

21世紀の科学技術リテラシー像～豊かに生きるための智～プロジェクト

宇宙・地球・環境科学

専 門 部 会 報 告 書

平成20年(2008年)6月



<http://www.science-for-all.jp/>

科学技術の智プロジェクト

科学技術の智プロジェクト
研究代表者 北原和夫（国際基督教大学教養学部）
<http://www.science-for-all.jp/>

「科学技術の智」プロジェクト専門部会報告書の刊行にあたって

「科学技術の智」プロジェクト委員長

北原和夫

全ての日本人が身に付けてほしい科学技術の基礎的素養を明示しようというプロジェクトを開始したのは、2005年であった。若者の理科離れが進んでいる現状にあって、2003年に日本学術会議は「若者の理科離れ特別委員会」（後に「若者の科学力増進特別委員会」と改称）を組織し、その現状打開のために何をなすべきかについて検討を始めた。その結果、学校教育、社会教育を含む広い意味での教育のゴールを明示することが必要ではないか、との認識に到った。

そこで、米国における「Science for all Americans」の刊行(1989年)に倣って、我が国においても、「Science for all Japanese」を策定する必要があると考え、2005年度に科学技術振興調整費を得て、「科学技術リテラシー構築に向けた調査研究」を推進した。その成果を踏まえて、平成18年度(2006年度)から、我が国の「科学技術の智」すなわち「成人段階を念頭において、全ての人々に身に付けてほしい科学・数学・技術に関係した知識・技能・物の見方」を実際に作成することを目的とした「日本人が身に付けるべき科学技術の基礎的素養に関する調査研究」(平成18・19年度科学技術振興調整費「重要政策課題への機動的対応の推進」)を発足させた。

全体として約150名の科学者、教育者、技術者、マスコミ関係者、また科学技術理解増進に従事する人々などが参加した。このプロジェクトの特徴は、学問の枠を超え、さらに、日本の科学技術の現状と歴史、伝統を踏まえて、科学者と教育学者等が協同で行うことであった。また、一般に公開しながら共に作っていくということを大切に、ウェブサイトやシンポジウムを活用してできるだけ多くの人々が参画することによって、このプロジェクト自体が科学技術リテラシー向上の運動となることを目指した。

先ず全体像に取りかかる前に、現在の膨大な科学技術を七つの分野に分けて、それらに対応する専門部会を組織した。この七つの分野は、学問の体系に対応するのではなく、21世紀を豊かに生きるための智として、関わりの強いところをまとめて一つの分野とした。また、近年急速に大きく広がって

社会を変えつつある情報学の分野に対応して「情報学専門部会」を設置し、また、人類が存在する環境としての宇宙と地球に関わる分野について検討するために「宇宙・地球・環境科学専門部会」を設置した。また、人間の行動や社会の現象を科学の視点から考えるために「人間科学・社会科学専門部会」を設置した。物質に関わる分野について統合的に検討するために「物質科学専門部会」を設置した。数学の本質は、認識とコミュニケーションという人間の基本的精神活動にとって重要な知識と考え方であるという観点から、広く数理的な分野について検討するために「数理科学部会」を設置した。生物学から人間に関わる医学や保健までを含め、さらに生命倫理も含めて検討するために「生命科学専門部会」を設置した。技術は、特に日本において近年は科学と強く相互作用しながら進展してきたのであり、またかつては、芸術と一体となって生活の中にあった。社会の在り方と関わる面を考慮した技術の在り方を明示するために「技術専門部会」を設置した。

このように、既存の学問あるいは教科の枠組みを超えた新たな智の領域の枠組みを、七つの専門部会の形で提案したのである。

この各専門部会には、多様な分野の科学者、教育学者、メディア、科学技術理解増進に関わる人々などが参加した。また、部会報告書の原稿が出来上がった段階で、部会間で相互閲読を行い、専門ではない分野の報告書の内容について理解できるように、相互に意見交換を行って、最終原稿をまとめる際の参考とした。

科学技術の智の全体像とその中の個々の知識の間の結びつきを明らかにする作業はまだ途上にあり、むしろその作業を今後とも国民的な協同作業として継続して行くことが、日本の「科学技術の智」を定着化し高めて行くために必要であると考えている。

この七部会報告書が、新たな科学技術理解増進運動の指針として、また、国民的な科学技術の議論と関心を喚起する材料として、多くの人々の手に届くことを願っている。

今後は、この報告書のさらなる改良と、科学技術の智の全体像への統合、さらに、定着化に向けた様々な教材と活動の企画を進めたい。是非、ともに科学技術の智の漲る社会を創成して行きましょう。

宇宙・地球・環境科学専門部会長 あいさつ

部会長 西田篤弘

一般人が常識として持っている科学用語のうち半数ほどは宇宙と地球に関するものではないだろうか。宇宙は誰にも人間を越える大きな世界の存在を感じさせ、疑問を持たせる。古くから人類は天体現象に興味を持ち、宇宙観を築こうとしてきた。また、地球は人間が生きる場である。身近に起きる様々な自然現象は身近な謎であるばかりでなく、生活に直接に影響する。人類は地球の謎に挑戦するだけでなく、地球諸現象の予報を志し、周期性や他の現象との相関関係を求めてきた。さらに人間の存在が地球環境に深刻な影響を与えることも認識されてきた。

従って、宇宙・地球・環境についてのリテラシーは、事物や事象の記述にとどまるものではない。それは既に共有されているとあってよい。自然界の構造や現象の背後にあるメカニズムや歴史についての理解のレベルでのリテラシーの普及を目指したい。

さらに、どのようにしてそのように理解できるのか、どうして正しいと言えるのだろうか、という所まで踏み込みたい。自然現象の理解には系統的な観測や、基礎的な法則が基礎をなしている。誰しも持つ素朴な疑問に答えるためにも科学的な手法を用いることが必要である。これは反面、疑似科学の蔓延を防止する努力でもある。たとえば地震予知がなぜ困難であるかを理解してもらうことである。

宇宙・地球・環境部会では、この認識に基づき、文科系に進む高校生程度を対象として想定し、事実の羅列ではなく、その科学的な理解の浸透を目指した。地球上の身近な自然現象、および心を惹く宇宙の構造・現象をとりあげ、その理解を通して、科学的な物の見方、考え方の面白さを見につけてもらうことを目標とした。

要 約

地球上の身近な自然現象や心を惹く宇宙の構造・現象をとりあげ、事実の羅列ではなく、これらの現象の理解を通して科学的な物の見方、考え方の面白さを味わってもらうことを目指した。念頭に置いたのは次のような疑問である。

なぜ気圧分布から天気を予報できるのだろうか
どんなメカニズムが気候を決めているのだろうか
人間の活動は環境にどのように影響しているのだろうか
水の存在は地球にどんな特徴を与えているのだろうか
海と大気の運動はどのように影響しあっているのだろうか
太平洋と大西洋にはどんな相違があるのだろうか

地球の年齢はどのようにして測るのだろうか
過去に大陸が移動したことがなぜ分かるのだろうか
プレート・テクトニクスとは何だろうか
ヒマラヤ山脈はどのようにして作られたのだろうか
日本列島はどのようにして現在の形になったのだろうか
地震や火山はプレート・テクトニクスによってどのように理解できるのだろうか
地球上の生命はいつ頃から存在するようになったのだろうか
石油や鉄などの資源蓄積は、過去の生命活動とどのように関わっているのだろうか

太陽放射のエネルギーはどのようにして作られているのだろうか
太陽活動は宇宙空間にどんな影響を与えているのだろうか
オーロラは地球以外の惑星にも発生しているのだろうか
冥王星より外側の太陽系にはどんな天体があるのだろうか
曜日はなぜ月火水木金土日の順序になっているのだろうか

星はどのようにして生まれ、どのように進化するのだろうか

進化の果てにブラックホールになるのはどんな星だろうか
元素はいつ、どこで作られたのだろうか
遠くの星や銀河までの距離はどのようにして測るのだろうか
宇宙が膨張していることはどうして分かるのだろうか
宇宙が過去に一点から膨張を始めたというビッグバン説の証拠は何だろうか
ビッグバンはどのようにして始まったのだろうか

目 次

「科学技術の智」プロジェクト専門部会報告書の刊行にあたって	i
宇宙・地球・環境科学専門部会長 あいさつ	iii
要 約	iv
目 次	vi
第 1 章 宇宙・地球・環境科学とは	1
第 2 章 気象・気候と海洋	4
2.1 気象と気候の正しい理解のために	4
2.1.1 天気図と気圧	4
2.1.2 台風	7
2.1.3 気候とその変動	10
2.1.4 人間と気候変動	13
2.2 海と大気の運動のかかわり	17
2.2.1 大西洋は塩辛いか	17
2.2.2 風で引きずられる海水	18
2.2.3 塩辛い大西洋と深層の海水	20
2.2.4 エルニーニョ	21
2.2.5 海水は深いところが冷たく養分がいっぱい	22
第 3 章 奇跡の星・地球	23
3.1 太陽系のなかの地球（水の惑星と生命の誕生）	23
3.2 地球誕生のドラマ	24
3.2.1 地球の年齢	24
3.2.2 地球が生まれたときの様子	26
3.3 大地も動く	27
3.3.1 大陸移動説	27
3.3.2 プレート・テクトニクスと離合集散する大陸	29
3.4 地球は変動する	33
3.4.1 地層は環境変動を記録する	33

3.4.2	大陸の衝突 ヒマラヤと海洋島弧の衝突 丹沢-伊豆	35
3.4.3	失われた超大陸	36
3.4.4	海溝の堆積と日本列島の成り立ち	38
3.4.5	変形する大陸	39
3.5	地震と火山	40
3.5.1	プレート・テクトニクスと地震・火山噴火	41
3.5.2	地殻・マンツルの破壊—地震と断層	44
3.5.3	マンツルの融解—火山はマンツルの窓	46
3.5.4	地震波によって見える地球の内部	47
3.5.5	プレート運動と希少金属の濃集	49
3.6	生命史と地球環境	49
3.6.1	生命の誕生とその後	50
3.6.2	恐竜とマンモス	52
3.6.3	ヒト：ラストランナー	55
3.6.4	石油と鉄	56
第4章	太陽系と宇宙	60
4.1	太陽と地球	60
4.1.1	太陽とは	60
4.1.2	地球は太陽コロナの中にある	61
4.1.3	太陽から地球までのエネルギー流	63
4.1.4	太陽活動とは	64
4.1.5	地球周辺の宇宙空間への影響	67
4.1.6	宇宙の天気を予報する	69
4.1.7	宇宙のいろいろな場所で	69
4.2	太陽系	71
4.2.1	わが太陽系	71
4.2.2	地球の自転運動と日周運動	73
4.2.3	地球の公転運動と年周運動	74
4.2.4	季節が生じる仕組み	76
4.2.5	月	77
4.2.6	日食と月食	80

4.2.7	変わりゆく太陽系の描像	80
4.3	星と銀河	83
4.3.1	天文学の始まりと星座	83
4.3.2	星の誕生	85
4.3.3	星の一生と輪廻	86
4.3.4	元素の起源と私たち	89
4.3.5	宇宙の構造	90
4.3.6	宇宙の観測	91
4.4	宇宙論	92
4.4.1	太陽系が宇宙であった頃	92
4.4.2	銀河宇宙への道のり	98
4.4.3	現代宇宙論の基礎—ビッグバン宇宙	102
4.4.4	ビッグバン宇宙の難問	106
宇宙・地球・環境科学専門部会名簿		111
「科学技術の智」プロジェクト 研究組織		111
この報告書の利用について		115

第1章 宇宙・地球・環境科学とは

宇宙・地球・環境科学はどのような研究を行っているのだろうか。私たち人類の生活は、宇宙の中にある天体としての地球で営まれている。その地球上の自然環境を基盤にして私たちは活動し、社会的あるいは経済的環境や文化的環境が成立している。私たちは、子どもの頃から直接自然に接し触れることにより、そこに見いだされる自然の「不思議さ」や「なぞ」を解いてみたいという好奇心を抱いたり、自然の事物現象に「おもしろさ」を見だし、わくわくしながらそれらを観察し多くのことを学んできた。人類は、古代よりそういった自然環境の中に存在し生成する自然物や自然現象に支えられ、影響を受け、またその中に神秘性、美しさ、荘厳さを感じ心をうたれ、時には恐れを感じながら日々生活している。たとえば、古代の人は、美しい星空を眺め、星座にまつわる神話を創り出した。また、社会が工業化される前の農業社会では、季節を知ることは重要なことであり、太陽や月、星の位置を知り、暦を発達させてきた。宇宙・地球・環境科学の目的の一つは、このような私たちの生活や社会活動に直接関わる、地球およびそれを取り巻く宇宙に顕れる自然の事物現象を研究対象とし、科学的に解明し説明することである。

宇宙・地球・環境科学を学べば何が得られるのだろうか。宇宙・地球・環境科学に関する成果は、古代より私たち人類が地球や宇宙の起原、進化を探究する過程において、その時代の科学者や古くは哲学者などによって提示され、社会に広く認知され受け入れられてきた。それは、芸術などと同じように人類により営々と築き上げられてきた文化と言える。このような宇宙・地球・環境科学に関する成果は、その当時の関係する諸科学や技術の制約、あるいは社会的状況に少なからず影響を受けるとともに、人類の持つ自然の見方や考え方を変容させてきた。たとえば、古代より人類は、地球の形や大きさ、宇宙の始まりや大きさ、われわれはどこから来てどこに行くのか、といった疑問を抱いてきた。この人類の基本的とも言える知的好奇心は、神話や宗教に基づく地球観や宇宙観を創出し、やがて科学の進歩や時代とともに科学的な地球観や宇宙観を形成する原動力となっていた。私たちは、こうした地球観や宇宙観に代表される自然の見方や考え方を学びかつ享受し、次世代に継承していくことが大切となる。それ故にこそ、人間活動の一つの文化と

して宇宙・地球・環境科学を学ぶ意義がある。

宇宙・地球・環境科学の研究はどういった特徴があるのだろうか。地球・宇宙・環境科学で扱うスケールには、他の科学の領域や社会科学とは違い、鉱物や宝石などを構成する原子や分子から広大な宇宙といった空間スケール、さらには地球上で起こる気象現象の短時日から、地球の誕生である約46億年前、さらに宇宙の始まりである約137億年前といった時間スケールがある。科学者は、このような空間スケールや時間スケールで起こる自然の事物現象について、忍耐強くそして創意工夫した観察や観測、調査、実験、時にはシミュレーションなどを続けて膨大なデータや科学的証拠を得て丁寧に整理し、地球や宇宙の姿を解明し描いてきた。この過程で提示された研究の結果は、科学者の活動の場である学会において、精査・検討・批判などが加えられ、修正され時には破棄され、科学者たちによってコンセンサスが得られたものが、新しい宇宙・地球・環境科学の理論として登場してきた。たとえば、古くからの静的な地球観では、大地と海洋は動かないものと信じられてきたが、その後、科学的データや証拠が集められそれに基づきいくつかの考え方が提案され、棄却されてきた。現在では、大陸と海洋は位置を変え、形を変えると考えられ、動的な地球観へと変容している。この現代の地球観であるプレート・テクトニクス説により、地球の歴史を示す様々な地質現象、現在でも起きている火山や地震などの現象が統一的に説明できるようになった。けれども、そのような統一的な説明の中には、まだ議論の余地がある問題も残されている。また、地球で起こる現象の中には、非常に多くの要素によって支配されるための本質的な複雑さがあって、原因と結果を一義的に結びつけることが難しい場合がある。

ところで、宇宙・地球・環境科学の話私たちがどこで目にするのだろうか。私たちが日々の生活において、宇宙・地球・環境科学に関する話題に最も触れることが多いのは、新聞やテレビといったメディア報道である。このメディア報道を通して伝えられる宇宙・地球・環境に関する話題は、私たちの生活に直接的・間接的に結びついているものや、興味や関心を喚起するものが多い。他方で、メディア報道で示される宇宙・地球・環境科学に関する話題について、私たちは、新しい発見や出来事、あるいは自然災害など日常生活や社会に影響する部分についての関心は高いけれども、そのメカニズムや背後にある科学的原理まで知ろうとしているだろうか。このような話題の背景

にある科学的原理を学ぶことは、メディア報道が読め、正確にかつ深く理解する上で不可欠であるとともに、日常生活や社会活動に結びつける上でも必要である。加えて、自然の事物現象に関し、個人の教養をより豊かにする上でも大切である。

宇宙・地球・環境科学と社会はどのように結びついているのだろうか。今日、地球規模の問題である人為的な地球の温暖化に見られる地球環境問題や天然資源の枯渇といった代替エネルギー問題、さらにはより局所的な問題である地震や火山、津波、台風といった自然災害の問題が顕在化している。この場合、「環境」という言葉（あるいは概念）には二つの意味がある。その一つは、様々な自然現象や過程の生起する「場の条件・状況」としての自然環境であり、もう一つは、そのような状況を地球上に住む人類が「自分たちから見た都合・不都合」という視点から捉えた環境である。地球環境問題や代替エネルギー問題などは、後者の意味における環境であるとともに持続可能な社会の構築にも関わるものであり、今後人類が解決の方途を模索することになるであろう諸問題である。宇宙・地球・環境科学の研究がめざす自然の事物現象の解明と成果は、地球環境問題や代替エネルギー問題、また自然災害といった人類が直面する諸問題の解決にとって不可欠な基盤を提供するものである。一方、このような諸問題は、自然に手を加えることによって生存圏を拡大し発展させてきた人類の生き方の本質に関わるものであって、科学者が処方箋を示すだけで解決できるものではなく、人類全体にその生き方の見直しを迫るものである。たとえば、人為的な地球の温暖化の防止に関しては、世界の科学者が科学的データや証拠に基づいて提示するコンセンサスが、政治家や官僚など政策立案者によって生かされることが必要となる。だからこそ、社会の責任ある構成員（いわゆる市民）としての私たちは、宇宙・地球・環境科学について学び、自ら地球環境問題や自然災害の問題といった人類が直面する諸問題を認識し、解決策を考える態度と能力を身につけることによって、科学的に判断し意思決定することが求められる。

また、歴史的にみればある時期において、宇宙・地球・環境科学は研究者の意図にかかわらず、研究の目的が統制されたり、成果が軍事利用されてきたところもあった。このような点からも、私たちは宇宙・地球・環境科学を学んだ市民として、現在はもとより将来的にも、現代の宇宙・地球・環境科学に注意を払い、科学、技術、社会の相互作用を理解することが求められる。

第2章 気象・気候と海洋

2.1 気象と気候の正しい理解のために

地球を取り巻く大気層のうち、天気現象として人間生活に関係する高度領域は地球の半径六千数百 km に比べてその僅か 0.2% の十数 km に過ぎない。しかしこの薄い層の中に生じる複雑で多様な現象は日常生活の衣食住すべてに関わりをもっている。そのため、気象・気候に関連して使われる言葉や事象には一般の人々にとって馴染みのあるものが多い。

だがそれらを単なる生活上の実用知識として受け止めるだけなら底の浅いものになってしまう。そこからもう一步踏み込んで、我々を取り巻く地球上の大気現象(気象)を支配している法則や原理にまで遡って考え直してみることは、様々な現象の間の相互関係を理解すると同時に、大自然の奥の深さに触れる楽しみにもつながってくる。

多くの人々は小学校中学校の理科の時間に、身近ないろいろな天気現象について既に多くの事柄を学んできたはずである。折角勉強したことを、通り過ぎたあとに忘れてしまっては勿体ない。そのつもりでもう一度、自分の頭の中の引き出しを整理してみると、意外に新しいことが見えてくるはずである。

ここでは教科書的な知識を網羅して復習することよりも、自然現象を楽しみながら理解することの具体例として、日ごろ馴染みの深い「天気図と気圧」、「台風」および「気候とその変動」について考えてみよう。

2.1.1 天気図と気圧

毎日のテレビや新聞で報道される「気象情報」、「天気予報」では、殆どの場合まず日本付近の地上気圧分布図をもとに、明日は大陸からの高気圧が張り出してくるとか南方海上の前線が北上してくるなどの概況に続いて、晴雨寒暖の予測が伝えられる。しかしながら、一切の理屈を抜きに、高気圧なら好天、前線が近づいたら雨、というだけの受け止めかたでは道路交通情報を聞いて車の混み具合を知ることと何ら変りはなくなってしまう。大切なことは表面上の事実(知識)よりもその背景の理解である。

気圧分布を知って天気の予測をすることの背景には近代科学の長い歴史がある。17世紀のはじめ、イタリアのガリレオは有名なピサの斜塔の物体落下実験を通して、物質には地球の引力のため重さがあることの意味を明らかにした。その

発展として、空気のような気体もまた物質である以上、重さを持つと考えた。これは当たり前のようにも思われるが良く考えてみれば不思議でもある。気温なら寒暖を肌で感じることができるが、我々を取り巻く空気に重さがあることを身体で実感することは難しい。

ガリレオの弟子のトリチェリは、師の考えを実証するため、上端を閉じたガラス管に入れた水銀が約 76 cm の高さで空気全体の重さと釣り合うことを示した。これは水銀の比重が水に比べて常温で 13.5 倍もあるからこの高さで釣り合うことになる。同じ実験を水で行なえば 1 気圧に釣り合う水柱の高さは約 10 m にも達する。

トリチェリの後を受けて、フランスのパスカルは高さが約 1.5 km の山頂と地上で同時に気圧を測定し、山の上では気圧が低いことを確かめた。これはまさに、気圧が頭上にある空気全体の重さであることを実証したことになる。やがて気圧計はヨーロッパ全土に普及し、17 世紀の後半、ドイツのゲーリケは日々の気圧の変化と天気の推移との間に良い対応関係のあることを発見した。気圧が下がれば天気が悪くなる、という事実が経験的に発見された結果、気圧計は晴雨計（バロメーター）として人々の生活に溶け込んだ。言い換えれば、当時の人々は、今の人々以上に物質としての空気の存在を日常的に意識していたと思われる。19 世紀に入ると、悪天をもたらす低気圧が数千 km 以上の広がりを持つ組織的な現象であることも明らかになり、気圧と天気の関係の解明が進んだ。

ニュートン以来の力学でよく知られているように、物体に働く力と運動は強く結びついている。教科書に出てくる「質量×加速度＝力」という公式を単に暗記するだけではなく、気象のような身近な事柄に当てはめて素朴に実感して貰いたい。空気も質量を持った物質なのであるから、その動き、つまり風も「運動方程式」で説明できる。

地上気圧の分布が一様でない場合には空気には気圧の高いところから低いほうに押される力が働いている。しかし空気の運動は高気圧から低気圧に向って等圧線を直角に横切るのではない。このことは、川の水が地形の高いところから低地に向って流れていることとは違う不思議で面白い運動形態である。その理由は、1000 km 以上の広がりを持ち、従って空気の移動時間が数日もかかるような大きな運動には、地球が一日で一回りの自転をしていることに起因する「コリオリの力（転向力）」が働いているからである。この力は運動している物体に横向き（北半球では右向き）に働く。その結果、気圧の差による横向きの力とこの転向力がほぼ釣り合った形で、高気圧なら時計回り、低気圧なら反時計回りの風が吹く。天

気予報解説の中でよく聞く「等圧線の混み具合で風の強さがわかる」というのはこの回転地球上の大規模運動として理解することができる。

さらに、このような風の吹き方には地面付近で摩擦の効果が働くので、風は等圧線に完全に平行とはならず高気圧側から低気圧側に少しだけ吹き込む。低気圧の中心に集まった空気は行先を失って上空に昇るしかない。つまり低気圧の中心付近には上昇流が生じる。梅雨前線のように冷たいオホーツク気団と暖かい太平洋気団が不連続に接する場所では暖気が寒気の上に乗上げるからやはり上昇流が生じる。上昇した空気は気圧が下がることによる断熱膨張で冷えるので、含まれている水蒸気は凝結して雲となる。雲中の微小水滴は衝突を繰り返し併合して大粒となりやがて雨となって地上に落ちる。低気圧や前線が悪天をもたらすという現象はこのように様々な基本法則の組み合わせの結果として理解することができる。現在でも地上気圧分布図が天気図として日々の天気予報に活用されている理由は、気圧の場が地上付近の風の吹き方のみにとどまらず、空気の三次元運動、ひいては雲の生成を決める基本的な条件を表しているからなのである。

現在の天気予報（数値予報）では、このような様々な法則をもとに、数多くの地点での気圧や気温などの観測値から出発して地球全体での空気や水蒸気の動きを高速計算機で計算している。この場合大切なことは、個々の計算に用いられる方程式やその解法技術の詳細を知ることよりも、むしろ予測手段の根底にある自然法則の持つ意味とそれを応用活用することの意義を正しく理解することである。

個別的な技術は専門家に任せておいて差し支えない。科学の理解とは、このように一見素朴な物事のなかに自然法則の原理が働いていることを知ることこそある。

【用語解説1】 コリオリの力

あなたが、上から見て反時計回りに回転する円盤の中心に立っていたとしよう。そして円盤の縁にいる人にボールを投げる。だが、ボールが縁に届くころ、受け手は円盤とともに左に動いてしまっている。つまり、ボールは、あなたから見て受け手の右側にずれてしまう。もしあなたが、ちょうど地球の回転を感じないように、円盤が回転しているとは知らなかったとしよう。すると、きっとあなたは、「ボールを右向きに引っ張る力が働いて、ボールのコースが変わったんだな」と思うだろう。

本当は、ボールにはこのような右向きの力は働いていない。まっすぐ飛んでいるだけなのに、「自分は回転していない」というあなたの考え方と矛盾を出さないために導入された見かけ上の力、それがコリオリの力だ。大気や海洋の動きを考えると、ふつう、地球を基準にして、それと相対的に大気や海流がどう流れるかを考察する。つまり、地球は回転していないと考える。だから、高気圧や低気圧、ジェット気流、海流などを考えるとき、コリオリの力は大切な役割を演じる。

先ほど反時計回りの円盤を考えたのは、それが地球を北極側から見たときの回り方だからだ。つまり、北半球を考えたことになる。コリオリの力は、北半球では物が進行する方向の直角右向きに、南半球では逆に左向きに働く。したがって、高気圧を回る大規模な風は、北半球では時計回りに、南半球では反時計回りになる。

コリオリの力はとても弱い力で、ジェット気流や海流のようにスケールの大きなものにじわじわ働くのでないと、遠心力などの陰に隠れて出てこない。風呂の水を抜くとき渦の巻き方が北半球と南半球とで逆になるという話があるが、現実には、風呂の水程度の広がりではコリオリの力が出る幕はない。俗説である。

【用語解説2】断熱膨張

空気のような気体を押し縮めると、熱が外に逃げ出さない限り温度が上がる。逆に膨張させると、温度は下がる。ある気体の塊に注目したとき、その気体と周囲との間で熱の出入りが断たれた状態で膨張させることを「断熱膨張」という。現実には空気が上昇するときは、周囲との間に断熱材があるわけではないが、例えば積乱雲ができるような急な空気上昇のときは周囲と熱を交換するひまがないので、実質的には断熱膨張と同じで温度は下がる。

2.1.2 台風

西太平洋の低緯度で発生発達し北上する台風（熱帯低気圧）はメキシコ湾のハリケーンとならんで多くの人々に馴染みのある大気現象である。夏から秋にかけて毎年日本列島に接近あるいは上陸する台風は、様々な大気現象のなかでも他に類を見ない独特の特徴を備えているために現在でも多くの謎を秘めた興味深い

研究対象となっている。過去の統計から言えば、太平洋域での発生数は年間約 28 個、本土への接近と上陸する台風はそれぞれ 5 個、3 個くらいである。

気象衛星から撮影された日本付近の台風の画像を見たことのある人なら、その姿かたちから様々なことを想起するに違いない。

その一つは、台風を暴風雨や高潮のような災害をもたらす恐ろしい現象として警戒し進路予報などを頼りにして被害から逃れようとする受け止め方である。逆に、夏の日照り続きによる干ばつに悩む立場からは大雨によって水不足を解消してくれる自然の恵み、というプラス思考もあり得よう。事実、本州を中心にしてみれば日本の年間降水量に最も多く寄与しているのは梅雨よりもむしろ台風なのである。

これに対して、もう一つの異なった見方は、人間の社会生活と切り離して台風を純粋な自然現象として科学的に捉えることである。台風の衛星画像を見て、どうして地球上にはあのような半径が数百 km にも及ぶ巨大な渦巻きが存在するのか、その見事な美しさと大自然の造形の妙に魅せられる人も多いはずである。小中学生のなかには、いつかプラネタリウムで見たアンドロメダ星座の渦巻きに似ている、と連想を逞しくする子供達もいることであろう。もし「気象の不思議」という項目を挙げよと言われたら、台風が五指に入ることは間違いない。

熱帯海域で台風が発生する最大の要因は高い海水温とそれに伴う水蒸気の供給である。統計的には表面海水温が 28 度以上であることが条件のひとつになっている。熱せられた水蒸気は上昇し高さ 10 km 以上にも達する積乱雲（いわゆる入道雲）となる。そのとき水蒸気の凝結によって放出される潜熱が台風のエネルギー源となる。積乱雲の集合体は熱帯偏東風のなかで渦を生み出し、中心の上昇気流を補うように周囲から吹き込む空気は地球回転の効果（コリオリの力）を受けて低気圧性の反時計回りの運動を強める。この発達過程は、台風が夏の太平洋高気圧の西側のへりを回るように北上し日本付近の中緯度に達するまで継続される。

このように台風の発生発達のおよその原理は理解されてきたが、実際の台風の構造が衛星画像に見られるように単純な同心円ではなくスパイラル・バンドと呼ばれる細かい帯状の雲の集合体であることから想像されるとおり、台風内部での個々の雲の生成やその作用に関して未知の問題は多々残されている。そもそも半径が数百 km という台風のサイズを決めている原理は何か、と問われたら一言で簡単に説明できるまでには至っていない。それだけに奥の深い問題なのである。

一方、市民生活における防災の立場からは、台風の発達や進路を数日前から精度良く予測（予報）することが要請される。台風の予測手段としては通常の天気予報と同じく数値予報が用いられているが、中緯度の偏西風に乗って西から移動してくる普通の高低気圧や前線の予報とは幾つかの点で異なった問題が含まれている。

そのひとつは広い海上における観測の難しさである。如何に衛星観測が発達したと言っても、地上観測点における高精度の観測には及ばない。台風発達の要因が海面からの熱の供給とそれによる雲の生成であることを考えると、空間的に密度の高い観測網の必要性は台風の予測にとって大きな問題である。さらにまた、台風の内部構造に伴う大気の運動は太平洋高気圧や中緯度上空の偏西風（ジェット気流）のような地球規模の大きな流れの場と複雑な相互作用をもたらしている。大気渦運動としての台風の進路は、回転するコマがベルトコンベアに乗って動いてゆくような単純なことではない。ここにおいてもまた、人間社会の側から自然現象と対峙するとき現象の背景にある原理の理解を持つことの大切さが知られるであろう。

【用語解説3】 潜熱

夏の暑い日に打ち水をすると、地面の温度が下がる。その理由は二つある。一つは冷たい水で地面が冷やされること、もう一つが、水が蒸発するときに地面から熱を奪うことだ。この後者が潜熱に関係する。水は温度に応じて固体、液体、気体の三つの状態をとるが、固体（氷）から液体、液体から気体（水蒸気）に変化するとき、熱を吸収する。例えば液体の水が水蒸気になるとき、熱を加えてはいるが、その時点では状態が変わるだけで温度は変わらない。加えた熱のぶんだけエネルギーは高まっているが、それがすぐさま温度の上昇という明らかな形で現れるのではなく、まるで「潜んだ熱」のように水蒸気に隠れている。同じ物質の「状態」が変わったことにもともない出入りする熱。これが潜熱だ。逆に、水蒸気が冷えて液体の水になるときは、水蒸気に潜んでいた熱が放出される。だから、打ち水というのは、地球を「冷やして」いるわけではなく、地面の熱を潜熱の形で空気の側に移しているだけだ。打ち水から変化した水蒸気が上空で再び水になるとき周囲の空気は加熱されるので、打ち水は地球温暖化の軽減にはならない。

台風の内部で上昇気流が起き、運ばれた空気が冷やされてその中の水蒸気が雨に変わるときも、この潜熱が放出される。すると、その場の空気が暖められて軽くなり、さらに激しく上昇する。

ちなみに、「潜熱」と対になる言葉は「顕熱」。顕熱は、出入りの際に温度変化をともなう熱のことで、台風の例では、水蒸気が冷却されて雨粒になる際に、潜熱が顕熱として放出されて周囲を暖めたことになる。

2.1.3 気候とその変動

地球上の中緯度に位置する日本では、春夏秋冬の季節変化もまた日常の馴染みが深い。しかしこれもまた、「夏は太平洋高気圧に覆われるから暑い、冬はシベリア高気圧からの北西季節風が吹くから寒い」といった言葉の上の知識だけでは自然の摂理の理解には繋がらない。国際化が進んで地球上各地の気候に触れる機会が増えたいま、北欧やカナダの寒冷な風土、ハワイやグアムのような常夏の国々の産物などに代表されるように、地球全体の気候を考えるヒントは多々あるが、そこだけに留まらずもう一歩先まで、気候とは何かを考えてみるとその奥の深さが垣間見えてくる。

一方、気候の変化・変動に関しては、人間社会と関連した「地球環境問題」として現在大きな関心のまとなっていることも確かである。この問題については、次節の「人間と気候変動」で詳しく述べることとし、ここではその基礎となる地球科学的見地から、気候の問題を「熱のバランス」と「変動の実態」の二つの側面について考察してみよう。

机の上に置いた地球儀に横から光を当てて回してみると、地球が太陽から受け取る光（熱エネルギー）は緯度によって大きく異なることがすぐわかる。或いは、気象衛星「ひまわり」の画像をみても、雲の形や振舞は緯度によってはっきりと異なっている。

地球の受け取る熱エネルギーは、太陽から来るエネルギーのうち可視光線を中心とした波長域のものが殆どである。一方、地球自身は地面海面および大気層の温度に応じた赤外線エネルギーを宇宙空間へ放出している。赤外線は人間の眼には見えないが、昼間に熱せられた石垣などが夜になっても少し離れた所からぼんやりと暖かく感じられることを思い出してみればよい。地球は赤外線を出すことによって自分自身の温度を下げる働きをもっている。天気予報解説の中で時おり使われる「放射冷却」がそれである。

この放射冷却の程度に直接関与するのが二酸化炭素や水蒸気などの大気組成濃度であり、赤外線が完全には宇宙空間に逃げ出さないため気温が高く保たれる現象が「温室効果」と呼ばれる。したがって大気組成濃度の精密な観測は、後で述べるように「地球の温暖化問題」の大きな課題のひとつになっている。

これらの異なった波長域のエネルギーのやりとり（すなわち太陽からの入射と地球からの射出）が釣り合っている。長い目で見て地球の気候が一定に保たれているのは太陽放射と地球からの放射の間に成り立つ「熱収支の平衡状態」として理解できる。科学の世界でエネルギーや質量の「収支：バジェット」という捉え方をするのは、一般社会で「予算や決算」を扱うこととよく似ている。

この考え方を地球全体に当てはめてみると、熱の受け取り方の小さい高緯度では加熱が放熱を下回り、逆に低緯度では受熱のほうが大きい。それならどうして高緯度側は今よりもっと低温になり逆に低緯度側は温度が上がっていかないのか。その緯度毎のアンバランスを解消しているのが地球規模の大気循環および海洋循環による熱エネルギーの水平（緯度間）交換過程である。しかし低緯度と高緯度の空気が完全に攪拌されて地球上の温度が一定になっているわけではない。地表で見ると赤道と極域の間に数十度の温度差を保った状態で落ち着いている。寒帯温帯熱帯という緯度分布は、このように放射収支の緯度別アンバランスと水平熱交換の兼ね合いで決まっている。

地球規模での大気の運動（つまり風の吹き方）について見れば、冷たい高緯度の気圧は低く高温の低緯度は高気圧だから先に述べた気圧と風の関係で中緯度上空にはジェット気流と呼ばれる西風が卓越する。その反対に、低緯度では中緯度偏西風と相補的な偏東風（いわゆる貿易風）が吹く。このように地球全体での風の吹き方にバランスがとれているのも、上に述べた運動量の「収支」という考え方に適合している。

地球全体の気候を考えると、もう一つ忘れてはならないものに雲の生成とその作用がある。気象衛星「ひまわり」の全球写真を見ればすぐわかるように、地球上の雲の分布は大きく分けて低緯度で東西に帯状に伸びているものと中高緯度で波状（渦状）に発達しているものがある。雲は地面海面から蒸発した水蒸気が上昇して凝結して出来るものであるから、雲の発達と移動は地球規模での「水循環」を担っていることになる。

水が地球規模で循環していることは海流や大河の流れに限った話ではない。地上に降る雨の量は地域差が大きいですが、年間降水量を地球全体で平均してみると約

1000 mm である。ところが、いま頭上の空気全体に含まれている水蒸気を全部水に変えて雨として降らせたとしても高々25 mm にはしかない。このことは、個々の水蒸気分子についてみると、蒸発→雲→降水、というプロセスが年間に約 40 回も繰り返されていることを意味する。これを気象衛星画像に見られる雲分布と大規模風系による水平移動と組み合わせてみると「地球規模の水循環」のイメージが明確となろう。

雲はまた、日射が地上に達するのを遮ると同時に地表面からの赤外放射が宇宙空間に逃げ出すのを妨げる作用も持っている。わかりやすい喩えでいうと、気候における雲の働きは人間の着る衣服に似ている。衣服は陽射しの強い屋外での日射を遮るが、同時に発汗等による自分の熱を逃がす効果も抑えてしまう。この意味で、現在の地球の気候を一定に保つ上で水蒸気（およびその一形態としての雲）の果たす役割は大きい。火星や金星との比較において地球が「水惑星」と呼ばれる所以である。

上に述べたように長期間を通してみたときの気候は平衡状態を保っているが、日本なら日本という特定の地域で見れば、猛暑干ばつや冷夏多雨のように年毎のバラツキが見られる。しかしそれもまた自然現象のもつ変動の範囲内であることが多い。たとえば、俗に猛暑の夏として一般人の記憶に残るような年でも、8 月の月平均気温からのズレは高々2 度程度である。この変動幅は日本の夏の平均気温（約 300 K）の 1% 以下に過ぎない。これは日本の夏の暑さをもたらす太平洋高気圧の中心位置のズレが、赤道から北極まで 1 万 km の中で僅か 100 km 以下（本州の横幅の約半分）の変動にしか当たらないことに対応している。このように、地球全体を大きな目で見直してみると日常生活とは違った視点の得られることも気候を理解する上で大切である。

同様に理科年表に載っている雨量などの平年値とはあくまでも過去 30 年の単純平均値であって、たとえば梅雨による降水量をみても毎年一定とは限らない。日本列島上で初夏の雨量が少ない年は実は梅雨前線の位置が少し南にズレて海上で雨を降らせているのである。地球全体で均してみれば、雲の全量や降水の総量は毎年殆ど一定と考えて良い。偶々自分が住んでいる場所だけで気候状態を判断するのは客観的な見方とは言えない。事実、ある年の日本の夏の平均気温が 2 度程度高かったというとき、地球全体を見ると、北米大陸やアジア大陸中部あたりで同程度の低温が生じていることが多い。このような地域別の気温偏差と、地球の平均温度が過去百年で 0.6 度ほど上昇しているという「地球温暖化」とは別

のことである。

このような自然現象としての気候の「ゆらぎ」については、現在でも未知の問題が多く残されている。オゾンホールと並んで地球環境問題の主要な関心の的となっている地球の温暖化は人為的影響によるところが大きいと考えられているがそれがすべてではない。観測的に確かめられている過去一世紀以上にわたる気温変動の実態は、他にも火山爆発や太陽活動の変動など多くの過程が複雑に関与している。

【用語解説 4】放射冷却

熱の伝わり方には、伝導、対流、放射の 3 種類がある。金属棒の端を熱するともう一方の端も温くなるのは伝導のためだ。金属という物体の中を熱が伝わる。対流では物質自体が動いて熱を運ぶ。例えば、やかんで湯をわかしたとき。底を熱すると、温まった水が上昇して上部に熱を伝える。

もうひとつが放射で、物質を仲立ちにしないで熱が伝わる。焚き火から離れていても手をかざすと温かいのは、この放射のためだ。焚き火の持つエネルギーが可視光や赤外線などの電磁波として放射され、それが手に当たって再び熱に変わる。真空中でも伝わるから、太陽の熱が地球に届く。

地面は、大気に向けてつねに赤外線を放射している。もし雲があれば、雲からも地面に向けて赤外線が放射されるので、地面からの放射があるていど相殺されるが、快晴の夜だと熱は逃げていく一方で、とくに冬の明け方には厳しい冷え込みになる。

2.1.4 人間と気候変動

地球の気温は、大昔から温暖化と寒冷化を繰り返してきた。地球大気を温めているもとは、おもに太陽からのエネルギーだから、太陽を回る地球の軌道や、軌道面に対する地球の傾きなどが変われば、それに応じて気温も変わる。これにより約 4 万年、あるいは約 2 万年などの周期で寒暖が訪れている。

このような気候の変動にともない、大陸のどこかに氷河がある「氷河時代」、さらにその中でも氷河が拡大していく「氷期」、縮小していく「間氷期」が訪れる。現在は南極大陸などに氷河があり、しかも各地の氷河は減少傾向にあるので、私たちは氷河時代の中の間氷期に生きていることになる。

ただし、ここ 20 年ほどの間にマスメディアなどで盛んに使われるようになって

た「地球温暖化」という言葉は、このような地球の自然な気候変動を指すのではない。石炭や石油のような地中に眠っていた燃料を大量に使い、その結果、大気中に二酸化炭素が増えて温暖化が強まる「人為的な地球の温暖化」の意味で使われることが多い。

地球は太陽からエネルギーをもらって地面を温め、その熱を再び宇宙に放出する。もらうエネルギーと出すエネルギーのバランスで地球の暖かさが決まるのだが、もし大気がなければ、地表の温度は零下 18 度になってしまう。現実には地上の平均気温は約 15 度だから、大気のおかげで 33 度も気温が高められていることになる。これを温室の温かさになぞらえて表現したのが、「温室効果」という言葉だ。

太陽から地球に降り注ぐエネルギーは、目で見える光、つまり可視光で運ばれてくるものが多い。それで地面が温められるが、逆に地面から宇宙に逃げていく熱エネルギーを運ぶ主役は赤外線だ。大気中の水蒸気や二酸化炭素には、可視光は通しやすく赤外線は通しにくい性質がある。だから、地面が放出した熱エネルギーは大気にたまる。それで地球大気は暖かい。これが温室効果の原理だ。ちなみに、温室が暖かいのは、おもに太陽からの可視光によって温められた空気が逃げていかないためなので、可視光と赤外線のバランスが重要な温室効果のメカニズムとは本当は違う。

先に述べたように、温室効果は自然な状態の地球にもともと備わった性質だが、自動車の排ガスなどで二酸化炭素が大気中に増加すれば、温室効果を人為的に強めることになる。これが、現在問題になっている「地球温暖化」だ。温室効果をもたらす気体は温室効果ガスと呼ばれ、水蒸気や二酸化炭素のほか、メタン、オゾン、フロンなどがある。

現在の大气中に含まれる二酸化炭素は、およそ 360 ppm。ppm は「100 万分の 1」を表すので、360 ppm とは、空気を構成する気体の 100 万分の 360、百分率でいうと 0.036 %が二酸化炭素という意味だ。大気中に窒素は 78 %、酸素は 21 %あるので、それに比べると、二酸化炭素は非常に少ない。この微量の二酸化炭素が、温室効果を通して地上の気温を大きく左右する。18 世紀の産業革命以前には 280 ppm 程度だった。ハワイ・マウナロア山で 1958 年に継続観測が始まったころには 315 ppm 程度で、その後も増加し続けていることが明らかになっている。このマウナロア山の観測は、気候の温暖化による地球の危機が叫ばれる前から地道に続けられてきたものだ。地球の観測は、いざ事が起きてから始めても、それ以前

の状態と比較できなければその意義は大きく損なわれる。マウナロア山の例は、継続的な観測の大切さを端的に示すものだ。

人為的な地球温暖化が世界的な問題になったのは、1992年に地球サミットがリオデジャネイロで開かれたころからだ。もし地球が温暖化しているならば、大陸の氷河が解けて海に流れ込んで水位が上昇し、小さな島が多い国は大打撃を受けるかもしれない。他国の出した二酸化炭素で国土が沈んでしまうのだ。気温が上がれば、いまは熱帯などの暑い地域にしかない病気が、温帯へも広がるかもしれない。これらの危機を正確に予想するためには、現在の地球は本当に温暖化しているのか、そしてそれが人為的な二酸化炭素の増加によるものなのかを判断しなければならない。

その目的で設立されたのが「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」だ。IPCCは、大気中の二酸化炭素が増加することで起きる地球気候の温暖化について、各国が政府レベルで検討するための組織。国連傘下の世界気象機関 (WMO) と国連環境計画 (UNEP) が 1988 年に設立した。科学的評価、社会への影響、防止戦略をそれぞれ検討する三つの作業部会があり、その時点までに公表されている最新の科学的知見を評価して報告書をつくる。1990年の第1次評価報告書に始まり、2007年には第4次評価報告書が公表された。

気候のように複雑なシステムでは、事の因果を単純に言い当てることは難しい。大気中に二酸化炭素が増えると地上の平均気温が上昇することに異論を唱える専門家はまずいないが、逆に、1980年代以降に顕著になった地上気温の上昇が、人間の社会活動で排出された二酸化炭素によるものと断定できるかという点、それは話が別だ。実際に、この温暖化は地球の自然な変動の一環で人為的なものではないと主張する研究者もいた。しかし、第1次評価報告書ですでに、地球は温暖化しているとの評価をまとめ、第4次評価報告書では、20世紀後半以降に観測された温暖化は人間活動にともなう温室効果ガスの影響である可能性がかなり高く、また、世界のさまざまな研究グループが公表したコンピューターによる温暖化予測などをもとに、化石燃料に頼り続ければ21世紀末には気温が1990年に比べて4度上昇するという結論をまとめた。

第4次評価報告書によると、世界の平均気温は2005年までの100年間で0.74度上昇し、海面水位は20世紀の間に17cm上がった。すでに暑い日や暑い夜、熱波、大雨の発生頻度は増えている。1970年代以降は、熱帯や亜熱帯で干ばつ地域が拡大し、しかも、より激しく長期間にわたるようになった。また、強い熱帯低

気圧が 1970 年代以降は北太平洋でさらに強度を増していることも指摘された。

このような気候の温暖化による自然環境への影響は、すでに現れている。氷河の後退や永久凍土の融解、さらに動植物にとっての春の訪れが早まり、その生息域はより寒冷的な地域に移ってきている。

もし、これからも石油などのエネルギーを使いながら世界の経済成長が続くという最悪のシナリオが現実のものとなった場合、先に述べたように 21 世紀末には地球の平均気温が 1990 年に比べて 4 度高くなると予想される。だが、この数字には予測手法などによって幅があり、報告書では最大で 6.4 度高くなる可能性も指摘している。この上昇幅は 2001 年に出された第 3 次報告書での予測を 0.6 度も上回るものだ。さらに、このような温暖化の進行により、並外れた暑さや大雨のような極端な気象が世界各地で増える。社会で「異常気象」と感じられる現象が増えていくということである。

科学は、これまでの知見に矛盾が出ないように自然の仕組みを説明する営みであり、将来にわたって不変な真実を述べるものではない。また、先端的な研究では、その知見の妥当性について評価が分かれることも珍しくない。このような状態では、国際政治は動けない。IPCC は、科学界が自らの内にコンセンサスを探り、それと国際社会とを結んだ画期的な試みだったともいえる。この活動に対して IPCC は、アル・ゴア元米副大統領とともに、2007 年のノーベル平和賞を受賞した。

IPCC による科学的評価をもとに、各国が対応策を取り決めたのが「京都議定書」だ。1997 年の「第 3 回気候変動枠組み条約締約国会議」で採択された議定書で、会議が京都で開かれたためこのように呼ばれる。温室効果ガスの削減目標を、2008～2012 年に各国が達成することを求めている。2005 年に発効した。

ただ、温室効果ガスの削減は、各国の利害が絡むだけに先行きは不透明だ。二酸化炭素の排出を減らすには費用がかかり、経済成長にもブレーキがかかる可能性があるが、先進国は地球温暖化が世界的な問題になる前に工業化を終えたので、これらに配慮する必要がほとんどなかった。その一方で、いま工業的な成長の段階を迎えている中国やインドに温室効果ガスの削減を求めるのが本当に妥当なのか。現在の地球温暖化問題は、その主役の座が科学から政治と経済に移りつつあるといってもよいだろう。

【用語解説 5】異常気象

気象庁は、その地点で過去 30 年に 1 度しか現れなかったようなまれな現象と定義しているが、マスメディアでは、豪雨による水害や干ばつなどで被害が目だったとき、気象庁の定義とは別に、やや主観的にこの言葉が使われることも多い。科学用語と生活実感とのズレを示す好例でもある。また、例えば、生活に支障が出るような夏の少雨が毎年続けば、実感としては「ここ何年か夏の天候が異常だ」と思うだろうが、気象庁の考え方だと、このような「異常」が続けば、それはやがて普通のことになり「異常」ではなくなる。科学用語としての「異常」と一般用語の「異常」は、同じではない。

【用語解説 6】オゾンホール

南極上空のオゾンが春先の 10 月ごろに急減する現象で、象徴的に「地球を覆うオゾンの層にぽっかりと開いた穴」を意味してこう呼ばれる。高度 20~25 km のあたりにあるオゾン層は、太陽からの有害な紫外線を吸収してくれるが、1980 年代ごろからオゾン量の減少が激しくなって国際問題化した。スプレー缶や冷房機の冷却材などに使われる「クロロフルオロカーボン（フロン）」が大量に大気中に放出されたことが原因とされ、1985 年に採択された「オゾン層の保護のためウィーン条約」でフロン規制が始まった。

2.2 海と大気の運動のかかわり

海洋は大気に比べると、質量は約 300 倍、含むことのできる熱量はざっと 1000 倍にのぼる。したがって、地球の気候を支配するシステムの中で、特に気候の長期の変動になればなるほど、海の役割は大きくなる。いったん海が暖まるとそこに蓄えられた熱量は膨大なものとなりもとにもどりにくいからである。そこで、天気や気候に大きな影響を及ぼしている海と大気のかかわりを中心に、さまざまな角度から海の役割考えてみよう。

2.2.1 大西洋は塩辛いか

北太平洋と北大西洋の海面の塩分を比べると、北大西洋の方が平均して約 0.14% 高い（注：北太平洋は 3.417%、北大西洋は 3.545%）。この濃度はプロのシェフなら容易に分かるほどの差だ。海面の塩分は、蒸発と降雨や河川

による淡水の供給の差、などによって決まる。貿易風は北大西洋から蒸発した水蒸気をパナマ地峡を越えて北太平洋に運び、それが雨となって北太平洋に供給される。一方、偏西風が運ぶ北太平洋起源の水蒸気は、北アメリカ大陸西岸の山地で雨となり、北大西洋には届かない。このように大規模な地形の配置が塩分の分布に影響していると考えられている。また、大気大循環のパターンも塩分に影響を及ぼしている。大規模な下降気流域にあたる亜熱帯高圧帯では降雨が少ないため、海面の塩分は寒帯より高いのだ。

2.2.2 風で引きずられる海水

では、この北緯 40 度付近を吹く西風はどのようなものか。これはすでに 2.1 で述べた偏西風である。これも気象と海とは密接に関係していることの一例である。そして北緯 20 度付近では東風（貿易風）が吹いている。これらの風が海流を作る大事な役割を果たしている。世界の海の大規模な循環の様子を、模式的に図 1 に示した。黒い矢印は海の表層の循環を表している。太平洋でも大西洋でも、海の西の端だけに強い流れがある。北太平洋の西の端の流れは黒潮、北大西洋は「湾流(Gulf Stream)」と呼ばれている。このような海流はどうしてできるのか。表層の海水は、主にその上を吹く風によって動かされているのだ。貿易風と偏西風は、北太平洋、北大西洋の表層の海水を時計回りに吹き回しているのだが、地球が自転していることや地球が丸いことによって、強い流れはこれらの大洋の西側だけに限られて形成される。黒潮や湾流は海流の中でも特に強い流れであるが、秒速は 1~2 m、人間が早歩きするくらいの速さである。低気圧が発達すると秒速 20 m 以上で風が吹くのは大違い。これは水が空気より重いこと、海が深いことに大きく関係している。いくら空気が海面をこすっても、流れはそんなに速くならないのだ。しかし 1 秒間に流れる水の量はナイアガラの滝の 5000 倍ほどに上る。黒潮は熱帯から寒帯へ熱を運ぶ大きな役割を果たしているのだ。そして北太平洋の水が、この表層循環に乗って北太平洋を一巡するのには、数年かかる。日本の南岸を流れる黒潮の水は、南の海から来るから温かい流れで、東北の東の海には、親潮と呼ばれる冷たい流れがある。日本付近の海流を図 2 に示してある。海中はとても流れがゆっくりしているので、見ても流れているのがなかなか分からない。それに黒潮や親潮が流れているところまで行ったことのある人も少ないだろう。しかし、黒潮や対馬海流が西から流れて

くることは、遠く中国から日本の沿岸に中国語で書かれた空き缶や産業廃棄物が漂着することからも思いを馳せることができよう。

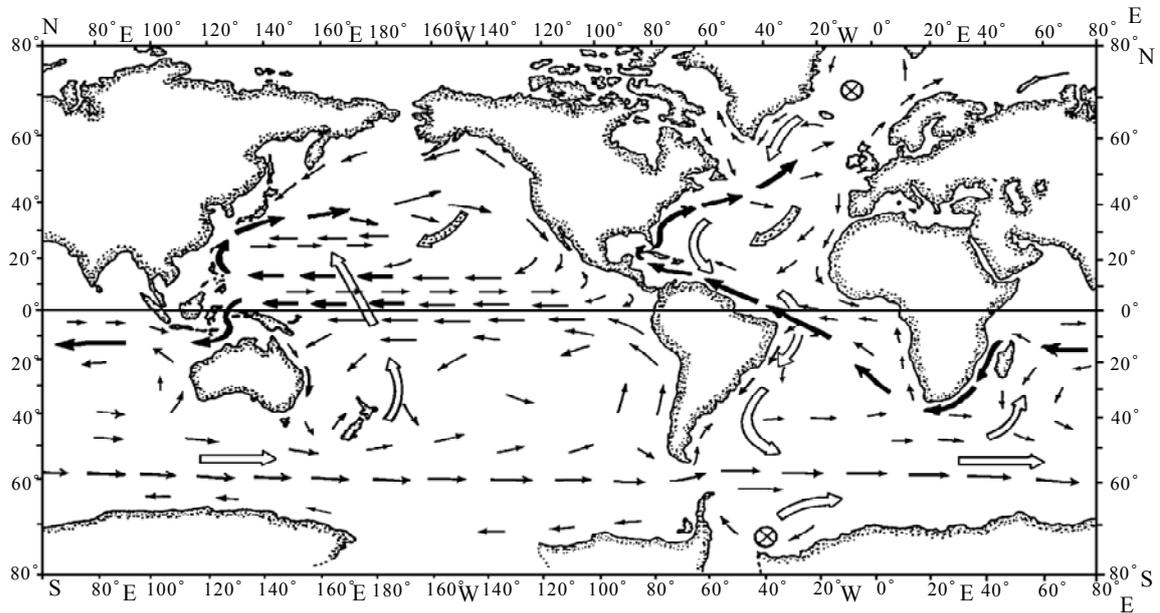


図1 世界の海流¹

海面を流れる海流（黒矢印）と深層を流れる海流（白い矢印）
○に×を入れた記号の場所は世界で一番重い海水が形成される海域



図2 日本付近の海面付近の海流²

¹ 日本海洋学会「海を学ぼう」編集委員会『海を学ぼう』東北大学出版会、2003、p.6

² 日本海洋学会「海を学ぼう」編集委員会『海を学ぼう』東北大学出版会、2003、p.6

2.2.3 塩辛い大西洋と深層の海水

高緯度の寒いところの表層の水が、冷たい風によって冷やされて、その下方の水より密度が大きくなると、対流が起きて、表層の水が沈み込む。大規模にそのような沈み込みが起こっているところが、世界の海に2か所ある。1つは、グリーンランドの東方、もう1つは南極大陸のウェデル海と呼ばれているところで、どちらも図1の中に丸で囲んだ×で記してある。どうしてグリーンランドの沖で表層の水が沈み込むのに太平洋では深層まで沈み込まないか、というと太平洋は2.2.1で述べたように塩分が小さいから同じ温度まで冷やされても塩分の高い大西洋の海水の方が重くなるのだ。そして太平洋は北がベーリング海でほとんど閉ざされているが、大西洋は広く北極まで続いていることも大事だ。にわとりと卵の関係になるけれど、大西洋の海水がグリーンランド沖で沈み込むので、湾流は北の方まで流れることができる（ひきずられるイメージで）。よってヨーロッパは緯度が高いのに冬でも暖かい。湾流が北まで流れるから、熱帯地方の塩分の高い水がグリーンランド沖まで到達できるのだ。

グリーンランド東方で沈み込んだ重い水は、深層まで沈み、図1に白い矢印で示したように、やはり大西洋の西の端あたりを通過して、赤道を越え、ウェデル海から沈んだ水とともに、南極の周りを東に流れる。その一部はインド洋にも入りこむが、多くはニュージーランドの東を通過して北上し、赤道を越えて北太平洋に流れ込む。北太平洋に達した水は、最初グリーンランド沖で沈みこんでから、2000年程度の時間を費やしていることが分かってきている。表層の水の動きは速いけれど、この深層循環の水の動きは大変緩やかなのだ。

【用語解説7】密度

ある決まった体積あたりの重さのこと。より正確には「重さ」ではなくて「質量」。地上で重さ1 kgの物体を宇宙の無重力空間に運ぶと、そこでは重さはないが、質量がなくなってしまうわけではない。質量はその物体に固有の量で、なくなりはない。1 kgの「質量」を持つ物体が地球の重力によって引かれるときに生まれる地上での力を、私たちは1 kgの「重さ」と感じている。さて、水の密度は1 cm³あたり約1 g。だが、1 gの水は温めれば膨張して1 cm³より増える。つまり、1 cm³あたりの質量は小さくな

り密度は下がる。また、水に塩を溶かすと密度は上がる。だから、海の水でいえば「低温」「高塩分」の水は密度が高く、「高温」「低塩分」だと密度は低い。だが、実際には「低温」で「低塩分」、あるいは「高温」で「高塩分」などという組み合わせもあって、それが海水の動きを複雑にしている。ちなみに、水は冷やせば冷やすほど密度が高くなるわけではなく、4℃で密度が最大になる。

2.2.4 エルニーニョ

エルニーニョとは、ガラパゴス海域からペルー沖にかけて、海面温度が数年に一度、大規模に上昇する現象をいう（専門的には「エルニーニョ現象」という）。スペイン語で「神の子」を意味する。

赤道太平洋では、通常の場合東から西へ吹く貿易風が、日射によって暖められた海水を西へ集めるので、それを補うため東部太平洋、ガラパゴスやペルー沖では、深いところから冷たい水が湧昇してきている（といっても一日にせいぜい数十メートル上昇する程度であるが、地球の引力に逆らって海水が上昇するのだから並大抵のことではない）。日本のはるか南、西太平洋の海水温は年間を通じて28℃以上もある。日本では最低気温が25℃より高い夜を熱帯夜と呼ぶことを、そして海水が空気よりも暖まりにくいことを考えると、どれほど熱いか想像がつかだろう。海水がそれほど暖かいのでその上の空気も暖かく湿っており、西太平洋にはおびただしい数の積乱雲が存在している。積乱雲が水温の高い西太平洋に集中していると、そこに吸い込まれる貿易風をさらに強め、海水温の東西のコントラストを支える相乗作用を持つ。さて、ここで貿易風が弱まったときの状態を考えてみよう。これがエルニーニョに対応する。東風の支えが弱くなったことにより、西側の暖水は東向きに流れ出そうとする。単純に考えると、暖水の流出により太平洋赤道域では西から東へ向かって海水面温度が上昇していく。（これまでのエルニーニョ現象発生時の状況を見ると必ずしもそれでは説明できないのであるが、詳しい話は抜きにしよう。）このような海水面温度分布の変化に対応し、活発な雲のできやすいところも暖水が現れた東方へ移っていき、普段雨が降らない地域で雨が降り、赤道域西側では小雨となるのだ。

それでは、貿易風が強いときにはどうなるか。このときには暖水はさらに西側へ蓄積して厚みを増し、水温も高くなる。東側では湧昇流が強化され、

通常よりも低温な海面が広く東西に拡大する。この状態はエルニーニョ現象と対比して、「ラニーニャ現象 (La Nina event)」（特別な女の子）と呼ばれる。エルニーニョやラニーニャは5年から10年おきに起こり、例年とは異なる海洋や気象の現象を引き起こすのである。なお、貿易風が強まったり弱まったりするのは海水温度とも関連していて、地球規模の現象であることが分かっている。よくエルニーニョの年は日本では冷夏、インドネシアでは小雨、そしてアメリカやヨーロッパでもさまざまな特異な気象が観測されるので、異常気象だと言われるのだが、およそ5年おきに起こる現象なので、一方的に気温が上昇していく「温暖化」とは区別して考える必要がある。

2.2.5 海水は深いところが冷たく養分がいっぱい

海水は深いところが冷たいし、また植物が成長するのに必要な養分も深いところほどたくさん含まれている。海水の温度は浅いところほど日射を受けて高い。しかし海面から数百メートル潜ると、太陽光が届かなくなり、暖まらなくなる。したがって、おおざっぱに見れば、冷たい深海水の上に暖かい表層水が乗っていることになる。太陽光は植物が光合成するのに必要だから、海中の植物プランクトンも表層付近にしかいない。これを食べる動物たちも表層に集中しているのだ。そして彼らの排泄物や死骸が深層に運ばれる途中で分解していくので、深いところは養分が蓄えられる。ペルー沖ではこの養分をたくさん含んだ水が湧昇してくるのでプランクトンが多く、それを食べるカタクチイワシも多量に獲れるのだが、エルニーニョがおこると湧昇が弱まるのでカタクチイワシが獲れなくなったりするのだ。エルニーニョは気候ばかりでなく、魚の生態にまで影響を及ぼしている。

38億年前に、海水の中か海底の下で原始的な生きものが誕生したと考えられている。その生物は進化して、4億2千年前に陸に上がった。いまいる生物の体液の化学元素組成と、海水の組成とが似ていることから、生命が誕生した38億年前のころから、海水の主な化学成分の組成は、すでにいま現在の海と、そんなには変わらないものであったと考えられているのだ。

第3章 奇跡の星・地球

3.1 太陽系のなかの地球（水の惑星と生命の誕生）

私たちの人間の体の半分以上は水でできているようだ。だから、毎日なんらかの形で水分を取らないとたちまち死んでしまう。私たちが毎日、水を飲んでいられるのは、地球という水の惑星に住んでいるからだ。地球には、ありとあらゆる所に水がある。しかし、このような天体は、宇宙広しといえどもざらにあるわけではない。地球に水がなければ、私たちは生きていけないだけでなく、微生物をふくめ、そもそも地球上の生命そのものがこの地球に誕生しなかったと思われている。

それではなぜ、地球だけがこのように豊かな水の惑星なのだろうか。太陽系のなかにある8つの惑星のうちで、惑星の表面に水があるのはただひとつ、地球だけである。地球にもっとも近く、太陽からのエネルギーは地球と同じように受けている月は、表面が砂と岩石の広がる砂漠のような天体であり、一滴の水も見られない。これは月の大きさが地球の4分の1ほどしかなく、重力も地球の6分の1しかないことと関係している。重力が小さいために、水の分子を引きとめる十分な力がないからだ。月に海や川があったとしても、この水は宇宙空間に簡単に逃げ出してしまうのだ。

地球と同じぐらいの大きさの金星にも水はない。金星の表面の温度は鉛でも溶けてしまうような高温なのだ。これは金星が地球よりも太陽の近くにあり、地球より多くの太陽熱をもらうからである。地球は、太陽から1億5000万kmの場所にあるのに対して、金星は太陽から約1億kmの場所にある。たった5000万km（宇宙ではこの程度の距離は微々たるものである）の違いで、金星の受け取る太陽熱は地球の約2倍になり、金星の海は蒸発してしまう。金星表面から海がなくなると、内部から放出される炭酸ガスは（地球の海のように炭酸ガスを吸収できないので）、大気として金星を取りかこみ、炭酸ガスの温室効果で、金星はますます熱くなっていく。

地球より約8000万kmだけ遠くにある火星には、地球が太陽から受け取るエネルギーの半分以下（同じ面積で比べて）しか届かない。また火星の大きさは地球の半分しかないので、火星を暖めておくのに十分な大気の毛布がない。このため火星の平均気温はマイナス70℃まで下がっている。このため火星に水があったとしても、氷になってしまう。火星の歴史の上では温

暖な気候があった時期もあり、海があった可能性もあるといわれているが、暖かい期間はごく短かったと思われる。

火星よりも遠くの惑星では、さらに温度の低い極寒の世界であり、水はみんな氷になっている。太陽系の惑星のなかで、水が液体の水として惑星表面に存在するのは、私たちの地球だけなのだ。

もし太陽がいまの2倍の重さがあれば、その寿命は20億年という短いものになってしまうと予想されている。そういう寿命の短い星の周りの惑星では、生命が進化していくのに十分な時間がとれない。また、いまの太陽の2分の1しかない小さな星の周りでは、その星の発する熱は現在の太陽の4%ほどしかなく、惑星をちょうど良い温度に保つことができなくなるのだ。

こう考えると、私たちの地球はこの広い宇宙のなかでも奇跡のような存在であることがわかる。太陽という星の周りで、ちょうど良い場所に、ちょうど良い大きさの惑星があったために、そこで生命が誕生し、海のなかで生命の進化が進み、やがて人間のような生物が生まれたと思われる。これを読んでいる君も、宇宙のなかの奇跡のような存在と言えよう。

3.2 地球誕生のドラマ

皆さんが生まれたときの様子を知るにはどうしたら良いだろうか。両親に「自分が生まれたときはどうだったか」と聞いてみるのも一つの方法だ。両親に聞けないときは、友達の誕生の様子を聞いて、自分の誕生のことを類推することも可能だろう。両親にも友達にも聞けないときには、自分の生まれたころの新聞や雑誌をみて、その当時の様子から自分の生まれた時代を考えることも出来る。

地球の誕生の様子についても、科学者は同じようにして調べるのであるが、地球を産んだ両親から直接話を聞くことは出来ないので、科学の力を借りなければならぬことになる。

3.2.1 地球の年齢

まず地球誕生の様子を探るために、最初に地球が今から何年前に生まれたかを考えてみよう。誕生の時期を知ることが大切なことは、人間の場合と変わりはない。でもこれが結構難しい。

地球の岩石のなかで最も古い岩石がカナダにある。この岩石の年齢はおよ

そ 40 億年だ。このような古い岩石の年齢は、それに含まれるウランや鉛の量を測定することから知ることができる。それには下の図に示すような方法によるものである。

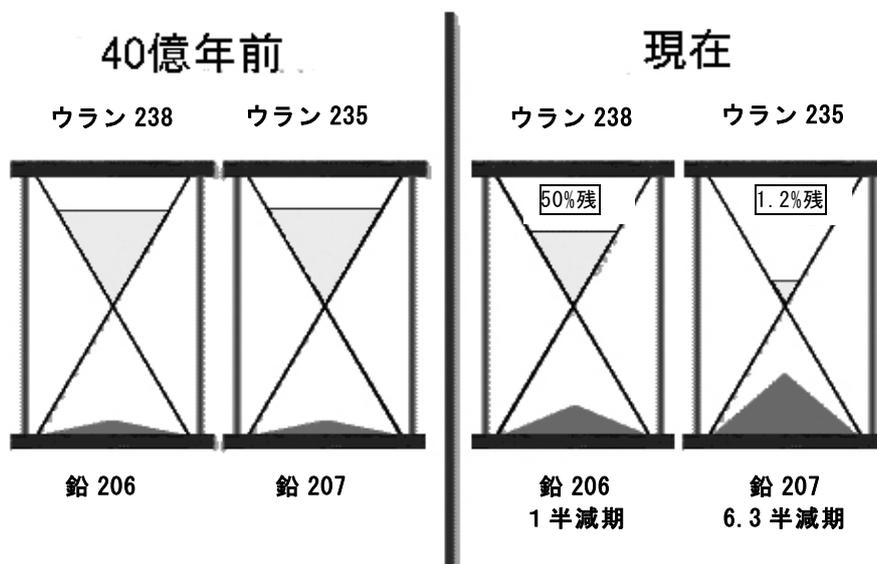


図 3 放射性元素ウランがその量に比例して鉛に変化することから岩石の年齢を知る方法の概念図

ウランという元素は放射性元素と言い、原子核が自然に変化して他の元素にかわっていく性質がある。このうち、ウラン 238 やウラン 235 は、それぞれが固有の変化の係数を持ち、かつそれぞれの量に比例した速度で鉛 206 や鉛 207 に変わっていく。したがって地球が誕生したときにどれだけ、鉛 206 や鉛 207 という原子がどれだけ岩石の中に含まれていて、現在はどうかということが分かれば、その鉛の量の増え方でこの岩石がいつ生まれた物が分かるのである。

しかし、地球上のもっとも古い岩石の年齢は地球の年齢と同じになるとは言えない。隕石や月の岩石などの年齢を参考にすると、どうやら地球の年齢は 46 億年ということが分かる。地球の誕生時に出来た古い岩石は、風化作用や浸食作用や後で述べるプレート運動などによって地表面から消えてしまったものと思われる。

3.2.2 地球が生まれたときの様子

地球が生まれたときの様子を記録したものは、残念ながら地球上には見あたらない。しかしそれが月の岩石に記されている。これがどのようなものであるか、次に述べることにしよう。

アポロ宇宙飛行士が月から持ってきた岩石を調べてみると、月の誕生した時は今から 46 億年前。月の岩石が地下のマグマから出来たのがおよそ 40 億年前から 30 億年前までの間だったということが分かった。しかも古い時代に作られた地域ほど数多くのクレーターが見られ、激しい隕石（小惑星や彗星も含む）の衝突が 40 億年前には起きていたことが分かる。

もし月のような小さな天体が、誕生したときに冷えて冷たい天体であったとしたら、そこからマグマが出てくるほどの高温の天体になるには、どうがんばっても 40 億年以上もかかることが理論的にわかる。それに対して事実は誕生直後からマグマの活動が月に起きていたことを示している。月が低温で誕生したと仮定すると、月の岩石の特徴を説明できないのである。しかもマグマの活動が 10 億年も続いているというのだから、マグマの規模も大規模なものだったに違いない。多くの科学者は月が生まれたときには、月はマグマの海で被われていたに違いないと考えている。

月がこのように高温で誕生したのなら、同じように地球も高温で誕生したに違いない。地球の方が月よりも大きくて、重力も強いので地球を作った微惑星（太陽系誕生期にあったと推定される惑星のもとになるような小天体のこと）も地球の表面に激しく衝突したと考えられるからである。そうだとするとその微惑星の衝突で地球は熱せられ、月と同じように地球もマグマの海で被われていたのであろう。月や他の惑星の表面にみられる無数のクレーターが示すように、地球誕生期には微惑星や隕石の激しい衝突が見られたに違いない。

岩石の中に含まれていた水や揮発性元素は蒸発し、原始の大気を作り、その大気が冷えるにつれて水蒸気が雨となり、地球の海をつくることになったのであろう。表面が冷えるにつれ、マグマが冷えて岩石を作り、これが原始大陸となったのであろう。地球が誕生してから 10 億年の間に何が起きていたか、それを直接物語る資料は地球上にはないけれども、他の惑星を調べることによって地球誕生期の様子を推察できるのである。

3.3 大地も動く

3.3.1 大陸移動説

世界地図を拡げてみて、大西洋をはさむ南アメリカ大陸とアフリカ大陸の形を見て貰いたい。南アメリカの東海岸とアフリカの西海岸の海岸線がとても良く似ていることに気付くであろう。

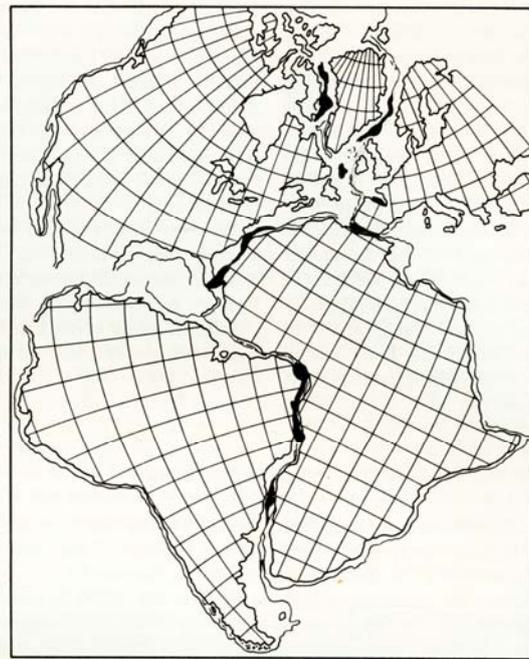


図4 南アメリカとアフリカの海岸線がよく似ていることを示している³

今からおよそ 100 年前、ドイツの気象学者アルフレッド・ウェゲナーはこの海岸線の類似性から、これは昔この二つの大陸がひっついて一つの大陸だったものが、その真ん中あたりから割れて、二つの大陸となって動き始め、現在のような姿になったのではないかと想像した。この想像はその後の研究によって確かめられ、大陸が移動することは疑いを入れない事実だろうと考えられるようになった。

近年では、南アメリカ大陸とアフリカ大陸だけではなく、北アメリカもインド大陸も南極大陸もオーストラリア大陸も、みんな 2 億 4000 万年前には

³ Bullard, E. G., J. E. Everett, and A. G. Smith, Phil. Trans. Roy. Soc., London, A-258, 41-51, 1965.

一つの巨大な大陸だったと信じられるようになってきた(図4参照)。「動かざると大地のごとし」と考えられたものが、地球の歴史の時間で考えると、結構自由に動き得るものであるという驚くべき結論は、様々な証拠から得られたものである。ここでは二つの証拠についてのみ取り上げる。

まず最初の証拠は、大西洋や太平洋の真ん中にある中央海嶺と呼ばれる地形の発見から得られた。特に大西洋のアメリカ大陸とアフリカ大陸のほぼ中央に海底火山が繋がる中央大西洋海嶺というものがある。この地形を詳しく調べてみると、これはいかにも大陸を引き裂いた割れ目の跡のように見えるのである。このような割れ目の地形が大陸を取り巻いており、これらはそこが大陸の引き裂かれた場所、新しい海が生まれている場所という考え方を採らない限り説明できないものだった。

二番目の証拠は岩石に記録された地球の磁気から得られたものである。地球の岩石は弱いけれども、いずれも小さな磁石のように磁気を帯びている。この磁気はその岩石が作られたときに、地球全体の磁石の影響で磁化されたものである。一方、地球の磁場は極に近いところ(緯度の大きなところ)では、伏角が大きく(磁針が下を向く)、赤道に近い緯度の小さなところでは伏角が小さい。そこで岩石の磁化の方向を調べることによって、この岩石の生まれた緯度を知ることができる。色々な大陸の、色々な時代の岩石の時代を調べてみると、この岩石に記録された磁気から大陸が移動していることが分かる。

地磁気から得られる証拠のもう一つは、海洋底の岩石に記録された磁気にある。中央海嶺では、溶岩が噴出して新しい玄武岩が生まれている。この玄武岩には地球の過去の地磁気の歴史がテープレコーダーのように記録されていることが分かったのである。これは次のような事情から起きた現象である。

まず最初に「地球全体の磁石の向きが時々ひっくり返る」ことがあることを、述べておかなければならない。すなわち現在の磁石の方向(北極がS極で、南極がN極)が、かつて何度も反対になっていたことが分かっているのである。なぜそんなことが起きるのかについては、まだ良くは分かっていないけれど、地磁気反転の歴史は陸上の岩石の研究からよく分かっている。一方、海嶺の周辺で海底の磁気の様子を調べると、磁気の方が現在と同じ向きになった地域やその反対の向きになっている地域が整然と(海嶺軸に平

行に) 帯のように広がっていることがわかった。昔の地球の磁気の方角をあらわすものが、海嶺から遠い場所に見つかり、海嶺に近い場所ほど現在に近い磁気の方角となっている。この海底磁気の変化の様子は、ここで新しい玄武岩の地殻が生まれ、それが海嶺軸から左右に広がっていること考えることによって、きれいに説明できる。海嶺で作られる岩石の磁気はその時の地球の磁気を記録し、テープレコーダーのテープのように左右に移動しつつ地球磁気の歴史を記録し続けていたのである。

3.3.2 プレート・テクトニクスと離合集散する大陸

100年ほど前にアルフレッド・ウェゲナーによって提唱された大陸移動説は今から50年ほど前から、様々な地球科学的方法によってその考えが確かめられてきた。さらにその研究が進むにつれ、大陸も海洋底もともにダイナミックな変動を遂げるものであると考えられるようになった。その考え方をプレート・テクトニクスと呼ぶようになった。すなわち、現在の地球の表面は10枚ほどの板のような岩板（これをプレートと呼ぶ）で覆われており、このプレートの運動が、地震や火山などの活発な地質現象を引き起こしたり、大規模な大陸の移動も起こすというのである。

ここではプレート・テクトニクスと呼ばれる考え方のもとになった、地震学から得られた図5をお見せすることにする。この図の中央にあるのは太平洋の地下を表すものと考えて欲しい。表面を覆っているのがプレートと呼ばれる厚さ100km足らずの岩板（リソスフェアと呼ばれることもある）である。その板の上に書かれている矢印が板の動いている方向を示す。中央部分にある板の割れ目が中央海嶺に相当する。ここではマグマがわき出して、両側の板を左右に押し広げるかのように見えている。ここでは新しい岩石がプレートに付着してプレートを拡大している。一方、海嶺で作られたプレートは太平洋の場合は東西に広がり、大陸の端にきてマントルの下に沈み込む。プレートがマントルに沈み込むことによって、海が深くなり海溝ができる。日本海溝はこのように太平洋のプレートがマントルに沈みこんでいる場所である。

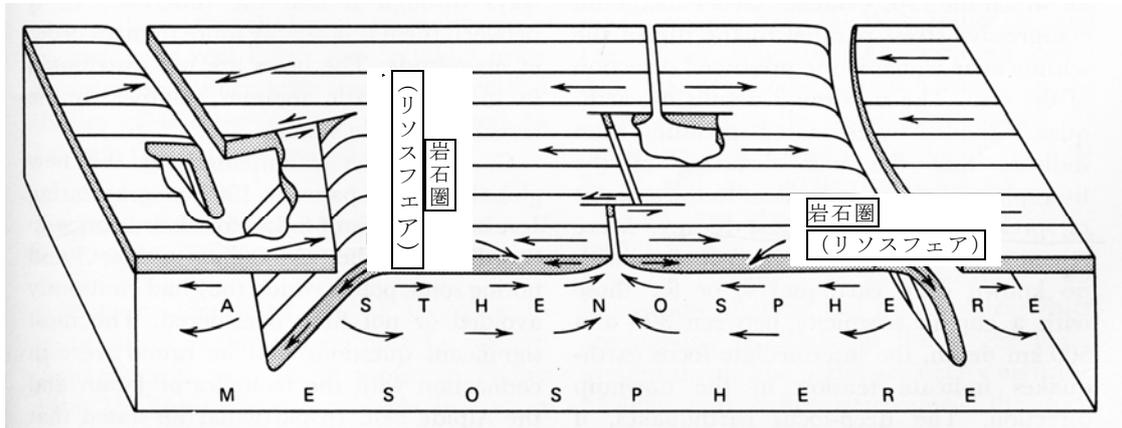


図5 プレート・テクトニクスの概念図⁴

この図が示しているように一枚のプレートの境界は、海嶺、海溝の他、プレート同士が横ずれにすれ違っている断層(トランスフォーム断層と呼ばれる)の3種類からなっている。このようなプレートの境界では大なり小なり地震が発生し、プレート相互の運動があることを示している。日本のようにプレートがマントルに沈み込む場所にあるところでは、時に大きな地震に見舞われるが、これもプレートの運動によるものである。

プレートの相互の運動はごく最近までは、地震学や地形学、地磁気学から推定されるものであったが、現在ではこの動きをGPS(全地球測位システム)という人工衛星を使った精密な位置決定方法を使うことによって、直接に測定できるようになった。これによると確かに太平洋プレートはユーラシア大陸にむかってほぼ1年に約10cmという速度で動いていることがわかる。

さてこのように地球の変動をもたらす仕組みがわかってみると、現在の大陸配置をプレート・テクトニクスに従って昔の姿にもどすことができる。このようにして得られた過去の大陸の配置を図6に示した。

⁴ Isacks, B., J. Oliver, and L. R. Sykes, J. Geophys. Res. **73**, 5855-5899, 1968.

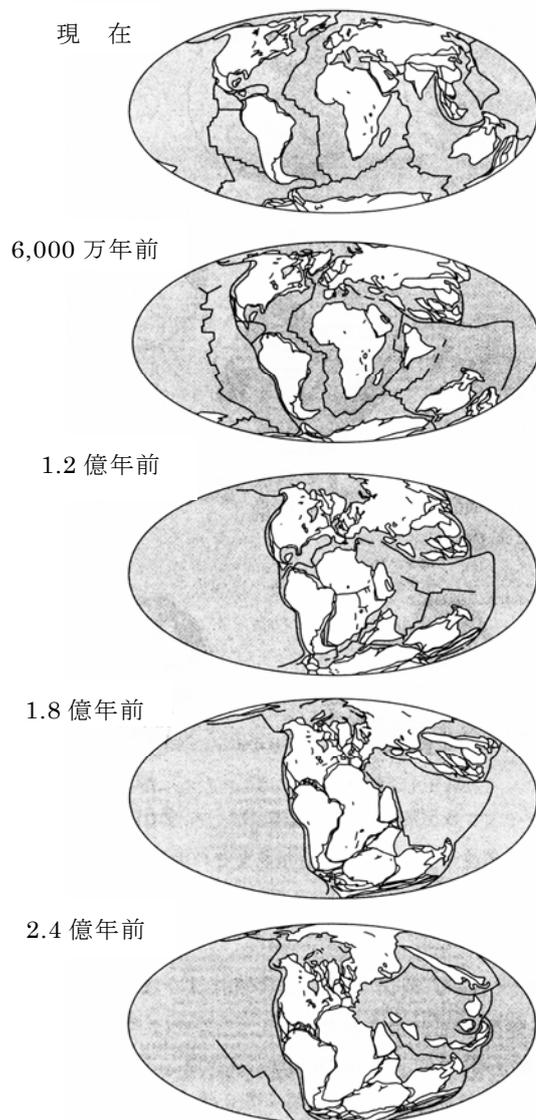


図6 2億4000万年前までの大陸の配置⁵

この図から、2億4000万年前には、南北アメリカ大陸、アフリカ大陸、インド大陸、オーストラリア大陸、南極大陸が一塊の超巨大な大陸であったことがわかる。このような超巨大大陸のことを「パンゲア」と呼んでいる。地球の歴史からすると、たった2億4000万年前というのは、本当に最近の事とも言えるが、このように現在の地球の姿から予想もつかないような大陸配置だったことがわかる。地球上に一つの大洋、一つの大陸しかなかった時

⁵ Dietz, R. S., and J. C. Holden, *J. Geophys. Res.*, **75**, 4939-4956, 1970.)

代があるのである。恐竜はこのような時代の地球に住んでいたのである。

さらにプレート・テクトニクス考え方と地質学にしたがって、このパンゲア超大陸の前を想像することもできる。そのようにしてみると、約4億年前には再び大陸が分散していた時代があり、4.9億年、7.5億年前にはパンゲアのような大陸が集まっていた時代もあったらしいことがわかる。どうやら地球の歴史の上ではこのような大陸の離合集散が何度もあったと思われる。「動かざること大地のごとし」ではなく、「大地は海に浮かんだ葉っぱのように、マントルの上を漂流する」らしい。

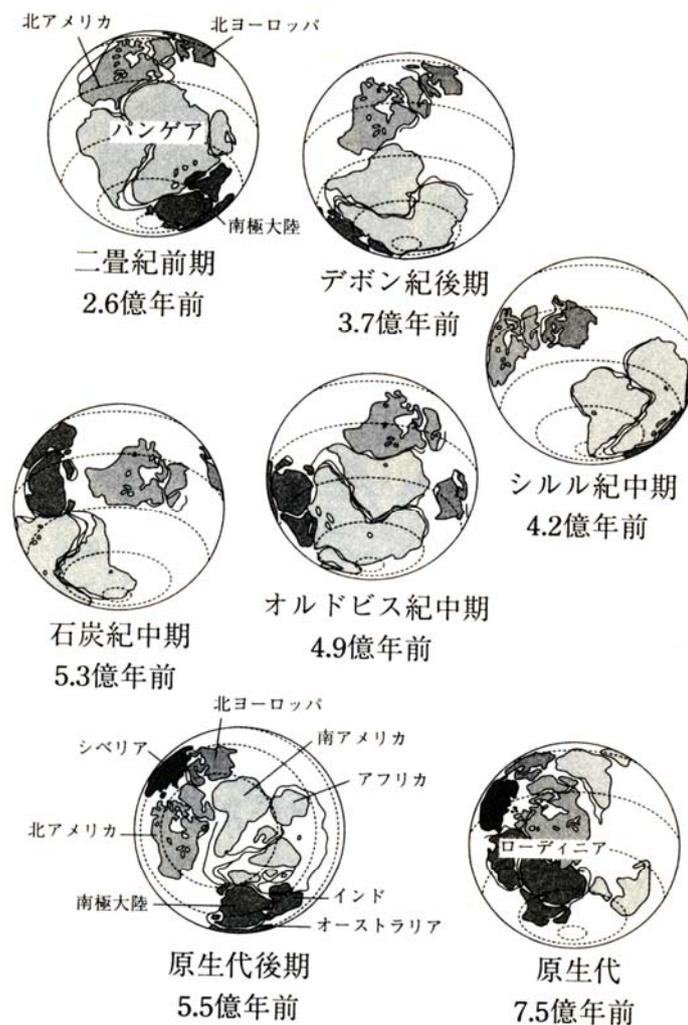


図7 7.5億年前までの大陸の移動をさかのぼって見たもの⁶

⁶ 熊沢峰夫、伊藤孝士、吉田茂夫(編)「全地球史解説」、東大出版会、p.182の図3.3.15、2002

3.4 地球は変動する

地球の内部は温度が高く、熱伝導と熱対流による熱の放出過程にともなうて、地球はさまざまに変動してきている。初期地球における原始大気や原始海洋の形成、生命活動による酸素の放出による環境変化、マントル対流とブルームの活動、プレート・テクトニクス、大陸の分裂と合体・海洋底の拡大と沈み込み・地震活動や火山噴火、リズミカルな環境変化の氷期・間氷期などがあり、ときには宇宙からの小天体衝突による環境の激変とそれにとまなう生物の大量絶滅や、全地球が凍結した雪玉の時代があったことも知られている。現在では、GPS観測網などの宇宙測地によって、地球上の大地がどのように運動しているかが実測されるようになっている。まさに地球は生きているのである。

3.4.1 地層は環境変動を記録する

地球上で風化・浸食でできた砂や泥は、水や風あるいは氷河によってより低い方へと運ばれ、沈積し、ほぼ水平に堆積して地層を造る。地層は絶えず造られていて、次々にたまって厚くなった地層は、時刻のもっとも連続的な記録となっている。同時に、その地層はたまった場所の環境も表しており、その古地磁気は堆積場の古緯度なども記録している。また、水中に溶解していた物質も沈殿して地層となり、生物の多量の遺骸もまた地層となって残る。地球環境がどのように変遷してきたか、あるいはなぜ激変したのか、その原因については、地層に残されている記録から調べることができる。

地層は何枚かの単層からなる。地層が堆積すると、単層と単層の境には層理面ができる。この面は、崖の断面で見ると縞模様としてみられるが、堆積が中断した時刻を表している。しかし、それは地質時代の長さからみると瞬間的な時間なので、地層は連続的に堆積したと言える。このように整然と積み重なった地層では、下の位置にある地層ほど古く、上の位置にある地層ほど新しい。そこで、地層の中に含まれている化石を比べて、下の地層の化石は古く、上の地層にある化石は新しいと言えるのだ。

地層について、その厚さ、堆積物の性質、堆積の仕方、含まれている化石、積み重なるの順序（岩相層序）を調べ、堆積物や堆積環境の相違にもとづいて積み重なるの様式（層序区分）が分かる。これを他地域の堆積の様式と比較して、ある地域の地質の履歴（地史）が解読される。こうして地層の分布

の仕方から環境の変化が分かるのである。一連の地層の中で、ある地層が欠けて、不調和な関係で重なっていることもある。この関係は不整合と呼ばれ、地層が浸食されたことを表している。つまり、海底が隆起して、陸地となるような造山活動があったことなど、地層はそんな事件も記録している。

地層は堆積した場所や環境によって異なり、分布も限られるので、世界共通の層序というものはないが、地層の新旧や同時性を確かめるのに古くから化石が用いられている。同じ時代の地層には同じ化石が含まれているので、化石つまり古生物群集の変遷（生層序）が時間経過をあらわすと考えて、地質年代表が作られてきた。古生物群の変化の大小にもとづいて、古生代・中生代・新生代のような大区分から、さらに細かな区分までがなされている。区分の境界は、多くは古生物群の絶滅にもとづいている。古生代と中生代の境界は世界的規模の海洋貧酸素事件によって、中生代と新生代の境界は巨大隕石の衝突によって、生物の大量絶滅事件があったと考えられている。前者の境界の地層には、堆積場が還元環境から酸化環境へ移行したことが記録されており、後者の境界の地層では地球上では少ない元素イリジウムの濃集が確かめられ、衝撃石英や岩石が融けてできたガラスビーズなどが発見されている。

地層と化石から編纂された地質年代表は、世界共通の年代尺度として地球上の地学現象を相互に比較できるようにしたが、まだ、より古い、より新しいという相対的なものであった。何年前か、何年間続いたかを明らかにしたのは、放射性同位体の壊変を利用した年代測定で、それによってはじめて地質年代表に目盛りが刻まれたのである。それは、化石がほとんど産出しない先カンブリア時代の年代区分も可能にし、初期地球からはじまり地球史の80%程度を占める先カンブリア時代に起こった事件の順序を読みとれるようにした。

放射年代と化石による年代の対応が分かって、地層と地磁気の逆転史（古地磁気層序）が明らかにされている。地磁気の逆転は地球全体に同時に起こる現象なので、世界共通の年代区分として便利である。深海掘削計画による海底コアからは、微化石による生層序と古地磁気層序の威力が発揮され、海洋底の年代を決めて海洋底拡大が見事に証明された。

サンゴ、2枚貝、有孔虫などが炭酸カルシウムの骨格や殻を作るとき、酸素の同位体も取り込み、その同位体比は海水の温度を反映する。そこで化石

の酸素同位体比を測定して、過去の気候が推定される。海水から水分が蒸発するときには、小さい質量の酸素を含む水分がより多く蒸発するので、海水には重い酸素が残る。その水分が雪となって極域に降り積もり氷床を発達させ、海水温が低くなると、生物は重い酸素の方を殻に取り込む。暖かいときにはこの逆になる。海底コアの有孔虫やサンゴの年輪などについて時代を追って酸素同位体比を調べると、寒暖のリズムが記録されており、地質時代の気候変動を読むことができる。同様なことは、極域の氷床でも解析されている。270万年前頃から約4万年周期で寒暖のリズムが刻まれてきたが、最近の50万年間では約10万年周期で寒暖がくり返されている。

3.4.2 大陸の衝突 ヒマラヤと海洋島弧の衝突 丹沢-伊豆

海洋プレートの海溝からの沈み込みは、海洋底の面積が縮まり、ついには大小さまざまな大陸地塊が衝突合体していくことにつながる。アジア大陸はいくつもの大陸地塊が次々に寄せ集まってできたものであるが、最後に衝突してきたのがインド大陸地塊である。世界の屋根ヒマラヤ山脈は、インド大陸地塊がユーラシアに衝突してできたもので、幅が数100 km、延長3000 kmにわたる大山脈である。

ヒマラヤ山脈をふくむ造山帯は、地形と地質から次のように区分される。南のインド大陸上の堆積物からなるサブヒマラヤと低ヒマラヤ、インド大陸周辺とテチス海の堆積岩と基盤岩からなる高ヒマラヤとテチスヒマラヤ、沈み込まれた側のチベット高原（キメリジア小大陸）である。

白亜紀の頃に、チベット高原の南側から、テチス海プレートが北方へ沈み込んでいたが、第三紀に入ってインド大陸地塊が接近してきて、ついには衝突するにいたった。沈み込むのが大陸であり、沈み込まれるのも大陸であったため、どちらも地下深部へ沈み込むことができない。そのため上下に重なって厚いリソスフェアを形成した。ヒマラヤ山脈は約800万年前頃から急に高くなったといわれる。厚くなったリソスフェアが不安定となって、マントルへと沈み込んでいったため、つりあうように下から上昇してきたアセノスフェアが、残った薄いリソスフェアとチベット高原を隆起させたい。これにはインド洋プレートの押しも貢献している。

ヒマラヤ山脈が浸食されてできた堆積物は、ガンジス川やインダス川で運ばれてインド洋の海底にたまる。その量は膨大なもので、東側ではベンガル

三角州から沖合3000 kmにわたって広がるベンガル海底扇状地をつくっている。堆積物の厚さは10 kmを越え、その一部はインド洋プレートの沈み込みにもなって、付加体としてミャンマー側へ加わっている。西側でもインドス海底扇状地はパキスタン側へ付加している。

ヒマラヤの存在は、東アジアの気候に大きな影響を与えている。インド洋で蒸発した水分はヒマラヤで遮られるために、中国内陸部は乾燥化し、東南アジアから日本列島にかけてはモンスーンをもたらす。

南部フォッサマグナ地域において丹沢-伊豆の衝突はよく知られている。これは島弧の衝突であって、大陸の衝突とは異なる。北側から南へ連なる御坂山地、丹沢山地、伊豆半島は、いずれも変質した海底火山岩からなり、厚い地殻をもっているわけではない。衝突した時期は、御坂が1500万年前、丹沢が800万年前、伊豆が150万年前頃と考えられている。丹沢と伊豆の間にある足柄山地は、衝突にもなって隆起した山地が削られてできた粗粒の堆積物が厚く堆積した場である。このような島弧の衝突帯では、海底火山地塊の衝突と隆起、粗粒堆積物による盆地の埋積、それらが交互にくり返す地質体がつくられている。およそ5000万年前に誕生した伊豆-小笠原島弧は、2000万年前頃の四国海盆の拡大で、現在の島弧と九州-パラオ海嶺にわかれ、フィリピン海プレートの沈み込みにもなって本州へ衝突付加してきた。海洋性島弧は海洋地殻と違ってより軽いらしく、沈み込まずに付加するものと考えられる。この動きはなお続いており、将来は伊豆大島をのせた銭州海嶺が付加してくるのであろう。

3.4.3 失われた超大陸

昔の地球観は、大陸の地質の知識にもとづいていたが、現在のプレート・テクトニクスは海洋底の新しい発見を契機として確立されている。海洋底からの知識には、中央海嶺やトランスフォーム断層、海溝などの大地形、地震・地磁気・表面熱流量といった地球物理的性質、そして年代分布などがある。とはいえ、海洋底には2億年前頃までの記録しかなく、それ以前の海洋底は地球内部へと消え去ってしまっているため、それより古いことは直接にはわからない。断片的ながらもおよそ40億年前までの情報が閉じ込められている大陸の地質は、地球史を明らかにして、惑星の発達過程を考える上で今なお大事な事柄だ。

プレート・テクトニクスでは、大陸を分裂させて新しく海洋底が生成し、拡大していく。それにともなって大陸は移動し、ついには合体して新しい大陸を形成したことが明らかにされている。このような大陸の分裂、海洋底の拡大、大陸集合の過程は、提唱した地球物理学者の名をとってウィルソン・サイクルと呼ばれる。海洋底の歴史が2億年ほどしかないのに、地球の歴史が40億年を超えることからみると、前記のようなサイクルが、地球史の中で10回以上も繰り返されたのではないかと考えられる。

よく知られているのは超大陸パンゲアである。それは2億4000万年ほど前に地球上にたった一つ存在した超大陸で、まわりは超海洋パンサラッサで取り囲まれていた。超大陸パンゲアより古い時代にも、超大陸があったのであろうか。最近の復元によると、約6億年前には超大陸ゴンドワナが、さらに古い10億年前頃には超大陸ロディニアがあったと考えられている。いずれにおいても新しく形成された大陸部分をとりのぞき、同じ気候・環境を指示する堆積物や化石にもとづいて、古地磁気による古緯度とあわせて、大昔の超大陸が復元されている。北アメリカの地質の証拠によると、さらに古い超大陸が14億年前と19億年前にも存在した可能性があり、27億年前にもあったのではないかとされている。超大陸の中央部には大陸氷河が発達した様子があり、その分裂・移動は生命活動に大きな影響を与えたと考えられている。



図8 約6億年前の超大陸ロディニア⁷

⁷ 磯崎行雄「日本列島の起源、進化、そして未来—大陸成長の基本パターンを解説する」『科学』70巻、133-145、2000

なぜ超大陸は分裂して消え去ってしまうのであろうか。それにはマントルの中のより温度の高い上昇流、ホット・プルームが関係していると考えられている。ある大陸の下へと海洋プレートが沈み込むと、そこには海洋プレート上にある大小さまざまな大陸地塊がはきよせられるように集まってきて、大陸を成長させていき、沈み込んだスラブは上部マントルと下部マントルの境、深さ670 kmのあたりに滞留して大きくなり、ついには下降流のコールド・プルームとなって地球深部へ沈下していく。そこを埋めるように、上昇してきた温度の高いホット・プルームが大陸を膨張させ、引っ張りの場となった大陸の力学的に弱い部分から分裂させていったのであろう。

3.4.4 海溝の堆積と日本列島の成り立ち

陸域と海域の境で、海洋プレートが地球内部へと沈み込むところでは、地表は引きずり込まれて海溝となる。海溝は地球上でもっとも低いところなので、あらゆるものが最終的にたまるところでもある。浸食されてより低い方へと運搬されてきた陸源の砂や泥は、大陸棚を埋め、さらに大陸斜面を乱泥流として流れ下り、海溝をうめる地質体を形成する。一方、海洋プレートのほとんどは海溝から沈み込んでしまうけれども、沈み込めない表層の一部が海溝の堆積物に混在することがある。このような地質体は、海洋プレートの動きとともに陸側へ押し付けられ、付け加えられ、付加体がつくられる。

付加体はおもに陸側で削られた砂や泥などの碎屑物で構成される。それに必要な大量の土砂は、隆起の激しかった後背地の山脈あるいは高地から供給されたものである。古生代から中生代の付加体では、海洋プレート上の遠洋性堆積物である石灰岩やチャートが多量に混在し、ときに海洋地殻そのものの玄武岩やはんれい岩が含まれていることもある。

造山帯の中で、付加体として初めて詳細に解析されたのは、日本列島の太平洋側を占めている四万十帯であった。その地質体は、まれに産出する二枚貝やアンモナイトの化石から白亜紀後期のものであろうと考えられていたが、ほとんどは時代不明のままであった。この地質体の時代と成因を明らかにしたのは、微化石の一つ放散虫である。膨大な数の泥岩やチャートの放散虫化石から堆積の時代が調べられ、もっとも古いのが海洋地殻をつくって

た玄武岩と石灰岩、次いで遠洋性のチャート、そして半遠洋性の多色頁岩と続き、もっとも若いのが泥岩や砂岩であることが実証された。そして、玄武岩の古地磁気が低緯度を示すのに対し、泥岩や砂岩は現在と同じような場で形成されたことも証明されたのである。このことは、海洋プレートが移動してきて、その一部が海溝で陸源の砂や泥と混じり合い、付加体となったことを見事に表していた。海洋プレートの沈み込み帯において、起源の異なる地層や岩石が混在している様子は、野外では一見ぴったりと接合しているように見えても、それらが必ずしも同じ場所で一連整合に積み重なっているわけではないことを教えてくれたのである。このような固まった岩石の層が泥のような柔らかかったものの中に取り囲まれ、本来の積み重なった地層となっていないものは、メラングジュと呼ばれている。これまで安定大陸の地質学が変動帯に応用されてきたが、ここではじめて変動帯地質学が確立されたのだ。

四万十帯の北側に分布し、日本列島の骨格をなす秩父帯についても再検討が加えられた。秩父帯は、その中の石灰岩にふくまれるサンゴやフズリナの化石から、堆積時代は古生代後期の石炭紀ーペルム紀とされ、秩父古生層とよばれていた。しかし、1970年代以降にチャートから三疊紀のコノドント化石が発見され、さらにジュラ紀の放散虫化石が次々と発見された。秩父古生層は古生層ではないことが明らかとなって、日本列島の生い立ちは、根本的に見直された。日本列島の基盤には、古生代後期から三疊紀の付加体が一部あるけれども、ほとんどがジュラ紀の付加体であり、石灰岩やチャートおよび玄武岩の変成した緑色岩体は、海洋プレートによって付加体にもちこまれた外来物だったのである。日本列島には、付加体のほかに大陸地塊のような所もある。それは南部北上山地、阿武隈山地、飛騨外縁帯、黒瀬川構造帯に分布するシルル紀から石炭紀前期の地質体で、大陸的な性質をもつ異地性地塊と考えられるものである。日本列島は世界のいろいろな所からやってきた寄木細工の様なものと言える。

3.4.5 変形する大陸

大陸地塊の間にある海洋底が沈み込み、大陸地塊どうしが接近して、ついに衝突すると、その境界には造山運動による山脈が形成される。そこでは、普通 30 km ほどの大陸地殻が重なりあって倍の厚さになることもあり、変成作用やマグマ活動あるいはマントル物質の上昇といった物質の移動・混合

によって大陸地殻の改変が起こる。その代表例の一つに、前に述べたヒマラヤ山脈がある。

プレート・テクトニクスでは、プレートは変形しない剛体と考えられ、その境界で地震や造山運動といった地学的事件が起こるとされる。しかし、インドとアジアのような大規模な大陸地塊どうしの衝突では、プレート内も破壊され、変形していることが指摘されている。インドの北方への押す力によって、その前面にあったインドシナと中国は南東方向へ押し出されるように移動している。この動きは近年の GPS 観測でも示唆されており、この変形にともなう運動で南シナ海やアンダマン海もできたと考えられている。ヒマラヤ山脈の北方、中国からモンゴルにわたって、いくつもの横ずれ断層によってアジア大陸は変形している。インド大陸の押す力と同じ方向にできた割れ目の例として、ロシアのバイカル湖と中国の山西地溝帯があげられる。それらは正断層運動でできた割れ目で、押す力と直交する北西—南東方向に現在も開いている。その動きは、沿海州を日本海から日本列島へ、また中国北部を東シナ海から琉球諸島へと押し出す働きをしているようにみえる。

ここで不思議なことは、インド大陸が他の大陸よりも速いスピードで北方に移動していて、アジアがチベットから中国さらにモンゴルまで変形しているのに対し、インド大陸自体はあまり変形していないことである。インド大陸の押す力だけでアジア全体の広域にわたる変形を説明するのは難しい。インドが衝突する前に、アジア側は海洋プレートの沈み込みによるマグマ活動のせいで温度が高くて変形しやすかったのではないかと考えられるが、変形はもっと内陸まで広域にわたっていることから、地球内部からの熱い対流運動で広域にあたためられて大陸が変形しやすかったのかもしれない。

3.5 地震と火山

プレートの境界である海嶺では熱いマントルが上昇し、海溝に沿っては冷たいプレートがマントルの中に沈みこんでいる。変動している地球のほとんどの動きはその境界に集中している。その一つである地震は、海嶺では比較的浅く、小さいが、海溝では地殻からマントル深部にいたるまで頻発する。地震は地殻やマントルで起こった破壊であり、プレート境界で発生するということは歪みと応力がそこに集中していることを示す。もうひとつの変動は火山噴火である。海溝に沿う火山列島は島弧であり、爆発的なマグマの噴火

や大規模な火砕流が起こる。海嶺も火山であり、マグマ噴出量の多さでは海嶺は島弧の噴火を大きく超えている。プレートの内部にも火山があり、そのマグマはプレートより深い所のマントルに起源がある。このように地震と火山とは地球内部の窓と呼ぶことができる。

3.5.1 プレート・テクトニクスと地震・火山噴火

プレート運動は実に単純な動きである。ミルクのかわのように皺が寄らないので、地球の表面に沿って海嶺から海溝まで移動するだけである。ただ、水平な面の上ではなく、地球の形は丸いので、表面に沿って動くということは、ボールに手を当てて滑らすと判るように回転するのである。

地球の表面部分は約 10 枚程度のプレートに分かれている。その境界の海溝と海嶺は地球を野球ボールの縫い目のように取り巻いている。プレートの境界はそれぞれのプレートが互いに離れたり、沈み込んだりしているので、地殻やマントルに大きな変化が起こる所である。海嶺では 1000 度を越す熱いマントルの岩石が海面下 1 km 程度まで上昇している。海溝に沿っては冷たい 100 度程度に冷えた岩石がマントルの中に斜めに沈みこんでいる。このようなプレート境界の運動が地球のほとんどの変動をもたらしているのである。

地球に起こる変動のうち頻繁に起こる大きなものは地震と火山噴火だ。日本列島はちょうどプレートの沈み込み境界に位置しているので、いろいろな地球現象が集中して起こる。地震はその最たるものである。日常的に感じる地震の揺れは大きいもので震度階で 7 まで達している。ここ数年で 6 強という非常に強いゆれを日本列島は何度も経験した。

地震はプレートの境界に沿って密集して起こる（図 9）。海嶺では比較的浅い 5 km 程度までの深さの小さい地震が頻繁に起こるが、一方海溝沿いの境界では 10 km 程度の浅い地殻内部から 600 km 程度の深いマントルに至るまで頻発するのである。このような地震は沈み込むプレートの境界と内部におこっている。地震によるゆれは地震の規模が大きく近いと大きいものである。反対に遠ければ大きい地震でも感じない。例えば最近の中越沖地震でもすぐ上の柏崎では 6 強であったが、博多では感じられなかった。プレート境界沿いの地震では、浅い 10–50km 程度の巨大な地震が大変被害を大きくするのである。そして阪神淡路大地震のようにプレート境界から少し離れた内

陸で起こる地震もその規模と近さから恐ろしいのである。

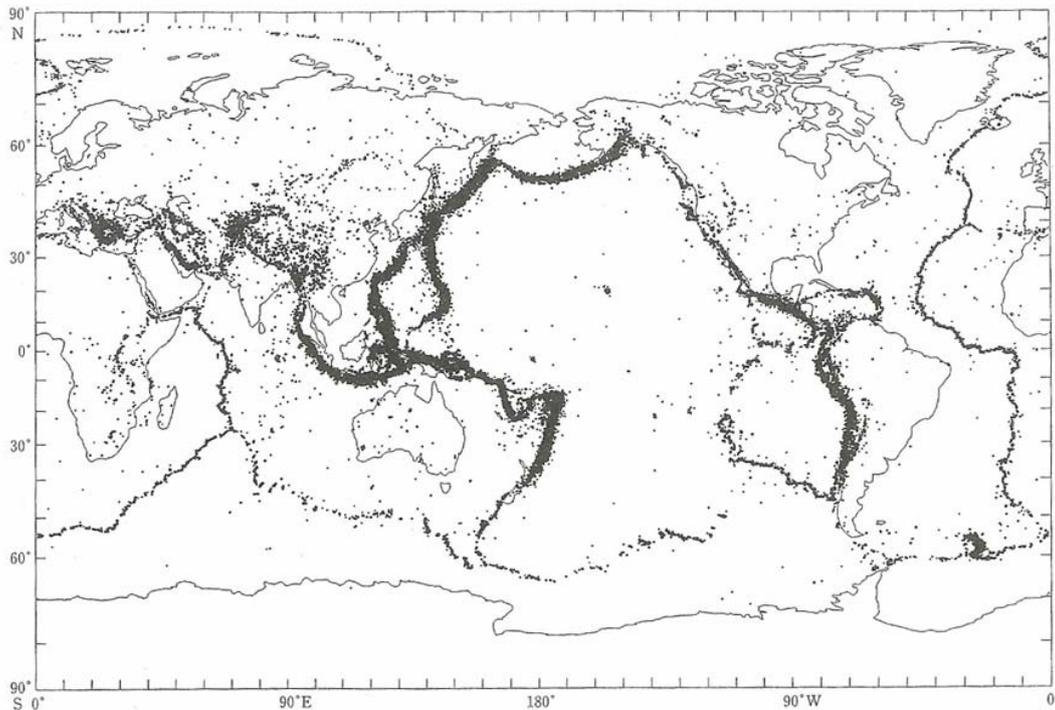


図9 地球上の地震の分布

日本海溝や伊豆マリアナ海溝などの沈み込み境界で起こる地震は深い所まで起こり、大西洋中央海嶺などの拡大境界で起こる地震は浅い所で起こる。

内陸の地震は少し変わっている。それは地震の深さが地殻の浅い部分に限られている事だ。大体 10–20 km 程度の深さに大きな地震がおこる。また、日本列島ではほとんどの地域に人が住んでいるので、その直下 10 km 程度でおこると、たとえ小さい規模でもゆれは大変大きくなってしまう。

プレートの沈み込み境界に沿って地震が多発している面がある。地震の多発する面が、日本海溝からアジア大陸の下にむかって斜めに入っていることが初めて見つけられたのは 1930 年代のことである。現在ではこの面を発見者にちなんで和達・ベニオフ面と呼んでいる。この発見は後に 1968 年になってプレート・テクトニクス建設の中心的な事柄となった。

プレート境界に起こる変動の一つに火山噴火がある (図 10)。太平洋を取り巻く、いわゆる環太平洋火山帯というのはプレート・テクトニクスが建設される前の用語であるが、実はそれはプレートの沈み込み境界に沿う火山帯

であったのである。海溝は、太平洋をぐるりと取り巻いて南アメリカから北アメリカ、アリューシャンから日本列島、伊豆、マリアナ、トンガからニュージーランドまでつながっている。海溝から陸側に約 200 km ほど離れて、点々と火山が並んでいる。海底でもほぼ 50 km 程度の一定間隔で活動的な火山が並んでいるのだ。海溝よりにはそのような火山はない。このような火山の並びを火山前線と呼んでいる。アメリカ西岸のカスケード山脈や南アメリカのアンデス山脈もこのような火山の列なのだ。

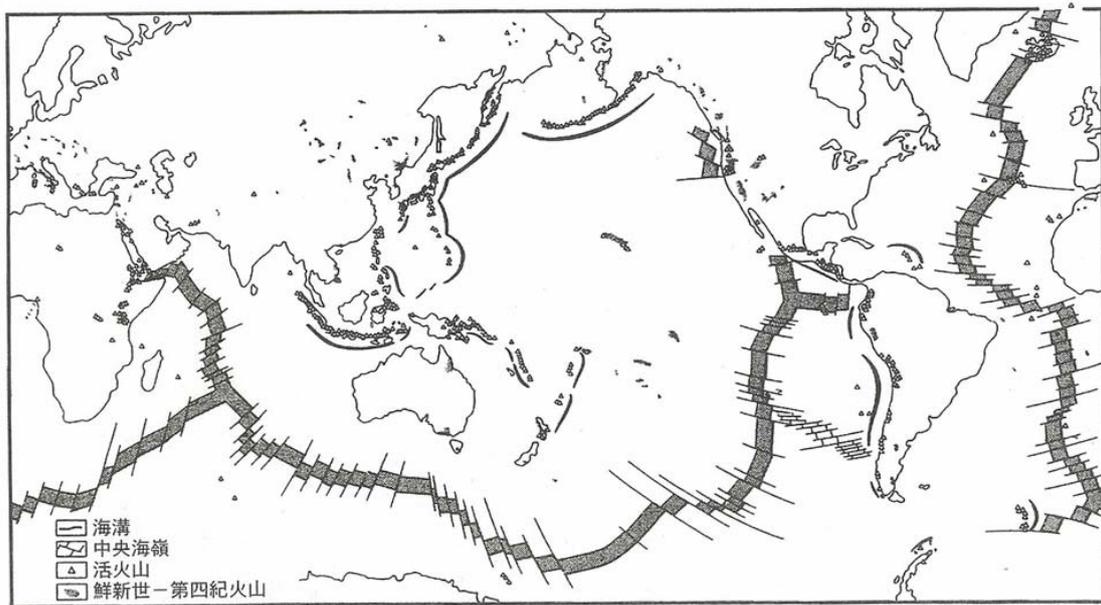


図 10 地球上の活動的な火山の分布

海溝から 200 km ほど離れた火山フロントから大陸側に火山が分布する。また、海嶺軸に沿う影のついた部分は活動的な拡大軸に沿うマグマ活動域である。

ところで、もう一つのプレート境界である海嶺ではどうだろう。海嶺も火山である。海嶺の中心に沿ってたくさんのマグマが噴出している。ほとんどは深海底であり、爆発的な噴火をしないので目立たないのであるが、陸にあがった海嶺はアイスランドだ。そこでは火山噴火が頻繁に起こっているのである。火山噴出量の多さではこの海嶺は島弧の噴火を大きく超えている。

ハワイ島は火山島である。全部が火山活動で作られたものである。その形は底面 200 km、高さは海底から 10 km の平たい円錐形である。富士山は高さ 3.8 km だが、火山噴火でつくられた富士山の高さは 2 km 程度である。そして底面直径は 20 km なので、ハワイ島火山の総量は富士山のなんと 500

倍となる。そしてハワイからカムチャッカ半島にかけて北西に向かって点々と続くハワイ・ミッドウェー・天皇海山列はハワイ島のような火山島が連なってできたものである。これらのプレートの内で噴火した火山をプレート内火山と呼んでいる。地球の表面付近の変動はプレート境界で起こるが、プレート内部は変動がほとんどないので、ハワイ火山などの噴火の原因はプレートより深い所のマントルに起源がある。つまりプレート内火山は深部マントルの窓と呼ぶことができる。

【コラム1】 ちょっと一息 固体も流れる

水やミルクのような液体が流れるのはわかるが、鉱物や結晶が流れるというのはどうしたことだろうか。買い物ポリ袋を強く引っ張ると伸びてしまう。ものが流れるというのは、そのように引っ張ると自由に伸びっぱなしになるようなことなのである。では結晶はどうか。例としては針金がいい。針金を手にとって曲げようとすれば、簡単に曲がってしまう。アルミや銅では多少太くても簡単に曲げられる。それらの針金は結晶の集まりである。そして多結晶体のまま曲がっている。線を少し腐食させて顕微鏡で見ると鉄の結晶が伸びてしまった様子が見られる。マントルや地殻を造っているのは岩石であり、鉱物つまり結晶の集合体である。それも針金程柔らかくないが伸びたりねじれたりすることができる。この性質は粘性という。鉱物の粘性は温度が 1000 度を越えると急に小さくなる。そして小さな力でも長い時間力を加え続けると変形していくのである。やや深いマントルでは温度は 1200 度以上もあり、長い時間かかってゆっくりと流れている。それがマントル対流だ。

3.5.2 地殻・マントルの破壊—地震と断層

2007 年の能登半島沖地震には驚かされた。その前の中越地震にも驚かされた。そして 1995 年の阪神淡路大地震も予想されない地震であった。つまり内陸の地震はどのように起こるかよく判らないのである。判っていることはこうした内陸の地震は断層が原因であるということである。断層は地殻の中にできた食い違い面である。阪神淡路大地震のときには淡路島の野島断層が動いたことは有名である。アメリカ西海岸に沿ってロスアンジェルスからサンフランシスコにかけて走っているサンアンドレアス断層もよく知られ

ている。

日本列島には多数の断層があり、普段は癒着していて動かないが、歪みがたまるとその断層面で破壊が進む。破壊するときのひずみは断層面の摩擦の強さによって変化する。摩擦が小さいと少ない歪みで断層が動き、大きな破壊は起きない。ところが摩擦が大きいと、大きな歪みが蓄積し、断層面で破壊して大きな地震を起こしてしまうのである。

地殻に歪みが蓄積するのは、ちょうどスプリングを縮めるようなものである。押して縮んだ長さ分を、元のばねの長さで割った値を歪みという。押す力はこの歪みの大きさに比例している。これがばねの法則である。断層面が動くときには、蓄積した歪みを放出するので、大きな歪みであるほど大きな力が放出されることになる。日本列島にはプレートが沈み込んでいることで歪みが蓄積する。その歪みが東北地方の地殻を東西に圧縮する力なのだ。

東北地方の地殻には南北に断層が並んでいる。歪みが蓄積し、力が増大していくと、その押す力が断層面の摩擦力を越えた時に破壊し、地震となってエネルギーが放出されるのである。西日本では押す力は東西のままであるが、断層が南東や北西の方向となっている。そこが違うのである。

プレートの境界は食い違い面でもある。その面を境としてプレートが斜めに沈み込んでいるが、この面にも摩擦があり、プレートの動きで増大する力が摩擦力を越すと、境界面で断層運動が起こり、地震が発生する。こうした地震を境界型地震と言っている。1929年の関東大地震、1946年の南海道地震、2005年の十勝沖地震などはこの巨大なもので境界型巨大地震と呼んでいる。

境界型巨大地震は、1回の地震で100 km × 100 kmほどの大きな破壊面がつくられる。むろん一瞬でそれだけの面積が割れるのではなく、所々引っかかりながら割れ目が進む。こうした境界地震はたいてい同じ場所で発生している。そして境界地震が起こらない部分は、今までは空白域として将来地震が起こるだろう地域と考えていたが、今では滑っていて地震が起こらない、つまり摩擦が小さい領域であると見られている。

島弧の地殻で起こる地震は、地下10–20 km付近で起こり、それより深いところではほとんど起こらない。これはなぜか。岩石はゆっくりと力を加えると曲がったり、流れたりする。この性質は温度が低いと次第に失われる。そして壊れやすくなるのである。そこである温度以下では岩石は流れずに割

れてしまうことになる。岩石が割れるか流れるかの条件の違いが 10–20km の深さにあるのである。つまり地殻のやや深い所では破壊せずに流れてしまっているのだ。

【コラム 2】震度階とマグニチュード

地震は地面に大きな揺れをもたらす。人が感じ被害が出るのはこの揺れである。地震のエネルギーは同じであっても遠く離れた場所では揺れは小さい。揺れの強さは震源から遠くなるにつれて、小さくなっていくためだ。そこで地震の規模をあらゆる共通のものさしとして、地震のエネルギーを考え、その強さを、地震計に記録された波の振幅の対数を取り、地震の震源からの距離を補正する。そこで同じ距離では、マグニチュードが 1 つ大きいと 30 倍ほどのエネルギーをもつ地震を表すことになる。一方、震度階はその場での揺れの強さで測る。0 はほとんど感じない程度の揺れ、6 は人が立ってられない程の揺れの強さである。一方マグニチュードは巨大地震では 7 以上になる。微小地震は 3 以下である。

3.5.3 マントルの融解—火山はマントルの窓

2000 年 6 月 26 日、伊豆諸島の三宅島が突然噴火した。大規模な噴火で、たくさんの火山灰や溶岩そして火砕流が流れ下った。しばらくして 8 月には中央の火口が直径 400 m ぐらいにわたって円形に落ち込み、カルデラを造ったのである。

火山噴火には、マグマそのものの噴火とマグマが地下水にあたって起こる水蒸気の爆発とがある。噴火の仕方も、爆発的な噴火と静かにマグマを噴出する噴火がある。三宅島や雲仙普賢岳では爆発的な噴火をおこし、しばしば火砕流が発生した。ハワイのキラウエア火山やイタリアのストロンボリ火山は静かに噴火する。1100 度もあるマグマが火口や斜面から連続的に噴出し、溶岩流が流れ下る。その早さは時速数十キロメートルにもなる。

沈み込み境界の火山活動では安山岩のマグマが多量に噴出する。一方の海嶺では玄武岩質のマグマを噴出する。安山岩マグマは粘度が高く、水を多く含んでいてたくさんの水蒸気などの泡を作り出す。このため、よく振ったビールを開けるときのように、火山の噴火口から爆発的に噴火するのである。一方のハワイのキラウエア火山では粘度が低く、水のようなマグマなので火

口や割れ目から連続的に噴出する。

火山噴火には巨大噴火もある。たとえば、エーゲ海に浮かぶサントーニ島や太平洋のクラカトア島だ。前者は紀元前 1500 年ごろ、後者は 1883 年の巨大噴火で、火山全体が吹き飛んでしまった。最近でも 1995 年に起こったフィリピンのピナツボ火山の大噴火がある。そのとき大量の火山灰が大気に撒き散らされ、5 年以上にわたって大気中に非常に小さい火山灰が残存し、地球環境に大きな影響を与えた。このように一つの火山でも大規模に噴火すると地球規模の環境変化を引き起こす。そしてそれは人類にとっても重大な脅威となりうるのである。

火山噴火は地下からマグマが地表に噴出することだ。なぜマグマが出来るのか。地殻やマントルは固体の岩石である。岩石が融解するというのがマグマ発生である。岩石が融解するには三つのことが考えられる。ひとつは温度が上がること、二つ目は温度が保たれて圧力が下がること、そして三つ目は水が混入することである。深さ 100 km ぐらいで 1100 度に達するマントルの岩石が、マントル対流に乗って 10 km ぐらいにまで上昇すると融解するのである。一方で、水が混入すると岩石は低い温度で融解する。ちょうど水に塩をいれると氷結温度が低くなるのと同じで、凝固点降下現象が起きるからである。

海嶺やハワイ島などの火山活動では対流によって高温のマントルが上昇し融解している。一方、日本列島のように海溝に沿う弧状列島の火山噴火では、沈み込むプレートが脱水して放出された水が、日本列島の下に横たわるマントルにしみこみ、そのためマントルの岩石が融解してマグマを造っていたのである。このように火山噴火はマントルの物質と運動を透かす窓なのだ。

3.5.4 地震波によって見える地球の内部

地球の中は、星のように光で観測はできない。しかし、地震の波は地球の内部をよく伝わるので、それをつかって地球の内部の物質やその状態を観測することができる。地球の内部では深くなるにつれて温度や圧力が大きくなる。そのためいろいろな深さで地球を作る鉱物に変化する。地震の波が伝わる速度は、岩石の種類やその状態（温度や圧力）によって変化するので、地震波の速度を調べることによって地球の内部を探ることができるのだ。

地震波は音の波である。それは地球の中で岩石が断層などの割れ目にそってずれると、そのずれが地殻やマントルに沿って伝わっていく波である。それには縦波と横波がある。縦波は、岩石が縮まったり、伸びたりする波であり、横波はずれの動きが伝わる波だ。縦波は横波より速度がおおきいので、さきに到達し（プライマリー波、P波と呼ばれる）、横波は後から到達する（セカンダリー波、S波と呼ばれる）。それぞれ鉱物によってそれらの速さも違い、その比も違う。

お風呂の中から手の指を半分ほど出すと、指が折れているように見えてしまう。これは光の波が水の中と空中では速さが違い、そのために屈折するためだ。地震の波でも同じように速さが違うところを通過すると屈折する。ところで地震の波は、おおまかには地球の中では深くなるほどその速さは大きくなる。このため、初めは下に向かう地震波はしだいに曲がって進み、地震の発生地点（震源と呼ぶ）から一定距離離れた所で観測される。そこで震源から様々な距離にある地点に地震の揺れが到達する時間を測ると、違う深さの波の速さを知ることができる。こうして地球の中で地震波の速度が変化する様子が測られた。すると 30 km、410 km、660 km、そして 2900 km の深さで地震波速度が急に大きくなった。それぞれは地殻とマントルとの境界、上部マントルとマントル遷移層との境界、マントル遷移層と下部マントルとの境界、そしてマントルと核との境界である。

急激な変化は鉱物が違うことに由来する。いろいろな深さで違う鉱物が地球を作っていたのだ。それは、圧力が増加して密度の大きい鉱物に変化していることである。後に実験で調べると 410 km と 660 km の不連続面がそれであった。しかし、30 km と 2900 km の深さではそれぞれ地殻とマントルとの境界とマントルと核との境界であり、化学成分が大きく変化する。そして、横波が伝わらないので、外核は液体であった。

地震波による地球内部の探査は、全世界的にネットワークとして張られた高精度の地震計を用いて、速さのゆらぎの大きさをマントルや地殻内部をマッピングすることができるようになった。その結果、驚くべきことに、冷たく日本列島の下に沈み込むプレートの姿や、それが 500–600 km のマントル遷移層に滞留する姿、そして海嶺のマントルや日本列島などのマントルに速度の遅い領域が見えたのだ。それらはプレートやマントルがどのように運動しているかを明らかにしたのである。マントル対流とその中でマグマが発

生している様子を見せていたのだ。

3.5.5 プレート運動と希少金属の濃集

火山噴火や地震活動などが頻発するプレート境界の地殻では、沈み込むプレートから脱水した水や、地表の河川水や海水などが岩石の内部にしみこんでいる。このような水は岩石にわずかに含まれているいろいろな元素をイオンとして溶かし、広い範囲にわたって岩石の中を循環することで次第にイオンの濃度を大きくする。この水溶液が地表水と混ざり合うと、温度が下がり、水素イオン濃度が変化し、溶け込んでいた金属イオンは鉱物となって岩石のなかの割れ目などに沈殿する。その過程は、通常の岩石ではしばしば1億分の1ぐらいしか含まれていない金などを1万分の1以上に濃集させる。このような岩石が銅や鉛、そして亜鉛、などの非鉄金属資源やレアメタル資源なのだ。

地殻には微量しか含まれていない元素が、所々濃集する現象はいろいろな時代のプレート境界で起こっている。日本列島だけでなく、南北アメリカ大陸の太平洋岸に沿う部分では過去3億年以上にわたって海洋プレートとの境界であった。また、アジア大陸の内部には4億年から2億年にかけて長大なプレート境界であったと考えられている山脈が連なっていて、こうした過去のプレート境界に沿って、長い時間かけて作られた豊富な金属資源が分布している。いろいろな地質時代のプレート境界の探査は新たな有用資源の探査という意味でも重要である。

3.6 生命史と地球環境

生命が誕生してから38億年、生き物は長い年月の間に現在見られるような多様な形をとるようになった。その間にいろいろな出来事があり、多くのエピソードを生んだ。長い時間と大きい空間の中で、地球は複雑系として成立し、さまざまな変化を刻んだ。

ここでは、アイテムとして基本的なこと、面白いこと、知っている楽しいこと、生活に関係あることなどを選び、共通するキーワード（いかに読み取るか、年代と場、変化、発見、生活との結びつきなど）と関連させて生命史・地球環境史の一端に触れる。その中に見られるルールを、ぜひ読み取ってほしい。

3.6.1 生命の誕生とその後

地球を特徴づける生命、その起源（いつ、どこで、どのようにして）について、19世紀半ばまでは自然発生説が信じられていたが、科学の発展に伴って否定され、その後、さまざまな考えが唱えられた。古くはダーウィンの「温かい水たまり」に始まる、原始スープに満ちたおだやかな浅海において「化学進化」が進んだとする考えが従来の主流であったが、一方、地球外から運ばれたとする考え、地球内部で生まれ、海へ出たとする説などがあり、何らかの形で粘土が関わっていると言われている。最近では、海底のブラックスモーカー（硫化物を含む熱水の噴き出し口）の近くで起こったとする説が有力になってきている。その年代は地球誕生後約8億年の、38億年前と考えられている。

しかし、これらのことは、いろいろな状況証拠を基にして、人間が論理的に組み立てた結果である。さまざまな考えがあることからわかるように、すべてが証明されたことではない。それでは実際に生命（生物）の存在を示す「もの」、それから読み取れる「こと」の世界へ入っていこう。最近までに発見された、最古の岩石や化石など、それに続く生命の証拠となるものは表1のように整理される。

これらの化石の証拠は生物が原核生物（核やミトコンドリアのない原核細胞よりなる）→真核生物（細胞膜・核（核膜）をもつ真核細胞よりなる）→無殻無脊椎動物という発展の歴史を示している。46億年の歴史を現在の1年として表す地球カレンダーでは1億年が約8日、現在の1日は1260万年にあたる。ここまでの約40億年は地球の歴史の90%近く、11月半ばまでの、一年の大半ということになる。環境的な視点で見た重要な点は20億年前ころのらん藻の光合成により、酸素が増え始めたことである。

エディアカラ動物群は腔腸動物（クラゲの仲間）や環形動物（ゴカイ類）、節足動物を含み、すべて殻を持たず、印象化石として発見されている。そしてその後、生物の大発展が起こる。5億4千万年前ころ（年代で言えばカンブリア紀の初め）、三葉虫と腕足類を主とする、殻を持った動物の化石が発見されている。生命史における大きな事件といえよう。

一方、不思議な生物群がカンブリア紀初期～中期の、カナダ、中国、グリーンランドの地層中に見られる。それぞれ、バージェス、澄江、シリウスパ

セットの動物群と呼ばれる。多くは硬い殻をもたない動物の化石で、きわめて多様な、奇妙な種類からなる。特徴は現在見られる動物のグループの先祖型が短い間に現れたこと、捕食動物を含むこと、脊椎のルーツともいえる脊索をもつ動物がいたことなどである。このような多様な動物の存在は従来のこの時代の化石のイメージを大きく変えるものであるが、このような形のものが保存のよさによって生まれた、本来の姿を示すものだろうと言われる。

表1 最古の岩石・化石とその後

岩石・化石など	分類	年代(億年前)	地層(岩石)	場所
片麻岩	最古の岩石	39.6		カナダ
石墨	炭化水素 (有機物?)	38	弱変成岩	グリーンランド
らん藻・バクテリア	原核生物	35	チャート*	オーストラリア
らん藻・バクテリア	原核生物	32	チャート	南アフリカ
グリパニア	真核生物	21	縞状鉄鉱層	アメリカ
縞状鉄鉱層・ストロマトライト**		20±		世界各地
菌類・緑藻(らん藻を伴う)	真核生物	9	チャート	オーストラリア
エディアカラ動物群	無殻無脊椎動物	5.4	浅海成層	オーストラリア ほか 世界各地

* SiO₂ の成分をもつ堆積岩

**らん藻と堆積物が互層したマット状の岩石



写真1 バージェス頁岩層の露頭(カナダ)

この後、古生物の世界では、脊椎動物が出現し（4.8 億年前—地球カレンダーの 11 月 25 日、以下同様の表し方をする）、生物が陸地へ上がる（4.2 億年前—11 月 27 日）。

3.6.2 恐竜とマンモス

恐竜とマンモス、化石の世界の二大スターである。恐竜は中生代に栄えたは虫類で、そして中生代の終わりに一斉にいなくなった。一方、マンモスは最近の 500 万年ほど栄えたが、今では地球上から姿を消している。

2005 年、愛知県で開催された日本国際博覧会（愛・地球博）は環境を主題とした博覧会であったが、マンモス化石はその目玉の一つで、多くの人が行列して肉つきの頭蓋骨を観覧し、その後の国内各地の博物館巡回展も大人気であった。一方の恐竜はかつて日本にはほとんど出ないと考えられていたのに、1960 年代から全国各地で産出が続き、福井県には恐竜専門の県立博物館が誕生した。1995 年には三重県鳥羽市で大型の恐竜化石が産出し、話題を呼んだ。そして、2007 年には兵庫県と福井県で大型恐竜が見つかり、発掘が続けられている。

恐竜とマンモス、この 2 つの化石の人気ものに共通するキーワードは絶滅したこと、珍しいこと、目立つこと、大きいこと、夢のある動物であること、などだろう。それぞれの特徴を簡単にまとめてみよう。

恐竜は、は虫類で、ワニやヘビの仲間だ。2 つの大きなグループをまとめた呼び方で、現在までに知られている確かな属数は 285、種数は 366 であるというが、未発見のものが多く、総計では 900~1200 属に及ぶといわれる。中生代（2.5 億年前—12 月 10 日~6500 万年前—12 月 26 日）に生息した。世界各地から産し、発見には多くのエピソードがある。陸地・水辺に棲み、草食、または肉食であった。最大長 30 m、重さは 50~80 トン、二足~四足歩行をした。速いものは 13~18 km/時で歩いた。寿命はよくわからないが、最長のものは 120 年という推定がある。6500 万年前に絶滅した。ただ、最近では、羽毛のある恐竜化石が発見され、トリの仲間が恐竜の子孫ではないかという議論があり、もしそうであれば、恐竜は今に生き続けていることになる。



写真2 トバリユウ 右大腿骨
(長さ 1280mm)

マンモスは、哺乳類であり、ゾウの仲間である。1属3種であるが、普通マンモスと言うときはケナガマンモスを指す。新生代の500万年前～1万年前（12月31日午後3時ころ～午後11時59分）に生存し、例外的に3500年前まで生きた例がある。先祖はアフリカであるが、北極圏の周りの寒冷地域に生息した。シベリア・北アメリカ・ヨーロッパなどから多くの化石を産する。日本では北海道襟裳岬、島根県沖の日本海から発見されている。草原～森林に棲み、草食であった。最大高3m、重さ10トンで、今のゾウなみである。四足歩行をした。絶滅の時期はヨーロッパで1.2万年前、アジアで1.06万年前である。

18世紀の初め、シベリアのコリムスクの近くで、永久凍土（ツンドラ）中に冷凍されて、全身が残った化石が発見された。発掘されてレニングラードへ運ばれ、研究された。胃の中には食べた植物（草原の草や実）が残っており（15kg）、生息環境が推定された。死因は崖から落ちて怪我をし、窒息死したと考えられている。

さて、実際恐竜とマンモスの一部の骨の化石を見て、私たちにこの二つの区別ができるだろうか。特に、部分しか見つからないときには非常に難しい。これまで、長い年月をかけて調査・研究が行われていて、その集大成としての知識を基として比較検討し、判断される。産出した地層の年代がわかれば、有力な手がかりになる。新しい化石の発見はデータを加えたことになり、そ

それぞれの、より厳密な全体像を作り上げる上に役立つ。分類学的な意味だけでなく、古生態（生活のしかた）や古生物地理（どこに棲んだか、どのように分布を広げたか）なども復元される。古環境の復元に役立つことは言うまでもない。

恐竜とマンモスは、は虫類と哺乳類、しかも多様さは285属と1属のように違い、生存していた時代や場所にも違いがある。このように違うのに、博物館で、新生代の哺乳類化石（例えば日本の代表化石、デスマスチルス）を見て、恐竜と勘違いする人もいる。

絶滅という共通点について見てみよう。恐竜の絶滅は地球史においても大きい意味をもっている。恐竜の場合は飛来した巨大隕石が衝突し、塵が大気中に舞い上がり、地球を覆い、太陽の光を妨げ、そして気候の変化（寒冷化）を引き起こした。食物となる植物が死滅し、恐竜を初めとする多くの生物が生きられなくなって、絶滅したとされる。ここで注意しなくていけないのは、絶滅の時間の長さである。現在の私たちの感覚では、数日、あるいは数年と捉えがちだが、決してそんなに短い時間ではない。それは100万年のオーダーの時間であったろうと考えられる。

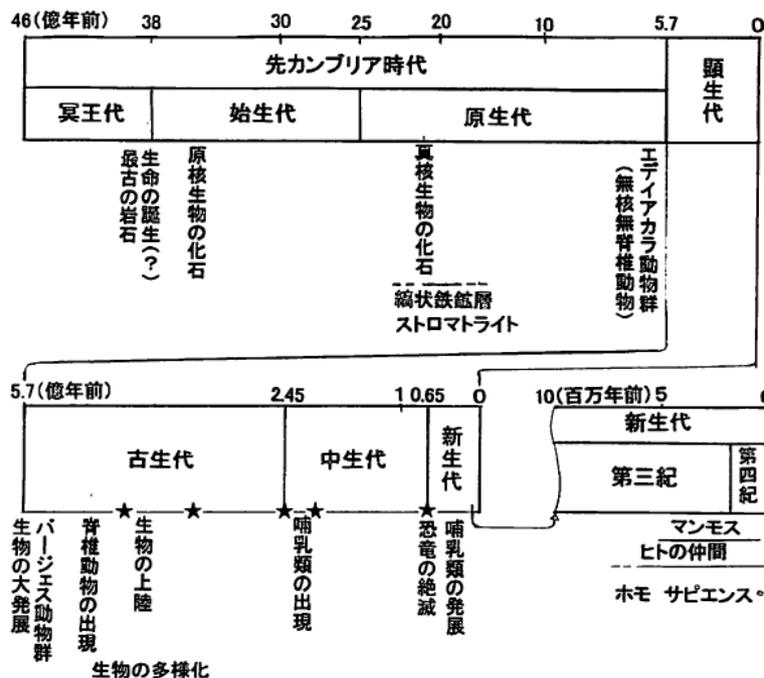


図 11 地質年代区分

こうした絶滅はこれが最大のものでなく、地球史の上ではこの規模のものが5回、さらに小さい規模のものが8回もあったと言われている。その規模、形、絶滅した生物の種類などには違いがある。関連する環境変動もいろいろで、無酸素事件、気候変動、海水準低下、隕石衝突（恐竜の場合）などがあげられている。変化する、変動する地球というイメージはここでも見られ、こうした絶滅事件は、地質年代区分に現れているのだ。

マンモスの絶滅は小規模で、上の中には入ってこない。時間的には数千年で絶滅したことがわかっている。気候変動（温暖化）により、植生が変わったことが原因としてあげられるが、人間による狩猟が一番の原因と考える説もあり、病気を原因のひとつとしてあげる研究者もいる。絶滅の後には新しい地球環境が生まれ、そこに適応した新しい生物が勢力を拓げる。いわゆる、生物の大分散が起こるのである。恐竜が絶滅した後、それまで小さなグループとして生存していた哺乳類の仲間(小動物が多い)がその後(新生代)に大きく発展するのはその典型的な例である。

3.6.3 ヒト：ラストランナー

ヒト（人類）の起源とその後の広がり最近、新しい化石の発見と遺伝子レベルの解析の進展、さらに石器の研究も進んで、大きく変わってきた。しかし、議論は必ずしも、終わっているわけではない。ヒトの特性はまず直立二足歩行することであり、これに伴って手を使うこと、道具を使うこと（労働すること）が始まり、こうしたことが脳の発達を促し、社会生活をするまでに至った。

ヒトの祖先が生まれたのはアフリカであり、600万年前～700万年前のことである。最近ではもっとさかのぼるといふ。それでも地球カレンダーでは12月31日の午前から午後へかけてのことである。ヒトの進化の原因としては、気候の乾燥化の仮説がある。アフリカ～ヨーロッパの間で、地中海が干上がり、乾燥気候が生まれた。このことから森林が草原（サバンナ）に変わり、森の住人であったヒトの祖先は草原へ適応せざるを得なくなった。その結果、二足歩行が始まったというのである。

昔のチンパンジーから分かれたヒトの祖先は猿人としてまとめられているが、その最後の猿人（アウストラロピテクスの仲間）から、250万年前頃に、アフリカで原人が生まれた。ホモ属の始まりである。170万年前ころ、

原人はアフリカを出て、ヨーロッパ・アジアへと拡がってゆく（第一次の拡散）。ジャワ原人・北京原人はアジアへ移り住んだ原人である。この時期は第四紀と呼び、氷期・間氷期が繰り返していた、いわゆる氷河時代であった。苛烈な気候条件の中で、どのように移り住んだのであろうか。これらの原人はさらに旧人（例えばヨーロッパのネアンデルタール人）へ、さらに新人へと進化する。

新人は狭い意味での、ホモ・サピエンスで、現代人の直接の祖先と考えられているが、20万年前～10万年前アフリカで生まれた。10万年前ころ、原人と同様新人もアフリカをあとにした（第2次拡散）。その道には北ルート（北アフリカ→西アジア→ヨーロッパ）と南ルート（東アフリカ→アラビア半島→南アジア）があったと考えられている。南ルートは北ルートより遅い時期だったが、さらに拡散して、東南アジアからオーストラリア（6万年前）、太平洋の諸島（1500年前）、日本（3万年前？）、そして東シベリアから北アメリカ、さらに南アメリカ（1万3千年前）に及んだ。時間をかけて、だんだんと移動したのである。この時期は最終氷期が始まり、寒冷化が進行したときである。気候の変動に伴う植生や動物相の変化が起こり、海水準の変動があつて、移動を易しく、あるいは難しくしたと思われる。住みよい場所を求めて移動したのか、冒険心に富んでいたのか、想像するだけにロマンのある話である。

日本への移動はいろいろな時期にいろいろな経路を通って行われた。北からのグループと南からのグループがあったと考えられるが、縄文人→弥生人という単系でなく、それぞれ異なるルーツをもつ両者が交わって生まれたと考えられている。

世界的にみたとき、人口動態は時代と共に大きく変わった。100万年前—12.5万人、1万年前—約500万人、500年前—3.5億人、16世紀—5億人と増加が推定されている。現在は67億人、2020年には140億人になるだろうといわれているが、すごい増え方である。

3.6.4 石油と鉄

鉄や銅などの金属、石炭・石油などの化石燃料は紀元前から人間によって、道具の原料・灯火・医薬などに使われてきた。18世紀半ばに、イギリスで始まった産業革命は人間の生活を大きく変えたが、その基盤となったのは鉄

と石炭である。石油は 1859 年に採掘が始まり、20 世紀に入ってガソリンや重油を使う動力用のエンジンが普及し、需要が増えた。自動車の発達はそれに拍車をかけ、20 世紀の半ばにはプラスチックとしての需要も増え、天然ガスも含めた化石燃料の使用は増加の一途をたどっている。これらの地下資源は地球が与えてくれた宝物であるが、その起源には生物が関わっていることも多い。石油と鉄の例を見てみよう。

石油の起源には無機説もあるが、現在では石油のもとには生物の遺骸であると考えられている。それらが水中に堆積して岩石となる過程で、その中の有機物が重合してケロジェン(油母)と呼ぶ複雑な構造をもった高分子となり、岩石と共に地中深く埋没し、地熱の作用を受けて分解して石油が出てくる。その石油は地層の中を移動し、それをとらえるトラップと呼ぶ構造(例えば地層が上方へ湾曲した背斜)があったとき、そこにとどまる。石油を含む、隙間の多い岩石(貯留岩)の上に隙間の少ない帽岩があると、外へ逃げ出さないうで、鉱床となる。

石油のある場所は限られている。上に述べた条件、堆積岩(中生代ジュラ紀以降が主、それ以前の地層には残っていないことが多い)があること、熟成反応が進行する、十分な時間と熱があること、石油が逃げないような地質構造があることが必要である。条件が十分にある中東、シベリアそしてアメリカに世界の、石油・天然ガスの三分の二が埋蔵しているといわれる。

このように石油の起源は生物であるが、探査にはまた微化石が利用される。地質構造をとらえるためには対比(離れた場所の地層の同時性を決める)という作業が必要で、それに、有孔虫や放射虫(原生動物)、珪藻などが利用される。化石を使って化石起源の物質を探すのである。

鉄鉱石の起源は火成性(マグマから由来)、堆積性(水の作用が関係する)、変成性(熱や力で既存のものが変わる)とさまざまであるが、現在の鉄鉱石の採掘の約 80 %は堆積性の鉱床である。その産地にも偏りがあり、古い時代の地層や岩石のあるところが多い。オーストラリア、アメリカ、カナダ、インド、ブラジル、アフリカなどにある、縞状鉄鉱層と呼ぶ、鉄分とシリカ(SiO_2)が互層している地層である。先カンブリア時代で、20~25 億年前ころが多い。その起源は海水中にあった還元状態の鉄成分が、生物の光合成によってつくられ、供給された遊離の酸素と化合して酸化鉄となり沈積したのである。一見生物とは無関係とみえる鉄も、地球の歴史の上ではその起源

において生物と深い関係にあった。

地下資源は人間の生活を豊かにし、今やなくてはならないものになった。しかし、こうしたものは採掘すれば減少し、なくなってゆく。特に化石燃料は有限である。最近のデータによると、石油の可採年数（いつまで採掘できるか）は期待を含めて約 60 年であり、天然ガスもほぼ同じである。類似資源（オイルシェールやオイルサンドなど）では約 220 年といわれる。エネルギー資源として、メタンハイドレード、水力・風力発電など、バイオエタノールなどもあるが、人間の使うエネルギーをとってもまかないきれものではない。これから先どうなるのか、人間の知恵、科学の力によってエネルギー問題を解決しなければなるまい。

生き物ではあるが他方、違う存在となったヒトはこれから先、どこへ行くのだろうか。気になることである。

【コラム 3】自然科学系の博物館（ミュージアム）へ行ってみよう

授業や読書の折に、あるいはテレビを見たりしたときに、もっと何かを知りたくなることがある。より多くの知識がほしいのであれば、図書館やインターネット検索を利用して調べることができる。しかし、私たちの好奇心はそこにとどまることなく、本物を直接見たり、実際に実験をしたり、自分自身でやりたいと思ったりする。それには、全国各地にある博物館を利用するのがよい。博物館といっても、学校理科や科学に関係している施設として広くとらえると、自然史系の博物館、科学館、技術系の博物館、動物園、植物園、水族館、公開天文台、プラネタリウムなどがある。これらのどこでも、自然をつくっているものや自然で起る現象を、すべてではないけれども時間空間をこえて体験することができる。それらは、自然を知るまたは考えるときの入口のようなところなので、科学の面白さと触れあうことができる。

自然史系の博物館は、むかし博物学といわれていた分野、鉱物や化石および動植物などの分類展示をしているところと思われるかもしれない。しかし、いまでは最近の地球科学や生命科学の発展を反映させながら、初期生命から三葉虫や恐竜などを経て人類に至るまで、発展・絶滅を繰り返してきた生物界の変遷について、化学進化、機能形態、寄生や共生、環境変動、大陸移動なども含めて、展示が工夫されてきている。そこは私たちと

地球生命史をつなぐ場となっていて、数十億年前まで遡る時間旅行ができるなんていい。自然史系の博物館は生物の多様性を理解する上でもよいところであるが、その生きているさまを楽しみたければ動物園や植物園がよい。そこでは、世界旅行に出かけなくても、いろいろな気候下の生物の世界をかいま見ることができる。また、海中散歩したければ水族館に出かけるのがよい。

私たちは、地球にへばりついているだけでなく、公開天文台やプラネタリウムを利用すると、太陽系からさらに宇宙に飛び出すこともできる。天体望遠鏡で実際に星を観察するたびに、自分たちが生きている世界の不思議さを感じないわけにはいかないだろう。プラネタリウムでは、天体の運行の面白さを学びながら、ときには昔の人たちが想像した神話の世界まで入って遊ぶことができる。一方、自然の中の物理現象や物質の化学については、科学館や科学技術館がその秘密を知る手がかりを与えてくれる。自動車やテレビやコンピュータをはじめ、私たちが便利に使っているいろいろな道具のほとんどがブラックボックスとなっているが、技術系の博物館では作動する原理を理解することができるに違いない。

このように、博物館は学校や家庭では得られない情報をたくさんもたらしてくれるところなのだが、博物館自体が動けないので、みなさんが足を運んでくれないと役に立たないという欠点がある。多くの方々に来てもらいたくて、どの館でも工夫をこらしたイベントを企画するものの、広い範囲に広報されているわけではない。ぜひ博物館を利用しつくすために、まずどこにあるかを調べ、自分が住んでいるところの近くから順々に訪れてほしい。

参考：全国科学博物館協議会のホームページ

<http://www.kahaku.go.jp/jcsm/>

第4章 太陽系と宇宙

4.1 太陽と地球

4.1.1 太陽とは

太陽は太陽系の親玉であり、その中心で太陽系を二つの点で支配している。ひとつは、重力的な支配、もうひとつは熱的な支配である。

重力的な支配者としての太陽を説明しよう。半径139万キロメートルという太陽は、地球を一列に並べれば109個分というだけではなく、地球の33万倍もの質量を持つ重い恒星である。ニュートンの万有引力の法則では、重力の強さは重力源の質量に比例する。重い天体ほど強力な重力を生み出すので、太陽系に属するすべての天体は、太陽の巨大な質量に起因する強大な重力に支配されているわけである。したがって、太陽系のすべての天体は、ほぼ太陽を中心として、その周りを回っている。これを「公転」と呼ぶ。惑星が太陽を一周する周期を公転周期と呼び、水星では88日、海王星では約165年である。太陽から遠ければ遠いほど、公転する速度が遅くなり、時間がかかるのである。

もちろん、これは惑星だけではなく、すべての小天体にも当てはまる。衛星の場合は、惑星の周りを回っているものの、同時に惑星と共に太陽の周りを回っている。太陽系のすべての天体が、このように太陽の強大な支配下にあるわけである。

ちなみに、惑星も太陽に比較すればわずかながら重力はあるので、それらによって微妙にそれぞれの惑星は影響を受ける。こういった太陽以外から受ける重力的な影響を「摂動（せつどう）」と呼んでいる。

もうひとつ、熱的な支配者としての太陽を考えてみよう。こちらは想像しやすいと思うが、教室に置かれたストーブのようなものである。冬の寒い日、ストーブからの席順が暖かさを決めていたのを覚えているだろうか。ストーブに近い席は暖かく遠いと寒い。太陽はいってみれば、このストーブのようなもので、わが太陽系の中で唯一圧倒的なエネルギーを放射し、太陽系全体の天体の温度を決めている。したがって、我々の住む地球を暖めてくれている母なる星といえるだろう。日が射せば、暑くなるという日常の体験からも実感できる。

太陽のエネルギーの源は核融合反応である。太陽はガスの主成分は水素である。ガスを集めれば集めるほど、内部の温度はまるで押しくらまんじゅうのように上昇していく。ある限界を超えると、核融合反応が起きようになる。太陽の中心は 1500 万度、2500 億気圧を超えている。核融合反応は、簡単に言えば水素と水素が合体してヘリウムになるという反応である。このとき、不思議なことに材料に使われた水素の質量と、できあがったヘリウムの質量は等しくない。1 たす 1 が 2 になっていないのである。そのごくわずかな質量が、この反応の過程でエネルギーに変化し、それが高温の元になっている（アインシュタインの相対性理論では、エネルギーは質量と等価で、 $E = mc^2$ という関係がある）。この反応のために熱が発生し、太陽の内部は 1000 万度に達している。よく太陽は「燃えている」と表現されるが、地上での燃焼反応が酸素を用いた化学反応であり、生成前と生成後の質量は同じであるのとは全く異なるメカニズムである。太陽は誕生から現在までの 46 億年の間に、全体の水素の約 7% がヘリウムに変換された。この計算でいくと、あと 50 億年程度は輝き続けることになる。

こうして中心部の核融合反応で生まれたエネルギーは、対流や放射として外へ向かう。いずれにしろ内部は高密度である。人混みの中を早足ですり抜けようとする、人にぶつかってしまってもうまくいかないように、太陽中心で発生した光も、押しくらまんじゅう状態の物質の中では、なかなか外に出られない。ぶつかりながら、なんとか表面に達するまで相当な時間がかかる。どのくらいかかるかというと、モデルによって異なるが少なくとも数十万年、一説では一千万年とも言われている。つまり、太陽の表面から光り輝いているエネルギーは、少なくとも我々人類が文明を築く前に生まれたものなのである。

このエネルギーが光として、太陽の表面から宇宙に放たれている。表面温度は約 5800 度という高温となって光っているわけである。幸いなことに、このエネルギーの供給量はきわめて安定していて、おかげで地球はほぼ安定した気候環境を維持できている。そして、これが太陽系全体の温度環境を決めているのである。

4.1.2 地球は太陽コロナの中にある

両手を思いっきり伸ばして野原に寝転がり、頭上に広がる大空を眺めてみ

よう。あの澄みわたる青空は、一体どこまで続いているのだろうか。雲は、なぜあのようないろいろな形に出来るのだろうか。空のずっと上に行けば太陽に近づくはずなのに、山に登ったり、飛行機が飛んでいるあたりの高度では、なぜ気温は低いのだろうか。「スペースシャトルからの宇宙遊泳」とか言うが、あの場所は地上からどれくらい高いのか。広い空のどこまでが地球の領分で、どこからが宇宙になっていくのだろうか。

地球をとりまく大気を、私たちは目で見ることができる。晴れた昼間には青空が広がり、朝夕には朝焼けや夕焼けが見られる。極地の空は、美しいオーロラの舞いで彩られる。そして時々、赤いオーロラが北海道までやってくる。これらは皆、大気の発光現象である。

私たち人類は、惑星地球号の上で太陽から光の恵みを受けて生きているが、太陽から地球にやってくるのは光だけではない。太陽をとりまくコロナからは、コロナのガスそのものが流れ出している。このガスはイオンと電子が離れ離れになったプラズマと呼ばれるガスである。コロナからのプラズマ流は太陽風と呼ばれ、太陽系全体を満たしている。

遠く離れた太陽の表面での磁場構造の変化が、この太陽風と共に地球へと伝わってくる。しかし、地球は自分の磁場をもっているため、太陽風は地球の周辺で曲げられてしまう。太陽風と地球磁場が作用し合い、地球周辺の宇宙空間に、オーロラや磁気嵐など、様々な興味ある現象を作り出す。私たちは実は、太陽の大気の中にいるのだが、地球が磁場をもっているために、そのことに気づいていないのである。

【コラム4】夕焼け空が赤いわけ

私たちは日常生活で、空の色が時間によって変わることを知っている。とくに、山頂で見る雲海から昇る清々しい朝日や、大海原に沈む真っ赤な大きな夕陽に感激した人も多いに違いない。

空の色が変わると言っても、大気を構成する酸素ガスや窒素ガス自体に色がついているわけではない。太陽の光は、大気ガスの分子・原子によって散乱されて広がるため、太陽面の大きさより広い範囲からやってくるように見える。青空と赤い朝焼け・夕焼けの違いは、昼間と朝夕では太陽光線の散乱の度合いが違うからである。光が散乱される度合いは光の波長によって異なり、青い光は赤い光よりも強く散乱される。そのため、昼間は青い光だけが空全体に広がって見え、朝方・夕方の太陽光線は大気を斜め

に貫くので通過する距離が長くなり、赤い光も多く散乱され、空を赤く染めるのである。

【コラム5】可視光線と呼ぶのは人間の利己主義

太陽から来るいろいろな波長の光のうち、可視光線の波長域（人間の目に見える波長域）のエネルギーが一番大きい。つまり、人間の網膜・視神経・脳を繋ぐ視覚システムが、太陽の光のうちもっともエネルギーが高い波長領域を効率良く受けているということである。これは、自然界における偶然の一致であるとは考えにくい。おそらく他の動物では、このようにうまくはっていないだろう。人間の進化の段階で、視覚システムが、太陽からのエネルギーのもっとも大きい波長の光を効率よく受けるように適応してきたものと考えれば納得がいく。

それにしても、可視光線の可視という言葉は、人間さまにとって見ることが出来るという、極めて自分勝手な用語ではないだろうか。

4.1.3 太陽から地球までのエネルギー流

太陽は地球という惑星の軌道を支配しているだけではなく、地球上のあらゆる生命のエネルギー源でもある。銀河系の中では、太陽はごくありふれた星にすぎないが、地球が100万個も入ってしまうほど巨大な星である。太古の昔から、人類は太陽の持つパワーの秘密について想像を巡らし、あるいは生命を支配する太陽を神と崇めてきた。ギリシャ神話やエジプト神話を始め、世界各地で太陽への崇拝は信仰を生んで来た。ローマ神話のアポロ、日本の天照大神（あまてらすおおみかみ）など、世界中の太陽神は50にもなる。一方、夜になると太陽がなくなることや、時々起きる日食などの自然現象は、神話的と科学的両面からの説明がなされてきた。

太陽からのエネルギーの伝わり方には、電磁波とプラズマ流がある。電磁波の主要部分は約6千度の光球ガスからの熱放射で、いわゆる太陽光と呼ばれているものである。地球大気の色度は、生命の活動に適切な範囲に保たれ、植物の光合成によって作られた酸素も生命活動を支えている。

光球よりも上層にある彩層やコロナからも、電磁波が放射されている。彩層の色度は約1万度、太陽コロナの色度は数百万度にも達する。コロナからは、光球からの電磁波より波長が短く、エネルギーが高い紫外線やX線が放

射される。また、コロナの高温プラズマ自体も、太陽系空間に向かって常に流出している。これは太陽風と呼ばれ、毎秒数百キロメートルの超音速で惑星間空間を流れており、惑星の前面には衝撃波面が作られる。

太陽系空間はこの太陽風プラズマで満たされ、このことは、惑星間空間は太陽の外延大気であるということでもある。プラズマは、固体、液体、気体という物質の3態に次ぐ、第4の物質形態である。宇宙空間を構成しているのは、プラズマの他に磁場である。

いつも流れ出ている定常太陽風に加えて、突風が吹き荒れることもある。黒点として観測される特に強い磁場をもった構造が成長し、そのエネルギーが爆発的に開放されるときである。これは太陽フレアと呼ばれ、磁場構造が磁力線のつながり換わり（磁気リコネクション）によって急速に変化し、磁気エネルギーがプラズマの運動エネルギーに変換される。ちなみに、フレアというのは「パッと広がる」という意味である。

太陽フレアによる磁場変動が太陽風と共に運ばれて地球付近に達すると、ここでも地球磁場との磁気リコネクションが起こり、地球周辺の磁場形状が大きく変化する。

【コラム6】磁力線がつなぎ換わる

太陽の黒点領域でも地球磁気圏の尾部でも、磁場のエネルギーがイオン・電子を加速していることがわかってきた。力学的に磁力線はパチンコのゴムひものような性質を持っており、引き伸ばすとエネルギーがたまる。そして、ゴムを引っ張り過ぎてちよん切れるとき、付け根の方は縮み、先端のほうは飛び出す。その瞬間、プラズマがエネルギーを得ることを磁力線リコネクション（つながり換わり）という。

4.1.4 太陽活動とは

太陽定数という用語があるように、太陽が地球に与える光や熱の量は殆ど一定である。しかし、ごくわずかな太陽活動の変動によって、地球の超高層大気やオーロラ現象は大きな影響を受ける。では、太陽全体の活動とは、いったいどのように測定するのだろうか。

太陽活動度はしばしば黒点の数で代表され、数時間程度の短期変動はオーロラや磁気嵐の発生に影響する。一方、図12で明らかのように、長期変動でもっともポピュラーなのは11年周期で、黒点数が約11年周期で極大/極小

になり、また太陽の大規模磁場の極性が平均 11 年ごとに反転するが、このメカニズムは解明されていない。

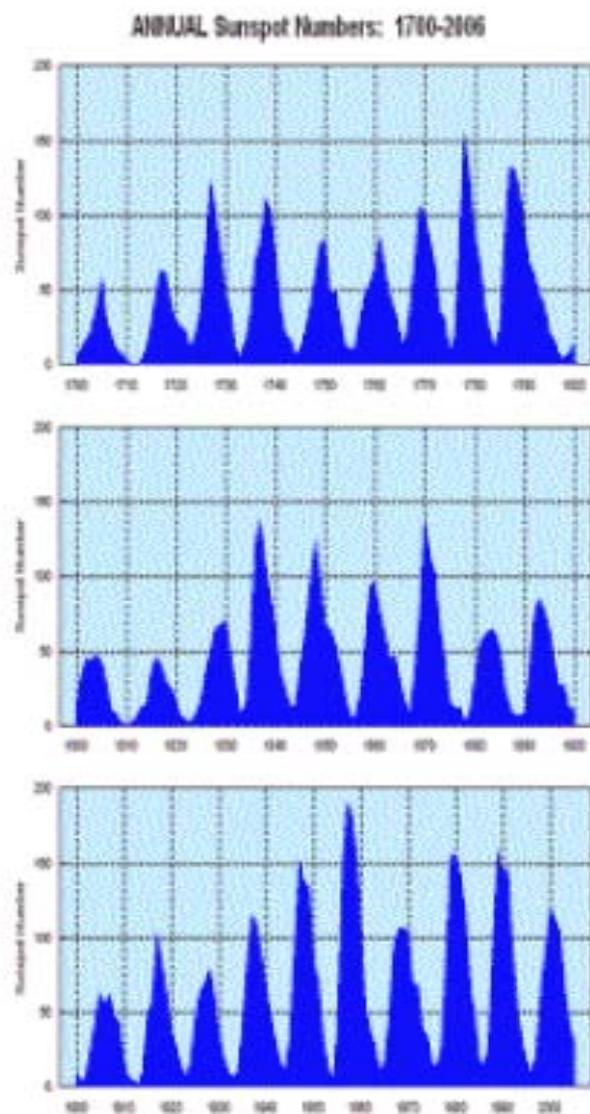


図 12 太陽活動度（黒点数）の変動⁸

振幅は一定ではないが、活動度の 11 年周期がよくわかる。

中国では、紀元前から太陽に黒いシミがあることを肉眼で確認していたといわれる（図 13）。ガリレオ・ガリレイは自作の望遠鏡で太陽を観測し、表面に大小とりまぜた黒点があり、それらが自転とともに動いていることを発見した。17 世紀初めのことである。

⁸ NOAA/NGDC, <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/SSN/ssn.html>

日常生活では、つまり可視光線の範囲では、太陽の刻々の変化には気づかないが、実は太陽面の構造は一様ではない。しかも、時間的にも烈しく変動している。光球では、黒点は温度が低く、磁場の強い領域である。外向きと内向きの極性を持つ領域がペアーをなし、これらは磁力線で結ばれている。また、自転の周期が緯度によって異なること（差動自転）のために、磁力線が引き伸ばされたりねじれたり、浮き上がったりする。黒点には磁場エネルギーが蓄えられており、この領域でフレア爆発が起きる。そして爆発とともに明るさが増し、紫外線強度が増え、高速のプラズマのかたまりが放出されるというわけだ。

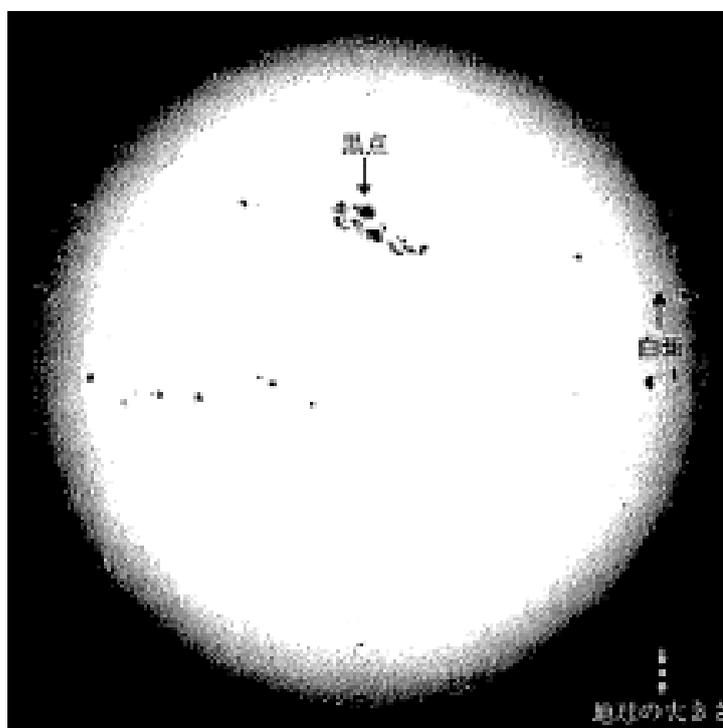


図 13 太陽の黒点写真（白色光）⁹

太陽はプラズマ状態にあるので、電気が流れやすい。このような電離流体が磁場を横切って移動すると、電流が生じ、その電流が周りに新たな磁場を産む。コロナや黒点など、太陽のいたるところでプラズマと電磁現象が絡み合って、ちょうど発電機のように運動エネルギーを電磁エネルギーに変換する作用が働いているということである。

⁹ 柴田一成・大山真満『写真集「太陽」』裳華房、2004

最近になって、太陽活動の長期変動と地球の気候が高い相関を示すことが定量的に示されてきた。もっともガリレオ以前の黒点数は記録にはないので、長樹齢の大木や極地の氷床に残されている炭素の放射線同位元素の量を丹念に調べることによって、過去 1000 年程度の太陽黒点数を推定する試みが行なわれた。その結果、黒点極小期には、地球では寒冷化が進行していたことが推定されている。また近年の人工衛星観測によっても、黒点数が増えると太陽定数がわずかに増加することがわかってきた。黒点数が多ければ、太陽全体としては暗くなるような気がするが、実際は黒点の周囲に明るい領域ができて、太陽全体としては明るくなる。定数が定数ではなかったというわけである。

4.1.5 地球周辺の宇宙空間への影響

太陽からやってくる紫外線、太陽風、プラズマ雲は、地球をとりまく宇宙空間に大きな影響を与える。紫外線は、地球大気を構成する分子から電子を剥ぎ取って、電離層を作る。イオンと電子の生成率がもっとも高いのは約 100 km の高度においてである。太陽フレアの際には紫外線や X 線が強まるため、電離層の電離度も増す。

太陽風は地球磁場を磁気圏に閉じ込める。図 14 に示すように、夜側の磁気圏では、磁力線が太陽と反対側に長く引き伸ばされて、まるで地球が長い磁場の尾っぽを持っているような形状になる。この磁場がエネルギー源になって、オーロラを光らせる電子の種ができる。また、放射線帯（ヴァン・アレン帯）を満たす高エネルギー粒子も作られる。太陽面の爆発のあと、放射線帯が成長し、地球をリング状に取り巻く環電流が発達し、磁気嵐と呼ばれる状態になる。磁気嵐はふつう数日間続き、活発なオーロラがひっきりなしに出現する。強い磁気嵐のときには、北海道からもオーロラが見られる。

オーロラは、大気の原子・分子が励起されることによって発生する光である。磁気圏尾から極域めがけて降り込んでくる電子ビームのエネルギーによって、大気の原子や分子の内部で核の周囲をまわる電子のエネルギーが高い準位に上げられ（これを励起という）たあと、元の状態に戻る際に光が発生する。オーロラ光が発生する高度は 100–300 km である。発生する光の色は原子や分子の種類によって異なる。オーロラの光のうち最もポピュラーなのは、中性酸素原子の緑色と赤色、窒素分子イオンの青色、中性窒素分子のピンク・赤紫色である。

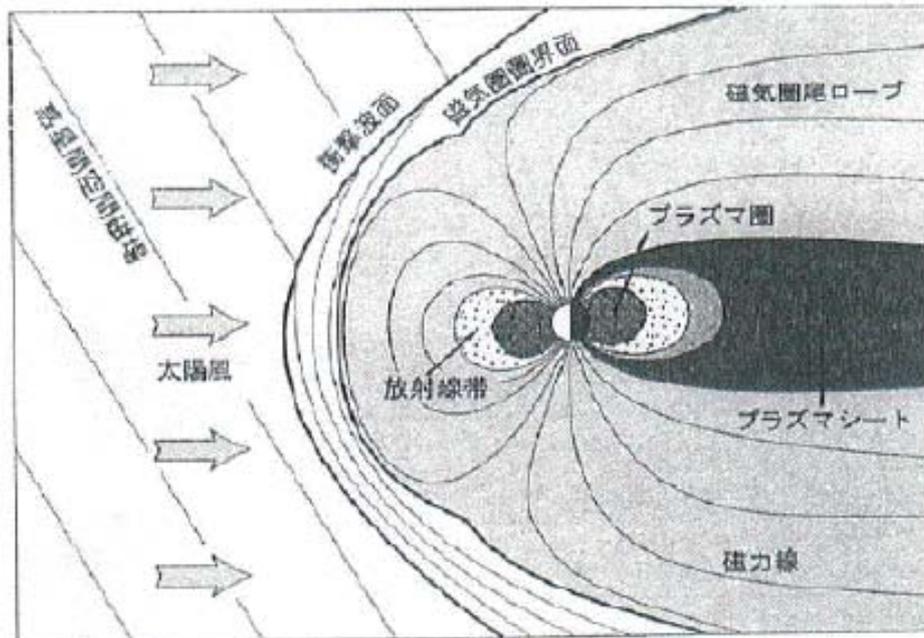


図 14 太陽風-地球磁気圏の模式図¹⁰

オーロラは、数時間に1回、ブレークアップを起こす。まるで空が裂けたように光が吹き出し、突然明るさを増す。そして、その幻想的な舞いは数分のうちに全天に広がる。このような爆発現象がどのようにして発生するのか、よくわかっていない。

【コラム7】オーロラ観光

毎年冬になると何万人もの日本人が、アラスカやカナダ、北欧を目指してオーロラ鑑賞の旅に出る。ハワイ観光や、ショッピングツアーよりも「科学的」なツアーであり、オーロラの解説書を読んだ旅行社が企画したことで始まった。本稿で述べたように、オーロラは太陽と地球の相互作用の度合いを表す、人間の目で見ることができる唯一の現象である。惑星でオーロラが発生するためには、その惑星が自前の磁場と大気を持っていることが条件であるが、この2つは生命がその星で生きていくためにも必要な要素である。地球に大気と磁場がなければ、高エネルギーの宇宙線が直接地上まで到達し、遺伝子にダメージを与えることになる。つまり、オーロラ

¹⁰ 国立天文台編『理科年表』丸善、2008

がこの地球上で見られるということは、この星に生命が生きていけることの証しなのである。

オーロラの妖しい舞いを見ながら、太陽と地球の微妙な関係に思いを馳せてみることをお勧めしたい。

4.1.6 宇宙の天気を予報する

太陽面での爆発現象フレアは、太陽系に何億トンものプラズマを放出し、宇宙空間に嵐をひき起こす。GPS や宇宙通信など、現代社会は宇宙に置かれた工学システムに強く依存しているが、これらのシステムは、こうした宇宙嵐の直撃を受ける。換言すれば、私たちの文明社会が正常に働くか否かは、太陽活動に支配されているといっても過言ではない。

太陽で巨大なフレア爆発が起こったときには、太陽表面でも非常に強い磁場構造が大きく変化するため、一部の粒子が光速に近い速度まで加速されて、わずか 10-20 分で地球に飛来し、電離層を異常電離する。無線通信を乱し、国際線の旅客機と数時間交信ができなくなる事態も発生する。人工衛星や宇宙飛行士、航空機の乗客にまで放射線被曝の危険を与えることがある。放射線帯へ投入される粒子強度が特に強い時には、衛星の電子回路が破壊されたことも報告されている。

太陽表面の磁場変動は、太陽風と共に太陽放射線よりもはるかに遅いスピードでやって来るために、1-2 日してからその影響は地球に表れる。地球磁気圏の構造のみならず、オーロラ中には大電流が流れ、地球の表面の磁場まで大きく変動させる。電磁誘導により地表に生じた巨大な電場は、送電線等に大きな電流を流し、変電所の変圧設備が破壊され、停電事故に至ったこともある。地球上には、伝書鳩や渡り鳥など、磁場をセンサーとして生きている動物がいることが知られているが、これらの動物は磁場の変化をまともに受けることになる。人間は視覚と脳が発達しているが、ヒトの細胞に磁場変化がどのように影響しているかの研究は始まったばかりである。

太陽面爆発、磁気嵐に伴うこれら一連の電磁誘導の現象は宇宙天気と呼ばれる。地上・宇宙インフラに大きく依存する文明社会にとって、太陽からの嵐、つまり「悪い」宇宙の天気を的確に予報することが緊急課題である。

4.1.7 宇宙のいろいろな場所で

オーロラが発生するのは、地球大気の中だけではない。惑星が自前の磁場

と大気を持っている木星、土星、天王星、海王星のいずれにおいても、人工衛星によりオーロラが撮影されている。イオンや電子の加速が起きているのである。もちろんその場合、窒素と酸素が主成分である地球大気から出るグリーン主体のオーロラではなく、オーロラの色は各惑星の大気成分を反映している。また、加速された電子は熱放射よりも高い周波数の電波を発生し、これらの惑星からは強い電波が放射されているのが確認されている。また惑星の磁気圏には、光速にせまる高エネルギー電子が捕捉されている放射線帯という領域があり、ここからはシンクロトロン放射と呼ばれる機構によって広帯域の電波が放射されている。

実は、イオンや電子が加速されるという現象は、宇宙のいたるところで起きていることもわかってきた。高エネルギーに加速された粒子は宇宙線として観測され、また加速された粒子から発生する光は遠くの天体のダイナミックな姿を見せてくれる。

【コラム 8】日常生活での電磁誘導

オーロラの中に流れる電流が地上の送電線に大きな電流を発生させる電磁誘導の原理は、私たちの日常生活で積極的に応用されて我々の生活を豊かにすることにも役立っている。たとえば、電化された台所では、火を使わずに鍋の底に電流を流して調理をすることができる。これは、調理器の中に電流を流すコイルがあり、そのコイルに流れる電流が磁場を作って、その磁場が鍋の底を透過することを利用している。コイルの電流を短い周期で素早く変化させることにより、鍋の底の磁場を変化させて誘導電場が作られる。導体にはうず状の電流が流れるため、その抵抗から熱を発生させることができるのである。また携帯電話や電動歯ブラシの充電器には、金属電極がない非接触型のものがあり、充電器の上に乗せるだけで充電が出来る。また駅の改札口では、改札システムから乗客の IC カードに電磁誘導の原理を使って電力を送り、IC カードをコンピュータとして動作させて、カードメモリーのデータを電波で改札システムに送り返すことにより運賃の精算をしている。

4.2 太陽系

4.2.1 わが太陽系

我々の太陽系は、太陽を中心にした8つの惑星、惑星になりかけの準惑星、それに彗星や小惑星といった小天体などからなるシステムである。我々が住んでいる地球は太陽から数えて3番目の惑星である。

太陽に近い4つの惑星：水星、金星、地球、火星は、主に岩石質からなり、ややこぶりの惑星群で、地球型惑星と呼ばれる。外側の4つの惑星：木星、土星、天王星、海王星は、大型の惑星で、どれも半径は2万 km をこえるほど大きいものの、表面が大量のガスで覆われ、地球型惑星よりも密度が小さく軽い。これらを木星型惑星と呼ぶ。木星や土星が太陽と同じ水素やヘリウムが主成分であるのに対して、天王星や海王星は巨大な氷核をもち、内部構造が異なっている。そのため、木星と土星を巨大ガス惑星、天王星と海王星を巨大氷惑星と分けて呼ぶこともある。

なお、地球よりも内側で太陽の周りを回っている惑星（水星と金星）を内惑星、それ以外の外側の惑星を外惑星と呼ぶ。内惑星は地球から見ると見かけ上、太陽から大きく離れることはなく、夕方や明け方の空にしか見えない。金星が宵の明星、明けの明星と呼ばれるのは、そのためである。一方、外惑星は、地球がそれらを追い越していくときには真夜中の空に見える。

太陽系には惑星や衛星以外に、太陽系小天体と総称される天体群がある。これらはサイズも小さいものが多いが、数は無視できないほど多い。

火星と木星の間は、小惑星帯と呼ばれており、たくさんの小惑星が存在する。ほとんどは岩石でできていて、氷はわずかにしか含まない。最も大きな小惑星ケレスでも、直径は千 km 足らずで、他のものは数百 km 以下である。数 km から数百 km といった、小さいかけらのようなものもすべて合わせると、百万個近くもあると言われている。この小惑星帯をはずれて、火星の内側にやってくるような、はぐれた小惑星もあり、特異小惑星と呼ばれる。ときどき、地球に落ちてくる隕石は、こういった小惑星のかけらである。

一方、海王星の外側にも同じような小天体群があり、太陽系外縁天体と呼ばれている。これらは氷を大量に含む天体群で、中にはかつては惑星と

呼ばれていた冥王星や、これに準じる天体も発見されている。

太陽系でもっと風変わりな公転をしている小天体として彗星がある。大部分が大きく歪んだ楕円の軌道を描き、太陽に極端に近づいたり（場合によっては衝突してしまったり）、逆に途方もなく遠ざかったりする。彗星は小惑星と違って、氷が主成分であるため、太陽に近づくと融け出して太陽からの電氣的な風（太陽風）に吹かれて、太陽の反対方向に尾を伸ばす。そのためにほうき星とも呼ばれてきた。彗星本体の大きさは、せいぜい数十キロメートルほど、太陽から遠いところにある時には、氷が融けることもなく、暗くて見つける事ができない。したがって、太陽に近づいて明るくなるまで発見されないことが多い。そのために、今でも太陽系にどのくらいの数の彗星があるのかわかっていない。一部の彗星は太陽系外縁天体からやってきたものであると考えられている。

惑星の中で最大の木星でも、その質量は太陽の千分の一しかない。太陽系に属する天体をすべて集めても、その質量は太陽の 1%にも満たない。つまり太陽系の 99%以上の質量は、太陽が担っているのである。

【コラム9】 曜日と惑星の関係

わたしたちが実生活を送る上で、必要なカレンダー。そこに曜日が七つ並んでいる理由をご存じだろうか。実は、ここに夜空を眺め、宇宙を考えた、いにしえの人々の宇宙観が反映されている。

夜空を眺めていると、お互いの位置関係を変えることはない星座を形作る恒星に対して、その位置を毎日のように変えていく星があった。動き回る、惑う星、つまり惑星である。水星、金星、火星、木星、土星の5つである。惑星（planet）の語源をさかのぼれば、もともとギリシャ語の planetes：さまようもの、に由来している。

これら肉眼で見る限り、大きさがわからない惑星に対し、夜と昼を支配する太陽と月がある。月は東洋では太陰とも呼ばれているが、西洋では月も太陽も惑星と分類されていた。いずれにしる太陽と月と5つの惑星を加え、この7つの惑星が特別視された。

暦が考えられた古代、この7つの天体が、いわば聖なる惑星であり、空間も時間も、7つの天体に支配されていると信じていた。動く天体は、全部で7つなので、地上のサイクルも1週間7日となった。

曜日の順番にも古代の人達の宇宙観が反映されている。天動説では、宇宙の中心は地球で、その周りを月、水星、金星、太陽、火星、木星、土星、の順に回っていた。すなわち、天球上を動く速度が早い順に、月、水、金、日、火、木、土と並んでいると考えたのである。ただ、この順番がそのまま曜日の順番になったわけではない。

この順番に、まずは時刻を支配する天体を決めた。週の第1日第1時には、最も遠くの惑星をあてはめた。すなわち、週の第1日第1時が土星、第2時が木星、第3時が火星と第24時まで支配する星をあてはめてゆく。すると、第1日は火星で終わる。第2日目の第1時は次の太陽から始まり、水星で終わる。第3日目の第1時は月で始まり、第4日目は火星で始まる。こうやって1週間にわたって、各時刻を決めていったのだが、その各日の最初の時刻を取り出し、それぞれの日を支配する星が決められた。すなわち、第1日が土星で始まり、太陽、月、火星、水星、木星、金星の順となる。これが、現在の曜日の順番：土、日、月、火、水、木、金、の起源である。

4.2.2 地球の自転運動と日周運動

空あるいは夜空の天体の動きと、われわれの地球の動きは密接に関係している。

空は、丸い天井のように見える。この天井のような丸い天井が、地平線の下にも続いていると考えた大きな仮想的な球面のことを、天球と呼ぶ。頭の真上を天頂、真下を天底と言う。地平線は、この天球を二つに区切っている。地平線の上に現れているのが、目に見える天球であり、その星空を再現したのが半球状のドーム型を天井を持つプラネタリウムである。

天体の見かけの動きは、この天球が天体を張り付けたまま動くと考えると便利であるし、実際に地球が宇宙の中心であると考えていた天動説の時代には、そのように思われていた。実際には、星座を形作る星々は、それぞれに地球からの距離が異なっているが、その距離はとても遠く、お互いの差は感じられないからである。そのために星は、近似的に天球にはりついているように考えてもよい。(天動説では、この恒星の張り付いた天球を、恒星天とも呼んでいたほどである。)

太陽は東から昇って西に沈む。月も同様である。また夜に見える星座も

同じように、東の空にのぼった星は時間がたつとともに南の空の高いところへ移動し、また西の空へと沈んでいく。一方、北の空の星は、北極星をほぼ中心として、反時計回りにまわっている。星は一日たつと、またほぼ同じ位置に見える。つまり、星空全体が東から西へ1日に1回、回転している。

つまり、すべての天体の見かけの動きは大まかに言えば、ほぼ北極星を中心として、天球にはりついた太陽や星が、東から西へ約1日で1回転しているように見える。これは星空全体、つまり天球が東から西へ1日に約1回回転していると考えると都合がよい。これを日周運動と呼ぶ。

この日周運動は、我々地球の自転の裏返しである。地球は北極と南極をむすぶ自転軸を中心に、ほぼ一日で一回転している。この自転軸を天球まで延長したものが、天の北極と天の南極となる。すなわち、地球の自転は、この天球上の北極と南極を結んだ軸のまわりに天球が回転する日周運動という、みかけの動きを引き起こしているのである。

ところで、地球における日周運動の見え方は、地球上の場所によって異なる。オリオン座は北半球では南の空に見えるが、赤道付近ではちょうど東からのぼって天頂を通過し、真西に沈む。南半球ではオリオン座は北半球で見る形とは逆さまとなって、北の空を通過していくことになる。

4.2.3 地球の公転運動と年周運動

ところで、星の日周運動をよく調べてみると、24時間で完全にもとの場所に戻ってくるわけではない。同じ時刻には、ほんの少し少し西に動いている。同じ場所に正確に戻ってくるのは、23時間56分後で、24時間に対して4分ほど短い。つまり、星座を形作る星たちは、毎夜少しずつ西に動いていき、ついには夕方に西の地平線に沈んでしまい、見ることができなくなる。こうして、見えなくなった星座も、数か月すると、今度は明け方の東の地平線で、日の出前に眺めることができるようになる。こうして、同じ時刻に見える星座は季節毎に移り変わっていく。四季毎に有名な季節を代表する星座があるのは、このためである。こういったサイクルは一年を周期に繰り返すので、これを年周運動と呼ぶ。

年周運動が起こる原因も地球にある。地球は自転しながら、太陽の回りを一年で公転している。そのため、季節を代表する星座は、地球が太陽を

背にする方向に見えることになる。一方、地球から太陽の方向にある星座は、太陽と同時に東の空に上り、西に沈むので見ることができない。地球が太陽の回りを公転していくことにより、地球から見ると太陽と反対側にある星座は、次第に移り変わっていくわけである。

一方、天球を注目してみると、地球から見た太陽の見かけの位置は、これらの星座の間を動いていくように見える。この太陽の通り道を黄道と呼び、伝統的には、この黄道上に 12 の星座があったので、これらを黄道 12 星座と呼ぶ。

地球が太陽の回りを公転していることによって起る、太陽の天球上における 1 年を周期する見かけの運動も年周運動である。

【コラム 10】カレンダーの話

現在使われているカレンダーは 1 年が 12 か月となっている。その理由も夜空を眺めて、暦を考え出した結果である。

季節の変化が夜空の星座の変化と一致していることは理解できていたが、一年はとても長く、数百日もある日数で記述するのは不便だった。そこで月を利用した。月は約一か月で満ち欠けを繰り返し、とても明るい天体で便利だったため、月を基準にして一年を区切る方法が編み出された。月は平均して 29.5 日の周期で満ち欠けする。そこで、1 か月を 29 日あるいは 30 日とし、それを交互に繰り返すことで、平均を保とうとしたわけだ。こうすると、これを 12 回繰り返すと約一年となる。一年は 12 か月というのは、この月の満ち欠けの周期が最も一年に近いので採用されたわけである。月を基準にした暦を太陰暦と呼ぶ。

ところが、太陰暦は不便なところもある。一年が 354 日にしかないからだ。太陽の動きと比較すると、1 年間ごとに約 11 日ずつずれていく。これでは、季節を示す暦としては機能しなくなる。エジプト・ナイル川流域のように季節を知り、農業を行う必要があった地域では、現在、われわれが用いている太陽が基準とした暦、太陽暦が編み出された。太陽暦でも月は補助的に用いられているので、1 年 12 か月というのは変わらない。私たちは現在、太陽暦を用いた暦を採用している。

実は日本では、明治 5 年までは月を基準にし、太陽暦もミックスさせた「旧暦」と呼ばれる太陰太陽暦が使われていた。この暦は月を基準としつ

つも、季節がずれないように、ときどき「補正」のために、閏月を入れている。閏月がある年は1年13か月となる。

4.2.4 季節が生じる仕組み

ところで、一年というのは季節のサイクルにもなっている。ではなぜ、このように季節があるのだろうか。

夏は暑く、冬は寒くなるものの、夏の太陽が地球に近づいて来るわけではない。太陽を巡る地球の軌道は完全な円ではなく、ほんのわずかに楕円ではあるものの、その差はせいぜい3%ほどである。しかも、太陽と地球が少し近づくのは、実は1月3日頃で、日本では真冬にあたる。(逆に最も遠いのは7月7日頃となる。)

それでは、なぜ夏は暑く、冬は寒いのか。その理由は、太陽の高度つまり空を通る太陽の高さの違いである。真冬の太陽は空の低いところ横切っただけで、冬の日差しが窓から部屋の奥まで入り込むのはそのためである。逆に夏の太陽はかなり高く上まで昇る。

懐中電灯で地面を照らした時、真上から照らした場合と、斜めから照らした場合を比べるとよくわかる。真上からの方が、単位面積あたりの明るさが増す。これと同じように真夏の太陽は真上から照りつけるために単位面積あたりに受けるエネルギーが大きく、暑くなる。真冬の太陽は斜めから照りつけるために広がって弱くなるのである。これは一日の中でも経験できる。真昼の日差しより夕方の日差しの方が弱くなるのと同じ原理である。

太陽の高度が最も高くなるのは6月21日ごろの夏至の日で、東京では正午の太陽の高さは78度となる。太陽が最も高く昇る、つまり真南を通過するのを、南中と呼び、その時の地平線からの高さを南中高度と呼ぶ。夏至の南中高度である78度という値は、天頂が90度なので、感覚的には、ほとんど真上から地上を照らしていると感じさせるものである。反対に昼が一番短い、冬至の正午ごろの太陽の南中高度は32度と夏の半分ぐらいの低い空にあり、かなり斜めから地上を照らすことになる。さらに冬は太陽が低い所を通る分、出るのも遅く、日の入りも早くなり、昼の時間が短くなる。結果として地上が受けるエネルギーが少なく、寒くなるわけである。

ところで、地球には海や大気があるため温まったり、冷えたりするのに時間がかかり、一番の寒さや暑さは冬至や夏至の約一か月ほどあとになる。一日の中でも、正午よりも午後 2 時頃が最も暑くなるのも同じ原理である。

このように冬と夏で、太陽の高さが変わるのは、地球の自転軸が、公転する軌道平面に対して、傾いているからである。地球は地軸が公転面に対して立てた垂線に対して、23.4 度傾いたまま公転している。夏は北極が太陽の方を向き、冬は逆に南極が太陽の方を向いているわけである。ところで、南半球と北半球では冬と夏が逆になる。いずれにしろ、この自転軸の傾きがなかったら、季節変化が起きなかったわけである。

【コラム 11】 閏年、閏秒

地球が太陽の回る周期は 365 日ではなく、正確に言えば 365.2422 日である。たまたま、1 日以下の半端な数字を 4 倍すると、ほぼ 1 日になるため、4 年に 1 度閏年を作って、調節している。この調節がなければ、長年にわたって季節とカレンダーのずれが生じてしまうからである。だが、この方法でも 100 年ほど経過すると、やはり約 1 日程度ずれてくる。これを調節するために、400 年に 3 回ほど閏年を抜くことにしている。400 で割り切れる 1600 年や 2000 年は閏年とし、残りの 100 で割り切れる年は閏年にしないのである。(そのため、2000 年は閏年だったのは、非常に特別な措置であった)。

地球の自転運動もそれほど単純ではない。地球内部や大気・海洋の変動が微妙に影響して、自転速度はふらふらしている。全体としては自転は遅くなりつつあるが、その割合は一定ではないため、年によっては閏秒を入れたりして調節する。もし、この閏秒の挿入を怠っていると、10 万年後には昼と夜が逆転してしまうことになるからである。

4.2.5 月

天体の中で、太陽に次いで目につくのが月である。かつては惑星の一つと考えられていたが、実際には地球の周りを回る衛星である。半径は 1738 km と地球の直径の四分の一ほどもあり、惑星と衛星との比率ではダントツに大きな衛星といえる。地球からの平均距離は約 38 万 km だが、楕円軌道のため、一割ほど遠ざかったり近づいたりする。

月は他の惑星と同様に、自ら光を発していないので、太陽の光を受けた部分だけが輝いて見える。したがって、一か月の間に、地球と太陽との位置関係が刻々と変化していくので、満ち欠けをする。新月から三日月へ、そして半月となり、太陽と反対方向に来ると満月になる。その後、次第に欠けていき、再び半月となり、さらに細くなって新月になって見えなくなる。最初の半月を上弦の月、後半の半月を下弦の月と呼ぶ。かつて月を基準にした太陰太陽暦を採用していた頃には、月の最初の日目は必ず新月となり、15日目はいわゆる十五夜で、満月に近かった。そのため、月の上旬の半月、月の下旬の半月という意味で、上弦の月、下弦の月と呼んだのがもともとの由来であり、弦の上下とは全く無関係である。

月は地球の周りを約一か月で公転しているが、その周期は 27.32 日である。一方、新月から新月になるまで、あるいは満月から満月になるまでの満ち欠けの周期は、これより 2 日ほど長く、29.53 日となる。これは、約一か月の間に地球が太陽の回りを回る公転軌道上を 30 度ほど進んでしまうために、一周しても太陽との位置関係が元通りにはならないからである。

ところで、月は常に地球に同じ面（表側）を向けている。日本では餅つきノウサギに見える模様が常に見えているのだが、そのために月の裏側は地球から見ることにはできない。これは、月の自転周期が、その公転周期と完全に一致しているせいである。地球からの重力の影響によって、月は表側を向いたまま、地球に対してロックしてしまったといえる。これは起きあがり小坊師を考えるとわかりやすい。起きあがりこぼしのお尻は、頭に比べて相当に重くなっている。そのため、お尻が地球の重力に引かれるので、お尻を下にして（つまり地球に向けて）、立ち上がった状態が最も安定である。実は月の表側は、裏側に比べて、やや重い。そのため、起きあがり小坊師のように、月は、そのお尻を（つまり表側を）地球に向けて、安定した状態になった末に、そのままになってしまったのである。

月の表面の明暗模様をつくっているのは、海と高地というふたつの領域である。海と呼ばれる暗い部分は、表面が滑らかで天体の衝突によるクレーターが少ない、溶岩流によってできた平原である。それ以外の領域は、一般に高地（陸）あるいは山岳地帯と呼ばれ、クレーターが多い、つまり古い時代にできあがった地形で、衝突による破砕物に覆われた明るい領域である。



図 15 月の満ち欠けの図¹¹

月は惑星との比率では巨大な衛星であるため、地球への影響も大きいことは、現在でも海面の潮汐作用をみれば理解できる。潮の満ち干が起きるのは、主に月の影響である。地球は有限の大きさを持っているので、月に対して、月側の地点と月の反対側の地点とでは、その引力の大きさが微妙に異なる。地球の中心を基準にとれば、地球中心が月の引力を受ける差だけ、異なる力をそれぞれ受けることになる。月に近い場所では月に引かれる力がやや大きく、月と反対の裏側では、月に引かれる引力がやや小さくなる。そのため、どちらも地球の中心から見ると地球を引き延ばそうという力として現れ、海が持ち上がるのである。実際には、地球は自転しているので、純粋な力がかかってから、海の高さが最大になるまでには、ある

¹¹ 細矢治夫他『理科 2 分野下』教育出版、2006

程度の時間がかかる。この時間的遅れに海水の粘性や、その場所の海がどんな地形になっているかによって、干満の時刻は場所によって大きく違ってくるのである。なお、月が新月や満月の時には大潮とって満ち干が大きく、逆に半月の時には小さい。これは、太陽の影響である。新月や満月の時には太陽は、月と地球とともに直線に並ぶため、月と太陽の引力が重なりあうことで、潮汐も大きくなるのである。

4.2.6 日食と月食

月が織りなす天体現象として、日食と月食がときどき起きる。日食は、月が太陽と地球との間に入り込み、太陽を隠してしまう現象、逆に月食とは、地球が月と太陽の間に入り込み、地球の影の中に満月が入り込んで暗くなる現象である。

月の軌道は歪んでいるために、遠いときと近いときでは実に1割近い差がある。日食が、どんなふうに見えるかは、この時の月の距離が鍵になる。太陽をすっぽり覆うと皆既日食となり、太陽の周りがあるコロナが暗くなった空に荘厳な輝きを放つ。日食の時に月が遠いと、太陽面を覆うことができず、太陽の光球がリング状に見える金環日食となる。太陽の一部分をかすめるだけの場合は部分日食と呼ぶ。

一方、すっぽりと満月が地球の影（本影）に入り込む場合、月全体が暗くなるので皆既月食と呼ぶ。ただ、地球には大気があるので、その上層部分をかすめて、強く屈折した光が影の部分に入り込んでいる。大気を通過したせいで、青い光は吸収され、赤い光しか残らないので、皆既月食中の月は一般に赤銅色になる。大規模な火山爆発などがあると、上層大気のチリが増えて、赤い光も吸収されてしまい、真っ暗な月食となることもある。なお、影の一部をかすめる場合は、部分月食と呼ぶ。

4.2.7 変わりゆく太陽系の描像

これまで述べてきた太陽系の姿は、観測技術が進むにつれて、過去からどんどん変わってきたといえる。天動説が地動説へと変わり、また惑星の運動の法則が明らかになると同時に、その原理である万有引力の法則が発見され、天体の運動は計算できるようになった。

望遠鏡の発達と共に、太陽系の領域も広がっていった。18世紀にはウィ

リアム・ハーシェルによって土星の外側に新しい惑星・天王星が発見された。太陽から土星までの距離は約 15 億 km。天王星までの距離は約 30 億 km で、太陽系はほぼ 2 倍に広がった。

天体力学は全盛を迎えていた。天王星の過去の日撃記録なども発見され、その軌道は正確に決められたかに見えた。正確な軌道が決まれば、計算によって未来の位置も正確に予測できるはずであった。ところが、19 世紀になると、予報位置と実際の観測位置がどんどんずれて来るという現象が明らかになった。内側にある木星や土星の影響を考慮しても、このずれは説明できなかつた。

そうしてひとつの仮説が浮上してきた。天王星に大きな影響を及ぼすような未知の惑星が、まだ遠方にあるのではないか。天王星の軌道の外側に未知の惑星が存在していれば、このずれをうまく説明できるかもしれない。これに取り組んだイギリスのアダムスと、フランスのルベリエの二人は、天王星の外側に未知の惑星を仮定することで、天王星の運動を説明できることを見抜いた。そしてルベリエの依頼によって、ベルリン天文台のガレが、搜索最初の夜に、新しい惑星・海王星を発見したのである。星図の整備という偶然も重なってはいたが、基本的には天体力学の有効性をこれほど証明した事例はないだろう。海王星の太陽からの距離は約 45 億 km。この発見により、太陽系はさらに 1.5 倍に広がったのである。

さらなる発見は、写真、すなわちある種の化学物質が光によって変化することを用いて、光の量を化学物質の変化量として記録する手法によってなされた。何時間も露出をかけて、乾板上に蓄積することで、より微かな光、すなわちより遠くの天体を捉えることが可能となった。これによって 20 世紀には、第 9 惑星といわれた冥王星がアメリカ・ローウェル天文台でクライド・トンボーによって発見された。こうして、太陽系は写真という技術革新によって、冥王星までの 60 億 km にまで広がったのである。

ところが、20 世紀後半、さらに新たな技術革新があった。デジタル撮像技術、つまり半導体を用いて、電子に変えて蓄積する CCD 素子の発明である。これによって天文学はさらに大きく変貌し、写真時代には見えなかつた遠くの微かな天体が見え始めてきた。こうして 1992 年、ハワイ大学のジューイットらが、冥王星の外側を大回りする軌道を持つ最初の小惑星 1992QB1 を発見し、太陽系の外縁部は、小惑星にあふれていることが判明

してきた。太陽系外縁天体の発見である。その数はすでに千個を超えており、平均的な軌道としては太陽から 75 億 km にまで伸びている。冥王星を越える天体も発見され、冥王星は惑星から準惑星へと分類替えになった。

実は、これで終わりではない。外縁天体の中には、特別に 100 億 km を超えるような場所で発見され、その軌道が大きく外側にはみ出していて、周期が 1 万年に達する新種も発見されている。こういった天体が、どのようにしてできたのか、天文学者は頭を悩ませている最中だが、いずれにしろ、まだまだ太陽系の外側には我々の知らない天体が隠れているに違いない。そして、新しい技術革新が進めば、さらに未知の天体が発見され、太陽系が広がっていくことは間違いないだろう。

【コラム 12】冥王星

1930 年の発見当時から、冥王星は風変わりな惑星であった。軌道は大きく歪んでおり、内側の海王星の軌道にまで食い込んでおり、軌道面が 17 度と大きく傾いていることも異質だった。

また、発見当時、地球程度の大きさと思われていた。ところが、観測技術が進むにつれ、その推定直径はどんどん小さくなった。1978 年には衛星が発見され、その距離と、公転周期から求められた両者の質量の和は、地球の 400 分の 1 程度であった。さらに 80 年代には、冥王星と衛星の相互の食（隠し合う現象）によって、正確な大きさが推定された。その結果、冥王星の直径は 2300 km 足らずで、月よりも小さいことがわかったのである。ただ、小さいだけでは、惑星からはずそうという議論は起きなかった。

問題になったのは、太陽系外縁天体と呼ばれる小天体群が発見されてからである。よく調べると、冥王星とほとんど類似の軌道を描いているものが多数存在していた。つまり、冥王星は太陽系外縁天体の一員だったのである。さらにやっかいなことに、発見数が増えるにつれ、次第に大きな天体が見つかってきた。そして、2005 年には冥王星を超える「大物」が発見された。太陽系外縁天体は小惑星扱いだったので、「惑星よりも大きな小惑星」が誕生するという「おかしな」状況となった。この天体を第十惑星とすべきか、どうするかという問題が持ち上がったのである。国際天文学連合は、2006 年の総会で「惑星の定義」を採択した。これによって、太陽系の惑星は海王星までの 8 つとなり、冥王星は他のいくつかと共に惑星に

準じる新たなグループである準惑星に分類された。太陽系天体は、惑星、準惑星、それに彗星や小惑星を含む太陽系小天体という三種類に分類されることになったのである。

人類史上、初めて惑星の数は減ったが、これはむしろ太陽系の多様性がより明らかになり、準惑星という新しいカテゴリーを増やした結果である。

4.3 星と銀河

4.3.1 天文学の始まりと星座

都市の喧噪を離れ、自然に親しむ際、ふと夜空を見上げて満天の星に遭遇したとしたら、人は誰でもその星々の輝きに圧倒されることだろう。その思いは人類誕生以来受け継がれてきた。ここでは宇宙と私たちのつながりについて考えてみよう。もっとも古い学問は天文学、代数、幾何、音楽と言われているが、これらは実学であると同時に世の中の本質でもある。さらに遠い将来、仮に人類が異星人と遭遇したならば、この4つがコミュニケーション・ツールとなることであろう。

天文学はその発祥が、古代バビロニアであるとよく言われるが、いずれの文明発祥の地でも、それぞれ独自に天文学が芽生えていた。そもそも、人間の力を超えた存在を自然の中に見いだした古代の人間たちは、自然を畏怖する念がアニミズムと結びついていて、一方、権力者にとっては自然界を平民以上に理解することが指導者として必須であった。このため、暦や測量といった実学の発達と平行して、人々の宇宙への関心はそれぞれの土地・民族の神話との結びつきや占星術の発展を生むことになる。

昔から人々は天の神秘を解き明かそうとしてきた。古代の人々は星の世界を「星座」にまとめ、神話と結びつけた。現在使われている星座の幾つかの原型はすでに古代バビロニアに見られるが、エジプト、ギリシャと引き継がれ発展してきた。特にギリシャ人は多くの星座にギリシャ神話に登場する神々の名前をつけた。元もとは人々の生活圏毎に異なる星座をそれぞれの民族が用いていたのだが、現在ではギリシャの星座を整理し、その後、主に大航海時代に南半球で名付けられた星座を含め、1928年に国際天文学連合（IAU）で定めた全天で88の星座が国際的に活用されている。リテラ

シーとして、これらの星座の名称をすべて覚える必要はもちろんないが、夏のはくちょう座やさそり座、冬のオリオン座やおうし座など、四季折々の星座を覚えることや、おおぐま座やカシオペヤ座、南十字座など方位を知るのに役立つ星座を覚えて、それを手がかりに天球上の星々や主な星座を探しあてることは、市民一人一人の人生を豊かにする上で、また、スローライフや癒しという側面からも今後とも求められていくことだろう。

占星術は、天体の運行と人間社会の出来事を結びつけて占う技術で、古代バビロニア、ギリシャなどで発展した西洋占星術と、中国で発展した東洋占星術が有名で、今でも学術としての天文学とは無関係に民間ではもてはやされている。誕生星座に基づく黄道十二子宮による星占いは、毎朝の民放テレビ番組の中でその日の運勢として紹介され、大衆雑誌のほとんどにも毎週・毎月の運勢が載っている。信じることを止めなさいと一方的に言うつもりはないが、科学的な根拠は全くないことを理解した上でつき合ってほしいものだ。

一方、暦や測量といった実学としての天文学の発展も、すでに古代文明時代には現在用いられている技術の基礎が築かれている。バビロニア暦の始まりはB.C.4700年頃、エジプト暦はB.C.4200年頃からと言われており、不完全なものとは言え7000年近く前に暦を人類が使っていたというのは驚くべき事実である。古代エジプトではシリウスが夜明けとともに出現する頃、上流で雨期が始まりナイル川が氾濫することを民は知っていた。このように天体の観察は農耕にとってとても重要であった。エジプトの暦は太陽の運行を元に編み出された暦（太陽暦）だが、一方、古代中国では、殷の時代に月の満ち欠けを基準として、太陽の動きも加味した太陽太陰暦がすでに使われていた。日本人になじみの深い十干十二支もこのころからすでに使われている。周の時代になると、天帝が天文現象を通じて地上の統治者に思いを知らせるといふ信仰が生まれ、天文学者の先駆けとも言える天体を観測してその意味を解釈する専門家が生まれた。

天体の観測により時刻や季節を知ることが出来るほかに、方位を正確に知ったり、地球上で自分のいる緯度経度を求めたりすることができる。例えば、北極星（ポラリス）を見つけることで北の方位を知ることができるのみならず、北半球において北極星の高度を測定すればその値は観測者の緯度と等しい。このことは、遊牧民のように旅をする民族にとっては古く

から重要な科学技術であったが、ヨーロッパ人が大海原に飛び出した 15 世紀以降の大航海時代を迎えると天体の位置を測定する機器や時計が急速に発展する。一方、天体の位置に基づく測量も古くから行われていた。例えば、古代エジプトでは B.C.3000 年前のピラミッド時代にすでに、星の位置を測定してピラミッドの向きを決めていたことが分かっている。通常、ピラミッドの四辺は東西南北の 4 方位を正確に示しており、ピラミッドの傾きも測量の技術がないと対称形で建設することはできない。

4.3.2 星の誕生

私たちは太陽系の第 3 惑星地球に住んでいる。太陽系を含む一千億以上の恒星の集団「天の川銀河（銀河系）」の内部は、そのほとんどが真空に近い状態である。しかし、ところどころにガスが多く集まっている部分があり、そこは「星間雲」と呼ばれている。星間雲は、星のもととなる水素ガスのかたまりで、そのままでは密度が低く星にまで成長することはできない。ところが、例えば、星間雲の近くでの超新星爆発（詳しくは後述）のような星間雲内の密度を変化させる出来事があると、星間雲のなかでガスの濃い部分ができる場合がある。そこでは、ガス同士の重力（引力のこと）でお互いのガスが引っ張り合って、次第に収縮していくと考えられている。そして中心は大きな圧力のためにしだいに高温になり、収縮によって生じる熱で赤外線を放射する原始星が誕生する。太陽も今から 46 億年前、こうして原始太陽として輝きはじめたと考えられている。

冬の代表的星座オリオン座を眺めてみよう。2 等星が 3 つ並んだ「三つ星」を中心に 1 等星のベテルギウスとリゲルを対角線に配置した大きな四角形が鼓（つづみ）のような形を描いている。日本ではベテルギウスを平家星、リゲルを源氏星と呼んで対比してきた。三つ星の南に縦に並んだ小三つ星、その真ん中をもし望遠鏡で観察する機会があれば、そこには水素ガスで包まれた 4 つの星（トラペジウム）を見ることができる。これはオリオン大星雲（M42）と呼ばれるもっとも明るい散光星雲の一つで、写真に撮ると、ピンク色の水素ガスが広くまるで鳥が羽を広げたように広がっていることが分かる。この厚い水素ガスのなかでは、いままさに次々と星が誕生している。1999 年にハワイ島マウナケア山頂に完成したばかりのすばる望遠鏡の赤外線カメラには、数多くの赤外線星が写し出された。可視

光線では見ることの出来ない水素ガスの中に潜む「原始星」が赤外線星として輝いている姿を研究者たちは目の当たりにした。また、すばる望遠鏡は巨大な水素ガス雲（KL 天体と呼ばれていて内部に大質量星が存在している）も赤外線を激しく放出している様子を明らかにしている。

すべてのガスが原始星になってしまうかというところではない。もとのガスのかたまりは均一な密度分布をしていないので、集まったガス全体が回転していることが普通だ。このため、原始星に集まりきれなかったガスとチリは、どんどん原始星の赤道面に集まってくる。ガスとチリは全体としては平べったくなり、「原始惑星系円盤」と呼ばれる円盤を星のまわりに形作る。その後、星のうぶごえとして最初に大量のエネルギーを放出する原始星も次第に放出するエネルギーが安定していく。すると、原始惑星系円盤の温度が下がり、その中で惑星ができてくる。

天の川に沿って、このような恒星誕生の現場が数多く見つかっているが、特に夏の天の川中心方向には数多くの恒星誕生の現場、すなわち散光星雲が見つかる。また、冬の天の川でもオリオン座のほかおうし座などにもいくつか星形成の現場がある。

4.3.3 星の一生と輪廻

天体の謎を解き明かそうとするとき、天体から届く基本的な物理量はその明るさと色だ。例えば、星の明るさ（放出しているエネルギー）と表面の温度との間の関係を表した、ヘルツシュプルング・ラッセル図（HR 図）は、縦軸に絶対等級、横軸にスペクトル型をとったグラフのことで、HR 図を見ると恒星には3つのグループがあることが分かる。右下から左上に並んでいるもっとも数が多いグループを「主系列星」と呼ぶ。つぎに多いのが右上のグループで、これらの星は赤くて明るい星なので「赤色巨星」、左下のグループは「白色矮星」と呼ばれる。

もっとも数の多い主系列星は、明るい星は青白くて、暗い星は赤っぽいという特徴がある。これは、重い主系列星ほど表面温度が高いため青くなり、また、たくさんのエネルギーを放出するから明るく輝くと考えるとよい。逆に軽い主系列星は温度が低くて赤くなる。では、大多数の星でこの関係が成り立っているのに、なぜ、赤くて明るい赤色巨星が存在するのだろうか。温度が低いのにたくさんのエネルギーを放出するのは、主系列星に

比べてとても大きな星だと考えればよい。赤色巨星の代表、さそり座のアンタレスは太陽直径のおよそ 230 倍、オリオン座のベテルギウスは太陽のおよそ 500 倍もの直径がある。一方、白色矮星は青白いのに暗いので、逆に直径が小さくなくてはならない。白色矮星の一つおおいぬ座のシリウスの伴星は、太陽の 60 分の 1 の直径しかない。

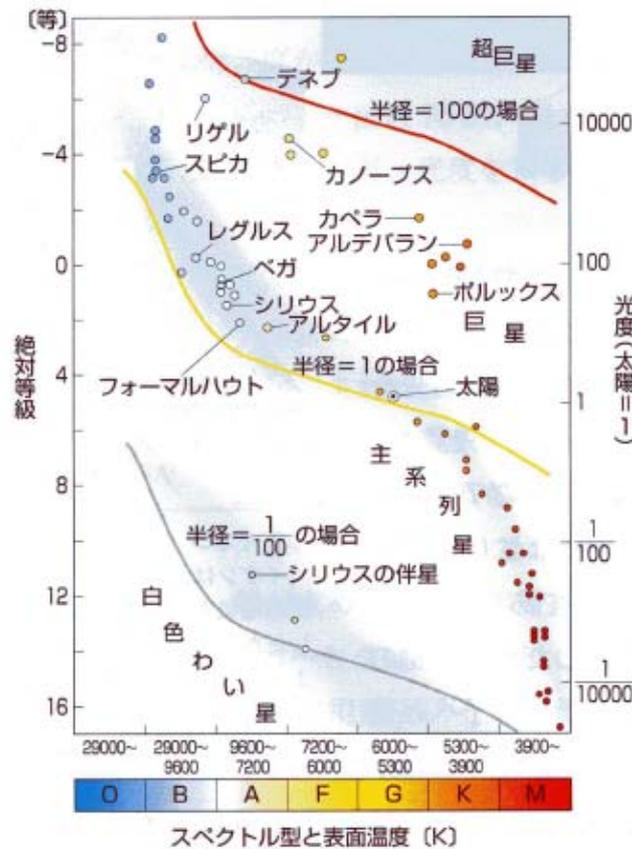


図 16 ヘルツシュプルング・ラッセル図¹²

恒星はその一生のほとんどを、中心部における水素の核融合反応で輝く状態、すなわち主系列星として安定した状態で過ごす。太陽も現在はこの状態にある。主系列星のなかの青白い星たちは、一度にたくさんのエネルギーを放出することができるのだから、燃料をたくさん持った質量の大きな星のはずだ。しかし、質量の大きな星は燃料の消費もさらに多いので、

¹² 島崎邦彦他『地学 I 地球と宇宙』東京書籍、2005

大質量星ほど短い時間で水素を燃えつくし、主系列星の時代を終了して赤色巨星になってしまう。このように星の場合は、生まれてきたときの質量によって、華々しく短命をまっとうするのか、細く長く生きるのかが決まっている。太陽の場合はおよそ 100 億年ほど主系列星として輝くことになる。

赤色超巨星はあまりにも直径が大きいので、太陽と同じぐらいの質量の星では外側の大気を自分自身の重力で保っておくことができない。星の外層部のガスは星の重力を離れてしだいに宇宙に広がっていく。ガスは中心天体に照らされて美しく光る。これが惑星状星雲（惑星とは何の関係もありませんが小型望遠鏡で見たときに形状からそう呼ばれる）で、中心部には炭素と酸素からできている高温の芯だけが残され、白色矮星となる。このとき太陽ぐらいの質量の星が地球ぐらいの大きさ（約百分の 1 の直径）にまでつぶれてしまい、角砂糖の大きさ（ 1 cm^3 ）の質量が車の質量（数百 kg）にも達する。核融合が停止した白色矮星は、しだいに冷えてやがて暗黒の星となってしまう。太陽の数倍以上の質量を持つ星の場合は、白色矮星にはならず、「超新星爆発」という華々しい最期をむかえる。そして、なかには「中性子星」や「ブラックホール」といった不思議な天体を残すものもある。

大質量の星は低質量の星より中心部が高温高密度の状態になっている。そのため、ヘリウムによる核融合反応によって生じた炭素、窒素、酸素までもが次々と核融合を始めることができる。このため恒星の中心では次々とより重たい元素が作られる。もっとも重たい星では、最終的に中心で鉄が作られる。このような大質量星の内部構造は「たまねぎ構造」と呼ばれ、中心に行くほど重い元素が豊富な構造をしている。鉄ができたあとの重たい星の中心では何も燃えない。それどころか、軽い元素への崩壊が起こるため星は突然収縮を始める。中心部が原子核密度ほどの超高密度になったところで収縮は止まり、一気に星全体を吹き飛ばすような大爆発が起こると考えられている。これが超新星爆発だ。鉄より重たい元素の多くは、この超新星爆発という、普通ではあり得ない特別な超高温高压状態のなかで作られ、同時に宇宙空間にまき散らされる。こうして、太陽の数倍から十数倍程度の質量の星は超新星爆発のあと中心に中性子の集まった星、中性子星を残し、さらに重たい星はブラックホールを形成すると考えられてい

る。ブラックホールとは、膨大な質量がごく小さな領域に押し込められてしまった特殊な天体で、あまりにも重力が強いため光さえもそこから抜け出すことが出来ない。このため直接見ることが出来ないので「ブラックホール」と呼ばれている。

4.3.4 元素の起源と私たち

宇宙にある物質の多くは原子から成り立っている。原子は電氣的に＋の性質を持つ陽子、電氣的には中性の中性子、－の性質を持つ電子という 3 種類の粒子から出来ている。陽子と中性子はその中心に集まって原子核を形成する。一方、陽子や中性子に比べると質量が 2 千分の一ほどしかない電子は、原子核の周りを取り囲むように存在している。原子は原子核の陽子の数によって、大きくその性質が変わるため、陽子の数によって違う名前がつけられている。これが元素である。元素を表のように並べて見やすくしたものを元素の周期表と呼ぶ。自然界には原子番号 1 番の水素（陽子が 1 個）から始まって 92 番のウラン（陽子が 92 個）までが存在する。それより大きな原子番号の物質は人工的につくられた元素であり、現在原子番号 113 番までが知られている。

宇宙の誕生直後には、水素とヘリウムという最も軽い元素が形成された。その後、宇宙では星が作られ、星の超新星爆発が起こり、少しずつ、水素・ヘリウム以外の元素（天文学のことばで「重元素」と呼ぶ）が宇宙に満ちていった。私たちの住む天の川銀河（銀河系）は、宇宙が誕生してからおよそ 20 億年程度後から形成が始まったと現在では考えられているが、銀河系の中でも、銀河系中心のふくらみ（バルジ）や球状星団にある星のほとんどは重元素をほんの少しだけ含む星だ。一方、太陽系をはじめ、銀河系の円盤部分（ディスク）にある星ぼしには、酸素や炭素などの元素が比較的多く含まれており、さらに少量だが金や銀などの重たい元素も存在している。このような重たい元素を含む星は銀河系が出来てからの第二世代、第三世代以降の星ぼしと考えられている。

その後、惑星状星雲や超新星爆発によって宇宙空間にまき散らされたガスやチリが集まって新たに星間雲が形成されて、やがてその中から次の世代の星々が誕生していく。こうして、宇宙を構成している一つ一つの銀河の中で、星は輪廻転生しさらに物質としての進化を続けることになる。

人間の体はさまざまな元素からできている。そのうちの水素は 137 億年前のビッグバンによってでき、体の主な成分である炭素や酸素や窒素などは、かつて銀河系の中で輝いていた恒星の内部で作られたものである。だから私たちは「星の子」とも言える。そして体にはほとんど含まれてはいないが、人類の文明社会には不可欠な銅や金、銀やウランなどの物質のほとんどは超新星爆発の瞬間に作られたと考えられている。

4.3.5 宇宙の構造

太陽系は銀河系（天の川銀河）の中に存在している。銀河系は直径 10 万光年の 1 千億個以上の恒星を含む集団で、宇宙は基本的にはこのような銀河から成り立っている。地球からの可視光観測では、星間物質の存在により銀河系の全体構造を知ることは不可能だ。可視光線で見えている範囲はほんのわずかで、星座を形作っている明るい恒星たちはおよそ 3000 光年程度の範囲、すなわちすべて太陽系の近くの恒星たちだ。

特に、星間物質の濃い銀河系の中心方向（いて座の方向）はその構造をほとんど知ることができない。銀河系の構造は星間物質の向こうを見通すことができる電波観測によって明らかにされてきた。水素原子が出す波長 21cm の電波によって、水素原子が宇宙でどのように分布しているかが調べられ、他の渦巻銀河に見られるような渦巻き状の構造をしていることが明らかになった。太陽系は銀河系の中心から 3 万光年離れた位置にあり、いくつかの渦巻きの腕のなかの 1 つオリオンアームの上にある。

銀河の多くは渦巻銀河か楕円銀河に大別される。渦巻銀河には渦巻き状の円盤部分（ディスク）が見られるのが特徴だが、楕円銀河にはこのような構造は見られない。銀河の形状によって、エドウィン・ハッブルは銀河の分類を行った。楕円銀河は楕円のつぶれ具合によって、渦巻銀河は渦巻きの巻きぐあいをもとに分類している。また、渦巻きのなかに中心を通る棒状構造が見られるものは棒渦巻銀河として渦巻銀河のように渦の巻きぐあいで分類した。さらに大小マゼラン雲のように形の不規則なものは不規則銀河と呼んでいる。

銀河は宇宙空間に均一に分布しているわけではない。私たちの銀河系のまわりには、大マゼラン雲、小マゼラン雲をはじめ、アンドロメダ銀河（M31）やさんかく座の銀河（M33）など 20 個ほどの大小さまざまな銀河

が約 250 万光年の範囲に集まって、局部銀河群を形成している。さらに大きな銀河の集団は銀河団と呼ばれる。例えば、おとめ座銀河団は数百～数千の銀河を含み、大きさは数百万～数千万光年もある。

銀河の分布を天文学者はいま詳しく調べようとしている。銀河が存在していない部分はボイド（空洞）と呼ばれているが、ボイドを取り囲むように銀河が集団で存在していることが明らかになってきた。私たちの銀河系から 3 億光年ほど離れたところには多数の銀河が壁のように連なったザ・グレート・ウォール（中国の万里の長城のこと）と呼ばれる構造も見つかっている。このような宇宙の大規模構造を作る原因は、正体不明のダークマターにあると考えられている。宇宙では、通常物質が 4%、目には見えない正体不明の物質（暗黒物質またはダークマターと呼ばれている）が 23%、さらに正体不明のエネルギー（研究者はとりあえずダークエネルギーと呼んでいる）が 73%もあることが分かってきた。ダークマターもダークエネルギーも何物なのか、いまだ説明は進んでいない。このように宇宙はまだ未知の世界なのだ。

4.3.6 宇宙の観測

宇宙を探る時、隕石等を除くと、一般に直接得られる情報はその天体からの光の情報（明るさ、色、運動等）のみである。少ない情報からその天体の特性を導くその作業は、根気と論理性が求められる作業だ。

天体からの光の情報は身近な可視光線のみではない。可視光線は電磁波の一部であり、現在の天文学では、電磁波すなわち電波、赤外線、可視光線、紫外線、X線、ガンマ線それぞれの波長に対応する専用望遠鏡を用いて地上や大気圏外で観測が行われている。また、重力波検出装置やスーパーカミオカンデのようなニュートリノ検出器など電磁波以外の情報を捉える天文学も始まっている。一方、理論天文学では、紙と鉛筆のみではなく、スーパーコンピュータを駆使することで、さまざまな宇宙の姿を可視化することに成功しつつある。観測と理論の両輪で天文学は進歩してきた。

本来、earth（アース）という言葉は大地を意味しており、丸いという意味を含有していない。ところが、日本語では「地球」であり、このためか、たとえ学校で教わらなくても、ほぼすべての児童・生徒が地球は丸いことを知っている。

一方、地球が自転していることや公転していることを証明することは簡単ではないが、多くの市民が地球の自転や公転をリテラシーとして身につけている。地球の自転はフーコー振り子や転向力によって説明され、公転は年周視差と年周光行差によって説明されてきた。1851年にフランスのパンテオン寺院で、物理学者フーコーは67mの振り子を使って地球の自転を証明した。振り子は一度振れ始めると、地球の自転と無関係にその方向で振れつづける。そのために北半球では振動面が上から見て時計回りに変化していく。地球がもし自転せずに止まっているのだとしたら、振動面は変わらないはずだ。この振動面が変わっていくことが、地球自身が回っている直接的な証拠である。

地球が太陽の周りを公転していることをおよそ400年前に唱えたガリレオ・ガリレイは宗教裁判にかけられ、自分の考えを取り下げざるをえなかった。ガリレオが正しかったとローマ法王（ヨハネス・パウロ II 世）が正式に認めたのは1992年のことだ。

宇宙を観察するとき、遠くを見ることは昔を見ることになる。今見えている太陽は8分19秒前の太陽であり、わし座のアルタイル（彦星）は地球から17光年離れているので、光のスピードで17年旅をしてきた光を今見ていることになる。つまり、17年前の姿だ。お隣の銀河、アンドロメダ銀河は250万年前の姿、現在知られている最遠の銀河の姿は129億年前の姿となる。このように、遠くを見ることは昔を見ることになり、私たちが観測できる宇宙の果ては、もっとも昔の宇宙の姿、すなわち宇宙の誕生の瞬間である。そして、それはおよそ137億光年先であると現在では考えられている。

4.4 宇宙論

4.4.1 太陽系が宇宙であった頃

(1) 「宇」と「宙」

漢字の語源から言えば、「宇」は空間を意味し、「宙」は時間を意味している。だから、宇宙論とは空間や時間の広がりや始まりについて考える「時空論」なのである。しかし、時間や空間は直接目で見ることができず、そこにある物質の構造や運動や変化を通じて時間や空間を認識している。空

間を部屋で区切って3次元であることがわかり、振り子の動きから時間に刻みを入れることになる。今では原子時計を使ったり、光の動きで時間を測っているが、それも原子や光の運動を利用して時間を決めていることになる。だから、物質とその変化を調べるのが宇宙論の基本とすることができる。

【コラム 13】時間とは何か

「時間について聞かれないうちはわかっているが、聞かれるとわからない」とはアウグスティヌスの言葉だが、時間を客観的に定義するのは困難である。通常、物理的な客観世界を記述するとき、時間はものの「変化」を通じて測っている。位置や形態の変化、色などの状態変化、場面や画像の変化、などである。完全な静止状態で何も変化しなかったら、時間の感覚がないだろう。そこに人間がいると、鼓動や脈拍、呼吸や血圧などの変化で時間が測れることになる。あるいは、人間には（動物にも）体内時間があって時の経過を知ることもできる。それも体内の状態変化を利用した時間と言えるだろう。他に、心理的な時間もある。叱られているときは長く感じられ、楽しいときは短く感じられる、そんな心の中で推移する時間のことだ。心理的な時間の流れる速さは人それぞれに異なるので、客観的な事象には使えない。ニュートンは客観的に存在し誰にも共通して流れる「絶対時間」が存在すると考えた。しかし、アインシュタインは物体の運動状態などによって個々の時間の流れる速さが異なる「相対時間」を主張した。通常では検出できないくらい小さいが、それぞれが進む速さが異なった時計を持っていることが実験で示され、相対時間が正しいと考えられている。

（2）神話時代の宇宙論

この世界（空間）はどこまで続いているのだろうか、あの山の向こうには何があるのだろうか、この世（時間）はどのようにして始まったのだろうか、いつまで続くのだろうか、古代の人々はそんな疑問を抱いてきた。現代の私たちと同じである。まだ科学を知らなかった原始時代の人々は、山に登って遠くを眺め、海や川を見てその広がり进行を想像し、火山や大水や日照りの夏を経験して激しく変化する自然を知って、宇宙や人間の始まりや移りゆ

きについて空想してきた。それを物語として語り伝えてきたのが「神話」である。

神話には3つの主題があると言われている。宇宙がどのようにして始まったの。(宇宙の起源)、人間の祖先はどこから生まれたの(人間の起源)、お祭りや装飾品などはいつどのように始まったの(文化の起源)である。それらは、何事にも「なぜ」と聞きたがる子どもたちの質問に対する大人の虎の巻であったかもしれない。やがて、まとめられたのが『創世記』や『古事記』などで世界に多く存在している。

興味深いことは、世界各地の神話の90%以上は「宇宙は過去のある時期に創成された」と伝えていることで、「宇宙は永遠に続いてきた」とする神話はむしろ少ないという点である。原始の人々は、宇宙を生と死がある生物と同じように想像していたのだ。

(3) 古代ギリシャの宇宙体系

メソポタミアやエジプト文明の時代、人々は夜空を眺めて星の動きを細かく観察していた。メソポタミアでは遊牧生活で夜に移動するために真っ暗闇でも方向や時刻を知るため、エジプトでは季節を知って畑に種を蒔く時を決めるなど農業の段取りをつけるために、規則的に変化する星空を目印にしたのである。実際、紀元前50年頃にはエジプトで1年を365.25日とする割と正確な暦が作られていた。(それをローマに輸入したのがジュリアス・シーザーでカエサル暦と呼ばれている。)

一方、科学の原型と呼ぶべきものが生まれたのは古代ギリシャで、紀元前500年頃からと考えられている。古代ギリシャでは、自然が示す変化や運動を「神に頼らないで説明する」という精神が育まれていた。奴隷を使っていたためギリシャ人には自由時間があり、思弁と議論を重んじたためと思われる。この宇宙がどのような仕組みとなっているかを考える宇宙体系論も重要なテーマであった。

といっても目で夜空を観察していただけなので、宇宙は太陽系に閉じていた。(これはコペルニクスの時代まで続いた。) 遠い天球に貼り付いた恒星、恒星と地球の間であってさまよい歩くように動く惑星(水星、火星、木星、土星)、そして太陽と月、それが宇宙を構成するすべてで、それらの運動を宇宙体系によってどのようにうまく説明するかが鍵であった。

おもしろいことに、古代ギリシャ時代では考えうるほとんどの宇宙体系

が提案されている。地球が中心にあって太陽・月・惑星が地球の周りを運動する天動説（地球中心説）、太陽が中心で地球をはじめとする惑星が太陽の周りを運動する地動説（太陽中心説）、惑星は太陽の周りを回りつつ太陽は地球の周りを運動する折衷説、宇宙の中心には「中心火」があって地球も太陽もその周りを回っている中心火説、などである。結局、直観的に太陽が動いているように見えることとともにプラトンやアリストテレスなど偉大な哲学者が支持したことから、多くの人々が天動説を信じるようになり、以後二千年近くも天動説が定説になった。

（４）天動説宇宙の難点

天動説は、太陽・月・5つの惑星が地球の周りを円運動するとの仮定の下で組み立てられている。円運動は調和があり、永遠を象徴すると考えられたためだ。（つまり、これによって古代ギリシャ時代には宇宙は永遠と見なされていたことがわかる。）しかし、惑星が天球上を動く速さが変化したり、時には逆向きに動くように見えたりする。また、春分から秋分までの時間の長さ、秋分から春分までの時間の長さが異なっていることも知られるようになった。このような運動の変化も説明できねばならない。

そこで、2世紀頃にトレミー（プトレマイオス）はさまざまな工夫をして天動説宇宙を完成させた。惑星は地球の周りを単純な円運動（導円）だけをしているのではなく、その円運動の上に小さな円運動（周転円）が重なっていると、さらに円運動（導円）の中心が地球から離れている（離心円）とまで考えて、惑星の運動が正しく再現するよう工夫したのだ。といっても、それらいくつかの円運動を惑星1個1個に付与しなければならぬから、実に複雑な体系になってしまった。

12世紀のダンテは戯曲『神曲』において、天動説宇宙に地下にある地獄と天上にある天国を加え、それぞれの惑星は天球に貼り付いていて、その天球を天使が駆動している、という秩序ある美しい宇宙体系を描き出している。ダンテが描いた宇宙体系のイメージは現代まで残っており、文学の力の偉大さを思わざるを得ない。

（５）地動説宇宙から万有引力の発見まで

天動説宇宙に最初に疑問を呈したのは16世紀のニコラウス・コペルニクスであった。彼は、小さな地球の周りを巨大な太陽が回っているのではなく、逆に大きな太陽が中心にあって地球をはじめとする惑星がその周り

を円運動しているとした場合を考えてみた。すると、水星や金星がいつも太陽の近くに見えることが自然に導かれ、他の惑星の運動も素直に再現できることがわかった。特に、火星や木星が逆向きに進むように見える現象が簡単に説明できそうであった。

といっても、その頃は宗教改革の時代でルターやカルヴィンによって「聖書に戻れ」と強く主張され、ローマ教会も聖書に記載された事柄を認めるよう強制するようになっていた。聖書には太陽が動くという記述があり、権力の座にあったローマ教会としても地動説を受け入れることを拒んだ。コペルニクスが地動説宇宙を主張した『天球の回転について』が出版されたのは、彼が死の床にあった 1543 年のことである。

しかし、地動説は徐々に浸透していった。地動説の立場に立てば惑星運動が極めて自然に説明できるためである。もっとも、惑星が円運動をしているとする限り、やはり複雑な円運動の組み合わせを考えねばならず、完全な理論でもなさそうであった。

その難点をうち破ったのがヨハネス・ケプラーで、恩師のティコ・ブラーエが長年かかって集積した惑星運動のデータを引き継いで地動説の立場で解析し、3 つの経験則（理由はわからないが、観測や実験によって得られた現象を整理する法則）を発見した。その第 1 法則が「惑星は太陽を焦点とする楕円軌道を描く」というもので、円運動から楕円運動に移ることによって惑星軌道が簡単に再現できたのである。第 2 法則は「惑星が描く軌道の面積速度は時間的に一定」とするもので、惑星運動の速さの変化や春分から秋分までの時間が秋分から春分までの時間より長いことが説明できた。さらに第 3 法則で「惑星運動の軌道半径の 3 乗が周期の 2 乗に比例する」ことを述べている。第 1 法則と第 2 法則は個々の惑星の楕円軌道の大きさや形と面積速度の大きさを指定しなければならないが、第 3 法則はすべての惑星に共通して成立している。そこには何か一貫した理由があるとしなければならない。

このケプラーの 3 法則から万有引力を発見したのがアイザック・ニュートンである。特に、第 3 法則から万有引力が距離の 2 乗に反比例することが導かれ、空間を越えて力が伝わるという当時としては奇妙な考え方に到達した。「奇妙」というのは、力はすべて接触によって伝わりと信じられていたためだ。ニュートンは魔術師のように見なされた。事実、晩年に錬

金術に凝ったようにニュートンには魔術師的な要素もあったようである。

実際に地動説を直接証明したわけではないけれど、地動説の立場から実のある議論を展開したのがガリレオ・ガリレイであった。ガリレオは、当時発明されたばかりの望遠鏡を使って木星の4大衛星を発見し（巨大な木星の周りを小さな衛星が回っている、ならば地球も巨大な太陽の周りを回っているのかもしれない）、金星が満ち欠けすることを見つけ（金星が太陽の周りを回っている重要な証拠である）、地球が動いていても何ら困ったことが起こらないこと（暴風が起こるはずだとか人間は地球に振り落とされるとい議論が出されていた）を証明し、地動説が確からしいと指摘したのである。

【コラム 14】 ティコ・ブラーエの宇宙体系

観測家として優れていたティコ・ブラーエは、天動説を疑いつつも地動説を信じることができなかつた。というのは、もし地球が動いているなら遠くの土星の見える方向が変化するはず（例えば、動く電車に乗って窓外の建物を見ると見える方向が変わっていくのと同じ）なのに、その動きが観測によって検出できなかったためである。彼は土星までの距離が近い、つまり宇宙は小さいと考えていたのだ。実際、宇宙は彼が考えていたよりずっと大きく、目で観測する限りでは土星の動きを検出することは不可能であった。しかし、自らの観測に自信を持っていたブラーエは地球が動いているとは信じられず、惑星は太陽の周りを回りつつ、それら全体は中心に静止している地球の周りを回っている、という天動説と地動説の折衷案を提案したのである。まさに、ティコ・ブラーエの説は天動説と地動説の替わり目の時代を象徴しているかのようである。

【コラム 15】 天動説・地動説という言葉

ここでは天動説・地動説という呼び方をしているが、これは日本独特の呼称で、西洋では地球中心説・太陽中心説と呼ばれている。江戸時代末期の志筑忠雄という人が西洋天文学の本を翻訳した際、地球中心説を天動説、太陽中心説を地動説と意識したのが現在まで使われてきたのである。一神教の西洋では神がいる場所が中心であり、中心がどこにあるかに重大

な関心が払われた。それに対し、日本では中心の場所よりも、どちらが動いているかの方に着目したことになる。むろん、座標変換すればどちらも対等だから優越がつけられるものではないが、西洋と東洋の視点の違いが伺われて興味深い。

4.4.2 銀河宇宙への道のり

(1) 望遠鏡の発達

ガリレオは、私たちの宇宙は太陽系のようなちっぽけなものではなく、さらに大きな星の世界にまで広がっていることを示した最初の人と言える。彼は望遠鏡を使って天の川の星を観測し、そこに太陽と同じ姿の恒星を無数に見出したからだ。彼の著書『星界からの報告』において、天の川が星の集団であることを書いている。人々が認識する宇宙が、太陽系から星の世界へと一気に拡大したのである。それはまた、技術の革命（望遠鏡の発明）が宇宙の探索には欠かせないものであることを示している。

17世紀から18世紀にかけては、望遠鏡が次々と改良されてきた歴史とも言えるだろう。ガリレオやケプラーが採用した屈折望遠鏡はレンズさえあれば手軽に製作できるのだが、欠点もあった。大きくて精巧なレンズの製作が困難であること、光の波長によって屈折率が異なるため色収差が出ること、などである。一方、それに代わって登場したのは、ニュートンなどが発明した反射望遠鏡である。反射望遠鏡は、レンズを使わない（放物面の鏡を使う）ことで口径を大きくでき、色収差が出ない長所が高く評価されるようになった。以後は、反射望遠鏡が天文学の主流になっていったのである。初めは金属鏡で非常に重く、すぐに曇ってしまう欠点があった。そこで鏡の表面に銀メッキを施し、薄型のガラス鏡とし、鏡を分割して製作してから組み合わせる、というような工夫が重ねられて現代に至っている。

(2) 島宇宙

哲学者のカントは天文学にも造詣が深く、太陽系がどのように生まれるかについての仮説を提案をしているほどである。宇宙論に関しては、星雲が島のように点々と宇宙空間に散らばっているとする「島宇宙」を提唱した。まだ星がどのような集団になっているかわかっていない時代（18世紀中葉）に、このようなアイデアを出すことができたのだから、哲学者の想

像力はすごいものだと感心せざるを得ない。

島宇宙というイメージを観測によって証明したのがウィリアム・ハーシェルである。彼は、天球面を碁盤の目のような座標に切り、各座標内に見える星の数を1つ1つ数えて天球面の星分布を明らかにした(1780年頃)。それも星の明るさごとに数えたのが特筆されることである。星がすべて同じ明るさで輝いているとすると、明るく見える星は近くにあり、暗い星は遠くにあることになる。つまり、彼は天球上に射影された星分布だけでなく、その奥行き(遠近)分布まで明らかにしようとしたのである。

星の明るさは皆同じではないことや星の光は途中の空間で吸収されて遠くまで見通せないことから、彼が作成した星分布の図は完全ではないが、重要な事実を示唆していた。星の集団の分布は有限の大きさに限られており、まさに島のように固まっているということである。天の川は宇宙空間に群れた星雲(星が雲のように固まって集団となっているという意味)であり、太陽系は天の川の一員であることを明らかにしたのだ。私たちは、現在、この星の集団を「銀河系」または「天の川銀河」と呼んでいるが、まさにカントの島宇宙のイメージが事実らしいことを観測によって具体的に示したのである。

(3) 銀河宇宙へ

では、夜空の写真を撮ると(写真術は1840年頃から天文観測に応用されるようになった)渦を巻いた星雲や丸い星雲や棒形の星雲など、さまざまな形の星雲が写っているのをどう考えれば良いのだろうか。それらが何であり、どのように分布しているかを知るためには、星雲1つ1つの距離を決定しなければならない。

ところが、宇宙の観測で最も困難であるのは天体までの距離を決定することである。一番簡単で精度が高いのは「年周視差」を測る方法で、星の見える位置が季節とともにどう変化するかを測定するものだ。しかし、この方法では、人工衛星が使える現在でも、せいぜい500光年くらいしかまでしか距離が決められない。これ以上遠くになると、星の位置変化が小さすぎて検出できないためである。後になってHR図を利用する方法が考案された。まず近傍の星のHR図を作り、その主系列星の絶対光度と表面温度との関係を求める。その関係がもっと遠くの星にも成立するとして表面温度から絶対光度を推定し、それと見かけの明るさを比較すれば距離が求

められることになる。この方法によって 2000 光年まで延ばせるようになった。しかし、それ以上の距離にある星では、その明るさや温度が途中にあるガスのために変化してしまうので誤差が大きくなり使えなくなってしまう。

20 世紀初頭になって開発された方法は変光星を利用するものである。H R 図を使って距離が決まった星には変光星があり、その変光周期と絶対光度の間に簡単な関係が成立することがわかったのだ。その関係を使うと、もっと遠方にある変光星の変光周期を測って絶対光度を求めることができる。それと見かけの明るさを比較すると距離が決定できるのである。この方法は非常に有力で、現在では宇宙望遠鏡を使って 6000 万光年まで星の距離を決定することができる。

変光星を使う方法によって、渦巻き星雲（例えば、お隣のアンドロメダ星雲（銀河））や楕円型をした星雲が私たちの銀河系の外にある独立した星雲であることが確かめられた。一方、誕生したての明るい星が周辺を煌々と照らし出している姿も同じく「星雲」と呼ばれていて紛らわしいので、銀河系の外にある巨大な星の集団を「銀河」と呼び、銀河系の内部で明るく輝く星の周辺を「星雲」と呼ぶことになった。

つまり、宇宙には銀河という星の集団が基本単位となって物質が集まっており、その銀河が点々と宇宙空間に散らばっているという「銀河宇宙」像が確立したのだ。1924 年のことである。

【コラム 16】宇宙の距離測定の新しい手法

変光星を使うことによって 5000 万光年くらいまで宇宙の距離測定が可能だが、宇宙論的な議論においては、その 100 倍も遠い銀河までの距離を測定することが必要になる。その格好の方法として、現代では超新星が利用されている。I a 型と呼ばれる超新星は、白色矮星にガスが降り積もって爆発するタイプで、爆発時の光度のピークやその後の光度の時間変化が一定になるという特徴が知られている。そこで、まず距離のわかっている近傍銀河で生じた I a 型超新星によって絶対光度のピークとその時間変化を測定しておく。そして、遠方の銀河で発見された I a 型超新星の見かけの明るさとその時間変化を比べると距離が決定できることになる。I a 型超新星は銀河一つ分に匹敵するほど明るく輝くので、遠く 50 億光年ま

での銀河の距離測定が可能になった。その他、銀河の回転速度と絶対光度の関係なども利用されているが、現代の宇宙論では、最も正確である I a 型超新星を用いて宇宙の大きさを推定している。

(4) 膨張する宇宙

では、宇宙に分布する銀河はどのような運動をしているのだろうか。銀河同士の間では万有引力が働くので、そのままでは互いに引き合っただけでは潰れてしまうことになる(収縮運動)。宇宙は縮んでいるのだろうか。太陽系のように回転していて遠心力で支えられているとも考えられる(回転運動)。では、宇宙は回っているのだろうか。しかし、宇宙全体が回っているとすれば、特別な方向(回転軸の方向)が存在することになり、宇宙がどの方向も同じではなくなってしまう。

そこで、遠くの銀河の視線方向の速度を測定する観測が行われた。光源が近づいているときは光の波長が短くなり(青い方にずれる)、遠ざかっているときは波長が長くなる(赤い方にずれる)というドップラー効果を利用するのだ。そのズレの量から速度も計算することができる。

1929年にエドウィン・ハッブルは、20数個の銀河について、変光星を使って距離を決定し、ドップラー効果から視線方向の速度を測定して、それらを縦軸と横軸にとってプロットした図を発表した。この図は、近傍にある数個の銀河を除いて、遠方の銀河は例外なく私たちから遠ざかっていること、そして遠ざかる速度は距離に比例していることを明白に示している。この結果の最も自然な解釈は、宇宙空間が膨張しており、空間上に位置している銀河は互いに遠ざかっている、というものである。こうして宇宙膨張が発見されたのだ。

実は、宇宙がどのように運動しているかを記述する方程式は、既に1916年にアルバート・アインシュタインが発表していた。アインシュタインは、宇宙は静止していて永遠に不変であると考えていたので、その方程式に手を加えて宇宙が止まっているように調節したということが知られている。その後、ロシアのフリードマンは元の方程式を素直に解いて、宇宙が膨張するか収縮するかの2つの解しかないことを発見していた。しかし、それらは単なるモデルに過ぎず現実には適用できないと思われていたのである。ところがハッブルが宇宙膨張を発見し、かつフリードマンが求めた解

に一致することがわかった。そこで一躍アインシュタインの方程式が見直され、以後はこの方程式を使って宇宙の運動を論じるようになったという経緯がある。

こうして、20世紀前半に、宇宙の物質は銀河に集中して点々と分布しており（銀河宇宙）、それらの銀河は宇宙膨張によって互いに遠ざかっている（膨張宇宙）という、現代宇宙論を支える重要な2つの事実が確立した。

【コラム 17】アインシュタインの永久不変の宇宙観

アインシュタインは、自らが提案した宇宙方程式からは宇宙が運動し続ける解しかないことに気づき、余分の項を付け加えて静止した宇宙を作り上げた。彼の審美感によれば宇宙は永久に不変でなければならなかったのだ。アインシュタインが付け加えた項は「宇宙項」と呼ばれ、万有引力とは逆の「反重力」、つまり宇宙斥力を意味していた。その斥力と万有引力が釣り合って静止した宇宙を創り出したのである。宇宙が膨張していることが1929年にハッブルによって発見され、アインシュタインは「生涯最大の失敗」として宇宙項を取り下げた。しかし、近年、宇宙が加速膨張していることが観測で示され、アインシュタインの宇宙項が復活することになった。その斥力効果が万有引力に勝って宇宙膨張を加速しているとする考えで、これを「ダークエネルギー」と呼ぶ。そのエネルギー密度は宇宙全体のエネルギーの72%を占めるとされている。現在のところ、ダークエネルギーの物理的起源については何もわかっていない。

4.4.3 現代宇宙論の基礎—ビッグバン宇宙

(1) ビッグバン宇宙の提唱

宇宙が膨張しているとして、その過去の姿を想像してみよう。宇宙のサイズはもっと小さかったから、銀河はもっと近くにあったはずである。さらにもっと昔を考えると、銀河は互いに重なりあっていただろう。もっとも過去に遡ると、もはや銀河という固まりはなく物質が一様に詰まった状態であったと考えざるを得ない。そして極端まで想像すると、すべての物質が一点にまで押し詰められた状態に行き着いてしまう。そう、宇宙は一点から始まったと考えざるを得ないのだ。そして、それは何も（時間や空間や物質）無い状態であったとしなければならない。もし何か（時間

や空間や物質)があれば、それがいつどこで生まれたのかという疑問が生じ、その起源を問題にしなければならないから、宇宙の始まりは一切のものが無かったことになる。

そこで、物質も時間も空間もない「無」の状態から宇宙の一点が突然膨張を開始し、そこから時間や空間や物質が生まれ出たとするのだ。何か禅問答のように見えるが、何も無い状態を想定しなければ本当の始まりが定義できないためである。では、どのようにして時間や空間や物質が生まれたのだろうか。実は、それに関して面白いアイデアは出されているのだが、まだ推測の域を出ていない。私たちは、まだその状態をちゃんと記述する科学の法則を知らないからだ。

宇宙の始まりについて詳しいことはわからなくても、いったん時間や空間や物質が誕生したと仮定すれば、どのようなことが宇宙で起こるかについて私たちは調べる手段を持っている。物質の状態が時間とともにどのように変化してゆくかについて、現在知っている物理学の法則を適用すればいいのである。

ビッグバン宇宙論は、1946年にジョージ・ガモフが中心となって提案した理論で、「宇宙は有限の過去に一点から急速に膨張を開始し、現在まで続く膨張過程で宇宙に存在するすべての物質構造が形成された」と主張している。そして、現にビッグバン理論の予言通りの証拠が見つかっていて、ほとんどの天文学者が正しいと認めている唯一の理論なのである。

もっとも、ガモフたちが最初に理論を提案した頃は支持者も少なく、宇宙は永遠に姿を変えないとする立場の意見の方が強かったらしい。実際、「ビッグバン」と名付けたのは、宇宙は永遠と考えていたフレッド・ホイルで、「こんな奇妙な理論を提案した奴がいる」と揶揄するつもりで「ビッグバン(大口を叩く)」と呼んだのである。しかし、まさに大爆発に似た状況で宇宙が始まったことを的確に表現しているので、この呼び名が残ってしまった。ホイルは心ならずもビッグバンの名付け親になってしまったというわけである。

(2) ビッグバン宇宙の証拠

ビッグバン理論では、宇宙は超高温・超高密度の状態から始まり、空間が膨張して冷えていく過程で、原初的に壊れていた物質から私たちが知っている原子核や原子や銀河や星が形成されてきたと考えている。実際に宇

宙がどのように進化してきたか、簡単にたどってみよう。

宇宙が生まれて 10 万分の 1 秒という極めて早い段階で、物質の根源であるクォークが生まれた。(実は、クォークも何かの基本物質でできていると考えられるが、現在の物理学ではまだ明らかにされていない。だから、それ以前の物質の状態はわからず、クォークの重さや反応性から、この時点で形成されたと推測しているのである。) そしてクォークから陽子や中性子という原子核を構成する基本粒子(核子)が生まれたのは 1000 分の 1 秒頃と推算されている。ようやく私たちが良く知っている物質が登場したのがこの時間である。

宇宙の時間が 1 分から 3 分の頃、温度にして 1-10 億度の時代に核子が反応して原子核を形成するようになる。ガモフは、この宇宙に存在するすべての元素はこの段階で生まれたと考えたのだが、計算間違いもあってヘリウムしかできないことがわかった。しかし、水素に続いて多い元素であるヘリウムが形成されたとする主張はビッグバン宇宙を証明する重要な証拠となったのだ。

太陽などほとんどの星は主系列星で、それらは中心で水素の核反応が起こってヘリウムを形成する過程で輝いている。ならばヘリウムは星内部で大量に作られそうに思うが、計算すると星からの供給はわずかでしかないことが示された。ところが、古い星も新しい星もみんな同じ量のヘリウムを持っていることが観測されている。とすると、ヘリウムは星が生まれる以前に大量に形成されたと考えざるを得ないのだ。それは宇宙全体がまだ熱く核反応が起こっていた 1 分から 3 分の時代に求めるしかない。こうして、ヘリウムがどの星にも多く存在することがビッグバン宇宙を証明する重要な証拠となったのである。

宇宙が膨張を続けるうちに、物質の温度や密度が下がってゆく。宇宙空間の体積が大きくなった分だけ物質が希釈され冷却されてきたと考えられるからだ。やがて、宇宙の温度が 3000 度以下になると、それまで水素やヘリウムは原子核と電子に分かれていた(これをプラズマ状態と言う)のが、それら(原子核と電子)が結合して水素原子やヘリウム原子に変わっていく。電荷を持っていた原子核(や電子)から電氣的に中性の原子になるのである。

実は、この段階で宇宙に大きな変化が起こると予想できる。一般に熱エ

エネルギーを持つ物質は、その温度に応じた「熱放射」と呼ばれる光（電波やX線も含めた電磁波）を放っている。私たち人間は体温が 36 度（絶対温度に直すと 309 度）だから、その温度に対応して赤外線領域で光を放っている。（人は皆輝いている！）従って、宇宙の物質が高温であった頃は強い光を放ち、光と物質（原子核や電子）は強く相互作用していたことになる。主として電子が光と散乱し合っていて、光は真っ直ぐに進めない状態であった。ところが、物質の温度が 3000 度以下になった時点で（宇宙の時間にすれば 38 万年頃）、物質は中性の原子に変わってしまった。その結果、光（この頃は可視光であった）は遮るものがなくなって自由に飛び交うことができるようになったのだ。大きな変化とは、光が直進して宇宙空間を自由に飛べるようになったことを指している。

ガモフたちは、この光が私たちに降り注いでいることを予言していた。この光を、すべての天体の向こう（より過去）から来るので「宇宙背景放射」と呼んでいる。実際に、この放射が確認されたのは 1965 年のことで、ビッグバンを直接証明する証拠が見つかったことになる。この放射は宇宙膨張とともに波長が長くなり、現在私たちに到達する時点では波長が 2mm にピークを持つ分布（マイクロ波）となっていることが観測から確かめられている。その分布を熱放射の公式に当てはめると絶対温度が 2.725 K になっており、おおざっぱに「3K放射」と呼ばれているのがこれである。

こうして、ビッグバンを証明する証拠が複数見付き（他にもまだ証拠はあるのだが、ここでは省略する）、ビッグバン宇宙論は揺るぎのないものと考えられるようになった。現在、ビッグバン宇宙の立場に立って、より初期の宇宙で何が起こったか、銀河はいかにして誕生したか、ビッグバン宇宙の正確な運動法則はどうなっているか、などが精力的に調べられている。

【コラム 18】宇宙背景放射の発見逸話

ペンジマスとウィルソンは、ベル研究所の科学者で、人工衛星を用いて大西洋越しの電話回線のテストを行っていたとき、偶然に宇宙背景放射を発見した。発信源が不明の電波が受信機に混入してくることを徹底的に突き詰め、最終的に宇宙からやってきていることを明らかにしたのだ。このとき、ビッグバン宇宙論を研究していたプリンストン大学がベル研究所の

近くにあったことが幸いした。彼らはプリンストン大学の研究者と議論して宇宙背景放射であると断定することができたからだ。実は、それ以前に、ロシアや日本の電波天文学者も宇宙背景放射を検出していた。しかし、彼らは宇宙論に詳しくなかったために、そのような電波が宇宙からやってきているとは考えず、ひたすら受信機の性能を上げることに熱中した。受信機が雑音を発していると考えたからだ。ペンジラスとウィルソンは、ベル研究所が持つ技術の高さに絶対的な自信を持っており、外部から混入した電波であると確信できたこともロシアや日本の研究者との大きな違いであった。この逸話は、観測研究において理論の習得と技術力がいかに重要であるかを物語っている。

4.4.4 ビッグバン宇宙の難問

さて、現代の宇宙論の概要を述べたが、皆さんは欲求不満かもしれない。宇宙に関して知りたい肝腎のことを語っていないからだ。以下では、それらをまとめておこう。といっても、まだ十分に解明されていないことばかりなので、こんなアイデアが出されているとしか言えないのが現状なのである。

(1) 宇宙は、どのようにして始まったのか

一番多く質問されるのが、宇宙の始まりに関する疑問である。途中でも少し触れたが、宇宙は「無」から始まったと考えられているが、さて「無」から「有」をどのようにして作るのだろうか。

ミクロな系を記述する量子論では、完全な「無」は存在しない。まったくの真空状態にしたとしても、電磁波や粒子がかすかに波打っており「ゼロ点振動」をしているためだ。不確定性関係から生じるもので、エネルギーは完全にゼロにはなり得ず、ある小さな値で揺らいでいる。つまり、真空もエネルギーを持っているのだ。

そこで真空は空っぽの空間ではなく、マイナスのエネルギーの粒子が詰まっており、その状態が変化することによって真空のエネルギーも変化すると考えてみればどうだろうか。ある海水面の高さを1つの真空のエネルギー原点だとしよう。そして、その海水面が大きく低下した状態が別の真空のエネルギー原点だとし、2つの異なった真空の間に遷移が起こると考えるのである。すると、2つのエネルギー差の分が外部に放出されるこ

とが期待されるだろう。これを「真空の相転移」と言い、物質（例えば水）と同じように真空も状態が変わると考えれば、そこからエネルギー（つまり物質）を取り出すことができることになる。「無」から物質を生じるのを真空の相転移に任せるのだ。

では、時間や空間はどのようにして誕生したのだろうか。それについてはまだ確かな理論はないと言わざるを得ない。というのは、時間や空間の誕生を考えるためには私たちが知っている物理学の2つの理論である量子論と重力理論（一般相対性理論）を融合させねばならず、それにまだ成功していないためである。時間や空間は重力によって決まるのだが、空間の大きさが超ミクロになり、時間が極小になると、量子論的な不確定性関係を考慮しなければならず、重力も量子論的に扱う必要がある。これを「量子重力理論」と呼んでいるが、いわば時間と空間が渾然一体となっていて、それぞれに分離して扱うことができないのだ。それが時間や空間がまだ確定していない「無」の状態で、そこから時間軸や空間軸が独立して宇宙が誕生したと思われるが、まだそのつながりを解くことができていないのが実情なのである。

（2）宇宙が始まる前はあったのか

私たちは、「以前」とか「以後」というふうに時間の前後を指定するが、それには共通した時間が流れていると暗黙のうちに仮定している。時間が途切れなく続いていると思いついでいるためである。しかし、宇宙が誕生して時間軸や空間軸が定まった状態と、宇宙が誕生する瞬間の時間や空間が区別のつかない状態の間には、共通した時間が無いこととなる。共通した時間が無いのだから、それ「以前」ということは言えない。それ「以前は無い」のである。だから宇宙が誕生する「前」を問題にできないことになるのだ。

（3）宇宙に果てはあるのか

私たちが観測できる領域は、光の速度で走って宇宙時間内に到達できる範囲に限られていて、これを「宇宙の地平線」と呼んでいる。信号が伝わる速度の上限は光の速さで、これまで経過した宇宙の時間を掛けた距離内しか情報が伝わらないためである。この宇宙の地平線が私たちの観測によって知り得る限界で、知り得る宇宙の果てになる。観測によって実証できる宇宙には限界があるのだ。

では、もっと大きな空間を仮想してみた場合、宇宙に果てはあるのだろうか。現在の観測によれば、宇宙は無限に大きく、果ては無いとする立場が良さそうである。「行けども、行けども、宇宙が広がっている」というわけだ。といっても、それを最終的な答と受け取る必要はない。宇宙の観測は時代とともに進化しており、現在の観測で直ちに結論を出すには及ばないというためである。新しい観測によって現在の結果が覆ることもあり得るのだから、とりあえず現在の観測結果は無限の方が良さそうとしか言えない。

さらに空想を広げて、広大な宇宙空間には多数の宇宙が存在していて、次々と宇宙が連なっていると考えている人もいる。次に述べるように、宇宙は無数に存在している可能性があるためだ。といっても、それぞれの宇宙の空間次元が異なり時間の歩みも違っていて、スムーズにつながっているわけではない。しかし、宇宙の果てには別の宇宙があり、その宇宙はまた別の宇宙と連なり、というふうに果てしもなく宇宙が連なっていると思っても構わないのである。もっとも、それは決して証明することはできず、想像する限りそのような可能性も否定できないだけのことなのだが。

(4) 宇宙はいくつも存在するのか

まだ最終的な答は得られてはいないが、宇宙の誕生は何か(神のような)特別な力や助けを必要とせず、普通の物理過程であったと思われる。ある条件さえ整えば、どこにでも起こる現象と考えて良いのである。とすると、宇宙はいくつあっても良い、言い換えれば宇宙は無数個存在することも考えて良いことになる。

ここでは述べないが、インフレーション宇宙というモデルがあり、それによればごく初期に宇宙は急膨張したと予想している。その発端は相変化を起こす真空のエネルギーのゆらぎにあり、そこからいくつもの宇宙が次々に生まれると考えるのだ。極端に言えば、私たちが住むこの空間のある点から別の子宇宙が生まれて膨張し、どんどん広がって新しい宇宙に成長してゆくことさえあり得るのである。そして、その中で真空のゆらぎがあればそこから孫宇宙が生まれ、さらにひ孫宇宙が生まれ、と無数に繰り返していくこともあるだろう。とすると、宇宙が次々と連なっているとして良いことになる。

しかし、再度言うておくが、これはあくまで理論的な予想で、決して実

証することはできないのも事実である。

(5) 宇宙の未来はどうなるのか

宇宙の未来については、理論的な可能性として、①いずれ膨張が止まって収縮に向かい、すべてが潰れてブラックホールになってしまうか、②永遠に膨張を続けてどんどん温度も密度も低い状態になってしまうか、のいずれかが予想されている。私たちが住むこの宇宙がいずれの運命になるかは、観測によって決めるしかない。

これまでの観測結果を総合すると、私たちの宇宙は後者②の運命をたどりそうである。つまり、宇宙は限りなく膨張を続け、宇宙はますます希薄になり（銀河がどんどん遠ざかって見えなくなってしまう）、温度が下がり続けていくのである。寂しい宇宙になってしまうのだ。もっとも、銀河系とアンドロメダ銀河などの近くの銀河の群れは重力で結合されているので、それらがぽつんと宇宙空間に漂っているようになると思われている。

また、1兆年も先になると、すべての星は寿命を終えて輝きがなくなり、星同士の間重力が作用して互いに結合して巨大なブラックホールを形成するようになるだろう。暗闇の中でブラックホールが運動するだけの銀河になってしまうのである。

なんだか暗く冷たい未来しか待っていないことになる。逆に言えば、まだ現在の宇宙が若いからこそ、宇宙を研究する人間を生み出すことができるのである。

【コラム 19】ハイテクの先端をいく宇宙物理学

宇宙の研究は、直接私たちの生活に関係せず、また金儲けにも縁がない。いわば「役に立たない」研究分野なのだが、実はハイテク開発において先導的な役割を果たしているという側面を忘れてはならない。宇宙研究においては、地上で使っている光や電波とは比較にならないくらい弱い信号を観測している。そのため、私たちが日常的に必要なカメラや受信機に使われる素子の何倍も優れたものを開発してきた。例えば、今流行の CCD カメラに使われている半導体素子は、まず天文学者が開発して天体観測で実績を上げ、その後にカメラやビデオに使われるようになったものである。また、電波通信は徐々に短波長側に移っているが、それらの受信素子も、まず天文学で開発されてから地上で応用されてきたという歴史があ

る。いずれも、天文学者の手作りの装置が出発点となって商業化の道歩んだのだ。極限的な技術を必要とする宇宙観測は、現代のハイテク現場の先導役となってきたのである。

宇宙・地球・環境科学専門部会名簿

西田 篤弘	元宇宙科学研究所／総合研究大学院大学	理事
唐牛 宏	国立天文台 光赤外研究部	教授
縣 秀彦	国立天文台天文情報センター	准教授
池内 了	総合研究大学院大学	教授
磯崎 哲夫	広島大学 大学院教育学研究科	准教授
糸魚川 淳二	名古屋大学	名誉教授
大村 善治	京都大学 生存圏研究所	教授
上出 洋介	京都大学 生存圏研究所	特任教授
岸 道郎	北海道大学 大学院水産科学研究院	教授
斉藤 靖二	神奈川県立生命の星・地球博物館	館長
鳥海 光弘	東京大学 大学院新領域創成科学研究科	教授
廣田 勇	京都大学	名誉教授
保坂 直紀	読売新聞東京本社科学部	次長
水谷 仁	株式会社ニュートンプレス	編集長
渡部 潤一	国立天文台 天文情報センター	准教授

「科学技術の智」プロジェクト 研究組織

平成 20 年 3 月現在

1. 評議会

有馬朗人（日本科学技術振興財団会長）[議長]、赤田英博（日本 P T A 全国協議会会長）、阿部博之（科学技術振興機構顧問）、石井紫郎（日本学術振興会学術システム研究センター副所長）、井上和子（神田外語大学名誉教授）、金澤一郎（日本学術会議会長・国際医療福祉大学大学院教授）、佐々木正峰（独立行政法人国立科学博物館館長）、鈴木晶子（京都大学大学院教育研究科教授）、遠山敦子（財団法人新国立劇場運営財団理事長）、中村日出夫（全国中学校理科教育研究会会長）、村上陽一郎（国際基督教大学大学院教授）、毛利 衛（日本科学未来館館長）

【以下、企画推進会議委員】

北原和夫（国際基督教大学教養学部理学研究科教授）、伊藤 卓（横浜国立大学名誉教授）、室伏きみ子（お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科教授）、長崎栄三（国立教育政策研究所教育課程研究センター総合研究官）、浪川幸彦（名古屋大学大学院多元数理科学研究科教授）、星 元紀（放送大学教授）、岩村 秀（日本大学大学院総合科学研究科教授）、笈 捷彦（早稲田大学理工学術院教授）、西田篤弘（元宇宙科学研究所／総合研究大学院大学理事）、長谷川寿一（東京大学大学院総合文化研究科教授）、丹羽富士雄（政策研究大学院大学政策研究科教授）、渡辺政隆（科学技術政策研究所上席研究官）

2. 企画推進会議

北原和夫（国際基督教大学教養学部理学研究科教授）[委員長]、伊藤 卓（横浜国立大学名誉教授）[副委員長]、室伏きみ子（お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科教授）[副委員長]、長崎栄三（国立教育政策研究所教育課程研究センター総合研究官）[事務局長]、名取一好（国立教育政策研究所教育課程研究センター基礎研究部総括研究官）[事

務局次長]、天野 徹 (科学技術振興機構審議役)、有本建男 (科学技術振興機構社会技術研究開発センター・センター長)、岩崎秀樹 (広島大学大学院教育学研究科教授)、岩村 秀 (日本大学大学院総合科学研究科教授)、小川正賢 (神戸大学大学院人間発達環境学研究科教授)、小川義和 (国立科学博物館展示・学習部学習課長)、荻野 博 (放送大学副学長)、奥林康司 (摂南大学経営情報学部教授)、笈 捷彦 (早稲田大学理工学術院教授)、川勝 博 (名城大学総合数理研究センター長)、熊野善介 (静岡大学教育学部教授)、小林 興 (帝京平成大学現代ライフ学部教授)、小林傳司 (大阪大学コミュニケーションデザインセンター 副センター長大学院教授)、佐々義子 (NPO 法人くらしとバイオプラザ 21 主任研究員)、重松敬一 (奈良教育大学副学長)、高安礼士 (千葉県総合教育センターカリキュラム開発部部長)、高柳雄一 (多摩六都科学館館長)、滝川洋二 (東京大学教養学部社会連携寄付研究部門客員教授)、永山國昭 (自然科学研究機構 岡崎統合バイオサイエンスセンター長)、浪川幸彦 (名古屋大学大学院多元数理科学研究科教授)、西田篤弘 (元宇宙科学研究所/総合研究大学院大学理事)、丹羽富士雄 (政策研究大学院大学政策研究科教授)、長谷川寿一 (東京大学大学院総合文化研究科教授)、馬場錬成 (東京理科大学専門職大学院教授)、古田ゆかり (フリーライター・サイエンス リテラシー プロデューサー)、星 元紀 (放送大学教授)、堀 裕和 (山梨大学大学院医学工学総合研究部教授)、本田孔士 (京都大学名誉教授)、美馬のゆり (公立ほこだて未来大学教授)、吉田 淨 (日本科学技術振興財団理事)、吉野輝雄 (国際基督教大学教養学部理学研究科教授)、渡辺政隆 (科学技術政策研究所上席研究官)

3. 専門部会

(1) 数理科学専門部会

浪川幸彦 (名古屋大学大学院多元数理科学研究科教授) [部会長]、森田康夫 (東北大学大学院理学研究科教授) [副部会長]、新井紀子 (国立情報学研究所情報社会相関研究系教授)、石井仁司 (早稲田大学教育・総合科学学術院教授)、上野健爾 (京都大学大学院理学研究科教授)、岡本和夫 (東京大学大学院数理科学研究科教授)、亀井哲治郎 (亀書房代表)、國宗 進 (静岡大学教育学部教授)、清水美憲 (筑波大学大学院人間総合科学研究科准教授)、根上生也 (横浜国立大学教育人間科学部教授)、藤木 明 (大阪大学大学院理学研究科教授)、真島秀行 (お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科教授)、三井斌友 (名古屋大学名誉教授)、吉村 功 (東京理科大学工学部教授)、米田英一 (元東芝システムインテグレーション開発部部長)

(2) 生命科学専門部会

星 元紀 (放送大学教授) [部会長]、浅野茂隆 (早稲田大学理工学術院特任教授) [副部会長]、入來篤史 (理化学研究所・脳科学総合研究センターグループディレクター)、唐木英明 (東京大学名誉教授)、小林 興 (帝京平成大学現代ライフ学部教授)、丹沢哲郎 (静岡大学教育学部教授)、千葉和義 (お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科教授)、本田孔士 (京都大学名誉教授)、松本忠夫 (放送大学教授)、室伏きみ子 (お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科教授)、毛利秀雄 (東京大学名誉教授)、渡辺政隆 (科学技術政策研究所上席研究官)。
[オブザーバー] 加藤和人 (京都大学大学院准教授)、長谷川真理子 (総合研究大学院大学教授)、和田正三 (基礎生物学研究所特任教授)、青野由利 (毎日新聞社論説委員 ※平成 20 年 2 月まで)。

(3) 物質科学専門部会

岩村 秀 (日本大学大学院総合科学研究科教授) [部会長]、藤原毅夫 (東京大学大学総合教育研究センター特任教授) [副部会長]、池本 勲 (東京都立大学名誉教授)、伊藤 卓 (横浜国立大学名誉教授)、小倉 康 (国立教育政策研究所教育課程研究センター基礎研究部総括研究官)、北原和夫 (国際基督教大学教養学部理学研究科教授)、小林啓二 (城西大学大学院理学研究科教授)、染宮昭義 ((財)化学技術戦略推進機構常務理事)、辻 篤子 (朝日新聞社論説委員)、中山 迅 (宮崎大学教育文化学部教授)、花村栄一 (千歳科学技術大学光科学部教授)、濱田嘉昭 (放送大学教授)、三浦 登 (東京大学名誉教授)、横山順一 (東京大学大学院理学系研究科教授)、吉野輝雄 (国際基督教大学教養学部理学研究科教授)、覧具博義 (東京農工大学大学院共生科学技術院教授)

(4) 情報学専門部会

笈 捷彦 (早稲田大学理工学術院教授) [部会長]、渡辺 治 (東京工業大学大学院情報理工学研究科教授) [副部会長]、芦田昌也 (和歌山大学経済学部准教授)、川合 慧 (放送大学教授)、竹内郁雄 (東京大学大学院情報理工学系研究科教授)、辰己丈夫 (東京農工大学総合情報メディアセンター准教授)、西崎真也 (東京工業大学大学院情報理工学研究科)

准教授)、萩谷昌己(東京大学大学院情報理工学系研究科教授)、原田悦子(法政大学社会学部教授)、藤田憲治(日経BP社編集長)、松井啓之(京都大学経営管理大学院/大学院経済学研究科准教授)、益子典文(岐阜大学総合情報メディアセンター教授)、吉見俊哉(東京大学大学院情報学環教授)

(5) 宇宙・地球・環境科学専門部会

西田篤弘(元宇宙科学研究所/総合研究大学院大学理事)[部会長]、唐牛 宏(国立天文台光赤外研究部教授)[副部会長]、縣 秀彦(国立天文台天文情報センター准教授)、池内 了(総合研究大学院大学教授)、磯崎哲夫(広島大学大学院教育学研究科准教授)、糸魚川淳二(名古屋大学名誉教授)、大村善治(京大大学生存圏研究所教授)、上出洋介(京大大学生存圏研究所特任教授)、岸 道郎(北海道大学大学院水産科学研究院教授)、斉藤靖二(神奈川県立生命の星・地球博物館館長)、鳥海光弘(東京大学大学院新領域創成科学研究科教授)、廣田 勇(京都大学名誉教授)、保坂直紀(読売新聞東京本社科学部次長)、水谷 仁(株式会社ニュートンプレス社編集長)、渡部潤一(国立天文台天文情報センター准教授)

(6) 人間科学・社会科学専門部会

長谷川寿一(東京大学大学院総合文化研究科教授)[部会長]、辻 敬一郎(名古屋大学名誉教授)[副部会長]、伊藤たかね(東京大学大学院総合文化研究科教授)、亀田達也(北海道大学大学院文学研究科教授)、木畑洋一(東京大学大学院総合文化研究科教授)、清水和巳(早稲田大学大学院経済学研究科准教授)、隅田 学(愛媛大学教育学部准教授)、利島 保(広島県立広島大学理事)、戸田山和久(名古屋大学大学院情報科学研究科教授)、二宮裕之(埼玉大学教育学部准教授)、長谷川眞理子(総合研究大学院大学教授)、早川信夫(日本放送協会解説委員)、廣野喜幸(東京大学大学院総合文化研究科准教授)、間田泰弘(広島国際学院大学工学部教授)、松沢哲郎(京都大学霊長類研究所教授)、松原 宏(東京大学大学院総合文化研究科教授)、松本三和夫(東京大学大学院人文社会系研究科教授)、山岸俊男(北海道大学大学院文学研究科教授)、山本眞鳥(法政大学経済学部教授)、渡辺政隆(科学技術政策研究所上席研究官)

(7) 技術専門部会

丹羽富士雄(政策研究大学院大学政策研究科教授)[部会長]、小林信一(筑波大学大学院ビジネス科学研究科教授)[副部会長]、伊藤順司((独)産業技術総合研究所理事/産業技術アーキテクト)、大河内信夫(千葉大学教育学部教授)、佐々木葉(早稲田大学理工学術院教授)、高安礼士(千葉県総合教育センターカリキュラム開発部部長)、田代英俊((財)日本科学技術振興財団/科学技術館企画広報室次長)、中村正和((株)日鉄技術情報センター特別研究員)、名取一好(国立教育政策研究所教育課程研究センター基礎研究部総括研究官)、谷島宣之(日経BP社編集委員)、山崎貞登(上越教育大学学校教育学部教授)、中川尚志(内閣府経済社会総合研究所研究官 ※平成19年3月まで)。「オブザーバー」元村有希子(毎日新聞社科学環境部記者)、

4. 広報部会

渡辺政隆(科学技術政策研究所上席研究官)[部会長]、小川義和(国立科学博物館展示・学習部学習課長)[副部会長]、縣 秀彦(国立天文台天文情報センター准教授)、亀井 修(国立科学博物館展示・学習部学習課ボランティア活動・人材育成推進室長)、木村政司(日本大学芸術学部教授)、野原佳代子(東京工業大学留学生センター准教授)、服田昌之(お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科准教授)、横山広美(東京大学理学系研究科准教授)

5. 事務局

長崎栄三(国立教育政策研究所教育課程研究センター総合研究官)[事務局長]、名取一好(国立教育政策研究所教育課程研究センター基礎研究部総括研究官)[事務局次長]

【国立教育政策研究所】

小倉 康(国立教育政策研究所教育課程研究センター基礎研究部総括研究官)、鈴木康志(文部科学省初等中等教育局教科書調査官)、相馬一彦(北海道教育大学教育学部旭川校教授)、人見久城(宇都宮大学教育学部准教授)、阿部好貴(国立教育政策研究所研究協力者)、斉藤萌木(国立教育政策研究所研究協力者)、熊岡昌子(国立教育政策研究所研究補佐員)、国立教育政策研究所総務部

【日本学術会議】

信濃正範(日本学術会議事務局参事官)、廣田英樹(日本学術会議事務局参事官)、成瀬由紀(日本学術会議事務局参事官補佐)、佐野和子(日本学術会議事務局審議専門職)、関 浩

子（日本学術会議事務局審議専門職）、生形直樹（日本学術会議事務局審議専門職付）、阿部左織（日本学術会議事務局審議専門職）

【国際基督教大学】

アンドリュー・ドモンドン（国際基督教大学非常勤講師）、原口るみ（国際基督教大学準
研究員）、曾根朋子（国際基督教大学物理学教室）

この報告書の利用について

この「報告書」を編集した「科学技術の智プロジェクト」では、「報告書」に書かれていることが、一人でも多くのひとたちにとっての共通の考え方、共通の知恵になっていくことを希望しています。そのために、「報告書」の著作権に関しては、次のとおり取り扱うこととしています。

記

1. 営利を目的としない利用の場合

- ・誰でも、「科学技術の智プロジェクト」のウェブサイトから「報告書」（の一部または全部）をダウンロードして記録媒体に保存し、またはプリントアウトして利用することができます。
- ・誰でも、「報告書」の（一部または全部の）コピー、送信、貸出し、無料配布、もしくは実費での有料配布などの方法による利用ができます。
- ・誰でも、「報告書」（の一部または全部）を変更、改変、加工、切除、部分利用、要約、翻訳、変形、脚色、もしくは翻案などを施して利用することができます。
- ・上記三つの利用をするに際して、「報告書」の著作権管理者の承諾を得る必要はありませんが、出所または出典として「科学技術の智プロジェクト報告書」と記載してください。
- ・上記の利用方法には例外があります。「報告書」には、第三者の著作物を「引用」として使用しています。引用部分については該当箇所に表示があります。「報告書」としての利用ではなく、この引用部分のみの利用については、上記の利用方法の例外であり著作権法が定める著作権の制限規定にしたがうこととなりますのでご注意ください。

2. 営利を目的とする利用の場合

- ・「報告書」の著作権の管理は、「科学技術の智プロジェクト」の代表研究者である北原和夫が行っています。営利を目的として「報告書」を利用される場合には、北原和夫（国際基督教大学教養学部）にまでお問い合わせください。
- ・「引用」その他著作権法が定める著作権の制限規定にしたがって「報告書」を利用されるときには、もとより自由です。

以上

2008年6月

科学技術の智プロジェクト

