

宇宙現象における周期性の検出と解釈

テクニカルノート: 藪下信 (Shin Yabushita) , 2004年11月15日掲載

1. 周期現象とは

人間がかかわっている現象、たとえば経済現象にも周期的と思われるものがある。よくいわれるように、コンドラチェフが見出した周期である。すなわち、経済の発展も単純な成長曲線ではなく、いろいろな波があり、それを分析するとそこにある周期がみとめられるというのである。

また地震の発生にも周期性があるとする学説がある。日本でもっとも良く知られているのは、関東における地震の69年周期説であろう。さらに、日本に上陸する台風の数も、その年々によって変化はあるものの、8月、9月に多く、あきらかに1年の周期性をもっている。

これらの3つを比較してみると、おおよその人が周期的とみなすのは、日本列島に上陸する台風の数であり、69年の地震の周期説については、今ひとつ信頼性が低いとみなす人が多いのではなかろうか。コンドラチェフの波については、余り認知されていないように思われる。

さてこれらの現象が周期的であるというのは、正確にはどういうことをさすのであろうか。たとえば、日本に上陸する台風の数も、約1年の周期で繰り返されることについて異論をさしはさむ人は少ないと、思われるが、それはどのような根拠によるものなのか。それは、ひとつには気候には1年という周期があることはだれもが認めており、しかもその原因も、地球と太陽の関係にあることから、周期性はあって当然という認識が出来上がっている。しかも実際に台風の数をしらべても、やはり夏に集中していることから、周期現象であることに誰もが疑いをさしはさまないわけである。すなわち、原因が周期的でありことが認められており、しかも現象がきわめて周期的に見えるからである。

ただし、地震となると少し事情は異なる。地震発生メカニズムは解明されているが、そこからただちに周期的との結果は導かれない。すなわち、プレートのぶつかり合いによって蓄えられたエネルギーは無限に大きくはなりえないから、ある限界をこえるまえにその開放がおこるので、その限界、またエネルギーの蓄えられる速度がどれくらい一定なのかも知られていない。よって、長い目でみれば、たとえば一万年の間の地震の発生をみれば、地震と地震の間の平均的な時間がみちびかれ、それが周期であるといえれば、周期であるといえるのだろう。

それでは、宇宙に目をやればどうだろうか。言うまでもなく、地球は太陽の周りを公転運動している。このことから、多くの地球規模での現象が1年の周期性をしめすことが導かれる。さらに、地球の運動は単純な楕円軌道ではなく、その離心率も周期的に変化するし、また地軸の公転面への傾斜角も、周期的に変化する。これら二つの周期の組み合わせで、地球のある点で受ける太陽放射の量は複雑に変化することとなり、これが氷河期の原因となるのである(いわゆるミランコヴィッチ・サイクル)。

2. 問題の発端

地球上の過去の大きな異変が、周期的に生起しているのではないかということは、折に触れ議論されていた。たとえば、英国の著名な天文学者の故 W. McRea は、そのような問題をいくつかとりあげている。

しかし、この問題に火をつけたのは、シカゴ大学の古生物学者の Raup と Sepkoski である (Sepkoski 1995 を参照)。彼等は1982年に、アメリカの科学アカデミーの会報で、生物種の絶滅の割合は、一定ではなく、ある周期性をもっているらしいと発表したのである。

生物種は絶えず死滅している。すなわち、いくつかの種が絶滅する反面、新しい種が発生して、全体として、生物の進化が進んでいるのである。Raup と Sepkoski は、海洋生物種が、地質時代とともにどのように入れ替わっているかを、細かく調査した。そうすると、ときによっては、あまり種が絶滅しないときと、大きく絶滅するときがあり、それをグラフとしてあらわすと、絶滅のピークがいくつも認められ、それらはおおよそ2600万年の間隔で起こっていることを見出したのである。そしてこの論文の終わりのところで、このような周期性は、生物そのものに、原因をもとめることは出来ない。おそらく、絶滅を引き起こす外部要因に、周期性があるのだろうとつけくわえた。

この論文が引き金となって、絶滅の原因論が活発におこなわれ、いくつもの論文が発表された。しかし、科学の手續きとしては、まず現象が本当に周期的とみなされるのか、否かを、考察されねばならない。じっさいにはこれ

は行われず、周期性を引き起こすと思われるモデルがいくつか提唱された。そのひとつに、太陽には未発見の伴星があり、その星の軌道周期は2600万年であるというのがあった。あった、という過去形をつかうのは、現在ではもはやこの説を支持する研究者はいないと、思われるからである。

以下では、この週期説をめぐる、どのような結果が発表され、それに伴ってどのような理論モデルが提唱され、そしてどのような結論に次第に落ちてきたかについて、解説を試みたい。

3. Raup と Sepkoski の研究

1980年代に入ってから、地質学において、大きな進展がみられた。地球の過去に、大きな大異変があったことは、すでに受け入れられていたが、その原因をめぐるには、地球そのものに原因を見出そうとするグループと、地球外に見出そうとするグループの間の葛藤である。言うまでもなく、地質学者は前者に多く、天文学者は後者に属する。しかし、地球外の原因を支持するこれといった材料は見出されていなかった。これに、大きな変化をもたらしたのが、L. Alvarez を中心とするカリフォルニア大学バークレー校のグループである。

L. Alvarez はノーベル賞を受賞した物理学者で、Walter Alvarez はその息子であり、同じ大学に所属する地質学者である。まず、Walter がイタリアのグッピオにある白亜紀と第三期の境界地層を持ち帰り、ローレンス・リバーモア研究所で、その地質資料に含まれるイリジウムの量を測定した。そして、イリジウムの量が、地球表面の量と比較して、非常に大きいことから、これは大きな隕石(小惑星)が落下した証拠であると主張した。白亜紀第三期の境界は6500万年前に対応し、多くの種が絶滅したときである。なかでも有名なものは、白亜紀に生息していた巨大爬虫類(恐竜)が絶滅した時でもある。

この発見は多くの論争をまきおこしたが、地球外から大きな物体は落下したことの強力な証拠となることから、地球上の異変を宇宙現象に結びつけることに、研究者が違和感を持たなくなっていたのは事実であろう。

このような時代背景のもとで、Raup と Sepkoski の論文が発表された。彼らは、膨大な古生物(主として海洋生物)の資料のデータをファイルとして整理していた。地層の研究からおおよその年代が推定される。そうすると、ある時間の間に、どれだけ生物種が絶滅したかを、時系列として示すことができるのである。もちろん、多くの生物種が生息していた時であればそうでないときもある。それで、彼等がしたのは、絶滅した種の割合(パーセント)を、時系列で示したのである。

たとえば、白亜紀第三期の境界(K/T境界)をとってみよう。図によれば、この境界において、85%の生物種(海洋生物)が、消えてなくなっている。その他にも、いくつかのピークがみとめられる。これらのピークのあいだの間隔はおおよそ2600万年であることに、彼等は気づいた。そして、その結果を発表した論文のしめくりとして、生物の絶滅(そしてそれに伴う放散)が、周期的におこるのは、生物の持つ内的要因の結果として、理解するのは難しい。なにか外的要因のなかに、周期的なものがあるのだらうとしめくった。

4. 地球外原因 オールトの彗星雲

さて、ここで、彗星についてふれなければならない。彗星は基本的には巨大な氷の塊である。彗星が地球に衝突したさいに放出される巨大なエネルギーに着目したのは、重水素の発見で著名な H. ユーレイ(Urey)である。K/T境界のような破壊をもたらすエネルギーが、放出される。したがって、Raup と Sepkoski が導いたいくつかの絶滅のピークには、このような天体による衝突が関係しているとかんがえるのは、きわめて自然である。

さて、オランダの天文学者の J. オールトは、現在太陽系には非常に多くの彗星が属していることを推論した。1950年の有名な論文である。すべての彗星は太陽の周りを公転運動している。しかし、惑星近くにきたもの多くは、惑星(主として木星と土星)の引力の作用で、太陽系の外部に放出される。放出されてしまわない彗星のうちいくつかは地球に衝突するのである。他方、惑星から遠くにあるものは、太陽系の近くを通過する恒星の引力で、惑星近くにくる軌道に、変えられる。オールトは、この恒星の作用を考えていたが、最近では、銀河全体の重力作用のほうが、より彗星軌道をかえるのに、効果が大きいことがわかってきた。

5. Oort雲の周期的なかく乱

それでは、どのようにして、このオールトの彗星雲から、周期的に彗星が地球ちかくに来る軌道に変えられるのだろうか。太陽系近傍に来る恒星の数が、周期的に変化するのか、それともなにかほかのメカニズムが考えられるのだろうか。

これこそがまさにそのメカニズムなのだ、大上段からかまえたのが、カリフォルニア大学のグループとP. ハット

(Princeton高等学術研)である。彼等は、太陽は孤立した星ではなく、宇宙によく見られる連星のひとつだと主張した。伴星が太陽の周りを周期2600万年で公転している。伴星がオールト雲を通過するときに、それをかく乱し、多数の彗星が地球の近くにやってきて、いくつかは地球とぶつかるというのである。見出されていないこの伴星を、彼等はネメシスとなすげた。ネメシスとは、ギリシャ神話に出てくる死の女神の呼び名である。彼等は論文の最後に、かりにこの伴星が見出されなければ、この論文が自分たちにとってのネメシスになるだろうと付け加えさせた。なおこの論文は雑誌、Nature に発表されている。そして、実際にこの伴星を発見するために、観測プログラムも作られた。

このモデルには二つの欠点がある。まず伴星の軌道である。周期2600万年ということは、軌道半径が約9万天文単位となることである。離心率にもよるが、このように大きな軌道は、太陽系の近くを通過する恒星の作用で、いつまでも太陽の伴星としてとどまれない。どこかに飛び散ってしまう可能性があるか、あるいは、軌道半径が大きく変化し、したがって、周期が2600万年という一定の値が保てない。もうひとつの問題は、この伴星がオールト雲を通過するたびに、彗星をあちこちにとびちらせてしまい、肝心の彗星が太陽系からなくなってしまうことである。

というようなことから、現在では、太陽が銀河面を上下する運動が、時計の役割をするとの枠組みが受け入れられている。もう少し説明しよう。太陽の属する銀河は、パンケーキ状をしている。そして、太陽は中心の周りに公転運動をしていて、その周期は約2億年である。しかしこれだけではない。パンケーキの中心面の上下にも運動しているのである。まず、中心面では、その上と下にある物質の量はおよそ等しいから、そこでは、上下の方向に力は作用しない。しかし、かりに太陽がそこから少し上にいけば、下向きの力(銀河を構成する物質、すなわち星々やガスの引力)が作用して、太陽を下に引っ張ろうとする。今度は下にいけば、上に引き戻そうとする力が作用する。結果として、太陽は銀河面の上に行ったり下に行ったりするのである。そして、銀河の中では当然中心面の近くに物質が多く分布しているから、そこでは、Oortの彗星雲がかく乱され、結果として、地球近くにくる彗星が多くなると考えられる。

6. クレーター年代の周期は3700万年

さて、Alvarezらの研究によって、地球外からの巨大な衝撃は生物界に大きな影響を与え、生物の大量絶滅につながる可能性が高いということが、多くの研究者の受け入れるところとなっていた。したがって、巨大の衝撃の結果であるクレーターの年代から、果たして周期性が認められるかということがとりあげられたのは、自然の成り行きである。AlvarezとMullerは早速この問題に手をつけ、当時年代が確定しているクレーターには2600万年の周期性がみとめられると発表したのである。

これはしかし今からおもえば、勇み足であった。というのも、年代の知られていたクレーターの数も少なく、周期性を調べる数学的手段も、説得力に欠けるものであった。さらに、恐竜の絶滅が起こった6500万年前に対応するクレーター(メキシコはユカタン半島のチツユルユル・クレーター)は1990年代に入ってようやく確認された。

しかし、クレーターの調査は順調に進み、その個数は次第に増えてきた。現在では、130強のクレーターがリストアップされている。問題はデータの正確さである。すなわち、年代と大きさ(直径)が正確に知られているものがどれだけかである。たとえば、チツユルユル・クレーターの場合、非常に大きいということはわかっているが、その直径は100kmとするグループから、300kmとするグループがいる。他方、年代測定はかなり正確に行われている。他方、大きさはかなり正確にわかっているのに、年代は不確かだというものもある。ということで、周期性の仮説を検討するという場合、どのデータベースを用いるかということ、あらかじめ、定めておかなければならない。

さて、データベースを定めたとして、どのような手法が用いられるだろうか。いままで用いられているのは、フーリエ解析のパワースペクトル法、Broadbent法、そしてスペクトログラム法である。詳細は引用文献にゆずるとして、得られた結果を要約すれば、次のようになる；

26Myr (100万年) Yabushita 1996 , Napier 1998 , Matsumoto & Kubotani

30Myr Yabushita 1998

37Myr Stothers 1998 , Matese et al. 2001 , Yabushita 2002 , Yabushita 2004

実は、ここにあげた数字は、いろいろとデータベースから、部分集合をとりだして、求めた値であって、すんなりと得られたものではない。しかし、年をおうごとに、得られた結果はより確度の高い物となっている。それは、クレーターの個数が多くなっていること、年代測定に伴う誤差が、小さくなっていることによる。

さて大切なことは、こうして得られた周期の統計学的な信頼性である。というのも、たとえ乱数の列からクレーター年代が抽出されたものであったとしても、そこにある周期が偶然にみられることもあるからである。ここでとくに強調したいのは、筆者が最近に得た結果である。普通、大きなクレーターをあつかうときに、すべてのクレーターは

同じ重みをもつものとして、あつかわれる。しかし、スペクトログラム法では、大きいものと、小さいものとの重みを区別して扱うことができる。すなわち、クレーターの直径、あるいは、破壊のエネルギーを、重みとしてあつかえるのである。そうして得られた結果が2004年の論文でしめされ、さらに統計学的な検証の結果、きわめて信頼性の高い周期が導かれ、それが3700万年なのである。

7. 銀河観測との整合性

さて、導かれたクレーター年代の周期は、考えられている天文学のモデルと整合性があるのだろうか。すでにのべたごとく、3000万年前後の周期現象として考えられるのは、太陽系の銀河内での運動である。それは、銀河面を上下する周期である。これは言うまでもなく、銀河のなかにどれだけの物質があるかに依存する。別の言葉でいえば、銀河内での物質密度についての測定値によってチェックをうけるのである。これにパスしてはじめて、ひとつの理論として確立されたことになる。

銀河内での物質といえば、星々と星間ガス、それにわずかのチリだから、この問題はそれほど難しいものとは思われないかも知れない。しかし、ここで暗黒物質という、厄介な問題が存在していた。「いた」という過去形でかくのにはそれなりの理由があるが、それは次第にあきらかにされていく。

物質が総て、電磁力と相互作用するのであれば、結果として電磁波によって、観測される。しかし、電磁的な相互作用をしない物質、または相互作用しても、すでに電磁波では検出出来ないような状態にある物質が相当の量存在するのではないかと、疑われていた。いうところの暗黒物質 (dark matter) の存在である。前者の例としては、中性微子やブラックホール、後者の例としては、褐色矮星 (星が進化して白色矮星となり、さらに冷えてしまっ、暗くなってしまったもの) がある。すくなくとも太陽の属する銀河全体としては、存在することが確かと考えられている。また銀河の集団であるクラスターでも、確かめられている。

このような可能性があるために、太陽近傍での物質密度を測定するというのは、やさしい問題ではない。電磁波を出している物体の量を測定するだけで十分ということではないのである。どうするかといえば、すでに星々と相互作用した結果、その速度分布がある定常状態に達していると思われる星々をえらびだして、その位置と速度を測定し、それをもとに物質密度を導き出すということをするのである。これは、古くは、オランダの著名な天文学者である J. Oort に始まり、いろいろな研究者がこの問題に挑戦した。1980年代には、暗黒物質と関連して、アメリカの Bahcall という研究者も、いくつもの論文を発表している。1998年の論文で、Stothers はそれまでに発表された値をリストアップしている。そこには28の異なった測定値が与えられている。ところで、銀河内での物質密度は、1パーセック立方あたりの太陽質量を単位として表すのが通例である。Stothers のリストでは、この単位をもちいると、0.26から0.076までがあり、その分布は0.15を平均として、おおよそ正規分布となっている。このように、使用したデータ、解析手法の異なる結果を、単純に統計的な値とみなして、平均値をとることにどれだけの意味があるかはわからない。しかし、0.15という値が、もっとも多くの研究者によって得られているという事実は注目に値する。

他方、ESA (European Space Agency) は、人工衛星 Hipparcos の測定機器を搭載して、星々についての多くの精密な測定データをもたらした。それをベースに、3つのグループが銀河の物質密度をもとめている。最新の値は Holmberg & Flynn によるもので、その値は0.1である。他の二つのグループの値は少しことなるが、彼等はある近似をしているので、それをより正確にすれば、0.1となると、Holmberg & Flynn は結論している。

このことが、ここで考えているクレーター年代の周期性に持つ意味合いはなんだろうか。太陽が銀河面をよぎる周期を $P_{1/2}$ とすると、それは簡単な式

$$P_{1/2} = 13.2\rho^{-1/2} \text{ (100万年)}$$

で与えられる。ただし ρ は物質密度を立方パーセックあたりの太陽質量を単位として、表したものである。かりに、 $\rho = 0.1$ とおけば、 $P_{1/2} = 4100$ 万年となる。他方、周期として、以前に得られた2600万年を得ようとすれば、 $\rho = 0.26$ でなければならない。これは、きわめて大きい値であって、最近の Hipparcos 衛星による測定結果とも大きく矛盾することとなる。

このことから、クレーター周期3700万年が、銀河面を上下する太陽運動と整合性をもつためには、銀河内 (銀河中心面付近) での物質密度が0.12でなければならないことがみちびかれる。この値は Holmberg & Flynn の求めた値よりも少し大きい、Stothers が得た平均値よりは小さい。

筆者自身は Holmberg & Flynn の値が決定的であったとしても、そのことは理論モデルと整合性のあるものとする。その理由は、次のようなものである。

クレーターの年代としては、4億年前のものまでが用いられている。この間に太陽は二つの渦状腕を通過してい

る (Leitch & Vasisht, 1998)。ここは星々やガスの密度の高いところである。とくに、ガスのみでなく、古い星々も渦状腕では、密度が高くなっていることである。すなわち、渦状構造はガスや若い星々のみでなく、銀河を構成するすべての要素によって成り立っている (Binney & Tremaine, 1987)。したがって、そこでは当然のことながら、太陽の上下運動の周期は短くなる。どれだけ短くなるかは、そこでの物質密度による。クレーター年代から得られた周期は、太陽が銀河内を公転運動する4億年にわたっての平均値であるから、現在の太陽の運動の周期は3700万年よりも長いことが考えられる。

このような経過を経て、ひとつの天文学の理論が確立されようとしている。

8. 生物絶滅との関連

最初にふれたように、クレーターの年代の周期性という問題は、生物絶滅に周期性があるとする Raup & Sepkoski の主張に由来する。それでは、生物絶滅には周期性があるとみなしてよいのだろうか。

これはじつは奇妙な問題なのである。個々の絶滅事件を詳細に調べてみると、クレーター形成に伴う衝撃と、絶滅がかならずしも関係しないことが判明してきている。その例として、6500万年前 (白亜紀 / 第三期境界、K/T境界) を取り上げる。地質学的には、いくつかの放散虫が死滅したときをもって、境界としている。これは、他の境界でも同じことである。この地層からは多量のイリジウムが検出されていることについては、すでにふれた。

ところが、ここに生物絶滅と、天体衝突とは無関係であると主張しつづけてきた研究者がいる。Princeton大学のGerta Kellerである。たとえば、1995年に国連が主催した会議では、小惑星衝突と大絶滅～心配無用と題する論文を発表している。彼女をリーダーとするグループは最近、興味ある論文をアメリカの科学アカデミーの会報に発表した。それは「The impact predates the K/T boundary」と題されている。チチュルールのクレーターの破片を詳しくしらべたところ、K/T境界とされるものよりも30万年も古いことが判明したというのである。要するに、大衝突があつてから、30万年経過して、ようやく生物界の大異変が起こったのである。そうすると、衝突と絶滅のあいだに因果関係ありと断定してきたことは正しかったのか、という疑問がわいてくる。絶滅シナリオとしては、たとえば、衝突で、世界中に火事が起こって、生物は死にたえたとか、あるいは、酸性雨がふりだして、環境異変がもたらされたとか、あるいは、核の冬シナリオがある。これらは起こったとしても、衝突後、数年から数十年で終わってしまう。30万年も衝突の効果はつづかないのである。Kellerらはこの点について、まずチチュルールの衝突で、地球環境が大きく変化し、その後30万年が経過して小さな衝突があり、これが生物界の最後の打撃になったのだと考えている。ただし、そのようなクレーターは見つかっていない。

K/T境界よりもさらに大異変が生物界にもたらされたP/T境界 (ペルム / 三疊紀境界、2億5千万年前) にも、対応するクレーターは見出されているが、直径は40kmと、あまり大きくない。これが、大異変をもたらした直接の原因とは考えにくい。このとき、シベリアでは大噴火が起こり、多量の溶岩が噴出した。その体積は400万立方キロメートルである。これは、地球上のすべてを8メートルの溶岩で覆いつくせるだけの量であり、とてつもなく大きな噴出であった。これに伴い炭酸ガスが噴出し、これが地球温暖化をもたらし、さらにそのことが海水中にあるメタンハイドレートの気中への噴出をもたらし、これは空気中の酸素と化合して、酸欠状態がもたらされ、生物の死滅につながったとする。

要するに、それぞれの異変を調べると、「衝撃 → 生物絶滅」という単純な図式はかならずしも成り立たない。

とすれば、生物絶滅の周期性の問題は、あまり議論しても、意味がないのではないかと、数学のひとつの演習問題以上の意味はないのではないかと思われる。

引用文献

直接引用した文献のみを、以下に挙げておく。

- Alvarez, W. & Muller, R. A., 1984, Nature, 308, 718.
- Binney, J. & Tremaine, S., 1987, Galactic Dynamics, Princeton University Press.
- Holmberg, J. & Flynn, 2000, MNRAS, 313, 209.
- Keller, G et al, 2004. Proc. Natl Acad. Sci., 101, 3753.
- Leitch, E. M. & Vasisht, G., 1998, New Astronomy, 3, 51.
- Matese, J. J. et al., 2001, in Collisionnal Processes in the Solar System, eds. Marov, M. & Rickman, H., Kluwer Academic Publishers.
- Napier, W. M., 1998, in Dynamics of Comets and Asteroids and Their Roles in Earth

- History, eds. Yabushita, S., Henrard, J., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Oort, J., 1932, B.A.N. 6, 249.
 - Rampino, M. R. & Stothers, R. B., 1984, Nature, 308, 709.
 - Sepkoski, J. J. Jr, 1995, in Global events and event stratigraphy in Phanerozoic, eds. O.Walliser, Springer.
 - Stothers, R. B., 1998, MNRAS, 300, 1098.
 - Yabushita, S., 1996, MNRAS, 279, 727.
 - Yabushita, S., 2002, MNRAS, 334, 369.
 - Yabushita, S., 2004, MNRAS, 355, 51.

テクニカルノート「宇宙現象における周期性の検出と解釈」
藪下信 (Shin Yabushita)
奈良産業大学情報学部
636-8503 奈良県生駒郡三郷町立野北3-12-1