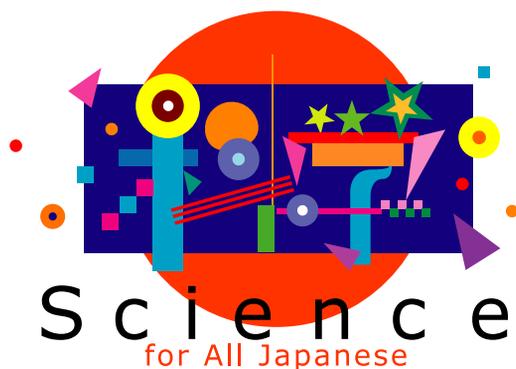


21世紀の科学技術リテラシー像～豊かに生きるための智～プロジェクト

総 合 報 告 書

平成20年(2008年)6月



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

科学技術の智プロジェクト

科学技術の智プロジェクト

研究代表者 北原和夫（国際基督教大学教養学部）

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

科学技術の智プロジェクト総合報告書刊行にあたって

この科学技術の智プロジェクトは、すべての日本人が身に付けてほしい科学・数学・技術に関わる知識・技能・考え方を提案しようという試みである。

このプロジェクトの前に、2005年に「科学技術リテラシー構築のための調査研究」を行い、プロジェクト全体の目標、進め方、組織のあり方などについて十分詰めておいたものの、2006年後半から2008年3月までという約一年半という短期間で、どこまでプロジェクトを進め、その内容を充実させることができるか、については、不安なところが大きかった。しかしながら、プロジェクトに参加した約150名の方々の熱心なご努力により、七つの専門部会の報告がまとまり、さらに総合報告書を研究期間内にまとめることができた。議論を尽くしきれなかった面もあるが、今後は専門部会報告書ならびに総合報告書が広く議論のための「たたき台」となり、改善されていけばよいと考えている。そして、次の段階として、これらの報告書をもとにして、具体的な教材、教育プログラムの開発がなされていくべきである。教育に関して様々な議論がなされている中で、様々な分野の方々を結集して具体的なゴールを明示するという試みはあまりなされてこなかったのではないかと、思う。

この「科学技術の智」の報告書は、現在の学問の枠組みをそのまま教育の場に移すことを目的とした解説書ではなく、むしろ、今これから育っていく世代がすべて成人となる2030年の日本のあるべき姿を想起し、すべての人々が様々な職種、年齢などの相違を超えて協働して、世界的な課題に取り組み、心豊かで健康的な社会を作っていくために、いかなる智慧が共有されていなければならないかという壮大な問いかけに答えようとするものである。

そのための作業として、まず私たちが直面している、あるいは、するであろう課題にチャレンジするために連携すべき科学技術の領域を七つに設定して議論してまとめたのが「専門部会報告書」である。この分け方は一応の分け方であって、人類の智として深くつながっている。したがって、それらを総合したものが「総合報告書」である。それぞれの専門部会には、それぞれの分野の専門家だけでなく、ひろく教育関係者あるいはメディア関係者なども参加しており、また、専門部会間で相互に専門部会報告書の閲読を行い、共通認識を図るように努めた。総合報告書作成においては、さらに広い分野の方々が関わって全体での議論によって内容を詰めるという作業を繰り返し行った。すなわち、専門部会報告書ならびに総合報告書をまとめる作業自体が、様々な職種を超えて協働する作業であったのである。

本報告書が専門部会報告書とともに、広く人々の手に届き、日本の次世代育成、さらに、将来の社会のデザインのための具体的な活動に資することを願うものである。

平成20年（2008年）3月

北原 和夫

（科学技術の智プロジェクト研究代表者）

本報告書につきまして、字句の訂正、図版の追加、巻末の索引の訂正などを行いました。

2010年8月

要 約

科学技術の智プロジェクトは、これまで人類が蓄積してきた智を踏まえた上で、21世紀を心豊かに生きるにあたり、「持続可能な民主的社会」を構築するために万人が共有してほしい科学技術の智を検討し成文化することを目的として行われた。

ここでの科学技術の智（または、科学技術リテラシー）とは、「すべての大人が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」である。

このプロジェクトは、平成18年・19年の科学技術振興調整費によって行われたプロジェクトであり、約150名の科学者、教育者、技術者、マスコミ関係者等が参加した。

科学技術の智は、既存の学問あるいは教科の枠組みを超えて、新たな智の枠組みとして七つの領域の形で提案する。すなわち、

数理科学、生命科学、物質科学、情報学、宇宙・地球・環境科学、
人間科学・社会科学、技術、
である。

科学技術の智においては、いわゆる物理・化学・生物・地学という従来の固定的な専門分野にこだわっていないだけでなく、技術を一つの領域とし、さらに、情報学、人間科学・社会科学をも含めた。

ただし、これら七つの専門分野は決して独立した存在ではなく、総合的な科学技術の智を目指すための七つの入り口にすぎない。

科学技術の智は、上に示した七つの領域で示されているが、それらはそれぞれ次のような共通の視点に基づいて具体化されている。

- (1) 人間社会を軸に構成されている。
- (2) ストーリー性を持って構成されている。
- (3) 現在から将来を視野において構成されている。

また、科学技術の智を全体的にそして視覚的に捉えるために、人間や社会と科学技術の智との関わりを展望する図、曼荼羅（まんだら）が作成されている。

このような科学技術の智は、20世紀後半からの科学技術の歴史的な事実、現代の科学技術に共通の考え方、科学的な態度・センス、という視点から見ることができる。

20世紀後半からの科学技術の歴史的な事実としてここでは、人間についての科学的

理解、情報処理革命、ナノテクノロジー、生命の仕組みの解明と操作技術の開発、宇宙モデルの確定、地球環境についての科学的理解、の六つに分けて考えている。

また、現代の科学技術に共通の考え方としては、総合的視点に立つ選択、多様性と一様性、可視化、スケールとサイズ、多量データ高速処理のアルゴリズム、科学と技術の相互貢献、の六つを取り上げた。

科学的な態度には、科学にとって必要不可欠な資質（好奇心、批判力・懐疑力）、科学が持っている特質（証拠・論拠依存性、理論的・数的志向性、暫定性）、科学的な活動の特質（自己限定、科学者共同体管理、公開性、公共性）の三つがあり、日常生活において、科学的な知識や見方・考え方が必要な場面を適切に判別できるセンスの重要性を挙げた。

科学技術の智は、現実世界の問題の分析や解決に応用していく上で有効である。

現在、地球規模で直面する緊急の問題には、水問題、食料問題、エネルギー問題などがある。科学技術の智は、これらの問題について現在まで何が分かっているのか、将来何をしなければならないのかを明らかにすることができる。

このような科学技術の智を、2030年を目指して定着・普及させる。

科学技術の智プロジェクトでは、今の時代に生まれた子どもが2030年に成人として社会を背負って立つ時点で、科学技術の智が社会全体に行き渡っていることを願っている。

そのために、

- (1) 科学技術の智プロジェクトを今後も継続させる。
- (2) 科学技術の智を定着するための戦略を策定し実行する。
- (3) 科学技術の智を共有するためのネットワークを構築する。

過去20年の変化よりも、今後の20年の変化の方が激しいであろう。私たちはその変化に備えなければならない。変化を克服し、将来にわたって人類と地球が共存し、科学技術の智を身に付けた人々が、心豊かに生きることのできる社会を構築することを願ってやまない。

未来の子どもや社会に責任を持つ私たちは、科学技術の智を定着・普及するために今こそ立ち上がるべきである。

科学技術の智プロジェクトの成果

本プロジェクトでは、科学技術の智について、8冊の報告書を作成し、公表した。

1. 総合報告書（本書）

2. 専門部会報告書
 - (1) 数理科学専門部会報告書
 - (2) 生命科学専門部会報告書
 - (3) 物質科学専門部会報告書
 - (4) 情報学専門部会報告書
 - (5) 宇宙・地球・環境科学専門部会報告書
 - (6) 人間科学・社会科学専門部会報告書
 - (7) 技術専門部会報告書

なお、これらの報告書は、本プロジェクトのウェブサイト

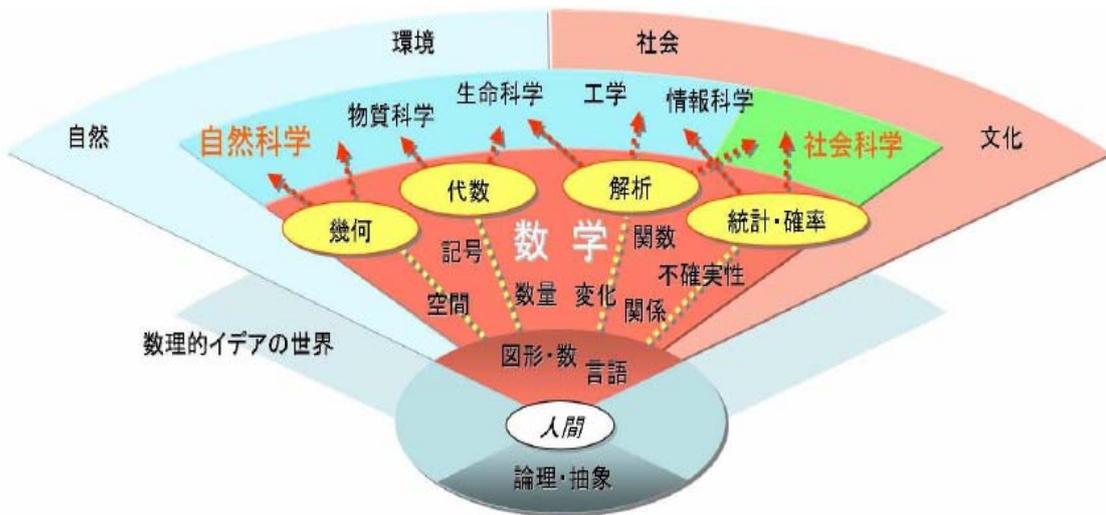
<http://www.science-for-all.jp/>

で広く一般に公開される。

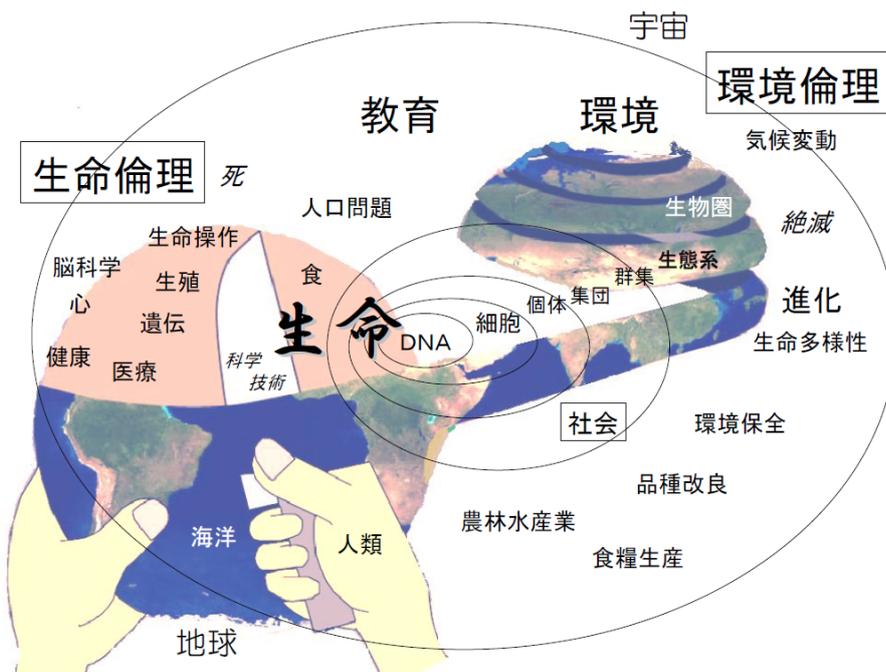
科学技術の智の曼荼羅

科学技術の智を全体的にそして視覚的に捉えるために、人間や人間社会を軸に科学技術の智を展望するために曼荼羅（まんだら）という図に表した。

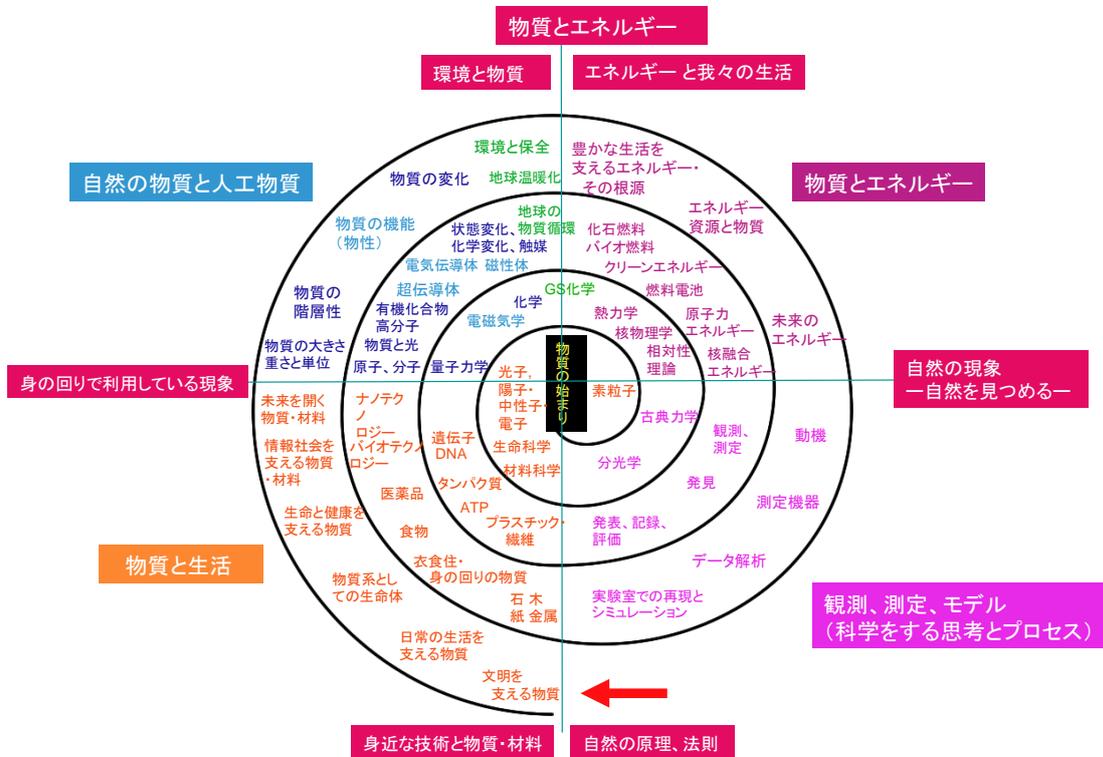
1. 数理科学



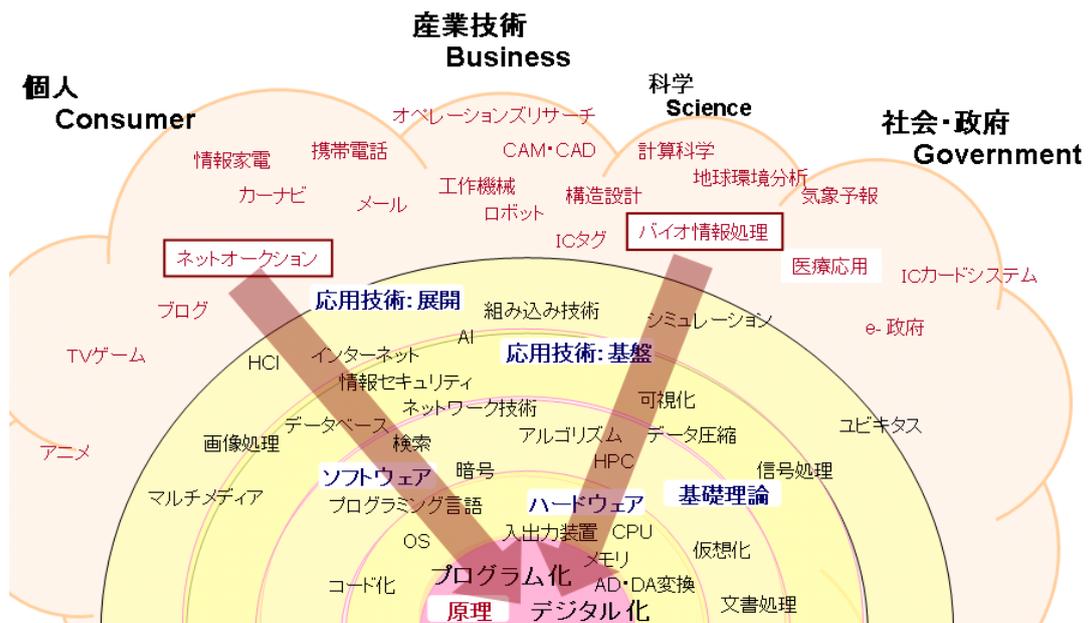
2. 生命科学



3. 物質科学

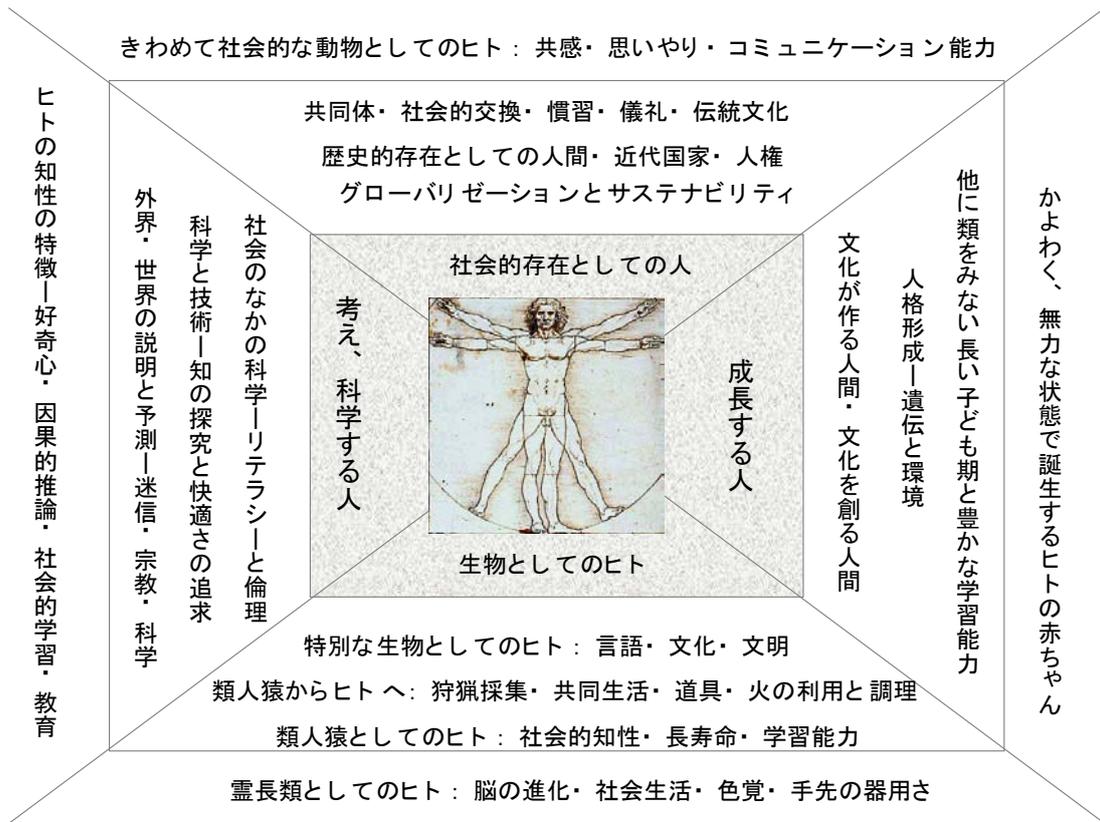


4. 情報学

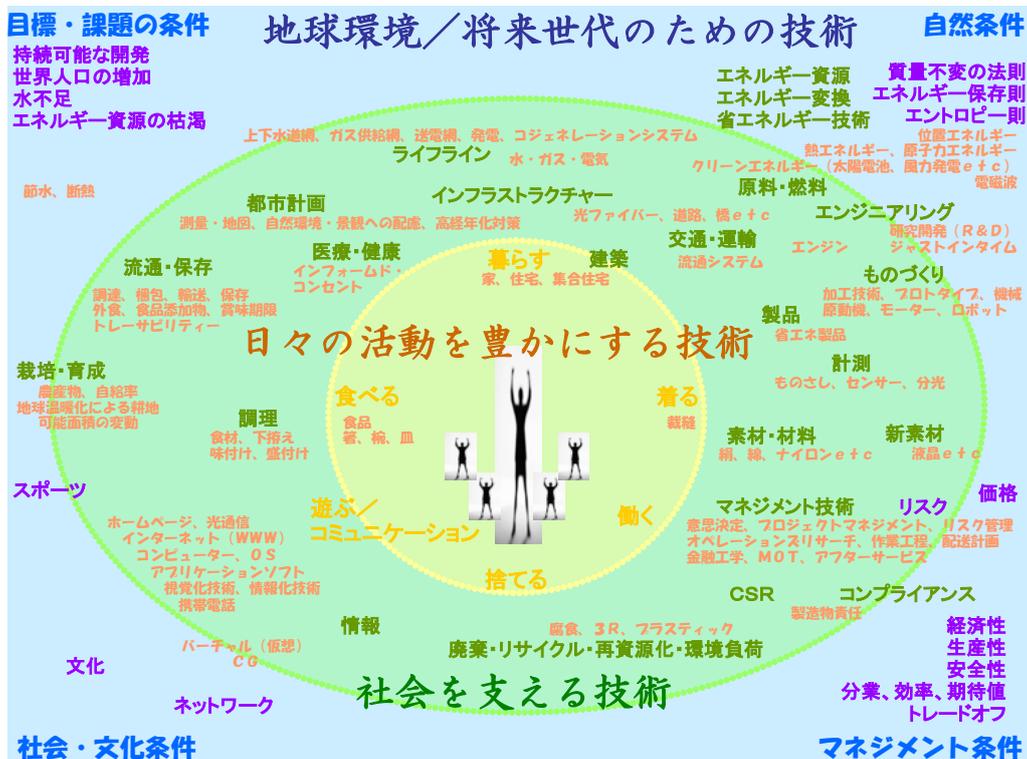


HCI = Human Computer Interface, AI = Artificial Intelligence, CAD = Computer Aided Design, CAM = Computer Aided Manufacturing, HPC = High Performance Computing (Supercomputing), AD ⇔ DA = Analog ⇔ Digital

5. 人間科学・社会科学



6. 技術



目 次

科学技術の智プロジェクト総合報告書刊行にあたって.....	i
要 約.....	iii
科学技術の智プロジェクトの成果.....	v
科学技術の智の曼荼羅.....	vi
1. 数理科学.....	vi
2. 生命科学.....	vi
3. 物質科学.....	vii
4. 情報学.....	vii
5. 人間科学・社会科学.....	viii
6. 技術.....	viii
目 次.....	ix
第1章 21世紀を豊かに生きるための科学技術の智に向けて.....	1
1.1 2030年を目指す科学技術の智.....	1
1.2 科学技術の智に関わる現代の課題と将来の社会像.....	1
1.2.1 一人ひとりの尊厳が認められる社会を.....	1
1.2.2 生命の多様性の持続を.....	2
1.2.3 科学技術がもたらす影響の認識を.....	3
1.2.4 科学技術との関わりでみずから判断を.....	3
1.2.5 科学技術について学ぶ意義を.....	4
1.2.6 日本の将来像.....	4
1.3 21世紀を豊かに生きるための科学技術の智の必要性.....	5
1.3.1 科学技術についての判断.....	5
1.3.2 科学技術についての世代間の継承.....	5
1.3.3 学校教育における理科、算数・数学、技術の学習の長期的展望.....	6
1.3.4 科学技術教育の生涯にわたる目標の俯瞰.....	6
1.4 科学技術の智に期待されること.....	6
1.4.1 指針としての科学技術の智.....	6
1.4.2 素材としての科学技術の智.....	6
1.4.3 推進力としての科学技術の智.....	6

1.5	科学技術の智を作成する際の前提と基本的な考え方	7
1.5.1	日本人の感性や伝統を考慮する	7
1.5.2	新しい時代の科学技術に即応する	7
1.5.3	技術も重要な柱とする	8
1.5.4	成人段階で考える	8
1.5.5	専門分野を総合する	8
	【注】科学技術の智プロジェクトの研究の経緯	9
第2章 科学技術の本質		12
2.1	科学の本質	13
2.1.1	科学とは	13
2.1.2	科学の方法	13
2.1.3	科学の可能性	14
2.2	技術の本質	15
2.2.1	技術とは	15
2.2.2	私たちは技術の中で生きている	16
2.2.3	技術は人間が作り出したもの	16
2.2.4	技術をデザインし、評価し、管理し、制御する	17
2.2.5	技術と社会とは共進化する	17
2.3	数学の本質	18
2.3.1	数学の基礎は数と図形である	18
2.3.2	数学は抽象化した概念を論理によって体系化する	19
2.3.3	数学は抽象と論理を重視する記述言語である	20
2.3.4	数学は普遍的な構造（数理モデル）の学として諸科学に開かれている	20
第3章 科学技術の智：七つの扉		22
3.1	数理科学	24
3.1.1	数学リテラシー	24
3.1.2	数学と私たち	24
3.1.3	数学の世界	26
3.1.4	言葉としての数学	34
3.2	生命科学	36

3.2.1	一様にして多様な存在.....	36
3.2.2	生物の世界.....	37
3.2.3	ヒトという生物.....	41
3.2.4	生命の倫理.....	45
3.2.5	心豊かに生きるために—生命科学の立場から—.....	47
3.3	物質科学.....	49
3.3.1	物質科学の考え方.....	49
3.3.2	物質の始まりとその階層性.....	50
3.3.3	物質の法則とエネルギーの法則.....	52
3.3.4	人工物質：物質科学の最先端と私たちの生活.....	55
3.3.5	エネルギー資源と物質資源.....	57
3.3.6	物質科学の新たな展開.....	58
3.4	情報学.....	60
3.4.1	情報科学技術の基本原理：デジタル化と計算化.....	61
3.4.2	基本原理に起因する情報科学技術の特質.....	64
3.4.3	情報科学技術に共通する仕組みと特質.....	66
3.4.4	情報科学技術リテラシーの大切さ.....	68
3.5	宇宙・地球・環境科学.....	70
3.5.1	気象・気候と海洋.....	70
3.5.2	奇跡の星・地球.....	72
3.5.3	太陽系と宇宙.....	74
3.6	人間科学・社会科学.....	81
3.6.1	科学技術の智としての人間科学・社会科学の知見.....	81
3.6.2	科学の本質、科学を学ぶ意義.....	82
3.6.3	人間（ヒト）の科学.....	83
3.6.4	社会の科学.....	85
3.6.5	科学的人間像に向けて.....	86
3.7	技術.....	88
3.7.1	技術の世界.....	88
3.7.2	技術リテラシーの利点.....	89
3.7.3	技術リテラシーの構造.....	92
3.7.4	社会へつながる技術の扉～未来への提言.....	96

第4章 科学技術の智の視点.....	98
4.1 近代的自然観と方法論.....	99
4.1.1 自然現象の説明の論理性と単純さ.....	99
4.1.2 現代科学における物理学の基本概念.....	100
4.1.3 科学の総合化.....	105
4.1.4 倫理性の必要性.....	106
4.2 科学技術の転換をもたらした歴史的事実.....	107
4.2.1 人間についての科学的理解.....	107
4.2.2 情報処理革命.....	109
4.2.3 ナノテクノロジー.....	111
4.2.4 生命の仕組みの解明と操作技術の開発.....	113
4.2.5 宇宙モデルの確定.....	115
4.2.6 地球環境についての科学的理解.....	117
4.3 現代の科学技術の考え方.....	120
4.3.1 総合的視点にたつ選択.....	120
4.3.2 多様性と一様性.....	121
4.3.3 可視化、イメージ化は私たちの科学を、日常をどのように変えたか.....	123
4.3.4 スケールとサイズ.....	125
4.3.5 多量データ高速処理のアルゴリズム.....	127
4.3.6 科学と技術の相互貢献.....	129
4.4 科学的な態度・センス.....	131
4.4.1 科学的な態度.....	131
4.4.2 科学的センスを身につけた人は.....	135
第5章 科学技術の智の活用：四つの話題.....	137
5.1 水の自然科学・利用技術・人間との関わり.....	139
5.1.1 導入：水について考える.....	139
5.1.2 人間生活と水との関わり.....	141
5.1.3 地球環境における水：マクロな視点で見る水.....	146
5.1.4 ミクロな視点で見る水：水分子の特異性.....	150
5.1.5 生命はなぜ水を必要とするのか.....	155

5.1.6	水の起源：水と生命の星(地球)の誕生.....	158
5.1.7	日本と西洋における水認識の歴史.....	163
5.2	食料、その量と安全性の確保.....	166
5.2.1	世界の食料.....	166
5.2.2	食料の分布.....	168
5.2.3	食用以外の用途.....	168
5.2.4	食料の自給と廃棄.....	170
5.2.5	食事と健康.....	173
5.2.6	食品の安全.....	177
5.3	エネルギー、自然と社会を動かす源泉.....	183
5.3.1	エネルギーの利用とエネルギー変換装置.....	183
5.3.2	エネルギーの七変化.....	184
5.3.3	エネルギーの単位.....	186
5.3.4	エネルギーの質.....	187
5.3.5	熱と温度.....	187
5.3.6	エネルギー変換効率.....	189
5.3.7	生命とエネルギー.....	190
5.3.8	生産に必要なエネルギー.....	193
5.3.9	生活・経済におけるエネルギー.....	194
5.3.10	世界および日本のエネルギー使用.....	194
5.3.11	宇宙・地球的観点.....	198
5.3.12	再びエネルギーとは.....	201
5.4	地球と人間圏.....	202
5.4.1	地球システムと人間圏の誕生.....	202
5.4.2	人間圏の境界.....	203
5.4.3	人間圏の維持と地球システム.....	204
5.4.4	人間圏の持続的発展と地球システム.....	206
第6章	将来へ：科学技術の智の継承と共有.....	209
6.1	私たちは何をなすべきか.....	209
6.2	科学技術の智の継承と共有の視点.....	210
6.2.1	何のために継承・共有をするのか.....	210

6.2.2	何を継承・共有するのか.....	210
6.2.3	誰を対象にするのか.....	211
6.2.4	学ぶとは.....	212
6.2.5	プロジェクト型の学習を.....	212
6.2.6	学習環境のデザインを.....	213
6.3	科学技術の智の継承と共有に関する具体的な方策.....	214
6.3.1	科学技術の智プロジェクトの報告書を活用する.....	214
6.3.2	科学技術の智の定着・普及活動を恒常的に行う.....	215
6.3.3	科学技術の智の定着・普及のための諸機関への働きかけ.....	216
6.4	2030年を目指して.....	217
科学技術の智 総合報告書・報告書作業部会および原案作成者一覧.....		218
科学技術の智プロジェクト 研究組織.....		219
索引.....		222
この報告書の利用について.....		234

第1章 21世紀を豊かに生きるための科学技術の智に向けて

1.1 2030年を目指す科学技術の智

「科学技術の智プロジェクト」（設置から本報告書作成に至る経緯については、本項末尾の【注】を参照）は、日本人が心豊かに生きるためにすべての大人が2030年の時点で身に付けておいてほしい科学技術の素養（これを「科学技術の智」と呼ぶことにする）を提示することを目指している。「科学技術の智」（または、科学技術リテラシー）とは、科学・数学・技術に関係した知識・技能・物の見方である。2030年を目標としているのは、その時が、今の時代に生まれた子どもが成人として社会を背負って立つ時であり、それまでに、本プロジェクトで提言されるような科学技術の智が、社会全体に行き渡っていることを期待してのことである。

この目標が実現するためには、今後22年間に、幼児から成人までの各発達段階に応じて、科学技術の智を定着・普及させることが必要となる。その意味では、本プロジェクトで提言される「21世紀を豊かに生きるための科学技術の智」は、今後22年間の定着・普及のための活動の土台であり、出発点となるものである。

1.2 科学技術の智に関わる現代の課題と将来の社会像

現代の地球規模の環境危機ならびに人口構成の危機的状況に対処し、「世界人権宣言」に盛られた理想的な社会を実現し持続していくためには、自然環境や社会状況を正しく把握し、客観的な判断を下し、個人も社会も協同して現代の課題に挑戦するために、科学技術の智を共有することがすべての人々に求められている。

1.2.1 一人ひとりの尊厳が認められる社会を

私たちが目指す社会は、一人ひとりがかげがえのない構成員として認められ、かつ恐怖と欠乏から解放される社会である。それは、「世界人権宣言」（1948年）¹において、「人類社会のすべての構成員の固有の尊厳と平等で譲ることのできない権利とを承認することは、世界における自由、正義および平和の基礎である」、さらに、「人権の無視および軽侮が、人類の良心を踏みにじった野蛮行為をもたらし、言論および信仰の自由が受けられ、恐怖および欠乏のない世界の到来が、一般の人々の最高の願望として宣言された」とあるように、人類全体の理想としての社会のあり方が提示された

¹ 外務省「世界人権宣言」1948年12月10日採択、<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/udhr/>

のである。そして、その後 60 年にわたって、様々な個人、社会、国家、国際機関等がその理想を追求してきたが、それにもかかわらず、世界にはまだ戦争、災害の恐怖があり、先進国では飽食が進んでいるのに対し、毎日多くの人々が飢餓で命を落としているという現実がある。

1.2.2 生命の多様性の持続を

一方において、そのような理想を実現するための基盤となる私たちの生存圏自体が危機に直面しつつある。化石燃料のエネルギー利用が大幅に拡大した結果、炭酸ガス排出量が急速に増大し、温室効果による大気の温暖化を招き、深刻な気候変動を招来しかねない危機に瀕しているからである。温暖化によって海水面の上昇がすでに始まっており、いくつかの島々が水没の危機に瀕している²。

人類が莫大な数の生物種と共有している生命圏は、地球の表層のほんの狭い場所にすぎず、これまで思ってもいなかったほど、環境の変化に対して脆弱であることが判明しつつある。みずから招いた危機ではあるが、人類を含めた多様な生物の生存を持続させるための智慧を持つ必要性が、今ほど求められているときはない。

その危機感に立って、平成9年（1997年）の京都議定書³は温暖化ガス排出量規制の目標を定めた国際条約として画期的なものであった。20世紀における科学の大きな変容の必要性は、平成11年（1999年）にユネスコと国際科学会議の共催で開催された「世界科学会議」⁴において議論され、「科学と科学的知識の利用に関する宣言」としてまとめられた。そこで「知識のための科学、進歩のための知識」、「平和のための科学」、「開発のための科学」、「社会における科学、社会のための科学」として、新たに科学が広く世界のためにコミットすべきであるとされた。

その後もわが国においては、日本学術会議は平成19年5月16日にG8サミットに向けて関係各国のアカデミーとの共同声明「成長と責務—持続可能性、エネルギー効率及び気候保全」を発表した。そこでエネルギー需要の拡大が深刻な気候変動を引き起こ

² 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）「第4次評価報告書」（2007年11月）
環境省 http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th_rep.html

³ 「気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書」（略称 気候変動枠組条約京都議定書）
（1997年12月11日）

外務省 http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/treaty_020413.html

環境省 <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop.html>

⁴ 世界科学会議「科学と科学的知識の利用に関する世界宣言」（1999年7月1日）
文部科学省 http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/11/10/991004a.htm

しているという現状を踏まえ、「我々は、世界のすべての国々に対し、持続可能で効率的な気候に優しいエネルギーシステムのための共通の戦略的目標を確認し、それを実行するよう要望する」と結んでいる。これは、平成17年（2005年）6月8日の共同声明「気候変動に対する世界的対応に関する各国学術会議の共同声明」、平成18年（2006年）6月14日の共同声明「エネルギーの持続可能性と安全保障に関する各国共同声明」に続くものである⁵。

1.2.3 科学技術がもたらす影響の認識を

20世紀前半の量子力学、遺伝学などに始まる近代科学の急速な発展は、自然の構造と歴史、あるいは生命について多くの知見をもたらし、その知見から各種の技術が急速に発達した。その結果、私たちは健康で便利な生活ができるようになった。

その一方で、科学技術の急速な発展と細分化により、一般の市民と科学技術の現場との間に大きな隔たりが生じてきている。日々の生活では科学技術の恩恵に大いに浴しているにもかかわらず、多くの人々が科学技術の内容について知るすべもなく、無関心であったり極端な苦手意識を抱いていたりする。また、科学技術の専門家であっても、自分の専門以外に関しては門外漢たらざるをえなくなっている。

1.2.4 科学技術との関わりでみずから判断を

科学技術の発達、一人ひとりに科学技術に関わる判断を迫っている。医療技術の発達により、高度な治療延命措置や生殖医療が可能となっている。そうした中で、自分の生き方と死に方を一人ひとりが見つめなおし、治療方法をみずから選択していく時代になりつつある。あるいは、食の安全に関しても、開示された情報を基に、みずから判断を下す必要に迫られつつある。

ごく身近な生活においてさえ、科学技術の知識と応用が求められている。しかしながら、科学技術政策研究所の調査（『科学技術に関する意識調査－2001年2～3月調査

⁵ 日本学術会議

「成長と責務—持続可能性、エネルギー効率及び気候保全」（2007年5月16日）

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-s4j.pdf>

「エネルギーの持続可能性と安全保障に関する各国共同声明」（2006年6月14日）

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-s1j.pdf>

「気候変動に対する世界的対応に関する各国学術会議の共同声明」（2005年6月8日）

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-19-s1027w.pdf>

一』2001)⁶によると、わが国の成人段階の科学技術に関する知識は国際的にみても低い水準にあることが明らかにされている。科学技術の運用や科学技術と社会とのよりよい関係を築く役割を一部の専門家だけに任せておいてよい時代は終わったともいえる。

1.2.5 科学技術について学ぶ意義を

日本の若者の多くは、現在、科学技術について学ぶことの意義を見失っており、場合によっては懐疑まで抱いているという実情が浮かび上がっている。経済協力開発機構(OECD)の「生徒の学習到達度調査」(PISA2003、PISA2006)⁷によると、日本の高校1年生は、科学技術や科学技術を学ぶ意義に対する肯定的な意識が他の国々と比較して非常に低い。先端科学技術の恩恵を享受しながらも、科学技術に関わることの意義を見つけられずにいる若者が多いことは問題である。

次代を担う若者たちのそうした現状を鑑みるに、成長過程にある子どもたち自身が充実感を持って未来を切り開ける社会状況を作ることが重要であろう。少子高齢社会が到来する中で、子どもたちの明るい将来のため、また、日本の社会がこれまでに築き上げてきたものを継承していくための施策を探ることが、重要なのではないだろうか。

1.2.6 日本の将来像

そこで、私たちが抱く日本の将来像は以下のようなものである。

- (1) 社会の構成員一人ひとりがかけがえのない存在として認められること。
- (2) 社会の構成員のすべてが地球という環境を慈しみつつ持続可能な社会を実現するための叡智を共有して活動を起こせること。
- (3) 社会のあり方として、若者が将来への希望を抱きつつ文化を継承していけるシステムが有効に稼働していること。

このプロジェクトでは、これまで人類が獲得してきた智を再点検して、私たちが目

⁶ 科学技術政策研究所『科学技術に関する意識調査—2001年2～3月調査—』

NISTEP REPORT No.72、2001年12月、<http://www.nistep.go.jp/achiev/results01.html>

⁷ 国立教育政策研究所編『生きるための知識と技能② OECD生徒の学習到達度調査(PISA)2003年調査国際結果報告書』ぎょうせい、2004(主たる目標は、数学的リテラシー)

国立教育政策研究所編『生きるための知識と技能③ OECD生徒の学習到達度調査(PISA)2006年調査国際結果報告書』ぎょうせい、2007(主たる目標は、科学的リテラシー)

指す 21 世紀の「持続可能な民主的社会」構築のために、どのような知識と智慧を万人が共有すべきかを検討してきた。

1.3 21 世紀を豊かに生きるための科学技術の智の必要性

人間は、自分たちはどこから来て、どこにいて、どこに向かっているのかと問いかけ続けてきた。その問いかけによって得られた知識の体系、認識の方法は、人類共通の文化であり財産である。自然科学と人文社会科学という分け方にとられることなく、人類の財産を基本的な素養として共有していくことが重要である。科学技術の智もその一つであり、これまで幾世代も継続してきたように、これからも継承発展させていかねばならない。

科学技術は、単に科学研究者、技術者だけが関わるものとしてではなく、その功罪を含めて、社会・経済・政治などの関係性の中で考え、社会全体の文化資産として次世代育成の視点からも考えていくべきである。そこでは、伝統的な文化や宗教、習俗に根ざした自然観、感性の中に、智の可能性を探ることも重要となる。

つまるところ、このプロジェクトとしては、社会を構成する個々人が、持続可能な民主的社会を創出するために共に社会の一員という自覚を持って決断し行動するための力となるような科学技術の智慧とは何かを明らかにしたい。現代社会で求められているのは、それぞれ高度化した科学技術研究の現場を担う専門家だけではなく、科学技術の素養を持ちつつ、みずからと社会全体の豊かさを追求していける個人なのである。

現代のわが国において、科学技術の智を作成する意義・必要性は、次の四つにある。

1.3.1 科学技術についての判断

現代においては、科学技術と社会は密接につながっており、人々は日々進歩する科学技術の恩恵を享受する一方で、環境問題や人口問題、情報技術革新など地球規模の持続可能性に関わる科学技術のあり方について判断を迫られることが多い。したがって、基本的な知識、考え方を人々が共有することにより、判断の根拠を共有できることが望ましい。

1.3.2 科学技術についての世代間の継承

社会における科学技術について、人々が民主主義社会において共通な基盤で考え、豊かな世界を構築していくために協働するには、科学技術についての知識や物の見方

を次世代に継承して、世代間で共有していく必要がある。

1.3.3 学校教育における理科、算数・数学、技術の学習の長期的展望

小学校・中学校・高等学校において、理科、算数・数学、技術を学ぶ目的が問われ始めている。児童・生徒は、これらの教科をあまり楽しんではおらず、また、これらの教科と現実体験との関係も見出せずにいる。私たちは、知識が智となっていく過程を重視し、長期的展望の中で教科を活かしていかなければならない。小中高校における理科、算数・数学、技術の学習の目的について児童・生徒に長期的展望を示すことが必要である。

1.3.4 科学技術教育の生涯にわたる目標の俯瞰

変化の激しい社会において、人々は生涯にわたって学ぶ必要がある。人々は自己実現を目指すようになってきており、生涯にわたって多様な学習の進路を用意することが求められるようになってきている。

1.4 科学技術の智に期待されること

科学技術の智は、指針、素材、推進力、となることが期待される。具体的には、次の通りである。

1.4.1 指針としての科学技術の智

- (1) 人々にとって、身に付けるべき基礎的知識・考え方・行動の指針となる。
- (2) 科学館・博物館・学校等で活動内容を検討する際の指針となる。
- (3) メディアが科学技術を扱うときの指針となる。
- (4) 政策担当者が科学技術と社会に関する政策を判断するときの指針となる。

1.4.2 素材としての科学技術の智

- (1) 人々の科学技術への理解・関心を高める素材となる。
- (2) 人々が科学技術の内容・重要性・必要性を理解する素材となる。
- (3) 教員・科学者・技術者等が科学技術を説明する素材となる。

1.4.3 推進力としての科学技術の智

- (1) 科学技術の智を作成する過程で、科学技術の意義や科学技術と社会との関係に

ついでの人々の関心が高まり、理解が進む。

- (2) 科学技術の智を作成する過程で、科学技術の智の向上に関する国民と科学者等関係者との協働関係が強化される。

1.5 科学技術の智を作成する際の前提と基本的な考え方

科学技術の智を論議する場合には、一般的な前提として、次のことを置く。

- (1) 現代社会における科学技術の意義を問う。
- (2) 人間にとっての意味を考える。
- (3) 白紙の状態から考え、先入観を入れない。
- (4) 現在の教育の限界を考えず、理想型を求める。
- (5) 本質的な知識と能力の中核部分だけを明示する。
- (6) 対象としてすべての成人を考える。
- (7) 日本の科学技術の現状、伝統、感性、文化を踏まえる。

このような前提を置いた上で、わが国で科学技術の智を作成する場合には、それが人々に受容されやすくするために、わが国の現在の時代的背景、文化的背景などを踏まえたものとしなければならない。わが国で科学技術の智を作成するための基本的な考え方は次の通りである。

1.5.1 日本人の感性や伝統を考慮する

日本人にとって、関心事であることが必ずしも世界的な関心事と一致しないこともあり得るし、またその逆も言える。例えば、日本人が発想してきた生物の分類は、人間との関係性の中で考えられている。また、日本では自然を大切にし、自然と調和して生活しつつ自然を使いこなす技術は極めて高いものがある。一方で、原理的問いかけや発想が少なかったと言われている。このような日本人の感性、伝統を踏まえつつ、目指すべき科学技術の智を構築することこそ、日本のすべての成人が科学技術を身近なものにする要諦といえよう。

1.5.2 新しい時代の科学技術に即応する

近年、情報環境が大きく変化し、情報へのアクセスが容易となった。それは、情報の公開、共有という点では民主主義社会の基盤の充実に寄与しているものの、一方で一瞬にして情報が世界を巡り、情報の乱用、情報の操作、情報の占有等によって、民主主義の根幹が揺らぐことになるという問題も抱えている。

また、デバイスの開発も急速に進んでおり、電子デバイス、光デバイス、分子デバイス、分子制御による機能分子の開発など、分子レベルの物質制御によって様々な人工物をデザインし創り出すことができる時代に私たちは生きている。そして、その影響については予測できない部分もある。環境問題も京都議定書を契機に世界的な課題となっている。炭酸ガスの排出過多、水質保全、地球温暖化、異常気象など、地球規模での持続可能性に関する課題が出現してきていると思われる。

また、技術、科学、芸術が融合して、生活の質、豊かさを求める感性を大切にすることも重要となってきた。例えばモルフォ蝶の色の研究など、自然の美しさを読み解くような科学と技術のあり方が人類の感性をさらに豊かにするものと期待される。

さらに、科学と技術との相互依存関係が深まり、「科学を基にした技術」、「技術を基にした科学」の関係を越えて、科学と技術との境界が融合した「科学技術」が深く浸透しているとの認識を踏まえる必要がある。

1.5.3 技術も重要な柱とする

日本では技量が重視されてきたという歴史的事実を踏まえて、「技術」も重要な柱として位置づける必要がある。すなわち、日本における経済発展の原動力としての技術の位置づけや「ものづくり」の伝統、「技術リテラシー」の議論などから、これから作成する科学技術の智においては、技術も重要な柱とすべきである。

1.5.4 成人段階で考える

科学技術の智においては、成人段階を対象に考えている。成人とは、社会の構成員として責任ある個人という意味であり、年齢を特定するものではない。すなわち、具体的には、高等学校までの教育だけでなく、大学の教育のあり方および生涯教育をも視野に入れる。

1.5.5 専門分野を総合する

科学技術の智の作成のための基礎的検討は、専門分野別の結果を踏まえて、総合的に作成する。

【注】科学技術の智プロジェクトの研究の経緯

平成 15 年、日本学術会議（第 19 期）に「若者の理科離れ問題特別委員会」（委員長：北原和夫）（後に「若者の科学力増進特別委員会」と改称）が設置された。そこでの議論により、わが国では科学技術教育の目標が明示されていないこと、そうした目標についての国民的議論がなされていないことが指摘された⁸。そこで参考となる先行事例とされたのが、米国における科学技術リテラシー構築のためのプロジェクトである⁹。そこでは、アメリカ人に持ってほしい科学技術リテラシーとしての『すべてのアメリカ人のための科学』¹⁰がすでに作成されていた。そこで、わが国においても科学技術リテラシー像作成の可能性と意義を検討する必要性が提案された。米国のプロジェクトは「for all」の主張を前面に押し出しており、この観点から日本の科学技術教育を考え直すことが重要と考えられたからである。

そうした経緯を受けて、平成 17 年度には、わが国でも科学技術リテラシー像を作成するための課題整理と基盤整備を行うことを目的とした科学技術振興調整費によるプロジェクト「科学技術リテラシー構築のための調査研究」（研究代表者：北原和夫）が発足した。研究機関は、国際基督教大学（中核機関）、国立教育政策研究所、お茶の水女子大学、日本学術会議の 4 機関とし、約 70 名の科学者、教育者等が参画して、次の三つのテーマに関する研究を行った。

- ・科学技術リテラシーに関する先行研究・基礎文献に関する調査（代表：長崎栄三）
- ・科学者コミュニティや産業界等の国民の科学技術リテラシーに関する意見集約・類型化調査（代表：服田昌之）
- ・科学技術リテラシー像の策定に関する検討課題に関する分析（代表：北原和夫）

それぞれの研究成果は、報告書としてまとめられたほか、本プロジェクトのウェブサイトにも掲載されている¹¹。

平成 18 年度には、「科学技術の智」すなわち、「成人段階を念頭において、すべての人々に身に

⁸ 日本学術会議若者の科学力増進特別委員会『次世代の科学力を育てるために』2005 年 7 月、
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-19-t1031-9.pdf>

⁹ American Association for the Advancement of Science（米国科学振興協会：AAAS）は 1985 年にすべてのアメリカ人の科学技術リテラシーを高めるプロジェクト「Project 2061」を始め、現在も積極的に活動している。

¹⁰ AAAS “Science for All Americans” Oxford University Press, 1989. 邦訳：日米理数教育比較研究会『すべてのアメリカ人のための科学』三菱総合研究所（文部科学省科学技術・学術政策局基盤政策課）2005。AAAS のウェブサイトに掲載されている。
<http://www.project2061.org/publications/2061Connections/2008/2008-02a.htm>

¹¹ 『「科学技術リテラシー構築のための調査研究」サブテーマ 1 科学技術リテラシーに関する基礎文献・先行研究に関する調査 報告書』国立教育政策研究所、2006。
『「科学技術リテラシー構築のための調査研究」サブテーマ 2 科学者コミュニティや産業界等の国民の科学技術リテラシーに関する意見集約・類型化 報告書』お茶の水女子大学、2006。
『「科学技術リテラシー構築のための調査研究」報告書』国際基督教大学、2006。
いずれも本プロジェクトのウェブサイトに掲載されている。

<http://www.science-for-all.jp/link/index2.html>

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」(または、科学技術リテラシー像)を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」(研究代表者:北原和夫)が発足した。これは、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」による調査研究であり、執行機関は、内閣府日本学術会議、文部科学省国立教育政策研究所であった。

この調査研究の目標は、七つの専門分野別の科学技術の智(専門部会報告書)と、それらをまとめた総合的な科学技術の智(総合報告書:本書)を作ることであった。

研究組織は、評議会、企画推進会議(企画推進会議は、日本学術会議「科学と社会委員会」(委員長:鈴木興太郎)の「科学力増進分科会」(委員長:毛利衛)の中の小委員会に位置付けられる。)、七つの専門部会(数理学専門部会、生命科学専門部会、物質科学専門部会、情報学専門部会、宇宙・地球・環境科学専門部会、人間科学・社会科学専門部会、技術専門部会)と広報部会および事務局からなり、約150名の科学者、教育者、技術者、マスコミ関係者などが参加した。これらの委員は、研究代表が中心となって評議会委員、企画推進会議委員や専門部会長を選び、専門部会長が専門部会委員を選ぶようにして決まっていた(研究参加者については本報告書末尾を参照)。なお、委員に対する手当は、旅費のみであった。

各専門部会は15名ほどの委員で構成されたが、その分野の専門家だけでなく、教育学者、マスコミ関係者、博物館関係者などを含めた。また、専門部会報告書の素案ができあがった段階で、部会間の相互閲読を行い、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。

なお、これまでも、若者だけでなく日本の社会一般の科学力の衰退の危機が認識され、科学者コミュニティ、教育学者のコミュニティ、あるいは産業界、教育界で議論されてきた。しかし、それら関係者間の連携は必ずしも十分ではなかった。本プロジェクトでは、学問の枠を超え、さらには日本の科学技術の現状と歴史、伝統を踏まえた上で、科学者と教育学者の協同により、人々に親しみやすいものを作成することとした。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の智の向上の運動となることを目指した。

科学技術の智プロジェクトは、実際には、平成18年11月から始まった。平成18年11月20日の企画推進会議幹事会において総計約150名の委員でプロジェクトが発足した。そして、企画推進会議が、プロジェクトの全体の計画を決め遂行し、平成18年12月から20年3月にかけて、合計で12回開催された。さらに、プロジェクトの運営を円滑に進めるために、企画推進会議の中に委員長・副委員長・事務局長ら合計6名からなる三者会議が平成19年2月に設けられた。三者会議は、プロジェクトが終わる平成20年3月にかけて合計37回開催された。

なお、プロジェクト全体を総括したのは評議会であり、3回開催され、また、プロジェクト参加者全員が集まる全体会議が5回開催された。

平成18年12月の第1回企画推進会議において決定された計画に基づいて、それぞれの専門部会で専門分野の科学技術の智の検討が始まった。なお、第1章で述べた共通のプロジェクト方針を確

認するために、企画推進会議には、専門部会から必ず委員が出席するようにした。

専門部会は、平成 18 年 12 月から平成 20 年 3 月にかけて開催され、共通のプロジェクト方針に基づいて各専門部会のそれぞれの運営方針で行われた。この間の専門部会の開催回数は次の通りである。数理科学専門部会 14 回、生命科学専門部会 13 回、物質科学専門部会 7 回、情報学専門部会 7 回、宇宙・地球・環境科学専門部会 10 回、人間科学・社会科学専門部会 6 回、技術専門部会 13 回。専門部会報告書の素案がある程度固まった段階に、先ほど述べた相互読書の機会を設けた。そして、七つの専門部会のそれぞれの専門部会報告書が、平成 20 年 3 月 19 日の第 2 回シンポジウムにおいて公表された。

総合報告書については、企画推進会議と各専門部会の委員からなる報告書作業部会を平成 19 年 9 月に設けて、専門部会報告書の成果を生かしつつ並行して総合報告書の内容を検討した。総合報告書の原稿は、報告書作業部会の委員かまたは必要に応じて依頼された委員が作成した。報告書作業部会は、平成 20 年 3 月に終わるまで合計で 12 回開催した。総合報告書の素案は、報告書作業部会で作成され、それをもとに企画推進会議において各章ごとに検討され、平成 20 年 3 月末に報告書をまとめられた。

プロジェクトを公開し意見を交換するために、専門部会別のシンポジウムと全体シンポジウムを開催した。平成 19 年 3 月から 5 月にかけて、それぞれの専門部会が公開でシンポジウムを開催し、各専門分野の科学技術の智のあり方について討議した。全体では、日本学術会議講堂でシンポジウムを 2 回行った。第 1 回全体シンポジウムは、平成 19 年 8 月 27 日に行われ、委員長らの基調報告と各専門部会長からそれぞれの専門部会で検討している科学技術の智の骨子案の報告と意見交換がなされた。第 2 回全体シンポジウムは、平成 20 年 3 月 19 日に行われ、委員長からプロジェクト報告などと今後の定着方策（第 6 章参照）についての意見交換がなされた。

本プロジェクトの成果を広めるために広報部会が設けられ、会合が 6 回開催された。そこでは、シンポジウム等の運営、ウェブサイトの構築、報告書のあり方などについて検討された。

事務局は、国立教育政策研究所、日本学術会議、国際基督教大学の 3 か所の委員が担い、国立教育政策研究所の委員が全体的な事務、日本学術会議の委員がシンポジウムや専門部会などの会議開催、国際基督教大学の委員が委員長補佐、というそれぞれの役割を担った。さらに、事務局は、会合が円滑に行われるように専門部会会合を含むすべての会合の議事要録を作成し次回会合に配付できるようにした。また、この議事要録はウェブサイトでも公開し、結果としての報告書だけでなく、過程としての議論をも一般の人々と共有できるようにした。それらを今後行われる科学技術の智の定着・普及のための様々な取り組みに生かしてほしいと考えたからである。

このように、本プロジェクトは、企画推進会議、評議会、全体会議、七つの専門部会、広報部会、事務局が有機的に連携して行われた。

第2章 科学技術の本質

日本の社会では、科学技術という言い方はそれなりに定着しているが、それでもまだ違和感を唱える人は多い。科学と技術は本質的に異なるというのが、そうした人々の意見である。これから論じるように、たしかに言葉の意味としては異なる概念を含んでいる。科学の原理や法則には、いたるところで成立する「普遍性」という性質があるのに対し、技術は、この地球上の特定の文化、環境の中で、人間が使うという絶対的な制約条件の下で成り立っている。しかし、今や科学と技術は境目が曖昧なほど重なり合っており、明確な一線を引くことは難しい。

本プロジェクトでは、科学技術という総称には、狭い意味での科学、技術、数学、それと広い意味での人文科学・社会科学を含めている。なぜなら、言葉の定義を超える問題として、21世紀を「豊かに生きる」ためには、人類が築いてきたあらゆる叡智を統合する必要があると考えるからであり、その要となるのが最も広い意味での「科学技術」であるとの認識に立っているからである。

科学と技術の関係を表す表記としては、科学技術ではなく科学・技術とすべきだとの意見もある。これは、上述したように科学と技術は本質的に異なるという認識によるところが大きい。たしかに、科学は自然現象の謎に迫る研究であるのに対し、技術は私たちの生活に役立つ製品・システムなどの開発や科学研究の応用などが主である。しかし、近年のノーベル化学賞、物理学賞、医学生理学賞などの受賞者を見ても、科学と技術の境界はますます曖昧になりつつある。

例えば、白川英樹博士の業績は、電気を通すプラスチックの開発につながった研究であり、田中耕一氏の業績は質量分析装置の開発につながった研究である。また、2003年の医学生理学賞は、人体の断層写真を撮影するMRI(磁気共鳴イメージング)装置の発明者・開発者に授与されている。

あるいは、科学は欧米から輸入した学問であるのに対し、日本には古来から様々な技術が根付いていた。例えば法隆寺や東大寺大仏殿など、世界最古、最大の木造建築物は世界に誇るべき日本の技術である。日本の発展は、そうした伝統技術の上に科学的方法を加味することで実現したと言ってもよいかもしれない。

そう考えるなら、科学技術という表記は、極めて日本的な発想であるとも言える。科学と技術の本質を正しく理解すると同時に、両者の基底をなす数学の本質についても正しい認識を持ち、頑なに区別しない姿勢を養うことが重要であろう。

2.1 科学の本質

2.1.1 科学とは

「科学」という言葉は、英語のサイエンスの訳語である。サイエンスは「知る」という意味のラテン語に由来している。身の回りの自然現象について知りたいと思い、その原因や過程を追求することは人間の本性であり、それが文化、文明の発展をもたらしてきた。日本語の「科学」は、元来は様々な分野の学「分科の学」、個別の学問分野の知識の意味で使われていた言葉だったが、明治時代にサイエンスの訳語として転用され定着した。

では、現代的な意味での科学とは何だろうか。実は、これを一言で説明することは難しい。自然界や人間社会の現象を研究することは確かに科学の役割であるが、科学だけの役割ではない。「実験観察をするのが科学だ」という答も不十分である。天文学や進化学のように、実験のしようがない科学の研究分野もあるからだ。このように、科学的な研究と呼ばれるための条件についてさえ、一言では答えられない。

2.1.2 科学の方法

言葉の由来を見ても分かるように、科学（サイエンス）は、もともとは体系化された学術の知識というような意味で使われていた。そうした知識集積の歴史は古く、古代オリエントや古代中国、古代インドなどで独自の萌芽が見られた。その後も古代ギリシアなどで、自然哲学と総称される研究は進んできた。

近代的な科学が誕生したのは、1500年代から1750年頃にかけてのことだった。コペルニクス（1473～1543）の地動説の提唱に始まり、ケプラー（1571～1630）、ガリレオ・ガリレイ（1564～1642）、デカルト（1596～1650）、そしてニュートン（1643～1727）に至る天文学、力学などの研究が、近代科学の基礎を築いた。この時期の動きは科学革命と呼ばれている。

この時期およびそれ以後に確立された科学の方法に関する考え方について説明しよう。

科学の基本は実験や観察である。それらの行為によってじかに見たり、触ったり、聞いたりできる事柄（経験）が主な出発点となる。そうした経験的なデータから仮説を構築する。そしてことあるごとに、仮説を経験的なデータに照らし合わせる作業（検証作業）を行う。そうした検証作業に耐えた仮説は、科学の理論として認められていく。そうした検証の重みに耐えて研ぎ澄まされた科学の理論には美しさが宿っている。

どんなに立派な理論でも、実験で確かめられないもの、実験や観察で検証・反証できないようなものは科学的仮説ではないという言い方がされることもある。しかし前述したように、実験が不可能であるような仮説もある。例えば、ヒトとチンパンジーが共通の祖先から進化したことは、実験では再現できない。それでも、化石やDNA分析などの結果から、その仮説を支持する証拠を積み上げることはできる。仮説を否定するデータが新たに見つかったなら、その仮説は捨て去り、新発見のデータに合う仮説を新たに構築すればいい。この点が、いかなる証拠を突きつけられても教義や主張を変更しようとはしない宗教や似非科学と異なる。科学は自己否定、自己修正が可能な活動なのである。

また、特に物理学や化学の実験では理想に近い条件を設定する機会が多い。そのような実験では、実験条件を同じにすることでまったく同じ結果が得られる。ところが例えば生物学では、実験材料に用いる生物個体によって得られる結果にばらつきが出る場合も多い。したがって、いかなる場合でも再現実験の結果が絶対的な意味を持つ、ということにはならない。

科学の理論は、予測も可能にする。科学は、世界の直接的な経験を越えた法則について語ることにより、実際に世界で起こる事柄について「説明」と「予測」を与えられるのだ。例えば万有引力という目に見えない力を想定することで、目に見える天体の規則正しい運動を説明し、それが10年後にはどうなっているかを予測できる。この予測は、いずれ検証されることになる。

2.1.3 科学の可能性

科学ですべてが説明できるとは限らない。喫煙率と肺がん発症率との相関が明らかに高いことは疫学的に証明できるが、それは喫煙と肺がんとの因果関係を証明したわけではない。残された灰色の部分はどう解釈しどう行動するかは、個々人の合理的な判断にまかされる。あるいは、神や靈魂が存在するかどうかといった問題は、科学的に証明できることではないし、科学が扱うべき対象でもない。

科学が提供できるのは合理的判断を下すための材料であって、科学は絶対的な権威とはなりえない。研究の過程から出た結果、それに対する批判までもが、論文や学会発表などの形式で公開されることで、透明性が確保されている。

これまで、科学の研究を駆動してきたのは尽きることのない好奇心である。そうした好奇心の大きな部分は子ども時代に養われる。自然界の事物・現象に対する素朴な驚きが「なぜ」という疑問を生み、それを探求するための方法を模索する。そうした

好奇心、豊かな感性を養い、科学的探究に導くことは、大人たちに課せられた大きな責務である。そのためには、大人自身が、好奇心を持ち続けることが大切である。また、子を持つ親は、家庭でも意識的に身近な科学を話題にすることが望まれる。

科学技術によって発展してきた社会は、今、科学技術の負の側面によって持続が危ぶまれつつある。持続可能な社会を実現するにあたって、科学技術が必要である。科学技術は専門家だけの領域ではない。一人ひとりが科学に関心を持ち、何らかの形で関わっていく必要がある。

2.2 技術の本質

2.2.1 技術とは

技術は幅広い概念であり、技術の定義には様々なものがあるが、ここでは技術を広く捉えて、「技術とは人間生活に役立てるわざ」と考える。

私たちの考える「技術」は、以下の性質を含んでいる。

- (1) 技術には、「人間生活に役立つ」という目的と「人の日々の問題の解決に貢献する」という目的がある。
- (2) 技術には、自然の事物を改変・加工するといういわゆるハードな側面と、組織を運営すること、意図を正確かつ適切に伝達することなどのソフトな側面との両方が含まれる。

私たちはしばしば、「自動車」「携帯電話」などの具体的なモノを技術と呼ぶ。しかし、これらの具体的なモノそのものが技術なのではない。「移動する」「遠隔地にいる人と通信する」といった特定の目的を達成するために「使う」技術を、「自動車」「携帯電話」といったモノの名前で表現しているだけである。一方、これらのモノは、特定の目的を達成するために、様々な要素技術（タイヤ、エンジン、液晶ディスプレイ、電池、発信回路など）とそれらを組み立ててモノに構成する製造技術の結果として存在している。私たちはそのような「作る」技術を、「自動車」「携帯電話」といった具体的なモノの名前を使って表現しているのだ。いずれの場合も、「自動車」「携帯電話」などの具体的なモノは、厳密に言えば技術そのものではないが、その背後にある技術を指し示すために用いられていることを了解しておく必要がある。

また、技術には、移動技術、通信技術、自動車、携帯電話、機械技術、材料技術などの様々な個別技術があり、一つひとつに固有の技術としての特徴がある。具体的な技術を開発する場合や、個々の技術を利用する際には、そのような個別技術について

知ることが大切である。しかし、無数にある個別技術の一つひとつについて、その本質を網羅することは現実的ではない。

2.2.2 私たちは技術の中で生きている

技術に関してまず理解すべきことは、私たちは技術の中で生きているという事実である。日々の生活の中では知覚しにくい技術、直接には知覚できない技術もある。

私たちは「飲料水」を日々口にしている。しかし、安全に飲めるようにするための技術、家庭の蛇口まで確実に届けるための上水道システム、さらには排水処理のための下水道システムなどは、特段に技術とは認識されていない。「空気」ですら技術の賜物である。安心して呼吸できるようにするために、工場や自動車から排出される大気汚染物質を削減するために技術が使われているからだ。実際の空気が安全であるかどうかを監視するためにも技術が使われている。

このように技術は、まさに空気のような存在であり、特段に知覚することがなくとも、私たちは技術の中で生活しているし、技術なしで生活することはほとんど不可能である。

2.2.3 技術は人間が作り出したもの

技術に関して次に理解すべきことは、技術を生み出したのは人間であるという事実である。技術は自然に存在するものではなく、また技術が自己増殖して新たな技術が生まれるわけでもない。あくまでも人間が創造したモノである。そして多くの場合、複数の人々の協力によって技術は創造される。

技術は、科学と同様に知識の様態、知識の存在の仕方の一つである。ある人が試行錯誤の結果、木の枝を伐り落とすのに便利な斧を作り出したとしよう。後の人たちはその斧を使うことで、先人が経験した試行錯誤を省略して、容易に枝を伐り落とすことができる。つまり、斧は、先人が試行錯誤の末に獲得した知識を体現したモノであり、後の人々にとっては斧を使うことで、先人の行った思考や経験を節約することができる。

現代の「技術」および「技術システム」が斧のような単純な道具と異なるのは、技術によって節約される思考が膨大で、組み込まれている知識もあまりにも莫大かつ高度かつ多様であることだろう。それゆえに、一般の人々にとっては、その技術の存在を可能にしている知識や開発した人々の営為を直観的に想像することはほとんど不可能である（これを「技術のブラックボックス化」という）。そのため、技術を使ってい

でも、「人間が技術を生み出している」という根本的な事実を忘れがちになる。なればこそ私たちは、技術は人間が作り出しているという事実を強く認識する必要がある。

2.2.4 技術をデザインし、評価し、管理し、制御する

科学そのものには、性能の良し悪し、倫理的な良し悪し、高価安価といった各種の価値観が入り込むことはない。それに対して技術には価値が付随する。誰もが歓迎する技術を作り出すことが可能である一方で、悪意によって技術を作り出すことも可能である。前者の場合でも、性能の良し悪し、倫理的な良し悪し、高価安価など多様な可能性がありうる。また、ある目的は達成しても、思いがけない影響（既存の技術システムに対する影響、健康に対する影響、環境に対する影響など）をもたらすこともある。

そこで、技術を作り出す際には、デザイン（設計）が重要になる。現代社会では偶然に技術が生み出されることは少ない。偶然の発明であるとしても、そのまま技術となることはない。デザインの過程で、一定の制約条件（既存の技術体系、安全性など）の下で目的を達成するために、様々な可能性の中から実現可能な方法が採用される。その際に重要になるのが評価である。評価基準の間ではトレードオフが生じる。性能を上げるにはコストがかかる。安全性を上げるにもコストがかかる。そのようなトレードオフの中から、最善の選択肢を選んでデザインが決まる。

技術は生み出され、社会へ投入されれば終わりというわけではない。技術の使用に際しては、技術のコントロール（制御）やマネジメント（運用）が必要である。その結果、技術の使用を中止する場合もある。

新技術の導入にあたっては、既存の技術システム、社会システム、環境に対して様々な影響を及ぼす可能性がある。そうした影響を評価するテクノロジーアセスメント（技術の事前評価）が必要である。技術システムが複雑化すればするほど、テクノロジーアセスメントの重要性は増す。また、事前に予想できない結果や意図しない結果がもたらされる場合もありうるので、モニタリング（監視）も必要になる。

2.2.5 技術と社会とは共進化する

技術は人間が作り出す。したがって、多くの人々が期待するように技術を発展させていくことになる。一方で、新しい技術は人々の行動様式を変容させうる。その結果として、社会の仕組みも変わる可能性がある。このように技術と社会は相互に影響し合って発展していく。これを技術と社会の「共進化」という。

技術と社会の「共進化」においては、私たちも重要な役割を担っている。私たちは技術に対して受け身であってはならない。私たちが技術に対して注文をつけることは、技術の悪影響を排除するためだけでなく、技術のより望ましい発展のためにも、よりよい社会や文化を作るためにも必要である。このためには、私たち技術利用者、技術利用の影響を受ける者と技術開発の専門家間のコミュニケーションの仕組みが必要であるし、私たちの能動的な参加や情報発信が必要である。

技術は元来、人間が作り、使うという制約の中で成立していたため、おのずと「身の丈」に合ったものになっていた。人々は技術を、理屈を通してではなく、自分の身体の動作（使う、操作する、調整するなど）を通じて知覚することができた。このような性質を身体性という。伝統的な道具や職人のわざといわれるものは、人間の「身の丈」にあったものであり、人々はそれらの技術の優秀性も欠点も容易に知覚できた。

技術の身体性は、技術を知覚させやすくするだけでなく、人間が技術を統制するための条件でもあった。しかし、現代の複雑化した技術システムは、身体性を喪失しつつある。技術を直観的に知覚しにくいだけでなく、その統制も「身の丈」を越えたものになりつつあり、もはや直観的な統制だけでは不十分である。技術の開発や統制のためにシミュレーション等の方法論も開発されているが万全ではない。

このような状況を前にして、技術と社会の共進化を健全なものとするためには、技術を理性的に認識するよう努める必要がある。それと同時に、技術システムの開発にあたっては、伝統的な道具や職人のわざが持つ長所を見直すことも必要である。

2.3 数学の本質

数学は古い学問であるが、その進歩と共に、数学についての認識は時代と共に変わっている。ここではそうした数学認識の歴史的発展も考慮しつつ、数学の本質をいくつかの観点から（単純なものから発展的なものへと）並列的に述べてみよう。

2.3.1 数学の基礎は数と図形である

数と図形は、言語とならんで人間が持つ代表的な抽象的認識であるが、数学はこれら数と図形（およびそれらを元に生まれた抽象的概念）を考察の対象にする。つまり他の自然科学と異なり、その対象は最初から抽象的なものであって、そこに数学の特色がある。

数は様々な量を認識するものであり、一般的な（言葉によって表される）質と区別される。最も根本的な数は自然数であるが、自然の中で計測されるほとんどの量は連

続量として認識されており、これを私たちは単位と比の考え方をを用いて実数として表現している。現代の数学は、空間的な（多次元の）量をベクトルとして表現し、またこの数の概念を広げることにより、さらに広い範囲の量を考えることを可能にしている（複素数、有限体）。また数学は、単に静的な確定した量だけでなく、変化する量、不確定性を持った量も取り扱うことで、その世界をより豊かなものに発展させている。現実世界にあるこれ程多くの様々な概念が量として数を用いて表され、それらの関係として自然法則が記述されるというのは、考えてみれば実に驚くべきことである。自然科学が数学を言葉として用いる第一の根拠は、まさにここにある。

図形は空間内にある様々な形という特別な質を認識するものである。このとき数学が行うことは、形の持つ特定の特徴にのみ着目して、他の一切を捨象するという作業であり、数学に特有な抽象性、厳密性はここに由来する。またこれらの図形の性質間の関係を明らかにしていくことが重要で、そのために論理的な推論が用いられる。数学の持つ論理性、体系性もまたここに由来する。

図形は、実は長さ、角度など様々な量を持っており、図形の性質の多くはそれらの量を用いて記述されることから、図形の量的な性質を調べる（計量）ことが重要である。逆に様々な量を座標・グラフなどを用いることで視覚化ができる。こうした、数と図形との間の密接な相互関係が数学を極めて豊かなものになっている。

2.3.2 数学は抽象化した概念を論理によって体系化する

数にせよ図形にせよ、それを扱うためには、現実の複雑なものの中から、ある概念を抽象化し、その本質を明確化する（数学的に厳密に定義する）のが数学の基本的な方法である。この考え方から、数学は、数や図形を出発点として、さらに抽象的な概念を創出していく。

その一方で、現実の課題の複雑性に対応するために、これらの諸概念を体系的に結びつけて全体像を明らかにするとともに、諸概念間の因果関係を明示する。その構築を支えるものが論理である。

このようにして、数の演算の研究から代数学が、その変化の研究から解析学が、図形の研究から幾何学が生まれ、さらに確率論、数学基礎論などが数学の主要分野として生まれ発展して現在に至っている。

抽象化とは、ある性質にのみ着目して、他のすべてを切り捨てることである。抽象化によって得られた概念が貧しいものかということ、まったくそうではない。抽象化とは単に既知の一群のものに共通な性質を取り出すことにとどまらない。むしろそれに

よって、それまで意識されていなかったまったく異なるものとの新たな関連づけが見えてきて、それによってその概念自身が新たな豊かさ、広がりを獲得する機会が多いからである。

2.3.3 数学は抽象と論理を重視する記述言語である

概念を抽象化して論理的に組み合わせるといえるのは、実は（自然）言語の持っている働きでもある。人間の知識全体が体系的なものである。それは人間がものを考え、人間同士が意思を通じ合うための基本前提である。

実際、数学は一種の言語なのである。ただし記述を主とする言語である。

数学では、一般的な数や図形を文字で表し、様々な記号を用いた数式という文を書く。定義などでは自然言語を使わざるを得ないが、それは最小限の「数学的に許容される言い方」とどめ、また意味が曖昧にならないよう十分な注意がなされる。

理論を記述するときの核となる部分は、演繹的推論と呼ばれる特別な文法に依拠することにより、一定の前提から結論を得るプロセス（証明）が厳密な形で書かれる。この仕組み（論理）は自然言語でも同じであるが、数学では限られた特有の使い方をすることで、「（前提を承認する限り）反論の余地のない」ものとなる。

数学において「正しい」とは、論理的に正しいことにほかならない。したがって、他の自然科学におけるように、なにか新しい現象が発見されて、それまで「正しい」とされていたことが「誤り」になるということはない。

ここで特に強調しておきたいのは、計算もまた文章であり、しかもそこに数学言語の特徴があるという点であるということである。数式、特に文字式は数学的に意味のある文であり、それらをアルゴリズムに従って形式的に操作することは、論理に従った推論を行っていることにほかならない。具体的な数の代わりに文字を用いることで、数学言語は極めて大きな汎用性を獲得した。

2.3.4 数学は普遍的な構造（数理モデル）の学として諸科学に開かれている

数学が言語であるとすれば、数学の理論、すなわち、数理モデルは、文芸作品と比べられるかもしれない。数学が自然言語の文芸作品と大きく異なるのは、その理論が普遍的で、それゆえ自然や社会を記述するモデルになることである。つまりある現象が数学理論の要求する諸前提（ある種の基本的法則性）を満たすことが分かれば、その理論を数理モデルとすることで、その結果を用いることにより現象についての様々な帰結（より高度の法則性等）が直ちに得られる。代表例は力学における微分方程式

の理論である。文芸作品は個別独自性に価値があるが、数学理論はこうした普遍性にこそ価値がある。近代科学はこの普遍性あるがゆえに数学を自己の言語として採用し、またそうすることによってみずからを確立したとも言えるだろう。

こうして、論理という前提のもとに、人々が分野を超えて誤解なしにコミュニケーションできる道具だてとしての数理をもつことが、科学を含む広い精神活動を支えたということができる。

第3章 科学技術の智：七つの扉

科学技術の智は、既存の学問あるいは教科の枠組みを超えた新たな智の枠組みとして七つの領域の形で提案する。

七つの領域、すなわち、数理科学、生命科学、物質科学、情報学、宇宙・地球・環境科学、人間科学・社会科学、技術、に対応する分野は、大まかにいえば、科学、数学、技術の分野であるが、この分野分けは、従来の学問の領域にこだわらず、むしろ、私たちが直面している課題に対応するために連携すべき科学技術の領域という視点から、これらの七つの領域を設定した。これらは一応の分け方であり、完全に独立し分離した領域ではなく、人類の智として深くつながっているものである。

これら七つの専門分野は、総合的な科学技術の智を目指すための七つの入り口にすぎない。これらのどの領域からその扉を開けて入っても、科学技術の智へと入っていける。

「数理科学」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し、それらを具体的に明示することを目指した。

「生命科学」は、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考えた。こうして、「生命とは何か」という問いかけに関わる領域を包括して考えることとした。

「物質科学」は、この世界が物質を基礎として構成されていて、生命も物質を基礎としているという視点から、化学、物理学を中心に据えて、さらに生物学、環境科学、工学などどの関わりまで踏み込んでいる。

「情報学」は、この20年の間に世界の社会構造を変革するほどに大きく発展した分野であり、人々が共有してほしい知識と考え方を明示することを目指した。

「宇宙・地球・環境科学」は、私たちを取り囲む自然環境は如何なるものであるかという問いかけに関わる領域を包括して考えることとした。

「人間科学・社会科学」は、近年文理融合の重要性が認識されてきている状況の中で、人間の行動、社会の現象を科学的にとらえることを目指した。

「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つた。社会のあり方と関わる面を考慮した技術のあり方を明示することを目指した。

科学技術の智においては、いわゆる物理・化学・生物・地学という従来の科学の専門分野にこだわっていないだけでなく、技術を独立させた上に、情報学、人間科学・社会科学をも含めたことに特徴がある。現代の科学技術においては技術と科学とは相互に密接な関係を保って発展しており、しかも現代社会においては技術やその考え方は生活の隅々まで入り込んでいる。また、現代の情報科学の急速な発展を考慮すれば情報学を独立した専門分野として立てることは当然である。さらに、文理融合の立場から人間科学・社会科学をも視野に入れ、現代社会を生きるための術としての技術の役割を考慮した上で技術も独立させた。

物理学と化学をあえて独立した分野として設定しなかったのは、最近の諸科学が物質の科学を根底としていることを考慮した上のことであり、合わせて物質科学に統合した。このようにここでの科学技術の智は、これまでの科学技術の学問の枠を超えて、新しい視点から再検討を行う企てなのである。

このようにして作成された科学技術の智には、次のような大きな特徴がある。

(1) 人間社会を軸に構成されている。

科学技術の智は、それぞれの科学技術の学問体系に配慮しつつ、人間や人間社会を軸に科学技術の智が構成されている。

(2) ストーリー性を持って構成されている。

科学技術の智は、科学技術の知識を個々に集めた百科事典のようではなく、相互に関連を持ったストーリーとして構成されている。

(3) 現在から将来を視野において構成されている。

科学技術の智は、現時点での科学技術でどこまで分かっているのか、また将来の課題として何があるのかをも視野において構成されている。

3.1 数理科学

3.1.1 数学リテラシー

リテラシーという言葉は、元来、読み書き能力を表す用語であったが、現在ではそうした読み書きができる文化的な背景の理解を含む素養という意味で使われている。数学リテラシーにあっては、これら二つの意味を共に含んでいる。すなわち、数学は長い伝統を持つ文化であり、また私たちは数を使って計算したり、地図で方向や距離を測ったりして数学の知識を日常的に用いている。ここで必要とされるリテラシーは後者の意味と考えて差し支えない。

しかし、同時に数学は、科学の言葉として、自然科学あるいは社会科学、最近では人文科学においても用いられている。ここでは本来の読み書き能力の意味のリテラシーに近い。そして、科学技術リテラシー全体の中で数学リテラシーが果たす意味としてはこの部分が極めて大きいのである。いわば数学は他の諸科学の基礎にあってそれらを支えている。これは技術が人々の生活と諸科学とのインターフェースであることと対になっているものと言えよう。

そこで、ここでは、まず素養として理解してほしい数学の世界を紹介し、次いで数学の言葉がどんな特徴を持っているかを述べよう。いずれの場合にも、私たちの日常生活だけでなく、科学と関連する事項に重点を置いて述べることにする。数学自身に関わる事項については専門部会報告書を参照されたい。

もちろん二つのリテラシーの意味は分かちがたく結び付いている。ある言語を理解するためには、語彙や文法と共にその言語を支える文化を知らなければならない。理系の人々にまま見られる数学を単なる道具だと見なす態度が根本的に誤っている理由はここにある。

3.1.2 数学と私たち

「数学」という言葉を聞くと、「難しい」という形容詞を連想する人が少なくないようである。そして小学校で学んだ算数、特に数の計算は確かに日常使っているけれども、中学や高校で習った数学はもう自分と関係ないと思っている成人が多い。残念なことに知識人と呼ばれる人たちからさえもそのような声が聞かれる。

そうした意見があることを踏まえ、私たちと数学との関わりについていくつかの一般的な注意を最初におきたい。

まず、第一は、小学校で学んだ算数の世界は、実に豊かな広がりと深さを持っている

て、それ自身がすでに巨大な文化遺産と呼ぶべきものだということである。例えば私たちは日々十進法を用いて表した数を用いているが、ふだん空気の存在を忘れているように、その恩恵の大きさを意識していない。

次に、数学は、数と図形を基として様々な抽象概念を生み出し、記号や論理を用いて状況を的確に記述する言葉、効果的な問題の解決方法を創り上げることで、新たな文化を生み出すと共に自然科学をはじめとする諸科学の推進に貢献してきた。こうした事実を知り、数学の価値を認めることもリテラシーの一部であるが、それ以上にここで強調したいのは、そうしたより高度な数学のルーツはほとんどすべて私たちが小中学校で学んだ算数・数学の中に見出されるということである。ちょうど「不思議の国のアリス」で私たちのすぐ足下の草むらの中にまったく別の世界への扉が隠れているように。そうしたルーツを理解することで私たちは、より高度な数学を知る手がかりを得ると共に、学校で学ぶ数学の世界の豊かさを知ることができる。

三番目に、こうしたより高度の数学に関する理解が、専門家だけでなく、私たち一般の人々にとっても必要になっているという事実である。これはそうした数学を用いた成果である科学が私たちの身の回りに溢れているということもあるが、さらに重要なことにはこの現代社会に生きる市民として私たちは、そこに起こる様々な出来事を主体的に理解し、政治をはじめとするいろいろの事柄に責任を持って判断を下していかなければならない。そこでは統計をはじめとする数学が直接あるいは（科学的説明の根拠という形で）間接的に用いられている。私たちの多くは進んだ高度の数学を自分から用いる必要は必ずしもないが、提示された内容の妥当性を判断できる程度の数理的な感覚・能力を成人として持っている必要がある。例えば与えられた統計グラフが何を語っているか、あるいは語っていないかを適切に読み取ることは状況の理解・判断において極めて重要である。

以上は数学的な素養に関わることであるが、さらに、数学の方法・考え方・表現法が私たちの日常と深く関わっていることを指摘したい。すなわち用いる言葉や共通の前提を明確にし、ものごとを論理的に考え、その筋道や結論を的確に表現することは、私たちがものを考え、また相互に意思疎通をはかっていく場合に最も基本的なことであるが、数学ではこれらが極めて「純粹に」目に見える形で行われる。したがって数学を学ぶ中で私たちはこうした論理的な思考法や抽象的な概念を用いた表現法を身に付けていくことができるのである。中学校で学ぶ文字式や証明の市民にとっての大切さは、ここにあると言えよう。

最後に、必ずしもすべての人が「身に付けなければならない」わけではないが、で

できれば、ぜひ身に付けてほしいこととして「数学を楽しむこと」を挙げたい。

日本人は、江戸時代の和算でも、実用的な話題の中に様々な非実用的な問題を出してはそれを解くことを楽しんでいて、今「数独」は日本発の世界的なブームになっているが、この他にもたくさんの数学パズルがある。子どもの時に知ったユークリッド幾何学の様々な問題を解く楽しみから学問の面白さを知って（数学に限らない）学者の道を選んだ人は数多い。数学文化を楽しむことによって、広い想像の世界を持ち精神性を豊かにすることも数学の大切な価値の一つである。

3.1.3 数学の世界

数学は「数の学」と書かれるように、数学が扱う対象として、第一に挙げられるのは数である。これに次いで幾何学の扱う図形がある。数と図形とは、言語と共に人間の持つ代表的な抽象的認識である。これらはギリシャ時代からの伝統的なものであるが、近代になって、変化する数としての関数、不確かな量としての統計データなどが重要になってくる。現代の数学には、もちろんこれからさらに進んで様々な研究対象があるが、ここではこれら四つの主要概念を中心に述べよう。

(1) 数 ～数はどこにでもある～

私たちは様々なものを数を用いて表現する。数を用いると、物事が正確に表現できる。その範囲の広さは、考えると驚くべきものである。しかし一方で、「数字は嘘をつかないが、嘘つきは数字を使う」というマーク・トウェインの言葉にあるように、数が考えている対象をどれだけ正確に表現しているかという点は十分に吟味しないといけない。リテラシーとしては、数についての知識と共にこうした感覚も求められる。

① 数と量

数にもいろいろあるが、その基本は自然数と実数である。前者は後者の一部であるが、まったく違うものと考えた方がよい。その性質として、共通なものは順序があることと、加法・乗法ができることである。これらの中に整数、有理数などが代表的な数としてある。

数によって表されるものを量と言う。数は数学の世界の概念であり、量はその自然界における実現である。ある考察対象を量として認識する、すなわちその性質を数として表すことを数量化すると言う。「長いー短い」、「広いー狭い」、「重いー軽い」、「濃いー薄い」、「熱いー冷たい」といった対になった様々な性質は、長さ、面積、重さ、濃度、温度として数量化される。

自然科学あるいは経済学などではさらに様々な量が現れる。ある性質が数量化され

るという事実自体がすでに科学理論の結果である。それによって対象を正確に表現し、その性質を法則などの明確な形で言い表すことができる。自然科学や経済がみずからを記述する言葉として数学を用いる第一の理由はここにある。これほど多くの事柄が数量化できる、すなわち数というただ一つ概念を用いて言い表されるとは考えてみれば実に不思議なことである。

数は人間内部の抽象的な概念であるが、量は自然その他外部にあるものなので、それぞれがどの世界に属するかという独自の性格を必ず持っている。物理量の場合にはこれを次元と言う。

加法減法がそれぞれの量の世界で閉じているのに対し、2種類の量の乗法除法は新しい量を生み出し、新しい次元ができる。同じ種類の量であってもその乗法は違うものになる。例えば、長さ×長さ＝面積である。

量は自然数（あるいは整数）と対応付けられる場合に離散量、実数と対応付けられる場合に連続量と呼ばれる。従来の科学での多くの量は連続量であるが、その近似値である測定値は離散量であり、近年コンピュータの発達と共に離散量の取り扱いの重要性が増している。

② 数の表示

人間は十進法を基礎とした命数法を用いて効率的に数（自然数・小数）を表現する。

さらに人類は0を導入して位取り記数法を可能にした。日常的には十進位取り記数法が用いられる。十進位取り記数法には、1) 0から9までの10個の数字だけでいくらかでも大きな数を表せる。2) 桁の数だけの短い長さで数を表せる（大きい数ほど効率がよい）。3) 四則計算のアルゴリズムが存在し、容易に実行できる。4) 二つの数の大小もすぐ分かる、などの優れた特徴があり、私たちは日々その恩恵を被っている。

連続量に対応する実数（特に無理数）を表現するには、近似を用いなければならない。近似数の表記法としては、小数と分数の二つがある。

小数の四則演算は、位取り記数法を用いれば、整数のそれとまったく同じアルゴリズムで実行できること、誤差評価が容易であることなどの利点がある。一方で有理数であっても多くの場合は無限循環小数としてしか表せないというデメリットがある。

整数の比の値として有理数の概念が得られるが、その表示方法に重点を置いて言う場合は分数と呼ばれる。分数による四則演算は乗除法が容易であるが、そのかわり加法や大小比較はより面倒である。

順序によって二つの量の近さ（絶対値）が定義でき、それによって、ほしい誤差の中に収まるように近似することができる。精確に近似するだけでなく、逆に概数とし

て丸めることで計算や比較が簡単になる利点もあり、目的によって両者をうまく使い分けることは大切な数のスキルである。

もう一つ大切な数の表示法として数直線（座標）によるものがある。すなわち数をその代表的な量である長さ（正確には、位置）によって視覚的に表現するのである。したがってあらゆる量は数を経由して視覚化できる。特に二つまたはそれ以上の量の関係をこうして視覚化したものはグラフと呼ばれる。人間の視覚は極めて発達しているので、これによって様々な数学的性質を直観的に把握できる。

③ 数の世界の抽象化

ある数に別の数を加える、というようにいくつかの数について一度に考えるとき、この、ある数、別の数を文字によって、例えば a , b を用いて $a + b$ と書く。このように書かれた式を文字式と言う。文字を数を表すものとして用い、いくつかの量を一度に、しかも一般的に考えることができるのは、数学という言葉の優れた特徴である。

加法や乗法のように、ある対象（集合）の二つの要素に対して、第三の要素の対応の仕方が定まっているものを（2項）演算といい、一つまたは複数の演算を持つ対象を一般に代数系と呼ぶ。これは数の演算の抽象化である。自然数や実数の他、ベクトル、行列など様々な代数系があつて、科学で重要である。代数系を研究する数学の分野を代数学という。

（2）図形 ～単純にすると大切なものが見えてくる～

例えばある場所への道筋を示すとき、私たちは略図を書く。言葉よりも図で示した方が分かりやすい。そしてこのときには道順と方向、曲がり角の目印など、必要最小限のことを図で表示する。こうした図形の持つ特性を理解し、その用い方を身に付けることは大切な数学リテラシーである。

① 空間と図形

私たちは、3次元空間の中で生きており、その中で視覚的に様々なものを認識して、取り扱っている。その際、視覚的对象の形を、類似性と差異とによって分別し、体系付ける。数学はそれらの、ある特徴（性質）だけに着目した、理想化された概念である図形としてみずからの中に取り込む。点、直線、平面、円、三角形、多角形、多面体といった私たちになじみ深い図形たちはいずれも現実にあるイメージを理想化したものである（まっすぐな線→直線、丸い形→円、等々）。その概念の定義は、（少数の例外、無定義用語を除き）数学的に明確なものとなっている（例：円＝平面内の、ある点（中心）からの距離（半径）が一定である点の軌跡 [集合]）。

人間の視覚認識は非常に優れているので、様々な性質を図形化することで直観的に容易に認識できる一方、図は一般に情報が多すぎるので、その中から最も適切なものを読み取ることが逆に易しくない。幾何学の問題を解く難しさは、この「見れども見えず」というところにある。

② 図形と計量

図形の性質としては、二つまたはそれ以上の図形の関係が重要である（交わる、平行、接する等）。中でも同じ名前と呼ばれる二つの図形が、同じ形であるかどうか、すなわち相似、形も大きさも同じであるかどうか、すなわち合同が基本である。

数学としての図形の性質の探究は、これを行う数学分野の名称、幾何学の語源が測地という意味であることから知られるように、人類文明の発祥以来の現実の問題に根ざしている。人々は、土地の地図を作り、建築物などの造営で図面を作るために、図形の様々な性質を応用した。そこでは長さ、角度、面積などの基本的な量が現れ、これらの量を用いて図形の性質が記述される。このように量を用いて表される図形の性質を計量的性質と呼ぶ。

図形の性質で特に重要なものに対称性がある。一般に高い対称性を持つものほど特殊な（数学的に）「美しい」図形であるとされる。古代に円が完成された図形と見なされた理由はここにある。現代でも「自然は最も対称性の高いモデルを選ぶ」というのが、理論物理学などで研究を進める一つの指針になっている。

③ 様々な幾何学

1) ユークリッド幾何学 図形についての概念、あるいは図形間関係を表す概念の性質を理解し、その概念や性質相互の関係を理解するために、ユークリッドはその著書『原論』の中で、いくつかの基本的命題（公理、公準）と数学的な定義から演繹的推論（証明）に基づいて様々な概念とそれらの関係を体系的に整理し記述するという方法を確立した。これは以後数学のみならず、学問的な認識およびその記述方法のモデルとなった。

2) 座標幾何学 古典的な幾何学に対し、空間に座標という「物差し」を入れて点の位置を数の組として表し、計量的な性質を数の世界で記述する幾何学を座標幾何学と言う。それはデカルトによって 17 世紀に導入されたものであるが、運動など時間で変化する量を解析するための不可欠な場を与えた。

実は座標の考え方はずっと古く、天体の位置を表す手段として球面座標が古代から導入利用されている。現在では、これは地球上の位置を表すもの（経度・緯度）として用いられている。

また4次元以上の空間を視覚的に「想像」するのは難しいが、座標を通して空間を数的なものに転換することにより、一般の次元の空間を考えることが可能になる。これは数学の持つ「自由さ」の代表的な例である。

3) 非ユークリッド幾何学 数学はユークリッド幾何学の公理を批判的に捉え直すことにより、私たちの身の回りにある（と考えている）空間とは別の空間上の幾何学で、同じように豊かなものが存在することを見出した。当初それは「想像上の」ものと考えられていたが、実は、空間や直線、点を別のものとして解釈することにより、この世界（ユークリッド空間）の中に目に見える形で存在することが分かった。例えば球面は別の2次元幾何学の空間になっている。ここでの直線は大円になる。このように思いがけない二つのものが直線として結び付くところにも数学の自由さがある。さらにその理由を考え抜くことで、曲がった空間の中でも通用する「まっすぐ」という直線の特徴付ける性質の一般化（測地線）が得られている。そして相対性理論は、この非ユークリッド的な幾何学の上に成立している。人間の「想像力」が宇宙のより深い理解のための場を用意したのである。

(3) 変化と関係 ～動いてみるともっとよく分かる～

止まっている電車の中では、線路がまっすぐなのか曲がっているのかは分からない。しかし電車が走っていれば遠心力の働きで私たちはそれを感じることができる。また日々の温度の変化から私たちは四季の移り変わりを知る。こうした時間などによる「変わり方」を知ることで、私たちはものごとをより深く知ることができる。そうした探究の仕組みを数学は持っている。

① 関数とその表現

二つの量の間には様々な関係がある。特に時間との関係を変化という。これらを抽象化して数学の世界の概念としたものが関数である。

関数を記述する方法として代表的なものに、表、グラフ、数式の3種類があってそれぞれに特徴を持ち、考えている問題に応じて、適当な手段を選ぶ必要がある。

例えばグラフを用いて関数を表示する方法によれば、変化の様子、つまり関数の性質は一目で分かる。ただし分かりやすい図を書くには、変域や値の範囲の取り方に工夫が必要である。さらに（これが本質的であるが）、図を見ることで変化の性質は読み取れても、なぜそうなるかの説明はできない。

② 代表的な関数

数学は、関数の最も基本的なものとして、正比例（または1次関数）、反比例、多項式的変化（特に2次変化）、指数的变化、対数的変化、周期的変化など（とその組合せ）

を考える。これらが現実の世界の様々な場に現れること、その変化の特徴を知ることが数学リテラシーの基本である。

③ 関数の性質を調べる

関数については、その変化の様子を関数の形、グラフ等から読み取り、その現実の問題における意味を考えることが大切である。そうした変化の性質としては、増加、減少に始まり、急に増加する、発散する（爆発する）、ある値に漸近する、周期的に繰り返す、ある場所で特定の値を取る（例えば0になる）など様々なものが挙げられる。

変化の基本は正比例 $y=ax$ である。この比例定数 a が正であれば関数は x の増大と共に増加し、負であれば減少する。0であれば一定で変化しない。また a の絶対値が大きいほどその変化の度合いは大きい。グラフで見ると、この関数のグラフは原点を通る直線であるが、比例定数はその傾きになっている。

さらに詳しく関数の挙動を調べる有力な方法に、微分法がある。これは関数の瞬間的な変化率（微分係数）を見るものである。関数に対し、各点でその微分係数を対応させて得られる新しい関数を導関数といい、この導関数を用いてもとの関数の変化を調べる。例えば導関数がある範囲で正であれば、そこで関数は増大し続ける。

微分積分学は力学との関連で研究確立された。運動における位置の関数の導関数が速度であるが、この速度の導関数（すなわち2次導関数）が加速度である。ニュートン力学の基本法則は質量と加速度の積が力に等しい $ma = f$ というものである。したがって運動の関数は2階微分方程式（運動方程式）の解として表されることになる。

関数そのものがすぐ数式で書けないとしても、その性質から例えば運動方程式のように微分方程式の解として関数が記述できる場合がある。このときそれを数学的に解いて解がよく知られた関数を用いて書ける場合もあるが、たとえ容易に解けなくとも、その解の関数の様々な性質を微分方程式としての性質から導くことが可能である。さらに近年はコンピュータの発達により、数値的に近似計算で解を求め、あるいは微分方程式さえ知られていなくともシミュレーションなどでその関数の性質を調べるといった方法が広く行われるようになってきている。こうした様々な関数の性質を調べ、それを応用する数学の分野が解析学である。

（4）データと確からしさ ～でたらめさの中にも法則性がある～

① 数理科学の対象としてのデータ

数そのものに不確かさはないが、ある量を具体的に数として表すには観測・測定などが必要になる。この場合得られた値が真の値かどうかは分からない。また各種の統計調査を通して得られた数の場合には、そうした数の集合全体が示す意味を見出して

いく必要がある。こうした不確実性を持った数の集まりをデータと呼ぶ。データの中の個々の数は、数値、観測値、測定値等と呼ばれる。

データを処理するための数理的な手法が統計学である。そして「不確実性を持った数」を数学的に研究するのが確率論である。また現在はコンピュータの発達により、極めて大量のデータをどう効果的に処理し、またそこから情報をどう読み取るかが別の大切な問題になっている。

統計は、経済学や生命科学（医学を含む）で大きな役割を果たしており、市民的な活動で私たちが最もしばしば遭遇する数理科学である。与えられた統計データから何を読み取るか、あるいは図などで表示されたデータをどう理解するか、データに与えられた解釈の妥当性を判断できるか、といった能力が市民としては期待される。

② データの縮約と表示

データの基本部分は、例えば1クラスの個々人の身長というように、数値の集まりである。その様子は数値を個々に見ているだけでは把握できない。そこでデータを単純化して少数の数値で全体像を把握する。

その目的で用いられる、平均と標準偏差（分散）など、データの数値から計算される値を分布の代表値という。あるデータに対してどのような代表値が適切かは、データの性質によって異なるが、あまり複雑でない「有効数字が3桁の3個の数値」程度のもものが適切である。

データは柱状図（ヒストグラム）、棒グラフ、帯グラフ、円グラフ、レーダー図、折れ線グラフなど様々な仕方で図表示されるが、その見方や特徴を知っていると、関連や推移の様子が直観的に把握できる。

図表示は、直観的に理解できるが、それゆえ逆に錯覚も起こさせやすい。例えば、ある値以下を切り落としたグラフで時間推移が表示されると、時間的变化が拡大して印象づけられる。この種の錯覚・誤用に対する心得が大切である。

③ データに含まれる不確かさ

ある量を測定して得られた数値は必ず誤差（想定される真の値との差）を含んでいる。人間の体重は一日の中でも多少変動するので、「ある人の体重」というように、量の定義自身の中に不確定性がある場合もある。データとはこのような微小な変動を持つ「確率論的な」量である。

したがって、二つのデータの間関係も曖昧にしか語れない。二つのデータの間どれだけ線形関係があるかを示すのが相関係数である。因果関係があれば、一般に相関関係のあることがデータに現れるが、相関関係が見られたからといって、これを

因果関係（原因と結果）と見るのは正しくない。

また新聞やテレビでは、視聴率 15.7%とか、政党支持率 42.1%といった調査データが頻繁に登場する。これらの数値は、対象となっている集団（母集団）の一部（標本）についての数値であり、本当に知りたい母集団全体での数値ではない。母集団での視聴率を真の値とすると、標本での視聴率の値には誤差が含まれる。データとして標本による数値を考えると、標本誤差がどれくらいかを吟味することが必要である。標本に基づいて母集団についての処置を考えると、標本に偏りのないことが重要である。

④ 確からしさと確率

ある命題の確からしさを評価するには、論理と経験の一方あるいは両方が用いられる。「サイコロ投げで1が出ることの確からしさは1/6である」というのは、6通りの場合が同じ条件にあるという前提に立った論理によるものである。これに対し経験による確からしさの評価はデータに基づくことになる。

確からしさを表すには確率という数学的な概念による。これは数学的に厳密に定義されるが、日常的にはもっと曖昧な形で感覚的に使われる。

一般の人が確率について心得るべきことは、1) 確率が大きい事象の方が、確率が小さい事象より、生起・実現が期待できること、2) 非常に小さい（あるいは大きい）確率の事象が現実起こったなら（あるいは起こらなかったら）、確率計算の前提が間違っている可能性が高いと考えること、である。

⑤ 確率分布と確率モデル

統計データに現れる度数分布として標準的なものがいくつかある。

最も単純なのは一様分布と呼ばれるものである。サイコロの目の出る確率がこれである。連続的な分布で最も重要なのは正規分布と呼ばれるもので、自然や社会の様々な場で現れる。例えば測定値の誤差の分布がこれである。正規分布は平均と分散を与えると唯一通りに定まる。この他、二項分布、ポアソン分布などがある。

現実問題で確率分布がこのような分布族に従うことなどを想定して、確率をパラメータを持った数式で表し、データとの整合性を確かめるやり方を「確率モデル」を使うという。

偏差値は、試験の結果が正規分布に従う確率モデルを用いて、得点にある種の変換を行ったものである。自分の相対的な位置を推定するのに便利な量であるが、これを過度に絶対視したり、母集団が異なるのに比較したりするなど、誤った使い方が多く見られる。

3.1.4 言葉としての数学

(1) 考える手段としての数学

私たちがものごとを認識し、課題を解決し、意見の妥当性を判断するといった知的活動は、広い意味で「考える」ことだと言えよう。そして考えるときに私たちは言葉を用いる。言葉は他の人とのコミュニケーションに用いられると共に、みずからの中で考えるときにも用いられる。このとき用いられる言葉は、普通は通常の意味での言語、すなわち自然言語であるが、それだけではなく数学は普遍的な言葉として、独自の考える方法（および他とコミュニケーションする方法）を持っている。数学の方法を一言で言えば、「数学の言葉を用いて考える」ことである。

(2) 数学語の特徴

数学の特徴として、次の二つがよく挙げられる。

- ① 抽象的であること（特に文字の使用）
- ② 論理的であること

ところが、これらは実はいずれも言語そのものの特性である。しかし数学は通常の手話（自然言語）以上にこれらの性格が際だっている。特に自然言語の場合には、論理と共に、レトリックによる情緒的な働きも大きいのであるが、数学はこれをむしろ退ける。数学の文章では必ず論理の筋が通っていなければならない。正しい命題による正しい（演繹的）推論の連鎖によって結論に至ること、これは数学では必ず必要とされる文章のルールである。

さらに自然言語との違いとしては、

- ③ 数学は基本的に記述言語であること

④ 用語の意味に曖昧さを許さず、言い方も限定されたもののみを用いることが挙げられる。しかも数学でその記述に用いる記号はほぼ世界共通であり、数学者（や科学者）たちは数式を用いて筆談ができる。数学用語ではもちろんそれぞれの話者の言語が用いられるが、その多くは直接的に翻訳可能である。この意味で数学は最もグローバルな言語で、英語をも遙かに凌いでいる。もちろん数学を通常の手話を用いて音声化して語ることはでき、それは相互のコミュニケーションに必要でもある。漠然とした表現や、例示的・暗示的な言い方を補助的に使うことも相互理解に有効であるが、知識体系としては上記の骨組みがきちんと存在していなければならない。もう一つ、さらに数学語に特有のこととして、

⑤ 思考・コミュニケーションの補助手段としての図形（特にグラフ）の使用がある。自然言語でもシンボルは用いられるが、数学では数字、記号と並んで、図形

が本質的な役割を果たしている。数学が幾何学において図形の性質を探究することでみずからの言語を精緻なものへと築き上げていったことは本質的に重要な事実である。

(3) 計算とアルゴリズム

数学の活動として大きな部分を占めるものに数や文字を用いる計算がある。計算の多くの部分を私たちは形式的に実行するため、そのプロセスをあまり意識しないが、しかしそうする前提として、計算はあくまでも数式を用いた文章なのだという事実を私たちは忘れてはならない。すなわち計算手順を実行することは論理的な推論を行っていることにほかならず、その計算一つひとつにはきちんとした数学的な意味がある。普段はそれを意識しなくてよいのだが、必要なときにはいつでもその意味が分かるのでなければ計算を「理解している」とは言えない。ここにコンピュータと人間の違いがある。なぜ分数の掛け算では分母同士、分子同士を掛ければよいのか、 -1 と -1 を掛けたらなぜ $+1$ になるのかが納得できないのは、人間だからである。教育者は子どもたちのそうした疑問に答えていくことが期待されている。

ある種の一般的な問題についてその解に至る一定の手続きがはっきりしているとき、それをアルゴリズムという。私たちは小学校で（負の数ではない）分数や小数の四則演算について十進法に基づく筆算のアルゴリズムを学ぶ。また中学に入ると負の数の扱いや文字式の扱いを学ぶ。これらは代表的な、しかも優れたアルゴリズムであり、人間が産み出した最大の文化遺産の一つである。その発展として、連立線形方程式や高次方程式、微分方程式などを数値計算で解いたりするアルゴリズムが開発され、知られている。こうした計算においてアルゴリズムが確定していて、機械的にそれを実行できることは私たちの思考エネルギーの多大な節約になっており、そこに数学の大きな価値の一つがある。またそうした手順の部分は現在コンピュータに任せることもでき、そのことで私たちはとてつもなく高い能力を獲得することができている。様々な計算機アルゴリズムの開発は、人間業では考えられなかったようなより広範な問題への解法を与え、数学としても新たな分野を切り開きつつある。かくしてアルゴリズムは最も古い文化でありながら、同時に今なお最も現実的な文化であり続けている。

3.2 生命科学

3.2.1 一様にして多様な存在

生命は、その誕生から今日までの約 38 億年、絶えることなく続いてきた驚くほど頑丈なシステムであるが、その世界は地球表層の薄皮一枚に限られており、現生生物の総質量が地球の質量に占める割合は、成人における睫毛一本にも及ばない。生物の世界は物理量としては微々たるものであるが、大気中の酸素分子は生命活動の結果として生じたことから明らかなように、生物は地球表層の物理化学的性状を劇的に変えてきた。

生命活動の基盤となる遺伝情報は、天変地異といった偶発的な要素を含む進化の過程を通じてたまたま選ばれてきたものである。その結果として生物は多様化し、現在では数千万とも数億ともいわれる種に分かれている。進化の結果多様化してきたということを裏返せば、現生生物はいずれも共通の祖先に由来するということであるが、実際、私たちが知っている現生生物はすべて共通の祖先に由来すると思われるべき科学的な根拠がある。生物は実に多様ではあるがその基本的な成り立ちは驚くほどに共通で、生物は多様にして一様な存在である。

ヒト（ホモ・サピエンス）は体の外に情報を蓄積し、それを時間と空間を超えて伝達・共有することのできる唯一の生物であり、積極的な教育を行う唯一の生物でもある。この大型で、一個体が消費する物資やエネルギーの量も著しく大きな動物が、生物世界全体に与えている影響は甚大で、地球にかつてない深刻な状況をもたらしている。

生きているということの基本を理解し、生物世界全体の存続に思いを致すことなしには、人類の存続もまた立ち行かないのではないかと危惧される。このような観点から、生命科学に関する素養の基盤として次の3点を取り上げたい。

- ① 生物の世界：生命の歴史、ならびに細胞から生物圏に至る各階層の成り立ちを概観し、生物世界の特徴を理解する
- ② ヒトという生物：ヒトを特徴づける知性と心、およびその特徴的な営みである教育、農耕、医療を通じて、生物としてのヒトの特性を理解する
- ③ 生命の倫理：生命倫理を人間社会内の問題に限ることなく、生命システム全体の存続という観点から考え、人類が直面している困難な課題の本質を理解する

3.2.2 生物の世界

進化の歴史を通じて生物の世界は極めて多様にして複雑になり、地球表層には生命が満ち満ちている。現在では数千万種あるいは数億種が生きていると推定されているが、生物学者がこれまでに命名したものは170万種程度に過ぎず、生物学者といえども現存する生物の大部分についてはまったく知らない。にもかかわらず「生物」学が成り立つのは、現存する生物の系統は一つで、すべて共通の祖先に由来しており、その営みの基本は驚くほどに変わらないからである。生物は非常に多様であるが一様でもある。すべての生物は「生命の詩」という単一の音楽を、それぞれの種や門などのグループに固有な変奏曲として奏でていると言い換えてもよいかもしれない。

(1) 生命の歴史

生物（細胞）が誕生したのは約38億年前で、地球が生まれてからわずか8億年後のことである。生物の誕生に先立って、原始の海では核酸やタンパク質をはじめとする生体成分などが化学合成され、それらの中から自己複製システムができたものと考えられている。最も単純な自己複製システムは単一の分子がそれ自体で自己複製するものであるが、その様な自己複製分子の候補としてリボ核酸（RNA）があげられている。やがて、遺伝情報を保持する能力をより安定なデオキシリボ核酸（DNA）に、複製能力をより多くの特性を持ったものを作りうるタンパク質に渡して、新しい自己複製システムができたと考えられている。このような自己複製システムが脂質を基礎とする膜によって外界から仕切られて細胞（すなわち生物）へと進化したのであろう。

原始地球には遊離した酸素分子はほとんどなく、初期の生物は嫌気性の原核生物（バクテリア）であった。しかし、およそ27億年前に酸素放出型の光合成を行うシアノバクテリアが出現したことで状況が一変した。光合成とは、太陽光のエネルギーと水と二酸化炭素から糖を生成すると共に酸素分子を放出する過程である。当初、光合成によって放出された酸素は海水中の鉄イオンと反応して酸化鉄を生じた。そのため、最初のほぼ10億年間は海水中の酸素濃度はわずかしか上昇しなかったが、やがて鉄イオンが枯渇すると海水中の酸素濃度が急速に上昇し始めた。その結果、おそらくそれまでの主流だった嫌気性細菌の大絶滅が起こると共に、生物にとっては本来危険な酸素を上手に利用してエネルギーを効率よく得る好気性細菌が進化する道が拓かれた。

遺伝情報の担い手であるDNAを収納する「核」を持った真核細胞は、原核細胞どうしの共生によって生じたと考えられている。これまでに見つかっているその最古の化石は約21億年前のものである。約6億年前の先カンブリア時代末には、硬い殻を持たない扁平な多細胞動物群が出現したが、カンブリア紀を迎える直前にすべて絶滅し

た。カンブリア紀になると、硬い殻を持つ大型の多細胞動物が爆発的に進化し（これは「カンブリア紀の爆発」と呼ばれている）、現生動物の門はヒトが属する脊索動物門も含めてこの時期にほぼ出そろった。

光合成によって海水中の酸素が飽和すると、大気中にも酸素が放出され、今から 4.5 億年ほど前には、生物にとって有害な紫外線を吸収するオゾン層が大気圏上層に形成され、生物が陸上に進出する道が開けた。まず植物が陸上に進出し、それを追って節足動物や脊椎動物が上陸した。ペルム紀中期末から後期にかけて 2 回の大絶滅が起こり、三葉虫など動物種の 80～95% が絶滅した。

約 2.5 億年前に始まる中生代の海にはアンモナイトや遊泳能力に優れた魚類が登場し、陸上では古生代末の大量絶滅を生き残った爬虫類が多様な種類を進化させた。そのなかから恐竜と哺乳類が約 2.3 億年前に出現した。今から 6500 万年前には、恐竜やアンモナイトなど、中生代を代表する動物を一掃する大量絶滅が、おそらくは巨大隕石の衝突によって起きた。恐竜などの絶滅により空いた生態的地位は、哺乳類の急速な進化によって埋められ、1500 万年ほどの間に現生哺乳類の主なグループがほぼすべて登場した。約 700 万年前のアフリカでヒトの祖先がチンパンジーの祖先と別れて直立二足歩行を始め、約 250 万年前ごろには脳の大型化と石器の作製が始まりホモ属の出現となった。しかし、私たちヒト（ホモ・サピエンス）が出現したのは、たかだか 20 万年前のことだった。

進化の歴史は絶滅の歴史でもある。生物はありあわせの部品を一部改変したり増築したりしながら使い回すことによって新たな種を生み出し、多様性を増大してきた。個々の種は多様な遺伝的変異を抱えており、自然界ではそうした個体のすべてが同数の子孫を残せるわけではなく、生息環境にたまたま適応した個体ほど多くの子孫を残す可能性が高い。これが、ダーウィンが提唱した自然淘汰（選択）説の骨子である。進化とは枝分かれであることを正しく指摘したのもダーウィンだった。

しかし、大規模な環境変動に際しては、それまでに築いてきた適応などでは対処し切れなかったりする。そうした大量絶滅の危機を乗り越えられるかどうかは偶然による部分が大きい。

（2）細胞の成り立ち

すべての生物は細胞から作られている。細胞は自立的に生活できる最小の単位でもある。その形、大きさ、働きなどは、生物の種類や組織などによって多様であるが、細胞の基本的な構造と機能はどんな細胞でもよく似ている。最も基本的な類似点は、外界から栄養やエネルギーをとり入れて成長・増殖し、特定の遺伝情報を DNA の形

でその中に保持していることである。細胞の基本的な構造と働きを知ることで、生命活動の基本を知ること、生物が辿って来た進化の過程を推測することもできる。細胞は細胞膜によって外部から仕切られ、細胞の独立性を維持すると同時に細胞外からの物資や情報を受けとって細胞内に伝えている。

細胞は進化の過程で、遺伝物質 DNA を安全に維持し、複製するために、核と呼ばれる構造を作り上げてきた。現生生物の細胞は、この核の有無で原核細胞と真核細胞とに分類されるが、両者は細胞小器官や細胞骨格の有無などにおいても異なる。

真核細胞の核の中では、遺伝情報を伝達するための物質である DNA や RNA が合成される。極めて大きな分子である DNA に書き込まれている遺伝情報が、その単位（遺伝子）ごとに短い mRNA（メッセンジャーRNA）に写し取られて、核外に出てタンパク質の合成工場であるリボソームに運ばれる。

細胞は分裂によって増殖するが、それぞれの細胞がいつ分裂するかは厳密に制御されている。がん細胞は、この分裂の制御を逸脱した細胞である。また、除去したい細胞を積極的に死なせる機構が存在し、そのような死に方をアポトーシスと呼ぶ。細胞がさかんに分裂している組織には、幹細胞と呼ばれる細胞が存在している。発生初期の胚から細胞を取り出して培養することで、色々なものに分化しうる胚性幹細胞を作ることができる。また、成体から取り出した幹細胞を利用したり、分化した細胞を処理して多能性を持つものに変化させたりする技術の開発も進んでいる。

（3）個体の成り立ち

原核生物のほとんどは単細胞性であるが、真核生物には多細胞体制をとるものが多い。多細胞生物では特殊化した細胞を部品として集積し、組織・器官・器官系と順次組織化することによって構築された個体が独立した活動の単位となっている。個体が大きくなり、その細胞数が増すにつれ、外界と接する細胞の割合が減るので、外界からの情報を受け止めて内部に伝える必要が生ずる。また、外界とのガス交換、養分の取り入れ、老廃物の排出などを拡散などに頼ることはできず、体内の隅々にまで物資を輸送する必要も生ずる。さらに、病原菌などの攻撃を排除し、自分の細胞であっても感染・がん化・老化・損傷・死亡したものを処理することも必要である。私たちの体内の諸器官は、個体という高次システムの統一性を維持・運営し、再生産するために発達したものである。

生物が新しい個体を生み出すことを生殖という。その方法には大きく分けて雌雄の性に関わる有性生殖と性を伴わない無性生殖の二つがあるが、その両方を行う種も少なくない。無性生殖では遺伝情報のすべてが親と同じであり、このような個体群をク

ローンという。有性生殖は無性生殖よりコストは高いが、子の遺伝的な多様性も高い。個体の生涯にわたる変化の過程を発生という。受精卵から細胞分裂によって作りだされる細胞は、個々の段階で発現する遺伝情報の差に基づいて特殊化し、様々な組織や器官へと分化していく。

メンデルはエンドウを用いて花や種子などの形状がどのように遺伝するかを解析し、後にメンデルの法則と呼ばれることになった遺伝の基本法則を発見した（1865）。しかし、メンデルの偉大な業績は1900年に三人の研究者によって独立に再発見されるまでほとんど注目されなかった。

遺伝子が染色体の上に乗っていることは比較的早く分かったが、遺伝子の本体が何であるかは20世紀半ばまで不明であった。バクテリアやファージ（バクテリアに寄生するウイルス）を用いた実験の結果と、ワトソンとクリックによるDNAの二重らせんモデルの提唱、半保存的なDNA複製の実証などによって、遺伝子本体はDNAであることが判明した。現在では、DNAの加工、素早い増幅、遺伝子の解読（DNAの塩基配列の決定）、特定の塩基配列を持ったDNAの合成、人為的な遺伝子の導入・改変も可能である。ヒトをはじめ色々な生物で、ゲノム（その個体が持つ遺伝情報の総体）の解読が行われ、ゲノム科学という新分野が作りだされた。

（4）生物社会、生態系および生物圏の成り立ち

生物は自然界で様々な集合を作っている。同種個体間の相互作用によって形成されている集団を生物社会と呼ぶ。有性生殖における新しい個体への遺伝情報の伝達は、社会的な事象の出発点であり、求愛行動や親による子の世話行動は社会性の萌芽といえる。

実際の生物社会を構成しているメンバー間には様々な発達段階があり、個体間の相互依存性、協同性、集合性などを尺度にして比べることができる。ある個体が他個体に与える影響は、利己的、利他的、相利的（協同的）、両損的の4種類に分けられる。動物の通常の有性生殖は、両親双方の遺伝子が子に伝達されているので、雌と雄との協同的な作業である。

ハチ、アリ、シロアリなどのいわゆる社会性昆虫では、集団内の個体間関係が複雑な行動を介して行われており、結果として個体間の利害得失が複雑になっている。それらは大集団を形成し、多数の不妊のヘルパー（ワーカーや兵隊）がごく少数個体の生殖活動を助ける生殖分業を行っている。

異種の個体間における関係の多くは、競争、捕食、寄生などである。このような一対一の関係は、その程度が強いと一方が他方の種を滅ぼしかねないが、そのような種

間関係に別種との関係が加わったり、生息環境の変動があれば、種間関係の程度は緩和される。共生は種間の相利的な関係であり、自然界で多く見られる。例えば、昆虫類などでは、消化、栄養、防衛、発光などで微生物との共生関係が普遍的に見られる。共生微生物は昆虫の体内（細胞内）に生息している内部共生であることが多い。

同じ地域に生息している生物の総体を生物群集として捉えることができる。まとまった地域や水域における生物群集（生物的要素）と、水、大気、土壌などの無機的环境（非生物的要素）を一つのシステムとして捉えたのが生態系であり、両要素は密接な関係にあり、相互に影響しあっている。さらに、様々な生態系を構成要素とした最も大きな複合体を生物圏として認識することができる。

自然生態系の構成要素である生物群集は、多数の生物種から成り立っている。ここでは独立栄養生物（一次生産者）である緑色植物が基礎生産を行い、その緑色植物を摂食する動物（消費者、あるいは二次生産者）、さらにその動物を摂食する捕食動物といった食物連鎖が見られる。通常このような食物連鎖の関係は大変複雑であり、網目のようであるという意味で食物網とも呼ばれる。海洋では陸上と異なり、食物連鎖の中で微生物が占める位置がとても大きい。

生物に含まれるエネルギーは、食物連鎖の経路を辿って化学エネルギーとして移動していき、その一部は生命活動に使われて熱エネルギーとなって生態系から失われ、元に戻ることはない。これを生態系における「エネルギーの流れ」という。これに対して、生体を構成している元素は食物連鎖を通じて移動していくが、やがて微生物や菌類などの分解者の活動によって再び生産者に戻る。元素のこのような動きを生態系における物質循環とよぶ。

現在の地球の生物圏では、ヒトの現存量と活動量が異常に大きく、ヒトが改変した生物である栽培植物や家畜まで含めれば、大量の生物がヒトの産物となっており、生物圏全体に大きな影響を及ぼしてきた。不用意な人為活動によって幾多の生物を絶滅に追いやって来たこと、絶滅してしまった生物集団は決して甦らないことを、現代人はその素養として強く自覚すべきである。

3.2.3 ヒトという生物

（1）脳と心

知性の創造に至るヒトの進化は、運動器官と感覚器官の進化に始まり、脳神経系がそれに適応するかたちで後から進化した。樹上生活をする霊長類では、長い四肢と指、平爪、対向する親指の獲得に始まり、奥行きを正確に知覚する能力などを適応的に獲

得した。さらに手が触覚探索を獲得し、精巧な感覚装置にもなった。手が自己以外の事物を操作し、その結果を両眼視で詳細に確認できるようになると、脳内の神経回路もそれに適応して進化し、身体運動は体を「動かす」という自動詞的行為のみならず、物を「動かす」という他動詞的行為をも担うようになった。動かす主体たる身体と、動かされる客体たる身体外の事物が物理的に分離したのだ。さらに道具の使用においては、道具が身体の一部となると共に、身体は道具と同様の事物として客体化され、それを動かす脳神経系の機能の内に、独立した地位を占める主体を想定せざるを得なくなった。その仮想的な主体が、意思を持ち感情を抱く座である心というものの始まりだったのだろう。

自己の脳神経の機能の内に心が想定されると、主体は身体の永続性に気づき、自己の概念が確立されていく。また、他者の内にも心の存在を想定せざるを得なくなる。さらに、「動かす」対象は事物を超えて他の主体たる他者にも及ぶようになり、心は相互作用を始める。こうして、心を持った複数の主体は相互に心を認め合うようになり、共感、忖度（そんたく）、同情、模倣、教育など、心の活動（これを「心の理論」という）を基盤とした行為を通して人間性豊かな文化社会が形成され、その社会を通してまた心の作用がより発達した。このような心の作用はやがて自己をも制御対象として自制心や克己心に基づく精神文明を生み出し、一方では自然を操作対象とした科学技術文明が発展していくことになった。このような精神活動こそが知性と呼ばれるべきものである。

心に宿る自由意志は主体的に周囲の環境に対して働きかけるようになり、心を持った知性が環境をみずからの都合の良いように変化させ、その創られた環境に合わせて体と心の在り様が変わるといった連鎖が形成された。ヒトは物理的な地球環境ばかりでなく自分自身をも変化させ、手の延長としての道具に始まり、眼の延長としての鏡や望遠鏡を発明し、記憶能力の延長としての文字を発明し、さらに多くの機能を外在化させて、知性によって形作られた文化の中に蓄積してきた。情報や知識は世代を超えて共有され、教育によって伝承されるようになり、社会環境との相互作用の中で新たな進化の形を獲得したのである。

現代社会は、外在化させた脳神経の機能を電子通信によってネットワーク化しつつある。そこでは、個々の主体の意思は身体から離れ、機能別にネットワークを介して自律的に相互作用し、千切れた自己の切れ端が仮想社会で共有され融合される。科学技術を生み出した人間の知性は、そのことでみずからの知性をも変えつつある。こうした人間の脳と心の集合体は、新たな何かを創造しようとしているのだろうか。

（2）学習と教育—非遺伝情報の継承—

ヒトの大型で活発に働く脳は、知性をはじめ他の動物には見られないいくつかの特徴をもたらした。そのことを象徴するのが、ヒトの優れた学習能力に支えられた、体外への情報の蓄積および時間・空間の制約を越えたその共有である。このような意味でヒトは、真核生物であり多細胞生物であり哺乳類にして霊長類であると同時に、そうした枠を超えた極めてユニークな生物であるといえよう。

地球上で急速な発展を遂げてきたヒトは、増大する情報を共有し、利用するために、獲得した知識や技術、思考の方法、価値などの文化を、体系的に後生に伝える方法を見いだした。それが教育と呼ばれる文化伝達様式である。経験に基づき行動様式を変更する能力、すなわち学習する能力を持つ動物は少なくないが、次世代を積極的に教育するのはヒトだけである。教育はおそらく母子間にはじまり、徐々に広がって社会として組織的に行うに到ったものであろう。組織的な教育も、古代ギリシャのソクラテスにおける問答法に見られるように、当初は一对一の形態の中で行われた。しかしながら、社会が発展し、複雑化するのに伴って、伝達すべき知識や考え方の量が増大し、効率的にこれを行う必要が生じてきた。ここに学校教育制度が確立し、長い時間の流れの中で蓄積してきた文化遺産（学習成果）を次代に伝える画期的な方法を獲得したわけである。このことによってユニークな生物ヒトは、地球上でさらなる飛躍を遂げることとなった。

（3）食の確保—農耕—

約1万年前に始まった農耕とそれに続く牧畜は、食料の確保と保存を可能にしただけでなく、人間の生活様式を大きく変え、文明を育み、科学技術を育てた。また、少なくともこれまでは「人口爆発」をも支えている。20世紀後半の約40年間を見ると、農耕地の面積の増加は微増に過ぎないが、単位面積当たりの収穫量が2倍以上増加したために、一人当たりの穀物の量は増加した。収量の躍進は「緑の革命」とよばれる農業改革、すなわち作物の品種改良、化学肥料と農薬の使用、灌漑設備の整備、農業機械の利用などによるものである。最近では、遺伝子組換え技術を応用した育種も進んでいるが、21世紀の最初の4年間は、世界の穀物生産量が消費量を下回った。

現在、陸地面積の約12%に当たる15億ヘクタールを耕地とし、約44億トン（2000年）の農業生産をあげている。このうち、米、小麦、トウモロコシ、ジャガイモ、大豆の主要5作物の合計が約20億トンで、これを現在の世界人口67億人に均等に配分すると一人当たり約300キログラムになり、生きていくためには十分な量となる。畜産業は農業生産全体の約4割を担っているが、その中心は野外での飼育から屋内での

配合飼料による多頭羽飼育へと移行し、最近 25 年ほどで世界の食肉生産量はほぼ倍増して 2.6 億トンに達した。魚介類に関しては 2001 年には世界で約 9000 万トンの魚が漁獲されているが、なお 400 万トン不足であるという。

農業は自然環境を人工的に農地に作り変えるところから始まる。農地は田園風景として、本来の自然とは違った美しい景観を作り出しており、これを多くの人々は「自然」と感じて心の安らぎを覚える。適切に管理された農地や森林は洪水、土砂崩壊、土壌侵食などの防止を期待できるが、過剰な伐採、耕作地や放牧地の拡大のために森林破壊が進み、保水力が減って水不足や洪水が起きている。穀物の生産には収穫量の 1000 倍の水が必要であるが、水の過剰な使用により世界各地の河川や湖の水量が減少し、地下水の枯渇も始まっている。農耕地の土壌浸食が進み、不適切な水管理によって農耕地に塩害が広がり、過耕作や過放牧による耕地や草地の破壊と砂漠化が進んでいる。

農業は二酸化炭素より温暖化効果が高いメタンと一酸化二窒素を排出し、発電と輸送よりも温暖化への寄与が大きい。温暖化は農業に影響を与え、4 度の上昇が起これば、すべての地域で穀物の生産性が低下し、海水面の上昇により世界の沿岸湿地の約 30%が水没する可能性がある。特にアフリカでは降雨量の減少により 2020 年までに農業生産量が半減し、アフリカの貧困と餓えの克服を大きく遅らせる可能性がある。

農業は人間の健康に負の影響を与えてもいる。集落の形成は病気の発生や感染の拡大を起しやすき環境の形成でもある。一部の病気は農業を始めたために起こり、流行・蔓延が拡大したものである。ペストやインフルエンザ、あるいは狂犬病などの人畜共通伝染病、ウシの腸内細菌である腸管出血性大腸菌（O157）やニワトリなどの腸内細菌であるサルモネラなどによる食中毒などがその代表的な例といえる。

（４）健康の確保—医療—

医療は疾病の過程に干渉し、できるだけ正常な状態に戻そう、戻らないまでもその進行を止めようとする行為である。ここでいう疾病はヒトの心身に生じた機能の異常であるので、その理解にはヒトの細胞や個体の成り立ちの理解を欠くことができない。人体の機能は他の哺乳類のそれと類似しており、他の哺乳類で起こっている生体現象の多くは人体にも当てはまる。しかし、ヒトでは脳が他の動物と比べて極端に発達しており、それがヒトを人たらしめるゆえんでもあり、精神機能に関してはこの限りではない。

疾病の原因と異常を来たしている場所（臓器）を特定するのが医療における診断であり、その原因を除いたり、異常を軽減しようとするのが治療である。疾病の原因は感染、腫瘍、変性の三つに大別されるが、さらに外傷を加える場合もある。また、疾

病の発生を遺伝的に（生まれつき）決まっているもの、遺伝的素因に環境因子が加わって発症するもの、まったく後天的に発症するものに分けて考えることも必要となる。

すべての生物には身体の異常な状態を元に戻そうとする自己修復機能が備わっており、医療はそれを最大限に利用する。医療的治療行為の代表として、薬物、手術、訓練（リハビリテーション）が選択されるが、医学・医療の世界には未だ不確定の要素が多く含まれている。現実の医療は患者と医療者が情報を共有したうえで、最善と思われる道を選択して実行する医療（インフォームド・コンセントに基づく医療）なので、各人が健康と疾病に関して、相当の知識と判断能力を持つことが要請される。

人が健康に生きて行くためには、個人が個々の疾病に対処する他に、環境の整備が大切である。これには適切な食事と適度な運動や、手洗いの励行のように個人の努力でできるものと、下水道の整備、大気の清浄化、予防接種による疫病の防止など集団の努力でないとできないものがある。このためにも、一人ひとりの市民が、環境の問題を健康生活の維持という面から正しく評価・判断できるようになる必要がある。

人を取り巻く環境因子として、物理的環境因子、社会・文化・経済的因子、生物学的因子、さらには人間関係などがあげられる。健康の維持には、誕生から老齢に到るまでの各時期に応じた適切な環境が必要である。特に心の健康には、発達段階の移行に伴う危機を乗り越えねばならず、社会的な対策と支援が講じられる必要がある。精神疾患では、生物学的要因のみならず、人を取り巻く生活環境、社会的葛藤状況の持続、発達のあり方など複合的な要因が関与していると考えられている。脳の画像診断や病理学的所見によってその病因を明らかにできるもの、脳内の神経伝達物質の働きが発病に関与しているもの、ある種の薬物が原因となるものなどが徐々に知られ始めているが、今なお未知の部分が多く、身体の疾病に比べて病因を解析することは一般に困難である。精神疾患の治療については、従来から薬物療法、精神療法、社会復帰活動の有効性が認められてきたが、社会活動への参加を目的として、社会資源の充実がおし進められている。精神疾患の回復において最も大切なことは、地域社会において精神疾患に対する偏見を排除し、温かい目をもって支持していくことである。

3.2.4 生命の倫理

（1）ヒトとしての倫理—個人としての倫理—

生命に関する科学と技術の目的は、様々な生命現象を科学的に解明することと、創出される生命操作技術を医療、食糧、環境、エネルギーなど広い分野で人間の福利向上の目的に利用していくことにある。この過程において、人間らしさとは何かを深く

考え、人間らしさからくる弱さを悟ることで生まれるのが、人間社会における個々人の行動規範としての生命倫理である。急速に進展しつつあるゲノム科学／遺伝子操作技術、生殖発生生物学／胚操作技術、高次脳科学／神経回路操作技術の三領域は、人間の本質についてより確かな科学的論拠を提供し、幅広い応用領域で生命倫理の捉え方に一貫性を与えるものと期待される。

人間の本質は、ヒトが進化する過程で併せ持つことになった個性と社会性の密接な相互関係の中で形成される高度の社会性にある。人間らしさにはコミュニケーション能力の高さや学習によってそれが強化できるという強さと共に、高度に発達した理解力や判断力であっても、感情や欲望などの影響を容易に受けてしまうという弱さもある。個性は価値観の多様性を、また、理解力や判断力の不安定性は価値観の揺らぎをもたらす。これらは社会や個人の進歩にとっては不可欠なことであるが、しばしば社会的合意形成を困難にする。このような事態を回避するには、専門家側は自分は特殊な素人であるという自覚を持って、非専門家に十分な情報を提供すると同時に他分野の意見を聞く必要がある。また、非専門家側もできるだけ情報が偏らないように日ごろから多くの専門家側の情報を聞き、相互の溝を埋める努力をしなければならない。

しかし、格差や価値観の開きが大きくなり過ぎると、このような努力だけでは対応できなくなる。このような人間らしさがもたらす事態には、人間は倫理・道徳に最高位の価値基準をおいて対処してきたが、20世紀後半になって生命科学技術の研究開発が本格化して医療分野に応用されるようになると、弱者である患者（被験者）の生命の尊厳が脅かされがちになり、「自律性、無危害、恩恵、正義」の四原則という人間中心主義的な狭義の立場の生命倫理が提唱された。これら四原則は医療が重視される社会では廃れることは決してないが、社会の変容によってその捉え方は変わり、ときには原則の対立や葛藤を生ずる。さらに、生命科学技術の応用が医療以外の分野に広がることで、社会環境や自然環境と生命との関連、未来世代への影響、心への介入などが配慮されるようになり、生物圏全体の調和を原則とする人間非中心主義的な広義の生命倫理に代わろうとしつつある。

今後は、四原則に矛盾や葛藤を起こすことなく柔軟な融合を図りながら、人間社会における個々人の行動規範を徐々に確立していく必要がある。そのためには、人間らしさからくる弱さを基軸とした生命倫理学の学問的体系化を図りつつ、科学的体系化へ向けた努力を続けねばならない。また、従来の四原則に全生態系の調和を加えた新しい生命倫理を普遍的な価値観として構築すべきである。そのような社会システムの

構築に際しては、生命活動を支える生物学の基礎知識のみならず、生態系などに関する基礎的素養をすべての人が備える必要がある。

(2) ホモ・サピエンスとしての倫理—生物種としての倫理—

人口の増加とそれに伴う農業生産や工業生産の増加が生物圏全体に大きな衝撃を与えていることはレイチェル・カーソンの『沈黙の春』(1962年)をはじめとして、繰り返し警告されてきた。地球環境の悪化を示す指標の一つは、急激な種の絶滅とそれに伴う生物多様性の危機であるが、現在進行している絶滅の速度は、過去最大のペルム紀末の大絶滅より2~3桁ほども速いと推定されている。そのすべてが人間の活動によるものではないにしても、これはすさまじい状況であると言わざるを得ない。最近、「持続性」という言葉を耳にすることが多い。生物の世界は本来持続性のある循環型である。例えば光合成と呼吸からなる系では、光合成によって二酸化炭素と水から糖と酸素を作り、呼吸によって糖と酸素を二酸化炭素と水に戻している。光合成と呼吸の調和さえとれば、太陽から光が届き、宇宙空間に熱を捨てられる限り、持続が可能である。しかし、全光合成産物の5%をヒト一種が消費するという現在の状況では、この系の崩壊すら招きかねない。

すべての現生生物が生命38億年の歴史を等しく背負っているにもかかわらず、ヒトというただ一種の生物のみが、これほど大きな影響を生命圏全体に及ぼしているという状況は、倫理的に許されるものではない。私たち人類は、自分たちも一生物種にすぎないという事実に立ち返り、人類社会と地球の行く末に対しての責任を自覚すべきである。

3.2.5 心豊かに生きるために—生命科学の立場から—

ヒトの成り立ちには他の動物と共通する点が多く、ヒト自身を理解するためにも生命科学の基礎的な知識は欠くことができない。これはまた、日常的に遭遇する食、医などの問題に対処するうえでも要求される素養である。同時に、膨大な数の現生生物種のなかにあつてヒトは極めて特異な存在であり、その特異さは脳の発達による。脳の発達は豊かな文化をもたらしたが、その帰結の一つとしてヒトの異常な増殖をもたらした。人口問題は人類が直面している食糧、エネルギー、環境などの問題の根幹であり、この問題の解決なしにはヒトの未来はない。

脳の発達は、飽くことのない消費の性癖をももたらし、人口爆発との相乗効果によって、生命というシステムを根底から破壊しかねない状況にある。このような傾向に歯止めをかけうるのもまた知性の力であり、それがかなわなければ、心豊かに生きる

どころか、生存すら危い。ヒトは自身をいみじくもホモ・サピエンス（知性のある、賢明なヒト）と自称しているが、人類は今、真にその名に値するか否かの正念場にさしかかりつつある。英知を結集して広い意味での生命「倫理」を構築することなしには、種として直面している危機を乗り越えることは難しい。そのような生命「倫理」の前提としても、生命科学の素養は要求されている。

3.3 物質科学

3.3.1 物質科学の考え方

物質に対応する英語はマテリアルないしマターであり、これはラテン語の母を意味する言葉に由来しており、母に属するもの、母から導かれるものを意味する。このことから、物質科学の対象とする物質が、根源的なものを包括しようとしている言葉であることが分かる。エネルギーの語源は、古代ギリシャ語の仕事を意味するエルゴンから派生したエネルゲイアであり、「仕事をする能力」、「活動、活動する、力強く働く」といった意味の言葉である。したがってこちらは古代も現在も忠実に同じ意味で用いられている。

物質科学は物質とエネルギーを対象とし、「具体的で認識しやすい物質の科学」であり、実験に立脚した科学である。物質科学の体系は、それ自身他の科学分野とは独立したものである。同時に物質科学は、科学全体の「基礎」としての役割を担い、特に生命、宇宙・地球、環境、技術との接点の多い分野である。

物質科学リテラシーのテーマとしては、

- (1) 物質に関する理解はどこまで進んだか。
- (2) 私たちの生活は、如何に物質科学の成果に支えられているか。
- (3) 地球環境を維持しながら、現在の安全で豊かな生活環境を維持するにはどのようなすればよいか。

の三つがあげられる。

物質科学リテラシーに関しては、下記の点も重要である。

- 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。エネルギー資源の源でもある。
- ② 物質科学が、現代の便利な生活の基礎にある。科学体系の知識だけではなく、科学的認識、科学をする思考とプロセスが重要である。すなわち科学を学ぶことで、論理的な思考のプロセスを身につけられる。人間の歴史は、物質およびエネルギー利用の歴史でもある。
- ③ 現実的生活の中での物質科学リテラシーの重要性の一側面は、安全で豊かな市民生活を送るためにも欠かせない。その立場から、似非科学についても触れるべきであり、さらに科学者の実像も知ってもらいたい。
- ④ 日本人独自の物質観である「循環」および「もったいない思想」に留意するべきであろう。床下を高くして風が抜ける家の作り、仕立て直しや染め替えなどによっ

て生地を何度も活かす和服、小さく折りたたむ扇子、夏の日差しや西日を遮る葦簀、風鈴の涼しげな音など、人の感性と結びついた物質観は、産業化および都市化の拡大によって失われかけているが、「地球環境の持続可能性」という課題の下に、新鮮な価値観として生れ変わろうとしている。

- ⑤ 日本（文化）の特徴を持った素材についても再認識すべきである。例えば、「身の回りで利用される物質」として、日本は伝統的に紙や木などの独特の文化を持っている。これらの物質を通じた伝統的考え方について物質科学の視点から見直すべきである。ここでは十分触れることはできないが、伝統文化としての物質系として、塗料（漆、朱）、接着剤（膠、糊、布海苔）、セラミックス（陶磁器）、建築資材（木材、竹、わら、檜膚、紙、漆喰）、食材（発酵食品、糠味噌）などが挙げられる。
- ⑥ 物質・材料は種々のレベルで、基礎科学としての面白さ・重要性の側面と日常的に用いられる材料としての二面性がある。

3.3.2 物質の始まりとその階層性

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。ヘリウムの大半は、宇宙開闢以来1秒（温度100億度）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。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。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。

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。今日の元素の考えが発展したのは、近代科学が始まった17世紀以降である。

原子は、陽子と中性子から成り立っている原子核の周りを電子が運動している複合粒子である。1904年に長岡半太郎が世界に先駆けて、正電荷を帯びた原子核の周りを電子が回っているという原子モデルを提唱した。その後、ラザフォードやボーアのモデルを経て、量子力学に基づいた今日の原子構造の理解が形作られた。原子の大きさ

は 0.053 nm から 0.1 nm 程度である (1 nm は 10^{-9} m)。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 (まとめて核子と呼ぶ) 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 る。原子核の大きさ (広がり) は 10^{-7} nm である。水素の原子核は例外で、陽子 1 個からなる。重い原子核では、原子核分裂によってその結合エネルギーが放出されて、より安定になる。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。

2007 年現在では 118 種類の元素が知られている。原子の種類、特に陽子の数が違うとそれらの原子およ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。例えば数グラムの煤は 10^{24} 個程度の炭素原子からなる。

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。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を高分子という。小分子の連結で決まる立体的な構造を 2 次構造という。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、より大きいスケールの構造が決められる。これを高次構造という。

逆に大きな方に目を向けると、宇宙にも階層構造がある。月のような衛星、地球のような惑星、太陽のような恒星、太陽系、銀河系などである。地球の質量は $M = 5.97 \times 10^{27}$ g、太陽の質量 (M_s) は地球の質量の約 33 万倍、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。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 = 1.5×10^{11} m とし、光が 1 年間に進む距離の 1 光年 = 9.46×10^{15} m を用いる。すると、銀河の大きさは 5 万光年、銀河団の大きさは 600 万光年、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 億光年である。

こうした物質科学全体のイメージは図 1 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言われる。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 1 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、1979年のノーベル物理学賞受賞学者グラシヨウが表現したものである。

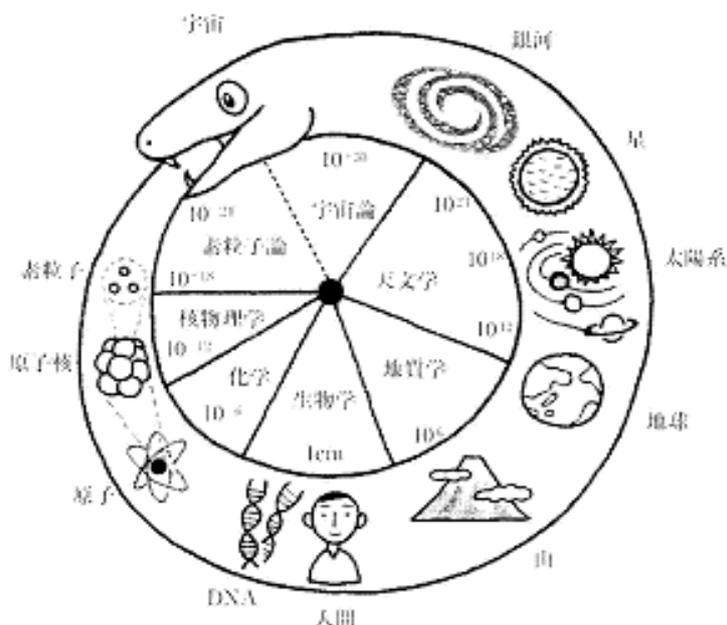


図1 ウロボロスの図¹²

3.3.3 物質の法則とエネルギーの法則

(1) 物質の法則

私たちの住む世界は、宇宙全体から素粒子に至るまで、確固とした物理法則にしたがって質量および長さに関して60桁に及ぶ物質世界の構造を持っている。

私たちの身の回りで目に見える程度の大きさを持った物体の運動は、ニュートンの運動の法則(古典力学)により記述される。一定の速度で運動している物質に対して、外部から力が働いてその方向が変化する。このことから運動の変化(方向や速度の変化、加速度)が力と結びついていることが理解できる。

原子や分子のスケールの世界の物理法則は、量子力学に従う。電磁波(光)の法則は電磁気学(マクスウェルの法則)により、また光速に近い物体の運動は、相対性原理(力学法則はどの慣性系においても同じ形で成立する)と光速不変の原理(真空

¹² 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。

中の光の速さは光源の運動状態に無関係に一定である)に基づく特殊相対性理論により記述される。一方、重力の法則を記述するのが一般相対性理論である。さらに一般相対性理論と量子力学とを統合しようというのが現在の理論物理学の一つの最先端である。超弦理論がその最も有力な候補と考えられている。すなわち宇宙の誕生を支配している法則は物質の基本構造を支配する法則であるといえる。

それぞれのスケールの世界で特徴的に働く力も階層性を持っている。原子核と電子を結び付ける電磁力、素粒子の間に働く弱い相互作用および強い相互作用(核力など)ならびに重力が自然の中の基本的な四つの力である。力の弱い方から重力、弱い相互作用、電磁力、強い相互作用の順になる。力も物質の始まりおよびその階層性と同じように、宇宙の始まりから階層的に進化してきたのではないかと考えられているが、物質科学として未完成の分野である。

原子を結びつけて分子やより大きな結晶、高分子を作る結合機構にもいろいろな種類がある。イオン結合、金属結合、共有結合などは強い結合であり、ファンデルワールス相互作用、水素結合などは弱い結合である。これらの結合は物質の凝集機構として、もちろん一つの物質中に共存していることも多い。物質が金属であるか半導体であるか、また絶縁体であるかなど、どの結合機構が主であるかによって決まる場合も多い。

(2) 物質の変化とエネルギーの法則

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、あるいはどれか一つのみの安定した相で存在する。

原子や分子の運動は、温度によってその状態が変化する。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。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。固体が液体に、液体が気体に変わること(あるいはその逆)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、原子密度はさらに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。固体から液体、気体から液体、固体から気体という相転移では、融解熱、気化熱、昇華熱などの熱エネルギーの出入りを伴う。

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、物質中の原子や分子の結合状態が変化して新たな物質に変わる。化学変化の場合には、エネルギー

一を放出（発熱反応）するものと、吸収（吸熱反応）するものがある。反応の進行過程では、活性化エネルギーと呼ばれるエネルギーの山を越さねばならず、そのために外からエネルギーを供給する必要がある。実際に用いられる化学反応では、触媒と呼ばれ生成する最終物質には関係のない物質を用いて、活性化エネルギーを下げ、反応速度を高めることが行われる。触媒反応は、工業において計画的に使われるだけでなく、光合成を含む多くの生体反応の中で自然に働いている。

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なくなるとき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（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）、この運動エネルギーは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。発電機は回転エネルギーを電気エネルギーに変換する。最初の高いところにある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にある水を水蒸気に変えたことによって得られたものである。

エネルギー変換には熱の出入りが伴う。あるエネルギーをすべて熱に変えてしまうことは簡単だが、熱をすべて他のエネルギーに変えることはできない。例えば上の例では、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、熱エネルギーとして利用する以外には利用できない。そのためエネルギーの利用に当たっては、エネルギー効率という概念が重要である。

熱の移動の現象は熱力学のエネルギー保存法則に従う。仕事として取出すことのできるエネルギー量に関して、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。これは情報科学における情報量という概念に利用されている。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。

（3）物質と場の相互作用

私たちの物質世界では、物質、エネルギーに加え、場の概念が重要である。通常、質量のあるものだけでなく、質量がない光も物質の中に加える。光、あるいは電磁場が場の典型であり、重力場も重要である。また弾性体では歪の場、流体では流れの場などを考える。場は物質と様々な形で相互作用をする。またたくさんの電子のある状

態を場として記述することもある。それは、量子力学では複数の電子の一つひと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。

(4) 物質の性質

原子の種類は全部で 100 余りに過ぎないが、これらが組み合わせられて集合すると、その組合せや構造によって様々な性質を持った物質ができ、その種類は無数にある。特に高分子物質の性質は、構成元素の性質ではなく、高分子物質の構造で決まる。

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でできる電子（自由電子）の存在によっている。自由電子がなく、電気を伝えない物質が絶縁体である。半導体も絶縁体である。しかし半導体の場合には、不純物元素を添加することにより、自由電子または電子の抜けた状態である自由に動き回る正孔をごく僅かに導入することができ、これらが電気伝導を担う。添加不純物濃度により自由電子や正孔の数を制御することができる。私たちの便利な生活を支える電子デバイスには、この半導体が広く素材として用いられている。

磁場を加えると磁気を帯びる性質が特に大きい物質が磁性体である。磁性体の性質は個々の原子（電子）が磁石としての性質を持つためである。強磁性体では磁場を加えなくて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持つ。強磁性体は非常に多くの目的に応用されている。また新しい磁性体が見出され、あるいは人工的に作られている。

電場を加えると電気を帯びる性質が特に大きい物質が誘電体である。物質はプラスの電荷を持った原子核とマイナスの電荷を持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。強誘電体は、電場の中に置かなくてもそれ自身が電気分極を示す。

3.3.4 人工物質：物質科学の最先端と私たちの生活

(1) 人工物質：物質科学の最前線

人類の歴史は、物質利用の歴史であるといっても過言ではない。人類の歴史は、自然の中での物質採取に始まり、石、鉄、シリコン、化合物の利用の歴史であり、あるいはエネルギーとしての、火、蒸気タービン、ガソリンエンジン、原子力エネルギーの利用の歴史でもある。食料および伝統的な物質・材料を別にすれば、多くの場面で利用する物質は自然に得られるものそのものであることは少ない。

天然には存在することのない人工物質（新しい化合物や、人工的に作った構造）の代表的な例は半導体の電子素子に多く見られる。例えば二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。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。コンピュータをはじめとする情報処理装置にはシリコンを母材とするトランジスタ回路が大規模に集積されている。このシリコンは自然に採取されたシリコンでも、純粋なシリコン結晶でもない。

情報処理の高速化と大容量化は、情報処理を行う個々の素子（トランジスタなど）を数十 nm 以下の大きさにすることを要求し、ナノテクノロジーと呼ばれる分野を切り開いてきた。ナノテクノロジーは、ナノメートルサイズを原子や分子から作り出す技術、元の物質を小さくしていったナノメートルサイズを得る技術、微小な領域の構造を制御する技術など様々で、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。

情報記録媒体としては磁気ディスク、情報伝送としては半導体レーザーとその光パルス信号を伝える光ファイバーのシステムが用いられている。

人工物質はこれまで私たちが自然の中に見出せなかった現象を見るということも可能にした。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ックス、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の材料開発が行われている。

生体物質は、無生物にはない優れた機能を持っている。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が急速に発展しつつある。また遺伝子を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、食品や医薬品などの分野への応用が研究され、拡大している。

タンパク質、糖質、脂質はエネルギー源、生体構成物質として生命を支える重要な物質である。特に、タンパク質は生体高分子であるが故の特徴ある構造と機能を持つ。生体反応の触媒が酵素である。日本では古来、カビや酵母、細菌などの微生物を利用して日本酒、納豆、味噌、醤油などの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。

(2) 材料

人間の利用意図が反映される物質を材料と呼ぶ。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、純化や機械的な成形を経てその材料特性が活用されてきた。衣と住の分野においては有機材料が主流を占めている。食に供される素材はほとんどすべて生物起源である。近代科学技術の発展により、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。

近年、持続可能な発展が世界的な関心事となり、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。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。

3.3.5 エネルギー資源と物質資源

(1) 地球環境と物質

電磁波で放射される太陽エネルギーの一部は、地球表面で反射され、再び宇宙空間に放射される。残りは、地球上の固体や液体、気体の物質に作用して、様々な物理的变化や化学変化、生物的变化、および、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。

もし地球に大気が存在しなければ、地上付近の温度は -19°C くらいになると計算される。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吸収するため、地上付近は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。しかし温室効果が強まると、大気の温度が上昇し地球の温暖化を進めることになる。特に水蒸気は量が多く重要である。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(1800年の200 ppm程度から2000年の370 ppmまで)急激に上昇しており、この主な原因は化石燃料の大量消費など人為的な活動であることはほとんど確実であると考えられている(気候変動に関する政府間パネル(IPCC)「第4次評価報告書」(2007年))。

エネルギーを生み出せ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年代の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、全体の11%は原子力である。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。

地球環境に配慮した快適な日常生活を維持するためには、大部分を化石燃料に依存し続けることはできない。小規模の水力発電や、バイオエネルギーなどの再生可能エネルギーなど、エネルギー利用の多様性を目指し、技術開発によりエネルギー効率を上げると共に、「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。

(2) 環境と安全性

科学技術の利用に当たっては、エネルギー・環境・経済原理の間のバランスに配慮するなど、生態系を包括する視点が不可欠である。エネルギー源の正確な理解、生態系のなかでのエネルギー消費と環境負荷の関係・炭素の循環サイクル・窒素の循環サイクル・食物連鎖・リスク評価などといった相互関係を持続可能な技術の観点から理解し、認識する必要がある。食品の安全性、住環境の安全性、医薬品・健康維持関連物質に関わる安全性などに関する正しい理解も重要である。環境保全のための市民の役割の重要性も認識する必要がある。

3.3.6 物質科学の新たな展開

人間は、みずからを取り巻く物質界を理解しようとして、視覚、聴覚、触覚などを頼りに、様々な観察や測定を行った。明るさや形、大きさ、距離、重さ、ものの堅さ、音などを観察し、同じ物、類似した物、違う物を識別する博物学として物質科学も出発した。そのうちに五感に頼る限界が認識され、虫めがねから望遠鏡や顕微鏡、また時計などを作り出し、観測や観察の範囲や精度を飛躍的に進展させてきた。物量的な計測と平行して規則性を見出し、数式の助けを借りて、物質を支配するいくつかのレベルの法則ができあがった。こうして生命体を構成する物質の理解、人の五感そのものの物質科学的理解も進み、自分自身を知ることにもつながってきた。

深まった自然の理解に基礎を置き、自然に得られる材料およびエネルギーを効果的に開発してきたのが人間の歴史である。さらに獲得した知見と物質観を基礎に、天然自然にない優れた性質を持つ人工物を開発し、今日の人類の豊かさの礎を築いている。

物質に関する知識の蓄積と新たな概念は、私たちの文化一般にも大きな影響を与え、新しい思想を形作ってきた。

このように豊かな文明を築いてきたその舞台となっている地球という星の環境を持続しつつ、さらに豊かで安全な生活を発展させていくことが、物質科学の課題に新しく付け加わった。

3.4 情報学

情報学は非常に広い領域にまたがる。ここでは、科学技術リテラシーに関連する情報学である情報を扱う科学技術（情報科学技術と呼ぶ）について述べる。情報科学技術は、1940年代のコンピュータの出現から急速に発展し、今や私たちの日常生活に欠かせないものとなってきている。ごくごく限られた人たちだけが使うことのできる超高価な装置であったコンピュータが、家庭で普通に使われるようになりつつある。また、あらゆる機器に組み込まれ使われるようになってきている。

コンピュータとコンピュータ間の通信により、一般の人々でも様々な情報を活用する手段を持てるようになってきた。世界中のニュースや記録の中からほしい情報を探し出してくることができるし、これから出かける先までの安くて速い交通経路を知ることができる。現金を持たずとも買い物ができ、自宅から株の売買もできる。

一方、様々な機器の中に埋め込まれ、有線・無線で互いに連携して動いているコンピュータも多い。例えば、現在の乗用車には、多数のコンピュータが制御のために使われている。通勤・通学定期として使っているICカードにもコンピュータが入っている。

こうしたコンピュータとコンピュータ利用の爆発的な拡大と急速な浸透には、装置（これを総称してハードウェアという）の進歩と共に、コンピュータやコンピュータ群を正しく有効に利用するための仕組み（これを総称してソフトウェアという）を作り出すための科学技術の進歩が必要不可欠であった¹³。その科学技術が「情報を扱う科学技術」（情報科学技術）である。

利用の仕組みという実感はわきにくいかもしれない。コンピュータや通信あるいはその関連の情報機器は人々の目にふれるものであり、実感もわく。けれども、それを利用するための科学技術である情報科学技術は隠れた存在であるために、人々の認識も薄く、機器の開発が情報科学技術だと誤解されることが多い。機器も重要だが、目に見えない利用技術も大切なのである。

また、利用技術というと、車の運転技術のような機器の操作と誤解される場合も多い。利用技術といっても、高度な数理科学の研究とみなせる面もあれば、社会科学や人間科学と言ってよい部分もある。実例を示そう。1997年にディープ・ブルーと呼ば

¹³ 情報処理はハードウェアからソフトウェアまで緊密な関係のもとに行われる。したがって、そのうちのソフトウェアの開発だけが情報科学技術ではない。しかし、本稿では話を分かりやすくするために、敢えてこのような線引きを行う。

れるスパコンがチェスの対決において、人間の世界チャンピオンに勝利した。1秒間に2億手を読むという卓越した計算力が重要だったことは確かだが、ただそれだけでは一流のチェス選手にすらなれない。過去の棋譜を自動分析し、戦略を立てる計算メカニズムが鍵を握っていたのである。それがこの場合の利用技術である。スパコンの設計の中にも、もちろん情報科学技術がふんだんに盛り込まれているが、たとえ、スパコン自体を機器とみなしたとしても、その上に、チェスを行うための高度な利用技術が展開されたから世界チャンピオンに勝てたのである。

情報科学技術にはいくつかの特質がある。その特質のお陰で、昨日夢物語であったことが今日は現実になるほどの急速な進化が可能となった。しかしその一方で、その特質は、最近ときどき問題になる情報関連機器の誤動作の原因にもなっている。その特質とは何か、それがなぜ爆発的なコンピュータ利用を産み出したのか。そして、それが情報関連機器の誤動作の発生にどのように関わってくるのか、を説明していこう。

情報科学技術は、その変化が早く、個人や社会に与える影響も大きい。その変化や影響に流されることなく、情報科学技術をみずからの生活の中に上手に取り込み、みずからの知的活動が広がることを楽しみ、新しい社会の仕組みに参画していくには、その根幹にあるものを知っておくことが欠かせない。

ここでは、情報科学技術の基本原則、そして知っておくべき要点を箇条書きで示していく。これらを押さえておけば、次々と現れてくる新しい事柄にもみずから考え学んで対応していく心掛けを失うことなく、この科学技術の発展の中でも心豊かに過ごしていけるだろう。

3.4.1 情報科学技術の基本原則：デジタル化と計算化

情報科学技術は、デジタル化と計算化という二つの基本原則の上に成立しているといつてよい。この二つの原則の説明からはじめる。最初は次の原則である。

その1：すべての情報は0と1の列で表すことができる（デジタル化の原則）

情報には本来形がない。人は、それを伝え、記録に残すためにデータという形のあるものにしてきた。そのデータが情報処理の対象となるものであるが、それを0と1の列、すなわち2進列として表すことを、ここではデジタル化と呼ぶ。このデジタル化ができる、という考え方がデジタル化の原則である。もちろん、データによっては近似でしか表せない場合もあるが、その精度を目的に応じて高めることができる。その点まで含めて、すべてのデータは（非常によい精度で）デジタル化できるという主

張が、デジタル化の原理である。

原理と称したが、これは自然界の法則のように自然に成り立っているものではない。この原理に向けて、様々な情報科学技術が駆使され、その成果として実現され、実証されてきた原理なのである。

一例として、画像や音のデジタル化の概略を示そう。白黒画像は、例えば、図2(左)のように白点○と黒点●を並べることにより描ける。これは12行17列なので、とても粗くて精密な絵は描けないが、右(256行256列)ならば、かなり絵らしい絵が描ける。この白点、黒点を1と0で表せば、白黒画像の2進列表現が得られる。

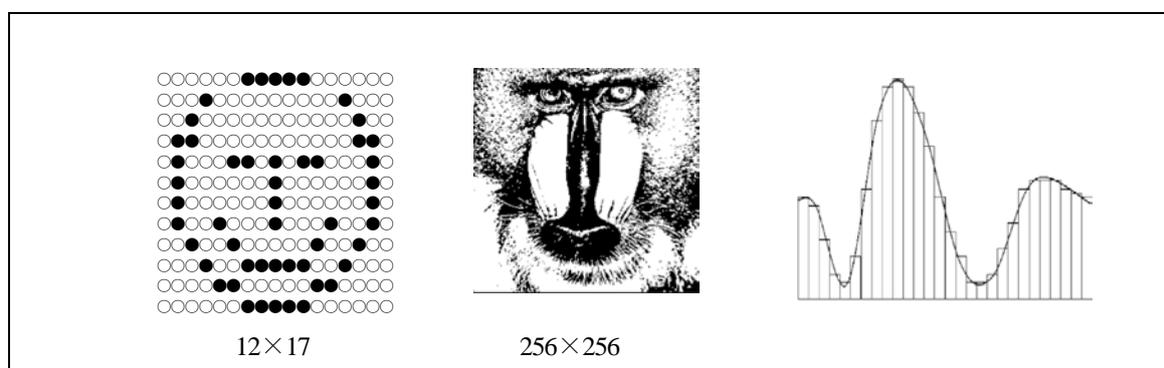


図2 画像や音のデジタル化

音は、時々刻々変化する電気の強さで表される。直感的には図2(右)のような波である。横軸が時刻、縦軸がその時刻での電気の強さである。音の高低は波の山の多さ(単位時間あたりの振動数)で決まる。一方、波の高さは音の大きさである。この波を階段状の棒グラフで近似し、その高さを表す数値列(これは2進数として表すことができる)で波を表すのである。

このデジタル化の原理については、もう少し踏み込んだところまで述べておこう。元のデータがアナログデータの場合、デジタル化はその近似を与えることしかできない。そのため、アナログデータの大切な情報が失われる場合もある。そのことから、「デジタル化の原理の上に成り立っている情報科学技術は不完全だ」と無闇にアナログ信仰に進むのは危険である。デジタル化の原理の大切なのは次の点である。

その2: デジタル化では必要な精度で近似が可能。ただしコストは必要

例えば画素数を増やすことにより、より精密な近似が可能なのである。ただし、それにはコストがかかる。画像でいえば、縦横の画素を3倍にすると、画像の表現に必

要なデータ量は $3^2 = 9$ 倍となる。一般にも、精度を x 倍にしようとする、その 2 乗のデータ量や処理時間がかかることが多い。

そのため、近似の精度は、そのときの技術的、経済的要請に基づいて決まり、一般の利用者にはコントロールができない場合がほとんどである。しかし、そのためにアナログ信仰に進むのは無意味であること、本当に必要であれば、必要な精度だけデジタル化ができることを知っておくべきだろう。

逆に無闇に精度を上げて意味がないことも少なくない。精度を上げることは一般人には無理な場合が多いが、下げることは十分可能である。最近のデジカメの精度は、その三分の一でもスナップとしては十分な場合が多い。友人に送りたい写真の精度を三分の一にするだけで、通信時間や通信コストが約九分の一になる、つまり約 89% も削減できるのである。

二つ目の原理である計算化の原理は馴染みが薄いかもしれない。

その 3 : すべての計算は単純な計算の組合せで実現できる (計算化の原理)

デジタル化されたデータを生成したり、加工したりする処理は、実は、非常に単純な計算の組合せで実現可能なのである。具体的には、デジタル化されたデータを数字だとみなすと、それに対する処理は、すべて、

- (1) 自然数に対する +1、-1 の計算、そして
- (2) 変数の値が 0 になるまで指定した作業を繰り返す

という基本計算の組合せだけで表すことができる。このように (1) と (2) の組合せで表すことが計算化である。すべての処理が、このように非常に単純な計算の組合せで実現できる、というのが計算化の原理である。

この計算化の原理についても、もう少し踏み込んだ知識を述べておこう。(1) と (2) の組合せを記述したものをプログラムという。

その 4 : プログラム自身もデータとして処理でき、その処理自身も計算化できる

計算化の原理で重要なことは、プログラム自身もデータとして処理でき、その処理自身も計算化できるという点である。

プログラムも 0 と 1 の列として表すことができ、そのプログラムの通りの指示を解釈・実行すること自身も (1) と (2) の組合せで実現できるのである。この特徴を強調して、計算化の原理は、プログラム化の原理と呼んでもよいだろう。

プログラム化の原理により、プログラムを実行する計算を行う装置さえ作っておけば、あとはプログラムを変えることにより、すべての処理をその装置が行うことが可能になった。それが現在のコンピュータなのである。

基本原理の説明の最後に、もう一点重要な注意を述べておく。アナログデータへのこだわりは危ないと述べたが、デジタルデータへの過信も危ない。デジタル化されたデータ自体は何度コピーしても消耗しない。また計算化の原理で示された基本演算を見ても誤差が出てくるように思えない。

その5：デジタルデータでも処理の過程で誤差が生じることがある

しかし、デジタルデータといえども、処理の過程で誤差が入る場合がある。これは、実際の計算では限り有る記憶領域を使って計算しているからである。さらには、データ量を下げたための近似を行っている場合もある。したがって、「デジタルデータは処理過程で誤差が生じることはない」というのはデジタルデータに対する過信である。

3.4.2 基本原理に起因する情報科学技術の特質

基本原理から直接導かれる特質で最も重要なのは、情報処理は電子回路により実現できるという点だろう。0と1ならば、電気のオンとオフ、電圧の高低、あるいは磁石のNとSで表すことができる。2進列の表現は、これを組み合わせればよい。さらに0と1に対する基本演算だけであれば、比較的単純な電子素子で実現できる。このことが、コンピュータの出現へとつながったのである。

電子回路による実現は、処理の高速化につながる。また、情報処理という大きな応用領域を創出したことは、電気電子技術の飛躍的な発展の原動力となった。その相乗効果により、情報処理を実現する機器の高速化、小型化、低価格化が進んだのである。

この情報機器の飛躍的な発展に貢献した特質がもう二つある。デジタルデータのメディア非依存性、そして情報処理の汎用性である。

これまでは、文書ならば紙に、写真ならばフィルムに、音楽ならばレコードあるいはテープに、とデータごとにそれを保持・伝達する媒体が決まっていた。しかしながら、すべてのデータを0と1で表すというデジタル化の原理が実現された結果、すべてのデータを単一の媒体で保持・伝達することが可能となったのである。これが媒体（メディア）への非依存性である。

さらに、そのようなデジタルデータを処理する機器も、対象によって変える必要がなくなった。逆にいえば、一つの機器で様々なデータを処理できる、という情報処理

機器の多重利用法が生み出されたのである。携帯電話で、電話はもちろんのこと、メールや写真、そして財布まで兼ねることができるようになったのも、この多重利用法のためである。このメディアと情報処理機器の多重利用法がコンピュータの利用を飛躍的に伸ばした要因の一つである。

情報処理機器の多重利用法には、データの汎用性だけでなく、プログラム化の原理も重要であることを指摘しておきたい。データだけでなく処理自身も同一の機器でできる（詳細はプログラムで指示）という点が必須だったのである。

汎用性が高いのは機器だけではない。その利用技術である情報科学技術にも、むしろ機器以上に、高い汎用性が見出されている。例えば、2進列中に与えられたパターンを見つける高速計算法が発見されたとする。それは、文書中の用語の検索などに使えるが、写真の検索や、音楽中のあるフレーズの検索にも使用できる。それを可能にしたもとは、デジタル化の原理だが、後に述べるような抽象化や仮想化の手法や、計算（処理）を科学的に分析する研究が大きく貢献している点も付け加えておこう。

この汎用性という特質により、多くの異なる分野のための機器や情報科学技術の開発を、ある程度共通に行うことが可能となり、開発のために、資金や人材を集中して利用することができた。その結果、非常に多くの改良が短期間に実現され、小型で安価な機器とその上に載るソフトウェアが続々と登場した。これもコンピュータが爆発的に使われるようになったもう一つの要因である。

その6：汎用性のために、データや処理の意味が見えなくなる可能性がある

デジタルデータや情報処理の汎用性には、問題点を生み出す要因もある。多少分かりにくいかもしれないが、一言で言うと、汎用性のために、データや処理の意味が見えなくなる可能性がある、という危険性である。

例えば、昔は電話器は遠くの人と話しをするためのものであり、写真機は写真を撮るための機器だった。用途ごとに機器が異なっていたのだが、汎用性による機器の多重利用法のお陰で、一つのケータイで事が済むようになった。それは便利ではあるが、処理の分かりにくさの要因になっている。一つのボタンが、シャッターにも、通話スイッチにも使われるからである。

デジタルデータの分かりにくさが最も極端な例だろう。0と1の列を見て、それが何を意味するかが分かる人はごく稀である。通常はデジタルデータを解釈する機器とソフトウェアがなければ（人間にとって）意味をなさない。また、デジタルデータのどの部分が本当に重要なのかも大抵は分からない。一箇所でも狂っていたり欠けてい

ると、膨大なデータ全体が意味をなさなくなることもある。

こうした問題は、ソフトウェアの誤用を招く原因にもなっている。しかし、対処は可能である。要するに、情報機器やソフトウェアの開発者や、それを導入する立場にある人々が、汎用性や多重利用法を安易に使わないよう注意することが肝心である。誤りが起きないような、場合によっては情報弱者ができないような工夫も必要だろう。

また、利用者もデータを区別する道具（ソフトウェア）をうまく利用するとよい。昔は、写真ならばフィルムに、文書ならば紙が使われていて、それでデータを区別できた。紙を渡されたならば、それが書類であり、フィルムではないことは、誰でも理解できたからだ。現在でも、同じデジタルデータであっても、フィルムなのか書類なのかがすぐに分かるような区別ができればよく、その分別のための道具（ソフトウェア）をうまく使えばよいのである。しかも、昔は技術の必然性から来る区別だったが、現在は、それとは独立に、利便性からの分別を自分なりに導入できるのである。

3.4.3 情報科学技術に共通する仕組みと特質

基本原理は単純だが、それを実現していくのは容易ではない。情報科学技術の分野では、デジタル化と計算化を現実化するために、また、その特質を最も生かすために、様々な理論研究や技術開発が行われてきた。その内容は、非常に具体的な工夫から高度な数理科学の理論構築まで多岐に渡る。ここでは、その詳細を述べるよりも、多くの情報科学技術に共通する仕組みとそれに起因する特質を述べる。

計算化の原理では、すべての処理がごくごく単純な処理の組合せで実現できることを述べたが、非常に複雑なソフトウェアを、そのような単純な処理だけで組み立てるのはほとんど不可能である。実際には、こうしたソフトウェアの構築には、もっと高度な処理を行う部品が場面や用途に応じて使われている。では、それらの部品はどのように提供されるのか。そのような部品もソフトウェアとして、プログラムで提供されるのである。さらにその部品の中では、もう少しレベルの低い、けれども +1 や -1 のような演算よりは、はるかに高度な処理を行う部品が使われ、それも別のソフトウェアで提供されている。連鎖が、提供されるコンピュータの基本命令に基づいて作られるソフトウェアに到達するまで続く。これがソフトウェアの階層化である。

このソフトウェアの階層化を上手に行うための考え方が、抽象化と仮想化であり、多くの情報科学技術では、この抽象化と仮想化を実現する仕組みが取り入れられ、用いられている。

階層化で重要なのは、下位の部品とそれを使う上位のプログラムとの関係である。

その際、下位の階層で作られた部品の仕組みが重要ではなく、どのような状況で、どのような処理結果を出すか、という仕様だけが重要である。つまり、同じ処理結果を出す部品ならば、いつでも別の部品に入れ替えることができるという点である。この考え方が（処理の）抽象化である。さらに部品群を備えたソフトウェアによって、それらが実現する機能をそなえた装置をあたかも提供しているような環境を用意することが仮想化である。

部品の仕様を明確にし、抽象化を確実にしておけば、同じ仕様を満たす部品との組合せが自由にできる。それが様々な情報科学技術の開発に大きな自由度を与えているのである。例えば、従来と同じ仕様を満たす部品で、さらに従来にない機能を持たせた部品を提供することで、これまでのシステムも同時に生かしながら、新たな利用法も提供できるという拡張ができる。この機動的な拡張性が、情報科学技術の変化の速さという特質の一因にもなっている。ただし、実際には仕様を明確にし、それを確実に合わせることは非常に難しい。

その7：仕様を合わせるのはソケットを合わせるようなもの。ただし、そのソケットの形がとても複雑で、微妙に異なることが多い

比喩的に言えば、仕様を合わせるのはソケットを合わせるようなものである。ソケットと言っても複雑なので、とても図形では表せない。どちらかというとな法律のようなものである。例えば、民法では「成人」とは何かを条文で規定している。ソフトウェアでも、そこで使う〇〇という機能は△△である、と明確に規定する必要がある。それが仕様である。仕様が厳密でないと誤りが起きる可能性があるが、厳密にしようとすればすぐに複雑になってしまう。法律でも民法のように条文数が1000以上にもなるものがあるが、少し大きなソフトウェアの部品に対する仕様を正確に書くと、それに匹敵するくらいの複雑さになる。法律ならば一つで十分だが、ソフトウェアの場合には、それをソフトウェアごとに作らなければならないのである。

ソケット（仕様）が合わないために、優れた部品でも利用できないという状況も比較的頻繁に起きている。さらに問題なのは、多少違っていても動いてしまう場合も多々ある、という点である。通常の機器の場合、少しでもソケットが違っていると動かない。けれどもソフトウェアの場合には、その違ったところが実際に使われない限り動いてしまうことが多い。もちろん、様々な手段で誤りを確認しているが、完璧なチェックは難しい。

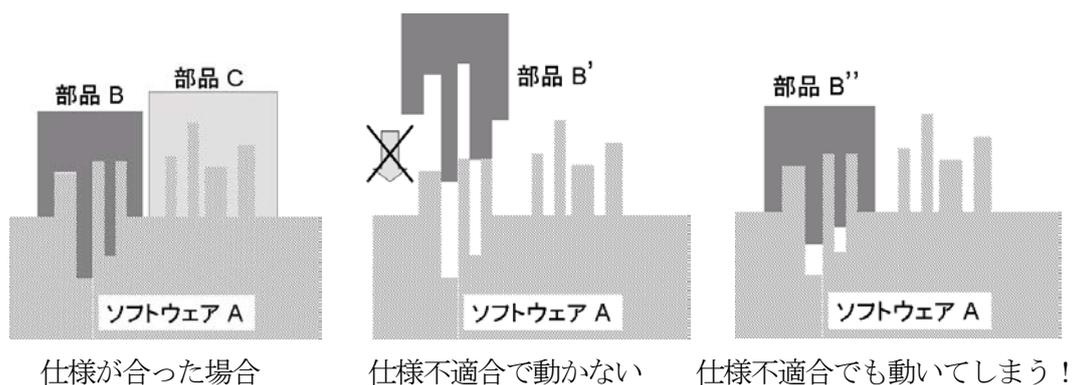


図3 部品の仕様の適合・不適合

その8：情報科学技術の成果物（例：ソフトウェア）は、いろいろな事情で、完璧ではない状態で（そのことを知らずに）実際に使われている場合がある

私たちは、情報科学技術の成果物（例：ソフトウェア）は、いろいろな事情で、完璧ではない状態で（そのことを知らずに）実際に使われている場合があることを知っておいた方がよいだろう。また、こうした問題点は、ソケット（仕様）の不適合による場合が多いことも知っておいた方がよいだろう。新たな要求のために部品が急ぎ作られ、組み込まれたときに、仕様の不適合が見過ごされたまま使用されることが起きるのである。それが自動改札装置が一斉に誤動作を引き起こすような事故の要因となっている場合が多いのである。

3.4.4 情報科学技術リテラシーの大切さ

情報科学技術の基本原理と仕組み、それらに起因する特質を簡単に解説してきた。最初にも述べたが、これまでの説明を振り返り、再度、「コンピュータに載せること」の意義と問題点を実感しておくことの必要性について述べる。

例えば、前に述べたように、ソフトウェアの多くが完璧ではない状態で使われている。しかし、「それは問題だ！」と叫んでストップすることはできない。どこまで検証ができればよいか、それに支払う対価はどこまでならば許せるのか、というトレードオフを考えねばならないのである。そのためには、トレードオフを考える立場にいる人々が、情報科学技術に対する正しい認識を持つ必要がある。情報科学技術の担い手の仕事に対する正当な評価も重要である。例えば、正確に仕様を書くこと、それに従

ったソフトウェアを構成すること、ソフトウェアの不具合を分析し隠れた問題点を見出すこと、等々、相当の能力が必要なのである。

個人レベルでも、情報科学技術に対する誤解が、多くの人々へ被害を与えることもある。情報科学技術の特質である高速性や自己増殖性は、個々の影響力をこれまでよりはるかに大きくしてしまう場合があるからである。

「知らねば困る」という点がある一方、「知っている」と豊かに暮らせる」という面も多くある。コンピュータを用いることで、今まで到底扱うことのできなかつた大量の情報を処理・分析できるようになる。そのことから、またコンピュータに載せるという手法から、新たな視点、新たな方法論が生まれてくる可能性があることを知っておくとよいだろう。そこまで深く入り込まなくても、情報科学技術の基本を知っているといろいろと便利である。情報科学技術は単純な操作の組合せであり、多くの場合、それを修正・変更することも可能である。つまり、その仕組みさえ分かれば、誰もが自分流に改変することが可能なのである。情報科学技術の速い変化に惑わされることなく、自分流に情報科学技術を使っていくすべを得るためには、そう多くのことを学ぶ必要はない。興味を持ち、接してみることも重要なのである。明るい豊かな未来をデザインしてみたいはいかがだろうか。

「コンピュータに載せる」こと ⇒ 新たな視点

情報科学技術の基本原理を実現する、ということは、簡単に言えば、様々な対象をコンピュータもしくはコンピュータ群で利用できるようにすることである。これがいわゆる「コンピュータに載せる」ということである。

例えば、国語辞典をコンピュータに載せる場合、辞典をそのまま文字列にしてデジタル化することもできる。しかしそれでは紙で書かれたものと大差ない。コンピュータの計算力を最大限に使った分析ソフトウェアまで提供して、はじめてコンピュータの上に乗せた、ということになるのである。

そのためには、国語辞典の構造の分析が必要になる。通常の国語学の分析とは異なるコンピュータによるデータ解析の視点化からの分析である。それが国語学の新たな知見の発見につながる可能性がある。計算化を通して新しい点がみえるのである。

ただし、六法全書のように複雑な対象の場合、どうしても人間が構造化をしていかなくてはならないだろう。その場合、かなり複雑な作業になるため、間違い、あるいは、誤解による誤った構造化を防ぐ工夫が必要である。どのようにすれば複雑な構造を、人に分かりやすく表すか、が重要となってくるのである。また、人での作業の誤りを減らすための補助システム、検査システムの開発も必要だろう。

本質的に複雑なものを複雑なまま（場合によっては、利用しやすいようにさらに複雑にしつつ）デジタル化し計算化するための、表現法や支援方法が重要となってくるのである。

3.5 宇宙・地球・環境科学

地球上の身近な自然現象や遠い宇宙の構造・現象に思いをはせると、様々な疑問が湧いてくる。そうした現象を理解することで、科学的な物の見方・考え方の面白さが味わえると同時に、リテラシーも養われる。

3.5.1 気象・気候と海洋

(1) なぜ気圧分布から天気を予報できるのだろうか

近代科学の成立した17世紀以降、ガリレオやパスカルらによって地球上の空気全体の質量が重力の作用下で、気圧という形で捉えられるようになった。その後、気圧計による日々の観測から、気圧と天気の関係が経験則として確立するに至った。これは雲の振舞いや風の吹き方を目で観察して行われてきた古代からの観天望気^{かんてんぼうき}とは本質的に違う自然現象の把握だった。

さらに、ボイル・シャルルの法則のような気圧と気温の関係、ニュートン力学のような圧力差に伴う運動の原理などに基づいて、大気現象を物理法則の目で解釈説明することが可能となった。

天気図に見られる地球上の気圧分布は時間的にも空間的にも一様ではない。

水平の気圧差による横向きの力は地球の自転に伴うコリオリの力（転向力）とつり合う形で風速風向が決まる。それに地表面の摩擦力が加わって、低気圧に吹き込む風が上昇流を引き起こし水蒸気の凝結（雲と雨）をもたらす。低気圧、高気圧を形成する渦運動は背景となるより大きな偏西風によって流される。気圧場を知ることによって天気の予測が可能なのは、このような原理に基づいている。現代の数値予報はこの原理の精密な技術化と言える。

(2) どんなメカニズムが気候を決めているのだろうか

気候とは地球上の緯度や海陸分布に応じた天気天候の長時間にわたる平均状態を指す。その基本となる物理量は温度（気温）であり、それを決めている原理は、地球が受け取る太陽からの放射エネルギーと地球自身が自分の温度に応じて赤外放射の形で宇宙空間に熱を放出することの兼合い（熱収支）である。

太陽放射の強さは太陽と惑星の距離で決まる。さらに地球の表面状態（陸面、海面、雪氷など）によって太陽放射の反射・吸収が決まる。

一方、地球から出ていく赤外放射は大気層によって一部遮蔽される。この一番分りやすい例は晴天時の夜間に気温の低下が激しい「放射冷却」であり、逆に全天が厚い

雲に覆われているときは地表面の冷却が押さえられ高温が保たれる。地球からの放射を決めているのは雲分布だけではなく、目には見えない水蒸気や二酸化炭素、メタンなどの大気組成濃度であり、地球環境問題ではこれらの組成が、温室効果気体として注目されている。

太陽放射の受け止め方は緯度によって異なる。受熱量は赤道域で大きく、北極や南極（極域）では小さい。もし大気が完全に静止しているならば極域の気温は現在よりもはるかに低く、赤道はもっと高温のはずである。このような赤道と極の温度差を現実の観測値のように成り立たせているのが、大規模な大気運動や海流による熱の輸送作用である。すなわち気候と大気大循環は不可分の関係にある。

（３）人間の活動は環境にどのように影響しているのだろうか

地球の気候は大昔から寒暖の変動を繰り返してきたが、ここ 100 年ほどの間に人間の産業活動が急激にさかんになり、それにもなって排出される多量の二酸化炭素で人為的な温暖化が引き起こされている。地球の平均気温が上昇すれば、例えば海拔の低い島国などが水没する恐れもあるため、二酸化炭素の排出削減が国際的な課題となってきた。

その前提として、地球温暖化に関する科学者の知見を総合的に評価するため、「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」が 1988 年に設立された。その報告書によると、20 世紀後半以降に観測されている気温の上昇は人為的なものであり、この温暖化が進行すれば世界各地で異常気象も増加する。このような評価をもとに、各国のなすべき具体策が「京都議定書」として 1997 年にまとめられたが、二酸化炭素を削減するには費用がかかり、また経済成長にブレーキをかける可能性もある。そのため、各国の利害が絡み、地球温暖化対策は、その主役の座がすでに科学から政治や経済に移りつつある。

（４）海と大気の運動はどのように影響しあっているのだろうか

大気の大規模な流れによって海洋の表層を流れる海流が引き起こされる。これは空気が海面をこすることによって海水が引きずられるためであるが、実際にはこれに地球の自転の効果（コリオリの力）が働いて、大規模な海流が流れるようになる。大気の大規模な流れには、日本付近の緯度を東向きに流れる偏西風、フィリピン付近の緯度を西向きに流れる貿易風がある。これらによって黒潮、湾流などの海流が引き起こされる。

一方、黒潮や湾流は、太陽で地球が暖められた熱を熱帯域から寒帯域に運搬する重要な役目を負っている。寒帯で黒潮は大気に熱を供給しているといってもよい。海は

含むことのできる熱の量が気体よりはるかに大きいので、気体との熱のやりとりの役割も大きい。

(5) 太平洋と大西洋にはどんな相違があるだろうか

太平洋と大西洋は単に広さが違うだけではない。海洋大循環の出発点である大西洋のグリーンランド沖から、その終着点である北太平洋に至る海水の運動は一周に 2000 年かかると言われている。つまり海水の運動がそもそも違っているのだ。

また、アジア・北米大陸の山脈の分布の違いが中緯度偏西風の蛇行に影響し、両大洋上での風系や降水量に相違が生じる。このことが双方の海水への淡水の供給量の変化をもたらしていて、大西洋の表層水は太平洋のそれよりも塩辛い。

3.5.2 奇跡の星・地球

(1) 地球とはどのような惑星だろうか

私たちが生きているこの地球は、太陽系の第 3 惑星であり、水星、金星の次に太陽に近い天体である。太陽という比較的長寿命の星のそばで生まれ、太陽のエネルギーをちょうどよい具合に受けて、水素と酸素の化合物 H_2O が、蒸気にもならず、氷ともならず、液体の水として存在し得る環境にある。太陽系には多くの惑星、衛星があるが、液体の水でできた海を持つのは地球だけである。すなわち地球は水の惑星であり、このような好条件にある惑星が誕生したのは奇跡のようなものだ。

地球の表面に海があったおかげで、そこに生命が誕生したのだろう。海に溶け込んだ様々な分子から、炭素、水素、酸素を主体とする複雑な構造を持つ有機物質が作られ、それが濃縮され生命物質のもととなるスープができたと思われるからだ。その原始スープのなかで、自己増殖するような生命体を作られたと思われる。

水はまた、地球の内部でも大きな役割を果たしている。地震や火山のような地球内部に原因を持つ大きな事件も、もとをただせば地球の中に水があるからこそ起きる現象ではないかと考えられる。まったく地球は不思議な天体である。

(2) 大陸が動くというのは本当だろうか

大陸が動くということを最初に科学的に提唱したのは、ドイツの科学者アルフレッド・ヴェグナー (1880~1930) という人である。今から 90 年も前のことである。彼はアフリカの西海岸と南アメリカの東海岸の海岸線の形がとてもよく似ていることに気づき、この二つの大陸はもともと一つの大陸で、これが後に分裂したのではないかと考えた。

この考えは、1950 年代になって、様々な地質学的、地球物理学的な観測から裏付け

られるようになった。各大陸に分散して存在している化石の種類、地層のつながりなどを説明しようとする、かつて現在の大陸が一つになっていた時代があったことを考えなくてはならないことが分かったのだ。また世界中の岩石に記録されている岩石磁気の研究、大洋底の地形や構造の研究、海嶺とよばれる大洋の真ん中にある海底火山脈の周辺の地磁気異常など、大陸が移動したと考えてはじめて説明ができる多くの事実が見つかった。これらのことから、大陸はマンテルの上に乗ったイカダのように、動いていくものではないかと考えられるようになった。

(3) プレート・テクトニクスとはどういう考え方なのだろうか

1960年代になって、大陸移動などの地球の変動を説明するのに、プレート・テクトニクスと呼ばれる新しい考え方が提唱された。これは、地球の表層が10枚ほどの厚さ80 km程度の固い岩板（これを板、すなわちプレートと呼ぶ）でおおわれており、このプレートが動くことによって大陸も移動するし、地震や火山が起こる原因となるというものである。プレートは海嶺で誕生し、海溝で地球の中に潜り込んでいたり、プレートとプレートが衝突してヒマラヤのような高い山を作ったりする。

プレートを動かす原動力はまだよく分かっていないと言えないが、海嶺で生まれた熱いプレートが、海嶺から離れるにつれて冷えていき、プレートが重くなってマンテルの中に落ちていくのが原因ではないかとする考えもある。異なったプレート同士の相対的運動があると、そこで地震が発生する。日本の東北地方では太平洋プレートと呼ばれるプレートが北米プレートあるいはユーラシア・プレートの下に沈み込んでいるし、東海・四国地方ではフィリピン海プレートがユーラシア・プレートの下に潜り込み、そこで地震を繰り返し発生させている。1年間に数cm程度のプレートの動きも最近では全地球測位システム（GPS）や超長基線電波干渉法（VLBI）と呼ばれるような新しい測地技術を使って実測できるようになり、プレートの運動の様子がよく分かるようになってきた。

(4) 日本列島はどのようにしてできたのだろうか

日本列島の太平洋側には、日本海溝と南海トラフと呼ばれる深い海の溝がある。ここは太平洋プレートとフィリピン海プレートが地球の深部に沈み込んでいる場所である。一般に一つの海洋プレートが大陸のプレートにぶつかると、そこで地球内部に潜り込むが、海洋プレートに乗って運ばれてきた海底の堆積物や海山の一部は、プレートと一緒に地球深部に潜り込めないまま大陸プレートに押しつけられ、そこにたまっていく。大陸から浸食されて運ばれてきた砂や泥もこの地域に堆積する。こうして海溝の陸側の地域には、遠洋で堆積した海底堆積物と陸側から運ばれて来た砂や泥など

が混ざった、複雑な構造を持つ付加体という領域が作られる。またこの付加体には、海洋プレートの一部であった海洋地殻を構成している玄武岩やはんれい岩といった岩石が含まれていることもある。

一方、日本列島を形作る岩石をよく調べてみると、あちこちにこの付加体の地質とそっくりな様相を示す地質帯がある。このことから、日本列島は現在の場所からずっと離れた、様々な場所で作られた物質がプレートによって、ユーラシア大陸の東端まで運ばれ、あたかも寄せ木細工のように組み合わせられ、日本列島を形作ったものと考えられる。

(5) 地下資源と地球環境の関係はどう考えたらよいだろうか

地球の中には人間にとって有用な多くの資源がある。なかでも代表的なものとして、石油や天然ガスのようなエネルギー源として使えるものと、鉄や銅などの金属材料として使えるものがある。石油や天然ガスがどのようにして地下で作られたのか、本当のところはまだよく分かっていないが、海底にたまった生物の遺骸が地下深くに埋没し、地熱の作用で複雑な有機物質へと変化し、石油・天然ガスになったのだろう。

いずれにしても、これらの地下資源は有限なもので、近い将来に人間が使い尽くしてしまうであろう。また、石油や天然ガスをエネルギー源として利用するということは、過去の長い年月の間に地球の生物が大気中から取り込んだ二酸化炭素を再び大気に放出することであり、地球大気温室効果を強化することになる。

地球の文明を支えてきたこのような地下資源は有限であり、一朝一夕には再生できない。私たち人類はこのような地下資源の有効利用、再利用などについて真剣に考えるべき時代にきている。

3.5.3 太陽系と宇宙

(1) 太陽のエネルギーはどのようにして作られているのだろうか

太陽のエネルギーは一言でいえば、太陽内部で常時起きている核融合反応で作られている。太陽の質量の 75 % は水素、25 % がヘリウムで、それ以外のものはわずか 0.1 % 程度にしか過ぎない。ガスが集まれば集まるほど、密度、圧力が高まり（それぞれ、150、2500 億気圧）、そして温度は上昇し（1500 万℃）、ある臨界点を超えると核融合反応が起きやすくなる。

核融合反応とは、水素と水素が合体してヘリウムに変換される過程である。不思議なことに、この過程で原材料に使われた水素の質量とできあがったヘリウムの質量は等しくない。そのわずかな質量の差がエネルギーとなって放出されることになる（ア

インシュタインの相対性理論によると、エネルギーは質量と等価である)。つまり、太陽はこの反応によって刻々と、例えば1秒間に420万トンも軽くなっている。誕生以来すでに水素の7%がヘリウムに変わり、この割合で核融合が続けば、太陽の寿命はあと50億年くらいと計算されている

こうして作られた熱エネルギーは、絶えず吸収と対流と放射を繰り返し、太陽表面へと向かう。太陽内部は密度が高いため、ぶつかりながら外を目指すので、なんとか表面に辿りつくのにどれくらいの年月を要するのかはあまりよく分かっていないが、1千万年もかかるというモデル計算もある。現在この地球に降り注いでいる太陽の光は、はるか昔に太陽の内部を出発したことになる。

(2) 太陽活動は宇宙空間や地球にどんな影響を与えているだろうか

太陽は太陽系全質量の99.86%を占める、ずば抜けて大きな星である。その巨大な重力により惑星の運動を支配しており、太陽系の親玉と呼んでもいい。そして、太陽の放つエネルギーも太陽系全体を支配している。私たちは、生命の存続にちょうどいい距離にある惑星地球の住民として、そのことを毎日実感している。幸い、このエネルギーはほとんど一定で、おかげで地球の気候はほぼ安定している。

太陽の表面には、磁場の作用で生ずる黒点と呼ばれる、周囲より温度の低い領域があり、この黒点の数で太陽活動を代表させる習慣になっている。黒点が多いほど、黒点の周りにある白斑からの放出エネルギーも大きく、太陽全体のエネルギーの簡単な指標として使われてきたからである。黒点数は約11年の周期で増減を繰り返している。実は、太陽の全エネルギー放出量は、長期的には完全には一定ではなく、太陽活動(つまり、黒点数)に比例していることが最近分かってきた。黒点数が少なかった17世紀後半は、小氷河期と呼ばれる地球全体が寒かった時期に一致しており、太陽活動と地球気候の関係の解明が今後重要な研究課題になる。

太陽からは、熱や光だけではなく、荷電粒子も放出されている。このプラズマ流は、太陽の磁場を引きちぎってまるで風のように太陽系中を流れているので、太陽風と呼ばれている。フレアと呼ばれている爆発現象のときも、太陽風は突風のように突然強さを増し、惑星間空間を吹きまくる。太陽風は、極地方に華麗に舞うオーロラや磁気嵐の原因にもなる。また、太陽からの高エネルギー粒子は人工衛星の計器を直撃して誤作動を起こす原因にもなり、このような悪い宇宙天気からの被害を軽減するための予報の研究が進められている。

(3) オーロラは地球以外の惑星にも発生しているのだろうか

オーロラは、地球の磁場に沿って宇宙から降り注ぐ粒子と大気が衝突することによ

って発生する。太陽風と地球磁場が発電機を形成し、そこから供給される電力による放電現象であると言ってもよい。ということは、地球以外の惑星でも、磁場と大気があれば、その惑星上でオーロラが見られることが想像される。実際、その両者を持つ木星、土星、天王星、海王星では、オーロラの存在が確かめられている。大気の成分が地球とは異なるため、オーロラの色は地球の場合とはかなり違う。また、磁場があっても大気がない水星や、立派な大気があっても磁場が非常に弱い金星ではオーロラがない。月にもオーロラはない。最近になって、磁場を持たないとされる火星にもオーロラらしき発光現象が見つかったが、これは局所的に残っている残留磁場に粒子が突入したのではないかと考えられている。

70年代後半から、木星と土星のオーロラの撮影は、宇宙探査機ボイジャーやハッブル宇宙望遠鏡などにより成功している。オーロラは主として紫外線域の光で、地球の場合と同様に、両極を取り巻く大きなリング状に現れ、ダイナミックに変動する様子も確認されている。木星のオーロラの源の一つとして、衛星イオの火山活動により放出されたガスも指摘されている。

(4) 冥王星より外側の太陽系にはどんな天体があるのだろうか

太陽系は、太陽を中心に海王星までの半径約 45 億 km の範囲に、八つの惑星が並んでいる。また、やや大きめの準惑星、それに彗星や小惑星といった小天体なども散在している。この太陽系の姿は、観測技術の進歩と共に確実に広がってきた歴史がある。肉眼しかなかった時代には土星が太陽系の最果てであった。天体望遠鏡の発明は天王星の発見につながり、天王星の運動の解析から海王星が予測・発見され、さらに写真技術の発明は冥王星の発見をもたらした。そして、電荷結合素子 (CCD 素子) という電子撮像技術の発明が、冥王星付近の小天体の群れの発見につながった。氷で覆われた太陽系外縁天体と呼ぶられる小天体の群れが無数に存在したのである。これらの発見によって、2006 年まで第 9 惑星と呼ばれていた冥王星は、惑星ではなくなり、太陽系外縁天体の一つとして準惑星、あるいは冥王星型天体の代表格となった。

では、この冥王星の外側の太陽系には、いったいどんな天体があるのだろうか。歴史を振り返れば分かるように、さらに遠方にも、まだまだ天体が存在することが示唆されている。太陽系外縁天体の中には、100 億 km をこえる遠方で発見され、その軌道が大きく外側にはみ出していて、周期が 1 万年に達する新種も発見されている。新しい技術革新が進めば、さらに未知の天体が発見されることが示唆される。

(5) 曜日はなぜ月火水木金土日の順序になっているのだろうか

曜日はどうして七つあるのか、それはどうして月火水木金土日の順番になっている

のだろうか。夜空には、お互いに位置を変えない恒星と、位置を毎日のように変える惑星がある。肉眼で夜空を観察していた時代、後者には水星、金星、火星、木星、土星の五つ、そして広い意味では夜と昼を支配する太陽と月の合計七つがあった。そのため、この七つというのが何らかの意味で世界を司る特別な天体とされていたのである。こうして、暦が考えられた時に、七つの天体をあてはめたサイクルが考えられた。これが一週間が七曜となった起源である。

曜日の順番には、古代人の宇宙観が反映されることになった。天動説では、宇宙の中心は地球で、そのまわりを月、水星、金星、太陽、火星、木星、土星、の順に回っていた。動く速度が早い順に、地球から月、水、金、日、火、木、土と並んでいると考えられたのである。この順番をもとに、まず時刻を支配する天体が決められた。週の第一日第一時に最も遠くの惑星・土星をあてはめ、以後、遠くから順番に各時間に当てはめていった。こうして、そのサイクルを翌日にも当てはめると、第二日目の一時間目は太陽、第三日目の第一時は月となり、各日の第一時の順番として、土日月火水木金となる。これが曜日の順番の起源である。

(6) 星はどのようにして生まれ、どのように進化するのだろうか

宇宙は、星の集団である銀河からできている。銀河にはガスやチリも含まれている。銀河内のガスの濃い部分を星間雲と呼ぶ。星間雲近くで超新星爆発のような密度を変化させる出来事があると、星間雲の中でガスの濃い部分ができ、そこでは、ガス同士重力でお互いのガスが引っ張り合って、次第に収縮していく。そして、中心は大きな圧力のために次第に高温になり、収縮によって生じる熱で赤外線を放射する原始星が誕生する。

みずから核融合で輝く星である恒星は、その一生のほとんどを、水素の核融合反応で輝く安定した状態で過ごす。ただし、質量の大きな星は燃料の消費が大きいため、大質量星ほど短い時間で赤色巨星になってしまう。このように星の進化はその質量によって異なる。太陽質量程度の恒星は、100億年程度の寿命で、白色矮星となりその一生を終えるが、太陽より重たい星々は、それより短い寿命の後、超新星爆発という過程を経て、中性子星やブラックホールとなって一生を終えるものもある。

(7) 元素はいつ、どこで作られたのだろうか

宇宙の誕生直後には、水素とヘリウムという最も軽い元素が形成された。その後、宇宙では星が作られ、恒星の超新星爆発が起こり、少しずつ、水素・ヘリウム以外の元素（天文学の言葉で、重元素と呼ぶ）が宇宙に満ちていった。その後、銀河内の惑星状星雲や超新星爆発によって宇宙空間にまき散らされたガスやチリが集まって新た

に星間雲が形成されて、やがてその中から次の世代の星々が誕生していく。こうして、宇宙を構成している一つひとつの銀河の中で、恒星は輪廻転生し、さらに物質としての進化を続けることになる。

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

(8) 遠くの星や銀河までの距離はどのようにして測るのだろうか

宇宙の観測で最も難しいのが天体までの距離を測ることである。まず星の絶対光度（その天体が放っている全エネルギー量）を何らかの方法で算出し、それと、見かけの光度（単位面積当たりによってくる光の量）から距離を求めている。このような絶対光度が分かった天体を標準光源と呼んでいる。いわば、何ワットで輝いているかが分かった電球のようなもので、それを遠くに持っていけばどのような明るさになるかから距離を決めている。

人間は二つの目で物体を見てその距離を推定している。物体を二つの違った方向（目）から見て、見える方向の差（視差）から三角形を作って距離を推定しているのである。地球は太陽の周りを回っているから、季節ごとに星の見える方向が違っている。1年間で星が見える方向の差を年周視差といい、それによって距離が見積もれるのである。こうして距離が分かると星の絶対光度を求めることができる。これと星の表面の色（温度）との関係をプロットすると、ヘルツシュプルング・ラッセル図（HR図）という図が描ける。HR図上で星は主系列と呼ぶ太い帯の上に並んでおり、絶対光度と表面温度が関係していることが分かった。そこで遠方の星にも同じ関係が成立していると仮定すると、表面温度から絶対光度を計算できることになる。さらにHR図には変光星も多く含まれており、変光の周期と絶対光度の間に簡単な関係があることが発見された。したがって、遠くの星の変光周期を観測すれば絶対光度が分かり、それと見かけの明るさから距離が求められるというわけである。

このように、年周視差、HR図、変光星と近くから遠くへ一段ずつ梯子を昇るように、標準光源を選定して天体の距離を推定しているのである。

(9) 宇宙が膨張していることはどうして分かるのか

まず遠くの銀河までの距離を変光星を使って測る。と同時に、銀河から放たれる光の波長ごとにその強さを測る。これを、スペクトル観測と叫ぶ。銀河のスペクトル

を撮ると輝線が多く見える。原子はそれぞれ特有の波長の光を強く放つので輝線として観測できるのである。その輝線がどのような原子から放たれたかを調べ、実験室の波長と比べることになる。一般に、遠ざかる光源からの光は赤い方（波長の長い方）へずれ、近づく光源からの光は青い方（波長の短い方）にずれることが知られている。「ドップラー効果」である。実験室と銀河からの輝線のずれの量を測定すると、銀河の視線方向の速さを求めることができる。

多くの銀河について視線方向の速さと距離を独立に測ってプロットすると、ほとんどの銀河は私たちから遠ざかっており、その速さは距離に比例することが分かった。これをハッブルの法則といい、宇宙空間が一様に膨張している証拠と考えられるようになった。写真を縦横等倍率で拡大する場合を考えてみよう。写真に写っている像は画面に固定されているが、互いに遠ざかり、その1点から見れば遠くの方が速く動いたように見える。これと同じで、銀河は空間上で止まっているのだが、宇宙空間が膨張するために遠ざかり、遠くの銀河ほど速く動くように見えるのである。ハッブルの法則は非常に遠方まで成立しており、もはや宇宙膨張を疑う人はいない。

(10) ビッグバン説の証拠は何だろうか

宇宙は超高温・超高密度の状態の1点から膨張を開始したというビッグバン説は荒唐無稽なような気がするが、現在ではいくつかの証拠から正しい理論であると考えられている。宇宙は、非常に温度や密度が高い状態から膨張してきたと考えられるから、その間にどのような物理過程が生じたかを調べ、それを証明する遺物を探すことになる。いわば、生物の進化を化石から調べるようなものである。

まず明らかになったのは、宇宙が誕生して3分間の頃、宇宙を舞台にした原子核反応が起こったことである。核反応率を計算するとヘリウムが大量に作られたことが分かった。そこで様々な天体のヘリウム量を観測し、どんなに古い天体にも新しい天体と同じ量だけヘリウムが存在していることが確かめられた。この結果、すべての星が生まれる前に、すでに多くのヘリウムが作られていたことが判明し、ビッグバン宇宙の予言通りであると分かったのである。

さらに、宇宙の年齢が38万年の頃、温度が3000度以下になって、物質はすべて原子になったと推定された。物質が原子になると、それまで宇宙を満たしていた光が自由に飛べるようになる。この光は温度が高い物質が放ったもので「熱放射」という。自由になった光は宇宙全体に広がり、現在の私たちにも降り注いでいるはずと予言された。これを宇宙背景放射と呼んでいる。宇宙にあるすべての天体の背後からやってくるために背景放射と呼ばれている。この宇宙背景放射が1965年に発見され、ビッグ

バンの直接証拠とされた。

このようにビッグバン説が予言した通りの証拠が発見されていて、ビッグバン理論が確立したと言える。

(11) ビッグバン宇宙はどのようにして始まったのか

宇宙の始まりについては、まだ確かなことは分かっていない。宇宙は1点から始まったと言われるが、実は1兆分の1の1兆分の1の100億分の1cmという小さな状態で生まれたと考えられている。この大きさは宇宙を支配する重力に量子論を適用しなければならぬ大きさで、これを量子重力理論と呼ぶが、まだ理論は完成しておらず、宇宙の誕生については推測するしかない。

量子論の世界では不確定性関係によって、時間とエネルギー、空間と運動量が完全に確定せず、ある広がりを持っている。量子重力理論ではそこに重力も考慮しなければならないので、時間・空間・エネルギーが渾然一体となり区別できなくなる。そうすると、私たちが今使っている時間の概念が大きく変更され、空間やエネルギーの有り様と強く関連することになる。新たな時間や空間を定義して何が起こるかを明らかにしなければならないのだが、その方法が皆目分からないのである。

3.6 人間科学・社会科学

3.6.1 科学技術の智としての人間科学・社会科学の知見

21世紀に生きる人たちの科学技術の智に人間科学・社会科学が含まれるというのはなにも特別なことではない。人類誕生の早い時期からすでに人間は自分自身や身近な他者のことだけでなく、人類やその社会に関心を抱いていたと思われるし、その関心に駆られ、20世紀を通じて人文科学・社会科学が多くの知見を蓄積してきたからである。それにもかかわらず、人文・社会系の学問分野を「科学」に含めることがなにか特別なように受け取られがちなのは、過去、科学技術が物質科学とそれに関連する物づくりの技術のこととして扱われてきたという事情によるのであろう。

人間や社会の問題が現代に生きるすべての人たちに共通の科学的素養とみなされるのは、人類の将来を考えるにあたって以下のような見方・考え方が欠かせないからである。

そもそも人類は、ヒトという動物種として生物進化の枠組に組み込まれて自然界の中で変化してきたが、同時にまた、早い時期からみずからの知的好奇心と創造性によってみずからの環境を改変しながら、社会集団を形成してよりよく生きるための組織や制度・規則を編み出してもきた。こうして、人工環境や社会環境の影響をも強く受けて変化を遂げてきたのである。自然、人工、社会の3種の環境からそれぞれ違った淘汰（選択圧）を受けるうちに、本来は動物としてのヒトが具えていた知覚や感情などの意識や環境に対処するための行動が変化し、次第に現在のような心のありよう（心性）を具えるに至ったと考えられる。

とりわけ、20世紀半ば以降の技術的發展により、情報の広域化・可視化・迅速化が過去に例をみない勢いで進み、そのような環境変化への対処を著しく困難にし、同時に、歴史的に継承されてきた社会の組織や規範のあり方の変化を促している。ただ、それにもかかわらず私たちが現況をさほど憂慮していないのは、変化の観測者自身もまた同じ環境に生きているために、その影響が読み取りにくいからであろう。このような状況下で、みずからに起きつつある変化を感知するには〈ロング・ショット〉で人間やその社会を捉えることが必要であろう。ちなみにロング・ショットの視点とは、人間をヒトという動物として捉え、それを多様な種から成る動物界に据えてみることであり、他方で人類が辿ってきた足跡を生物史、人類史、社会史としてそれぞれ発生論的に認識しようとする立場にほかならない。そうすることによってはじめて、人類の将来像を明確に描き出すことができると思われる。

科学や技術はなにも物質の構造や作用だけを扱うのではない。先にも述べたように、人間や社会もまた科学の対象であり、その成果は技術の進展とも密接に関わる。ただ、その場合、人間や社会の科学は、対象とする事象に人為的操作を加えてその変化を観察・測定することが概して難しく、その上、先ほど述べた生物史、人類史、社会史という三重の発生に規定されているために扱う事象自体が非常に複雑である。そういう事情のために、物質科学の諸分野に比べるとかなり厄介な問題を抱えることになる。例えば、数量化や再現可能性を基準にすれば、厳密な実証の点で遅れをとっている現状は否めない。

他方、技術に関して言えば、伝統的にそれは「物づくり」とみなされ、永らく人間科学や社会科学の成果を取り入れる気運に乏しかった。しかし、20世紀後半に、人工環境の特性と人間の能力との間に生じた不協和が次第に深刻化するに及んで、漸く技術革新にあたって人間的・社会的要因を考慮すべきだという認識が生まれた。「人に優しい」とか「快適性」というキーワードが建築や製品の性能表示に用いられはじめたのはその現れであり、技術開発チームに人間科学・社会科学分野の専攻者の参画が求められるようになったのもその頃からのことである。

もっとも、わが国では、高等教育の段階で生徒が文系か理系かの進路選択を迫られ、文系志望者には理系、理系志望者には文系の教科履修が軽減されることが多いし、大学教育でも文系と理系のカリキュラムが過度に特化していて、その結果、異分野の交流や相互理解に必要な共通の素養を身に付ける機会が十分に保証されていないという問題が指摘される。このような教育状況については早急な改善が必要であるが、本プロジェクトが提言する科学技術の智はその間隙を埋める役割を担うとも言えよう。

3.6.2 科学の本質、科学を学ぶ意義

私たちの社会は「科学」と呼ばれる活動をその内に含み、社会は科学技術の成果に依存している。このように科学は私たちの将来を左右する力を持つと同時に、非常に複雑な営みでもある。科学には多くの人たちや制度が関わっているし、それぞれには長い歴史がある。

人間は自分の意識や行為を自覚するという反省的意識を持つ点でユニークな存在であるから、その現れとして、科学の営み自体を明らかにしようとする強い動機を持つ。それが科学論・科学哲学であり、科学史あるいは科学社会学である。人間科学には、このように科学という行為それ自体を対象として考究する分野も含まれる。

科学の特質や史的展開、さらには科学と社会の関連性を考えることは、私たちが専

門家の生み出す知的活動の成果を無批判に受け容れるのではなく、科学の営みや技術のあり方を正しく認識し、その成果を評価する態度を培う上に欠かせない。そうすれば、似非科学の欺瞞性を見破る力も養われるはずである。

そのような科学的態度にとって、幼少期から日常生活の中で様々な実体験を通し豊かな経験知を持つことがなにより大切である。実体験は、私たちに具わる五感の多くを同時に活性化させ、リアルな感情を伴うものだからである。こうして私たちが本来持つ知的な好奇心が充足され、それに動機づけられて個々の経験を越えた学知の世界へと誘われるというのが、知性の発達に望ましい姿である。

私たちを取り巻く自然環境が次々と人工環境に置き換えられる中で自然現象に直接触れる機会が少なくなる一方、その代理体験という形でメディアを通じて多量の情報が注ぎ込まれるようになった。しかしながら、実体験の裏づけのない知識は脆弱である。今こそ知性の発達の原点に立ち返って、経験知を豊かにする方法やそれを抽象化した知識（学知）に高める方法、すなわち経験を知性化する教育プログラムを確立しなければならない。学校教育だけでなく生涯教育としてもそのことが急務だと言えよう。

3.6.3 人間（ヒト）の科学

自然界において、ヒトは霊長類の一員である。霊長類は約 6500～7000 万年前に出現し、樹上生活者として多様な進化を遂げたが、「未熟な赤ん坊、長い子ども期と長寿」「共同体と共感性の誕生」「脳の進化」「言語の起源」「柔軟な認知能力」「文化の生成と伝達」「定住と文明の誕生」がその過程で生じた重要な出来事であった。

人間に対する関心はおそらく人類誕生初期にすでに芽生えていたであろう。しかし、科学的な手続きに基づく人間理解が始まるのはずっと後、漸く 19 世紀半ば過ぎである。感性、知性、悟性など、それまで哲学的に論じられていた心の働きが実験科学の対象となり、人間科学の独立した分野として心理学が誕生する。ヴントがライプチヒ大学に心理学実験室を開設した 1879 年がその記念碑的な年とされている。同時期に、フェヒナーは精神物理学を唱えて感覚量を刺激量との関係で定式化したし、エビングハウスは無意味語（POQ のように単語に似せた無意味な綴り）を材料にして記憶の忘却過程を実験的に解明した。

他方、ダーウィンの進化論は、単に形態の問題にとどまらず知能やそれを反映する行動の進化への関心を促した。ヒトの知性の由来を探るべく、19 世紀末から 20 世紀にかけて、系統発生の異なる段階にある動物について知的行動を比較する試みがさか

んに行われた。それにつれて、神学に支えられて信奉されていた「人間は理性的存在、それ以外の動物は本能的存在」だとする二分法的な動物観が揺らぎ、両者に共通する知性の基礎過程となる学習や思考の特性やメカニズムが次第に明らかになってきたが、なかでも 20 世紀後半以降には高等霊長類の動物について、社会的知性の萌芽とも言える行動が次々と見出されている。

ほかに、心の科学が意識レベルの事象を探究する中で、フロイトのように、無意識（深層）の働きに注目し、精神分析学と呼ばれる独自のアプローチを試みた人たちもいる。

ところで、人間それ自身を対象とする科学はどのようにして可能になったのだろうか。身体と違って、「心」は眼に見えるものではない。だからと言って、それを本人が内側から観察するというのでは実証可能な科学にはなりえない。そこで、ひとまず心をブラックボックスとした上で、他者の言語、動作、あるいは生理反応を観測して、外部の条件により心が変化する様相を明らかにするという方略に従うのである。比喩的に言うならば、刺激という〈光〉が落とす反応という〈影〉を手がかりに、直接は覗けないブラックボックスの中身を探ろうとするということになる。心は脳や臓器のような実体ではなく、こうして論理的に導き出されたもの、すなわち論理的構成体なのである。そのために、物質科学にはない、様々な実験手続き、測定尺度、検査法などが開発され、得られた資料を解析するための方法も考案されてきた。

心性は複雑であり、たえず変化する。だから、いきなりトータルに捉えようとしてもうまく行かない。そこで、心理学では、心の働きを、知覚、感情、欲求、思考、性格などなど、いくつかの基本的な過程ごとに分析してきた。そのような基本的心性のうちでも、とりわけ人間を人間らしくしているのは、顕著な発達と優れた言語能力であると言ってよい。

生物的存在としてのヒトは母胎内で十分に成熟しないままに産み落とされる。新生児は、環境を知覚する能力が具わっているにもかかわらず、運動能力が未熟なために周囲の環境にみずから働きかけることができない。このような新生児期の知覚と運動のアンバランスな状態はヒトやごく限られた霊長類の動物にみられる特徴であり、ポルトマンによれば「生理的早産」なのである。そのため、栄養的にも行動的にも親に依存しなければ生きられない状態が長く続く。

そのような特徴がどのようにして生じたのか、人間を人間らしくする上にどのような働きをしているのかなど、まだ充分には解明されていないが、新生児が行動によって環境を探索したり対象を操作するようになる以前に様々な感覚を通じて周囲の事物

や出来事を知ることにより、知性が促進されるという可能性も考えられる。また、発達は生理的成熟に支えられているが、それですべてが決まるというわけではない。技術の進展にともなう社会状況の変化が心身機能を加速する事実も知られている。

知性は言語能力とも密接な関係にある。進化の過程で獲得された言語というコミュニケーション手段は、社会の成員相互の意思伝達だけでなく、思考の展開を促す。複雑な文法体系は生後7~10年の間に獲得されるが、それによって経験知を拡大し抽象化する能力が格段に増加することは言うまでもない。

こうして人間の心性が明らかになる一方、脳科学の展開に呼応して心と脳の相関がより詳細に明らかになってきた。とりわけ20世紀末から今世紀にかけ、脳の働きを可視化する技術が進むにともない、心の働きと関連する脳の部位活動について多くの知見が得られるようになった。

とはいえ、すでに述べたように、人間科学は、複雑な心性を知覚、感情、欲求、思考、性格など個別の過程に分離して解明してきた。そのため、それらの成果を統合しトータルな人間像を描くという課題が未だ達成されていない。同時にまた、心の仕組み（機構）と成り立ち（生成）の両面を明らかにすることにした上で、現代の心性が私たちが生きるのにどのような意味を持つかに迫ることも必要である。これらの課題の達成が今強く要請されている。

3.6.4 社会の科学

自然科学に物理学、化学、生物学などの分野があるように、社会科学には歴史学、経済学、社会学、政治学、文化人類学など様々な分野がある。個としての人間を理解することと並んで、社会的存在としての人間の理解も重要である。しかし、集団や社会というスケールの事象を扱う場合、物質科学に求められるように厳密な実証手続きに従うのは容易なことではない。言うまでもなく、社会現象は普通多くの要因が複合的に作用して成立するものである上に、時代や地域によって関与する要因が異なる。現象を実験的に再現することなどとうてい望めない。さらには、社会や集団に起きる事象に対する価値観という厄介な問題も存在する。そのため、社会科学の中には、分野や研究上の立場によって、科学とは別のタイプの学問を志向する動きも見られる。

そういう困難な事情にありながらも、政治学、経済学、社会学など社会科学諸分野では、実証を目指していくつかの試みが行われてきた。現実にかかる社会現象を考えた場合、関与する要因を操作することはとうてい不可能であるが、ゲーミングや演算処理などを用いたシミュレーションの技法によって、社会の動態を解析し変容を予測

するとか、社会の発展を進化の枠組みに据えて検討するなどの方略が考えられる。

大気汚染や国際紛争など地球的規模の社会現象が、それぞれの国の国内問題を含み、さらに国内問題が居住地域内で生じる問題を含むという具合に、違うスケールの問題が〈入れ子〉構造を持つ場合も少なくない。その点に着目すれば、シミュレーションによって有益な知見を導き出すこともできる。現に、そういうアプローチの成果が着実に蓄積されつつある。

自然科学と同様、社会科学が様々な現象を扱う際、個人の直感や私的経験に頼らない、標準化された手続きで資料を収集する、現象を適切なレベルで測定する、資料を精確に読み取る、という基本が大切である。それによって、因果関係を見極め、現象発現のメカニズムを理解することが可能になる。因果関係を明らかにするために、社会調査や統計分析の手法に加えて、実験的研究が用いられることもある。例えば、実験室に社会制度のミニチュア版を設けて、そこで人々が実際に取る行動や制度の変化を観測するというのがそれである。その場合、シミュレートした制度の一部を操作して、人々の行動がどう変化するかをみることができる。

さらに、因果関係の解明にとどまらず、予想もされなかった結果が生じるのはなぜかという問いに対する解を求めなくてはならない。社会科学にとって最も重要な事実と言え、人間は一人では生きていけないという、あたりまえに思える事実である。私たち一人ひとりの行動は、なんらかの形で他人の行動に影響を与え、そのことを通して自分自身に跳ね返ってくる。もちろん、そのような関係が個々人につねに意識されているとは限らないので、自分の行動が思わぬ影響を及ぼすことに驚かされることも少なくない。社会についての科学的理解が必要とされるのは、私たちの日常経験の蓄積だけでは、なぜ、いつ、どのような状況で意図しない結果が現われるのかが説明できないからである。社会を理解するということは、人々の行動が他者の行動に与える複雑な影響を、解きほぐし説明するという作業であり、それこそが社会科学の役割だと言える。

同時に、科学技術のあり方を社会との関連で考えることや、異文化を理解すること、民族や国家の概念を把握すること、それらに基づいて人類社会をより大きな空間的・時間的なスケールで捉えなおすことが重要であろう。

3.6.5 科学的人間像に向けて

人間や社会に関して私たちは、自分たちのことだからなにもことさら面倒な科学的手続きに従わなくても認識し理解することができると思いがちである。そのため俗説

や思い込みによる現象の解釈が流布しやすく、さらに厄介なことに、それらの「常識」が「科学」以上に強い影響力を持つことも少なくない。人間や社会に関わる学問が、科学であることを殊更に強調するのは、信頼に足る証拠によらない似非科学が人々を誤った考えに導きかねないからである。例えば、よく言われる血液型と性格の関係も、個性を規定する遺伝と環境の要因を分析することなく、限られたサンプルについての安易な相関にもとづいて過度に一般化されている例である。また、意識調査の結果が質問の仕方や回答の処理法によって容易に変わるという事実も案外知られていないために、得られた意見分布が実際とはかけ離れたものになるということも生じやすい。人間科学・社会科学がどのように事象を解明してきたか、その結果どのような成果が得られているかを正しく把握することによって、現実の諸問題に対する鋭い認識力を養うことが必要である。

ところで、すでに述べたように、人間の心性は生物として自然環境下で起きる進化に制約されると同時に、みずからの技術によって生み出した人工環境やそこで生きるための組織や制度によってもまた影響される。特に 20 世紀後半以降の技術による環境改変は、見過ごせない変化を人間の心性に及ぼし、新たな適応課題を生み出しつつある。しかしながら、このような一種の人工進化はますます加速すると予測され、心性の変化によって人類がこれまで慣習的に継承してきた社会組織や制度ではもはや秩序を維持することが難しくなるであろう。

また、グローバリゼーションの進展は、既存の見方に代わる、新しい地域概念、文化類型、歴史観などを必要としている。個々の地域や国を単位として出発した歴史学において、20 世紀半ば頃に国と国の交流を扱う関係史が興り、情報・人・物の流れが全地球的な広がりを持つようになった現在、グローバル・ヒストリーへの関心が高まると同時に、それら異なるレベルの歴史学をどう構造化するかという課題も提起されている。これなどは社会科学の進展を反映したものと言えよう。

ともあれ、人間科学・社会科学は、物質科学とは異なる視点から人類の未来を見据えて、絶えずその成果を広く発信するという役割を担っているのである。

3.7 技術

3.7.1 技術の世界

「技術」という言葉を聞いた時、私たちは何を思い浮かべるだろうか。宇宙ロケットや航空機、自動車に乗って行きたいと思うところに移動する。薄型テレビやDVD/HDDレコーダーなどAV（オーディオ・ビデオ）機器でテレビ放送や映画を楽しむ。パーソナルコンピュータ（パソコン）や携帯電話を使い、インターネットを介して世界各国の人々と電子メールをやり取りし、オークションで商品を売買する。今やネット経由で、株式を買うことも、銀行へ振り込みを依頼することもできる。いずれも典型的な技術の利用である。

人々が使う製品群の素材を造り出す製鉄所やガラス工場、化学プラントこそ、技術の象徴とみなす人もあろう。電化製品や発電所が頭に浮かぶ人もいるだろう。電気に加え、私たちが住んでいる所には水やガスも供給されている。家から外に出て仕事に行くには、電車に乗ったり、車で高速道路を走ったりする。建設技術によって建てられた高層ビルの中にある事務所で、仕事の連絡をとるために電話をかけファクシミリを送信する。身体の調子が悪くなれば病院に行き診療を受け、薬を貰う。電気・水道・ガス・交通機関・通信・病院など、社会基盤と言われるこれらの仕組みはすべて技術の賜物と言える。さらに人間が生きていくために必要不可欠な食料は、農業や畜産業、水産業によって生み出され、ここでもたくさんの技術が駆使されている。

もっと身の回りにある、自分自身の手で扱える技術を意識する人もいるはずだ。包丁を使って果物の皮を剥く、火を使って料理する、飯ごうでご飯を炊く。また、伝統工芸の優れた職人技もある。

ざっと見ただけでも技術が実に豊饒な世界を形成していることが分かるであろう¹⁴。技術とは、人々がよりよく生きるための技（わざ）のことであり、身の回りにある道具や機械の使い方から、社会・地球全体を支える大きな仕組みの準備・利用に至るま

¹⁴ 技術専門部会報告書では、豊饒な技術の世界を再認識いただくために「技術用語俯瞰図」を作成している（本報告書「科学技術の智の曼荼羅」参照）。図中では、一人の個人を中心に置き、「暮らす」「食べる」といった個人の日々の活動を豊かにするために、どのような技術が使われているかを例示している。個人は社会の中で生活を営んでいる。その社会を支える技術の例をさらに周辺に表記し、技術の全体像を俯瞰できるようにした。技術には必ず利用者がいる、このことを強調するため、代表的な技術を利用者を中心に整理して俯瞰図に表記した。他書に見られるように、エレクトロニクス、機械、素材、エネルギー、ICT（情報コミュニケーション技術）、農業といった分野ごとに個別技術を示すやり方は採用しなかった。

で、多種多様な内容を含んでいる。技術を生み、技術を使いこなすことにより、人々は豊かに暮らせるようになった。膨大な技術群はすべて人間が工夫して生み出した技（わざ）であり、技術によって生まれた人工物は自然界にはもともと存在しなかったものである。人間が地球に登場してから今日に至る長い歴史の中で、人間は技術を生み出し、発展させてきた。みずからの手を動かして使う道具、手作業を自動化した機械、複数の機械からなる大がかりな工場や設備、さらにはコンピュータ・ソフトウェアや通信ネットワークを組み合わせた社会システムに至るまで、長い歴史を持つ技術と生まれて間もない技術とが現代社会の中で共存している。

現代に生きる私たちは老若男女を問わず全員が、豊かに生きるためにたくさんの技術を使い、多くの利益を得ている。私たちは様々な技術が織りなす豊かな世界に住んでおり、地球上のどこを探しても、技術と無縁の生活をしている人はいない。そして、私たち全員は、技術に関する何らかの知識や、技術を使いこなす何らかの技能をすでに身に付けている。

技術に関する知識、技術を使うための方法論、実際に技術を使いこなす能力（技能）をまとめて、ここでは「技術リテラシー」（技術の素養）と呼ぶ。リテラシーには、読み書きソロバンという意味もある。いささか乱暴なことを言えば、読み書きソロバンができない人がいたとしても、技術リテラシーをまったく身に付けていない人はいない。繰り返しになるが、現代社会に生きる私たちは、意識をしているかどうかはともかく、技術の世界に暮らしており、何らかの技術リテラシーを身に付けている。

3.7.2 技術リテラシーの利点

一人ひとりの人間にとって、技術リテラシーは大きく三つの利点をもたらす。夢を実現できる、賢く生き抜ける、社会の発展に貢献できる、である。これら三点はそれぞれが独立したものではなく、現実においては重なり合っている。

（1）夢を実現できる

「夢を実現できる」とは、新しいものを生み出すことの喜びと興奮である。豊饒な技術の世界に慣れている私たちは忘れがちであるが、少し考えてみれば、これまでの人生の中で、何らかの技術に接し、感動したり、わくわくした経験があるだろう。人によってその経験は異なるが、生まれて初めて飛行機や電車に乗った時、初めて海外の知り合いと電子メールを交換した時、あなたはどのように思われたであろうか。思い出してほしい。

人間は「こんなことをしたい」「新しいものを創ってみたい」という夢を抱く。技術

を生業とする技術者・開発者は、技術の利用者を常に意識し、利用者にとってさらに便利になる技術を生みだそうとする。同時に、自身の夢や好奇心に牽引されながら、ものを作る楽しさと、いい技術を創造する達成感を味わっている。利用者が技術に感動するのは、便利であることに加え、技術者の夢を共有できるからである。例えば、人型ロボットは、センサーなどエレクトロニクス、歩行のための機械部分、全体を制御するコンピュータとソフトウェア、といったように、複数の技術の粋を集めたものである。複数の専門分野の技術者が一定の技術リテラシーを備えていれば、専門を超えた会話が可能になり、人型ロボットという共通の夢に挑戦できるようになる。同時にその購入者も同じ夢を共有している。

私たち人間は長い歴史の中で、膨大な技術を生み出してきた。しかし、人型ロボットをはじめ、技術の世界にはフロンティアがまだまだ広がっている。人間が夢を見続ける限り、技術の世界も広がり続ける。昔からあるものづくり技術においても、刺しても痛くないほど微細な注射針が作られるなど革新的な試みが行われている。

好奇心が強いと技術リテラシーが広がる。同時に、技術リテラシーが身に付いていると、技術に関する好奇心が強まる。技術リテラシーがあつてこそ、新しい技術がもたらすかもしれない負の側面にあらかじめ気を配ることができる。そして、子どもの成長過程に合わせて、技術に触れさせることにより、技術リテラシーが自然に身に付く。

一方、起業家、芸術家、生活者にとっても、技術リテラシーがあれば、優れた技術を使いこなし、自分の夢を追い、やりたいことの実現に取り組み、達成感のある生き方ができる。各種のスポーツ用具の技術改良によって、スポーツ選手は自身の能力を最大限に引き出し、記録という夢に挑戦できる。パソコンを操作するための音声読み上げ技術が生まれたことで、視力の弱い人も晴眼者と同様に、パソコンを使い、やりたいことに取り組める。

(2) 賢く生き抜ける

「賢く生き抜ける」とは、日常生活で問題にぶつかったとき、どのような道具や技術を使うとよいか、どんな技能が必要かを、自分で考えることができ、自分で選択でき、危険を回避でき、本当に必要なものだけを手に入れることである。例えば、私たちは多種多様な電化製品に囲まれ、便利な生活を送っている。技術リテラシーがあれば、自分に最も適した電化製品を選んで、美味しい料理を作れ、健康によい素材を選び、エネルギー効率のよい電化製品を使いこなすことができる。

技術に関するいくつかの原理原則を知っていれば、異なるメーカーの電化製品を複

数使っても、効率よく安全に使い、何らかの危険性があった場合、それを回避し、不慮の事態にも対処できる。技術リテラシーがあれば、製品の仕様書に書かれている注意事項に関心を持ち、その意味をよく理解できるようになる。厚生労働省の人口動態統計によると、2005年において家庭内事故死は交通事故死よりも多い。このことは技術リテラシー向上の緊急性を示唆している。

身の回りで使っている機器が壊れた場合、自分で直すことができれば、それが一番早く、かつ安上がりである。あるいは、自分で直せる範囲か、専門家を呼ばないといけないのかを判断できるとよい。技術リテラシーが足りない場合、他の人から押しつけられた解決策や道具を使わざるを得なくなる。場合によっては、必要以上の機能を持った高額な道具を購入してしまうかもしれない。最もまずいのは、電化製品を水回りの近くに置くなど間違った取り扱いをして、壊してしまったり、自分の身体を危険にさらしてしまうことである。

医薬品の発達によって、人類の寿命が延びた反面、多数の薬が出回り、薬害という問題が起きている。医療や薬という技術に関して、一定のリテラシーがあれば、薬を誤飲する可能性は下がる。テレビ番組に登場する、「××を食べるとこんな効果がある」といった過剰な演出に惑わされないようになる。

(3) 社会の発展に貢献できる

人々は技術リテラシーを持つことにより、協力し合って、「社会の発展に貢献できる」ようになる。現代社会は、様々な技術を利用して成立しており、どの技術を採用するか、例えば、鉄道中心の交通体系とするか、自動車中心とするか、といった様々な選択肢があり、選択によって社会自体が大きく変わりうる。技術リテラシーがあれば、社会の構成員たる私たちが主体的な判断を下せるようになる。

技術リテラシーがあれば、個人の夢、個人の賢い生き方、社会の持続的発展という、場合によっては矛盾する案件になんとかバランスをとって対処していけるようになる。ある人の夢はスポーツカーを保有することかもしれない。しかし、社会の持続的発展のためには、環境負荷の少ない車を保有すべきかもしれない。この対立する選択に対処するためにも、技術リテラシーは役立つ。

技術リテラシーを持つ利用者や消費者は、技術者や専門家へ、技術に対する意見や評価を伝えることができる。これは「フィードバック」である。技術が発達してきた歴史を振り返ると、利用者から専門家へのフィードバックが頻繁にあった。改善につながる適切なフィードバックがあつてこそ、社会全体で豊かな生活を享受できる。消費者からメーカーに対するクレームもフィードバックであり、新商品の開発や製品の

改良につながっている。

技術に関する様々な情報は、伝承（言い伝え）として社会に保存されている場合がある。ある技術が社会に危機をもたらす可能性が出てきた時、技術リテラシーがあれば、伝承をひもとくことができ、かつてあった同様の危機にどう対処したのか、先達の知恵を利用できる。

技術リテラシーは、技術の専門家や社会のリーダーにとっても重要である。技術の専門家は、様々な技術が相互に強く依存しているので、専門的な知識だけではなく、技術に関する一通りの基礎的知識を身に付けておく必要がある。実際、複数の専門技術を融合し、新たな価値を生み出す動きが顕著になってきている。専門家全員が公約数としての技術リテラシーを持つことで、共同作業がやりやすくなる。社会のリーダーは、技術が社会に及ぼす影響や、種々のトレードオフを勘案し、物事を判断する必要がある。技術が社会に深く入り込んでいる現代において、技術とまったく無縁の判断は、まずあり得ない。

3.7.3 技術リテラシーの構造

具体的な「技術リテラシー」とはどのようなものか。最近の定義では、リテラシーと言った場合、単に言葉を知っているだけではなく、それを適切に使える能力を意味する。そうだとすれば、「技術リテラシーがある」と言った場合、個別技術について知っているだけでは不十分である。すなわち、技術の知識、技術の方法、技術の利用に必要な能力、といった三つの要素をバランス良く備えている必要がある。また、ここでいう技術は、二種類の技術を意味していることに注意してほしい。一つは、一人ひとりの人間が持っている物づくりの能力を指す。これに対し、二つ目の技術は、製造システム、流通システム、金融システムなど、複数の技術が複合して社会の仕組みになっているものを意味する。

繰り返しになるが、技術とは人間生活に役立てるわざであるから、技術を理解するには、人間生活（社会）との関わりの中で理解していかねばならない。それぞれ、技術に関する知識や方法や能力といったものが、生活の中でどのように役に立つか、どのように利用していけばよいか、ということがリテラシーすなわち科学技術の智の内容となる。

（1）技術の知識

これだけは知っておくとよいという、公約数となり得る知識を、膨大な技術の世界からどう抽出するか。これは極めて難しい。そこで、まず公約数となる知識が、個別

技術の用語と、様々な技術が共通して持っている性格、に大別して考える。

自動車と原子力発電を例にとって説明してみよう。私たちはこれら二つの技術から恩恵を受けている。二つの技術をさらに推進するにせよ、規制するにせよ、二つの技術の具体的な仕組み、利用の仕方、操作（運転）の仕方について一定の理解をしておくことが望ましい。自動車であれば、かなりの人が知っていると思われるが、これだけ自動車が普及してくると、エンジンの仕組みについてほとんど知らずに運転している人も多いただろう。一方、原子力発電は発電方法の一つであることは知っていても、その仕組みを理解している人は少ないのではなかろうか。

自動車と原子力発電には共通の性格がある。どちらも人工物であり、人間によりデザインされたものである。（現在の複雑な技術は、すぐれたデザインすなわち設計によって成り立っている。人工物の製造から利用、管理、廃棄というライフサイクル全体を最適なものにし、技術の利用、管理という点からも設計は重要である。）どちらも複雑な部品や機構で構成されるシステムであり、人々に役立つ面とマイナスを与える面の両面を持ち、社会と相互に関連（共進化）し合い、馬車と火力発電等という先行技術の歴史を踏まえている、などである。特に、相矛盾する諸側面のバランスをとる「トレードオフ」（「安全性向上」と「コスト削減」のように互いに背反する関係を言う）は、技術の本質に関わる重要な共通点である。

このような共通性格は、技術や技術製品のほとんどに見られる。これらは、歴史や社会との関係を含め「技術の本質」と呼べるものであり、技術知識の一部である、次に、残りの一部である個別技術知識を「食べる」に関する技術を例として紹介する。

（２）個別用語の例～「食べる」に関する技術

生きていくために、「食べる」に関する技術は必須である。まず、狩猟のために道具を作る必要があった。その後、農業、牧畜を発明し、食料が安定して得られるようになり、燻製、醗酵など保存のための加工技術も発達した。

食べるためには、箸、椀、皿、といった様々な道具を使う。洗ったり、切ったり、火を通したり、安全においしく食べるために、調理する。調理には手順が重要で、レシピに基づき、作業工程が決まっている。食材を揃え、下拵え、味付け、盛付け、食後の片付け、と順番に行う。途中まで料理されたものを購入する場合もある。賞味期限、食品添加物の使用、調理の利便性、保存期限、美味しさなどは、それぞれが関連し、場合によってはトレードオフの関係にある。

現代社会では外食をする機会が増えた。栄養摂取のためだけでなく、食事を楽しみ、人々とコミュニケーションするために、会食の集いを開くこともある。その場合、実

に多彩な技術が動員される。調理技術、材料を調達・輸送し、保存する技術、演出をするための服装、調度、照明、BGM（バックグラウンドミュージック）、社会のルールとしてのマナーなどである。近年では、複雑化する流通の中で、効率的な配送計画だけではなく、食品の安全性確保の対策のために、食材のトレーサビリティ（生産、保管、物流、販売といった経路を明確にしておくこと）の確保が重要な技術になっている。

食後の片付けのために、残飯・容器の廃棄・リサイクル、食器の洗浄など様々な技術が関係している。どのように処理するかは、例えば、容器の洗浄費用と環境負荷、廃棄／再資源化に関わる費用と効果など、トレードオフを勘案した上で判断する必要がある。そこでは、地域性も重要な判断要素となる。「もったいない」と言われるように、できるだけ無駄を出さない調理、梱包、配送、調達も求められている。

食料は、農家での栽培や畜産、漁や養殖を通して獲得される。豊かな生活の実現のために、年間を通じて同じ食材を手に入れたり、世界中の食材を手に入れたりする技術がある。一方で、その地で採れたものをその場で食べる「地産地消」の意義が注目されている。

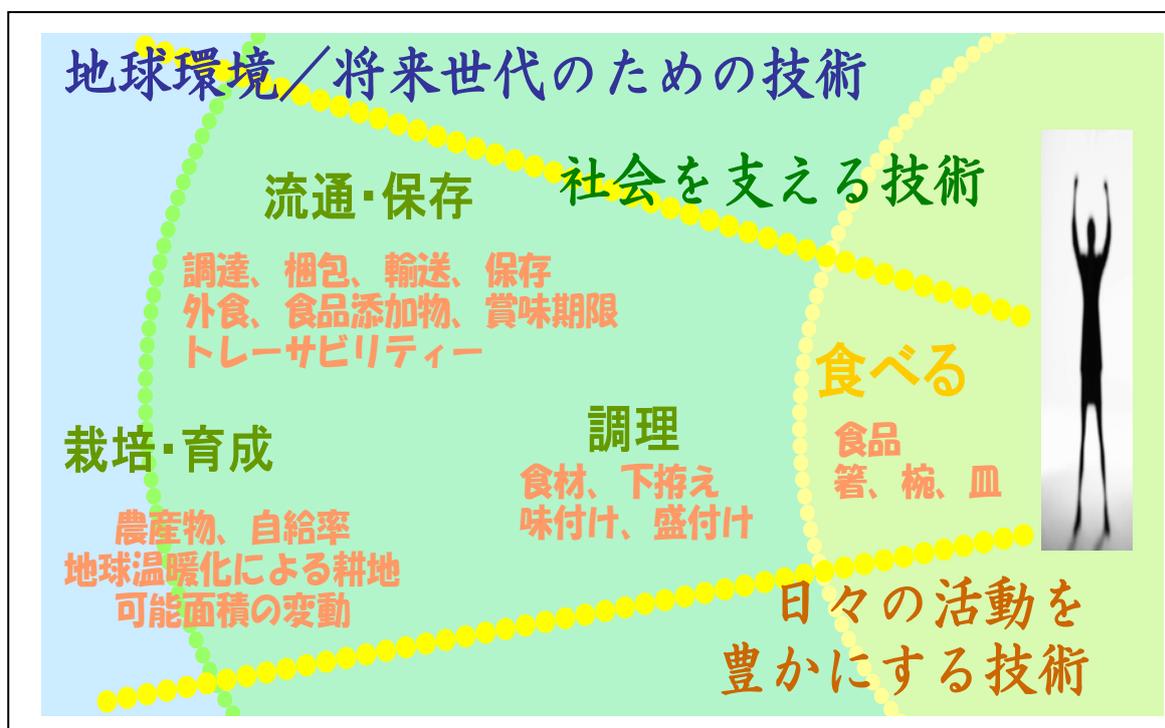


図4 技術用語俯瞰図（食べる技術に関する部分の拡大図）

豊かな生活を求める人間の活動は、地球規模での様々な問題を引き起こしている。

世界人口の増加、地球温暖化による耕作可能面積の変動、水不足・エネルギー資源の減耗などである。日本は、石炭・石油・天然ガスなどの化石燃料の産出が少なく、エネルギー資源の大半を輸入に頼っている。同様に、食糧についても自給率は低い。また、グローバル化が進み、近年は、BSE（牛海綿状脳症）のように、海外の飼料を通じて被害がもたらされることもある。

（３）技術の方法

技術の開発や技術の利用について、考え方や合理的な進め方を知っておくと便利である。技術に関する十分な知識を持っていたとしても、それを活用する方法を知らなければ、技術の効率的な利用や真の理解は難しい。技術に関する方法論には、設計方法論、システム論などがある。科学的な考え方も重要な方法論である。仮説と検証、実験やシミュレーションなど共通事項は多い。真理の探究を目指す科学と違い、技術は人間生活に役に立っているということから、例えば、シミュレーションによる安全性の研究など、社会との接点になるものが多い。また、安全性では、科学の絶対性を技術に安易に結びつける傾向がある。例えば、原子力の安全性について二重三重の制御機構が取られているが、事故は本質的に起こるものであり、事故が起きたときに、それがより重大な事故につながらないように、安全機構が機能したかどうかの評価されるべきである。ところが、日本においては、原子力は絶対に安全だという安全神話の影響で、かえって事故の有無だけで技術が判断されがちである。このような技術の絶対視（リスクゼロ）は、技術の本質に対する無理解から生じている。また、制約条件と最適化という技術方法論の理解の欠如も一因であろう。その他、問題を試行錯誤で解く、つまり、科学的な唯一の解がなくとも、問題を解決するという考え方や、最適化も技術の方法論の一つである。

（４）技術の利用に必要な能力

技術は実際に利用してこそ意味がある。技術に関する知識と方法論を身に付け、日々の問題解決に応用することで、さらに実践的な能力が増え、技術リテラシーが豊饒なものになっていく。この能力には、身近な生活を豊かにするために利用することや一種のデザイン能力まで、あるいは、生命維持や職業選択に関わるもの、技術そのものを開発する能力を含む。さらに、技術の評価やどの技術を利用するかを判断する能力も入る。したがって、技術を直接利用する能力だけではない。特に、社会に参画して、適切な技術評価をするためには、自分の意見を適切に表現でき、発信する能力やコミュニケーション能力も欠かせない。

評価や判断能力は、利用する人間の美意識や社会正義などに基づく場合もある。す

なわち、技術は「真・善・美」に関係し、それらに基づく評価と判断能力の養成が求められる。日本特有のものと言われる「道」は、技術の習得や伝承に関係する一種の能力と見なせよう。

3.7.4 社会へつながる技術の扉～未来への提言

20世紀末から、科学技術を取り巻く状況は大きく変わってきた。科学の発達、物質の起源や生命現象の解明などに大きく貢献し、私たちの世界観にも影響を与えてきた。技術の発達は、科学の発見を応用したり、利用者のニーズを追及したり、改良や改善を重ねたりして、モノを豊かに、生活を便利にしてきた。しかし、今、技術はその長い歴史の中で過去最大の課題に直面していると言っても過言ではない。本来、世の中の問題を解決し、私たちの生活を便利にしてくれるはずであった技術が、かえって様々な問題を引き起こしつつある。かつて「成長の限界」が懸念されたものの、私たちは技術によってその限界を超え続けてきた。だが今や、地球の限界により安易な成長は許されず、持続可能性が求められている。さらに世界各国が一様に技術を駆使し経済成長を競うことの是非を問う声も出てきている。こうした中、技術は引き続きイノベーションを起して、社会や身の回りの問題解決に貢献し、それによって技術自身が進化していくだろう。同時に、21世紀の技術はこれまでにないほど強く、社会や環境からの制約を受けるであろう。

そのために今、私たちには何ができるか。技術を左右する決め手が設計（デザイン）にある以上、技術が社会に与える問題を解決するカギもまたデザインにある。まず、持続可能かつ豊かな社会を構想（デザイン）し、そのために求められる技術を設計（デザイン）しなければならない。しかし、眼前にある世の中が当たり前だと思っている状態では、万人が共有できる明確な未来の社会像を構想することは困難である。現代のインターネットや携帯電話などを、十数年前に想像できただろうか。アインシュタインの相対性理論が発表された時、それが、カーナビなどに利用されるGPSの重要な原理の一つになると想像できただろうか。石炭や石油を使い始めた時、酸性雨が森を枯らし、二酸化炭素が地球を暖めるなどと想像できただろうか。社会が過去にない課題に直面している今、技術には過去にない新たな挑戦が必要である。エネルギー、環境、食糧など深刻な問題がせめぎあいながら迫っている今日、社会は^{ひっそくかん}逼塞感に覆われつつある。このような現代社会にあってこそ、どのような社会や文明を創り出すかという社会の未来像を提示し、その理想に向かうために、厳しい現状を真正面から見据え、苦しくとも問題解決に挑戦していく必要がある。

当然これは、わが国だけの課題ではなく、世界共通の課題である。環境、グローバルリゼーション、21世紀の豊かさ、といったキーワードに基づき、世界の人々が社会の未来像を考え、それを創り出す活動に着手しなくてはならない。

未来像のデザインにあたっては、あらゆる利用者と科学者・技術者・専門家の参画が欠かせないが、ここでは科学者・技術者の重要性を強調しておきたい。今後の社会をデザインする役割を担う人々には、科学や技術の原理・原則、社会や文化とそこに生きる人間への洞察、倫理観が求められる。科学者・技術者もまた、一人の生活者である。科学者・技術者が知識と技能を充実させるだけでなく、社会全体の最適化を考えるための思索と実践に時間を費やしていくことが、社会の未来像のデザイナーを増やす有力な手だてである。また、科学者・技術者の重要性を、科学技術の利用者や消費者が改めて認識することも大切である。

未来は、私たち一人ひとりが創り上げていくものである。どういう未来にしていきたいか、どういう未来をデザインしたいか、一人ひとりが立ち止まって考える時期にあるのではないだろうか。未来を構想するために、ぜひ、科学技術リテラシーを身に付けて、明るい豊かな未来をデザインしてほしい。

第4章 科学技術の智の視点

科学技術の智は、歴史的な事実から眺めると、新たな展望が開ける。それは、これまで述べてきた科学技術の智に生き生きとした具体性を与えてくれるとともに、科学技術の智は人類が長い時間をかけて築き上げてきた文化遺産であることに気づかせてくれる。本章では、まず、近代的自然観について、その代表例としての物理観について述べる。

ところで、科学技術は、20世紀後半から急激な変化を遂げている。そこで、次に、そのような科学技術の急激な変化を示す歴史的な事実として、20世紀後半からの科学技術の発展において、科学技術の考え方に大きな転換をもたらし、しかも、将来の科学技術を考える上で重要と思われる事実を取り上げる。ここでは、そのような歴史的な事実として、人間についての科学的理解、情報処理革命、ナノテクノロジー、生命の仕組みの解明と操作技術の開発、宇宙モデルの確定、地球環境についての科学的理解、の六つについて述べる。

科学技術は、第3章に述べたように、それぞれの領域において固有の内容を持って発展してきている。他方で、科学技術においてはそれらの領域にわたる共通の考え方がある。近代以降の科学技術においては、このような共通の考え方として、第2章の科学技術の本質において述べたように、実証性、論理性、予測性などがあげられる。そこで、現代の科学技術に共通の考え方として、総合的視点にたつ選択、多様性と一様性、可視化、スケールとサイズ、多量データ高速処理のアルゴリズム、科学と技術の相互貢献、の六つの考え方について述べる。

科学技術には、その背景に独自の考え方がある。とりわけ、自然科学の考え方は、科学技術のみならず学問全体に大きな影響を与えている。そこで、科学技術のうち、特に、自然科学的な考え方の背景にあるものを明らかにする。それらを、ここでは、科学的な態度・センスと呼ぶことにする。科学的な態度としては、科学にとって必要不可欠な資質（好奇心、批判力・懐疑力）、科学が持っている特質（証拠・論拠依存性、理論的・数的志向性、暫定性）、科学的な活動の特質（自己限定、科学者共同体管理、公開性、公共性）、の三つを取り上げた。そして、日常生活において、科学的な知識や見方・考え方が必要な場面を適切に判別できる科学的センスの重要性を挙げた。

4.1 近代的自然観と方法論

4.1.1 自然現象の説明の論理性と単純さ

私たちは自然現象を見て、なぜだろうかと考える。これは、人類が持っている本性かもしれない。自然現象の背後にあつて、直接的には見えない要因を知りたいと思うことが科学の始まりである。

思いつく要因と目にしている現象とが論理的に矛盾なく結びついていれば、現象を説明できたことになる。その因果関係を確かなものとするためには、その要因を少し変えた場合に現象がどのように変化するかを予想した上で、実際の検証を行う。予想通りの結果が得られれば、要因と現象の関係はますます確かなものとなる。このような推論と検証の積み重ねが、科学の基礎となってきたのである。

人間科学・社会科学の知見が語るように、人間は身の回りにある物質を有用な素材に変えて利用する一方で、その背後にある真理、法則を知りたいという欲求を高め、その探求にあたってきた。

その際に、現象の法則として受け入れられるためにはどのような妥当性が求められてきたのだろうか。同じ現象を説明するのに、その要因として妥当と思えるものが必ずしもただ一つではない場合もある。しかも、考える複数の要因が論理的に相矛盾する場合すらある。あるいは、要因と考えられること自体が論理矛盾を含む場合もある。そのような場合、科学は何を根拠として法則の妥当性を判断すべきなのだろうか。現代の社会には、いわゆる疑似科学が氾濫している。したがって、この点について確認しておくことは重要である。

例として、17世紀におけるガリレオ（1564～1642）とアリストテレス学派の論争を考えてみよう。物体の落下に関して、当時のアリストテレス学派の人々は、重いものほど速く落下するという仮説を立てた。たしかに、重い石と軽い紙とを落下させると、石は一直線に落下するが、紙はヒラヒラとゆっくり落下する。アリストテレス学派の説明を採用すれば、日常的に目にする石と紙の落下については一応の説明になる。これに対してガリレオは、アリストテレス学派の考えが矛盾していることを次のように示した。アリストテレス学派の考えが正しいとして、重い物体と軽い物体をひもでつないだらどうなるだろうか。重い方は速く落下し、軽い物体は遅く落下するので、それらをつなげば、中間の速さで落下せざるをえないはずだ。ところが、ひもでつなぐことによって、二つの物体を一つの物体と見なすこともできる。この場合には、二つの物体を合わせたものは、もともとの二つの物体よりも重い物体である。したがっ

て、アリストテレス学派の説からすると、それぞれの物体よりももっと速く落下することになる。つまり、一つの仮説から矛盾した二つの結論が出るわけで、これはおかしい。つまり、そもそもの仮説が誤っていることになる。このように、矛盾した結論に到るような仮説は、説明としての妥当性を欠いていると判断される。

天動説と地動説についても、現代では地動説が当たり前と思われているが、私たちの日常感覚からすると、天動説の方が受け入れやすい。自分が地球と共に動いているとは、とても感じられないからだ。ところが、惑星の運動の観測結果を天動説によって説明しようとする、地球のまわりに個々の惑星の周転円なるものがあり、個々の惑星はその周転円上を動く点のまわりを回転しているという説明になる。しかしそれでも矛盾が生じてくるため、天動説は矛盾が生じるたびに修正を加えた結果、とんでもなく複雑な体系になってしまった。

ところが、コペルニクス（1473～1543）は、太陽を中心とした円軌道を考える方が単純な説明になることに気付いた。そしてこちらの説明の方が、矛盾もなくすっきりした説明だった。

14世紀のスコラ哲学者オッカム（1285～1349）は、「ある事柄を説明するためには、必要以上に多くの実体を仮定するべきではない」とする「オッカムのカミソリ」と言われる原則を立てた。この原則に立てば、できるだけ単純な要因を想定することで多くの事実が説明できるとき、その要因による説明は強い妥当性を持つことになる。この点で、地動説の方が天動説よりも単純であり、より強い妥当性を持つことになる。

私たちの身の回りには、一応の説明がなされ、何となく納得している現象や事象が多い。しかしそうした事例に関しても、まずそのような説明が矛盾を含んでいないかどうか、根拠の乏しい考え方を使っていないかどうかを検討した方がよいものが多い。あるいは、一見単純そうに見えるがいろいろと取り繕って複雑になっていないかどうか、よく検討して批判的に見ていくことが重要である。

4.1.2 現代科学における物理学の基本概念

科学技術の基本概念の革命として近代人類が経験し、その波及効果が現代に及ぶものの典型的な例として、「力学法則」と「光」について述べる。

（1）力学法則について

アイザック・ニュートン（1643～1727）は『自然哲学の数学的諸原理（プリンキピア）』を1687年に刊行した。ここで、物体の運動を記述する基盤となる時間と空間の概念を明確にし、これを三つの法則にまとめた。

第一法則は「力が働かなければ、物体は静止したままでいるかあるいは等速運動を続ける」である。これは、運動を記述するための時間と空間を定義するものであると解釈される。つまり、力が働いていない物体の運動が、一定速度で運動をしているような時間を導入する、と言い換えてもよい。もし使っている時計が狂っていて時を刻むのに速くなったり遅くなったりすれば、それに応じて、物体が減速したり加速したようになってしまう。

第二法則は「物体に力が働くとその力に比例して加速する」である。つまり、第一法則で定義した空間と時間において、物体に力が働くと加速するということである。加速のされにくさを表すものが「慣性質量」と呼ばれるもので、同じ大きさの力に対して、慣性質量が大きければそれだけ加速度は小さくなる。

第三法則は「力を相互に及ぼしあう二つの物体のそれぞれに働く力は大きさが同じで向きが逆である」である。これは、二つの物体が力を及ぼし合っているときに、それぞれの加速の仕方を測定すれば、二つの物体の慣性質量の比が決まる。つまり、二つの物体の加速度の比は、慣性質量の比の逆数となる。質量の概念は、もともとは物体の量と関係しているものである。同じ大きさで同じ物質からなる物体を二つ合わせたものは、2倍の量であると考えられる。同じ物質でなくても、天秤で釣り合わせることによって、量としての質量を同定することができる。通常、量としての質量は重力の作用のもとで天秤を釣り合わせることによって決めるので、「重力質量」（あるいは単純に「重さ」）と呼ぶ。重力質量は物体の量を表すのに対して、慣性質量は加速しにくさを表す量であり、概念としては全く異質のものである。しかしながら、量として大きい物体は、加速されにくいという性質をもつことは確かなことである、とされている。つまり、重力質量と慣性質量は同等である、と考えられているのである。天秤の釣り合いにおいては、天秤の両端につり下がっている物体には同じ重力の力が作用していると考えられる。重力は非常に特殊であって、物体の重力質量に比例する力である。

別の言い方をすれば、全ての物体は、重力の作用のもとで、同じ加速度で運動する、ということになる。例えば、エレベータの中に物体や観測者の人間がいるとして、エレベータの綱が切れて落下しているとすると、エレベータも、物体も、観測者も同じ加速度で落下するので、エレベータの中では、あたかも無重力のような状況になる。つまり、第一法則で述べられているような力の作用しない状況となる。このような重力の特殊な性質をヒントにして、アルベルト・アインシュタイン（1879～1955）は質量と重力に関する「一般相対性理論」に到達したのであった。

第二法則で述べられているような力と加速度の比例関係は運動方程式と呼ばれ、その特徴は、運動の可逆性と決定論性にある。可逆性とは、ある運動が実現したとすると、逆向きの運動も実現できるということである。詳しくいうと、ある物体がある初期条件から出発してある時点まで運動したとする。そのときの速度を逆転させると、運動は逆転しもとの初期条件の位置に戻るのである。決定論性とは、初期条件として物体の位置と速度を与えるとその後の運動は完全に一意的に決定されるということである。二つの物体の間に働く重力（万有引力）が、それらの物体の質量に比例した距離の2乗に反比例する、という場合には、長円の形をした周期的な運動となることが導かれて、太陽の周りでの惑星の公転運動が説明されるようになった。

ところが、多数の物体が相互に力を及ぼし合う場合には、運動はもっと複雑になる。一般的な方法として、運動の間に一定を保つ量を求める。例えば、運動エネルギーと位置エネルギーを合わせたものは常に一定である。エネルギー以外にも運動の間一定値を保つ量がいくつか存在する。これらを運動の定数あるいは運動の積分などと呼ぶ。運動の定数が存在する、ということは、その定数によって表現される条件によって運動が限定される、ということである。エネルギーの他にも運動の定数があれば、さらに制限が加わるので、それらの条件を満たすものとして、初期条件を満たす1個の運動の曲線が決まる。ポアンカレ（1854～1912）は、一般に物体が三つ以上あると、十分の数の運動の定数を決定できない、ということを示した。つまり、運動は決定論的であるが、実際に初期条件と時間の関数として表現できないということである。このような場合に、実際に運動の曲線が複雑になり、その変動の振幅が大きくなってしまいうということを示した。

実際に、わずかな初期条件の差が大きく拡大されることが多い。これを「初期条件への敏感な依存性」と呼んだり、カオスと呼んだりする。このように運動が大きく変動する場合には、ある時点で全ての粒子の速度を逆転しても元に戻る確率は極めて小さくなる。逆転したあとの運動もその振幅が大きく変動するのであり、わずかな外部の作用に対して敏感に応じて、もと来た道から外れてしまうのである。コップの水にインクを垂らしたときに、インクは常に広がる一方であり、広がったインクがもとの一点に戻るということは、ニュートン力学では許されているにも関わらず、決して起こらない。このようなマクロの不可逆性の根拠として、粒子の運動のカオスが関わっていると言われている。

（2）光について

光ほど、私たちの日常に近く、また、私たちの感性に大きな影響を与え、様々な芸

術のテーマとなりながら、その本質が近代まで明らかにされなかったものではなく、また、現在の科学技術の基礎をなすものはない。

19世紀になって初めて光の本質として理解されることになった電気、磁気に関する物理学について述べよう。従来物理学においては、実在とは、物質として質量をもち、運動量、エネルギーを持つものであった。ところが、19世紀になって、物質を介さない実在する場としての「光」の概念が形成されてきたのである。電氣的な力は摩擦電気等の現象から古くギリシャ時代から知られていたし、また磁気現象も磁石が知られていた。しかし、この二つの力が統一されたのはアンペール（1775～1836）によって電流が磁場を発生させることが示されてからである。さらに磁場の変動が電界を生じることがファラデー（1791～1867）によって見出された。

これらを統一して電磁場の変動を記述する方程式を導いたのがマクスウェル（1831～1879）である。マクスウェル方程式の特徴は、電場と磁場が協同して波動として真空中を伝播するということである。その伝播速度が光速と一致することから、光が電磁波であることが確認されたのである。つまり、物質を介さない「場」が実在として存在して、伝播するということである。一時は、私たちが検出できない「エーテル」という媒質があって、電磁波はその媒質の波動現象ではないか、と考えられたこともあったが、マイケルソン・モーレーの実験（1881年）によって、エーテルの存在は否定された。

物体の運動については、運動の法則は、静止している空間でも、一定速度で動いている空間でも同じである、ということが知られている。実際に、静かに動いている電車の中では、その中での物体の運動を見る限り、電車が動いているのか止まっているのかを区別することができない。アインシュタインは、もし電磁波が真空中を伝播する場という物理的実在であるならば、物体の運動と同様に、静止している空間でも、一定速度で動いている空間においても、その伝播の仕方は同じでなければならない、と考えた。つまり、動いている空間（電車）の中でも、静止している空間（地上）でも、光速は同じでなければならない。

常識的に考えると、光と同じ向きに動いている電車から光を見ると、光は地上における速さよりは遅くなって観測されるように思われるが、実際にマイケルソン・モーレーの実験によれば、電車から見た光の速さも同じ光速、つまり、毎秒 30 万 km ということになる。この光速不変性を原理として、アインシュタインは時空の概念に改革をもたらした。すなわち、電車の中の時間の進み方（時計）と空間の中の長さ（物差し）と、地上の時計と物差しとは同じでなく、一定の変換法則に従う、ということ

を示した。これがアインシュタインの特殊相対性理論である。その時空の変換法則から、質量もエネルギーの一つの形態であるということが導かれる。実際に原子核反応では、反応の前後で質量が変化することがあり、そのときには膨大な核エネルギーが解放される。

このようにして、光の本質が電磁波であり、質量を持たないが場という実在であるということが明らかにされた。実在である以上、物体の運動と同じように、光の速さも一定速度で動いている空間において一定値であるということになり、これから特殊相対性理論が導かれた。

光の本質は、量子論によって、新たな面を見せることとなった。物体が放射する光は、物体が高温ならば青色で、低温ほど赤くなる。このことを説明するために、プランク（1858～1847）は、光という電磁波のエネルギーは振動数に比例した「エネルギー量子」の整数倍の値しか取れない、ということを提唱した（1900年）。アインシュタインはこの考えをさらに進めて、電磁波は、エネルギー量子を持つ粒子であると考えた（1905年）。そうすれば、エネルギーがエネルギー量子の整数倍であることが説明できるだけでなく、実際に、光の粒（光子）が、電子等を跳ね飛ばす実験結果を説明できることを示した。光は電磁波という波動性を示すと同時に、エネルギー量子を持った粒子という性質も持つ。

一方、電子線の干渉実験等から電子という粒子が波動現象を示すということもドブロイなどによって提唱されて、シュレーディンガー（1887～1961）は粒子の波動性を表す基礎方程式を提唱した。その波動の意味をめぐってボーアとアインシュタインの論争が起こったが、現在では、波動は振幅と位相をもち、振幅は粒子の存在確率を与える、という解釈になっていて、実験的にも検証されている。すなわち、個々の粒子の存在の検出は確率的であり、その確率は波動性を持つ。確率の波動自体は決定論的であり、初めの波動を与えればその後の波動が決まるようになっている。しかし、その波動で表されているのは、粒子の存在確率である。したがって、光の本性は、量子論によれば、確率的に存在する光子という粒子であり、光子の数が多数であると、光の強度（光子の数）は電磁波の強度として、波動性を示すことになる。

原子が負の電荷を持つ電子と正電荷を持つ原子核からなるという原子構造の考え方については、長岡半太郎（1865～1950）による原子模型が先駆的であり、その後ラザフォード（1871～1937）によって、中心に正電荷が集中した原子核があり、そのまわりに電子があるという描像が確定した。電子と原子核が引力で引き合っているにもかかわらず、原子としてはつぶれずに大きさを保っていることの根拠として、原子核の

まわりの電子の波動性が重要である。すなわち、波動であるということは、空間全体で振幅と位相が矛盾なく決まる、ということが必要となる。例えば、ある場所から「山、谷…」と言う順番で波が発せられたとして、それが回りめぐって元に戻ってきたときに、同じ波でなければならない。そのような条件からある一定の形の波だけが許されることになる。このような条件から定常状態が保たれるという原子論がボーア（1885～1962）によって提唱され、シュレーディンガーの方程式によって最も簡単な水素原子の量子状態が確定した。

このように、光の本性を追求する中で、場の概念、相対性理論、量子論が生まれ、光の豊かな側面が明らかになってきたのである。

4.1.3 科学の総合化

現在、科学の諸分野は個別に深化すると同時に細分化されてきた。確かに、科学研究に関わる技術が高度化し、概念が精密化してくると、研究者の関心は個別のことに重点が移ってしまう。しかしながら、学術の新しい進展は往々にして異分野との交流によって生じることが多い。また、個々の領域に関してより深く新しい洞察を得るためにも、他分野との交流は極めて重要である。生命現象の物質的基礎としての生化学は、量子論の基礎を必要としているし、一方で生命現象のマクロな動的現象の理解には、熱力学などに基づく考察が必要となってきた。つまり個別の現象に対して、様々な学問分野からの多角的な取り組みがあつてこそ、全体像が浮かび上がってくる。

近代科学、特に物理科学は、注意深く制御された実験と観察を基礎として、要因と現象の間の因果関係を明らかにしてきた。その際には、因果関係がより明瞭となるように、理論も実験もなるべく単純化して理想的な状況に近づけるべく様々な要因を導入していくという方法をとってきた。しかし近年における計算技術の急速な発達は、様々な要因が複雑に関わる現象について、単純な要素に分けることをせずそのまま解析することを可能にしてきた。

このことは、学問の領域を大きく拡大させた。これまでは、複雑な現象に対してはそれに関わる様々な要因を個々に取り出し、それぞれについて厳密な因果関係を検証するという立場をとることが多かった。これに対して、むしろ複雑な系をそのまま解析し、あるリスクを考慮しながらも、予測を立て、人類の将来への備えを打ち出すような科学のあり方も重要性を増してきたように思われる。特に、地球温暖化等に関するシミュレーションによる研究などは、様々なモデル化があり、厳密性に関してはある限界があるにも関わらず、その研究成果は地球環境の将来について極めて重要な意

味を持っている。厳密性を追求する科学の重要性は今後も続いていくだろう。しかしその一方で、複雑系としての地球や社会の現実の課題に大胆に取り組む科学者あるいは科学的素養を持った専門家も、世界は必要としている。

4.1.4 倫理性の必要性

これまでの科学は、自然現象を研究対象とし、その知見を利用して、人間の生活を豊かにする使命を帯びてきた。しかしこれからは、科学の本来の意味である「知ること」を、人類みずからの存在のあり方に向けることも重要である。人類は生物圏を構成する一つの種であるにもかかわらず、農業の開始により、他の生物種と比較して極めて大掛かりな自然への介入を、すでに始めてしまった。さらには、産業革命以降、人類は地球に対する負荷を急速に増大させてきたという現実を、私たちは謙虚に直視しなければならない。

私たちは、自分たちの存在を時間空間の広がりの中に位置づけてみるものが求められている。そうすることで、外界を認識する智としての科学から、自分たちの存在を認識する智としての倫理性も共有することが、21世紀には求められるのである。

4.2 科学技術の転換をもたらした歴史的事実

4.2.1 人間についての科学的理解

(1) 人間科学

人類誕生の初期には、人間という存在に対して、おそらくすでに関心を持たれていたであろう。しかし、哲学的に論じられていた心性の諸相が実験科学の対象となり、独立の精神科学として心理学が誕生したのは、漸く 19 世紀半ば過ぎである。それにより、科学的な手続きに基づく人間探究が始まった。

ライプチヒ大学に心理学実験室を開設したヴントは、意識の研究を開始した。もともと、彼が目指した心理学というのは、自分でなければ体験しようのない感覚や感情を自己観察によって基本的な要素に分析し、複雑な意識を要素の構成として理解しようとするものであった。そこには化学の物質観の影響がみられるところから、その立場は「心的化学」とも呼ばれたが、自分自身の意識を内側からみるというのでは科学としての客観性が保証されないので、ヴントは同時代の人たちから批判され、20 世紀前半にかけ、心理現象を総括的に説明するための理論をめぐって、いくつかの学派間に激しい論争が起きる。

その間、フェヒナーが精神物理学を唱えて感覚量を刺激の物理量との関係で定式化し、エビングハウスが無意味語を材料にして過去経験影響を巧みに排除した記憶実験によって記憶の忘却過程を明らかにするなど、実験科学としての基礎が固められていく。また、ダーウィンの進化論に影響されてヒトの知性の由来に関心が高まり、19 世紀末から 20 世紀初頭には系統発生の異なる段階にある動物を対象に知能を比較する試みがさかんに行われる。そして、知性を支える学習や思考などの働きが明らかになった。それまで人間は理性的存在、他の動物は本能的存在とみなされ、両者を二分する動物観が常識であったが、こうしてヒトを動物界に位置づけることによって、人間心性の生物学的基礎が正しく認識されるようになる。比較研究はその後いったん衰微したのち 20 世紀末の認知研究の台頭と共に再び活発になり、霊長目の動物に人間の心性の前駆的な様態が次々と見出されている。

ところで、ほとんどの心理学が意識や行動を論じるなかであって、フロイトは当人の気づかない深層の心（無意識層）の働きに注目した。幼少期の心的外傷や抑圧された願望・欲求などの深層を精神分析によって捉え、それらに起因する心的障害や適応不全を治療する方法を導き出した。精神分析に対しては、それが科学の要件を充たすか否かをめぐって論争が続いたが、今日の心理臨床のなかで理論と技法の両面におい

て重要な役割を担っている。

(2) 心へのアプローチ

人間の心を対象とする科学がどのようにして可能になるのだろうか。身体と違って、「心」は眼に見えるものではない。ヴントのように心を本人が内側から観察するという方法が考えられるが、それでは実証可能な科学にはなりえない。そこで、心を直接には捉えようのないブラックボックスだとした上で、環境の条件を変化させたときに心に生じる変化を、他者の言語報告、動作表出、生理反応などから探っていくという方法を採用する。つまり心は、脳や臓器のような実体ではなく、こうして論理的に導き出されたもの（論理的構成体）なのである。そのため、心を扱う科学には、物質を対象にする科学にはない、独自の実験手続き、測定尺度、検査技法が開発され、観測データの解析法も考案されてきた。

ところで、複雑な心性をそのまま全体として扱うことは非常に難しい。そこで、本来は相互に絡み合っているはずの知覚、感情、欲求、思考、性格などの心理過程を個々に切り離して分析を進めてきた。その結果、それぞれの働きについて多くの知見が蓄積されてきたものの、それらを統合した心理学的人間の全体像を描き出すという目標は未だ達成されていない。その課題の解決が今強く要請されている。

人々が心理学に期待するのは、人間一般に当てはまる法則性というよりも、むしろ自分自身や身近な他人の心理を知ることであるかもしれない。それは地球全体の気象を知ることよりも自分の住んでいる町の天気に関心を持つのと似ている。しかし、気象学によって天気予報の精度が保証されるように、個としての人間を理解するためにも人間の科学的理解が欠かせないことは言うまでもない。

(3) 他の学問分野との関係

脳科学の進展につれて、心の科学と脳の科学の関連はいつそう密になってきた。心の科学が心を論理的構成体として扱うのに対し、脳の科学は実体である脳の構造や機能を探るのであるから、両者のアプローチは違っている。しかし、20世紀末から今世紀にかけ、脳の働きを可視化する技術（脳内活動イメージング技法）が進むにともない、心と脳の活動の相関について新たな成果が得られるようになった。

また、心の科学は、20世紀半ばに始まる学際化のなかで、行動科学・生命科学・認知科学を構成する分野の一つとして役割を担うと共に、技術的分野において、快適性の追求や安全・安心の推進を目指す人間工学や環境工学の発展に貢献してきた。

(4) 社会科学

社会的存在としての人間を理解することもまた重要である。ただ、社会というスケ

ールで問題を扱う場合、物質科学におけるような厳密な実証手続きに従うことは望めない。そういう事情の下で、国際関係や環境保全などの事象のシミュレーションにゲーミング技法を導入したり多量のデータを投入して演算処理を行ったりして、社会構造の特性や社会動態の予測を試みる動きがさかんである。今後、このようなアプローチによって社会事象の広範な分析が行われ、社会の科学的理解が進むものと期待されよう。

人間の心性は生物として自然環境や進化に制約されると同時に、みずからの技術によって生み出した人工環境や、そこで生きるための制度や慣習によってもまた影響される。特に 20 世紀後半以降、技術による環境改変は、見過ごせない変化を人間の心性に及ぼすと共に、新たな適応課題を生み出しつつある。この状況にあって、人間科学・社会科学と自然科学や技術の諸分野との連繋はさらに深められなければならない。

(5) 科学と常識

私たちは日頃、自分の心の働きや社会の動向を内側から眺めることに慣れている。そのために、科学的に明らかになった人間像や社会像に違和感を覚えることも少なくない。そこに、科学的根拠のない思い込みに基づく自己理解や場当たりの社会認識が入り込みやすい。人間科学・社会科学の素養を身に付けることは、似非科学の弊害を回避する上でも重要である。

4.2.2 情報処理革命

最初のプログラム内蔵方式のコンピュータが世に登場した 1949 年から、コンピュータを中心とした電子工学技術ならびに情報科学技術は飛躍的な進歩をとげた。その過程では、時代時代で革命的と思われるような進展があった。

真空管を用いた巨大な特殊機械だったものが、集積回路を用いた汎用コンピュータとなり、企業等の事務処理に本格的に使われるようになり、「電算化」がキーワードとなった時。列車の切符予約や銀行預金の出し入れを、コンピュータセンターのコンピュータに回線でつながれた専用端末でできるようになった時。パソコン（パーソナルコンピュータ）が登場し、家庭でも使うことができるようになった時。しかし、それらはまだ、本格的な情報処理革命の予兆に過ぎなかった。

1990 年代から 2000 年代にかけてのインターネットの利用、そして組み込みコンピュータの浸透は、まさに、革命と言ってよいほど、私たちの生活や社会を大きく変える変化をもたらした。この二つの革命的進展をコンピュータ上の情報処理の立場からながめてみると、コンピュータと通信との融合、コンピュータと他の機器との融合に

より、情報処理が大きな意味を持つようになった変革と見ることができる。

(1) インターネット革命：真の情報処理機器となったコンピュータ

インターネットとは、コンピュータ間通信技術を意味していたが、最近では、コンピュータ間通信技術を用いた社会情報基盤の総称になってきている。インターネット（の利用）が本格化したのは、1990年代も後半になってのことである。日本に商用のインターネット・プロバイダが登場したのは1993年だが、その頃は、プロバイダというビジネスが成り立っていくかどうかさえ分からなかった。それが10年弱で、社会の基盤として欠かせないものになってしまったのは、まさに革命と言える進展だろう。

この社会情報基盤としてのインターネットの発展には様々な要因がある。インターネット用の通信技術の開発（1970年代終わり）、コンピュータの小型化とパソコンの普及（1980年代前半）、そして、電子メール（1977年）、ウェブ（1990年）に代表される情報科学技術の進展などである。日本では仮名漢字変換に代表される日本語処理の実用化（1970年代終わり）がある。また、その中では、暗号や電子署名などの情報セキュリティ技術も大きな役割をはたしている。

コンピュータ（上の情報処理）の視点に立つと、インターネット革命は、通信と融合することで、コンピュータがはじめて本当の情報の処理に使われるようになった変革だとも言える。もちろん、それまでもコンピュータは、企業等の事務処理や銀行や列車予約等のオンラインシステムなどで情報処理をしてきた。しかし、それはまだデータ処理という域を越えていなかった。データは人を介し、人間のコミュニティで利用されることで、情報としての意味を持つようになる。インターネットにより、私たちにとって本当の意味での情報が、コンピュータの手助けにより処理されるようになってきたのである。また、それがコンピュータを身近なもの、必須なものにしたのである。

パソコンの使い方の変遷を見てみよう。パソコン登場当初は、TVゲームなどで遊ぶしか使途がなかった。それが、仮名漢字変換ができてワープロに使えるようになった。そして、ネットワークで電子メールやニュースをやり取りするようになり、あっという間に情報を扱うための必須の道具となってしまったのである。

もちろん、情報と言っても、意味のあるもの、ないもの、間違っているもの等、玉石混淆である。また、最近では高度なセンサー技術によって様々なデータが得られるようになってきているが、それらも、処理をしなければ、人にとって意味のある情報にはならない。情報を選別する、データから有益な情報を得るなどの真の情報処理が今後非常に重要になってくるだろう。

(2) 組み込みコンピュータ革命：生活に深く浸透したコンピュータ

インターネット革命ではコンピュータが私たちの前面に大きく現れてきたが、見えないところで生活に深く浸透したコンピュータの利用も革命的に進んでいる。電気電子工学の進歩により、コンピュータ（演算装置＋メモリ）は超小型化し、様々なセンサーと共に、あらゆる機器の中に埋め込まれ、有線・無線で互いに連携して動いている。例えば、現在の乗用車で使われているコンピュータとその上に載るプログラム量は、1980年頃の小規模なコンピュータセンターのコンピュータに匹敵するとさえ言われている。いつの間にこうなってしまったのかと思うほど、コンピュータが機器の中に組み込まれ、使われているのである。

組み込みコンピュータがここまで浸透したのは、まず、電気電子工学的な技術の進歩がある。そうしたハードの進歩の上に、すべての現象をデジタル化して、計算で処理してしまおう、という情報科学技術の基本原則が開花したのである。また、オブジェクト指向プログラミングのような計算の新たな表現方法がなければ、多種多様なプログラムを実現することは不可能だったであろう。

1990年代の後半から起こった革命の変革の特徴は、コンピュータ上の情報処理と他の機器の融合であり、通信、電子工学、機械工学などと情報科学技術の協調が鍵となっていた点である。今後も、こうした融合による革新的な進歩が出てくることだろう。

4.2.3 ナノテクノロジー

最も初期のコンピュータ ENIAC では真空管が 17,468 本使われ、倉庫一つを占有していた。今日のパソコンでは 1 CPU でトランジスタが数億個、1 ギガバイトのメモリでトランジスタ約 10 億個が使われていると考えると、全体で真空管十数億個に相当する。これを収納するためには数万棟の倉庫が必要であり、真空管一つの消費電力を仮に 0.5 W (ワット) とすれば、全部で 0.5 GW (ギガワット) である。原子力発電所 1 基で、パソコン 2 台しか動かすことができないことになる。実際のところは、これだけの数の真空管があれば、ほとんど常に真空管のどれかは切れて新しいものと取り替えていかなくてはならず、このシステムが動いている時間などない。現在コンピュータで用いられている集積回路中のトランジスタは数十 nm (ナノメートル) 程度の大きさである ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)。十数 cm の真空管が 100 nm になったと考えると、コンピュータは百万分の一の大きさになったことになる。小さくかつ安定した固体素子を使えるということが、社会を如何に変えてきたかということが実感できる。

ナノメートル・スケールの系を作り、これを利用しようというのがナノテクノロジー

一である。固体素子をさらに小さくすることができれば、コンピュータを現在よりもっと小型化し、動作をより高速化し、消費エネルギーも少なくなり、記憶装置も小型化・高機能化ができる。また新しい量子力学的現象を直接用いることも、ナノテクノロジーに期待されている。一方でより小さいスケールでのトランジスタを作れば、単位体積当たりの発熱量が増えるので、冷却機構をどうするかが大きな課題となるし、それぞれの素子の間の絶縁性を確保することなどの新たな課題も多い。ナノテクノロジーの拡大に伴い、新しい材料の研究も新しい人工物質に急速に拡大している。

電子の振る舞いは量子力学により支配される。それでは量子力学をマクロスコピックな系における電子の振る舞いに適用したらどうなるだろうか。電子はフェルミ粒子という純粋に量子力学で決まる統計的性質を備えている。物質の電気伝導特性である金属、半導体、絶縁体のいずれであるかなどを決めるのは、物質内部の電子の状態とこの量子力学的統計性である。しかし電子の波動としての振る舞い、例えば波動関数の干渉などをマクロな系で観測することは、超伝導などの「巨視的量子現象」を除くと、できない。不純物などの欠陥による散乱、原子の熱振動による散乱、電子間のクーロン相互作用による散乱などの多様な非弾性散乱機構があり、その結果、電子の波動関数の位相が乱されるからである。

ミクロスコピックとマクロスコピックの中間のスケールであるメゾスコピック (μm あるいはサブミクロンの長さ領域) スケール、さらには nm スケールの構造体を作ることや原子1個1個を制御することが可能になっている。このスケールでは、電子波動関数の位相が本質的な役割を果たす量子力学的現象があらわれる。電子の位相は磁場によって制御でき、電子の量子力学的性質を制御し応用することが可能になってきた。これら量子力学的性質の制御と応用の実現は、様々な要因による位相の乱れ (位相記憶の喪失) を抑えることができるかどうか課題となっている。

半導体研究で開発されてきたナノテクノロジーはより広い科学技術分野に応用され、電子材料以外にもソフトマター、ナノバイオの研究や、ドラッグデリバリーなどの医療への展開も試みられている。

ナノテクノロジーの物理的手法は大きく二つに分けることができる。ミリメートル (mm) およびマイクロメートル ($\mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$) の大きさの物質に対して微細加工技術を用いて原子スケールの構造を再編成するトップダウン方式と、原子や分子を一つひとつ正確に並べたり繋いだりしていくボトムアップ方式がある。前者の例は「電子線リソグラフィ」である。後者の典型的な例は、「走査型プローブ顕微鏡 (SPM)」の探針を用いて、原子や分子を動かす技術である。メゾスコピック領域では、測定器

を工作機械として用い、あるいは試料と測定系を一体と考えてはじめて現象が理解できるということは一般的なことであり、電極の構造やそこでの現象も重要になる。

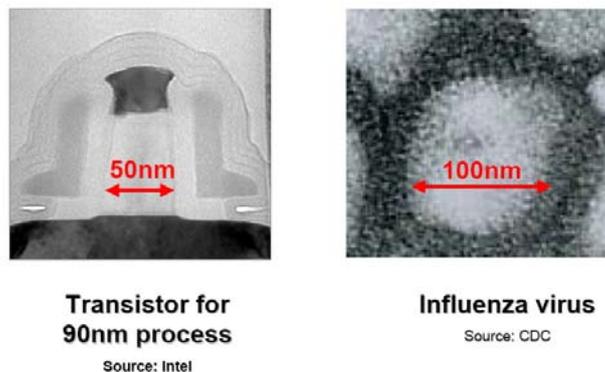


図5 トランジスタとインフルエンザのスケール

(左)90 nm スケールのトランジスタ(インテル)。(右)トランジスタと比較するために同じスケールでインフルエンザ・ウイルスの写真を示す。2008年初頭には35 nm トランジスタが発表された。

4.2.4 生命の仕組みの解明と操作技術の開発

生命の仕組みが示す普遍性と多様性は、科学者・技術者の興味を集め、数世紀にわたって、そのメカニズムを解明するための基礎研究や応用研究が行われてきた。19世紀末には、生命体を人為的に操作しようとする動きが現れた。微生物を対象としたものがその最初の例である。すなわち、人々に不安と恐怖を与えていた感染症(伝染病)の原因として次々と発見された病原微生物を試験管内で増殖させたのが、生命体を人為的に扱うことのはじまりであった。そこで開発された培養技術は、その後、感染症や伝染病の患者に有用なペニシリン(フレミング、1940年)やストレプトマイシン(ワックスマン、1944年)などの抗生物質の発見やワクチンの製造につながった。また、生命体を作り、その機能を司っている、核酸、タンパク質、糖質、脂質などの生体物質や、生体内の代謝経路を研究するために役立ち、さらには、疾患における代謝異常などについての生理学的、細胞学的、生化学的および遺伝学的研究を進展させた。

これらの研究の進展により、20世紀後半には、多くの画期的な発見や開発・発明が生まれることとなった。例えば、DNA二重らせんモデルの提唱(ワトソンとクリック、1953年)やDNAポリメラーゼの発見(コーンバーグ、1956年)によって、遺伝子の本体であるDNAの構造や複製のメカニズムが明らかにされ、遺伝子組換え技術の確立(コーエンとボイヤー、1973年)、CTスキャナーの開発(ハウズフィールド、1973

年)、幹細胞の証明 (ティルとマッカロック、1961 年)、体外受精児の誕生 (エドワーズとステップトー、1978 年)、プリオンの発見 (プルシナー、1983 年)、クローン羊の誕生 (ウィルムット、1997 年)、ヒトゲノム全塩基配列の解読 (2002 年) など、それまでには考えられなかった出来事が次々と起こり。そして、これら発見・発明が契機となって、人間を含むあらゆる生命体の、生命現象の本質の解明に迫る研究が推進され、生命操作を可能にする、新たな三つの領域、すなわち、ゲノム科学/遺伝子操作技術、生殖発生生物学/胚細胞操作技術、脳科学/高次脳機能解析技術という領域が創生されることになった。現代は、これら領域が、これまでに得られてきた多くの科学的知識やコンピュータなどの情報通信技術、ナノテクノロジーなどと結びついて、急速に進化しつつある時代であると言える。

ところで、現代はまた、市場経済至上主義と科学技術至上主義が全世界的に広がっている時代でもあり、すべての科学と技術は、経済効果や産業化に結びつくか否かで、その価値が評価される。このことは、生命科学と生命技術でも同様であり、上記3領域の中では、特に医療分野におけるゲノム科学/遺伝子操作技術の応用に注目が集まっている。その結果、少しずつではあるが、これらの技術の中から有用性が認められ、社会に定着していく成果も出つつある。人々に不安や恐怖を与え続けている遺伝病、がん、成人病、新興・再興感染症などに対する DNA 剤や iRNA 剤などの分子標的治療剤の開発や、遺伝子診断の開発などが、その例である。

これに対して、生殖発生生物学/胚細胞操作技術領域では、胚性幹細胞 (ES 細胞) やクローン胚、また、人工誘導幹細胞 (iPS 細胞) などを利用する再生医療の可能性と必要性が強調されてはいるが、これら幹細胞を確保する上で生じる、倫理上あるいは安全上の課題や、増殖法と分化制御法が確立されていないための技術的課題から、なかなか進展しない。また、医療分野以外では、遺伝子操作技術によって新作物や新微生物の作製が行われ、また、胚操作技術によってクローン生物の作製が行われているが、社会的には、まだ議論が充分にはなされていない状態である。しかしこれらの技術は、未来世代への影響が懸念される多くの問題、例えば、大気汚染、水不足、水質汚染、生態系変化、天然資源不足、食糧不足などを解決する技術として、今後、利用されることが期待される。20 世紀以降の工業経済社会の繁栄がもたらした負の効果を解消することに、役立つ事が期待されている。しかし、価値多元社会においては、社会的合意形成が困難であるために、ときにその利用が阻止されることもあり得る。

生命操作技術の応用は、なかなか進展しない状況であるが、人間を含めた生命体の生命の仕組みに関する知見は、3 領域の研究の発展によって、期待通りに増大しつつ

ある。例えば、ゲノム科学／遺伝子操作技術と生殖発生生物学／胚細胞操作技術の発展により、生命が維持されるためには、異なった機能を有する多数の遺伝子、タンパク質が働き、細胞レベルのネットワーク・システムが常に秩序よく統合された形で働いていることが不可欠であることが、すでに明らかになっている。また、ゲノム科学／遺伝子操作技術によって、それぞれの人の DNA で、一塩基多型のパターンが異なっていることが解明され、その違いが、個々人の薬剤感受性や易罹患性^{えきりかんせい}などに個人差をもたらしていることも、明らかにされた。

これに対して、脳科学／高次脳機能解析技術によってもたらされた知見は、その対象である脳が極めて複雑であることから、まだ科学的に確かと言えるほどのものは多くない。しかし、人間を特徴づけているのは、経験・学習・記憶が影響する高次脳機能であり、社会におけるコミュニケーションを形成する上で必要な、判断能力や理解能力、価値判断基準も、その時々感情や利己的欲望によって容易に揺らぎを生じることが、次第に確かになりつつある。科学技術の応用に際して、個と社会（公）の衝突がしばしば起こることや、科学技術の応用を主導する専門家が、大事な局面で利己的欲望によって不正行為を働くこと、また、社会的合意形成の段階で、十分な議論をして合意を得たとしても、結果としては常に負の効果を完全には回避できないことなどは、人間が有する弱さに起因するのであって、完全には避けることはできないのかも知れない。

しかし、生命科学・技術は、この人間としての限界を超えるべく、次のシステム生物学と脳倫理科学へと転換しつつあり、将来に向かって新たな進展を見せることが期待されている。

4.2.5 宇宙モデルの確定

宇宙が一様に膨張しているという観測事実を基礎において、ビッグバン宇宙モデルが1947年に提唱された。超高温・超高密度状態の1点から宇宙が膨張を開始し、現在まで続く膨張過程の中ですべての物質構造が形成されたという進化宇宙モデルである。このモデルが予言するヘリウムの遍在が確かめられ、宇宙背景放射が発見されてビッグバン宇宙モデルは確立した。しかし、宇宙の年齢や大きさ、宇宙空間の曲率やエネルギー密度など（これを、宇宙論的パラメータと呼ぶ）宇宙の骨格ともいべき物理量についてはビッグバン宇宙モデルからはなにも言えない。それらは宇宙の観測によって決められるべき量で、理論的に予言できるものではないからだ。

1970年代から宇宙観測が急速に進展した。人工衛星が打ち上げられて地球大気外か

ら X 線、可視光、赤外線、電波の観測が可能になり、大型光学望遠鏡が世界各地に建設されて、宇宙を監視する目が整備されたのだ。それによって、高分解能で高精度の観測や地上には到達しない波長での観測ができるようになり、宇宙論的パラメータの範囲を制限する研究が続けられてきた。1990年代に入って、とりわけ宇宙背景放射のゆらぎと遠方の超新星に関する観測が蓄積されて、ついに宇宙モデルを確定することに成功した。

その結果、

- (1) 宇宙を特徴づける最も重要なハッブル定数は 72 km/s/Mpc であること
- (2) 宇宙の曲率がゼロであること
- (3) エネルギー密度に占める物質の割合は 26%程度であり、その内訳はバリオン 4%、ダークマター 22%であること、

などが明らかになった。

(2) と (3) を組み合わせると、ダークエネルギーと呼ばれるエネルギー密度が不可欠であり、それが 74%も占めていることになる。ダークエネルギーはアインシュタインが持ち込んだ宇宙項に対応するもので、宇宙空間を斥け合うように働く力（宇宙斥力）が存在しなければならないという結論になった。そのことから、宇宙空間が無限に広がっており、永遠に膨張を続けるということも確定した。

このダークエネルギーの存在を仮定して (1) のハッブル定数の値を考慮すると、

- (4) 宇宙の年齢は 137 億年になること

も明らかになった。これは銀河において最も古い天体と考えられる球状星団の年齢の 120 億年とも整合的であり、従来の矛盾（球状星団の方が宇宙より古いという矛盾が指摘されていた）が解決された。その結果、宇宙の晴れ上がり時期が 38 万年頃、最初の銀河形成が 2 億年頃、というふうに宇宙の時間尺度が正確に決まったのである。

さらに、超新星の距離と明るさの関係と結び合わせると、

(5) 宇宙は 57 億年前くらいに減速膨張から加速膨張に転じたこと、が明確になった。これは宇宙斥力による効果と考えられ、ダークエネルギーが存在するもう一つの重要証拠となっている。

このように (1) から (5) までの結果から、全体宇宙の骨格が明らかになった。この枠組みの中でビッグバン理論を正統的な立場に位置づけ、宇宙論は実証的な科学の地位を確立したのである。

とはいえ、宇宙論は、ダークマターと呼ぶ物質は何か、ダークエネルギーはいかなる起源を持つか、という難題を抱え込んだことになる。ダークマターは電磁波では観

測できないが重力を及ぼす物質で、現在のところそれが何であるか分かっていない。他方、ダークエネルギーは巨大な空間に働く斥力なのだが、それがどのような物理機構で生じているのか見当もつかない。いずれも現代物理学に対する重大な挑戦と行うことができる。この二つのダーク成分を導入することによって宇宙論的パラメータをすべて決定することができたのだが、大きな難問に向かい合っているとも言える。二つのダーク成分は、成功しつつあると見られる宇宙論の喉元に突き刺さったトゲなのである。

4.2.6 地球環境についての科学的理解

環境問題についての科学的理解は、生活の利便性向上という陽の部分に対する陰の部分として、問題が発生するごとに体験的に蓄積されてきた。近年地球が持つ生態系扶養能力の限界が認識されるようになり、科学的に理解するには、空間的にも時間的にも極めて広範かつ多数の要因を考慮することが必要となっている。地球環境問題は人類の活動によって生じた問題であり、大気圏・水圏・地圏、生態系、人類社会が密接に関連するものと理解されている。

(1) 化学物質による環境影響の理解と社会の対応

- ① 動物学・海洋生物学者のレイチェル・カーソンは『沈黙の春』（1962年）で、当時殺虫剤として大量に散布されていた有機塩素系農薬、有機リン系農薬による生態系の破壊と人への健康影響を、米国各地で起きていた断片的事実を科学的に考察して警告を発した。その後、世界各国で特に毒性の強い化学物質の製造禁止や規制・管理の強化に結びついた。現在実施されている化学物質の安全性評価の視点の大部分はこの時に指摘されたものである。
- ② 放射化学者、気体光化学者のシャーウッド・ローランドらは、当時スプレーガスなどに大量に使われていたフロンガスによるオゾン層破壊の可能性（1972年）を指摘した。生物にとって有害な紫外線を遮蔽するオゾン層の破壊は、すなわち、地表に住む全ての生物にとっての脅威である。この指摘に呼応して多くの研究が開始され、13年後のモントリオール議定書で漸次廃止する計画が合意された。その後も活発な研究と検証が実施され、危機感がさらに高まって計画の大幅な前倒しと対象物質の拡張がなされた。この過程で宇宙工学技術が果たした貢献は極めて大きい。オゾン層の問題は人類活動の影響が成層圏にまで到達したことを示し、社会の持続可能性に対する配慮の認識を大きく広めた。

(2) 地球の能力の有限性理解と社会の対応

- ① 1972年にローマ・クラブは、マサチューセッツ工科大学経営大学院に委託した研究成果を『成長の限界』として発行した。システム・ダイナミクス理論により12のシナリオのシミュレーションを行い、いずれのケースにおいても「地球の供給能力（資源、食糧など）と吸収能力（消化能力・処理能力など）には限界があって、この限界を超えるとそれを補うために支払うコストが膨大になり過ぎて崩壊する」と警告した。それまでエネルギー資源や原料資源、食糧資源などの生産・消費量は科学技術の革新によって飛躍的に拡大したが、地球の扶養力はその幾何級数的変化に耐えられないとして有限性を提起したのである。この後2度にわたるオイルショックがあったが、この警告に対して具体的対応策はとられなかった。
- ② 1992年に環境と開発に関する国際連合会議において「アジェンダ21」（リオ宣言）が発表された。地球の能力の有限性に関する認識が、ローマ・クラブの提言後20年を経て、世界の共通認識として発信された。現代社会の駆動力である石油を初めとする化石エネルギー資源や、利用可能な水資源の有限性、廃棄物による汚染ほか、発展途上の国々における開発の方向性を念頭に、「持続可能な開発」のための具体策を講じることが提言された。学界、産業界、行政など社会の多くのセクターで持続性確保に向けた取り組みを開始する契機となった。
- ③ 1988年にIPCC（気候変動に関する政府間パネル）が設立され、多くの科学者が参加して気候変化の科学的評価と影響評価、対応戦略等の検討を行い、5年ごとに評価報告書を発行してきた。20年目に当たる2007年に発行された第4次評価報告書では、最高性能のコンピュータ(地球シミュレーター)を使用して「気候システムの温暖化は疑う余地がなく、原因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」との結論を発表した。世界各地で頻発している異常気象についても、「因果関係の確信度が高い」と指摘した。一方で、1992年に「気候変動枠組条約」が提案され、1997年に京都で開催された締約国会議（COP3）で炭酸ガスの排出削減目標を定めたが、世界の排出量の1/4を占める米国の離脱や中国を初めとする開発途上国の削減目標がないなど、各国の利害が対立する中で事態の改善に向けた努力が続けられている。

(3) 地球環境についての科学的理解の今後の方向性

産業化社会の発展は世界各地に悲惨な公害問題を発生させ、その克服過程で環境についての科学智が進歩した。しかし、人類活動は今や自らの生活環境だけでなく、全地球的な気候変動、生態系の存続基盤の領域にまで影響を及ぼすようになった。

現在我々の周囲で起きている幾何級数的な変化に対しては、問題を認識した時点からの対応では手遅れとなる危険性があり、危機を未然に回避する新しい科学の智慧が必要となっている。そのためには自然科学、社会科学、人文科学の科学的方法論をすべて取りこんだ、総合的な科学智の形成が期待されている。

社会の問題認識共有に果たすべき科学の役割と期待、責任は大きい。

4.3 現代の科学技術の考え方

4.3.1 総合的視点にたつ選択

近年、環境問題への意識の高まりと共に、環境配慮行動への関心も高まっている。現代社会は、様々なモノに溢れ、大量のエネルギー消費に依存して生活が成り立っている。このような便利な生活と持続可能な発展を目指した環境に配慮した生活は、一見矛盾する。いろいろな家電製品に囲まれて生活している現代社会では使用する電気の量は、1980年から2000年の20年間の間に1.6倍以上に増えている。そして、その電気を作るのに、二酸化炭素が排出されており、これが地球温暖化の一因であるとされている。便利な生活のために電気を消費することと地球温暖化を防ぐために電気の消費を減らすことの両立は難しい。この問題を解決するためには、小まめに明かりを消すといったことや省エネ家電を利用するといった、できるだけ無駄に電気を使わないようにすることから、太陽光発電や原子力発電といった二酸化炭素を発生しない発電を行うといった様々な解決方法が考えられる。しかしながら、これらの解決方法も、その製品のライフサイクル全体では二酸化炭素の排出が大きかったり、別の有害物質を発生したりするなど、必ずしも有効ではない場合もあるので、注意が必要である。また、省エネ製品の場合、個々の製品では省エネでも台数が増えたり、大型化すると全体としてはエネルギー消費が進む場合もある。例えば、自動車の改良が進み、より快適に安全に運転できるようになった結果、自動車を保有する人が増えているし、また、燃費がよくなったために、大型車に買い替えたり、セカンドカーを保有することが進んでいる。環境への負荷を考えると、個々の車ごとには環境負荷が減っていても、社会全体では環境負荷が増えるという結果を招く。ミクロレベルの最適化がマクロレベルでは最適にならない場合もある。特に、地球環境問題を考える場合は、地球規模での最適化を図る必要がある、その設計には十分な配慮が必要である。

環境配慮行動と行って行ったことが、別の環境を悪化させる場合もありうる。割り箸や紙コップなどの使い捨てに対する批判もあるが、水が貴重だったり、污水处理ができない場合などは、箸や食器を洗う方がかえってコストが高くつく場合もある。環境配慮行動自身が追加的なコストである場合は、そのコスト負担を誰が行うか（自分が行うのか、費用を払って専門家が行うのか）、費用対効果は適当か、他の環境への悪影響はないか、をよく吟味する必要がある。

このような環境問題とよく似た問題に、トレードオフという問題がある。トレードオフとは、いわゆる、「あっちを立てれば、こっちが立たず」という状態のことである。

その問題を解くには、両立できない、同時には達成できない要因を折衷させなくてはならない。安全性を上げることとコストを下げることは両立しないことが多い。コストを上げることで安全性を担保することは、コストを上げることのトレードオフとして安全性を得るということである。技術開発においてトレードオフとは、ユーザーからの要求や、マーケティングによる最新のニーズ、最先端の科学の成果を応用した新たな技術という様々な条件の中から解を得るということである。解いた結果が設計である。設計行為とは、様々なトレードオフを折衷させて最適な解を見つけること、と言える。経済学においてもトレードオフは重要な概念の一つである。あるものを手に入れるために別のものを放棄しなければならない関係が成立するとき、両者の状態をトレードオフの関係にあるという。性能とコスト、スピードと質、味と手間など私たちは、仕事や日常生活を送る上でトレードオフを経験しないことはない。

私たちは、現代社会を生きるにあたって様々な判断を迫られるが、そのときは、便利に暮らせるか、ということだけではなく、俯瞰的な視野に立って、ある時は地球規模で物を見たり、ある時はトレードオフをよく考えて、未来のために選択していく、ということが必要なのである。

4.3.2 多様性と一様性

私たちは、天然物から人工物まで、様々なもの、多様なものに取り囲まれている。それらを見てどのように感じ解釈するかは、感性と知性の問題となるのかもしれない。

古来より人類は、自然界の事物や人工物を様々なに分類し、仕分けしてきた。素朴な分類方法としては、役に立つものと立たないもの、食べられるものと食べられないものといったやり方があったはずである。そのほか、動物であれば、例えば足の数や生息している場所で分ける方法があった。日本では、クジラやイルカは四つ足でもなく、海にすむ生き物であるため、魚の同類とされ、クジラを食べても仏教の教えに基づく肉食禁止令には抵触しなかった。また、二本足の鳥も、その禁から外れていた。

近代的な生物分類学の祖といわれるスウェーデンの博物学者カール・リンネ（1707～1778、カルロス・リンネウスともいう）は、二名法による学名表記（ヒトの学名ホモ・サピエンスのように、ラテン語の属名と種小名の二つで学名を表記する方法）を提唱し、それをさらに目、綱、界にまとめていくという階層的な分類法を確立した。

リンネは、自然界の事物を、動物界、植物界、鉱物界の三つに分けた。さらに動物（界）については、四足動物、鳥類、両生類（爬虫類を含む）、魚類、昆虫類、^{ぜんちゅうるい}蠕虫類（ミミズから貝、タコ、イカまでが含まれる雑多なグループ）という6グループ（綱）

に大別していた。植物（界）は、主に雄しべの数によって24の大きなグループ（綱）に分類したのだが、この分類は混乱を招くことになった。他の特徴が類似していても、雄しべの数が異なると、まったく異なるグループにされてしまうからである。鉱物（界）に関しては人間にとっての有用性の観点から、岩石、鉱物、採掘物の3グループに大別された。

リンネの分類方式は斬新でそれなりに有用ではあったが、個々の分け方が主観的なせいで、不便な点も多かった。生物の分類に画期的な視点をもたらしたのが、チャールズ・ダーウィン（1809～1882）の進化理論である。現生する生物は共通の祖先から分岐することで進化してきたという考えから、系統の近い生物どうしを同じグループに入れる分類体系が登場することになったからである。

現在の地球上には数千万種、数億種の生物が生息していると推定されている。このような生物・生命の多様性こそ、ダーウィンがその進化理論に思い至ったきっかけだった。たしかに生物は多様だが、よく見ると、その形態や行動、分布などには共通した特徴が見つかるものが多い。祖先を共有しているからと考えれば説明のつく特徴が多いのだ。

すべての生物がなんらかのかたちで類縁関係にあるとしたら、表面的な多様性の裏には一様性が潜んでいるはずである。事実、同じ脊椎動物である哺乳類、鳥類、爬虫類、両生類、魚類には形態学的、生理学的な一様性が見られる。そしてすべての生物の遺伝物質も、実は共通していることが20世紀半ばに確認された。地球上のあらゆる生物の遺伝物質の実体はデオキシリボ核酸（DNA）であることが明らかになったのだ。しかもこの遺伝物質はすべての生物に共通しており、遺伝暗号も同じ4種類の塩基の組合せであることまで判明した。

DNAは、いわゆる二重らせん構造をしている。この構造を1953年に解明したのはジェームズ・ワトソン（1928～）とフランシス・クリック（1916～2004）である。しかしDNAが遺伝物質であることから遺伝暗号の解明までには、ほかにも日本人も含む多くの科学者が関与したことを忘れてはならない。

遺伝物質をめぐるその後の研究は、数々の驚くべき事実を明らかにしてきた。なかでも、生物は互いに数多くの共通した遺伝子（体のつくりや生理的機能を指定するDNAの特定の塩基配列）を備えているという発見は驚きだった。例えば、動物の眼の構造は、主に8種類の基本タイプに分けられる。かつてそれらは、それぞれ独立して進化したと考えられていた。タコと哺乳類の眼の構造はとてもよく似ているが、それはあくまでも別個に進化する過程で似てしまった結果であると考えられていたのだ。

しかし最近になって、いずれの種類の眼の発生に関しても、共通した遺伝子が関与していることが分かってきたのだ。

こうした遺伝子の共有関係は、動物の中だけでなく、動物と植物の枠を超えていたりもする。それは、生物は、かつて遠い昔の共通祖先が備えていた遺伝子を様々に転用させることで、多様性を増大させてきたからにはほかならない。つまり、ダーウィンの進化理論から予想された「生命は多様にして一様である」という考えが分子のレベルでも実証されつつあるのだ。

15~20 万年前にアフリカで起源した私たち人類は、たくさんの人種に分かれているように見える。しかし、人種を分ける明確な基準は存在しない。確かに形態の差は多様だが、DNA レベルの変異で見ると、ヒトは驚くほど遺伝的に一様な種なのである。それは、起源してからの時間が短いことと、環境に対するヒトの適応は、遺伝的な変化よりも火の使用、衣服、狩や農業の道具など、知能を働かせた適応に負うところが大きかったという歴史的経緯による。言語の多様性も、遺伝的に備わっている言語能力としての違いに基づくものではないことが、チョムスキーが牽引した 1950 年代以降の言語学の研究で明らかにされている。つまり現在の人間は、人為的な区分である人種の壁を越えて極めて一様な集団なのである。

多様にして一様なのは、生命に限ったことではない。すべての物質は原子からできている。原子を構成するのは電子、陽子、中性子であり、陽子や中性子はさらにクォークと呼ばれる素粒子から構成される。そう考えると、万物はマクロなレベルで見ると実に多様だが、ミクロなレベルで見えていくと一様であることがどんどん明らかとなっていく。そしてその起源は、宇宙の起源であるビッグバンにまで遡る。

生命の来し方行く末に思いを馳せることが、宇宙の起源、広大な宇宙の一隅に生れ落ちたみずからの存在にまでつながる。科学が提供するこのような見方には、壮大さ、荘厳さがある。

4.3.3 可視化、イメージ化は私たちの科学を、日常をどのように変えたか

これまでの科学の世界共通言語は、一般言語、数式、グラフなどであった。例えば、新しい物理理論は、数式で表現され、その意味が日常言語で記述され、その数式の結果がグラフで表現される。20~30 年位以前にグラフが 1 変数グラフから多次元グラフ（2 次元平面での密度等高線図など）に変わってきた。さらに 10 年前ぐらいからは動画が学会発表や論文に現れるようになった。現在では印刷およびインターネット上の論文出版に加え、付属資料としての動画の公表、あるいは論文の参考文献欄に自分

のホームページ上の動画やアニメーションなどの引用も行われる。

一般言語や数式だけでは、科学的事実を伝達する手段としては、もはや十分とはいえなくなってきた。たくさんの原子の運動を式で記述するよりは動画で表現するほうが、はるかに明確であるし、また式の上で見落とした運動に気づくことも多い。例えば、原子の集団的運動を記述するためには、通常は配位座標を用いる。これは多数原子の運動の自由度を力学的に独立なものに分解し、最も本質的であるとして取り出した自由度である。したがって多数の原子の運動を物理的、数学的に記述・理解する上で大変強力である。しかし配位座標が独立なのは、例えば微小変位の仮定の下でのことであり、実際の運動や大変形の場合には異なる配位座標間の相互作用、系の運動の配位座標間の跳び移りが起きる。可視化技術は原子の運動、液体や気体の流れ、天体の運動、地球上の空気の流れ、地球上の海流の様子など、計算結果の把握や理解に対して大きな役割を果たしている。さらに可視化により、科学の成果を、専門家の独占物でなく非専門家と共有することができるようになった。

近年、固体表面構造を測定する手段として、走査トンネル顕微鏡、原子間力顕微鏡など新しいタイプの顕微鏡が科学の分野で広く使用されるようになってきている。これらは、それぞれ、物質表面の微小電位の変化、試料と探針の原子間に働く力の変化を測定するものである。その測定結果から、画像を作る技術、またその生の画像から雑音を取り除く技術など様々な技術の組合せで、これまで観ることのできなかつた表面原子配置や運動さらにはそのスケールでの電磁場の時間的振舞いを観ることができる。 10^{-9} s (1 ナノ秒) の変化を画像上の1分間で表現することもできる。

可視化技術の進歩は大量な情報から目で見たとような画像を作り上げるだけでなく、見えないもの、例えば、概念地図の作成と概念の可視化を可能にした。山の高低は、山裾に立てば実感することができ、それを表現するものとして地図の等高線図が発明された。地図上で、2点間の距離は2点を結ぶ線の長さで表現されている。しかし今日では等高線図は実態としての高低ばかりでなく、気圧、温度、その他の概念や、さらには、目に見えないものの可視化ツールとして用いられている。概念について、分類や用法および他単語との関係などを膨大な文書データから抽出した「概念辞書 (シソーラス)」、さらに連想概念辞書が作られている。その結果、種々の「概念間の距離」を「概念空間」上で数学的に定義することができ、これに従って「概念の地図」を描くことができる。古典的な例として古地図を思い浮かべてみよう。古地図では、自分たちに近い場所は詳細に大きく、遠い場所は雑把に小さく書いている。したがって2点間の距離は地理的な距離ではなく、それを描いた人物との関係の大小を現わして

いる。これは古典的な概念地図であるといえよう。最近では抽象的な概念間の距離を数値化し、その相対関係を可視化することは一般的に行われている。生物の進化系統図や思想系統図などにもこれが見られる。コンピュータ技術の発展により、複雑で多様な概念に関しても、膨大な文書データをもとに、概念間の距離や相互関係を定量的に取り扱うことが可能になり、私たちの概念形成に大きな影響を持っている。現在急激に発展拡大している生命科学、医科学の分野では、膨大なデータの相互関連を解析する手段として、自然言語処理（計算言語学）が試みられている。

もう一つ可視化技術の応用として、映画・映像芸術を含む「芸術」を忘れることはできない。映画「ジュラシック・パーク」（1993年、スピルバーグ）の3次元コンピュータ・グラフィックス（CG）画像は新鮮な驚きであった。「バーチャル・リアリティ」ではこれまでの映像芸術を超えて、体験可能な仮想空間、五感に対する総合的な働きかけ、同時対話性の存在を指摘できるだろう。可視化技術が広く芸術領域に取り入れられることにより、芸術のあり方が、臨場感を含めて大きく変化してきている。日常に導入される可視化、CGは、現実世界での体験が先行している場合には情報伝達手段として大変有効である。しかし反対にCGが先行して現実世界との関わりが希薄になる可能性や、情報伝達手段としてのCGの受動性も指摘されている。

4.3.4 スケールとサイズ

ここ数十年の科学と技術の進歩は、様々な形で人間が物事を見る視野を拡大してきた。その一つの特徴として、自然現象や物質の構造を見る時間空間のスケールやサイズの急激な広がりがある。それらの知識理解を深め、さらには自然認識の質的な変化をもたらしてきた事情を挙げることができよう。

一般人にとって、以前は桁の大きな数字や微小なサイズを表すのに「天文学的数字」とか「ミクロの世界」などの言葉が使われていた。考えてみれば物を測る尺度として日常の生活で用いられてきたメートル法、ヤードポンド法、あるいは尺貫法などは、すべて人間のサイズに合わせて作られてきたものである。同様に、時間に関しても時計や暦は地球の自転公転に合わせた日・月・年が生活単位であり、地球上に恐竜が生息していた数億年前という時間の長さを実感することは難しかった。

数の大きさについてみれば、日常語では百・千・万・億・兆や割・分・厘・毛あたりが使用限界であり、ギリシャ語の単位もデカ・ヘクト・キロあたりまでは馴染みがあるにせよ、その上のメガ（ 10^6 ）、ギガ（ 10^9 ）、テラ（ 10^{12} ）などは生活実感からはほど遠い大きさであった。

別の言い方をすれば、一般人にとっての実用的な数の範囲は暗算で計算できる 3 桁程度に留まっていた。これに対し、巨大あるいは極小の数値を持つ世界の表現方法自体が、以前の単純な加減法から指数で言い表されるようになり、物事のスケールを見る視座が日常生活におけるそれとは明らかに異なってきたと言える。

このようなスケールとサイズの範囲が大幅に拡張されてきた状況として、ここでは宇宙地球科学と物質科学からいくつかの実例を選んで考えてみよう。

宇宙の時間的歴史は、現在、137 億年前のビッグバンに始まるとされている。また銀河系のサイズは直径が約 10 万光年 (約 10^{18} km) でその中に 1000 億個以上の恒星が含まれていることも知られている。このような数値が正確に定められるようになった背景には、物理学の諸法則に基づく理論的根拠があるのはもちろんであるが、まずは何よりも観測の技術的進歩があった。

ガリレオ以来の天体望遠鏡が肉眼で見ることに、すなわち可視域の光に限られていたのに対し、近年は人工衛星搭載の諸測器や「すばる望遠鏡」などにより、電波・赤外線・紫外線・X線・ガンマ線等々あらゆる波長域の電磁波を活用し、宇宙の構造に関し次々と新しい知見が得られてきている。これはまさに科学におけるいわゆるハイテク技術の貢献と言ってよい。

地球の歴史に関しては、太陽系の中の惑星として地球が生まれたのは 46 億年前と同等されている。現在のような大陸分布ができあがった大陸移動は 2 億 4 千万年前のことであり、各大陸を乗せたプレートは現在も 1 年間 (約 3 千万秒) に 10 cm というきわめて小さな速度で動いていることが、相対性理論に根拠を置く全地球測位システム (GPS) に代表される精密測量によって確かめられている。また、古い地層から発掘される化石は放射性同位体元素などの解析手段によって年代が精度良く決定されている。同様に、過去の気候に関しては、南極大陸やグリーンランドの氷床からのボーリングによって、過去に形成された氷の中に含まれる重水や酸素同位体から数十万年のタイムスケールで気温や二酸化炭素濃度の変動が精度良く求められ、地球環境問題への貴重な資料を提供している。このような進歩があつてこそ、「産業革命以後の人為的影響を受けた気候変動」といったような社会的関心の高い議論に重みが増す。

一方、物質の微細構造に関する知識理解も進歩が著しい。例えば原子 1 個のサイズが 10^{-8} cm だと聞いただけでは実感が伴わないが、旧来の光学顕微鏡の分解能が高々 1 マイクロメートル ($1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$) だったのに比べ、電子顕微鏡はその約 1000 倍でナノメートル ($1 \text{nm} = 10^{-9}\text{m}$) 以下の構造までを分解できる。このような成果が技術に反映されている好例は、現在、電子回路のトランジスタ (サイズが数十 nm)

などに活用されているナノテクノロジーである。分子サイズの構造分析による DNA 技術もその例に漏れない。最近では静電容量の単位 F としてナノのさらに 3 桁下のピコさえ用いられるようになってきた。

これらのいくつかの例から明らかなように、科学の成果を応用した技術の進歩が再び科学の発展に寄与することによって、現象や事物を飛躍的に幅広い時間空間スケールで捉えることを可能にしてきた。その結果、私たち人間の自然観・世界観は、従来の日常生活感覚をはるかに超えた形で質的な変化を遂げつつある。

そして同時に、このような認識の深化は、アリストテレスに代表されるギリシャ時代の自然哲学が扱った宇宙の果てや元素の世界に関する考え方を、厳密な法則性に裏打ちされた具体的かつ定量的な形で再評価することにまでつながってきている。これこそ、まさに現代科学と技術が一般社会にもたらした意義であると言える。

4.3.5 多量データ高速処理のアルゴリズム

コンピュータの急速な発展・普及は、科学技術分野に大きな影響を与えた。多量のデジタルデータを蓄積し、検索し、処理することが可能になったことによって科学技術を進める新しい手段と方法がもたらされた。

コンピュータが得意とするのは、同じ手順を反復して行うことである。反例を探す、というのはそうした範疇に入る。ゴールドバッハの予想 (6 以上の偶数は、2 個の奇素数の和となるという予想) の反例を探す手順はいたって簡単である。次々の偶数に当たりながら、奇数 2 個の和へのすべての分解について、その 2 個の奇数が共に素数であるかどうかを調べていけばよい。反例があるものなら、いずれ見つかる。反例がないものなら、この反例探しは終わらない。調べる範囲が無限に広がっているからである。しかし反例探しの範囲が有限なら、反例が見つかるにしても、反例が見つからないにしても、いずれ反例探し - しらみつぶし - は終わる。反例が見つからなければ、その予想は正しかったということになる。つまり、その予想が「証明」できたことになる。数学の四色問題 (どのような地図も、隣り合う地域が異なる色になるように塗るには 4 色あれば十分かという問題) の証明は、実際にこの方法で行われた。こんな「力任せ」の証明は、コンピュータが生まれる前には行われることがなかった。いや、人力では行いようがなかったのである。

有限の範囲の反例探しに帰着させることができ、その反例探しの手順をプログラムとして正しく書きあげさえすれば、後はコンピュータが働いて結果を出してくれる。とはいえ、範囲が有限であっても、その範囲が広がればしらみつぶしの時間も増えて

いく。問題の種類によっては、うまい方法が見つかっていて範囲が広がってもしらみつぶしの時間がさほど伸びずに済むものもある。また、逆に、問題の種類によっては、うまい方法が見つからず、範囲が広がるとその広がり方の何乗とか2のべき乗とかの勢いでしらみつぶしの時間が増えてしまう問題もある。後者の増え方をする問題の種類にあっては、しらみつぶしの範囲が少し広がっただけで、現実的な時間内には結論が出ないことになる。情報セキュリティのために使われている公開鍵暗号の作り方は、こうした種類の問題をうまく利用している。

コンピュータに反復計算させて人力で直接的には得られない情報を得るのは、反例探しに限らない。古典力学で記述できる現象は、微分方程式という形で定式化される。方程式は簡潔なものであっても、具体的な解がどのようなものになるかを人力で知ることができるものは少数である。天気予報・気候予測は、時間・空間にわたって得られているデータを元に、コンピュータで解を数値的に求めて行われている。時間・空間を小区分に分け、それぞれを単位として数値的に流体方程式の解を計算していく。計算結果の精度を上げるには、小区分の大きさを小さくしていく必要があるが、それはその大きさの4乗に反比例する勢いで計算時間を増やしてしまう。それでも、天気予報・気候予測なら、航空機や宇宙ステーションから眺めれば、その予報・予測の通りに雲が動きまわる様を目で見ることができる。

銀河の果てや分子の中で起きていることは、もっとずっと観測しにくい。間接的な手段で“見える”形にできるものを観測するほかはない。観測された事柄を元に作られた方程式から出発して、そこで生じうる現象、生じていたに違いない現象をコンピュータで計算する。そして新しい知見が得られ、新しい発見がある。

コンピュータに直結した観測装置を使って、膨大な量の観測データが蓄積されていく。その蓄積されたデータを使って、何度でも精密に観測した現象を再現することができるし、様々な形で整理し、パターンを抽出することもできる。そこから新しい知見が得られ、新しい着想が生まれて、科学技術が進歩していく。

蓄積データは、連続現象を観測したデータばかりではない。ヒトゲノムなど膨大な遺伝情報が蓄積されている。そのデータは、4種類の塩基配列の記録に過ぎない。それらが何をどのように支配しているのかを洗い出すには、コンピュータを使ったパターン抽出が不可欠である。そこでの正否は、いかにして「有用な」パターンが見つかるような手順を組み立てるかにかかっている。また、インターネットによって相互にアクセスが可能になった世界中のコンピュータの上には、多量のデータが蓄積されている。検索技術の発達によって、その中からいち早く「有用な」情報を取り出すこと

ができるようになり、日常生活においても科学技術にとっても欠かせない役割を果たすようになった。さらには、その膨大なデータから何らかのパターンを抽出し、価値ある情報を得ようというデータマイニング技術も発展しつつある。

いずれにしても、手順を尽くせばできる形に問題を整理し、その手順を間違いなくプログラムとして組み上げることを通して、人力では果たすことのできなかつた、膨大なデータを整理し、特徴を抽出して新しい知見を得ることや、すべての場合を尽くすことで証明に代えることが、科学技術でのごく当たり前の方法になった。このような、目的を達成するための手順をアルゴリズムという。科学技術の中にアルゴリズムが大きな比重を占めるようになったのである。

ここで留意しておきたいことがある。コンピュータの信頼性は非常に高いものであるので、日常的な時間範囲でのコンピュータの記憶・動作に誤りは起きないと信じてもよい。けれども、コンピュータによる計算は、プログラムに書かれた手順に従ったものであり、その手順が本来目的としていたものを生み出すものになっているかどうか、あるいは、その手順を間違いなくプログラムに書き写してあるかどうかは、プログラミングという人の営みにかかっている。単にコンピュータが出した結果だということだけで、その結果が正しいとは言えない。正しい結果をもたらすと「検証」されたプログラムに従った計算の結果であって初めて正しいと言えるのであり、数学の「証明」ともなり得るのである。

4.3.6 科学と技術の相互貢献

(1) 基礎科学と応用技術との協働

もともと、科学研究の動機は、世界を認識し理解することであり、技術への応用を目的とするのではない。一方、技術は、利便性、効率性、生産性などを目的として、有効なシステムを作り上げることであり、そこで、科学的な知識を使うことがある。このように、科学と技術は動機付けのところで異なるとされてきた。しかしながら、このような区別は必ずしも、厳然としたものではなくなってきた。

18世紀における産業革命の大きな推進力となった蒸気機関について、熱効率を上げる努力がなされ、ニューコメンの機関からワットの蒸気機関へと進化したときに、二つの熱源の間で作動する「熱機関」の概念が生まれ、その効率について考察を行い、効率には限界があることを示したのがカルノー（1820年）であった。さらに、クラウジウスが数学的に精密な理論としてエントロピーの概念を生み出した（1855年）。エントロピーが熱運動による分子の乱れを表すという確率的な解釈はボルツマンによっ

て与えられた (1873 年)。プランクは、エントロピーの確率的解釈を用いて、電磁場のエネルギー分布と温度との関係を考察した結果、エネルギー量子の考えに到達した (1900 年)。これが、量子力学の出発点となり、物質構造を考える際の基礎となった。基礎科学の発展が、その後の量子的素子の開発など現代のエレクトロニクス技術を生み出したことは明らかである。

基礎科学の内容が技術に応用されることだけでなく、基礎科学研究の動機自体がそのまま技術開発につながることが多い。例えば、ニュートリノ物理学、また宇宙物理学などを進めるために、高感度の検出器や望遠鏡などを必要とすることから、技術開発が進められる。このような超高度の技術開発は当面は民生用ではないが、いずれ開発された技術は、人々の暮らしに役立つ行くのである。その観点から、基礎科学研究のための超高度の技術から、一般家庭用の平常の技術まで、連続的であることが望ましい。20 世紀は軍事的目的のために高度の技術開発がなされ、やがて民生用に転化されていくという過程を経ることも多かった。

また、民生用の高度の技術が、基礎科学の研究を支えているということもある。例えば、画像処理技術や実験機器のコンピュータ制御の技術は、基礎科学の推進に有効であることは、特に、宇宙探査のように、無人でかつ電波による制御に時間がかかるような遠方の探査の場合は、自動制御の技術は重要であるし、映像の電送等にも重要である。

(2) 認識科学と設計科学

これまでの科学が、自然現象を解明して自然に対する認識を深めるという「認識科学」といわれるのに対して、近年では、むしろ積極的に新しい物質や物質の機能をデザインするという「設計科学」という考え方が出てきている。

物質における電子状態、分子間相互作用について、精密な量子力学的計算が可能となり、それによって得られた分子間力を用いて、多数の分子からなる系について分子の運動を実際に計算機によって解析することも可能となってきた。その結果、既存の物質について理解するだけでなく、新しい物質を設計することが可能となった。ナノテクノロジーを用いると、分子レベルの構造を制御することが可能であり、実際に新しい物質を創成し、さらに、それらを複雑に組み合わせて不均質な構造を創ることによって、個々の分子にはない新しい性質を持つ材料を作ることも可能である。さらに、材料の創成だけでなく、反応など物質が変化する過程をも設計し制御することも可能となってきた。触媒化学の分野では、特に触媒の機構を解明する認識科学の面と、触媒の物質と機構を制御する設計科学とが、相補って進展している。

4.4 科学的な態度・センス

現代社会に生きる人々にとっては、自分たちの生活世界が科学や技術の成果に支えられていることを自覚し、科学や技術に関するリテラシーを向上させていこうとする態度や、日常生活において科学的な知識や見方・考え方が必要な場面を適切に判別し、必要に応じてそれらを参照しようとする態度を身につけていることが望ましい。だが、現代では、科学といってもそれはじつに多様な領域や分野に分化してきているので、「科学的な見方・考え方とは何か」「科学的な態度とはどのようなものか」を、一般論として言い立てるのは案外難しい。それでもなお、ここでは、現代の科学と呼ばれる営みに共通すると思われる「科学的な見方・考え方や科学的な態度」の基本的な部分を取り出してみようと思う。一般の人々が、科学的な見方・考え方を理解し、身に付けるとは、簡単に言えば、科学のどのような特徴を理解し、身に付けることなのか。また、科学的な態度を身に付けるとはどのようなことができることなのか。そのことを、科学の特徴から抽出して考えてみようと思うのである。

4.4.1 科学的な態度

(1) 科学にとって必要不可欠な資質

① 好奇心

科学的な言説は、基本的に、物質世界の内部構造や、物質世界に生起する諸事象・諸現象のメカニズムに関する言説である。それゆえ、科学的な営みの出発点には、科学に関わる人々の物質世界に関する強い好奇心が存在する。「内部はどうなっているのか。」「内部ではどのような現象が起こっているのか。」といった強い好奇心こそが、科学的な営み、科学的な言説を生み出す原動力である。科学を生業とする人々には、目の前にある事象・現象は、疑問の宝庫である。好奇心のかたまりであった幼児期に一般的であった「あれなあに」、「これどうして」、「なんで」といった疑問を今でも普通に持ち続けられている人々の営みが、科学である。大人になって忘れ去ってしまったこの「知的好奇心」は、科学という営み、科学的な言説の最も根源的な特徴の一つと言える。ただし、科学的な言説に関連する好奇心はあくまでも物質世界に関する好奇心であって、それとは異なる領域（宗教、政治、文化など）への好奇心とは、一応、一線を画していると理解しておいた方がよいだろう。

② 批判力・懐疑力

科学という営みや科学者という人々の特徴の一つに、「ほんとかな」、「ちょっとまてよ」という批判力や懐疑力がある。たとえどのような権威のある人が述べたことでも、

たとえどのように確からしい言説であっても、そのまま、鵜呑みにして受け入れるのではなく、まずは、「ちょっとまてよ」、「ほんとにほんとかな」と自問してみるという習性がある。「本当かな。その根拠は何だろうか。」といった疑問が自然と湧き出してくる。そういう資質が、科学に取り組む人々には普通に備わっていると思われる。大事なことは、その科学的な言説の根拠と論理に対する批判や懐疑を提出するのであって、その言説の主張者に対する批判や非難をするものではないという点である。これは、科学という営みに参加する人々にとって重要な資質である。言説に対する批判や懐疑、討議は激しく行われるが、それは、主張者同士の人格に対する非難ではない。

(2) 科学が持っている特質

① 証拠・論拠依存性

科学という営みに身をおく人々は、どのような言説であっても、その根拠、証拠というものに信頼をおく。権威に寄り添うのではなく、あくまでも、明快で万人を納得させうる根拠の方に信頼性をおく。そのために、どのような言説であっても、まずは、距離をおいて、その正統性、信頼性、妥当性を保証してくれる根拠を確認する。この姿勢が科学という営みに従事する人々には共有されている。

しかも、彼らは、根拠や論拠、証拠に対して、人一倍、厳格であろうとする。ある根拠がどれくらい説得力のあるものかを決める厳格な方法は、科学者の間で様々に開発され、共有されており、例えば、現象や事象の発生可能性に関しては、発生頻度の確率論的な手続きが開発されており、言説も慎重な表現にとどめる。だから、科学者と呼ばれる人々が一般の人々に説明しようとする言説は、得てして回りくどい印象を受ける。これは、科学者が現象や研究成果を一般の人々に、より正直に、より正確に伝えようとすることによる。それだけ、証拠や論拠に対して、厳格で正直に向かい合おうとする特性があるということの証左といえる。

② 理論的・数的志向性

科学的な言説では、物質世界の現象や事象を説明するために、簡潔で美しい理論を求める志向性が存在する。そしてその多くが数的な理論を志向する。その意味で、数学は科学的な言説の基盤となる。より美しい理論、より美しい数式による現象や事象の合理的な説明と、それを裏付ける証拠を求める営みが科学的な営みの特徴である。また、その理論や数式を用いることで、未知なる現象・事象の存在を予想したり、まだ発生していない現象・事象の出現を予見しようとすることも、科学的な言説の得意とする営みである。

精密さ、緻密さの一方で、現象や事象を大局的に眺め、全体の様相や動向を的確に

把握することができるのも、理論的・数的志向性の特徴といえる。

③ 暫定性

科学という営みや、科学的な言説には、「批判力」((1) ②)があり、また後に述べるように「公開性」((3) ③)がある。このことは、おのずから、科学的な言説の「暫定性」という特性を導き出す。「暫定性」とは、今現在、同業の人々の間で最も信頼されている科学的な言説であっても、それは、「今のところ、最もよくできた説明の仕方」とあるという性質を持つことを免れないということの意味している。どれほど長い年月にわたって、その言説の正統性、妥当性が担保されてきたとしても、それは、明日にでも、「批判力」に基づく考察や新しい証拠を用いて、「公開性」の原則に立って、攻撃に晒されることがないとは言えない。理論上は、いつでもどこでも、より明確な証拠や論拠によって攻撃をされる可能性はあるということである。大事なことは、そのような「公開性」の上に立つ「暫定性」について、それを潔しとする心性を、科学という営みに従事する人々は、心地よく共有しているということである。

また、科学的な言説には、現在なお「論争中」というものもいくつも存在する。同業の人々の間においても決着がついていない言説群である。「論争中」あるいは「未決着」だからといって、それらが科学的な言説でないということではない。複数の言説のそれぞれに、それを是とする論拠や証拠がいくらか存在していることを同業者の人々は理解しているが、どれか一つの言説ですべての事象・現象を明快に説明できるほどの決定的な論拠や証拠が未だ入手できていないだけである。この意味で、「論争中」の科学的な言説も「暫定性」という視点で語ることができよう。

(3) 科学的な活動の特質

① 自己限定

先にも述べたように、科学的な言説は、基本的に、物質世界の内部構造や、物質世界に生起する諸事象・諸現象のメカニズムに関する言説である。それゆえ、科学という営みは、その探究活動の対象領域を物質世界に限定しているといえる。このことは、物質世界以外を対象とする探究活動に対しては、禁欲的であることを意味する。すでに説明されてきたように、心や脳に関する探究活動においても、その矛先は、あくまでも物質世界に基盤を置いた探究活動にある。精神的活動そのものを直接的に探究しようとするのではなく、精神的活動の発現根拠としての物質的基盤の解明に関する探究活動が主眼であろう。

科学という営みが、物質世界の諸現象・諸事象の解明に範囲を限定しているということは、物質世界を越えた領域そのものに関する探究活動からは、科学という営みは

距離をおくということを意味している。この自己限定は、科学という営みや科学的な言説の有効範囲を、みずから明確にしているという点で、重要である。科学のテリトリーは、すべての世界に及ぶわけではないのである。何でもすべて「科学で」という科学への過度の信奉は、科学主義として、科学自身から排除されるべきものである。

② 科学者共同体管理

科学的な言説の正統性や妥当性はどのようにして担保されるのであろうか。それは、これまで見てきたように、当該の研究分野の同業者（科学者共同体）が保障し、管理しているといえる。科学的な言説の正統性、妥当性の番人は、科学者たち自身なのである。むしろ、彼らが独善的にこの管理をしているわけではない。彼らは、新しく提出されてくる様々な異議申し立て（それぞれに主張の根拠を携えているが）を共同で協議し、旧来の言説と今回の異議申し立てのどちらに軍配を上げるかを専門的な立場から証拠、論拠に基づいて議論するわけである。この共同体のメンバーシップには国境も年齢も性別も関係ない。一定のトレーニング過程（大学院の教育など）を経て、それぞれの共同体の持つ研究規範を順守することを宣言し、また、共同体側から部内者としてのお墨付きをいただくことによってメンバーの一員となるのである。端的に言えば、科学的な言説の生産から品質保証、生産者管理まで、すべての過程を彼ら自身の共同体が担っているということになる。完全なる自律的世界というわけである。

③ 公開性

科学的な言説は、公表された（学会で発表されたり、学術雑誌に論文が発表された）時点で、公の性質を持つ。いつでも、誰に対しても公開されており、誰でも利用できる。このことは、いつでも批判の対象となる準備ができていることを示している。誰であっても、いつでも、その言説に異を唱えることができるのである。もちろん、異を唱える明快な根拠を提出したうえでのことであるが。これは、自説に対しても同じである。なぜなら、いったん公開された科学的言説はすでに公のものだからである。したがって、科学的な言説は、いつでも変更される可能性を持っている（「暫定性」の項参照）し、変更されることを喜んで受け入れる準備ができていうことになる。それが、みずからを越えていくだけの明快な根拠を伴っていればである。

科学的に良質な言説は、その内部にみずからの限界性や前提条件を明快に包み込んでいると言われることも同じことである。逆に、どのような批判でもその言説の内部に取り込むことができたり、外部からの批判を受け付けないような言説は、科学的な言説とは呼べないものだということも重要だろう。

④ 公共性

科学的な言説には公共性がある。人々の公共財だということもできる。だから、特定の個人だけが利用できたり、特定の個人にだけ貢献するようなものではなく、誰でも自由にアクセスできて利用できるという性質を備えている。科学的な言説は、特定の個人の外に置かれているものと言える。もちろん、科学的な言説は、科学者と呼ばれる専門の人々（個人であれ、グループであれ）の手によって生み出される。そのため、生み出される過程自体は、私的な過程である場合も多い。専門の人々の創造性や独創性が出発点にあり、それぞれの人に固有の思考過程を経て生み出されるものであろう。

しかし、そのような思考産物は、そのままでは科学的な言説とは呼ばれない。生まれてきた思考の産物は、まずは同業の人々に、その思考産物の独創性や新奇性を理解してもらうように説得をしなくてはならない。この説得の過程には、一定のルールがあり、これまでに分かっていたことと分かっていなかったことを明確に区別したうえで、自分の思考の産物の新しさをその中に説得的に位置づけていく作業が行われなくてはならない。この作業の結果、その思考の産物の新奇性が同業の人々の理解を得た時にこそ、それが、科学的な言説として認定され、公のものとなるのである。この理解を得るには、通常、相当な時間がかかる。その間には、本当にその通りであるのかどうか、同業の人々によるチェックと追試と批判が自由に行われるからである。だからこそ、公の知識としての正統性と信頼性が担保される。

4.4.2 科学的センスを身につけた人は

では、一般の人々が身に付けておいた方がよいと思われる科学的なセンスとはどのようなものであろうか。科学的な態度を踏まえたうえで、どのようなセンスを身に付け、日常生活の中で、普通に発揮できるようになればよいだろうか。

それを簡潔に言えば、「現代社会と私たちの生活世界が科学や技術の成果に支えられていることを自覚し、科学や技術に関して関心を持つとする態度」を身に付け、「日常生活において、科学的な知識や見方・考え方が必要な場面を適切に判別できるセンス」を身に付けることではなかろうか。

より具体的には、

- ・科学的に考えてみたらどうなるだろうという発想が自然に出てくること
- ・基礎的知識から根拠を持って合理的に推論していく習性が身に付いていること
- ・科学的に正しいとされる知識を簡単に入手するすべを身に付けていること

- ・うさんくさそうな知識や言説をかぎわける嗅覚を身に付け、科学的に検討をしてみようとする態度を持つこと

などが考えられる。

このような態度が必要になる具体的な場面として、「生活者としての個人生活の場面」、「職業人としてのキャリア生活の場面」、「コミュニティの一員としての市民生活の場面」、「社会的意思決定者としての市民生活の場面」などに分けけて考えてみることができる。

例えば、「生活者としての個人生活の場面」とは、食品や食の安全問題、医療や健康問題とか、法律や司法問題など、個人レベルで意思決定をしなくてはならない場面のことである。どの食品、どの食材を購入するか、どのような医療を受けるかといった個人レベルの意思決定において、科学的なセンスがある人の意思決定過程とセンスを身に付けていない人の意思決定過程とでは、決定に際して着目する点や重視する点に違いが出てくるだろう。むしろ、意思決定の結果としての「何を買うか」という点ではその場面だけでは差がでないかもしれない。しかし、意思決定の積み重ねの中で、その違いは明確になってくるに違いない。

同じように、「職業人としてのキャリア生活の場面」では、職場で直面する多くの課題に、直接的、間接的に、科学や技術が関わっていることが多く、科学的なセンスの有無は、個別課題の解決策の模索過程に大きな影響を与えることが想定できる。「コミュニティの一員としての市民生活の場面」では、ゴミ問題や騒音問題、環境美化や環境保全の問題などが関係するだろうし、「社会的意思決定者としての市民生活の場面」では、地球規模の環境問題への対応、エネルギー問題、食料問題、交通問題、情報化社会の問題、それに科学技術政策に関する問題など、ほとんどの政治課題、政策課題の解決策の模索場面であり、人々の科学的なセンスが議論の前提として求められることになるだろう。

最後に重要なことを付け加えておこう。この項目では、センスとか態度に焦点を当ててきた。そのため、科学的知識についてはあまりウェイトを置いてこなかった。それは、科学的な知識を持つことが不要であるということではない。膨大な細切れの知識を詰め込むよりも、本当に必要な時に、「必要だと直感する」センス、「探し出さなければ」とか「探そうとする」態度の方が、より重要だと考えるからである。そのようなセンスや態度を持っていれば、必ず適切な知識を入手することはできるのであるから。

第5章 科学技術の智の活用：四つの話題

すでに述べてきたように、最近の科学と技術の発達、人々がよりよい生活を送るために大きな役割を果たしている。私たちが、今手にしている科学と技術が、もし、存在していないとすれば、数千年前の文明レベルに逆戻りしなければならないはずである。ところで、地球上での人間の活動レベルが、近年、その質の向上と共に量的にも急激な拡大をしたことで、100年、200年前には無限の包容力を持つと信じて疑わなかった「地球」というシステムが、実は、様々な制約条件のついた活動の舞台「大気」、「大地」、「海洋」であることが分かってきた。そのことが、科学技術の進歩により、「事実」として把握されたのは、20世紀後半のことであった。

そして、今後、人類を含む多様な生物が地球上において生存を持続していくためには、あまり時間の猶予なく、私たちの向かうべき方向を選択しなければならない。民主主義社会においては、その重要な選択は一握りの為政者やリーダーによって決定され、強制されるべきものではなく、社会を構成する私たち一人ひとりが状況を認識し、その認識に基づいて、自分たちが採るべき方向を、責任を持って選択するというプロセスであるべきであろう。ここで、「責任を持って」とは、私たちがその選択肢を行動としていくということである。

第2章では、科学技術の本質について議論をしてきた。その土台の上に、第3章では、現代の科学技術の全体を七つの領域に分けて、それぞれの分野における基礎的な知識を提供している（詳しくは、専門部会報告書を参照してほしい）。そして、第4章では、最近の科学技術を特徴づけている「フロンティア」6項目と「考え方と手段」6項目を取り上げている。専門分化の進んだ現代の科学技術が、ここで、新たに組み直しをされてトータルに提示されることで、一般の人たちにとっても、専門分化した科学技術の1部門を担当する人たちにとっても、大いなる刺激になるものとする。しかし、その知識を獲得することが最終目標ではない。その知識を、私たち人類の生活あるいは地球環境の問題に、いかに活用できるか、でなければならない。

この第5章では、私たちが直面する喫緊の問題のいくつかを俎上に載せ、それらの知識を縦横無尽に活用して、科学技術の力で、これまで何が分かったのか、これから何をしなければならないのかを、努めて幅広く議論を展開している。読者には、このようなかたちで、科学技術の知識を現実の問題の分析・解決に応用していくことの「有効性」を理解していただくと共に、それまでばらばらに見えていた異なる知識がそれらの問題の上に集まることで、一つの筋道が拓けてくるという「醍醐味」を味わって

いただきたいと思う。

ここで取り上げたテーマは、「水」、「食料」、「エネルギー」そして「地球と人間圏」の四つである。いずれも緊急性があり関心の高い問題である。そして、問題の所在は複雑であり、制約条件がついており、その解決策は典型的な「トレードオフ」の問題である。その意味で、極めてポリティカルであり、エコノミックな問題であり、かつビジネスに関わる事項でもある。私たちは、この政治的、経済的あるいは経営的判断については、抑制的に記述していることを付記しておきたい。読者一人ひとりが、的確に判断をしていただきたいと願っている。

私たちは、この四つの問題以外のテーマについても、チャンスを作り、順次このように「横串を通す」形式で、科学技術の智の活用例として示していきたいと考えている。

5.1 水の自然科学・利用技術・人間との関わり

5.1.1 導入：水について考える

三重苦のヘレンケラーは、自宅の庭の井戸¹⁵から汲み上げた冷たい水の流れに触れて、“water”という言葉が発した。それは、ヘレンが、すべての物には名前があり、言葉と自分との関係を理解するための“橋”の役割をもっていることを知った瞬間であった。目で見えず、流れる音が聞こえなくても、手のひらで流れの感触と冷たさを感じ取り、水を認識したのだ。私たちにとって水は、いつも身近にありふれた存在になっているので、水について改めて考えたり感じたりすることが少ないのではないか。



図6 ヘレンケラーの井戸

水は、昔から人間の生活、感性、思想と深い関わりを持っていた。科学・技術の発達した現代において、水と人間との関わり、自然環境における水の役割を知ることは以前にも増して重要になっている。

ざっと水と人間との関わりについて考えてみよう。のどが渇けば誰もが水を欲する。食事、洗面、洗濯、入浴といった日常生活は水と切り離せない。お茶を飲んでくつろぎ、酒を飲んで疲れをふき飛ばし、飲み過ぎた時には水を飲む。化粧品はほとんどが水を含み、保湿効果をうたった製品が多くある。水を利用したスポーツや楽しみも多い。例えば、水泳、スキー、魚釣り、ヨット、スキューバーダイビング、花栽培、観光船など数限りない。温泉は身体と心の癒しであり、日本人の生活文化となっている。雨、雪は日常の気象だが、台風、大雨による崖崩れ、洪水といった災害は水が荒れ狂った姿を現した時だ。

世界中どこに行っても、井戸、雨水、上水道の利用は人間生活の基本である。また、食料を得るための農業、漁業に水は不可欠である。水田による米作りは、人間が水とのつき合いの中で得た知恵と言える。機械・電機工場でも水は冷却用水、洗浄用水として無くてはならない。IT産業も高純度の半導体製造に超純水を必要とする。水力発電は山間地に降った雨水の位置エネルギーを電気エネルギーに変換する技術だ。蒸気機関も水蒸気のエネルギーを利用したものだが、火力・原子力発電でも水蒸気によって発電タービンを回転させて電気エネルギーを得ている。このように人間生活の多くの場面に水が関わっている。

¹⁵ 朝日新聞より

水は太古の昔から地球上を絶えず循環している。水は人間だけでなく地球上のあらゆる生物にとって必要不可欠な物質で、水によって保たれている自然環境の変化があらゆる生物の生存に影響を与える。地表の71%を覆う海水と大気中の水蒸気の動きは、気候変動、地球温暖化と密接に関係している。

世界人口が70億人を超えようとしている今世紀、生命を支える安全な生活水が不足するという予測が国連から出されている。「20世紀は石炭・石油をめぐる戦争が起きたが、21世紀は水を巡る戦争が起こる」という予言がなされ、「21世紀は水の世紀である」と言われる理由がここにある。

水を自然科学の目で調べていくと、水は他の物質とは異なる性質をもっていることが明らかとなる。例えば、温まり難く冷め難い（比熱が大きい）、氷が水に浮く（固体の密度が液体よりも小さい）、0℃ではなく4℃で水の密度は最大になる、水ほど多くの物質を溶かすものはない（大きな溶解性）、分子間引力が大きく、毛細管に浸透でき

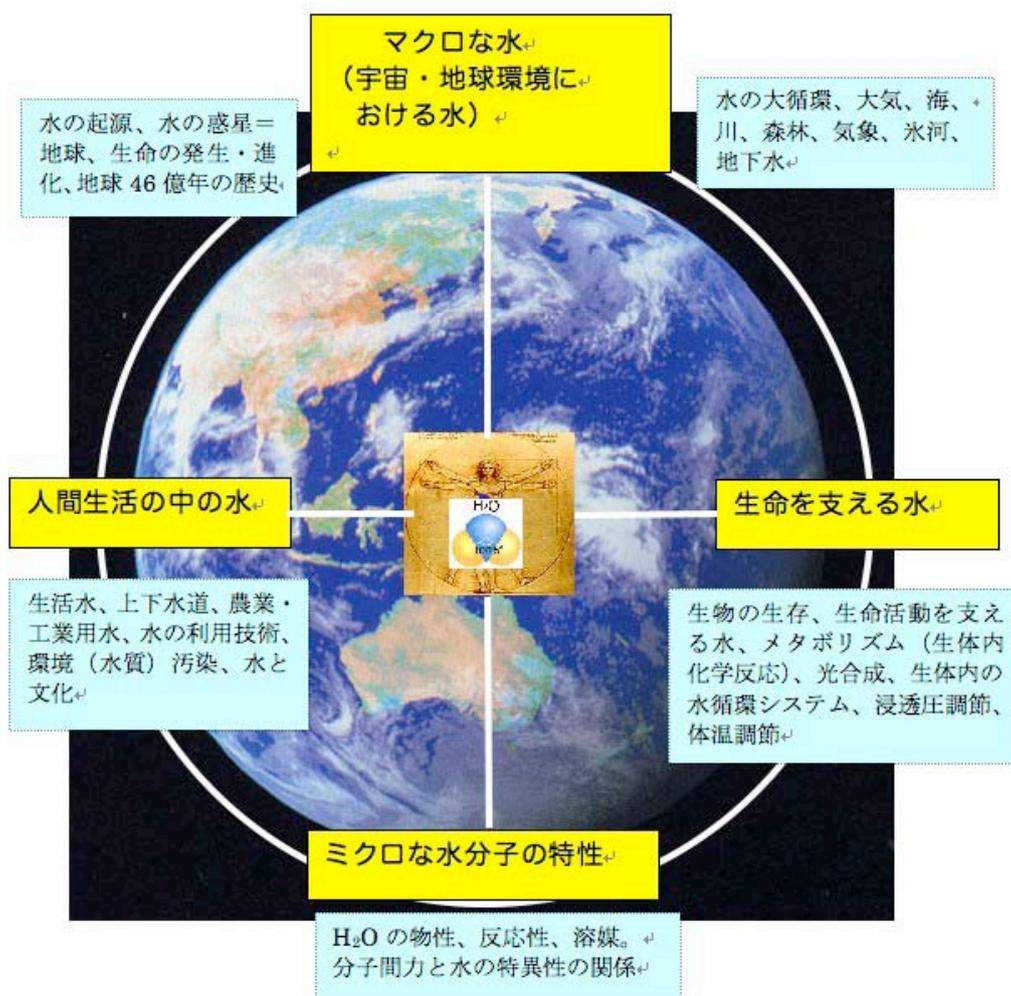


図7 水を結ぶテーマ

る（大きな表面張力）などの性質は、“異常”と言えるほどである。Matin Chaplinは、水には63の異常な性質があると言っている¹⁶。それらの性質が、上に述べた生命活動、人間生活、自然環境を支え、地球を「水の惑星」と言う他の惑星とは異なる特異な星にしているのである。

水は、人間生活——生命——原子・分子の科学——自然環境——気象——宇宙を結ぶテーマである。水について以下の順に考えてみることにしよう。

- (1) 人間生活と水との関わり
- (2) 地球環境における水：マクロな視点で見る水
- (3) 水分子の特異性：ミクロな視点で見る水
- (4) 生命はなぜ水を必要とするのか
- (5) 水の起源：水と生命の星＝地球の誕生
- (6) 水と文化

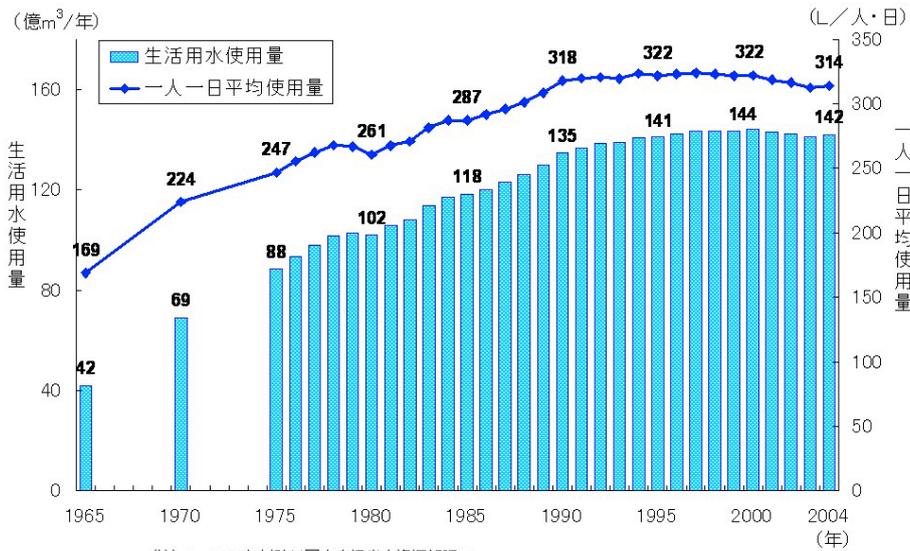
5.1.2 人間生活と水との関わり

人間は、水なしでは一日たりとも生活できない。水は人間にとって資源である。飲み水、調理、洗濯、風呂などの生活用水として、日本人は一日1人当たり約300L（全国民で年間140億トン）使用している。この量は世界平均170Lの約1.8倍である。

水資源は、農業用水（7割）、工業用水（2割）、運搬、レクリエーション用に使用されている。生活に必要な水は都市化と共に増大し、日本の水使用量は過去25年間で1.5倍に増えている。使用量の変化を見ると、GNPの変化と共に増加していることが分かる。今後、世界中で都市化が進み、発展途上国も経済成長と共に水需要が多くなることが予測されるので、世界的に水不足が大きな問題となるであろう¹⁷。水資源は、降水量に依存する。日本は平均降水量が1,700mm（総量で6,500億 m^3 ）と世界平均値950mmの2倍近くで、水資源に恵まれている国だ。しかし、山地が多く、台風、梅雨などの地理的気候的条件のために、降水量の約80%は利用されずに川から海洋に流れて行くか、地下水となる。また、蒸発により2,300億 m^3 が失われる。地下水の2.3%が汲み上げられ利用されることを考慮すると、日本の水資源は850億 m^3 （総量の13%）となる。この量は、世界的に見ると恵まれている方だが、年間降水量自体は多いものの一人当たりの降水量は約5,100 m^3 /年で、世界平均（22,000 m^3 /年）の約4分

¹⁶ Matin Chaplin, Water Structure and Science <http://www.lsbu.ac.uk/water/anmlies.html>

¹⁷ 国土交通省 『日本の水資源』 国土交通省水資源部
<http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/>



生活用水使用量の推移

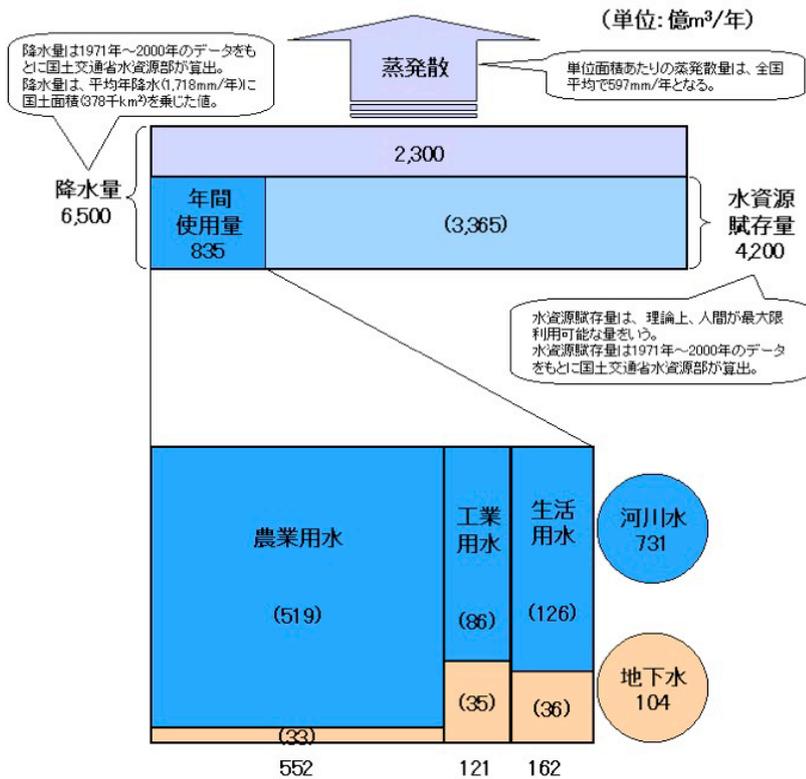


図8 生活用水使用量の推移

の1であり、日本は決して水の豊かな国とは言えない。しかし、一般に水不足感に乏しい。それはなぜか。日本は、季節的に大雨に襲われることが多いからという理由もあるが、実は、いま大量の水を輸入しているからだ。飲料水ではなく、農産物、畜産物を輸入するというかたちである。農産物を国内で育てるには水が（穀物 1kg生産するために約 1.4 m³）必要とされる。牛、豚を育てるにはさらに多くの水が（牛肉 1kgで 20 m³）使われる。すなわち、農産物を国内で生産する代わりに輸入することにより、国内の水不足を補っているのである。2003年に日本で開催された「世界水フォーラム」で、沖大幹教授はこの事実を「仮想水」あるいは「間接水」と名付け、日本人の目を開かせた（右図）¹⁸。

現在、日本が輸入している仮想水の量は年間約 640 億 m³ で、国内水資源の 78%に当たる。農畜産物の輸出国もこれから水需要の問題に直面することを考えると、この方法だけ

では水不足の抜本的な解決とはならないことは明らかだ。水資源の利用効率は、利用技術の進歩があつたとしても、最高 20%が限界と言われている。水需要の課題をどう解決するかは、日本だけでなく、どの国においても死活の問題と言っても過言ではない。

最近、「青い黄金（Blue gold）」と呼ばれる水ビジネス企業が欧米に出現している。人間の生存の基本である水源地を買い取り、水を商品として販売する企業、上水道システムが不完全な町村の水管理や水供給をビジネスとする企業である。水を買うことのできない貧しい人々が生活水を得ることができない事態を生む可能性のあるこのような動きを、商業の自由として許容するかどうかは今問われている。

日本に限らず各々の国が、ダム建設により水の供給を図ってきたが、土砂の流入によるダム効果の減少、自然環境への影響などを慎重に考慮しながら建設を進めなければならないことが共通認識となっている。

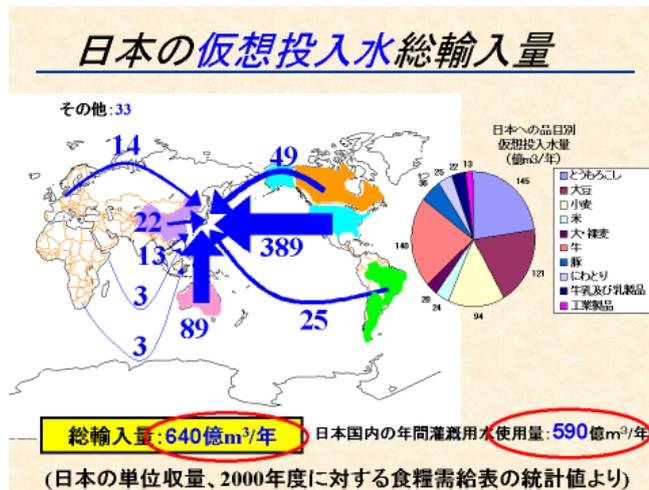


図9 日本の仮想投入水総輸入量

¹⁸ 沖大幹 『世界の水危機、日本の水問題』 2006 <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/Info/Press200207/>

森林が人工のダムの20倍以上の保水能力をもつことは案外知られていない。森林は、涵養作用（スポンジのように水を貯め、ろ過により水を浄化する作用）をもっている。すなわち、森林は自然の貯水場（水源林）であり、落ち葉で柔らかくなった土に浸透した雨水をろ過し、上質の水をつくり出す浄水場なのだ。ハゲ山と比較すると、森林は大雨の時の鉄砲水を減らし、蒸発で失う水量を大幅に減らす効果がある。また、森の土壌は棲む虫や微生物を育てる力があり、汚れた水も、その土の中の微生物によって分解され、浄化される。さらに、空気中のCO₂を吸収して成長し、酸素をつくり、緑豊かな美しい自然をつくり出してくれる。今や国をあげて森林保護に取り組む時代ではないか。

宮城県では、カキの養殖のために海と山地の人々が協力して植樹運動を始めたところ、昔のように腐葉層からの養分を含んだ清い水が戻って来て、カキが元気に育つようになったという事例がある。豊かな森が豊かな海を育てるという自然のしくみの妙味がここにある。

多くの人口を抱える都市の生活を支えるためには、安全な水を大量に供給できなければならない。そのために、井戸水ではならず、各都市に上水道が整備されている。水道の水の多くは川から汲み上げられ、安心して飲める水に浄水処理されている。都市化と共に汚染の進む川の水を浄化するには、長年の経験と高度な水処理技術が要求される。東京、大阪の浄水場では、旧来の沈殿処理だけでなくオゾン処理、生物活性炭吸着処理を行った水が給水されるようになっている。最終的には微生物を死滅させるために塩素処理が行われるが、水道水はおいしく安全な水である。ボトル入りの水だけが安全で、水道水が飲めない、あるいはおいしくないから飲まないという人々が多くなったとしたら、それは深刻な事態ではないか。水道水を飲まない理由としてトリハロメタンの危険性をあげる人がいるが、汚染度が高くなるほど塩素処理する量を多くする必要があり、その結果トリハロメタンを生成すると言われている。汚染原因に目を向けず、川の汚れを見過ごしては、自らの命と安全な生活を危うくするということを認識しなければならない。

都市の生活の結果は下水道に現れる。下水道は、公衆衛生を守るだけでなく、生活排水を処理し再び自然の川に戻すシステムである。ここでも沈殿、ろ過と共に微生物を利用した有機物の分解処理が行われている。問題は処理能力で、中性洗剤、油カスを含んだ生活排水の処理は難しいと言われている。田畑からの余剰肥料の流入も問題となっている。

上下水道は、人間が生活を営むために不可欠な水利用システムであるが、それを生

活と自然にとって安全なサイクルとして維持管理することは人間の責任である。また、水生植物や微生物の力を借り、曝気やオゾン処理による有機物の分解を利用するなど科学の知識を総動員して、より安全な水を供給する技術を開発する必要がある。

東京都墨田区は「雨水は流せば洪水、貯めれば資源」を合い言葉にして都市の雨水利用を積極的に進めている。都会に降る雨は一举に下水管に流れ込み、下水処理場の処理能力を越えることがあるが、雨水を雨水貯留タンクに溜めてトイレの流し水、植木の手入れ、初期消火用水などに利用することで資源の節約ができる。

水利用技術の中で、海水の淡水化は最も注目すべき技術の一つであろう。淡水だけが水資源と考えると、無限に近い量が存在する海水を淡水化して利用できれば、水不足の問題が一举に解決する。水が石油よりも高いサウジアラビアでは、海水の蒸留によって淡水をつくるプラントが日本のメーカーから輸出され実施されている。しかし、他の国ではコストの点で実施は現実的ではない。最近、日本の企業が逆浸透膜法で日量1万トンを超える大型プラントによる海水淡水化を実現している。まだ規模が小さいが、将来の水不足に備えて技術を発展させることが望まれる。

その他、水の特性を利用した技術として水カッター、超純水、電子レンジ、MRI（磁気共鳴画像法）などがある。水カッターは、超高圧水の衝突エネルギーを利用する加工技術で、細いノズルから噴射する水によって金属や宝石などの硬い物や、樹脂や食品などの軟らかい物まで、あらゆる物の切断を可能にした。超純水は、純度100%に限りなく近い水で、微粒子や酸素まで除去し尽くす力があることから半導体素子関連の製造工程における洗浄や遺伝子工学分野での細胞培養などに利用されている。電子レンジは、特定の振動数のマイクロ波を照射して水分子の回転運動を最大にさせ、効率よく温度が上がるように設計された家庭調理器具である。熱を加えずに水を含む物だけを暖めることができる電子レンジは、水の特性に注目した科学の智の例と言える。

MRIは、脳をはじめ身体の断面を手術することなく視覚化するもので、今や医療診断に無くてはならない機器となっている。MRI断層イメージ（図10¹⁹）は、身体組織中の水分子をはじめとする水素原子からの微少な磁気信号を検知し、コンピュータ処理することによって得られる。どの臓器も水を含むので水分子の挙動や状態を見て診断することができ、X線撮影と違い放射線の危険性

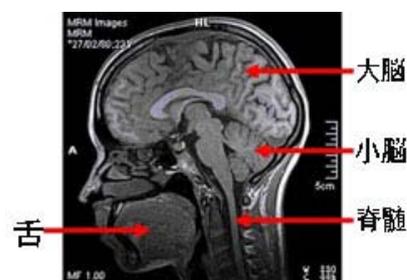


図10 脳の断層イメージ

¹⁹ 大阪府立呼吸器・アレルギー医療センター http://www.hbk.pref.osaka.jp/s_xsen/mri.html

がないのが特徴である。

環境（水質）汚染

川、湖沼、海の汚れは人間活動の結果である。

これを水質汚染という。汚染には、家庭、職場、企業から出される大量の一般ゴミと産業廃棄物がある。しかし、これらの見える汚染源だけでなく、中性洗剤、化粧品の残り、ドライクリーニングや半導体産業で使用する有機塩素化合物（トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンなど）、漁業用の網に塗る有機スズ化合物、廃油は水に溶けずに分散して水質を汚染する。これらは難分解性で生物体内に蓄積される。例えば、PCB（ポリ塩化ビフェニル）が海水に棲むプランクトンに取り込まれると、それを食べた魚の体内に蓄積し、食物連鎖を経て1万倍以上に濃縮されて人間の体内に入ってくる。

また、食料生産や保存の過程で使用される肥料、農薬が環境汚染の原因となっている。肥料は水溶性の窒素やリンを含むため、余剰肥料が河川や湖に流入すると富栄養化の原因となる。また、スミチオンなどの有機リン農薬は生体に入ると生体内の物質代謝を阻害し、神経系の機能を狂わせ、中毒を引き起こす。DDT、BHCなどの有機塩素系農薬は分解されず脂肪中に蓄積される。除草剤の中には植物の成長を狂わせる効果を持つものが多く、生態系に大きな影響を与える。

これからは、自然界の生態系と物質サイクルを考慮し、自然界で安全な物質に分解される農薬、肥料の生産をめざすことが今後の課題となる。

30年前までは、水質汚染は製紙工場や化学工場等からの廃水が主な原因であったが、それらの工場は汚染を最小限に抑える環境対策を行ってきた結果、現在の水質汚染原因のトップは、家庭排水となっている。個々の家庭から油汚れを含む生ゴミを流すと、積もり積もって膨大な汚染源となることを認識し、地球市民としての自覚をもって行動する必要がある。

5.1.3 地球環境における水：マクロな視点で見る水

地球は水と生命の惑星である。地球は半径 6400 km の球体で、地球表面の 71% が海の水で覆われている。陸と海には多様な生物が生息し、水を飲み、水の中や森の中で生き、絶えず変化する気象の影響を受け、水と空気の満ちた大地と太陽エネルギーによって生命が支えられている。人間もそのような地球環境の中に存在する生物の一種であるにも拘わらず、科学技術の成果を利用して、海空を越えて自由に移動することができ、火を初めとする地球のエネルギー資源を発掘・消費し、生活面積を地表のど

こまでも広げ、地球環境を変えるまでの力を得てしまった。しかし、人間も地球の仕組みの中で生き、生かされている存在であることには変わらない。ここでは、地球をマクロな視点で見ながら、地球環境における水と人間との関係について考えてみよう。

地球上の水

地球上の水の総量は、およそ13.8億 km^3 あると推計されている。しかし、その内訳は、海水が約97.5%を占め、淡水はたった2.5%である。しかも、その大部分は極地の氷で、残りの淡水のほとんどは地下水である。したがって、全体のわずか0.014%(20万 km^3)が淡水の液体の水として、湖沼、河川などの形で我々の周りにはすぎない (World Resources 1988-89、World Resource Institute)。それを水資源として利用しながら人間の生活が営まれており、また、生き物の生命が維持されている。水資源は、石油・石炭と違って消費されることはない。しかし、人間がすぐに利用できるのは淡水であり、降水として供給される量に限界がある資源であるという特徴がある。

地球上の水は、気体・液体・固体という三つの状態で存在している。気体は雲、液体は海や湖、川、そして固体は氷河・氷山・雪として存在する。海と陸地の水は、太陽の熱で蒸発し、上空で雲となり、それから雨や雪となって再び地上に降ってくる。このように地球誕生以来、地球上の水は、水蒸気、液体、雪や氷と状態変化しながら地球上を循環している。この時と空間を越えて絶えず動き、循環している地球上の水を「水の大循環」という²⁰。水の大循環を数量的に見てみよう。海からの蒸発量は毎年約 $430 \times 10^3 \text{ km}^3$ 、海への降水量は約 $390 \times 10^3 \text{ km}^3$ と推計されており、その差 $40 \times 10^3 \text{ km}^3$ が、海から蒸発した水が陸に運ばれてくる量である。それが降雨などとして陸地に降り、 $40 \times 10^3 \text{ km}^3$ が河川や地下水を通過してまた海に戻っていく。

ここで、「水の大循環」の意味を考えてみよう。

(a) 水は蒸発する時に周囲から大きな熱を吸収し、かつ、熱容量が大きいので温まり難く冷め難いという性質をもつため、広大な海に覆われた地球の気温変化を和らげる働きがある。いわば太陽からの熱エネルギーを吸収・蓄積するスポンジと言える。その結果、地球の年間平均気温は 15°C に保たれ、水が液体として存在でき、動物・植物の生存に適した環境をもたらしている。因みに、最も暑い中近東の夏の最高温度は約 40°C 、グリーンランドの冬の最低温度は -50°C であるが、海水温度の最高は 36°C (ペルシャ湾)で最低は -2°C (3.7%の塩溶液の凝固点)である。水のない月表面では、昼間の気温は 110°C 、夜間は -180°C と急激な寒暖を繰り返している。また、宇宙全体の

²⁰ Nikon Today, Vol.68 (2007) <http://www.nikon.co.jp/main/jpn/profile/about/today/vol68/index.htm>

平均温度は-270℃付近と言われ、逆に恒星の中は数千万度という超高温であることを考えると、地球の気温は非常に狭い温度範囲に保たれていることが分かる。

(b) 水の大循環は、海水という塩水を真水に変えて地上に戻す巨大な蒸留装置と見なすことができる。陸地には年間 $115 \times 10^3 \text{ km}^3$ の雨雪が降るが、その約 1/3 の約 $40 \times 10^3 \text{ km}^3$ は海面から蒸発し、陸地に移動した後に降ったものだ。すなわち、人間の生活用水、農業用水、工業用水として不可欠の真水（水資源）が、水の大循環により無料で供給されるしくみが地球に備わっていることになる。

(c) 陸地に降った雨は、動植物の生存を可能とし、豊かな生命活動を支える恵みの水である。

(d) 山地に降った雨はダムに貯められると、水力発電によってエネルギーに変換される。

(e) 雨、川、海は自然の浄化装置である。雨は大気中のほこりやチリを洗い浄め、また、地上の岩も屋根も車もすべての物を洗い、その汚れを川へ海へと流し出してくれる。かつて人間は、川や海をゴミ捨て場のように考えていた。確かにある限度内の量の食べ物カスや枯れ葉などは、この水の大循環の過程で、微生物によって完全に分解され、再びクリーンな水循環に戻っていく。しかし、人間が出す廃棄物は、今や川も海が浄化できる能力を超えてしまっている。この事実を認識し、エコサイクルの破壊がこれ以上進むのを防がなければならない。

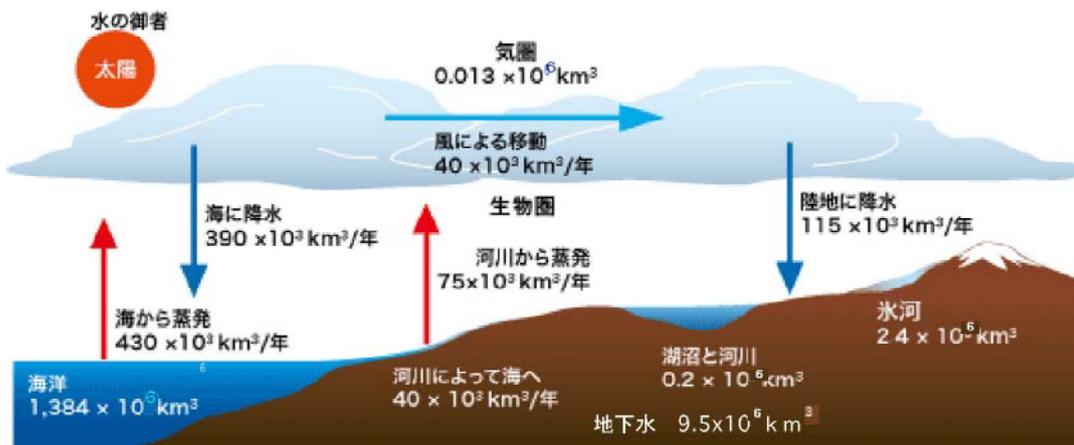


図 11 水の大循環

(1) 気象変化と水

日本の夏の気象は、 1m^3 の空気中に 30g 以上の水蒸気を含んでいる。大気の主成分である窒素、酸素に比べるとせいぜい 1%に過ぎないが、気象への影響は圧倒的に大きい。海を含む広い地域における水の三態変化と、変化の際に出入りする熱エネルギーが気象変化を引き起こしていると言ってもよい。海と陸地から蒸発した水蒸気は雲

となり、地球の自転と気圧の差によって移動する。暖められた大地の上空に辿りつくと、雲となり、雨雪として降る。地球は地軸が 23°傾いて自転しているため、位置によって異なる光照射を受け、受ける太陽熱に差が生じ、緯度の違いによる気象や四季の変化となって現れる。また、大気成分（主に水蒸気と CO₂）に差が生まれて気圧の差が生じ、気象変化となる。気象変化は大まかな規則性に従って起こるが、一定の規則性に従うわけではない。それは、水や大気の運動が古典力学の方程式に従わないことを示すもので、天気予報が難しい理由がそこにある。最近、「カオス理論」、「非線形の理論」によって説明しようとする科学研究が行われている。

近年、この気象変化に人間活動が影響を与えるようになってきた。天然ガス、石油、石炭の燃焼によってエネルギーを得るといふ人間活動の結果、CO₂の排出量が増大し、海での CO₂の吸収・放出、光合成による植物の CO₂吸収と呼吸の均衡（バランス）が崩れ、その結果、熱エネルギーの移動に大きな変化が生じて「地球温暖化／気候変動」が起こっているのである。なお、ある地域において数 10 年間にわたって繰り返される気象変化を気候と呼び、30 年に 1 度の確率でしか起こらない気象現象を異常気象と呼ぶ。世界各地から今、異常気象が報告されており、人間活動による気候変動が今起こりつつあるという IPCC の報告（2007 年）を真剣に受け止め、「京都議定書」（1997）の CO₂削減目標に国、企業、個人がそれぞれの責任で取り組む必要がある。

（2）海と二酸化炭素（CO₂）²¹

海に吸収される CO₂の正確なデータは出されていないが、 3.7×10^{14} kg/年と見積もられている。

地球と大きさが似ている惑星（水星、金星、火星）との大きな違いは、海の存在（大量の液体の水）と大気中の CO₂量が少ないこと、及び動植物の存在である。海も生物もない他の惑星では、重い気体である CO₂が惑星表面を覆っている。

海水には CO₂が溶ける。また、ありとあらゆる金属がイオンとして溶けている。海水中に CO₂が溶けると沈殿として堆積し、石灰岩を造る。こうして原始地球の歴史の過程で、大気中の CO₂量が減少していったと考えられている。さらに、サンゴや貝類が発生した後は、炭酸カルシウムとして体組織中に固定化され、さらに生物濃縮効果も加わって CO₂が減り、今から 40 億年前に現在量まで減少したと考えられている。さらに、20 億年前に光合成する生物（シアノバクテリア、緑色植物）が発生し、CO₂

²¹ 和田英太郎編 講座地球環境学『水・物質循環系の変化』岩波書店 1999

を利用して酸素と糖を合成するシステムが地球にできあがった。この CO₂ 収支バランスのとれたシステムを歪めているのが、化石燃料を大量消費する人間の活動による地球温暖化である。

(3) 氷河・氷山

最近数年間で、北極、南極の氷が急速に減少している。氷は、淡水の約 6 割を占め、氷の大きな融解熱（融ける時に水よりも 80 倍の熱エネルギーを必要とする）により地球全体の気温調節の役割を担っている。また、地球上の水を氷として貯蔵し、海の水位の上昇を抑えている。氷山が融けると、水位が上がり、水面下に沈む島や地域が出てくる。すでに、ツバル島では現実となっており、東京湾のゼロメートル地帯は、海水に覆われる可能性がある。

水は、液体、水蒸気、氷・雪を三つの状態を変えながら絶えず循環し、地球の自然環境に大きな影響を与え、生物の存在を支え、気象を決定し、緑の草木を育て、人間生活に潤いを与えている。この地球には、水なしでは生きていけない多様な動物、植物が互いに関係をもちながら生存している。水が海として、川として、氷河として、大気中の水蒸気として存在することで、熱帯から温帯、寒冷帯の気候が決定され、四季による自然の変化がもたらされ、豊かな地球環境ができ上がっているのである。まさに、地球はユニークな水と生命の星である。

5.1.4 ミクロな視点で見る水：水分子の特異性

水は H₂O という単純な構造をもつ分子である。人間の生命、生活、文明と深い関わりがあり、自然環境の中で重要な働きを担っていることは、有史以前から明らかで

あったにも関わらず、その正体が H₂O という分子式で表せる微粒子であることが分かったのは、今から 200 年前に過ぎない。分子としての性質を自然科学の目で調べていくと、水は他の物質とは異なるユニークな物質であることが分かる²²。

水のいくつかの特性に目を向けてみよう。水は、日常生活の中で液体—固体—気体の三つの状態間を変化する様子を見ることができる。そのような物質は、化学の実験室は別として、他にはほとんど見あたらない。

水は氷になると水面に浮く。これは水が液体から固体となると密度が小さくなることを意味する。一般には物質は固体になると重くなるので、水は“異常な”性質をも

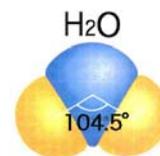


図 12 水の分子構造

²² 鈴木啓三 『水と水溶液』 共立出版 1980

つと言える。水以外ではアンチモンくらいしか例がない。もしも水が普通の物質のように固体の密度の方が大きいとどんなことが起こるか。真冬に湖が氷結した場合を考えると、氷は湖の底の方に沈み水温全体が0℃となって、恐らく湖にすむ魚や植物は全滅するであろう。仮に生きのびたとしても、冬が過ぎても太陽の光は湖底まで届かず、長い期間氷が湖底に残るに違いない。実際には、氷は表面に張るだけだ。

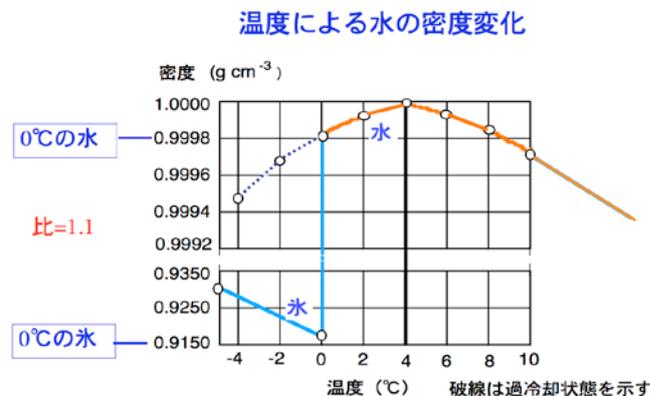


図13 温度による水の密度変化

また、水には冷え難く（比熱容量が大きい）、凍り難い（融解熱が大きい）という性質がある。そのため水を氷に変えるには氷点下に長時間放置する必要があり、余程の寒波に襲われない限り氷の厚さが1m以上になることはない。湖面に張った氷は厚みが増しても氷の温度は0℃のまま。一方、水には4℃で比重が最大になるという特異な性質がある。つまり、どんな寒波がやって来ても、湖の底の方の水温は4℃近くになっているので魚はここへ死ぬことがないのだ。

水に対してさらに自然科学の光を当てていくと、水は自然界に存在する物質の中でもかなり“常識はずれ”の物質であることが分かってくる。

自然界には一番軽い水素から最も重いウランまで92個の元素が存在し、ファミリーのように構造、化学的な性質、物理的な性質がよく似た元素が周期的に現れることから、「周期表」という一覧表が作られている²³。これらの中で、酸素と同じファミリー元素（硫黄S、セレンSe、テルルTe、ポロニウムPo）は、H₂Oのように二つの水素と化学結合して安定な分子をつくる。H₂Oでは、H-O-Hの結合角が104.5°であるが、硫黄やセレンなどの結合角は約90°と狭い。しかし、量子力学的には、90°の方がむしろ自然で、104°まで開いている水分子は異常だ。結合角が180°の直線構造であってもよいはずだが、H₂Oの場合には不安定であることが理論的に説明されている。

この水の構造は、水が持っている特異な性質を説明する基本となる。そこで、H₂Oの仲間の分子(H₂O、H₂S、H₂Se、H₂Te)について、融点（固体が融けて液体になる時の温度）、沸点（液体が気体になる時の温度）、そして、蒸発熱（液体を完全に気体

²³ 文部科学省 「一家に一枚周期表」 http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/week/shuki.htm

に変わるのに必要な熱量) の三つの性質を比較してみよう。

他の分子の値から H₂O の値を予想すると、水の融点は -100°C、沸点は -80°C になる。しかし、実際には融点 (氷点) は 0°C、沸点は 100°C なので、予想が裏切られる。蒸発熱も実際の値 (540 cal/g) の約 1/2 と予想される。これらのデータは、水が融けにくく (融解熱が大きい)、沸騰しにくい

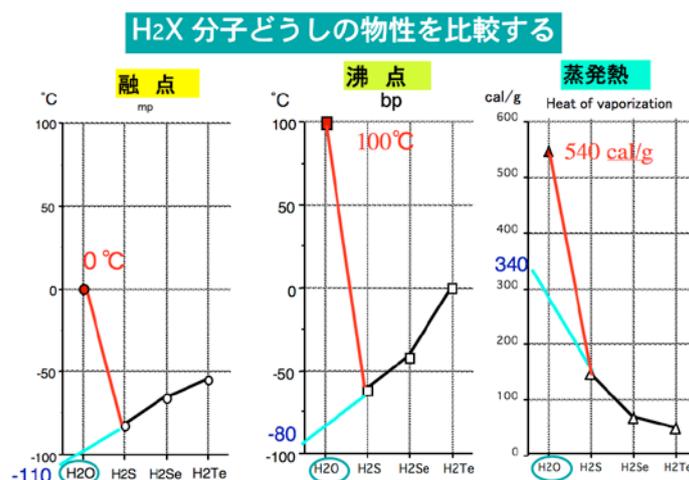


図 14 H₂X 分子どうしの物性の比較

(蒸発熱が大きく、気体に変

えるには多くの熱エネルギーを要する) ことを意味する。同様な性質として、比熱容量 (1g の物質の温度を 1°C 上げるのに必要な熱量) も他の物質と比較すると水は異常に大きい。これらの異常な性質によって、地球の平均気温が +15°C に保たれ、地表の気温変化を和らげ、温暖な気候をもたらす原因となっている。この性質は日常生活においても、昔は庭の水打ち、氷のう、湯たんぽ等に応用され、現代においては、車のラジエーター、機械の冷却剤、魚の冷蔵運搬などに応用されている。なお、H₂O 以外の H₂X 分子はどれも人間にとって毒性をもつことが知られている。硫化水素ガス (H₂S) は火山地方に噴出し、登山客が中毒で倒れるという事故を引き起こした例がある。

水の持つ物理的な性質の一つに、「表面張力」がある。分子間力の大きな液体分子ほど表面張力が大きいという性質と関係づけて考えると理解しやすい。表面張力の大きい液体は、大きな球、液滴を作ることができる。水の表面張力は、水銀に次いで大きく、他に例のない液体である。表面張力の大きな水は親和性の大きな物質と接触すると、できるだけ相手と密着し、すき間があれば浸透し、全面を濡らそうとする。これは毛細管現象として現れる。例えば、紙の上に水を垂らすと、紙繊維の間に浸透して濡れる。タオルも汗が繊維の間に浸透する性質が利用されている。数十メートルもの高い木の頂まで水が昇っていけるのは、細い導管内を昇る性質と葉の表面にある気孔からの蒸散作用による。逆に、水と馴染まないロウやプラスチックのような物質と接触した場合には、水分子だけで集合する力が強いために相手の物質を弾く。これを撥水作用という。日常生活における撥水作用の例としては、例えば、フッ素化剤で表面処理し撥水加工したテントや傘、雨雪用のズボンは水に触れてもしみ込んだり、濡れ

ることがない。

水ほど多くの物質を溶かす力のある物質はない。砂糖、食塩が水によく溶けることはだれでも知っていることだが、様々な無機物、有機物の溶解度を調べるとその範囲の広さに驚かされる。実際、海にはあらゆる物質が溶けていると言っても過言ではない。様々な金属イオン、無機塩、糖、アミノ酸はもとより、酸素、二酸化炭素などの気体も溶解している。また、水には溶けないはずの油性の物質や DDT などの農薬も小さく分散して溶けている。また、ヒトの体内には、酵素タンパク質をはじめ糖、金属イオン、無機塩が溶け、生命活動を維持している。ヒトの身体の元素成分は海水の成分とよく似ていると言われるが、事実である (5.1.6 参照)。

油は水に溶けない。しかし、人間は油脂を食物として摂取し消化できる。また、体内には油性のコレステロールやリポタンパク質が存在する。水に溶けない物質を生命活動に利用するための仲介役を担っているのが、胆汁酸、リン脂質などの界面活性分子である。界面活性分子は、親水性と親油性 (疎水性とも言う) の性質を同時に備えている分子で、油性物質を包み込み、水溶性に変えてしまう力がある。セッケンも界面活性分子である。油性の汚れをセッケン分子が包み込み、水に分散させる作業が洗濯である。セッケンは、水の表面張力を下げる力があるので、セッケンが布地の隙間に浸透しやすくなり、洗濯効果が大きくなる。水だけでも汚れを落とす力があるが、界面活性剤を使うと洗浄効果が増大する。

水は、これ以外にも多くの特性を持つ。Chaplin は、水には 63 の異常な性質があると言っている²⁴。なぜ、 H_2O という単純な構造を持つ分子がそのような異常性をもっているのか。自然科学の法則から外れた分子なのか。

そのようなことはない。基本的な現象については、きちんとした科学的説明がつけられている。その根本を簡単に解説する：水分子 H_2O の酸素原子は部分的にマイナスに電荷し、2つの水素原子はプラスに電荷している。このように分子内の正負極が分かれている分子を極性分子という。水分子間には、図のように $H-O-H \dots OH_2$ という配置をとった時に大きな分子間引力が生じる。この極性分子間力を水素結合という。水素結合は、2分子間だけでなく、周囲の水分子の間にも生じるので、水分子が集合すると、互いに水素結合で結ばれた大きなネットワークを形成する。この結合は、固定したものではなく、結合・切断を絶えず繰り返しながら運動している。これが、液体の水のダイナミックな構造である。水分子間の水素結合が異常に大きいことが、水の

²⁴ Martin Chaplin, Water Structure and Science <http://www.lsbu.ac.uk/water/anmlies.html>

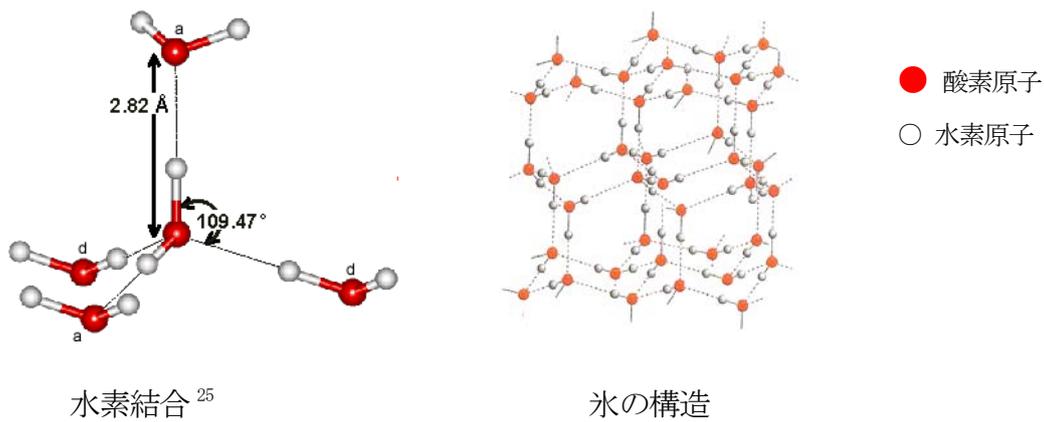


図 15 水素結合と水の構造

融点、沸点、熱容量、蒸発熱、表面張力（凝集力）が異常に大きい理由となっている。

氷は、水素結合が最大に働く形をとって位置が固定した状態であり、水分子は規則正しい結晶構造（六方晶系、氷Ih構造）をとる（図参照）²⁶。氷構造は、水素結合による安定構造をとっているため液体の水よりも隙間が多く、水よりも 1/11 だけ密度が小さくなるために、氷が水に浮くのである。水の密度が 4℃で最大になるのは、0℃で氷が融けた後も 4℃までは部分的に氷構造が残っているため、と考えることができる。また、氷の融解熱(80cal/g)が、水の比熱容量(1cal/g)よりも 80 倍も大きいことは、氷が水よりも強い水素結合による結晶構造を形成していることで説明される。雪の結晶が六方晶系の美しい形をしていることも容易に理解できる。

さらに、水は、 $2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$

という電荷をもつイオンと非イオンとの平衡状態にあるため、イオン性の物質（塩）をよく溶かすと同時に、 H_2O という極性分子として様々な物質と親和性をもつことができ、極性分子であれば容易に溶解できる。この性質が、体内でイオン性をもつタンパク質や DNA、RNA が、水に溶けているナトリウムやカルシウムなどの金属イオンと共存しながら水との親和性を持ち、機能を発現するための基本条件となっている。

以上述べたように、水の性質や役割を説明する場合には、 H_2O 分子単独の性質ではなく、水素結合でネットワークを作りながら柔軟に絶えずダイナミックに構造を変える水分子の集合体の特性と考えることが重要で、小さな水分子の集合体（クラスター）が長時間保持されることはないと言ってよいだろう。

²⁵ 荒田洋治 『水の本質』 共立出版 1998

²⁶ 荒田洋治 『水の本質』 共立出版 1998

5.1.5 生命はなぜ水を必要とするのか

水の特性と生物との関係を整理してみよう。

(1) 植物と水の関係

水は大きな溶解力をもつので、植物は土壌中の様々な有機・無機物を溶かして根から吸収し、導管を通じて組織の隅々にまで運ぶことができる。また、比熱（熱容量）と蒸発熱が大きいので、太陽熱を受けても暖まりにくい。日中は、気孔から水分を蒸発させて灼熱化を防いでいる。水分を失った植物はしおれ、やがて枯れる。水の融解熱は非常に大きい（80cal/g）ので寒風にさらされてもすぐには氷結しない。しかも葉の中の水はハチの巣のような構造の細胞組織の中にあつて様々な物質を溶かしているため氷点下でもすぐには凍らない。また、葉の表面はろう物質で覆われた照葉樹や油性分子を含んでいる針葉樹は、冬でも落葉しない。これは、氷結による枯れ死を防ぐメカニズムを備えているからである。

水は表面張力が大きいので、毛細管現象により組織の隅々にまで行きわたり、親水性の細い導管を通して、背の高い樹木の頂まで昇っていくことができる。高さが100mのメタセコイアの頂きまで到達するためには、さらに葉からの蒸散による陰圧ポンプ作用が働いている。水を含む枝や葉は柔軟性に富む。それに対して枯葉はすぐに砕け、枯れ枝は折れやすい。

ほとんどの植物の木部や葉の組織はグルコースが高分子化したセルロースからできていて、水分子によって取り囲まれている。グルコースは、緑の植物が太陽エネルギーを受け、水と二酸化炭素から酸素と共に光合成される。水と二酸化炭素は、生物体内で、グルコースをはじめとする栄養素が酸素と反応（体内燃焼）してエネルギー

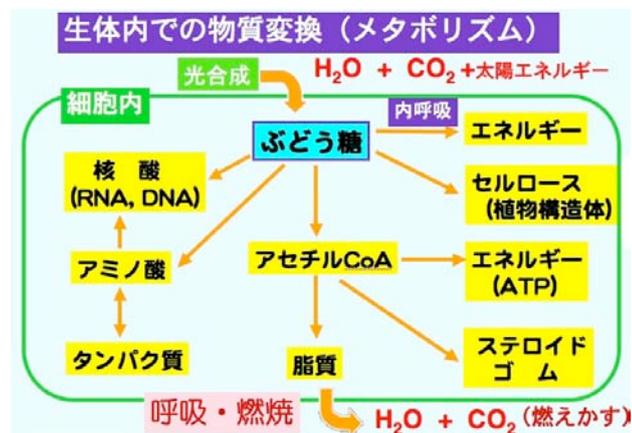


図16 生体内での物質変換

に変換する際に生じる、いわば燃えカスである。この燃えカスを太陽エネルギーによって再利用し、グルコースと酸素を再生産するシステムが光合成である。光合成する緑の植物は、地球に棲む全生物が必要とする原料合成工場であることが分かる。

グルコースがセルロースとは別のかたちの高分子になると、エネルギーの貯蔵源であるデンプンがつくられる。グルコースは、生体が必要とする物質を生合成するため

の原料としても使われる。例えば、体内のエネルギー運搬体である ATP がつくられる。さらに、植物に固有の匂い物質、花の色物質、味物質などが生合成される。水が原料となってグルコースがつくられ、グルコースから様々な生体材料がつくられ、それらが組み合わされて多様で豊かな植物の世界がつくられているのである。

すいか、ぶどう、みかん等の果物は、水分を豊富に含む自然の恵みである。含まれる果汁は、土の中から根を通して吸収され、いくつものろ過装置を経てゆっくりと果実中に蓄積されるので、浄化された安全な飲み物である。しかも、グルコースや、クエン酸、ビタミン C、香料成分を含むおいしい飲み物である。自然のしくみは何とすばらしいことか。しかし、果樹園に水溶性の農薬が撒かれると植物体内に吸収され、汚染された果物に変わる可能性もあることに注意しなければならない。

(2) 動物と水の関係

動物と水の関係に目を転じてみる。植物と違って、動物（陸上哺乳類）は水場を求めて移動し、食物をとり、変化する自然環境に適応しながら生きている。地球上の生物は極寒地、乾燥した砂漠、空気の薄い山岳地帯にも適応して生息しているが、水を必要としない生物はいない。砂漠に棲む昆虫もラクダも水を必要としている。ウイルス、微生物でさえ水の存在する場で生き、水を含む細胞を抱えて生きている。ウイルスは、細胞の中で、生存に必要な物質を生合成し、自らを複製し増殖している生物と無生物の境界にいる生物であるが、水なしでは感染能力を失う。

脊椎動物の場合、血液は酸素と結合したヘモグロビンと生命維持に必要な多種多様な物質が水に溶け、体中に張り巡らされた毛細血管を通じて体の隅々にまで運搬されている。ここでは水の大きな表面張力と溶解力が役にたっている。

食物は消化酵素の助けにより、水との反応によって生体材料に消化・分解される。タンパク質からはアミノ酸、デンプンからはグルコース、脂肪からは高級脂肪酸がつくられ、酵素の作用により、それらを材料として必要な生体物質が再構築される。

生体反応の過程で残される血液中の老廃物は、体内の水処理機関である腎臓でろ過されて除かれ、再生された水は 99% リサイクル利用される。

水を含む体は急激な体温変化から守られている。また、運動によって体温が上昇すると、発汗により体温調節する。ここでも水のもつ大きな比熱容量、蒸発熱が役だっている。

水中生活をする魚や貝、サンゴや藻の場合、水に溶けている酸素、ミネラルを取り入れ、食物連鎖により他の水生動物から栄養を取り入れている。水中生物は水と絶えず接触しているため、浸透圧により体が水で膨張しないように、また、体表面や内部組織が

水に溶けないようにするための防御機構が備わっている。

(3) ヒトと水の関係

ヒト（大人）の体重の60-70%は水である。すべての組織中に水が含まれている。例えば筋肉に76%、脳に75%、骨に12%。髪の毛も水分を失うと、潤いを失いカサカサとなり、裂けやすくなる。「髪はカラスのぬれば色」とは、潤いのある髪のことである。

ヒトは一日平均2.5Lの水を取り入れ、同じ量を排泄する。水補給は生命維持の基本条件であることをヒトは乳飲み子の時から本能的に知っており、日常生活の中に組み入れている。一般に、ヒトは（体重60kg）、水分が2%（120mL）減少すると渴きを覚え、5%で目眩を起こし、20%失うと死を招く。乾燥地に住む人や大量の汗を流すスポーツを行う時は、水分補給に注意しないと脱水状態になる。2003年のノーベル賞は、ヒトの腎臓細胞にあつて脱水状態から体を護る「アクアポリン（水の穴）」というタンパク質を発見した人に贈られた。アクアポリンは腎臓に存在し、水分が不足すると尿管表面に現れて、尿の中からきれいな水だけを取り出し、水分の減った血管に送り出す。脱水状態が解消されると、元の細胞内に戻るといふしくみである。

このように腎臓は、ヒトの場合にも水処理場のような重要な働きを担っているが、一日に飲む水2.5Lの約100倍量の水が腎臓を通過している²⁷。ヒトが毎日生きていくためには、それだけの水が生命維持装置を動かす物質代謝（メタボリズム）に必要であることを意味する。

水は栄養素、酸素、エネルギー運搬物質（ATP）、ミネラルを血液、体液に溶かして体内の隅々まで運搬し、また、使用済みの老廃物等を溶かして腎臓に運び、糞尿として排出される。こうして、ろ過された水の99%以上が再び体内に戻り再利用される。

(4) 酵素タンパク質の作用

細胞の中で物質代謝とエネルギー代謝が行われ、成長・分解を繰り返しているのが生命体である。

水に溶解して運ばれる栄養素は、酵素の助けを借りて水と反応（加水分解）し、アミノ酸、脂肪酸、糖に分解・消化され、アミノ酸からは、DNAの遺伝情報に基づいて酵素をはじめとするタンパク質がつくられる。さらに別の酵素作用によって多糖、脂質、核酸が生合成される。

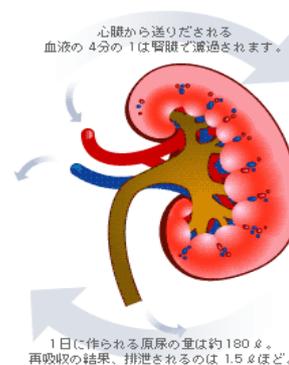


図17 ヒトの腎臓

²⁷ <http://www.koei-chemical.co.jp/know/kidney/index2.htm>

これらの生命活動を担う物質の合成・分解反応が、水で満たされた細胞内や体液中で行われており、水は生体反応の溶媒としても必須である。

代謝を司っている酵素タンパク質は、柔軟で特定の立体構造をとらなければ機能を発揮することができない。タンパク質が柔軟で特定の構造をとるためには、アミノ酸が数十から数百個連なったペプチド鎖が立体的に折りたたまれ、その鎖全体に水分子が水素結合によって密着し、クッションのように取り囲む必要がある。そして、水分子に囲まれた生体分子と出会い、特異的に結合することによって相手を識別し、合成・分解反応が行われる。このような生体機能を担っているのが酵素である。すなわち、生命活動は酵素作用によって営まれ、制御されている。これが、なぜ生物は水を必要とするのかという問に対する分子レベルの世界からの答えである。

(5) 生態系

水をたたえる海、川、湖、湿地帯、干潟には、魚、昆虫、藻類、貝類をはじめとする多種多様な生物が生息している。大きな体の動物は、より小さな動物を餌としながら互いに食物連鎖で結ばれている。これを生態系という。豊かな生態系は豊かな水環境を必要とする。その典型例は海だろう。海鳥が潮の引いた干潟に集まるのは、そこに小さな魚、カニ、貝、ゴカイなど多くの生物が生息していることを知っているからである。豊かな海に棲む魚介類は、また人間に豊かな食をもたらしてくれる。その生命をいただいて人間は生き、生活している。人間も生態系の一部であるが、他の動物たちの生存条件を奪い、絶滅の危機に追いやっている事例が多くある。人間はいつから地球の主人公になったのか。主人公であるならば、生態系を正しく認識し管理する責任がある。主人公でないならば、人間活動を制御し、許容範囲を見定める謙虚さが必要ではないか。

5.1.6 水の起源：水と生命の星(地球)の誕生

生物はなぜ水を必要とするのか。その理由を、ここでは、宇宙における水の起源、水の惑星(地球)の誕生、海の出現、地球における原始生命の発生から現在の生物システムに進化するまでの地球46億年の歴史を見ながら考えてみよう。

水の起源をたずねることは、

- (1) 宇宙のはじまりをたずねること
- (2) H (水素原子)、O (酸素原子) がなぜ存在するのか
- (3) H₂O という分子がなぜ地球上に液体として大量に(海として)存在するのか
- (4) 海の中で生体分子がいかんにして合成されたのか
- (5) 生命はいかんにして発生したのか

(6) 生物はどのように進化していったのか

というような問に向かい合うことであり、自然科学の大課題である。自然科学ではまず観測データを集め、事実を説明する仮説を立て、何度も修正され、確かな根拠を探りながら真実を追求する。以下は宇宙創世の仮説である²⁸。

宇宙で最も多い元素は水素(93%)で、次いでヘリウム(7%)、他は1%以下である。

水素原子核は、137億年前に数十億度の超高温のビッグバンによって宇宙が誕生して、最初に作られた正電荷をもつ素粒子で、陽子と名付けられている。陽子と同時に、中性子と負電荷をもつ電子が作られた。その後、数億度に温度が下がって銀河系が誕生(120億年前)し、92種の元素が形成された、と考えられている。このような超高温状態では、核融合反応が起こり、水素(H)原子核からヘリウム(He)がつくられ、さらにヘリウムから炭素(C)や酸素(O)の原子核がつくられた。H、O原子核は数千万度以下に冷えると、負電荷をもつ電子と結合してH、O原子がつくられ、H、O原子が出会って安定な分子であるH₂Oが形成された、と説明できる。

銀河系の中の超新星が約50億年前に爆発し、飛び散った元素(92種)が再び集まって密度の高い集団(星)を形成した。その一つが太陽(protosun)であり、46億年前に地球をはじめとする8つの太陽系惑星と微惑星がつくられた。

原始地球は、灼熱の星であったと考えられているが、その地球上で起こったことをまとめると、

- ・大部分の酸素は、鉄やケイ素などの重い元素と結合して岩石となり、地核を形成した。従って、原始地球大気中には酸素ガスはほとんど無かった。岩石の中には、水と物として水が取り込まれた。

- ・軽い元素は大気成分となった。例えば、二酸化炭素CO₂のような比較的重い気体と、水素を含む軽い気体(H₂O、アンモニアNH₃、メタンCH₄、硫化水素H₂S、塩酸HCl、ホルムアルデヒドHCHO、青酸ガスHCN)。

- ・水素ガスH₂、ヘリウムガスHeのような軽い気体は、大部分が宇宙空間へ逃げた。

因みに、地球と同時期にできた木星の大気はH₂、Heが主成分である。

- ・水蒸気は、雲となり激しい雨となって降り注ぎ、再び、太陽熱/地熱によって蒸発を繰り返していた。大気中では絶えず雷(放電)が発生し、同時に太陽からの強い紫外線が地上に注いでいた。

²⁸ 上田弘「地球」 裳華房 1995

文部科学省「一家に一枚宇宙図」http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/week/uchuu.htm

・ HCl(gas)は雨に溶け、強酸性の塩酸になった。強酸性の雨（水）は岩を溶かし、ナトリウム Na^+ 、カルシウム Ca^{2+} 、マグネシウム Mg^{2+} 、鉄 Fe^{3+} などが溶けた川となり海となった。

・ CO_2 の行方は。（水星、金星、火星では CO_2 が大気の主成分なのに、今の地球ではなぜ窒素と酸素が主成分なのか。）

CO_2 は海に溶け、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} と出会って沈殿物（石灰岩）となった。

CO_2 はサンゴが発生した後は、サンゴの身体を作って固体化した（珊瑚礁）。こうして、海の存在が地球の CO_2 量を減少させた。

・ ミラーは原始地球の大気を再現する実験を行った（右図、1953）。

環境：激しい雷雨、強い放電、太陽からの強い紫外線が降り注いでいた。

結果：溜まった水の中に有機化合物（アミノ酸、糖、核酸塩基）が生成した。

生成した有機化合物は海に溶け、太陽からの強い紫外線によって分解されずに蓄積していった。海の中では、有機化合物同士が反応し、より複雑な分子（分子と分子の間から水分子が脱離した高分子）が形成されていった、と考えられる。

ここまでは、原始地球ができてから約 10 億年間の出来事で、「化学進化の時代」と呼ばれる。

（1）原始の海の形成（30–35 億年前）

地球上の水素 (H_2) のすべてが宇宙空間に飛び散ってしまったのではなく、火によって燃えて H_2O となり、一部は水蒸気として大気中に噴出し、また一部は岩石中に水和物として閉じこめられた。地核内部に閉じ込められた水は、火山活動に伴って岩の間から噴き出し、原始の海となった。

海（液体の水）が出現する基本条件を考えてみよう。地表温度が $0 \sim 100^\circ\text{C}$ であることが基本条件である。

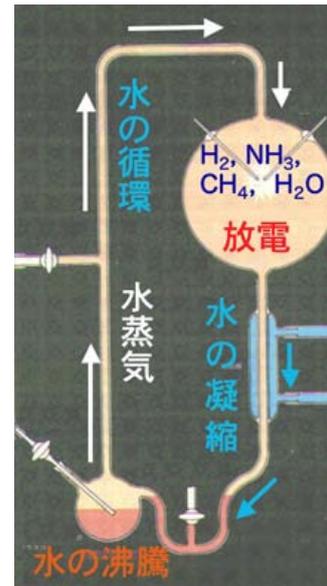


図 18 原子地球の大気の再現実験

第一条件：太陽からの距離（表面温度を決定する）。

惑星	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	
表面温度	330	200	15	-50	-130	-150	-190	-200	(°C)

地球より太陽に近い惑星では、水はすべて水蒸気、地球よりも外の惑星表面は氷結している。

第二条件：惑星のサイズ（引力の大きさをきめる）

月は、太陽からの距離が地球と同じであるにもかかわらず水が無い。その理由は、月が地球よりもサイズが小さいために、重力が地球の 1/6。そのため、水分子を引力圏内にとどめておくことができず、宇宙空間に逃げてしまった。また、水がないために月表面の昼間の温度は 110°C、夜間は-180°Cになる。

結論：地球は、太陽からの距離と大きさが、水が液体として存在できる奇跡の条件を満たしている。そのために、水が海として大量に存在するのだ。海は、大気温の変化を和らげ、種々の物質を溶かす。自然界に存在する 92 種すべての元素が溶けている。

海にはイオン性の物質 (Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻等) だけでなくアミノ酸や糖などの有機化合物、二酸化炭素、酸素) も溶けている。こうして、海の中で生命が発生する基礎条件がつけられた。

(2) 海の中で生命が発生した²⁹

海は、生命の発生、進化の場となり、生物を支える源となった。ミラーの実験が示すように、原始大気成分からアミノ酸、糖（グルコース、リボース）、核酸塩基が生成して海に溶け、さらに、いろいろな有機化合物も作られたと考えられる。以下は、原始生命発生の仮説である。

海水に溶けた有機化合物は、火山周辺の岩のくぼみに蓄積し、太陽熱と地熱により水が蒸発して高濃度の海水になった。粘土表面は化学反応を容易にする触媒作用をもつので、高濃度の有機化合物同士が反応して高分子になる。その結果、タンパク質、核酸(RNA)、多糖類などの生体高分子が合成されたと考えられる。あるいは、原始の海底から噴き出す熱水エネルギーによって有機化合物がつけられ生体高分子がつけられたと考える仮説もある。高分子は、液胞をつくりやすい。液胞の中にイオン性の物質やアミノ酸や糖などの小分子を包み込んだものが原始細胞(コアセルベート)である。

コアセルベートの中は外部よりも 1000 倍も物質濃度が高いので、その内部で物質代謝（生体物質の合成、変換、分解反応）が起こったと考えられる。このような変化の

²⁹ 中村運 『水の生物学』培風館 1992

過程で同一組成のコアセルベートを複製するものが生まれた。こうして無生物から細胞（生命体）が発生したと考えられている。今から 34 億年前のことである。

酸素が無かった時期の原始生物（藍藻類、バクテリア）は、グルコースを栄養源として使い、発酵によってエネルギー運搬体（ATP）とアルコールをつくっていた。

生命活動には、物質代謝を円滑に行わせるための触媒（酵素）と細胞を構成するタンパク質が必須である。原始単細胞生物のあるものは、細胞を複製し、タンパク質合成の遺伝情報を備えた自己複製システムを構築した。最初は RNA から複製していたが、細胞核に DNA として遺伝情報を保持するように進化していった。

シアノバクテリア（藍藻類）は、太陽エネルギーを使って二酸化炭素と水からグルコース（糖）と酸素をつくる光合成システムをつくった。今から 20 億年前のことである。その後、バクテリアも植物も動物も蓄積した酸素を使って、より多くのエネルギー運搬体（ATP）を効率的につくるシステムをつくりあげた（これを呼吸という）。呼吸は発酵よりも 19 倍の ATP 生産能力をもつ。

それまで酸素は有機化合物や細胞を破壊する力をもつ“毒ガス”であった。呼吸はその毒ガスを有効利用する革命的なシステムと言える。また、大気上空の酸素は太陽の紫外線によりオゾンに変換されて、地上に降り注ぐ紫外線を和らげる装置としての役割を担った。こうして、陸上でも生物が生存できる環境ができあがった。

やがて、おだやかな気温と酸素量が増えた陸上で生活する動物が現れ、多種多様な生物へと進化していった。そして、今から約 200 万年前に人類（ホモサピエンス）が地球上に現れた。地球 46 億年の歴史を 1 年 365 日に例えると、人間は大晦日の 23 時過ぎになって現れたことになり、地球上では全くの新参者である³⁰。

ヒトを構成する元素の種類と比率を海水と比較して見ると、非常によく似ている。これは、生命が海の中で発生し、今も海を抱えているためと考えられる。

地球に棲むすべての生命（生物）の細胞・組織中には水が含まれており、水の存在



図 19 地球カレンダー

³⁰ 朝日新聞・日曜版より

が生命活動である物質代謝を支えている。なぜ生命は水を必要とするのか。その答えがここにある。

表2 人体（体液）、ヒトの羊水、海水の主要元素の成分構成と存在する量

存在量の順位	1位	2位	3位	4位	5位	6位	7位	8位
人体	H	O	C	N	Na	Ca	P	S
羊水	H	O	Na	Cl	C	K	Ca	Mg
海水	H	O	Na	Cl	Mg	S	K	Ca

H: 水素 O: 酸素 C: 炭素 N: 窒素 Na: ナトリウム Ca: カルシウム
P: リン S: イオウ Cl: 塩素 K: カリウム Mg: マグネシウム

5.1.7 日本と西洋における水認識の歴史

日本人は、水に対してどんな思いを持ち、表現してきたかを見てみよう。

縄文時代につくられた火焰土器には、川の流れに現れる渦と炎が描かれている³¹。そこから、縄文人が水辺で生活し、草や獣の肉を火で煮たり焼いたりしていたことが想像される。鎌倉時代、鴨長明は「方丈記」で「ゆく河の流れは絶えずして、しかも、もとの水にあらず。淀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例なし」と、流転する人の世を絶えず流れ変化する水の姿と重ね合わせている。



図20 火焰土器

京都鴨川の水源地には貴船神社という晴雨を司る神が祭られている。日照りや長雨が続きと雨ごい、雨やみの祈願が行われてきた。鴨川は生活の基盤であると共に、暴れ川でもあった。また、都に疫病がはやり、たくさんの子どもが亡くなったことがあった。鴨川は、都の人々にとって生活と密接し、その水源の神は命の源の神であり、怒れば洪水をもたらし、汚すと疫病が広がり祟りをもたらす、ありがたい神であるとともに、恐ろしい神として信仰されてきた³²。日本各地には水神社が祭られ、井戸が大切にされてきた。正月には各家で、井戸に供え物をして感謝を表す習慣があった。

江戸時代、歌川広重が描いた東海道五十三次の浮世絵の中には、「庄野の雨」、「蒲原」の雪景色をはじめとして作品の中に水が描かれているものが38枚もある。自然の

³¹ 長岡の歴史 http://www2.ocn.ne.jp/~nryou/history_nagaoka.html

³² 高井和大 水とともに暮らす作法 <http://www.kkr.mlit.go.jp/yodosou/result/kicyou.html>

中の水の美しさが広重の感性と日本人の心に触れたのだと思う。千利休によって始められた茶の湯は、井戸から汲み上げたばかりの自然の水を使って茶の湯を立て、味と香りを楽しむ文化である。武具も飾りも脇に置いて茶の湯に向かうという美学は日本独特のものであろう。また、芭蕉は、古池に飛び込む蛙や最上川の流れなど水を詠んだ名句を残している。古都京都には、土の中に埋めた瓶に水が落ちる響きを静寂の中で楽しむ（水琴窟）という繊細な文化があり今に引き継がれている。

江戸末期、高野長英は、「遠西水質論」の中で、「水は自然界に普遍的に存在するが故に、水を構成する三元素、即ち、酸原（酸素）、水原（水素）、火原（カロリック）が自然のあらゆる営みにかかわりをもつ」と述べ、水を化学的に理解していた。また、宇田川榕菴は、18世紀末期の西洋の化学を完全に理解し、多くの化学用語を創作して、「舎密開宗」（化学入門）を著した。この本には、ラボアジェの水分解実験や気体実験装置の挿絵も含まれており、日本の化学を一気に西洋の水準まで上げたものとして評価されている。近代となって、物理学者の中谷宇吉郎は、雪の結晶成長について独創的な研究を行い、「雪は天からの手紙である」という名言を残した。

雨について、日本人ほど繊細な目で観察している民族はいないのではないか。それは、雨を多様な言葉で表現していることから分かる。例えば、春雨（はるさめ）、五月雨（さみだれ）、氷雨（ひさめ）、時雨（しぐれ）、凍雨（とうう）、俄雨（にわかあめ）などである。

水を意味する 氵 の付く漢字をあげてみると、水の多様な姿、人間と水との関わりが分かっておもしろい：海河湖沼沢汐洲波瀬流湧渦酒漬浄清澄濁濡漁潜淳渴湯液涙汗活など。

言葉は認識の豊かさと深さを示す尺度でもあることを考えると、日本人は中国人と同様に優れた自然認識力を持っていると言えるのではないか。

一方、西洋では、古代ギリシャのターレスが、「万物の根源（アルケー、元素）は水である」と唱え、自然界と人間存在の根源は何かという究極の問を發した。その後、アリストテレスは、「万物は、水、空気、土、火の四つの元素から成る」という四元素仮説を唱え、その後の元素転換（金でない物から金をつくる）の基礎理論となって、1700年間以上錬金術者たちを導いた。同時代に、デモクリトスは、「万物は、これ以上分割できない最小の物質である原子（分割不可能を意味するアトム）と空間から成る」と主張したが、1800年にドルトンが原子論を復活させるまで歴史の陰に追いやられてしまった。世界の四大文明地は大河の近くに発生した事はよく知られた事実であるが、その中の一つ古代エジプトでは、ナイルの水を利用してパピルスを作り、農業、陶器

作りなどの技術を発達させ、その豊かな水利用技術を墓の壁画として残した。

聖書にはヘブライ人の自然観、水に対する考えが書かれている。天地創造の神が水をはじめ光、大地、生き物、人間を造った。水は、海と天上の雨に分かれ、天から降る雨は地を潤し、収穫をもたらす恵みの賜物であると同時に、ノアの時代に人々が洪水で滅ぼされたように、大きな破壊力をもつ恐ろしい存在でもあった。また、洗礼に見られるように人間の罪の赦しと救いの象徴であり、生きる力を聖霊なる神が与えてくれる永遠の命のしるしであった。

ルネッサンス時代、ダビンチは絵画だけでなく多くの科学研究を行い、その考察と結果を書き残した。その中で水の矛盾した挙動を見抜いて波や渦の動きをスケッチし、「水は自然の推進力である」と書いている³³。17世紀にデカルトは、学問において真理を探究する方法の一例として、「気象学」を著し、粒子論の立場から水について論じている。すなわち、「水は

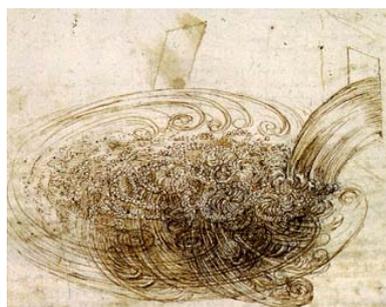


図21 ダビンチの水のスケッチ

ウナギのような微粒子が集合したものである。液体は互いに絡まり合った状態、体積膨張した気体は激しく動き回っている状態、固い氷は干からびた状態と考えられる」と説明した。18世紀後半にラボアジェは、水は、アリストテレスが考えていたような元素ではなく、水素と酸素から成る化合物であることを、水の合成（水素の燃焼）と分解反応の定量実験データに基づいて証明した。

19世紀に入り、アボガドロによって、水が H_2O という原子組成の分子から成ることが証明され、18グラムの水には 6.02×10^{23} 個の分子が含まれることが分かった。ここに近代化学の基礎が確立し、水を含めた全ての物質の性質、反応、合成法の基本原理が明らかとなった。この時から、肉眼で見える物質の世界と一億分の一の分子の世界をつなぐ橋が出来上がり、近代化学が急速に発展して行った。今や電子顕微鏡で原子の像を見ることができ、原子、分子の存在は疑いのない真理であることが証明されている。

³³ Chris Witcombe, Leonardo da Vinci and Water, <http://witcombe.sbc.edu/water/artleonardo.html>

5.2 食料、その量と安全性の確保

食料には米や小麦など主食になる「食糧」のほかに、野菜や果物、砂糖や塩など多くの種類がある。食料をそのまま、あるいは加工して食用とするものが食品である。穀物の一部は飼料として家畜に食べさせ、その卵、乳、肉などを人間が食料にする。水産物も重要な食料である。

食品の役割の第一は活動のためのエネルギー源である。食品に含まれる炭水化物や脂肪は消化されて細胞内でエネルギーに変わり、これを使って臓器や筋肉が働く。だから十分な量の食料を摂取しなければ身体の働きを保つことができない。第二の役割は身体を作る材料の補給である。食品に含まれるタンパク質は消化されてアミノ酸に変わり、身体を作るタンパク質の材料になる。カルシウムは骨の材料になる。第三は微量栄養素の補給である。ビタミンやミネラルは細胞の機能を正常に保つ働きをする。第四の役割は楽しみである。食べることは本能の要求であり、これを満たすことは大きな快樂である。

人間は長い歴史の中で安全で身体によく、手に入れやすい植物や畜産製品、水産物を選んで食料にしてきた。しかし食品にはマイナスの面もある。過食やバランスの悪い食事は様々な病気の原因になる。食中毒菌やウイルスで汚染した食品を食べることにより食中毒を起こすことがある。ある種のキノコやフグなどが持つ自然毒による死亡者も出ている。これらに対する対策を強化すると共に、農薬や食品添加物などの量を適切に管理して食品の安全を保つことも重要な課題である。

5.2.1 世界の食料

今から2000年ほど前に約3億人であった世界の人口はゆっくり増加して、1800年に10億人に達した。その後の世界は急速な人口増加の時代に入り、現在は約66億人である。そして農業の発達による食料の大幅な増産がこのような人口の増加を支えてきた。特に1961年から2003年までの約40年間は、農耕地の面積の増加はわずかであったが単位面積当たりの収穫量が2倍以上増加したために、穀物の生産量が人口の増加を上回った。このような収量の増加は1940年代に始まって1960年代に大きな成果を出した「緑の革命」とよばれる農業改革、すなわち作物の品種改良、化学肥料と農薬の使用、灌漑設備の整備、農業機械の利用などによるものである。

現在、世界の66億人の人口を支えているのは世界の44億トンの農業生産であり、そのうち米、小麦、トウモロコシ、ジャガイモ、大豆の5種類の主要作物の合計が20

億トンである。世界の人口は今後も増え続け、国連は2030年には83億人まで増加し、そのときには27億トンの主要作物が必要になると予測している。一方、世界の農耕地面積は地球の陸地面積の約12%に当たる15億ヘクタールを維持しているが、1990年代以後その面積は横ばいである。今後、農地の面積を増やすためには森林の破壊などの環境問題への配慮が必要である一方、現在の農地が住宅地や工業用地、道路などに転用されてその面積が減少する可能性もある。また単位面積当たりの収量の増加もそろそろ限界に近づいている。その結果、1人当たりの穀物生産量は頭打ちになると予測され、これまでのような食料の増産が今後も続く可能性は低くなっている。

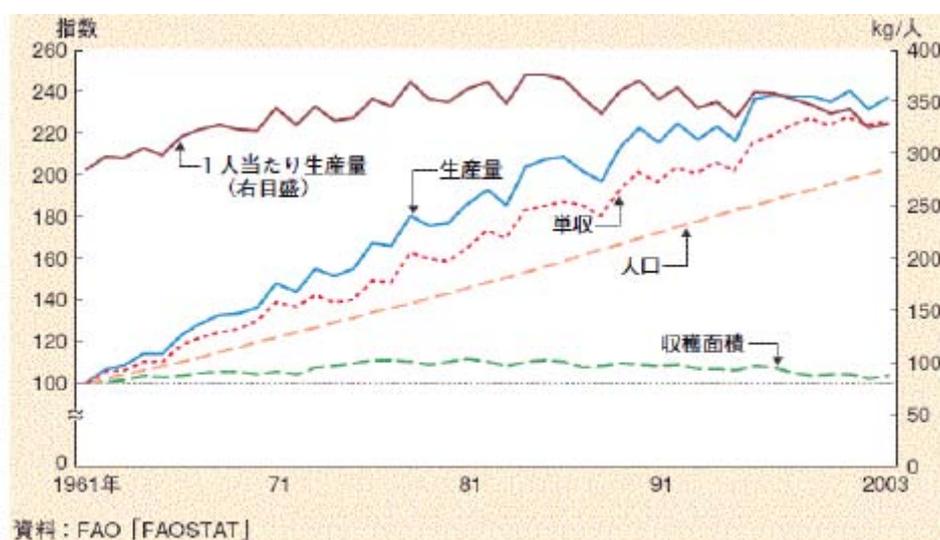


図 22 世界の穀物の生産量、単収等の推移³⁴

動物性タンパク源として畜産製品と水産物がある。世界では2001年に約9000万トンの魚を漁獲し、その内訳は中国が5100万トン、ペルーが800万トン、日本が610万トン、インドが600万トン、米国が540万トン、インドネシアが530万トンなどである。日本の食用魚介類の自給率は2005年には57%しかなく、世界一の魚介類の輸入国であり、その内訳はエビ、サケ・マス、マグロ、タラなどである。畜産製品については後で述べる。

³⁴ 農林水産省 http://www.maff.go.jp/www/hakusyo/16/jp/h16_1_c1_3.pdf

5.2.2 食料の分布

世界で生産される主要作物の合計は 20 億トンであるが、これを単純に世界人口で割り算すると、地球上の人間 1 人当たり年間 300 キログラムになる。日本人は 2005 年に 1 人当たり 140 キログラムの主要作物を消費しているので、日本人の平均的食生活を基礎として計算すれば、現在の量の食料で現在の倍の 130 億人程度の人口を養うことができる。

ところが、国連食糧農業機関 (FAO) の 2003 年の推計では、世界には食料の不足による栄養障害と体力の低下を起こしている人たちが 8 億 2000 万人いる。すなわち世界人口の 12% が飢えていることになる。食料難に悩む人の多くが、サハラ砂漠以南のアフリカに生活している。国連は世界の食料不足人口を 2015 年までに半減させることを目指してきた。しかし、FAO は 2030 年になってもまだ半数以上の 4 億 4000 万人が食料不足のままであろうと予測している。

世界で生産される食料の量が世界の人口を養うだけあるにもかかわらず、貧しい国で食料の不足による病人や餓死者が出ている大きな原因は、国際商品である食料が豊かな国に集中しているためである。食料に限らず、飼料、医薬品、工業製品、日用品などすべての商品は豊かな国に集中している。そして豊かな国ではメタボリックシンドローム (内臓脂肪症候群)、すなわち食べ過ぎによる内臓脂肪型肥満が糖尿病、高血圧、虚血性心疾患、脳卒中等の生活習慣病の発症リスクを高める問題が深刻になりつつある。

世界の食料難に悩む人々を救う対策として、二つのことが行われている。第一は、戦争や災害のような非常事態が原因で短期的な餓えに直面している人たちに対して行う緊急食料援助である。第二は、貧しさのために長期的の飢えに苦しむ人たちが食料を自給できるようにするための援助である。貧しい人が特に多いアフリカを援助する動きは多いが、その一つがアフリカ開発会議 (TICAD) である。これは日本が国連などと共催で 5 年ごとに開催する国際会議で、1993 年に開催された第 1 回会合では国際社会による積極的な対アフリカ支援の必要性を認めつつも、援助によりアフリカの問題がすべて解決されるわけではないことを指摘し、民主化や「良い統治」に向けてのアフリカ諸国の自助努力の必要性と、貧困の克服に成功しつつあるアジアの経験のアフリカに伝える「南南協力」推進の方向を示した。

5.2.3 食用以外の用途

食料が食用以外の用途に使われていることも世界の食料問題を複雑にしている一つ

の要因である。食料以外の最大の用途が家畜の飼料であり、現在増加しつつあるのがバイオ燃料である。

(1) 家畜の飼料

一般に生活が豊かになると食生活が変化して、肉、卵、乳製品など畜産製品の需要が増加する。例えば日本では1960年から2004年の44年間で畜産製品の消費量が約4倍に増加した。FAOによれば1970年代の初めから1990年代中旬までの間に世界の発展途上国の畜産物の消費量は約3倍に増加した。このような畜産製品の急激な増加を支えたのが多数の家畜を飼育施設に集めて配合飼料を与えて飼育する畜産工場的な畜産産業の発達であり、FAOはこれを「畜産革命」と呼んでいる。

現在、世界で飼育されている家畜の数は、ニワトリ164億羽、ウシ13億6千万頭、ヒツジ10億3千万頭、ブタ9億4千万頭、ヤギ7億5千万頭である。ニワトリに毎日産卵させ、ブタや肉牛を短期間で肥育し、乳牛に多量の乳を出させるためには、栄養価が高い穀物を与える必要がある。また牧草だけで飼育した場合と穀物を与えた場合では肉の味や匂いや脂肪の付き方などに大きな違いが出る。食用肉1キログラムの生産のために、鶏肉は4キログラム、豚肉は7キログラム、牛肉は10キログラムの穀物が必要と言われ、世界で生産される穀物のうち約40%が家畜の飼料に使用されている。

現在、畜産製品を大量に消費しているのは豊かな先進諸国だが、ロシア、中国、インド、ブラジルなど人口が多い国が急速に豊かになり、畜産革命が進んで畜産製品の消費が拡大している。そして2020年には畜産製品の消費量は現在の倍になると予測されている。消費の増加を補うためにさらに多くの家畜を飼育することになれば、飼料になる穀物の量が増えるだけでなく、過放牧による土地の荒廃、新たな放牧地を確保するための森林伐採、水の汚染、排泄物などからの温室効果ガス排出の増加などの問題もさらに深刻になる可能性がある。

(2) バイオ燃料

木材や作物など生物由来の再生可能な有機性資源をバイオマスと呼び、これを利用した燃料をバイオ燃料と呼ぶ。石炭や石油は生物由来ではあるが再生可能ではないため化石燃料と呼んで区別している。バイオマスを燃やせば二酸化炭素が排出される。しかしこれはバイオマスが成長過程で光合成により大気中から吸収したものであり、全体としては大気中の二酸化炭素量を増加させない。ただし作物を育て、バイオ燃料を作る過程で肥料、農薬、燃料などの形で石油や石炭製品を使うので、炭酸ガスをまったく増やさないわけではない。

バイオマスのうち、トウモロコシの澱粉やさとうきびの糖分から作ったエタノール

を自動車の燃料にし、大豆や菜種の油からディーゼルエンジン用燃料を作るといったバイオ燃料の生産が大きく伸びている。その技術は作物の新たな利用法として 1960 年代から研究されていたが、地球温暖化の対応策として化石燃料から排出される炭酸ガスの削減が求められたこと、中国やインドの石油消費量の増加や活発な投機などのために原油価格が高騰を続けるなどの動きを背景にして盛んになったものである。

一方、バイオ燃料のためのトウモロコシやサトウキビの作付面積が増えたり、あるいは、現在食用として利用されている穀類のバイオ燃料への転用が増加すれば、食料の不足と価格の高騰が懸念される。また森林の育成が地球レベルでの炭酸ガスの吸収に大きく貢献しているにもかかわらず、バイオ燃料用の穀物を生産するために森林を伐採して畑化するという矛盾も進行している。

5.2.4 食料の自給と廃棄

2003 年の世界各国の食料自給率を見ると、オーストラリアが 237%、フランスが 122%、米国が 128%で、食料輸出国である。一方、ドイツ (84%)、英国 (70%)、スイス (49%) などは食料輸入国である。さらに自給率が低いのが日本で、2006 年には 40%を下回っている。

食料自給率の低下の原因を農林水産省は次のように説明している。日本では昔から米を中心とした食生活が行われてきたが、戦後、副食の割合が増え、中でも特に畜産物や油脂の消費が増えた。自給率の高い米の消費が減り、自給率の低い畜産物や油脂の消費が増えてきたことにより、食料全体の自給率が低下した。また、このような食料消費の変化に生産が対応できなかったことも要因の一つである。

現在は世界各国から食料を順調に輸入し、身の回りには豊富な食品がある。しかし 1993 年には記録的な冷夏の影響で日本は米不足になり、タイを初め世界各国から緊急に米の輸入を行ったように、作物の収量は天候により大きく変動する。さらに中・長期的には世界人口の増加、途上国の経済的発展による食料需要の増加、食料増産の頭打ち、気候変動等の地球環境問題などの影響で、これまでと同様の食料の輸入が難しくなる可能性もある。国内で生産される食料だけで最低限の食料(成人 1 日当たり 2020 キロカロリー) を供給しようとすれば、米とイモを中心にして畜産製品がほとんどない戦後の食料不足の時代の食事に戻ることになる。そうならないためにも、日本の農業を活性化して、産業として生き残ることができる形に変えることで自給率を上げていくことが必要である。また、海外から多量の食料を輸入すればその運搬のために多くの燃料を使用し、温室効果ガスの排出が多くなるという「フードマイレージ」の間

題も起こる。政府は日本の食料自給率を 2015 年に 45%に引き上げる目標を掲げている。これを支援するために、その土地で取れた作物を食べる「地産地消」運動、栄養バランスの改善、食べ残し・廃棄の減少などの食生活の見直しを含む「食育」運動が行われている。

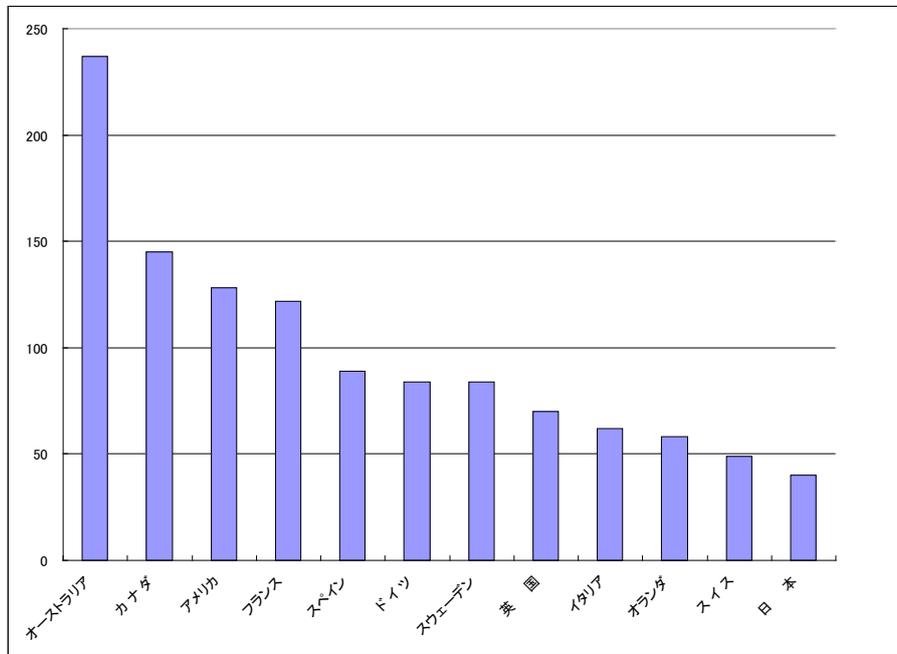


図 23 各国の食料自給率 (2003 年)³⁵

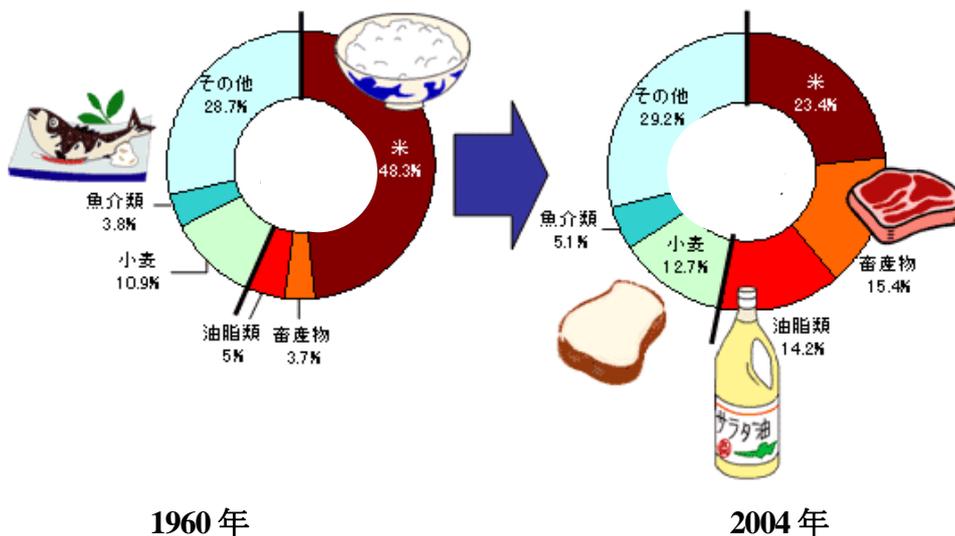


図 24 食生活の変化 (食事のカロリーに占める割合)³⁶

³⁵ 農林水産省「食料需給表」、FAO "Food Balance Sheets"を基に供給熱量総合食料自給率を農林水産省で試算したもの。 http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/012.html

³⁶ 農林水産省 <http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/anpo/pdf/menu.pdf>

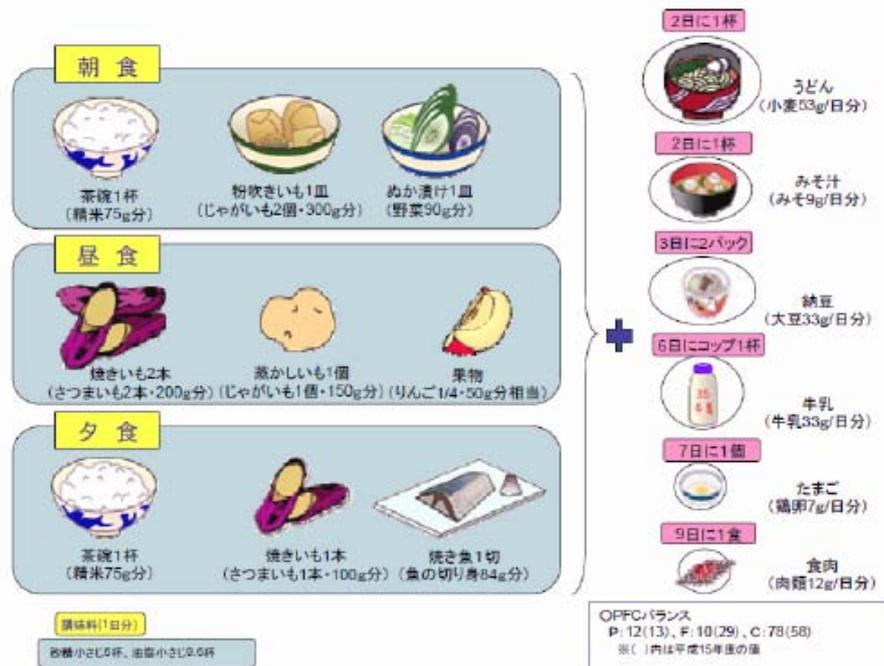


図25 国内農業生産のみでの1日の食事のメニュー例³⁷

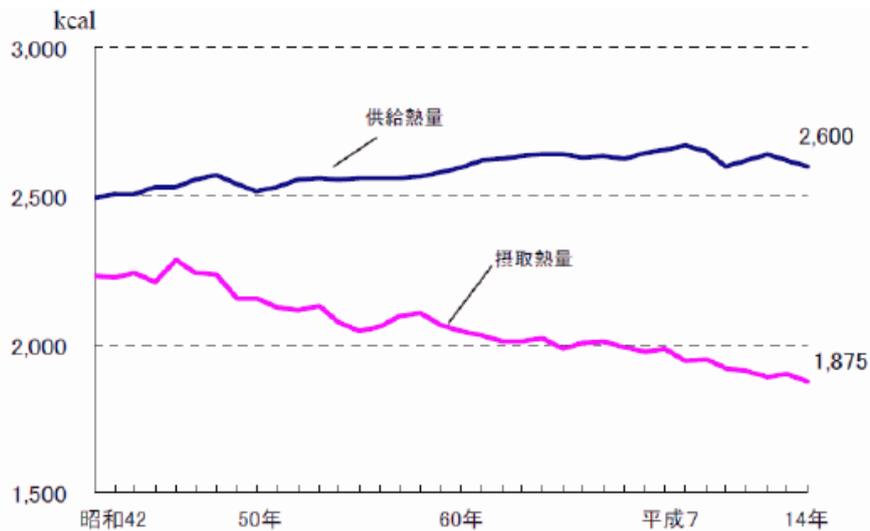


図26 供給熱量と摂取熱量の推移（一日一人当たり）³⁸

日本は多量の食料を輸入しているにもかかわらず、多くの食品を廃棄している。2002年度の農林水産省「食料需給表」によると供給熱量は2600キロカロリーである

³⁷ 農林水産省 <http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/anpo/pdf/menu.pdf>

³⁸ 農林水産省「食料需給表」、厚生労働省「国民栄養調査」より作成

が、厚生労働省の「国民健康・栄養調査」の摂取熱量では 1875 キロカロリーである。その差の 725 キロカロリーは食べずに捨てられた食品と考えられ、その割合は供給熱量の約 28%にあたる。これは日本で収穫される米をすべて廃棄しているのと同じことになる。家庭では食品の約 5%を食べ残しや「賞味期限切れ」などの理由で捨てている。食品廃棄物の発生を抑制し、減量化することにより廃棄量を減少させると共に、バイオマスである廃棄食品を飼料や肥料や燃料の原材料として利用するため、国は食品関連事業者による食品循環資源の再生利用を促進している。その結果、2004 年度に食品製造、卸売、小売、外食などの食品産業から出る食品廃棄物 1100 万トンのうち約半分が再生利用されたが、残りの半分は廃棄されている。また一般家庭から出る大量の廃棄物は分別が難しく、回収されていない。さらに、企業から出る廃棄物の量はわずかしか減っていない。

5.2.5 食事と健康

明治時代から昭和の始めまで、日本人の平均寿命は 40 歳代であったが、1947 年に 50 歳に達し、その後急速に長寿化して 2006 年には男性 79.0 歳、女性 85.8 歳に達した。長寿の原因は公衆衛生と医療の発達により乳幼児の死亡率が減ったこと、結核などの感染症が減少したこと、そして低脂肪・高繊維の食事が主流だったために生活習慣病が少なかったことなどが挙げられている。

しかし、現在の食事は欧米型の高脂肪、高コレステロール、高カロリー食が多くなり、食べ過ぎによるメタボリックシンドロームが増加して生活習慣病の発症リスクが高まっている。このような傾向が続けば、日本人の寿命はいずれ頭打ちになると考えられている。

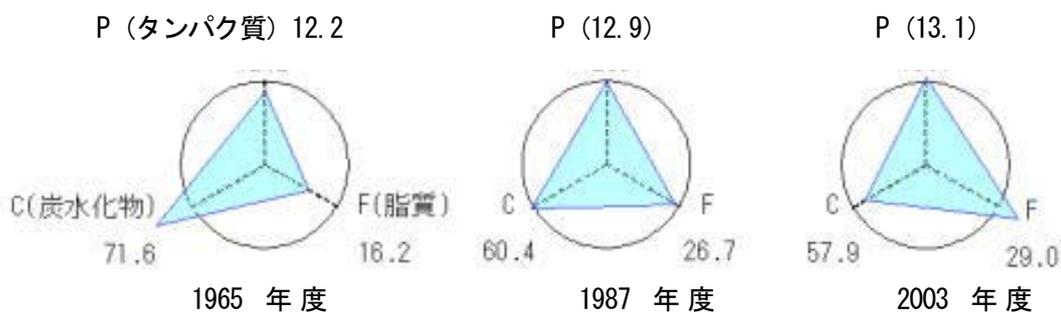
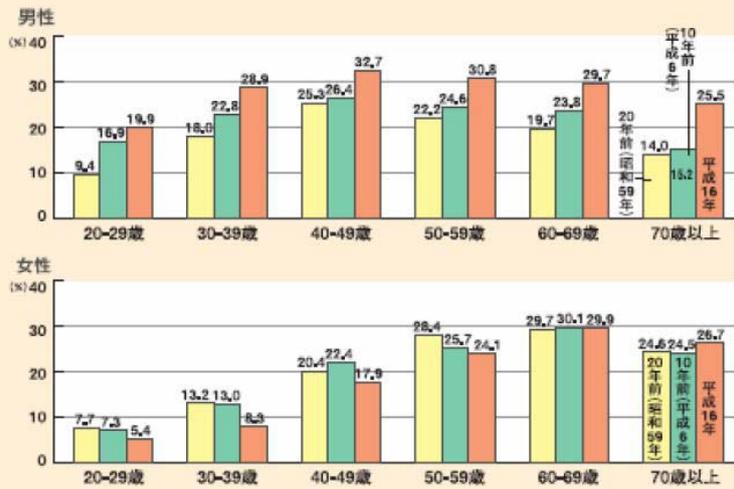


図 27 栄養バランスの推移（1 人 1 日当たり供給熱量に占める割合）（単位：%）³⁹

³⁹ 農林水産省 http://www.kanbou.maff.go.jp/www/jikyuu/files/jikyuu_kojo.pdf

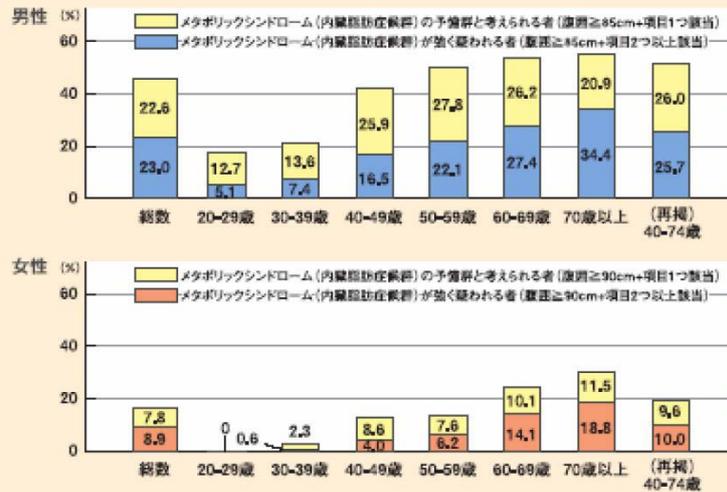
肥満者 (BMI \geq 25) の割合 (20歳以上)



資料：厚生労働省「国民栄養調査」（昭和59年・平成6年）、「国民健康・栄養調査」（平成16年）

肥満度の判定：BMI (Body Mass Index) を用いて判定 BMIは「体重kg/(身長m)²」により算定
 やせ(仮体重)：BMI<18.5 正常：18.5 \leq BMI<25 肥満：BMI \geq 25

メタボリックシンドローム (内臓脂肪症候群) の状況 (20歳以上)



資料：厚生労働省「国民健康・栄養調査」（平成16年）

図 28 肥満者とメタボリックシンドロームの状況⁴⁰

肥満度はBMI (Body Mass Index) で表すが、これは体重 (キログラム) を身長 (メートル) の2乗で割ったもの (kg/m²) であり、BMIが18.5から25の間であれば正常と判定される。

⁴⁰ 厚生労働省「国民健康・栄養調査」 <http://www.mhlw.go.jp/houdou/2006/05/h0508-1a.html>

日本では毎年約 100 万人が亡くなっているが、そのうち約 33 万人はがんである。疫学調査によれば、がんの原因の約 30%は喫煙、約 30%は普通の食事である。タバコの煙に含まれる各種の有害化学物質ががんの原因になるので、喫煙者だけでなく副流煙を吸ってもがんになる確率が高くなることはよく知られている。しかし、日本はまだ世界的な禁煙の動きに遅れている。

普通の食事ががんの原因なる理由は食事の種類と栄養バランスと量である。国立がんセンターの調査によれば肉類を多く食べると大腸がんになり、食塩を多く取ると胃がんになる可能性が増す。酒は食道がん、肝臓がん、乳がんの可能性を増し、熱い食事や飲み物は食道がんの可能性を、肥満は食道腺がん、大腸がん、閉経後の乳がんの可能性を増やす。

	食道	胃	大腸	肝臓	肺	乳房	前立腺
食習慣							
野菜	↓		↓				
果物	↓	↓			↓		
獣肉類(保存・加工肉)			↑				
塩分		↑					
アルコール	↑↑			↑↑		↑↑	
熱い飲食物	↑						
栄養関連要因							
肥満	↑↑ (腺がん)		↑↑			↑↑ (閉経後)	
運動			↓↓ (結腸)				

図 29 がんと食物・栄養素との関連⁴¹

↑ (上向き矢印) がん発生の促進効果あり
 ↓ (下向き矢印) がん発生の抑制効果あり
 (↑↑、↓↓) は確実、(↑、↓) は可能性大

このような個別の原因だけでなく、もっと基本的な仕組みもある。それは、食品が消化・吸収され、全身の細胞でエネルギーに代わるときに酸素が消費されて活性酸素が作られることである。活性酸素はがんだけでなく多くの病気や老化の原因になることはよく知られている。

⁴¹ 国立がんセンター http://ganjoho.ncc.go.jp/public/pre_scr/cause/dietarylfe.html

このように普通の食事ががんの原因になるが、がんを防ぐために四つの方法が推奨されている。第一の方法は野菜や果物を十分に取り入れたバランスのよい食事をすることである。野菜や果物はビタミンやポリフェノールなどフィトケミカルと呼ばれる化学物質を持ち、人間はこれを生薬、染料、香料、殺虫剤など多くの目的に利用している。その中には発がん性の化学物質も少なくないが、その一方で活性酸素を消去するビタミンその他の化学物質も含んでいる。そして総合的には野菜や果物を多く食べることががんの可能性を少なくするのである。第二は食べ過ぎないことである。多量の食事は多量の活性酸素を生み出してがんや老化の原因となるだけでなく、肥満を引き起こし、糖尿病、高血圧、心臓病などの生活習慣病の可能性を大きくする。実験動物（ラット）では、人間の発育期にあたる生後6週間から摂取カロリーを40%少なくすると、餌を自由に食べさせた時と比べて寿命は1.5倍に延長し、人間の青年期にあたる生後6か月から始めても1.3倍に延長するという研究がある。ただし、人間の場合には極端なカロリー制限は身体の成長と機能に悪い影響があるので、「腹八分目」を心がけることが大事である。第三は適度の運動をすることである。運動は酸素消費を増やして活性酸素を増やすので、一見、身体に悪い。しかし軽い運動をするとその刺激により活性酸素消去酵素が増えるので、総合的に見るとよい効果が得られる。他方、過剰な運動は避けた方がよい。第四は、言うまでもなく、禁煙である。

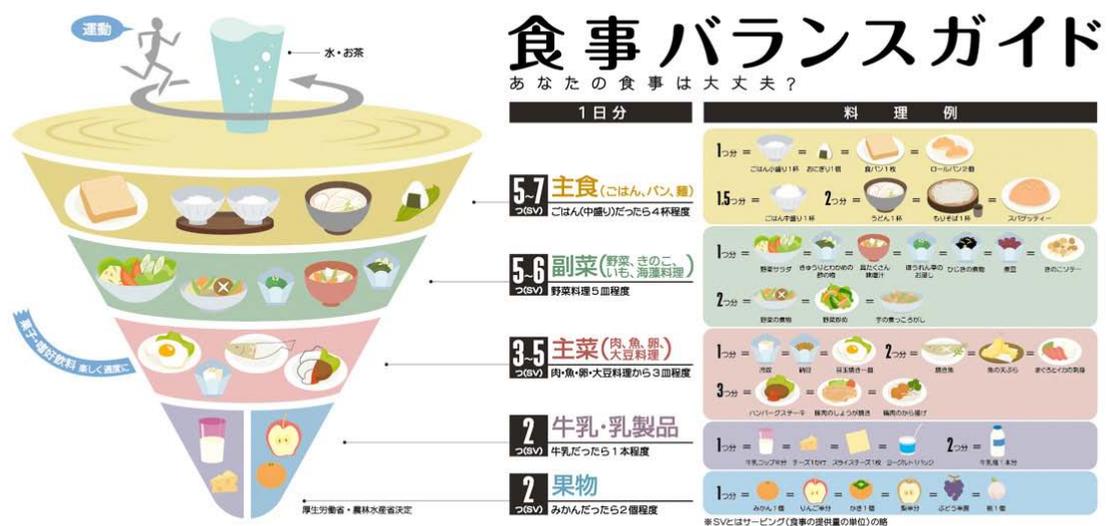


図 30 食事バランスガイド⁴²

⁴² 農林水産省 http://www.maff.go.jp/food_guide/balance.html

2005年に農林水産省と厚生労働省が発表した「食事バランスガイド」は、健康で豊かな食生活の実現を目的にしたものであり、「食事の基本」を身に付けるために毎日の食事を主食、副菜、主菜、牛乳・乳製品、果物の五つに区分し、望ましい食事のとり方や量を分かりやすく示している。これはおおよその目安なので、毎日、厳密にこの通りにする必要はないが、大きく偏った食事は避けなければならない。

食べ過ぎによる肥満がメタボリックシンドロームとして問題になっている一方で、「やせている方が美しい」と考えている女性が多く、20歳代の女性の5人に1人が低体重である。そして低体重の女性の割合は20年前には約15%だったのに比べて2006年には21%を超えている。自分の体型についての自己評価を見ると、女性の場合には「普通の体型」であるにもかかわらず「太っている」と自己評価する人が多い。しかし男性の場合にはそのような傾向はない。食事の量は多すぎても少なすぎても成長や健康に障害を与えることを理解することが必要である。

5.2.6 食品の安全

食品には有害な微生物や化学物質、すなわち危害要因（ハザード）が含まれている可能性もある。そのようなハザードが人の健康に及ぼす悪影響の深刻さの程度と、それが起こる確率を「リスク」と呼ぶ。食品の安全とは、食品のリスクを減らすことである。

（1）食品の安全を守る仕組み

英国で1986年に牛海綿状脳症（BSE）が発見され、1996年にはBSEが人間に感染する可能性が発表された。その後、英国にしかないと思われていたBSEが実はヨーロッパ全土に広がっていることが分かり、ヨーロッパ各国の政府は食品安全対策を大幅に見直し、リスク分析を食品安全管理技術として採用した。日本でも「BSEは存在しない」という政府の見解に反して2001年にBSEが発見され、政府は消費者保護を柱とする食品安全基本法を制定して内閣府食品安全委員会を設置した。

食品安全基本法にも取り入れられたリスク分析は三つの要素からできている。第一の要素が「リスク評価」であり、食品中にどのようなハザードが入っているのか、それを食べることでどのような危害が生ずるのか、どのくらいの量を食べたら危険なのかを調べる。これを担当するのが食品安全委員会である。第二の要素が「リスク管理」である。これはリスク評価の結果を踏まえて、技術的な可能性、費用対効果、消費者感情などを参考にしながらリスク低減のための適切な政策・措置を決定、実施するもので、厚生労働省や農林水産省が担当する。

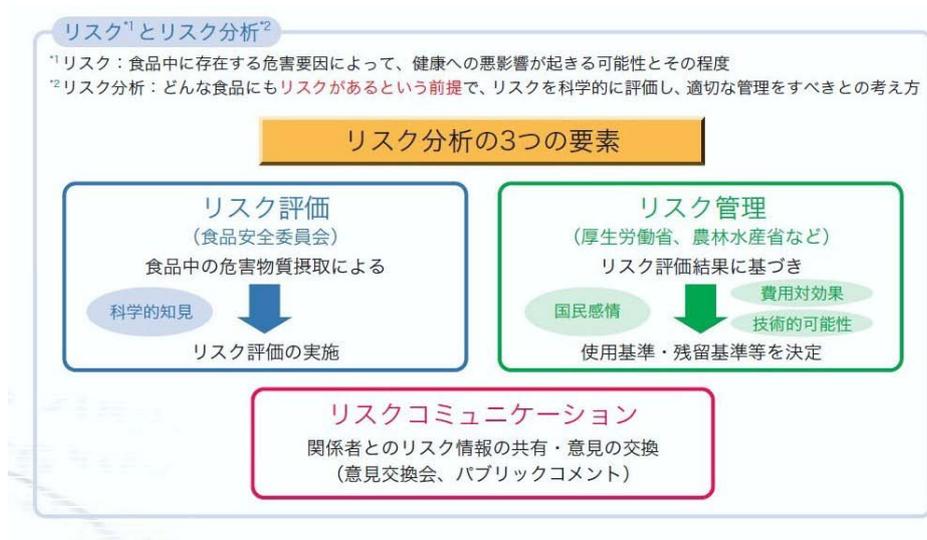


図 31 リスク分析の三つの要素⁴³

食品は生産者、加工業者、流通・小売業者、そして消費者と流れていく。このような「農場から食卓まで」の食品供給の工程を「フードチェーン」と呼ぶ。フードチェーンのどの関係者が間違いを起こしても食品のリスクは大きくなる。関係者が対立して非難しあうのではなく、「安全を守る」という目的を共有して、協力して努力することが食品の安全を守る。そして、リスク分析の全過程において、フードチェーンのすべての関係者の間で情報および意見を相互に交換する「リスクコミュニケーション」が、リスク分析の第三の要素である。

人間はよく分からないものや「危ない」といううわさがあるものは避ける性格を持つことでリスクを避けて安全に暮らしてきた。一方、自分の得になる場合には多少のリスクを受容する性格も持つ。例えば、明治時代に写真の技術が入ってきたときには、人々はそれまで見たことがない写真に驚き、「魂を吸い取られる」といって写真を撮ることを避けたという。例えば、スーパーの閉店間際に生鮮食品を値引きすると、食品のリスクと安価であることの得失を考える。このような判断が新しい技術の受入れに大きく影響する。例えば、自分にもメリットがある自動車やサプリメントのリスクは小さく感じて受け入れるが、自分のメリットが見えにくい原子力発電所、遺伝子組換え食品、食品添加物、残留農薬などのリスクは大きく見えて、受入れを拒む人が多い。リスクコミュニケーションは、科学的な根拠に基づいた関係者間の話し合いにより受入れ可能なリスクのレベルについて話し合うことが目的だが、一旦できた先入観を解

⁴³ 内閣府食品安全委員会 http://www.fsc.go.jp/sonota/pamphlet/2007/pamphlet3_jap-3.pdf

消することは困難な場合が多い。

自然の食品にも食中毒菌や自然毒など多くのリスクがある。さらに、分析技術が発達した結果、すべての食品に多くの種類のハザードが含まれることが分かってきた。リスク管理の目標はこのリスクを「健康に被害がないレベルまで減らすこと」であり、リスクを必ずしもゼロにすることを目標においてはしない。健康に被害がない小さなリスクはそれ以上削減する必要はないし、リスクをゼロにすることは技術的あるいは経費的に不可能だからである。

食品中にハザードが「あるのか、ないのか」ではなく、「どの程度の量があるのか」が食品の安全性を決定するのである。

(2) 最大の危険：食中毒

食品が原因である健康被害で最も重大なものは微生物による食中毒である。2006年に国内で発生した食中毒件数は1,491件、患者数39,026名、死者数6名であった。患者数が最も多かったのはノロウイルス中毒で27,616名、続いてカンピロバクター2,297名、サルモネラ2,053名（内死者1名）、ウェルシュ菌1,545名（内死者1名）、ぶどう球菌1,220名、キノコなどの植物性自然毒446名（内死者3名）、フグなどの動物性自然毒65名（内死者1名）などであった。化学物質による172名の食中毒のほとんどが魚に含まれていたヒスタミンであり、食品添加物や残留農薬による中毒はない。原因となった食品を食べた場所で最も多いのが飲食店、次に家庭、旅館・ホテルの順で、どこで食べたのか分からない場合も多い。

1954年から2005年までの統計を見ると食中毒患者数は3万人前後でそれほど変わっていない。しかし、これは保健所に届け出があった数だけで、実際に食中毒にかかった人の数は150万人から750万人であろうと推測されている。ただし1967年以前は毎年100名以上、多い年には500名を超えていた食中毒による死者が、1985年以後は10名前後まで減少している。

このような多数の食中毒患者を減らすことが食品安全行政の最大の課題である。さらに、家庭でも次の六つの注意が必要である⁴⁴。①食品の購入：新鮮な食品を購入する。②家庭での保存：持ち帰ったらすぐに冷蔵庫や冷凍庫で保存する。③下準備：手を洗う、清潔な調理器具を使う。④調理：手を洗う、十分に加熱する。⑤食事：手を洗う、室温に長く放置しない。⑥残った食品：清潔な器具容器で保存する、再加熱する。

⁴⁴ 内閣府食品安全委員会 <http://www.fsc.go.jp/sonota/shokutyudoku.html>

(3) 食品添加物と残留農薬の安全性

人間は衣食住だけでなく医薬品、先端情報技術など幅広い用途に化学物質を利用して、その恩恵を受けている。化学物質には有益な作用を持つものも多いが、有害な作用が強いものもある。食品添加物や農薬は有益な作用を持ち、しかも有害な作用が弱いものが選ばれている。また化学物質の一般的な性質として、「どんな化学物質でも多量なら毒だが、量が少なければ身体には何の影響も与えない」という「用量作用関係」がある。例えば有益な作用を持ち、有害な作用が弱い食塩でも、400 グラムを一度に摂取したら死亡する可能性があり、20 グラムを毎日食べ続けると高血圧、脳出血、心臓病などのリスクが高まる。しかし1日7グラム以下なら、一生の間毎日食べ続けても害はない。青梅に含まれる青酸は毒性が強く、青梅300粒を一度に食べると死ぬ可能性がある。しかし青梅1粒に入っている程度の少量なら健康にほとんど影響がない。これを「用量作用関係」と呼び、これ以下の量なら何の影響もないという量を「閾値⁴⁵」と呼ぶ。

食品添加物や農薬を安全に利用するために、リスク評価において用量作用関係を求める。すなわち、動物実験でなんの毒性も示さない量を決めて、その百分の一あるいはそれ以下の量を一日摂取許容量とし、それ以下の量を使用基準とする。これは閾値以下の量であるため、基準を守る限りその化学物質を一生の間毎日食べ続けても何の影響もないと考えられている。さらに基準は広い安全域を取っているので、基準を多少超過しても直ちに有害な作用が起こることはない。

歴史的には、戦前から戦後の混乱期に基準を大幅に超えた量の食品添加物を使用して被害を起こした例があった。しかし1970年代以後日本は国際基準に準じた規制を行い、食品添加物による被害は出ていない。また、それまで許可されていた食品添加物がその後の研究で発がん性の疑いがもたれたために、禁止になったものもある。例えばAF₂、チクロ、サッカリン、アカネ色素などである。さらにその後の研究でチクロとサッカリンの発がん性は否定されている。

こうして、食品添加物や残留農薬については、健康に影響がない程度の基準違反があるだけある。しかし、アンケート調査では多くの消費者が食品添加物と残留農薬に不安を感じている。被害が出ていないにもかかわらず不安を感じる原因はいくつかある。戦前、戦後に起こった基準を超える食品添加物や残留農薬による食中毒や、かつての高度経済成長の中で起こった工場から排出される煙や自動車排気ガスによるぜん

⁴⁵ 遺伝子を傷つけることにより発がん性を示す化学物質は閾値がないものと仮定して、食品添加物や農薬として使用することは禁止されている。

そくのような化学物質による公害の記憶、化学物質の用量作用関係についての誤解、そして有吉佐和子氏の小説『複合汚染』の影響などである。

用量作用関係の誤解とは、基準をはるかに超えた多量を実験動物に与えたときに見られる様々な毒性が、基準以下の量でも現れるのではないかという誤解である。また小説『複合汚染』は、複数の化学物質を同時に摂取すると体内で予想もしない毒性が現れるのではないかという懸念を描いている。複数の化学物質が体内で相互作用して「拮抗」や「相乗作用」を示す例は、医薬品の場合にまれに見られる。医薬品を身体に明らかに影響を及ぼすような閾値以上に多量に摂取するためである。しかし、基準以下の添加物や残留農薬は閾値以下の極めて少ない量であるために、身体に何の影響も与えない。このような量の化学物質を複数摂取しても、複合作用は起こらない。これもまた用量作用関係である。

野菜や果物が持つ各種の化学物質を抽出、濃縮して錠剤やドリンク剤などの形にした、いわゆるサプリメントが多数販売されている。これを利用する前にその効能に科学的な根拠があるのか確認する必要がある。「私には効きました」という体験談は、個人差や思い込みの要素が入るために、科学的根拠にならないことに注意しなくてはならない。またどんな化学物質も高濃度では毒性がある可能性があるので、「たくさん飲んだ方がよく効く」という誤解は危険である。栄養素は食品から摂取することが原則であり、ビタミンでさえ過剰に摂取すれば健康に害を与えることもある。例えば、禁煙せずに1日20mg以上のβ-カロテンを錠剤などで補給することは、かえって肺がんのリスクを高める結果になる。

(4) 食品の表示違反

戦後の高度経済成長の中で加工食品の大量生産時代になり、全国どこでも同じ加工食品を買うことができ、どこの地域の外食チェーン店でも同じ料理を食べられるようになった。また輸入食品が増えてきた。こうしてかつては農業を身近なものとして暮らしてきた人々の多くが、農業の現場を知らない生活を送るようになった。このような変化が、食品の安全に対する意識を大きく変えることになった。

調理済み食品の購入と外食の費用を足した額が1965年には食料消費支出の約10%であり、多くの人が野菜や魚、肉などの原材料を買って自分で調理をしていた。しかし2000年以後はその割合は30%を超え、外食や調理済み食品を買う人たちが増えてきた。外食や調理済み食品の安全性はそれを提供する事業者の責任が大きい。

不正に利益を上げるため、あらゆる商品で昔から表示の偽装があった。食品についても産地の偽装や賞味期限の偽装などの違反が現在も後を絶たない。食品の「安全と

安心」と言われるが、偽装は基本的には食品の安全性を損なうものではない。しかし事業者に対する信頼が消費者の安心の基盤であり、偽装はこれを根幹から崩すことになる。

特に違反が多いのは食品の期限表示である。期限表示の一つは、定められた方法により保存した場合において、腐敗、変敗その他の品質の劣化に伴い安全性を欠くおそれがないと認められる期限を年月日で示す「消費期限」であり、製造日を含めておおむね5日以内の期間で品質が劣化する食品に表示される。もう一つの「賞味期限」は、定められた方法により保存した場合において、期待されるすべての品質の保持が十分に可能であると認められる期限を示す年月日である。どちらの期限も事業者が自主的に決めるものであり、絶対的な基準ではなく、あくまで目安である。

未開封の食品であっても「期限が切れたら危険」という誤解が広がっている。しかし、食品の品質は時間と共に徐々に変化するものであり、ある期限を超えたら直ちに品質が悪化するものではない。しかも期限は十分な余裕を持って決められているので、期限が切れた場合でも直ちに捨てる必要はない。逆に、開封した食品については保持期限を頼りにすることはできない。開封後、室温に長時間置くなど取り扱いが悪ければ、食品は短時間で品質が低下することがあるからである。人間は昔から食品の安全性を視覚、嗅覚、味覚、触覚で判断してきた。そして、そのような感覚による判断は現在も必要であり、有用なのである。

5.3 エネルギー、自然と社会を動かす源泉

エネルギーという言葉が新聞・雑誌やテレビ・ラジオに出ない日はない。環境問題、エネルギー問題として多くの人の注目を浴びている。エネルギーは誰でもが知っている言葉でありながら、また、よく分からない言葉でもある。まずは、科学での考え方と特徴を確認しておこう。

5.3.1 エネルギーの利用とエネルギー変換装置

人類は火を使う動物として発達してきた。樹木を燃すことにより暖をとり、煮炊きにより食物の範囲を広げ、そして明かりによって他の動物からの危害を避けてきた。これはエネルギーとしての熱と光を使ったことになる。エネルギーという言葉を使うまでもなく、動物は生きるために植物を食べる。これは食物に含まれる化学エネルギーを取り出していることを現在の私たちは知っている。その植物は太陽からの光のエネルギーを使って二酸化炭素と水から炭水化物を作っている。生物は生きるためにエネルギーを使わなければならない。

人類は生物として本来備わっているエネルギーの取得と利用の仕組みをはるかに越えた装置を作り、文明を築き上げてきた。その大展開は18世紀の後半に西洋で始まった産業革命である。水の加熱により発生する水蒸気の力を、機械を動かす力に変換する装置を発明し、物の生産と運搬に飛躍的な進歩をもたらした。そのことが社会の構造、ひいては人間の行動、そして世界の国の関係にも大きな変化を及ぼすことになった。この装置、蒸気機関の概念図(図32)を見てみよう。水の加熱によって膨張した水蒸気でタービンを回し、それに接続した動力伝達装置を介して、機械を動かし、車輪を回す。

この装置を組み込んだ蒸気機関車が世界の隅々まで走り回り、人と物を運んだのである。蒸気機関車は今や電車で置き換わっているが、現在でもこの概念図はエネルギー変換装置の基本となっている。水を循環させる部分(冷却器と送水ポンプ)を取り外し、ボイラーに対応するエンジンに直接、燃料を導入し、その爆発的な燃焼によって生じた熱を、さらに力学的な駆動力に変換して利用しているのが、石油を燃料とする自動車であり、飛行機である。発電所では、熱から生じた力学エネルギーで発電機を回し、電気エネルギーを生成している。蒸気機関(およびエンジンなどの内燃機関)は、原理的には熱のエネルギーを力学的なエネルギーに変換する装置である。

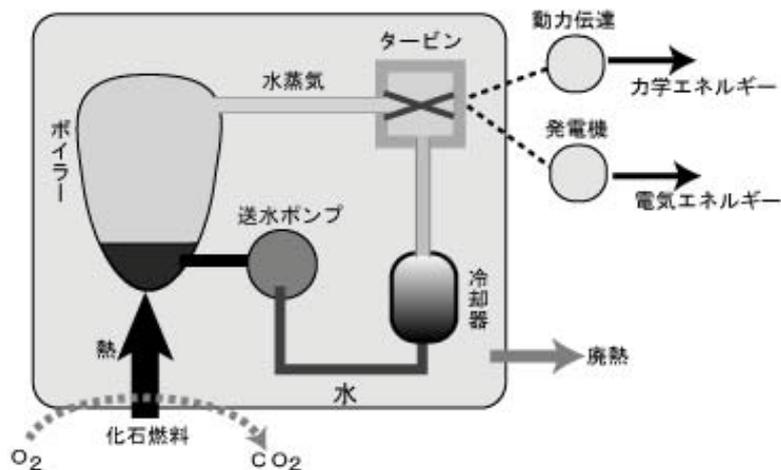


図 32 エネルギー変換装置の例

この“素晴らしい装置”を、さらに大きなエネルギーを発生する装置に、そして、無駄のないものにしようとするのは当然であろう。多くの科学技術者がこの問題に取り組んできた。その結果、分かったことを次に述べてみよう。

5.3.2 エネルギーの七変化

これまでも、熱、電気、力学的なエネルギーという言葉を用いてきた。エンジンでは、石油を燃焼して熱を発生させている。これは石油という物質に閉じ込められた化学結合のエネルギーを取り出しているのである。(火力・原子力) 発電所では、熱エネルギー → 力学エネルギー → 電気エネルギーのように変換している。水力発電所では水の持つ力学エネルギーが出発点になる。どのような種類のエネルギーがあり、どのように互いに変換するかを示したものが図 33 である。

原子力発電では、ウランなどの原子核の分裂により解放された熱エネルギーを利用する。一方、太陽では水素の原子核がヘリウム原子核に融合するときに熱エネルギーが発生する。その熱エネルギーが光エネルギーに変換して宇宙空間に流れ出し、地球にもやってくる。

手に持った石が落ちると地上に落下して音がする。空気の疎密波を生成する運動エネルギーに変換したのである。また、微小な温度も測定できる温度計を用いれば、落下した場所は少し温度が高くなっていることが分かるはずである。物の落下によって熱エネルギーが発生したのである。すなわち、地上から離れて上にある物体は、その高さで決められるエネルギーを持っていることが分かる。その高さまで物体を持ち上げるには、仕事をしなければならない。高い所にある物体が持っているエネルギーを

位置（ポテンシャル）エネルギーと呼ぶ。これは力学的なエネルギーの一種である。落下によって速度が生じた物体は衝突することで、相手の物体に何らかの運動を引き起こすことができる。この運動エネルギーと位置エネルギーをまとめて力学的エネルギーと称している。力学的なエネルギーをこのように二つに分ければ、図 33 に示したように、エネルギーはまさに七変化することが分かる。

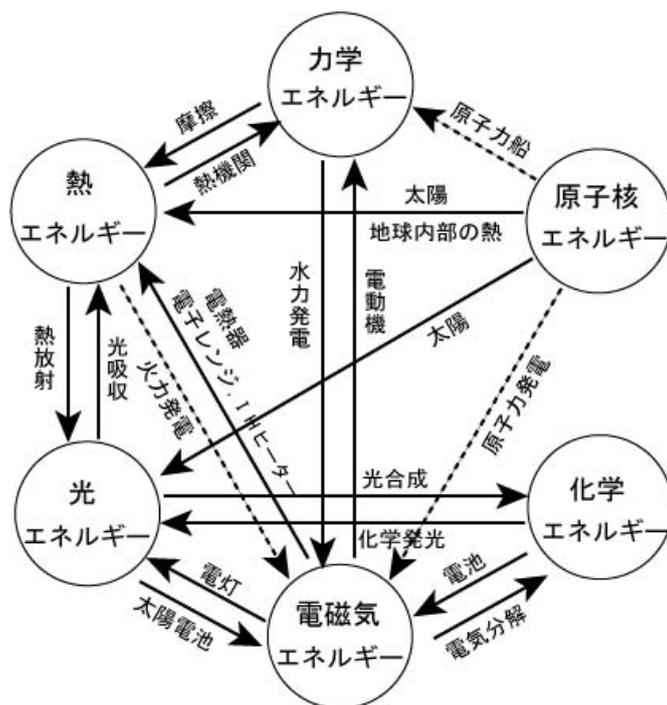


図 33 種々のエネルギーと変換・移動の関係

ここで破線は直接の変換ではないことを示している。

このような様々なエネルギーが、変化の前後でどのように増減するかを詳細に調べたところ、変化によってエネルギーの全量は減りも増えもしないことが分かった。これをエネルギー保存則あるいは熱力学の第一法則という。

あるエネルギーが別の姿に変化する際には、物質の状態の変化が必ず伴っている。逆に言えば、物質の状態の変化をさせるためにはエネルギーが必要である。自然科学では、エネルギーは仕事をする能力と定義されている。熱エネルギー、運動エネルギー、電気エネルギー、原子力エネルギーなどにはすべて仕事をする能力がある。しかし、これらの異なる言葉で表現されるような別種のエネルギーがあるわけではない。これはエネルギーの現われ方の違いである。また、エネルギーそのものを純粹に取り出すなどということはありません。仕事をする能力は何らかの現象として現われるこ

とによって、その能力を発揮できるものである。速く走る“能力”は実際に走ることで分かることであり、勉強のできる“能力”は試験をすることで測ることができるのと似ている。

5.3.3 エネルギーの単位

エネルギーは様々な現われ方をする。それに従って異なるエネルギー単位の呼称が使われてきた。熱を表す場合にはカロリー (cal) が、電子顕微鏡のように電子を一定の電圧下で飛ばしたときに生じる運動エネルギーを表す場合には、電子ボルト (eV) が用いられる。光を含む電磁波のエネルギーは、電磁波の波長領域に応じた様々な単位が用いられている。エネルギー変換では、全エネルギーの量は変化しないので、これらの単位の間には厳密な変換の関係があることを知っておくことが大切である。

国際的に統一されたエネルギーの単位はジュール (J と表記) である。当然、ジュールの厳密な定義はあるが、ここでは、1 J とは、1 kg の物体を 10 cm 持ち上げるとき、あるいは人の心臓が 1 回鼓動するときに必要なエネルギーと覚えておけばよいだろう。1 カロリーは 1 g の水の温度を 1°C 上げるのに必要な熱エネルギーであり、1 cal = 4.18 J の関係がある。

後半で現在のエネルギー問題の一端に触れる。様々な統計白書、専門書籍、あるいはインターネット上の情報を参照すると、様々なエネルギーの単位が使われているのを発見できよう。石油がエネルギー資源であることから、エネルギーの発生量と関係づけて、石油の体積や重量で表したデータもある。また、経済との関係で、石油の値段に変換されたものもある。これらは科学的な意味でのエネルギーの単位変換とは言えないが、実用上は重要であり、また、データ間の比較や評価をする上で重要なので、表 3 にそれを示しておく。

表 3 実用的なエネルギー単位の換算表

	SI 単位 GJ	電力 kWh	熱量 kcal	原油換算 キロリットル
1 GJ (10^9 J)	1	2.78×10^2	2.39×10^5	2.58×10^{-2}
1 kWh	3.60×10^{-3}	1	8.61×10^2	9.30×10^{-5}
1 kcal	4.18×10^{-6}	1.16×10^{-6}	1	1.08×10^{-7}
1 原油換算 キロリットル	3.87×10	1.08×10^4	9.25×10^6	1

現在、石油（原油）は、国際的にはバレルという単位で取引がなされている。1 バレルは 159 リットルに等しい。また、石油の重量で表記しているデータもある。その場合には、比重 0.925 を用いて、1 バレルが 147 kg として変換すればよい。石油 1 キロリットルは 0.925 トンである。

5.3.4 エネルギーの質

エネルギーの保存則があるから、A というエネルギーは別の B というエネルギーに 100 %変換できるであろうか。また、 $A \rightarrow B$ が可能とした場合、 $B \rightarrow A$ という逆の変化も可能であろうか。もし、それができれば、エネルギーの無駄使いという問題のほとんどが解決できることになる。残念なことに、自然界では実質的にこれらの関係は許されていない。図 32 の蒸気機関（エンジン）でも、発生させた熱エネルギーをすべて動力として、すなわち、力学エネルギーに変換することはできない。図に示したように、必ず廃熱が生じる。そこで、熱について考えてみよう。

高温の物体を低温の物体に触れると、熱の移動が起こり、一定時間の後には中間の温度に落ち着くが、低温側に移った熱が、なにかの拍子に元の高温側の物体に移って温度差が生じることを観測した人はいない。床に落とした石の運動エネルギーは、音と熱になってしまう。発生した音は遠くに伝わり、やがて減衰してしまう。消えかかった音が元に戻って大きな音が再び発生することはない。床に発生した温度上昇は熱エネルギーを得た結果であるが、これは容易に周囲に拡散してしまう。その熱が集まってきて、落ちた石が再び自然に床から飛び上がるのを見た人はいないであろう。熱の移動や熱の発生を伴うエネルギー変化は、現実には不可逆な変化である。

このような不可逆の変化を扱うときの量として、エントロピーが考えられた。エントロピーは熱として捨てられるエネルギーと考えてもよい。機械が働いたとき、動物が運動したとき、自然の変化が起こったとき、エネルギーの変換が起こり、それらの一部分は必ず熱として捨てられる。そして、すべての熱が力学エネルギーなどに自然に変化することはない。外部からのエネルギーの移入や物質の移動がない一定の孤立した系では、常にエントロピーは増える方向にある。これをエントロピー増大の法則あるいは熱力学の第二法則という。

エネルギーには他に変換が容易な質の高いエネルギーと消費すると元に戻せない質の低いエネルギーがあることになる。熱は最も質の低いエネルギーと言える。

熱力学の第一、第二法則の結果として、エネルギーの補給なしに仕事を続ける永久機関、周囲から熱を受け取り外部への仕事を繰返す永久機関は存在しないことになる。

5.3.5 熱と温度

エネルギーの変換において、熱というものが、重要な意味を持つことが分かった。熱について、さらに考えてみよう。

熱の本質は物体の構成をミクロに考えるとよく分かる。私たちが生きている地球上の通常自然現象を考えている場合、物体のミクロの基本単位は原子や分子と考えてよい。

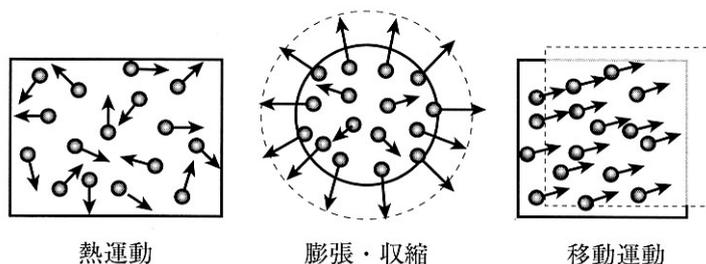


図 34 力学的な仕事と熱に関するミクロのイメージ

物体を構成するミクロの粒子が同じ方向に同じ速さで運動する場合が物体の移動であり、運動エネルギーになる。粒子がその存在する空間を広げる運動が体積膨張である。これらは力学的な仕事をするエネルギーである。一方、物体全体の移動も膨張（収縮）もなく、物体内の粒子がばらばらな方向に互いに衝突を繰り返しながら運動している状態の持っているエネルギーが熱であり、その粒子の激しさの程度を表すのが温度である。このようにばらばらな粒子の運動（熱）から、他の物体を動かすような力を直接取り出すことはできないであろう。せいぜい、粒子運動の程度の低い（温度の低い）物体と接触して、接触面を通じて激しい粒子の運動をより緩慢な粒子の方に伝える（熱伝導）だけである。

一方、物体はその温度に応じたエネルギー分布の電磁波を放出している。これは物体を構成している粒子が、 $+$ の電荷を持った原子核と $-$ の電荷を持った電子から構成されており、これらの多数の粒子の運動による $+/-$ のゆらぎが電磁波を発生すると考えればよい。

さて、これまで熱は質の低いエネルギーと述べたが、十分に温度が高い物体（太陽、赤外放熱板など）は、電磁放射を通じて大きなエネルギーを伝達できる優れたエネルギー源であることも確かである。

温度は二つの物体が接触した場合に、熱の伝わる方向を決める指標であり、高温から低温に熱は流れる。一方、熱はエネルギーである。表面が氷に覆われた湖の水と、 100°C に沸騰しているヤカンの中の水では、前者の方が圧倒的に多くの熱エネルギーを貯えている。熱と温度は意味する内容が異なる。したがって、「風邪をひいて熱が高くなった」というのは、科学的な用語の使い方としては間違っていることになる（温度は高低で、熱は量の大小で測られる）。

ばらばらな粒子の運動というのは、その粒子に許された運動の自由度を最大限に“発揮”した状態とも言える。エントロピーのもう一つの定義が、「取り得る可能性の大きさを反映した量」である。ミクロの粒子は、許される可能性を最大限に取るように状態は変化する。ミクロの粒子の観点からは、エントロピーが増大する方向に変化が起こるといふ自然の法則は妥当なものである。注意や努力をしなければ、データや書類がばらばらになることは自然な流れなのである。別の言い方をすると、一定の秩序を保つには努力が要る（エネルギーを使用する）ということになる。

5.3.6 エネルギー変換効率

ガソリンなどを燃焼させて、その爆発的な膨張により力学的な推進力を得る装置（エンジン）を一般に熱機関という。発生した熱エネルギー（ Q ）を力学的な仕事（ W ）として取り出す仕掛けである。貴重なエネルギーをなるべく無駄にしないことが望まれるが、前にも述べたように、その過程で発生した質の低いエネルギーである熱をすべて望みの力学的なエネルギーに変換するわけにはいかない。熱機関が達成することができる最大の理論的エネルギー変換効率（ W/Q ）は $W/Q = (T_H - T_L) / T_H$ である。ここに T_H は高温の熱源の温度、 T_L は熱機関が捨てる低温側の温度である。この変換効率は1より小さい。

石油ストーブは化学エネルギーを燃焼により熱エネルギーに変換している。化学エネルギー → 熱エネルギーでは、ほぼ100%の変換である。発生した熱エネルギーは室内の空気の温度を上げ、そのエネルギーの一部が人の体の上昇に用いられる。

通常、熱は高温から低温に流れる。一方、エアコンは、室内よりも寒い外から熱を集めてきて、暖かい室内に熱を送り込む装置である。どうしてこんなことができるのかを不思議に思った人はいないだろうか。

エアコンの原理は図35に示したヒートポンプである。低温側にある熱を収集して、高温側に熱を移動させて放出する。装置に使われるのは熱エネルギーの移動に要する電気エネルギーであり、熱として室内に取入れたエネルギーの量とは関係ない。移動させたエネルギーを、装置が使ったエネルギー使用量で割った値を COP (Coefficient Of Performance、成績係数) といい、この値は最近の技術の改善で6.5程度になっている。ヒートポンプの技術は日本が世界をリードしており、環境に優しい技術の一つと言える。エアコンの逆を行っているのが冷蔵庫である。このヒートポンプの理論的エネルギー効率は、 $T_H / (T_H - T_L)$ であり、温度差が高温側の温度より小さい限り、効率は1より大きくなる（注意：この計算をするときは絶対温度を使うこと）。

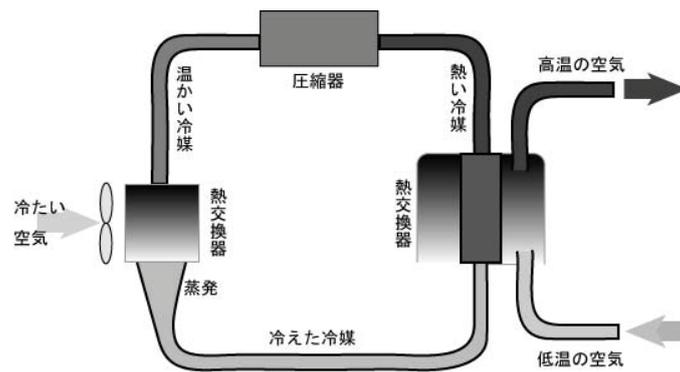


図 35 ヒートポンプの原理

以上で、エネルギーに関する自然科学的な側面のおおよその説明は終わった。このような性質のエネルギーが、人間の生活、社会の動きにどのように関係しているのだろうか。エネルギーをめぐる人間や社会の問題は非常に広くて複雑であるが、エネルギーの本質が変わるわけではないので、それを踏まえて、いくつかの側面をデータによって考えてみよう。ここで、以下の記述でしばしば使う“エネルギー消費”という使い方に注意をしておく。これまで述べたように、エネルギーの全量は使用（消費）によって増えも減りもしない。“消費”とはエネルギー資源の消費、あるいは質の高いエネルギーを使って質の低いエネルギーにしてしまうことを意味することとする。

5.3.7 生命とエネルギー

先に、秩序を保つためにはエネルギーが要ると述べた。生物個体あるいは生態系は秩序を形成している系であるから、必ずエネルギーを消費する。生態系はエネルギーの流れとしても整理できるが、そのエネルギーは物質移動・循環を伴っている。生物の立場からは、物質移動とは摂食ということになる。生態系は生産者（植物）、消費者（動物）、分解者（微生物）に分かれ、それらを円環に結ぶことができる。植物は地球上に普遍的に存在する水と二酸化炭素を原材料として、太陽からの光エネルギーを用いて作られたものである。動物が行っていることは、植物が行った化学的な過程の逆を行って、栄養物質に取り込まれたエネルギーを取り出すことである。結局、地球上のすべての生物は太陽からのエネルギーを利用し、水と二酸化炭素を基にした化学合成と分解過程を行っている。

そこでまずは生産者である植物を考えよう。その働きの基本であるエネルギー変換は光合成によるものである（図 36）。

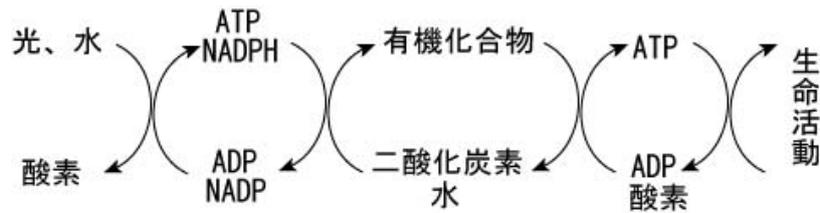


図 36 光合成におけるエネルギー変換と物質変換

太陽からの光エネルギーを吸収した植物細胞は、水分子の中から水素を取り出し、さらに電子とプロトン (H^+) に分割する。エネルギーの高い電子は細胞 (葉緑体) 内の様々なタンパク質の中を移動し (すなわち、電気エネルギーとして伝わり)、プロトンを NADP という分子に電子をつなぎ役にして結びつけることによって (結果として還元して) NADPH (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate) を生成し、また ADP から ATP (adenosine triphosphate) を生成する。NADPH あるいは NADH は生体内の電子の移動あるいは水素の移動に関係した重要な役割を果たす。ATP は大きなエネルギーを貯えた物質で、生物が摂取した様々な有機物を分解したり、運動したりするときに使われる一種のエネルギー通貨と考えられるものである。ATP の 1 モル (約 6×10^{23} 個の分子) は末端にあるリン酸を一つ切り離すときに 7.3 kcal のエネルギーを放出する。NADH も還元物質として、生体内の物質の生産や分解に携わる物質となっている。このように、光合成は生物の構造を作る物質を創生し、エネルギーを貯蓄し、それを後で取り崩したり作り直すときの道具も作っておくということを行っているのである。

一方、呼吸は図 36 の右側にある過程であり、酸素を取り入れ、有機物を二酸化炭素まで分解することにより、エネルギー通貨 ATP を獲得している。すべての生物は、この通貨を生命の維持や活動において活用するのである。

動物が必要とする栄養物質は、他の動物あるいは植物からの物質であるが、元を辿ると植物が作る物質ということになる。その基本は糖質であるグルコースであり、そのグルコース中に化学結合として貯えられたエネルギーは、酸素を用いて (すなわち呼吸によって)、水と二酸化炭素に分解する反応によって解放される。1 モルのグルコース (180 g) の完全酸化反応によって、6 モルの二酸化炭素と 6 モルの水、そして 686 kcal の熱が作り出される。このエネルギーを用いて最大で 38 モルの ATP を作り出す。

動物は生命の維持、生長、体温の維持、および運動のために外部から栄養物質を取り入れる。その物質から、糖質 (炭水化物)、脂質、タンパク質の 3 大栄養素を取り出し、体の構成成分に組み直している。栄養素に分解したり組み立てたりする化学反応が代謝である。この代謝を行うにも、また、個体が運動をするにも、そして外界の情報を

取得したり、体に必要な命令を行ったり、特にヒトの場合には考えたりするためにも大量のエネルギーを必要とする。このエネルギーも栄養素を用いた化学反応から得る。1 g の糖質、脂質、タンパク質が産生するエネルギーは、それぞれ、約 4、9、4 kcal である。

ヒトは年齢、体格、性、運動状態によって必要なエネルギーが異なる。覚醒安静時においても様々な内臓の活動の維持に最低必要なエネルギーを基礎代謝量というが、30～50 歳の男性 (体重 68 kg) と女性 (体重 53 kg) で、それぞれ、1520 および 1140 kcal/日と言われている。

生物が入手したエネルギーは様々な生命活動に用いられるのであるが、最終的には熱として捨てられている。熱力学的には生物も完全機関ではなく、特にヒトを含めた動物全体も入手したエネルギーの約 75% は熱となっている。もっとも、その熱は外界に捨てる前に体温の維持という重要な役割を果たしている。

ヒトが運動を含めた 1 日の生活に必要とするエネルギーはおおよそ 2000 kcal である。これは 1 秒当たりほぼ 100 J、つまり 100 W (ワット) である。熱の観点からはヒトは 100 W の電球を灯していることに匹敵する。逆に言えば、100 W の電灯はヒト 1 人を養うエネルギーを消費していることになる。

人類は生物として持っている運動能力を超える道具として家畜を使い、さらにエンジンなどの内燃機関を作り出してきた。現時点で、ガソリン自動車が走るために使われているエネルギー効率は 15–20% に過ぎない。次世代の動力源として期待されている燃料電池でも 30–40% 程度と言われている。それに対して、生物が運動に用いている筋肉のエネルギー変換効率は 70% にも上がる。生物の行っているエネルギー変換は人類が科学と技術で作りに出した機械よりも優れているのである。まだまだ、私たちは生物に学ぶべきことが多い。様々な動物のエネルギー使用量を図 37 に示した。

体重当たりの使用率が同じだと考えれば、生物個体が実際に使うエネルギー量はその身体の大きさ (体重) に応じるはずで、まさにそのようになっている。この図はヒトが生物の 1 種であることを明白に示すものである。一方、人類は生命維持に必須な量よりも多くのエネルギーを消費している。現代の日本人のエネルギー消費率は 2 kW と言われる。これを図 37 に当てはめると、日本人は体重 4 トンの生物に対応するエネルギーを使っていることになる。

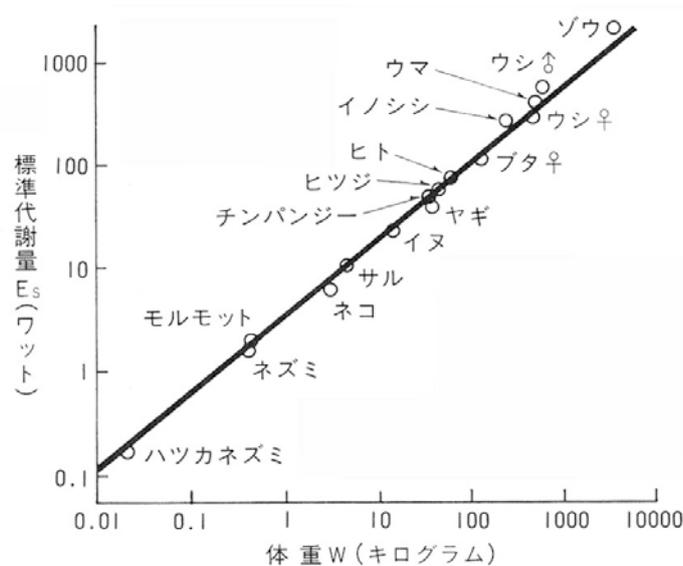


図 37 代謝量と体重の関係⁴⁶

5.3.8 生産に必要なエネルギー

人は栄養源の安定供給を確保するために、植物を栽培し、動物を家畜化してきた。人口が増え、増えた人口を養うためにさらに大量の食料の確保が必要となった。その結果、農業、牧畜、漁業の規模と技術が進展し、文明が“進歩”してきた。米の生産を考えてみよう。米を効率的に生産するには肥料、灌漑など土地改良、農薬散布、農機具などが必要であり、これらの生産や使用にエネルギーが必要になる。

生産方法が近代的になるほどに、生産の絶対量は増えるが産物の持つ単位エネルギーに投入するエネルギーは増えてくる。土地と補助エネルギーが無限にあれば、この方策でもよいが、現代はその成長路線の限界に達しつつある。現代の生活は、技術や生産システムの進歩による文明機器などの大量生産・大量消費を基に成り立っている。これらを可能にする高速・大量輸送システムによって大量の物質が移動・循環している。これには高速・大量の通信情報処理システムの発展も必要であり、ゲームなどの娯楽も含め、物質循環と情報処理に大量のエネルギーが使われている。

生物としての活動を維持し、個人としての生活を向上させるためには、より多くのエネルギーを必要とすることを述べてきたのであるが、人類全体、社会や国のレベルでエネルギーを獲得する課題に入ると、エネルギーはエネルギー資源の問題に入れ替わってくる。以下では、このことの現状を見てみよう。

⁴⁶ 本川達雄『ゾウの時間ネズミの時間』中公新書、1992

5.3.9 生活・経済におけるエネルギー

人類の歴史は生産に使える道具の素材（石→鉄→プラスチック）、あるいは使えるエネルギー源（木材→石炭→石油）によって分けることができる。同時代に他地域（国）よりも高い技術を用いて製品を作り出す方が、より高い文明生活を享受してきたが、それを実現するために、より多くのエネルギーを必要とした。そのエネルギー資源は地球上に偏在している。エネルギー資源の獲得と流通権益が経済活動の対象でもあり、戦争の主な原因であることも事実である。したがって、エネルギーは政治にも深く関係している。現在のエネルギー資源の主なものは石油・石炭・天然ガス・放射性ウランである。その産出は富の源泉であるがゆえに、政治経済的な紛争の原因でもある。

石油を原料としたエネルギーと素材が、現在の文明生活の物質的な基盤を形成している以上、その価格が日常生活に直接に関係することは避けられない。その価格は供給と需給のバランスで決まるのであるが、同時にそれ自身が商品として投機の対象になっていることも、事態をより複雑にしている。

日本の2003年における水力、国産の石炭・天然ガス、地熱によるエネルギー自給率は4%、原子力を合わせて16%である。国の安定的な経済・社会活動には、国際エネルギー市場の安定および供給と輸送の安定が確保されることが必須であり、これが国策の最優先課題にもなる。

一方で、燃料電池、バイオマス、太陽光電池などエネルギー生成方法の開発が企業や国家の主要課題になっているし、ハイブリッドカーなどエネルギー資源の使用法の転換あるいは複合化などの工夫が進められ、それがまた新たな経済活動の対象にもなっている。

5.3.10 世界および日本のエネルギー使用

全世界で、人類がどの程度のエネルギー資源を消費しているかを、石油に換算した量で図38に示した。石油の発生するエネルギーは1リットル当たり、38.7MJ（M、メガは 10^6 に対応）であるから、2005年の全世界の使用量は、 4.5×10^{20} Jとなる。

現在も、全世界のエネルギー使用量はますます加速する方向にあるが、先進国では消費量は多いが（米国が20%強）、増加率は低下し、途上国はまだ消費量は少ないが、その増加率が急激に大きくなっている。石油などのエネルギー資源に限界があること、エネルギー消費の結果として出てくる様々な廃棄物の処理の難問が出現し、地球温暖化に至る二酸化炭素の増加が世界的な課題として突きつけられている。

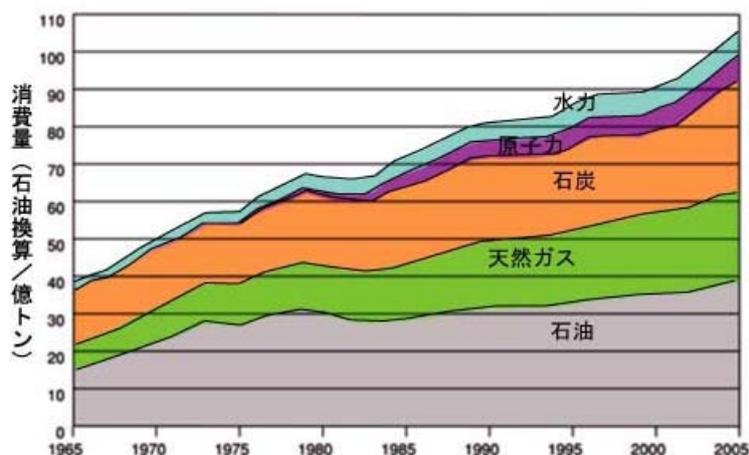


図 38 世界のエネルギー資源の消費⁴⁷

国によって、人口や面積あるいは気候が異なるので、単純な比較はできないが、経済的な発展がエネルギーに関係していることは容易に読み取れよう (図 39、40)。

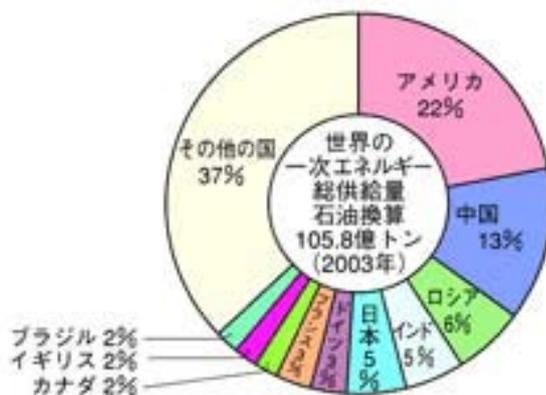


図 39 国別エネルギー消費量⁴⁸

日本は経済大国と言われてきた。エネルギーの面から簡単に振り返ってみよう。図 41 は 1950 年代以降の日本のエネルギー供給量である。ほぼ消費量と考えてもよい。1950 年代の 8.4 千万人の人口が 2000 年の 12.7 千万人に 1.5 倍に増加したが、エネルギー消費はほぼ 10 倍である。これが、第二次大戦後から現在までに、日本人の生活が“豊か”になったことの意味である。

⁴⁷ 資源エネルギー庁『エネルギー白書 2007 年度版』2007、より改変

⁴⁸ (財) 日本原子力文化振興財団「原子力」図面集、2006

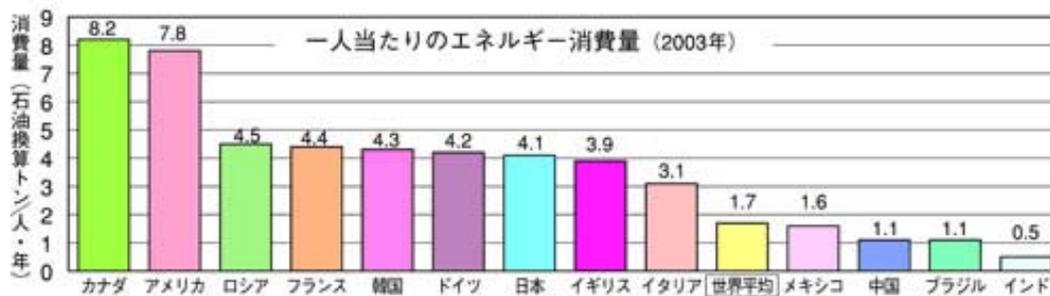


図 40 一人当たりのエネルギー消費量 (2003)⁴⁹

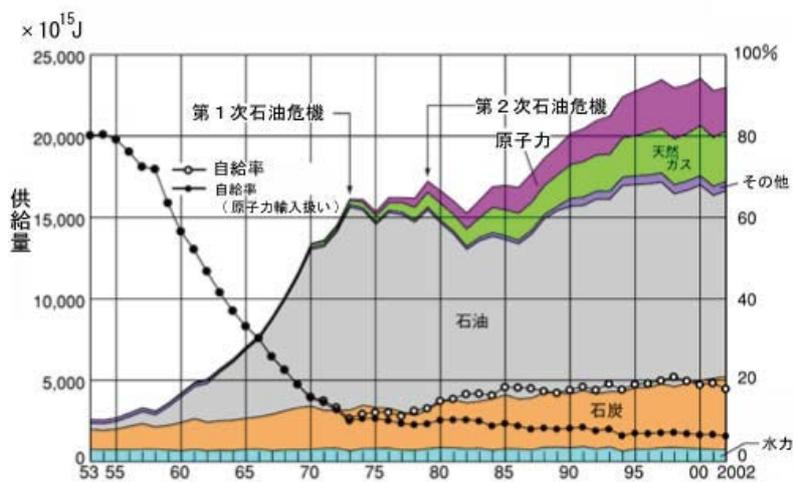


図 41 日本のエネルギー事情⁵⁰

日本人のエネルギー消費量は世界第5位であり（図39）、全体の5～7%近くを消費している。1人当たりの年間使用量を石油に換算すると4トン以上である。したがって、二酸化炭素の排出量も世界第4位になっている。限られたエネルギー資源をどのように活用するか、省エネルギー・省資源の努力が喫緊の課題である。

わが国のエネルギー輸入依存度は、原子力を含めると96%であり、ほとんどのエネルギー資源を輸入に頼らざるを得ないこともあり、エネルギーの効率的な利用には大きな努力を重ねてきたことも事実である。主な先進国とBRICsと呼ばれる発展途上国のGDP（Gross Domestic Product；国内総生産）と石油に換算したエネルギー使用量の比を図42に示した。

⁴⁹ (財) 日本原子力文化振興財団「原子力」図面集、2006

⁵⁰ (財) 日本原子力文化振興財団「原子力」図面集、2006

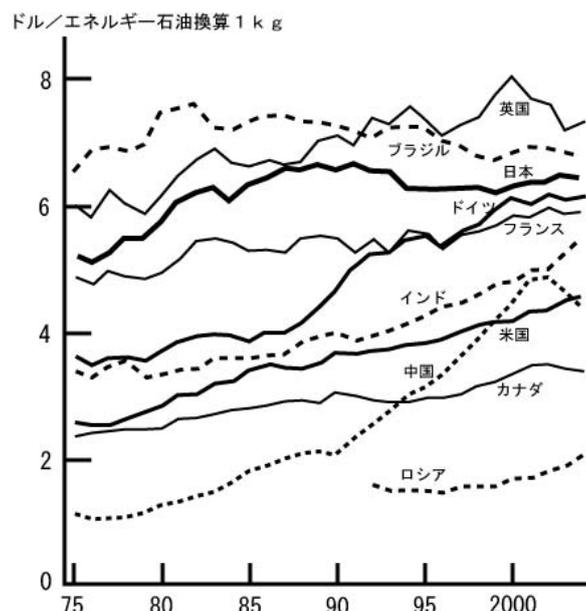


図 42 GDPとエネルギー使用量の比⁵¹

この表には示していないが、ポルトガルは表の縦軸の単位（ドル／石油 1kg）で、1975 年の 10 から 2004 年の 7.1 まで、ほぼ直線的に下がってきているとはいえ、効率の良い結果を示している。これは農業を主体とする産業における太陽エネルギーの効率の良さを含むものであろう。また、各国の平均大気温度の違いによる暖房消費なども関連しているものと思われる。図 42 を基に単純な計算をすると、日本では、1 単位のエネルギー価格を約 10 倍の経済価値にする活動をしており、先進国の中でも長年にわたりエネルギー利用効率の良い活動をしてきたことが分かる。これは、わが国の技術的・政策的な成果でもあり、生活様式における省資源・省エネルギーの気風の反映とも思われる。さらに、一人ひとりの科学的知識の獲得と生活意識の向上が望まれるが、わが国の経験と技術の世界への発信も積極的に行ってよいのではないだろうか。

先に、現在の文明を支えているのは、石油・石炭・天然ガス・放射性ウランというエネルギー資源であり、その産地は地球上で偏在していると述べた。さらに、それらの供給は無限ではなく、現在確認されている埋蔵量に対して現在の使用量を続ければ、石油が約 40 年、天然ガスが 61 年、石炭が 200 年、ウランが 60 年と見積もられている。その正確な数値はともかく、有限であることははっきりしている。使用の効率化（省資源・省エネルギー）、代替のエネルギー資源の開発が望まれると同時に、あまりに大きくなったエネルギー使用が地球環境の悪化を招いていることも、すでに多くの人の

⁵¹ WDI Online 2007.7.14 より改変。実質 GDP を 2000 年の米ドルに換算。

感じていることであり、生活様式の見直しも考えなければならない。それにも拘らず、現在の人々は、文明生活のさらなる向上を望むというトリレンマ（三つをすべて成立させることができないこと）に陥っている。これを解決するものは何だろうか。科学技術リテラシーを身に付けることが、その一つの解答であることは確かであろう。

エネルギーに関係する現代的な問題について概観してきた。問題を解決する場合の一つの有効な方法は視点の拡大、次元の追加であることは、これまでの科学の発展から学べることである。地球上の問題を、宇宙・地球の観点で見直してみよう。

5.3.11 宇宙・地球的観点

地球の生命は、地表面を挟んだせいぜい数 m 程度以内の空気と土の中、あるいは水の中で生活している（もっとも、これは好気性の真核生物について言えることであり、地球で誕生した初期の生命体である原核生物は地殻内 7,000m の深さ、2,000 気圧、300°C の環境にも存在していると考えられ、2008 年の段階でこれらの探索が行われている。ここではこれらの生物体は除外して考えている）。この生命体は、分子のレベルではまったく同じ素材と仕組みで成り立っているから、生命として存在できるいくつかの環境の条件（温度や圧力）もほぼ同じと考えてよい。地球の表面温度の平均は +15°C である。これはどのようにして保証されているのだろうか。大気がないと、地表の平均温度は -18°C と言われている。それでも、絶対温度で 255 K の温度を保っているのである。0 K ではすべての物質の運動は停止してしまう。

まず、後者から考えてみよう。現在の地球自身が持っている熱エネルギーの源泉の一つは、地球誕生の物語に遡る。地球は太陽系が作られるときに太陽の周りに浮遊していたたくさん微小な岩石やガスが衝突して一つの塊になったものである。そのときの衝突の運動エネルギーで、灼熱した球体ができあがった。誕生から間もない頃には、地表はマグマオーシャンと呼ばれるような状態であったが、徐々に冷えて、現在は 10~30 km の厚さの硬い地殻が地球の表面を覆っている。それでも、地球の半径 6500 km から言えば、薄皮のようなものであり、その内部には数千度のマントルがゆっくりと対流しているのである。さらに、地球内部に取り込まれたウランなどの原子核の崩壊で熱が放出される。その証拠が地球内部からやって来るガンマ (γ) 線という X 線よりもさらに波長の短い電磁波、放射線である。電磁波を一つの粒、光子と考えたときのエネルギーは振動数（波長の逆数に比例する）に比例する量になるが、ガンマ線のエネルギーは X 線よりもさらに大きい。この放射線は生命にとって危険でもあるが、進化の要因になっているとも考えられている。

ともかく、マントルの熱とウランなどの原子核崩壊による熱が地球表面を極寒の世界から守っているのである。地震や火山爆発は地球が生きていることの証拠でもある。結局、地球が生命にとって住みやすい環境になっているのは、地球誕生に遡る宇宙の塵の持っていた運動エネルギーであり、超新星爆発のときの膨大なエネルギーを原子核内部に溜め込んだウランなどの放射性元素であり、さらには現在も降り注いでいる太陽からのエネルギーということになる。地球とその生命は、まさに宇宙的な関わりの中で生きているのである。

次に、地球表面温度が -18°C から $+15^{\circ}\text{C}$ になる理由を考えてみる。大気温度は産業革命以降上昇し続け、特に過去100年に $0.4\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ 上昇し、さらにその勢いが1997年以降加速している。その原因が人類による化石燃料の消費と指摘されている。現在の人類の使う主なエネルギー源は、図38で見たように、石油や石炭、天然ガスという化石燃料である。これは数百万年～数億年かけて、生物体が地層の中で変化してできたものである。元を辿れば、水と空気中の二酸化炭素で作られた化学物質の中に太陽からのエネルギーが取り込まれたものである。この化石燃料の大量消費によって発生する熱が地球大気を暖めているのであろうか。

それを解明する前に、地球に降り注ぐ太陽からのエネルギーと、それがどのように使われているかを確認しておこう。太陽自身は毎秒 $3.85 \times 10^{26} \text{ J}$ のエネルギーを放出しているが、1億5千万 km 離れた地球には、その二十二億分の一、毎秒 $1.77 \times 10^{17} \text{ J}$ ($177,000 \text{ TW}$) ; T は 10^{15}) が降り注いでいる。地球大気の上層では約 1.38 kW/m^2 であり、地球の全地表面に平均的に降り注がれるエネルギーは、 342 W/m^2 となる。主にこのエネルギーを使って、地表のあらゆる自然現象、生物活動そして人間活動が行われているのであるが、海洋や大気の大循環に使われるのが $41,000 \text{ TW}$ 、光合成でバイオマスとして生物系に取り込まれるのが 150 TW 、現在の人類が使うエネルギーはおおよそ 13 TW と言われている (2003年)。すなわち、地球にやってくる太陽エネルギーの31%は雲などでそのまま宇宙空間に反射で戻されてしまう。地表まで届いたエネルギーのうちの33%が海洋・大気の運動に、1.2%が植物に利用されている。人類が使う 13 TW は0.01% (地球にやってくる全太陽エネルギーの0.007%) にしか過ぎないのである。 13 TW のエネルギー消費は最終的には熱になって表面温度を暖めるが、その効果は現在の大気温度をわずか 0.006 K 程度しか上昇させないことが計算で予測できる。現在問題になっている地球温暖化は、化石燃料の燃焼によって発生した“熱”によるものではない。これは大したことではないのである。問題は、化石燃料の燃焼の結果として発生する二酸化炭素が放出され、大気中の濃度が上昇することである。

大気中にある水と二酸化炭素分子は地表から宇宙空間に放射される赤外線を吸収して、一部を地球の方に戻すために熱が逃げなくなる。ビニールシートを被った温室の内部が暖かくなるのと同じである。地球の下層大気の温度を約 30°C も高くしているこの温室効果の 90% 以上は水蒸気や雲であり、二酸化炭素の寄与は数% と見積もられている。水も二酸化炭素も地球上の生命にとって必須のものである。しかし、人類が化石燃料を大量消費した結果として生じる二酸化炭素が大気中に放出され、現代に至るまで長い間ほぼ一定であった大気中の二酸化炭素濃度が、短期間に増加することが、“地球温暖化問題” を引き起こしているのである。

日中に 30°C くらいに上昇した大気の温度も、夜には 10°C くらいに冷えることは日常的に経験している。これは放射冷却とって、熱を光エネルギーとして宇宙空間に返しているからである。数十°C 程度の熱を半日で冷ます機能を地球は本来的に持っている。増えた二酸化炭素は、この機能の邪魔をする働きをしているのである。

ここで、エネルギーに関する様々な現象の比較を行っておこう。

表 4 様々な現象に伴うエネルギー

現象	エネルギー	原子力発電 (100 万 kW、1 年間に換算した数)
太陽から地球に来るエネルギー (1 年間)	$5.6 \times 10^{24} \text{ J}$	175,000,000
大型台風	$1.8 \times 10^{20} \text{ J}$	5,600
富士山噴火 (宝永噴火)	$1.2 \times 10^{18} \text{ J}$	38
地震 (東海、東南海、南海地震同時発生)	$7.1 \times 10^{17} \text{ J}$	22
原子力発電 (100 万 kW) (1 年間)	$3.2 \times 10^{16} \text{ J}$	1
原子爆弾 (TNT 火薬 15 k トン)	$6.3 \times 10^{13} \text{ J}$	0.002
人類が使うエネルギー (1 年間)	$4.1 \times 10^{20} \text{ J}$	12,000
人が生きるための最低エネルギー (1 年間、男女平均)	$2.0 \times 10^9 \text{ J}$	0.000 000 06

ほとんど無限とも言える太陽からのエネルギー、大部分がそのまま宇宙空間に戻されてしまう (MOTTAINAI) 太陽エネルギーをどのように取り入れ、温室効果のある物質の発生を抑制しつつ、有効利用できるか、これが 21 世紀の人類が挑戦すべき最高の課題の一つであり、科学と技術がそれを解決する知識と手段を提供することは疑いがない。

5.3.12 再びエネルギーとは

結局、エネルギーとは何なのだろうか。ここで、再び自然科学に戻って、エネルギーの考察を試みる。相対性理論によれば、質量を m としたときの、その物質のエネルギーは $\varepsilon = mc^2$ である。これが、原子力エネルギーの基本方程式と言ってもよい。そして、人類は最初にこの式を原子爆弾に応用してしまったことも忘れてはなるまい。物質は永久に物質ではなく、そのエネルギーを光などに変化させるのである。

一方、光のエネルギーは $\varepsilon = h\nu$ と表すことができる。ここで、 h はプランク定数であり、 ν は光の振動数である。光は物質に当たって吸収される。数億光年の彼方の星からやってきた光エネルギーは、あなたの目の中に飛び込んで化学的なエネルギーに変換されて、宇宙の情報をあなたに与えて使命を終える。光は永久不変のものではないのである。さて、光は化学エネルギーになったと言ったが、そのエネルギーは、結局、私たちの体の中に閉じ込められて、外から見れば物質になったと言ってもよい。物質と光の変換は、電子や陽電子など、さらにミクロの世界を扱う加速器の中では日常茶飯事に起こっていることである。

先の二つの式は、エネルギー ε を介して、 $h\nu = \varepsilon = mc^2$ と結び付けられる。これは光が物質に、物質が光に変換することを示している式である。永久不変ではない光や物質は互いに変換するが、エネルギーは不変に保たれる。言い直すと、光や物質はエネルギーの一つの現われだということになる。物質はエネルギーが空間的に局在化し、一定の時間留まった状態のことであり、光は、理想的には、宇宙全体に広がり、時間に制約されない状態と考えてよいだろう。相対論では光の上の時間経過はゼロなのだから。

物質と光を両極とした様々な状態として現われるのが、最初に述べたエネルギーの七変化であった。エネルギーは自然や生命そして人の社会を貫く、すべての活動のもとになるものである。

5.4 地球と人間圏

5.4.1 地球システムと人間圏の誕生

人間が地球に誕生してからほぼ 20 万年近くが過ぎようとしている。それより以前の人類史はおよそ 500~700 万年に及ぶ。アフリカで起源した現生人類ホモ・サピエンスがその分布を他の大陸に広めたのは高々 1 万年ほど前のことであり、人生 50 年としてもまだ 200 世代ほどしかたっていない。

人間はその歴史のなかでずっと大地、海、川、そして山に、生きる手立てを依存してきた。そしてそこにみずからを庇護してくれる神と破滅させようとする神を見出し、その時点ではまだ、自然の一部として生きていた。ところが人間の勢力は瞬く間に巨大化し、その影響は地球環境の復元力を犯すまでになった。

地球は太陽系では唯一の水惑星であり、多様な生命を擁する唯一の星である。未来のことはともかく、人間は、この母なる地球を離れて生きていくことはできない。この地球で豊かに生きていくためには、地球の成り立ちを理解し、そこに成立している環境を慈しみ持続させていく必要がある。つまり、地球という星の実体、成り立ち、挙動、そして進化について多角的な視点から、人間との日常的な係わり合いを踏まえつつ考えてみる必要がある。

地球は太陽系の第 3 惑星である。半径 6400 km のほぼ球体の星であり、太陽の周囲を 365 日かけて回っている。自転軸は 23 度ほど傾いていて、24 時間ほどで 1 回転している。地球には衛星の月があるのも大きな特徴である。現在の地球は水惑星であり、宇宙から見ると青い惑星である。表層は窒素と酸素の大気に覆われ、その下には大陸と海が広がっている。大陸と海底の表層部分は地殻と呼ばれ、その下にマントルとコアを持つ。

地球をとりまく宇宙空間は広大であり、今でもまだフロンティアである。宇宙に到達して滞在した宇宙飛行士の数は決して多くはなく、月に降り立った人数はさらに限られている。

2007 年には日本の人工衛星が月を周回した。人類が初めて月に到達してからほぼ 40 年のときを経て、日本人々は感慨を持って月からの地球の出を、高性能カメラの眼を通して眺めたのである。この出来事は、それまで遠くから見上げていた月をずっと身近な存在にすると同時に、自分たちが住む地球を改めて客観的に眺める機会を与えてくれた。そして科学と技術の力を実感したのではないか。

かつて、宇宙から送られてきた地球の画像は、「宇宙船地球号」という、それまで

になかった視点をもたらした。そして今回、月の向こうから見た「地球の出」の映像は、地球が広大無辺な宇宙に浮かぶちっぽけな一惑星に過ぎないことを思い知らせてくれた。

狩猟採集生活を送っていた人間が農業と牧畜を開始し、それを基軸として文明を開花させてから、まだ高々1万年程度しかたっていない。その時点から人間社会は、地球というシステムの中に別のサブシステムを作り始めた。このサブシステムを人間圏と呼ぼう。

人間圏の端緒となった農業や牧畜は、いうなれば地球を取り巻く生命圏の分別だった。それは、生命圏の中から人間にとっての有用種を取り出して選択的に育種することで人間圏に取り込んで隔離するという行為だった。それまでの狩猟採集生活では、人間圏と生命圏との分離は明確ではなかった。

5.4.2 人間圏の境界

人間圏と地球や宇宙の他のシステムとの境界は時代と共に大きく変動してきている。人間圏の地理的な境界は、いくつかに分けられる。一つは人間社会が普通に存続できる範囲の境界、二つめは、探検として到達できる限界、三つめは、観測装置を使って見ることができる限界であろう。

人間圏の境界の変化はその中の様相と関わっている。人間圏が地球システムの中に分離成立した当初は、三つのタイプの境界は分離せずに、同じ境界であっただろう。なぜなら人間が生活を営んで、農業や牧畜などの生産する場と、人間が行くことができる場、そして人間が見ることのできる世界はすべて一致しているからだ。自分の目で、耳で、触って知る世界がすべてだったはずである。ところが16世紀以後になるとフロンティアを目指して太平洋や大西洋、砂漠地域、極地域へと探検が始まり、この結果、第二の境界が第一の境界から分離した。つまり、通常の世界からよほどの支援がないと生存できないところまで人間が到達できるようになったのだ。例えば、南極やヒマラヤ山頂、20世紀になってからは月や6000mの深海底などのフロンティアが第2種の境界であった。

少し考えると、かつて人間圏が成立する以前に原人やその後の新人がアフリカからヨーロッパ、アジア、そして南北アメリカ大陸へと移動したことや、ポリネシアの人々が南太平洋からイースター島へと移動したこと、そして一部では移動した社会が崩壊したことなども人間圏の境界の分離と見えなくもない。しかしそれは人間圏の成立以前か、小さい社会集団の移動で、人間圏の境界の分離というほどのものではない。

第3種の境界の発生は人間圏が科学と技術という社会装置を持ち始めたときからである。例えばチコ・ブラーエやガリレオ・ガリレイが望遠鏡を作って、月や惑星を観察し、ステノが顕微鏡を作って岩石や結晶を見たときに始まるだろう。現代では宇宙の始まりやその果てからブラックホール、別の太陽系の惑星の姿、そして地球の内部から、ニュートリノ、クォークなどの素粒子の姿までが第3種境界となっている。そして理論の世界で語られる壮大な世界が人間圏の境になろうとしている。

5.4.3 人間圏の維持と地球システム

人間圏が巨大になるにつれてその第1種の境界は地球システムの中で拡大する。人間圏の巨大化は、おもに人口増加と社会装置の増大、およびそれらを維持し、発展させるための食料、水、物資やエネルギーなどのフローの巨大化によっている。そしてその増加の速さは決して一定ではなく、その時刻でのストックが大きさに応じてますます大きくなるだけでなく、フローが大きいとさらに将来を見越して大きくなってしまふ。このような関係にあると、人間圏のストックとフローの大きさは加速度的に大きくなってしまふ。実際には人間圏に入るインフローは地球の他のシステムからのアウトフローであり、それは言うまでもなく有限である。その有限さには2種類がある。ひとつは絶対的な有限さであり、石油や石炭などの地殻にある化石資源だ。一方農業や漁業、林業、および畜産によって生産し、それを収穫して人間圏に取り込むフローは繰り返し収穫が可能である。ただし、そのためにもまた別のフローが必要であり、それによって有限さが決まる。

地球に住む人間圏がひとつのシステムを作り、外界からのインフローに対して、人間圏から他のシステムに流れ出るアウトフローがもう一つの持続性の鍵である。人間圏から地球の他のシステムへのアウトフローには蓄積されてしまうものと別のシステムにとって有用であり、消化されるフローがある。しかしたとえ消化されたとしても、その結果消化したシステムが非常に巨大化すると、地球の他のシステムを脅かすことになる。人間圏が大量の有機物を海洋に捨てると大規模な赤潮や青潮が発生する。これなどはその例だろう。人間圏にとって生物圏は共存している一つの大きなシステムである。その生物圏の内容が例えばネズミだけとなったり、ゴキブリだけとなるようなことになると人間圏は当然持続できない。人間圏から流れ出るフローが彼らの有効なえさとなると、そのような事態が起こりうるのだ。

一方排出されるアウトフローでも人間圏特有の物質もある。例えばプラスチックなどはその典型だろう。それらは現在ではバクテリアで分解されるものも開発されて

いるが、圧倒的には石油からの分解されないものである。外部に放出され続けると、人間圏と生物圏の共通基盤である地殻に蓄積し、生物圏を脅かし、人間圏を脅かすこととなる。金属も地殻に自然過程で蓄積した様々な鉱物から、人間圏に取り込んだ金属資源を社会装置などに変換し、ストックとなるものだが、それらが捨てられ続けると地殻のなかで酸化し、水に溶解して生物圏の自然状態を破壊する。例えばヒ素、水銀、鉛などは微量ならさほど影響はないが、蓄積すると生物圏に致命的な破壊をもたらす。また、生物圏を通過して人間圏に強い毒性を与える。

放射性の物質もまた致命的な影響をいろいろなシステムに与える。ウランやプルトニウム、トリウムなどの物質は化学的には同じような性質を示して同じ鉱物を作っているが、中性子や陽子の数が少し違い、そのために核が不安定なので、一定時間たつと元の量に比例して分解し、中性子や陽子を放出する。分解するときの原子核のエネルギーが大きいので発電に使われるのだが、その結果出てくる物質も分解して、中性子などを出す。それは生物の細胞の中に入って内部から細胞だけでなく遺伝子を破壊する。このため極めて毒性が強いのだ。原子力発電の結果出てくる廃棄物はこうして生物圏と人間圏に破壊的な影響を与えるものである。

人間圏はそのストックである人口に応じて、大量のエネルギー生産と社会装置の蓄積、食料の生産、そして淡水の採取をしてきた。また、一人当たりのそれらの使用量も過去 100 年で急激に増大した。その結果大気や海洋への物質やエネルギーのフローはストックの増加速度以上に速い速度で増加し続けた。そのような物質の中でも特に影響が大きいのは二酸化炭素やメタンであろう。多くの有機物は最終的に水や、二酸化炭素、そしてアンモニアは窒素となる。窒素や水は空気の主成分でもあるが、二酸化炭素は海洋や、地殻、そして大気に放出される。大気システムからみると、インフローとして二酸化炭素が入り、海洋と地殻に溶け込む二酸化炭素のアウトフローとが釣り合っていれば大気中のストックはない。ところが後者のアウトフローが小さいので、大気システムの二酸化炭素が大気圏に蓄積するだろう。この影響は承知のように大気エネルギーのバランスを崩すのだ。

大気エネルギーのバランスが崩れて温暖化が進行し、気候が変化しても、人間圏の安定さが失われなければ地球システムが新しい状態でバランスを取るのかもしれない。しかし、人間圏が安定して維持され、発展し続けるのには、いくつかの特殊な条件が必要となってしまった。その結果は地球システムの他の部分システムに対しても不安定な要素を持ち込んでしまうことになる。

ところで地球システムを作るいろいろな部分システムは本来それ自体では安定なシステムだろうか。大きく見ると、一定の大きさを持つ大気や海洋、そして地殻は外からエネルギーや物質が入り、おなじ量だけ外に出せば、平均的に見ると最初の状態とあまり変化はないだろう。ところが内部の動きや温度などを支配する法則がもともと不安定さを生み出す要素を持っているのだ。そこで、ちょっとしたバランスを崩すことが入り込んだ時、全体のエネルギー事情が許す範囲内では場所によって、そして時間によって大きな変動を起こしてしまうのだ。大気では気温や気圧、風速や雨量などが大きく振れ始める。海洋では海流が大きく変動する。極地域や山岳地域の氷河が急に後退したり、広がったりするだろう。

こうした場所や時間によって大きく変動する地球システムは、生物圏と人間圏に致命的な影響を与えてしまう。地球システムはかつて大きな変動を経験している。1万5千年前にあった氷河期やそれ以前の温暖期など過去50万年の間で5回程の氷河期と温暖期を経験した。しかしそれが人類に及ぼした影響は地理的な拡大と縮小だった。それは人類の人口がわずか1億人以下の状態であり、現在のように60億人を越すような状況ではなかったのだ。すでに述べたように人間圏が生物圏から分離していない状態の頃であった。現在60億人で今世紀中には100億人になろうとしている。そこに温暖化と寒冷化が起こる時、人間圏は崩壊しないのだろうか。

5.4.4 人間圏の持続的発展と地球システム

人間圏の持続的な発展とはどういうことなのだろうか。1990年に示されたものは現在のような生活水準を維持しつつ、人間圏が今後も人口を増加させることができるかという問題であった。今まで述べてきたように、人間圏が生物圏から分離して食料や社会装置などをストックとして蓄積し、フローをコントロールし始めてから、平均としてみると持続的発展を続けたと言える。その結果が人間圏の総人口60億人に達し、今世紀中頃には100億人になろうとしているのだ。人口のこのような指数的な増加の速さはそれを可能としたストックの増加とフローの増大があったからにはほかならない。しかし、人間圏へのインフローの量が急激に増大したのは、エネルギーとして石炭や石油、天然ガスを燃やしたときに得られる熱を利用し始めたからだ。それ以前は牛や馬、そして人力を直接利用していたので、大変非効率だし、利用範囲は狭い。産業革命後のエネルギーはそれまでの牛や馬の動きを使うフロー型の利用から、蒸気機関や発電装置をストックとして、化石資源を燃料のインフローとして用いる方式になり、結果として膨大なストックを蓄積し、それをを用いるためインフローの著しい増大が必

要となったのだ。

しかし、人間圏から他の地球システムへと放出されるアウトフローも急激に増大した。放出される物質やエネルギーはすでに説明した。熱となって放出されるエネルギーが都市部に集中するとき、それが拡散して全地球で平均化する時間よりも短い時間で大量の熱が放出されるので、都市部での熱は蓄積され、特殊な気候を作る。これが世界のあちこちで起こっているヒートアイランドである。人間圏の中樞が都市部にあり、その維持が今後も人間圏の持続的発展に必要である以上、蓄積される熱を減少させるような仕組みを作る必要がある。

人間圏の持続的発展とは人間圏の維持だけではなく、人間圏の周囲の地球システムの安定とゆったりした変化のもとで、ストックの増加とフローの安定な供給にある。ところがすでに見たように現状の人間圏のあり方では放出されるアウトフローが地球システムを大きく変更し、不安定な状況を作り出した。また急増する総人口は急激なストックと流入するインフローの増加を引き起こし、これもまた有限な地球システムのストックを消滅させようとしている。それらの不安定な要因を取り除いて、安定的な人間圏の発展を期するにはそれぞれの部分での適切な制御が必要だ。

大きな問題は総人口の急激な増加である。かつては人間圏が成立し、局所的に人口増加による食料不足やストック不足に陥ったときには、人間圏の拡大によって不安定さを回避してきた。現在でもまだ未耕作地は多数残されているが、同時に環境変化による耕作不適地域も大変増加している。したがって必要な事態は、緩慢な総人口の増加と、そのうえで安定的な発展を可能にするストックの改変だ。そのストックとは総人口を除いた社会装置一般である。経済的な用語では総資本と総蓄積であり、それは社会資本と労働資本、産業資本と金融資本を含む。社会資本は様々な教育、研究施設、公共施設から医療施設、交通施設、そしてネットワーク施設などのハードウェアとソフトウェアなどからなる。科学や技術の知識や研究開発システムも社会資本の大きな部分を占める。総資本には人間圏の基盤である生物圏や大気、海洋、地殻などのシステムの経年的変化も正あるいは負の値として入る。それらの総和が時間と共に増加するならば人間圏の全体は持続的発展であるとされる。ただし、総人口に基礎的な資本をかけた基準総資本を引いた実質総資本値が正であることが必要である。

こうした人間圏の総資本増加の速さや実質総資本が正となるには、地球システムからのインフローを急速に増加させると、当然人間圏から地球システムへのアウトフローも著しく増大し、その結果地球システムに大きなダメージを与えることで負の経年変化を起こさせる。そしてそのことで人間圏の持続的発展が失われることになる。特

に確かなことは石油など化石エネルギー資源の枯渇と二酸化炭素の大気濃度が急激に増加することだ。すでに、大気中の炭酸ガスは 1840 年代までは 260 ppm だったが、現在では 380 ppm を越えている。それは気候変動の激化を生み、総資本への大きな負の効果となる。むろん様々な化学物質の放出も負の効果を与える。

ではそのような負の効果をもたらさない、むしろ総資本への正の効果があるストックの増加は何か。それは科学と技術の獲得であり、フローの内容の転換である。よく言われているように、化石資源から水力、風力、地熱、太陽光発電、核融合発電などの新エネルギーの開発であり、送電技術の効率化、蓄電技術などである。そして、様々な産業設備をゼロエミッション（排出ゼロ）化し、金属資源などすでに地球システムから採取し生産物に変換されたストックの再利用技術の開発である。そしてストックとフローを構造的に転換するような基礎科学研究の大規模な展開である。これらの科学と技術の蓄積と展開が総資本への大きな正の経年変化を生むだろう。温暖化や気候変動の過激化、そして総人口増加のもとで生じる巨大災害から有効に人間圏を守り、安定化する上で、それらは必須の事柄である。

第6章 将来へ：科学技術の智の継承と共有

6.1 私たちは何をなすべきか

自然環境は、人間社会からの影響を受け急激に変化しており、少子高齢化など、社会構造も変容しつつある。このような現代にあって、一人ひとりが心豊かに生きることができる未来を構築するために、科学技術の発展と適切な利用は不可欠である。科学技術が発展することにより、生活の質が向上し、便利になってきているとともに、生活が科学技術の成果に依存すればするほど、人々の意識と科学技術との距離感が遠くなってきている。一方、一般の人々が科学技術に直接関係し、対応や判断を迫られる場面が増えるなど、科学技術と一般社会が密接不可分になっている側面もある。

このような現状を認識して、心豊かに生きるための科学技術の智の定着・普及を考える必要がある。

この調査研究においては、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、断片化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してきた。しかしながら、その作業はまだ途上であり、むしろその作業を国民的な協同作業として継続していくことが、日本の「科学技術の智」を定着化し高めていくために必要である。

そして、この報告書の内容が具体的に社会に浸透し、2030年までには、すべての人々が科学技術の智を共有して、ともに時代の課題にチャレンジできるようにしたい。

そこで、私たちは、本調査研究に続けて次のことを行うべきである。

(1) 科学技術の智プロジェクトの継続

本プロジェクトを継続させ、より広い人々の参加により国民的な運動として、科学技術の智を人々のニーズ、社会や時代の変化に即して最適化させるとともに、科学技術の智の定着化のために、科学技術の智の諸々の概念間の関係を表した図や、対象に応じた多様な手法や考え方を基にした資料などを作成する。

その際、日本学術会議が日本の知の拠点として、さらに継続してこの運動に関与することが重要である。

(2) 定着のための戦略の策定と実行

科学技術の智の定着化に向けて、定常的な組織を作り、定着のための、①政策と戦略、②実行プログラム、③実践、という段階的な行動計画を策定し実行する。

(3) ネットワークの構築

上記の戦略に基づき、実行プログラムの策定段階で、全国に拠点を組織し、大学、研究機関、小中高校、博物館、科学館、行政、NPOなどの地域的連携のネットワークを構築し、科学技術の智を共有する運動を行う。

(4) 成果の検証と世代間の継承

科学技術の智の共有と世代間の継承のために、実践段階において、定着の検証と評価を行い、人々が共有した科学技術の智を政策や戦略にフィードバックする。

(5) 変化への対応

時代と環境の変化によって心豊かに生きるための智も変化することを前提に、私たちは人々が必要とする科学技術の智を常に検討し、変化に備える。

6.2 科学技術の智の継承と共有の視点

6.2.1 何のために継承・共有をするのか

本プロジェクトにおける科学技術の智とは、「成人段階を念頭において、すべ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」のことを示す。これはすべての人々が21世紀を心豊かに生きるために、変化する社会において適切に対応できる能力のことであり、そのことによって社会がさらに豊かなものとなる。

科学技術の智の継承・共有とは、早急に科学的知識の理解だけにその成果を求めることではない。人々は長い人生の中で、かつ社会の様々な場面において、常に科学技術の刺激に満たされ、時には知識を求め、時には科学技術を楽しみ、時には科学技術に対し嫌悪感を抱く。人々の感性や思考はこのような経験を通じて人生の中で構築されていくものであろう。それは科学技術の内容に関わる学びだけにとどまるものではなく、情意的、社会的側面の影響や自らが経験してきた個人の文脈の影響を受ける。

そこで、科学技術の智の継承・共有のために、社会を構成する人々が科学技術の内容、現象、課題に対する長期間の関係性を発展させることである。それによって、科学技術文化を醸成し、一人ひとりが自律した豊かな社会の構築につながるものと期待できる。

6.2.2 何を継承・共有するのか

私たちは、毎日の生活において様々な日常的な課題をあまり意識することなく処理

している。しかし場合によっては、簡単には判断できない科学技術に関する課題に遭遇することがある。その場合、生活する上で自然現象や社会の出来事に対し、疑問に思い、探究し、調査し、批判的な考え方を持って自分で判断するといった科学的な態度を身に付けることが重要である。これは、現代社会における科学技術の意義を理解し、その考え方に基づき判断、行動できることを意味する。

科学的な態度は、科学技術が対象とする様々な分野領域において、専門家同士または専門家と一般の人々とのコミュニケーションによって育まれてきたといえる。それは科学技術の創造の過程であり、科学技術の本質である。本プロジェクトの目的は、科学技術の智の中核をなす科学的な態度やセンスを明らかにし、その定着・普及を図ることである。そのためには、本プロジェクトで検討し、明らかにしてきたことを多様なコミュニケーションの場を用意することによって、広く多くの人々と共有する機会を持っていくことが必要となる。

6.2.3 誰を対象にするのか

本プロジェクトにおける科学技術の智は、成人段階を対象にしている。その定着・普及の対象はすべての日本人である。しかし社会には様々な人々がおり、人々を一つの均質な集団として扱うのは無理があるだろう。

また、人々が多様であるからといって、すべての人々の一人ひとりに異なる方法を提供するのは困難である。社会における集団をいくつかの種類に分類し、その傾向を理解することは重要である。例えば、科学技術に対する意識について、科学技術に関わらない仕事をしている社会人は「昔、理科を習った。科学って暗い。興味がないね」、「自分は文系人間だし、科学のことはよく分からないね、知らなくても別に困らないし」、また「科学は難しいから嫌い、実験は面白かったけどね、意味は分からなかった」などと科学技術に対し嫌悪感や疎外感を示している集団も想定できる。TV やインターネットに頼り、何故を問わない状況の子ども達や、「昔、理科を習った。携帯電話やパソコンなど科学技術をよく活用しているけど、その仕組みについてはよく分からないね、使えればいんじゃない」という集団もあろう。同一集団内でも個人差は存在するし、その差異は無視できなくなることもある。人々の科学技術に対する印象や意識は、年齢や置かれている状況、経験によって異なっている。これらを考慮して対象を決め、方法を考えていく必要がある。

6.2.4 学ぶとは

これまでの学習観では、学習とは知識の獲得であり、知識は所有するもの、学習者は同じ共通な知識で満たされる容器、教師はすべての知識の源泉とされる。この考え方は、科学技術教育における欠如モデルそのものと言える。教育における欠如モデルとは、専門家から素人への一方的な情報の注ぎ込みによる知識向上を目指すものである。このような学習観に対し、近年の認知心理学の研究成果から新しい学習観が生まれてきた。人間の学習は、「知識の獲得」という個人的な営みではなく、対話やコミュニケーションから生まれるものであり、そのときの状況や文脈とは切り離せないとするものである。

すでに確立された知識を理解し、記憶するのではなく、問題や関心を共有し、解決しようとする共通の言葉で話すことによって共同体が構築され、学びあいの場が生じる。そこに先輩である教師や科学技術者が参加することによって、個々の役割が認識され、自己のアイデンティティが形成されていく。分野の異なる、また指導に対する視点の異なる複数の先輩が存在することで、ある課題についての内容を多視点的に捉えることの面白さも見えてくる。このような環境では、学習内容や方法が豊かになるだけではなく、学習者に対する評価も多次元的になる効果も期待できる。最終的に身に付いた知識や技術や、できあがった「作品」に対する評価よりも、行動することにより、自分自身がどのように変化していったのかの過程を重視する。

6.2.5 プロジェクト型の学習を

20世紀に入ってから、科学技術は私たちの暮らしを大きく変化させ、科学技術なしには暮らせない状況になってきている。しかしながら学校教育の中では、教わる内容が将来学習者の人生において何の役に立つのかという、教科内容と社会とのつながりが見えなくなってしまっている。各教科の内容だけではなく、教科間のつながりもなかなか見えてこない。

こういったことを解決する手段として、プロジェクト型の学習がある。現代社会との接点を深く意識したテーマを設定し、学習者はグループで活動し、教師もチームで参加する。学外の人たち、たとえば科学者や技術者、地域の人々などと接点を持ち、社会に影響を与えるような学習を設定する。ここでは、「設定された目標を達成するためにはどのような知識を身に付ければよいか」を考える状況が必然的に作り出される。学習者は参加するプロジェクトに与えられた課題を解決するために、情報を収集したり、実験を行ったり、モデルを作ったり、シミュレーションを行ったりという活動に

従事することになる。このような共同的な学習の場合、視点が複数存在することで気づきも多くなり、修正や新しいアイデアが生まれる可能性も広がる。また、それは相手に伝えるために言語化され、共通の知識として整理されていく。このことが、自分たちが所属している社会や文化の中で、知識の価値や必要性について認識することにつながるのである。

このようなプロジェクト型の学習では、科学者や技術者との共同的な活動が望まれる。ここでは学習者を「見習い研究者・技術者」と考えることで、科学技術共同体へいざなうことが可能となる。見習い研究者・技術者とは、先輩研究者・技術者から言われたことだけを行うという意味ではなく、研究活動に役割を持って周道的に参加していくことを意味する。そうして徐々に、研究活動、すなわち自分で問題を発見し、検証していく活動に携わっていく。そのためには、「先輩研究者・技術者」である科学者・技術者や教師は、自分たちが日常行っている活動を意識して学習者に見せ、参加する道筋を用意していく必要がある。こういった活動に参加することは科学者や技術者にとっても、社会貢献、説明責任の実施等の機会になるだけでなく、研究に対する新たな視点を獲得の機会にもなり、また、後進育成にもつながっていく。

6.2.6 学習環境のデザインを

科学技術の智の定着化を図るにあたっては、学習を個人だけの問題とせず、そこに関わる人々の活動を組織し、空間を用意し、それを実践していくことによって共同体を構築していくことが必要である。このことが、学習環境のデザインであり、社会を継続させ、発展に導く鍵になる。学習環境をデザインするとは、目的、対象、要因、そこへ至るまでの過程などを意識した活動すべてをデザインすることを含んでいる。

学習環境のデザインにおいて、学習に直結する核になる概念は、「活動」である。学習環境のデザインの中で最初にすべきことは、学習が生起する可能性が高い濃密な活動のアイデアを考えることである。ここでいう活動は短期集中型のプログラムから長い期間が必要なものまで含まれる。どのような規模の活動がよいのか、どのような内容がよいのかは、求めている学習の領域と対象に依存する。ただ、一般的には次の3点に気を付けておく必要がある。

- (1) 活動の目標が明快であること：学習者の立場に立ち、この活動はどのような目標で行われており、それが学習者にとってどういう意味があるのかがすぐに理解できることが重要である。
- (2) 活動そのものに面白さがあること：分かりやすい活動でも、活動そのものが面

白くないと長続きしない。面白さとは、新しい知識を生み出す面白さや、問題を解決していくことの面白さを指す。

- (3) 葛藤の要素が含まれていること：学習を生み出す最大の要素は、そこに葛藤が含まれていることである。大変で苦しいが、本質的には面白いという一見矛盾した感情を上手に共存させることが重要である。

これらの点に留意しつつ、学習環境のデザインは、事前に完全に記述することができない、開放形のものであると認識し、継続的にデザインを行っていく必要がある。

6.3 科学技術の智の継承と共有に関する具体的な方策

科学技術の智の継承と共有のために、本調査研究のメンバー間で、その定着・普及のための具体的な方策を議論してきた。それらは、おおむね、三つの型に分けることができる。第一は、本プロジェクトで作成した報告書を活用するための方策である。第二は、本プロジェクトを継続していくための方策である。そして、第三は、より一般的に、科学技術の智を定着・普及させていくための方策である。

なお、科学技術の智の継承と共有のためには、それ相応の経費が必要である。しかし、それは将来への大切な投資であることを忘れてはならない。

6.3.1 科学技術の智プロジェクトの報告書を活用する

科学技術の智プロジェクトで作成した報告書を、各世代を対象に、幼小中高校、大学、教育センター、科学館、博物館、企業、家庭などにおいて活用したり、政治、経済、行政において活用したりする。

(1) 科学技術の智プロジェクトの報告書の活用を促進する

- ①「科学技術の智」報告書を指針、素材として活用できるようにするために広く頒布する。
- ②「科学技術の智」報告書が大学での授業や教育センターでの教師教育の教科書として使えるだけでなく教員免許更新制における更新講習の教科書としても使えることを知らせる。
- ③「科学技術の智」報告書などをウェブサイトで公表し自由に活用できるようにする。その際に検索エンジンを備えるとよい。
- ④「科学技術の智」報告書の要約版を作成する。
- ⑤「科学技術の智」報告書を利用するための資料を作成する。

(2) 科学技術の智を対象に応じて具体化する

- ① 幼小中高校生が興味を持続できるテキストを作る。
- ② 理系研究者・技術者をめざす高校生を支援するテキストを作る。
- ③ 教師の自主的な「再勉強」のためのテキストを作る。
- ④ 保護者が子どもにも語れる楽しい読み物となるテキストを作る。
- ⑤ 大人が社会や企業における科学技術の役割を理解できるテキストを作る。

6.3.2 科学技術の智の定着・普及活動を恒常的に行う

科学技術の智の定着・普及のためには、幼小中高生や成人などの対象者に応じた具体化、教育者のための指針・資料の作成、サイエンス・リテラシー・カフェなどの定着・普及活動、定着・普及活動の評価などとともに、科学技術の智そのものの社会や時代に基づいた検討などが必要である。そこで、科学技術の智の定着・普及のための恒常的な組織を作り、そこを拠点に活動を行う。また、その際には、ウェブサイトを設置するだけでなく、科学技術の智をテーマにしたポッドキャストを作成し配信するなど、ICTを積極的に利用する。

(1) 定着・普及活動を推進する中心的な組織を設ける

- ① 本プロジェクトと同様に、日本学術会議に小委員会を置いて、そこに多様な人々が結集して定着・普及のあり方を検討する。
- ② 長期的な展望として、政策・戦略策定の機能を持った組織を設ける。

(2) 定着・普及に向けて全国に拠点を作り、ネットワークを構築する

- ① 大学などが中心となってその地域の研究機関、幼小中高校、科学館、博物館、行政機関などとともに定着・普及のための拠点を作る。
- ② 地域の拠点間のネットワークを作って、科学技術の智を共有する運動を行う。
- ③ 既存の科学理解を促進する活動を行っている地域の NPO などと連携・協働し、地域と人々の生活に根ざした運動にする。
- ④ 成果を国内外に発信し、国際的なネットワーク構築に努力する。

(3) 定着を評価し、その成果を政策にフィードバックする

- ① 科学技術の智の定着を評価し、その成果を政策にフィードバックする。
- ② 成果をもとに、人々の共有できる科学技術の智について再検討し、新たな変化に備える。

6.3.3 科学技術の智の定着・普及のための諸機関への働きかけ

科学技術の智の定着・普及のためには、国民的な協働作業が必要である。ここでは、科学技術の智の定着・普及に関わる諸機関への要望を簡潔にまとめる。

(1) 国に向けて

- ①科学技術創造立国として科学技術の智の定着・普及に関する明確な中長期ビジョンを策定する。
- ②科学技術創造立国として科学技術の健全な発展と科学技術の智の定着・普及のための予算を措置する。
- ③科学者、技術者と教育現場とを連携させる仕組みを構築する。
- ④科学技術の智に基づいて小中高校の現職教育を充実させる。

(2) 科学技術の振興に関わる機関に向けて

- ①科学技術の智プロジェクトの報告書を活用するための支援を行う。
- ②科学技術の智を実現するためのプロジェクトを募集する。

(3) 企業に向けて

- ①企業が科学技術の智の実現を支援する枠組みを作る。

(4) 学協会に向けて

- ①科学技術および科学技術教育関連の学協会等で、科学技術の智に関するシンポジウムなどを行う。
- ②日本学術会議を中心として関連する学協会等が科学技術の智の定着・普及に取り組む。

(5) メディアに向けて

- ①科学技術に関する報道の機会を増やす。
- ②テレビ番組や小説などで、科学技術の智に関する題材を扱う。

(6) 大学に向けて

- ①科学技術の智が生きるように高等学校と大学の接続を図る。
- ②科学技術の智を基にして一般教育課程を再構築する。
- ③科学技術の智に基づいた教師教育を構築する。

(7) 幼稚園・小学校・中学校・高等学校に向けて

- ①幼年期から小中高校を通して全教科を視野に入れて科学技術の智の育成を図る。
- ②実験・観察を重視した科学技術の教育を行う。
- ③保護者に対して機会を捉えて科学技術の智の重要性を説明する。

(8) 科学館や博物館等に向けて

- ①科学館や博物館等の活動を科学技術の智を踏まえ構築する。
- ②科学館や博物館等の館員の一般教養として科学技術の智を活かす。

(9) 家庭に向けて

- ①家庭において科学技術の話題を積極的に取り上げる。

(10) すべての人々に向けて

これまで述べてきた(1)から(9)に関わる人々や機関が一堂に会し、情報交換、意見交換をして、科学技術の智についての継承と共有ができる場を構築する。

6.4 2030年を目指して

科学技術の智プロジェクトでは、この報告書が公表される今の時代に生まれた子どもが2030年に成人として社会を背負って立つ時点で、科学技術の智が社会全体に行き渡っていることを願っている。

そこで、今の時代に生まれた子どもの、幼年期、小学校、中学校、高等学校、そして、大学や社会のそれぞれの発達段階において、科学技術の智の定着・普及を具体的に考える。例えば、今回の科学技術の智に基づいて、幼稚園児用、小学生用、中学生用、高校生用、社会人用とそれぞれの読み物を子どもの発達段階を追って作成し、それに応じて、さらに教育者用の指導のための指針、評価の資料なども作成していくことが考えられる。

科学技術の智を定着・普及するには、膨大な時間や労力がかかり、たやすくできるものではないであろう。しかしながら、今それに取りかからなければ、私たちの子どもや社会の未来がないと言っても過言ではない。

過去20年の変化よりも、今後の20年の変化の方が激しいであろう。私たちはその変化に備えなければならない。変化を克服し、将来にわたって人類と地球が共存し、科学技術の智を身に付けた人々が、心豊かに生きることのできる社会を構築することを願ってやまない。

未来の子どもや社会に責任を持つ私たちは、科学技術の智を定着・普及するために今こそ立ち上がるべきである。

科学技術の智 総合報告書・報告書作業部会および原案作成者一覧

報告書作業部会

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〕〔作業部会長〕
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〕
小川義和（国立科学博物館展示・学習部学習課長）〔企画推進会議〕
吉田 浄（日本科学技術振興財団理事）〔企画推進会議〕
渡辺政隆（科学技術政策研究所上席研究官）〔企画推進会議〕

【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）〔数理科学専門部会〕
星 元紀（放送大学教授）〔生命科学専門部会〕
岩村 秀（日本大学大学院総合科学研究科教授）〔物質科学専門部会〕
藤原毅夫（東京大学 大学総合教育研究センター特任教授）〔物質科学専門部会〕
笥 捷彦（早稲田大学理工学術院教授）〔情報学専門部会〕
渡辺 治（東京工業大学大学院情報理工学研究科教授）〔情報学専門部会〕
西田篤弘（元宇宙科学研究所／総合研究大学院大学理事）〔宇宙・地球・環境専門部会〕
廣田 勇（京都大学名誉教授）〔宇宙・地球・環境専門部会〕
鳥海光弘（東京大学大学院新領域創成科学研究科教授）〔宇宙・地球・環境専門部会〕
長谷川寿一（東京大学大学院総合文化研究科教授）〔人間科学・社会科学専門部会〕
辻 敬一郎（名古屋大学名誉教授）〔人間科学・社会科学専門部会〕
丹羽富士雄（政策研究大学院大学政策研究科教授）〔技術専門部会〕
小林信一（筑波大学大学院ビジネス科学研究科教授）〔技術専門部会〕

【原案作成者】（原案作成に関わった上記以外の委員）

浅野茂隆（早稲田大学理工学術院特任教授）〔生命科学専門部会〕
池内 了（総合研究大学院大学教授）〔宇宙・地球・環境専門部会〕
小川正賢（神戸大学大学院人間発達環境学研究科教授）〔企画推進会議〕
唐木英明（東京大学名誉教授）〔生命科学専門部会〕
濱田嘉昭（放送大学教授）〔物質科学専門部会〕
美馬のゆり（公立ほこだて未来大学教授）〔企画推進会議〕
吉野輝雄（国際基督教大学教養学部理学研究科教授）〔物質科学専門部会〕

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）、笥 捷彦（早稲田大学理工学術院教授）、西田篤弘（元宇宙科学研究所／総合研究大学院大学理事）、長谷川寿一（東京大学大学院総合文化研究科教授）、丹羽富士雄（政策研究大学院大学政策研究科教授）、渡辺政隆（科学技術政策研究所上席研究官）

2. 企画推進会議

北原和夫（国際基督教大学教養学部理学研究科教授）[委員長]、伊藤 卓（横浜国立大学名誉教授）[副委員長]、室伏きみ子（お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科教授）[副委員長]、長崎栄三（国立教育政策研究所教育課程研究センター総合研究官）[事務局長]、名取一好（国立教育政策研究所教育課程研究センター基礎研究部総括研究官）[事務局次長]、天野 徹（科学技術振興機構審議役）、有本建男（科学技術振興機構社会技術研究開発センター・センター長）、岩崎秀樹（広島大学大学院教育学研究科教授）、岩村 秀（日本大学大学院総合科学研究科教授）、小川正賢（神戸大学大学院人間発達環境学研究科教授）、小川義和（国立科学博物館展示・学習部学習課長）、荻野 博（放送大学副学長）、奥林康司（摂南大学経営情報学部教授）、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长）、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长)

(2) 生命科学専門部会

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

(3) 物質科学専門部会

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

(4) 情報学専門部会

笈 捷彦(早稲田大学理工学術院教授)[部会長]、渡辺 治(東京工業大学大学院情報理工学研究科教授)[副部会長]、芦田昌也(和歌山大学経済学部准教授)、川合 慧(放送大学教授)、竹内郁雄(東京大学大学院情報理工学系研究科教授)、辰己丈夫(東京農工大学総合情報メディアセンター准教授)、西崎真也(東京工業大学大学院情報理工学研究科准教授)、萩谷昌己(東京大学大学院情報理工学系研究科教授)、原田悦子(法政大学社会学部教授)、藤田憲治(日経BP社編集長)、松井啓之(京都大学経営管理大学院/大学院経済学研究科准教授)、益子典文(岐阜大学総合情報メディアセンター教授)、吉見俊哉(東京大学大学院情報学環教授)

(5) 宇宙・地球・環境科学専門部会

西田篤弘(元宇宙科学研究所/総合研究大学院大学理事)[部会長]、唐牛 宏(国立天文台光赤外研究部教授)[副部会長]、縣 秀彦(国立天文台天文情報センター准教授)、池内 了(総合研究大学院大学教授)、磯崎哲夫(広島大学大学院教育学研究科准教授)、糸魚川淳二(名古屋大学名誉教授)、大村善治(京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

济学研究科准教授)、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)、原ろるみ(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)

索引

あ行

アイザック・ニュートン (1643~1723)

13,100

ICカード 60

アジェンダ 21 (リオ宣言) 118

圧力 53

アナログデータ 62

アルゴリズム 35,129

アルフレッド・ウェゲナー (1880~1930) 72

アルベルト・アインシュタイン (1879~1955)

75,96,101,103,116

安全性 58,95

位置エネルギー 184

一様

ー性 122

ー分布 33

一般相対性理論 101

遺伝 40

遺伝子 40,122

ー工学 56

ー操作技術 114

医薬品 91

医療 44

因果関係 86

インターネット 109

インフォームド・コンセント 45

牛海綿状脳症 (BSE) 177

宇宙 50

ーの時間的歴史 126

ーの誕生 77

ーの年齢 116

ーの始まり 80

ーの膨張 79

ー背景放射 80

ーモデルの確定 115

ー論的パラメータ 115

宇宙・地球・環境科学 70-80

宇宙の誕生 77, 宇宙の始まり 80, 宇宙の膨張 79, 宇宙背景放射 80, 海 72, オーロラ 76, 温室効果気体 71, 温度 70, 海流 71, 核融合反応 74, 火山 73, 観測

技術 76, 気圧 70, 気候 70, 気候変動に関する政府間パネル 71, 京都議定書 71, 銀河 77, 黒潮 71, 元素 77, 恒星 77, 黒点 75, 暦 77, コリオリの力 70, 地震 73, 磁場 76, スペクトル観測 79, 赤外放射 70, 大気 71, 大西洋 72, 太平洋 72, 太陽 74, 太陽系 76, 太陽風 75, 太陽放射 70, 大陸 72, 大陸移動 73, 地下資源 74, 地球 72, 超新星爆発 77, 天気図 70, 天気予報 70, 天体の距離 78, 天動説 77, 南海トラフ 73, 二酸化炭素 71, 日本海溝 73, 日本列島 73, 年周視差 78, ハッブルの法則 79, ビッグバン 79, 標準光源 78, プレート 73, プレート・テクトニクス 73, 偏西風 71, ボイル・シャルルの法則 70, 貿易風 71, 星の進化 77, マントル 73, 水の惑星 72, 曜日 77, 惑星 76, 湾流 71

宇宙モデルの確定 115

宇宙の年齢 116, 宇宙論的パラメータ 115, 進化宇宙モデル 115, ダーク成分 117, ビッグバン宇宙モデル 115

海 72

ーに吸収される二酸化炭素 149

運動

ーエネルギー 184

ーの可逆性 102

ーの決定論性 102

永久機関 187

栄養

ー素 181

ーバランス 175

似非科学 14,83,109

エネルギー 49,54,183-201

ー効率 54

ー自給率 194

ー資源 194

ー消費 190

ー単位 186

ーの質 187

ーの流れ 41

—の変換 183
—の利用 183
—変化 187
—変換効率 189
—保存則（熱力学の第一法則） 185
—輸入依存度 196
—利用効率 197
エネルギー 183-201
位置エネルギー184, 運動エネルギー
184, 永久機関 187, エネルギー自給率
194, エネルギー資源 194, エネルギー
消費 190, エネルギー単位 186, エネル
ギーの質 187, エネルギーの変換 183,
エネルギーの利用 183, エネルギー変
化 187, エネルギー変換効率 189, エネ
ルギー保存則（熱力学の第一法則） 185,
エネルギー輸入依存度 196, エネルギ
ー利用効率 197, エントロピー187, エ
ントロピー増大の法則（熱力学の第二
法則） 187, 温室効果 200, 温度 188, 化
学エネルギー184, カロリー186, グル
コース 191, 原子核エネルギー184, 光
合成 190, 呼吸 191, ジュール 186, 省資
源・省エネルギー197, 生産に必要なエ
ネルギー193, 世界のエネルギー資源消
費 194, 摂食 190, 相対性理論 201, 代謝
191, 代替エネルギー資源 197, 地球温
暖化問題 200, 地球の熱エネルギー198,
電磁気エネルギー184, 動物のエネルギ
ー使用量 192, 日本人のエネルギー消
費量 196, 日本のエネルギー供給量 195,
熱 187, 熱エネルギー184, 熱機関 189,
ヒートポンプ 189, 光エネルギー184,
ヒトに必要なエネルギー192, 物質と光
の変換 201, 力学エネルギー184, 粒子
188,
演繹的推論（証明） 20,29
演算 28
エントロピー 187
—増大の法則（熱力学の第二法則） 187
オーロラ 76
オゾン層破壊 117
オッカムのカミソリ 100
温室効果 57,200

—気体 71
温暖化 2,44,57
温度 53,70,188

か行

懐疑力 131
海水 147
快適性 82
概念
—地図 124
—の可視化 124
海流 71
カオス 102
科学 13
—研究の動機 129
—史 82
—社会学 82
—哲学 82
—の可能性 14
—の総合化 105
—の始まり 99
—の方法 13
—の本質 13-15
—の理論 13
—論 82
化学
—エネルギー 184
—物質 117
—変化 53
科学技術 12
—に関する意識調査 3
—の素養 1
—の智 1
—の智の継承と共有 209
—リテラシー 1
科学・技術 12
科学技術の智 1
—七つの扉 22
—に期待されること 6
—の活用 137
—の視点 98
—の特徴 23
—の必要性 5

- －プロジェクトの研究の経緯 9
 - －を作成する際の前提 7
- 科学技術の智の継承と共有 209
 - －の具体的な方策 214
 - －の視点 210
 - －の対象 211
 - －の内容 210
 - －の目的 210
- 科学技術リテラシー 1
 - －構築のための調査研究 9
- 科学者共同体 134
- 科学的
 - －センス 135
 - －な考え方 95
 - －な態度 131-136
- 科学的な態度 131-136
 - 懐疑力 131, 科学者共同体 134, 公開性 134, 好奇心 131, 公共性 135, 暫定性 133, 自己限定 133, 批判力 131, 理論的・数的志向性 132, 論拠・証拠依存性 132
- 科学と技術
 - －という社会装置 204
 - －の蓄積と展開 208
- 科学と技術の相互貢献 129-130
 - 科学研究の動機 129, 技術開発 130, 技術の目的 129, 基礎科学 130, 設計科学 130, 認識科学 130
- 科学の本質 13-15
 - 似非科学 14, 科学 13, 科学の可能性 14, 科学の方法 13, 科学の理論 13, 仮説 13, 観察 13, 検証 13, 好奇心 14, 合理的判断 14, 自己修正 14, 自己否定 14, 実験 13, 宗教 14, 説明 14, 予測 14
- 核 39
- 学習 43
 - －観 212
 - －環境のデザイン 213
- 拡張性 67
- 核融合反応 74
- 確率 33
 - －論 32
- 火山 73
- 可視化 123-125
 - 概念地図 124, 概念の可視化 124, 3次元コンピュータ・グラフィックス (CG) 125, 自然言語処理 125, 多次元グラフ 123
- 賢い生き方 90
- 化石燃料 169
- 仮説 13
- 仮想
 - －化 67
 - －水 143
- 価値 17
 - －観 85
- 家畜 169
 - －の飼料 169
- ガリレオ・ガリレイ (1564~1642) 13,70,99,126,204
- カロリー 186
- がん 175
- 環境 45,81
 - －配慮行動 120
- 関係 30
- 幹細胞 39
- 観察 13
- 関数 30
- 観測技術 76
- 気圧 70
- 機械 89
- 幾何学 29
- 気候 70
- 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 57,71,118
- 技術 15, 88-97
 - －開発 130
 - －と生活 16
 - －と人間 16
 - －の絶対視 (リスクゼロ) 95
 - －の知識 92
 - －のブラックボックス化 16
 - －の方法 95
 - －の本質 15-18
 - －の目的 129
 - －の利用に必要な能力 95
 - －リテラシー 89

- 技術 88-97
 安全性 95, 医薬品 91, 科学的な考え方 95, 賢い生き方 90, 機械 89, 技術の絶対視 (リスクゼロ) 95, 技術の知識 92, 技術の方法 95, 技術の利用に必要な能力 95, 技術リテラシー89, 技術リテラシーの利点 89, 原子力発電 93, 工場・設備 89, 最適化 95, 事故 95, 自動車 93, 社会システム 89, 社会の仕組み 92, 社会発展への貢献 91, 社会の未来像 97, 人工物 89,93, 制約条件 95, 設計 (デザイン) 96, 食べる 93, 電化製品 90, 伝承 92, 道 96, 道具 89, トレードオフ 93, 人型ロボット 90, フィードバック 91, 物づくり 92, 夢の実現 89, 技 88
- 技術の本質 15-18
 価値 17, 技術 15, 技術と生活 16, 技術と人間 16, 技術のブラックボックス化 16, 共進化 17, 個別技術 15, コミュニケーション 18, 身体性 18, 製造技術 15, 制約条件 17, 節約 16, テクノロジーアセスメント 17, デザイン 17, トレードオフ 17, モニタリング 17, 要素技術 15
- 技術リテラシー 89
 ーの利点 89
- 気象変化と水 149
- 基礎科学 130
- 教育 43
- 共進化 17
- 共生 41
- 共通の素養 82
- 京都議定書 2,71
- 魚介類 44
- 禁煙 175
- 銀河 77
- 近似 62
- 金属 55
- 近代的自然観 99-106
 一般相対性理論 101, 運動の可逆性 102, 運動の決定論性 102, オッカムのカミソリ 100, カオス 102, 科学の総合化 105, 科学の始まり 99, 原子 104, 原子構造 104, 検証 99, 光子 104, 推論 99, 妥当性 99, 地動説 100, 電磁波 103, 天動説 100, 特殊相対性理論 104, ニュートンの運動法則 100, 場 103, 光 102, 物体の落下 99, 法則 99, マイケルソン・モーレーの実験 103, 力学法則 100, 粒子 104, 量子論 104, 倫理性 106
- 空間 28
- クオーク 51
- 組み込みコンピュータ 111
- グラフ 28
- グルコース 191
- グローバル・ヒストリー 87
- クローン 39
- 黒潮 71
- 経験知 83
- 計算 20,35
 ー化の原理 63
- 計量的性質 29
- 結合機構 53
- ゲノム 40
 ー科学 114
- 言語 20,123
 ー能力 85
- 健康 44
- 原子 50,104
 ー構造 50,104
- 原子核 50
 ーエネルギー 184
- 原始
 ー生命の発生 161
 ー地球 37
 ー地球の大気の再現実験 159
 ーの海 160
- 検証 13,99
- 原子力発電 93
- 元素 50,77
- 高温超伝導体 56
- 公開性 134
- 好奇心 14,131
- 公共性 135
- 光合成 37,155,190
- 光子 51,104
- 高次脳機能解析技術 115
- 工場・設備 89
- 恒星 77

酵素 157
 高速
 -化 64
 -性 69
 合同 29
 高分子 51
 合理的判断 14
 氷
 -による気温調節 150
 -による水位調節 150
 呼吸 191
 国際紛争 86
 黒点 75
 心 42,84,108
 -の健康 45
 誤差 32,64
 コスト 62
 個体 39
 個別技術 15
 コミュニケーション 18,212
 暦 77
 コリオリの力 70
 コンピュータ 56,60,109,127
 -に載せる 69

さ行
 最適化 95,120
 細胞 38
 材料 57
 -の再利用 57
 座標 29
 -幾何学 29
 3次元コンピュータ・グラフィックス (CG)
 125
 算数 24
 酸素 37
 暫定性 133
 残留農薬 180
 ジェームズ・ワトソン (1928~) とフラン
 シス・クリック (1916~2004)
 40,113,122
 磁気 55
 -共鳴画像法 (MRI) 145
 仕組み (ソフトウェア) 60

 事故 95
 自己
 -限定 133
 -修正 14
 -修復機能 45
 -増殖性 69
 -否定 14
 -複製システム 37
 地震 73
 指数表示 125
 磁性体 55
 自然
 -言語処理 125
 -数 26
 -淘汰 38
 -の中の基本的な四つの力 53
 持続可能な民主社会 5
 持続性 47
 実験 13,49
 実証 82
 実数 26
 疾病 44
 質量 52
 自動車 93
 磁場 76
 シミュレーション 85
 社会
 -現象 85
 -システム 89
 -性昆虫 40
 -の仕組み 92
 -の未来像 97
 -発展への貢献 91
 宗教 14
 ジュール 186
 主体 42
 十進位取り記数法 27
 種の絶滅 47
 循環 49
 仕様 67
 上下水道 144
 省資源・省エネルギー 197
 小数 27
 消費期限 182

- 情報 60
 - －科学技術 60
 - －科学技術リテラシー 68
 - －学 60-69
 - －弱者 66
 - －処理革命 109
- 情報学 60-69
 - IC カード 60, アナログデータ 62, 拡張性 67, 仮想化 67, 近似 62, 計算化の原理 63, 高速化 64, 高速性 69, 誤差 64, コスト 62, コンピュータ 60, コンピュータに載せる 69, 仕組み (ソフトウェア) 60, 自己増殖性 69, 仕様 67, 情報 60, 情報科学技術 60, 情報科学技術リテラシー 68, 情報弱者 66, 乗用車 60, 精度 61, 装置 (ハードウェア) 60, ソフトウェアの誤用 66, ソフトウェアの階層化 66, 多重利用法 65, 抽象化 67, データ 61, データを区別する道具 (ソフトウェア) 66, デジタル化の原理 61, 電子回路 64, トレードオフ 68, 2 進列 61, 汎用性 64, プログラム 63, プログラム化の原理 63, メディア非依存性 64, 利用技術 60
- 情報処理革命 109
 - インターネット 109, 組み込みコンピュータ 111, コンピュータ 109, 電算化 109, 日本語処理 110
- 賞味期限 182
- 乗用車 60
- 食育 171
- 食事の基本 177
- 食中毒 179
- 食品 166
 - －循環資源の再生利用 172
 - －添加物 180
 - －の安全 177
 - －の廃棄 172
 - －の表示違反 181
 - －の品質 182
 - －のリスク 177
- 植物と水 155
- 食物連鎖 41
- 食用以外の用途 168
- 食料 43, 166-182
 - －自給率 170
 - －消費支出 181
 - －の分布 168
 - －不足 168
- 食料 166-182
 - 牛海綿状脳症 (BSE) 177, 栄養素 181, 栄養バランス 175, 化石燃料 169, 家畜 169, 家畜の飼料 169, がん 175, 禁煙 175, 残留農薬 180, 消費期限 182, 賞味期限 182, 食育 171, 食事の基本 177, 食中毒 179, 食品 166, 食品循環資源の再生利用 172, 食品添加物 180, 食品の安全 177, 食品の廃棄 172, 食品の表示違反 181, 食品の品質 182, 食品のリスク 177, 食用以外の用途 168, 食糧 166, 食料自給率 170, 食料消費支出 181, 食料の分布 168, 食料不足 168, 水産業 167, 生活習慣病 173, 世界の食料 166, 世界の人口 166, 畜産革命 169, 地産地消 171, 日本人の平均寿命 173, 日本人の平均的食生活 168, 農業 166-167, バイオ燃料 169, バイオマス 169, フードマイレージ 170, 緑の革命 166, 用量作用関係 180, リスクコミュニケーション 178, リスク分析 177
- 食糧 166
 - しらみつぶし 127
- 新エネルギーの開発 208
- 進化 38
 - －宇宙モデル 115
 - －理論 122
- 人工
 - －進化 87
 - －物 89,93
 - －物質 56
- 人口増加 207
- 心性 84
- 新生児 84
- 深層の心 107
- 身体性 18
- 診断 44
- 心理学 83,107
- 森林 144

水質汚染 146
 水産業 167
 水素 50
 推論 99
 数 18,26
 数学 18,24
 - 語 34
 - の本質 18-21
 - 文化 26
 - リテラシー 24
 数学的な正しさ 20
 数学の本質 18-21
 演繹的推論 20, 計算 20, 言語 20, 数 18,
 数学 18, 数学的な正しさ 20, 数理モデル
 20, 図形 19, 抽象化 19, 普遍的 20,
 文字 20, 量 18, 論理 19
 数直線 28
 数理
 - モデル 20
 - 科学 24-35
 数理科学 24-35
 アルゴリズム 35, 一様分布 33, 演繹的
 推論 (証明) 29, 演算 28, 確率 33, 確率
 論 32, 関係 30, 関数 30, 幾何学 29, 空
 間 28, グラフ 28, 計算 35, 計量的性質
 29, 合同 29, 誤差 32, 座標 29, 座標幾
 何学 29, 算数 24, 自然数 26, 実数 26,
 十進位取り記数法 27, 小数 27, 数 26,
 数学 24, 数学語 34, 数学文化 26, 数学
 リテラシー 24, 数直線 28, 数量化 26,
 図形 28, 図表示 32, 正規分布 33, 正比
 例 30, 相関関係 32, 相似 29, 対称性 29,
 代数系 28, 代表値 32, 確からしさ 31,
 抽象的 34, データ 31, 統計学 32, 度数
 分布 33, 反比例 30, 微分法 31, 微分方
 程式 31, 非ユークリッド幾何学 30, 標
 本 33, 比例定数 31, 分数 27, 変化 30,
 変化の様子 31, 法則 27, 母集団 33, 文
 字式 28, ユークリッド幾何学 29, 有理
 数 27, 離散量 27, 量 26, 連続量 27, 論
 理的 34
 数量化 26
 図形 19,28
 スケールとサイズ 125-127
 宇宙の時間的歴史 126, 指数表示 125,
 地球の歴史 126, 物質の微細構造 126
 ストック 204
 図表示 32
 スペクトル観測 79
 すべてのアメリカ人のための科学 9
 生活
 - 習慣病 173
 - 用水 141
 正規分布 33
 生産に必要なエネルギー 193
 生殖 39
 - 発生生物学 114
 精神
 - 物理学 83
 - 分析学 84
 製造技術 15
 生態系 41,58,158
 生体物質 56
 精度 61
 生徒の学習到達度調査 (PISA) 4
 正比例 30
 生物 36
 - 群集 41
 - 圏 41,204
 - 社会 40
 生命 36
 - 科学 36-48
 - 圏 203
 - 操作 114
 - の仕組みの解明と操作技術の開発
 113-115
 - 倫理 46
 生命科学 36-48
 遺伝 40, 遺伝子 40, 医療 44, インフォ
 ームド・コンセント 45, エネルギーの
 流れ 41, 温暖化 44, 核 39, 学習 43, 環
 境 45, 幹細胞 39, 教育 43, 共生 41, 魚
 介類 44, クローン 39, ゲノム 40, 健康
 44, 原始地球 37, 光合成 37, 心 42, 心
 の健康 45, 個体 39, 細胞 38, 酸素 37,
 自己修復機能 45, 自己複製システム 37,
 自然淘汰 38, 持続性 47, 疾病 44, 社会
 性昆虫 40, 主体 42, 種の絶滅 47, 食物

- 連鎖 41, 食料 43, 進化 38, 診断 44, 生殖 39, 生態系 41, 生物 36, 生物群集 41, 生物圏 41, 生物社会 40, 生命 36, 生命倫理 46, 絶滅 38, 畜産業 43, 知性 41, 治療 44, デオキシリボ核酸 (DNA) 37, 二重らせんモデル (DNA) 40, 人間中心主義的な生命倫理 46, 人間非中心主義的な生命倫理 46, 人間らしさ 46, 農業 43, 農耕 43, 脳神経 42, 発生 40, ヒト 36, ヒトの進化 42, 病気 44, 物質循環 41, 文化 42, 文明 42, ホモ・サピエンスとしての倫理 47, 緑の革命 43, リボ核酸 (RNA) 37
- 生命の仕組みの解明と操作技術の開発 113-115
 - DNA 二重らせんモデル 113, ゲノム科学・遺伝子操作技術 114, 生殖発生生物学・胚細胞操作技術 114, 生命操作 114, 脳科学・高次脳機能解析技術 115, 培養技術 113, 微生物 113
- 制約条件 17,95
- 西洋における水の認識 164
- 世界
 - －科学会議 2
 - －人権宣言 1
 - －のエネルギー資源消費 194
 - －の食料 166
 - －の人口 166
- 赤外放射 70
- 絶縁体 55
- 設計 (デザイン) 96,121
 - －科学 130
- 摂食 190
- 説明 14
- 絶滅 38
- 節約 16
- 相関関係 32
- 総合的
 - －視点に立った選択 120-121
 - －な科学智の形成 119
- 総合的視点に立った選択 120-121
 - 環境配慮行動 120, 最適化 120, 設計 121, トレードオフ 120, 費用対効果 120
- 相似 29
- 総資本 207
 - －増加 207
- 相対性理論 201
- 装置 (ハードウェア) 60
- ソフトウェア
 - －の階層化 66
 - －の誤用 66
- 相変化 53
- 素粒子 50
- た行
- ダーク成分 117
- 大気 71
 - －汚染 86
 - －システム 205
- 代謝 191
- 対称性 29
- 代数系 28
- 大西洋 72
- 代替エネルギー資源 197
- 代表値 32
- 太平洋 72
- 太陽 74
 - －系 76
 - －風 75
 - －放射 70
- 大陸 72
 - －移動 73
- 確からしさ 31
- 多次元グラフ 123
- 他者 86
- 多重利用法 65
- 妥当性 99
- 食べる 93
- 多様性 121
 - －と一様性 121-123
- 多様性と一様性 121-123
 - 一様性 122, 遺伝子 122, 言語 123, 進化理論 122, 多様性 121, 分類 121
- 多量データ高速処理のアルゴリズム 127-129
 - アルゴリズム 129, コンピュータ 127, しらみつぶし 127, 多量デジタルデー

- タ 127, データマイニング 129, パター
ン抽出 128, 反例さがし 127
- 淡水化 145
- 地下資源 74
- 地球 72
 - －温暖化問題 200
 - －環境についての科学的理解 117-119
 - －環境問題 117
 - －システム 205
 - －と人間圏 202-208
 - －の熱エネルギー 198
 - －の歴史 126
- 地球と人間圏 202-208
 - 科学と技術という社会装置 204, 科学
と技術の蓄積と展開 208, 新エネルギ
ーの開発 208, 人口増加 207, ストック
204, 生物圏 204, 生命圏 203, 総資本
207, 総資本増加 207, 大気システム 205,
地球 202, 地球システム 205, 二酸化炭
素 208, 人間 202, 人間圏 203, 人間圏の
巨大化 204, 人間圏の持続的な発展 206,
人間圏の地理的な境界 203, ヒートア
イランド 207, フロー 204
- 地球環境についての科学的理解 117-119
 - アジェンダ 21 (リオ宣言) 118, オゾン
層破壊 117, 沈黙の春 117, 化学物質
117, 気候変動に関する政府間パネル
118, 総合的な科学智の形成 119, 地球
環境問題 117, ローマ・クラブの『成長
の限界』 118
- 畜産
 - －革命 169
 - －業 43
- 地産地消 171
- 知性 41,83,107
- 地動説 100
- チャールズ・ダーウィン (1809～1882)
38,83,107,122
- 抽象化 19,67
- 中性子 50
- 超純水 145
- 超新星爆発 77
- 治療 44
- 沈黙の春 47,117
- データ 31,61
 - －マイニング 129
 - －を区別する道具 (ソフトウェア) 66
- デオキシリボ核酸 (DNA) 37
- テクノロジーアセスメント 17
- デザイン 17
- デジタル化の原理 61
- 電化製品 90
- 電気的性質 55
- 天気
 - －図 70
 - －予報 70
- 電算化 109
- 電子 50
 - －回路 64
 - －レンジ 145
- 電磁気エネルギー 184
- 電磁波 103
- 伝承 92
- 天体の距離 78
- 天動説 77,100
- 伝統文化としての物質系 50
- 道 96
- 道具 89
- 統計学 32
- 動物
 - －と水 156
 - －のエネルギー使用量 192
- トータルな人間像 85
- 特殊相対性理論 104
- 度数分布 33
- トップダウン方式 112
- トランジスタ 111
- トレードオフ 17,68,93,120
- な行
 - 長岡半太郎 (1865～1950) 50,104
 - 長さ 52
 - ナノテクノロジー 56,111-113
 - ナノテクノロジー 111-113
 - トップダウン方式 112, トランジスタ
111, ナノメートル・スケール 111, ボト
ムアップ方式 112, 量子力学 112
 - ナノメートル・スケール 111

- 南海トラフ 73
- 二酸化炭素 57,208
- 二重らせんモデル (DNA) 40,113
- 2進列 61
- 日本
 - －海溝 73
 - －における水の認識 163
 - －のエネルギー供給量 195
 - －のエネルギー源 57
 - －の将来像 4
 - －列島 73
- 日本学術会議 2
- 日本語処理 110
- 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 9
 - －のエネルギー消費量 196
 - －の平均寿命 173
 - －の平均的食生活 168
- ニュートンの運動法則 52
- 人間 202
 - －科学・社会科学 81-87
 - －中心主義的な生命倫理 46
 - －についての科学的理解 107-109
 - －非中心主義的な生命倫理 46
 - －らしさ 46
 - －理解 83
- 人間科学・社会科学 81-87
 - 因果関係 86, 似非科学 83, 快適性 82, 科学史 82, 科学社会学 82, 科学哲学 82, 科学論 82, 価値観 85, 環境 81, 共通の素養 82, グローバル・ヒストリー 87, 経験知 83, 言語能力 85, 国際紛争 86, 心 84, 実証 82, シミュレーション 85, 社会現象 85, 人工進化 87, 心性 84, 新生児 84, 心理学 83, 精神物理学 83, 精神分析学 84, 大気汚染 86, 他者 86, 知性 83, トータルな人間像 85, 人間理解 83, 脳科学 85, 発生論的な認識 81, 発達 85, ヒト 83, 霊長類 83, ロング・ショットの視点 81, 論理的構成体 84
- 人間圏 203
 - －の巨大化 204
 - －の持続的な発展 206
 - －の地理的な境界 203
- 人間についての科学的理解 107-109
 - 似非科学 109, 心 108, 深層の心 107, 心理学 107, 知性 107, 脳科学 108
- 認識科学 130
- 熱 187
 - －エネルギー 184
 - －機関 189
- 年周視差 78
- 脳
 - －科学 85,108,115
 - －神経 42
- 農業 43,166-167
- 農耕 43
- は行
- 場 54,103
- バイオ
 - －テクノロジー 56
 - －燃料 169
 - －マス 169
- 胚細胞操作技術 114
- 培養技術 113
- パターン抽出 128
- 発酵食品 56
- 発生 40
 - －論的な認識 81
- 発達 85
- ハップルの法則 79
- 半導体 55
- 反比例 30
- 汎用性 64
- 反例さがし 127
- ヒートアイランド 207
- ヒートポンプ 189
- 光 102
 - －エネルギー 184
- 微生物 113
- ビッグバン 79
 - －宇宙モデル 115
- ヒト 36,83
 - －と水 157
 - －に必要なエネルギー 192
 - －の進化 42

- ーの腎臓の働き 157
 - ーの組織中の水 157
 - ーの水の摂取量 157
- 人型ロボット 90
- 批判力 131
- 微分
 - ー法 31
 - ー方程式 31
- 非ユークリッド幾何学 30
- 病気 44
- 標準光源 78
- 費用対効果 120
- 標本 33
- 表面張力 152
- 比例定数 31
- フィードバック 91
- フードマイレージ 170
- 物質 49
 - ー科学 49-59
 - ー科学リテラシー 49
 - ー循環 41
 - ーと光の変換 201
 - ーの階層性 50
 - ーの微細構造 126
 - ー界の理解 58
- 物質科学 49-59
 - 圧力 53, 安全性 58, 遺伝子工学 56, 宇宙 50, エネルギー49, エネルギー54, エネルギー効率 54, 温室効果 57, 温暖化 57, 温度 53, 化学変化 53, 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 57, 金属 55, クォーク 51, 結合機構 53, 原子 50, 原子核 50, 原子構造 50, 元素 50, 高温超伝導体 56, 光子 51, 高分子 51, コンピュータ 56, 材料 57, 材料の再利用 57, 磁気 55, 磁性体 55, 自然の中の基本的な四つの力 53, 実験 49, 質量 52, 循環 49, 人工物質 56, 水素 50, 生態系 58, 生体物質 56, 絶縁体 55, 相変化 53, 素粒子 50, 中性子 50, 電氣的性質 55, 電子 50, 伝統文化としての物質系 50, 長さ 52, ナノテクノロジー56, 二酸化炭素 57, 日本のエネルギー源 57, ニュートンの運動の法則 52, 場 54, バイオテクノロジー56, 発酵食品 56, 半導体 55, 物質 49, 物質の階層性 50, 物質界の理解 58, 物質科学リテラシー49, 物理変化 53, 物理法則 52, 分子 51, ヘリウム 50, もったいない思想 49, 誘電体 55, 陽子 50
- 物体の落下 99
- 物理
 - ー変化 53
 - ー法則 52
- 普遍的 20
- プレート 73
 - ー・テクトニクス 73
- フロー 204
- プログラム 63
 - ー化の原理 63
- プロジェクト型学習 212
- 文化 42
- 分子 51
- 分数 27
- 文明 42
- 分類 121
- ヘリウム 50
- 変化 30
 - ーの様子 31
- 偏西風 71
- ボイル・シャルルの法則 70
- 貿易風 71
- 法則 27,99
- 星の進化 77
- 母集団 33
- ボトムアップ方式 112
- ホモ・サピエンスとしての倫理 47
- ま行**
- マイケルソン・モーレーの実験 103
- 曼荼羅 vi-viii
 - 技術ー viii
 - 情報学ー vii
 - 数理科学ー vi
 - 生命科学ー vi
 - 人間科学・社会科学ー viii
 - 物質科学ー vii
- マントル 73

水 139-165
-カッター 145
-資源 141
-と生命の星(地球)の誕生 158
-の三状態 150
-の大循環 147
-の分子 150
-の惑星 72
-不足 140
水 139-165
海に吸収される二酸化炭素 149, 海水
147, 仮想水 143, 気象変化と水 149, 原
始生命の発生 161, 原始地球の大気
の再現実験 160, 原始の海 160, 光合成
155, 酵素 157, 氷による気温調節 150,
氷による水位調節 150, 磁気共鳴画像
法(MRI) 145, 上下水道 144, 植物と水
155, 森林 144, 水質汚染 146, 生活用水
141, 生態系 158, 西洋における水の認
識 164, 淡水化 145, 超純水 145, 電子レ
ンジ 145, 動物と水 156, 日本における
水の認識 163, ヒトと水 157, ヒトの腎
臓の働き 157, ヒトの組織中の水 157,
ヒトの水の摂取量 157, 表面張力 152,
水カッター145, 水資源 141, 水と生命
の星(地球)の誕生 158, 水の三状態 150,
水の大循環 147, 水の分子 150, 水不足
140, 溶解 153
緑の革命 43, 66
見習い研究者・技術者 213
メディア非依存性 64
文字 20
-式 28
もったいない思想 49
モニタリング 17
物づくり 92

や行

ユークリッド幾何学 29
誘電体 55
有理数 27

夢の実現 89
溶解 153
陽子 50
要素技術 15
曜日 77
用量作用関係 180
予測 14

ら行

力学
-エネルギー 184
-法則 100
離散量 27
リスク
-コミュニケーション 178
-分析 177
リボ核酸(RNA) 37
粒子 104,188
量 18,26
利用技術 60
量子
-力学 112
-論 104
理論的・数的志向性 132
倫理性 106
霊長類 83
連続量 27
ローマ・クラブの『成長の限界』 118
論拠・証拠依存性 132
ロング・ショットの視点 81
論理 19
-的 34
-的構成体 84

わ行

若者
-の科学力増進特別委員会 9
-の理科離れ問題特別委員会 9
惑星 76
技 88
湾流 71

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. 営利を目的としていない利用の場合

- ・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

