

プロジェクト 2061

Project 2061

すべてのアメリカ人のための科学

SCIENCE FOR ALL AMERICANS

Floyd James Rutherford and Andrew Ahlgren

プロジェクト 2061

すべてのアメリカ人のための科学

米国科学振興協会

人間が存在するための
諸々の条件そして環境は、
次世代において
大きな変化を
迎えようとしている。
科学、数学、技術は、
そうした変化の中心にあって、
変化を生み出し、
変化を形作り、
変化に対応していくことであろう。したがって、
科学、数学、技術は、
明日の世界を担う
現在の子どもたちにとって
必要不可欠なものである。
そのための教育は
どのような内容と性格を
持つべきものであろうか。
本報告書の目的は、
そのような疑問に対して
一つの答えを示すことにある。

すべてのアメリカ人のための

科 学

SCIENCE

FOR ALL AMERICANS

科学, 数学, 技術におけるリテラシー目標に関するプロジェクト 2061 の報告書

A PROJECT 2061 REPORT ON
LITERACY GOALS IN SCIENCE
MATHEMATICS,
AND
TECHNOLOGY

米国科学振興協会

AMERICAN ASSOCIATION
FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE

1989

1848年に創設された米国科学振興協会(American Association for the Advancement of Science : 略称 AAAS) は、世界を代表する総合的な科学協会である。個人会員は13万2,000名を数え、提携する科学関係学協会、工学関係学協会、学術関係学協会は300近くに上る。AAASは、科学や人間の進歩を目標とする様々な活動に従事している。そうした目標達成を促すため、AAASは、科学者の責任と人権、科学における各国政府間の関係、科学に関する一般大衆の理解、科学教育、科学と工学に関する国際協力、科学や工学における女性、少数民族、障害者にとっての機会など、科学及び技術での政策に関係する多様な計画の提言を用意している。AAASはまた、専門家向けの週刊誌『科学』や、学校や図書館向けのレビュー誌『科学の本とフィルム』を刊行している。

ISBN 0-87168-341-5

AAAS Publication 89-01S

米国議会図書館 (Library of Congress) カタログ・カード番号:88-36252

著作権 : © 1989 the American Association for the Advancement of Science, Inc. , 1333 H Street NW, Washington, D.C.20005

無断複写・複製・転載を禁ずる。本書のいかなる部分も、電子的又は機械的を問わず、写真複写、記録、または情報記憶・検索システムを含むいかなる形態又はいかなる手段によっても、出版社の書面による同意を得ずして複製又は伝送することはできない。

アメリカにて印刷

日本語版『すべてのアメリカ人のための科学』への序文

この日本語版『すべてのアメリカ人のための科学』は、科学の普遍性を立証するものである。芸術や人間性の価値の多くはそれぞれ個々の文化的独自性に由来するものであるが、科学の価値はその文化的な独立性にある。事実、科学はある意味においてそれ自体が文化であり、いかなる国、言語、民族にも属さない。科学は、自然界を理解し、その知識を人類と環境の利益のために用いることに関心を持つすべての人々に属するのである。

したがって、『すべてのアメリカ人のための科学』は一部の人々からは不適切な表題と思われるかもしれない。初版が初めて刊行された際に、我々はその表題を「すべての人のための科学」とすることも考えたが、我々が他の国々の同輩諸氏の権限を侵していると彼らを感じることを恐れたため、そうすることはなかった。しかし結果的には、世界の多くの地域の科学者や科学教育者たちは本書をありのままに受け取り、科学的リテラシーの構成要素と見なすことのできる知識と技能に関して科学界の尊敬されるメンバーが行った表明として、本書を受け入れてくれた。

今回の日本語版の刊行決定は、日本とアメリカが科学教育と将来に関して共感し合う関係にあることを示すものであると私は信じている。この両国はともに、科学的リテラシーを有する国家を築き上げる我々の能力と、科学的革新や経済的発展を支える科学と工学分野の指導者たちを我々が的確に見出すことができるかどうかということに、将来の安寧が少なからず依存していると考えているのである。

おそらく、この日本語版『すべてのアメリカ人のための科学』、またはその他のいかなる刊行物も、その1冊だけで全国的な科学的リテラシーを保証するものとはならないことを注記しておくべきであろう。書物にできることは、改革努力を正しい方向に導くための概念的な指針を与えることである。日本の人々も、我々アメリカ人と同様、今後の年月において前向きな科学教育政策、適切なカリキュラムの変更、そして、そうした事柄に加えてとりわけ担当する生徒たちに科学的リテラシーを身につけさせるための助力を惜しまず、その目標達成に必要な知識と技能を修得しえた教師の教育態勢に見合った、新たな指導教材と検証によって支援を受けなければならない。

日本はこれまで、変化する必要性和環境に合わせて教育に適用させてきた称賛すべき経歴を持っている。日本学術会議のリーダーシップのもと、日本の科学者、理科教師、教育行政担当者が一致協力して『すべての日本人のための科学』文書を作成し、それを

日本における理科教育改革の知的基盤とすれば、こうした日本の手腕は再び発揮されることになる。それによって、科学的リテラシーを持つ人材や革新的な科学者、技術者を育成すべき日本の必要性に有効に対応できると私は信じている。日本の未来はこれにかかっているのである。

2005年6月

F. ジェームズ・ラザフォード
プロジェクト 2061 名誉ディレクター

目 次

日本語版『すべてのアメリカ人のための科学』への序文	i～
目次	iii～
謝辞	vii～
全米科学技術教育評議会	ix～
要約	1～
プロジェクト 2061 と科学的リテラシー	1～
提言	2～
将来への架け橋	3～
第 I 部：変化する将来に備える教育	5～
序文	5～
科学的リテラシーの必要性	6～
現状	7～
プロジェクト 2061 における三つの段階	9～
第 II 部：全米評議会の提言	10～
序文	10～
第 1 章 科学の本質	15～
科学的世界観	15～
科学的探究	17～
科学的営為	20～
第 2 章 数学の本質	24～
数学のいくつかの特徴	24～
数学的過程	26～
第 3 章 技術の本質	29～
科学と技術	29～
技術の原理	31～
技術と社会	34～

第4章 物理的背景	38～
宇宙	38～
地球	40～
地球を形作っている力	42～
物質の構造	43～
エネルギーの変換	45～
物体の運動	47～
自然における力	49～
第5章 生命環境	51～
生命の多様性	51～
遺伝	52～
細胞	53～
生物の相互依存	54～
物質とエネルギーの流れ	55～
生物の進化	57～
第6章 人間（ヒト）	59～
ヒトとしての特性	59～
ライフ・サイクル	60～
基本的機能	63～
学習	63～
身体健康	65～
精神健康	67～
第7章 人間社会	69～
行動に与える文化的影響	69～
集団組織と行動	71～
社会的変化	73～
社会的選択	74～
政治・経済組織の形態	76～
社会紛争	78～
世界全体の社会制度	79～

第 8 章 設計された世界	82～
人間の存在	82～
農業	83～
材料	85～
製造	86～
エネルギー資源	88～
エネルギー利用	89～
通信	91～
情報処理	92～
医療技術	94～
第 9 章 数学的世界	98～
数	98～
記号の関係	100～
形	101～
不確実性	102～
データの要約	103～
標本抽出	105～
推論	106～
第 10 章 歴史的観点	109～
宇宙の中心でなくなった地球	109～
天と地の統合	111～
物質とエネルギー・時間と空間の統合	112～
経過した時間の拡張	113～
地球表面の移動	114～
火の理解	115～
原子の分裂	116～
生物の多様性の解明	117～
微生物の発見	119～
動力の利用	120～

第 11 章 共通の主題	123～
システム	123～
モデル	125～
恒常性	128～
変化のパターン	130～
進化	132～
規模	134～
第 12 章 思考の習慣	136～
価値観と態度	136～
技能	139～
第Ⅲ部：将来への架け橋	146～
序文	146～
第 13 章 効果的な学習と指導	147～
学習の原理	147～
科学，数学，技術の指導	149～
第 14 章 教育改革	155～
改革の必要性	155～
改革の前提	156～
第 15 章 次の段階	161～
プロジェクト 2061 の第 2 段階	161～
行動計画	162～
将来	167～
付録	169～
A.プロジェクト 2061 第 1 段階の参加者	169～
B.選定参考文献	173～
日本語版『すべてのアメリカ人のための科学』へのあとがき	178～

謝辞

ジェームズ・ブライアント・コナントがかつて教育について語った際に、『不思議の国のアリス』に登場するアリスとチェシャ猫との会話を引き合いに出し、どこに行きたいのかがわからなければ、どんな地図でも役に立つものだと言った。そういう意味からも、科学、数学、技術の教育においてこの国が向かうべき方向を決める手助けをするという著しく困難な作業を引き受けられた「全米科学技術教育評議会」の意思に対し、米国科学振興協会の理事会を代表して感謝の意を表明するものである。全米評議会は、ウィリアム・ベーカー、マーガレット・マクビカー両氏の精力的で知識に裏打ちされた思慮深い指示の下、情熱をもって献身的にその責任課題に取り組まれたのみならず、画期的なものとして評価できる報告書も作成されている。同報告書は、数百名の科学者、技術者、教育者が関係した3年間に及ぶ研究の集大成として、同評議会によって AAAS 理事会に提出された。慎重な検討作業の後に、当理事会は同報告書を全会一致で受理している。

当理事会は、プロジェクト 2061 第1段階の5部門の科学パネルのメンバーが果たされた中心的な役割に対して深く感謝したい（パネル・メンバーと当該の研究におけるその他の参加者の氏名、所属については、付録 A の総合リストを参照のこと）。上記の5部門のパネルは2年間にわたって頻繁に会議を行い、科学、数学、技術を学ぶ生徒たちが何を理解すべきかという問題について検討し、その結論を収めた報告書を全米評議会に提出した。『すべてのアメリカ人のための科学』を準備するにあたり、全米評議会はパネルからの報告書に依拠する面が非常に大きかったが、そうした報告書との重複を避け、その概要説明的にならないよう努めた。パネルからの報告書は以下で構成されており、本報告書の姉妹編として米国科学振興協会から入手可能である。

『生物学・健康科学』 メアリー・クラーク著

『数学』 デビッド・ブラックウェル、レオン・ヘンキン著

『物理学・情報科学・工学』 ジョージ・バグリアレロ著

『社会科学・行動科学』 モーティマー・アプリー、ウィニフレッド・B.メイハー著

『技術』 ジェームズ・ジョンソン著

有益な提案や批評を提供し、第1段階に関して貴重な貢献を惜しまなかったこの他多くの人々（付録 A 参照）に対しても謝意を表したい。全米評議会、科学パネル、プロジェクト・スタッフは、それぞれの作業における非常に重要な部分に関し、困難な問題の明確化と自らが適正な能力を持たない専門事項に関する助言を得る目的で、専門家の見解を仰ぐことができた。加えて、多くの科学者、数学者、技術者、教育者が、報告書の様々な草稿を吟味し、改善のための提案を行った。そうした個々人の助力は非常に貴重なものとなったが、この事実によって、これらの人々が本報告書の提言を是認してい

るものと受け取るべきではなく、またこれらの人々は、本報告書の至らない部分について、いかなる意味においてもその責任を問われることはない。

プロジェクト 2061 の関係者スタッフには特に感謝するものである。本プロジェクトの構想と構成を手がけ、ディレクターも務めた F. ジェームズ・ラザフォード氏、アソシエイト・プロジェクト・ディレクターを務めたアンドリュー・アールグレン氏は、全米評議会による査読、検討に供すべき本報告書の一連の草案準備に当たった。プロジェクト・マネージャのパトリシア・ウォレン氏は、貴重な編集上の援助をしてくれた。当スタッフは、AAAS 職員、特にオードリー・シャンペイン、シャーリー・マルコム両氏の助言に依拠するところが非常に大きく、またマイケル・オキーフ氏は、本プロジェクト第 2 段階の計画立案作業において特に援助をしてくれた。

第 1 段階の作業はいずれも、ニューヨークのカーネギー社、及びアンドリュー W. メロン基金が AAAS 向けに行った寛大な資金援助なしでは不可能だったことであろう。カーネギー社のプログラム主任オルデン・ダンハム氏は、アメリカで初めてこうした研究の必要性を理解した人物であり、その漠然とした発想を本報告書に具体化するに要した 4 年以上にわたる期間において、同氏ほど本プロジェクトに専心した人物はいなかった。

米国科学振興協会理事会議長
シーラ・ウィッドノール

全米科学技術教育評議会
(National Council on Science and Technology Education)

共同議長

ウィリアム・ベーカー：AT&T ベル研究所 理事長（退役）

マーガレット L. A. マクビカー：マサチューセッツ工科大学 物理科学 教授，学
部生教育部長

メンバー

ポーラ・アプセル：NOVA-WGBH(ボストン)常務取締役

フランシスコ J. アヤラ：カリフォルニア大学アーバイン校の高名な生物科学・教授

F. ハーバート・ボーマン：イェール大学 森林環境研究学部 森林生態学 オース
トラ教授

マーガレット・バービッジ：カリフォルニア大学サンディエゴ校 天体物理学・宇宙
科学センター教授

アーネスタイン・フリードル：デューク大学 人類学 ジェームズ B. デューク教
授

ロバート・グレイザー：ピッツバーグ大学 心理学・教育 教授 学習調査・開発主
事

ジュディス・レイニエ：ミシガン州立大学 教育学部長

アーテューロ・マドリッド：クレアモント単科大学 クレアモント大学院トーマス・
リベラセンター所長

ケネス R. マニング：マサチューセッツ工科大学 科学史 教授

レイ・マーシャル：テキサス大学オースチン校 LBJ 公共問題学部 経済・公共問
題 教授

ウォルター・マッシー：シカゴ大学 アルゴン国立図書館 研究担当副館長

アリス・モーゼス：全米科学財団 教材・開発・研究・非形式的科学教育課 教育資
材開発プログラム主任

フレデリック・モステラー：ハーバード大学 数理統計学 名誉教授

ギルバート S. オーメン：ワシントン大学 公衆衛生・地域医療学部長

ジェラルド・ピール：サイエンティフィック・アメリカン 名誉会長

ジョージ C. ピメントル：カリフォルニア大学バークレー校 化学 教授

ロバート E. ポラック：コロンビア大学 コロンビア単科大学 生物科学部長 教
授

ヘンリー O. ポラック：ベル通信研究所 数理通信・コンピュータ科学研究所 前
副学長補佐

F. ジェームズ・ラザフォード：AAAS 主任教育担当役員
テッド・サンダース：イリノイ州教育指導監督官
アルバート・シャンカー：全米教職員連盟 会長
レイモンド・シーバー：ハーバード大学 地質学 教授
ハワード・シモンズ：ハーバード大学 ニーマン特別研究学芸員
マクシン **F. シンガー**：国立癌協会 名誉科学者 ワシントン・カーネギー財団 理事長

プロジェクト 2061 のスタッフ

F. ジェームズ・ラザフォード：プロジェクト・ディレクター
アンドリュー・アールグレン：アソシエイト・プロジェクト・ディレクター
パトリシア **S. ウォレン**：プロジェクト・マネージャ
キャロル・ホームズ：秘書
グウェン・マクカチオン：秘書

注

プロジェクト 2061 は、アメリカの科学、数学、技術の教育における改革を支援する目的で構想された。このプロジェクトは、米国科学振興協会による長期的な多段階からなる取組みであり、その第 1 段階における作業の一環として 6 冊の報告書が作成されている。

これらの報告書は、1 冊の概要報告書と 5 冊のパネル報告書で構成されている。

概要報告書は『すべてのアメリカ人のための科学』と題するもので、AAAS プロジェクト 2061 スタッフが全米科学技術教育評議会の協力を得て作成した。

パネル報告書の表題は次の通りである。

- ・『生物学・健康科学：プロジェクト 2061 第 1 段階、生物学・健康科学パネル報告書』メアリー・クラーク著
- ・『数学：プロジェクト 2061 第 1 段階、数学パネル報告書』デビッド・ブラックウェル、レオン・ヘンキン著
- ・『物理学・情報科学・工学：プロジェクト 2061 第 1 段階、物理学・情報科学・工学パネル報告書』ジョージ・バグリアレロ著
- ・『社会科学・行動科学：プロジェクト 2061 第 1 段階、社会科学・行動科学パネル報告書』モーティマー・アプリー、ウィニフレッド・B. メイハー著
- ・『技術：プロジェクト 2061 第 1 段階、技術パネル報告書』ジェームズ R. ジョンソン著

上記 6 冊の報告書すべての注文に関する情報については、Project 2061, 1333 H Street, NW, Washington, D.C.20005 まで問い合わせられたい。

要 約

『すべてのアメリカ人のための科学』は、科学的リテラシーに関するものである。本書は、米国科学振興協会が選任した著名な科学者と教育者のグループ「全米科学技術教育評議会」が提示した、科学的リテラシーを備えた社会の市民すべてにとって必要不可欠な理解や、思考の習慣についての一連の提言で構成されている。

科学的リテラシーとは、科学、数学、技術に関するリテラシーを包含し、教育の中心的な目標として注目されるようになったものである。しかし、実際のところ、アメリカにおける一般的な科学的リテラシーは低いものとなっている。最近実施された数多くの研究によって、国内的標準によってもまた国際的規準からしても、アメリカの教育があまりに多くの生徒を十分に教育できておらず、したがって国の期待に沿えていないことが明確になっている。どの点から見ても、アメリカには科学、数学、技術の教育の改革以上の優先性を持つ課題はない。

しかし、教育改革は簡単に法制化することはできない。そのためには、時間、決断、協力、財源、そして指導力が必要となる。勇気と実験も必要である。また、そのためには学校が達成すべき事柄に関する国全体の共通の未来図が必要となる。プロジェクト 2061 と呼ばれる AAAS の活動の一環としての『すべてのアメリカ人のための科学』は、そうした未来図の形成に資することを意図するものである。

全米評議会は、その提言を準備するにあたり、5部門の独立した科学パネルの報告書に依拠した。加えて全米評議会は、科学者、技術者、数学者、歴史家、教育者という多様かつ数多くの顧問、査読者の助言も仰いだ。この過程は全体で3年以上を費やし、関係した人物の数は数百名に上るものとなったが、その結果『すべてのアメリカ人のための科学』が AAAS 理事会によって全会一致で承認されるに至った。

プロジェクト 2061 と科学的リテラシー

プロジェクト 2061 は、非常に必要性が大きい科学、数学、技術における教育改革に貢献するための、目的別の継続的な3段階の行動計画で構成されている。

・第1段階は科学的リテラシーの内容に重点を置くものである。その目的は、すべての子どもが幼稚園から高校に至るまでのその総体的な就学経験の結果として習得すべき知識、技能、態度を詳細に示すことによって、改革のための概念的基盤を確立することにあつた。

『すべてのアメリカ人のための科学』、及び科学パネルの報告書は、この段階における主たる成果である。

・第2段階は教育者や科学者のチームが関係するもので、『すべてのアメリカ人のための科学』を学区、州において利用するためにいくつかの新しいカリキュラム・モデルに転換するための作業である。この段階を通じて、本プロジェクトではまた、教師教育、教材、教育技術、試験、学校組織、教育政策、教育研究に関連した改革の青写真が作成される。

・第3段階では、教育改革に積極的な多くのグループが、第1段階と第2段階の成果を活用し、アメリカ全体の科学的リテラシーの向上を図るために10年以上に及ぶ広範な相互協力活動を展開していくことになる。

提言

プロジェクト2061の基本的な前提は、学校にさらに多くの内容を教えるよう求めるのではなく、科学的リテラシーにとって必要不可欠な事項に重点を置き、それをより効果的に教えるよう求める必要があるということである。したがって、共通の中心的学習内容に関する全米評議会の提言は、科学的リテラシーにとって最も大きな科学と教育上の重要性を持つ概念と技能に限られたものとなっている。

『すべてのアメリカ人のための科学』は、「科学的リテラシーを備えた人物というものは、科学、数学、技術がそれぞれの長所と制約を持ち、かつ相互に依存する人間活動であるということ意識した上で、科学の主要な概念と原理を理解し、自然界に精通してその多様性と統一性の双方を認識し、個人的、社会的目的のために科学的知識と科学的な考え方をを用いるような人物である。」という考えに基づいている。

全米評議会の個々の提言が本報告書の多くの部分を占めている。初めの3章は、人間活動としての科学、数学、技術の本質、及びこれら相互間における類似点と相違点に焦点を当てている。それ以降の6章は、科学と数学の観点から見た世界、技術によって形作られている世界に関する基本的な知識、すなわち物理的環境、生命形態の進化と特性、人間社会の力学、そしてその他の重要な側面に関する知識を提供するものである。それ以降の2章は、科学的な努力の歴史において知るべき優れた逸話と、世界の仕組みを理解できるようになるための、システム、変化のパターン、規模などの主要な多分野横断的テーマについて扱う。提言の最終章では、科学的リテラシーに必要な不可欠な思考の習慣に重点を置く。

全米評議会の提言は、一連の広範な主題に及んでいる。こうした主題の多くは、既に学校カリキュラムの中で普通のものとなっている（例えば、物質の構造、細胞の基本的機能、病気の予防、通信技術、数の様々な使用など）。しかし、これらの主題の扱い方は二つの点で従来のものとは異なっている。

一つの相違点は、従来型の主題分類が緩和され、相互関係が強調されていることである。例えば、エネルギーの変換は、物理的、生物的、技術的システムにおいて起こり、進化的な変化は、星や有機体や社会で見られる。

もう一つの相違点は、子どもたちが習得することを期待されている細かな内容の分量が、従来型の科学、数学、技術の課程におけるよりもはるかに少ないということである。専門的な語彙や記憶された手順よりも、概念や思考技能が強調されている。ここでは、単純な水準において一定の満足できる意味を与えるだけでなく、さらに学習を重ねるための継続的な基礎となるような一連の概念が選択されている。細かな内容は、一般的な概念の理解を保証するものとしてではなく、それを高めるためのものとして扱われている。基本的な

科学リテラシーとは、例えば「生体細胞の主な機能は DNA 分子に暗号化されている指示に従って蛋白質分子を合成することにある。」というような知識を意味するものではあっても、「リボソーム」や「デオキシリボ核酸」といった用語、又はメッセンジャーRNA などのようなものであって、それが DNA とどのような関係にあるかといった事柄に関する知識は意味しないものと評議会は考えている。

全米評議会の提言には、学校のカリキュラムにおいては通常ではないような主題も一部含まれている。それらの主題の中では、科学、数学、技術が相互に、また社会的なシステムとどのように関係しているかといった事柄も含めた科学的活動の本質も扱われている。評議会はまた、科学や技術の歴史における最も重要な逸話に関する知識、ほとんどすべての科学的思考を貫く主要な概念的な主題に関する知識も一定程度求めている。

将来への架け橋

『すべてのアメリカ人のための科学』に示した目標の実現に向けてアメリカが重要な進歩を遂げようとするならば、次の何段階かが必要不可欠なものとなる。これらの段階は、以下の事項を反映すべきものである。

- ・すべての生徒に科学リテラシーを身に付けさせるためには、カリキュラムは、その網羅する教材の絶対量を削減し、厳格な教科の境界線を緩和又は排除し、科学、数学、技術の相互関係により多くの注意を向け、人間の思想や行動に強く影響を与えるとともにそれらによって影響される社会活動の一環として科学的努力を説明し、かつ科学的な考え方を育てていくように変えられなければならない。

- ・科学、数学、技術（又はその他のあらゆる知識や技能）の効果的な指導は、組織的な研究と適正に検証された技術経験に由来する学習原理に基づくものでなければならない。さらに、科学リテラシーに関する指導は、科学的探究と科学的価値に内在する精神や特徴と調和する必要がある。このことはすなわち、学習すべき解答からではなくまず現象に関する疑問から始めるようなアプローチを意味し、生徒たちが仮説、証拠の収集と利用、探究や過程に関する構想を積極的に活用できるようにし、生徒たちの好奇心や創造性を重視するアプローチを意味する。

- ・教育改革は総合的であるべきで、すべての子どもたちの学習の必要性に重きを置き、あらゆる学年、教科を含む、教育制度のあらゆる構成要素や側面に対処するものでなければならない。教育改革のためにはまた、変化のために望ましい状況を確立し、改革に向けた公的支援を 10 年又はそれ以上の期間維持する必要がある。

- ・改革は協力的なものでなければならない。これには、教師や親、子ども自身はもとより、行政者、大学職員、及び地域社会や企業や労働団体や政治の指導者も関わりを持たねばならない。

協力的な改革を支援する上で、『すべてのアメリカ人のための科学』は、その結論の中で、

個人，団体，組織，政府機関が改革に向けて実施することが可能な一連の行動計画を示している。プロジェクト 2061 としては，第 2，第 3 段階以降にも，教育者，科学者，政策立案者，一般市民の課題として科学的リテラシーと教育改革を掲げ続けるために，できうることを引き続き行っていくことになる。

アメリカにおいて，すべての生徒が科学的リテラシーを習得するための学校改革ができない妥当な理由は一知的にも，社会的にも，経済的にも一何もない。必要なものは，共通の目標に向けて一致団結するための国全体の参加，決意，そして意欲である。

第 I 部：変化する将来に備える教育

序文

科学的リテラシーとは、科学、数学、技術に関するリテラシーを包含し、教育の中心的な目標として注目されるようになったものである。しかし実際のところ、アメリカにおける科学的リテラシーは低いものとなっている。最近実施された数多くの研究（付録 B を参照）によって、国内的標準によってもまた国際的規準からしても、アメリカの教育があまりに多くの生徒を十分に教育できておらず、したがって国の期待に沿えていないことが明確になっている。アメリカにおいては、科学、数学、技術に関する教育改革が最も優先性の高い課題とならねばならない。

科学に関連した学協会は多くの面からこうした問題に対応している。そうした対応の一つとして、米国科学振興協会では、アメリカ全体の科学的リテラシーの向上を支援する目的で、長期的な多段階式の活動となるプロジェクト 2061 を発足させた。このプロジェクトは、偶然にもハレー彗星が地球に接近した 1985 年に発足することになった。この偶然の一致によって、このプロジェクトにはハレー彗星にちなんだ名称がつけられた。というのも、2061 年に再び帰ってくるこの彗星を目にする子どもたちは、まもなく就学年齢に達する時期だったからである。

プロジェクト 2061 は、次の信念に基づいている。

- ・すべての子どもたちは、興味深くまた生産的な人生を送るための準備となるべき科学、数学、技術に関する基礎教育を受ける必要があり、かつそれに値するものである。
- ・基礎教育を構成する世界的な規準は、科学的知識と技術力の急成長に伴って劇的に変化してきた。
- ・アメリカの学校組織はいまだに、アメリカの将来を担うことになる若者たち、特に少数民族の子どもたちに対し、科学と技術が形作る世界に向けた準備をさせるための行動を十分な決断力をもって行うには至っていない。
- ・アメリカが科学的リテラシーを持つ市民で構成される国になるためには、幼稚園から 12 学年に至るまでの教育制度全体における大きな変化が必要となろう。
- ・科学、数学、技術の教育における体系的な改革を実現するために必要となる最初の第一歩は、科学的リテラシーを構成するものを明確に理解することにある。

こうした観点に立ち、プロジェクト 2061 では、全米の子どもたちのための科学、数学、技術における学習目標を設定する必要性にその当初段階での努力の重点を置くこととした。著名な科学者、教育者のグループである全米科学技術教育評議会は、科学的リテラシーを備えた社会の市民すべてに必要な理解と思考の習慣はどういったものかという問題に対処することを目的として、AAAS 理事会が特に指名したものである。この評議会の対応は、本報告書の提言において見出される。

この評議会は、その提言を準備するにあたり、5 部門の独立した科学パネルの報告書

に依拠した。加えて同評議会は、科学者、技術者、数学者、歴史家、教育者という多様かつ数多くの顧問、査読者の助言も仰いだ（パネリストの氏名、プロジェクト 2061 の第 1 段階へのその他の参加者の氏名については、付録 A を参照のこと）。こうした過程は全体で 3 年以上を費やし、関係した人物の数は数百名に上るものとなったが、その結果『すべてのアメリカ人のための科学』が AAAS 理事会によって全会一致で承認されるに至った。

本報告書の第 3 部においては、全米評議会の提言に関係し、又はこれに由来する他の問題について論じられている。その中には、評議会の提言と一貫性を持つ指導原理、全米規模での改革を実現するのに必要な事柄、及びアメリカを科学的リテラシーを有する国に変容させるための支援を行う上で個人、団体、組織が『すべてのアメリカ人のための科学』に盛り込まれた提言をそれぞれの努力の中で活用する方法に関する意見も含まれている。

科学リテラシーの必要性

教育の最大の目的は、人々に個人的に充実した責任ある人生を送るための準備をさせることにある。科学教育、すなわち科学、数学、技術による教育というものは、子どもたちが自ら考え、人生を直視することができ、かつ共感に溢れた市民同士となるために必要な理解と思考の習慣を育む助けとなるべきである。科学教育はまた、開放的で慎み深く、かつ活気に満ちた社会を建設し、それを守っていくという思慮深い活動に、子どもたちが他の市民たちとともに参加できるようにするための備えとなるべきものでもある。アメリカの将来—すなわち、真に公正な社会を創造し、経済的活力を維持し、敵意によって引き裂かれた世界の中で安全を確保するためのアメリカの能力—は、かつてなかったほどに、この国がそのすべての子どもたちに与える教育の特性と質の如何にかかっているのである。

しかし、個人的な自己実現やアメリカの近い将来における国益よりも、さらに危機に瀕しているものがある。人間が現在直面している最も深刻な問題は、世界的な規模の問題である。つまり、世界の多くの地域における野放しの人口増加、酸性雨、熱帯雨林の縮小、その他の貴重な種の多様性の減少、環境汚染、病気、社会紛争、地球規模での富の極端な不均衡、戦争の準備と遂行にかかる莫大な人知と限られた財源、全面核戦争の不吉な影など、枚挙に暇がないほど数多くの憂慮すべき問題である。

将来において人間、国、世界を待ち受けているものは、人間が科学と技術を利用する際の賢明さに大きく依存している。しかしそうした賢明さはまた、人々が受ける教育の特性、配分、有効性に依存している。端的に言えば、全米評議会の主張は次のようになる。

・科学は、精力的な探究によって、人類が世界的、地域的な問題の有効な解決方法を考案する上で必要な生物物理学的な環境、社会行動に関する知識を与えてくれる。こう

した知識がなければ、安全な世界に向けた進歩は不必要なほどに障害を受けることになる。

・生物の相互依存性や物理的環境への依存性を強調し、説明することで、科学は自然に対する一種の知的な敬意を育み、それが技術の利用に際しての決断材料となるであろう。この敬意がなければ、我々はその生命を維持してくれるものを無謀にも破壊してしまう危険性があるのである。

・科学的な思考の習慣を身に付けることで、いかなる職業においても、証拠や量的な考察、論理的主張、不確実性に関する多くの問題に分別をもって当たることができるようになる。批判的かつ自由な考え方ができなければ、市民は独断家やパテント師、あるいは複雑な問題に単純な解を与えてしまうような人物の餌食に容易になってしまうだろう。

・システムの本質、フィードバックや制御の重要性、費用・利益・危険性の関係、副作用の不可避性といった事柄に関する技術的な原則を理解することで、人々は新たな技術の利用と、それが環境や文化に与える意味を評価するための健全な基盤を手に入れることになる。こうした原則を理解していなければ、人々は身近な自己の利益を考えること以外何もしようとはしないであろう。

・世界的、地域的な切迫した問題の多くは技術的な起源を抱えているものであるが、技術はそうした問題に対処する手段や、科学を通じて非常に重要な新たな知識を生み出す手段を提供してくれる。新技術の継続的な開発と創造的利用がなければ、社会は、生き残りのための能力に加え、人類が自分自身と環境との関係において平和に暮らせる世界に向けて努力する能力をも制限することになる。

・科学と技術が持つ人生を高めてくれる可能性は、一般市民が科学、数学、技術を理解し、科学的な思考の習慣を身に付けなければ実現できるものではない。科学的リテラシーを持つ市民がいなければ、より良い世界への展望も得られないものになってしまうであろう。

現状

アメリカ人の大半は、科学的リテラシーを持っていない。教育の達成度に関する国際的な調査結果を見れば、アメリカの生徒が科学と数学において最低順位に近いことがわかるであろう。これは、学校がそのなすべき職務を果たしていればほとんどありえないことである。例えば、最近の国際的な数学に関する調査報告によれば、アメリカの生徒は、問題解決において国際水準をはるかに下回っており、全米教育進歩評価の最新調査でも、最近になってわずかながら改善されてはいるものの、1986年現在の17才の平均的な成績は、実質的に1969年のそれを下回っている。

アメリカ人の能力はもっと高くあるべきである。結局のところ、アメリカは民主主義の基盤として公的教育を重んじていると主張する繁栄した国家なのである。またアメリ

力は、敢えてその将来的な繁栄を科学と技術における自国の能力と指導力に賭けた国なのである。したがって、そうした意思を現代的で確実な支持基盤と高度の資格を有する教師や管理責任者を持つ学校制度という形で実現することを期待するのは当然のことである。そしてまた、こうした学校のカリキュラムにおいても、すべての生徒に科学、数学、技術を指導するようにしなければならない。しかし実際には、あまりに多くの州や学区において全く異なった状況になっているのである。

- ・小学校教師のほとんどは科学、数学の基礎教育すら受けておらず、中学校や高校の科学、数学の教師の多くはそうした分野の適正な基準に達していない。不幸なことに、このような欠陥は、長い間教師の育成機関や資格認定機関、教師を雇用して仕事を割り当てる学校、教職専門団体自身さえも黙認してきたことなのである。

- ・科学と数学の教師たちは押し潰されそうなほどの指導内容を抱えており、そのため彼らがどれほど事前にすばらしい準備を整えても、指導実績を上げることはほとんど不可能に近い。このような負担は、教師たちを支えるべき現代の支援システムがほとんど全く存在しないことで、さらに悪化している。21世紀に近づく現在、アメリカの学校は、人、時間、技術の配備ということになると、依然として19世紀から脱していないように思えるのである。

- ・現在の科学の教科書と指導方法は、科学的リテラシーに向けた進歩を助けるどころか、しばしば実際にはそれを阻害するものとなっている。教科書では疑問の探究よりも答を覚えることに重点が置かれ、重要な思考よりも記憶、文脈の中での理解よりも断片的な情報、議論よりも暗唱、実践よりも読書の方が重視されているのである。こうした教科書は、協調的な努力、考えや情報の自由な相互交換、あるいは現在の道具を使っての知的能力の拡張といった方向に子どもたちを促すことはない。

- ・科学と数学における現在のカリキュラムは詰め込みすぎであり、栄養不良となっている。過去数十年にわたって、これらのカリキュラムはほとんど何の制約もなしに拡大してきており、それに教師や生徒たちは圧倒され、科学、数学、技術の真の本質を知ることができなくなっている。一部の主題は不必要なほど詳細に繰り返し教えられ、その一方では科学的リテラシーにとってそれらと同等又はそれ以上の重要性を持つ他の部分（物理学、社会科学、技術に関するものが多い）がカリキュラムから削除され、又はごく少数の子ども用にしか用意されていない。

こうした状況を変えるには、決断、財源、指導力、そして時間が必要となる。世界は大きく変化しており、科学的リテラシーは、特権階級の一部だけではなく、すべての人に必要となっている。したがって、科学教育もまた変化し、それを可能にしていかなければならない。我々は皆、教育における現在の嘆かわしい状況に責任があり、その改革には我々すべてが関わっていかなければならない。プロジェクト 2061 は、そうした国民的努力に貢献することを期待している。

プロジェクト 2061 における三つの段階

プロジェクト 2061 をめぐる活動は 10 年又はそれ以上にわたると考えられるため、このプロジェクトは三つの段階に分けられている。

このプロジェクトの第 1 段階は、すべての子どもが幼稚園から高校に至るまでのその学校経験全体を通じて身に付けるべき知識、技能、態度を明確化することによって、改革に向けた概念的基盤の確立を目指すものである。著名な科学者、数学者、技術者によるパネルが提案した構想に基づく本報告書『すべてのアメリカ人のための科学』は、そうした努力の結実である。

現在策定作業が進められているこのプロジェクトの第 2 段階では、教育者と科学者のチームが本報告書を叩き台として行動のための青写真を描くことになる。プロジェクト第 2 段階の主な目的は、それぞれの学区や州が科学、数学、技術に関する指導の改革に着手する際に利用できる多様なカリキュラム・モデルを生み出すことにある。第 2 段階ではまた、新たなカリキュラムの実効性を高めるために必要な他の改革の内容、すなわち教師の教育、試験の方針と実施、新たな教材と現代の技術、州や地方当局の政策、研究についても明確化される（第 2 段階に関する詳細内容については、第 15 章「次の段階」を参照のこと）。

第 3 段階では、第 2 段階の青写真を教育の場での実践に変えていくための全国的な活動において、科学、数学、技術の教育の改革に関わる科学に関係した学協会、教育組織、団体、その他の集団とこのプロジェクトとの協調が図られる。

第 II 部：全米評議会の提言

序文

全米科学技術教育評議会は、「あらゆる可能性の中で、アメリカ人は学校を卒業するまでにどのような科学、数学、技術に関係した知識、技能、思考の習慣を身に付けるべきか。」という質問に対する回答を求められた。同評議会はすぐに、この一見簡単そうな質問には簡単な答えも自明な答えもないことに思い至った。回答作業は、次の条件が評議会に課されたことでいっそう困難となった。

- ・上記の質問については何もないところから検討を行い、いかに長期間にわたってカリキュラム、教科書、試験に組み入れられているものであっても、提言にはそれを一切自動的に組み込んではいない。

- ・科学、数学、技術全体における可能性を考慮しなければならないが、そのそれぞれについて、あたかも当然であるかのように同程度の分量を確保しようとしてはならない。

- ・(教科において通常はあまり成績が芳しくない者も含め、)すべての生徒にとって有意義となるような十分余裕のある学習目標を定めなければならないが、しかしながら生徒や教師の視野を高める上で十分野心的な目標でなければならない。

- ・科学パネルの報告を慎重に調査し、かつ他の意見も参考にしながら、可能性のあるあらゆる見解の妥協点を求めるのではなく、独立した結論を得なければならない。

これらの条件に従って、評議会のメンバー全体は強力な総意を得た。各メンバーとしては、多少なりとも事項に関して追加若しくは削減、又は順序や表現の変更等を望む向きもあったであろうが（顧問や査読者もまた同様である）、そうした見解の相違は概ね末梢的な事柄であった。評議会は、全体として見れば、後に示す提言がプロジェクト 2061 によって提起された質問に対する前向きな回答を与えるものであり、また科学界全体の見解を公正に反映した回答であると考えている。

提言は 12 の章に分かれ、それぞれ主題別に以下の四つの主要な分野を扱っている。

- ・第 1 章から 3 章までは、人間活動としての科学、数学、技術の本質、すなわち総合すれば科学的努力について扱っている。

- ・第 4 章から 9 章までは、現在の科学、数学の観点から見た世界、技術によって形作られた世界に関する基本的知識を扱っている。

- ・第 10 章と 11 章は、科学的努力の歴史において人々が理解すべき偉大な逸話の一部と、世界の仕組みについて考えるための道具として役立つ分野横断的な主題を扱っている。

- ・第 12 章は、科学的リテラシーに不可欠な思考の習慣について述べるものである。

こうした提言を考える上で、以下に述べる本報告書の特別な性格に留意することが重要である。

提言は、科学的リテラシーの意味する広範な定義を反映するものである

科学的リテラシーそれは自然科学や社会科学だけでなく、数学や技術をも含むものであり、多くの側面を持っている。その中には、自然界に精通し、自然の統一性に敬意を払うことや、数学、技術、科学が相互に依存している重要な方法の一部について知ること、科学の主要な概念や原理の一部を理解すること、科学的な考え方をする能力を身に付けること、科学、数学、技術が人間の活動であり、そのことが長所にも制約にもなっているということを知ること、科学的知識と考え方を個人的、社会的な目的で利用する能力を持つことが含まれる。

こうした科学的リテラシーの様々な側面には、本報告書の特定箇所ではしか触れないものもあれば、各章の本文に盛り込まれているものもある。したがって、提言はその全体を科学的リテラシーに関する多面的な議論として見る必要がある。

この報告書内の提言は、すべての生徒に適用できる

一連の提言は、社会環境や志望する職業に関係なく、若者のための科学、数学、技術における学習に共通の中心部分を構成するものである。特に、これらの提言は過去においてほとんどの科学や数学の教育を避けて通ってきた人々、すなわち少数民族や少女たちに相応しいものである。提言には、提案されたすべての興味深い主題が含まれるわけではなく、また従来型の大学準備用カリキュラムを薄めることによって導き出されたものでもない。しかしながら、生徒に多くを期待しすぎるよりも過小評価する方が好ましくないため、これらの提言は敢えて野心的なものとなっている。全米評議会は、明確な目標を定め、適正な財源を準備し、13年間の学校生活を通じて適切な指導を行えば、必然的にすべての（実際上では90%以上の）子どもは、高校を卒業するまでに、推奨された学習目標をすべて達成することができるであろう。

しかし同時に、どの子どもも、本報告書に示されている学習に共通したこれらの中心部分にその学習範囲を限定すべきではない。特別な興味や技能に応じ、一部の子どもは、本書に示した主題について、より洗練された理解を得たいと望むであろうし、また一部の子どもは、本書に全く扱われていない主題を探究したいと思うであろう。適正に設計されたカリキュラムであれば、科学、数学、技術における学習に共通の中心部分を犠牲にすることなく、そうした特別な必要性に対応することができよう。

提言は、科学的な重要性とともに人間にとっての重要性に基づいて選択されている

学校に対しては、より多くの内容を教えるように要求する必要はなく、より良い指導を行うために、より少ない内容を教えるよう求める必要がある。より少ない主題に絞ることによって、教師は様々な文脈において段階的に考え方を導入することができ、子どもの成熟度に応じてそれらを強化し、拡張できるのである。

また生徒の側でも、吸収できないほど多くの指導内容を表面的に扱った場合よりも、さらに豊かな洞察と深い理解を最終的に得ることができる。したがって、カリキュラム開発者にとっての問題は、何を加えるかではなく、むしろ何を削除するかなのである。

したがって、多年にわたる教材の分量を増やし続けるような傾向を改めることが、プロジェクト 2061 の主な目標となる。しかし、この目標達成には選択が必要となる。科学、数学、技術の学習に共通の中心部分を特定するための基準としては、科学的であるとともに教育的であることが求められる。まず考慮されたのが、稀に見るほどの科学的な重要性を持つように思える思想である。その理由は、誰でも一生のうちに身に付けられる知識には限りがあり、まして 13 年間ではなおさらだからである。このことはすなわち、現在知る価値があるだけでなく、今から数十年後の将来においても依然として知る価値を持つであろう事柄に大きく影響した内容を重視し、一次的な専門的関心事や限定的な科学分野のみに関する主題を除外することを意味する。特に、一生を通じてより多くの知識を上乗せできるような継続性のある基礎としての役割を果たしうる概念が選択された。このようにして選択された事項は、次に人間生活と、自由社会における一般的な学校教育を正当化する広範な目標に関係した重要な規準を満たす必要があった。その規準は次のようなものであった。

有用性：提案された内容すなわち知識や技能は、卒業生の職業に対する長期的な展望を大幅に好転させるものとなるか。そうした知識や技能は個人的な判断を行う際に役立つものか。

社会的責任：提案された内容は、科学と技術に関係した社会的、政治的な決定に市民が知的に参加する上で助けとなるか。

知識の内的な価値：提案された内容は、人間の歴史上非常に重要であるか、又は我々の文化において広まっており、それらを抜きにすると一般教育が不完全なものとなるような科学、数学、技術の側面を代表するものであるか。

哲学的価値：提案された内容は、生と死、認識と現実、個人の善と集団の幸福、確実性と疑念といったような人間にとっての永遠の疑問について人々が熟考する能力を高めるものとなるか。

少年期の豊かさ：提案された内容は、少年期（後の人生を導く意味からだけでなく、それ自体が重要性を持つ人生の一時期）を充実させるものか。

提言は、新奇さを意図するものでも永続性を意図するものでもない

提言の作成に当たっては、新奇さを追究する企ても、またそれを回避しようとする企ても行われてはいない。提言の作成作業は、たまたま現在の学校のカリキュラムに含まれているか否かに関係なく、重要な最小限度の中心的概念と技能を特定することを目的としていた。この提言が唯一可能性のある事柄を構成するわけではなく、事実、本プロジェクト参加者の間では様々な主題をめぐって見解の相違が見られた。しかし、評議会

としては、この提言が有意味なものであり、科学、数学、技術に関するカリキュラムを組む上で健全な基礎となることを信じている。

しかし、科学、数学、技術は絶えず流動し続けるものであり、一定の考えや手段を維持しつつ、あるものを再形成したり破棄したり、あるいは他の考えや手段を追加していく。遅かれ早かれ、特に一部の領域では早々に、新たな知識を盛り込むためにこれらの提言を改訂する必要が出てこよう。さらに、プロジェクト 2061 の第 2 段階において、教育者と科学者が協力して本報告書に基づくカリキュラム・モデルを設計するために努力する中で、これら提言の妥当性について自らの結論をまとめ、変更を提案することも考えられる。いずれにしろ、この提言は、新たに不変の規範を確立するためにここに示すものではなく、むしろ第 2 段階の展開に向けて信頼できる情報源を提供し、教育内容の問題に関する活発な論議を促し、カリキュラム改革を触発するためのものである。

この報告書は、カリキュラム文書でも教科書でもない

読者は、本報告書に対して、特定の課程又は学年段階において教えるべき提言の提示を期待すべきではない。この報告書は学習目標、すなわち生徒が記憶し、理解し、実施能力を持つべき事柄について扱っているにすぎず、それらを達成するためのカリキュラムの編成方法を紹介するものではない。また、提言の提示は、読者に対して教科書のような指導を行うことを意図したものでもない。主題を線形的に示しても、実際のカリキュラムや教科書に不可欠な、概念や経験の関連性を満足に表すことはできない。

提言は、すべての人々にとって妥当な理解の水準を示す意図を持つものである

ほとんどの教育目的に関して、包括的な一般化（「すべての人は、科学と技術がどのような関係を持っているかを知るべきである。」など）は、（原子、細胞、惑星、グラフなど）個々の主題を長々と羅列したものと同様有用性を持たない。このどちらの手法も、学習すべき内容を明らかにするものではなく、またどちらも、読者に対してどの程度の洗練化が必要となるかの推量を求めることになる。したがって、本報告書に含まれる個々の提言は、意図する理解の水準とその文脈を示すに十分な程度の詳細さを持つ構成となっている。提言は、次の四つの一般化の水準のもとに策定されている。

章：各章は、主要な一連の関連主題を総合的に扱うものである。章の見出し語は、子どもがこの世界に関する新しい知識を獲得していく中で、人生を通して活用できる科学を理解するための概念的枠組を示している。

小見出し：各章内には、「地球を形作っている力」や「生物の相互依存」などの小見出しによって、すべての子どもが精通すべき概念項目が明示されている。小見出しの全一覧は、個々の提言の範囲に関する疑問への近似的な答えを示すものとは言えるが、その内容を示すものではない。

段落：各小見出しの下には、詳細な知識が記憶から消えてしまった後にも人々が身に

付けておくべき知識，洞察，技能を示す段落がある。高校卒業生が，例えば「情報処理」などの主題に関してインタビューを受けた時，自らの言葉でこれらの段落に概説された概念を説明できることが望ましい。

語彙：提言の表現は，目標とする水準の学習を示すように意図されている。提言は，生徒ではなく，現在の教育を受けた成人用に書かれたものであるが，専門的な語彙はすべての生徒が学校卒業までに習得することが望まれるものに限定されている。これらの語彙は，科学，数学，技術に関する健全な教育の成果の一つではあるが，その主目的と考えるべきではない。

全体的に見れば，本書の提言の内容は，個別性は様々であるが，その 12 章の見出し，小見出し，本文，語彙に含まれている。しかし，本書のように短い書物では，収録した主題の全範囲にわたって認識される知識の質を示すことは不可能である。この質，すなわち物事を知る方法は，その学び方に依存する面が大きい。この点で，第 3 部における学習と指導に関する議論が，提言自体の本質に関する理解の展望を示すものである。

第1章 科学の本質

人はその歴史の中で、物理学、生物学、心理学、社会学の分野で相互に関連するさまざまな思想を発達させ、それを検証してきた。このような多くの思想はその後の発展を経て、人間とその環境がさらに包括的で信頼できる形として理解できるものになってきた。こうした思想を発展させる上で用いられた手段が、観察、思考、実験、検証という独特な手法であった。これらの手法は科学の本質について基礎的な側面を表し、科学と他の知識獲得方法との相違を反映するものとなっている。

科学的な営為を構成しそれを成功に導くのは、科学、数学、技術の融合体である。これらの人間の活動には、それぞれ固有の特徴と歴史があり、それぞれは他の2分野に依存し、強化するものである。したがって、提言の最初の3章では、科学的営為における科学、数学、技術の特徴と役割に重点を置き、さまざまな類似点と相互関係を明らかにしていく。

本章では、科学の仕組みに関する知識の中で、科学的リテラシーにとって不可欠なものを提言として提示する。本章は、三つの主要な主題、すなわち科学的な世界観、科学的な探究の手法、科学的営為の本質に焦点を当てる。第4章から9章には、現代科学によって描かれる世界観を示し、第10章「歴史的観点」では、科学の発達における重要なエピソードについて述べ、第11章「共通のテーマ」では、こうした世界観全体にまたがる思想をまとめる。

提言

科学的世界観

科学者は、その活動と活動の見方に関し、一定の基本的な考え方と態度を共有している。これらは、世界の本質とそこから学ぶ事柄に関係している。

世界は理解できる

科学は、体系的で注意深い研究を通して、宇宙や世界の物事と出来事は理解可能な一貫したパターンで起こることを前提としている。科学者は、知性を活用することにより、また感覚器官の延長としての道具の助けを得ることによって、自然界のすべての物事を発見できると考えている。

科学はまた、世界はその名が示すように巨大な単一のシステムであって、その中ではどこにおいても同一の基本的な法則が当てはまるということも前提としている。世界のある一部分の研究から得られた知識は、他の部分にも適用できるということである。例えば、地球表面上における落下物の運動を説明する運動と重力の法則は、月や惑星の運動も説明できる。多くの年月の中で変更は加えられているが、運動に関する同一の法則は、他の力や、最小の素粒子から最も質量の大きい星、あるいは帆船から宇宙船、弾丸から光線に至るまで、あらゆるものの運動に適用されてきた。

科学知識は変更を余儀なくされるものである

科学は、知識を生み出すための過程である。この過程は、現象についての慎重な観察と観察から有意な理論を作り上げるという双方の活動に依存している。新たな観察によって優勢な理論に問題が生じる可能性があるため、知識は変更を避けることができない。ある理論が一連の観察についてどのように妥当な説明をしようとも、他の理論がそれと同等又はそれ以上に適合する場合もあるし、より広範な観察について説明ができる場合もあろう。科学においては、理論の新旧に関係なく追試と改良が加えられ、時には破棄されることが常に繰り返されていく。科学者は、完全かつ絶対的な真理を確実に突きとめる方法がないとしても、世界とその仕組みを説明するための、より精度の高い近似化は行うことができると考えている。

科学知識は永続的なものである

科学者は絶対的真理を獲得するという考えを否定し、自然の一部として一定の不確実性を受け容れるが、大半の科学的知識は永続的なものである。科学においては、概念を完全に否定されるよりも、それを修正される方が一般的であり、強固な構成概念は存続し、より精度を高めてより広範に受け容れられるようになる。例えば、相対性理論を構築するにあたり、アルバート・アインシュタインはニュートンによる運動の法則を破棄することはせず、むしろそれが、より一般的な概念の中で適用範囲が限定された一つの近似であるにすぎないことを示したのである。例を挙げれば、アメリカ航空宇宙局（NASA）は、衛星の軌道を計算する際にニュートン力学を用いている。さらに、科学者が自然現象に関してますます正確に予知できるようになっているという事実は、我々が世界の仕組みについての理解を真に深めつつあるということの確たる証拠となっている。継続性と安定性は、変化と同様科学の特徴であり、信頼性も暫定性と同様に科学の顕著な特徴となっているのである。

科学はすべての疑問に完全に答えることはできない

科学的な手法によっては有効に調べることができないような問題も多くある。例えば、本質的に立証も反証も行えないような信念がある（超自然的な力の存在や人生の真の目的など）。また他の事例では、妥当性のある科学的手法が、一定の信念を持つ人々によって不適切として拒否される可能性もある（例えば、奇跡、占い、占星術、迷信など）。あるいはまた科学者は、時には特定の行動の引き起こしうる結果を特定し、さまざまな選択肢の考量に役立つことで一定の貢献をすることがあるとしても、善悪に関係する問題を解決する手段を持ち合わせていない。

科学的探究

基本的に、さまざまな科学的学問は、証拠への依存、仮説と理論の使用、用いられる論理の種類等において共通している。それにもかかわらず、科学者はその研究する現象、活動に取り組む姿勢、歴史的データや実験的所見、定性的又は定量的手法、基本原則への依拠、他の科学の所見を重視する程度において大きく異なっている。それでもなお、技術、情報、概念の交換は科学者間で常に行われており、科学者の間では、科学的正当性を持つ研究調査がどういったものであるかに関する共通の理解が存在している。

科学的探究は、特定の研究調査の手順を抜きにしては論じにくいものである。科学者が常に従っている定まった一連の手順などはなく、誤ることなく科学的知識に導いてくれる単一の道筋があるわけでもない。しかし、科学には、探究モデルとして固有の性質を与えている一定の特徴がある。そうした特徴は特に科学者の専門的仕事を特徴付けるものであるが、誰であっても日常生活の中で科学的に考える際にそれを用いることができる。

科学は証拠を要求する

遅かれ早かれ、科学的主張の妥当性は現象を観察することで解決される。したがって、科学者は正確なデータを収集することに努力する。このような証拠は、自然状態(森林など)から完全に作り出された状態(実験室など)に至るまでの状況においてなされた観察や測定を通して得られる。観察する時、科学者は自らの感覚、そうした感覚を補う器具(顕微鏡など)、あるいは人が知覚できるものとは異なる特性(磁場など)を引き出す装置を用いる。科学者は、受動的観察(地震、鳥の渡りなど)、収集(岩石、貝殻など)、積極的な調査(地殻の掘削や試験医薬の服用など)を行う。

一部の事例においては、科学者は意図的に条件を制御し、正確にその証拠を得ることができる。例えば、温度を制御し、化学物質の濃度を変化させ、あるいは交配させる生物を選択する。1回に一つの条件を変化させることで、他の条件変化による複雑さを避けて、事象に対するその単一条件の影響を特定しようとする。しかし、条件の制御ができなかったり(星の研究など)、非倫理的であったり(ヒトの研究)、あるいは自然現象を歪める(捕獲された野生生物の研究など)ような場合もしばしばある。そのような場合には、十分に広い範囲の自然発生条件において観察を行い、さまざまな要素の影響を推論しなければならない。このように証拠に依存することにより、より優れた装置や観察技術の開発に大きな価値が認められるとともに、個人又はグループの研究者によって見いだされたことは、通常の場合他者によって試されるのである。

科学は論理と想像力の融合である

仮説や理論の形成にはあらゆる種類の想像力や思考力が利用されるが、遅かれ早かれ、どのような科学的主張であっても論理的推論の原則に合致しなければならない。すなわ

ち、推論、実証、常識に関する一定規準を適用することで、主張の有効性は試されなければならないのである。科学者は、しばしば特定の証拠の価値や特定の想定 of 妥当性について見解が異なるため、正当化すべき結論に関する見解が異なることがある。しかし、証拠と想定を結論に結びつけるための論理的推論の原則については、科学者の見解は一致する傾向にある。

科学者は、データや適正に構築された理論のみを使って研究活動を行うわけではない。しばしば、科学者は物事の実体を表すと思われる暫定的な仮説しか利用できないことがある。このような仮説は、科学において、注目すべきデータや追加すべきデータを選択したり、データを解釈する指針としたりする目的で広く用いられている。事実、仮説を立ててそれを検証することは、科学者の中心的活動の一つである。仮説に有用性を持たせるには、仮説を支持する証拠と仮説の反証となる証拠を明確にする必要がある。本来的に証拠を検証することができない仮説は、興味深いものではあるかもしれないが科学的には有用ではない。

論理と証拠に関する詳細な調査は必要なものではあるが、これだけでは科学の発展にとって十分ではない。科学的概念は、データや実施された多くの分析から自動的に発生するわけではない。世界の仕組みを想像する仮説や理論を發明し、次にそれらを現実に試験することに供するための方法を考案することは、詩を書いたり、作曲したり、高層ビルを設計することと同じように創造的な活動である。時に、科学的な発見が予期しない方法で、偶発的に行われることもある。しかし、予期しない事象の意味を認識するためには、通常の場合、知識と創造的な洞察力が必要である。ある科学者が無視していたデータの側面が他の科学者によって新たな発見につながることもある。

科学は説明し、予測する

科学者は、現在受け容れられている科学原理を用いるか、又はそれに適合するような説明方法を發明することで、現象についての観察に意味を持たせようと努力する。こうした説明すなわち理論は、その範囲が広範なものも限定されたものもあるが、いずれにしても論理的に矛盾することなく、科学的に有効な観察の重要な部分を取り入れられるものでなければならない。科学的理論の信頼性はしばしば、以前には関連性がないと思われていた現象間における関連性を示す能力から生まれてくる。例えば、大陸移動理論は、地震、火山、様々な大陸における化石の種類 of 合致、大陸の形状、海底の等高線など様々な現象の関係を示すことによって、信頼性を高めてきたのである。

科学の本質は、観察による検証にある。しかし、既に知られている観察結果のみに符合するだけでは科学理論として十分ではない。理論はまた、最初の段階で理論の形成に用いられなかった追加の観察結果にも符合しなければならない。すなわち、理論は予測的な力を持たなければならないのである。理論の予測的な力を実証する上では、必ずしも将来における出来事の予測が必要となるわけではない。予測は、まだ発見又は研究さ

れていない過去における証拠に関係する場合もある。例えば、ヒトの起源に関する理論は、ヒトに似た化石の新たな発見によって検証することができる。この手法は明らかに、地球の歴史上の出来事や地球上の生物形態について再構築を行うために必要である。こうした手法はまた、山脈の形成や星の加齢など、通常の場合非常にゆっくりと発生する過程の研究のためにも必要である。例えば星は、通常観察できるよりゆっくりと進化する。しかし、星の進化理論によって星の光の特性における未知の関係が予測され、そうした関係を星に関する既存のデータにおいて追究することができる。

科学者は偏向を特定し、回避する

何かが真理であるという主張に直面すると、科学者はどういった証拠がそれを支持しているかという質問をする。しかし、科学的な証拠は、データの解釈方法、データの記録又は報告、そして第一にどのデータを考慮するかといったことにおいて偏向する可能性がある。科学者の国籍、性別、出身民族、年齢、政治的信念などといった事柄が、特定の種類の証拠や解釈を重視する方向に向かわせる可能性がある。例えば、多年にわたる男性研究者による霊長類の研究は、雄の競争的な社会的行動に重点を置いていた。女性の科学者がこの分野に入ってくるまでは、雌の共同体建設行動は認識されなかった。

研究者、標本、手法、又は装置に起因する偏向を、すべての事例において完全に避けることはできないかもしれないが、科学者は偏向の原因を探り、偏向が証拠に与える影響を知ろうとする。科学者は、他の科学者の活動に関して同様に、自らの活動において可能性のある偏向に注意しようとする。また、そうすることを期待されてもいるが、このような客観性は必ずしも実現されるとは限らない。偏向が研究分野において見過ごされないようにするための一つの予防策は、多くの異なる研究者又は集団を活動させることである。

科学は権威ではない

科学においては、他のあらゆる分野におけると同様、通常の場合は関連の学問分野を専門とする人々などの知識豊かな情報源や見解に注目することは妥当である。しかし、科学の歴史の中で、尊重された権威が幾度か過ちを犯してきた。結局のところ、いかに著名であれ、また高い地位に就いていても、他の科学者のために何が真理であるかを判断する権限は誰も持っていないのである。なぜなら、誰も真理を特別に入手できる経路を持っているとは考えられていないからである。科学者がそれぞれの研究を通じて達しなければならないようなあらかじめ確立された結論は存在しないのである。

短期的に見れば、主流となっている思想にうまく適合しない新たな思想は激しい批判にさらされる可能性があり、そうした思想を研究する科学者は研究に対する支持を得る上で困難に直面するかもしれない。実際のところ、新たな思想に対する挑戦は、有効な知識を確立しようとする科学にとっては正当な行為である。時には、たとえ最も権威の

ある科学者であっても、他者を納得させるに十分な証拠の蓄積があるにもかかわらず、新たな理論を受け容れようとしなないことがある。しかし、長期的に見れば、理論はその結果によって判断されるものである。つまり、誰かが以前の見解よりもより多くの現象を説明し、またより重要な疑問に答えられる新しい見解を生み出せば、それが最終的に以前の見解に取って代わることになる。

科学的営為

活動としての科学は、個人的、社会的、組織的な広がりを持っている。科学的活動は、現代世界の主な特徴の一つであり、おそらく他のどれにもまして、我々の時代を以前の世紀と区別するものであろう。

科学は複雑な社会活動である

科学的な活動には、多くのさまざまな種類の活動を手がける多くの個人が関わっており、ある程度は世界のすべての国に拡大していくものである。あらゆる民族や国籍を持つ男女が、科学とその応用に向け努力している。こうした人々、すなわち、科学者、技術者、数学者、物理学者、技術家、コンピュータ・プログラマー、司書、その他の人々は、まさに科学的知識を得るため、あるいは特定の実践的な目的のために、科学的知識を得ようとし、データ収集や理論形成、器具の製造、連絡通信に関わっている。

社会的な活動として、科学に社会的価値観や見解が反映されることは避けられない。例えば、経済理論の歴史は社会正義の概念動向と並行して進展し、ある時期における経済学者は、労働者がようやく生きのびられるだけの賃金を労働者にとっての最適賃金と考えていたこともある。19世紀末から20世紀初頭の時期において、教育と雇用機会の制限によって、女性や黒人は実質的にほとんど科学から遠ざけられていた。またそうした障害を乗り越えた傑出した少数の者も科学的権威によってその業績を過小に評価されていた。

科学研究の方向性は、科学的文化自体に内在する非公式的な影響、例えばもっとも関心がある問題は何か、最も成果を上げる可能性の大きい研究手法は何かなどについての大勢的な見解によって影響を受ける。資金援助を受けるべき研究案件を決定するための科学者自身の関係する入念な過程が開発されており、科学界も、資金提供を行う一般的な優先分野を推薦するために、さまざまな学問分野の進歩について検討を加えている。

科学は、さまざまな背景において進められている。科学者は、大学、病院、企業、産業界、政府、独立研究機関、科学学会などで雇用されている。科学者は単独で、また少数の集団で、あるいは大規模な研究チームの一員として活動している。その活動場所には、教室、仕事場、研究所、そして宇宙から海底に至るまでの自然現場も含まれている。

科学の社会的性質のために、科学的情報の普及はその進歩にとって非常に重要である。一部の科学者は文書の形でその所見や理論を発表し、会議で配布したり、又は科学誌な

どを通じて出版する。こうした文書のおかげで、科学者は他者に対してその活動を告知し、その思想を他の科学者の批評にさらし、そしてもちろん世界中の科学の発展に遅れずについていくことができるのである。

情報科学(情報の性質とその操作に関する知識)の進歩と情報技術(とりわけコンピュータ技術)の発達は、すべての科学に影響を与えている。そうした技術は、データの収集、編集、解析を加速化し、発見と応用の時間を短縮する。

科学はその構成要素となる分野に組織化され、様々な機関において実施されている

組織面で、科学はさまざまな科学部門すなわち構成要素となる分野の集合体と考えることができる。人類学から動物学の間におけるそうした分野は十数に上る。これらの分野は、歴史、研究対象となる現象、用いられる技術や言語、目的とされる種類の結果といった多くの点で互いに異なっている。しかし、目的や哲学の点ですべての分野は等しく科学的であり、全体として同一の科学的活動を構成しているのである。構成分野を有することの利点は、それらが研究や研究所見を編成するための概念的な構造体を提供してくれる点にある。不利な点は、各分野が必ずしも世界の進展に適合しないということと、相互の意思疎通を困難にするという点である。いずれにしても、科学分野は固定された境界を持つものではない。物理学は化学、天文学、地質学に融合し、化学は生物学、心理学などに融合するといった具合である。新たな科学分野(例えば宇宙物理学や社会生物学)も絶えず他分野との境界面で生み出されている。一部の分野は拡大、分裂して下位分野が生まれ、それらはさらにまた別個の分野となっていくのである。

大学、産業界、政府はまた、科学的営為を担う構造の一部となっている。大学での研究は、自ら利用する目的での知識の獲得に重点を置くのが通常であるが、重点の大部分はまた実際的な問題にも向けられている。もちろん、特に大学は科学者、数学者、技術者の各世代を継続して教育する使命も担っている。産業界や企業は、実用的な目的のための研究を重視するのが普通であるが、多くはまた、長い目で見れば応用して成果を得られるという前提の下で、明確な直接的用途を持たない研究も援助している。連邦政府は、大学や産業界における研究の多くに資金提供を行っているが、多くの国立研究所や研究センターにおいても研究を実施し、また助成を行なっている。民間の基金、公益団体、州政府もまた研究を援助している。

資金提供を行う機関は、それが援助すべき研究を決定することによって、科学研究の方向性に影響を与えている。科学研究に対するこの他の意図的な影響力は、実験に用いられる人や動物検体に対して脅威を与え、かつ危険な研究活動に対する連邦政府(そして時には地方政府)の規制の結果として加えられることになる。

科学研究の実施に際しては、一般に受容される倫理的原則がある

大部分の科学者は、科学的な倫理規範に従って自らの身を処している。正確な記録管

理，開放性，反復性に関して堅く維持されている伝統に加え，同業者による批評的な精査が支えとなって，ほとんど大多数の科学者は専門職における倫理的な制約の範囲内で活動している。しかし時に，ある発想や所見を最初に公表することで名声を得たいと思うあまり，一部の科学者は情報の提供を拒み，又はその所見を歪曲したりすることさえある。そのようなまさに科学の本質を侵害する行為は科学にとっての障害となる。そうした事例が発見された場合は，科学界全体や研究資金を提供する機関から強く非難されることになる。

科学倫理のもう一つの領域は，科学実験の結果生じうる害悪に関係するものである。一つの側面は，生きている実験検体の扱いである。現代の科学倫理は，動物検体の健康，快適性，福利に対して適正な配慮をすることを求めている。さらに，ヒトの検体に関係する研究は，たとえ潜在的な重要性を持つような種類の研究を制約するような結果になるか，あるいは研究結果に影響する場合であっても，検体に対する事前同意（インフォームド・コンセント）がある場合においてのみ実施することができることになっている。事前同意は，関係の研究に関する危険度と意図される便益と，参加を拒否する権利に関する完全な情報開示を必要とするものである。さらに科学者は，事前の情報提供と同意なくして，共同研究者，学生，近隣の人々，又は地域社会の健康や財産を故意に危険にさらしてはならない。

科学倫理はまた，研究結果の応用によって生じうる害悪とも関係している。科学の長期的な影響は予測できないかもしれないが，科学的成果からどのような用途が期待されるかに関する見通しは，関係の研究への資金提供に関心を寄せる当事者を知ることによって確かめることができる。例えば，仮に国防省が理論数学分野の活動に関する契約を提示したとすれば，数学者はそれが新たな軍事技術への用途を持つものであり，したがって機密措置の対象となることを推論するであろう。軍事又は産業上の機密は，一部の科学者には受け容れられるものであるが，受け容れない科学者も存在する。多くの科学者は核兵器や細菌兵器など，人間に対して大きな潜在的な危険性を持つ研究活動を科学者が選択するかどうかは，個人的倫理観の問題であって，職業上の倫理観ではないと考えている。

科学者は専門家や市民として公的な問題に参加する

科学者は，情報，洞察，分析技術を用いて一般的な関心の向けられる問題を扱うことができる。科学者はしばしば，一般市民やその代表者がさまざまな事象（自然災害や技術的被害）の原因と思われる物事を理解し，計画されている政策がもたらす可能性がある影響（さまざまな農耕技術が生態系に与える影響など）を見積る上での助けとなることができる。科学者はまた，事象の不可能性について立証する場合もある。このような助言的役割を果たすに当たって，科学者は，解釈と事実，研究所見と推量や意見との区別において特に慎重になることを求められる。すなわち，科学者は科学的探究の原則を

十分に生かすよう求められるのである。

そうではあっても、科学者も公的な議論に対して断定的な答えを提示することはめったにない。一部の問題はあまりに複雑であるために現在の科学の扱う範囲に適合せず、また信頼できる情報がほとんどないとか、関係する価値観が科学の領域外のものであるというような場合もある。さらには、特定の科学的知識に関して一時的には広範な合意が得られたとしても、そうした合意がすべての科学的な問題に拡張できるわけではなく、ましてやすべての科学に関する問題に拡張できることはない。そしてもちろん、専門領域外の問題に関しては、科学者は特別に信頼できる存在ではないのである。

科学者はその活動において、自らの活動も他者の活動とともに、偏向を避ける作業を徹底して行うが、一般的な関心事に関しては、科学者も他の人々と同様、自分個人、所属組織、施設、又は地域社会の利益に関わる場合において、その考えが偏向することも考えられる。例えば、理解できることではあるが、科学に傾倒するあまり、多くの科学者は、他の社会的必要性と比較してどのように科学分野に資金配分を行うかに関する考え方が多少とも客観性を欠くことがある。

第2章 数学の本質

数学は、論理と創造性の双方を基にしている。様々な現実上の目的と、数学の内にある興味の双方を目的として遂行されるものでもある。専門家である数学者だけでなく、ある人々にとっては、数学の本質はその美しさと知的な挑戦にある。また、多くの科学者や技術者を含めた別の人々にとっては、数学の主要な価値は自分自身の活動にどのように応用できるかにある。数学は現代文化においてまさに中心的役割を果たしているため、数学の本質の基本的な理解は、科学的リテラシーにとって不可欠である。数学の本質を理解するために、数学を科学的活動の一部として認識し、数学的思考の本質を理解し、重要な数学的発想や技能に親しむことが、生徒にとって必要なことである。

本章では、科学的活動の一部としての数学に焦点を当て、次に過程としての数学、言い換えると、思考方法としての数学に焦点を当てていく。数学的発想に関する提言は第9章「数学的世界」に示され、数学的技能に関する提言は第12章「思考の習慣」に示されている。

提言

数学のいくつかの特徴

数学は、パターンと関係の科学である。理論的な学問として、抽象概念が現実世界に類似性を持つかどうかには関心を持たずに、数学は抽象概念間における可能な関係を探究するものである。抽象概念は、数列から幾何図形や一連の方程式に至るまでのあらゆるものを含む。例えば、「素数の間隔は一つのパターンをなすか。」という理論的な問題に対して、多くの数学者はパターンの発見、又はパターンが存在しないことの証明にしか関心がなく、そうした知識がどういう用途を持つかには関心がない。例えば、ある正多面体の体積がゼロに近づくにつれてその表面積がどのように変化するかを式に表現するような場合、数学者は、幾何学的な多面体と現実世界における物理的な物体との対応性には全く関心を持たない。

数学はまた応用科学でもある。多くの数学者は、経験世界に端を発する諸問題の解決にその注意を向けている。数学者はまた、パターンや関係を追究し、その過程において純粋に理論的な数学において用いられる方法に類似の方法を用いる。相違点は、概ね目的の違いにある。理論的な数学者とは対照的に、上述の例における応用数学者は、抽象的な問題としてではなく、素数の間隔のパターンを研究し、数値情報を暗号化する新たな体制を開発するかもしれない。あるいはまた、結晶の性質に関する研究に対し、モデルを作り出すための手順として、面積と体積の問題に取り組むかもしれない。

理論数学と応用数学の結果は、しばしば相互に影響し合うものである。理論的な数学者の発見は、しばしば（時には数十年後において）予期しない実際的な価値を持つ場合もある。例えば、無作為事象の数学的性質に関する研究によって、後に社会科学、自然科学における実験計画を改善することが可能となった。逆に、長距離電話の利用者に対す

る料金請求を公平に行うという問題を解決しようとして、数学者が複雑な連絡網の数学に関する基礎的な発見を行った例もある。理論数学は、他の科学分野とは異なり、現実世界によって制約を受けることがないが、長い目で見れば現実世界に関する理解の向上に貢献している。

数学はその抽象的性質により、人間の思考の他の分野にはありえない意味での普遍性を有している。数学は、企業、産業、音楽、歴史学、政治学、スポーツ、医学、農業、工学、そしてその他社会科学や自然科学において有効に応用されている。数学と他の基礎科学・応用科学との関係は、特に強いものである。これには、以下のようないくつかの理由がある。

- ・科学と数学の連携関係には長い歴史があり、数世紀にも及ぶものである。科学は研究対象として興味深い問題を数学に提供し、数学はデータ解析に利用できる強力な道具を科学に提供してきた。数学者がそれ自体への興味から研究を行っていたある抽象的なパターンが、後になって科学で大変有用であることが見出されたこともしばしばであった。科学と数学はともに一般的なパターンと関係を発見しようとするものであり、この意味において両者は同じ方向を向いた活動の一部となっている。

- ・数学は、科学の主言語である。数学の記号言語は、結果的に科学的な概念を明確に表現する上で貴重なものとなった。 $a=F/m$ という表現は、単に物体の加速度がその物体と質量に加えられる力に依存することを簡潔に述べるための方法ではない。むしろ、これはそれら変数間の量的な関係についての正確な記述である。さらに重要なのは、数学が科学の文法、すなわち科学的概念とデータを厳密に分析するための規則も提供しているということである。

- ・数学と科学は、多くの共通の特徴を持っている。そうした共通点には、理解できる秩序に対する信念、想像力と厳密な論理との相互作用、率直さと開放性という理想、仲間による批評の重要性、重要な発見を最初に行うことに対する評価、世界的な視点、そして強力なコンピュータの開発を通じ、技術を用いて新たな研究分野を開拓できるということなどが含まれる。

- ・数学と技術もまた、互いに実りある関係を発展させている。例えば、関係と論理的なつながりに関する数学は、コンピュータ・ハードウェアやプログラミング技術の設計に大きく貢献した。数学はまた工学に対し、コンピュータ・シミュレーションに利用可能な複雑な体制の記述などにおいて、より一般的な貢献を行っている。こうしたシミュレーションにおいては、最適設計を見出す手段として、設計項目と作動条件を変化させることができる。コンピュータ技術は、証明の本質ということできえ、全く新しい数学の分野を切り拓いており、以前には手が出せなかったような問題の解決にも引き続き役立っている。

数学的過程

数学を使って発想を表したり問題を解くという作業には、少なくとも三つの段階が含まれている。すなわち、(1) 物事のいくつかの側面を抽象的に表現し、(2) 論理規則を使って抽象概念を操作することによって物事の側面の間に新たな関係を見出し、(3) そうした新たな関係から本来の物事に関して何か有用な事柄が判明するかどうかを検証する段階である。

抽象化と記号表現

数学的思考は、しばしば抽象化、すなわち、複数の物体又は事象の間に類似性を見出すという抽象化の過程から始まる。複数の物体や事象が共通に持っている側面は、それが具体的なものであれ仮説的なものであれ、数字、文字、その他の印、図表、幾何作図、言葉などの記号によって表される。整数（負ではない）は一連のものや事象の集合の大きさ、又は集合の中のものの順序を表す抽象記号である。概念としての円は、人間の顔、花、車輪、広がるさざなみから抽象されたものである。文字 A は様々な形をした物体の表面積の抽象記号であり、また運動物体の加速度や、ある特定の性質を有するすべての物体を表す。記号+は加法を表すが、加えるものがりんごであるかオレンジであるか、時間、又は時間あたりの距離であるかは問わない。抽象記号は具体的な物体や過程に由来するだけでなく、偶数などのように他の数のような抽象記号に由来するものもある。

こうした抽象化によって、数学者は物事のある特徴に注目し、他の特徴を常に考える必要性を排除する。数学に関する限りにおいて、三角形が帆船の表面を表すものであるか、二つの視点が一つの星に集中することを表すものであるかは問題とはならない。数学者は同じ方法で概念間でも作業することができる。抽象化を行う過程で、研究対象となる事象の結果判断において重要な役割を果たす特徴を無視しないように注意が払われる限りにおいて、その結果として得られる労力の節約は非常に有益なものとなる。

数学的記述内容の操作

抽象化が行われ、それらに関する記号表現が選択された後、それらの記号は、厳密に定められた規則に従って結合や再結合を行うことができる対象物となる。時に、こうした作業は心の中に目標を定めて行なわれ、またある時には起こる出来事を確認するために実験や遊びを通して行なわれる。時には、妥当な操作方法が構成要素となっている単語や記号の直観的な意味から容易に特定できることがあり、また有用な一連の操作方法を試行錯誤の中で見出していかねばならないこともある。

通常の場合、一連の記号は概念や命題を表現する記述にまとめあげられる。例えば、任意の四角形の面積を表す A という記号は、正方形の辺の長さを表す s という記号とともに用いて $A=s^2$ という命題を表記することができる。この式は面積と辺の長さとの関係を示すものであり、この他に依存するものがないということも表している。これに

基づき、通常の代数を用いて、辺の長さが2倍になれば正方形の面積は4倍になるということがわかる。さらに一般的には、こうした知識によって辺の長さがどのように変化しても正方形の面積がどうなるかが明らかになり、また逆に、面積の変化が辺の長さにどう影響するかも明らかになる。

抽象的な関係に関する数学的な洞察は、数千年にわたって発展してきたもので、現在もなお拡張され、時には修正も経験している。数学的な洞察は計算や測定 of 具体的な経験に始まったものであるが、多くの抽象化の積み重ねを経て、現在では機械的な実証よりも内的な論理により多く依存するようになってきている。ある意味で、抽象記号の操作はゲームに似ている。ある基本的な規則に基づいて開始され、その規則に合うように動いていく中で、追加の規則を工夫したり、古い規則間に新たな関係を見出したりする。新しい概念の妥当性を確かめることは、それらに一貫性があり、他の規則に論理的に適合するかどうかということである。

理論数学における研究の中心的な方向は、それぞれの研究分野において、少数の基本的な概念と規則を特定することにある。そしてその規則は、同じ分野における他のあらゆる興味深い概念や規則を論理的に導き出すことになる。数学者は、他の科学者と同様、以前には関連性のなかった数学の構成部分が、互いに、又はより一般的な理論から導出可能であることが明らかになった時、特に満足を感じるものである。多くの人々が数学において感じてきた美しさの一部は、最大限の複雑さや精巧さの発見にあるのではなく、それとは対照的に、この上ない簡潔さと表現や証明の単純さにある。数学が進歩するにつれて、別個に発展してきた数学の各部分間、例えば代数の記号表現と幾何学の空間的表現などに、より多くの関係が存在することが明らかとなった。こうした相互関係によって、様々な部分における洞察がさらに深められるようになり、そうしたすべての動向が、数学的構造全体の正しさと統一性に対する信念をさらに強化することにつながっている。

応用

数学的過程は、一種の物事のモデルを導くもので、そこから物事自体に関する洞察を得ることができる。抽象的な記述内容を操作することによって明らかとなった数学的な関係は、モデル化された物事に関する何らかの真理を示したり、時には示さない可能性がある。例えば、コップ2杯の水をコップ3杯の水に加えれば、 $2+3=5$ という抽象的な数学的操作が用いられて正しい合計の分量として、コップ5杯という計算がなされる。しかし、コップ2杯の砂糖がコップ3杯の熱い紅茶に加えられる場合と同じ操作を行えば、コップ5杯という間違っただけの分量が示されることになる。実際に出来上がるものは、コップ4杯強の非常に甘い紅茶だからである。量を単純にたし算することが最初の状況では正しかったが、二つ目の状況では正しくなかった。これは、上述の二つの状況における物理的な相違点をあらかじめ知っていれば予測できたことであろう。したがって、

数学をうまく活用し、解釈するためには、抽象的な操作の数学的妥当性のみに関心を持つのではなく、それらが表現された物事の性質にいかとうまく対応しているかに関心を持つ必要がある。

時には、常識だけで十分に数学の結果が妥当であるかどうかを判断することができる。例えば、現在 5 フィート 5 インチの身長があり、年間 1 インチの割合で成長している少女の 20 年後の身長を推定する場合、単純に「割合に時間を乗じて」得られる 7 フィート 1 インチという答えがまずありえないことは常識でわかり、その代わりに極限值に近づく曲線のような他の数学モデルを利用することになる。しかし、時として、数学的な結果がどの程度妥当なのかがわかりにくい場合もある。例えば、株式の市場価格や地震を予測する場合などである。

1 回だけの数学的推論では満足のいく結論を出せない場合がしばしばあり、表現方法や操作自体の変更が試みられることがある。事実、進むべき方向を指し示す規則がないため、各過程の順序を行きつ戻りつしたりする試みも行われる。こうした過程は通常の場合時折思い出したように突然進展を見せ、誤った方向への試行錯誤を繰り返し、十分に良い成果が得られるまで続けられるのである。

しかし、どの程度の正確さが十分に良いのであろうか。その答えは、結果の利用方法、誤差の影響、見込まれるモデル化やより精度の高い計算に必要な費用などによって異なってくる。例えば、ケーキの調理法における砂糖の分量 1% の誤差は大して重要ではないが、宇宙探査の軌道計算における同程度の誤差は致命的である。しかしながら、「十分に良い」ことがどの程度かという疑問は、計算結果において誤差の生じる程度や、望ましい水準の精度を得るのに必要な計算の程度に関する数学過程の開発につながった。

第3章 技術の本質

人間がいる限り、そこには技術があった。事実、道具を作る技は、ヒトの文化の始まりを示す主な証拠と考えられている。全体的に見れば、技術は文明を発展させる強力な力となってきたが、科学との関連性が生まれてからはより一層その力が強くなった。技術は、言語、儀式、価値、商業、芸術と同様に、文化システムにおける本質的な部分であり、システムの価値を形成し、それを反映するものである。現代の世界において、技術は、研究、デザイン、工芸の分野だけでなく、財務、製造、管理、労働、マーケティング、点検・保守を含む複雑な社会的活動となっている。

最も広い意味において、技術は世界を変えていく我々の能力を拡大するものであり、切る、形作る、材料を組み立てる、物を移動させる、我々の手や声、感覚をより遠くに届かせることなどを可能にするものである。我々は、世界を自らにとってより快適なものに変えていくために技術を利用するのである。それは、食料、避難所、防衛などの生存の必要性に関係する場合もあり、また、知識や芸術、支配などの人間の欲求に関係する場合もある。しかし、その結果として、世界は、複雑で予測できない状況にしばしば見舞われることもある。予期せぬ便益や経費、危険度などもそれに含まれ、様々な時期に様々な社会集団が利害を受けることになる。したがって、技術利用の結果を予想することはその能力を発展させることと同様に重要である。

本章では、技術の賢明な利用に資するための技術に対する考え方に重点を置き、その提言の中で、科学的リテラシーにおいて求められる技術の本質に関する知識がどのようなものであるのかを示す。本章は、科学と技術の関連性、技術自体の原理、技術と社会の関連性という三つの部分に分かれている。第8章「設計された世界」では現代世界の重要な技術に関係した原理について述べ、第10章「歴史的観点」では産業革命について論じ、第12章「思考の習慣」では技術の世界に参加する上で妥当性を持ついくつかの技能（スキル）について述べる。

提言

科学と技術

技術は科学に依存し、かつ科学に貢献するものである

技術は物事の性質とそれを操作する技に関係する個人的な経験から発達し、その専門的知識・技能（ノウハウ）は何世代にもわたって専門家から継承者へと受け継がれてきた。現代において受け継がれる専門的知識・技能（ノウハウ）は、熟練者個人の特殊技能だけでなく、様々な指南を与える膨大な言語、数字、画像などの蓄積された著作物に見られる。しかし、蓄積された実践的な知識と同様に重要なのは、物事の仕組みの根底にある原理についての理解、すなわち科学的理解に根ざした技術への貢献である。

技術の開発と利用に関する科学的知識の体系的な応用としての工学は、製作技能から生まれてそれ自体が科学となったものである。科学的知識は、製作または観察の前に、物事

の振舞いがどうなるかを推定するための手段を提供する。さらに、科学はしばしば、以前想像さえしえなかったような新しい種類の振舞いを暗示し、それが新しい技術につながっていくことがある。技術者はデザイン戦略と併せて科学と技術の知識を利用し、実際的な問題の解決を図る。

これに対して技術は、科学的な目と耳を提供し、筋肉の一部も提供してくれる。例えばコンピュータは、気象システム、人口統計学的傾向、遺伝子構造、その他の複雑なシステムの研究における大幅な進歩を促したが、コンピュータがなければこうしたことは不可能であっただろう。測定、データの収集、標本の取り扱い、計算処理、調査現場（南極、月、海底など）までの移動、標本の採取、有害物質からの防護、それに情報伝達に関する技術は、科学にとっては不可欠なものである。技術を通じてますます多くの機器や新たな技術が開発され、さまざまな分野の科学研究を可能にしている。

しかし技術は、単に科学のための道具を提供するだけのものではない。技術は、理論や研究に対してそれぞれの動機や方向性を与えるものでもある。例えば、エネルギー保存の法則は、商業用蒸気機関の効率を向上させる上での技術的な問題から展開された面が大きい。ヒトの DNA 遺伝子全体の位置の特定は、そうした位置の特定を可能にするとともにその要因ともなった遺伝子工学の技術によって動機付けされたものである。

技術が洗練の度を深めていくにつれ、科学との関連性もさらに強化される。固体物理学などの一部の分野においては（トランジスタや超伝導体を含む）、物を作る能力と物を調査する能力が極度の相互依存関係にあるため、科学と工学を分離することは不可能なほどである。新しい技術はしばしば新たな理解を必要とするが、新たな研究は、また、しばしば新しい技術を必要とするのである。

工学は科学研究を現実的な価値に結びつける

科学研究と数学的モデルに最も密接に関係する技術の構成要素は工学である。最も広い意味において、工学は問題の解釈とその解決方法をデザインすることで構成されている。基本的な手法は、まず一般的な取組み方を考え、次に必要な対象物（自動車のエンジン、コンピュータ・チップ、機械仕掛けの玩具など）、または、過程（灌漑、世論調査、製品試験など）の構成に関する技術的な詳細を構想するというものである。

科学の本質について述べてきた事柄の多くは、特に数学の利用、想像力と論理の相互作用、発案に対する積極性、関係する人々の多様性、職業面での特性、公的な責任などは、工学にもまた当てはまることである。事実、科学者と呼ばれる人よりも技術者と呼ばれる人のほうが多く、また多くの科学者は科学であると同時に工学とも見られるような活動を行っている。

科学者は、世界を理解可能なものにする目的で現象の中に一つの傾向を見ようとするが、技術者もまた世界を操作可能なものにする目的で現象を見ている。科学者は、理論がデータに一致することを示そうとし、数学者は抽象的な関係を論理的に証明しようとするが、

技術者は、デザインが有効であることを実証しようとする。科学者がすべての疑問に答えられるわけではないし、数学者も可能性のあるすべての関係を証明できるわけではないように、技術者もあらゆる問題を解決するようなデザインができるわけではない。

しかし、工学は科学研究よりも直接的に社会システムや文化に影響を与え、人の成功や失敗に即座に反映され、個人的な便益や損害に反映される。工学における判断は、航空機のボルトデザインであれ、灌漑システムのデザインであれ、必ず科学的判断に加えて社会的・個人的価値と関係を持つことになる。

技術の原理

工学の本質は制約の下でのデザインである

すべての工学デザインは、特定され、考慮されなければならない制約の中で行なわれている。そうした制約の一つは絶対的なもので、例えばエネルギー保存などの物理的法則や、柔軟性限界、電導率、摩擦などの物理的性質である。この他の制約にはある程度の柔軟性があり、例えば経済的（個々の目的に利用可能な資金）、政治的（地方、州、国家的な規制）、社会的（一般市民の反対）、生態学的（自然環境の破壊の可能性）、倫理的（一部の人々に対する不利益、後続世代に対する危険度）な制約である。最適なデザインは、あらゆる制約を考慮に入れ、その中で何らかの合理的な妥協点を探ろうとする。特定の追加的な技術開発を行わないといった決断を含め、そうしたデザイン上の妥協点を定めるには、個人的、社会的な価値を考慮する必要がある。デザインは時に既知の要素の組合せに関する所定の作業しか必要としないこともあるが、問題解決のための新たな手法、新たな要素、及び新たな組合せの発明に向けた優れた創造性、新たな問題や可能性を見極めるための革新を要することもしばしばである。

しかし、完全なデザインというようなものは存在しない。一つの制約を適正に組み入れることによって、他の制約に触れることもよくある。例えば、最軽量の材料は強度に問題があったり、最も効率的な形状が安全性や美観を損ねるものであったりする。したがって、すべてのデザイン上の問題は、人々が様々な制約にどのような価値を与えるかによって、多くの代替的な解決方法につながるものである。例えば、強度と軽量性のどちらが重視されるのか、外観は安全性より優先するのか、といったことである。重要なことは、最も安全で最も信頼性があり、最も効率的で最も低経費であるような単一のデザインが存在しないことを理解しつつ、両立しない多くの要素間で合理的な均衡のとれるようなデザインを考案することにある。

使用される広範な条件を考慮することなしに、隔離された対象や過程をデザインすることはほとんど実質的な意味を持たない。技術によって生み出されたものの大部分は、運用され、点検・保守され、時には補修され、最終的に置き換えられねばならないものである。これらの相互に関係する活動はすべてそれぞれの経費を抱えるため、経費もまた考慮しなければならない。より複雑な技術に関してますます重要性を増している似通った問題は、

技術の運用、点検・保守、補修を行う人材を訓練する必要があるということである。特に、技術が急速に変化する時には、訓練が最も経費のかかるものとなる。したがって、人材の需要を抑える必要性がデザインに課される新たな制約になろう。

デザインは、ほとんど常に試験を要するものであり、特にデザインが非通常的なもので、かつ複雑な場合、最終製品または過程が高価若しくは危険な場合、あるいは失敗すれば非常に経費が高くなる場合にはなおさらである。デザインの性能試験は完全な製品を使って行うことができるが、そうすることが非常に困難であるか、または経費高になる場合もある。したがって、試験は小規模な物理的モデル、コンピュータ・シミュレーション、類似システム（例えば、ヒトに代わる実験動物、核被害に代わる地震被害）の分析によって代用するか、または別個の要素のみに関する試験を行うことがしばしばである。

すべての技術は制御を伴う

最も単純なものから最も複雑なものに至るまで、すべてのシステムはそれを適正に運用するための制御を必要とする。制御の本質は、実際の現象と期待する現象との情報を比較し、適正な調整を行うことにある。制御は、（センサーまたは他の情報源による）フィードバックと指示内容（そして、おそらく他のデータ入力）との比較に加え、変更を行うための手段を必要とするのが通常である。例えば、調理用オーブンは、温度センサーからの情報を制御設定値と比較し、温度を一定の狭い範囲内に維持するために加熱装置をオン・オフする非常に単純なシステムである。自動車はさらに複雑なシステムで、エンジン温度、燃焼率、方向、速度などを制御し、急激な指示の変化または状況変化の際にそれらを変化させるためのサブシステムで構成されている。小型化された電子機器は、様々な技術システムにおける論理的制御を可能にしている。現在使用されている最も単純な家庭用機器を除くほとんどすべての機器は、その性能を制御するためのマイクロプロセッサを搭載している。

制御がその複雑さを増すにつれ、制御間の調整作業も必要となる。それはすなわち、追加の制御段階を新たに設けることを意味する。高速での通信や情報処理の改善は、非常に精巧な制御システムを可能にする。しかし、あらゆる技術的なシステムには、人、機械、電子機器がその要素として含まれている。最も自動化されたシステムでさえも、組み込まれた制御部品のプログラミング、モニタリング、機能不全時における肩代り、システムを改変する目的での変更などのために、いずれかの段階における人的制御を必要とする。最終的な制御は、制御過程の目的と性質、及び過程の運用環境を一定程度理解する人の手によるものである。

技術には常に副次的な影響がある

意図された便益に加え、あらゆるデザインにはその生産と利用の過程で意図しない副次的な影響があり、その中には予期しない便益もある。例えば、材料を型どおりに研削する

よりも、鑄造する場合の方が労働条件の安全性が高まり、また人工衛星用にデザインされた材料が消費財に有効であるような場合もある。他方、生産に関係する物質や過程が、生産労働者、または一般の人々に損害を及ぼす場合がある。例えば、コンピュータの前に座っていることは、利用者の目を疲れさせるとともに、他の労働者から隔離してしまうことにもつながる。また、新しい技術に関係する人員を雇用するために、それまでの旧技術に関わる人員を削減するなど、職業従事者の生活を変えてしまうなどの影響を与える場合もある。

副次的な影響を伴う傾向にあるのは、原子炉や農業などの大規模な技術だけではなく、小規模で日常的な技術も含まれる。通常、技術の影響は個々には小さなものかもしれないが、総合すれば大きなものとなる。例えば、冷蔵庫は食物や食品流通システムに対して予想通りの好ましい影響をもたらした。しかし、あまりに多くの冷蔵庫が存在するため、冷却システムに用いられるガスのわずかな漏出も地球の大気に重大な悪影響を与える可能性がある。

こうした副次的な影響のいくつかは、予測するための関心や方策の欠如のために予期せぬものとなる。しかし、技術システムや新たな用途を見出そうとする人々の創意工夫が極めて複雑であるために、多くは原理的にも予測できるものではない。一部の予期せぬ副次的な影響は、結果的に一部集団内の多くの人々にとって倫理的、美的、または、経済的に受容できないものとなり、地域社会における共同体間の軋轢に発展する可能性もある。そうした副次的な影響を極力抑えるために、計画する者は体系的な危険度分析に依存するようになっている。例えば、多くの地域社会では、病院、工場、幹線道路、ゴミ処理場、ショッピングモール、またはその他の構造物の新設に先立って、環境影響調査を行うことが法律上義務付けられている。

しかし、危険度分析は複雑なものになる可能性がある。一連の行為に伴う危険度は決してゼロにできないため、受容可能性は代替可能な一連の行為による危険度、または、他のよく知られた危険度との比較によって決定しなければならない。危険度に対する人々の心理的な反応は、必ずしも便益と経費に関する単純な数学的モデルに合致するとは限らない。人は、自ら支配できない場合（たばこの煙など）や、好ましくない事象が一時的に大きな結果を伴って発生する場合（航空機事故 1 回あたりの多数の死者に対する自動車事故 1 回あたりの少数の死者）には、危険度をより高いものとして知覚する傾向がある。危険度に関する個人的な理解は、危険度の記述方法によって大きく影響される。例えば、死ぬ確率と生き残る確率、恐れられる危険度と容易に受け容れられる危険度、総経費と 1 日 1 人あたりの経費、実際に影響を受ける人々の数と影響を受ける人々の比率、といった対比によって、危険度の知覚上の重大性が異なってくる。

すべての技術システムには失敗する可能性がある

トランジスタ・ラジオから航空機に至るまでの現代の技術システムの大部分は、非常に

高い信頼性を持つようにデザインされ、また生産されている。失敗は驚きを呼ぶほど稀なことである。しかし、システムの規模と複雑さが増すにつれ、それが誤った方向に向かう可能性も高まり、失敗による影響もまたさらに広範なものとなる。システムや装置は、様々な理由から失敗、故障することがある。それは、何らかの部品が故障したり、部品間の整合性がうまくいっていなかったり、システムのデザインがその使用される全条件について妥当性を持っていないなどである。失敗に対する予防策の一つは、オーバーデザイン、すなわち、例えば必要と予想される以上に頑丈に、または大きく製造することである。もう一つの予防策は、冗長性（重複機能性）である。すなわち、主要なシステムが故障した際に引継ぎができるような一つ以上のバックアップシステムを組み入れることである。

システムの失敗が非常に経費のかかる結果を招来する場合、そのシステムは最も起こりそうな失敗によって発生する損害を最も少なくなるようにデザインされることがよくある。そうした「安全装置型」のデザインの例としては、ヒューズが故障すると爆発しない爆弾、割れた時に鋭角の破片ではなく鈍角の破片になるような自動車の窓ガラス、疑わしきは無罪ではなく無罪になるような法制度などである。失敗の確率を低減させるこの他の手段には、より多くのデータ収集、より多くの変数の考慮、より現実的な実用モデル、より長期にわたるコンピュータ・シミュレーションの実施、より厳格な品質管理の導入、問題発生時にそれを感知し是正する制御装置の設置などによるデザインの改良などがある。

失敗を予防または極力抑えるための手段は、すべて経費の増加につながりうるものである。しかし、どのような予防措置が実施され、資金が投入されようと、技術的な失敗の危険度をゼロにすることはできない。したがって危険度分析には、予測可能なあらゆる望ましくない結果の発生の確率を推定し、実際に発生した場合に生じうる損害の程度を推定する作業が含まれる。次には、それぞれの危険度の確率と損害の程度を組み合わせることで、予想される重要性が推定できる。そうすることで、様々なデザインから生じうる可能性のある損害の組合せという観点から、それぞれの相対的な危険度を比較することができるようになる。

技術と社会

技術システムと社会システムは相互に強く影響し合っている

技術革新にとって個々の発想は必要不可欠である。にもかかわらず、どのような技術が採用され、注目され、投資され、利用されるかについては、社会的、経済的な影響が強く及ぶことになる。こうした事柄の決定は、政府の政策問題として直接的に行われる場合もあり、また一定の時期における社会状況や価値観によって間接的に行われる場合もある。アメリカにおいて、どういった技術的選択を優先するかは、消費者の受容性、特許法、リスクキャピタル（一般的に企業が使用する資本の中で、経営危険を負担するものをいう）の利用可能性、連邦政府の予算審議過程、地方や連邦の規制、報道機関の関心、経済的競争、優遇税制、科学的発見など、多くの要因によって影響される。このような優遇措置と

規制との均衡は様々な技術システムに多様な影響をもたらすものであり、一部を促進し一部を衰退させることになる。

技術は、これまでの歴史の進路と人間社会の特性に強く影響し、現在もその影響は続いている。例えば、農業技術における偉大な改革は、おそらく政治的な革命よりも人々の生活により大きな影響を与えたことであろうし、衛生と予防医薬の変革は人口爆発（そして、その抑制）に寄与している。その一方で弓矢、火薬、核爆弾は戦争の方法を変え、マイクロプロセッサは、人々の記述の仕方、計算、貯金、ビジネスの手法、研究、通信の方法を大きく変えている。技術はまた、社会のさらなる都市化や劇的に増大する世界的なコミュニティ間の経済的な相互依存のような大規模な変化の大きな要因となっている。

歴史的に見れば、一部の社会理論家は、技術的な変革（工業化や大量生産など）が社会的変革を引き起こすと考え、また他の理論家は社会変革（政治的または宗教的な変革）が技術的な変革につながると考えた。しかし、技術と社会システムとは、複雑に絡みあった関係にあるために、多くの影響が双方向に働いていることは明らかである。

社会システムは技術の開放性に一定の制約を課す

多くの場合、工学の職業的な価値は、開かれた知識の分配に見られるような利点を含め、科学に非常に似通っている。しかし、技術の経済的価値を理由として、しばしば技術革新に関係する科学と工学の開放性には制約が課されることになる。新しい技術の開発とその市場化には、時間と資金の大規模な投入と商業上の非常に大きな危険度が関係してくることがしばしばである。競争相手が同様の努力を払うことなく新しい技術を入手できるようになれば、そうした努力が脅かされることになり、したがって企業はしばしば技術的な知識の分配に消極的になる。しかし、どのような科学的または技術的知識であれ、それほど長い間極秘扱いにできるものではない。機密性は、他に先んじようとする時間的な利点しか持たず、知識を絶対的に支配するようなものではない。特許法は、個人や企業に対してその開発した新しい技術の使用に関する支配力を与えることで開放性を確保しているが、技術競争を促すために、そうした支配は一定の限られた期間においてのみ可能とされている。

商業的な利点だけが機密性と支配に対する動機であるわけではない。技術的発展の多くは政府機関などを背景として起こるものであり、そうした環境では商業的関心は少ないが、国家的な安全保障面での懸念が機密保持に向かわせることになる。軍事的用途の可能性を持つ技術は、間違いなく連邦政府による制限を受けることになるが、そのために工学に関する知識の分配、または、工学に関する知識を引き出すことの可能な製品の輸出さえもが制限される場合がある。科学と技術との関係は一部の分野において非常に密接であるために、機密性によって科学における情報の自由な流れの一部が制限されることは避けられない。科学者や技術者の中には、科学的な理想が妥協によって損なわれているように思われる部分について不快感を示したり、また機密性を遵守させるようなプロジェクトで働くこ

とを拒否する者もいる。またその反面で、こうした制限を妥当だと考える者もいるのである。

技術利用に関する決定は複雑である

大部分の技術的な革新は、自由市場の作用によって、すなわち個人や企業が個々の革新にどのように対応するかに基づいて、あるものは世に広まり、またあるものは消え去っていく。しかし、一部の技術の使用が一般市民の論議を呼び、正式な規制対象となる場合も時にはある。技術がそのような問題になる状況の一つは、等高線耕作、ワクチン製造、遺伝子工学、原子力発電所などの例に見られるように、個人、集団、企業が新しい技術の試験、または導入を提案するような場合である。もう一つの状況は、例えば、逆効果を持つことがわかり、あるいはその可能性があるような特定の技術、あるいはその技術により作られた製品の使用をやめさせたり、使用を減らすことが必要であることを（個人、組織、または、機関によって）知らされた時のように、既に広範に利用されている技術に疑念が生じる場合である。このような場合、解決策として、地域のゴミ処理場における毒性廃棄物の埋め立て処理を禁止するか、または、有鉛ガソリンやアスベスト断熱材の使用を禁止する提案がなされるであろう。

技術に関する問題は複雑で、多面的である場合が多い。関係する技術に関する事実が既に知られていて利用可能であったとしても（そうでない場合が多い）、通常の場合、そうした事実だけで問題を一方の側のみにより有利な形で完全に解決することはできない。技術に関して適正な個人的、集団的決定を行えるかどうかは、狂信者や懐疑論者がいつも進んで主張しようとはしない情報を持つことにかかっている。したがって、技術利用を抑制、または、促進する提案に関して重要な問題が提起され、かつ可能な限りの関連する情報が確実に示されるような過程を持ち合わせていることによって、社会の長期的な利益は最も適正に守られるのである。このような問題の考慮は、常に最善の決定が行われることを確実にするものではないが、重要な問題が提起されなければ、ほとんど常に不適切な決定がなされることになろう。提案される新しい技術に関する重要な問題には、以下のことが含まれるべきである。

- ・ 同じ目的を達成する上での代替手段にはどのようなものがあるか。代替手段の長所と短所は何か。それぞれのプラス、または、マイナスの副次的な影響の間ではどういった妥協が必要になるか。
- ・ 主要な受益者は誰か。利益をほとんど、または、全く受けられないのは誰か。提案されている新しい技術の結果、被害を受けるのは誰か。利益はどの程度の期間に及ぶのか。当該の技術に他の用途はあるのか。その受益者は誰か。
- ・ 提案されている新しい技術の構築や運用の経費はどの程度か。代替手段の経費と比較してどうか。受益者以外の人々は経費負担を強いられるか。誰が提案されている新しい技術の開発経費を引き受けるべきか。経費は時間経過とともにどのように変化する

か。社会的経費はどの程度か。

- ・ 提案されている新しい技術にはどのような危険度が伴うか。新しい技術を使わない場合に伴う危険度はどうか。誰に最も大きな危険が及ぶか。当該の技術は他の生物種や環境に対してどのような危険度をもたらすか。可能性のある最悪の場合として、それがどのような問題を引き起こしうるか。誰が責任を問われるのか。問題はどのようにして解消または抑制できるか。
- ・ 提案されている新しい技術の構築、導入設置、運用に必要な人材、材料、道具、知識、専門的知識・技能（ノウハウ）はどのようなもので、利用は可能であるのか。利用が可能でないとすれば、どこからどのように入手するのか。建設、または、製造、それに運用に必要なエネルギー資源は何か。当該の新しい技術を点検・保守、更新、補修するのに必要な財源はどの程度か。
- ・ 新しい技術の廃棄物を安全に処理するためにすべきことは何か。当該の技術が時代遅れ、または、老朽化した際に、どのように交換するのか。最後に、建設、または、製造の原材料とそれに職業を依存する人々の処遇はどうするのか。

個々の市民は、公的な段階でこうした質問を行ったり、また、それに答えるような立場に就くことはめったにないであろうが、そうした答えの妥当性と重要性についての知識によって、民間企業、利害関係者、公的機関が関係する問題に注目する度合いが増すことになる。さらには、個人であっても自らの技術の利用に関して同様の質問をする場合がある。例えば、家庭用機器の効率的な利用、汚染性物質の使用、食物や繊維製品の使用などである。個人的な決定の累積効果は、公的な決定に対する圧力と同様に、技術の大規模な利用に大きな影響を及ぼすのである。

こうした質問のすべてに対して容易に答えられるわけではない。大部分の技術的な決定は、不完全な情報に基づいて行わなければならない、政治的要因も技術的要因と同程度の影響を及ぼすこともある。しかし、科学者、数学者、技術者は、便益、副次的な影響、危険度を推定する上で、実際に可能な限りの将来を展望するという点において、果たすべき特別な役割を担っているのである。科学者、数学者、技術者は、また、妥当な検知装置やモニタリング技術をデザインし、関連データの収集と統計的分析を行うための手順を定めることによっても寄与する面が大きい。

第4章 物理的背景

人間は、宇宙がどのように組み立てられ、どのように働き、事物の広大無辺な構造のどこに組み込まれているのかを見出そうとする活動に対して、決して興味を失わなかった。宇宙の構造に関する我々の理解の進展度はもちろん完全なものではないが、大きな進歩を遂げてきている。宇宙が、到達できないほど巨大な距離と小さすぎて見ることのできない粒子から成り、しかも数え切れないほどのものであることを考えると、我々人間が事物の仕組みについて説明することのできる現在の水準にまで進歩してきたことは、まさに人間の知性のおかげと言えよう。すべての人々は、宇宙についての知識を深める喜びを分かち合うべきである。

本章は、宇宙の全体的な構造と、宇宙が従っているように見える物理的原理に関する基礎的知識のための提言で構成されており、地球と太陽系に重点が置かれている。本章では、二つの主な主題、すなわち、宇宙の構造、惑星としての地球を形作った主な過程、そして科学が物理的世界を一般的に記述するのに用いる概念に焦点を当て、便宜上、物質、エネルギー、運動、ならびに力などに関わる表題で編成する。

提言

宇宙

宇宙は大きく、しかも太古からのものであり、人間には信じがたいほどの規模である。地球は宇宙の歴史のたかだか三分の一程度しかそこに存在しておらず、宇宙空間のほんの小さな斑点ほどのものである。我々の太陽は中型の星で、平均的な円盤型銀河の腕の一つの先端部近くの軌道を回っている。この銀河の一部は、雲のない夜空に横たわる巨大な輝く星の帯（天の川）として目にすることができる。我々の銀河の中には数十億個もの星があり、宇宙全体にはそのような銀河が数十億個も入っている。それらのいくつかは、澄んだ夜にはぼやけた点として肉眼で見ることができる。

最も速いロケットを使ったとしても、我々の太陽から最も近い恒星まで行くのに数千年もかかってしまう。光でさえも、その最も近い恒星から我々のところまでやって来るのに4年もかかる。そして、最も遠く離れた銀河から地球に届く光は、宇宙の始まりから間もない頃に放出されたものである。それこそが、星を観察する理由である。我々は星や宇宙の過去を観察しているのである。

宇宙には、我々の太陽よりもはるかに大きい星や小さな星、はるかに熱い星や冷たい星、はるかに古い星や若い星など、驚くほど様々な種類の星がある。星の大部分は我々の太陽のように外見上孤立した単独の星ではなく、共通の重心の周りを回転する二つまたはそれ以上の星からなる系の一部である。同様に、大きさ、形状、運動方向が我々の銀河とは異なる他の銀河や銀河団も存在する。しかし、このような多様性にもかかわらず、これらはすべて我々の太陽系や銀河に見られるものと同じ元素、力、エネルギー形式で構成されているようであるし、同じ物理的原理に従ってふるまっていると思われる。

既に知られている宇宙の内容物のすべては、熱く高密度で混沌とした一つの塊が 100 億年以上前に爆発的に膨張して誕生したものであるとされている。恒星は、最も軽い元素（水素やヘリウム）の雲が凝集して誕生し、それらの重力収縮のエネルギーによって加熱され、極度に高熱・高密度の中心部分において、軽い元素が重い元素へと融合されることによる核エネルギーの放出が始まった。ついには、恒星の多くが爆発し、新しい雲が作られ、その雲の密度が高まり、また他の恒星、そしておそらくその周りを回る惑星も凝集して形作られていった。星の形成過程は続いていく。星が生まれ、いつかは消え去り、今まで数十億年の間そうしてきたように、物質とエネルギーがその形を変えていく。

我々の太陽系は、約 50 億年前に星が爆発した後に残った気体と破片の巨大な雲が凝集して誕生した。生物体を含む地球上のすべてのものは、この物質からできあがっている。地球や他の惑星が形成される時には、比較的重い元素がその中心部に集まった。太陽に近い惑星（水星、金星、地球、火星）では、最も軽い部類の元素は新しく形成された太陽からの放射によってほとんど吹き飛ばされたり、蒸発して飛ばされたりしてしまった。外側の惑星（木星、土星、天王星、海王星、冥王星）では、比較的軽い元素が、分厚い気体から成る大気や凍結した固体の層として、依然として惑星を取り囲んでいる。

太陽系には、大きさ、組成、表面の特徴の大きく異なる 9 個の惑星があり、円に近い軌道で太陽を周回している。惑星の軌道の周りには、実に多様な種類の衛星や（場合によっては）岩石と氷の破片でできた平坦な環、あるいは（地球の場合は）一つの月と複数の人工衛星が回っている。多くの惑星とその衛星の特徴は、地球と同様の土地変化の過程（地震、溶岩流、浸食など）が起こった証拠を示している。

非常に多くの比較的小さな岩石や氷片も太陽の周りを回っている。それらの物質のうち、地球が太陽の周囲の 1 年間の公転軌道上で遭遇するものの一部は、大気に突入する際の摩擦によって燃え尽きてしまう。一部のものは、非常に長く中心からはずれた軌道を持っているため、太陽の非常に近くにまで周期的に接近し、太陽の放射が物質の一部を蒸発させて我々が彗星として目にする長く輝く尾に向けて押し出していく。

太陽系とその他の宇宙に関して増大を続ける我々の知識は、部分的には直接的な観察によって得られるが、大部分は人間の感覚器官を延長し、補完するために開発された機器を使用して得られる。このような機器の中には、宇宙から地球に達する電磁波情報の幅広い帯域を感知できる電波望遠鏡や X 線望遠鏡、重力系または核反応に関するますます複雑さを増す計算が可能で、データのパターンを見出して理論的な意味を導出することができるコンピュータ、我々の太陽系の中の遠く離れた惑星から詳細な画像やその他のデータを送信してくる宇宙探査装置、初期宇宙の状況をシミュレーションして原子内部の動きを探ることのできる巨大な粒子加速器も含まれる。

我々が宇宙について知っていると思っていることの大部分は、どう見てもこれらの機器を使って空間と時間の非常に小さな断片を見つめることによる推論から得られるも

のである。我々が地球内部について知っていることは、地球表面またはその近くで行う測定や上空を周回する人工衛星による測定に基づいている。太陽や惑星の進化について我々が知っていることは、星の小規模な標本からの放射、惑星の視覚的特徴、物質の標本（岩石、隕石、月や火星の剥離物など）の研究や、それらがどのようにして現在のようになったのかについて推測することから得られるものである。

地球

我々は、確実に存在が知られている惑星系（もっとも、これと類似した惑星系は宇宙ではありふれている）の中でも、太陽から数えて3番目のほんの小さな惑星に住んでいる。物質相互間の引力によって共通の中心部に向かってお互いが引き寄せられる結果、地球の形状はすべての惑星や恒星と同じようにほぼ球状である。地球よりもはるかに巨大でほとんど気体から成っている外惑星とは異なり、地球は大部分が岩石でできており、その表面の四分之三は比較的薄い水の層で覆われ、惑星全体は薄い空気の層で覆われている。水の層は月と太陽の引力によって惑星の両側で盛り上がり、1日にほぼ2回海岸沿いに満潮を発生させる。同様の盛り上がりは空気層においても発生する。

我々の太陽系における様々な惑星や衛星の中で、地球のみが我々の知っている生命の維持が可能だと思われる。惑星の質量による重力は、大気を引きつけておくのに十分な程度である。この薄い気体の膜は、地球表面の変化する物理的条件と植物の進化の結果として形成されたもので、地球の生態系を構成する必須の部分となっている。大気中に含まれる自然の気体成分濃度を変化させたり新たな成分を付加したりすると、地球の生命システムに重大な影響を及ぼす可能性がある。

太陽から地球までの距離は、生命を維持する上で十分な分量でエネルギーが到達することを確実にするものであり、それは、水が蒸発してしまったり、生命にとって必要な分子が形成されないほど急速なエネルギー到達の割合になったりしない程度の距離である。水は地球上では液体、固体、気体として存在しており、これは惑星の間では希なことである（他の惑星は太陽に近いために熱すぎるか、離れているために冷たくなりすぎるかのどちらかである）。

地球の動きや、太陽と月に対する地球の位置は著しい影響力を持っている。地球が太陽を回る1年間の公転は、地軸が傾いているため、地球への直射日光の降り注ぎ方に地域差を生じさせる。このように地球表面の加熱が場所によって異なることで、季節の変化が生まれる。地軸を中心とする24時間の地球の自転は、この惑星の昼と夜の周期を生み出し、（地球上の観察者にとっては、）あたかも太陽、惑星、恒星、月が地球の周囲を回っているかのように見える。地球の運動と地球に対する月の公転軌道が作用し合い、約28日間で月の位相が変化する（月表面の日光に照らされた側の地球上から見える角度が変化することによる）。

地球は多様な気候パターンを持ち、それらは温度、降水量、湿度、風、大気圧、そし

てその他の大気現象の異なった条件を備えている。これらのパターンは多くの要因の相互作用の結果である。基本的なエネルギー源は、太陽放射による陸地、海洋、大気加熱である。大気が陸地や海洋と接する境界面における熱エネルギーの移動により、大気と海洋の双方に様々な温度の層が生まれる。これらの層は、上昇、下降、あるいは混合し、温暖領域と寒冷領域との間で熱エネルギーを運ぶ風や海流を発生させる。地球の自転は風の流れや海流を曲げ、さらに陸地の形状によってそれらの向きが変わる。

大気における水の出入りを伴う循環は、気候パターンの決定に重要な役割を果たしている。つまり、地表から水が蒸発し、上昇して冷やされ、凝結して雲となり、それから雪や雨となって再び地表に降り注ぎ、川、湖、そして水のしみ込む岩石の層に集められる。地球表面には、分厚い氷で覆われた地域もあり（南極大陸など）、大気や海洋と相互に作用し、世界的な気候の変化に影響を与えている。

地球の気候は劇的に変化しており、その変化は、数世紀にわたっての氷河の進行と後退、あるいは短期的な一連の大規模な火山噴火といった地質的な変動が最も大きな要因となって今後も続くものと予想されている。しかし、一部の大気構成物質や海洋の温度の比較的小さな変化でさえも、それが十分に長い期間維持されれば、気候に広範な影響を及ぼすかもしれない。

地球には、人間の生活にとって非常に重要な多くの資源がある。ある資源は容易に再生でき、ある資源は再生に多額の費用を要し、別のある資源はまったく再生不可能である。地球は非常に多様な鉱物で構成され、その特性は構成元素だけでなく形成過程によっても異なる。鉱物資源の埋蔵量は稀少なものからほとんど無尽蔵なものまで様々である。しかし、環境から鉱物資源を抽出する上での困難さは、その埋蔵量と同様に重要な問題である。鉄、アルミニウム、マグネシウム、銅などの様々な鉱物は、必要不可欠な産業資源である。最も良質な資源の多くは枯渇しつつあり、それによってそれらの鉱物を手に入れることはますます困難で費用のかかることになってきている。

淡水は、日常生活と産業の工程に必要な不可欠な資源である。私たちは、水を河川、湖沼、そして地表の下を移動する水から得る。多くの人々にとって淡水の主要な供給源となっている地下水は、現在利用されている量にまで蓄積されるのに長い時間を要している。それが、一部の場所では非常に急速に枯渇しつつある。しかも、多くの淡水資源は汚染のために利用できない。

風、潮汐、太陽放射は継続的に利用可能で、エネルギー源の供給に活用できる。海洋、大気、表土、海洋生物、そして樹木も再生可能な資源である。しかしながら、汚染された大気や水の浄化、破壊された森林や漁場の回復、または、管理の行き届いていない農業地域の浸食された土壌の回復・維持には莫大な費用がかかる。海洋や大気は非常に巨大で、様々な物質を自然に吸収して循環させる偉大な能力を持っているがそれには限度がある。人間の活動にとって不都合な影響を及ぼしかねないほどの大きな生態系の変化を引き起こすことなく変化に対して抵抗する限られた能力を、海洋や大気は持っている

に過ぎないのである。

地球を形作っている力

地球の内部は熱く、その上に存在する様々な層の重さによって高い圧力がかかっており、岩石から成る地殻よりも高密度である。地球内部の力は、地球の表面に継続的な変化を引き起こしている。大陸や海洋底を含む固体の地殻は、ほとんど溶けた層の上に乗ったいくつかの断片から構成されている。いくつかは別れた地殻のプレートは、やわらかい層の上で移動し（年間 1 インチまたはそれ以上）、ある場所では衝突し、他の場所では離れていく。地殻プレートが衝突する場所では、それらは側面から削り取られる場合があるし、陸地が圧迫して折り曲げられて最終的に山脈（ロッキー山脈やヒマラヤなど）が形作られることもある。あるいは、片方のプレートが他方のプレートの下に滑り込み、地球の深い部分に沈み込む場合もある。衝突するプレート同士の境界面に沿う場所では、地震が生じて地表に亀裂が生じ、火山の噴火で地下から溶けた岩石が噴き出し、山脈の形成も起こる。

プレートが大陸の下で分かれる場合、陸地が沈んで谷を形成し、それが拡がり続ける。海洋底の下にあるプレートの薄い領域で分離が起こる場合は、溶解した岩石が噴出して拡大を続ける海底が生じる。このような海洋の中央付近の分離境界に沿った火山活動によって、陸地表面にそびえるものよりはるかに高い海底山脈が形成されることもあり、時には海面から突き出して海洋諸島を形作る（ハワイなど）。鉱物は、地表面、海洋、そして地殻の下の熱く高圧の層で、生成・分解・再生成される。

波、風、水、氷が地表面を削り、特徴的な地勢を形作っていく。河川や氷河は土壌を運び去って岩を砕き、ついには物質を堆積させ、あるいは水に溶かして海まで運んでいく。このような作用の一部は急速に起こり、他の一部は非常にゆっくりと起こる。たとえば、現在の地球表面の特徴の多くは、100 万年以上続く期間における北半球の大部分の地域での氷河の動きに端を発するものである。対照的に、波が海岸を浸食し、風が表土を運び去って他の場所に下ろせば、海岸線はほとんど一夜にして変化してしまうかもしれない。

炭素、酸素、窒素、硫黄などの元素は陸地、海洋、大気を通してゆっくりと循環し、その位置や化合物が変化していく。砂や死んだ生物の殻から成る堆積物がしだいに埋まり、大きな圧力がかかることで最終的に再び固体の岩石に変化していく。再形成されたこれらの岩石層が、再び持ち上げられて陸地の表面となり山脈を形成することすらある。何千何万という堆積岩の層は、地球の長い歴史の証拠となるものであるし、連続する岩石層に化石が見出される生物の形態の変化の長い歴史の証拠となるものでもある。

動植物は、様々な方法で地形を変化させる。土壌の成分と組成、そして必然的にその肥沃さと浸食に対する抵抗力は、植物の根や岩屑、細菌、菌類、ワーム類、げっ歯動物、その他の動物が土壌を崩し有機物をそれに添加することなどによって大きく左右され

る。生物の存在はまた、地球の大気の変化も引き起こす。植物は大気から二酸化炭素を取り除き、糖の合成に炭素を使用し、そして酸素を放出する。この過程が、我々の大気中に、現在、酸素が含まれている原因である。

地形、気候、そして地球表面の資源は、どこでどのように人々が生活し、人類の歴史がいかに展開されたかに影響を与える。それと同時に、人間の活動は地球の陸地の表面、海洋、そして大気を変化させてきた。たとえば、地球表面を覆う森林面積の減少が大気中の二酸化炭素を劇的に増加させ、そのことが地球大気と地表面の平均温度の上昇につながった。人間活動による煙やその他の物質が大気中の物質と化学的な相互作用を起こし、スモッグや酸性雨、大気を通過する有害な紫外線の増加といった望ましくない影響を及ぼしている。集約的な農業は植生地域の土地や表土をはぎ取り、世界の一部の地域では事実上の砂漠を生み出している。

物質の構造

物理的な世界に属する物は、驚くほど様々な種類の物質で構成されていると思われる。物質は、その形、密度、柔軟性、肌理、強靱さ、そして色が大きく異なっているほか、光を放出、吸収、屈折、反射する性質や様々な温度における形態、物質相互間における反応、ならびにその他数多くの点で大きく異なっている。しかしながら、それらの外観にもかかわらず、すべての物は比較的少数の基本的な物質が様々な結合して形作られたものである。実のところ、約 100 種類のそういった物質（化学元素）の存在が現在知られているが、そのうち宇宙に豊富に存在するものはごくわずかしかない。（燃焼、消化、腐食、そして調理などによって）複数の物質が相互作用して新たな物質を形成する場合、それらを構成する元素は以前とは異なる結合をする。そのような再結合においては、新たな化合物の性質が以前のものとは大きく異なることがある。

物質に関する現代の理論における基本的な前提は、元素は数種類の原子（小さすぎて顕微鏡では見られないような微粒子）から成り、それが様々な配置で組み合わさって物質が構成されているということである。約 100 種類の元素それぞれには、1 種類または複数の種類（多くの種類ではない）のこのような原子が含まれている。それぞれの原子は、中心に正の電荷を持つ核（原子の体積においてはごくわずかな一部しか占めないが、質量では大部分を占める）があって、その周囲をはるかに軽い負の電荷を持つ電子の雲にとり囲まれている。一つの原子に含まれる電子の数は 1 個～約 100 個までの幅があり、核内にあって正電荷を持つ粒子すなわち陽子の数と一致しており、原子が他の原子とどのように結びついて分子を形成するかを決定している。原子核内にある電氣的に中性の粒子（中性子）は、質量はあるが電子の数に影響を与えず、したがって原子と他の原子との結びつき（化学的ふるまい）にはほとんど影響を与えない。たとえば、純粋な炭素の塊は、質量に多少の違いはあるが化学的性質のほとんど等しい 2 種類の炭素原子すなわち同位体で構成されている。

どの物質も、温度と圧力に依存して、様々に異なった状態で存在することができる。水が氷、水、水蒸気として存在可能であるように、少数の例外を除いてほとんどの物質が固体、液体、気体の形態をとることができる。物体が十分に冷やされると、原子または分子の位置は固体としてのほぼ規則的な配置に固定される。温度の上昇は、原子の運動エネルギーの平均値が増大することを意味する。したがって、温度が上がると、原子や分子はさらに激しく運動し、通常は互いの間の距離がわずかながら広がる。すなわち、物質が膨張する。より高温になると、原子や分子はまたさらに激しく運動するようになり、緩く結合したままの状態でありながらお互いの間を動き回るようになる。これが液体である。さらに温度が上がると、原子や分子の激しい運動が相互の引力を上回って自由に動き回れるようになり、たまに接近した時にだけ相互作用するようになる（通常は互いに衝突し跳ね返る）。これが気体である。液体または気体の状態で温度が上昇すると、分子がより頻繁に衝突し、より急速に混ざり合うようになるため、大半の化学的、物理的反応の速度も増大する。

温度がさらに高くなると、最終的に衝突のエネルギーによってすべての分子が原子に分解され、電子が原子から叩き出される。極度の高温では、衝突中に原子核が非常に接近するため、内部の強力な核力に影響され、核反応が起こることがある。

原子の最外殻電子の配列は、どのように原子が他の原子と結合して物質を形成するかを決定する。電子が一つの原子から他の原子へと移動するか、異なる原子間で電子がほぼ共有される時に、結合が原子間に起こる。どのような種類の結合が起こるかによって、原子は、無秩序の混合体の中か、一様な原子数と原子配置を持つ特徴的な分子の中か、または、対称的に繰り返される結晶配列の中で結びつくことになる。分子配置には、同一原子の対といった単純なもの（酸素分子など）や、数千個もの原子が複雑に折りたたまれ架橋結合した鎖のようなもの（蛋白質や DNA の分子など）がある。このような複雑な分子の正確な形は、分子が他の分子とどのように相互作用するのかに関する決定的な要因である。結晶配列には完全に規則正しいものもあるが、不規則な組成や構造が広がっているものもある。組成や構造のわずかな違いが、物質の性質を大きく変えてしまうこともある。

原子における電子の配置は、原子間でどのような反応が起こり、反応を起こすためにどれだけのエネルギーが必要となり、反応中にどれだけのエネルギーが放出されるかを決定する。原子の集合体の中で反応が起こる速度は、その即時的な環境（温度、圧力、反応物質の濃度）に大きく依存する。反応速度は、極めて低濃度の原子や分子によって大きく影響されることがある。たとえば、一部の分子は、反応速度を大幅に増減する一方で自らは変化しないような複雑な反応に関与する。これらの触媒分子は、反応分子を相互に結びつき合うのに適した位置に置くか、あるいは反応が起こるのにちょうど良い量のエネルギーを転移できる励起状態を生み出すかのいずれかの作用をする。

よく知られている物質を構成している各元素は、ほんの数種類の天然の同位体からな

っている。あらゆる元素のそれ以外の存在可能な同位体のほとんどは不安定であり、偶然に形成されたとしても、遅かれ早かれ崩壊して他の元素の同位体になる（それもまた不安定である可能性がある）。崩壊は、核からの粒子の放出と核からの放射を伴っており、それが放射能である。地球の物質の中には、ほんのわずかではあるが恒星における当初の重い元素の形成から現在まで残っている放射性同位体、より最近になって宇宙から飛んできた粒子の衝突によって形成された放射性同位体、あるいは他の同位体の原子核崩壊によって生み出された放射性同位体が含まれている。これらの放射性同位体がいっしょになって、一般の環境における低水準のバックグラウンド放射線を生み出している。

不安定な原子核がいつ崩壊するかを予測することは不可能である。我々に知ることができるのは、同種の原子核の集合体のうちのどれだけの部分が一定の期間で崩壊するかということだけである。不安定な同位体の半減期とは、対象となる同位体の任意の標本における原子核の半数が崩壊するのに要する時間を意味する。様々な同位体の半減期には、百万分の一秒から数百万年までの開きがある。どの同位体の半減期も一定であり、圧力や温度のような物理的条件には影響されない。したがって、既に崩壊した原子核の比率を測定することによって、時間の経過を推定することができる。たとえば、岩石標本に残存する不安定で半減期の長い同位体は、その岩石がどのくらい以前に形成されたものであるかを推定するのに利用できる。

エネルギーの変換

エネルギーは、放射、物体の運動、原子の励起状態、そして分子内部、分子間における歪みなどの多くの形態で現れる。このような形態はすべて重要な意味において等価であり、エネルギーの一つの形態は他の形態に変化可能である。星の崩壊と爆発、生物学的な成長と腐敗、機械やコンピュータの動作など、宇宙で起こっていることの大部分には、一つの形態のエネルギーから他の形態のエネルギーへの変換が伴っている。

エネルギーの形態は、次のような異なった方法で記述できる。音のエネルギーは主として分子の規則的な往復運動であり、熱エネルギーは分子の不規則な運動であり、重力のエネルギーは相互に引き付け合う質量が引き離された状態に存在し、機械的な歪みに貯蔵されたエネルギーは相互に引き付け合う電荷を引き離すことを意味している。様々なエネルギー形態は非常に異なっているように見えるが、それぞれの形態は、一つのエネルギー形態のどれだけの量が他のエネルギー形態に移転するかを追跡できるような方法で測定できる。一つの場所または形態のエネルギーが減少するときには、かならず他の場所または他の形態のエネルギーが同じ量だけ増加する。それゆえ、一つの系の境界を越えてエネルギーが漏れ出したり流入したりすることがなければ、どのような段階的または激しい変化が系内に起ころうとも、その系内の様々な形態のエネルギー量の総和は変化しない。

しかし、エネルギーは系から漏れ出す傾向が強い。特に、エネルギー変換の結果として、通常は熱の形態でエネルギーが生み出され、それが放射や伝導によって漏れ出すことになる（エンジン、電線、温水タンク、我々の肉体、ステレオシステムなど）。それゆえ、変換に利用可能なエネルギー量の総和はほとんどいつも減少する。たとえば、自動車の運行中に使用されるガソリン分子に蓄えられたエネルギーのほとんどすべては、摩擦や排気ガスによって、車体、道路、空気をわずかながら暖めることに費やされる。しかし、このように発散される熱エネルギーの漏出を防いだとしても、そういったエネルギーは均一に分布するため、もはや我々にとって役に立つものではない。その理由は、それが他の場所と比較して一か所に集められたときにだけエネルギーの変換が可能となるからである（落下する水、燃料や食物内の高エネルギーの分子、不安定な核、灼熱の太陽からの放射など）。エネルギーが周囲に均一に広がった熱エネルギーに変換されてしまうと、それ以上の変換は起こりにくい。

熱が常に比較的湿度の高い場所からより低い場所に拡散する傾向にある理由は、確率にある。物質内の熱エネルギーは、原子や分子の永続的な衝突による無秩序な運動から成り立っている。物質の一つの領域内にある非常に多くの原子や分子は、近接する領域内の原子や分子との間で繰り返し不規則な衝突を行い、その不規則な運動エネルギーが最終的に双方の領域内で均等に分布する場合の数は、最終的に片方の領域内の濃度の方が高まる場合の数よりもはるかに大きい。したがって、熱エネルギーの無秩序な均等分布は、熱エネルギーが1ヶ所に秩序立って集中することよりもはるかに起こりやすいのである。より一般的に言えば、原子や分子によるいかなる相互作用においても、統計的な見込みからすれば、最終的には当初の状態よりも必ず無秩序な状態になっていくということである。

しかしながら、接触する他の系の無秩序さをさらに増大させさえすれば、ある系の秩序を高めることは完全に可能である。たとえば、人体の細胞は、複雑な分子を合成したり体の組織を作りあげたりと、常に秩序を高めるために忙しく活動している。しかしこの活動は、我々が摂取する食物の分子構造を破壊したり、周囲の温度を上昇させたりするというふうに、人体組織以外の部分での無秩序を増大させるという代償のもとで行われている。要点は、無秩序の総量が常に増大するということである。

分子内の異なる原子配置には異なるエネルギー水準が対応している。ある原子配置の変更には追加のエネルギーが必要であり、別の原子配置の変更ではエネルギーが放出される。たとえば、木炭に火をつけるには熱エネルギーを供給しなければならない（気化によって木炭内の一部の炭素原子が他の炭素原子から離れる）。しかしながら、酸素分子が炭素原子と結合してよりエネルギーの低い配置の二酸化炭素分子になる際には、それよりもはるかに多くのエネルギーが熱と光の形で放出される。あるいは、クロロフィルの分子は太陽光線によってよりエネルギーの高い配置に励起されることが可能で、こんどはクロロフィルが二酸化炭素と水の分子を結合可能な程度までに励起させ、いくつ

かの段階を経て、よりエネルギーの高い配置である糖分子（それに加えて再生された酸素）に変化させることができる。後に、糖分子は酸素と作用し合って再び二酸化炭素分子と水分子を生み出し、太陽光線からの余分なエネルギーを他の分子に変換する。

分子の大きさ以下のところで、エネルギーだけでなく物質も離散的な単位で発生することが明らかになる。任意の原子または分子のエネルギーがある値から他のある値に変わる際には、明確に規定された飛躍が起こり、その間の値をとることはできない。このような量子論的効果は、我々が慣れ親しんでいるのとは非常に異なった現象を原子の規模で引き起こす。放射が一つの原子と遭遇するとき、その段階に規定されたまさにそのエネルギー量が原子に供給されたときにだけ、当該の原子はより高いエネルギー水準に励起される。その逆も起こる。すなわち、原子のエネルギー準位が一段階下がれば、離散的な量の（量子論的）エネルギーが放出される。物質が放出または吸収する光は、それゆえ、実験室内でも遠くの星の表面でも物質の同定に役立つ。

原子核内部における反応には、原子の外側の電子構造における反応（すなわち化学反応）よりもはるかに大規模なエネルギー変換が関わっている。ウランやプルトニウムなどの非常に重い原子核が中間的な重さの原子核に分裂する際、水素やヘリウムなどの非常に軽い原子核が結びついてより重い原子核が形成される際には、放射や高速度の粒子として大量のエネルギーが放出される。重い原子核の分裂は自然発生的に起こり、余分な中性子を放出してさらに多くの原子核内での分裂を誘発し、連鎖的な反応を引き起こす。しかしながら、原子核の融合は、恒星の内部に生み出される極度の高温状態や核分裂爆発の際に起こる衝突など、原子核同士が（原子核同士の電気的な斥力を上回るような）非常に高速度で衝突した場合にのみ起こる。

物体の運動

運動は、物質やエネルギーと同様に物理的世界の一部である。原子と分子、恒星・惑星・月、地球とその表面や地表上のあらゆる物体、すべての生物と生物のすべての部分、これらのすべてが運動を行う。宇宙の中で静止しているものは何もない。

すべての物体が運動しているため、物体の運動を記述するための固定した基準点はない。すべての運動は、どのような点または対象を我々が選択しても、それに対して相対的である。したがって、駐車しているバスは地表面に対しては運動していないが、地球が地軸を中心に自転しているため、バスも時速約 1,000 マイルで地球の中心の周囲を回転している。バスが道路を走っているとすれば、そのバスの中の通路を歩いている人はそのバスに対してなんらかの速さを持つが、道路に対してもまた別の速さを持ち、地球の中心に対してもさらに別の速さを持つ。宇宙には、実際に運動している物の基準となるべき点は存在しない。

運動における変化、すなわち速さの増減や向きの変化は力の影響によって起こる。いかなる物体も、つりあわない外力が加わらない限り一定の速さと向きを維持する。外力

が物体に加わると、その物体の運動は変化する。運動の向きに対する力の向きによって、その物体は速さを変化させたり（落下するりんご）、運動の向きを変化させたり（周回軌道を回る月）、あるいはその両方だったりする（飛んでいるボール）。外力が強いほど、物体の速さや向きの変化は急激であり、物体の質量が大きいほど、加えられた力に対する速さや向きの変化は穏やかである。そして、いつ何時ある物体 A がある物体 B に力を及ぼしたとしても、B はこれに等しい強さの力を A に及ぼし返す。たとえば、鉄の釘 A は、磁石 B が鉄の釘 A を引くのと同じ強さの力で磁石 B を引くが、それらの向きは反対である。最もよく見かける状況において、面と面との摩擦が運動の記述を複雑化することがあるが、やはり同様に基本的な原理が適用される。

一部の複雑な運動も、力という直接的な見地によってではなく、振動や波動のような運動パターンの要約的な記述によって最もうまく記述することができる。振動は、ほぼ同じ場所で往復運動を行う一つの系内の部分に関係するため、その運動は繰り返しの頻度（振動数）と一つの粒子が一巡する際にどれだけの距離を移動するか（振幅）によって要約することができる。もう一つの要約的な特徴は、エネルギーの減衰に伴って振動が自然に停止するまでの時間である。

振動は、振動源から遠ざかって拡がっていく伝播性の揺れを生み出す。そういった揺れの例には、音、光、地震などがあり、これらのふるまいはよく見かける水面波に似ていて、媒質の境界で向きを変え、物体の角のまわりで回折し、相互に干渉し合い、しかもその進路を予測することができる。そのため、音波や光波などという表現を用い、波のふるまいについての数学がこれらのすべての現象を記述するのに役立つ。波のふるまいはまた、揺れがどのくらいの速さで伝播するかという観点からも、また連続する揺れのピーク間の距離という観点(波長)からも記述できる。

観察される波の長さは、ある程度は観察者に対する波源の相対的な運動に依存する。波源が観察者に向かって移動している場合（またはその逆の場合）、波は事実上圧縮されて短くなっているように観察される。反対に、波源と観察者が互いに離れて行く場合、波は事実上引き伸ばされ、長くなっているように観察される。この双方の効果は自動車が観察者の前を通過する場合のそのクラクションの音の高さの変化に現れる。したがって、このような波長の明白な変化によって、相対的な運動に関する情報が得られる。このような波長の変化のとりわけ重要な例は、恒星や銀河から来る光の波長の変化である。大部分の恒星や銀河から放出される光は波長が長い方（すなわちスペクトルの赤側）に偏っているため、天文学者はすべての銀河が互いに離れて行く、すなわち我々は普遍的に膨張する宇宙の中にいると結論づけている。

波長は、波と物質との相互作用、すなわち波がどの程度伝播し、吸収され、反射され、回折されるのかに大きく影響している。たとえば、異なる波長の衝撃波が岩石層を通過し反射する様子は、地球の内部について知る重要な手がかりとなる。電磁波と物質との相互作用は、波長によって相互作用の起こり方や影響のあり方が大きく異なっている。

電波，マイクロ波，放射熱または赤外放射，可視光，紫外放射，X線，ガンマ線など，様々な波長帯域，一部重複する波長帯域には，それぞれ異なった名称が与えられている。

ある波長帯域の波を通過させる物質が，他の波長帯域の波を完全に吸収する場合がある。たとえば，二酸化炭素や水蒸気などの大気中の一部の気体は，太陽光線の大半に対して透明な性質を持っているが，暖められた地表面からの赤外線放射に対してはこれを通させず，大気中に跳ね返す性質がある。その結果，熱エネルギーは大気中に留まることになる。地球からの放射が太陽から地球に入ってくる放射と量的に等しくなるまで，地球の温度は上昇し続ける。大気中の気体の一つであるオゾン，太陽光線に含まれる紫外線（人の皮膚に火傷，日焼け，癌を発生させる光線）の一部を吸収する性質がある。

名称が与えられた電磁波の帯域の内側でも，異なった波長は異なった形で物質との相互作用を引き起こす。最も身近な例は，異なった波長の可視光線は我々の眼に対して異なった作用をするため，我々にはそれらが異なった色として感じられる。物が異なった色に見えるのは，青と赤の波長を吸収して緑と黄色だけを反射する植物の場合のように，それらがある波長の可視光線を他の波長よりも多く反射または散乱させるためである。大気が太陽光線（あらゆる波長の混合された光線）を散乱させる場合，短い波長の光線（我々には青く見える）は，長い波長の光線（赤）よりもはるかに多く大気中の分子で散乱する。そのため，大気は青く見え，大気を通して見る太陽は赤みがかっている。

自然における力

我々が通常意識している二つの力は重力と電磁的な力である。宇宙のすべての物体は他のすべての物体に対して重力を及ぼすが，その効果は，少なくとも一方の質量が非常に大きくなければ認識できない（恒星や惑星など）。重力は，降雨，河川の力，潮汐などの背景となっている力であり，それが惑星や恒星の物質をそれぞれの中心に引き付けて球を形作り，惑星の軌道を維持し，宇宙の塵を集めて星を形成させている。重力は，質量のまわりの空間に影響を与える重力場に伴うものと考えられている。物体の周囲の重力場の強さは，その質量に比例し，中心からの距離とともに衰える。たとえば，地球が一人の人に及ぼす引力は，その人が海岸にいるか地球から離れた宇宙空間にいるかによって異なる。

原子の内部や原子間で作用する電磁的な力は，それらの間で作用する重力よりも一兆の一兆倍ほど強い。原子の規模では，異種の電荷を持つ陽子と電子の間の電気力が原子や分子を保持するための力となっており，それゆえこれがあらゆる化学反応にかかわっている。より大きな規模では，これらの力が固体や液体の物質の結合を維持しており，また接触する物体間においても作用する（たとえば，タオルと人間の背中との摩擦やバットからボールへの衝撃など）。我々は，普段は身近な多くの力の電氣的な性質に気付いていない。それは，物質内には正負の電荷がほぼ等しい密度で存在していて，物質外

への効果の大部分を相殺してしまうからである。しかし、異種の電荷の釣合いがほんのわずかでも崩れるだけで、放電による火花や、衣服がくっついて電光を放つといった現象を引き起こす。

自由に移動できる電荷がどの程度存在するかによって、物質が電氣的な力にどの程度反応するかが大きく異なってくる。一方の極限として、ガラスやゴムなどの絶縁材は、通常はその中で電荷が移動することを許さない。逆の極限として、銅などの導体は電気の動きに対する抵抗が非常に小さく、電氣的な力が作用すると容易に電流が生じる（電線の大半はこのような両極端の材料の組み合わせであり、非常に優れた導体が非常に優れた絶縁材で覆われたものである）。実際、ある物質は非常に低い温度で超伝導体となり、電気抵抗がゼロになる。低と高の中間的な電気抵抗を持つ物質は半導体と呼ばれ、電荷が移動する際の容易さは組成や条件のほんのわずかな違いで大きく変わる。そのため、これらの物質はトランジスタやコンピュータ・チップで電気信号を制御するために使われている。水は、通常は電荷を持った可動性の溶存不純物の分子断片を含んでおり、それなりに良い電気伝導体である。

磁力は、電気力と非常に密接な関係にあって、この二つの力は一つの電磁的な力の異なった側面としてとらえることができる。磁力と電気力は、ともに場によって作用すると考えられており、電荷は周囲の空間に電場を持っていてそれが他の電荷に影響を及ぼし、磁石は周囲に磁場を持っていてそれが他の磁石に影響を及ぼす。その上、運動する電荷は磁場を発生させ、しかも、それらは磁場によって影響を受ける。この作用は多くの自然現象の基盤となる。たとえば、地球の核内で循環する電流は、地球に広範囲にわたる磁場を与えており、それを私たちが方位磁針の指針から検出している。

電気力と磁力の相互作用は、多くの技術的設計の基礎にもなっている。たとえば、電動機（モーター：電流が運動を引き起こす）、発電機（運動が電流を発生させる）、そしてテレビのブラウン管（運動する電荷のビームが周期的に変化する磁場によって曲げられて行ったり来たりする）などがそれである。より一般的に言えば、変化する電場は磁場を誘導し、逆もまた同様である。

この他の種類の力は、原子の規模以下の世界のみで作用する。たとえば、原子核内で粒子を結合させておく核力は電気力よりはるかに強い。そのことは核反応によって相対的に大量のエネルギーが放出されることから明らかである。

第5章 生命環境

人々は、生物について長い間好奇心を持ち続けてきた。生物にはどれだけ多くの種があるのか、それらはどのようなものか、どこに棲んでいるのか、互いにどのように関係しあっているのか、そしてどのような行動をするのか、というふうに。科学者はこうした疑問をはじめとして、地球上に生息する生物のその他多くの疑問点について答えようとしてきた。特に科学者は、人間が生物環境をよりよく理解できるようにするための概念、原理、理論の構築に努めてきた。

生物はあらゆる他の物質と同じ要素から構成されており、同種のエネルギー変換を行い、同様に基本的な物理的力を利用している。したがって、第4章「物理的背景」で述べた物理学の原理はすべて、恒星や降雨、テレビなどと同様に生命にも当てはまる。しかし、生物はまた、他の原理を用いた場合に最も良く理解できるような性質も持ち合わせている。

本章では、生物がどのように機能し、生物が相互に、そして環境との間でどのように作用し合っているかに関する基本的知識を、提言として示していく。本章では、以下の六つの主題について取り上げる。それは、地球上の生物の生物学的特徴に反映した生命の多様性、世代から世代へと受け継がれる遺伝的特徴の伝達、あらゆる生物の基本的な構成単位である細胞の構造と機能、生物と環境との間の相互依存、大きな規模の生命サイクルを通じた物質とエネルギーの流れ、生物進化がどのように生命の多様性と類似性を説明するか、という六つである。

提言

生命の多様性

地球上には、どの時期においても数百万種にのぼる様々な生物が存在してきた。一部のものは互いに非常に似通っており、他のものは非常に異なっている。生物学者は、構造と行動における類似点と相違点に基づいて、生物を階層型の集団に分類している。生物を分類する上で最も一般的な区別は、直接太陽光からエネルギーを得ている植物と、植物が最初に合成したエネルギーに富む食物を消費する動物の区別である。しかし、すべての生物が明確にどちらかに分類されるわけではない。たとえば、膜で仕切られた核を持たない単細胞生物（細菌）が存在し、これは別のグループに分類されている。

動植物は、様々な全体構造、内部配置を持ち、食物の生産と獲得、食物からのエネルギーと物質の抽出、新たな物質の合成、そして生殖を目的とする基本活動を行っており、きわめて多様な特徴を有している。科学者が生物を分類する際には、行動や一般的な外観よりも解剖学的な詳細事項を優先的に考慮する。たとえば、乳腺とか脳の構造といった特徴を理由として、クジラとコウモリは、クジラと魚類またはコウモリと鳥との関係よりも近縁の生物として分類される。様々な関連性の程度に応じて、犬は背骨を持つことで魚類と同じグループに分類され、また体毛を持つことで牛と同じグループに分類さ

れ、肉食であることでネコと同じグループに分類される。

有性生殖を行う生物に関しては、交配を行って生殖能力を持つ子孫を産むことのできるすべての生物が、単一の種として分類される。しかし、種の定義は明確ではなく、境界線付近では特定の生物をいずれに分類するかを決定するのが困難な場合もある。実際のところ、分類システムは自然の一部ではなく、実に多様な生物を記述し、生物間の関係を示すと同時に研究上の問いを形作るために生物学者が創り出した枠組なのである。

地球上の生命形態の多様性は、解剖学的、行動学的な類似性や相違に関する研究からのみならず、生物を構成する分子の類似性と相違に関する研究からも明らかになっている。生物の中に形成される最も複雑な分子は小さな分子の鎖である。様々な種類の小さな分子は、すべての生命形態においてほとんど同じものであるが、非常に複雑な分子を構成する要素の個々の並び方は種に特徴的である。たとえば、DNA の分子はわずか 4 種類の小さな分子が結びついた長い鎖であり、その正確な配列が遺伝情報を暗号化している。生物間の関係の近さや遠さは、それぞれの DNA の配列が似通っている程度によって推定することができる。分子構造における類似性から推定された生物間の関連性は、解剖学的類似性に基づく分類とよく一致している。

種の多様性の維持は、人類にとって重要である。我々は生存に必要なエネルギーと物質を獲得するために 2 種類の食物網に依存している。一方の食物網は微細な海洋植物や海藻に始まって、それらを食料とする動物やそれらの動物を捕食する動物を含む。他方は陸生植物に始まって、それらを食料とする動物等々を含む。各生物種の間における精巧な相互依存関係は、こうした食物網の安定に寄与している。すなわち、特定箇所におけるわずかな釣合いの崩れが生じた場合、最終的にシステムを回復させるような変化もたらされる。しかし、生物群またはその環境における大規模な釣合いの崩れは、結果的に食物網における不可逆的な変化を引き起こす可能性がある。多様性を維持するということは、変化した環境下でも生き残るのに適した特性が集団内にある確率を高めるものである。

遺伝

長い間良く知られた観察上の事実として、子はその親に非常に良く似ているが、部分的には異なるということがある。すなわち、子はその親とも、また同じ子ども同士とも多少異なっているということである。何世代も経る中ではこうした相違が蓄積していくことがあるため、生物は外観も行動も遠い祖先と大きく異なる可能性がある。たとえば、人間が家畜や植物を育て、それぞれの望ましい特性を選択してきた結果、現代においては、それぞれの祖先とは大きく異なるように思える多様な種類の犬や猫、牛、鶏、果物、穀物などが見られるようになった。これらについては、たとえば穀物では、新種を生み出すほど大きな変化もあった。事実、同一の生物種に由来する系統の間で、あまりに異なったために互いに交配できないような例も見られる。

発生のための指令は、何千個という遺伝子を通じて親から子に伝えられる。遺伝子は DNA 分子に含まれることが知られている。無性生殖による子孫（クローン）は、親の遺伝子すべてを受け継いでいる。動植物の有性生殖においては、雌の特別な細胞が雄の特別な細胞と融合する。これらの生殖細胞それぞれには、親の遺伝情報のうち予測できない半分の分量が含まれている。受精によって特定の雄の細胞が特定の雌の細胞と融合する際には、それぞれの親に由来する半分ずつを合わせて完全な 1 組の遺伝情報を持った細胞が形成される。受精した細胞が細胞分裂を起こして胚となり、最終的に種または成熟した個体に生育していく間に、対になった遺伝情報はそれぞれの新たな細胞内で複製されることになる。

有性生殖におけるこのような遺伝子の選別と組合せの結果、2 個体の親からは、非常に多様な遺伝情報の組合せを持つ子が誕生することになる。生殖細胞それぞれに振り分けられる遺伝子半分の可能な組合せは数百万通りもあり、また特定の雌または雄の生殖細胞の組合せもさらに数百万通りある。

しかし、遺伝子の新たな組合せが生物の特徴における唯一の変異要因ではない。遺伝子による指令は何千世代にもわたって変化なく受け継がれていくが、時に細胞内の DNA 情報の一部が変化する場合がある。任意におこるコピーの誤りや、化学物質または放射能などによって、DNA 断片の欠失、挿入、置換が自然に起こる。このように突然変異した遺伝子が生物の生殖細胞に存在すると、その複製は子孫に受け継がれ、それらすべての細胞の一部となり、おそらくは子孫に新たなまたは変化した特徴を与えることになろう。このように変化した特徴は、結果的に生物の生存や生殖の能力を高めたり、逆にそうした能力を低下させたり、あるいは特に目立った影響を示さなかったりするだろう。

細胞

自己複製能力を持つあらゆる生命は、単細胞の細菌から、数兆個もの細胞をもつ象に至るまで、すべて細胞から成り立っている。ニワトリの卵のように少数の巨大な細胞は肉眼でも見るができるが、大部分の細胞は顕微鏡でないと見えない。蛋白質の合成、栄養からのエネルギーの抽出、複製など、生物の基本的機能の多くが実行されるのは細胞水準においてである。こうした過程が進む仕組みは、すべての生物において似ている。くわえて、大半の細胞は一定の特別な機能を果たしている。

細胞の主な特徴は、細胞を覆い細胞への物質の出入りを制御する細胞膜、細胞内の溶媒と細胞に形を与え細胞内の他の器官を支える役割を果たしている蛋白質の骨格、DNA を含む核、そして物質輸送・エネルギー放出・蛋白質の組立て・老廃物の排出・情報のフィードバック・運動性などに関係する数多くの特化した細胞内小器官ならびに他の構造である。

DNA 分子の中に暗号化された遺伝情報は、蛋白質分子の組立てに関する指令を与え

る。この暗号はすべての生命においてほぼ同一である。したがって、たとえばヒト細胞の遺伝子を細菌に注入すれば、その細菌の化学的な仕組みが遺伝子の指令に従って、ヒトの細胞内で作り出されるのと同じ蛋白質を作り出すことになる。蛋白質分子は長く、通常は 20 種類のアミノ酸分子で構成された折りたたみの鎖状になっている。それぞれの蛋白質の機能は、アミノ酸の配列と、鎖の各部分が引きあう力によって形作られる鎖の形状によって決まる。ある遺伝子に起こる DNA の変異は、大した影響を与えない場合もあり、また細胞の活動に致命的な障害を与える場合もあり、細胞の正常な活動に重大な影響を及ぼす場合もある（たとえば、癌のように制御のきかない複製をもたらすかもしれない）。したがって、特定の化学物質や放射線に細胞をさらすことによって、変異率が高まり、癌の発生確率が高くなる可能性がある。

細胞の活動の大部分は、その合成する様々な種類の蛋白質分子によって行われる。ある分子は遺伝情報の複製を助け、細胞分裂の実行、細胞の形の変化、細胞構造の修復、そして広く分子間相互作用の触媒と調整を助ける。ホルモン、抗体、消化酵素、血液中の酸素や他の物質の運搬物質、あるいは髪の毛、爪、身体をつくる他の物質など、これら蛋白質分子の一部は細胞から分泌される。

細胞内のおびただしい種類の分子間における複雑な相互作用によって、成長や分裂といったはっきりとした活動周期が生み出される。細胞過程の制御は外側から行われる。すなわち、細胞の振舞いは、生物の他の部分や他の生物からの分子（たとえば、ホルモンや神経伝達物質など）によって影響を受ける可能性がある。これらの分子は、細胞膜にくっついていたり、膜を通過して、細胞を構成する分子の間の反応率に影響を与える。

あらゆる細胞に共通の基礎的な細胞機能に加え、多細胞生物の大半の細胞は特殊化している。それらは、他の細胞にはできない特殊な機能を担う。たとえば、腺細胞はホルモンを分泌し、筋肉細胞は収縮し、神経細胞は電気信号を伝達する。しかし、こうした細胞はすべて 1 個の受精した卵細胞に由来するもので、同じ DNA 情報を持っている。分裂により次々と細胞が形成される際には、その直接的な環境におけるわずかな相違によって、DNA 情報の異なる部分が活性化または不活性化されることで、これらの細胞はわずかに異なった発生をする。そこから分裂して作られる細胞はさらに変異の度を加え、最終的には分泌腺、筋肉、そして神経細胞のように多様な細胞に成熟していく。

生物の相互依存

すべての生物種は、直接的または間接的に生態系内の他の多くの種と結びついている。植物は、他の生物にとっての食料、避難所、営巣場所を提供している。逆に多くの植物はその生殖の助けと（たとえばハチは花の受粉を助ける）、特定の栄養素（動物の排泄物内のミネラル分など）を動物に依存している。すべての動物は、植物や他種（時には同一種）の動物を含む食物網の一部である。そこでは捕食者と被食者の関係が普通に見られ、捕食者は歯、くちばし、鋏爪、毒などの攻撃的な道具を持ち、被食者は身を隠す

ための擬態、逃げるための速さ、防御するための甲羅や棘、撃退するための不快物質などを身につけている。一部の生物種は、他の種に対して非常に密接な依存関係にある（たとえば、パンダやコアラは特定の樹種しか食べない）。また一部の種は相互依存関係を深め、いずれも他者なくして生存することができないようになっている（たとえば、イチジクのみで営巣し、かつイチジクを受粉させる唯一の昆虫でもあるハチ）。

生物相互間には、この他の関係も存在する。寄生虫はその宿主から栄養を得るが、そのために時に宿主に悪影響が及ぶ。腐食動物や分解者は、動物の死体や枯れた植物のみを食料とする。また一部の生物は、相互に便益を提供し合う関係にある。たとえば花から蜜を吸い取り、それに伴って花粉を花から花へと運ぶハチや、ヒトの腸の中で生き、同時にある種のビタミンを合成したり、腸内を他の雑菌から保護したりする細菌などがいる。

しかし、生物の相互作用は、受動的な環境の舞台において起こるわけではない。生態系は、陸上や水中の非生物環境、すなわち太陽放射、降雨、無機物の濃縮、温度、地質などに左右される。世界には多様な物理的条件が存在し、それによって多様な環境、淡水と海洋、森林、砂漠、草原、ツンドラ、山地などが生み出されている。こうした環境すべてにおいて、生物は重要な地球資源を利用し、それぞれが他の生物によって制限を受けながら固有の生存方法を探っているのである。生息可能な環境のすべての場所で、様々な生物が食料、空間、光、熱、水、空気、避難場所を求めて競争している。結びつきながら変動している生物と環境との相互作用が生態系全体を構成しており、そのいずれかの部分を適切に理解しようとすれば、その他の部分との相互作用に関する知識が必要となる。

生態系内における生物の相互依存性は、しばしば数百年以上にも数千年以上にも及ぶおよそ安定した状態をもたらす。一つの種が激増すれば、一つまたは複数の環境要素、たとえば食料の枯渇や営巣地の不足、捕食者による被食の増加、寄生物の侵入などによって抑制作用を受けることになる。洪水や火災などの自然災害が発生すると、被害を受けた生態系はいくつかの遷移段階を経て回復し、最終的に当初と類似した生態系が再び現れることになる。

多くの複雑なシステムと同じように、生態系もまたほぼ平衡状態を維持しながら循環的な変動を示す。しかし長い目で見れば、気候変動が起こったとき、あるいは進化や移動によって非常に異なった生物種が出現した場合に（あるいは人間が故意または不用意に持ち込んだことで）、生態系は不可避的な変化を遂げることになる。

物質とエネルギーの流れ

生物の活動がいかに複雑であるとしても、それらは他の自然システムと同一の物理学の原理、すなわち物質とエネルギーの保存と変換に関する法則に従っている。長い時間間隔で見れば、物質とエネルギーは生物の間を循環し、また同時に生物とその環境との

間を循環している。このように規模の大きな周期の中では、物質とエネルギーの形態や位置は絶えず変化するものの、両者の総量は一定に保たれている。

地球上のほとんどすべての生命は、究極的には太陽からのエネルギーを変換することで維持されている。植物は太陽エネルギーを捉え、それを利用して二酸化炭素と水を原料にエネルギーに富む複雑な分子（主として糖類）を合成する。このように合成された分子は次に、直接的または間接的に、植物自体や最終的にはあらゆる動物や分解生物（細菌や菌類など）にエネルギー源として利用される。これが食物網であり、植物を消費する生物は、植物の分子を分解してエネルギーと物質を取り出し、それらを使って自分自身に必要な物質を合成し、またそれら自身も他の生物に消費されていくのである。食物網のそれぞれの段階では、一部のエネルギーは新たに合成された物質に蓄えられ、一部は細胞内の化学的エネルギー放出過程によって生じた熱として環境中に放出されていく。同様のエネルギー周期は、海洋微生物による太陽エネルギーの捕捉からも始まる。食物網におけるそれぞれの連続する段階では、食料として捕獲する生物のもつエネルギー量のうちごくわずかししか利用できない。

生物に存在する分子を構成する元素は、絶えずリサイクルされている。こうした元素の中でも主なものは炭素、酸素、水素、窒素、イオウ、リン、カルシウム、ナトリウム、カリウム、鉄である。これらをはじめとする元素は、その大部分がエネルギーに富む分子に由来するもので、食物網を通じて引き渡され、最終的に分解者によって再び植物が利用可能な無機栄養素にまでリサイクルされる。局所的な余剰や不足はあるものの、地球全体の状況としては、新たな生命が生み出されるのと同程度の割合で生物が死に、分解されている。つまり、バイオマス全体はほぼ一定しており、古い生命から新しい生命へと物質は循環し、捕捉された太陽エネルギーから熱の放出に至るまでエネルギーは逆行せず流れていく。

陸生植物と海洋生物の増加が分解者のリサイクル能力を超えた数百万年前には、通常のエネ​​ルギーの流れを止める重大な事象が起こったと考えられている。その時には、エネルギーに富む有機物質の蓄積した地層が、上方の地層の圧力でしだいに巨大な石炭層と石油貯留層に変わっていった。これらの分子構造に蓄えられたエネルギーは現在まで残って燃焼によって利用することが可能となり、現代文明は地下から採掘されたそうした化石燃料の莫大なエネルギーに依存することとなったのである。化石燃料を燃焼することで、我々は結局蓄えられたエネルギーの大部分を熱として環境に放出している。我々はまた、数百万年をかけてゆっくりと大気から除去されていった大量の二酸化炭素も、比較的短期間のうちに再び大気中に戻している。

ある環境が維持できる生命の量は、その最も基本的な資源量、すなわちエネルギー、無機栄養分、水分の流入量によって制限される。生態系の生産性を維持するには、合成される新たな産物（樹木や穀物など）に必要な十分なエネルギーと、古い産物（枯葉、排泄物など）の完全なリサイクルのための十分なエネルギーとが必要となる。人間の技

術が介入する場合、リサイクルされない廃棄物として物質が蓄積される可能性がある。資源の流入量が不十分であれば、生態系は、それが保持する生きたバイオマスと死んでいるバイオマスに依存することになる。この過程は結果的に、加速度的な土壌の浸出、砂漠化、または鉱物資源の枯渇を招くことになる。

生物の進化

地球上の現在の生命形態は、約 30 億年前の最も単純な単細胞生物に遡る共通の祖先から進化してきたものである。現代における進化の考え方は、地球上の生物に関する以下の三つの主要な観察可能な事実について、科学的な説明を提供してくれる。すなわち、(1) 我々の周辺に存在するおびただしい数の異なる生命形態、(2) そうした多様性の中での解剖学的、分子化学的視点から見た体系的な類似性、(3) 10 億年以上にわたって形成されてきた連続する岩石層に見出される化石における変化の連続性である。

化石記録の始まる時代以降、多くの新しい生命形態が出現し、大半の古い形態は消滅していった。岩石層の年代から推定される、追跡可能な多くの解剖学的形態変化の順序は、世代間における相違の蓄積が最終的に細菌と象ほども異なった生物種に発展していったことを科学者に確信させるものとなっている。分子水準での証拠は、化石からの解剖学的証拠を裏付け、様々な生命系統が互いに分岐していったその順序についても、さらに詳細な情報を提供するものとなっている。

地球上における生命の歴史に関する詳細は、今なお地質学的、解剖学的、分子的証拠を総合して推定作業が行われているが、その歴史の主な特徴については一般的に同意が得られている。地球上の生命は 30 億年前に誕生した。それ以前は、単純な分子が複雑な有機分子を形成し、それがしだいに自己複製能力を持った細胞に変化していった。生命の誕生から 20 億年の間は、微生物のみが存在していた。その一部は、明らかに今日存在する細菌や藻類に似通っていた。約 10 億年前に核を持った細胞が現れたことにより、非常に複雑な多細胞生物の進化速度が大幅に上昇した。新種の進化速度はそれ以降一定ではないが、おそらくそれは、物理的環境についての異なる変化率を反映したものであろう。

進化論の中心的な概念は自然選択にあり、それは以下の 3 点に関する確立された観察結果から導かれるものである。(1) すべての生物種において、遺伝的特徴に何らかの変異がある。(2) こうした特徴のいくらかは、成熟し生殖できるまで生き残る上で、他者より有利な点を個体に与えている。(3) それら有利な個体はより多くの子孫を残す傾向にあり、その子孫もまた他者よりも生き残って生殖する可能性が高くなる。その結果、世代を重ねるうちに、利点を与える特徴を遺伝的に継承した個体の比率が増加するであろう。

選択可能な特徴には、ホルモンや消化酵素の分子構造などの生化学的特徴、骨の大きさや柔毛の長さなど、最終的に生物の発生において現れる解剖学的特徴も含まれる。選

択可能な特徴にはまた、視覚の鋭さや心臓の送出効率など解剖学的に決定される小さな特徴も含まれる。生化学的または解剖学的手段によって、選択可能な特徴はまた行動にも影響を与える。たとえば、一定の形状の蜘蛛の巣の張り方とか、交配相手に対する一定の特徴の好み、または子孫の世話をする性質などである。

遺伝可能な新たな特徴は、親の遺伝子の新たな組合せやその突然変異によってもたらされる。生殖細胞における DNA の突然変異を除き、生物の生涯において起こる事象の結果生じる特徴は、生物学的に次世代に受け継がれることはない。したがって、たとえばある構造または機能の使用もしくは不使用、または環境における変化によって生じた個体の変化は、自然選択によって広まることはない。

自然選択は、まさにその性質上、特定環境での生存に適した特徴を持つ生物につながるであろう。しかし、特に個体数が少ない場合には、生存または生殖上の利点を持たない遺伝的特徴が、偶然だけによって広まることもある。さらには、環境が変化した場合（この意味では、他の生物もまた環境の一部である）、特徴の有利・不利が変化する可能性もある。したがって、自然選択が必ずしも一定方向への長期的な進歩につながるとは限らない。すでに存在する特徴の上に進化は築かれるものであるため、多様性が多く存在すればするほど、さらに多くの多様性が生じる可能性が高まる。

数百万年もの間、新たな特徴に対して、そして変化する環境の中で自然選択が繰り返し継続的に作用したことで、多様な新しい種が次々と誕生してきた。進化は、低劣な形態がより優れた形態に常にとって代わられた結果、人類が最も進歩した種としてその頂点に出現したといった、はしごのようなものではない。むしろそれはやぶのようなものであって、多くの枝がはるか先に伸びてきて、その枝のいくつかが枯れてしまい、時間経過に伴う目立った変化もなくいくつかは生き残り、またいくつかは繰り返し多方向に枝を出し続け、時により複雑な生物を形成するといったものである。

進化に関する現代の考え方は、地球上における生命の歴史やあらゆる生物間の関係、物理的環境への生物の依存性を理解する上で一つの統合原理を提示するものである。進化が詳細な点でどのように作用しているのかは依然として不明確であるが、その概念は揺るぎないものであるため、大半の生物学的知識を一貫性のある全体像にまとめあげるための一つの枠組を提供している。

第6章 人間（ヒト）

我々ヒトは他の種と多くの点で似通っているが、その言語能力と思考能力において地球上の生物の中でも特異な存在となっている。大きく複雑な脳を発達させたことで、ヒトは他の生物種をはるかに超えた思考力、想像力、創作力、そして経験から学習する能力を持つに至った。我々はこの能力を使って技術、文学、芸術作品を大規模に作り出し、我々自身と世界に関する科学的な理解を深めてきた。

我々はまた、自分自身に対する好奇心の深さにおいても特異な存在である。我々は物理的にはどのようにできているのか。どのように形作られているのか。生物学的に他の生物や人類の祖先とどのように関係しているのか。我々は個体として他の人間とどこが異なりどこが似通っているのか。健康を維持するにはどうしたらよいか。科学的な営みの多くは、このような問いに焦点を当てている。

本章では、自分自身、種としてのヒトに関して、科学的リテラシーを身につけた人々が知っているべき事柄を提言する。そうした知識は、自分自身と社会の両方に関する意識を向上させる基礎となるものである。また本章は、人間の六つの主要な側面、すなわち人間としての特性、ライフサイクル、体の基本的機能、学習、身体の健康、精神の健康に焦点を当てる。身体的、精神的健康に関する提言が含まれているのは、これらが、人間に関する科学的な理解を、人類すべてに共通する主要な関心事である個人の幸福に関係付ける上で有効だからである。

提言

ヒトとしての特性

大部分の生物学的な側面において、人間は他の生物と似通っている。たとえば、他の動物と同じように細胞から構成され、化学的な組成もほとんど同じであり、器官系や物理的特徴も他の多くの生物種と似通っており、生殖方法も同様に、同じ遺伝情報システムを利用し、食物網の一部を構成している。

化石や分子的証拠は、ヒトが他の生物と同様に、他の生物から進化してきたという考えを支持している。証拠は今なお蓄積しており、科学者も年代や系統に関する論議を継続しているが、進化の大まかな道筋については一般に合意が得られている。ヒト、サル、類人猿を始めとするその他数種の哺乳類を含む分類項目である霊長類は、1億年に満たない以前に他の哺乳類から分かれて進化し始めた。約500万年前には数種のヒト型霊長類が出現し始め、枝分かれしていったが、ただ1種を除いてすべて絶滅した。その生き残った種が現代のヒトに続いているのである。

他の複雑な生物と同様に、人間もその大きさや形、皮膚の色、体型、体毛、顔の特徴、筋力、利き手などが個体ごとに異なっている。しかし、これらの相違はすべての人間に共通した内的な類似性に比較すれば些細なものであり、それは、世界のどの地域の間であっても、生殖や輸血、臓器移植という点で身体的に混じり合うことができるという

事実からも示されている。ヒトは実際に単一種なのである。さらに、人間集団間の文化的な相違は非常に大きなものに見え、彼らの複雑な言語、技術、芸術性は他の種と比較して際立っている。

他の一部の生物種は、それぞれの個体が主として様々な専門化した機能、たとえば防御、食物採集、または生殖活動等を分担することによって社会的な組織を形成しているが、これらは遺伝的に受け継いだものによって制限された比較的固定したパターンに従っている。それに対して、ヒトの社会的な行動ははるかに幅の広いもので、トランプ遊びから合唱、複数の言語の習得から法律の制定まで多岐に及んでいる。

人類の歴史において最も重要な出来事の一つは、約1万年前に起こった狩猟・採集から農耕への移行であり、これによって人口の急激な増加が可能となった。人口増加の初期においては、人類の社会的な発明の才によって村落や都市、新たな経済、政治制度、そして記録手段が生み出され、そして組織的な戦争が行われるようになった。最近になって、農業効率の改善と伝染病の抑制がさらに人口増加を加速し、現在では50億人を超えるまでに膨れ上がっている。

ヒトは生物的、社会的、文化的な生物であると同時に、技術的な存在でもある。他の生物種と比較した場合、速さ、俊敏さ、強さ、持久力、視力、聴力、または極端な環境条件に耐える力という点で我々は特別ではない。しかし、様々な技術によって物理的世界と相互作用する能力は改善されている。ある意味で、我々の発明が生物学的な不利を埋合せているのである。書かれた記録によって我々は大量の情報を共有し、編成することができる。乗物は他の動物よりも速い移動を可能にし（宇宙空間に至るまで）、多くの媒体中の移動を可能にし、住むことのできない遠い場所にも行くことができる。道具は非常に繊細な制御、並外れた強さ、そして速さを我々に与えてくれる。望遠鏡、カメラ、赤外線センサー、マイク、他の機器は、我々の視覚、聴覚、触覚を拡張し、それらの感覚をさらに鋭敏にしてくれる。人工器官や化学的、外科的な処置によって、身体に障害をもつ者も、その環境において効率的に活動できるようになっている。

ライフ・サイクル

それぞれが半分ずつ遺伝情報を持つ卵と精子の融合した単細胞から、ヒトは発生を遂げる。女性の卵巣では、通常の場合月経周期ごとに1個成熟した卵細胞が作られ、男性の睾丸では数多くの精細胞が作られる。卵と精子との受精は、通常精子が卵の近くに位置した後に起こる。しかし、受精は常に起こるわけではない。精子の配置が女性の月経周期の中で卵細胞が存在しない時期に起こったり、あるいは避妊措置や避妊施術によって受精を故意に阻止する場合や、配偶者の一方が受精可能な生殖細胞を作り出せない場合などがそうである。

妊娠から数時間後以内に、受精卵は二つの同一の細胞に分裂し、それぞれはまもなくさらに分裂を繰り返していき、小さな球体を形作るようになる。数日以内にこの球体は

子宮壁に着床し、そこで胎盤が形成され、それを通して母体の血液と成長しつつある胎児の血液との間で物質移動が可能となって、胚すなわち胎児に栄養分が送られるようになる。妊娠初期の3か月間には、一連の分裂した細胞が器官を形成し、その後の3か月間では、すべての器官と体の特徴ができあがる。そして最後の3か月間では、さらなる発達と成長が起こる。

発生途中の胚は、自分自身の遺伝的欠陥や、母体の健康不良または妊娠中の不適切な食事、アルコール、タバコ、その他の薬物の使用による影響から、危険に曝される場合がある。胎児の発達が不十分な時点で出産が行われると、未熟または不十分な医療によって、新生児が生き残れない場合がある。誕生後、新生児は誕生時における負傷または出産時もしくはその直後における感染症によって危険に曝されることもある。したがって、新生児の死亡率は、衛生状態、妊娠時の栄養、医療の違う出生地によって大きく異なる。生き残った新生児にとっても、妊娠時の悪条件によって肉体的または精神的能力が低下する場合がある。

正常な子どもであれば、連続的に一連の能力が順に発現することによって、精神的な発達が特徴付けられる。こうした能力には、出生後1か月前後に示される記憶力の向上や、1歳までに示される言語音、2歳までに示される文による会話、6歳までに示される概念やカテゴリーを関連付ける能力、そして大人の発言の一貫性や矛盾に気づく能力などが含まれる。このような複雑さの水準を高めていく方向での知的能力の発達は、脳の成熟と学習経験の双方の働きによって起こる。幼児が特に発達の微妙な段階で適切な種類の刺激を得られなければ、その後の生物学的または心理学的なある種の発達が困難になったり、起こらなかつたりする。

こうした他の生物種と比較して非常に長期にわたるヒトの発達期間は、ヒトの進化過程における脳の顕著な役割に関係している。大半の種は、その行動形態が非常に限定され、また生存のために概ね遺伝的プログラミングによって決定される予測可能な反応に従うが、哺乳類、特にヒトは、学習行動への依存度の方がはるかに大きい。幼児期が長いことで、知的生活のための有効な道具として脳が発達するための時間と機会が得られる。こうした発達は遊びや他の幼児や大人との接触を通してだけでなく、世界の他の地域や他の時代の人々の言葉や芸術に接することを通してでも促される。学習能力は生涯を通じて維持されるが、考え方の基礎を確立し、最善の学習方法について理解するにつれて、それは様々な意味で改善されていく。

発達段階は、異なる心理的要素と異なる経験の関数として、個人によってある程度異なった時期に現れる。一つの段階から次の段階への移行においては、生物学的な変化が劇的であったり、社会的能力や他者の期待と調和しなかつたりする場合に、特に問題となることがある。社会が異なると、発達段階とその間の移行に異なる意味や重要性が持たされる。たとえば、少年期は、生物学的にのみならず、法律的にも社会的にも定義され、その期間と意味は文化と歴史によって異なってくる。アメリカにおいては、思春期

の始まり、すなわち生殖準備のための身体の成熟が、身体的・精神的に親として、また大人としての機能を果たす上で一般的に妥当であると考えられている時期の数年前に起こる。

成人が親になるかどうか、そして（親になる場合）何人の子どもをもうけるかということは、生物学的要素に加え、非常に多様な文化的、個人的要素によって決定される。技術によって、これらのことを決めるための選択が非常に増えている。また妊娠を防止し、検知し、中止させるための化学的、機械的手段も存在する。ホルモン治療や人工授精といった手段によって、本来は起こりえないが望みどおりとなる妊娠を実現することもまた可能である。しかし、こうした技術を使って妊娠を防止または促進することには議論があり、社会道徳、倫理、宗教観、そして政治面においてさえも問題が起こっている。

老化については依然として誤った理解がなされているが、これはすべての人間にとって正常な過程である。老化の影響は人によって非常に異なる。一般に、筋肉や関節は柔軟でなくなり、骨や筋肉は小さくなり、エネルギー水準は低下し、感覚が鈍くなっていく。女性の場合、老化の過程における一つの重要な出来事は閉経である。45歳から55歳までの間に、性ホルモンの分泌状態が大きく変化し、その結果月経周期がなくなり、排卵も行われなくなる。

人間の老化の過程は、ホルモン・システムにおける変化だけではなく、病気や怪我、食事、細胞内に発生し蓄積する変異、重量を支える関節などの組織の摩耗、心理的要因、有害物質への曝露などとも関係している。血栓など有害物質のゆっくりとした蓄積や、喫煙による肺の損害、日光による皮膚の損傷といった事柄が、重大な疾病につながることもある。時には、人生の後半に現れる疾病が、記憶力や人格などの脳の機能に影響する。加えて、肉体的能力の衰えとそれまで与えられていた社会的役割の喪失によって、憂鬱や不安感に悩まされる場合もある。他方で、高齢者の多くは障害を長期間持つことなく、独立して活動的な生活を問題なく送っている。

ヒトを含め、それぞれの種には寿命の限界があるように思われる。ヒトの中には100歳以上生きる者もいるが、大半はそうではなく、幼児期に死亡する例も含めれば、ヒトの平均寿命は一部の地域の35歳から大半の工業国におけるような75歳程度まで幅がある。平均寿命が長いのは、大部分が幼児と児童の死亡率の低さによるものであるが、大部分の人々の衛生状態、食事、健康保持と高齢者の医療改善によるものでもある。平均寿命はまた、様々な社会経済的階層と性別によっても異なる。最も多い死亡原因は、年齢、民族、経済的階層によって異なっている。たとえばアメリカでは、若年層の男性では交通事故死が最も多く、また心臓疾患が原因となる死亡例は女性よりも男性のほうが多い。そして、伝染病や殺人による死亡例は富裕層よりも貧困層に多い。

基本的機能

ヒトの肉体は、細胞から構成される複雑なシステムであり、その大半は専門機能を持つ器官系に属している。器官系を理解するには、それらが果たす必要不可欠な機能、すなわち食物からのエネルギーの抽出、負傷からの保護、内部的な調整、そして生殖という観点から見るとよい。エネルギーに対する継続的な需要を賄うため、感覚器官や骨格筋が食物の獲得に使われ、消化器系が食物を利用可能な化合物に分解し、未消化食物を排泄する。肺は食物の燃焼用に酸素を供給し、発生した二酸化炭素を排出する。泌尿器系は細胞活動によるその他の溶存老廃物を排泄し、また皮膚や肺は（食物内のエネルギーが最終的に分解する際に発生する）余剰な熱を除去する。そして、循環器系は、こうしたすべての必要な物質あるいは作られた物質を細胞との間でやり取りする。

すべての生物同様、ヒトも自己防衛手段を持っている。自己防衛には、危険を察知するための感覚器官、心臓を刺激して緊急にエネルギー供給を得るためのホルモン系、逃避または防御のための筋肉の使用を伴う。皮膚は、有害物質と細菌や寄生虫などの生物に対して盾となる。免疫系は、体内に入り込む物質や、体内で無制限に増殖する癌細胞から身を守るものである。神経系は生存のために特に重要な役割を果たしている。これは、人間が環境変化に対処する上で必要な種類の学習を可能にする。

こうした複雑な系の統制と調節に必要な内部制御は、ホルモンの分泌腺と共に脳と神経系によって行われる。神経とホルモンが伝達する電気的、化学的な信号は、人体を全体として統合するものである。ホルモンと神経との間における多くの相互作用により、ほとんどすべての人体機能において調整された循環システムが確立されていく。神経はある腺を刺激してホルモン分泌を促し、あるホルモンは脳細胞に影響し、脳自体もまたヒトの行動に影響するホルモンを放出する。ホルモンは、神経細胞間における信号伝達にも関わっている。合法的であるなしに関係なく、一部の薬物は、ホルモン系と神経系が作り出すホルモンと神経伝達物質を模倣または阻害することによって、人体と脳に影響を与える。

生殖は、種の存続を確実にするためのものである。性衝動は生物学的なものであるが、この衝動がどのようにしてヒトの行動に現れるかは、心理的、文化的な要因によって決定される。性衝動には、内部・外部生殖器自体だけでなく、感覚器官とホルモンも関係してくる。有性生殖が親の遺伝子の混合によって遺伝的多様性を作り出すという事実は、進化においてその鍵となる役割を果たしている。

学習

ある生物種に属する個体が、一定の予測可能な行動（たとえば、カエルがその視界に入ってくるハエを捕獲する行動など）を、それに結びつく経験がなくとも示すという意味で、生物においては、多くの行動は生まれながらに備わっていると言える。しかし、このような生まれつきの行動を可能にするためには、個体が刺激と経験の点で適度に正

常な環境で発育することが必要である。たとえばヒトについて言えば、幼児がその環境において話し言葉を聞き、まねることができる場合、特別な訓練なく言語能力が発達する。

生物の脳が複雑になるほど、その行動の方式は柔軟になっていく。個体の行動における相違は、部分的には遺伝的要因に、また部分的には経験の違いに由来するものである。遺伝と学習の相対的な役割に関しては継続的な研究が行われているが、行動がこうした役割の単なる合計ではなく、その相互作用の結果として現れることは明らかである。世代から世代へと考え方や行動を伝え、新たなものを作り出していくという明らかに人類に特有の能力は、結果的に、様々な文化に関係する事実上無限の多様性を持った考え方を生み出している。

筋肉を操る技能の習得は、大部分練習によって行われる。同じ筋肉を何度もほとんど同じように使っていると（ボール投げなど）、動きのパターンが自動的なものになり、もはや意識的な注意を必要としなくなる。最終的に達成する技能水準は、個人の生来の能力と練習量、そして情報のフィードバックと報酬によって変わる。十分に練習すれば、一連の長い行動もほとんど自動的になる（たとえば慣れた道を運転するような場合）。その場合、視点と筋肉の動きの詳細な調整作業に集中する必要なしに、たとえば会話などを同時に行うことができる。緊急時においては、再び必要とされる慣れない作業に速やかに全神経を集中させることができる。

学習は、通常の場合、自らの身体と周辺を取り巻く物理的・社会的環境に関する情報を受け取る感覚器系から始まる。個々人がこの情報を知覚したり経験したりする方法は、刺激自体だけではなく、刺激が起こる物理的な背景や刺激を受ける側における数多くの物理的、心理的、社会的要素によっても異なってくる。感覚器官は世界の鏡像を映し出すものではなく、一定範囲の刺激に対して選択的に反応する（たとえば目は、わずかな帯域の電磁波しか感知しない）。さらに、感覚器官は情報を選択的にろ過、暗号化し、眠っている親が幼児の泣き声に敏感になるように一部の刺激により重要性を持たせ、不快な臭気等にも慣れて特に感じなくなるように他の刺激を重要でないものとして扱うようになる。経験、期待、動機、情緒水準といったことが知覚に影響する。

学習の大部分は連合によって行われているように思われる。すなわち、二つの入力情報がほぼ同時に脳に達すると、それらは記憶内で関連性を与えられ、一方を知覚することで他方が期待されるようになる。知覚と同時にまた行動においても連合が行われうる。最も単純な水準では、快感を伴うかそうした感覚が後に続くような行動は何度も繰り返される傾向が強いが、不快な感覚が伴うような行動は繰り返さなくなる。特定の状況下でのみ感じる快感や不快な結果を伴う行動は、これらの状況が現れた時に、多かれ少なかれ実現される可能性が出てくる。学習の強さは、入力情報がどの程度時間的に密接に関連付けられ、それらが共にどの程度の頻度で起こるかによって異なる。しかし、いずれにしても一定のわずかな効果はある。たとえば、特定の行動に単一の非常に不快な出

来事が伴った場合、それ以降そうした行動が回避される。他方では、特定の行動を示した時のみ報酬を与えることで、非常に継続的な行動が促されることもある。

しかし、学習の大部分はそれほど機械的なものではない。人間は、意図的な模倣によって学習する量の方が多い。また、すべての学習が単に新たな情報や行動を増やすだけのものでもない。連合は、知覚と行動との間においてだけでなく、記憶の中の抽象的な表現すなわち考えの間においても行われる。人間の思考は、「考えの間の相互作用」や「考えについての考え」に関係するものであり、したがってさらなる知覚情報がなくとも多くの連合を行うことができるのである。

人々の考え方は、新たな知覚情報と考えをどのように解釈するかを変えることによって学習に影響を与えることができる。すなわち、人間はすでに持っている考えを支持する情報に反応しそれを求める一方で、そうした考えに矛盾する情報を見落としたり無視したりする傾向がある。矛盾する情報が見落とされも無視もされない場合、新たな情報を意味付けるために、以前のすべての情報とともに思考の再編を促すかもしれない。ある人の考えの特定部分における連続的な再編成は、通常の場合、新たな情報や環境に直面した際に行われるものである。こうした再編作業は、人間の成熟にとって必要不可欠なものであり、生涯を通じて継続し得る。

身体健康

健康な体を維持するために、人間の体は様々な食物と経験を必要とする。一人の人間が必要とする食物のエネルギー量（カロリー）は、体の大きさ、年齢、性別、活動水準、代謝率によって異なる。エネルギーだけではなく、正常な身体活動には、それを構成する物に追加したり置き換えたりする物質が必要となる。すなわち不飽和脂肪酸、原子が重要な役割を担う数十種類の微量元素、ヒトの細胞が合成できない一定量の物質（一部のアミノ酸やビタミンなど）である。大半の体のシステムが正常な状態に維持されるためには、それぞれに割り当てられた機能を果たす必要がある。たとえば、筋肉は動きを起こさせ、骨は負荷に耐え、心臓は効率的に血液を送り出さねばならない。したがって、健康な心肺系を維持し、筋肉の調子を維持し、骨が脆くならないようにするには、定期的な運動が重要になってくる。

健康を維持するにはまた、体の活動を阻害する物質に過度に曝されないようにしなければならない。これらのうち個人が制御できる主なものには、タバコ（肺癌、肺気腫、心臓病の原因となる）、習慣性のある薬物（精神障害や神経系の疾患の原因となる）、過度のアルコール摂取（肝臓、脳、心臓に悪影響を及ぼす）がある。加えて、環境にもヒトに害を与える可能性のある危険な水準の物質（鉛、一部の殺虫剤、放射性同位元素）が含まれていることがある。したがって、個人の健康はまた、空気、土壌、水の状態を監視し、それらを安全に維持するための集約的な努力にかかっている。

他の生物もまた、人体の正常な活動を阻害する場合がある。一部の細菌や菌類は、好

みの器官または組織に取りついてコロニーを形成することがある。ウイルスは健康な細胞に侵入し、それらの細胞により多くのウイルスを作らせ、通常その過程で関係した細胞を殺していく。伝染病はまた動物の寄生生物からも発症し、腸や血管、組織に棲みつく。

病原体に対する体自身の最初の防衛線は、病原体を体内に侵入させない、または棲みつかせないことである。体を保護するこれらの仕組みには、病原体を遮断するための皮膚、それらを排出するための涙や唾液、それらを殺すための胃や膣の分泌物も含まれる。これに関連した侵入生物に対する保護手段には、皮膚を清潔に保つ、適切な食事をする、汚染された食物や液体を避ける、そして一般的に疾病に不必要に近寄らないといったことが含まれる。

次の段階における体の防衛線は免疫系である。白血球は侵入者を取り囲んだり、それらを攻撃したりする（または他の白血球による攻撃を促したりする）特定の抗体を作り出す。個体が病原体の侵入を克服して生き残った場合、これらの抗体の一部が残る一方で、より多くの抗体を作り出す能力が身につく。それから数年間または一生涯を通じて、免疫系はその型の生物に対抗する準備ができており、疾病を抑制または防止することができるようになる。ヒトが何度も「風邪を引く」のは、似通った症状を引き起こす様々なばい菌がいるためである。アレルギー反応は、通常の場合、花粉や動物の毛、特定の食物などに含まれる何らかの環境物質に対する異常に強力な免疫反応によって引き起こされる。時にヒトの免疫系が機能不全を起こし、健康な細胞をも攻撃する場合がある。AIDS などの一部のウイルス性の疾病は免疫系の重要な細胞を破壊するため、人体はおびただしい種類の病原体や癌細胞に対して無防備になってしまう。

しかし、伝染病が身体への健康に対する唯一の脅威ではない。体の様々な部位やシステムが、まったく内的な理由から機能不全を起こすことがある。人体活動の一部の機能不全は、遺伝子によって起こることが知られている。これらは、たとえば出血しやすいなどの直接的で明確な影響を及ぼすこともあるが、血栓や鬱病など特定の病を発症しやすい傾向を増大させるにすぎない場合もある。このような遺伝子は親から伝わる場合もあれば、発生過程における単一または複数の細胞の突然変異に起因する場合もある。遺伝子対のうち適正に機能する遺伝子が片方であれば、遺伝子の機能は十分に果たせる場合が多いため、多くの遺伝病は、誤った情報を持つ遺伝子が両親から受け継がれない限り発現することがない（その親もまた、同様の理由から自分自身は関係する疾病の徴候を示さない）。

はるか昔にヒトの生理機能が適合させた環境とは非常に異なる物理的・社会的環境に大部分の人が暮らしているという事実は、一般的に集団の健康を決定する要素である。工業国に見受けられる現代の「異常性」の一つが食事であり、以前は主として生の植物性、動物性の食事であったが、現在では、カフェイン、アルコール、ニコチン、他の薬物に加えて、砂糖、飽和脂肪酸、塩を過剰に摂取している。運動不足もまた、有史以前

のより活動的であった生活様式から変化した点の一つである。人混みが激しく、慌しく、急速に変化する社会環境に暮らす精神的ストレスや環境汚染物質もある。他方では、新たな医療技術、効率的な医療提供システム、衛生の改善、疾病に関する一般市民のより深い理解によって、現代の人間は祖先たちよりも健康を維持できる機会に恵まれている。

精神の健康

健全な精神は、心理学的、生物学的、生理学的、社会的、文化的システムの間における相互作用に関係している。精神の健康は、一般に人々がその個人、職業、社会の生活の中で遭遇する通常的环境に対処する能力と考えられている。しかしながら、精神の健康を構成する要素に関する考え方は、文化によってもまた時代によっても異なっている。ある文化において完全な狂気と見なされるような行動でも、他の文化では単に変わった振舞い、または靈感とさえ見なされる場合がある。一部の文化においては、宗教や政治上の権威に対して異議を一貫して唱えていると精神病に分類される場合がある。異常な精神状態に対する適切な治療についての考え方もまた様々に異なっている。ある文化では積極的に処罰されるような異常な考えの証拠に対して、他の文化では社会的な関係、隔離、社会支援の強化、祈祷、広範な面談、医療処置などによって対応が図られる。

個人々々は、ストレスに満ちた環境への対応能力が大きく異なっている。少年期のストレスは特に対応が困難で、それ以降の経験と考え方を形作るだけに、個人の精神的健康と社会適応に関して永続的な影響を与えるものとなる。また、個人々々は精神的な障害が起こった際の対処の仕方という点でも異なっている。人々はしばしば、自らが精神的な問題を抱えていることを否定することによって精神的な障害に対応しようとする。たとえそうした障害を持つことを認識したとしても、助けを求めるための費用、時間、または社会的支援が得られないかもしれない。長期に及ぶ行動の障害は、家族、職場の管理者、民生当局からの強い対応を招くことがあり、それらがさらに個人に対するストレスを増大させていく。

人間の精神生活の多くの部分は自分自身も把握できないものであるため、精神的障害の診断や治療は、特に困難を極める場合がある。たとえば我々が誰かの名前を思い出す時、その人の名前がただ浮かんでくるように思えるだけであり、名前の検索作業がどのようなものであったかはまったくわからない。同様に、我々は理由もわからずに怒り、恐れ、憂鬱になったりすることがある。ある精神的障害の理論によれば、このような感情は、意識から除外された、ひどく混乱するような考えや記憶からやってくるという。そうした理論に基づく治療に当たっては、患者の夢や言い間違いの中で、混乱を招く原因となっている無意識の思考の鍵が捜し求められ、患者は長い時間自由に話をして、対処できるところまで考えを引き出すように促される。

かつて純粋に精神的または心理的なものと考えられていた深刻な心理学的障害の中には、生物学的な異常に根源を持つものもある。腫瘍や血管障害による脳組織の破壊が

原因となり、影響を受けた脳の部位によって、様々な行動面での徴候が現れてくる。たとえば、脳が損傷を受けることで、包括的に言葉を組み合わせる能力が影響を受けたり、他人の言葉が理解できなかつたり、無意味な感情の発露を示すことがある。脳内で作り出されるある化学物質の過剰や不足によって、妄想や慢性的な鬱状態が現れる場合もある。高齢者に時折起こる痴呆は、脳の実際の病気によって引き起こされる場合がある。生物学的異常は、それだけで必ずしも精神的な機能不全を引き起こすとは限らないが、そのために他の障害原因に対する抵抗力を弱めることがある。

逆に、激情状態は一定の明確な生化学的影響による。恐れや怒りは、戦闘や逃亡などの行動に備えて肉体の準備をさせるホルモンを血液中に放出させる。心理的苦悩もまた、生物学的な疾病に対する抵抗力を弱めることがある。激しい、あるいは慢性的な情緒状態は、時に神経、内蔵、免疫系における変化を引き起こすことがあるということを裏付ける一定の証拠がある。たとえば、恐れ、怒り、憂鬱、または単なる失望感も、頭痛、潰瘍、感染症の原因となる場合がある。このような影響は、個人を心理的なストレスに対してよりいっそう弱くし、機能不全の悪循環に陥らせる可能性がある。他方、社会的な接触と支援が、ある疾病に対する抵抗力を改善したり、その影響を最小限にするという証拠もある。

第7章 人間社会

一つの生物種として、私ども人間とは他の人々とともに自らの生涯を生き抜く社会的な存在である。人間は、遊牧民の集団、村落、都市、国といった様々な種類の社会集団を組織し、その中で働き、交易し、遊び、生殖活動を行い、またその他多くの方法で交流を行っている。他の生物種とは異なり、人間は時間経過の中で社会化に意図的に社会的行動と組織化の転換を組み入れるようになった。その結果、人間社会の形態は地域や時代、それぞれの文化によって異なるようになり、社会的な世界は非常に複雑で活発な環境になっている。

人間の行動に関する洞察は、様々な多くの研究分野から得られる。ここに紹介する見解は、主として科学研究に基づくものであるが、文学、劇作、歴史、哲学、その他の非自然科学的な学問分野も我々の人間自身についての理解に大きく貢献していることを認識すべきである。社会科学者は、様々な文化的、政治的、経済的、心理学的な観点から、定量的、定性的な双方の手法を用いて人間の行動を研究している。社会科学者は、個人や社会的行動において一貫性のあるパターンを探し出し、またそうしたパターンを科学的に説明しようとしている。一部の事例において、そうしたパターンが指摘されて明確なものに思える場合があるが、それは大部分の人間がこの世界について意識的に考えていたことではないかもしれない。またある事例においては、科学研究によって明らかにされたあるパターンによって、人間行動の特定の側面に関して人々が長く抱いてきた信念が誤りであることが示される場合もある。

本章では、個人と集団の行動、社会組織、社会変革の過程という観点から、人間社会についての提言を示す。本章は、以下に示す主題に対する特定の手法に基づくものである。すなわち、人類学、経済学、政治科学、社会学、心理学などの社会科学の各分野の個々の学問領域において明らかになったものと合致した理解可能な世界観を描く手法である。ただし、個々の明らかになったもの自体について、又はその根底にある方法論についての記述は意図していない。

本章では、人間社会の七つの主要な側面、すなわち、人間行動に対する文化の影響、集団の組織と行動、社会変革の過程、社会的な折り合い、政治、経済組織の形態、集団・個人間での紛争解決仕組み、国内と国際的な社会制度について扱う。こうした考えの多くはすべての人間社会にあてはまるものであるが、本章では現代のアメリカの社会的特性に焦点を当てていく。

提言

行動に与える文化的影響

人間の行動は、遺伝的形質と経験の双方によって影響を受ける。人間が発達していく方向性は、それぞれの遺伝形質の可能性の中で、社会経験と環境によって形作られる。科学的な問題としては、経験と遺伝的可能性がどのようにして相互に作用し合って人間

の行動を生み出していくかということである。

それぞれの個人は、家族、地域社会、社会階層、言語、宗教などの社会、文化的な背景に生まれ、最終的には多くの社会的な関係を築いていく。子どもを取り巻く社会背景の特性は、教授、褒美、罰、模範を通じて、その子どもの考え方や行動の仕方をいかに学ぶかに影響する。こうした環境には、家庭、学校、近所の人々に加え、おそらくは地域の宗教、法制当局も含まれる。その他にはまた、友人、他の同僚、親類との最もうちとけた関係や、娯楽、あるいは報道機関との関係もある。これらのあらゆる影響に対して個人がどのように対応するか、又はどういった影響が最も強いかということは、予測しがたいことである。しかし、同様の影響形態、すなわち同一の文化の中で育つことに対する個人の反応には、一定の実質的な類似性がある。さらに、文化的に誘発された行動形態、たとえば言語形態や身振り、ユーモア性などは、人間の精神に非常に深く根ざしたものであるため、しばしば個人々々が気付かぬままに作動している場合がある。

すべての文化には、生活手段の獲得方法、交易や統治方法、社会的役割、宗教、衣服、食物、芸術における伝統、行動に関する期待、他の文化への態度、こうしたあらゆる活動に関する信念や価値観など、多少とも異なる一連の形態や意味が含まれている。大きな社会では、地域、民族起源、社会階層などに付随するそれぞれ別個の下位文化を持つ多くの集団が存在する可能性がある。一つの文化が多くの地域において優勢になった場合、その価値観は正しいものと考えられ、家族や宗教集団だけではなく学校や政府によっても推奨されることになろう。一部の下位文化は特殊な社会範疇(十代、企業の重役、犯罪者など)の間で生み出され、その一部が国境を超える場合もある(ロック・ミュージシャンや科学者など)。

公正であろうとなかろうと、また望ましかろうとなかろうと、社会的区別はほとんどすべての文化において顕著である。区別の形態は場所や時代によって異なり、時には厳格な階級制を持ち、時には種族や部族階層を持ち、時にはより柔軟な社会階層を持っている。階層の区別は主として富、教育、職業によって行われるが、他の下位文化的相違、たとえば服装、方言、学校や仕事に対する態度などをともなう場合もある。これらの経済的、社会的、文化的な区別は、ほとんどすべての個人によって認識され、その一部が不快感を抱く対象ともなっている。

人間が生まれつく階層は、通常の場合少年期の言語、食事、趣向、関心事を決定し、それが社会的な世界をどのように知覚するかに強く影響してくる。さらに、階層はそれに属する人々が経験する圧力や機会にも影響し、したがって、学校、職業、結婚、余暇の過ごし方、富の獲得といったその後の人生において進む道にも影響することになりうる。

ところで、他の階層への移動の容易さは、場所と時代によって大きく異なっている。人間の歴史の大半を通じて、人々はほとんど例外なく彼らが生まれついた階層で暮らし、死んでいった。社会が新たな事業(たとえば領土の拡大や技術の導入など)に着手する

際には、下層階級から上方に向けて最大級の移動が起こり、そのためより多くの人員を上位の階層に加える必要性が生まれた。現在の世界の一部地域では、ますます多くの人々が経済や教育機会を通じて貧困から脱しているが、他の地域では、ますます多くの人々が貧困に苦しんでいる。

受容可能な人間行動と見なされるものは、文化によって、また時代によって異なる。すべての社会集団は、一般に受け容れられた行動範囲を持ち、かつおそらくは成人、子ども、女性、男性、芸術家、スポーツ選手などの下位集団に関してさらに限定的な基準が設けられている。普通でない行動は、単に愉快的なもの、又は不快なものに見なされるか、処罰すべき犯罪行為と見なされる。ある文化においては正常な行動であっても、他の文化では受け容れられないものもある。たとえば、攻撃的な競争行為は非常に協力的な社会においては無礼と見なされる。逆に、アメリカのような非常に競争的な一部の下位文化においては、競争に対する関心の欠如は異端として扱われる。世界には非常に多様な文化的伝統があるが、そのほとんどすべてにおいて受容できないものと見なされる一定の種類 of 行動がある（近親相姦、近親者に対する暴力、窃盗、強姦など）。

受容できない行動に対して妥当と見なされる社会的成り行きもまた、異なった社会の間、又は同じ社会内においても大きく異なっている。処罰の幅は、罰金から屈辱刑、投獄、流刑まで、または鞭打ちから切断、死刑までの幅がある。妥当な処罰の形態は、個人が当該の犯罪を繰り返すことを防止若しくは抑止するか、他者が当該の犯罪にかかわらないように回り道させるか、又は単に懲罰として痛みを与えるかという目的の考え方によって影響される。犯罪抑止における処罰の成果については研究が困難である。その理由は、同一の犯罪者に様々な処罰を与える実験には倫理上の制約があることと、他の要素を一定に保つことが困難なことがあげられる。

技術は、長期にわたって人間行動に大きな役割を果たしてきた。世界の多くの地域で新技術の発明に向けられる高い評価は、ますます急速で安価な通信、移動手段の開発につながり、それが次には服装、食物、音楽、いろいろな娯楽の流行や考え方の急速な拡大につながっていった。書籍、雑誌、ラジオ、テレビは、服の着方や子どもの育て方、金の稼ぎ方、幸福の見つけ方、結婚の仕方、料理の方法、恋愛の仕方を説明している。それらはまた、子どもや親、教師、政治家、スポーツ選手などの行動や、暴力、セックス、少数民族、男女の役割、合法性に関する彼らの態度を枠にはめることで、一定の価値観、切望、優先順位を先にすることを暗示的に薦めている。

集団組織と行動

生まれついた社会、文化的環境に属することに加え、人間は、共通の職業、信念、又は関心事などに基づき、自発的に集団に参加する（組合、政党、クラブなど）。こうした集団への所属は、自分自身への考え方や他者自身に対する考え方に影響する。これらの集団は、メンバーの行動をより予測しやすく、かつ各集団が円滑に機能し独自性を維

持できるようにするため、一定の期待や規則を定めている。そうした規則には、たとえば懇親会などでの振舞い方などを模範で示す非公式なものもあるが、書面に定められ厳格に実施される場合もある。正式な集団はしばしば、褒賞（たとえば賞賛、賞品、特権のようなもの）や罰（たとえば脅迫、罰金、除名のようなもの）によって好ましい行動を示すことがある。

自発的に参加したものであろうと生まれついたものであろうと、何らかの社会集団への帰属性は、資源（金銭や労働力など）を共同管理する可能性、団結的な努力（ストライキ、ボイコット、投票）、帰属意識と認識（組織、象徴、報道機関からの注目など）など、より多くの利益をもたらすものである。それぞれの集団内において、自らの集団が他集団より優れているというイメージを持つことが多いメンバーの態度は、集団内における団結心を高めるとともに、その一方で他集団との深刻な紛争を招く可能性もある。他集団に対する態度には、ある集団のメンバーを同一視し、そうしたメンバーの行動において観察者の先入観に見合う性質しか知覚しようとしないうような固定観念化がともなうことが多くある。これは社会的差別につながるものである。医師や聖職者などの職業に対する盲目的な敬意や、同様にして少数民族であるとか女性であるとかに関する盲目的な軽蔑も、固定観念化から生じる差別の一つの形態である。

集団の行動は、個人の行動の集合体としてのみ理解することはできない。たとえば、現代の戦争を個人の攻撃的性向の集合体として理解することはできない。人間は、一人でいる時や家族と一緒にいる時と、たとえばフットボールの試合や礼拝、又はピケラインなどの集団における場合とでは、大きく異なる振舞いをする可能性がある。何人かの子どもと一緒にいると建物をこころなく破壊したりする可能性があるが、そのうち誰一人として単独では同じことをしようとしないうものである。同様の意味で、成人も、一人でいる場合よりもたとえばあるクラブや宗教団体のメンバーである時には他者の求めに対してより寛大で親切になることが多い。これは、集団内にいるという状況が集団の共通行動に従っていることに関する仲間意識と受容性という褒賞を提供するためであり、したがってその場合に誰か1人を非難したり賞賛することは困難である。

社会組織は、その公式の存在目的以外に多くの目的を果たしている。表面上はレクリエーションを目的として存在する民間のクラブは、しばしば商取引の重要な場所となる。また公式には学習と学問研究を促進するために存在する大学が、階層間差別の助長や希薄化に寄与することがあり、産業、宗教組織もしばしば、営利活動や宗教活動を超えた、政治的社会的課題を掲げていることがある。多くの場合、明言されることのない集団の目的として、特定の範疇に属する人々をその活動から排除するということが含まれる。これもまた別の差別形態である。

社会的変化

社会は、生物種と同様に、部分的に技術の進歩や政治的伝統などの内部の力によって開かれ、又は制約を受ける方向に進化していく。一つの世代の状況が、次世代に開かれた可能性の領域を制限し、形作っていく。したがってそれぞれの新たな世代は社会の文化形態を学習するため、食料生産、紛争解決、若年者の教育、統治などに関する戦略を改めて作り出す必要がない。新たな世代はまた、社会の望ましい維持や改善方法についても学習する。他方では、それぞれの新しい世代が前世代において未解決の問題、たとえば戦争につながる可能性のある緊張関係、広範な薬物の乱用、貧困や搾取、人種差別、多くの個人的集団的不満、といった問題に取り組まなければならない。たとえば、アメリカの初期の歴史における奴隷制度は、依然として黒人市民やアメリカの経済、教育、医療、法制度全般に重大な影響を及ぼしている。不満は、耐えられる程度にまで緩和される場合もあるが、社会構造自体に反対する革命に発展する場合もある。多くの社会は、国境や宗教、あるいは過去の過ちに関する根深い感情をめぐって、何世紀にもわたる紛争を依然として引きずっている。

各国の政府は、一般的に政策、法律、優遇策、又は強制措置を通じて社会的な変革を行おうとする。時にこうした努力は効果を発揮し、実際に社会的な争いが回避できることもある。しかし時には、紛争を激化させる場合もある。たとえばソ連において、自らが所有する私有地を耕作したいとする農民の希望に反して農業コミューンを設立しようとした活動は、武力と数百万人もの命を失うことによってしか達成できなかった。アメリカにおける奴隷の解放は、凄惨な南北戦争の結果実現したものであった。それから百年後、一部地域における明確な人種差別の撤廃は、法的措置、裁判所の命令、軍の保護の下でようやく実現したものであり、現在もなお大きな社会問題であり続けている。

戦争、移民、植民地支配、輸入された思想、技術又は疫病、自然災害などの外的な要因もまた、それぞれの社会が進む方向性を形作るものとなる。たとえば、ソ連の姿勢は、二度の世界大戦で被った壊滅的な損失によって強く影響されている。アメリカ・インディアンの社会は、欧州から到来した入植者のもたらした疫病や戦争によって破壊され、追放された。アメリカでは、アフリカ人の強制的な雇用と、その後における欧州、ラテンアメリカ、アジアからの連続的な移民の流入が、アメリカの文化的多様性を増大させたのみならず、政治、経済、そして社会制度（労働力、選挙区、教育計画など）に大きく影響した。豪雨や干魃といった自然災害は作物の不作を招き、飢餓と苦難をもたらし、時には移民や革命の要因ともなる。

便利な通信や輸送手段もまた社会的変化を助長する。以前は地理的又は政治的に隔離されていた集団が、様々な考え方、生活、行動に触れ、時には大きく異なる生活水準を意識するようになる。移民やマスメディアの存在は、文化的な混交を促すだけでなく、一部の文化の滅亡と他の文化の急速な変貌をも促す。世界的な通信や移動が容易になることにより、様々な価値観や期待が、時には政治的な宣伝として意図的に、また時には

商業的利益の追究などにおいて単に偶然に、対立せざるをえなくなる。

人間の人口、一定地域における人口の集中やその増加傾向は、物理的な環境とともに、経済、政治、技術、歴史、宗教といった文化の多くの側面によって影響を受ける。経済的な関心に対応して、各国政府は、人口増加の抑制又は促進を目的として、非常に相異なる政策を定めている。一部の宗教団体もまた、人口問題に関して強硬な立場をとっている。たとえばローマ・カトリック教会の指導者たちは、長い間避妊に反対する活動を行っているが、一方では最近になって、他の主要な宗教関係者が家族の数を制限するために避妊手段の利用を承認している。

政府の政策や宗教的教義とは全く関係なく、多くの人々は、母体に対する健康上の危険性、経済的社会的観点から見た子どもにかかる雇用、生活空間、又は親としての適合性に関する個人的な感覚など、現実的な問題によって子どもを作るかどうかを決断している。世界の一部地域では、(またいかなる国でも教育の不足した集団では、)現代の避妊に関する情報や技術についてほとんど知らないか、又はそうした情報や技術を入手、利用できない男女が多い。アメリカでは、若年層の性交渉に対する無頓着な傾向が、ますます多くの望まれない妊娠を招いている。

逆に、社会制度もまた、人口の規模、変化率、様々な特徴(年齢、性別、言語など)を持つ層の比率などによって影響を受けることになる。急激な人口増加によって、より進んだ職業の専門化、政府の新たな責任、新たな種類の制度、さらに複雑な資源分配に対する必要性が生じてくる。人口形態もまた、特にそれが変化している場合、社会的な優先課題を変化させる影響を持つ。下位文化の多様性が大きいほど、そのために必要となる備えも多様化せざるをえない。社会集団が増加するにつれて、その社会への影響も増大する。そうした影響は、市場(若年層はより多くのスポーツ製品を購入するなど)、投票権(たとえば、高齢者は学校関係の法令に賛同する傾向が低い)、又は社会教育担当者による必要性の認識(たとえば、家庭の外で働く母親が増えれば、育児計画が必要となる)などに現れよう。

社会的選択

様々な選択肢としての便益と経費の組み合わせの中からの選択は、個人にとっても集団にとっても避けられないことである。我々がその欲するものや必要とするものを得るためには、通常の場合、何か既に持っているものを手放すか、又は少なくともその代わりに得られたであろうものを諦める必要がある。たとえば、幹線道路や学校など、政府資金によるプロジェクトに多くの公的資金を費やすほど、防衛に費やせる公的資金は少なくなる(税収入や負債を増額しない旨の決定を既に行っている場合)。

社会的な選択は、必ずしも経済や物資に関係するものとは限らない。時には、個人的権利と公益との間での選択を迫られる場合もある。たとえば、公共の場所での喫煙、ペットの排泄物の始末、幹線道路の速度制限に関する法律は、他の人々の便益のために一

部の人々の個人的な自由を制限するものである。あるいは、美観と便利さとの間での選択が必要になる場合もある。たとえば、提案された大規模なマンションは、居住希望者には歓迎されるが、既に近隣に住む人々には反対されるような場合である。

選択方法に関しては、様々な人々が様々な考えを持っているため、結果的に妥協や長期的な不和を招くことになる。異なる利害をどのように調整するかは、それら利害の相対的な重要性和、関係する個人や集団の権力によって決まってくる。影響を受ける人々が計画に参画する場合や、関係するすべての専門家からの情報が入手できる場合、又は価値や権力の争点が明確に理解され、かつそれらが組織の意思決定過程に盛り込まれた場合に、平和的な社会改革の努力が最も成功を収める。

現在の手続きを改善すべきかどうか、又は全く新しい手続きを作り出すべきかどうかについては、しばしば議論のあるところである。一面では、繰り返し起こる問題状況を取り繕うことで、その根底にある問題を大規模に変革しなくとも十分耐えられる可能性がある。またある一面においては、急いですべての問題あるシステムを取り替えると、それによって解決される以上の問題が生じる可能性もある。

社会政策上の選択肢の潜在的な便益を比較するのは困難である。その理由の一つは、様々な形態の便益を測る共通の尺度がないことにある。たとえば、富と社会正義を直接比較できるような尺度はない。もう一つの理由は、様々な人々の集団が、たとえば公教育や最低賃金など、同種の社会的便益にさえも非常に異なった価値を与えていることにある。人口が非常に多い場合、価値の比較は、人口の中の非常にわずかな比率でも多くの数になりうるという事実によってさらに複雑化する。たとえば、総人口が1億人だとすると、わずか百分の一%（取るに足らないほどのわずかな割合だと考える人々もいるであろう）だけ失業率が上がっても1万人が職を失う（非常に重大な事態だと考える人々もいるであろう）ことを意味するのである。

社会的な選択における影響度の判断には、この他の問題もまた関係してくる。その一つは遠隔効果である。すなわち、決定の影響が距離又は時間の面で離れていればいるほど、その重要性が低く感じられるということである。たとえば、都市生活者は、農民ほど全国的な農作物補助法を支持したがる傾向にあり、また農民は都市の住宅問題プロジェクトに向けた連邦税率の引き上げを望まないであろう。個人としては、たとえ長期的な影響が負のものであったとしても即時的な快楽を拒みにくく、また最終的な便益のために一時的な不快に耐えることを困難に感じるのである。同様に、社会全体としても我々は、長期的な影響（我々又はその子孫が被るであろう石油や鉱物資源の不足状態）よりも、直接的な便益（石油や鉱物資源の活発な利用）により大きな重要性を与える傾向にある。

社会的な選択を判断する際の遠隔効果は、潜在的な経費・便益が実際に発生するかどうか不確実である場合においてはよりいっそう大きくなる。時には、ある社会的決定に関して可能性のあるいくつかの結果となりうる確率を推定することが可能となる。た

たとえば、避妊を行わない性交渉の結果妊娠に至る確率は約4分の1である。すべての可能な結果に相対的な価値の尺度を当てはめることができれば、発生確率と価値の尺度を組み合わせてどの選択肢が最善策であるかを見積ることができる。しかし、発生確率と価値の尺度の双方が利用できるとしても、それらの情報をどのように組み合わせるかについては議論があろう。たとえば、人々が特定の危険性を恐れるあまり、他にどのような便益や危険性が関係しようと、可能な限りその特定の危険性をゼロにすべきだと主張することもありうる。

そして最後に、社会政策上の選択に関する判断は、通常の場合、人々が敏感に反応する事実によって複雑化することになる。一定の意図された効果を実現するために社会計画が実施される場合、そうした効果を促進又はそれに抵抗しようとする人々の発案が、常にその結果の不確実性を増大させるのである。

政治・経済組織の形態

世界のほとんどの国においては、通常の場合には矛盾する利害間の妥協による政治を通じて、様々な個人や集団に対して国家権力が与えられている。政府は、政治を通して選挙され、指名され、又は一部の事例では武装勢力によって創設される。政府は、国の運営方法を決定する規則や決議を策定し、解釈し、実施する権力を有している。

政府が策定する規則は、商業、教育、結婚、医療、雇用、軍事、宗教、旅行、科学研究、思想の交流を含む広範な人的問題に関係するものである。国の政府、又は一部の事例においては州若しくは地方政府は、個人や民間組織それ自体では適正に実施できないと考えられている職務に関する責任を付与されているのが通常である。たとえば、アメリカ憲法は、連邦政府に対して、郵便の配達、国勢調査の実施、貨幣の製造、軍事防衛など、そうした数少ない機能を果たすことを求めている。しかし、アメリカ社会の規模が大きくなり複雑さが増すにつれて、政府の活動は大幅に拡大されるようになっている。

今日、連邦政府は、教育、福祉、市民権、科学研究、気象予報、輸送、国立公園など国家資源の保存をはじめとする分野に直接関与している。国、州、地方政府が担うべき責任に関する決定は政府機関において話し合われるが、政府機関はまた有権者や企業、軍、農業団体、労働組合などの権力組織によって影響を受ける。

商品やサービスの価格設定、新たなベンチャー向けの財源、政府の規制する利得の制限、財政の収支・管理、経営者と労働者の関係、その政府との関係などを含め、各国の政治的経済的システムは多くの点で異なっている。国の政治システムは、その経済システムと密接な相互関係を持っており、すべての段階において個人と集団の経済活動を監督している。

国の経済は、二つの主要な両極端の理論モデルのいずれかに傾いたものとして考えるのが有効である。一つの理論モデルは純粹に資本主義的なシステムで、自由競争によって資源の最善な配分、最高の生産性と効率性、最低経費が実現されるという前提に立つ

ものである。誰が何を行い、誰が何をを得るかは、消費者や企業が市場において活動する中で自然に決定される。市場では、ものや行為の生産や実行にかかる経費と、人々がそれらに対してどの程度の対価を支払う用意があるかによって価格が決定される。大部分の企業は、個人又は自発的な人々の集団によって創始される。(工場建設のためなど)個人が利用できる以上の資金が必要になると、その資金は銀行からのローンや事業所有権の売却などを通じて他者から入手される。個人的な競争心を高めるには、生産資源(土地、工場、船舶など)の私有と、生産、交易に関する最小限の政府介入が必要となる。資本主義理論によれば、個人の独創力、才能、勤労に対しては成功と富がその報酬として与えられ、個人の政治的経済的権利が保護される。

もう一つの理論は純粋に社会主義的なシステムで、生産すべきものと、どういった経費で誰がその生産物を入手するかに関する政府の計画によって、最も賢明かつ公正な資源分配が実現されるというものである。企業の大半は政府が創設し、資金提供を行う。私有によって拝金主義と所有者による労働者の搾取が起こるという前提から、すべての生産資源は国が所有する。この社会主義理論によれば、人々は個人的な利得のためではなく、社会的利益のためにその労働力と能力を社会に提供し、政府は人々に対して、それぞれの能力や努力ではなく、その相対的な必要性に基づいて公正に利益を分配する。社会全体の福祉は、いかなる個人の権利よりも重要だと見なされる。

しかし、資本主義にしても社会主義にしても、極端なシステムを実施している国はなく、むしろ双方の要素の少なくとも一部を取り入れている。そうした混用は、現実的な観点から理解できるものである。

一方において、純粋に資本主義的なシステムにおいては、いかなる資源、製品、又はサービスに関しても、少数の大手企業や企業連合が市場を独占し、自由競争によって可能となる以上の価格設定をしようとするため、競争が自由になることはほとんどない。経済的に不適切な社会態度に基づく差別(たとえば、友人や親戚を優遇し少数派や女性を差別する)は、さらに自由競争の理想を歪ませるものとなる。また、たとえシステムが有効であっても、貧富の差が拡大する傾向が大きい。したがって、たとえばアメリカは、自由市場システムへの選択的な政府介入によって、その基本的に資本主義的な経済システムの極端な影響を抑制しようとしているのである。この介入には、富に応じて引き上げられる税率や、失業保険、健康保険、貧困層に対する生活補助、単一企業の経済力を制限する法律、州間における交易の規制、不公正な広告、安全でない製品、差別的雇用に対する政府の制限措置、農工業向けの政府補助などが含まれる。

他方で、純粋に社会主義的な経済は、より公平ではあるものの、個人的な活動の軽視と国全体の経済をすべて詳細に計画しようとすることで、非効率化に向かう傾向がある。人々の努力を動機づける良さがなければ、生産性は低下する方向に向かう。また、個人が自ら決定を行う自由を持たなければ、需給関係における短期的な変化に対応できなくなる。さらに、消費財の現実的な需給関係に見合うように、地下経済が発達してくる。

したがって、多くの社会主義システムは一定の自由競争を認め、個人的な活動と所有権の重要性を認識している。今日の世界における経済の大部分は変化の途上にあつて、一部はより資本主義的な政策や慣行を採用し、一部はより社会主義的なものを採用しつつある。

社会紛争

あらゆる人間社会には紛争があり、あらゆる社会にはそれを調節するためのシステムがある。人々や集団間における紛争は、しばしば資源、権力、地位を得るための競争から生じてくる。家族のメンバーは注目を得ようと競争する。個人々々は職業や富を得ようと競争する。国は領土や威信を得ようと競争する。様々な利害集団は影響力や規則を策定する権限を得ようと競争する。しばしば、資源ではなく思想のために競争が行われる場合がある。すなわち、個人又は集団が、他の個人又は集団の思想や行動を抑圧、処罰、又は非合法であると宣言しようとする場合である。

社会的変化は、紛争を誘発する可能性もある。提案される社会的、経済的、又は政治的な変革が社会システムのすべての要素に均等に便益を与えることはほとんどなく、したがって損害を被ると考える集団はそれに抵抗する。変革の賛同者と反対者の双方が、それぞれの変革を行うか、又は行わないことによるあらゆる影響について納得できる形で予測することができない場合、相互間の敵対意識や疑念はさらに悪化することになる。紛争は、ごくわずかな選択肢しか存在せず、かつ一切の妥協もできない場合には特に激しいものとなる。たとえば、降伏か戦争か、又は候補者 A か B かといった場合である。問題が複雑で人々の立場が当初さして離れていないような場合であっても、一つの方針に決定する必要が生じた際には、いずれの選択肢が望ましいかに関する自らの決定を通そうとするあまり、人々は極端な立場に自らを追い込むことがある。

家族集団や小規模な社会においては、承認された権力、すなわち親や年長者によって規則が定められる。大学職員から地方のスカウト隊に至るまでのすべての集団は、規則の策定と紛争の仲裁を目的とする正式の手続きを備えている。より大きな規模では、法律を制定してそれを実施することによって、政府が紛争処理のための仕組みを提供する。民主主義国家においては、政治制度が選挙を通じて社会的紛争の仲裁を行う。立候補者は規則の制定と改定に向けたその意図を訴え、人々は、政策意図とその有効な実現可能性において最善と思われる人物に投票する。しかし、複雑な社会的選択を行う必要性のために、政治家がその任期中において自らの意図する政策をすべて実現することは不可能である。

思うままに移動し、武器を携行し、デモを組織するといった自由に対する欲求は、治安に対する切望感と衝突することがありうる。断固とした有能な意思決定（極端な例では独裁につながる）に対する欲求は、一般市民の社会への参画（極端な例ではすべてを投票で決定する民主主義につながる）に対する欲求と衝突することがある。法律や政策

の策定は通常、様々な利害集団間において協議された周到な妥協案を含むものである。非常な重要性を有すると考えている特別な利害を持つ人々の集団は、そのメンバーに対し、そうした欲求に基づいて一つの論争点に対して投票を行うよう説得し、それによって様々な見解を持つ大多数の人々から譲歩を引き出すことができるかもしれない。

社会の大多数の人々が特定の社会的選択に関して合意したとしても、それに反対する少数派を保護することもできる。たとえばアメリカの政治システムでは、連邦や州政府の憲法において、いかに大多数の支持を得たとしても、選任された議員には変更することのできない市民の権利が定められている。そうした憲法条項の改正には、通常の場合、単なる過半数ではなく、全有権者数の三分の二から四分之三に至る圧倒的多数が必要となる。政治的権利についての同様の保護システムは、連邦議会と大半の州議会における二院制によって提供されている。たとえば、国会の下院においては、人口に比例した代表が選出され、したがって国内のすべての市民が平等に代表が出されている。しかし、上院は人口に関係なく各州から正確に2名ずつが選任されるため、いかに人口の少ない州であっても、その州の市民は人口の多い州と同じ数の代表を送ることができる。

くわえて社会は、ディベート、ストライキ、デモ、世論調査、宣伝、そして劇、歌、漫画に至るまで、争議を公にする多くの非公式な方法を発達させている。マスメディアは、苦情を持つ少数派にとっても明瞭な声明文を出すための無料の手段を提供している（そうした主張を促す場合さえある）。このような方法や手段はいずれも、緊張関係を和らげたり妥協を促す可能性があるが、逆に相違点に火をつけ、両極化を助長する場合もある。紛争を解決又は緩和できない場合、社会システムには大きなストレスがかかることになる。変革の能力又は意思の欠如は、結果的に紛争の段階を高め、訴訟、破壊行為、暴力、又は全体規模の革命や戦争に発展する場合もある。

集団間の紛争は、合法的であるなしにかかわらず、必ずしも社会の一部が望むような決定を最終的に実施できるようになったことによって落ち着くわけではない。その場合、抵抗する集団はそうした変化を覆し、修正し、又は妨げるための努力を開始するため、紛争は継続していく。しかし、紛争はまた集団行動を発生させた国民も家族も危機に合ってさらに一体感を深める傾向にある。時には、集団の指導者がこの知識を意図的に利用して、外部集団との紛争を煽ることによって自らの集団内部の緊張を抑え、一体的な支持を取り付けようとすることがある。

世界全体の社会制度

国際的な経済システムと環境問題の共有（核戦争や森林破壊、酸性雨などの地球規模での影響）により、国や文化はますます相互依存関係を増大させている。人々はまた、海外旅行やマスメディアの利用によって互いの知識を深め合っている。地球のシステムはますます密接に絡まりあった網目となっており、その中では、どこにおける変化も他の地域に重大な影響を及ぼすのである。たとえば、地域紛争は国境を越えて拡大して他

の国々を巻き込んでいく。また、石油供給量の変動は世界中における経済的生産性、貿易収支、金利、雇用に影響する。ほとんどすべての国の富、安全保障、全般的な福祉は相関関係にある。大半の国々の指導者の間においては、孤立主義政策がもはや維持できないものであり、核兵器拡散防止や通貨システムの激しい変動から保護するといった世界的問題が、すべての国々の協力を得て初めて実現できることである点をますます一様に認識するようになっていく。

各国は、多様な公式、非公式な取り決めを通じて意思疎通を行っている。公式なものとしては、外交関係、軍事、経済的な同盟や協力関係、国連や世界銀行のような国際組織などが含まれる。しかし、国の政府とは異なり、国際組織はその加盟国に対して限定的な権限しか持たないことがしばしばである。この他の取り決めには、文化交流、旅行者の往来、交換留学生、国際貿易、全世界規模の加盟国を持つ非政府組織の活動などが含まれる（国際アムネスティ、飢餓対策キャンペーン、赤十字、スポーツ組織など）。

国の富は、その国の労働者の努力と技能、天然資源、およびそうした技能や資源を最大限に利用するために投入できる資金と技術にかかっている。しかし、国の富は国自らが生み出せるものだけではなく、その製品を他国がどの程度求めているか、また他国の製品を当該の国がどの程度求めているかにもかかっている。国際貿易は、石油や様々な農作物、燃費の優れた自動車など、単に特定の資源や製品が不足している国々との間でのみ発生するわけではない。たとえ国がその必要とするものをすべて生産できるとしても、他国との貿易から得る利益がある。ある国が（品質や経費、又はその双方の観点から）最も効率的に一定の活動を行い、その製品を他国に販売するのであれば、理論的にはそうしたシステムによって、結局のところ参加国がすべて得をすることになるはずである。

しかし、国際貿易の経済的な現実を歪ませている多くの実際上の影響がある。たとえば、経済的又は政治的により強大な国によって搾取されるという恐怖や、外国との経済競争に完敗すると思われる特別な労働者集団を保護しようとする政策意図、および将来の紛争時に入手できなくなる可能性がある特定の製品に関して外国に依存することへの消極的な姿勢などによって、国際貿易が挫折する可能性もある。

国際的な関係が深まっているために、多くの事例において対外政策と国内政策との区別が多くの場合不明確であるかもしれない。たとえば、どの種類の自動車や衣服をどういった価格で買うかを決定することになる政策は、外国貿易、国際収支に基づくものである。国内での農業生産は、国内政策と同時に外国市場にも依存している。国際市場はすべての国にとって利益となるかもしれないが、特定の国の特定の集団にとっては大いに不利益になるかもしれない。たとえば、アジア諸国における安価な自動車生産は、世界中の自動車の買い手にとっては利益になることかもしれないが、他国の自動車製造会社の人々にとっては失業することになるかもしれない。このように、国内政策は上記のような集団が苦しまないように配慮しなければならないが、そうした政策が翻って国際

貿易に影響を及ぼすことになる。独自の宗教的又は政治的なイデオロギーに関して強力な国内世論を持つ国々は、そのイデオロギーの他国への普及を積極的に促進し、競合する思想を持つ集団を排斥するような対外政策を推し進めるかもしれない。

世界の社会的、経済的、生態系システムの相互依存関係が拡大していることで、社会的な政策決定の結末を予測することが困難になっている。世界のどの地域における変化も、他の地域にそれが増幅した形で影響する可能性があり、それによって一部の人々が利益を得、他の人々の負担する経費が増大することになる。また一方では、特定の変化が不安定性と不確実性を生み出し、すべての人々に不利益をもたらす可能性もある。世界全体の安定のためには、各国が、商業活動や情報交換などに関してさらに信頼性のあるシステムを確立し、世界的な被害（たとえば飢餓や核戦争など）に関する警告を発するための監視システムを開発し、富める国と貧しい国との生活水準における大きな隔たりを低減させていく必要がある。国は、社会システムのすべての参加者と同様に、安定した世界経済という、より長期的な便益を達成するためには、短期的な損失を出しても結局それが利益につながることを既に認識し始めている。しかし、世界的な利益のために国益を妥協させることが、すべての中で最も重要な社会的決断であるのかもしれない。

第8章 設計された世界

我々の住む世界は、人間の活動によって多くの重要な点で形作られてきたものである。人間は、生活と環境に対する脅威を防止し、排除し、又は低減させ、同時に社会的な必要性を満たすために技術的な選択肢を創り出してきた。人間は河川にダムを築き、森林を伐採し、新たな物質や機械を作り、広大な区域に都市や幹線道路を建設し、時には手当たりしだいに他の多くの生物の運命を決定付けてきたのである。

ある意味、世界の多くの部分は、我々はその利益に適うと考えるものに照らして、主に技術の利用を通じて設計され、形作られ、管理されているのである。我々は、自らの将来における福利が技術の開発、利用、制限の仕方に大きく依存するようになるまで、この地球の方向性を左右してきたのである。逆に言えば、将来における人間の福利は、技術と我々が暮らす社会、文化、経済、生態系システムの作用について、我々がどれだけ適正に理解するかにかかっているのである。

本章では、我々の環境と生活を形作ってきた主要な人間活動に重点を置きながら、技術をめぐる一定の重要な諸側面に関する提言を示す。本章はまず地球上における人間の存在による影響について論じ、次に8項目の基本的な技術分野、すなわち農業、材料、製造、エネルギー資源、エネルギー利用、通信、情報処理、医療技術に焦点を当てる。

提言

人間の存在

地球上の人口は、過去100年間に3倍に増えた。その上、ほとんど地球上のどこにでも見られる人間の存在は、単に数字が示す以上の影響を与えてきた。我々は、(他のいかなる生物種にも不可能なこととして)ほとんどの植物、動物種を支配し、単に将来に対応するだけではなく将来を形作る力をも発達させてきたのである。

そうした力の行使は、利点も欠点も持っている。一面において、技術開発は莫大な利益をほとんどすべての人にもたらした。今日の大部分の人々は、輸送、通信、栄養、衛生、医療、娯楽など、かつて富める人々しか享受できなかった贅沢品やサービスを利用している。他面において、生物としてのヒトがこれほど急速に繁栄することを可能にした、まさにその活動が、我々人類と地球上の他の生物に新たな種類の危険性をもたらすことになった。農業技術の発展によって非常に多くの人口を養うことが可能となったが、それは同時に、十分な生産量を維持するために必要な土壌や水系に大きな負担を与えることになった。人間の作り出した抗生物質は細菌による感染症を治すことができるが、抵抗力を持つ細菌の菌種が出現するより早く新たな抗生物質を開発できる場合にのみ継続的な効果を持つものである。

膨大な化石燃料の埋蔵資源に関する開発と利用によって、人間は非再生の資源に依存することになった。現在の数字からすれば、現有の技術が提供するエネルギーで我々の生活水準を維持することはできず、代替技術も適性を欠くか、又は受容不能な危険性を

もたらす可能性がある。広範な採鉱、生産活動によって様々な製品が生み出されているが、それは同時に河川や海洋、土壌、大気を危険なまでに汚染するものでもある。既に、工業化に伴う大気中の副産物が地球表面を有害な紫外線から守っているオゾン層を破壊しつつあり、その一方では熱を閉じ込めて地球の平均気温を大幅に上昇させる可能性のある二酸化炭素が蓄積しているものと思われる。あらゆる災害の中でも、核戦争が起これば、地球上のすべての生命の重要な側面を変化させてしまう可能性がある。

他の生物種の観点からすれば、人間の存在によって、多くの面積が食料栽培のために切り拓かれたために彼らが利用できる地球表面の面積は減少し、彼らの食物資源が損なわれ、世界的な環境の温度や大半の化学組成が変化したことでその生息環境が変化し、故意又は偶然に外部の生物が持ち込まれたことで生態系が不安定化し、現存する生物種が減少し、また一部の事例においては、選択的な育種と最近の遺伝子工学によって、実際に特定の動植物の性質が変化している。

一部の大きな自然災害を除き、地球上の生物の未来を待ち受けるものは、大部分人間によって決定されることになろう。人間存在の多くの側面を改善し、新たな危険性を世界にもたらしつつ、我々人間を現在の状況に導いた我々の知性がまさに、我々が生き残るための主たる資源でもあるのである。

農業

歴史を通じて、大部分の人々は多くの時間を食料と燃料の入手に費やさねばならなかった。人々は放浪の狩猟者や採集者として出発し、環境において見つけた動植物を食料として利用した。しだいに人間は処理技術（粉碎、塩漬け、調理、発酵など）を用いてその食料供給量を拡大する方法を学んでいった。人間はまた、一部の通常は食料とならない動植物の部分を使って道具や衣服、容器を作る方法を学んだ。狩猟と採集による生活が数千年間続いた後、人間は動植物を操作してより望ましい食料供給を実現し、より多くの人口を養う手法を開発していった。人間は一定の場所に作物を植え、耕作、除草、灌漑、肥料の添加によってその成長を促した。また食料や材料として利用するために動物を捕獲、飼育し、農耕や運搬用に訓練さえ施した。後にはそうした動物を繁殖させるようになる。

農業におけるさらなる進歩は、その後人間が生命形態の利用だけではなくその変更方法を学んで以降に見られるようになった。当初の間、人間は繁殖させる動植物の選択によってしかそれを制御できなかった。自然な多様性を持つ特性の組み合わせが試みられ、動植物の生育性、耐久力、生産力の改善を図っていった。異種交配に利用できる自然に適応した多様な植物種を維持するため、世界中に種子銀行が設けられた。その重要性はそうした遺伝的資源に対するどのような権利を誰が所有するかについて国際的な協議が行なわれることにも現れている。

20 世紀には、放射線を使って突然変異を誘発するという現代遺伝学の成功が、植物

種における自然の多様性の増加に寄与し、その結果選択的育種に利用可能な種が増えることになった。科学者たちは現在、生物の遺伝物質を直接変更する方法を学びつつある。人間が遺伝暗号（すべての生命形態について事実上同一である）の働きについての学習を深めるにつれ、一つの生物種から他の生物種へと遺伝子を移すことが可能になりつつある。遺伝暗号の配列がどのように機能を支配しているかに関する知識が得られれば、一部の特性を生物種の間で移動させることができる。この技術は最終的に、新たな特性の設計へと導くものである。例えば、植物に昆虫に対する抵抗力を持つ物質を合成する遺伝プログラムを組み込むことが可能となる。

最近数十年間を通じて農業生産性が改善されていることの一つの要因は、動植物の疫病対策にあった。以前のアメリカでは、また世界的にはさまざまな地域において依然そうであるが、農作物の多くの部分が雑草、齧歯類、昆虫、病気の原因となる微生物による被害を受けてきた。殺虫剤や除草剤、除菌剤などの広範な利用によって有効な農業生産量は大幅に増加した。しかし、問題も起こっている。その一つは、殺虫剤がまた環境内の他の生物にも有害に作用し、時にはその利用場所から遠くはなれた地域にまで影響を及ぼし、また時には農業排水や食物網によって濃度が高まってしまう。例えば、ワタミハナゾウムシの除去のために用いられた殺虫剤は、その自然捕食者（天敵）をも殺す結果となり、ワタミハナゾウムシの被害は却って拡大することになった。もう一つの問題は、生物が遺伝的に決定された殺虫剤に対する抵抗力がつくように自らを発達させるにつれて、殺虫剤の効力が低下し、さらに大量の殺虫剤や新たな薬剤の開発が必要になるという点である。

その結果、環境に対してより調和のとれた技術の利用が研究されるようになってきている。この活動には、化学物質の慎重な設計と利用、作物のより賢明な多様化に加え、特定の土地において栽培される作物の種類を、土壌の一部成分を枯渇させるようなものから、そうした成分を補充するものに替えていく作業も含まれる。作物の変更によって、作物における特定の疫病の発生確率を低下させることも可能になる。疫病の化学的な抑制に代わるべき手段としては、農業生態系における疫病の種類を減少させることを目的とした、他の生態系からの生物の導入が挙げられる（例えば、局所的な雑草を食料とする外国の昆虫を導入するなど）。この手法もまた、導入した生物自体が疫病になるという危険性を内包している。

農業の生産性は、機械や肥料の利用によって向上している。機械やその動力源として必要な化石燃料エンジンのおかげで、一人でさらに広い土地を耕作し、収穫し、より多くの種類の土地を耕作し、より多くの数の動植物を飼育、栽培し、関連製品を利用できるようになっている。肥料は、特に西半球においては、他の多くの地域において用いられている有機肥料に代わって、不足する土壌の栄養素を補うために広く利用されている。機械と肥料の大量使用における危険性は、過剰利用による土壌の不毛化傾向である。そのため、アメリカ政府は農業生産者に対し、定期的に土地の休作期間を設けて土壌の自

然な肥沃さを回復する措置を講じるよう促している。

何世紀にもわたって、大部分の食物はその飼育、栽培場所から数十マイル程度の範囲内で消費又は販売されていた。しかし、輸送や通信技術の発展とともに農業市場は改革されていった。土地の生産性における数々の改善により、一部地域では地元の人々が必要とするよりはるかに多くの食料が利用できるようになった。また迅速で安価な輸送手段の開発により、処理方法、添加剤、冷蔵設備、梱包の利用とあいまって、食料の損失が抑えられるようになった。しかし、農業製品の迅速な長距離輸送は、そのための迅速で長距離の販売と流通に関する手段も必要とする。現代の輸送・通信システムは、食物をその生産地から数千マイル離れた地域で販売し、消費することを可能にしている。しかし、こうした長距離の流通網が、供給途絶に対しては脆いものであることは事実である。

大半の市場が局所的なものであった時期、悪天候によって農民や消費者の生活は大いに影響された。現在では、食物が世界的な市場を通じて流通されているために、豊かな国の消費者は、食料供給の不足に対する懸念が以前よりはるかに小さなものになっている。他方、世界のどの地域の悪天候であれ、他の市場に影響する状況にもなっている。消費者のために国内の食料供給を維持し、同時に収入の大幅な変動から国内の農民を保護するという政府の政策が、多くの形態の農業規制につながっている。それには例えば、土地の利用方法や販売すべき製品、その価格に関する規制も含まれる。

わずか1世紀前の時点で、アメリカ国内の労働者の大多数は農業に従事していた。現在では、技術によって農業の生産効率が大幅に向上したため、国民のうち直接農業生産に関わっている比率はごくわずかである（約2%程度）。しかし、農業用機器や化学薬品の生産、食物や繊維の加工処理、貯蔵、輸送、流通販売に関わる人々にはるかに多い。国内の食料生産に要する農民の数が急激に減少していることで、田園地域の多くの人口が都市部に移っており、結果的にごく最近まで主たる生活様式であったものが事実上消滅しつつある。

材料

技術は、非常に多様な材料の利用と応用に基づくものであるが、そうした材料の一部は自然に入手でき、一部は混合や加工処理によって生産され、さらに一部は原材料から合成される。すべての材料には強度、密度、硬度、柔軟性、耐久性、耐水性、耐火性、熱や電流の伝導性といった一定の物理的特性がある。これらの特性は、製造業者、技術者、その他技術に携わる者たちによる材料の用途を決定するものとなる。

人間の歴史の大部分において、材料技術は主に動植物や鉱物など、天然資源の利用に基づくものであった。時間が経過するにつれて、人間は自然の材料の性質が処理によって変えられること（皮のなめしや粘土の焼締めなど）を学んでいった。後に人間は、（混合、層状化、結合により）材料を物理的に結びつけ、複数の異なる材料の特性を組み合

わせることができることを発見した（例えば、様々な種類の木材を貼り合わせて作られた弓、コンクリートに埋め込んだ鉄棒、鉄の垂鉛めっき、布に編みこんだ繊維など）。人間はまた、鉄の焼き戻しやガラスの焼鈍しなどによって一部の特性が大幅に改善されることも学んだ。

1960年代以降、材料技術はますます全く新しい性質を持つ材料の合成に重点を置くようになってきた。この工程には通常の場合、冶金において数千年にわたって行われてきたような複数の物質を混合する作業が含まれる。しかし、一般には化学変化が関わっており、新材料の性質がその構成要素と全く異なる可能性もある。プラスチックなどの一部の新たな材料は、原子の長い鎖を結びつける化学反応によって合成される。プラスチックは、自動車や宇宙船の部品から、食料包装や繊維製品、人工関節や生分解性の縫い糸に至るまで、様々な用途用に広範な性質を持たせるように設計できる。セラミックもまた多様な性質を持たせることができ、さらにセラミック同士でも全く異なる性質にすることができる（例えば、極度に低い電気伝導性を持つセラミック絶縁材や制御可能な電気伝導性を持つセラミック半導体、事実上無限の電気伝導性を持つセラミックの超伝導体）。一部の材料は、全天候型油や濃度可変サングラスなど、多様な環境に適応できるように設計できる。

技術の進歩により、人間は環境内の一定の物質を自然の過程で変換される速度以上の速度で利用するようになった。多くの国では、過去数百年間で森林が急速に減少し、鉱床も枯渇しつつある。代替材料の研究は継続して行われ、多くの場合においてそうしたものが発見され、又は開発されている。

使用済材料の処理がますます大きな問題となっている。有機廃棄物など一部の使用済材料は、再び安全に環境へ戻すことができる。しかし、人口が増えるにつれ、その作業はさらに困難に、さらに費用がかかるものとなっている。一方で、プラスチックなど一部の材料は、容易にリサイクルすることができないだけでなく、環境に戻した際にも急速には分解しない。またさらに別の使用済物質は、長期間にわたって非常に危険であるために、その最善の処理方法が明確でなく、広く論議の的となっている（最も顕著な例に放射性廃棄物があるが、これにとどまらない）。こうした処理問題を解決するには、社会的かつ技術的な革新を含む組織的な努力が必要となる。

製造

物を作るには様々な道具が必要である。一般的に技術の進歩は切削道具の精密性と能力、適用可能な動力、熱を集中させることのできる温度、作業効率の迅速性、作業を反復する際の一貫性といった事柄における改善によるところが大きい。そうした道具は、主に均質製品の大量生産（自動車や腕時計など）と、超高品質製品の少数生産（宇宙船や原子時計など）を中心とする現代の製造業において必要不可欠な要素である。

現代の製造工程は、通常の場合（1）原材料の入手と準備、（2）成形、接続、組立な

どの機械的作業，(3) 被覆，試験，検査，包装，という三つの段階で構成されている。この全段階において，作業をどのような順序で行い，それをどのように実施するかについて選択すべき事柄があるため，生産性を最適化するための作業編成もまた製造業における重要な要素となる。

現代の工場は，特定製品の生産用に特化する傾向にある。同じ場所で継続的にほとんど似通った製品の大量生産が行われる場合，それらを別個に製造するよりもはるかに安価に行うことが可能となる。このような費用効率は，機械，エネルギー源，原材料又は構成部品を労働者の近くに配置することで実現される。この場合，別個の装置間又は別個のモデル間においてさえも互換性のある部品を作ることができるため，製品の保守や補修もまた生産が集中化されている場合の方が容易になる可能性が大きい。

生産はますます自動化が進んでいる。一部の環境では，大量生産の反復作業を行うのにロボットが利用されている。加工処理に関する指示は，人が解釈し実施する代わりに，工程を電子的に制御する目的で利用されている。制御上の柔軟性は，製品ラインを特別仕様にできる多目的機械の設計と利用を可能にしている。そうした機械はまた，製造業者が最初に新規機械のための特別な配置を構成することなく，新たな製品ラインを導入することを可能にするものである。

製造システムの設計は，自動化の如何に関わらず，非常に複雑化するものである。第一に，作業の順序は多くの可能性を許容するものであり，そこから能率と費用効率に優れたものを選択しなければならない。次には，選択された順序に応じて，数多くの材料の流れと作業の時間を制御し，監視し，調整しなければならない。人的技能や判断に関する多くの詳細事項を正確に定めることは困難であろう。しばしば，専門家であっても作業の方法や内容について説明できない場合がある。コンピュータによる制御は，非常に複雑な製造システムの効率的な運転を可能にするものであるが，依然として予見不能な，又は予見されていない事態に対処するために人による監督は必要である。

生産の進歩によって，労働の性質も変化している。過去においては，一人の職工が製品や技術面でほとんど変わらない作業を一生継続することも可能であった。しかし，一か所での大規模生産が極端な特化を促し，それぞれの労働者は，完成品を組み立てるのではなく，単一の単純作業を何度も繰り返すだけになった。その後の自動化の拡大は，直接労働や熟練した職人を減少させ，その反面ではより多くの工学技術，コンピュータ・プログラミング，品質管理，監督，保守が必要になっている。それによって，長時間にわたって同一の小さな作業を繰り返すことによる労働者の退屈感ややりがいの欠如は軽減できるかもしれないが，自動化はまた労働者による制御についてもその必要性を低下させるものであり，一部の労働者が採用される一方で他の労働者が失業する事態も生み出している。そうした意味では，技術的変革の速度が増すにつれて，次々に変遷する新たな職業上の役割を学習する柔軟性と技能がますます重要になっている。

エネルギー資源

産業、輸送、都市開発、農業、その他の大半の人間の活動は、利用可能なエネルギーの量や種類と密接な関係を持っている。エネルギーは、分解、組立、移動、通信、原材料の調達、それらの利用やリサイクルに関係する技術的な工程に必要なものである。

様々なエネルギー資源とその利用方法は、それぞれの費用、影響、危険性を包含している。資源の一部、例えば直射日光、風力、水力などは、引き続き無尽蔵に利用できるであろう。木材や草などの植物燃料は自己再生能力があるが、それも限られた速度でしかなく、収穫量と同量の植林や栽培を行ってはじめてできることである。既に地球に蓄積されている燃料、すなわち石炭、石油、天然ガスやウランは、最も容易に入手可能な資源が枯渇してしまえばさらに獲得が困難になるであろう。欠乏の恐れが出始めたとき、超深度掘削や低濃度ウラン鉱の採掘、又は海底での採鉱など、新技術が残る資源のより有効な利用を可能にするかもしれない。しかし、それらの資源が完全に枯渇する時期を予測するのは困難である。最終的な利用限度に達する場合、完全な枯渇よりむしろ法外な費用がその理由となる可能性があり、資源を獲得するのに必要なエネルギーの方がそうした資源のもたらすエネルギー量を上回る時点が問題となる。

太陽光線は、我々が利用するエネルギーの大半における究極の供給源である。太陽光線にはいくつかの利用方法がある。太陽光線のエネルギーは、植物において直接蓄えられ、大気、土地、水を加熱して風や雨を引き起こす。しかし、太陽光線のエネルギー量はかなり弱く、ほとんどの技術面での利用に供するには、大規模な集光システムが必要となる。例えば、水力発電技術では広大な土地から流出によって河川に蓄積された降水を利用し、風車は広大な土地と海洋表面の加熱によって生み出された気流を利用し、また風力と感光面によって直接太陽光線から電力を得るには、非常に大規模な集光システムが必要になる。家庭内で利用するための小規模なエネルギー生産であれば、風車や直接的な太陽光加熱によって部分的に実現できるが、風車や太陽光加熱の大規模利用のための費用効率に優れた技術は、いまだ開発されていない。

歴史の大部分の期間を通じては、木材の燃焼が、調理、住居の暖房、機械の運転を目的とする最も通常 of 集中的なエネルギー源であった。現在利用されているエネルギーの大半は、化石燃料の燃焼に由来するものであるが、化石燃料には、植物が数百万年の間に集めた太陽光線エネルギーが蓄えられている。石炭は最近まで最も広く利用されていた化石燃料であった。しかし前世紀には、採取が容易であり、産業において多くの用途があることに加え、自家用車、トラック、列車、航空機など輸送手段用の手軽なエネルギー源としての濃縮利用が可能であるため、石油とそれに付随する天然ガスの方が好まれるようになった。しかし不幸にして、化石燃料の燃焼はすべて、健康や生命にとって脅威となりうる廃棄物を大気中に排出することにつながるものである。地下での石炭の採掘は炭鉱労働者の健康と安全に対する極度の危険性を持ち、かつ地中に穴を開けたまま放置することにもなる。また、石油流出は海洋生物を危険に曝すことになる。再び木

材の燃焼に戻ったとしても、それもまたいわゆる大気中の温室効果ガスを増加させ、燃料用に木材を過剰に伐採すれば、局所的にも世界的にも健全な生態系の維持に必要な森林を枯渇させることになるため、満足できる代替手段ではない。

しかし、この他にもエネルギー資源は存在する。その一つは重い元素の原子核分裂によるもので、化石燃料の燃焼と比較すれば、利用される材料の質量に比例して、莫大な量のエネルギーが放出される。原子炉においては、生産されるエネルギーの大半は水を沸騰させて蒸気に変えるために利用され、その蒸気によって発電機を駆動させる仕組みになっている。必要とされるウランは、限りはあるものの供給量は非常に多い。しかし、核分裂によって生成される廃棄物は高度の放射性を持ち、数千年間もその性質を維持する。こうした核分裂の廃棄物を合理的な程度に安全処理するという技術上の問題は、放射能に対する一般市民の恐怖感、原子力発電所の破壊行為、武器製造目的での核物質の窃取などに関する懸念によってさらに増幅されている。制御された核融合炉は、潜在的にはこれよりはるかに大きなエネルギー源となりうるものだが、技術的にまだ実現可能となっていない。核融合炉は、それ自体がより安全な燃料物質を利用するが、それでも核融合反応の過程で放射性を持つに至った老朽化した建設資材の処理という問題が残ることになる。また新技術には通例のこととして、予期しない危険が発生する可能性もある。

エネルギー利用

エネルギーは、その発生源から利用場所まで送らなければならない。人間の歴史の大部分の期間を通じて、エネルギーはその場で、すなわち風車や水車、又は森の近くなどで利用しなければならなかった。やがて、輸送手段の改善によって化石燃料をその採掘場所から離れた場所で燃焼させることが可能となり、集中的な製造業が以前よりはるかに広い地域にまで拡大していった。今世紀においては、エネルギー資源を使って発電を行うことが一般的になり、それによってエネルギーをほとんど瞬時に電線を通じて発電場所から離れた所に送ることができるようになった。さらに電気は、他の種類のエネルギーとの間で都合よく変換したりされたりすることが可能である。

利用可能なエネルギー量と同様に重要なのがその質である。すなわち、エネルギーを濃縮することが可能な程度と、それを利用する際の便利さである。これまでの技術改革の中心的要素は、どの程度熱い火が作れるかということであった。新たな燃料の発見、より優れた炉やオーブンの設計、強制的な給気又は純粋酸素の供給によって、粘土やガラスの焼成、金属鉱石の溶解、金属の精錬や加工のために利用可能な温度がしだいに高められていった。レーザーは放射エネルギーを非常に強度と正確さで集中させることができる新たな道具であり、コンピュータ・チップの製造や眼球の外科手術から衛星通信に至るまで、ますます多くの用途に向けて開発が進められている。

一つの形態から他の形態への有効なエネルギー変換の間に、一定量のエネルギーが環

境に散逸することは避けられない。製造された物質の構造内での結合エネルギーを除き、大半の場合は我々のエネルギー利用の結果そのすべてが結局は分散し、環境をわずかに暖め、最終的には宇宙空間に放射されてしまう。この現実的な意味において、エネルギーはどこかに存在はするが、事実上「使い果たされてしまう」ものである。

人間は、自らにとって有用性を持つエネルギー変換を意図的に引き起こす巧妙な手法を考案している。そうした手法には、岩石を投げたり（生化学的エネルギーを運動エネルギーに変換する）火をつけたり（化学エネルギーを熱と光のエネルギーに）するような単純な動作から、蒸気機関（熱エネルギーを運動エネルギーに）、発電機（運動エネルギーを電気エネルギーに）、核分裂炉（核エネルギーを熱エネルギーに）、太陽電池（放射エネルギーを電気エネルギーに）に至る複雑なものまで幅がある。あらゆる現象と同様、こうした装置の運転においては、有効なエネルギーの出力（さらなる変換のために利用可能なエネルギー）は、常にエネルギーの入力を下回り、通常その差は熱として現れる。このような装置の設計における一つの目標は、可能な限り効率を良くすることであり、それはすなわち、一定の入力に対する有効な出力を最大限に高めることを意味する。

地球上における豊かさと発展度の分布状況は一般的に差があるが、それに伴ってエネルギー利用も世界の様々な地域によって非常に偏っている。工業国は莫大な量のエネルギーを工場の化学的、機械的な工程で利用し、合成材料や農業用肥料を製造し、産業や個人的な輸送手段の動力供給を行い、建物の冷暖房を行い、照明設備や通信機器を稼働させている。世界人口が増加し、より多くの国々が工業化を進めるにつれて、さらに急速なエネルギー需要の増加が見込まれる。大規模な利用と並行して、大規模な無駄使いも行われている（例えば、機能以上の出力を持つ自動車や断熱施工の不十分な建物など）。しかし、他の要素、特にエネルギー利用効率の向上によって、エネルギーに対する追加需要が削減できる可能性がある。

エネルギー資源の枯渇は、技術的、社会的手段の双方によって遅らせることが可能である。技術的手段には、エネルギー変換装置の設計改善や、熱移動を抑制したい箇所での断熱（例えば温水タンクの断熱）、又は散逸する熱の対策を施すことによって、一定量のエネルギー入力から実現可能な有効性を最大限に高めることも含まれる。社会的手段には、政府が優先度の低いエネルギー利用を制限したり、効率性（自動車エンジンに関してなど）又は断熱性（建築など）に関する要件を定めることなどが含まれる。個人もまた、原則問題としてエネルギーを節約するか、又は個人の長期的な支出を削減する目的で、個々の技術的な選択と利用においてエネルギー効率に配慮することが可能である（例えば、照明のこまめな節約や高効率車に乗るなど）。しかしながら、これには常に社会的選択が伴う。例えば、断熱性に優れた住宅は通気を抑えるため、室内における汚染物質の蓄積量が増加する可能性がある。

通信

人間は、常に適正な形においてではないが、頻繁に通信を行う。数百もの様々な言語は、それを使う人々の必要性に合うように発達した。言語はその音、構造、語彙の面で大きく異なり、また言語は文化に密接に関係しているため、正確な翻訳は常に容易なものとはならない。書き言葉による通信は、個人的な手紙から書籍やくだらないメールに至るまで、大陸を横断し、最も遠く離れた辺境地にも届けられる。電話、ラジオ、テレビ、衛星、音声、光学記録、その他の形態の電子通信によって情報の流れが増大し、その選択肢も増えている。

通信には、情報を表す手段、それを発信して受信する手段、発信された内容と受信された内容との間での忠実度に関する一定の保証が関係する。情報を表すためには、何らかの通信媒体において情報を符号化する必要がある。人間の歴史においては、自然媒体として機械的な接触（触れること）、化学的接触（匂い）、音波（音声や聴覚）、可視光線（視覚）があった。しかし、信頼性と永続性を求める中で情報を記録するための媒体が必要とされた。最初に開発された信頼できる媒体は、木材、粘土、石、そして最終的には紙など、堅い物質に印をつけることであった。今日では、プラスチック・ディスクや磁気テープなどに微視的な程度で印をつけている。これらの修飾された物質は多年にわたって記録を維持することができ、またその符号化された情報をそのまま遠くに移動することもできる。

電流を発生し、制御できる機器の発明により、情報は電流の変化として符号化し、電線を使ってほとんど瞬時にして遠くまで送ることができるようになった。電波の発見によって、同様の情報は波形の変化として記録され、電線を接続しなくとも大気を通してすべての方向に向けて発信できるようになった。特に重要なのは、微弱な電気信号によってより強力な電流を制御し、同一パターンの情報を転写できる電子増幅器の発明である。最近では、レーザーによる光波の効率制御によって、光ファイバー中での光量のパルス変化として情報を符号化し、伝送することが可能となった。

情報は、アナログ又はデジタル方式で符号化することができる。例えば、当初は電線による電気通信も無線通信もともにオン/オフ型のバースト波によるデジタル方式でしかなく、文字や数字を表すための人工的な符号を必要としていた。電子工学の発明によって大きな成果が得られ、音声や光信号と電気信号の間での変換を行う装置が開発された。電子工学によって、音声や光におけるわずかな変化を表すアナログ信号を伝送し、そうした信号を継続変化として何らかの媒体に転写することが可能となった。微視的な程度で情報を転写し、高速で情報を伝送する能力により、現在では、信頼性の高いオン/オフ型のデジタル信号を再び利用することで、アナログ信号を処理する際に発生する歪やノイズが低減できるようになった。現在、どのような種類のアナログ信号もサンプリングを行って数値として表し、その形で記憶又は伝送を行い、コンピュータで簡便に処理したり、又は音声やグラフィック表示としてアナログ形態に戻ることが可能となっ

た。

通信に関する基本的な技術面での課題は、情報の記録、変換、伝送時に増大する傾向があるノイズに対し、信号の比率を大きく維持することである。ノイズに対する信号の比率は、信号の増幅又はノイズの低減によって改善することができる。信号は、増幅又はエネルギー損失の防止（波動を細いビームとして集中させるなど）によってその強度を維持することができる。ノイズは、信号を外部のノイズ源から遮断する（マイクロホン・ケーブルのシールドなど）か、又は内部のノイズ源の抑制（増幅器の冷却など）によって低減することができる。通信におけるノイズによる誤りを極力抑えるためのまったく別の手法として、誤りの比較と検知を可能にする反復又はその他の冗長な形式がある。通信においては、単一の誤りによって伝達内容の意味が全く変わってしまう可能性があるため、一定の冗長化は常に望ましいことである。

通信は、時に機密性を必要とする。手紙は窃取して複写することができ、電話線も盗聴が可能であり、無線電信も傍受できる。プライバシーは、信号へのアクセスを防止する方法（例えば、鍵やパスワードなどを用いる）や、又は信号の解読を防止する方法（秘密の暗号などを用いる）によって保護できるものである。解読が非常に困難な秘密の暗号の作成は、数学の数論に関係する一つの興味深い用途である。機密性を提供する技術が向上するにつれて、それを暴こうとする技術もまた向上している。

情報処理

技術は、情報の収集、記録、検索、伝送において、長期にわたって重要な役割を果たしてきた。書き言葉、データ表、図、数学の公式、書類整理システムなどの発明はすべて、我々が扱うことのできる情報量とその処理速度を増大させた。現代社会の運営には大量の情報が欠かせない。事実、情報の作成、処理、伝送は、工業国の労働者にとって最も通常の業務になりつつある。

情報は、それが秩序だった記号の集合体によって表される場合に最も有効となる。人間は、表、索引、アルファベット順のリスト、階層ネットワークを使って大量のデータを編成している。情報を記録する最善の方法は、その情報の用途に応じて異なる。一つの目的を念頭に置いて記録された情報は、他の目的に用いる場合に非常に検索が困難になる可能性がある（例えば、電話番号をアルファベット順に並べた場合、調べる人の氏名を知っていれば便利だが、住所しか知らなければ不便である）。多目的データベースは、情報をいくつかの異なる方法で検索することを可能にするものである（例えば、著者名や題名、主題別に一覧表にされた書籍など）。そのような情報システムの典型的な特徴は、それぞれのデータ入力に、コンピュータが一致項目を探すことができるあらかじめ定められた一連のキーワードを割り当てる点にある。

数学的又は論理的な演算を行う機械的装置は数世紀前から存在するが、情報処理に革命を起こしたのは電子計算機すなわちコンピュータの発明であった。数学的論理学の一

つの側面として、数値、文字、論理命題を含め、いかなる情報も二項選択ビットの列として符号化できるということがある（例えば、トン（・）とツー（－）、1と0、オン/オフ・スイッチなど）。電子計算機は本質的に、論理演算を行えるような方法で接続された非常に大規模なオン/オフ・スイッチの列である。新材料や新技術によって、非可動部スイッチの超小型化と信頼性の向上が可能となり、接続された非常に多くのスイッチを小さな空間に収めることができるようになってきている。小型化は接続導線の短縮化を意味し、それによって信号の伝送時間が非常に短くなるため、小型化された電子回路は非常に速い速度で動作することができる。処理手順に必要な時間の短さに加え、非常に多数の接続が可能となったことで、コンピュータは極度に複雑又は反復的な演算指示を、人間が行う数百万倍もの速度で実行することができるのである。

コンピュータの活動は、部分的にはその接続方法によって制御され、また部分的には符号化された指示の組合せによって制御される。一般目的のコンピュータにおいては、情報処理に関する指示は配線に組み込まれているのではなく、一次的に記憶されるにすぎない（他の情報と同様である）。この仕組みによって、コンピュータによってできることがらに大きな柔軟性が与えられる。人間は、あらかじめプログラムされたソフトウェア又はプログラミング言語で書かれた元のプログラムを使って、コンピュータに指示を与える。プログラミング言語は、プログラマーが例えば英語や代数、又は図の幾何学操作を使って指示を構成することを可能にするものである。こうした指示は次に、他のプログラムによってコンピュータ用の機械言語に翻訳される。しばしばこのプログラムは、キーボード入力される形式のデータや情報記憶装置や自動観測装置からのデータなど、他の入力を必要とする場合がある。コンピュータの出力には、記号（単語や数）、グラフィック（チャートや図）、他の機械の自動制御（アラーム信号、ロボットの動作など）、又は人間の操作員に対する指示の要求などがある。

コンピュータの重要な役割は、例えば、経済や天候、交通信号網、戦略的ゲーム、化学反応など、システムのモデル化とシミュレーションの作成にある。実際のところ、コンピュータは、いかにシステムが動作するかを表す一連の複雑な指示の論理的な結果を計算するものである。コンピュータ・プログラムはそうした指示を書き記したもので、初めにシステムの初期状態を記述するデータを使って実行される。プログラムはまたシステム後の状態をも示すことができ、それを実際のシステムの振舞いと比較して、ルールに関する人の知識の正確さを確認し、修正することができる。すべてのルールをきちんと理解しているのであれば、我々はコンピュータの結果を導出する能力を利用してシステム設計に役立てることができる。

コンピュータ・プログラムの重要な潜在的役割は、人間の問題解決と意思決定を補助することである。コンピュータは既に、データを蓄積し、解析し、総括し、表示することで、人間の思考を助ける役割を果たしている。パターン検索プログラムは、大量のデータ群の中から意味を導き出す上で助けとなる。コンピュータ科学における重要な研究

分野は、人工知能の原理に基づき、人間の思考を模倣し、そしてその改善さえも可能にするプログラムの設計である。ただし、人間の思考の大部分はまだよく理解されていない。経済や天候など、他の複雑なシステムに関するシミュレーションと同様に、プログラムの成果をその元となった現象と比較することは、いかにシステムが動作するかについての学習を深めるための一つの技術である。

よく理解されている機械的なシステムにおいて、コンピュータは周到な人間による制御と同程度、又はそれより正確かつ迅速な制御を可能にする。したがって、自動車エンジンの駆動、航空機や宇宙船の航行制御、武器の照準や発射といったことをコンピュータ化すれば、より多くの情報を考慮して人間の操作員以上の迅速さで対応することが可能となる。しかし、入力された指示又は情報が誤りを含む場合や、コンピュータがそのハードウェア又はソフトウェアに機能不全を起こす危険性があるほか、コンピュータやプログラム、及び情報が完全に信頼できるものであっても、何らかの関係要素がプログラムに含まれていない、又は含まれる要素のいずれかの値がその期待される範囲を逸脱している場合、誤った結果が出される可能性がある。また、システム全体において技術的に欠陥がなくとも、非常に複雑な高速システムはその対応速度のゆえに、出力結果に関する人間の監視や判断能力を超えることが考えられる。

現代世界における制御の複雑さは、莫大な規模のコンピュータによる情報管理を要するものとなっている。また、情報量が増えるにつれて、ますます情報の追跡、制御、解釈に対する必要性が高まっている（これには情報の多層化を通じての追加情報なども含まれる）。こうした情報の洪水により、より少ない空間に記憶する方法、より有益な分類方法、より迅速な検索方法、より高速の伝送方法、より効率的な分類・探索方法、誤りの低減方法（すなわち、誤りをチェックして検出時に修正する方法）を考案することが求められている。通信の場合と同様、情報記憶もまたプライバシーと機密性の問題に関係してくる。コンピュータが管理する情報システムは、情報が決して偶発的に変更されたり失われたりすることがなく、不法なアクセスが行われても情報が引き出されないような手段を必要としている。

医療技術

医療技術は、健康にとって脅威となる条件に対する人体の曝露を低減すると同時に、そうした条件に対する人体の抵抗力を増し、実際に起こる有害な影響を極力抑えることを目的とするものである。

歴史的に見て、ヒトの健康に対する技術の最も重要な影響は疾病の予防を通してのものであり、その処置や治療を通してのものではなかった。疾病の原因となる生物が昆虫や齧歯類、人糞などを通して広まるという認識が高まったことで衛生状態が大幅に改善され、それが人間の寿命と生活の質に大きな影響を及ぼした。衛生的な手段には、ゴミの管理と処理、下水施設、下水処理場の建設、水や牛乳の滅菌浄化、伝染性患者の隔離

(又は適切な予防)、昆虫や微生物の数を化学的に抑えること(殺虫剤や防腐剤)、微生物を媒介するネズミ、ハエ、蚊の駆除が含まれる。疾病予防においてこれと同様に重要なのは、蛋白質、ミネラル、微量栄養素などの人体に必要なすべての物質を含む多様な食物で構成する妥当な食事を提供することであった。

健康技術は、疾病に対する人体の自然な防御能を高めるために利用することができる。適度な栄養と衛生条件の下であれば、何らの人工的な関与を行わずに、人体は大部分の伝染病から回復することができ、また回復すること自体によって免疫が得られることもある。しかし、多くの重大な疾病の罹患や危険性は、人工的に防止することになる。接種により、人体の免疫系は活性化され、実際に疾病に冒されることもなく、またその危険性も負わずに、人体は自らの防御能を発揮することができる。弱体化又は殺した状態の病原体を血液中に接種することで、人体の免疫系が活性化して抗体を作り出し、それが後の段階で侵入しようとする生きた病原体を無力化させることになる。接種は、特に小児の場合においては、衛生措置に次いで疾病に起因する早期の死亡を防ぐ最も効果的な予防法である。

分子生物学は、現在のワクチンよりも正確かつ安全に免疫反応を活性化させる物質の設計を可能にしつつある。遺伝子工学においては、研究と実用化に十分な分量で生物にこうした物質を作り出させる方法が開発されつつある。

疾病の多くは細菌やウイルスによって引き起こされる。人体の免疫系が細菌による感染症を抑制できない場合は、少なくとも設計対象に含まれる細菌については、抗菌性の医薬が有効となろう。しかし、いかなる抗菌剤であっても、その過剰な服用は、自然選択によって関係薬剤の影響を受けない細菌の増殖につながってしまう。ウイルス起因の感染症の処置についてはさらに知識が限られているうえ、細菌の感染症に用いられる医薬品よりもウイルス感染症の処置に用いられる医薬品は非常に少ない。

疾病の検出、診断、経過観察は、様々な技術によって改善されている。体温や血圧を測る装置や、心音を聴診する機器の開発によって、人体の全般的な状態に関する診断を行うという点では大きな進歩が見られた。その一方では、可視光線又は(体の外から)磁場、赤外線、音波、X線、放射線などを利用する細いプローブを用いた画像装置を通じて、人体内部はより正確に見られるようになった。波の挙動に関する数学的モデルを用いることにより、コンピュータはこれらのプローブからの情報を処理して三次元の動く画像を作り出すことができる。この他に、疾病に関係する体液成分の検出や、一般的な成分の水準を正常値の範囲と比較することを目的とした化学的技術もある。

染色体上の遺伝子の位置を特定する技術により、小児や出産を予定している両親において、疾病に関係した遺伝子を検出することが可能となっている。後者については、可能性のある危険性に関する情報を提供し、助言を行うことができる。人体の観察と測定に関する技術の継続的な進歩によって、情報負荷は医師が1回に考慮できる分量を超え

る場合もある。患者のデータを正常値や疾病に典型的なパターンと比較するコンピュータ・プログラムは、ますます診断に役立っている。

現代では、多くの疾病の治療もまた科学に基づく技術によって改善されている。例えば、化学的知識によって、医薬品や自然発生する人体化学物質の働き、それらを大量合成する方法、及び人体に適量の化学物質を投与する方法などに対する我々の理解が向上している。一部の種類の癌細胞に最も効果的な物質も特定されている。細かく制御された光線や超音波、X線、放射線（これらはすべて、画像用に用いられるものよりはるかに強度が大きい）の生物学的効果に関する知識は、外科用メスや焼灼術に代わる技術の開発につながっている。人体の免疫系に関する知識が増え、新材料が開発されるにしたがって、組織や器官全体の移植がますます頻繁に行われるようになった。持続性があり、免疫系による拒絶反応を起こさない新材料は、一部の人体部位に取って代わり、また電氣的に心拍数を維持したり、体内の状態を感知する装置、又は最適な時間に医薬を投与する装置の移植を可能にしている。

精神障害の効果的な治療においては、直接的な精神的症状だけではなく、可能性のある生理学的な原因とその影響、そして個々人の全体的な経験において可能性のあるその根源にも注意を向ける。精神治療には、長期間又は集中的な個人面談、同様の問題を抱えた人々による集団討論、又は行動を形成するための周到に計画された賞罰などが含まれる。医療措置には、医薬品、電気ショック、又は外科手術の利用さえ含まれる。こうした治療の総合的な効果は、他の大半の医療措置の効果にもまして不明確である。一定の手法が一部の事例において効果を示すものの、他の事例では効果がないこともある。

医療技術の改良によって、倫理的、経済的な問題が生じてきている。公衆衛生、医薬品、農業技術の改良が相乗効果となり、人間の寿命の延長と人口増加が実現した。21世紀半ばまでに終息することはないと思われるこうした人口増加は、人類すべてに十分な食料、住居、医療、雇用を提供するという問題を深刻化させ、同時にかつてないほどの負担を環境に与えている。一部医療の費用高騰により、社会はその負担者と受益者を選別するという歓迎せざる判断を余儀なくさせられている。加えて、疾病や機能不全の診断、経過観察と治療に関する技術の発達により、本来であれば自ら命を存えることができなかつたであろう人々まで生き続けさせることのできる能力が強化されている。このことは、非通常的な治療を誰に対してどの程度の期間行うべきか、あるいは行うべきでないかに関する決断を誰が行うかについての問題を提起している。さらには、妊娠中絶、重度の障害を持つ幼児に対する集中治療、脳死状態にある人々の生命維持、臓器の売買、ヒトの遺伝子変換、その他多くの社会的、文化的問題が生物医療技術から生じてきている。

予防的医療や矯正的医療においてますます重要になっている付随問題は、統計学を用いた様々な地理的、社会的、経済的集団における疾病、栄養不良、死亡率の分布状況についての追跡作業である。これは、公衆衛生問題の所在とその伝播速度を把握する際の

助けとなるものである。こうした情報を時に数学的モデルを利用して解釈することで、予防的医療や矯正的医療の効果を予測し、それによってより効率的な治療計画を策定することが可能となる。

第9章 数学的世界

数学は本質的に、論理的に関係づけられた抽象概念のネットワークを構築しそれを適用することに関係する、思考の過程である。こうした概念はしばしば、科学、技術、及び日常生活における諸問題（複雑な科学的問題におけるある側面のモデル化から、収支の釣り合いをいかにとるかという方法に至るまでの問題）の解決に対する必要性から生み出されるものである。

本章では、基本的な数学的概念に関する提言を示すが、中でも特に実用性があり、全体としてほとんどすべての人間活動において重要な役割を果たす概念に重きを置く。第2章において、数学は、抽象概念を想定してそれを操作し、結果を当初の状況に照らして検討するモデル化の過程として特徴付けられている。本章では、そうしたモデル化に利用可能な7種類の数学的な項目、すなわち数の本質と利用、記号の関係、形、不確実性、データの要約、標本抽出、推論に関する事例に焦点を当てる。

提言 数

数にはいくつかの種類がある。それらを相互に関係付ける論理と組み合わせると興味深い抽象体系が形成され、それを様々な非常に異なる方法で役立てることが可能になる。古くからある数の概念は、おそらく物の集まりにおいてそれがいくつあるかを数える必要性から生まれたものであろう。したがって、指や容器内の小石、粘土板に刻まれた印、棒の切り込み、紐の結び目などはすべて、数えた分量を表し、その経過を追うための原始的な方法であった。その後、過去およそ2,000年間を通じて、数を表すために様々な形態の書き言葉が用いられてきた。現在普通に用いられているアラビア数字は、10種類の記号(0, 1, 2, …, 9)とそれらを組み合わせるための位置を重視する規則に基づくものである(例えば203の場合、3は三、2は二百、ゼロは加えるべき十の位の数がないことを表す)。コンピュータ用の数学的言語である2進法においては、0と1の2種類の記号のみが1列に組み合わせられて任意の数を表す。現在でも一部の目的に利用されている(ただし計算にはほとんど用いられない)ローマ数字は、アルファベットの中の少数の文字と、それらを組み合わせる規則で構成されている(例えば、IVは4、Xは10、XIVは14を表すが、ゼロを表す記号はない)。

数には様々な種類がある。物を数えることに由来する数は整数(負ではない)で、我々が日常生活の中で最もよく使う数である。整数(負ではない)それ自身は、物自体ではなく、一つの集合にいくつ物があるかを表す抽象概念である。「3」は、りんご、岩、人、電圧、あるいは時間あたりのマイル数など、何でも表すことができる。しかし、大半の現実的な状況においては、どのくらいあるのかとともに、その物が何なのかを知る必要がある。したがって、大部分の計算の答えは、その量の大きさ、すなわちある単位に関係した数になる。誰かが3時間で165マイル移動したとすると、その平均速度は毎時

55 マイルであって、55 ではない。この例において、165, 3, 55 は数であるが、165 マイル、3 時間、毎時 55 マイルは量の大きさである。単位はこれらの数の意味を追っていく上で重要である。

分数は、何かの一部分を表したり、二つの量を比較したりする際に用いる数である。よく行われる比較は、長さや重さなどの大きさを測定する場合、すなわち、メートルやポンドなどの普遍単位に対して比較する場合に生ずる。端数を表すものとして 2 種類の記号が広く用いられているが、数的には等しいものである。例えば、通常分数 $3/4$ と小数 0.75 はいずれも同じ数を表している。しかし、測定された大きさを表す場合、この 2 種類の表記法は多少とも異なった意味を含んでいる。すなわち、 $3/4$ は単に $2/4$ や $4/4$ よりも $3/4$ の方が近いことを意味するために用いられることがあるが、 0.75 はこれよりはるかに精確に、 0.74 や 0.76 よりも 0.75 に近いことを意味する可能性がある。整数（負ではない）、分数は合わせて用いることができ、例えば $1\frac{1}{4}$, 1.25 , $125/100$, $5/4$ はすべて、数として同一の値を表している。

数学における柔軟性は、数直線上で考えることのできる負の数の使用によってさらに大きくなる。数直線は、ゼロを中心とする直線に沿って等しい間隔に、連続する数を配置したものである。ゼロから一方の側の数を正の数と呼び、反対側の数を負の数と呼ぶ。ゼロの右側の数を正の数とすれば、ゼロの左側の数が負の数になる。海水面より上の距離を正の数とすると、海水面より下の距離は負の数になる。収入を正の数とすると、負債は負の数になる。 $2:15$ が離陸予定時刻であるとする、 $2:10$ は「マイナス 5 分」となる。数のすべての範囲、すなわち正の数、ゼロ、負の数においては、どの数からどの数を引いても答えを出すことができる。

計算は、数と他の記号との操作であり、一定の新たな数学的表現を得るものである。他の記号には、数を表す文字も用いられる。例えば、ある問題を解決しようとする際に、問題の条件に見合う任意の数を X で表す。数記号に関して行う操作を意味する記号もある。最もよく使われるのが $+$, $-$, \times , \div の記号である（この他にも記号はある）。 $+$ と $-$ の演算は、 \times と \div がそうであるように、互いに逆の演算である。一方の操作は、他方の操作が行ったことをもとに戻す。 a/b という表現は、「量 b に対する量 a の比」、「 a を b で割った場合に得られる数」、あるいは「 $1/b$ の大きさが a 個あること」を意味する可能性がある。 $a(b+c)$ における括弧は、 b と c の和に a をかけることを意味する。数学者は、数の体系を研究し、その性質や関係を明らかにし、妥当な結果を提供する数学記号の操作方法に関する規則を考案している。

数には様々な用途があり、その一部は量的なものでも厳密に論理的なものでもない。例えば、数を数える際に、ゼロは「何もない」という特別な意味を持っている。しかし、通常温度計の目盛の上では、ゼロは単に多くの目盛の一つにすぎず、温度（またはその他の何か）がないことを意味するものではない。数は物事を順序だてて並べ、その大きさではなく、他者と比較した場合の高低関係のみを表すのにも用いられる（例えば、

競争の順位、通りの番地、数値の差が一定の意味をもたない心理テストの得点など)。数はまた、電話番号や選手の番号、自動車プレートの番号などのように、意味のある順ではなく、単に物事を識別する目的でも用いられる。

日常的に経験する世界での用途は別にしても、数自体興味深いものである。古代から、人間は「最も大きな数や小さな数は存在するか。」「すべての可能な数は、整数（負ではない）を他の整数（負ではない）で割ることで得られるか。」といった疑問を抱いてきた。また、直径に対する円周の比（円周率 π ）のようないくつかの数は、数学者だけでなく、多くの人々の想像をかきたてている。

記号の関係

数、数と数との関係は、記号で表現することができ、それを通じて現実世界の関係モデル化し、探究し、表示することができる。我々が一つの量や項目にだけ関心を持つことはめったになく、通常の場合はむしろそれらの関係、すなわち年齢と身長、気温と昼の長さ、政党と年収、性別と職業などの関係に関心を持つ。このような関係は、絵（通常は図表やグラフ）、表、式、又は言葉で表現できる。グラフは特に、量と量の間を調べる上で有効である。

代数は、様々な量を記号で表し、それらの記号を関係付ける陳述を操作することによってその関係を探る数学の分野である。時に記号表現は、ただ一つの値、または値の集合がその陳述を真にするということを意味している。例えば、 $2A+4=10$ という表現は、 $A=3$ のときに、そして、そのときに限って真である。しかし、より一般的には、式によって一つの量が一定の範囲の値をとりうることを意味し、そのそれぞれに対応する値を示している。例えば、 $A=s^2$ という表現は、変数 s の任意の値に対する変数 A のとりうる値を示している。

変数と変数との関係にはいろいろ可能な種類がある。基本的で簡単な例には、(1) 正比例（一つの量が他の量に対して同一の比率を維持する）、(2) 反比例（一つの量が増加するとそれに比例して他の量が減少する）、(3) 加速変化（一つの量が一様に増加するにしたがって、他の量がしだいに速く増加していく）、(4) 収束（一つの量が無限に増加するにしたがって、他の量がしだいにある極限值に近づいていく）、(5) 周期変化（一つの量が増加するにしたがって、他の量が周期的に増減を繰り返す）、(6) 階段変化（一つの量が滑らかに変化するにしたがって、他の量が段階的に変化する）が含まれる。

記号表現は、数学的論理規則によって操作され、より興味深い側面をさらに明確に示すような、同じ関係を持つ他の表現を生成することができる。例えば、ページの幅 P 、1 行の文字の長さ L 、水平方向の余白それぞれの幅 m の間の関係を、 $P=L+2m$ と記号的に表すことができる。この式は、ページ構成を決定する上で有効なモデルである。これを論理的に整理し直し、他の正しい表現に書き改めることができる。例えば、 $L=P-$

$2m$ や $m=(P-L)/2$ など、これらは L や m の実際の値を計算する上で、より便利である。

いくつかの事例においては、複数の異なる関係を同時に満足させる値を見出す必要もあろう。例えば、ページ構成モデルにもう一つの条件として「文字の行の長さはページ幅の $2/3$ 、すなわち $L=2/3P$ でなければならない。」を追加することができる。この式を $m=(P-L)/2$ の式と組み合わせることで、新たな式 $m=1/6P$ が論理的に得られる。この新たな式は、他の二つの式から導かれたもので、この双方の関係を満たす m の値を決定する。この単純な例では、記号による関係式を用いなくとも、余白幅の値が容易に計算できる。しかし、これ以外の状況では、答えを得る上で、または答えがそもそもありうるかどうかを調べる上で、記号表現と操作が必要である。

しばしば、我々が最も関心を持つ量として、変化自体ではなく、変化の速さが問題になる場合がある。いくつかの事例において、一つの量の変化率は他の量に依存している（例えば、運動物体の速度の変化は、その物体に加えられる力に比例する）。また他の事例においては、変化率が量自体に比例する場合がある（例えば、一群のネズミの中で新たにネズミが誕生する数は、既にその一群に含まれるネズミの数と性別に依存する）。

形

空間の模様は、対応する記号表現を有する比較的少数の基本的な図形とその関係によって表すことができる。世界を知覚するにあたって、人間は形や模様についての知覚に大きく依存している。我々の周囲にある人工物（建物、自動車、おもちゃ、ピラミッドなど）、自然において見慣れた形態（動物、葉、石、花、そして月や太陽など）は、しばしば図形によって特徴付けられる。幾何学における概念や用語の一部は、日常的な言葉の一部となっている。実際の物体が完全に図形と一致することはありえないが、概ね近似的な形状は描くことができ、したがって図形とその関係について得られる知識を物体にも適用することができる。多くの目的においては、点、線、面、三角形、長方形、正方形、円、楕円、直方体、球、相似と合同の関係、凸、凹、交わること、接線の関係、線や面の角、線や面の平行と垂直の関係、平行移動、線対称移動、回転移動などの形態、ピタゴラスの定理といった事柄に精通するだけでも十分である。

形も大きさも、様々なシステムの性能にとって重要な影響を持つ可能性がある。例えば、三角形の構成は頑丈さを最大にし、滑らかな表面は乱流を減らし、球形の容器は与えられた質量や体積に対して表面積を最小にする。同一の形状を維持しながら物体の大きさを変化させると、幾何学的な拡大縮小によっていくつか深遠な結果が得られる。すなわち、面積は1次元の2乗の値として変化し、体積は1次元の3乗の値として変化する。他方では、フラクタルと呼ばれる一部の特に興味深い図形は、どんな縮尺で観察しても互いに非常に似通った形をしていて、一部の自然現象においても類似のものが見出される（雲、山、海岸線の形など）。

幾何学的な関係はまた、記号や数によって表すことができ、その逆も可能である。座標系は、数を幾何学に関係付けるためのよく知られた手段である。最も単純な例を挙げれば、最初に 0 と 1 を表す点を定めておけば、いかなる数も線上の一つの点として表すことができる。任意の平面上において、位置は、一組の数、すなわち座標によって一意的に定めることができる。例えば、地図の左辺からの距離と底辺からの距離、または地図の中心からの方向と距離によって表すことができる。

座標系は正確な地図を作る上で欠かせないが、多少のずれが出てくる。例えば、ほぼ球形の地球の表面は、歪みのない状態では平面上に表すことはできない。数十マイル程度の距離では問題点がほとんど明らかにならないが、数百から数千マイルの規模になると歪みが不可避免的に現れてくる。様々な近似的表現も可能であり、それぞれ形状、面積、または距離の点で別個の種類歪みを伴う。普通に用いられるある種類の地図では、極点に近い地域（例えば、グリーンランドやアラスカなど）の面積が誇張され、またこの他の種類の地図では、2 点間の最短距離や隣接する区域に事実と異なる部分が現れる。

形の数学的な取り扱いには、数や記号の関係についてのグラフ表現も含まれる。量は、長さや面積として（棒グラフや円グラフ）、あるいは基準の軸からの距離として（折れ線グラフや散布図）表現される。グラフ表示することによって、これら以外の表現では明らかにならないような傾向を容易に認識できるようになる。例えば、相対的な大きさ（比や差）、変化率（傾き）、急激な変化（横に離れていたり縦に離れていること）、収束（点と点との距離）、傾向（傾きや投影の変化）などである。幾何学的関係を表す数学はまた、複雑な構造物（例えば蛋白質分子や航空機の翼）や論理的なネットワーク（例えば、脳細胞のつながりや長距離電話システム）の設計を分析する際の助けとなる。

不確実性

世界の仕組みに対する我々の知識は、(1) 影響を与える可能性のあるあらゆる要素に関する知識の不十分さ、(2) それらの要素に関する観察件数の不足、(3) 観察における精確性の欠如、(4) あらゆる情報を意味あるように結びつける妥当なモデルの欠如、(5) 同モデルに基づいて計算を行う能力の欠陥、という少なくとも 5 種類の不確実性によって制約を受ける。一部の現象（日食や月食）については高い精度で予測を行うことが可能である一方、かなりの精度で予測を行えるもの（選挙）や、ほとんど正確には予測できないもの（地震）もある。絶対的な確実性は実現不可能であることが多いが、大小に関わらず、一部の事象が起こる偶然性とその予測における誤差の幅を推定することはしばしば可能である。

偶然性を数的な確率として表すことは有効である場合が多い。我々は通常、0 から 1 までの大きさの確率を用いる。この場合、0 は特定の事象が起こらないことが確実であるという予測を表し、1 は確実に起こるという予測を表す。0 と 1 の間の値はすべて不確実性を表す。例えば、確率 0.9 という値は、ある事象が予測通り起こる可能性が 10

回のうち 9 回あることを示し、0.001 という数値は、1,000 回のうち 1 回しか起こる可能性がないことを示す。同様に、確率は 0%（可能性がゼロ）から 100%（確実に可能性がある）までの百分率で表すことができる。不確実性は、比としても表すことができる。すなわち、ある事象に関する 0.8 の確率は、その発生に関して 8 対 2（または 4 対 1）として表すことができる。

ある事象の確率を推定する一つの方法は、過去の事象について考察することである。現在の状況が過去の状況に似通っていれば、多少とも類似した結果が期待できる。例えば、今年の夏の時期に日数にして 10%の割合で雨が降ったとすれば、今年も夏の日数のうちほぼ 10%の割合で雨が降ることが期待できる。したがって、夏の任意の 1 日における降雨の確率に関する合理的な推定値は 0.1 で、10 回に 1 回は降ることになる。追加情報が確率の推定を変える場合もある。例えば、今年の夏には曇りの日の 40%に雨が降ったとして、任意の日が夏の曇りの日であれば、降雨確率の推定値を 0.1 から 0.4 に引き上げることになる。関心の対象となっている状況におけるより多くの側面が既に我々がデータを持っている状況に似ているほど、推定結果はより現実性の高いものになる。

確率を推定するもう一つの方法は、任意の事象に対して可能性のある他の結果を考慮する方法である。例えば、ルーレットの輪の中に等しい幅の溝（スロット）が 38 か所あるとすれば、ボールがそれぞれの溝に落ちる可能性は試行回数の 1/38 であると予測できる。このような理論的な確率の推定は、可能性のあるすべての結果が考慮され、かつそのすべてが同様に起こるという前提に基づいている。しかし、そうではない事例、例えば溝の幅が異なっていると、時にボールがルーレットの輪から外に飛び出すことがあるなどの場合には、計算された確率が誤っているということになるであろう。

確率は、数多くの事象における結果の比率を予測するのに最も有効である。硬貨を投げ上げれば 50%の確率で表が出るが、硬貨を偶数回投げ上げても通常は正確にその 50%が表になるわけではない。多くの回数投げ上げるほど、正確に 50%の比率ではないが、表になる割合が理論値の 50%に近づいていくであろう。同様に、保険会社はよく 20 歳の人が任意の年に死亡する確率を 1~2 ポイントの誤差で予測することがあるが、結局のところ合計では数千人ものずれが出ることになる。その上、特定の 20 歳の個人が死亡するかどうかについては、全く予測する能力を持たないのである。また他の状況においても、比率と実際の数とを区別することが重要である。非常に多くの類似した事象がある場合、発生確率が非常に低い事象もかなり頻繁に起こることがありうる。例えば、99%の確率で正確な医学診断検査は非常に正確なように思われるが、この検査を 100 万人の人に施せば、約 1 万人が誤った結果を受け取ることになるのである。

データの要約

情報は我々の周りに溢れている。その量が非常に多いため、意識できないことも多い。

一群のデータは、その重要な側面を明らかにすることもまた隠すこともありうる少数の要約的特徴によって表すことができる。統計学は、大量のデータの体系化と解析に有効な方法を開発していくための数学の一つの形態である。一群のデータがどのような特徴を持っているかを把握するために、例えばそれぞれのデータを数直線上に表し、次にそれらのデータがどこで重なり合い、どこでその一部が他から分かれているか、またどのデータが最高値、最低値であるかなどを調べることができる。あるいはまた、データの中央値がどこにあり、その中央値周辺にどの程度の散らばりが見られるかを記述することで、データの一群を要約的に特徴づけることもできる。

データ分布の要約の方法として最も良く知られた統計値は、平均値である。しかし、平均値の使用と解釈には注意が必要である。データが離散的である場合（1家族あたりの子どもの数など）、平均値は現実にはありえない値になる可能性がある（例えば2.2人の子どもなど）。データが一つの極端な値の方に偏っている場合、その平均値は典型的な値に近づくことさえもない場合もある。例えば、非常に個人所得の高い人々の割合がごくわずかであっても、低所得層にかたまった多くの人々が平均値を下げる効果にも増して、平均値を著しく引き上げる可能性がある。データのうち値が低い方の半分と高い方の半分とを分ける中央値（メジアン）は、多くの目的に対して、より意味がある。量を表す少数の離れた値しか存在しない場合、最も有益な代表値は最頻値（モード）であろう。これは、例えばアメリカの1家族あたりで最も普通の自動車台数は1台であるというような、最も通常の単一の値である。

より一般的に言えば、平均値自体、データにおける散らばりを無視したものであり、実際に存在する以上の均一性を暗示する可能性がある。例えば、水星の約15°Fという平均気温はあまり過酷な条件には思えないが、上は300°Fから下は-300°Fまでの幅があると知れば状況は一変するだろう。散らばりを無視することは、特に平均値を比較する際に誤解を招くことになりうる。例えば、男性の平均身長が明確に女性の平均身長を上回っているという事実は、「男は女より背が高い」とまとめて表現される可能性があるが、多くの男性より背が高い女性も多くいるのである。したがって、平均値を解釈するためには、集団内における散らばりに関する情報、例えばデータ全体の範囲や中間の50%に関するデータの範囲などの情報を得ることが重要である。数直線上に沿ってすべてのデータを点で示すことで、それらのデータの拡がり方がわかる。

我々は、二つの変数の間の関係を示そうとする意図はあるものの本質的な情報に欠けるような要約データを示されることがしばしばある。例えば、「宗教が異なる既婚者カップルの50%以上は最終的に離婚した」という主張は、「同一の」宗教を持った離婚カップルの比率に関する情報が知らされない場合には、宗教と離婚との関係を何も明らかにしない。二つの比率を比較することによってのみ、我々は実際に関係があるかどうかわかるのである。しかしその場合であっても、標本（サンプル）の選び方に偏りがあつたり、標本を選ぶ時に偶然に比率に差が生じたりするので、注意が必要である。そうし

た情報に関する適正な報告には、可能性のある偏向要因と比較にあたっての統計的な不確かさの推定値とを盛り込むべきである。

二つの量は、一方の量が増えると他方の量も増える場合、正の相関があるという（負の相関は、一方の量が増えると他方の量が減ることを意味する）。しかし、二つの量の間に強い相関関係があったとしても、それは必ずしも一方が他方の原因であることを意味しない。一方のいずれもが他方の原因である可能性もあり、双方ともに何か第三の要因の結果である可能性もある。例えば、ある地域社会における平均寿命は、世帯あたりの電話機の平均台数と正の相関がある。この場合、電話機の台数を増やすことで健康が改善されることの理由や、より健康な人がなぜ多くの電話機を買うかといったことの説明をしようとする人がいるかもしれない。しかし、健康も電話機の数も地域社会の一般的な豊かさの結果であって、それが総体的な栄養状態や医療、そして電話機を買おうとする傾向にも影響を与えているという可能性が高いであろう。

標本抽出

我々が世界について学ぶことの大半は、我々が調べる標本（サンプル）、例えば岩石組成、星からの光、テレビ視聴者、癌患者、クジラ、又は数などの標本に基づく情報から得られるものである。標本が使われるのは、対象物をすべて調べることが不可能であるか、現実的でないか、またはあまりに費用がかかりすぎるためであり、また大半の目的において標本が十分に入手できることが多いためである。標本から対象物すべてについての結論を引き出す際には、二つの問題点を考慮に入れておく必要がある。第一に、標本の選び方に関して起こる可能性のある偏向に注意しなければならない。標本を選ぶ際によくある偏向の要因には、便宜性（例えば自分の友人だけに意見を聞いたり、地表の岩石だけを採取するなど）、自己選抜（例えば、自発的な参加者やアンケートに回答した人々だけを調べるなど）、離脱した対象の除外（例えば、在学中の生徒だけを調べる、一定の診療コースを受診し続けている患者だけを調べるなど）、あるいは先入観を裏付けるデータだけを用いることなどが含まれる。

標本の有効性を決定するもう一つの主な問題点は、その規模である。手法における偏向を伴わずに標本抽出が行われる場合、標本数が多いほどその示すデータの全体的な正確性が増していく。この理由は、標本数が多くなるほど、純粋に不規則な散らばりが要約の結果に及ぼす影響がより小さくなるためである。誤った結論を導き出す可能性は、標本の規模が大きくなるほど低下する。例えば、無作為に抽出した標本に関して、1,000のうち600に一定の特徴が見られる場合、それは、10のうち6の標本に（または10のうち9であったとしても）同様の特徴が見られる場合よりも、標本を抽出された母集団の中の多数がそうした特徴を持つことのより強力な証拠となる。他方で、標本を抽出された母集団の実際の大きさは、標本の結果の正確性にほとんど影響しない。1,000の無作為な抽出は、それが1万の母集団から抽出されたものであれ、1億程度の母集団か

ら抽出されたものであれ、ほぼ同程度の誤差の範囲を持っている。

推論

推論のある側面には明確な論理的な規則があり、また他の側面には指針しかなく、さらに他の側面にはほとんど無限の創造的な（そしてもちろん誤りの）余地がある。説得力のある主張には、真の表現とそれらの表現の間の妥当な関係とが必要である。しかし、形式論理においては、表現が実際に真であるかどうかではなく、表現の間における関係の妥当性が重要となる。すべての鳥が飛ぶことができ、かつペンギンが鳥であれば、ペンギンは飛ぶことができると主張することは論理的に正しい。しかし、前提が真でないならば、この結論は真ではない。すべての鳥は本当に飛べるのか。そしてペンギンは本当に鳥なのか。前提が真であるかどうかの吟味は、それらに基づいて行われる論理と同様、正当な推論にとって重要である。上記の事例では、論理は正しいが結論が誤っているので（ペンギンは飛べない）、前提の一方、または双方が誤っていることになる（「すべての鳥が飛べるわけではない」かつ/または「ペンギンは鳥ではない」）。

非常に複雑な論理的議論も、「もし」、「かつ」、「または」「～でない」というような基本的用語の正確な使用に基づいた、ごく少数の論理的手順を通じて構築することができる。例えば、医学診断には、「もし患者が疾病 X または疾病 Y を持ち、かつ実験結果として B を有するが、C の履歴がない場合、当該の人物は処置 D を受けるべきである。」というような分岐的な論理の連鎖が関係してくる。このような論理的な問題の解決には、数多くの関係についての専門家の知識と、それらの関係を示す多くのデータの入手、及び分岐的な論理の連鎖における推論の能力が必要となろう。コンピュータは非常に多くの関係やデータを記憶し、検索する能力を持ち、一連の長い論理手順も迅速に実行できるため、コンピュータは専門家が複雑な問題（コンピュータがなければ解決が非常に困難であるか、不可能な問題）を解決することにますます寄与するようになっている。ただし、すべての論理的な問題がコンピュータによって解決できるわけではない。

論理的な関係は、容易に歪められるものである。例えば、すべての鳥は飛ぶことができるという命題は、飛ぶことができるすべての生物は鳥であるということを論理的に意味するものではない。この簡単な例で明白なように、歪曲は、特に感情が加わった状況においてしばしば生じるものである。例えば、「有罪の囚人はすべて自らに不利な証言をすることを拒否する。囚人スミスは自らに不利な証言をすることを拒否している。したがって、囚人スミスは有罪である。」というようなものである。

論理における歪曲は、必要条件と十分条件とを区別しないことからしばしば生じる。ある結果にとっての必要条件は、常に実現に必要なものではあるが、それ自体では十分ではない場合もある。例えば、アメリカ市民であることは、大統領に選出されるための必要条件であるが、それだけで十分な条件ではない。ある結果に対しての十分条件はそれ自体で十分なものであるが、同じ結果につながる他の方法も存在する可能性がある。

すなわち、州の宝くじに当たることは金持ちになる上で十分なものであるが、他の方法も存在するのである。しかし、一つの条件がともに必要であり十分である場合がある。例えば、大統領になるためには選挙民から多数票を得ることが必要であり、かつそれで十分である。なぜなら、それが唯一の方法だからである。

論理は、多くの問題の解答を見出す上で限られた有効性しか持っていない。抽象的なモデルを除き、我々は前提やそれらの論理的な関係について真であるかどうかを、確信を持って断言できないことがしばしばある。正確な論理のためには、「もし X が真であるなら、Y もまた真である」（吠える犬は咬まない）、「X は真である」（スポットは吠える）というような主張を行なえることが必要となる。しかし通常の場合、「もし X が真であるなら、Y もまた真実である場合が多い」（吠える犬は普通咬まない）、「X は多くの場合にほぼ真であるように思われる」（スポットは普通吠える）という程度の知識しかない場合が多い。したがって、通常の場合、厳密な論理に代えて確率その他の種類の推論を使い、より確かさの低い結果を導いている。例えば、「平均すれば、今日の午前中に似た気候条件の日の 70%には、夕方前に雨が降る」というような主張である。

一般的な規則（羽の生えた生物はすべて飛ぶ）に演繹論理を適用すると、特定の事例または一群の事例に関して結論を得ることができる（ペンギンは飛ぶ）。しかし、その一般的な規則はどこから来るのだろうか。それらはしばしば、観察の結果として得られた一般論、すなわち、数多くの似た事例を観察してそれらに当てはまる事柄がその一群すべてに当てはまると推論するやり方（「私の見た羽の生えたすべての生物は飛べる。だから、たぶんすべて飛べるだろう。」）であることが多い。あるいは、一般的な規則が何らの追跡可能な手段もなしに想像から生まれ、特定の現象の観察可能な側面がその規則によって論理的に導かれることを示そうとする場合もある。（例えば、「太陽が、地球を含むすべての惑星の運動の中心であるということが真であればどうなるか。」「そのような系が空に外見上の運動を生み出すことができるだろうか。」）

一般的な規則が仮説として定められたならば、どのような手段によってであろうとも、その妥当性を調べる上で論理が役に立つ。逆の事例が見出された場合（飛ぶことのできない羽の生えた生物）、仮説は真ではない。他方、一群の事例に関する一般的な仮説が真であるということを論理的に証明する唯一の方法は、すべての可能な事例（すべての鳥）について調べることである。これは現実的には困難であり、時には原理的にも不可能である。したがって、通常の場合、一般的な仮説が論理的に偽であることを証明するほうが、それが真であることを証明するよりもはるかに容易である。現在ではコンピュータを使い、膨大な数の個別の事例を調べることによって、証明はできないとしても、疑問のある数学的な一般論が真であることを説得力のある形で実証することが可能である。

現象に関する一般的原理についての仮説が立てられれば、科学は演繹的な論理を使うことができるが、そのような論理によってそうした一般的原理が導かれるわけではない。

科学的な原理は、通常の場合、限られた数の経験を一般化することで得られる。例えば、観察された羽の生えた生物すべてが卵から孵化するとすれば、おそらくすべての羽の生えた生物は卵から孵化するのであろう。観察件数が少ないとしても、これは非常に重要な種類の推論である（例えば、「一度火傷をすることは、一生を通じて火を恐れさせる上で十分な効果を持つ」など）。しかし、一般化に対する我々の生来の傾向はまた、我々に道を誤らせる。鏡を割った翌日に気分が悪くなれば、一部の人は一生割れた鏡を恐れるようになる可能性が十分にある。より高度な段階においては、同じ症状を持つ数人の患者が新薬を服用した後に回復した場合、それが単なる偶然で回復したのであっても、医師は類似性のある患者はすべてその新薬によって回復するものと一般化するかもしれない。

人間の一般化に対する傾向は、微妙な側面をいくつか持っている。一旦形成されてしまうと、一般論は事象に関する人々の理解や解釈に影響する傾向がある。例えば、ある医薬品が特定の症状を持つすべての患者に有効であるという一般化を行ってしまうと、たとえ疑わしい場合であっても、医師は患者の状態がその医薬品の服用後に改善したものと解釈してしまう可能性がある。研究調査におけるそうした偏向を防止するため、科学者は一般に、結果の観察者や解釈者とその条件を制御する人物とを別の人物にする「盲検法」の手順を用いている（例えば、患者の状態を判断する医師は、その患者が受けた個別的な処置について知らない）。

推論の大部分、そしておそらくは創造的思考の大部分もまた、論理だけではなく類推に関係する。ある状況がいくつかの点で他の状況に似通っているように思われる場合、それが他の点でもまた似通っていると考えるかもしれない。例えば、光は水の波が攪乱点から拡がっていくのとほぼ同じように光源から拡がっていくため、おそらく光は、例えば波が出会う所に干渉縞を発生させるなど、他の点でも水の波に似た振舞いをするであろうと考えるかもしれない（事実似通った振舞いをする）。あるいはまた、太陽は熱と光を発生させるという点で火に似ているため、おそらく太陽も燃料の燃焼が関係するであろう（実際には関係していない）。重要な点は、類推による推論は、結論を暗示するものであるが、それが真であるかどうかは証明しないということである。

第10章 歴史的観点

提言に歴史の知識を盛り込む主たる理由は二つある。一つには、科学がどのように営まれているかに関する一般論を説く際に、それを空虚なものとしなないためには具体例が欠かせないからである。たとえば、新たな考えは、それが構想された文脈による制約を受けるとか、しばしば科学的な権力組織によって拒絶されてきたとか、時として予期せぬ発見から突然生まれ、通常はゆっくりと、多くの様々な研究者の寄与を通じて発展する、などの主張について考えてみよう。歴史的な実例がなければ、たとえうまく記憶されたとしても、そうした一般論はうたい文句にすぎない。このためには、どれほど多くの逸話を紹介してもしすぎることはないであろう。

二つ目の理由は、科学的な取組みの歴史における一部の逸話が我々の文化遺産にとって卓抜した意義を持つからである。そうした逸話には当然、宇宙における我々の位置関係についての見方を転換させる上でガリレオの果たした役割、同一の法則を地球上と天体の運動に適用するニュートンの論証、生物種起源の仕組みに関する自らの仮説の根拠となった生物形態の多様性と関連性についての長期にわたるダーウィンの観察、地球ができてからの信じられないような年数に関するライエルの入念な文書化作業、顕微鏡でしか見ることのできない微生物による伝染病を特定したパスツールの業績が含まれる。こうした物語は、西洋文明のあらゆる思想の発達における画期的な出来事であった。

本章の提言は、古代のエジプト、ギリシャ、中国、アラブの文化に起源を持つ科学、数学、技術的発明における多数の観念ではなく、西洋文化の発達に重点を置くものである。本書で考慮される科学とは、主として過去 500 年間に欧州で発達した伝統思想の一部である。この伝統に対しては、今日のあらゆる文化に属する人々が寄与している。

本章では、科学知識の進歩と影響を例示する 10 件の重要な発見、転換を扱う。それらは、惑星としての地球、万有引力、相対性理論、地質年代、プレート・テクトニクス、物質の保存、放射能と核分裂、種の進化、病気の本質、産業革命である。同等の価値を持つ他の選択肢もあるだろうが、これら 10 件は、歴史的テーマの例示と文化的卓越性という我々の二つの規準に明確に適合した。

提言

宇宙の中心でなくなった地球

地球上の観察者からすれば、地球が静止し、他のものがすべてその周りを回っているように見える。したがって、宇宙の仕組みを想像しようとする際に、古代の人々がそうした外見上の事実を起点としたのはもっともなことであった。古代ギリシャの思想家たち、中でもアリストテレスは、約 2,000 年間信じられることになる一つの構造を描いた。すなわち、大きくて静止した地球が宇宙の中心にあって、地球の周りには太陽、月、小さな恒星が完全な球体の中に配置され、これらの天体はすべて一定の速度で完全な円軌道を描いて回っているというものであった。キリスト紀元が始まって間もなく、この基

本的な概念はエジプトの天文学者プトレマイオスによって強力な数学モデルに姿を変えた。完全円の運動に関する彼のモデルは、太陽、月、恒星の位置を予測する上で大変役立った。このモデルは、明らかに不規則に見える一部の天体の運動さえ説明した。少数の「とまどう星」すなわち惑星は、地球の周囲を完全な円を描いているのではなく、速度を変化させ、時には逆行しながら奇妙な二重の円を描いて回っているように見えた。プトレマイオスのモデルでは、この振舞いを導円の軌道上で回転する別の円を追加することによって説明した。

その後数世紀にわたって、天文学データが蓄積され、さらに正確さを増していくにつれて、このモデルはアラブ人やヨーロッパ人を含めた多くの天文学者によって洗練され、さらに複雑化されていった。これらの天文学者たちは、完全円のモデルを巧妙に洗練したものの、天体がなぜそのように動くのかという理由について物理的な説明を一切行わなかった。天体の運動原理は、地球上の運動原理とは全く異なっていると考えられていたのである。

アメリカ大陸の発見から間もない頃、ポーランドの天文学者ニコラウス・コペルニクス（マーチン・ルターやレオナルド・ダ・ヴィンチと同時代の人物）が、別の宇宙モデルを発表した。静止する地球という前提を破棄した彼は、地球と惑星がすべて太陽の周りを回っていれば、外見上不規則な惑星の動きもさしつかえなく、それでいてより知的に満足できる形で説明できることを示した。しかし、コペルニクスのモデルも依然として完全な円形の運動を用いており、古い地球中心のモデルとあまり変わらず複雑なものであった。くわえて彼のモデルでは、外見上不動に見える地球が1日に一度自らの回転軸を一回りし、かつ宇宙がそれまで想像されていたよりもはるかに大きくなければならず、最悪なことに地球が宇宙の中心たる地位を失い平凡な存在になってしまったという点で、当時優勢であった世界についての常識的な考え方に反していた。その上、軌道を周回し自転する地球というのは聖書の一部のくだりに合致しないと考えられた。大半の学者たちは、太陽中心のモデルではあまりに利点が少なく、また伝統的な地球中心のモデルに付随する他の多くの考えを放棄するには代償が大きすぎると感じた。

天文学的な測定が引き続き精度を増す中で、太陽中心の系も地球中心の系もともに、すべての天体が一様な円周運動をしなければならない限りにおいて、不具合があることが明らかになってきた。ガリレオと同時代に生きたドイツの天文学者ヨハネス・ケプラーは、静止する地球と円運動という古くからの前提をともに破棄し、惑星の運動に関する数学的モデルを考案した。彼は三つの法則を前提として提示した。そのうち最も革新的であったのは、予測可能ではあるが速度を変化させながら惑星が本来楕円軌道を周回するというものであった。この法則は結局正しいものだとわかるのだが、楕円軌道の計算は当時知られていた数学では困難だったため、ケプラーは惑星がそのように運動する理由については説明しなかった。

シェークスピアやルーベンスと同時代に生きたイタリアの科学者ガリレオによる幾

多くの貢献は、物理学と天文学の発展において非常に大きな意味を持つものであった。天文学者として、彼は新たに発明した望遠鏡を使って太陽、月、惑星、恒星を研究し、惑星の運動に関するコペルニクスの基本的な考え方を裏付ける多くの発見を行った。おそらくそうした発見の中でも最も影響力があったのは、木星を周回する四つの衛星の発見であり、それによって地球が唯一天体運動の中心にあるわけではないことが示された。望遠鏡を使って、彼は月の表面のクレーターや山脈、太陽の黒点、月に似た金星の相、そして肉眼では見えない膨大な数の恒星など、説明不能だった現象も発見した。

宇宙論の革命におけるガリレオの別の偉大な業績とは、それを一般市民に向けて示したことであった。彼はその新たな見解を、同時代の教育あるすべての人々に理解できる形式と言語（イタリア語）によって表した。彼はまた、地球が軌道を周回し自転することに反対する多くの民衆の主張を反駁し、運動に関するアリストテレスの説明における矛盾を指摘した。依然としてプトレマイオスのモデルを信じていた聖職者からの非難、そしてその後ガリレオの異端的とされた思想を理由として行われた宗教裁判は、この問題に対する注目をさらに集めるばかりで、それによって常識を構成する事柄に関して一般に受け容れられていた観念を加速的に変革させる契機となった。それはまた、科学者が革新的な考えを提示する時に必ず沸き上がる避けられない緊張状態の一部分を露呈するものでもあった。

天と地の統合

それでもこれらの捻れた糸を編み直し、そのはるか先にまで思いを馳せ、新たな宇宙に関する概念を創造するには、英国人の科学者アイザック・ニュートンを待たねばならなかった。17世紀末近くに発表され、かつて著された中でも最も影響力の大きい書物の一つとなった彼の著作『自然哲学の数学的原理』の中でニュートンは、地球上における物体の運動と遠く離れた天体の運動とに関する知識を統合し、継ぎ目のない数学的世界観を提示した。

ニュートンの世界は驚くほど単純なものであった。すなわち、少数の主要な概念（質量、モーメント、加速度、力）、運動に関する三つの法則（慣性、力と質量に依存する加速度、作用と反作用）、すべての質量間の引力が距離にどのように依存するかに関する数学的法則を用いて、ニュートンは地球上と天体における運動を厳密に説明することができた。わずか一組の概念だけで、彼は当時観察されていた惑星や恒星の周回軌道、彗星の運動、月の不規則な運動、地球表面上における落下物体の運動、重量、潮汐、地球赤道上的わずかな膨らみも説明することができた。ニュートンは地球を理解可能な宇宙の一部として示し、典雅な単純さと壮大な構造を持つ宇宙、つまり構成要素間の力の作用によって自動的に動いていく宇宙を示したのである。

ニュートンの体系は、科学的かつ哲学的な世界観として 200 年間にわたって主流となった。ある彗星がニュートンの原理に基づいて計算された特定のときに再び現れると

いうエドムンド・ハレーの予言が実証されたことで、それは早い段階で強力な確証を得ることとなった。ニュートンの体系に対する信頼は、20世紀の宇宙探査に至るまで（を含めて）、科学や現実的な取組みにおけるその有効性によって継続的に強化されていった。アルバート・アインシュタインの相対性理論は、それ自体革命的ではあったが、ニュートンの世界を覆すのではなく、その最も基本的な概念の一部を修正するものであった。

ニュートン科学は大成功を収めたため、その影響は物理学や天文学を超えて広がっていった。物理原則とそこから帰結を導出するニュートンの数学的方法は、共に他のすべての科学のモデルとなった。結局のところ自然のあらゆる事柄は物理と数学によって解明することができ、したがって自然は神の助けとか意思なくして自ら運航できるものであるという考え方が拡大していったが、ニュートン自身は、自らの物理学を神の手が宇宙に作用していることを実証するものとしてとらえていた。社会思想家たちは、政府もニュートンの太陽系に倣い、力と作用とのつり合いによって規則正しい運営と長期的な安定が保証されるように設計できないものかと考えた。

科学界内外の哲学者たちは、恒星から原子に至るまでのあらゆるものが正確な機械論的法則に従って動いているとすれば、人間の自由という観念も幻想にすぎないかもしれないという暗示に悩んでいた。思想から社会的大変動に至るまで、すべての人間の歴史は、単に完全に定められた事象が連続して現れているにすぎないのか。社会思想家は、18世紀および19世紀に広く議論されていた自由意志と社会制度の編成に関する疑問を提起した。20世紀に原子の振舞いに基本的な予測不可能性が見られたことで、こうした懸念の一部は緩和されたが、同時に新たな哲学的問題も提起することになった。

物質とエネルギー・時間と空間の統合

ニュートンの世界観が精巧で成功を収めていたとはいえ、20世紀初頭になるとついにいくつかの根本的な修正を迫られることとなった。まだ20代の若さであったドイツ生まれのアルバート・アインシュタインが、自然理解に対して革命的な貢献をすることになる理論的見解を発表したのである。その一つが特殊相対性理論で、その中でアインシュタインは、ニュートンが考えていたような完全に別々な次元ではなく、むしろ相互に密接に関係した次元として空間と時間を考えた。

相対性理論にはいくつかの驚くべき意味が込められていた。その一つは、観察者や光源の運動に関係なく、光速はすべての観察者にとって同じに計測されるというものである。こうしたことは、他の物体の運動には当てはまらない。なぜなら、物体の計測上の速度は常に観察者の運動に依存するからである。さらに、真空中における光速が可能となる最高限度の速度であり、どのようなものもその速度まで加速することはできず、またそれ以上の速度での運動を観察することもできない。

特殊相対性理論は、質量とエネルギーの等価性を主張することで最も良く知られてい

る。すなわち、いかなる形態のエネルギーも質量を持ち、また物質自体がエネルギー形態の一つだということである。このことは、有名な方程式 $E=mc^2$ (E はエネルギー、 m は質量、 c は光速) に表されている。 c はほぼ 186,000 マイル/秒なので、ごくわずかな質量でもエネルギーに変換すると莫大な量が放出される。原子炉で熱エネルギーを生み出す核分裂反応や、太陽から放出されるエネルギーを生み出す核融合反応においては、こうしたことが起こっているのである。

特殊相対性理論から約 10 年後、アインシュタインは、その最高の業績でありかつ人類の知性の歴史全体を通じて最も深遠な偉業の一つと考えられている一般相対性理論を発表した。この理論は、重力、時間、空間の相互関係を扱うもので、その中でニュートンの万有引力は幾何学空間と時間における歪みとして解釈されている。相対性理論はそれに基づく予測を調べることによって繰り返し試験され、決して誤ることはなかった。また、宇宙の構造に関するより強力な理論がこれに取って代わることもなかった。しかし、多くの物理学者は、一般相対性理論と原子の振舞いに関する量子論とを結び付ける、より完全な理論をどうやって創り出すか現在も探し求めている。

経過した時間の拡張

地球ができてからの年数は人間の歴史の大半を通じて問題とはされなかった。19 世紀に至るまで、西洋文化のほとんどすべての人々が地球の年齢はほんの数千年程度であり、地球の表面すなわち山、谷、海洋、河川は、瞬間的に創造されて以来変化していない固定されたものだと思っていた。折に触れて様々な人が、起こっていることが観察可能な種類のゆっくりとした変化の過程で地球の表面が形成されてきた可能性に思いを巡らせたが、その場合、地球は大半の人々が信じている以上の年齢でなければならなかった。渓谷が河川の浸食によって形成されたものであり、岩石層が堆積層における浸食を起源とするものであれば、現在の地形になるまでに数百万年を要したと推定できるだろう。しかしその議論は、19 世紀初めに英国人の地質学者チャールズ・ライエルがその代表作『地質学原理』の初版を刊行するまで、ごくわずかな進展しか示さなかった。ライエルの著作の成功は、山々の岩石層のパターンや様々な種類の化石の所在についての豊富な観察と、そうしたデータから彼が推論する際に用いた厳密な推論によるものであった。

『地質学原理』は数多くの版を重ね、数世代に及ぶ地質学研究者たちが学んだ。その結果ライエルの原理は受け容れられ、彼の調査や推論方法が採用されるようになっていった。さらにライエルの著作はまた、チャールズ・ダーウィンにも影響を与え、ダーウィンは種の多様性を研究するための世界的な航海に出ている際にその本を読んだ。ダーウィンは生物進化に関するその思想を発展させていく中で、地球の年齢に関するライエルの想定と、膨大な証拠によってその主張を裏付ける彼の手法を採用した。

科学においてはよく起こることであるが、こうして世界に関する思想を切り拓いたラ

イエルの革命的な新しい見解は、同時に彼自身の考え方を制限するものとなっていった。ライエルは非常にゆっくりとした変化という考えを採用し、それは地球が決して突然に変化することがなかったことを暗示した。そして事実、本当に地球の全般的な特徴は全く変化することがなく、類似した小規模変化の連続を繰り返しているものに思えた。しかし、新たな証拠が蓄積され続け、20世紀半ば頃になると、地質学者たちは、そうした小さな繰り返しは、急な露出変化であるとか地殻の激変、新たな状態に向けた長期的な斬新的変化も含めたより複雑な過程のごく一部にすぎないと考えるようになった。

地球表面の移動

かなり正確な世界地図が現れ始めるようになると間もなく、アフリカ大陸と南米大陸があたかも巨大なジグソーパズルのように組み合わせることのできる形をしていることに一部の人々が気付くようになった。これらは、かつての一つの巨大な大陸が分離、漂流していったものではないだろうか。その考えは繰り返し提案されたが、証拠がないことを理由に否定された。そうした考えは、大陸や海洋の大きさ、質量、剛性率、外見上の不動性といった観点から空想だと思われた。

しかし20世紀初め、ドイツの科学者アルフレッド・ウェゲナーによってこの考えは新たな証拠とともに再び示された。つまり、各大陸の海面下における輪郭の形状は、海水面から上の輪郭の形状よりもいっそう正確に一致した。また、片側の大陸端の動植物や化石は、対面する大陸端のそれらと似通っていた。さらに最も重要なことには、グリーンランドと欧州がゆっくりと離れていっていることが測定により明らかになったのである。しかし、新たな技術や機器の開発によってさらに多くの証拠が蓄積されていくまで、この考えはほとんど受け容れられなかった（また強く反対もされた）。大西洋の海洋底の組成と形状に関する探査や、放射性元素による大陸やプレートの年代測定、大陸棚の深奥部から採取した岩石標本や断層に関する調査により、大陸棚と海洋の特徴がさらに一致していることが明らかになった。

1960年代までには、膨大で多様なデータはすべて、地殻が少数の巨大なゆっくり移動するプレートで構成され、その上に大陸や海盆が乗っているという考えに一致していた。最も克服が困難であった主張、すなわち地球の表面が大陸の移動には剛直すぎるという主張は誤りであることが実証された。高温の地球内部はプレートの下に溶解した岩石の層を形成し、その層内における対流によってプレートが動いている。1960年代には、プレートテクトニクス理論という形で大陸移動が広く科学において受け容れられるようになり、地質学に強力な統合概念が提供された。

プレートテクトニクス理論が最終的に受け容れられたのは、それが証拠によって裏付けられたからであり、そしてこの理論によって以前は曖昧だったり論議的となっていた非常に多くの事柄を説明することができたからである。地震、火山、山脈や海洋の形成、太平洋の縮小と大西洋の拡大、そして地球の気候における一部の大変動のような多

様で無関係に思える現象さえも、現在では地殻プレートの移動による結果と考えることができる。

火の理解

人間の歴史の多くの期間を通じて、火は土、水、空気と並び、すべての物を形成する四大基本元素の一つと考えられていた。燃えるものは、それらに既に含まれていた火を放出すると考えられた。18世紀まで優勢となっていた科学理論は、何らかの物体が燃えると、それによってある物質が放出され、重量が奪い去られるというものであった。この見解は、人々が見る「重い木片が燃えると軽い灰の残留物しか残らない」ということを追認するものであった。

アメリカ独立革命後の20年間に自らの業績の大半を発見し、後にフランス革命の犠牲者として処刑されたフランスの科学者アントワーヌ・ラボアジエは、一連の実験を行い、その中で、用いられた気体や放出された気体も含め、燃えることに関係するすべての物質を正確に測定した。彼の測定によって、燃えるという過程は人々の考えとはちょうど正反対であることが実証された。彼は、物質が燃える時、その正味重量において増減がないことを示したのである。たとえば、木材が燃える時、それに含まれる炭素と水素が空気中の酸素と結合して水蒸気と二酸化炭素を生成し、この二種類の目に見えない気体は双方とも空气中に放出される。燃えることによる生成物(気体と灰)の総重量は、反応物(木材と酸素)の総重量に等しい。

燃えること(燃焼の一形態)の謎を解明することで、ラボアジエは近代化学を確立した。近代化学の前身である錬金術は、物質の変換方法の探究であり、特に鉛を金に変え、不老長寿を与えてくれる霊薬を作り出す方法の探究であった。この研究の結果、物質や過程を一部説明する知識が蓄積されたが、物質の本性やそれらの相互作用の仕方についての理解に導くものではなかった。

ラボアジエは、物質理論、物理法則、そして定量的な方法に基づき、全く新しい活動を創始した。この新たな科学の知的な核心部分は、物質の保存という概念であった。すなわち、「燃焼や他のすべての化学的な過程は物質の相互作用によって構成され、反応後における物質の総質量は反応前の総質量と全く同一である」というものである。

このような根本的な変革ではあったが、この新しい化学は比較的急速に受け容れられていった。その一つの理由は、ラボアジエが、物質を命名し、それらの相互反応を説明する体系を考案したためである。こうした明確な主張を行うこと自体が定量的な研究を促し、曖昧さのない形で化学的発見の広範な普及を可能にしたという点で、前進への重要な一歩であった。さらに、燃えることは単に、化学反応の一分野である酸化、つまり酸素と他の元素又は化合物が結合してエネルギーを放出する反応の一例にすぎないと見なされるようになった。

新たな化学が受け容れられたもう一つの理由は、英国の科学者ジョン・ドルトンがラ

ボアジェの著作を読んだ後に構想した原子説にそれがよく適合したからである。ドルトンは、ラボアジェが自らの体系に組み入れた概念、つまり元素、化合物、原子、分子に関する古代ギリシャの観念について詳述し、またそれを洗練させた。この化合が起こる仕組みは、ラボアジェの原理体系をより一層厳密にするものとなった。それにより、定量的な表現で化学的な振舞いを表すための基礎が提供された。

たとえば、木材が燃える時、炭素という元素の各原子が酸素という元素の二つの原子と結びつき、二酸化炭素という化合物を一分子生成し、その過程でエネルギーを放出する。しかし、酸化反応には必ず炎とか高温を伴うわけではない。錆や体内での糖類の代謝は、室温で起こる酸化の例である。

ラボアジェとドルトン以降の三世紀間で、上記の体系は大きく拡大され、原子同士が結合する際の原子の配置について説明したり、原子内部の仕組みを描写して原子がそのように結合する理由を説明したりするようになった。

原子の分裂

物質の構造に関する我々の理解における新たな一章は、写真乾板が何らかの理由でウラン化合物によって感光した 19 世紀末フランスでの偶然の発見に端を発するものである。こうしてこの「放射能」を説明するための科学研究が始まった。この新しい分野における開拓者が、ポーランド生まれの若い科学者でフランスの物理学者ピエール・キュリーと結婚したマリー・キュリーであった。ウランを含む鉱物からの放射能は極微量の何らかの非常に放射性の高い物質に起因するものであると考え、マリー・キュリーは一連の化学的手段を通じて、対象物質の純粋な試料を作成し、それを同定することに努めた。彼女の夫は、自らの研究を中断して、膨大な量の原材料からとらえにくい微量元素を分離するという途方もない作業を助けた。その結果二人は、ともに非常に高い放射性を持つ二つの新しい元素を発見し、それぞれポロニウムとラジウムと名付けた。

キュリー夫妻は、放射能研究によってノーベル物理学賞を受賞したが、その発見を商業的に利用しようとはしなかった。事実、二人はラジウムを科学界に提供し、放射能の本性をさらに研究できるように配慮した。ピエール・キュリーが亡くなった後にも、マリー・キュリーは、当時の物理科学界に蔓延していた女性に対する偏見に関係なく成功を収められると固く信じて研究を続けた。そして実際に彼女は成功した。彼女は 1911 年にノーベル化学賞を受賞し、ノーベル賞を二度受賞した最初の人物になった。

その一方で、マリー・キュリーが利用できたものより優れた設備を有する他の科学者たちが放射能に関して重要な発見を行い、放射能に関する大胆な新しい理論を提唱していった。ニュージーランド生まれの英国の物理学者アーネスト・ラザフォードは、まもなくこの急速な展開を見せる分野のリーダーとなった。彼とその同僚たちは、ウランにおいて自然に発生する放射能が、ウラン原子の放出する非常に軽い元素のヘリウム原子に相当する粒子で構成されること、そしてその後にはもはやウラン原子ではなくわずか

に軽い別の元素の原子が残されることを発見した。その後の研究によって、この変素は、最終的に安定した鉛の同位体になるまでの一連の壊変過程の一部にすぎないことが示された。ラジウムは、その放射性系列の中の一つの元素にすぎなかった。

この変素過程は、科学的発見における一つの分岐点となった。というのも、原子が物質の最も基本的な単位ではなく、原子自体もまたそれぞれが三種類の異なる粒子（陽子と中性子からなる小さくて質量の大きい原子核とそれを取り巻く軽い電子）で構成されることが明らかにされたからである。放射能は原子核を変化させるが、化学反応は外側の電子にしか影響しない。

しかし、ウランをめぐる物語はこれで終わったわけではない。第二次世界大戦の直前、数人のドイツとオーストリアの科学者たちは、ウランに中性子を照射すると、ウランの原子量の約半分の原子量をもつ様々な元素の同位体が生成されることを示した。彼らは、現在では明白だと思われる結論、すなわちウランの原子核が誘導されて二つの概ね同程度のより小さな原子核に分裂するという結論を受け容れることに消極的だった。この結論は、まもなくオーストリア生まれの物理学者であり数学者であったリーゼ・マイトナーと、「核分裂」という用語を持ち込んだその甥のオットー・フリッシュによって提唱された。彼らは、アインシュタインの特殊相対性理論によれば、核分裂生成物が全体として元のウラン原子より小さな質量になっていれば、莫大な量のエネルギーが放出されているであろう点を指摘した。

核分裂はまた余分な中性子も放出するため、それらがさらなる核分裂を誘発し、継続的に莫大な量のエネルギーを放出する連鎖反応が起こる可能性があると思われた。第二次世界大戦中には、イタリア生まれの物理学者エンリコ・フェルミ率いるアメリカの科学者チームが、注意深く制御された条件下で十分な量のウランを集めて積み上げれば、実際に連鎖反応が維持できることを実証した。この発見は、核兵器開発を目的に発足したアメリカ政府による極秘プロジェクトの基礎となった。大戦の末期近くには、日本での二度にわたるアメリカの核爆弾の爆発によって、制御されない核分裂反応の威力が実証された。大戦以降、核分裂は引き続き一部の国で開発され戦略核兵器の主要な要素であり続けると共に、制御下におけるエネルギーの放出を電力へと変換する方向でも広く利用されている。

生物の多様性の解明

ダーウィンによって着手された知的な革命は、激しい論争に火をつけることになった。科学的に問題となったのは、現存する生物や化石記録において明らかな以前の生物の大きな多様性をどのように説明するかということであった。地球には無数の様々な生物種が生息していることが知られており、また絶滅に至った多くの種がかつて生存していた証拠も豊富にあった。それらすべての生物はどのようにして地球上に生息するようになったのだろうか。ダーウィン以前の時代には、種は変化することがなく、知られている

すべての種は世界が始まって以来正確に現在のままであるという見方が優勢であった。ごく稀な状況において、何らかの大変動によって、あるいは他の種との食物競争に敗れることによって、特定の生物種全体が消滅することはあったとしても、新しい種が現れることはないとされていた。

にもかかわらず、19世紀初めには、種の進化という思想が現れるようになった。その考え方の一つが、生物はその生涯を通じて環境条件に対応してわずかに変化し、そうした変化が子孫に継承されうるというものであった（たとえば、木々の高いところにある葉に届こうと伸びをしているうちに、幾多の世代を経る中で、キリンは長い首を発達させたというような見解である）。ダーウィンは全く別な進化の仕組みを発表した。彼は、ある生物種内において各個体が遺伝的に受け継いだ変異によって、一部の個体が他よりも生き残って子孫を残す可能性が大きくなり、その子孫がさらにそうした有利な形質を遺伝的に受け継いでいったという理論付けを行った（したがって、より長い首を遺伝的に受け継いだキリンは生き残り、子孫をもうける可能性が高くなる）。幾多の世代を経る中で、有利な形質は一定の環境下において他の形質を凌駕し、それによって新たな種が誕生するとされる。

ダーウィンは、19世紀半ばに出版された『種の起源』と題する著書において、長年にわたって収集した膨大な量の実証証拠とともに自らの理論を発表した。生物学に与えたその強力な影響は、いくつかの要因によるものであった。すなわち、ダーウィンが行なった主張は包括的ではあったが、明快でよくわかるものであったこと、その主張がすべての点で膨大な生物学的証拠や化石による証拠で裏付けられていたこと、彼が動物の交配に用いた「人為選択」と自然選択との比較に説得力があったこと、そしてその主張が将来の研究の指針となるべき統合的な枠組みを提供したことによるものであった。

ダーウィンのモデルに反対した科学者たちは、ダーウィンが自然選択に関して提示した仕組みの一部に異論があったか、又はニュートン科学のような予言性を持たないと考えたかのいずれかであった。しかし20世紀初めになると、生物学的遺伝の仕組みは依然として完全に理解されていたわけではなかったものの、大半の生物学者は種がしだいに変化していくという基本的な前提を受け容れるようになっていた。現在の論争は、もはや進化が起こるかどうかについてではなく、進化が起こる仕組みの詳細に関するものである。

一般大衆の中には、科学的根拠に基づくものではなく、受け容れがたいその含み、すなわち、人間も他の種も共通の祖先を持ち、したがって同族にあるということや、人間と他の生物は方向性や目的のない過程の結果出現した可能性があること、そして人間は他の下等生物と同様に生存や生殖のための競争に関わっていることなどの含意によって、進化という概念を完全に否定する人々もいる。また一部の人々にとって、進化の概念は人間や他のすべての種が特別（かつ個別的）に創造されたものであるという聖書の教えに反するものである。

20世紀初め、長年にわたって注目されなかったオーストリアの実験家グレゴール・メンデルによる遺伝形質に関する業績が再発見された。その内容は、一つの生物が遺伝的に受け継ぐ形質は、両親の体液を混合した結果できあがるものではなく、現在では遺伝子と呼ばれる別個の粒子が両親から受け渡されることによって生じるというものであった。生物がそのような粒子を数多く持ち、生殖過程で何らかの無作為な並べ替えの過程が起こるとすれば、ダーウィン進化論に不可欠な種における個体の変異も自然に発生することになる。

メンデルの業績が再発見されてから四半世紀が経過する中で、顕微鏡による発見で、遺伝子が紐状に組織化されており、それぞれの卵子又は精子細胞に様々な遺伝子の組合せをもたらすような形でその紐が分裂し再結合することが示された。20世紀半ばには、遺伝子がDNA分子の一部であり、このDNAが生物を構成する必要不可欠な物質の形成を制御していることが確認されていた。DNAに関する化学研究によって、生物学的な進化に対して強力な化学的裏付けがもたらされている。すなわち、DNAに見出される遺伝子暗号が、細菌からヒトに至るまでのほとんどすべての生物種において等しいことが明らかになったのである。

微生物の発見

歴史を通じて、人々は病気に対する説明を創り出してきた。多くの病気はその原因が精神的なものであり、ある人の罪に対する罰であるとか、神や霊の気まぐれな行為と考えられていた。古代から、最も一般的に信じられていた生物学的な理論では、病気を体液（仮説上の液体で、その影響によって記述されるが化学的には特定できないもの）における何らかの不均衡に帰すべきものとされていた。したがって数千年もの間、病気の治療は、貢物、生贄、祈祷を通じて超自然的な力に訴えることや、あるいは嘔吐、出血、又は浄化を誘発して体液を調整しようとすることによって行われていた。しかし、19世紀に細菌説が導入されたことから、病気の原因に関する説明やその治療形態は根本的に変化した。

遡って16世紀には、病気には自然の原因があり、病気の原因物質は体の外にあるという憶測がなされていたため、医学はそうした原因物質を特定し、それを抑制するための化学物質を見出すことをその内容とすべきだとされていた。しかし、病気を引き起こす何らかの原因物質が目に見えない微生物かもしれないという疑念を持つ者はいなかった。なぜならそうした生物は未だ発見されていなかったし、ましてや想像すらされていなかったからである。17世紀における顕微鏡レンズとその設計の改良が、細菌やイースト菌をはじめとする、微視的な動植物の棲む巨大な新世界の発見につながった。しかしそうした微生物の発見は、それらがヒトや他の生物に及ぼしうる影響を示すものではなかった。

病気に関する細菌説と最も密接な関係を持つ人物は、フランスの化学者ルイ・パスツ

ールである。とりわけ（現在わかっているように）大半の微生物は病気を引き起こすことではなく、多くは人間にとって有益であるため、微生物と病気との関係は直ちに明確にはならない。パスツールは、ミルクとワインが腐る原因に関する自分の研究を通じて、微生物の役割を発見するに至った。彼は、微生物が空気中からこれらの物に入ると、急速に増殖して老廃物をつくることによって腐敗や発酵が起こることを実証した。彼は、微生物が入らないようにするか、又は熱で微生物を破壊すれば食物が腐らないことを示した。

実践的な治療方法を見出す目的で動物の病気に関する研究にとりかかっただけから、パスツールはこれにもまた微生物が関係していることを明らかにした。彼はその過程において、病原菌による感染が原因となつて、その後の同種の微生物による感染に対する免疫が体内で形成されることと、実際に病気そのものを発症させなくとも、病気に対する免疫を体内において誘発するワクチンを作り出すことが可能であることを発見した。パスツールは特定の病気が特定の識別可能な細菌によって引き起こされることを厳密に実証したわけではないが、その研究は程なく他の科学者たちによって行われた。

病気に関する細菌説が受け容れられた影響は、科学界にとっても社会にとっても非常に大きなものであった。生物学者は微生物の特定と調査に没頭し、おびただしい数の様々な細菌やウイルスを発見し、生物間における相互作用についてさらに深い理解を得た。その実践面での成果として、一部の病気の事実上の撲滅はもちろん、食物や水の安全な取り扱い、ミルクの殺菌、衛生基準の採用、検疫、予防接種、外科の消毒措置など、人間の健康習慣がしだいに変化していった。今日では、高性能画像処理やバイオテクノロジーといった現代技術によって、微生物がどのようにして病気を引き起こし、免疫系がそれとどのように闘うかを研究したり、さらにはどうやって微生物を遺伝子的に操作することができるかすら研究可能になっている。

動力の利用

「産業革命」という言葉は、モノづくりの方法や社会の組織化に非常に大きな変化が起こった歴史上のある長い期間を指す。それは、田園地域の手工業経済から都市型製造業経済への変化であった。

最初の変化は、19世紀英国の繊維産業において起こった。その時まで、繊維製品は実質的に数世紀にわたって用いられてきた同一の技術と道具を使って家庭で作られていた。その機械は、当時のあらゆる道具と同様に、小型の手作り品で、筋力、風力、あるいは流水を動力とした。そうした状況は、紡績や製織、エネルギー資源を利用するための一連の発明によって、根本的かつ不可逆的に変化した。機械は一部の職人にとって代わり、石炭が機械の動力源として人間や動物にとって代わり、集中化された工場体制が分散型の家庭中心の生産体制にとって代わった。

産業革命の核となったのは、蒸気機関の発明と改良であった。蒸気機関は、化学エネ

ルギーを力学的な仕事に変えるための装置である。燃料が燃やされ、その放出する熱が水を蒸気に変えるのに使用され、続いてその蒸気が車輪やレバーを動かすのに利用される。蒸気機関は当初、炭鉱や鉱山から出水を汲み出すという現実的な必要性に応じて発明家が開発したものであった。スコットランドの発明家ジェームズ・ワットが蒸気機関を大幅に改良した後、蒸気機関は直ぐに工場の機械を駆動させるのに用いられるようになり、炭鉱での石炭運搬や、鉄道機関車、船舶、そして後には最初の自動車を動かすのに利用されるようになった。

産業革命が英国で最初に起こったことにはいくつかの理由がある。つまり、科学知識を現実的な事柄に応用する英国人の気質、産業開発を奨励する政治体制、特に大英帝国の各地域からの原材料の入手しやすさ、そして世界最大の商船群によって入手方法が整備された追加の（綿花や木材のような）原材料調達と繊維製品販売の巨大市場がその理由である。英国人はまた、安価な鋤など農業分野における革新の導入も経験しており、そのおかげでより少数の労働者でより多くの食物が生産できるようになったうえ、それらの労働から解放された人々は新設の工場で働けるようになった。

経済的、社会的影響は甚大なものだった。新たな生産機械は高価であったため、それらは主として多額の資産を有する人々しか入手できず、そのため大半の家庭には導入されなかった。労働者と機械を集めることのできた家庭以外の作業場は、結果的に集まって、繊維産業を手始めに、後には他の産業の工場へと成長していった。長期に及ぶ徒弟制によって習得されるような技能を要する伝統的な手工業とは異なり、比較的未熟な労働者でも新しい機械を管理することができた。そのため、余剰な農業労働者や児童たちが雇用され、賃金を求めて働くことができた。

産業革命は西欧を通して大西洋を渡り、北米にまで拡大した。その結果、19世紀は、西側世界において、生産性の向上と資本主義的な産業組織の支配によって特徴付けられることとなった。その変化に伴って、大規模で複雑かつ相互に関係する産業が成長し、また総人口の急増と田園地域から都市部に向けた移動が起こった。一方で生産を管理し、そこから利益を得る者、そしてもう一方でかろうじて生活を維持できる程度の賃金しか得られない賃金労働者との間の緊張関係が高まっていった。実質的には、20世紀の主な政治的イデオロギーは、産業革命の経済的な現れに起因する。

狭い意味では、産業革命は歴史上の特定の期間や事象を指す。しかし、より広い視野に立てば、産業革命は未だに終わってはいない。英国で始まって以来、産業化は世界の他の地域よりずっと速く一部地域に拡大し、現在でもまだ一部地域に広がり続けている。新たな国に拡大する際の、その経済、政治、社会面での影響は、地域の状況によって詳細は異なるものの、19世紀に欧州や北米で起こったものと同様に相変わらず強力である。

さらに、産業革命は汽力や繊維産業を超えて拡大し、一連の新しい技術開発も組み込んでおり、そのそれぞれが人々の生活様式に多大な影響を与えている。次いで登場した

電気、電子、そしてコンピュータ技術は、輸送、通信、製造、健康その他の技術を根本的に変化させ、労働や娯楽の形態も変化させていて、世界の仕組みに関する知識の拡大にもつながっている（連続的な革新の波が時間的に以前より近接して到来するため、新興工業国における変化はさらに速くなっていると思われる）。そうした産業革命の押しよせる波には、それぞれに科学と技術との必然的で拡大しつつある相互依存関係が現出している。

第 11 章 共通の主題

科学、数学、技術には一定の共通した重要な主題があり、研究の対象が古代文明であろうと、人体であろうと、あるいは彗星であろうと、それは何度も繰り返し現れてくる。それはすなわち、学問的分野を超えて共通したものの考え方であり、解釈や理論、観察、設計において有用であると判明したものである。

本章では、そうしたものの考え方の一部に関する提言に加え、それがどのように科学、数学、技術に適用されているかについて述べる。ここでは、システム、モデル、不変性、変化のパターン、進化、規模という六つの見出しの下にそれぞれの主題となる考え方を紹介する。

提言

システム

相互に一定の影響力を持ち、統合された全体を構成するように見える物事の集まりは、一つのシステムと考えることができる。物体、生命体、機械、過程、思想、数、組織など、そうした物事はほとんどどのようなものにも含まれる。我々は、物事の集まりを一つのシステムと考えることで、それに意味を持たせる上で付加すべきものが何であるか、その構成要素は相互にどのような作用をしているのか、システム全体として他のシステムとどのような関係を持つのか、といったことに注意を向けるようになる。システムの観点から考えるということは、その構成要素それぞれが他の構成要素との関係においてのみ完全に理解できることを意味している。

システムを定義するにあたっては、それが生態系や太陽系、教育制度や金融制度、あるいはまた生理体系や気象システムのいずれであるかを問わず、構成要素間の関係が何らかの意味を持つだけの十分な要素を盛り込まなければならない。そして、意味をなすということは、目的が何かということによって異なってくる。たとえば、森林生態系におけるエネルギーの流れに関心があるとすれば、太陽エネルギーの入力と死んだ生命体の分解を考慮する必要がある。しかし、捕食者と被捕食者の関係のみに関心があるとすれば、それらの要素は無視できよう。地球の潮の干満について単に大まかな説明をすることだけに関心があるとすれば、地球と月以外宇宙のその他すべての天体は無視できるだろう。しかし、より正確な説明をするには、太陽もまたシステムの中に組み込む必要がある。

システムの境界線を明確にすると、事象に関して理解できている部分と理解できていない部分とをよく区別できるようになる。たとえば、燃焼時における質量の保存は、生み出されるガスがその重量を測定できる形でシステムに組み入れられなかったために、長い間認識されることがなかった。また、卵を産み付けるハエをシステムから除く実験をするまで、人々は蛆虫がゴミから自然に湧いてくるものと信じていた。

あるシステムが存在している一定の境界の内であらゆる物事を考える場合、特定の種

類の影響と振舞いに目を向ける必要性が出てくる。たとえば、システムの入力と出力に目を向けてみよう。空気と燃料がエンジンに入り、排気ガス、熱、機械的仕事量が生み出される。情報、音のエネルギー、電気エネルギーが電話システムに入り、情報、音のエネルギー、熱が生み出される。そしてまた、一部分からの出力が他の部分の入力となることがあるため、システムのどの部分から何が入り、どの部分から何が生み出されるかに注目する場合もある。たとえば、生態系における植物の出力である果実と酸素は、同システム内の一部の動物にとっての入力となる。また、動物の出力である二酸化炭素と糞尿は、植物にとっての入力としての役割を果たす場合がある。

システム内の出力の一部が他の部分にフィードバックされる場合もある。一般に、このようなフィードバックはシステム内における現象に対する制御装置としての役割を果たしている。フィードバックは、既に起こっている事柄をさらに促進、若しくは抑制し、又は何か異なるものに改変したりする。たとえば、スピーカーシステムから増幅されて発生する音の一部はマイクロフォンにフィードバックされ、次にさらに増幅されて再び音として出力される。これが繰り返されると、ついにはシステムを過負荷に追い込んでしまう。これがよく知られたフィードバック・スクイール（ハウリング）である。しかし、システム内のフィードバックは必ずしもこれほど迅速に起こるわけではない。たとえば、特定の場所における鹿の頭数がある年に増えた場合、冬の時期の少ない食料に対する需要が増すため、結果として翌年の餓死数が増え、それによってこの場所での鹿の頭数が減少する結果になる。

システムの構成要素同士が相互に影響し合う場合、それは物質の移動だけではなく、情報の伝達によっても起こる。そのような情報のフィードバックには通常、システムの一部としての比較対照の仕組みが関係している。たとえばサーモスタットは、室内で測定された気温を設定値と比較し、その差が大きすぎる場合に加熱又は冷却装置を作動させるものである。もう一つの例は、政府の計画に関する情報が正式発表の前に漏らされ、その計画を変更する原因となるような反発が起こることがある。この場合、人々は漏らされた計画と自分たちの望む方針とを比較し、それに応じて計画を支持したり反対することになる。

システムのどんな部分もそれ自体システム、すなわちサブシステムと呼べるような固有の内部構成要素と相互作用を有しているとみなせる。鹿は、生態系の一部でもあり、かつ鹿の体自体が相互作用しあう器官と細胞で構成されるシステムであり、またそれらの器官や細胞もまたそれぞれをシステムとして考えることができる。同様に、いかなるシステムも、それが影響しまた影響を受けるような、より大きなシステムの一部であるとみなせる。たとえば、州政府は郡と都市の政府を構成要素とするシステムと考えられるが、州政府自体もまた連邦政府という国家システムにおける一つの構成要素にすぎない。

システム同士は相互に排他性を持つわけではない。複数のシステムが非常に密接に関

係し、一方の全構成要素と他方の全構成要素との間に境界線を引くことができない場合もある。通信システム、輸送システム、社会システムには広範な相互関係があり、たとえば一人の航空機のパイロットは、同時に他の三つのシステムの構成要素でもある。

モデル

モデルとは、我々がある物をよりよく理解するための単純化された模倣物を意味する。モデルとは、装置、計画、図画、方程式、コンピュータ・プログラム、あるいは単なる心象であることもある。モデルが物理的なもの、数学的なもの、概念的なもののいずれであっても、その価値はいかに物事が働くかやその可能性について示してくれる点にある。たとえば、かつて心臓は、その機能を説明するためにポンプに喩えられたが、ポンプの設計に用いられる工学原理が心臓病の理解に役立ったのではないかという推測もできよう。モデルが現象を適正に模倣できていない場合、その相違点の本質はモデルを改良する際の糸口となりうる。しかし、モデルはまた、モデルの対象物と実際には共有していない特徴を提示することによって、誤った結果に導くことがある。たとえば、火は長い間太陽におけるエネルギー変換のモデルと考えられていたが、実際には太陽では何も燃えていないことがわかったのである。

物理モデル

「モデル」の最も良く知られた形態は、物理モデル、すなわちモデル化の対象となった現象と十分に似通った振舞いをするために、我々がそれから何か学ぶことを期待できるような実際の装置又は過程である。通常の場合、物理モデルはその模倣対象よりも小さく、材料の点で経費が低くなるか、又は持続時間が短いために利用しやすい。

物理モデルに関しては、反応が実際の自然現象と似通った反応になることを期待しつつ、変数を厳密に制御した実験を行うことが可能である。たとえば、航空機の縮小モデルを使って、様々な翼の形状の影響を調査するための風洞実験を行うことができる。ヒトの生物学的過程は、実験動物や試験管内の培養物を使ってモデル化し、人間に適用することを目的とした医学治療の試験を行うことができる。社会過程もまたモデル化が可能である。たとえば、新たな指導方法を全校のシステムにおいてではなく、一つのクラスで試行することができる。しかし、モデルの規模は必ずしも縮小と低経費の方向のみに向かうとは限らない。分子構造などの微視的な現象は、人の手で測定し、操作できるようなとても大規模なモデルが必要であろう。

モデルは、大きさや物性ととともに時間においても規模を調整することができる。現象の中には、その発生において不都合なほど長い時間がかかるものがあるため、我々はその一部しか観察できない。たとえば、人々が学校のある教科で教えられたことを何年後かにどの程度覚えているのかを知りたいとしても、1週間後に試験することで間に合わせるしかない。短縮型のモデルは、事象が発生する割合を増大させることによって、長

期的な影響を濃縮しようとするものである。その一例は、比較的短い時間内に数多くの世代交代が生じるバクテリア、ハエ、ネズミなどの生物を対象とした遺伝子に関する実験である。もう一つの重要な例は、大量の化学物質を実験動物に投与し、より少量の投与が長期間で及ぼす影響を短期間で発生させようとするものである。機械的な例としては、たとえば通常の使用では何年もかかるような靴や武器の経年劣化を数時間でシミュレーションするような、機械を使った製品の破壊的検査がある。他方では、鳥やダンサー、車の衝突のスローモーションによる描写など、非常に速度の速い現象は遅延モデルを必要とするものもある。

物理モデルの振舞いに関しては、研究対象となる限定的な一連の特徴のみについてさえ、実際の現象を完全に正確に表すことを期待することはできない。模型のボートが非常に小さなものであれば、水がそれを通過して流れる様子は実際の海洋やボートの場合とは大きく異なってくるだろう。あるいは、学校の1学級だけに新たな指導方法を用いた場合、その特殊性によって同一の手法が一般的に用いられる場合よりも成功する可能性が高くなる場合がある。また、大量の医薬を服用すれば、単により早い影響だけでなく、(治癒を超えて殺してしまうような場合も含めて、) 様々な種類の影響が出る可能性がある。モデルの不適切さは、規模における相違又はモデルにおいて考慮されていない質的な相違などの要因に関係する可能性がある(たとえば、ラットは人間よりも一定の医薬に敏感であるかもしれないし、その逆の可能性もある)。

概念的モデル

見知らぬ物事に意味を持たせる一つの方法は、それを何か既知の物事に喩えること、すなわち比喩や類比を用いる方法である。たとえば、自動車は当初馬のない馬車と呼ばれ、生きている「細胞」がそのように呼ばれたのも、植物の中で細胞は修道院の部屋のように列をなして並んでいたためである。また、「電流」は水流に対する類比であり、原子内の電子のかたまりは「殻」に入った状態で原子核の周囲を回っていると言われていた。このそれぞれの事例において、比喩や類比は一部の類似した属性に基づくものではあるが、それは一部のものにすぎない。生細胞にはドアは付いていないし、電流は湿っていない。電子殻には固い殻があるわけでもない。したがって、比喩や類比によって助けられる点もあるが、それはまた同時に、類似性の適切な側面とともに不適切な側面も類推される程度に応じて、誤解を招く可能性がある。たとえば、「進化系統図」という呼称において表現されている連続的な生物種の分岐的進化についての比喩は、分岐だけではなく、上方に向けた進歩という印象も同時に与えるものである。他方、これを低木に喩える比喩は、進歩に結びつく好ましい方向性というものを伴わず、進化の分岐があらゆる方向に向けた大きな多様性を生み出すものだという印象を与える。原子規模での量子現象などのように、何らかの現象が我々の通常の経験と非常に異なっている場合、我々が喩えられるような既知の物事は存在しない。

他のいかなるモデルと同様に、概念的モデルも限定的な用途しか持たないものである。一つには、あまりに単純すぎるという問題がある。たとえば、ガスの分子を絶えず動き回って衝突しあっている小さな弾力性のあるボールの一群として考えることは有効であるが、他の現象に適応しようとするれば、そのようなモデルを大幅に変更し、それぞれのボールの中で動いている部分を含める必要が出てくる。他方では、モデルが複雑すぎて実用性がない場合もある。地球上の人口、気象、社会的な統合に関する複雑なシステムをモデル化した場合、その正確性は、同時に扱うべき数多くの相互作用し合う変数によって制限を受けることになる。あるいはまた、観察結果によく適合する抽象モデルであっても、直観的な意味を持たない場合がある。たとえば、分子の振舞いをモデル化するには、数学的な記述に依存しなければならず、それでは付随するイメージが描きにくい。いかなるモデルも一定の不適切な特徴を持っていて、それが我々にとっての用途を制限する可能性がある。たとえば、スポーツ選手や芸能人はその高い注目度と地位によって、子どもたちからはその優れた点だけでなく、不適切でおそらく理想とは程遠いような点においても、理想の姿（模範）として受け取られてしまう。

数学的モデル

数学的なモデル化の基本的な考え方は、関心の対象となるシステムと同様の振舞いをする数学的な関係を見出すことにある。（この場合のシステムは、物理学的又は生物学的な現象だけでなく、その他の抽象的な現象も含むのである）たとえば、落下する岩石の増加していく速度は、 $v=gt$ (g は定数) という象徴的な関係によって表される。このモデルは、落下速度 (v) が落下時間 (t) に比例して増大することを示している。数学的モデルは、既に観察されている状況以外の状況において現象がどのようになりうるかに関する予測を可能にするものであるが、それはあくまで「どのようになりうるか」ということにすぎない。一定の狭い範囲の条件（たとえば温度や時間）に関しては現象に適合する数学的モデルをかなり容易に見出せるが、そのモデルがより広い範囲ではうまく適合しないということがしばしばある。 $v=gt$ は（静止状態から）数メートル以上にわたって落下する岩石などの物体には事実正確に当てはまるが、物体が葉であったり（空気抵抗によって速度が抑制される）、又は落下距離がはるかに大きくなると（空気抵抗が増すだけでなく、重力も変化する）、うまく適合しなくなる。

数学的モデルには、踏むべき一連の手順（たとえば数論的、論理的、又は幾何学的など）を詳細に規定する一群の規則や指示が含まれることもある。時には、非常に単純な規則と指示であっても、実際に手順を踏まなければ極度に予測困難な結果を招くこともある。高速コンピュータは、非常に長い、又は複雑な指示を実施した場合の結果について探ることができる。たとえば、原子力発電所はその制御システムのすべての部分に検出器や警報器を組み込めるように設計できるが、様々な複雑な状況下で起こるであろう事象を予測することは非常に困難である。そこで、制御システムのすべての部分に関す

る数学的モデルを統合して、様々な故障条件の下での運転状況をシミュレーションすることができるのである。

どのような種類のモデルが最も妥当かは、状況によって異なってくる。根本原理についての理解が不十分であったり、又は既知の原理に関する数学が非常に複雑なものであったりすれば、物理モデルの方が望ましいかもしれない。たとえば、流体の乱流はそうした事例の一つである。コンピュータの計算速度が増すにつれ、数学的モデル化とその結果としてのグラフィック・シミュレーションがより多くの問題に適したものとなっている。

恒常性

科学、数学、工学においては、システム内の変化しない側面に関心が向けられる。我々がシステムを理解しようとする際には単純化の原理を求めるが、システム内で変化しない側面は確実に単純化が可能な部分である。システム的设计にあたっては、内在するいくつかの特性が予測可能な程度に同様であることについて確証を得たいものである。

安定と平衡

活動に利用可能なエネルギーの消滅に伴って、大半の物理的なシステムは最終的に定常状態、又は平衡状態に移行していく。たとえば、落下する岩石は崖の下で静止し、またコップに入った氷水の氷はしだいに解けて室温まで温まっていく。これらの状態では、すべての力が平衡し、すべての変化過程が停止したように見える。そして、システムに対して何か新たな事象が起こるまでこの状態は続き、その事象の発生後にはまた最終的に新たな平衡状態に落ち着いていく。新しい氷のかけらがコップの水に加えられれば、コップ内の水が再び室温になるまで、環境からの熱がコップ内に移っていく。安定した価格の消費財が改良された場合、その価格上昇は、買い手の増加傾向が頭打ちになって平衡する一定の高価格水準に至るまで続くことになる。

このような平衡の考え方はまた、継続的に変化が起こっているシステムにおいても、変化がその相互間の均衡化作用を持つ限りにおいて適用できる。たとえば、新規に雇用される労働者数と新たに失職する労働者数がともに多い場合であっても、失業者の総数にほとんど変化がなければ、雇用市場は平衡状態にあると考えることができる。あるいはまた一つの生態系において、全生物種の死亡率がその出生率に等しければ平衡状態にある。

分子の観点からすれば、すべての定常状態は分子の継続的な活動について誤った印象を与えるものといえる。たとえば、ソーダ水の入った1本の瓶に蓋がされていれば、ソーダ水の水溶液から上方の空気層に逃げていく水の分子と二酸化炭素の分子の濃度は、水溶液中に戻ってくるその両方の分子の量と気化量が等しくなるまで増え続ける。この場合気化と液化は高い比率で発生し続けているが、観察可能な濃度と圧力はいつまでも

定常状態にある。液体自体の内部では、水分子と二酸化炭素分子の一部が常に結合と解離を繰り返し、それによって爽快感を与えてくれる穏やかな酸性濃度の平衡が維持されるのである。

しかし、一部の過程はこれほど容易な可逆性を持つわけではない。化学結合による生成物が容易に解離しない場合、又は溶液から気化するガスが散逸してしまえば、その過程は反応物質がなくなるまで単一方向の反応を継続し、動的な平衡ではなく静的な平衡状態に落ち着くことになる。また、わずかな作用であれば安定を維持するが、大規模な作用に対しては安定を失うような状態のシステムもある。たとえば、丘の中腹まで落下して止まっている岩石は、わずかな力に対して動くことはないが、力いっぱい蹴飛ばせばまた落下を始め、丘の下より安定した状態に落ち着くであろう。

多くのシステムには、システムのある側面を一定に保つか、又は少なくとも指定された一定の変動幅以内に維持する役割を果たすフィードバック・サブシステムが含まれている。加熱又は冷却システムの調節用に設計されたサーモスタットなどがよく見られる例であるが、哺乳類において体温を一定の狭い範囲内に維持する一連の生物学的反応もまたそうである。しかしこうした仕組みも、条件が通常の働きの枠内をはるかに超えるようになると有効ではなくなる（たとえば、日射病によって人体の冷却システムが破綻する場合など）。

保存性

システムのある側面は、常に保存されるという顕著な特性を持っている。ある所で量が減少すると、いずれか他の場所で常に正確に同量の増加が見られる。システムがそうした種類の量に関して閉じていて、境界を通して出入りする量が存在しない場合、システムがその他の面でどのように変化しても内部の総量は変化しない。部分的な分解、爆発、腐食、又はその他の何らかの変化を含め、システム内で何が起ころうとも、正確に同じままで全体的に変化しない量が存在する。たとえば、一定量のダイナマイトが爆発する場合も、(破片、ガス、熱、光を含む)すべての生成物の全体的な質量、モーメント、エネルギーは一定である。

対称性

総量の一定性に加え、形態の不変性も存在する。ピンポンのボールはどのような向きから見てもほとんど同じように見える。その一方で卵は、その長軸を回転中心として回転した場合にのみ同じように見えるだけで、その他の回転方法では同じには見えない。人間の顔は上下を逆にすると非常に異なって見えるが、鏡のように左右を逆にしてもさほど異なっては見えない。八角形の停止標識又はヒトデの輪郭は、特定の角度で回転させると同じように見える。形状における自然の対称性は、しばしば対称的な過程の発達過程を見せてくれる。たとえば、粘土のかたまり(陶磁器用の粘土)が対称なのは、そ

れが作られる過程において、一定に保たれた手の中で常に回転されているためである。陸生動物のほとんどすべてはほぼ左右対称であるが、これは胚の初期における対称的な細胞の分布状況に端を発するものである。

しかし、対称性は幾何学のみに関係する問題ではない。数や記号の操作もまた不変性を示しうるものである。最も単純な例は、 $X+Y$ の式において項を交換しても、 $Y+X=X+Y$ であるために結果は同じ値になるというものである。しかし、 $X - Y$ はこれとは異なる対称性を示す。すなわち、 $Y - X$ は $X - Y$ と正負が逆になる。高等数学には、非常に難解な種類の対称性もある。数学は世界の物事の振舞いをモデル化する上で非常に広く用いられているために、数学における対称性は、物理現象の根底にある思いもよらない対称性を暗示する場合がある。

変化のパターン

変化形態は、科学においては特に関心が持たれるものである。変化に関する記述は、将来起こることを予測する上で重要である。変化についての分析は、未来に起こる事柄の予測だけでなく、起こっている事柄について理解するためにも必要不可欠であり、また変化の制御は、技術的なシステム的设计において必要不可欠である。変化のパターンを一般的な三つのカテゴリーに分類できる。すなわち、(1) 傾向が一定した変化、(2) 周期的に起こる変化、(3) 不規則な変化の三つである。一つのシステムにはこれらの三つの変化がすべてとも含まれることもある。

傾向

一定した変化は、落下する岩石の加速する様子や母集団内の遺伝子の突然変異、あるいは放射性物質の原子核の崩壊に至るまで、多くの現象において見出される。こうした現象のすべての傾向が同じ意味で一定しているわけではないが、これらすべての変化は一つの方角に向かって進んでいくものであって、かつかなり単純な数学的記述が可能である。ある岩石試料における放射性物質の崩壊率は時間経過とともに低下するが、その値は常に未崩壊の残った原子核の数に比例する。識別可能な数学的パターンに適合する前進的变化を使って過程の継続時間を推定することができる。たとえば、岩石に残存する放射能は、岩石が形成された年代を示し、また 2 種類の生物種の DNA における現在の相違数によって、何世代前にその両種が共通の祖先を持っていたかがわかる可能性がある。

周期

何度も繰り返して起こる一連の変化すなわち周期的変化もまた、天候の季節変化やギターの弦の振動、哺乳類の体温、テレビのブラウン管内における電子ビームの走査など、多くの現象においてよく知られている。周期は、最大値と最小値の差で表される変化幅

の大きさと、1回の周期にかかる時間と、その最高点が正確にいつ起こるかによって特徴付けられる。たとえば、ヒトの体温における1日の周期について言えば、変化幅は約1度で、一つの周期が約24時間、最高点は通常午後遅くに起こる。ギターの場合、振動の変化幅は約1mmで、一つの周期の発生時間は約1,000分の1秒である。周期は氷河期の間のように数千年に及ぶものもあれば、電気発振器のように10億分の1秒以下のものまである。地震や氷河期などの多くの現象は、パターンは一定しているものの間隔が不規則な変化パターンを持っている。我々はそれらが繰り返し起こることは知っているが、正確にいつ起こるかは予測できないのである。

一つの周期の変化幅は、たとえば地震時の振動によって建物がぼろぼろに崩れるように、システムを崩壊させるほど大きくなる場合もあれば、検知できないほどわずかで、システムの不規則な活動の中に見失われてしまうような場合もある。しかし、何が不規則で何が規則的かは、単にデータを見ているだけでは必ずしも明らかになるとは限らない。完全に不規則に見えるデータであっても、統計的解析によって根底にある傾向または周期が明らかになるかもしれない。他方では、データに現れる傾向や周期が、任意性又は偶発性にのみ起因するという、統計的解析によって容易に説明可能であることが示される場合が時にある。

周期的変化は、システム内にフィードバック効果が存在する場合に通常よく見出される。たとえば、いかなる方向への変化もその変化に反対する力の出現を促すのである。このようなフィードバックがゆっくりと作用するシステムは、本来の状態に戻される前に大幅な変化を示す可能性が大きく、かつ本来の状態に戻った後に、その変化のモーメントによってさらに反対方向に振れるという動きを繰り返し、結果的に多少とも規則的な周期を生み出すことがある。単細胞のような小規模な生物学的システムは、反応の生成物が反応速度に影響するために、フィードバックに由来する化学周期を有している。複雑な生命体においては、構成要素相互間における神経系やホルモンによる制御システムのフィードバック効果が、多くの肉体機能（たとえば、血球数、医薬品に対する感受性、用心深さ、気分など）において明確なリズムを作り出す。人間社会の段階では、いかなる傾向も最終的にはそれに反対する反応を喚起する可能性が大きいいため、多くの社会的な周期が生まれる。振り子の振動周期が、経済や流行から教育哲学に至るまで、あらゆるものに現れている。

カオス

十分に小さな規模においては、すべての変化は不規則な要素を持っているように見える。どの反応がいつ原子の中で起こるかは、原理的にも予測不能であるように思われる。くわえて、不規則な出現が時には内在する規則性の結果現れている可能性もある。いくつかのかなり単純で正確に定義された過程であっても、何度も反復するうちにとてつもなく複雑で一見カオス的な結果を呈することがある。分子以上の大きさを持つシステム

の大半は、非常に多くの要素と力の相互作用が関係し、条件におけるわずかな相違にも敏感であるため、その正確な振舞いは予測できないものとなり、少なくとも部分的には不規則に見える。

しかし、詳細は予測できないものの、いくつかの大規模なシステムの概観的な振舞いはかなり予測できる。分子のカオス的な動きと個々の分子の科学者の予測は不可能であるにもかかわらず、平衡状態にあるガスの圧力と温度における変化は、しばしばかなりの精度で予測できる。1本の木に生える葉の平均的な分布や、一連のコイントスを長い間繰り返し行って表が出る比率は、それぞれの場合に応じて予測可能な信頼性で現れる。同様に、個人の行動に関する予測も、個人の集団内における構成員の平均的な行動に関する予測ほどの信頼性は得られない。

多くのシステムはまた、周期的な振舞いにおいて大雑把な安定性も示す。それらはほとんど同一の一連の状態を何度も反復するが、その詳細は二度と同じものになることはない。たとえば、地球を回る月の動き、ヒトの睡眠と覚醒の周期、捕食者と被捕食者の個体数における周期的な変動などがこれにあたる。このようなシステムには高度に複雑な影響を及ぼす要素間の相互作用が関わっているが、ほぼ同一に近い非常に単純な周期をいつまでも繰り返す。小規模な乱れが起こっても結果的にほぼ同様の周期に戻っていくが、大規模な乱れが起こるとシステムが異なった振舞いをするようになる場合がある。しかし、その新たな振舞いもまた単純な周期になっていく。

進化

少なくとも古代ギリシャにまで遡る一般的な進化の概念は、現在が過去の材料や形態から、概ね漸進的にかつ説明可能な方法で形成されてきたというものである。そしてこのような方法で、太陽系、地球表面、地球上の生命形態がそれぞれの初期状態から進化を続けてきており現在でも進化をし続けているというふうに考えられている。進化の考え方はまた、より曖昧にはあるが、言語や文学、音楽、政党、国家、科学、数学、技術的な設計にも適用される。これらの人間活動におけるそれぞれの新たな発展は、それに先行する形態から成長してきたものであり、またその以前の形態もそれ以前の形態から進化してきたものである。

可能性

クジラのヒレ、コウモリの翼、ヒトの手、鉤爪のあるネコの足はすべて、古代爬虫類の足を構成していた同一組の骨から進化してきたように見える。一組の骨に関する遺伝情報がその過去の時点で存在していて、ヒレや鉤爪のある足は、多くの世代にわたる遺伝情報の変化が自然選択を経て形成されたものである。光を知覚する器官が以前全く存在しなかった状態から、完全な形態の眼が突然に出現したわけではなく、また4輪の乗り物がない状態から自動車が出現したわけでもない。また、万有引力の理論も、数世代

にわたる力と軌道に関する思考の後に生まれてきたものである。

次に何が起こるかは、それまでに起こったことによってある程度制約を受ける。しかしどの程度制約を受けるのか。極端な見解では、次に起こることがこれまで起こったことによって完全に決定されるというものである。すなわち可能性のある未来は一つしかないことになる。この見解を疑う少々異なる理由が二つある。その一つは、多くの過程が無秩序なものであり、条件の相違点がほとんどなくても、結果においては大きな相違が生まれる可能性があるということである。もう一つの理由は、原子の振舞いには完全に予測不可能な不規則な要素が存在し、それが物事の根底に働いているためである。したがって、現在の状態は次に起こる事柄の可能性を制限するものではあるが、それを完全に決定するものではないということである。

速さ

通常の場合、人々はシステムの進化を古い状態から新しい状態に至るまでの一連の中間的な状態を持った漸進的なものとして考える。これは、進化的な変化が必ずゆっくりとしたものになるという意味ではない。中間的な段階が非常に急速に起こって特定が困難になることさえありうる。たとえば爆発は、それが雷のような電氣的なものであれ、又は自動車エンジンのような化学的なもの、あるいは恒星のような核融合であれ、ほとんど追跡が困難なほど急速に起こる連続的な変化が関係したものである。しかし、急速すぎるかどうかは、データがいかに適正に時間ごとに分けられているかによって異なる。たとえば、数千年に及ぶ期間において存在したことが知られているかなり珍しい生命体の化石の集合体を考えてみよう。この場合、1,000年以内に起こった進化的な変化を正確に追跡するのは不可能であろう。また、いくつかの進化的な変化は事実一挙に起こるものである。たとえば、新たな生物学的変化は、既存の遺伝子の連続的な再配置によってのみ起こるわけではなく、時には遺伝子が急に新たな形態に突然変異することによっても起こる。原子の規模において、電子は何らの中間的な状態を経ることなく、一つのエネルギー状態から他のエネルギー状態に変化する。しかしながら、遺伝子も電子とともに、その新しい状況は以前の状況によって制限され、また同時に以前の状況から説明できるものである。

相互作用

進化は隔離して起こるものではない。一つの生命体が進化する間には、その周辺の他の生命形態もまた進化している。一つの政治思想の方針が進化すれば、その周辺の政治状況もまた進化する。あるときは進化する方向に、あるときは変化を阻害する方向に、さらには促す方向などのある特定の変化の方向に変化していかなければならないのである。たとえば、長期的に安定した気象における急激な変化によって、その気象によく適合した生物種が絶滅する可能性がある。第1次世界大戦後の欧州における経済的な逼

迫状況は、第2次世界大戦を引き起こしたファシストの台頭を促した。最近考案された球面空間に関する数学理論が利用できたことで、アインシュタインはその相対性の概念を説得力のある定量的な形態で表現することができた。また、電気の発達は長距離通信の急速な拡大を促進した。

規模

我々の宇宙の規模の範囲、すなわち大きさ、持続時間、速度などは途方もないものである。物理科学の発見の多くは、人間の経験とは程遠い規模の現象に関係するため、事実上我々にとって理解できないものである。たとえば光の速度や最も近い恒星までの距離、銀河内に含まれる星の数、太陽の年齢といった事柄を計測することはできるが、これらの規模は我々が直観的に理解できるものよりはるかに大きい。もう一方の方向に関しては、原子の大きさ、その膨大な数、原子間でどのぐらい早く相互に動き回るかなどを特定することができるが、これらの極端な値もまた我々の直観的な理解力を超えるものである。我々の限られた理解力と情報処理能力では、その全体を扱うことは到底できない。にもかかわらず、我々はそうした規模を抽象的な数学的用語で表し（たとえば10億の10億倍）、相互間の有意義な関係を探ることができる。

規模における大きな変化には、発生する現象の種類における変化がともなうのが通常である。たとえば、よく知られた人間周辺の規模では、周回する衛星から放出されたわずかな量のガスは宇宙空間に散逸していく。一方、天文学的な規模では、十分な質量を持ったガス雲が相互の重力によって引き付けられ、核融合を引き起こすような高温の球体となり、それが恒星となっていく。また、人間の規模では物体とエネルギーは永久に別個のものであるが、原子の規模では、物質とエネルギーは区別できないにもかかわらずそれぞれは独自性を持ち、またエネルギーは不連続な跳躍によってしか起きない。木の周囲の距離は、リスにとってよりも昆虫にとっての方がはるかに大きなものとなる。それは、昆虫の規模においては越えねばならない多くの丘や谷があるが、リスにとってはそうしたものが存在しないからである。

我々にとって直接的に馴染みのある時間や空間の領域でさえ、規模は重要な役割を果たす。建物、動物、社会組織は、その構造や振舞いにおける根本的な変化を経験せずには、巨大化することも矮小化することもできない。たとえば、普通は4階建ての建物に用いられている設計と材料で40階建ての建物を建てることは不可能である。その理由は、(他の事項はさておき、)4階建て用の材料と設計では自重で崩れてしまうからである。物体がその大きさを増していくにつれて、その体積は表面積よりも大きな比率で増加していく。したがって、体積に依存する特性、たとえば容積や重量は、面積に依存する特性、たとえば支持材の強度や界面活性と対応しなくなっていくのである。たとえば、物質は塊状よりも細かく粉砕した状態の方がはるかに溶解性に優れる。これは、体積に対する表面積の比率がよりはるかに大きくなるためである。微生物はその表面を通して

直接環境との間で物質交換を行うことができるが、より大きな生命体では特殊化し細かく枝分かれした表面を必要とする（肺や血管、根など）。

内部の関係にもまた規模の影響が大きく現れる。物事の中の可能な二つの組合せ（たとえば友人関係や電話の接続など）の数は、物事の全体数が増加するとその増加率の約2乗の割合で増加する。したがって、住民の数が10倍になった社会は、その住民間において接続可能な電話回線の数約100倍に増えることになる。より一般的に言えば、都市は単に大きな村ではない。その理由は、都市を特徴付けるほとんどすべての物事、すなわちサービス、労働形態、統治手法などが、単に規模が大きいというだけでなく、村のそれとは全く異なっているためである。システムには時に非常に多くの相互に関連した要素が含まれるため、それらを正確に記述することは困難である。複雑さの規模が増大していくにつれて、最終的に我々は特徴の概括化、たとえば膨大な原子数や瞬間的時間の平均値、又は典型例の記述などに依存しなければならない。

ある程度以上の複雑性を持つシステムは、その構成要素間の相互作用が適正に理解されているとしても、そうした相互作用からは予測できない特徴を示す可能性がある。このような状況では、根底にある仕組みに直接言及しないような原理であっても、その仕組みと矛盾することがなければ、そうした原理が重要になる場合がある。たとえば、氷河による侵食過程は、地質学においてはその根底にある岩石の鉱物の電気力や結晶構造などの物理特性に言及しなくとも論じることができるし、また心臓は細胞の振舞いに関係なくその送り出す血液量の観点から考えることができる。あるいはまた、脳細胞の機能に言及しなくとも、任意のメッセージに対する人の反応を予測することができ、政治学においては、必ずしも特定の人物に言及しなくとも圧力団体の影響を分析することができる。このような現象は、その完全な説明を行うには我々が直接経験できないような規模に落とさなければならないが、これらを理解することは様々な複雑性の段階において可能である。

第12章 思考の習慣

歴史を通じて、人間は共通の「価値観」「態度」「技能」を世代から世代へと伝達してきた。この三つの事柄は、正式な学校制度が確立されるよりもはるか昔から教えられてきたものである。今日でさえ、家族、宗教、同僚、書籍、報道、娯楽媒体、そして一般的な生活経験は、知識、学習、その他の生活の側面に対する人々の考え方を形成する上で主要な影響を及ぼしている。学校における指導という文脈においては、科学、数学、技術もまた重要な役割を果たしうるものである。なぜなら、これらは明確な一連の価値観の上に築かれ、一般的な社会の価値観に対応し、共通の文化的価値の形成に対してますますその影響度を高めているからである。したがって、学校教育が人々の価値観や態度に影響を与え、若者に卒業後の人生に向けた準備を行わせる際に、科学的な価値観や態度を考慮しなければならないのである。特に、文化的多様性と個性を重視し、イデオロギーに対する警戒意識を持った社会においては非常に敏感な問題である。

同様に、科学、数学、技術には、若者がその就学期間を通して発達させていく必要のある思考技能がある。これらの技能の大半は、公式・非公式な学習において、または生涯を通じての社会全体への参加において、必要不可欠な数学的、論理的技能である。

こうした価値観、態度、技能は、全体として「思考の習慣」と定義することができる。その理由は、これらはすべて、知識や学習に対する見方、あるいは思考や行動の仕方に直接的に関係しているからである。

本章では、科学教育という文脈から、価値観、態度、技能に関する提言を示す。本章の前半部分では、価値観と態度に関する4項目の個別的な側面に焦点を当てる。それらは、「科学、数学、技術に内在する価値観」「科学と技術の社会的価値」「一般的な社会的価値の強化」「科学や数学を理解に対する人々の能力や態度」である。また、本章の後半部分では、基礎的な数学、批評的思考、コミュニケーションに重点を置いた技能に関する六つの側面に焦点を当てる。

提言

価値観と態度

科学教育は、科学者、数学者、技術者が共通に持つ価値観に対する人々の知識や一般的な社会的価値に貢献し、かつ科学、数学、技術の社会的価値観に関して、情報に基づく釣り合いのとれた信念を人々の中に醸成し、科学、数学、技術の学習に対する若者の積極的な態度を育むべきものである。

科学、数学、技術に内在する価値観についての知識

科学、数学、技術は特定の価値観を備えており、その一部は、事業、法律、芸術など他の人間活動の価値観とは性質あるいは強度の点で異なっている。科学、数学、技術を理解するには、この三分野の根底にあってそれらの特徴付けをし、これら三分野で活動

する人々が共有している価値観について認識することが不可欠である。これらの価値観は、本報告書の科学、数学、技術の本質に関する三つの章に示した提言に明確に示されており、そこでは後に続く検証可能な事実や仮説、科学における予測可能性、数学における厳密な証明と美しさ、技術における最適設計の重要性が考慮されている。

一般的な科学的価値観の強化

文化的に見れば、科学は革命的とも保守的とも捉えることができる。科学が明らかにする知識は、我々が自分自身や物事の大きな枠組みの中での自らの重要性について長い間抱いていた信念を、時として変更あるいは放棄することさえ迫るものとなる。ニュートン、ダーウィン、ライエルに対して我々が連想する科学的な変革とは、地球やそこに棲む生物に関する知識と同様に、人間性に対する感覚にも大いに関係するものであった。さらに科学的知識は、特にこの世界について、我々が考えあるいはそうあってほしいと期待していたものとは異なっているとわかった時に、我々に驚異をもたらし、問題提起することにもなる。それは例えば、地球の年齢が数千年単位ではなく数十億年単位であることを我々が発見した時などである。このような発見は時として大きな衝撃を伴うために、その新たな知識が受け容れられるまでには、何年（あるいは社会全体としては数世代）もの時間を要する場合がある。新たな知識を得るまでに待った時間について言えば、その間我々は少なくとも不確かな理解の中にあっただということである。科学的、技術的発展が人間の信念と感覚に影響を与えるという点を認識することは、すべての人々のための科学教育の一部となるべきである。

科学がこの世界と自分自身に対する我々の理解に問題を与えるものであるにもかかわらず、科学は日常的な価値観に基づくものであることを認識することも重要である。事実、科学は多くの点で、統一性、勤勉さ、公正さ、好奇心、新しい思想に対する開放性、懐疑主義、想像力など、重視されるべき一定の人間の価値観を体系的に適用したものである。こうした価値観はどれ一つとして科学者が発明したものではなく、また科学者だけが抱いているものでもない。しかし、科学という広範な分野には実際にこうした価値観が組み入れられまた重視されており、人間の知識と福利の向上に向けたその重要性が大いに強調されてもいる。したがって、科学を効果的に教えることができれば、こうした一般的に望ましい人間的態度と価値観を強化する結果につながるであろう。

科学教育は、これらの態度や価値観のうち、好奇心、新しい思想に対する開放性、懐疑主義という三つの特性を高める上で特に有効な立場にある。

好奇心： 科学者は好奇心を生き甲斐とするが、子どももまたそうである。子どもは、目に映るものすべてに対する疑問を胸に抱いて学校に入ってくる。しかし、子どもが科学者と異なる唯一の点は、その疑問に対する答えを見出す方法と、その答えがどの程度正しいかを検証する方法をまだ学んでいないという点にある。子どもたちの好奇心を育み、その好奇心を生産的な手法に向かわせるようにする科学教育は、子どもにも社会に

も役立つものである。

新しい思想に対する開放性： 新しい思想は、科学の発展と人間の全般的な活動のために必要不可欠である。心の狭い人々は、生涯を通じて発見の喜びや知的成長に対する満足感を得ることはない。なぜなら、本報告書で明確に示されているように、科学教育の目的は単に科学者を生み出すことのみにあるのではないからである。最初は不信に思えたり、一般に信じられていることと矛盾するような考えであっても、それを注意深く検討することが非常に重要である。科学教育は、このことをすべての生徒が理解できるように支援すべきである。科学、科学と社会、及び社会内部での主な緊張関係の要因は、思想間の争いに関係している。そうした緊張関係の本質を整理し、競合する思想間の争いに関わることは、自分や社会にもたらす価値について考えることにほかならないという点を、科学の歴史は示してきた。科学教育は、このことを生徒たちが判断できるように支援すべきである。

懐疑主義： 科学は、開放性と同時に懐疑主義によっても特徴付けられる。新たな理論は大きな注目を浴びるであろうが、その主張が証拠によって裏付けられ、論理的に他の確かな原理との一貫性を持ち、かつ他の競合する理論よりも多くの現象を説明することができるようになり、新たな知識を導く可能性があることが示されるまで、科学界において広く受け容れられることはめったにない。大半の科学者はすべての新しい理論に対して懐疑的であるため、それを受け容れるまでには、数年から数十年に及ぶことのある検証と反駁の過程を経なければならない。生徒が体系的な懐疑主義の社会的価値を理解し、開放性と懐疑主義との間に立つ健全な平衡感覚を生徒が自分自身で育成するように、科学教育は支援すべきである。

科学、数学、技術の社会的価値

学習の成果について考える際に、価値観がもたらす意味はもう一つある。それは、生徒が自らどのような科学的価値観を身に付けるかということとは全く別のことで、社会的価値について生徒が何を知り、信じるべきかという問題である。高校を卒業するすべての生徒にとって、科学、数学、技術の社会的価値に関する深い理解と確信をもつ必要はあるだろうか。

一般的に見れば、科学、数学、技術によって日常生活の質が向上していることから、生徒はこれらの分野の思慮深い支持者となるべきである。しかし、科学自体は独立的思考を非常に高く評価するため、教師は単に生徒を科学に対する無批判的な支持者になるように吹き込むべきではないということになる。むしろ教師は、本報告書の提言に述べられた目標の達成を通して、最終的に科学、数学、技術に関する良識的な見解を持ち、無批判的に肯定的にも否定的にもならないような市民に生徒を成長させていくという立場を取るべきである。

科学，数学，技術の学習に向けた態度

小学校の児童は，自然や数について自発的な興味を持っている。にもかかわらず，高校を卒業する頃になると，多くの生徒は数学をあまりに難しくつまらないものとして敬遠し，科学を軽視するようになる。彼らは科学を単なる学問的活動と見なし，彼らが生活している世界を理解する方法だとは考えない。こうした嫌悪感の影響は深刻なものとなる。なぜなら，彼らの人生の多くの可能性が制限されたものとなり，科学者，数学者，技術者が生まれてくる土壌にあるこの国の総体的な才能が，本来のあるべき規模から縮小されてしまうことを意味するからである。

学校教育だけではこうした状況を好転できないかもしれないが，現実にそれを期待する上で学校教育の役割は重要である。生徒の中に前向きな態度を育むことは，教師の力による。科学や数学において，有意義でかつ取組みやすく，刺激的な話題を教師が選び，生徒間の競争だけではなく協力体制にも重点を置き，用語の丸暗記ではなく探究と理解に焦点を当て，また学習の目的も探究と理解に置かれ，それぞれの到達目標を評価してもらえることを生徒すべてが認識するように努めれば，そうした生徒のほとんどは本当の意味で学習したことになるであろう。そして学習を成功させる中で，生徒は何より最も重要な教訓，すなわち自分に学習の能力があるという意識を得るであろう。

技能

前章までに述べられた提言は，その大部分が知識に関するものであった。しかしそれらはまた，問題解決の場面でも応用可能な方法にしたがって知識を理解することも意味するものであった。この意味で，これまでに示された提言は，すべて思考技能（スキル）に関するものである。言い換えれば，思考技能を修得できるのは，私たちが住むこの世界に関する本質的な事象を理解し，多くの背景や状況下でそうした事象に向き合い，理解した内容を反復して用いるような過程ということになる。

計算技能

有意味な場面での計算の反復経験は，頭の中や紙の上，電卓やコンピュータなど，様々な計算を行う上で最も適した状況を判断するための，より高度な水準の技能を育むものにもなる。これらの計算方法はそれぞれ，問題解決において適切な役割を持っているが，その役割は状況によって異なってくるであろう。

基本的な数の技能： 日常生活においては，頭の中で簡単な計算ができなければならない。しかし，実際に暗算を行う必要のある量は非常に限られたもので，普通の人であれば誰でも習得する能力を持っている。この技能を身に付けるには，まず次のような基本的な数の事実を記憶し，それを即座に思い起こす必要がある。

- ・ 1 から 10 までのすべての整数の和，差，積。

・重要な分数，すなわち二分の一，三分の一，四分の一，四分の三，五分の一，十分の一，百分の一に相当する小数の値（ただし六分の一，七分の一，九分の一，大半の人々がめったに使わないような他の分数は除く）。

・小数と百分率との関係（0.23 と 23% が等しいという関係）。

・10, 100, 1,000, 100 万, 10 億の相互関係（例えば，百万は千の千倍であるという知識）。10 の累乗で表せば，この関係はそれぞれ 10^1 , 10^2 , 10^3 , 10^6 , 10^9 になる。

すべての人々が行えるようになるべき暗算には，次の 2 種類がある。

・二つの 2 桁の数の足し算。

・任意の数への 2, 10, 100 の掛け算，任意の数の 2, 10, 100 による割り算（有効数字 1 桁か 2 桁まで）。

電卓を用いる技能： 日常生活において，特に職場などでは，ほとんどすべての人が計算を行う場面に出会う。最近までは，筆算が暗算で解けない計算を行う最も通常の方法であった。大半の生徒にとって，学校の数学は筆算をすることを意味していた。多くの場合，長除法（除法の筆算），百分率，割合の計算方法を学ぶという形態をとってきた。しかし，そうした演算の手順が有効である理由，それをいつ用いるべきか，あるいはその答えからどういう意味を汲み取ればよいかについての学習はなされてこなかった。

小型の安価な電卓が登場したことで，こうした状況は劇的に変化した。電卓は計算が非常に速いため，学校では本当の数学を実行し，学習するための時間が得られるようになった。生徒は，数値問題を解くための手順や，その答えの合理性を調べる方法を容易に学習できるようになった。誰もが基礎的計算能力を持つ状況が，現実にも可能になったのである。

電卓の利点は教育的な分野にとどまらない。筆算は遅く，間違いを起こしやすい。また，電子機器の大半と同じように，大部分の利用者にとって電卓には概念的にわかりにくい側面もあるが，精確さが求められる場合や扱う数が複数桁のものである場合，あるいは計算が何段階かにわたるような場合には，電卓の方が筆算よりも多くの点で利点がある。しかし，そうした利点も，電卓を賢く利用する方法を学んでいなければ現実のものにはならない。事実，電卓を利用するには技能が必要であり，また電卓は人間の推理における誤りを訂正できるものではない。しばしば必要以上の精度で答えを出したり，操作者の誤りによってその意味が損なわれることもある。重要なのは，生徒が早い時期から電卓を使い始め，修学期間を通して多くの科目において可能な限り電卓を利用するということである。

すべての生徒は，電卓を用いて次の計算を行えるようになるべきである。

・任意の整数（負ではない）または小数の加減乗除（ただし，指数，根，三角関数は除く）。

- ・任意の分数に相当する小数を見出す。
 - ・任意の数同士の百分率を計算したり，任意の数のある百分率を取る（例えば，10%減や60%増など）。
 - ・任意の数の逆数を見出す。
 - ・いくつかの量の大きさから割合を計算したり（例えば，時間と距離から速度を計算する），割合から量の大きさを求めたりする（例えば，金利と元本がわかっている場合に支払うべき利子の金額などである。ただし複利計算は除く）。
 - ・長方形，三角形，円の周の長さや面積を計算する。直方体の体積を計算する。
 - ・一群のデータの平均値を計算する。
 - ・簡単な式に値を代入して求める。例えば， $aX + bY$ ， $a(A+B)$ ， $(A-B)/(C+D)$ など。
 - ・複合単位を変換する（円/ドルをドル/円に，マイル/時をフィート/秒になど）
- 電卓を十分かつ効率的に利用するには，次のこともできるようになる必要がある。
- ・新たな手順について学習する際には，電卓利用説明書に書かれた段階ごとの指示を読んでそれに従う。
 - ・複数の段階を要する問題を解くために，簡単な演算手順を組み立て，書き出す。
 - ・入力から計算に至るまで，答えの単位（秒，平方インチ，ドル/タンクなど）がどのようなになるかを考える。現実的な計算の大半は量の大きさ（単位を伴う数値）に関係するが，電卓は数値にしか対応しない。利用する場合，電卓の示す例えば「57」という数を「57マイル/時」として理解する必要がある。
 - ・電卓に答えとして示される数値を，入力の精度を正確に反映する桁数の有効数字に四捨五入する。例えば，「3時間（±1～2分）で200km（±1～2km）走行する自動車の速度」に関しては，「67km/時」がおそらく十分な精度といえる。「66.67km/時」は細かすぎるし，「66.666667km/時」ではほとんど無意味な値となってしまう。
 - ・答えが合理的なものであるかどうかは，それを見積もった答えと比較することで判断する。例えば，「6.7km/時」や「667km/時」という答えは，自動車が幹線道路を走る場面としては一見して誤りであると判断できる。

見積もり技能： 正確な答えと同程度に，近似的な答えが有効になってくる状況が多くある。事実，こうした事例は例外ではなくむしろ基本である。近似的な答えの見積もりは，正確な測定や慎重な計算に取って代わることもしばしばあるが，大半の場合は電卓や筆算で行った計算結果の検算に利用される。見積もりの技能は，特定の状況下での妥当な程度の正確さに関する感覚に基づくものであり，それは逆に問題の背景と計算目的についての理解に依存するものである。個々の見積もり技能の中でも，すべての生徒が習得すべきものは次の事項である。

- ・よく知られた長さや重さ，時間間隔
- ・地図から読み取れる距離と移動時間

- ・縮図を用いた対象物の実際の大きさ

- ・歴史（特定のフットボールチームが過去 10 年間で 8 回開幕戦に勝利しているという事実など）あるいは可能性のある結果の数（例えばサイコロの面の数 6）に基づく、よく知られた状況が起こる確率

入力した情報が誤っているか、入力作業中に間違いがあったか、あるいは誤った計算手順が用いられたことによって、電卓に示される答えが間違っていることがしばしばある。計算の結果、出された答えの妥当性を判断する基準がないような状況では、その答えを受け容れる前に、答えがどのようなものであるべきかを大まかに見積もる必要がある。これには次の三つの事項が関係してくる。

- ・和、差、積、商、分数、百分率の大まかな見積もりを行う。

- ・見積もりと計算値とが大きくずれている場合、その原因を突きとめる。

- ・量の大きさは常に任意の 10 の累乗に最も近い形で指定する。例えば、世界の人口は 10^9 （10 億）とか 10^{10} （100 億）の桁の数字である。大きさが 1 桁変わるということは、数が 10 倍前後で変わるということであり、4~5 倍から 20~30 倍に大きく（あるいは小さく）なるということである。40 倍から 200~300 倍の範囲で変わった場合は、2 桁大きくなった（小さくなった）と言えるであろう。

操作や観察の技能

家庭やその他の日常生活において技術を利用したり、注意深い観察を行ったり、情報を取り扱うために、すべての生徒は、共通の道具を使いこなす能力を身に付けるべきである。これには、次の事項に関する能力が含まれる。

- ・行った観察を正確に記録し、実際の観察結果とそれに関する想像や推量とを慎重に区別し、かつ数週間から数か月にわたって記録するようなノートを作る。

- ・主題、アルファベット、番号、重要用語別のファイルを用いて、コンピュータに情報を保存し、それを検索する。あるいは個人で考案した簡単なファイルを用いる。

- ・標準的なソフトウェアを使ってコンピュータ上で情報の入力と検索を行う。

- ・長さ、体積、重さ、時間間隔、温度を直接測定する際に適切な器具を用いる。適した器具の選択に加えて、この技能には状況に応じた精度の活用も含まれる（例えば、棚作りの際には 1/4 インチ間隔で近似値を測定するだけでは不十分であるが、長い塀を作る際にはこれで十分な精度となる）。

- ・アナログ、デジタル双方の標準的な測定器の表示を読み、つまみ、目盛、スイッチを指示通りに設定する。

- ・安全性に配慮しながら、様々なプラグやソケットを接続し、端子を設置する。

- ・人力の工具や電動工具を使い、安全性に配慮しながら、よく使われる材料（木材、粘土、紙、プラスチック、金属）を成形し、組み立て、分解する。

- ・安全性に配慮しながら、（台所、倉庫、実験室内の）乾燥材や液体材料を指定され

た割合で希釈，混合する。

・通常の機械や電気系統に関する簡単な故障点検を行い，機能不全の原因となりうるものを特定し，取り除く（家庭内で見られる切れた電球，電源から抜けた導線，欠陥のある導線やスイッチ，または自動車の空になった燃料タンクや上がったバッテリー，水が入った気化器など）。

- ・基本的な特徴，性能，耐久性，費用に基づいて製品を比較し，個人で選択を行う。
- ・機械内部の部分的な変化（入力，出力，接続）が他の動作に与える影響を探る。

コミュニケーション技能

科学，数学，技術に関する対話には，考えをやり取りし，実態に対する再現性と明確さを持つ情報を共有し，理解力を持って読み，聞く能力が必要とされる。これらに関する技能の一部は科学，数学，技術に特有のものであり，またその他の技能は一般的なものであるが，そうした技能も内容に関係なく存在するわけではない。すべての生徒は，次のような事項を可能にする技能を持つべきである。

・本報告書の提言に示された基本的な概念を，音声や文字で表現する。このためには，特にそうした概念に対する一定の理解と，自分の概念構成にそれらを組み入れ，例や合理的な主張を交えてそれらを説明する能力が必要となる。

・本報告書に用いられているような，科学，数学，技術において妥当性を持つ標準的な科学用語に親しみ，自由に使えるようになる。多くの学校において，科学（理科）の授業では用語のみが教えられ，主として用語のみに関する試験が行なわれている。このような方法は致命的なものであり，また本書で求めるような「科学用語を適切かつ有効に習得することが，科学に関する理解につながる」という水準には程遠いものである。

・「もし…なら，…である」「そして」「すべての」「ではない」「との相関関係がある」「原因」などの用語や表現について正しい解釈ができる。

・情報を簡単な表に表すことができる。

・定規を使わずに情報や関係を表すグラフを描き，傾向（定常，加速，漸減，循環など）を示す。

・円グラフ，簡単な棒グラフ，折れ線グラフ，着色地図，二つの変数のデータからなる表を読み取ったり，傾向や極限值に着目したりして，グラフの内容が選択する尺度においてどのような変化が見られるかを認識する。

・表，グラフ，データの言葉による記述の対応関係を検証する。

・段階ごとの指示，手法，処理方法，流れ図，略図で手順を書き，それに従って作業する。

・垂直，平行，相似，合同，接線，回転，対称を含む基本的な幾何学的関係を理解し，これらを用いる。

・直交座標や極座標を使った地図上の位置を確認し，記述する。

・科学的な話題に関する議論に参加し、他の人々の発言を反復または要約し、発言内容の明確化や詳述を求め、それらに代わって他の観点から論じる。

批評的に検討する技能

生徒は、様々な形態で、情報媒体、教師、同級生から主張や議論を聞くことになるが、その一部には科学、数学、技術分野に属するものがある。教育は、人々がそうした主張を批評的に読み聞きし、注目すべき証拠と無視すべきものとを判断し、注意深い主張といい加減な主張とを区別できるように支援すべきである。加えて人々は、そのような批評的技能を自分自身の観察、主張、結論にも適用し、それによって自らの偏見や理由付けに縛られないようにすべきである。

大部分の人は技術的な分野の専門家にはならないが、すべての人は疑わしい主張や議論の徴候を検知する方法を学ぶことができる。こうした徴候は、意図された結論の伝達方法に関係している。生徒たちは、次のような脆弱な主張の徴候に注意し、警戒することを学ぶべきである。

- ・主張の前提が明確に示されていない。
- ・主張の結論が、示された証拠から論理的に導かれるものではない（例えば、「大半の富裕層は共和党に投票する」ことが真実であったとしても、そこから逆に「共和党に投票する人々の大半は富裕層である」ということが必ずしも導かれるわけではない）。
- ・主張が類比に基づくものであるが、比較が適切でない。
- ・事実と意見が混ざり合っていて、意見が事実として示されていたり、またはどちらがどちらであるかが明確でなかったりする。
- ・有名人が権威として利用されている（「有名映画俳優が新しいダイエット法を支持している」など）。
- ・明確な判断基準が用いられず、曖昧な表現になっている（例えば、「一流の医師たちはこのように述べている・・・」「科学によって明らかになっていることとして、・・・」「科学界が推奨している・・・」などはよく用いられる表現である）。
- ・報告する意見や情報の中に、意識的あるいは無意識的な歪曲を防ぐために講じられるべき措置についての言及がない。
- ・ある実験からの結果に関して、実験集団と比較される対照集団についての言及がない。
- ・目盛の一部を省略したり、通常ではない目盛単位を用いたり、あるいは全く目盛を示さないなど、結果の外観を歪曲するようなグラフが用いられている。
- ・ある集団のすべての構成員（例えば「十代の若者」「消費者」「移民」「患者」など）が、他の集団とは重複しないほとんど等質の特徴を有しているということが暗示されている。
- ・平均値は示されているが、平均値に対する偏差の程度が示されていない。

- ・百分率または分数で示されているが、標本全体の規模が示されていない（「歯科医の10人のうち9人が〇〇を推奨している」など）。
- ・絶対量と比率を混同している（「我々の都市では昨年に比べて3,400件も窃盗事件が増えたが、一方、他の複数の都市では1%未満の増加率になっている」など）。
- ・誤解を招くような精度で結果が示されている（例えば、19人中13人の生徒の割合を68.42%と表すなど）。
- ・説明や結論が他の可能性に言及せず、考察に値する唯一のものとして提示されている。

第 III 部：将来への架け橋

序文

プロジェクト 2061 は、科学、数学、技術の教育の大規模な改革に貢献することを目指すものである。しかしそれは、このプロジェクトの第 1 回報告書としての本報告書だけでは、全米的な改革を実現するためには不十分であるという認識に立った上でのことである。それでは、この国が本報告書に述べられたような目標の実現に向けて大きく前進するには、どのようにすればよいのであろうか。私たちは、満たされるべき条件が三つあると考えている。すなわち、(1) 科学、数学、技術の指導を改善し、(2) 全米的に大規模かつ持続的な改革を実現するために必要な事柄についての現実的な理解を得て、(3) 全米科学技術教育評議会の提言に基づき、多くの面で迅速に活動を開始することである。これらの条件を満たす方法に関するプロジェクト 2061 の見解は、以下の 3 章において示していく。

・第 13 章「効果的な学習と指導」は、「どのように内容を教えるのかということは、どのような内容を教えるのかということと同様に重要なことである」という信念に基づいている（全米評議会と第 1 段階科学パネルの強力な支持を得ている）。この章ではまず初めに、指導全般に影響するある適正に確立された学習原理を示す。次に、全米評議会の提言と一貫性を持ち、またその内容においてその提言に光を当てることになるある効果的な指導原理を紹介する。

・第 14 章「教育改革」では、一般的な教育改革という問題に目を向ける。ここでは、科学、数学、技術の教育における全米的な改革の必要性について論じ、プロジェクト 2061 の改革への取組み方の根底にある前提条件を概説する。

・第 15 章「次の段階」は、プロジェクト 2061 第 2 段階の目的について概説し、次に、関係する個人、機関、組織が、科学、数学、技術の教育における改革に貢献するために、本報告書をいかにして活用するかという方法に関する提言について述べていく。

第13章 効果的な学習と指導

『すべてのアメリカ人のための科学』は生徒たちが学習すべき内容に重点を置いているが、科学の指導法がもちろん同様に重要であるということも認識されている。有能な教師は、指導計画を策定するにあたって、研究を通じて深まりつつある学習の本質に関する一連の知識と、時間をかけて実証されてきた指導法に関する知識に依拠している。通常の場合、教師は学習対象となる教材個々の特徴、生徒たちの背景、指導と学習が行われる状況を考慮する。

本章では、非体系的に、かつ完全に網羅することを心がけることなく、上述の教師を特徴付けている学習や指導に関するいくつかの原理を紹介する。そうした原理の多くは、学習と指導全般に当てはまるものであるが、明らかにその一部は科学、数学、技術教育にとって特に重要なものである。学習と指導は相互に密接に関連するものではあるが、ここでは便宜上、両者を別個の節にまとめた。

学習の原理

学習は必ずしも指導の成果ではない

認知的な研究により、良い指導と見なされるものであっても、学問的に豊かな才能を持った生徒を含む多くの生徒たちは、我々が考えているほど理解していないことが明らかになっている。決意を抱いて試験を受ける生徒たちは、教えられたことや読んだことのある内容はわかることが多いが、慎重に調査してみると、完全に間違っているというわけではなくとも、彼らの理解が限定されていたり歪曲されたりしていることがしばしばであることがわかる。こうした知見から明らかになるのは、教育目標を設定する際には内容を絞ることが不可欠だということである。すなわち、生徒の情報量を増やすのではなく、その理解の質を高めることができるように、学校は最も重要な概念や技能を強調すべきである。

生徒の学習内容は彼らが既に持っている考えによって影響される

教師や書物がいかに明確に物事を教えてくれようとも、生徒は自ら意味を構築しなければならない。大半の場合、こうした作業は新たな情報と概念を、既に持っている概念と結び付けることで行われる。人間の思考における必要不可欠な単位である概念は、生徒の世界観と多様な関係を保つものでないかぎり、記憶されたり役立ったりすることはない。あるいはまた、それらが記憶に残ったとしても、「1995年の生物学の授業」というようなラベルを貼られて引き出しの奥にしまわれてしまい、この世界の他の側面に関する思考に影響を与える形で利用されることはないであろう。概念は、様々な状況において遭遇されるだけでなく、様々な方法で表現されるとき、最も修得しやすく、そのことで、生徒の知識体系に組み込まれる機会がより多く提供されるようになる。

しかし、効果的な学習を行うには、しばしば新たな概念と古い概念とを幾重にも関係

付けるだけでは済まなくなってくる。人々は時には自ら思考の再構成を劇的に行わねばならないことがある。すなわち、ある新しい考えを組み入れるために、学習者は既に知っている物事の変化させるか、または長い間信じてきた世界観を放棄さえしなければならないのである。必要となる再構成作業の選択肢としては、自らの古い考えに適合するように新たな情報をねじ曲げるか、新たな情報を完全に拒絶するかのいずれかである。生徒は、日常出くわすほとんどあらゆる種類の話題について自らの考えを抱いて学校に通ってくるが、その一部は正しいが一部は間違っている。彼らの直観や誤概念を即座に無視したり、簡単に退けたりすれば、試験の際には教師の望む答えを書いたとしても、生徒は当初の信念をおそらくいつまでも抱き続けることになるだろう。単に否定するだけでは不十分である。新たな見方が世界をより正しく認識する上でどのように役立つかを理解させることで、生徒を新たなものの見方の構築に向かわせなければならない。

学習の進歩は通常、具体から抽象へという道筋をたどる

若者が最もなめらかに学習できるのは、実体験できたり、視覚、聴覚、触覚、運動感覚などの五官に直接訴えたりする物事に関してである。彼らは経験を経て、抽象概念を理解し、記号を操作し、論理的に判断し、一般化する能力を発達させていく。しかし、これらの能力の発達はゆっくりとしたもので、大半の人々は新たな考えの具体例に生涯を通じて固執し続ける。具体的な経験は、何らかの適切な概念構造の文脈の中で行われた場合に、最も学習効果を上げる。抽象概念を把握する際に多くの生徒が直面する困難さは、生徒自身が理解していない専門用語を記憶し、暗唱する能力によって覆い隠されがちである。その結果、幼稚園から大学に至るまで、教師は時として抽象概念を扱う生徒の能力を過大評価し、生徒による正しい用語の使用を理解した証拠と受け取ってしまうのである。

学習は練習によってのみ効果を上げる

生徒に新しい状況で考えを適用することを期待するのであれば、彼らに新しい状況でそれを用いる練習をさせなければならない。彼らになんら新しくもない演習問題や非現実的な「文章題」の答えを考える練習ばかりさせていけば、生徒が学ぶことは単にそれだけに終わってしまうであろう。同様に、生徒が批評的に考えたり、情報を分析したり、科学的な考えを伝え合ったり、論理的な主張を行ったり、集団の構成員として作業したり、その他望ましい技能を身に付けたりすることはできるようにするためには、数多くの状況において繰り返しそれらのことを行う機会を与えなければならない。

生徒による効果的な学習にはフィードバックが必要である

肉体作業であれ知的作業であれ、単なる作業の反復は、生徒の技能の向上や洞察力を

鋭ぎすますことにはつながらないであろう。生徒が考えを表現し、同級生からフィードバックを得た時に学習は最も効果を上げることが多い。しかし、フィードバックが学習者にとって最も効果的なものになるためには、正しい答えを出すことばかりに終始するものであってはならない。フィードバックは分析的かつ示唆に富むべきものであるとともに、生徒が関心を持った時に行われるべきである。さらに生徒は、受け取ったフィードバックの内容について熟考し、調整を行って再挑戦する時間がなければならない。これは、大部分の試験、特に期末試験において無視されている要件であることに注目すべきである。

期待は成果に影響する

生徒は、自分が学習できることとできないことに対する期待感に左右される。方程式を解くにせよ自転車に乗るにせよ、何かを学ぶことができると自らが信じれば、通常の場合は進歩するものである。しかし、自信が持てなければ、学習はおぼつかない。生徒は、繰り返し失敗することで自信をなくしていくように、学習において成功を経験することで自信を深めていくのである。したがって教師は、難解であるが達成可能な学習課題を与え、生徒の成功を支援する必要がある。

加えて、生徒は他者が自分に対して抱いている成功や失敗に関する期待感を敏感に受け取るものである。親やカウンセラー、校長、同級生、そしてより一般的にはマスコミによって示される肯定的、否定的な期待感、生徒の期待感に影響を与え、ひいては彼らの学習態度に影響を与えることになる。たとえば、特定の教科に関する生徒の理解力に信頼感がもてないことを教師がほのめかせば、生徒は自らの能力に自信をなくし、本来よりもさらに成果は上がらなくなるであろう。そうした生徒の明らかな失敗が教師の当初の判断を強化することになれば、結果的に自信の喪失と失望を与えるという悪循環に陥ることになる。

科学、数学、技術の指導

指導は科学的探究の本質と一貫性を持つべきである

科学、数学、技術は、その成果と同じように、その対象や手法によっても特徴付けられる。科学、数学、技術を、知識からだけでなく、思考や行動の様式という観点からも理解するには、生徒がこれらの分野に特徴的な思考と行為において一定の経験を積む必要がある。したがって、教師には以下の事柄が望まれる。

自然に対する疑問から出発する： 効果的な指導は、通常の場合、生徒の知覚、理解、知識の範囲を超えた抽象概念や現象ではなく、生徒にとってなじみがあり、関心の持てる現象と疑問から始まるものである。生徒は、装置、生物、材料、形状、数を含む周囲の物事について知るとともに、それらを観察し、収集し、扱い、記述し、考えをめぐらし、問いを發し、議論を行い、それからそうした疑問に対する答えを見出す努力をする

必要がある。

生徒を積極的に活動させる： 生徒に対しては、収集、分類、目録作成、観察、ノート作成、スケッチ、意見調査、投票、調査を行ったり、虫めがね、顕微鏡、温度計、カメラ、その他の一般的器具を使用したりするための、様々な機会を数多く提供する必要がある。生徒はまた、解剖や測定、計数、グラフ化、計算を行い、一般的な物質の化学的特性を調べ、植物を栽培し、人間や他の動物の社会的行動を体系的に観察すべきである。こうした活動の中で、測定ほど重要なものはない。その理由は、何を測定し、何をを使って測定するか、測定結果の正しさをどのようにチェックするか、その結果をどう表し、結果からどういった意味を見いだすかを考えることが、科学と工学の主要部分となるものだからである。

証拠の収集と活用に重点を置く： 生徒たちには、どの証拠が有効であるかを判断し、証拠が意味するところについて自らの解釈を求めるような、それぞれの発達の程度にふさわしい水準の問題を与えるべきである。そうすれば、科学で行われるように、注意深い観察と思慮深い分析を重視するものとなる。生徒は、指導や励ましを必要とし、また証拠の収集、分類、分析、さらには証拠に基づく論点の構築に関する訓練を必要とする。しかし、そうした活動がとてつもなく退屈なものでなければ、生徒たちが関心を寄せる知的に満足すべきいく分かの成果は得られるにちがいない。

歴史的な観点を示す： 生徒たちは、学校に通っている間には、歴史的な背景において示される多くの科学的な概念に遭遇するはずである。教師が（第10章で紹介したいいくつかの重要な逸話に加えて）どのような個々の逸話を選択するかということよりも、選択行為そのものが科学的活動の範囲と多様性を示すということの方が重要である。生徒は、科学的概念の発達や、そうした概念を我々人間が現在理解するに至るまでの紆余曲折、様々な研究者や評論家が果たした役割、長い時間にわたる事実と理論との相互作用といった事柄を学習することで、科学が実際にどのように行われているのかについて理解することができる。

科学、数学、技術の効果的な指導にとって、歴史が重要である理由は、それが社会的な観点（科学や技術の発達に対する社会の影響や、社会に対する科学や技術の影響）に導いてくれるからでもある。たとえば、社会がもたらした障壁にもかかわらず女性や少数民族が多大な貢献をしたこと、科学、数学、技術の起源が古代エジプト、ギリシャ、アラビア、中国の文化に遡ること、そして科学者が自分の暮らしている文化における価値観や偏見をその仕事にも持ち込んでいることについて、生徒が意識を持つことは重要である。

明快な表現を強調する： 音声や文字による効果的なコミュニケーションは、生活のすべての場面において非常に重要であるため、すべての教科のあらゆる学校段階の教師は、すべての生徒に対して、このことの優先順位を高く位置づけるべきである。加えて、科学の教師は明快な表現を強調すべきである。なぜなら、自らの手順、知見、考えを厳

密に表現し、他者の説明を解釈するために、かなり苦心をしなければ、証拠の役割や曖昧さのない形での証拠の再現を理解することはできないからである。

集団的手法を用いる： 科学的作業と技術的作業がもつ協調的な性質は、教室における頻繁な集団活動によって強化されるべきである。科学者や技術者の大部分は集団で仕事をしており、単独の研究者はそれほど多くない。同様に、生徒には互いに学び合うことの責任を共有する経験をさせるべきである。共通の理解に至る過程において、集団内の生徒たちは互いに手順や意味について頻繁に情報交換を行い、得られた知見について議論し、作業がどの程度進んでいるかについて評価を行わなければならない。集団責任という状況下では、フィードバックとコミュニケーションがより現実的なものとなり、通常の個人的な教科書－宿題－暗記という手法とは全く異なった性質を帯びるようになる。

知識と探究を分離しない： 科学においては、結論とその結論を導くための方法とは緊密な関係にある。探究の本質は研究対象によって異なり、学習の成果も用いる方法によって異なってくる。生徒に対して、ある分野における蓄積された知識のみを単に伝えることだけを目指すような科学の指導では、理解に至ることはほとんどなく、ましてや知的な独立心や才能の発達にはつながらない。しかし、ある特定の物体と切り離された一連の手順（たとえば「科学的方法」）として科学的推論の方法を指導することもまた同様に実りが少ないものである。科学の教師は、生徒たちがこの世界の科学的知識と科学的なものの見方の両方を同時に身に付けられるように支援すべきである。

専門用語の暗記を重視しない： 科学の指導においては、語彙ではなく、理解を主な目的とすべきである。しかし、曖昧さのない用語の使用もまた、科学的なコミュニケーションや、最終的には理解にとって重要である。したがって、一部の専門用語は誰にとっても有用なものであるが、必要不可欠な用語の数は比較的少ない。考えを明確にし、効果的なコミュニケーションを促進するために必要な専門用語だけを教師が導入するのであれば、生徒もしだいに次回の試験以降も覚えているような有用な語彙を習得していくことであろう。しかし、教師が語彙を重視すれば、科学の過程としての効果を減ざることになり、理解を目的とした学習が危うい状況になる上、生徒が学んだ内容について教師が誤解する危険性も生じてくる。

科学の指導は科学的価値観を反映すべきである

科学は、一群の知識とその知識を蓄積し、検証することだけにとどまらない。科学は、人間としての特定の価値観を組み入れた社会的な活動でもある。好奇心、創造性、想像力、美しさを持つことは科学や数学、技術に限ったことではなく、ましてや独断に対する忌避の感覚や懐疑主義は言うまでもない。しかし、これらはすべて科学的な取組みを大きく特徴付けるものである。科学を学習していく中で、生徒たちは、空虚な議論ではなく、自らこうした価値観を経験するであろう。したがって、教師は以下の事柄につい

て努力すべきである。

好奇心を歓迎する： 科学，数学，技術は，好奇心を生み出すことはできない。科学，数学，技術は好奇心を受け容れたり，育んだり，組み入れたり，褒めたり，鍛えたりする。そして，優れた科学の指導もまた同様である。したがって科学の教師は，学習している教材について生徒が疑問を提起するように促し，答えを追究し始められるだけの明確な枠組を持った疑問について学習できるように手助けをし，生徒に対して答えを見出すための有効な方法を示すとともに，変わってはいるが適切な疑問を持ち，その疑問を追究する生徒を高く評価すべきである。科学の授業においては，不思議に思うことを知ることと同様に重視すべきである。

創造性を高く評価する： 科学者，数学者，技術者は，想像力を創造的に利用することを重んじる。科学の授業は，学問的な優秀さとは異質の創造性と発明の才が認められ，奨励される場となるべきである。事実，生徒の創造性と想像力が役立つような活動を考案することで，教師は自らの創造性を示すことができるのである。

健全な懐疑的精神を奨励する： 科学，数学，技術が繁栄しているのは，それを実践する人々が習慣として懐疑主義を身に付けているためである。彼らの核となる信条は，どのような事実，論理，主張にも疑問を持ち，どのような実験も再現しなければならないということである。科学の授業では，教師が普段から「どうしてわかるのだろうか。事実は何だろうか。事実を解釈してどのような主張ができるのだろうか。それに代わる説明やより優れた他の問題解決方法はないだろうか。」というような疑問を提起すべきである。その目的は，生徒たちにそうした疑問を提起し，その答えを構築する習慣を身に付けさせることにある。

独断を避ける： 生徒は，科学を不変的真理としてではなく，理解を拡張させるための過程として経験すべきである。このことはすなわち，教師自身または教科書が絶対的な権威であって，その結論が常に正しいという印象を与えないように配慮しなければならないことを意味している。科学的主張の信憑性，受け容れられてきた科学的信念の崩壊，科学者間の見解の不一致から汲み取れる事柄，といった話題を授業で扱うことによって，科学の教師は，数多くの科学的な事物を信頼して受け容れる必要性和，開かれた精神を維持することの重要性との釣合いをとれるように生徒を支援できるであろう。

美的な感覚を養う： 多くの人々は，科学を冷徹で面白みのないものと考えている。しかし，たとえば恒星の成り立ちや空の青さ，ヒトの心臓の構造についての科学的な理解は，必ずしもそうした現象に伴う空想的で精神的な意味を損なうものではない。さらに科学的知識は，カーテン越しに見える街灯の回折パターン，微生物における生命の鼓動，橋の片持ち梁の湾曲，生物細胞における燃焼効率，岩石や樹木の歴史，美しい数学の証明など，新たな美的感動を可能にするものでもある。科学，数学，技術の教師は，生徒が，考えや方法や器具や構造や物体や生物の美しさに対する感動する心を豊かにし，かつ深められるような学習環境を確立すべきである。

科学の指導は学習に対する不安の払拭を目指すべきである

教師は、多くの生徒にとって、数学や科学の学習は失敗に対する深刻な不安と恐れを伴うものであることを認識すべきである。これは、一部には指導内容と指導方法に由来し、また一部には、学校に通い始めたごく初期に科学や数学が得意でない親や教師たちから偶発的に感化を受けた態度に由来するものであることは疑いない。しかし教師は、数学や科学に対する不安を根拠のないこととして片づけるのではなく、生徒たちに対し、問題点を理解し、ともにその克服に向けて努力するよう働きかけるべきである。教師は以下のような措置をとることができるだろう。

達成感を利用する： 教師は、科学や数学の学習において、生徒になんらかの達成感を持たせるように配慮すべきであり、またすべて正しい答えを出すことを達成度の主な基準として重視すべきではない。結局のところ、アルフレッド・ノース・ホワイトヘッドが述べたように、科学自体、完全に正しいものではないのである。物事理解には絶対ということはなく、多くの形態をとりうるものである。したがって教師は、すべての生徒、特に自信のない生徒が自らの進歩を自覚できるように配慮し、学習を継続するよう促すべきである。

器具の使用に関して豊富な経験を与える： 多くの生徒は実験室の器具やその他の道具を使用することを怖がる。この恐れは、主として生徒の多くが安全な環境で器具に慣れるような機会が欠如していることに起因するものであろう。特に女子生徒は、元来男子生徒の方が器具の扱いが得意であるという誤った考え方の犠牲になっている。低学年から始まって、すべての生徒は段階的に器具とその適正な使用方法に慣れていくべきである。卒業するまでには、生徒全員が一般的な手工具、半田ごて、電気計測器、製図器、視聴覚機器、電卓、コンピュータについて、教師の監督の下での使用経験を持つべきである。

科学における女性と少数民族の役割を支持する： 科学や工学に関する職業にはこれまで圧倒的な数の男性や白人が携わってきたため、女性や少数民族の生徒は、これらの分野が自分たちの能力外であるとか、または自分たちには適していないという印象を持ってしまいがちである。こうしたやる気を削ぐような意識は、学校外の環境によって助長されることが多いが、教師が積極的に覆す努力をしなければ後々まで残るものとなる。教師は、女性や少数民族の貢献に光を当てた教材を選び、模範となる人物を取り上げるとともに、女性や少数民族について、彼らが他のみんなと同じ教科を同じ水準で学び、同等の成果を上げることを期待されているということを明確に伝えるべきである。

集団学習に重点を置く： 集団的手法は、科学や工学がどのように行われているかということに関する理解を促すことを目的とした集団学習の活用の必要性(前述)以外に、動機面での価値を持つものである。高得点を目指した生徒間の競争に重きを置きすぎると、科学を学習する第一の動機付けとなるべきもの、すなわち探究意欲が歪曲されるこ

とになる。科学の授業における生徒間の競争はまた、生徒の多くが科学を嫌いになり、科学を学習する能力に対する自信を喪失するという結果を招く。科学において標準となっている集団的手法は、教育面で多くの利点を持っている。たとえば、この手法によって、だれもが共通の目標を達成することに貢献できること、そしてだれもが同じ能力を持っていないとも進歩できることを生徒たちが理解する手助けとなる。

科学の指導は学校を超えた広がりを持つべきである

子どもたちは、教師だけではなく、親、兄弟姉妹、他の親類、同級生、そして成人の権威ある人物から多くのことを学ぶ。子どもはまた、学校の教科書や学校生活全般からだけでなく、映画、テレビ、ラジオ、レコード、一般書や雑誌、家庭のコンピュータからも学び、あるいは博物館や動物園、パーティー、クラブ活動、ロック・コンサート、スポーツ・イベントに行き、それらから学ぶこともある。科学の教師は、地域社会というより大きく豊かな資源を活用し、親や他の大人たちとの有効な関係を築くべきである。教師は、生徒たちが個人的に学ぶことの一部が間違っていたり、不完全だったり、理解が不十分だったり、誤解されたりしていることを認識すべきではあるが、公教育を通じて生徒たちがそうした知識を改め、新たな知識を獲得できるように手助けすることができるということも認識すべきである。

指導は時間をかけて行うべきである

科学の学習において生徒たちは、探究し、観察し、間違った方向に進み、考えを確かめ、またやり直すための時間が必要であるとともに、物を組立て、器具の較正を行い、物を収集し、考えを確かめるための物理的モデルや数学的モデルを構築する時間が必要である。同時に、身近に発生する問題を扱うために必要となる数学、技術、科学を学習するための時間や、周囲の人に質問し、本を読み、議論するための時間、未知の考えや直観に反する考えに取り組んだり、別の考え方の利点に気付いたりするための時間が必要である。さらには、科学、数学、技術に関してわずか1回の授業や単元でしか教えられない内容は、学校を出るまでには忘れられてしまう可能性が大きい。概念が根を張り成熟するためには、単にそれらを時折生徒に示すだけではなく、定期的に様々な文脈でかつ洗練度を深めながら示すことが重要である。

第14章 教育改革

アメリカの多くの地域では学校教育の速やかな改善が必要とされている。そうした改善も可能であり、また実際に進められてはいるが、プロジェクト2061は、そのような短期的な改善よりも、継続的な教育改革により大きな比重を置くものである。しかし、30年以上前、スプートニクの打ち上げ以後にこの国がようやく気付いたように、継続的な教育改革は容易に達成できるものではないのである。

科学教育を総体的に再構築することを成功させられるかどうかは、科学教育改革に対する市民全体の要請と、アメリカが国家として改革を達成する上で必要だと考えるものによって決まってくる。本章は、科学、数学、技術の教育の改革に対する市民の一致した要請が実際に存在することを明示し、次に改革に向けたプロジェクト2061の取組みの根底にある前提について述べる。

改革の必要性

アメリカにおける科学教育を強化する必要性は、1980年代に実施された数多くの教育研究の中でも広く認められている事柄である（そのような代表的な報告書を集めたものは付録Bに一覧をあげてある）。すべての生徒向けの科学教育の改善を訴える最も強力な根拠は、人間知性の解放に果たすその役割ということになるだろうが、公的な議論の多くはより具体的かつ実利的、直接的な利点に重きを置くものとなっている。

1980年代の教育報告の大半は、国全体の二つの異なる懸念がともに高まることによって動機付けられたものである。一つの懸念は、アメリカ経済の凋落イメージであった。アメリカの国内的豊かさと国際的競争力は、実質、アメリカの科学技術の卓越さに基づいたものであったが、他国、特に日本のそれと比較すると弱くなってきている。もう一つの懸念は、アメリカの公教育におけるある傾向、すなわち、試験の得点の低さ、科学や数学に対する生徒の忌避、多くの学校におけるやる気と能力のない教師陣、他の技術先進国と比較した場合の学習期待度の低さ、科学や数学についての生徒の知識に関する国際調査における下位への位置付けといった事柄に対するものであった。すべての報告書や報告書に関するマスメディアの報道は、こうした教育面での欠陥を強調するものであった。そして、ようやくアメリカは国内の教育が危機に曝されていることに気付いたのである。

アメリカにおける教育の衰退は、それ自体嘆かわしいものであったが、全体としては経済の衰退の主要因として見られてきている。この考え方は、それが全面的に正しいかどうかは別として、上述の報告書の大半において暗示され、また他の報告書では明示的に指摘されていたことであった。こうした様々な報告書それぞれは幾分か異なる視点から教育問題に光を当てていたが、そのすべては気がかりな経済と教育の衰退傾向が契機となって作成されたものであった。

このような経緯に照らせば、これらの報告書が、より一般的な性質の教育改革だけで

なく、色々な方向から全生徒の科学・技術教育を改善する必要性を強調したのも理解できる。全体として見れば、これらの報告書は、アメリカのような脱工業化社会においては、国の趨勢と質の高い裾野の広い教育の存在が非常に密接に関係しているということを強調するものとなっている。アメリカには現在、すべての小学校と中等学校で科学、数学、技術に関する教育を改善すべきであるという明確な世論がある。

改革の前提

改革には必然的に長い時間が必要になる

教育における応急処置は必ず失敗するが、その理由は容易に理解できるものである。中でもおそらく最も明白な理由は、単純に規模の問題である。アメリカの教育は巨大な事業である。300万人以上の雇用を抱え、支出額は年間2,000億ドル近くに上り、総資産は1兆ドルを超えている。50州に8万校以上の学校と5,000万人近くの生徒を抱えるアメリカの初等・中等教育が、容易に又は速やかに変えられると思うのは非現実的である。優れた構想と、最善の意志、この事業に適した規模の財源、そして多くの努力を傾けても、全国的な水準での教育制度改革には、10年以上を要するであろう。

しかし、単純な規模以外の問題もある。他の大部分の国とは異なり、アメリカの教育制度は政治的にも経済的にも非中央集権型になっている。教育政策や教育支出に関する決定は、1万6,000の学区、3,300の大学、50の州、連邦政府のいくつかの機関、あらゆる段階の議会を含め、事実上数千もの別々の公益事業者によって行われている。こうした状況にはそれなりの利点もあるが、急速な改革能力はそれに含まれていない。第一には、教育者と一般市民との間に劇的な変化が必要であるという強い総意が確立されるまでに時間がかかる。次には、改革の主たる内容について話し合う何らかの全米的な会議を開くまでにさらに時間がかかる。そして、行動計画を策定し、構想を調べ、数千に上る様々な機関において活動を開始するまでにまたいっそう多くの時間がかかるのである。

結局のところ改革は、政策、機関、過程の問題というよりむしろ人々の問題である。そして教育者のみならず大半の人々は、態度、信念、物事を行う方法という話になると、変化が実に遅くなる。教師や学校管理者は、教育の目的、若者の性質、学習を促すための最善策に関して、実におびただしい量の様々な見解を持ってそれぞれの仕事に臨んでいる。彼らの見解は、生徒として、教師として、そしてしばしば親としての多年に及ぶ経験に由来し、それによって強化されている。分別のある専門家は、自分が固く信じている見解や行動形態を法令や最新の流行によって置き換えることはない。その代わりに、彼らは尊敬する同僚たちの間で高まる意見や、新たな可能性を開拓するための真摯な努力に対する高い評価、新たな構想を何度も試すうちに得られる肯定的なフィードバックに対応していくことになる。こうしたことはすべて何年もかかる事柄である。

専門職の意識は大半が人の移動によって変わっていくことになろう。例えば、若い物

理学者や技術者は、新たな知識、技術、態度をそうした専門職分野にもたらす。新たな世代の教師や学校管理者も同様の働きをする可能性があるが、それは彼らが今までとは異なる態度や知識、技能を現場に持ち込む場合に限られる。したがって、教師の教育は学校改革の必須条件であるが、その効果が現れるのはどうしても遅くなるのが常である。

協力は不可欠である

教育改革に向けた一枚岩的な手法はアメリカ流にそぐわないが、それにはもっともな理由がある。つまり、この国の英知、発想力、財源、権限はいずれかの集団又は部門が独占しているわけではなく、また重要性を持つ教育問題の一つしか可能性のある解決方法がないということはほとんどありえないからである。しかし、努力の多様性は、変革に向けて努力する人々がすべて他者の動向に関係なく別々の方向を向いている場合、全米規模での成果にほとんど結びつかないということにもなりうる。教育において柔軟性に欠ける手法を採用することは可能でもなければ望ましくもないが、協力に向けた態度の明確化は可能であり、望ましいものである。実施面から見れば、そうした態度の明確化は、同一又は関連の問題に取り組んでいる他者との間での考え方や情報の共有を意味する。科学教育改革という観点からすれば、このような見方は、教育改革において重要な貢献を行う意思を持つ程度において、科学界自身にも当てはまることである。

言うまでもなくプロジェクト 2061 は、科学、数学、技術の教育において新たな方向性を打ち出し、現行システムに有意味な改善をもたらすための多くの努力の中の一つにすぎない。国内の様々な地域で、個々の教師や学校は、しばしば大きな障害に直面しながら変革のために奮闘しており、また一部の学区や州では、積極的な改革が最重要課題となっている。加えて全米規模では、様々な基金や政府機関が資金提供を行い、専門学協会、大学、独立組織を中心として、改革の様々な側面に重点を置く多くのプロジェクトが実施されている。現在は、こうした様々な改革努力の連携を図り、改革の動きに一貫性を持たせる必要がある。

教師が中心である

教育改革に向けた創造的な発想は多くの方面から示されているが、教室自体における集中的で直接的な経験から得られる洞察を示すことができるのは教師だけである。教師は、他者には得られない生徒、指導技術、学校文化に関する知識を改革作業にもたらしることができる。さらに、改革はトップダウン方式や外圧を加えるようにして教師に課すことはできない。提案された変革の利点について教師が確信を持てなければ、彼らは精力的にそうした変革を実施しないであろう。また教師が、新たな内容や指導方法を導入する上で求められている事柄や、それまでに適正に準備されてこなかった事柄について十分に理解していなければ、改革対策は挫折するであろう。そのいずれの場合においても、改革対策の策定に参加する教師が多ければ多いほど、そして合意された改革の実施

にあたってより多くの支援を受けられるほど、彼らが改革を根付かせることができる可能性が大きくなるのである。

教師は改革の中心となるものであるが、教師だけにその達成責任を負わせるわけにはいかない。教師には協力者が必要である。教師だけで教科書を変え、現行のものより賢明な試験方針を実施し、管理支援制度を創設し、一般市民に改革の方向性とその達成までに時間がかかる理由を理解させ、改革に必要な資金を集めることはできない。したがって、学校管理者と教育政策立案責任者は教師を支援する必要がある。教師はまた学問的な同僚も必要としている。それには例えば、当面の教科、子どもの発達や学習、現代技術の教育面での可能性に関する専門家である学者が含まれる。さらに教師は、地域社会の指導者、産業界、労働界の指導者、そして親たちの助力と支援も必要としている。なぜなら、詰まるところ教育改革は共同責任だからである。今こそ、教師が教育改革に向けてさらに大きな責任を引き受ける時であるが、それだからといってその他の関係者それぞれの責任が軽減されるわけではない。

包括的なアプローチが必要とされている

断片的な改革対策は、実現したとしても断片的な成果しか生み出さない。学区段階では、改革努力を全学年、全科目領域、全コース編成にわたる包括的なものにすべきである。例えば3学年の読解、中学校の社会科、又は職業課程の生徒向けの生物などの改善に重点を置くようなものは比較的实施が楽である。しかし、このような相互に無関係の変化では、現在のような断片的で過負荷のカリキュラムより、いくらかでも統一され、一貫性があり、効果的なカリキュラムの導入に資することは望めない。より全体的なアプローチがなければ、変化は、授業時間や教科、授業編成、コースなどそれ自体が問題の大きな部分を占めている事柄に適合させることによって制約を受けることになる。

全米的な改革は、システムのあらゆる側面に対応するという意味において包括的である必要がある。科学教育における改革は、幼稚園から高校に至るまでの既存のカリキュラムの変革にかかっている。しかし、新たなカリキュラムを機能させるには、教師の養成、教科書の内容、その他の学習教材、技術の活用、試験の性質、学校組織においても改革が行われなければならない。さらには、変革内容相互間に互換性を持たせ、成果を相殺することがないようにする必要もある。

包括的な改革は、即座にあらゆる方向に進んでいくことを意味するものではなく、むしろ、一部の手順を他の手順の後に実施し、一部の問題を優先的に取り扱い、財源を戦略的に配分することを意味する。行動の前にはシステム全体に及ぶ慎重な計画策定を行うべきであり、計画策定においては優先課題の設定を第一に考えるべきである。優先課題を設定しなければ、結果的にわずかな改革しかできなくなる可能性があり、また誤った優先課題を設定すれば、改革実施前より却って生徒に悪影響をもたらすことにもなる。

改革は、あらゆる子どもの科学学習に対する必要性に重点を置くべきである

人口統計学的な現実、国家的な必要性、民主的な価値観を考慮すれば、アメリカはもはやどの生徒の科学教育も軽視できないことが明確になってくる。もはや、人種、言語、性別、又は経済状況によって、科学、数学、技術における優れた教育を受けるべき人々とそうでない人々が区別されることがあってはならない。誰に関しても（女性と少数民族の生徒によく起こりがちのように）その科学教育を軽視することは、それらの人々から基礎教育を奪い、生涯を通じての不利を与え、この国から有能な労働者や知識豊かな市民を奪い去ることを意味する。それはこの国には耐えることのできない損失となる。

すべての生徒に教育を行き届かせるということは、職業教育や一般教育、そして大学への進学教育も含む生徒全体に及ぶすべての課程を改革することを意味する。高校卒業後そのまま職に就くことを希望する生徒には、職業技能にわずかに焦点を当てるだけでは間に合わない。そうした生徒は、科学的知識、推論、コミュニケーション、学習技能に関する強固な基礎を身に付ける必要がある。大学に進学予定の生徒はすべて、その専門分野が最終的にどのようなになると彼らが考えているかとは全く別に、将来的な足場になると同時に専門分野の選択も可能にするような科学、数学、技術の理解を持って大学に進む必要がある。また、進路をまだ決定していない生徒は、どのような方向にでも進めるような知識、技能、態度を身に付ける必要がある。したがって、本報告書の提言はすべての生徒に等しく適用できるものである。

あらゆる子どもたちの学習の必要性を満たすためには、学習がある意味で子ども時代の主な職業であることを社会全体が認識する必要がある。遊びもそれ自体が重要性を持つだけでなく、しばしば学習に導くという点で重要であり、また金銭を得るために働くことは子どもにとってためになることでもあるが、遊びも仕事も体系的な勉強に取って代わることはできない。したがって、親や市民全体が、子ども時代のエネルギーの多くの部分を学習という仕事に向けるべきであるということを理解しなければならないのである。

改革に向けた望ましい状況を確認しなければならない

改革には、変化のための状況作りが必要になる。教育者に対してその行っていることを改めるように勧めながら、改める上での障害は気にするなどと言っても意味がない。改革に向けた大きな障害が、同時に一般的な良い教育の障害ともなっていることは驚くに当たらない。それはすなわち、教師や学校管理者の職場環境である。

あまりに多くの学校において、物理的、管理的、心理面での環境が大きなカリキュラムの改革努力を阻んでいる。通常の場合、教師には、考え、勉強し、教材を編成し、同僚と協議し、個々の生徒と面談し、研究会に出席する時間はない。加えて、教師たちには個室や、文書や記録作成のためのコンピュータがなく、実験助手、専門の助言者への面会、あるいは他の分野の専門職であれば期待するようなその他の種類の支援も得られ

ない。そして校長はまず資金的にゆとりがない。さらに、渉外事務、人員管理、予算、生徒への対応、安全管理などによって、校長には計画の問題に携わるだけの時間、エネルギー、気持ちを持つことができなく、ましてや大規模な改革活動など論外である。

改革に対する障害が除かれるのと同時に、変化に向けた望ましい状況を確立しなければならない。特に、教師や行政者のためには、実験を奨励し、試験の得点を上げるというような目先の目標ではない長期的な成果を重視し、かつ革新を認めてそれを評価できるような環境を作り出す必要がある。

改革のための望ましい環境作りに対する必要性は、学校の範囲内にとどまるものではない。生徒の四分の一が貧困と薬物乱用の中で育ち、暴力が減らず、人種差別が残り、商業主義のテレビがくだらないものを放映している一方で、教育用のテレビが慢性的な栄養失調状態にあり続ける限り、学校が多くの子どもたちのために達成できることは非常に限られている。より良い教育がより良いアメリカのために必要であり、またより良いアメリカに導くものであるという考えは申し分ないものであるが、今日の最悪の社会問題の一部でも改善されるようになってはじめて、学校は社会に広範な肯定的影響を及ぼす全国的な改革対策を実施できるようになるのである。教育の改革と社会の改革は、並行して進める必要がある。

改革の実現を確実なものとするためには、教育に対する継続的な地域社会の支援が不可欠である。人口統計や社会的優先課題が変化する中で、そのような支援を維持することは容易ではない。したがって、政府、産業界、労働界、教育界などのあらゆる段階・部門において、情報に基づく断固たる政治的な指導力が改革実現に不可欠なのである。そうした指導力がなければ、教育改革に対する地域社会の支援も継続的な成果が得られるはるか以前に立ち消えになってしまうであろう。

第15章 次の段階

プロジェクト 2061 のための本報告書は、教育制度の問題点を詳細に扱うものではなく、非難すべき対象を挙げるものでもなく、また個別的な改善措置を示すものでもない。その代わりに、本報告書は以下に述べる 2 組の非常に重要な改革に向けた行動の始点として、教育改革に重要な貢献をすることを意図するものである。

その一方の行動は、多段階からなる長期的な過程の第 1 歩としての本報告書の利用に基づくものである。『すべてのアメリカ人のための科学』は、第 1 段階パネル報告と合わせて、プロジェクト 2061 の第 2 段階の活動に向けた概念的基盤として利用されている。これらの活動を通じて、教育制度のすべての部分における改革のための提言が策定され、それらは同プロジェクトの第 3 段階において実施に移される予定である。

もう一方の行動は、これまでに行われた活動を再評価し、必要に応じてその努力の方向性を変え、改めて根本的な改革目標に身を投じるために、教育改革に携わるすべての人に対して、新たな高度に本質的な機会を本報告書が提供するという事実に基づくものである。

『すべてのアメリカ人のための科学』におけるこの最終章では、初めにプロジェクト 2061 の第 2 段階で実施されることになる改革に向けた今後の手順の概要を示す。次には、教育者、政策担当者、関係を有する一般市民が本報告書を実行に移す際に利用できる方法の一部について論考を行う。

プロジェクト 2061 の第 2 段階

プロジェクト 2061 の第 2 段階は、第 1 段階の直接的な延長である。その目的は以下の通りである。

- ・本報告書の提言に基づき、幼稚園から高校に至るまで(K-12)の多様な編成のカリキュラムモデルを作成する。
- ・カリキュラム改革を補完すべき教育の他の構成要素の改革を目的とした一連の青写真を作成する。
- ・学校カリキュラム改革の専門家として貢献できる教育者、科学者の人材を増強する。
- ・科学、数学、技術の教育における改革の必要性に対する一般市民の意識を高めるとともに、教師、学校管理者、教育政策担当者の改革努力を促す。

カリキュラムモデル

プロジェクト 2061 の第 2 段階の主な創造的活動は、国内の五つの学区において、現行カリキュラムに代わるべき科学、数学、技術の教育に関する K-12 カリキュラムモデルを開発することにある。各学区の開発チームには、物理、生物、社会科学、数学、技術分野における全学年の教師も含まれる。新しいカリキュラムモデルは、すべて本報告書提言の実施を目的とするが、それらが現行モデルから離れていく程度、重点、形式

などの点で相互に異なることが予想される。

モデルの開発と並行して、科学、数学、技術における K-12 カリキュラムを記述するための標準書式も開発される予定である。成功すれば、これによって、現在では不可能となっているさまざまな学区のカリキュラムをその主要な特質別に特徴づけ、比較することが可能となる。

行動のため青写真

新しいカリキュラムモデルは、それ自体では学習目標に関する合意も実際の改革をもたらしことはできない。双方ともに必要ではあるが、それだけでは十分でない。したがって、第2段階では、プロジェクトメンバーが他者と協力して、科学、数学、技術教育の国全体の改革実施を目標とする青写真を作成することになる。彼らは一連の報告書を通じて、教師の教育、試験において活用すべき方針や手段、教材と技術、授業の構成と指導編成、教育方針、教育研究、実施戦略に関係した提言を提示する予定である。

カリキュラム改革の専門家

システムを変えるには人材が必要となる。実際、新たな第2段階のカリキュラムモデルがどんなに魅力的なものになったとしても、科学、数学、技術に関するカリキュラムを本報告書の示した目標を反映する形で変革することは、自動的に行えるものではない。第3段階における行動計画実施の成功は、専心的で見識があり経験豊富な指導者グループという中核があるかどうかにかかっている。したがって、第2段階の目標の一つは、全米評議会の提言の内容全般に精通し、かつそうした題材を実際のカリキュラムに組み入れる技能を持つような、教育者と科学者の豊富な人材を育成することにある。

改革の促進

第2段階を通じては、科学、数学、技術教育における改革の必要性と、その実現のためになすべき事柄に関する議論を促すためのさまざまな手順が実施される。その手順には、『すべてのアメリカ人のための科学』、専門誌や一般誌の記事、専門家会議における講習会やセミナーの広範な浸透、教育者、科学者、メディア向けの行動計画青写真の配布、また小学校の教師、中学校の校長、高校の社会科学の教師、又は教育委員会のメンバーなど、特定の人々を対象とした一連の文書の作成も含まれる。

行動計画

以下の記述は、行動と討論を喚起することを意図したものである。科学教育改革に貢献するために可能な事柄についての議論に加わり、その後計画を行動に移していく個人、機関、組織の数が多くなればなるほど、ますますこの国の進歩の速度が増していくであろう。

公的支援

科学、数学、技術の教育における真に根本的な改革は、広範な公的支援があつてはじめて可能になる。本報告書は、そうした支援を確保し、個々の仕組みよりむしろ望むべき目標の観点からその支援を活用するために役立てることかできよう。その目的に向けて、プロジェクト 2061 は以下を提言するものである

- ・アメリカ大統領はアメリカの人々に対し、科学的リテラシーの必要性を強く訴えかけるための原理として本報告書を他の報告書と合わせて活用し、科学的リテラシーを国家的な目標と定め、定期的に同目標の優先性を再確認すること。

- ・教育省長官は、公的に科学的リテラシーの趣旨を支持し、その内容説明を行う。また、科学的リテラシーに向けた恒常的評価による進歩が認められるような有意義な学習の見本を示し、またその評価をするための手法を開発するように促す。さらに科学的リテラシーに向けた進歩が、アメリカの年次報告書『レポート・カード』の一部に盛り込まれることを公表する。

- ・議会において、この国の科学、数学、技術の教育の窮状に対する懸念を一般市民に示すための共同決議を採択するとともに、本報告書の目標達成を支援する上で実施可能な措置を特定するための公聴会を開く。

- ・全州の知事は、科学的リテラシーを優先課題として定め、かつ必要な改革を急ぐ意向であることを伝えるための公的な声明を発表するとともに、全米知事協会、全米州教育協議会を通じて本報告書とその議題に乗せるよう働きかける。

- ・国の財界や労働界の指導者は、個々にまたそれぞれの組織を通じて、すべてのアメリカ人が本報告書に定められた知識や技能を持つ切迫した必要性があることを明確に述べ、科学教育改革のための努力を支援する旨の約束を行う。

- ・報道機関が著名な科学者、教育者、財界や労働界の責任者、軍人、議員、社会評論家を招いて討論会を開き、それをラジオやテレビ、新聞や一般誌において報道することで、本報告書の提言に対する一般市民の注目を促す。

教育の指導力

改革はまた、改革を支援し指導力を発揮する教師、学校管理者、教育政策担当者の意思にもかかっている。そのためには、科学的リテラシーがすべての子どもたちの基本要件となるべきであり、また科学的リテラシーという目標の設定が教育的に意味を持つことに関して、彼らが確信を得なければならない。本報告書は、科学、数学、技術の教育における国家的な改革努力の後ろ盾として教育者を参加させるための好都合な手段である。したがって、プロジェクト 2061 は以下を提言するものである。

- ・教育省長官は、すべての州と地方の教育機関に対して科学的リテラシーの浸透を優先性の高い課題として定めるよう働きかけ、教育省内の適任の次官補に対して目標達成

に向けた計画活用方法の特定を指示し、州や市内の学区が少数民族とその他の教育面で不利な立場に置かれている子どもたちを本報告書が提言する基準にまで引き上げるための計画を策定する上で助けとなるべき仕組みを発足させる。

- ・各州の教育委員会は特別パネルを設置し、同パネルを通じて『すべてのアメリカ人のための科学』について吟味し、その教育的な意味を州の学校担当官、州議会、地方の学校委員会、州の教育長、校長、教師に報告する。

- ・教師、学校管理者、学校委員会、親による団体を含む国内のすべての教育関係団体は、そのメンバーに対し、本報告書提言に関する報告を行ない、それに関する討論会を開き、提言を実現するための仕組みを確立する。

- ・全米科学教師協会、全米数学教師協議会、全米社会科教育協議会、国際技術教育協会、提携する教育団体が主体となり、あらゆる教科・段階の教師、管理者、教育政策担当者を交えて『すべてのアメリカ人のための科学』の目標達成に向けて努力する。

協力

教育改革を成功させるには協力が必要となる。科学、数学、技術の教育の場合、科学界が教育界と協力関係を結ばなければならない。数百人の科学者、数学者、技術者が本報告書提言の枠組み作りに参加しているが、改革運動が弾みをつけるには、より多くの参加が必要となるであろう。その目的のために、プロジェクト 2061 は以下を提言するものである。

- ・全米科学財団、国立保健研究所、商務省基準局、米航空宇宙局、エネルギー省、農務省、その他の科学関連の連邦機関・省庁が、それぞれの所轄部門の関係者に対し、教育者による科学、数学、技術の教育の改善を支援する必要性を訴え、各関係職員にそれぞれの機関がそうした努力に対して貢献することができる妥当な方法を策定するよう指示する。

- ・すべての科学、数学、技術、医学の学会、さらに州の科学アカデミーが、本報告書を使って、各メンバーによる科学的リテラシーの構成要素に関する討論を促し、教育者と協力して共通の目標に向け努力するよう要請を行うとともに、本報告書を使って教育者を支援するための計画を策定する。

- ・トライアングル連合、科学教育連合、州の科学協力団体、その他のグループ（これには既に科学、教育、財界の指導者も加わっている）により、各界において本報告書を活用してさらに科学者の参加を促すための方法を決定する。

- ・全米科学教師協会、全米社会科教育協議会、全米数学教師協議会、国際技術教育協会は、合同委員会を設置し、学際的な性質を持つ本報告書提言を実現するためにこれらの教科の教師が実施することが可能な協力活動について検討する。

資格のある教師

科学的リテラシーという本報告書の目標は、小中学校の生徒たちが、指導する上で十分資格のある教師を得てはじめて達成できるものである。悲しいことに、現状はしばしばそうっておらず、本文書で求めているような科学、数学、技術に関する広く深みのある理解という観点に照らして見れば、さらに惨憺たる状況である。したがって、プロジェクト 2061 は以下を提言するものである。

- ・教師たちは、すべての分野における指導基準を引き上げるため、全米教育専門基準委員会、NSTA 全米教師資格プログラム、ホームズグループなどによる様々な努力の後押しをするとともに、そうしたグループに対し、本報告書提言に基づく科学、数学の教師のための基準を確立するよう働きかける必要がある。

- ・全米科学財団、全米科学教師協会、全米数学教師評議会は、本報告書の提言に照らして、科学、数学の卓越した指導に対するアメリカ大統領賞受賞者の選定基準を見直す。

- ・科学、数学、技術の教育協会は、スタンフォード教師評価プロジェクトなどの活動努力を後押しし、本報告書に概説した内容を効果的に指導する個人の能力を判断するための信頼できる方法を開発する。

- ・全米科学財団、教育省は、全米の科学、数学、技術を指導する教師たちの質を本報告書に示す理解水準にまで引き上げる過程を早めることができるように、予算面での支援を検討する。

- ・全単科大学、総合大学の学長は、科学的リテラシーをそれぞれの大学全体にわたる優先課題として定めるとともに、各大学において、本報告書がすべての高校卒業生向けに提言する内容を上回る科学、数学、技術の理解を持って、すべての卒業生（将来教師になる）が大学を去ることができるようにするため、在学生の要件を必要に応じて改めるようにする。

- ・単科大学の科学、数学の関係学部において、本報告書提言の内容は超えるが、その精神を盛り込んだ将来的な小学校教師、中高等学校の科学教師向けの課程を編成する際の指針として、本報告書を活用し、本報告書に示した提言に示された優れた教師の資質水準に達することを望む教師たちの必要性に対応した、現職教育の講習会や施設を運営するための資金調達を行う。

- ・教育学部は、小中高等学校の科学教師を育成するための内容や教育的な基準を本報告書に照らして再吟味し、他学部の担当者と協力して将来の教師を育成する方法を改革する。

教材

教師がすべての生徒を本報告書に示された理解と技能の水準にまで引き上げるためには、新たな教材やその他の指導手段が必要となろう。他の複雑な活動と同様、教育において条件の多い目標を達成するには、妥当な技術を利用できる状態になればならな

い。現在使用されている教科書その他の教材は、厳密に言えば教材に適しておらず、コンピュータやその他の現代技術の可能性も実現できていない。本報告書は、指導によって達成すべきものとされる範囲に新たな次元を加えようとするものであるため、したがって必要となる教材についても新たな次元が加わることになる。この点に関しプロジェクト 2061 は以下を提言するものである。

- ・教科書の出版社は、共同で科学、数学、技術部門の上級編集者による全国的な会議を開き、本報告書の内容を詳細に把握し、教育出版業界の将来に対するその意味について論じるとともに、各社個々に本報告書の提言を検討し、既存教科書の続版に関する計画策定に際して開発途上にある第2段階のカリキュラムモデルを参照し、新たに開発すべき教科書モデルを決定する。

- ・学校、家庭、図書館向けに視聴覚教材の生産、販売を手がける企業は、新たな製品開発にあたって本報告書をその指針として活用する。

- ・全米科学財団が主体となって、指導と学習の分野におけるコンピュータや先進双方向機器の使用に関する研究開発を支援し、その目的のための予算を大幅増額する。

- ・全米科学教師協会、全米数学教師協議会、全米社会科教育協議会、国際学術教育協会は、互いに協力してコンピュータソフトウェア開発者と話し合いを行い、本報告書において提言されている概念と技能を指導するために教師が必要とするソフトウェアの種類を特定する。

- ・学力テストの作成者は、本報告書に示した目的ある学習のための動機付けとなるような学力テストの内容と様式をどのように改めていくかという観点から本報告書を検討し、断片的知識の記憶のみを評価するテストに代わるべき新たな種類のテスト開発への投資を過去にもまして積極的に行う。

研究

最後に、さまざまな種類の子どもたちがいかに学習するかということや、本報告書に示した目標を達成するために最善の方針を定める上で、誰にとっても最適な効果を持つ指導をいかに確立するかということに関して知られていることがあまりに少ない点を理解すべきである。そういう理由から、以下を提言するものである。

- ・教育省と全米科学財団は、双方が科学、数学、技術の学習と指導に関係した研究に対する援助額を大幅に増額するごに加え、優秀な自然科学者、社会学者、数学者、技術者、認知・発達心理学者、教育者で構成される研究チームに対する援助を行うための研究資金の比率を拡大する。彼らが長期にわたって生産的な研究方針に従うことができるように配慮する一方で、双方の研究計画の一部を本報告書に示した科学的リテラシーという未来像に基づくものとする。

- ・教育省は、アメリカが他の非常に大きな影響力を持つ全国的な問題と同程度の規模、緊急性、支出額を伴う学校改革の実施にあたり、可能性を有する事項を特定するために、

大規模で詳細に評価された国家的な実験として、恵まれない子どもたちを多く抱える二・三の主要都市が、その学校制度を劇的、完全かつ迅速に再設計し、再編成できるように図る。

将来

こうしたことをすべて総合するとどのようになるのであろうか。例えば第2段階が完了する1992年の時点でアメリカはどこにいるのだろうか。確かに、我が国の主要な教育問題はどれも完全には解決されていないであろう。大半の生徒たちは依然として、科学、数学、技術の教育を適正に受けた状態で学校を卒業してはいないであろう。アメリカのカリキュラムは現在のそれとあまり変わりがなくであろう。また、教科書、テスト、その他の教育要素も大幅には変わっていないであろう。しかしながら、その頃には、科学的リテラシーを持つ市民の必要性は間違いなく以前よりも大きくなっているであろう。

しかし、1992年までに以下が現実のものとなっていれば、進歩は見られたことになるであろう。

- ・アメリカ全体が依然として科学、数学、技術における教育改革に注目している。
- ・国の指導者たちが、定期的にかつ力強く、すべての市民が科学的リテラシーの実現に向けて協力し続ける必要があることを明権に訴えている。
- ・我々は、本報告書が提言しているところの目標、すなわち科学、数学、技術の教育において、達成したい事柄を決定している。
- ・すべての生徒、特に学校システムが見捨ててきた生徒たちに、科学、数学、技術の教育が行き届くことが明らかになるよう、教育者と教育政策担当者との間で、学校システムの再編に必要となる事柄に関して強力な合意が得られ始めている。
- ・数多くの教育者、科学者が実際に全米の学校システムの改革活動において協力しあっており、またその数が急速に増えている。
- ・すべてのアメリカ人のための科学、数学、技術の教育を改善するために我々が一致団結して取り組んでいる中で、科学者、教育者、親、市民は本報告書に大いに注目している。彼らは、報告書に書かれていない事柄を探し出し、それを補う方法について、プロジェクト2061とそれを利用する人々への助言を惜しまず提供している。

アメリカにおいて、すべての生徒が科学的リテラシーを習得するための学校改革ができない妥当な理由は一知的にも、社会的にも、経済的理由にも一何もない。必要なものは、共通の目標に向けて一致団結するための国全体の参加、決意、そして意欲である。我々は、『すべてのアメリカ人のための科学』がそうした目標を明確にするものと信じている。

ワシントン・カーネギー協会の地磁気研究所所長ジョージ W. ウェザリル氏は、1986

年4月にハレー彗星を観測するために訪問したチリのラ・セレナにおいて次のような一篇の詩を書いている。

ユーカリの木々の陰で
緑の葉が秋の風に踊っている
青ざめた顔をした人間が
また再び昔の歩みを繰り返す

荒々しい雄牛座の脇をすりぬけ、
星明かりの魚座や水かめ座を通り過ぎ、
太陽の破壊的な炎に抗い
いて座の弓、
さそり座の一刺し、
ケンタウルスの怒りも、
ヒュドラの恐ろしいとぐろも退けて
しかし君はまた去って行く
ヘースティングスのハロルドはどこかと尋ねられても
彼はもうここにはいない
アッティラもまたシャロンで敗れ去った
ニュートンの法則を操ったハレーも、
ジオット、そしてエルサレムの熱狂者も皆いなくなった

君は見たにちがいない
君に挨拶するために浮かんできた船を
今度はもっと多くなるだろう
やせ細った君の頭に上る者さえいるだろう
そして君に乗って海王星の夜に向かう者さえ！
そう、我々はまだ冒険好きなのだ
君が携えるメッセージを何度学んでも、
君の恐ろしい喇叭に合わせて鳴り響く
我々の種のリズムが
君の確実な再来を待っている

付録

A.プロジェクト 2061 第1段階の参加者

『すべてのアメリカ人のための科学』は、300名以上に上る科学者や教育者の努力の成果である。3年以上にわたり、これらの人々は異なる方法で異なる時期に貢献をしたが、いつでも、思慮深さ、専門的誠実さ、すべての子どもたちが科学的リテラシーを身に付けることができる未来への責任のそれぞれを非常に持っていた。しかしながら、このことは、個々の参加者が『すべてのアメリカ人のための科学』のすべての提言を支持しているとか、この報告書の誤りや欠点に何らかの責任を持つということを意味するものではない。

参加者は、次の順に挙げてある。

- ・全米科学技術教育評議会
- ・第1段階科学パネルのメンバー（そして、パネルスタッフメンバー）
- ・プロジェクト 2061 のスタッフ（AAAS）
- ・プロジェクト 2061 のスタッフへの助言者
- ・第1段階科学パネルの顧問
- ・『すべてのアメリカ人のための科学』の査読者
- ・第1段階科学パネルの報告書の査読者

[訳者注：以下、参加者の個別名は原語で挙げ、所属・職名は省略した。]

全米科学技術教育評議会

評議会メンバーは、本報告書の初めに挙げてある。

第1段階科学パネルのメンバー

生物学・健康科学

Helen M. Ranney, Mary Clark, Maxwell Cowan, Tony Hunter, John Moore, George Somero, Nicholas, Spitzer, Herbert Stern, Andrey Terras. パネルスタッフメンバー：Jan Yaffe

数学

David Blackwell, Leon Henkin, Lenore Blum, Paul Garabedian, Paul Halmos, Harvey Keynes, R. Duncan Luce, Ingram Olkin, James Sethian, Audrey Terras, P. Emery Thomas. パネルスタッフメンバー：Sara Wong.

物理学・情報科学・工学

George Bugliarello, James J. Conti, David H. Copp, Kathleen Crane, Samuel Devons, Paul Garabedian, William Starnes, Alan Strahler, Spencer Weart. パネルスタッフメンバー：Margaret Mastrianni.

社会科学・行動科学

Mortimer H. Appley, Jill K. Conway, John T. Dunlop, Ann F. Friedlaender, Jerome Kagan, R. Duncan Luce, Rosemarie Rogers, Nur O. Yalman パネルスタッフメンバー : Winifred B. Maher.

技術

James R. Johnson, Sister Marquita Barnard, Don Boyd, William Hamer, Robert T. Holt, Harvey Keynes, John W. Pearson, Phillip Regal, Matthew Tirrell, パネルスタッフメンバー : Karen Olson.

プロジェクト 2061 (AAAS) のスタッフ

F. James Rutherford, Andrew Ahlgren, Patricia Warren, Carol Holmes, Gwen McCutcheon.

プロジェクト 2061 のスタッフへの助言者

J. Myron Atkin, Michael Baker, Ted Bartell, James R. Beniger, Alfred Brown, Charles Brownstein, Linda Campbell, William D. Carey, Peggy Carnahan, Donald L. Chambers, Andrey B. Champagne, Bernard L. Charles, K. C. Cole, David Crandall, Alden Dunham, Karin D. Egan, Paul M. Elliott, Joseph D. Exline, Stuart I. Feldman, Michael G. Fullan, Stephan Gilbert, Ronald L. Graham, David A. Hamburg, Johnnie Hamilton, David Hawkins, Frances Hawkins, Patricia Heller, Elam Hertzler, Shirley Hill, Cary C. Hoagland, Gerald Holton, Lynn David Hubsch, Susanne M. Humphrey, Paul DeHart Hurd, Arlene M. Kahn, Mary L. Kiely, Michael Kirst, Manfred Kochen, Laura Krich, Gerald Kulm, Douglas M. Lapp, Charles LaRue, Marvin Lazerson, LeRoy Lee, Michael E. Lesk, Karen B. Levitan, Shirley M. Malcom, Sheilah Mann, Robert M. McClure, Marge McClurg, Fay Metcalf, Wayne Moyer, Robert F. Murray, Jimmy E. Nations, Fred Newmann, Elena Nightingale, Michael O'Keefe, Susie Oliphant, Lester G. Paldy, Joan Palmer, Julie Phillips, Harold Pratt, Diane Ravitch, David Z. Robinson, Bella Rosenberg, Kenneth Russell Roy, Thomas Sachse, Dan Saltrick, Ethel L. Schultz, Cecily C. Selby, Elliot R. Siegel, Elizabeth Stage, Dorothy Stephens, James Strandquist, Lee Summerville, Marcia Sward, Constance Tate, Chad A. Tolman, Jerry Valadez, Decker Walker, Fletcher G. Watson, Jeannette Wedel, Wayne Welch, Scott Widmeyer, Marshall C. Yovits.

第 1 段階科学パネルの顧問

生物学・健康科学

Michael Crichton, M.D., Jared Diamond, Jean Lindsley, D. William Rains, Phoebe

Roeder.

数学

Zvonko Fazarinc, Lyle Fisher, William Kahan, David Logothetti, Joel Schneider, Alan Schoenfeld, Elizabeth Stage.

物理学・情報科学・工学

Frank Aikman, Enrico Bonatti, Marvin P. Epstein, Kenneth Ford, Cindy Lee, David Mog, John Sanders, John G. Truxal, Edward Wolf.

社会科学・行動科学

Herbert P. Baker, Roger Brown, Paul W. Carey, Lily Gardner Feldman, Richard Herrnstein, Jacob Irgang, Brendan A. Maher, Joseph S. Nye, Jr., Orlando Patterson, David Riesman, Edward E. Smith, Robert M. Solow, Janet Spence, James Stellar, Sidney Verba, Ezra F. Vogel, Myron Weiner.

技術

Laszlo A. Belady, M. James Bensen, Mario Bognanno, John Borchert, Alfred B. Bortz, Kris K. Burhardt, Elof Carlson, John Entorf, Robert M. Hexter, William F. Kaemmerer, Jack Kilby, Robert Kudrle, Edwin Layton, Douglas McCormick, Mylon Eugene Merchant, Jay Morgan, Vernon W. Ruttan, John Sadowski, Roger Staehle, Sister Mary Thompson, Paul Weiblen, Wendelle Williams.

『すべてのアメリカ人のための科学』の査読者

Walter H. Abelmann, Allen F. Agnew, Bjorn Anderson, Richard D. Anderson, Ronald D. Archer, Jane Armstrong, William F. Aspray, J. Myron Atkin, Albert V. Baez, Adrienne Y. Bailey, Nancy S. Barrett, John A. Bartley, James T. Barufaldi, Robert Bensching, M. James Bensen, Henry A. Bent, Joseph Beydler, Susan H. Bicknell, Paul J. Black, Henry Blackburn, Rolf K. Blank, Walter Bodmer, Juan A. Bonnet, Jr., Kenneth E. Boulding, Albert H. Boyd, Lewis M. Branscomb, Richard F. Brinckerhoff, Stephen G. Brush, Alphonse Buccino, Thomas D. Cabot, Bob Calcaterra, Ann Card, Iris M. Carl, Robert E. Chesley, Saul B. Cohen, William L. Colville, Roy G. Creech, F. Joe Crosswhite, James E. Davis, John Dawson, Linda R. DeTure, Thomas R. Dirksen, John A. Dossey, James L. Doud, Rosalinda Driver, Daniel C. Drucker, J. R. Durant, Harriet P. Dustan, Annagreta Dyring, Jack Easley, James L. Elder, Yehuda Elkana, Jerry Elliott, John D. Emerson, James Fey, Richard I. Ford, William R. Freudenburg, Alice B. Fulton, Charles O. Gardner, Ronald Geballe, B. Frank Gillette, Owen Gingerich, Steven Goldman, Mary L. Good, Thomas A. Gorell, Judith P. Grassle, Richard Gregory, Richard J. Griego, Norman Hackerman, Sheila M. Haggis, Archibald O. Haller, William W. Hambleton, John

Harris, Anna J. Harrison, Bernt Hauge, Henry Heikkinen, Robert L. Heller, Ernest M. Henley, Robert L. Hirsch, Betty-ann Hoener, Donald F. Holcomb, John E. Hopcroft, James H. Hubbard, Paul DeHart Hurd, Daphne Jackson, David Jenness, Francis S. Johnson, Larry Johnson, Richard A. Y. Jones, Irene Jordan, Jane Butler Kahle, Ann Kahn, Anna Karlin, J. Katus, Alice B. Kehoe, Manert H. Kennedy, Judith T. Kildow, Philip Kitcher, Sally Gregory Kohlstedt, Gretchen S. Kolsrud, Gerald Kulm, James M. Landwehr, Michael Lang, Edwin T. Layton, Jr., Richard M. Lemmon, Simon A. Levin, Robert J. Levine, Alan P. Lightman, John A. Limongiello, Harald Loe, Gil Lopez, Vincent N. Lunetta, Shirley M. Malcom, Sheilah Mann, Nancy H. Marcus, Stephanie Pace Marshall, Paul C. Martin, Jessica Tuchman Mathew, John Matis, John May, Victor J. Mayer, James J. McCarthy, Joseph D. McInerney, Blaine C. McKusick, Barbara R. Migeon, Jon D. Miller, Robert Moore, Brian Oakley, Robert H. Page, Jay M. Pasachoff, Naomi Pasachoff, Marjorie L. Reaka, Nat C. Robertson, Thomas A. Romberg, Walter G. Rosen, Mary Budd Rowe, Kenneth Russel Roy, Rustom Roy, J. Oliver Ryan, Donald O. Schneider, Frederick Seitz, Cecily C. Selby, Lawrence Senesh, Sydel Silverman, Derek Smyth, Colin Spedding, Kendall N. Starkweather, Lynn A. Steen, Frank J. Sulloway, John Swets, M. W. Thring, Charles R. Tolbert, James W. Trott, Jr., John G. Truxal, John W. Tukey, Ruth D. Turner, Anne Tweed, Bruce L. Umminger, Burton E. Voss, Herbert J. Ware, Ed Waterman, Richard L. Webber, Gunter Weller, Edward Wenk, Jr., F. Karl Willenbrock, H. S. Wolff, Dael L. Wolfle, Robert E. Yager, Chris Zafiratos, John Ziman.

第 1 段階科学パネルの報告書の査読者

Dean Abrahamson, Guenther Albrecht-Buehler, Richard D. Anderson, Nancy S. Barrett, Henry Blackburn, Joseph Bordogna, Kathryn Borman, Audrey Brainard, Alphonse Buccino, Gail Burrill, Rodger Bybee, Rosemary Chalk, Saul B. Cohen, R. Kent Crawford, Roy G. Creech, William V. D'Antonio, Robert B. Davis, John A. Dossey, Kenneth Ford, Charles O. Gardner, John E. Gaustad, Gary D. Glenn, Steven Goldman, Harold Green, Janice G. Hamrin, Jon Harkness, Anna J. Harrison, Robert Highsmith, Donald F. Holcomb, David D. Houghton, L. Douglas James, Neal F. Johnson, Jane Butler Kahle, Marvin E. Kauffman, Judith T. Kildow, Gregory A. Kimble, Gretchen S. Kolsrud, James M. Landwehr, Anneli Lax, Margaret D. LeCompte, Fred Leone, Karen B. Levitan, Vincent N. Lunetta, Peter Lykos, Shirley M. Malcom, James Marran, Robert B. McCall, Helen M. McCammon, Henry A. McGee, Jr., Blaine C. McKusick, Barbara R. Migeon, David Nanney, Robert H. Page,

Jay M. Pasachoff, Michael I. Posner, William F. Prokasy, Ronald Pyke, Anthony Ralston, John S. Rigden, Rustum Roy, Jerome Sacks, Paul Sally, Theodore Schlie, Willis Sibley, Sidney Simpson, Jeremiah Stamler, Lynn A. Steen, Charles R. Tolbert, Ruth D. Turner, Zalman Usiskin, Sylvia A. Ware, Robert E. Yager.

B.選定参考文献

・モルティマー・アドラー（1982年）『パイディア提言』ニューヨーク：マクミラン・パブリッシング（基本的な前提条件として、すべての生徒が同様の基礎教育を受けるべきであるという立場に立つ。体系化された知識の取得、知的技能の開発、概念と価値観に関する理解の拡大に重点を置いた厳格なカリキュラムを提唱している。）

・アーネスト・ボイヤー（1983年）『アメリカにおける中等教育に関する報告』ニューヨーク：ハーパー・アンド・ロウ（全国的な中等教育改革に関する詳細な課題を示したもの。生徒に2年間の数学課程と技術の影響力を教える1学期間を要件とする高校のコア・カリキュラムを含め、質の高い教育を実現するための12項目の主要な戦略を紹介している。教育向上のためのカーネギー財団の資金提供に基づく。）

・ビジネス・高等教育フォーラム（1983年）『アメリカの競争力をめぐる課題：全米的な対応の必要性』ワシントン D.C. 同フォーラム（アメリカの経済的な衰退徴候を指摘し、その要因について述べるものである。貿易、資本投資、民間部門の主導、人的資源、技術革新に関する提言を示す。財界や大学に対して主導性の発揮を奨励し、それらが個々の運営手続きを改善する方法も提示している。）

・ニューヨーク・カーネギー社（1983年）『教育と経済発展：全国的な教育政策に向けて：連邦の役割』ニューヨーク。同社（アメリカの拡大を続ける科学技術を基盤とする経済に対して教育政策と改革が貢献できる方法を提言として示す。主として、一般的な科学的意識の向上とカリキュラム開発における科学の関与の必要性に重点を置く。職業訓練、教育改革における連邦、州、地方の役割、恵まれない生徒向けの教育、教授面での提言を示す。）

・教育と経済に関するカーネギー・フォーラム職業としての教職に関する作業部会（1986年）『備えのある国：21世紀の教師』ニューヨーク：同フォーラム（アメリカの学校における教職の質、評価に関する大幅な改革の必要性を唱える。教師の有資格性と能力基準を引き上げ、拡大し、学校を再編して教師のより効果的な指導を実現するとともに、教師に対する報酬、優遇策を増やすための改革計画を示す。）

・教育テスト事業団、教育進歩評価センター（1987年）『危機の兆し：アメリカの若年成人のリテラシーに関する考察』ニュージャージー州プリンストン：教育テスト事業団（ETS）（ETSによるアメリカのリテラシーに関する評価が示唆する事柄について考察する。広範なリテラシーの低さが雇用、国の経済的競争力、貧困、下位集団間での不平等に与える影響に焦点を当てる。アメリカにおけるリテラシー技能の評価、様々な種

類の主題における認知、リテラシーの要求に関する評価を含む。)

・オードリー・シャンペイン編 (1988 年) 『科学教育：システムを機能させるために』ワシントン D.C. : AAAS (『今年の学校科学』と題する一連のシリーズ化された刊行書の中の 1 部。このシリーズは、科学教育の三つの要素、すなわち科学教師、科学のカリキュラム、学習者、それぞれに関連する問題点と対応策の動向を各年順に記録したものである。各冊では、最新の統計と関係分野の指導者による論文が紹介されており、くわえて様々な問題についての分析と、科学教育を発展させる目的で公的な政策担当者が提案した措置に関する論評が示されている。現在まで刊行されたこの他の分冊には、1987 年『生徒と科学の学習』、1986 年『科学のカリキュラム』、1985 年『科学の教育』などがある。)

・全米州教育協議会 (1984 年) 『州における活動：教育の刷新に向けた歩み』デンバー：ゴードン・ベル・プレス (経済成長のための教育に関する作業部会の報告書。アメリカ国内の小中高等学校教育に影響を与える州の教育計画、州の法律、州委員会の決定について調査したもの。成功している州の措置を取り上げ、州の計画、協力関係、学校の指導性、指導、恵まれない子弟などの主題に関する提言を提示している。科学、数学、コンピュータ、技術の教育の改善に向けた有望な措置も特定している。)

・エクソン教育財団 (1984 年) 『アメリカの科学教育：根本的な改善のために不可欠な手順』ニューヨーク：同財団 (科学教育改革運動によって提起された主要問題の一部について検討を加えている。小中高等学校における科学教育の改善事項を確実に実施するために講じるべき提言を提示している。科学・技術教育に対する新たな概念的枠組に対する必要性を指摘し、科学教育の目標、カリキュラム、教材について論じ、科学教師の訓練、研究、産業界と科学界との協力関係に焦点を当てている。)

・ジョン・グッドランド (1983 年) 『学校と呼ばれる場所：将来への展望』ニューヨーク：マグロウヒル (アメリカの中等学校教育に関する 5 年間の調査をまとめた「学校教育に関する研究」における知見に関する報告。公表された教育目標に見合う学校作りの方法、学校を改善する方法、個々の学校を変革の重要な要素とするための方法、改善過程に着手するために学校が収集すべき自校に関するデータの種類の種類に焦点を当てる。)

・ホームズ・グループ (1986 年) 『明日の教師たち：ホームズ・グループの報告書』ミシガン州イーストランシング：同グループ (各州の研究機関に所属する学術関係の責任者、事務局長によって構成される連合会による報告書。アメリカの教師の質を改善するための広範な課題を提示している。提言は、資格認定、募集、基準、責任、評価、教育環境に焦点を当てたものとなっている。)

・国際教育到達度評価学会 (IEA) (1987 年) 『成果の上がらないカリキュラム：第 2 回国際数学教育調査に関する国内報告書』イリノイ州シャンペイン：スティップス・パブリッシング (初等・中等数学に関する第 2 回国際数学教育調査に基づく報告書。アメリカの数学教育の質を評価し、カリキュラムの内容、指導の質、生徒の達成度と態度に

ついて論じている。)

・国際教育到達度評価学会 (1988 年) 『17 か国における科学教育の達成度：予備報告』 オックスフォード：ペルガモン・プレス (IEA の第 2 回国際理科教育調査 (1983～86 年) による当初の所見を示したものの。三つの学校母集団段階に関する調査結果について論じるとともに、異なる母集団段階間における学力の伸び、理科の学力における性別による違いについて検討を行っている。)

・マーグレット・クライン，ジェームズ・ラザフォード共編 (1985 年) 『世界的な視点から見た科学教育：5 か国から得た教訓』 コロラド州ボルダー：ウェストビュー・プレス (特に革新的な科学教育アプローチを開発した日本，中国，東西ドイツ，ソ連の教育制度を調査したもの。有用なデータ比較による国際的な横断面を示す。)

・イナ・マリス，リン・ジェンキンズ共編 (1988 年) 『科学成績票：危険と発見の要素：1986 年の全国評価に基づく傾向と達成度』 ニュージャージー州プリンストン：教育テスト事業団 (3, 7, 11 学年の生徒の科学的知識に関する「全国教育進歩評価」のデータに基づき、過去 20 年間に於ける傾向を報告したもの。知識を、科学的指導、教師の質、授業活動、親の関与、課外経験の程度に関連付けている。リチャード・ベリー，オードリー・シャンペイン，ジョン・ペニック，センタ・ライゼン，イリス・ワイズ，ワイン・ウエルヒによる説明的な概説では、上記の結果が論理的に解釈されている。)

・全米中等職業教育委員会 (1984 年) 『未解決の課題：高校における職業教育の役割』 ワシントン D.C.：同委員会 (アメリカの中等職業教育の役割と機能について検討を行ったもの。職業教育の認知度、募集、教師の育成、基準、責任、そして学校、産業界、労働界、地域社会全体の協力関係といった問題について扱っている。提言には、学問分野と職業分野間での柔軟なカリキュラム、教師募集計画などに関するものが含まれる。)

・教育の卓越性に関する全米委員会 (1983 年) 『危機に立つ国家：教育改革の緊急性』 ワシントン D.C.：アメリカ教育省 (アメリカの教育制度が国の必要性に於いていないと主張する際立った報告書。アメリカの高校教育における欠陥と、生徒の達成度の低さについて述べている。カリキュラム内容の改革、基準と期待水準、学校活動に投入される時間、指導、指導力、財政支援に関する提言を示す。)

・全米知事協会 (1987 年) 『アメリカを機能させるために：障害障壁の撤廃 生産的な人材と生産的な政策』 ワシントン D.C.：同協会 (福祉の障害、学校中退者、十代の妊娠、成人のリテラシー、アルコールや薬物乱用といった問題に関する知事による作業部会の推奨する政策を示したものの。アメリカの経済的競争力を強化するための上記各分野における政策変更にも焦点を当てている。)

・全米知事協会政策調査分析センター (1986 年) 『成果を示す時：教育に関する 1991 年度知事報告』 ワシントン D.C.：同協会 (教育改革に関する 7 件の主要な質問に対する知事の回答を示したものの。教師の説明責任、学校の指導性、バウチャー、深化的、治療的計画、学年の長さ、指導技術、財源、大学生の達成度に関する政策手法も示されて

いる。)

・大学以前の数学，科学，技術の教育に関する全米科学委員会（1983年）『21世紀に向けたアメリカ人の教育：アメリカ人・全米科学委員会向けの報告書』ワシントン D.C.：全米科学財団（アメリカの数学，科学，技術の教育を1995年までに世界最高水準に引き上げるための詳細な戦略を示したもの。生徒参加の幅，指導の方法と質，生徒の準備と動機付け，生徒のための達成度基準における大幅な改革を提案している。また，提案された改善措置に伴う財政，政府手続きの変更についても詳述されている。)

・全米科学財団・米教育省（1980年）『1980年代とそれ以降の科学教育・工学教育』ワシントン D.C.：同財団（アメリカの長期的な必要性に照らした科学教育，工学教育の適切性に関するカーター大統領の懸念に対応する形で準備されたもの。中等とそれ以降の段階におけるアメリカの科学教育，工学教育の全般的な欠陥と衰退傾向について述べるとともに，そうした衰退傾向が科学界と連邦政策に与える影響について詳述している。)

・変化する職場環境のための中等学校教育に関する委員会（1984年）『高校と変化する職場環境：雇用者側の視点』ワシントン D.C.：全米アカデミー・プレス（労働環境に入っていく高卒者の必要性に焦点を当てているもの。労働市場での成功をもたらすと雇用者側が考える一連の中心的な能力，すなわち知識，技能，態度，習慣について述べている。全米科学アカデミー，全米工学アカデミー，医学研究所による合同委員会が主催する委員会によって準備されたものである。)

・アーサー・パウエル，エリナー・ファーラー，デビッド・コーヘン共著（1985年）『ショッピングモールの高校：教育市場での勝者と敗者』ボストン：ヒュートン・ミフリン（高校がどのようにして様々な種類の生徒たちに教育的利益を提供し，かつ可能な限り多くの卒業生を送り出そうと努力しているかということと，そのために，特に教育的な要求を持たない生徒，すなわち平凡な教育しか受けずに卒業する平均的な生徒の必要性を必然的に無視している点について述べたもの。『高校の研究』と題する中等教育に関する5年間の調査に基づく数部の書籍の1部である。)

・『科学的リテラシー（全編）』（1983年）（ダイダロス）（春季）アメリカ芸術・科学アカデミーの会報第112巻第2号として出版された。（科学的リテラシーの様々な側面に関する11篇の論文を収めたもの。)

・経済成長のための教育に関する作業部会（1983年）『卓越性のための行動：我が国の学校を改善するための包括的な計画』デンバー：ハーシュフェルド・プレス（教育目標を明確化し，その目標達成手段を確立することによってアメリカの教育を改善するための提言を示したもの。地域社会や産業界の参加を促し，財源を効果的に配分し，質の高い教師をさらに強化すると同時に優遇し，学校の指導力を向上させ，生徒を平等に指導するために，州，地方段階での行動の必要性を強調している。また，すべての生徒が習得すべき数学能力，科学能力，コンピュータ能力，推理能力についても概説している。)

・連邦の小中学校教育政策に関する 20 世紀財団作業部会（1983 年）『目標の達成』
ニューヨーク：20 世紀財団（州、地方の管理という文脈内での質の高い教育の促進に
おける連邦政府の適正な役割に関する提言を示したもの。連邦政府に対し、全市民のた
めの基礎的な科学的リテラシーの向上と、中等学校の生徒向けの科学と数学の高度な指
導を目的とする教育計画に力点を置くよう提言している。）

日本語版『すべてのアメリカ人のための科学』へのあとがき

本書は、米国科学振興協会（American Association for the Advancement of Science：略称、AAAS）によって1989年に発行された『Science for All Americans』（初版）の邦訳である。この邦訳は、わが国におけるアメリカの科学教育研究の参考資料として、さらに、わが国における科学技術リテラシー研究の参考資料として、日米理数教育比較研究会によって翻訳されたものである。

アメリカでは、1980年代、当時の科学教育の危機に対処すべく、科学教育改革についての多くの提言がなされるようになり、その中で、すべてのアメリカ人のために科学的リテラシーの育成の必要性が叫ばれるようになった。

米国科学振興協会は、このような流れの中で、1985年に科学教育改革プロジェクト「Project 2061」を始める。このプロジェクトの名称は、プロジェクトが始まった1985年にハレー彗星が地球に接近したことに由来しており、しかも、ハレー彗星が次に地球に接近する2061年をその名称に入れることによって、「Project 2061」が壮大な教育改革であることを示唆している。そして、1989年には、本書『Science for All Americans』（初版）を公表し、その後、改訂を重ねており、その最新版は米国科学振興協会の下記のウェブサイトで見ることができる。

<http://www.project2061.org/publications/sfaa/online/sfaatoc.htm>

本書は、アメリカの著名な物理学者であるラザフォード博士の強力なリーダーシップの下で作成されたものであり、氏は現在でも米国科学振興協会において重要な役割を果たしている。ラザフォード博士には、本邦訳のために快く序文をお書きいただいた。心より、感謝する次第である。

『Science for All Americans』は、すべてのアメリカ人が持つべき科学的リテラシーについて述べたものであり、3年以上を費やし、数百名の科学者や教育者等が関係して作成された。アメリカの叡智を集め、総力をあげて作成されたといっても過言ではないであろう。

『Science for All Americans』は、「すべての」市民を対象としているところに特徴がある。21世紀には、すべてのアメリカ人が科学的リテラシーを持たないと、個人にとっても、国家にとっても不幸となるという強い危機感が背後にある。

ここでの科学的リテラシーとは、「科学、数学、技術に関係した知識、技能、思考の習慣」であり、その基準として、有用性、社会的責任、知識の内的な価値、哲学的価値、少年期の豊かさ、が挙げられている。そして、それはカリキュラム自身ではなく、カリキュラムの指針となるものとしている。本書を一読すると、科学的リテラシーとは、単なる科学、数学、技術に関する知識の寄せ集めではなく、科学、数学、技術の本質そのものを深く理解することであることに驚かされるであろう。しかも、科学、数学、技術が互いに密接に関係し、そしてなによりも、それらが、社会や文化と、そして、人間と深くかかわっていることを前提としている。

「Project 2061」は、本書で述べられているように、科学教育改革を3段階で考えている。第1段階は、科学的リテラシーを明確にする段階であり、本書はこの段階の成果である。第2段階は、科学的リテラシーに基づいて、カリキュラム開発を行い、教材や教育方法を開発し、そして、教師教育を行うなど、『Science for All Americans』をカリキュラム・モデルに転換する段階である。スタンダード運動はこの範疇に入る。第3段階は、第1、第2段階の成果を生かして科学的リテラシー向上のための活動を全国的に展開していく段階である。現在、アメリカの科学教育は、第2、第3段階に入っていると言えよう。『Science for All Americans』は、アメリカの科学教育改革の哲学的な基盤としての役割を演じるとともに、そして、今でもアメリカの科学教育のすべての指導者にとっての基本的な未来像となっている。

翻って、わが国の科学教育の現状を見ると、小中学生の科学技術離れが問題とされているだけでなく、成人の科学の知識や関心が低いことも明らかにされている。受験だけを目標に得た知識は、高等学校を出るとともに、生徒たちにきれいに忘れ去られてしまう。ともすると上級学校への進学への意識が強くなりがちな教育現場において、小学生、中学生、高校生、そして、大学生、さらに、成人までを通して、何を身につけるべきかの明確なメッセージとなるものがあれば、科学教育の現場や、ひいては成人段階にいたるまで、科学技術に関する関心の喚起や科学的能力の習得によりよい影響が与えられるのではないだろうか。

科学とは、数学とは、技術とは、という問い掛けに、そして、その教育はどうあるべきかという問い掛けに、今こそ、わが国の文化や社会を背景として、わが国の総力を挙げて答えることが求められているのではないであろうか。

このようなとき、『Science for All Americans』の作成意図、作成方法、作成過程、そして、その成果は、わが国が何をなすべきなのかの一つの具体を示しているように思われる。

本書の翻訳は、日米理数教育比較研究会（文部科学省委嘱研究。事務局：三菱総合研究所）のメンバーを中心に行われている。この研究は、日米文化教育交流会議（通称、カルコン）の一環として、平成14年度から16年度にかけての3年間にわたり、アメリカの理科教育、数学教育、技術教育の現状を調査・分析するものであった。

この研究会において、現在のアメリカの科学教育を理解する上での最重要文献の一つを翻訳することになり、研究会メンバーで討議した結果、本書が選ばれた。本書は、アメリカの科学教育の現状を理解する上で必要不可欠であるとともに、科学的リテラシーの基本文献でもあった。実は、第2年次の調査において、研究会のメンバーは米国科学振興協会を訪問し、「Project 2061」についてもインタビューを行い、その大きさを明らかにしている。

本翻訳書の作成においては、翻訳の第1次稿を三菱総合研究所が作成し、それをもとに研究メンバーを中心に修正を行った。また、オックスフォード大学出版局、米国科学振興協会との著作権等に関する交渉、索引の整理は三菱総合研究所が当たった。本書の作成にかかわった研究メンバーと分担は、次の通りである（メンバー名は、五十音順）。

小倉 康 (国立教育政策研究所 総括研究官) 第Ⅱ部第 8 章
猿田祐嗣 (国立教育政策研究所 総括研究官) 第Ⅲ部第 13 章
国宗 進 (静岡大学教育学部 教授) 第Ⅱ部第 9 章
熊野善介 (静岡大学教育学部 教授) 第Ⅱ部第 7 章, 第 11 章
重松敬一 (奈良教育大学教育学部 教授) 第Ⅱ部第 2 章
隅田 学 (愛媛大学教育学部 助教授) 第Ⅱ部第 10 章
丹沢哲郎 (静岡大学教育学部 教授) 第Ⅱ部第 5 章, 第 6 章
長崎栄三 (国立教育政策研究所 総合研究官) 序, 第Ⅰ部, 第Ⅱ部序, 第Ⅲ部序,
第 14 章, 付録
名取一好 (国立教育政策研究所 総括研究官) 第Ⅱ部第 3 章
中山 迅 (宮崎大学教育文化学部 教授) 第Ⅱ部第 4 章
人見久城 (宇都宮大学教育学部 助教授) 第Ⅱ部第 12 章
吉田 淳 (愛知教育大学教育学部 教授) 第Ⅱ部第 1 章, 第Ⅲ部第 15 章

また, 三菱総合研究所からは次のメンバーがかかわった。

藪田尚宏 (安全技術研究部 主任研究員)
滝沢真之 (安全技術研究部 主任研究員)
山田秀幸 (安全技術研究部 主任研究員)
篠崎剛史 (安全技術研究部 研究員)
平川幸子 (安全技術研究部 研究員)

全体のまとめは, 長崎栄三, 篠崎剛史, 吉田淳, 名取一好が行った。

なお, 翻訳の過程で, 日本語に的確に当てはまる言葉がない原語に対して, カタカナ語で表すかどうかが問題になった。例えば, 「skill」は一般には「技能」と訳されるが, 「技能」は「技芸を行ううでまえ」(広辞苑第三版)とあるように多くは身体的なことを指すが, 本報告書では「thinking skill」などと「考える」ことにも使っている。このようなことから本報告書の場合には「スキル」とすべきであるとの意見もあったが, できるだけカタカナ語は避けるということで今回は「技能」とした。一方, 「system」は, 「制度」が可能な場合にはそのようにしたが, 多くの場合には「システム」とした。このように英語の用語に対してカタカナ語で表すかどうかについては, 今後の課題としたい。

本翻訳書の公刊は, 文部科学省の大臣官房国際課, 科学技術・学術政策局基盤政策課の方々のご支援がなければできなかつたであろう。また, 米国科学振興協会, オックスフォード大学出版局には, 本翻訳書の出版を快く受け入れていただいた。そして, 翻訳文に関しては, 多くの方々からご意見をいただいた。心より感謝する次第である。

本翻訳書が, わが国の科学技術リテラシーの構築に役立つことがあれば幸いである。

平成 17 年 8 月

翻訳関係者一同
(文責: 長崎栄三)

あ 行

アイザック・ニュートン 109,111-112,137
アーネスト・ラザフォード 116
アリストテレス 109, 111
アルバート・アインシュタイン 「相対性、
相対性理論」を参照 16,112, 113,117,134
アルフレッド・ウェゲナー 114
安全性
 情報処理における～ 94
 通信 92
 ～と技術革新 33-34
アントワーヌ・ラボアジエ 115-116
意思決定過程
 資本主義者の体制における～ 77
 ～における遠隔効果 75-76
 ～におけるコンピュータの利用 94
 ～の結果の予測 81
 平和的社会変化のための～ 75
遺伝
 遺伝 54-55,59-60,66-67,69-70,119
 主題の順序：
 特定の遺伝的特徴を選び出すため
 の交配
 遺伝情報の選択
 突然変異
 遺伝可能な特徴 60
 経験との相互作用 67,69-70
 ～と遺伝学理論 118-119
遺伝子
 暗号化された情報としての～
 55,60,63,69,119,133
 ～の潜在的な組み合わせ 54
 ～の組織 119
 ～の突然変異 56,58-59,65,69,84,133
 マッピング 30,84, 95
遺伝子工学
 危険性 83
 細菌中でのヒト・タンパク質の生産 56
 特徴を選択するための育種 54-55,84

～における技術発展 30
～により触発された科学的研究 30
～の遺伝的資源に対する権利 83
～の利用に関する意志決定 36
免疫反応を活性化させる物質の～ 95

宇宙

宇宙 38-40
 主題の順序：
 大きさと目録
 起源
 太陽系の目録
 観測機器
天と地の統合 111-112
 主題の順序：
 地球と天体に共通な運動法則
 他の科学や社会思想への影響
 機械論的宇宙 対 自由意思
 単一システムとしての～ 15
 ～における運動原理 109-112
 ～に関する知識の基礎 47-49
 ～に関する歴史上の見解 109-112
 ～の膨張 48
 ～の理解可能性 15

運動

物体の運動 47-49
 主題の順序：
 準拠系
 力と運動の変化
 作用と反作用
 運動の要約としての振動と波
 一般的な波のふるまい
 波長に伴う属性の変化
 ～からのエネルギー変換 90
 天体～の原理 15,109-112
 ～と相対性理論 16,112
 ～の法則 15,111

エドモンド・ハレー 112
エネルギー

運動～ 44
化学反応における～の放出 46
機械的な歪みにおける～ 45
境界における～の漏出 46
質量の等価性と～ 112
衝突の～ 44
振動における～の減衰 48
～の形態 39
～の質 89
～の消費 89-90
～の測定 45
～の流れの停止 59
～の離散的な単位 47
～の利用可能性と製造 89
～保存 31,58
無秩序な運動の～ 46
～レベル 46
「産業化」、「物質」を参照

エネルギー資源

エネルギー資源 88-89
主題の順序：
普遍的な必要性
資源の有限性
太陽光に起源
化石燃料
核融合と核分裂
新しい技術のための～ 37
核エネルギー（原子力）35-36,
39,89,117
風 41
蒸気機関 30,121
生物のための～ 41,54,58-59
太陽放射 41
潮汐 41
燃料として利用できるウラン鉱
88-89
～の枯渇 80,82-83
「化石燃料」を参照

エネルギー変換

エネルギーの変換 45-47

主題の順序：

形態、転換、保存
熱の拡散と変換可能性の損失
確率と無秩序
分子配置におけるエネルギー貯蔵
量子論的不連続性と放射
核分裂と核融合
化学的な～ 90
生化学的な～ 90
生物における～ 43,58-59,66
太陽の～ 125
電気における～ 88-90
～に必要なエネルギーの濃縮 88
～の際のエネルギーの散逸 58,90
～のシステムを横断する特徴 2,58-59
～のための装置 90
～のためのヒトのシステム 66
物理的運動による～ 90
星の形成における～ 39

エネルギー利用

エネルギー利用 89-90
主題の順序：
エネルギー配分と電気
エネルギーの質
熱損失
エネルギーの変換と効率
エネルギー消費の世界的パターン
エネルギー資源の保存
エネルギー資源の再生のための～ 88
化学反応における～ 46-47
技術的な工程に関する～ 87
人口増加と～ 90
生態系の生産性を維持するための～ 59
人間の身体による～ 68
エンリコ・フェルミ 117

汚染

工業化と～ 82
酸性雨 43,79
スモッグ 43

- 大気に影響する～ 43
- ～を回復するための対価 41
- オゾン層
 - ～の機能 49,83
 - ～の消失 33,83
- オットー・フリッシュ 117
- 音
 - 医療技術での利用 95
 - 音波 48,95
 - ～のエネルギー 45
 - ～の増幅 124
- 温度
 - 化学的および物理的反応の速度 44
 - ～と物質の性質 50
 - ～と分子の構造 44
 - 人間の体 129
 - ～の調節 129
- か行
- 改革「教育改革」を参照
- 害虫の抑制 84
- 海洋
 - 気温の変化と気候 40
 - 原因としての海流 41
 - 物質を吸収しリサイクルする能力 41-42
- 海洋諸島の形成 42
- カオス 131-132
- 科学
 - 科学的世界観 15-16
 - 主題の順序：
 - ～は理解できる
 - ～の変更
 - ～の変更を避けられない
 - ～的解答の不完全性
 - 科学的探究 16-20
 - 主題の順序：
 - 証拠に基づく
 - 論理と想像の融合
 - 説明と予測
 - 偏向を特定し回避する
 - ～営為対権威
 - 科学的営為 20-23
 - 主題の順序：
 - ～の多様性と社会的活動
 - 領域間の曖昧な境界
 - ～研究の資金
 - 倫理
 - 専門家の証明と限度
 - 安全性の測定と制限 34
 - 観察と測定技術 30
 - 結果の応用 23,30,「技術」を参照
 - 実験計画 25
 - ～における実験制御 17
 - ～における偏向 108
 - ～における倫理的な課題 71
 - ～の技術的な動機 30
 - 盲検法 108
 - 科学教育 「指導、教育」を参照
 - 化学的結合 43
 - 科学的な機器
 - 学校での使用 8
 - 顕微鏡 119
 - 生物学的な不利を補うものとしての～ 63
 - ～の発展の価値 17
 - 望遠鏡 111
 - 粒子加速器 39
 - 「コンピュータ」を参照
 - 科学的リテラシー
 - アメリカにおける～の状況 1,5,7-8
 - ～の定義 2,5,11
 - ～の必要性 6-7
 - 科学的理論
 - 科学者共同体による受容性 111, 114-115, 138
 - ～に対する否定的な反応 111, 114, 118
 - ～の市民への公表 111
- 化学反応

- 火の理解 115-116
 - 主題の順序：
 - 燃えると放出される元素：火
 - 燃えるときの物質保存の実証
 - 化学元素と原子理論
- 酸化 115-116
- 電磁的な力と～ 50
- 電子の配置と～ 44
- ～におけるエネルギーの放出 46-47
- ～に必要なエネルギー 44
- 燃焼 115-116,123
 - ～の触媒 44
 - ～の分野 115
 - 反応速度 決定要因 44,131
- 核、原子 44, 45
- 学習
 - 学習 66-68
 - 主題の順序：
 - 遺伝と学習との相互作用
 - 練習と意識せず用いられる技能
 - 知覚
 - 連合
 - 模倣
 - 思考の再構成
 - 遺伝と～ 67
 - 解読技能 144
 - 概念 148-149
 - 会話能力の発達 67
 - 期待感と～ 150
 - 既存の考え方と、新しく知覚したこと
 - ことの解釈 68
 - 筋肉を使った技能 67
 - 具体から抽象へという進歩 149
 - 研究の必要性 166-167
 - 自信と～ 150
 - 指導の成果としての～ 148
 - 社会的設定と～ 70
 - 既に持っている考えによる～への
 - 影響 148
 - 精神的発達と～ 64
- 生存と～ 67
 - ～において必要な能力と柔軟性 87
 - ～における感覚系の役割 67
 - ～に対する積極的な態度 136
 - ～に対する態度 136
 - ～に対する不安 154
 - 人間の～能力 64
 - ～の原理 148
 - ～の生徒の目標 159
 - ～の強さ 67-68
 - フィードバックと～ 149-150
 - 文化的な形態 73
 - 報酬と罰と～ 67
 - 模倣による～ 67,70
 - 連合による～ 67-68
 - 練習と～ 149
 - 「思考」を参照
- 核反応
 - 核分裂 45, 47,89-90,113,117
 - 核融合 47,89,113
- 核兵器 79,117
- 確率 102-103
 - ～と社会的な意思決定 75-76
 - ～と熱エネルギーの拡散 46
 - 「不確実性」を参照
- 火山噴火
 - 気候への影響 41
 - 大陸移動と～ 18,114-115
 - ～によって造られる島 42
- 風
 - エネルギー源としての～ 41
 - ～が起こる原因 41
 - ～が作る地形 42
- 化石記録 19,59,113,132-134
- 化石燃料 43,88-89
- 仮説
 - 証明する 107-108
 - 妥当と認める 107-108
 - ～を立てることと検証すること 18
- 形

形 101-102	～による検証 18
主題の順序：	～の範囲 16
基本的な形や関係	「科学的な機器」を参照
形の自然的意味	
数や記号表現	
座標系	
グラフ表現	
～と数学的抽象 26	
価値、価値観	
価値観 136-139	
主題の順序：	
科学に内在する価値	
一般的な社会的価値の強調	
科学の社会的価値	
科学を学ぶことに対する態度	
科学的営為における～ 22	
科学と技術における～と機密保持 37	
危険度分析における～ 33	
工学における～ 31-32	
選択における～ 75-76	
～と科学的探究 17	
「選択、代償（トレードオフ）」を参照	
カリキュラム 2-3,9,11-13,161-162	
ガリレオ・ガリレイ 109, 110-111	
ガン	
突然変異率と～ 56	
～に対する免疫系反応 66	
～の化学的治療 96	
環境の影響と問題	
核戦争の～ 83	
化石燃料の燃焼の～ 58,89	
監視（モニタリング） 37,70	
技術の～ 33,82-83	
工業化の～ 83	
人口増加の～ 96	
大気組成の変化の～ 40-42,58-59,83	
～と人間の健康 31,70,86	
～の国際的特徴 79	
観察	
受動的～ 17	
	記憶
	記憶障害 71
	子どもの～能力の発達 67
	年齢と～ 64,65
	幾何学 27,101-102,110
	危険度、危険性
	技術的發展の～ 83
	人間の胚と胎児への～ 64
	～の許容レベル 33,76
	～の人間の認知 33
	～の評価における先入観 33
	危険度分析
	新しい技術のための～ 7,33
	工業デザインのための～ 34
	気候
	季節の変化の原因 40
	地質学的な変化（変遷）と～
	41, 114-115
	～と生態系の変化 57,133
	～のパターン 41
	技術
	科学と技術 29-31
	主題の順序：
	理解することの強み
	研究のための道具
	研究の方向性
	不明瞭な境界
	課題とデザイン
	技術の原理 31-34
	主題の順序：
	デザイン、制限、選択（トレードオフ）
	利用と保守・点検の課題
	検査（試験）
	制御、システム、フィードバック
	人間（ヒト）のインターフェイス
	便益、経費、危険度の分析

- 技術と社会 34-37
 - 主題の順序：
 - 相互の影響
 - 革新の商業的制御
 - 軍事秘密
 - 技術についての決定
 - 二者択一性、責任、不確実性
- 社会的な企てとしての～ 29
- 宗教と～ 65
- ～と科学の相互関係 15,120-122
- ～と個人の訓練 31-32
- ～と職場での技能の変化 87
- ～と数学の相互関係 15,25
- ～と人間の信条や感覚 137
- ～における安全の制限（規則） 35-36
- ～における電磁的な力 50
- ～に対する態度 136
- ～に求められる資源 37
- 人間の生物学的な不利を補うものとしての～ 63
- ～の価値 137
- ～の逆効果 36
- ～の副次的な影響 7,29,32-33,37
- 廃棄物処理 86
 - 「工学」を参照
- 技術の発展
 - エネルギーの質と～ 89
 - 個々人の意志決定と～ 37
 - 産業革命と～ 120-122
 - システムの本質と～ 7
 - 社会変化と～ 34-37,69-74,120-122
 - 貿易と～ 78-80
 - ～における経済的な影響 34-35
 - ～における費用の便益と危険度の関係 7,31-35
 - ～におけるフィードバックや制御 7
 - ～に関連した雇用の変化 73-74, 87,120-122
 - ～に対する障害 78-80
 - ～の影響（効果）の予測 29
 - ～の責任 6,7,23
 - ～の人間の行動への影響 71-72
 - ～の範囲 82
 - ～の利点と欠点 82
 - ～の歴史 29,63
- 気象
 - ～と農業 85
 - ～におけるコンピュータの利用（応用） 30
 - ～の研究 30
 - ～の周期的特性 130
- 技能（スキル）
 - 技能 139-145
 - 主題の順序：
 - 計算
 - 電卓
 - 見積もり
 - 操作と観察
 - コミュニケーション
 - 批評的な思考
 - 技術によりもたらされる雇用変化 87,120-121
- 教育改革
 - 教材 165-166
 - 教師の資格 165
 - ～における教師の役割 157-158
 - ～に対する状況 146,159
 - ～に対する要求 5,155-156
 - ～に必要な時間 156-157
 - ～に要求される協力的な努力 1,3, 157,164
 - ～への包括的なアプローチ 158
 - ～の焦点 3
 - ～の進歩、～の指標 167
 - ～の生徒の焦点 158-159
 - ～の専門家 162
 - ～の促進 162
 - ～のための公的支援 163
 - ～のためのリーダーシップの必要性 163-164

教材

- 科学の教科書 8
- ～の適切性 8
- ～の開発 166

教師

- 科学と数学の教育 8
- ～の教育改革における役割 157-158
- ～の支援システム 8
- ～の資格 165
- ～の負担 8

空間と時間 113

グラフ

- 形の数学的取り扱い 102
- ～と関係した学習目標 143
- ～の有効性 100,102

グレゴール・メンデル 119

軍事技術

- 核兵器 80,117
- ～の社会的影響 22,35
- ～のための安全予防策 35

傾向

- ～のグラフ表示 102
- 変化のパターンとしての～ 130

経済学

- 金融システムの保護 80-81
- 原油価格の変動の～ 80
- 工業デザインにおける～ 31
- 産業化と～ 121
- 市場の影響 74
- 社会変化と～ 73-74
- 社会紛争と～ 78-79,134
- ～と健康技術 96
- ～と社会的正義 20
- 富、全国の～、～の決定要素 80-81
- 理論モデル 76-77

経済システム 76-77,121

研究 「科学」を参照

言語

コンピュータ・プログラミング～ 93-94

コンピュータ用の数学的～ 98

数学における記号的～ 25

文化的特徴としての～ 91

「話すこと」を参照

健康技術

健康技術 94-97

主題の順序：

病気への接触防止

殺菌

発見、診断、経過観察

精神障害の治療

倫理的問題と経済的問題

統計的に追跡すること

生殖に関連した～ 65

～と死亡率 65

～の試行 125

～の社会的影響 65

～の発展 119-120

利点と欠点 96

レーザー 91

ワクチン接種 36,120

「遺伝子工学」を参照

検査、検証、試験

仮説の～ 18

工学デザインの～ 32

個別の構成要素の～ 32

コンピュータシミュレーション

による～ 32

相対性理論の～ 113

～のための物理学的モデル 32

破壊的な 126

類似システムの分析による～ 32

「モデルとモデル化」を参照

原子

原子の分裂 116-117

主題の順序：

放射性元素の発見

原子の内部構造

ウランの誘導核分裂
 連鎖反応と核エネルギー
 ～の結合 43, 116
 ～の種類 43
 ～の組成 43, 116-117
 ～の予測不可能性 112, 131
 量子論 113, 126
 原子力 36, 89
 元素
 宇宙に豊富に存在 43
 生物における～ 58
 地球上における～の循環 42
 同位体 43, 117
 ～の数 43
 ～の普遍性 39, 58
 放射性系列 117
 顕微鏡 119
 工学 25, 30-31, 94-95, 125
 光合成
 ～におけるエネルギー変換 46-47, 53, 58
 ～の大気への影響 43
 鉱物
 ～の枯渇、消耗 41, 58, 76, 86
 ～の生成 42
 ～の抽出、採集 41, 83, 89
 ～の特性 41
 ～の埋蔵量 41
 氷
 南極 41
 ～による地形の形成 42
 氷河 41, 135
 小型化 32, 93
 国際的取引（貿易） 80-81
 コミュニケーション、通信
 通信 91-92
 主題の順序：
 世界的伝播
 物質的な媒体
 電磁的媒体と電氣的媒体
 デジタル表現とアナログ表現
 信号とノイズ
 プライバシーとセキュリティ
 音声および文字によるコミュニケーション 143, 151
 科学における分野横断的な困難性 21
 批評的に対応する技能 144, 149
 用語 139
 コミュニケーション技術
 制御システムにおける～ 32
 電気と～ 134
 ～と社会システムの国際化 79-81
 ～と社会的な変化 72-74
 ～と社会紛争の公開 78-79
 ～と農業市場の拡大 85
 ～の人間の行動の影響 71
 ヒトの認識力を高める 30
 「情報」を参照
 雇用
 技術がもたらした～のための能力
 水準の変化 87
 産業化と～ 120-121
 人口による影響 73-74
 昆虫、殺虫剤への抵抗力 84
 コンピュータ 92-94
 科学的な利用 30
 学習目標 142
 シミュレーション 25, 32, 128
 数学的応用 25, 39, 127-128
 数学的な一般論を証明すること 107
 製造への応用 87
 ～における工程制御 94
 ～におけるデザイン、応用数学 25
 ～による情報処理 92-94, 95
 ～の問題解決と意志決定の役割 94
 マイクロチップ 50, 89
 ～用の数学的言語 98
 論理的問題の解 106

さ 行

細菌

- 薬への抵抗力 95
- ～に対する人間の防御 66
- ～の特徴 53
- ～の中でのヒト・タンパク質の合成 56
- 人間にとって有益な～ 57, 120

サイクル、循環

- 細胞におけるエネルギーの～ 58
- システムにおける～ 132
- 社会変化の～ 131
- 食物網 54,58,62,84
- 振動における～ 131
- 生態系の変動における～ 57
- 生物学的～ 56
- 地球における化学元素の～ 42-43, 58-59
- 地球変化の～ 113-114
- 天候 130
- 人間の生活 63-65
- 物質とエネルギー 58-59
- 変化のパターンとしての～ 131
- 水の～と気候 41
- 有機物の分解の～ 58

細胞

- 細胞 55-56
 - 主題の順序：
 - 一般的特徴
 - タンパク質合成のための暗号
 - タンパク質と細胞内活動
 - 生物学的なサイクル
 - 細胞の特殊化
- ～から出る熱 46
- 真核～の誕生 59
- ～における性と遺伝情報 55,63
- ～による系の秩序 46
- ～の遺伝的指令 56,64
- ～の化学的な循環 131
- ～のタンパク質の機能 53-54

～の分化 56,63-64,66

～の分子間相互作用 56

分裂 63-64

材料、物質

- 材料 85-86
 - 主題の順序：
 - 天然の特性
 - 組み合わせと加工による特性の変換
 - 新材料の合成
 - 資源の枯渇
 - 廃棄と再利用
- 温度と～の性質 50
- 様々な～ 43-44
- 電氣的な力への反応 49-50
- 分子の形と～の性質 44

産業化

- 力の利用 120-122
 - 主題の順序：
 - 紡績や製織の機械
 - 蒸気機関の発明
 - 社会状況と帰結
 - 現代的な存続と新しい革命
- エネルギー利用と～ 90
- ～と人口 82-83

ジェームズ・ワット 121

時間

- 空間と～ 113
- 物理モデルにおける～の規模 125

思考

- 概念的～ 148-149
- 科学的～と日常生活 7
- システムという点において 123
- 数学的～ 26,136
- 抽象的～ 27
- ～における直観や誤概念 149
- ～の再構成 68,149
- ～の独自性 138, 148
- 批評的な～ 136
- 「学習」、「精神的発達」、「推論」

を参照

地震

～による振動 48,131

～の原因 18,114-115

～のパターン 131

～の予測 28,102,131

システム、系

システム 123-125

主題の順序：

システムの確認

入力、出力とフィードバック

システムの相互作用と下位

システム

～でのフィードバック 129

～と技術的発展の本質 7

～における安定性と平衡状態 128-129

～における行動の予測 132,135

～における周期 131

～における不規則な動き 131-132

～における変化、適用 143

～の大きさと性能 101

～の形と性能 101

～の進化 132-134

～の設計 94,128

～の相互関係 135

～の秩序 46

～の保全 129

複雑性、～のモデル 127

本質における～ 15

システムの平衡 128-129,132

自然選択 60,95,118,132,

「進化（生物的）」を参照

自然災害

～からの生態系の回復 57

～に対する地球規模の監視システム 81

～と社会的変化 73

実験

「科学」の下位項目の「科学的探究」

を参照

実験（条件）制御 17

質量

エネルギーの等価性と～ 112

～と加速度 25

指導、教育 150-155

科学的リテラシーを獲得するための～

3,11,125-126

現在の～方法 8

～に対する積極的な態度 136

～についての研究の必要性 166-167

～の成果としての学習 148

磁場 50,95

社会体制と組織

政治および経済組織の形態 76-78

主題の順序：

異なった利害間の妥協としての政治

政治機能の延長

政治と経済の相互作用

資本主義者と社会主義者の理論

現実の資本主義者と社会主義者の社会

世界全体の社会制度 79-81

主題の順序：

経済的、政治的相互依存

組織体

世界市場

国内および外交政策の相互作用

安定性、不確実性と長期的運営

システム間の紛争 71-73,78-80

自由意思と～ 112

情報処理の必要 92

団体組織とふるまい 71-73

～と技術的なシステムとの相互

関係 32

～における上方流動性 70

～に対する人口の影響 73-76

～の独立 79-80

～のパターン 69

ヒト以外の種における～ 63

「人間の行動」を参照

社会的行為

社会的変化 72-74

主題の順序：
優性と劣性の遺伝
政府による工学化
外部への影響
適切な意思疎通
人口規模と気質の関係
産業化と～ 120-122
障害を受けた精神の健康に対する
対応 70
選択、代償（トレードオフ） 77-78,
80-81,87, 90
他種と比較してのヒトの行動の範囲
63
～の周期 129
～のモデル化 125
「人間の行動」を参照
社会的差別
階層の識別 70
経済システムと～ 77
固定概念化と～ 71-72
団体による～ 71-73
奴隷と～ 72-73
社会的対立
社会的選択（社会的トレードオフ）
74-76
主題の順序：
必然性
価値の釣り合いの難しさ
修理と交換
短期的な影響に対する長期的な影響
確率
人間による再活性化
社会紛争 78-79
主題の順序：
競争
変化、不確実性と選択
争いと妥協
政治的弱者の保護
～の下での統合
経済と～ 134

社会团体間の～ 71-72
社会変化と～ 72-73
政府が原因の～ 72-73
政府が原因の革命 72-73
～の影響を統合すること 78-80
～の回避と防止 72-73
～の世界的影響 83
「選択、代償（トレードオフ）」
を参照
尺度と尺度化
規模 134-135
主題の順序：
大きな又は小さな極値
スケールの変化に伴う振る舞いの
変化
新しい特性の芽生え
確率の～ 102-103
経済性、製造における～ 87
時間の～ 125
～と形 101-102
～とシステムの性能 101
物理的なモデルにおける～ 125-126
種
～間の自然選択 59-60
～間の相互依存性 54,56-57
共通の祖先 130
生態系への外来種の影響 57-58,
83-84
～の進化 40,59-60,113, 117-119
～の生存 54
～の絶滅 83,117,134
～の多様性 53-54,60,113
～の定義 54
～の適応 57
～の保存 54,83
宗教
科学と～ 16,110-111, 112,
118-119
技術と～ 65,74
人口の規模と～ 74

～と外国の政策 81
病気と～ 119
集団組織
期待度と規則 70-71
国際的な～ 80-81
社会的紛争と～ 72,78-79
人口パターンと～ 74
～の影響 73-74,80-81
～の目的 73-74
～の優越 71-73
「人間の行動」を参照
重力
影響 49
コンピュータによる計算 39
時間・空間と～ 113
潮汐と～ 40,111
～のエネルギー 45
～の原理の応用範囲 15,38,
111-112
～の強さ 49
発見 111,134
惑星の形と～ 40,111
順序と順序性（秩序と秩序性）
系における 46
数学と科学における～ 25,99-100
情意的な状態
～の生化学的な影響 71
蒸気機関 30,90,121
衝撃波 48-49
少数派
少数民族の教育の必要性 5
少数民族への提言の適応性 11
政治的保護 79
情報
情報処理 92-94
主題の順序：
情報の普及
データベース
デジタルな符号化と電子計算機
コンピュータ制御、モデル化、

シミュレーション
問題解決と意志決定
プライバシーとセキュリティ
システムにおける～ 124
情報処理の人間の許容能力 134
制御システムにおける～ 32
～の科学的応用 21
～の記号的表現 93
～の記録 91
表現手段としての通信 91
フィードバック 124
「コミュニケーション、通信」
を参照
植物
光合成 43,53,58
～の地形を変える力 42
～を用いた遺伝子工学 84
食物網 54,58,62,84
ジョン・ドルトン 116
進化（一般的な過程として）
進化 132-134
主題の順序：
過去によって制限を受ける未来
変化の速さ
周囲の状況の進化
システムの～ 132-133
社会の～ 73
～における相互作用 133
～の一般的な考え 132
～の可能性 132
～の速度 59,133
変化を辿る 132-133
星の～ 19
進化（生物的）
生物の進化 59-60
主題の順序：
化石証拠と分子的証拠
時間のスケール
自然選択
多様性の増大

統合原理
生物の多様性の解明 117-119
主題の順序：
獲得形質 対 自然選択
進化理論とそれに対する反対
進化の遺伝学的根拠
遺伝子の混じり合いと～ 66
自然選択 60,118,132
植物の～ 40
地質学理論の影響 113
～に関する化石記録 59,62,117
～に対する分子的、形態学的証拠
59,62
ヒトの～ 62,65,66
霊長類の～ 62
身体的健康 「人間の健康」を参照
振動
運動の振動数 48
「波」を参照
振動 131,「サイクル、循環」を参照
振動
振動数 48
～の周期的な性質 131
森林破壊 43,79,83, 86, 88-89
推論
推論 106-108
主題の順序：
論理とその限界
一般的な規則を見だし証明する
類推
「確率」、「技能（スキル）」を参照
数
数 98-100
主題の順序：
異なった記号
量の大きさの単位
分数
数直線と負の数
記号表現

数のいろいろな使用
楽しみとしての数
暗算 139-140
幾何学的関係 101-102
四捨五入 141
小数 140
整数（0以上） 26
～に関する基礎的な技能 139
～の操作における対称 130
百分率 140-142,145
数学
数学のいくつかの特徴 24-25
主題の順序：
パターンと関係
理論と応用の相互作用
科学と数学の連携関係
数学と技術
数学的過程 25-28
主題の順序：
抽象化と記号表現
数学的記述内容の操作
数学における関係
数学的モデル化
評価結果
記号の関係 100-101
主題の順序：
関係の可能な表現
変数
いくつかの簡単な関係
式の操作
変化率
アメリカの生徒の～の達成度 7
科学との相互依存性と共通性
（連携関係） 15,25
数の理論 92
幾何学 27,101-102,143
技術との相互依存 15,25,92
計算 99,139
正確さ 28
代数 27, 99-100, 130

- 通信への応用 92
- データをまとめること 75-76
- 波のふるまいの～ 48
- ～における加速変化 100
- ～におけるコンピュータへの応用 93
- ～における対称 129-130
- ～における抽象化 30,93,134
- ～における電卓の使用 139-140
- ～における不確実性 102-103
- ～における論理と想像 25, 100-101
- ～に対する態度 136
- ～による自然の解明 111-112
- ～の価値 136
- ～の本質 25
 - 「数」、「確率」、「推論」、「形」、
 - 「統計分析」を参照
- 数学的モデルとモデル化 127-128
 - いろいろ異なった関係 100
 - 極限值に近づく曲線のような～ 28
 - ～において重要な、量の大きさ 98-99
 - ～による健康統計情報の解釈 97
 - 波動の振舞いの～ 95
 - 便益と経費の～ 33
 - 変化率 101-102
 - 惑星運動の～ 110
 - 「コンピュータ」を参照
- 数直線 99,104
- 制御システム
 - 会話の場面 30
 - コンピュータにおける～ 87
 - 全ての技術の一部としての～ 32
 - 製造における～ 87
 - ～において求められる人間的な要素 33
 - ～における情報処理 32, 93-94
 - ～におけるフィードバック 32,124
 - ～の自動化 87
- 政治
 - 工業デザインにおける～ 31
 - 社会変化と～ 72-76
 - ～と技術の利用 65
 - 政治体制
 - 産業化と～ 120-122
 - 代替案 78
 - ～と経済体制の相互関係 76,120-122
 - ～の進化 133
 - 性質 「物理的な性質」を参照
 - 生殖
 - 性交と妊娠率 76
 - ～と種の分類 54
 - ～における文化的、個人的要因 64, 65,66,74
 - ～に関係するシステム 66
 - ～の制御 63, 74,75-76
 - ヒトの～ 64,65,66,74
 - 精神的発達
 - 子どもの～ 64-65
 - 文化と～ 70-71
 - 「学習」、「指導、教育」を参照
 - 精神の健康 「人間の健康」を参照
 - 製造
 - 製造 85-86
 - 主題の順序：
 - 道具
 - 構成
 - 特殊化と集中化
 - 自動操作
 - 制御と監督
 - 仕事の性質
 - 技術の発展 120-122
 - ～に対するエネルギーの利用可能性 89
 - 生態系
 - ～と工業デザイン 31
 - ～におけるエネルギーの流れ 58-59, 123
 - ～における循環的な変動 57-58
 - ～における生息環境の破壊 84

～における生物間の相互依存性 56-57
～におけるフィードバック 124
～における平衡 128
～における変化の原因 57-58
～に導入された外来種 57-58,83,84
～の安定性 57,60,129
～の多様性 57
バイオマス、～の定常性 58
～を形成する力 57
「生物」を参照

政府

外交と内政間の違い 80
社会的な変化の役割 73
政治的な権利の保護 77
ニュートンの太陽系を倣した設計
112
～の憲法で要求された機能 76

生物

生命の多様性 53-54
主題の順序：
多様性と類似性
体の特徴と分類
分子と分類
多様性の維持
生物の相互依存 56-58
主題の順序：
食物網
地理と生態系
安定性とサイクル
性のない～ 55
地球上における～の始まり 59
～に応用可能な物理学原理 53,58
～の間の物質とエネルギーの流れ
58-59
～の構成元素 58
～の進化 40,59-60
～の相互依存 56-58,60,119-120
～の選択可能な特徴 60
～の分子構造 54
～の分類 53-54

有性生殖 54

政府の規制

エネルギー利用の～ 90
研究の～ 22,36
社会主義者の経済における～ 77-78
自由市場システムにおける～ 77
農業の～ 85
～の範囲 76-77

生命 「生物」を参照

潜在意識 70-71

選択、代償（トレードオフ）

医療技術に関する～ 82
エネルギー利用に関する～ 89-91
工業デザインにおける～ 31-32
社会的な～ 73-78,80-81,87, 90
先端素材に関する～ 86
団体組織の～ 71-73
農業技術に関する～ 82-84
～における不確実性 75-76
人間の生物学的意味合いでの～ 64
費用便益分析における～ 7,31-32,
36-37,73-76
「社会的対立」を参照

全米教育進歩評価 7

相対性、相対性理論

物質とエネルギー、時間と空間の
統合 112-114
主題の順序：
統合された次元としての時間と空間
普遍的な限界としての光速
エネルギーの一形態としての物質
幾何学空間と時間の歪みとしての
重力
さらなる完全理論の追求
～と核分裂におけるエネルギー放出
117
～と曲面における数学的な思考 134
～とニュートンの運動法則 16,112
組織 「集団組織」、「社会体制と組織」

を参照

ソビエト連邦

社会変化と紛争 73

た 行

対称 129-130

代数 27, 100-101,130,141

体積

大きさや形と～ 101-102

～のたし算 27

太陽系

太陽 38, 41,109-111

月、衛星 39, 40,111

～の運動 109-112

～の進化 39

～の特徴 38-40

～の惑星上の水 42

惑星 39, 104, 110

大陸移動 18, 42, 114

蛋白質

細胞内の～合成 3,56

細胞内の～の機能 56

～の分子構造 44,56

力

自然における力 49-50

主題の順序：

重力と場

原子間や物質間の電氣的な力

導体、半導体、絶縁体

磁力と電気力の相互作用

その他の力

核の～ 50

地球を形作る～ 42

～と加速度 24-25,48

速さと～ 101

「電磁的な力」、「重力」を参照

地球

地球 40-42

主題の順序：

組成と運動

気候

鉱物の循環

岩石の移り変わりと地層

生物の影響

地球を形作っている力 42-43

主題の順序：

地球内部とプレートの移動

風化

鉱物の循環

岩石の移り変わりと地層

生物の影響

地球表面の移動 114-115

主題の順序：

大陸間で一致するものの発見

地殻プレートの移動説

統一原理としてのプレートテクト

ニクス

経過した時間の拡張 113-114

主題の順序：

地球の年齢に関する古い考えと証拠

地球の年齢が非常に高いことに

関する論争

ゆっくりとした変化のサイクル

対 時折の突然変化

宇宙の中心でなくなった地球 109-111

主題の順序：

地球を宇宙の中心とした古代の

宇宙モデル

太陽の周りの円または楕円

望遠鏡による観察

聖職者からの反対

年齢（年代）と組成 38-39,113-

114,137

気候パターンの原因 41

季節の変化 40

磁場 50

重力 40

～上の生物の進化 40

大気 40-42

- 堆積物 42
- 太陽からの距離 40
- 淡水 41
- 潮汐 40-41,123
- 天然資源 41
- ～の内部 40, 42
- 平面上の表現 102
- 変化の過程 113
- 水の形態 41
- 地球の大気
 - 温室効果 49, 63, 83
 - 光合成と～ 43
 - 森林面積の現象が～へ与える影響 41
 - ～による光の散乱効果 49
 - ～による温度変化 49
 - 人間の活動の～への影響 43, 58-59, 88
 - ～の色 49
 - ～の進化 38-39
 - ～の変化による気候への影響 43, 58-59, 83
 - 熱エネルギーの移動 49, 58
 - 物質を吸収して循環させる能力 41-42
- 地図
 - 座標系 101-102
 - ～に関して必要とされる技能 141,144
- 知的発達 「精神的発達」を参照
- チャールズ・ダーウィン 109, 113, 117-119, 137
- チャールズ・ライエル 109, 113-114,137
- 抽象的な関係
 - 学習と～ 67-68
 - 数学における～ 27, 98-99
 - ～と物理的性質 27
 - ～の操作 26
 - ～のモデル 126
 - 老化 65
- 潮汐
 - エネルギー源としての～ 41
 - ～の原因 40
- 超伝導 50,86
- 通信の冗長性（重複機能性） 92
- 月 39-40
- デザイン 31
- データ収集
 - 技術による時間の短縮 21
 - 操作及び観察を通じた～ 142
 - ～と技術的決定 37
 - 「統計分析」を参照
- データの要約
 - データの要約 103-105
 - 主題の順序：
 - 点で表されたデータと可能な平均
 - 平均のあたりの変化の重要性
 - 比率の比較
 - 相関関係対因果関係
 - 平均、～の解釈 135
 - 複雑さの程度と～ 135
 - 「統計分析」を参照
- 電気
 - 静電気 50
 - ～と意思疎通の開発 134
 - ～のエネルギー変換 88-90
 - 火花 50
- 電子
 - エネルギー相の変化 133
 - 原子内での数 43
 - 電子の配置と化学反応 44
- 電磁的な力
 - 電流 50,91
 - 電場 50
 - ～と化学反応 49
 - ～の強さ 49
 - 発電機 50,89
 - モーター 50

電磁波

～に対するヒトの感度 68-69

物質との相互作用 49

「放射線」を参照

伝導性 46,50,85-86

天然資源

再生可能 41

～の枯渇 41,59,80,83, 86, 89

～の再生 88

非再生 41,59,83, 88

同位体

年代測定への利用 45

～の半減期 45

～の崩壊 45

統計分析

標本抽出 105

主題の順序：

部分から全体を知る

偏向に関する共通の原因

標本の大きさの重要性

医療における～ 97

応用 103-104,131

技術の費用便益分析を助ける

ための～ 31-32

「確率」を参照

動物

～における対称性 129

～のためのエネルギー源 53

～の地表の形を形成する効果

42-43

～の適応 57

捕食者／被食者の関係 57,123,

132

土壌

～からの栄養分の到達 58

成分と組成 42

特許法 35

突然変異

加齢と～ 65

植物の意図的な～ 84

～とガン 56

～と進化論的变化の追跡 133

～におけるパターン 130

～の遺伝 60

～の影響 56

トランジスタ 50

な 行

波

～が作る地形 43

電磁波 67

電磁波の帯域の名前 49

～の数学的モデル化 95

～のふるまい 48,95

波長の決定要因 48

波動 48

物質との相互作用 49

ニコラウス・コペルニクス 101, 111

ニュートンの運動法則 16,111-112

人間の感覚

学習における役割 67

情報の濾過と記号化 67

～を補うこと 17

人間の健康

身体の健康 68-70

主題の順序：

栄養と運動

有害な要因

微生物と免疫系

遺伝的要因

現代の習慣と環境

精神の健康 70-71

主題の順序：

規範の文化的相違

ストレスと疾病素質

気づかない要因

身体の健康との相互作用

アレルギー反応 69

遺伝的欠陥 69,95
運動と～ 70
加齢の過程 65
規範における文化的相違 70,71
社会経済的地位と～ 65
心理的なストレスと～ 71
生理学的な防御システム 66,69
精神障害への処置 96
伝染病と～ 30,69,94-95
～と有害物質 68-69,70
～に対する食物エネルギーと食事面
での要求 68
妊娠と身体的発達段階 63-64
人間への薬物の影響 66
物理的・社会的状況と～ 66,70,95,
119-120
「微生物」を参照
人間の行動
行動に与える文化的影響 69-71
主題の順序：
遺伝と経験の相互作用
文化と下位文化
階層の識別と移動性
行動規範
マスメディア
集団組織と行動 71-72
主題の順序：
集団からの期待と規則
団結と固定概念化
共有責任の影響
非公式の議題
学習された～ 64,67-68
賞罰と～ 67, 96
社会的な選択（トレードオフ） 74-76
社会的変化と～ 72-74
非科学的な分野からの～への洞察 69
妊娠 63
熱エネルギー
エネルギー変換時の～の損失

46,58,90
高温部分から低温部分への熱の
拡散 46
大気境界面における変換 41
～としての核資源 35,89-90,113
～の変換のためのヒトのシステム 66
～の無秩序な分布 46
変換装置 90
農業
農業 83-85
主題の順序：
成長促進、計画、飼育
遺伝子の管理
害虫の抑制
肥料
生産物流通
天候と政府の規制
雇用の変化
選択的育種プログラム 54-55, 84
～と社会的紛争 73
～による土壌の劣悪化 43
～の社会的影響 33, 63, 84-85
～の発展 82, 121
は行
廃棄物処理 37,89
話すこと 70
子どもの～の能力の発達 63,67
文化と～ 70
半導体 50,86
光
宇宙からの～ 40
可視光 49,95
～の速度 112-113,134
波長による物質の同定 47
波動、～の波 48-49
微生物
微生物の発見 119-120

主題の順序：
 顕微鏡でしか見えない生物の発見
 微生物と病気の実験
 誘発された免疫の発見
 健康習慣の変化
 ヒト、人間、人類
 人間の特性 62-63
 主題の順序：
 より単純な生物からの進化
 人間の多様性と類似性
 社会的柔軟性
 能力の技術的な拡張
 ライフ・サイクル 63-65
 主題の順序：
 受精
 細胞分化
 発生と出産時のリスク
 知的発達
 発達段階の移り変わり
 親子関係
 加齢に伴う変化
 平均余命
 基本的機能 63
 主題の順序：
 食物からのエネルギー獲得
 怪我の予防
 内部的な調整
 生殖
 人間の存在 82-83
 主題の順序：
 将来を形作る力
 技術の恩恵と副次的影響
 他の生物種への影響
 エネルギー変換システム 66
 体の機能とリズム 131
 加齢の過程 65
 起源 19
 筋肉を使った技能 67
 行動における文化的影響 69-71
 子どもの精神的発達 64
 思考 68
 死亡率と共通する原因 64,65
 社会行動 64
 寿命 65,96
 狩猟採取者から農耕者への移行 63,83
 人口増加と規模 63,74,82, 90, 96,
 121,132
 生物学的防御システム 66,71
 他の生物との類似性 62
 多様性と類似性 62
 団体組織と振る舞い 71-73
 ～における学習 67-68
 ～における制御システム 66,124,130
 ～に対する食物エネルギーの要求 68
 ～の会話能力の発達 64,67
 ～の学習行動 64
 ～の身体健康 68-70
 ～の進化 62,64,66
 ～の生物学的な不利な立場 64
 ～の精神的健康 70-71
 ～の体内の有益な細菌 57
 ～の妊娠と身体的発達段階 63-64
 胚発生と胎児の発達 63-64
 発達 64-65
 発達段階の移行 64-65
 文化的な差異 63
 ～への自然界の力の影響 42-43
 ～への有害物質 68-69
 薬物とその影響 66
 「進化（生物的）」を参照
 「人間の健康」を参照
 ヒトの神経系
 ～と精神的健康 71
 ～におけるフィードバック効果 131
 ～の生き残り上の役割 66
 ホルモンとの相互作用 66
 ヒトの免疫系 66,69,71,95,120
 百分率 103,140-142,145
 氷河 41,135
 費用便益分析

- 新しい技術の～ 7, 33
- ～における社会的選択 74-76
- ～における不確実性 76
- 標本抽出 17,30, 105, 「統計分析」を参照
- 不確実性
 - 不確実性 102-103
 - 主題の順序：
 - 不確実性の源
 - 確率
 - データや理論から確率を見積もる
 - 数えること 対 比率
 - 社会的選択の判断における～ 75-76
 - 「確率」、「危険度分析」を参照
- 物質
 - 物質の構造 43-45
 - 主題の順序：
 - 物質の多様性
 - 元素と原子
 - 原子の構造
 - 温度と物質の状態
 - 結合, 分子, 及び結晶
 - 反応速度
 - 同位体と放射能
 - 物質とエネルギーの流れ 58-59
 - 主題の順序：
 - 物質とエネルギーの保存
 - 太陽エネルギーの連続的な変換
 - 元素の循環
 - 化石への蓄積
 - 資源利用の割合
 - ～の可分性 134
 - ～の状態 24, 44
 - ～の保存 115
 - 「原子」、「元素」を参照
- 物理的な性質
 - 鉱物の～ 41
 - 生物の～ 46,58
 - 抽象的な記述内容を操作する 27
- 分子の形と～ 44
- 物理法則
 - 工業デザインと～ 31
 - ～の普遍性 38,53
 - プトレマイオス 110, 111
 - プレートテクトニクス 42,114
 - 文化 69-74
 - 科学的な価値観と態度と～ 136-138
 - 科学的な取り組みの歴史と～ 109
 - 技術と～ 29, 63
 - 狩猟採集者から農耕者へ 63, 83
 - ～と大人の定義 64-65
 - ～と精神面での健康についての捉え方 70
 - ヒトと他の生物を区別する要因としての～ 63
 - 「人間の行動」を参照
- 分子
 - 形成 43
 - 細胞内での相互作用 56
 - 蛋白質合成 44,56
 - ～に蓄えられたエネルギー 44
 - ～の振る舞い、動き 128-129
- 分子構造
 - 温度と～ 44
 - 進化の証拠としての～ 59,62
 - DNA の～ 44,54
 - 配置 44
- 分数 99,140
- 分類
 - 岩石の～ 59
 - 形態学的な類似性による～ 53-54, 59,62
 - 植物の～ 53
 - 分子的な類似性による～ 59,62
 - 星の～ 19, 38-39
- 平均値の解釈 103-105,135
- 変化のパターン
 - 変化のパターン 130-132

主題の順序：
 傾向
 周期
 カオス
 恒常性 128-130
 主題の順序：
 安定と平衡
 保全
 対象
 運動の～ 48
 科学者や技術者の、また、
 による認知の～ 30-31
 人口統計学的な～ 30
 数学における～ 24
 データの～ 39
 人間社会の～ 69
 ～のグラフ表示 102
 「進化」を参照
 変化率
 同位体の半減期 45
 ～の数学的モデル化 101-102

 崩壊
 生物のための循環 58
 同位体の～ 45, 117, 130
 放射線
 X線 49,95-96
 原子核、健康技術における 96
 紫外線 43,83
 赤外線 49,95
 太陽放射 41,88-90
 電磁波 49,69
 電波 49,91
 量子論的効果 47
 「熱エネルギー」、「光」を参照
 放射能
 医療診断道具としての～ 96
 核廃棄物からの～ 89
 同位体崩壊 45,117
 年代測定 45
 ～の発見 116-117
 バックグラウンド放射 45
 星、恒星
 ～からの光 48
 太陽系に最も近い～ 38,134
 ～における違い 38
 ～に関する知識の基礎 39
 ～の誕生 19,38-39, 47, 49,134
 ～の融合反応 47
 無数の～ 109-111,134
 保存
 エネルギーの～ 30, 58
 ～の一般的な概念 123
 物質の～ 115,123
 ホルモン 56,66,71

 ま 行
 摩擦 46-48
 マリー・キュリー, ピエール・キュリー
 116

 水
 大気中の～の循環と気候 41
 淡水資源の枯渇 41
 地球上の～の形態 41
 ～の地勢への影響 42
 ～の電気伝導性 50

 無作為、不規則な変動 (変数)
 データにおける～ 131-132
 ～の数学的性質 24
 標本数 105
 変化における～ 131-132

 面積
 正多面体の表面積 24
 ～と大きさと形 101-102
 ～の計算 27, 141

 モデル

モデル 125-128

主題の順序：

物理的モデル

概念的モデル

数学的モデル

コンピュータシミュレーション

「数学的モデルとモデル化」を参照

や 行

山

海底山脈 42

造山運動 42,114

輸送技術

蒸気機関 121

～と科学 30

～と社会システムの国際化 78-80

～と社会変化 72-74,121-122

～と農業市場の拡大 85

要素 「元素」を参照

予測

極限值に近づく曲線のような他の

数学モデル 28

個人のふるまいにおける～ 132

システム内のふるまいの～ 132

自然現象の～ 16,28,102-103

社会的な結果の～ 102-103

社会変化の影響の～ 77-78,80-81

～において使われる確率 102-103

～における推理 135

～における数学的な応用 27,127

変化のパターンと～ 130

ヨハネス・ケプラー 110

ら 行

力学

運動の法則 26,48

ニュートン力学 16,48

リーゼ・マイトナー 117

理論

科学的～ 18-19,30

検証 16,26

証明 24-25,27,30

数学～ 27

～の技術的な動機 30

～の信用性 18-19

～の判断 19

～の予測力 19

倫理的課題

生き物の取り扱い 22,71

医療技術における～ 96

研究結果の適用における 22

成果の虚偽 22

人間の生殖における～ 65

ルイ・パスツール 109,120

霊長類

～の研究における偏向 19

～の進化 62

レーザー 89

労働の性質

製造での～ 87,120-122

農業での～ 85

「雇用」を参照

ロボット

～の製造への利用 87

論理

一般的な規則を適用した～ 106-108

科学的な～ 100

形式～と妥当性 106

推論における～ 106-108

数学的～ 25,100

～と想像 18

～における関係の歪曲 106

～における必要条件と十分条件 106

～による問題解決 106

～の基本的用語 106

複雑な議論における～ 106

分岐的な～の連鎖 106

有用性 106

「推論」を参照

論理的なネットワーク 102

論理的問題

～のコンピュータ解 107

DNA

遺伝子配列 55,83,119

細胞内の存在場所 61

タンパク質合成のための指令 3,61

～の欠失、挿入、置換 55

分子構造 44,54,119