

レクチャー2

覆水盆に返らず？ エントロピー、カオスと物理学における時間の向き

田崎秀一



物理学においては、〈時間は過去から未来に流れるのか。過去・現在・未来とはそもそも何か。時間は万物に共通か。時間が流れているとしたら、流れは一樣なのか。〉というような問題は、ほとんどの場合扱いません。力学の基礎となったニュートンのプリンピキアの冒頭の一節にこのような言葉があります。「真の数学的時間は（中略）均一に流れる」。現在では相対性理論がありますから、「真の数学的時間は個々の観測者について均一に流れる」ということでいいかと思えます。つまり物理学において、時間は一定方向に均一に流れるというところまでは仮定しているわけです。ですから私の話は、そこから先の、自然現象に時間の流れの向きはどう反映されるのか、すなわち時間の矢の問題に関してになります。

可逆運動と不可逆運動

これから2つの動画をお見せします。

「時間の矢」と運動

- ・逆再生運動も自然 ⇔ 自然法則に従って可能
- ・運動から時間の向きは分らない=可逆運動 (時間反転対称性)

物質を構成する原子・分子の運動は可逆

協力：東京理科大学理工学部第2教育支援課 原安氏、橋本氏

エアホッケーの玉が上から下へ、下から上へという2つの動きを捉えているのですが、これはどちらも物理的に矛盾しない動きです。しかし実は、これら2つの動画は同じ映像の順再生と逆再生なんです。逆再生であっても自然法則にしたがって起こりえる場合、こういう性質の運動のことを可逆運動と呼びます。こういうふうに運動を見ても時間の向きがわからないような場合を、時間反転対称性と言います。さらにこの性質は、物質の根源とも言える原子や分子の運動が持っている性質なんです。これは大前提です。では、別の2つの動画をご覧ください。

「時間の矢」と運動

- ・逆再生運動は不自然 ⇔ 自然法則に従って不可能
- ・運動から時間の向きが分かる=不可逆運動

巨視的現象のほとんどは不可逆

協力：東京理科大学理工学部第2教育支援課 原安氏、橋本氏

止まっている2つの玉の1つが突然上に向かって動きだす動画と、上から玉が降りてきて下の玉にくっついて止まる動画ですが、これも逆再生です。しかし、この場合前者は不自然ですし、自然法則に従えば不可能ということになります。こういった運動を不可逆運動と呼ぶわけです。物体の動きから時間の流れる方向が分かる運動ですね。私たちの身の回りで起こっているほとんどはこちらの不可逆運動のほうなんです。

もう一つ別の別の例を挙げます。これは、メスシリンダーという容器に水を入れ、奥の方に青色のついた水を静かに入れます。そうすると、最初は分離しているのですが、次第に混ざり合って色もうすくなり、最終的には全体が一様のうすい水色になります。そして、うすい水色になると、いつまで置いておいても元の分離した状態には戻らないのです。こういった現象も不可逆変化の代表的な例です。

不可逆変化

例：拡散

水 → 硫酸銅水溶液

熱力学の第二法則

エントロピーと呼ばれる量があって、外から熱も物質も出入りしない物体では変わらないか増加する。

- 変化途中の二状態について、エントロピーの大小から、どちらがより以前の状態かが分かる。⇔ 不可逆
- 自然に生じる変化のほとんどが不可逆であることを保証

この変化を我々は経験的に知っているわけですが、物理学の場合はこの変化を数量で特徴づけることが出来ます。それが熱力学の第2法則、エントロピー増大の法則です。可逆運動と不可逆運動は、時間の向きが反映しない運動と反映する運動なわけですが、原子や分子の動きは可逆運動なのにもかかわらず、原子や分子が寄り集まって形作られている物質では、ほとんど不可逆運動しか起こらない。すなわちここには、可逆運動が原因で不可逆運動が起こっているという矛盾、可逆性のパラドックスが生じているわけなんです。これをどう考えたらいいのか、これが時間の矢の問題です。今日はこの問題について解説していきます。

可逆性のパラドックス

ここでちょっと話が飛びますが、解決のための2つの物理的前提についてお話しします。まず一つ目はカオスの運動です。カオス、日本語訳は混沌ですが、これは運動の規則は定まっているが非常に不規則な運動をするような場合を指します。例を挙げます。

パラドックスの解決に向けて

カオス

運動の規則が定まっているにもかかわらず、最初の条件を少し変えただけで、その後の振舞が大きく異なる運動のこと。

例：ロジスティック写像 $x_{t+1} = 4x_t(1-x_t)$

小さな初期値の差→大きな振舞の違い → 不規則変化

この表は $x_{t+1} = 4x_t(1-x_t)$ という単純な数式による運動ですが、最初の種になった x の値がほとんど変わらないにもかかわらず、後の振舞いが大きく違ってしまいます。このような運動をカオスと言います。もう一つの種は、ギブスの統計集団という考え方です。

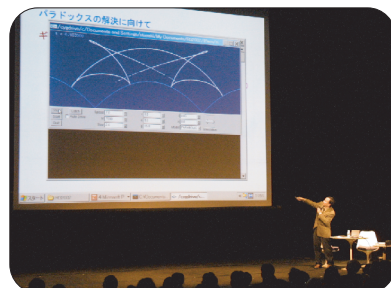
パラドックスの解決に向けて

ギブス集団の変化

でこばこな床で跳ね回る粒の運動 = カオス

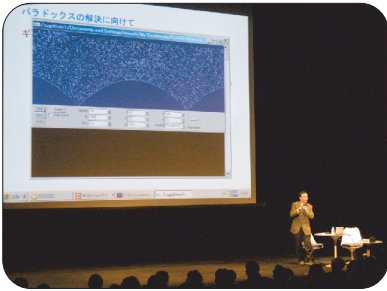
シミュレーション (ATR 原山卓次氏作成、両氏のご好意による)

これは、巨視的な物体は確率的にしか分からないというアイデアを基本にしています。つまり物体とは、無数の点のある広がりのある分布であり、その集合で出来ている、という考えですね。この2つの考えから質的にまったく違う変化が生まれてくるというシミュレーションをお見せしましょう。



半円の連なった地平上を、1つの点が動いていきます。これはカオス運動ですが、1つの点が動いている分には可逆

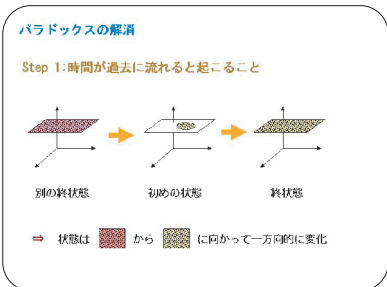
ですが、7000個の点が同時に動くとなると、最初はほんのちょっとしたズレですが、それがどんどん広がってゆき、あっという間に点で埋め尽くされる一様分布に近づいていくんです。



これをビデオにとって逆再生すると、非常に奇妙に見えるはずですが。ランダムな7000個の点が1点に集約されていくわけですからね。つまり、この7000個の点の1つ1つはすべて可逆運動をしているにもかかわらず、集団として考えると不可逆になるわけです。つまり集団を考えることで、可逆運動でありながら不可逆な変化は可能である、というパラドックスが生まれてしまいます。言い換えれば、可逆性のある分子で成り立っている物質が不可逆性を持ってしまうというパラドックスなわけです。

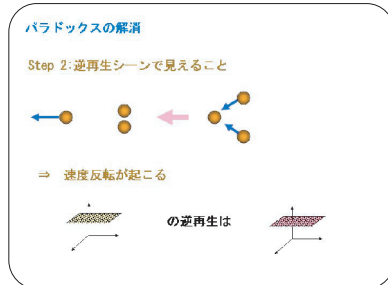
パラドックスの解消法

では、どうしたらこのパラドックスを解消できるか。まず、ある集まった状態の集団が一様に分布して行く運動について、仮に時間が過去に流れるとすると、集まった状態の集団がどう変化するかを数学的に考察してみます。するとやはり広がっていくわけですが、その状態は一般的に言うと、一様分布に近づいて広がっている状態とは全然違う状態なわけです。つまり過去から未来へ向かって、ある方向性を持った動きをしていることになります。

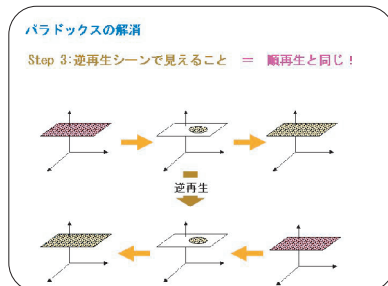


それを逆再生するわけですが、ここで逆再生というのは具体的に何が起きているかを確認しておきたいと思います。1つの玉が2つの玉に当たって、2つの玉が分かれて動き出すという状態を逆再生すると、当然のことながら、2つ

の玉が1つの玉に当たって、1つの玉が動き出すわけです。つまり逆再生と順再生を比較すると、速さの向きが逆になっているのです。



そうすると、逆再生した場合、一様分布に近づいている状態の集団というのは、速さの向きが逆になるわけですから、その集団を構成している個々の速さの向きも逆になります。それはつまり、同じように広がった状態に見えていながら、実は先ほど仮定した過去に時間が流れた場合の状態へと集団が変質してしまっているのです。つまり逆再生した時に見える分布の変化は、過去から初期状態までの変化ということになるわけです。



そうすると逆再生をしても順再生をしても変化の方向性は変わらないことになり、そこに一見存在するように思えた不可逆性のパラドックスは実は存在しなかった、ということになるわけです。まとめるとこのようになります。

まとめ

問題編

- 基礎的な運動法則には時間の向きが反映されていない、可逆
- 巨視的現象を扱う熱力学第2法則には、時間の向きが反映される、不可逆

巨視的現象の原子分子の運動による説明 ⇒ 可逆性のパラドックス

解決編

- 微視的運動は力学的
- 巨視的状態はギブス集団 (分布)

→ 運動法則は可逆でも、分布は一方向的に不可逆変化
分布に時間の向きが刻まれる
運動の可逆性と不可逆現象は再立
逆再生シーンと順再生シーンは同一

これを時間の問題として言えば、ある変化とその逆の変化がどういう関係にあるかということを観察してきたわけですが、その結果としては、物理学においてパラドックスは存在せず、自然現象と時間の向きは問題なく関係しているということなわけです。