



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	地球システムの教育内容構成における方向性
Author(s)	櫻田, 知子
Citation	教授学の探究, 16, 41-67
Issue Date	1999-03-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13610
Type	departmental bulletin paper
File Information	16_p41-67.pdf



地球システムの教育内容構成における方向性

櫻 田 知 子

(北海道大学大学院教育学研究科修士課程)

〈目 次〉

1. はじめに
2. システム論史
3. 地球システムの特　性
 - (1) システムの定義
 - (2) システムの構造
 - (3) 地球システムの特　性
 - (4) 地球システムを教える目的とそのメリット
4. テキストの検討
 - (1) BSCS
 - (2) EPA
5. 地球システムの教育内容の方向性

1. は　じ　め　に

われわれの日常的な時間スケールでは、ほとんど地球の変化を感じ取ることはできない。それゆえ直観的には、地球の変化は漸進的なものであると思われるかもしれない。しかし地質学的なものさしで見ると、地球はその長大な歴史の中で幾度も突発的な変化を繰り返してきたことがわかる。こうした突発的な変化は、地球に降りかかる幾多の擾乱の中から、新しい秩序を生み出そうとする地球の自己組織化の過程の現れである。この自己組織化の繰り返しが、地球の安定性を根本から支えているのである。時系列的に地球の変遷を追うだけでは、地球に生じるダイナミックかつドラスティックな変化の持つ重要性を見過ごしてしまいがちである。しかし、理科教育の中でこれまであまり注目されてこなかった地球の突発的な変化は、実は地球の安定性を理解する上で無視することのできないものなのである。

この小論では、こうした側面を教育内容として取り入れていく上で、システムという視点が非常に有効な道具となり得るという認識のもとに、地球システムの教育内容を構成する上での方向性を明らかにすることを目的とする。そのためにまず、本論におけるシステム概念がどのような位置づけにあるのかを明確にするため、システム理論の歴史について概観する(第2節)。その上で地球システムの特性を整理し、地球システムを教える目的とそのメリットについて示す(第3節)。また、教育内容を構成するにあたって参考となる2冊のテキストについてそれぞれ検討を行い(第4節)、最後に教育内容構成の枠組みと取り上げる題材について述べることにする(第5節)。

2. システム論史

システム理論は現代科学の方法論の1つである。後に改めて定義するが、システムとは要素の単純な総和とはならない要素の複合体をいう。それゆえ、システム概念は分析—総合の過程において、還元主義にもとづいた近代科学の加算的総合という方法——研究、観察の対象を部分に分解して詳しく調べ、それらを組み立て直すことで全体をよりよく理解できるとする——の持つ限界を乗り越えるものとして注目されている。

システム概念は歴史的にきわめて古く、「全体は部分より成る。全体は部分に依存して、部分は全体を前提として存在する」という古代ギリシアにおける認識にさかのぼる¹⁾。しかし、システムという概念の重要性が認識され、さまざまな分野において広く理論的枠組みが確立され始めたのは、1920年から1950年代の半ばのことである²⁾。

生物と非生物との相違を靈魂まがいのもので説明しようとした生氣論に対して、1925、26年にベルタランフィとホワイトヘッドは「有機体論」を唱え、その中で生命現象の特異性は物質的要素とは異質な特殊な要因にあるのではなく、全体性／オーガニゼーション、すなわちそれらの要素が相互作用することで固有の性質が生まれることにあることを示した。続いて1929、32年にキャノンの「ホメオスタシス」に関する研究が出され³⁾、生物体は環境の変化に対応して内的環境——たとえば体温、浸透圧、pHなど——を調整できる恒常性維持のメカニズムを持つことが明らかにされた。

これら生命の理論を土台として、1948年にはウィーナーの「サイバネティクス」、1949年にはシャノンおよびウィーバーの「情報理論」、1947年にはフォン・ノイマンおよびモルゲンシュターンの「ゲーム理論」などシステム理論に密接に関わり合う、あるいはその概念を積極的に取り入れた諸研究が次々として出された。そうした中でベルタランフィは、生命の固有性を表すオーガニゼーションの概念を生物という対象領域を超え、社会、歴史、精神などより広い範囲に適用できることを指摘し、すべてのシステムに普遍的な原理の定式化をめざした「一般システム理論」を提起した。

こうして1950年前後までにシステム科学の枠組みが形作られていったが、アコフはそれについて次のように述べている。

「この20年間に私たちは科学研究での一中心概念として「システム」が現れてくるのを目撃した。もちろんシステムというものはこれまでいく世紀も研究されてきたのだが、ある新しいものがつけ加えられたのだ。……システムを部分の寄せ集めでなしに、1つの全体として研究しようとの傾向は、現代科学での傾向、すなわちめいめいの現象をもはや狭い限った見方からばらばらに捉えるのでなしに、相互の働きあいに研究の目を向け、大自然をますます大きい断片として調べるという傾向と軌を一にしている。」⁴⁾

ベルタランフィにより「一般システム理論」として整理されたこの段階のシステム論の特徴は、システムの自己維持という点、つまりある秩序(=自己)がいかに安定し、そのまま存続するかという点にある。それゆえ、システムの状態は負のフィードバック⁵⁾によって調節されており、万一その安定性が崩れたとしても元の状態に復帰することができるという点が強調されている。

生命の理論に端を発したシステム理論は、1960、70年代以降、急速に新しい展開を見せ始めた。それはプリゴジンやハーケンらによる物理化学分野の研究を土台として、システムの自己

組織化という側面が理論化されたことによる。ベルタランフィのシステム理論ではすでに出来上がった秩序の「維持」を中核としていたのに対し、自己組織化の理論では秩序が「生成」されていくプロセスに注目する。システムの持つフィードバックには正/負2つの働きがあるが、自己組織化において重要となるのは正のフィードバックである。システムの安定性が崩れ負のフィードバックだけでは修復しきれなくなると、システムは正のフィードバックを作動させて積極的にシステムを不安定な状態に追い込み、そこから新しい秩序を作り上げるのである。このようにシステムが自律的に秩序を作り出していく過程をシステムの自己組織化という。

こうした自己組織化の理論は、プリゴジンの「散逸構造」の研究⁶⁾やハーケンによる「シナジェティクス」の理論⁷⁾により基礎的な機構が与えられた。またアイゲンは生命化学の分野において、「ハイパーサイクル」という生体高分子の自己組織化の理論を提出している⁸⁾。地球システムを教える際にはこのシステムの自己組織化という概念を基盤とするが、その根拠については次で詳しく述べることにする。

注

- 1) 平凡社『世界大百科事典』(1988) p. 275 (市川惇信)
- 2) 1920年から1950年代半ばころまでのシステム論史は、おもにベルタランフィ(長野敬他訳)『一般システム理論』(みすず書房, 1973) 第1章による。
- 3) 参考文献2) p. 9に「有機体論の先駆者はベルナールといわれているが、彼の仕事はフランス以外ではほとんど知られなかった。」という記述がある。
- 4) 参考文献2) p. 7
- 5) フィードバックとは、システムからの出力がそのシステムへの入力コントロールする過程をいう。大まかにいうと、入出力のバランスが崩れシステムに変化が生じると、正のフィードバックは変化を促進してシステムを不安定にし、負のフィードバックはそれを抑制してシステムの暴走を防ぎ、システムを安定にする方向に働く。
- 6) プリゴジンは、系内の過剰なエネルギーを熱として効率よく散逸させるように自己組織化される秩序的な構造のことを、その秩序が作り出される熱力学的メカニズムにちなんで「散逸構造/dissipative structure」と呼んだ。詳しくは、ニコリス・プリゴジヌ(小島陽之助 他訳)『散逸構造』(岩波書店, 1980)を参照されたい。
- 7) ハーケンのいう「シナジェティクス」とは、系内の個々の要素が相互作用によって秩序を形成すると同時に、出来上がった秩序という司令(order)によって動かされる(隷従する; slave)という司令・隷従関係にもとづく秩序形成のメカニズムをいう。詳しくは、ハーケン(牧島邦夫 他訳)『協同現象の数理』(東海大学出版会, 1980)を参照されたい。
- 8) この理論の詳細については、アイゲン・シュスター(廣野喜幸 訳)「ハイパーサイクル」『現代思想』(1992, 8月号)を参照されたい。

3. 地球システムの特性

(1) システムの定義

システムを最も簡単に定義すると、「相互作用する要素の複合体」といえる。つまり、要素間の、また全体との間の相互作用の有無によって、システムは単なる要素の集合とは区別される。

たとえば、レンガの山のようないわゆる「山」として考えられるものは、単なる要素の集合とみなせるものの典型である。この場合、レンガ1つ1つの重さを合計して山全体の重さを知

ることができるし、全体の重さを個数で割ってやれば1つ1つのレンガのだいたいの重さを知ることができる。このように単なる要素の集合においては、集合全体の特性はバラバラの要素の特性を足し合わせることで導き出すことができる。

それに対して、バラバラの要素が集合することで個々の要素には見られなかったまったく新しい特性を生み出すことがある。これを「創発」というが、この創発性こそがシステムの本質である。システムがどの要素、どの部分も持ち合わせない創発的な性質を発揮する源泉は、各要素が互いに、また全体との間で相互作用していることにある。たとえば、DNAに書き込まれた遺伝情報は生物体を構成するすべての細胞において全く同じである。しかし、材料としての細胞は全てがまったく同じ遺伝情報（あるいは特性と言い換えてもよい）を持っていても、それらの細胞が集合すると単なる細胞の山、それも同じ特性を備えたものがいくつもできるわけではなく、さまざまな器官や組織などの多様な機能を持つようになるのである。

これは個々の細胞が集合して個体をつくりあげるときには、どの細胞においても一様な遺伝情報が発現されるわけではなく、他の細胞との相互作用によって発現される遺伝情報がふり分けられることによる。つまり、各細胞は他の細胞との相互作用によって発現する遺伝情報を決定し、自身がどの器官、組織として機能するかというアイデンティティーを獲得しているのである。こうした創発という現象は、還元主義にもとづく近代科学の加算的な総合という方法の限界、つまり、要素の特性を外挿してもつかむことのできない現象が存在するというを示している。

システムはそれを構成する各要素が相互作用することで、個々バラバラにではなく、上の例の場合はあるいは消化器官として、あるいは筋肉組織としていうように、全体として機能することを特徴としている。ハーケンこれを「協同」という言葉で表現している⁹⁾が、これはシステムの特性をうまく言い表しており、それゆえシステムを定義する上ではこの言葉を用いるのが妥当であると思われる。

ところで、システムにおいては要素には見られなかった創発的な性質が生じることから、各要素のレベルと複合体全体のレベルとは明確に区別される。つまり、要素のレベルと複合体のレベルではそれが持つ性質も機能もまったく異なっており、それぞれが独自の法則にしたがっているのである。この独自の性質、独自の法則をもった各々のレベルを「階層」と呼ぶと、システムは階層構造を持つということができる。

ここで1つ注意しておかねばならないが、ここでいう「要素」とはシステムを構成する最小単位ではあるが、それは必ずしも物質的な意味での最小単位であるわけではない。多くの場合、システムを構成する各要素はおのおのがまた1つのシステムとして存在しており、それゆえシステムが階層的に積み重なった入れ子構造を成している。つまり、下位のレベル（階層）のシステムが相互作用によって結合することで、より上位のシステムを構成しているのである。

したがって、何をシステムとし、何を要素とするかは自明なことではなく、それゆえシステムの構成要素を「サブシステム」と呼んで、システムの階層性を明示する場合がある。地球システムを教える際にも、要素にあたるものがシステムとしての特性を備えていることを強調する場合にはサブシステムという呼び方を用いることにする。

最後に、何を要素と見てシステムを規定するかは、システムの「どのような性質」を明らかにしたいのかによって変わってくる。たとえば、火山活動は日々の天気の子測には影響しないが、百万年スケールでの気候変動を調べる際には重要な要素となってくる。また、システムの

構成要素は複数の性質を所持しているが、どのような視点でシステムを考えるかによって活かされる性質は変わってくる。たとえば、大気と海洋は「流体」という意味では同じ1つのサブシステムとして取り扱えるが、「気体」と「液体」という差異に着目すれば性質が異なるサブシステムとなる。それらを同じサブシステムと考えるか、異なるサブシステムと考えるか、つまりサブシステムのどのような性質に着目するかということは、システムの「いかなる性質」を明らかにしたいのかということによる。こうしたことから、システムとは何らかの「性質」にもとづいて規定されるものだということができる。

したがって、以上見てきたことから、システムの定義としては「相互作用する要素の複合体」というだけでは不十分で、「ある性質にもとづいて規定される、協同する要素の複合体」とするのが妥当であるといえる。そして「創発性」とそれにもとづく「階層性」とをその基本原理として整理することができる。

注

1) ハーケン (牧島邦夫 他訳)『協同現象の数理』(東海大学出版会, 1980)

(2) システムの構造

地球を1つのシステムと捉えた場合、ごく一般的にはそのサブシステムとして考えられているのは、磁気圏(宇宙空間との境界領域をなす)、固体圏(地殻、マントル、コアからなる)、流体圏(大気、海洋からなる)、生物圏、人間圏(人間活動によって規定される)である。ただし、サブシステムとして何を取り上げるかは扱う現象によって異なってくるので、その都度明らかにしていく必要がある。

それらのサブシステム間の相互作用、あるいは地球システムと外界との相互作用を考える上では、システム科学におけるボックス・モデルが大変役に立つ。一般に、システムはその内部機構をブラック・ボックスとし、外部との相互作用を入力/出力として矢印で示したボックス・モデルを用いて表される(図3.2.1)が、これはシステムを視覚的に理解できるという特徴をもつ。

地球システムの場合、入出力に相当するのはシステムへ流入・流出する物質やエネルギーである。システム内の物質・エネルギーの存在量を蓄積とすると、諸量の関係は物質やエネルギーの保存則にもとづき、次のように決められる。

入力-出力=蓄積

地球システムにおいては、システムへ流入、流出する物質・エネルギーの量は時間とともに変化するため、これを一定時間当たりの量で表すことが必要になる。この単位時間当たりの流入量、流出量をそれぞれ F_{in} 、 F_{out} 、蓄積量を N とすると、システムの状態(蓄積量の時間変化)は次のように表される。



図3.2.1 システムのボックス・モデル

$$dN/dt = F_{in} - F_{out}$$

とくに $F_{in} = F_{out}$ の場合は $dN/dt = 0$ となり、 N は時間的に変化しない一定量となる。つまり、システムには物質・エネルギーの流入、流出があり、システム内では絶えず新しい物質・エネルギーへの入れ替えが生じているが、総量として見ると時間的には不変であるということになる。このような物質やエネルギーの出入りがあっても（開放系）、入出力がつりあうことで達成されるシステムの平衡状態を動的平衡状態（dynamic equilibrium state）あるいは定常状態（steady state）と呼ぶ。現実の地球システムでは入出力が一致した完全な動的平衡状態が実現されているわけではないが、このようなモデルは地球システムの安定性を考える際の近似的なモデルとして役に立ち得る。

ところで、多くの場合システムにはいくつかのフィードバック機能が働いている。フィードバックとはシステムからの出力がそのシステムへの入力をコントロールする過程をいい、正/負の2つの働きがある。フィードバックの概念は図3.2.2のようなモデルで表すことができる。

正のフィードバックはシステムを不安定に向かわせる働きをする。たとえばこの典型としては、化学反応における自己触媒的効果がある。化学反応の中には発熱を伴うものがあるが、ここでは物質Aが酸化して物質Bと反応熱が生じる過程を見してみる（図3.2.3）。システムに物質Aが連続的に供給されているとする。酸化反応が進むと、熱の発生によって温度が上昇し、それによって反応速度が増大する。反応速度の増大によって酸化反応が促進され、さらに温度が上昇する。この過程が繰り返されるとシステムは暴走し、爆発にいたると考えられる。これは反応熱による正のフィードバックの例である。

一方、負のフィードバックはシステムの暴走を防ぎ、システムを安定に向かわせる働きをする。たとえばこの例としては、サーモスタットの働きがある（図3.2.4）。サーモスタットは設

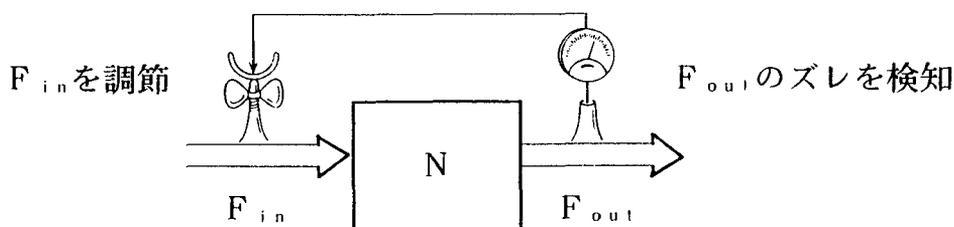


図3.2.2 フィードバック概念のモデル

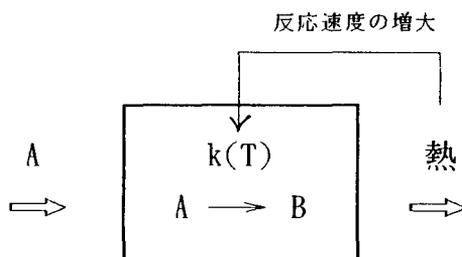


図3.2.3 化学反応における正のフィードバック。 $k(T)$ は反応速度定数(T ; 温度)。

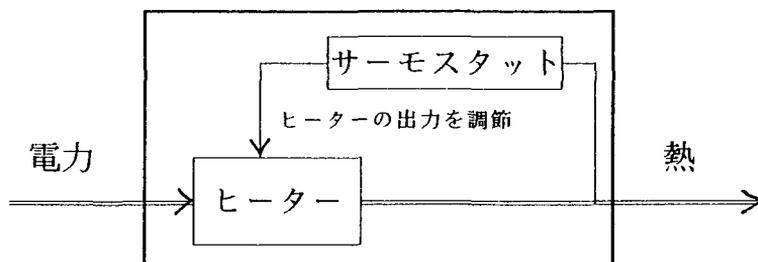


図3.2.4 サーマスタットによる負のフィードバック

定温度と室温との差に応じて、熱生産するヒーターの出力を調節するのである。これは温度の差を感知するサーモスタットによる負のフィードバックの例である。

地球システムの場合を考えてみると、正のフィードバックの例としては、たとえばアルベドがあげられる。白いTシャツが太陽の光を反射するのと同様に、雲や地表の白っぽい部分（雪や氷、砂漠など）は太陽からの光のエネルギーを反射する働きをしている。この地球による太陽エネルギーの反射率をプラネタリーアルベド（惑星反射率）というが、ここでは雪氷によるアイスアルベド・フィードバックの例を考えてみる。まず、何らかの原因で地表の温度が低下したとする。そうすると、降雪量や氷床の面積が増え、それによって地表のアルベドが大きくなる。その結果、太陽が放出するエネルギー量は変わらなくても、地表に到達する太陽エネルギーの量が小さくなり、地表の温度はますます低下する。この過程が繰り返されると地表の温度低下はさらに加速され、地球全体を寒冷化へと向かわせることになる。

一方、負のフィードバックの例としては、植物の光合成活動と温暖化の抑制との関連性があげられる。まず、何らかの原因によって地表の温度が上昇したとする。温度が上がると植物の光合成活動が活発になるので、大気中の二酸化炭素はどんどん光合成に利用されることで大気中の濃度を減少させる。主要な温室効果ガスである二酸化炭素の大気中濃度が減少することで大気の温室効果が低下し、温暖化が抑制されるのである。

ただし、実際には地表温度はアイスアルベドや植物の光合成活動との関係だけで決まるわけではなく、海陸の分布や岩石の風化率などさまざまな要因によって左右されるため、正のフィードバックにしる負のフィードバックにしる、上のように単純な図式として捉えられるわけではないことを断っておく。

(3) 地球システムの特性

前述したように、正のフィードバックはシステムを不安定にし、負のフィードバックはシステムを安定化する働きをする。それゆえ直観的には、システムの安定性とはシステムの定常性が負のフィードバックによって維持されている状態として理解されるかもしれない。

しかし、ドラスティックな変化の歴史が示すように、地球システムにおいては特定の定常状態が保持され続けると保証することはできない。それゆえ「定常性維持」という視点だけでは、地球システムの安定性を正しく把握することはできない。地球システムの安定性は、「自己組織化」をその本質としているのである。逆説的に見えるが、自己組織化においてはシステムを不安定にする正のフィードバックの働きによって、自律的に新しい安定状態が生み出される。地球システムはその長い歴史の中で、こうした自己組織化を繰り返すことで外部環境と調和して

きたのである。ここではこうした地球システムの特徴について整理する。

今、地球システムがシステムへの入出力がつりあった定常状態にあると仮定する。このとき、地球システムの状態をある物理量 X を指標としてグラフ化できるとする。 $X=X_0$ のときシステムへの入出力が等しいとすると、システムの状態はそのまわりを微妙に揺れ動く曲線として表すことができる(図 3.3.1)。この入出力の一致した状態からのズレをシステムの「ゆらぎ」というが、システムへの入出力のバランスが崩れ、システムのゆらぎが大きくなったとき、負のフィードバックによってそのゆらぎを吸収し制御できれば、地球システムはそのままその定常状態を維持することができる。この状況はたとえば次のようなイメージとして捉えられる(図 3.3.2)。ある物理量 X 、 Y によってシステム状態を表せると仮定し、定常状態を1点で表すとする。このとき、図 3.3.2 において平面上のどこに初期条件をとばしてやっても、システムは図中の点で表される定常状態に戻ってくる。これがシステムの定常性維持という側面である。

しかし、ゆらぎの吸収という形で安定性を維持できなくなると——つまり、ゆらぎが安定性の限界を越えると——、地球システムは逆に正のフィードバックによってそのゆらぎを増幅して積極的にシステムを不安定にし、そこから、システムの体制そのものを作り替えることで元の定常状態とは質的に異なる新しい定常状態を獲得するのである。このようにシステムが自律

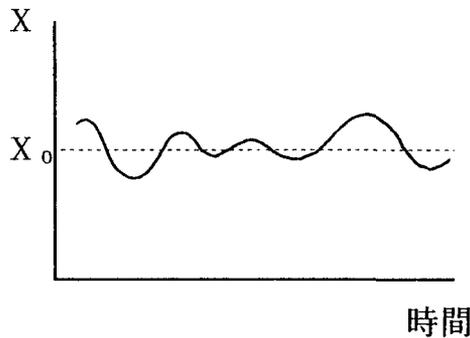


図 3.3.1 ある物理量 X を指標として表したシステムの定常状態

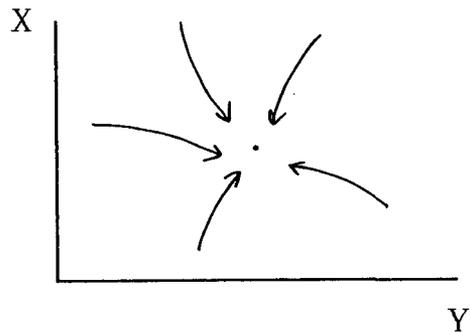


図 3.3.2 システムの定常性維持という側面のイメージ図

的に新しい体制を作り上げることをシステムの自己組織化というが、それに伴ってシステムには突発的な変化が生じることになる。この場合、ゆらぎはもはや入出力の一致した状態からの単なるズレではなく、システムの体制そのものを変えてしまう強制力といってよい。このような、そこを越えるとシステムが新しい体制を組織化するという安定性の限界を「しきい値」という。地球システムはその長大な歴史の中で、幾度もこうした自己組織化を繰り返してきたのである。

上の状況はたとえば次のようなイメージとして捉えることができる(図 3.3.3)。図 3.3.3 において、図中の 2 点が質的に異なる定常状態(安定定常状態)に対応し、点線を境にその吸引域が分割されているとする。吸引域とは、システムにどんな初期条件を与えても最終的にはもとの点にもどってくる(吸引される)ような初期条件の集合をいう。もしシステムが点 1 の安定定常状態にあるときに点線を越えるようにシステムを乱してやると、システムは点 1 にはもどってこずに、点 2 に吸引されてしまう。点線は不安定な定常状態で、システムがこの状態にある場合には少しの乱れですぐにどちらかの点に吸引されてしまう。つまり、この不安定な定常状態が 2 つの安定定常状態のしきい値を決めるのである。

ただし、このイメージ図だけではシステムが 2 つの安定定常状態の間を行ったり来たりすることができるという誤解を招く恐れがあるため、地球システムにおける質的に異なる新しい定常状態への遷移という点について、少し説明を加える必要がある。以下では気候を例にして考えることにする。

気候とは日々の気象現象の平均的な状態をいうので、外力に対する気候システムの応答を考えるとときには定常性を仮定することができる。図 3.3.4 はこのような観点で組み立てた地球システムの気候モデルで、太陽定数²⁾が最初減少し、次に増大した場合、「履歴」現象が起こる様子を示している。システムには氷床のある状態(全球凍結)/部分的に氷床のある状態/氷床のない状態という 3 つの安定な定常状態と、それらの間の 2 つの不安定な定常状態という複数の定常状態が共存しており、同じ外部パラメータ(太陽定数)に対して異なる定常状態をとりうる³⁾

現在の地球システムは図中の c 点付近に相当する(太陽定数が 1 で、部分的に氷床がある状態)と考えられる。ここから太陽定数が減少すると、システムは真ん中の分枝に属する定常状態を取りながら d 点までいったあと、突然そこから下側の d' の状態へと落ち込んでしまう。逆

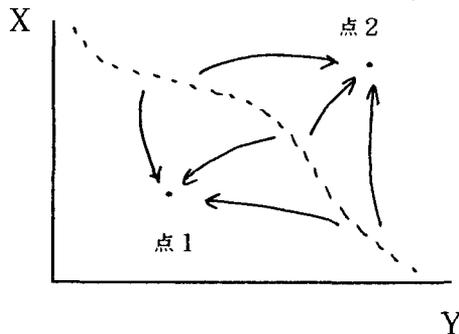


図 3.3.3 システムの自己組織化という側面のイメージ図

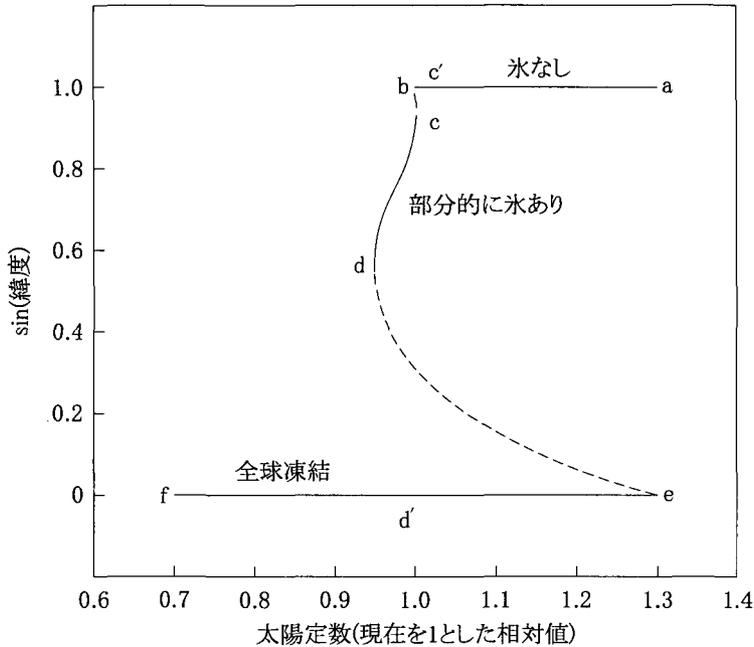


図 3.3.4 地表面のエネルギー収支と南北熱輸送だけを考えたエネルギー収支気候モデル。縦軸は雪氷の張り出している緯度の正弦。実線は安定な定常状態，破線は不安定な定常状態を表わす。田近英一「大気海洋系の進化」p. 318（『地球進化論』岩波書店，1998）より

に d' の状態から太陽定数が増大しても、氷のアルベドが高いため、 e 点まで太陽定数が増えなければ上の分枝に属する定常状態 (a 点) へ遷移することはできない。つまりどの状態が実現するかということは、システムのそれまでの履歴によって決定されているのである。

こうした履歴にしたがう新しい定常状態への突発的な遷移が、外部環境に対する地球システムの安定性を根本から支えているのである。したがって、達成された定常状態がいかに安定し、そのまま存続するかを考えるには定常性維持という視点が必要だが、地球システムそのものの安定性を理解するためにはそれだけではなく、新しい定常状態が生成されていく過程として自己組織化、およびそれに伴うシステムの突発的な変化に注目する必要がある。

ところで、ヤンツは自己組織化の基本条件として①開放性／②非平衡／③自己触媒の3点をあげている。①の開放性とは、システムが周囲の環境とエネルギーや物質を交換することであり、4.(2)で見たように地球システムは外部との間で物質やエネルギーをやりとりしている。

次に②の非平衡という点についてだが、先に入出力のある系、すなわち開放系における平衡状態を動的平衡状態（定常状態）といい、地球システムの安定性は入出力のつりあったボックス・モデルとして近似的に表すことができると述べた。ここで「近似的に」とことわったのは、閉鎖系（あるいは孤立系）か開放系かは別としても、現実の地球システムは平衡状態ではなく、根本的には非平衡にあるからである。ヤンツの言葉を借りれば、平衡状態とは「停滞ないしは死」を意味し、ここにはおよそ変化というものが存在しない。それゆえ、完全な動的平衡であればシステムを記述する上で時間は変数としては無視することができる。しかしながら、地球

システムは（動的）平衡においては無視することのできる時間の流れと決定的に関わってきたのであり、そのことはダイナミック、かつドラスティックな長い変化の歴史が示すところである。

最後に③の自己触媒という点だが、これはシステム内部で発生するゆらぎの自己増幅をいう。つまり、正のフィードバックを通してゆらぎがシステム内部に蓄積していくことをいう。ある体制から別の体制への突発的な遷移という点では自己組織化の理論と共通するところのある理論として、ルネ・トムの「カタストロフィ理論」⁵⁾がある。この理論の詳細には立ち入らないが、両者の本質的な違いについては指摘しておく必要がある。つまり、カタストロフィ理論においてはシステムは外部からの作用によって新しい体制への遷移が引き起こされるのに対して、自己組織化においてはシステム自身がゆらぎを増幅させるという内的な強制力によって、システムを新しい体制へと遷移させるのである。単純化していえば、システムを遷移させる強制力は内部で増幅されたゆらぎなのか、それとも外部から与えられたものなのかという点が両者の決定的な違いとなっているのである。

地球システムにおける自己触媒の例としては、たとえば先に取り上げたアイスアルベド・フィードバックの例がある。ヤンツは自己組織化の条件としてとりわけこの自己触媒という点を重視しているが、地球システムに生起する諸現象は多様な時間・空間スケールで展開されており、それゆえ何が自己触媒として作用しているかは、どんな現象を／どんな枠組みで／何を要素と見て取り上げるのかによってその都度明らかにしていかなければならない。

注

- 1) プリゴジン・スタンジェール（伏見康治 他訳）『混沌からの秩序』（みすず書房、1992）p. 244
プリゴジンは、ゆらぎの増幅によってシステムが形成する新しい秩序のことを「ゆらぎを通しての秩序」と呼ぶ。
- 2) 太陽定数とは、太陽から1天文単位（地球と太陽との平均距離）だけ離れたところで、太陽光線に垂直な面を考え、その面の単位面積当たりに降り注ぐ太陽エネルギーをいう。その値は $1370 \text{ W/m}^2 (\text{J/m}^2 \cdot \text{s})$
- 3) 線形であれば外力で強制される定常状態は1つであるので、複数の定常状態の共存は非線形システムに特有の現象である。このことは、外力が同じでもシステムの状態が自律的にいろいろ変化する可能性を示している。
- 4) ヤンツ『自己組織化する宇宙』（工作舎、1986）p. 105
- 5) この理論の詳細については、トム（彌永昌吉・宇敷重広 訳）『構造安定性と形態形成』（岩波書店、1980）を参照されたい。

(4) 地球システムを教える目的とそのメリット

地球システムを教えるといった場合、大きくは、地球をモチーフとしてシステムの基本概念・基本原理を教えるという立場と、システムとしての認識のもとに地球の挙動を教えるという2つの立場が考えられる。このどちらの立場を取るかにより構成する教育内容の性格は大きく変わってくるが、本論で方向性を示す教育内容は後者の立場にもとづいて構成するものである。

理科教育の中では、物理・化学・生物・地学の個々の分野においてそれぞれが異なる地球像を描き出している。だからといってそれらは決して間違った知識にもとづいて描かれているわけではなく、同じ1つの地球が見せるさまざまな側面をクローズ・アップしたものにすぎない。しかしだからこそ、そこで得られる地球の姿はいびつなのである。

地球システムという認識は、これに対してより統一的な地球像を描き出す上で大きな力を発揮する。個々の分野の視点に縛られた歪んだ地球像では、そこで生起する人為的な諸分野の枠組みを超えた複雑な諸現象を正しく把握することなど不可能である。それらを1つのシステムの挙動として生徒に科学的に捉えさせることが、地球システムを教える大きな目的であり、またそのメリットでもある。

地球システムを教えることにはもう1つ大きな目的がある。それは地球に生じる突発的な変化の重要性を生徒に認識させることである。前述したように、長い歴史の中で繰り返されてきた地球の突発的な変化は、トータル・システムとしての地球の自己組織化の過程として理解することができる。その変化の過程において地球システムがどのような状態をとるかは履歴、すなわちそれまでの歴史に左右されるのであり、こうした不可逆な自己組織化のプロセスが地球システムの安定性を根本から支えているのである。漸進的な変化の過程としてしか地球の歴史を捉えなければ、このような地球の安定性の本質を見過ごしてしまうことになるだろう。

今日、人間活動による地球環境への擾乱が大きな問題となっているが、地球システムの変動は人間活動を含めたさまざまなサブシステムの協同によって生み出されているのであり、原因(たとえば人間活動)を取り除けば元に戻るというものではない。システムに生じる履歴現象の存在はそのことを裏付けている。

それゆえ、こうした問題に対する建設的な解決策を探るには、そのバックグラウンドとして、地球システムそのものの特性として過去の地球変動を正しく認識することが不可欠である。地球をシステムと捉え、その自己組織化の過程として歴史の中で繰り返されてきた地球の突発的な変化に着目することにより、こうした問題と向き合うための科学的な素地を生徒に与えることが可能となる。ここに地球システムを教えるもう1つの大きなメリットがある。次では、これらのメリットを活かしながら実際に教育内容を構成していく上で参考となるテキストについてそれぞれ検討を行う。

4. テキストの検討

地球システムの教育内容を構成するにあたって、BSCS (Biological Sciences Curriculum Studies) の“Systems and Change”と、EPA (U. S. Environmental Protection Agency) の“Global Climates — Past, Present, and Future”という2冊のテキストについて検討しておく。地球システムを教える上では不十分な点もあるが、内容構成において大いに参考になるものであることから、この2冊のテキストをとくに取り上げる。

(1) BSCS “Systems and Change”

BSCS の“Systems and Change”は、アメリカのミドルスクール(日本では小学校高学年から中学校に相当)における科学教育プログラムの1つとして構成された“Middle School Science & Technology”というプログラムのために作成されたテキストである。このプログラムはA, B, Cの3つのレベル(あるいは学年)から構成されており、各々のテキストはそれぞれ4つのユニットに分けられている。それら4つのユニットは幅広いトピックを集めたものではなく、統一的なテーマにもとづいて配列されている。具体的には、レベルAでは「変化のパターン/Patterns of Change」、レベルBでは「多様性と限界/Diversity and Limits」、そしてここで取り上げるレベルCでは「システムと変化/Systems and Change」をテーマとして掲げ

ている。各々のレベルのテキストの概要とレベルCのテキストにおける到達目標については、それぞれ表4.1.1, 4.1.2に簡単に示しておく。

レベルCの「システムと変化/Systems and Change」は、ユニット1：安定したシステム¹⁾/Systems in Balance, ユニット2：変化/Evolution, ユニット3：エネルギー・システム/Energy Systems, そしてユニット4：人口（あるいは個体総数）システム/Population Systemsという構成になっている。このうちユニット1, 2では、システムを考える上での基本となるシステムの安定性とその変化について取り上げているので、次ではとくにこれらのユニット（ユニット1；第1～5章, ユニット2；第6～9章）に注目して議論を行う。

ユニット1：安定したシステム

第1章では「システムとは何か」「システムはどのようにして安定性を維持しているのか」を考察する。さらに、システムが安定した状態とはどのようなグラフとして表されるかを学習する。

表 4.1.1 各レベルのテキストの概要
Scope and Sequence

Level A: Diversity and Limits				
Unit	1	2	3	4
Curriculum Emphasis	Personal dimensions of science and technology	The nature of scientific explanations	Technological problem solving	Science and technology in society
Focus Question	How does my world change?	How do we explain patterns of change on the earth?	How do we adjust to patterns of change?	How can we change patterns?
Level B: Diversity and Limits				
Unit	1	2	3	4
Curriculum Emphasis	Personal dimensions of science and technology	Technological problem solving	The nature of scientific explanations	Science and technology in society
Focus Question	What is normal?	How does technology account for my limits?	Why are things different?	Why are we different?
Level C: Systems and Change				
Unit	1	2	3	4
Sub-theme	Systems in Balance	Change through Time	Energy in Systems	Populations
Curriculum Emphasis	Personal dimensions of science and technology	The nature of scientific explanations	Technological problem solving	Science and technology in society
Focus Question	How much can things change and still stay the same?	How do things change through time?	How can we improve our use of energy?	What are the limits to growth?

表 4.1.2 レベルCのテキストにおける到達目標

Level C—Systems and Change Summary of Learning Outcomes			
Unit1	Unit2	Unit3	Unit4
<p>Systems in Balance</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Understanding dynamic balance in systems ● Understanding how human body systems maintain balance ● Learning to graph ● Recognizing examples of systems that are out of balance ● Studying how AIDS affects the balance of the immune system 	<p>Evolution</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Recognizing change in systems ● Understanding evolution of scientific explanations ● Understanding natural selection ● Differentiating between evidence and inference ● Developing if-then statements 	<p>Energy Systems</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Recognizing when energy is present in a system ● identifying types of energy use and energy resources ● Understanding technological systems for delivering energy ● Recognizing the input and output of various technological systems ● Developing strategies to reduce personal energy use 	<p>Population Systems</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Identifying dynamics of human and animal populations ● Understanding exponential growth and limiting factors ● Conducting a research project ● Participating in a debate about human Population growth

システムの定義としては、一般的に受けいれられているものとして「協同して仕事をする要素の集合」という定義が示されている（教師用書；p. 96）。生徒用書の巻末にある用語集では以下のように説明されている。

“One definition of a system is a collection of things that work together to do something. Another definition of a system is a group of objects that a person has isolated in order to study. In either definition, the choice of what to include in the system is up to the person trying to understand what is happening.”（生徒用書；p. 454）

「システムとは協同して仕事をする要素の集合であるというのが1つの定義である。また別の定義としては、研究の目的に応じて取り出された要素の集合をシステムという。いずれにしても、何をシステムに含めるべきかを決めるのは、何が起きているかを理解しようとする観察者しだいである。」

本論の3.(1)で述べたシステムの定義——ある性質にもとづいて規定される、協同する要素の複合体——はこの定義と矛盾しておらず、それゆえ、上の定義は地球システムを教える上でも妥当であるといえる。

またこの章では、システムの安定性維持のメカニズムとして（負の）フィードバック²⁾ (feedback mechanisms and restoring mechanisms) を取り上げているが、この概念については生徒用書の p. 13 で以下のように説明されている。

“When the system moves away from the balance point, a feedback mechanisms detects this and then triggers one or more restoring mechanisms. These restoring mechanisms return the system to the balance point.”（生徒用書；p. 13）

「システムがつりあいの状態からズレると、フィードバック機構はそれを探知し、1つあるいはそれ以上の復帰機構を作動させる。これらの復帰機構が作動することで、システム

はつりあいの状態へと引き戻される。」

生徒にフィードバックの概念を理解させるために、たとえば次のような実験を行う（生徒用書；p. 8-10）。ビーカーを半分ほど水で満たし、3分間その水温を 15°C に保つことにする。何も手を加えなければ水温はやがては室温（20-23°C）と等しくなるので、氷を加えたり水をかきまぜるなどの操作によって水温を 15°C に保たせる。10 秒毎に水温を測定し、結果をグラフに表す。この場合、フィードバックとして働くのは実験者である生徒自身である。水温の測定という行為は温度が 15°C からズレたことを探知する働き（feedback mechanisms の働き）をしており、それをうけて行われる氷や湯を加えるといった操作は、水温を 15°C に戻そうとする働き（restoring mechanisms の働き）をしている。つまり、この実験を通して、生徒はフィードバックの働きを実感として理解することができるのである。

またこのとき、水温を 15°C に保とうとして操作を加えたことにより、グラフは 15°C のまわりを上下に揺れ動く（fluctuate）曲線として表される（図 4.1.1）。つまり、15°C より水温が上昇すると氷を加えて温度を下げ、下がりすぎると湯を加えて温度を上げてやるといった操作を繰り返すことにより、15°C のまわりを不規則に行ったり来たりする波形の曲線が描き出されることになるのである。生徒用書の p. 12 では、このようなグラフとして表されるシステム状態をシステムの安定状態（定常状態のこと。原文では“systems in dynamic balance”と表現されている。この概念については次の第 2 章で詳しく学習する）というまとめられている。この実験はフィードバックの働きを実感として理解できるという点と、グラフ化という作業によってシステムの安定した状態を視覚的に理解できるという点で、システムの安定性を取り上げる際の教材として優れているといえる。

また教師用書では、自律的に安定性を維持するシステムの例として bimetallic strip（二種の異なる金属を背中合わせにした棒。バーナーで熱すると、両者の膨張率の違いから片側に屈曲する）の性質を利用してサーモスタットを作成する例（図 4.1.2）があげられている（教師用書；p. 19-23）。bimetallic strip の性質については生徒用書の p. 17, 18 で説明されており、（図 4.1.

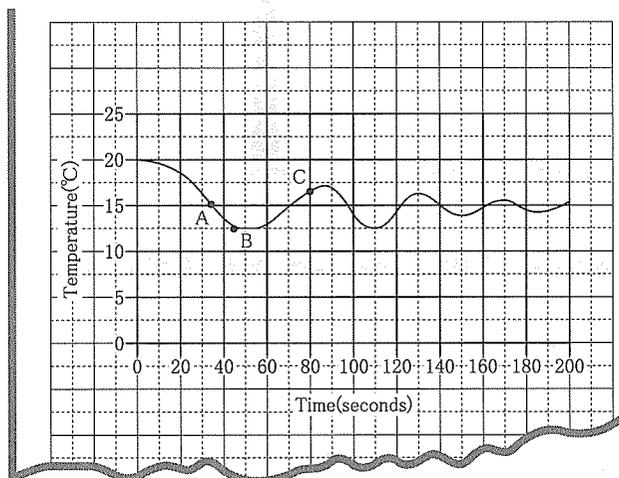


図 4.1.1 15°C のまわりを揺れ動くグラフ

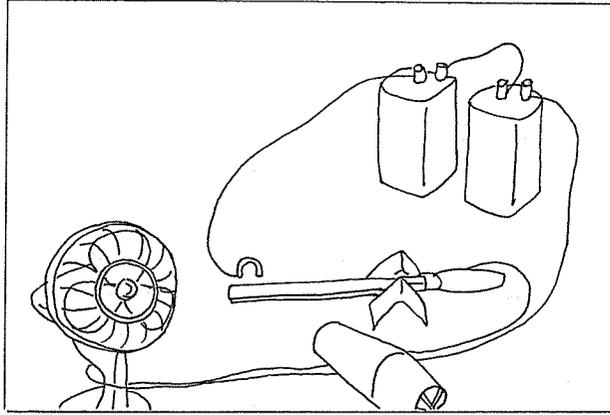


図 4.1.2 bimetallic stripの性質を利用したサーモスタットの例。手前のドライヤーによって熱せられると bimetallic stripが屈曲し、扇風機のスイッチが入るしくみ

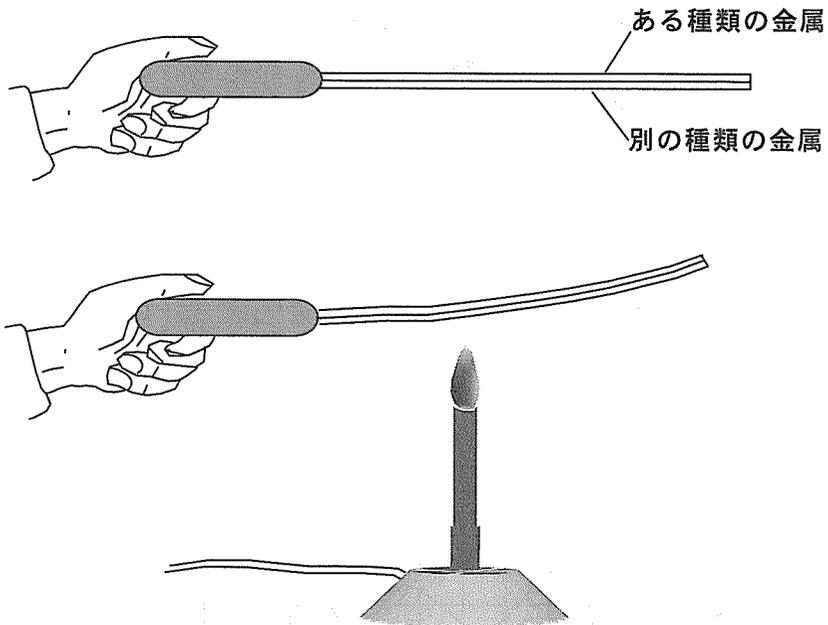


図 4.1.3 bimetallic stripの性質。熱すると片側に屈曲する

3), この例においてはそれが (負の) フィードバックとして働いていることが理解できるようになっている。

第2章では、第1章でみたシステムの安定性についてより詳しく学習する。そのために、たとえば次のような実験を行う (図 4.1.4) (生徒用書; p. 28-36)。プラスチック製の大きな水差しとビーカー、バケツを用意し、プラスチック・チューブを使って図 4.1.4 のように水差しからビーカーへの水の流れと、ビーカーからバケツへの水の流れを作る。各々のチューブの中ほ

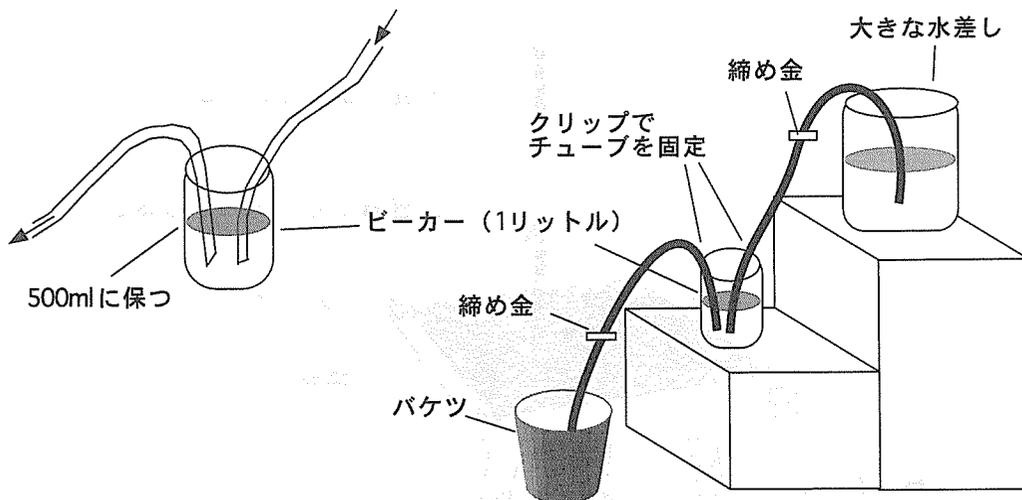


図 4.1.4 流入、流出量がつりあうことで、ビーカー内の水量が一定に保たれる

どに締め金を付け、それらを調節しながらビーカー内の水量を一定（たとえば 500 ml）に保つようにする。その操作を通して、ビーカー内の水量を一定に保つためには、ビーカーへ流入する水量とビーカーから流出する水量とを等しくしなければならないことを生徒につかみとらせるのである。

また、水で満たした紙容器をバーナーで熱し、このとき紙の容器が燃えてしまわないのは、バーナーから容器に与えられる熱量と水の蒸発に使われることで容器から外に出ていく熱量とがつりあっているからであることを理解させる（図 4.1.5）。これらの実験を通して、第 1 章で学習したシステムが安定した状態（systems in dynamic balance）とは、実際にはシステムへ出入りする物質や熱の量がつりあうことで保たれているのだということを理解させるのである。このようにこの章では、システムが安定した状態とは、システムへの入出力がつりあった状態をいうのだということが直観的に理解できるような学習活動が行われている。

こうしたことから、このユニットはシステムの自己組織化を教える上での基礎・基本となるシステムという概念とその定常性維持という側面が、優れた教材によって整理されており、その点で地球システムの教育内容構成において非常に参考となるものである。

ユニット 2：変化

ユニット 2 では、長期間におけるシステムの（発展的な）変化を「evolution」と表現し（教師用書；p. 114）、生物の進化に限らずシステム一般について、その変化を evolution として取り上げている。ただし、ここで扱われているシステムの変化とは、体制の突発的な遷移をもたらすようなシステムの自己組織化にもとづくものではない。教師用書の p. 2 では、年間を通して定常状態にあるシステムについての基本概念を扱うと述べられており、したがってこのテキストでは、システムの自己組織化を取り上げる意図はないものと読み取れる。

しかし、地球システムの安定性を理解するためには、システムの定常性維持と自己組織化の両面に注目する必要がある。それは本論の 4.(3) で述べたように、地球システムにおいては特定の定常状態がずっと安定して存続するわけではなく、その時その時に応じて最も安定した状態

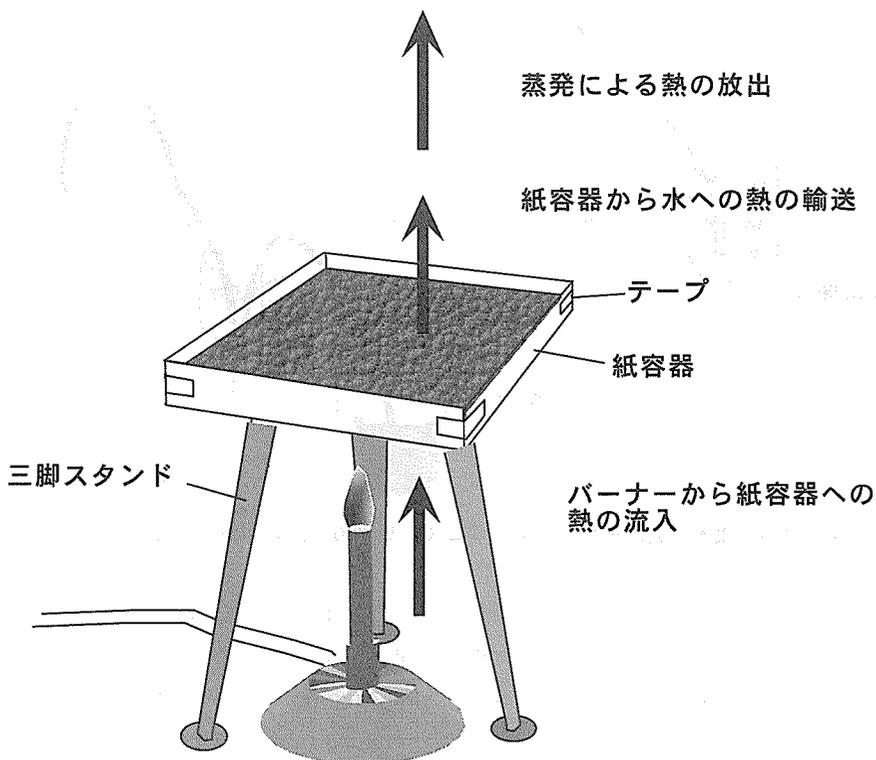


図 4.1.5 熱の収支があてれば、紙容器は燃えてしまわない

を作り替える、自己組織化の過程がその安定性を支えているからである。それゆえ定常性維持という枠組みしかもたないこのテキストでは、地球システムを教えるにはその点において大きな限界があるといえる。

以上、BSCS の “Systems and Change” について議論してきた。このテキストはシステムをテーマとしており、生徒に諸現象をシステムとして認識する力を形成するために、徹底した学習活動が行われている。とくにシステム概念とその定常性維持という側面については、それらが実感として理解できるような優れた教材構成がなされているが、これらの概念は地球システムを教える上で基礎・基本となる概念である。したがってこのテキストは、地球の突発的な変化をシステムの自己組織化として整理するという点では参考にはできないものの、そのための基本概念の扱いにおいては学ぶべきところの多いものといえる。

注

- 1) 教師用テキストの p. 8, 32 に、平衡/動的平衡という用語の区別をするかどうか、つまり、系が閉じているか開いているかを問題とするかどうかで「平衡/equilibrium」という用語の解釈は学問分野により異なるので、混乱を避けるため、このテキストでは“balance”とか“dynamic balance”という言葉を用いるという断りがある。しかし、地球システムを教える場合には、系が閉じているか開いているかの別よりも平衡か非平衡かという区別の方が重要であるので、本論ではそれらの表現に対して安定した、つりあったという訳

語と同時に、定常という訳語をあてる。

- 2) このテキストでは“feedback mechanisms and restoring mechanisms”と表現されているが、システム科学に関する文献では、一般にはそれらをまとめてフィードバックと呼んでいるため、それにならない、ここではフィードバックという訳語をあてる。

(2) EPA “Global Climates — Past, Present, and Future”

EPA (U. S. Environmental Protection Agency)の“Global Climates — Past, Present, and Future”は、アメリカの8年生から10年生（日本では中学2年生から高校1年生に相当）を対象として構成された科学教育カリキュラムのためのテキストである。このカリキュラムは科学者と教育研究者との共同により、科学の成果を教育に反映させ、科学教育全体を統合することを意図して構成されており、テーマとして地球の温暖化を取り上げている。全体は下の5つのユニットに分けられている。

1. 気候のユニット/Glimate Unit
2. 温室効果のユニット/Greenhouse Effect Unit
3. 炭素循環のユニット/Garbon Cycle Unit
4. 気候変動と温室効果ガスのユニット/Climate Change and the Greenhouse Gases Unit
5. 生じ得る影響のユニット/Possible Effects Unit

各々のユニットはいくつかの学習活動 (ACTIVITY) に分かれているが、その一覧は表 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 学習活動の一覧

Global Climates Past, Present, and Future :	
Activities for integrated Science Education	
Climate Unit	
1. Is the current weather “nomal”?	1
2. What factors influence climate?	7
3. What is the relationship between climate and terrestrial biomes?	13
4. How has Earth and its climate changed over time?	19
5. What infomation do paleobotanists use to study ancient climates?	25
Greenhouse Effect Unit	
6. What is a greenhouse and how does it trap heat from the sun?	39
7. What factors influence a greenhouse?	47
8. What makes Earth like a greenhouse?	53
Carbon Cycle Unit	
9. What is the carbon cycle?	59
10. Where does CO ₂ come from?	65
Climate Change and the Greenhouse Gases Unit	
11. How do scientists analyze greenhouse gases and global temperature over time?	77
12. How does human activity contribute to greenhouse gas increases?	91
Possible Effects Unit	
13. How might elevated CO ₂ affect plants?	97
14. What impact might sea level rise have?	103
15. How does science contribute to policy?	109

「気候のユニット」では、そもそも「気候」とは何を指し、どのような要因によって決められているのかについて学習する。ACTIVITY 1では「気象／weather」と「気候／climate」という2つの用語の違いを学習する。教師用ページ¹⁾(p.2)では、地球規模の気候変動を理解するにあたってまずこれらの用語を区別し、両者の関係をはっきりさせておくことが必要であると述べられている。生徒用ページ(p.5)では、気象は日々の大気の状態(温度、降水量、風向・風速、湿度など)を指し、気候は特定の地域における長期間の、たいていは30年間の平均的な大気状態を指すと定義されている。さらに、気候の変動には数十年の時間スケールに限らず、数千年、数万年、数十万年といったさまざまなスケールの変動があるため、地球規模の気候変動の研究においてはこうしたより大きな時間スケールが用いられると説明されている。

その上で、ACTIVITY2では気候を決める要因について考察する。大まかに自然的要因として気圏／水圏／地圏／生物圏、人為的要因として土地利用／資源の利用というカテゴリーに分類し、ディスカッションを通じて諸々の要因を明らかにしていく。教師用ページ(p.7,8)では、自然的要因として太陽との関係、アルベド、温室効果ガス、造山活動や火山活動、海流や氷床、生物活動、炭素循環、さまざまなフィードバックの働きなどがあげられており、人間活動によるものとして森林伐採、農耕、都市のヒートアイランド効果、化石燃料の燃焼などがあげられている。

これらのカテゴリーは地球システムの主要なサブシステムであり、したがって、ここでは「システム」という表現は直接用いられていないが、この学習活動を通して気候は地球全体が関与するものであることが認識できるようになっている。この点は地球システムの教育内容を構成する上で参考となるところである。

ACTIVITY4では生物進化や気候変動、環境変動のイベントを時間軸に沿って対応させ、それをもとに地球史を通じた気候の変遷について辿る。教師用ページのBackground(p.20)では、地球の長い歴史の中で生物と気候は相互作用してきたのであり、そうした視点に立つことで人間活動が地球の変動に関してどのような位置づけにあるのかを正しく認識することが可能となると述べられている。ここから、これ以後の学習活動への前提として、地球史の整理を通して生徒に生物と気候との相互作用を理解させることがこの学習活動の意図であると読み取ることができる。

「温室効果のユニット」では温室効果のメカニズムを学習する。たとえばACTIVITY6では、モデルを作成して温室が太陽からの熱を取り込むしくみを学習(図4.2.1)し、それをもとに地球の温室効果について考察する。作成するモデルは2本のペットボトルを利用したもので、熱を吸収できるよう底の部分を黒色にしておく。1本は側面にいくつかの穴をあけておき、もう1本はそのままにしておく。各々に温度計を(底の黒い部分にかからないように)貼りつけてキャップをしめ、熱源(電気スタンド)にあてて温度変化を観察する。さらに実験結果を地球の温室効果と関連させて考察するが、教師用ページ(p.42)には次のような指摘がある。温室の場合は、壁や天井を覆うビニールやガラスには地表から放射された熱を取り込む働きと、大気の対流による外界への熱の流出を防ぐ働きがある。これに対して温室のビニールやガラスに相当する地球の大気層には、そもそも対流による宇宙空間への熱の流出を防ぐという働きはなく、地表から放射された熱を取り込み、それらが宇宙空間へ運び去られるのをブロックするという働きをしているだけである。教師用ページでは、こうしたモデルの持つ限界をおさえておく必要性を指摘している。

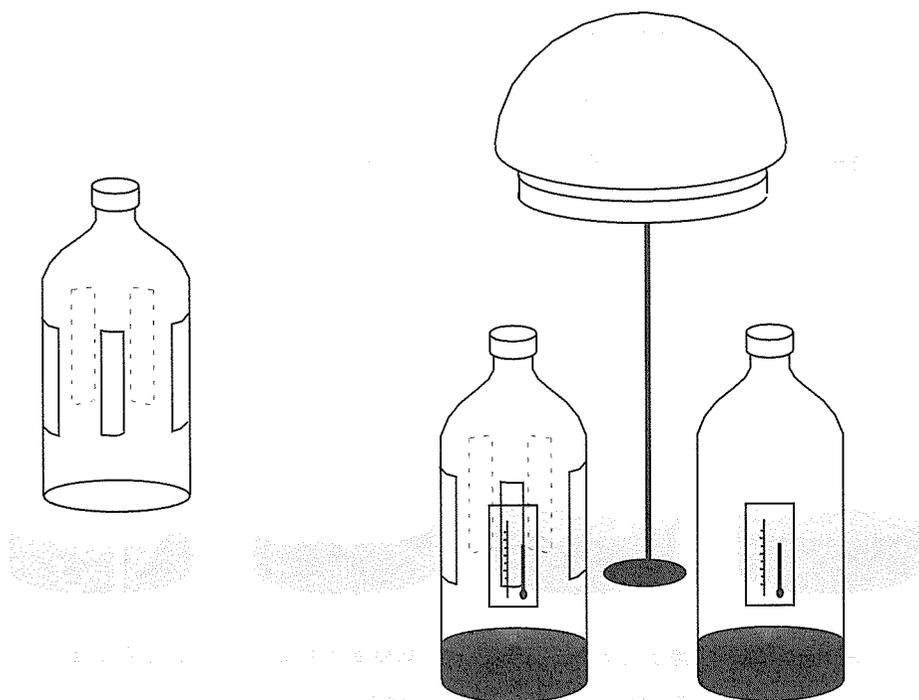


図 4.2.1 温室効果のメカニズムを学習するためのモデル

また ACTIVITY7 では、異なる条件を設定したモデルを用いて、温室効果に影響を与える要因について考察する。生徒用ページ (p. 51) では、それに関してアルベドとフィードバックについての説明がなされており、モデルによる実験によって温室効果に及ぼすアルベドの影響を確かめる (図 4.2.2)。実験に用いるモデルはペットボトルを利用した A から D の 4 本で、A、B は底に黒土を入れ、B は上部 1/3 を白くペイントする。C は白っぽい砂を、D は室温の水を底に満たす。ACTIVITY6 と同様、温度計を貼りつけてキャップをしめ、熱源にあてて温度変化を観察する。それらの結果をもとに地球の温室効果に影響を及ぼす要因を考察する。

こうした実験は、地球の温室効果というスケールの大きな事象を生徒が自分の目で確かめることができるという点、しかも身近な材料をそのモデルとして活用しているという点で、非常に優れた教材であるといえる。

「炭素循環のユニット」では、用語を整理 (炭素/二酸化炭素/炭素循環/炭素の放出源/炭素の貯蔵庫) した上で、温室効果における二酸化炭素濃度の影響について学習する。とくに ACTIVITY10 では、二酸化炭素を最も重要な温室効果ガスとして位置づけ (教師用ページ p. 66)、その放出源について詳しく見ていく。教師用ページの Background (p. 66) では、現在、大気中の二酸化炭素濃度が増え続けているということは、その吸収源あるいは貯蔵庫よりも放出源の方が多くなっていることを強く示しており、その過剰な放出源として最も重要なのが人間活動であると指摘している。その他の放出源として、動植物 (呼吸、遺骸の腐敗)、炭酸塩岩 (化学的風化)、熱水、火山活動などがあげられているが、ACTIVITY10 では、動植物が二酸化炭素の放出源となっていることを次の実験によって確かめる。

二酸化炭素は水に溶けると酸性を示すことから、BTB 溶液の色の変化 (青から青緑、緑、黄

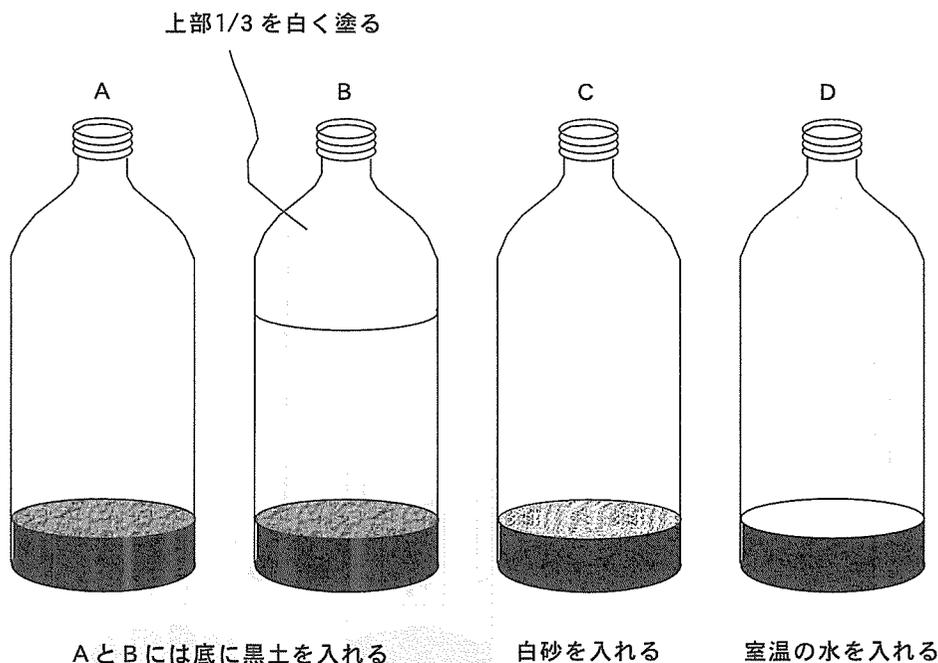


図 4.2.2 温室効果に及ぼすアルベドの影響を確かめるためのモデル

などへ) から二酸化炭素の存在を確認する。動物が二酸化炭素の放出源かどうかを確かめるために、生徒自身の呼吸を風船を膨らませてその中に取り込み(ヒトは動物である), そこからストローで試験官に取り入れて BTB 溶液の色の变化を観察する。また, 植物が放出源かどうかを確かめるために, 次に BTB を溶液を入れた試験官に藻を沈め, 光を遮断して一晩おいてから溶液の色の变化を観察する。教師用ページ (p. 69, 70) では発展的な実験として, 植物の光合成と呼吸とのバランスについて考えるために, 藻を入れた試験官を一晩明所に置いて, 暗所に置いたものと結果を比較してあげられている。さらに演習実験として, 人間活動(化石燃料の燃焼)が二酸化炭素の放出源となっていることを確かめるため, 排気ガスを風船に取り込み BTB 溶液の色の变化を観察するという例があげられている。

物質循環は地球がトータル・システムとして機能していることを端的に示すものである。炭素循環を取り上げたこのユニットでは, システムという表現を直接用いてはいないが, 大気中の二酸化炭素濃度が大気だけでなく, さまざまな要素がその放出源, 吸収源として働くことによって決められていることを生徒が実感として理解できるような実験が行われており, その点で地球システムの教育内容構成においても参考となる。

続く「気候変動と温室効果のユニット」では, 生物と気候との相互作用という視点をもとに, 人間活動と温暖化との関わりを温室効果ガスの放出源という点から考察する。また「生じ得る影響のユニット」では, 温暖化による考えられる影響として, 植物の生長速度の増加と海水面上昇が取り上げられているが, いずれにしても, 地球システムを教える大きな目的の1つである地球の突発的な変化の重要性に着目して構成された内容ではなく, この目的に関しては EPA のテキストには限界があるといえる。

以上、EPAの“Global Climate— Past, Present, and Future”について議論してきた。ここではシステムという表現を直接用いてはいないが、グローバルな気候変動を地球全体が関与するトータル・システムの挙動という枠組みで捉えている。それゆえ、このテキストは地球をトータル・システムとして捉えるという、本論が方向性を示す地球システムの教育内容構成の目的の1つを内包しているといえる。また、学校の実験室において実際に再現することのできない、地球規模で展開される気候変動のような時間・空間スケールの大きな現象を、身近な材料を活用したモデルによる実験を豊富に取り入れて生徒に実感として理解させようとしている点は、地球システムの教育内容を構成する上で大いに参考となるものである。したがってこのテキストは、地球の突発的な変化を教育内容としてどのように取り入れていくかという点に関しては参考にはできないものの、地球システムを教える上での教材構成においては示唆に富むものであるといえる。

注)

- 1) 検討に用いた教師用テキストの中に、生徒用のテキストが同時に綴じ込まれているため、ここではそれぞれ教師用ページ、生徒用ページと呼ぶことにする。

5. 地球システムの教育内容の方向性

これまで述べてきたように、地球システムの教育内容はシステムという認識のもとに地球の安定性を考えることを構成上の基盤とする。それゆえ内容構成においては、次の2点を大きな柱とする。1つはトータル・システムとして地球を捉えるという点、もう1つはその自己組織化の過程として地球の突発的な変化に着目するという点である。先に検討したBSCSのテキストでは、地球システムを理解する上での基本概念となる、システムという認識の仕方と定常性維持という側面が整理されている。またEPAのテキストでは、システムという表現を直接用いてはいないが、トータル・システムとしての地球の挙動という認識のもとにグローバルな気候変動が取り上げられている。それゆえ、トータル・システムとして地球を捉えるという点に関しては、これらのテキストで充分対応できるように思われるかもしれない。

しかしこれら2冊のテキストでは、いずれも自己組織化に伴う体制の突発的な変化が扱われておらず、地球システムの安定性を理解する上で本質的に重要な側面が抜け落ちているという限界がある。この点を乗り越えるために、地球システムの教育内容構成においては、システムとしての認識にもとづき、その自己組織化の過程として地球の突発的な変化に着目することをもう1つの大きな柱として据える。ここに、本論が方向性を示す地球システムの教育内容の独自性がある。

内容構成にあたっては、システムの突発的な変化を示す1つの大きな事例として「気候ジャンプ」に着目し、地球システムを「気候システム」という枠組みで考えることにする。とくに気候に注目するのは、気候には地球システムの主要なサブシステムのほとんどが関与しており、地球がトータル・システムとして機能しているという認識が得やすいことによる。気候システムとは、地球システムにおいてとくに地球表層の環境を決定するシステムをいい、その主要なサブシステムとしては、大気、海洋、雪氷、地表面、生物圏、(人間圏)を考える。

地球上のすべての気象現象のエネルギーは太陽から供給されており、それゆえ気候は太陽か

ら流入するエネルギーで基本的に決定されているといえる。つまり気候システムは、太陽から流入したエネルギーがシステム内の各サブシステム間で循環しながら、最終的に宇宙に放出されるというエネルギーの散逸過程として捉えることができる。

エネルギーの流れとして見ると、気候システムへの入力に相当するものは太陽の入射エネルギーであり、出力に相当するものは地球の放射エネルギーである。また、エネルギーにはさまざまな形態があるが、気候を考える上ではエネルギーは温度と近似できるので、蓄積に相当するものとしては地表温度を考える。気候システムの挙動を決定するパラメータとしては、太陽定数が入力の値を決めるという点で重要である。また、その入力をコントロールするパラメータとしてプラネタリーアルベドがある。このほかに、システムの構造を決めるパラメータ（地球の半径、海陸分布など）、システム内部でのエネルギーの流れを決めるパラメータ（大気の組成、地球の自転角速度、重力加速度など）などが考えられるが、パラメータとして何に注目すべきかは、扱う現象によってその都度考えていく必要がある。

太陽から流入するエネルギーのうち約30%は、地表面などによって反射されすぐに宇宙空間に戻されてしまうため、エネルギーの収支(図5.1)という点だけを考えれば、地表の温度は太陽からの入射エネルギー量とプラネタリーアルベドとの関係で決まることになる。しかし、地球の場合この値は -18° と推定されており、実際の平均表面温度(15°)との間に 30°C 以上の差が生じている。これは大気のもつ温室効果によるものと考えられている。つまり、地表の温度変化とそれに伴いシステムがどう変化するかを考えるには、エネルギーの流れだけを取り出してくるのではなく、それに伴うシステム内部での物質の流れ（水の循環、温室効果ガスである二酸化炭素の流れなど）にも着目する必要がある。

このように、気候システムは大枠ではエネルギーの流れとして捉えられるものの、実際にはエネルギーと物質の流れは密接に関わりあっており、両者を視野に入れてシステムの挙動を考えていくことが必要となるのである。これらをふまえ、地球システムの教育内容における気候システムの枠組みを整理すると図5.2のようになる。

このように気候システムの枠組みを捉えた上で、気候ジャンプの具体的な事例として何を取り上げるのかを整理しておくことにする。地球は長い地質時代の中で、何度か氷河時代/無氷河時代——つまり、地球上に大規模な氷床が存在していた時期と、反対に氷床がなかったかあっても小さかった時期——とを繰り返してきた(図5.3)が、このうちとくに、現在に続く

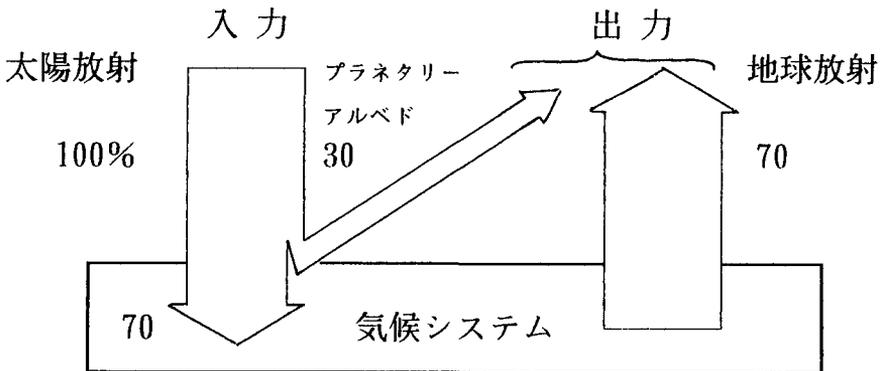


図5.1 気候システムのエネルギー収支

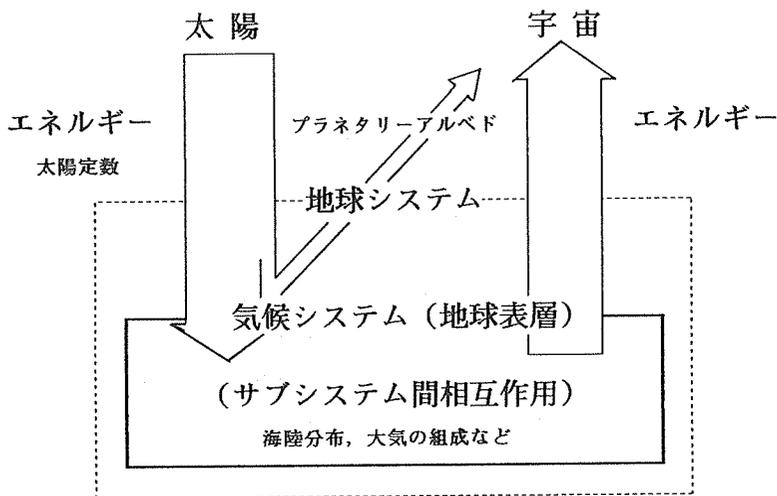


図 5.2 地球システムの教育内容における, 気候システムの簡単なボックス・モデル

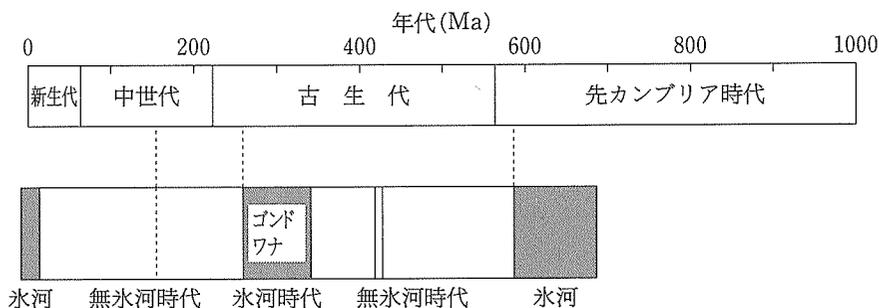


図 5.3 過去 6 億年間の氷床の変動。増田富士雄「地質時代変動」p. 200 (『気候変動論』岩波書店, 1996) より

新生代第四紀の氷河時代 (更新世中頃～) について取り上げようと考えている。

第四紀に着目したのは次の理由による。気候変動の痕跡は地形や地層, 化石などの地質学的な記録として現在の自然の中に残されている。たとえば, 堆積物の層相の垂直変化 (海底・湖底堆積物や氷床のボーリング・コアの分析) や植生・動物相の変化 (花粉分析, 化石), 海水準の変動に伴って形成された海岸段丘などの地形的特徴などから, 過去の気候変動を読み取ることができる。とくに第四紀は時代が新しいため, それ以前の時代に比べ地殻変動や侵食などによる破壊が少なく, より原形が保存されており, 過去の気候状態に関する質の高い情報が得られる。そうしたことから, 第四紀の気候変動に関してはそれ以前の時代に比べ理論化が進んでおり, それらの成果を科学的に妥当な知識として生徒に示すことが可能である。

また, 上で述べたように過去の気候変動は地質学的な記録として自然の中に刻まれていることから, 教材作成にあたってはモデルを用いた実験室レベルの教材 (これは EPA のテキストが大いに参考になる) と同時に, フィールドを教材として利用することができる。とくに第四紀は残存する証拠が豊富であるので, 教材作成という点からも第四紀を取り上げることは妥当で

あるといえる。フィールド教材の研究についてはまとまった研究の蓄積がなされており、それを活用できるのではないかと考えている。

第四紀氷河時代（更新世中頃～）は、寒暖の差が明瞭な気候変動で特徴づけられる。つまり、氷床の出現／後退が顕著な10万年サイクルとして見られるようになる。これは第四紀の前半（更新世前期）にはきわめて弱かったかあるいは存在しなかったもので、10万年サイクルが存在しない状態から顕著に現れる状態へと気候が突発的に変化したことを示している。第四紀全体にわたる海底コア分析によると、更新世の中頃にあたる約90万年前に $\delta^{18}\text{O}$ の平均値と変動幅が大きくなる³⁾（図5.4）ことから、この時期に氷期—間氷期が顕著に現れる状態へと「気候ジャンプ」が生じた（図5.5）ことがわかる。第四紀の気候変動の研究は、フィールド研究（間接的な地質記録から古気候を推定する）とモデリング（因果関係を理解する）の両面が密接に結びついて行われており、研究者の間ではこうした突発的な気候の遷移は、気候システムに複数の定常状態が共存していることを示すという解釈のもとにモデル化がなされている⁴⁾

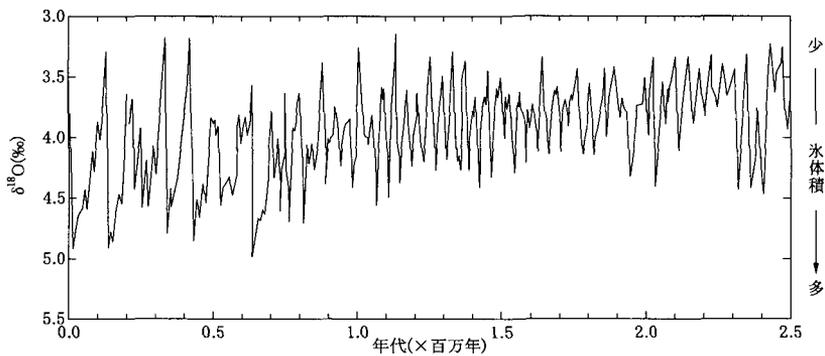


図5.4 海底コア分析から得られた、過去250万年間の $\delta^{18}\text{O}$ の永年変動。福山薫「過去200万年における日射量の変化とミランコヴィッチ・サイクル」(『地球環境変動とミランコヴィッチ・サイクル』古今書院)より

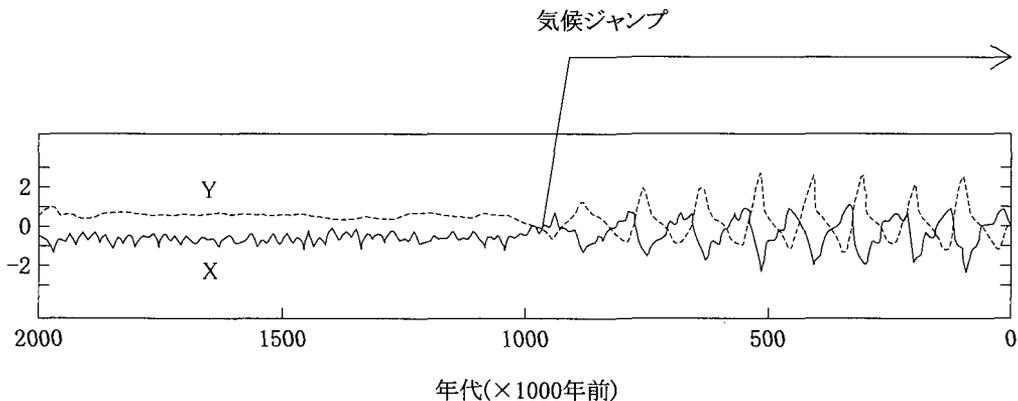


図5.5 大気中の CO_2 —海洋の相互作用を表すモデルで再現された、更新世中期の「気候ジャンプ」。図中のXは氷体積、Yは大気中の CO_2 の変動を示す。福山薫、前掲書より

気候の長周期的変動（2～10万年）の要因として無視できない外力は、地球公転の軌道要素（離心率、地軸の傾き、近日点）の変動、つまり太陽と地球との位置関係の変化に伴う太陽からの入射エネルギーの変動（ミランコヴィッチ強制という）である。しかし、更新世の全期間を通して、地球の軌道要素の変動に伴う外部パラメータ（太陽定数と考えるとよい）の変動はわずかであるため、更新世中期における気候の突発的な変化（10万年サイクルが存在しない状態から顕著に現れる状態へ）を引き起こした直接的要因としては考えにくい。つまり、システムの遷移はこうした外部パラメータのわずかな変化（ミランコヴィッチ強制、局地的な地殻の隆起など）に対して、気候システムが強い非線形応答を示した結果——すなわち、内的な強制力によって引き起こされたもの——である可能性が非常に高いといえる³⁾

このように第四紀の氷河時代については、地球の突発的な変化とそれを引き起こす自己組織化という側面——つまり、外的な強制力（外部パラメータの変動）ではなく、内的な強制力によって、地球システムが自律的に新しい体制を作り上げる（10万年サイクルが顕著に現われる状態へ）という一連のプロセス——がつかみやすいことから、これを題材として取り上げることが妥当であるといえる。ただし、具体的な肉付けについては今後の課題である。

注

- 1) たとえば、田中実・境智洋「道内地域地史教材作成のための「キー現象」と根室地域の教材化」『北海道教育大学紀要、48-2』（1998）
- 2) 酸素の安定同位体比。安定同位体比として使われるのは、酸素（O）、炭素（C）、窒素（N）、硫黄（S）の4元素で、たとえば酸素には質量数16と18、炭素には12と13の安定同位体がある。このうち自然界に多く存在するのはいずれも軽い元素で、物理・化学現象においては軽い同位体が活性が高いため、たとえば水（H₂O）が蒸発する際、軽い酸素同位体の水の方が蒸発しやすいので、蒸発水（たとえば雨水）と残った水（たとえば海水）とでは同位体の分別が起こる。つまり蒸発水は軽い酸素同位体（¹⁶O）に富むようになり、逆に残った水は重い酸素同位体（¹⁸O）に富むようになる。これらの同位体比は標準サンプルとの比較による式で求められ、それぞれ $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ （値は‰で表す）がよく用いられる。
- 3) 氷床に供給される水（雨水）には ¹⁸O が多く含まれ、それが氷として固定されることになるので、海底コアの分析において、 $\delta^{18}\text{O}$ の大きい時期は水体積の大きい時期すなわち氷期を示し、その逆は間氷期を示すと解釈できる。
- 4) たとえばまとまったものとしては、Crowley and North (1991) “Paleoclimatology” Oxford Univ. Press, Trenberth (1992) “Climate System Modeling” Cambridge Univ. Press などがある。どのモデルを利用するのかは今後の課題である。
- 5) 福山薫「過去200万年における日射量の変化と気候変動モデル」／安成哲三 他編『地球環境変動とミランコヴィッチ・サイクル』（古今書院、1992）

謝辞

本稿作成にあたり、大野栄三氏をはじめ北海道大学教育学部教育方法学研究室から有益な助言をいただいた。この場を借りて謝意を表したい。