのだ。まるで海洋に意志／知性が宿っているかのように。ただし、

それまでに知られていたいかなる知性とも異なる種類のものだったが。

惑星ソラリスの謎を解明するために、ソラリスの周回軌道上にステーションが設置され、数十人の科学者が常駐して研究を進めることになる。ところが科学者たちはつぎつぎと自殺していき、研究ステーションは大混乱に陥る。ステーションに調査に赴いた精神科医クリス・ケルヴィンは、さらに不可思議な現象に遭遇するのだった。

調査を進めるクリスの前に自殺した妻ハリー（リメイク版ではレイア）が現れたのだ。ソラリスの“海”は、人間の潜在意識を探り出し、具象化する能力があったのである。妻と同じ姿形をして、妻の記憶をもっているが、“それ”は人間ではない何かだ。しかし、クリスは次第に実体化された“それ”を愛するようになる・・・(図2)。夢と現実、過去の記憶と現在の実体、これらが交錯し、不条理な状態が続いて、ついに。自分は何者なのだろう、という根元にまで突き進んでいく・・・。

最初の『惑星ソラリス』(1973年)では、レムの原作のイメージを強く残しており、不可解性とか不合理性が前面に出ている、哲学的というか内宇宙的というか、いかにも旧ソ連的な何ともわかりにくい映画だったように思う(大昔に見たので細かいところは忘れた)。一方、リメイク版『ソラリス』(2002年)は、主人公と亡妻の間の感情・愛情のやりとりに焦点が置かれており、物語的にはわかりやすくなったが(ハリウッド映画らしい)、知性体同士の意志疎通という観点は見えなくなったような気がする(こちらは廉価版DVDが出ており入手しやすい)。ジェームズ・キャメロンが製作なので、一見の価値はあるだろうが、(『トゥームレイダース』なんかを見慣れていると)最初の30分はまったく退屈なので、他のことをしながら横目で見るといいだろう。

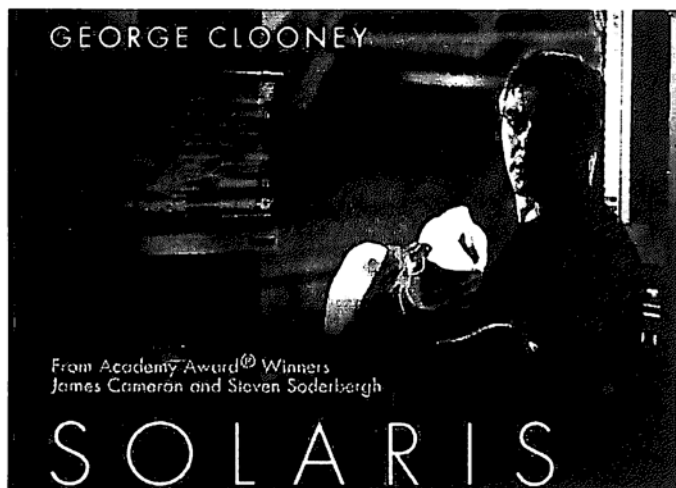


図2 旧作(上)とリメイク版(下)のシーン
 (www.artcon.ru/tarcovsky/img/solaris.jpg と
 www.apple.com/trailers/fox/solaris/images/solaris_apple_01.jpg)。主人公の二人は旧作はド
 ナータス・パニオニスとナタリア・ボンダルチュ
 ク、リメイク版はジョージ・クルーニーとナター
 シャ・マケルホーン。

3. 海洋の影響

まず、少しチェックしておきたいのは、惑星運動に与える海洋の影響だ。地球の場合、たしかに地表の7割は海に覆われていて、水惑星とも呼ばれる所以だが、その一方で、海の平均深度は5km弱しかなく、地球半径の6400kmと比べると微々たるものだ。実際、地

球表面積 $\times 0.7 \times$ 深さ \times 密度から海水の総質量を概算してみると、ざっと、10の21乗kgほどになる。それに対して、地球の質量は、6かける10の24乗kgなので、10000倍くらい違う。つまり、地球の場合は、海水の総質量は地球の質量の1万分の1ぐらいしかないので、何億年もかけて地球の自転速度を緩めることは可能かも知れないが、地球の軌道運動を変えることは、少なくとも数年のタイムスケールではほとんど不可能だ。運動量の保存からは、1万分の1程度しか影響を与えることができないということである。

惑星ソラリスの場合は、海洋の重心移動によって、公転周期のタイムスケールで、惑星運動に顕著な影響が生じている。それが可能になるためには、ソラリスの“海”の総質量は、惑星質量の10分の1とか100分の1ぐらいはあるのだろう。惑星ソラリスが地球と同じくらいの大きさだとすれば、“海”の深さは、平均100kmとかそれ以上もあるのだろう。

もしソラリスの“海”が地球と同様に水からできているのなら、起源が問題になる。地球の海の場合は、その総質量は地球質量に比べて十分に小さいので、原始海洋の水は、原始地球や原始地球に衝突した多数の微小天体に含まれる水で十分に供給可能だ。しかし、ソラリスの“海”ぐらいの規模になると、惑星形成論からは、水の供給源が問題になるだろう。

もっとも、原作では、ソラリスの“海”は“プラズマの海”だという記述もあるので、実は惑星ソラリスはガス惑星なのかも知れない。

ソラリスの場合は惑星規模の生命体／知性体だが、地球の場合も生命の存在領域は惑星全体にわたっており、生命の存在する惑星表層は生物圏(biosphere)と呼ばれている。酸素の発生に代表されるように、地球と生命とがお互いに影響を与え合いながら共に進化し

てきたこと—共進化—は確かだろうが、より強い意味で、ガイア仮説につながる。

その前に、暗い太陽と明るい太陽の話をしておこう。

4. 暗い太陽のパラドックス

現在の地球では、太陽から地球に入射するエネルギーは、大気や海洋や地表などの間で、温室効果などを受けながらエネルギー循環し、宇宙空間に放出されている。

地球のアルベド（反射能）は 0.3、すなわち、太陽から入射するエネルギーの 3 割は上層で宇宙空間に反射され、地表まで届くのは 7 割である。このことを考慮して、太陽から地表まで届く入射エネルギーが、赤外線などでまんべんなく宇宙空間に放射されるとして、エネルギーバランスから地表の温度—放射平衡温度—を弾き出すことができる。具体的には、マイナス 18℃ (255K) ほどになる。実際には、地表の平均温度（標準大気）は 15℃ (288K) ほどで、放射平衡温度より 33 度ぐらい高いのは大気の温室効果のためである。

このように、現在の地球に関しては、細かなエネルギー循環はともかく、おおまかなエネルギー収支は問題ない。問題なのは、過去の地球である。

星の進化論からは、太陽の光度は一定ではなく、誕生以来、徐々に明るくなってきている。逆に言えば、過去の太陽は現在よりも暗くて、たとえば、地球が生まれた 46 億年前には、太陽は現在よりも 30% ぐらい暗かったと考えられている。太陽が暗ければ、地表の温度も低かったはずで、セーガンたちの計算 (Sagan and Mullen 1972) では、20 億年くらい前には地表温度が零度以下になることになった (図 3)。ところが地質学的な記録からは、過去も地表の温度は高く、液体の海も 38 億年前から存在していたと考えられている。この理論と観測の不一致を「暗い太陽のパラ

ドックス」と呼んでいる [1]。

この暗い太陽のパラドックスが生じたのは、大気組成を一定と仮定したことに原因があると考えられている。すなわち、過去の地球では、現在よりも二酸化炭素が多く、そのため温室効果が強く働いていて、太陽光度が現在よりも小さかったにもかかわらず、地表温度は低くなかったのだ。しかし、問題は複雑であり、地球システム全体にかかわる話で、現在でも完全に解決しているとはいいがたいようだ。

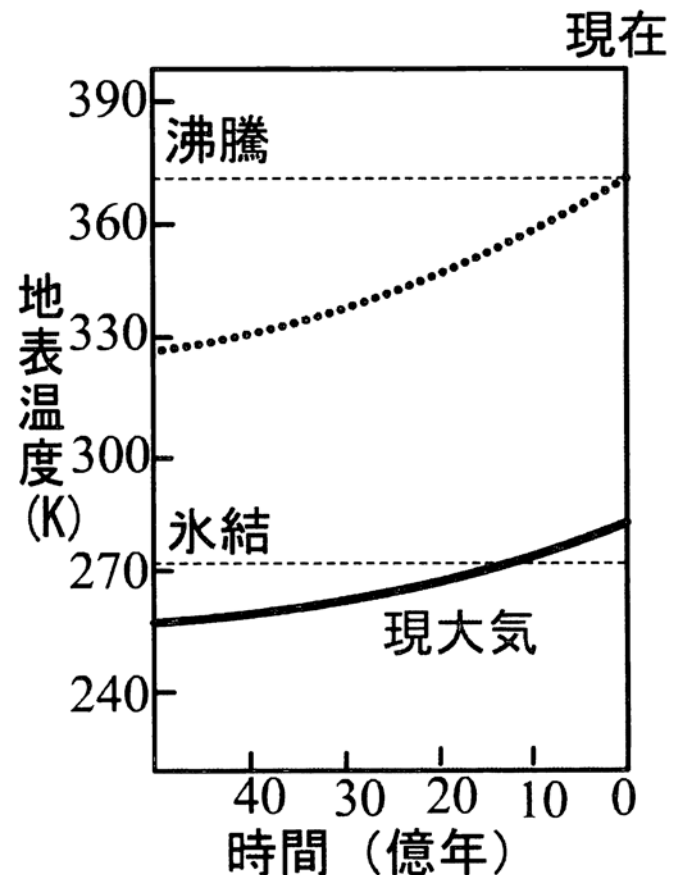


図3 暗い太陽のパラドックス。実線は現在の大気組成の場合で、過去に遡ると、20 億年ぐらいで地表温度は氷点下になる。点線は現在の大気組成に 10 万分の 1 の割合で、アンモニア、メタン、硫化水素を加えた場合で、逆に温度が高すぎる。Sagan and Mullen (1972) [2]に基づく。

5. 明るい太陽のパラドックス

現在の地球では温室効果は主に水蒸気が引

き起こしているが、過去の地球では、二酸化炭素が重要な役割を果たしていた。実際、二酸化炭素が多くて温室効果が十分に働いたために、太陽光度が小さいにもかかわらず、地表の温度は液体の水が存在できるほどには高かったわけだ。そのおかげで、暗い太陽のパラドックスは回避できた。しかし、過去の地球における二酸化炭素の量を評価してみると、必要以上に多いのである。

大気中の二酸化炭素の量は、大気や海洋や海洋底（地殻）の間での炭素循環によって決まるのだが、生物の存在しない地球を考えると、化学的な平衡によって、炭素量の分配が決まってくる。

現在の地表付近に存在する炭素の総量は、大気圧にして60から80気圧ぐらいあるので、たとえば、一つの試算では[3][4]、無生命の地球では、大気の総気圧は60気圧、二酸化炭素の量は98%と、まるで金星並になる(表1)。

表1 無生命の地球の大気組成

気体	金星	地球	無生命の地球
二酸化炭素	97%	0.03%	98%
窒素	3.5%	79%	1.9%
酸素	微量	21%	0
総気圧	90	60	1

実際には地殻などに分配され、さらに海洋にも溶け込むので、大気中の二酸化炭素の分圧は、10気圧以下、0.2気圧くらいまで下がるようだ。しかし、0.2気圧あっても十分多量である。そんなに二酸化炭素があれば、温室効果が暴走して、地球は金星のような状態になってしまうだろう。これを「明るい太陽のパラドックス」と呼んでいる。別に太陽が明るいわけではないが、言葉の語呂合わせだろう。

6. デイジーワールド

地球が誕生して以来、太陽の光度は一定ではなく30%も増加してきた。このような外的環境の変化に対して、地球システムは、理論的には不安定なように見えるが、実際には(おそらく大気組成の負のフィードバック効果によって)ずっと安定な状態を維持し続けている。大気組成の変化は生命活動とも密接なつながりがあり、地球システムが安定な状態を保てるのは、生命の存在に負うところが大きいのかも知れない。

生命活動が惑星環境を安定化させる極端な方向が、ジェームズ・ラヴロックやリン・マーギュリスたちが1970年代にガイア仮説に関連して提案した「デイジーワールド」である[3][4]。以前、別の本[5]にも書いたが、以下のようなモデルである。

惑星の全表面をヒナギクが覆っている仮想的な惑星<デイジーワールド>を想像して欲しい。

ヒナギクが成長するには最適な気温(たとえば23℃)があって、気温があまり低い(たとえば5℃以下)とヒナギクは育たないし、逆に、あまり高くても(たとえば40℃以上)ヒナギクは枯れてしまう。またヒナギクには、白いヒナギクと黒いヒナギクの2種類がある。黒いヒナギクは、反射能(アルベド)が低いので太陽光を吸収しやすく、したがって日射が弱いときにも生育できるが、日射が強くなるとダメになる。一方、白いヒナギクは、アルベドが高く太陽光を反射しやすいので、日射が弱いときはダメだが、日射が強くなっても頑張りがきく。

まず白いヒナギク(あるいは黒いヒナギク)の1種類しか存在しないとしよう(図4)。この場合、惑星の環境(たとえば気温)は外的な物理的条件だけで定まるだろう。すなわち、太陽の明るさが増加すると共に、気温も次第に上昇するだろう(図4下)(物理的・化学

的な大気組成の変化などはいまは考えない)。そしてデイジーの生育はその温度変化に依存し、気温が適当になると繁栄するが、耐えきれないほど暑くなると死滅するしかない。この場合は、生物相と惑星環境の相互作用は起こらない。

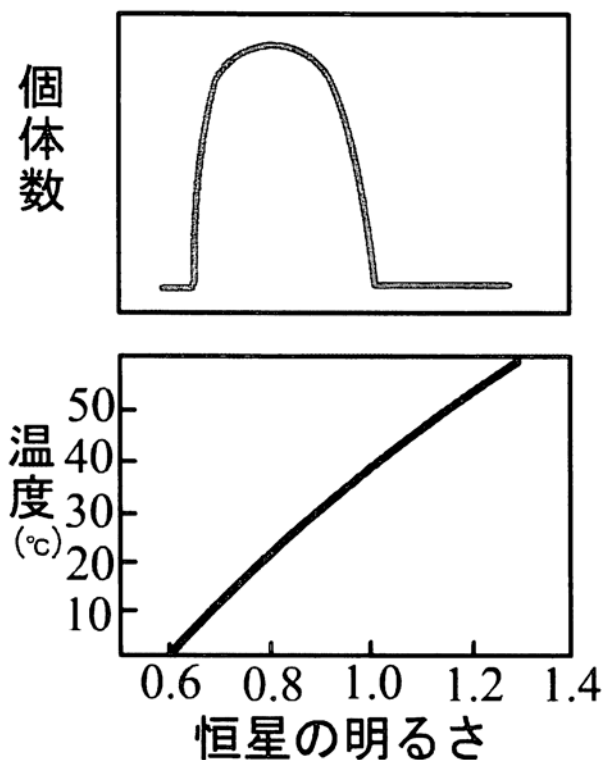


図4 デイジーワールド1。ヒナギクが一種類しか存在しなければ、恒星の明るさが増加すると共に惑星の温度も増加する（下）。そして、その外的環境下でヒナギクの生育は決まる（上）。生物相と惑星環境の相互作用はない。

しかし、白いヒナギクと黒いヒナギクの両方の種類が存在するデイジーワールドでは、両種が競合して変化するため、結果は大きく異なる（図5）。すなわち、太陽の明るさが小さい間は、黒いヒナギクが白いヒナギクより有利なため、個体数が増加する（図5上の黒い実線）。その結果、（ヒナギクに覆われた）惑星全体のアルベドも下がるので、太陽光を十分に吸収することが可能になり、惑星気温の上昇をもたらす。しかし時間が経って、太

陽の明るさが大きくなると、黒いヒナギクの成長は抑えられ、逆に白いヒナギクが繁栄する（図5上の灰色の実線）。その結果、惑星全体のアルベドは上がり、気温を下げる働きをする。このような生物相からのフィードバックを受けて、惑星環境（気温）は、長期間にわたり安定化されるだろう。デイジーワールドにおいて、惑星の環境（この場合は気温）と生物相の変化は、お互いに影響を及ぼし合っていて、共に進化していく！のである。

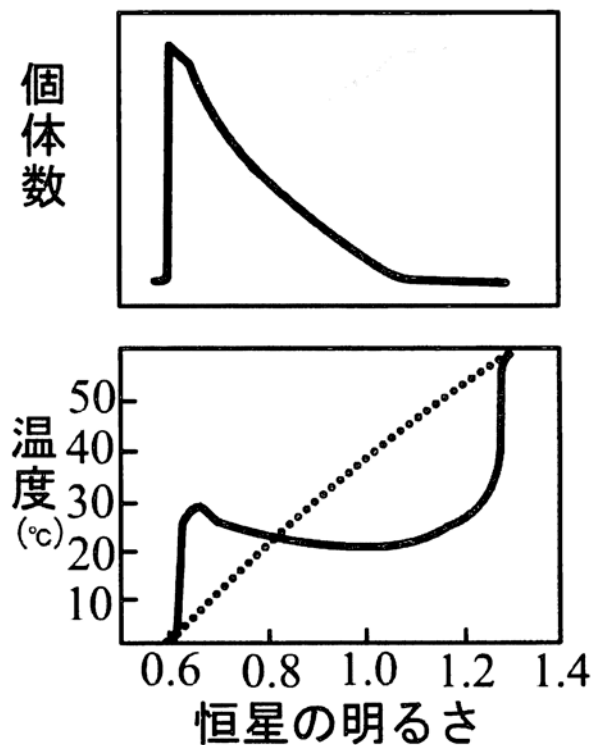


図5 デイジーワールド2。黒いヒナギク（黒い実線）と白いヒナギク（灰色の実線）と、ヒナギクが二種類存在すると、生物相と惑星環境の相互作用が劇的に変化する。二種類のヒナギクの生育パターンのフィードバックを受けて、惑星の温度（下の図の実線）は安定化される。下の図の破線は、ヒナギクが一種類のときの惑星温度。

7. ガイア仮説

金星や火星の大気成分は、95%ぐらいが二酸化炭素で、数%の窒素と微量の希ガスがあるが、酸素はほとんどない。原始地球の原始大気も、そして仮に生命が生まれなかった“無

生命の地球”の大気も、おそらく同じような成分だったと推測されている(表1)。しかし、現在の地球大気は、二酸化炭素は0.03%程度にすぎず、窒素が79%、そして酸素が21%もある。この状況があきらかに生命の存在による惑星規模の影響であることは明らかだ。すなわち、海洋に溶けた二酸化炭素がおそらく生物の作用によって炭酸カルシウムとして固定され、一方で、生物が一所懸命発生した酸素は、最初のうちこそ酸化鉄で消費されたが、20億年前くらいからは大気中に蓄積していった。そして、現在では、ほぼ21%で固定されている。

ところで、大気中の酸素濃度は、何億年も前から21%で一定となり、増えたり減ったりしていない。なぜ25%や30%でなく、21%なのだろう。生物はいまでも一所懸命酸素を発生しているだろうに、なぜ増えていかないのだろう。

実は酸素分圧が高くなると、自然発火や落雷による森林火災が起こりやすくなるのだ。現在の酸素濃度の場合、木々の水分含有率が15%ぐらいになると自然火災は起こらない。しかしたとえば酸素濃度が25%になっただけで、水分含有量が数十%になっても、すなわち湿った小枝や降雨林でも自然発火してしまう。そして森林火災などの自然火災がたびたび起こると、当然酸素を消費するので、酸素濃度は低下する。これはいわゆる“負のフィードバック作用”である。すなわち、酸素分圧が高くなりすぎると、自然火災によって酸素分圧を下げる方向にシステムが動作する。

酸素濃度だけでなく、大気の気温、酸性度、などなど、地球表面の生命圏(バイオスフィア)の状態が、生物相の無意識的自動的なフィードバック作用によって、一定の状態に保たれている、すなわち恒常性(Homeostasis)が維持されている、という考え方がある。イギリスの自然科学者ジェームズ・ラヴロック

(James Lovelock)が1970年代に提唱した概念で、ギリシャ神話の大地の女神Gaiaの名前を取って、「ガイア仮説」と呼ばれている。ガイア仮説では、地球の大気・海洋・気候・地殻など地球生命圏が、生物自身の活動によって、生命にとって快適な状態に調節されていると考えるのである。

なお、ガイアという言葉だけが一人歩きして、まるで地球生命圏が人格・目的意識をもっているように誤解されている場合があるが、ラヴロックはそこまでは主張していない。あくまでも、結果として生命の存在に都合がいいように、生物相が惑星環境に影響を与えているというだけで、そこに意識や意図は存在しない。ここらへんは、リチャード・ドーキンスの「利己的遺伝子」に対する誤解と似たものがある。

最近でこそ、地球と生命の「共進化」ということがよく言われるが、ガイア仮説は共進化にはるかに先駆けた概念で、かつよりラジカルな概念だといえる。生命と環境はきわめて密接に絡み合っていて、生命の進化は、個々の生物相や環境だけに起こると言うよりは、それらをひっくるめた地球生命圏=ガイアに起こるといった方がふさわしいのかも知れない。

参考文献

- [1] 鳥海光弘他『地球システム科学』岩波書店(1996年)
- [2] Sagan, C. and Mullen G., 1972, Science, 177, 52
- [3] J・E・ラヴロック『地球生命圏』スワミ・プレム・プラブダ訳、工作舎(1984年)
- [4] J・ラヴロック『ガイアの時代』スワミ・プレム・プラブダ訳、工作舎(1989年)
- [5] 福江 純『SF 天文学入門(下)』裳華房(1997年)