

宇宙の階層構造（神の土木事業）

近畿大学理工学総合研究所教授 理学博士 海 野 和 三 郎

Wasaburo UNNO

1. 混沌学のはじまり

宇宙の階層構造は宇宙の混沌がつくった或はつくりつつある足跡にほかならない。宇宙の混沌を万物流転という。しかし、混沌は長い間科学の対象とはならなかった。定量的な取り扱いが困難だったからである。定性的な記述にはすぐれたものがある。土木学界の先哲永井了吉は科学的な宗教観を持った人で、「混沌」という著書もあるが、その著「科学から宗教へ」において、万有一元、平衡循環、自律協存、分合発展の四つを基礎とする生命哲学を説いており、特に宇宙に関しては、「小から大へと重層的に積み上げられた無辺際の一つの大きな力学的体系である。しかもその力の平衡関係は固定した平衡だけでなく、平衡し、また平衡せんとして波動し、限りなく変動する力学体系の世界である。」と述べている。この記述は今の力学系理論からみても全く正しい記述である。第1図は万物流転を極めて表面的に図にしたものである。土木事業が生命活動と堅い地球と軟い地

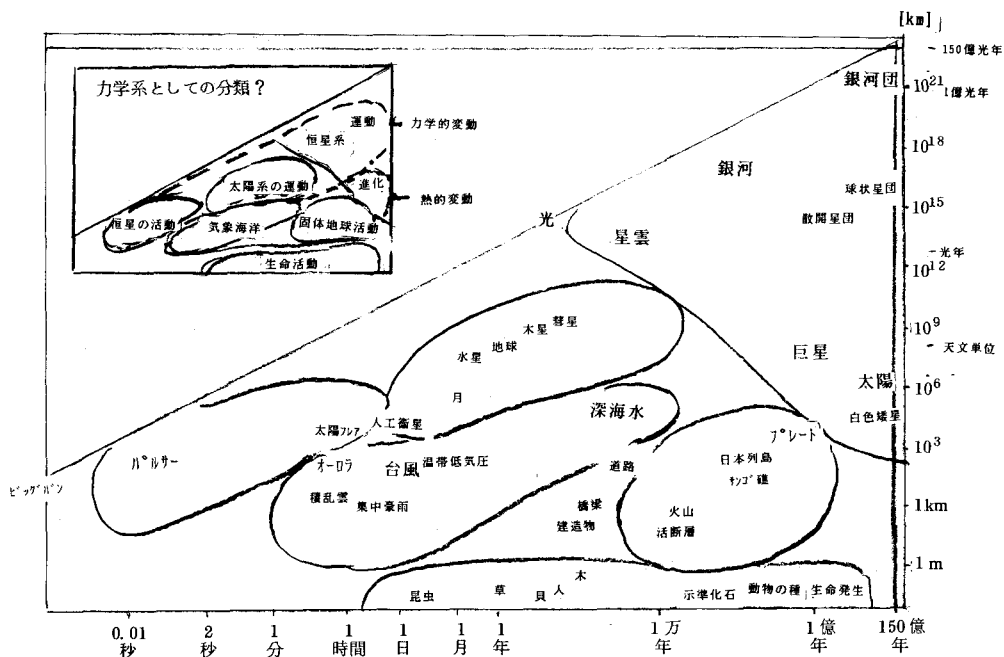


図1 宇宙混沌の時間と空間の尺度

球との間にくものも面白い。

今日、混沌学の始祖はポアンカレであると目されている。彼は、太陽・木星・火星といった三体

の力学に解析的な解がない事情を研究し、はからずも混沌学の始祖になった。いつかは再び今の状態に限りなく近い状態がくることを示した回帰定理などがその所産であった。二体問題の解はケプラーの法則で知られる周期解であるが、第三体があると、これに二体の影響があり、その影響が第三体を通じてもとの二体に影響するので、周期解になれなくて当り前のように思える。だが、三つ以上の要素が非線形に影響し合うのがカオスの起源であることを最初にきちんと示したのがポアンカレというわけである。

2. 階層構造の検出

宇宙には、銀河団があり、銀河があり、星団があり、星があり、惑星があり、衛星がある。更に地球上の様々な構造があり、分子原子があり、素粒子からクォークに至る。このように階層構造があることはわかっているが、それだけでは哲学の対象にはなっても科学にはなりにくい。科学にするには階層構造を量的にとらえる必要がある。この十年ほどの間に力学系理論と称する学問分野が異常な発展をみせ、そのことを可能にした。これは、ポアンカレが主として2次元トーラス面でやったことを多次元に拡張し、また彼がエネルギー保存系で考えたのに対しエネルギー散逸系でも考えるようになったものといえる。きっかけは、流体の対流運動の乱れや生態系の異常変化など様々な分野が発展の契機となったが、中でもマンデルブローのフラクタル幾何学は、通常カオスという時間変動を主に扱うのに対し、自己相似的な図形を問題にするので、視覚にうたえて解り易い。フラクタルとは点が0次元、線が1次元、面が2次元、空間が3次元というように整数の次元をもつものに対し、1.4次元というような中途半端な次元をもつ図形をいう。例えば、床の上に豆を一樣又は無作為にばらまいたとしよう。平均的な豆の密度は一定であるから、半径Rの円内にある豆の総数は半径の2乗に比例する。床は2次元だからである。今度は豆を5個ずつ集め、その集りをお互いにある間隔はなしで5個まとめ、またそのまとまりを同じ割合ではなしで5個かため、またそのかたまりを……というように多段の階層構造を作ったとしよう。平均の密度は半径Rを大きくとればとるほど下り、その下り方は5を次々の段階のクラスターの面積拡大比で割ったものである。豆の総数は、今度は R^2 でなく R^D に比例し、Dは $\log 5 / \log (\text{半径拡大率})$ である。豆をのせている部分の床だけをあつめると、これはD次元の空間ということになる。このような一般に非整数な次元をフラクタル次元という。一見ランダムに見える現象の中に、競合する力の織りなす階層構造を検出する第一歩はフラクタル次元の決定にあるといってよい。更に時間の一軸を加え、あるいは適当な物理量を座標軸にとった一般の位相空間でのフラクタル幾何学の決定が力学系理論の課題である。

3. 地球環境を支えるもの

われわれが唯一知っている生物のいる天体である地球は水の惑星とも呼ばれる。空気と水と地面は、生物が直接的に必要としている条件であり、それらを基本的に維持しているのは、太陽と地球と宇宙空間である。宇宙空間の役割は通常無視されがちであるが、太陽や太陽系の母胎が星間雲であった事実以外に、雨を降らせ陸に水を補給しているのは太陽光という質のよい(エントロピーの高い)エネルギーの流入と質の悪い熱エネルギーを捨てる宇宙空間の冷却作用である。したがって、捨てたエネルギーがごみ捨て場のようにたまって一杯になってしまわないのは何故か、いいかえれば、夜空が暗いのは何故かは生物の生存にとって重大な問題なのである。

オルベルスの背理というのがある。星が宇宙空間に一樣に分布しているとしよう。星のみかけの

面積（立体角）は星が遠くなれば距離の2乗に比例して小さくなるが、一方ある距離にある星の数は距離の2乗に比例して増大する。両者をかけ合せて、ある距離範囲にある星が空をおおう面積は距離によらず一定の有限な値をもつから、それを距離で足し合せると無限大になってしまう。つまり、どちらを向いても星の壁にさえぎられて宇宙空間から逃げ出せないから、放射光は高温の炉の中に閉じ込められたことになる。かくて宇宙は熱死してしまう。これを逃がれる方法は2つあって、一つは膨張宇宙による赤方偏移である。宇宙のはてに見える壁は、光を発射した当時の3000 Kの温度放射としては見えず、現在は千分の一にうすまった3 Kという極低温の放射を地球に送ってくる。これが宇宙3°K黒体放射である。これは宇宙初期の高温プラズマからの放射で星の光ではない。星からの光はどうなったか。星が生まれたのは3000 Kプラズマの時期（中性水素のできたとき）よりずっと後で、現在宇宙最遠に観測されているクェーサーの光の波長は標準波長の5倍くらいであるから、6000 Kの太陽放射がそこから出たとしても1000 K以上の高温を保っていることになる。幸なことに、その距離までの全部の星を天球にちりばめてみても全天の何百万分の一かをおおうだけで、いわば星は壁どころか窓の格子にもならないのである。星、星団、銀河、銀河団、超銀河団の階層構造がその原因である。もし銀河の大きさが果しなく、銀河内の星の密度と同じ密度でどこまでも続いているとしたら、宇宙膨張による限界はあるにしても、どれほど夜空が明るくなってしまうかわからない（星間吸収の取り扱いをどうするかが問題）。階層構造によりオルベルスの背理を逃がれる宇宙モデルをシャーリエ宇宙という。彼の宇宙は階層構造をどこまでも考える宇宙であるが、実際的には宇宙膨張で上端をカットしてよい。

4. 宇宙大局構造のフラクタル次元

宇宙にカオス現象はいたるところにあるが、それがフラクタル幾何学の化石となって残る例は比較的少ない。その稀な例の1つが宇宙大局構造である。これは宇宙膨張のため一旦できたクラスターがかきまぜられずに残るためと考えられる。

観測的には、星団の質量と半径、銀河の質量と半径、銀河群の質量と半径、銀河団の質量と半径、超銀河団の質量と半径の関係を $M = kR^D$ にあてはめて、1つの k と D の値でほぼ合わせられれば同じ形成のプロセスで次々と小さな構造へと分裂をくり返したというシナリオが描ける。 k は単位のとおり方によるからあまり意味ない。問題は D であるが、ド・ヴォークレールによると1.23であるという。一様分布が $D = 3$ であることからすると、大きな宇宙ほどどんどん薄められていることになる。

2つの問題がある。1つは最大の構造はどうやってできたか、他は $D = 1.23$ は何故であるかである。第1の問題は実はまだ片づいていない。それどころか、素粒子論の最先端と関連して流動的である。ダークマターの問題である。基礎の考えは昔ながらのジーンズの重力不安定性で、物質は一様密度でいるよりはある大きさのかたまりになる方が落着くということなのであるが、うまくすると最近宇宙に大量にあるらしいといわれる見えない物質の正体がわかるかもしれないのである。

話を重力不安定性にもどすことにしよう。ゴムまりにつめた圧縮空気はゴムに穴をあけるとまわりと同じ密度にもどってしまう。ガス圧のためである。一方、地面も地球大気も宇宙空間にとび散ってしまわない。重力のためである。その中間に境目があって、一様なガス体はあまり大きいと分裂することになるのである。ただその大きさはガス粒子の質量、温度、運動状態などにもよるので、宇宙モデルとダークマターの素粒子的性質との組合せが宇宙最大構造の観測からきまるはずである。

超銀河団の網状構造、銀河の少ないボイドなどの観測が話題にのぼるのもそのためといえる。

$D=1.23$ の問題は全く別のアプローチで研究されていた。十余年前になるであろうか、東大物理の木原太郎教授は当時大学院生であった東辻、坂井、三好の三君と相対論的膨張宇宙の重力不安定性と銀河の集散を研究していた。膨張宇宙では通常の重力不安定性とちがって時間の指数関数的に速くは密度むらが成長しない。実験室でも中立安定なある種の相転移のゆらぎの生長は同様である。そのゆらぎの相関の距離に対する依存性がフラクタル次元の別の表現になっていたのである。木原らの研究は後にアメリカのピーブルスによって再発見され、そちらの方が世界中によく知られているが、バイオニアは木原である。

5. 博物学のすすめ

宇宙は混沌にみちている。しかし、混沌には混沌のルールがあってでたためのことではない。その見方を知らないと混沌はなかなかその正体を見せない。それが、近年の力学系の理論によって、その見分けが誰れにでもできるようになった。やはり大きな進歩といわねばならない。従来、博物学又の名を自然史という学問があって自然の語る史（ふみ）をまとめるものであった。これが物質科学および自然哲学と協力して自然科学ができたのであるが、博物学には野山を巡って石をひろい草木を採集して観察するというような泥くささがあるので、日本のようにできた学問を輸入してきたような伝統のもとではとかく軽視されがちであった。しかし、今や自前の学問をどんどん発展させていかなくてはならない時代になってきた。このときにあたって力学系の理論からする物の見方が一つの方法論として確立してきたので、博物学のルネッサンスを計るべきではないかと考える。博物学の長所は発見的な点である。

博物学の新しい手法は、コンピューターの発達によって可能になった多変量解析と上述のフラクタル幾何学である。これによって、従来はダーウィンやウェゲナーなどのように直観力のすぐれた人だけが博物学の門を切り拓いたのを、意欲のある人なら誰でもいきなり門の中へ入れるようにしようという算段である。あまり適切な例ではないが、よい橋を造るために橋の博物学をつくることを考えてみよう。それにはまず、日本国内の橋のデータをすべて集めることとする。橋の長さ、幅、橋脚の数、高さ、コンクリートと鉄の使用の比、堤防の高さ、最高水量、気温の最高最低、最高水量、道路と川の角度、最寄の町や都市からの距離、隣りの橋までの距離、人や車の昼夜の交通量の平均、最高最低最高荷重、道路の幹線か否かの程度、周辺的环境（橋の様式）、事故、建設費用、建設時期等すべてを数量化して元データとする。次に、主成分解析をして、一体橋をきめる要素がいくつあるのかを推定する。それには、まず、上述の各々の量について平均値が0、分散が1になるよう原点の移動と尺度変化を行い、第2の元データとする。このようにした p 個の量を、お互に直交する座標軸として、すべての橋を p 次元空間の点であらわし、全部の点の分布が原点を中心とした p 次元超楕円体で最もよく近似できるような楕円体をつくる。その主軸が主成分である。数学的には軸方向の成分の分散が極大となる条件で簡単に求まる。その分散が1よりより小さい方向の主成分は重要でないと考える。ついでにどの元データが第1主成分に何割寄与しているかなどそれぞれの主成分の意味がわかる。第2段階はクラスター解析である。これによって、橋はいくつかのタイプに有意に分類できるかどうかわかる。主成分解析で得た有意な主成分のみで空間を張り、その上に橋1つが1つの点として全体が n 個の点として記述されている。そこで n_c 個 ($n/n_c > 5$) のクラスター中心を空間内にばらまき、近傍の点とを結んで、その結んだ腕の長さの2乗の総和が最小になるように

クラスター中心の位置を調整する。また n_c を変えてこの総和が極小になればクラスターとして有意であると判定する。次いで、こうして得られたクラスター中心を元データとして第2のクラスター分析を行えば、これから第3段階のフラクタル次元解析となる。最初のサンプルの分布の半径を R 、第1のクラスターの平均半径を R_c 、第2段階クラスターの平均半径を R'_c とすれば、フラクタル次元 D は $\log(n/n_c)/\log(R/R_c)$ 又は $\log(n_c/n'_c)/\log(R_c/R'_c)$ である。橋についてフラクタル次元がどうなるか、やってみないとわからないが、少くとも川の支流が次々と合流する構造はフラクタル構造をしていることを反映して、あるいは人間社会のフラクタル構造(政治)を反映して D が非整数次元になる可能性は充分ある。橋の建設にはいろいろな要素がからまるが、将来は橋の博物学を基礎にした客観性のある要求にもとずいて建設されるようになることが望まれる。新しい時代が駆け足でやってくるのである。