

第98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 : jrfd117@ybb.ne.jp

事務局 岩下 幸功

TEL & FAX 042-35-3810

E-mail : yiwashita@syncreatep

第98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97回アブダクション研究会のご報告をします。

2014・7・26(土)に開催致しました、前回の第97回アブダクション研究会では、『宇宙科学と地球科学の歴史を学ぶ——矢島道子・和田純夫編《はじめての地学・天文学史》(2004・ベレ出版)を輪読して、新たな領域の知見を研鑽する——』というテーマで、世話人の福永征夫(序章・第I章)、大河原敏男氏(第II章)、八尾徹氏(第III章)の三名が分担して、研鑽と解説発表を試み、古代ギリシャ以来、二千数百年の歴史をかけて開かれ、営々と蓄積されてきた、地球科学(地学)と宇宙科学(天文学)の知見の偉大で壮大なパラノマの数々に触れて、目を見張り、心を揺さぶられる知的な研鑽を経験することができました。

また、遠大かつ長大な大自然の秩序とカオスの解明に情熱の限りを注いできた、科学と技術の先人たちの営みの壮絶さと秀逸さに、身も心も圧倒される感動と感慨に浸る機会を得ることができました。

都合によってやむなく欠席された、花村嘉英氏(第I章のレポート参加)を含め、長時間の研鑽を重ねて、解説発表をしていただいた各位、ならびに、本会・懇親会ともに、活発に議論をいただいた、ご出席の皆様にご心から感謝しお礼を申し上げます。

[1] 人間が理解するに至った、さまざまな知識のうちでも、大地・空気・水・火・木など、地学の知識と、空・月・星など、天文学の知識は、いずれも文明が発祥した古代から今日まで変わることなく、広く深い研究と洞察がなされた、人間の生存環境に関する直接的で基盤的な総合知識であり続けてきました。

[2] 地学と天文学は、知識が専門化し細分化する今日では、いずれも、一つの領域的な知識として位置づけられますが、その実を見ると、いずれも、多元的で多面的な、さまざまな領域的な知識を包含する、広域的な知識であり、かつ、包括性を有する高次の領域的な知識に進化するプロセスの歩速を増しつつあります。

それらは、いわば、知識のコングロマリットとでも称すべき様相を呈しつつあります。

[3] とりわけ20世紀において、科学と技術の革命的な進化を背景に、地学と天文学は、いずれも大きくダイナミックな飛躍を遂げました。

地学では、ヴェーゲナーの大陸移動説とウィルソンのプレートテクトニクス革命など、天文学では、アインシュタインの一般相対論、ハッブルの銀河に関する法則、フリードマンの宇宙モデルなどが、相乗的に結実して生じた膨張宇宙論などが、特に顕著な事績ですが、それらが地学と天文学を飛躍させて、それぞれ、地球科学と宇宙科学という呼び名こそがふさわしい総合的な学術領域として、長足の進化を実現しつつあります。

[4] 自然や社会の系は、(1) 自由度を増大させる方向性、すなわち、エントロピーを増加させる方向性、(2) 安定度を増大させる方向性、すなわち、内部エネルギーを減少させる方向性、という2つのベクトルが、相補的に循環し、融合して、システムの恒常性や定常性を維持し、確保しているものと考えられます。

生態系と生命系の未来における、確固たるサステナビリティを維持し、確保するために、これからの地球科学と宇宙科学が、このようなベクトルを有意に発見し、有意に表象することを目指して、学術研究のさらなる発展と進化を遂げることを願い、期待して止まないものであります。

■主題に関するわれわれの現在および先行きの研鑽と探究、および実践のために資する糧とするために、『宇宙科学と地球科学の歴史を学ぶ——矢島道子・和田純夫編《はじめての地学・天文学史》(2004・ベレ出版)を輪読して、新たな領域の知見を研鑽する——』と題する資料を編集して、この案内状の最後部に掲載しました。

この資料は、矢島道子・和田純夫編《はじめての地学・天文学史》(2004・ベレ出版)の各章の記述から必要な要点を抜粋して、できるだけ正確に分かりやすく要約したものです。

■皆様には、広域学の研究と研鑽のために、広域的な知識の多元的・多面的で包括的な研鑽と探究に、実りの多い成果を挙げられますようご期待を申し上げます。

■そのため皆様には、記述の各部分を相互に参照し、相互につき合わせ、相互に矛盾なく補完させ合いながら、積極果敢に、何度も繰り返して、整合的に読み取る、実行力を発揮して下さることに、心より期待しています。

(2) 各界、各分野の皆様の積極的な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、各層の皆様様の積極的な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、積極的にお申し出下さい。

皆様には、今後にも、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お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： 2014年9月27日(土) 13:00~17:00(本会)
17:15~19:15(懇親会)

◇ 場所： NEC企業年金会館 1階中会議室 (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：

『エドウィン・ハッブルの知見に学ぶ銀河の世界——
ハッブル著・戎崎俊一訳——
「銀河の世界」を解説発表する——』

安平 哲太郎 氏

■ 文献 : ハッブル著・戎崎俊一訳「銀河の世界」(1999・岩波文庫)

■ アブダクション研究会は、さらに新たな知識の領域に漕ぎ出します。
皆様には、積極的なご参加をお願いします。

◇プログラム:

- | | |
|-------------------------------|-------------|
| (1) 解説発表: [PART-1] | 13:00~14:20 |
| <小休止> | 14:20~14:30 |
| (2) 解説発表: [PART-2] | 14:30~15:50 |
| <小休止> | 15:50~16:00 |
| (3) 総合的な質疑応答: | 16:00~16:55 |
| (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98回 アブダクション研究会(9/27)の出欠連絡

●9/22(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: yiwashita@syncreatep 岩下 幸功 行

出席

出席

●9/27(土)の研究会に、未定ですが調整します。●懇親会に、未定ですが調整します。
欠席 欠席

ご署名 _____

■次々回 2014 年 1 1 月度の第 9 9 回アブダクション研究会は、
2014 年 1 1 月 2 9 日（土）に、NEC 会館 1 F 中会議室で開催します。

■2014 年 1 1 月度のテーマは、次の通りです。

テーマ：『シノ・セグシに学ぶ「温度と宇宙・物質・生命」——セグシ著・桜井邦朋訳
「温度と宇宙・物質・生命」（2004・講談社ブルーバックス）を輪読して新たな
領域の知見を研鑽する——』

■各章の担当は、下記の通りです（敬称を省きます）ので、ご協力ください。

- 第 1 章 37.0度C 北村 晃男
- 第 2 章 尺には尺を 中山 貞望
- 第 3 章 地球を読み解く 大河原 敏男
- 第 4 章 極限状況下の生命 八尾 徹
- 第 5 章 太陽からのメッセージ 福永 征夫
- 第 6 章 量子飛躍 福永 征夫

■皆様には、大いにご期待をいただき、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 9 7 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。

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

『宇宙科学と地球科学の歴史を学ぶ』

——矢島道子・和田純夫編《はじめての地学・天文学史》を
輪読して、新たな領域の知見を研鑽する——』

序 章 地 学 事 始 め

■地球の大きさから■

【1】 地球の大きさ

◇地球の半径は、約6378km。 子午線象限が、10001.970km（1周は、ほぼ4万km）。

◇紀元前3世紀、エラトステネスが、地球の一周は45000kmであると算出した。誤差は13%のおそるべき正確さ。

◇現在では、人工衛星を利用して、正確に測定することができる。

【2】 地球の形

◇地球の形は回転楕円体で、子午線の形は楕円となる。

赤道方向に膨らんだ楕円体。

地球が自転しているので、赤道のほうが遠心力は大きく、重力は極から赤道に向かってわずかに小さくなっている。

【3】 地球の重さ

◇ここで重さとは、重量（重力の大きさ）ではなく質量のことと考える。

◇地球の質量は 5.974×10^{24} kg。万有引力の法則と重力加速度を用いて計算する。

【地上での重力の式】 $F = mg$ 【万有引力の公式】 $F = G \times Mm / r^2$ 乗

⇒ $M = g \times r^2 / G$

ただし g ：重力加速度 G ：万有引力定数 M ：地球の質量 r ：地球の半径

【4】 月の大きさ

◇現在では、月の直径は地球の直径の4分の1くらい（3476km）、地球から月までの距離は、地球の直径の30倍（38万4000km）、月の重さは地球の重さの90分の1と分かっている。

◇月の大きさを測定したのは、紀元前2世紀のヒッパルコスが最初といわれる。
地球上の2地点から同時に月を観測し、月の見える角度（2地点で月を見上げた角度が違う）をくらべる。2地点の距離が分かれば、三角測量で、月までの距離が求められる。
得られた月までの距離と月の視直径 ω （月の両端で、地上から見上げる角度が少し違う）より、月の大きさ d （直径）が求められる。
ヒッパルコスは、月の直径は地球の半径の7分の2倍といっている。

◇現在は、多くの宇宙船が月に反射板を置いてきたので、地球から、それにレーザー光を当て、その反射を利用して、月までの距離を正確に求めることができる。

【5】 太陽の大きさ

◇体積は地球の130万4000倍、質量は33万2946倍。

◇ われわれの目にも、月と太陽がだいたい同じ大きさに見える。
月は小さいけれど近くにあり、太陽は遠くにあるからと分かる。
紀元前3世紀の古代ギリシャのアリスタルコスは、これらを利用して月までの距離と太陽までの距離の比を求めた。
アリスタルコスは月が正確に半月に見える時を選んで、そのときの太陽一月一地球の三角形の角度を測った。月と太陽までの距離の比が分かれば、月と太陽の大きさの比も分かる。
地球と月の大きさの比は月食のときの地球の影の大きさから推定した。
最終的に太陽の体積は地球の体積の300倍という数字が出てきて、アリスタルコスは地球の周りを太陽が回るのではなく、太陽の周りを地球が動くと考えた。
コペルニクスよりも2000年くらい前の地動説だった。

◇太陽の大きさも月の大きさと同じように、太陽視差（地上の2地点で太陽を見上げたときの角度の違い）を求めて、太陽までの距離を求め、得られた太陽までの距離と太陽の視直径 ω （太陽の両端で、地上から見上げる角度が少し違う）より、太陽の大きさ d （直径）が求められる。
太陽視差はたいへん小さい角度なので、測定は困難だったが、現在では、人工衛星や他の惑星などを総動員して測定している。

◇火星の表面の様子を同時中継で見ることができる時代に生きるわれわれには、何もが分かっているものと思ったり、難しいことは誰かが解明してくれるものと思いがちだが、実は、それぞれが辛抱強い観測と緻密な考察の上に積み上げられてきた。

■地球はどれだけ古いのか■

【6】 地球の年齢についての知識の移り変わり

◇ 宇宙に地球が誕生したのは約45億年前だと分かったのは、20世紀半ばを過ぎてからだった。
100年前に比べると、地球の年齢は10倍以上にも伸びた。
地球がどれだけ古いかは、昔から人々の関心事で、地球の年齢についての知識は移り変わってきた。

【7】 近代科学の誕生と地球の歴史

◇聖書に記述にとらわれないで、天や地がどのように誕生したかについて、具体的なアイデアを初

めて展開したとされるのは、近代科学の創始者の一人、デカルトである。

デカルトは1644年の『哲学の諸原理』の中で、最初は微粒子の集まりだった宇宙から3種類の元素が誕生し、それから渦が生じて太陽系が形成され、やがて地球ができる過程を、図入りで描いている。

地球の中心には火があり、その外側に第3の元素、さらにその外側に空洞、金属質の地殻、水、岩石質の地殻、大気の順に取り巻いている。

岩石質の地殻にひびが入って、金属質の地殻に斜めに落ち込んで重なり合ってきたのが、大陸や山脈とされた。

◇ニュートンと張り合ったライブニッツやフックも、地球の歴史を聖書に結びつけて解釈することを戒め、生物の遺骸である化石ができるためには、多くの時間が必要であることを主張している。

【8】 ダーウィンと物理学との相克

◇1807年、ロンドンに地質学会が誕生した頃になると、化石は昔生きていた生物の遺骸であることが常識になり、その化石を目印にして、古い地層と新しい地層を区別する方法（化石層序学）が確立した。

1840年頃までには、カンブリア紀・シルル紀・デボン紀・石炭紀・ペルム紀・三畳紀・ジュラ紀・白亜紀・第三紀など、現在使われている地質時代名のほとんどが命名された。

◇このように厚い地層が形成されるのに、時間がかかることは、共通の認識になりつつあったが、果たしてどれほどの時間が必要なのか。

化石層序学は、その地層の堆積した時代が古いか新しいかの相対的な年代についてはいえるが、それがいつだったのかの絶対年代については答えられない。

◇この時間の壁に挑んだのが『種の起源』で有名なダーウィンである。

ダーウィンの進化論は、環境に適応した種だけが生き残るという、自然淘汰にその基本がある。

このような自然淘汰には、当然時間がかかるはずだ。

ダーウィンは、ライエルの『地質学の原理』を貫く斉一説の影響を受け、地質学はこのような長い時間を十分に保証してくれていると考えた。

◇ダーウィンは1859年の『種の起源』の初版で、第三紀（約200万年前～6500万年前の地質年代）だけでも「3億年をはるかに超える時間が経過している」と記述している。

3億年という数字は、自宅に近いウィールドと呼ばれる、白亜紀層の崖が、海の浸食によってできるのにどのくらいの時間がかかるのかを自分で見積もった結果であったが、その算定に初歩的な計算ミスがあったので、初版が出るとたちまち誤りを指摘する声が出た。

◇1860年のロンドン地質学会では、学会総裁のJ・フィリップスが、ダーウィンの計算を「算術の乱用」と批判した。

フィリップスはガンジス川での堆積速度の測定結果を引用して、ウィールドほどの崖ができるのに130万年もあれば十分で、カンブリア紀から今までに経過した年数は、9500万年程度にすぎない、と述べたのだ。

◇このため、ダーウィンは、1861年の第三版では、ウィールドの崖の記述を削除してしまった。しかし、ダーウィンはこの後も、進化に必要な時間の問題に悩まされることになった。

その最も手ごわい論敵は、物理学者で、後のケルビン卿こと、トムソンだった。

◇トムソンは自分が定式化した、熱力学の第2法則に照らして、斉一説はおかしいと考えていた。彼は宇宙や地球の年齢を3種類の方法で計算し、進化論や斉一説を批判した。

その1の方法は、フーリエが発見した、熱の伝導方程式によるもの。

その頃には地球の熱伝導率や比熱について、大まかな推定ができるほど科学は進んでいたもので、トムソンはこれらの推定値を方程式に入れて、地球がドロドロに溶けた状態から、現在の温度まで、冷えるのにかかった時間を計算した。

ただし、この計算は、地球の中には、新たに熱を発生させるものは何もないという、のちに覆される仮定を前提にしていた。

1862年に発表した最初の計算結果では、地球の年齢は9800万年と出た。

その後、この計算値は2000万年から4億年にまで変動した。

ダーウィンは「計算結果に、これほど幅があるのは、計算が頼りにならない証拠だ」と反撃した。その2の方法は、太陽は重力でゆっくり収縮することによって、そのエネルギー源を得ていると想定し、燃え尽きるまでの時間を計算するもので、結果は2000万年だった。

その3の方法は、月による潮汐の影響で、地球の自転速度が徐々に遅くなっていることから、計算するもので、今の減速の割合からすると、地球が固まってから約1億年がたっていることを示唆する結果が出た。

◇トムソンの計算結果が出ると、多くの研究者が、地球の年齢を量的に知る他の方法を開発しようと努力した。

ライエルも、生物の進化の速度が一定として、古生代から現在までの時間を見積もった。

一つの種が完全に新しい種に交代するのに、2000万年かかるとして、古生代の初めから現在までには12回の交代があったので、この間に2億4000万年が経過したという結果だった。

川や海での堆積速度をもとにしたり、岩石の風化によって、次第に海水の塩分濃度が上昇していくことなどを応用して、地球の年齢を見積もった研究もあったが、それらの結果のほとんどは、数千万年～数億年に収まっていた。

◇ダーウィン自身も、1872年の第6版（最終版）では、進化論を導く原動力になった、斉一説を捨てて、地球の年齢についても妥協した。

しかし、同時に「地球の年齢を確かに推定するほど十分には、宇宙や地球内部の構造について、分かっていないことを多くの哲学者は認めている」と記述することも忘れなかった。

【9】 放射性元素の発見と放射年代測定法

◇ダーウィンの死後14年の1896年、フランスの物理学者H・ベクレルは、ウランが写真乾板を感光させる不思議な“光線”を出しているのを見つけた。

1898年には、フランスのキュリー夫妻が、ウラン鉱石の中から同じような能力をもつ、新元素ラジウムを発見、こうした力を放射能と名づけた。

20世紀に入ると、ラジウム1gは、同じ重さの水を0度から100度まで熱することが分かった。

◇放射能はまもなく、トリウム、ルビジウム、カリウムの中にも発見された。

地殻の中には、わずかの割合だが、こうした放射性元素が含まれている。

地球全体では、ばかにはならない、こうした元素が熱を出し続けているとすれば、地球は一方的に冷えていくわけではなく、その温度は長い間変わらなかったのではないだろうか。

ケルビンの計算結果に重大な疑問が生じたのだ。

◇カナダの大学で研究していたラザフォードは、1904年、ロンドンで、ケルビンを前にして、「放射性元素の発見は、この惑星の持続期間の限界を広げ、進化が進むために、地質学者と生物学者が求めた時間を許容する」と講演した。

ケルビンは、3年後に死ぬまで自説を棄てなかった、といわれているが、地球の年齢論争は、振り出しに戻った。

◇ラザフォードたちは、1902年に、ウランなどは α 線を出して他の元素に変わっていくこと（放射性崩壊）を発見していた。

まもなく、このアルファ線は、正の電荷を帯びたヘリウム原子であることに気がついた。

とすれば、ウランやラジウムを含む岩石の中に含まれる、ヘリウムの量を測れば、その岩石のできた年齢が推定できるのではないかと考えたのだ。

ラザフォードたちは、1gのラジウムから1秒あたり何個のヘリウムができるかを測定し、ロンドン講演から5ヶ月後の1904年9月、セントルイス万博に合わせて開かれた国際会議で、放射性元素を使った岩石の年代測定法のアイデアを発表した。

まもなく、放射性元素の崩壊速度（崩壊速度は、単位モル数の原子核が、単位時間あたりに崩壊する原子核の数＜崩壊定数＞として定義されるが、原子核の数が崩壊によって、もとの半分になる時間＜半減期＞もよく使われる）は、温度や圧力の影響を受けず、一定であることが分かり、放射能が年代を測る時計として利用できることが、確かめられたのである。

◇ラザフォードたちは、翌1905年、ノルウェーから採取した岩石が、5億年の古さをもっていると発表した。

しかし、ヘリウムは、岩石の割れ目から逃げ出した可能性があり、ヘリウムがどれだけ逃げたか分からない限り、岩石のできた正確な年代は分からないという指摘を受けた。

◇ヘリウムに代わる方法はないものか。

この問題は、ラザフォードの共同研究者だったボルトウッドによって、突破口が開かれた。

彼は、ウランの崩壊によって生じる最終産物は、鉛であることを見つけた。

鉛が最終産物ならば、古い岩石ほど、含まれる鉛の量が増えるはずなので、岩石のできた年代を知るには、それに含まれるウランと鉛の比を測ればよいのではないのか。

◇ボルトウッドは、この方法を26個の岩石資料に適用し、1907年には、一番に新しいもので、3億4000万年、一番に古いもので16億4000年という年代を発表した。

放射能の発見から10年余りで、地球の年齢は10倍以上も古くなったのである。

◇しかし、この方法も正確さに欠けていることが分かった。

自然界に存在する鉛には、鉛204、鉛206、鉛207、鉛208の4つの同位体が含まれている。206はウラン238から、207はウラン235から、208はトリウム232から、それぞれできる。

204は増えも減りもしない安定な元素。

岩石の年齢を正確に知るには、こうした同位体ごとに、分けて測らなければならない。

1930年代になって、ごくわずかの同位体の量を正確に測ることができる、質量分析計の開発が進んだので、この問題は解決した。

◇1950年までには、ウラン—鉛法に加えて、ルビジウム—ストロンチウム法やカリウム—アルゴン法などが開発され、岩石の年代を測る、さまざまな時計が誕生した。

このように、放射性崩壊を利用して年代を測る方法は、放射年代測定法と呼ばれ、1960年代までに、その手法が確立された。

◇こうした研究の推進力になったのは、地質学者のホームズである。

彼は化石の年代を決めるのに、初めて放射年代測定法を使い、1911年には、地質時代に絶対年代を入れるのに成功した。

現在使われている地質年代年表は、その後、精密になった、放射年代測定法を使って決められたものである。

【10】 地球の年齢は45億年

◇1960年頃までに測定された、岩石のうち、最古のものは35億年前のものだったが、これをもって、地球の年齢とすることはできないだろう。

岩石の年齢は、その岩石が溶融状態から固化した時点から数えているが、誕生まもない地球では、表面がドロドロに溶けていた時代があったと考えられるので、地球の年齢という場合には、その時期も勘定に入れたいところだ。

◇地球の年齢を知るもっと良い方法はないものか。

1950年代になって、何人かの科学者が方鉛鉱という鉛の鉱物に注目した。

方鉛鉱は、ウランをまったく含まないので、方鉛鉱に含まれる鉛206、207は、その方鉛鉱ができた、その時代から増えていないはずである。

したがって、いろいろな時代にできた、方鉛鉱を集めて、その鉛206、207と、安定な鉛204の比を測ってやれば、地球の年齢に迫れる可能性がある。

その場合に、やっかいなのは、地球ができたときに、既にあった鉛206、207の量が分からないことである。

◇この問題を、見事に解決したのは、パターソンだった。

彼は、隕石の一種の隕鉄に目をつけた。

隕鉄のトライライトと呼ばれる、鉄と硫黄の化合物の中には、ごくわずかの鉛が含まれていて、都合のよいことに、トライライトは、方鉛鉱と同じように、ウランをほとんど含んでいない。

彼は、5万年ほど前にアリゾナに落下した、大隕石孔の近くにあった隕鉄をとってきて、鉛の同位体比を測定した。

隕石は、太陽系形成のごく初期に形成された、微惑星が壊れてできたものだと考えられている。

その微惑星が集まってできたのが、地球などの惑星である。

だから、パターソンが測定した、トライライトの鉛の同位体比は、地球ができた当時とほとんど同じ同位体比を表していると考えられる。

こうした前提のもとに、パターソンは1953年に、地球の年齢は45.5億年であると発表した。

◇1956年には、ルビジウム—ストロンチウム法を使って、隕石そのものができた年代が、別の研究者によって測られ、ほとんどの隕石が、やはり45.5億年の値をもつことが確かめられた。

◇今、45.5億年といわれている地球の年齢は、このように、実は、隕石ができたときの年齢だ。

現在の太陽系の形成理論によると、微惑星が衝突合体して、原始惑星になり、それから地球が現在に近い大きさになるまでには、さらに数千万年の時間がかかったと考えられている。

■地震の理解はどのように進んだか■

【11】 地震計の発明とともに近代的な地震学が誕生

◇19世紀の末、地震の揺れを連続的に記録できる、地震計の発明とともに、近代的な地震学が誕生した。

地震とは、地下で起きる断層運動である、という現在の地震観が確立したのは、1960年代になってからだった。

しかし、それ以前にも、地震という不思議な自然現象を説明しようとする、さまざまな企てがあった。

【12】 多様な現象の研究

◇地震の原因については、さまざまな説が飛び交い、容易に決着のつきそうもない状況がしばらく続いた。

代わって台頭してきたのは、地震の振動はどのように伝わるのか、伝わる速さはどれくらいなのか、地震が起きた場所をつきとめる方法はないのかなど、さまざまな特徴をもつ、地震現象を明らかにしようという研究だった。

◇「近代地震学の父」と呼ばれることもあるマイケルは、1755年12月に起こった、ヨーロッパ全土の大地震の際の、リスボン津波が各地に到達した時間の差から、津波の速さや津波の波源の位置を推定しようと試みた。

彼は、津波の速さは秒速500m、波源の位置はポルトガル海岸から西へ50~70kmと計算した。マイケルの計算は、今から見ると、不正確なものだが、この種の試みでは初めてのものだった。

◇1828年にオランダで地震があった。

エーゲンは、この地震で、どの場所が強く揺れたかを、6段階で示す震度分布図を作り、震源地は震度が最も大きかった場所の中心になると推定した。

n試みを幅広く展開したのは、マレットだった。

マレットは、移1857年に南イタリアのナポリ近くで起きた地震を、約2ヶ月にわたって現地調査し、900頁近い報告書を、1862年に出版した。

この中で、彼は地震の被害程度に応じて、震度を4段階に分け、これをもとに震度分布図を作った。

マレットは、地面に掘った穴で火薬を爆発させて、人工地震を起こし、地震動の伝わる速さを測定しようとした。

また、彼は旧世界を中心に、それまでに起きた地震6831個を集めて、地震カタログを作り、これをもとに、世界の地震の分布図を初めて作ったことでも知られる。

◇地震動について、初めて正しい解釈を与えたのは、イギリスのホプキンスである。

1847年、ホプキンスは、弾性理論を地震に応用した、論文を発表した。

彼はその中で、地球は弾性体とみなしてもよく、その中を伝わる波には、縦波と横波の2種類があり、縦波の速度は、横波のそれよりも大きいので、最初に到来する地震動は、縦波であると指摘した。

さらに、最初に縦波が到着してから、横波が到着するまでの時間を、数点で観測できれば、最初に始まった振動の位置（震源の位置）が決定できると主張した。

これは現在も使われている震源決定法の原理になっている。

◇しかし、ホプキンスの理論的な成果も、しばらくは役に立たなかった。

地震動を記録できる、地震計がなかったからだ。

地震動の大きさを知るために、振り子が使えることは、18世紀から知られていたが、それを記録する方法については、あまり進歩がなかったようだ。

1839年には、英国学術協会に、地震動を記録するための装置を開発する、委員会が作られて、揺れを感じる感震器が何台か試作された。

◇観測に使われた最初の感震器は、1856年に、イタリア・ベズビオ火山の観測所に設置されたもので、発明者の名をとって、パルミエリ感震器（または地震計）と呼ばれている。

地震の水平方向の揺れは、水銀を満たしたU字管に鉄の浮きを浮かべ、その浮きの動きで検出し、上下方向の揺れは、ばねで支えられた錘の動きで検出した。

地震動の方向や強さ、継続時間は記録できたが、まだ波の形を、連続的に記録することはできなかった。

日本でも、1874年に輸入され、観測に使われた。

【13】 近代的な地震観測とその成果

◇地震動を連続的に記録することができる、最初の地震計を作ったのは、地震国の日本にやってきたお雇い外国人教師のユーイングだった。

来日2年目の1880年に、振り子を水平に近い位置に置けば、振り子の周期を、長くできることに着目して、水平振り子を応用した、初めての地震計を製作して、記録をとるのに成功した。

ユーイングの地震計は、お雇い外国人教師のミルンやグレーも加わって、何度かの改良が施され、上下動を観測できる地震計も付け加えた、グレー・ミルン・ユーイング地震計に発展した。

この地震計は1885年から順次、東京気象台など日本各地の測候所に据え付けられ、世界最初の地震観測網が誕生した。

◇その後、地震計は、さまざまな人によって改良が加えられ、現在では、さまざまな周期帯にわたって、大きな振幅から小さな振幅まで記録できる、高性能の電磁式地震計が使われている。

◇ミルンは、1895年にイギリスに帰国すると、英国学術協会に働きかけて、数年のうちに、国内10カ所と海外30カ所に、自分の開発した地震計を備えた、観測網を作るのに成功した。

各地で観測されたデータを、ワイト島に構えた研究所に集めて、偏りのない世界の地震分布図を初めて作った。

これによって、地震がよく起きる場所は、きわめて限られていることが見えてきた。

◇地震計のもう一つの成果は、地球の内部の様子が、分かってきたことである。

1889年4月17日、ドイツのポツダムに置かれた“地震計”は、今までに見たこともないような大きな揺れを記録した。

観測の責任者だったパシュビッツは、その2ヶ月後に、『ネイチャー』誌で、4月17日に東京付近で、地震があったことを知った。

この2つの地震が、時間的に前後することから、彼は、ポツダムの揺れは、日本での地震が約1時間かかってドイツに伝わってきたものだ、とする報告を『ネイチャー』誌に発表した。

◇当時はまだ、地球の内部が、固体なのか液体なのかについて、論争が続いていた。

地震の波が、地球の中を通過して、遠くまで伝わるとしたら、これを手がかりに、地球の内部の状態が分かるかもしれない、という考えがヨーロッパの学者たちを刺激した。

◇これが、地球の核の発見につながった。

その先鞭をつけたのは、オルダムだった。

彼は1906年、地球の反対側で起きた地震では、横波が10分以上も遅れて到着するのに気づき、これは、深さが4000km付近に中心核があって、この核の中では、横波の速度が遅くなるためだ、との論文を発表した。

◇地震波の伝わり方を、さらに詳しく分析したグーテンベルグは、1914年、核までの深さは2900kmで、横波が伝わらないことから、核は液体だと発表した。

◇1936年には、デンマークの女性地震学者、レーマンによって、核の内部には半径1500kmの固体層（内核）が存在することが、明らかにされた。

地震波の解析によって、内核で反射したとしか考えられない、地震波が見つかったのだった。

◇これより先、バルカン半島で起きた地震を調べていた、モホロビッチは1909年、地表から深さ50kmに、地震波の伝わる速度が、急激に速くなる境界面があるのを見つけた。

これはその後、モホロビッチ不連続面（あるいはモホ面）と呼ばれ、地殻とマンツルの境界であると考えられている。

◇このようにして、地球は表面から数十kmが地殻、その下の深さ2900kmまでがマンツル、さ

らに深さ 1200km までが鉄を主成分とする液体状の外核、そして中心部は固体上の内核からなっていることが分かった。

◇日本人の発見では、1920 年代から 30 年代にかけて発表された、和達清夫の深発地震面が有名である。

和達は、日本付近で起きる、深い地震の震源を詳しく調べて、東から西に傾斜するような面の上に、深発地震が起きていることを見つけた。

この面は、今では、日本海溝付近から沈み込む、プレートの上部を表していると解釈されている。

◇このように、地震波を使って、地球の内部や地下の構造を調べる方法は、その後も発展し、地下資源の探査にはなくてはならないものになった。

1980 年代に入ってから、地震波トモグラフィーという、新しい研究分野も生まれた。

X線や超音波などを当てて、人体の内部を画像化するのに使われる、トモグラフィーなどと同じ手法である。

地震波トモグラフィーによって、深くまで沈み込んだプレートや、マンツルの対流と考えられるものも、描けるようになってきた。

【14】 断層運動原因説の確立

◇1891 年に起きた濃尾地震では、長さ約 80km にわたって、根尾谷断層が出現した。

断層を境に、最大で水平に約 8m、垂直に約 6m も、地面がずれ動いた。

現地調査した小藤文次郎は、断層の写真付きの論文を、英文で発表し、地震の原因は、この断層が動いたものであると主張した。

◇1906 年に、米国・サンフランシスコなどを襲った地震では、サンアンドレアス断層に沿って、長さ約 400km、最大で 6m にも及ぶ、水平ずれが見つかった。

レイドは、この地震の約 50 年前と、約 20 年前の、2 回にわたって行なわれていた、三角測量に注目した。

それによると、断層から遠く離れたところでは、断層の西側が、すでに地震の前に、3m 以上もずれていたのだ。

このデータを根拠に、レイドは、断層の両側の地殻には、断層に平行に反対方向の力が働いており、この長年のひずみが、ある限界に達した結果、地殻が自らの弾性によって、断層を境に、一挙に動いたのが、今回の地震であると主張した。

弾性反発説と呼ばれている。

◇しかし、弾性反発説には、疑問もあった。

どんな地震でも、断層が動いた証拠が見つかるわけではない。

中規模の地震や、震央が海域にあるような地震では、断層は地表に姿を現さないのが普通である。

断層は、地震が起きた結果、たまたま地表に現れたのかもしれない。

それに、地震は深い所でも起こるが、深い所では、温度が高いので、岩石も柔らかくなり、弾性も失われているはずである。

そんな所でも、弾性反発説が適用できるのだろうか。

断層を境に反対方向に働く水平力の正体も不明だ。

◇こうした疑問があったので、弾性反発説は、すぐに受け入れられたわけではないが、結局、ある幅と長さをもった断層面（破壊面）を境にして、地殻が相互にずれ動くのが地震であるという、現在の地震観が確立したのは、1960 年代に入ってからのことであった。

◇断層をずれ動かす力は、レイドが言ったような、断層に平行に反対方向に働く 2 つの力ではなく、

震源に向かって、両側から圧縮する力と、それと垂直方向に、引っ張る力の2組の力の組み合わせであることが、はっきりした。
理論的な計算の結果と、地震波の解析の結果が一致したのだ。
これには、本多弘吉ら日本人の研究が貢献した。
水平力の正体が、プレート運動によるものだと、理解できるようになったことも、こうした地震観の確立の大きな支えになった。

◇核爆発によるものなど、特殊な地震を除いては、浅い所で起こる、ほとんどの地震については、このような断層運動で説明がつく。
火山性地震も、上昇してきたマグマによって、岩にひずみが加わった結果、やはり、断層運動が起きると、考えられている。

◇しかし、深さ数百 km で起きる地震の仕組みについては、断層運動で説明するには、疑問もある。岩石を構成する、鉱物の相転移によって、起こるのではないか、という説が有力だが、まだ結論は出ていない。

第 I 章 近代以前（～17 世紀）

■ 地 学 ■

【15】 アグリコラが地球論の原型を作る

◇地学史上のコペルニクスとも呼ばれる、アグリコラ（1494～1555、本来ゲオルク・バウアーという名のドイツ人。アグリコラは農夫という意味のバウアーを、ラテン語訳したもの）は、ザクセン生まれの医師で、イタリア留学後、鉱山に魅せられてボヘミア地方で活躍した人物である。
彼の時代まで、地下の諸現象は、どのような形で、論じられていたのだろうか。

◇初期近代の思想家たちは、今日のわれわれが想像するより、はるかに多くのものを、古代や中世の作家から引き継いでいた。
アグリコラが参照している著作には、アリストテレスの気象論や自然学、プトレマイオスの地理学、ストラボン（ローマのギリシャ人地理学者）の地理書、プリニウス（ヴェスヴィオ火山の噴火を観察しようとして死んだローマの自然史家）の自然誌、テオフラストス（プラトンのアカデメイアで学んだ自然誌家）の鉱物学、タキトゥス（ローマの歴史家）の年代記、セネカの自然研究など、多くの古典がある。
これらの中には、プリニウスの著作のように、中世を通して読み継がれたものもあったが、大多数は、ルネサンス期に再発見され、印刷術の発達に助けられて、広く流通するようになったものだ。

◇特に、重要と考えられるのが、中世のキリスト教神学と結びついて、定着していたアリストテレスの体系である。
そこでは、月より下にある世界の事物をあつかう、気象論が、地上や地下における諸現象を説明するのに、大きな役割を果たしていた。

◇しかし、ルネサンス期の社会的変動は、それまでの知識体系を、批判にさらしつつあった。

たとえば、大航海時代の経験は、古代人の知らなかった、グローバル化された地球の実際を暴き出し、鉱山開発の進展は、地下の諸現象の豊富な実態を明らかにした。地下に存在する大きな湖や、地震を引き起こす風の通路といった、古代からの観念が、実際に照らして、検討されるようになってきていた。

◇そのような、時代の要請を受け止め、鉱山開発の現場を表現するために、アグリコラは非常に都合のよい位置にいた。

『デ・レ・メタリカ』（1556。12巻の有名な鉱山技術書で、その図版の情報量は、豊かである。英訳をアメリカ大統領だったフーバーが、夫人と行なったことで知られる）では、イラストをふんだんに使って、鉱山内部の状況や行程を説明している。

また、地球のあり方を、全体として論じた「地下物の生成と原因について」（1546。邦訳が進行中）という貴重な論文があり、その中で、アグリコラは、地上や地下で見られる現象を、水と火の作用から説明するとともに、地球を構成する物質が、どのようにできたのかを解説しようとしている。

◇アグリコラは、古代人が書いたものだけでなく、坑夫たちの証言などの、経験的に確かだろうと思われる、事実を考慮に入れて、議論を組み立てている。

例として、地球における、循環の問題がある。

アグリコラは、まず、地下から湧き出る、泉や井戸の水は、どこからやってくるのか、という問題を立てる。

古代人たちは、2通りの考え方をしていた。

その1は、海水が、遠く隔たった大地の空洞にある、入り口から、鉱脈や割れ目を伝わって上昇し、その間に、塩分が取り去られて、淡水の地下水となったり、地表に出ると泉を形づくったりする。

地表の水は川に集まり、また、海に戻るというものだ。

この考え方に対し、アグリコラは、水が重力に逆らって、上昇することは、あり得ないのではないかと疑問を呈する。

その2は、もともと、地下には、淡水の大きな湖があって、そこから、水が流出してくるというものだ。

この考え方に対しても、アグリコラは、鉱山での経験上から、あり得ないとする。

◇アグリコラが着目したのは、蒸留の方法から、明らかな、水が湿気から凝結する、という事実である。

これを、地上の現象にあてはめれば、海や川や土から、蒸発した湿気は、冷やされると、水滴になって降下し、地中の割れ目を流れ、地表にしみ出すと、湧き水となり、湧き水から小川が、さらに、小川が集まって大河になり、海に流れ込む。

こうして、循環が完結することになる。

◇アグリコラが、自然物が、創造のとき以来、変化してきていることを、確信していたという点も注意しておきたい。

彼は、海などの、今日では、くぼんでいる土地が、すべて、昔から存在していたわけではない、と述べている。

彼によれば、丘陵や山地は、水力と風力の2つの力によって、生成され、その一方、水力に風力、加えて、地球の内部の火力が、丘や山を破壊する。

そして、アグリコラは、火山噴火や洪水などの、有史以来の記録ばかりでなく、有史以前における、地表の変動という出来事をも、想定している。

【16】 太陽と月の運動

◇人間が、狩猟採集生活を、行なっていた時代から、四季の変化は、多くの地域で、関心を集めていた。

季節によって、獲物の種類は異なり、また採集できる、木の実などの種類も、変化する。予め、狩猟や採集の準備を、滞りなく行なうためには、現在が、冬に向かっているのか、どれくらい待てば、次の獲物や木の実が現れるのか、を知ることが重要だった。

◇こうした情報は、日の出直前や、日没直後の、空の星の変化、太陽の、日の出の地点の変化を、継続して、記録することで得られる。

また、地面に立てた、棒の影の長さによっても、同じ情報が得られる。

1日のうち、影が最も短くなったときの、長さを記録していけば、その長さは、次第に大きくなるか、小さくなるか、していくが、これにより、現在が冬に向かっているのか、夏に向かっているのか、が見てとれる。

◇こうした情報が、蓄積されれば、季節が、ある周期で、循環することが分かり、年という時間の単位が、生まれることになる。

1年という単位を、昼夜の循環の周期である、1日という単位で、表現すること（1年＝365・24日）も、可能になる。

◇時間の単位が、年と日のみでは、不便だろうというのは、容易に想像がつくが、地球からは、もう一つ、時間の単位を提供してくれる、便利な天文現象が観測できる。

それは、月の満ち欠けである。

月の満ち欠けの周期は、29.53日だから、1年はこの周期の、整数倍にはならないが、月の満ち欠けが、12回から13回くり返せば、1年が経ったことは、分かる。

◇年・月・日の組み合わせは、このようにして、太陽と月の運動をもとに、誕生した。古くから、天文現象は、人類の生活と密接な結びつきを、もっていた。

【17】 恒星と惑星の運動

◇夜の空を埋めつくす星は、太陽や月とは、また異なった種類の運動をする。

ほとんどの星（恒星）は、年間を通して、相互の位置関係を変えず、地球から、夜に見える星は、季節に応じて、周期的に入れ替わる。

星座という発想が、生まれたのは、そのためだ。

◇秩序立った、恒星の世界と比較すると、太陽や月の運動は、変則的に見える。

これらのほかにも、水星・金星・火星・木星・土星という、5つの星が、恒星とは異なる、変則的な運動をしていることに気づく。

古代ギリシャでは、恒星の間をさまよう、これら7つの天体を、惑星と呼んでいた。

天王星・海王星・冥王星は、近代に入ってから、発見されたもので、古代には、その存在が知られていなかった。

惑星の変則的な運動を、説明するためには、恒星の運動を説明するものとは、異なる工夫が必要となる。

◇古代から観測されてきた、惑星（以下では、太陽・月は惑星に含めないことにする）の奇妙な動きとは、次のようなものだった。

◇地球からは、太陽・月・惑星が、恒星の間を、西から東に、移動していくように見える（順行）が、この運動は、一定の時間に、一定の角度を進む、一様な運動にはならない。また、惑星は、太陽から一定の幅（南北8度）の範囲を、動いているが、静止した（留）のち、東から西へ移動し（逆行）、再び静止して、順行に戻ることもある。

◇さらに、惑星には、太陽から、一定の角度以上は、離れることがない、水星・金星と、それ以外のものがあり、また、金星や火星のように、地球との距離の変化が、目でも確認できる、明るさの変化となって、表れるものもある。

◇現在では、地球を含む惑星が、太陽を焦点の一つとする、楕円軌道を進んでいることが、理解されており、それに基づいて、以上のような、惑星の運動が、矛盾なく説明されている。

たとえば、順行が、一様な運動にならないのは、地球の公転運動が、等速円運動ではないことの反映である、と理解されているし、水星や金星が、太陽から、一定の角度（最大離角）以上離れないことは、これらの軌道が、地球のそれよりも、太陽に近い（内惑星である）ことから、説明される。

◇近代的な地動説の現れる以前の人々は、以上のような、惑星の視運動を、地球が、運動しているという前提ではなく、空の星々は、地球を中心とした、運動を行なうという説（天動説）に基づいて、説明していた。

そのようなことが、どうして、可能だったのだろうか。

また、天動説が主流であった時代に、近代的な地動説は、どのようにして誕生し、その後、受け入れられていったのだろうか。

【18】 同心天球説

◇惑星の運動を、説明する工夫としては、まず、同心円説があった。

これは、古代ギリシャのエウドクソス（紀元前408年頃～紀元前355年頃）に由来するもので、一様円運動（等速円運動のこと）の組み合わせによって、惑星運動を説明するには、どうすればよいかという、プラトンの問いに答えて、考え出された。

天球とは、地球の中心と一致する、中心をもつ球であり、同心天球説は、天体の運動を、（1つまたは複数の）天球の回転運動（の組み合わせ）によって、説明しようとするものである。

◇まず、1日のうちに観測できる、恒星の出没（日周運動）は、恒星が、天の北極と南極を結ぶ線を軸として回転する、天球に張りついていると考えれば、1つの天球で表すことができる。

◇太陽の日周運動も、同様に、1つの天球で表現できるが、このほかに、天の赤道から24度傾いた、黄道上の運動を表現するための、天球と、さらに、その運動に遅速を生じさせるための、天球が必要になる。

◇月の場合にも、3つの天球が想定された。

◇惑星の場合には、天球は、4つ考えられた。

太陽の場合と同様の、3つの天球と、黄道から離れる運動を、表現するための、天球1つである。

◇恒星に対し1つ、5つの惑星に対して、それぞれ4つ、太陽と月に対して、それぞれ3つだから、合計27個の天球によって、天体の運動が、説明されることになる。

◇同心天球説は、逆行を含む惑星の運動を、一様円運動の組み合わせのみで、説明する可能性をもつ、理論ではあった。

しかし、その原理からいって、同心天球説では、古代でも観測できた、地球と惑星の距離の変化（金星や火星の明るさの変化）を、説明することができない。

このため、同心天球説は、次第に、天文学者たちからは、支持されなくなっていった。

ただし、後世の思想に大きな影響を及ぼした、アリストテレスが、この説を自分の自然学の体系の中に、取り入れたために、天文学者の外の世界では、長く影響力を保ち続けた。

【19】 導円・周転円・エカントの理論

◇同心天球説に代わって、古代の天文学者たちの支持を集めたのは、導円・周転円・エカントからなる理論だった。

◇導円・周転円・エカントという着想の端緒は、ギリシャの数学者アポロニオス（紀元前262年頃～紀元前190年頃）によって開かれた。

アポロニオスは、惑星が、地球の中心以外に中心をもつ円（離心円）の上を、運動すると想定し、これによって、惑星と地球の距離の変化と、地球から見た、惑星の運動速度の変化を説明しようと試みた。

また、逆行の説明のために、離心円の中心が、地球の周りを回転するという、工夫も導入したが、これによって表される運動は、惑星の乗った円（周転円）の中心が、地球を中心とする円（導円）の上を、運動することもできた。

この導円・周転円の組み合わせは、離心円よりも扱いやすいので、その後の天文学者の支持を集めた。

◇アポロニオスの後、ヒッパルコス（紀元前190年頃～紀元前120年頃）は、離心円の理論で、太陽の運動を説明し、月の運動の説明も試みました。

ただし、ヒッパルコスは、月や惑星の理論を完成させずに、観測結果の蓄積に努めた。

◇導円・周転円・エカントの理論を、完成させたのは、プトレマイオス（100年頃～170年頃）である。

◇この理論では、惑星は、周転円という回転する円の上であり、周転円の中心は、黄道面上の地球を中心とする円（導円という）の上を運動している。

惑星は、ループをもった曲線を描いて、運動するが、プトレマイオスは、これによって、順行・留・逆行を説明することに成功した。

◇プトレマイオス理論では、たとえば外惑星（地球の軌道より外側に軌道をもつ惑星）の場合には、周転円が、内惑星（地球の軌道より内側に軌道をもつ惑星）の場合には、導円が、地球の公転運動に対応しているように、地動説の構成要素の、天動説版とでもいえるべきものを、理論の中に見てとることができる。

つまり、地動説で説明できる、観測結果は、プトレマイオス説では、すべて説明できることになる。

◇プトレマイオスは、また、理論の精度を上げるために、導円の中心を、地球からわずかにずらし、さらに、周転円の中心の回転中心（そこを中心に、周転円の中心が、等角速度で運動している点、そこから見れば、周転円の中心が、常に一定の角速度で運動しているように見える点）を、導円（周転円の中心が描く軌道）の中心をはさんで、地球と等距離にある点に設けた。

この、周転円の中心の回転中心が、エカント（虚中心）である。

◇こうした工夫は、のちの地動説から見れば、楕円軌道や面積速度一定の法則を、近似的に表現しており、導円・周転円説の精度は、きわめて高いものとなった。

しかし、その一方で、プトレマイオス理論は、古代において理想とされた、一様円運動を放棄してしまった理論でもあった。

【20】 導円・周転円・エカント説に基づく宇宙体系

◇プトレマイオスの時代には、地球と惑星の距離を知るための、視差（同一対象に対する2地点からの視差と、2地点の距離から、各地点から、対象までの距離を、求めることができる）が観測できなかつたため、太陽系の構造、つまり、太陽・惑星・地球の位置関係は、それらの間の、距離以外の情報を用いて、組み立てなければならなかつた。

◇古代から、宇宙の中心から遠ければ遠いほど、惑星の回転周期は長くなる、という考えなどに基づいて、月・水星・金星・太陽・火星・木星・土星・恒星は、この順番で配置されているとする説があり、プトレマイオスも、これを踏襲した。

◇プトレマイオス以降、彼の説には、次のような原理を導入して、宇宙体系を考察する試みが行われた。

◇その1は、惑星理論の中に現れる、地球（の中心）と惑星の距離（地心距離）の最大値と最小値の比は、実際の最大・最小距離の比に等しいというものである。

近代以前の天文理論は、宇宙（太陽系）の構造を、明らかにするものではなく、天体の位置の変化を説明することを、主要な目的としていた。

この理論を手がかりにして、宇宙の姿に関する知識を得るためには、理論で用いた枠組みが、実際の宇宙の姿を表現していると、仮定することが、必要であった。

◇その2は、ある惑星の最大地心距離は、そのすぐ上に位置する、惑星の最小地心距離に等しいというものである。

最下位にある月と、地球の距離は、月の視差から求められるので、それをもとにすれば、すべての惑星（太陽を含む）の地心距離が得られる。

これは、惑星の天球の間に、無駄な空間の存在することを、許さないという、アリストテレス以来の考えの現れのように思われる。

◇しかし、プトレマイオス理論では、このように、惑星運動に関係する、観測データとは無縁の前提がなければ、惑星間の位置関係は確定できなかつた。

【21】 コペルニクスの地動説

◇プトレマイオスの理論は、その後、他のギリシャ文化の遺産とともに、アラビア世界に受け継がれ、次いで、中世ヨーロッパに伝えられた。
ルネサンス期には、天文書の研究も盛んになり、プトレマイオス説の復興も進んだ。

◇ポーランドのコペルニクス（1473～1543）は、導円・周転円・エカントからなる説が、惑星運動をよく説明する点を、高く評価していたが、これが、一様円運動に基づいていない点に不満を抱いていた。
一方、一様円運動に基づく、同心天球説では、惑星の地心距離の変化を、説明できないので、コペルニクスは、独自に研究を進め、いくつもの一様円運動の組み合わせによって、惑星運動を説明する理論を作ろうとしていた。

◇コペルニクスは、初め、惑星運動の逆行を、周転円ではなく、離心円によって説明しようとした。
この方針に従って、理論を組み立てる過程で、コペルニクスは、本来惑星ごとに位置の異なる離心円の中心を一点にまとめ、それを、太陽の平均的な位置（平均太陽）であるとした。
こうして、惑星天球が、平均太陽を中心に回転するという、発想が誕生した。
しかし、この時点では、太陽が、地球を中心に回転するのか、地球が、太陽を中心に回転するのかは、決定できない。

◇コペルニクスが、地球が、太陽の周りを回転している、と考えるようになったのは、火星の天球と太陽の天球の關係に注意を払ったためである、と考えられる。
地球の周りを、太陽が回転しているとすると、地球を中心とする、太陽の天球と、太陽を中心とする、火星の天球が交差してしまうが、天球のこのような交差は、天球を物理的な実在とみなす、古代以来の伝統とは相容れなかったのだ。
逆に、太陽を中心とする天球の上に、地球があり、その外側に、太陽を中心とする、さらに大きな火星の天球がある、とする図式は、小さな天球が、大きな天球の内側に含まれるという、伝統的な発想を継承するものであった。

◇いったん、地球の公転運動を想定してしまえば、惑星の運動の説明は、天動説よりも、単純かつ統一的に行うことができた。
惑星周期〔惑星現象の起こる周期のことで、たとえば、ある衝（合）から次の衝（合）までの時間を指し、惑星ごとに異なる〕から、公転周期を求めたり、天文観測のデータから、太陽・地球・惑星の位置關係を確定したりすることは、地動説によって、初めて可能になった。
太陽系の構造に関する議論は、コペルニクス以前にもあったが、すでに見た通り、それは、根拠の薄い前提に基づくものであった。
天動説の枠組みの中では、原理的に、太陽系の構造に関する、信頼性の高い手がかりを得ることはできなかった。

◇コペルニクスは、こうして、地動説に到達したが、楕円軌道上の非等速運動である、惑星の運動を正確に説明するためには、さらに、さまざまな工夫が必要だった。
コペルニクスは、離心的導円の上に、周転円があるという、図式を採用したが、この前提のもとに、プトレマイオス説と同様の正確さをもつ理論を作るためには、たとえば、地球の公転運動に対して、3つの一様円運動が必要であった。
コペルニクスの図式では、地球の軌道の中心は、真の太陽の位置にはなく、そこからずれた点を中心として回転していた。

【22】 コペルニクス説の問題点

◇コペルニクスの理論は、プトレマイオス理論よりも単純であったわけではなく、また、惑星運動に関してより正確であったわけでもなかった。エカントはなく、一様円運動で惑星運動が説明されているが、そのためには、多くの一様運動と、それに対応する天球を導入する必要があった。また、地動説をとれば、恒星の年周視差が観測されるはずだが、これは当時の肉眼による観測では不可能だった。コペルニクスは、年周視差が検出できないほど、遠くに恒星が存在すると考えたが、恒星天球が、それほど大きなものであるとすると、土星天球と恒星天球の間には、何もない膨大な空間が存在することになって、当時の宇宙観と相反する帰結を生じた。さらに、当時は望遠鏡がなく、天体を肉眼で観測したので、恒星の像がぼやけて、視直径が実際よりも大きく見えたこともあって、恒星天球が、コペルニクスの主張のように大きいとすると、恒星もまた、受け入れがたいほど巨大なものだということになってしまう。

◇ 聖書の記述との不整合も、問題だった。

聖書のみを権威と認める、プロテスタント側からの反発は強く、コペルニクスは、地動説の発表の時期について気を配った。

◇地球が動くという主張に対しては、古くから、日常経験に基づいて、さまざまな反駁が存在した。

コペルニクスは、地球の回転運動は、強制的な運動ではなくて、自然な運動であり、この自然な運動では、地球が分散したり、地上の物体が振り飛ばされたりすることは、ないと主張し、空中の物体も、大地と類縁関係にあるため、地球とともに運動を行うと考えた。

◇多くの人が、これらで説得されたわけではなかったが、コペルニクスの方も、地動説を十分に根拠づけるためには、新たな自然学が必要なことに気づいて、独自に考察を重ねた。

【23】 コペルニクス理論の読み替え

◇コペルニクスの地動説に対して、天文学者たちの多くは、これが、単なる仮説であるとする態度をとった。

コペルニクスの『天球の回転について』の序文を書いたオジアンダー（1489～1552）も同様の見解を示していた。

コペルニクスの天文学的な技巧が、優れていることは認められたが、彼の説は、当時の自然学とは両立しておらず、また、教会や聖書の教えとも反していたために、これが、実際の宇宙の姿を表していると考える者は少なかった。

そして、コペルニクス説は、天文学者の間では、単に、便利な計算法の一つとして、受けとめられるようになっていった。

◇恒星の視差の問題や、地動説の自然学上の困難を避けるために、コペルニクス理論と同等のものを、地球を中心とする宇宙体系として、読み替えようとする人々もいた。

パウル・ヴィテッヒ（1546年頃～1586年頃）は、太陽の周りを水星と金星が回転し、その太陽が、静止する地球の周りを回転していると考え、火星・木星・土星は太陽の外側で、地球を中心として回転していると考えた。

このヴィテッヒの理論にも、天球の交差を避けるための工夫が見てとれる。

◇コペルニクス説を、地球中心説に置き換えた理論のうち、最も強い影響力をもったのは、ティコ・ブラーエ（1546～1601）のものだった。

ティコは、コペンハーゲンの近くの小島に観測所を設け、大きな観測機器を用いて、20 数年にわたって天文観測を行い、機器に由来する誤差なども考慮に入れた、精度の高い観測結果を残した。

新星の発見や彗星の観測により、彼は、天界はエーテルではなく、火でできており、生成や消滅もあると考えるようになった。

また、天球は、存在しないと考えていた。

◇プトレマイオス説と、コペルニクス説の、どちらを選択するのかを判断する際に、ティコは、火星の視差を問題にしたようである。

地球から見ると、プトレマイオス説では、火星は常に太陽よりも遠く、コペルニクス説では、火星は衝〔太陽・地球・外惑星が一直線上に並び配置（2種類ある）のうち、外惑星が、地球から見て、太陽の反対側にくるものを指す〕の位置付近では、太陽よりも近くにくる。

したがって、衝のときの火星の視差と、太陽の視差を比べれば、両説の優劣を判定することができる。

実際には、ティコの能力をもってしても、この比較が可能になるような精度の観測は、できなかったことと思われるが、ティコは、火星が太陽よりも近くにあったと述べているので、これをもって、コペルニクス説に傾いたようだ。

◇一方で、ティコは、天球の存在を認めていなかったため、コペルニクスのように、天球の交差を嫌って、地動説へと至ることはなかった。

地動説に代わって、ティコが正しいと考えたのは、地球以外の惑星が、太陽を中心とした回転運動を行い、太陽は、それらの惑星を連れて、地球の周りを回転するという体系だった。

この説ならば、恒星の年周視差の問題など、地球の運動に付随する、多くの問題を解決する必要がない。

当時、この説は人気があり、発表の先取権や発展への貢献度に関して、論争が生ずるほどだった。

【24】 ケプラーの理論

◇ コペルニクス説を、現実の宇宙の姿の表現であると考えた人々もいた。

ヨハネス・ケプラー（1571～1630）は、独自の発想に基づいて、コペルニクス説を発展させて、精緻な天文理論を作り上げた。

◇ケプラーは、この説が、体系的に宇宙の構造を解き明かしている点に感動し、以後、これを深く信ずるようになった。

1596年に発表した『宇宙の神秘』では、惑星の数や、コペルニクス説で明らかになった、惑星天球の大きさや周期に対して、これらが、どうしてそのような値になるのか、という根拠を得ようとする試みを展開した。

◇この結果、ケプラーは、惑星天球と正多面体が、交互に内接するような配置で、宇宙が設計されているという考えに至った。

この理論では、土星軌道（を含む球）・正六面体・木星軌道・正四面体・火星軌道・正十二面体・地球軌道・正二十面体・金星軌道・正八面体・水星の順に、惑星が配置されており、中心に太陽が置かれた。

◇ケプラー説からは、コペルニクス説と、ほぼ相似の関係にある、太陽系の構造が得られたが、ケプラーは、両説の間に、わずかな違いがあることにこだわり、これを説明しよう

と考えて、ティコの最新の天文観測データに関心を抱くようになった。

◇ケプラーは、従来の天文学者と異なり、天体が動く原因についても議論した。

『宇宙の神秘』では、太陽は自転しながら「駆動靈魂」(anima motrix)という、運動の原動力となるものを、外部へ放射していると考えられており、これによって、惑星の回転が説明されている。

◇ティコは、1599年にデンマークから追放されたのち、ルドルフ2世の宮廷天文学者としてプラハに移っていた。

ケプラーは1600年の初めに、ティコの助手になったが、ティコの生前は、観測データへの接近は許されなかったといわれる。

1601年にティコが没すると、ケプラーは、ティコの火星観測の結果を利用できるようになり、以後1605年まで、火星軌道の問題に取り組むこととなった。

◇ケプラーは、観測データのみから、惑星の軌道と運動を明らかにしようと考え、まず、地球から見た、火星の位置のデータを用いて、地球の軌道を明らかにした。

このとき、ケプラーが用いたのは、ある衝のときから始めて、そこから、火星の公転周期の整数倍の時間が経過した時点で、地球から観測される火星の位置を手がかりに、地球の軌道の形を決めて行くというものだった。

これは、火星の公転周期ごとの観測結果を用いるので、火星と太陽の位置関係は、常に同じだが、地球の位置は少しずつ異なっていくので、ここから、地球の軌道が決定できるというものだった。

その結果、地球の軌道は、ほぼ円形であることが分かった。

◇地球の運動速度が一定でないことは、知られていたもので、ケプラーは、地球は、ほぼ円形の軌道を、太陽の近くでは速く、遠くでは遅く動いている、という結論を導くに至った。

そして、惑星を動かす力は、太陽からの距離に反比例しており、その力の変化が、惑星の速さに影響すると考えた。

さらに、ケプラーは、エカントという考え方も復活させた。

◇地球の軌道を求めたケプラーは、次いで火星の軌道の検討を始めた。

このときは、ある時点で、地球から観測された火星の位置と、そこから、火星の公転周期分だけの時間を隔てた時点での、火星の観測位置から、太陽と火星の位置が決定された。

◇こうして、彼は、まず、火星の軌道上の4点を選んで、その位置を決定し、それらの点が、すべて乗るような円軌道を決定しようとした。

そして、70の組み合わせを試みたのち、観測結果とのずれはあるものの、一応は満足のいく円軌道(代用仮説)が得られた。

◇さらに、ケプラーは、観測結果をより忠実に再現するために、代用仮説を修正したモデルを作ろうとした。

その際に、ケプラーは、①惑星の速さは太陽からの距離に反比例する、②惑星軌道の中の、ある円弧上の各点と太陽との距離の総和は、円弧に対応する扇形の面積で代用できる、という2つの誤った判断に基づいて、「面積速度一定の法則」(ケプラーの第2法則)を発見した。

ところが、面積速度一定の法則を用いて求めた火星の軌道は、先の代用仮説と一致せず、大きなところでは、経度のずれが角度にして8分もあったのだ。

◇そこで、ケプラーは、火星の軌道が円ではないと判断し、さまざまな図形を試みた後に、それは、楕円であるという結論に達した(ケプラーの第1法則)。

◇さらに、ケプラーは、1619年に発表した『世界の和声論』で、ケプラーの第3法則を明らかにした。

それは、「惑星の太陽からの平均距離（惑星の楕円軌道の長いほうの軸の半分の距離）の3乗と公転周期の2乗の比は、惑星の種類によらず一定である」という内容である。

◇以上の成果をもとにして、作成された天文表は、他の天文表よりも、30倍もの高精度で、天体の位置を予測することを可能にした。

こうして、地動説に基づく天文理論は、ケプラーの段階で一応の完成に至った。

【25】 ガリレオと地動説

◇ケプラー同様、ガリレオ（1564～1642）も、コペルニクス説は、宇宙の真の姿を表していると考えた。

ガリレオは、運動論や機械学の研究をしていたが、1609年に、オランダ人が望遠鏡を製作したことを聞いて、自分でもそれを作り、天体観測を行うようになった。

観測の結果は、1610年に『星界の報告』として出版され、ガリレオの名をヨーロッパ中に広めた。

◇パドヴァ大学にいたガリレオは、1597年にケプラーに手紙を書いているが、その手紙からは、ガリレオが、この時期すでに、コペルニクス説を信じていたことが分かる。

地動説とガリレオとのかかわりは、望遠鏡による観測によって、さらに深まっていった。

◇ガリレオは、望遠鏡で、次のことを確認した。

①月面には凹凸がある、②銀河（天の川）は無数の恒星の集まりである、③星雲は小さな星の集団である、④肉眼で見える恒星の間に、さらに多くの恒星がある、⑤木星には4つの衛星がある、⑥太陽には黒点がある、⑦金星は満ち欠けをする、⑧土星は三重星である（輪がこのように観測された）。

◇これらの発見により、地球も月も、同じような天体であること、宇宙は広大で、肉眼で見えるよりも多くの恒星が存在すること、木星が衛星を引き連れて、太陽の周りを回転するように、地球が月を引き連れて、太陽の周りを回転している可能性があること、などが理解されるようになった。

◇また、太陽の黒点の位置が移動することから、太陽の自転が発見され、地球も自転しているのではないかとする考えに、根拠の一つを与えた。

◇最も重要であったのは、金星について確認された事柄である。

金星の満ち欠けは、プトレマイオス説では、生じないが、コペルニクス説では、説明することができる。

ティコの説であれば、金星の満ち欠けを説明できるが、三日月形のときの金星が、円形のときの6倍にも見えることまでは、説明できない。

金星の観測結果は、地動説に対して、決定的な証拠を与えた。

◇ガリレオは、地動説の正しさについての確信を得ると、ローマのイエズス会にまで出かけて、コペルニクス説の普及に努めた。

このようなガリレオに対して、すでに1610年から、地球が運動することに対する伝統的な疑問や、聖書の記述を論拠にした批判が、盛んになっていたが、1615年には、ガリレオは告訴され、翌年、ローマに召還された。

そして、この年、ローマ教皇庁の検邪聖省は、地動説が異端であり、信仰上の誤りであると断ずる判決を下し、ガリレオに対しては、コペルニクス説を支持し続けるならば、重罪を科するという警告を与えた。

◇その後、ガリレオは、慎重に活動を続けていたが、教皇の交代などを契機として、徐々にコペルニクス説の復権を目指すようになった。

◇ガリレオが1632年に出版した『天文対話』では、いったん、円運動の状態に置かれた物体は、そのまま、円運動を続けるという「ガリレオの円慣性」と呼ばれる原理が主張され、惑星の等速円運動は、これによるものであると述べられている。運動状態にある物体には、運動を引き起こす何らかの要因が、常に働いていると考えるのではなく、運動が、状態として捉えられている点と、「慣性」という概念の提出されたのが、注目に値する。

◇さらに、ガリレオは、運動が、他との関係においてのみ認識され、運動を共有しているものの間では、互いの運動は感じられないという観察（運動の相対性）を根拠に、地球が動いているとしても、地上のわれわれには、それが分からず、同様に、雲や飛ぶ鳥も後方に跳ね飛ばされることはないと主張した。

◇こうして、ガリレオは、地球の運動に対する、伝統的な疑問に答えたわけである。天文理論の変革が、自然学の変革をもたらして行った理由は、ガリレオの足取りをたどることで明らかになるものといえる。

【26】 ニュートンの理論

◇ガリレオの生前から、ヨーロッパの各所に、ガリレオの努力を引き継いで、新しい自然学を築こうとした人々がいた。

◇中でも、ニュートン（1642～1727）は、自然学に関する、ほぼ十全な理論を作り上げ、それをもとに、天体運動を説明することに成功した。

◇ニュートンは、1661年にケンブリッジ大学に入学し、ここで、アリストテレスの自然学に接したが、ガリレオやデカルトの理論により強く引かれ、特に、デカルトからは、強い影響を受けた。

◇ニュートンが学士となった1665年、イギリスでは、ペストが流行し、大学は閉鎖された。この年と、その翌年という短期間のうちに、ニュートンは、運動量の保存や慣性の法則を明確に表現するに至り、これを、衝突と円運動の説明に用いるのに成功した。

◇ガリレオとは異なり、ニュートンは、円運動では、中心向きの力（向心力）が働いていることを見抜いた。後年の回想では、同じ頃、ニュートンは、月の軌道に及ぶ重力の問題も考察し、向心力の大きさを求め、これにケプラーの第3法則を適用して、惑星を軌道上に保つ力は、回転の中心からの距離の2乗に反比例することを導いたという。

◇その後、10数年間、ニュートンは、力学の問題から遠ざかってしまったが、1679年に、フック（1651～1703）との間で書簡を交わした〔フックは、惑星の運動を、接線方向の直線運動と、軌道の中心に向かう運動の合成として理解する可能性について、ニュートンの意見を求めた。〕

ニュートンは、これに対して、はかばかしい返事を与えなかったが、惑星の運動を接線方向の運動と中心向きの運動に分けて考察するという着想には刺激を受けたようである] ことを契機に、ニュートンは再び力学に取り組み、ケプラーの3法則を導くことに成功するに至った。

◇彼は、まず、1684年までの間に、中心力に従って運動する物体は、力の中心を含む平面上を運動し、その動径は、同じ時間内に同じ面積を通過することを証明した。

さらに、ニュートンは、この結果をケプラーの第2法則とくらべ、惑星は、太陽に向かう力のもとで運動を行っている結論した。

次いで、楕円軌道を描く物体に、焦点の一つから力が働いているとすると、その力は焦点からの距離の2乗に反比例しなければならないことを示した。

◇ニュートンは、結局、惑星が太陽から距離の2乗に反比例する力を受けながら、運動していると考えれば、ケプラーの3つの法則はすべて説明できることを示した。

ニュートンの発見した、この力が、今日、万有引力と呼ばれるものである。

◇ニュートンの得た成果は、『プリンキピア』（1687年）として発表されたが、これにより、天体の運動を含む多くの自然現象に、力学的な説明を与えるための基礎が、ヨーロッパの広い地域で共有されることとなった。

◇天動説から地動説への転換は、こうして、140年ほどの後に、自然学の転換をもたらすことになった。

そして、これ以降の天文学者の関心は、基礎のでき上がった力学を用いて、さらに、天体運動の記述を精緻化させることへと向かった。

第Ⅱ章 近代（18世紀～19世紀）

■地 学■

【27】 近代地質学が芽吹き始める

◇16・17世紀の「地球の理論」は、地球の形成について推測する、思弁的な議論だったが、18世紀から19世紀にかけて、実際の物を重んじる、近代的な地質学に変わっていった。

◇人々は、実際に山や谷に行き、観察したり、調査したりするようになった。

たとえば、フランスは、1730年から、地球の大きさや形を求め、国家をあげて測量事業に取り組み始める。

これには、地球が扁平なのか縦長なのかという、物理学者たちの議論も絡んでいたようだ。

ニュートンの力学理論によれば、自転による遠心力のため、地球はやや扁平になるはずなのだが、17世紀の測量では、その反対の結果が出ていた。

今回の測定では、もちろん扁平という望ましい結果に落ち着いた。

◇地層中の化石や鉱物を直接調べて、岩石や地層の分布を記入した、地質図のようなものも描くことも始まった。

近代的な地質図と呼べるものが作成されるのは、19世紀になってからだが、鉱物分布図は、18世紀から始まる。

たとえば、ゲタール（1715～1786）が、フランスの鉱物資源を調査し、鉱物分布図を書き上げたのは、18世紀後半だった。

【28】 自然史と鉱山学

◇18世紀は、組織立った科学探検も行われるようになる。

地学的な面に関して言えば、科学を目的とした大航海が行われ、世界中から奇妙な鉱物や化石が、西欧に集められた結果、裕福な人々が夢中になり、博物学的な関心が喚起された時代だった。例えば、1768～1779年のクックの航海の目的は、金星の太陽面通過を、南洋で観測するために行われたものだが、このような航海を通じて、未知の大陸から、さまざまなものが入ってきた。

◇鉱物への関心は、鉱山学校の創立へと発展した。

パリ鉱山学校は、1783年に創立された。

ドイツの鉱山学校は、主として鉱山管理者のための学校で、16世紀からの伝統のあるものだった。

鉱山学校から、近代的な地質学が芽生えた。

イギリス、フランス、ドイツなどの学者たちは、まだ私信ではあったが、意見を交換し合った。

学者たちの多くは、17世紀後半に創設された、ロンドンのロイヤル・ソサエティやパリの科学アカデミーに所属したが、実際に鉱山で採掘をしている人の意見も、多く含まれていた。

◇18世紀後半になると、地質調査を目的とした旅行が、頻繁に行われるようになり、様々な現象が、野外で観察されるようになった。

それらが記述された、旅行記が出版され [たとえば、ゲーテの『イタリア紀行』には、地質学的な記述が多く見られる]、世界各地の情報が増えてきて、自国の狭い地域の現象だけを解釈するだけでは、済まなくなった。

いろいろな現象を統合する、理論が必要になってきた。

【29】 ヴェルナーの水成説

◇山や鉱物を分類することは、ドイツのフライベルグにあった鉱山学校で、ヴェルナー（1749～1817）が発展させた、鉱物学の方向に、次第にまとまって行った。

そして、ヴェルナーの鉱物学は、『geognosy ゲオグノジー』と呼ばれる学問になって行った。

◇ヴェルナーは、明らかに火山起源と分かる、溶岩などを除いた、すべての岩石を、初源岩と堆積岩に、大きく分類した。

最初、堆積岩を、フレッツ（ドイツでは石炭を含む地層をこう呼んでいた）と未固結岩（非常に新しいもの）に分けたが、初源岩とフレッツの間に、堆積岩が存在することを認めて、漸移岩（ほぼ現在の古生代）の区分を考えた。

そして、岩石は、世界中のどこでも、規則的に積み重なっているものと考えられた。

つまりは、世界中の地層が、一つの柱状図で表せることになり、地層の“層序”という考え方が、確立したといえる。

◇初源岩は、生物が、まだ存在しない頃に、地球全体を覆っていた海で、沈殿してできた岩石だと考えられていた。

花崗岩 [花崗岩は御影石ともいわれ、日本でもよく見られる岩石] も初源岩の一つとされた。

その上には、化石を含む岩石が、堆積している。

現在は火成岩とされている玄武岩は、堆積岩の一つと考えられていた。

◇そして、すべての岩石は、水中で堆積して、できたものだと解釈されていた。

この考え方は、水成説と呼ばれ、ヴェルナーがその中心であった。

18世紀から19世紀初めには、水成説が広く信じられていた。

【30】 ハットンの火成説

◇同じ頃、イギリスでは、ハットン（1726～1797）が別の考え方を発表した。

◇大陸の岩石は、風化や浸食を受けて、土壌に変わり、川を通過して、海まで運ばれ、海底に堆積する。

海底の堆積物は、地下の熱で、高温になって融解し、その後冷えて固化し、再び岩石になり、地下からの圧力で、押し上げられ、陸地を構成するようになる。

それが、また、風化や浸食を受ける、というプロセスを、永遠にくり返す、という考え方が述べられている。

◇岩石の生成や陸地の上昇の原動力が、地球の内部のエネルギーであるということから、この考え方は火成説と呼ばれる。

地層の中に、花崗岩が貫入していたり、地層が不整合を示していることが、地殻変動の証拠であることを、ハットンは主張した。

◇ハットンの考え方は、いわゆる〈定常論〉であり、「陸が海になる一方、海が陸になり、地球全体としてみれば、いつでも陸地と海がある」と言っているのだ。

彼は、地殻変動は、永遠に繰り返される、と考えた。

地球とは、思慮深い神によって創られた、永続する宇宙であり、「われわれは、その始まりの痕跡も、終わりの兆しも見つけることができない」と記述している。

また、地球は、常に同じスピードで移り変わっている、とも述べている。

【31】 水成説—火成説論争

◇玄武岩や花崗岩の成因についての、水成説と火成説の論争は、後者が、次第に優勢になって行く。

イギリスでは、粘土の溶融実験を行い、岩石ができることを、確認した。

実際に火山を調査して、火山起源としなければ、説明のできない岩石が、観察されたことなどから、地質を調査する学者たちの間に、火成説が広まって行った。

◇イギリスにおいて、1807年に結成された、ロンドン地質学会では、化石に基づく層序学に関する、解決すべき多くの問題を抱えていて、水成説と火成説の論争は、盛んではなかった。

◇ドイツでは、ヴェルナーの高弟に当たる、プーフ（1774～1853）は、1825年、カナリア諸島の火山の観察から、玄武岩の火山体は、地下にあるマグマが押し上げて、できたものだと主張した。

さらに、多くの山脈の中央に見られる花崗岩も、同じプロセスで、できたものだと考えた。

◇すでに、有名な研究者であったプーフが、火成説に与したことで、多くの人に影響されて、水成説は衰退して行った。

【32】 地質学の確立

◇水成説—火成説の論争が落ち着いた、1820年頃から、地質学が、大発展を遂げていく。火成岩と堆積岩の区別が、明確になって、岩石に対する見方の確立したのが、大きかった

が、より重要だったのは、化石と地層の関係が、明らかになったことだろう。

◇その結果として、地質の調査が進み、世界中の地質図が作成されることになった。18世紀の終わりに、鉱物分布図の書かれたことがあるが、地質図と呼べるものが、作成された最初のもは、1811年に出版された、キュヴィエ（1769～1832）とブロンニャール（1770～1847）によるパリ盆地の地質図だろう。

◇18世紀の終わりから、19世紀の初めの頃を、「地質学の英雄時代」と呼ぶことがある。1790年から1820年の間の時期に、ベルナー、ハットン、ウィリアム・スミス（1769～1839）、ラマルク、キュヴィエらの英雄が、輩出したことを指して、ドイツの地質・古生物学者のツィッテル（1839～1904）がその著『地質学史』（1901）で、そのように名づけたのである。

【33】 ウィリアム・スミス

◇イギリスでは、ウィリアム・スミスが1815年に、最初の本格的な地質図である『イングランド、ウェールズおよびスコットランドの地質図』を出版した。これには、地層のつながりが、明確に示されている。

◇スミスは、各地層には、それに独自の化石が、対応していることに気づき、地層と化石の対応表を作成した。

それによって、スミスは、化石によって、離れた地域における地層を同一視し、イギリス全土の地層を対比して、地質図を製作した。

その功績を称えられて、スミスは「層序学の父」と呼ばれている。

【34】 古生物学の始まり

◇現在では、化石は、「生物の遺骸、あるいは、生物が生存した痕跡」と定義され、化石を研究する学問は、古生物学と呼ばれる。

19世紀に入って、フランスやイギリスでは、古生物学が盛んになり、種類も数も多い、貝類の化石を中心に、研究された。

自然史博物館が設立されると、それを中心に、精力的な調査が行われ、化石と岩相〔岩相とは、地層がどんな物質で、できているか、どんな特徴をもっているか、について観察した記述のこと〕のデータが記録されて行った。

◇地球の歴史を編むうえで、化石が大切な鍵となることを、最初に述べたのは、ドリュック（1727～1817）だとされている。

ドリュックは、1778年に、初めて、「地質学 geology」という言葉を提唱した。

彼は、ヴェルナーが再定義した、「地層累重の法則」〔地層は時間とともに順番に積み重なっていくと言うという原理〕に対応させて、化石の組み合わせが、地層ごとに、異なることにも、法則があることを発見したのだ。

この考え方で、地層を実際に観察したのは、イギリスでは、スミスであり、フランスでは、キュヴィエとブロンニャールだった。

【35】 地質時代名がそろそろ

■地質時代の区分表（数字は2004年に発表されたもの）■

新 生 代	第四紀	181 万年前～	
	中生代	第三紀	6550 万年前～
		白亜紀	1 億 4550 万年前～
		ジュラ紀	1 億 9960 万年前～
	古生代	三疊紀	2 億 5100 万年前～
		ペルム紀	2 億 9900 万年前～
		石炭紀	3 億 5920 万年前～
		デヴォン紀	4 億 1600 万年前～
		シルル紀	4 億 4370 万年前～
	先カンブリア紀	オルドヴィス紀	4 億 8830 万年前～
カンブリア紀		5 億 4200 万年前～	
		それ以前	

◇46億年と考えられている、地球の歴史における、最近の5億4200万年を、顕生代という。

「生物が顕（あらわ）れる時代」という意味である。

それよりも、古い時代の地層からは、化石が見つからなかったため、この顕生代から生物が顕れると考えたようだ。

化石になるような骨格をもつ、生物がいなかったただけだ、と判断することは、まだ、できなかったようだ。

◇顕生代は、古生代・中生代・新生代に分けられ、さらに、表のように細分化されている。この区分は、19世紀の前半に、化石を基準にして、決められた。

地質年代の名前の由来には、きちんとした理由がある。

◇カンブリア、オルドヴィス、シルルは、ウェールズ地方にある、模式地 [模式地とは一般には最初に研究されたところで、その時代の地層が連続して観察される場所を意味する] にちなんで、ウェールズの古い部族名から名づけられた。

◇デヴォンは、イギリスのデヴォン州、ペルムは、ウラル山脈中にあるペルム盆地、ジュラは、スイスのジュラ山脈と、それぞれ模式地の地名に由来する。

◇地層の特徴から名づけられることもある。

石炭層から石炭紀、特別な3枚組の地層から3疊紀、白亜層 [黒板で使うチョークは、最初、この白亜そのものを使っていた。過去の石灰質の海洋性微生物が固まってできた化石だらけの岩石のこと] から白亜紀などが、そのケースである。

第三紀・第四紀は、以前に、ヴェルナーの初源岩・フレッツを、第一紀・第二紀と呼んでいた時期があったために、それよりも若い地層として、名づけられた名称である。

【36】 地質時代名をめぐって

◇19世紀には、ヴェルナーが命名した漸移岩を、地質調査で更に詳しく分析して、現在使用している石炭紀やシルル紀などの地質時代名を、新たに設けるという方向に進んだ。

これは、後に、古生代としてまとめられる。

第一紀（初源岩）と第二紀（フレッツ）の間の漸移岩には、いろいろの時代からなる、岩石が豊富にあることが分かり、第一紀・第二紀という呼び名は、使えなくなっていた。

それでも、第三紀・第四紀は、そのまま使われている。

◇シルル紀論争は、ウェールズ地方を、北から調査したセジウィック（1785～1873）と南から調査したマーチソン（1792～1871）で、見解が異なったもので、最終的には、19世紀の後半に、オールドヴィス紀を設けて解決された。

◇デヴォン紀論争は、マーチソンとビーチ（1796～1855）の間の論争で、ロンドン地質学会を揺るがすような大論争となったが、シルル紀と石炭紀の間に、デヴォン紀を設けて解決した。

植物化石層は、デボン紀のものであり、石炭が大量には出ない、ということが分かった。

【37】 変移か激変か

◇地質が変化する原因は、何だろうか。

地球の歴史は、どのように、生物の歴史に影響をあたえたのだろうか。

18世紀末になると、化石が生物の遺骸であることは、認識されていたが、現在の生物とは全く違う生物が、大変に多いことを、どのように考えるかが大問題になった。

◇フランスのラマルクは、地質学的な変化は、悠久の時間の流れの中で、緩慢に進み、生命も連続的に変化し、突然の絶滅はない、と主張した。

ラマルクは、貝類の化石の中に、現生種の変種とみなされるものが、あることに注目し、1809年の著、『動物哲学』の中で、進化論的な変移という発想を展開している。

◇これと対照的な解釈を、フランスのキュヴィエが主張している。

キュヴィエは、パリ盆地から産出する化石が、地層ごとに異なることは重要だと考えて、1826年に、『地表革命論』の中で、「地質変化という激変ごとに、生物は絶滅し、その後、再び創造される」と記述した。

この考えは、「激変説」と呼ばれる。

【38】 ライエルの斉一説

◇キュヴィエは、キリスト教から自由だったが、イギリスでは、激変説は、地球の歴史を聖書の枠内に置きたいという人々によって、ノアの洪水の話と結びつけられ、一般の人には、ハットンの定常的な地球観よりも、アピールしたようだ。

◇このような中で、宗教的な考え方を批判し、ハットン説を復活させたとされるのが、ライエル（1797～1875）である。

ライエルは、ヨーロッパ各地で、野外調査を行って、「過去の地質現象の積み重ねによって現在がある」と考えるようになり、その集大成として、『地質学原理』全3巻を、1830年から1833年にかけて出版した。

その第2巻では、生物や化石の変化について、議論がなされている。

◇ライエルの考えは、「斉一説」と呼ばれ、「現在は、過去の鍵である」という言葉で、知られている。

ライエルは、地質や生物の変化は、ゆっくりとした、一定の速さで進み、激変などは起こらないし、過去の出来事は、現在でも起こっていることなので、現在をみれば、過去のことも分かる」と主張した。

◇層序学が確立していた、イギリスの学会では、斉一説を支持する者も多く、キリスト教

のノアの洪水説による影響を、弱めることに寄与した面もある。

◇ただ、ライエルは、生物の進化を信じておらず、ラマルクの主張に反対している。

【39】 氷河期論争

◇ヨーロッパの各地には、どこから運ばれたのかが分からない、巨大な岩石の塊が、散在していて、迷子岩などと呼ばれていた。

火成説を唱えたハットンは、これらの岩石が、氷河によって、運ばれたのではないかと主張している。

◇洪水説や氷河説があったが、アガシ（1807～1873）は、野外調査において、氷河が動いた多くの痕跡を発見し、1840年に、その著『氷河の研究』で、過去には、何度も氷河期が存在したことを、述べた。

◇激変説を主張したキュヴィエは、すでに、亡くなっていたが、斉一説のライエルは、アガシの主張に、大反対をした。

◇斉一説では、氷河期を説明できないが、あちらこちらから、氷河期の証拠が出てきたので、1858年には、過去に、氷河時代が何度か繰り返された、ということが、ライエルを含めて、認められるようになった。

ただし、氷河期などの気候変動は、地球に原因を求めても、答が得にくいので、次第に、その原因を、宇宙に求めるようになった。

【40】 恐竜化石の発見

◇バックランド（1784～1856）のメガロサウルスや、マンテル（1790～1852）のイグアノドンなどの化石の発見によって、1820年代から、陸上の大型爬虫類の存在が、知られるようになった。

◇日本語の首長竜は、ラテン語をもとに、プレシオサウルスというが、プレシオは、「より近い」で、サウルスは、「竜」の意であり、魚竜よりも竜に近い、という意味を表している。1812年に、魚竜の化石が、先に発見され、魚と竜（爬虫類）の間という意味で、魚竜と名づけられていた。

この時期には、カエルやサンショウウオなどの、両生類という分類グループは、まだ、考えられていなかった。

◇上のような命名の仕方の、背景にあるのは、存在の連鎖という考え方である。

これは、アリストテレス以来の、古くからの考え方で、地球上には、最も高等なわれわれ人間から、最も下等な生物までが、一本の鎖でつながるものと考えた。

そして、キリスト教と結びついて、神は、秩序よく創造したので、新しい種の発生も、絶滅もない、と考えられた。

そして、生物を研究する者の使命は、生物と生物の間を埋める、生物を発見して、神の創造の完全性を証明することである、と考えられた。

したがって、爬虫類と鳥類の間に位置する、生物が存在するはずである、と考えたので、始祖鳥の化石が発見された時には、多くの学者が大いに喜んだ。

◇激変説のキュヴィエは、生物の絶滅が、何度もあったと考えていた。

これは、アリストテレス以来の、存在の連鎖という考え方には、反しており、キュヴィエ

は、アリストテレスとは異なる、生物の大分類法を、提唱した。
しかし、生物は進化することが、確認されている現在でも、存在の連鎖という考え方は、
なお、色濃く残っているようである。

【41】 進化論と『地質学原理』

◇チャールズ・ダーウィンは、1859年、その著『種の起原』において、生物は進化してきたものであり、それを推進したのは、自然選択であることを説いた。

◇ダーウィンは、ピーグル号に乗り込む際には、ライエルの『地質学原理』を持ち込んで、熱心に読み、進化論を考える上での、一つの支えにした、ともいわれている。

◇一方、ライエルには、種が新しく作り上げられるということは、考えられず、進化論を受け入れることはなかった。

【42】 地球の冷却収縮説

◇世界中の地質データが、そろってくると、多くの大山脈は、どのようにできたのか、という造山運動の問題が、大きなテーマとなってきた。

◇最初のものは、地下のマグマが、花崗岩を押し上げて、山脈ができるとする、プーフによる隆起説である。

しかし、アメリカのアパラチア山脈など、花崗岩のない山脈も発見されて、疑問が残った。

◇パリのエリー・ド・ボーモン（1798～1874）は、いくつかの造山活動が、同時期に起きていることに着目し、1829年に、地球が冷却し収縮して、「しわ」ができるという、地球の冷却収縮説を発表した。

◇また、地層の調査が進むにつれて、アルプスの奇妙な地層構造が、注目を集めるようになった。

第三紀の地層の上に、それよりも古い、古生代の地層が被っていたのだ。

これは、巨大な岩体が、水平方向に移動したことになる。

◇ウィーンのジュース（1831～1914）は、1885年から1909年の間に、『地球の相貌』という、それまでの地質学を集大成する、大著を著したが、その中で、地球の収縮に伴って、アルプス全体が、北方へ水平に移動し、その北端にあった地層の上に、押し被さったという水平運動説を唱えた。

【43】 地向斜説

◇19世紀のヨーロッパでは、冷却収縮説が、一般的であったのに対して、アメリカでは、地向斜説という、独自の考え方が発達した。

◇ホール（1811～1898）[ハットンの実験をしたジェームズ・ホールと同姓同名]は、アパラチア山脈の、古生代の厚い地層の、東側が厚くて、西側が薄い、という傾向に着目した。

そして、アパラチア山脈の、さらに東側の、現在の大西洋にあった、大きな大陸の浸食で

できた、小石や砂や泥が、線状に伸びた海底の窪地に堆積し、それが、あまりにも多くなると、その重みで褶曲〔福永注：地殻にはたらく力によって地層が波状に押し曲げられること〕が起き、そして上昇して、大山脈ができたと考えた。

◇その後、そのような海底の堆積場所は、アメリカのデーナ（1813～1895）によって、地向斜と名づけられた。

その後、20世紀の半ばに、プレートテクトニクス理論が確立するまで、地向斜説が、さまざまな形で、展開されることになる。

【44】 アイソスタシー

〔福永注：ブリタニカから引用：アイソスタシー（isostasy）は、地殻平衡、地殻均衡と訳されている。J・プラット（1855）は、地球表面に凹凸があっても釣り合いが保たれるのは、底が平坦面で地塊ごとに密度が異なるからであるという説を出したが、G・エアリー（1855）は、地形が高まっているところほど、その根も深く、まるで氷山が海に浮ぶように地殻がマントルの上に浮ぶことによって平衡が保たれていると考えた。C・ダットンがエアリーの考えをアイソスタシーと名づけた（1889）。現在、地震波速度の深さ分布、重力異常などの地球物理学的資料は、アイソスタシー説を強く支持している。日本海溝やフィリピン海溝など、海洋底拡大説によって海洋底が沈み込むところとされている場所では、アイソスタシーからの大きなずれが存在する。〕

◇19世紀の後半には、アジアやアフリカの地質データが増加した。

特に、1840年前後、イギリスの観測隊が、ヒマラヤで、重力の測定をしていた時に、重力に異常の見られることが、発見されたのだ。

数学者プラット（1809～1972）の計算（1885年）によれば、ヒマラヤ山脈の堆積を考慮すると、測定された重力の値が、小さ過ぎるということであった。

◇山脈の下にある、物質は軽く、山脈は、浮力によって、そびえ立っている、という考えは、18世紀から存在した。

それは、1735年、南米大陸を調査した時に、アンデス山脈の重さの影響が小さいことに気づいた、ブーゲーが指摘したことであった。

◇プラットの計算結果を見た、エアリー（1801～1892）は、密度の大きい物質の上に、密度の小さい物質の層があり、層の下側への出っ張りが、地表の起伏とは、反対になるものと考えた（1855年）。

それは、軽い物質が、重い下層の物質の中に根を張り、氷山のように、上にも、突出しているのが山脈である、ということだ。

地表には、凹凸があるが、それは、内部の物質の質量の大小による、結果であり、地下には、圧力が、均衡している面がある、ということになる。

これを、地殻均衡説と呼ぶが、後に、アメリカのダットンが、等圧という意味の、アイソスタシーという語を提案（1889年）し、以後、使われるようになった。

◇エアリー説が正しいとすると（20世紀になって、正しい方向だったことが分かる）、大陸と海底の物質は、異なることになって、海洋が、大陸には変化することができない、ということになる。

地球の歴史上で、何度も起きている、沈降と隆起を説明することができなかつたので、プラットは、物質は同じでも、温度の違いによって、密度が変わるという考え方をした（1859年）。

だが、その説も、それだけの熱を、どうして得ることができるのかが問題になって、うま

く説明することが、できなかった。

◇アイソスタシーでは、うまく説明ができなかったが、大陸は、軽い物質が、浮き上がっている現象だということは、広く認められるようになった。
そして、時には、地向斜説で、地向斜の上昇が起こりうる理由として、アイソスタシーが使われた。

■天 文 学■

【45】 18・19 世紀の近代天文学

◇1543 年、コペルニクスが、地動説を発表した時の影響は、天文学者の間でも、それほど大きなものではなかったが、その後 140 年の間には、天文理論の革新が進み、天文理論とさまざまな点で結びついていて、自然学の変革も進んで、1687 年には、ニュートンが、その著『プリンキピア』で、天体の運動を、力学の法則に基づいて、説明した。

◇この時期における、革新と変革の影響は強く、以後 20 世紀の初頭になるまで、天文学では、地動説やニュートン力学に匹敵するような、大きな出来事は発生しなかった。

◇18・19 世紀の天文学では、望遠鏡の発展によって、天文観測が精度を高めながら、データを蓄積して行くのと平行して、ニュートン力学によって、天文現象の解明に、進展をみた。

◇この時期における、天文学者の関心は、太陽系だけでなく、恒星の世界も対象にするようになって、宇宙全体の大きさや構造も、議論されるようになった。

◇19 世紀後半には、天体の発する、光の分析が始まり、太陽や恒星に関する、物理学的な議論も試みられるようになった。

【46】 望遠鏡の発展

◇望遠鏡による、天文観測で有名なのは、ガリレオだが、同時期のケプラーや、後のニュートンなども、望遠鏡の改良に関心を持っていた。

ケプラーは、接眼レンズに、凹レンズではなく、凸レンズを用いた「天体望遠鏡」（「ケプラー式望遠鏡」とも呼ばれ、倒立像が得られる）などを、発表している。

ケプラー式望遠鏡は、視野が広く、測定器としての利用度も高かった。

ニュートンは、屈折望遠鏡の欠点を補うために、反射望遠鏡を開発した。

当時の屈折望遠鏡の色収差 [福永注：ブリタニカより引用：収差にはレンズや曲面鏡の形に起因する球面収差と光の屈折率が波長によって違うことに起因する色収差とがある。収差をなくすためには、材質の違うレンズを組み合わせた組み合わせレンズを用いる。また表面反射を使った曲面鏡では色収差がない。] と呼ばれる現象が生じて、像が不鮮明になりがちだった。

色収差という問題を、解決するために、1668 年に、ニュートンは、対物レンズの代わりに、凹面反射鏡を用いた、反射望遠鏡を製作した（有効口径約 2cm、焦点距離約 20cm、倍率 35 倍）。

◇ニュートン以後の反射望遠鏡では、観測の困難な、暗い星や星雲を観測するために、W・ハーシェル（1738～1822）が製作した、口径 122cm、焦点距離 10m のものや、アイルランドのロス卿（1800～1867）が作った、口径 1.8m、焦点距離 16m のものが知られている。

◇ハーシェルは、妹のキャロライン・ハーシェル（1750～1848）の協力のもとに、精力的に、天文観測を行い、1781年に天王星を発見した。
土星よりも遠方の、惑星が発見されたことで、太陽系の大きさは、一気に2倍にまで、広がった。
ハーシェルは、天王星や土星の衛星も、発見している。

◇反射望遠鏡に用いられた、主鏡は、19世紀の半ばまで、スズと銅の合金を、用いたものだったが、1856年に、ガラスに銀メッキを施す方法が、発明されると、ガラス鏡反射望遠鏡が主流となった。
20世紀に入ると、天体物理学の観測のために、反射望遠鏡が、利用されるようになり、口径が5m（パロマ山天文台、1948年開所）を超えるものも現れた。

◇18世紀の半ばには、2種類のガラスを組み合わせた、対物レンズを作れば、色収差がなくなることが、発見された。
これを利用して、20世紀の直前まで、91cm（1888年、リック天文台）、102cm（1897年、ヤーキーズ天文台）という、大きな口径をもつ屈折望遠鏡が、作り続けられた。

【47】 観測天文学の誕生

◇17世紀後半のイギリスでは、船舶の航行が、盛んになるにつれて、航海術の確立が、要請された。
海上で、船の位置の経度を決定する、方法の一つとして、月の位置観測（恒星の位置を基準にする）に頼る、月距離法〔注：ここでいう距離とは、月の位置を表す角度のこと〕があるが、この方法を用いるためには、月の位置の基準となる、恒星の位置を決定し、月の運動表を作成することが、必要になる。

◇1675年には、このような天文学的な研究を行う、施設として、グリニッジ天文台の建設が決まり、翌年には、そこで、観測が始まった。
観測の任に当たった、初代の王室天文官・フライムスティード（1646～1720）は、目盛をつけた望遠鏡を用いて、観測を行い、ティコの時代には、分単位であった、観測の精度を、秒の単位にまで高めた。
フライムスティードが残した、観測結果は、その後の天文学にも、重要な意味をもっており、ニュートンが『プリンキピア』を書き上げるに当たっても、フライムスティードの月や彗星についての観測結果が、役に立った。
観測天文学は、フライムスティードによって、グリニッジ天文台を拠点として、創始されたといえる。

◇月の研究では、後に、彗星の研究で有名になる、ハレー（1656～1742）が、永年加速〔注：月が時間の経過に対して加速していく現象。これにより、月の公転周期は次第に短くなって行く。〕を発見した。
さらに、ハレーは、1705年には、自らの名を付けて呼ばれることになる、彗星の周期を確定し、1718年には、恒星の固有運動を発見した。

〔福永注：ブリタニカより引用：恒星は天球上に固定して星座の形は変化しないように見

えるが、実はきわめてわずかずつ恒星も位置を変えている。これを恒星の固有運動という。厳密には地球上からの観測から、光行差、視差、歳差、章動などのすべての影響を除いた恒星の真の位置の永年変化をいい、角速度で表わす。その量はきわめて小さいので、1718年E・ハレーが、アルクトゥルス、シリウス、アルデバランの観測結果を古代のプトレマイオス星表と比較して求めたものが最初。固有運動の確認された星を固有運動星ということがある。]

また、金星が、太陽面を通過するのを、観測できることを利用して、太陽や金星の視差を正確に測定する方法を、提案したのも、ハレーだった。

[注：地球上のどこにいるかによって、同じ時点で観測できる、金星の角度は異なるが、この角度の違い（視差）と、それぞれの地点の間の距離から、金星と地球の距離を求めることができる。ハレーは、太陽面を通過する金星の軌跡を、地球上のさまざまな地点から観測し、金星の通過する経路の視差をもとに、太陽や金星と地球の距離を正確に求めることを提案した。]

金星の太陽面通過は、1761年と1769年に、相次いで起こったが、これを観測するため、多くの人々が、各国に派遣された。キャプテン・クックの初回の大航海（1768～1771年）の目的の一つは、南太平洋において、金星の太陽面通過を、観測することであった。

【48】 光行差と年周視差

◇古代から、地動説の難点として、指摘されてきたのは、この理論によれば、存在するはずの年周視差（地球から見た恒星の方向と、太陽から見た恒星の方向の差が、地球が公転しているために、季節によって、変化して見えること）が、実際には、観測されないことだった。

◇観測天文学は、航海用星図を作成するために、生まれた学問だったが、多くの天文学者は、恒星の年周視差を確認するという、学術的な目的をも目指して、観測に携わっていたので、測定機器や観測法の改良が試みられた。

◇年周視差の検出を目指した、精密な観測で、まず、ブラッドリー（1693～1762）が発見したのは、光行差という、年周視差とは異なる、地動説の証拠だった。光行差とは、光の速度が有限であるために、公転軌道上で地球がもつ、速度の方向に依りて、恒星の位置が、わずかに、ずれて見える現象を指している。

◇光速が、有限であることは、木星が合と衝の位置にあるときの、衛星の食についての情報をもとに、すでに、デンマークのレーマー（1644～1710）が、1675年に指摘していた。レーマーは、光が、太陽から地球に届くのに必要な時間は、8分から11分の間であると報告していた。

[注：木星の衛星イオの公転周期は知られていたが、これから、地球から見てイオが木星の裏に隠れる時刻が計算できた。しかし、実際に観測される食の時刻は、予測とは異なり、地球が木星に近づいているときには、食の時刻は予測よりも早くなり、遠ざかっているときには、予測よりも遅くなった。レーマーは、木星の位置が変化すれば、光が木星から地球に到達するのにかかる時間も異なってくるために、地球で観測される食の開始時刻の食い違いが生じると考え、この情報を用いれば、光の速度が算定できることに気づいた。]

◇ 光行差も、地動説を証明する十分な証拠だった。

1728年、ブラッドリーの発見が報じられると、それに関連したのか、その後の1757年には、教皇ベネディクト14世は、地動説を説く書物に関する禁令を取り消した。

また、1835年の禁書目録からは、コペルニクスの『天球の回転について』や、ガリレオの『天文対話』が消えた。

◇ブラッドリーは、光行差の発見には満足せずに、年周視差の確認を求めて、観測を続けたが、年周視差は、ブラッドリーが想定したものよりも、はるかに小さく、彼は遂に、これを観測することができなかった。

しかし、ブラッドリーは、1747年に、章動と呼ばれる、恒星の周期的な動きも発見した。

[注：恒星の章動とは、恒星の赤緯が、9秒から10秒の振幅と18.6年の周期で変動する現象を指す。また、地球の自転軸は、太陽や月、惑星の影響によって、約2万6000年の周期で円錐を描く運動をしているが（コマの軸の首振り運動のようなもの）、この運動には18.6年の周期をもつ微細な振動が重なり合っている。この18.6年の周期をもつ微細な振動も、歳差運動（首振り運動）をする地球の自転軸の章動である。]

◇ブラッドリーに次いで、同じイギリスのW・ハーシェルも、年周視差の決定を志した。

ハーシェルは、恒星の距離を知ること、つまり、年周視差を確定することの必要性を、強く感じていた。

ハーシェルは、なるべく接近していて、なるべく等級差の大きい、二重星を観測の対象に選んだ。

二重星は、距離が離れているが、偶然にも、地球から同じ方向に見える、2つの星で、恒星の本来の明るさが、ほぼ同じだと仮定すれば、暗い恒星（伴星）は、明るい恒星（主星）よりも遠くにあることになる。

もし、伴星が、無限遠にあるとみなすことができれば、主星の相対的な視差が観測できる。

しかし、ハーシェルは、この方法でも、年周視差を観測することができなかった。

◇しかし、ハーシェルは、この観測を通じて、「連星」（主星の周りを伴星が公転軌道運動を行っているもの）を発見した。

◇後に、恒星の間の距離が、正確に算定できるようになると、連星については、質量も求めることができるようになった。

公転周期から、質量の和が算定でき、また、重心の位置が分かれば、それぞれの星の質量も計算ができる。

◇主星と伴星の間の、重心を決定したのは、東プロイセン（現在のポーランド）のケーニヒスベルグ天文台のF・W・ベッセル（1784～1846）だったが、実は、初めて、年周視差を観測したのも、ベッセルであった。

◇1838年から翌年にかけての、ほぼ同じ時期に、独立に、ベッセルと、南アフリカのケープ天文台のヘンダーソン（1798～1844）、ロシアのプルコワ天文台のストルーヴェ（1793～1864）の3人が、年周視差の検出に成功している。

◇この時期には、年周視差の検出が、地動説の正しさを検証する、という意味は、なくなっていたが、年周視差から産出される、恒星と太陽系の距離は、恒星系の姿を解き明かすための、重要な手がかりとなった。

【49】 天体力学の誕生

◇ニュートン力学の成功により、万有引力と運動の法則によって、天体の運動を説明しようという動きが、盛んになった。

◇航海術を確立するために、月の観測を熱心に行ったのは、イギリスの天文学者たちだったが、月の運動に関する、理論的な研究を行ったのは、フランスを中心とする、大陸の科学者たちだった。

◇クレロー（1713～1765）は、1746年に、万有引力の法則を修正して、月の運動を説明しようと試みたが、クレロー自身や、オイラー（1705～1783年）、ダランベール（1707～1783）によって、従来の法則のままでも、計算の精度を高めて行けば、月の運動を、理論的に説明することの可能なことが、明らかになった。

◇また、航海術を確立するために、天文観測を推し進めていた、イギリス政府は、海上で、経度を15分以内の精度で決定する、方法の考案に対して、3万ポンドの懸賞金をかけていたが、これを獲得したのは、T・マイヤー（1723～1762）だった。マイヤーは、オイラーの月の理論に、経験値で補正を加えて、1755年に、月の運動表を作成した。

◇ニュートンの力学をもとに、太陽系の起源について論じる者も現れた。哲学者のカント（1724～1804）は、1755年に、星雲から、現在の太陽系のような惑星系が生まれる過程について、論じた。この時期までには、太陽系の惑星運動に関する研究や、星雲についての知識が、蓄積されてきており、カントの議論は、それらを利用したものだったが、カントの宇宙が、時間とともに、その姿を変えていくという発想は、天文学史上、画期的なものだった。同じような、太陽系起源論は、フランスのラプラス（1749～1827）が、1796年に、発表した。

◇18世紀には、幾何学で記述されていた、ニュートンの力学を、代数学や解析学の言葉に書き換える作業が行われたが、その集大成は、ラグランジュ（1736～1813）の『解析力学』（1788）であった。ラグランジュの成果を踏まえて、ラプラスは、『天体力学』（1799～1825）を著し、力学によって、天体の形状と運動を論じた。ハレーが発見した、月の永年加速も、ラプラスによって、地球の公転軌道の離心率の減少によるものであることが示された。

[福永注：クーラント／ロピンス著・森口訳『数学とは何か』から引用した、離心率の定義：楕円曲線 $(x^2/p^2) + (y^2/q^2) = 1$ が x 軸と交わる点は $A(p,0)$ と $A'(-p,0)$ であり、 y 軸と交わる点は $B(0,q)$ と $B'(0,-q)$ である。もし $p > q$ ならば、長さ $2p$ の線分 AA' のことを楕円の長軸と呼び、長さ $2q$ の線分 BB' のことを短軸という。この楕円は点 $F(\sqrt{p^2-q^2}, 0)$ と $F'(-\sqrt{p^2-q^2}, 0)$ とからの距離の和が $2p$ であるようなすべての点の軌跡である。点 F および F' のことを楕円の焦点と呼び、比 $e = \sqrt{p^2-q^2}/p$ を楕円の離心率という。]

ただし、後に、ラプラスの得た結果が、完全には、正しいものではないことが示され、最終的には、その他の効果も、考慮しなければならないことが、明らかになった。

[注：月の永年加速には、潮汐の効果により地球の自転周期がしだいに長くなっていくことによる見かけ上の項と、惑星の引力によって地球の軌道の離心率が減少していくために生ずる項、および地球の自転の角運動量が潮汐の作用で月の公転の角運動量に移されること

による項（減速）がある。ラプラスが指摘したのは二つめのものである。]

【50】 新たな惑星と小惑星の発見

◇惑星の公転軌道の半径の、平均的な大きさの間には、ある規則性が存在するが、このことは、1766年に、ティティウス（?~1796）によって指摘され、さらに、数年後、ボーデ（1747~1826）によって再発見された（ティティウス・ボーデの法則、または、ボーデの法則）。

[注：ティティウス・ボーデの法則：次のように数値を並べると、惑星の軌道半径の比を表現することができる。水星には4（実際は3.9）。金星には $4+3=7$ （実際は7.2）。地球には $4+(3\times 2)=10$ （実際は10.0）。火星は $4+(3\times 4)=16$ （実際は15.2）。 $4+(3\times 8)=28$ のところに惑星はないが、のちに、ケレス（27.7）が発見される。木星は $4+(3\times 16)=52$ （実際は52.0）。土星は $4+(3\times 32)=100$ （実際は95.4）。ティティウス・ボーデの法則が発表された以後に見つかった3つの星のうち、天王星については $4+(3\times 64)=196$ （実際は192）とうまく説明できるが、海王星では $4+(3\times 128)=388$ （実際は301）、冥王星は $4+(3\times 256)=722$ （実際は395）となって実際との差が広がる。]

◇ボーデが、この事実を初めて記述した時点では、天王星は、発見されていなかったが、新たに発見された、天王星の軌道の平均半径は、ボーデの法則通りの大きさであった。ボーデの法則への信頼が高まって、実際には、惑星の存在しない、火星と木星の間に、未知の惑星が存在するのではないかと考える人々が、現れ始めた。

◇この惑星、ケレスを、実際に発見したのは、シチリア島のパレルモ天文台にいた、ピアッツィ（1746~1826）だった（1801年）。ピアッツィは、ボーデに手紙で知らせたが、手紙が着いた頃には、惑星は、太陽の付近にあって、見失われていた。これを知ったガウス（1777~1855）は、ピアッツィの観測結果を用いて、ケレスの位置を計算し、雑誌で発表した。

◇ピアッツィの発見から1年目に、ガウスの予測通り、オルバース（1758~1840）が、ケレスを再発見した。ケレスの再発見から、3ヶ月後には、ほぼ同じ公転軌道をもつ、もう一つの小さな惑星が、発見された。オルバースは、より大きな惑星が、爆発して、これらの小さな惑星が、誕生したのではないかと考えた。この説に基づいて、観測が行われた結果、1804年と1807年に、1つずつの、ケレスなどと同じ公転軌道をもつ、小さな惑星が発見された。W・ハーシェルは、これらに、小惑星（アステロイド）という名称を与えた。

◇天王星については、40年間の、規則的な子午線観測が、蓄積されたのを機会に、1820年に、正確な運動表の作成が試みられた。しかし、その任に当たったブヴァール（1767~1843）は、古い観測結果と、新しい観測結果の両方を満足させうる、運動表を作ることができないことに、気づいた。

[注：天王星は、1781年に、W・ハーシェルによって、発見される以前に、多くの人々が、それと知らずに、観測していた。「古い観測結果」とは、発見以前に、蓄積されたもののこと。]

◇ブヴァールは、古い観測結果が、精密ではないとして、新しい記録のみを用いて、運動表を完成させたが、困難が存在することは、指摘した。

しかし、その後、ブヴァールの運動表は、天王星の正確な観測位置を、与えなくなっていた。

◇天王星の問題について、パリ天文台長のアラゴ（1786～1883）は、当時、彗星の研究をしていた、ルヴェリエ（1811～1877）に検討をするように勧めた（1845年）。

ルヴェリエは、天王星の外側の未知の惑星が、天王星の運動に影響を与えるものと、仮定して計算を進め、1846年に、未知惑星の位置についての報告をした。

◇ルヴェリエの報告から数日後には、予測通りに、ベルリン天文台のガッレ（1812～1910）が、新たな惑星、海王星を発見した。

◇ルヴェリエとは、全く独立に、イギリスのアダムス（1819～1892）も、同様の計算を行っていたが、その報告を受けて観測していた、チャリス（1803～1882）が確認できないでいるうちに、ガッレによる発見の報が届いてしまった。

ところが、チャリスが、改めて観測結果を調査してみると、すでに、数回にわたって、この惑星を観測していたことが分かった。

これによって、海王星の発見に関しては、先取権争いも生じている。

◇海王星の発見によって、ローエル（1855～1916）は、さらに、その外に、別の惑星が存在すると考えた。

この惑星、冥王星は、1930年に発見されたが、ローエルの計算には、誤りがあったため、彼の位置予測は、ほとんど役に立たなかった。

【51】 恒星の天文学

◇ハーシェルは、全天の恒星の数と、空間分布を明らかにしようとし、1784年には、宇宙は、太陽系が中心にある、円盤状の恒星の集まりであり、この恒星系を、地球から見ると、天の川になる、という見解を発表した。

ハーシェルは、1785年には、恒星の明るさから、その距離を求める、方法についての議論を展開した。

彼は、恒星が1等級暗くなるごとに、距離は、2倍になると仮定した上で、天の618カ所について、一定の広さに見えた場所の、星の数を調べ、われわれの宇宙が、数億の恒星からできており、広がりのある、枝分かれをした、複雑な形態をしている、という結論を得た。

それまでには、恒星の真の明るさや、空間的な配置についての知識が、得られてなかったため、ハーシェルは、恒星が、すべて同じ真の明るさをもっており、それらの恒星が存在する領域では、一様な密度で分布しているという前提に立って、議論を進めている。

◇ハーシェルによる星団と星雲の調査は、綿密であり、1786年には、1000個ほどの新しい星団と星雲の目録を、ロイヤル・ソサエティーに報告している。

1789年には、さらに1000個、1802年には、500個が、これに加わった。

一つひとつについて、位置・形状・明るさなどが記録されている。

W・ハーシェルと同様に、巨大な反射望遠鏡を作ったロス卿も、星雲の記録を、数多く残している。

◇19世紀になると、星雲の研究は、さらに進み、19世紀の後半には、アンドロメダ星雲

のような渦状星雲は、天の川銀河という、われわれの宇宙の外に存在するのではないかと考える人も現れ始めた。

しかし、1885年に、アンドロメダ星雲内で、発見された新星が、7等という明るいものであったために、この星雲が、天の川銀河の外にあるとする見解には、否定的な声が高まった。

[注：新星：現在では爆発により、激しく変光する星であると理解されているが、星が新しく生まれたように見えることから、新星と呼ばれた。]

◇恒星の空間分布については、1826年に、オルバースが、パラドックスを提示している。それは、宇宙が、無限の広がりを持ち、恒星が、どの方向にも、均一に分布しているとすると、地球上での宇宙の明るさは、無限大になってしまう、というものだった（オルバースのパラドックス）。

このパラドックスは、20世紀に、膨張宇宙論によって、解決をされることになる。

◇19世紀には、分光学を用いた、天体の観測も始まって、天体の物理現象を解明する、手がかりが得られるようになった。

天文観測における、写真の利用も始まり、また、写真技術は、恒星の光のスペクトル分析のためにも、活用されることとなった。

分光学や輻射の理論が発展を見ると、恒星を構成する元素の種類や、温度を知ることも可能になった。

このように、19世紀末には、天文学者の関心は、恒星系や宇宙構造論、恒星の内部構造にまで、及ぶことになった。

20世紀には、これらの成果を総合した、基礎理論の大転換が起こることになる。

第三章 現代（20世紀）

■ 概 説 ■

【51】 世界に対する理解

◇現代（20世紀）について一言で述べると、宇宙、天体、そして、地球のすべてに対して、科学に基づく「創成と進化」の話が語られるようになった、ということになるだろう。

宇宙は、どのような広がりをもつのか、その中で、太陽系や地球は、どのような位置を占めているのか、地球と、その陸や海洋は、どのようなプロセスで、今の姿になったのか、等の多くの問題に、科学的な答が与えられた。

◇20世紀には、新しい物理や化学の理論が発達し、また、それらに基づく、技術の発展により、科学者の情報収集能力に目覚ましい進歩があった。

それらのすべてが絡み合っ、宇宙・天体、そして、地球の、すべてに対し、科学に基づく「創成と進化」の話が語られるようになったのだ。

◇その話の結論は、大略、次のようになる。

1. 大陸や海洋、山脈などの地形ができたプロセスが分かった。
2. 岩石の起源が分かった。
3. 地球が、いつ、どのようにして、できたのかが分かった。
4. 地球をつくっている、さまざまな元素が、どこで、どのようにして、つくられたのかが分かった。

た。

5. 太陽などの恒星が、どのようにして誕生し、どのようなプロセスによって輝き、どのように変化していくのかが分かった。

6. この世界を構成する粒子自体にも、誕生と変化のあることが分かった。

7. 宇宙空間自体にも、歴史のあることが分かった。

【52】 新しい重力の理論—— 一般相対論

◇20世紀は、自然科学のすべての分野にとって、好適な条件が整ってきた時代であった。一つ分野の発展が、他の分野に影響して、自然界のことを、全体として議論できるようになった。

◇宇宙論については、1915年に、一般相対論という、ニュートンの万有引力の法則に代わる、新しい重力の理論が登場し、その応用として、膨張宇宙という、宇宙に対する、全く新しい見方がもたらされた。

一般相対論が、直接にもたらしたのは、宇宙が膨張しているという枠組みだけだが、それによって、天体の形成や物質の誕生を考える上での、土台ができたのだ。

◇宇宙が、膨張していることは、時間を逆にして、過去に遡れば、収縮するということである。収縮の行き着く先は、宇宙空間の誕生という瞬間になる。

「宇宙空間が誕生する」という、19世紀には、考えもしなかった枠組みの中で、物質の誕生や天体の形成についての研究が進んだ。

そして、現在、地球上に存在する、さまざまな元素が、どこで、どのように、合成されたのか、が分かってきた。

◇宇宙空間の誕生が、いつ、どのように、起きたのかは、まだ、分かっていない。

一般相対論は、そのような状況までは、カバーしないのである。

【53】 新しい物質の理論

◇宇宙が、膨張しているという、宇宙論の大前提をもたらした、一般相対論は、もちろん重要だったが、物質に関する、新しい物理学理論の登場は、さらに大きな意義をもっていたかも知れない。新しい物理学理論とは、大きな枠組みとしては、量子論であるが、20世紀には、量子論をベースにして、原子物理学、原子核物理学、素粒子物理学という分野が、発展した。

それらの発展と、まさに並行して、天文学や宇宙論の議論が、進んできた。

◇量子論とは、量子力学や、それを発展させた、場の量子論を意味する。

それらは、原子などのミクロな粒子の振る舞いを、説明するために、1920年代後半に登場した、学問である。

◇量子論は、まず、原子の振る舞いを、説明した。

原子が、どのように、光を吸収したり、放出したりするかを、明らかにしたのが、原子物理学である。

その結果、遠方の星からやってくる光を分析して、その星が、どのような元素から構成されているか、が分かるようになった。

◇原子核物理学は、原子の中心にある、原子核の振る舞いを、研究する学問であり、素粒子物理学は、物質の最も基本的な構成粒子である、素粒子を研究する学問である。

1960年頃までは、原子核を構成する、陽子と中性子の2種類の粒子が、物質の基本的な構成粒子

だと、考えられていたので、原子核物理学と素粒子物理学とは、一体のものだった。ところが、1960年代に、陽子や中性子は、クォークという、さらに基本的な、3つの粒子の結合したものであることが、提案され、1970年代には、それが、認められるようになった。そのことは、宇宙論にも、影響を与えた。

◇星の中で、起きているプロセスは、基本的に、原子核の反応である。しかし、20世紀の初頭には、そのような反応の存在すること自体が、知られていなかったので、星の進化を議論することは、不可能だった。中性子という粒子が、存在することさえ、知られていなかった。1932年に、中性子が発見され、1935年には、陽子や中性子の間に働く、力の理論として、湯川秀樹が、中間子論を発表した。そのような基礎ができて、核物理学が発展し、星に関する研究も進んでいく。

【54】 星はなぜ燃えている

◇19世紀から20世紀初頭の、地質学者・進化学者・物理学者たちを、悩ませたのは、太陽が、なぜ、どれだけの期間にわたって、輝いているのか、という、太陽の年齢に関する大問題であった。太陽のエネルギー源としては、化学エネルギー、電気エネルギーや、重力エネルギーが、考えられたが、それらでは、太陽がすぐに燃え尽きてしまうので、説明がつかなかった。

◇湯川の中間子論で記述される、原子核で働く力は、核力と呼ばれ、核力が生み出すエネルギーは、核エネルギーと呼ばれる。核エネルギーは、重い原子核が、分裂（核分裂）するときや、2つの軽い原子核が、結合（核融合）するときに、発生する。1940年代に、星が輝いているのは、核融合が原因である、という知見が確立した。

◇核融合には、いろいろな段階がある。最も簡単なのは、2つの陽子が、衝突して、結合する、プロセスである。正確にいうと、2つの陽子が、結合したときに、陽電子という粒子を放出して、片方の陽子が、中性子に変換し、陽子と中性子が結合した、重水素原子核になる。次には、それらの重水素原子核が結合して、ヘリウムができ、それが、さらに結合して、もっと大きな原子核（炭素、酸素、・・・鉄・・・）ができていく、というプロセスがある。単に、結合して、大きくなっていくばかりではなく、途中で、何らかの粒子を放出して、新たな原子核になる、という複雑なプロセスもある。

◇さまざまな、核融合のプロセスのうちの、どれが、進行しているのかは、星の大きさ、星の中心なのか、外側なのか、新しい星なのか、古い星なのか、によって異なる。核物理学の理論的・実験的な進歩によって、個々のプロセスの詳細が、解明されており、それに基づき、星の進化のプロセスについても、厳密な計算が、できるようになった。

【55】 星の一生、元素の起源

◇星の理論が確立したことは、「天地の創成と進化」という観点から見て、2つの大きな意味がある。第一に、星には、その大きさによって異なる、いろいろな一生のあることが、判明したことである。星には、(1)最終的には、爆発して、なくなってしまう場合（爆発して、輝いている間の星を、超新星と呼ぶ）、(2)爆発して、中心部に、小さいが、非常に重い天体を、残す場合（その重さによって、中性子星、または、ブラックホール、というものが残る）、(3)爆発はしないが、外側の

ガスが、宇宙に飛び去り、中心に、小さな天体を、残す場合（残った天体を、白色矮星と呼ぶ）、などのあることが分かった。

◇第二に、星の理論によって、現在、地球上に存在している、元素の起源が、判明したことである。宇宙で、最初の星は、宇宙にあった水素原子を集めて、でき上がった。

水素は、その原子核が、陽子1つだけからできた、最も単純な原子である。

星の中では、水素原子核の結合によって、より重い原子（元素）が合成されていく。

そのようにして、作られた元素は、星の爆発によって、宇宙にばらまかれ、それらが、再び集まって、次世代の星ができ、それが、また、爆発をして、・・・というプロセスが続く。

地球は、そのようにして、できてきた、元素が集まって、作られたのである。

【56】 ビッグバン理論と素粒子物理学

◇宇宙が、膨張していることは、時間を逆にして、過去に遡れば、収縮する、ということである。過去の、収縮した状態における、宇宙空間内の物質密度は、非常に大きく、しかも、超高温であった、はずである。

物体は、すべてが、分解し、その構成粒子（原子や原子核）は、単独で、動き回っていたことだろう。

宇宙は、このような、超高温・超高密度の状態から、始まったとするのが、ビッグバン理論である。そして、最近、それは、140億年前であることが、確定した。

◇ビッグバン理論は、ジョージ・ガモフらによって、1950年前後に、提唱された。

彼らの理論によれば、宇宙の最初の状態は、陽子・中性子・電子・ニュートリノ・光子（光の粒子）が充満する、超高温であった。

その当時は、これらの粒子が、物質を構成する基本粒子、つまりは、素粒子だと考えられていた。

◇電子・ニュートリノ・光子は、今でも、素粒子だと考えられているが、1970年代になってから、陽子や中性子が、クォークと呼ばれる、素粒子の3つが、結合したものであることが、明確になってきた。

さらに、これらの素粒子の間に働く、力についても、新しいことが、分かってきた。

その理論は、自然界の基本法則を、統一的に理解しようとしていることから、統一理論と呼ばれている。

◇1980年前後から、この理論を、宇宙論に応用することが、始まった。

ガモフらが考えた、ビッグバン時代の前には、陽子や中性子ではなく、クォークが充満した、時代があり、それを、さらに遡ると、宇宙空間は、現在よりも、はるかに急激に、膨張していた、と考えられる、インフレーションの時代があった、という予想が、提出された。

このような研究は、現在も続いているが、その時代のことが、直接に、観測できるわけでもなく、また、統一理論にも、まだ、分かっていない多くの部分があるので、なかなか、確定的なことは、言えない。

最近になって、人工衛星を使った観測などを通じて、インフレーション時代の痕跡が、少しずつ、観測されるようになり、21世紀の宇宙論として、期待がもたれている。

【57】 惑星の形成

◇惑星が、ガスや塵の固まり（星雲）の収縮によって、誕生する、というシナリオは、18世紀から提唱されていた。

収縮する星雲が、回転していると、収縮の過程で、土星の輪のようなものができ、その輪の中の塵

が集積して、惑星ができるというのが、標準的な考えであった。
したがって、ガスが収縮してできた、地球の最初は、熱く、次第に冷えて、表面から固化する、というイメージになる。

19世紀の、地球収縮説の背景には、このようなイメージがあった。

◇しかし、太陽の自転速度と、惑星の回転速度の割合などの、詳細に基づいて、力学的に、計算してみると、回転する星雲の収縮によって、太陽系が形成される、というモデルでは、惑星の誕生を、うまく説明できない、という指摘が出た。

◇そのために、20世紀の初頭には、他の恒星が、太陽の横を、通ったときに、太陽の物質の一部を、引っ張り出し、それが、惑星になったという、分裂説が、有力視されるようになったが、これも、力学的に、不可能なことが判明した。

その結果、1930年代は、信頼性のある、太陽系の形成理論が存在しない、という状態にあった。

◇その後、星雲の収縮による、太陽系形成のモデルでは、想像以上に、複雑なプロセスが起きている可能性が指摘されて、星雲収縮説が復活した。

すなわち、太陽が生み出す磁場と、周囲にある、イオン化した原子の、相互作用によって、太陽の自転に、ブレーキがかかる、というプロセスが提案された。

また、天体の理論が発展して、星雲の主成分が、水素とヘリウムである、ことが分かった。

星雲内に、水素とヘリウムという、多量の物質があると、ガスや塵が集積して、微小な惑星（微惑星）ができやすい、ことも分かってきた。

◇現在において、基本的に、認められている、太陽系の形成のシナリオは、1960年代から1970年代にかけて、確立された。

それは、太陽の周囲に、円盤状の原子雲ができて、その中で、まず、小さな惑星（微惑星）が誕生し、それらが、次第に集まって、大きな惑星になっていく、というものである。

◇太陽系の理論は、現在、コンピュータによる、計算の世界に移されて、上のシナリオの、より細かな部分が、計算されている。

微惑星の形成に関する問題など、なお、検討すべき課題は、あるのだが、地球と木星の違いの原因など、惑星のさまざまな性質が、理論的に、説明できるようになっている。

【58】 月の形成

◇19世紀の末に、月は、地球から分離したものと推定したのは、進化論のチャールズ・ダーウィンの息子、ジョージ・ダーウィンだった。

しかし、地球から、月を引っ張り出すようなプロセスが、見つからなかったため、この分裂説は、次第に忘れられていく。

◇その後、検討された理論には、月と地球の同時形成説（別名、兄弟説）、他の場所で作られた惑星が、地球に捕えられたという説（捕獲説）などがある。

しかし、それらの説は、月の密度が、地球の平均密度よりも、かなり小さいこと、などを、うまく説明することが、できなかった。

◇1970年代には、巨大衝突説が登場した。

火星レベルの大きさの惑星が、地球に、斜め方向から衝突し、散らばった破片が集積して、月になる、という説である。

このような衝突が、実際に起きたとすれば、わずかな期間（1ヶ月程度）のうちに、月が形成されることは、最近のコンピュータ計算で、確かめられている。

巨大衝突では、地球の外側（マントル）の、比較的軽い物質が、月になるので、月の物質が、平均して、地球より軽くなることを、説明することができる。
地球だけが、これほど大きな衛星をもつ、惑星である、という事実も、月の形成には、このような特殊なプロセスが働いた、という考え方を、支持している。

【59】 地球に関する物理学的知識

◇19世紀に、地質学が確立したが、その地質とは、地球の表面の部分の意味する。
地球の構造や、造山プロセスなど、地球の変化を、捉えるためには、地質以外の、多くの情報が、必要になる。

◇そのような情報の一つが、ヒマラヤで、重力の測定をしていたときに、発見された、重力異常である。
これによって、大陸を構成する岩石は、海底の岩石とは、別種のものであることが、示唆された。

◇地震からは、さまざまな形で、直接に、地球内部の情報を、与えられる。
まず、地球上で、地震が起きる場所は、非常に偏っており、そこでは、何か特殊なことが、起きていると分かる。
震源の深さも、重要な情報である。
また、地震波の伝達は、震源地に限らず、地球全体についての情報を、与える。
地震波の伝達速度によって、それが通ってきた部分の、密度や固さを、推定できるからである。
さらに、地震波には、縦波と横波があるので、それぞれの速度を調べれば、情報が、増えることになる。

◇地震波によって得られた、情報の一つは、「モホ面」が存在する、ことである。
1909年、モホロビッチは、地下30km付近に、地震波の速度が、急激に大きくなる部分のあることを、発見した。
以降、この「モホ」面よりも、上を地殻、下をマントルと、呼ぶようになる。

◇地球の全重量と、岩石の平均重量の比較から、地球の中心部には、鉄などの重い元素が集まった、コア（中心核）があると、予想されていたが、1906年に、地球の中心部には、地震波の速度が、急激に遅くなる領域のあることが、指摘された。
その部分では、横波が伝わらないことが、分かったので、液状であることが、確認され、地球の中心部では、高温の鉄が、液状になっていることが、推定された。
また、液状部分の、さらに中心部は、固体になっていることも、分かったが、それは、圧力が高いので、鉄が固化しているものと、解釈された（物質は、一般に、圧力が高くなると、融点も高くなる）。

◇このようにして、地球は、外側が地殻、その内側がマントル、中心部は、液状の外核と、固体の内核から、構成されていることが、分かったのである。

◇もう一つの、重要な情報は、岩石がもつ、残留磁化である。
マグマが、冷えるときに、その中の鉄成分が、磁化（微細な磁石になること）する。
そのときの、磁化の方向（N極の向き）は、その時点での、地磁気の方法になる。
もしも、その岩石が、移動すれば、岩石の磁化の方向が、地磁気の方法と異なるようになるので、岩石が移動したことの、証拠になり、移動の方向についての情報も、もたらす。
この残留磁化は、極めてわずかなものだが、1950年頃に、地磁気の100万分の1までの磁場を測定できる、磁力計が、開発されて、観測が可能になった。
これは、その後の、地球科学の革命において、決定的な役割を果たす。

【60】 大陸移動説、海底拡大説、そしてプレートテクトニクス

◇南米の東側が、アフリカの西側に、北米の東側が、ヨーロッパの西側に、それぞれの海岸線の形が、対応しているように見えることから、かつては、一体だったのではないかと想像した人は、19世紀にもいた。

20世紀になって、アルフレート・ヴェーゲナーが、大陸移動説を、提唱した。

ヴェーゲナーは、気象学者だったが、大西洋の両側の生物や化石の、類似性などを、根拠にして、1912年に、大陸の分裂・移動を主張し、学者たちの注目を集めた。

◇彼の主張は、1920年代に、活発な議論をもたらしたが、多くの学者、特に、北米の人たちは、一貫して、冷ややかであったようだ。

大陸のような、巨大な塊の動く理由が分からず、動いているという、具体的な証拠も、得られていなかったからであろう。

地球の内部（マントル）の対流が、原因である、と主張した人もいたが、具体的な証拠がなかった。

◇ヴェーゲナーは、静止している海底を、大陸が動いていくというイメージを、もっていたようだが、実際には、そうではなかった。

板状（プレート状）になっている、海底の岩石が、いくつかの方向に向けて、動く。

そのために、プレートに乗っている、両方の大陸が、離れていく、というのが、正しいイメージだったのである。

1960年代になって、そのいくつかの証拠が、次々に、発見される。

◇まず、20世紀には、軍事上の理由から、海底の地形が、詳しく調べられるようになった。

そして、大西洋の北から南まで、あるいは、南太平洋やインド洋の東西に、海嶺と呼ばれる、峰が続き、その中央には、溝があることが分かった。

この海嶺は、地下から湧き出した岩石が、両側に引っ張られて、離れていく場所だと、想定される。

また、海底には、逆に、海溝と呼ばれる、深く掘り下げられた場所があって、地震が発生する場所は、海嶺と海溝の付近に、集中していることも分かった。

つまり、この付近において、物質の特殊な移動が、起きているものと、考えられる。

◇これらのことから、1960年に、アメリカのハリー・ヘスは、マグマが、海嶺の下から上昇し、冷えて岩石になり、それが、海底を横に移動して、海溝で、地球内部のマントルに、沈み込んでいくという、海洋底拡大説と呼ばれる、考え方を提唱した。

移動する岩石は、板状になっているので、後に、プレート（板）と呼ばれるようになる。

[注：海洋底拡大という名称は、厳密には、大西洋には当てはまるが、太平洋の場合は適切ではない。アメリカ大陸は、大西洋中央の海嶺から西へ移動するプレートの上に乗っているため、大西洋は拡大する。しかし、東南太平洋の海嶺から北西に移動してきたプレートは、日本近くの海溝で地中に沈み込んでしまうので、太平洋は拡大していない。]

◇ハリー・ヘスの説を支持する、残留磁化という、強力な証拠が、すぐに現れた。

100万年程度のスケールで、地磁気の方法が、何度も、逆転していることは、既に分かっていた。

海嶺で、地下から上昇するマグマは、冷えて岩石になるときに、その時点での、地磁気の方法を向いた磁気を、帯びる。

したがって、その岩石が、海底を横に移動していくとすれば、海底の岩石の磁気の方法は、過去の地磁気の逆転現象を反映して、海嶺の上から見ると、岩石の磁化が、北向きの所と南向きの所とが、交互に並んでいるはずである。

また、岩石が、海嶺から、左右に移動していることを考えると、岩石に記録されている、磁気の方向は、海嶺を挟んで、左右が対称になっているはずである。
そして、1963年から1966年頃にかけて、そのように、なっていることが、いくつかの場所で確認された。

◇プレートという考え方は、陸地についても、新しい見解をもたらした。
陸地を構成する岩石（主として花崗岩）が、海底の地殻を構成する、玄武岩よりも、かなり軽いことは、以前から知られていて、重力異常などの事象から、大陸は、地球の表面に浮ぶ、氷山のようなものだと、イメージされていた。
したがって、大陸が、プレートの上に乗って、移動するという、大陸移動の説明は、自然な形で、受け入れられた。
大陸が移動する、原因が分かると、大陸や山脈の形成についても、新たな見方が、できるようになる。
このように、海底に限らず、陸地を含む、地球表面の全体のことを、プレートの動きをベースにして、考える理論を、プレートテクトニクスと呼ぶようになっている。
テクトニクスとは、「動きについての理論」という意味である。

【61】 大陸の形成

◇プレートテクトニクスでは、地表（時代によって、少しずつ変わっていく）は、何枚かのプレートで覆われている、と考える。
それらのプレートは、さまざまな方向に、動いているので、あちこちで、衝突をすることになる。
衝突をした、プレートの双方に、陸地が乗っていると、それらが合体して、大きな陸地になり、場合によっては、盛り上がって、山脈ができる。

[注：水平方向に動いてきた、2枚のプレートが衝突すると、片方のプレートは、他方の下に沈み込むが、その上に乗っている、陸地を構成する岩石は、軽いので、地表に残る。]

◇山脈の起源についての、信頼できる理論が、初めて、登場したのだ。
世界の、大きな陸地や山脈が、どのようなプレートの衝突で、形成されたのかが、その地層を見ながら、調べられた。
地質学は、山脈の真の形成過程を、考え出すことは、できなかったが、プレートテクトニクスでの造山過程を、検証する上では、重要な役割を果たした。

◇以上は、すでに存在している、陸地の変化についての話だが、プレートテクトニクスは、陸地そのものの起源、すなわち、花崗岩の起源についても、新たな見解を、もたらした。
この問題では、岩石学が、重要な役割を果たした。
1950年頃、ノーマン・ポーエンらは、水分を多く含んだ岩石は、圧力が高まると、比較的低温で、部分融解し（成分の一部が、融解すること）、花崗岩に似た、成分をもつ、マグマが生成することを、実験で示した。

◇この事実は、プレートテクトニクスと、容易に結びつく。
海嶺の下から上昇した、マグマは、海水に接触するので、固化するときに、水分を含む。
また、その岩石（プレート）が、海底を、横に移動するときにも、さらに、水分を吸収することになる。
それが、他のプレートと衝突して、再度、地下に沈み込むと、高温・高圧になり、しかも、水分を含んでいるので、花崗岩質のマグマを、容易に、生み出すことになる。
それらのマグマが、上昇して、固化すれば、大陸をつくる、岩石となる。

つまり、地表では、地球が誕生して以来、プレートの運動とともに、大陸が、少しずつ増えてきたのだ。

実際には、花崗岩といっても、成分には、かなりの幅があり、その形成には、さまざまなプロセスが絡んでいるのだが、花崗岩が形成される、プロセスの基本が、分かったことで、陸地の起源という、大問題に対する、考え方が、確立された。

【62】 プレートテクトニクスの問題

◇プレートテクトニクスは、地球科学に見られる、さまざまな現象を、統一した、地球科学の、初の実証的な理論であり、まさに、1960年代に、地球科学の革命が起きた、といっても過言ではない。

プレートテクトニクスは、地質学、岩石学、地磁気や地震波など、地球に関する、さまざまな、物理学的な情報を、取り入れて、固体部分の地表全体のことを説明する、理論となった。

◇しかし、プレートテクトニクスが、現象を理解するための、枠組みから、真の科学理論となるためには、プレートが、何故動くのかを、明らかにしなければならない。

◇プレートの下で、融けた状態になった、マントルが、対流を起こしているからだ、というのが、最初の考え方だったが、それには、疑問が呈されている。

たとえば、海嶺が、真っ直ぐには延びずに、ジグザグの形をとることが、多いのだが、これは、マントル対流論では、説明するのが難しい、現象である。

◇最近、有力なのは、海底で冷えて、重くなった、プレートが、他のプレートと衝突して、地下に沈み込んだ部分による、引っ張りが、プレートの動きの原動力である、という考え方である。

◇プレートの動きの原因は、21世紀における問題として、残されている。

われわれは、地表の部分については、かなりのことを、理解できるようになったが、地球の内部については、まだ、知らないことが多いのだ。

【63】 気象現象とカオス

◇20世紀に発展を見た、地球に関係する、学問として、忘れてはならないのが、気象学である。

気象には、日々の天気予報、数カ月から数年にわたる現象、数千年・数万年・数十万年を周期とする現象、地球の歴史の45億5000万年の中で、起きた事象など、さまざまな、レベルのものがある。

◇その、それぞれについて、地質学的な調査を含む、観測の面で、大きな発展があったのだが、理論的にも、カオスという、現代物理学の一つの潮流の誕生に、結びつく、展開があった。

◇さまざまなレベルでの、理論に共通するのは、気候システムという、捉え方である。

気候現象の原動力は、太陽からやってくる、エネルギーだが、そのエネルギーが、どのように吸収・反射され、循環するのかは、大気だけではなく、海洋（特に海流）・積雪・氷河などの側面が、複雑に絡み合う問題である。

◇たとえば、極地が寒冷化して、海水が凍結すると、塩分濃度が上昇して、海水の沈み込みが起こる。

そうすると、温暖地から、暖流が流れ込んで、かえって、温暖化する地域も出現する。しかし、何らかの理由で、地表の一定以上の面積が、氷河で覆われるようになると、太陽光線の反射率が、増大するために、地球全体が、さらに冷却化し、地球の全体が、氷河によって覆われる、全球凍結という現象が起こり得る（そして実際にも起こった）ことも、指摘されるようになった。

◇さまざまな要素が、絡み合い、ある場合には、互いの効果を抑制して、安定な状況をつくり出し、また、ある場合には、周期的な変動を生み、また、ある場合には、互いの効果を強め合い、激変がもたらされるのである。

数年のスケールで繰り返される、エルニーニョ、この100万年の間に、7回ほど繰り返された、氷期―間氷期のサイクル、6億～7億年前に、起きたとされる、全球凍結など、興味深い研究が、なされてきた。

◇気象現象、とくに、天気予報などで、特徴的なのは、その予測の困難さである。地球の、ある場所で、蝶が舞うと、その1週間後の、地球の反対側の天候に、影響が出るということ（バタフライ効果）さえ、あり得るのだが、数学的な非線形ということが、キーワードになる。

◇「線形」とは、外部から、ある変化が、もたらされるときに、その大きさに比例する、影響が出るということだが、非線形の場合には、外部からの影響の大きさを、変えていくと、突然に、激変の生じることがある。

そうすると、わずかな変化によって、大きな相違が、もたらされる。

◇このような現象を、一般に、カオスと呼び、その研究は、気象学から出発して、1960年代以降に、数学や物理の分野での一つの流行になった。

◇気象の問題は、理論的にも、また、地球の歴史の中で、実際に、どのような変化が起きたのか、に関しても、本格的な研究が、始まったばかりだ、と言わざるを得ない。

■地 学■

【64】 大陸移動説からプレートテクトニクスへ

◇「動かざること大地のごとし」というように、日常の中で、大陸が動く、などと考える人は、いないだろう。

この常識を打ち破り、かつては、一つだった大陸が、分裂・移動して、現在のような、配置になったという、大胆な仮説「大陸移動説」を提唱したのが、ドイツのアルフレート・ヴェーゲナーだった。

◇この大陸移動説は、ヴェーゲナーの存命中には、認められず、次第に、過去のものと見なされがちだったが、プレートテクトニクスという、新たな装いの中で、復活して、地球科学に革命が起きたといわれる。

◇ヴェーゲナーは、1910年に、大陸移動の考え方を発想し、1912年1月6日、フランクフルトの地質学会で、大陸移動説に基づく「地殻の大規模な特徴（大陸と海洋）の成因に関する地球物

理学的基礎」と題する講演を行った。

同年1月10日には、マールブルグの自然科学振興協会で、「大陸の水平移動」という題の講演を行った。

そして、この年の内に、「大陸の起源」と題する論文が、2つの雑誌に発表された。

◇ヴェーゲナーは、1912年の夏から、1913年の夏にかけて、コッホ隊のグリーンランド探検に参加し、1914年には、第一次大戦に応召して、2度の負傷により、戦闘の前線から退いた。

◇ヴェーゲナーは、1915年には、大陸移動説を、まとまった形で主張する『大陸と海洋の起源』を出版し、1919年には、『大陸と海洋の起源』の第2版を出版し、その後も、改訂を続けた（最終版は1929年の第4版）。

ヴェーゲナーは、1924年には、グラーツ大学（オーストリア）の地球物理学および気象学の正教授に就任した。

◇1929年の予備調査の後、1930年4月には、ヴェーゲナーを隊長とする、ドイツ隊が、グリーンランド探検に出発した。

ヴェーゲナーは、グリーンランドの氷床が、北半球の気象に及ぼす、影響を探る、という目的をもって、精力的に調査を続けた。

しかし、1930年11月1日、ちょうど50歳の誕生日に、ヴェーゲナーは遭難し、帰らぬ人となった。

【65】 ヴェーゲナーの大陸移動説

◇ヴェーゲナーは、『大陸と海洋の起源』において、当時、有力であった、2つの説を取り上げて、それらを同時に認めようとする、不合理を生じるが、大陸移動説ならば、解決することができる、と説く。

◇「陸橋説」は、古生物学者、生物地理学者を中心に、広く信じられていた。

「陸橋説」とは、現在、海洋によって、遠く隔てられている、大陸の間に、ミミズやカタツムリのような、海を渡るとは考えにくい、動植物の近縁種が、分布することを、説明するために、かつては、大陸間をつなぐ、陸橋が存在し、それが、ある時点で、海に沈んだ、という考え方のことである。

◇「(大陸と海洋の) 永久不変説」は、大陸地殻と海洋地殻の組成の違いと、アイソスタシー（地殻均衡説）の考え方という、地球物理学の成果に基づいて、提唱された立場で、大陸が、大規模に、海洋化することは、あり得ないとする説である。

◇当時、地球収縮説が、ヨーロッパの地質学者に、広く信じられており、陸橋説にとっても、都合のよいものだった。

ヴェーゲナーは、その当時までに、明らかになっていた、地球物理学的な事実から、地球収縮説を否定して、永久不変説を支持した。

そして、陸橋説が、説明しようとする、事実の存在を認めた上で、陸橋が、沈降して、海洋になることはなく、動植物の類似は、現在は離れている大陸が、直接に接続していたことを示す、ものだと説明する。

◇彼の「測地学的議論」[注：地球の形や大きさを正確に知ろうとする研究を測地学という]では、天文学的観測による、大陸間の経度変化の測定から、大陸移動を、直接的に証明しようとしている。グリーンランド探検の目的の一つに、測地学的観測が、含まれていた。

ただし、報告の中には、観測値が大きすぎて、現在では、観測誤差と考えられているものもある。

[注：異なる大陸上の2地点で、同一の天体を同時刻に観測することを、長年にわたって続ければよいのだが、正確な同時刻がなかなか得られなかった。]

◇「地球物理学的議論」の中で、ヴェーゲナーは、当時に議論されていた、アイソスタシーに関するプラットとエアリーの説を比較している。

ヴェーゲナーは、エアリー説を支持しながら、プラット説にも利点がある、としているが、現代において、受け入れられている、モデルに近い、考え方をしている。

いずれにしても、大陸の大規模な沈降によって生じる、海洋化は、地球物理学的に、不可能であることを明白に示している。

◇ただし、ヴェーゲナーの心中には、アイソスタシーに基づいて、密度の小さい、シアルからなる大陸地殻が、「海に浮ぶ氷山のように」密度の大きい、シマの上に浮んで移動していく、というイメージがあったように思われるが、この点は、その後においても、認められることはなかった。

[注：シアルとは、花崗岩を代表とする、珪素（シリカ）とアルミニウムを主成分とする岩石。シマとは、玄武岩を代表とする、珪素とマグネシウムを主成分とする岩石。]

◇さらに、放射性元素という、新たな、地球内部の熱源の発見が、地球収縮説ではなく、大陸移動説の方に、有利である、と述べられている。

◇「地質学的議論」として、ヴェーゲナーは、大陸の間における、岩石の年代、地質構造や山脈の連続性などから、大陸の移動を、証明しようとしている。

ヴェーゲナーが用いる、例えば、ちぎられた、新聞紙の断片の形が、偶然に合致することは、あるかもしれないが、印刷されている、記事の文字までが、偶然に、一致することは、あり得ない、と言う。

◇「古気候学的議論」とは、過去の氷河、岩塩・石膏などの蒸発岩、石炭、などの分布に基づいて、地質時代の気候帯を、復元しようとするものであり、ヴェーゲナーが、力を注いだ点であった。

単に、過去の気候帯が、現在とは、異なっていた、というだけでは、「極移動」（地球の自転軸の極、磁極の位置が移動し、地球の、公転面に対する、向きが変わること）によっても説明できる。しかし、たとえば、現在では、距離が離れている、南極・南アフリカ・南米・オーストラリア・インドなどの大陸に、共通して残っている、石炭紀からペルム紀にかけての、氷河の痕跡は、当時、それらの大陸が、一カ所に集まっており、その後の大陸の移動によって、今の位置に、分散をしたと考えないと、つじつまが合わないと、ヴェーゲナーは主張する。

◇ヴェーゲナーは、1924年に、著名な気候学者で、義父でもある、ケッペンとの共著で、『地質学的過去の気候』を著している。

[注：この本の中では、気候変動の原因に関するミランコヴィッチの仮説も紹介されている。ヴェーゲナーとミランコヴィッチは、当時、広く受け入れられなかった互いの学説に関する、数少ない真の理解者だった。]

◇後年における、大陸移動説の復活と、プレートテクトニクスの誕生に、大きな役割を、果たしたのは、古地磁気学の進歩によって、作成が可能となった、詳細な極移動曲線だった。

しかし、そのような方法が、知られていなかった、当時にとっては、ヴェーゲナーの「極移動」に関する議論は、十分に周到なものであった。

彼は、地球の極が、内部的に移動したのか、それとも、地球の表層の、大陸が移動したのか、を判定する必要性にも、言及しているのだ。

◇『大陸と海洋の起源』の「移動の原動力」を扱う章の冒頭で、ヴェーグナーは、「大陸移動説におけるニュートンはまだ現れていない」と述べている。

◇ヴェーグナーの大陸移動説が、彼の存命中に、認められなかった、最大の理由は、大陸移動の原動力が、不明であったからだ、とされている。

【66】 海洋底拡大説の登場

◇地球の表面の、7割を占める、海洋は、永らく未知のベールに、包まれていたが、さまざまな測定技術の進歩によって、系統的なデータが、集まるようになった。

まず、1920年頃から始まった、音響測深法の進歩によって、広範囲にわたる、詳細な海底地形が、判明してきたことが、重要である。

◇大西洋の中央に、地形的な高まりがあることは、19世紀後半に、大西洋横断海底ケーブルを敷設した際に、すでに気づかれていた。

1950年代までには、世界中の大洋の中央に、巨大な海嶺が続いていること、それらは、玄武岩質の溶岩を流出する、火山で、海嶺の中軸部には、横方向への張力で、形成されたと考えられる、谷（リフト）があり、地球収縮説はもとより、大陸上の山脈と同様の成因では、説明できないことが、明らかになってきた。

◇また、地球内部からの、熱の流出（地殻熱流量）を、海洋上で測定する技術が、開発された結果、それら熱流量が、海嶺の中軸部では、周辺より、多くなっているという、重要な観測データが、得られた。

◇中央海嶺の位置と、地震の震源の分布が、一致することも明瞭であるが、その震源は浅く、日本列島で起こるようなものとは、全く性質が異なる。

人工地震を用いて、海底の地質構造を探究し、海洋上で、重力を探查した結果、大陸の地殻と違って、海洋の地殻は、薄くて、玄武岩質のみからなることも、明らかになった。

◇このように、大陸地殻と海洋地殻は、互いに、異質のものなので、この時点で、ヴェーグナーが主張した通り、大陸の沈降による海洋化は、不可能であることが、ほとんど自明になっていた。

◇玄武岩のような、火成岩は、マグマが、冷え固まって、できたものだが、含まれる鉱物のうち、磁気を帯びるものは、キュリー点の温度以下になるときに、その場所での、地磁気の方向にしたがって、磁化する。

また、砂岩のような、堆積岩ができるときにも、磁気を帯びた粒子は、小さな磁針のように、振る舞うために、その場所での地磁気の方向に、磁化する。

◇これらの岩石中に、保存された、残留磁気の研究は、大きくは二つの面から、大陸移動説の復活と、新しい地球科学の誕生に向けた、最大の立役者になった。

その1は、岩石残留磁気の示す、伏角や偏角から、岩石の生成の当時における、その地点の緯度・経度、逆にいえば、その地点と、地球の磁極の位置関係、を推定することが、可能となり、より直接的に「極移動曲線」を作成することが、できるようになった。

◇赤道上で、正しく水平になる磁針は、北半球では、N極が下がるが、その水平から下がった角度、すなわち伏角は、緯度とともに大きくなり、北極では90度となって、N極は真下を向いてしまう。南半球では、逆に、S極が下がり、N極が上がる。

◇ロンドン大学のブラケットらが、インドのデカン高原に分布する、玄武岩を中心に、系統的に、

残留磁気を測定したところ、インドでは、中生代ジュラ紀に、上向き 64 度もあった伏角が、次第に小さくなり、新生代第三紀中新生には、下向き 17 度となることが、明らかになった。彼らは、これを、極の移動ではなく、固定した磁極に対する、インド亜大陸自体の移動と考えて、インドが南緯 40 度の位置から北進し、赤道を越えて、現在の位置までやってきたものと、結論づけた。

◇一方、ニューカッスル大学のランカーンらは、大陸は固定していて、極が移動したという立場に基づいて、イギリス本国やヨーロッパ各地で、精力的に残留磁気を測定し、極移動曲線を完成した。ところが、続いて、北米大陸のデータから、極移動曲線を作り上げてみると、ヨーロッパと北米大陸、それぞれの極移動曲線は、同様の移動の傾向を、示すものの、地質時代を遡るとともに、一定の角度で、ずれることが分かった。

これを、大陸移動ではなく、極移動で、説明するとなると、現在は 1 つの北極が、以前には 2 つあり、しかも、古い時代ほど離れていたという、無理な説明を考えなければならない。

ところが、移動したのは、磁極でなく、大陸である、という立場を認めると、移動した大陸を、大西洋を閉じるように、元に戻していけば、極移動曲線も、一つに一致することになって、多くの難問が氷解する。

◇その 2 として、岩石中に保存された、残留磁気の研究から、もう一つの重要な事実が、明らかになった。

それは、地磁気の北極・南極が、現在とは、ほぼ反対になっている、磁気があるという、地磁気の逆転現象である。

◇地球上で、最も古い岩石が、どこにあるかという、それは必ず、大陸の内部に限られる。

広大な海洋底には、古い岩石が存在しそうだが、実際には、中生代ジュラ紀（約 2 億年前）より古い岩石は存在しない。

アメリカの深海掘削計画がもたらした、大量のデータに基づいて、海洋底の岩石の年代を、調べると、海嶺の付近が最も新しく、両側へ遠ざかるに従って、対称性を示す形で古くなり、海溝の付近で最も古くなることが分かる。

◇このように、さまざまな方面から、新しい事実が、得られていく中で、1962 年、ハリー・ヘスが、海洋底拡大説を提唱した。

海洋底が、マントル対流の湧き出し口である、中央海嶺でつくられ、ベルトコンベアのように、両側に移動して、海溝で沈み込むという、海洋底拡大説は、結果的には、アーサー・ホームズのマントル対流説（1929 年）と、非常に近いものになっていたが、ヘスが、海洋底拡大説に行き着いたのは、あくまでも、さまざまな新事実を、統合的に説明しようとした、結果であった。

[注：プレート移動の原動力：最近では、プレート移動の原動力について、マントル上に載っているプレートがマントル対流の水平的な動きに引きずられて移動するという説は、現実的でないと考えられ、むしろ、海溝で沈み込むプレートの縁の部分（スラブという）が「テーブルクロスがずり落ちるように」自重で引っ張るというモデルのほうが主流になっている。]

◇ヘスの海洋底拡大説に対する、科学的な証明は、思いのほか早く現れた。

その一つが、ヴァインとマッシューズによる「テープレコーダーモデル」（1963 年）であった。

岩石残留磁気の測定から、海洋底の、磁極の正逆を記録すると、海嶺に平行的な、縞模様になることが知られ、その成因は、謎とされていた。

ヴァインとマッシューズによる「テープレコーダーモデル」により、この謎は、海洋底が、海嶺でつくられるときに、岩石が、その当時の、地磁気の正逆に従って、磁化をした結果であるとすれば、説明が付き、実際にも、正磁極期・逆磁極期の縞模様が、海嶺を軸として、左右が対称になっていることが、示された。

◇海洋底拡大説にとって、もう一つの、決定的な証拠になると同時に、プレートテクトニクスへの最大の転換点になったのは、カナダの地球物理学者、ツーゾー・ウィルソンによる、トランスフォーム断層の提唱であった（1965年）。

◇地層や岩盤が、ずれてできる断層には、正断層や逆断層のような、縦ずれ断層のほか、横ずれ断層もある。

海洋底の地磁気縞模様を図示すると、直線を境に、横ずれしているところが、多く見られる。

◇海嶺には、その軸に直交する、断裂帯が、頻繁に現れ、それらは、一見して、通常の横ずれ断層のようにも思える。

ところが、ウィルソンは、それらの断層が、単なる横ずれ断層とは異なる、ことを見抜き、トランスフォーム断層という、新しいタイプの断層の概念を、提唱した。

◇海嶺と直交する、トランスフォーム断層がある場合、そこでの、ずれの向きは、たとえば、通常の横ずれ断層によって、尾根がずれる場合に、予想される動きとは、全く逆になっているし、海嶺に達した地点では、断層が、突然に消えてしまう。

海嶺に達した地点で、断層が突然消えてしまうという現象に対して、ウィルソンは、断層が、海嶺という別の構造（別のプレート境界）に、トランスフォーム（変容）するのである、と結論した。

◇重要な点は、ウィルソンが、検証が可能な、幾つかの予言をしたことで、その中には、サンフランシスコやロサンゼルス地震の震源として有名な、サンアンドレアス断層が、トランスフォーム断層であること、そして、その南端だけでなく、北端にも、未知の海嶺があるはずだ、ということも含まれていて、これらは、見事に実証された。

◇ここに、①島弧-海溝型（プレートが互いに近づく境界）、②海嶺型（プレートが互いに遠ざかる境界）、③トランスフォーム断層型（プレートがすれ違う境界）という、3つのタイプのプレート境界が出そろふことになり、ついに、プレートテクトニクスが発見するための、素地が整った。

【67】 プレートテクトニクス革命

◇プレートテクトニクスと、ヴェーゲナーの大陸移動説の最大の違いは、実際に移動するものが何であるか、という点にある。

◇ヴェーゲナーは、シマの上に浮んだ、シアルからなる大陸が、海に浮ぶ氷のように進む、というイメージから、離れることができなかった。

これは、現在の用語で言えば、大陸地殻（上層部）が、海洋地殻の上を、移動する、ということに相当する。

◇一方、プレートテクトニクスでは、地殻とマントル上層部を合わせた、厚さ約100kmのリソスフェア（「岩石圏」という意味。冷たく固い層。）が、プレートとして、移動すると考える。

◇プレートテクトニクスでは、地殻とマントルの境界である、モホロビッチ不連続面よりも、リソスフェアからアセノスフェアへ変移する、上部マントル低速度層を、重視する。

（アセノスフェア：「軟弱な圏」といった意味。部分的な熔融状態にあり、流動しやすい層。地震波の速度が遅くなるので、リソスフェアとの違いが分かる。）

◇この結果、プレートテクトニクスでは、ヴェーゲナーが、乗り越えることのできなかった、大陸移動の原動力の問題が、解消された（あるいは、ひとまず棚上げされた）のである。

◇大陸移動説が、ヴェーゲナーという、一人の天才に負うところが大きい、のとは対照的に、プレートテクトニクスは、多くの科学者たちが、それぞれの分野から寄与して、完成されていったものであるといえる。

その中で、異彩を放っているのは、ツーゾー・ウィルソンである。

◇ウィルソンは、トランスフォーム断層の他にも、ホットスポットという、ユニークな概念の提唱者(1963年頃から)としても有名だが、プレートテクトニクスは、地球科学における革命である、と宣言して、強かに唱道したことでも知られる。

[注：ホットスポット：中央海嶺や島弧の火山のようなプレート境界に位置するものと違って、ハワイ諸島のように、プレート内部にある火山の成因は、プレートテクトニクスにとって頭を悩ます問題だった。ウィルソンは、プレートより下のマントル上部に、ホットスポットという固定した「熱い点」があり、そこで発生したマグマが上昇すると考えた。この仮説は、ハワイ諸島―天皇海山列の配列とその噴出年代の規則性から証明され、プレートテクトニクスを支持する証拠となった。その後のプレートテクトニクスにつながる仮説と言えるかも知れない。]

◇ウィルソンは、ヴェーゲナーの大陸移動説の中に、旧来の地質学には、見られなかった、新しい地球科学的手法の萌芽を見抜き、自らの学説に、その新しい方法を体現しようとした、科学者であった。

すなわち、プレートテクトニクス以後の新しい地球科学では、モデルの提唱が、重要な役割を担っており、対抗するモデルとの間で、データによる検証がなされ、より説得的なモデルが、生き残ることになる。

【68】 プレート以後

◇プレートテクトニクスが、地球科学における、事実上のパラダイムとなった今、その先を目指す動きはあるのだろうか。

その一つとして、プレートの沈み込みに連動する、マントル内部での大規模な対流を論じる、プレートテクトニクスがある。

◇プレートテクトニクスも、ウィルソンが、すでに発案していたものだが、プレートテクトニクスの適用範囲が、地球の表層に限られるのに対して、プレートテクトニクスは、プレートテクトニクスをも、一部として包含するような、全地球的なテクトニクスの構築を目指すものと考えられる。当初は、検証の方法に乏しかった、プレートテクトニクスだが、最近では、地震波トモグラフィーなどの技術的な進歩によって、より具体的に検討することが、可能になってきている。

◇また、全地球史を通して、大陸の分裂・離散・衝突・集合といった、イベントを記載して、プレートテクトニクスから、説明しようという、動きも出てきている。

【68】 システムとしての地球

◇プレートテクトニクスは、固体地球、つまり、岩石や鉱物の固まりとしての地球、についての理論であった。

システムとしての地球では、海洋や大気という、地球の柔らかい部分について、記述する。

◇海洋と大気の振る舞いは、密接に結びついており、しかも、それらは、太陽系の中での、地球の動きとも関連していることが、次第に、明らかになってきた。

◇いくつかの要素が、互いに結びついて、一つのシステムを構成すると、全体として、独特の現象が出現する。

たとえば、過去に、何度か繰り返された、氷河期にしても、地球外からの影響のわずかな変動が、地球というシステムの、何らかのメカニズムに連動して、増幅された結果である、と考えられるようになっている。

◇生物は、地球 46 億年の歴史のほとんどを、地球とともに、生きてきたが、地球に育てられたばかりではなく、地球を変えてきた。

生物が、大気の約 20% を占める、酸素をつくり出した。

また、大気圏・水圏・地圏の間の、元素の循環において、生物は、本質的な役割を、果たしている。

◇このように、地球は、さまざまな要素が、絡み合った、一つのシステムである、という見方は、20 世紀の後半に確立されてきた。

【69】 海洋の探索

◇海洋の研究や、水循環の発想は、古代から見られ、17 世紀の地球論的な著作でも、繰り返し、取り上げられた。

イギリスのボイルは、海水の化学を研究し、その助手をしたことのある、フックは、海洋測深のための器具を開発した。

キルヒャーは、全地球的な循環や海流、さらには、海底山脈の存在にも、言及していた。

しかし、全地球的な体系が、展望されていたにもかかわらず、19 世紀になるまでは、世界には、多くの海洋が、探索されずに、残されていた。

たとえば、地理的な拡大の点で、後発国であった、イギリスなどが、切り開こうとした、北東航路や北西航路は、18 世紀を通じて、実現されなかった。

◇最初に、北東航路の航海が、実現したのは、当時は、スウェーデンに属した、フィンランドのノルデンシェルドによる、航海（1878～1880 年）であった。

ノルデンシェルドのヴェガ号が、困難な北極海ルートを切り開き、1879 年に、ベーリング海峡から日本に向かう途中に、黒潮に遭遇したことが、記録されている。

◇他方、カナダの北辺を回る、北西航路は、20 世紀の初頭に、ようやく、ノルウェーのアムンゼンの航海（1906～1908 年）によって、切り開かれた。

◇ノルデンシェルドが来日する、4 年前の 1875 年には、イギリスのチャレンジャー号が、横浜に入港している（航海期間は 1872～1876 年）。

チャレンジャー号は、ワイヴィル・トムソン（1830～1882）の指揮の下に、数百回に及ぶ深海測深や、気象・海流・海水温度・化学成分・生物・海底堆積物などの、観測と観察を行っている。すべての調査結果は、20 年後の 1895 年に、50 巻に及ぶ大報告書となって結実し、海洋学の古典となる。

この航海の成果の一つに、トムソンが、海底山脈の存在を、測深によって、実証的に確認したことがある。

トムソンによると、大西洋の東側と西側では、水温の差があり、東側が常に 1 度ほど高いという事実から、海底に、何らかの遮蔽物が、存在することが推定されたが、これが、測深によって確認されたという。

◇こうした、世界周航の調査船とは別に、19 世紀の終わりにかけて、大陸間の海底ケーブルが敷設され、それに伴い、深海底の基質や生物に関する情報が、徐々に、蓄積されて行った。

◇1893年、ノルウェーのナンセンは、氷結に対する、耐久性を高めたフラム号で、北極海の横断を試みた。

これは、数年をかけて行われた、一種の漂流実験だったが、その結果、船の進行方向、すなわち、海流の方向が、風下方向から右に、20度から40度の幅で、それて行く現象が見出された。ナンセンは、このことを、ノルウェーの気象学者、V・F・ビャークネスに伝えて、理由を尋ねたところ、ビャークネスの弟子、スエーデンのエクマンが明快な答を出した。

◇V・W・エクマン（1874～1954）は、密度が一定で、無限に広く深い海である、という仮定の下に、風と海面に働く摩擦の力として、渦動粘性係数を導入し、風の応力による海流、すなわち、吹走流が、地球の自転による、見かけ上の力である、偏向力（コリオリの力）のために、右旋回することを、理論的に示した。

以上のことは、1905年に、「海流に及ぼす地球の回転の影響について」という題名の論文として発表され、海洋物理学史上の画期的な成果となった。

◇水産業や農業に与える影響の大きい、気象や海象の現象を予測することは、北欧社会には、死活的な問題であった。

そのため、北欧諸国は、地球科学の発展に、力を尽くしてきたが、20世紀への、変わり目あたりからは、広域的な観測のデータを有効に利用するために、国際的な組織づくりを目指して、イニシアティブを発揮し始める。

デンマークの海洋学者、オットー・ペッテルソン（1848～1941）が提唱して、1899年に、国際海洋探求準備会が、ストックホルムに設立された。

これは、1901年に、国際海洋探求会議に発展し、第二次世界大戦の直前に、国際的な湾流観測が実施される基盤になった。

◇20世紀の海洋学の発展には、国際協力とともに、海洋観測の国家的な事業化と海洋学研究の制度化の方向が、色濃く出てくる。

◇1912年、タイタニック号が、氷塊と激突して沈没した、事故の以降には、海面下の物体を、反響音で捉えるという試み、が開始される。

この技術は、第一次世界大戦で、潜水艦が、戦力として投入されたこともあって、アメリカやフランスで実用化が進んだ。

電子工学的な音響測探器を、初めて実用化して、海底の地形の複雑な姿を、明らかにしたのは、ドイツの南大西洋探索であった。

◇ドイツは、1925年から1927年にかけて、海洋学者、アルフレート・メルツ（1880～1925）の指揮の下で、観測船メテオール号によって、先駆的な深海調査を行っている。

メテオール号は、南大西洋の特定海域に絞って、海況を詳細に探査した。

大西洋を14回にわたり、横断して、深海の水の動きと混じり具合、すなわち、赤道下の深海を南流する、10cm/sのゆっくりした動きや、中層域における、北部から赤道方向への冷水の張り出しを測定した。

この事実は、1955年になって、北大西洋の西側の深層で、高緯度から低緯度に向かう、10cm/s以上の速さの流れが、実験的に確認された。

◇日本では、1930年代に、海洋の一斉調査が進んだ。

水産試験場の宇田道隆（1905～1982）が関与した、1930年の計画では、樺太南部から、日本の四島、朝鮮半島を含んで、台湾に至る範囲の海域の60カ所以上で、水産試験場などの船舶が、一斉調査に入った。

一斉調査の方式では、多数の観測点が、同時に確保されて、同一時間帯の海況を捉えるのに大きな威力を発揮することになって、黒潮と親潮の相互作用や、海流と冷夏の相互関係、黒潮蛇行の問題、などの解明に成果を上げるようになった。

【70】 海洋大循環モデルの作成

◇第二次世界大戦後の、本格的な海流の調査で、重要な試みは、アメリカが 1950 年に行った、湾流の共同観測である。

オペレーション・キャボットと呼ばれた、この一斉観測では、2機の航空機が投入されて、鳥瞰的な海流観測の可能性を開いた。

◇このような観測事業の、積み重ねの上に、1957年から1958年までの国際地球観測年の国際協同観測事業が成立して、グローバルな観測体制を構築するために、重要なステップになった。

[福永注：国際地球観測年：ブリタニカから引用：普通、1957年7月1日から58年12月31日までの18ヵ月間を指し、その期間中に行われた、地球物理学現象についての国際協同観測事業をいう。従来、地球の両極地方の研究のために行われてきた国際極年と称する協同観測事業の観測対象を全地球およびその周辺に拡大したもの。地震、重力、氷河、気象、海洋、地磁気、オーロラ、大気光、電離層、宇宙線、放射能、太陽活動などがその対象。ロケット、人工衛星が手段として、また対象として扱われ、南極観測が大規模に行われたのがその特徴。また、太陽活動は、極大の時期に当たっていた。]

◇ソヴィエト連邦とアメリカによる、人工衛星の打ち上げは、宇宙空間から、海洋を観測できるようにして行く。

こうして、20世紀を通じて、多面的で組織的に、観測網が構築されたことが、海洋大循環の研究や、大気―海洋の相互作用による気候変動などの研究の、基礎になっていることを見逃してはならない。

◇すでに、1812年、アレクサンダー・フォン・フンボルトは、熱帯海域の低層の冷水は、南北両極から赤道へ向けて流れる、低層流が存在する、証拠であると主張し、海水の一般的な大循環と、航海に最も関係する、表層の海流を区別していた。

深海における、水流の実態が、分かってくると、そのモデル化が議論されるようになる。

◇アメリカの物理学者、ストンメル（1920～1992）は、1958年以降、深層の水循環を、理論的に研究した、成果を発表して行った。

海の表面では、熱の吸収による蒸発と、淡水の流入によって、塩分濃度に、地域差が生じる。

海水は、塩分濃度が濃いほど、比重が大きくなって、沈降することから、濃度差によって、水の循環が、発生する。

これを、熱塩循環と呼び、冷たく塩分の多い海水が、北大西洋の北部と、南極大陸の周辺、特に、ウェッデル海とロス海で沈み込んで、大規模な対流を生み出していることが、分かってきた。

◇1950年代には、海底地形の様相が、明らかにされつつあった。

コロンビア大学のラモント・ドハーティ地質観測所のブルース・C・ヒーゼンとマリー・サープは、音響測探による、海底断面図を、つなぎ合わせて、地球の海洋全体を8枚の地図にまとめ上げた。

これによって、人々は、初めて、リアルに描き出された、海底地形を、目の当たりにすることになった。

海中山脈である、海嶺が、延々と続いて存在し、地球全体にうねっていることが明白になった。

このような海底の実際に関する、研究成果は、海水循環論や海洋底拡大説にとって、重要な意義をもつことになる。

◇実際に、1980年代に入ると、深層水の動きを組み入れた、海洋大循環の様相が、明確に表現されるようになった。

A・ゴードンは、1986年の論文で、世界の海洋をめぐる、海水の移動経路を、図示し、グリーンランド沖で沈み込んだ、冷たい海水が、南下し、ウェッデル海周辺の南極起源の冷水を合わせて、太平洋に移った後に、湧き上がり、インド洋を経て、大西洋に巡回するという、ルートを明らかにした。

◇一方、コロンビア大学のウォレス・S・ブロッカー（1931～）は、海洋中の二酸化炭素の挙動を調べて、表層水と深層水が、千年の単位で入れ替わることを、見出した。

密度流と海底地形から描かれた図は、ブロッカーのコンベア・ベルトの図として、有名になった。

〔福永注：密度流：スーパー大辞林から引用：海水の密度の差によって起こる海流。密度の大きい方から小さい方へ流れる。〕

◇こうした大循環が、大筋で正しいことは、世界海洋循環実験という、国際共同研究計画によって証明された。

また、同時に、気候変動と海洋大循環が、密接に関係し合っていることも、広く受け入れられるようになった。

◇現在では、スーパーコンピュータを用い、モンスーンなどの他の要因も考慮した、さまざまなモデルが作られて、議論がされている。

全地球的海洋大循環の数値シミュレーションモデルとしては、ブライアンとコックスの1967年のモデルを基礎に、1988年から1992年にかけて、発展をさせた、セプトナーとチャーヴィンのモデルが、成功例として、知られている。

【71】 エルニーニョからエンソハ

◇北半球が夏の間において、ペルーの沖合は、ペルー海流と、冷水の湧き上がりによって、通常は、涼しく保たれ、栄養塩に富む、下層の海水の恵みで、よい漁場になっている。12月に入り、南半球に夏が訪れると、赤道付近の暖かい水が、南方へ逆流を始める。エルニーニョは、「神の子」を意味するが、もともと、クリスマスの直後に始まる、季節的な暖水の南下を指す、船員たちの言葉だった。

◇ところが、数年に一度、（南半球の夏の）エルニーニョが異様に強まり、（南半球の冬の）海水温が、下がらないままで推移する、ことが起こる。

このいわゆる「エルニーニョ現象」（以下では、「」なしで、単に、エルニーニョという）は、ペルーに異常気象をもたらす、漁業に打撃をもたらすと共に、太平洋の広範囲の地域に、影響を与えることが、分かってきた。

◇1957年は、国際地球観測年として、海洋や気象について、世界的な観測が行われたが、たまたま、この年に、エルニーニョが発生していたので、観測年の観測データを使って、60年代から、エルニーニョの本格的な研究が、始まった。

◇そして、ペルー沖の海域が、異常に高温であった、ばかりではなく、太平洋の赤道付近の、気圧配置や貿易風に、特徴的な変動が見られていた、ことも分かった。

◇遠く隔たっている、地域の気候が、何らかの相関関係をもって、変動する場合に、これを、テレコネクション（遠隔結合）という。

南米のブエノスアイレスとオーストラリアのシドニーの気圧が、数年の周期で、一方が上昇すると、他方が下降するという、シーソーのような関係にあることが、かなり以前から、知られていた。

1930年頃、インド気象庁の長官ウォーカーは、こうした現象が、赤道付近の幅広い地域における、降水量や風向き、あるいは、インドのモンスーンの発生と、関連していることに気づき、南方振動（Southern Oscillation）と名づけた。

ウォーカーは、これらの現象の相関関係は、過去数十年も続いてきた、と指摘したが、その当時は、あまり、注目されなかったようだ。

◇1960年代から、エルニーニョの研究が深まると、その発生が、南方振動と連動していることが分かり、専門家の関心を引きつけ始めた。

エルニーニョとは、東太平洋側の海域に、異常高温の部分ができる、現象だが、それが消滅している時期を、ラニーニャと呼ぶ。

そして、エルニーニョとラニーニャの移り変わりと、南方振動との相関が、明らかになった。

すなわち、ラニーニャの時期が、南米側で気圧の高い時期に、対応している。

◇1969年には、気象学者、J・ビャークネスが、エルニーニョと南方振動を、同時に説明する、海流と大気の相互作用に関する、具体的なモデルを提示した。

ビャークネスによれば、南米側が高圧のとき、南米から西に、強い貿易風が吹き、海表面の暖かい海水を、西太平洋側（インドネシア方向）に、吹き寄せる。

東側では、西に移動した、表面水の分だけ、海中から冷たい海水が上昇し、海水が低温になる。

これがラニーニャである。

このようにしてできる、太平洋の東西の温度差は、両側の気圧差を、さらに、拡大することになり、また、高温になった西側で生じる、上昇気流の一部は、高層部で、東に向かい、低層部での反流（西に向かう貿易風）を強める。

このように、大気の流れと海洋の流れが、絡み合って、ラニーニャの状態が、強化され、維持される。

◇しかし、何らかの理由で、貿易風が弱まると、西側に偏っていた、温暖な水が、逆流を初め、その結果として、温度の変化により、気圧が変化して、さらに風が弱まるという、逆の連鎖反応が起こり、エルニーニョの状態が発生する。

◇このように、エルニーニョと南方振動は、一体のものと見られて、エンソ（ENSO=El Nino and Southern Oscillation）と呼ばれるようになった。

◇エンソでは、海洋と大気の挙動の関連を考えて、初めて、それぞれの挙動を説明することができる。

このように、システムとして、いくつかの要素が、絡んでいるときに、互いに強め合う場合と、互いに弱め合う場合があり、前者を、プラスのフィードバック、後者を、マイナスのフィードバックという。

◇ところで、エンソに関する、上記の説明において、不明なのは、エルニーニョとラニーニャが、なぜ、周期的に入れ替わるのか、という点である。

大気と海洋の結合のシステム自体に、振動を引き起こすような、性質があり、それが、外部からの何らかの影響（季節の変動、インドのモンスーンなど）を引き金にして、発生す

る、というメカニズムが考えられており、具体的なモデルも、提示されているが、まだ、明確な答は、出されていない。

【72】 大気海洋結合モデルと地球温暖化

◇ビャークネスのモデルに、見られるように、大気と海洋は、密接に結びついている。
1969年、最初に、一般的な大気海洋結合モデルを、提案したのは、カーク・プライアンと真鍋淑郎だった。
これは、大気と海洋、陸地のすべてを合わせた、水や熱の流れを、追って行く、モデルである。
このモデルに基づく、成果として、有名なのは、地球温暖化の予測である。
温室効果ガスの二酸化炭素の増加によって、地球が、温暖化することは、すでに、1900年頃に、スヴァンテ・アレニウスやトーマス・チェンバレンによって推測されていたが、1970年代頃からは、大気の流れの効果なども含めて、コンピュータを駆使した、全地球的な計算が、できるようになったのである。
地球温暖化が、国際的に、公式に議論されるようになったのは、1988年11月に、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が設置されてからだが、その第1回報告書では、プライアンや真鍋らの予測結果が、大きく取り上げられた。

【73】 ミランコヴィッチ・サイクル

◇エンソ（エルニーニョ+南方振動）は、数年を周期とする、変動だが、地球の歴史を見ると、数万～数十万年を周期とする、気候変動も存在する。
その証拠の一つは、この百万年ほどの間に、7回ほど、繰り返されてきた、氷河（氷河期）である。

◇氷河が存在したことは、1830年代に、アガシが発見し、1840年に、著された『氷河の研究』では、過去に何回も、氷河期があったと、述べられている。
その後、氷河は、なぜ発生したのか、なぜ氷期一問氷期という、サイクルが、繰り返されたのか、という問題が、注目を浴びるようになった。

◇この問題に対して、20世紀の初頭（10～30年代）に、セルビアの天文学者、M・ミランコヴィッチが、1つの可能性を提示した。
ミランコヴィッチは、地球を、惑星系という、大きなシステムの中で考察し、氷期一問氷期というサイクルが、繰り返されたことの原因を、地球の内部の要素の絡み合いではなく、地球の外部の要素に求めた。
彼の主張は、注目を集めたが、その意義が、真に理解されるようになったのは、探査技術の向上で、過去の気候の変動が、明らかにされてきた、1970年代以降のことである。

◇ミランコヴィッチの発想は、次のようなものである。
地球は、太陽の周りを、ほぼ楕円軌道に沿って、回っている。
もし地球が、太陽の周りを回る唯一の惑星であれば、その軌道は、完全な楕円になるが、実際には、他の惑星の影響を受けるので、完全な楕円にはならない。
また、地球の地軸は、現在、軌道面に直角の方向から23度ほど傾いているが、この傾きも、月や他の惑星の影響を受けて、あるいは、地球の形が、完全な球形ではないために、変動する。
これらの変動が、地球の各地への日射量に、影響を与えて、気候に変化をもたらす、というのが、ミランコヴィッチの考えであった。

◇これらの地球の動きの変動（楕円からのずれ、地軸の傾き）を、厳密に計算するのは、不可能だが、天文学では、変動が小さい場合に許される、摂動計算という、近似的な計算が行われる。

その計算によれば、一つの原因による変動は、周期的に起こることが、分かるのだが、複数の原因が共存する、実際の変動では、さまざまな周期の振動が、重なり合った、複雑な変化になる。

これらの複雑な変化をまとめて、ミランコヴィッチ・サイクルと呼ばれる。

◇ミランコヴィッチ自身は、複雑な計算を、コンピュータも無く、苦労して行った。最新の、より厳密な計算は、次のようになる。

◇まず、楕円軌道の変化だが、楕円の形は、長径（いちばん長い部分の直径）と短径の比の1からのずれで表される。

離心率を e とすると、長径/短径 $= (1+e) / (1-e)$ になる。

このずれは、離心率の、ほぼ2倍に相当する。

楕円軌道の現在における、ずれは3%程度だが、計算の結果、1%から10%の間で、主として、10万年周期と、40万年周期が混ざった形で、振動することが分かった。

ただし、この程度の変化では、日射量は、0.2%しか変化しない。

◇一方、地軸の傾きは、4万1000年単位で、角度が3度ほど変化する。

これは、地球の全体が受ける、日射量を変えないが、地域別に考えると、かなりの変動をもたらす。

◇また、地軸は、軌道面に直角な方向を軸とした、（少しふらついているコマのような）みそすり運動をする。

この効果によって、現在、北半球の夏は、軌道上では、太陽から最も離れた位置（遠日点）の付近に相当するが、1万年ほど前には、北半球の夏は、太陽から最も近い位置（近日点）に相当していたことが、分かった。

つまり、1万年前には、北半球での夏と冬の日射量の違いは、現在よりも、かなり大きかっただろう、ということである。

みそすり運動の周期は、2万6000年と、1万9000年である。

◇ミランコヴィッチのアイデアは、これらの変動の周期に応じて、気候の変動があったはずであり、氷期が繰り返すのは、そのためではないか、というものであった。

◇このアイデアの意義が、真に理解されるようになったのは、探査技術の向上で、過去の気候の変動が、明らかにされてきた、1970年代以降のことである。

1970年代に入ると、深海の堆積物の、精密な分析が進んで、事情が変わってきた。

◇コロンビア大学のJ・D・ヘイズらは、深海の堆積物における、酸素同位体の比率や化石数の増減を調べて、過去数十万年の間の、気候変動を追究した。

その結果、10万年、4万1000年、2万4000年、1万9000年という、周期があったことを、見出した。

これを、地球の変動と比較すると、10万年という周期は、楕円軌道の歪みの変動、4万1000年の周期は、地軸の傾きの変動、そして、他の2つは、近日点・遠日点の移動の周期に一致している（ただし、1万9000年という周期の存在は、観測結果が提示された後の精密計算で得られたもの）。

1976年に発表された、ヘイズらの結果は、ミランコヴィッチの発想を復活させ、過去の気候の変動が、さまざまなデータ（たとえば、氷河中の気泡の成分の変動など）から分析

されるようになった。

◇しかし、氷河が到来する周期としての 10 万年に対応する、楕円軌道の変動は、日射量を 0.2%しか変化させないので、氷河が発生する、主因と考えるのには、無理がある。そのため、楕円軌道の変動は、起因とは、なるにしても、氷河の発生に、重要な役割を果たしているのは、地球というシステム自体の、特徴ではないか、という考え方が、追究されている。

特に、1980 年頃に、ブロッカーが提示した、「熱塩循環」が原因となっているのではないかと、とする考えが有力である。

◇熱塩循環とは、大西洋で赤道から北極へ向かう表面水が、途中で塩分濃度が増加し、重くなって、北大西洋で潜り込み、深層流となって南下することである。

しかし、氷期には、この深層流が、停滞していたようである。

それは、海底堆積物の、下層のカドミウム濃度が、表層にくらべて高く、表層水との混合が不活発であったと、推定されるからである。

深層水が、停滞していたとすれば、北への表層水の流れも、停滞していたはずなので、その結果、赤道から北極への、熱の移動が不活発になり、高緯度地域が、寒冷化することになる。

◇深層流が、停滞する原因としては、たとえば、極地の氷床が溶け出して、海水の塩分濃度の下がるのが考えられる。

実際に、大西洋と太平洋の高緯度での塩分差は、0.1%でしかないが、この違いのために、北大西洋で見られる、水の沈降は、北太平洋では、起きていない。

◇つまり、熱塩循環は、非常に微妙なバランスの下に、成立しているプロセスなので、バランスがくずれると、地球規模で、突然の変化が、起こる。

ミランコヴィッチが着目した、日射量のわずかな変化でも、それが、ある限界値を超えると、突然の変化が、発生することは、十分にあり得るものと考えられる。

いずれにせよ、氷期—間氷期のサイクルの問題は、なお、さまざまな調査と研究を必要とする分野であろう。

【74】 スノーボール・アース

◇氷期—間氷期のサイクルが、繰り返されたのは、この百万年ほどのことであり、それ以前の地球は、極地にも、氷河が存在しない、温暖期であった。

しかし、地球の 46 億年の歴史全体を見れば、氷期と呼ばれる時期は、何度かは、あったことが知られている。

6 億年前と、7.5 億年前頃も、その時期であったことは、以前から分かっていたが、1992 年、ジョセフ・カーシュピンクは、それらが、単なる氷期ではなく、地球の全氷結（全球凍結）、つまり、地球の全体が、氷で覆われていた状態であった、という説を提唱した。

〔注：これは、地球が顕生代（カンブリア紀）に入る直前のこと。カンブリア紀とは、地球上に多様な大型動物が突然のように登場した時期で、当然、全球凍結と大型動物誕生との間には、何らかの関係があると、予想ができるだろう。〕

◇原理的に、全球凍結が可能であることは、地球からの熱の出入りを考えると、理解ができる。

引き金としては、大気中の二酸化炭素の減少が、考えられる。

温室効果をもつ、二酸化炭素が減少すると、熱の放出量が増えて、地球は徐々に冷却する。

かなり冷却して、地表の氷床の面積が、ある程度以上になると（緯度で 30 度程度まで、氷床が下がってくると）、日光の反射率（アルベド）が大きくなるために、地表の冷却と、氷床の拡大が、連鎖反应的に、急激に進行し、地表の全体が、一挙に凍結するという変化が起こる。

そして、計算によれば、地球の全体が、摂氏マイナス 40 度という極低温になる。

◇このような可能性のあることは、すでに、1960 年代末に、ロシアのミハイル・イ・ブディコらによって、予測されていたのだが、誰も理解しなかったようだ。

プレートテクトニクスの進展する中で、残留磁化により、以前は、赤道付近に位置していたものと、判断される大陸に、氷河の痕跡が発見されるなどの、証拠が見つかって、実際に、全球凍結が、起こっていたのが、確実になった。

◇外部からの影響の変化が、わずかなのに、バランスがくずれると、システムの状態が、突然に大きく変化する、というのが、相互に関連しているシステムの挙動の、興味深い点である。

全球凍結は、その例だが、その状態が、永久に続くことはなく、やはり、二酸化炭素の効果で、ある時期に、突然に、温暖化することも、分かっている。

◇二酸化炭素は、火山によって、大気に、少しずつ供給される。

二酸化炭素は、海水に溶けたり、岩石を風化させ、炭酸塩として、地中に戻ったりして、通常では、大気中の濃度が、一定に保たれる。

ところが、全球凍結の状態では、氷は、二酸化炭素を吸収することが、できないので、空中に放出された、二酸化炭素の濃度が、少しずつ上昇する。

その温室効果によって、温度が上昇して、氷が溶け出すと、今度は、逆の連鎖反応が、起こり、地球は、摂氏 60 度という、高温状態になることが、理論的に示されている。

そうなれば、二酸化炭素が、地表に、吸収されるようになるので、最終的には、全球凍結前の状態に、戻る。

◇興味深いのは、全球凍結と、生物の進化との、関係である。

氷河が、融解するとき、栄養価の高い、深海水が、攪拌によって、表層に現れたこと、また、高濃度の二酸化炭素によって、藻類が繁茂して、酸素が急増したこと、などが、原因になっているのではないかと、いうアイデアが出されているが、確実なことは、分かっていない。

■天 文 学■

【75】 宇宙は膨張していた

◇他の自然科学と同様、20 世紀には、宇宙論も、飛躍を遂げた。

われわれの宇宙観が、根本的に、変わってしまった、と言ってもよいだろう。

その中でも、中心的な役割を果たした、概念が、「宇宙は膨張している」というものであった。

この考え方を、基本にして、宇宙のさまざまなことが、理解されるようになった。

◇宇宙の膨張とは、宇宙の中の何か（例えば太陽系や銀河）が膨張している、ということではなく、宇宙空間が、全体として、広がって行くことである。

一本の無限に続く、ゴムひもが、あるとすると、それが、どこも、同じように、伸びると

というのが、そのイメージである。

◇宇宙空間は、膨張しており、その結果として、天体の間隔は、広がっていると、言えるのだが、どのような天体と天体の間隔が、広がっているのだろうか。

例えば、地球と太陽の間隔、あるいは、星と星との間隔が、本当に広がっているのだろうか。

◇これらの間隔は、広がっておらず、間隔が、広がっているのは、もっと大きなスケールで考えた天体、つまり、星の集団である銀河の間隔である。

◇星は、銀河という集団をつくっている。

例えば、太陽は、2000 億個ほどの星と一緒に、「われわれの銀河系（天の川銀河）」と呼ばれる集団をつくっている。

そして、宇宙には、このような銀河が、無数に散らばっており、それらの銀河の間の、間隔が広がっているのである。

【76】 距離の測定

◇夜空に輝く、星を観察しても、それらが、宇宙空間に、どのように、分布しているのかは、すぐには、分からない。

問題は、星までの距離が、そう簡単には、分からないことである。

実際に、過去数十年の間、距離の測定間違いや、不確かさが、宇宙論の発展の、大きな障害になってきた。

ごく近い天体であれば、夏と冬に見える方向の、わずかな違い（三角視差、あるいは年周視差）から、距離が推定できる。

この方法によって、数千の星の距離が、測定されたが、遠方の星には、この方法が、使えない。

[注：フリードリッヒ・W・ベッセルという人が 1838 年、初めて、この方法で星までの距離を測定した。その星の視差（角度）は 0.3 秒、地球からの距離は約 10 光年だった。現在では、この 10 倍遠い星までの距離を、この方法で測定することができる。]

[福永注：三角法：桜井邦明「宇宙物理学入門」から引用：星までの距離の求め方で、最も基本となるのは、地球上での三角測量と同様に、三角法を用いる幾何学的方法である。例えば、100 メートル離れた場所に立っている木の見かけの角度が 30 度だったとすると、木のてっぺんから根元までを直接物差しを使って測らなくても、三角比を用いて、木の高さが、およそ 60 メートルであることが分かる。逆に、高さ 60 メートルの木が、角度で 30 度に見えたとすれば、その木までの距離は、およそ 100 メートルである。星までの距離は、たいへん遠いので、地球が太陽の周りを半周したときに、星の見かけの位置がどれだけ動いたかを測定することで、導かれる。星が動いた大きさ（角度）の半分を、年周視差という。]

◇遠方の天体の距離を推定する、典型的な方法は、「何らかの情報」から、その天体の実際の明るさ（実光度と呼ぶ）を、推定することである。

それと、地球上で見たときの明るさを、比較すれば、その天体までの距離が、分かる。

実光度が分かる、タイプの天体のことを、距離測定のための「標準光源」と呼ぶ。

◇そこで、実光度を、知るための「何らかの情報」が必要となる。

20 世紀を通じて、使われるようになる、かなり信頼のおける情報は、1912 年に、ヘン

リエッタ・リーヴィットが発見した、ある種の変光星の、周期と光度の関係である。

◇変光星とは、一定の間隔で、明るくなったり、暗くなったりする、つまり、変光する、星のことである。

リーヴィットは、小マゼラン星雲という、星の集団の中に存在する、セファイドと呼ばれるタイプの、変光星の 25 個を観測し、その周期と、見かけの明るさが、ほぼ、比例していることを、指摘した。

1つの星雲の中にある、この 25 個の星は、地球から、ほぼ等距離にある、と考えてよいので、これは、周期と、実光度が、ほぼ、比例することを、意味する。

◇この関係の、比例係数を、定める仕事が、その後、10 年ほどをかけて、行われた。

互いに、比較的近くにある、セファイドの動きを観察して、距離を推定した、のである。

比例係数を確定することによって、変光の周期を、測るだけで、実光度を、推定することができ、それと、見かけの明るさを、比較することによって、星までの距離が、分かることになる。

ただし、後になって、この比例係数には、2 倍ほどの誤差がある、ことが判明した。

だが、技術的な進歩によって、かなり遠方の、暗い変光星であっても、変光の周期を測定できるように、なったこともあって、われわれの宇宙像が、大きく進展することになった。

【77】 銀河論争

◇太陽系が、現在、「われわれの銀河系」と呼ばれている、星の集団の中に位置している、という考え方は、18 世紀の末から存在した。

しかし、銀河系の大きさは、かなり過小評価されており、また、太陽系は、その中心近くに位置すると、思われていた。

◇1920 年頃になると、ウィルソン山天文台で、ハーロウ・シャプレーによる、セファイドを使った、距離の測定が進んで、「われわれの銀河系」が、直径約 10 万光年の大きさを持ち、太陽系は、その中央から、外れた位置にある、という現在のイメージに近いものが、認められるようになった。

◇この頃、大きな論争の的になっていたのは、渦巻き星雲（渦巻き型に集まっている星の集団）と呼ばれているものである。

星団とか星雲と呼ばれているものは、それまでも、さまざまなものが、見つかっていた。

それらが、われわれの銀河系内ののものであると、確定したのも、多かったのだが、渦巻き星雲は、その正体や距離が、不明のままであった。

◇1917 年、渦巻き星雲のうちの 1 つの中に、新星というものが、発見された。

新星というのは、星が短期間だけ、非常に明るく輝く、現象であり、決して、珍しいことではない。

しかし、渦巻き星雲で発見された、新星は、一般の新星とくらべて、10 等級も暗かったので、ヒーバー・カーチスは、これは、渦巻き星雲自体が、われわれの銀河系外の、遠方にあることの証拠だと考えて、渦巻き銀河の 1 つずつが、独立した銀河なのではないか、と提唱をした。

◇その後、過去の記録などから、他の渦巻き星雲の中にも、暗い新星が、いくつか、見つかったのだが、1885 年に記録された、アンドロメダ星雲（典型的な渦巻き星雲の 1 つ）の新星は、それほど暗いものでなかった、こともあって、カーチスの主張をめぐり、論争が続いた。

[注：後になって、分かったことだが、このアンドロメダ星雲の新星は、超新星と呼ばれる、通常の新星とは異なるものであった。通常の新星は、星の表面だけで、爆発が起こり、短期間だけ輝くものだが、超新星は、星全体が爆発してしまう現象である。]

◇渦巻き星雲が、われわれの銀河系外にあることを、確定的にしたのは、やはり、変光星による、距離の確認であった。

◇アンドロメダ星雲の中に、セファイドが発見され、その変光周期から、この星雲までの距離が、われわれの銀河系の大きさよりも、かなり大きいことが、エドウィン・ハッブルによって、1923年に確認された。

セファイドは、他にも40個ほどが見つかり、アンドロメダ星雲までの距離は、70万光年ほどであると、主張された。

ただし、変光周期と実光度との関係が、不正確だったり、星の明るさの測定に、問題があったりして、現在では、アンドロメダ星雲までの距離は、200万光年ほど、ということになっている。

◇いずれにせよ、渦巻き星雲は、われわれの銀河系の外部にある、同じような形をした、銀河であることが、確実になり、星雲ではなく、「渦巻き銀河」と呼ばれるようになる。

また、ハッブルは、渦巻き銀河が、暗いものほど（大まかに言えば遠いものほど）、数は多くなる、つまり、大ざっぱに見れば、宇宙空間には、銀河が、ほぼ一様に、分布しているようであることも、示した。

[注：もし、銀河が宇宙空間に一様に分布しているとすれば、ある範囲内に見えている、ある距離の銀河の数は、その距離の2乗に比例して増えるはずである。それは、頂角が一定の円錐の底面積は、高さの2乗に比例するからである。]

◇ここに、宇宙の全体のどこでも、同じように、銀河が分布しているという、新しい宇宙像が、確立したのである。

そして、ハッブルは、銀河の動きを観測して、宇宙の膨張を、発見することになる。

【78】 一般相対論とアインシュタインの宇宙

◇膨張宇宙論の、理論的な基礎になったのは、1915年に、アインシュタインが提唱した、一般相対論である。

◇1905年に、アインシュタインは、特殊相対論という理論を、発表していた。

これは、光速度不変（光の速度は、光源や観測者の動きにかかわらず、一定）という性質を説明するために、時間と空間（まとめて時空と呼ぶ）に対して、全く新しい見方を、提示したものである。

この理論は、多くの成功を収めたが、ニュートン以来の万有引力（重力）の法則とは、矛盾するものだった。

[注：たとえば、特殊相対論では、すべての物体や信号の伝わる速度は、光速度を超えないことが示されるが、これは、重力（万有引力）は、瞬間的に伝わると考える、ニュートンの万有引力の考え方に反している。一般相対論では、重力は、2つの物体の間で瞬間的に伝わるのではなく、物体間の時空の歪みを通じて伝わるのだと説明される。]

◇この矛盾を解消するためには、時空に対する見方を、さらに、改める必要があり、それ

に成功したのが、1915年の一般相対論である。

一般相対論によれば、万有引力とは、時空が「曲がっているために」現れる効果である、とされた。

◇つまり、一般相対論の理論は、もともとは、物体の間の重力を、説明するためのものであり、宇宙を調べるために、考えられたものではない。

◇しかし、宇宙論には、重力と関連して、ニュートンの時代から続いている、大きな問題があった。

それは、天体が、宇宙に、どのように分布していれば、安定した分布であり続けるのか、という問題である。

アインシュタインは、自分の理論を使って、この問題を解決することを試みた。

◇膨張宇宙という、考え方が出るまでは、宇宙は、「定常」であると、信じられていた。宇宙の姿（天体の大まかな分布の様子）は、無限の過去（あるいは宇宙創成のとき）から、無限の未来まで、変わらない、という考え方である。

◇しかし、ニュートンは、そんなことが、なぜ可能なのか、と悩んだ。

例えば、もし、太陽を含む限られた領域だけに、星が分布しているとすれば、それらは、互いの重力で、引きつけ合い、最終的には、1つの大きな固まりになってしまうだろう。また、星が、宇宙空間の全体に、広がっていれば、四方八方からの引力が、釣り合って、そのまま静止していることも、可能だが、そのためには、どこの星に対する引力も、完全に、釣り合っていなければならない。

釣り合いが、少しでも破れると、星は、動きだし、あちこちに、集まり出すだろう。

そのように、集まり出してできる、星の固まりは、どんどん、大きくなり続けるが、星が無限の遠方にまで、存在しているとすると、安定した分布になることは、永久に、ないだろう。

つまり、ニュートンが、悩んだのは、宇宙に星が静止して、分布し続ける理由が、分からない、ということだった。

この問題は、ニュートンとリチャード・ベントレーの往復書簡の中で、論じられている。

◇ニュートンの悩みを、解決するために、考えられた一つの方法は、天体の間の力は、互いに近ければ、万有引力で表されるが、非常に離れると、反発力になる、と仮定することである。

そして、アインシュタインは、一般相対論の、もともとの形からは、引力の効果しか、出てこないが、少しだけ、形を変えれば、反発力も生じる（引力を打ち消す効果が生じる）ことに、気づいた。

変更された部分は、その後、「宇宙項」と呼ばれるようになるが、アインシュタインは、一般相対論の中に「宇宙項」を取り入れれば、定常な宇宙が、実現できることを、主張した。

◇この反発力は、遠方になるほど、相対的に、強くなる。

太陽系程度のスケールでは、ほとんど、効かないのだが、宇宙的なスケールでは、重要になる。

そして、宇宙の全体としては、引力（万有引力）と反発力（宇宙項）が、うまく釣り合って、定常な状態になるというのが、アインシュタインの主張であった（1917年）。

これは、アインシュタインの定常宇宙と呼ばれる。

〔注：ここでは、引力や反発力という表現を使っているが、それぞれを、「空間を収縮させようとする効果」、「空間を膨張させようとする効果」と表現することもできる。〕

◇しかし、一般相対論の枠組みの中では、アインシュタインの定常宇宙の他にも、さまざまな宇宙を、考えることが可能である。

まず、アインシュタインの論文と同じ年に、ド・ジッターは、天体（物質）が、何も無い宇宙で、空間が膨張する（つまり定常ではない）ことが、あり得ることを示した。

これは、ド・ジッター宇宙と呼ばれている。

◇また、ロシアのアレキサンダー・フリードマンが発見し、1922～1924年に発表された、フリードマン宇宙は、現実の宇宙に近い、さらに重要なものであった。

フリードマンは、宇宙空間には、物質が、一様に分布している、と仮定して、空間が、どのように膨張し得るかを調べた。

そして、空間は、すべての距離が、ゼロの瞬間から始まり、次第に膨張し、ある場合には、そのまま膨張を続け、また、ある場合には、収縮に転じて、すべての距離が、ゼロの状態に戻る、ということを示した。

◇このフリードマン宇宙は、その後、宇宙論を議論するときの、標準的なモデルになる。

フリードマン宇宙の場合には、宇宙項を取り入れていない。

宇宙項を取り入れて、計算することも可能で、その場合には、ド・ジッター＝フリードマン宇宙（あるいは、ル・メートル宇宙）と呼ばれている。

【79】 ハッブルの法則

◇空間が膨張すれば、そこに存在する、物体の間隔が、広がるはずである。

もちろん、物体が、（空間の膨張の効果とは別に）速く、動いていれば、その速度の方向や大きさによっては、近づくものも、あるだろうが、全体としての傾向を見れば、物体の間隔が、広がるはずである。

◇それを見るためには、銀河どうしの動きを、調べなければならない。

前述のように、1つの銀河内の、星の間隔は、広がっていない。

銀河は、その内部の天体が、互いの重力によって、結合している系であり、そのような系の内部は、空間の膨張の影響を、受けないからである。

宇宙空間が、膨張するからといって、地球や太陽が、膨らむこともない。

◇宇宙の膨張は、銀河どうしの動きを、見ることによって、初めて、分かる。

ある銀河が、われわれの銀河系に対して、どのような速度で、遠ざかっているか（あるいは、近づいているか）は、光のドップラー効果を使えば、測定することができる。

遠ざかっている音源（例えば、電車）から、発せられた音は、波長が伸びて、低音になるのと同様に、遠ざかっている星からの光も、波長が伸びる。

色でいえば、青い光が、赤い方向にずれる、ということなので、赤方偏移と呼ばれる。

実際に、1917年には、大部分の銀河からの光は、赤方変移している（つまり、銀河は遠ざかっている）ということが、発見されていた。

ただし、この時点では、宇宙の膨張との関連は、意識されていなかった。

◇ハッブルの法則として、有名になった関係が、初めて、認識されたのは、1929年のハッブルの論文によって、であった。

ハッブルは、距離が、分かっている24個の銀河を取り上げ、そこまでの距離と（遠ざかりの）速度との間には、大ざっぱに言って、比例関係がある、ことを示した。

この比例関係を、「ハッブルの法則」と呼ぶ。

この法則は、明らかに、宇宙空間全体が、一様に膨張している、ことを示唆する。

空間全体が、同じ割合で、膨張していれば、2倍の距離にある銀河は、2倍だけ動いて見

えるので、2倍の速度で、遠ざかっているように見える。

◇もっとも、ハッブル自身は、フリードマンの仕事を、知らなかったようである。ハッブルのデータが、フリードマン宇宙に、うまく当てはまる、ことを示したのは、1932年の、アインシュタインとド・ジッターによる、論文であった。これによれば、宇宙の大きさを表す、パラメーターは、ゼロから始まり、時間の3分の2乗に比例して、大きくなる。つまり、宇宙には、始まりがあり、そのときの、宇宙空間の大きさは、ゼロであり、次第に膨張して、現在の宇宙になった、ということである。

◇この頃、アインシュタインは、自分が、以前に、定常宇宙を実現するため、一般相対論に、宇宙項を導入したことを、強く後悔していた、といわれている。宇宙が、定常ではなく、膨張しているのであれば、ニュートンは、宇宙が、定常であり続けていることを、悩むことなどはなかった、ことになる。自分が発見した、一般相対論を使って、膨張宇宙を、予言できたはずなのに、定常宇宙の実現という、誤った方向に、向かってしまったことを、アインシュタインは、悔やんだのであろう。

◇しかし、アインシュタインが、宇宙項を考えついたのは、決して無駄ではなかったことが、数十年後になって、判明する。

◇いずれにせよ、アインシュタインも、定常宇宙論を捨てて、膨張宇宙という考え方を、支持したのだが、専門家たちが、フリードマン宇宙モデルを、すんなりと、受け入れた訳ではなかった。

[注：一般相対論自体が正しい理論であるという確信は、実験の積み重ねによって、常に高まってきた。しかし、この理論から、現実の宇宙の膨張について、確実な予言ができる訳ではない。一般相対論と矛盾しない宇宙の振る舞いは、無数にある。つまり、現在の宇宙は、膨張をしているにせよ、その細かな振る舞いには、いろいろな可能性がある、ということである。]

◇専門家たちを、受け入れにくくしたのは、ハッブルたちによる、現時点の銀河の距離と速度の関係をい用いると（つまり、距離と速度の比例関係における、比例係数を使うと）、宇宙の始まりは、20億年前ということに、なってしまった、ことにある。しかし、放射性元素の測定から、地球の年齢は、もっと長いということが、知られていた。また、1940年代になると、星の進化の理論が発展し、20億年よりも、明らかに古い星があることも、分かっていた。そのため、フリードマンの「ゼロから始まる膨張宇宙」という宇宙像は、半信半疑で受け取られ、フリードマン宇宙以外の宇宙の可能性が検討されたり、そもそも、宇宙には、始まりがあったのか、宇宙は、無限の過去から存在したのではないか、という主張もなされていた。

◇ただし、全宇宙空間が、一様で、同じように膨張し、また、宇宙項がないと仮定すれば、フリードマンが計算した結果になる。そして、実際に、大まかに見た、宇宙空間が一様ではない、という積極的な観測事実は、なく、また、宇宙項があるという、積極的な観測事実もなかったので、議論は、常に、フリードマン宇宙を中心に、展開されて行く。

【80】 ビッグバン

◇このような状況の中で、1940年代後半から、1950年代前半にかけ、ジョージ・ガモフや共同研究者たちによって、重要な研究が行われた。

それは、現在、地球や宇宙に存在する元素は、どこで、誕生したのかという、「元素合成」と呼ばれる問題である。

◇これは、最初、宇宙論というよりは、星の理論という、天文学の分野から、出てきた問題だった。

当時、星の輝きのエネルギー源は、原子核の融合によって生じる、核エネルギー以外には考えられない、という風潮になっていた。

この宇宙に存在する、すべての原子核は、小さな原子核が融合して、大きな原子核になるようにして、できたのではないか、という考え方が、強くなってきた。

さまざまな元素は、星の中で、原子核が融合することによって、合成されている、という訳である。

◇しかし、他方で、星の温度は、核融合が起こるほど、十分に、高くはないのではないか、という疑問についても、議論がなされていた。

原子核は、プラスの電荷をもっているので、電気力で反発し合う。

原子核が、非常に近くに、接近できれば、核力という力が働いて、結合するのだが、電気力に打ち勝って、十分に接近するためには、相当な勢いで衝突しなければならない。

しかし、星の内部の温度は、原子核が、そのような勢いを持つほど、高温ではない、という主張がなされていた。

◇そのような状況の中で、ガモフは、宇宙の初期に目を向けた。

フリードマン宇宙モデルが、正しいとして、時間を過去に遡れば、宇宙空間は、収縮して行くことになる。

そうすると、宇宙の温度が、どんどん上がって、原子核は、非常に大きなエネルギー（つまり、非常に大きな勢い）をもつようになり、原子核の融合が、可能になるのではないかと考えたのであった。

[注：宇宙の初期は、超高温・超高密度の状態なので、天体などは、そもそも、存在せず、すべての物質は、ばらばらになって、個々の原子核になり、宇宙空間の全体が、原子核や電子の「スープ状態」になっていたはずである。そのように、粒子が、激しく動いていれば、衝突をして、反応を引き起こす可能性が、大いにあり得るのである。]

◇このような考え方を、ビッグバン宇宙論と呼ぶ。

その基本に、宇宙の始まりには、物質が、超高温・超高密度の状態で、存在していた、という発想があり、「宇宙は、大爆発から始まった」というイメージと、結びついたのが、名前の由来である。

ただし、この場合、宇宙の始まりでは、宇宙のどこかに、超高温・超高密度の状態が、出現したと考えてはならず、宇宙の全体が、超高温・超高密度の状態だったと、考えなければならない。

◇ビッグバン宇宙論を展開するには、宇宙の始まりには、どのような粒子が、存在していたのか、という点から考えなければならない。

ガモフらは、最初、宇宙全体が、電氣的に中性なので、初期宇宙は、中性子が充満した、世界であったと考えた。

中性子は、陽子と電子、それに、ニュートリノと呼ばれる粒子、の3つの粒子に、転換ができるので、まず、最初に、中性子があればよい、と考えたのであった。

◇それに対して、1950年に、日本の林忠四郎は、兄弟のような粒子である、陽子と中性子の片方だけが、存在するというのは、あり得ず、初期の宇宙では、陽子・中性子・電子・ニュートリノが、すべて、充満しており（全体として電氣的に中性）、それらが、反応して、互いに入れ替わり合っていたはずだ、という指摘をした。

結局は、この主張が認められ、宇宙の膨張につれて、それらが、どのように、変化して行くのかについて、計算がなされた。

その結果、陽子や中性子が結合して、ヘリウム（陽子2つと中性子2つからできた原子核）は、合成されるのだが、それよりも重い元素は、ほとんど合成されない、という結論が出てしまったのである。

その主な原因は、宇宙の初期の膨張速度が、特に速いので、すぐに、粒子の密度が、減ってしまって、それ以上に結合できるほど、頻繁には衝突しなくなる、ということであった。

【81】 宇宙背景放射

◇宇宙の初期に、元素が合成されるという、ガモフの最初のアイデアが、失敗に終わり、ビッグバン理論も、あまり注目されなくなったが、そこでは、非常に重要な予言がなされていた。

それは、ガモフの弟子であった、アルファとハーマンが、1948年に行なった、予言であり、現在では、宇宙背景放射と呼ばれている現象のことで、宇宙空間の全体に、ビッグバン時代から残存する、電磁波が、充満している、という主張であった。

[注：ビッグバン時代：超高温の初期宇宙において、電子と原子核が、ばらばらになって、動いていた時代を、ここでは、ビッグバン時代と呼ぶ。最新の計算によれば、宇宙の始まりから、約38万年ほどの期間に相当する。]

◇もし、この予言が、実証されれば、ビッグバン理論や、宇宙には、始まりがあったという、フリードマン宇宙論そのものの、強力な証拠になるはずであったが、あまり、注目されなかった。

その宇宙背景放射が、1965年に、アーノ・ペンジアスとロバート・ウィルソンによって、全く偶然に、発見される。

彼らは、銀河内の電波の観測を始める前に、装置のチェックをしていた時、装置を、どの方向に向けても、消えない「雑音電波」があることを、発見した。

◇アーノ・ペンジアスとロバート・ウィルソンには、この「雑音電波」が何であるのか、見当がつかなかったのだが、その頃に、ビッグバン理論の再評価を目指して、宇宙背景放射の測定などを、行おうとしていた、プリンストン大学のディッケが、その「雑音電波」は、まさに、宇宙背景放射であることに気づいた。

その後、プリンストン・グループなどの、観測も行われて、この電波の性質が、詳しく調べられ、ビッグバン時代からの、生き残りの電磁波であることが、確実視されるようになった。

◇宇宙背景放射の温度は、アルファとハーマンによる、5K程度という、最初の予測とは、やや異なって、約3Kであった（最新の観測によれば、2.7K）。

[注：物体は、常に何らかの電磁波を放出している。熱い物体は、光を放出するが、光っていない物体でも赤外線を放出する。光も赤外線も電磁波の一種だが、どのような波長の電磁波をどの程度放出するかは、その物体の温度によって決まっている。宇宙背景放射の温度が3K（絶対温度で3度、摂氏マイナス270度）とは、この温度の物体が放出する電磁波と同じ性質をもつ電磁波（の集団）のことだと考えてよい。]

そして、このデータに基づき、初期の宇宙での、ヘリウムの合成量、あるいは、微量に生成される、リチウムなど、比較的軽い元素の合成量が計算されて、観測の結果と、うまく合うことが、示された。

これまでは、机上の理論であった、ビッグバン理論が、観測によってチェックできる、科学となった。

◇ビッグバン理論が、信頼されるようになった、ということは、その基本にある、膨張宇宙論のステータスも、大いに高まったことを意味する。

ビッグバン理論・フリードマン宇宙モデルを含む、膨張宇宙論は、その後、現代の「標準宇宙論」と呼ばれるようになった。

【82】 宇宙の年齢

◇初期の、ハッブルたちの観測によれば、宇宙の始まりは、約 20 億年前とされた。

しかし、地球の年齢は、それより古いことが、明らかなので、膨張宇宙論が、誤りである根拠とされたことも、あったようだ。

しかし、遠方の変光星までの、距離の決定法などが、少しずつ進歩し、銀河の動きから推定される、宇宙の年齢は、1950 年代には、60 億年、1990 年頃には、90 億年、と少しずつ延びてきた。

つまり、地球の年齢（45 億～46 億年）とは、矛盾しないことには、なったが、星の進化理論からは、最古の星団の年齢が、140 億年に近いものと、主張された。

このような、宇宙の年齢のギャップは、膨張宇宙論の最大の問題点の一つとされていた。

◇もっとも、解決策が、なかったという訳では、なかった。

アインシュタインが、最初に、宇宙論に取り組んだときに導入し、後になって、導入したことを悔やんだとされる、宇宙項は、天体間の反発力だと説明することもできるが、天体の動きではなく、空間の膨張という、見方からすれば、その膨張を、激しくするという効果をもつ。

アインシュタインは、単に、一般相対論に、そのような効果を、取り入れることのできる、可能性を示しただけであるが、その後における、物理学の発展の中で、宇宙項は、真空にエネルギーが、存在する場合に、生じることが、示されていた。

◇真空であれば、エネルギーなどは、存在しないだろうと思われるが、量子論が確立された、以降になると、物理学者は、真空には、膨大なエネルギーが隠されている、と考えるのが、自然だと思うようになっていた。

しかし、それほどのエネルギー（宇宙項）があれば、宇宙は、あっという間に、膨張し、銀河は、すぐに、互いに、見えなくなってしまうはずである。

そのような宇宙では、粒子が集まって、銀河が形成されることもないだろう。

◇実際の宇宙は、それほど、急激には、膨張していないので、宇宙項が存在したとしても、驚くべきほど、小さいものでなければならない。

そこで、おそらく、何らかの理由で、宇宙項はゼロなのだろう、と考えるのが、一般的な風潮であった。

◇とは言え、もしも、仮に、非常に小さな宇宙項が、存在するとすれば、宇宙年齢の推定値を、数十億年は、延ばすことのできることも、分かっていた。

フリードマン宇宙モデル（宇宙項はゼロ）では、宇宙は、誕生した勢いで、どんどん膨張して行くが、宇宙空間内に存在する物質の影響で、膨張の速度には、少しずつ、ブレーキ

がかかる（天体間に万有引力が働くから、と考えてもよい）。

しかし、わずかでも、宇宙項があると、その大きさにもよるが、ある時点で、宇宙の膨張は、逆に、加速し始める。

◇そこで、現在の宇宙が、すでに、加速段階に入っているものと、仮定しよう。

そうすると、現在、観測されている、膨張速度には、この加速効果が、加わっていることになる。

つまりは、例えば、数十億年前の過去には、膨張速度が、今までに計算していた数値よりも、もっと小さかった、ということになる。

そして、宇宙の大きさが、ゼロであった、と推定される時点も、今までに推定していた、時点とくらべて（宇宙項がゼロの場合とくらべて）、余分に、過去に遡ることになる。

ということは、現在、推定されている、宇宙の推定年齢が、長くなるのである。

◇そうは言っても、宇宙の年齢を、長くせんがため、異常に小さな宇宙項を導入するのは、ご都合主義であるという、印象を拭うことができず、人々を納得させることが、できなかった。

◇この問題に、一つの決着をつけたのは、Ia型の超新星の観測であった。

超新星は、星の爆発によって、数週間、銀河の全体と同じ程度の輝きを示す、現象である。

超新星は、変光星よりも、圧倒的に明るいので、もし、その実光度が分かれば、遠方の距離の測定にとって、きわめて有用なはずである。

しかし、超新星には、さまざまなタイプのものがあり、実光度を、正確に推定することが、できなかった。

◇ところが、1990年頃に、分かったのは、Ia型の超新星では、爆発の仕方が決まっており、多くの場合に、もっとも明るくなるときの、実光度が、推定できるということである。

[注：超新星とは、通常、星が燃え尽きたとき温度が下がるので圧力が減り、重力によってつぶれ、その反動で外側が爆発するときに起きる現象。しかしIa型の超新星は少し特殊で、連星の一方の星で起こる。連星とは2つの星が互いの周りをぐるぐる回っているものだが、一方の星の周囲のガスが他方の星の重力に引っ張られて移動し、その表面に蓄積し、それがある限界以上になったときに起きる爆発をいう。]

◇とは言っても、超新星とは、かなり稀で、短期間の現象であり、いつ、どこで、発生するかも予測できないので、広視野カメラをもつ、望遠鏡やハッブル望遠鏡（1990年に、人工衛星で打ち上げられた望遠鏡）を使った、困難な観測に、取り組んだ結果、2000年には、数十の超新星のデータが集まった。

その中には、距離が10億光年に近いものも、含まれている。

◇そして、それらを分析した結果、宇宙の膨張は、わずかながら、明らかに、加速していることが、示された。

つまり、宇宙項が、存在する、ということである。

宇宙空間の真空のエネルギーは、宇宙に存在する、すべての物質がもつ、エネルギーの2倍程度であると、計算された。

[注：2倍というのは現時点での比率であり、この値は宇宙の膨張とともに増大する。真空のエネルギーというのは空間の体積の増加に比例して増大するが、物質のエネルギーはほとんど一定であるからだ。]

宇宙の年齢は、140億年程度であると、計算が、やり直された。

20世紀に、膨張宇宙論が始まって以来、初めて、宇宙の年齢と、天体の年齢の間に、矛盾のないことが、断言できる、状況になったのである。

最近、宇宙項は、別の方法でも、間接的に測定され、上の結論が、再確認されている。宇宙項の問題は、自然の基本法則にもかかわる、重要な問題であるが、なぜ、このように小さな宇宙項が、存在するのか、その理由は、はっきりしていない。

【83】 銀河はいつつくられたか

◇標準宇宙論の、もう一つの難点とされてきたのが、銀河は、いつ、どのように、できたのか、という問題である。

超高温・超高密度のビッグバン時代が、終わったとき、宇宙空間には、水素原子とヘリウム原子からなるガスが、充満していて、天体などが、全くない世界であった。

現在の観測によれば、おそらく、その少なくとも、5億年後には、銀河などの、何らかの天体が、出現していたようである。

[注：遠方の天体からの光は、地球に届くまでに時間がかかる。遠方を観測できるようになればなるほど、それだけ宇宙の過去の姿が見られるようになる。]

問題は、5億年という期間が、銀河の形成にとって、十分なのかどうか、ということである。

◇ビッグバン時代から残された、原子のガスは、宇宙空間に、ほぼ均等に分布していた。それは、宇宙背景放射の強さから分かる。

ビッグバン時代の残光は、宇宙のどちらの方向からも、ほぼ均等、に注いでいる。

1万分の1の精度で測定しても、方向による違いは、見られなかった。

宇宙背景放射というのは、ビッグバン時代の終わりに、原子の構成粒子から、発せられた電磁波であるから、これは、その時代の原子ガスが、非常に均質であった、ことを意味する。

◇一方、銀河などの天体をつくるには、ガスの分布が、不均質でなければならない。濃度の大きい所が、重力によって、周囲の原子を引きつけて、さらに濃くなって、次第に、天体に発達して行かなければならないからである。

◇1992年には、宇宙背景放射に、濃淡のあることが、初めて分かった。

NASAが打ち上げた、COBE（宇宙背景放射観測衛星）が、10万分の1の揺らぎを見つけた。

しかし、この程度の揺らぎでは、5億年で銀河をつくるのは、とうてい、不可能であるのが、明らかであった。

この程度の揺らぎでは、宇宙年齢の140億年をかけても、1つの天体も、作り出せない。

◇しかし、また、この宇宙空間には、通常の物質ではない、未知の物質が存在していることが、次第に、明らかになっていた。

正体が不明でも、名前がついていて、「ダークマター（暗黒物質）」と呼ばれている。

暗黒といっても、暗いものではなく、むしろ、透明で、光も発しないが、重力が働いているので、その存在が分かる、という物質である。

◇宇宙には、何か正体不明の、膨大な物質が存在しているらしい、ということが、論じられるようになったのは、1980年頃であった。

われわれの銀河系は、全体が渦巻いているが、天体や原子が発する、光を観測することに

よって、特に、銀河の周囲で、物質が、どのような速度で、渦巻いているのかが、調べられた。

◇渦巻く速度は、それより内部の、銀河全体からの重力によって決まる。逆にいえば、速度を測定することによって、それよりも内部の、銀河の全質量を、計算できる。

そして、観測の結果、銀河内には、輝いている天体の質量の 10 倍に近い、未知の物質の存在することが分かった。

しかも、それは、円盤状ではなく、球状に分布しているらしい、ことも分かった。

◇その後、個々の銀河の、渦巻く回転ではなく、銀河集団の中での、銀河の動きも、観測されて、その観測からも、多量の未知の物質の存在することが、確認された。

◇未知の物質（暗黒物質）が、通常物質よりも、はるかに、多量であるとすれば、銀河の形成プロセスも、暗黒物質の方を、主体にして、考えざるを得ないであろう。

[注：未知の物質などというと、かなり、いかがわしい議論のように聞こえるかもしれないが、1970 年代頃からの宇宙論は、ミクロの学問である素粒子物理学からの影響を大きく受けて発展してきた（実際、20 世紀の宇宙論全体が、ビッグバン時代の陽子や中性子の反応を始め、ミクロの物理学の影響を常に受けて発展している）。そして、素粒子物理学ではこの頃、統一理論というものと関連して、さまざまな未発見の粒子の存在を予言していた（現在もそれは続いている）。]

まず、暗黒物質が凝縮した、領域（おそらく銀河程度の大きさ）ができ、それに、通常物質が引きつけられて、凝縮し、その中で、星をつくって行く、というプロセスが、考えられる。

そして、暗黒物質が、どのような性質を持つ、粒子の集団であれば、そのようなプロセスが可能であるのかについて、1980 年代から 1990 年代に、活発な議論がなされた。

◇一つの有力な候補は、ニュートリノという粒子だったのだが、それは、現在では、ほぼ否定されている。

ニュートリノは、非常に活発に、動き回る粒子なので、凝縮するのに、時間がかかり過ぎるのだ。

そして、現在、有力視されているのは、コールド・ダークマター（冷たい暗黒物質）説である。

これは、未知の粒子の質量が、かなり大きなもので、ビッグバン時代の終わりの頃には、それほど激しくは動いておらず、すでに、かなり凝縮して、銀河を形成する種になっていたであろう、という理論である。

この粒子は、原子との間で、重力以外の力を、（ほとんど）及ぼし合わず、しかも、重いので、原子よりも先に、凝縮できた、というのである。

◇このような説を、さらに確実にしたのは、2003 年に公表された、宇宙背景放射の一層詳しい測定であった。

10 年前に、COBE での測定によって発見された、揺らぎは、宇宙空間を、かなり大まかに見たときのデータであったが、今度の WMAP（ウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機）という衛星による測定では、より細かく見たときの揺らぎが、詳しく観測された。

◇この測定は、さまざまな情報をもたらし、膨張宇宙論を、大ざっぱな計算に基づく、理論から、精密科学に転換させた、ものだとして、強いインパクトを与えている。

全天を、どの程度の細かさで見たときに、宇宙背景放射の強さが、どの程度に、揺らいで

いるか、というデータを示して、そこから、さまざまな情報が得られたのである。

主な結果を挙げると、次のようになる。

- (1) 宇宙の年齢が、約 140 億年であることが、確認された (137 ± 2 億年とされたが、誤差の評価には、微妙な問題があるので、140 億年程度と考えるのがよい)。
- (2) 現在の宇宙のエネルギーは、通常物質が 4%、(冷たい) 暗黒物質が 23%、そして、宇宙項の寄与が、73%を占めている。

超新星の観測から示唆された、宇宙項の存在 (つまり最近の宇宙の加速膨張) が確認され、また、暗黒物質が、豊富に存在することも、確実になり、5 億年ほどで、銀河が形成されることも、不可能ではない、ということになった。

もちろん、暗黒物質を構成する、粒子の正体を明らかにする、という課題が残っているのだが (この課題は素粒子物理学に属する)、標準宇宙論は、21 世紀の宇宙論の基本として、確立したと言ってよいであろう。

【84】 ビッグバン以前の宇宙

◇前述のように、ビッグバン時代とは、宇宙が超高温・超高密度であった、「宇宙の始まり」から約 38 万年の間である。

宇宙が、ビッグバンから始まったとすれば、ビッグバンの始まりが、時間の始まり、でもあるので、それ以前などは、あるはずがない。

◇しかしながら、ビッグバンの理論、あるいは、フリードマン宇宙の理論が、宇宙の始まりの「瞬間」にまで適用できるとは、考えられていない。

宇宙の始まりの「瞬間」は、これらの理論のもとにある、一般相対論の適用限界を、超えているからだ。

◇物理学の話になるが、20 世紀になってから、ニュートン以来の力学 (古典力学と呼ぶ) は、ミクロ (原子) の世界までは、通用せず、量子力学という、新しい考え方の必要なことが、分かった。

[注：量子力学はミクロの世界にもマクロの世界にも通用するが、マクロの世界では実質的に、従来の古典力学と同等になる。]

また、19 世紀に完成した、マクスウェルの電磁気学 (古典電磁気学) も、原子と光が、かかわる現象には通用せず、量子電磁気学という、新しい学問の必要なことが分かった。

同様に、一般相対論は、その理論構成から考えると、古典重力理論と呼ぶべきものであり、ミクロなレベルでは、「量子重力理論」という、新しい学問の必要なことが、早くから認識されていた。

◇これは、量子論の原理に基づき、一般相対論を再構成して、つくるべき理論であり、空間を、ミクロなレベルで考えるのに、必要となる理論である。

そして、宇宙の始まりは、空間が、ミクロなレベルにある、という状況なので、まさに、量子重力理論が必要な、対象である。

◇しかし、矛盾のない、量子重力理論をつくるのは、予想外に難しいことが、次第に分かり、21 世紀になっても、難問として残されている。

現在、素粒子物理学で、最も重要なテーマの一つに、超弦 (スーパー・ストリング) 理論の研究という、テーマがあるのだが、これは、量子重力理論の構築に向けての研究である。現時点のレベルでの、超弦理論を使って、宇宙の始まりの議論がなされかけているが、まだ、暗中模索の段階である。

◇量子重力理論を、絶対に、必要とするのは、宇宙の始まりから、 10^{-43} 秒という、短時間のことであるが、まさに、宇宙の始まり方が、問題になる時間なので、宇宙論にとって、決定的な時間であるといえる。
そして、その時間以降のことを議論するのに、量子重力理論のことを、どれだけ、考える必要があるのか、については、まだ分からない。

◇しかし、もう、量子重力理論のことを、忘れてもよいという、宇宙の始まりから、 10^{-43} 秒の時間が経過しても、すぐに、従来の標準宇宙論を、適用できる段階には、入らないことが、1970年代の末頃から分かってきた。
これは、アインシュタインが導入し、後悔をしたといわれている、宇宙項にも、密接に関係している。

◇陽子・中性子・電子という、素粒子のレベルでは、電磁気力・核力（別名、強い力）、そして、弱い力などが働いている。
1970年代には、それらの力を説明する、統一理論という考え方が、確立した。
その中で、明らかになった、重要なことの一つは、空間は、相転移をする、ということである。

◇相転移とは、通常、物質が、固体から液体に、さらには、気体になる、という変化を指している。
しかし、現代物理学の考え方では、物質以外にも、場というものが、空間の全体に、広がっている。
そして、場の値が変わることによる、相転移がある、というのが、統一理論の主張である。
そして、実際、ビッグバン時代の初期に、このような相転移が起きた、と考えられるのである。

◇このタイプの相転移が起こると、物質とは無関係の、空間のエネルギー、つまり、真空のエネルギーが変わり、その結果、宇宙項の値も変わる。
現在の宇宙における、宇宙項は、ゼロではないとしても、非常に小さいので、相転移が起こる前には、かなりの宇宙項があった、ということになる。

◇ところが、宇宙項があると、空間は急激に膨張する。
それは、宇宙項のない、フリードマン宇宙の膨張よりも、はるかに、急激な膨張である。
宇宙論において、このような急激な膨張は、インフレーションと呼ばれ、ビッグバン時代以前に、このような段階があったと考える説を、インフレーション理論と呼ぶ。

◇インフレーション理論は、1981年に、佐藤勝彦とアラン・グースが、最初に提案してから、さまざまなタイプの理論が、提出されている。
1980年代の末に提案され、非常に有名になった、ホーキングによる、虚数時間の宇宙創成論も、その一つと言っても、よいだろう。

◇インフレーション理論のような試みは、ある程度の理論的な根拠のもとに、行われているのであるが、直接に、実験や観察によって、立証できるものではない、という面があるので、超越的な宇宙論と呼ばれていた。
その傾向は、現在も、改善されたとは言えないが、それでも、WMAPにおける、宇宙背景放射の性質の観測によって、インフレーション時代の痕跡と考えられる情報が、獲得され始めている。
21世紀に入って、インフレーション理論が、人類の宇宙観の一つの側面として、定着するかも知れない、という展望が開け始めている、と言ってもよいのかも知れない。

以 上
