

地質事象におけるカオス, 法則と法則性 — 複雑系科学としての地質学 その 4 —

志岐常正 *

Chaos, laws and general tendencies of geological affairs — Geology as a science of complex systems — part 4

SHIKI Tsunemasa*

Abstract Chaos occurs often in fluid, namely in water and air. Even the solid material in the earth's crust and the 'Solid Earth' have some fluidal nature. This can happen in nature especially over a very long time. Chaos occurs commonly in human society also. The combined effect of these two kinds of chaos, natural and social chaos, can be a deadly complication. Laws (rules) in nature can be distinguished into two kinds. One is the principle (axiom) which does not demand demonstration (proof). Another is a law (rule) which is induced from the principles. On the other hand, some so called rules which is often adapted in 'scientific' works are, in reality (fact), mere 'general tendencies'. In these cases, possible occurrence of chaos also must not be ignored. Many 'general tendencies' in nature, however, have often been dealt with as 'definite rules (laws)' in geosciences. A typical example is the use of the 'correlation rule' between the length of an active fault and the strength of an earthquake for pre-estimation of the earthquake strength around atomic stations in Japan. Seeming regression lines of data distribution have been applied for estimation without any examination of the real geological causes of the data variance.

Key Words : complex systems, chaos, laws in nature, pre-estimation, geology

はじめに

本編では, その 2 (志岐 2014), その 3 (志岐 2016) に引き続き, 複雑系に関わる諸概念に関わる 2, 3 の問題を取り上げる. まず, 筆者が関心をもっている事象の変化パターンの多様性, とくにカオスとカタストロフとの関係その他の問題を考え, 次に, 法則と法則性の区別を検討する. 言葉の定義をスコラ的に議論することが目的ではない. 複雑系の事象変化パターンの多様性に無頓着であることが, 今, 一般社会だけでなく専門科学者の研究にも, 無駄な議論対立や混乱を招いていると考えるからである. 筆者は, この混乱が, 激甚災害発生の社会的要因の一つともなっていると思う. 東日本大震災発生以来, 調査・研究の盲点や想定外の事態の発生要因が深刻に検討されてきたが, この問題を考える上でも, 複雑系の諸概念を踏まえた理論的検討が必要である.

なお, 「全地球史解説」(熊沢ほか編 2002) においては, 地球を複雑系として見る見方が貫かれている. だが, そのことに注目している研究者は, この著作の関係者以外には多く

ないと思われる. そうなる理由は, 皮肉なことに, 地質学の対象が正に複雑系であるからではないだろうか. しかし, この問題は本編のテーマではない.

事象の変化パターン — とくにカオス, カタストロフ, フリーズ

自然界の流動とカオス

ここでは, 時間の経過でランダムな方向に進みながらも, 決定論の大枠の範囲にとどまっているもの, つまり“決定論的カオス”を取り上げる.

地質学の対象は, 志岐 (2014) で記述したように, 階層性があり明瞭でない複雑系である. 複雑系の変化においてもっとも重要なことは, 創発と自己組織化であろうが, その中でしばしば起こる現象として注目されるものにカオスがある. 複雑系には, 何時でもどこでもカオスが発生するわけではない. しかし, その発生は予測できない. カオスは間違いなく, 複雑系に最も特徴的な興味深い変化である.

2017 年 2 月 20 日受付 2017 年 8 月 10 日受理 担当エディター 金井克明

* 京都支部 〒 611-0002 宇治市木幡北畠 15-8

15-8, Kitabatake, Kohata, Uji City, Kyoto 611-0002, Japan



第1図 コーヒーとミルクの写真が示す、コップの中のカオス。時系列的変動でなく、その一瞬のパターンである点で、ローレンツ・アトラクタやジャパニーズ・アトラクタの図とは異なる。

Fig. 1 A picture of chaos appeared in a coffee cap.

カオスについての著作や論文はおびただしく出されている。地球科学的問題に関するものもある。地質学関係では、伊東敬祐がすでに1980年代以来、カオスに関する仕事や解説的著作を発表している（たとえば伊東1993, 1998参照）。

カオスが流れにしばしば発生することは良く知られている。そこで、自然界に存在する流れをざっと見渡してみる。

地球系には、気相、液相、固相があるが、そのうち気相（気体）と液相は流体であり、その運動にカオスが発生する。たとえば、洪水や津波の流れに見られる渦は典型的なカオスである（第1図）。

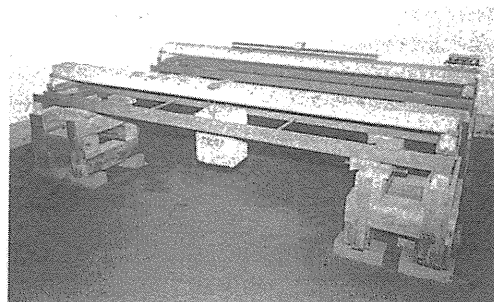
気相については今、省略する。

河川流や洪水流だろうが津波だろうが、それを支配する原則はニュートンの運動の法則である。それからだちに、流体の速度が流体にかかる力に比例して変化することが導かれる。ところがその方程式は複雑すぎて解けない。実は、数学者が「流体の運動方程式を解くことは今の数学の力を越えている」と言っている。方程式が解をもっているかどうかさえ分っていないという（丹羽1999）。流体の運動は完全に相互依存的で、流体の小さな「断片」それぞれの運動が、そのまわりのすべての「断片」の運動に左右されるからだろう。とくに乱流では、概算することも平均することもかなわない（フィリップ・ボール；塩原通緒訳2011）。

土石流は液相の水と固態の碎屑物（ときに気体を含む）からなる混相流である。その中では、異なる相が異なる速度で動きつつ相互に作用する。混相流体の力学は、今、急速に発展しつつあるが、基礎方程式が複雑な形をとるので、非混相の非粘性・非熱伝導性流体に見られるような基礎定理が一般的に成り立つ可能性はない（日本流体力学会1979）。このような“ややこしい”流れには、なおさらにカオスが現れて不思議ではない。

混相体の流動といえば、地盤、地層の液状化、流動化はその典型例である。固体粒子間隙の水圧が、地震動により異常に高まる場合などが良く知られている。

固態にも流動は起らないわけではない。そのもっとも普通



第2図 熊谷、伊藤その他による花崗岩柱の長期クリープ実験。前方は荷重、後方は自重状態。伊藤（1991）より。

Fig. 2 The creep experiment during a very long period of time of a large granite column (carried out by Kumagai, Ito and others). Frontward: with weighting. Backward: without weighting (Ito 1991).

なのは塑性流動である。破断（脆性破壊）後の塑性変形も一種の流動である。自然に存在する固態は岩石・地層と土壤である。これらは固態である鉱物（結晶）からなる。ここで、これらにごく微量でも水が含まれていることが問題になるが、ともあれ、続成が進んで水に乏しい地層も、一見硬い岩石も褶曲する。褶曲の形やメカニズムは多様であるが、その多様性の一端に、破断やすべりを伴わない流れ褶曲を置くことができる（佐藤2003）。

横山次郎は、すでに1940年代から、極微の原子結合から島弧―海溝系の形成機構といった大きな問題までを総合的に結びつけて考えていた。その中で、地殻、基盤の造構運動、山脈の形成に關しての塑性変形の役割を重視した（横山1944, 1956；Makiyama 1979；日本材料学会編1966）。塑性変形による“基盤褶曲”が限界に達すると断裂が起こる。この考えは、ネオテクトニクスの体系を建てた藤田によっても受け継がれている（藤田1983, 1985）。

そもそも、粘性や塑性を全く持たない完全な弾性体はない。岩石の流動には粘性さえも現れる。これは、唐戸（2000）によれば、鉱物結晶の格子欠陥や原子の並び方の乱れた転位などの、ゆっくりした流れによる。言うまでもなく、この岩石、岩盤の流動性は温度、圧力によって急激に増す。結晶片岩の褶曲構造パターンは、正に粘性流動とそのカオスを思わせる。

ここで、熊谷直一と伊藤英文や笹島貞雄などによる巨大岩石棒の長期クリープ実験（伊藤1984, 1991；熊谷編1991；笹島編1991）を紹介しておく（第2図）。この実験は、215cm × 12.3cm × 6.8cmの花崗岩の角棒を試料として、1957年以来数10年にわたり続けられた。その結果によれば、岩石はどんなに小さな応力に対しても、液体のごとく、時間に比例して限りなく流動する。この試料の粘性係数としては 1.3×10^{20} poiseが見いだされている。言い換えれば、花崗岩は（その他の岩石も）降伏応力を持たず粘性流動する（伊藤1991）。なお、伊藤（1984）は、上記のような実験や事象に基づき、地殻さえも、粘性体であると考えている。

試料でなく自然状態での巨大な岩体は、応力の作用時間が

短ければ弾性体のようにふるまうが、これも長ければ粘性液体のように行動する。このことは、実は古くから認められていた。日本材料学会編（1966）に紹介されているが、すでに1950年代に、たとえば Scheidegger（1958）は、時間間隔を（1）0秒～4時間、（2）4時間～15,000年、（3）15,000年以上に分け、それぞれの時間間隔に応じて岩石の力学的性質が違うことを述べている。地殻内の粘性流動と理解されている現象で有名なのが、後氷期のスカジナビア半島の隆起である。この場合、地殻の粘性係数として 3×10^{21} poise が得られている。そういえば、アルプス山地の岩層の著しい褶曲構造には、粘性流動を思わせるパターンを示すものがあることは、古くから良く知られていた。日本列島の古い付加帯の非～低変成層も同様である。

地震学では今でも地球を弾性体として扱うが、唐戸（2000）によれば、地震の伝搬特性を良くみると、それが弾性体と粘性流体との中間的な振る舞いをするのがわかる。ここで言う“地球”は地殻だけでなく固体地球全体を見る意味かもしれない。

固体地球は球殻構造をしているが、そのうちで、とりわけマントルは流動し、内部に対流やブルームが発達する。外核は溶融体であると今でもされている。してみれば、これら全体としての、あるいは部分、部分の、テクトニクスな運動にカオスが起って不思議でない。

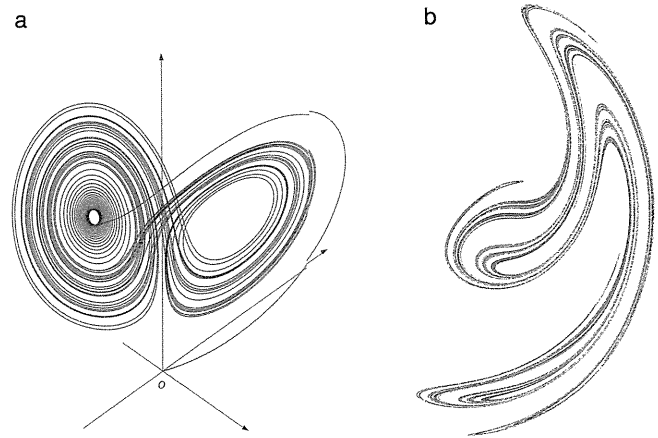
要するに、地球系とその内部では、いたるところで、また大小の規模（広義の階層：志岐 2014）で流動がある。そうとすれば、カオスもまた、至る所で発生していると考えられる。地球テクトニクスを流れのカオスの観点から見るとは、興味深いテーマであるだけでなく、地質学の根本問題と言えるだろう（熊沢ほか 2002 参照）。

カオスとカタストロフ

ここにもう一つ問題がある。地球や岩盤の、流動以外の動きにはカオスがないかということである。岩盤は、少なくとも地表近くでは、弾性体として扱えるような運動の末に破断というカタストロフを起こすのは事実である。だから地震が起こる。カオスの問題を論ずるにあたって、弾性変形を“流動”と捉えた例や、それがカオスを起こすという論議を行った例を筆者は知らない。破断についてははどうだろうか。

橋本（1992）は、「固体に力を加えた時の座屈の起こりかたにもカオスは見られる」「たとえば、ブリキ板を手で押しつけると、ある力まではブリキは耐えるが、限界を超えると急にガタンと曲がってしまう。その折れ方が一定でなく予測し難い。これもカオスの現象である」と言っている。橋本（1992）が言うのは、カタストロフ限界到達の、予知不可能性の問題であると思われる。それなら破断でも同様だろう。

地震や斜面崩壊を考えてみよう。適当なモデルを想定すれば、これらが発生するメカニズムは、物理学や化学の法則に基づき、従来の解析の方法で数値計算して定量的に追求する



第3図 ローレンツ・アトラクタ (a) とジャパニーズ・アトラクタ (b). 逢沢（1996）より二つの図をとり並載.

Fig. 3 Lorenz attractor (a) and Japanese attractor. Based on Aizawa (1996).

ことが出来る。しかし、何時ストレス・歪み蓄積→破壊の閾値に達するかは予知（特定）できない。この特定不可能性に着目すれば、地震や崩壊も決定論的なカオス現象と言えるかも知れない。

では、一般にカオスとカタストロフとはどういう関係にあるのだろうか。

カオスの最初の発見で有名な、ローレンツの計算に現れた図形（第3図）には、カタストロフは現れていない。無限時間後にもカタストロフは現れそうにない。しかし、上に触れたように、激変現象である座屈にはカオスが見られる。カオスには、特段に激変を起こさないものと起こすものがあるのでないだろうか。別の見方をすれば、カタストロフ的なイベントのうち、明瞭な法則に従って発生しながら予想困難な場合については、橋本（1992）が言うように、カオスの性格を持つと捉えてよいのかも知れない。

破断にもカオスがあることが、地震の予知不可能な理由であろう。だが、予知と予測は違う。増田（2004, 2009）は、“世界は臨界に近い状態にあるが、臨界からのズレかたは何時でもどこでも同じではない。その世界の中で細かく観察すれば、「もし破壊が起こるとすれば、どのくらい大きな領域がどのくらいの確率で起こるか」の変動は予測できる。そうとすれば、地震のようなカタストロフも、時と場所を特定しない（決定論的でなく確率論的な）、予測の可能性はあるのではないか”という意味のことを言っている。少なからぬ地震学者が、地震予知を目指して研究を進めているのは、同様の考えによるのだろう。筆者はそれを肯定的に見ている。

以上の例を一般化して考えてみよう。現実の地球系を構成する「一般の物質」階層（志岐 2014）の中では、局所的不均一性が必ずある。差異があれば矛盾が漸次的にでも発生し、蓄積される。そうとすれば、いつか閾値（限界）に達して激しい変動（あるいは“カタストロフ”）が起こること自体は

必然的である。これは、この複雑系世界の法則と言ってよい。

ともあれ、カオスと激変、とくにカストロフとの関係の、複雑系の科学の観点からの検討は、まだ一般化されているとは言いがたいのではないだろうか。この問題は、災害予測にとって重大である。ところで、地盤の局地的不均一性とはすなわち地質とその4次元構造の問題である。地震や岩盤の崩壊がカストロフの好例であるとすれば、地質学を含む地球科学こそ、カオスとカストロフとの関係の検討を重要課題とする科学であると言えるだろう。

「フリーズ」

「フリーズ」は、志岐・鈴木 (1998)、志岐 (1999)、Shiki and Iso (2001) によって提出された抽象概念である。下記のように定義されている。

「挙動中の事象が瞬間的に停止し、その事象系(運動物質系)の様態(構造や組織など)が、その瞬間(無限に短い時間内)に、変化することなく固定されること」

この定義に厳密に当てはまる現象は自然界には存在しない。だが、近似できるとして扱うことができる現象(「フリージング」: actual freeze, または practical freeze)は、複雑系に普通に起こる。その記録を追求することは、地質学的過去のエピソードやカオスの現象の研究に新しい切り口を開く可能性がある。

フリーズは、一見、カオスやカストロフの逆のようだが、カオスの一種の突発現象、あるいは、カストロフの特殊なケースと言えるかも知れない。もしカオスの特殊な一種とすれば、予測できないフリーズがあり得ることになる。自然や社会における諸事象のフリーズ、フリージングの予測・予期可能性(possibility)は、今後の興味ある検討課題である(志岐 1999)。なお、数学者によれば、フリーズを数学的に扱うことはかなり難しい課題である。

これらの問題については、稿を改めて、もう少し丁寧に論述する予定である。

法則と法則性

法則

理化学事典第5版(長倉ほか 1998)での、“法則”やそれに関連する事項に関する記述では、“法則”と“法則性”の二つの概念がはっきり区別されていない。筆者は、これらの区別は重要であると考え、これらの区別が意識されないことが、“科学的”、あるいは社会的議論に混乱が生ずる一因であると見るからである。

法則は、個別の個体(粒子、波動、物体、生物体)の挙動と無数の個体がなす事象(系)とを支配する。これ(法則)は、科学を担う人類が地球から消え、科学が存在しなくなっても存在し、宇宙のあらゆる事象を支配し続ける。将来、地球上に新しく高度の知的存在が現れれば、彼らは、たとえばニュー

トンの運動の力学の3法則(以下、ニュートン力学の3法則とかニュートン則とか略記)やアインシュタインの相対性原理を発見するに違いない。また、地球外に高度の文明を持つ生物がいるならば、彼らは、地球人類が知ってきた諸法則をすでに知っているか、あるいは将来、知るに至るだろう。そして科学を発展させるに違いない。これは、法則の成立限界(下記)とは別のことである。(宇宙のスケールでは、この“すでに”とか“将来”とか言う言葉は相対論的に正しくないが、“法則性”との概念の違いを判りやすく説明するために、ここではあえて用いた。)

法則には、成立限界があるものとなないものがある。成立限界がある法則もその限界内に関する限り真理である。しかし、古来、多くの哲学者や科学者は、いかなる限界もなしに存在する万古不変の真理、言わば宇宙の根本原理を追求してきた。ほかの法則から演繹されない根本原理と言え、まず挙げられるのは数学の公理であろう。公理から多くの定理が導かれる。それらは、時空の何処においても成立するものとして提示されてきた。たとえば三平方の定理がそうである。しかしこれは、非ユークリッド幾何空間が存在するならば話が別であろう。実際に、現代自然科学では空間は均質等方ではない。物体が存在すれば空間は曲がっている。これは、宇宙を支配する根本法則の一つ、相対性原理の現れである。なお、“公理”、“原理”、“定理”、“法則”などの定義や内容については、白鳥(2009)に、多くの具体例について、分りやすく解説されている。

数学と実在世界との関係は筆者の手に負えない難問であり、小論のテーマに直接関係するわけでもないでこれ以上触れない。

実在するこの世界は、重力(万有引力)、電磁気力、強い力、弱い力などの四つの力によりなりたつ法則、つまり世界の物理現象の基礎にある根本法則(簡単な数式によって記述される)に支配されている。これらの力のうち強い力や弱い力が及ぶ距離は極めて小さい。これに対して、重力と電磁力はこの宇宙一杯に及ぶ。つまり、これらの力の働きが示す法則には時空的成立限界がない(志岐 2014, 第1表)。しかし、重力にせよ電磁力にせよ、距離の二乗に反比例して減衰する。この二つの力についてみれば、重力に比べて電磁力の減衰は激しい。地球系のサイズでは、これら二つの力の作用の相対的大きさが、物質内で時空的に微妙に違う。それで、これらの力の組み合わせで派生する事象、物質、法則が多様になる。たとえば、流体力学の諸法則、化学反応の諸法則(基本的に電磁力に起因する)など、実際のところ無数である。これらをまとめて(化学における法則も含めて)、以下に仮に“物理・化学的法則”と呼ぶ。4つの力が働く法則から次々と2次3次の法則が派生し、またそれらの絡み合いが進み、より複雑な関係式によって記述される無数の事象が生じた。これらには成立・作用限界がある。宇宙の根本法則はいざ知らず、これらの諸法則は、宇宙、地球の歴史の進行とともに生まれて

きたものである。事象が起らなければそれを支配する法則もあり得ない。したがって、そのような法則に、発生のはじめから作用限界があるのは当然であろう。だがこの作用限界が、後述のように、しばしば忘れられ、無視される。

自然の法則は上記の“物理・化学的法則”だけではない。地質学の根本には、地層累重の法則やそれに類する、証明を要しないという意味で“公理”，あるいは“原理”のように見なされている法則がある。これは，“物理・化学的法則”と違ったマクロな形で、歴史を越え、地球の外の宇宙のいづこにおいても現われる。それは、因果律や宇宙に働くもっとも基本的力の一つである重力に直接に起因するからであって、地震の周期性などとは質的に違う。地質学でこれを“法則”と呼ぶのは許されてよいだろう。この問題の複雑系研究における意義については、稿を改めて述べる。

“法則”の認識は、無限の概念から始まる。あるいは、これが含まれると言ってよいかもしれない。無限には、「無限小」と「無限大」がある。無限の概念が含まれる典型例は、ニュートンが想定した質点である。質量があつて大きさが無限に小さいものは実在しない。しかし、それが担うニュートン力学の3法則を実在する原理（公理）と認識すれば（それに加えれば）、上記のように、現実世界を支配する多くの法則を組み立てることができる。この、いわば“第一次”の法則から派出される諸法則も、本当に数学的な厳密性をもっては、つまりどんなずれもなしには、発現することがあり得ない。

個別物体の運動法則については、ここで論ずべき問題がないので、以下の記述では省略する。

無数のものが集ってつくる系の内部運動も法則に支配される。ブラウン運動のように、個性を持たない物体が一見ランダムに動いているように見えても、無数の個体の運動の集積結果としては、一定の確率法則に従う現象がある。また、集団が一つの系をなすときのその全体や部分の運動には法則が現れる。その例は、化学、熱力学、流体力学などに非常に多く見られるが、系をなす集団が個性のない個体からなり、その数が無数である“理想的”場合に成立するものである。

実在の世界ではこの条件が成り立たないが、個体数を無数と見なしてよい場合には、この法則を適用して支障がない。真に無数のものの集まりの系も、実際の世界には存在しない。しかし、實際上、非常に微小なものの無数の集まりと見做してよいものの運動の理解には、無数のものに成り立つ法則（定理と呼ばれる）を適用することができる。流体の運動に関するオイラーの方程式やベルヌイの定理の応用はその好例である。

法則性

まず断っておくが、一般社会では、“法則性がある”とか“法則的である”とかの言葉は、a) “ちらばりはあるが全体的にそのように分布する”ことの他に、時として、b) “厳密に法則に従う”ことをも含意するように思われる。理化学事典（長倉ほか1998）でこの二つの概念の区別がされていないのは、

そのためかもしれない。本論では、aの意味に限定して“法則性”という。

上記のように、非常に多数の個体がなす事象も、法則の支配の下で、しばしば、ある程度の“法則性”をもって、あるいは“法則的”に展開する。ややこしいのが、それほど多くない個数の集まりの場合である。その有限の程度によって性格が全く異なり、それに応じて研究方法に注意が必要である。気象や海流の研究では、事実上無限個の粒子の集合と扱ってよいが、地震についてはそうはいかない。地球系（あるいはガイア）を構成するものには、調査・研究の対象の個数、あるいはその種類の数が数10個に過ぎないものが少なくない。たとえば、島弧—海溝系とか、日本列島の断層の“活動”などには、それらに働く物理・化学的法則は共通であるのに、規模や周期性には、個性性が強く現れる。要するに、それが複雑系、言い換えれば地質学、地球科学の対象の特質である。

以下、法則や法則性というものの性質について、さらに次の二つの切り口で検討する。

a: 適用限界の有無, b: 真に“法則”と呼べるものであるか否か。

法則性は、法則の現れとして現象する。“規則性”と呼ぶ方が分かりやすいかも知れない。これは、ばらつきを伴いつつ、統計的にのみ認められ、モデル化され、しばしば“法則”として扱われる。“経験則”はこれである。その底には物理・化学的（本質的）理由があるのが普通であるが、このことについては後述する。

“法則性”の例として、まず良く知られた「ボーデの法則」（「ティティウス・ボーデの法則」ともいう）を取り上げる。これは、

a) ニュートン則（法則）の下で生まれ、維持されている法則“性”である。

b) 形成の歴史、プロセスを反映している。

ここでは“法則性”が式で表わされているが、各構成体の軌道は、これから僅かながら外れる。海王星や冥王星（準惑星）のような、かなり外れる惑星が存在する。さらに、“法則”上はある大きさの惑星があるべき位置の一つにそれがなく、小惑星群がある。これらの事実は、小惑星の特殊な形状その他と合わせて、かつて、いろいろと議論された（小森1995参照）。筆者は、運動の法則の支配の下での太陽系の自発的発展だけでなく、その歴史の中で何か特別な事象あったことを示唆していると見るのが自然であろうと考える。しかし、それを論ずることは、ここで「ボーデの法則」を取り上げた目的ではない。要は、「ボーデの法則」と呼ばれてきたものが、“法則”でなく“法則性”の典型例として挙げられることにあ

る。法則“性”の発現が典型的複雑系に限られるものではないことは、上記の惑星の軌道の例にみるとおりだが、地球上の複雑系には極めて一般的である。断層活動、地震の大きさや周期性、山崩れ地すべりの周期性や免疫性、河川の蛇行、碎屑物質の粒度組成、生物生態系や進化の諸法則など、その例

は無数にある。これらは諸要因が絡んで働くことによって生まれる。その“絡み”の時間に着目して言えば“歴史的”なものである。社会科学で、たとえば生産様式の変化・発展に基づく社会構造の変化に関する“法則”と言われるものも同じである。つまり、これらには実体的な“法則性”はあっても、本論で言う“法則”ではない。

念のために付記すれば、基礎科学としての物理学や化学の無数の室内実験の目的は、“法則”を発見することであって、法則“性”が認められれば良いのではない。実際問題としては、どんなに注意深く行っても、データの散らばりを完全になくすことはできない。この散らばりを正規分布であるとし、回帰直線からの散らばりを「誤差」と見なして、この直線が表すものを“法則”として提起することは、科学的認識の過程的手段として間違っていない。この研究実践上の事情が、“法則”と“法則性”との概念の区別を分かり難く、あるいは曖昧にしてきたのかもしれない。

法則性は確率論的現象に（すなわち、上に触れたように統計的に）しばしば現われる。上記、無数の要因が働く場合、現象は数学的確率分布をする。多数の場合にも、数が多いほど、大数の法則によってそれに近づく。一つの要因が支配的に働く場合にも、他に多くの要因が絡まる場合にも、現象は一つの高いピーク（最高値）を示しつつ、その周りに分布する。この場合、観察者がデータの散らばりを偶然的な誤差とし、その分布をただ一つの法則に従っているはずのものと思うことは、社会でしばしばある。科学的議論をしているつもりの世界でも、有限な数のデータの散らばりを正規分布と見なして回帰直線を引くことがある。たとえば、断層の長さや発生地震の大きさとの関係に関する当初の「松田式」（松田 1975）は、これを提出した本人は目安を示しだけのつもりなのに（たとえば松田 1995, 2005 参照）、一時、決定論的な“法則”として、原発やダムその他構造物の安全性の評価に乱用された。

ここには二重の問題がある。一つはデータの直線からのずれが、しばしば測定誤差の正規分布の場合のように扱われていることである。数学的検定をきちんとすればよいのではない。地震動に関する問題の多くの場合、元々の母集団の標本（データ）の数が少なすぎるのが問題だが、もっと基本的な問題は、質的に異なるものを“ごちゃ混ぜ”に扱っている可能性があることである。実際には、この“回帰直線”からのずれは発生地震の大きさ以外の要因、すなわち震源や伝達経路の地質と地質構造の多様性、不均質性を大きく反映しているはずである。この点で、松田式の安易な適用は問題である。強震動予測方法の一つである「入倉レシピ」（入倉 2004）では、はじめの松田式と異なり断層面の性状は一樣でないとし、アスペリティとそれ以外の領域の存在を設定している。それは良いが、やはり、その質（物性）の分布をきちんと把握して用いられているとは言いがたい。

なお、地震動の大きさの予測に関しては、もう一つの問題

がある。図の縦軸（地震動の大きさ）のスケールがログ（Log）であり、大きな断層の場合、そのわずかな違いに対応する地震動の大きさの違いが非常に大きいことが、實際上、しばしば無視されている。しかし、本編のテーマではないので、ここでは省略する。原発の安全性に関わる地震動評価に関する“残差”（散らばり）の数学的扱いの問題については、内山（2015）が詳しく述べている。これを参照いただきたい。

我々は、多くの経験をして、事象間の相関関係を認めるとそれをよく経験則とみなす。もちろん相関と因果とは違う。ある因子が支配的であったり、直接にはほとんど働いていなかったり、いろいろな場合がありうるが、現実の世界では、ただ一つの要因だけしか作用していないことはあり得ない。ところが、たとえば地震の大きさを予測する際には、この単純な想定がしばしばなされている。つまり、活断層の長さ（あるいは面積）と地震動の大きさの既知のデータを図に落とし、それらデータの分布に“回帰曲線”を引き、今後発生する地震の大きさを推定している。

繰り返すが、複雑系である地球系の諸系の事象を扱うに際しての基本的な問題は、1) ほとんどの系は無数の個体からなるわけではないこと、2) 実際の自然の事象には、程度の差こそあれ、複雑な重相関があることを忘れてはならないことである。観測で得られる、法則を示すかのように見える式は経験式であって、法則を示す式ではない。そこでのデータの“回帰直線”（とみなす近似式）からの散らばりは無視して良いものではない。しかし、無意識的に（あるいは意識的に？）しばしば無視される。上に触れた活断層の評価の状況は、その著しい例である。

同様の乱用は、ボーリング調査の N 値の使用にもしばしば見られる（平井 1989）。

一般にいう経験則はここで言う“法則”ではなく“統計的法則性”のことである。記載的、現象論的なものを実態として構造的に捉えたものであり、その背後には、実態を成り立たせる本質が働いているには違いない。しかし、数学的に式で記述すれば、個別的事物はそれに厳密に従わず、式からずれる。

念のため記すが、経験則、法則性を社会的目的で公式として利用することは、いつでも悪いとは言えない。ここで強調しているのは、法則性を法則と取り違えて社会的実践に機械的に適用するのは過ち、あるいは災いの元だということである。たとえば地震の予知可能性に関し、専門家の間でも論争があるが、地震発生の周期性が、その底に物理法則が働いているとはいえ経験則であることは、専門家の誰でも知っている。予知は確率論的には可能であるが、決定論的には不可能である。それでも、周期性（法則性）を見いだすことは、防災的地域計画を考える上で有用である。この両面が、一般市民に判りやすく説明される必要がある。

ちなみに、上にも触れたが、理化学事典（長倉ほか 1998）128p. には、自然科学のすべての法則が経験則であるかのよ

うに読める箇所が見られるが、個別物体に働くニュートン則を含め、四つの力の直接の作用による法則も、上記集団系に働く作用法則も、経験則ではない。もっとも、実験に裏付けられていることを“経験”に含めて言うのなら別である。これはむしろ語学的問題かも知れない。“法則性がある”という言葉も、“法則が成立する”のか“法則的とも言える強い傾向性がある”のか、必ずしも明確でない。“法則的である”も“的”にアクセントを置くか否かで意味が違う。これらを区別した叙述が望まれる。とりあえず、この筆者の一連の論説では、厳密性が必要な場合、個別の物体に働くニュートン則や、集団に働くパスカルの原理、熱力学の法則などのような法則を“(決定論的・統計論的)法則”、バラツキながら統計的に傾向性を持つものを“(経験的・統計的)法則性”ということにしたい。後者は傾向性を持つ散らばりの回帰直線の式とそれからの散らばりなどで示されう。

カオスと法則、法則性

カオスにも発生する原理はある。これは良く言われる、決定論的カオスが一定の枠(数式で表される法則)の元での変化であることは別の問題である。逢沢(1996)によれば「リャプノフ指数」という専門用語がある。後で触れる「べき数の法則」の問題もこれに関係すると思われる。「リー・ヨークの定理」という定理も重要であるという。これらはカオスに関する基本的(原理的)法則だが、上記の“法則”の分類とどう関係するか、筆者には検討できない。

筆者が注目したいのは、カオスがつくるパターンでも、ここで言う法則“性”が、ないとは必ずしもいえないことである。ローレンツ・アトラクタはきちんとした周期を持たない。しかし、繰り返して同じようなところを回り、あるいは飛び離れ、また戻るとも見える。ジャパニーズ・アトラクタでは、さらに、時刻毎に打った点が、密なところと疎なところとの帯を繰り返すつくることが顕著である(第3図)。一般に、カオスには「統計的安定性」がある(逢沢 1996)。これらが現実の自然で法則性として現れることがないのか。実例があれば知りたいところである。

なお、生物の進化史には、爆発的な適応放散と定向進化との繰り返しがみられる。上記アトラクタのパターンと、繰り返すことでは似ているが、これには単一でなく複数の要因が関係しており、別の性質の事象であると考えられる。

べき数の法則

近年、複雑な因子が働いているある種の自然現象や社会の事象の数値が、比較的簡単な指数分布やべき分布をなす例が見いだされ、複雑系科学の研究課題として着目されている。たとえば、増田(2004, 2009)のノートや Shimada and Koyama (2015)によれば、地震の発生のような自然現象や政治の動向(具体的には投票率の変化)などの分布に法則性が現れる。このことが、指数の“法則”やべき数の“法則”

が認められると記されることがありうる。しかし、これらは正に経験則であり、筆者の分類では“法則性”に属する。

コンピュータシミュレーションによる複雑系の研究

“豪腕”シミュレーション

複雑系がカオスを起こすこと、法則性が統計的にしか存在せず、それを決定論的法則のように扱ってはならぬことは、自然を調査・研究し具体的に把握する上で、また社会的に辛いところである。カオスが起こるような複雑系の挙動を、数式を用いて追求することは、理論的にはナンセンスあるいは無理なのだろうか。多くのコンピュータ専門家は、そうは考えていないらしい。

コンピュータを使用すれば、無数と感ずるほど多数の因子の作用を解析できる。複雑系研究の複雑系の事象に法則性を見出し、予測を現実に行おうとする研究が、今、一つの大きな流れとして発展しつつある。既知の因子を入れて計算し、現象を再現できれば(自然や社会で実際に起こっている事象と整合すれば)、事象のメカニズムや要因が認識できたとするようである。増田(2004, 2009)によれば、近年では、破局現象が起こるような物理的モデルさえもシミュレーションができるようになった。

正直なところ、筆者には、この研究方向は、従来の、非複雑系科学の分析主義的解析と、思想的に同じであるように見える。そもそも、従来の解析の方法では認識できない事象、とくに、予測できないカオス現象の存在に気付いたのが、複雑系研究の端緒ではなかったのだろうか。上記のフィリップ・ボール(2011)や、丹羽(1999)その他の数学者が言っている「カオスの運動方程式は複雑すぎて解けない」という説明はどうなるのだろうか。この説明は誤りではないだろう。また、上にも触れたが、たとえば流体の運動方程式を解く事は、今でも数学の力を超えている。方程式が解を持っているかどうかさえ分っていないという。

しかし一方、現実の世界の認識は進めない訳にはいかない。そこで、コンピュータの“腕力”の駆使は、むしろ式を解くことを諦めた上で、現実の事象の変化をできるだけ把握するために、ほかに選択の余地がないからの方策なのだろう。たとえば気象予報のためには、コンピュータシミュレーションによる気象現象再現の研究は、いっそう進められねばならない。

カオスは、はじめに数式があって、それに基づく計算を行ってみたら発見されたのだった。これに反し、上記の場合は、多数のデータを処理して法則や法則性を見出そうとするものである。これは数学で言う逆問題の解析であり、その意味では地質学の主要な課題の研究と共通性がある。

収集(“経験”)した無数データのパターンの適用

実際の天気予報で多用されているのは、上記と少し違う方

向の方法、つまり経験的パターンの活用であるらしい。要するに、できるだけ多くの事例をコンピュータに記憶させ、その中から、現在の気象と最も似ているケースを選んで、それが辿った推移をもって今後を推測する方法である。地震や津波の発生や規模などの予測も、気象庁から出される情報を見る限り、正にこの手法によってなされていると思われる。この手法の有効性は、将棋の差し方で試され、名人をも打ち負かすものであることが明らかにされた。気象の長期予報でも、実際に精度を上げるに役立っている。“経験則”を法則として適用するのではなく、非常に多数の経験（実例）から似たものを選んで使用することによって、上に論議した論理的問題、すなわち“統計的法則性”を“(決定論的)法則”として扱う誤りを外しているのだと思われる。だが、気象予報で成功しているからと言って、何に関してもこの手法を適用し、複雑系の諸問題が克服されたかのように見なすのは問題であろう。気象の場合と異なり、地震や津波の場合には、限られ数の事例についてしかデータがない点で、この手法は、適用の安全条件を欠いている。東北大震災や熊本地震災害の“想定外”事態の発生は、その典型的例であった。

コンピュータシミュレーション依存への根本的疑問

ここで筆者が疑問とするのは、コンピュータによるパターン研究には原理的に問題がないのかということである。

デジタルコンピュータの演算メカニズムは、1かゼロかの2択の連続である。つまりデジタルである。ところが実際の世界はデジタルではない。とくに、我々ヒトが住む“通常の物体”、つまり気体、液体、固体などからなる地球では、志岐(2014)が論述し、本編でも上に触れたとおり、それを構成する諸系の階層性が不明瞭である。言い換えれば諸系の独立性が弱く、大なり小なり開放性である。このことが、地球系の複雑系としての特徴を、他のどの階層の系よりも顕著にしている。つまり、系の境界は、島津(1974)が言ったように、しばしばシームレスである。このような系をデジタルに扱うことには疑問がないのだろうか。カオスは起こらないのか。この問いは、超巨大コンピュータによる超大量計算による複雑系研究方式の根本問題ではないのか。専門家の間でこれが検討されていると聞いたことがあるが、残念ながら、今、思いだせない。

地質学的逆問題解析

地質学では、事象の発現の結果生成されたもの(物)を調べることにより、過去に起こったことを認識する。これは、数学的言葉で言えば、逆問題解析である。

地球惑星システム科学では、46億年という長期に渡る、地球や惑星というシステムで実際に起こったことを調査、発見し、それに基づいてシステム全体の振る舞いを理解しようとする。今、複雑系科学の研究者達は、上記のように、要素還元的方法だけでは分らない物事の全体の振る舞いを、なん

とか予想したいと考えているようである。この点で、46億年にわたる実際に起こったことの地質学的情報は貴重でありうる。つまり、コンピュータによるシミュレーションで推定されたことが実際と整合しているか。たとえば、地質調査で明らかにされているカストロフィックなカオスがコンピュータシミュレーションで見いだされうるかという問題が、これによってチェックされるかも知れない。これは、数量的に限定的ながら、コンピュータの演算に上記のようなカオスが起っていないかをチェックすることでもある。ただし、46億年では時間の長さが不足であるかも知れない。

おわりに(まとめに代えて)

本編の意図は問題の整理である。しかし、物事は(とくに複雑系では)、世に言うとおり、“逆もしばしば真である”。正直なところ、問題自身が多様、複雑であり、分からないことばかりである。ともあれ、地質学の対象を含むこの複雑系では、何時、いかなる場所にも、予期せぬカオスが起こる可能性(probability)があることは疑いない。これは公理と言えるだろう。カオスは、地球上の至る所で、大小の規模で発生していると考えられる。とくに、46億年の地球テクトニクスを流れのカオスの観点から見るとは、興味深いテーマであるだけでなく、地質学の根本問題と言えるだろう(上記、熊沢ほか2002参照)。

本編では、少なくとも“法則”と“法則性”の区別の重要性は指摘できたと思う。これを単なる言葉の問題に過ぎないと思う者もあるかもしれない。しかし、術語のコンセプトの整理は科学的思考に重要である。現実には、これに混同があったことが、地震や津波などのカストロフの想定を狂わせた。

この二つの概念の違いは精度ではない。地震の周期性に比べて明日の天気予報の精度が高いことは、後者が法則に近いということではない。

複雑系での事象に現れる“経験則”は“法則”でなく、筆者がこの論説で言う“法則性”である。カオスを含みうる事象のデータの分布に回帰直線を引いて、これを法則として扱うことは、“想定外”の事態を起こすリスクが大きい。

特に付言しておくが、現実には、経験“則”、統計法則性を“法則”のように扱っているのが、原発やダムその他の設計、設置マニュアルである。原発設置地に起こりうる地震や津波の規模推定にあたり、今、原子力規制委員会を含む多くの関係者がこの誤りを冒しているように筆者には見える。2011東北沖巨大地震と津波の「想定外問題」の科学的側面にも、すでにこのマニュアルの方式の限界が露呈していたのだが、それは教訓とされなかった。どの式にせよ、経験式を法則と同様に扱うことは理論的に間違っている。このやり方は止めなければならない。

なお、誤解があっては困るので重ねて記しておくが、筆者は法則性を知ることが無意味だと言っているのではない。と

くに、防災上の問題として、たとえば何にどのくらいの予算を投入すべきかと言った社会的な問題がある。これを検討するためには、確率論的予知の精度向上は、地球科学的にも社会的にも重要な課題である。個別ケースでの法則性のあり方は、複雑系科学の実際の適用対象として、軽視されてはならない。

ところで、ダーヴィンの進化論は、数多の例の情報を基礎にしたものであるが、統計数学的な議論をしたわけではない。もちろん、データに回帰直線を引いたりしてはいない。このような質的転化に関する法則性は、数式では扱われないことが、社会科学では(地質学でも)、これまで普通だったと言えよう。それが非科学的だとは言えない。実は、筆者自身、ごく少数の例から法則性を仮説として提起したことがある。「島弧発展段階説」(志岐ほか 1976; Shiki et al. 1980 など)がそれである。

謝辞：小論の内容を検討する中で、嶋田一郎東北大学名誉教授や菅野礼司大阪大学名誉教授に教示や討論を頂いた。フリーズコンセプトの提起については、故山口昌哉京都大学教授の御生前に、また磯 祐介京都大学教授に激励や教示を頂いた。数10年前のことになるが、水谷伸治郎名古屋大学名誉教授は、確率論的現象とは何かについて教示され、数理論的問題についての眼を持つ必要を教えて下さった。エディター金井克明氏、査読者小寺春人氏、竹内圭史氏には有益なご指摘、ご助言、疑問、批判をいただき、原稿を大きく改善することができた。いずれも深く御礼申し上げる。

文 献

- 逢沢 明 (1996) 複雑な、あまりに複雑な—複雑さの科学を解明するカオス vs コンピュータ編。現代書館、東京、213p.
- フィリップ・ボール：塩原通緒訳 (2011) 流れ—自然が創り出す美しいパターン。早川書房、東京、302p.
- 藤田和夫 (1983) 日本の山地形成論。蒼樹書房、東京、466p.
- 藤田和夫 (1985) 変動する日本列島。岩波書店、東京、228p.
- 橋本 尚 (1992) カオス理論がわかる本。HBJ 出版局、東京、222p.
- 平井利一編著 (増沢鯨男監修) (1989) 全訂新版ボーリング図を読む。理工図書、東京、220p.
- 入倉孝次郎 (2004) 強震動予測レシビー—大地震による強震動の予測手法—。京大防災研年報、47A: 25-46
- 伊藤英文 (1984) 18. 地殻と造構応力。藤田和夫編 アジアの変動帯。海文堂、東京、327-341.
- 伊藤英文 (1991) 9. 岩石の変形構造と長期クリープ実験。笹嶋貞雄編著 物理地質学—その進展。法政出版、京都、413p. 232-244.
- 伊東敬祐 (1993) カオスって何だろう。ダイヤモンド社、東京、228p.
- 伊東敬祐 (1998) カオスの縁にいる地球。特集 全地球史はどこまで解明されたか。科学、68-10: 808-813.
- 唐戸俊一郎 (2000) レオロジーと地球科学。東京大学出版会、東京、251p.
- 小森長生 (1995) 太陽系と惑星。新版地学教育講座 12。東海大学出版会、東京、203p.
- 熊谷直一編 (1991) 花崗岩流動室内実験継続 30 年記念論文集。282p.
- 熊沢峰夫・伊藤孝士・吉田茂生編 (2002) 全地球史解説。岩波書店、東京、407p.
- 横山次郎 (1944) 岩石変形学。星野書店、京都、216p.
- 横山次郎 (1956) 構造地質学。朝倉書店、東京、264p.
- Makiyama J (1979) Tectonomechanics: An structural analysis of folded field rocks. Tokai University Press, Tokyo, 135p.
- 増田耕一 (2004, 2009) 読書ノート、破局もまた世の常 / Ubiquity (Buchanan). http://macroscope.world.coocan.jp/ja/reading/buchanan_ubiquity.html.
- 松田時彦 (1975) 活断層から発生する地震の規模と周期について。地震、28: 269-283.
- 松田時彦 (1995) 活断層。岩波書店、東京、242p.
- 松田時彦 (2005) 活断層からの地震の評価—現状と課題—。Fukadaken Library、深田地質研究所、東京、75p.
- 長倉三郎・井口洋夫・江沢 洋・岩村 秀・佐藤文隆・久保亮五 (編) (1998) 理化学事典、第 5 版。岩波書店、東京、1854p.
- 日本流体力学会編集 (1991) 混相流体の力学。朝倉書店、東京、220p.
- 日本材料学会 (編) (1966) 岩石力学とその応用。丸善、東京、434p.
- 丹羽敏雄 (1999) 数学は世界を解明できるか—カオスと予定調和。中公新書、中央公論新社、東京、182p.
- 笹嶋貞雄 (編著) (1991) 物理地質学—その進展。法政出版、京都、413p.
- 佐藤 正 (2003) 地質・土木技術者のための地質構造解析 20 講。近未来社、名古屋、398p.
- Scheidegger, AE (1958) Principles of Geodynamics, 2nd ed. Springer-Verlag, Berlin, 115p.
- 志岐常正・青木 斌・三沢良文 (1976) 九州—パラオ海嶺および大東海嶺群の島弧的性格とその発展段階。海洋科学、8-3: 19-23.
- Shiki T, Misawa Y and Konda I (1980) The Daito Ridge Group and the Kyushu-Palau Ridge — with special reference to the tectonics of the Philippine Sea. In: Asano S (eds) Structure of transitional zone. AEPS, D Reidel Pub Co, 113-124.
- 志岐常正 (1999) 「フリーズ」と「堆積フリーズ」。日本地質学会関西支部報、No.125: 6.
- Shiki T and Iso Y (2001) "Freeze" and "Sedimentary freeze" — A preliminary report. IAS-2000 Session, S10: Mathematical modelling and non-linear processes in sedimentary systems. 207.
- 志岐常正・鈴木一久 (1998) 「フリーズ」と「フリーズ堆積物」予報。堆積学研究、47: 95-101.
- 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.
- 志岐常正 (2016) 複雑系科学である地質学における武谷三段階論の有効性—堆積学、環境問題に関わる地質学の例を取り上げて—複雑系科学としての地質学—その 3—。地球科学、70: 35-44.
- Shimada I and Koyama T (2015) A theory for complex system's social change: an application of a general 'criticality' model. Interdisciplinary Description of Complex Systems, 13, 342-353.
- 島津康男 (1974) 国土科学。日本放送協会出版、東京、213p.
- 白鳥 敬 (2009) 定理と法則 101。学習研究社、東京、240p.
- 内山成樹 (2015) 原発地震動想定の問題点。七つ森書館、東京、99p.

志岐常正. 2017. 地質事象におけるカオス, 法則と法則性—複雑系科学としての地質学—その4—, 地球科学, 71, 157-166.

SHIKI Tsunemasa. 2017. Chaos, laws and general tendencies of geological affairs — Geology as a science of complex systems — part 4. Earth Science (Chikyu Kagaku), 71, 157-166.

要 旨

流体, つまり水や大気にしばしばカオスが発生する. 固態の物質や地殻さえも, ある種の流動性を持つ. この性質は, とくに非常に長い時間において顕著である. カオスは人間社会にも現れる. 自然と社会のカオスの複合効果は極めて複雑である. 自然における“法則”には二つの種類がある. 一つは証明を要しない“原理(公理)”, もう一つはこれから導かれる“法則”である. 他方, ‘科学的’作業に用いられるある種の“法則”は, 実際には散らばりをもつ分布の示す“一般的傾向”である. これについては, カオス発生の可能性も無視されてはならない. しかし, 自然現象に見られる一般的傾向が, 地球科学や社会科学で, しばしば決定的法則であるかのように扱われている. 活断層の長さと地震動の強さとの相関関係が, 安易に原発周辺の地震動の予測に適用されてきたことなどその典型例である. 見かけの回帰直線が, データの散らばりの地質的要因の検討なしに用いられてきたのが実情であった.