

宇宙, 地球の構造的階層性 —複雑系科学としての地質学 その2—

志岐常正 *

System formation levels in The Universe and The Earth -Geology as a science of complex systems - part 2

SHIKI Tsunemasa*

Abstract The philosophical concept of the “system formation levels” in nature and world has been discussed and widely accepted in physics, biology, and some social sciences including economics in Japan. Each level is characterized by specific features formed by the constituent systems with an independent or self-reliable nature. The each constituent system is also formed by systems with such nature of lower levels. Rather recently, it was stressed that the special features of these levels are caused by different specific roles of four essential forces namely gravity, weak interaction, strong interaction, and electromagnetic force. It was pointed out also that “three structural level series discriminated by three size-density relations” are formed by the different roles of the forces. Thus the term “system formation level” can be used with two meanings. A wide, rather indistinct meaning and a narrow essential definition. On the whole, the “system level” concept is significant in geology as well.

Our world, namely the universe, came into creation 13.7 billion years ago by the Big Bang. After that, its constituent materials and its complexity developed forming different “levels” of material systems in chronological order over time. That is to say, separation of the four forces occurred first. These were followed by the birth of various particles and bodies of different levels step by step. They are quark, elementary particle, atom, molecule or crystal body, the common materials on the earth, organic bodies and the biosphere. It must be noted that this process of building up from the lowest level (quark) to higher levels is the same in fact as the process of the birth of the universe, galactic systems and star systems, planet systems including the earth, and the common materials on the earth. That is to say from the highest level (the universe) to the lower levels. Through this long process of 13.7 billion years and after the geohistory of 4.5 billion years, effects and consequences of innumerable occurrences have piled up on the earth forming very complex structures of various sizes and levels. In fact, the earth possesses every characteristics of a real complex system now. It is to be noted, however, that the system composition level structure is not very distinct as far as the inorganic world above crystal body level is concerned. On the other hand, the biological world (biosphere) on the earth is characterized by the development of distinct level structure which consists of typical complex systems.

On the whole, the earth (Gaia) is a complex system. Geology is a science which studies four dimensional material and phenomena inside this complex system.

Key Words : Complex systems, System formation levels, Essential forces, Geology

はじめに

複雑系の科学は、今、非常な勢いで発展しつつある。地質

学もその外にあって良いはずはないが、今のところ、複雑系を扱っているという明確な意識を持つての研究は一部に限られ、多いとは言えないように見える。

2014 年 8 月 4 日受付 2014 年 11 月 9 日受理

* 京都支部, 〒611-0002 京都府宇治市木幡北畠 15-8
15-8, Kitabatake, Kohata, Uji, Kyoto 611-0002, Japan

前編（その1）において、筆者は、複雑系科学としての地質学を考える導入として、第四紀確定の経過を取り上げ、地質学の対象が複雑系であるために必要となる年代区分と年代区分の区別を説述した（志岐 2011）。その2では、先ずこの世界（宇宙）の階層構造について説明した上で、階層性の不明瞭さが地球の特徴であり、宇宙と惑星地球の歴史の必然であることを指摘する。

その1の論述は、複雑系や複雑系科学の定義を記さずに進めた。地質学の対象が複雑であることは、その研究者が日々痛感しているところであり、自明のことであると考えたからである。しかしその後、これに関する説明がないとの批判を受けたので、その2では、複雑系をとりあえず「相互に関連する要因が多数集まって複雑に絡み合い、全体としてなんらかの性質（あるいはそういった性質から導かれる振舞）を見せるようにまとまっている系」と捉え、これを研究する科学を複雑系の科学と定義しておく。その“なんらかの性質”の特徴は、構成要素間の大規模な相互作用や非線形性によって、全体として自己組織化・大自由度カオス・散逸、フラクタル、確率論的現象、記憶学習などのさまざまな挙動や機能を示すことである。それは、系をなしてまとまっているものの閉じてはおらず、全体がエネルギー、物質が常に流入する非平衡系、開放系である場合に生ずる。生物学、とくに人工生命などの分野では、部分としては簡単なものが集まることによって極めて複雑な系が生まれることを“創発”と呼んできた。この言葉（術語）も、今、複雑系科学全体における一つのキーワードとなっている。なお、上記の複雑系の特徴を記述する術語については、菅野（2013）の著書の最初の部分で列挙、説明されている。筆者の知る限り最も簡明で必要かつ充分であるので参照を薦めたい。

ともあれ、複雑系の定義は本論の関心事ではない。本論文の目的は、地質学が複雑系の科学であることを証明することではなく、また複雑系科学の成果を地質学に適用しようとするということでもない。地質学の対象を複雑系の科学の視点を取り入れて多角的に再検討し、この世界（4次元宇宙）におけるその位置と特質を認識し直すことにある。最終的には、このための研究方法論の整理、検証を試みたい。本編（その2）で物質の階層性から見た地質学の対象の特質を検証するのは、上記の目的を追求するうえで必要だと考えたからである。

宇宙の階層構造

世界における複雑性の発展と階層性形成

世界における事物は、歴史的に、単純なものから複雑なものに発展する。哲学的に言えば、それは、古い段階の規定性を契機として、それ自身のうちに揚捨する（止揚する）新しい段階が成立することである。弁証法に言う“否定の否定”は、歴史的発展の総過程の法則であり、反復性と変革性との統一であり、復帰と進展との統一である（岩崎 1968）。

物理的には、この法則は、エントロピー、ネグントロピー（負のエントロピー）の概念で数学的に記述される。宇宙というのは、それ自身の一般の定義では孤立系とされている。孤立系にはエントロピー増大の法則が成り立つ。宇宙でエントロピーが増大すれば熱平衡へ近づき、宇宙は単純化して一様で構造を持たない方向へ向かうはずである。しかし事実はそうっていない。膨張し希薄になっていく宇宙の大部分では、確かに“のっぺらぼう”の空間が広がっていく。しかし一方、ところどころに温度の低下に伴って集合した物質の中で、複雑化の現象が進む（海部 1993）。このことについて、その各部分（たとえば地球の自然や社会）は孤立系でなく相互に関連しているから、そこではエントロピーが増大する一方、ネグントロピーもまた増大しつつあるのだという解釈がある（我孫子 1983）。むしろ、菅野（2013）が詳しく記しているように、宇宙の膨張が開放系と同じ役割を果たしていると捉えるべきなのであろう。もっとも、閉鎖系であるという宇宙の“定義”（理解）も問題である。ホーキング（2001）や佐藤（2010）など近年の宇宙物理学の著書が説くところによれば、実は宇宙は一つではない。エントロピー増大則が成り立たないことは、“我々の宇宙”が開放系であることを示しているのではないだろうか。

難解な哲学や物理学的用語を使うまでもなく、事実として、我々が見聞するこの世界の事物は時間の経過、歴史とともに簡単なものから複雑性を増していつている。何かの前後して起こる事象の及ぶ範囲が完全に同じであることはあり得ない。先にできたものが存在する場合、後にその部分、部分が別の作用を受け、互いに別の物（状態）に分かれるのは普通のことである。一方、物事の変化には、作用が消えても状態が元に戻らないヒステレシスのような現象がある。むしろ、元に戻らない方が普通である。これらの結果として、時と共にこの世界は全体的に複雑の度合いを増して行く。このように考えれば、自然や社会の複雑化は不思議ではない。しかし、宇宙の歴史において、それが自発的に階層性を形成したことが注目されなければならない。

階層性形成の、個別の事象毎の具体的現れ方、それを貫く法則性などの把握は研究対象を異にする個別科学の分野の課題である。そうして地質学こそが、ビッグバン以来の宇宙の発展の結果生まれ、最も複雑となった現在や過去の生物系、人間社会などを対象に含む複雑系の科学である。しかもそれは、後述する本来の“硬い意味での階層性”が必ずしも明確でない点で一層“ややこしい”属性を持つものを研究対象とする科学分野であることを意味する。

階層と系

階層と階層性についてさらに説述を進める前に、“系”についての説明が必要であろう。筆者の考えでは、階層の認識の鍵は、それぞれの階層をつくる系の認定だからである。このことの重要性は、従来の階層論においては、必ずしも明確

に捉えられていないように思われる。田中(2008)が、“同一階層の中の隣合う部屋”という言葉で説明しているものがこれに当るようだが、この“部屋”は、筆者の言う独立性を持って運動する“系”とは若干異なり、やや広義の概念のように思われる。なお、問題は認識論ではなく、実際に系があるから階層ができていくという事実にある。

筆者が言う“系”は「その構成要素が、互いに物質やエネルギー（それにネグエントロピー）をやりとりして緊密に関連し、全体としてある一つの状態を形成しているもの」である。数学者、たとえば丹羽(1999)の“システム”と同じようでもあるが、確信はない。彼は太陽系やコンピュータを例として挙げてシステムを説明している。半谷・秋山(1989)は宇宙、地球、人間の歴史をシステムの発展と捉え、システム思考（認定か？）の特徴を5つ挙げて説明している。彼等のいう“システム”は、筆者が“典型的系”というもの（下記）に同じように思われる。ただし、階層論との関係は検討されていない。

このような記述では、概念の説明にはなっても、具体的イメージが示されていないので、系の意義を指摘したことにはならないと思われる。そこで以下に、典型的な複雑系である人体とその細胞を取り上げて系の概念を考える。なお、我孫子(1983)によれば、すでに1940年頃に、生物学者ベルタンフィが生物についてのこのような考察を行い、生物体を定常状態にある開放系の、階層構造を持つ複雑なシステムであると認識している。いささか驚きである。

人体や細胞は、独立性をもつ一つの系をなす。筆者の理解するところにより、その特徴を挙げる。

- 1: 独立性を持つとは内と外の区別があることを意味する。人体や細胞の場合には、境界をなす物の存在に依存する。
- 2: 境界の内部には構造があり、運動がある。つまり内部矛盾があるが、それが、一定期間、準安定の状態にあるから、全体として一つの系でありえている。矛盾が蓄積され、閾値をこえれば系は破滅する。
- 3: 内と外との間には相互作用がある。外から力が加えられることがあるだけでなく、常に物質（各種エネルギーを含む）の出入りがある。この状態が安定的に続く間、系がなりたっている。境の内外の相互作用が一定以上に大き過ぎれば系は成り立たない。いや、内外の区別がなくなれば一つの系と呼べない。外からの作用が内部に取り込まれ、その結果が過剰となっても系は滅びる。
- 4: 人体という系は、それが生まれて存在する間、1～3の結果として常に変化しつつも、準安定性を保つ。しかし、それは何時までもは続かない。形、大きさだけでなく内部運動も、いったんは活性化してもやがて衰え、停止にいたる。
- 5: これらの系には初めと終わりがあるだけでなく、それ自体の中に子孫を残す機能を持つ。細胞は単純に分裂するだけだが、人体の場合は複雑であるのは言うまでもない。

1, すなわち、独立性は、特徴というより、むしろ系成立

の最低必要条件である。これが認められるか否かが階層認定の条件であるというのが筆者の立場である。この特徴の強さや現れ方は階層によりかなり異なる。後述の第一の構造系列の系では、個別の粒子をなすという意味で独立性は明確である。しかし、空間的に微小な階層ほど、それに即して、時間的にも極めて短い間しか安定的に存在せず、発生してすぐに消滅する場合がある（その逆に宇宙の発生以来の寿命を持つものもある。なお、素粒子は、粒子性ととも波動性をもつことは言うまでもない）。第2、第3の構造系列（後述）についても、外界との相互作用（上記2）が強くなりすぎ、内外の境界さえも消滅することは普通に起こる。そうなればもはや系とは言えない。つまり、系は生成、消滅の間の準安定状態である。

上に、人体や細胞を“典型的”と述べたが、これらは系というものの特徴、とくに外界との相互作用をしつつ準安定（あるいは準定常的）に独立性を保持する開放系の特徴を最も良く示すので理解し易いということであって、平均的だという意味ではない。とくに5は、下に強調するとおり、生物の系にのみ見られる特異な特徴である。

なお、独立性を持つものと言えば閉鎖系であるが、独立性を持つことは閉鎖系であることを必ずしも意味しない。それに、完全な閉鎖系は世界に存在しない。一方、無機物からなる系、たとえば一つの鉱物結晶では、独立性ばかりが卓越し、内部運動が極めて小さいことが特徴と言ってよい。これに物理的外力が働けば（これも境界内外の相互作用である）、一個体として運動する。境界内部には物性的条件（素因）以外の要因をほとんど持たない。原子、イオンのオーダー（階層）での働きがあれば、外側から順に反応するが、いきなり内部深くに影響が及ぶわけではない。ヒトが造った多くの物体も同様で、むしろその特徴と言える。たとえば、砲丸投げの玉などはその極端な例で、それ自体の内部に動的構造やその変化の要因をほとんど持たない。このような物は、“系（システム）”と呼ぶにはふさわしくなく、単純に“物体”と呼ぶべきかもしれない。ただし、物体にも階層性は存在する。下位との関係についてみれば、結晶や鉄の玉は原子（イオン）からなり、また、いくばくかの運動エネルギー（熱エネルギー）をもっている。つまりある特殊性をもった運動をしている。しかし、上位階層の系との関係は、必ずしも明確でない。

これらの物体や系が、地球上で階層をなしていると捉えられる。物体は言うまでもなく上記1の属性が明確であり、その識別は容易である。したがって、自然の階層区分に際し問題となるのは、物体でない系の認定、識別である。

系の1以外の属性、とくに内部の構造と運動のあり方は階層毎に異なるが、それら属性の存在自体は、人体や細胞などよりずっと下位や上位の階層、つまり、後述の第1や第3の構造系列に広く見られる。たとえば、第2構造系列の分子は運動する原子からなるが、原子もまた、運動する素粒子（第1の構造系列に属する）からなる。一方、第3の構造系列の

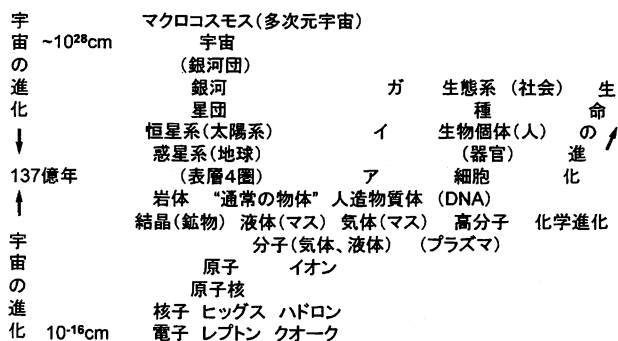
恒星には内部に激しい運動や質的变化があり、そのあげくに爆縮に至る。

本来の定義の階層と階層性

物質の分布は連続的でなく、切れ目のある階層をなしている。このこと、すなわち自然の階層性は、近代原始論に関わって、エンゲルスが“結節点”という言葉を使って論じて以来繰り返し検証され（たとえば坂田 1966；岩崎 1968；牧・宮原 1968；牧 1973；岩崎・宮原 1974）、今では、日本では、物理学、生物学をはじめ、多くの分野で常識的認識となっている（たとえば不破 2009）。この中で、階層性の実態と起源、階層認定の基準に関し、構成要素（物体や系）間に働く力（相互作用）、法則性などの把握の重要性が指摘され、近年ますます強調されていることが注目される（たとえば、町田 1990；栗野 1997；菅野 2003, 2013；田中 1997, 2008；池内 2008）。更に、働く力の種類と働き方の違いをもって階層を識別・定義することが考えられる。菅野（2003）は、構成要素間の相互作用と、（その）法則性、および“階層時間”が、階層性が生まれる理由であるだけでなく、階層を認定する基準であるとした。たとえば菅野（2013）の「通常物質」は、分子間力が構成力の主体であるものと呼んでいる。このような定義の階層を、以下の2章に狭義の階層、あるいは硬い意味での階層と呼び、その意味での階層がなす階層性を説明する。なお、ただ階層と言えば狭義の階層の意味である。

宇宙（自然）の階層と階層性を第1図に模式的に示す。このような図は何人もの著者によって書かれているが、それらの中では、筆者の図は複雑な方に属する。もっと簡略化して、たとえば、

世界の4次元構造 動的階層構造



第1図 世界（宇宙）の階層構造。

銀河や鉱物を含む主幹から生物の枝系列が派生している。素粒子以下の階層の系は粒子性だけでなく波動性をもつが、階層構造図では粒子性を扱っている。

Fig. 1 A schematic show of “system formation levels” in the world (the Universe). Arrows show directions of the successive formation of the levels.

宇宙—超銀河—銀河団—銀河—星団—恒星系（太陽）—惑星系（地球）

— “通常物質” — 分子—原子—原子核—素粒子—クォーク（—サブクォーク？）

と画いたり（辻田 2003）、更に、この系列（主幹系列）から生物界の階層を分子・原子から分岐させて、

有機分子—細胞—組織—器官—個体—生態系—生物界
という副系列（枝系列）を画いたり（岩崎 1968；栗野 1997；菅野 2003, 2013）するのが、むしろ普通であろう。

人によって図が異なり、たとえば惑星系を書かず惑星とか地球とかを挙げ、また上の辻田（2003）の記述で“通常物質”と記しているものを“マクロな物体”とか“マクロな物質”、あるいは“通常物質”と表現したり（栗野 1997；菅野 2003, 2013）、分子と原子を一括したり（田中 2008）するのは、階層の認定、区分の基準に違いがあるからである。筆者はこれに関して上記“系”認定の重要性を強調したいと考えている。生物の諸階層は、実体的には地球系の構成物であり、惑星系階層の下にある。これを、諸家が、分枝としてにせよ系列と扱うのは、その特異性に注目し、発生の意義を重く考えるからであろう。

なお、視点を地球の自分に置く場合には、銀河系より下の系列を銀河系—太陽系—地球—と書ける。しかし固有名詞を使って書くのは階層名としてふさわしくない。そこで宇宙内の実際の構造を一般的に示そうとすると、たとえば「恒星系は恒星と惑星その他、複数種類の天体からなる」などと、ややこしいことをどう図示するかが問題になる。ミクロの階層について見ると、原子は、原子核と電子からなるのだから、原子核は原子の一つ下位の階層である。しかし、電子は本来、もっと下位の階層に属する。つまり、ある階層の系を構成するものが一つ下位の系だとは定義できない。第1図ではこのような問題が考慮されている。なお、素粒子以下の階層では、物質は粒子性だけでなく波動性をもつが、このことも図示されていない。

階層は系の大きさで定義されるのではない。一般には下位の階層の系は小さく、上位の階層の系は大きい。しかし、たとえば鉱物結晶にはメートルオーダーに達するものがある。一方、岩石片は1ミリ大以下の大きさしかなくとも、より細かい鉱物からなっており、鉱物より上位の階層に属する。

階層性が存在する理由と3構造系列

菅野（1993, 2013）の説述によれば、宇宙に硬い意味での階層と階層性が生まれるのは、宇宙に生まれて存在する4つの力（相互作用）、すなわち重力（万有引力）、強い力（強い核力）、弱い力（弱い核力）、電磁力（クーロン力）のそれぞれの性質、とくに大きさと到達限界、それらの絡み合い方が違うからである（第1表）。この4つの相互作用を1次相互作用として、それから次々に2次（原子間力：核力、化学結合力など）、3次（分子間ファン・デル・ワース力）、4次（弾

第1表 宇宙に存在する4つの力（第1次）とそれぞれの特徴。
池内（2008）より、平易化のため、一部改変。

Table 1 Four essential forces which act in the universe, and their characteristic features. Based on Ikeuchi (2008).

4つの力	発見者	相対的強さ	到達距離	特徴
重力	ニュートン	10^{-41}	∞	質量を持つ粒子間 常に引力
弱い力	フェルミ	10^{-5}	10^{-13} cm	素粒子を変換・崩壊させる
電磁力	クーロン	10^{-2}	∞	電荷を持つ粒子間に働く
強い力	湯川秀樹	1	10^{-13} cm	色電荷を持つ粒子間に働く

性力、圧力などマクロな力)、などが階層性を持って派生する。さらに高次の、たとえば生物体の組織間や個体間、生物個体と環境との間などの複雑な相互作用が認められる。詳しくは菅野（2003, 2013）などを参照されたい。

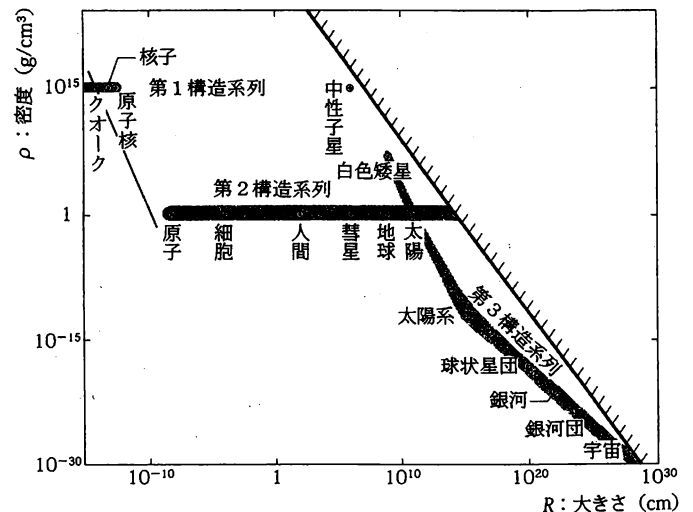
池内（1989, 2008）は、これら4つの力の違いが、階層に、大きさと密度の関係が根本的に異なる3つのグループ（構造系列）を生じさせていることを指摘した（第2図）。

第1の構造系列は量子力学が扱う超ミクロの世界である。この系列の重要な特徴として、筆者は、後述のように、個別の粒子にも系にも個性がないことに注目すべきではないかと思う。これは、超ミクロの物質（エネルギーを含む）には粒子性と波動性が認められることに関係があるのかも知れない。しかし、この世界の系についてこれ以上述べることは、とうてい筆者のよくするところではない。

地球を含む惑星やその上の、我々が日常的に見聞きする事物（第1図の“通常のもの”）は、第2の構造系列に属する。重力と電磁力（や2～4次の力）により構造が造られ、ニュートンの力学法則が成り立つ運動と化学反応とだけが起こる階層である。

第3の構造系列は、言うなれば彗星を除く天体の世界である。ただし、第3の構造系列と言う場合、それには低温な星間のミクロ粒子やダークマターなどを含まない。この構造系列は基本的に第1構造系列の階層の系からなり、第2の構造系列の階層を欠いている。

ここでとくに第2の構造系列について、注目すべき点をもう少し述べておく。三つの構造系列の発生は、宇宙の発生からの膨張（ビッグバン）やその後の発展経過に由来することは言うまでもないだろう。第2の構造系列に属する物質、物体は、宇宙の晴れ上がり以後の、相対的に新しい時代に生まれたものである。そのために、現象を生起させる要因とその絡み合いが複雑化し、時とともに上述のように履歴の違いが大きくなり、時と空間による不均一性の著しい複雑系が特徴的に発達した。このことは、後述のように、この系列の主部で階層性が必ずしも明瞭でないことに繋がる。それには、惑星地球を作る物質に働く上記二つの力（重力と電磁気力）が、距離による減衰の仕方（率）は非常に違うものの、共に連続的で切れ目がなく、両者が拮抗するところさえあることが大



第2図 宇宙に存在する諸系が構成する3つの階層構造系列。

池内（2008）により、一部加筆、および削除。

Fig. 2 Three structural series of the systems in the world. Based on Ikeuchi (2008).

きな役割を果たしている。このような物質とその運動が、地質学を含む地球科学と生命科学の広い研究分野の対象である。言い換えれば、その研究に際して相対論や量子力学の諸法則を考慮する必要がないという特徴を持っている。その意味では地質学の対象は単純とも言える。

まとめて言えば、宇宙（すなわち時空と物質）はもっとも上位の階層、すなわち137億年前の一点からはじまり、膨張し低温化しつつ、次々に下位の階層を作った。それは、図中のもっとも下位の階層から始まり、次々により上位の、より複雑な構成の階層を形成してきたことでもある（第1図）。その結果生まれたのが、現在の地球の諸物質系（エネルギーを含む、以下同じ）であり、生物系列であり、とくに人間とその社会の系である。当然に、それらの総体としての宇宙全体の構成も複雑性を増した。

これに比べれば、より上位の第3の構造系列の宇宙内の銀河の分布とか、銀河とか、恒星などの各階層の系の構造は比較的単純であると言える。たとえば恒星内部で起こってい

ることは、人間社会で起こっていることはもとより、地球上で起こっている化学反応などと比べても複雑ではない。恒星内部の反応は、ずっと下位の階層の運動である原子核反応だけだからである。そもそも、原子と恒星との間の諸階層は、低温の表層を別とすれば存在せず、当然その反応（化学反応、生体の活動など）もない。

広義の階層と階層構造

上に述べてきた“硬い意味”での“狭義の階層”が、日本で発展してきた本来の定義の階層である。しかし、階層の概念をもっと広く捉える考えもある。

坂口ほか（2008）は、宇宙・地球・生命をつなぐ新しい視点であるとして、「階層構造の科学」を著した。“階層構造”の語を表題に掲げた最初の地球科学の本として注目される。また、複雑な現象の理解の糸口が、階層構造を暴くことによって得られるという視点は首肯される。ここで言う階層の基準は、「固有の集団現象や特徴を考え、あるいは決めることができる」ことにある。系の認定の問題には触れられていないが、階層の構成要素として、“あるまとまりのあるもの”が設定されているようではある。具体的には、乱流、地殻形成、微小粒子の階層構造、星と宇宙、気象現象、生命体などに見られる例をあげて説明がなされている。そこには、支配的力の種類と働き方が違うものと基本的に違わぬものが、区別なく含まれている。つまり、階層識別の基準が、上記、従来の“硬い意味の階層”より甘く、広義である。

坂口ほか（2008）は、上記の基準が社会の階層構造にも当てはまるとする。それは良いが、この著作の初めの章で、階層の社会における例として、階級制が挙げられていることには当惑させられる。これでは、企業の課長や部長、相撲の番付までが階層となってしまう。念のために記すと、小結が集まって閥閥をなすわけではない。つまり、ある階層が、下位の階層のなんらかの系の集合からなることを定義に含めないために混乱が起こったのであろう。実際には、彼らの論説でも、“固有の集団現象”にそれが起こる境界があることを詳しく論じている。つまり、階層をなす系についても無意識的に論じていると見て良い。彼らは、渦と渦の間には壁があるわけではないが、境界は存在すると見る。一理あると言えるかもしれない。渦は乱流であり、カオスであり、実のところ独立性、安定性は儂いのだが。

このように、坂口らの著作の初めの章以外の多くの章は、古くから捉えられ、発展してきた“自然の階層性”の概念と、幾分かの共通性を持つ概念で記述されている。たとえば、観測された現象の原因が、その現象とは異なる階層にあるとの指摘がある（坂口ほか 2008, p.219）。また、地球が何故この大きさであるかを知るには、より大きな宇宙の構造形式を理解せねばならないと述べている（坂口ほか 2008, p.219）。この記述には、力とそれが働く法則が階層毎に違うという認識が含まれているのかも知れない。しかし、上記の例示を見る

限りでは、本質論的検証は避けたのではなく、意識にないのだろうと思われる。そう言えば、彼らは、複雑系科学の概念である“自発的”という言葉を多用し、また、物質、原子から素粒子に至る階層を“階層性の代名詞のように扱われる”と書きながら、何故か、これまで日本で発展してきた階層と階層構造についての多くの研究に全く言及していない。

このように、坂口ほか（2008）の階層基準は不明確であるが、ここ（本編）では、あえて、上記彼らの記述、すなわち「固有の集団現象を考え、あるいは決めることができる」を文字通りに読むことにする。この場合、系の内部に働く力の階層による違いは問われないことになる。この、より甘い基準の階層、階層構造、階層性を、本来の意味での（狭義の）階層、階層構造、階層性と区別し、以下に広義の階層、階層構造、階層性と呼ぶ。この場合、内部の部分（系や物体）の独立性や境、内部運動も、研究対象ではあるが、定義には含まれない。なお、筆者の考えでは、階層構成系の内部運動のある期間の安定や準安定が階層の存在の条件をなしていることは、広義、狭義を問わない。

系をなさないものの階層性

前記のように、よく閉じた系は物体である。いわば粒子性を持つ。そうして階層性が明らかである。系は開かれるほど階層性が不明瞭になる。だが、系をなすとさえ言えないほど周囲との境界が不明瞭な、開放性を持つものにも、非常に広義には階層性が全くないとは言えないだろう。たとえば水の波についてみる。水は分子系からなり、地球の水圏を構成しているのだが、瞬間、瞬間に個別の波をなしていることが認められる。波が発達している海の部分部分（局所）は全くの解放系である。波は、特定の場所（局所）についてみれば、大きさ（波長や波高）の異なるものが重なっている。これらは波長が異なっても同じ流体力学の法則に従っているのだが、波源での発生条件も特徴も多少違うという意味では、弱いながらも階層性を認めることが出来る。これらの波の識別は現実的に重要である。この種の、開放系がなす“階層性のごときもの”は、自然や社会に珍しくない。

もっと一般化してみれば、スケール、オーダーを区別して見ることは、物事の認識の基本である。たとえば、いわゆる“温暖化”の要因問題を検証するに際しては、短くとも数十年～数百年のスケールで見なければならぬ。2、3年の経過だけから、“温暖化”とCO₂増加のどちらが原因でどちらが結果であるかを判断するのは科学的でない。活断層の評価に関し、一次断層（主断層）と二次断層（副断層）とで検討すべき直上構造物破壊リスクの種類が異なることは誰でも知っているように思われるが、原発再稼働問題での実情を見ると必ずしもそうではない。テクトニック・ストレスの断層へのかかり方に関し、断層の次数を無視した解析が行われていないか、筆者は不安に思っている。

地球系内部には、種々の異なったスケールのものが集合、

複合している。これを総て階層性と捉える人もあるかも知れない。これには筆者は賛成できない。その例に、下に記すフラクタルがある。

階層性とフラクタル

決定論的系でありながら予測不可能である現象が、開放系内部にしばしば現れ、カオスと呼ばれることは良く知られている（理化学事典，長倉ほか編 1998 参照）。これは、開放系であるどころか内部の物質、物体に独立性が希薄なものからなる部分が非常に多い地球系には、非常に一般的に出現する。

カオス的な力学系にしばしば現れるのが、「フラクタル」と呼ばれる集合である。ある空間（相空間やパラメーター空間）をその挙動により分類して得られる集合の微少な部分が、全体とそっくりになっている場合を指す（理化学事典，長倉ほか編 1998 参照）。高安（1986）、山口（1986a, b）などによれば、数学的には、古典的な数学が主に扱ってきた滑らかな曲線・曲面・多様体といった対象とは大きく異なる新しい研究対象である。

自然にはフラクタルな特徴を示す現象が多く存在する、たとえば、シダ類の葉の形がしばしば例に挙げられることは、地質・古生物研究者に良く知られているところだろう。物質、物体にフラクタル構造が出来るのは、菅野（2013）も指摘しているが、それを構成する物質や力の種類に部分による違いがない場合である。これと反対に、自然の諸階層とは、それぞれの階層毎に独特の空間的・時間的構造を持っている状態を指している。とくに狭義の階層構造は、階層毎に主に支配する力と法則が異なる。このような実態を見るならば、自然の階層構造はフラクタルとは決して言えない。

ちなみに、複雑系である自然に現れる各種の現象に、フラクタル的な事象、あるいは滑らかな線で近似してはいけなようなものがありうるという視点自体は、地質学的にも重要である。これと別に、自然に確率論的現象があることの認識も重要であると考えるが、ここでは省略する。

“通常の物体”と生物副（枝）系列

論議の流れの途中であるが、ここで、上記、第2構造系列には属性が全く違う2種類があることに触れる必要がある。

上に記したように、この構造系列の生物以外のかかなり広い範囲では、独立的な系としては運動しない。言い換えれば階層性が不明瞭である範囲が広く大きく発達する。地球全体が内部に運動を持つ一つの系であることは確かであるので、結局、自然界で鉱物や岩片（これらは系や階層をなす）の上にある階層は地球であるということにもなりうる。この間にある無生物の集団は、第2の構造系列に属する階層であり、宇宙の階層構造の主幹部分に存在する。それは、筆者を含む上記何人かの著者が“通常の物体”とか、“マクロな物質”とか呼んだ無数の系の集団（あるいは階層）にあたる。

一方、同じく第2の構造系列に属する物質、物体のうち、

上に系の説明に挙げた生物の細胞や生物個体などや、個体の集団、たとえばオオカミの群れとか人類とかを、系と捉えることが可能である。生物の系には、上に注目したように、集団（階層）として子孫を残そうとするという、主幹部にない特徴がある。このような違いに着目すると、生物界を一つの特殊な副系列として無生物界から枝分かれさせる（たとえば前記、田中 2008）意味が理解される（第1図）。なお、ヒトの特殊性については、その1で触れた。

生物副系列の特殊性、その発生と発展は、分子という特別な階層、つまり、階層構造図上で原子の上に必ず置かれるほどには一般的な存在でないもの（後述）を含み、高分子をなすことに由来する。また、液体の水という特殊な分子が、高分子がつくる細胞にも、その外にも多量に存在し運動していることが注目される。この条件が地球系の、奇跡的とも言える歴史経過で生まれたものであることについては、非常に多くの著者が論じている。

地球表層系は、その構成物に、上記のような特質を持つ副系列をなす生物が存在する点で、地球の内部と比べても特異である。その遺骸、遺物（内部運動を失っている）が大量に含まれていることで、その複雑性がさらに大きくなっていることも指摘されねばならない。“地球表層環境”は閉鎖系でないことは明らかだが、人類（ヒト）とその社会を含む生物全体と無生物全体とを一つの系として四次元的に捉えなければ、諸問題の把握、解決を誤ることになるのは、このような階層構造、複雑系の視点からみれば当然である（志岐 2007）。この、幾度か破局の危機に晒されながら40億年を生き延びてきた系は“ガイア”と呼ばれる（第1図）。

ここで、全ての研究者が知っていながら重視していないことを一つ付言しておく。多くの人々の階層図には、原子の上の階層として、分子が置かれている。しかし、これは有機物と、水などの液体、気体についてだけ当てはまるのであって、地球上の自然界の固体の大部分を占める無機物、すなわち岩石や土壌、それに金属については成り立たない。たとえば、鉱物結晶粒子は分子の階層を挟まず、直接に原子（イオン）からなる。分子は自然が低温化した時にのみ、特定種類の原子によって作られるので、量比からみれば特殊な階層である。有機物ができなければ生まれない生物系の特殊性もこれに関係する（第1図参照）。

シームレスな地質とその階層不明瞭性

地質の階層不明瞭性

本章では、上の諸章と切り口を変え、地質学の対象である地球系が複雑系であるだけでなく、内部の階層性が不明瞭でないという特徴をもつことを指摘する。内容的には一部重複するが、あえて、小論の眼目の一つとして具体的な事例を挙げてまとめを試みる。

第2の構造系列の中でも、地質学や生物学の対象となる階

層と系は、上記のとおり、宇宙と地球の長い歴史の新しい段階の形成物であるから、複雑なこと自体は当然である。むしろ、地質学の対象の多くが、系をなさず、狭義の階層構造を持たず、広義の階層も明瞭でないものであることが注目されるべきである。

地球系は、固体地球（岩圈）、液体地球（水圈）、気体地球（気圈）からなる。これらは、惑星系という階層の下で階層と捉えて良いだろう。固体地球の下に、リソスフェアとかコアとかいった系からなる階層を置くこともできよう。もちろん空間的に上下に重なるからではない。それぞれが独立性と境界をもち、作用力の特徴ある組み合わせによる内部運動をもって系をなし、長期間準安定的に発展しているからである。ただし、これら諸階層の系間の相互作用は一般に非常に盛んであるだけでなく、相互の境界自体、甚だしく複雑に入り組みあっている。

固体地球の固体をつくるのは、自然界では、原子（イオン）が結合した鉱物結晶である。これは周囲の物質との間に明瞭な境界を持ち、独立性が著しい個別物体（系）をなす。これに対し他の2相は、内部を系に区分することができない大きな全地球的に広がる系をなす。

液体地球系をなすものはほとんど水分子である。これは地球表層で“テームス川の水が江戸につながる”ように切れ目なく分布して海をなす。その一方、地球の岩圈内部にまで大量に存在する。固体地球の下で階層である岩片や鉱物の内部にまで細かく入り込み、物性や組成の空間的不均質性、複雑性の要因をなしている（唐戸 2000 参照）。このことが、地球表層や地球の全体を、かつて島津（1974）が強調したように“シームレス”な大きな系としている。要するに、水が多量に存在することが、地球表層環境系や地球系が単純に構成階層に分けられないものになっている一つの要因である。

なお、この要因は、当然ながら水がない惑星には当てはまらない。4つの力のうち、重力（万有引力）と電磁力以外の働きがほとんどゼロであることは、水がない惑星や衛星でも同様であるが、地球ほどの複雑性は発達しない。

やや乱暴に言えば、固体地球を構成する階層物体として鉱物の上の階層に位置づけられるのは、自然界では岩石破片だけだと言って良い。液体であるマグマには形と境があり、独立性がある。その相転移した岩石体、たとえば花崗岩体にも形と境界がある。外界との相互作用も前者には存在する。だが、これらの階層の上位が何かは問題である。火成作用には時空的にもっと広く大きい物質の相互作用が関係しており、その範囲に画然とした外枠はない。さらに、火山脈、島弧の形成、発展は、グローバルスケールのテクトニクス、つまり、全地球が一つの系をなしている物質・エネルギー運動の時空的部分である。この“部分”の範囲は人為的には画くことができるが、実際の境はシャープでない。

もう少し問題を一般化して考えよう。数理物理学上の難問に3体問題というものがあることは良く知られている。4つ

の力のうち重力だけが支配する系においても複雑さの問題はある。複数の、しかも2次、3次、4次の、種類の違う力が絡み合い、多相系をなして作用する地球系やその3圏の内部が複雑なのは当然である。原子、分子の階層でさえも、地球上では原子や分子の結合・作用状態が異なる固相、液相、気相の3つの状態（相）をとりうる。そうしてこれらが混じりあって混相系をつくる。混相系が単一系よりはるかに複雑な挙動をすることは言うまでもない。

たとえば、混相流体の力学は、現在の流体力学の最先端の研究テーマである（日本流体力学会編 1991）。しかも、これら混相系内で相の性質が変化したり相転換が起こったりする。その条件は、地球の表層や内部の場所（位置）によって多様である。これが地球、とくに地球表層での階層性の発達を妨げ複雑にする基本的な要因である。

要するに、地球は複雑系である。複雑系に、地球系のように、内部の階層性が不明瞭なものがあることは不思議ではない。むしろ驚くべきことは、地球系では、生物系という枝系列が発展し、数10億年の間続いてきたことであろう。

おわりに

簡単なまとめを記すとともに、誤解があるかと思われる2、3の事項について補足を加え、かつ筆者が小論で指摘したい問題の要点を記しておく。

以上の論述において、筆者は、まずこれまで発展してきた世界（宇宙）の階層と階層構造や構造系列のとらえ方を検証し、系の把握の重要性を指摘した。また次には、複雑系である地球系は、内部の階層構造、階層性が不明瞭だという特徴があることを述べた。物質には階層性が狭義にも顕著なもの（事象）と階層性がない事象とがあるが、階層性がある事象と階層性がない事象は複合しうる。地球系においてこそ、これが顕著である。このような見方は、複雑系問題一般を考える上で必要でないだろうか。そうして、多分、階層論を発展させてきた物理学関係者が発想してこなかったものではないか。まさに複雑系である地球系の細部を研究対象としてきた者として、あえて疑問を呈したい。

もちろん、筆者は、世界の階層構造に関するこれまでの認識に誤りがあると言っているのではない。とくに、階層性の本質を作用する力の種類に見るという方向は正しいと理解している。そのことに関連して言えば、世界（宇宙）には、4つの1次の力だけでなく、それから派生した2次以上の力がある。そこで、狭義の階層を1次、2次などと分けることが考えられる。今後の課題としたい。

地球における階層性のありかたの特徴を事象毎に把握することは、理学的、哲学的自然認識の問題としてだけでなく、現実社会においても重要である。たとえば、汚染物質が、イオン、分子、碎屑粒子など、どのような階層の系として移動したのかを把握することは、その除去などの対策を考えるに

必須であるが, 世上, これを無視し, 工学的マニュアルだけに従った“対策”工事が平気で行われている. このような問題については, 別に記述の機会を得たいと考える.

「地球科学」の多くの読者にとっての関心は, むしろ複雑系としての地球の科学的認識論, 研究方法論にあらう. これについては, その3以降に論述する.

謝辞: 複雑系研究会菅原礼司大阪大学名誉教授からは, 複雑系問題の初歩から, 親切的な教示をうることができた. 辻田蒸治龍谷大学名誉教授や鶴見大学の小寺春人氏は, 初期の素稿を読んでくださり, あるいは率直な批判的意見をくださった. エディターである竹内圭史氏には面倒をおかけし, また注意深い査読をいただいた. これらの方々に厚く御礼申し上げる.

文 献

- 我孫子誠也 (1983) エンドロピーとエネルギー. 大月書店, 235+3p.
- 栗野 宏 (1997) 「複雑系の科学」と自然弁証法. 経済特集・現代と唯物論哲学の課題, 76-87.
- 不破哲三 (2009) マルクスは生きている. 平凡社, 227p.
- 半谷高久・秋山紀子 (1989) 人・社会・地球 - 私たちのシステム論から未来への構図を探る. 科学同人, 1999p.
- ホーキング (佐藤勝彦訳) (2001) ホーキング未来を語る. 早川書店, 239p.
- 池内 了 (1989) 宇宙進化の構図. 大月書店, 184p.
- 池内 了 (2008) 自然を解剖する. NTT 出版, 246p.
- 岩崎允胤 (1968) 物質の哲学的概念と自然の論理. 坂田昌一・近藤洋逸編, 自然の哲学, 岩波書店, 155-221.
- 岩崎允胤・宮原将平 (1974) 自然科学的認識の諸問題. 唯物論編集委員会編, 唯物論, 汐文社, 4-29.
- 海部宣男 (1993) 宇宙の中の人間. 岩波書店, 243p.
- 唐戸俊一郎 (2000) レオロジーと地球科学. 東京大学出版会, 251p.
- 丹羽敏雄 (1999) 数学は世界を解明できるか. 中公新書, 182p.
- 町田 茂 (1990) 時間・空間の誕生. 大月書店, 184+3p.
- 牧 二郎 (1973) 物質科学. 日本科学者会議編: 現代の科学論 I, 勁草書房, 69-94.
- 牧 二郎・宮原将平 (1968) 現代科学の物質観 - 物質の問題, 坂田昌一・近藤洋逸編, 岩波講座 哲学 VI, 自然の哲学, 岩波書店, 223-252.
- 長倉三郎・井口洋夫・岩村 秀・佐藤文隆・久保亮五編 (1998) 岩波理化学事典第5版. 岩波書店, 220p.
- 日本流体力学会編 (1991) 混相流体の力学. 朝倉書店, 220p.
- 坂口 秀・草野完也・末次大輔 (2008) 階層構造の科学 - 宇宙・地球・生命をつなぐ新しい視点. 東京大学出版会, 226p.
- 坂田昌一 (1966) 科学に新しい風を. 新日本出版社, 190p.
- 佐藤勝彦 (2010) 宇宙 137 億年の歴史. 角川書店, 252p.
- 志岐常正 (2007) 4 次元世界, 理論, 三位一体の土台—私の経験から. 地団研京都支部報, No.114, 16-18.
- 志岐常正 (2011) 時代区分と年代区分の区別 - 地質年代区分としての第四紀, 複雑系科学としての地質学, その1 - . 地球科学, 65: 231-235.
- 島津康男 (1974) 国土科学. 日本放送出版協会, 213p.
- 菅野礼司 (1993) 物質の進化とその定義について. 科学基礎論研, 121: 19-25.
- 菅野礼司 (2003) 自然の階層性からみた物理, 化学, 生物, 地学 - 物理を基礎とした包括理科を. 物理教育, 51: 290-297.
- 菅野礼司 (2013) 複雑系科学の哲学概論. 本の泉社, 197p.
- 高安秀樹 (1986) フラクタル. 朝倉書店, 181p.
- 田中 正 (1997) 場と実在 - 量子論の世界像. 新哲学講義5 コスモロジーの闘争, 岩波書店, 135-165.
- 田中 正 (2008) 湯川秀樹とアインシュタイン. 岩波書店, 366+33p.
- 辻田蒸治 (2003) マクロの (巨視的) 世界. 志岐・清水・辻田・川平・池田・平賀・好広, 新編宇宙・ガイア・人間環境, 三和書房, 10-34.
- 山口昌哉 (1986a) 現代科学の術語集, 相対論から AIDS, カオスまで. 駸々堂, 235p.
- 山口昌哉 (1986b) カオスとフラクタル. 講談社, 235p.

志岐常正. 2014. 宇宙, 地球の構造的階層性－複雑系科学としての地質学 その2－. 地球科学, 68, 173-182.

SHIKI Tsunemasa. 2014. System formation levels in The Universe and The Earth - Geology as a science of complex systems - part 2. Earth Science (Chikyu Kagaku), 68, 173-182.

要 旨

近年, 自然をつくる力の種類と作用の仕方の階層毎の違いが注目され, これによって階層や階層がなす構造を定義する考えが出されている. これを狭義の階層, 階層構造とする. 一方, 広義には, 形成要因を問うことなく, 特徴の違う系が集合していることだけを階層の基準とする. いずれにせよ, 階層の認定には, それをつくる系の実体的認定が必要である. 階層が発達していることを階層性があると言う. 宇宙が生まれ, 4つの一次の力がつくられ, 相互に作用し, さらに2次～4次の相互作用が派生するにつれて, その中に自発的に複雑性と階層性が発展した. 1次の力の違いによって生まれた諸階層は3つの構造系列をなしている. 第1次と第3次の構造系列の形成は表と裏の関係にある. 第2次の構造系列は, 宇宙が膨張して低温部が生まれる中で創発された諸系からなる. この系列には, 細かい粒子部分を除けば, 狭義の階層が認められないという意味で, 階層性が希薄な部分が大きく複雑に発達している. しかし, その中の地球系には階層性が顕著な生物の集団(生物系)がある. 地球系ではそれらの系や物質が絡み合い, 相互に作用している. 地球系とその内部, そして, ヒトが生きる地球環境系(ガイア)は典型的な複雑系である. その内部の階層の系や階層をなさない物質間の相互作用を検証することは, ヒトが自らの生きる方策を探るためにも必須である.