

第86回アブダクション研究会開催のご案内

アブダクション研究会

世話人 福永 征夫

TEL & FAX 0774-65-5382

E-mail : jrdf117@ybb.ne.jp

事務局 岩下 幸功

TEL & FAX 042-35-3810

E-mail : yiwashita@syncreate.jp

第86回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

(1) 第85回アブダクション研究会のご報告をします。

◆12・7・28(土)に開催致しました、前回の第85回アブダクション研究会は、マーク・ブキャナン著・水谷淳訳『歴史は「べき乗則」で動く』(10・ハヤカワ文庫)の各章を、次のように分担し、解説発表をしていただきました。

□第1章～第3章 大河原 敏男 氏

□第10章～第12章 岩下 幸功 氏

□第4章～第6章 北村 晃男 氏

□第13章～第15章 八尾 徹 氏(レポート

□第7章～第9章 安平 哲太郎 氏

による参加)

◆本会、懇親会共に、熱気と情熱の雰囲気にもまれて、興味深い質疑の数々、多様な感想と意見が喚起され、議論されて、お互いが、理解を触発し、触発されることの多かった、素晴らしい会合にすることが出来ました。先ずは、ご発表者のご出席の皆様から心から感謝とお礼を申し上げます。

◆「べき乗則」とは、“Power Law”の日本語訳。一般的には、ある観測量(例えば、地震の頻度)がパラメータ(媒介変数。例えば地震の規模)のべき乗に比例(または反比例)することを指します。

◆われわれが生存する21世紀の科学・技術が取り組むべき、重点テーマの一つは、「ネットワークの理論と実際」の探究だと、考えられています。

◆例えば、インターネット、脳の情報、細胞の代謝経路の繋がり、など多種多様なネットワークに現れる、ノードとそのリンクの数の間には、反比例のべき乗則が存在することが知られています。これらの例では、リンク数の少ないノードが大半で、多い目のリンク数を持つノードがそこそこ存在し、際立って多くのリンク数を持つ、いわゆるハブのノードが僅少に存在するというのです。

◆上の例は、一つの特定のネットワークにおけるべき乗則についての話です。

これとは違って、マーク・ブキャナの『歴史は「ベキ乗則」で動く』では、ベキ乗則が、別個に発生した地震や山火事などの出来事の統計において、地震や山火事などの規模と頻度の相関関係に関して、反比例のベキ乗則が現出することを述べています。

◆しかしながら、両方の間には、矛盾は無いと思われます。

一見、別個に独立して発生しているように見える地震や山火事も、地球や大陸という共通の時間と空間の場において、近接したり離隔したりしながら、継起している現象なのですから、脳や細胞の時間と空間の場において、近接したり離隔したりしながら、継起している情報処理の過程で形成される、脳や細胞のネットワークと本質的に異なる現象だとは考えられないからです。

◆ブキャナは、更に、地震や山火事という事象の違いを超えて、類似の、あるいは、同一のベキ乗則の関係式が見出されるという、驚くべき、自然のユニバーサリティー（普遍性の原理）についても述べています。

◆これらのベキ乗則には、自然の非平衡開放システムにおける、臨界性という特性が関わっています。物理学で臨界性（criticality）と呼ばれている、この注目すべき知見は、1980年代中盤あたりから、複雑性を確率モデルとして研究する人たちによって、書物に書かれるようになっていきます。臨界性とは、安定性の状態と不安定性の状態の間に成立している微妙なバランス状態のことで、少しの揺らぎが引き金になって、大小の雪崩現象をもたらすものです。

◆世話人は、かつて20代の中盤から後半に読んだ、ある仕事の実務書——書名が不確かなのですが、“人の潜在能力をいかに開発するか”という類の専門書——の中に見つけた、短い注目すべき記述の趣旨を今も印象深く覚えています。人生や仕事の特定の領域で、苦心と苦労、あるいは、挫折というような苦節を経ながら、努力を重ねた人の場合には、時として、頭脳の中に、雪崩現象とも呼べるような、深く広い範囲に及ぶ自己組織化現象を生じることがある、というような趣意でした。このような現象があるとすれば、それは、まさしく、脳の進化にも相当する、臨界性の現象の例に当たるのかも知れません。

◆因みに、世話人は、1996年から2003年に掛けて構成した、自然の非平衡解放系の相補性の一般モデルを「ラティスの構造モデル」(Model of Lattice Structure)と名づけて提出していますが、これは、同時に、自然の非平衡解放系の臨界性を表す一般モデルでもあります。

◆マーク・ブキャナ著・水谷淳訳 『歴史は「ベキ乗則」で動く』(10・ハヤカワ文庫)において、その主張の中核的な内容は、主として、第1章から第7章までの前半部のうちに記述し尽くされています。

そこで、この案内状の、最後部に、収録しました **＝歴史は「ベキ乗則」で動く＝** と題する、世話人の取りまとめは、第1章から第7章までの内容の本質的な要点を、可能な限り、過不足なく抜粋するように努め、それに要約の表札を付けて、編集したものです。

皆様には、何度も、詳しく、お読み取りをいただき、広域学の建設を目指して、研究と研鑽の糧に、ご活用いただければ、真に、幸いです。

(2) 各界、各分野の皆様のご参加をお願いします。

既存の領域的な知識をベースにして、新たな領域的な知識を探索し、それらを広域的な知識に組み換えて、より高次の領域的な知識を仮説形式的に創造することを目標に、アブダクション研究の飛躍を期して参りますので、各界、各分野の皆様のご参加をお願いします。

(3) アブダクション研究会は、知識の広域化と高次化を目指し進化を続けて参ります。

1996年に設立されたアブダクション研究会は、地球規模の難題に真正面から対処するために、知識の広域化と高次化を目指し、いつまでも、真摯に、勇気を持って、粘り強く、積極的に、可能性を追求し、多様な探究を積み重ねて、一步一步進化を続けて参ります。

(4) 発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に、積極的に申し出下さい。

皆様には、今後、ぜひとも発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に積極的に申し出をいただきたく、お願いを申し上げます。お申し出は、通年的にいつでも、お受け入れを致します。上記の方向に沿うものなら、いかなる領域に属するいかなるテーマであっても、将来の可能性として、誠意を持って相談をさせていただき、実現に向けて調整を果たす所存であります。

記

◇ 日 時： 2012年9月29日(土) 13:00~17:00(本会)
17:15~19:15(懇親会)

◇ 場 所： 日本電気企業年金会館 1階会議室 (中山氏のお名前で申し込み)

東京都 世田谷区 代沢5丁目33-12 電話：03-3413-0111(代)

* 当日の連絡先(岩下幸功・携帯電話)070-5541-4742

* 小田急線/京王・井の頭線 下北沢駅 下車 徒歩約8分

* 会場の地図は、グループメールのブリーフケース内「下北沢 NEC 厚生年金基金会館MAP」に記載。
<http://groups.yahoo.co.jp/group/abduction/files/>

◇ テーマ：

『科学の錯誤と創造性—

J・P・ランタンの「われ思う、故に、われ間違ふ」に学ぶ—』(仮題)

安平 哲太郎 氏

文献：J・P・ランタン著＝丸岡高弘訳「われ思う、故に、われ間違ふ」(96・産業図書)

◇プログラム：

- | | |
|-------------------------------|-------------|
| (1) 解説発表： [PART-1] | 13:00~14:45 |
| <小休止> | 14:45~14:55 |
| (2) 解説発表： [PART-2] | 14:55~16:05 |
| (3) 総合的な質疑応答： | 16:05~16:55 |
| (4) 諸連絡： | 16:55~17:00 |
| (5) 懇親会： <皆様の積極的なご参加を期待しています> | 17:15~19:15 |

第86回 アブダクション研究会 (9/29) の出欠連絡

●9/24 (月) までの返信にご協力下さい。ご連絡なしの当日出席も無論可ですが、会場や資料の準備の都合もありますので、できるだけ、ご協力くださるようお願いいたします。

FA X： 042-356-3810

E-mail： abduction-owner@yahoogroups.jp

岩下 幸功 行

- | | | | |
|-----------------------|----|----|----|
| ●9/29 (土) の研究会に、未定ですが | 出席 | 調整 | 出席 |
| 調整 | 出席 | 調整 | 出席 |
| 調整 | 欠席 | 調整 | 欠席 |
| 調整 | 欠席 | 調整 | 欠席 |

ご署名 _____

☆ 出欠の連絡は、グループメールメニューの「投票」コーナーから行うこともできます。
<http://groups.yahoo.co.jp/group/abduction/polls>

*次々回 2012年 11 月度の第 87回アブダクション研究会は、2012年 11 月 24 日（土）に
NEC企業年金会館・1階会議室で、開催します。

* 11 月度は、村中 達矢 氏に、次のテーマで、ご発表をいただきます。
ロテーマ：『言語表現とアブダクションの論理』（仮題）
参考文献： 近日中に、ご連絡します。

*大いに期待をいただき、奮ってご参加ください。

< 定例アンケート調査 >

もしご協力がいただければ、という趣旨であり、必須ではありません。
皆様のメッセージ集として他の会員にも伝達しますので、情報の交流に積極的に参画下さい。

- (1) 今、アブダクションの研究・実践と関連のある事項で特に興味をもって取り組んでおられること。
- (2) 研究会の議論の場を通して INTERSECTIONAL なアイデアや知見の INCUBATION が進んでおり、例会で発表したい
と思っておられること。
- (3) これまで（第1回～第 85回）の研究発表やなされた議論（「議事録」を参照下さい）に関して、さらに改めて質疑や
意見を表明したいと考えておられること
- (4) アブダクションの観点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
- (5) 細分化された「知」の再構築を図るという視点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
- (6) 貴方ご自身がお考えになられている「知」の定義とは？
- (7) その他のご意見、ご要望、連絡事項など。
特に他学会・研究会での発表内容や発表論文等についても是非お知らせ下さい。

.....
.....
.....
.....
.....
.....

＝歴史は「べき乗則」で動く＝

■なぜ世界は予期せぬ大激変に見舞われるのか■

[1] 物理学者たちは何世紀にもわたって、量子論や相対論のような、時間に依存しない不変な方程式で記述される宇宙の基本法則を追い求めてきた。

物理学者たちは何世紀にもわたって、量子論や相対論のような、時間に依存しない不変な方程式で記述される宇宙の基本法則を追い求めてきた。

風船の中にもある種の不変性が存在する。条件が変化さえしなければ、風船内の空気は平衡状態を保つからだ。

それに対して、大気中の空気は平衡状態から大きく外れている。

太陽からの光の流入によって、絶えずかき回され、揺り動かされ、エネルギーを与えられているからだ。

ここに激変の源を探る手がかりがある。

平衡状態で起こることと、平衡から大きく外れた状態で起こることとの違いが重要である。

平衡状態は非常に単純だが、平衡から外れた状態は明らかに複雑になりうるのだ。

[2] 非平衡状態のもとで相互作用する物事が形作るネットワーク、そのなかで生じる自発的パターンを研究することによって我々は、荒れ狂う大気から人間の脳まで、幅広い種類の自然現象を理解できるかもしれない。

種々の激変を説明できるある発見、そして本書の中核をなす概念は、非平衡物理学という急速に発展しつつある分野に属している。

もっと流行の言葉で言うと複雑系物理学だ。

非平衡状態のもとで相互作用する物事が形作るネットワーク、そのなかで生じる自発的パターンを研究することによって我々は、荒れ狂う大気から人間の脳まで、幅広い種類の自然現象を理解できるかもしれない。

複雑系の研究はどれも、平衡状態から外れた物事に関するものであり、科学者たちはこれらの研究に取りかかりはじめたばかりである。

臨界状態と複雑系との関係はきわめて単純だ。

臨界状態の普遍性が、複雑系理論における初めての真なる発見であると言えるだろう、ということだ。

[3] 物理学者は複雑系の研究を通して、ある単純な事実を新たに認識するようになった。我々の目の前の世界では「歴史」が重要だ、ということだ。

もう一つ重要な点がある。

物理学者は複雑系の研究を通して、ある単純な事実を新たに認識するようになった。

我々の目の前の世界では「歴史」が重要だ、ということだ。

突きつめるとたった一つの細胞から進化してきた生物に関しては、これは当然のことだ。

しかし、鉄のパイプの硬さや、壊れたレンガの不規則な表面でさえも、その成り立ってきた歴史全体を調べることなく理解することはできない。

風船の中では歴史は意味をなさない。

平衡状態では何も変化しないからだ。

しかし平衡状態から外れれば、歴史が意味をもつようになる。

雪の結晶のきわめて複雑な形は、希薄な空気からゆっくり凝結することで成長してきた歴史を追跡することでしか、説明できない。

[4] なぜ生態系や経済は、ニュートンの法則と同様の単純性をもちあわせていないのだろうか？
その答えは一言で言えば、「歴史」なのだ。

非平衡物理学、複雑系物理学、そして新しい言葉として「歴史物理学」には、様々な課題が存在する。

物理法則が本質的に単純であるなら、なぜ世界はこんなに複雑なのだろうか？

なぜ生態系や経済は、ニュートンの法則と同様の単純性をもちあわせていないのだろうか？

その答えは一言で言えば、「歴史」なのだ。

[5] 砂山ゲームでは、一粒の砂がどこに落ちるかは、偶然に支配される。そして砂山がその上に成長し、その砂粒はその場所で「凍結」することになる。

平衡状態から外れた物事は、時間に依存しない方程式を解くことでは調べられない。

そこで物理学者たちは、別の方法に切り替えた。

方程式の代わりにゲームを使うことにしたのだ。

砂山ゲームでは、テーブルの上に砂粒を一粒ずつ落としていったら何が起こるのか、という問題が考えられた。

砂粒が積み上がってくると、当然、大きな砂山が徐々に空に向かって伸びていくと考えられる。

しかし明らかに、それがずっと続くことはない。

山が大きくなってくると、斜面はどんどん急になり、次の砂粒が引き金となって雪崩が起きる可能性がどんどん高まっていく。

そして砂山ゲームと同様、ゲームのどれもが非平衡システムに関係しており、そのために本質的に深く歴史に依存している。

すべてのゲームが、フランシス・クリックがかつて「凍結した偶然」と呼んだものに影響されている。

砂山ゲームでは、一粒の砂がどこに落ちるかは、偶然に支配される。

そして砂山がその上に成長し、その砂粒はその場所で「凍結」することになる。

砂山全体は、その砂粒が他ならぬその場所にあるという事実、永遠に影響を受けつづけることになる。

つまり、今起きていることは、決して消え去ることなく未来全体に影響を与えつづけるのだ。

[6] 臨界状態の普遍性の発見は、複雑系理論の初めての信頼しうる発見であるだけでなく、歴史における出来事の典型的な性質に関する、初めての意味深い発見でもある。

もし物理法則が凍結した偶然を許さなかったとしたら、世界は平衡状態になり、すべてが風船の中の気体のように、永遠に均一で不変の状態に留まっていたはずだ。

しかし実際には物理法則は、一つの出来事が、そこに永続的な結果をもたらす未来の進む先を変化させることを許している。

物理法則は、歴史の存在を許しているのだ。

臨界状態の普遍性の発見は、複雑系理論の初めての信頼しうる発見であるだけでなく、歴史における出来事の典型的な性質に関する、初めての意味深い発見でもある。

■地震には「前兆」も「周期」もない■

[7] カリフォルニア州は、単一のプレートではなく、互いにゆっくりと押しのけ合う二つのプレートからできており、普通は密着し合っているが、時々滑り、それが地震を引き起こすのだ。

サンアンドレアス断層は、カリフォルニア州の西端に沿って走っている。

空から見るとそれは、いくつもの丘を貫いて北から南へと走る独特な直線として、はっきり認識できる。

この断層の西側の地面は、東側の地面に対して1年に2から3センチというゆっくりとした速度で、北に向かって動いている。

つまりカリフォルニア州は、単一のプレートではなく、互いにゆっくりと押しのけ合う二つのプレートからできているのだ。

二つのプレートは摩擦によって密着し合う傾向があるので、普通はこの動きを認識できない。普通は密着し合っているが、時々滑り、それが地震を引き起こすのだ。

[8] サンアンドレアス断層の地震は、ある周期的に繰り返される過程によって引き起こされているに違いない、おそらく、約22年かかって歪みが限界に達し、そのときにこの断層部分に沿って岩盤がずれるのだろうと、地球物理学者たちは結論した。

1979年、カリフォルニア州にある米国地質調査所の地球物理学者たちは、サンフランシスコの南のパークフィールド近くに位置するサンアンドレアス断層の一部分で起こった過去の地震の記録を調べていて、ある興味深いことに気づいた。

その地域では、1966年に地震が一回起きている。そして1934年にも、別の地震が起きている。さらに、1922年、1901年、1881年、1857年に起きていることが分かった。

この研究者たちは、これらの地震の間隔の年数を数えていき、24年、20年、21年、12年、32年という結果を得た。

地震の間隔の平均は22年となった。

そしてさらに興味深いことに、彼らは、パークフィールドで発生する地震がすべてマグニチュード5.5から6のあいだであることに気がついた。

これらのことは暗に、ある疑いのような事実を指し示しているように思えた。

これらの地震は、ある周期的に繰り返される過程によって引き起こされているに違いない、というのだ。

おそらく、約22年かかって歪みが限界に達し、そのときにこの断層部分に沿って岩盤がずれるのだろうと、彼らは結論した。

[9] 米国地質調査所は、1985年4月5日に、パークフィールド近郊で今後5年から6年の間に地震が発生するはずだという、予知情報を発表し、地震予知の分野がついに、長く待ち焦がれた大成功を収めるかに思われた。

パークフィールドの地震は、約22年周期で発生するのだと考えられた。

最後の地震は1966年に発生したので、次は1988年のはずだった。

地震予知の分野がついに、長く待ち焦がれた大成功を収めるかに思われた。

国際的な専門委員会が、彼らの予知を信頼できるものと判断したのを受け、米国地質調査所は、1985年4月5日に、パークフィールド近郊で今後5年から6年の間に地震が発生するはずだという、予知情報を発表した。

研究者たちは、その地域の丘陵に世界のどの地域よりも周密で精巧な地震観測網を設置し、事の起こるのを待ち構えた。

ところが、地球物理学者たちは落胆した。

パークフィールドではそれまで、目を見張るほど規則正しく地震が発生してきたというのに、それ以来現在（福永註：本書の出版は2000年）にいたるまで、マグニチュード5.5から6の地震は、パークフィールド地域では一回も発生していない。

[10] 地震の信頼できる前兆現象は見つかっておらず、ほとんどの地球物理学者たちは、特定の地震を正確に予知するのはまだ不可能だという見解で一致している。

研究者たちは、周期などないところに規則的な周期を見つけたいという人間の欲求そのものに、担がれてしまったのだ。

信頼できる前兆現象は見つかっておらず、ほとんどの地球物理学者たちは、特定の地震を正確に予知するのはまだ不可能だという見解で一致している。

[11] 歴史学者が人類の歴史について言っていたことは、そのまま地殻の仕組みについても当てはまるように思える。「歴史は未来の出来事を予知するのにほとんど役に立たないということが、再三再四、明らかになってきた。歴史は決して繰り返されないからだ」。

歴史学者が人類の歴史について言っていたことは、そのまま地殻の仕組みについても当てはまるように思える。

大きな戦争や革命は、単純な周期で巡ってくることもないし、あらかじめ電報で知らせてくることもない。

それらの出来事に先立って起こる状況はいつも違っていて、何らかの信頼できる前兆現象を誰も特定できていない。

ある歴史学者は次のように書いている。

「歴史は未来の出来事を予知するのにほとんど役に立たないということが、再三再四、明らかになってきた。歴史は決して繰り返されないからだ。人間社会において、まったく同じように二度起こる出来事など存在しない」。

地震もそうだ。

周期も警報も合図も前兆もない。

地球はいつでも好きなときに身を震わせるのだ。

科学者は、台風がいつどこを襲うのか、そしてそれはどのくらいの破壊をもたらすのかを、少なくとも大雑把には予知できる。

大気の状態がいつ竜巻の発生に適したものになるか、あるいは大河でいつ洪水が差し迫るかを、我々は知ることができる。

どちらの場合も、積乱雲や風や雨などといった適切な前兆現象を見つけ、そして危険な状況になったら警報を鳴らすということは、単純な作業にすぎない。

気象学者も、比較的高い確率で毎日の、あるいは数日先の天気を予想できる。

しかし地震については、それらに相当する技術は科学の範囲を超えたものであるように思える。なぜだろうか？

[12] その手がかりを得るには、地球内部で起こっていること、そして地殻で自発的に起こる圧力と歪みの蓄積と解放について、もう少し詳しく見る必要がある。

その手がかりを得るには、地球内部で起こっていること、そして地殻で自発的に起こる圧力と歪みの蓄積と解放について、もう少し詳しく見る必要がある。

地球物理学者は、地球の機構について様々なことが分かっているだけになおさら、予知が不可能なことに苛立ちを覚える。

歴史学者は人間行動に潜む深遠な謎に取り組むことになるので、人間社会の泥臭さを知らないと途中で行き詰まってしまうかもしれない。

しかし、地震を引き起こす過程に謎はない。

しかも地震には、本質的に予測不可能なランダム性が支配する量子力学も関係してはこない。

地中で起こっていることは完全に決定論的であり、原理的には完全に予測可能である。

岩が岩を押す以上の何ものでもないのだ。

[13] 地殻は、大きな断片に分かれ、巨大な筏のように地球上を滑っていく。プレートテクトニクスと呼ばれている地殻の動きに関する現代の理論では、この何百キロという厚さのもろい地殻の断片を「プレート」という言葉で表現している。

地球には、硬い物質でできた殻、つまり地殻と、その下で流れている熱い物質、つまりマントルがある。

マントルの流れは、地球内部の猛烈な熱によって引き起こされている。

当然、熱い物質は上昇し、冷えた物質は下降する。

その結果、大規模な伏流をもつ深いマントルの海に地殻が浮かんでいるという状態になる。

地殻は固体状なので、その下で流れる熱いマントルのように途切れなく動くことはできない。

その代わり地殻は、大きな断片に分かれ、巨大な筏のように地球上を滑っていく。

プレートテクトニクスと呼ばれている地殻の動きに関する現代の理論では、この何百キロという厚さのもろい地殻の断片を「プレート」という言葉で表現している。

[14] 北アメリカプレートはおおよそ南に向かって動いており、太平洋プレートは北に向かって動いている。その結果、断層全体にわたって互いに激しく擦れ合っている。

いくつかの場所では、プレート同士が互いに正面衝突している。

これが、日本の地下で起こっていることである。

日本の地下では現在、三枚のプレートがぶつかり合っている。

一方、カリフォルニアのような場所では、二枚のプレートが長い境界線に沿って肩を擦り合わせている。

その一つ、太平洋プレートは、大部分が太平洋の下にあるが、カリフォルニアのうちサンアンドレアス断層の西側の小さな部分も、その上に乗っている。

サンアンドレアス断層の東側の地殻は、北アメリカプレートに属しており、このプレートは北アメリカ全体と大西洋の西半分を覆っている。

北アメリカプレートはおおよそ南に向かって動いており、太平洋プレートは北に向かって動いている。

その結果、断層全体にわたって互いに激しく擦れ合っている。

[15] プレートの容赦ない動きに岩石が変形し、圧力がある限界を超えると、その表面が突然滑り、地震が発生する。

地震の基本的な機構は、一つの岩石がもう一つの岩石とすれようとするときに、密着し合ったり滑り合ったりするだけのことだ。

プレートの容赦ない動きに永遠に逆らうことはできない。

岩石が変形し、圧力がある限界を超えると、その表面が突然滑り、地震が発生する。

これこそは、1500 万年から 2000 万年の間サンアンドレアスで起こってきたことなのだ。

[16] それぞれのプレートは、何百種類という岩石からできており、すべて異なる性質をもっており、さらに、地殻を走るたくさんの断層が互いに作用しあっていることも、問題をさらに複雑にしている。こういった複雑さを考えると、地震予知が成功していないのは、驚くことではないのではないかと？

地震発生の過程は、確かにプレート同士の密着と滑り合いにすぎない。

しかし、地殻の全体構造は非常に複雑である。

単にたくさんのプレートがあるというだけではない。

それぞれのプレートは、何百種類という岩石からできており、すべて異なる性質をもっている。

あるプレートの岩石は固く、別のプレートの岩石はもろい。地球上には、互いにそっくりな性質の地震発生地域など存在しないと言ったほうがよい。

おそらく地震予知の問題も一つではないだろう。

地域によって、その問題も違うものになるはずだ。

さらに、地殻を走るたくさんの断層が互いに作用しあっていることも、問題をさらに複雑にしている。

ある断層の動きが他の断層に影響を及ぼすのだ。

こういった複雑さを考えると、地震予知が成功していないのは、驚くことではないのではないかと？

[17] もう一つ、この問題の困難さの原因を付け加えたとしたら、それは微小な地震が常に起こっているということである。我々は大きな地震を気にかけるが、それは比較的稀にしか起こらない。

もう一つ、この問題の困難さの原因を付け加えたとしたら、それは微小な地震が常に起こっているということである。

我々は大きな地震を気にかけるが、それは比較的稀にしか起こらない。

しかし小さな地震は違う。

たとえば 1999 年 8 月 30 日には、カリフォルニアの各地で 22 回以上地震が発生した。

そのうち一つだけが、マグニチュード 3 に達した。

これが普通の日である。

これらの微小地震の際にも、大地震と同様に断層沿いの岩石が滑ったが、その滑った距離は非常に短く、おそらく 1 ミリ以下だったろう。

[18] こうした複雑さは、地震を発生させている過程が本当はどれほど単純なものなのかを、科学者たちに気づかせないようにしているのかもしれない。

ある単純な疑問が浮かんでくる。

なぜ、ある地震は大きく、別の地震は小さいのだろうか？

ある場合には他の場合に比べて岩石が大きく滑る、というのが当然思いつく答えである。

しかし、これは本当の答えではない。

なぜ、ある地震では他の地震に比べて岩石が大きく滑るのか？

半世紀にわたる研究によって、この疑問に対してある逆説的な答えが得られ、そして今まで述べてきた複雑さは実際には隠れ蓑にすぎないということが明らかになってきた。

こうした複雑さは、地震を発生させている過程が本当はどれほど単純なものなのかを、科学者たちに気づかせないようにしているのかもしれない。

■地震の規模と頻度の驚くべき関係―べき乗則の発見―■

[19] 微小地震も、地殻の中で突然岩石が滑りエネルギーが開放されるという出来事には違いない。だとしたら、巨大地震を引き起こすような地殻の中の特別な条件とは、何なのだろうか？

1811年12月16日、セントルイスの南東約240キロにあるミズーリ州ニューマドリッド周辺の地域を、立て続けに三度起こった大地震のうちの一つ目が襲った。

この一回目の地震はあまりにも大きくて、ミズーリ州とテネシー州の大部分の地形は変わり、雄大なミシシッピー川は逆流した。

この地震と、それに引きつづいて起こった1812年1月23日と2月7日の二度の地震は、新たな湖を作り出すほど大きいものだった。

カリフォルニア州同様テネシー州でも、人間の感知限界以下の微小地震が絶えずガタガタと発生している。

その激しさで言えば、これらの地震はニューマドリッドの巨大地震と比べようもないが、これらの微小地震も、地殻の中で突然岩石が滑りエネルギーが開放されるという出来事には違いない。

だとしたら、巨大地震を引き起こすような地殻の中の特別な条件とは、何なのだろうか？

[20] 米国地質調査所が1983年に発表したある報告では、「1906年のサンフランシスコ地震での破断地域のうちもっとも南の部分は、その北側の各地点に比べてずれがきわめて少なく、そのため今後十年で破断する可能性が高い」と指摘されていた。

ほとんどの地球物理学者は、断層の一部分を調べることで、近い将来大きな地震が起こるかどうかを知る手がかりを見つけ、それを地震予知につなげたいと考えている。

たとえばサンアンドレアスなどの断層全体にわたって、ここ100年間で生じたずれの程度の平均値はある一定の値になっているが、断層のある一部分だけは取り残されていてあまりずれが生じていないことが分かったとしよう。

すると、この「ずれの不足」によって、その取り残された部分には異常な歪みがかかり、他の場所のずれに追いつこうと待ち構えている状態になっているのかもしれない。

何人かの研究者は1980年代に、その状況がまさにカリフォルニアに当てはまるものと考えていた。

米国地質調査所が1983年に発表したある報告では、「1906年のサンフランシスコ地震での破断地域のうちもっとも南の部分は、その北側の各地点に比べてずれがきわめて少なく、そのため今後十年で破断する可能性が高い」と指摘されていた。

[21] 科学者が、ある断層を詳細に調べ、そして予知を出すときには、その岩石は、過去の小さな地震では十分に歪みを解放できなかった。そのエネルギーが蓄積して、その岩石は最終的に劇的

な崩壊点に達する、と言っていることになる。

科学者が、このような考えをもとにしてある断層を詳細に調べ、そして予知を出すときには、彼らは本質的に次のようなことを言っていることになる。

この地域の断層の歴史、歪みと圧力のパターン、そして地殻の性質などが、そこにまさに爆発寸前の爆弾そのものがあることを示している。

その岩石は、過去の小さな地震では十分に歪みを解放できなかった。

そのエネルギーが蓄積して、その岩石は最終的に劇的な崩壊点に達する。巨大地震は、地殻の巨大爆弾が原因で起こるのだと。

[22] この考え方によると、断層のどんな部分でも、大地震を起こしていない期間が長いほど次の地震はすぐに起こるといふ、一見合理的な推測に至るが、ありのままの統計データは実はまったく逆を示している。

この考え方によると、断層のどんな部分でも、大地震を起こしていない期間が長いほど次の地震はすぐに起こるといふ、一見合理的な推測に至る。

この考え方は合理的で当然のものに思えるが、ところがありのままの統計データは実はまったく逆を示している。

地震の間隔を統計的に詳しく調べたところ、ある地域で地震の発生しなかった期間が長いほど、近い将来にそこで地震が発生する可能性は低くなるということが見出されたのだ。

地震はまとめて起きるのである。

現在地震を予知する最良の方法は、一度地震が起きるのを待ち、そして直ちに、別の地震が起きるといふ予知をだすという方法だろう。

[23] 地震予知において、「爆弾探知法」が成功するかどうかはまだ分からない。地殻での現象はきわめて複雑なので、何が爆弾で何が爆弾でないのかを見極めるのは、簡単なことではない。

地震予知において、「爆弾探知法」が成功するかどうかはまだ分からない。

もしかしたら科学者たちは、地殻におけるどのような歪みと圧力のパターンが「爆弾」、つまり準備中の大地震の存在をあらわすのかを特定する方法を、まったく修得できていないのかもしれない。地殻での現象はきわめて複雑なので、何が爆弾で何が爆弾でないのかを見極めるのは、簡単なことではない。

[24] 半世紀前、二人のアメリカ人地震学者は、爆弾探知法そのものに疑いの目を向けざるをえないような統計データを集めた。

ところが半世紀前、二人のアメリカ人地震学者は、爆弾探知法そのものに疑いの目を向けざるをえないような統計データを集めた。

地震には小さなものも大きなものも、中間の大きさのものもあるということを、我々は知っている。しかし、そのなかに、他の地震よりも一般的な地震というものはあるのだろうか？

地震の典型的な大きさとはどのくらいなのだろうか？

この二人の研究者は、何百という本や論文を詳しく調べ、世界中で起きたたくさんの地震に関する詳細を集めた。

まず、すべての地震についてマグニチュードを記録した。

そして、マグニチュード2から2.5の地震の数を数えた。

さらに同じことを、2.5から3の間、・・・と続けていった。

こうして彼らは、大きさに対する地震の相対頻度の統計表を作った。

この相関関係は、単純なグラフを使って視覚的に表わすことができる。

しかしそれを見る前に、どんな関係になっていると思われるか、考えてみよう。

[25] 測定した値が鐘形曲線の「正規分布」に乗るとしたら、平均値から大きく外れた値に出くわすことはほとんどないと確信をもって言える。

一つの可能性が、数学の世界でもっとも有名な曲線の一つである鐘形曲線のようなグラフになるというものだ。

1000人の学生に試験を受けさせたり、ある小さな町の成人男子の体重を測ったりすると、そのテストの得点や体重は釣り鐘形の曲線の上に乗るだろう。

そして平均値は、もっとも頻度の高くなる、曲線の頂点に位置することになる。

異常な高得点や異常な低得点はとても稀なので、この曲線は両側で急速に下がる。

たとえば、男性の平均体重は80キロで、ほとんどの男性は60キロから100キロの間に位置するといったようになるだろう。

測定した値が鐘形曲線に乗るとしたら、平均値から大きく外れた値に出くわすことはほとんどないと確信をもって言える。

知能指数からサイコロゲームまで、あらゆるものが鐘形曲線に従うので、数学者たちはそれを、自然界の正規な状態という意味で、「正規分布」と呼んでいる。では地震はどうだろうか？

[26] グーテンベルクとリヒターが見出したのは、もっとずっと変わった法則で、縦軸に地震の頻度、横軸にマグニチュードをとった、そのグラフは、左上から右下に分布して、地震は大きいほど稀だということを示している。

グーテンベルクとリヒターが見出したのは、もっとずっと変わった法則だった。

彼らは世界中の地震の記録について調べたが、カリフォルニア南部で起こった地震に限定した最近の研究でも、同じように頂点の山のまったくない、特徴に欠けたパターンが見出されている。

縦軸に地震の頻度、横軸にマグニチュードをとった、そのグラフは、左上から右下に分布する、そのグラフは単純に、地震は大きいほど稀だということを示している。

[27] グーテンベルク＝リヒターの法則は、タイプAの地震はタイプBの地震の2倍のエネルギーを解放するとすれば、タイプAの地震はタイプBの1/4の回数しか発生しない、というもので、物理学者たちはこのような関係を「べき乗則」と呼んでおり、この「べき乗則」はその単純な見た目から想像できないほど重要なものになっている。

地震については何が典型的なのかという我々の疑問に関して言うと、この法則にはあまり得るものはなく、そんなに意味深いものではないようだ。

しかしこの曲線は、とても興味深い特別な形をしている。

このグラフは、地震の回数をそのマグニチュードに対して表わしたものである。

マグニチュードが1増えると、解放されるエネルギーは10倍に増える、ということを思い出してほしい。

エネルギーで考えれば、グーテンベルク＝リヒターの法則は、ある非常に単純な規則へと還元できる。

それは、タイプAの地震はタイプBの地震の2倍のエネルギーを解放するとすれば、タイプAの地震はタイプBの1/4の回数しか発生しない、というものである。

つまり、エネルギーが2倍になると、その地震の起きる確率は1/4になる——これがこのグラフの意味である。

この単純なパターンは、非常に幅広いエネルギーの地震に通用する。

物理学者たちはこのような関係を「べき乗則」と呼んでおり、この「べき乗則」はその単純な見た目から想像できないほど重要なものになっている。

[28] 1000個ぐらいのジャガイモを壁に向かって投げてたくさんの破片を作り、それをグーテンベルク＝リヒター流に処理してみよう。

凍ったジャガイモは、もろくて強い衝撃をうけると粉々になる。

凍ったジャガイモを一つ壁に向かって投げると、様々な大きさの破片の山ができあがる。

では、その典型的な大きさはどのくらいになるのだろうか？

それを知るために、1000個ぐらいのジャガイモを壁に向かって投げてたくさんの破片を作り、それをグーテンベルク＝リヒター流に処理してみよう。

初めに破片を、重さによっていくつかの山に分ける。

十分注意して、10ぐらいの山に分けることにしよう。

一番小さい破片は1グラム程度になるかもしれない。

もっと小さな破片もあるだろうが、取り扱いがかなり難しいので、無視することにしよう。

そしてグラフ上に、それぞれの山に含まれる破片の数をその重さに対して記すことにする。

[29] 重さが2倍になるごとに、破片の数は約1/6になるのだ。グーテンベルクとリヒターが発見したべき乗則と同様のパターンである。一つ違うのは、重さが2倍になるごとに、この場合には1/6になるが、地震の場合には1/4になるという点である。

地震の代わりにジャガイモの破片を使うと、グーテンベルク＝リヒターの法則と同様の、特徴のない曲線が得られる。

ブドウの種ぐらいの微小な破片は膨大な数あり、破片が大きくなっていくにつれて、その数は徐々に少なくなっていく。

実際注意深く調べていくと、破片の数は、大きさに応じてきわめて規則正しく減少していくことが

分かる。

重さが2倍になるごとに、破片の数は約 $1/6$ になるのだ。グーテンベルクとリヒターが発見したべき乗則と同様のパターンである。一つ違うのは、重さが2倍になるごとに、この場合には $1/6$ になるが、地震の場合には $1/4$ になるという点である。

[30] 破片が小さくなるほど数は増え、その増え方は規則的になる。重さが半分になるときに、その数は6倍ずつ増えていく。

先ほど無視した非常に小さい破片はどうなるのだろうか？

それらも凍ったジャガイモの破片には違いないので、本当はそれらも含めて考えなければならない。

そのためには虫眼鏡を使って、それらの破片を分けていかなければならない。

そうすることで、破片の分布をより小さい領域にまで広げることができる。

この範囲では分布はどのようになるのだろうか？

驚くことに、それらの破片もまた、まさに同じ法則に従う。

破片が小さくなるほど数は増え、その増え方は規則的になる。

重さが半分になるときに、その数は6倍ずつ増えていく。

南デンマーク大学の三人の物理学者は、1993年に実際にこの実験を行なった。

この実験では、破片の重さは100グラムから $1/1000$ グラムにまでわたっており、その間ずっとこの単純なパターンが保たれていた。

これがべき乗則の意味するところである。

[31] ニワトリの体は、産まれる卵の大きさを、見慣れた典型的なスケールのあたりで鐘形曲線をなすような方向へと、偏らせるような構造になっている。しかし凍ったジャガイモがばらばらになる過程では、偏りは生じない。破片の山は必ず、「スケール不変性」や自己相似性と呼ばれる特別な性質をもっているからである。

凍ったジャガイモが壊れる過程は、きわめて複雑であろう。

実際、ばらばらになるときの正確な形は、壁に投げたジャガイモの一つ一つで異なっている。

それでもその過程には、驚くほど単純な何か秘められているはずだ。

なぜなら、破片の山は必ず、「スケール不変性」や自己相似性と呼ばれる特別な性質をもっているからである。

破片が広がった様子はどの大きさにおいても同じに見え、まるで各部分が全体の縮小像であるかのように見えるということだ。

ニワトリの体は、産まれる卵の大きさを、見慣れた典型的なスケールのあたりで鐘形曲線をなすような方向へと、偏らせるような構造になっている。

しかし凍ったジャガイモがばらばらになる過程では、偏りは生じない。

物理法則は本来、幅広い範囲にわたる大きさの破片を生み出すようにできているのだ。

したがってべき乗則のもとでは、一般的な、あるいは典型的な破片というものは存在しない。

これは重要なことである。

[32] グーテンベルク=リヒター曲線は、ある E というエネルギーの地震の頻度が E の2乗に反比例するというを示している。このべき乗則によって、これまで述べてきたような単純なパターン、すなわちエネルギーが2倍になるごとに地震の頻度が $1/4$ [2 (倍) の2乗分の1] になるというパターンが現われてくる。

代数学では、べき乗則とは、縦軸の値が横軸の値の何乗かに比例しているような曲線のことを指す。

たとえば、縦軸 = (横軸) の2乗という等式は、どんどん傾斜が急になりながら上に上がっていく曲線を表わしている。

これは、冪(べき)が2の場合のべき乗則となる。地震の場合、マグニチュードでなくエネルギーの大きさで考えてみると、グーテンベルク=リヒター曲線は、ある E というエネルギーの地震の頻度が E の2乗に反比例するというを示している。

このべき乗則によって、これまで述べてきたような単純なパターン、すなわちエネルギーが2倍になるごとに地震の頻度が $1/4$ [2 (倍) の2乗分の1] になるというパターンが現われてくる。

[33] 今取り扱っているものの分布をグラフに表わし、その曲線が代数的なべき乗則の形になっていたら、それは、鐘形曲線のような「一般的」「典型的」「異常」「例外的」といった言葉が通用しないたぐいのものだということになる。

今取り扱っているものに、べき乗則が有効かどうかを判断するには、単に注目している分布をグラフに表わし、その曲線が代数的なべき乗則の形になっているかどうかを見ればよい。

もしそうなっていたら、今取り扱っているものは、「一般的」「典型的」「異常」「例外的」といった言葉が通用しないたぐいのものだということになる。

べき乗則が成り立ちさえすれば、対象物が何であれ必ずそのようになる。

そしてこのことによって我々は、グーテンベルクとリヒターの研究からもっとも重要な結論を導き出すことになる。

[34] 大きな地震が特別なものである理由がないという事実は、小さな地震を引き起こすものと大きな地震を引き起こすものはまったく同じであるという、逆説的な結果を示唆している。この考え方にもとづけば、大地震に対する特別な説明を探しても意味がないことになる。

ジャガイモの破片の山におけるスケール不変性は、大きい破片は小さい破片を拡大したものにすぎないことを示している。

すべての大きさの破片は、あらゆる大きさで同じように働く崩壊過程の結果として生じる。

グーテンベルク=リヒターの法則は、地震や地震を発生させる地殻で起こる過程についても、同様のことが言えることを示している。

地震のエネルギーはべき乗則に従うので、その分布はスケール不変的になる。

大きな地震が小さな地震とは違う原因で起こると示唆するものは、まったく何もないのだ。

大きな地震が特別なものである理由がないという事実は、小さな地震を引き起こすものと大きな

地震を引き起こすものはまったく同じであるという、逆説的な結果を示唆している。
この考え方にもとづけば、大地震に対する特別な説明を探しても意味がないことになる。
そこには、我々の足下で絶えず起こっている微小な振動と比べて、特別で異常なことは何も
ないのだ。

[35] きわめて重要なこととして、この結論はベキ乗則以外のどんな数学法則からも導くことが
できない。しかし、ベキ乗則からは必然的にこの結論が出てくる。1980 年代初めには、どん
な分野の科学者も、ベキ乗則のもつ深遠な重要性に気づいていなかった。

きわめて重要なこととして、この結論はベキ乗則以外のどんな数学法則からも導くことができな
い。

しかし、ベキ乗則からは必然的にこの結論が出てくる。

グーテンベルク=リヒターのベキ乗則から考えて、巨大地震を予知する計画が実行可能であると
はとても思えない。

実際に、地震予知計画は根本的に誤った道へと進んでいて、現実的に予知は不可能である。

これは、地震の科学が構築不可能だという意味ではない。

1980 年代初めには、どんな分野の科学者も、ベキ乗則のもつ深遠な重要性に気づいていなか
った。

その後静かな変革が、文字通り何百という科学分野の伝統的な見方を覆したのだ。

■ベキ乗則は自然界にあまねく宿る■

[36] いかなる考えも、たとえそれがどんなに美しく新奇で強力で柔軟であろうとも、最終的に
は限界にぶつかることになる。

聡明な歴史学者アイザイヤ・バーリンはかつて、思想や文化の歴史を、「偉大な開放的思考が、
必然的に息苦しい拘束衣へと変質する様子」と表現した。

いかなる考えも、たとえそれがどんなに美しく新奇で強力で柔軟であろうとも、最終的には限界
にぶつかることになる。

ニュートンの『プリンキピア』の初版（1686 年）には、万有引力の法則や運動の一般法則に関
する彼の洞察がつづられており、これは 2 世紀以上にわたる科学という名の航海のための海図を
与えるものだった。

しかし 1900 年までの間、ニュートンの考えに内在した決定論的精神は、科学の想像力を抑え
つけ衰えさせてしまった。

[37] シュレーディンガーの創造したものは、ニールス・ボーア、ヴェルナー・ハイゼンベルク、
ポール・ディラックの考えとともに、科学者を再び解放し、世界に対する見方を一変させた。

原子の世界の謎と取り組んでいた物理学者にとって、ニュートン物理学は邪魔者であった。

最終的に何人かの物理学者が、勇敢な取り組みで自らの身を何とか解放させ、新たな量子論を作りだした。

シュレーディンガーの創造したものは、ニールス・ボーア、ヴェルナー・ハイゼンベルク、ポール・ディラックの考えとともに、科学者を再び解放し、世界に対する見方を一変させた。

1920年代末までには、矛盾した事実で満ちた混乱した世界は、おのずから再び落ち着きを取り戻した。

[38] 最近では、IBMのある数学者がこれに匹敵する変革を引き起こした。シカゴ商業取引所での綿花価格は不規則に上下し、数ヶ月間の価格のグラフは激しくうねる山脈のように見える。しかしマンデルブローは、その変動に隠された規則を見つけられるはずだと考えた。価格はあらゆる時間のスケールで変動しており、短い期間の変動を拡大すると、より長い期間での変動とほとんど同じに見えることを発見した。

最近では、IBMのある数学者がこれに匹敵する変革を引き起こした。

1963年、マンデルブローは、シカゴ商業取引所での綿花価格の騰落のパターンについて研究していた。

価格は不規則に上下し、数ヶ月間の価格のグラフは激しくうねる山脈のように見える。

しかしマンデルブローは、その変動に隠された規則を見つけられるはずだと考えた。

彼はこのグラフから、価格はあらゆる時間のスケールで変動していることに気がついた。

価格は毎日上昇下落しているし、毎時間、毎分にも上下しているし、もっとゆっくりと何週間や何ヶ月にわたっても変動している。

しかしマンデルブローはさらに、たとえばグラフの一日分の範囲を切り取って、それをグラフ全体と同じ大きさに拡大すると、両者はほとんど同じに見えるということを見出した。

つまり速い変動は、短い期間に圧縮にされているだけで、より長い期間での変動とほとんど同じに見えるのだ。

[39] 1970年代の初め、マンデルブローは注目する先を変え、自然界、特に網状に枝分かれする大小の川について、詳しく調べはじめたところ、ここでもマンデルブローは同じパターンに出くわした。

彼は、金や小麦といった別の商品の価格変動も調べ、そこにも同じパターンを見出した。

さらには、株式や債券の価格の騰落にも同じことを発見した。

グラフのいかなる小部分も、全体の大まかなコピーであるかのようだった。

1970年代の初め、マンデルブローは注目する先を変えた。

自然界、特に網状に枝分かれする大小の川について、詳しく調べはじめたところ、ここでもマンデルブローは同じパターンに出くわした。

たとえば、最終的にミシシッピー川へとつながっていく水路網を写した空中写真において、そのなかのどの一部分を拡大しても写真全体と同じように見えることに、彼は気づいたので。

[40] マンデルブローは、1983年に出版された画期的な著書『フラクタル幾何学』のなかで新

たな幾何学を創造したが、その鍵となるのは、我々がジャガイモの破片で見つけた概念、つまり自己相似性である。

その後の10年間マンデルブローは、図書館での調査やあらゆる分野の科学者たちとの意見交換に膨大な時間を費やし、綿花の価格について発見した興味深い事実を出発点とした知的過程をたどることとなった。

彼は同様のパターンを、山脈の不規則な形、まばらな雲の形、割れたガラスのぎざぎざな角、砕けたレンガの粗い表面、海岸線や木などの一定しない自然の形にも見出した。

これらの不規則な形は、何世紀にもわたってあらゆる科学的説明を退けてきたものである。

それらは数学や科学の支配を大きく超えたところにあり、通常の幾何学による取り扱いに逆らいつつけてきた。

しかしマンデルブローは、1983年に出版された画期的な著書のなかで新たな幾何学を創造し、科学者たちの目を覆ってきた目隠しを外した。

物事を見る方法がひとたび分かれば、それはたいてい非常に単純なものだと気がつくはずだ。

彼はそう指摘した。

その鍵となるのは、我々がジャガイモの破片で見つけた概念、つまり自己相似性である。

[41] 今では科学者は自己相似性を、月の上に刻まれたクレーターから海に浮かぶプランクトン、はては人間の鼓動にまで見出している。このたぐいの秩序性にはフラクタルの名前がついている。マンデルブローが自らその名前をつけ、それは近年でもっとも重要な科学的動向の火蓋を切った。

今では科学者は自己相似性を、月の上に刻まれたクレーターから海に浮かぶプランクトン、はては人間の鼓動にまで見出している。

数年前、ハーバード大学医学部の心臓内科医エイリー・ゴールドバーガーと、ボストン大学の物理学者たちは、ある被験者の心臓の鼓動を一日中記録し、そのデータを詳しい数学的分析にかけた。

まず彼らは、各心拍の間隔を計算し、約10万の数字からなるデータ列を得た。

ゴールドバーガーたちはこのデータ列を見て、マンデルブローが金融のデータに見出したものとそっくりなパターンがあることに気がついた。

そこには、数時間かけて増減する変動もあれば、数分で、あるいは数秒で増減する変動もあった。

人間の心臓は、同じことを続けるだけでは決して満足せず、常に速さを変えているように思えた。

ゴールドバーガーたちは、ここにもある程度の自己相似性があることを見出したのだ。

データの一部を切り取って拡大すれば、数秒間の変化が、もっとゆっくりの数分間や数時間で起こる変化とそっくりだということが分かった。

この不規則さの裏には、奇妙な秩序が隠れていた。ただそれは、秩序立った科学が伝統的に取り扱ってきたたぐいのものとはまったく違っていた。

このたぐいの秩序性には名前がついている。

マンデルブローが自らその名前をつけ、それは近年でもっとも重要な科学的動向の火蓋を切った。フラクタルである。

[42] 自然の物にフラクタルを見出したのはおそらくマンデルブローがはじめてであろうが、それよりずっと前から数学者はこの概念について考えてきた。

自然の物にフラクタルを見出したのはおそらくマンデルブローがはじめてであろうが、それよりずっと前から数学者はこの概念について考えてきた。

ドイツの数学者ヘルゲ・フォン・コッホが 1904 年に考案したコッホ曲線は、ある反復過程によって作ることができる。

先ず水平な直線を書く。

次にそこに三角形のこぶをつけて、二つの平野の間に一つの山がそびえているような形にする。

次に、その平野と山の斜面の両方に再びこぶをつける。

そしてこの、すべての直線の真ん中にこぶをつけていくという過程を続けていくと、この図形はどんどん細かくなっていく。

もしこの過程を無限回続けられれば、コッホ曲線を得ることができる。

[43] コッホ曲線の自己相似性は、実際には書くことのできない完璧な図形でしか成立しない。

コッホ曲線が特別なのは、どんなに近くで見たとしても同じ構造が現われるという点である。どの部分を拡大しても、全体と同じになる。

コッホ曲線を何万回拡大しても、同じ構造が次から次へと現われてくる。

もちろんこの自己相似性は、実際には書くことのできない完璧な図形でしか成立しない。

先ほどの作図の場合は、ある縮尺で限界に達し、フラクタルではなくなってしまうので、近似的なフラクタルにすぎない。

[44] 現実世界には完璧な円や完璧な直線は存在しないが、そのために、これらの概念が役に立たないということはない。同様にフラクタルの数学も、あらゆる種類の物事に何らかの方法で現われてくるスケール不変性を表現するための、理想的な概念を提供することになる。

現実世界のいかなる物も、作図の例のように、真に数学的なフラクタルではない。

たとえば我々のジャガイモの破片の山については、ベキ乗則をもたらす自己相似性は、約 100 グラムから 1 / 1000 グラムまででしか通用しない。

しかしそれは 10 万倍という広範囲にわたっており、この範囲では事実上のフラクタルとなる。

現実世界には完璧な円や完璧な直線は存在しないが、そのために、地球の形や光の通り道を表わす上でこれらの概念が役に立たないということはない。

同様にフラクタルの数学も、あらゆる種類の物事に「何らかの方法で」現われてくるスケール不変性を表現するための、理想的な概念を提供することになる。

[45] マンデルブローのフラクタル幾何学は、フラクタルとは何か、そしてあるフラクタルは他のフラクタルとどう違うかを説明することならできるが、あるものがどのようにしてフラクタルになるかを説明できる方法はもちあわせていない。

この「何らかの方法で」というのが重要な点になる。

数学上の完璧なフラクタルは、数学者の想像力が生み出したものである。

しかし、現実世界におけるフラクタルはどこから生み出されるのだろうか？

原因は何なのだろうか？

マンデルブローのフラクタル幾何学は、フラクタルとは何か、そしてあるフラクタルは他のフラクタルとどう違うかを説明することならできるが、あるものがどのようにしてフラクタルになるかを説明できる方法はもちあわせていない。

ケプラーが惑星の運動におけるいくつかの規則性を突き止め発表したずっと後になって、ニュートンがその過程に隠された物理を明らかにしたのと同様に、マンデルブローの発見も、より深遠な説明を導くためのものにすぎない。

[46] 自然界で見られる一般的なフラクタルに関連した答えとは、フラクタルは成長や進化の過程においてもっとも自然に現われるというものである。ほとんどの場合、何らかの意味で歴史が重要な役割を果たすので、フラクタルやべき乗則の理解に必要なのは歴史物理学ということになる。

自然界で見られる一般的なフラクタルに関連した答えとは、フラクタルは成長や進化の過程においてもっとも自然に現われるというものである。

ほとんどの場合、何らかの意味で歴史が重要な役割を果たすので、フラクタルやべき乗則の理解に必要なのは歴史物理学ということになる。

その言葉を理解し、歴史という概念とのつながりを見るために、温かい水の入ったコップに塩粒を少々入れてかき回すところを想像してみる。

塩粒は溶けるだろう。物理学における歴史の意味は、その塩粒を元に戻そうと考えたときに明らかになってくる。

[47] 温かい水の入ったコップに塩粒を少々入れてかき回す。水の温度が十分高ければ、水の分子が塩の結晶からすべての原子が弾き出すのにかかる時間は短くなり、結晶はまったく残らなくなる。塩は溶け、すべての原子は四方を水に囲まれ、孤立して浮かぶことになる。これが平衡状態であり、外部の条件が変化しないかぎり永遠に同じ状態が続く。平衡状態では、歴史という概念はほとんど意味がない。

塩の一粒一粒を微視的に見ると、ナトリウム原子と塩素原子とが完全に幾何学的な並び方で結びついてできた結晶となっている。

これらの原子は、エネルギーによって結びついている。

しかし水のなかでは、各原子には水の分子が激しく衝突している。

水の温度は、水分子がどれだけ速く動いているかによって決まる。

水分子の速度が速いほど、衝突の力は強くなり、その分原子を跳ね飛ばす確率が増えることになる。

水の温度が十分高ければ、結晶からすべての原子が弾き出されるのにかかる時間は短くなり、結晶はまったく残らなくなる。

そして塩は溶け、すべての原子は四方を水に囲まれ、孤立して浮かぶことになる。
これが平衡状態であり、外部の条件が変化しないかぎり永遠に同じ状態が続く。
平衡状態では、歴史という概念はほとんど意味がない。

[48] このコップを冷蔵庫に入れて冷やしてみよう。温度がある限界を下回ると、コップの中で塩が再び成長してくる。ナトリウム原子と塩素原子が集まりはじめるが、水分子はもはやあまり速く動いていないので、それらの原子を効果的に跳ね飛ばすことはできない。温度を限界値のわずかだけ下の値に維持したとき、平衡状態に非常に近いところで新たな固体が成長する。この場合固体成長は非常に遅く、できてくる結晶は、ダイヤモンドのように完全で傷のない、ユークリッド幾何学における規則的な形になる。この場合も歴史はほとんど意味を持たない。実験を何百回繰り返しても、必ずまったく同じ結果に終わるからだ。

さてこのコップを冷蔵庫に入れて冷やしてみよう。

温度がある限界を下回ると、コップの中で塩が再び成長してくる。

ナトリウム原子と塩素原子が集まりはじめるが、水分子はもはやあまり速く動いていないので、それらの原子を効果的に跳ね飛ばすことはできない。

温度を限界値のわずかだけ下の値に維持したとき、平衡状態に非常に近いところで新たな固体が成長する。

この場合固体成長は非常に遅く、できてくる結晶は、ダイヤモンドのように完全で傷のない、ユークリッド幾何学における規則的な形になる。

その理由は、水分子が結晶の成長を食い止めるのに近いエネルギーをもっていることである。

原子は、しばらく結晶に結合すると再び弾き出され、結晶の表面近くを漂いつづけることになる。

その原子は、一度ついてはまた離れるということを繰り返し、最後には成長中の結晶にぴったりはまり込む正しい場所を見つける。

このように結晶は、原子が正しい場所に結合することで成長していく。

この場合も歴史はほとんど意味を持たない。実験を何百回繰り返しても、必ずまったく同じ結果に終わるからだ。

[49] 温度がもっと低く、限界値のずっと下だったら、何が起こるだろうか？ この場合結晶成長の駆動力はもはや小さくなく、結晶は非平衡条件下で成長し、規則的な形ではなく、様々な枝分かれやひげのたくさんある複雑な形に成長することになる。

温度がもっと低く、限界値のずっと下だったら、何が起こるだろうか？

この場合結晶成長の駆動力はもはや小さくなく、結晶は非平衡条件下で成長することになる。

どの原子も一度結晶に結合してしまうと、水分子はそれを跳ね飛ばすことができないので、その原子はそこにとらえられてしまう。

したがって、すべての原子が互いにぎゅうぎゅう詰めになって、結晶は急速に成長する。

その結果、原子の交通渋滞が起これ、固体は規則的な形ではなく、様々な枝分かれやひげのたくさんある複雑な形に成長することになる。

[50] 物理学者は、この状況に隠された本質を明らかにするための単純な数学的ゲームを作った。拡散律速凝集というこのゲームは、我々が今見てきた結晶成長を完全に数学的に表わすことができ、新たな歴史物理学の原型として考えることができるだろう。

物理学者は、この状況に隠された本質を明らかにするための単純な数学的ゲームを作った。

このゲームは、新たな歴史物理学の原型として考えることができるだろう。

拡散律速凝集というこのゲームは 1984 年にシカゴ大学の物理学者トム・ウィッテンとレオナルド・ソーンダースによって発明され、我々が今見てきた結晶成長を完全に数学的に表わすことができる。

[51] このゲームは、何も無い空間の中心に粒子が一つだけあるところから始まる。二つめ三つめの粒子がでたらめな方向から出発し、再びでたらめな道筋を通過して近づいてくる。中心にある塊を構成する粒子にぶつかれば、それにくっつくことになり、ぶつかなければ進みつづけることになる。

このゲームは、何も無い空間の中心に粒子が一つだけあるところから始まる。

そこに遠くからもう一つの粒子が、でたらめで偶然に支配された道筋を通過してさすらってくる。

二つめの粒子が一つめにぶつかなければ、それはさすらいつづけていく。

しかしもしそれらがぶつかり合うと、互にくっついてしまう。

次に三つめの粒子がでたらめな方向から出発し、再びでたらめな道筋を通過して近づいてくる。

この粒子の行く末も同じように決定される。つまり、中心にある塊を構成する粒子（一つかもしれないし二つかもしれない）にぶつかれば、それにくっつくことになり、ぶつかなければ進みつづけることになる。

このゲームは、このようにでたらめに粒子を送りつづけ、中心の塊がどうなるかを見るというものである。

この粒子がナトリウムか塩素の原子を表わし、塊が成長しつつある塩の結晶を表わすと考えればいい。

[52] このゲームでは、粒子は塊に衝突するとそこに留まる。これは歴史のうえで決定的な役割を果たす出来事であり、その結果は不可逆で、その後起こるすべての出来事に影響を及ぼすのである。

これらの規則が単純であるにもかかわらず、この非平衡成長ゲームで作られる塊は、平衡成長で作られる単純な形とはまったく違った、異様な形になる。

その理由は難しくはない。

このゲームでは、粒子は塊に衝突するとそこに留まる。

これは歴史のうえで決定的な役割を果たす出来事であり、その結果は不可逆で、その後起こるすべての出来事に影響を及ぼすのである。

粒子が付着することによって塊の形が変わり、他の粒子がその近い場所につく確率が上がる。

さらに粒子がつくと、ますますその場所に粒子がつきやすくなる。

この成長の仕方は非常に不安定で、あらゆるささいな出来事に左右される。

この非平衡状態では、歴史に相当するものが存在し、それは非常に重要な役割を果たすのである。

[53] フランシス・クリックはかつて、「凍結した偶然」の発生が進化過程の本質であると指摘した。あらゆる凍結した偶然は、過去に凍結した一連の偶然のうえに付け加わり、時間の流れに従って先へ進む曲がりくねった道筋を構築する。このゲームでは、粒子は塊に衝突するとそこに留まる。これは歴史のうえで決定的な役割を果たす出来事であり、その結果は不可逆で、その後起こるすべての出来事に影響を及ぼすのである。

フランシス・クリックはかつて、「凍結した偶然」の発生が進化過程の本質であると指摘した。偶然発生する遺伝的変異はほとんどの場合、生物の生存能や生殖能を奪い、そのため突然変異した系統はたいてい絶滅へと進む。

しかし稀に、適応性を上げるような突然変異が発生し、それが定着して集団へ広がっていくこともある。

ひとたびこのようなことが起こると、その偶然の出来事はその場で凍結し、その生物種のさらなる進化は必然的に新たな出発点から始まることになる。

このように、進化とは累積的なものである。

あらゆる凍結した偶然は、過去に凍結した一連の偶然のうえに付け加わり、時間の流れに従って先へ進む曲がりくねった道筋を構築する。

このゲームでは、粒子は塊に衝突するとそこに留まる。

これは歴史のうえで決定的な役割を果たす出来事であり、その結果は不可逆で、その後起こるすべての出来事に影響を及ぼすのである。

この道筋は歴史に深くかかわっており、凍結した偶然はまさに歴史の不確かさを具現化したものである。

[54] あらゆるささいな偶然は、成長しつつある構造に、それ以降永遠に消し去ることのできない影響を残す。この凝集ゲームを二回行なっても、あるいは100回行なっても、まったく同じ結果は決して得られない。それでも、生じてくる複雑な構造は必ずべき乗則に従うのだ。

凍結した偶然は、凝集ゲームにおいても中心的役割を果たしている。

このゲームは結晶成長の様子を表わすものであり、粒子の付着する規則が不可逆になると、本質的な偶然とともに歴史が姿を表わすことになる。

あらゆるささいな偶然は、成長しつつある構造に、それ以降永遠に消し去ることのできない影響を残す。

したがってこのゲームを二回行なっても、あるいは100回行なっても、まったく同じ結果は決して得られない。

それでも、生じてくる複雑な構造は必ず同じある性質をもっている。

中心から距離R以内には何個の粒子があるか、この答えはすべての塊でおおよそ同じになり、すでにお馴染みのべき乗則に従うのだ。

Rが2倍になるたびに、粒子の数は約3、25倍になるのである。

[55] たとえ、混乱した偶然の嵐のなかから塊が成長し、あるいはでたらめな偶然によって未来の進む向きが刻々変化したとしても、予測可能な性質は必ず現われてくる。この塊がフラクタルであり、個々の部分に関して典型的な大きさはないということを示している。

例のごとく、見た目は単純なこのべき乗則には、深い意味が隠されている。

この塊がフラクタルであり、個々の部分に関して典型的な大きさはないということを示している。実際、この図の一部分を切り出して拡大すると、もとの絵とそっくりになる。

意外なことに、粒子の塊は必ずこの性質をもつ。

たとえば、混乱した偶然の嵐のなかから塊が成長し、あるいはでたらめな偶然によって未来の進む向きが刻々変化したとしても、予測可能な性質は必ず現われてくる。

偶然の裏には明白で規則的な過程が潜んでおり、それは塊の正確な形ではなくその統計に現われるのだ。

[56] ここで物理学者が教訓として得たのは、結晶成長のような歴史に支配される過程は、時間に対して不変な方程式では理解できないということである。凝集ゲームを行なうことによって、非平衡の歴史物理学について学んだことになるのだ。

これが、歴史に支配され、おのずからフラクタルとスケール不変性を導くような、非平衡過程の一例である。

この凝集ゲームは、歴史とその不可避な偶然性を前にしたときに、我々は物理学をどのように進めていけばよいかという手本になる。

ここで物理学者が教訓として得たのは、結晶成長のような歴史に支配される過程は、時間に対して不変な方程式では理解できないということである。

起こったことを詳細まで理解するには、一つ一つの粒子に至る正確な成長の歴史をたどる以外に方法がないとしたら、方程式を使うのは的外れになりかねない。

凝集ゲームを行なうことによって、非平衡の歴史物理学について学んだことになるのだ。

[57] 地震の統計に関するグーテンベルク＝リヒターの法則というべき乗則は、地震に潜む物理的、歴史的過程を指し示す、一種の数学的な道標のようなものである。その道標には説明が必要だが、科学者たちは近年、それを説明するゲームを発見したのだ。

ウィッテンとソーンダースの凝集ゲームは、ありうるゲームのなかの一つであり、他にもこのようなものはたくさんある。

規則を変えれば、異なる種類の歴史ゲームや、異なる歴史的過程が得られる。

そして凝集ゲームに結晶化の過程の本質が含まれていたのと同様に、他のゲームには現実世界における別の歴史的過程の本質が含まれているかもしれない。

地震の統計に関するグーテンベルク＝リヒターの法則というべき乗則は、地震に潜む物理的、歴史的過程を指し示す、一種の数学的な道標のようなものである。

その道標には説明が必要だが、科学者たちは近年、それを説明するゲームを発見したのだ。

■最初の地滑りが運命の分かれ道―地震と臨界状態■

[58] 地球上のどの地震地帯も同様のひび割れ構造をもっているが、その細部は少しずつ違って、それぞれ独特のネットワークを形成しており、二つとしてそっくりな場所はないのだ。地震はそれぞれ無数に違う条件下で発生しているにもかかわらず、その激しい複雑さは最終的に、グーテンベルク＝リヒター則の単純さへと収斂する。なぜ細部の条件が影響しないのだろうか？

サンアンドレアス断層は確かに、南北に走りカリフォルニアを分断している一本の線である。しかしその主断層の近くでは、両側の地殻は何千というもっと小さな断層によってぼろぼろになっており、そのそれぞれの断層からはさらに小さな副断層が走っており、そしてさらに・・・と続いていく。

「断層」という言葉は実際は、「断層帯」という言葉に置き換えるべきである。

また、この大地のひび割れは、ロサンゼルス近郊でサンアンドレアス断層が途切れている地点ではまだまだ終わらない。

地球上のどの地震地帯も同様のひび割れ構造をもっているが、その細部は少しずつ違って、それぞれ独特のネットワークを形成しており、二つとしてそっくりな場所はないのだ。地震はそれぞれ無数に違う条件下で発生しているにもかかわらず、その激しい複雑さは最終的に、グーテンベルク＝リヒター則の単純さへと収斂する。なぜ細部の条件が影響しないのだろうか？

[59] 多くの研究者たちのアイデアによって、最近やっと地震に対する説明が可能になってきた。バリッジとクノポフによるブロックとばねのモデルや、バクとタンによるモデル、オラミ、フェダー、クリステンセンによるその改良版モデルを用いた研究がなされてきた。しかし、どうしてそうなるのかを理解することと予測することとは違う。

多くの研究者たちのアイデアによって、最近やっと地震に対する説明が可能になってきた。バリッジとクノポフによるブロックとばねのモデルや、バクとタンによるモデル、オラミ、フェダー、クリステンセンによるその改良版モデルを用いた研究がなされてきた。しかし、どうしてそうなるのかを理解することと予測することとは違う。実際この場合も、科学者たちの描いた地震の発生過程の描像は、きわめて単純なものであったが、その理解によって得られた結論は、個々の地震を予知するのはおそらく不可能だということだった。

[60] 大地震は、どんなときにでも、どんな断層体でも起こりうる。そのような地震がなぜ起こるかなら説明できる。地殻が臨界状態に調整されており、大変動の瀬戸際に立っているからだ。コロンビア大学の地震の専門家クリストファー・ショルツは、次のような独創的な言葉を記した。「地震は、起こりはじめたときには、自分がどれほど大きくなっていくか知らない。地震にわからないのなら、我々にも分からないだろう」。

地球内部の熱によって起こるプレートの運動は、地殻に一定の歪みを与えつづけている。この歪みは蓄積していき、断層のごく一部分の岩石が滑る限界に達すると、それは滑り出す。この初めに滑る部分は、1ミリ程度の長さかもしれないし、あるいは目には見えないほど小さいかもしれない。

しかし、それに引きつづいて起こることはそんなに小さいとは限らない。

最終的な影響の大きさは、その初めの原因の大きさとは何の関係もないからだ。

もし地殻が、このような仕組みになっているとしたら、様々な岩石の断片にかかる歪みと圧力は、時間とともに臨界状態へと組織化されていくはずだ。

地殻は、あらゆる大きさの不安定性という見えざる手によって穴だらけにされている。

したがって、どこかで最初の岩石の断片が滑れば、その後には文字通り何でも起こりうるのだ。

地震はすぐに止まるかもしれない。

あるいは最初の動きが近くの岩石に強い歪みを与えて、さらなる滑りを引き起こすかもしれない。

最終的な地震の規模は、おそらく永遠に我々の調査の及ぶことのない非常に細かな詳細、つまり初めの微小な滑りが発生した場所での見えざる手の大きさに左右されるのだ。

したがって壊滅的な地震は、事実上まったく理由なしに発生する。

そのような地震がなぜ起こるかなら説明できる。

地殻が臨界状態に調整されており、大変動の瀬戸際に立っているからだ。

しかし、なぜ1811年のニューマドリッドの地震があんなに大きかったのかを説明するには、地震の発生後になって、どの岩石がどの順番で滑ったかという物語の形で語る以外に方法はない。

初めに滑った岩石がたまたま、非常に大きな見えざる手に乗っていたということだ。

この見えざる手は、断層体全体にまで届いていたことになる。

大地震は、どんなときにでも、どんな断層体でも起こりうる。

コロンビア大学の地震の専門家クリストファー・ショルツは、次のような独創的な言葉を記した。

「地震は、起こりはじめたときには、自分がどれほど大きくなっていくか知らない。地震にわからないのなら、我々にも分からないだろう」。

もし歪みと圧力のパターンを正確に描き出すことができ、すべての岩石についてどの程度の歪みにまで耐えられるかといった性質を非常に細かく知ることができたとしたら、不安定性という見えざる手の様子を地図上に描き出すことができるはずだと考える人がいるかも知れない。

しかしもしそうだとすると、大地震の予知はほとんど不可能だろう。

地殻のなかには、押される力が限界に達し、今まさにごくわずかな距離だけ滑ろうとしている場所が、何億ヵ所とあるはずだ。

それらすべての場所を監視し、そのすべてについて、不安定性という大きな見えざる手に乗っていないかどうかを確かめなければならないのである。

[61] 地震や金融崩壊や革命や戦争について言えば、我々は当然誰でも、これらの出来事の原因を特定し、将来の発生を防ぐことを切望している。もし我々の世界が常に、突然の劇的な変化の瀬戸際に立つように調整されているとしたら、あらゆる大変動は、その発生直前でさえ絶対に避けることができず、予測不可能なのかもしれない。

この著述では、この世界のあらゆる階層における変化と組織化に見られる普遍的なパターンを探

ろうとしている。

地震や金融崩壊や革命や戦争について言えば、我々は当然誰でも、これらの出来事の原因を特定し、将来の発生を防ぐことを切望している。

これらの出来事の背景にはフラクタルやベキ乗則が働いており、おそらくそれは、これらの出来事の力学の裏に臨界状態が潜んでいるためである。

その結果、説明を望む人間の願望はひどく裏切られ、絶えず満足できない運命にある。

もし我々の世界が常に、突然の劇的な変化の瀬戸際に立つように調整されているとしたら、あらゆる大変動は、その発生直前でさえ絶対に避けることができず、予測不可能なのかもしれない。

[62] 物理学以外の世界ではほとんど知られていないことだが、今日物理学者たちは、地球科学、人間生理学、進化生物学、そして経済学という広範囲にわたる領域に、臨界状態に関する科学の確固たる陣地を築いているのだ。

臨界状態に関する科学は、扱いにくい鉄の磁石の働きや、水が熱せられて水蒸気になるときの分子レベルの詳細など、一見ありふれた事柄に深く根ざしている。しかし、物理学以外の世界ではほとんど知られていないことだが、30年前にこれら思いもよらない事柄を背景にして、今日物理学者たちは、地球科学、人間生理学、進化生物学、そして経済学という広範囲にわたる領域に、確固たる陣地を築いているのだ。

■世界は見た目よりも単純で、細部は重要ではない■

[63] 1938年、ロシアの物理学者ピョートル・カピッツァはヘリウムガスを摂氏マイナス271度という驚くべき温度にまで冷却した。ヘリウムガスを極低温にしていくと、まず通常の液体に変化し、そして次に、この世でもっとも奇妙な物質の一つ、超流動体に変化することを発見した。これは物理学者が「相転移」と呼ぶ現象の例である。

1938年、ロシアの物理学者ピョートル・カピッツァはヘリウムガスを摂氏マイナス271度という驚くべき温度にまで冷却した。

この温度は、存在しうる最低温度である絶対零度の、わずか2度上である。

カピッツァは、ヘリウムガスを極低温にしていくと、まず通常の液体に変化し、そして次に、この世でもっとも奇妙な物質の一つ、超流動体に変化することを発見した。

超流動体は、普通の液体のように瓶に入れて貯めておくことができるが、器の中でかきまわすと、できた渦は永久に止まらなくなる。

超流動体は、粘性という、あらゆる運動を止めてしまう内部摩擦の一種である。

蜂蜜は粘性が非常に高く、水は低く、超流動体にはまったくない。

数年後には超流動ヘリウムに関する立派な理論ができ、1950年までにはもはや謎は残っていなかった。

これは物理学者が「相転移」と呼ぶ現象の例である。

[64] 1600年のこと、イギリスのウィリアム・ギルバートは、磁石を金物職人の使う炉に入れた。磁石が熱くなってオレンジ色に輝くと、驚いたことに釘を引きつける性質を失ってしまった。過度の熱が磁石の力を無効にしてしまったようだった。その後、科学は鉄磁石のために4世紀近くも費やしたのだが、この謎を解明していくなかで、物理学者たちは次のような教訓を得た。世界は見た目よりも単純だ。そして、何かを理解するときには、細部はほぼ間違いなく重要ではないのだ。

1600年のこと、イギリスのウィリアム・ギルバートは、磁石を金物職人の使う炉に入れた。磁石が熱くなってオレンジ色に輝くと、驚いたことに釘を引きつける性質を失ってしまった。過度の熱が磁石の力を無効にしてしまったようだった。

このギルバートの観察結果に対するまともな解釈は、その300年以上後の1907年になってから初めて現われたが、この最初の理論が誤りだったと物理学者たちが気づくのに、それから40年かかり、より洗練された理論になるのに、さらに30年かかった。

合計して科学は、鉄磁石のために4世紀近くも費やしたのだが、この謎を解明していくなかで、物理学者たちは次のような教訓を得た。

世界は見た目よりも単純だ。そして、何かを理解するときには、細部はほぼ間違いなく重要ではないのだ。

[65] 鉄の磁石のすべての原子は、それ自身小さな磁石であり、上下左右どの矢印の方向を向くこともできる。原子磁石は、本来互いに整列する傾向があり、放っておいても、統制のとれた軍団のようにすばやく隊列を組む。しかしこれらの矢印は、熱という、混乱を起こそうとする敵と戦わなければならない。

鉄の磁石のすべての原子は、それ自身小さな磁石であり、上下左右どの矢印の方向を向くこともできる。

原子磁石は、本来互いに整列する傾向があり、放っておいても、統制のとれた軍団のようにすばやく隊列を組む。

しかしこれらの矢印は、混乱を起こそうとする敵と戦わなければならない。熱である。

物質の温度は、その物質の中に組織化されていないエネルギーがどれほどあるかを表わしている。

温かい空気のなかでは冷たい空気に比べて、空気の分子はより激しく飛び回っている。

固体の鉄の中では、原子は飛び回らずに定位置のまわりで振動しており、鉄が熱くなるほどその振動は激しくなる。

したがって、鉄原子の間に働く磁気力が原子を整列させようとしても、熱がそれを妨げようと激しく襲ってくる。

ここに秩序の力とカオスの力との戦いが起こり、その勝敗によって、磁石が外部に対してどう振る舞うかが左右される。

[66] 室温では、原子を揺さぶる力はかなり弱く、原子磁石はうまく整列できる。一つ一つの原子磁石の力は非常に小さいが、鉄の小さな塊でさえ、それらが一緒になると、軍団全体ではかなりの力になり、釘を引きつけられるようになる。もし鉄が炉の中で赤熱していると、激しい熱雑

音が秩序の力を上回ってそれを無力化させる。そして軍団は無秩序な状態になる。

室温では、原子を揺さぶる力はかなり弱く、原子磁石はうまく整列できる。

一つ一つの原子磁石の力は非常に小さいが、鉄の小さな塊でさえ、そこに含まれる原子の数は10の24乗個をはるかに上回るの、それらが一緒になると、軍団全体ではかなりの力になり、釘を引きつけられるようになる。

一方、もし鉄が炉の中で赤熱していると、激しい熱雑音が秩序の力を上回ってそれを無力化させる。

そして軍団は無秩序な状態になる。

この場合、すべての微小磁石の効果は打ち消し合い、鉄は釘を引きつけることができない。

[67] これも、物理学者が「相転移」と呼んでいる現象の例である。氷が溶けたり、水が蒸発するのも、相転移である。どれも、ある物質がある形態（相）から別の形態（相）へと変化する現象である。

これも、物理学者が「相転移」と呼んでいる現象の例である。

氷が溶けたり、水が蒸発するのも、相転移である。

どれも、ある物質がある形態（相）から別の形態（相）へと変化する現象である。

どの場合も、原子や分子が異なる形に組織化するのに伴って、物質の内部的な仕組みの変化が起きる。

カピッツァは、ヘリウムが通常の液体から超流動体に変化するという、新たな相転移を発見したことになる。

[68] 磁石の場合、冷えると秩序の力が勝ち、熱くなると形勢は逆転してカオスが支配する。鉄の場合は摂氏 770 度という中間的な臨界点の温度では、秩序とカオスとの戦いは膠着状態になる。物理学者ラルス・オンサーガーが磁石の臨界状態を描き出すことに取り組みつづけて、正確な計算をしたところ、二つの磁石が近ければ近いほど、それらは互いに同じ向きを向く傾向が増えるということが分かった。そして、一組の磁石の距離が2倍になると、それら二つの磁石が同じ向きを向く傾向の偏りは、約1.19分の1ずつ減少するというべき乗則を見出した。

磁石の場合、冷えると秩序の力が勝ち、熱くなると形勢は逆転してカオスが支配する。

中間的な温度では、秩序とカオスとの戦いは膠着状態になる。

この温度は臨界点と呼ばれており、鉄の場合は摂氏 770 度である。

この温度で、矢印の軍団には何が起こるのだろうか？

秩序的でも無秩序的でもなく、それらの間の微妙な境界に留まっているというのは、どういうことを意味するのだろうか？

ノルウェー人物理学者ラルス・オンサーガーは磁石の臨界状態を描き出すことに取り組みつづけて、ブルーリア・カウフマンと共に矢印のパターンに関する興味深い特徴をいくつか見つけることができた。

今、磁石集団のなかの磁石Xがたまたま上を向いたとしよう。

それによって、ある距離離れた磁石にはどのような影響が及ぶのだろうか？

物理学の専門用語で言うと、これは磁石の間の「相関」についての問題である。

オンサーガーとカウフマンは、臨界点に留まっているおもちゃの磁石に関して、ある興味深い結果を得た。

もし磁石のパターンが完全にランダムなら、どの二つの磁石を取ってきても、それらが同じ向きを向いている確率は正確に $1/2$ のはずだ（磁石は上か下かのどちらかしかむかない）。

しかし正確な計算をしたところ、二つの磁石が近ければ近いほど、それらは互いに同じ向きを向く傾向が増えるということが分かった。

そしてオンサーガーとカウフマンは、一組の磁石の距離が2倍になるごとに、それら二つの磁石が同じ向きを向く傾向の偏りは、約 1.19 分の1 ずつ減少するということを見出した。

この傾向は、磁石の間の距離がマス目の 10 個分、100 個分、1000 個分でも成り立ち、さらに、マス目 10 万個分や 1 億個分でも同様に成り立ったのだ。

これは意味深いことである。

結果が正確にべき乗則に従ったのだ。

[69] 我々は、オンサーガーとカウフマンが使うことのできなかったデジタルコンピュータを使って、磁石に関するべき乗則が真に意味することを、はるかに簡単に浮き彫りにできる。

我々は、オンサーガーとカウフマンが使うことのできなかったデジタルコンピュータを使って、磁石に関するべき乗則が真に意味することを、はるかに簡単に浮き彫りにできる。

速いコンピュータを使えば、25 万個の磁石を並べてその成りゆきを見ていくのは、難しいことではない。

やり方としては、様々な温度を設定して計算を行ない、その結果を、「上向きの」磁石を白に、「下向きの」磁石を黒に塗ることで図に表わす。

臨界点以上の図では予想通り、熱雑音が勝り、磁石は無秩序な並び方になっている。

それぞれの磁石はでたらめにすばやく上下に反転しつづけている。

これは純粋にカオス的な温度範囲にあり、この図はチャンネルの合っていないテレビのように見える。

一方臨界点以下の温度の図では、ほとんどすべての磁石が同じ方向（この図では下向き）に整列している。

この秩序的な温度範囲では、ほぼ完全に黒一色になっているのが見られる。

さて臨界点以下の温度の図から少しだけ温度を上げて、臨界点へ近づけて見ると、もっと面白いことが起こってくる。

[70] この臨界点の図は、べき乗則の意味を明らかにしてくれる。この臨界点では、たった一個の孤立した磁石から全体にわたる巨大な塊まで、あらゆる大きさの磁石集団が形成される。

もしさらに磁石を増やして、アメリカ合衆国と同じ大きさに並べたとしても、同じことが成り立つ。既述のように、べき乗則が成り立つ場合、幾何学的には典型的な大きさというものはない。

この臨界点における図には、この性質がはっきりと現われており、この図はフラクタルになっている。

臨界点へ近づけて見ると、ほとんどの磁石は同じ向きを向いたままだが、いくつかの白い反逆者たちの集団が広がり始める。

さらに温度を上げていくと、これらの集団は大きくなり、数も増えてくる。

最終的に臨界温度に達した図では、反逆者たちの白い集団の上だけを通して図の端から端まで行けるようになる。

あるいは黒い集団の上だけを通して横断できる。

この臨界状態では、磁石は磁力をもつ状態ともたない状態とのちょうど中間の状態に保たれるのだ。

そして、この臨界点の図は、ベキ乗則の意味を明らかにしてくれる。

この臨界点では、たった一個の孤立した磁石から全体にわたる巨大な塊まで、あらゆる大きさの磁石集団が形成される。

もしさらに磁石を増やして、アメリカ合衆国と同じ大きさに並べたとしても、同じことが成り立つ。

既述のように、ベキ乗則が成り立つ場合、幾何学的には典型的な大きさというものはない。この臨界点における図には、この性質がはっきりと現われており、この図はフラクタルになっている。

[71] 様々な瞬間の図を書いていくと、ある集団は分裂し、また別の集団は合体するというように、常に集団の離合集散が起こっている様子が分かる。臨界状態は、常に激しい変動にさらされ、突然起こりうる劇的な変化の瀬戸際に常に留まっている。

しかし一枚の図だけでは、この臨界状態の性質を十分に表わすことはできない。

臨界状態では、この図は永遠に変化しつづけているからだ。

様々な瞬間の図を書いていくと、ある集団は分裂し、また別の集団は合体するというように、常に集団の離合集散が起こっている様子が分かる。

臨界状態は、常に激しい変動にさらされ、突然起こりうる劇的な変化の瀬戸際に常に留まっている。

この状態を表わすのに、「過敏」という言葉ではまだ不十分である。

矢印の軍団は、二つの状態を仕切る扉の上で釣り合いを取っており、常にどちらかに一斉に落ちうる状態にあるので、わずかな影響を受けただけでも、軍団はそこから突き落とされることがある。

たった一つの磁石が反転することによって、さらなる反転が雪崩状に引き起こされ、それが図の端から端まで襲うこともありうるのだ。

[72] ベキ乗則では、どの場合もスケールの変化に伴う規則的な傾向が見られたが、対象が異なればそのベキの数字は違う値になっていた。そのため物理学者は、臨界状態の性質についてより具体的に知るために、ベキ乗則の形だけでなく、そこに現われる正確な数字にも注目する。

オンサーガーとカウフマンのベキ乗則に現われる1.19という数字は、この臨界状態を特徴づけるある種の数学的指標である。

グーテンベルク=リヒター則やジャガイモの破片のベキ乗則では、どの場合もスケールの変化に

伴う規則的な傾向が見られたが、対象が異なればそのべきの数字は違う値になっていた。グーテンベルク=リヒター則によると、地震の大きさが2倍になればその頻度は1 / 4になる。ジャガイモの破片のべき乗則では、破片の大きさが2倍になればその数は約1 / 6になる。これらの数字はそれぞれ、固有の自己相似的フラクタルパターンに対応している。そのため物理学者は、臨界状態の性質についてより具体的に知るために、べき乗則の形だけでなく、そこに現われる正確な数字にも注目する。

[73] また異なる相転移に対しては、その臨界状態の値はそれぞれ異なるものと考えられる。気体中や液体中の原子の間に働く相互作用は、二つの微小磁石の間に働く相互作用とはまったく違う。

また異なる相転移に対しては、その臨界状態の値はそれぞれ異なるものと考えられる。気体中や液体中の原子の間に働く相互作用は、二つの微小磁石の間に働く相互作用とはまったく違う。原子や分子は飛び回って互いに衝突しているが、磁石は一カ所に留まって、その向きを変えているだけである。超流動ヘリウムの場合には、量子世界の法則が重要な役割を果たしており、そこに働く力は、我々が通常知っているようなものとはまったく違う。

[74] ところが、1960年代に研究者たちが、酸素、ネオン、一酸化炭素といった様々な物質を使って気体から液体への相転移を調べたところ、どの場合も正確に等しい臨界値が得られ、彼らは首をかしげることになった。

ところが、1960年代に研究者たちが、酸素、ネオン、一酸化炭素といった様々な物質を使って気体から液体への相転移を調べたところ、どの場合も正確に等しい臨界値が得られ、彼らは首をかしげることになった。さらに驚くことには、化学物質の混合や分離といった、気体から液体への変化とは何の類似性もない状況においても、それとまったく同じ値が見出された。そしてもっとも衝撃的だったのは、それと同じ数字が、オンサーガーの研究したおもちゃの磁石の三次元版を用いた計算においても、再び現われたことである。このモデルは非常に大雑把なものであり、物質の混合や液体への凝縮などとはまったく何の関係もないことが、明らかなのにもかかわらず、である。

[75] 1965年までに物理学者は、ある驚くべき可能性をまのあたりにするようになった。あらゆる相転移に伴って臨界状態と集団形成が起こるだけでなく、その臨界状態の正確な数学的特徴は、その物事の詳細にはほとんど依存しないのではないかというのだ。

1965年までに物理学者は、ある驚くべき可能性をまのあたりにするようになった。あらゆる相転移に伴って臨界状態と集団形成が起こるだけでなく、その臨界状態の正確な数学的特徴は、その物事の詳細にはほとんど依存しないのではないかというのだ。

その時点では、これは発展途上の単なる可能性にすぎず、人々にもどかしい思いをさせていたが、1970年にシカゴ大学のある若い物理学者が、この可能性に確実な根拠を与えた。レオ・カダノフは、あらゆる詳細のうち重要なものは少数しかないと考え、そして実際に、そのような要素を特定することに成功したのだ。

[76] この問題を突き詰めると、次のような基本的な幾何学的問題へと還元できる。それは、ある一点が秩序化の影響を受けたとき、その近傍の点がどれほど容易に同様の秩序状態になるか、という問題である。これは物理学の問題ではなく、幾何学の問題だ。

臨界点では、いつどここの場所でも集団が組織化されうる状態にあり、実際に、そこかしこで絶えず組織化が起こって、その集団は大きくなりやがて消滅する。

集団はどの程度まで大きくなるのか？ そしてどれほどの時間で消滅するのか？

この問題を突き詰めると、次のような基本的な幾何学的問題へと還元できる。

それは、ある一点が秩序化の影響を受けたとき、その近傍の点がどれほど容易に同様の秩序状態になるか、という問題である。

これは物理学の問題ではなく、幾何学の問題だ。

三次元の通常の磁石の中では、すべての原子磁石は、三つの独立した方向に隣接する原子磁石に影響を与えられる。

一方、平面世界では、その三つの方向のうち一つは取り除かれている。

[77] カダノフは、様々な相転移に伴って現われる臨界状態の臨界値を調べていくなかで、対象としている物体が存在する空間の物理的次元が重要な役割を果たす、ということを見出した。またもう一つ、個々の物体の形状も重要な役割を果たすことを見出した。

カダノフは、様々な相転移に伴って現われる臨界状態の臨界値を調べていくなかで、対象としている物体が存在する空間の物理的次元が重要な役割を果たす、ということを見出した。

またもう一つ、個々の物体の形状も重要な役割を果たすことを見出した。

たとえばキセノンガスの原子は、微小なビリヤードの玉に似ており、動き回ることにはできるが、どちらかの方向を向くということにはできない。

磁石の中では原子は、矢印のような性質をもっており、様々な方向を向くことでキセノン原子よりも多くのことを行なうことができる。

個々の物体が多くの自由度をもつほど、秩序状態がまわりに伝播しにくくなるというのは、もっともらしい話だ。

物体の形状も確かに、臨界状態における自己相似性の正確な形に影響を与えるのである。

[78] ところが驚いたことに、カダノフは、その他のどんな事柄もまったく問題にはならないということを見出した。物理学者は、このきわめて奇跡的な事実を「臨界状態の普遍性」と呼んでおり、今では、何千回もの実験やコンピュータ・シミュレーションによって確かめられている。

ところが驚いたことに、カダノフは、その他のどんな事柄もまったく問題にはならないということを見出した。

つまり、粒子の質量や電荷については考えなくてよい。

その粒子が酸素なのか、窒素なのか、クリプトンなのか、ニッケルなのか、あるいは鉄なのかも考えなくてよい。

その粒子がたった一つの原子でできているのか、それとも何十何百という原子からなる複雑な分子なのかも、考えなくてよい。

実際、粒子の種類も、その間の相互作用の強弱も、考えなくてよいのである。

こういった詳細は、臨界状態の組織化にわずかでも影響を与えることはない。

物理学者は、このきわめて奇跡的な事実を「臨界状態の普遍性」と呼んでおり、今では、何千回もの実験やコンピュータ・シミュレーションによって確かめられている。

[79] 臨界状態では、秩序の力とカオスの力とが不安定なバランスの上で争っているが、この争いの特徴や、それによって戦況が常に移り変わり入れ替わるといふ状況は、それに関与するほとんどすべての事柄の詳細には関係なく等しい。

臨界状態では、秩序の力とカオスの力とが不安定なバランスの上で争っており、そのどちらかが完全に勝つわけでもない。

そしてこの争いの特徴や、それによって戦況が常に移り変わり入れ替わるといふ状況は、それに関与するほとんどすべての事柄の詳細には関係なく等しい。

対象となる物体の物理的次元とその基本的形状は重要であるが、その他の事柄はすべて問題にならないのである。

[80] 普遍性の奇跡的な特徴とは、同じクラスに属する物体は、それが現実のものであろうか想像上のものであろうか、そして互いにどんなに似ていないように見えても、正確に同じ臨界状態へと組織化するということである。

そこでさらに抽象的な方向へと、小さいが有益な一歩を踏み出すことにしよう。

考えられるあらゆる物体が存在する、抽象的な世界を思い浮かべてみよう。

この世界はおのずから、いくつかの国々へと分割される。

一つめは「三次元内の矢印状の物体」の国、二つめは「一次元内の点状の物体」の国、などとなるわけだ。

物理学者はこの国々を、「普遍性クラス」と呼んでいる。

普遍性の奇跡的な特徴とは、同じクラスに属する物体は、それが現実のものであろうか想像上のものであろうか、そして互いにどんなに似ていないように見えても、正確に同じ臨界状態へと組織化するということである。

[81] 臨界状態の普遍性を通して、自然は科学者たちに驚くべき贈り物を与えてくれたのだ。すべての物理的システムは必ずどれかの普遍性クラスに分類されるので、一つのクラスのなかの

あるシステムがとる臨界状態を理解できれば、それはすなわち、そのクラスに含まれるすべてのシステムを理解したことになる。

臨界状態の普遍性を通して、自然は科学者たちに驚くべき贈り物を与えてくれたのだ。

すべての物理的システムは必ずどれかの普遍性クラスに分類されるので、一つのクラスのなかのあるシステムがとる臨界状態を理解できれば、それはすなわち、そのクラスに含まれるすべてのシステムを理解したことになる。

どんなに大雑把なおもちゃのモデル、たとえオンサーガーのモデルでさえ、必ずどれかの普遍性クラスに含まれる。

したがって、臨界点に位置するどんな現実の物理的システムを理解したいときでも、そのシステムのあらゆる現実的で厄介な細部を忘れ、その代わりに、同じ普遍性クラスに含まれるもっとも単純な数学的ゲームを考えればよいのだ。

そのゲームは、大雑把なものであっても、ばかげたものであっても構わない。

物理法則を破っていても、現実のシステムのほとんどあらゆる細部を無視したものであっても構わない。

二つの重要な特徴が合っているかぎり、そのゲームは、臨界状態において現実の物理的システムと完全に同じ振る舞いをするのが保障されている。

おそろしく大雑把なモデルでさえ、現実のシステムと完全に同じに振る舞うのだ。

[82] 今や我々は、前よりもずっと高度な観点に立っている。臨界状態にある物事に関して、その本質的な組織構造を理解するときには、いくつかの真に重要な特徴を無視しないかぎり、他のどんな詳細をも無視して構わない。

今や我々は、前よりもずっと高度な観点に立っている。

臨界状態にある物事に関して、その本質的な組織構造を理解するときには、いくつかの真に重要な特徴を無視しないかぎり、他のどんな詳細をも無視して構わない。

そしてグーテンベルク＝リヒターのべき乗則や、地震が自己相似的にある時間に集中することから考えると、地殻は臨界状態にあり、時間に関しても場所に関しても、固有で典型的なスケールはもっていない。

これは細部が考慮されていないという反論を退けるものである。

実際に、バリッジとクノポフによるブロックとばねのモデルや、バクとタンによる、あるいはオラミ、フェダー、クリステンセンによるその改良版といった、ひどく大雑把なモデルを使っても、地殻の本質的な仕組みを理解するのは可能なのだ。

[83] こうして我々は、臨界的思考とでも呼べるような態度へと到達した。臨界状態にある物事は、どれも似たような組織構造を形成する傾向がある。この組織構造は、システムに特有の詳細やそれを形作る要素にもとづいて生じるのではなく、それらの細部の裏側に隠された、より深遠な基本的幾何や論理構造にもとづいて生じる。

こうして我々は、臨界的思考とでも呼べるような態度へと到達した。

臨界状態にある物事は、どれも似たような組織構造を形成する傾向がある。

そしてこの組織構造は、システムに特有の詳細やそれを形作る要素にもとづいて生じるのではなく、それらの細部の裏側に隠された、より深遠な基本的幾何や論理構造にもとづいて生じる。

臨界構造は、そのシステムが何物であるかに関係なく姿を現わすのだ。

したがって、ある物事が臨界状態にあると分かれば、その物事の詳細をほとんど無視したとしても、その本質的な性質は理解できるのである。

■ 防火対策を講じるほど山火事は大きくなる ■

[84] ウランの原子核は、外から刺激を与えられなくても、頻繁に分裂して中性子を放出している。条件を整えば、1個の中性子が放出されただけで、制御不能な連鎖反応が起こるかもしれない。

物理学者のエンリコ・フェルミは 1936 年に、ウランの原子核に1個の中性子が当たると、その原子核が分裂してさらに多くの中性を発生させる、という現象を発見した。

発生した中性子は他のウランの原子核にぶつかり、理論上はそれによってさらなる核分裂が起こり、中性子が雪崩状に発生することになる。

これが自律核反応である。

ウランの原子核は、外から刺激を与えられなくても、頻繁に分裂して中性子を放出している。

条件を整えば、1個の中性子が放出されただけで、制御不能な連鎖反応が起こるかもしれない。

フェルミは、準備が整うまで反応炉内で反応が始まらないようにするために、ウランの燃料棒の間にカドミウムでできた「制御棒」を挿入した。

この制御棒は、中性子を取り込むことで、1個の中性子から引き起こされた雪崩的反應をすぐに止め、反応炉にブレーキをかけている。

しかしこの日のフェルミは、ブレーキを外す準備を整え、何が起こるかを見ることにした。

[85] フェルミは制御棒を引き出すのをやめた。反応炉を臨界点の直前に調整したのである。このとき、1個の中性子が、あらゆる大きさの雪崩的反應を引き起こしうる状態になったのだ。

フェルミがブロックからゆっくりとカドミウムの棒を引き出しはじめると、引き出していくにつれて、ガイガーカウンターがカチカチと音を立てはじめ、さらに引き出していくと、マシンガンのように鳴りはじめた。

フェルミは計算尺を使って、反応炉が壊滅的な連鎖反応へと暴走するまでに、さらにどれだけ制御棒を引き出せるかを計算していた。

制御棒がその点に達したとき、ガイガーカウンターは激しく鳴りだした。

フェルミは制御棒を引き出すのをやめた。

反応炉を臨界点の直前に調整したのである。

このとき、1個の中性子が、あらゆる大きさの雪崩的反應を引き起こしうる状態になったのだ。

[86] 核反応炉においても磁石においても、小さな出来事が巨大で持続的な激変を引き起こすような臨界状態を作るには、誰かが力を尽くさなければならない。

フェルミの話のポイントは、何物もおのずから臨界点に達することはないということだ。調整が不可欠なのである。

核反応炉においても磁石においても、小さな出来事が巨大で持続的な激変を引き起こすような臨界状態を作るには、誰かが力を尽くさなければならない。

どんな鉄の塊でも、炉に投げ込めば、加熱されていって臨界状態を超える。しかしそれを摂氏770度近辺という狭い範囲に保つには、調整が必要となり、1~2度ずれただけで集団形成は起こらなくなる。

[87] 1987年にバク、タン、ヴィーゼンフェルドが、単純な砂山ゲームがごく自然に臨界状態へと発展することを発見したときに、驚き困惑したのは、このためである。彼らはそれを奇跡と認め、「自己組織的臨界」という名をつけて特別視した。

1987年にバク、タン、ヴィーゼンフェルドが、単純な砂山ゲームがごく自然に臨界状態へと発展することを発見したときに、驚き困惑したのは、このためである。

彼らはそれを奇跡と認め、「自己組織的臨界」という名をつけて特別視した。

物理学者が歴史上初めて、まったく何も無いところから調整することなしに、臨界状態が見事に組織化されるという例を見つけたのである。

コンピュータは、平らな面に砂粒を、ゆっくりとでたらめに落としていった。

砂山は大きくなって傾斜が急になり、そして雪崩が始まった。

最初のうちは数粒が崩れるだけだったが、山が大きくなってくるにつれ、雪崩の典型的な規模も大きくなっていった。

そして最終的にこの砂山は、フェルミが正しく調整した反応炉同様、臨界状態に達し、あらゆる規模の雪崩が起きうる状態になった。

さらに、その組織構造には回復力があつた。

手で砂山を半分の大きさにしてしまっても、何も問題はない。

砂粒が落ちていくと、砂山は再び自ら臨界状態へと組織化されるのだ。

[88] 我々はすでに、自己組織的臨界という考え方によって、臨界状態にあると思われる地殻の不規則で予測不可能な振る舞いを説明できるらしいということを知っている。はたしてこの世界には他にも、一見複雑だが、実は砂山ゲームと本質的に同じ論理構造をもつような物事が存在するのだろうか？ この問題を巡っては10年以上、「熱狂的な論争」が繰り広げられてきた。物理学者は、いまだにすべての答えをはっきりとつかんだわけではない。

臨界状態にある磁石を見つけることはできない。

磁石に関しては、臨界状態は非常に特殊なものである。

しかし、もし臨界状態が自然に発生しうるとしたら、自然界のなかでこの驚くべき性質をもっているのが砂山だけのはずはないと考えるのは、当然のことである。

我々はすでに、自己組織的臨界という考え方によって、臨界状態にあると思われる地殻の不規則で予測不可能な振る舞いを説明できるらしいということを知っている。

じわじわと容赦なく移動する大陸プレートは、砂粒の落ちていく様子に対応しており、このために地殻は、あらゆる規模の「雪崩」を起こすことになる。

この場合の雪崩とは、断層に沿って、次から次へと岩石が滑っていくことに対応している。

はたしてこの世界には他にも、一見複雑だが、実は砂山ゲームと本質的に同じ論理構造をもつような物事が存在するのだろうか？

この問題を巡っては 10 年以上、「熱狂的な論争」が繰り広げられてきた。物理学者は、いまだにすべての答えをはっきりとつかんだわけではない。

[89] 1988 年のイエローストーン国立公園での大森林火災が、なぜあれほどまでにひどいものになったのかを理解するのは、容易ではない。

1988 年のイエローストーン国立公園での大森林火災が、なぜあれほどまでにひどいものになったのかを理解するのは、容易ではない。

どこで、なぜ、どのように火災が広がっていったのかは、火の通り道にあった木の種類、木と木の間隔、そして森林と草原とがどのように混じり合っていたかという詳細なパターンに左右される。

風は火の広がりを速め、雨は広がりを遅くする。

森林の詳細な歴史もまた重要である。

ある部分では他に比べて木がずっと古く、そのことが木の燃えやすさに影響を与える。

川のような自然の防火帯は火災の拡大を防ぐことができるが、火災によって飛び散る火の粉が川を飛び越えれば、火災はその先何キロも広がることになる。

[90] 1998 年、コーネル大学の地質学者は、過去 1 世紀間にアメリカ合衆国とオーストラリアで発生した森林火災についての広範なデータを集めた。彼らは、森林火災の規模を、その火災による木の焼失本数、あるいは焼失面積として定義した。

このような影響を考え合わせると、科学者が大森林火災の予知に、地震予知と同程度にしか成功していないのも、たぶん驚くことではない。

しかしそこには、より深い原因があったのだ。

1998 年、コーネル大学の地質学者であるブルース・マラマッド、グレブ・モライン、ドナルド・ターコットは、過去 1 世紀間にアメリカ合衆国とオーストラリアで発生した森林火災についての広範なデータを集めた。

彼らは、森林火災の規模を、その火災による木の焼失本数、あるいは焼失面積として定義した。

さて、典型的な森林火災の規模は、どのくらいだったのだろうか？

[91] 驚くことに彼らは、火災に典型的な規模が存在するという徴候を何も見つけられなかった。その代わりに、米国内務省魚類野生生物局による 1986 年から 1995 年までの 4284 件の火災に関するデータは、きわめて正確なべき乗則の存在を示していた。

火災の歴史は、破壊的な自然の力とそれを食い止めようとする人間の努力とのせめぎ合いの様子を、大まかに示しているのではないかと考えられる。

マラマッドたちは、それを確実に知るために、1平方キロを焼失した火災の頻度、10平方キロを焼失した火災の頻度・・・、などを示す単純なグラフを作った。

驚くことに彼らは、火災に典型的な規模が存在するという徴候を何も見つけられなかった。

その代わりに、米国内務省魚類野生生物局による1986年から1995年までの4284件の火災に関するデータは、きわめて正確なべき乗則の存在を示していた。

[92] 我々は、再び同じ幾何学的傾向を見出したのである。火災の広がり方は非常に複雑であるにもかかわらず、様々な規模の火災の頻度について見ると、自然火災におけるグーテンベルク=リヒター則とも言える、驚くほど単純な傾向が現われるのだ。

我々は、再び同じ幾何学的傾向を見出したのである。

火災に包まれる面積が2倍になるごとに、火災の頻度は約2.48分の1になり、そしてこの傾向は100万倍もの範囲にわたる規模の火災に当てはまった。

言い換えれば、火災の広がり方は非常に複雑であるにもかかわらず、様々な規模の火災の頻度について見ると、自然火災におけるグーテンベルク=リヒター則とも言える、驚くほど単純な傾向が現われるのだ。

[93] 火災が発生したときには、火災は自分がどれほど大きくなるのか知らない。火災の広がり方がこのような形になるのは、あらゆる森林が臨界状態の組織構造をもっているためであり、ある特定の火災がどこまで広がるのかは、偶然に大きく左右されるのだ。

スケールに依存しないというべき乗則の性質は、大規模な出来事は小規模な出来事を単に拡大したものにすぎず、それらは同じ原因で発生することを示している。

実際、大きな地震は何か特別な出来事によって引き起こされるわけではなく、地殻の臨界的組織構造と、長距離にわたる連鎖反応が起こりやすいために生じる、稀ではあるが自然な出来事なのだった。

コーネル大学の研究者たちは、これと同じことが、アメリカ、オーストラリア、そして最終的に世界中のあらゆる場所の森林火災についても当てはまることを発見した。

火災が発生したときには、火災は自分がどれほど大きくなるのか知らない。

火災の広がり方がこのような形になるのは、あらゆる森林が臨界状態の組織構造をもっているためであり、ある特定の火災がどこまで広がるのかは、偶然に大きく左右されるのだ。

[94] 既に我々は、普遍性の原理について知った。ある点からある点へと活動状態が広がっていく過程における、本質的な論理構造さえ把握していれば、あらゆる詳細は放り投げてしまってもいいのだ。では森林火災においては、何が本質的なのだろうか？

マラマッドたちは、そのようなべき乗則がどのようにして成り立つのかをより深く理解するために、さらに一步を踏み出した。

既に我々は、普遍性の原理について知った。

この原理によれば、ある物が臨界状態にあれば、それと本質的に同じように振る舞うモデルを作るのは簡単である。

ある点からある点へと活動状態が広がっていく過程における、本質的な論理構造さえ把握していれば、あらゆる詳細は放り投げてしまってもいいのだ。

では森林火災においては、何が本質的なのだろうか？

[95] コーネル大学の研究者たちは、火災の広がりに関する事柄を三つの原理へと還元した。マラマッドたちは、これらの原理をもとにした数学ゲームを作り、コンピュータを使ってどのようなようになるかを観察した。

コーネル大学の研究者たちは、火災の広がりに関する事柄を三つの原理へと還元した。

一つめは、森林は木で構成されており、そのままにしておくとも木の本数は時間とともに増えるということ。

二つめは、時々どこかの木に火がつくということ。

三つめは、その火がそばにある木に燃え広がるということ。

林業従事者にとってこの最低限の描像は、現実の森林を滑稽なまでに単純化したものにすぎない。しかしマラマッドたちは、これらの原理をもとにした数学ゲームを作り、コンピュータを使ってどのようなようになるかを観察した。

[96] このゲームは、ランダムに木を生やし、時々1本の木に火をつけ、そして可能ならその火を燃え広がらせるというものである。

砂山ゲームと同様に、この山火事ゲームもマス目上で行なわれる。

コンピュータは、各ステップごとにマス目をでたらめに選び、そこに木を植えていく。

時間が経つと、森一帯にランダムに木が増えていく。

しかしある本数の木が植えられた後に、コンピュータはでたらめに選んだマス目にマッチを落とす。

したがって、木は各ステップごとに一定の頻度で増えていくが、それより低い頻度で、たとえば木が200本とか400本生えるごとに1回、マッチが落とされる。

もしマッチが何も無いマス目に落ちれば、何も起こらない。

もしマッチが木に当たれば、その木に火がつく。

そしてこのゲームの最後の規則は、次のようになる。

1本の木に火がつくと、次のステップでは、その隣にある四つのマス目のどこか一つに生えている木に火がつく。

このゲームは、ランダムに木を生やし、時々1本の木に火をつけ、そして可能ならその火を燃え広がらせるというものである。

[97] このゲームの振る舞いは、普遍性の概念から予想された通り、実際の森林火災のデータと見事に一致した。

このモデルには、川や道路のような防火帯は含まれていない。

この森のなかで虫食いのように木の生えていない部分が、おのずから防火帯の役目を果たすことになる。

このモデルはまた、すべての木をたった1種類にまとめてしまっている。

すべての木に火がつく確率は同じで、火がついたときにそれが燃える速さも等しい。

このゲームは、消防士の存在や天気の影響も無視している。

それでもこのゲームの振る舞いは、普遍性の概念から予想された通り、実際の森林火災のデータと見事に一致した。

[98] マラマッドたちは何回もシミュレーションを行ない、そのたびに、ある面積を焼き尽くす火災が何回発生するのかを数えていった。このモデルでも、再びほぼ完全なべき乗則が現われた。この木のネットワークは、おのずから自分自身を臨界状態へと調整し、そのため次に落とされるマッチは、森全体を破壊するようなものをも含む、まさにどんな規模の火災でも起こす可能性をもつようになる。このモデルでも、再びほぼ完全なべき乗則が現われた。

マラマッドたちは何回もシミュレーションを行ない、そのたびに、ある面積を焼き尽くす火災が何回発生するのかを数えていった。

すると実際の森と同様、規模の小さい火災は、規模の大きい火災に比べて多く発生した。

そしてこのような単なる定性的な一致に留まらず、このモデルでも、再びほぼ完全なべき乗則が現われた。

この木のネットワークは、おのずから自分自身を臨界状態へと調整し、そのため次に落とされるマッチは、森全体を破壊するようなものをも含む、まさにどんな規模の火災でも起こす可能性をもつようになる。

[99] マラマッドらは、この単純なゲームとの驚くべき一致から判断して、地殻だけではなく森林もまた、少なくとも成りゆきを自然に任せておけば、みずからを臨界状態へと組織化するような例の一つであるという結論に達した。

マラマッドらは、この単純なゲームとの驚くべき一致から判断して、地殻だけではなく森林もまた、少なくとも成りゆきを自然に任せておけば、みずからを臨界状態へと組織化するような例の一つであるという結論に達した。

この「自然に任せておけば」という条件は不可欠である。

というのも、このゲームはもう一つ興味深い特性を明らかにしたからである。

この特性は、米国林野庁が将来、大規模な壊滅的火災を減らすのに役立てられるかもしれない。

[100] ここ1世紀にわたってアメリカの森林管理政策は、制御棒を一気に引き抜くのに相当することを犯してきた。その結果、森林は現在、単に災害の瀬戸際に立っているだけでなく、ほぼ

確実に災害へと転がり落ちるように足枷をはめられている。

1988年のイエローストーンの火災は、150万エーカーを焼いた。

もちろん臨界状態では、大規模な出来事に特有の原因を見つけることはできない。

臨界的組織構造が存在するというだけで、ときにはどんなに恐ろしい火災も発生しうる。

それはちょうどフェルミの臨界反応炉と同じように、森林が災害の瀬戸際に立っているからである。

しかし、イエローストーンなどアメリカの自然公園の森林は、さらに悪い状態にあるように思われる。

もしフェルミが制御棒を引き出すのを止めなかったら、すべての中性子がどんどん数を増やしていくような雪崩が引き起こされ、反応炉は破滅的な暴走状態に陥ったであろう。

残念ながら、ここ1世紀にわたってアメリカの森林管理政策は、制御棒を一気に引き抜くのに相当することを犯してきた。

その結果、森林は現在、単に災害の瀬戸際に立っているだけでなく、ほぼ確実に災害へと転がり落ちるように足枷をはめられている。

それはなぜかを、このゲームは教えてくれるのだ。

[101] 火災発生の頻度が非常に低い場合、すべてを焼き尽くすような壊滅的な災害が起こる傾向が、非常に高くなるのだ。

マラムッドらは、あるときには、木が100本植えられるごとにマッチが落とされるようにし、またあるときには、2000本ごとに落とされるようにした。

一つめの場合には、マッチは頻繁に落とされて、たくさんの火災が発生する。二つめの場合には、火災は稀にしか発生しない。

この第二の場合に起こることが重要である。

火事が少ししか発生しないので、木はほとんど取り除かれることなく、生えている木の密度は高くなっていく傾向にある。

実際、2000本の木が植えられるごとに1回マッチが落とされるとすると、火災が1回発生するまでに、普通はすべてのマス目が木で埋まってしまう。

そして、1本の木に火がつくと、それが森全体に広がってしまう。

言い換えれば、火災発生の頻度が非常に低い場合、すべてを焼き尽くすような壊滅的な災害が起こる傾向が、非常に高くなるのだ。

[102] 森林を臨界状態に保つという自然の力学にとって、火災は不可欠な要素である。それゆえ、火災を抑えたことによって、そこらじゅうに燃えやすい物がたくさん存在することになり、森林はさらに不安定な状態、超臨界状態へと進むことになったのである。

マラムッドたちはこの現象を「イエローストーン効果」と名づけた。

近年森林火災はどんどん増加し、しかも食い止めるのが難しく激しいものになってきている理由を、この効果は説明してくれるかもしれない。

1890年以降、米国林野庁は、自然発生した森林火災でさえ「断固として認めない」という態度をとっており、どんな火災であれ必死になって消火しようとしてきた。

これはちょうど、山火事ゲームにおいてごく稀にしかマッチを落とさないことと対応しており、その結果もそれと同じようになるのである。

森林を臨界状態に保つという自然の力学にとって、火災は不可欠な要素である。

それゆえ、火災を抑えたことによって、そこらじゅうに燃えやすい物がたくさん存在することになり、森林はさらに不安定な状態、超臨界状態へと進むことになったのである。

[103] 森林は、自己組織的臨界状態のすばらしい一例であるように思われる。臨界状態において重要なのは、複雑な詳細ではなく、影響の伝播の仕方を左右する、きわめて単純な隠れた幾何学的特徴なのである。

この山火事モデルを普遍性の概念と組み合わせて考えると、火災の広がり方はそれに関係する物事の詳細とはほとんど関係ないという、重要な事実が浮かび上がってくる。

森林は、自己組織的臨界状態のすばらしい一例であるように思われる。

臨界状態において重要なのは、複雑な詳細ではなく、影響の伝播の仕方を左右する、きわめて単純な隠れた幾何学的特徴なのである。

[104] 1994年、生態学者のロックウッド兄弟は、北アメリカ西部におけるバッタの大発生について、以前にはなかったほど詳細な数学的研究を開始した。彼らは、いくつかの地域での発生記録の統計を見て、発生規模の分布がべき乗則に当てはまることを発見した。

1994年、生態学者のロックウッド兄弟は、北アメリカ西部におけるバッタの大発生について、以前にはなかったほど詳細な数学的研究を開始した。

米国農務省は、アイダホ州、モンタナ州、ワイオミング州の様々な地域で半世紀以上にわたり、バッタの個体数が環境収容力と呼ばれる限界値（1平方メートルあたり約8匹）を超えると、そのバッタの1年間の活動によって、その地域の植物群落の構造に永続的な被害が残ることになる。この値に達した面積の広さが、バッタの大量発生 of 規模を示すよい指標になる。

彼らは、いくつかの地域での発生記録の統計を見て、発生規模の分布がべき乗則に当てはまることを発見した。

小規模な発生はよくあるが、大規模なものは稀であった。

そして重要な点が、小規模な発生と大規模な発生とでは、その原因に関して意味のある違いはなさそうだという点である。

[105] 大発生が避けられない理由は単に、各個体の相互作用と物理的影響とからなる密なネットワークが臨界状態に位置し、劇的な変化の瀬戸際に立っているからだ。

べき乗則が示しているのは、一見ささいな原因が、あるときには小規模な発生しか引き起こさない一方で、ときには破壊的な大量発生を引き起こすこともあり、そして発生初期の時点での地域的条件をいくら分析しても、その最終的な規模の推定はできないということである。

この害虫管理についても、森林火災について得たものと同様の教訓が得られるかもしれない。一つには、たとえ生態学者が2万種類の要因を完全に制御できたとしても、大量発生を予測できるようにはならないということである。

大発生が避けられない理由は単に、各個体の相互作用と物理的影響とからなる密なネットワークが臨界状態に位置し、劇的な変化の瀬戸際に立っているからだ。

したがって、次の大発生を予測しようとするのは、おそらく無意味なことなのだ。

もう一つの教訓は、大発生を抑えようとしてきたこれまでの取り組みは、見当違いだったかもしれないということだ。

そのような抑制政策は、より大規模な異常発生の可能性を増加させただけかもしれない。

[106] 森林火災の広がりを説明するために作られ、そして実際に非常によく機能するモデルがまた、人間集団のあいだでの病気の広がり方の本質的特徴をもとらえているのだ。

1996年研究者のロイ・アンダーソンとクリス・ローズは、アイスランドとノルウェーの間にあるフェロー諸島での、1912年から1969年まではしかの流行について研究した。

彼らは、はしかの流行の規模（感染者数）の分布が、地震や森林火災と同等に見事なべき乗則に従っていることを発見した。

山火事モデルにおいて、木を人に置き換え、火を感染に置き換えるだけで、この観察結果を正確に説明できるのだ。

このことは何にもまして、物事の詳細は重要ではないという事実を表わしている。

森林火災の広がりを説明するために作られ、そして実際に非常によく機能するモデルがまた、人間集団のあいだでの病気の広がり方の本質的特徴をもとらえているのだ。

[107] 1993年二人の物理学者が、パルサーのグリッチという現象について20年間にわたるデータを調べ、小規模なグリッチは大規模なグリッチよりも頻度が高く、グリッチの分布は完全にスケール不変的なべき乗則に従うということを見出した。

臨界状態の概念はまた、宇宙にある奇妙な物体の仕組みについても説明してくれるかもしれない。全体が中性子からできているパルサーと呼ばれる星は、驚くほど密度が高く、自転しながら、宇宙に光線を発している。地球上にいる天文学者は、地球がその光線を通過するたびにパルスを観測することになる。

しかし、時々パルサーは、突然自転の速度を速めたかのように、パルスの間隔を急に短くすることがある。

この変化はパルサーのグリッチと呼ばれている。

グリッチのなかには、他のものより変化が大きいものもある。

つまりそのとき、自転速度がより大きく変化するということである。

1993年二人の物理学者が、20年間にわたるデータを調べ、小規模なグリッチは大規模なグリッチよりも頻度が高く、グリッチの分布は完全にスケール不変的なべき乗則に従うということを見出した。

彼らの考えによると、中性子星を形成する純粋な核物質は非常に密度が高いため、その表面での

重力は非常に強い。

そしてこの重力によって、星自体がより小さくならうとする。この重力は、地球上では大陸移動によって断層にかかる力にたとえることができる。

地球の地殻が滑りに耐えているのと同様に、パルサーの構成物質は崩壊に耐えているが、時々、耐えられなくなることがある。

この「星震」によって中性子星は、少しだけ小さく、より密度の高い星へと変化し、そのとき、ちょうどアイススケートの選手が腕を縮めると回転が速くなるのと同じように、中性子星の自転も少し速くなる。

もしこの考え方が正しければ、パルサーのグリッチにおけるベキ乗則は、地震におけるグーテンベルク=リヒター則を、単純に中性子星に当てはめたものだということになる。

[108] 自己組織的臨界状態の例はどんどん増えている。臨界状態は、それが何でできているかやどんな物理法則によって説明されるかには関係なく、あらゆる種類の物事のなかに存在しているようだ。臨界状態の組織化現象は、ある意味、物理学よりも基本的なものなのだ。それは、広大な世界を指揮する魂として、物理学の背後に控えているのである。

1990年代に物理学者は、超伝導体内での磁場の動きや、太陽フレアの不規則な爆発や、交通渋滞などに自己組織的臨界状態の形跡をいくつも発見してきた。このような例はどんどん増えている。臨界状態は、それが何でできているかやどんな物理法則によって説明されるかには関係なく、あらゆる種類の物事のなかに存在しているようだ。臨界状態の組織化現象は、ある意味、物理学よりも基本的なものなのだ。それは、広大な世界を指揮する魂として、物理学の背後に控えているのである。

以 上