

2章 ゆく河の流れは絶えずして

—文学で綴る非平衡熱力学—

後藤 信行

(教養部物理学教授)

1節 時間の不可逆性とエントロピー

忘却とは忘れ去ることなり

忘れ得ずして

忘却を誓う心の悲しさよ

—菊田一夫「君の名は」より—

切なくも美しきは青春の想い出。その日々は既に帰らず、今はただ、遠ざかるのみ。時間の流れはなぜ反転できないのだろうか。時間に関する、この素朴な間に、現代の物理学は根源的な意味では答えていない。古典論でも量子論でも、微視的過程を表わす運動方程式は時間的に対称であるのに、系の巨視的なふるまいは一般に不可逆である。時間の不可逆性を経験則として認め、それを法則化したのが、熱力学の第2法則、即ち、エントロピー増大則である。

エントロピーとは、系の乱雑さの度合いを定量的に表すためにクラウジウスによつて導入された物理量であり、温度、圧力、体積などと同じく、系の状態を示す状態量の一つである。通常、物質を構成する粒子は原子または分子であるが、構成粒子個々の位置や向き、または運動が、一様に揃った状態から、不揃いな状態になるにつれ、系のエントロピーは増すことになる。

熱力学第1法則が、エネルギーの保存則、つまり、エネルギーは、その形態は変化しても、生成も消滅もしないことを述べているのに対し、熱力学第2法則は、エントロピーについては、その生成のみが可能で、如何なる場合にも、エントロピーの消滅はありえないことを述べている。つまり、熱力学的時間の流れる向きは、エントロピーを生成する向きということになる。もし、系が孤立系なら、系はエネルギーを一定に保ちながら、エントロピーを生成し、エン

トロピー最大の状態、つまり、熱平衡状態に向かって変化する。

摩擦のない力学系、即ち、純粹に力学的な系では、系は完全に過去を記憶している。しかし、エントロピーを生成する系では、系は過去の記憶を失う。平衡状態になってしまった系から、その系が過去にどのような非平衡状態であったかを、最早、推測することはできない。エントロピーの生成とは系が過去の自分の姿を忘却することである。

非平衡状態の中に置かれた開放系や部分系では、その中に構造が形成されることがある。自然界には、雪の結晶や惑星リングなどの美しい秩序をもった構造がひとりでに生じる。我々自身も、原子や分子の単なる集合でなく、生命が地上に現れて以来、長い進化を経て、到達した秩序を持つ構造である。

構造が形成されるには、系のエントロピーは減少しなければならない。しかし、それはエントロピーが消滅したのではなく、系がエネルギーや物質とともにエントロピーを系の外に放出したために、系の規則性が増したのである。即ち、系がエントロピーを放出するには、系は外部の環境との間にエネルギーまたは物質のやりとりをしなくてはならない。そのためには、系と外部は非平衡でなければならない。そして、非平衡状態でのエネルギーや物質の流れは、エントロピーを生成し、注目している系と環境を含めた全体系のエントロピーを増大させることになる。

記憶は時と共に薄らいでいくはずなのに、人は歳を重ねるごとに過去に執着するようになる。過去の思い出も、忘却によつて脳裡に形成されていくのだろうか。全体系におけるエントロピーの増大が部分系に構造を創るのである。

2 節 散逸系の力学

にぎたつ
熟田津に船乗りせむと月待てば
潮も叶ひぬ今は漕ぎ出でな

恋人の許へ船出する夜の、馳せる想いを詠んだ恋歌であろうか。それとも未知の大海へ向う若者の力強い旅立ちの歌なのだろうか。史実によれば、斉明天皇が新羅出兵のため、九州の那大津へと航海した西暦661年、途中、熟田津に立ち寄った一行が、再び、出航する際に、時の閨秀歌人、額田王が天皇に代って詠んだ歌という。

伊豫の海を照らす万葉の月も、今宵、稲佐山に照る月も、月は天地創造の時代以来、天空の一定の軌道上を巡り続けてきたのだろうか。宇宙という真空中を、何物とも触れ合うことなく運動する月は、摩擦とは全く無縁の存在のように思える。しかし、潮汐による海水と海底との摩擦は、地球から、遙か38万kmの彼方を運動する月に影響を及ぼし、その軌道を変えているのである。

月が地球に及ぼす引力は地球の海に潮汐を引き起こす。潮汐と海底との摩擦は地球の自転を遅らせ、そのため一日の長さが僅かづつ長くなる。そして、潮汐摩擦は、月にもその反作用を及ぼす。地球の自転の角運動量が減少した分、月の公転の角運動量が増加する。そのため月は少しずつ地球から遠ざかり、ケプラーの法則から公転の周期も長くなる。

もし、潮汐摩擦がなければ、地球の自転および月の公転において、各々の角運動量や力学的エネルギーが独立に保存される。摩擦があると、地球の固体部は、起潮力のため盛り上がった海水を引き摺りながら自転する。そのため、月に働く地球の引力は、完全な中心力とならず、わずかに月の進行方向の成分をもつ。この成分は、月の公転運動に、トルクを与えると同時に仕事をするので、公転は角運動量と力学的エネルギーを得ることになる。当然、それらは地球の自転から補給されたものである。内部摩擦は系全体の角運動量を一定に保ちながら、系全体の力学的エネルギーを散逸させるとともに、自転と公転の運動に、力学的エネルギーを再配分するのである。このような潮汐摩擦による地球と月の運動の進化を予言したのは、ジョージ・ダーウィンである¹⁾。

NASAは、アポロ計画の時に月に反射鏡を備えつけ、それいらいレーザーを用いて月までの距離を測定し続けてきた。20年間に亘る、その測定結果によると、月は一年間に3.8cmの割合で遠ざかっているとのことである。この値から、地球の自転周期が伸びる割合も簡単に計算出来る。現在、1年間当たり、 10^{-5} 秒程1日の長さが長くなっている。即ち、地球の自転速度を基準にした地球時計はそれだけ潮汐摩擦のため、遅れていることになる。

前世紀の日月食のデーターをもとにして、最近の日月食の起こる時刻を予測すると、実際には、その時刻よりも早い時刻に、日月食が起きることが知られている。これは月の公転周期が長くなっていることと矛盾しているように思える。この矛盾は時間の測定に地球時計が用いられていたためである。月の公転

周期は遅くなっているにも拘わらず、地球時計はそれ以上の割合で遅れていくので、月の公転が見かけ上、速まっているように観測されるのである。現在では、原子の振動による原子時計が用いられる。

このような地球と月の運動の変化は潮汐摩擦がなくなるまで続く。地球の自転も月の公転もその周期はともに長くなっているが、長くなる割合は地球の自転のほうが大きい。やがて、地球の自転周期が月の公転周期に一致すると、潮汐摩擦は無くなってしまう。その状態では、地球と月は互いに同じ面を向け合いながら、系の重心のまわりを運動することになる。

潮汐は固体の月でも起きている。実際、月は、地球からの起潮力のため、地球から見て前後に僅かに長い形に変形している。もし月が地球に同じ面を向けていなければ、月は起潮力のため、絶えず変形を繰返すことになり、内部摩擦によつて力学的エネルギーが散逸し、月の運動状態は摩擦を生じない状態へと移っていくことになる。現在では、すでに月は同じ面を地球に向け、月の変形は一定に保たれている。

太陽系の一番内側の星である水星の近日点移動は一般相対性理論の検証に重要な役割を果たしたが、その自転周期は、強い太陽光線のために測定が困難であった。太陽からの強い起潮力と、そのためにおこる潮汐摩擦のため、水星も太陽に同じ面を向けて公転しているものと考えられていた。しかし、最近の水星の自転周期の測定によれば、水星は1回公転する間に1回半自転することが知られている。

月や水星の場合のように、公転周期と自転周期の比が簡単な整数比をとることを尽数関係という。水星の場合、尽数関係が1:1でなく、2:3であるのは、水星の軌道が楕円軌道だからである。自転の角速度が、ほぼ、一定であるのに対し、公転の角速度は、楕円軌道のため、一定の値をとれず、水星は同じ面を常に太陽の方向に向けることが出来ないのである。そのため、水星は、起潮力が一番大きくなる近日点で、その長軸を太陽方向に向けている。そして、1回公転するごとに、表と裏を交互に太陽に向けることになる。

海王星の衛星であるトリトンの公転の向きは、海王星の自転の向きとは逆である。そのため、海王星での潮汐摩擦は、トリトンから力学的エネルギーを奪い、トリトンは海王星に近づくことになる。しかし、トリトンは落下する前

に、今度は海王星がトリトンに起こす起潮力のため、破壊され、海王星のまわりを海王星の自転と逆向きに公転するリングになると考えられる。

惑星同志の自転や位置関係の変化が万有引力の変動をもたらす、惑星の形状を絶えず変化させ、そのため生じる内部摩擦が、惑星の運動を進化させ、月や水星に見られる尽数関係のような規則性を創り出すのである。そして、惑星リングこそは摩擦が創り上げた究極の構造であろう。

摩擦によつて秩序が創られる。これは熱力学の第2法則と矛盾しているように思える。力学的エネルギーが熱エネルギーに変わることは、エントロピーを生成することであり、それは秩序の崩壊を意味するからである。しかし、惑星と衛星の系は、力学的には孤立系でも、熱的には孤立形でなく、摩擦によつて生じた熱が周囲の宇宙空間に放出される。熱が放出されると、それとともにエントロピーが放出される。放出されるエントロピーは系内で発生するエントロピーより大きく、系のエントロピーは減少し、構造ができることになる。

水蒸気から雪の結晶が作られる場合にも、系が外部に潜熱を散逸することによつて秩序が形成される。惑星リングも雪の結晶も、一度、出来てしまえば、エントロピーを生成しない。よつて、熱の散逸が止み、系が外部と熱平衡になっても、構造は存在し得る。そのため、これらの構造を平衡構造と呼ぶ。

3節 エネルギー・時間・生命

ゆく河の流れは絶えずして、しかも、もとの水にあらず
淀みに浮かぶうたかたは、かつ消え、かつ結びて、ひさしく
とどまりたる例しなし

—鴨長明「方丈記」より—

定めなきが浮き世の定めであろうか。停止することも、引き返すこともない時の流れの中で、移り変わる世の様を、水の泡に、或いは朝顔や露に例え、格調高く謳い上げた方丈記は、時代を越えて後の世まで読み継がれていくのだろうか。古来、河の流れは、人生や歴史における時間の流れの比喩として、随筆や詩歌などの文学に描かれてきた。しかし、ここでは、「河の流れ」を「エネルギーの流れ」解して、方丈記の冒頭の一節について、熱力学的な考察を試してみよう。

河に泡や渦が次々と生じ、また、消えてゆくのは、河が流れ、その流れが水の粘性や岸との摩擦のため淀みをなすからである。流れのない静かな湖には渦や泡が生じることはない。また、流れがあっても、粘性のない液体、即ち、完全流体中では、渦や泡が自発的に生じることはない。河の流れを、エネルギーの流れと考えれば流れにできる泡や渦はエネルギーの散逸に伴ってできる動的な構造、即ち、プリコジンのいう散逸構造²⁾ということになる。

平衡構造が適当な平衡状態のもとで安定であるのに対して、散逸構造は動的な構造のため、絶えずエントロピーを生成する。そのような構造が生き長らえるには、生成したエントロピーを周囲に放出しなければならない。そのため、散逸構造は非平衡状態の中でしか生きのびれない。

太陽エネルギーは、太陽の表面から宇宙空間に向って、6000℃のスペクトルの光として、絶えず光速で放出されている。しかし、そのうちの僅かではあるが、地球に捉えられた太陽エネルギーは、回り道をしながら、ゆっくりと流れていく。地球は太陽エネルギーの流れのなかにできた淀みであり、そこにいろいろな構造が造られることになる。

波のまにまに西風に乗ってキプロス島へ漂着したという、アフロディーテのように、原始生命も、太古の昔、海の泡から生じたのだろうか。太陽エネルギーの流れが大気循環という散逸構造を造り、それが静電気を引起し、ゼウスの霆^{いかづち}によって、アミノ酸が太古の海で合成されたのだろうか。そして、自然界は、ジグゾーパズルを組み立てるように、試行錯誤を繰り返しながら、アミノ酸から原始生命を創り出したのだろうか。生命も平衡構造と散逸構造が複雑に入り組んだ構造であろう。それが、太陽エネルギーの流れにさらされた地球という非平衡系のなかで、成長し、老化し、世代交代を続けるのである。

さらに降り注ぐ太陽エネルギーの一部は炭酸同化作用によつて化学結合のエネルギーとして固定され、食物連鎖や腐食連鎖の中で、生態ピラミッドをなす様々な生き物の間を巡りながら代謝エネルギーとして散逸する。散逸せずに動植物の体内に残った化学結合のエネルギーは石油や石炭として保存される。

また水の循環のエネルギーと化した太陽エネルギーは大地に河を造り、その流域に古代文明を形成する。地下資源として蓄えられた太陽エネルギーもやがて発掘され、その散逸が今日の文明をもたらすことになる。いずれにせよ太陽

2章 ゆく河の流れは絶えずして

エネルギーは、最終的には、絶対温度 3 K の冷たい宇宙空間へ向かって 300 K 程度の赤外線として散逸する。

等しい量の熱エネルギーでは、そのエントロピーは温度に反比例する。地球に太陽から入ってくるエネルギーと地球から宇宙空間に出ていくエネルギーとでは、エネルギー量としては等しくても、両者の持つエントロピーは 20 倍程度、後者が大きいことになる。

太陽から入射する可視光と、地球が宇宙空間に放出する赤外線のもつエントロピーを量子論の立場から比較してみよう。量子論では、光は波動であるとともに粒子でもある。この光の粒を光子と呼ぶ。光子 1 個が持つエネルギーは、振動数に比例する。即ち、波長の短い光ほど、大きなエネルギーの粒からなると考えられる。太陽エネルギーは粒の大きなエネルギーとして地球に入射し、出ていくときには、シュレッターを通した書類のように、碎かれて粒の小さなエネルギーとなってしまう。やはり、太陽エネルギーのエントロピーは地球を通過する過程で増大したことに変わりはない。

地球は、熱い太陽からエントロピーの小さい熱を貰い、冷たい宇宙空間にエントロピーの大きい熱を赤外線として捨てているのである。この二つの熱エネルギーのもつエントロピーの差によつて、生命も誕生し、また、その活動が維持されているのである。生命は非平衡状態を食潰して成長し、生きていともいえる。シュレディンガーの表現を借りれば、生命は負のエントロピーを食べていることになる³⁾。生命は、非対称⁴⁾であり、非線形であり、そして非平衡である。

太陽から宇宙空間へ光速で向かうエネルギーの絶えざる流れの中の、地球という淀みに浮び、消えては生れ、久しくとどまることのない⁵⁾泡沫の構造、人も国家も文明もその一つに過ぎないのである。この場合のエネルギーの流れは、質の劣化、即ち、散逸を伴った流れである。地球と言う太陽エネルギーの流れのなかにできた淀みに、平衡構造や散逸構造がつくりだされ、また、それが生き延びる代償として、太陽エネルギーは、可視光から赤外線へと、その質を劣化させているのである。

エネルギーの質の劣化、即ち、エントロピーの生成が、地球に生命やその他の構造を造り、その時間的な変化の方向性、いわゆる、時間の矢の向きを規定

する。つまり、エントロピーが生成される向きに物事は変化する。時間の流れを逆転させるためには、宇宙空間に散逸した赤外線を地球に集め、それを、可視光に還元して太陽に返さなくてはならない。しかし、それはエントロピーの消滅を意味し、熱力学第2法則に反することになる。

熱力学第2法則に反して、平衡状態にある孤立系のエントロピーを消滅させ、非平衡状態を作りだすことのできる仮想的な生き物がマックスウェルのデモンである。つまり、このデモンは低温から高温に熱を流し、また拡散した気体を逆に集め、高濃度にするこことができる生き物である。

もし、マックスウェルのデモンの助けを借り、太陽から地球を経て暗黒の宇宙へと向かうエネルギーの流れを逆流させることができたなら、時間は反転し、想い出の渚に、再び、あの夏の日の青春が帰ってくるのだろうか。そして、今度は君に告げられるだろうか、あの時の、あの熱い胸のうちを。

愛は帰らざる河の旅人

流されて嵐の海に消えたまま

—映画「帰らざる河」より—

4節 宇宙の輪廻と解脱

国破れて山河あり

城春にして草木探し

時に感じては花にも涙を^{そそ}濺ぎ

別れを恨んでは鳥にも心を驚かす

—杜甫「春望」より—

唐は乱れ、平家は滅び、今また、ソビエト連邦が、歴史の流れの中を消えてゆく。世の常なきに比べれば、季節と共に移る山の色は、悠久の時を巡り、流れる河は、水を湛えて尽きることなく海へと注ぐのだろうか。最近では、自然さえが人の手によって造り変えられていく。兎追いし彼の山は、削り取られて、レジャーランドとなり、小鮒釣りし彼の河に、今は棲む魚はなし。ふるさとの美しき天然も、多感な少年の日の想い出を残して、ひとつ、またひとつと消えてゆく。

真の永遠はどこにあるのだろうか。夕べに沈み、朝また昇る太陽も、核融合

のエネルギーを使い果たしたとき、その輝きを失う。やがて、太陽は赤色巨星と化し、金星の軌道さえも飲み込むほどに膨れ上がり、ガスを宇宙空間へと撒き散らす。その後の太陽は、白色矮星として、静かな余生を送るという。

太陽の十倍程重い星の終末はより劇的である。いくつかの客星の出現が明月記や中国の宋史天文誌に述べられている。なかでも、1054年7月に現れた客星は当時の人々を驚かせたようである。異常に明るい星が、突如として、おうし座の角のあたりに現れ、2年間程見え続けたという。最初のうちの三週間は、昼間でも確認できたそうである。客星とは、恒星がその長い一生を終える時の爆発現象であり、今日では超新星と呼ばれている。

地球から6500光年程離れたところに、かに星雲という、秒速1000kmの速さで膨張を続けている星雲がある。かに星雲の中心部には、1秒間に33回転という高速で自転している超高密度の天体、中性子星が存在する。中性子星が発する電磁波を地球から観測すると、周期的なパルスのように見える。このかに星雲こそが1054年に現れた超新星の残骸なのである。

星は重力によつて自らを押しえつけている。押える力は星の内部に進むほど益々強力となるが、それを支えているのは、星の内部での核融合反応による発熱である。やがて星が核燃料を使い果すと、支えをなくした星の内部は急激に収縮し、それに伴い、莫大な量の重力エネルギーが一瞬にして解放される。星の表層部分も内部の重力崩壊に続いて収縮しようとするが、星の内部が放出する重力エネルギーによる衝撃波のため、逆に外に向かって吹飛ばされる。これが恒星の爆発、即ち、超新星の出現である。

中性子星は、元の星の中心部が重力崩壊によつて押し潰されてできたものであり、高速で自転しているのは、収縮した後も、初めの角運動量を保持しているからである。また、中性子星の周囲に形成される膨張星雲は元の星の吹き飛ばされた表層部分である。

中性子星は、中性子のみからできた超高密度の天体であり、1cm³当りの質量が10億トンにも達する。これは原子核の密度に匹敵する。原子は原子核とその周囲を回っている電子から成る。外殻電子の軌道の直径が原子の大きさと考えてよい。原子核の大きさは、原子核に素粒子を衝突させたときの、衝突断面積の測定からわかる。原子の大きさを東京ドームの大きさに拡大しても、原子核

の大きさは数mmの小石に過ぎない。しかし、原子の質量のほとんどはその小さな原子核が担っている。

中性子星は、重力のため原子核どうしがくっつき合うまで押し潰された天体である。このとき、陽子は電子を吸収し、すべて中性子となる。中性子星は、それ自体が一つの巨大な原子核をなしているとも考えられる。つまり、その密度は、東京ドーム一杯の固体または液体を数mmの空間に押し込めたときの密度に等しいのである。

恒星も、やがては年老い、自らの重力を支えきれなくなったとき、かに星雲と同じ運命を辿る。人、国家、文明はもとより、夜のしじまに星座をなしてきらめく星さえも、「盛者必衰^{ことわり}」から逃れる術はないのである。

恒星の華々しい死の瞬間である超新星出現。その後に残される膨張星雲、それに中性子星やブラックホールなどの超高密度の天体。膨張星雲は、やがて星間物質へと還元され、新しく生まれてくる星の材料となる。一方、極限まで押し潰されてしまった超高密度天体に、再び核融合の灯がともることはない。宇宙もまた輪廻と解脱の世界なのである。

少年の頃、無限に広く永遠に変わらぬものと信じていた宇宙も、エントロピーを生成し続けながら年老いていく無常な存在なのである。宇宙がこれまで、エントロピーを生成し続けてきたのなら、宇宙は創世記においては、極端に非平衡の状態であつたらうと予想される。宇宙は超高温、超高密度の状態からはじまったのだろうか。

自然科学の啓蒙書として有名なガモフ全集の著書でもあるジョージ・ガモフは、宇宙は大爆発から始まり、その時の超高温の熱輻射は宇宙が膨張するにつれ温度が下がり、現在では低温の輻射として、宇宙を満たしていると预言していた⁵⁾。このビッグバンの化石ともいふべき宇宙の背景輻射は、その後、ベル研究所のベンジヤスとウイilsonによつて偶然に発見された。彼らは宇宙のあらゆる方向から等方的に降り注ぐマイクロ波を観測し、その波長は、ガモフの预言した値とは少し異なるが、絶対温度3 Kの黒体輻射に相当していることをつきとめたのである。初期の非平衡状態はビッグバンによつてつくられ、宇宙はそれ以来今日まで、エントロピーを生成し続けてきたのである。

もし、宇宙の全ての変化が、純粋な力学的運動と準静的な熱的变化のみによ

2章 ゆく河の流れは絶えずして

るものなら、エネルギーの散逸はなく、エントロピーの生成もなく、変化は全て可逆的となるのであろう。しかし、そのような可逆的な世界に、涙を瀧ぐべく花や、心を驚かす鳥や、そして我々自身は存在したであろうか。

あだし野の露消ゆる時なく、鳥部山の^{けぶり}烟 立ちさらでのみ
住みはつる習いならば、いかに、ものあわれもなからん。
世は定めなきこそいみじけれ。

—兼好法師「徒然草」第七段より—

人の一生は、露のように、はかなく、故人を語る縁者も、火葬場の煙が拡散するように、やがて、その土地を離れていく。でも、そのために、ものあわれもあるのだろう。エントロピーを生成しない世界は、成長も老化も死もない永遠の世界である。しかし、それは、可逆的で無味乾燥な力学的世界か、さもなくば、すでに、熱平衡に達してしまった変化のない世界である。我々の住む世界は、ビックバン以来、絶えずエントロピーを生成し続けている、後戻りのできない世界である。エントロピー増大則は定めなき世の定めであり、それがこの世界に、生命をはじめとして、はかなくもいみじき構造を創りだしているのである。

参 考 文 献

- 1) G. H. ダーウイン：「潮汐」古今書院（1942）
- 2) プリジコン，スタンジュール：「混沌からの秩序」みすず書房（1987）
- 3) シュレーディンガー：「生命とは何か」岩波新書（1951）
- 4) M. ガードナー：「自然界における左と右」紀伊國屋書店（1971）
- 5) G. ガモフ：「ガモフ全集 7 宇宙の創造」白揚社（1959）