



21世紀の科学技術リテラシー像～豊かに生きるための智～プロジェクト

生 命 科 学

専 門 部 会 報 告 書

平成20年(2008年)6月



科学技術の智プロジェクト

研究代表者 北原和夫（国際基督教大学教養学部）

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

「科学技術の智」プロジェクト専門部会報告書の刊行にあたって

「科学技術の智」プロジェクト委員長

北原和夫

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

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

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

まず全体像に取りかかる前に、現在の膨大な科学技術を七つの分野に分けて、それらに対応する専門部会を組織した。この七つの分野は、学問の体系に対応するのではなく、21世紀を豊かに生きるための智として、関わりの強いところをまとめて一つの分野とした。また、近年急速に大きく広がって社会を変えつつある情報学の分野に対応して「情報学専門部会」を設置し、また、人類が存在する環境としての宇宙と地球に関わる分野について検討するために「宇宙・地球・環境科学専門部会」を設置した。

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

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

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

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

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

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

ごあいさつ

今世紀は生命科学の時代とも言われますが、実際、華やかな研究の成果が次々と報道されています。地球の誕生後 8 億年足らずという、ある意味では驚くほど速やかに誕生した生命は、爾来 40 億年近くにわたって、基本はほとんど変えることなく複雑さと多様性を増しながら、あらゆる天変地異を乗り越えて続いてきました。その結果として、今日われわれが見る生命の世界は、物理量としては微々たる物であるにもかかわらず、余りに複雑であり、われわれの知識は余りに限られているという感慨に打たれます。

にもかかわらず、環境問題という言葉を目にしなれない日はないほどに、われわれの惑星は深刻な状況に置かれています。われわれは何処に行こうとしているのか、われわれに未来はあるのかという漠とした不安を抱えて生きている現代人にとって、生きているというのはどういうことであるのかその基本を理解して、生命系全体の存続に思いをいたす智の力を持つことこそが、生命科学リテラシーであろうかと思えます。このような立場から、本報告では生命科学を「生物世界の成り立ち」、「ヒトという生物の特異な営み」、「生命の倫理」という観点から切り分けてみました。

40 年余りにわたって、己を知るということを目指して、余り省みられることのない「奇妙な」動物達の研究を続けてまいりましたが、無知を知らされることのみ多い日々を重ねて研究生活を終えねばならなくなりそうです。そのような身に、「科学技術の智」プロジェクトの生命科学専門部会をまとめるよう仰せつかったときには、文字通りに途方にくれたものでしたが、委員諸氏の熱意と献身に支えられて、曲がりなりにも現時点での報告書をまとめることができました。本報告は、委員諸氏が部会などにおける討論の結果を踏まえて分担執筆したものを、私の責任においてまとめたものです。

本報告が読者諸氏に多少ともお役に立つことを願うとともに、忌憚のないご批判をいただけるものと期待しております。

2008 年 弥生

生命科学専門部会委員長 星 元紀

要 約

生命は、地球の誕生後 8 億年足らずで誕生し、その時以来今日生きる喜びを享受している私達に至るまで、40 億年近くにわたってあらゆる天変地異を乗り越えて絶えることなく連綿と続いてきた驚くほど頑丈なシステムでもある。この頑丈さは、次々と分子は変わっても細胞は維持され、細胞は死んでも次々と更新することによって個体は維持され、個体は死んでも生殖によって種は維持され、種は絶滅しても種形成によって生命というシステムは維持されるというように、要素・構成員の絶え間ない入れ替えによって維持される脆弱^{ぜいじゃく}にして頑丈なシステムである。生命の世界は地球のごく表面の薄皮一枚に限られており、仮に両手で地球を保持することができたとしても肉眼ではほとんど認識できないほどの厚さに過ぎない。また、地球の重さが成人のそれ程度であるとする、この世に存在するあらゆる生物を合わせても細い睫毛^{まつげ}一本にも及ばないほどにしかならず、生命の世界は物理量としてはまことに微々たるものにすぎない。しかし、大気中の酸素分子は生命活動の結果生じたものであることから明らかのように、生物は地球表面の物理化学的な性状を劇的に変えてきた。逆に、環境の変化は進化を促し、大気中の酸素の増加は、猛毒であった酸素を手なづけ、有機物を完全に酸化してエネルギーを効率よく取り出す生物の進化をもたらした。

生命の誕生から、遺伝情報の担い手である DNA を収納する構造すなわち「核」を持った生物が出現するまでに 10 数億年、多細胞生物が出現するまでにはその後さらに 10 億年ほどもかかっているが、ホモ・サピエンスは高々 20 万年の歴史しか持たない。このような進化の歴史を通じて生物は多様化し、睫毛一本の世界の中は数千万とも数億ともいわれる「種」に分かれており、驚くほど多彩なものとなっている。物理量としては微々たるものに過ぎない生物の世界が、これほどの多様性を生み出していることこそ、生命現象においてもっとも驚くべき事実であるとすら言われている。生命の世界は、この多彩な生物が複雑に絡み合っ成り立つ極めて複雑なものであるが、その複雑さは、一個体や一細胞についても言えることで、生命世界は本質的に複雑なものである。

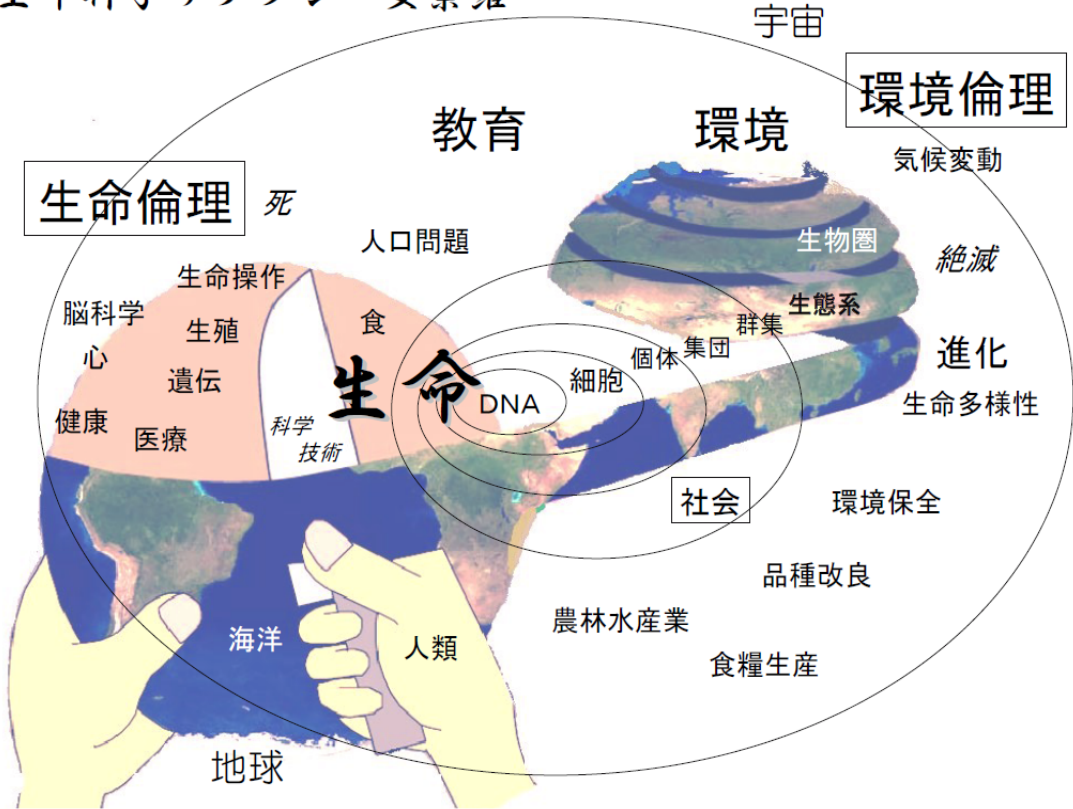
基礎生物学の立場から見ると、ヒトは非常に「異常」な生き物で、体の外に情報を蓄積し、時間と空間の制約を超えて情報を伝達・共有することのできる唯一の生物であり、積極的に教育をする唯一の生物でもある。そのような能力がもたらしたことのひとつが、異常な個体数の増加で、ホモ・サピエンスの誕生以来、現在までの総積算人口の 5 %以上が現在生きていと推定されているが、個体数がこういう増え方をして

いる生物種はヒト以外には未だかつていない。この間、わずか約8万年ほどの間に歩き歩いてアフリカから南米の先端まで、人口を増やしながら全世界に広がったわけである。その結果として、今や環境問題という言葉を目にしにしない日はないほどに、地球はかつてない深刻な状況に置かれている。このような危機的な状況の中で、生きていくというのはどういうことであるのかを正しく理解し、生命系全体の存続に思いを致すことなしには、人類の存続もまた成り立たなくなるのではないかと危惧されている。

生命科学専門部会では、このような認識から生物の世界が進化を通じてどのようにしてできてきたのか、細胞、個体、生物社会、生態系・生物圏はどのようにして成り立っているのか、ヒトという生物の特徴である脳と心、文化と教育（非遺伝情報の創出と継承）、食と健康の確保（農耕と医療）、生命の倫理（個人としての倫理と生物種としての倫理）についての基本的な理解を持つことが、21世紀に生きる人々に必要な生命科学のリテラシーであろうと考えている。

生命科学リテラシー曼荼羅

生命科学リテラシー曼荼羅



目 次

「科学技術の智」プロジェクト専門部会報告書の刊行にあたって	ii
ごあいさつ	iv
要 約	v
生命科学リテラシー曼荼羅	vii
目 次	viii
第1章 はじめに ―生きていくということ―	1
第2章 生物の世界	3
2.1 多様な生物世界	3
2.2 生命の歴史	3
2.2.1 生命の起源	4
2.2.2 生物の多様化	5
2.2.3 陸上への進出	5
2.2.4 進化のコースを変えた大量絶滅	6
2.2.5 被子植物と哺乳類の多様化	7
2.2.6 進化の仕組み	7
2.2.7 多様性が生み出された謎	8
2.3 細胞の成り立ち	9
2.3.1 細胞の構造	10
2.3.2 細胞周期と細胞分裂	13
2.3.3 DNA複製と修復のメカニズム	14
2.3.4 染色体の構造と複製	15
2.3.5 遺伝情報発現機構	16
2.3.6 RNAワールド	16
2.3.7 アポトーシス	17
2.3.8 細胞の老化とがん化	17
2.3.9 情報伝達	18
2.3.10 幹細胞	19
2.4 個体の成り立ち	20

2.4.1	個体を構成する要素	20
2.4.2	生殖	20
2.4.3	発生・分化	22
2.4.4	遺伝	23
2.4.5	恒常性（ホメオスタシス）	26
2.4.6	免疫	27
2.5	生物社会の成り立ち	28
2.5.1	生物社会とは	28
2.5.2	生物における社会生活の出発点としての有性生殖	29
2.5.3	生物個体の社会関係	29
2.5.4	異種個体間の利害得失	30
2.5.5	人間と他の生物との共生	30
2.6	生態系・生物圏の成り立ち	31
2.6.1	自然界における生物集団の構造レベル	31
2.6.2	生態系と生物圏	31
2.6.3	生物群集における食物連鎖	32
2.6.4	生態系における物質循環とエネルギーの流れ	32
2.6.5	生態系・生物圏に対する人間の影響	33
第3章 ヒトという生物		34
3.1	脳と心	34
3.1.1	ヒトは知性を持った動物である	34
3.1.2	「脳」は体が“動く”ために創られた	34
3.1.3	まず「手」と「眼」が“進化”した	35
3.1.4	「心」は物を“動かす”ために想定された	36
3.2	文化と社会 —非遺伝情報の創出—	37
3.2.1	「文化」はヒトに新たな“進化”をもたらした	37
3.2.2	「知性」は再び自己を“溶け込ませ”新たな何かを創る	38
3.3	学習と教育 —非遺伝情報の継承—	39
3.3.1	ヒトが獲得した文化伝達手段 —教育—	39
3.4	食の確保 —農耕—	41
3.4.1	農業の歴史	41

3.4.2	日本の農業	42
3.4.3	世界の人口と食料	43
3.4.4	畜産業と漁業	44
3.4.5	農業を支える科学と技術	46
3.4.6	緑の革命	49
3.4.7	農業と環境	50
3.4.8	農業と地球温暖化	51
3.4.9	農業と健康	53
3.5	健康の確保 —身体—	55
3.5.1	人体の基本構造	55
3.5.2	疾病と医療	56
3.5.3	疾病は臓器機能を見無視して理解できない	57
3.5.4	病因により疾病を分析的に考える	57
3.5.5	医療の不確実性と納得医療	58
3.5.6	個の医療の限界と環境整備の重要性	58
3.5.7	食事と運動の大切さ	59
3.5.8	疾病の予防と自己修復機能	59
3.6	健康の確保 —精神—	60
3.6.1	精神機能の発達と環境の影響	60
3.6.2	ヒトの発達には年令に応じた課題がある	60
3.6.3	発達段階における危機を乗り越えることで心の健康が維持できる	61
3.6.4	精神疾患と社会的サポートの必要性	62
第4章	生命の倫理	63
4.1	ヒトとしての倫理 —個人としての倫理—	63
4.1.1	生命科学・技術の進歩に学ぶ生命倫理	63
4.1.2	「人間らしさ」とその科学的論拠	63
4.1.3	広義の生命倫理観とその普遍化	65
4.2	ホモ・サピエンスとしての倫理 —生物種としての倫理—	67
4.2.1	ヒトが地球環境に与えている衝撃	67
第5章	まとめ 心豊かに生きるために —生命科学の立場から—	70

生命科学専門部会名簿.....	71
「科学技術の智」プロジェクト 研究組織.....	71
この報告書の利用について	74

第1章 はじめに ー生きているということー

地球は水の惑星とも生命の惑星とも呼ばれるが、「生きている」という言葉からは「みずみずしさ」や「やわらかさ」が感じられる。生きているということを端的に表現することは極めて難しいが、あえて言えば、「階層性と創発性、秩序性と調節性が顕著で、多くの高分子を含み、進化の歴史を内包した遺伝プログラムに基づいて営まれている、動的な準平衡状態にある複雑な開放系」という無味乾燥な表現となろう。生命は地球の誕生後8億年足らずで誕生し、爾来今日生きる喜びを享受している私達にいたるまで、40億年近くあらゆる天変地異を乗り越えて絶えることなく連綿と続いてきた驚くほど頑丈なシステムでもある。この間、遺伝情報の担い手であるDNAを収納する構造すなわち「核」を持った生物が出現するまでに10数億年、多細胞生物が出現するまでにはその後さらに10億年ほどもかかっている。多細胞動物が出現するのは約6億年前である。

生物の世界は地球のごく表面の薄皮一枚に限られており、仮に両手で地球を保持することができたとしても肉眼ではほとんど認識できないほどの厚さに過ぎない。また、地球の重さが成人のそれ程度であるとする、この世に存在するあらゆる生物を合わせても細い睫毛一本にも及ばないほどの重さにしかならず、生命の世界は物理量としてはまことに微々たるものにすぎない。しかし、大気中の酸素分子は生命活動の結果生じたものであることから明らかなように、生物は地球表面の物理化学的な性状を劇的に変えてきた。逆に、環境の変化は進化を促し、大気中の酸素の増加は、猛毒であった酸素を手なづけ、有機物を完全に酸化してエネルギーを効率よく取り出す生物の進化をもたらした。

進化の歴史を通じて生物は多様化し、睫毛一本の世界の中は数千万とも数億ともいわれる「種」に分かれており、驚くほど多彩なものとなっている。物理量としては微々たるものに過ぎない生物の世界が、これほどの多様性を生み出していることこそ、生命現象においてもっとも驚くべき事実であると言われている。生命の世界は、この多彩な生物が複雑に絡み合っ成り立つ極めて複雑なものであるが、その複雑さは、一匹の個体や一個の細胞についても言えることで、生命世界は本質的に複雑なものである。

基礎生物学の立場から見ると、ヒトは非常に異常な生き物である。第一に、体の外に情報を蓄積し、時間と空間を超えて情報を伝達・共有することのできる唯一の生物である。そのような能力がもたらしたことの一つが、異常な個体数の増加である。1960

年には30億だった人口が、たった40年間で倍に増えて60億を超し、現在では66億を突破したと推定されている。ホモ・サピエンスの誕生以来、現在までの総積算人口の5%以上が現在生きていると推定されているが、個体数がこういう増え方をしている生物種はヒト以外には未だ嘗ていない。この間、わずか8万年ほどの間に歩き歩いてアフリカから南米の先端まで、人口を増やしながらか全世界に広がったわけであるが、ヒトが侵入すると、その土地の大型の哺乳類や飛べない大型の鳥が激減したといわれている。ヒトはいろいろなものを食べ尽くしながら全世界に広がり、人類の時代を謳歌してきたのである。

しかも、一個体が消費する物資やエネルギーの量も著しく増大している。現存する動物の種の重さを比較してみると、上位にいるのはナンキョクオキアミを唯一の例外として、すべてヒトおよび家畜であることから、ヒトの活動が生物圏全体にどれだけのインパクトを与えているかが容易に知られよう。今や、水の惑星、生命の惑星と呼ばれる地球は、かつてない深刻な状況におかれている。われわれ人類は何処に行こうとしているのか、われわれに明るい未来はあるのかという漠とした不安が人々の心に蔓延しだしている。このような危機的な状況のなかで、生きているというのはどういふことであるのかを正しく理解し、生命系全体の存続に思いを致すことなしには、人類の存続もまた成り立たなくなるのではないかと危惧されている。

第2章 生物の世界

2.1 多様な生物世界

新春ごとに初詣客で溢れかえる明治神宮は見事な森で囲まれているが、この森は人工的に作られたもので、造成開始以来百年足らずの若い森である。しかも、温帯地方の世界でも有数の大都会の中にある。しかしこの森に一步入り込めば、片足の下には7万5千匹の線虫を筆頭に、多くの土壌動物がいることが知られている。さらにバクテリアなどの微生物の種類と数を考えれば、この森が如何に複雑な成り立ちをしているか想像に難くない。まして、熱帯雨林などではどれほど多様かつ多数の生物が生存しているか、この一事だけからでも推し量られよう。

現在、地球表層には生命が満ち満ちており、およそ生命の痕跡もないかのように思われるサハラ砂漠表面の砂1グラムの中にも、百万匹のバクテリアが見られるという。進化の歴史を通じて生命の世界は極めて多様にして複雑になっており、現在では数千万種あるいは数億種が互いに複雑に絡み合っていて生きていと推定されている。生物学者がこれまでに命名したものは170万種程度に過ぎず、生物学者といえども現存する生物の大部分については全く知らない。にもかかわらず「生物」学が成り立つのは、知られている限りの生物は単系統（祖先をたどればすべての生物は共通の祖先に由来する）で、その基本は変わらないからである。例えば、遺伝情報の流れや、そのとき用いられている遺伝暗号は、バクテリアから植物やわれわれに到るまで基本的に同じである。生物は非常に多様であるが一様でもあり、一様にして多様な存在である。すべての生物は「生命の詩」という単一の音楽を、それぞれの種に固有な変奏曲として奏でていると表現できよう。

2.2 生命の歴史

現在の地球上には多様な生物が生息している。一見するとどれもみなまるで異なる生物のように見えるが、詳しく調べていくと、様々な共通性を備えていることが分かってくる。これらの生物はどうやって誕生したのだろうか。この謎に迫ったのが、イギリスの自然史学者チャールズ・ダーウィン（1809～1882）だった。地球上の生物は遠い過去の共通祖先から枝分かれするように進化することで多様化してきた。これが、ダーウィンが出した結論だった。現代の生物学も、この考え方を支持している。

2.2.1 生命の起源

地球が生まれたのは今からおよそ 46 億年前。やがてそこに原始の海が出現し、生命体 that 出現する準備が整いだした。

海底には、硫化水素やメタン、水素などを含む熱水が噴出する熱水噴出孔がある。特に深海のそうした熱水噴出孔の周辺では、様々な化学反応が起こったと思われる。その一つとして、単純な有機物から核酸分子が生成され、それが何個も結合することでリボ核酸 (RNA) という物質が生まれた。RNA はタンパク質を生成する能力を備えており、自分を複製して増殖する自己複製能力を備えた物質だった。

現在の地球に棲むすべての生物はデオキシリボ核酸 (DNA) を遺伝物質としており、基本的な遺伝暗号も共通している。DNA 以外にも、RNA を初めとして様々な物質が生成されては消えていったと思われるが、少なくともこの事実から、現在の生物は、ほぼ間違いなく共通の祖先から進化してきたことが分かる。結果として RNA ではなく DNA が遺伝物質となっているのは、RNA は構造的に不安定な物質であるのに対し、2本の鎖ががっちりと組み合わさったような構造をしている DNA は構造が安定しているため (RNA は1本鎖)、遺伝物質の座を安定な2本鎖の DNA に取って代わられたものと思われる。ただし RNA は、今も DNA の情報をタンパク質に翻訳する上で重要な役割を担っている。

過去の生物も現在の生物も、遺伝情報 (DNA) をコピー (複製) して受け渡すことで増殖してきた。DNA のコピーは、核酸分子の化学的特異性と特殊な酵素の働きにより、正確に繰り返される。しかし、コピーの過程でたまには偶然のミスが生じることもある。大半のミスは有害なため、コピーの失敗として存続しないが、たまにはそのまま受け渡される、有害ではないミスもある。そのようにして実現した DNA 配列の多様化が進化の源となってきた。

単純な遺伝物質は細胞を形成することで生物へと進化した。最古の生物の痕跡はグリーンランドの約 38 億年前の岩石から、最古の生物化石はオーストラリアの約 35 億年前の岩石から見つかっている。その生物は、核膜も細胞小器官ももたない微小な原核生物である。

そもそも原始地球には、海水中にも大気中にも、自由酸素がほとんどなかった。当初は、硫化水素など、酸素以外の物質を呼吸に利用し、酸素を嫌う (嫌気性) バクテリアが主流だった。そうした状況を変えたのは、およそ 27 億年前に出現した、光をエネルギーに変えて酸素を放出する (光合成を行う) ラン藻類 (シアノバクテリア) の出現だった。光合成によって放出された酸素は海水中に行き渡り、海水中の酸素濃度

が高くなったことにより、エネルギー効率のよい好気性生物が進化する道が拓かれた。

細胞中に細胞小器官を持つ真核生物の最古の化石は、アメリカの約 21 億年前の岩石から見つかった藻類のものである。真核生物は、原核生物どうしの共生によって起源したと考えられている。ミトコンドリアや葉緑体、鞭毛などは、もともと自由生活をしていた原始細菌だったと言われている。ミトコンドリアは、今でも独自の DNA を備えている。われわれの細胞内には、原始的なバクテリアが住みついているという言い方もできよう。

2.2.2 生物の多様化

真核生物からは植物や菌類、単細胞動物などを進化させる系統が分かれていった。やがてそれぞれの系統からは多細胞生物が進化した。約 6 億年前の先カンブリア時代末には、確実に多細胞生物と分かる生物が進化していた。その時期の世界各地の地層からは、エディアカラ動物群と呼ばれる多種多様な大型多細胞動物化石が見つまっている。エディアカラ動物群は、硬い殻を持たない扁平な動物群で、その生態は謎に包まれている。しかも、カンブリア紀を迎える直前に、すべて絶滅してしまった。

カンブリア紀になると、硬い殻を持つ多種多様な大型動物が爆発的に進化した。この出来事は、「カンブリア紀の爆発」と呼ばれている。その中には捕食者も含まれており、奇妙な形態や、泳ぐための鰭や脚を持つ動物が数多く進化した。しかも、現生する動物の門（動物という大グループを分けるいちばん大きなサブグループ）は、この時期にほぼすべて出そろったと考えられている。ヒトが属する脊索動物（門）の祖先も出現していた。

それから数千万年後のオルドビス紀中期には、原始的な魚類が進化した。ヤツメウナギの祖先にあたるグループである。このグループには、口はあるが開閉できるあごがなかった。シルル紀になるとあごを持つ魚も進化し、やがて現在の大半の魚が属している硬骨魚類とサメやエイなどが属する軟骨魚類が進化した。

2.2.3 陸上への進出

ラン藻や藻類などの光合成生物が大量の酸素を放出したことで海水中の酸素が飽和すると、大気中にも酸素が放出され、大気圏上層にはオゾン層が形成された。今から 4 億 5000 万年ほど前、オルドビス紀のことである。オゾン層には、生物にとって有害な紫外線をカットする働きがある。したがって、オゾン層がない時代には、生物は陸上で生きていくことができなかった。紫外線を吸収する水中でしか生きていけなかつ

たのである。オゾン層の形成により、生物は陸上への進出が可能となった¹。

最初に上陸したのは植物だった。約 4 億 4000 万年前のシルル紀の地層からは、植物体の姿を残す最古の化石が見つかっている。

デボン紀になると多様な植物が進化した。トクサやシダ、種子植物などである。シダやトクサからなる最初の森林も出現した。クモ、ダニ、ムカデ、昆虫など陸生の節足動物も進化した。約 3 億 7000 万年前には、肺魚やシーラカンスの祖先にあたる魚類のグループから原始的な両生類が進化した。

石炭紀は、その時代に繁茂していた森林の化石が石炭層を形成したことから、石炭紀と呼ばれている。当時の大陸低緯度地域は温暖湿潤な気候に恵まれ、巨大なシダ類などの森林が茂り、巨大なヤスデや空を飛ぶ大型昆虫なども進化していた。

2.2.4 進化のコースを変えた大量絶滅

古生代最後の時代ペルム紀中期末から後期にかけて 2 回の大量絶滅が起こり、三葉虫など動物種の 80~95%が絶滅したと考えられている。海中では固着動物や底生動物の多くが絶滅し、陸上でも両生類、爬虫類、昆虫の多くが絶滅した。原因は不明だが、大規模な地殻変動に伴う気候急変、海水中の酸素濃度激減などの事実が知られている。

中生代の海中には、ウニ、ヒトデ、巻き貝のほか、遊泳能力に優れた魚やアンモナイトが登場した。陸上では、古生代末の大量絶滅を生き残った爬虫類が多様な種類を進化させた。恐竜と哺乳類も、三畳紀後期にほぼ同時に出現した。

恐竜は、大型の種類を進化させたが、哺乳類は主に夜行性の小型種しか進化させられなかった。ジュラ紀には、二足歩行をする小型の恐竜から鳥類が進化した。

陸上では小型から大型の恐竜や翼竜、海中では大型爬虫類やアンモナイトなどが繁栄していたが、それら中生代の陸、空、海を代表する動物を絶滅させた大量絶滅が、今から 6500 万年前に起きた。その引き金を引いたのは、北アメリカのユカタン半島に衝突した巨大な隕石だったとする説が有力である。衝撃によって巻き上がった大量の粉塵が太陽光をさえぎり、地球全体が寒冷化する一方で、光合成をする植物の多くが死滅し、それを基盤とする食物連鎖が大打撃を受けたのだ²。

植物は、ソテツやイチョウ、針葉樹など様々な裸子植物が進化した。被子植物もジ

¹ フロンガスなどによってオゾン層が破壊されてオゾンホールが発生すると、強い紫外線が地上に降り注ぐため、皮膚ガンが多発する危険がある。

² この学説から「核の冬」という理論が生まれた。これは、万が一に地球の各地で核戦争が勃発すれば、巨大な隕石が衝突したときと同じような環境変動が発生し、地球全体が闇に覆われて寒冷化するという説である。地球の歴史に学ぶことは、核兵器廃絶を訴える有力な理由ともなるのだ。

ユラ紀末に進化し、白亜紀に様々な種類を進化させた。

表 1 地質年代

2.2.5 被子植物と哺乳類の多様化

新生代に入ると、衰退し始めた裸子植物に代わり、多様な被子植物が進化した。白亜紀末の大量絶滅を生き延びた哺乳類、鳥類、昆虫なども、急速に多様化した。

哺乳類は、絶滅した恐竜やその他の爬虫類が占めていた生態的地位（役割）を埋めるように急速な進化を遂げ、1500 万年ほどの間に、現在の主なグループがほぼすべて登場した。第四紀には氷期と間氷期がくり返された。その結果、生息地の分断化が起こり、生物種の移動や隔離による新種の形成が進んだ。約 500 万～700 万年前には、アフリカで、人類の系統が起った。

2.2.6 進化の仕組み

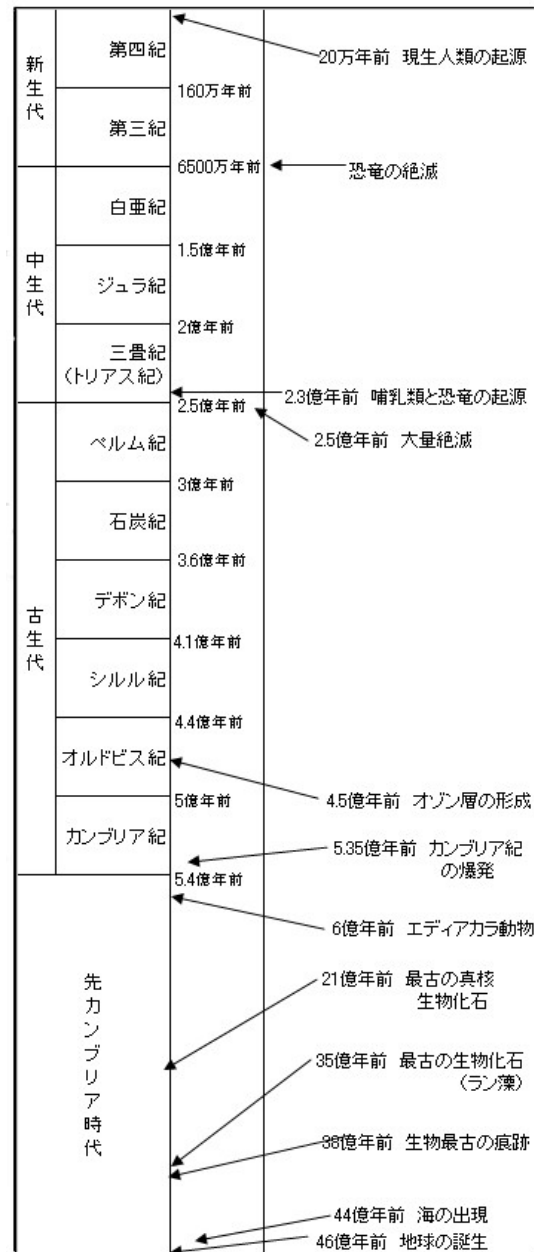
生命の進化を概観してきたが、時代とともに生物の種類が増え、複雑で、大きな体をした種類も増えてきたのはどのような仕組みによるものなのだろうか。それは、生物の体はどうやってできるかということと深く関係している。

カエルや魚、ニワトリの卵などを見て分かるように、ほとんどの動物の体は1個の

卵から発達する。イヌやネコや人間も、母親の子宮の中で1個の卵から発生が始まる。

1個の卵から複雑な体ができるのは、卵の細胞の中にDNAという設計図が組み込まれているからである。その設計図にしたがって細胞が分裂し、器官が形成されていく。体づくりの設計図は、動物の種類ごとに異なっている。同じことは植物でも言える。

35億年以上前に登場したバクテリアの設計図はとても単純だった。ところが、前述



したように、設計図をコピーして子どもに伝えているうちに、ときどき、コピーの失敗が起こる。

たまに、使える失敗コピーが出現する。新しい設計図をもらった子どもは、親とはちょっと違う種類になる。そうやって新しく生まれた種類の生物にとって最大の問題は、暮らしていける環境があるかどうかである。あるいは、同じ種類の子どもたちの間にも、少しずつ、遺伝的な違いがある。それは、雄の精子と雌の卵子が受精することで子どもがつけられる有性生殖では、子どもは両親の遺伝物質を半分ずつもらうだけでなく、それぞれの両親からどの遺伝物質をもらうかも、そのつどほぼ偶然によって決まるからである。つまり、子どもごとに、両親からもらう遺伝物質の組み合わせが異なるのだ。

そのような違いを持つ子どもの中のどの子どもが無事に成長して自分の子どもを残せるかは、環境と偶然によって決められる。別の言い方をすれば、個々の生物種は多様な遺伝的変異を抱えており、自然界ではそうした個体のすべてが同数の子孫を残せるわけではなく、生息環境に適応した個体ほど多くの子孫を残せる可能性が高い。これが、ダーウィンが提唱した自然淘汰（選択）説の骨子である。

2.2.7 多様性が生み出された謎

長い歴史の中で新しい生物が続々と進化してきたが、遺伝子のレベルではその共通性が極めて高い。この事実を最初に強く印象づけたのが、各種生物の体の形成において、どの遺伝子がどこで働くかを決定するという重要な働きをする遺伝子群の発見だった。昆虫、線虫、ウニ、エビ、カエル、魚、鳥、哺乳類、そしてなんと植物からも、ほとんど同じその遺伝子群が見つかっているのだ。このことから、生物は共通の祖先から進化してきたことが改めて確認できる。

では、共通の遺伝子を持ちながら、種類ごとに生物の形が異なっているのはなぜなのだろう。それは、体の各部分を作る遺伝子とそれを働かせる遺伝子は共通していても、どの遺伝子をどこでどのように働かせるかという組み合わせは生物の種類ごとに異なっているからである。その組み合わせを違えることで、無数にも近い組み合わせが生み出されているのだ。進化は、ありあわせの部品を一部改変したり増築したりしながら使い回すことで多種多様な生物を生み出してきたのである。

繰り返すが、自然淘汰が作用する下では、生息環境に適応した個体ほど、可能性として多くの子孫を残せる。しかし、大規模な環境変動に際しては、それまでに築いてきた適応など何の意味も持たない。生物の歴史では、とてつもない規模の大量絶滅が

少なくとも5回は起きてきた。前述した、2億5000万年前のペルム紀の終わりに起きた大量絶滅では海に住む生物種の96%が絶滅したと言われている。また、6500万年前の白亜紀末の大量絶滅では、恐竜が一掃された。裏を返せば、進化とは絶滅の歴史でもあるのだ。そうした大量絶滅を生き残れるかどうかは偶然しだいである部分が多い。

ダーウィンは、自然淘汰の原理を提唱しただけでなく、進化とは枝分かれであることを正しく指摘した。生物は、木の枝が分かれるように種の数を増やしてきた。いったん分かれた枝は、別々の方向に進み、さらに枝分かれを繰り返すものもあれば、子孫を残さないまま枯れ落ちるものもある。

現在、ヒトにもっとも近い生物はチンパンジーである。ヒトの系統とチンパンジーの系統は、およそ500万年前に共通の枝から分かれ、異なる進化を遂げてきた。したがって、共通点は多いが異なる点も多い。よく、ヒトの祖先はサルだったという言い方がされるが、厳密に言えばこれは正しくない。正しくは、ヒトとサルは近い祖先が共通していると言うべきなのだ。分かれた枝が再び交わることはないように、チンパンジーが進化するとやがてヒトになるということもありえない。単に別の新しい種類が生まれるだけである。

現在の地球では、新しい種類を生む進化よりも絶滅の方がたくさん起こっている。人間による環境破壊のせいである。この絶滅は、過去5回の大量絶滅のペースをも上回るほどのスピードで進んでいる。一度失われた生物種は、二度と戻らない。今を生きるわれわれは、そのことをよく考え、地球環境の保全に努めるべきである。

2.3 細胞の成り立ち

全ての生物は「細胞」と呼ばれる小さな単位から作られている。このことは、顕微鏡が作られ、改良されて、細かい構造を観察できるようになったことから、英国の物理学者ロバート・フックを初めとする研究者たちによって明らかにされた。細胞の形、大きさ、働きなどは、生物の種類や組織などによって極めて多様であり、内部の構造も様々である。しかし、細胞の基本構造と基本的な働きは、どんな細胞でもよく似ている。最も基本的な類似点は、次の2点である。

- ① 外界から栄養やエネルギーをとり入れて成長・増殖する。
- ② 特定の遺伝情報をDNAの形でその中に保持している。

細胞の基本的な構造と働きを知ることで、生物の生命活動の基本を知ることができ、さらには生物がたどって来た進化の過程を推測することもできる。

2.3.1 細胞の構造

(1) 原核細胞と真核細胞

細胞は、その進化の過程で、自分自身の形や働きを決めるための設計図である遺伝物質 DNA を安全に維持し、複製するために、核と呼ばれる特別な構造を作り上げてきた。現存の生物を形作る細胞は、この核の有無で「原核細胞」と「真核細胞」とに分類される。

原核細胞は核のような構造は持たないが、その遺伝物質はバラバラに存在するわけではなく、タンパク質と結合して、まとまった核様体として、細胞質中に存在する。細胞骨格(後述)は存在せず、細胞の呼吸をつかさどる酵素は細胞膜に局在している。それに比して、真核細胞では、遺伝物質は種々のタンパク質と結合し、高次な構造である染色体を作っている。また細胞質中には、細胞骨格が張り巡らされており、細胞の呼吸をつかさどる酵素群は、ミトコンドリアと呼ばれる構造体の膜に存在して、秩序正しく働いている。図1にそれぞれの模式図を示す。

(2) 生体膜

細胞を電子顕微鏡で観察すると、多くの膜状構造からできていることが分かる。これらの膜を生体膜と呼び、その基本的な構造は、脂質分子からなる二重層である。その二重層に、種々のタンパク質などが埋め込まれて、物質の透過、認識と受容、触媒作用など、様々な細胞の活動を担っている。埋め込まれたタンパク質は、一定の場所にじっとしているわけではなく、脂質二重層の中を動き回って、細胞が外界との情報交換を行う上でも、重要な役割を果たしている。

生体膜には、細胞を外界から隔てている細胞膜のほかに、真核細胞では、核の内容物を取り巻いて他の部分から独立させている核膜や、ミトコンドリア、葉緑体、小胞体、ゴルジ体、リソソーム、ペルオキシソームなどの小器官を取り巻く膜がある。細胞膜は、細胞の独立性を維持する働きをもち、同時に、外界からの刺激や情報を受けとって、細胞内に伝える機能と構造を持っている。細胞外からの情報に反応することで、細胞は環境に対応することができるようになり、また、近隣の細胞とも相互に働きあうことができるようになっている。

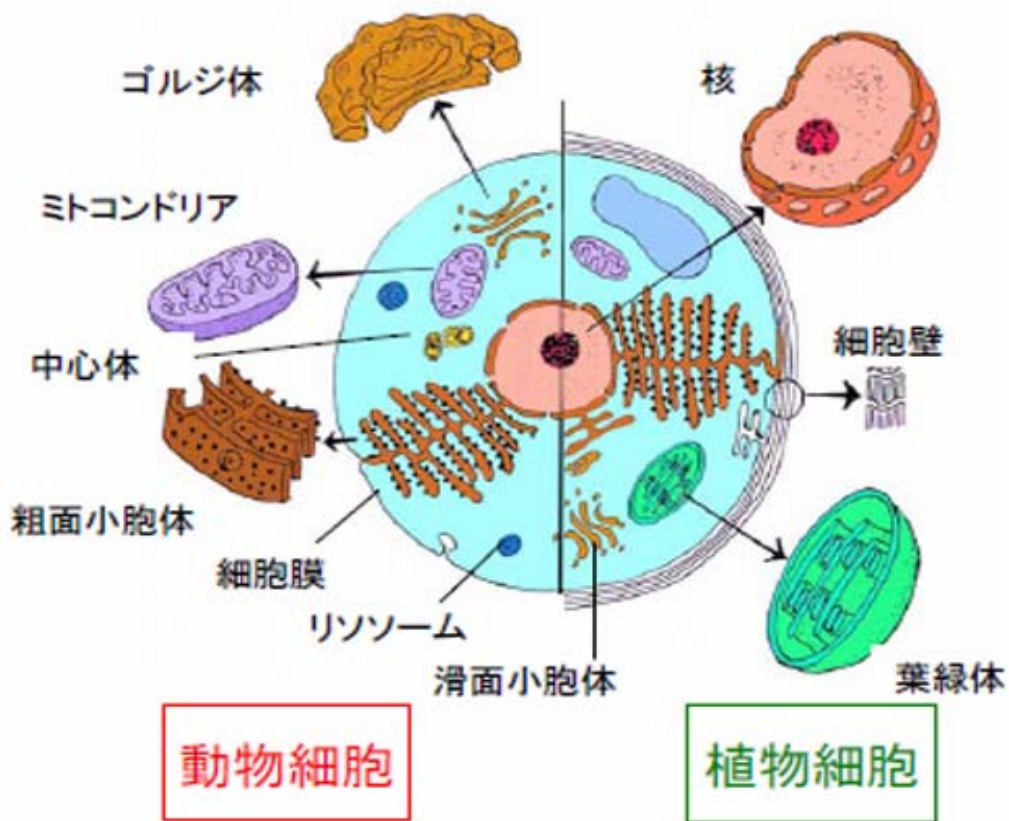


図1 細胞の模式図(動物細胞と植物細胞)

それらの膜で仕切られることによって、細胞内に含まれる種々の物質、すなわち、生命を維持するために必要な核酸 (DNA と RNA) やタンパク質などの大きな分子 (高分子)、種々の化学反応に必要な小さな分子 (低分子) の分布や濃度が一定に保たれ、種々の反応に用いられる物質が拡散することや、不要なものが混じり合うことが阻止されている。

(3) 細胞骨格

細胞内には、微小管、中間径フィラメント、マイクロフィラメントと呼ばれる繊維状の構造が張り巡らされている。これらの構造が細胞の形を保ち、運動などの働きをサポートすることから、「細胞骨格」と呼ばれるようになった。

それぞれの繊維状構造は、異なるタンパク質から作られていて、それぞれが特別な働きを持っている。微小管は、チューブリンと呼ばれるタンパク質から構成され、これが結びついて長い繊維状になったり、結びつきが切られて短い繊維となったりすることで、種々の機能が調節されている。微小管には、チューブリン以外にも、多様な

タンパク質（微小管結合タンパク質）が結合していて、それらのタンパク質の働きで、細胞の移動や、細胞分裂における染色体の分離と移動、細胞内の物質の輸送など、多様な機能が調節されている。ミクロフィラメントは、筋肉を作っているのと同じアクチンと呼ばれるタンパク質からできていて、これも、細胞の形の維持や、移動や伸展、細胞分裂の際に細胞質を二つにくびり切る収縮環の形成など、細胞の活動に重要な役割を果たしている。中間径フィラメントは、多彩なタンパク質からできており、微小管と相互作用して、細胞の形態形成や維持に働いていると考えられている。

（４）核とオルガネラ（細胞小器官）

核は、遺伝物質（DNA）を含む膜状の構造体で、普通は細胞に1個含まれるが、複数の核を持つ細胞（軟骨細胞、肝細胞など）や多核の細胞（骨格筋細胞、血小板のもととなる巨核球など）も存在する。核の中では、遺伝情報を伝達するための物質であるDNAやRNAが合成される。極めて大きな分子であるDNAに書き込まれている遺伝情報が、その単位（遺伝子）ごとに短いmRNAに写し取られて、それが、核膜につくられている特別な孔（核膜孔）を通り抜けて、タンパク質の合成工場であるリボソームに運ばれる。核は、遺伝物質を安定に格納し、効率よく合成を行うために特殊化された構造であるが、原始細胞が地球上に誕生してから進化する過程において、この特殊な構造が作られるまでに、20億年以上もの時間が必要であったと考えられている。

核内にも、主としてラミンと呼ばれるタンパク質から作られた核マトリックスと呼ばれる骨格構造があることが分かっている。これは、核の構造を維持し、核マトリックスを足場として、DNA複製（DNA→DNA）、転写（DNA→RNA）など、遺伝情報を伝達するための反応が起こる。

真核細胞の細胞質内に存在する様々な構造体をオルガネラ（細胞小器官）と呼び（図1参照、表2）、これらはいずれも、細胞が生きていくために必要不可欠な働きをしている。

なお、葉緑体は、植物で特異的に見られる構造であり、ここで植物は光のエネルギーを使って、水と二酸化炭素からブドウ糖を作っている（この反応を光合成とよぶ）。葉緑体は、ミトコンドリアと同様に、元々は独立した原核細胞であったものが、進化の過程で他の細胞中に住み着いて、共生を続けているうちにその細胞小器官となったものと考えられている。

表2 真核細胞の主な細胞小器官

	主な小器官など	主な働き
細胞の表層	細胞膜	細胞内外の物質の輸送、外部から内部への刺激の伝達
	細胞壁(植物のみ)	細胞の保護、物質の変換
細胞の内部	核	遺伝物質の保存、DNA や RNA の合成
	核小体	リボソームの合成
	微小管	形の保持、運動、細胞分裂、物質の輸送
	リボソーム	タンパク質の合成
	小胞体	タンパク質の輸送
	ゴルジ体	タンパク質への糖の付加、分泌顆粒の形成、膜の形成
	リソソーム	不要物などを分解する細胞内消化の場
	ミトコンドリア	呼吸によるエネルギーの産生
	葉緑体(植物のみ)	光合成の場
	中心体(動物のみ)	細胞分裂の際に微小管からできている紡錘糸を形成

2.3.2 細胞周期と細胞分裂

生物が成長する際や、子孫を残す際には、細胞が分裂して数を増やす。染色体が二つの新しい細胞（娘細胞）に配分される核分裂は、動物でも植物でも同様な様式で起こるが、細胞質分裂の様式は異なっている。動物細胞では、収縮環と呼ばれるアクチン繊維の束が形成されて細胞質を真ん中でくびり切り、植物細胞では、細胞質の中央に細胞膜の構成成分からなる細胞板が形成されて、二つの娘細胞の間に隔壁が作られる。体を構成する細胞と、生殖細胞が作られる際の分裂は、様式が異なり、前者を体細胞分裂、後者を減数分裂と呼ぶ。減数分裂では、その名のとおり、分裂の前後でDNA量が半減する。これは、雌雄の生殖細胞が受精などによって結合し、その中で新しい遺伝物質の組み合わせを作る上で重要な過程である。新しい遺伝物質の組み合わせが作られることで、親細胞とは異なる新しい性質が生まれ、それが生物の生育に新たな可能性を生じさせる。

細胞が分裂して増殖する際に、分裂を開始してから次の分裂を開始するまでを細胞周期と呼ぶ。細胞周期は、図2に示すように、M期（分裂期）、S期（DNA合成期）、M期とS期間のG₁期、S期とM期間のG₂期に分けられ、細胞はこの周期を整然と回っている。顕微鏡観察で、変化が観察されるのは、M期だけである。細胞周期が

正常に回るためには、種々の特別なタンパク質が関与した、精巧な調節のメカニズムが働いている。なお、分裂をしないことが知られている神経細胞は、細胞周期を回らずに、 G_1 期で分裂を停止している。この状態を G_0 期と呼んでいる。

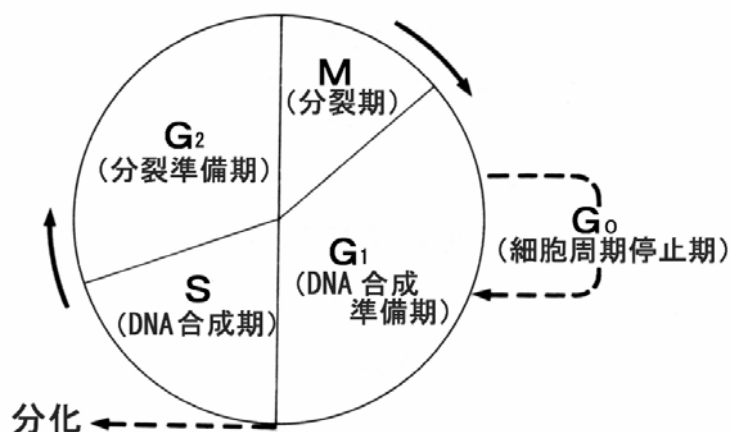


図2 細胞周期

2.3.3 DNA複製と修復のメカニズム

細胞分裂によって、細胞が増殖する過程では、遺伝情報が正確に複製されなければならない。そして複製された遺伝情報 (DNA) は、核分裂の過程で、等しく二つの娘細胞に分配される。

DNA 複製とは、DNA の二重らせん鎖の一方を鋳型として、相補的な DNA 鎖が作られることで、その細胞の遺伝情報が、正確に次の世代へと伝達される巧妙な仕組みである。すなわち、元の DNA 鎖の二重らせんがほどかれて、それぞれが鋳型となって新たな鎖が合成されるので、元の二重鎖の半分を保存した形で、新たに2本の二重らせんが複製されることになる。この複製様式は、放射性同位体を用いた実験で明らかにされた。

DNA 複製は極めて厳密に行われるが、まれに誤りが生じる場合があり、また、紫外線、放射線、ある種の化学物質などによって、DNA に傷が入る場合がある。DNA 鎖の誤りや傷がそのまま放置されると、細胞に突然変異が引き起こされ、細胞の増殖の調節が正常に行われなくなって、細胞はがん化する。細胞は自分自身を守るために、誤って作られた鎖を修復したり、傷を治したりする機構を備えており、その過程では、

修復酵素群と呼ばれる様々なタンパク質が働いている。

2.3.4 染色体の構造と複製

真核細胞では、遺伝子 DNA は種々のタンパク質と複合体を形成して、染色体と呼ばれる構造体を作っている。染色体は、直径約 10 nm の小さな球が細い繊維で連結された構造をとっている。小球は、ヒストンと呼ばれるタンパク質からできて、コアを作っており、そこに DNA が巻きついてヌクレオソームと呼ばれる構造を形成している (図 3)。ヒトの場合、それぞれの細胞に含まれている DNA には、およそ 22,000 の遺伝子を書き込まれており、それらが 23 対 (46 本) の染色体に分けられて存在している。性染色体 (X 染色体と Y 染色体) 以外の、対を成す染色体には、同じ遺伝子が載っており、対をなす染色体を、相同染色体と呼ぶ。

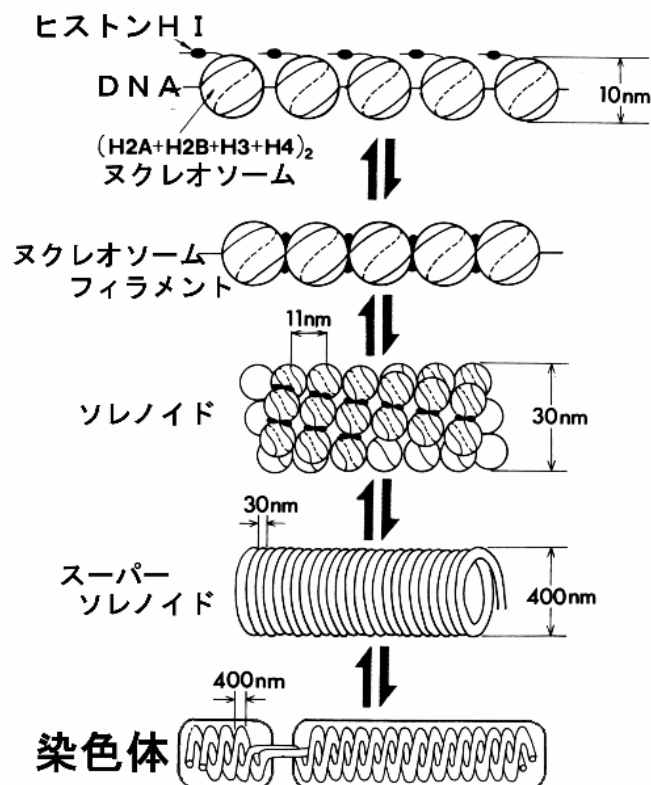


図 3 染色体の構造

普段、細胞内の DNA は伸びた形 (染色糸あるいはクロマチンと呼ぶ) で核内に分

散しているが、細胞分裂が開始されると、核内で凝縮してヌクレオソームが密に連なった構造をとる。顕微鏡観察で、細胞分裂前期になると染色体が見えるようになるのは、このためである。

染色体を作る DNA は、S 期において複製されて 2 倍に増え、その後の細胞分裂に備える。従って細胞分裂によって細胞が二分されても、それぞれの娘細胞に含まれる DNA 量と染色体数は分裂の前後で変化しない。

2.3.5 遺伝情報発現機構

細胞はその遺伝子 DNA 上に書き込まれている遺伝情報に従って、タンパク質を合成する。その際には、いつ、どこで、どんなタンパク質が作られるかが、極めて厳密に調節されている。

膨大な DNA の遺伝情報から、そのときの細胞の働きや変化のために必要とされるタンパク質に対応する遺伝子だけが、短いメッセンジャーRNA (mRNA) としてコピーされる。そして、そのコピーが、核膜孔を通過してリボソームへと運ばれ、そこで、mRNA が持っている情報に基づいて、必要とされているタンパク質が合成される。このことを、遺伝子発現という。

真核細胞では、核内に存在する遺伝子 DNA を鋳型として、RNA ポリメラーゼの働きで mRNA が合成される。mRNA は核膜孔を通過して、細胞質中に出て行き、細胞質基質に存在するリボソーム上で mRNA の塩基配列情報がアミノ酸配列に置き換えられ、タンパク質が作られる。このとき作られるタンパク質には、生物の体を作る材料となるものと、種々の化学反応に必要な酵素がある。酵素が、いつ、どこで、どのような化学反応を触媒するかによって、細胞の形や働きが決定されることになる。

2.3.6 RNAワールド

現在の生物界では、DNA が遺伝物質として遺伝情報を担い、また、タンパク質が種々の生理作用を担っている。RNA は、長く、それらの働きを補助するものと考えられてきた。しかし、原始細胞の時代には、RNA が遺伝情報の担い手として働いていたとする説が提唱され、多くの証拠が示されてきている。遙か遠い昔の地球上には、DNA ではなく RNA を中心とした生命体の世界があったと考えられ、その世界を RNA ワールドと呼んでいる。

RNA は、DNA ほど安定ではないが、その中に遺伝情報を書き込んで保存することが可能であり、また、タンパク質のように触媒作用を示す場合もある。触媒作用を持

つ、酵素のような RNA をリボザイムと呼ぶ。

これまで、DNA に極めて多くの遺伝子以外の配列が存在することが知られており、それらはジャンク（ごみ）と呼ばれてきた。しかし現在、それらの塩基配列から作られる短い RNA に、転写調節、mRNA の分解、翻訳の抑制など、種々の作用があることが分かってきて、RNA が細胞の働きを調節する上で、重要な役割を果たす分子であることが再確認された。

2.3.7 アポトーシス

生物の体を作っている細胞が老化したり傷ついたりすると、そのまま体の中に残ることは好ましくない。細胞中には、除去したい細胞を積極的に死なせる機構が存在し、そのような死に方をアポトーシスと呼ぶ。アポトーシスを起こしつつある細胞では、細胞膜や細胞小器官は比較的正常であるが、DNA 分解酵素が合成され、核に存在する DNA を短く切断する。それに続いて、細胞が断片化し、膜に包まれた小胞となって、近隣の細胞に取り込まれ、その中で消化されてしまう。

細胞の損傷などによって急激に引き起こされる消極的な死に方をネクローシス（壊死）と呼ぶ。この場合は、アポトーシスのような変化は認められず、細胞を構成する物質が細胞外に撒き散らされ、周囲の組織や細胞にダメージを与える結果となる。したがって、アポトーシスは、周囲に迷惑を与えずに、自らを死に至らしめる方法である。

生物が発生する過程で、アポトーシスは重要な意味を持つ。神経細胞は、発生初期に多量に作られ、後に余分な細胞が不要となって、アポトーシスによって間引きされる。また、手足の発生の過程で、最初はミットのような手足が作られ、それから指の間の細胞が脱落することが分かっており、これも、アポトーシスの重要な働きである。最初から指ができていては、発生の途中で、小さな指は折れてしまうかもしれないので、よくできた仕組みであるといえよう。

また、免疫系で中心的な役割を果たすリンパ球の一種である T 細胞は、骨髄で作られて胸腺という器官に入り、そこで成熟するが、その際、自分自身を攻撃してしまうような、不適切な性質を持った T 細胞ができてしまうと、それを除去するためにアポトーシスの機構が働く。これは、自己免疫疾患を防ぐ仕組みである。

2.3.8 細胞の老化とがん化

生物は、個体として老化し、死を迎えるが、細胞も老化することが知られており、

老化した細胞は分裂できず死に至る。多細胞生物は、その体を作っている細胞の分裂と死の繰り返しによって維持されており、細胞が老化し、死ぬことは、生物個体をバランスよく生かすために必要な現象である。

細胞の老化と死のメカニズムについては、「プログラム説」と「エラー説」が提唱されている。前者は、遺伝子 DNA に書き込まれているプログラムに従って細胞が老化するという説で、後者は、細胞が分裂・増殖を繰り返す間に DNA に複製の間違いや傷が作られ、それが細胞の老化と死を引き起こすという説である。現在、種々の研究から、細胞の老化は、その両方がない交ぜになって起こることが分かっている。

遺伝的に異常に早く老化してしまう病気が知られている。ウェルナー症候群がその代表例で、患者の細胞を培養すると正常人の細胞の約 2 分の 1 の寿命しかない。最近、DNA 複製に関わる酵素が正常に働かないことが、その原因であることが分かった。この酵素の遺伝子に異常が生じて、DNA の複製が正常に進まないこと、また、DNA にできた傷が正常に修復できないことが、極めて速い老化を引き起こす原因である。

がんは、細胞の増殖の調節がうまく働かなくなって、過剰に増殖した細胞が塊を作ったものである。がんの発生には、細胞にがん化を引き起こす発がん因子(ある種の化学物質、放射線、ウイルスなど)が関与しており、細胞の増殖に関わる遺伝子に異常を引き起こしてしまう。それら増殖に関わる遺伝子は、普段は互いにバランスをとって、正常に働いているが、発がん因子の働きによって、変異が生じ、バランスが崩れて、がん化のスイッチが入ってしまう結果となる。そして、がん化した細胞は、無制限に増殖して病巣を作り、それが周囲の細胞や組織から養分を奪ったり、毒素を産生してダメージを与えたりして、最悪な場合には、生物体を死に至らしめることになる。

2.3.9 情報伝達

細胞は、細胞外や近隣の細胞からの情報を受け取って、それを細胞内に伝達する仕組みを備えている。自分自身の置かれている環境に応じて、種々の活動と化学反応を変化させて、自分自身の生命を守っている。これは、細胞が長い進化の歴史の中で獲得してきたメカニズムである。

外部からの情報は、先ず、その情報に対して特異的に反応する受容体 (レセプター) によって、認識される。情報を受け取った受容体は活性化されて、それに引き続いて、種々の情報伝達経路 (シグナル伝達経路) が働く。そして、外部からの情報を、細胞内の種々の情報伝達分子 (cAMP などの環状ヌクレオチド、リン脂質、プロテインキナーゼ (タンパク質リン酸化酵素)、プロテインホスファターゼ (タンパク質脱リン酸

化酵素) などへと伝えて、次の反応につなげていく。そして、細胞の応答反応の最終的な実行役であるタンパク質の発現や活性化を引き起こす。

情報伝達機構において重要な役割を担っている受容体タンパク質は、前に述べた細胞膜に存在するもののほかに、細胞質や核内に存在するものがある。それらも、様々な情報を特異的に受け取り、正確に伝達して、細胞に、目的にあった応答を引き起こさせる。がん細胞では、受容体タンパク質が変異を起こしている場合が多く、その結果として細胞分裂の制御に異常が生じ、細胞が無制限に増殖するようになってしまっている。

単細胞生物では、環境の変化が、生物そのものに種々の変化を引き起こすが、多細胞生物では、環境変化に対応して、それぞれの細胞で種々の生理活性変化が起こり、生物体を構成している細胞の間で、情報伝達が行われる。それらの伝達の過程で、ホルモン、増殖因子、神経伝達物質など、種々の物質が働いている。

2.3.10 幹細胞

細胞が盛んに分裂している組織には、幹細胞（ステムセル）と呼ばれる細胞が存在している。例えば、皮膚、小腸、精巣などは常に新しい細胞に入れ替わっている組織で、それぞれに存在する幹細胞が分裂を繰り返して、新しい細胞を補っている。骨髄には、造血幹細胞が存在しており、赤血球、血小板、白血球などの血球細胞を作っている。

発生初期の胚から細胞を取り出して培養し、胚性幹細胞を作ることができる。これは、多能性を持つ細胞で、薬剤などで種々の役割を持つ細胞へと分化させることが可能な細胞である。この性質を利用して、幹細胞を再生医療へ応用することが考えられているが、将来個体として生まれることが可能な発生初期の胚を損なうことから、倫理上の問題が問われており、現在、その利用について多方面からの議論がなされている。

成体から取り出した幹細胞を利用したり、分化した細胞を処理して多能性を持つものに変化させたりすることができれば、自分自身の損傷部位を自分自身の細胞で補うことができるので、理想的な再生医療が実現できると考えられている。最近、分化した細胞にある種の遺伝子を組み込むことで、幹細胞様の細胞を作り出す実験の成功が報告されており、自分自身の細胞から幹細胞様の多能性を持つ細胞を作り出し、それを治療に用いようとする方法の開発を目指した研究が推進されつつある。

【コラム1】 遺伝子を持たない病原体プリオン

近年、BSE（狂牛病）の病原体として話題になっているプリオンは、ウイルスの約1/100程度の大きさを持つタンパク質の粒子である。これは、動物の脳や脊髄などの中枢神経に障害を引き起こす病原体として発見されたが、これまで知られている他の病原体に当然のこととして含まれているDNAやRNAといった遺伝物質を、全く含んでいない。プリオンが関係する疾患はプリオン病と呼ばれるが、動物で分かっているウシのBSE、ヒツジやヤギのスクレイピーなどのほかに、ヒトでも、クロイツフェルト・ヤコブ病やクールー病が知られている。いずれも中枢神経が侵され、破壊されて、死に至る病気で、感染性もある。

プリオンは、元来、生体中に存在するタンパク質であり、神経細胞で合成されて、その細胞表面に存在する。プリオンの正常細胞での働きは、まだ解明されていないが、なんらかの原因で異常となったプリオンが感染すると、その周囲にある正常なプリオンを次々と変化させてしまって、プリオン病を起こすことが知られている。

一般に、構造が変化したタンパク質は、細胞中で分解されてしまうのだが、異常なプリオンタンパク質は分解を受けず、そのまま脳・神経に蓄積するため、中枢神経の破壊が起こると考えられている。

2.4 個体の成り立ち

2.4.1 個体を構成する要素

原核生物および真核生物において個体はそれぞれ原核細胞および真核細胞から成り立っている。特に、真核生物においては、それらの細胞が集まり、組織、器官、および器官系を作り、生物個体を構成しており、この個体の生命現象が基になって、生物界は成り立っている。個体維持のための主たる生命現象は生殖、発生、遺伝、それに免疫を含む恒常性の維持（ホメオスタシス）となる。

2.4.2 生殖

生物が新しい個体を生み出すことを生殖といい、それは生物の生活環の中で捉えることができる。その方法には雌雄の性に関わる有性生殖と、性を伴わない無性生殖の二つが知られている。

無性生殖では卵や精子が生ずることなく、体細胞分裂によって殖えていく。このようにして殖えた個体は、ゲノムの全て（遺伝情報の全て）が親と同じであり、このよ

うな個体群をクローンという。クローンは生命科学の分野では応用面も広い。多くの場合分裂によって生じる新個体は同じ大きさであるが、分裂した一方がもとのものより小さい場合は出芽という。植物およびプラナリアなどは、個体を断片化すると、それぞれの断片が完全な成体に成長する。これは断片化によって失った体の部分の再生を意味する。無性生殖はすみやかに増殖できる利点があるが、ゲノムが均一なので病気など、環境の変化で絶滅する恐れもある。

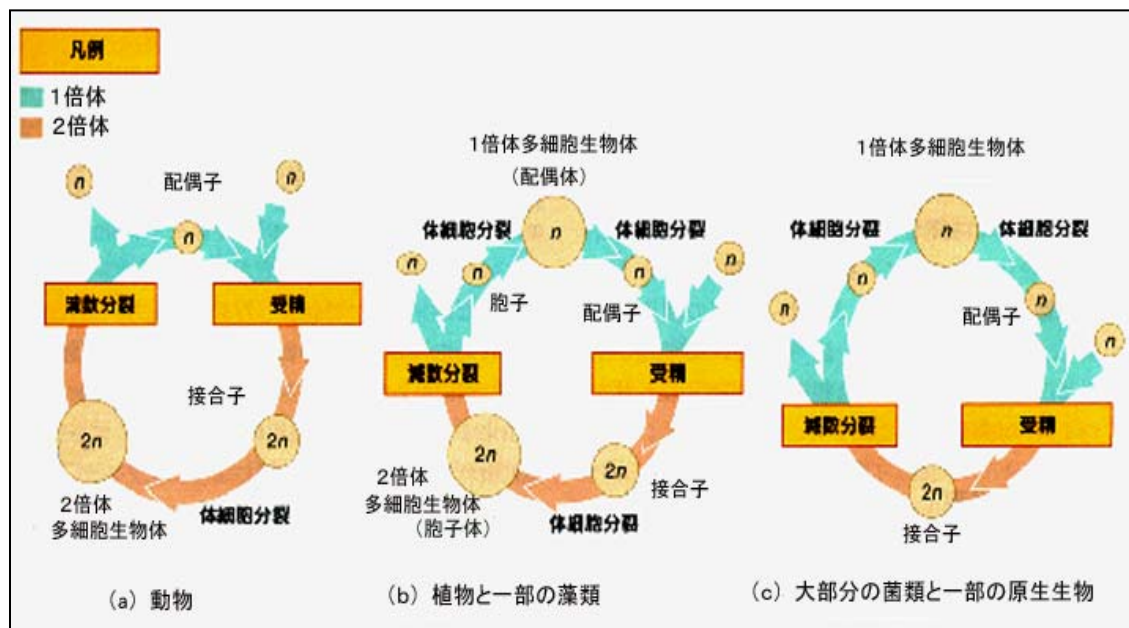


図4 生殖の生活環³

一方、有性生殖は単相体 (n) の雌性配偶子 (卵子) と雄性配偶子 (精子) が融合 (受精) して複相体 ($2n$) の接合子 (受精卵) ができることによって新個体を作る方法である。一般的には図4のように3通りがあり、ヒトの場合は図5のようになる。受精と減数分裂が、生活環のどの時点で起るかについては生物種により固有である。

減数分裂は複雑で時間がかかるが、雌雄に由来する相同染色体の間で遺伝子の交換が起って親とは異なる遺伝子組成を持った卵と精子が生じ、また受精時にも両者の間でも両者の間で様々な組み合わせが生じることにより、子孫が環境の変化に対し生き残る可能性を高めている。

³ 『キャンベル生物学』小林興監訳、丸善株式会社、2007、p.273

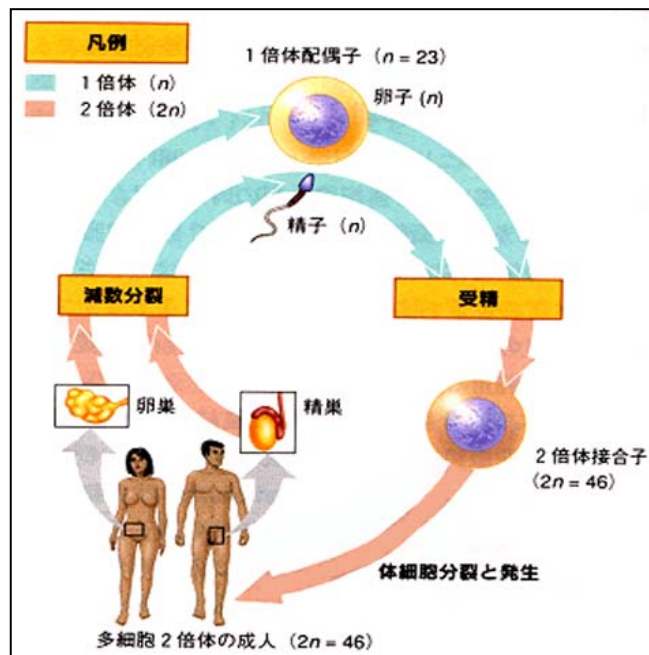


図5 ヒトの生活環⁴

2.4.3 発生・分化

発生は受精卵が細胞分裂（卵割）を繰り返し成体に至りさらには老化して自然死に至るまでの過程をいう。細胞分裂の過程の中でそれぞれの細胞は遺伝情報に基づき特殊化され（運命づけられ）、各器官で機能する細胞に分化して行く。その分化した細胞は、ある条件下では脱分化し、すべてのものに再分化する可能性があり、それを分化全能性と言っている。

発生・分化については古くギリシャ時代から考えられており、前成説と後成説として知られている。すなわち、前者は、卵または精子の頭部の中に親の雛形のようなものが入っており発生とはそれらが成長する過程であると考えた。一方、後者はニワトリの発生を肉眼で詳しく観察したギリシャ時代のアリストテレスに代表されるように、卵はもともと均質なもので発生につれて複雑な構造が生じてくるとした。17～18世紀にかけては前成説がその時代を風靡したが、19世紀に入ると前成説は影を潜め後成説が主流となっていく。

1924年にドイツのシュペーマンは種の異なるイモリの胚同士の間部分移植実験により、移植された胚から二次胚が誘導され、発生分化がその細胞や組織の置かれた

⁴ 『キャンベル生物学』小林興監訳、丸善株式会社、2007、p.272

環境要因によって起こることを証明し、二次胚を誘導する能力を持った原口上唇部をオーガナイザーと名づけた。その後、世界の研究者達は細胞の予定運命を決定するこのような誘導物質の探究に昼夜を惜しまなかったが、長い間誰もこの物質を明らかにできなかった。

シュペーマンがオーガナイザーの発表を行ってから 65 年目の 1989 年に、日本の浅島誠が中胚葉を誘導する物質がアクチビン A であることを突き止めた。この研究では用いたアクチビン A の濃度勾配により各種器官が分化すること（低濃度の方から白血球、骨格筋、脊索、心臓など）から、その応用面は広く、現代医学で問題となっている臓器再生における多くの可能性を示唆している。

2.4.4 遺伝

生物は自分が属する生物種を産生する能力により識別され、羊は羊、スマイルはスマイルというように形質（かたちや性質）は決まっている。さらに、子孫は同種の遠縁の個体よりも、両親によく似ており、ある世代からある世代へのこのような形質の伝達を遺伝と言っている。

ただし有性生殖のところでも述べたような仕組みにより、子の形質は両親や兄弟姉妹に似てはいるが、いくらか異なっている。人類は数千年にわたり自然界のこうした変化を注意深く見守り、望ましい形質を持つ植物を穀類、野菜、果実、果物などとして、また動物を家畜として育ててきた。このような種の類似性の変化を変異という。

（1）遺伝の法則

古来より、人類は人を含めた生物の類似性と相違性についての好奇心を抱いてきた。そのような中で、遺伝の法則を最初に見つけたのはメンデルである。彼はエンドウ豆を用い、種子が丸くて黄色であること、その反対の形質（対立形質）である皺が寄って緑色であることなど、この形質を決めている要因を要素と名づけた。後に、この要素はウイヘルム・ヨハンセンによって「遺伝子」と命名される。

メンデルの遺伝の法則は、大きく見ると分離の法則と独立の法則によって表されるように、一对の対立遺伝子は別の配偶子に分離し、複数の対立遺伝子は互いに独立に配偶子に分配される。その時、第一代に現れる形質を優勢形質、現れない形質を劣勢形質としている。その後、メンデルの遺伝の法則はしばらく世間の人々には理解されなかったが、1900 年ド・フリース、コレンス、チェルマクの 3 人によって、それぞれ独自に再発見された。

遺伝子の本体が何であるかという問いは続けられたが、最初は、当時の学問の主流

であったヨーロッパではタンパク質が遺伝子の本体ではないかと考えた研究者が多かった。例えばウイルスの構成要素を見るとタンパク質が90%、核酸が10%という成分比であり、当時の学問では、占有する成分の割合の多い方が、生命現象をコントロールしているのではないかと推測された。その後、遺伝子は染色体上にあるというサットン¹の提案や、グリフス、アベリーらの肺炎双球菌の形質転換の実験から遺伝子の本体はDNAではないかという推論が生まれてきた。しかし、この当時でも依然としてタンパク質が遺伝子の本体であるとする研究者が多かった。その後ハーシーとチェスのT₂ファージを用いたブレンダー実験やワトソンとクリックのDNAの二重らせんモデルとその半保存的な複製の提唱により、遺伝子本体のDNA説が研究者の間でも認められるようになり、現在のように「遺伝子の本体はDNAである」という事実となったのである（表3）。これらの事実を基に、この50年間に生命現象の解明は飛躍的に進歩した。

そして現在、ヒトの全ゲノムの解明により、人間の難病や生活習慣病を克服しようという努力が重ねられており、遺伝子レベルでのあらゆる生命現象の解明も進んでいる。またゲノムを中心とした生物の進化についての解明についても新しい試みがなされている。

その他、遺伝には致死遺伝子、複対立遺伝子、不完全優勢、伴性遺伝などの現象が知られている。

（2）変異

変異には環境変異と突然変異があるが、前者は個体変異であり遺伝しない。後者には染色体突然変異と遺伝子突然変異があり、いずれも次代に遺伝する。染色体突然変異には、染色体の数の変化と構造の変化がある。数の変化は倍数性、半数性、異数性があり、構造の変化は欠損、重複、逆位、転位、転座、付着、挿入などがある。遺伝子突然変異には塩基配列の変化が塩基の置換、欠失や付加によりコドンの読み枠（フレーム）がずれる場合がある。

（3）遺伝情報とその発現（形質発現の調節と形態形成）

ゲノムはそれぞれの生物に固有のものである（表4）が、生物の形態形成にはゲノムの遺伝子調節の仕組みが働いている。ヒト体細胞の染色体（2n）は46本（配偶子ではn = 23本）であり、ゲノムの大きさは約30億塩基対である。体の各器官のどこの細胞をとってもこの数に変わりはない。そこにあるゲノム上の遺伝子も全て同じである。それなのに、頭、心臓、肺、胃、腸、肝臓、腎臓、皮膚、髪の毛、爪、手、足などいろいろな組織や器官ができて来るのは、各組織や器官にある遺伝子の発現が調節され

ているからである。

表3 遺伝法則の発見からヒトゲノムプロジェクトまでの道のり

年	事 項
1865	メンデルが「遺伝の法則」を発見
1869	DNA の発見
1879	染色質（染色体）の発見
1900	メンデルの法則の再発見
1903	遺伝子が染色体上にあることが提唱される
1910-11	連鎖した遺伝子の解明が進む
1920	染色体が遺伝形質を伝達することが提示される
1928	形質転換の発見
1944	DNA がバクテリアの遺伝子であることの証明
1952	DNA がウイルスの遺伝子であることの証明
1953	ワトソンとクリックによる DNA 二重らせんモデルの提唱
1958	DNA の半保存的複製の実証
1961	遺伝暗号の解読
1962	クローンカエルの作出
1973	バクテリアにおける遺伝子組換えの成功
1975	DNA 塩基配列解析法の開発
1978	ヒト体外受精児の誕生
1981	最初のがん原因遺伝子同定
1983	ポリメラーゼ連鎖反応による DNA 増幅法の開発
1984	DNA 鑑定法の開発
1990	ヒトゲノムプロジェクトの開始
1996	クローン羊「ドリー」の誕生
2000	モデル植物シロイヌナズナの全ゲノム解読
2003	ヒトゲノムプロジェクトの完了

ヒトのゲノムのうち遺伝子として実際に働いているのはその3%程度（遺伝子数で21,000）に過ぎない。その塩基対以外のDNAは何をしているのだろうか。それは今ま

で不明であったが、最近の研究により、この機能している遺伝子を発現するための調節遺伝子である転写因子を機能させるために働いていることが分ってきた。(2.3.6.参照)

表4 ゲノムの大きさ

生物種	ゲノムの大きさ (億塩基対)	生物種	ゲノムの大きさ (億塩基対)
チンパンジー	36	ショウジョウバエ	1.8
ヒト	30	ミツバチ	2.7
マウス	25	カイコ	5
ニワトリ	13	イネ	4.3
アフリカツメガエル	17	シロイヌナズナ	1.3
フグ	4	コウボ	0.12
メダカ	8	センチュウ	0.97
ウニ	8	大腸菌	0.046

その生物が持っている遺伝情報の総体をゲノムという。その大きさは DNA の塩基対 (G-C、A-T) の数で表す。ゲノムという語は、遺伝子 (Gen) と染色体 (Chromosom) を意味するドイツ語から造語されたもの (Genom) で、英語では Genome と書く。

2.4.5 恒常性 (ホメオスタシス)

ホメオスタシスについては動物と植物でそれぞれ異なる。動物の場合は、外部シグナルの刺激に対して感覚器官や神経細胞でそれぞれの電気信号に変換し、それを脳の中枢に送り、知覚し、そこから指令を受け応答するようになっている。

感覚器官では、視覚、聴覚、味覚、臭覚、皮膚の感覚などの受容体からシグナルが各器官のシナプシスに伝わり、脳に入力され、脳の統合野から中枢神経を通して、末梢神経に送られ運動出力となり、その結果行動として現れることになる(図6)。一方、神経系のうちで自律神経系には交感神経と副交感神経があり、互いにバランスを取って、生体の機能を維持している。

神経系とならんで、動物の内分泌系におけるホルモンの働きは重要であり、それぞれの生物の生命維持に関与し、代謝系のバランスを保っている。

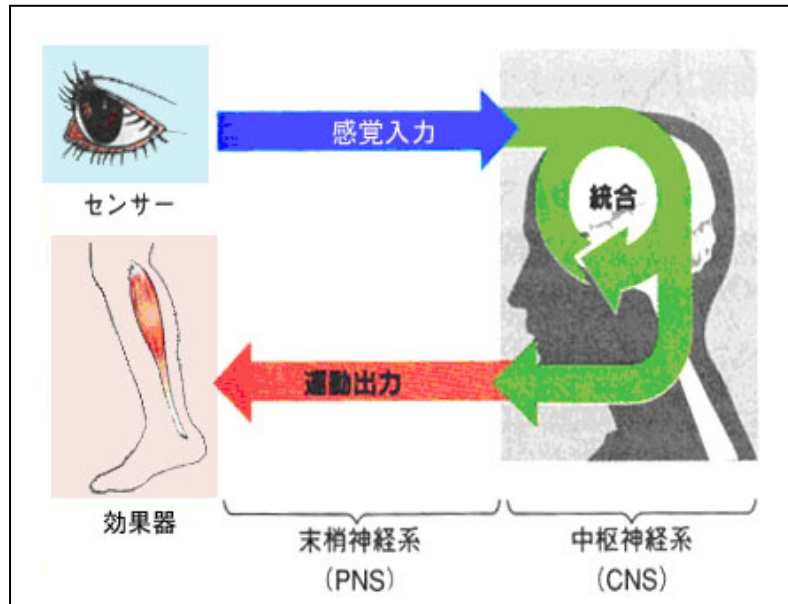


図6 神経系による情報の進行⁵

植物の場合は動くことができないので、環境への適応は優れている。光、重力、温度、水、化学物質などに対する応答が知られており、光屈性、重力屈性、化学屈性などはよく知られている。また、植物ホルモンは植物の成長制御に対し、それぞれの目的に適った働きをしており、農業などへの応用面も広い。

2.4.6 免疫

免疫は生物の生体防御の一方法であり、自己と非自己を認識するシステムである。進化的には魚類、両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類に至るまでであるが、哺乳類で最も発達している。抗原に対して抗体はリンパ球のB細胞で産生され、普通の免疫細胞と免疫記憶細胞ができる。後者は同じ抗原が再びやってきたときに応答して、それに対応する抗体を作り防御する（予防接種の原理）。マクロファージ（食細胞）に貪食された抗体に結合した抗原は、リンパ球で作られたT細胞に抗原提示され、キラーT細胞により抗原は完全に破壊される。この際、サイトカインは食細胞を活性化し、取り込んだ異物の破壊を助ける働きを持っている。

いかなる抗原に対しても抗体が対応できるメカニズムは、利根川進が分子生物学的手法により解明した。抗体はグロブリンタンパク質であり、L鎖とH鎖からできてお

⁵ 『キャンベル生物学』小林興監訳、丸善株式会社、2007、p.119

り、両方に可変部分が存在する。L鎖の可変部分の遺伝子は1500種類あり、H鎖の可変部分の遺伝子は3.6万種ある。両方を掛け合わせると5400万種類となり、これにより抗体がいかなる抗原にも対応できる仕組みを持っていることが分かる。利根川は1987年にノーベル賞、日本人で未だ唯一の医学・生理学賞を受賞した。

しかし、自然界にはエイズ、SARS、鳥ウイルス、プリオンなど人類がまだまだ対応できない抗原がたくさん潜んでいる。

【コラム2】エイズ

日本の高等学校の生物の教科書にはヒューマンバイオロジーが欠落しているが、先進諸外国（中国や韓国も）の教科書は全て、どの国も人体について詳しく述べている。それは高校生という精神的、肉体的に発達してくる段階で生徒自身の体を科学的に理解させることに重点が置かれている。例えば、米国の生物の教科書には、ヒトの健康維持、エイズ感染のメカニズム、喫煙と肺がん、向神経性薬物の脳にもたらす影響、アルコール中毒が胎児に与える影響などを科学的に説明し、「生物学」を学ぶことが如何に生徒達のこれからの生活に役立つかが具体的に書かれている。

さらに、先進主要国の中では日本だけが患者が急増している（特に若者の間で）エイズの問題についても、日本では、保健体育や家庭科で教えているが、これらの教科書の先生はエイズのメカニズムを理解しているとは思われない。オランダの高校「生物」の教科書ではそのメカニズムを生物学で科学的に説明し（エイズの遺伝子はDNAではなくRNAであり、逆転写酵素によって複製されているということを教えて）、コンドームを使って感染を防ぐ方法まで具体的に生物の授業で教えているのである。

2.5 生物社会の成り立ち

2.5.1 生物社会とは

生物は自然界で様々な集合を作っているが、動物の集合に対しては「群れ」、バクテリアや菌類に対しては「コロニー」、植物に対しては「群落」などの用語が使われている。このような生物の集合を構成している同種個体間には、普通、なんらかの相互作用がある。また、動物では、一見、個体間の距離が離れていて相互に関係していないように見えても、におい、音、身振り、発光といった様々な手段（信号）で自らの位置を他個体に知らせ、相互に関係を持っている場合が多い。そこで、同じ地域に生息していて、潜在的に生殖可能な同種個体群を「生物社会」と見ることができる。

2.5.2 生物における社会生活の出発点としての有性生殖

生物個体は、その体の維持活動を行っているばかりでなく、子孫に自己の遺伝情報を伝える生殖活動を行なう。自己の配偶子（卵あるいは精子）と他者の配偶子を合体させて、新たな個体を作る場合を有性生殖という。前節で述べたように、生物社会というものを、同種個体間の相互作用によって形成されている集団と見るなら、有性生殖における新しい個体への遺伝情報の伝達は、他個体との関わりで行なわれているので、社会的な事象の出発点と言える。なお、無性生殖では、自己の体だけ、あるいは卵だけで個体が増えるので、自己の再生産であり、有性生殖のような他者と関わった社会の出発点にはならない。

普通の動物の場合は動けるので、必要性に応じて個体同士が接触したり、離れたりすることができる。孤独性が強く、普段は雌と雄がまったく離ればなれに暮らしているような動物でも、繁殖活動の時期になれば、雌雄が接近して求愛し、そして交尾する。また、動物においては、生まれた卵や子どもが確実に育つように（子孫に遺伝情報が確実に伝わる）、親が子どもの世話をする行動がよく見られる。このような求愛行動や親による子の世話行動は、社会性の萌芽といえる。

有性生殖をする生物では、繁殖活動を血縁の近い個体のみで交配（内交配）で行った場合には、遺伝的な劣化が起こることが多い。それを近交弱勢というが、それを避けるために、多くの生物では非血縁者と交配（外交配）するのが普通である。有性生殖でできた子どもの遺伝子構成は、両親由来の遺伝情報の混合であり、通常、両親と子どもの血縁度は2分の1である。このような遺伝情報の混合によって、有性生殖の集団では、遺伝子組成は多様となっている。他方、無性生殖で作られた子どもは、いわば自己の分身であって（クローンといわれる）、基本的には元の個体とは遺伝子構成が同じであり、その集団の遺伝子構成は一様である。

2.5.3 生物個体の社会関係

最も単純な社会関係は、同種の2個体で始まり、社会的な形質とは、少なくとも他の1個体に影響を及ぼすような形質のことである。このように考えると、生物における社会性とは、ことさら特別なことではない。実際の生物社会を構成しているメンバー間の関係に様々な発達段階があり、それらの関係の強さは、個体間の相互依存性、協同性、集合性などを尺度にして見ることができる。

今、ある個体が他個体に与える影響を考えると、それは利己的、利他的、相利的（協

同的)、両損的の4種類に分けられる。動物の生殖活動において、通常の生物の有性生殖は、雌と雄の協同的(相利的)な作業である。なぜなら、その結果生じた子供には、両親からの遺伝子が伝達されているからである。

しかし、生物によっては、集団内の個体間の関係が、複雑な行動を介して行われ、結果として、個体間の利害得失が複雑になっているものがある。特に社会性の動物たちでは、多数のメンバーの利他行動によって支えられた複雑な社会が形成されている。その進化は血縁選択によるものと言われている。例としては、ハチ、アリ、シロアリなどがあり、それらは社会性昆虫と言われている。それらでは、大集団を形成し、多数の不妊のヘルパー(ワーカーや兵隊)がごく少数の個体の生殖活動を助ける生殖分業を行っている。このように集団の構成メンバー間で、繁殖にたずさわる程度の偏りが大きいような動物においては、社会性が発達しているという見方もある。

なお、ヒトの集団では、生殖分業はほとんど見られないが、個体間の相互依存性、協同性、集合性のどれをとっても大変大きいので、社会性が大きく発達していると言える。

2.5.4 異種個体間の利害得失

異種の生物間では、一方的な利他行動は発達し得ない。なぜなら、他種に全面的に奉仕するのみでは、自らの子孫を残せず滅んでしまうからである。異種の個体間での関係の多くは、競争、捕食、寄生などの関係である。このような一対一の関係は、その程度が強いと一方が他方の種を滅ぼしてしまう。しかし、そのような種間関係に対して、別種との関係が加わったり、生息環境の変動があれば、種間関係の程度は緩和されている。種間の相利的な関係は「共生」であり、自然界で動物同士、動物と植物、動物と微生物、植物と微生物などの間で多く見られている。例えば、昆虫類などでは、微生物との共生関係が普遍的に見られ、消化共生、栄養共生、防衛共生、発光共生などでは、共生微生物の働きが多岐である。多くの場合共生微生物は、昆虫の体内(細胞内)に生息している内部共生である。

2.5.5 人間と他の生物との共生

人間は文明を獲得することで、その個体数を膨大に増やし、地球上の他の生物を大きく圧迫してきた。人間のおかげで増えた生物は、人間の手によって改変された栽培植物や家畜などであり、また、害虫や雑草と言われるごく一部の生物たちである。今や、地球上で人間の影響のない地域はごく限られている。また、熱帯域では、熱帯森

林を伐採し、農地や牧場を拡大することで、多大な種数の生物が減少においやられ、また絶滅していつている。このような現状において、自然界における生物社会の成り立ちのメカニズムをもっとしっかりと理解することが大事である。そのためには、それぞれの生物たちは長い進化の歴史の中に由来しているものであり、「ひとたび失われた生物は二度とよみがえらない」ということを深く考える必要がある。生物の進化に対する畏敬の念は、現代人に最も必要な素養であると思われる。

2.6 生態系・生物圏の成り立ち

2.6.1 自然界における生物集団の構造レベル

地球上の何千万種とも言われる生物たちは、様々な地域環境に適応分布している。そして、それぞれの生物は、持ち合わせている生命情報を連綿と後世へと伝えようとしている。生物は非常に多様であり、例えば、緑色植物において大きさで見た場合、単細胞の藻類のようなごく小さなプランクトンから、北米の針葉樹セコイアのような高さが100メートル以上にもなる巨木まで、実に多様である。それぞれの生物は集団を形成している場合が多く、例えば、草原や森林などでは、同種の個体が群落を形成して、個体間の関係が緊密な場合が多い。また、生物は同種他個体とばかりでなく、異種の個体とも様々な相互作用を持っている。このような同所的に生息している生物の総体を、「生物群集」としてとらえることができる。

生物集団は、その性質とその大きさから、家族、群れ、群体、群落、混群、種個体群、群集などといった様々なレベルで認識することができる。自然界における各種の生物の保全や管理を図る際には、生物集団の成り立ちは、個々の生物が生息環境の中で巧みに適応した結果であること、その適応の背景には、長い進化の歴史があることを知ることが大変重要である。

2.6.2 生態系と生物圏

自然界における生物群集の種構成は、人間の干渉がなければ、その地域の無機環境および地史を密接に反映しているものである。また、生物群集を構成している生物種間では、様々な相互関係が成り立っている。まとまった地域や水域における生物群集と、水、大気、土壌などの無機環境を一つのシステムとしてとらえたのが「生態系」である。多くの地域では、場所が移って行くにしたがって、生物群集の種組成が徐々に変わっていくので、生態系の境界を明白につけることは容易ではない。しかし、海

洋中の島のような周囲とは環境的に隔離されたところでは、そこを島生態系として明瞭に認識することができる。近年では人為の影響が自然を大きく改変させていて、原始的な自然生態系が細分され、島化（孤立化）していく傾向にある。人間の影響の大きい生態系としては、都市生態系、水田生態系、畑地生態系、人工林生態系、牧場生態系など、数多くを認識することができる。

生態系の2大構成要素は、生物群集(生物的要素)と、それを取り巻く無機的な環境(非生物的要素)である。生態系を認識する際に重要な事柄は、以下の3点である。(1)生物的要素と非生物的要素は等しく重要である。(2)生物的要素と非生物的要素は互いに密接な関係にある。(3)生態系の一つの構成要素の変化は、影響の大小の程度はあっても、他の様々な構成要素の変化を導く。

地球の表面には、様々な生態系を構成要素とした最も大きな複合体としての「生物圏」の存在を認識することができる。生物圏が認識されている星は、今のところ地球のみであり、宇宙の中のかげがえの無い存在と言えよう。

2.6.3 生物群集における食物連鎖

自然生態系の構成要素である生物群集は、多数の生物種から成り立っている。そこでは独立栄養生物（一次生産者）である緑色植物が基礎生産を行い、その緑色植物を摂食する動物（消費者、あるいは二次生産者）、さらにその動物を摂食する捕食動物という具合に食物連鎖がみられる。通常、自然生態系におけるこのような食物連鎖の関係は、大変複雑であり、網目のようであるという意味で、食物網という用語も用いられている。食物連鎖の実際は、単純な1本の鎖のようなものではなく、いくつもの枝部分があり、それらが複雑につながって網目のような関係になっているのである。つまり、食物連鎖とは食物網を極端に抽象化してとらえたものか、あるいは食物網にある一つのつながりを指したものである。また動物は、寄生性の動物によって、体の外部や消化管内、あるいは体腔や臓器内に寄生されて、同化産物を摂食や吸収されたりもするが、寄生者にさらに寄生する生物がいる場合に、寄生連鎖といっている。なお、生きた植物から出発する食物連鎖を生食連鎖、植物の遺体から出発する食物連鎖を腐食連鎖と言っていて、生態系によってそれらの割合が異なっている。なお、最近、海洋生態系では食物連鎖の中で、微生物の位置が大変大きいことが指摘されている。

2.6.4 生態系における物質循環とエネルギーの流れ

生物に含まれるエネルギーは、食物連鎖の経路をたどって化学エネルギーとして移

動していく。そして、その化学エネルギーの一部が生物の活動によって使われると、結果として熱エネルギーになり、それは生態系から失われていく。このようにエネルギーは川のように一方向に流れ、再び戻ることはないが、そのことを生態系における「エネルギーの流れ (エナジー・フロー)」と称している。これに対して、生体物質を構成している元素は、食物連鎖を通じて移動していくが、やがて微生物や菌類などの分解者によって分解され、再び生産者に戻ることができる。いろいろな元素のこのような動きは、生態系における「物質循環」と呼ばれている。

例えば、生物の死んだもの、つまり植物の枯死体や動物の死骸などは、様々な微生物や菌類そして小型の動物などによって栄養源として利用され、最終的に二酸化炭素、アンモニア、塩類、水などの無機物に分解され、それらは再び植物によって吸収され利用される。炭素、酸素、水素、窒素、リン、ナトリウム、カルシウムなどといった生体を構成している元素は、生態系の中の食物連鎖そして分解過程を通じて大きく循環している。なお、最近、緑色植物の根圏で菌類が共生していることが、一次生産者である緑色植物の栄養吸収にとって大変重要であることが指摘されている。

2.6.5 生態系・生物圏に対する人間の影響

生物としてはたった一種でしかない人間であるが、文化を獲得し、工業・農業・漁業・林業などの各種の産業によって (時には戦争で)、膨大な種数の生物を含む生物圏の全体に大きな影響を及ぼし、また多数の生物を絶滅させてきた。現在の地球の生物圏中では、人間の現存量と活動量が異常に大きく、人間が改変した生物である栽培植物や家畜まで含めれば、大量の生物がヒトの産物なのである。そして、地球大気への二酸化炭素の放出や、放射性元素を含む各種微量元素の拡散に見られるように、人間の活動量は、何がしかの制限を設けないと、地球の全生物に取り返しのつかない被害を及ぼしかねないほどになっている。端的に言えば、不用意な人為活動によって、幾多の生物を絶滅に追いやって来たことか、また、ひとたび絶滅してしまった生物集団は、もはや決して甦らないことを、現代人はその素養として深く自覚すべきである。

第3章 ヒトという生物

3.1 脳と心

3.1.1 ヒトは知性を持った動物である

われわれ人間を生物種として見る場合には、通常「ヒト」と書き慣れている。ヒトは、動物のうちのサル仲間を総称する「霊長類」の一種であるが、一般的には「人間」対「動物」と対比され、「人間は万物の霊長である」とも言われるように、際だった優れた能力である「知性」を持つと見なされる。「知性」とは極めて多義的な概念ではあるが、それはヒトの脳神経の最も高次で複雑な機能の発露であると、とりあえず操作的に定義してみることができるだろう。そうすれば、まずは生物に脳神経が如何に出現して進化し、それに伴ってその最高次の機能がどのように変容して、現在のヒトの知性発現に至ったのかの歴史を振り返れば、ヒトの「知性」の特徴を生物的に記述することができるに違いない。そして、その「知性」を持った生物はやがて文化・文明を創造して、その棲息環境を大きく変容させてゆくことになり、現在のわれわれがある。「知性」を持ったヒトの振る舞いは他の生物とは何が決定的に異なるのか、われわれがこの地球上で「生きている」ということはどういう意味を持っているのか、について科学的に考えてみる。

3.1.2 「脳」は体が“動く”ために創られた

脳は、下等動物の原初的神経系に由来する情報処理装置である。生物は神経系を進化させて何を獲得したのだろうか。それが無い生物と比較すれば一目瞭然である。植物は地球上で大繁栄しているが無脳である。植物は代謝し成長するが、動かない。感覚された外界の環境に反応して最適に「動く」のが動物である。摂取すべき食餌があれば接近して捕食し、捕食者が接近すればそこから逃避し、自己の棲息に適した環境を求めて移動する、といった具合である。感覚運動系を最適制御すべく「情報」を記号化し計算する装置として神経系が進化したのである。体が大きく感覚運動系が複雑化すると、より高度な情報処理が要請されるので、その負荷に応ずべく神経系の上位端に中枢としての脳ができた。

このように、単細胞動物から哺乳類に至る動物種の運動の基本は、自らの「移動」という「自動詞的行為」である。動物の運動器官は、身体を効率的に移動させるべく最適化されている。その感覚器官は、運動をスムーズに遂行するための情報を環境か

ら収集すべく最適化されている。神経系はこれらを環境に最適な対応関係で繋いでいる。すなわち、動物の運動は、環境の中に組み込まれ最適化された、一連の「自然現象」の一環である。

ヒト(と霊長類の一部)を除くほとんどの動物種について上記の事情が当てはまる。このように、環境の変化が先ず起こり、それに対応した最適の反応としての動物の行動パターンのなかに、われわれは意志や感情の座としての「心」を感じることは少ない。その身体や行動を擬人化して、彼らに心があるかのように表現することはできるが、脳神経系の作用としての感覚運動制御の範囲内においては、心を想定する必然性は無い。言い換えると、この生物の「自己」は自然の中に溶けていた。

3.1.3 まず「手」と「眼」が“進化”した

それでは、ヒトの「知性」の創造に至る進化は、どのように起こったのだろうか。脳神経系がそれを創り出すべく進化したのであるだろうか。事態はそうではないらしい。まず最初に起こったのは、運動器官と、感覚器官の進化であった。脳神経系はそれに適応すべく、後から進化したのである。

手は前肢の遠位端である。脊椎動物の前肢は、魚類の胸鰭から進化したらしい。胸鰭は推進力と姿勢の制御を司る。脊椎動物が上陸して、両生類、爬虫類と進化しても、前肢は一貫して身体の移動に寄与する。鳥類では翼に変化するが、やはり空中移動を司る器官である。哺乳類でも身体を支え移動することが前肢機能の主体である。その末端である手は、脊椎動物が推進力を産み出すべき環境との接点として適応進化した。例えば、水や泥を掻くため膜を張り、地面を蹴るためかぎ爪をつけ、羽ばたくために羽毛を生やしたりした。これらの動物では、前肢は体の横あるいは下方に付着して、顔より前に出ることは希なため、ほとんどの脊椎動物は手先を見ることはできなかった。つまり、前肢および手の制御は、専ら規定の運動プログラムと体性感覚性フィードバックに頼っていた。

樹上生活者の霊長類が出現すると、枝をたぐり寄せるために四肢が長く伸び、枝を把持するために指は長くなり平爪をつけ、対向する親指を獲得した。空中で枝をうまく掴むためには、その位置と形状を良く観て確かめ、それに合わせて手を伸ばさなければならない。長く伸びた四肢の先端は、こうして常に視界に入るようになった。特に前肢とその末端で器用に動く手指は、顔前の精緻な視運動コントロール下におかれることとなった。

眼も変化して、正確な手の到達と把持運動を助けた。両目が前を向き、両眼視野の

重なりが拡大し、奥行き知覚が正確になった。多くの動物種では、両目は左右に分かれて視野を広く確保する方が有利なので、両眼視は一般的でない。例外は、獲物をまず視覚的に捕捉する肉食獣や猛禽類であるが、彼らの狩りは、近くの獲物に前肢を伸ばして到達するのではなく、むしろ遠くの獲物に移動運動によって飛びかかる。

進化した霊長類の前肢・手・視覚能力は、さらなる特徴を獲得した。前肢のより自由な回内、回外運動によって、掌を顔に対面させられるようになった。自ら精緻に制御可能な身体部位である手指によって自由に形作られる「空間」が、それを視覚的に精巧に解析することが可能な視覚装置である両眼の直前に出現したのである。かくして、霊長類は中心視野で立体視が一番正確にできるところで精緻に手指を動かす能力を獲得した。これにより、手に集中した精巧な体性感覚フィードバックを視覚的に確認できるようになった。「触覚探索」が可能になり、手は感覚装置にもなった。われわれは、手探りで物を探し、空間を知覚し、それらを視覚情報と照合することができる、視覚的に知覚した空間を手運動に伴う体性感覚で検証確認することもできる。

3.1.4 「心」は物を“動かす”ために想定された

動くという「自動詞的行為」では、身体運動を制御する「主体」としての装置たる脳神経系と、制御対象たる「客体」としての身体運動器官が、動物の身体の中で不可分に統一されている。つまり、脳神経系で行われる情報処理の効果が及ぶ範囲は、基本的には自らの身体の内部に常に一体となって閉じているので、主体と客体を分離して考えるのはむしろ不合理であった。

霊長類が出現し、手が移動運動から解放されて、自己以外の環境中の事物を操作し、その結果を両眼視で詳細に確認できるようになると、脳内神経回路もそれに適応して進化し、事態は変化し始める。動物の身体運動は、物を「動かす」という「他動詞的行為」をも担うようになった。すなわち、動かす「主体」たる身体と、動かされる「客体」たる身体外の事物が物理的に分離したのである。しかし、まだ意志や心を想定する必然性はない。その霊長類は、環境からの直接的要請に従ってそれらを動かしているに過ぎないからである。

様相が一変するのは、ヒトの祖先が、外界の事物を手を持ち、それを身体の延長として動かそうと、道具の使用を始めたときだったろう。このとき、道具が身体の一部となると同時に、身体は道具と同様の事物として「客体化」されて、脳内に表象されるようになる。自己の身体が客体化されて分離されると、それを「動かす」脳神経系の機能の内に独立した地位を占める「主体」を想定せざるを得なくなる。その仮想的

な主体につけられた名称が、意思を持ち感情を抱く座である「心」というものではないか。

3.2 文化と社会 —非遺伝情報の創出—

3.2.1 「文化」はヒトに新たな“進化”をもたらした

自己の脳神経の機能の内に「心」が想定されると、主体は身体の永続性に気づき、次第に自己の概念が確立されてゆく。また、他者の内にも心の存在を想定せざるを得なくなる。さらに、「動かす」対象は事物を超えて、他の主体たる他者にも及ぶようになり、心は相互作用を始める。こうして、心を持った複数の主体は相互に心を認め合い、いわゆる「心の理論」が芽生える。そして、共感、忖度、同情、模倣、教育、などといった心の活動を基盤とした行為を通して、人間性豊かな文化社会が形成され、その社会を通してまた心の作用がより発達した。

このような心の作用は、やがて再帰的に自己をも制御対象として自制心や克己心に基づく精神文明を産み出し、またもう一方では自然を操作対象とした科学技術文明が発展してゆくことになる。このような精神活動を、われわれは現在「知性」と呼んでいるのではなかろうか。われわれの脳が自分自身に対する「メタ自己」の視点を獲得し、時空間内で独立した合理的な、自由意思を備えた自己の相互作用によって、現代の知性は成り立っているのである。

心に宿る自由意志は「主体的」に周囲の環境に対して働きかけるようになった。これまでは、環境からの直接的要請に応じてそれに適応するように動いていた動物は、自らの環境を快適にするためにそれを「目的」的に変化させるようになったのである。ここに、心を持った知性が環境を自らの都合の良いように変化させ、その創られた環境に合わせてまた体と心の在り様に変化する、といった輪廻が形成された。現代文明社会におけるヒトが生息する地球環境を見渡してみると、全くの自然はほとんど見あたらない。われわれは、これらの人工環境に適応すべく変化してきたのである。

物理的な地球環境ばかりではない。ヒトは自分自身も変化させた。手の延長としての道具に始まり、眼の延長としての鏡や望遠鏡を発明し、記憶能力の延長としての書字を発明し、自己の様々な機能を外在化させて、知性によって形作られた「文化」の中に蓄積してきた。もはや、情報や知識は世代を超えて共有され、「教育」によって伝承されるようになったのである。かつては、遺伝子情報の中に蓄積され、身体とともに進化してきた生物が、いまや社会環境との相互作用の中で、新たな進化の形を獲得

したのである。

3.2.2 「知性」は再び自己を“溶け込ませ”新たな何かを創る

現生人類は進化の最終段階ではなく、未来へ向けて進化発展を続ける途上にある。われわれの（道具を使う）心はどこへ向かうのか。最初の道具は「運動器官」である手の延長だった。次には「感覚器官」の外在化たるカメラや探知機を使いこなした。さらに絵や文字による記憶や、計算機による思考などといった「脳神経」の機能さえも外在化させてしまった。そして今、外在化させた脳神経の機能は、電子通信によってネットワーク化されつつある。そこでは、個々の「主体」の意思は身体から離れ、機能別にネットを介して自律的に相互作用し、千切れた自己の切れ端が仮想社会で共有され融合される。そして操作された外なる自己は、既成事実となって再び内なる自己へ回帰する。個の行為は再びネットワーク現象の一環となる。

これまで、心と自己は物理的な脳と身体を拘束条件として統一されていた。身体を離れ、浮遊する多数の部分的自己は、再び電子社会の中に溶け込んでゆく。「メタ自己」によって自然環境からの独立を獲得した自己は、再び電腦ネットワークという新たな自然環境の中に埋没し個としての独立を失ってゆく。そこでの自己の行為は、働きかける動作や受け身の状態などを包括する「用言的行為」になってゆくだろう。「心」が体を離れた時、それはどこへ向かうのか。科学技術と現代的知性を持った人間の脳と心の集合体は、直接相互作用する脳の集団を操作する主体としての新たな「何か」を創造して、より高次で複雑な脳神経機能の新たな階層を切り開いて行くのであろう。

【コラム3】自分と他人（「自己」と他の「自己」）

動物の行動は、直近の環境状況からの当面の要請や、そこから湧き起こる感情などに突き動かされるように、刹那的ではあるがその場に即して最適にかつ最も効果的に発動される。動物の行為にも、「意図や目的」を想定することはできるかもしれないが、それは行為する主体というよりも、むしろ、その場、周囲の環境の中にある。そして発動される「行為の形式」は、与えられるべき状況に即して予め用意されたレパートリーの中から最適解が選択されて自動的に発現すると考えるのが適当に見える。即ち、動物の行動は、目的と行為が分かち難くセットになっており、それを発動する主体は、環境の中で自明に定義されてしまうので、「自己」としてみずから意識する必要はない。

ヒト以前の動物の「自己」はその身体を制御する脳の回路網の中に溶けており、そ

こから滲みだした部分がさしあたってそこにある「他者」と共鳴していた。ヒトでは、それ自身を自己の中にある「他者」の視点を持って再発見することによって、内省的で継続的な「自己意識」が芽生えたのではないだろうか。高度な人間精神の発露たる文明的行動について再考すると、行為の主体（「自己」あるいは「他者」）の意図、それを発動する原因となる状況と、行為そのものの型式とが、明確に分離して記述可能であることに気づく。言い換えるとヒトの脳には、企画者の趣意書、工程設計図と、その行為を発動すべき状況、それぞれが意義を持って独立別個に存在し得るのである。これは、霊長類の一種が人類へと進化する過程のどこかで獲得されたと考える以外にはない。

そもそも、一体われわれは、幾つの「自己」を持っているのだろうか。感情に突き動かされる行為、「他者」との即時的関係性に依拠する行為、環境からの緊急要請に呼応する行為。これら各種の行為を担う別個の神経系それぞれに、その行為を発動する主体たる「自己」を想定することができる。脳内に分散して表現されていた、各種の自己が、偶発的行為によって、連携し、ネットワークとした全体的な「統一的自己」を産み出したのではないだろうか。翻って、動物では何故この様なネットワークが生まれなかったのだろうか。自然の一部として環境と一体化した動物的「自己」は、その過酷な野生環境を生き延びるのに、統一を図る余裕も必要性も無かったであろう。ところがヒトになって、家族愛により、社会により、安全が保証され、好奇心による冒険を許される中で、内省的な「統一的自己」を産み出す余裕が生まれたのではなかろうか。しかし、この安全な社会は、人間的「自己」の連関の産物でもある。

3.3 学習と教育 —非遺伝情報の継承—

3.3.1 ヒトが獲得した文化伝達手段 —教育—

生物としてのヒト (*Homo sapiens*) は、地球上のあらゆる生物同様、遺伝子 (DNA) の情報を活用しながら、タンパク質という機能素子を用いて生命活動を維持している。また身体の構造は多くの脊椎動物と共通しており、その基本的な機能もまた多くの共通点を持っている。このようにヒトは、生物としての一様性 (共通性) を示しつつも、同時にヒト固有の特性も発達させてきた。その大きな理由 (原因) が脳 (大脳) の発達にあることは明らかである。このことによってヒトは、環境によりよく適応する手段を発明し、地球上にその生存範囲を拡張し、個体群サイズを拡大してきた。

アフリカでヒトの祖先とチンパンジーやボノボの祖先が分岐し、直立二足歩行を始めたのは約 700 万年前であるが、250 万年前頃には脳の大型化（体に対する脳の相対的な大きさの増加）と石器の作製が始まりホモ属の出現となった。その一部は約 180 万年前にユーラシア大陸に進出し、160 万年前頃には東アジアに到達している。火の使用は約 80 万年前に遡り、積極的な狩猟は少なくとも 40 万年前には始まっていたが、アフリカでヒトが誕生したのは約 20 万年前に過ぎない。ヒトは恐らく 7 万 5 千年前頃にはシンボルを扱い抽象的な思考をする能力を獲得し、音声言語の使用も始めたようである。知性の獲得である。4 万年から 3 万年前には、彫刻、絵画、音楽（楽器の製作）も始まっている。ヒトの一部は 10 万年ほど前にアフリカを出発し、歩き歩いてユーラシア大陸からベーリング陸橋（当時は氷期で海水面が下がり現在のベーリング海峡は陸続きであった）を経てアメリカ大陸に入り、約 1 万 3 千年前には南米の深南部にまで達している。この長い旅は新たな獲物を求めてのことであつたろうと言われていたが、ヒトが侵入すると、ほぼ時を同じくしてその土地にいた大型の哺乳類や大型の飛べない鳥が激減・絶滅している。人間による狩猟と、気候の変動とが重なったことであろうが、ヒトは行った先々でこれらの動物を食い尽くしてはさらに新天地を求めて移動したのであろう。約 1 万年前には本格的な農耕が中東や中国などで始まり、農耕に適した大河の流域には多くの人が集まって文明が栄えた。また、農耕の開始とほぼ並行して、人間は動物を飼い慣らして家畜にする術も手に入れた。(3.4.1.参照)

知性の獲得と文明社会の形成は、発達した脳がもたらしたものである。ヒトの脳は体重が同じ他の霊長類の約 6 倍の大きさがある。また、重量の上では体の約 2% であるが、エネルギー消費の上では 20-25% に達する。この値は、他の霊長類では 8-10%、多くの哺乳類では 3-5% 程度に過ぎない。このように大型で活発に働く脳は、知性を初め他の動物には見られないいくつかの特徴をもたらした。そのことを象徴するのが、ヒトの優れた学習能力に支えられた、体外への情報の蓄積および時間・空間の制約を越えたその共有である。このような意味で、ヒトは原核生物、真核生物、多細胞生物に続く第四の生物であると言えよう。

さて、このように地球上で急速な発展を遂げてきたヒトは、増大する情報を共有し、利用するために、獲得した知識や技術、思考の方法、価値などの文化を、体系的に後生に伝える方法を見いだした。それが「教育」と呼ばれる体系的・系統的な文化伝達様式である。経験に基づき行動様式を変更する能力、すなわち学習する能力を持った動物は少なくないが、次世代を積極的に教育するのはヒトだけである。教育は恐らく母子間にはじまり、徐々に広がって社会として組織的に行うに到ったものであろう。

組織的な教育も、古代ギリシャのソクラテスにおける問答法に見られるように、当初は対一の形態の中でそれは行われた。しかしながら、社会が発展し、複雑化するのに伴って、伝達すべき知識や考え方の量が増大し、効率的にこれを行う必要が生じてきた。ここに学校教育制度が確立し、長い時間の流れの中で蓄積してきた文化遺産（学習成果）を飛躍的に次代に伝える方法を獲得したわけである。このことによって第四の生物ヒトは、地球上でさらなる飛躍を遂げることとなる。

3.4 食の確保 — 農耕 —

農業とは、土地を耕して畑や水田を作り、そこに穀物や野菜や綿などの有用な作物を植え、これを害虫や病気から守り育てて、収穫をする一連の作業である。約1万年前に始まった農業は食料の生産と保存を可能にただけでなく、人間の生活様式を大きく変え、文明を育み、科学技術を育てた。

3.4.1 農業の歴史

人間は、誕生以来長い間、狩猟採集生活を送ってきた。そして、誕生の地であるアフリカからユーラシア、南北アメリカ、オーストラリアと世界中に広がった。約1万年前に氷河期が終わって気候が温暖化し、狩猟の対象であった大型動物の多くが絶滅した。そして、この頃から中東と中国などで農業が始まり、その後世界各地に広がった。農業は突然に始まったのではなく、狩猟採集生活の中で、例えば有用な実をつける樹木の周囲の雑木や雑草を取り除くことで多くの実をつけさせ、食用になる実や根を持つ植物があればこれを一箇所に植え替えて守り育て、優れたものを選び出すなどの原始的な農業の経験や知識の蓄積を生かして、次第に農耕生活に移行したと考えられる。

狩猟採集時代にはその日に食べる食料を集めれば一日の労働は終わった。余分に働いてたくさんの食料を集めても、保存ができなければ意味がない。当時は人口が少なく、広い土地にわずかな人間しか暮らしていなかったために、少ない労働時間で必要な食料が手に入ったと考えられている。農業時代に入ると多数の人間が集落を作って定住した。農作業を1年中続けても、年に一度か二度の収穫期以外には穀物が手に入らないために、穀物を貯蔵する必要が生まれた。貯蔵した穀物は他の食品や道具などと交換ができる財産になった。また、十分な食料が得られるようになると、人口が増加した。

農業には、作物の生育に適した気候、耕作のしやすい地形、十分な水、栄養分が豊

富な土壌などの条件を備えた土地が必要である。古くから農業が行われたチグリス・ユーフラテス川、インダス川、黄河、ナイル川など、大きな川の流域には上流から流れてきた栄養豊富な土が堆積した広く平坦で農業に適した土地であった。そして、これらの場所で最初の文明が生まれた。

農業の時代になると男女の仕事の分業が進み、男性優位の社会になったと言われる。狩猟採集時代にも男性は主に狩猟、女性は主に簡単な農作業を含む採集という分業があったが、食料を得るという点では採集の方が確実であり、男女の地位は同等だった。農業の時代になると、自然の土地を開墾して農地にし、これを耕すという農業の労働は厳しいために、農作業の中心は体力がある男性にならざるを得ず、女性はそれ以外の補助的な仕事をするという分業が一般的になり、これが女性の地位の低下につながった。

しかし、農業労働は男性にとっても過酷であった。これを助けたのがウシやウマなどの家畜である。こうして重い鋤を自分の力で引いて土地を耕す重労働は大きく軽減された。そして20世紀に入ると農作業にトラクターなどの機械が導入され、化学肥料と農薬が使用され、作物の新しい品種が開発され、生産量は大きく増加して農作物は世界に流通する国際商品になった。現在は工場生産方式の土を使わない水耕栽培や、室内飼育設備での多数の家畜の飼育が行われるなど、農業の一部は自然から離れる動きもある。

3.4.2 日本の農業

約3万年前、日本人の祖先はナウマン象やヘラジカなどの大型動物を獲物にして、狩猟採集生活を送っていた。氷河期が終わりに近づいた1万8千年ほど前には気候の変化や狩猟などの影響でこれらの大型動物は絶滅し、人間は生き残ったシカやイノシシを獲物にするようになった。1万年前には気温はさらに上昇し、森林も変化して、クリやクルミなど食用になる木の実が増えた。ドングリやトチの実などはあく抜きをすれば食べられるので、火と土器を使った調理が始まった。また海岸線では魚介類を食用にし、その跡が貝塚として残っている。森林を焼き払ってアワなどの雑穀を栽培する農業も始まり、人々は集落を作って竪穴式住居に定住するようになった。

1万5千年ほど前に中国で始まった稲作は2500年ほど前に日本に伝わった。多くの人が集落に集まり、水田と水路を作り、銅や鉄で作った農機具を使って本格的な農業が始まった。稲とともに大陸からウシが伝えられ、続いてニワトリが入ってきた。集落の中には身分制度ができて支配階級が生まれ、農耕地や食料の奪い合いなどで集落

の間の争いが激しくなった。

この時代の遺跡から発掘された人骨などから推定すると、当時は乳幼児の死亡率が高く、約半数が10歳までに死亡し、成人の寿命も40歳程度、ゼロ歳児の平均寿命は10歳代だった。ちなみに大正時代には10歳までの死亡率は約25%、平均寿命は40歳代であった。現在は10歳までの死亡率はわずかで、平均寿命は80歳近くである。

その後、新たな農耕地の開拓、作物の品種改良や新しい作物の導入、灌漑の整備などが行われ、農地は次第に広がり、生産量は増加した。しかし、天候不順や害虫の大量発生のために不作になり、多くの餓死者が出ることもあった。正確な記録が残っている江戸時代には大きなものだけでも10回の飢饉があった。特に享保、天明、天保の飢饉は三大飢饉といわれ、数十万人の餓死者が出た。草根木皮を食い尽くし、家畜野獣も姿を消し、さらには餓死者の肉を食べたという悲惨な記録もある。ほとんどの場合、天候は翌年には回復したが、栄養失調による体力低下や疾病、そして種籾を食べ尽くしたために翌年の稲作ができないなど、飢饉の影響は何年も続くことが多かった。明治以後、特に昭和に入ってから農薬と化学肥料の使用、農機具の発達、稲の品種改良などにより米の生産量は大幅に増加し、飢饉の危機は遠のいた。

3.4.3 世界の人口と食料

キリストが誕生した頃には約3億人だった世界の人口は、それからゆっくり増加し、英国で産業革命が進んでいた1800年に10億人になった。ところがその後の200年は「人口爆発」と言われるような大幅な増加を示して現在の約67億人に達した。2050年ごろには92億人に達すると言われる。世界の人口の22.3%はインドなどの南アジア、20.9%が中国、13.4%がアフリカ、9.4%が北ヨーロッパ、8.6%が東南アジア、8.6%が中南米、5.2%が北米に分布する。

このような急激な人口の増加をもたらした最大の要因は農業技術の発達による食糧の増産であり、こうして増えた人口を支えているのも農業である。現在の農耕地面積は、地球の陸地面積128億ヘクタールの約12%に当たる15億ヘクタールである。食用作物の種類は主食の米、小麦、ジャガイモなどの根菜類、主に家畜のえさに使われるトウモロコシ、主に油をとるための大豆、そして野菜、果物、お茶やコーヒーなどの嗜好飲料などである。これらをすべて合わせた世界の農業生産量は約44億トン。このうち、米、小麦、トウモロコシ、ジャガイモ、大豆の5種類の主要作物の合計が約20億トンである。このように、人間はわずかな種類の作物を主食にしているが、なかでも世界人口の約半数に当たる30億人が米を主食としている。ちなみに主食となる

食料を「食糧」という。



図7 世界人口の増加⁶

2000年には世界全体で約20億トンの小麦や米などの主食になる作物が生産されている。これを世界人口67億人の一人当たりになると約300キログラムになり、生きていくためには十分な量である。しかし、アジアやアフリカの開発途上地域では食料が不足し、人口の12%が低栄養状態にある。これは穀物の多くが先進諸国で消費され、さらにその約1/3がウシやブタの飼料として利用されているためである。食用肉1キログラムの生産のためには、鶏肉で4キログラム、豚肉で7キログラム、牛肉で10キログラムの穀物が必要である。今後、中国や東南アジアなど途上国の経済発展に伴って畜産物の消費が拡大し、飼料用穀物の需要が増加すると見込まれる。

日本では、カロリーベースで計算すると食料の約60%を輸入に頼っている。1億2000万人の人口のうち、自国の食料で養うことができるのは約5000万人で、これは江戸時代の人口3000万人より少し多い数である。日本が今後も食料を確保していくためには、国際情勢を安定化し、世界全体の食料事情の悪化を防ぐことが必要である。

3.4.4 畜産業と漁業

人間は多くの種類の動物を飼い慣らした。最初に家畜になったのはイヌで約1万

⁶ 国連人口基金 http://www.unfpa.or.jp/p_graph.html

2000 年前、続いて1万年前にヤギとヒツジ、8000 年前にウシとブタが、4500 年前にニワトリが家畜化された。こうして人間はウシやウマの労働力だけでなく、乳、肉、卵などの食料、そして羽毛、皮革、毛糸など衣料や住居の材料を手に入れた。さらに、家畜の排泄物は肥料として農地の維持に欠かせないものになった。

2004 年の統計では、世界には 164 億羽のニワトリ、13 億 6 千万頭のウシ、10 億 3 千万頭のヒツジ、9 億 4 千万頭のブタ、7 億 5 千万頭のヤギなどがある。このように多数の家畜を飼育するためには広大な土地が必要であり、放牧地の面積は農耕地面積の 2 倍以上、陸地面積の 20%以上を占めている。また農耕地の約 1/3 は家畜飼料を生産するために使われている。

家畜の飼育は地域差が大きく、ニワトリは世界全体の 25%が中国に、次いで中南米に 15.1%、北米に 12.8%、東南アジアに 12.2%分布する。またウシは中南米に 27%、南アジアに 20.5%、アフリカに 16.9%、北ヨーロッパに 9.1%、北米に 8.1%、中国に 7.5%分布し、ブタは中国に 49.3%、北ヨーロッパに 16.2%、中南米に 8.6%、北米に 7.9%、ヒツジはアフリカに 23.6%、オーストラリア・ニュージーランドに 14.2%、中国に 13.3%、南西アジアに 13.1%分布する。

表5 世界の食肉および牛乳消費量の増加（単位：100 万トン）⁷

地 域	食 肉		牛 乳	
	1983 年	1997 年	1983 年	1997 年
中 国	16	53	3	10
インド	3	4	34	60
その他の西アジア	1	2	1	1
その他の南アジア	1	3	11	21
東南アジア	4	9	4	6
ラテンアメリカ	15	26	35	54
内ブラジル		11		20
西アジア・北アフリカ	5	7	21	25
サハラ以南アフリカ	4	6	12	17
途上国	50	112	122	198
先進国	88	99	233	254
世 界	138	211	355	452

⁷ FAO データベース

ヒンズー教は牛を神聖な動物として牛肉の食用を禁じ、イスラム教では豚を不浄な動物として豚肉の食用を禁止している。しかし、そこには農耕地帯で牛を食用にしまうと耕作が難しくなること、そして穀物が少ない地域で豚を飼育すると人間の食料が不足する恐れがあることなどの理由もあると考えられている。キリスト教は人間が家畜を初め動物を利用することを許容し、仏教は無駄な殺生や牛や豚など四本足の動物の食用を禁じている。

国際連合食糧農業機関（FAO）によれば、2005年には現在の世界の13億人が畜産業に従事し、その生産高は農業生産全体の40%になる。畜産業が大きく発達したのは1970年代以後であり、特に1980年代から2004年までの間に世界の食肉の生産量はほぼ倍増して2億6000万トンに達した。このような生産の急増の原因は人口の増加によるものだけでなく、主に発展途上国の都市化と収入の増加により畜産製品の消費量が増加したためで、特に中国、インド、ブラジルの伸びが大きい。このような需要の増加に対応するために畜産の方法が大きく変化して、かつての野外での牧草による家畜の飼育から、屋内での配合飼料による多頭羽飼育が中心になった。これをFAOは「畜産革命」と呼んでいる。今後の世界の食肉生産は2050年には4億6500万トンに倍増し、乳生産量も5億8000万トンから10億430万トンに増加すると予測されている。

畜産製品と並んで重要な動物性食品が魚介類である。2001年には世界で約9000万トンの魚を漁獲している。その内訳は中国が突出して多く、5100万トン、2位のペルーが800万トン、以下、日本が610万トン、インドが600万トン、米国が540万トン、インドネシアが530万トンなどである。日本の食用魚介類の自給率は2005年には57%しかなく、世界一の魚介類の輸入国である。

3.4.5 農業を支える科学と技術

農作物の安定した供給のためには農耕地や灌漑の整備などとともに、優秀な作物を作り出す育種と、作物を病害虫から守る農薬、そして作物に栄養を与える肥料の改善などを実現するための農学と農業技術が必要である。

(1) 育種

農作物は収量が多く、病害虫や環境の変動に強く、味や色や形がよく、栄養価が高いなどの多くの優れた性質を持つものが望ましい。このような農作物を育てる技術が育種である。その方法は突然変異育種と呼ばれるもので、偶然に生まれた優秀な性質を持つ農作物と、別の優秀な性質を持つ農作物を掛け合わせて、長い時間をかけて両方の性質を兼ね備えた農作物を作り出すものである。この方法は人間が農業を始めた

ときから現在まで、何千年にもわたって行われてきた。家畜についても同じ方法が使われている。

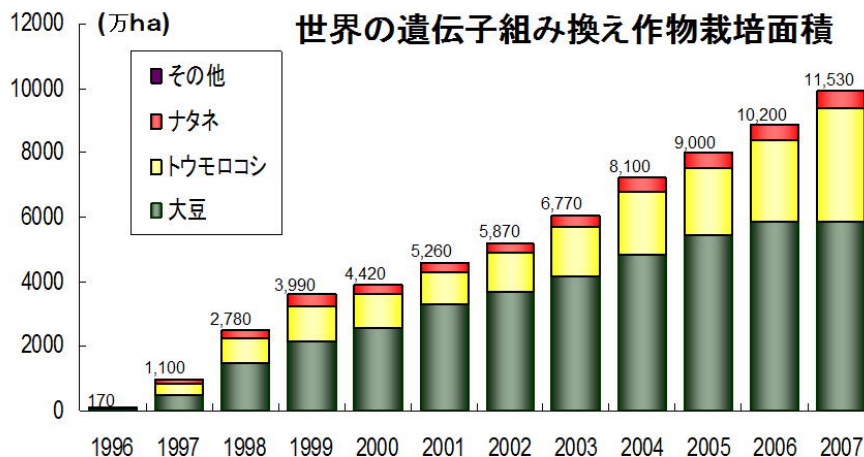
その後、農作物に放射線を照射して人工的に突然変異を起こさせて、その中から偶然に生まれた優秀な性質を選び出す放射線育種も開発された。そして最近生まれたのが、目的とする優秀な遺伝子を作物に人工的に組み込むことで短時間に効率よく育種を行う遺伝子組換え技術である。この方法を使って害虫に強い作物や除草剤で枯れない作物などが実用化され、米国では遺伝子組換え大豆の栽培が全体の90%を超えるなど、世界各国で栽培されている。しかし、日本ではまだ一般化していない。

【コラム4】 遺伝子組換え農作物

1996年に遺伝子組換え技術で作られた新しい作物が商品化されたことをきっかけに、遺伝子組換え作物は急速に世界中に広がった。遺伝子組換え農作物等のほとんどがトウモロコシ、ダイズ、ナタネ、ワタの4種類であり、従来の技術では得られなかった除草剤耐性（特定の除草剤を撒いても枯れない）や害虫抵抗性（生物農薬成分を植物体内で作ることにより害虫の被害を受けにくい）といった新たな特性を備えている。

遺伝子組換え作物を栽培している国は2007年には世界の23カ国であり、その栽培面積は米国、アルゼンチン、ブラジル、カナダ、インド、中国の順で広い。世界の栽培面積は11530万ヘクタールであり、日本の農地面積480万ヘクタールの24倍に当たる。主要生産国である米国では、ダイズの約9割、トウモロコシの約7割、カナダではナタネの約8割が遺伝子組換え品種である。世界の総栽培面積に占める遺伝子組換え作物の割合は、大豆64%、ワタ43%、ナタネ20%、トウモロコシ24%である。遺伝子組換え作物が急速に普及した理由は、除草に係る労力を大幅に軽減すること、農薬の使用量を減らすこと、土壌浸食を引き起こす耕作作業を不要とするといった、生産者に直接の利点があったことで、経費の低減を通じて消費者にも間接的に利点がある。

遺伝子組換え技術により作り出された新しい農作物が人の健康や環境に対して悪影響を及ぼす可能性が指摘された。例えば、組み込んだ遺伝子や合成されたタンパク質の安全性、アレルギー誘発性などの食品としての安全性の問題、雑草化や土壌微生物相など周辺環境に及ぼす影響などである。これらの問題については、農場での栽培を始める前に、関係法令に基づいて科学的な知見に基づく評価を実施し、これに合格したもののみを公的に承認する仕組みが世界共通の規則として確立している。



”Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops” by Clive James, 1999-2007

日本では遺伝子組換え作物の商業栽培は法的には可能であるが、実際に行われてはいない。しかし、日本が輸入しているダイズの約8割、トウモロコシの約9割は米国から、ナタネの約8割はカナダからのものであり、その多くは遺伝子組換えと非組換え農作物を分けずに流通している。これらは主に飼料用や油糧用の原材料として使用されているが、一部は食品の原料にもなっている。

このように遺伝子組換え作物はわれわれの生活に深く関与しているにもかかわらず、遺伝子組換え技術の内容、安全を守る法制度の存在、世界の実情などについての正しい情報が国民に伝わっているとは言い難い。そのために「遺伝子組換え作物は危険」といった風評が広がり、これを聞いて不安を訴える声も多い。このままの状況では日本での遺伝子組換え作物の開発も栽培も世界の進歩に大きく遅れをとり、将来は重要な遺伝子組換え作物の種子をすべて海外から購入する事態になる懸念さえある。科学教育の中で遺伝子組換え技術の利点と欠点について取り上げて正しい知識を伝えるとともに、実用化に向けた取組みを国民の意見を聴きながら進めるというリスクコミュニケーションの充実が重要である。

(2) 肥料

農作物が育つためには窒素、リン酸、カリウムなどの栄養素が必要である。自然の状態であれば植物は地中からこれらの栄養素を吸収して育ち、やがては枯れて、栄養素は地中に戻るという循環を繰り返している。そこには地中に住むミミズや微生物など、多くの生物の働きがある。しかし、農作物は人間が持ち去って消費するので、栄養素

が地中に戻ることはない。そのために肥料という形で農地に栄養素を補給しなければ、農作物は育たない。

かつては農作物のうち人間が食べない部分を焼いてその灰を農地に撒いたり、家畜や人間の排泄物や植物から作った有機肥料を農地に戻すことで栄養分を循環させた。しかし、これらの方法では栄養素の量とバランスを調節することが難しく、そのために農作物の収量には限りがあった。その後、必要な栄養素を化学肥料の形で必要なだけ供与できるようになり、農作物の収量は大きく増加した。

ただし、化学肥料を過剰に使用すると水質汚濁を引き起こし、温室効果ガスの発生を増加させるなどの恐れがある。また化学肥料だけを使い続けると土壌中の生物が減少し、土壌の通気性や保水性が失われるなどの劣化が起こりやすいので、有機肥料の併用が行われている。

(3) 農薬

農業のもう一つの問題は、病虫害や雑草による被害で、その被害で農作物が全滅することも珍しくなかった。さらに収穫後の貯蔵期間のネズミや害虫、カビなどの被害も深刻な問題である。これを防ぐために開発されたのが農薬で、有害な昆虫や線虫、病原菌や雑草から作物を守るとともに、農作業の労働を軽くする役割を果たした。例えば水田作業の多くを占めるのは除草作業だが、除草剤ができたために日本では水田作業の量が25分の1に減ったと言われる。

ただし、農薬の使いすぎは多くの昆虫を殺し、これを餌にする動物を減らすなど環境に大きな変化を与える。また、化学物質一般の例に漏れず、農薬も多量では毒性があるので、農薬の種類、使用法、そして農産物への残留量などについて厳しい規制が行われている。

3.4.6 緑の革命

作物の育種、化学肥料、農薬、灌漑、そして農業機械の組み合わせにより世界の農業の近代化が行われた。これを推し進めたのが「緑の革命」である。

第二次世界大戦末期の1943年に米国はメキシコに国際トウモロコシ・小麦改良センターを開設して効率の高い農業の研究を開始し、高収量的小麦とトウモロコシを作り出した。その結果、メキシコ的小麦の生産量は3倍、トウモロコシの生産量は2倍に増加し、1950年代には小麦の自給が可能になった。1962年から1966年にかけて不作に見舞われたインドはメキシコからこの小麦を導入し、大幅な増産に成功した。

1962年にはフィリピンに国際稲研究所(IRRI)が設立され、日本も協力して1970

年代にはイネの新品種 IR8 が開発された。当時のアジアは人口が増えているのに農地も穀物生産も増えず、飢餓が避けられない状況にあった。しかし IR8 とその改良品種が普及すると米の収穫量は 40 年間で 3 倍増加し、米の価格は半分以下に低下し、アジアは食糧危機から脱することができた。そしてこれらの品種はアジア地域の 75% にまで普及している。

さらに地域の事情に配慮した国際農業研究センターが世界各地に設立され、成果をあげている。例えば、ナイジェリアの国際熱帯農業研究所による病虫害抵抗性のトウモロコシの開発、同研究所とコロンビアの国際熱帯農業研究センターによる耐病性や冷害、乾燥地適性を持つキャッサバの開発、ペルーの国際馬鈴薯センターによる新種の芋の開発、インドの国際半乾燥地農業研究センターによるミレット（きび、あわの一種）の開発などである。このような農業の大きな改善を「緑の革命」と呼び、これが世界の農業の近代化のモデルになったのである。

品種改良されたイネの特徴は背が低く茎が丈夫で葉が生い茂ることであり、肥料をやると多くの実をつけ、しかも穂の重さでイネが倒れないので生産量が伸びたのである。ところが新品種は害虫に弱く、大量の農薬が必要であった。また、生産量を高めるためには化学肥料と水も必要である。したがって緑の革命は灌漑施設と化学肥料と農薬と農業機械に支えられる農業であった。しかし、これは裕福な農家だけが実施できる農業でもあり、富農と貧農の二極分化が進み、期待されたような貧困層の救済には必ずしもつながらなかった地域もある。また化学肥料や農薬を不適切に使用したために、水域の汚染が引き起こされた地域もある。

3.4.7 農業と環境

農業は自然環境を人工的に農地に作り変えるところから始まる。現在の世界は天然の自然と、人間が手を加えた山林や農耕地のような人工の自然と、都市や工業地帯のような人工の空間に分けられた。そして人工の自然は田園風景として、天然の自然とは違った美しい景観を作り出し、多くの人が水田や畑の四季の風景を「自然」と感じて心の安らぎを覚える。

農地には豊かな生物生態系があり、生物の多様性が保全されている。さらに農業が地域社会や文化を作り出してこれを維持し、農村の存在が都市生活の緊張を緩和する役割も担っている。子どもたちにとっては、食べ物が動物や植物という「いのち」に由来していることの認識が薄れているが、農業とりわけ生き物との触れ合いによって生命の尊厳に触れ、生命への畏敬の念を持つことが認められている。

農業は環境保護の機能も持つ。管理された水田は雨水を一時的に湛水することができるので洪水を防止する。水田や畑地から水が地下に浸透して水質浄化と地下水の涵養を助け、土砂崩壊防止と土壌侵食防止が期待される。森林は土壌の流出を防ぎ、雨水を保持し、地域の気候を保ち、動物の生息地にもなる。そして、人間は森林がその機能を最大限に発揮できるように手を加え、そこから燃料、食料、建築材料などを得ている。しかし、これらは適切で持続的な農地や森林の管理が行われることが条件である。

世界では、人口の大幅な増加と農地の拡大のために農業や林業の持続性が危うくなっている。例えば、過剰な商業伐採や燃料を得るための伐採、そして耕作地を広げ、家畜の放牧地を広げるための森林破壊が進んでいる。十分な休養期間を取らない過耕作を行っているために地力が回復しない土地が増えている。過剰な数の家畜を放牧しているために、世界の放牧地の約 20%では草地の破壊と砂漠化が起こっている。

農業は多量の水を必要とするが、森林の減少による保水力の減少のために水不足や洪水が起こっている。水の過剰な使用により世界各地の河川や湖の水量が減少し、地下水の枯渇も起こっている。水の管理が悪いために地中の塩分が地表に出てきたり、海水が遡上したために、農耕地に塩分が蓄積して農作物ができなくなる塩害が広がっている。雨や風で農耕地の表面の土が失われ、農耕ができない荒地になってしまう土壌侵食が続いている。

世界で 9000 万トンの漁業資源を利用しているが、なお 400 万トンの水産物が不足している。資源の再生が不可能になるほど多量の漁獲が行われたために、マグロ、カツオ、タラ、ウナギが減少するなど、世界の漁業資源の四分の三が危機的な状況にある。問題の解決のために栽培・養殖漁業が盛んになっている。しかし、それが水質の悪化などの環境問題を起こすこともある。

3.4.8 農業と地球温暖化

穀物生産や畜産などの農業部門から排出される温暖化ガスの量は、発電と輸送部門から排出される温暖化ガスより多い。農業部門からの温暖化ガスとしては、炭酸ガスより強い温暖化効果を持つメタンと一酸化二窒素が作り出される。

農業部門から排出される温暖化ガスの 35%が畜産部門からのもので、その約三分の一は新たな放牧地の造成や飼料になる大豆の生産地を確保するための森林破壊、過放牧、踏み固め、侵食などにより土地が劣化し、砂漠化が進展したためである。また約四分の一が反芻動物の胃に住むメタン菌の働きでできるメタンガスであり、約三分の

一は排泄物から出るメタンガスである。残りは牧草地からの一酸化二窒素の排出や稲わらの焼却などによる。畜産部門から出る温暖化ガスは、炭酸ガス全体の 9%、メタンガス全体の 35-40%、一酸化二窒素全体の 65%になり、合わせて全温暖化ガスの 18%に相当する。

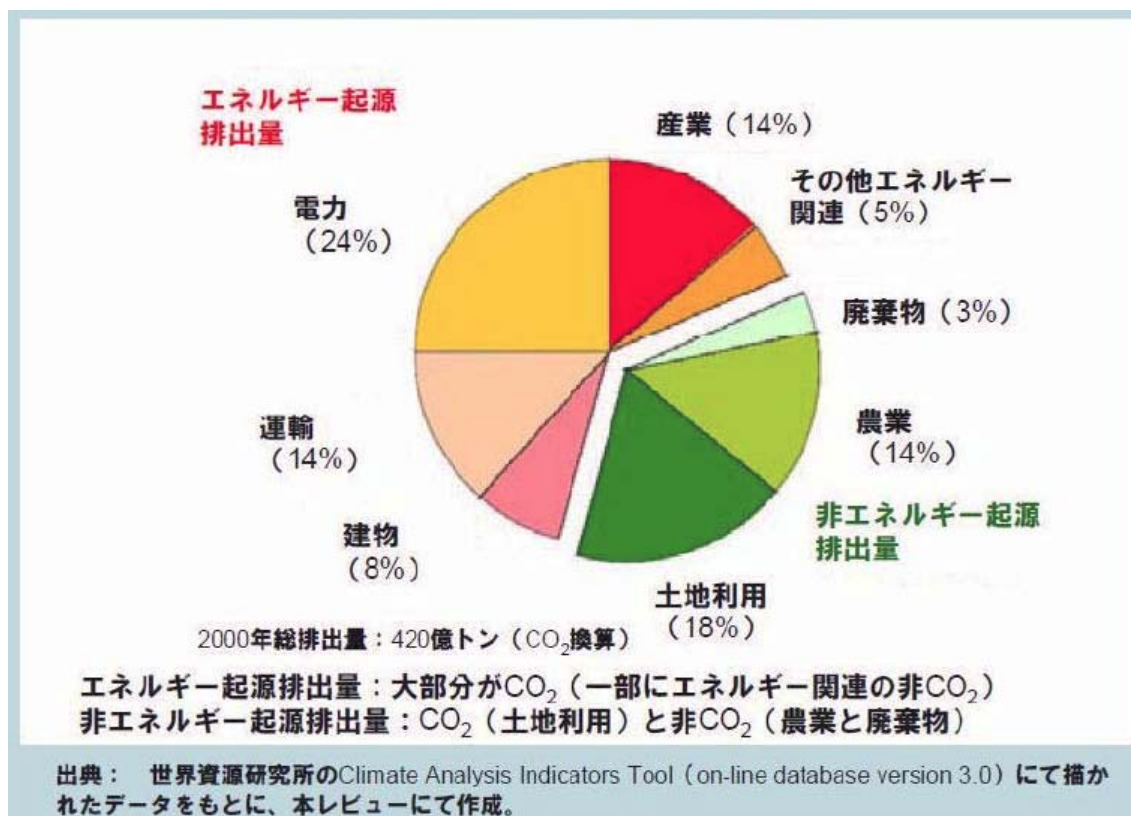


図8 2000年における温室効果ガス排出量（排出源別）⁸

最も影響が大きいのは13億6000万頭のウシで、年間に炭酸ガス19億トン、メタンガス8300万トンを出している。続いてヒツジとヤギは炭酸ガス5億1400万トン、メタンガス930万トン、ブタは炭酸ガス5億9000万トン、メタンガス900万トン、ニワトリは炭酸ガス6100万トン、メタンガス100万トンを出している。

水田土壌にはメタン菌が定着しているためメタンガスが発生する。畑地に窒素肥料を散布すると一酸化二窒素が発生する。温暖化が進めば土壌中の微生物の活動が活発になり、水田土壌からのメタンガスや炭酸ガスの放出が増加し、温暖化を促進する可

⁸ スターン・レビュー『気候変動の経済学』
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/stern_review/es/es-ej-1.pdf

能性がある。

その一方で、温暖化は農業に影響を与える。2007年に、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は地球の温度が1度から2度上昇すると洪水と暴風雨による被害が増加し始め、赤道に近い低緯度地域では穀物の生産性が低下する一方、中・高緯度地域では穀物生産性が増加する場所もあると予測している。3度の上昇があると、東および東南アジアでは今世紀半ばまでに穀物生産量が最大で20%増加する一方、中央および南アジアでは最大30%の減少があるかもしれない。しかし4度の上昇が起これば、すべての地域で穀物の生産性が低下し、海水面の上昇により世界の沿岸湿地の約30%が水没する可能性がある。特にアフリカでは降雨量の減少により2020年までに農業生産量が半減し、アフリカの貧困と餓えの克服を大きく遅らせる可能性がある。

3.4.9 農業と健康

農業は人間の健康に大きな影響を与えた。農業が始まったところの人骨を見ると、狩猟採集時代に比べて体格が小さくなっている。これは、農業労働が厳しかったこと、天候の不順や害虫の発生などで不作の年もあったこと、農業が始まると少数の種類の作物に頼ることになり、食品の種類は狩猟採集時代より少なくなって栄養のバランスが悪くなったこと、身分制度ができて一部の特権階級以外の人たちは食料が不足することもあったことなどが原因と考えられている。

また、多数の人間が集まった集落は多量の排泄物やごみのために不衛生な状態になりやすく、これに家畜の排泄物が加わって、病気の発生や感染の拡大を起しやすいく環境になった。

その一つがペストである。穀物の貯蔵を始めるとネズミが集まり、ネズミが持つペスト菌がノミを介して人間に感染した。ペストの死亡率は高く、患者は皮膚が黒くなることから「黒死病」と呼ばれて恐れられた。多数の人間が暮らす集落では、一人が感染するとペストは瞬く間に集落全体に広がった。しかし、集落の間の交流がないときにはペストの流行は集落の中に限定されていた。ところが地域内の交易だけでなく東西の交易が盛んになると、ペストもまた交易ルートに乗って広がった。特にモンゴル帝国時代の14世紀には中央アジアで始まったペストがイタリアを經由してヨーロッパ全土に広がり、ヨーロッパの人口の約三分の一に当たる2500万人が死亡した。その後、ペストは世界中で何度か流行し、1665年のロンドンでは約7万人が亡くなった。現在は先進諸国では根絶されたが、発展途上国ではまだ残っている。

動物を家畜化したことにより、動物が持つ病気にも感染した。例えばインフルエン

ザウイルスはカモなどの水鳥が持つウイルスだが、4500年前にニワトリが家畜化されたときに人間に感染してヒトインフルエンザウイルスになったと考えられている。こうして人間はインフルエンザウイルスに繰り返して感染するようになった。もっとも大きなインフルエンザの流行は1918年から1919年にかけて発生した「スペイン風邪」で、世界の人口の30%以上が感染し、約5000万人が死亡したと推測され、日本でも39万人が死亡した。世界では毎年170万人が結核で死亡し、300万人がエイズで死亡しているが、これらの病気に比べてスペイン風邪の死亡者は桁違いに多く、一度に最も多くの被害者が出た病気と言われている。その後も1957年に「アジア風邪」、1968年に「香港風邪」、1977年に「ソ連風邪」が流行している。ここでいう「風邪」は「インフルエンザ」のことである。

これらの流行はトリインフルエンザウイルスが突然変異を起こして人間に感染しやすい新型に変わったものと考えられる。現在、東南アジアではニワトリの間に高病原性トリインフルエンザの感染が見られ、少数の人間がこれに感染している。これも野生の水鳥が持つウイルスがニワトリに感染したもので、日本でも感染したニワトリが多数処分された。このウイルスが突然変異を起こして人間に感染しやすい新型になることが懸念されている。

そのほかにも麻疹（はしか）、結核、天然痘、百日咳などは元々家畜が持つ病原体が人型に変化したものである。また家畜から人間に感染する狂犬病や炭疽などの人畜共通伝染病がある。さらに、ウシの腸内細菌である腸管出血性大腸菌（O157）やニワトリなどの腸内細菌であるサルモネラなどは畜産製品に付着して人間に食中毒を起こす。これらはすべて人間が家畜とともに暮らすようになってから、その被害を受けることになったのである。

【コラム5】BSE（牛海綿状脳症）

英国で1986年に発見された一頭の変死牛から世界の牛海綿状脳症（BSE）問題が始まった。BSEは短時間で英国全土に広がり、1992年と93年には年間3万頭以上の牛がBSEで死亡し、畜産業は大打撃を受けた。英国政府は1996年にBSEが人間に感染して変異型クロイツェルフェルトヤコブ病（新型ヤコブ病）を引き起こす可能性を認め、大きなパニックが起こった。

BSEの病原体であるプリオンは牛の脳や脊髄などのいわゆる「特定危険部位」に蓄積する。病原体で汚染した危険部位を含む廃棄物を乾燥させて粉末にした肉骨粉を健康な牛に食べさせると感染する。また汚染危険部位が付着した牛肉を人間が食べても

感染する。英国政府は肉骨粉の使用と危険部位の食用を禁止したために BSE も新型ヤコブ病もその数を減らした。ヨーロッパ各国もまた英国から輸入した汚染肉骨粉が原因になって多くの BSE 感染牛を出した。そして、この問題により各国政府は消費者の信頼を失い、消費者保護を中心に置いた食品安全の新しい方式を取り入れることになった。

日本もまたヨーロッパから肉骨粉などを輸入していたために 2001 年に BSE が発見された。「日本に BSE はない」と言い続けていた政府は十分な対応ができず、国民の信頼を失った。政府は当初は肉骨粉の禁止と危険部位の除去に加えて、30 ヶ月齢以上の食用牛の検査を対策にする案を示した。検査では弱齢牛の BSE を発見できないため、BSE に感染していても検査で陰性になる可能性が高い。そのような理由でヨーロッパでは 30 ヶ月齢以上の牛だけを検査していることに習ったものである。しかし、この案に対して「検査した牛肉としないものがあると混乱を招く」、「牛の月齢がはっきりしない」などの理由ですべての牛を検査すべきであるとの要求が起こり、政府は全頭検査を実施した。しかしこれが国民の間に「すべての牛を検査して、政府が安全を保証しているのだから、BSE に感染した牛を食べることはない」という誤解を生み出すことになった。

2003 年末に米国で BSE が発見され、日本は米国産牛肉の輸入を停止するとともに、米国に全頭検査の実施を要求した。しかし弱齢牛の検査には科学的な根拠がないという理由で拒絶された。ところがこれが国民の目には米国の傲慢さと映り、米国産牛肉への反発が大きくなり、逆に全頭検査を行っている国産牛の信用が高まった。

政府は食品安全委員会のリスク評価に基づいて 2005 年から検査対象を 21 ヶ月齢以上の牛に変更したが、すべての自治体が国の補助金により全頭検査を続行した。2008 年 7 月には国の補助金が廃止され、国は検査月齢を変更するよう自治体に求めたが、すべての自治体が「消費者が不安に感じる」ことを理由にしてさらに全頭検査を継続する方針である。このような日本独特の事態は、全頭検査を開始したときに政府が検査の意味を国民に十分に説明しなかった結果であり、自治体もまた検査を続行する科学的な根拠が薄弱であることを説明していない。

3.5 健康の確保 ー身体ー

3.5.1 人体の基本構造

人体の、生き物としての機能は、他の温血哺乳類と類似している。多種、多様な細

胞が集まって臓器を形作り、血液成分をめぐらせることによってエネルギー源や酸素をそれらの臓器にまで届け、神経系やホルモン系で臓器間の連携を保とうとする動物としての基本は、人体でも他の温血哺乳動物でもさして変らない。他の動物で起こっている生態現象の多くは人体にも当てはまる。その共通事象については前章で述べた通りであり、ここでは人体に特徴的な事項を、特に「医療」という動物には無い、人間に特有な行為と関連させながら理解したい。言い換えれば、約36°C程度の体温の下に生命機能が維持されている個体としての人の身体機能異常とその回復について理解することである。ただ、人では脳が他の動物と比較して極端に発達しており、それが人が人たる所以でもあるので、精神機能については身体機能と別に、項を改めて述べる。

3.5.2 疾病と医療

疾病とは、前述の、人の正常な哺乳動物としての機能に異常をきたすことであり、ある時はその異常が可逆的であり、ある時は不可逆的である。これが疾病が治る、治らないであり、基本機能である血液循環と呼吸による酸素摂取と運搬が停止し、体温が下がり、脳幹中枢の機能が失われれば人は死に至る（個体の死）。

医療はその過程に干渉し、できるだけ正常な状態に戻そう、戻らないまでも異常の進行を止めようとする。例えば、人体には機能保持のため、適正な体温環境が要求されており、生きている限り常にエネルギーを燃やし続けなければならない。適正な体温維持は、体内で活動する諸酵素が正常な働きをするために必要だからである。そこで、例えば、異常な高温（発熱）が起これば、正常体温に戻す必要に迫られる。これを、解熱薬などを用いて達成するのが医療である。

全ての生き物、勿論、人にも、身体の異常な状態を元に戻そうとする自己修復機能が備わっており、医療はそれを最大限に利用する。医療的治療行為の代表として、薬物、手術、訓練（リハビリテーション）が選択される。薬物治療では、薬物の種類、量、時期と期間の選択が正しく行われなければならない。例え正しい薬が選択されても、量が少な過ぎれば効果がないし、多すぎれば有害となる。一般に、薬物は多方向の作用を持つから、目的とする主作用を引きだし、副作用をできるだけ小さくするよう、治療法が工夫されるが、個体によって薬物の効き方が異なる場合があるので、薬の処方複雑な作業となる。

また、100%安全な手術は無く、手術にはある程度の確率で危険が伴う。最近では、新しい医療手段が試行を経て医療として定着しつつあるが、ある程度の危険を伴うことが避けられない。遺伝子操作を伴うような治療法の採用に当たっては、倫

理面での社会的合意形成が求められる。社会構成員として、また、一個人として、治療効果のはっきりしない未知の医療に対し、正しい価値判断ができる素養を身に付ける必要がある。

3.5.3 疾病は臓器機能を見捨てて理解できない

古くは、病は「気」から発し、祈りや祈祷で治すものと考えられていた。それを、臓器そのもの、或いはホルモン・神経などの連絡機能の異常など、疾病を身体の器質変化に結びつけるところから近代医学はスタートしている。従って、近代医学では、消化器疾患、循環器疾患、腎臓・泌尿器疾患、呼吸器疾患、内分泌疾患、神経疾患、生殖器疾患、骨・筋肉疾患、感覚器疾患、皮膚疾患、血液疾患（血液は造血器と言う臓器の一部と考えられる）等々、病因を分析的に考える。勿論、多臓器を同時に脅かす、例えば、リュウマチ、糖尿病というように、病因から分析的に疾病に迫ることも行われるし、細菌・ウイルス感染など、の外因の特定から、臓器異常を横断的に見ることも行われる。症状から統合的に病変をとらえる東洋医学的医療もある。

3.5.4 病因により疾病を分析的に考える

医学の世界では、疾病の原因を、大雑把に（１）感染、（２）腫瘍、（３）変性の三つに分類する（外傷を、別に加えることもある）。例えば、インフルエンザは感染であり、肺がんは腫瘍である。変性疾患とは、そもそも、生き物は生まれた時から死に向かって加齢現象の中で生きているので、その過程を全て疾病とは言えないが、著しく他の個体と異なる経過をたどる場合を指す。例えば、個体差はあるが、高齢者の眼の水晶体は少なからず濁っている。もし、そのために視力障害を自覚すれば加齢性白内障という疾病であり、医療の対象となる。ある高齢者の腰が曲がっていても、他人は、老化であり疾病ではない、と言うかもしれない。しかし、痛みがあり耐えがたければ、この加齢変化は医療の対象となる。

このように、健康と疾病の境界はかなり相対的なものである。上記の如く、疾病の原因と異常を来たしている場所（臓器）を探し求めるのが医療における診断であり、その原因を除こうとするのが治療である。疾病の発生を、生まれた時から遺伝で決まっていたもの、遺伝的素因に環境因子が加わって発症するもの、全く後天的に発症するものに分けて考える。後の二者は、本人の努力で発症の時期も経過も異なってくることから、各人が健康に関して正しい知識を習得し判断能力を鍛えることの有用さが実感される領域である。

3.5.5 医療の不確実性と納得医療

医学の成果を人体に応用・展開して行くのが医療であるが、医学・医療の世界には未だ不確定の要素がたくさん含まれている。原因の分からない疾病、原因が分かってもその治療が不可能で、症状の治療をするしかない（対症療法）場合もある。従って、現実の医療は、患者となる立場の人と医療者が情報を共有した上で、最善と思われる道を選択して実行することになる。疾病の進行は待ってくれないから、その時点で考えられる選択肢からの決断を迫られる。何も手を加えないで自然の経過に任せる、という決断も慢性疾患において無いではない。

それらの決断過程で最近言われているのが、「インフォームド・コンセントに基づく医療」（「納得医療」などとも訳される）である。この考え方が現れたのは20世紀後半の米国で、日本でもようやく定着しつつある。医療を受ける立場の人も正しい医療情報を取得し、医療者と共に考え、自分で治療方針を決定するというシステムである。従って、国民一人一人が健康と疾病に関して、相当の知識と判断能力を持つことが求められる時代になった。これが以前の様な「医療者にお任せします、よろしく」というパターンリズムの時代との違いである。一方、経験則に負う所の大きい医療が不確実な行為であるだけに、その安全性を高めるためにも、情報の透明性が強く求められている。

3.5.6 個の医療の限界と環境整備の重要性

人が健康に生きて行くためには、個人が個々の疾病に対処する他に、例えば、下水道を整備する、空気を清浄化するなど、疾病の発生に大きく影響する環境の整備が大切である。これから環境破壊が進みそうな時代に、環境問題を健康生活の維持という面から眺め、一人一人の国民が、正しい価値判断ができるようにする必要がある。医学で言えば、公衆衛生学と言われる分野への国民の正しい理解である。例えば、健康を阻害するような物質を、生活環境から除外する必要がある場合、個人の努力でできるものと、集団の努力でないとできないものがある。感染性の疾患対策で、病原菌の侵入を防ぐため、各人が皮膚（手洗い）や呼吸器（マスク）を介する感染ルートを遮断するのは個人の努力による自己防衛である。不健康な習慣からの脱却、例えば、タバコに由来する有害物質との接触を避ける、過食の戒めや適度の運動による身体の鍛錬、結果としての生活習慣病の回避なども、個人の努力が有効な場合である。しかし、或る種の発ガン物質、例えばアスベストからの回避は、個人の努力だけでは如何とも

しがたい。ある程度の水準を超えると人体に有害なことが確認された物質は、知られているだけでも数多い。だから、空気、水、土壌の環境整備は、社会全体の問題として取り組まねばならないという認識の醸成が必要である。社会の理解の広がりでも生活環境がより安全になり、一方、各人の疾病への理解が深くなって、初めて人間が健康を長く維持できる状態を作り出すことができる。

3.5.7 食事と運動の大切さ

身体の体温保持、心臓の拍動や腸管の蠕動運動など、内臓の機能維持に要するエネルギー源は、全て消化管を介して食物から吸収される。また、身体を構成する細胞は、日々、入れ替わっているから、それらを作るための物質の摂取が、生命維持のために継続的に必要である。その中には、必須アミノ酸、ビタミン、微量金属のように、人の体内では合成できないものがあり、それらをバランス良い食事から取り入れなければならない。その必要量は、体の大きさ、年齢、性別、身体活動の激しさ、代謝の効率などによって、人それぞれ異なってくる。また、人体は生命維持（基礎代謝）以外に、身体運動に消費するエネルギーを補給する必要がある。身体運動の確保は、人が普通の社会生活を送る上でも、スポーツをする上でも必要であるばかりか、生命維持にとっても必須である。例えば、骨や筋肉の強度は運動無しには保たれないし、循環器機能、呼吸器機能等についても、身体運動無しには維持、向上しない。

3.5.8 疾病の予防と自己修復機能

身体の防衛機能の一つとして、白血球などによる免疫系の活躍がある。個体は病原体の攻撃に反応して自己の体内に抗体を作り、それと戦う。そして、疾病に打ち勝って個体が生き残った時、防衛力として抗体が残る。それが持続する場合、時間と共に消滅してしまう場合がある。この機能を人為的に作るのが、ワクチン、予防接種であり、時に有効な疾病予防効果を生む。この基本機序について、全ての国民が理解できることが望ましい。花粉や食物に過敏に反応する、いわゆるアレルギー体質の原因も免疫系の働きによるものであり、この場合、身体に免疫反応がマイナスの現象として現れている。薬剤、食物によるショックも類似の生態反応に属するが、何故そのようなことが起こるのかについて、ある程度の理解ができるようでありたい。

3.6 健康の確保 ー精神ー

3.6.1 精神機能の発達と環境の影響

ヒトには、他の動物と同様に、生まれながらにして多くの行動能力が具わっている。その上、ヒトは生まれてから1~2年後には言葉を獲得し始め、幼児期をとおして民族に固有の複雑な言語を話すことができるようになる。この生まれながらに具わった能力を引き出し、発達させていくためには、適切な刺激と環境が必要である。

ヒトを取り巻く環境因子として、物理的環境因子、社会・文化・経済的因子、生物学的因子、さらにはヒトとヒトとの人間関係などがあげられる。これらの環境因子は、ヒトの成長と発達を促すとともに、望ましくない環境因子が長期間持続した場合には、ヒトの発達と健康を阻害する要因となる。

3.6.2 ヒトの発達には年齢に応じた課題がある

ヒトは誕生の瞬間から外界との関わりの中で生命活動を開始する。生まれたばかりの乳児においても、啼泣することで生物としての欲求を表現し、飢えを満たすために母親の乳首に吸い付き、母親の胸に抱かれることで安心と温もりを求める。これら乳児期における生物としてのヒトの本能的な欲求を満たしていくことが、乳児がヒトに対して信頼を獲得し、環境に対して安心を得ることに役立つ。このような乳児の愛着行動に対する欲求の充足と養育者に対する信頼の獲得は、その後のヒトの発達を支える基盤となる。

幼児期に入って、言葉や運動能力が発達すると、遊びを通して家族以外との関係を持つようになる。生活環境の広がり、言語機能や運動能力を一層高めるとともに、外界に対する知的関心を広げていく。

学童期において、生活の場は家庭から学校へと広がり、教育によって社会生活に必要な知識と技能を獲得するとともに、仲間との協同作業を通じて集団への参加や社会的協力の意義を自覚し始める。

青年期においては、成長に伴う急速な身体的変化が出現し、社会の中で様々な仲間集団を形成し、同世代との交流の中で、概念的な思考と価値観を形成していく。また、異性との交際が始まり、慣れ親しんだ家族から自立していくのもこの時期の課題である。

成人期においては、労働を通しての社会的参加が求められ、結婚により新たな家族を構成したり、子どもの養育と教育によって次の世代を育成したりしていくことが求

められる。

老年期においては、加齢に伴う心身機能の変化や子どもの自立や退職に伴う生活環境の変化が起こり、生活環境の変化が孤独や喪失感を招くことがある。老年期の課題は、孤独や葛藤を乗り越えて新しい生きがいを作りだしていくことにある。

3.6.3 発達段階における危機を乗り越えることで心の健康が維持できる

3.6.2 で挙げた各年代における発達の課題は普遍的なものであるが、一方では社会との関係の中で様々なストレスに遭遇し、対処の仕方によっては、心の健康に重大な影響を与える危機に陥る。また発達段階における危機のみならず、身近な人との別離や重い病気にかかった時、望まざる退職などの生活状況の変化、あるいは突然の災害や事故に遭遇した時などに、日常の生活に支障をきたすような精神的な異常反応を引き起こすことがある。

児童の虐待は、子どもの生命を危機にさらし、心身に被害を与えるのみでなく、その後の心の発達に大きな影響を残す。思春期・青年期において自分の欲求に見合った社会的集団への参加が得られなかったり、社会の一員としての確信が持てなかったりする場合には、心理的危機に陥り、不登校や反社会的行動が出現することもある。

成人期においては、多くの人は就業や社会的活動に参加し充実した時期を迎えるが、配置転換、転勤、転職、失業等職業上のストレスが大きくなり、家庭においても、出産、子育てなどに生きがいを感じる一方で、育児に対して自信を失い精神的な健康を損なうことがある。

老年期においては、心身の機能の低下に伴い自らの健康不安が増大する。特に独り暮らしで近辺の援助が得られない時や配偶者の死に直面したときには、孤独感がつのり、抑うつ状態が出現しやすい。

これらの各段階の危機に対して、例えば、児童虐待に対しては、子育ての支援センターや虐待防止のネットワークが設けられ、高齢者に対しては、医療・福祉の支援活動が行われ、社会からの孤立を防ぐための社会的な対策と支援が講じられるのが人間の社会である。

しかし人間の発達段階における危機を論じるとき、第二次世界大戦後一貫して続いている我が国における家族構成の変化と家族に対する価値観の変遷、人口構造における少子化と高齢化の問題、子どもを育てるための住宅環境と地域社会とのつながりなど、社会のあり方について考察すべき時期に来ている。

3.6.4 精神疾患と社会的サポートの必要性

以上の、人間の発達段階においてストレスから生じる心理的な危機は、生活環境における適切なサポートがあれば乗り切ることが可能である。しかし一方で、青年期以降においては、ストレスの関与のみでは説明できない精神疾患の発病がみられるようになる。

精神疾患については、身体の疾病のように、脳を初めとする臓器を解析することで、その病因を解析することはできない。認知症のように脳の画像診断や病理学的所見によって、その病因が明らかにでき、生物学的研究、特に生化学の分野において、脳内の神経伝達物質の働きが精神疾患の発病に関与していること、ある種の薬物が精神疾患を引き起こすこと等が知られて来たものの、今なお未知の部分が多い。精神疾患の発病については、生物学的要因とともに、ヒトを取り巻く生活環境、社会的葛藤状況の持続、発達のあり方など複合的な要因が関与していると考えられている。

精神疾患の治療については、従来から薬物療法、精神療法、社会復帰活動の有効性が認められてきたが、さらに社会活動への参加を目的として、社会資源の充実が推し進められている。精神疾患の回復において最も大切なことは、地域社会において精神疾患に対する偏見を排除し、温かい目を持ってサポートしていくことである。

第4章 生命の倫理

4.1 ヒトとしての倫理 ー個人としての倫理ー

4.1.1 生命科学・技術の進歩に学ぶ生命倫理

生命科学・技術の目的は、様々な生物の生命現象を科学的に解明することと、創出される生命操作技術を医療、食糧、環境、エネルギーなど広い分野で人間の福利の向上を目的に利用していくことにある。この過程において私たちは、人間と人間、人間と社会、人間と他の生命体との関わり合いの深さを実感する。それは、また、人間の本質あるいは「人間らしさ」とは何かについて多くのことを考える機会を常に与える。そして、それを深く論及し「人間らしさ」からくる弱さを悟ることで生まれるのが、人間社会における個々人の行動規範として必然なものとしてすべての人々に受け入れられるべき価値観としての生命倫理であると言える。

このように考えると、生命科学・技術と生命倫理とは、本来、前者を起点とする同じ文脈において語られるべきものである。しかし、現実にはそのようにはならず、ときには対立するようにさえ思えることがある。その理由は、その起点である「人間らしさ」からくる弱さに関して十分な科学的論拠に基づく明確な定義がないことと、生命倫理は社会科学として歴史的事実の経験と社会変化の影響を受けることで生じる様々な捉え方を矛盾が生じないように柔軟に融合させることに時に失敗していることが挙げられよう。

このような背景の中で、人間の本質を一段と解明し、「人間らしさ」からくる弱さについてより確かな科学的論拠を提供し、幅広い応用領域で生命倫理の捉え方に一貫性を与えるべく、相互に関連しながら技術融合によって極めて急速に進歩しつつあるのが、ゲノム科学／遺伝子操作技術、生殖発生生物学／胚操作技術、高次脳科学／神経回路操作技術の三つの生命科学・技術領域である。以下、これらの領域と「人間らしさ」とその科学的論拠と、広義の生命倫理とその普遍化の二点に焦点を置き、生命科学・技術の進歩から私たちが学ばねばならない生命倫理のこれからのあり方について論考する。

4.1.2 「人間らしさ」とその科学的論拠

「人間らしさ」の科学的論拠は、人間が進化する過程で併せもつことになった「個性」と「社会性」それぞれとその二者の関係に求められなければならない。前者の

「個性」は個が持つ純粋に生物学的と見なされる生命体としての特性であり、これは父母から引き継ぐ遺伝要因と胎芽・胎児期・乳児・幼児期を中心に一生に及ぶ環境要因の影響の下で形成されていく個体差に収斂する。この個体差については、ゲノム科学を中心とする領域においてヒトゲノム全塩基配列が解明に続く様々な機能を担う遺伝子の多型性やそれら遺伝子のエピジェノミック制御機構の解析などのポスト・ゲノム研究、また、生殖発生生物学を中心とする領域において胎生（ES）細胞やクローン胚や人工多能性幹細胞（iPS 細胞）などの人工胚を用いた初期発生分化誘導に関する研究などによって急速に解明されつつある。そして、その一部のデータはすでに環境保全や食糧増産や犯罪捜査のみならず、疾患予防や早期診断などの未来医療を視野に入れた医療分野にも利用できるまでになっている。今後もこれに関連するデータは急速に膨大し続けコンピュータ技術と融合しながらその利用は拡大していくと考えられている。

一方、後者の「社会性」については人間としての種を存続するとともに自らの生活を守るために形成されるようになった集団（社会）の中で個々人が他人や社会と良いコミュニケーションを築くために自然と身に付いたものである。このために必要なコミュニケーション能力を主として担う大脳機能に関しては、これまで蓄積されてきた解剖学と個体発生学や精神科学との融合研究から得られていた知見に、最新画像解析技術導入による詳細な解析が加わったことで急速に多くのことが分かってきた。例えば、学習、記憶、言語、感情・欲望制御、思考、理解、判断、などのコミュニケーションに深く関係した中枢が存在する大脳の容量とその中に存在する神経細胞とその支持細胞であるグリア細胞数は、胎胚期、胎児期、乳児期、幼児期、小児期において自然に増大していくことが知られている。また、コミュニケーションの統合の場として人間で最も発達する前頭連合野においては、シナプス数は、小児期の間は周囲との間のコミュニケーションが刺激となって増加していくが、青春기에達すると不要なシナプスの刈り込みが起り減少し、その後は比較的長い安定期が続き、最終的に老化によって減少することも知られている。さらに、発語数の増加について言えば、ゲノム塩基配列が人間に最も近いチンパンジーの場合は全く見られないのに、人間の場合は生後 40 ヶ月を越えるまで急速に増加することも示されている。

この他にも、人間の本質を示す成熟した大脳機能として人間特有の「社会性」に関連して、特に強調されなければならない点がある。その一つは、神経回路が完成した後でも鍛錬によってその機能を強化できるということが分かりつつあることである。他の一つは、人間の意思決定の際に働く最も高度な機能である理解力と判断力は如何

に強化されていても、意識下あるいは無意識下で働く感情や欲望によって影響される点である。このうち感情については、人間では、理性による制御がどちらかと言えば困難な動物的な情動（快・不快など）に加えて、理性による制御が可能な人間独特の感情（愛、憎しみ、淡い感情、沈鬱など）もあることはよく知られるところである。

以上まとめると、人間の本質とは、「個性」と「社会性」の密接な相互関係の中で形成される高度の「社会性」であり、「人間らしさ」にはコミュニケーション能力の高さや学習によってそれが強化できるという強さはあるが、「人間らしさ」からくる弱さは最も高度に発達した理解力や判断力であっても制御がときに困難な感情や欲望などの影響を容易に受けてしまうことは科学的な確かさを持って証明されつつあると言える。いずれ近いうちにその弱さに関係する神経回路も、大量の情報が超高速で処理される機序、神経細胞の10倍以上の数で存在しているグリア細胞の働き、神経回路の詳細、などの解明に伴って明らかにされるに相違ない。

4.1.3 広義の生命倫理観とその普遍化

上述した「個性」は価値観の多様性を、また、理解力や判断力の不安定性は価値観の揺らぎをもたらすと考えられる。これら価値観の多様性や揺らぎは、人間の本質と「人間らしさ」からくる弱さの必然である。しかし、これらが社会全体や個々人の進歩にとっては必要不可欠なことであることは言を待たない。したがって、私たちはそれに対して悲観的である必要もない。

しかし、社会全体で決定しなければならない事柄についての価値判断が必要な場合、通常、この価値観の多様性や揺らぎはしばしば社会的合意形成を困難にすることがある。また、その合意プロセスが非民主的であれば勿論のこと、民主的であっても情報や知識や経済などの格差が生む様々な強者の価値観に基づいて一方的に進むように弱者が感じるものがあれば、その困難さは増すだけでなく、時には強者側と弱者側の間に情動的な衝突までに至ることも考えられる。このような事態は、安全面および倫理面で新たな問題を提起することが多い遺伝子操作技術、胚操作技術、神経回路操作技術などの利用が特定の患者の強い要望のある医療分野であっても起りやすい。その利用が社会全体に広がりやすい食糧、環境、エネルギー分野の場合や現代社会のように技術領域での専門細分化が進んで科学と社会との間隙が特に広がり、また、市場経済至上主義のグローバル化に伴う激しい技術開発競争で不正がしばしば起り科学者・技術者への不信感が増大しやすいと、尚更である。内容が余りにも専門的であって専門外の科学者・技術者を含めた一般市民は関心を失い、専門の科学者・技術者に任せて

しまうことになれば、事態はさらに深刻である。

このような事態を回避しようとするなら、まずは、専門家側は自らが特殊な素人であるという自覚を持って非専門家に十分な情報を提供すると同時に他分野の意見を聞き、また、非専門家側もできるだけ情報が偏らないように日ごろから多くの専門家側の情報を聞き、必要あれば相互に意見を取り入れるなどして相互間の間隙を埋める努力をしなければならない。しかし、情報、教育、知識などの非同時化によって格差や価値観に開きが大きくなり過ぎると、それが「人間らしさ」からくる弱さに起因する以上、このような努力だけでは対応できないのも確かである。

このような「人間らしさ」がもたらす事態には、古来、人間は倫理・道徳に最高位の価値基準をおいて対処してきた。20世紀後半になって生命科学・技術の研究開発が本格的になり、それが医療分野に応用されるようになると弱者である患者（被験者）の生命の尊厳が脅かされていることが明らかになると、自律性、無危害、恩恵、正義の四つの原則という人間中心主義的の狭義の立場の生命倫理が提唱された。これら四つの原則は医療が重視される社会では廃れることは決してないが、社会の変容によってその捉え方は変わってくる。ときにはそれは原則の対立や葛藤を伴うことになる。例えば、市場経済至上社会では個人の能力を重視するために自律性原理と恩恵原理の対立・葛藤の結果として自律性原理の優先論・至上化が起こる。消費者権利意識が高まると、自律性原理と正義原理の対立を伴いながらどちらかと言えば正義原理が強調される傾向がある。

さらに、生命科学・技術が急速に進歩してその応用が医療以外の食糧・環境・エネルギー分野へ広がることで社会環境や自然環境と生命との関連意識の高揚、時間・空間軸を超えた未来世代への影響、心への他人の介入、などが危惧されるようになった今日では、その捉え方には大きな転換というか、古来叫ばれて続けてきた全生態系の調和を原則とする人間非中心主義的な広義の生命倫理が被験者の人権擁護を中心に置く上述の狭義のそれに代わろうとしつつある(4.2. 参照)。現在は、例えば脳倫理科学やバイオポリテックスなど様々な名称が生命倫理の領域で提案されている。

しかし、これから大事なことは、様々な歴史的事実の経験を通して原則に矛盾や葛藤を起こさせることなく柔軟に融合させながら漸次的に人間社会における個々人の行動規範として必然なものとしていかねばならないということであろう。そのためには、「人間らしさ」からくる弱さを基軸とした生命倫理学の学問的体系化を図り、科学的体系化へ向けた努力を続けることは欠かせない。その過程においては、また、四つの原理に全生態系の調和を加えた生命倫理を普遍的価値観とし、それぞれの社会の文明

史と自然環境に適う公理によって仮説的判断基準を定めた上で、個々人が人間の福利の向上を目的に生命科学・技術が適正に展開できる基盤として機能する秩序構築と制度設計を行っていく必要もあろう。このような社会システムの構築にあたっては、多数の関連生体要素が整然とした秩序を保つことで調和的な統合が自律性を持って進む生命維持のための基盤的な機能である遺伝子ネットワークやタンパク質ネットワークや細胞ネットワークに学ぶ必要があると考えられる。このようにして、生命科学・技術は‘社会のための科学’として社会に大きく役立つことになるだろう。

4.2 ホモ・サピエンスとしての倫理 —生物種としての倫理—

4.2.1 ヒトが地球環境に与えている衝撃

3.4.3.で述べたような人口の増加とそれに伴う農業生産や工業生産の増加が生物圏全体に大きな衝撃を与えていることは、レイチェル・カーソンの名著”Silent Spring“(1962、邦訳『沈黙の春』)を初めとして、繰り返し危惧され警告されてきた。ヒトが生命圏全体を大きく攪乱していることは、すでに3.4.6や3.4.7で述べたが、ここでもう一度簡単に振り返ってみよう。

肥料のための工業的窒素固定などの人間活動によって、一次生産者に利用可能な固定窒素の全地球における供給量はすでに2倍に増えている。過剰な栄養素の付加は水界生態系を汚染し、富栄養化をもたらしている。化石燃料の使用による酸性雨、農薬を初めとする化学物質は生物学的濃縮によって思いもかけない影響を与え、大気中の二酸化炭素濃度の上昇などによる温暖化、大気中のオゾンの減少もまた生命圏全体に深刻な影響を与えている。

表6は動物の種の重さ(その種の総現存量)を、1999年のデータを基に推定したものである。ナンキョクオキアミは、年により量がかなり変動するが、多い年には人類の重さを越す。これを唯一の例外として、上位はすべてヒトおよび家畜である。最大の現生動物シロナガスクジラも、陸上最大のアフリカゾウも、この値においてはヒトの1%にもならない。この一事からも人間の活動が地球環境にどれだけの影響を与えているか想像に難くない。

地球の温暖化が危惧されて久しい。1997年12月に京都で第3回気候変動枠組条約締約国会議(地球温暖化防止京都会議、COP3)が開催され、地球温暖化の原因となる二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素などの温室効果ガスの国別の削減目標を決めた京都議定書が議決された。当時は温暖化については疑問の声があり、米国はこの枠組か

ら離脱したが、2007年の気候変動に関する政府間パネルは温暖化が実際に起こっていると断定した。地球の温度が3度から4度上昇すると、すべての地域で穀物の生産性が低下し、海水面の上昇により世界の沿岸湿地の約30%が水没する可能性がある。特にアフリカでは降雨量の減少により農業生産量が半減し、アフリカの貧困と餓えの克服を大きく遅らせるのではないかと危惧されている。

表6 動物種の重量比較

動物名	個体数(億頭)	重量(億トン)
ウシ	13.4	6.7
ナンキョクオキアミ	—	~5
ヒト	60	3.0
スイギュウ	1.6	0.8
ブタ	9.2	0.4
ヒツジ	10.7	0.3
ウマ	0.6	0.3
ヤギ	7.1	0.2

地球環境の悪化を示す指標の一つは、急激な種の絶滅とそれに伴う生物多様性の危機である。生命の歴史を振り返ってみると、化石のデータは5回の大絶滅を示している。中でも、最も激しかったのはペルム紀の最後に起きた大絶滅で、海洋動物の種は95%以上が失われた。(2.2.4 参照) 実は、現在起こっている絶滅の速度は、この時より二桁から三桁高いと推定されている。その全てがヒトの活動によるわけではないにしても、これは凄まじい現実と言わざるを得ない。

最近、“sustainable”とか、“持続性のある”とかいう言葉を見かけることが多い。光合成と呼吸の組み合わせに見られるように、本来、生物の世界は循環型であり“sustainable”である。例えば生物圏における炭素の循環は、地表に降り注ぐ太陽光の約1%のエネルギーを用いて賄われている光合成産物を、呼吸によって二酸化炭素と水に戻すシステムで、太陽から光が届き、宇宙空間に熱を捨てられる限り続く循環型のシステムである(図9)。しかし、全光合成産物の5%をヒト一種が消費するという現在の状況は、このシステムの崩壊すら招きかねない。

生命というシステムは、その誕生以来現在に至るまでの38~40億年に起こったあらゆる天変地異を乗り越えて連綿と続いてきた。この長い進化の歴史の結果として、この地球には数千万とも数億とも言われる種の生物が存在すると考えられており、それらが直接間接に関わりあって生きているのである。これまでに生物学者によって認

識され命名されたものは175万種ほどに過ぎない。大部分の種は未だ認識すらされていないにもかかわらず、凄まじい速度で消えつつある。

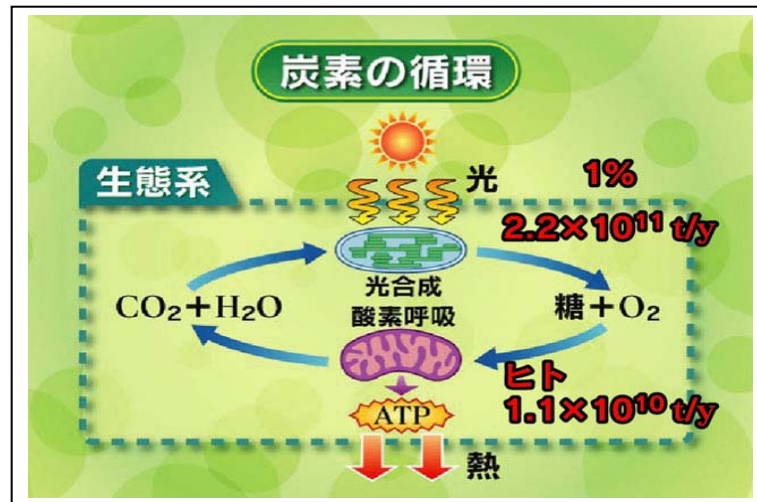


図9 生命圏における炭素の循環⁹

空間的にも時間的にも広がる生命のありようの総体を、「生命系」として認識しようという提案は極めて重要である¹⁰。あらゆる現生生物は生命38億年の歴史を等しく背負っているにもかかわらず、ヒトというただ一種の生物が、これだけ大きなインパクトを生命圏全体に与えている状況は、種として許されるのであろうか。このような意味において、ヒトが一つの種、しかも知性のある種として、生命系に対して負う責任を自覚する必要があるのではないか。この意味での生命「倫理」を真剣に考えねばならない状況に、ヒトは追い込まれているのではないだろうか。ヒトは自身をいみじくも*Homo sapiens*と自称しているが、人類が真にその名に値するか否かは直面するこれらの難問を解決できるか否かにかかっている。

⁹ 星元紀・松本忠夫・二河成男著、放送大学教材『初歩からの生物学』放送大学教育振興会、2008

¹⁰ 岩槻邦男『生命系—生物多様性の新しい考え—』岩波書店、1999

第5章 まとめ 心豊かに生きるために ー生命科学の立場からー

言うまでもなくヒトは生物であり、その成り立ちの多くは他の生物、特に動物と共通する点が多く、ヒト自身を理解するためにも生命科学の基礎的な知識は欠くことができない。同時に、数千万とも数億とも言われる現生生物種のなかにあつて、ヒトは極めて特異な存在であり、その特異さは脳の発達をもたらしたものである。

再三述べたように、生命の世界は物理量としては微々たる物に過ぎないが、極めて多様かつ複雑な世界である。また、38億年にわたって絶えることなく続いてきた驚くほどに頑丈なシステムでもある。生命というシステムの頑丈さは、分子から生命系全体にわたるあらゆるレベルで、脆弱で儂い構成要素を次々と更新し再生産し続けることによってもたらされる頑丈さである。個々人としての、また種としての存在を維持するためにも、生物としての己の持つ逞しさと儂さを正しく理解する必要があるだろう。

ヒトの異常な増殖と飽くことのない恐るべき消費・浪費の性癖とが生命系というシステムを根底から破壊しかねない状況をもたらしている。脳の発達をもたらしたこのような傾向に、知性の力を持って歯止めをかけない限り、心豊かに生きるどころか、生存を続けることすら危ういことになるだろう。人口問題は人類が直面している食糧問題、エネルギー問題、環境問題などの根幹である。この問題の解決なしに、ヒトの未来は無いのではないか。戦争・飢餓・疾病によって人口を減らすことはできる。事実、地球の一部では不幸にもそのようなことが現実となっている。しかし、これらは余りにおぞましい、非人間的な解決策である。ヒトは自身をいみじくも *Homo sapiens* と自称しているが、人類が真にその名に値するか否かの正念場に差し掛かりつつあるというのは余りに悲観的に過ぎるだろうか。英知を結集して広い意味での生命「倫理」を構築することなしには、種として直面している危機を乗り越えることは難しかろう。そのような生命「倫理」の前提としても、生命科学のリテラシーは要求されているのである。

生命科学専門部会名簿

星 元紀	放送大学	教授
浅野 茂隆	早稲田大学 理工学術院	特任教授
入来 篤史	理化学研究所・脳科学総合研究センター	グループディレクター
唐木 英明	東京大学	名誉教授
小林 興	帝京平成大学 現代ライフ学部	教授
丹沢 哲郎	静岡大学 教育学部	教授
千葉 和義	お茶の水女子大学 大学院人間文化創成科学研究科	教授
本田 孔士	京都大学	名誉教授
松本 忠夫	放送大学	教授
室伏 きみ子	お茶の水女子大学 大学院人間文化創成科学研究科	教授
毛利 秀雄	東京大学	名誉教授
渡辺 政隆	科学技術政策研究所	上席研究官
[オブザーバー]		
青野 由利	毎日新聞社	論説委員
加藤 和人	京都大学 大学院	准教授
長谷川 眞理子	総合研究大学院大学	教授
和田 正三	基礎生物学研究所	特任教授

「科学技術の智」プロジェクト 研究組織

平成20年3月現在

1. 評議会

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

【以下、企画推進会議委員】

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

2. 企画推進会議

北原和夫（国際基督教大学教養学部理学研究科教授）[委員長]、伊藤 卓（横浜国立大学名誉教授）[副委員長]、室伏きみ子（お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科教授）[副委員長]、長崎栄三（国立教育政策研究所教育課程研究センター総合研究官）[事務局長]、名取一好（国立教育政策研究所教育課程研究センター基礎研究部総括研究官）[事務局次長]、天野 徹（科学技術振興機構審議役）、有本建男（科学技術振興機構社会技術研究開発センター・センター長）、岩崎秀樹（広島大学大学院教育学研究科教授）、岩村 秀（日本大学大学院総合科学研究科教授）、小川正賢（神戸大学大学院人間発達環境学

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

3. 専門部会

(1) 数理科学専門部会

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

(2) 生命科学専門部会

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

(3) 物質科学専門部会

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

(4) 情報学専門部会

笥 捷彦(早稲田大学理工学術院教授)[部会長]、渡辺 治(東京工業大学大学院情報理工学研究科教授)[副部会長]、芦田昌也(和歌山大学経済学部准教授)、川合 慧(放送大学教授)、竹内郁雄(東京大学大学院情報理工学系研究科教授)、辰己丈夫(東京農工大学総合情報メディアセンター准教授)、西崎真也(東京工業大学大学院情報理工学研究科准教授)、萩谷昌己(東京大学大学院情報理工学系研究科教授)、原田悦子(法政大学社会学部教授)、藤田憲治(日経BP社編集長)、松井啓之(京都大学経営管理大学院/大学院経済学研究科准教授)、益子典文(岐阜大学総合情報メディアセンター教授)、吉見俊哉(東京大学大学院情報学環教授)

(5) 宇宙・地球・環境科学専門部会

西田篤弘(元宇宙科学研究所/総合研究大学院大学理事)[部会長]、唐牛 宏(国立天文台光赤外研究部教授)[副部会長]、縣 秀彦(国立天文台天文情報センター准教授)、池内 了(総合研究大学院大学教授)、磯崎哲夫(広島大学大学院教育学研究科准教授)、糸魚川淳二(名古屋大学名誉教授)、大村善治(京都大学生存圏研究所教授)、上出洋介(京都大学生存圏研究所特任教授)、岸 道郎(北海道大学大

学院水産科学研究科教授)、齊藤靖二(神奈川県立生命の星・地球博物館館長)、鳥海光弘(東京大学大学院新領域創成科学研究科教授)、廣田 勇(京都大学名誉教授)、保坂直紀(読売新聞東京本社科学部次長)、水谷 仁(株式会社ニュートンプレス社編集長)、渡部潤一(国立天文台天文情報センター准教授)

(6) 人間科学・社会科学専門部会

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

(7) 技術専門部会

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

4. 広報部会

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

5. 事務局

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

【国立教育政策研究所】

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

【日本学術会議】

信濃正範(日本学術会議事務局参事官)、廣田英樹(日本学術会議事務局参事官)、成瀬由紀(日本学術会議事務局参事官補佐)、佐野和子(日本学術会議事務局審議専門職)、関 浩子(日本学術会議事務局審議専門職)、生形直樹(日本学術会議事務局審議専門職付)、阿部左織(日本学術会議事務局審議専門職)

【国際基督教大学】

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

この報告書の利用について

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

記

1. 営利を目的としない利用の場合

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

2. 営利を目的とする利用の場合

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

以上

2008年6月

科学技術の智プロジェクト

