

1 科学的とは

科学とは何か。科学とは単に科学的知識の総体ではなく、科学的知識を体系付けたものである。イギリスの哲学者ラッセルは、「科学は多くの事実を統合して普遍的な法則を追及する知識である」と述べている。

科学的思考とはどういう特徴をもつであろうか。科学的思考は、適切な根拠（実験や観察、調査など）を基に、既知の理論の適用や適切な推論により、明確な結論を得たり、一般的な法則を導いたりすることである。

科学的推論の方法には、演繹法と帰納法がある。演繹法とは、一般的原理から論理的推論により結論として個々の事象を導く方法である¹。帰納法とは、個々の事象から因果関係を推論し、結論として一般的原理を導く方法である²。

科学的結論の特徴として、定量化されている、また、再現性がある（同じ方法で実験すれば、誰がやっても同じ結果が得られる）、などが挙げられる。定量化されているとは、数値で表されていることであり、時には統計的有意性などにより、結論それ自身の適用限界が明らかになっていることもある。

また、何が科学的であるかということも、時代とともに変化してきた。たとえば英語の *astrology* は占星術、*astronomy* は天文学と訳すが、この2つの単語は非常に似ている。これは、*astrology* と *astronomy* とが密接に関係しており、ある時代までは *astrology* も科学と見なされてきた歴史の反映でもある。

問 1.1 演繹法と帰納法の例を挙げよ。

問 1.2 科学の分野で、再現可能性がないと考えられている（にも関わらず例外的に科学と分類されている）分野の例を挙げよ。

問 1.3 かつては科学と見なされてきたが、現代では科学とはみなされていないものの例を挙げよ。

¹近世哲学の創始者デカルトは、知識の体系の構築に際し、数学的手段と演繹法の重要性を主張した。

²フランシス・ベーコンは著書の中で、知識の体系はデータの積み重ねによる帰納によって作られるとした。

2 科学の歴史

科学とは何かをつかむにあたって、科学の歴史を学ぶことは有用である。そこでいくつかの観点から、科学の歴史を概観する。

2.1 宇宙観の歴史

どの文明発祥地にも、天地創造神話があった。世界を神話ではなく論理によって理解していこうとする営みは、今日残っている文献の限りでは、紀元前 6 世紀頃のギリシャ自然哲学から始まったと言える。自然哲学の創始者は、タレスである（後述する）。この時期の哲学と科学はほぼ同一のものと考えられる。

紀元前 6 世紀から紀元前 5 世紀にかけて活躍したピュタゴラスは、天体の運動は円運動であると考えた。これは、円が最も完全な図形であるという考えに基づいている。紀元前 4 世紀、古代ギリシャ最大の科学者・アリストテレスが登場する頃には地球が球形であることが分かっていた。また、太陽や月などの天体や、宇宙も球形であると考えられるようになった。アリストテレスの宇宙系は、地球が宇宙の中心に位置し、内側から月、太陽、金星、水星、火星、木星、土星の天球があり、一番外側に恒星天があるというものであった。各天体は宇宙空間を移動しているのではなく、各天球に貼りついて、各天球ごとに等速で回転をしていると考えられた。

アリストテレス以後、バビロニアから入った知識を基に、天球の順序に入れ替えがなされた。紀元 2 世紀にプトレマイオスは、惑星の逆行現象など単純な円運動では天体の運動を説明できないので、離心円と周転円の仮説に基づく宇宙の体系をまとめあげた。この体系は、実測値をよく説明したが、そのためには約 80 もの周転円を必要とする複雑な理論であった。

コペルニクスはプトレマイオスの宇宙系において、太陽と地球の位置を入れ替え、太陽を宇宙の中心においてみると、天体の運動がより単純な理論で説明できることに気付いた。天動説から地動説に代表される、ものの考え方を大きく変えることを、のちの哲学者カントは、コペルニクスの転回と呼んだ。

16 世紀末、ティコ・ブラーエは惑星の運動の精密な観測データを蓄積した。ブラーエの助手のケプラーは、ブラーエの死後、遺されたデータを分析し、惑星の運動規則を、いわゆるケプラーの 3 法則という形にまとめた³。その第 1 法則は、「惑星は太陽を一方の焦点とする楕円軌道を描く」というもので、天体の運動は円運動であるという古代以来の宇宙観に打撃を与えた。

ガリレオ・ガリレイは望遠鏡を自作し、月面の凹凸、太陽の黒点、木星の衛星イオなどを発見した。月面の凹凸や太陽の黒点の発見は、天体が球体であり天上界が清浄無垢であるとする従来の考えを否定

³1609 年刊「新天文学」

し、イオの発見は、地球以外に天上界の運動の中心が存在することを示すもので、これらの発見により地動説が確立されたと言える。

古代ギリシャ以来、天上界の運動は地上の運動とは全く別の原理で説明されてきたが、ガリレイにより、天上界が決して完全無垢なものではないことが示された。アイザック・ニュートンは、運動の三法則と万有引力の法則を発見し、天体の運動と地上の運動を統一的な法則で説明したのがである。この研究は、「プリンキピア (自然哲学の数学的原理)」(1687 年) にまとめられた。この著書の中で、流率法を導入して自然界の運動を記述した。流率法は現在の微分法にあたるもので、ニュートンはライプニッツと独立に微分積分学の創始者として称えられている。

ハーシェルは、自作した反射望遠鏡で 1781 年、天王星を発見した。これにより、地球以外の惑星は 5 種とされた古代ギリシャ以来の固定観念を打ち破った。天王星の軌道は、既知の惑星による摂動を考慮しても万有引力の法則による計算結果からずれていた。アダムスとル・ヴェリエは独立に、天王星の外側に未知の惑星があると仮定し、その軌道と位置を推定した。その推定に基づき 1846 年、ガレは新惑星である海王星を発見した。これはニュートンの重力理論の勝利と呼ばれる。

海王星の軌道もさらにその外を回る未知の惑星により乱されているのではと考えられるようになり、ローウェルによってその存在が予言された新惑星を 1930 年、トンボーが発見し、冥王星と名付けられた。しかし実際に発見された冥王星は摂動の原因とするには小さすぎることが分かり、現在ではトンボーの発見は奇跡的な偶然であると言われている⁴。

アルベルト・アインシュタインは 1905 年、「光速度不変の原理」に基づく新たな理論体系「特殊相対性理論」を発表した。この理論により、これまで別個のものと考えられた時間と空間を一体の 4 次元時空として考えなければならないことが示され、動いている時計の遅れ、運動物体のローレンツ収縮などの不思議な現象が予言された。アインシュタインは 1916 年、特殊相対性理論を加速度運動する系を含むすべての系に拡張した「一般相対性理論」を発表した。この理論により、重力とそのまわりの時空間の歪みを結びつける「アインシュタイン方程式」が導かれ、アインシュタイン方程式を解くことにより、ブラックホールの存在が予言されるなどした。

1927 年、ジョルジュ・ルメートルは、宇宙は原始的原子の爆発から始まったとするモデルを提唱し、後にビッグバン理論と呼ばれるようになる。1929 年、エドウィン・ハッブルはすべての銀河が地球からの地球からの距離に比例した速度で遠ざかっていることを発見した (ハッブルの法則)。この事実は、宇宙が膨張していることを示唆している。時間を巻き戻せば、宇宙の始まりは超高温高密度状態の 1 点であったと考えても矛盾はない。現在では、ビッグバンは約 137 億年前の出来事と考えられている。

⁴2006 年 8 月、太陽系の惑星の定義の変更により、冥王星は惑星の地位を失った。(他の惑星に比べ小さ過ぎてその軌道の近くに他の天体を排除できないという理由による)

2.2 物質観の歴史

物質は何からできているか。自然哲学の創始者タレスは水だと言った。アナクシメナスは空気が物質の源であるとした。ヘラクレイトスは原質は火であり、水、土を経てまた火に戻るとした⁵。紀元前 5 世紀のエンペドクレスは、万物は水、火、土、空気の 4 つからなるとする、4 元素説を提唱した。プラトンは、水には冷と湿、火には熱と乾、土には冷と乾、空気には熱と湿のそれぞれ 2 つずつの性質を割り振った。さらにヘラクレイトスの考えを取り入れ、4 元素間の相互変換が可能と考えた。

紀元前 5 世紀から紀元前 4 世紀にかけて、レウキッポスやデモクリトスにより、原子論が提唱された。物質は、それ以上分割されない粒子である原子からなるとする説である。原子は、原子のまわりの何も無い空間、つまり真空を動く。アリストテレスは「自然は真空を嫌う」と言って、原子論に強く反対した。

中世のアラビアで錬金術が研究された。錬金術とは、鉛などの卑金属を金・銀などの貴金属に変える技術である。錬金術は水、火、土、空気の 4 元素が条件が整えば互いに移りあうとするプラトンの 4 元素仮説を根拠としていた。錬金術はその当初の目的は達成できなかったが、この研究により物質に関する知識が蓄積され、近代化学の礎が築かれた。

ガリレイの弟子のトリチェリは 1643 年、いわゆるトリチェリの真空⁶を発見し、アリストテレス以来の「自然は真空を嫌う」という観念を否定した。ボイルは、すべての物質は微小な粒子からなるとする粒子説を主張し、空気の一部だけが燃焼や生命の維持に用いられることを実験により示した。この空気の一部こそ酸素であり、空気が酸素と窒素の混合物であることを示したのがラヴォアジエである。ラヴォアジエは、それ以上には分解できない物質の構成単位である元素を 33 種⁷見出し、4 元素仮説を否定した。また、化学反応の前後で物質の質量は不変であるという、質量保存の法則を発見した。

プールのストは 1799 年、化合物の組成は一定であるという定比例の法則を発見した。ドルトンはこの法則を説明するため、1803 年、元素はそれぞれに特有の原子からなるとする「原子仮説」を提唱した。ゲー・リュサックは 1808 年、気体反応の前後で気体の体積比は簡単な整数比にあることを発見した。この法則を説明するため、アヴォガドロは 1811 年、物質は同種または異種の原子が結合した分子よりなるという、分子仮説を提唱した。

1869 年、メンデレーエフは元素を原子量の小さい順に並べていくと、化学的性質の似た元素が原則として 8 つごとに現れるという、元素の周期律を発見した。また、周期表中の空白の元素の化学的性質を预言するなどして、未発見の元素の探求へと化学者を駆り立てた。元素の周期律は、原子の構造の規則性を示唆することとなった。

1895 年、レントゲンが X 線を発見した。物質を透過する X 線に関心が集まり、その研究から偶然に

⁵ プラトンによる引用「万物は流転する」が有名である。

⁶ 満たしたガラス管を水銀浴の中に倒立すると、その上部が真空となる。

⁷ この 33 種のなかには光と熱素が含まれていた。

ベクレルは、1896年にウランの放射能を発見した。その後1898年、キュリー夫妻はポロニウムとラジウムの放射能を発見した。1899年、ラザフォードは放射線には α 、 β 、 γ の3種があり、それらの正体についても明らかにした。

1897年、陰極線の研究により、トムソンは負電荷を帯びた微小粒子である電子を発見した。ガイガーとマースデンにより1909年に観測された、いわゆるラザフォード散乱現象を説明するため、1911年、ラザフォードは原子の中心に 10^{-13}cm 程度の正電荷を帯びた原子核が存在することを示した⁸。

プランクは1900年、物質のみならずエネルギーさえも連続する値を取ることができず、ある微小な単位の整数倍しか取れないとするエネルギー量子仮説を提唱した。特殊相対性理論発表と同じ1905年、アインシュタインは電磁波の一種である光が粒子性をもつとする光量子仮説を提出した。これらの量子仮説は、1925年から26年にかけて、ハイゼンベルクによる行列力学とシュレディンガーによる波動力学の形に発展した。その後、行列力学と波動力学は等価であることが分かり、量子力学として統一された。量子力学によると、電子の位置と運動量は同時に確定できず（不確定性原理）、また、電子は粒子性と波動性の二面性をもつ（相補性原理）ことが示された。

1932年までの研究で、原子は原子核とその回りの電子からなり、原子核は正電荷を帯びる陽子と電氣的に中性な中性子からなっていることが分かった。原子核は陽子同士の電氣的な斥力にもかかわらず、ばらばらにならずに非常に狭い範囲で閉じ込められている。湯川秀樹は1935年、中間子という未知の素粒子を想定し、中間子を介して陽子・中性子たちの間に核力が働くとする中間子論を発表した⁹。パウエルが1947年、宇宙線の中から π 、 μ 2種の中間子を発見し、湯川は1949年、日本人初のノーベル物理学賞に輝く¹⁰。

その後、多数の素粒子が発見され、素粒子は物質の真の構成単位ではないのではないかと考えられるようになった。現在では、陽子と中性子は、2種のクォーク3個の異なる束縛状態であることが分かっている¹¹。また、物質の基本構造としての素粒子は、クォーク6種¹²、レプトン6種¹³、および力を媒介するゲージボソン4種から成る¹⁴。

⁸長岡半太郎は1903-4年、原子構造を土星とその周囲の環になぞらえた、原子構造の長岡模型を提出したが、ラザフォードらに知られることはなかった。

⁹実は湯川は中間子論の第一論文で巧みに計算ミスを犯し、原子核間に働く力を引力と結論付けた。ヨーロッパでもステュツケルベルクが湯川と同じことを考えたが、パウリにより核力が斥力になると指摘され、論文を発表できなかった。

¹⁰中間子を発見したパウエルは翌1950年、ノーベル物理学賞を受賞した。

¹¹ここで言う2種のクォークとはu(アップクォーク)とd(ダウンクォーク)である。電子の電荷を $-e$ として、uは $\frac{2}{3}e$ 、dは $-\frac{1}{3}e$ の電荷をもつ。陽子はuudの、中性子はuddの束縛状態である。

¹²クォークがまだ3種類しか見つかっていなかった1973年、小林誠と益川敏英は、もしクォークが3世代(6種類)以上存在するならば、「CP対称性の破れ」と呼ばれる現象を理論的に説明できることを示した。この功績により、2008年、小林、益川両名にノーベル物理学賞が贈られた。

¹³電子はレプトンの1種である。

¹⁴光の本体は、電磁力を媒介するゲージボソンの光子である。

2.3 生命観の歴史

生命観の歴史は、医学の歴史と深い関係にある。紀元前 5 世紀から紀元前 4 世紀のギリシャの医学者・ヒポクラテスは医学の父と言われている。古より病気は神の意志やたたりなどによるものとされたが、ヒポクラテスは病気の原因を自然的なものに求めた。人体には黒胆汁、血液、黄胆汁、粘液の 4 種類の液体があり、そのバランスが崩れると病気になるとする、4 体液仮説を提唱した。この仮説は 4 元素仮説の影響を受けており、黒胆汁には冷と乾、血液には熱と乾、黄胆汁には熱と湿、粘液には冷と湿の 2 つずつの性質と関係があるとした。

紀元前 2 世紀に登場したガレノスはギリシャ医学の完成者とも言われ、空気中の精（プネウマ）の存在を信じた。脳に必要な精神精気、心臓に必要な生命精気、肝臓に必要な自然精気の 3 種類の精があって、血液によって必要な個所に直線的に運ばれると考えた。中世の間、キリスト教世界では、ガレノスの医学が教会によって権威づけられていた。

ルネサンス期の芸術家でもあるレオナルド・ダ・ヴィンチは、15 世紀後半から 16 世紀初めにかけて約 30 体の人体解剖をし、その解剖図を遺している。イタリアの解剖学者・ヴェサリウスは 1543 年、「人体の構造」を著し、人体の構造がガレノスの説と全く異なることを明らかにした。多くの地域で長い間、人間の死体の解剖は宗教上の理由で厳禁であったが、学問上の理由でこのころから人体解剖が行われるようになった。

イギリスのハーヴィは血液量の測定から、血液の流れが循環であることを発見し、1628 年、著書「心臓と血液の運動」で血液の循環説を発表した。この功績によりハーヴィは、近代的な実験科学の精神と方法論を医学に導入し、実験生理学に道を開いた。

1590 年、オランダのヤンセンにより顕微鏡が発明された。イギリスのフックは 1665 年、顕微鏡によるコルクの観察により細胞を発見した。オランダのレーウェンフックは、ヒドラや原生動物などの微生物を発見した。

18 世紀、スウェーデンの分類学者・リンネは、生物の外見による分類法を確立した。全生物を属、目、種で分類し、人間もその分類表の一部とした。自然界の植物・動物・鉱物の三界への分類、植物、動物の属名と種名の二名法による学名はリンネによるものである。

1838 年、ドイツのシュライデンは、細胞が植物の基本単位であるとする細胞説を提唱した。1839 年、ドイツのシュヴァンは、動物においても細胞が基本単位であるとした。これらの業績により、生物はすべて細胞から成るとする考えが確立した。

イギリスのエラズマス・ダーウィンは 1794 年、著書「ズーノミア」で強い生物が生き残るとする、生物進化の考えを主張した。フランスのラマルクは 1809 年、著書「動物哲学」の中で、地球上のすべての生物は長い間に単純なものから次第に複雑化したこと、その変化は現在も続いているとする説を主張

した。

エラズマスの孫、チャールズ・ダーウィンは軍艦ビーグル号に博物学者として乗船し、ガラパゴス諸島など南半球を就航して動植物を観察した。その成果をまとめた著書「種の起源」を 1859 年に著し、進化論を提唱した。著書の中で、生物はきびしい生存競争を行い、環境に適した方向に変異することにより進化するという、自然淘汰説を唱えた。

オーストリアの修道僧・メンデルは、エンドウマメを用いた実験を統計的に処理することにより、優性の法則、分離の法則、独立の法則を発見した。しかしその業績は生前認められず、失意のうちに世を去った。1900 年、ド・フリース、コレンス、チエルマクの 3 人が独立にメンデルの法則を再発見した。ド・フリースはその翌年、突然変異が進化の要因であるとする、突然変異説を提出した。

フランスのパスツールは 1895 年、アリストテレス以来の微生物の自然発生説を、スワンネックのフラスコを用いた有名な実験により否定した。また、この実験により、発酵や腐敗は微生物によることも実証した。ドイツの細菌学者・コッホは結核菌やコレラ菌を発見し、これらの病原菌によって結核やコレラが引き起こされることを明らかにした。1905 年、コッホは結核菌に関する研究によりノーベル医学・生理学賞を受賞した。

アメリカのモーガンはショウジョウバエを用いた遺伝の研究により、遺伝現象の担い手は細胞の染色体上にある遺伝子であるとする遺伝子説を、1926 年までに確立した。1927 年、アメリカのマラーは X 線照射によりショウジョウバエに人為的突然変異を誘発できることを発見した。

その後、遺伝子の実体はデオキシリボ核酸 (DNA) であることが分かった。DNA は 2 本の長い鎖が 4 種類の有機塩基 (A: アデニン, T: チミン, G: グアニン, C: シトニン) によりらせん状につながったものである。この DNA の二重らせん構造はワトソンとクリックにより 1953 年に発見されたもので、DNA による遺伝情報の保持・伝達機構が明らかになった。現在では、生命現象を分子を使って理解すること目的とする分子生物学へと発展した。そのひとつの成果として、遺伝情報の完全解読を目指すゲノム計画が進行中で、ヒトゲノムについては 2000 年にはほぼ解読を終えている。

問 2.1 プトレマイオスが完成させた中世の宇宙観が、コペルニクス、ケプラー、ガリレイ、ニュートンらの業績によってどのように変遷していったか説明せよ。

問 2.2 エンペドクレスの 4 元素説、メンデレーエフの周期律、現代の素粒子論についてまとめ、それぞれの特徴を比較せよ。

問 2.3 生物の進化に関して、自然淘汰説と突然変異説に基づき述べよ。

3 疑似科学

前節では、科学的とはどういうことかということ、科学の歴史を通して学んできた。では、科学あるいは科学的と対立する概念は何か。端的に言えば非科学あるいは非科学的ということになる。非科学の中には、疑似科学と呼ばれる非常にタチの悪いものがある。

疑似科学の何が問題なのか。それは非科学であるにもかかわらず、科学の衣装をまとうて現れ、時に人をだまし、経済的・精神的に被害を与えるからである¹⁵。また、疑似科学の一部には、善意から出発しているものの、科学的には根拠がなく、結果的に人をだますことになっている場合がある¹⁶。いくつか例を挙げて説明しよう。

20世紀末から21世紀初め、マイナスイオン¹⁷が癒し・健康増進効果を持つとする説がもてはやされた。マイナスイオンは化学用語の陰イオンとは別の概念で、科学的には何らかの物質的実体があるものではない。しかし、マイナスイオン効果を謳ったエアコン・空気清浄機などの家電製品や健康器具などが、大手電機メーカーより多数販売され、2002年の流行語ともなった。しかし2003年の景品表示法改正で、商品の効用の表示に合理的根拠が要求されたため、以後下火になっていった。

「水からの伝言」(2001年)の著者が提唱した「波動」の概念は、物理学用語の「波動」とは全く関係のない非科学的なものである。「水からの伝言」の中で、水の結晶を作る際に「ありがとう」や「平和」など「よい言葉」をかけると美しい雪花状の結晶ができて、「ばかやろう」や「戦争」など「悪い言葉」をかけると汚い結晶ができるなどとした主張が受け、一部の小学校で道徳教育に使われるなど社会的影響が大きい問題である¹⁸。

「ゲーム脳の恐怖」(2002年)の著者は、テレビゲームやコンピュータゲームに熱中しすぎると「ゲーム脳」になり、脳が壊れるとする説を唱えた。この説によると、「ゲーム脳」になると、キレやすく、物忘れが多くなり、時間感覚がなくなり、思考能力が衰えるという。しかしながら、「ゲーム脳」やそれに伴う諸症状は医学的には一切認知されておらず、疑似科学の域を出ていない。

健康科学の分野でも、「血液サラサラ」や「納豆ダイエット」¹⁹などが疑似科学の例である。2007年、「納豆ダイエット」を扱った民放番組が、データ捏造問題から番組打ち切りとなったことがある。また、「血液型別性格診断」を扱った2004年放送の民放番組について、「科学的根拠は証明されておらず、社会的差別に通じる危険がある。」として、放送倫理・番組向上機構(BPO)の「放送と青少年に関する委員会」から改善勧告を受けたこともある。

¹⁵疑似科学には、ネズミ講や悪徳商法に利用されている場合が多い。

¹⁶その意味では、悪意を持って人をだます疑似科学より一層タチが悪いとも言える。

¹⁷森林浴や滝のそばが気持ちいいのは、マイナスイオンであるとされた。

¹⁸道徳授業で疑似科学を教えることが単に批判されているだけではなく、「言葉の善し悪しを水に教わる」という内容自体がそもそも道徳教材としては不適切である。

¹⁹その他、バナナダイエットなどいろいろな変形バージョンがある。

4 物質の保存

パスツールの実験に象徴されるように、「無から有は生まれない」と考え方は現代科学の根幹をなす。そのひとつの表現として、「物質の保存」あるいは「質量の保存」がある。

リンゴを食べると消えてなくなる。しかし、リンゴは私たちの体内に入り、その分体重が増える。質量の保存は成り立っている。これを私たちの体内を覗くことができたとしたらどうだろうか。何もなかったところに、噛み砕かれたリンゴが入ってくる。これは無から有が生まれたことになるだろうか。もちろん、それは今しがた食べたリンゴが体内に取り込まただけである。このように、ある一部分だけを見ると、モノが消えてなくなったり、無から有が生まれたりしたように見えることがある。従って、物質の保存とは、系全体、もっと言えば宇宙全体を見て成り立つ法則である。

別の例を述べる。薪を燃やすと、薪は消えてなくなる。これは、物質の保存、あるいは質量の保存に反しないのだろうか。実は、薪が燃えて二酸化炭素という気体が発生するが、薪が燃えることで発生した二酸化炭素の質量は、消えた薪の質量に等しい。より具体的に述べれば、薪に含まれる炭素 (C) が空気中の酸素 (O_2) と結合²⁰し、二酸化炭素 (CO_2) が発生する²¹。こうして、原子という物質の構成単位を考えると、化学反応とは原子の離合集散であり、原子の種類や数に変化がないから、質量が保存するのだということが分かる。原子の種類そのものが変化することもあるが、それについては次節で学ぶ。

問 4.1 コップ 1 杯の水を部屋に放置していたら、蒸発して水の量がわずかに減っていた。この現象は物質の保存に反しているか。反していないとすれば、それはどのようにすれば確かめられるか、説明せよ。

問 4.2 木材パルプの代替資源として、ケナフの栽培が盛んに行われている。ケナフ是一年草で成長が早く、成長時に二酸化炭素を吸収することから、森林伐採が防止でき、地球温暖化にもよいという評判がある。このことについて、物質の保存の観点から論評せよ。

問 4.3 小鳥が密閉したかごの中の止まり木に止まっている。かご全体を体重計に載せたところ、小鳥が止まり木から飛んでかごの中で羽ばたいた。体重計の目盛りに変化はあるか。

²⁰これが燃えるということである

²¹化学反応式 $C + O_2 \rightarrow CO_2$ で表される。

5 エネルギーの保存

「無から有は生まれない」という現代科学の根幹をなす考え方の別の表現として、「エネルギーの保存」がある。その典型例は、力学的エネルギーの保存則である²²。

たとえば、ジェットコースターに乗って高い地点まで持ち上げられた後は、ほぼ惰性で下降と上昇を繰り返す。このとき、地面からの高さに比例する位置エネルギーと、速度の2乗に比例する運動エネルギーの和を力学的エネルギーといい、力学的エネルギーは時間変化しない。ジェットコースターが下降するにつれ速度が速くなり、位置エネルギーの減少分を運動エネルギーの増加分が補う形で、力学的エネルギーは一定値を保つ。ジェットコースターが上昇するときも、速度が遅くなり運動エネルギーは減少するが、その分位置エネルギーが増加し、力学的エネルギーは一定値を保つのである。

それでは、ジェットコースターはなぜ最後は止まるのか。それも最高点より低い位置で。それはジェットコースターの車輪とレールの間で摩擦を起こすからである。このとき摩擦熱が発生し、力学的エネルギーは減少する。そこで、熱もエネルギーの一種と考えれば、力学的エネルギーと熱エネルギーの和は保存する。エネルギーには他にも、電磁的エネルギーなどがある。これらすべての種類のエネルギーの和を全エネルギーと定義すると、全エネルギーは保存すると考えられている。熱現象を扱う熱力学の枠組みでは、これを熱力学第一法則という。

全エネルギーが保存するとしたら、世に言う省エネルギーとはなぜ必要なのであるのか。それは、熱エネルギーが、力学的エネルギーや電磁的エネルギーに変換できない、あるいは変換しにくいからである。ジェットコースターが熱エネルギーを放出して止まることはあっても、その逆に熱エネルギーを吸収して動き出すことはない。力学的エネルギーや電磁的エネルギーが一旦熱エネルギーに形を変えると、あとはその熱エネルギーを有効には利用しにくくなるからである。

たとえばエアコンの室外機の周辺は非常に熱い。これは、エアコンを動かす電気エネルギーと室内の熱エネルギーの合計を室外に熱エネルギーとして放出しているからである。この過程で、室内外の全エネルギーは保存するが、一旦外に出た熱エネルギーを他の用途に有効活用するのは難しいのである²³。

エネルギーとは別に、エネルギーの質あるいは取り出しやすさに関係した、エントロピーという概念がある。エントロピーが増大すると、エネルギーの質は下がると考えられる。熱力学の枠組みでは、閉じた系（たとえば宇宙全体）では、エントロピーは増大するという、熱力学第二法則が成り立っている。実は、省エネルギーとは、エントロピーをなるべく増大させない、つまり、利用価値が低く取り出しにくい熱エネルギーをなるべく発生させないことを目指しているのである。

²² 力学的エネルギーが保存するとは力学的エネルギーが時間変化しないことを意味する。

²³ 最近では、熱エネルギーを有効活用できる技術も出てきている。

6 宇宙と生命

天体物理学で恒星進化論という、天体の誕生から最期までにおこる恒星内の構造の変化を扱う理論がある。恒星は自分自身の重力があるので常に収縮しようとする。一方、恒星内部の核融合反応により熱が発生し、膨張しようとする。このようにして収縮と膨張が釣り合ったところで恒星は安定している。重力と核融合によるエネルギーを使い果たすと、恒星は収縮をとどめることができず最期を迎える。

一番軽い元素である水素は、ビッグバン直後に生成されたものである。原始星の中心の温度が 1000 万度を超えると水素がヘリウムへと変換される核融合反応が起こり始める。太陽の 50% より大きい質量の恒星では、温度が 1 億度を超えると中心でヘリウムから炭素および酸素への核融合反応が始まる。太陽の 8 倍以上の質量の星では、中心の温度が 6 億度を超えると炭素の核融合反応が起こりネオンやマグネシウムを生成する。太陽の 10 倍以上の質量の星では、中心の温度が 15 億度を超えると酸素の核融合でケイ素などが、さらに 25 億度を超えるとケイ素などの核融合で鉄などが生成する。鉄の原子核は最も安定な原子核でありこれ以上核融合を起こさない。つまり恒星内部の核融合では、鉄より重い元素は生成されない。鉄より重い元素は、恒星の寿命が尽き、超新星爆発を起こす際に生成される。

超新星爆発、つまり恒星の死によって宇宙空間にまき散らされた元素が、われわれ人間を含む、生物を作る「素」となっている。生物の各個体が死ぬと、その元素は大地や大気、すなわち地球の一部となる。これらの元素は、約 50 億年後に太陽が超新星爆発を起こす際、再び宇宙空間にまき散らされて宇宙の一部となる。超新星爆発の際の衝撃波によりできた密度の高い部分が、重力により周囲の物質を引き寄せてできたのが原始星と言われている。こうしてわれわれの体を構成していた元素は、新しい星の一部となって循環すると考えられている。

無から有は生まれない、このことの 2 つの表現として、物質の保存とエネルギーの保存があると、前 2 節で述べてきた。恒星内部の核融合や超新星爆発によって新たな元素が生成されているが、これらは元素の「素」である陽子や中性子の離合集散と捉えることができる。宇宙全体の陽子や中性子の数は不変と考えてよく²⁴、これらはわれわれを含む生物の体の「素」でもあるので、生物も無限に増殖するわけにはいかない。生物が無限の寿命を持てない理由のひとつである。

実は、有性生殖をする生物の DNA はひも状になっており、テロメアと呼ばれる末端部がある。このような DNA は複製のたび、末端部を完全にコピーできずに少しずつ短くなっていく。そうして 50 回ほど細胞分裂すると、テロメアがなくなり、それ以上は分裂できなくなる²⁵。これが細胞の死であり、有性生殖をする生物に寿命がある、生物医学的な見地からの理由である。

²⁴ 実際は陽子の数から反陽子の数を引いた値が不変である。

²⁵ 有性生殖をしない細菌などは、DNA が環状になっているためテロメアがなく、無限に分裂できる。

7 がんの予防法や治療法

がんは1981年以来、日本人の死因トップである。日本人の約1/2ががんに罹り、約1/3はがんで死亡している。その意味で、日本人には大変身近な存在であるが、一般の日本人ががんについてよく知っているとは言い難い。近年では根拠に基づいた医療 (Evidence Based Medicine, 略してEBM) の大切さが言われるようになった。がんの予防法、また、実際にがんに罹ったときの対処法について、考えてみよう。

ほぼすべてのがんは遺伝子の突然変異、すなわち、遺伝子のコピーミスによって発生する。1日に5000個程度のがん細胞が発生しているが、免疫細胞により消されていると言われている。しかし、歳をとって免疫細胞の働きが衰えると、がん細胞が消されずに生き残る確率が高くなる。一旦免疫細胞の攻撃を潜り抜けて生き残ったがん細胞は、やがて無制限に増殖し、罹患者の栄養を奪い、臓器を機能不全に陥れる。なぜなら、がん細胞はもともと正常な細胞の突然変異であるので、外部から侵入した細菌やウイルスと違って、免疫細胞から異物と認識されにくいためである。

遺伝子に突然変異を誘発する物質は、たばこや食事に含まれている。また、太陽の紫外線やウイルスが原因であることもある。ウイルスは注射針の使い回しなど、人為的ミスにより感染することもあるが、たばこや食事、紫外線については、生活習慣の改善で防ぐことができる²⁶。

がん発生のメカニズムにより、ほとんどのがんは偶発的な遺伝子の突然変異によるもので、遺伝によるものではない。実際、遺伝の影響は1%に満たないと言われている。にもかかわらず、「がん家系」という言葉があるのはなぜか。それは、同じ家族であれば、生活習慣や食習慣が似てしまうことにより、がんに罹った人の家族はがんに罹りやすい生活習慣を持っているからではないかと推測できる。

がん予防の指針として、2005年6月に国立がんセンターが科学的根拠に基づくがん予防「がん予防8か条」を発表した。従来は「がんを防ぐ12カ条」が広く用いられてきたが、「8か条」は、「12カ条」では定性的であった表現を定量的に改めたり、科学的根拠に基づき修正したりしてできた、日本人にとってもっとも適切だと思われるがんの予防の指針である。

不幸にもがんに罹った場合の治療には、主に、外科手術・化学療法・放射線療法がある。がんの種類や進行度によって、適切な治療法は変わる。一方でサプリメントやアガリクスなどの代替療法もある。しかし、サプリメントには治療効果は期待できず、また、アガリクスの抗がん効果も医学的には確立していない。アガリクスを販売するため、専門家に著書で推薦させるなどしたとして、健康食品販売会社と出版社が薬事法違反容疑で逮捕された事例もある。がんの治療法選択においても、科学的思考を働かせたい。

²⁶このような観点から、がんは一種の生活習慣病とも言われる

参考：

「がん予防 8 か条」

1. たばこを吸う人は禁煙し、吸わない人は他人のたばこの煙を可能な限り避ける。
2. 適度な飲酒を心がける。日本酒なら一日一合、ビールなら大瓶一本。飲まない人が無理に飲む必要はない。
3. 野菜やくだものは少なくとも一日 400g 摂取する。野菜は毎食とり、果物は毎日とる。
4. 塩分の摂取は最小限にする。食塩にすると一日 10g 未満とする。
5. 定期的な運動を継続する。毎日合計一時間程度のウォーキングなどの運動をし、週一回は汗をかくくらいの激しい運動をする。
6. 太りすぎず、痩せすぎない。BMI で 27 以下 20 以上を保つ。
7. 熱い飲食物は最小限に抑え、熱い飲み物は冷ましてから飲む。
8. 肝炎ウイルスの有無を知り、治療や予防をしっかりとる。

「がんを防ぐ 12 カ条」

1. バランスのとれた栄養をとる。彩り豊かな食卓にすれば栄養のバランスもとれる。
2. 毎日変化のある食生活を。ワンパターンにならないように気をつける。
3. 脂肪は控えめに、食べ過ぎを避ける。おいしいものでも適量に抑えること。
4. 酒はほどほどに。飲み過ぎず、健康的に楽しむ。
5. たばこは吸わない。特に、新しく吸い始めるということは避けたい。
6. 適量のビタミンと繊維質を食べ物から多くとる。特に緑黄色野菜がいろいろ。
7. 塩辛いものは控えめに、熱いものは冷ましてから。胃や食道をいたわる。
8. 焦げた部分を避ける。突然変異を引き起こすことがある。
9. かびに注意。食べる前にチェック。
10. 日光に当たりすぎないように。太陽はよくない。
11. 適度に運動をする。いい汗を流そう。
12. 体を常に清潔に保つ。さわやかな気分で過ごそう。

問 7.1 「がん予防 8 か条」と、その前身である「がんを防ぐ 12 カ条」を比較して、がん予防の指針としてどの点が改良されたかまとめよ。

8 特定健康検査

日本人の三大死因は、がん・脳血管疾患・心疾患である。前節で学んだがん以外の脳血管疾患と心疾患は循環器病であり、肥満による動脈硬化が原因と言われている。メタボリックシンドロームとは、代謝異常を引き起こす病気が重なっている状態であり、脳梗塞や心筋梗塞などの動脈硬化性疾患に罹る危険性の高い状態を指す。

高騰する医療費の抑制を目的とした医療制度改革の一環として、2008 年 4 月から特定健康診査（いわゆるメタボ検診）の制度がスタートした。現在の日本の診断基準によると、ウエスト周囲径が男性で 85cm、女性で 90cm 以上²⁷であり、かつ次の 3 項目のうち 2 つ以上を満たしている場合、メタボリックシンドロームと診断される。

- 1 脂質異常（中性脂肪 150mg/dl 以上、HDL コレステロール 40mg/dl 未満のいずれかまたは両方）
- 2 高血圧（最高血圧 130mmHg 以上、最低血圧 85mmHg 以上のいずれかまたは両方）
- 3 高血糖（空腹時血糖値 110mg/dl 以上）

特定健康診査にはいくつかの批判がある。まず、メタボリックシンドロームの判定基準自体に批判がある。特にウエスト周囲径の基準が男性より女性に甘くなっているのではないかというのである。実際、国際的には女性のウエスト周囲径 80cm 以上が基準となっている。また、上記 3 項目目で、血糖値の基準値は国際的には空腹時血糖値 100mg/dl 以上となっている。

また、特定健康診査の目的にも批判がある。この検診では、メタボリックシンドロームの該当者および予備軍を、当初の 5 年間で 10%以上減らすことを当面の目標にしているが、必要のない人にまで治療を強いて、かえって医療費の増大を招くのではないかと批判がある。特定検診の対象者が 40～74 歳の全国民で、企業の健康保険組合や国民健康保険を運営する市区町村などの保険者の中には、健康診断の際、これまで実施していた検査項目をやめたりしたところもある。

特定健康診査と言えども、科学的・医学的根拠に基づいて行う必要がる。メタボリックシンドロームの判定基準自体や検査項目も、最新の知見を取り入れ、少しずつ改良していく必要がある。

問 8.1 BMI(体格指数) について、次の問に答えよ。

- (1) BMI の定義を述べよ。また、BMI はどのような場面で使われるか説明せよ。
- (2) 身長 173cm の男性が BMI 値 20 以上 27 以下の範囲に収まるには、体重はどの範囲にあればよいか計算せよ。

問 8.2 EBM とは何の略か答えよ。また、EBM が医療において大事であると考えられる理由は何か、説明せよ。

²⁷内臓脂肪面積 100cm² が本来の基準だが、CT スキャンする必要なので、ウエスト周囲径で代用している。