

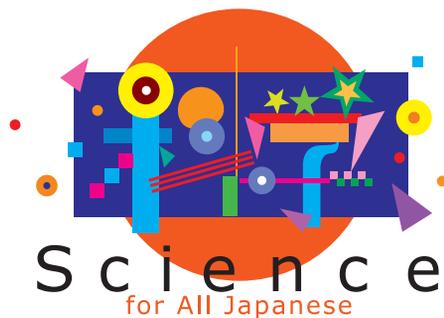


21世紀の科学技術リテラシー像～豊かに生きるための智～プロジェクト

物 質 科 学

専 門 部 会 報 告 書

平成20年(2008年)6月



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つて、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。

ま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。

まえがき

物質に対応する英語は material, matter であり、その語源はラテン語 materia である。これは同じくラテン語の母 mater に由来する。mater+ia (ius の複数) は、母に属するもの、母から導かれるものを意味し、本部会が科学リテラシーとして扱おうとする対象が、いかに根源的なものを包括しようとしている言葉であるかが分かる。他の専門部会が、抽象化された概念（数理、人間科学）や物質システム（生命、技術）を扱い、あるいは実験によって証明することが困難（宇宙・地球）な現象を扱うことが多々あるのに対して、物質科学部会では「具体的で認識しやすい物質の科学」のリテラシーを考える。物質科学の体系の独立性に注意しつつ、科学全体の「基礎」としての物質科学の役割も考慮して、物質科学の全体を俯瞰する。特に生命、宇宙・地球、環境、技術との接点の多い分野なので、連携をはかる必要はあるものの、若干の重複はあっても止むを得ないと考えている。報告書作成に当たっては、下記の点に留意することとした。

1. 物質とエネルギーの観点を重視する。物質は固有のエネルギーをもち、様々なエネルギーの担い手である。エネルギー資源の根源でもある。
2. 生活実感に結びついた物質・現象を選択し、物質科学が現代の生活の基礎にあることを説明する。科学の体系、科学的認識とその獲得、科学をする思考とプロセス、先端科学技術の到達度などについて記述したい。物質およびエネルギー利用の歴史についても触れる。
3. 現実的生活の中での物質科学リテラシーの一側面として、似非科学、科学者の実像などについても、コラム欄において触れる。
4. 日本人独自の物質観に留意する。これらは産業化及び都市化の拡大によって失われかけているが、Sustainable な価値観の復活で生まれ変わろうとしている。
 - 1) 物質循環と生命の輪廻転生思想、無常観。
 - 2) 「もったいない」思想（転用・使い回し・カスケード利用）。
 - 3) 文化と文明が混然一体となっている。
 - 4) 自然界の全てのものにそれぞれの神が宿る（vs. 西欧の全能の神の意思）。
5. 日本（文化）の特徴をもった素材を使いたい。例えば、「身の回りで利用される物質」の中では、紙や木などの物質を通じて伝統的考え方について物質科学の視点から記述する。その他の物質系として、塗料（漆、朱）、接着剤（膠、糊、布海苔）、セラミックス（陶磁器）、住（木材、竹、わら、檜膚、紙、漆喰、床下を風が抜け

ていく作り)、食(発酵食品、糠味噌)、衣料(和服の仕立て縫製、染色)、扇子、
葦簀、風鈴 他。

6. コニカル・スパイラルなイメージ図で示すように、スパイラルアップの記述体系とする。

ただし、4.と 5.の趣旨は本報告書では必ずしも十分に汲まれているとは言えず、今後の定着化活動において生かしていきたいと考えている。

要 約

わが国は、科学及び技術の知識を土台に、「知識ベース」の豊かな社会を構築しようとしている。このために必要な、市民の物質科学リテラシーの一つの体系を取り纏めた。次の4点を主要な視点としている。

1) 物質はエネルギーの授受により様々に変化をする。そのため物質はエネルギー利用のための舞台となる。地球規模での物質循環への理解が、地球環境の持続に重要である。

2) 物質の根源はわずか100種類ばかりの元素である。原子の細部から宇宙に至るまでに物質構造には様々な階層があり、またそれらを束ねる相互作用(力)も同様に階層的である。

3) 物質に人の利用意図が反映されるとき材料と呼ぶ。材料として重要なのは物質の性質であり、その性質がより優れていることである。優れた材料とは、その性質が利用目的に合致し、かつ地球環境の持続可能性を損なわない材料である。希少資源の利用に当たっては材料の再利用が重要である。

4) 物質は他の物質からエネルギーの授受を行うだけでなく、「場」と相互作用する。

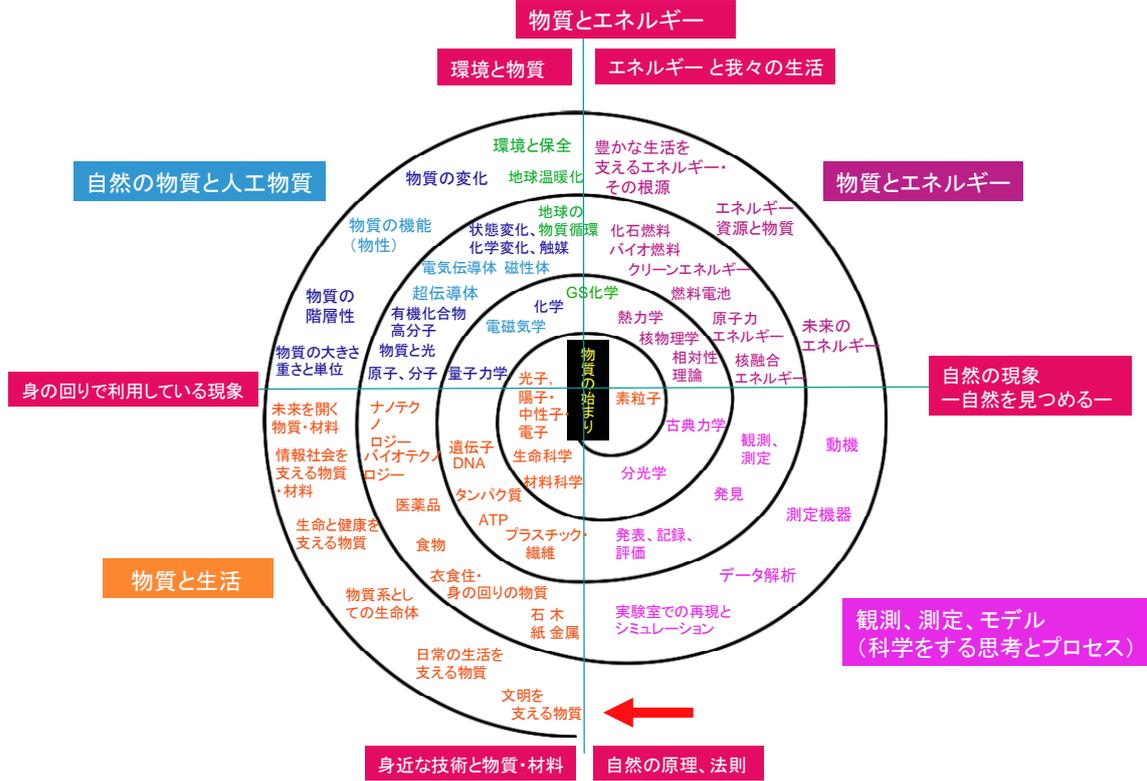
本報告書は7つの章からなる。第1章では文明の発達の歴史的視点から、物質とエネルギーおよびエネルギー変換への配慮が地球環境の持続的発展に重要であることを述べる。第2章では、自然界の法則を、物質の構成、物質の変化とエネルギーに関連して述べる。第3章では、第2章の内容を基礎科学の立場からより体系的に論じた。物質の始まりから、核子から原子、分子、高分子、結晶に至る構造階層性、原子およびそれぞれの特徴的な構造を保持する結合エネルギーの階層性、物質の機能(物性)及び変化の原理を概観する。この章は本報告書の中核となる。第4章では物質科学の知見が、我々の生活の中でどのように役立っているかについて具体的に説明する。特に生命、情報社会、未来の材料、材料プロセス、地球環境について、物質科学の立場から述べる。第5章では、現代社会の中で重要な課題であるエネルギーと資源について、物質科学の見方を紹介する。これらが、市民生活における選択と政策決定に役立つことを期待したい。第6章では(物質)科学を推進する思考とプロセスを簡単にまとめた。その中では科学的思考とは何か、測定、客観性、公開性、相互批判の重要性などについて述べる。

現代の市民生活の中でしばしば目にする重要な問題である、科学を装った「似非科

学」、「国際単位系」、「純物質（化学物質）と混合物」、また特殊な人間と見られがちな「科学者とはどんな人」、石油から「石油化学工業製品」ができるまで、生命物質の中で重要な役割を果たす「鏡像異性体」について、「環境と安全」、人間の「五感の科学」などについて、コラム欄を設けて述べる。

科学技術の智の曼荼羅 物質科学

豊かな市民生活を送るための物質科学リテラシー



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
まえがき	iii
要 約	v
科学技術の智の曼荼羅 物質科学	vii
目 次	viii
第1章 序論：物質とエネルギー	1
1.1 文明を支える物質	1
1.2 エネルギーと我々の生活	2
1.3 身近な技術と物質・材料	3
第2章 自然の現象 — 自然を見つめる	4
2.1 自然の原理、法則	4
2.2 物質の変化の原理とエネルギー	7
2.3 身の回りで利用している現象	10
第3章 自然の物質と人工物質	12
3.1 物質の始まり	12
3.2 物質の大きさ、重さと単位	12
3.2.1 素粒子、原子核と結合エネルギー	12
3.2.2 原子、分子	14
3.2.3 宇宙の大きさと質量	15
3.3 物質の階層性 — 原子から分子、結晶へ	18
3.3.1 原子から分子へ	18
3.3.2 原子から結晶へ	18
3.3.3 高分子	21
3.4 物質の機能 (物性)	23
3.4.1 物質の成り立ち	23
3.4.2 弾性的性質 — 伸びたり縮んだりする力	24
3.4.3 電氣的性質 - 電気が流れる	25

3.4.4	磁氣的性質 – 磁石とは.....	26
3.4.5	物質と光.....	26
3.4.6	超伝導と超伝導体.....	27
3.4.7	有機化合物とは – その物性と分子設計.....	28
3.5	物質の変化.....	30
3.5.1	状態変化.....	31
3.5.2	化学変化.....	34
3.5.3	化学変化の仲立ちをする触媒.....	35
第4章	物質と生活.....	38
4.1	物質系としての生命体.....	38
4.2	生命と健康を支える物質.....	38
4.3	日常の生活を支える物質・材料.....	39
4.4	情報社会を支える物質・材料.....	40
4.5	未来を開く物質・材料.....	43
4.5.1	新しい超伝導材料の開発と利用.....	44
4.5.2	新規な物質、物性の開発.....	44
4.5.3	ナノテクノロジー.....	45
4.5.4	バイオテクノロジー、ナノバイオ.....	46
4.6	物質と材料プロセス.....	48
4.7	環境と物質 — 環境保持のために求められる科学技術の智.....	49
4.7.1	環境と物質循環.....	49
4.7.2	地球温暖化.....	51
第5章	物質とエネルギー.....	54
5.1	豊かな生活を支えるエネルギー その根源.....	54
5.2	エネルギー資源と物質.....	54
5.2.1	化石燃料.....	54
5.2.2	バイオ燃料.....	56
5.2.3	クリーンエネルギー.....	56
5.2.4	エネルギー (燃料) 電池.....	56
5.2.5	原子力エネルギー.....	57

5.2.6 核融合エネルギー	57
5.3 未来のエネルギー	58
第6章 観測、測定、モデル (科学をする思考とプロセス).....	60
6.1 動機、観測、測定、発見.....	60
6.2 測定機器.....	60
6.3 データ解析 (数学・数式、モデル・仮説)	61
6.4 実験室での再現とシミュレーション	62
6.5 発表、記録、評価.....	62
物質科学専門部会名簿.....	65
「科学技術の智」プロジェクト 研究組織.....	65
この報告書の利用について	68

第1章 序論：物質とエネルギー

ー 豊かな市民生活を送るための物質科学リテラシー

物質は「質量のあるもの。場を成立させるものを指すことが多い。基本的には、電磁場の粒子である光子なども含めて、素粒子およびその結合体であり、空間・時間のなかに位置し、大きさ・形・質量および運動の可能性をもつもの」と定義される¹⁾。この定義を待つまでもなく、衣食住に密接に関係した物質をはじめとして、われわれの身の回りは物質で構成されている。いや、われわれの体自身も物質から成り立っている。

この物質界について、物理学と化学が明らかにしてきた物質像、さらに最近では材料科学、電気・電子科学、情報科学、生物物理学、生物化学、薬科学、環境科学が付け加えてきた先端的知見のうち、科学リテラシーとして市民と共有したい事柄をとりまとめる。最も重要なのは次の4点であろう。1) 物質は豊かな市民生活を営むために必要なエネルギーと切っても切れない関係にあり、エネルギーの担い手である。物質はエネルギーの授受により様々な変化をし、地球規模で循環する。2) 物質の根源は原子であり、その細部から身の周りの大きさの物体に至るまでに様々な階層がある。またそれらを束ねる相互作用(力)にも階層性がある。3) 物質に人の利用意図が反映されるとき材料と呼ぶ。材料で重要なことは物質そのものではなく、物質の性質である。材料として重要なことは、その性質がより優れていることであり、それは利用目的とともに、地球環境の持続的発展に合致しているということである。4) 物質は他の物質からエネルギーの授受を行うだけでなく、「場」との相互作用がある。

1.1 文明を支える物質

石器文明に始まり現代に至るまで、自然由来であるか人工物であるかを問わず、物質は身の周りにおいて人間の生存・文化・社会・経済活動の基盤となり、文明を支えてきた。その例は、石器文明に始まり、鉄器文明、印刷技術が契機となった宗教改革、蒸気エンジンと産業革命、シリコンチップとIT革命などの歴史的キーワードに見られるように、枚挙に暇がない。文明を支えた物質が石器、青銅器、鉄器と変遷することからも分かるように、人が物質を利用する際に問題となるのは、物質の種類ではなく、物質の示す固有の性質である。農耕作業用具、狩猟・戦用武器、食器、装飾器具などに必要な優れた性質をもつ物質が見つかり、土器から、石器、青銅器、鉄器へと材料は替わってきた。力学的、熱的、電気・電子的、磁氣的、化学的、生化学的性質の優れたものを求めて、人類の物質に対する理解と利用は進歩してきた。

21 世紀には、人類がいかに賢く、有限な資源を無駄にせずに、最適な物質を（再利用に配慮しつつ）地球環境の持続性（Sustainability）に配慮して使っていくかが、豊かで安全な生活を営む上で重要となる。

1.2 エネルギーと我々の生活

エネルギーという言葉は、異なるいくつかの文脈で使われる。エネルギーの定義は「物質が内蔵する仕事をする能力」である。この概念はニュートンに始まり、19 世紀の初頭に確立した。エネルギーには力学エネルギー（運動エネルギー、位置エネルギー）、電気・磁気エネルギー、光エネルギー、熱エネルギー、化学・生物エネルギー、核エネルギーなどの種類がある。これらを担うのは物質であり、物質はこれら各種のエネルギーの間の変換によって姿を変える。一つの形態のエネルギーが無くなる時にはそれと等しい量の別の形態のエネルギーが生まれる。

水力発電を考えてみよう。山地などの高い所にある水はダムに蓄えられ、そこから低い位置にある発電所まで落下して発電機を回転させる。この場合、水の位置エネルギーは激しい勢いで落下する水流の運動エネルギーに変換され、この運動エネルギーはさらに発電機のタービンが回転する運動エネルギーに変換される。発電機の機能はさらに回転エネルギーを電気エネルギーに変換する。こうして水の位置エネルギーが最終的に電気エネルギーに生まれ変わる。その元をさらに辿ると、水の位置エネルギーは太陽の熱エネルギーが海などの低地ある水を水蒸気に変え、それによって水分子が上空に浮上することによって得られたものである。このように考えると、水力発電による電気エネルギーは、太陽のエネルギーを元に種々の形態のエネルギー間の変換を経て生じるということがわかる。

エネルギー変換には熱の出入りが伴う。あるエネルギーを全て熱に変えてしまうことは簡単だが、熱を全て他のエネルギーに変えることはできない。上の例では、発電機が回転するときの摩擦によって発生する熱エネルギーは周囲に拡散し、利用することはできない。（2.2「物質の変化の原理とエネルギー」の項参照）

エネルギーを生み出すことのできる資源は様々であるが、そのいずれに依存しているかは国によって異なる。1970 年代には日本は一次エネルギー（石油、石炭、天然ガス、原子力、水力、地熱など、実際に使用する前のエネルギー源のことをいう）の 70% 以上を石油に依存していた。2004 年度には、石油依存度は約 48%、石炭 21%、天然ガス 14%で、これらを加えると化石燃料の合計は約 83%となっており、また全体の 11% は原子力である²⁾。その他は水力 4%、新エネルギー・地熱 3%となっている。長い時

間をかけて地下に蓄えられた石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料を短期間に大量に使うことにより、蓄積された炭素成分が二酸化炭素として放出され、地球環境が急激に変化する事態に直面している。

1.3 身近な技術と物質・材料

人間の歴史は身の周りの物質とエネルギーを工夫して利用することにより発展してきた。我が国では伝統的に、衣服は木の繊維と草木由来の染料を用い、和服は仕立て直し染め替えにより、世代を超えて着用されることが多かった。住居の材料は木材や竹、藁（わら）、茅、檜膚、紙、漆喰、陶器であり、膠、糊、布海苔が接着に用いられた。また高温・多湿でも快適さを保つため、窓は大きく、床下を風が抜けていく作りである。これらの伝統的な素材はコンクリートに囲まれた現代の無機質な生活の中で、われわれに潤いを与えるものである。近年、持続可能な発展（Sustainable Development）が世界的に重要視されるようになり、効果的・効率的な物質変換と機能発現を実現している生物機能の活用が注目されている。その基本原理は「様々な資源を再生のスピードより早くは消費しない、また廃棄物は自然が吸収できる以上には放出しない」ということである。我国の伝統的材料の多くは、土にかえる生分解性を持ち、この持続性の精神にも合致していた。地球環境を持続しつつ人類の文明を発展させるためには、この伝統を守りながら、我々の身の周りの材料の革新を進めていく必要があり、そのための有効な科学的基礎として、物質・材料科学が重要である。

第2章 自然の現象 – 自然を見つめる

2.1 自然の原理、法則

物質の世界は全て自然の法則に従っている。

物体の力学的運動はニュートン (Isaac Newton) の運動の法則 (古典力学の法則) に従う。「力」は我々が日常生活の中でしばしば感じることができる。物を持ち上げようとして筋肉を収縮させて「力を入れる」とき、ひざや太ももに「力を入れて」坂道を登って行くとき、などである。「物体に外部から力が働かないとき、その物体は静止しているか、等速直線運動をする」。これを「運動の第一法則」あるいは「慣性の法則」という。一見すると当然のようにも見えるが、地球からの引力の影響から逃れることはできず、また我々の周りには「摩擦」という現象があるため、外部から力が働かないという状況は本当には実現しがたい。このような運動の法則に人類が至るためには、多くの時間と観察と洞察力を要した。「物質の速度の時間変化は、外力に比例し、質量に反比例する」というのが、速度の時間変化 (加速度) と力を結びつける「運動の第2法則」である。これも電車が走り出すとき、あるいはブレーキをかけるときに、踏ん張ることで、あるいはエレベーターが動き出すときや止まるときに体を感じる自分の重さで、日常的に経験している。さらに、水をかいて泳ぐとき、あるいは他人と引っ張りっこするとき、作用・反作用の仕組みを感じ、「運動の第3法則 (作用・反作用の法則)」を経験する。このように「古典力学 (ニュートン力学)」を日常生活の中で体感することは多い。

大きさをもった物体の運動は、重心の運動と、重心の周りの回転および、物体を構成する部分の間の振動 (あるいは変形) 運動の自由度に分けられる。変形する物体や液体、気体に関しては、物体の連続体としての側面に注目して、弾性体論、流体力学などの形で記述され理解される。

物質は、原子核と電子からなる原子によって構成されている。電子や原子の運動は量子力学の法則に支配されている。熱的な現象も、古典力学と量子力学とは異なる。物質の熱的性質、例えば比熱において、低温では量子力学的な側面が顔を出してくる。電子やあるいは1つ1つの原子では、充分低温にして周りからの熱による擾乱を抑えると、回折、干渉などという波動の性質と考えられている現象が現れてくる。したがって量子力学では、粒子の状態を波動関数という概念を用いて、その回折や干渉の現象までを含めて記述する。量子力学的波動は、振幅だけでなく「位相」が重要になる点で、古典的波動とは大きく異なる。電磁波 (光) でも観測を充分精度良く行えば、

光の粒子である光子の1つずつを実際に観測することもでき、しかもそれが干渉を示すことを観ることもできる。このことを、朝永振一郎は「光子の裁判」の中で分かり易くかつ美しく一般向けに書いていて、興味深い³⁾。量子力学に従って物理法則を記述するとき、必ず現れるのがプランク定数 ($h=6.63\times 10^{-34}$ Js (ジュール・秒)) である。量子力学の形式において h をゼロにする極限で古典力学に帰着させることができる。

物理現象を記述するとき、粒子像にのみ頼ることはできない。電磁波やあるいは沢山の電子のある状態を「場」として記述する必要もある。それは、量子力学では複数の電子の一つ一つを区別することは原理的に不可能であり、電子と陽電子が衝突・消滅して光が放出されるように、粒子の生成消滅があるためである。「場」の概念は、連続体力学や相対性理論にも通じるものである。

一方、巨大な天体の運動や宇宙の運動法則は相対性理論に従う。また原子核反応では、アインシュタイン (Albert Einstein) の関係式 $E = mc^2$ に従って物質 (の質量) とエネルギーが相互に転換され、巨大なエネルギーが放出される。

長さのスケール、エネルギーの大きさなどにより、現象を支配する物理法則が異なる。これをマルチスケール、マルチフィジックスなどということもある。これは記述の仕方が変わるのであり、ニュートン力学や弾性論、流体力学、量子力学、相対性理論を互いに矛盾した法則であると考えるのは正しくない。すでに述べたようにプランク定数をゼロにする極限で、量子力学は古典力学に移行するし、光速 c を無限大にする極限で、相対性理論は古典力学に移行する。粒子像と連続体描像に関していえば、コップの中の水の全体の動きや川の中の水の流れを、一つ一つの水分子の運動により記述しようとするのは、意味のあることとはいえない。むしろ水としての流れの法則 (流体力学) に従って記述してこそ、境界に沿った流れ、渦の姿、淀み、などの、流体としての特徴を正しく捉えることができる。

音と光はともに波動としてエネルギーを伝搬するが、エネルギーの担い手が異なっている。音波は、音が伝わる物質内の一つ一つの分子が担い手となり、力学的相互作用を通じて、物質の振動として伝播していく。したがって空気の無い真空中では音波は伝わらない。音波の伝わる速さは、伝える物質の状態によって異なり、一般に、気体、液体、固体の順に速くなる。空気を介して会話している時の音の速さは1秒間に340m程度であるが、気温が高いとさらに速くなる。音波が発せられあるいは届くときに音源または観測者が運動していると、音の波長が変わり音の高さが変わる。これを音のドップラー効果といい、救急車や新幹線がそばを通り過ぎる時などに体験するこ

とができる。光（電磁波）でもドップラー効果は生じ、星の地球との相対速度の測定に用いられる。また音波は伝わる間にエネルギーの一部が熱に変換されるため、広い範囲には到達できない。

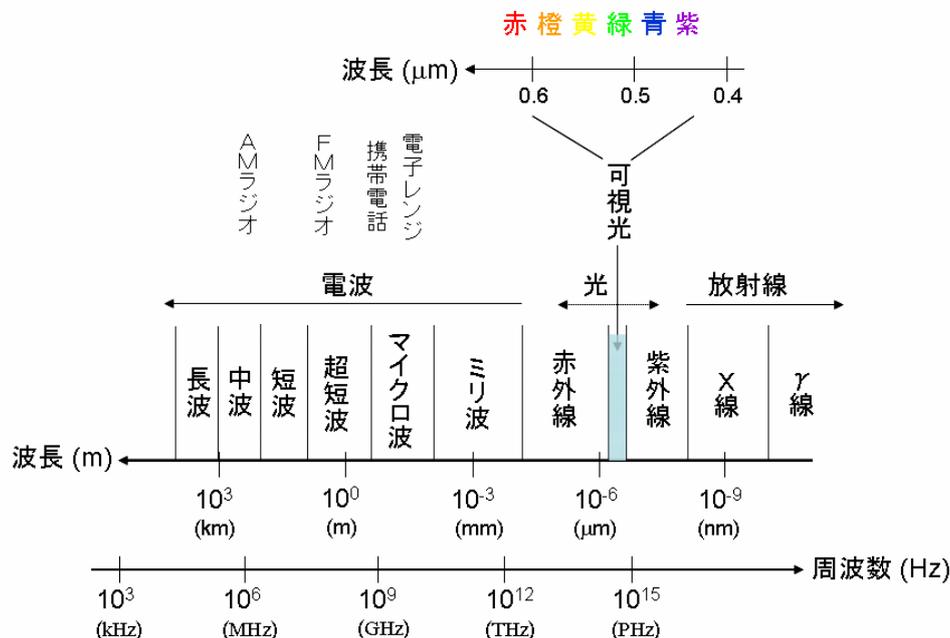


図1 電磁波の波長と長さスケール¹

地球生命は太陽の光（電磁波）のもとで進化し、光をエネルギー源として使う精緻なシステムをつくってきた。電磁波は質量をもたないがエネルギーを担うことができる。電磁波は、空間の電場と磁場の変化によって形成される波である。電界と磁界がお互いの電磁誘導によって交互に相手を発生させあうことで、空間そのものがエネルギーをもって振動する状態が生まれて、波を伝える媒体となる物質が何も存在しない真空中でも一定の光速 c （毎秒29万9千800キロメートル）で伝わって行く。電磁波は真空中を直進するが、物質が存在する空間では、吸収、屈折、散乱、回折、干渉、反射などの現象が起こる。電磁波の性質は、波長、振幅（電磁場の強さは振幅の二乗）、そして伝播方向などで決まる。光の振動数を ν （単位 s^{-1} ）、波長を λ （単位 m ）と書くと、光のエネルギーは $E=h\nu=hc/\lambda$ となって波長に反比例する。波長によって物体に及ぼす作用が少しずつ異なってくる点に着目して、電磁波は違った呼び名を持つ。波長の長い方から、電波（ラジオ波、マイクロ波）、赤外線、可視光線、紫外線、エックス線、ガンマ線などと呼び分けられている。われわれの目で見えるのは可視光線のみであり電

¹ 江馬一弘氏作

磁波全体の中ではきわめて狭い領域に対応する。可視光線の色は、波長の短い側から順に、青紫、紫、青緑、緑、黄緑、黄、黄赤（橙）、赤である。赤い光の波長は625－740 nm、緑は500-565 nm、青は450-485 nmに対応する（1 nm = 10^{-9} m、ナノメートル）。光の水滴に対する屈折率は波長により異なり、そのため空中に浮かんだ水滴により太陽からの光の色が分かれたのが虹である。電磁波の挙動は1864年にジェームズ・クラーク・マクスウェル（James Clerk Maxwell）により理論的に予測され、マクスウェルの方程式として体系化された。

2.2 物質の変化の原理とエネルギー

物質は温度と圧力に応じて、固体、液体、気体という異なる状態（相）をとる。温度や圧力に応じて複数の相が一定の割合で混じった状態をとることもある（共存）。温度や圧力を変えると、この平衡状態が移動する。物質のある相が別の相に変化（相転移）することに伴い、物理・化学的性質（密度、原子の配列、様々な物性値）が不連続的に変化する。化学変化では、酸と塩基の反応、水の電気分解、石油の燃焼のように、物質が別の物質に変化する。

「ゆく川の流は絶えずして しかも元の水にはあらず

よどみに浮かぶ うたかたは

かつ消えかつ結びて 久しくとどまりたるためしなし」

鴨長明は、つねに流れ続ける川の水に、定常状態にはあるけれども変化し続ける世界を読みとろうとした。日本人は古くから、自然や人の世の移り変わりに注目してきたようである。ところが、西欧で誕生した自然科学は、「変わらぬものは何か」に注目してきた。そして変化する自然の中に「不変の何か」を見つけようとした。そうして生み出されたのが、「物質不滅」という考え方や、「原子論」、「質量保存の法則」、「熱量保存の法則」、「エネルギー保存の法則」などといった一連の「保存の法則」を基盤とした自然科学の理論体系である。

不変な何かに注目して世界を科学的に理解するための鍵となる概念を二つ挙げるとすれば、「物質」と「エネルギー」であろう。人類がこれらの概念を創造したことで、物体の運動、物質間の反応と変化、電気や磁気にかかわる現象、生命現象、大気現象、地下や地表の現象、宇宙の現象などを関連的・統一的に記述し、説明できるようになった。

エネルギーは物質ではなく、例えば「石油」自体はエネルギーではない。しかもエネルギーは「力」とも区別されている。物質でも力でもない「エネルギー」という概

念を創造し、それによって物質の様々な変化を説明できるようにしたところに人類の英知がある。

エネルギーは、何もないところから生まれることはなく、それが消滅することもない。ある形態のエネルギーがなくなるときには、必ずそれと等しい量の別の形態のエネルギーが生まれる。これは、「エネルギー変換」と呼ばれ、エネルギーが何度変換されても、エネルギーの総和に変化は生じない。エネルギーのこのような性質は、「エネルギー保存の法則」、あるいは「熱力学第1法則」と呼ばれる。

他の外力（例えば引力）に抗して力を加えて物質を移動させ、「物質の位置のエネルギー」が変化したとき、「加えた力が物質に対して仕事をした」といい、移動の前後の物質のエネルギー差は、この仕事で与えられる。したがって、「仕事」と「エネルギー」は等価であり同じ単位で計られる。またこの例では、「仕事」とは二つの状態のエネルギーの変化とすることができる。この場合、二つの状態のエネルギーに「仕事」を加えれば、それぞれの状態での全エネルギーは変わらない。

日常生活でのほとんどのエネルギー変換には、熱の出入りが伴う。例えば、自動車のエンジンのような熱機関は、ガソリンや軽油を燃焼させて熱を生み出し、その熱（の一部）を「仕事」として運動エネルギー（自動車の運動）や位置エネルギー（坂を上る）に変換する。この場合を「熱エネルギー」から「仕事」に変換するといひ、運動エネルギーや位置エネルギーの変化に、変換されなかった熱を含めたエネルギーの総和は変わらない。投入した熱エネルギーが仕事や電力などに変換される割合を「熱効率」という。無からエネルギーを生み出すことはできないので、エネルギーの補給なく永久に動き続ける「永久機関」を作ることもできない。

エネルギー変換について考えるとき、もう一つ大切なのが「熱」の特殊性である。あるエネルギーを、すべて熱に変えてしまうことは簡単であるが、熱を単純に全部他のエネルギーに変えることはできない。熱のこのような性質は、「熱力学第2法則」と呼ばれている。そのため、熱機関では、発生した熱のかなりの部分がそのまま捨てられることになる。例えば、ガソリンエンジンでは、ほんの25%程度のエネルギーだけが有効利用され、あとは最終的に熱として放出される。このように、どんなエネルギーも最終的には熱に変換されてしまう。このことから、熱はもっとも利用しにくいエネルギーと考えられている。必要なエネルギー利用に対して、熱効率を如何にして高くするかということは、科学技術の大きな課題である。

熱の移動の現象は熱力学のエネルギー保存法則に従う。仕事として取り出すことのできるエネルギー量は熱力学第2法則に支配され、これに関係して、物質構造の規則

正しさを表す「エントロピー」の概念が必要である。エントロピー概念は情報科学における情報量という概念にも利用されている。また、物質科学の学問である熱力学、統計力学は、生物進化、経済現象、政治現象の理解にも応用されている。

エントロピーとは物質の熱力学的な「乱雑さ」を示す量である。一つの平衡状態にある系に対して、平衡状態であることを変えずにゆっくりと（体積などの）変化を与えて（したがって途中で熱の流出、流入があってもよい）、他の平衡状態に移行するとする。このときそれぞれの状態は、その中間にどのような過程を通ったかに依存せず特徴付けることができる。その特徴付ける状態量をエントロピーという。熱の正味の流入、流出があればエントロピーは二つの状態間で変化する。また、二つの状態の間の変化の過程で熱の流入、流出がなければ、エントロピーは減少することはない（エントロピー増大の法則）。熱が吸収されれば、その系のエントロピーはその分（熱を熱源の温度で割った分）だけ増加する。エントロピーはその系の乱雑さを示す量であるから、このとき熱を吸収して系の乱雑さが増加することになる。絶対温度 0 K のとき（完全な静止の状態であるから）、エントロピーはゼロであると考えてよい。

平衡状態にある物質の変化に注目すると、物質には、その系を保つ働き（ルシャトリエの原理）があることに気づく。平衡状態にある物質に、温度、圧力、成分の量など状態変数を変化させると、その変化を相殺する方向に平衡が移動する。この原理は、状態変化にも化学変化にも当てはまる。例えば、物質の温度は外から熱を加えると上昇し、熱を奪うと下降する。しかし、氷と水が共存する相の境で熱を加えても、氷が溶け始めるだけで、温度は上昇しない。このような動的平衡、緩衝作用は、生命のホメオスタシス、地球上の生態系の種と数のバランスなどにも適用できる。

人類が使用するほとんどすべてのエネルギーの根源は、太陽内部の核融合で放出されるエネルギーか、地球内部の放射性物質の崩壊（原子核分裂）に伴って放出されるエネルギーのどちらかである。太陽内部の核融合のエネルギーは、赤外線、可視光線、紫外線、その他の電磁波として地球に供給される。太陽からのエネルギーの約 30% は雲や海洋、極地の氷などにより反射される。残りの太陽エネルギーは地球を暖めることにより、大気の動き、海洋の動き、生命活動（光合成を含む）などのエネルギー源となり、風力、水力、波力、石油・石炭・天然ガスなどの化石燃料、バイオ燃料などのエネルギー源となる。放射性物質の崩壊エネルギーは、地熱の大部分及び原子力発電のエネルギー源となる。現在使用されている石油、天然ガス、石炭などの化石燃料は、非常に長い年月をかけて、太陽光を使って植物が光合成したバイオマスを地下の物質に蓄えたものである。

2.3 身の回りで利用している現象

我々は物質の性質を機能として利用し、あるいは物質を通じて様々な物理、化学現象を利用している。例えば電気冷蔵庫は、気化という現象（気化熱）を利用している。

電磁波による電場と磁場の変化は、金属中の自由に動き回る電子を運動させ、電流が発生する。これを利用したのがアンテナで、テレビやラジオ、携帯電話などはこれを利用している。電子部品への電磁波の影響が予想され、あるいは影響を十分予期できるものではないため、予期せぬ事故を防止するために心臓ペースメーカー装着者の近辺や航空機内などでは、電磁波を発生させる機器を使用してはならないことになっている。周りを導電性の物質で密閉すれば電磁波がその内部に進入しない。これを電磁波遮蔽（シールド）という。また電磁調理器では電磁誘導で金属中に誘起された渦電流の性質と磁性体の特徴を組み合わせるなど、様々な工夫がなされている。現在、広く使用されるようになった非接触型 IC カードでも電磁誘導を利用して IC チップ自身の動作に必要な電流を得ている。

交通信号機に広く利用されている発光ダイオードでは、素子の両端に電圧をかけると、その中に電流（一端からは電子、他端からは正孔が注入されて電流が生じる）が生じ、電子と正孔が結合して発光する。そのため、光の単色性や方向性に優れ電球に比べて遠くからでも見易く、またほとんど全ての電気エネルギーが光に変換されるなどの優れた性質がある。発光の色（波長、エネルギーと言い直してもよい）が後述する個々の物質のエネルギーギャップによって決まる。太陽電池は発光ダイオードと逆の現象を利用し、光を吸収して電流（電子と正孔の流れ）に変える。太陽光から電流への変換効率が優れた材料として開発されるようになり、広く用いられている。現在、多くの工業製品に組み込まれ、またロボットの眼や触覚に用いられるセンサーやアクチュエーターも、材料物性の変化を巧みに機能として利用したものである。

物質科学の医療機器への応用、医療そのものへの応用も著しく発達している。核磁気共鳴画像法（MRI）では原子の外部磁場に対する核スピンの共鳴信号を観測するものであり、医療に用いる場合には人体を作る水の水素原子核の信号を計測している。また近年注目されているのが脳機能の診断に用いる‘機能 MRI’（functional MRI）や近赤外線分光法である。これは、脳内血液中のヘモグロビンの酸素結合状態（磁気状態）を MRI あるいは近赤外分光で計測する。

【コラム1】 似非科学

現在の科学は、専門性が深まり、それに携わっていない人には理解が難しいことが多くなっている。一方では、科学に興味を持ち勉強することが格好悪いこと、理屈っぽくなって異性にもてなくなる、と避けたがる傾向があるといわれる。このような理由が結果的に、科学的な言葉を使った商品や社会的発言に対して、深い吟味を避け、安易に受け入れるという結果を生んでいる。さらには、本当は科学的根拠が無い商品や意見が、権威を持って世の中に出回る原因ともなっている。

血液型性格診断、ある種のサプリメントや薬事法等で認められていない医薬品や医療器具、ある種の健康食品といわれるものが、それらの例として挙げられる。「マイナスイオン」などをうたった電気製品、「室温核融合」などにも、科学的根拠が無いままに受け入れてしまうという例を見ることができる。また「統計学」の言葉である「誤差」とか「確率的」といったことを鵜呑みにすることにより、風聞に踊らされた事件も少なくない。

科学を装った言葉に対して批判的に対応するということは、我々の日々の生活の安全を図るという意味でも正しい政策決定を行う上でも、益々重要になっている。分からないことは、恥ずかしがらないで仲間と議論する、他人に尋ねてみる、またウェブサイトで得た検索情報を鵜呑みにしない、などが必要な態度である。

第3章 自然の物質と人工物質

3.1 物質の始まり

物質の究極的な起源は宇宙そのものの起源と共に考えなければならない。宇宙は137億年前の開闢以来膨張を続けている。宇宙の最も初期の急膨張（インフレーション）に続く超高温・超高密度の灼熱の火の玉（ビッグバン）状態の中で、最初に光子を含む大量の素粒子が作られた。その後、クォークと呼ばれる素粒子が結合して中性子と陽子が形成された。ヘリウムのはほとんどは宇宙開闢以来1秒（温度百億度）から3分ほどまでに陽子と中性子を原料として作られたものである。

人体を構成する炭素や空気中の酸素、窒素などの元素は太陽のような恒星の中での核融合反応によって水素とヘリウム原子を原料として作られたものである。元素が宇宙空間に遍在しているのは星の終末期の大爆発、すなわち超新星爆発によってそれまでに核融合した元素がばら撒かれたからである。

3.2 物質の大きさ、重さと単位

万物の変化・流転はそれぞれの文明において一大命題として扱われ、多くの哲学者によって根源的構成要素が探求された。古代ギリシャ、インド、中国においては、万物の構成要素として元素の概念が探求された記録が残っている。なかでもデモクリトスの説が注目されるが、今日の元素の考えが発展したのは17世紀以降である。「原子」に対応する英語のatomの語源はギリシャ語の「これ以上分割できないもの」からきている。

3.2.1 素粒子、原子核と結合エネルギー

現代では、水素原子の例をとると、一個の陽子のまわりを一個の電子が運動している複合粒子であることが分かっている。その大きさは0.053 nm程であり、質量は 1.66×10^{-30} gである。電子はこれ以上分割できない素粒子であるが、陽子や中性子（これを核子と呼ぶ）は、さらにクォークと呼ばれる素粒子から構成される。電子の質量は 9.11×10^{-34} gである。陽子と中性子の質量はほぼ等しく、電子の質量の約1840倍である。一方、光の粒子である光子には重さはない。微視的世界の最も基礎的な階層の粒子が、クォークであり、電子であり、光子である。

陽子と中性子が核力という相互作用で結合し合って、原子核ができています。原子核の大きさ（広がり）は 10^{-16} mであり、原子の広がり比べると、大きさのない点と

考えてよい。その結合の強さを結合エネルギーで表す。水素の原子核は例外で、陽子 1 個から成る。湯川秀樹は、核力を担うものとして中間子（今日ではパイ中間子と呼ぶ）を核子がやり取りしていると考えて中間子論を作った。中間子論は、今日の物理学や自然認識のモデルになっている。核力は強い相互作用と呼ばれ、クーロン力よりも 100 倍も強い力であるが、核子同士が充分近距離に近づかないと働かない。パイ中間子は中間子理論発表後に宇宙線の観測により見出された。

重い原子核では、原子核分裂によって、より安定になりその結合エネルギーが放出される。これが原子力エネルギーの利用である。一方、軽い原子核では、原子核が複数融合してより重くなるほうが安定となる。これを利用しようというのが核融合エネルギーの利用である。

【コラム 2】水の本性を探求した人間の歴史

万物の根源は何かという問いは、人間が抱く究極の問いの一つであろう。古代ギリシャのターレスは、自然現象には必ず何かの原因があって起こると考え、水こそが万物の根源（アルケー）であると唱えた。以来、水の本性は何かを知ろうとした人間の歴史は、物質の究極をたずねる科学の歴史でもあった。

ターレスと同時代の人々は、日常経験から水なしでは人、動植物が生きていけないこと、また、水は石のように氷となり、空気のように蒸発すると見えなくなることを知っていたであろう。水はあらゆる物に含まれ自由にかたちを変え、生命を支える恵みを与えてくれるが、時には怒り狂う暴風雨となり大きな破壊力をもつ水に対して畏敬の念をもっていたと思われる。

その後、アリストテレスは、水は空気、土、火と並ぶ四元素の一つであると唱え、デモクリトスは、水は、それ以上分割することのできない最小単位・原子の一つであると主張した。また、目に見える物体は原子の集合体で、原子の形、配列のしかたの違いによって性質が決まり、原子の集合離散によって物質変化が起こるだけで、物質は消滅することはない、と唱えた。歴史的には、アリストテレスの四元素説の方が真理と信じられ、元素の性質の組み合わせを変えると元素が変換すると考えられて、その後 1700 年以上の間、金属変換（錬金術）の基礎理論となった。しかし、錬金の試みは全て失敗に終り、17 世紀に天文学の影響を受け、自然現象や物質変化を観察・実験事実に基づいて考えるという自然科学の基礎が築かれた。18 世紀末に、ラボアジェ (Antoine-Laurent de Lavoisier) は、水は元素ではなく、水素と酸素からなる化合物であることを実験的に証明し、燃焼という物質変化の本質も明らかにした。1800 年に入り、

ドルトン(John Dalton) は、デモクリトスの原子の概念を復活させ、化学変化に伴う物質の量変化の結果に基づいて、水を、元素記号を用いて HO と表した。気体反応の体積変化に注目して水分子が H_2O であることを証明したのはアボガドロ(Amedeo Avogadro)である。ここに近代化学の基礎が確立し、多様な分子の組成、構造の決定、化学反応の本質が正しく認識され、その後 200 年の間に物質の科学は急速に発展し今日に至っているのである。

3.2.2 原子、分子

正電荷をもつ陽子と同数の負電荷をもつ電子がその原子核を取り囲んで中性原子ができている。このように原子核と電子とを結合させて原子を作る力は、電磁相互作用(クーロン相互作用)である。原子の大きさ(広がり)は、すでに述べたように 0.05 nm から 0.1 nm 程度である。いくつかの電子が中性原子からはぎ取られたものが陽イオンであり、電子が余計に付着すると陰イオンとなる。これらの全ての粒子は、重い原子も、波の性質を併せ持つ。全ての原子について、中性子と陽子の数の和を質量数、陽子の数を原子番号という。

原子の種類、特に陽子の数が違うとそれらの原子及び集合体の化学的性質が違ってくるので、陽子の数が違う原子の種類を分類するのに元素という言葉を用いる。原子が構造的な概念であるのに対して、元素は特性の違う物質の根源を示す概念である。陽子の個数が同じで中性子の数が違い、したがって質量数の違う原子も同じ元素に属する。化学的性質はほぼ同じであるので、これらを同位体という。分子振動など原子核が関係する運動や、後で述べる核分裂及び核融合といった原子核の関係する反応では、同位体によって異なるという重要な意味をもっている。原子を表すのに、元素記号を用いる。たとえば炭素はC、酸素はO、水素はHなどと書く。原子の質量を表したものが原子量である。これは質量数 12 の炭素原子 (^{12}C と書く) 1 個の質量を 12 とする相対的な無次元量である。

複数個の原子は電子を共有または授受して分子を構成する。分子の質量を表すためには分子量が用いられる。これは原子量と同じく、 ^{12}C 原子 1 個の質量を 12 としてそれに対して分子の質量を相対的にあらわした無次元量である。分子量だけのグラム数の物質の量をモル (mol) という。例えば炭素の場合、1 分子は 1 原子であるので、12 g の量が、炭素 1 mol である。1 mol の物質の中に含まれる分子の数は一定で、この数を アボガドロ定数 と呼ぶ。アボガドロ定数は $6.022 \times 10^{23}/\text{mol}$ である。したがって、12 g の炭素は 6.022×10^{23} 個の原子からできていることになる。

2007年現在では118種類の元素が知られている。これらを原子量順に並べると9番目または19番目に似通った性質の元素がくるといふ周期性が現れる。これは原子を作っている電子の状態、特に原子の外側にある電子の状態、が従う規則に由来する。原子を重さの順に並べ、その性質の周期性に従って表にしたものが元素の周期表である。周期表の多くの元素は18世紀中期以降、化学分析の手法（正確な秤量の技術、電気分解の利用、原子の吸収光や発光の利用、質量分析計など）の進歩により発見されてきた。近年になって発見され加えられた元素は、加速器の中で人工的に作り出されたものである。日本化学会、日本物理学会をはじめとする6学会は共同で、文部科学省の支援を得て「一家に一枚周期表」をという運動を進めている。

3.2.3 宇宙の大きさと質量

逆に大きな方に目を向けると、宇宙にも階層構造がある。惑星である地球の質量は $M=5.97 \times 10^{27}$ g、太陽の質量は $M_s=1.99 \times 10^{33}$ g、銀河の平均質量は $M_{gal}=(10^{11} \sim 10^{12}) \times M_s$ 、銀河団の平均質量は $M_{cl}=(10^{14} \sim 10^{15}) \times M_s$ と言われている。地球の半径は $R=6.4 \times 10^6$ m、太陽の半径は $R_s=7 \times 10^8$ m。また天文学における長さの単位としては、太陽と地球間の距離を1天文単位 $=1.5 \times 10^{11}$ mとし、光が1年間に進む距離の1光年 $=9.46 \times 10^{15}$ mを用いる。すると、銀河の大きさは5万光年 $=5 \times 10^{20}$ m、銀河団の大きさは600万光年 $=6 \times 10^{22}$ m、私たちが現在見わたすことのできる範囲の宇宙の大きさは、およそ140億光年 $=1.4 \times 10^{26}$ mである。

本節(3.2)で述べてきたような物質科学全体のイメージは図2のように表せる。ウロボロスとは「尾を飲み込む蛇」の意味で、古代人の「死と再生」「循環」の考えを象徴するといわれる。この種の絵は世界各地の古代文明の遺跡に残されている。図2は「物質のマクロ極限である宇宙の開闢を支配しているのは、逆に物質のミクロの極限の法則である」ことを、長さの長い方の極限と短い方の極限でつながっているとして、1979年のノーベル物理学賞受賞学者グラショウ(Sheldon L. Glashow)が表現したものである。

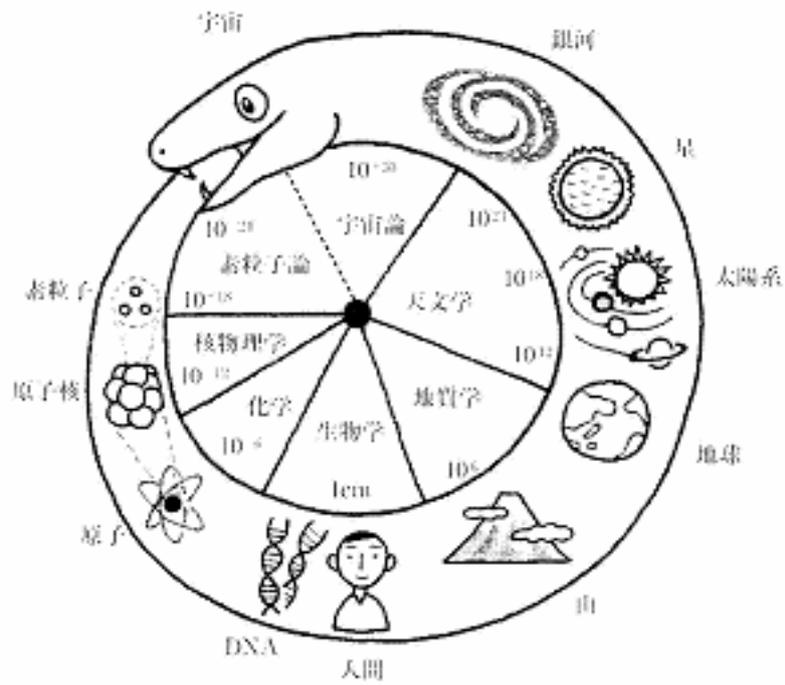


図2 ウロボロスの図²

² UT Physics 1「ものの大きさ 自然の階層・宇宙の階層」須藤靖著、イラスト：いずもり・よう、東大出版会

【コラム3】国際単位系

18世紀以降の行動範囲の拡大、科学や工業の発達により、種々の物理量について世界で統一した単位が必要となった。フランス革命後（1791年）、地球の北極点から赤道までの経線の距離の1000万分の1として定義される長さの単位「メートル」が決められた（地球の円周を4万キロメートルとする）。日本でも計量法が制定され、1959年には土地・建物の表記を除き（それまでの尺貫法に替えて）メートル法を完全実施するように法律で義務付けられた。これらを引き継いだ先に、現在、最も普遍的なものとして国際的に使用されている国際単位系がある。国際単位系（SI=Le Systeme International d'Unites）では、独立である7つの量、長さ、質量、時間、電流、熱力学温度、物質質量、光度を「基本単位」とし、それぞれの量の決め方を物理法則に基づいて定義している。これらの単位がそれぞれ、メートル[m]、キログラム[kg]、秒[s]、アンペア[A]、ケルビン[K]、モル[mol]、カンデラ[cd]である。その他の単位（例えば力やエネルギー、電荷）は、基本単位の組み合わせにより決められる。さらにSI単位の10の整数乗倍を作るための接頭語が以下のように決められている。本報告書でもギガ、マイクロ、ナノ、ピコなどを用いている。

10^{18}	10^{15}	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^2	10^1	10^0
エクサ	ペタ	テラ	ギガ	メガ	キロ	ヘクト	デカ	
E	P	T	G	M	k	h	da	
10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}	
デシ	センチ	ミリ	マイクロ	ナノ	ピコ	フェムト	アト	
d	c	m	μ	n	p	f	a	

量の割合を表すのに、%、ppm、ppbなどを用いることがある。ppbはparts per billionの略で、10億分の幾つ、ppmはparts per millionの略で、百万分の幾つをあらわすのに使われる。よりなじみの深い%はparts per centの略で、百分の幾つであるからppcと書いたほうが統一が取れて後の理解によかったのかもしれない。これらの記号は数字の末尾にppb、ppm、%とつけるが無名数である。1%は10,000ppmと同じである。

3.3 物質の階層性 — 原子から分子、結晶へ

3.3.1 原子から分子へ

私たちが日常生活で接する物質はさまざまな元素からできていることが 19 世紀の初めドルトン (John Dalton) によって明らかにされた。一つ一つの元素を担う粒子が原子である。

原子は周囲に持つ電子を他の原子と共有して、複数個の原子で分子を構成する。例えば、水素や空気中の窒素、酸素などは二つの原子が電子を共有し合い、二原子から成る分子 H_2 、 N_2 、 O_2 である。また、私たちの体の大半を占める水は水素原子 2 個と酸素原子 1 個からできている H_2O 分子である。この水の分子を 10^{25} 個ほど集めると、コップ一杯の水になる。

このように多種の原子の多様な組み合わせにより多様な分子が形成され、豊かな物質世界を構成している。分子には、常温で気体の H_2 、 N_2 、 O_2 のように簡単な構造の小分子から、液体のエタノール、酢酸などの中型分子、また多数の原子が結合した巨大な分子がある。その中には繊維や生命活動を担うデンプンやタンパク質などの高分子があり、物質界はたいへん変化に富んだ世界である。

分子の結合機構には様々なものがある。炭化水素分子の結合機構は、「共有結合」であり、複数原子の間で 2 個ずつ対になった電子を共有している。水素結合、疎水結合、ファンデルワールス結合は生体物質の立体構造と機能を定める重要な機構である。分子が形成されると、これらは原子がばらばらにある状態よりもエネルギーが低く、安定となる。これらのエネルギーを結合エネルギーと呼ぶ。結合エネルギーにも強弱の階層性があり、共有結合が強く、水素結合、疎水結合、ファンデルワールス結合は弱い。

3.3.2 原子から結晶へ

原子やイオンを周期的に規則正しく 3 次元的に配列したものが結晶である。結晶には並進移動に関する周期性とともに、回転対称性がある。結晶をある距離だけ全体を移動させたとき、あるいは定められた (周期的に配置された) 点の周りで回転させてやると、その結果の構造は初めの配置と完全に重なり合う。

我々の目にする多くの固体は、完全な周期性を備えた結晶 (完全結晶) ではなく、不純物を含んだり、結晶格子の不整合 (乱れ) があつたり、小さな結晶が集まった多

結晶体であったり、あるいは非晶質、高分子固体のような液体構造と大きく違わない構造のものであることがほとんどの場合である。(ただし非晶質と液体は動的な性質、粘性は大きく違う。) 実際に目にする機会の多い結晶は、美しく輝く宝石、方解石、砂糖(ショ糖、 $C_{12}H_{22}O_{11}$) や岩塩(食塩、 $NaCl$) の結晶など限られているが、沢山の電気機器の中に組み込まれたコンピュータには半導体結晶が広く用いられている。

物質の性質を知るためには結晶の性質を知り、それからさまざまに変化した状態での性質を調べることが、結局は早回りな手順である。また高い機能を備えた素子や機械を作るには、まず純粋な結晶をつくる必要がある。そのため実験室や産業の現場では結晶を人工的に作るさまざまな方法が開発されている。それらは、気相から作る方法、液相から成長させる方法、固体中の熱的拡散を使うものなど多様である。

広く用いられる金属である鉄の性質も、一般に見られる構造材として用いるもの、刀身などの鋼(はがね)、特殊用途に用いる高機能材、不純物を取り除いた単結晶(全体が一つの結晶になっているもの) などでは、それぞれ変形に対する強度や、電気伝導度などが大きく異なる。電子材料として広く用いるシリコン(Si)も単結晶を作るのには、電気炉の中で溶かして種結晶(たねけっしょう)の周りに成長させるなどの方法を用いる。シリコンの場合には単結晶にわずかな不純物原子を導入することによりその性質を制御することができ、利用価値の高い材料となる。美しい宝石ダイヤモンドは、純粋な炭素Cが(普通には地球内部の)高温高压状態で結晶化した透明な物質である。一方同じ炭素でも、グラファイトは黒い不透明な結晶で、粘土と混ぜて鉛筆の芯にする。近年はフラーレン、ナノチューブなどの新しい構造の炭素物質も作られており、広い用途に用いられる。またダイヤモンドは絶縁体、グラファイトは半導体であり、液体状態の炭素は金属である。同じ元素から成り立つ物質でも、このようにその構造によって大きくその性質が異なる。

結晶状態のシリコンやダイヤモンドの凝集は「共有結合」が担っている。金属の凝集機構は、「金属結合」といい金属イオンの間を自由に動き回る自由電子が糊のように、全体の結合を担っている。食塩(塩化ナトリウム)では陽イオンのナトリウムと陰イオンの塩素の間に静電的引力が働く「イオン結合」が、凝集機構である。分子の場合と同じく、水素結合、ファンデルワールス結合が関与することもある。グラファイトの場合には、2次元面内は共有結合が主たる凝集機構であるが、面間はファンデルワールス結合による。また液体状態の炭素やシリコンでは、1つの原子の周りに配位する原子数が増え、金属結合がその主役を果たす。結合エネルギーについていえば、共有結合と同じくらいに、金属結合、イオン結合も強い。



図3 結晶の例（宝石）

左からダイヤモンド、ルビー、水晶。それぞれ炭素、微量のクロムイオンを含む酸化アルミニウム (Al_2O_3)、酸化ケイ素 (SiO_2) である。

結晶には原子が密に積層したものと疎に積層したものがある。金属の多くの場合には、金属原子が密に積み重なった構造をとる。金属の玉を稠密に積み重ねたような構造を想像すればよい。一方、半導体の場合には共有結合であることから想像できるように、原子が化学結合の規則に従って積み重ねられており、金属に比べると原子の積み重なりは疎であり、それぞれの間に強い「結合手」ができた構造をとる。これらのために金属は粘りが強く、曲げたり、薄く延ばす（展性、延性）ことができる。一方、共有結合結晶は、ダイヤモンドに見られるように硬いが、ハンマーで強く叩けば粉々に砕け散る脆さがある。

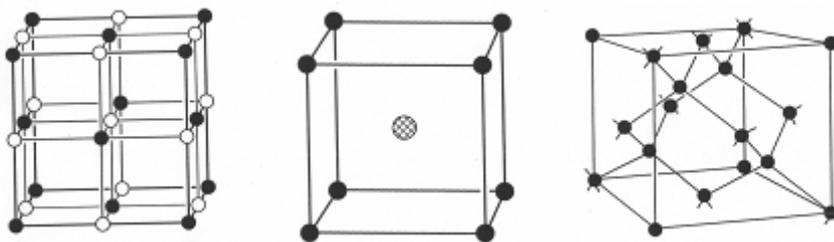


図4 結晶の構造：食塩の構造（左）、CsCl の構造（中）、ダイヤモンドやシリコン、ゲルマニウムの結晶構造（右）

食塩の構造（左）。黒丸がナトリウムイオン、白丸が塩素イオンに対応する。白丸を無視し、黒丸だけを考えれば、金、銀、銅など典型的金属の構造に対応する。CsCl の構造（中）。黒丸がセシウムイオン、真中の丸が塩素イオン。両方が同じ元素なら、例えば鉄の結晶構造。ダイヤモンドやシリコン、ゲルマニウムの結晶構造（右）。

最近は、一層毎に原子やイオンを積み重ねて結晶成長させたり、更に異種結晶を積層した人工結晶も作られて、発光ダイオードやレーザーダイオードなど多様な機能の発現が可能となっている。

高温でのマグマや熔融状態から時間をかけて徐々に冷やすと結晶となるが、急冷すると周期性を持たない準安定な非晶質（ガラスとかアモルファスとも呼ばれる）となる。

3.3.3 高分子

高分子物質は多数の小分子が規則的に繰り返し共有結合してできた巨大な分子からなる物質である。小分子の連結構造や分子量を一次構造、連結によって決まる立体的な構造（例えば、ヘリックス構造など）を二次構造という。二次構造には高分子鎖の内部回転によって決まる自由度がある。高分子鎖が凝集した系では、分子間相互作用や溶媒との相互作用によってより大きい長さスケールの構造が決められる。このような構造を高次構造という。これらの三つの構造を適切に設計することによって、極めて多様な機能や性能を創り込むことが可能である。

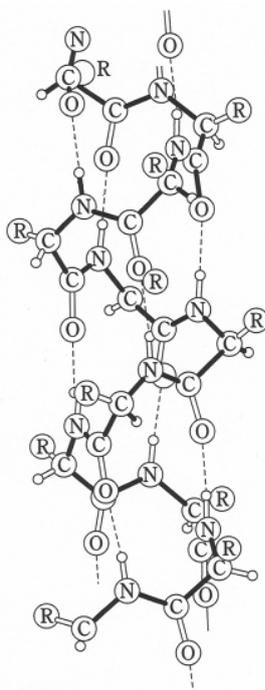


図5 たんぱく質中のアルファ・ヘリックス構造と呼ばれる螺旋構造

点線が酸素 (O) と水素 (小さい白丸で表現) の間にある水素結合を示している。

【コラム4】純物質（化学物質）と混合物

空気、海水、コンクリートなど、身の周りには多くの物質は、2種類以上の分子レベルの成分からできている。これらを混合物という。化学は、混合物を成分の純物質に分けとり、それぞれを研究対象とし、どのような元素から成るかを調べることから始まった。例えば、空気には大別して燃料を燃やすのに関係する成分と燃焼に与らない成分があることが分かり、これを分けとり、前者が酸素 O_2 、後者の主成分が窒素 N_2 であり、そうしてこれらが2原子分子であることを明らかにした。このような経緯から、酸素や窒素のような純物質を化学物質ということがある。これらの混合物である空気を化学物質とはいわない。海水の場合には、加熱すると蒸発する水 H_2O と残る塩類（主として食塩 $NaCl$ ）の混合物であり、水や食塩を化学物質という。一種類の元素からなる物質 O_2 、 N_2 などを単体といい、2種類以上の元素からなる物質 H_2O 、 $NaCl$ などを化合物という。

混合物の性質は、成分純物質の和で表される場合と、全く違う性質が現れる場合がある。空気中の酸素と窒素は前者の好例であろう。呼吸を助ける場合には、酸素の濃度を高くするために酸素吸入を行う。食品などの酸化を防止するには、酸素との接触を避けるために窒素ガスを封入することがある。後者の例の一つは食卓塩であろう。 $NaCl$ に各種の塩類が少しずつ加わることで、調味料としての豊かさが醸成される。半導体に至っては（4.4 参照）、第二の少量成分（これを不純物という）を加えて初めて機能が発現する。

化学物質には今日3千万種以上が知られており、そのなかには人々の衣食住、疾病からの予防・治療、また現在の先端的情報・通信技術におおいに貢献し、人類がいかに化学の恩恵を受けてきているか測り知れない。つきつめれば、人体そのものが化学物質でできている。一方、自然環境中で難分解性であり、かつ、人の健康を損なうおそれがある化学物質もあり、これらを特定しその使用を規制するため、1973年に「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（化審法）」が制定された。これによって、行政・メディア・社会一般で「化学物質」という言葉の負の側面のみ強調されるようになってきているのは好ましいことではない。

高分子物質は、天然高分子物質と人工高分子物質に大別される。

天然に存在する高分子物質の多くは生物が生産する。代表例は植物が光合成で生産するブドウ糖を構成単位とするセルロースやデンプンなどの多糖類、動物の体を構築

するタンパク質や生体反応を制御する酵素タンパク質、遺伝情報を蓄える DNA（核酸の一種）など生命維持に大切な物質である。一般的に天然高分子物質は高度な規則的構造を持っている。例えば酵素タンパク質による高度な反応選択性や穏和な条件下での触媒としての活性、DNA などの遺伝情報保持の堅牢性などは、この構造の規則性に因るところが大きい。これらの性質は主に二次構造の規則性によるが、温度や pH などの環境条件の変化や他の分子などとの相互作用によってこの構造は容易に変化し、最悪の場合には機能を失うこともある。

人工高分子物質の代表例は石炭や石油を主原料とするプラスチック類であり、熱をかけると流動する熱可塑性樹脂と、流動しない熱硬化性樹脂とに大別される。高分子鎖の繰り替えし単位となる小分子の構造と連結構造の規則性を制御することによって、柔軟なゴム状物質から耐熱性の高い剛直な物質まで取得でき、一方自重の 1000 倍程の水を吸収する高吸水性樹脂や電気伝導性を有する樹脂など、天然高分子物質では得られない性能や機能を設計・製造することが可能である。特に熱可塑性樹脂は成形加工が容易で、三次元形状の成形体やシート状、膜状、糸状などに自由に加工できることから、身の周りの雑貨をはじめとして、食品包装、家電・電子機器、輸送機器など広範な用途に利用されている。生活の利便性や食品の鮮度保持、衛生など現代生活を支える必須物質となった一方で、本来天然に存在しない物質であることから自然の代謝系では分解が困難で、廃棄物処理の問題に直面している。この観点から新しい高分子物質として、自然環境中でも容易に分解・無害化するプラスチックが開発されている。人工高分子物質は枯渇性資源を原料とすることから、高分子の一次、二次、高次構造をナノテクノロジーによって精密制御して、物質の限界性能・限界機能を実現して資源利用効率を最大化し、結果として資源消費量・廃棄物排出量を最小化することが期待されている。

3.4 物質の機能（物性）

3.4.1 物質の成り立ち

天然に存在する元素は 90 種程度に過ぎないが、これらが組み合わせられて集合すると、その組み合わせや構造によって様々な性質をもった物質ができ、その種類は無数にある。自然界に存在するあるいは人間が作り出した物質の多様な性質は、人類の日常生活に不可欠なものとなっている。

物質の性質は、一義的にはそれを構成する元素の種類で決まる。水素 H_2 、窒素 N_2 、

酸素 O_2 それぞれの性質を他の元素で置き換えることはできない。周期表の同じ族に属する元素の水素化物、例えば水 H_2O 、硫化水素 H_2S 、セレン化水素 H_2S を比べると、後二者は強い毒性をもち、水とは似ても似つかない。

しかしながら、同じ元素でも分子の構造の違いによって全く異なる性質を発現することも多い。炭素 C を例にとってみよう。共有結合でできた堅固な三次元構造をもつ結晶はダイヤモンドであり、宝石となるばかりでなく、最も硬度の高い物質であり、熱伝導性に優れている。研削機械の先端や電子機器のヒート・シンクとして使われている。一方、二次元の共有結合で層状の拮がりをもち、それらがファンデルワールス結合をしたグラファイトは黒い光沢を持った結晶で柔らかく、電気伝導性をもつ。フラーレン C_{60} は炭素原子 60 個がサッカーボールのような球を形成しており、カーボン・ナノチューブはグラファイトの 1 枚のシートを 3 次元に巻いた構造をもつ。カーボン・ナノチューブの場合にはグラファイト・シートの巻き方の違いで、半導体、金属の両方になる。 C_{60} やカーボン・ナノチューブはナノスケールで未知の物性を発現する可能性を秘めているため、ナノサイエンスで活発な研究対象となっている。最後に、発達した規則的な構造を持たない無定形炭素がいわゆる煤である。これらが皆同じ炭素という元素からできている。

以上の例からも分かる通り、第二義的には物質の性質は分子の構造あるいは原子の空間的配列構造で決まることも多く、構成元素のみで物質、材料の性質が全て決まるわけではない。(3.3.2 「原子から結晶へ」の項も参照)

3.4.2 弾性的性質 – 伸びたり縮んだりする力

固体結晶を引っ張ったり圧縮したりすると、一般に伸びたり縮んだりする。外力が小さいときは、固体の変形の大きさは外力に比例し、外力を除くと変形も無くなり元にもどる (フックの法則、いわゆる「ばねの法則」)。これを弾性という。後で述べるゴム弾性と対比して、エネルギー弾性ともいう。変形することにより固体内の原子間相互作用エネルギーが増加し、より低いエネルギーの状態に戻ろうとすることが復元力 (ばねの力) の原因である。さらに大きな力を加えて変形が大きくなると、力を除いても変形は元に戻らなくなる。これを塑性と呼ぶ。塑性変形は固体の原子面がずれることによって起こる。

高分子物質の変形は、固体結晶の変形とは異なる。ゴムを考えてみよう。固体結晶の変形に比べゴムの変形は大きい。また冷蔵庫に入れておいた輪ゴムを外に出したばかりの時には、輪ゴムがあまり伸びないのはよく経験することである。ゴムの伸び縮

みは、固体結晶の弾性と違い、丸まっていたゴムの分子鎖が伸ばされることによりエントロピーが減少するという機構による。これをゴム弾性（エントロピー弾性）という。ゴム弾性もフックの法則に従うが、伸び定数が温度に比例して大きくなる。温度が上昇すると、分子鎖の熱運動が活発になりゴムの張力が増加することが、その温度依存性の原因である。

3.4.3 電氣的性質 - 電気が流れる

物質は、電氣的性質で見ると、金属、半導体、絶縁体に分けられる。

金属は電気や熱をよく伝え、光を反射する。機械的には強度が強く展性・延性に富む。これらの性質は自由に動き回ることのできる電子（自由電子）の存在によっていえる。金属中の電子が占めている状態（占有状態）の最高エネルギー状態と占めていない状態（非占有状態）の最低エネルギー状態の間に、エネルギーの差が無い物質が、金属である。このため、僅かに外部電場をかけることにより、電子の分布が変わり電流を流すことができる。

自由電子がなく、電気を伝えない物質が絶縁体である。セラミックス、有機化合物や有機高分子はこの絶縁体の代表例である。半導体も絶縁体である。絶縁体では、電子の占有状態と非占有状態の間に有限のエネルギー差があり、小さな外部電場では電子の分布を変えることができず、電流を流すことはできない。この有限のエネルギー差をエネルギーギャップという。半導体の場合にはエネルギーギャップが小さく、不純物元素を添加することにより（この操作をドーピングという）、自由に動き回る電子（自由電子）または電子の抜けた状態である正孔をごく僅かに導入することができ、その数を添加不純物濃度により制御することができる。これらが電気伝導性の制御につながっている。半導体の電気伝導特性や光学特性は、エネルギーギャップによって説明できる。我々の便利な生活を支える電子デバイスには、半導体が広く素材として用いられている。IT(情報技術)を支える機能素子の多くは半導体を基盤としたものであり、半導体はIT革命を支えた物質であるといえる。

絶縁体のなかには、電場を加えると電気を帯びる性質が特に大きい物質があり、それを誘電体という。物質は正の電荷をもった原子核と負の電荷をもった電子から構成され、全体としては中性を保っているが、電場によってそれらの電荷がそれぞれ逆方向に移動すると電気分極が起こる。これが物質の誘電的性質の起源であり、その性質はコンデンサーなど多くのものに利用されている。

3.4.4 磁氣的性質 – 磁石とは

磁場を加えると磁気を帯びる性質が特に大きい物質を磁性体という。電子にはスピンの量子力学的な自由度がある。これはミクロの磁石と考えても良い。たくさんの電子によってマクロの性質として現れると磁石となる。強磁性体では磁場を加えないでも原子の磁石が一方向に揃っていて、磁石に引きつけられる性質をもつ。通常、磁石は鉄・コバルト・ニッケルと言ったある種の金属、合金、金属酸化物などからできている。最近ではネオジム-鉄-ホウ素系、サマリウム-コバルト系など希土類元素を含む金属間化合物で非常に強い磁石が開発されている。磁性体となる有機化合物、一つの分子が磁気モーメントを持つ状態を保つ分子磁石など新しい磁性体も発見され、磁性の理解も拡大している。

磁石の実用例は多岐にわたり、現代文明は磁石なしには考えられない。その力学的な性質を使ったもの（物を挟んで支持する“マグネット”、摩擦の少ないベアリング、廃品選別用マグネットなど）、音響機器（スピーカー、マイクロフォン、ヘッドフォンなど）、情報通信機器（磁気カード、スイッチ、センサー、FAX器、医療診断用MRI）、磁気ディスク、光磁気ディスク、電動モーター・発電機（交流／直流ステップモーターなど）、高圧線からの磁気遮蔽などがある。今日、自動車一台に約20種類の磁石が使われているという。

3.4.5 物質と光

太陽神天照大神が天岩戸に隠れると、この世は闇に閉ざされた。困惑した八百万の神々は策を巡らし、天照を導きだすことに成功し、この世は再び光に満ちた。

物質は高温になると固有の発光を示す（輝線スペクトルを与える）。白熱電球の光は、フィラメント（今日では主としてタングステン製）の抵抗で電流（電気エネルギー）が熱となり、これで加熱されたフィラメントが出す輝線である。点灯時は温度が低いので黄色く見え、次第に白色となる。台所のガスコンロの近傍で食塩を出し入れすると、ガスの炎が黄色くなる。これは炎色反応とよばれるナトリウムイオンの輝線スペクトルである。各種金属は固有の輝線スペクトルをもち、すなわち色を出す。これを大規模に使ったのが花火である。

太陽光は絶対温度6000℃の黒体放射で近似でき、地球に降り注ぐ極大波長は480nmである。黒体放射の極大波長は絶対温度に逆比例することが知られており、暖められ

た地球（平均表面温度 15 °C）が放射する光の極大波長は 10 μm（マイクロメートル）という赤外線になる。電気エネルギーで物質が直接光を出すことがある。雷光は高圧電流によって、大気の誘電分解が起こり光となる。これを制御した放電発光にプラズマディスプレイがある。金属をドーピングした硫化亜鉛など半導体に電圧を掛けると、電子と空孔とが反応して励起子が生じ、これが光を放出して元に戻る。これをエレクトロルミネセンスといい、EL と略記される。種々の有機化合物を使って任意の波長をもった励起子を作ることが可能なため、光源またはカラーディスプレイとして注目されている。液晶と違ってバックライトが不要で薄型・軽量化ができる。必要な電圧も数ボルトとプラズマディスプレイに比べて格段に低くてすむ。太陽からの地球に届いた「太陽風」と呼ばれるプラズマ粒子（陽イオンと電子に分離した状態）が大気に衝突し、大気原子を高いエネルギー状態に励起し、それが再び低いエネルギーに落ち込むとき光が発せられる。これがオーロラである。

白色可視光線が物質を透過し、また反射されると、その物質に固有の波長の光が吸収され、肉眼に補色が見えてくる。これが物質の色であり、これを材料として積極的に使ったものが染料、塗料、顔料である。

物質は光を吸収し、受け取ったエネルギーを再び光として放出することもできる。ケイ光やリン光とよばれるものがそれである。エネルギーは一部熱として失われるため、放出光の波長は入射光よりも長波長側に移動していることが多い。フィラメントからは真空中で電子が飛び出す。これが封入されている水銀蒸気と衝突すると紫外線が出る。ガラス管の内側に蛍光体を塗布し、紫外線を吸収して可視光線を出すようにしたものが蛍光灯である。

3.4.6 超伝導と超伝導体

超伝導マグネットを用いたリニアモーターカーや MRI 診断装置、また高温超伝導体などが話題となり、純粹に量子力学的現象である超伝導現象や超伝導体が身近な存在として感じられるようになった。超伝導とは、金属を低い温度に冷やしていくと電気抵抗が突然ゼロに成る現象である。この不思議な現象は 1911 年、オランダのカマーリン・オネス（Heike Kamerlingh Onnes）によって発見された。電気抵抗がゼロであるから電流を流してもエネルギーの損失がなく、大電流を必要とする多くの用途に応用することができる。

超伝導は、金属中の伝導電子が低温ではそれぞれ単独で動き回るのではなく、全体が一つの状態に落ち込んで集団的に運動することによって起こる。電子の波としての

性質が主役を演ずる量子力学的現象である。電子がそのような状態に落ち込むためには2つの電子が一組のペアを組むことが必要である。バーディーン (John Bardeen)、クーパー (Leon Neil Cooper)、シュリーファー (John Robert Schrieffer) によるBCS理論(1957年発表、1972年ノーベル物理学賞)により、超伝導状態では格子振動が媒介してこのようなペア (クーパーペア) ができると説明されている。超伝導体はまた磁場を加えても磁束を排除してその浸入を許さないというマイスナー効果 (完全反磁性) とよばれる現象や、超伝導体どうしを弱い結合を介して接合するとその間に電圧がゼロでも一定の電流が流れるというジョセフソン効果とよばれる現象など、特異な性質を示す。

従来の超伝導体の臨界温度は高々23 K (NbGe_3) であった。1986年にベドノルツ (Johannes Georg Bednorz) とミュラー (Karl Alexander Müller) は臨界温度が35 K のLa-Ba-Cu-O系のいわゆる高温超伝導体を発見し、臨界温度 (超伝導が実現する温度) は一気に上昇した。これがきっかけとなってその後次々と類似の物質が開発され、現在では最高160 K (高圧下) の物質が得られている。これらの高温超伝導体は共通して層状構造を持つ銅酸化物である。また近年、銅酸化物でなくても、 C_{60} フラーレンを母体にするもので33 K、 MgB_2 で39 K という高い超伝導温度を示す物質が発見されている。

3.4.7 有機化合物とは – その物性と分子設計

動植物が生産し有機体を構成する重要な物質を、特に有機化合物と定義し、これらを対象とする学問を有機化学と呼んだ。20世紀の後半からは、有機化学は炭素原子を骨格とする人工物の科学へと広がり、生命科学は言うまでもなく、材料科学においても重要な位置を占めてきている。有機化合物の特徴は、炭素を中心に、水素、窒素、酸素などごく限られた元素で構成され、これらの組み合わせ、配列の多様性で多数の化合物群を構成している点にある。したがって、①分子構造と物性の間の相関が系統的に調べられ、分子の中で物性・機能と密接に関係している部位やグループが解明され、また②そのようなグループを化学的に変換したり、骨格となる炭素-炭素結合を特定の位置で繋いだり切ったりする手法が研究されてきた。このようにして、有機化合物の分野は、紙の上に任意に書いた化学構造式に対応する化合物を比較的温和な条件で正確に作ることができる高度に発達した学術体系を形成している。これによって、天然からは極少量しか得られない医薬品を人工的に大量に作り、全く新しい医薬品を開発・製造することができるようになっている。あたかも建築物の設計図を描くよう

に、望みの化学的性質及び物性を発現させるためにはどのような物質を作ればよいか、分子レベルできちんと設計できるところまで到達している。

高分子物質は一般に炭素、水素、酸素、窒素などを主構成元素とし、生物の世界と無生物の世界双方にまたがって存在する物質であり、分子設計などにより金属や無機材料に比較して低エネルギー消費で多様な特性を実現できる特徴がある。高分子が、無機化合物を主とする低分子と違うのは、構造の自由度である。長い紐状の構造と、その分子が丸まっているか、伸びきっているかなどの分子形状、その分子が他の分子と相互作用をして作る空間構造と特性の関係など、高分子物質の特性を決める要因はきわめて多様かつ複雑である。そのためまだまだ多くの未解決の領域が残されている。特に高分子は周りの環境（溶媒）や濃度により構造を変え（高次構造）、熔融体、ゴムやゲル、結晶やガラス、液晶、ミクロ相など多様、複雑である。ゴムやゲルあるいはミクロ相は低分子物質では見られない。

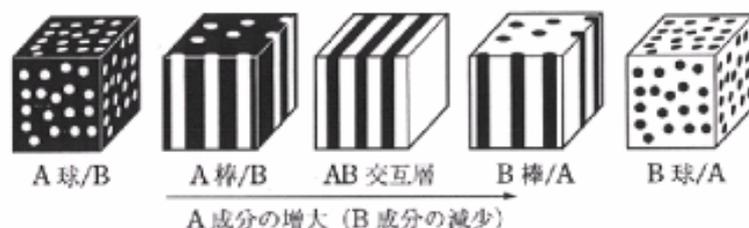


図6 高分子凝集体（A、B 2種の高分子相のブロック共重合体）が示すミクロ相分離

AとBが混ざり合わないものであれば、A部分同士、B部分同士が集まってドメイン（分域）を作る。A、B部分の濃度により球状、棒状あるいは層状というようにそのドメイン構造を変化させる。

典型的な有機化合物は、分子量の大小を問わず、力学的には弱く繊維には向くが強度は限られており、電気や熱の絶縁体であり、染料とはなるが光学的に特に注目されはこなかった。それが、ナイロンの発明（1935年）によって、構造が似て非なる合成ポリアミドが絹のポリペプチドに勝るとも劣らない繊維となることが証明された。さらに強度の高い耐熱性高分子が発明され、自動車の車体などに使われるようになってきている。有機低分子あるいは高分子物質の中に、電子が分子の広い領域にわたって拡がりを示すものがあり、これらは半導体的性質を持つ。これらにハロゲンイオン・ドーピングを行うと電気伝導性を発現することを実証してノーベル化学賞を得た白川英樹の業績は記憶に新しい。磁性の分野でも、極低温では有機化合物が磁石となり得る

ことが示されている。また有機EL 発光体も実用化が始まっている。

医薬品に対する分子設計も近年著しい進歩がある。遺伝子に対する分子科学的理解が進んでいる。その結果、種々の病気、例えば癌が遺伝子その他の生体分子の異常によって起きる場合があるなどが分かってきた。それに対する医薬品としては、遺伝子その他の生体分子の異常が起きる部位（鍵穴）に対して空間的にブロックするような医薬品分子（鍵）が埋めるという、「鍵と鍵穴」の関係で機能が理解・設計されるようになってきた。これらの例のように、高分子物質の性質は分子の構造で決まり、構成元素が全てではないという第二義的原理の重要性が増大している。



図7 金属性ポリアセチレン薄膜

ガラス管の中にある金属光沢を示しているものが金属性ポリアセチレン薄膜。

3.5 物質の変化

原子や分子の運動は温度によって変化し、熱が加わり高温になるほど運動は激しくなり、物理変化(相変化、溶解など)や化学変化が起こる。一般の温度上昇では物質は変わらず、構成要素である原子・分子の間の平均距離が連続的に長くなり全体の体積が膨張する。固体と液体の境界では、原子・分子の間の平均距離や秩序が、その物質に固有の温度で不連続的に変化し、全体の原子配列の仕方も変化する。このように固体が液体に、液体が気体に変わることを相変化という。固体では原子が平均的な静止位置の周りで熱振動する。液体では原子配置は乱雑で、各原子(分子)は(一般に粘性を持って)流動する。気体の場合には、さらに原子密度は疎になり圧力をかけると容易に体積を変化させることができ、また粘性はない。液体と固体の間相として液晶がある。また高温・高圧の延長線上に超臨界状態があり、ここでは液体と気体の区別はない。圧力を上げると図8の蒸気圧曲線に沿って、液体と気体の境界は高温の状態に移動する。これが圧力釜の原理である。一方で、高山で米を炊いても芯ができやすく美味しくないので、大気圧が低く低い温度で水が沸騰するからである。

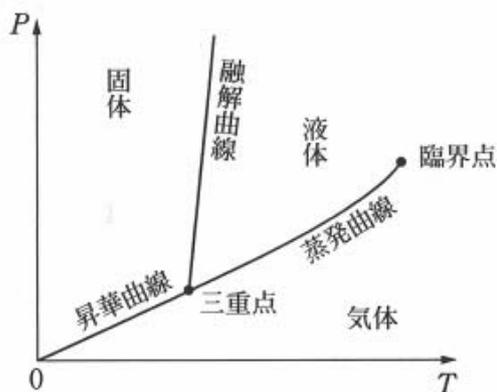


図8 気体、液体、固体の相図

(横軸は温度、縦軸は圧力)

固液境界、固気境界、気液境界が交わる場所を三重点、気液境界の終点を臨界点という。臨界点以上の圧力、温度にある状態が超臨界状態である。

熱平衡を特徴づけている温度を低下させていくと、理論上、分子や原子の運動が殆ど停止する状態ができ、その温度を絶対零度という。絶対零度はマイナス 273.15°Cで、これより低い温度は存在しない。

熱の移動に関して保存則があり、仕事として取り出すことのできるエネルギー量に關係してエントロピーの概念を理解する必要がある。「再生不能な資源」は、大きなエネルギー量を持つか小さなエントロピーを持つかいずれかの物質群のことである。大きなエネルギー量を持つ資源を再生するためにはそれ以上のエネルギーを用いねばならず、エネルギー効率が 100%でないため、その再生の過程で熱として放出されるものが大きい。たとえば核エネルギーがこれに当たる。炭素を固定化した化石燃料は、気体よりエントロピーが小さい。化石燃料を燃やして出た二酸化炭素は大気中に拡散している。大気中に出た二酸化炭素を再び集めるには莫大なエネルギーを消費しない限り不可能である。大気中の二酸化炭素から炭素を固定化するために地球上に植物が炭酸同化作用に費やした時間はこの上もなく永いものである。再生不能な資源を用いるときには、代替エネルギーの研究開発速度を超えて消費してはならない。

3.5.1 状態変化

殆ど全ての物質の原子・分子は、温度の高いところでは大きな運動エネルギーをもち、自由にとびまわっている。容器の中に閉じ込めないとどこまでも飛んでいき、地球大気中を対流圏から成層圏へと拡散する。容器の壁にぶつかる力が気体の圧力となる。低温では運動エネルギーが減少し、原子・分子の間の引き付け合う力（凝集力）が勝り、凝集し固体となる。条件が整うと、原子は周期的に配列し結晶となる。光り輝く美しい宝石も結晶である。中間の温度領域では、運動エネルギーと凝集力の間のせめぎあいが起こり、液体となる。全体として任意の形をとるが、重力場では蓋のない容器に納まる。これからも分かるように、原子・分子の間の平均距離は、気体≫液

体>固体の順番となり、逆に密度は気体<液体<固体となる。固体が溶けて液体になる温度を融点、液体が気体になる温度を沸点とよぶ。純粋な物質では、気体、液体、固体の間の状態変化はその物質固有の温度で起こるので、融点や沸点は 3.4 で述べた物性の一つとみなすことができる。圧力を上げると原子・分子の間の平均距離は縮むので、これらの値は圧力にも依存する。われわれの生活圏 1 気圧 (101.325 kPa) では、水 H₂O は融点 0 °C、沸点 100 °C である。これは摂氏温度の定義である。イオン性結晶の食塩 NaCl (融点 801 °C、沸点 1465 °C)、金属の鉄 Fe (融点 1538 °C、沸点 2861 °C) などでは室温からよほど高くなるが、この節で述べた物質の状態変化の規則から逸脱するものではない。

水の物性には、上の一般的な規則に対して顕著な例外がある。水は 3.98 °C で最大密度を示し、例外的に固体の方が密度が小さく、氷は水に浮く。スケートの刃やスキーの板の下は圧力が高く、一時的に氷や雪が溶け水となるため滑りやすくなっていると考えられている。液体の中で広範に形成されている水素結合が、水の密度を氷よりも高くしている。氷の結晶構造は規則的すぎて、水素結合の数と距離に制約がある。

液体物質が固化する際および気体が液化する際には熱エネルギーを放出する。この逆も正しく、固体が融解する際および液体が気化する際には熱エネルギーを吸収する。水の場合、融解熱は 6.0095 kJ mol⁻¹ (0 °C、101.325 kPa)、蒸発熱 40.657 kJ mol⁻¹ (100 °C) である。そもそも、1 g の水の温度を 1°C 上昇させるのに必要な熱量を 1 cal と定義するなど、カロリー・比熱・潜熱の定義などの基準としても用いられている。一定量の物質の温度を一定温度上げるに必要な熱エネルギーを熱容量というが、水はこれが大きい。地球には 1,386,000,000 km³ の水があり、地表の 70.8% を覆っている。地球は水の惑星と言われる所以である。降り注ぐ太陽からのエネルギーは水に蓄えられ、温度の上昇は少なく済んでいる。こうして生物の住みやすい地球環境が成立している。

二酸化炭素 CO₂ の場合、1 気圧では -78.5 °C において、固体と気体の相が接する。この圧力では液体は安定には存在しない。温度を上げると固体は昇華を始める。液相を経由しないで気化するので、ドライアイスとよばれる。5-6 気圧以上に加圧すると、液体となり得る。飲食店で生ビールを樽から移す際にガス圧を利用するが、多くの場合緑色の鉄製容器に入っている二酸化炭素を用いる。このなかでは CO₂ は液体になっていることを確かめることができる。

このように、地球環境を考える上で重要な二つの物質が例外的存在であるのは興味深い。もし科学者が水と二酸化炭素の状態変化のみ研究していたとしたら、状態変化の一般的規則が見つかるにはかなりの時間がかかったであろう。物質科学の方法の特

徴は、価値観と離れて、多くの物質について観察を行い例外に目をつぶっても規則性を見出し、その後で例外の例外たる所以を解明し、全体像を完成させることにある。

3.5「物質の変化」で述べたように、物質には高温・高圧の延長線上に臨界点があり、これ以上の温度と圧力では、いくら圧力を掛けても液化しない超臨界状態に至る。この状態では物質は独特な物性を示す。二酸化炭素の臨界点は31℃、7.38 MPaなので、比較的温和な条件でこの状態を実現することができる。再び臨界点以下の温度や圧力にすれば二酸化炭素は炭酸ガスまたはドライアイスとして取り去ることができ溶質のみが残る。このプロセスは実際に、コーヒーからカフェインを抜き取る（脱カフェイン）のプロセスとして実用化されている。また超臨界状態の水は、金を溶かしセルロースやダイオキシンも分解するといわれる。そのためダイオキシンなどの廃棄物処理の分野での応用に期待がもたれている。

【コラム5】 科学者とはどんな人

科学者とは、身の回りの自然界を観察し、美しさ、規則性、巧妙さとうたれ、なぜだろうという疑問を抱く感性をもち、想像力と論理を使って答えを見出そうとする人である。それに喜びを感じるナイーブさをもち、ついには世界を理解しようとする。科学者の先祖は神学者であり哲学者であった。わが国では、80%以上の小学5年生は、理科の勉強が好きである。しかしこの子どもたちの多くが、科学者の道を選ばなくなってきた。またなれるとは限らない。

人はどうしたら科学者となるのか。興味の持続性（執着心）、考え方・手法に対する向学心が必要であり、克己心だけでなく、励ましてくれる人や環境が必要である。「問題解決の知恵」を習得し、独自の工夫をして、自然界のより大きな問題を解決しようとする人でもある。

物質界だけしか見えないかと言うと、そうとも限らない。自らの発明・発見・知的財産を、大きな社会的、国家的、地球規模の問題解決に使えないかということに関心をもつ科学者もいる。核分裂のエネルギーを戦争に、また平和利用に使おうとしたのは核物理学者であり、化学者は衣食住や健康維持上有用な物を作ろうと努力する。日本では1975年のオイルショック時に、石油への依存を少しでも減少させる技術革新を担ったのは科学者と技術者である。ブラジルでは、1978年サトウキビからエタノールを生産し再生可能な代替え燃料とするのが適当であるという最初の論文を発表したのは、物理学者ジョゼ・ゴールデンベルグであった。

3.5.2 化学変化

万葉人にとって、ツルクサの青色は美しいけれども、移ろいやすさを象徴する色であった。遺跡は風化が進み、金属は錆び、食物は腐敗する。金のみが普通の条件では決して変化しないため、古くから高い価値をもち、それを金以外の他の元素を使って作り出すことが、近代化学が確立する前の錬金術師の研究の標的の一つであった。近代科学の父であるニュートンですら、錬金術の研究を行っていたといわれる。

時間の尺度は異なっても、物質は多くの場合別の物質に変わっていく。水の中で塩酸と水酸化ナトリウムを混ぜると、中和反応が起き、塩化ナトリウムが生成し中性となる。これを溶液の pH を見ながら観察することができる。ある物質 A の特定の化学結合が切れ、物質 B のある原子と新しい化学結合ができているとき、これを化学反応が起きているという。酸と塩基の中和反応は自発的に起こるが、一般に物質にエネルギーを加えないと化学反応は起きないことが多い。熱エネルギー、電気エネルギー、光エネルギーなどでこれを供給する。このエネルギーは核エネルギーほど大きくないので、化学反応では前後において「質量は保存される」。

化石燃料の燃焼で、主として炭素と水素からなる物質が空気中の酸素と反応して二酸化炭素、水その他の物質に変わってしまう場合を考えてみよう。燃料と酸素はすでに共存しているのに、燃焼は簡単には始まらない。いわゆる“火をつける”という操作によって、ある程度の熱エネルギーを供給する必要がある。ひとたび燃焼反応が始まると、反応熱が生じこれが次の反応に必要な熱エネルギーを供給する。これを連鎖反応という。ありあまった反応熱を、暖房にまたはボイラーに使い、さらに発電用タービンをまわすのに使っている。燃焼は酸化反応の一種で大きなエネルギーを得ることができるが、燃料分子はばらばらになり二酸化炭素、水その他の物質に変わってしまう。

もう少し温和な条件で反応を一段階で止めると、原料分子のある特定の化学結合の切断と新しい結合の生成を制御して行うことができる。この種の実験研究及び理論的研究から化学反応の規則性が発見され、この原理を使って、複雑なものまで含めて標的分子とそれに至る経路を設計し、自由に作り出す技が開発されている。これを化学合成、あるいは単に合成という。この制御のために、反応物質を不活性な他の物質で希釈する方法（これを溶媒という）や、触媒を用いる方法が用いられる。

必要なエネルギーを紫外線・可視光線から受け取ることによって起こる化学反応を特に光化学反応という。吸収した光のエネルギーは、分子の中のある特定の化学結合の切断や再結合に使われる。熱エネルギーで起こる化学反応と相補的に新物質を作る

のに駆使されている。健康な骨を作るのに必要なビタミンDは、体内でコレステロールが代謝を受けてプロビタミンD₃となった後、皮膚に近いところで紫外線を受けてビタミンD₃となり、さらに肝臓で代謝されて活性型となる。吸収した光のエネルギーを物質の中で正と負の電荷の分離に使い、これを化学反応に利用することもできる。あまり使われなくなった銀塩写真フィルムの感光機構及び地球上で広範囲に行われている植物の光合成はその代表例である。光合成では、色素タンパク質クロロフィルが吸収した光のエネルギーが空孔と電子を生じ、正の電荷は水を酸化して酸素を発生するのに使われ、負電荷はATPを介して二酸化炭素を還元しグルコースを作るのに使われる(4.1の項参照)。太陽電池の原理もこれと類似である。

光化学反応は、人と物質にとって負の側面ももっている。短波長寄りの紫外線を多量に受けると、眼障害および皮膚障害を起こす。後者は色素沈着、皮膚がんを引き起こす恐れがある。地上20 kmを中心とする成層圏に、高い密度をもつオゾンの層が短波長寄りの紫外線を遮断するフィルターの役割を果たしている。オゾンそのものも、成層圏の酸素分子O₂に短波長の紫外線が当たり、生成消失を繰り返し、その濃度は定常状態にある。地上からフロンをはじめとする幾種類かの物質が成層圏まで拡散して行くと、短波長の紫外線による光化学反応でオゾンと反応しやすい物質ができ、オゾンの定常濃度が低下する。これがオゾン層破壊である。弾性の節で例示されたゴムも、時間が経つと伸縮ができなくなり、切れてしまう。この変化も光化学反応で誘発された酸化反応である。古文書や絵画も光により劣化が進む。

化学反応のエネルギーを光として放出する物質もある。試験管の中で起きると化学発光とよばれ、生体の中で起こると生物発光とよばれる。ホタルの光が後者の代表例である。

3.5.3 化学変化の仲立ちをする触媒

物質同士の化学反応により様々な新たな物質を合成することができる。化学反応でもエネルギーが大きく関わり、反応の進行によってエネルギーを放出する場合もあれば(発熱反応)、外からエネルギーを与えて初めて反応が起こる場合もある(吸熱反応)。また、反応の進行の過程では、活性化エネルギーと呼ばれるエネルギーの山を越す必要があり、そのために外からエネルギーを供給する必要がある。

例えば、窒素分子は大気中にある代表的な不活性なガスとして良く知られている。これを水素ガスと接触させても通常は何の変化も起こらない。無理やりにでも反応させてアンモニアを生成させるためには非常に高い温度が必要になるが、気体同士の反

応では高温になればなるほど物質濃度は低くなるので、それを抑えるためには同時に非常な高圧を要する。こうしてとてつもない高温高圧で窒素と水素を接触させると、原理的には両者は反応してアンモニアを生ずることができる。一方では、窒素と水素とからアンモニアを合成する反応は基本的に発熱反応であることから、反応系の温度を上げることは平衡を生成系に移動する妨げになるという悩ましい問題もある。アンモニアは、窒素肥料の原料として、人類の生存には欠かせない物質であるが、これを工業的に製造するためにこのように莫大なエネルギーを消費する方法は現実的ではない。

1900年代初頭に開発されたハーバー・ボッシュ法は、鉄を主成分とする触媒を用いて、ある程度の高圧下で窒素と水素からアンモニアを合成することを可能にした。触媒とはこのように、反応系に作用して活性化エネルギーを下げ、反応速度を高める働きを持つもので、自身は生成物に組み入れられることはなく、触媒サイクルに従って反応系内で再生し、モル数にして何万倍、何百万倍もの生成物を与える物質を言う。

化学工業で用いられている触媒はこの他にも多数ある。その多くは固体状で、反応物が固体表面に吸着されて活性化され、反応しやすくなる。近年では、ガソリン自動車の排気ガスのなかから窒素酸化物などの有害物質を除去するために、自動車の排気管に白金系の触媒を装着することで、大気環境の保全に貢献している例もある。これらを固体触媒（不均一系触媒）という。これに対して、溶媒に溶ける遷移金属錯体には溶液中で触媒作用を示すものもあり、錯体触媒（均一系触媒）と呼ばれる。錯体触媒は精細な条件設定が可能であるために、医薬品等の精密な有機合成触媒として近年よく使われるようになってきた。野依良治らは、光学活性な配位子をもつロジウムやルテニウム錯体を触媒として、不斉中心を有する鏡像体の片方のみを選択的に合成する手法を開発した（2001年にノーベル化学賞）。また、チーグラール・ナッタ触媒はチタンを中心金属とする一種の錯体触媒であり、エチレンやプロピレンのようなオレフィンを規則正しく重合させるための触媒として重要である。白川英樹らにより開発された伝導性ポリアセチレン（2000年ノーベル化学賞）でも、アセチレンの重合にはこの触媒が用いられている。

3.5.2で、光のエネルギーを物質の中で正負の電荷の分離に使い、これを化学反応に利用できることを述べた。酸化チタン鉱物の一種であるアナターゼでは、紫外線を吸収して生じる正負の電荷によって、水を水素と酸素に分解する触媒作用が発見された（本多-藤島効果）。またこの触媒表面に吸着された各種有機化合物をも酸化分解することで注目されており、すでに便器、建物の壁面のタイルや窓ガラスなどの表面処理

(表面被覆) に実用化されている。

生化学反応触媒の役割を担うのは酵素であり、この場合には鍵と鍵穴の関係に基づいて、特定の酵素はそれに対応する特定の基質にのみ触媒作用を発現するのが特徴である。

第4章 物質と生活

4.1 物質系としての生命体

生命体は、それ自身物質である。生物の組織・細胞は、ほとんどが炭素、酸素、水素、窒素の4つの元素で構成され、その中で様々な生命活動が行われている。生物が無生物から区別される特徴として、生物は、①エネルギー変換能力、②自己増殖能力、③恒常性維持（ホメオスタシス）能力という少なくとも3つの能力をもっているとされる。

生命体はまず、組織・細胞の隅々までエネルギー補給しなくてはならない。動物、植物、菌類などの真核生物及び原生生物の中のエネルギー保存および利用には、必ずアデノシン三リン酸（Adenosine Triphosphate=ATP）が関与している。生物はATPの合成によってエネルギーを蓄積する。また一方で、ATPの加水分解によって放出されたエネルギーを神経細胞内の物質輸送、筋肉の収縮、電気的工作（電位差の発生）、合成（遺伝子の複製）などの仕事（代謝）に注入して、その秩序（生命体の維持、自己複製）を維持している。ATPの加水分解から一連の仕事における化学反応では、エネルギーが100%生命活動に使われるのではもちろんなく、熱エネルギーとして捨てられるエネルギーもある。したがって生命体も、物質系として例外ではなく熱力学の第2法則に支配され、生命体と環境を含めた全系のエントロピーは増大する。しばしばエネルギーを使って負のエントロピー（情報量）を取り入れているといわれる所以である。

自己増殖に必須な遺伝情報は遺伝子のデオキシリボ核酸（Deoxyribonucleic Acid=DNA）に塩基配列として埋め込まれ、この情報がmRNAに転写されて特定のたんぱく質合成に使われる。

生命体は、内外の環境が変わっても、体温維持、血糖値の調節、浸透圧の調節など、形態的・生理的性質を一定に保とうとする働きを持つ。その働きをホメオスタシスという。これには自律神経系と内分泌系による調整機構があり、ここでも神経伝達物質やホルモンなどの化学物質が動的平衡を保つことが重要な役割を果たしている。

4.2 生命と健康を支える物質

タンパク質、糖質、脂質は生命を支え健康を増進させるために重要な物質であり、エネルギー源、生体構成物質、生体内での各種の化学反応に使われる。このうちタンパク質と糖質（でんぷん）は、生体高分子であるが故の特徴ある構造（3.3 参照）と

機能をもつ。生体反応の触媒が酵素である。酵母（酒）、細菌（納豆）、かび（味噌、醤油）など微生物が関わる反応を利用して発酵食品が製造される。一方、病気の原因となる微生物に対しては化学療法が発展してきた。医薬品や酵素の反応など生体反応では、受容体への基質特異性の概念が重要である。血液型の適合性のように、細胞認識においては糖質も重要な役割を担っている。核酸の二重らせん構造と遺伝情報の伝達についても巧妙な特異的相互作用（塩基対）が働いている。

生体高分子の単位となるモノマーには限りがあるにもかかわらず、その配列の順番、さらには立体構造の違いにより、幾多の種、個の独自性や作用の特異性が生まれる。

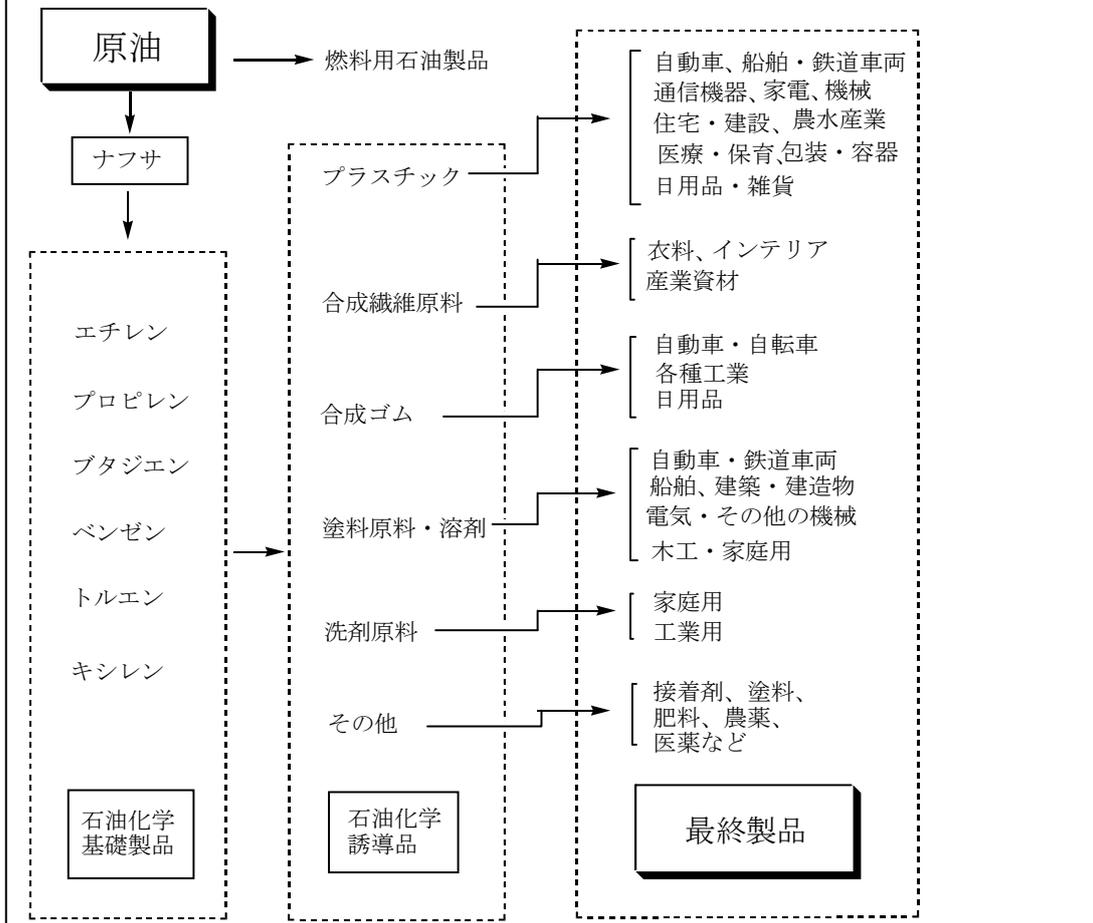
4.3 日常の生活を支える物質・材料

人の利用意図が反映される物質を材料と呼び、これには金属材料、無機材料、有機材料、複合材料などがある。天然に存在し材料のもととなり、最終の製品には形をとどめない物質を原料と呼んで材料と区別することがある。天然に存在する原料は、他の物質や元素との反応物、あるいは種々の他の物質との混合物として得られ、分離・精製といった化学的手法や機械的な成形を経てその材料特性が活用されてきた。比較的高純度に産出する物質、例えば砂鉄や砂金、陶土などは容易に材料化された。高度の採鉱、精錬を要する物質も少なくない。最近では、インジウム、ジスプロシウム、タングステン等の希少金属が、これからの成長分野である情報家電、ロボット、電池、触媒等の新たな産業分野の拡大により、需要が増大する見込みである。特定産出国への依存度が高いこのような希少金属の供給リスクが経済発展の制約要因になりかねないと懸念され、国家戦略的に備蓄したり、代替・使用量低減技術を開発したり、廃品から回収しリサイクルする技術の開発が進められている。

食に供される素材がほとんど全て生物起源であることはいうまでもない。最も容易にかつ広範に利用された材料は木材や綿、羊毛などの生物起源の有機材料である。衣と住の分野においては、永年の智恵の集積と継承により最近まで有機材料が主流を占めてきたが、最近ではいわゆる化石燃料を原料とする合成繊維や合成建材が増加してきている。産業革命後、化石燃料による高密度のエネルギー活用技術が開発され、科学技術の知識の拡大と相まって、高純度化と成形操作の適用範囲が飛躍的に拡大し、物質変換の科学技術が確立された。その結果、日常生活を支える材料は極めて多様化され、高密度・高精度化されている。

【コラム6】石油化学工業製品

化石燃料の一つである原油を原料とし、分子設計技術と物質変換技術によって、多様な材料設計が可能となってきた。特に、石油を出発原料とする石油化学工業製品は、日常生活のあらゆる場面で用いられている。



4.4 情報社会を支える物質・材料

パソコン、携帯電話などの IT 機器のみならず多くの工業製品には、コンピュータが組み込まれている。パソコン及びその周辺の IT 機器には、先端技術が詰め込まれている。情報処理とその格納にはシリコンを母体とするトランジスタ回路が大規模に集積され、それらの情報メモリやその再生には磁気ディスクが用いられている。液晶や有機 EL などの、新しいディスプレイ材料の発展も IT 技術の広い利用には不可欠である。昔ながらの大きなブラウン管と液晶ディスプレイでは、電源を含めて持ち運びやすさなどに大きな違いがある。

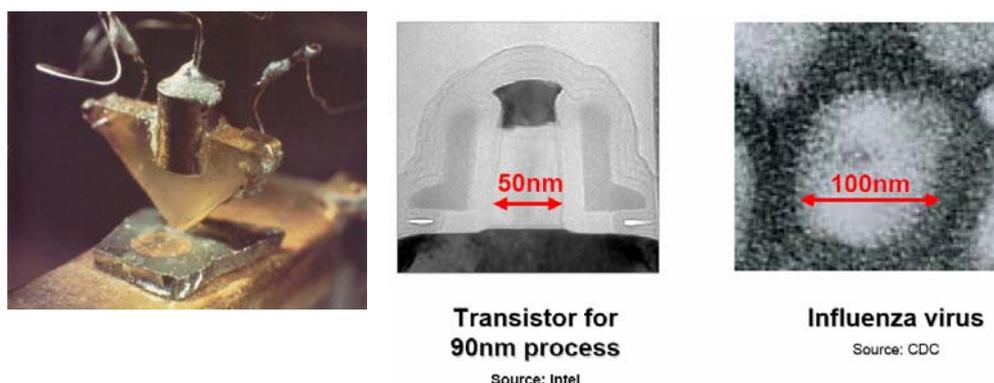


図9 トランジスタ（1948年）（左）、今日のトランジスタ（中）、インフルエンザ・ウイルス（右）

（左）1948年に発表された当時のトランジスタ（ベル研究所）、（中）今日の90 nmスケールのトランジスタ（インテル）。（右）真中のトランジスタと比較するために右側には同じスケールでインフルエンザ・ウイルスの写真が示されている。

1948年米国AT&Tベル研究所のショックレー（William Shockley）、バーディーン（John Bardeen）、ブラタン（Walter Brattain）がトランジスタを発明した（1956年ノーベル物理学賞受賞）。それ以前の電子機器で増幅その他の機能のために用いていたのは3極真空管である。3極真空管はガラスで封じた真空の中に正負の電極とその間を流れる電子の流れを制御するグリッドがある構造をしている。これを固体に移し変え、電子の過剰にあるn型半導体（n=negative）と電子の不足している（正孔がある）p型半導体（p=positive）を組み合わせて、npnまたはpnpという構造を作る。それぞれをnpnまたはpnp接合という。両側がエミッタとコレクタ部分で、その間にある部分をベースという。エミッタとコレクタの間に電圧をかけ、ベースの部分の電圧を制御することで、電流の増幅を行うというものであり、3極真空管と構造も機能も同じと考えてよい。初期のトランジスタは動作が安定しなかったが、今日では例外的な特殊用途のものを除いて真空管を見ることはなくなり、固体のトランジスタ素子に置き換わった。初期のコンピュータであるENIACには17468本の真空管が使われ、倉庫一つを占拠していたという。地球規模の気候など環境変動のシミュレーションを目的として2002年から稼動した地球シミュレータは、同様に建物一つに収められている。地球シミュレータは5120個のスーパーコンピュータを同時に動かす（並列計算）もので、1秒間に40.96 TFlops（テラフロップス）の倍精度浮動小数点演算を行う。（このマシンは2002年から2004年末まで世界最高性能を記録した。現在は再び激しい開発競争が進行している。）

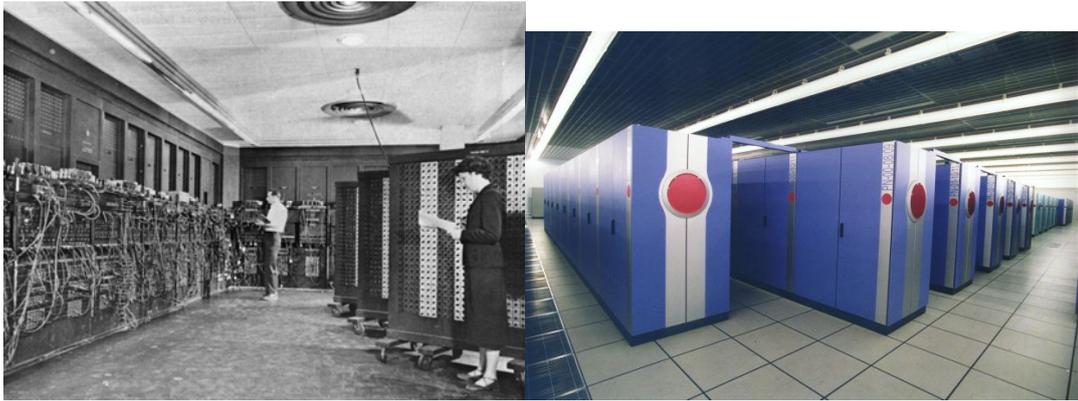


図 10 ENIAC (左) と地球シミュレータ (右)

(左) ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) (Wikipedia)、(右) 地球シミュレータ (<http://www.nec.co.jp/press/ja/0203/0801.html>)。

情報伝送には半導体レーザーからの光パルス信号とそれを伝える光ファイバーのシステムが用いられている。情報を伝送するには InGaAs 系の半導体レーザーからの光パルスに記号化された信号と、光ファイバーのシステムを用いて行われる。更に、地球規模の遠距離伝送には、光ファイバーを用いた海底ケーブルの途中でレーザーを備えて増幅・再生を行ったり、人工衛星を経由して無線で伝送される場合もある。AlGaInP 系赤色発光ダイオードに加えて、GaN 系の青色発光ダイオードも開発され、すでに交通信号を始めとして我々の目に触れる機会も多い。

今日の電子回路には単独のトランジスタが組み合わされるのではなく、半導体基板に複数の回路素子を物理的に離れた状態で配置し、絶縁物質上の導体を被着して配線するという集積回路(IC)が用いられている。集積回路の発明が以降の半導体を基盤とする新しい世界を作り上げた。(1958 年、テキサス・インスツルメンツ社のキルビー (Jack St. Clair Kilby) の発明。「キルビー特許」と呼ばれる。)

2000 年には、上の 2 つの発見・発明、「光エレクトロニクスと高速エレクトロニクスを開く半導体ヘテロ構造の開発」と「集積回路の発明」、に対して ノーベル物理学賞が授与された。

軍事的目的から民生に転用され、いまや日本では自動車や携帯電話にも広く用いられている GPS (Global Positioning System : 全地球測位システム) も先端技術と先端科学を沢山用いている。GPS は 4 つの衛星からの信号 (4 つの衛星からの時刻差) を用いて、自身の位置を決めている。GPS 受信システムでは、地表に対する人工衛星の速度と重力の効果という時間に対する二つの相対性理論の効果の補正が必要である。

携帯電話も欠かせぬ日常品となったが、ここにはシリコンチップやメモリなどの集積回路の先端技術が詰まっている。半導体レーザーで駆動するコンパクトディスクによる音楽やデジタルカメラによる映像も連動させ、我々は豊かな生活を享受している。

電池の発達も IT 技術を日常生活に生かすために欠かすことができない。電池はイタリアのガルバニ (Luigi Galvani) がカエルの解剖中に電気化学反応を発見し、同じくイタリアのボルタ (Alessandro Volta) がボルタ電池を発明 (1800 年) したことに始まる。乾電池は日本の屋井先蔵が 1885 年に発明したものである。光エネルギーを電流に換える太陽電池、熱エネルギーを電流に換える熱電池を別にすれば、化学エネルギーを電流に変えるのが一般に言う電池である。

ボルタ電池では、希硫酸や食塩水 (電解質) の中に銅と亜鉛を入れる。銅はほとんど溶けず、亜鉛はイオンとなって電解質溶液中に溶け出す。こうして銅は+極に、亜鉛は-極となり、電池の外側で銅と亜鉛の電極を導線でつなぐと、銅から亜鉛に電流が流れる (電子が亜鉛から銅に流れる)。電池には一回だけ使えるものの他、充電 (電流を逆に流して、化学エネルギーを蓄える。) 蓄電池 (二次電池) がある。電池の効率が急速に上がりまた小型化が可能になって、さまざまな携帯型電子機器の一般的な利用が可能になってきた。電位差の単位、ボルト (V) は電池の発明者であるボルタにちなんだものである。

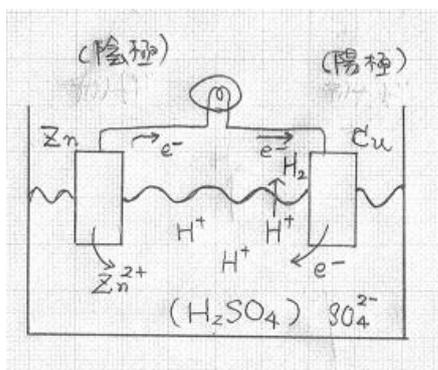


図 11 ボルタ電池の構造

銅(Cu)より亜鉛(Zn)の方が酸に溶けやすい。そのため亜鉛は硫酸(H₂SO₄)中に溶け出し、後に電子(e⁻)が残される。硫酸中では水素(プラスイオン(H⁺))が溶け出している。亜鉛と銅を導線で繋ぐと、電子は銅の方に流れ、硫酸中の水素イオンと結合し水素ガス(H₂)となる。こうして電流が流れる。

4.5 未来を開く物質・材料

材料として重要なことは、その性質がより優れていることである。優れた材料とは、その性質が利用目的に合致し、かつ地球環境の持続可能性を損なわない材料である。

4.5.1 新しい超伝導材料の開発と利用

電気抵抗がゼロになるという超伝導体の性質は、強力な磁場を発生するための超伝導マグネットに用いられている。現在では最高約 20 テスラにおよぶ磁場が超伝導マグネットによって発生されており、磁気浮上や医療用の MRI の他、物性研究用磁場発生装置、超高分解能の核磁気共鳴装置、加速器など、広範囲の多様な目的に利用されている。また電力輸送用の送電線に超伝導体があれば電線中で失われる電力を大幅に減少することができる。マイスナー効果を用いると電磁場を遮蔽するためのシールド装置などをつくることができる。ジョセフソン効果を用いると、加える電圧によって電流が 2 つの異なる値をとるスイッチ現象を示すジョセフソン素子をつくることができる。このスイッチングの速度は非常に速いので、ジョセフソン素子を論理回路に用いたコンピュータは、将来の超高速のコンピュータとして有力視されている。さらにジョセフソン素子にマイクロ波を照射すると、物理定数だけで決まる一定の電圧を取り出すことができるので電圧の標準にも用いられている。またジョセフソン素子を含むリングに磁場を加えると、リングの中に入る磁場を量子磁束とよばれるごく微小な量を単位として数えることができる。この性質を用いると、SQUID（超伝導量子干渉計）とよばれる超微弱な磁場を検出する装置ができる。このように超伝導の用途はきわめて広いが、難点は超伝導現象が絶対零度に近い非常に低い温度でしか実現しないことであった。そのため超伝導の利用は液体ヘリウム（温度 4.2 K）の中でのみ行われていた。

高温超伝導体は液体ヘリウムよりも取り扱いがはるかに容易な液体窒素（温度 77 K）の中でも超伝導を示すので実用には大変有利であり、将来の応用を目指して盛んに研究が行われている。超伝導体としては、金属、遷移金属酸化物のほか、さまざまな有機導体も、高圧下では超伝導温度が大きく上昇することが見出されている。しかし現在のところ、一部の特殊の用途を除いて、その実用化にはまだ多くの未解決な技術的問題が残されている。

4.5.2 新規な物質、物性の開発

さまざまな人工物質（新しい化合物や、人工的に作った構造）は、これまで我々が自然の中に見出すことのできなかつた現象を見るということも可能にした。

天然には存在することのない人工的な物質や物質の構造の代表的な例は半導体の電子素子に多く見られる。例えば 2 つの異なる結晶を接合するとその界面（ヘテロ界面と呼ばれる）に誘起された電子は界面内でのみ運動が許される 2 次元電子系として多

くの有用な機能を発揮する。また異種の物質のごく薄い層を規則正しく周期的に積み重ねた構造は超格子とよばれる。超格子は負性抵抗や赤外域でのレーザーなどの、構成する物質のいずれとも異なる特有の機能を持つデバイスとして盛んに研究が進められている。さらにある結晶の中に埋め込まれたごく小さな異種の結晶の粒は量子ドットと呼ばれ、その中の伝導電子は原子の中の電子と類似の性質を示す。量子ドットは半導体レーザーをはじめ、将来のエレクトロニクスを支えるデバイスとして期待されている。同様にごく薄い線状の結晶は量子細線、ごく薄い層は量子井戸とよばれ、それぞれ1次元電子系、2次元電子系としての応用が考えられている。

高温超伝導体は、自然には存在しない物質により実現された。最近では、電磁的、熱的特性を組み合わせて新しい物質を作り、それらの特徴的な物性を外部から制御するというも行われている。例えば、光で制御する磁石（光で強磁性と常磁性の間を制御する）、強磁性と強誘電性が共存する物質相であるマルチフェロイクス、カーボン・ナノチューブなどの新しい構造を持つ物質など、新しい現象を示す新規な材料開発が行われている。マルチフェロイクスを示す物質として、スピン超構造（電子スピンの方向が結晶格子上で周期的に変化している構造）および強磁性物質を含み電気分極が発生するよう設計された人工的な界面物質相の形成が考えられている。

単一分子からなる金属（単分子金属）や分子磁石（1つの分子が磁気モーメントを持つ状態を保つ磁石）、あるいは単原子ワイヤ（原子を1次元的に並べた原子スケールのワイヤ）、分子ワイヤなど、新しい原子スケールのデバイスのための材料を目指した物質開発が進められている。

4.5.3 ナノテクノロジー

現在のパソコンの機能（演算速度と記憶容量）は、建物の一つの階を占有した初期のスーパーコンピュータよりはるかに優れている。このように情報処理の高速化と大容量化をさらに進めるには、情報処理を行う個々の素子（トランジスタなど）を数10ナノメートル（ $1\text{ nm}=10^9\text{ m}$ ）以下の大きさにすることが必要であり、ナノテクノロジーと呼ばれる分野が切り開かれてきた。従来は、ミリ及びマイクロメートルのサイズの元の物質を加工技術の革新により小さくしていった、ナノメートルサイズを得る技術（これをトップダウンとよぶ）が主流であった。しかしナノテクノロジーでは、ナノメートルサイズを材料をナノメートルより小さい原子や分子を繋いだり並べることによりナノメートルサイズの微小な領域の構造を構築・制御する技術（これをボトムアップと呼ぶ）が主流となっており、扱われる物質も金属、半導体、有機物質、生

体物質など多種多様である。DNA 分子をナノメートルスケールの回路を構成する際の個々の素子をつなぐリード線として用いる可能性なども検討されている。

物質を非常に小さくしていき、中に含まれる原子の数が数個から数百個のサイズにいたると、元の物質とは非常に異なる性質を示すようになる（量子サイズ効果）。バルクなサイズの物質では、一辺を L の物質を考えると、内部の原子数は L^3 に比例し、表面の原子は L^2 に比例する。これからわかるようにバルクな系では内部の原子数に比べて、表面に現れる原子数の割合は桁違いに少ない。一方、小さい系では、ほとんどすべての原子が表面にあるといえる（表面効果）。またそのサイズはちょうどナノメートルの程度であり、したがって系が小さいことから直接的に現れる量子効果がある。反対に、原子 1 個では物質としての性質を示さないが、この規模の原子が集まると、“微小な物質”としてバルクな物質とは異なる性質を示すようになる。このような性質は物質の新しい利用を可能にする。集積回路の項で述べたように、半導体素子は集積回路として用いられる。小さい場所に沢山の素子を集めると、素子を繋ぐ電線の部分が細く短くなり、その相互の間を完全に絶縁することができずに、結線部分同士の間で電子のリークや量子力学的な干渉効果も現れる。また、微小の構造からの発生した熱を除く手段がなくなる。微細化の要求に対する限界をどこまで解決していくことができるかがナノテクノロジーの鍵となる。

4.5.4 バイオテクノロジー、ナノバイオ

生体物質は、無生物にはない優れた機能をもっている。これらの生体物質の機能を利用するバイオテクノロジー、ナノバイオが急速に発展しつつある。また遺伝子进行操作してこれまでにない生体を作り出す技術は遺伝子工学として、食品や医薬品、さらには医療それ自身の分野への応用が研究されている。ナノ粒子、ナノカプセルを用いて医薬を体内の患部に直接輸送する医薬デリバリーも急速に進展している。

ATP の合成過程に見られるタンパク質分子の回転運動や筋肉の収縮運動の素になるアクチン上のミオシンの直線運動などを、生体分子機械という。これらを真似て人工的に作った分子が光や熱、溶液の pH 濃度などの外部刺激に応じてその構造を変え明確な方向性を持った運動を行うものを合成分子機械という。今後のナノテクノロジーの分野における重要な要素となると予想されている。

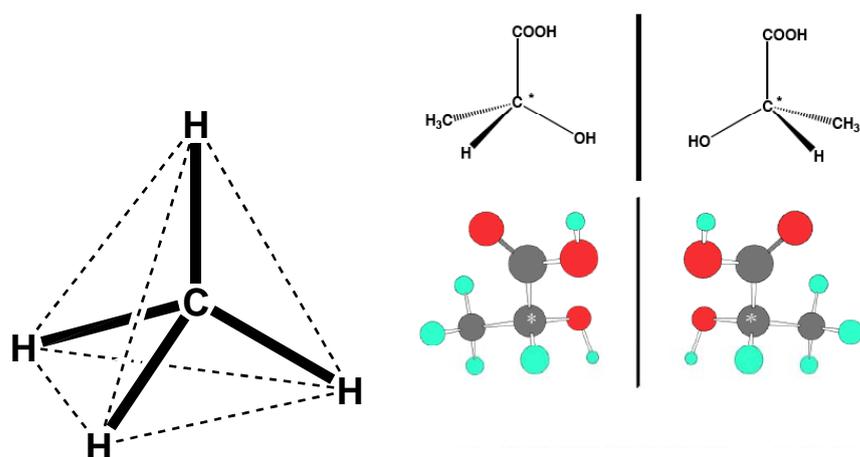
一方で、バイオテクノロジーの技術は人類にとって非常に有用なものであると同時にリスクを伴う可能性のあることが指摘されている。

【コラム7】鏡像異性体

乳酸のように、中心の炭素原子に4つの異なる原子または原子団がついた分子には、鏡像関係にある2つの構造が存在する。これを鏡像異性体と呼び、中心の炭素を不斉（キラル）炭素原子という（図）。右手左手の関係にある鏡像体は、物理的性質、化学反応性が全く同一で、平面偏光を左右に回転するという光学的性質（旋光性）だけが異なる。しかし、生体内では左右鏡像体の細胞に対する作用が異なる場合が多い。パスツール（Louis Pasteur）は、1848年に葡萄酒造りの副産物である酒石酸の研究から分子にも右左の別があることを発見し、その時から分子の立体構造の研究が始まった。発見から26年後、メタン CH_4 は中心炭素原子が正四面体構造の頂点に位置する4つの水素原子と結合した構造であることが明らかとなり、ここから有機分子の立体構造と生体内反応との関係を解明する研究が発展していった。

生体内のアミノ酸や糖の大部分は左右一方の鏡像体である。それらを単位とするタンパク質、多糖、核酸などの生体高分子は、一定のらせん構造を骨格とした立体構造をとることによって特定の生体機能を発揮している。生体内で作用する医薬品の中には一方の鏡像体だけが効果を現すものが多い。

鏡像体は天然物以外にも存在し、化学合成も可能である。分子構造の中に不斉炭素があっても人工合成物質の多くは左右両方の鏡像体の混合物である。生体中にはなぜ一方だけに偏って存在するのかは未だに疑問で、生命の起源に関わる未解決の問題である。



(左) メタン CH_4 の立体構造。(右) 鏡像関係にある乳酸の立体構造。

C^* は不斉炭素原子。

4.6 物質と材料プロセス

現在、さまざまな機能を持つ材料が使われている。材料の性質（機能）は、材料を構成する物質の化学的性質だけでなく、マイクロメートル、ナノメートルスケールの構造を作ることにより、新たに発現されることも多い。すなわち材料の機能（外部からの信号（刺激）を変換したり伝達したりする能力）を引き出すためのプロセスとは、材料を目的に応じた形態に作り上げ、要求される機能を最大限に発揮することができる材料の形態を作るにはどうしたらよいかを考えることである。例えば、強磁性体は、スピンの向きの揃った磁区に分かれているが、材料を作るプロセスの中でこの磁区をそろえるということが重要である。また光ファイバーは光が損失なくその中を進んでいくために、屈折率の傾斜をもっている。これを原料である SiCl_4 、 GeCl_4 から SiO_2 、 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{O}_2$ を経て作り上げる。その過程では、温度勾配を使った熱泳動などを巧みに利用しながらガラスを均一な張力で引っ張り伸ばしていくという過程（プロセス）がある。材料の製造プロセスには、熱伝導、対流と拡散などのさまざまなエネルギー移動、反応、核形成、結晶成長などの自然現象の組み合わせが用いられている。

材料の優れた構造を作り出すこととともに、環境に調和した材料プロセスが重要になる。例えば莫大な資源・エネルギーを消費する材料プロセスに対し、省資源（材料の再利用）やエネルギー利用の効率性や廃棄物の利用と無害化、副生成物の製造などが重要である。

新しい機能を示す原子スケールの人工構造を持った物質の環境負荷という側面は十分検討する必要がある。原子スケールの人工的な構造を作ると、それらの再利用を行うためには、物質の原子スケールでの分解、分離、精製を行う必要が生じるためである。同じ機能を持つならば、単一の物質の、構造によって達成するほうが優れているという考え方もあり得る。

広く知られている材料プロセスである製鉄所を考えてみよう。なんとなく鉄を溶かして伸ばしているわけではない。それは、酸化鉄の還元（高炉）、不純物の除去（転炉）、液体⇒固体（ casting）、微結晶粒化（圧延）という過程である。特に圧延の過程では、叩いて伸ばすプロセスで、さらに不純物を除き、微結晶の組織を均等にしてさらに強度を上げるなどが、行われている。明石大橋には、原子レベルの組織制御で高強度を発現した橋梁用高強度ワイヤが使用されている。実際、鉄は非常に大きな割合でリサイクルされているが、現実には組織が均質化して機能劣化が起きるため、リサイクルされた鉄は特殊鋼としては適さず、現在のところは一般的な構造材料に用いられている。

4.7 環境と物質 — 環境保持のために求められる科学技術の智

4.7.1 環境と物質循環

「人間または生物をとりまき、それと相互作用を及ぼし合うものとして見た外界」のことを広く環境という。環境問題には、隣近所、地方自治体、国・地域に限られたローカル（領域的）な問題もあるが、国境を越え地球を一つのシステムとしてグローバル（広域的）に考えなければならぬ事柄が多い。「環境問題には国境がない」と言われる所以である。これには二つの要因がある。一つは、グローバリゼーションにより人・生物・物資・資本の動きが拡大したためである。もう一つは、地球温暖化に代表される気候変動、オゾン層破壊などのように、物質の循環が地球規模で起こっていることが認識されるようになったためである。また、実験はできなくてもモデルをたて、大型計算機の助けを借りて地球規模の気候変動、物質循環をシミュレーションで確かめ、さらに将来を予測することができるようになったことが重要である。

地球環境問題の課題は以下のように整理できる。

- ① 地球が 65 億人のヒトと多様性をもつ他の生物をいかに育んでいるか、その環境がどう変化しているかを解析する。
- ② 2050 年までには 98 億人に膨らむと予測される人口を支えるのに、水、食料、材料、エネルギーなどを、如何に持続的に生産し確保するか。

これらの課題を、科学技術は経済発展、都市化、人口問題、国際政治経済の視点を加えながら考えていかなければならない。

地球の大気圏、水圏、陸圏は、物質の気体、液体、固体といった相に対応している。各圏の間で水がどのように循環しているかを図に示した。同様の図は、炭素（化石燃料、二酸化炭素を含む）、窒素（ N_2 、 NO_x など）といった元素についても書くことができ、物質循環の様子を認識する一助となる。これら各状態の物質の研究に使われてきた高感度測定機器を応用して多様な観測を行い、またこれら相の間での物質の移動に関する知見を基礎とする多元的解析を行っている。成層圏におけるオゾン層の形成及び破壊の解明の例をとると、実験室で行われてきた気体の光化学反応の研究が基礎となっている。地球規模での海流観測のために、赤道上その他の公海上には沢山の観測機器が配置され、それらが衛星を通じて定期的に観測データを報告している体制が作られている。これら観測機器はまた、物質科学を始めとする科学技術の成果でもある。

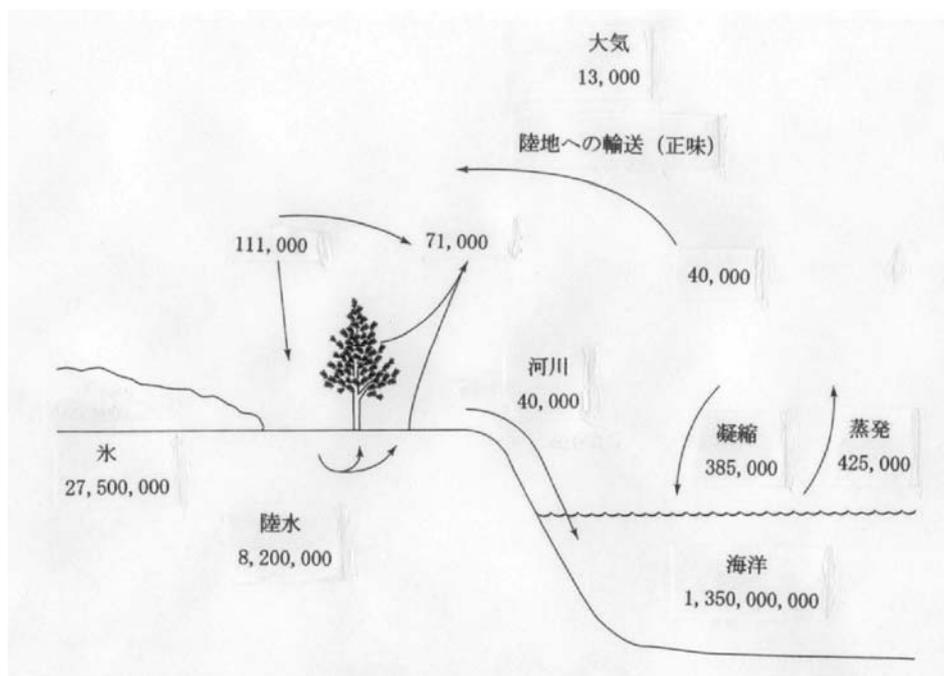


図 12 水の循環図

数字の単位は貯流水については km^3 、フローについては $\text{km}^3/\text{年}$ 。

W. H. Schlesinger 著、“Biogeochemistry: An Analysis of Global Change” 中の The Global Water の章の図を元に作成した。

【コラム8】環境と安全

経済産業省は、環境と経済が両立する循環型社会を形成して行く上で、廃棄物の発生抑制 (reduce)、再使用 (reuse)、再資源化 (recycle) を三本柱とすることが重要であるという 3R 政策を提唱している。3R 特に再資源化には輸送、電力など相応のエネルギーが必要であり、倫理・情緒だけでは済まない経済の問題が含まれている。この点を含めて政策を正しく理解し、環境保全のための市民としての役割を認識することも必要である。

つぎに、身の回りの物質に関する的確な知識・理解に基づく、生活上の安全確保のための科学技術の智も重要である。具体的には、毒性・腐敗・消化・賞味期限などの食品の安全性に関する正しい理解、住まいの安全・災害対策など住環境の安全性に関する正しい理解、無機材料・有機材料・金属材料など日常生活に関わる様々な物質の安全性についての正しい理解、そして処方薬剤・市販薬剤・健康サプリメントなど医薬品・健康維持関連物質に関わる安全性に関する正しい理解、などを挙げることができる。

4.7.2 地球温暖化

主に可視光線や波長の短い紫外線、波長の長い赤外線などの電磁波で放射される太陽エネルギーの約30%は、地球表面で反射され再び宇宙空間に向けて放出される。残りは、地球上の固体や液体、気体の物質に吸収されて、さまざまな物理的変化や化学変化、生物的变化、及び気象現象や地学的変化を引き起こすエネルギー源となる。これらが変化の際に熱エネルギーに変換されたエネルギーは、赤外線となって宇宙空間に向けて放射される。地球が吸収するエネルギーと、再び地球から宇宙に放射されるエネルギーが釣り合って地球の温度が決まる。地球が受けるエネルギーの方が大きいと小さいと、温度がそれぞれ上昇あるいは下降すると考えられる。もし地球に大気が存在しなければ、地上付近の平均温度は -18°C くらいになると計算されるが、大気が地上付近で温められるのに加えて、赤外線として地球から宇宙に放射されるエネルギーの一部を大気が吸収・反射するため、地上付近は結果として生命活動に適した温度に保たれている。大気による地球表面からの放射エネルギーの吸収を「温室効果」と呼ぶ。この現象は、地球の温暖化との関係で最近見出されたものではない。数学のフーリエ変換で有名なフーリエ (Jean Baptiste Joseph Fourier) が最初に気づき報告している (1824 年)。温室効果が強まると、大気の温度が上昇し、地球の温暖化に寄与すると考えられている。

大気は窒素 78%、酸素 21%、アルゴンガス 0.93%、二酸化炭素 0.037%からなる。地球の大気がこのような組成になったのは約7億年前であり、43億年の地球の歴史の中ではごく最近のことで、それ以前はもっと二酸化炭素濃度が高く、酸素濃度が低かった。この間、大気中の二酸化炭素を、炭素と酸素に分解し、炭素を化石燃料の形で固定化して、二酸化炭素を海中その他に固定化するプロセスが働いた。

大気を構成する気体のうちでも、特に水蒸気と二酸化炭素は、赤外線を吸収しやすく、温室効果への影響が大きい。大気中の割合の大きい窒素と酸素は赤外線に対して透明で、これを吸収する能力がない。大気中の二酸化炭素濃度は、産業革命以後、それまでの変化に比して急激に上昇しているが、これは、化石燃料の大量消費など、人為的な活動が主な原因と考えられている。一方、地球の平均気温は過去一世紀の間に $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ほど上昇しており、やはり過去の変化に比して顕著な変化を示している。また気温上昇があれば海中に溶け込んだ二酸化炭素が大気中に放出される正のフィードバック系であることは確実である。

二酸化炭素濃度の上昇と平均気温の上昇の間にある因果関係については、科学者間

できざまな議論がある。1970年代半ば以降の二酸化炭素濃度の急上昇と地球上の平均気温の上昇という事実の符合からだけでは、それらのどちらが原因でどちらが結果かは言い難い。争点の一つは、二酸化炭素（地球大気中 370 ppm = 0.037%）よりも圧倒的に多い水蒸気（場所と季節で大きく変わるが、おおよそ 0.1~1%）の影響をどう評価するかである。

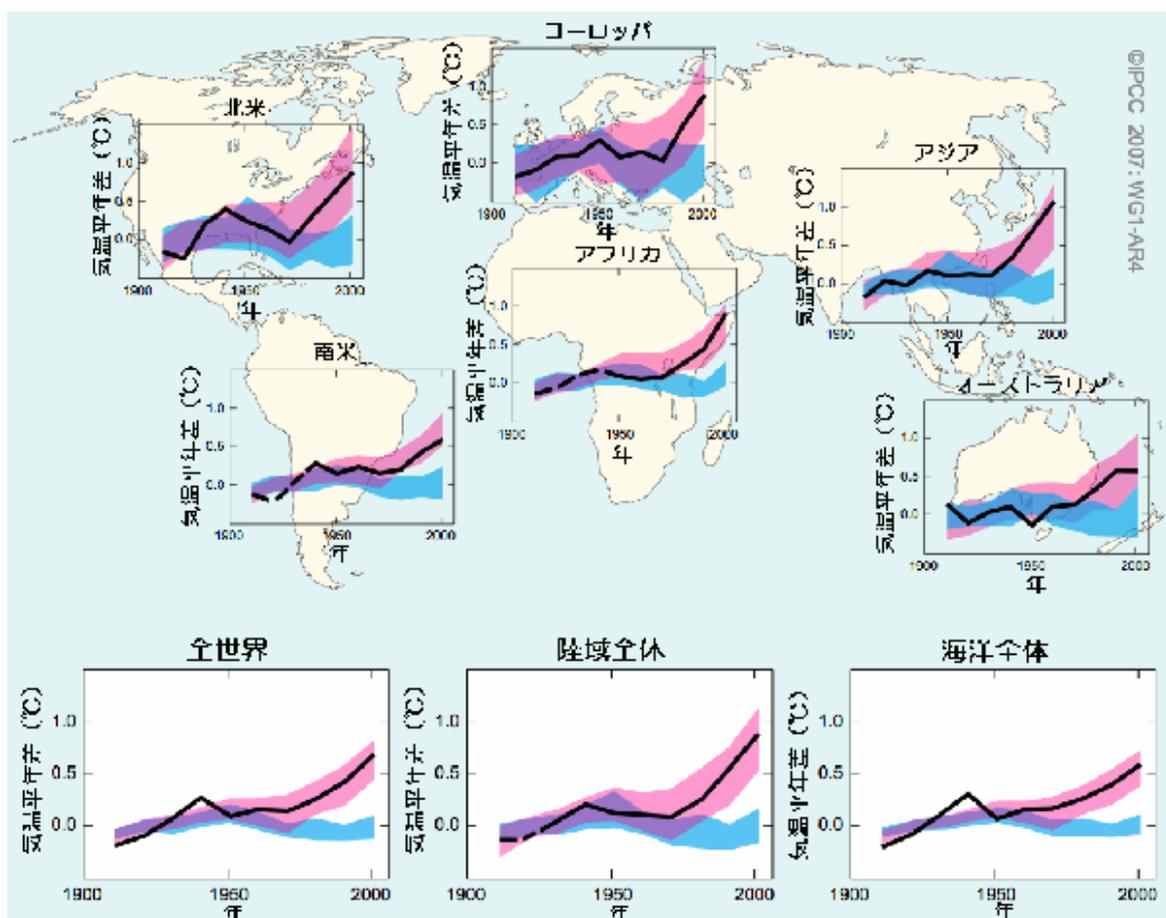


図 13 観測された大陸、地球規模の地上温度の変化（実線）と自然起源（青帯）および自然起源プラス人為起源（赤帯）を用いた機構モデルによるシミュレーション結果

観測結果は 10 年ごとの平均値を示す。観測値と自然起源プラス人為起源シミュレーションの結果がよく一致し、「1970 年代半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性がかなり高い」と結論付けられた。（気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 4 次評価報告書第 1 作業部会報告書、政策決定者向要約：図 SPM-4：気象庁ホームページ）

現在の科学で最も信頼できる説明と予測を提供していると考えられる国連の『気候

変動に関する政府間パネル』(IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change) (第4次評価報告書第1作業部会報告書、2007年2月)は、観測値とシミュレーション結果の一致に基づいて、「1970年代半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性がかなり高い(実現性が90~99%)」と報告している。二酸化炭素の他に、メタン、一酸化二窒素、代替フロン(ハイドロフルオロカーボン類 HFC、パーフルオロカーボン類 PFC)、六フッ化硫黄も、人間活動により排出され影響の大きい温室効果ガスと見なされている。

地球温暖化の個別事象への影響の程度を予測することは現在のところ困難である。気温上昇による極地の氷解、海面水位の上昇、干ばつや大雨など降水量の変化、気流の変化、熱波、ハリケーンや台風などの頻度や強度の増大、乾燥の結果発生する泥炭地や森林の自然発火、また、気候変動に特に敏感である生物種の絶滅などの生態系への影響の可能性が議論されている。

地球温暖化に関する科学的な予測には不確実性を伴う。しかし、地球温暖化の影響を抑制するため、国際的な行動計画として、『気候変動枠組条約締約国会議』(COP-FCCC)では1997年に京都議定書を採択し(1998年「地球温暖化対策の推進に関する法律」制定)、特に温室効果ガスの排出量削減を各国に求めている。個人や社会にとっても、省エネルギーを進め、化石燃料の消費を低減させる努力や新たな技術の導入が必要となっている。また二酸化炭素を集めて、地球内部に閉じ込める技術そのものはすでに可能である。しかしそれらが、地球全体を見渡したとき、正しい対応策であるかどうかは慎重な検討を重ねる必要がある。

地球温暖化問題に警鐘を鳴らし続けた IPCC と 1993 年から 2001 年まで米国副大統領を務めたアル・ゴア (Albert Arnold Gore, Jr.) に対して 2007 年度ノーベル平和賞が贈られた。

第5章 物質とエネルギー

5.1 豊かな生活を支えるエネルギー その根源

地球に降り注ぐ太陽光 54.4×10^{20} KJ/年の約 30%は宇宙空間に反射される。残りの地球が吸収する正味のエネルギーを 100 とすると、地熱は 0.03、月の引力（潮の干満）のエネルギーは 0.003 にしかならないが、これらエネルギーの総和が他の自然エネルギーの根源となっている。風力・波力は温められた大気の大気対流によってもたらされる力学的エネルギー、水力は水の蒸発、雲の形成、降雨といった地球規模の水の循環によって生じたポテンシャルエネルギーを利用しており、バイオマスは植物の光合成の産物である。化石燃料は、燃料分子が内蔵する化学エネルギーを燃焼によって空気中の酸素分子と反応させ二酸化炭素と水を生成する反応エネルギーを供給している。さらに近年、大気と海流を含めた全系としての物質循環、熱移動が本質的に重要であると考えられている。

太陽エネルギーの源は、核融合反応であり、地熱は地球の深部で起きている核分裂反応による地球の内部エネルギーが大半を占めている。原子力発電の原理が后者であり、未来のエネルギーの可能性が模索されている核融合炉が前者に対応するのは興味深い。決して人知が自然に反することを考えているわけではない。

日本は現在、世界中で利用されるエネルギー源のうちの約 5%を使っており、この量はアメリカ合衆国、中国、ロシアに次ぐ、世界で第4位のエネルギー消費大国にあたる。一方で GDP あたりのエネルギー利用という観点からは、欧米の工業先進国と比べても極端に効率の良いエネルギー利用「模範国」という側面を持っている。このようなエネルギー利用の量および効率の偏在が深刻なエネルギー問題となっており、我国の技術先進性を広く世界に広め提供していかねばならない。同時に、エネルギー利用効率を上げる技術的努力をさらに行う必要がある。

5.2 エネルギー資源と物質

5.2.1 化石燃料

化石燃料は太古の生物に由来する。つまり光合成により二酸化炭素から作られたバイオマスを主な起源とする物質である。今日、原油及び天然ガスが主流となっているが、石炭が産業革命を支え、近代化学工業の基礎を担った物質であることを忘れてはならない。また最近では、火力発電で二酸化炭素を大気中に放出せず、地中・海中に

貯留する技術 CCS (Carbon dioxide Capture and Storage)の開発も行われている。

そもそも 45 億年前植物がなかった頃の地球大気は 98%が二酸化炭素であり、酸素は殆ど含まれていなかったのに、地球上に植物が繁茂した今日大気は 0.037%の二酸化炭素と 21%の酸素から成り立っていることを考えると、大気中の二酸化炭素濃度を減少させるには、緑地を増やすことが最善であるという“常識”が成り立つように思える。しかし地球大気中に元々あった二酸化炭素のかなりの部分は、海洋に溶け込んだものであり、植物による二酸化炭素の吸収は、45 億年をかけて達成されたものである。

次に箇条書きするように、一本の草木の生育・死滅は二酸化炭素の増減に無関係であり、植林はそのまま大気中の二酸化炭素の減少に貢献するという“常識”は成り立っていない。

- ①地球上 1 年間に、植物は光合成で 112 Gt(ギガトン=109 トン)の二酸化炭素を吸収し、呼吸で約半分の 60 Gt を放出する。差し引き 52 Gt の吸収となる。
- ②この間、二酸化炭素は、グルコースやそのポリマーであるでんぷん、セルロース、リグニンなどに変換されて植物に蓄えられ、生育に使われ、いわゆる植物バイオマスが生産される。
- ③草木は枯れ倒れて朽ちると、土壤微生物の作用で分解し、50 Gt の二酸化炭素を生成する。さらに伐採で 1.6 Gt が加わり、草木と土をあわせて、二酸化炭素の収支はほぼゼロとなる。
- ④木材もパルプや廃材となると、いずれは焼却され、二酸化炭素が出る形で処分される。

植物が今日の地球大気の低い二酸化炭素濃度に寄与しているのは、森林面積が数十億年かけて増え続けてきたことと、埋没したバイオマスが、一千万年単位の時間を経て、埋没続成作用による温度・圧力上昇によって変化・変質し、化石燃料として地中に蓄えられ、朽ち果てて二酸化炭素へとはなりきらなかったことによる。産業革命以降、あまりにも早い速度で化石燃料が消費され、二酸化炭素として大気中に排出していることが問題なのである。

石炭は産業革命を支え、近代化学工業の基礎を担った。石油（原油）は分留されたのち、各種の燃料として用いられる。石油はまたプラスチックなど化学工業製品の原料となっている。石油の埋蔵量には限りがあり、エネルギーとして使い尽くすのではなく、再利用可能な化学製品の原料として重点的に利用することが重要である。

5.2.2 バイオ燃料

栽培植物を原料とするバイオエタノール、バイオディーゼル燃料は多種多様なバイオマス燃料の一部に過ぎない。米国では、以前から余剰生産されてきたトウモロコシをエタノールに変換し、ガソリンに10%混ぜたものをE10燃料として自動車に使ってきたが、ガソリン価格の高騰に伴い、エタノールなどの代替燃料への依存が増加してきている。地下に蓄積されていた炭素を開放するのではなく、大気中の二酸化炭素を固定化した植物由来であることが重要で、再生可能（循環型）エネルギーと呼ばれ、地球環境に配慮した燃料といわれる。しかしながら、トウモロコシは食料及び家畜飼料として使われ、この需要との競合があり、また増産することは農地の持続性への心配もあり、限界がある。ブラジルではサトウキビが用いられているが、基本的には廃バイオマス、すなわち藁（わら）、茎などの残渣（ざんさ）、廃糖蜜、廃食料油などから得られるエタノール、メタノール、メタン燃料、代替ディーゼル燃料に止めるのが望ましく、これらの研究開発が進んでおり将来が期待されている。一方、バイオマスの利用が進められると、それが有利に取引されるため、森林を焼き払い畑に変えるということも行われていて、危惧されている。

5.2.3 クリーンエネルギー

太陽電池、水素エネルギー、地熱発電、風力発電などは、環境を大きく乱すことがないことから、クリーンエネルギーと呼ばれ、急速に技術開発が進められている。太陽電池では、半導体中で光のエネルギーが、電子と正孔を作り出し、これを電流として取り出す。水素は燃やしても水しかできないのでやはりクリーンなエネルギーである。しかし現在のところ水素の製造は、石油の分解によるのが最も経済効率が高いなどの問題がある。

地熱により作られた水蒸気を取り出して蒸気タービンを回して発電するのが地熱発電である。世界で地熱発電量が最も多いのは米国であり、フィリピンがそれに次いでいる。風の力で羽を回し発電するのが風力発電であり、デンマークやドイツで開発が進められている。風力発電は日本でも注目されているが、風力が一定しないことやコストの削減効果が低い、環境への影響が少なくない、など克服すべき課題も多い。

5.2.4 エネルギー（燃料）電池

イオン化しやすい傾向が異なる物質を結びつけるとその間に電子が流れる。この酸化・還元反応によって発生する化学エネルギーを電気エネルギーに変換（放電）する

仕組みを電池という。また、放電と逆方向に電流を流すと、電気エネルギーを化学エネルギーとして電池内に蓄積（充電）しておくことも可能である。

水の電気分解では水分子に電気エネルギーを加えて酸素と水素に分解するが、その逆に、水素に酸素を結びつけて水分子にするときに発生するエネルギーを電気として取り出す一種の発電機を燃料電池という。生成物である水は環境に負荷を与えないと考えられるが、燃料としての水素をどのように調達・生成、貯蔵するかが課題となっている。

電池や電気分解において、電気エネルギーと化学エネルギーの変換を仲立ちするのはイオンである。導線を流れる電流は電子が担うが、電池や電気分解の仕組みの中で、電解質中を移動して電流を担うのは化学反応（酸化還元反応）で生じたイオンであることは忘れられがちである。

5.2.5 原子力エネルギー

原子力発電では、原子炉内での核分裂反応で発生する熱エネルギーにより水を沸騰させて水蒸気を取り出し、蒸気タービンを回して電気エネルギーに変換する。核燃料物質（ウラン、プルトニウムなどの特別の同位体）は、核分裂性物質の量、形状、中性子に対する条件が整うと、核分裂の連鎖反応を起こす。核分裂による連鎖反応が継続している状態を臨界状態という。中性子を吸収し易いホウ素、カドミウムを含んだ物質からできている制御棒を用いて中性子数を制御し、連鎖反応が止まったり暴走したりしないように制御している。

日本では、原子力平和利用3原則、「公開」、「民主」、「自主」が定められている。日本のような地震国においては、原子炉自身の安全性に加えて発電所施設全体の耐震安全性は特に重要な課題である。一方で、化石燃料に比べて温室効果ガスを排出しないという利点もある。欧米諸国では一時休止していた原子力発電所の再開を実行または検討している。原子力エネルギーの利用にはまた、核分裂反応の際に生じる高レベルの放射性廃棄物の処理という難問がある。また核燃料資源の埋蔵量も有限であり、原子力エネルギーも無限ではない。

5.2.6 核融合エネルギー

2つの原子核が十分近づくと、原子核の間に引力として働く核力が静電的斥力に打ち勝って融合し、新しい原子核が生まれることがある。これを核融合反応という。重水素（水素の同位体で、その原子核は陽子1個、中性子1個からなる）や三重水素（水

素の同位体で、その原子核は陽子1個、中性子2個からなる) の場合には、核融合反応によってヘリウムが生成し、全質量がわずかに減少するため大きなエネルギーが発生する。このような核融合反応の燃料になる水は地球上に実際上無限に存在するので、夢のエネルギーといわれる。太陽からのエネルギーも太陽での核融合反応により発生している。核融合反応を地球上で起こさせるために、高い温度の重水素ガスを安定して長い時間閉じ込める技術の開発に努力している。これに必要なプラズマ状態(中性気体が正イオンと電子に分離した状態)を極く短時間保つことには成功しているとされるが、実際に反応を起こすまでには至っていない。

5.3 未来のエネルギー

豊かで快適な日常生活を維持するためには、将来も引き続き化石燃料に大部分を依存するということとはできない。以下のいくつかのことに注意する必要がある。

まず、①少数のエネルギー資源にエネルギーの大部分を依存せず、再生可能エネルギー、クリーンエネルギーをはじめとする5.2の多様なエネルギー資源に対する利用の多様性を目指さなければならない。この点で、小規模水力発電(マイクロ水力発電とも呼ばれる)に内外で注目が集まっている。第1章でわが国のエネルギー需要は4%を水力発電に頼っていると述べた。これまでは大規模なダムを建設し大きな水位差をつくり、このポテンシャルエネルギーを発電機のタービンをまわす力学的エネルギーに変換している。マイクロ水力発電は、中小河川や用水路などの小さな高低差を利用し、高々100kW程度の水力発電を行おうとするものである。建設費・運用費が安価で、何よりもダム建設で大きな環境破壊を伴うことがない。発電した場所の近傍で使用することを想定している。

②エネルギー効率を上げることも重要である。高温熱源から熱エネルギーを仕事として取り出す場合、より高温熱源であるほど熱効率を上げることができる。従って高温で「仕事」に変換し、捨てられる熱エネルギーを何度も多段で利用していくことが望ましい。これを「熱のカスケード利用」といい、重要な点である。

さらに、③「節約」をエネルギー利用に当たっての必須事項としていかななくてはならない。「もったいない」思想に感銘を受けたという発言で有名となったワンガリ・マータイ(ケニア出身の環境保護活動家、2004年度ノーベル平和賞受賞)が指摘したように、わが国の文化・価値観には自然や物に対する敬意・いつくしみ(転用・使い回し・カスケード利用)があった。大量生産・大量消費の風潮や都市化などの影響で風化したこの価値観を復活させなければならない。身近な例で言えば、100Wの白熱灯

に対応する蛍光灯は20 W前後のものであるから、消費電力は20%かそれ以下に抑えることができる。エネルギー利用の際に、エネルギー効率と「もったいない」という考え方、そして再生可能エネルギーを利用することが、重要である。

第6章 観測、測定、モデル（科学をする思考とプロセス）

6.1 動機、観測、測定、発見

人間は、自らを知るために、また自らを取り巻く世界や自然を知るために様々な観察や測定を行う。

身に備えた視覚、聴覚、触覚などによって、明るさや形、大きさ、距離、重さ、ものの堅さなどを観察する。さらに、望遠鏡や顕微鏡、時計などの科学技術の成果として生み出された技術機器を用いて、観測や観察の範囲や精度を飛躍的に進展させてきた。また、その観測・測定の結果によって自然の理解が大幅に進み、科学技術の飛躍的な進歩がもたらされており、それがさらに観測・計測の技術を発展させている。

大型望遠鏡や電波天文台が宇宙についての理解を大きく進めている。光の代わりに電子の波動を用いる電子顕微鏡などの顕微鏡技術の発展により個々の原子を「見る」ことが可能になっている。サイズや形状を精密に測定し製作できるようになったことが、工業部品を低コストで大量生産することを可能にした。数百原子の広がり of 精密さで物質を加工・制御する微細加工技術によって（4.5.3 ナノテクノロジーの項参照）、超高集積回路（LSI）が作成されており、これがコンピュータをはじめとする先端的な電子機器に使われている。

18世紀の大航海時代には、従来の羅針盤に加えて安定に正確な時間を刻む時計が開発されるようになった。その後、精度と携帯性を兼ね備えたいろいろな時計が開発されたが、やがて電気回路や水晶振動子を用いた時計、セシウム原子の準位間振動を用いた原子時計が開発されるようになった。現在最も精密な原子時計は、1年間の狂いが1億分の数秒程度である。最近日本で開発された光格子時計（原子をレーザー冷却という手段で光の波長より短い間隔で並べて、そこでの遷移順位の間隔を測定する）では、さらに1000倍の精度、すなわち1年間に1000億分の数秒という高い精度が得られている。原子時計を搭載した人工衛星を用いた測量を利用する位置測定システム（GPS）は、自動車の位置を1メートル以下の精度で検出するカーナビなどに使われている。

6.2 測定機器

音や電磁波など自然界で使われている信号の範囲は非常に広いものである。科学と技術は自然が発する広大な信号を検出する方法として、さまざまな測定機器を開発してきた。ハッブル宇宙望遠鏡や電波望遠鏡により広大な宇宙空間の探索と宇宙観の拡

大が可能になった。電子顕微鏡、トンネル顕微鏡、原子間力顕微鏡などによって、サブミクロンの生物の世界や原子スケールの物質の世界が拓け、生命観も大きく変化しつつある。

測定器の性能を評価する指標としては、どの程度広い信号を検出できるか（ダイナミックレンジ）、どの程度小さな信号も検出できるか（検出限界）、信号の強度に応じた応答や出力が得られるかどうか（信号応答の直線性）、どの程度小さな信号あるいは時間間隔を区別できるかどうか（分解能）などがある。

測定機器を検出だけでなく、信号の発信として積極的に利用することでヒトの本来もっている能力を拡大してきた。通信機器は情報社会の基礎と発展を切り開き、医療診断の機器の開発は健康の維持に必須の道具となっている。

【コラム9】五感の科学

人間の五感は、物理現象・化学物質と生命体との接点・脳と神経などの視点で物質科学の立場から理解することができる。すなわち、視覚（眼）については、光の科学を柱にして、光の伝わり方・光の回折と干渉・波長と色・紫外線・赤外線などが関わる。聴覚（耳）については、音の伝わり方・音程と周波数・振動数など、音に関わる科学が、触覚（皮膚）については、体性感覚・皮膚感覚・圧点・痛点のような圧力などの刺激に関係する科学が、味覚（舌）については、味蕾の仕組みのほかに、うまみ物質・調味料・香辛料といった化学物質の科学も関わる。また、嗅覚（鼻）についても、香水・臭気といった化学物質の関わる科学が重要である。その他の感覚器として、前庭・半規管（耳）の関わる平衡感覚では重力と運動の視点で、皮膚（温点・冷点）の関わる温覚と冷覚については温度の視点でそれぞれ物質科学的に理解できる。

6.3 データ解析（数学・数式、モデル・仮説）

数学・数式は自然科学と技術を記述するための、あいまいさの無い、共通言語である。データを収集し、データのもつ意味を探り当て、さらには自然法則を導き、未来を予見するためにはデータを数値化し、一定の理論式に当てはめて、有意なパラメータ値を導き出す必要がある。

個々の現象を越えたより一般的な法則を導くためには、合理的な仮説を立て、その仮説を証明できるような実験や観測を行い、データを検証するためのモデルを構築する。モデルは自然や社会現象をより一般的に理解するための手段であり、考え方のルールでもある。

自然の観察に基づきモデルが作られ、自然や社会現象を理解するための仮想的な構造（作業仮説）として提示される。同時に、モデルに基づいて予想、予測をすることができる。モデルは、自然科学を進めるためおよび産業・技術開発のための有効で強力な過程であり、様々な検証と予測能力の確認を経て自然そのものの構造として受け入れられる。

6.4 実験室での再現とシミュレーション

科学技術の実験や試料製作過程では、人為的に制御できない要因で「誤差」が混入する。これらの原因は、熱的な揺らぎ、制御しうる範囲を超えた振動、現象が統計的なものであることによるもの、量子力学的な（本質的な）揺らぎ、測定精度による誤差、測定機内で用いられている計算機の桁数などに基づく誤差、などがある。特に測定精度などによる誤差は、測定回数を多くしてその結果を統計的に処理するなどして、誤差の精度をあげるなどの努力が行われている。

巨大実験による無駄を節減し、あるいは観ることのできない現象をシミュレーションによって観る、などの要求が高くなっている。たくさんの粒子が相互作用している系では、計算機シミュレーションによる以外、具体的に物質系の運動や熱的性質を知る手段が無いことも多い。実際、シミュレーションによって「発見」された現象は決して少なくない。特に地球規模での気候変動を理解（4.7.2 地球温暖化、および4.4 情報社会を支える物質・材料、の項参照）するうえで、日本の「地球シミュレータ」などによるシミュレーションの重要性が改めて注目され、今やそれらをなくして地球の未来、地球環境の持続性を議論することはできなくなっている。

一方で、モデルの本質的なところを僅かでも変えれば結果が大きく変わることもしばしばある（長期的天気予報は不可能である）。シミュレーション結果を、理由もなくむやみに受け入れる、あるいは過信することは避けるという態度が、科学者にも一般市民にも必要である。

6.5 発表、記録、評価

自然科学および工学の基本は、同じ条件で同じ手順に従えば、必ず同じ現象が起き、同じ結果が得られることである。そのため、科学や工学の基本は、観察であり、記録である。実験室の中では、温度、圧力など外的な条件をきちんと記録し、また資料の作成過程を明らかにしなくてはならない。これらの記録は実験者のための記録であるばかりでなく、実験過程の客観性を証明するものであり、後に独創性あるいは先取権

を主張するための根拠ともなる。現在ではこのような記録の無い実験は、客観的に行われた実験とはみなされなくなっているし、科学技術としての価値を認められなくなっている。

科学技術の研究では、産業面ではすぐに全てを発表することはできないとしても、基本的には公開原則は守られなくてはならない。また専門研究者同士による評価のプロセス（ピアレビュー）がなくてはならない。知的財産権は発明者あるいは発見者の利用上の権利を保護するものである。しかし知的財産権を強調すれば科学技術の成果がより多く得られるというのは必ずしも真実ではない。知的好奇心を大切に、科学に対する尊敬の念が社会に在って初めて科学技術が花開くことができる。

参考文献

- 1) 新村出編「広辞苑」、岩波書店、第5版、1998。
- 2) エネルギー白書 2006 資源エネルギー庁
- 3) 朝永振一郎著、「鏡の中の物理学」講談社学術文庫 31、1976、などに収録されている。
- 4) 例えば、ヴェルナー・カルル・ハイゼンベルク著、「自然科学的世界像」、みすず書房
- 5) J. G. Da Silva, G. E. Serra, J. R. Moreira, J. C. Concalves, and J. Goldemberg, “Energy Balance for Ethyl Alcohol Production from Crops”, *Science*, Vol.201, no.4359, pp. 903 – 906, 1978.
- 6) 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第4次評価報告書第1作業部会報告書（気象庁ホームページ）

物質科学専門部会名簿

岩村 秀	日本大学 大学院総合科学研究科	教授
藤原 毅夫	東京大学 大学総合教育研究センター	特任教授
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 物性研究所	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 大学院理学系研究科	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PTA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) [事務局長次]、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)、笥 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(公立はこだて未来大学教授)、吉田 浄(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

笥 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(国際基督教大学准研究員)、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

