

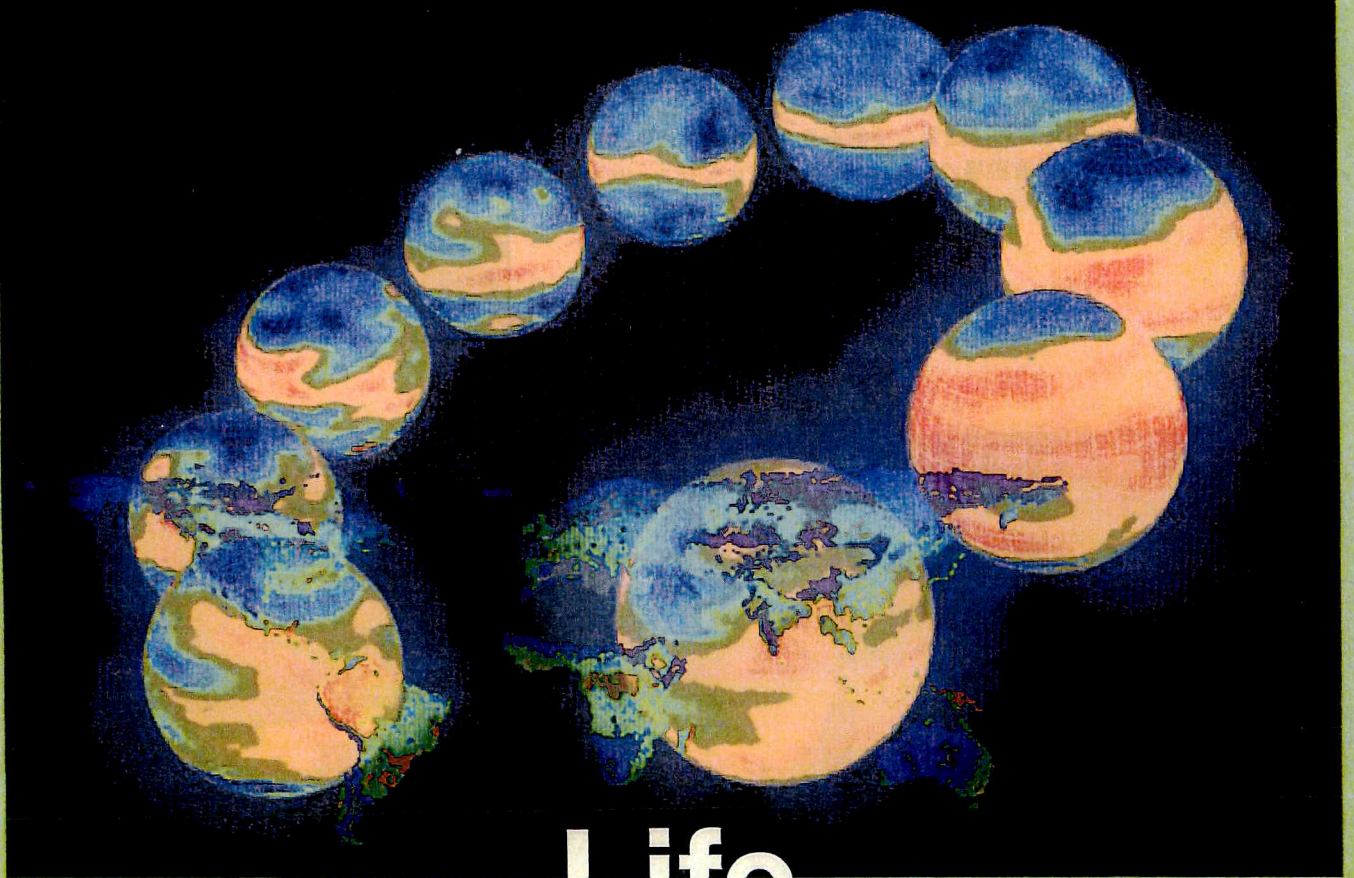
渡邊誠一郎＋檜山哲哉＋安成哲三 編

新しい地球学

太陽-地球-生命圏相互作用系の変動学

Sun

Earth



Life

目 次

はじめに i

地質年代表 vi

序章 地球学：太陽-地球-生命圏相互作用系の理解

序.1 地球学とは何か	2
序.1.1 これまでの地球科学は何をやってきたか	2
序.1.2 そして地球環境問題	2
序.1.3 生命圏, もうひとつの地球	3
序.1.4 地球学の基本思想	3
序.2 太陽-地球-生命圏相互作用系とは何か	9
序.2.1 太陽	9
序.2.2 地球	12
序.2.3 生命圏	15
序.2.4 太陽-地球-生命圏相互作用系	19
序.2.5 水惑星「地球」	20
序.2.6 生命圏の能動的役割とガイア仮説	22
序.2.7 SELIS の構造	23
序.2.8 本書の構成	25

第1章 太陽-地球-生命圏相互作用系の動態把握

1.1 太陽-地球系とその変動	28
1.1.1 太陽-地球系とは	28
1.1.2 太陽から地球へのエネルギー流入	32
1.1.3 地球周辺大気・プラズマ環境の変動	36
1.1.4 太陽放射・銀河宇宙線および地球磁場変動による地球大気環境の変動	40
1.1.5 人間活動による大気の変質	48
1.1.6 宇宙災害と宇宙天気研究	55

1.2	大気と水循環	60
1.2.1	水惑星「地球」	60
1.2.2	降水過程の概観	70
1.2.3	地球温暖化と降水	76
1.2.4	降水分布の観測法	77
1.2.5	今後の研究課題	79
1.3	地球生命圏——海洋	82
1.3.1	海水の循環	83
1.3.2	海水中の生物活動	87
1.3.3	海洋の炭素循環	93
1.3.4	炭素循環の変動	97
1.3.5	今後の研究課題	99
1.4	地球生命圏——陸域	102
1.4.1	陸域植生における生物過程の特徴	102
1.4.2	陸面での放射収支・熱収支・水収支・炭素収支	103
1.4.3	熱収支・水収支・炭素収支と気候・植生の相互作用	108
1.4.4	衛星リモートセンシングによる陸域植生の動態把握	114

第2章 古環境記録から見た太陽-地球-生命圏相互作用系

2.1	古環境復元のためのプロキシ	122
2.1.1	炭酸カルシウム中の酸素同位体比と微量元素比	123
2.1.2	黄土層の帯磁率	127
2.1.3	氷の酸素同位体比	128
2.1.4	樹木年輪の幅およびセルロースの $\Delta^{14}\text{C}$ と $\delta^{13}\text{C}$	132
2.1.5	今後の研究課題	135
2.2	花粉分析——東アジアの過去約 200 万年間の植生変遷	138
2.2.1	化石花粉を用いた植生変遷の復元	138
2.2.2	植物分類・気候区分・植生分布	141
2.2.3	植生変遷の推定例	145
2.2.4	琵琶湖湖底堆積物の化石花粉から見た約 43 万年間の植生変遷史	148

2.2.5	バイカル湖湖底堆積物の化石花粉から見た約 200 万年間の植生変遷史	152
2.2.6	花粉分析による古植生復元の問題点	156
2.2.7	気候変動と植生変遷——過去から現在, そして未来へ	162
2.2.8	今後の研究課題	163
2.3	陸域古環境変動解析——バイカル湖に見る, 北東ユーラシアの環境変動	167
2.3.1	陸域古環境変動解析の重要性	168
2.3.2	バイカル湖の構造と形成史	171
2.3.3	バイカル湖湖底堆積物の掘削と年代決定	174
2.3.4	バイカル湖湖底堆積物コアから得られた環境指標	178
2.3.5	気候・環境変動の周期性とその変化	187
2.3.6	バイカル湖での生物進化	190
2.3.7	まとめと今後の研究課題	193

第 3 章 太陽-地球-生命圏相互作用系のモデリング

3.1	大循環モデルとシンプルモデル	200
3.1.1	大循環モデル	200
3.1.2	シンプルモデル	205
3.1.3	力学系モデル	206
3.1.4	今後の研究課題	210
3.2	シンプルモデルによる気候変動メカニズムの解明	214
3.2.1	0次元エネルギーバランスモデル	214
3.2.2	1次元エネルギーバランスモデル	219
3.2.3	変動する地球システムの特徴	223
3.2.4	10万年周期問題と非線形応答	229
3.3	海が関わる気候変化	237
3.3.1	気候の変化にとって海が重要な理由	237
3.3.2	海洋の流れを理解するために	239
3.3.3	熱塩循環をより深く理解する	246
3.3.4	海洋の炭酸系を理解するための化学的基礎	254
3.3.5	海洋の物質循環	267
3.3.6	熱塩循環と海洋炭素循環の相互作用の理解に向けて	273

3.3.7	まとめと今後の研究課題	282
3.4	生命が気候を調整する	285
3.4.1	デイズワールド：アルベドを介した連関	285
3.4.2	長期炭素循環における生命の役割：風化を介して	288
3.4.3	光合成の進化と役割	290
3.4.4	水循環を介した気候変動と生命圏の相互作用	295
3.4.5	人類活動の影響	299
3.5	山岳上昇とアジアモンスーンの成立	306
3.5.1	アジアモンスーンの成立	307
3.5.2	GCMを用いた山岳上昇に伴うアジアの気候変化に関する研究	308
3.5.3	まとめと今後の研究課題	315
3.6	氷河時代における気候変化——AOGCMによる研究からの考察	317
3.6.1	10万年周期の氷期・間氷期サイクル	317
3.6.2	大気CO ₂ 濃度と熱塩循環の相互作用	318
3.6.3	表層水循環と深層水循環の相互作用	321
3.6.4	氷期・間氷期サイクルの中での人為起源の気候変化	323
	あとがき	325
	記号リスト	327
	事項索引	334
	略語索引	341

序章

**地球学：
太陽-地球-生命圏相互作用系の理解**

序.1

地球学とは何か

序.1.1 これまでの地球科学は何をやってきたか

20世紀の地球科学は、この地球を細分化し、それぞれの現象・プロセスに近代物理学・化学の手法と考え方を導入して解明を進めてきた学問分野といえる。それぞれの分野は、現象・対象が異なるだけでなく、多くの場合、研究の手法あるいはツールが大きく異なっている。それらは、19世紀から20世紀の物理・化学の発展の歴史と、密接に関係してきた。例えば、超高層大気や電磁気圏を扱う分野は、MaxwellやLorentzによって完成された電磁気学を駆使する学問分野であり、雲・降水活動の活発な対流圏を中心とする気象学は、熱力学とNavier-Stokesの流体力学をその基礎としている。地質学・岩石学は相平衡熱力学や物理化学をもとにしている。そして、それぞれの分野において、新たな現象の発見・解明を含めて、近代的な地球科学諸分野が発展し、それぞれの分野に対応した多くの学会が設立されている。

もちろん、こうした流れは、否定できるものではなく、科学の歴史的発展の一段階として必然の帰結である。しかし、「地球物理学」、「地球化学」という名称に代表されるように、あくまで指導原理は物理学、化学からの借り物であり、物質や宇宙の起原や普遍性を追求する物理学者の一部などからは、「ワンランク落ちる学問」（山本，1987）と見られてきた。

その見方と表裏一体をなすのが、地球科学を、物理学などの基礎科学ではなく、むしろ「役に立つ」応用科学として位置づける見方である。地質学や固体地球科学は資源探査と密接に関係して発展してきた歴史をもっており、気象学は、天気予報の精度を上げる過程で発展してきた。地震学は、（その結果はともかくとして）地震予知という目標に向かって、さまざまなかたちでの地球内部の理解を進めてきたことは確かである。地球のさまざまな対象を細分化して研究する流れは、このような実社会への利用、応用の視点からますます加速されたとも捉えられる。このような地球科学の拡大・再生産のため、教育・研究もますます細分化し、限られた方法論、手法で限られたテーマや現象を扱うという、学問の「たこつぼ化」が、他の多くの学問分野同様、地球科学でも進行してきたのが20世紀であった。

序.1.2 そして地球環境問題

20世紀後半になると、人間による生産活動の拡大が、地域の自然に、そして、大気圏・水圏など地球表層圏全体に負の影響を与えだした。まず都市域を中心とする公害問題、そして温室効果ガス増加による「地球温暖化」、オゾンホール、酸性雨問題を含む広域大気汚染、砂漠化などいわゆる地球環境問題群が顕在化してきた。そして、地球科学者の多くも、これらの問題に

「環境問題への貢献あるいは環境改善へ向けた研究」と称して、既存の地球科学の体系のまま、アプローチを始めた。しかし、これらの問題群は、本来、連続的に有機的につながっているはずの自然を、ある部分のみを切り出して理解し、利用しようとする「細分化」科学の帰結という側面があるため、このようなアプローチは自己矛盾を抱えている。現在の地球科学研究者は、自分(人間)とは直接相互作用しない地球上の自然現象の解明という、いわば実利的な目的を排した「物理学症候群」にかかりながらも、一方で、自分たちが住む地球の自然環境の変化あるいは破壊を何とかせねばならないという、はっきりとした問題解決を指向する「環境学症候群」にもかかっている人たちといえるであろう。その症状は、人によってかなり程度の差があるが、現在の多くの地球科学研究者は、2つの価値観のあいだで揺れる「マージナル・マン(境界人)」(Lewin, 1951)となっている。

序.1.3 生命圏, もうひとつの地球

これまでの地球科学が目をつぶってきたのが、地球の生命圏あるいは生物圏(biosphere)である。その理由は簡単であり、物理学・化学の指導原理では理解できないからである。生命圏は一方で、やはり19世紀後半からずっと、生物学、生物科学といわれる分野のまさに「専管事項」であった。それは、生物学の分野には、Darwinの「進化論」やMendelの「遺伝の法則」など、物理学の指導原理とはまったく独立した、しかし非常に強い原理が存在してきたため、生物的自然が物理・化学的(無機的)自然とまさに入れ子状に存在してきたにもかかわらず、20世紀においては、これら2つの自然は、自然科学の、ほとんど相容れない独立した分野として発展してきたためである。もっとも、医学・薬学など応用面でのニーズが爆発的に拡大したこともあり、生命のミクロなプロセスへの物理学・化学的手法での理解を進める分子生物学、生物物理学といった分野は、とくに20世紀後半から急激に発展してきた。

しかし、マクロな自然環境での生物の振る舞いを研究する生態学と地球科学との接点は、長いあいだ、古生物学など一部の分野を除き、非常に弱いものであった。この2つの分野を急速に近づけるきっかけは、やはり「地球環境問題」であった。すなわち、環境や気候の変化が生態系に与える影響が生態学でも無視できなくなってきたこと、また、気候や水・物質循環を考える上で、植生などの生命圏のコントロールが重要であることなどが、さまざまな観測やモデルによる研究で明らかになってきたからである。地球科学に生命圏過程が組み込まれなかったのは、19世紀以降の物理学・化学と生物学の発展過程の結果でしかなく、実際の地球において物理・化学過程と生物過程が切り離されているわけでは決してない。双方の相互作用を陽に扱った研究は、指導原理の違いをどうしていくかという大問題の克服が必要であるが、地球の表層環境の全体的理解にとって、今後の大きな、そして極めて重要な研究分野となるはずである。

序.1.4 地球学の基本思想

地球は地圏、水圏、大気圏、磁気圏に生命圏を含めて、1つのシステムとして存在している。

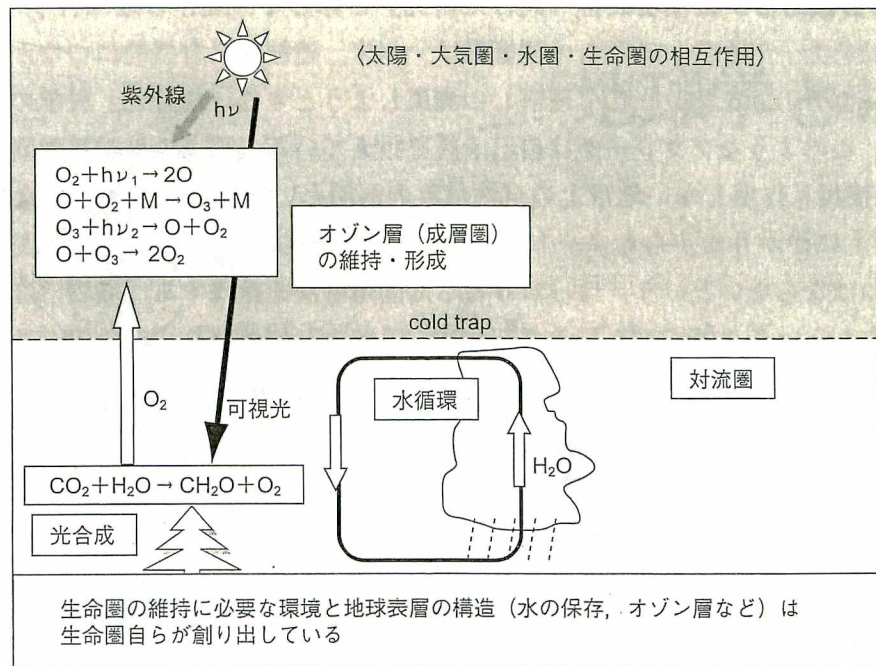


図 0.1.1 オゾン層 (成層圏) と生命圏の光合成活動および水循環の相互維持機構の模式図。

そして、このシステムが現在のかたちに至るまでには、46 億年の歳月がかかっている。このシステムは、すべての部分が境目なくシームレス (seamless) につながって構成されているが、その進化過程でいくつかの不連続のサブシステムに分かれて存在している。このような地球のシステムをまるごと理解できるような、言い方をかえれば、これまでの地球惑星科学あるいは地球環境科学を止揚できるような「地球学」には、どのような基本思想 (あるいは基本的な見方) が必要であろうか。それは、以下の 3 つの項目にまとめることができるのではないだろうか。

地球は生命圏を含むシームレス・システムである

地球表層のシステムが、太陽エネルギーをその根源としており、生命圏も含めて地球表層の各圏のさまざまな現象が、異なった時間スケールのエネルギーの流れ、水・物質循環を通して相互に密接に関係しつつ維持されている事実を考えると、シームレス・システムであることはまったく自明である。

例えば、大気中のオゾン層は、太陽からの紫外線フィルターとして、生命圏の維持に不可欠な役割を果たしていることがわかっているが、このオゾン (O_3) は対流圏からの酸素 (O_2) の絶えざる供給によって維持され、その O_2 は、生命圏の光合成活動により維持されている (図 0.1.1)。オゾン層のもう 1 つの重要な機能は、太陽紫外線の吸収による加熱によって大気成層圏の成層構造を維持していることであり、比較的低い高度に維持されている低温の成層圏の存在が、コールド・トラップとして機能して、生命にとって不可欠の水物質の保存と、地球表層と対流圏における閉じた水・物質循環を保障している。すなわち、オゾン層と生命圏は、相互にその維持を担う共生系を成しつつ形成されてきたことがわかる (安成, 1999; 岩坂・安成, 1999)。

一方で、強烈な太陽風エネルギーから生命圏を保護してきたのは、地球磁場の存在である。地球磁場の維持と変化によるオーロラの変動や、その変化機構を担う固体地球内部のダイナミクス

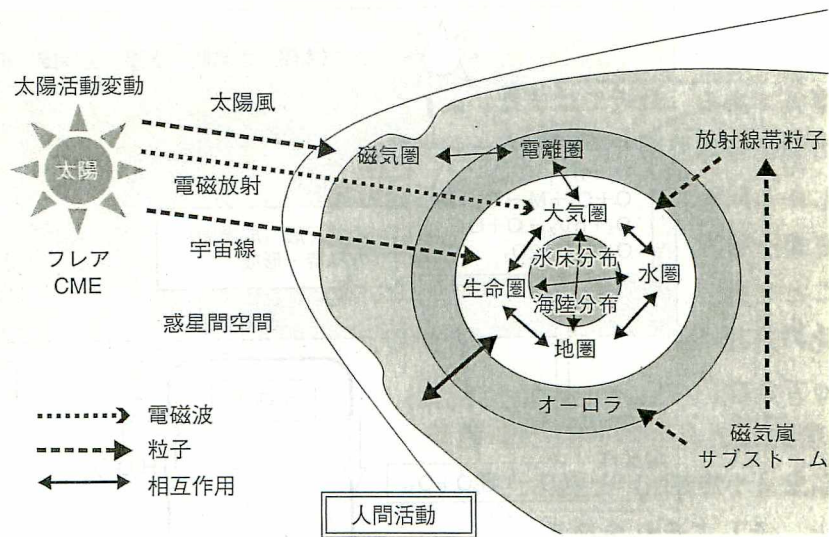


図0.1.2 太陽からのエネルギー、プラズマと地球磁気圏、電離圏と下層大気圏の関連を示す模式図 (名古屋大学太陽地球環境研究所・関華奈子提供の図を一部改変)。

も、地球表層の生命圏の進化と決して無縁ではないことがわかる。地球磁場は数万年から100万年の時間スケールで反転を繰り返しており、生命圏の進化に、時として大きなインパクトを与えた可能性が指摘されている。太陽活動そのものの変化に加え、地球磁場の変化を通じた地球表層圏への太陽エネルギー配分過程の変化は、生命の進化と地球環境変化の外部条件として、見逃すことができない重要なプロセスである (図0.1.2)。

現在の地球の生態系も、水・物質循環を介し、気候と共生的関係にあることが、1996年以来、筆者 (安成) を代表として進めてきた「アジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画」(GAME) などの観測的研究で明らかになってきた。ユーラシア大陸高緯度のシベリアには、永久凍土帯が広がり、その凍土の表層はタイガ (針葉樹林帯) に覆われている。永久凍土は夏季のみ表層わずか数十 cm だけ融解するが、その浅い融解層にたまった水を、タイガは浅く横に広く広がった根で効率よく吸収し、光合成と蒸発散を同時に行って、自らを維持している。一方凍土帯は、タイガの被覆と蒸発散による表面温度上昇の抑制により、夏季の融解を最小限に抑え、自らを維持している。すなわち、永久凍土とタイガは水・エネルギー循環を通して、お互いに維持しあった一種の共生系を形作っているともいえよう (Ohta et al., 2001)。アマゾンや東南アジアの熱帯雨林も、水循環とエネルギーの流れの強さは、シベリアのような寒帯とは大きく異なるが、やはり同様の気候と植生 (生態系) の共生系として維持されていることが近年の観測的研究から明らかになりつつある。このような共生系は、いったん一部でも破壊されれば、急激に変化してしまう特性をもっている可能性は想像に難くないであろう。最近の観測的研究や気候モデルによる研究は、気候と生命圏の共生的相互関係を強く示唆している (Sasai et al., 2005; Saito et al., 2006; Yasunari et al., 2006)。ただし、先にも述べたように、地球学における今後の大きな、そして非常に興味深い問題は、物理・化学的見方と、生物学・生態学的な見方が、地球環境の維持と変動を理解する過程で、どう止揚されるか、ということであろう。

地球は不可逆で非線形なシステムである

この地球の一方向的な進化過程は、生命圏の発展、進化そのものと表裏一体を成していることは、疑いもない事実である。最近ではまた、良くも悪くも「グローバル」に拡大・発展してきた人類活動が、一方で、地球温暖化やオゾンホールに代表されるいわゆる「地球環境問題」を引き起こしている。しかし同時に、この人類の知的活動の進展により、地球が、太陽エネルギーを受けながら、さまざまな物理・化学プロセスが相互に密接に関連して機能し、進化してきた1つのシステムであることを再認識させることにもなった。そして、人類を含めた生命圏も、このシステムの進化・変化の過程に能動的に働きかけながら、現在の地球を形づくってきたことが、少しずつ明らかになってきた。

このような地球システム全体を、太陽-地球-生命圏相互作用系 (Sun-Earth-Life Interactive System: SELIS, 序.2.4 小節参照) と捉え、過去から現在に至るこの系の変化のダイナミクスを改めて理解すること、そしてそれを通じて地球という惑星そのものが何であるかを考究することは、物理学・化学の応用問題としての地球科学ではない新たな「地球学」の構築の重要な部分である。そして、この時間軸での地球学は、人類を含む生命圏の存続と発展(進化)が、今後どのようなかたちでありうるか、起こりうるかを考える基礎と契機になりうるはずである。

とくに新第三紀から現在を含む第四紀にいたる過去約 1000 万年は、人類の出現と進化の舞台となった時代であり、生命圏における人類の位置を理解する上で重要な時代といえる。湖底・海洋底堆積物、氷床コア、年輪などにもとづく高精度の環境変動復元は、現在の地球環境の理解にとっても必要であろう。この時期は、図 0.1.3 に示すように、全球的に寒冷化が進行して、氷期と間氷期が交互に繰り返す氷河時代となるというトレンドの中で、人類が出現し、地球環境の変化に関わってきた。このような時期の環境変化の解明は、近年の「地球温暖化」を引き起こしているとされる人類と地球の関わりを、より深く理解するためにも、非常に重要なことである。

地球学における人間原理

ここまで述べてきたことを新たな視点でまとめるならば、地球学における「人間原理」を主張することではなかろうか。人間原理 (anthropic principle) とは、もともと物理学の宇宙論で提唱された概念 (例えば、松田, 1990) であり、簡単にいえば、宇宙は、人間 (知的生命体) の存在によって初めて理解できるものとして存在しており、したがって、人間の存在を前提に私たちの宇宙を説明すべきである、というものである。その論点の違いにより、強い原理、弱い原理など、いくつかバリエーションがあるが、ここでは詳しく論じない。

一方、ここで筆者が主張する、地球の理解 (認識) における人間原理は、宇宙論における人間原理とは、かなり異なるものである。

人間は、この地球を理解しつつ資源などを利用してきたが、その一方で、あるいはその結果として、現在の地球環境問題を引き起こしている。近年の地球環境科学が、これらの問題を解決すべき「問題解決型」科学と位置づけられ、それまでの「現象解明型」科学とは違うことを強調されていることは、先に述べたとおりである。しかし、地球学では、これら2つの科学は止揚されるべきものである。「問題解決型」科学では、ともすれば既存の問題把握の枠組みの中で、その解決・対策に関連した科学技術だけが重視される傾向が強くなっている。しかし、私たち人類を含む生命圏は、私たちのまだ認識していない現象やプロセスにより、その生存・成立が保障され

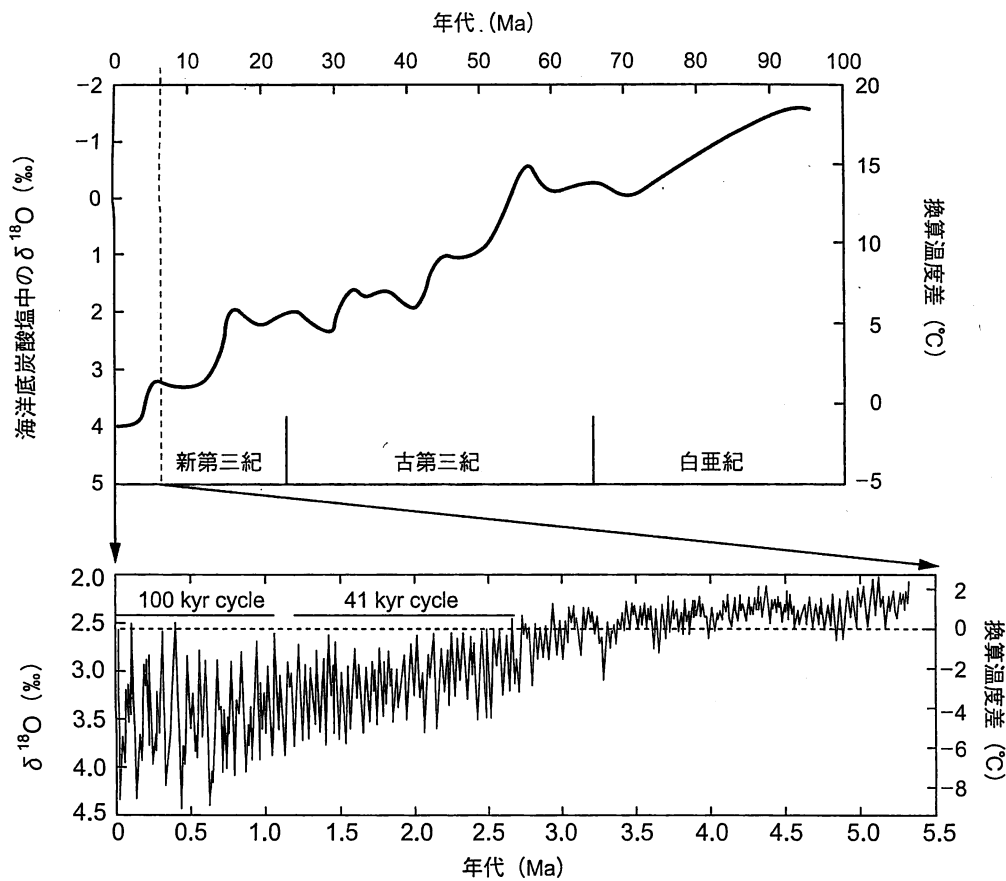


図 0.1.3 白亜紀から新生代にいたる地球気候の寒冷化 (岩坂・安成, 1999) : 酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) と温度との関係については, 2.1.1 小節を参照. 下図は, 最近約 500 万年の地球の平均気温の変化を示す. 0°C は, 現在の平均気温に相当する. Lisiecki and Raymo (2005) をもとに, R. A. Rohde が作成した図を用いた (<http://www.globalwarmingart.com/> 参照).

ている可能性はまだまだあるはずである. また反対に, 私たちがこれらの現象やプロセスに対して無知なために, 生命圏の基盤を危うくしている可能性すらありうる. そうした, 現象やプロセスをみつけ出す「問題発見型」科学を「現象解明型」科学や「問題解決型」科学と並行して遂行していくことは, 人類の生存に不可欠である. 地球 (自然) への飽くなき探求の正当性が保証されるのは, まさにこの部分にあるのではないかと筆者は考える.

一例を挙げよう. 大気圏は人間を含む生命圏の維持には不可欠であり, 大気水圏・地圏と生命圏は一体を成す圏 (スフェア) として存在している. さらに, 地球学から発信されるべきことは, 生命圏に対する地球磁気圏や電離圏も重要ではないかという認識である (Kamide, 2001; 2003). 地球磁場がなければ, 現在の地球生命圏は強い太陽風により存在しえたかどうか, 微妙な問題であることを, 最近の研究 (Ozima et al., 2005) は指摘している.

地球学における人間原理のもう 1 つの側面として強調すべきは, 現象の理解にせよ, 環境問題の解決にせよ, 単に自然科学の問題ではなく, 人間自身の問題である, という認識の重要性である. 地球温暖化やオゾンホールに代表される地球環境問題は, いわば地球への理解不足のために人間が引き起こしたものであり, そのことに気づくことも含め, 理解し, 結果を担うのもまた人間をおいて他にない, という事実を, 私たちはよく理解しておくべきであろう. 地球へのあくな

き探求を、生命圏の一員として人類が生きていくための本性として位置づけ、その意味を明らかにしていく学問が必要とされていると考える。本書の先駆研究とも位置づけられる『全地球史解説』研究プロジェクトをリードしてきた名古屋大学の熊澤峰夫は、「私たちが科学を始め、生命・地球・宇宙の歴史とその摂理を探り始めたことは、地球史上の最大の事件である」（熊澤ほか編，2002）と述べているが、その「最大の事件」の人間学的（哲学的）意味を今問うことこそ、地球学であり、地球理解のための人間原理に通じているともいえよう。

平たくいえば、19世紀の産業革命以来、あるいは西欧の帝国主義列強の世界支配が進む中で、地球科学の底流には、「(あくまで西欧を中心とした)人間圏の拡大と生産の向上のために地球を理解する」という思想があったが、21世紀の私たちは「人類を含む生命圏の維持（存続）のために地球を理解する」という基本思想への転換が必要である、ということである。

地球学が、これまでの地球科学との、その深層のところで違うとすれば、地球を単に、従来の自然科学の対象とする自然現象として見るのではなく、私たち人間を含めた生命の尊厳と維持の拠りどころとしての「地球」とは何かを、その過去・現在・未来について考える学である、ということであろう。このような人間の立場も含めて、地球理解における人間原理を提唱したい。

参考文献

- 岩坂泰信・安成哲三（1999）：地球システムの進化と大気環境の変化。『岩波講座 地球環境学 3 大気環境の変化』（安成哲三・岩坂泰信 編），岩波書店，1-48。
- Kamide, Y. (2001) : Our life is protected by the Earth's atmosphere and magnetic field : what aurora research tells us. *Biomed. Pharmacother.*, 55, 21s-24s.
- Kamide, Y. (2003) : What human being cannot see can exist : a message from recent studies of solar-terrestrial relationships. *Biomed. Pharmacother.*, 57, 19s-23s.
- 熊澤峰夫・伊藤孝士・吉田茂生 編（2002）：『全地球史解説』，東京大学出版会，503pp.
- Lewin, K. (1951) : *Field theory in social science : selected theoretical papers* (Dorwin Cartwright, ed.), 1st ed., Harper, 346pp. 猪股佐登留 訳（1979）：『社会科学における場の理論 [増補]』，誠信書房，350pp.
- Lisiecki, L. E., and Raymo, M. E. (2005) : A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanogr.*, 20, PA1003, doi: 10.1029/2004PA001071.
- 松田卓也（1990）：『人間原理の宇宙論——人間は宇宙の中心か』，培風館，240pp.
- Ohta, T., Hiyama, T., Tanaka, H., Kuwada, T., Maximov, T. C., Ohata, T., and Fukushima, Y. (2001) : Seasonal variation in the energy and water exchanges above and below a larch forest in eastern Siberia. *Hydrological Processes*, 15, 1459-1476.
- Ozima, M., Seki, K., Terada, N., Miura, Y. N., Podosekand, F. A., and Shinagawa, H. (2005) : Terrestrial nitrogen and noble gases in lunar soils. *Nature*, 436, 655-658.
- Saito, K., Yasunari, T., and Takata, K. T. (2006) : Relative roles of large-scale orography and land surface processes in the global hydroclimate. Part II: Impacts on hydroclimate over Eurasia. *J. Hydrometeor.*, 7, 642-659.
- Sasai, T., Ichii, K., Yamaguchi, Y., and Nemani, R. (2005) : Simulating terrestrial carbon fluxes using the new biosphere model "biosphere model integrating eco-physiological and mechanistic approaches using satellite data" (BEAMS). *J. Geophys. Res.*, 110 (G2) : Art. No. G02014 DEC 14 2005.
- 山本義隆（1987）：『熱学思想の史的展開』，現代数学社，593pp.
- 安成哲三（1999）：地球の水循環と気候システム。『岩波講座 地球環境学 4 水・物質循環系の変化』（和田英太郎・安成哲三 編），岩波書店，1-34。
- Yasunari, T., et al. (2006) : Relative roles of large-scale orography and land surface processes in the global hydroclimate. Part I: Impacts on monsoon systems and the tropics. *J. Hydrometeor.*, 7, 626-641.

序.2

太陽-地球-生命圏相互作用系 とは何か

本書では、太陽からの放射を浴びながら公転する生命の惑星「地球」の動態と変動を、太陽-地球-生命圏相互作用系 (Sun-Earth-Life Interactive System: SELIS, 序.2.4 小節参照) の振る舞いとして捉えて考察していく。本節では、第1章から第3章までを読み進める際の道標となるように、SELISの全体像を概観する。本節の前半(序.2.3小節まで)では、SELISという言葉を構成している3つの要素、太陽、地球、生命圏それぞれについて、その特徴と進化を簡単に述べる。しかし、それらを個別に分けて考えるだけでは本質が得られない。そこで、後半(序.2.4小節以降)では、相互作用系としてそれらを一体として捉える方法について述べる。

序.2.1 太陽

自己重力天体としての太陽

太陽 (Sun) は、その莫大な質量 $M_{\text{Sun}} = 1.98 \times 10^{30}$ kg で生じる自己重力を、中心温度 $T_{\text{c,Sun}} = 1.5 \times 10^7$ K という高温で生じる熱圧力で支えている天体である。この高温のため、原子核と電子がばらばらになって飛び回るプラズマ (plasma) 状態にある。

自己重力を熱圧力¹⁾ で支えて釣り合うことを静力学平衡という。静力学平衡にある天体では、重力ポテンシャルエネルギー (gravitational potential energy) Ω (符号は負) と内部エネルギー (internal energy: 熱エネルギー) U (符号は正) との間には、いわゆるビリアル定理 (virial theorem)²⁾

$$2U + \Omega = 0 \quad (0.2.1)$$

が成り立つ。このとき系の全エネルギー E (符号は負) は

$$E \equiv U + \Omega = \frac{\Omega}{2} = -U \quad (0.2.2)$$

となる。内部に熱源が無い天体では、表面からの放射によって E が1単位減少すると、 Ω の絶対値は2単位増加し、 U は1単位増加する。つまり、収縮して中心温度は上昇する。ガスの雲

1) 実際には熱運動以外に電子の縮退という量子力学的効果によっても圧力(縮退圧)が生まれる。この縮退圧が卓越する場合は、(0.2.1)式が成り立たない。現在の太陽内部では電子は非縮退状態にあると考えてよい。

2) 力学におけるビリアル定理は、 N 個の相互作用する粒子系の運動エネルギーの2倍とポテンシャルエネルギーの和が長時間平均すると0となるというものである。これを、星を構成する単原子理想気体に適用すると、運動エネルギーは内部エネルギーに置換できる。

から生まれたばかりの若い星は、このように収縮によって輝きつつ中心温度を上げる状態にあり、太陽質量の星³⁾では、数千万年をかけて中心温度が上昇していく。

やがて、中心温度が 1×10^7 K程度になると水素核融合反応が起こり、内部熱源として機能するようになる。その結果、 E はほぼ一定に保たれ、収縮と温度上昇は停止し、中心付近の核融合反応で発生した熱が表面から放射として失われる準定常状態が実現される。水素核融合反応による熱により準定常状態にある星を主系列星 (main-sequence star)⁴⁾という。核融合の反応速度は温度にきわめて敏感なため、わずかな温度上昇によって発生する熱が急増し、収縮を押しとどめる。つまり、核融合反応がサーモスタットの役割を果たし、主系列星はゆっくりと水素を消費しながら、ほぼ一定の光度 (luminosity: 総放射量, 星の全表面から単位時間に放出される放射エネルギー) と表面温度を保って安定に輝き続ける。現在の太陽の光度 L_0 は 3.85×10^{26} W で、表面温度は 5700 K である。

水素核融合反応と太陽の一生

太陽の中心付近では4個の水素原子核 ${}^1\text{H}$ (すなわち陽子 p) からヘリウム原子核 ${}^4\text{He}$ (2個の p と2個の中性子 n から成る) を生ずる水素核融合反応が起こっている。実際の反応は2核子衝突による素反応が次々に起こる連鎖反応 (p - p チェーン) であるが、素反応を組み合わせた正味の反応式⁵⁾ は



と書ける。ここで、 e^+ は陽電子⁶⁾、 ν は (電子型) ニュートリノ、 γ は光子 (ガンマ線) を表す。陽子が中性子になる際に e^+ と ν が放出される (弱い相互作用)。核反応で生ずるエネルギー ΔE は、質量欠損量 Δm から Einstein の公式 $\Delta E = \Delta mc^2$ (ここで $c = 3.00 \times 10^8$ ms⁻¹ は真空中の光速) によって計算できる。ただし、ニュートリノは物質とほとんど相互作用をしないため、太陽中心から宇宙空間へ直接飛び去り⁷⁾、その際、ニュートリノ1個あたり $E_\nu = 4.2 \times 10^{-14}$ J のエネルギーをもち去る。発生した e^+ は直ちに電子 e^- と対消滅し光子 γ (ガンマ線) となり、核融合反応で生じた光子とともに熱に変わる:



両反応で生じる全発熱量 Q は、光子の質量が0、ニュートリノの質量もほぼ0であることに注意すれば、

$$Q = (4\mu_{\text{H}} - \mu_{\text{He}}) m_{\text{u}} c^2 - 2E_\nu = 4.2 \times 10^{-12} \text{ J} \quad (0.2.5)$$

と計算される。 μ は、原子質量単位 $m_{\text{u}} = 1.66 \times 10^{-27}$ kg を単位として量った質量で $\mu_{\text{H}} = 1.0078$, $\mu_{\text{He}} = 4.0026$ (ともに e^- を含めた原子としての質量⁸⁾)、 $m_{\text{u}} c^2 = 1.49 \times 10^{-10}$ J である。

3) 星 (star: 恒星) とは生涯の一時期に核融合反応で発生するエネルギーによって準定常状態にある自己重力天体のことを指す。

4) 星の表面温度 (色) を横軸に光度を縦軸に取った図を Hertzsprung-Russell 図 (HR 図) という。約9割の星が HR 図の対角線上に列をなして並ぶ。これを主系列と呼び、そこに属する星を主系列星と呼んだのが名前の由来である。

5) 核反応式中の元素記号は原子核を意味し、左上の数字は質量数 (p と n の合計数) である。

6) 電子の反粒子で、電荷の符号が正であること以外は電子と同じ性質をもつ。電子と衝突すると光エネルギーを放出して消滅する (対消滅)。

7) 太陽ニュートリノの一部は岐阜県にあるスーパーカミオカンデで捕獲される。

これから、主系列星としての太陽の寿命を概算できる。核反応で使うことができる H の量は全質量の 10% 程度 ($f = 0.1$) である。この H が核融合する際に発生する全発熱量を L_0 (ほぼ一定と仮定) で割れば、主系列星としての太陽の寿命 τ_{Sun} が

$$\tau_{\text{Sun}} = \frac{f M_{\text{Sun}} Q}{4\mu_{\text{H}} m_{\text{u}} L_0} = 1.0 \times 10^{10} \text{ yr} \quad (0.2.6)$$

と概算できる ($1 \text{ yr} = 3.16 \times 10^7 \text{ s}$)。太陽は、現在 46 億歳であるので、寿命のほぼ半ばである。

主系列星の最終段階になり、星の中心に反応生成物である He のコアが形成されると、水素核融合はその周囲のシェル (殻) で起こるようになる。熱源が内部に無く等温の He コアが成長して全質量の 3 割程度になると、コアは収縮・昇温を開始し、外層は逆に膨張・冷却する。その結果、星の半径は増加し、有効温度は低下して、星は HR 図上で主系列から離れて、赤色巨星 (red giant) の段階となる。He コアは収縮とともに昇温し、やがて ${}^4\text{He}$ が次々に衝突することで ${}^{12}\text{C}$ さらには ${}^{16}\text{O}$ ができる核融合が進行するようになる。だが、太陽質量の星の場合、この段階でコアにおいては縮退圧が熱圧力に対して卓越するようになり、収縮による昇温は頭打ちとなり、さらなる核融合反応は起こらない。その結果、放射によって冷えていくだけの白色矮星 (white dwarf) となる。これが太陽の将来である。

太陽活動の変化

主系列星はほぼ一定の光度を保って輝くと述べたが、より正確には太陽は主系列星として輝きだした時は現在に比べ光度が 30% ほど暗かった。これはビリアル定理を用いて、次のように説明できる。太陽の中心部の H が He に変わるにつれて、質量の中心集中が進み、太陽の重力ポテンシャルエネルギー Ω の絶対値が増大する。(0.2.1) 式より、これは内部エネルギー U の増加を意味する。さらに、 $U \approx 3nk_{\text{B}}TM_{\text{Sun}}/2$ と書けるため⁹⁾、H が He に変わることで粒子数密度 n が減少する効果も加わって、 T が上昇する。これによって核反応速度が増加し、太陽光度も上昇するのである。この太陽光度の上昇は、10 億年スケールの地球環境の変遷に強い影響を及ぼしており、地球の将来にも大きな影響を与えると考えられる。

太陽は赤道付近で約 25 日、極近傍で約 28 日の周期で自転している。太陽磁場は 11 年ごとに反転し、それに同期して、黒点など表面活動 (太陽フレアなど) の強度が変化する。それによる太陽光度の変化は 0.1% 程度だが、紫外線や X 線の強さはより大きく変化する。さらに 17 世紀後半から 18 世紀初頭にかけては黒点がほとんど存在しなかった時期があったことが過去の観測記録から明らかになっていて、より長周期の太陽活動の変動が存在する。これらが気候変化に与える影響に関する研究も進みつつある (1.1.4 小節参照)。

8) よって (0.2.5) 式を丁寧に書けば、 $Q = [4(\mu_{\text{H}} - \mu_{\text{e}}) + 2\mu_{\text{e}} - (\mu_{\text{He}} - 2\mu_{\text{e}})] m_{\text{u}}c^2 - 2E_{\nu}$ である。

9) ここで、 n は平均の気体粒子数密度、 $k_{\text{B}} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ は Boltzmann 定数、 T は厳密には平均温度だがほぼ中心温度で置き換えられる。

序.2.2 地球

放射平衡温度と温室効果

地球 (Earth) は太陽系の第3惑星で、軌道長半径 $a_E = 1.496 \times 10^8$ km のほぼ円に近い楕円を描いて太陽のまわりを公転している¹⁰⁾。地球は他の惑星とともに太陽とほぼ同時期 (今から約45億年前) に形成され、その後、その公転軌道をほとんど変えていない¹¹⁾。地球軌道上の太陽方向に法線ベクトルをもつ面の単位断面積に、単位時間に太陽から届く放射エネルギーの現在の値 S_0 (太陽定数: solar constant) は

$$S_0 = \frac{L_0}{4\pi a_E^2} = 1.37 \times 10^3 \text{ W m}^{-2} \quad (0.2.7)$$

である。太陽放射のスペクトル (波長ごとの光の強さの分布) は、温度 5800 K の黒体放射 (blackbody radiation)¹²⁾ でよく近似され、可視域を中心とする波長の光で構成されている。地球に入射した太陽放射は大気 (atmosphere) を透過し、固体もしくは液体の表面で吸収される。地球は太陽放射を吸収して暖まり、その温度に応じた赤外域を中心とする波長の光を放射している。これを惑星放射 (planetary radiation: 地球放射) という。仮に地球に当たる太陽放射がすべて吸収されたとすると、それは惑星放射として惑星表面から全方向に再放出されるため、両者の釣り合いから

$$\pi R^2 S_0 = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (0.2.8)$$

となり、平衡となる温度 T は

$$T = \left(\frac{S_0}{4\sigma} \right)^{1/4} = 280 \text{ K} \quad (0.2.9)$$

と求まる。ただし、 $R = 6.38 \times 10^6$ m は地球の赤道半径、 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ は Stefan-Boltzmann 定数である。以下では、 $F_0 = S_0/4 = 342.5 \text{ W m}^{-2}$ のことを、現在の太陽放射フラックス (solar radiation flux) と呼ぶ。実際には、地球では太陽放射の一部は雲などで反射され、反射の割合 (惑星アルベド: planetary albedo) a は 0.3 程度である。反射された光は地球の加熱には寄与しないため、(0.2.9) 式の S_0 を $S_0(1-a)$ で置き換えれば反射を考慮した放射平衡温度 (radiative equilibrium temperature) を求めることができる。地球の放射平衡温度は 255 K 程度となり、宇宙空間から見た地球の放射温度 (有効温度) と一致する (3.2.1 小節参照)。

ところが現実には、地球の地表面気温は平均で 290 K 程度に保たれ、もし上記の有効温度が地表面気温であったなら氷になってしまうであろう水 (H_2O) の大部分は液体の状態にあって、海洋 (ocean) を形成している。有効温度に比べ地表面気温が高くなるのは、大気中に含まれる水蒸気や二酸化炭素 (CO_2) といった分子が、温室効果 (greenhouse effect) をもつためである。

10) 惑星の軌道に関する概念・用語については、3.2.3 小節参照。

11) より詳しくいえば、他の惑星の影響により、軌道の形はわずかに変動しており、それが長周期の気候変動の要因の1つである (3.2.3 小節参照)。

12) あらゆる波長の光を完全に吸収する物体を黒体という。黒体が出す放射 (黒体放射) のスペクトルはその温度のみで決定され、Planck の法則で与えられる。物体の出す放射スペクトルが温度 T の黒体放射で近似できるとき、 T を有効温度という。

大気の主成分である等核二原子分子（窒素 N_2 、酸素 O_2 ）や単原子分子（アルゴン Ar）は、分子の振動や回転では分極しない。しかし、 H_2O 、 CO_2 、オゾン (O_3)、メタン (CH_4) といった三原子以上の分子や異核二原子分子（一酸化炭素 CO など）は、振動・回転状態を変化させて差額分のエネルギー（エネルギー準位差）をもつ光子を吸収することができる。分子の振動・回転のエネルギー準位差は、赤外域の光子のエネルギーに相当する¹³⁾ ため、 H_2O 、 CO_2 などを比較的多く含む地球大気は、可視光に対しては透明（ほとんど吸収無し）であるが、赤外放射には不透明になる。地表面から出る赤外放射は大気に吸収され、その約半分は再び地表面に再放射される。このため地表面気温は有効温度よりも高くなる。

地球の自転と公転

地球は 23 時間 56 分の周期で自転して、365.2564 日（恒星年）で公転している。両者のかねあいで太陽の子午線通過を基準にすると平均すれば 24 時間の日変化（平均太陽日）が生じる。地球の衛星の月（Moon）は、27.32 日の周期で公転し、やはり地球の公転とのかねあいで、29.53 日の周期で満ち欠けを繰り返す（朔望月）。月が地球に及ぼす潮汐トルク¹⁴⁾によって、地球の自転角運動量が月の公転角運動量に輸送されることで、地球の自転周期は 10 億年の時間スケールで長くなっている。

地球の自転軸は軌道面の法線ベクトルに対して傾きが比較的小さいため、高緯度ほど、年平均太陽高度が低く、年平均の日射量（insolation）は減少する¹⁵⁾。その結果、極周辺では寒く、赤道付近では暑いという南北温度差が生じる。南北温度差は、一方で中緯度帯において上空ほど強まる偏西風を生むとともに、他方で大気の南北循環（ハドレー（Hadley）循環など、1.2.1 小節参照）や海洋の大循環¹⁶⁾を引き起こす。また、中緯度帯においては南北温度差が大きくなると偏西風は不安定化して蛇行し¹⁷⁾、これが南北熱輸送を生む。これらによって南北方向に熱が輸送され、温度差は緩和されている。

地球の自転軸は軌道面の法線ベクトルに対して 23.4° 傾いているため、地球の公転に伴う日射量の変動を生み、1 年の季節変化の主因となる。また、地球の公転軌道は楕円で、太陽との距離は、 a_E に対して $\pm 1.7\%$ ほど変化し¹⁸⁾、日射量を増減させるが、これは自転軸の傾きによる季節変化に比べずっと小さい。しかし、地球の軌道要素や自転軸の方向は他の惑星や月の影響で長時間変動し、それが日射量変動を通して気候変動に影響を与えることが知られている（3.2.3 小節参照）。なお、地球の自転軸の傾きが他の惑星の影響で大きく変化しないのは、衛星としては質

13) 安定な大気分子の内部状態変化によるエネルギー差で可視域の光子のエネルギーに相当するものはほとんどない。なお、光子のエネルギーは、Planck 定数を h 、振動数を ν として、 $h\nu$ であり、これがエネルギー準位差 ΔE と等しくなる振動数 $\nu = \Delta E/h$ の光が吸収される。

14) 軸まわりのトルクとは、軸から力 (F_j) の作用点までの位置ベクトルを r_j として、 $\sum_j r_j \times F_j$ （物体全体での和）である。物体にトルクが働くと、角運動量が変化する。潮汐力によるトルクを、潮汐トルクという。

15) 一方、日平均の日射量は、日照時間と太陽高度で決まるため、夏至前後にはむしろ高緯度の方が多くなる。

16) 海洋の表層水平循環は平均風によって駆動され、大陸により東西が仕切られることで循環流が形成される（3.3.2 小節参照）。一方、鉛直循環は海水の密度差により駆動され、熱塩循環と呼ばれる。これは、温度だけでなく塩分による密度差も重要なためである（3.3.3 小節参照）。

17) この不安定は傾圧不安定と呼ばれ、それによって発達した擾乱が温帯低気圧である。

18) 地球が太陽に最も近づく点（近日点）を通過するのは、現在は 1 月初旬である。

量の大きな月が存在しているためである。

大陸と海洋

地球の表面は大陸と海洋に覆われている。両者の熱慣性の違いが日変化においては海陸風、年変化においてはモンスーン（季節風）を生み出している。さらにヒマラヤ山脈・チベット高原のような大規模な山塊の存在がモンスーンの強化に寄与している（3.5節参照）。また、大陸が北半球に集中し、南半球は海洋の割合が大きいという非対称性が気候変動を生み出している。また海陸分布や海底地形は、海洋の大循環の形態や潮汐による鉛直拡散の強度分布に強い影響を与えている。水惑星としての地球については序.2.5小節で論ずる。

地球の層構造の形成

固体地球（solid earth）は、微惑星の集積によって今から45億年前（4.5 Ga¹⁹⁾）頃に形成された。集積の際に解放される重力エネルギーによって表面はやがて熔融し、マグマの海が形成された。そこでは金属鉄（Fe）と岩石が分離し、密度の大きなFeは地球の中心へ沈んでいった。こうして、当初均質だった原始地球は、Fe・ニッケル（Ni）合金を主成分とするコア（core: 中心核）を岩石（珪酸塩鉱物が主体）のマントル（mantle）が取り囲む層構造（stratified structure）をもった分化²⁰⁾した天体となった。やがて集積が完了すると、表面は固化し、内部では部分熔融による固体と液体（マグマ）の重力分離（火成活動: magmatism）が繰り返し起こり、マグマは地表に噴出して地殻（crust）を形成した。上部マントル物質（カンラン岩: peridotite）の部分熔融によって玄武岩（basalt）が生じ、海洋地殻（oceanic crust）を造った。さらにH₂Oが関与して、玄武岩質岩石が再熔融すると花崗岩（granite）質のマグマが生成される。これが固化して軽い大陸地殻（continental crust）が形成されたと考えられる。軽い大陸地殻は再びマントル中に引きずり込まれることが少ないため、地球史を通じて大陸面積と厚さは増加してきた。海のみならず、大陸もまた水惑星「地球」の特産物なのである。

原始地球の大気は、形成時に岩石から脱ガスしたH₂OやCO₂によって構成されていた。微惑星の集積率が下がると、大気中の水蒸気は凝縮し、雨となって地表に降り注ぐ。強い温室効果ガスであるH₂Oが大気から除かれたため、大気の保温効果が弱まり、大気温度は低下して、さらに凝縮が進行する。こうして比較的短期間のうちに海洋が形成され、蒸発と降水による地球表層の水循環システムが確立した。

コア・マントル・地殻

地球は形成時に蓄えられた熱と放射性同位元素の崩壊で生じる熱を対流によって表面に運びながらゆっくりと冷えている。当初全体が液体であったコアは、3 Ga頃に中心部から固化が始まり、固体の内核（inner core）が生じたと考えられている。周囲の外核（outer core）では、電気伝導度が高い電磁流体（液体のFe）が、自転運動とともに対流運動することで電流を生み出し、この電流が磁場を生成している。この磁場の生成と抵抗散逸による磁場の減衰が釣り合って地球

19) Gaは「今から10億年前」を表す。Maは「今から100万年前」、kaは「今から1000年前」を表す。

20) 分化（differentiation）とは、均質な状態にあるものが、部分熔融などによって組成的に異なる相に分離され、さらにそれが重力などによって空間的に分離される過程を指す。

磁場 (geomagnetic field) が維持される。この磁場生成の仕組みをダイナモ機構 (dynamo mechanism) といい、太陽や他のいくつかの惑星における固有磁場生成も、電磁流体の種類は違うものの機構は同様であると考えられている。地球の中心のコアのダイナモが生み出す地球磁場が、地球大気の外縁に広がる磁気圏を形成して、宇宙線から地球表層をシールドしている (1.1 節参照)。

マントルは、固体である一方で、1 億年程度の時間スケールで循環するマントル対流 (mantle convection) と呼ばれる熱対流をする流体である。プリューム (plume)²¹⁾ と呼ばれるコア・マントル境界から湧きあがる大規模な上昇流が間欠的に形成されて対流が維持されてきたらしい。GPS などによって実測される地球表面の相対的な動きは、地表を覆うそれぞれがほぼ剛体のように振る舞うように見える十数枚のプレート (plate)²²⁾ の相対運動によっておおよそ説明できる。またその動きとプレート境界での相互作用によって、大陸移動、海洋島の列、島弧と縁海、造山運動、地震や火山の帯分布や発生・形成機構、海嶺から海溝に至る海底地形、海洋底の地磁気縞模様などを統一的に説明するのがプレートテクトニクス (plate tectonics) である。マントル対流と結合されてプレートは生成 (海洋中央海嶺、地溝帯)・移動・沈み込み (subduction)・衝突をしている。地球の表層環境を規定する海陸分布や大規模な地形は、こうしたプレートの動きによって 1 億年程度の時間スケールで大きく変化している。

地球表層の進化

太陽の主系列星としての安定した輝きと、地球軌道の安定性によって、40 億年の長期にわたって地球表層環境は基本的には安定した状態におかれてきた。地球内部からは、形成時に蓄積された熱と放射性同位元素の崩壊によって生じる熱が継続的に放出されてきた。その量は、太陽放射フラックスに比べて十分小さいが、それに伴う物質分化が数十億年にわたって進行してきた。火成活動は、熱水活動、溶岩台地形成、火山噴火によるガス・エアロゾル放出、大陸形成といった形で表層環境に大きな影響を与えてきた。また、巨大隕石の衝突に起因する気候変動も、中生代/新生代境界 (白亜紀末) における恐竜などの生物大絶滅などの大変動をもたらしたと考えられている。地球の進化に関する記述は、熊澤ほか編 (2002) に詳しい。

序.2.3 生命圏

生命と生命圏

生命の本質²³⁾ は、恒常性を保ち生命機能を支える代謝系 (metabolic system) と生命情報を保

21) ハワイ諸島・天皇海山列などの海洋島の列は、プリュームと関連して形成されたホットスポット (hot spot) 火山によって、上を動く海洋プレートの動きが記録されたものである。

22) 地殻とマントルは化学的な区分だが、力学的には冷たくて硬いリソスフェア (lithosphere) と熱く流動しやすいアセノスフェア (asthenosphere) に区分される。リソスフェアは 70-150 km の厚さで地殻と上部マントルの上部から成る。プレートは鉛直に見るとリソスフェアによって構成されている。

23) われわれは未だに地球外生命を知らない。よって、ここでの生命とは地球の生命ということになる。より普遍的な宇宙における生命の科学的考究は、太陽系外惑星の発見によって、地球外生命を探る観測的なアプローチが可能となってきたため、宇宙生物学 (astrobiology) として始まろうとしている (例えば、松井, 2003)。

管・継承する遺伝系 (genetic system) の共立にある。現在の地球の生命では、前者は生体化学反応を触媒する酵素 (enzyme) としてのタンパク質 (protein) が、後者は相補的対形成で配列複写能力をもつ遺伝子 (gene) としての核酸 (nucleic acid: DNA もしくは RNA) が担っている。生命において代謝系と遺伝系は不可分の関係にある。タンパク質を合成するのに必要なアミノ酸配列が、核酸の塩基配列としてコード化されている。一方で、核酸の合成と複製にはタンパク質の補助が必要である。遺伝系が機能するためには、複写過程における低いエラー率が必須であるが、小さいながら複写エラーがあるために長時間のうちに遺伝子の変異が蓄積され、進化 (evolution) の原動力となっている。

本書において、生命圏 (Life) とは、地球上の生物がすんでいる領域を指す生物圏 (biosphere) の意味に加え、生物圏における全生物 (人類を含む) と非生物的環境をひとまとめにして、エネルギー・物質循環において、一連の機能を果たす系として見ることを含めた概念とする。よって、地球と生命圏は不可分の関係にある。なお、ある地域に限定した生命圏のことを生態系 (ecosystem) と定義する。

生命圏は、領域的には、地球表層の大気水圏と地圏に重なる。地球表層には遍く生物が広がっており、地球と生命を切り離して扱うことは困難である。例えば、地球表面のアルベドは陸域植生、海洋生物、雪氷生物などの存在によって決まっており、さらにアルベドに強い影響を与える雲の分布も蒸発散の調整を通じてコントロールされている。

世界各地において、それぞれの環境に応じて、生物が相互関係の複雑で精妙なネットワークを作っていることにはしばしば驚嘆させられる。これは、単に生物間 (同種間および異種間) の相互作用 (競争や共生) によってのみ培われたものではなく、地球環境の変動とそれに応じた生物の絶滅と適応放散などによって、長時間かけて編み込まれてきたものであることを認識すべきである。

生命圏の誕生

生命は地球形成当初には存在していなかったが、非平衡化学進化 (nonequilibrium chemical evolution) の結果として地球史のかなり早い時期に生じたと推定されている。生命の誕生とその後の生命圏の成立は、地球進化における分化過程の1つとして捉えられる。代謝系と遺伝系のどちらが先に登場したかは議論が続いており、生命誕生の議論は現時点ではどうしても想像的なものにならざるを得ない。1つの見方を述べよう。無生物的な化学進化の過程で、原始的な代謝系が、遺伝系の助けを借りずに比較的単純な自己触媒系 (autocatalytic system) として生み出された。タンパク質の構成単位であるアミノ酸の方が、核酸の構成単位であるヌクレオチドより化学合成されやすいことがこの考え方を支持する。アミノ酸が数十個つながったポリペプチドは2次構造を作って、自らを作る反応を触媒 (自己触媒) したり、2種のポリペプチドがそれぞれ相手の合成反応を触媒 (相互触媒) したりする。こうした系が、材料物質は通過するが生成物は流出しない半透膜構造の中に実現されたものが自己触媒系である。こうした系は、完全な自己複製能力をもつわけではないが、生成物の増加と膜構造の分裂によって確率的な自己増殖能力をもち得る。やがて自己触媒系のポリペプチドの助けによって、あるいは自己触媒系とは独立に鉱物 (粘土などが注目されている) など非生物的な鋳型を使って、自らのコピーを作成する能力をもつ自己複製子 (replicator) が登場したと考えられる。後者の場合でも、やがて自己触媒系と結びつき

自己複製能力をもつ自己触媒系，すなわち生命が誕生したと考えられる。

地球における生命誕生の場は海洋，とくに海底熱水活動域であるとする見方が有力である。現在でも，深海の熱水活動域では，硫化水素 (H_2S) などの化学物質の自由エネルギーを活用する化学合成細菌を一次生産者（基礎生産者）とする生態系がかたち作られており，太陽光のエネルギーを活用する植物・光合成バクテリアを一次生産者とする地表生命圏とは独立している²⁴⁾。生命が誕生した当時の地球では，現在に比べて熱水活動は桁違いに盛んであり，海底の広範な領域に広がっていたと考えられる。分子系統学的に分岐年代が古い生物は，好熱性の化学合成生物であることが知られている。

生命誕生の過程の解明は，SELIS 理解のための最重要かつ最も難しい問題といえる。

生命圏の進化

生物は遺伝系をもち，遺伝情報を次世代へと受け渡していく。何世代にもわたる受け渡しの過程で，遺伝子変異が少しずつ蓄積されていき，より多くの子孫に受け継がれた遺伝子が生き残っていく。これによって生物進化が起こる。遺伝情報の受け渡しの連鎖は，少なくとも現生の知られている生物の共通祖先以降は，途切れることなく続いてきた。いくつかの生物を含むグループを指定すれば，必ずそのグループに属するすべての生物に共通の祖先に行き当たる。近縁のものどうしのグループほど，共通祖先に行き着くまで遡る時間は短く，より最近に分岐したといえる。遺伝子配列を解析することで，分岐関係を再構築することができ，生物の系統関係（系統樹）を明らかにすることができる。さらに遺伝子変異の確率を化石記録との照合などから吟味することで平均変異数から経過時間を決める分子時計が確立されれば，分岐年代を推定することも可能である。これらを扱うのが分子系統学（molecular phylogeny）である²⁵⁾。

分子系統学は生物の進化の歴史だけでなく，地球の歴史をも照らし出す可能性をもっている。生物の系統樹の分岐は一様ではなく，非常に不均等で，特定の短い期間に分岐が集中する例が見られる。これは地球環境の変動に伴う大絶滅（mass extinction）と，その後の生き残ったものの適応放散（adaptive radiation）を反映している場合が多いと考えられる。あるいは，好熱性や好塩性などの共有子孫形質から祖先種の暮らした環境を復元することができる可能性がある。化石に基づく古生物学（paleontology）との併用によって 35 億年以上の生物進化の歴史が少しずつ明らかになっている。以下にそのスケッチをする。

生命の誕生は海底であった可能性があるが，やがて浅海において太陽光を利用して一次生産（基礎生産）を行う光合成（photosynthesis）バクテリアが登場したと考えられる。現在のところ，最古のバクテリアの微化石と思われるものは，西オーストラリアの約 3.5 Ga の地層から見つかっている。酸素発生型の光合成をするシアノバクテリア（cyanobacteria：藍藻）が登場したの

24) 実は，現在の熱水活動域の化学合成細菌は地表生命圏が生み出す O_2 に依存しているので，厳密には独立しているとはいえない。しかし，太古の海底では，生物起源の O_2 に依存しない生態系が実現されていたと考えられる。

25) ただし，遺伝子の水平伝播（horizontal gene transfer）が起こることを考慮する必要がある。これは親からではなく，感染や共生などによって他の生物・ウイルスの遺伝情報の一部が DNA に取り込まれる現象である。この変化が生殖細胞に反映されれば子孫に伝播するため，系統関係を定める基本原理が損なわれることになる。比較的古い現象（だから分子系統学が基本的にはうまくいっている）と考えられているが，生命誕生直後は，こうした水平伝播の頻度が高く，それが進化に強い影響を及ぼした可能性がある。

は 2.7 Ga 以前と考えられている。シアノバクテリアは地球大気に O_2 を蓄積した立役者と考えられている。生命による大気組成の改変をもって生命圏の成立の証と考えることができる。

この頃までに登場し現存する生物は、(狭義の) バクテリア (bacteria) と古細菌 (archaea) に大別される。その後、数億年して、大気中の O_2 濃度が上昇し、2.1 Ga 頃には、おそらく古細菌に酸素呼吸バクテリアが細胞内共生して真核生物 (eucaryote) が生まれ、現生の生物界の 3 大分類群 (ドメイン: domain) が確立された。真核生物の細胞のミトコンドリアは酸素呼吸バクテリアの細胞内共生によって、植物などの細胞の葉緑体はシアノバクテリアの共生によってもたらされたと考えられている。

生物の化石記録が一気に増えるのは、今から 540 Ma に始まる顕生代 (Phanerozoic) になってからである。その最初の 5000 万年ほどのカンブリア紀の間に、多細胞動物 (後生動物: Metazoa) の主要基幹分類群 (分類学上の門 (phylum) レベル) のほとんどが登場したため、カンブリア紀の生物爆発 (Cambrian bio-explosion) と呼ばれる。その後、大絶滅²⁶⁾ をいくたびか経験しながらも、生物は陸上や空中にまで分布域を広げつつ、進化を遂げてきた。緑色植物の地上への進出と繁栄は、アルベドの調整や水蒸気のバッファなどの機能を通じて、海陸のコントラストを緩和するとともに土壌の形成によって風化速度を上昇させる役割も果たしてきた。脊椎動物では、魚類の一部が陸上生活に適応して四肢動物となり、現生の両生類につながる系統と、陸上産卵が可能な有羊膜類 (Amniota)²⁷⁾ に分化し、さらに後者から現生爬虫類・恐竜・鳥類につながる系統と哺乳類につながる系統が分化した。

人類の進化と人間圏の成立

属としてのヒト (*Homo*) は、最初の石器製作者と考えられ、化石記録から約 2.4 Ma にアフリカに登場したらしい。ちょうどこの頃、地球は現在まで続く氷河時代 (第四紀氷河時代) に突入した。種としてのヒト (*Homo sapiens*) とされる最古の化石は、エチオピアの約 160 ka の地層で見つかっている (White et al., 2003)。化石記録とは独立に現代人のミトコンドリア DNA²⁸⁾ 配列の変異型の分布からも、現代人の共通の母系先祖 (ミトコンドリア・イヴ) が約 150 ka 頃、アフリカ中央部にいたと推定されている。その後、アフリカを出て世界各地に拡散していった。最終氷期極大期の前後に、氷床形成によって海水面が低下して陸続きとなっていた現在のベーリング地峡を通過して、人類は北米大陸 (アラスカ) に進出した。そして氷期の終焉によるローレンタイド氷床の後退とともに本格的な南下を開始して、またたく間に南米大陸南端まで達したと推定されている。

人間圏 (humanosphere) ともいうべき、生命圏の中でも特異なサブシステムが成立したのは、約 12 ka、西アジアで人類が最初に農耕牧畜を開始した時に求めることができる (松井, 1998)。これはちょうど、最終氷期後の寒の戻りである新ドリラス期、もしくはその直後にあたる。15

26) その最大のもは、今から約 250 Ma の古生代/中生代境界 (ペルム紀/三畳紀境界, PT 境界) の絶滅事変である。

27) 発生段階の胚が羊膜をもつ四肢動物の総称。爬虫類・鳥類では羊膜が卵の殻となる。

28) ほとんどの真核生物がもつ細胞呼吸を担う細胞内小器官であるミトコンドリア (mitochondrion) は、細胞核の DNA とは別の独自の小さな環状 DNA をもつ。これは真核生物の細胞内共生起源説の根拠の 1 つである。受精卵のミトコンドリア DNA はすべて雌性配偶子 (母方) から受け継がれる (細胞質遺伝)。

世紀の大航海時代にはヨーロッパ人はアメリカ大陸を「発見」し、16世紀初めには銃と馬と天然痘によってアステカ帝国とインカ帝国を制圧した。18世紀後半に西ヨーロッパで起こった産業革命によって、人間圏は急激な膨張を開始して、地球表層全体に影響を及ぼすようになり、20世紀後半には地球環境問題が人類の直面する大きな困難として認識されるに至った。

生物としての人間の特殊性は、「考える葦」として、遺伝子に拠らず情報（文化）を伝え、科学と技術を発展させ、生命・地球・宇宙の歴史と摂理を探求するようになったことにある。20世紀末には人類は遺伝子を読み操作する技術まで獲得した。人間圏の成立と拡大によって生命圏は質的变化の時代を迎えているのかもしれない。

この小節に関しては、より詳しくは、箕浦（1998）、熊澤ほか編（2002）などを参照していただきたい。

序.2.4 太陽-地球-生命圏相互作用系

太陽放射を浴びながら公転する地球を生命圏も含めて1つのシステムと捉え、それに影響を与える太陽活動や銀河宇宙線、惑星・月からの重力摂動、隕石衝突などの外力（forcing）も含めて、われわれは太陽-地球-生命圏相互作用系（Sun-Earth-Life Interactive System: SELIS）と呼ぶ。SELISは一体でありシームレスである。エネルギーの流れで考えると、太陽放射が地球-生命圏によって受け取られ、光合成を行う一次生産者を経て生態系を支えている一方、アルベドを差し引いた分が赤外放射として大気を加熱し、大気運動を引き起こしている。さらに、南北の日射量の違いによる温度差が大気と海洋の循環を駆動し、海陸の熱慣性の違いがモンスーンを生み出しているが、それぞれに生命圏がアルベドや蒸散を通じて、能動的に関与している。SELISは基本的には動的準定常状態にあるが、日射量の変化やプレート運動、火成活動などに応じて複雑な変動を示す。次の章からは、このようなSELISの動態把握や過去の変動の解明、あるいはモデリングによる理解をしていく。

本書では、大気や海洋など地球表層に関する過去1000万年程度の範囲での記述が多いが、SELISの本来の概念は地球全体に関してあらゆる時間スケールの現象を包含したものである。さらに地球も現実の地球だけではなく、あり得る地球——すなわち惑星を特徴づける多次元のパラメータ空間（質量、太陽定数、自転速度、元素比など）のうち現在の地球を含むある範囲のもの——を扱ったり、単純化された地球——すなわち地球を平板や、経度方向に一様な球といった理想化された形態に置き換えたもの、あるいはサブシステムの一部を切り捨てたモデル——として扱ったりすることもある。

SELISとは、通常、気候システムあるいは地球システムと呼ばれているものと表面上は大差が無いように見える。ただし、考察する時間スケールや、関与する領域や要因、過程を狭く限定せず、しかし、枚挙的ではなく総合的に見ていこうとする姿勢を強調する意図がある。また、地球温暖化の議論では、ともすれば人為起源の温暖化ガスなどの内在的要因のみに焦点が当てられるが、太陽活動変動や地球軌道要素／自転軸方向変動に代表される外的要因にも注目する必要があることを示している。さらに、古環境解析などにおいて、堆積物などに残された過去の地球のシグナルは、直接、気候変動を反映したものではなく、地球と生命圏の相互作用の結果が刻ま

れたもので、生物の環境ストレス耐性なども考慮して解析しなくてはいけないことを考慮している。あるいは、気候変動に対して生命圏が単に受動的に振る舞うのではなく、さまざまなフィードバックループを通じて能動的に気候を調整している（ただし、その実態解明やモデル化が遅れている）ことも念頭に置かれている。さらに、古典的なシステム論の範囲に留まるのではなく、複雑系としての見方や生命システム論（例えば、金子，2003）との共通点から地球システムの普遍的な概念モデルを構成していこうという哲学もある²⁹⁾。こうした哲学は、地球を惑星の1つとみなし、その特質を明らかにすることを目的とする比較惑星学や惑星形成論とも密接な関わりをもち、新しい「地球学」につながると考える。

序.2.5 水惑星「地球」

惑星としての地球の特徴は、生命を宿していて、生命によって表層環境が調整されていることにある。地球の場合、生命の誕生には、海洋が重要な役割を果たした（序.2.3小節）。生命を育む惑星の存在条件を語るのは現状では困難であるので、ここでは地球型生命の誕生の必要条件と考えられる、液体の水を表面にもつ惑星（水惑星）の存在条件を考えてみよう。仮に惑星表層に一定量の H_2O があるとしても、太陽からの距離に応じて、液体の水が存在できる領域は限定される。

太陽に近すぎる惑星ではどのようなことが起こるか、海を湛えた地球を太陽に近づけていく思考実験を試みよう。水蒸気が非常に強い温室効果ガスであることが、次のような暴走的な状況を引き起こす。

地球を太陽に近づけると、入射する太陽放射フラックス（序.2.2小節参照）が増大し、有効温度および地表面気温は上昇する。すると、大気中の飽和水蒸気量は温度に対して指数関数的に増すため、海洋から大気中に水の蒸発が進む。これによって大気の温室効果は増し、地表面気温はさらに上昇する。水蒸気の量が増えて、大気が惑星放射に対して不透明になると、その光学表面³⁰⁾ 付近の温度構造のみで惑星放射フラックスが決定され、地表面気温によらなくなる。すると地表面気温がいくら高くなっても惑星放射フラックスは太陽放射フラックスと釣り合えず、地表面温度の上昇は続き、海洋は蒸発し続けることになる。これを暴走温室効果（runaway greenhouse effect）という。

つまり、海洋をもつ惑星の出す放射には上限（これを射出限界と呼ぶ）があり、雲などに反射される部分を除いた正味の太陽放射フラックスがこの射出限界を超えると暴走温室状態となるのである（3.2.1小節参照）。対流圏の相対湿度を100%とすると、射出限界は 307 W m^{-2} となる。現在の地球に降り注ぐ太陽放射フラックス $F_0 = S_0/4$ は 342.5 W m^{-2} であるが、惑星アルベド a が0.30であるので、正味の太陽放射フラックス $F_0(1-a)$ は 240 W m^{-2} となり、射出限界を下回っている。この射出限界は水蒸気以外の温室効果ガスの量にはほとんど依存しない。そのため、現在問題となっている人為起源の CO_2 放出が、直接、暴走温室効果を引き起こすことはな

29) この意味では「地球複雑系」という言葉が適切かもしれない。

30) そこからの惑星放射量のうち $1/e$ が再吸収されずに宇宙空間に放出される面。

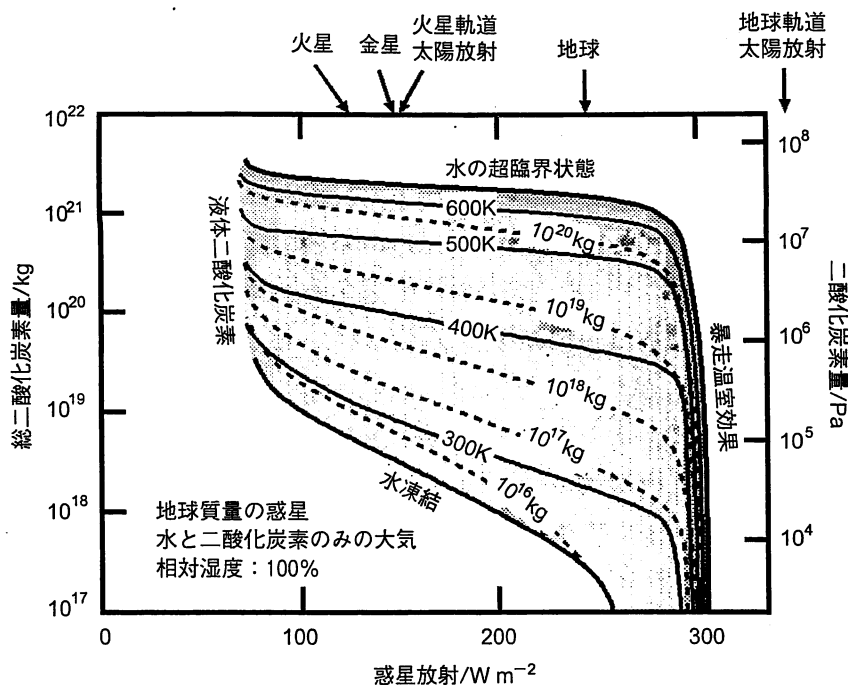


図0.2.1 海洋の存在条件: $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 大気をもつ惑星の地表に液体の水が存在できる条件. ハッチ部分が、海洋が存在するパラメータ領域. 実線は海表面温度の等温線, 破線は海洋ができるために最低限必要とされる H_2O の総量の等値線 (Abe, 1993 に基づき一部改変).

い.

次に地球を太陽から遠ざけてみよう. 鉛直方向だけについて放射や対流のエネルギー輸送を考えるモデル (これを鉛直1次元放射対流モデルという) では, 海表面温度が水の三重点の温度を下回ると海洋は凍結すると考えられる. 低温では水の蒸気圧が小さくなるので, 海表面温度を決めるのは水蒸気に限らず, 温室効果ガスのすべてである. つまり, 海洋がちょうど凍結するときの正味の太陽放射フラックスは, 水蒸気以外の温室効果ガスの量にも依存する.

以上の考察を精密化し, 惑星に入射する正味の太陽放射フラックスに加えて, 温室効果ガスとして CO_2 の量もパラメータとして, 海洋の存在条件を描いたのが図0.2.1である (Abe, 1993). 横軸が正味の太陽放射フラックス³¹⁾, 縦軸が CO_2 の総量で, ハッチをつけた部分が地球表面に液体の水が存在できる領域 (海洋の存在領域) となる. この領域では, 水をすべて蒸発させた場合の地表面の水蒸気分圧が飽和蒸気圧を超えていて, かつ地表面温度は水の三重点温度 (273.16 K) 以上となっている. 海洋の存在領域の上方の境界線は, H_2O の総量に依存し, その総量が多いほど, CO_2 の温室効果がより強くなっても海は蒸発しきらない. 海洋の存在領域の残りの三方の境界は H_2O の総量には, あまり依存しない. 右側の境界は, 暴走温室効果によって海洋が失われてしまう限界を, 下方の境界は海表面温度が氷の三重点を下回り凍てついてしまう限界を, 左側の境界は CO_2 が液体になってしまう境界を示している.

海洋の凍結条件をより精密に議論するためには, 緯度によって年平均の日射量が変化する効果

31) 正確には固体地球からのエネルギーフラックスを加えたもので, 正味の惑星放射と呼ぶべきだが, 惑星形成期を除くと, その差は無視できる.

を取り入れられるように、少なくとも緯度帯ごとに平均をとった量を扱う、南北1次元モデルを使う必要がある(3.2.2小節参照)。これは暴走温室効果の本質が鉛直放射対流平衡で語れることとは異なる。つまり、暴走温室状態では南北温度差は小さくなるのに対し、氷が生ずるような状況では南北温度差が重要となるからである。

地球を太陽から遠ざけていくと、入射する太陽放射フラックスが弱まり、極地方の氷床は赤道に向かって張り出していく。氷のアルベドは高いので、海表面温度は単に日射量の減少に相当する分以上に低下する。これによって氷床はさらに発達する。太陽からの距離が離れるにつれ、氷床の限界緯度は低緯度側に張り出すが、限界緯度が30°ほどになると一気に赤道までジャンプし、惑星全体が氷に覆われる全球凍結(snowball earth)の状態となってしまう。ちょうど暴走温室効果と逆方向の「暴走」と捉えることができるので、これを暴走氷室効果(runaway ice-house effect)もしくは暴走冷却効果と呼ぶことがある。後述するように、両者はシステム論では、正のフィードバックとして語ることができる(3.2.1, 3.2.2小節参照)。

序.2.6 生命圏の能動的役割とガイア仮説

Darwinの進化論では、遺伝的変異(genetic variation)と自然選択(natural selection: 自然淘汰)によって生物の進化を説明する。このうち自然選択の圧力は、生物間の相互作用と物理的な環境によって決定される。このうち物理的な環境は一方向的に与えられ、生物個体はその審判を受けるだけと思われてきた。

ところが、地球の大気組成やオゾン層の存在、陸面の風化速度など現在の地球表層環境の形成と維持に、生物活動自体が決定的な役割を果たしていることがわかってきた(Margulis and Lovelock, 1974)。地球大気は、 O_2 と CH_4 が共存するきわめて非平衡な状態にあるが³²⁾、生物がこれらのガスを絶えず放出することによって、その状態は準定常に保たれている。 O_2 は、植物やシアノバクテリアの光合成によって生み出され、大気に蓄積された。大気における O_2 の体積比は21%だが、これが大きくなると、火山岩の酸化や山火事の発生頻度が増加し、体積比を下げようとする働きがあると想定される³³⁾。成層圏から中間圏において、 O_2 は光化学反応により、オゾン層を形成し、遺伝子に損傷を与える太陽紫外線から地表の生命を守っている。 O_2 とは逆に、大気中の CO_2 は長期的には減少してきている。これにも、より低い CO_2 分圧に適応した光合成の進化や、陸上生物活動に伴う風化率の増大によるカルシウム(Ca^{2+})の海への供給増加などが関与している。

このように、大気には生命活動が刻印されている。第2の地球、すなわち生命を宿す惑星を太陽系外に探す計画においても、大気組成の観測が生命活動を同定するのに最も優れた手段として有望視されている。以上のことから、生物活動は地球環境の影響を一方向的に受けるだけでなく、地球環境の維持と変化に能動的に関与する存在でもあることがわかる。この意味で、生命と地球は共進化(coevolution)してきたといえる。

32) 平衡状態では CO_2 と H_2O になる。

33) ただし、3.4.3小節で述べるように、石炭紀後期には大気中の O_2 分圧は、現在の1.7倍程度に達したと推定されており、このフィードバックが現実的にどの程度働くかは疑問が残る。

地球システムにおける生命圏の能動的な役割をさらに先鋭化させ、ガイア (Gaia) 仮説という形で提唱したのが Lovelock である (例えば, Lovelock, 1995). ガイア仮説では、地球にすむ生物自体が、地球の表層環境を居住可能な状態に保持し続ける制御機構に深く寄与してきたと考える。そして、地球と生命は互いに強く結合した単一のシステム・生きている地球 (living Earth) = ガイアを形成していると主張する。

ガイア仮説は目的論 (teleology) 的であり、生命圏が地球環境を安定化すべしという総意をもつかのように語っていると批判される。毎年、世界中のエコシステムの代表が集まって年次総会「ガイア」を開き、過去を総括して来年の活動目標を定めているのか、などと揶揄する人もいる。

しかし、ガイア仮説は、個体レベルでの自然選択から、いかに惑星レベルでの自己制御が生ずるかを明らかにしていくための作業仮説とみなすべきである。3.4.1 小節で述べるようにデイズワールドという仮想惑星において Watson と Lovelock は、ガイアを1つの寓話として具体的に提示した (Watson and Lovelock, 1983)。さらに、現実の地球においても、ガイア仮説に触発されて、生命圏と惑星環境をつなぐフィードバックがいくつか示されている。ガイア仮説の解明作業は、目的論の科学化³⁴⁾ であり、生命科学と地球惑星科学を融合した新しい地球学の中核概念の1つに成長することが期待されている。

序.2.7 SELIS の構造

SELIS をいくつかのパーツに分割して記述し、相互のやり取りを明らかにして、それらの組み合わせとしてシステムを記述することが広く行われている。このパーツをサブシステムと呼ぶ。

サブシステムに分割することで失われてしまうものがあるのは明らかであるが、このような扱いにより SELIS の構造 (のある部分) を階層化して把握できる利点がある。ここでは、非常に単純な階層化によって SELIS の構造を概観しよう。

磁気圏、大気圏、海洋、固体地球という分け方は、媒質が、それぞれ、プラズマ、中性ガス、液体、固体³⁵⁾ であることによっており、それが連続体としての基本的な性格を規定するため、比較的明確である。ただし、連続体の運動学的な性格は時間スケールにも依存する。大気は圧縮性流体だというのが世の常識だろうが、音波の伝播時間より長い時間スケール (すなわち気象学・気候学が対象とする時間スケール) では非圧縮性流体として扱える。マントルは地震波を伝える弾性体だが、数億年をかけて循環する流体でもある。音波 (弾性波) が系を横切る時間をダイナミカルな時間スケールという。系の全熱エネルギーを境界から流入出する熱流量で割って得られる時間を熱緩和の時間スケールという。これら4つの圏において、ダイナミカルな時間スケールにあまり違いはないが、熱緩和の時間スケールは大きく異なり、磁気圏は数時間以内、大気は数十日、海洋は数千年、固体地球は10億年以上である。

こうした時間スケールの差のため、各圏は別個に扱われてきた。しかし、気候システムを扱う

34) Darwin の進化論は、まさに目的論の科学化の始まりといえる (Dawkins, 1982)。

35) 例外として、外核は、通常は固体地球の一部に入れられるが、金属鉄を主成分とする液体である。マグマは岩石の液体だが、マントルに対する質量比はきわめて小さい。

場合には、大気や海洋の熱緩和時間より長い時間スケールの変動に注目する必要がある。その場合、各圏の相互作用を再度考え直す必要がある。

地球表層での物質循環において、最も重要なものは H_2O および炭素 (C) である。さらに酸素分子 (O_2) や窒素 (N), リン (P), 鉄 (Fe) など元素は、生物生産を律速するため、その循環を把握することも重要である。

まず、水循環について述べる (詳しくは 1.2 節参照)。地球表層の H_2O は固体、液体、気体の 3 相がそれぞれある程度存在すること、その多くが液体であることが、他の主要物質との大きな違いである。これは化学物質としての H_2O の性質による (1.2.1 小節参照)。地球表層の H_2O の 97.5% は海洋が占め、ほとんどが液体だが、極域には海水が存在する。陸域の H_2O の 70% は氷床の形で南極やグリーンランドに存在し、残りの大部分は地下水であり、湖水・河川水は 0.6% にすぎない。ただし、氷床量は 10 万年周期で大きく変動し、最終氷期には北米大陸やヨーロッパが分厚い氷に覆われていたことがわかっている。陸域の水は海洋に比べて高い位置にあるので、大局的には海へと流れる。陸域の H_2O の多くが氷であるのは、氷の粘性が高く流動が遅いためである。 H_2O は大気中には水蒸気として存在し、それが凝結して雲をつくり、降水をもたらす。大気中の H_2O は濃度で見れば微量だが、地球放射の吸収 (温室効果ガスとしての役割) や蒸発・凝縮による潜熱移動を通じて、放射過程と大気力学に大きな影響を与える。地球表層の水循環は、おもに日射によって駆動される。海洋では、おもに中緯度高圧帯で蒸発が降水に卓越し、赤道域と高緯度域に水が輸送される。陸域では、植生が直射日射を遮ることで土壤水分の蒸発を抑制し、蒸散作用を通じて水輸送をコントロールしている。

次に炭素循環を概観しよう。地表の炭素の大部分は、 CO_2 および炭酸塩 ($CaCO_3$, $MgCO_3$ など) として存在する。生物の体、遺骸、化石燃料などは有機物であり、続成作用を受けると H や O が先に失われ、C の相対的割合が高くなる。大気中の CO_2 は、火山ガスなどによってマントルから供給され、陸域や海洋とやり取りされる。陸域では、大気中の CO_2 は光合成によって陸上植物に固定され、呼吸で放出される CO_2 との差の分の C が有機炭素として蓄えられる。植物の遺骸や落葉・落枝・脱落根などがリターとして土壤に供給され、菌類や昆虫、土壤微生物などによって分解されていく。植物細胞壁および繊維を構成するセルロースの分解は比較的早いですが、木部を構成するリグニンの分解には時間がかかる。また、地表の土壤や石灰岩から C が地下水や河川水に溶出して海に運ばれる。

海洋と大気は溶解平衡を通じて CO_2 をやり取りしている (3.3 節)。他の条件が変わらずに海表面温度だけが上昇すると CO_2 は海に溶けにくくなり大気側に放出される。これに加えて海洋では、植物プランクトンの光合成によって C は固定され、それが動物プランクトンや魚類などの海生動物を支え、多段の食物連鎖を特徴とする海洋生態系を作っている。注意すべきことは、植物プランクトンの活動が、光や CO_2 量よりも、N や P, Fe といった元素を含む栄養塩によって律速されていることである (1.3 節, 3.3.6 小節参照)。生物遺骸 (有機炭素) と殻 (炭酸塩) は有光層で生成され、沈降し、深海で一部が再溶解する。海洋の表層と深層は 2000 年程度の時間スケールで大循環している (3.3 節)。この大循環により深層水が湧昇する海域では CO_2 は大気に放出される。なお、炭酸塩の生成には、河川や海底熱水から供給される Ca^{2+} イオンや Mg^{2+} イオン、炭酸 (溶存 CO_2 , CO_3^{2-} , HCO_3^-) の量も関与する (3.3 節, 3.4.2 小節)。

深海に堆積した炭酸塩はプレートの沈み込みに伴い、地下深部に引きずり込まれ、一部は分解

され、島弧の火山ガスとして再放出されるが、残りはマントル深部まで運ばれると考えられている。これは数億年の時間スケールで再び海洋中央海嶺の火山ガスとして地表に戻ってくる(3.4.2小節)。

大気の水循環は海水の塩分を支配し、海表面温度分布とともに海洋の大循環に影響を与える。また、氷床の形成や植生分布、陸の風化速度などにも影響する。炭素循環は生物活動(光合成、呼吸、分解)や風化速度、海水への溶解度の温度依存性を通じて、地表面気温に敏感に応答する。また、化石燃料の燃焼や土地利用変化を通じて、人間活動が炭素循環に大きな影響を与えつつある。それらの結果として大気CO₂分圧が決まる。一方、大気CO₂分圧と日射量、地表面のアルベド分布によって地表面気温が決まる。外力とみなすことができる太陽放射の変動によって地球・生命圏がどのように応答するのか、人間圏を含めた生命圏が気候にどのような影響を与えているのかを明らかにすることが、SELISの変動学の目的である。

序.2.8 本書の構成

本書の構成を述べる。第1章は、「SELISの動態把握」と題して、SELISのサブシステムを空間的に太陽-地球系、大気、海洋、陸域に分けて、現在の状態と数十年程度の時間スケールでの変動を紹介する。ただし、限られた紙面で全般的な解説は困難であるので、それぞれトピックスを絞って解説する。1.1節は、太陽から地球表層までを太陽-地球系としてシームレスに捉え、太陽からのエネルギー流入、磁気圏・電離圏の変動、下層大気との相互作用、太陽活動と気候の関係、人間活動による成層圏大気への影響、宇宙天気研究などについて概説する。1.2節は、大気中の水の役割と振る舞いを述べ、水循環の様態、季節および年々変動、および地球温暖化に伴う変化を、とくに降水を中心に解説する。続く2節は生命圏を中心とした解説となる。1.3節は、海水の循環を概説した後に、海洋の生物が地球表層の水・物質循環の中でどのような働きをしているかを述べ、さらに炭素循環の変動について説明する。1.4節は、陸域植生の基本的な特徴をまとめた後に、植生によって支配される陸面の放射・熱・水・炭素収支について概説し、植生の数値モデル化について述べ、リモートセンシングによる地域あるいは地球全体での植生の動態把握を説明する。

第2章は、「古環境記録から見たSELIS」と題して、過去の地球環境を読み解く方法論と、それによって得られた過去1000万年程度の環境変動の歴史を紹介する。2.1節では環境要素に変換可能な測定量であるプロキシのうち、海洋底の酸素同位体比、中国北部の黄土層の帯磁率、極域氷床中の酸素同位体比、屋久杉の樹木年輪中の炭素同位体(年輪年代学の解説を含む)に絞って、その特徴を述べ、得られた変動曲線と気候復元の例を紹介する。2.2節では、花粉化石を用いた陸域植生変遷の復元法について例をあげて概説し、とくに琵琶湖湖底堆積物およびバイカル湖湖底堆積物中の花粉化石から復元された数十万年から200万年にわたる植生変遷史を紹介する。2.3節では大陸での過去1000万年にわたる環境変動を連続的に記録したバイカル湖の湖底堆積物について述べ、掘削コアから得られた各種プロキシの変動を紹介し、環境変化に対する生物の応答について考察する。併せて、バイカル湖の固有種の割合が高い生態系の特徴と進化についても紹介する。

第3章は、「SELISのモデリング」として、モデル化の方法と、実際のモデリング例を紹介する。モデリングには大循環モデルとシンプルモデルという対極的で相補的なアプローチがある。3.1節では、両アプローチの基礎と問題点を力学系の概念とともに簡単に説明し、モデル気候学の将来展望を行う。3.2-3.4節はシンプルモデルを扱う。3.2節はシンプルモデルの1つであるエネルギーバランスモデルを用いた地球の気候状態の把握と解の分類について述べ、気候変動の要因を分析し、とくに地球の軌道要素と自転軸方向の変化をもたらす天体力学的効果を詳しく説明するとともに、力学系モデルを使った氷期・間氷期サイクルの解析について紹介する。3.3節では、気候変動に海洋が果たす役割を、物理化学の基礎から説き起こし、力学過程と物質循環の両面から分析する。3.4節では、生命が気候を能動的に調整するメカニズムを、アルベド調整、風化促進、大気組成改変、水循環バッファなどに分けてシンプルモデルにより考察し、さらに、人類活動が引き起こした地球環境問題に対するアプローチについても紹介する。3.5節と3.6節では大気海洋結合大循環モデルを用いた長期気候変動解析の例を紹介する。3.5節では、山岳上昇（とくにチベット高原の隆起）がモンスーンの成立など全地球的な気候システムに及ぼす影響を調べる数値実験を紹介する。3.6節では、氷期・間氷期サイクルに海洋循環の果たす役割を論ずるとともに、長期気候変動に対する人為的なCO₂排出の影響を考察する。

参考文献

- Abe, Y. (1993): Physical state of the very early Earth. *Lithos*, 30, 223-235.
- Caldeira, K., and Kasting, J. F. (1992): Susceptibility of the early Earth to irreversible glaciation caused by carbon dioxide clouds. *Nature*, 359, 226-228.
- Dawkins, R (1982): *The extended phenotype. The Gene as the unit of selection*, Freeman, 307pp. 日高敏隆ほか訳 (1987): 『延長された表現型——自然淘汰の単位としての遺伝子』, 紀伊国屋書店, 555pp.
- 金子邦彦 (2003): 『生命とは何か——複雑系生命論序説』, 東京大学出版会, 430pp.
- 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, 540pp.
- Lovelock, J. E. (1995): *The ages of Gaia*, 2nd ed., Oxford University Press, 255pp.
- Margulis, L., and Lovelock, J. E. (1974): Biological modulation of the Earth's atmosphere. *Icarus*, 21, 471-489.
- 松井孝典 (1998): 人間圏とは何か. 『岩波講座 地球惑星科学 14 社会地球科学』(住 明正ほか 編), 岩波書店, 1-12.
- 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, 岩波書店, 218pp.
- 箕浦幸治 (1998): 地球環境と生物の進化. 『岩波講座 地球惑星科学 13 地球進化論』(平 朝彦ほか 編), 岩波書店, 367-445.
- Watson, A. J., and Lovelock, J. E. (1983): Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. *Tellus*, 35B, 284-289.
- White, T. D., et al. (2003) Pleistocene *Homo sapiens* from Middle Awash, Ethiopia. *Nature*, 423, 742-747.

その他の参考図書

- 住 明正ほか編 (1996-1998): 『岩波講座 地球惑星科学』, 全14巻, 岩波書店.