

Newton

GRAPHIC SCIENCE MAGAZINE ニュートン

別冊
ニュートンムック

生命と非生命の境界, 最初の生命, 進化, 生命創生など

やさしくわかる 生命の科学

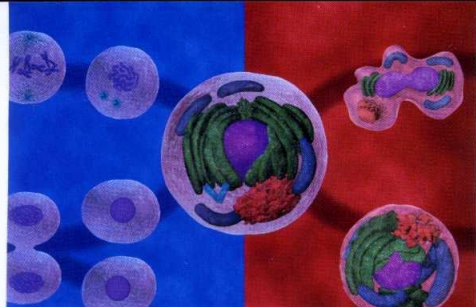


ニュートン 別冊

生命と非生命の境界、最初の生命、進化、生命創生など

やさしく わかる 生命の科学

NEWTON
PRESSES



ニュートン 別冊

生命と非生命の境界, 最初の生命, 進化, 生命創生など

やさしくわかる 生命の科学

プロローグ

生命をめぐる疑問

- 6 生命と非生命
- 8 物理学で生命を考える



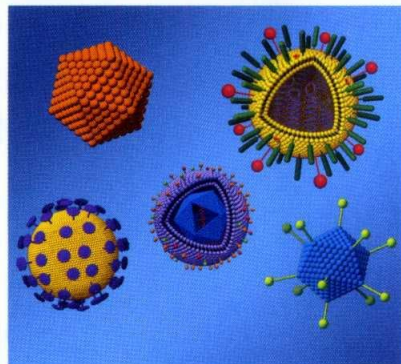
1 生物の共通点

- 12 千差万別な生物たち
- 14 生物は刺激に応答する
- 16 生物は外から栄養をとる
- 18 生物はふえる
- 20 地球の生物の共通点
- 22 発展編: 全ての生物は「DNA」をもつ
発展編: 「進化」は生物の最も重要な特徴の一つ
- 23 発展編: 地球外生命体は存在するか?



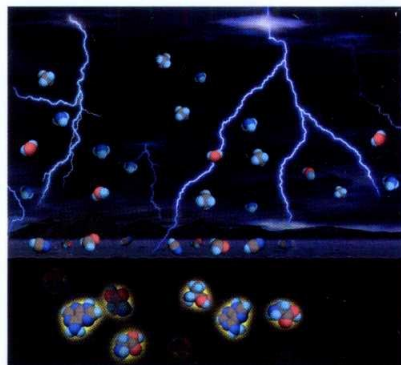
2 ウイルス

- 26 さまざまなウイルス
- 28 細胞とウイルス
- 30 インフルエンザウイルス
- 32 ノロウイルス
- 34 HIV / HTLV-1
- 36 コラム: ダニが運ぶ新種のウイルスとは?
- 38 コラム: 史上最大級の巨大ウイルス2種を発見



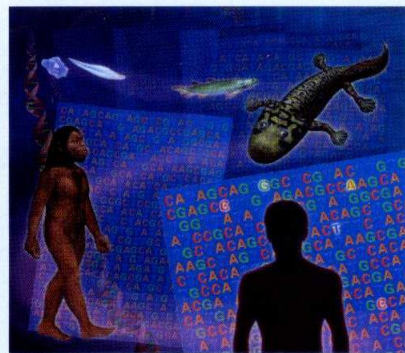
3 生命の誕生

- | | |
|--------------|---------------------------|
| 42 生命の起源 | 52 タンパク質ワールド仮説 |
| 44 生命の材料 | 54 コラム: 生物がもつ左手型と右手型のアミノ酸 |
| 46 最初の細胞 | |
| 48 ニワトリと卵の問題 | 56 生命の起源を求めて |
| 50 RNAワールド仮説 | |



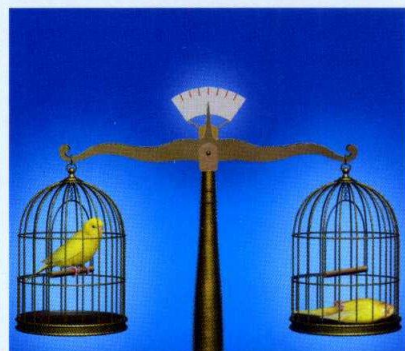
4 生物の進化

- | | |
|------------|---------------|
| 62 進化とは何か | 70 進化系統樹 |
| 64 ゲノムとDNA | 72 中立な変異 |
| 66 ゲノムの変異 | 74 生物の進化研究の動向 |
| 68 進化の実例 | |



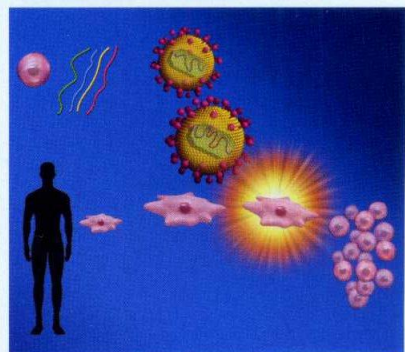
5 “生きている”とは何か

- | | |
|--------------|-------------|
| 80 生と死のちがい | 90 エントロピー |
| 82 エントロピーと生命 | 92 散逸構造 ①～② |
| 84 細胞の誕生と死 | 96 クマムシの秘密 |
| 86 物質の入れかわり | 98 生命の定義 |
| 88 生命の原理 | |



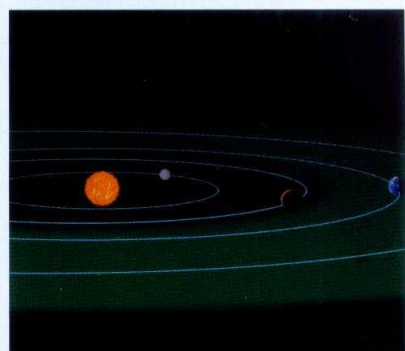
6 生命の最先端研究

- 102 生命の物理学 ①～②
- 106 無生物から生物をつくる
- 108 コンピューター上の生命
- 110 ES細胞とiPS細胞
- 112 ES細胞, iPS細胞の最新研究
- 114 生物の創生にいちどむ若者たち



7 地球外生命

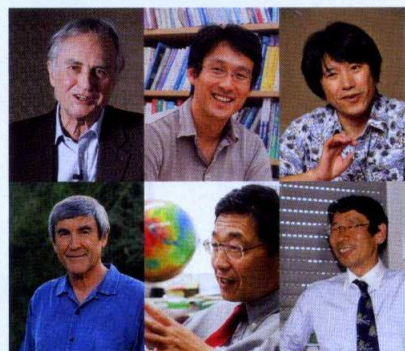
- | | |
|-------------------|--------------------|
| 122 条件1: 水の存在 ①～② | 132 条件5: 恒星の寿命 |
| 126 条件2: 惑星のタイプ | 134 条件6: 銀河中心からの距離 |
| 128 条件3: 惑星の大きさ | 136 衛星の生命 |
| 130 条件4: 巨大ガス惑星の数 | 138 地球外生命は存在するか? |

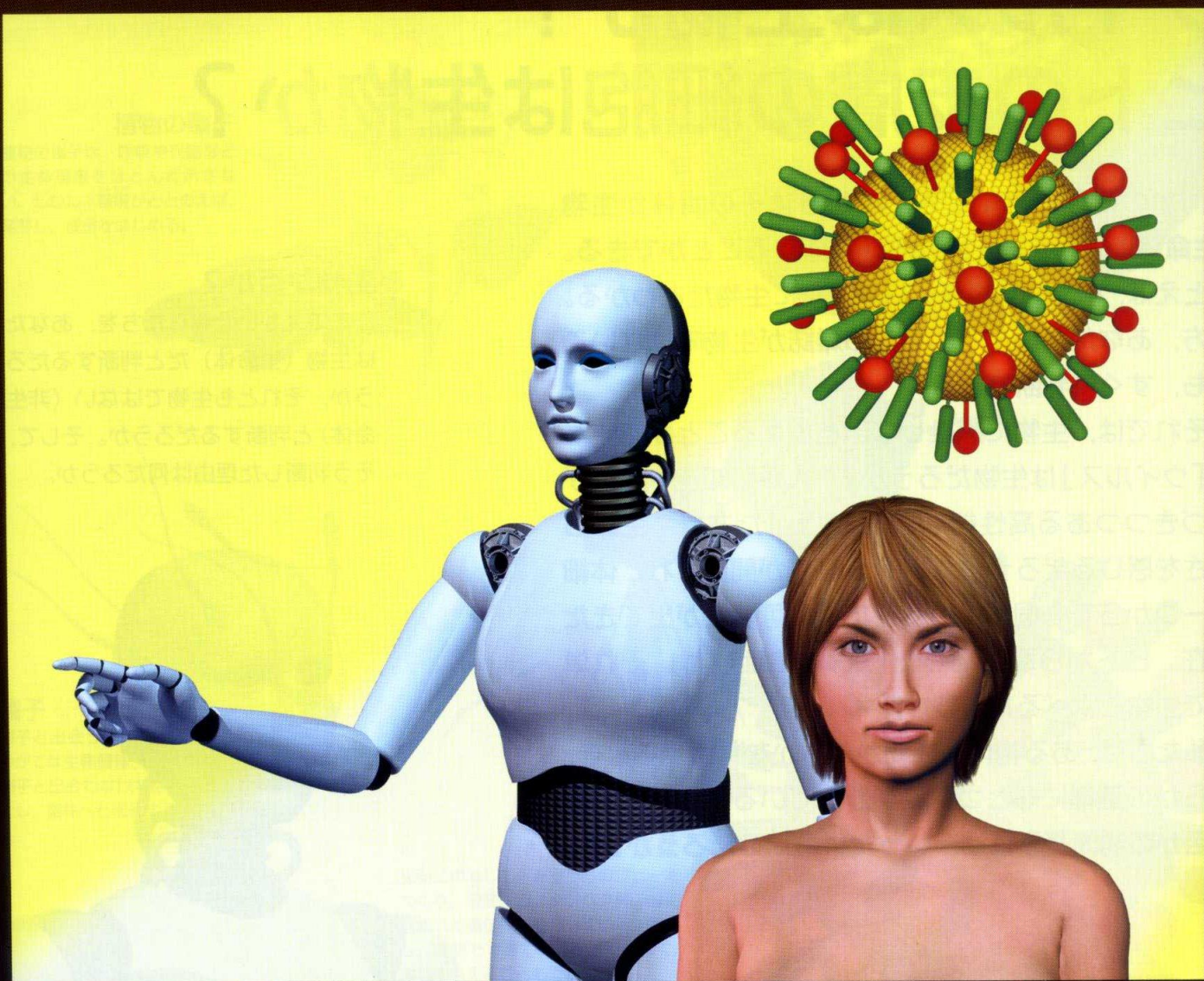


エピローグ

研究者が語る“生命とは何か”

- 144 生命と物質に根本的なちがいはない／リチャード・ドーキンス博士
- 146 “生命のソフトウェア”は書き換えられる／ポール・デイヴィス博士
- 147 「生命とは何か」の答えは宇宙にある／松井孝典博士
- 148 ヒトゲノムの全合成が生命解明の道を開く／上田泰己博士
- 149 生物学は「発見の時代」から「生命の本質にせまる時代」へ／吉川研一博士
- 150 極限環境の生物は地球外の生命を探る手がかりとなりうる／長沼毅博士





ウイルスは生物か？ ヒトの皮膚の細胞は生物か？

何かの物体を見たとき、**私たちはその物体が生物（生命体）かどうかを直観的に判断することができる。**
たとえば、イヌやネコを見ればすぐに生物だとわかる。
一方、あなたが読んでいるこの雑誌が生物ではないことも、すぐに判断できる。

それでは、生物に感染しないとふえることができない「ウイルス」は生物だろうか？ 人類に知能や動きが近づきつつある高性能な「ロボット」たちに、生命らしさを感じるだろうか？ アイピーエスさいぼう iPS細胞が開発され、体細胞一つからでも個体がつくりだせる可能性が出てきた現在、ヒトから取りだした「ひふ皮膚の細胞」は、それ単独で生物とよべるだろうか？

私たちは、ある物体が生物かどうかを判断するとき、何らかの基準にもとづいて判断しているはずだ。**生物か否かの判断基準とは、いったい何なのだろうか？**

生物か否か？

ここでえがいた物体たちを、あなたは生物（生命体）だと判断するだろうか、それとも生物ではない（非生命体）と判断するだろうか。そして、そう判断した理由は何だろうか。

ロボット

私たちが一般的に思い浮かべる生物とちが^うい、体は主に金属で構成されている。しかし、人間と同じように周囲の状況を判断し、自律的に動いたり、会話したりできる。

地球

岩石や金属でできた直径約1万2700キロメートルの球体。表面および内部は活発に動いており、「地球は生きている」などと表現されることもある。



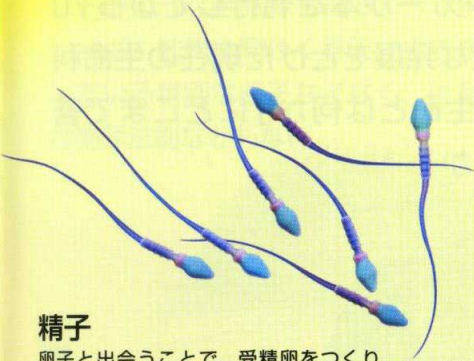
植物の種子

植物の種子は、呼吸や代謝などの生命現象をほとんど示さない。しかし、環境がととのえば、発芽し、成長をはじめる。



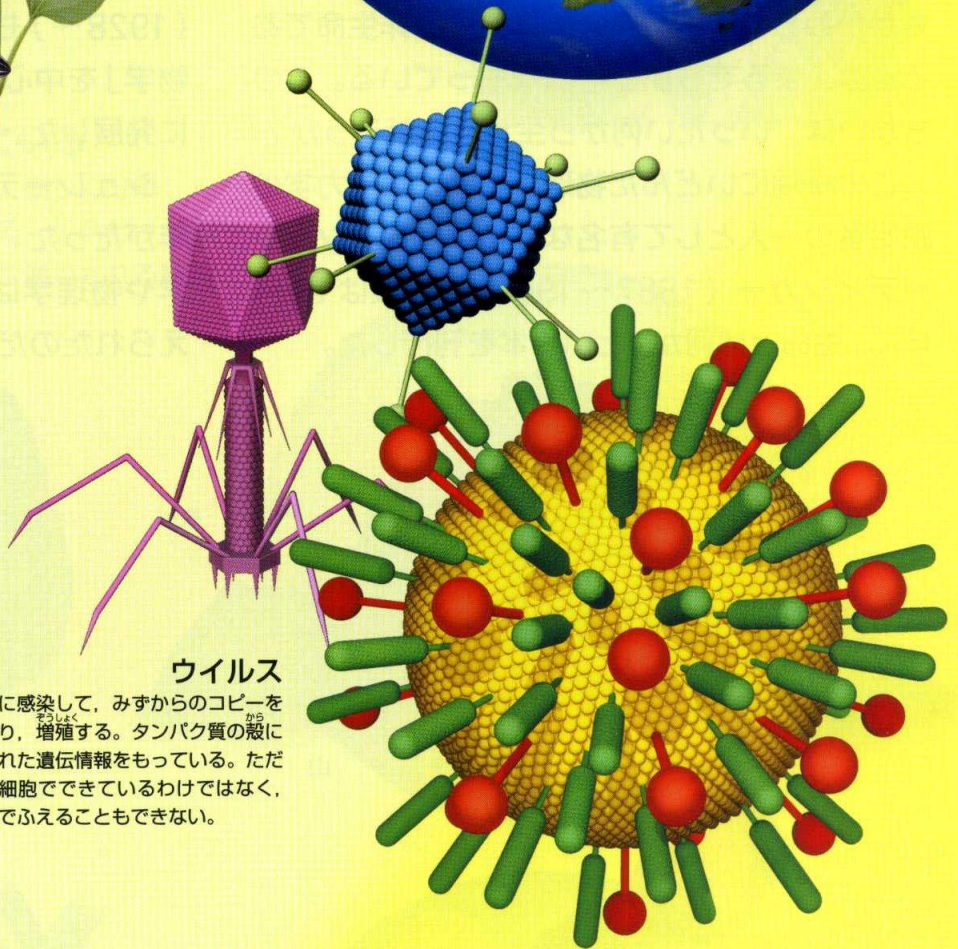
精子

卵子と出会うことで、受精卵をつくり、やがては生物個体へと成長する。しかし、卵子と出会わなければ、やがて活動を停止し、個体へと成長することはない。



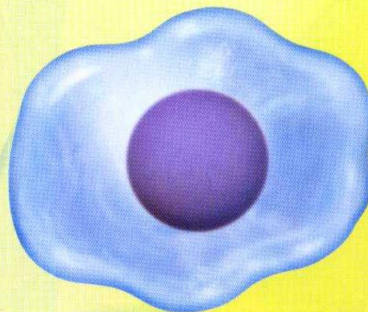
ウイルス

生物に感染して、みずからのコピーをつくり、増殖する。タンパク質の殻に包まれた遺伝情報をもっている。ただし、細胞でできているわけではなく、単独でふえることもできない。



皮膚の細胞

近年、クローン技術の発展やiPS細胞の開発によって、1個の皮膚細胞（体細胞）からでも、生物個体をつくれる可能性が出てきている。iPS細胞とは、皮膚などに分化した体細胞を、特殊な技術で未分化な状態にもどした細胞のことだ。





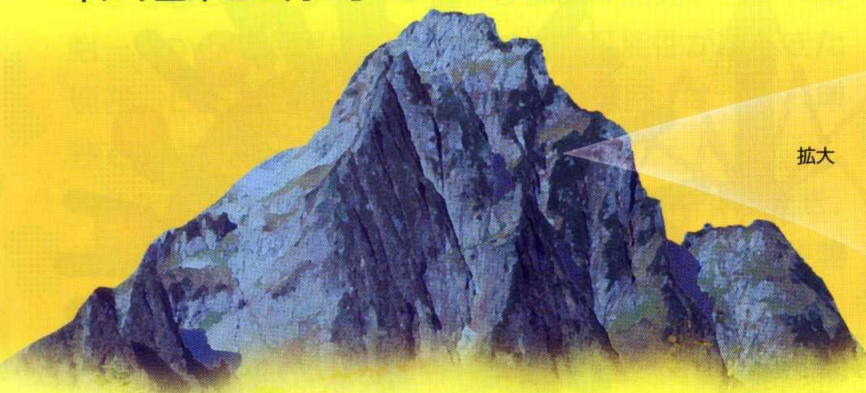
70年前、一人の物理学者が生命の謎にいどんだ

ヒトも岩も、細かく分解してみれば、どちらも同じく「原子」からできていることがわかる。同じ原子でできている以上、ヒトにも岩にも、同じ物理法則がはたらいているはずだ。それにもかかわらず、生命であるヒトと、非生命である岩は、まるでちがう特徴をもっている。このちがいは、いったい何から生じるのだろうか？

この疑問にいどんだ物理学者が、量子力学の創始者の一人として有名なエルヴィン・シュレーディンガー（1887～1961）だ。彼は1944年に『生命とは何か』という本を刊行した。

生命の謎を物理学と化学によって解き明かそうとしたこの本は、多くの科学者を刺激した。本の刊行から約9年後（1953年）にDNAの2重らせん構造を発見したジェームズ・ワトソン（1928～）もその一人だ。それ以降、「分子生物学」を中心とする、近代的な生命科学が急速に発展した。

シュレーディンガーが本を刊行してから70年がたった。急速な発展をとげた現在の生命科学や物理学は、「生命とは何か」にどこまで答えられたのだろうか？



山

拡大



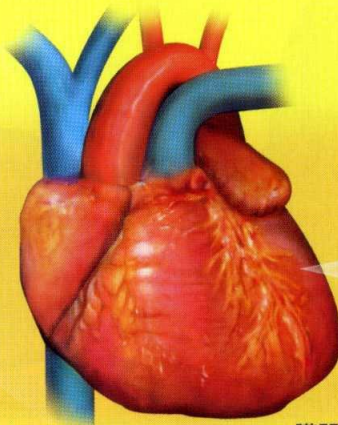
岩

拡大



ヒト

拡大



臓器

拡大

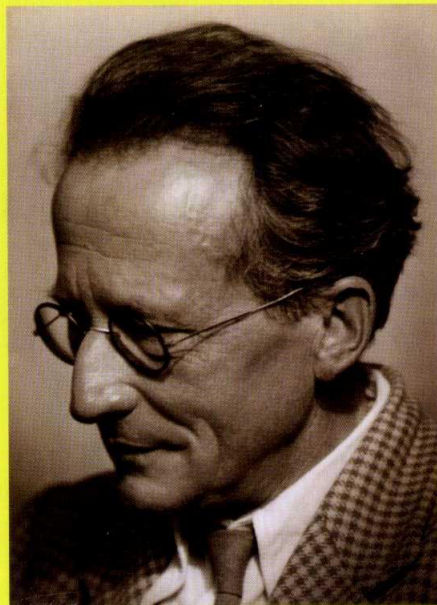
●『生命とは何か』（原題：What is life?）

現在の生命科学の発展を切り開いた、シュレーディンガーによる歴史的名著。1944年の刊行当時、遺伝子（親から子へ生物の特徴を伝えるもの）の正体がDNAであることすらわかっておらず、生物には、たんなる物体とはことなる特別な力（物理法則）がはたらいているとする思想も残っていた。そんな中、物理学と化学の視点から生命についての考察を行った本著は、大きな話題となった。

シュレーディンガーは本の中で、「生物体は負エントロピーを食べて生きている」とのべた。この意味についてはPART5で紹介するが、ここに出てくる「エントロピー」という物理学の概念こそが、生命の謎をとくための重要なかぎだと考えられている。

エルヴィン・シュレーディンガー (1887～1961)

オーストリア生まれの物理学者。電子や原子などのミクロな世界を説明するための理論である「量子力学」の創始者の一人として知られる。量子力学の重要な方程式である「シュレーディンガー方程式」をみちびきだした。



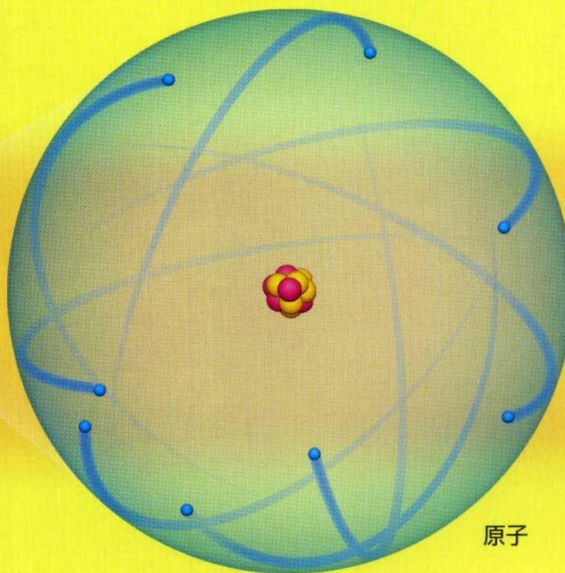
生命も物理学の法則に支配されている

ヒトのような生命体も岩のような物体も、細かく分解していけば、結局は同じく原子からできている。生命だけがもっている特別な原子などなく、生命だけに適用される特別な物理法則などもない。



鉱物

拡大

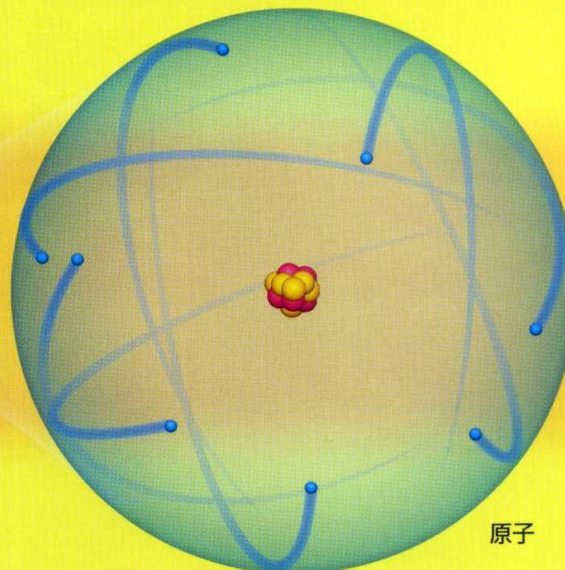


原子



細胞

拡大



原子

1

生物の共通点

協力 長沼 毅

草原を走りまわる動物，空を飛ぶ鳥，春になるといっせいに花をつける草木。私たちはこれらに「生命」を感じる。一方で私たちは，道ばたに落ちている石ころには生命を感じない。もともとは生命体であった木でつくられていても，机やいすに生命を感じることはない。花びんにさしてあるきれいな花は，造花だとわかった瞬間に生命を感じなくなるだろう。私たちは，いったい何に「生命」を感じているのだろうか？ PART1では，生命をもった物体，すなわち「生物」の共通点を探ることで，生命とは何かにせまっていく。

千差万別な生物たち

生物は刺激に応答する

生物は外から栄養をとる

生物はふえる

地球の生物の共通点

発展編：全ての生物は「DNA」をもつ

発展編：「進化」は生物の最も重要な特徴の一つ

発展編：地球外生命体は存在するか？



画像はサバンナを疾走するチーター。本能にしたがい獲物を追いかけて、とらえて食べる。私たちは、躍動する野生動物に「生命」を強く感じる。

ヒトと植物と細菌に 共通する特徴とは何か？

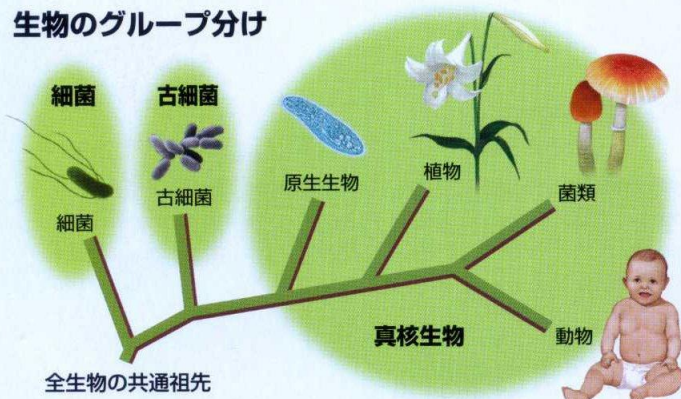
地球は、生物の惑星だ。陸上はもちろんのこと、空から深い海の底、地中深くに至るまで、さまざまな種類の生物が生息している。あなたの周囲を少し見渡ただけでも、ペットのイヌやネコ、水槽を泳ぐ魚、鉢植えの植物や、ハエや蚊など、多くの生物がいるだろう。あなたの体内や皮膚表面にも、100兆をこえる細菌が生息している。

細菌からヒトまでを含む、「すべての生物の共通点」は何かと問われたら、あなたはこう答えるだろうか？

たとえばヒトとイヌであれば、同じ哺乳類であり、形態的にも生態的にも共通点を見いだしやすい。どちらも目や耳、鼻などがあり、同じような食べ物を食べ、活発に動きまわる。

では、ヒトと植物をくらべてみるとどうだろうか。また、大きさが1000分の1ミリメートルほどしかない大腸菌をヒトとくらべてみたときはどうだろうか。そして「地球上のすべての生物」を考えたとき、そこにはどのような共通点があるのだろうか。

生物のグループ分け



生物学的には、地球上の生物は大きく三つのグループ(ドメイン)に分けられる。それは「真核生物」と「細菌」と「古細菌」の三つだ。真核生物ドメインには、「動物」と「植物」、「菌類(カビやキノコの仲間)」、「原生生物(ゾウリムシやアメーバなどの単細胞生物)」が含まれる。細菌ドメインには、文字通り大腸菌などの「細菌」が含まれる。古細菌ドメインには、「古細菌」という、細菌と大きさや形は似ているが性質のこととなる生物群が含まれる。真核生物以外の細菌と古細菌を、まとめて「原核生物」とよぶこともある。

姿形はちがっても、みな「生物」

現在の地球には、名前がつけられたものだけでも200万種以上の生物がすんでいる。生物の存在量(総重量)をみると、動物よりも細菌や古細菌などの微生物のほうが多い(動物が数十億～100億トンであるのに対して、微生物は約400億トン)。そして微生物よりも植物のほうがさらに多い(植物は1兆～2兆トン)。

アゲハチョウ
(節足動物)

アカクラゲ(刺胞動物)



イトマキヒトデ
(棘皮動物)



マダコ(軟体動物)



ワラビ
(シダ植物)

ヒメベニテングタケ
(担子菌)

シロフクロウ
(脊椎動物・鳥類)

テッポウユリ
(被子植物)

ボアコンストリクター
(脊椎動物・爬虫類)

ヤドクガエル
(脊椎動物・両生類)

シマミミズ (環形動物)

チョウチンアンコウ
(脊椎動物・魚類)

ヒト
(脊椎動物・哺乳類)

大腸菌 (細菌)

ボルボックス
(緑藻植物)

大腸菌さえも周囲の状況に対応しながら生きている

私たち人間は、光や音、におい、熱など、**周囲からあたえられる刺激を感じとり、それに応答しながら生きている**。たとえば、気温が上がれば汗をかき、光がまぶしければまぶたを閉じたり瞳孔が小さくなったりする。さらに、前方に障害物があったらよけて歩き、日差しが暑ければ日陰に移動するなど、**意識的あるいは無意識的に、自分にとってよりよい状況となるように活動している**。

大腸菌などの原始的な生物でさえも、周囲の刺激に応答しながら生きている。大腸菌の体(細胞)には、タンパク質でできた長い糸状の「べん毛」が複数生えており、これらを根元にあるモーターで回転させることにより推進力を得ている。べん毛がみな同じ方向に回転しているときは直進し、一部のべん毛が逆回転すると、推進力のバランスがくずれて進行方向が変わる。大腸菌はときおり進行方向をかえながら、腸の中などを泳ぎまわっている。

大腸菌の体の表面には、有害な物質を感じるセンサーがある。センサーが有害物質を感知すると、その情報がべん毛のモーターに伝わり、べん毛の回転方向が変わる。つまり、危険を感じて方向転換するのだ。これをくりかえすことで、結果的に大腸菌は有害物質から遠ざかることができる。

また、基本的に動かないように見える**植物たちも、実際は周囲の刺激に応答しながら生きている**。たとえば、暗い部屋でカイワレダイコンなどを育てて一方向から光を当ててみる。すると、光のほうへ向かって茎の先端が少しずつ曲がっていく。これは光の刺激に応答している証拠だ。

周囲の「**刺激に応答する**」ことは、すべての生物に共通する特徴の一つだといえそう。そして、このしくみを驚異的なまでに進化させた生物の典型例が、私たち人間だといえるだろう。

毒からは遠ざかり、好物には近づく

大腸菌の表面には、有害物質(金属イオンなど、細胞を破壊するようなもの)に反応するタンパク質でできたセンサー(受容体)がある。センサーに有害物質がくっつくと、べん毛の回転方向を逆にするスイッチが入り、結果として大腸菌の進行方向が変わる。これをくりかえすことで、大腸菌は有害物質が少ない安全な環境へと移動することができる。大腸菌は表面のセンサーを利用して、有害物質から逃げるだけでなく、栄養分(糖やアミノ酸)が多いほうや、温かいほう(より生息しやすい環境)へと近づいていく。



栄養の密度が高いほうへと進む大腸菌

栄養

有害物質



べん毛

大腸菌

有害物質が少ないほうへと
進む大腸菌

温かいほうへと
移動する大腸菌

熱

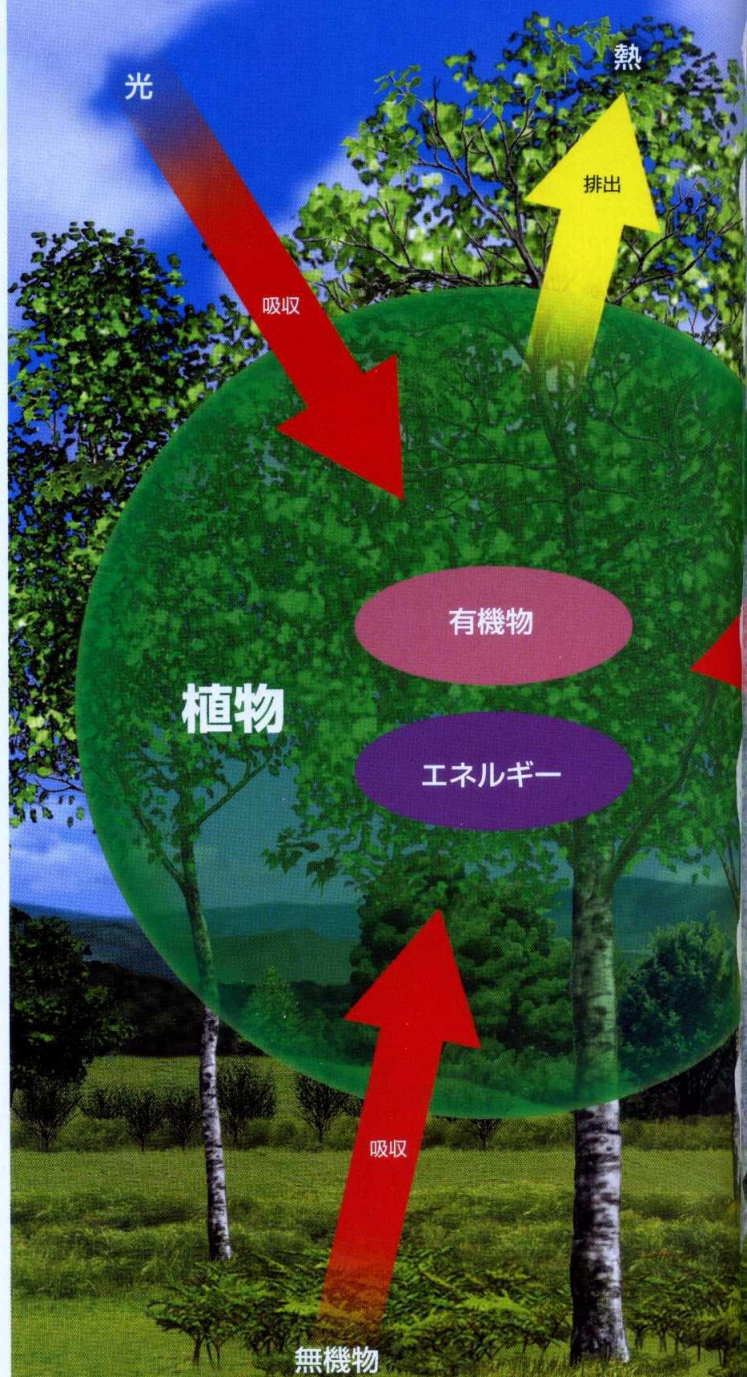
糖分、酸素、水、光…… 必ず何かを“食べて”いる

食べ物と水、そして空気（酸素）の存在なしには、どんな人間も生きることはいくつかできない。これはすべての動物に共通していることだ。一方、植物も、水やミネラル（無機物）、そして降り注ぐ太陽の光なしには生きることができない。

すべての生物は、生きるために「外から栄養をとる」必要があるようだ。栄養とは、生物が体の機能を維持し、高めるために必要な物質のことだ^{※1}。栄養として何を必要とするかは生物によってこととなるが、まったく栄養をとらない生物はいない。

生物が外から栄養をとって、体を動かすエネルギーを体内で作りだしたり、自分の体を構成する材料にしたりする一連の化学反応のことを「代謝」とよぶ。そして生物は、外からとった栄養を代謝で利用したあとに出る不要な物質を、ふたたび外に排出している。

実は、外から栄養をとるためには、ある特徴をもつことが前提となっている。あたりまえのことに聞こえるかもしれないが、すべての生物は、自分（内部）と自分以外（外部）を分ける境界をもっている。つまり、「内と外の区別がある」ということだ。そうでないと、そもそも外から栄養をとることはできないのである。



※1：生物学的には、「外界から物質を摂取し、体の機能を維持し、高めること」を栄養という。ところが一般的には、栄養のために外から取り入れる物質（栄養素）を指して、栄養とよぶことが多い。ここでは、一般的な用法にならい、栄養を栄養素の意味で使っている。また、水や酸素、二酸化炭素なども本来は栄養（栄養素）の一種であるが、別にあつかわれる場合も多い。

注：植物は、二酸化炭素を吸って、酸素を排出する（光合成）とともに、酸素を吸って二酸化炭素を排出（呼吸）してもいる。光が当たる昼間は光合成（酸素の排出）のほうが圧倒的にさかんなので、呼吸（二酸化炭素の排出）は目立たない。

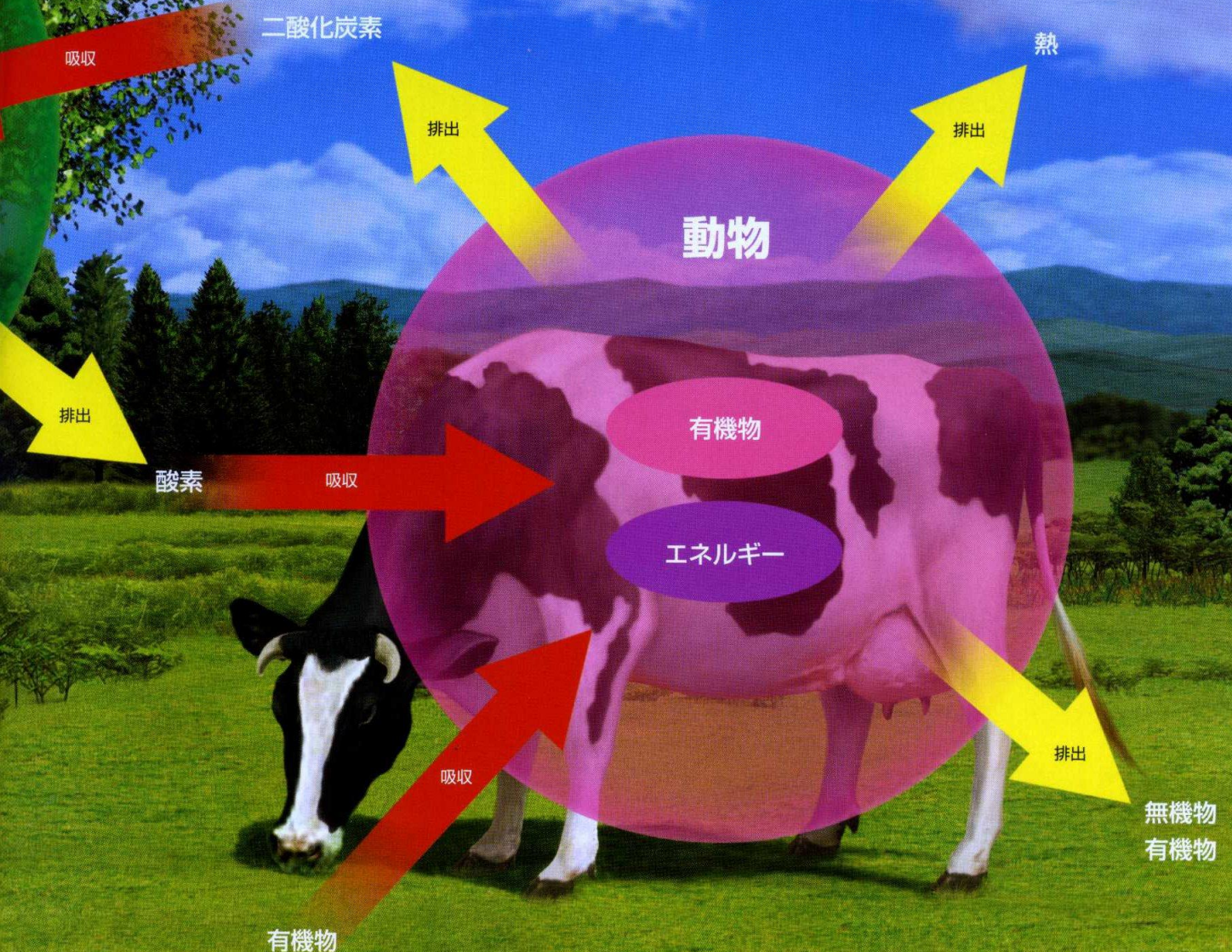
栄養をとって体やエネルギーをつくり、不要なものを排出

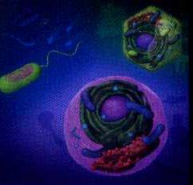
植物であれ動物であれ、すべての生物は、外から栄養をとり、みずからの体や活動のためのエネルギーをつくりだしている。そして不要な物質や熱を外に排出している。物質やエネルギーの出入りなしに、生物が生きることはいできない。

植物は、光（太陽光）のエネルギーを使って、水と二酸化炭素（無機物）を材料に、有機物と活動するためのエネルギーをつくりだしている。この反応が「光合成」だ。光合成反応の副産物として酸素ができる。植物がつくる有機物は、セルロースなど体を形づくるための有機物と、デンプンなどみずからの栄養として使う有機物に分けられる。

一方、動物は、植物がつくりだした酸素と有機物を取りこんで、みずからの体の材料や活動のエネルギー源としている。そして、不要な二酸化炭素や熱、取りこんだ有機物が分解されてできた無機物や有機物を外に排出している。

すべての生物のエネルギー源は、元をたどると太陽光のエネルギーということになる。





アメーバからはアメーバが，イヌからはイヌが生まれる

イヌは，一度に数匹^{ひき}から10匹前後の子供を産む。マンボウは，一度に数億個もの卵を海中に産む。タンポポは綿毛^{はんしよく}つきの種子を飛ばして，アオカビは孢子^{はんしよく}を飛ばして，繁殖する。すべての生物は「ふえる」のだ。

そして，生物がふえるときに何より重要な点は，**自分と同じ姿をした生物がふえる**ということだ。生物学的にはトビがタカを生むことはない。生物が自分と同じ種類の子供を産み，親の性質が子に伝わることを「**遺伝**」とよぶ。

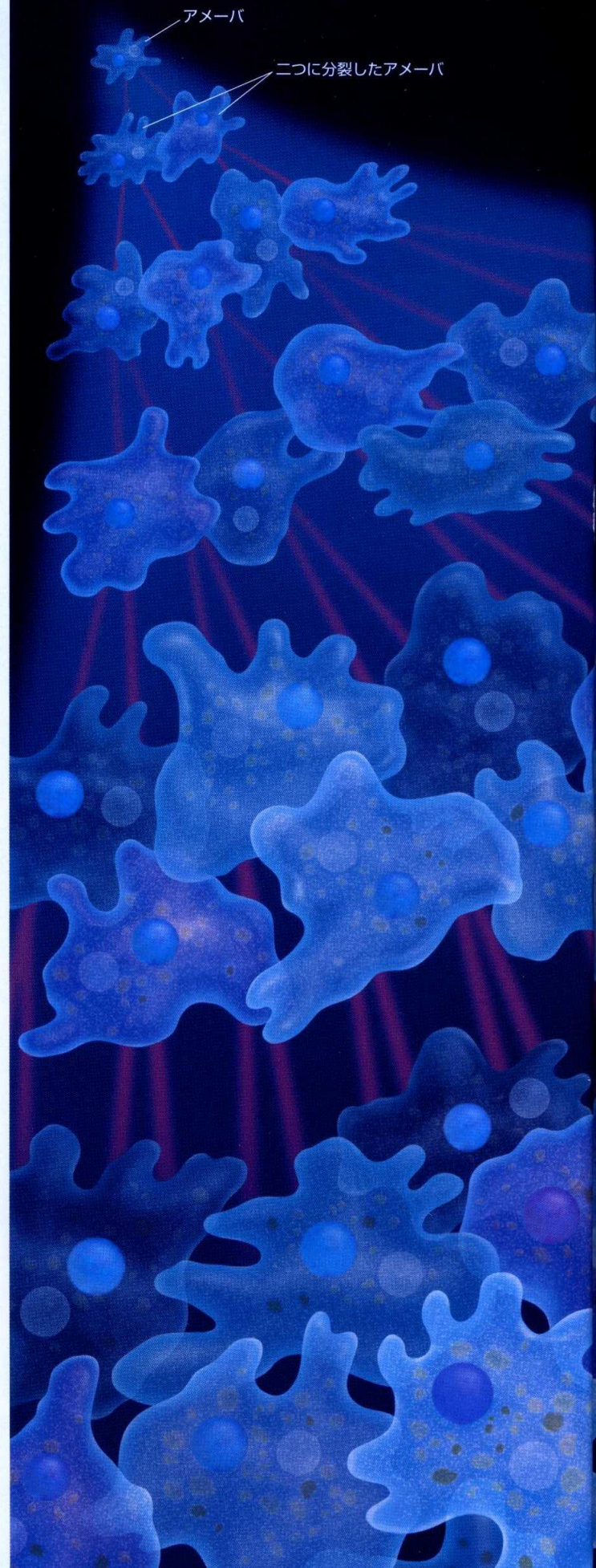
生物がふえるしくみの基本は，一つの細胞が二つに分かれる「細胞分裂^{ぶんれつ}」だ。細菌および原生生物（アメーバなど）は，一つの細胞だけで個体になりたっている「単細胞生物」だ。このような生物では，細胞が分裂することがすなわち，個体数がふえることを意味する。

一方で，多くの細胞が集まって個体をつくっている「多細胞生物」の場合，個体をふやすしくみは単細胞生物ほど単純ではない。多くの場合，卵子や精子などの「生殖細胞」とよばれる特別な細胞を使って子供をつくり，個体数をふやしている。

「遺伝」によって，
親と同じ姿をした
生物が生まれる

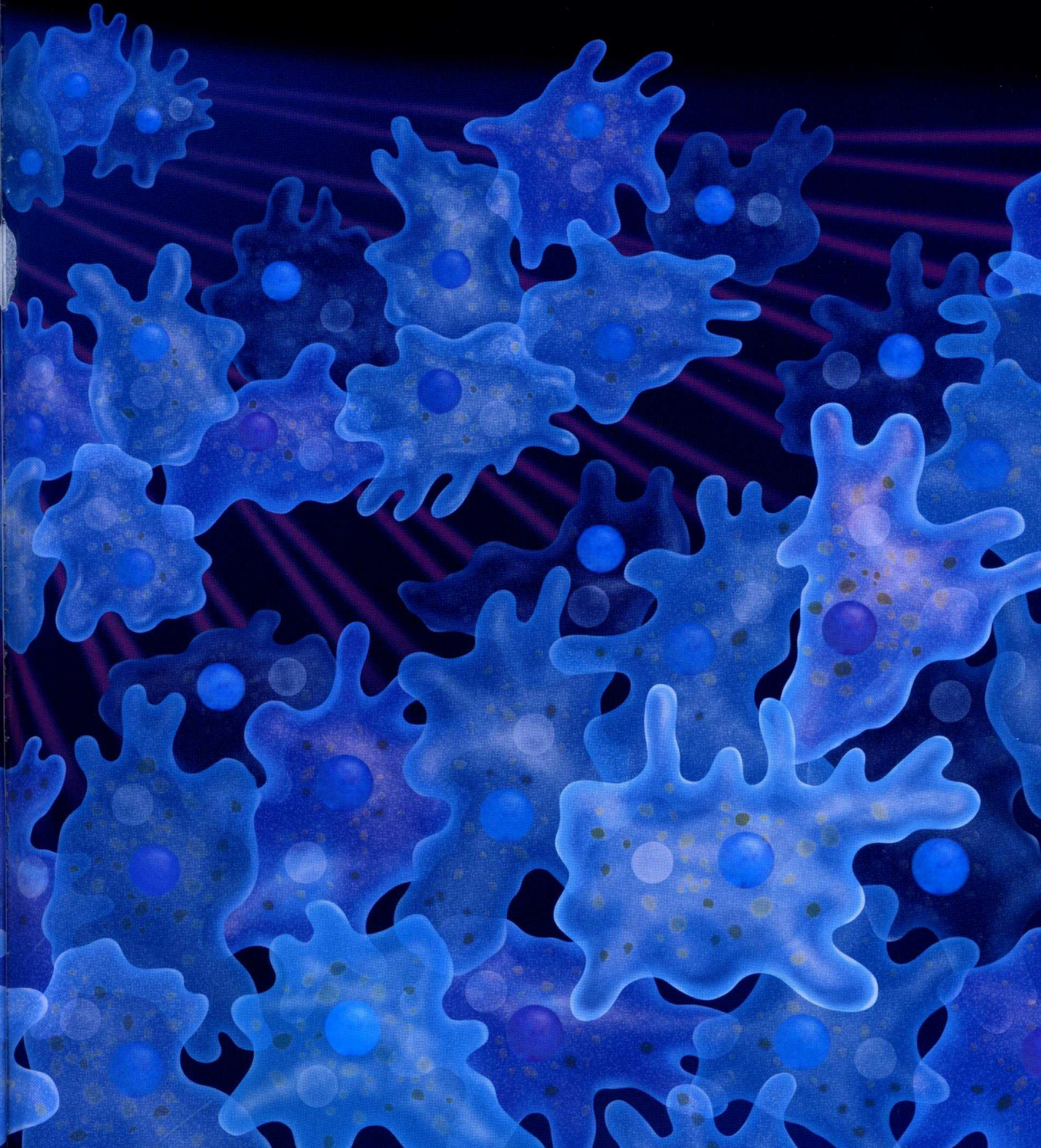


子供を産んだイヌ（犬種はダルメシアン）。画像のように，親と同じ姿をした生物が生まれるのは，親から子へと遺伝情報（DNA）を正しく伝える「遺伝」のしくみによるものだ。



細胞は倍々でふえていく

細胞分裂によってふえていくアメーバ（原生生物）をえがいた。1個の細胞が2個、2個が4個、4個が8個と倍々にふえていく。細胞の中に含まれる遺伝情報（DNA）などの物質は、同じものが複製されたうえで、分裂後の2個の細胞に分配される。イラストは単細胞生物の場合をえがいているが、どんなに複雑な多細胞生物であっても、個々の細胞が分裂するしくみは基本的に同じである。



地球の生物はみな「細胞」でできている

ここまで「刺激にตอบสนองする」、「外から栄養をとる」、「内と外の区別がある」、「(自分と同じ姿をしたものが)ふえる」といった、生物に共通する特徴をあげてきた。ただし、これらの特徴のどれか一つを満たすだけでは、生物とはいえない。たとえば、自動ドアは人がやってきたことを感じて(刺激にตอบสนองして)ドアを開くが、自動ドアが生物でないことは明らかだ。

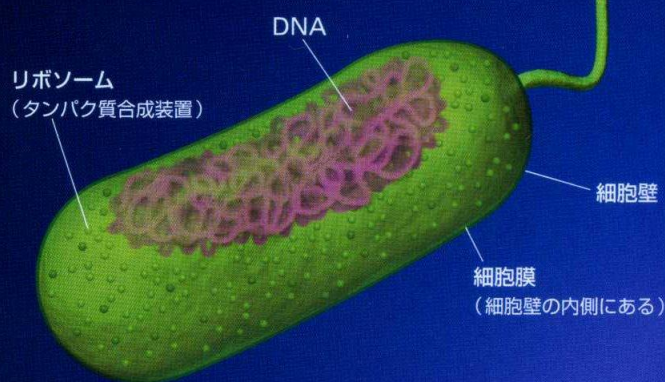
一方で、これらの特徴をすべてかねそなえた物体があれば、それは生物だと考えてまちがいないだろう。つまり、**生物とは、「内と外の区別をもち、周囲の刺激にตอบสนองし、外から栄養をとって、自分と同じものをふやせるもの」**だといえることができる。

これらの生物の特徴を実現させている実体——それが、「細胞」である。細菌でも植物でも動物でも、**地球上のすべての生物は、細胞を基本単位としてできている**。細胞の存在が発見されたのは17世紀だ。発見者は、イギリスの科学者ロバート・フック(1635~1703)である。19世紀に入るところには、すべての生物が細胞からできていると考えられるようになった。

プロローグ(6ページ)であげた物体が生物かどうかを、ここであらためて考えてみよう。細胞でできていないロボットやウイルス、地球は、生物ではないことになる。植物の種子は細胞でできており、環境がととのえば発芽して生物の特徴をすべて満たすため、生物だといえる。精子と皮膚の細胞は、細胞でできているが、単独では外から栄養をとってふえることができない。そのため、独立した生物とみなすのはむずかしそうだ。なお、生物と非生物の境界については、研究者の間でも議論がある。

原核細胞

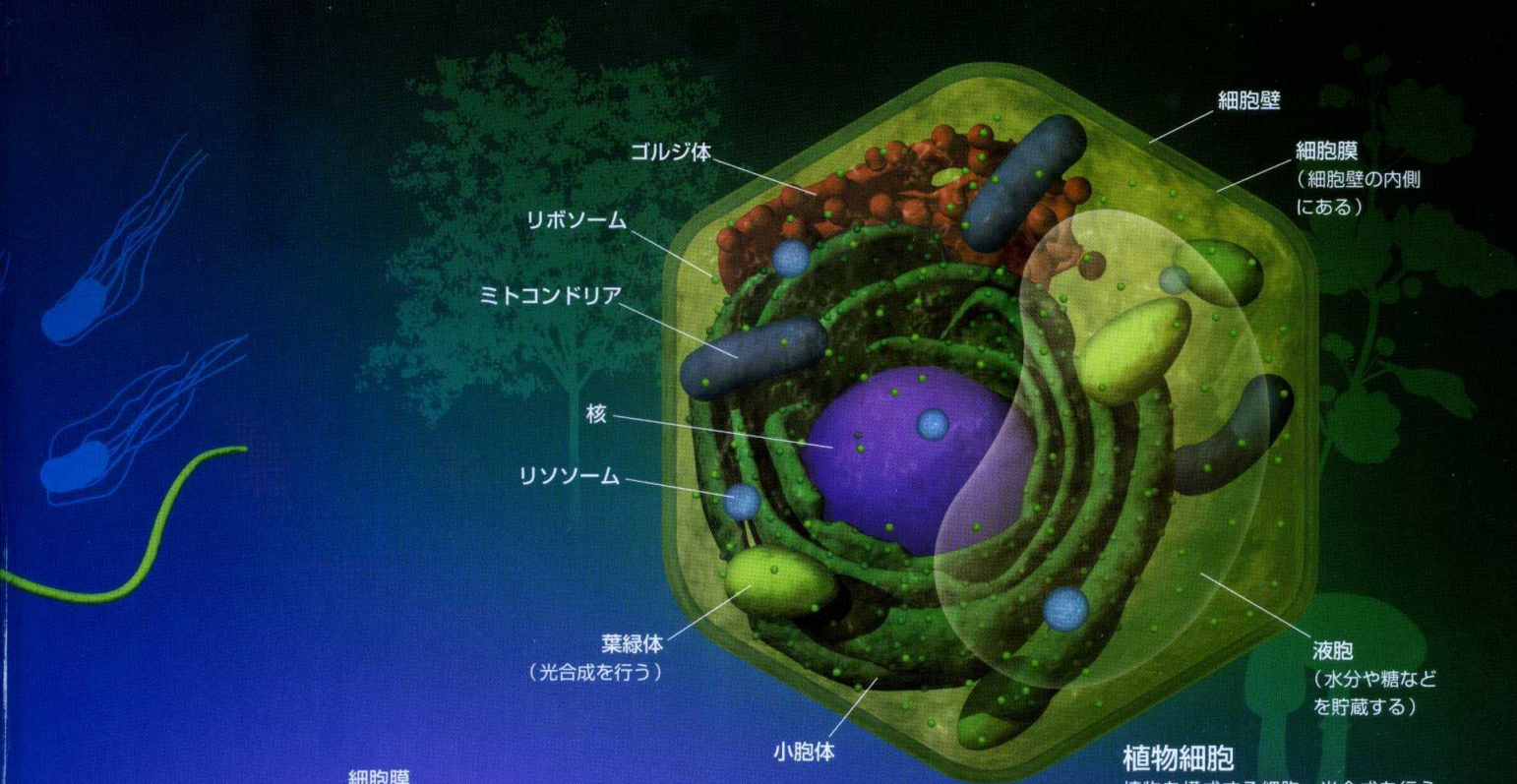
細菌や古細菌の細胞。ほかの細胞とくらべて、DNAが核に入っておらず、むきだしになっている。めだった構造物が少なく、簡単な構造をしている。



生物の基本単位「細胞」

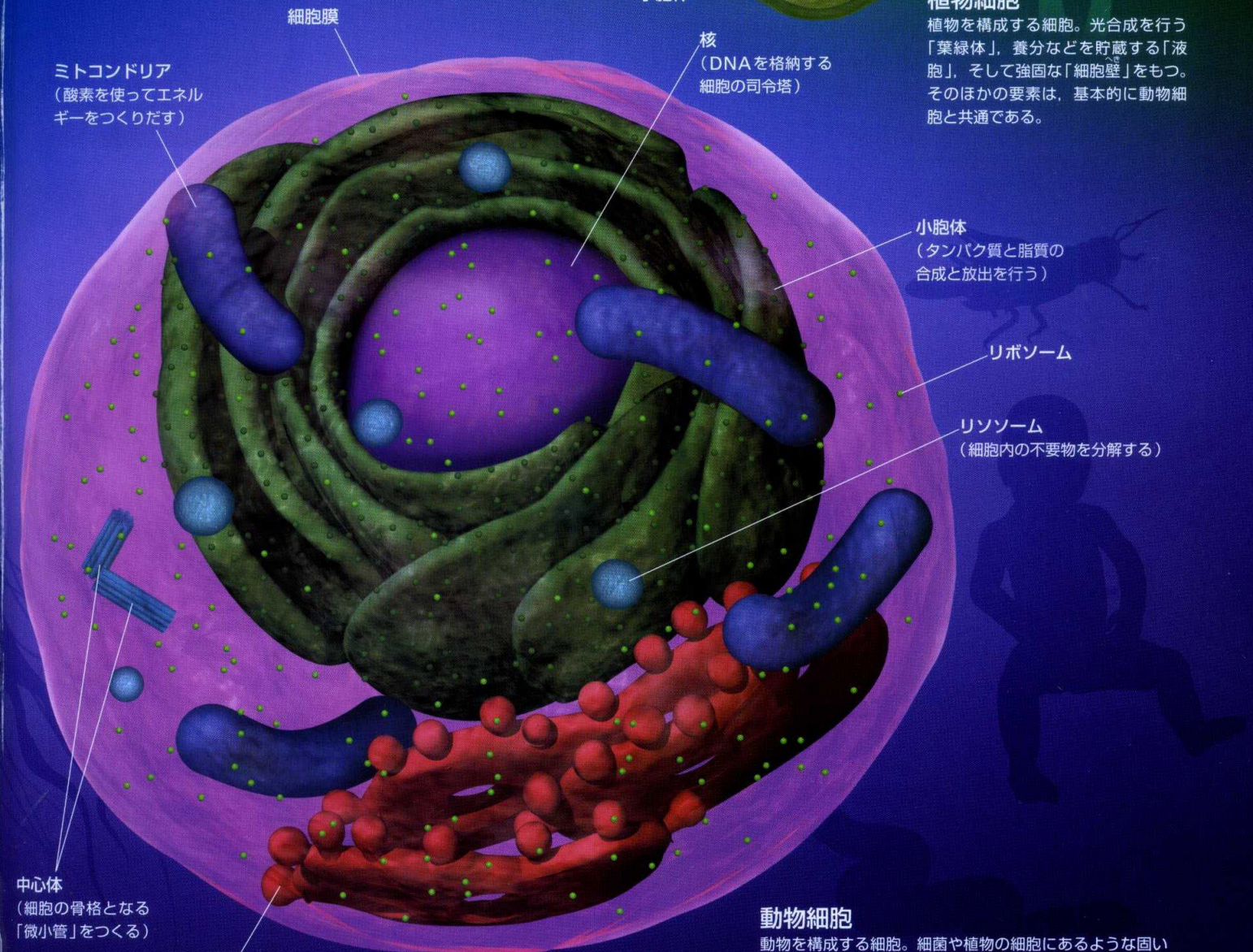
生物の細胞には大きく分けて3種類がある。細菌などの原核生物がもつ「原核細胞」と、動物がもつ「動物細胞」、植物がもつ「植物細胞」だ。このページでは、それぞれの細胞の代表的な構造をえがいた。動物細胞と植物細胞は、原核細胞とちがいで、遺伝物質(DNA)が核に格納されている。動物細胞と植物細胞をまとめて「真核細胞」とよぶこともある。

動物細胞と植物細胞の多くは、直径0.01~0.1ミリメートルほどの大きさだ。一方、原核細胞は直径0.001~0.01ミリメートルほどしかない。どの細胞も基本的な要素として、細胞と周囲をへだてる膜(細胞膜)とDNA、リボソームをもっている。それ以外の要素は、細胞によってことなる。たとえば、動物細胞と植物細胞は、「細胞小器官」とよばれるさまざまな機能をもった複雑な構造物をもっているが、原核細胞はもっていない。



植物細胞

植物を構成する細胞。光合成を行う「葉緑体」、養分などを貯蔵する「液胞」、そして強固な「細胞壁」をもつ。そのほかの要素は、基本的に動物細胞と共通である。



動物細胞

動物を構成する細胞。細菌や植物の細胞にあるような固い細胞壁をもたない。脂質でできた厚さ5～10ナノメートル(ナノは10億分の1)程度の薄い細胞膜におおわれている。

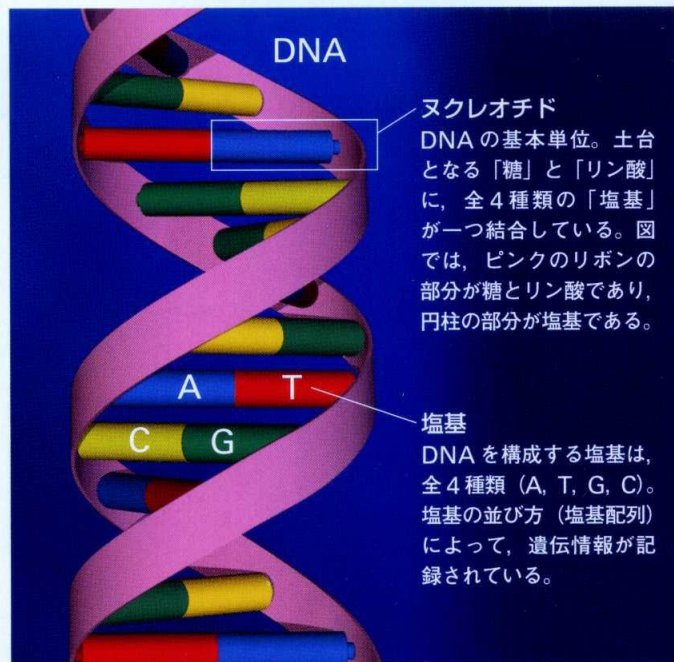
ここでは、さらに知っておきたいトピックスや発展的な内容を紹介する。

すべての生物は「DNA」をもつ

地球上の生物はすべて、遺伝物質として「DNA(デオキシリボ核酸)」を利用している。つまり、地球上の生物の共通点として、「DNAをもつ」をあげることもできる。

DNAは基本単位がくりかえしつながることで、長いひも状の分子をつくっている。DNAの基本単位は「ヌクレオチド」という。ヌクレオチドの中にはアデニン(A)、チミン(T)、グアニン(G)、シトシン(C)の全4種類の「塩基」が含まれている。この塩基の並び方によって、遺伝情報が記録される。AとT、GとCの塩基がたがいに引きあうことで、2本の長いDNAのひもが、らせん状にからみあっている(2重らせん構造)。

このようなDNAの構造は、大腸菌からヒトに至るまで、すべての生物に共通である。ただし、DNAの長さは生物によって、大きくことなっている。



「進化」は生物の最も重要な特徴の一つ

生物は「進化」する。進化がなければ、地球に誕生した原始的な生物から、私たちヒトのような複雑な生物が生まれることはなかったはずだ。進化とは、生物個体あるいは集団の性質が、時間をかけて変化していく現象である。



ゾウ類の進化 図はゾウ類の進化の過程をえがいたものだ。右に行くほど登場した時代が新しい。少しずつ大型化し、鼻がのびていったことがわかる。最古のゾウ類(左端)はおよそ5500万年前に登場した。

極限環境の生物を研究する広島大学の長沼毅准教授は、「進化は、生物がもつ最も重要な特徴の一つです。非常に長い時間をかけた変化なので、だれも直接確認したことはありませんが、化石や遺伝子を解析した結果などから、生物が進化することはまちがいないでしょう」と話す。

18ページで、生物は自分と同じ姿をした生物をふやすと紹介した。これは遺伝情報を記録したDNAを正しく複製し子に伝える、遺伝のしくみのおかげだ。ただし、DNAは親と100%同じものが子に伝わるわけではない。そのわずかなちがいが、進化の原動力になる。

DNAが複製されるときに“ミスコピー”が生じたり、紫外線などでDNAが一部損傷を受けて変化したりすることがある(突然変異)。DNAの突然変異が子に伝わると、子は親とはちがったDNAをもつことになる。世代をこえてこうした突然変異が蓄積され、生物グループの中で広まっていくと、やがて元の生物とはちがった性質をもった生物のグループができあがる。これが進化のしくみである。このような進化のしくみの基本となる考え方を最初に示したのが、イギリスの博物学者チャールズ・ダーウィン(1809～1882)である。

地球外生命体は存在するか？

すべての生物は細胞でできている。細胞は脂質でできた膜をもち、水で満たされた細胞内にはさまざまなタンパク質と、遺伝情報であるDNAがつまっている。外から栄養を取り入れて代謝し、自分自身を複製してふえる。ただし、これはあくまでも、地球の重力や温度、空気などの環境で進化してきた地球型の生物の特徴だ。

何を手がかりにさがせばよい？

地球とはことなる環境で進化した生物がいたとしたら、それは地球型の生物とはちがう物質で構成され、ちがう特徴をもっているもなら不思議ではない。広島大学の長沼准教授は、「理論上は、増殖をしない生物や膜をもたない生物だって考えることができます。ただし、代謝をしない生物というのは理論的にも考えにくいですね」と話す。

地球外生命体をさがすとしたら、いったい何を手がかりにさがせばよいのだろうか？「残念ながら、地球外生命体にも適用できるような、普遍的な生物の条件というものはわかっていません」(長沼准教授)。地球外生命体をさがすには、やはり地球の生物を手がかりにするほかないのだ。

まずは探査機を使って「有機物」を検出することが、地球外生命体をさがす最も現実的な方法だ。有機物とは、炭素の骨組み

をもつ化合物であり、炭化水素やアミノ酸など、地球上の生物を構成する主要な材料である。

地球外生命探査が最も進行している天体は火星だ。NASA(アメリカ航空宇宙局)の探査車「キュリオシティ」は、現在火星上で有機物の検出をめざしている(下の図)。ただし、有機物を検出できたとしても、生命体の存在を示す間接的な証拠にしかない。生命体の存在を示すには、やはり代謝や増殖といった、生命活動の直接的な証拠を検出する必要がある。そこでアメリカや日本では、さらに踏みこんだ探査を可能にする新たな探査機を火星に送りこむ計画が進んでいる。火星から「生命発見！」の歴史的ニュースが届く日は、意外と近いのかもしれない。

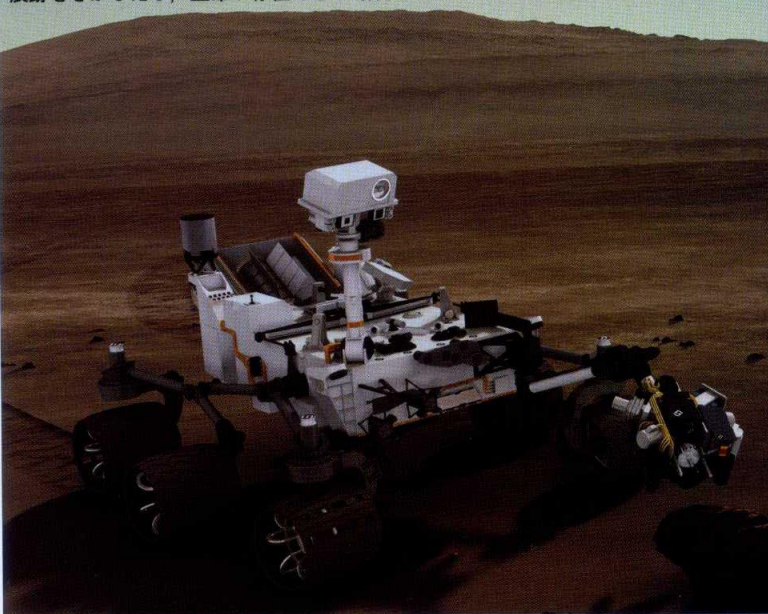
地球外生命体は火星のほかにも？

生命体が存在する可能性が高いのは、「ハビタブル・ゾーン(生命生存可能領域)」とよばれる領域だ。これは、「液体の水」が存在できる領域を指す。液体の水は、少なくとも地球型の生物にとって、生きるための必須条件だ。

太陽系で理論上ハビタブルゾーンに入る惑星は、地球と火星の二つだけである。ただし、木星の衛星エウロパには、表面をおおう厚い氷の下に、液体の水が存在すると考えられている。エウロパの氷の下に海に何らかの生命体がいる可能性も否定できないのだ。

火星探査車キュリオシティ

2012年8月に火星に到着し、火星表面で探査をつづけている。正式名称は「マーズ・サイエンス・ラボラトリー」。探査の主な目的は、火星で生命の痕跡をさがしだし、生命が存在できる環境であったかどうかを探ることだ。



上は、キュリオシティが探査の目的地に設定している火星の「シャープ山」の画像。キュリオシティが撮影したものだ。この場所のはかつて湖の底であり、そのとき堆積物が層状に積み重なったと推測されている。この地層に生物由来の有機物が存在する可能性が高いのではないかと期待されている。

2

ウイルス

協力 松岡雅雄／山内一也／西條政幸

PART1では、地球上の生物が皆、細胞を基本単位としてできていることを見てきた。その意味では、細胞からできていないウイルスは、生物ではないことになる。しかし、ウイルスは、みずからのコピーをつくってふえたり、DNAなどの遺伝情報をもっていたりと、生物の特徴も一部かねそなえている。いったい、ウイルスとは何者なのだろうか？ ウィルスとひと口にいっても、その種類はさまざま。PART2では、ウイルスの種類や生物の細胞とのちがいについて、くわしく見ていこう。

さまざまなウイルス

細胞とウイルス

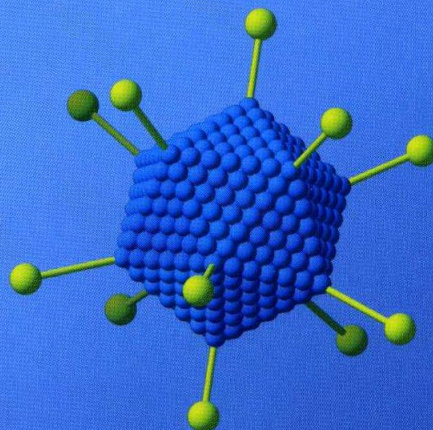
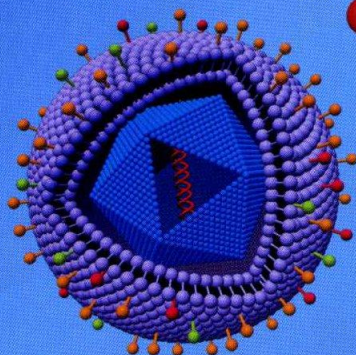
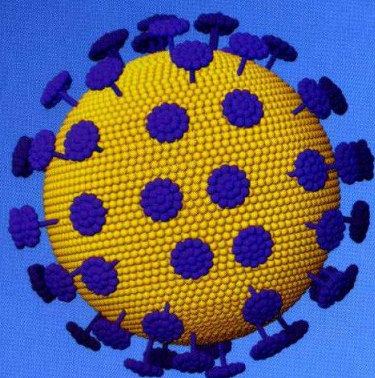
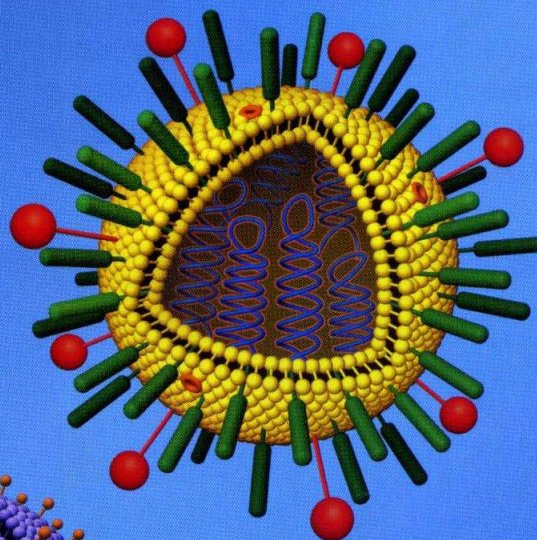
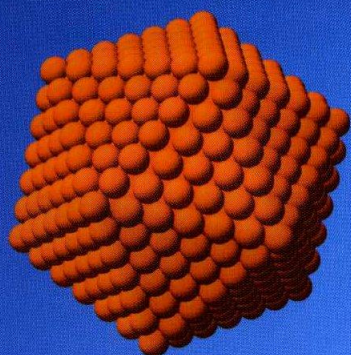
インフルエンザウイルス

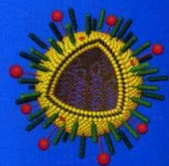
ノロウイルス

HIV／HTLV-1

コラム：ダニが運ぶ新種のウイルスとは？

コラム：史上最大級の巨大ウイルス2種を発見





ウイルス

さまざまなウイルス

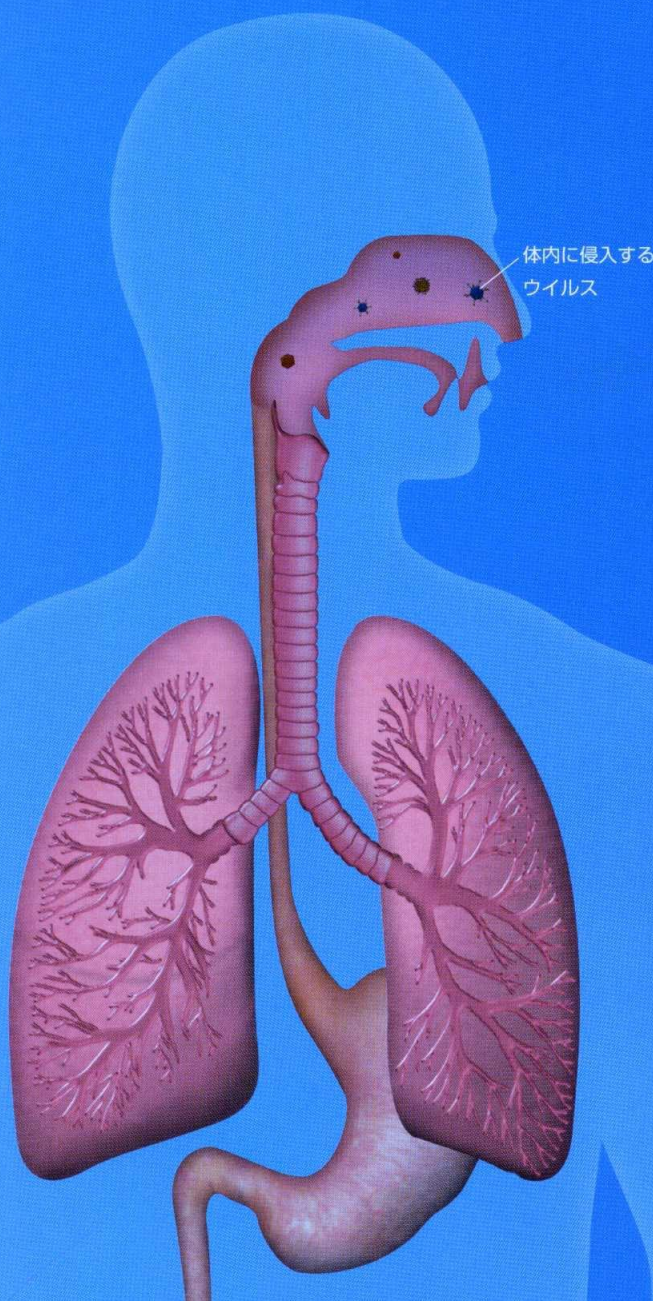
ウイルスは細胞に感染しないかぎり，ふえる

ウイルスとひと口にいても，のどの痛みや高熱を引きおこすインフルエンザウイルス，下痢をおこすノロウイルスなど，さまざまな種類がある。白血病や肝がんなどのがんの原因となるウイルスさえ存在する。

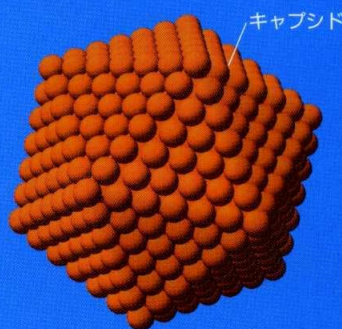
ウイルスの姿は種類によってさまざまだ。ウイルスはDNA（デオキシリボ核酸）やRNA（リボ核酸）などの遺伝情報をもつ。DNAやRNAは，タンパク質の殻（キャプシド）や脂質の膜（エンベロープ）によっておおわれている。キャプシドはら

さまざまなウイルス

イラストは，病気にかかわるウイルスをえがいたものだ。ウイルスの姿は，種類によってことなる。



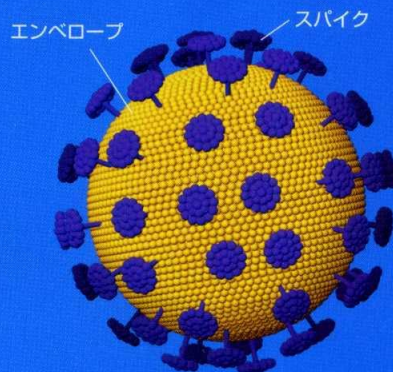
体内に侵入する
ウイルス



キャプシド

ノロウイルス

下痢や嘔吐を引きおこす（くわしくは32～33ページ）。RNAをもち，その周囲を正20面体のキャプシドがおおう。電子顕微鏡で観察すると，表面に盔のようなくぼみが見える。



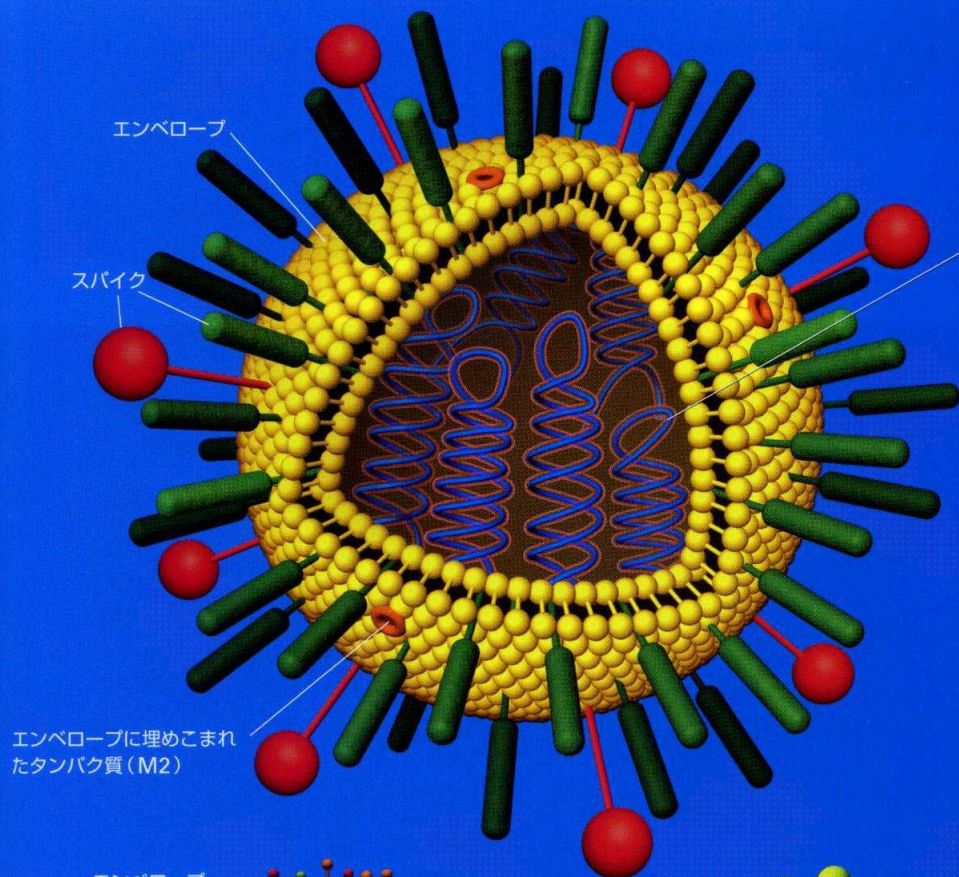
HIV（ヒト免疫不全ウイルス）

体を病原体から守る免疫システムがはたらかなくなる病気「エイズ（AIDS）」の原因となるウイルス（くわしくは34～35ページ）。RNAをもち，正20面体のキャプシドのまわりに，エンベロープという膜をもつ。

ことができない

せん状のものと正20面体状のものの主に2種類がある。なおエンベロープをもたない種類もある。そして、ウイルスは生物の細胞に感染しないかぎり、ふえることができない。
ウイルスは、なぜ単独ではふえることができないのだろうか？

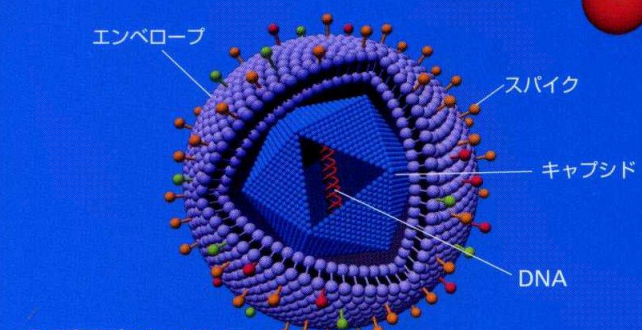
また、生物の細胞とどのような点がことになっているのだろうか？ 次のページでは、ウイルスと細胞の構造を比較し、ウイルスがいったい何者なのかについて考えていこう。



キャプシドに取り巻かれたRNA
青がRNA、まわりのオレンジがキャプシド。合わせて「ヌクレオキャプシド」とよばれる。

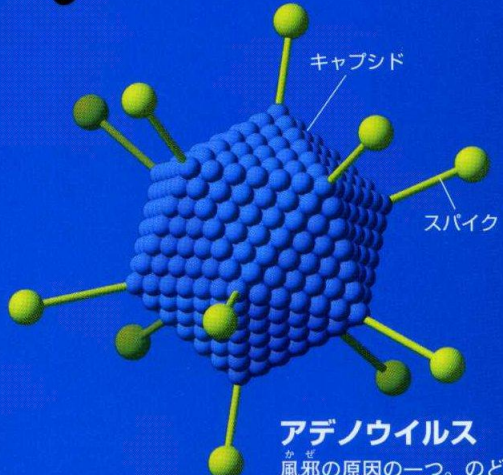
インフルエンザウイルス
のどの痛みやせきなど主に呼吸器の症状をもたらす(くわしくは30～31ページ)。遺伝情報をもつRNAはキャプシドに取り巻かれていて、らせん状になっている。そのまわりをエンベロープがおおい、そこに「スパイク」とよばれる突起が出た構造をしている。

エンベロープに埋めこまれたタンパク質(M2)



B型肝炎ウイルス

肝臓の細胞に感染して、細胞を破壊し、肝炎を引き起こす。肝硬変や肝がんの原因となり、世界中で毎年100万人が死亡するとされる。アジア、アフリカに感染者が集中しているという。肝炎を引き起こすウイルスはいくつかあるが、B型肝炎ウイルスは其中で唯一、DNAをもつ(ほかはRNAをもつ)。DNAのまわりを正20面体のキャプシドが囲み、そのまわりをエンベロープがおおっている。



アデノウイルス

風邪の原因の一つ。のどの痛みやせきなど、呼吸器の症状をひき起こす。一部のタイプは乳児に胃腸炎を引き起こし、下痢をもたらす。DNAをもち、周囲は正20面体のキャプシドにおおわれているが、エンベロープはもたない。



ウイルスは「細胞の断片」のような存在

細胞とウイルスはどちらがうのだろうか？ 動物の細胞と、インフルエンザウイルスの構造をイラストで比較してみよう。

まず、細胞もウイルスも、同じ方法でみずからの遺伝情報を記録している。細胞の場合は、核の内部に、その生物のすべての遺伝情報が記録されたDNAが保管されている。また、ウイルスも、自分の設計図を記録したDNAやRNAを内部にもっている。

ウイルスと細胞で共通しているのはここまでだ。細胞は、**核の周辺に生命活動を営むためのさまざまな器官をもつ**点で、ウイルスとことなる。たとえば、しょうぼうたい小胞体周辺のリボソームでは、DNAの設計図をもとに、さまざまなタンパク質がつくられている。また、ミトコンドリアでは、エネルギー源がつくられて

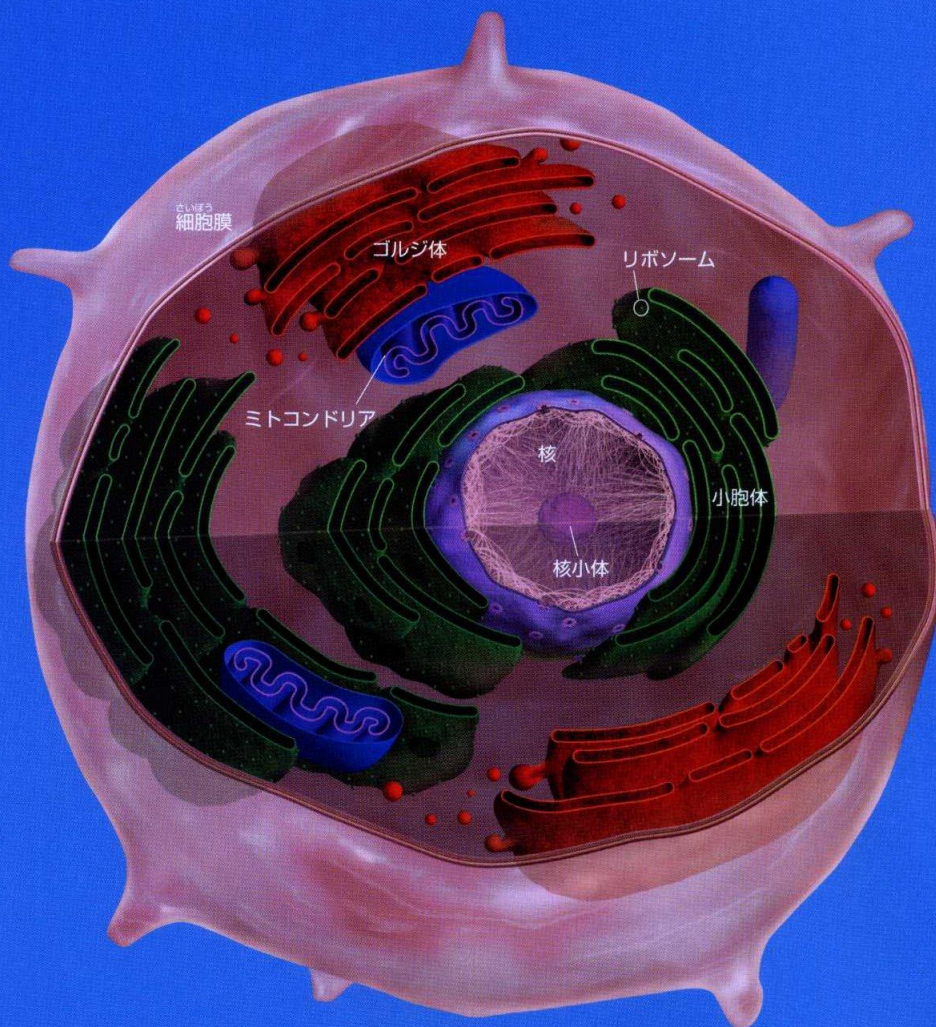
いる。細胞は、これらの器官を利用しながら、ぶんれつ細胞分裂によって単独で自分の複製をつくることができる。

一方、ウイルスの場合、みずからの設計図を記録した核酸（DNAあるいはRNA）のまわりには、それらをおおう構造があるだけだ。まず、核酸のまわりを「キャプシド」とよばれるタンパク質の殻が取り巻いている。また種類によっては、その外側に「エンベロープ」とよばれる膜があることもある。

このようにウイルスは、細胞にくらべると非常に単純な、いわば「細胞の断片」のような存在である。そのため、ウイルスは細胞のように遺伝情報をもっているものの、そうしよく単独では増殖することができない。ウイルスは、**生物と非生物の中間にある存在**といえるのだ。

動物の細胞の断面図

細胞には、単独で増殖するためのさまざまな器官がそなわっている。まず、核の内部に遺伝情報を記録したDNA（イラストではピンク色の繊維）が保管されている。その周囲には、DNAに記録された情報をもとにタンパク質をつくりだす「リボソーム」や、エネルギー源をつくりだす「ミトコンドリア」、つくられたタンパク質を加工したり、仕分けしたりする「ゴルジ体」などの器官が取り巻いている。



細胞に対する
ウイルスの大きさ

ウイルスの姿は大きく三つに分かれる

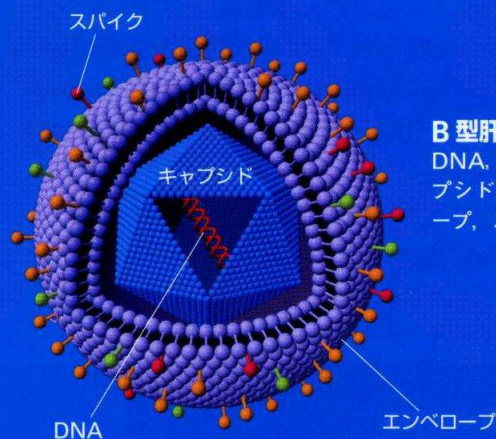
すべてのウイルスは、RNAやDNAなどの核酸に遺伝情報を記録し、その周囲を「キャプシド」とよばれるタンパク質の殻でおおっている。また、キャプシドの外に「エンベロープ」という膜や「スパイク」とよばれる突起をもつこともある。

ウイルスの姿は、大きく3種類に分かれる。

一つ目は、たとえば右のB型肝炎ウイルスのように、核酸が正20面体のキャプシドに包まれ、その周囲をさらにエンベロープがおおっているタイプのウイルスだ。

二つ目は、下のインフルエンザウイルスのように、キャプシドが核酸を取り巻き、その周囲をエンベロープがおおっているものだ。

三つ目は、核酸に正20面体型のキャプシドがおおっているだけの、エンベロープをもたないウイルスだ。

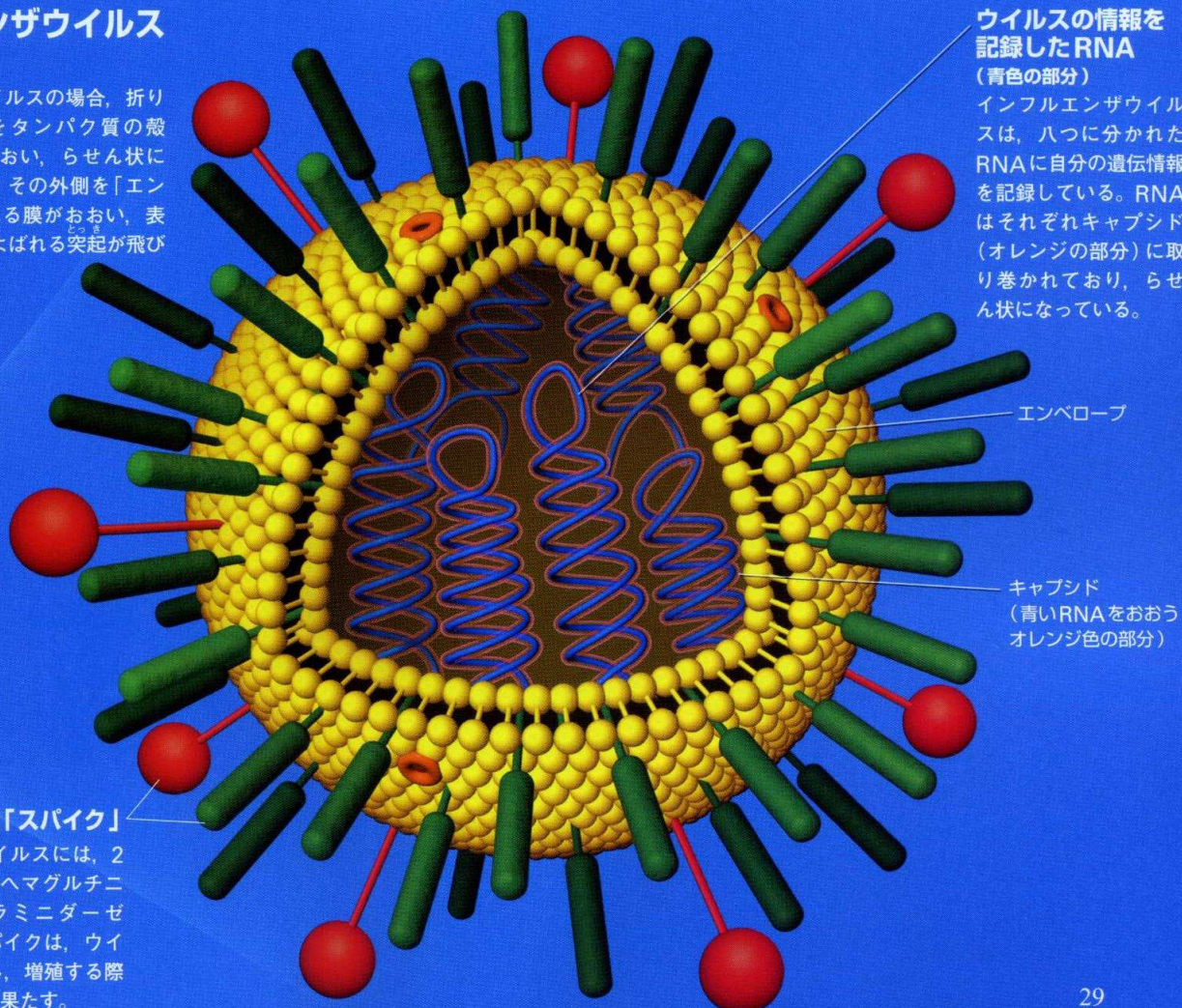


B型肝炎ウイルス

DNA、正20面体のキャプシド、球形のエンベロープ、スパイクからなる。

インフルエンザウイルスの断面図

インフルエンザウイルスの場合、折りたたまれたRNAをタンパク質の殻（キャプシド）がおおい、らせん状になっている。また、その外側を「エンベロープ」とよばれる膜がおおい、表面に「スパイク」とよばれる突起が飛びだしている。



表面に飛びだした「スパイク」

インフルエンザウイルスには、2種類のスパイク、「ヘマグルチニン(緑)」と「ノイラミニダーゼ(赤)」がある。スパイクは、ウイルスが生物に感染し、増殖する際にさまざまな役割を果たす。



ウイルス

インフルエンザウイルス

細胞が増殖するシステムを利用して、ウイルス

ウイルスは細胞に感染することで、ふえることができる。ウイルスはヒトの細胞に感染すると、体にさまざまな症状を引き起こす。いったい、ウイルスは細胞に感染したのちに、どのようにして増殖するのだろうか？ また、どのようなしくみで症状を引き起こすのだろうか？

まずはじめに、インフルエンザウイルスを紹介しよう。インフルエンザウイルスは、感染したヒトのくしゃみやせきに乗って飛びだし、空気中にただよう。それが他人の口や鼻へと侵入

し、のどや鼻の細胞に感染するのだ。

ウイルスは、**細胞が細胞自身の増殖のために使うシステムを利用して増殖する**。増殖した大量のウイルスは細胞の外へと放出される。そして放出されたウイルスがまた新たな細胞に感染していくのだ。

ウイルスに利用され、ウイルスを放出した細胞はぼろぼろにこわれ、死んでしまう。のどの細胞が次々にこわされると、私たちはのどの痛みを感じるようになる。ウイルスが気管や気管

インフルエンザウイルスの感染と増殖

イラストでは、ウイルスが体に入り、のどの細胞に感染、増殖するしくみをえがいている(1, 2)。ウイルスの感染によって、のどの痛みやせき、発熱といった症状が出る(3, 4)。

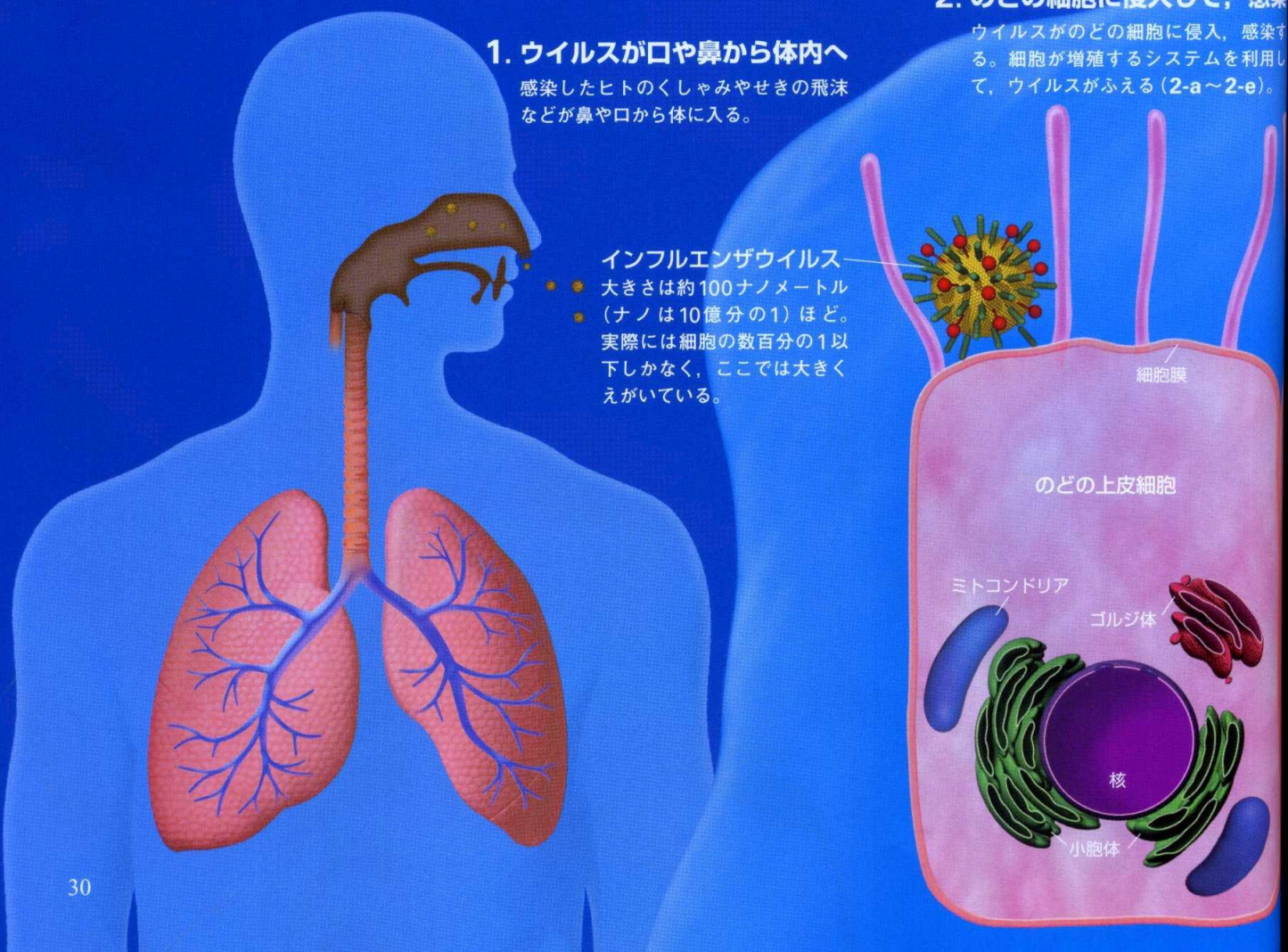
1. ウイルスが口や鼻から体内へ

感染したヒトのくしゃみやせきの飛沫などが鼻や口から体に入る。

インフルエンザウイルス
大きさは約100ナノメートル
(ナノは10億分の1)ほど。
実際には細胞の数百分の1以下しかなく、ここでは大きくえがいている。

2. のどの細胞に侵入して、感染

ウイルスがのどの細胞に侵入、感染する。細胞が増殖するシステムを利用して、ウイルスがふえる(2-a~2-e)。

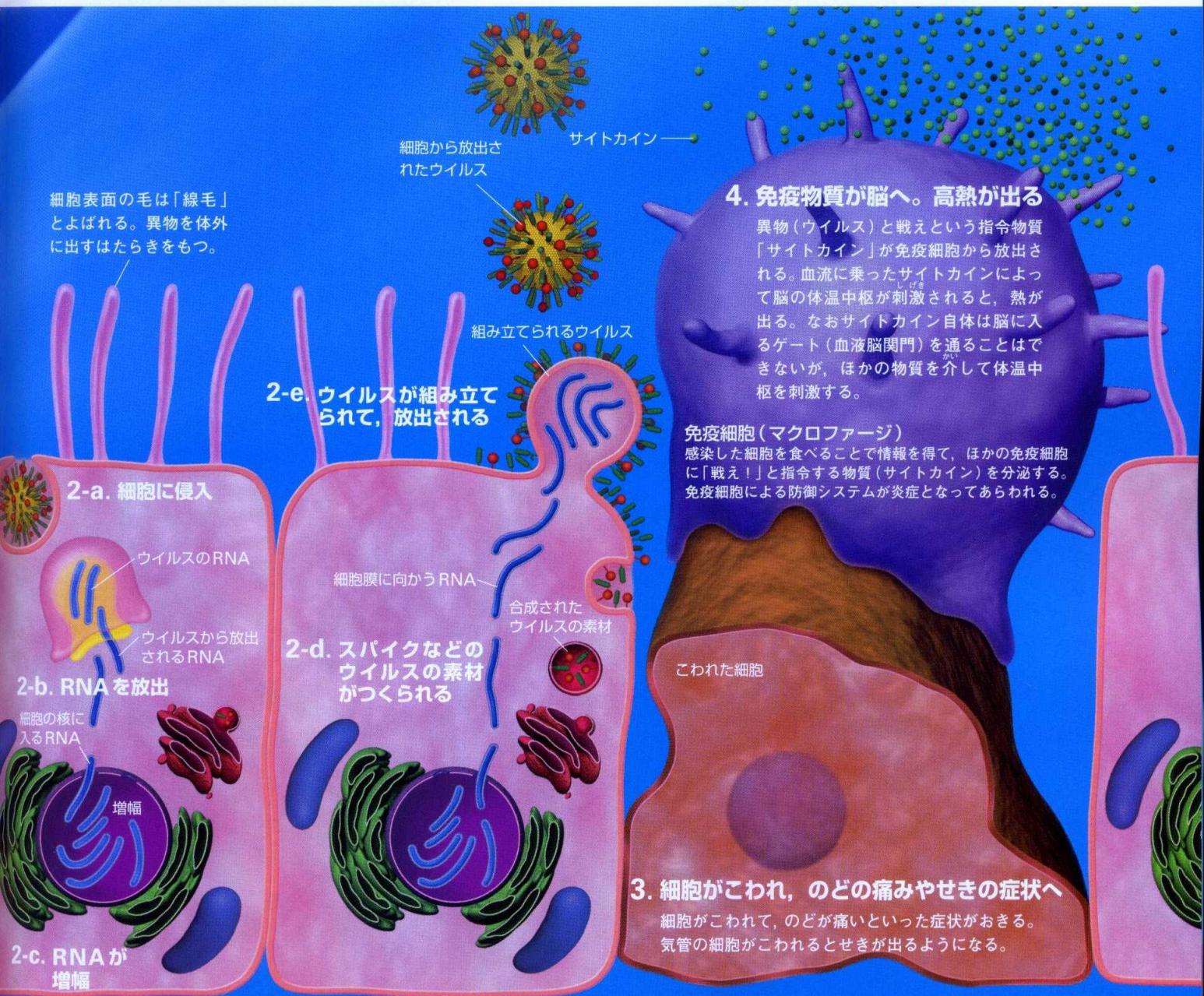


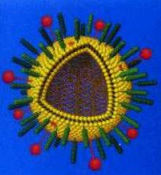
はふえる

支の細胞をこわしはじめると、せきやたんなどが出るようになる。免疫細胞による炎症反応も症状を加速させる。

発熱すると頭が熱くなるが、発熱は、頭にウイルスが侵入するためにおきるのではない。体内の免疫細胞がウイルスと戦うときに出す物質が、脳の体温中枢を刺激するために熱が出る。体温が上がると免疫細胞が活発にはたらけるようになり、ウイルスなどを退治しやすくなるといわれている。発熱は体を守るための反応なのだ。

インフルエンザ治療薬の「タミフル」や「リレンザ」は、ウイルスが感染細胞から放出されるのを防ぐ。それによって、大量のウイルスが新たに体内に出まわることをおさえ、症状を早く回復させる。





ウイルス

ノロウイルス

エンベロープをもたないウイルスは胃液による攻撃を

つづいて紹介するのは、ノロウイルスだ。ノロウイルスは感染性胃腸炎を引きおこし、下痢や嘔吐などの症状をもたらす。ウイルスが含まれた生牡蠣を食べたり、感染者の嘔吐物や排泄物にふれたりすることで感染する。感染力が強く、わずかな量のウイルスが体に入っただけで感染する。床にごく少量残った嘔吐物が乾燥して、嘔吐物のなかのウイルスが空気中を舞い、それを吸った多くの人が感染することもあるという。

インフルエンザウイルスなどは胃にある強酸の消化液でこわされて感染力を失うことが多い。しかし、ノロウイルスなどの**エンベロープをもたないウイルスの多くは胃液による攻撃をくぐり抜けて、小腸の細胞に侵入**する。ノロウイルスに乗っ取られた細胞はこわれ、栄養素や水分を吸収できなくなってしまう。すると下痢がおきるのだ。

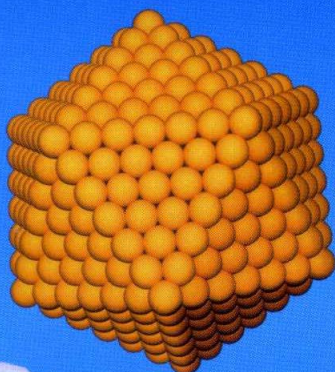
ヒトの排泄物にはノロウイルスが含まれている。ノロウイルス

ノロウイルスの感染と増殖

イラストでは、ウイルスが体に入り、小腸の細胞に感染、増殖するしくみをえがいている(1、2)。ウイルスの感染によって、下痢の症状が出る(3)。

ノロウイルス

正20面体のキャプシドをもつ。エンベロープはもたない。大きさは約40ナノメートル。



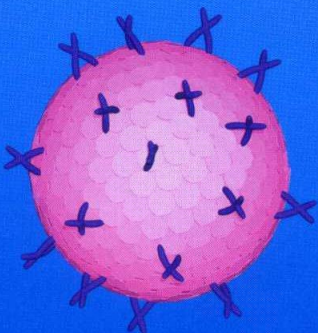
中腸腺

牡蠣に濃縮されるノロウイルス

ノロウイルスは牡蠣の消化器官の一つ「中腸腺」に濃縮される。生食用の牡蠣は、汚染の少ない海域で養殖するなど、ウイルスの濃縮を防ぐ対策がとられていることが多い。

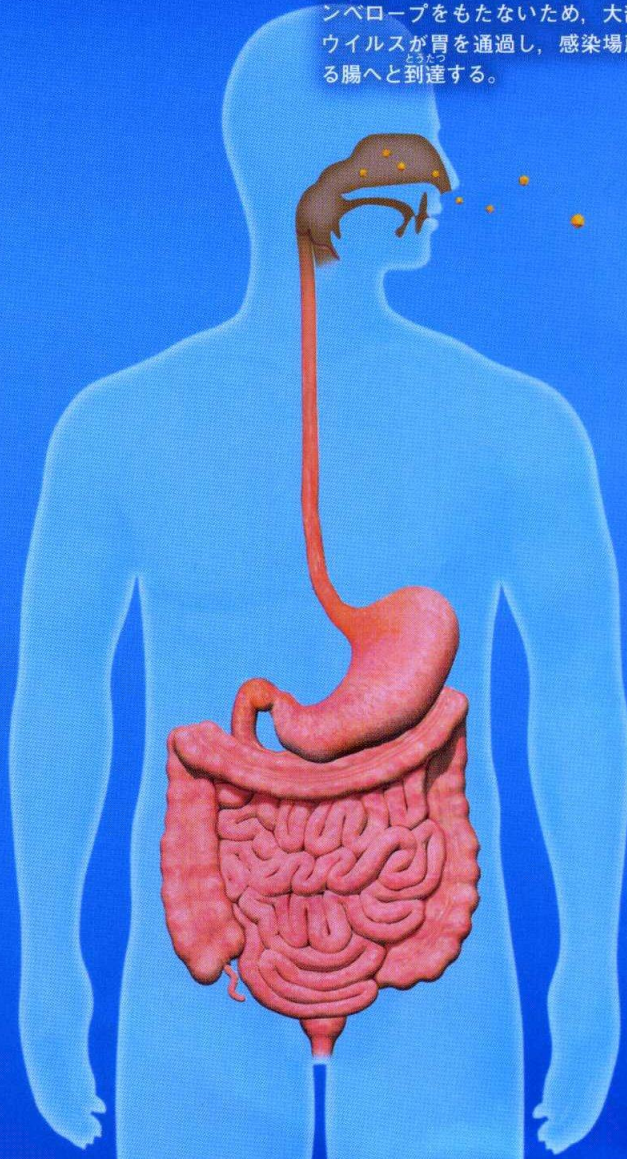
ロタウイルス

ノロウイルスと同様に、下痢や嘔吐を引きおこすウイルス。特殊なタンパク質でおおわれているが、エンベロープをもたない。



1. ウイルスは胃を通過して腸へ

汚染された牡蠣などの二枚貝を生で食べたり、空気中にただようウイルスを吸いこんだりすることで体に入る。エンベロープをもたないため、大部分のウイルスが胃を通過し、感染場所である腸へと到達する。



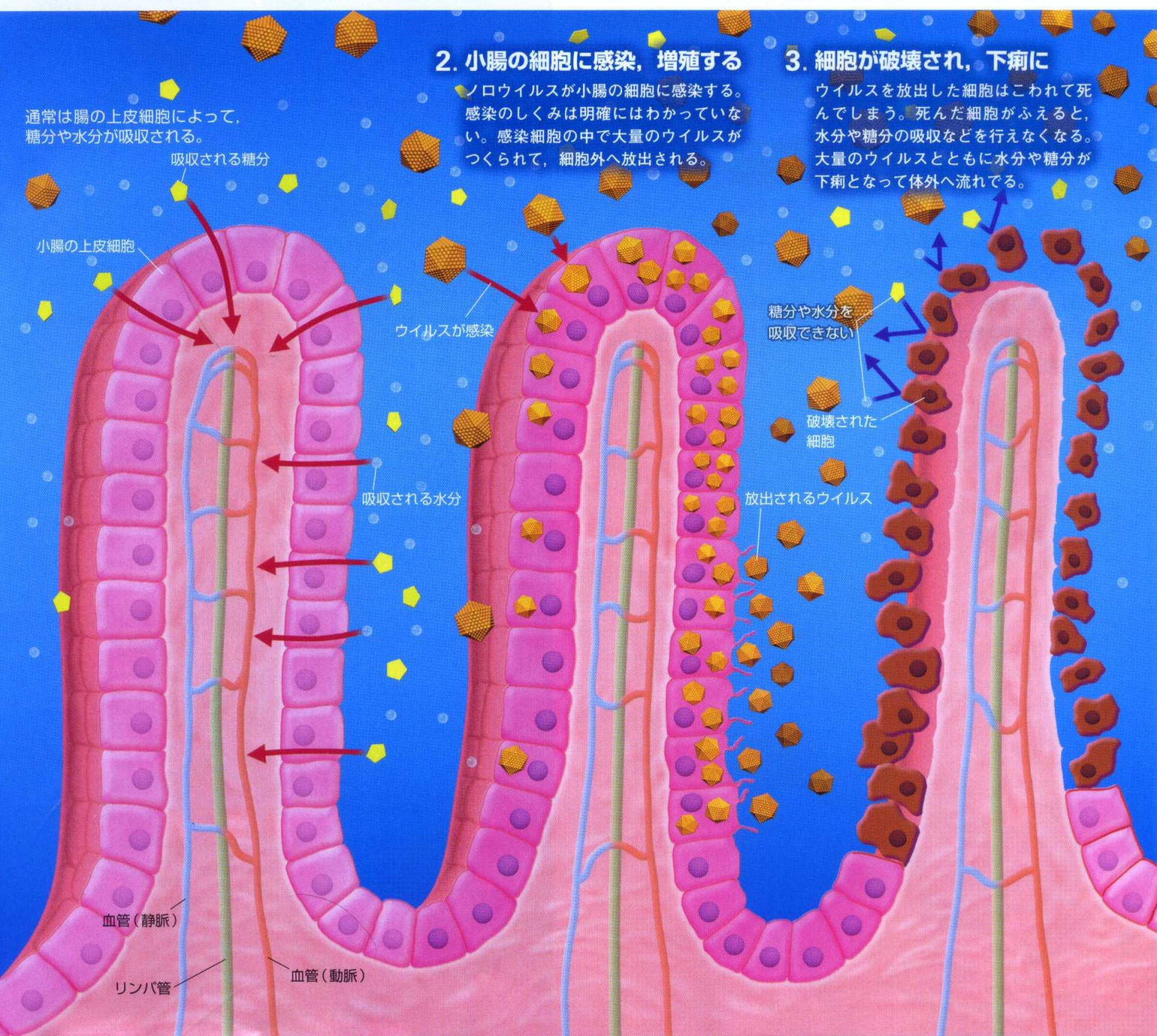
まぬかれる

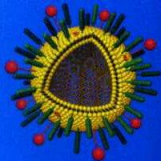
スはトイレから下水へと流れたあと、川から海へ流れつく。そして、牡蠣などの二枚貝に取りこまれ、濃縮されて、生牡蠣を食べた人に新たに感染する。

ノロウイルスに対抗する薬（抗ウイルス薬）はまだない。感染しても多くの人が免疫システムによってウイルスを排除して、2日ほどで症状が回復する。ただし、高齢者や乳児が脱水症状などをおこし重症化することがあるので注意が必要だ。

アルコールは、ウイルスの外側の殻「エンベロープ」を破壊するため、インフルエンザウイルスなどのエンベロープをもつウイルスを消毒することができる。しかしノロウイルスは、アルコールではほとんど消毒できない。

ノロウイルスのようなウイルスの感染予防対策としては、水で手を洗うことが効果的だという。石けんもウイルスには効果がほとんどないが、水で洗い流すことで大きな感染予防になる。





ウイルス

HIV / HTLV-1

ウイルス由来のDNAが細胞のDNAに組みこまれる

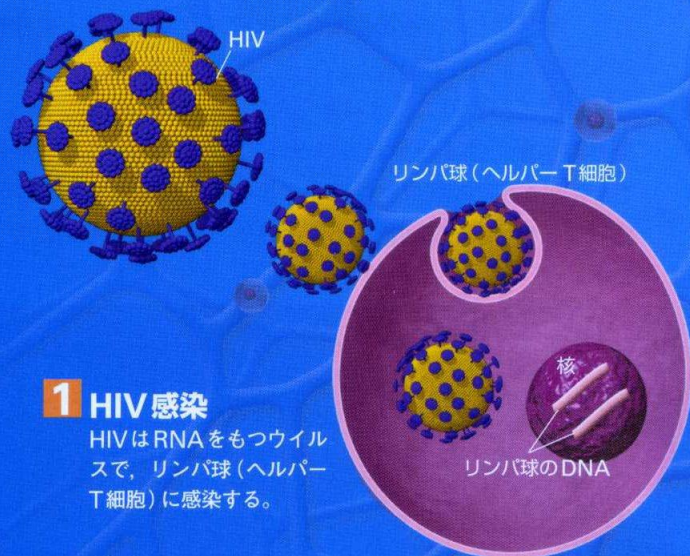
これまで紹介した症状は感染してすぐにおきる急性のものだ。しかし、数年～数十年たって症状をもたらすウイルスもある。その一つがHIV（ヒト免疫不全ウイルス）だ。HIVの場合、感染後すぐ（2～8週後）にかぜのような症状があらわれるが、多くの場合、数年は無症状だ。

HIVは病原体から体を守る免疫細胞の一つ「ヘルパーT細胞」というリンパ球に感染する。病原体から体を守るリンパ球が徐々に減少していくことで、病原体に対抗する力が失われる。すると、発熱や倦怠感がつづくなどの症状があらわれはじめ、通常感染しないような病原体にむしばまれる「エイズ（後天性免疫不全症候群）」を発症する。

それに対して、HTLV-1（ヒトT細胞白血病ウイルス1型）というウイルスは同じヘルパーT細胞に感染し、がん（白血病）をひきおこす。感染すると、**ウイルス由来のDNAがリンパ球に組みこまれ**、数十年後に白血病（成人T細胞白血病：ATL）を発症するのだ。ただし、白血病を発症するのはHTLV-1感染者の5%のみで、大部分の人が無症状のまま生涯を終える。

HIVの感染と増殖（1～4）

HIVは免疫細胞（ヘルパーT細胞というリンパ球）に感染して（**1**）、リンパ球に自身のDNAを組みこむ（**2**）。感染すると、1日あたり10億～100億個のウイルスが体内でつくられ、感染したリンパ球がどんどんこわれていく（**3**）。その失われたリンパ球を補うために、体内では急ピッチで新しいリンパ球がつけられ、体を守る免疫システムを維持しようとする。しかし年月がたちリンパ球の生産が追いつかなくなると、免疫システムが失われ（**4**）、通常感染しないような病原体に体がむしばまれるエイズが発症してしまう。

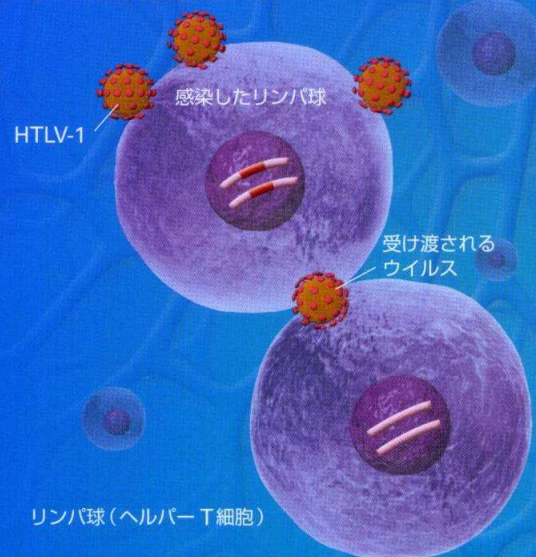


1 HIV 感染

HIVはRNAをもつウイルスで、リンパ球（ヘルパーT細胞）に感染する。

1 HTLV-1 感染

HTLV-1は、RNAをもつウイルスで、リンパ球（ヘルパーT細胞）に感染する。このウイルスは感染したリンパ球が別のリンパ球に接することでしか、新たなリンパ球に感染できない。リンパ球からリンパ球へのウイルスの受け渡し方法は諸説ある。



HTLV-1の感染と増殖（1～3）

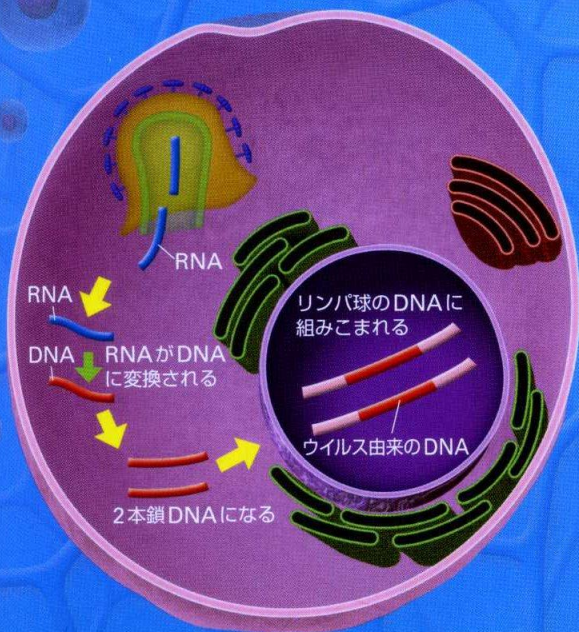
HTLV-1は、免疫細胞（ヘルパーT細胞というリンパ球）に感染して（**1**）、ウイルス由来のDNAを細胞に組みこみ（**2**）、細胞を異常に増殖させる（**3**）。増殖した異常な細胞は正常な免疫細胞によって駆除される。しかし駆除できずに異常増殖がくりかえされると、がん（成人T細胞白血病：ATL）を発症してしまう。

3 ウイルスが放出され、細胞が破壊

細胞内でウイルスの材料が大量に合成されて組み立てられ、大量のウイルスが放出される。放出した細胞はこわれて死んでしまう。

2 リンパ球のDNAに組みこまれる

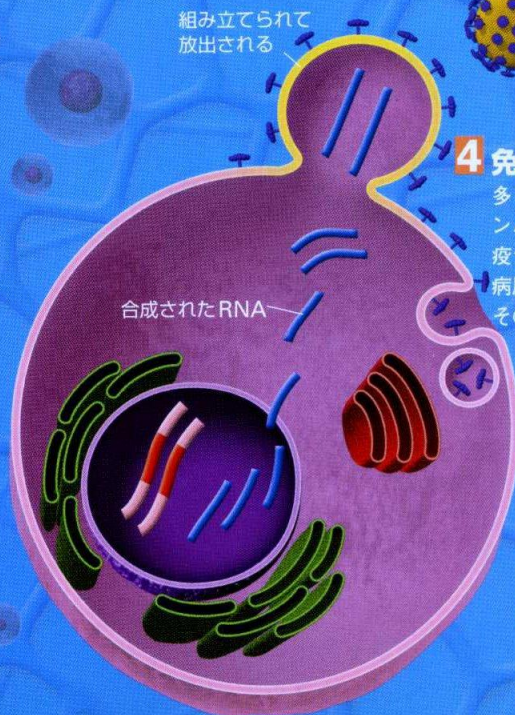
細胞の中にRNAが放出される。RNAは、DNAに変換されたのち、感染細胞のDNAに組みこまれる。



組み立てられて放出される

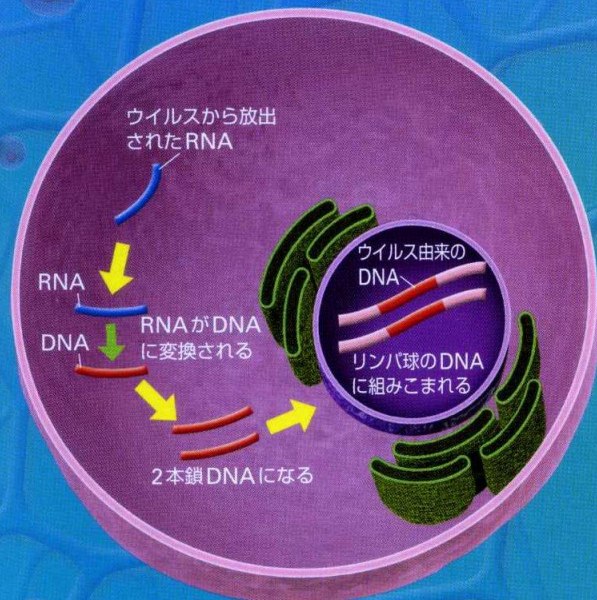
4 免疫システムの異常

多くのリンパ球が死に、リンパ球が少なくなると、免疫システムが異常をきたし、病原体に感染しやすくなる。その状態がエイズである。



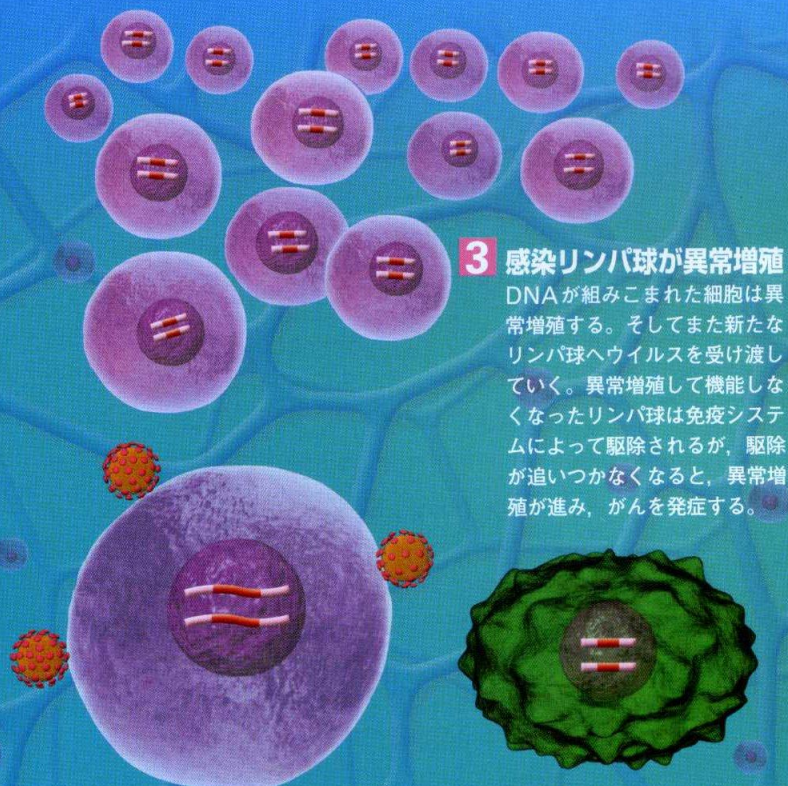
2 リンパ球のDNAに組みこまれる

細胞の中にRNAが放出される。RNAは、DNAに変換されたのち、感染細胞のDNAに組みこまれる。



3 感染リンパ球が異常増殖

DNAが組みこまれた細胞は異常増殖する。そしてまた新たなリンパ球へウイルスを受け渡していく。異常増殖して機能しなくなったリンパ球は免疫システムによって駆除されるが、駆除が追いつかなくなると、異常増殖が進み、がんを発症する。



ダニが運ぶ新種のウイルスとは？

致死率が高いことで注目されているが、感染する確率は低い

ダニにかまれることで感染する「SFTSウイルス」。2013年1月に、日本ではじめて死者が確認された。感染して重症化すると、10%以上の人が死に至るという。このウイルスは、どこからやってきたものなのだろうか？ また、今後大流行するようなことはあるのだろうか？

協力：西條政幸 国立感染症研究所 ウイルス第一部長

SFTS ウイルスに関する Q&A

Q. どのようなダニが媒介するのか？

A. 日本では「フタトゲチマダニ」と「タカサゴキラマダニ（右の写真）」である。中国では、フタトゲチマダニと「オウシマダニ」というマダニからウイルスがみついている。



Q. 人やペットからは感染するのか？

A. 中国では、患者から二次感染した例がある。ただし、傷口どうしの接触などがなければ感染しないと考えられている。ペットや家畜は感染しても症状が出ず、1週間ほどでウイルスが体内からいなくなる。そのため、ペットから感染する危険性はきわめて低い。

Q. マダニが自分を刺したら？

A. 病院へ行くのがよい。マダニは口の部分を人間の皮膚に刺しこんだのち、口と皮膚を接着させる物質を分泌する。そのため無理にとると口だけが皮膚内に残り、炎症の原因になることがある。マダニにかまれても、ウイルスに感染したかどうかは、症状が出るほどウイルスが増殖してからでないと診断できない。

Q. 西日本でしか感染のリスクはない？

A. これまでに感染例がみついているのが、西日本に多いのは事実だが、そのほかの地域でも発生する可能性がある。

2013年1月30日、日本ではじめて「SFTSウイルス」による死者が確認された。2005年以降2012年以前に11名が感染（うち6名が死亡）していたことが保存血液の検査で判明している。そして、2013年1月以降2014年6月4日の時点で53名の新たな患者が報告されている。

SFTSウイルスは、SFTS（重症熱性血小板減少症候群）という病気を引き起こすウイルスだ。この病気では、血液に含まれる、止血作用をもつ血小板や免疫細胞である白血球が減少する。そして、肝臓をはじめとして全身の臓器に異常があらわれ、死に至る場合もある。

古くから日本にいたウイルス

今年になって国内で死者が報告されたということは、ウイルス自体も近年まで日本に存在しなかったのだろうか？

「実は、このウイルス自体は、ずっと昔から日本に存在していたものと考えられます」と国立感染研究所の西條政幸部長は語る。このウイルスにより、これまでも毎年数人の患者が発生していた可能性がある。ところが、ウイルス自体が知られていなかったため、このウイルスが原因と特定できなかったのだ。

このウイルスは中国で発見された。2011年4月に中国の研究者らがアメリカの科学誌『The New England Journal of Medicine』に発表した論文によると、2009年から論文発表までに、中国東部の6省で171人の感染者が確認され、そのうち21名が命を落としている。

その後、日本でも、この論文で報告された症状とよく似た症状で亡くなった患者が出た。そこで、詳細な検査を行ったところ、SFTSウイルスが原因であることがわかったのだ。もっとも、中国と同じ種類のウイルスではあるが、その遺伝情報から、中国から来たものではないということがわかっている。

ウイルスの感染経路は？

発表された論文によると、SFTSウイルスに感染する原因は、ウイルスをもつマダニにかまれることだ。マダニは、やぶや森林などに生息しており、数ミリメートルほどまで大きくなる。家の中にいる1ミリ以下のイエダニとは別種だ。マダニは植物の上で動物が通りかかるのを待っており、動物が通りかかると、その動物に飛びうつる。そして、のこぎりのような口を動物の皮膚に刺して吸血をはじめめる。この際に、ダニから

人へウイルスが入りこむのだ。

ダニがウイルスや細菌を媒介することはよく知られている。年間40人ほどが発症する「日本紅斑熱」などがその例だ。ただし、SFTSウイルスの場合は、感染が確認された患者での死亡率が10%以上と高い。また、ワクチンや抗ウイルス薬がないため、症状が出てしまった場合には、血小板を輸血したり、解熱剤で一時的に熱を下げたりといった対処療法しかできない。ただし、現状では感染する人数は少なく、症状があらわれても、後遺症などもなく回復する人もいる。

大流行の恐れはほぼない

SFTSウイルスが、今後流行することはあるのだろうか？

「インフルエンザのように人から人へ簡単に感染するわけではありませんし、大流行することはありません。ウイルスの発見で話題となっていますが、これまでよりも感染する確率が高まったということではないのです」（西條部長）。

とはいえマダニにかまれないにこしたことはない。レジャーに出かける際には、長袖を着て襟元を隠すなど、露出部の少ない服装を心がけるとよいだろう。

史上最大級の巨大ウイルス2種を発見

つぼ状の新種ウイルス「パンドラウイルス」と「ピソウイルス」の正体は？

2013年と2014年に、これまでで最大級の巨大ウイルスが相次いで報告された。新種「パンドラウイルス」は、インフルエンザウイルスより10倍も大きく、新種「ピソウイルス」はパンドラウイルスのさらに1.5倍の大きさを誇る。両者はともにつぼ状の形をしているが、そのほかの特徴は大きくことなるという。これらの巨大ウイルスの発見が意味することは何だろうか。

協力：山内一也 東京大学名誉教授



パンドラウイルス

左は、パンドラウイルスの電子顕微鏡写真である。その長さは1マイクロメートル以上もある。

パンドラウイルスは殻にも特徴がある。これまでに見つかったウイルスは、すべてタンパク質でできた「キャプシド（語源はラテン語の「箱」）」という殻でおおわれていた。しかしパンドラウイルスはキャプシドをもっておらず、三つの層からなる厚い膜におおわれていると見られている。

生物と非生物の境界をゆるがす発見がつづいている。細胞さいぼうよりはるかに小さな“非生物”のはずのウイルスに、巨大な新種が次々みつつかっているのだ。

そもそも、生物とは何だろうか。地球の生物は、私たち人間ふくを含め、すべて細胞からなる。たった一つの細胞からなる細菌でも、栄養をとり、分裂して増殖するなどの生命活動を行う。細胞は、生物の最も基本的な単位だといえる。

一方ウイルスは、細胞と同じようにDNAまたはRNA、タンパク質をもつが、細胞よりもはるかに小さく、単純な構造であることが多い。遺伝子の数を比較すると、既知の細菌には少ない場合でも480個の遺伝子があるのに対し、インフルエンザウイルスの場合はたった8個しかない。またウイルスは、細胞のように独自に増殖することもない。増殖できるのは、細胞に感染し、細胞内の器官を利用できるときだけだ。ウイルスは、いわば“生物の断片”なのだ。

このように、生物である細胞と、非生物であるウイルスはまったくちがうものと考えられていた。しかし2003年以降、一部の細菌より大きく、遺伝子数の多い巨大ウイルスの発見がつづいている。その新記録が科学誌『Science』2013年7月19日号でエクス・マルセイユ大学のジャン・ミシェル・クラブリー教授らにより報告された。インフルエンザウイルスの10倍も大きい「パンドラウイルス」だ。さらに、2014年には、同教

授らにより、遺伝子数は細菌より少ないと見られるものの、パンドラウイルスよりも1.5倍大きい新種「ピソウイルス」も発見された。この成果は、科学誌『PNAS』2014年3月18日号に掲載された。

巨大ウイルスは大きすぎてみつけにくい!?

パンドラウイルスは、オーストラリアの湖とチリの海岸の水からみつかった。一方、ピソウイルスは、推定3万年以上前のシベリアの永久凍土から発見された。ともにつぼのような形をしている。

巨大なウイルスは、一般的なウイルスよりもみつけやすいように思える。しかし実際には、ウイルスとしては大きすぎるために細胞の一器官とまちがわれ、かえって見すごされやすい。ウイルスに詳しい東京大学の山内一也やまうち かずや めい名教授は「パンドラウイルスは、これまでも発見されていながら見すごされていた可能性が指摘されています」と語る。

クラブリー教授らは、単細胞生物であるアメーバにパンドラウイルスとピソウイルスが感染し、アメーバの器官を利用してそれらが増殖するようすを見てはじめて、それらがウイルスだとわかったという。

両ウイルスの進化過程は謎

パンドラウイルスのおどろくべき特徴は、最大で2556個と推定される膨大な遺伝子数だ。しかも、その93%はこれまでに発見された生物や

ウイルスの遺伝子と一致しなかった。そのため、その役割は不明だ。

生物やウイルスの遺伝子は、近い種の遺伝子ほど似ている。それは、かつて地球生物がたった一種の生物からはじまり、分化をくりかえして、現在のように多様な生物種が出現したことを意味している。そのため遺伝子を見くらべれば、いつ分化したのかがわかる。生物は、かつて三つのグループ（真核生物、古細菌、真正細菌）に分かれ、その内部でさらに分化したと考えられてきた。

ところがパンドラウイルスの遺伝子の93%は、どのグループの遺伝子とも一致しない。このことから、研究者たちは「かつて『第4の生物グループ』が存在したが絶滅した。その遺伝子の一部が、パンドラウイルスの内部に残されていた」という仮説を立てている。

一方、ピソウイルスの遺伝子数は推定467個と、細菌を下回る少なさである。また、ウイルスがふえる部位はパンドラウイルスが核であるのに対し、ピソウイルスは細胞質とことなっている。両ウイルスがどのような進化をたどってきたのかについては、まだ謎に包まれている。

太古の永久凍土に残されていたピソウイルスが、増殖性を示したことから、今後、極地での資源開発の際の掘削などで、昔のウイルスがよみがえる可能性が否定できない、と山内名教授は考えている。

3

生命の誕生

協力 小林憲正／藤井紀子／菅 裕明／池原健二

PART2では、生物と非生物の間にある、ウイルスについて紹介した。あんなにたくみに生命体を利用してふえることができるウイルスでも、完全な生命体とはよべないのだ。PART3では、そもそも、最初の生命はどのように誕生したのかにせまっていく。最初の生命は、どのような姿だったのだろうか？ また、生命が誕生するしくみについては、現在、どのように考えられているのだろうか？

生命の起源

生命の材料

最初の細胞

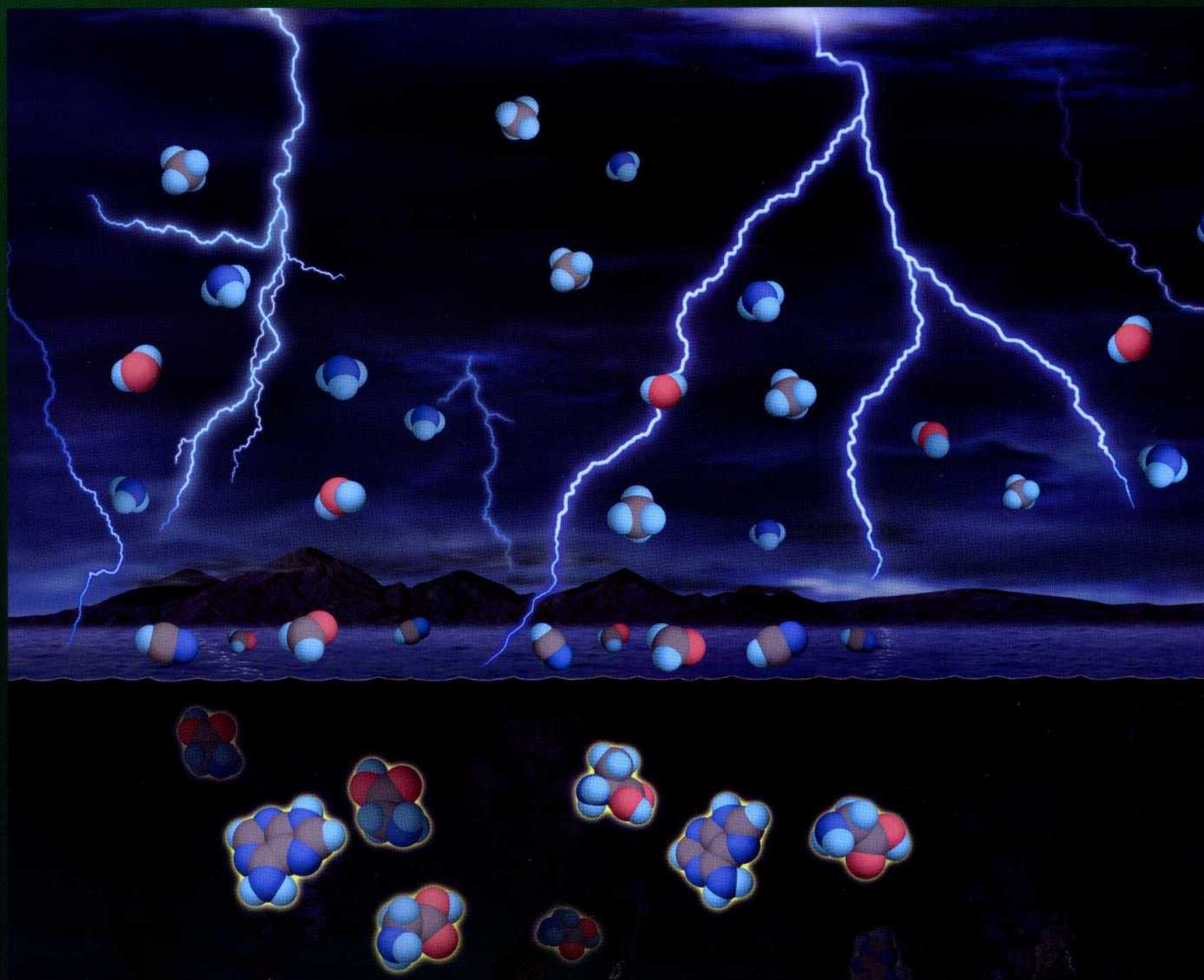
ニワトリと卵の問題

RNAワールド仮説

タンパク質ワールド仮説

コラム：生物がもつ左手型と右手型のアミノ酸

生命の起源を求めて



38億年前の地層に残る生命の痕跡

生命は、今からいったい何億年前に誕生したのだろうか？
それを正確に知ることはできないが、およそそのところを
推理することはできそうだ。太陽は、およそ46億年前に誕生した。その直後に、無数の微惑星が衝突・合体して、私たちの地球も誕生した。地球へはその後微惑星や隕石が衝突しつづけ、その熱で、地球の表層は煮えたぎるマグマでおおわれていた。

隕石の重爆撃がようやくやんだのは、今から約40億年前のことらしい。

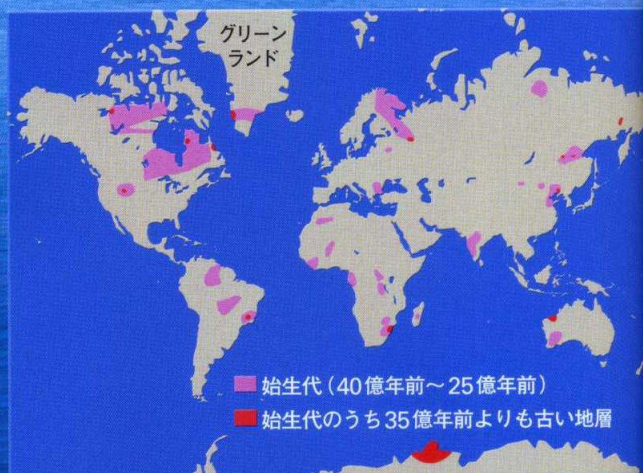
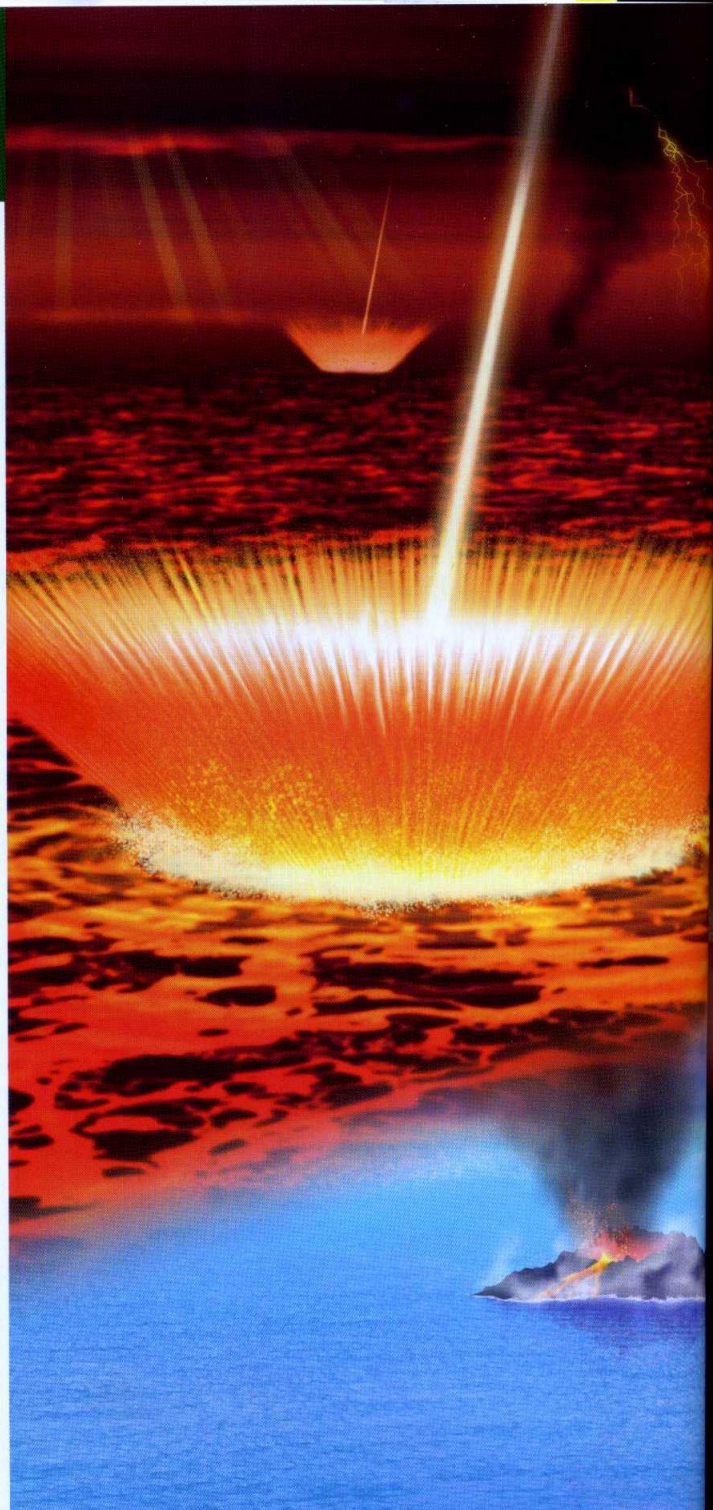
「もし、40億年より前の地球に生命が誕生しても、隕石の降りそそぐ過酷な環境を生きのびることはできなかったでしょう」と横浜国立大学大学院工学研究院の小林憲正教授は語る。

さて、隕石の重爆撃がおさまると、地球表層は冷えて固まり、地殻がつくられた。グリーンランドにある約38億年前の地層には、海水中で冷えて固まったとみられる溶岩が残されている。これは、この時代の地球にすでに広大な海があったことを物語る。

1999年、デンマーク地質博物館のミニック・ロージング博士は、最も古い生命の痕跡を報告した。博士は、グリーンランドにある約38億年前の地層に、黒いしみをみつけた。この黒いしみは、炭素のかたまりだった。宇宙に存在する炭素には、軽い炭素(^{12}C)と重い炭素(^{13}C)がある。生物が二酸化炭素などを取りこむとき、軽い炭素がより速く取りこまれることがわかっている。

ロージング博士は、38億年前の地層に残る炭素のかたまりを調べ、軽い炭素が濃縮されていることを突き止めた。この濃縮は、約38億年前の地球に存在していた何らかの生物の活動によるものだろうとロージング博士は主張している。

「現在の知見を総合すると、生命の誕生は、約40億年から38億年前の間のどこかでおきたのだろうといえそうです」(小林教授)。





40億年前までの地球

およそ40億年前まではげしい隕石の衝突がつづき、その後に隕石の雨が弱まったことが月のクレーターから読みとれる。地球には40億年前よりも昔の地層はみつからないが、月と同様に地球にもはげしい隕石の雨が降りそそいだ可能性が高い。その結果、地球の表面は熱で溶け、イラストのような「マグマオーシャン(マグマの海)」が広がっていたと考えられている。

38億年前の地球

現在の地球にみられる地層には、40億年前よりも古いとされるものはみつからない。40億年前から25億年前までの時代を「始生代(太古代)」とよぶが、この時代のものとみられる古い地層は世界各地でみついている(左図)。なかでも、グリーンランドでは、約38億年前の地層がみついている。その地層を調べると、火山から噴きだしたマグマが海水によって冷やされてできたと思われる「枕状溶岩」がみつかることから、この時代にはイラストにえがいたような広大な海が広がっていたと考えられている。最古の生命の痕跡とみられるものも、グリーンランドに残された約38億年前の地層でみついている。

生命の材料は地球から？ 宇宙から？

ロシアの科学者アレクサンドル・オパーリン博士(1894～1980)は、1924年の著作の中で、生命の誕生が、次の3段階を経ておきるとのべた。

まず第1段階として、原始地球で大気中のメタンやアンモニアが反応し、アミノ酸や、塩基などがつくられた。

つづく第2段階では、タンパク質や核酸がつくられ、海の中にたまっていった。これを「原始スープ」とよぶ。

そして第3段階では、タンパク質や核酸を包んだ原始細胞が

でき、それが複雑な化学反応(代謝)を開始して最初の生命となった、というものだ。オパーリンの考えは、「化学進化」とよばれる。

だが、この考えはすぐには受け入れられなかった。当時、アミノ酸などの化合物は、生物だけがつくることのできる特別な物質であると考えられていたからだ。その状況を一変させたのは、当時、カリフォルニア大学の大学院生だったスタンレー・ミラー博士(1930～2007)であった。

有機物の自然合成を再現した「ミラーの実験」

1953年、当時カリフォルニア大学の大学院生だったミラー博士は、メタンやアンモニアを主成分とする混合気体をフラスコの中に満たし、水蒸気を循環させた。混合気体は、当時想定されていた原始地球の大気を模したもので、水蒸気の循環は、海から水が蒸発し、雨として降ってくるという循環を模したものである。雷を模した放電をくりかえすと、フラスコの中でさまざまな有機物がつくられた。その中には、生命の材料である、グリシンやアラニンなどのアミノ酸(タンパク質の材料)や塩基(DNAやRNAの材料の一つ)などが含まれていた。イラストは、ミラー博士が想定した原始地球の大気から、雷のエネルギーによってアミノ酸や塩基が合成されるようす。ミラー博士らは、アミノ酸や塩基は、シアン化水素やホルムアルデヒドなどの中間体を経てつくられたと考えた。



生命誕生のきっかけは雷ではなく宇宙線？

現在では、原始地球の大気の主成分は、メタンやアンモニアなどの反応しやすい分子ではなく、窒素や二酸化炭素などの反応しづらい分子だっただろうと考えられている。小林教授らは、雷を模した放電ではなく、宇宙線(宇宙から飛来する放射線)を模した陽子ビームをこれらのガスに当てると、複数のアミノ酸などがつくられることを確かめた。生命の材料をつくったのは、雷ではなく、宇宙線のエネルギーだったのかもしれない。

1953年、ミラー博士は、メタン、アンモニア、水蒸気で満たしたフラスコの中で水蒸気を循環させ、放電をくりかえした。当時の想定にもとづいて原始地球の大気を再現し、その中で雷を発生させつづけたのだ（左ページのイラスト）。

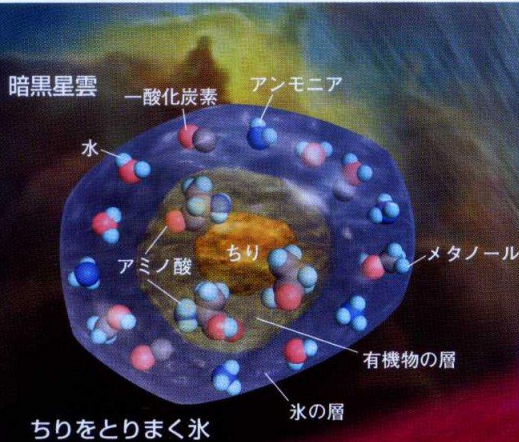
何日かすると、フラスコの底には、アミノ酸や塩基などが徐々にたまっていった。オパーリンのいう、単純な化合物から複雑な化合物への進化が再現されたのだ。

しかし、実験から16年後、生命の材料であるアミノ酸や塩基の供給ルートは、原始地球の大気からの自然合成だけではないことを示す事件がおきた。1969年9月28日、オーストラリア南東部の小さな町、マーチソンに、多量の隕石が落ちたのだ。通称「マーチソン隕石」とよばれるこの隕石を分析したアリゾナ州立大学のジョン・クローニン博士らは、その中にアミノ酸

が含まれていることを明らかにした。このアミノ酸は、地上で混入したものではないことも確認された。この事件によって、生命の材料が隕石に乗って大量に供給された可能性が示されたのである。

さらに1986年、地球に近づいたハレー彗星の組成が探査機によって調べられ、そこに複雑な有機物が存在することがわかった。太陽のような恒星の誕生の場である、宇宙の「暗黒星雲」とよばれるところにも、有機物があることもわかっている（右ページのイラスト）。宇宙空間には、さまざまな有機物が散らばっているのだ。

小林教授は次のように語る。「**生命の材料としては、地球でできたものと、宇宙から持ちこまれたものの両方があった**と考えてよいと思います」。



氷の中でつくられる有機物

暗黒星雲は非常に低温であり、水、一酸化炭素、アンモニアなどを成分とする氷が、暗黒星雲に含まれるちりを取りまいて（しごいて）いると考えられる。この氷に、宇宙線や紫外線などのエネルギーがあたえられると、アミノ酸を含む有機物がつくられる可能性があることが、暗黒星雲の環境を模した小林教授らの実験からわかっている。

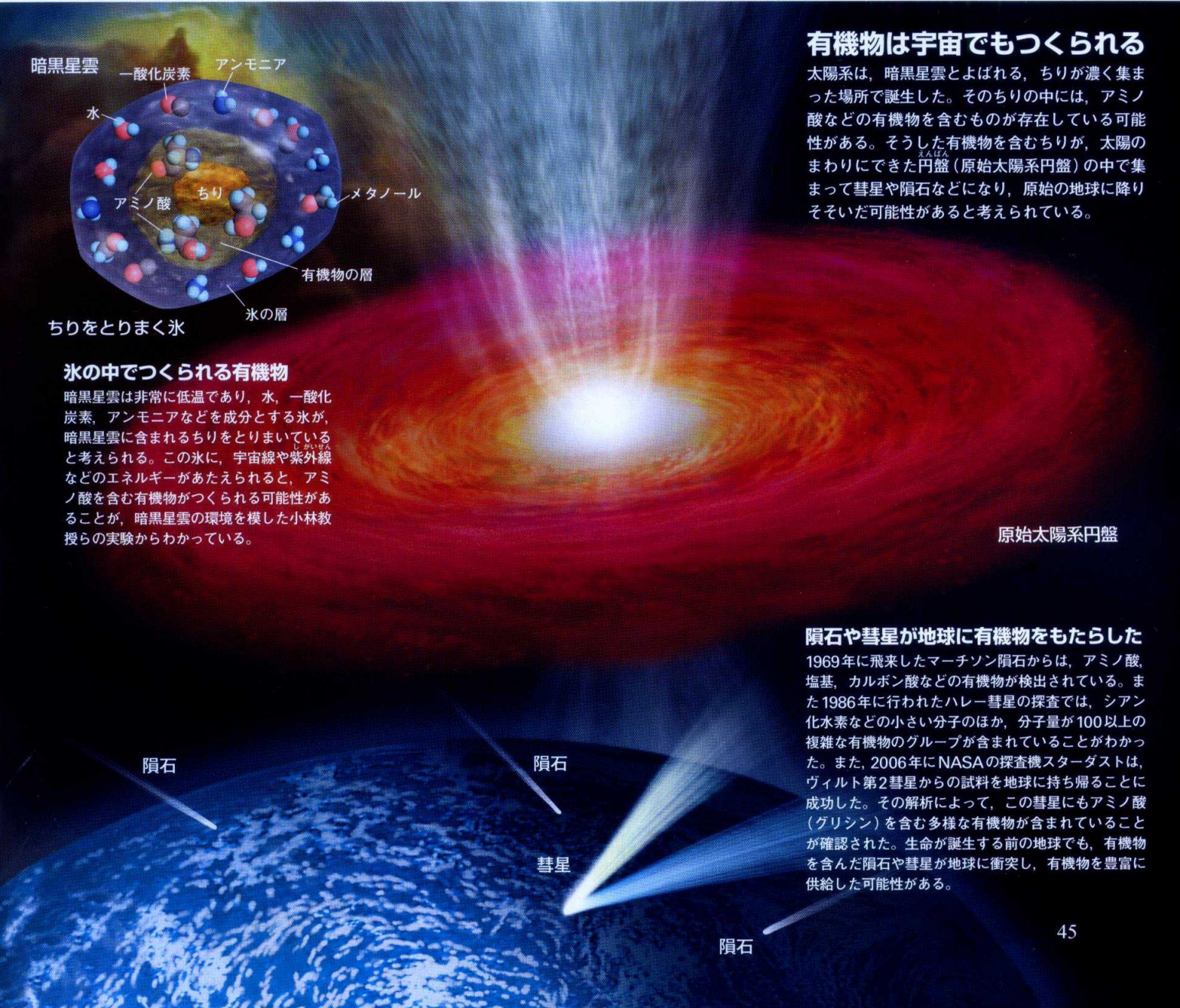
有機物は宇宙でもつくられる

太陽系は、暗黒星雲とよばれる、ちりが濃く集まった場所で誕生した。そのちりの中には、アミノ酸などの有機物を含むものが存在している可能性がある。そうした有機物を含むちりが、太陽のまわりにできた円盤（原始太陽系円盤）の中で集まって彗星や隕石などになり、原始の地球に降りそそいだ可能性があると考えられている。

原始太陽系円盤

隕石や彗星が地球に有機物をもたらした

1969年に飛来したマーチソン隕石からは、アミノ酸、塩基、カルボン酸などの有機物が検出されている。また1986年に行われたハレー彗星の探査では、シアン化水素などの小さい分子のほか、分子量が100以上の複雑な有機物のグループが含まれていることがわかった。また、2006年にNASAの探査機スターダストは、ヴィルト第2彗星からの試料を地球に持ち帰ることに成功した。その解析によって、この彗星にもアミノ酸（グリシン）を含む多様な有機物が含まれていることが確認された。生命が誕生する前の地球でも、有機物を含んだ隕石や彗星が地球に衝突し、有機物を豊富に供給した可能性がある。



「膜のカプセル」の出現が、重要なカギ

DNAやタンパク質などが豊富に準備されるだけで、生命は自然に出現するのだろうか？

小林教授は次のように語る。「生命現象には、活発な化学反応が必要です。しかし、生命の材料分子をいくら用意しても、大量の水があるところでは分子が拡散してしまいます。これでは分子どうしが会える確率は低いため、活発な化学反応はおきかないでしょう。つまり、**生命の誕生には、材料分子を高濃度に濃縮する必要があったはず**です」。

オパーリンは、生命の誕生には、**外界との境界をなす「膜のカプセル」が必要である**ととなえた（右のイラスト参照）。膜がつくるカプセルの中に生命の材料となる分子が閉じこめられれば、拡散することなく濃く保たれる。そうすれば、分子どうしが会える機会がふえて、化学反応が活発になるかもしれない。こうして、生命現象をいとなむ原始の細胞が誕生したと考えたのだ。

最初の細胞膜は、どんな分子でできたのだろうか？

現在の細胞膜は、「リン脂質」という分子が集まってできている。リン脂質は、1個の分子の中に、水になじみやすい部分（親水基）と水をはじく部分（疎水基）の両方をもつ。これを水の中に入れると、多数のリン脂質が、疎水基を内側にし、サンドイッチ状に整列する。このサンドイッチ構造の膜が、現在の生物がもつ細胞膜の構造である。

これと同じリン脂質の膜を、原始の細胞はもつことができたのだろうか？ 小林教授はこう語る。「リン脂質は、触媒がないかぎり、自然につくられるのがむずかしい有機物です。したがって、リン脂質でできた膜が自然に出現することはむずかしいでしょう」。

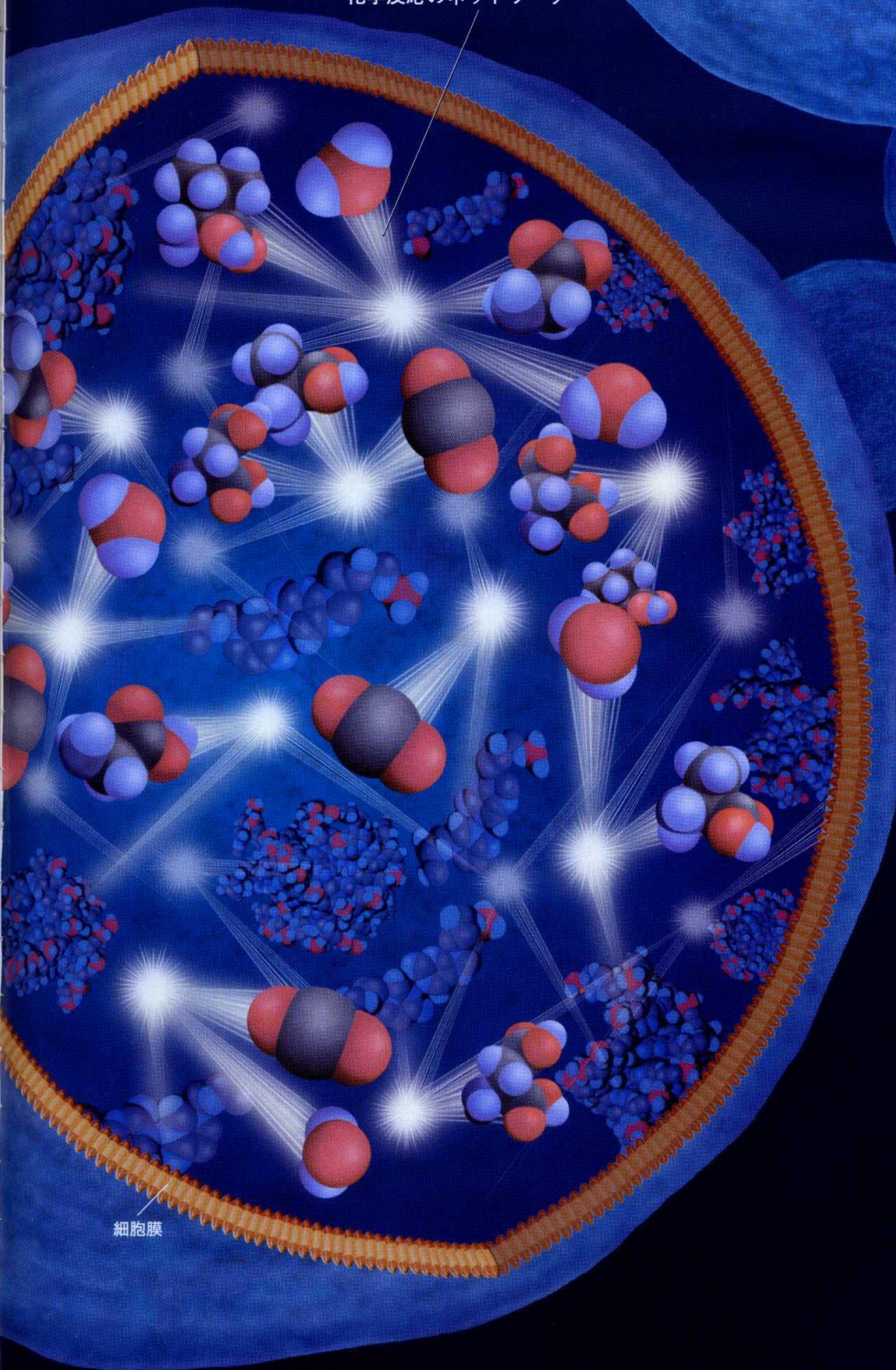
どんな膜が最初に出現したのかについては、現在さまざまな説がある。リン脂質の膜が最初だ、とする研究者もいれば、アミノ酸がつながってできた膜が最初だ、と考える研究者もいる。



膜ではなく、鉱物が生命誕生をもたらした？

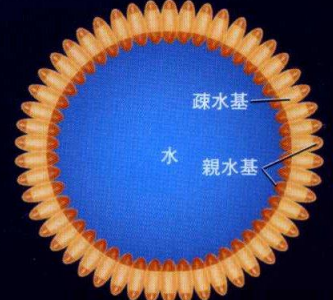
ドイツのギンター・ヴェヒターズホイザー博士は、「黄鉄鉱（パイライト）」とよばれる鉱物の表面で、生命の誕生にとって重要な化合物の濃縮がおきたとする説をとなえている。黄鉄鉱とは硫化鉄の結晶であり、海底などに自然に存在する。この表面がさまざまな分子を吸着し、有機物をつくる化学反応が促進された可能性があるという。この説は、細胞膜がなくても分子の濃縮はおき、それが生命を誕生させた可能性があることを指摘している。

さまざまな化合物を結ぶ
化学反応のネットワーク

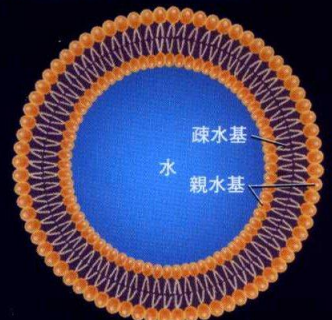


2種類の細胞膜

アミノ酸でできた細胞膜



リン脂質でできた細胞膜



上はアミノ酸、下はリン脂質を材料にした細胞膜の模式図。どちらも、水になじみやすい部分（親水基）だけが水と接するように、各分子が配置して膜をつくる。現在の細胞膜は、主にリン脂質でつくられている。

「最初の細胞」の中で何がおきた？

イラストには、原始の海に誕生した、最初の細胞の想像図をえがいた。何らかの分子を材料にした細胞膜の中に、大きささまざまな化合物が閉じこめられ、それらがさまざまな化学反応を通じて結ばれた。こうした化学反応のネットワークが、生命のはじまりだったと考えられる。オパーリンは、リン脂質やタンパク質などを材料に、「コアセルベート」とよばれる微小な球体を実験的につくってみせ、これが細胞の原型であると主張した。その後もさまざまな研究者が、細胞の原型となる膜構造を提案している。

DNAが先か？ タンパク質が先か？

生命の誕生に最も大きな役割を果たしたのは、いったいどんな分子だったのだろうか？ この謎にせまるキーワードが、生命の2大機能、「自己複製」と「代謝」である。

1953年、生命科学史に輝く大発見がなされた。ジェームス・ワトソン博士（1928～）とフランシス・クリック博士（1916～2004）による、「DNAの二重らせん構造」の発見である。この発見をきっかけに、DNAを複製するメカニズムが解明され、細胞が行う自己複製のメカニズムが明らかになった。DNAこそが、自己複製に必要な設計図だったのだ。

だが、DNAだけでは、「最初の生命」になることはむずかしい。DNAは、化学反応を促進する機能をもたないためだ。これでは、もう一つの重要な生命機能である「代謝」がおきない。

化学反応を促進する装置としてはたらくのは、DNAではなくタンパク質である。しかし、タンパク質だけを含む細胞も、最初の生命にはなりえないと多くの科学者たちは考えている。なぜなら、タンパク質は遺伝情報を保持できない。そのため、自己複製を行うことができないのだ。つまり**DNAとタンパク質は、車の両輪のようにともに生命に欠かすことができない分子**なのである。

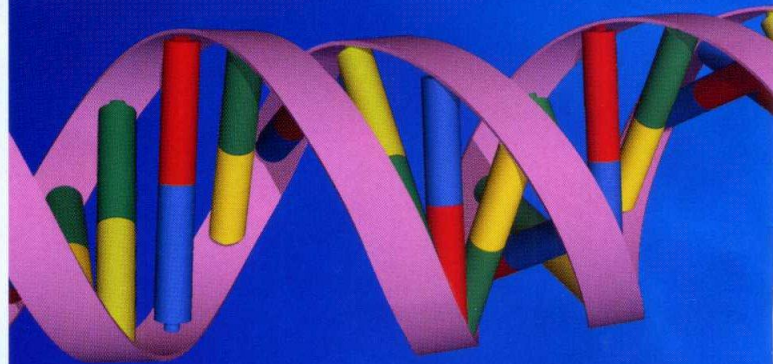
ところが、DNAもタンパク質も、それぞれ単独では出現しえない。タンパク質がつくられるためには、設計図であるDNAが必要であり、DNAの複製には、タンパク質が必要だからだ。ニワトリが卵を産み、その卵からニワトリが産まれるように、DNAとタンパク質も“ニワトリと卵”の関係にあり、どちらも単独には地球上に出現しそうにない。この問題が、生命の起源を探る科学者たちを長らく悩ませることになった。

DNAがタンパク質をつくり、 タンパク質がDNAをつくる

現在の生物が、細胞内でDNAやタンパク質をつくるようすをえがいた。A（上側）は、DNAの情報をもとにタンパク質がつくられるようすを、B（下側）は、タンパク質によってDNAがつくられていくようすをあらわしている。

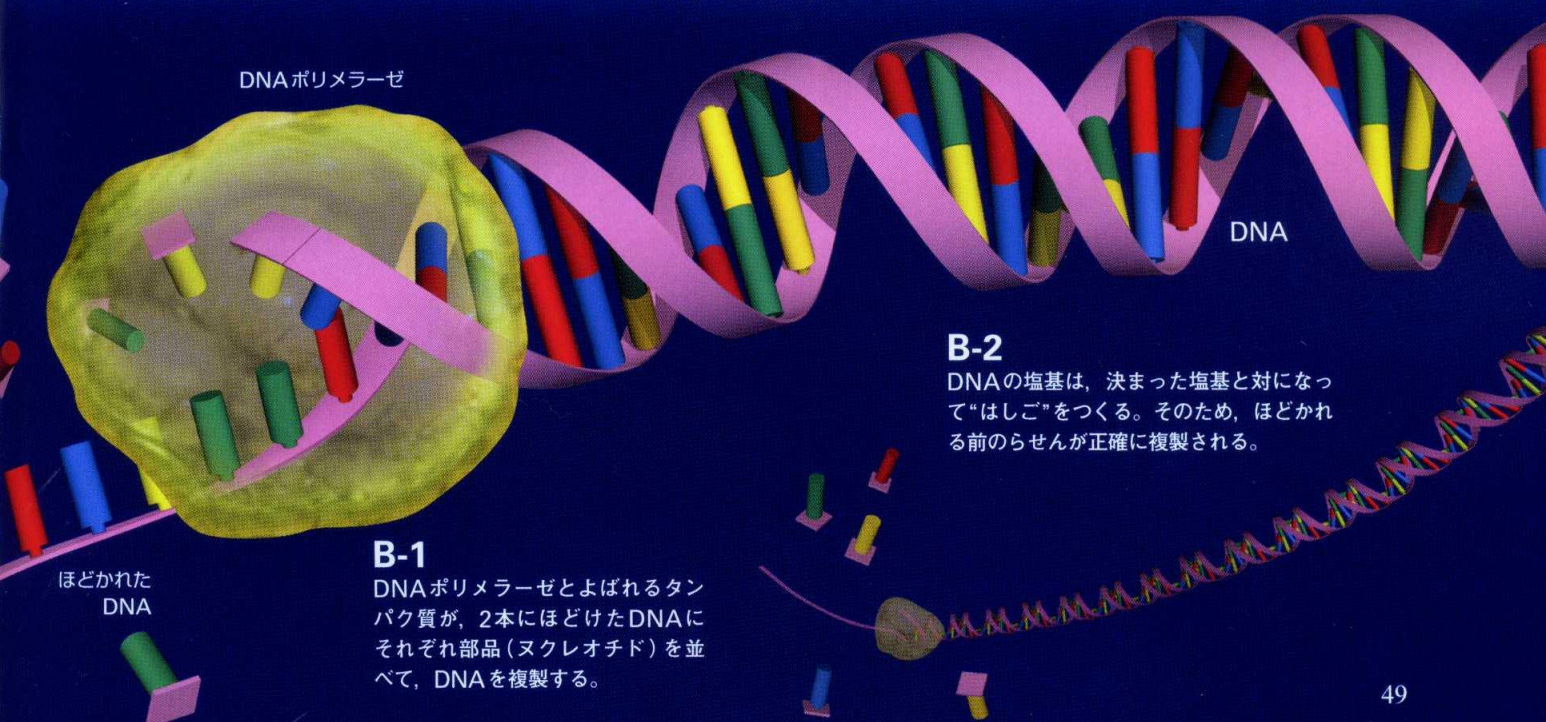
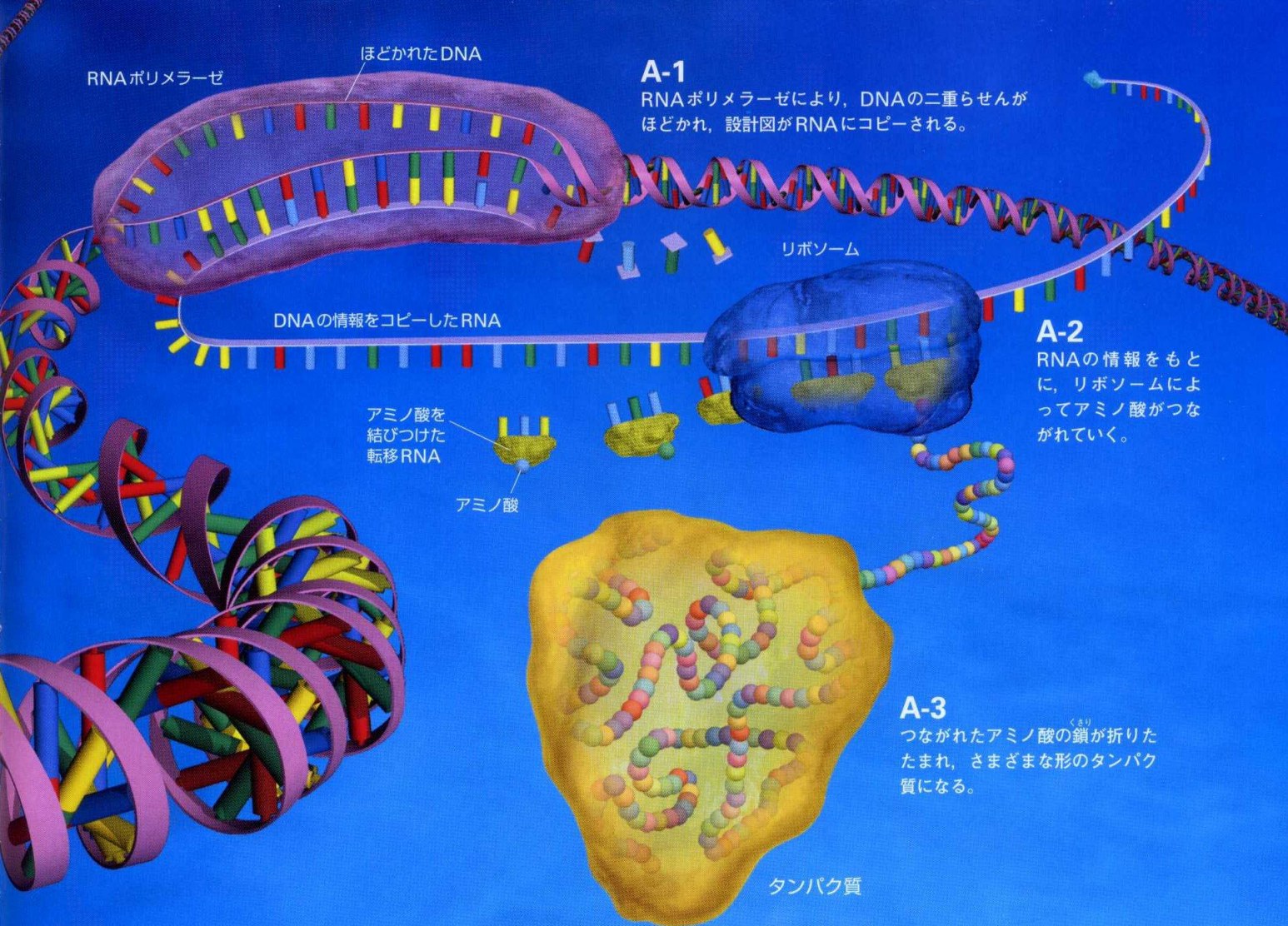
なお「DNAとタンパク質、どちらが先か」という問題は、「ニワトリと卵の問題」ともよばれている。「卵からニワトリがかえり、成長したニワトリが卵を産む。では、最初に誕生したのはニワトリか、それとも卵か？」という問題に似ているためだ。

A. DNAの情報をもとに、 タンパク質が組み立てられる



B. タンパク質のはたらきによって、 DNAが組み立てられていく





生命はRNAからはじまった？

1980年代のはじめ、「ニワトリと卵」の問題に大きな影^{えい}響^{きよう}をあたえる大発見がなされた。

コロラド大学のトマス・チェック博士とエール大学のシドニー・アルトマン博士は、それ自身が化学反応を促進できるRNAを発見した。このRNAは「リボザイム(ribozyme)」とよばれる(右のイラスト)。RNAの正式名称「リボ核酸(ribonucleic acid)」と、「酵素(化学反応を促進するタンパク質；enzyme)」とを組み合わせた造語だ。

リボザイムの発見により、RNAがニワトリと卵の役割をかねそなえた分子であることが示された。DNAとよく似た分子であるRNAは、DNAと同様に、遺伝情報をもつことができる。だが、RNAの機能はそれだけではなく、**タンパク質のように、化学反応を促進する装置としてはたらくこともできるのである。**

これを元に、アメリカ、ハーバード大学のウォルター・ギルバート博士が1986年にと考えたのが以下のような「RNAワールド仮説」だ(右ページのイラスト参照)。この仮説によると、まずRNAができ、その中から、自己を複製するリボ^{りぼ}ザイムが出現した。その後、遅れて登場したタンパク質が化学反応を促進する機能をになうようになり、さらに遅れて登場したDNAが遺伝子としての機能をになうようになったという。

原始地球には、いったいどんな化学反応を促進するリボザイムが登場したのだろうか？ 東京大学の菅^{すが}裕明^{ひろあき}教授らは、ランダムにつくられたRNAを試験管の中で進化させることで、多彩な機能をもつリボザイムが出現すること確かめている。菅教授は、「試験管からは、リン脂質の合成に必要な酸化還元^{かんげん}反応を促進するリボザイムが出現しました。こうしたリボザイムが、最初の細胞膜を誕生させたのかもしれない」と語る。

菅教授らはさらに、タンパク質の合成に必要な化学反応を促進するリボザイムをつくることに成功した。RNAワールドにこうしたリボザイムが出現すれば、RNAだけでなく、みずからタンパク質を合成し、それを利用する段階へと移行できただろうと菅教授は考えている。

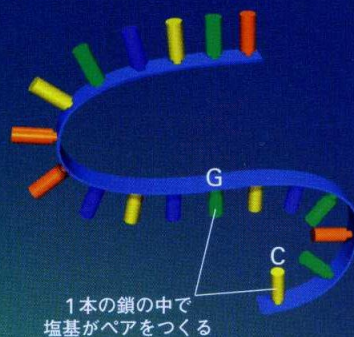
「RNAワールド仮説」とは？(1~4)

生命の誕生には、自分自身を複製するしくみが必要である。知られているかぎり、RNAは単独で自己複製を行うことのできる唯一^{ゆいいつ}の分子である。RNAワールド仮説によれば、まず原始の地球に自己複製を行うリボザイムが出現し(1)、細胞膜^{かく}の獲得^{かくとく}(2)やタンパク質の獲得(3)、DNAの獲得(4)を経て、現在の生物へと進化したとされる。

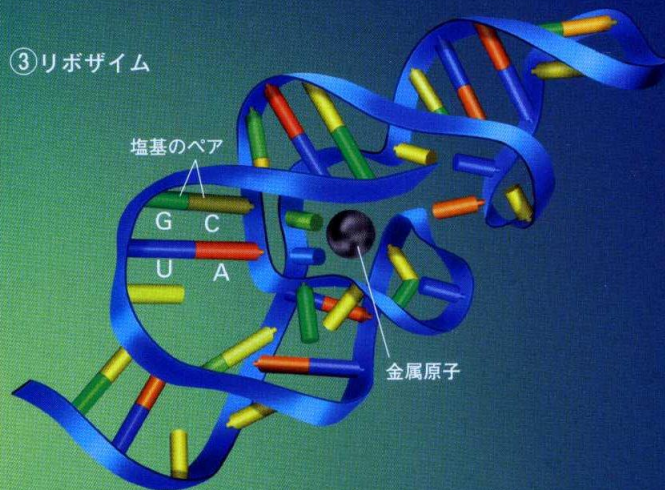
① RNAの鎖



② 鎖が折れ曲がる



③ リボザイム

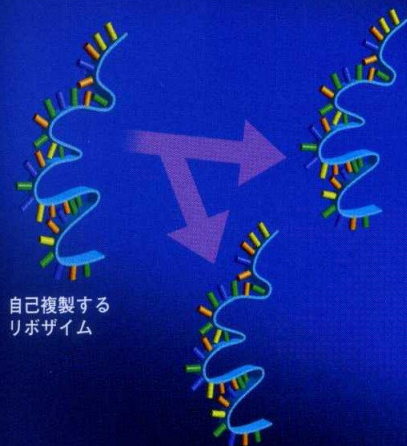


化学反応を促進する「リボザイム」(①~③)

DNAは2本の鎖からなるが、RNAは通常1本の鎖として存在する(①)。DNAでは、2本の鎖がもつ塩基が向かい合ってペアをつくるが、RNAでは1本の鎖の中で塩基のペアがつくられることがある。するとRNAの鎖は折れ曲がり、多彩な立体構造をとる(②)。その結果、タンパク質のように、化学反応を促進する装置としてはたらくことができる。こうしたRNAを「リボザイム」という(③)。リボザイムには、内部に金属原子を包みこみ、高い活性をもつものもある。

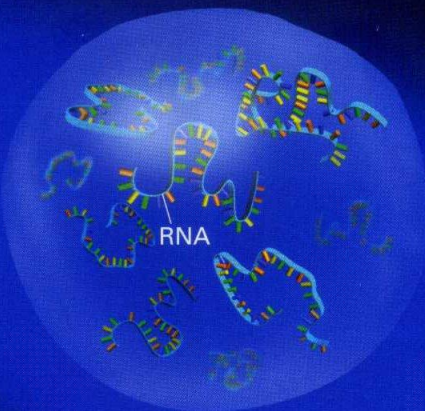
1. 自己複製するリボザイムが出現した

みずからとまったく同じ分子を合成できるリボザイム (RNA) が出現し、RNAによる自己複製がはじまった。



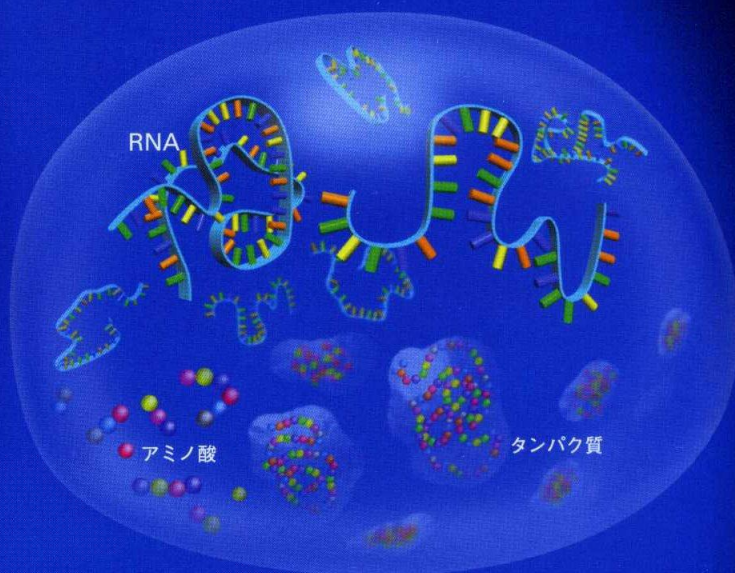
2. 細胞膜を獲得した

リン脂質の合成反応を促進するリボザイムが出現し、RNAが細胞膜に包まれた。



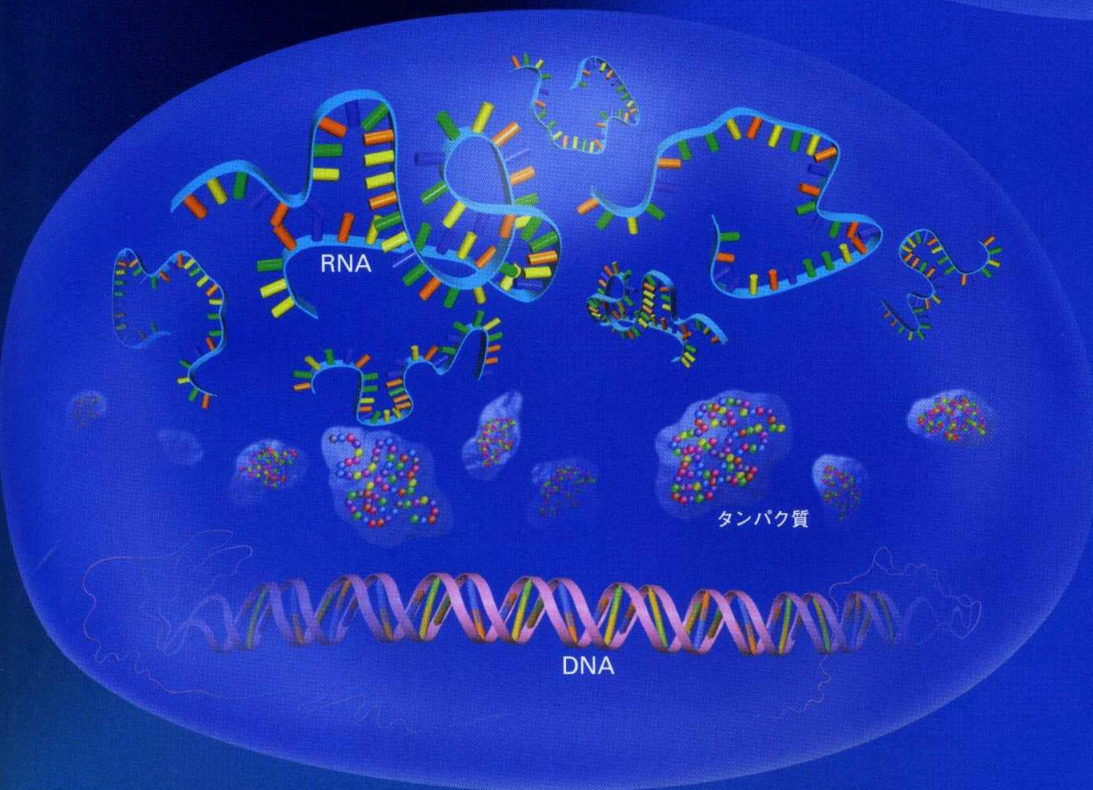
3. タンパク質を獲得した

タンパク質の合成反応を促進するリボザイムが出現し、細胞にはRNAのほかにタンパク質が含まれるようになった。タンパク質の中には、リボザイムが行えないような化学反応を促進できるものがあられて、細胞内の化学反応がさらに多彩になった。



4. DNAを獲得した

現在の生物には、RNAの基本ユニットであるリボヌクレオチドが、DNAの基本ユニットであるデオキシリボヌクレオチドに変換される化学反応がある。この化学反応を促進するリボザイムもしくはタンパク質があらわれて、細胞はDNAを合成できるようになった。やがてRNAは、より安定な分子であるDNAに、遺伝情報を保持する機能をゆずった。



生命はタンパク質からはじまった？

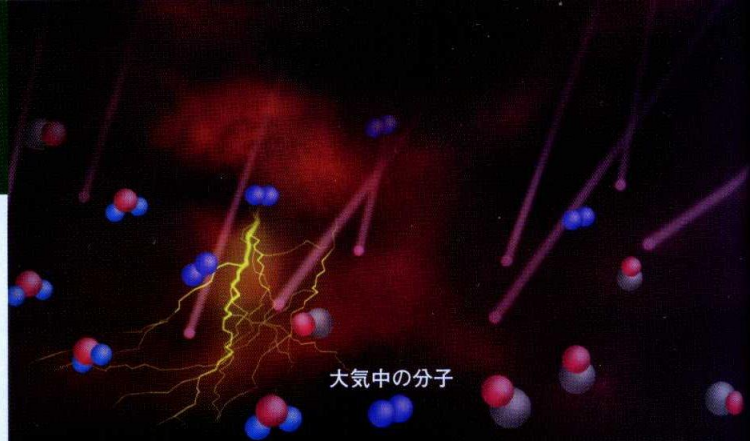
RNAワールド仮説は現在、多くの研究者によって支持されている。しかし、生命はRNAではなく、タンパク質からはじまったとする説もある。

放送大学奈良学習センターの池原健二教授^{いけはらけんじ}は次のように語る。「RNAは、非常に洗練された分子です。しかし、あまりに洗練されすぎており、それが自然につくられるには複雑すぎるのではないのでしょうか」。

たしかに、RNAの鎖をつくる基本ユニットである「リボヌクレオチド」は、アミノ酸にくらべて複雑な分子である。リボヌクレオチドがミラーの実験やそれに類似する実験において自然合成された例はない。また、リボヌクレオチドを含む隕石^{いんせき}の例もない。

そこで池原教授が注目するのはタンパク質だ。タンパク質の鎖をつくる基本ユニットであるアミノ酸は、リボヌクレオチドにくらべて構造が簡単である。とくに、アミノ酸の中でも構造が単純な**グリシン(G)**、**アラニン(A)**、**アスパラギン酸(D)**、**バリン(V)**の4種類は、ミラーの実験やそれに類似する実験において、無機物から容易に合成されることがわかっている。また、隕石にこれらのアミノ酸が含まれる例も知られている。池原教授は、これらの限られたアミノ酸を材料にしてつくられた「タンパク質ワールド」が、RNAやDNAより前に出現したのではないかと考えているのである(GADV仮説、右のイラスト)。

だが、前にものべたように、タンパク質がつくられるには、DNAやRNAという設計図が必要なはずだ。これらの分子がないのに、タンパク質はつくられうるのだろうか？「グリシン、アラニン、アスパラギン酸、バリンの4種類のアミノ酸を含む水溶液をくりかえし蒸発させると、4種類のアミノ酸が中心となってランダムに結合しただけのタンパク質ができます。このようなタンパク質でも、わずかながらタンパク質の分解反応を触媒できることを確かめています。生命の誕生には、設計図を必要とするような高級なタンパク質でなく、4種のアミノ酸がランダムにつながったタンパク質で十分だったのではないのでしょうか」(池原教授)。

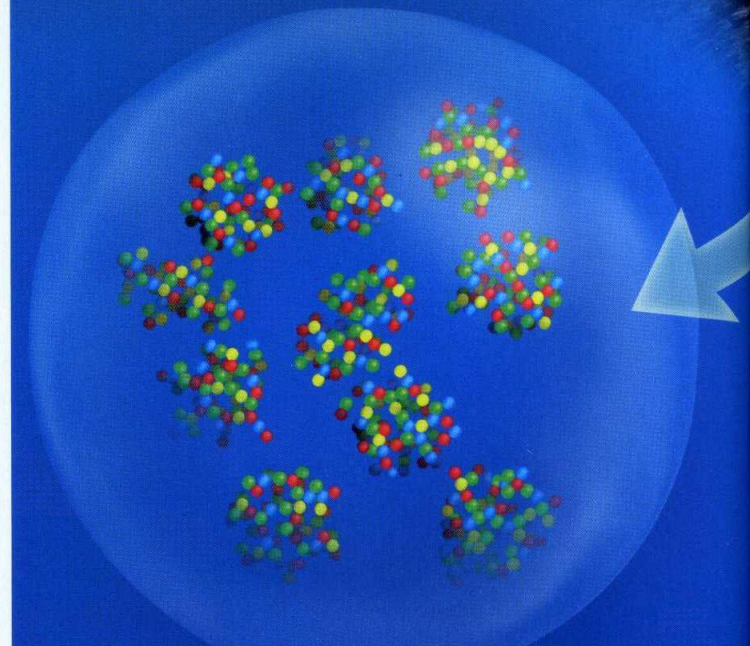


大気中の分子



1. 4種類のアミノ酸が出現した

無機物から、グリシン、アラニン、アスパラギン酸、バリンの4種のアミノ酸がつくられた。



4. 細胞膜を獲得した

細胞膜の材料であるリン脂質は、親水性の部分と、疎水性の部分をもつことで膜を形成している。同様に、親水性の高いアミノ酸(D)と、疎水性が高いアミノ酸(V)を含むGADVタンパク質は、最初の細胞膜をつくる材料になりうると池原教授は考えている。

「GADV仮説」とは？(1～5)

池原教授は、まず最初にタンパク質が出現し、最初の生命を誕生させたとする仮説をとっている。こうした仮説は古くからあり、総称して「タンパク質ワールド仮説」とよばれる。

ただし、池原教授が想定するのは、4種類のアミノ酸(グリシン[略号 G]、アラニン[A]、アスパラギン酸[D]、バリン[V])だけに材料を限定したタンパク質だ。池原教授はこの仮説を、ほかのタンパク質ワールド仮説と区別して「GADV仮説」とよんでいる。GADV仮説が想定する4種類のアミノ酸は、構造が比較的単純で、自然に生じやすいアミノ酸である。

また、GADV仮説によれば、DNAとタンパク質の間に見られる「ニフトサと卵」の関係は、GADVを材料としたタンパク質の形成が先だ。その後、核酸の並びとアミノ酸を結びつける遺伝暗号が成立し、その遺伝暗号がランダムに連結されることによって最初の1本鎖RNA型遺伝子が形成された。その後、2本鎖RNA遺伝子の形成を経て、最後に2本鎖DNA遺伝子の形成がおきたという。現在、生物の中で行われている、DNAからRNA、RNAからタンパク質という、遺伝情報の発現過程を逆にたどりながら形成されたというのだ。GADV仮説は生命が生きるための基礎となっている遺伝子や遺伝暗号、タンパク質の3つの起源すべてを、4種のアミノ酸(G, A, D, V)を中心に説明できる。これらのことが、池原教授が「GADV仮説が生命の起源を説明する最も有力な考えだ」と主張する根拠となっている。

2. 波打ち際でアミノ酸が繋がった

4種類のアミノ酸を含む海水が蒸発と乾固をくりかえしたことで、アミノ酸どうしが結合していった。これがおきた場所として、池原教授は波打ち際の潮だまりのような場所を想定している。

アミノ酸がランダムに結合

GADVタンパク質

3. タンパク質ができ、疑似複製がはじまった

4種類のアミノ酸がランダムに結合し、タンパク質(GADVタンパク質)ができた。やがて、4種類のアミノ酸をランダムに結合させることのできるGADVタンパク質があらわれ、正確な複製ではないが、自身と似た分子をつくる「疑似複製」がはじまった。

GADVタンパク質

短いRNA

5. RNAを獲得した

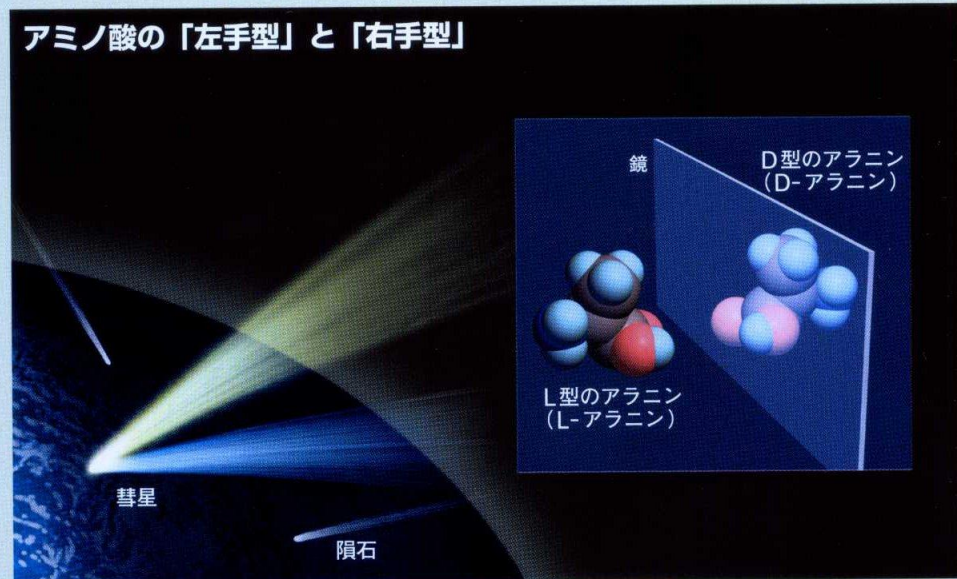
多彩な機能をもつGADVタンパク質が出現し、RNAなどを合成できるようになった。その後、RNAがもつ遺伝情報にもとづいてタンパク質を合成するシステムが出現した。

生物がもつ左手型と右手型のアミノ酸

今後、生物のもつアミノ酸の起源が明らかに？

アミノ酸には、「左手型」と「右手型」という立体構造のことなるものが存在する。生物を構成するアミノ酸は、ほぼ左手型だが、その起源は不明だ。近年、著者らが開発した、ペプチド、タンパク質中の右手型アミノ酸を検出する新しい分析方法を用いれば、生物を構成するアミノ酸の由来が見えてくるかもしれない。

執筆：藤井紀子 京都大学 原子炉実験所教授



私たちの左手を鏡に映すと、右手と同じ形になる。これと同様に、アミノ酸には左手型（L型）と右手型（D型）の2種類があり（イラスト参照）、両者は実物と鏡像の関係にある。構造的にはことなるが、化学的には両者の性質は同じである。

すべての生命は、ほぼL型のアミノ酸で構成されている。L型のアミノ酸の起源については、隕石や彗星によって宇宙から運ばれてきたなどとする説があるが、いまだ不明だ。

生命が誕生するためには、次の3段階が必要と考えられている。①アミノ酸、糖、核酸の塩基など、生命を構成する単純な有機分子が合成される。つづいて、②これらの分子が、それぞれつながっていき、触媒機能や代謝機能などの多様な機能をもつタンパク質や、タンパク質の設計図の役割をする核酸（DNA や RNA）が合成される。そして、③これらのタンパク質を閉じこめておく、脂質からなる膜の袋がつくられ、この中で複雑な化学反応がおきる。以上の3段階をへて、生命が誕生する。

アミノ酸には「左手型」と「右手型」がある

生命を構成する分子が機能をもつためには、その分子がこういった立体構造をしているのかが重要だ。

たとえば、アミノ酸を考えてみよう。アミノ酸には、「左手型」と「右手型」が存在する。専門的には、前者をL型のアミノ酸、後者をD型のアミノ酸とよぶ。左手型（L型）と右手型（D型）とは、左手と右手のように、たがいにぴったり重ね合わせができない立体構造の分子のことである。

生命はみな、ほぼL型のアミノ酸で構成されている。L型のアミノ酸の起源については、隕石や彗星によって宇宙から運ばれてきたなどとする説があるが、いまだに明らかとなっ

ていない。

しかし、もう一方のD型のアミノ酸は現存の生物にまったく含まれていないのかというと、そうではない。D型のアミノ酸は、実は、微生物から高等生物の体内にまで広く含まれているのだ。

アミノ酸の立体構造のちがいが、病気の一因となる？

たとえば、微生物の細胞壁の構成成分「ペプチドグリカン」には、D型のアスパラギン酸とフェニルアラニン、グルタミン酸が含まれていることが以前からよく知られていた。

また、イモ貝という貝類は「コントリファン」というアミノ酸9個からなる毒性の強いペプチド（アミノ酸が複数個つらなったもの）を、魚に注入して魚をつかまえるが、このペプチドの4番目のアミノ酸は、D型のチロシンである。

はじめはL型のアミノ酸が多数つらなることでつくられたタンパク質でも、加齢にともなってその一部がD型のアミノ酸に簡単にかかわることがわかってきた。実際、眼の水晶体、皮膚、脳などでは、D型のアスパラギン酸が生じていることが明らかとなっている。

では、D型のアミノ酸が体内に存在していると、生物にどのような影響が出るのだろうか？ D型のアミノ酸を含んでいるタンパク質は、構

造が変化することで、酵素との相互作用が低下する。D型のアミノ酸を含んでいるタンパク質は消化されて断片化しても、最終的には酵素に認識されずに、体内に蓄積すると考えられる。このことが、加齢にともなう病気の一因となっていることも考えられる。

宇宙由来の結合型アミノ酸の分析も可能に

タンパク質化学では、従来、L型のアミノ酸のみを研究の対象とし、タンパク質中のD型のアミノ酸分析はそう多くはなされてこなかった。生物がL-アミノ酸のみで構成されてその状態が維持される、と強く考えられていたのに加え、微量のD型アミノ酸を検出する方法が複雑だったためだ。

著者らは、眼の水晶体タンパク中のD型アミノ酸を研究する過程で、質量分析法を用いて、微量のD型アミノ酸含有ペプチドを簡単に検出する画期的な方法を開発した。

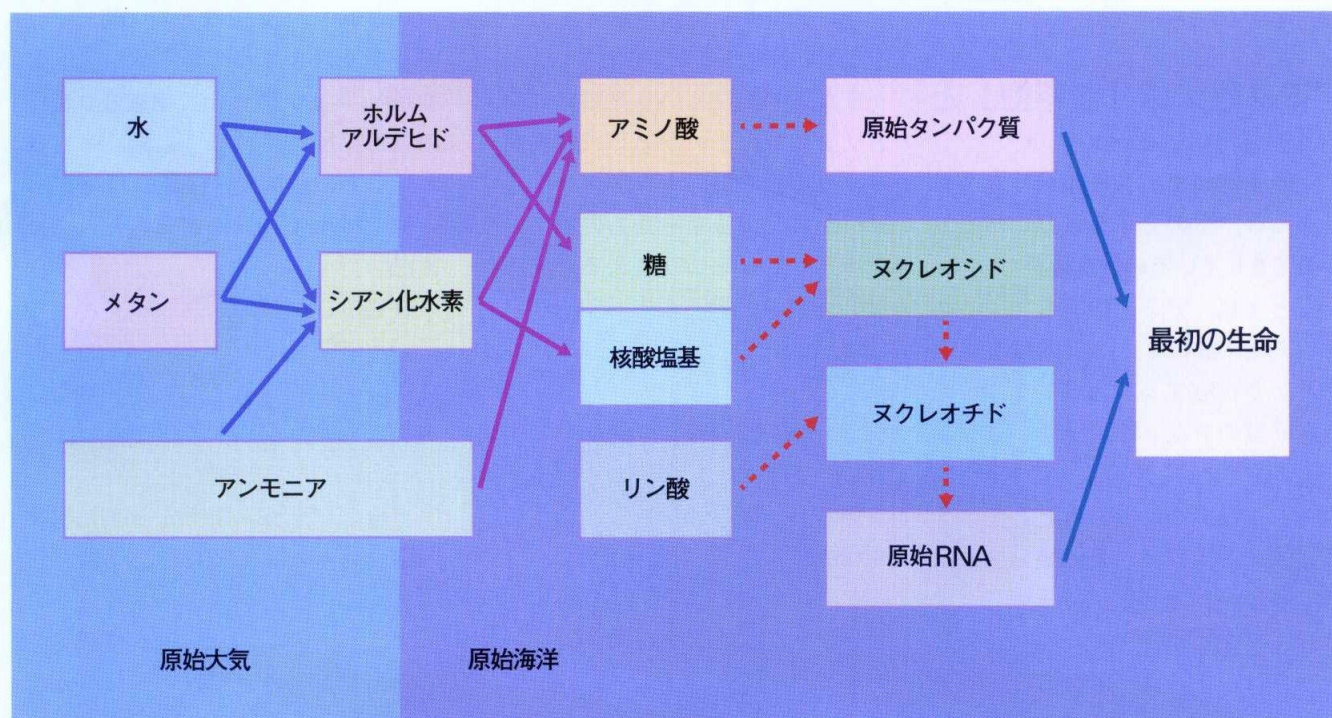
宇宙のはるかかなたから来た彗星の中に、もしも単独のアミノ酸だけでなく、ペプチドが含まれているとしよう。その場合、そのペプチドにD型のアミノ酸が含まれているかどうかこの方法で分析可能となる。それによって、生命の起源がどこからやってきたのかの手がかりが得られるだろう。

生命の起源を求めて

地球生命の構成材料はどこからきたのか？ 謎をとくかぎは宇宙にある？

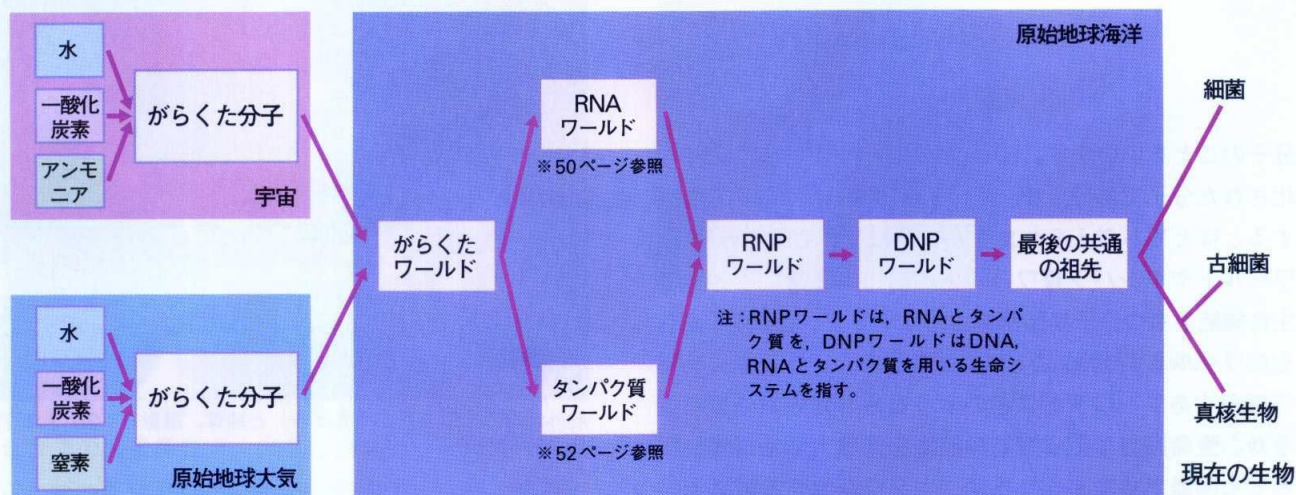
生命がいかにして誕生したか—これはわれわれ人類に残された最大の謎の一つです。これまでは、地球の原始大気の成分から生命の材料であるアミノ酸や核酸がつくられたと考えられていましたが、隕石や彗星に乗って宇宙から地球に生命の材料が運ばれてきた可能性も現在では考えられています。いったい、生命の起源はどこにあるのでしょうか？ 生命の起源に関する研究の最新の動向を紹介します。

執筆：小林憲正 横浜国立大学大学院工学研究院 教授



これまで考えられていた、生命の誕生に関する仮説「化学進化仮説」で説明される、生命誕生に至るまでの進化の流れを示した。右に行くほど、現在に近いことをあらわす。まず、原始大気に含まれていた水やメタン、アンモニアが雷の放電や紫外線、火山の熱によって、化学反応をおこし、ホルムアルデヒドなどの単純な有機分子になった（青い矢印）。つづいて、これらの有機分子が原始海洋で反応して、アミノ酸や糖、核酸塩基ができた（赤紫色の矢印）。さらに、アミノ酸からは原始タンパク質がつくられ、糖や核酸塩基とリン酸からは、それらを原料として、原始RNAができた（オレンジ色の矢印）。そしてついに、原始タンパク質と原始RNAから最初の生命がつくられたと考えられている。

がらくた分子から生命への進化



著者が考える、「がらくた分子」を経由して生物の誕生に至るまでの進化の流れを示した。右に行くほど、現在に近いことをあらわす。がらくた分子とは、高分子状の有機物であり、非常に不完全な生命機能をもつ分子をいう。宇宙や原始地球大気でつくられたがらくた分子をもとに、「がらくたワールド」という生命システムがつくられた。がらくたワールドからは、それぞれ RNA、タンパク質を用いる生命システムがつくられ、両者からは RNA とタンパク質を両方用いる「RNP ワールド」がつくられた。この生命システムは、生物の最後の共通祖先（コモノート）へとつながり、現在の生物に至ったと考えられる。

1920年代、ロシア（当時はソ連）の生化学者アレクサンドル・オパーリン博士（1894～1980）と、イギリスの遺伝学者ジョン・ホールデン博士（1892～1964）は、原始地球の海、もしくは池にとけこんだ有機物（原始スープ）が徐々に複雑なものへと「進化」し、ついには生命になったという「化学進化仮説」を提唱しました。そして1953年、アメリカ、カリフォルニア大学の大学院生だったスタンレー・ミラー博士（1930～2007）は、メタン、アンモニア、水素、水蒸気をつめたフラスコの中で火花を飛ばしたところ、アミノ酸ができたという報告をしました（44ページで紹介）。

この成果に、多くの研究者はおどろきました。アミノ酸は私たちの体をつくっているタンパク質のもとになる有機分子です。そのような重要な分子がメタンなどの単純な分子からいとも簡単にできてしまうなんて、それまでだれも考えていなかったのです。もし、原始地球にメタンなどがあれば、そこでアミノ酸ができ、さらにタンパク質もできるにちがいない。これならば生命の誕生の過程を実験室で再現することも可能だろう。このように考えた多くの研究者が生命の起源の謎をとく実験に取り組みました。

フラスコの中でアミノ酸をつなげてペプチドをつくる実験も行われました。タンパク質と並ぶ重要な生体分子は核酸（DNA、RNA）ですが、これらも条件がそろえば合成可能なこともわかってきました。

これらをまとめると左ページの図のようなシナリオができます。RNAはDNAより先にできたことに関しては多くの研究者が認めています。RNAとタンパク質のどちらが先にできたかはまだ論争中ですが、RNAとタンパク質を用いた生命世界（RNPワールド）を経て、現在の地球生命が誕生したのではないかと考えられています。

生命の材料は宇宙から？

また、生命の材料は宇宙からやって来た可能性も考えられました。その一つが隕石です。隕石は、宇宙から飛来した岩石の総称で、多くは小惑星起源であると考えられてきました。小惑星由来の隕石を水で煮出すと多種類のアミノ酸が検出されることが知られています。

もう一つは、彗星です。彗星から噴きだしたちりにも、アミノ酸のグリシンを含む多様な有機物が含まれていることがわかってきました。

生命の起源をとくかぎを宇宙に探る

隕石や彗星によって地球に届けられた有機物や、原始大気中で合成された有機物は、まだまだ生命とはよべないものです。これらから生命への道筋はどのようなものだったのでしょうか。上の図に、私が考える、「がらくた分子」から生命への道筋を示します。がらくた分子とは、高分子状の有機物であり、膜をつくる前段階で自己を組織化する機能といった、非常に不完全な生命機能をもつ

分子のことをいいます。RNAやタンパク質は高度に組織化された分子であり、まったくの無生物的な環境で生成するとはとても考えられません。それらが活躍するRNAワールドやタンパク質ワールドの前に、非常に不完全な生命機能をもつ分子集団があったはずで、これを「がらくたワールド」とよぶことにしましょう。

がらくたワールドとはどのようなものだったのでしょうか。生命誕生に至る道筋の痕跡を地球上でさがすのはとても困難です。なぜならば、生命が誕生する前に用いられた有機物や最初期の生命は、現在の地球上にはまったく残っていないからです。では、生命起源の謎をとく物質はどこにもないのでしょ

うか。ここで注目されるのが、地球外に存在する有機物と生命です。地球外からの有機物は、今日でも宇宙からもたらされています。さらに、有機物から生命への進化の過程が残されている可能性をもつ天体が見つかっています。その例が、土星の衛星のタイタンです。

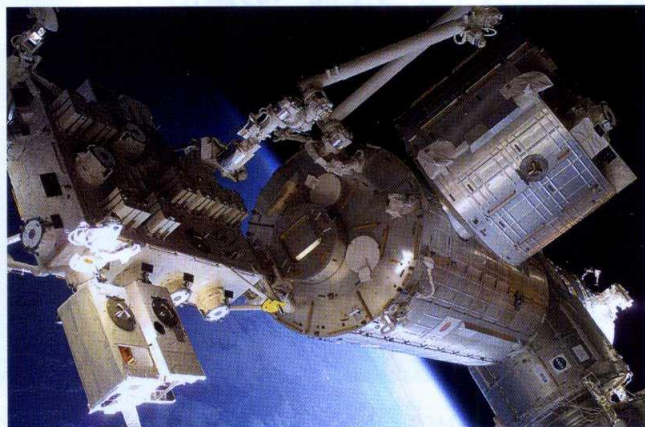
2005年に、NASA(アメリカ航空宇宙局)とESA(ヨーロッパ宇宙機関)とが協力して打ち上げた「カッシーニ探査機」がタイタンに接近、着陸機「ホイヘンス」をタイタンに着陸させました。この探査で、タイタン大気にきわめて複雑な有機物が存在すること、さらにタイタン表面に湖があることが確認されました。ただし、この湖は水ではなく、液体メタンや液体エタンでできています。地球において、原始大気でできた有機物や宇宙からの有機物が海にとけて、生命が誕生したように、タイタンでは有機物が湖にとけてさらに生命に向けた化学進化が進んでいる可能性が現実味をおびてきました。次のタイタン探査では、この湖水の分析がハイライトになることでしょう。

生命の原材料をさがす

生命の材料となる有機物を地球に運びこんだものとして、隕石、彗星、そして宇宙塵が候補にあがります。

まず、隕石に関しては、南極に大量に存在していることがわかっており、アミノ酸の分析だけではなく、核酸の材料の検出や、もっと複雑な分子の分析も進められています。さらに、小惑星探査機「はやぶさ2」が行う予定の、有機物を多く含むと考えられている小惑星(1999JU3)

ISSの日本実験棟「きぼう」



船外活動で撮影された「きぼう」と地球。撮影日：2012年11月1日(日本時間)。

からのサンプルリターンの成果が期待できます。また、ESAが打ち上げた「ロゼッタ探査機」による、彗星に含まれている物質の現地分析などの成果も期待できます。

隕石や彗星で有機物を地球に運びこむときに問題となるのが、その衝突がはげしすぎると、せっかく持ってきた有機物がみんなこわれてしまうことです。そこで、注目されるのが「宇宙塵」です。宇宙塵は、小惑星や彗星の小さなかけらと考えられています。ちりの大きさが1ミリメートル程度のものは地球大気に突入したときに燃えて、流星になってしまいます。一方、より小さなものだと、大気中をゆっくりと舞い降りてきます。これらは、地球に降ってきたあとだと、元々の有機物と地球でついた有機物との区別がむずかしくなります。そこで、宇宙塵を宇宙で集める計画が日本で進んでいます。これが「たんぼぼ計画」です。

たんぼぼ計画は、国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟「きぼう」(上の画像)を用います。きぼうには、屋根や壁のない「曝露部」という実験スペースがあります。ここに降ってくる宇宙塵を集めるわけですが、宇宙塵は秒速数キロメートルから十数キロメートルで飛んできますので、ふつうの方法で集めようとする、衝突の際に発生する熱でこわれてしまいます。

そこで、非常に密度の低い「エアロゲル」とよばれる物質を用い、ちりを徐々に減速させてつかまえることにしています。この実験は2015年にはじまる予定で、1~3年後に地球に持ち帰って、集めたちりを分析することになっています。なお、タンポポ計画では、ちりに付着した微生物が宇宙に飛び出していないかも調べる予定です。これがみつければ、微生物が惑星から別の惑星に移動できる可能性が高まります。

火星の全球画像



第二の生命を火星にさがす

地球以外に生命をさがすとき、まず候補となるのがとりの火星です(右の画像)。かつて、火星には火星人がいるのでは、と期待されたこともありましたが、これまでの探査で高等生物が存在する可能性はほとんどないことがわかりました。しかし、微生物ならば、という期待は、ますます高まっています。

これまでの火星探査で、火星にはかつて大量の水があったことがわかりました。また、2012年に火星に着陸したNASAの探査車「キュリオシティ」は、有機物の探査を行っています。ただ、火星の有機物は表面ではなく、地下により多く存在すると考えられています。ESAは次期火星探査機「エクソマーズ」で、地面の掘削を行い、地下の有機物をさがす計画をしています。さらに、日本では、「MELOS計画」とよばれる次期火星探査で、蛍光顕微鏡を用いて、直接生命の存否を調べることを計画中です。

地球外生命をさがすかぎ：極限環境生物学

実は、かつて火星の微生物をさがそうという探査が行われていました。これが1976年の「バイキング計画」です。このときに用いられた探査法は、土の中に光合成を行うものがいるかなど、地球にいる私たちに身近な微生物をモデルにしたものでした。残念ながら、このときは火星の微生物存在の証拠はみつかりませんでした。

バイキング計画のあと、地球の生命科学は大きく発達しました。その中で特筆すべきことの 하나가、これまで生物が暮らせるとは考えられなかった極限環境にも多様な微生物がいるということです。例えば100℃をこえるような熱水中で繁殖している微生物、地下や深海でまったく光の当たらないところで暮らしている微生物などです。これらの中には、太陽光ではなく化学エネルギーを用いて有機物を合成する「化学合成菌」とよばれるものが多数みつかっています。これは、今後、地球外生命を探るときに多くのヒントをあたえてくれます。実際に、地球の生命の生存を可能とする条件を考えると、火星の地中も、十分に生存可能であることがわかってきました。

火星のほかに注目されるのは、木星の衛星のエウロパと、土星の衛星のエンケラドゥスです。これらの衛星は、表面が水の氷でおおわれていますが、その下に液体の水

が存在すると考えられています。太陽光はこの地下の海には差しこみません。しかし、太陽光の届かない地球の深海底に化学合成菌に依存する生物圏が存在することを考えれば、これらの天体に生命が存在することが十分に期待できます。

われわれはどこから来たのか、われわれは何者か

これまで、私たちは、地球の生命しか知りませんでした。そのため、生物学といえば地球生物学のことだったので。地球には多様な生命が存在するかに見えますが、物理学・化学から見れば、1種類の生命しか存在しません。1種類の生命だけを見て「生命とは何か」を考えるのはきわめてむずかしいことです。しかし、今日、私たちは生命を宇宙の観点から調べることができるようになりました。このような学問を「アストロバイオロジー（宇宙生命科学）」とよびます。

「生命の起源」を英語でいうと、「The Origin of Life」と「Origins of Life」の二つがあります。前者はまさに私たちのルーツを探るというもので、現在の生命を過去にさかのぼっていく必要があります。これには分子生物学や極限環境生物学の活躍が期待できます。

一方、後者の「Origins」(複数形) of lifeは、宇宙に存在するさまざまな生命形態の誕生の可能性を探るものです。現在、太陽系の探査や、さらには太陽系外の惑星の研究も大きく進んでいます。これらの新しい情報をもとに、今後さまざまな実験も行われていくでしょう。私は、「生命指数L」というようなものを考えています。たんなる物質(非生命)は $L=0$ 、現在の生命を $L=1$ としますと、私たちの共通の祖先誕生前には、 $0 < L < 1$ (生命と非生命の間)の時代があったはず。57ページで紹介した「がらくた生命」のLは非常に0に近いのですが、0ではありません。このようなものをフラスコの中で、あるいはタイタンの湖の中に、近い将来みつけれられるのではないかと期待しています。

4

生物の進化

協力 五條堀 孝／斎藤成也／高畑尚之

地球上に最初の生命が誕生してから長い年月を経て、現在、地球上にはおびただしい種類の生物が生息している。この間に、生物におきたと考えられている現象が、「進化」である。進化とは、生物個体あるいは集団の性質が、時間をかけて変化していく現象のことだ。いったいなぜ、生物は進化するのだろうか？ また、進化は、どのようなしくみでおきるのだろうか？

進化とは何か

ゲノムとDNA

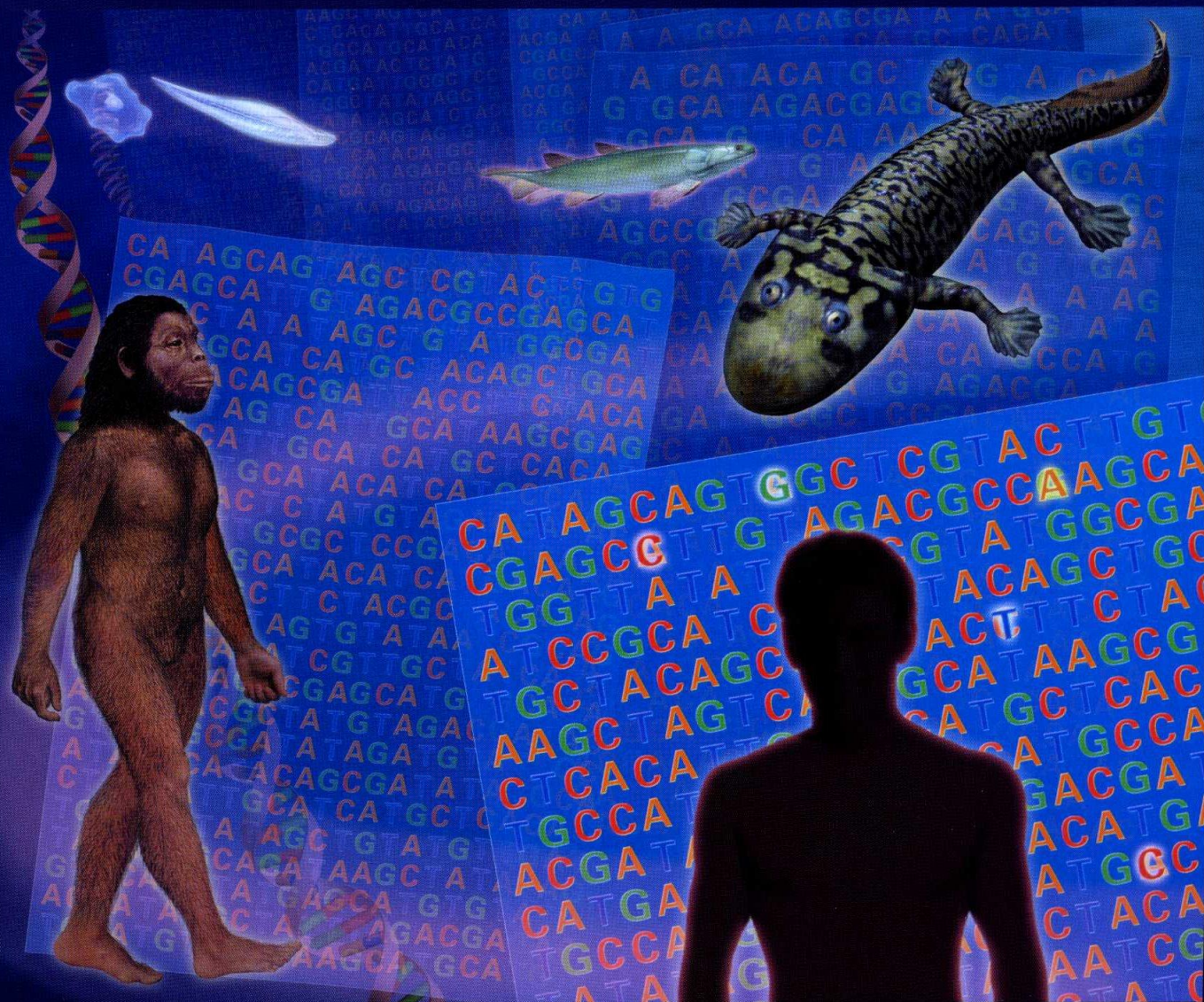
ゲノムの変異

進化の実例

進化系統樹

中立な変異

生物の進化研究の動向





生物のゲノムが書きかえられ、 形態などが変化していく

「進化」とは何だろうか？

進化とは、簡単にいえば、「**生物が長い年月をかけて、その姿形などを変化させていくこと**」である。進歩の逆のイメージがある「退化」も、実は進化の一例だ。たとえば、ヘビの祖先が足を失ったことも、進化だといえる。

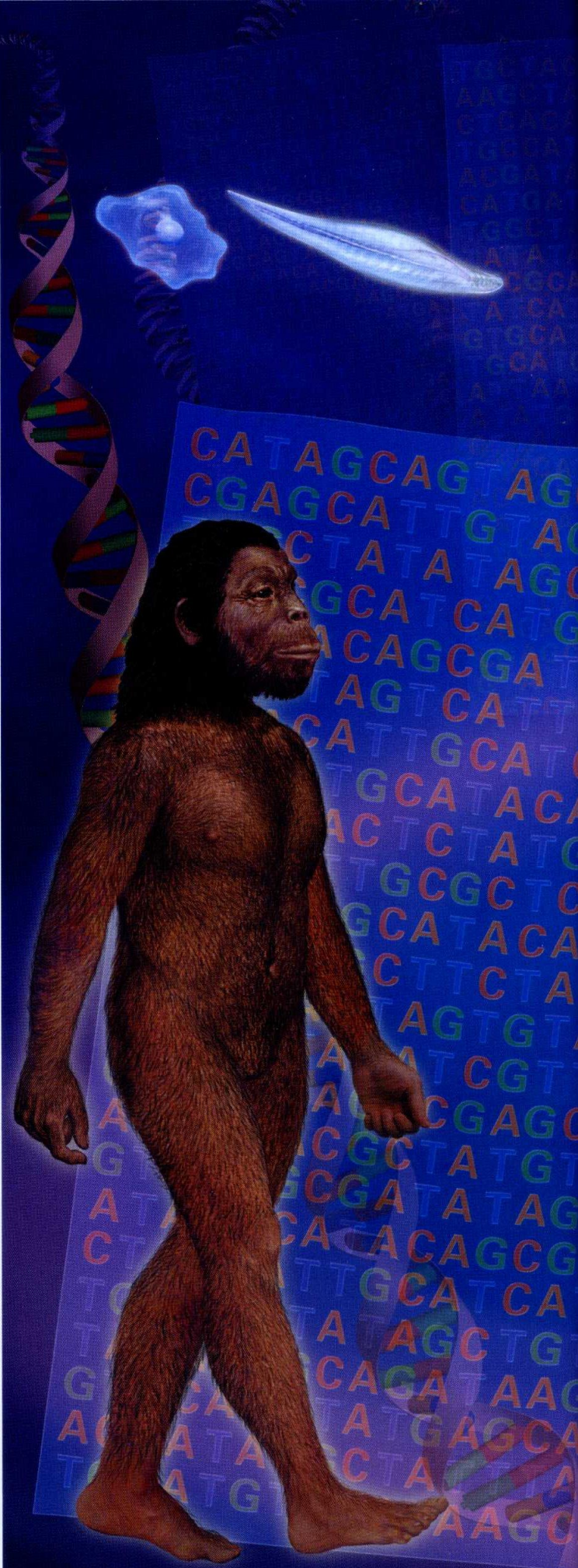
分子レベルで見れば、進化とは、「**生命の設計図である『ゲノム』が、世代を経るにつれて書きかえられていくこと**」である。ゲノムは、一つ一つの細胞にセットとして伝達されており、生物の体はゲノムの情報にもとづいて形づくられ、機能している。子は、両親の生殖細胞にあるゲノムのコピーをセットとして受けつぐわけだが、そのコピーのごく一部に書きかえが生じる場合があるのだ。

進化には二つの段階がある。第1段階では、**個体のゲノムに親のゲノムとことなる“書きかえ”が生じる**。その結果、体でつくられるタンパク質の形がかわったりする。この書きかえが「変異（突然変異, mutation）」である。第2段階では、**この変異をもつ個体の割合が集団中でふえたり減ったりしていく**。このように、変異の発生と集団中での増減を合わせた過程の全体が、進化である。

変異には、大きく分けて3種類ある。①**生存したり子孫を残したりする上で不利な変異** ②**有利な変異** ③**有利でも不利でもない変異（中立な変異）**である。

たとえば、血液中で酸素を運ぶ「ヘモグロビン」のように、生命活動に必須な分子の機能が失われる変異が生じると、その個体は生きていけない。すると、子孫を残せないで、そういった変異は進化には寄与しない。このような「**生存・生殖に不利な変異**」が時間とともに消えていく過程は、「負の自然選択（自然淘汰）」とよばれている。

世代を経ても残っていく、つまり進化に寄与する変異の多くは、「**生存・生殖に有利な変異**」と「**中立な変異**」である。このような変異の一部が、生物集団の中に広まっていくこと、それが進化なのである。とくに**生存・生殖に有利な変異が集団中に広まっていくことは、「正の自然選択」とよばれている**。一方、中立な変異も、運がよければ集団中に広がっていくことがあるという。



書きかわっていく“生命の設計図”

イラストは、生命の設計図であるゲノムの情報が書きかわり、生命が進化していくイメージ。ある生物のゲノムを1枚のシートで表現し、その上にATGCの4文字を配置した。長年の間にゲノムには書きかえが生じ、それによって生物の形態などもかわっていく。これが進化である。



書きかえが生じた場所

ゲノム（生命の設計図）のイメージ



続々と解き明かされる “生命の設計図”

進化でおきるゲノムの書きかえとは、どのようなことなのだろうか？ まず、ゲノムとは何かについてみていこう。

生物の体は、数多くの細胞で構成されており、人体は約60兆個の細胞でできている。細胞核の中には、長い鎖状の分子、DNAがつまっている。ヒトの一つの細胞中にある全DNAをつないで、端から端までのばすと、約2メートルにも達する。

DNA分子の中には、**A(アデニン)**、**T(チミン)**、**G(グアニン)**、**C(シトシン)**の四つの「塩基(base)」とよばれる化合物が並んでいる。DNAの向かい合う2本の鎖のうち、片方の鎖のAはもう一方の鎖のTと“かぎとかぎ穴の関係”で結合し、同じようにGはCと結合する。こうして二つの鎖が結びつくことでDNAは二重らせん構造をつくっている。**このATGCこそ、ゲノムという生命の設計図に書かれた文字である。**ゲノムはたった4種類の文字だけで書かれている文章のようなものだ。

特定のタンパク質(たとえば、筋肉を構成するタンパク質)をつくるなど、**ゲノム中において、ある一つの機能をもつ領域が「遺伝子」である。**ゲノムを1冊の本にたとえるなら、遺伝子は、まとまった意味をもつ一つの文といえる。なお、通常、両親からそれぞれ一つずつ同種の遺伝子(対立遺伝子)を受けつぐので、私たちは同種の遺伝子を二つもっていることになる。

2003年4月、約30億にも達するヒトのゲノムのほぼ全塩基配列、つまりほぼすべてのATGCの並び方が解読され、大きな注目を集めた。ただし、「解読」とはとっても、塩基配列が明らかになっただけで、ゲノムの「意味」を読み解いていくのはこれからだ。ゲノムの解読は、ヒト以外にも多くの生物種で進んでおり、ゲノムのデータは爆発的に増加している。

こういった中、**さまざまな生物種のゲノムを比較し、進化の謎にせまる研究が活発になってきた。**従来は、いま生きている生物や化石の形態を比較することで、進化を解明しようとしてきたが、今やゲノムの比較も進化学には欠かせない。ATGCの4文字だけで書かれたゲノムは客観的、数値的な比較が容易で、進化学の大きな武器となっている。

すでにゲノムが解読されている代表的な生物

線虫

1998年に多細胞生物として最初にゲノムが解読された。



ショウジョウバエ

2000年にゲノムが解読された。



メダカ

2007年にゲノムが解読された。



マウス

2002年にゲノムが解読された。



シロイヌナズナ

2000年に植物として最初にゲノムが解読された。

イネ

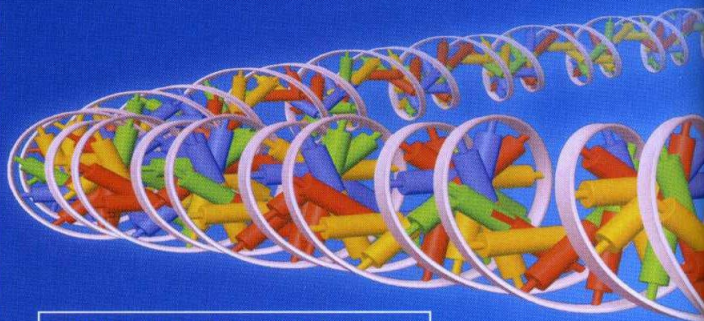
2002年にゲノムが解読された。

ヒト

2003年にゲノムのほぼ完全な配列が解読された。



2011年12月までに、動植物や細菌などの生物や、ウイルスなどのゲノムが、5500例以上も解読されている。



ヒトはゲノムを2セットもっている

ゲノムとは、片方の親から受けついだ23本の染色体(DNAが寄り集まったかたまり)に含まれる遺伝情報の全体を指す言葉である。つまり、ヒトは父親由来と母親由来のゲノムを合計2セットもっていることになる。父親由来のゲノムと母親由来のゲノムには、若干のちがいがあ

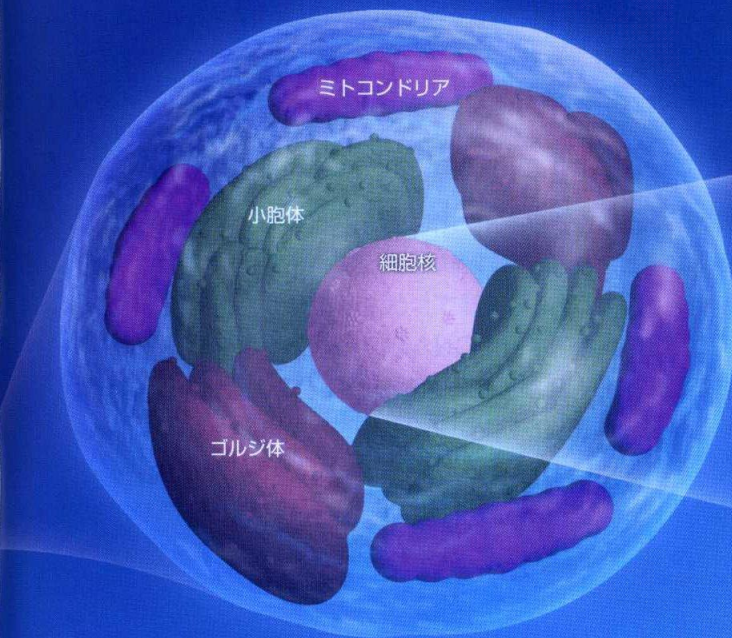
ヒトのゲノムは約30億の文字(塩基配列)でできているので、一つの細胞核の中には、約60億の文字がぎざまれていることになる。なお、ゲノムは英語で「genome」と書き、「gene(遺伝子)」と「chromosome(染色体)」の融合語である。

G C A
A T G

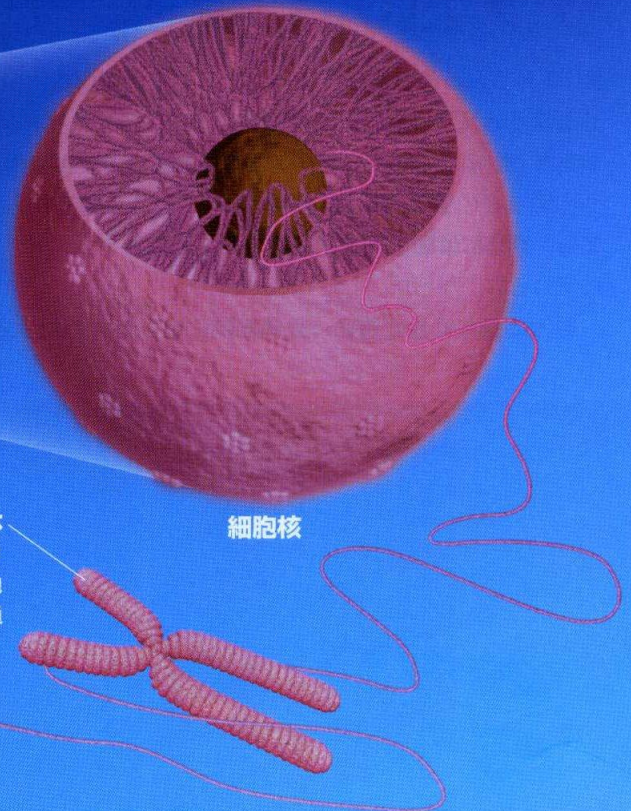
細胞核の中には、DNAがつまっている

イラストは、細胞と細胞核、そして細胞核の中につまっているDNAである。DNAは、生命の設計図であるゲノムの実体といえる。DNAの中にはA、T、G、Cの四つの塩基が並んでいる。

細胞



拡大



DNA

2本の鎖が向かい合って結びつき、らせん構造をつくっている。片方の鎖のAはもう一方の鎖のTと、片方の鎖のGはもう一方の鎖のCと“かぎとかぎ穴の関係”で結びつく。細胞核の中に多く存在する酸性の物質ということから、「核酸」と命名された。核酸にはほかに、RNAがある。

染色体
DNAがタンパク質に巻き付き、凝集したもの。細胞分裂の際にあらわれる。通常はこの形では見えない。

塩基

DNAの塩基には、ATGCの4種類がある。これがゲノムの文字だ。DNAの中の塩基性（酸性のものを中和する性質）の成分なので、単純に「塩基」とよぶようになった。

A(アデニン)

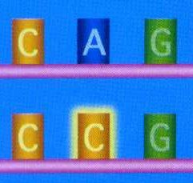
G(グアニン)

T(チミン)

C(シトシン)

TGCTCAGACGTATGC

ACTAGCTAGCAAGCTA



ゲノムの「変異」とは、具体的には何？

62ページで、進化の第1段階は、ゲノム中に生じる「変異（突然変異）」、つまり遺伝子の書きかえだとのべた。しかし、皮膚や内臓などの普通の細胞（体細胞）のDNAに書きかえが生じても、進化には影響をおよぼさない。その書きかえは、次世代に伝わらないからだ。

進化に寄与する変異は、生殖細胞に生じたものだけである。

生殖細胞とは、雄の精子と雌の卵子、そしてそれらの元となる細胞のことだ。精子と卵子が受精して融合し、そのゲノムが子のゲノムとなる。

細胞分裂にともなってDNAのコピーがつくられるときには、まれにコピーミスがおきる。また、自然界に存在する放射線*や化学物質などがDNAを傷つけることもある。こういった場

さまざまな変異

左右のページには、ゲノムに生じるさまざまな変異の例をえがいた。

元の塩基配列



塩基の置換



塩基の欠失



塩基の挿入



合、通常はDNAの修復機構がはたらくが、それでも100%完全には修復しきれず、中には書きかえが次世代に伝わることもある。これが変異だ。

書きかえが具体的にどのようなものかをみていこう。

まず塩基の「置換」^{ちかん}、「挿入」^{そうにゅう}、「欠失」^{けつしつ}がある。これらは、ATGCで書かれた塩基配列の中の1文字が置きかわったり(置換)、いくつかの塩基が塩基配列の中に新たに割って入ったり(挿入)、いくつかの塩基が失われて間がつまったり(欠失)といったことをさす。

遺伝子が丸ごとゲノム中で移動することもある。この動く遺伝子は「トランスポゾン」とよばれている。もしトランスポゾ

ンが移動先で別の遺伝子の中に割って入ると、移動先の遺伝子が機能を失うことがある。また「水平遺伝子移行」^{すいへいいでんしいうこう}といって別の種から遺伝子が何らかの機構によってゲノム中に移行することもある。

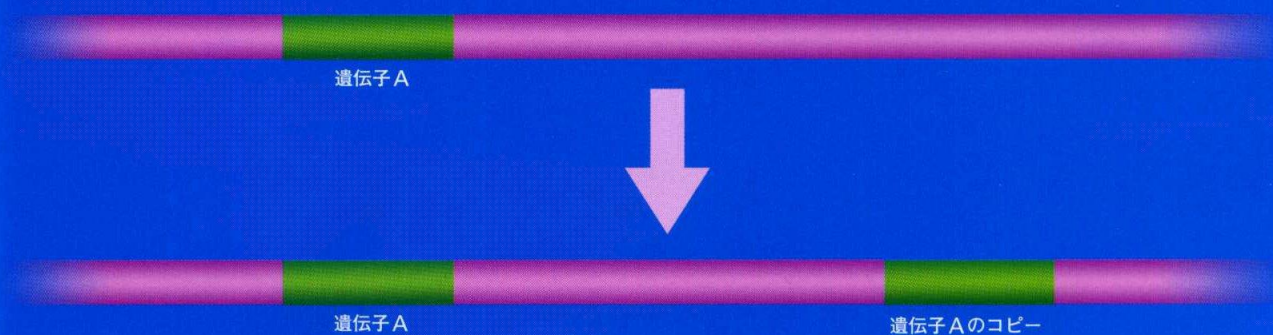
また、一つの遺伝子が二つにふえることもある。これは「遺伝子重複」とよばれている。遺伝子どころか、ゲノムが丸ごとふえて倍加することもあり得る。これは「ゲノム重複」とよばれている。

※：宇宙からやってくる放射線(宇宙線)のほか、空気や大地、食物なども微量の放射線を出している。なお、自然界の放射線は、健康に害をあたえるほどのものではない。

動く遺伝子(トランスポゾン) トランスポゾンが別の遺伝子の間に割って入ると、その遺伝子のはたらきがこわされることがある。

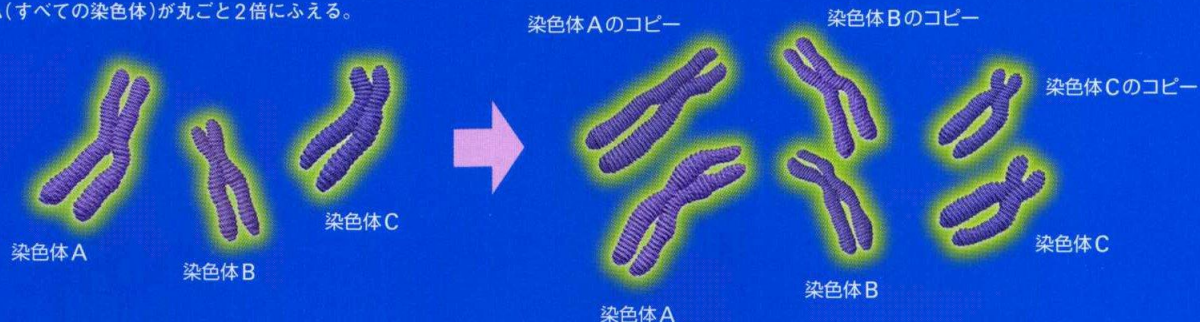


遺伝子重複 遺伝子Aが二つにふえる。



ゲノム重複

ゲノム(すべての染色体)が丸ごと2倍にふえる。



たった1塩基の変化が赤血球の形をかえる

ゲノム中に変異が生じると、その個体には、さまざまな影響があらわれる。たとえば、^{ばきでき}たった一つの塩基の置換によって、^{かま}細胞レベルでの劇的な変化が生じる「鎌状赤血球」の例がある。

赤血球の中で酸素と結びつく「ヘモグロビン」の遺伝子の塩基の一つに置換がおきると、その遺伝子からつくられるヘモグ

ロビンどうしが大量につながって長い糸状になる（右ページ下のイラスト）。この影響で、赤血球の形状が鎌のような形になってしまうのだ。父親由来と母親由来の両方とも鎌状赤血球をつくりだす遺伝子の場合、重度の貧血になりやすく、命にかかわる。なお鎌状赤血球を生じる遺伝子が一つだけなら、通常の生

正常なヘモグロビンを指定する塩基配列

GTG CAC CTG ACT CCT GAG GAG

mRNA (DNAの情報をコピーしたRNA)

遺伝の情報がmRNAに写しとられ、アミノ酸を指定する3連塩基配列(コドン)にしたがってアミノ酸がつながれていく

正常なヘモグロビン

リボソーム

ヘモグロビンの部品

多数のヘモグロビンを含んだ
正常な赤血球

活を送れるという。

ところで、この鎌状赤血球には、伝染病のマラリアへの耐性^{たいせい}（抵抗力）がある。マラリア原虫は赤血球に寄生するが、鎌状赤血球をもつヒトの体内では、十分に増殖^{ぞうしょく}できないのだ。そのため、熱帯のマラリアが蔓延^{まんえん}する地域では、通常の遺伝子と変異遺伝子をつずつもつヒトは、むしろ生存に有利になる。その

ため熱帯では、変異遺伝子をもつヒトがある程度の割合で存在している。また、アフリカ系アメリカ人における変異遺伝子の割合（遺伝子頻度）は、アフリカでの割合より小さい。これはマラリアへの耐性が、アメリカでは生存に有利にはたらかないからだと考えられ、進化（遺伝子頻度の変化）の実例といえる。

繊維状のヘモグロビンを指定する塩基配列
（塩基AがTに置きかわっている）

GTG CAC CTG ACT CCT GTG GAG

ヘモグロビンどうしが
結合して、繊維状になる

異常なヘモグロビン

繊維状のヘモグロビンを
含んだ鎌状の赤血球

遺伝子やタンパク質から進化の歴史を知る

これまで、さまざまな生物種が進化の過程でどのように分岐してきたかは、生きている生物や化石の形態を比較して推定されてきた。同じようなことは、遺伝子やタンパク質といった分

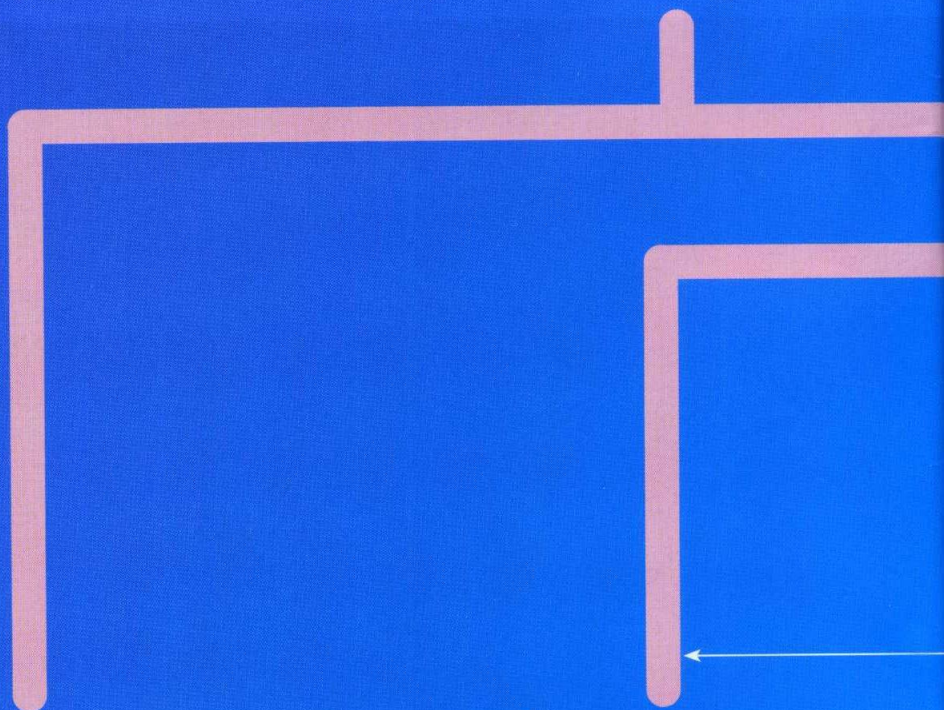
子レベルでの比較でも可能である。

近縁種^{きんえんしゅ}どうしで、同じ遺伝子を比較することを考えよう。それぞれの種は、共通祖先の遺伝子から、別々に変異^{ちくせき}を蓄積して

分子を比較して、系統樹をつくる

タンパク質も20種のアミノ酸という“文字”でできている。アミノ酸の並び方を比較することで、系統樹をえがくことができる。

右は、ヘモグロビンのアルファ鎖のアミノ酸配列をいくつかの動物で比較してつくった系統樹である。両矢印の下に数字が、それぞれの種間でアミノ酸が異なる数である。ヒトとウマでは141個のアミノ酸のうち18個がことになっているが、ヒトとコイでは分岐年代が古いので68個もことになっている。分岐してから時間が長いほどアミノ酸のちがいが多くなっていくので、1組の種間の分岐年代が化石からわかれば、そのほかの種間での分岐年代を推定し、系統樹を作成することができる。



ヤツメウナギ

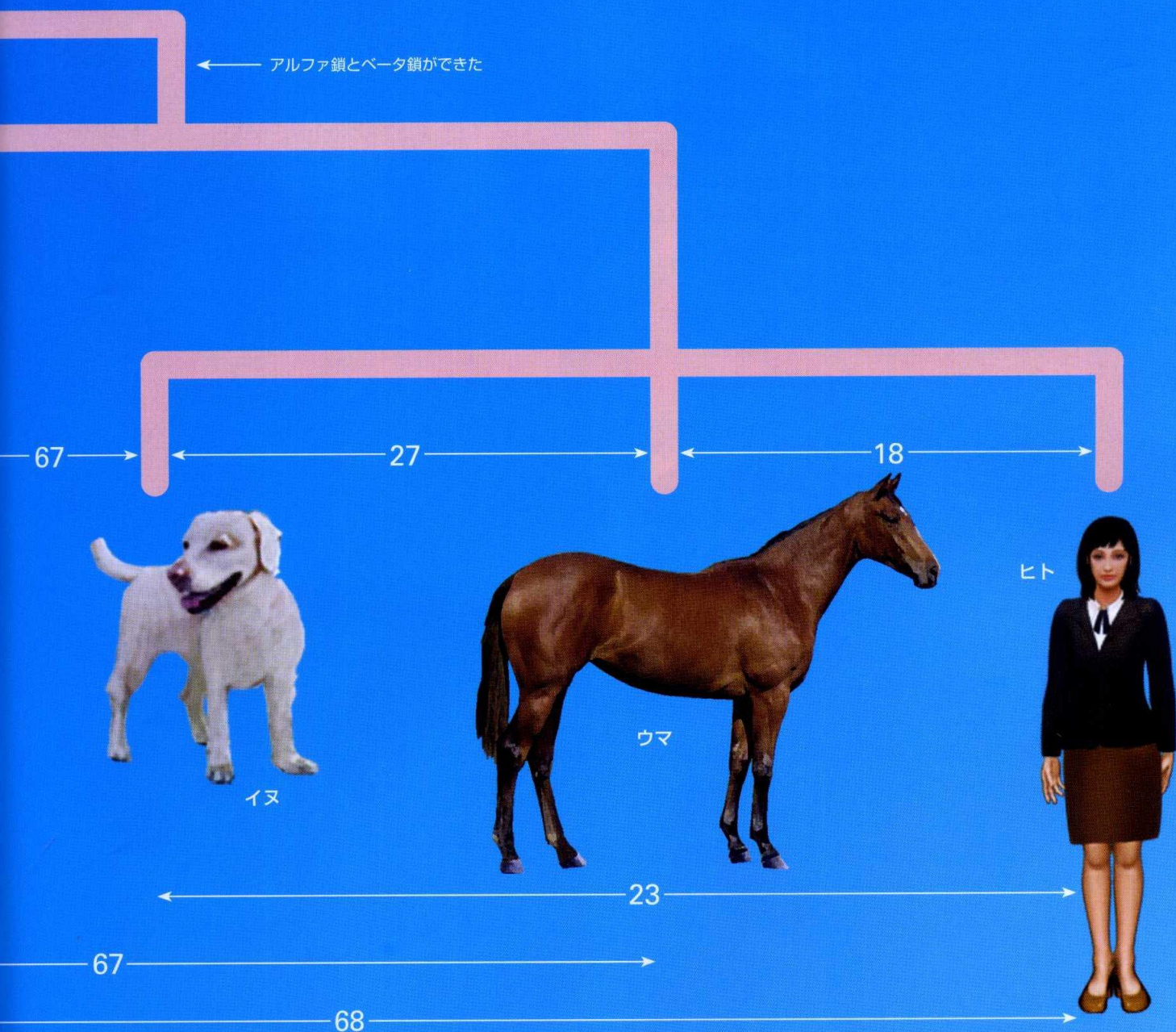


コイ

※「生物進化を考える」(木村眞生著、岩波書店)
の205ページの図を参考にして作成

いく。両種の分岐から時間がたつほど、塩基配列がことなる場所が多くなっていく。こういった比較をさまざまな種で行えば、どの種とどの種が最も近縁かがわかり、「系統樹」をえがくことができる。系統樹とは、さまざまな生物種の類縁関係を樹木のような形で模式的に示したものである。木の枝分かれが、共通祖先からの種の分岐をあらわしている。

これまでに数多くの生物種の分岐年代(二つの種がいつ分岐したか)が、分子レベルの比較によって推定されている。たとえば、ヒトとチンパンジーの分岐年代は、以前は1500万年前と考えられていたが、分子レベルの比較によって、今では約500万～700万年前と考えられている。このように化石研究での推定をくつがえした例も多い。





現代の進化学の基盤 「中立論」

1960年代までは、進化論の祖であるチャールズ・ダーウィンの考えをもとにした「変異（突然変異）と正の自然選択が進化を押し進める主役」とする考えが支配的だった。

一方、国立遺伝学研究所の^{きむらもと お}木村資生博士（1924～1994）は、「分子レベルの変異では、生存・生殖に不利なものを除けば、有利でも不利でもない『中立な変異』がほとんどである。有利な変異は無視できるほど少ない」と主張した。これが「中立説（または中立論）」である^{*1}。

中立な変異をもつ個体は、偶然性に支配されながら子孫を多く残したり、残さなかったりする。それにともない、世代を経るにつれて、中立な変異遺伝子をもつ個体の割合は、集団中で増減する。ある変異遺伝子は運が悪く消えていくが、ある変異遺伝子は運よく集団中に広まり、定着する。このような過程は「遺伝的浮動^{ふどう}」とよばれている。

国立遺伝学研究所の^{さいとうなる や}斎藤成也教授は次のように語る。「現代の進化学は、中立論を基盤としています。それまでの進化学は自然選択万能の考え方が支配的でしたが、中立論の登場で、進化学に大きなパラダイムシフト（考え方の大転換）がおきたのです」。

遺伝子浮動の実例には、ビタミンCの例がある（右のイラスト参照）。ビタミンCは極端に不足すると壊血病（皮膚や^{ねんまく}粘膜などから出血する）になって、死ぬ場合もある。しかし、^{ほにゅう}たいていの哺乳類はビタミンCを体内で合成できる。

ビタミンCを合成できないのは、ヒト、サル、ゾウ、モルモットなどでく少数だけだ。これらでは、ビタミンCの前駆体^{ぜんくたい}（ビタミンCに変化する前段階の物質）からビタミンCを合成するのに不可欠な^{こうそ}酵素（触媒）の遺伝子に、変異が生じており、酵素をつくれないのだ。

このような変異は一見生存に不利で、負の自然選択で消えてしまいそうだが、中立論では以下のように考える。ヒトの祖先がすんでいた森には、ビタミンCを含む果実などが豊富で、この遺伝子を失うことは生存に有利でも不利でもない、つまり中立だった。そのため、ビタミンCを合成できない変異が偶然、遺伝的浮動によって集団中に広まり定着したのである。

^{*1}： ただし、木村博士は、分子レベルでも有利な変異が少数ながら存在し、進化に寄与していること自体を否定したわけではない。

遺伝子浮動がおきるしくみ（右）

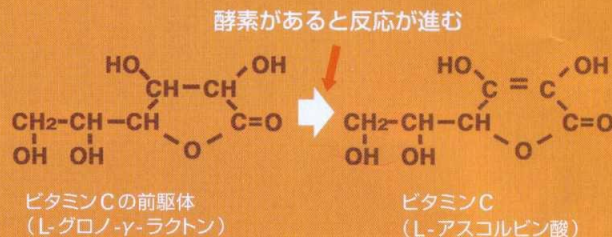
ある個体が遺伝子A₁とA₂のどちらをもとうとも、生存・生殖に有利でも不利でもない（中立）とする。また、それぞれの個体は、父からA₁かA₂の一方を、母からもA₁かA₂の一方を受けつぐ（A₁とA₂は「対立遺伝子」とする）。

第1世代（問題を単純化して2個体とした）では、A₂の割合は $\frac{1}{2}$ である（1）。精子と卵子は大量につくられるが、受精に使われるのはほんのわずかで、どちらの遺伝子を含むものが受精に使われるかは、偶然に決まる（2-aと2-b）。イラストでは、精子におけるA₂の割合が $\frac{3}{4}$ に偶然かたよっている。その結果、第2世代でのA₂の割合は $\frac{5}{8}$ となり、第1世代から変化した（3）。このように偶然に左右されながら、遺伝子A₁とA₂の割合は変化していく。

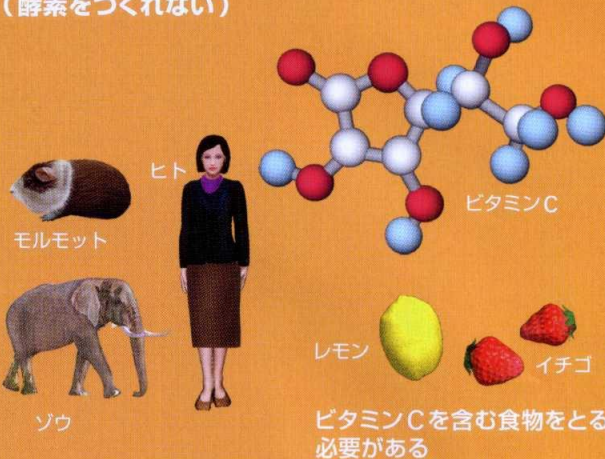
ヒトはビタミンCを合成できない（下）

ヒトは、ビタミンCの前駆体からビタミンCを合成するのに不可欠な酵素（触媒）の遺伝子に、変異が生じており、酵素をつくれない。

体内でビタミンCを合成する反応



一部の哺乳類は、ビタミンCを合成できない（酵素をつくれない）



偶然に左右され、遺伝子は広まっていく

1.

第1世代

2個体の中での遺伝子A₁と
遺伝子A₂の比は2:2。

$$\text{blue bar} : \text{red bar} = 2:2$$

第1世代での遺伝子A₁と
遺伝子A₂の割合

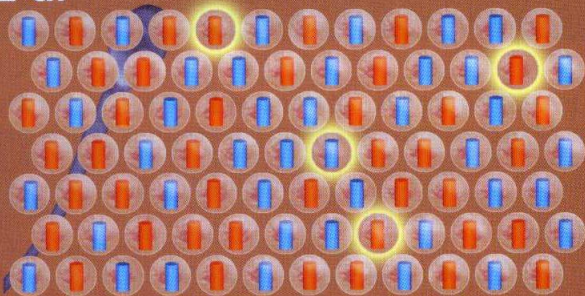
遺伝子A₁

遺伝子A₂

精子と卵子が大量につくられる

2-a.

精子 遺伝子A₁またはA₂のどちらか一方をもつ。



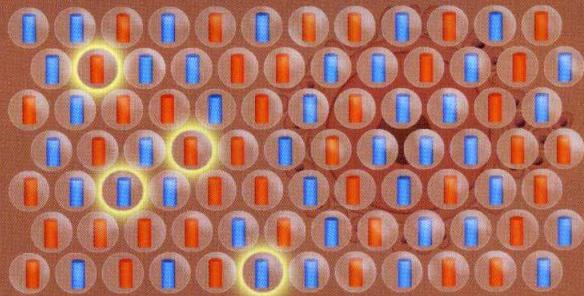
黄色の線で囲ったものが、受精に使われる精子

受精に使われる精子で
の遺伝子A₁と遺伝子
A₂の割合

$$\text{blue bar} : \text{red bar} = 1:3$$

2-b.

卵子 遺伝子A₁またはA₂のどちらか一方をもつ。



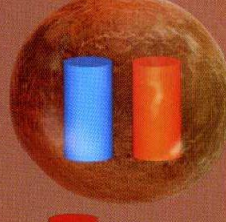
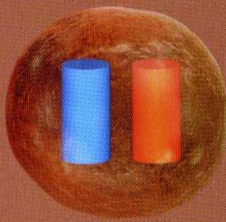
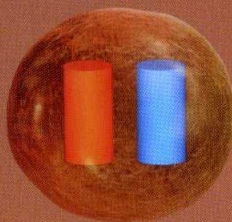
黄色の線で囲ったものが、受精に使われる卵子

受精に使われる卵子
での遺伝子A₁と遺伝
子A₂の割合

$$\text{blue bar} : \text{red bar} = 2:2$$

3.

受精 精子と卵子が偶然に選ばれて融合。



第2世代

4個体の中での遺伝子A₁と遺伝子A₂の比は3
対5となり、第1世代から変化した。

第2世代での遺伝子A₁
と遺伝子A₂の割合

$$\text{blue bar} : \text{red bar} = 3:5$$

遺伝子A₁

遺伝子A₂

生物の進化研究の動向

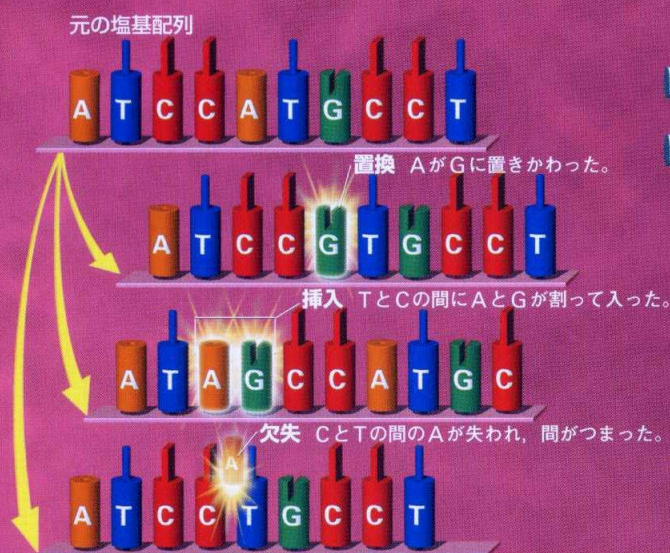
DNAの変化は進化の原動力となる

進化とは、DNAに生じた遺伝情報の変化が、生物集団内に広がることでおきる現象です。近年、DNAの遺伝情報を解析する方法が飛躍的に向上し、進化の研究も進んできています。しかし、それまでになかった複雑な機能をもった臓器が進化によってつくられるしくみは、まだ解明されていません。進化の研究が今、どこまで進んでいるのか、見ていきましょう。

執筆：五條堀 孝 アブドラ国王科学技術大学 ディスティングイッシュト・プロフェッサー

変異の種類

DNAの塩基配列の変化



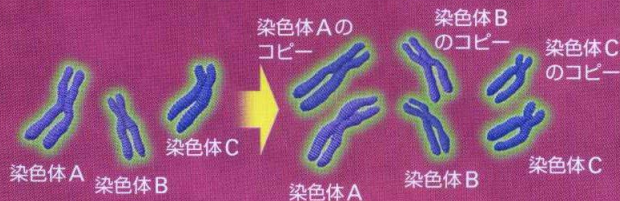
遺伝子重複

遺伝子Aが二つにふえる。



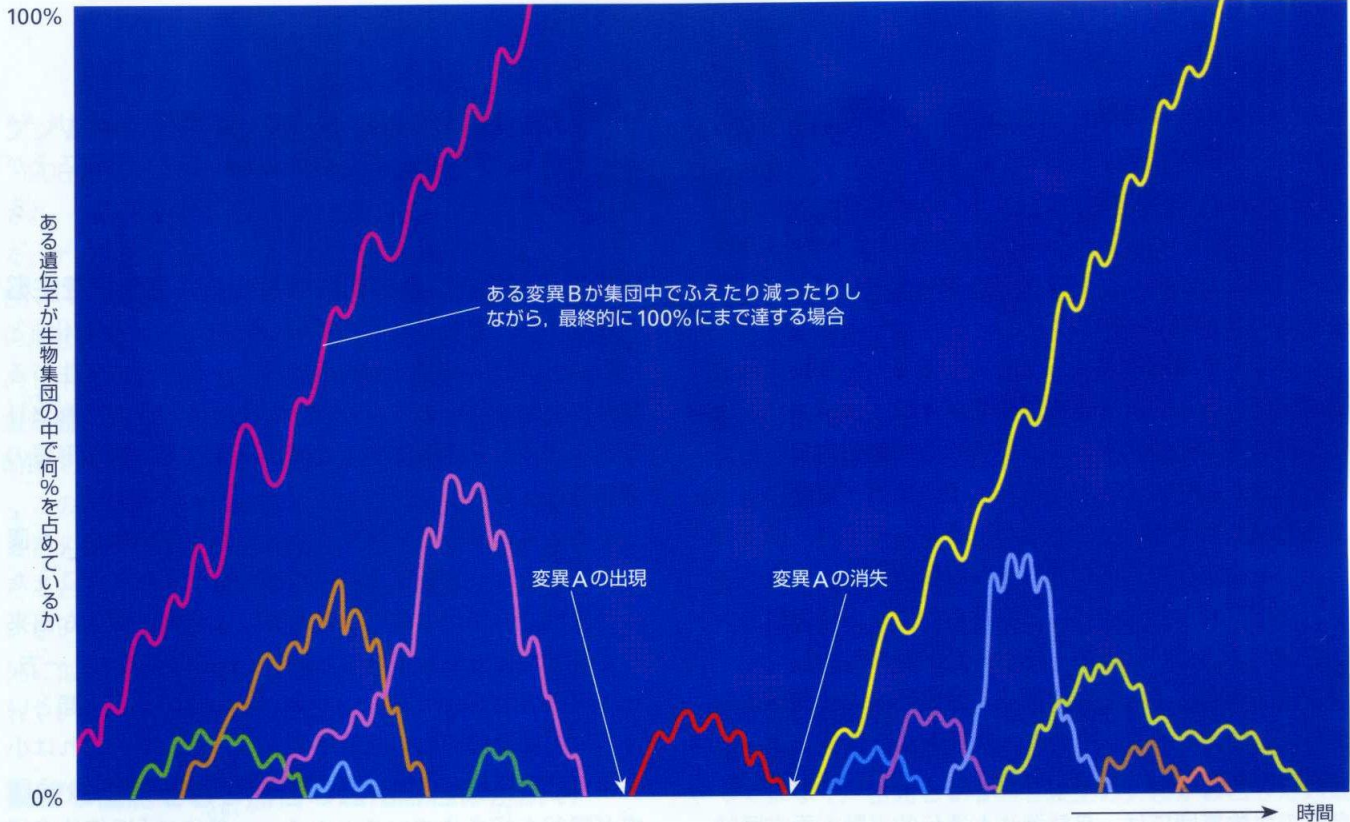
ゲノム重複

ゲノム(すべての染色体)が丸ごと2倍にふえる。



DNAに生じる変異の例をあげた。DNAの塩基配列が変化する場合、ATGCで書かれた塩基配列の中の1文字が置きかわったり（置換）、いくつかの塩基が塩基配列の中に新たに割って入ったり（挿入）、いくつかの塩基が失われて間がつまったり（欠失）する。また、一つの遺伝子が二つにふえる「遺伝子重複」や、ゲノム（すべての染色体）が丸ごと2倍にふえる「ゲノム重複」がおきることもある。

変異遺伝子の存在割合が、生物集団の中で変動する



上は、さまざまな変異遺伝子が、生物集団の中でその存在割合を変動させるようすの概念図。一つづきの波線が一つの遺伝子の変動をあらわす。ある変異遺伝子が出現すると、その変異遺伝子をもつ個体は世代を経るごとに、偶然性に支配されながら増減していく（遺伝的浮動）。ある変異遺伝子は出現からしばらくのちに消滅し（上図の変異A）、ある変異遺伝子は集団中での割合が100%になって定着する（上図の変異B）。イラストは、『生物進化を考える』（木村資生著、岩波書店）の215ページの図を参考に作成した。

進化というと、何かの基準を達成しながら、生物がある目的に向かって進む現象のように思いがちです。しかし実は、生物の時間の流れとともにおきる「変化」そのものが進化なのです。とくに、生物の形態や行動など、私たちが目で見てわかりやすい性質（形質）は、ある環境によく適応していることが多く、その環境に適応するように変化することから、これだけを進化としてとらえがちです。しかし、タンパク質などの分子やDNAの段階では、必ずしもそうでないことが多く、環境適応だけを目的のように考えていると理解できないことが多くあります。

進化を考えるうえでもう一つたいせつなことは、生物は遺伝的に似た集団を構成しており、多くの場合、その生物集団の中に、「変異」という個体間でのちがいが存在していることです。ヒトの場合、髪の色や目の色が個人ごとにことなることがあります。これは、「集団内変異」とよばれています。この変異が遺伝する場合には、遺伝情報であるDNAにちがいが存在しています。これを「遺伝的変異」とよびます。

遺伝的変異はどのようにしておきるのでしょうか？

DNAは、次世代へ受けつがれる過程で複製されます。複製では、もとになるDNAの鎖の塩基の並び方（塩基配列）に対応するように4種類の塩基が並び、新しい鎖が合成されていきます（49ページ参照）。その際に、本来並ぶべき塩基ではない塩基が並び、つまり、複製のまちがいがおきることがあります（左ページのイラスト参照）。通常、生体内ではこのまちがいを修復しますが、ときに、修復できないことがあります。こうした塩基配列の変化は、「突然変異」とよばれます。突然変異は、たんにDNAの塩基配列が変化しただけで、生物の生命機能には影響をおよぼさないこともあります。しかし、体内の生理的な現象や形態、そして行動などにまで変化をおよぼすことも多々あります。

DNAの変化であっても、形質的な変化であっても、それらの変化が、環境に適応しているかどうかによって、生存競争を勝ち残れるかどうかが決まります。これが「自然淘汰」です。自然淘汰に勝ち残った場合、その突然変異

をもつ個体の数が時間とともにふえ、最終的に集団の全個体がその突然変異をもつことになってしまいます。この段階では、全個体が同じ遺伝子や形質をもっているの
で、もう“変異”とはいえなくなり、いわゆる「普通型（伝統的に野生型という）」になってしまいます。これが、自然淘汰による進化の過程です。

しかし、自然淘汰があってもなくても、たまたま個体間の交配を通じて、ある突然変異がその子供に生じ、世代を経てその突然変異をもつ個体の数が集団内でふえていくことがあります。もちろん、その変異が交配によって集団から消えていくこともあります。つまり、偶然の交配の機会だけで、その変異をもつ個体の数が、集団中でふえたり減ったりすることがあるのです。この現象を「遺伝的浮動」といいます（75ページ上のグラフ参照）。

遺伝的浮動によって、突然変異が集団中の全個体に広がる
ことがあります。これは、自然淘汰の優劣によらない進化の過程であり、「中立進化」という進化の過程です。自然の生物集団には、自然淘汰も遺伝的浮動も両方同時にはたらいっており、どちらのほう
がより強く進化に寄与しているかが論点となります。また、自然淘汰には、個体数を基本的に増加に向かわせる「正の淘汰」と、減少に向かわせる「負の淘汰」が存在します。次世代に残っていか
なければならぬので、進化に重要なものは、いうまでもなく正の淘汰です。

つまり、突然変異が、自然淘汰や遺伝的浮動を通じて生物集団内に広がって全個体がその変異をもつようにな

り、また新たな突然変異が生じて、集団内に広がり……というように同じことがくりかえされていく過程こそが進化なのです。

種内での変化が、長期的には種をこえた進化を生む

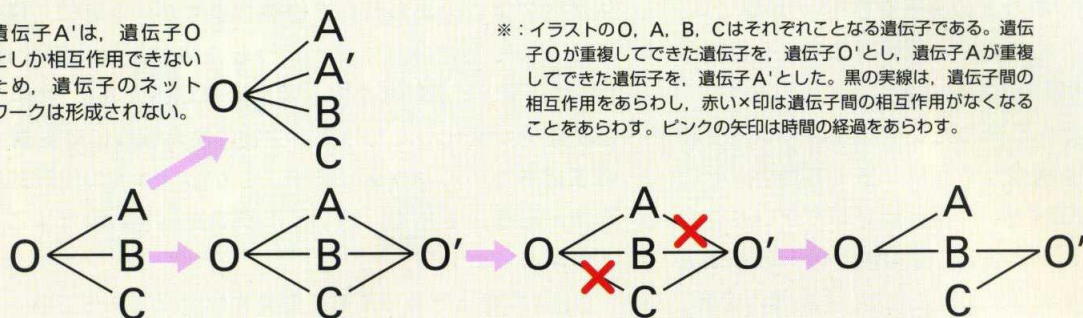
進化には、大きく分けて2種類あります。「小進化」と「大進化」です。小進化は、同じ種の生物集団内で生じる形質の変化をいいます。一方、大進化は、種やそれより高いレベルの分類単位である属や科などでおきる形質の変化のことです。

たとえば、ある種や属などで、これまでになかった眼が出現したとしましょう。これは、種やそれらをこえた分類単位での変化であり、進化的には非常に大きな出来事
がおきたと考えるので、大進化として考えます。一方、ヒトの眼の瞳の色が黒いとか青いというのは、人類という同一の種の集団内の変異です。したがって、これは小進化の部類と考えられます。最近では、小進化という語感が誤解を招きやすいことから、一般には「遺伝的多様性」といいかえるほうがよいでしょう。小進化（遺伝的多様性）と大進化の位置づけとしては、小進化が長い時間
にわたって蓄積してきた結果、大進化がおきると考えられています。

したがって、生物集団内における遺伝的多様性と、それにとまう大進化のしくみを、DNAやタンパク質などの分子レベルで理解することは、生物の進化の研究を行ううえで不可欠なのです。

遺伝子のネットワークが形成されるしくみ

遺伝子A'は、遺伝子O
としか相互作用できない
ため、遺伝子のネット
ワークは形成されない。



遺伝子O'は、遺伝子A, B, C
と相互作用できるため、遺伝子
のネットワークが形成される。

※：イラストのO, A, B, Cはそれぞれことなる遺伝子である。遺伝子Oが重複してできた遺伝子を、遺伝子O'とし、遺伝子Aが重複してできた遺伝子を、遺伝子A'とした。黒の実線は、遺伝子間の相互作用をあらわし、赤い×印は遺伝子間の相互作用がなくなることをあらわす。ピンクの矢印は時間の経過をあらわす。

左のイラストは、遺伝子どうしが相互作用することによって、複雑な遺伝子ネットワークが形成されていくようすをえがいたものだ。遺伝子O（画期的遺伝子）は、遺伝子A, B, Cと相互作用することができる。遺伝子Oが重複することによって、新たなネットワークが形成されていくことがわかる。

ゲノム解読が進化の研究を飛躍させた

2000年に、ヒトのゲノムの全塩基配列の概略^{がいりゃく}が解読され、2003年にはその詳細な配列データ^{しょうさい}が発表されました。ゲノムとは、生物がもっている遺伝情報全体のことで、DNAの塩基配列によってしるされています。ヒトゲノムの場合、全塩基配列の長さは、約30億にもなります。このヒトゲノムの全塩基配列を解読するのに、現在では、最新鋭^{さいしんえい}の機器を用いると、費用はわずか数十万円で、数時間で解読が終わるほどになっています。

このようなゲノム解析は、進化の研究に大きな影響をあたえています。ゲノム解析によって明らかになってきたこととしては、長期間にわたって塩基配列が変化していない配列があるということや、ウイルスがもつ塩基配列に似た新たなDNA断片^{はにゅうるい}が哺乳類^うのゲノムに埋めこまれていたこと、などがあります。

複雑な機能をもつ器官の進化過程は未解明

こうしてゲノム解析が進展してきたものの、大進化のしくみ、たとえば、われわれの脳はどう進化してきたのかとか、いったい、その起源は何だったのかといったことはまだわかっていません。

たとえば、ヒトやマウスの脳・神経系でのみはたらいっている一連の遺伝子や、脳の形態形成に関係する遺伝子などの発見があいついでおり、これらの遺伝子の進化過程がつぶさにわかってきました。しかし、それらの遺伝子の間をつなぐネットワークや、それを制御するしくみがどのように進化してきたのかを明らかにしなければ、大進化のしくみを分子レベルで理解することはできないと考えられています。進化上、遺伝子の種類や数をふやしていくことは重要なことです。しかし、それだけでは複雑な機能や構造をもつ眼や脳などの進化過程はわからないことが、明らかになってきているのです。

私は、これを説明するかが、「画期的遺伝子の重複とそのネットワーク化」にあると考えています(上のイラスト参照)。脳のような複雑な機能と構造をつくり、はたかせるには、網目のようにはりめぐらされた、遺伝子間の相互作用^{そうご}(ネットワーク)の出現が重要だったと考えられます。この遺伝子ネットワークが進化の過程で出現するには、多数の遺伝子が必要であり、これを達成する手段として遺伝子重複やゲノム重複(74ページ参照)が必要と

なることはいうまでもありません。

人類の未来の進化は、現在のわれわれがつくる

「今後、人類はどう進化していくのか?」といった問題は、だれもが気になる、普遍的^{ふへん}な問題です。

今後の進化を考えると、二つの大きな要点に注意する必要があります。一つは、38億年という悠久^{ゆうきゅう}の生物進化の時間からすれば、この数百年から千年というほんのわずかな期間に、元にはもどれないほどの環境変化を人類がおこしてきたという現実です。

進化という現象は、RNAウイルス(26ページ参照)のように超高速で進化する場合をのぞいて、最低でも数万年から数百万年の時間スケールで議論します。人類にはすぐれた知恵^{ちえ}と知性があるので、私たちの子孫は、1万年後もきっとこの地球上で生存しているにちがいありません。しかし、彼らは自然があたえた環境への適応を通してではなく、祖先となるべき現生の人類がおこした地球規模の環境変化を経験しながら、生き抜いて行かねばならないのです。したがって、私たちみずからが、未来の進化に能動的に関与しているのです。

もう一つの要点は、突然変異を人類がコントロールできる時代が到来してきているということです。何百組という親子の全ゲノムを比較^{ひかく}することにより、進化の根源的な機構である突然変異の発生率や、ゲノム上のどこに突然変異がおきるかということが、直接調べられるようになってきました。また、どの塩基からどの塩基にどのくらいの確率で変わりやすいかなどの傾向^{けいこう}も明らかになってきています。このことは、究極的には、突然変異そのものを制御したり、どういった突然変異をおこさせるかを設計したりすることが可能となってきたことを意味しています。

タンパク質工学などでは、「定向性進化」という人工進化の手法が用いられることがあります。これは、一定の方向に向かって形を変化させる手法をいいます。突然変異の制御や設計は、こうした研究の発展につながるものと期待されます。しかし一方で、こうしたことは、未来の進化を突然変異レベルでコントロールできるという究極の道具を手に入れることにもつながります。ここにも、ことなる意味での人類の知恵と知性が必要になってきていることはいうまでもありません。

5

“生きている” とは何か

協力 田沼靖一／吉川研一

PART5では、シュレーディンガーが注目した「エントロピー」と生命との関係など、物理学の視点を取り入れながら、より深く「生命とは何か」にせまってみよう。そもそも、“生きている”とはどういう状態を指すのだろうか？ これを探る一つの方法は、生きている状態と生きていない状態、つまり「生」と「死」を比較し、生きているときにはおきるが、死んでしまうとおきない現象をさがすことだ。生きている状態と死んでいる状態では、いったい何がことになっているのだろうか？

生と死のちがい

エントロピーと生命

細胞の誕生と死

物質の入れかわり

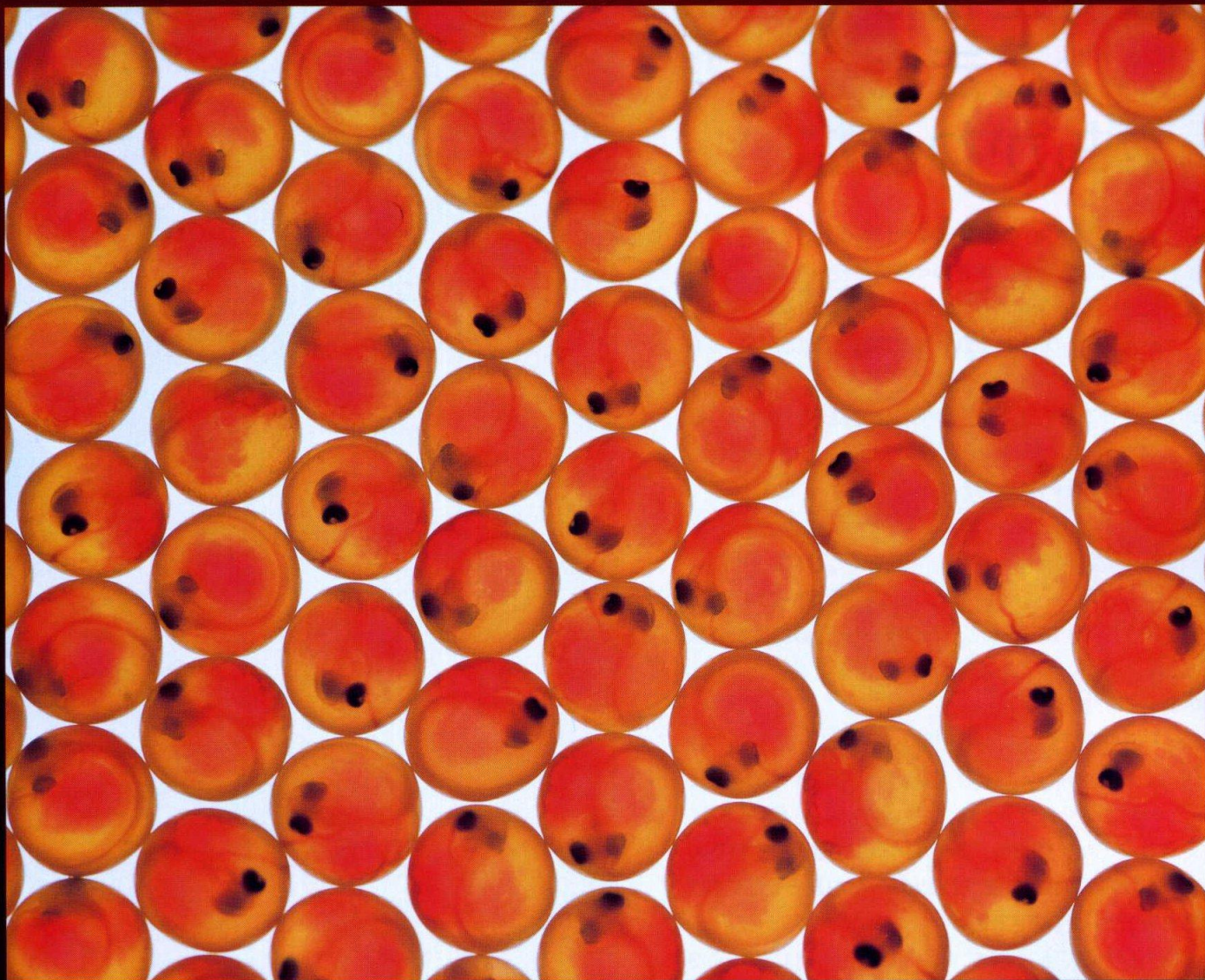
生命の原理

エントロピー

散逸構造 ①～②

クマムシの秘密

生命の定義



発生が進み、ふ化間近となったサケの卵。私たち人間も最初は1個の受精卵からはじまる。そこから分裂をくりかえし、複雑な体の構造がひとりてにできあがる。自律的に何かを実現する能力は、生命がもつきわめて重要な能力の一つである。

“生きている”とは何か？

生と死のちがい

死んだ生物は、生きていたときと重さも元素もかわらない

現在、自然界には90種類の元素^{*1}があることが確認されている。そのうち、生物の体をつくるのに使われている元素はごく一部だ。たとえば人体は、**体重の約98%が、酸素、炭素、水素、窒素、カルシウム、リンの6種類の元素でつくられている**（右ページのグラフ参照）。

地球上の生物であれば、体を構成する元素の比率はみな似通っている。すべての生物は、生物以外の物体とはことなる、特有の元素組成をもっているということだ。

それでは、ある生物が**生きているときと死んだあと**では、体を構成する元素の組成にちがいはあるだろうか？ 生物が死ぬとタンパク質が分解されるなどして、元素の組み合わせ方（化合物の種類）はかわるが、**元素の組成自体はかわらない**。また、生きているときと死んだあとで重さをはかってみても、**ちがいはない**。

生きている生物と死んだ生物では、構成している元素の種類や量にちがいはない。つまり、生物を元素にまで細かく分解していても、そこに「生」と「死」のちがいを見いだすことはできないのだ。**生物を“生きている”状態にしているのは、どんな元素をどれだけ使うかではなく、むしろ元素の「組み合わせ方」や「使い方」である。**

生物を“生きている”状態にする元素の組み合わせ方や使い方は、いったいどのようなものだろうか？ それは生物に何をもたらすのだろうか？

生と死のちがいは分解してもわからない

同じ体重の鳥が2羽いるとする。一方の鳥が死んだ直後で、2羽の体重をくらべてみても何もかわらない（下の図）。死んだからといって、生物の体を構成する物質（元素）の量が増減するなどということはない。

生物の体を構成する元素の組成を右ページにえがいた。生物は水（ H_2O ）を多く含むため、元素の個数としては水素（H）が最も多い。しかし、水素は非常に軽い元素であるため、重さの比では酸素（O）が最も多くなる。この組成は、生物が生きていても死んだとしても同じである。

多細胞生物の場合、死んだ直後であれば、体を構成する一部の細胞はまだ生きている。しかし、継続的に活動をつづけるためのエネルギーが供給されなくなり、やがてすべての細胞は完全に死んでしまう。

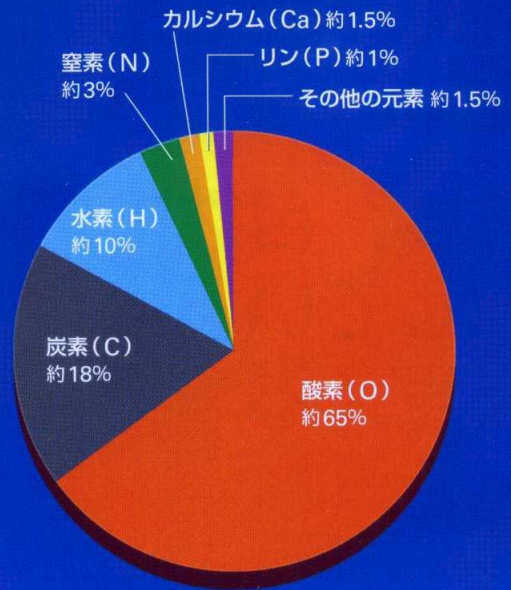
生きている生物



^{*1}：天然に存在するのは90種だが、そのほかに22種の元素が人工的に合成されている。つまり、合計112種の元素が確認されている。元素とは、同じ原子番号（陽子数）をもつ原子のグループのことをいう。たとえば、酸素は原子番号（陽子数）8の元素である。

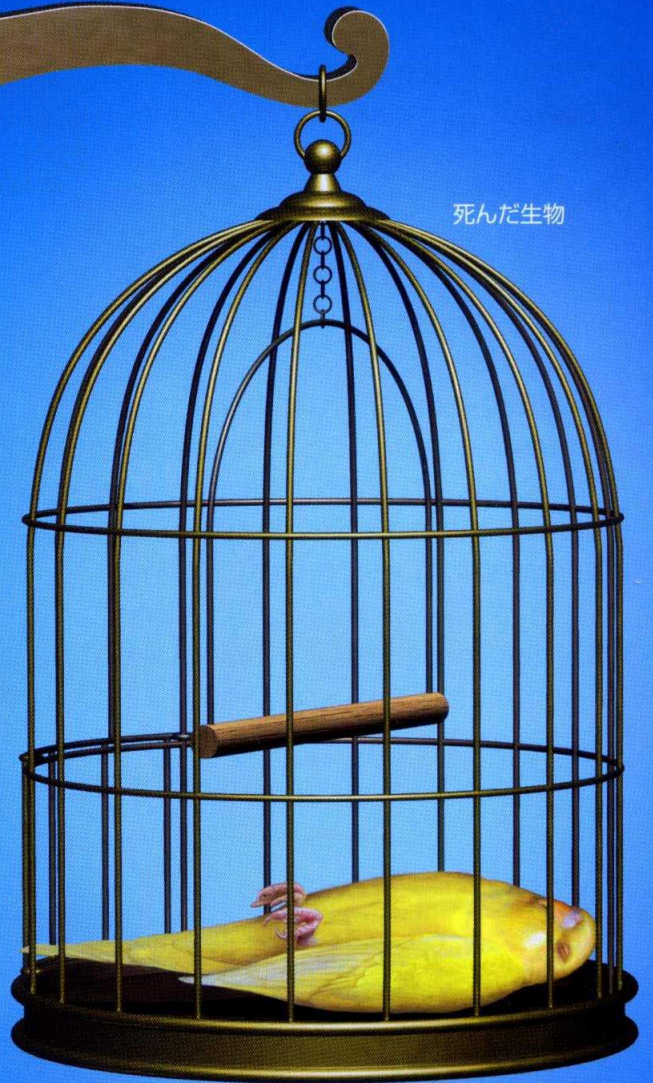
生物の体を構成する元素の比率

右のグラフは、人体を構成する元素の比率をえがいたものだ。各元素の原子数の比率ではなく、重さ(質量)の比率である。生物が使用する元素は、基本的に自然界にもたくさん存在する、めずらしくない元素である。そんな中、リンは自然界(地球表面の岩石中)の存在比が0.1%程度であるのに対して、生物は1%程度と多い。リンはDNAの構成要素でもあり、生物では非常に重要な元素である。



重さはかわらない

死んだ生物



生物は、自然の法則に反しているようにさえ見える

死んだ直後の生物は、見た目には生きていたときとほとんどかわらない。しかし、時間がたつにつれ、生きている生物と死んだ生物の状態は大きくちがっていく。

死んでしまった生物は、もはや「**外から栄養をとる(代謝)**」ことができない(PART1, 16ページ)。外から栄養が入ってこないと、体を動かすエネルギーを合成することも、自分の体を新たにつくこともできない。結果として、**死んだ生物は、その体の構造をとどめておくことはできない**。時間がたつにつれ、それまで維持されていた体の構造がくずれていく。

この世界では、**形あるものは時間の経過とともにくずれていく傾向がある**。これを物理学では「**エントロピー増大の法則**」という。エントロピーとは、平たくいえば「無秩序さの度合い」のことだ^{※1}。たとえば、砂浜につくった砂の城(秩序だった構造物)は、放っておけば徐々にくずれていくだろう(無秩序になる)。死んだ生物も、砂の城と同じように、物理法則にしたがって時間の経過とともに秩序だった体の構造がくずれていくのだ。

一方で、生きている個体は、時間がたっても秩序だった体の構造を維持し、活動しつづける。物理学の言葉で表現すると、**時間の経過とともに、死んだ生物はエントロピーが増大していくが、生きている生物はエントロピーが増大しない(もしくは減少する)ように見える**ということだ。

生きている生物は、一見すると、自然の法則(エントロピー増大の法則)に反しているように見える。これは、いったいどういうことだろうか？ なぜ生物はこのようなことが可能なのだろうか？

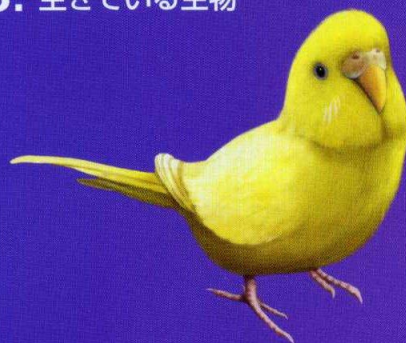
1. 砂の城



2. 死んだ生物



3. 生きている生物



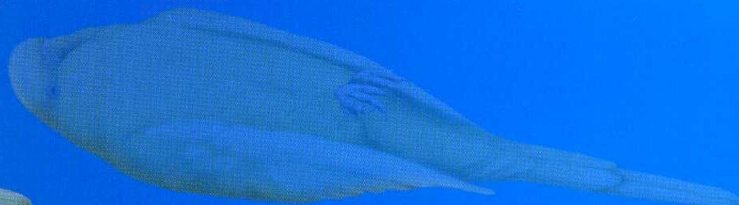
死んだ生物と生きている生物のちがいは時間の経過とともにあらわれる

砂の城のような物体は、時間の経過とともに(右に進むとともに)、徐々にその構造がくずれていく(1)。死んだ生物はもはやたんなる物体なので、砂の城と同じく、時間がたつとその構造がくずれていく(2)。一方で、生きている生物は、時間がたっても、その構造を維持することができる(3)。

※1: エントロピーは、体積や圧力、温度などと同じく、物質もしくは空間の状態をあらわす量の一つである。より秩序だった状態ほどエントロピーが低く、より無秩序な状態ほどエントロピーが高いことになる。くわしくは90ページ参照。



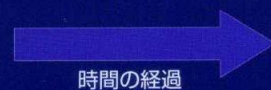
時間経過（右側に進む）とともに、構造がくずれていく（エントロピーがふえる）



時間経過（右側に進む）とともに、構造がくずれていく（エントロピーがふえる）



時間が経過しても、構造がくずれることはない（エントロピーがふえない）



生物の体内では、たえず細胞の「誕生」と「死」がおきている

生物が、体の構造を維持するためにたえず行っていることがある。生物は、日々、新しい細胞をつくりつづけて、古くなった細胞と入れかえているのだ。この現象がいわゆる「新陳代謝」である。

新しい細胞をつくる方法は、「細胞分裂」だ（左ページの図）。ただし、細胞がふえる一方だと、健康な体を維持するのに問題が生じる。実際に「がん細胞」は、勝手に分裂して増殖してし

まうために、体に悪影響をおよぼす。

そこで重要になるのが、細胞の生（誕生）と死のバランスだ。このバランスを保つために、生物は一部の細胞をあえて死なせるしくみをもっている。それは「アポトーシス」とよばれるしくみだ（右ページの図、上側）。アポトーシスは、細胞の「自死」である。

A-3. 中心体が細胞両極に移動し、その中間に染色体が集まる。

A-4. 細胞の中央に並んだ染色体が二つに分かれはじめる。

A-2. 核の膜が消え、中にあったDNAが集まり染色体となる。中心体が複製される。

A-1. 分裂前の細胞。核の中すでにDNAは2倍にふえている。

細胞の「誕生」

動物細胞の細胞分裂のようす（A-1～A-7）。A-2～A-7では、染色体と中心体以外の小器官は省略している。分裂がはじまる前（A-1の時点）で、DNAは核の中で2倍にふえている。分裂するとき、DNAが染色体という形になり、二つの細胞に均等に分配される（A-2～A-6）。

A-5. 分かれた染色体が、それぞれ両極に向かって移動する。

A-7. 細胞が分裂し、二つの細胞（娘細胞）に分かれる。

A-6. 染色体が両極へと移動し、細胞が中央でくびれはじめる。

一方、やけどや酸素不足、病原体によるダメージによっても、細胞は死んでしまう。このような細胞の死(事故死や病死)を「ネクローシス」という(右ページの図、下側)。

新たにつくられる細胞のほうが多ければ、体は成長し、死ぬ細胞のほうが多ければ、逆に体は小さくなる。若いころは体が大きくなり、年をとると体が小さくなるのは、細胞の誕生と死のバランスによるものだ。

けがが治るときにも、細胞の誕生と死のしくみを利用される。たとえば、手に切り傷ができたとき、傷口では、傷を修復しようとさかんに細胞分裂がおきる。このとき、まずは多めに細胞がつくられ、余分な細胞はあとでアポトーシスによって死んでいく。

誕生と死のバランスで体は維持される

左ページに細胞を新しくつくるしくみである「細胞分裂」をえがいた。一方、右ページには細胞の“自死”である「アポトーシス」と、細胞の“事故死”あるいは“病死”である「ネクローシス」のしくみをえがいた。えがいたのはいずれも動物細胞だ。この誕生と死のバランスによって、生物の体は維持されている。

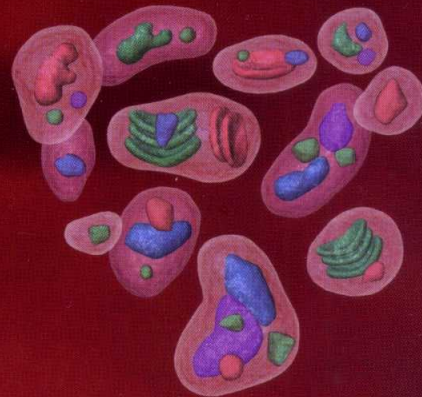
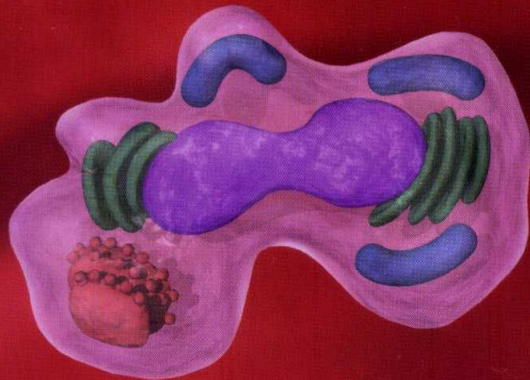
なお、この誕生と死のしくみにしたがわらない細胞もある。ヒトの脳の神経細胞や心臓の心筋細胞など、入れかえがむずかしい細胞たちだ。これらの細胞は、基本的に分裂しない(ふえない)。そのかわりに長寿命である。

B-2. 細胞内のDNAやタンパク質は、酵素によって切りきざまれる。細胞ははげしく動きながら、くびれていく。

B-3. 細胞内の要素は細かく分断され、小さな袋状のものに分かれる。

アポトーシス

B-1. 正常な細胞



細胞の「死」

上側は「アポトーシス(自死)」のようす(B-1~B-3)。細胞が細胞内小器官とともに細切れになっていく。下側は「ネクローシス(事故死、病死)」のようす(C-1~C-3)。細胞が全体的に膨張し、最後は膜がやぶれて、中身が周囲にもれ出す。

C-1. 正常な細胞

ネクローシス

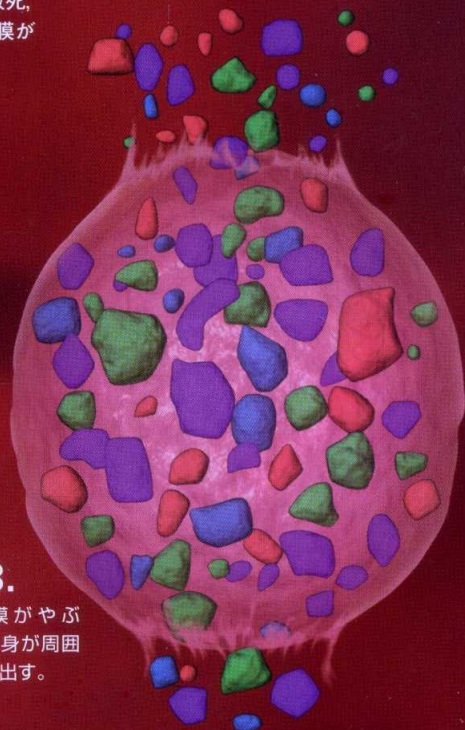
C-2.

細胞全体が膨張するほか、ミトコンドリアなどの細胞小器官もそれぞれ膨張する。



C-3.

細胞膜がやぶれ、中身が周囲にもれ出す。



外から得た材料をもとに、 より複雑な構造をつくり あげる

前ページで見たように、生物は体を構成する細胞を新しくつくり、古いものと入れかえている。細胞が分裂するときには、遺伝情報が記録されたDNAも複製され、同じものが2倍にふえる。その材料は、外から取りいれた栄養や不要になった細胞を分解したものに由来する。つまり、**DNA や細胞がふえるたびに、体を構成する物質は新しく入れかわっていくのだ。**

DNAは非常に高度で複雑な構造をもった分子だ。DNAの複製は、外から取りいれた栄養や不要になった細胞を分解した物質を材料に、高度な構造をつくりあげる作業である(右の図)。このDNAの複製のように「**秩序だった体の構造を新しくつくる**」ということは、「**エントロピーを減少させる**」ということにほかならない。

物理学者シュレーディンガーは、自著『生命とは何か』の中で、「生物は、負(マイナスの)エントロピーを食べて生きている」と指摘した。これは生物が、**外から得た物質やエネルギーを使って秩序だった構造をつくる(エントロピーを減少させる)ことで、放っておくと自然にふえるエントロピーを、何とかふえないように維持していることを表現したものである。**

秩序だった体の構造をつくるための方法は、“生命の設計図”である「**DNA(遺伝情報)**」に書かれている。生物はDNAの情報にもとづき、外部から入手した素材(無機物)を使って自分の体(有機物)をつくりつづける。



新しく合成されたヌクレオチド(DNAの基本単位)

新しいDNAをつくるための材料(糖やリン酸、塩基など)

外から得た分子を組みこんで、複雑なDNAをつくりあげていく

DNAが複製されるようすをえがいた。DNAの複製は、比較的単純な分子を組み合わせて、高度な構造をつくりあげていく作業である。DNAの2重らせんがほどかれ、1本ずつになったDNA鎖の上に、それぞれ対となるDNA鎖が新しく合成されていく。新しいDNAを合成するための材料は、外から栄養として取り入れた物質がもとになっている。

新しく合成されたDNA鎖

ほどかれた元のDNA鎖



エネルギーの出入りが生みだした高度な秩序——それが生命

自然界には、生物でなくとも、**時間の経過とともに無秩序なところから秩序だった構造が生まれてくる現象が存在する**。たとえば、夏になると南の海上で発生し、日本にやってくる「台風」はその一つだ。積乱雲の集合体^{うず}が渦を巻き、一定の勢力にまで成長したものが台風である。

外からエネルギーや物質を取りこみ、その一部を熱として外に放出するような環境がととのうと、自然と台風（渦巻き型の風）のような秩序だった構造ができあがることもある。このような構造を「**散逸構造**」^{さんいつ}とよぶ^{*1}。このことを理論的に示したのが、ロシア生まれの化学者**イリヤ・プリゴジン**（1917～2003）である。

外部からエネルギーや物質を取りこみ、一部を外に排出することで、秩序だった構造をつくる。**これは生物が生きている状態そのものだ**。現在、多くの科学者は、プリゴジンが示した散逸構造の理論は、生命の原理を物理学的に説明するのに有用であると考えている。

生命とは何か——この問いに対して、現在の科学が出した答の一つは「**生命（生命体）とは、外部とエネルギーや物質をやり取りすることで秩序だった構造（散逸構造）をつくり、維持する存在である**」というものだ。

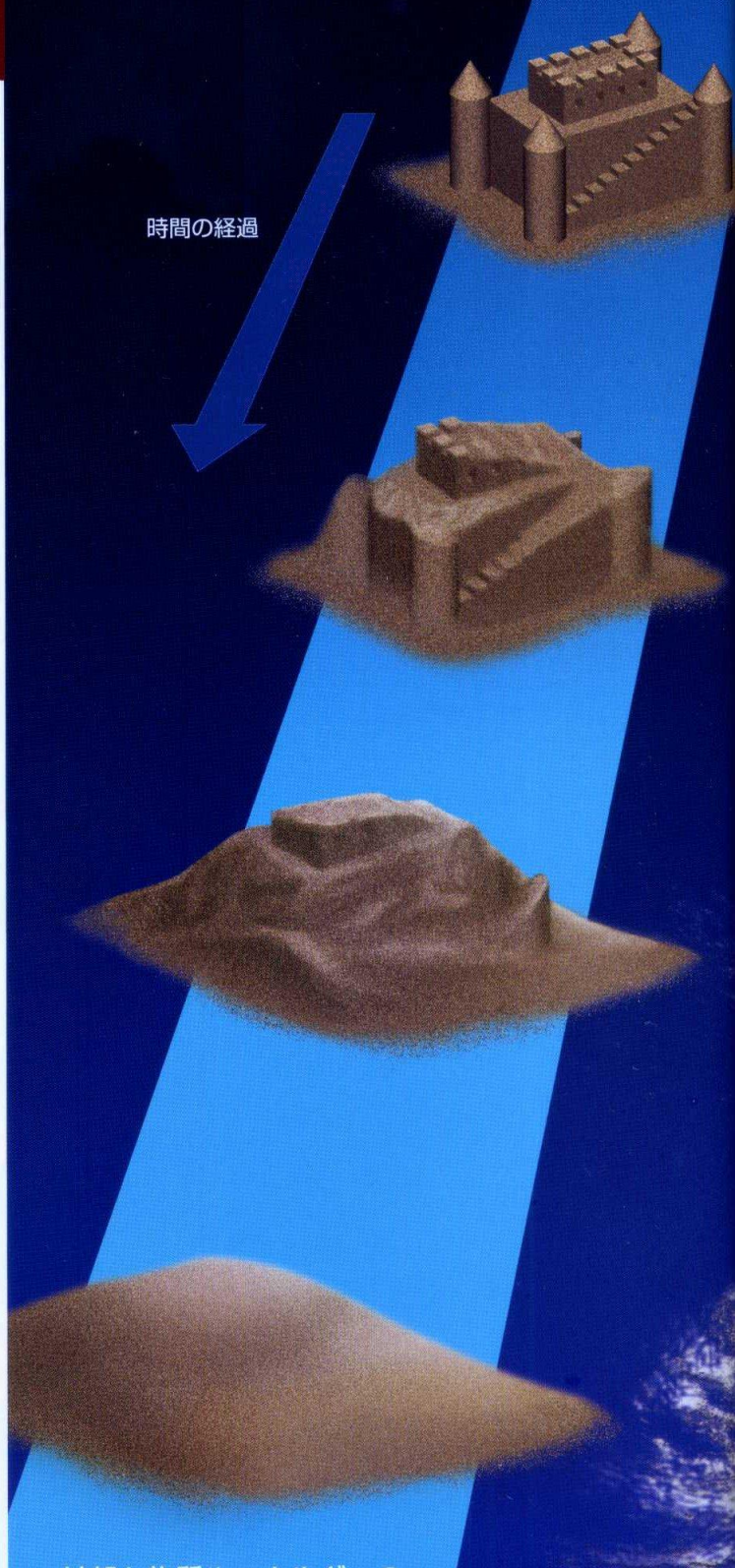
生物は、外から得た物質とエネルギーを使って秩序だった構造である散逸構造をつくり、維持することで、エントロピーを低い状態に保っているのである。

^{*1}：物理学では、運動エネルギーや電気エネルギーが、熱エネルギーになって拡散することを「散逸」という。散逸構造とは、この散逸がおきる過程でできあがる構造のことを指す。くわしくは92～95ページ参照。

エネルギーの出入りが構造をつくる

生物を含め、外部とエネルギーや物質のやり取りがある物体だけが、時間が経過しても、その秩序だった構造を維持することができる。逆に外部とエネルギーや物質のやり取りがない場合には、エントロピー増大の法則にしたがい、秩序だった構造は時間がたつと崩壊する（無秩序になる）。

時間の経過



外部と物質やエネルギーの出入りがない物体

時間の経過とともに、秩序だった構造がくずれていく（エントロピーが増大する）。ただし継続的に砂の城が手入れされるなど、外からエネルギーが供給されれば、構造は維持され、人為的にエントロピーの増大を防いでいることになる。



**イリヤ・プリゴジン
(1917~2003)**

ロシア生まれのベルギーの化学者。無秩序から秩序が生まれるしくみを説明する仮説「散逸構造理論」を打ち立てた。この仮説を提唱した功績により、1977年のノーベル化学賞を受賞した。



エネルギー 熱

エネルギー 熱

エネルギー 熱

エネルギー 熱

エネルギー 熱

エネルギー 熱

エネルギー 熱

エネルギー 熱

台風

外部と物質やエネルギーの出入りがある物体

エネルギーが外部から供給され、一部を排出することによって、秩序だった構造がつくれ、維持される(エントロピーがふえない)。その後台風が小さくなるときには、外部に乱雑な風を吹かせ、まわりの環境も含めるとエントロピーが増大する。

生きている生物

DNAに書かれた遺伝情報にもとづき、外部から得たエネルギー源を使って、エネルギーの産生と消費による散逸構造がつくれ、維持される(エントロピーがふえない)。鳥が死ぬと、エネルギーの産生・消費がとまり、散逸構造がくずれ、死んだ鳥をとりまく環境全体でのエントロピーは増大する。

無秩序さの指標「エントロピー」

ここで、エントロピーについてさらにくわしくみていこう。エントロピーは、熱力学や統計力学とよばれる物理学の分野で使われる概念である。専門的な定義はここでは紹介しないが、エントロピーとは、物体や空間の状態の「無秩序さ」や「乱雑さ」をあらわす指標である。

エントロピーが無秩序さの指標であることを示したのは、オーストリア生まれの物理学者ルートヴィッヒ・ボルツマン（1844～1906）だ。なお、エントロピーはたんなる抽象的な概念ではなく、温度や圧力などのように、計算し、数値であらわすことができる物理的な量である。

閉じた空間で、エントロピーは増加する

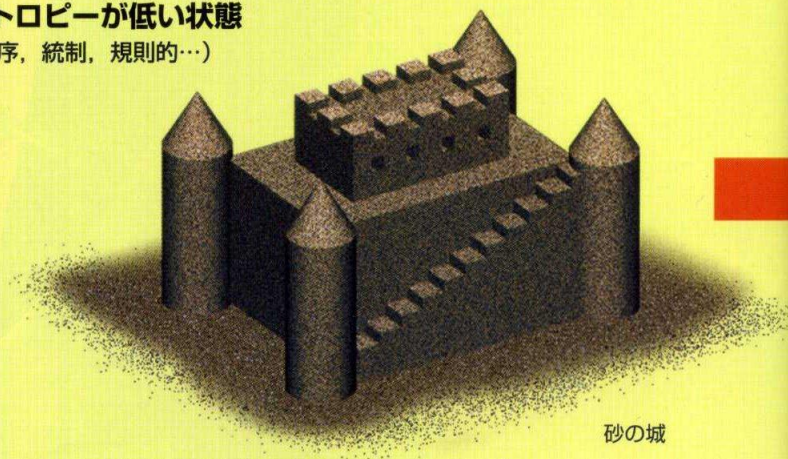
82ページで紹介したように、物体を放置しておくと、時間がたつにつれ、エントロピーは自然とふえていく（エントロピー増大の法則）。たとえば、コップに入った水の中に氷を入れると、氷は徐々にとけていく。実は、これもエントロピーがふえる例の一つである。氷は、水の分子が秩序だって並んでいる状態だ。氷がとけるといことは、水分子の配列がばらばらになり、水の中に無秩序に散らばっていく、つまりエントロピーがふえるということだ。氷がとけたあとで、もう一度氷が自然とできあがる（エントロピーが減少する）ことはない。



ルートヴィッヒ・ボルツマン
(1844～1906)

オーストリアの理論物理学者。原子や分子のふるまいから、身のまわりにおこる不可逆的な現象を説明しようと試みた。エントロピーを、無秩序さの度合いをあらわす量として定義した。なお、エントロピーという言葉は、ポーランド生まれの物理学者、ルドルフ・クラウジウス（1822～1888）によってつくられたものである。

エントロピーが低い状態 (秩序、統制、規則的…)



砂の城



氷水

ただし、コップごと冷凍庫で冷やせば、ふたたび氷をつくる（エントロピーを減少させる）ことができる。コップを冷やすことのできる、冷凍庫という空間は、外部から物質やエネルギーのやり取りの行われている「開かれた空間（開放系）」であるといえる。「開放系」では、エントロピー増大の法則による制約は取り払われる。

一方、先ほどみたように、水の入ったコップに氷を入れて、ただだんに放置する場合、コップは、外部との物質やエネルギーのやり取りがない「閉じた空間（閉鎖系、孤立系）」に置かれているといえる。エントロピー増大の法則は、こうした、「閉

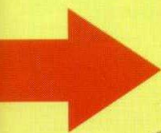
鎖系」においてのみなりたつ法則なのである。

生物は“負エントロピー”を食べる

物理学者シュレーディンガーは、「生物は負（マイナスの）エントロピーを食べて生きている」といった。これは生物が外からエネルギー（栄養）を得ることで、自身のエントロピーがふえないようにしている（秩序だった構造をつくり、維持している）ことを表現したものだ（86ページ）。生物は、外部と物質やエネルギーのやり取りがある「開放系」であるため、エントロピー増大の法則がなりたたなくてもよいのである。

エントロピーが高い状態 （無秩序、乱雑、でたらめ…）

エントロピー増大



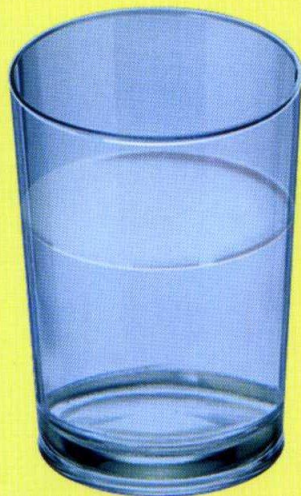
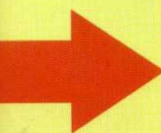
くずれた
砂の城

エントロピーと エントロピー増大の法則

エントロピーは、物体や空間の状態の「無秩序さ」や「乱雑さ」をあらわす指標である。イラストの左に示すように、砂の城や水につかっている氷は、砂の粒子や水分子が秩序だって並んでおり、「エントロピーは低い」状態にある。

砂の城や氷を放置しておく、砂の城はくずれ、氷はとけて水になる。くずれた砂の城や水の中では、砂の粒子や水分子が無秩序に散らばっており、「エントロピーは高い」状態といえる。このように、形あるものを放置しておく、エントロピーは時間とともに自然とふえていくという法則がある。これを「エントロピー増大の法則」とよぶ。

エントロピー増大



氷がとけた水

熱を効率よく拡散させようとしてできる構造

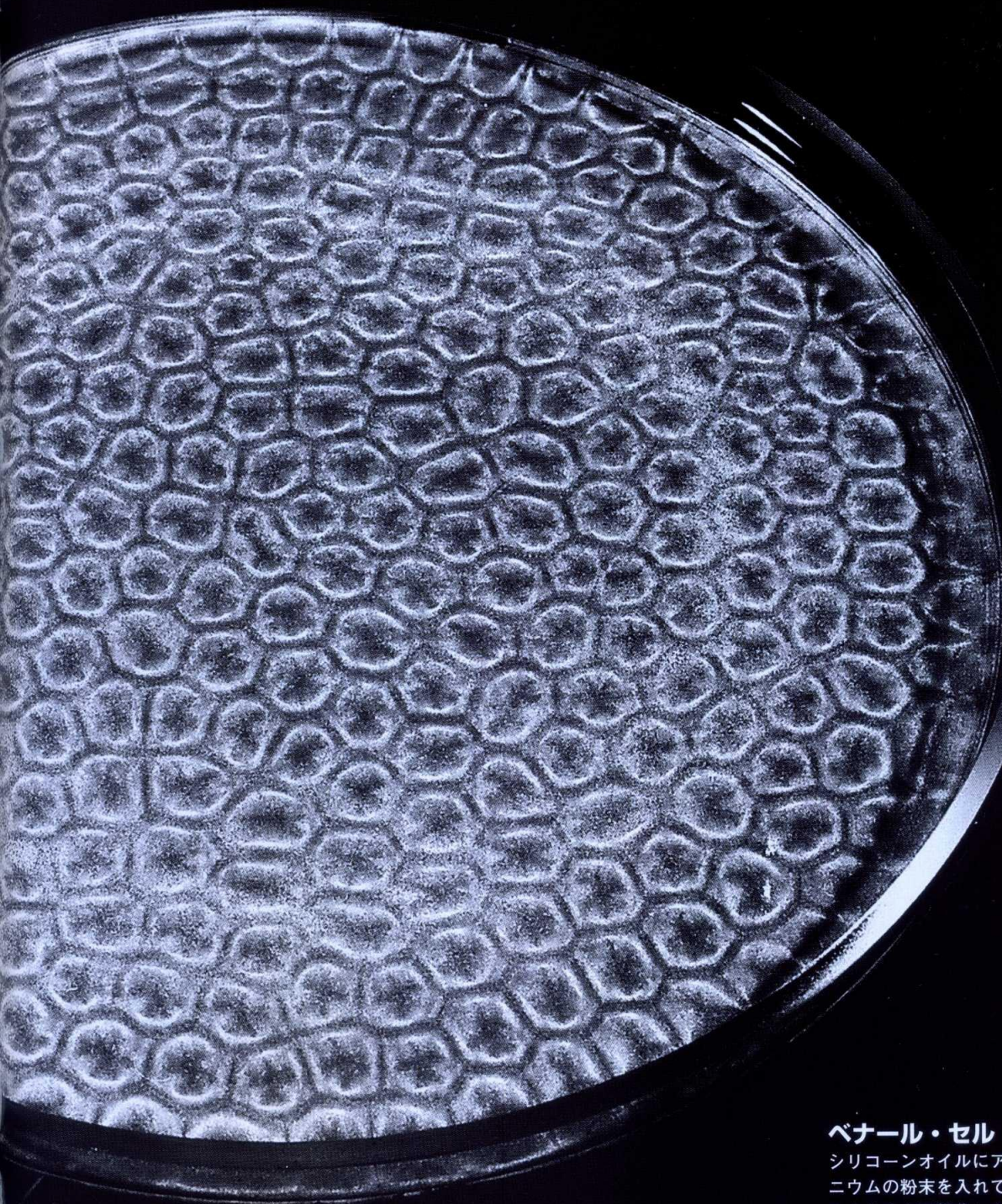
つづいて、88ページで紹介した、「散逸構造」についてもくわしくみていこう。散逸構造は、外部とエネルギーや物質をやり取りできる「開放系」でつくられる、秩序だった構造だ。散逸構造は、どのようにしてつくられるのだろうか？ また、そもそも散逸とは何だろうか？

物理学では、運動エネルギーや電気エネルギー、化学エネルギーなどが、熱エネルギーになって周囲に拡散することを「散逸」という。たとえば、電線に電気を流すと電気抵抗で必ず熱が生じる。これも散逸の一種だ。散逸がおきる過程でできるのが、散逸構造である。

散逸構造の代表的な例として、「ベナール・セル」がある。液体を均一に下から温めると、液体が上下にかきまぜられる「対流」がおきる。その結果、ハチの巣のように六角形が整然と並んだ構造ができあがる（右ページの画像）。各六角形の中央（もしくは端）で液体が下からわき上がり、端（もしくは中央）では液体が上から下に流れている。

これは、下から入ってきた熱エネルギーを、表面に効率よく運ぶことのできる動的な構造となっている。六角形が規則的に配列した対流パターンを形づくるほうが、対流のない静的な液体にくらべて、全体としては熱エネルギーを効率よく外に放出できる。そのため、自然とこのような構造ができあがるのだ。これが散逸構造ができる基本的な原理である。





ベナール・セル

シリコンオイルにアルミニウムの粉末を入れて対流のようすを可視化した画像
(画像：東京大学大気海洋研究所 三澤信彦)

台風やシマウマの縞模様も散逸構造

88ページで紹介したように、「台風」も、散逸構造の一種である。海から供給される熱エネルギーを効率よく散逸させようとして渦ができる（左ページの画像）。また、シマウマの縞模様（右ページの画像）など、生物の体表にできる模様も散逸構造の一種だといわれている。

ベナール・セルや台風の例からわかるように、散逸構造がつくられるためには、「外からエネルギーが供給され、それをふたたび外に熱として放出する」環境が必要である。つまり、外部と物質やエネルギーの出入りがある「開かれた空間（開放

系）」であることが必要だ。エネルギーの供給と排出（散逸）の両方がそろわないかぎり、規則正しい六角形や渦などの構造ができることはない。

生物は、外から栄養を得て、自分の体をつくったり、活動のためのエネルギーをつくったりしている（代謝）。そして、その結果生じる熱を、体外に放出している。つまり、生物は開放系だ。生物がつくる体の構造は非常に複雑で、六角形や渦のように単純ではないが、その構造（散逸構造）をつくる基本的な原理は同じだと考えられている。

散逸構造の例 ②

台風・サイクロン・ハリケーン

画像は2008年にインド洋で発生した
巨大サイクロン「ナルギス」

秩序だった構造である散逸構造では、エントロピーは低いまま維持される。散逸構造は、外部と物質やエネルギーの出入りがある「開放系」においてできあがる構造のため、エントロピー増大の法則の制約を受けない(91ページ参照)。

散逸構造は“動きつづける”構造

散逸構造のように、みずから秩序だった構造ができあがる現象は「動的自己組織化」ともよばれる。1個の受精卵から人間のような秩序だった構造が生まれる生物という存在は、まさに動

的自己組織化の代表例といえる。自然界で見られる秩序だった構造としては、原子が規則的に配列してできる塩の結晶や、上空で水分が凍ってできる雪の結晶などもある。これらも自己組織化の例ではあるが、散逸構造とはちがう種類の構造だ。

というのも、塩の結晶や雪の結晶などは、物理的な衝撃が加わったり温度がかわったりして、その構造がこわれても、自発的に修復されることはない静的な構造である。一方、散逸構造は、外部との物質やエネルギーの出入りが継続されることで維持される動的な構造だ。

散逸構造の例 ③



シマウマの縞模様

生物の体表にできる模様も散逸構造の一種とされる。イギリス生まれの情報科学分野の研究者、アラン・マティソン・チューリング(1912~1954)は、こうした体表の模様が微分方程式の安定な解としてあらわれることを見出した。このパターンは「チューリング・パターン」とよばれている。

“生きている”とは何か？

クマムシの秘密

一切の生命活動を停止できる生物「クマムシ」

生物はたえず外から物質やエネルギーを取り入れ、体の中身を更新することで“生きている”。ところが自然界には、この法則が単純にあてはまらないものがある。

たとえば、クマムシという体長1ミリメートルに満たないほどの小さな生物は、周囲が乾燥すると、通常は80%ほどある体内の水分量を数%以下にまで減らし、小さくちぢむ。この状態を「乾眠」という。こうなると、もはや動くことも外から栄養

をとることもない。つまり、乾眠状態のクマムシは、生命活動をまったく示さないのだ。ところが水をあたえると、体は元の大きさにもどり、ふたたび以前と同じように活動しはじめる。

また、2000年以上もの間、地中に埋まっていたハスの種子が、発芽してみごとに花を咲かせたことがある（千葉県の「大賀ハス」）。一般的に植物の種子に含まれる水分量は少なく（10%前後）、生命活動をほとんど示さない。種子は、水分や温度など

一切の活動を停止して、復活の日をじっと待つ

クマムシとハスがそれぞれ、体内の水分量を下げて、生命活動を停止させ、再開するようすをえがいた。乾眠状態になったクマムシは、乾燥のほか、真空や放射線への耐性も強まる。さまざまな報告によると、乾眠状態で数年間は生きのびられるようだ。なお、クマムシは昆虫ではなく、緩歩動物というグループの生物だ。その仲間は1000種ほど確認されているが、すべての種がクリプトビオシスの能力をもっているわけではない。クマムシは周囲の環境変化に応じてクリプトビオシスの能力を発揮するが、植物の種子の場合は、あらかじめ親世代が子のために準備した能力だといえる。



クマムシ

周囲が乾燥する



乾眠状態のクマムシ

クリプトビオシス



種子

ハス

種子がつくられる



ハスの種子

クリプトビオシス

の秘密とは？

の条件がととのったら発芽し、生命活動を開始する。

乾眠状態のクマムシもハスの種子も、環境がよくなれば生命活動を開始するので、決して死んではいない。ただしこれまで見てきたような、細胞をたえず新しいものに入れかえる活動的な方法ではなく、本来細胞内でおきる化学反応を停止させることで、体の秩序だった構造がくずれないように維持している。

このように生命活動を一時的に停止させている状態を、「ク

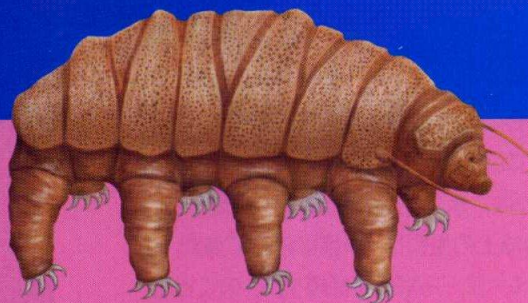
リプトビオシス(cryptobiosis)」とよぶ。“かくれた生命”という意味である。

なお、クマムシも植物の種子も、生命活動を再開できるような準備をととのえたうえで、活動を停止させている。その証拠に、急速に乾燥させたクマムシは、ふたたび水をあたえても“復活”しない。乾燥の速度が急すぎると、生命活動の再開にそなえた細胞内の準備が間に合わずに死んでしまうのである。

周囲に水分がもどる



乾眠状態からもどりつつあるクマムシ



元どおりになったクマムシ

水分や温度など、発芽の条件がととのう



発芽したハスの種子



開花したハス

生命の定義

「生命」を定義することはできるか？

「生命」を辞書で調べると、「生物が生物として存在する本源。栄養摂取・物質代謝・感覚・運動・生長・増殖のような生活現象から抽象される一般概念」と書かれている（広辞苑・第6版）。これは言葉としての「生命」の定義であり、生命とは何かという疑問に答える科学的な定義ではない。多くの科学者が同意する、科学的な「生命の定義」はまだ完成していない。

とはいえ、これまでも著名な研究者が、生命とは何かについてさまざまな提案をしている（右に例を示した）。生命科学に関する知識が現在のように十分でない時代にもかかわらず、するどい指摘をした人物もあり、興味深い。

“生命とは何か”に答は出るのか？

生命とは何かを定義しようとすると、いくつかの問題点が出てくる。まず、私たちは地球に存在する生命しか知らないということだ（20～21ページ、23ページ参照）。一般的に「生命の定義」がめざすものは、地球上の生命に限定しない、生命についての普遍的な定義だ。全宇宙の生命に共通する普遍的特徴が何であるかは、まだ明らかになっていない。

さらに、少なくとも地球上の生命は、環境に応じて変化（進化）する（PART1 22ページ、PART4参照）。このことも、生命の定義をつくることをむずかしくしている。もし現時点で生命の普遍的な特徴をみつけることができたとしても、それはあくまでも現時点の特徴でしかない。遠い未来において、それは生命の特徴ではなくなる可能性があるということだ。このような点から、生命の普遍的な定義をつくるというのは、非常に困難な作業なのである。

これまでに提案された“生命（生命体）とは何か”の例

著名な研究者による、生命とは何かについてのさまざまな提案を、右にあげた。生命科学に関する知識が現在のように十分でない時代にもかかわらず、するどい指摘をした人物もあり、興味深い。

すべての生物は神が制作した機械である。

— 1648年, ルネ・デカルト(フランスの哲学者・科学者)

生命とはタンパク質の存在の仕方である。そして、この存在の仕方は、本質的には、タンパク質の化学成分が不断に自己更新を行うことにある。

— 1894年, フリードリヒ・エンゲルス(ドイツの思想家・経済学者)

生物体は、「負エントロピー」を食べて生きている。

— 1944年, エルヴィン・シュレーディンガー(オーストリア出身の物理学者)

生命は、(1)まわりの環境と物質を交換する能力、(2)成長する能力、(3)個体数をふやす能力、(4)自己複製能力、(5)運動能力、(6)環境からの刺激に応じて活性化する能力、をもつ。

— 1961年, アレクサンドル・オパーリン(ロシアの生化学者)

生命とは有機化学反応の結合により構成される、自己を永続させるシステムであり、システム自身がつくりだした複雑で特異的な有機触媒によって段階的に、そしてほぼ等温的に触媒されるシステムである。

— 1965年, ジョン・バナル(イギリスの生物物理学者)

生命とはダーウィンの進化を遂行することができる、自律的
化学システムである。

— 1994年, NASAが採用した定義

6

生命の 最先端研究

協力 吉川研一／瀧ノ上正浩／田端和仁／有田隆也／石井哲也／木賀大介

1965年に朝永振一郎^{ともながしんいちろう}らとともにノーベル物理学賞を受賞したリチャード・ファインマンは、次のような言葉を残している。「自分につくれないものは、理解したとはいえない(What I cannot create, I do not understand)」。残念ながら人類は、これまでに生命体をゼロからつくりだすことはできていない。私たちは生命体がつくられ、維持されるしくみについて、まだまだ理解できていないことだらけなのだ。PART6では、“生命をつくる”ことを試みることで、生命の謎を解明しようとする最新の研究を取り上げる。さらに、細胞を人工的に培養して体のさまざまな細胞に変化させるES細胞・iPS細胞についての最新の話題や、生物の創生にいちどむ若者たちの取り組みについても紹介する。

生命の物理学 ①～②

無生物から生物をつくる

コンピューター上の生命

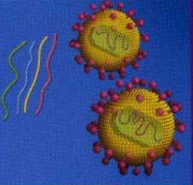
ES細胞とiPS細胞

ES細胞、iPS細胞の最新研究

生物の創生にいちどむ若者たち



2010年にアメリカのクレイグ・ベクター博士がつくった
“人工細菌”。マイコプラズマという細菌のDNA(遺伝情報)
が、本来もっていたDNAから、人工的に合成された
DNAに完全に置きかわっている。



細胞に見立てた水滴のふるまいから、生命の

自発的に秩序だった構造をつくり、動きまわり、栄養をとり、余分なものを排出する。生命は、このような複雑なことをやっ
てのける存在だ。生命がどのような「物理的なしかけ」によっ
てこれを実現しているのかは、まだわかっていない。

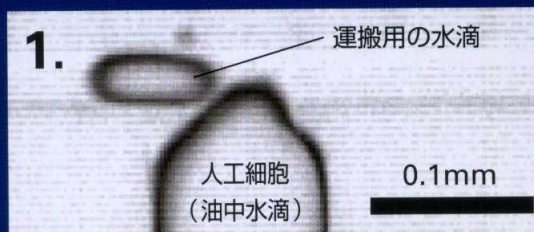
そこで、実際の細胞を単純化した「人工細胞」などをつくっ
て「生命らしさ」を再現し、生物を動かす物理的な原理を解明
しようとする研究がある。「生命物理学」や「生物物理学」とよ
ばれる研究分野だ。

“ただの水滴”が生命のようにふるまう

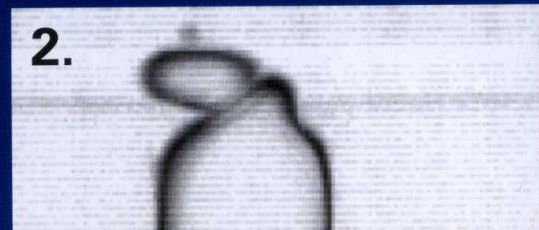
東京工業大学の瀧ノ上正浩講師は、油の中につくった小さな

水滴（油中水滴）を細胞に見立てて、細胞というシステムが動
く物理的な原理を探る実験を行っている。油と水はまざりあわ
ないので、油中の水滴は周囲から切りはなされて、球状の“小
さな容器”として存在することができる。瀧ノ上講師がつくっ
た油中水滴の大きさは直径0.01～1ミリメートルほどで、生物
の細胞と同じくらいの大きさだ。

この人工細胞（水滴）に向かって、細い流路を通して別の水
滴を送りこむと、水滴の一部が人工細胞に取りこまれては排出
されるような動きがくりかえしおきる（下の画像）。このように
持続的に生きた細胞に栄養が取りこまれ、余分なものが排出さ
れるようなくみは、水や油の物理的な性質によって自発的に



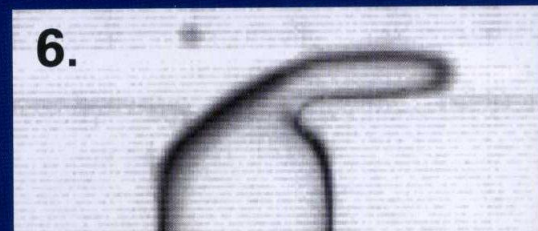
時間経過 0ミリ秒



0.33ミリ秒



1.33ミリ秒



1.67ミリ秒

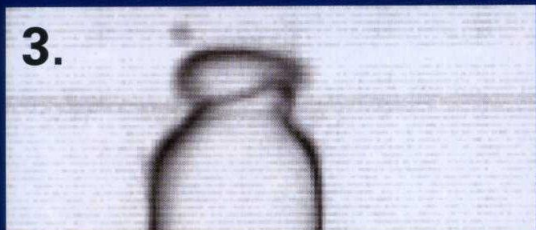
人工細胞（油中水滴）に、分子を運搬するための水滴が融合し、分裂していくようすをとらえ
た連続画像（1～8）。人工細胞は、シリコーン樹脂でできた細い流路のわきにつくられたくぼ
みの中におさまっている（右ページ下の構造図参照）。そこに油の流れに乗って水滴が近づい
てくると、画像のような融合・分裂がおきる。融合するかどうかは、電極にかける電圧によっ
て制御できる。（画像：東京工業大学 瀧ノ上正浩）

物理的な原理を探る

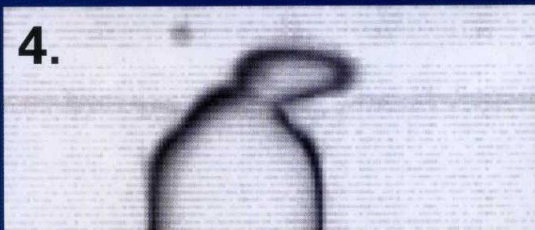
引き起こされたものだ。

送りこむほうの水滴（運搬用の水滴）に栄養に相当する分子を入れて、送りこむ頻度をかえていく。すると人工細胞の中で、分子を取りこんでは排出する現象にリズムが生じたり、消えたりする。リズムがある状態が生きている状態で、リズムがない状態が死んでいる状態に対応するといえる。運搬用の水滴の量が多すぎたり、少なすぎたりすると死んでしまうが、ちょうどよい量ならリズムがつづく。このように水滴を細胞のモデルとして使い、**生命らしさが生じるための条件をしばらくこんでいけば、細胞というシステムを動かす原理が次第に明らかになっていく。**

「生きている細胞で重要な点は、物質が出たり入ったりすることにより、内部で化学反応が引き起こされ、ダイナミックな活動が持続することだと思っています。**生きている細胞の本質は、物理的な現象なのです**」と瀧ノ上講師は語る。そして、「物質を外部と継続的にやり取りできる状態でないと、人工細胞にリズムなどの生命らしさは生じません」とも説明する。これは生命現象が、まさにプリゴジンが提唱した「散逸構造」（くわしくは92ページ参照）であることを示している。



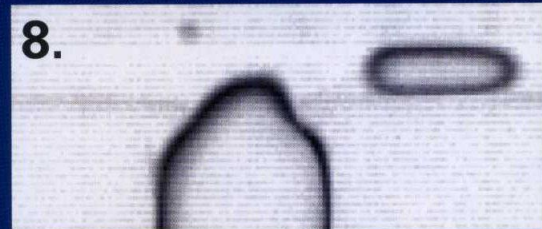
0.67ミリ秒



1ミリ秒

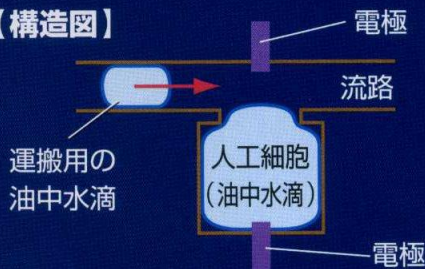


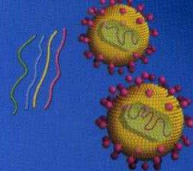
2ミリ秒



2.33ミリ秒

【構造図】





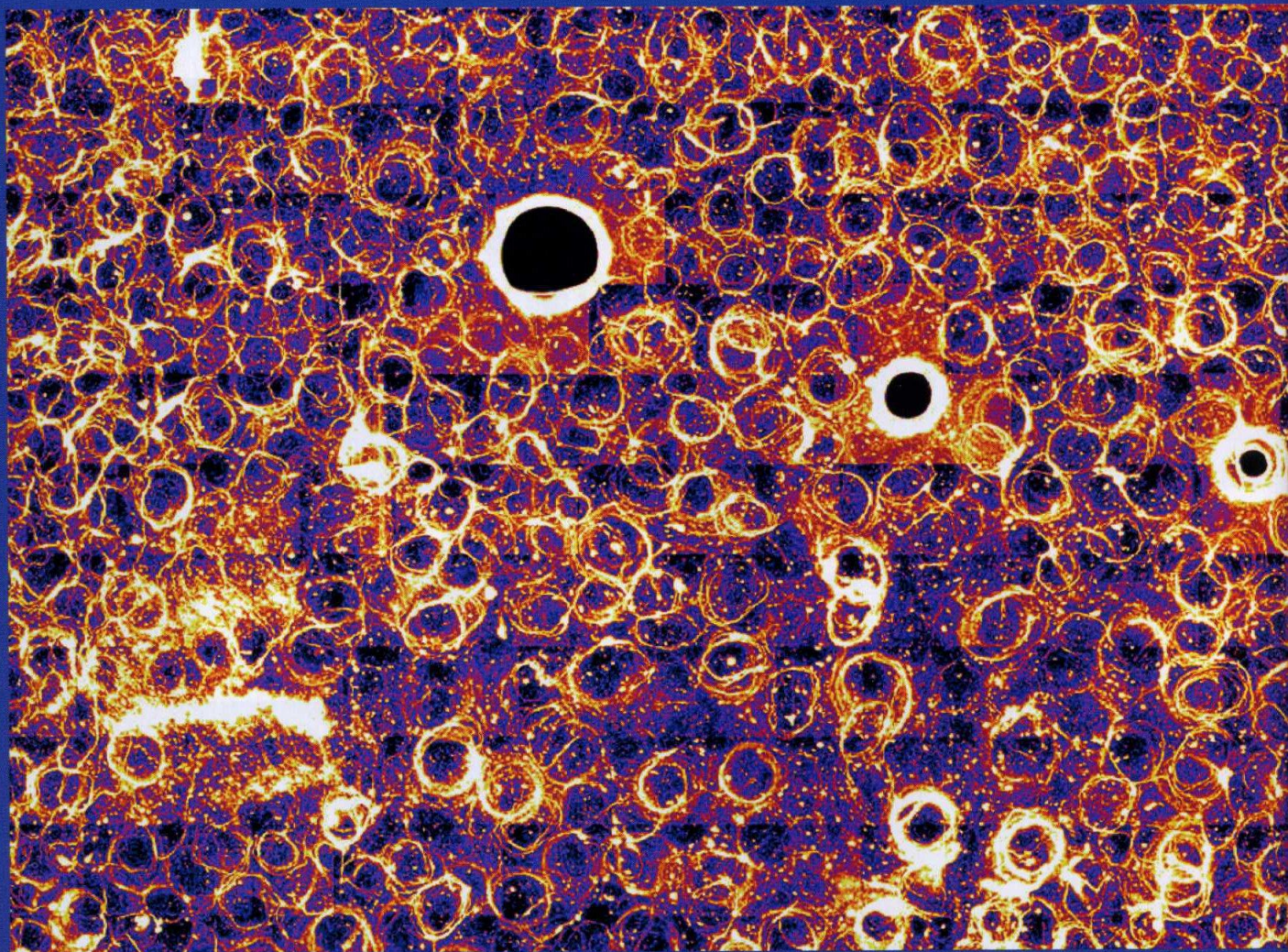
生物はどうやってリズムを生むか？

同志社大学の吉川研一教授は、生物の体内で生じる「リズム」や「同調性」に注目して、その物理的なしくみを明らかにしようとしている。たとえば、心臓の拍動は、生物がつくるリズムの一例だ。心臓を構成する複数の細胞が動きをそろえて、基本的にいつも同じ強さで規則的なリズムをきざんでいる。

吉川教授らは、次のような実験を行った。薄く水でおおわれているガラス板の上に油滴を置き、水に界面活性剤（油と水をまぜる性質をもつ物質）を加える。すると油滴は、ガラス板の

形に応じて、直線的に往復運動をしたり回転運動をしたりするという。水や油の分子一つ一つに注目すれば、いろんな方向にはげしく動いているはずなのに、油滴全体としては秩序だった行動を示すのだ。

また、吉川教授らは、生物の細胞の運動にかかわるタンパク質である「微小管」を特定の条件で運動させた。すると、最初是不規則に動いていた微小管が徐々に動く方向をそろえはじめ、最終的に渦のような構造をつくることを明らかにした（下



小さな輪のように見えるものは「微小管」がつくった渦だ。すべての渦は回転運動をしている。一つの渦は0.5ミリメートル程度である。微小管が動くためのエネルギー源となる「ATP」という分子を入れてから約22分で、この画像のような状態になった。（画像：情報通信研究機構 大岩和弘）

の画像左側)。さらに、このような渦ができるしくみを数式を使ってあらわし、その過程をシミュレーションすることにも成功した(下の画像右側)。生命現象を支配する物理的な原理を明らかにした例といえる。

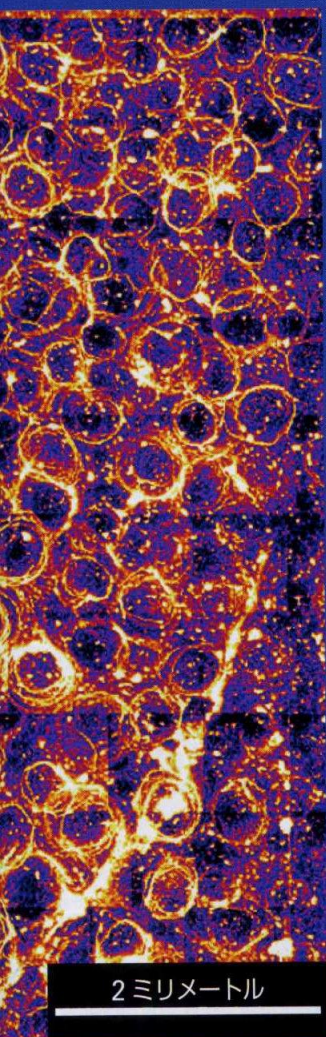
生命の謎に取り組める時代がやってきた

生命科学の進展によって、DNAやタンパク質など、細胞を構成する“部品”に関する理解はかなり進んだ。ところがそういった“部品”どうしが集まったときに、“全体”としてどのような動きが生じるのかについては、まだほとんど理解が進んでいない。

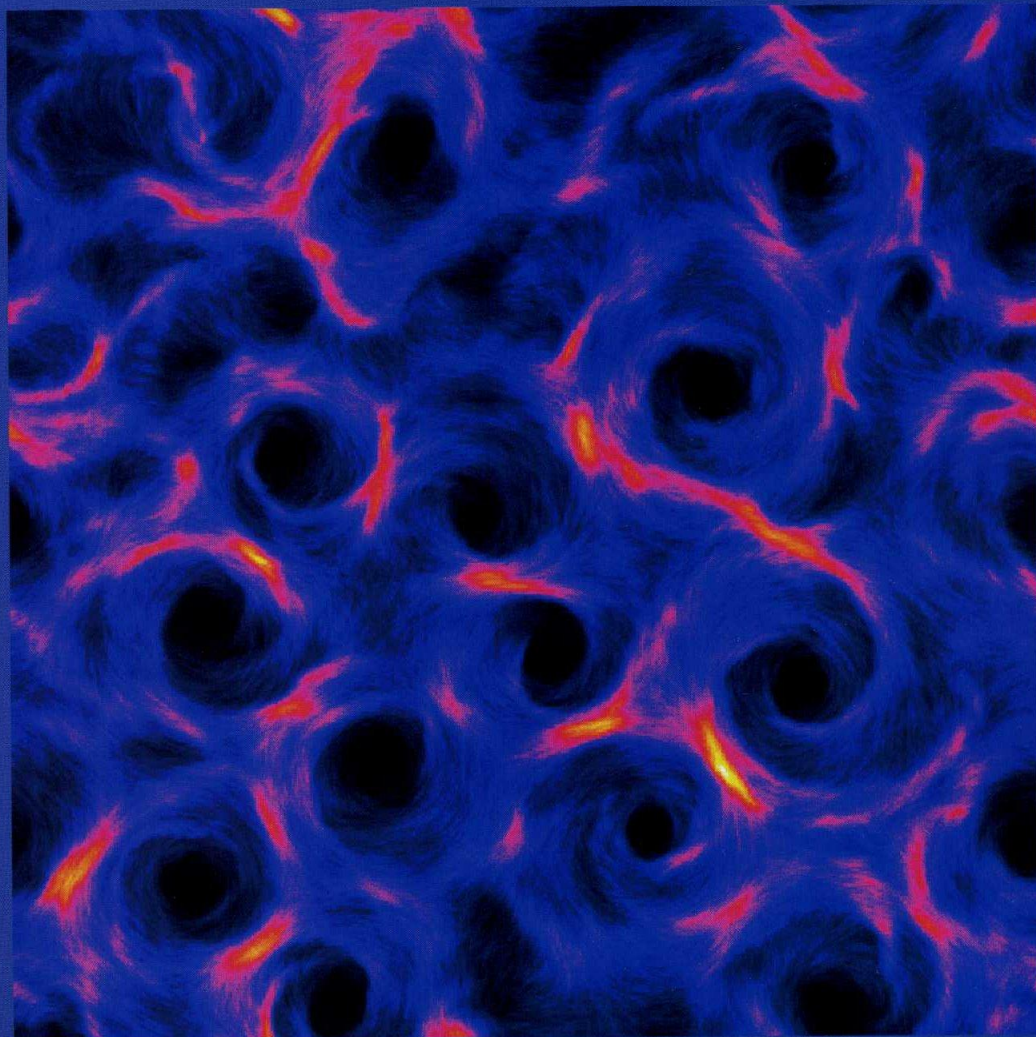
瀧ノ上講師は、「これからは、細胞と同じくらい小さな空間で、

細胞を構成する分子の空間的な配置や動き、量、時間変化などを、物質やエネルギーの出入りがある『非平衡開放系』とよばれる状況で、どうやって探るかが重要になるでしょう。今は、そのためのアイデアを実現するための技術がようやくそろってきたところです。私の人工細胞の研究もその一つです」と語る。

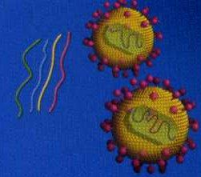
吉川教授は次のように語る。「20世紀初頭に登場した相対性理論や量子論は、その理論が化学や電子工学に応用されるまでに50年以上かかりました。生命の謎をとくために重要だと考えられている『散逸構造』などの理論が登場したのは、20世紀中ごろです。『生命とは何か』を探究する学問もこれからが本番だと思います」。



2ミリメートル



渦ができる過程をシミュレーションした画像。実際の画像(左側)と同じような構造ができている。これらの成果は、科学雑誌『nature』2012年3月22日号に掲載された。(画像:愛知教育大学 住野豊・東京大学 永井健)



無生物の“部品”を組み上げて、 生きた細胞はつくれるか？

2010年、アメリカの分子生物学者クレイグ・ベンター博士らは、**完全に人工的に合成されたDNAのみを遺伝情報としてもつ細菌**をつくることに成功した(101ページに画像)。このような生物がつけられたのは世界初だ。

ただし、この細菌をもって「人工的に生物をつくることができた」とよぶには議論の余地がある。DNAはすべて人工的なものに置きかわっているが、細胞膜や細胞質などそのほかの構成要素は元の細菌(マイコプラズマ菌)のものを利用しており、細菌のすべてを人工的につくったとはいえないからだ。

トップダウンvs. ボトムアップ

一方、東京大学の菅原正名^{すがわらただしめい}教授らは、2011年に、DNAとそれを複製する酵素^{こうそ}を、袋状^{ふくろ}になった脂質^{しつ}の膜に閉じこめることで**人工細胞を合成**することに成功している。この人工細胞はDNAを複製し、分裂することができる。これは実際の細胞をごく単純化した人工細胞であり、生物の細胞とまったく同じというわけではない。しかし、初期の原始的な生物に近いものである可能性があるという。

ヴェンター博士らのように既存^{きそん}の生物を利用して、人工的に生物をつくる方法は、「**トップダウン型**」とよばれる。一方、菅原名教授らのように、個別に用意した生物の“部品”を組み合わせて、「無生物」から「生物」をつくる方法は「**ボトムアップ型**」とよばれる。

大腸菌を一度分解してから“復活”させる

ボトムアップ型の方法で生きた細胞を合成するのは、きわめてむずかしい。細胞を構成する“部品”をどのように組み合わせれば“完成品”ができるのかが、複雑すぎて現時点ではまるでわかっていないからだ。そこで、トップダウン型とボトムアップ型を組み合わせたようなユニークな方法で、細胞の合成にいどむ研究者がいる。東京大学の田端和仁^{たばかずひと}助教は、**大腸菌をいったん分解してから、ふたたび組み上げることで大腸菌を“復活”させようと試みている。**

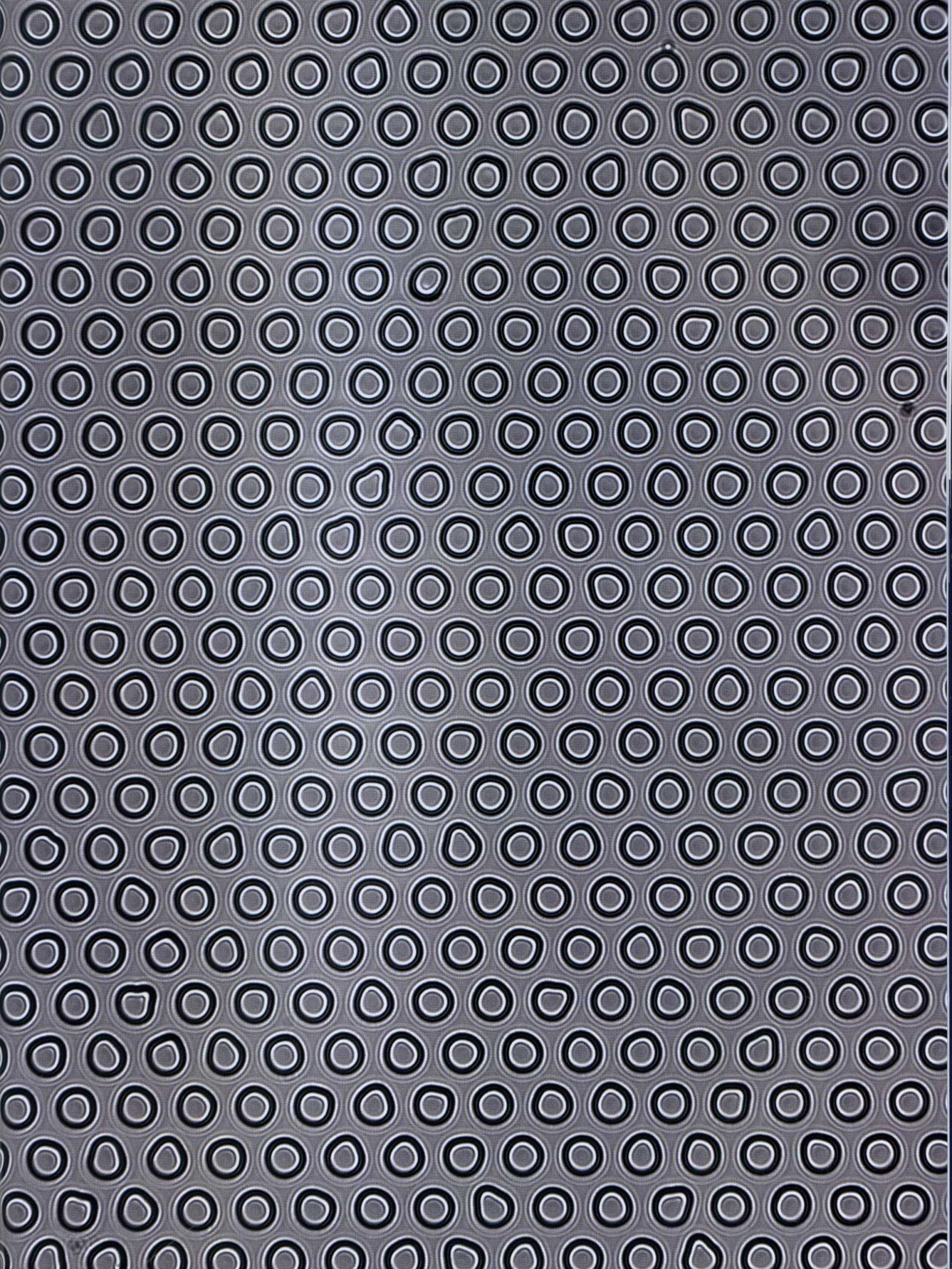
まず大腸菌の体積とほぼ同程度のごく小さなくぼみを用意する(右の画像)。そして、大腸菌の細胞膜をこわして、細胞内の

成分をくぼみの中にそっくり移すのだ。現在、くぼみの中でも大腸菌の生命活動(代謝など)がおきことはすでに確認されている。この状態は物体でも生物でもなく、両者のハイブリッド(混成物)だといえる。もしこの小さなくぼみから、元の大腸菌が生まれたら、「**議論の余地はありますが、世界ではじめて、生物ではないものから、生物が生まれることになるでしょう**」と田端助教は語る。

田端助教は「大腸菌をこわしてつくりなおすというアイデアは数年前に思いついたのですが、当時は大腸菌を1つずつ精密に制御^{せいぎよ}する手段がありませんでした。最近の技術の向上でようやく実現が可能になりました」と話す。

細胞を“生きている”状態にするために重要な要素は、細胞内にあるタンパク質の濃度なのか、あるいは細胞膜の構造なのか。細胞をつくる試行錯誤^{しこうさくご}をつづけることで情報が得られてくる。そうなれば、ボトムアップ型の方法で細胞をつくることも夢ではなくなるかもしれない。

それぞれのくぼみの直径は約5マイクロメートル(0.005ミリメートル)で、容積は約40フェムトリットル(フェムトは1000兆分の1)だ。この容器の素材は二酸化ケイ素(SiO₂)とフッ素樹脂^{じゆし}である。各くぼみに大腸菌1個体の細胞内の成分をそっくり移し、表面を脂質の膜でおおう。
(画像：東京大学 田端和仁)



地球上には存在しない “仮想生物”で生命のルールを探る

現在の地球に存在する生物は、これまでの地球環境に応じて変化してきた生物だ。地球上の生物に共通する特徴をあげていっても、それが地球の生物以外にも通用する“普遍的な”生物の特徴であるかどうかはわからない。

もし地球とはことなる環境で生まれた生物を観察することができれば、生物の普遍的な特徴をみつけることができるかもしれない。そのアイデアを実行することができるのが、コンピューター上につくられた生命体である「人工生命(Artificial Life)」だ。

人工生命は、増殖(自分自身のプログラムをコピー)したり、突然変異(不規則にプログラムを変更)したりする特徴を持っており、コンピューター上で実際の生物のようなふるまいをする。1990年にアメリカの生態学者トマス・レイ博士が書いたプログラム「Tierra」が、世界で最初の人工生命だといわれる。

人工生命は仮想空間で実際に進化する

人工生命の研究では、自分がまさに“宇宙の創造主”となって、生命体の大きさや能力のほか、環境(温度や重力など)さえも、地球の“常識”にとらわれることなく自由に設定できる。あとは仮想空間上の時間を進めて、人工生命がどのようなふるまいをするかを観察し、分析するのだ。

名古屋大学の有田隆也教授は、仮想的な3次元空間で、人工生命どうしをきそわせる(たとえば、食べる側と食べられる側を設定)などして、生物が進化する過程を調べている(右の画像)。ことなる種間や同じ種内での生存競争のほか、まわりの環境が進化にどのように影響するのかを、さまざまなパターンをつくり、分析している。「人工生命は現実世界で過去におきた進化を再現するものではありません。コンピューター上で新たな進化をおこすことで、進化のしくみを探るのです」と有田教授は説明する。

有田教授は、生物がどのような進化の道筋をたどるのは生物や環境によってことなるが、進化の過程そのものには普遍的なルールがあるのではないかと考えている。「進化のルールをみつけだし、地球という環境の中でどうしてヒトのようなものが出現したのかを突きとめたい」と有田教授は語る。もし進化の

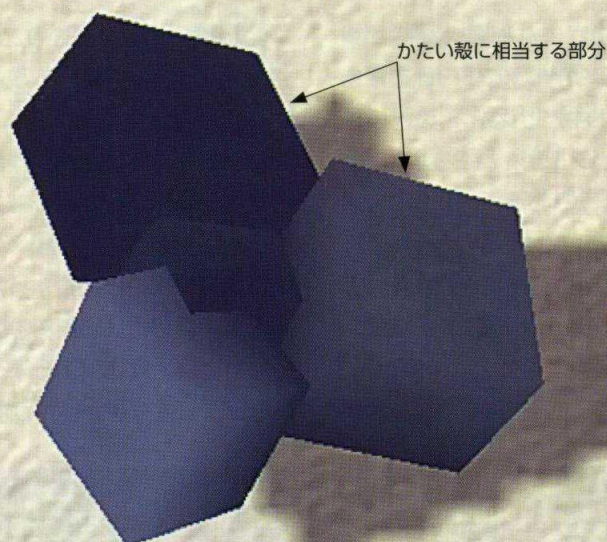
普遍的なルールがみつければ、人類を含めた地球上の生物が今後どのように進化していくのかや、火星などの環境で生物がどのように進化するのかを推測できるようになるかもしれない。

生物らしさをそなえたロボットが人間をこえる

人工生命のプログラムを使った研究は、ヒトにおける言語の発生や文化の伝達など、**物的な証拠が残らない現象を調べるときにも威力を発揮する**。言語はたえず変化し、使いやすい表現が広まっていくという点で、生物の進化とよく似ている。「言語や文化、心、協調性といった現象がいかに進化してきたのかを探ることは、ヒトという生物の独自性を探るために重要です」(有田教授)。

人工生命の研究でわかったことは、ロボットや人工知能などにも応用できる。「ロボットが、生物のようにみずから進化する性質をそなえることができれば、人間をこえる知能を獲得することも可能になるでしょう」(有田教授)。

有田教授らがつくった人工生命



Algorithm:

Fitness: Distance to another morphid (2pop co-evo)

GA: Evaluating (T:1 [G:1] E:0 S:26451)

Ti: G0G7461 vs G0G7872

上の画像の中央にるのが、有田教授らがつくった仮想空間の中で、かたい殻をもつように進化した人工生命だ。人工生命を食べる側と食べられる側に分けて、仮想空間上の時間を進めると、食べられる側は、殻をもったり、殻をもたないかわりに足が速くなったりするなどして、生きのびるための戦略を独自に進化させた。(画像：名古屋大学 伊藤孝・鈴木麗聖・有田隆也)

体のさまざまな組織の細胞を生み出すこと

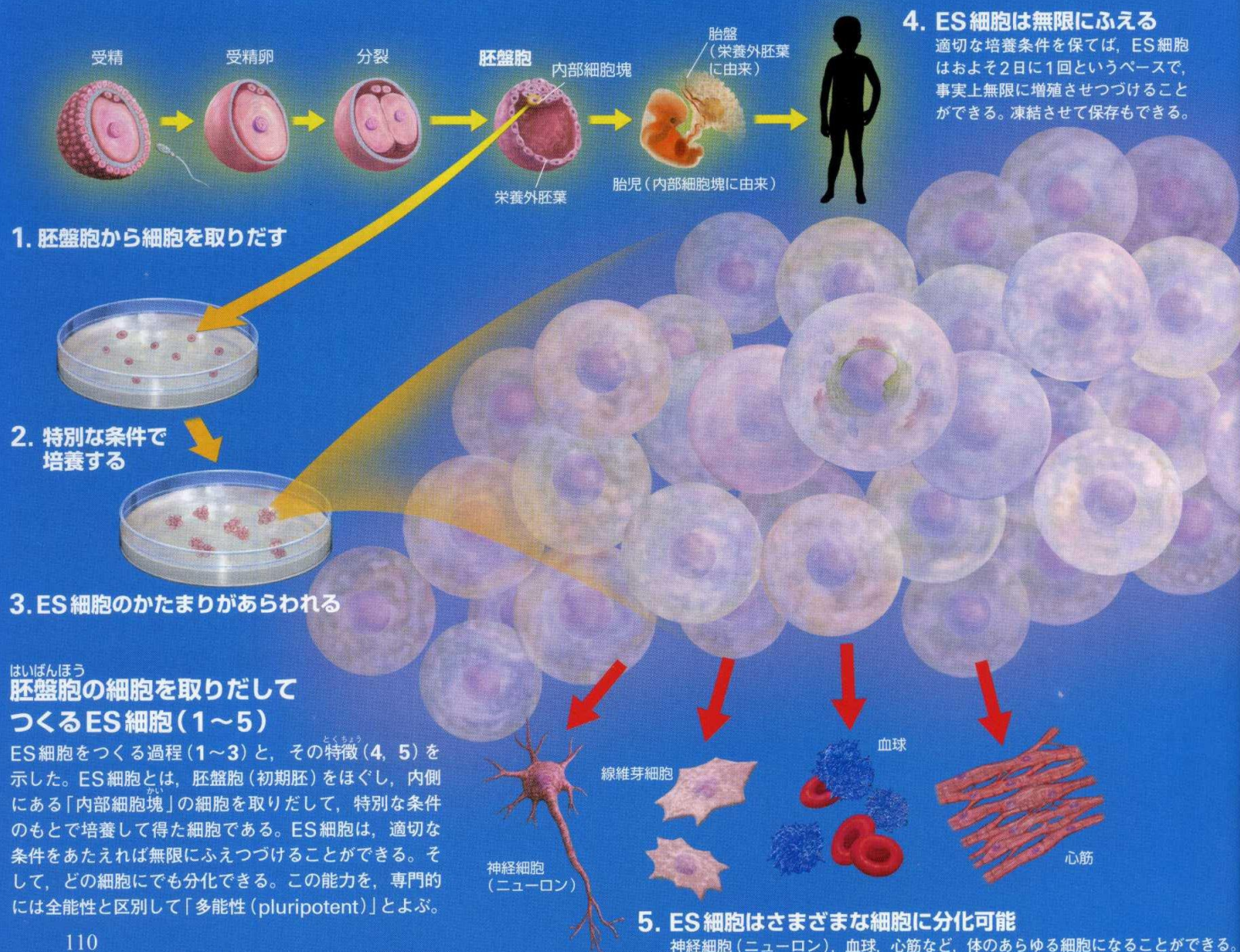
ヒトの体は、受精卵からできたさまざまな種類の細胞が集まってできている。今、細胞を人工的に培養して体のさまざまな細胞に変化（分化）させる研究が行われている。その代表例が、「ES細胞（胚性幹細胞）」（下のイラスト）と「iPS細胞（人工多能性幹細胞）」（右ページのイラスト）である。

ES細胞は、初期胚の内部から細胞を取りだし、特別な条件で培養することでつくられる。ES細胞は無限にふえていき、培養条件に応じて神経細胞や血球、心筋など、さまざまな組織の細胞に分化していくことができる（多能性をもつ）のだ。

そのため、けがや病気で失われた組織を再生するための医療

（再生医療）に応用できると考えられているが、倫理的な問題と免疫拒絶反応の問題がある。

不妊治療のため体外受精で初期胚を作製した夫婦が無事、子を出産後、不用となった初期胚を研究用に寄付することがある。ヒトES細胞をつくる際には、この初期胚（余剰胚）を試験管の中で、ばらばらにほぐす必要がある。胚を研究用途で破壊することを倫理的に問題視する声が少ない。一方、免疫拒絶反応で問題なのは、ES細胞からつくった細胞や臓器を患者に移植した場合、他家移植となるため患者の免疫系によって「異物」とみなされ、排除されてしまう可能性があるということである。



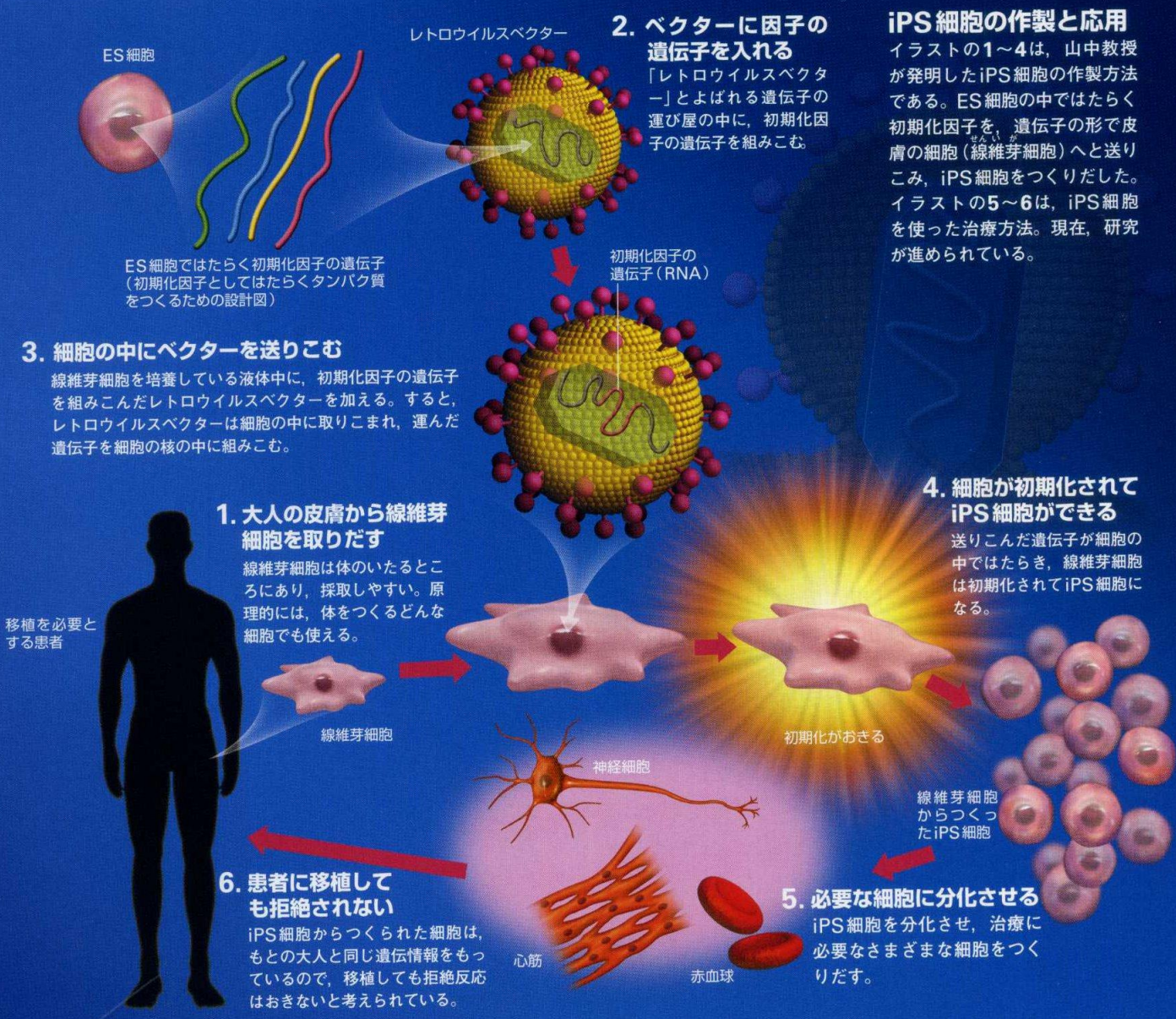
ができる, 2種類の万能細胞

現在, 世界では, ES細胞から分化させた細胞を用いた臨床試験が少なくとも八つ進められているが, いずれにおいても免疫抑制剤の使用が不可欠である。

この二つの難題をクリアできる新しい万能細胞がつかれないかと多くの研究者たちが考えていた。そのひとりが京都大学の山中伸弥教授だった。山中教授は2006年8月10日, 世界初の「胚を使わない万能細胞」をマウスで誕生させたことを発表した。この万能細胞を, 山中教授は「iPS細胞(induced Pluripotent Stem cell)」「(人工多能性幹細胞)」と名づけた。そして, 2007年11月20日には待望の「ヒトiPS細胞」も誕生さ

せたと発表した。
iPS細胞は, 皮膚や血液の細胞に外から4種類の遺伝子(Oct3/4, Sox2, Klf4, c-Myc)を入れることでつくられる。これらの遺伝子を細胞に入れると, 細胞が分化前の状態にもどる。つまり, どのような細胞にもなれる状態(これを初期化という)になるのだ。ES細胞と同様に, iPS細胞も多能性をもつ。しかも, 患者の細胞からつくったiPS細胞は再生医療の自家移植に応用できる。

iPS細胞の作製と応用
イラストの1~4は, 山中教授が発明したiPS細胞の作製方法である。ES細胞の中ではたらく初期化因子を, 遺伝子の形で皮膚の細胞(線維芽細胞)へと送りこみ, iPS細胞をつくりだした。イラストの5~6は, iPS細胞を使った治療方法。現在, 研究が進められている。



自家移植にも応用可能なES細胞がつくられた

体のさまざまな組織の細胞を生みだすことができるES細胞とiPS細胞。これらの細胞を、再生医療に応用するための研究が、今、世界中で行われている。

ES細胞由来の細胞を用いた臨床試験は、世界で少なくとも八つ進められている。現在、アメリカ、英国、韓国で、ES細胞由来の網膜の細胞「網膜色素上皮細胞」*1を用いた臨床試験が行われている。これらの臨床試験は、主に、「加齢黄斑変性」と「スターガルト病」という眼病を対象としている。これらの眼病は、網膜の中央部（黄斑とよばれる）に異常が生じて視力が低下したりする病気である。また、ES細胞の臨床応用は、視力回復を目的としたものだけではない。フランスではES細胞由来の細胞を用いた虚血性心疾患の治療試験がはじまっている。

ES細胞の臨床応用は、これまで他家移植向けだった。しかし、2013年5月に、自家移植にも応用できる、患者の遺伝情報をもつヒトES細胞をつくる画期的な方法が、アメリカのグループにより科学雑誌『Cell』に報告された。この細胞は「クローンES細胞」とよばれている（右の図上側）。作製されたクローンES細胞は、脾臓細胞や造血細胞、心筋細胞、肝細胞、神経細胞に分化したという。その後、別の2グループが追試を行い、成人や糖尿病患者の細胞核を使ったクローンES細胞作製に成功した。クローンES細胞は患者の遺伝情報を持ち、自家移植に応用可能である。しかし、女性から卵子の提供を受けなければならない（投薬や外科手技が必要）こと、また、クローン胚をこわす意味で倫理的懸念はある。

iPS細胞については現在、臨床試験が、世界で唯一、日本の理化学研究所の高橋政代博士らにより行われている。その臨床試験は、加齢黄斑変性の治療を目的とするものだ（右の図下側）。この臨床試験では、iPS細胞を「網膜色素上皮細胞」という網膜の細胞に変化させ、これをシート状に培養し、患者の黄斑に移植する。北海道大学安全衛生本部の石井哲也特任准教授は「この臨床試験の結果次第で、iPS細胞を用いる再生医療の今後の進展が大きくなるでしょう」と話す。🍎

*1：このES細胞由来網膜色素上皮細胞は、アメリカのAdvanced Cell Technology (ACT)社による製品である。

クローンES細胞の作製方法

他人の細胞であるES細胞から目的の細胞や組織をつくって移植する治療は、基本的に拒絶反応をさけられない。

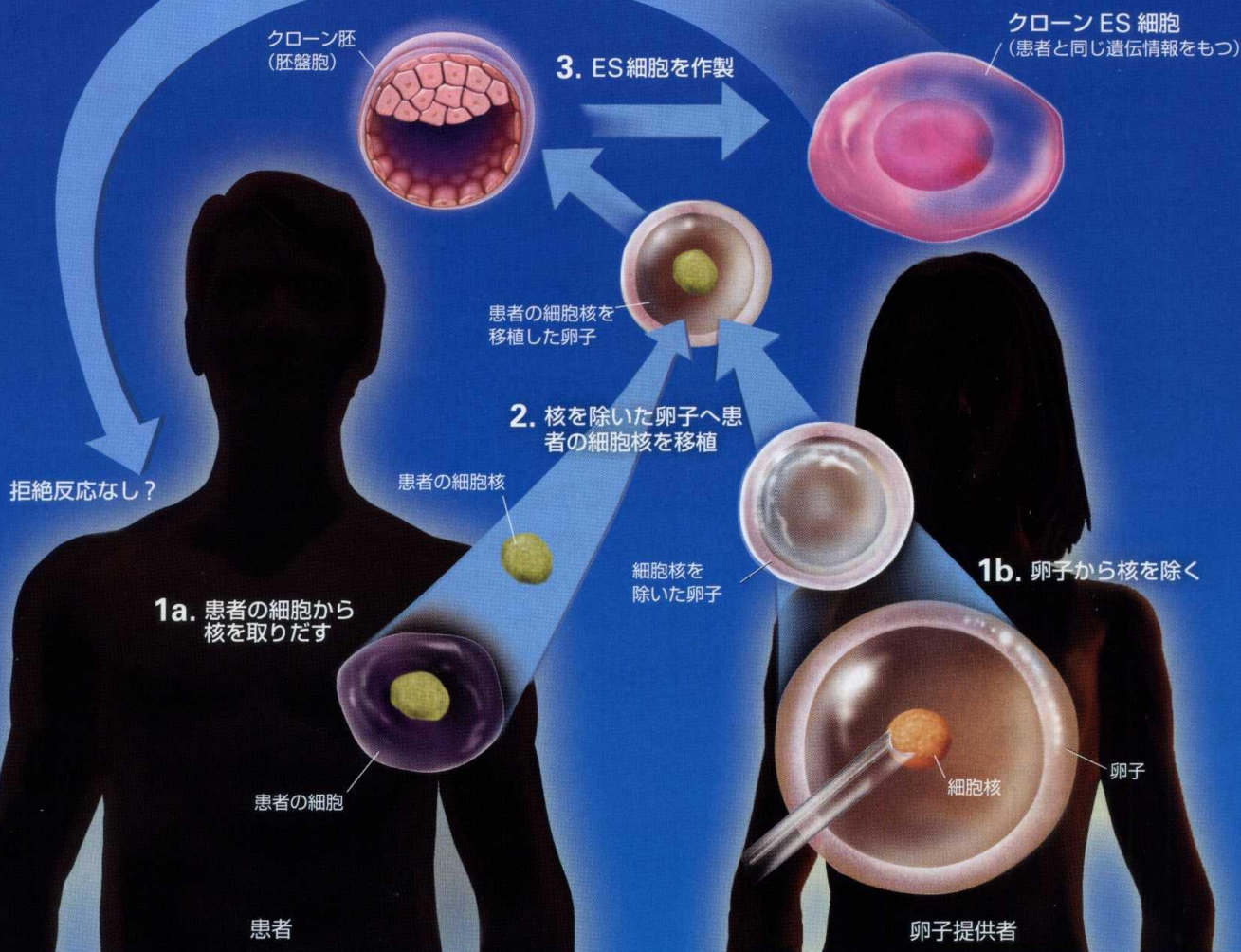
この拒絶反応をさけられる可能性がある「クローンES細胞」というES細胞をつくる方法が、2013年に報告された。クローンES細胞をつくるには、まず患者の細胞の核を取りだす(1a)。一方で、卵子の細胞核を取り除いておき(1b)、患者の細胞の核をかわりに移植する(2)。その卵子を成長させた「クローン胚」内部の細胞塊から、ES細胞を作製する(3)。これが患者と同じ遺伝情報をもつクローンES細胞となる。

クローンES細胞から目的の細胞や組織をつくって移植すれば、それは患者自身の細胞や組織と同様の遺伝情報を持ち、拒絶反応はおきないと考えられている。

iPS細胞を用いた「加齢黄斑変性」の臨床試験

理化学研究所の高橋政代博士らによる「加齢黄斑変性」の臨床試験の概要をイラストにあらわした。まず、患者の体細胞からつくったiPS細胞(1)を「網膜色素上皮細胞」に変化させ、網膜色素上皮細胞以外の必要ない細胞を除いて純化したのちにシート状にする(2)。そして、このシートを患者の網膜に移植する(3)。

4. 必要な細胞や組織
をつくって移植



iPS 細胞

1. iPS 細胞を作製

患者の皮膚などの細胞から iPS 細胞をつくる。

2. 細胞をシート状に

iPS 細胞を網膜色素上皮細胞に変化させ、網膜色素上皮細胞以外の必要ない細胞を除いて純化したのちにシート状にする。

網膜色素上皮細胞のシート



網膜色素上皮細胞の役割

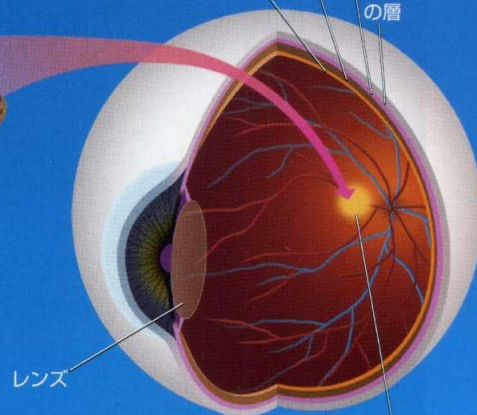
網膜色素上皮細胞の層は、神経の層と血管の層の間にある。古くなった神経細胞の分解などの重要な役割をはたす。

3. 網膜へ移植

シートを必要な大きさに切りとり、網膜中央部の黄斑に移植する。

切りとったシート

網膜色素上皮細胞の層 (茶色)
神経の層 (黄色)
血管の層 (ピンク)
強膜 (白眼) の層



注：薬剤を使い、必要な遺伝子をはたらかせることで、iPS 細胞は特定の細胞に変化する。

生物の創生にいどむ若者たち

大腸菌の遺伝子組換えで新たな生物を創生する世界大会

世界中の若者たちが、新たな能力をもつ大腸菌をつくろうとしのぎをけずっている戦いがある。「iGEM」とよばれる合成生物学の世界大会だ。2014年に開かれる大会には、世界各国から246チームが参加予定だという。若者たちは、遺伝子を組み合わせて大腸菌に入れ、自分たちの思いえがく能力をもたせようと、奮闘する。こうして生みだされる大腸菌は、若者ならではの斬新な発想の賜物であり、将来、研究や産業分野で応用される可能性を秘めている。

協力：木賀大介 東京工業大学 大学院総合理工学研究科・地球生命研究所准教授

iGEM2012大会（本選）の集合写真



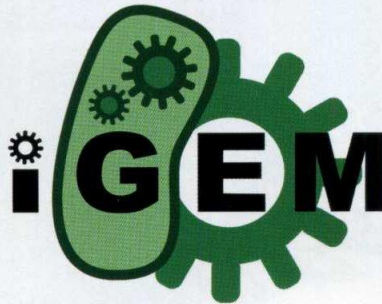
iGEM2012大会の本選は、アメリカ、マサチューセッツ州ケンブリッジで2012年11月2日から5日にかけて開かれた。アメリカ、アジア、ヨーロッパ、ラテンアメリカから、計71チームが出場した。（出典：the iGEM Foundation and Justin Knight）

毎年、初夏から秋にかけ、世界中の学生たちによって、合成生物学の熱い戦いがくり広げられている。「iGEM」とよばれる大会だ。iGEM (International Genetically Engineered Machine competition) は、大学の学部生が主体でチームを組み、新しい生命システムを構築して競い合う、合成生物学の世界大会である。学生たちは、遺伝子の“部品”を組み合わせ、思い通りの生命システムをつくり上げる。彼らが生命システムを築くために用いるのは、「遺伝子を組換えた大腸菌」だ。

iGEMが生まれたのは、2003年の1月である。マサチューセッツ工科大学 (MIT) における授業の一環として1か月間のプログラムが行われたのだった。翌年2004年には、このプログラムは5チームによる夏の大会に発展し、2005年には13チームによる初の国際大会となった。その後、年とともに参加チーム数はうなぎ登りにふえ、2013年には204チームにまでふえた(下のグラフ)。2014年は246チームが参加予定である。2012年には、iGEMはマサチューセッツ州ケンブリッジに位置する非営利組織になった。また、この年には、合成生物学そのものを競う大会に加え、合成生物学を利用したビジネスモデルなどを考え、競い合う大会も新たに始まった。

iGEMには、日本からも多くの大学が参加している。過去の参加校には、北海道大学、東京工業大学、東京大学、東京農工大学、首都大学東京、千葉大学、京都大学、京

iGEMのロゴマーク



大腸菌と歯車がえがかれているiGEMのロゴマーク
(出典: the iGEM Foundation)

都工芸繊維大学、大阪大学などがある。

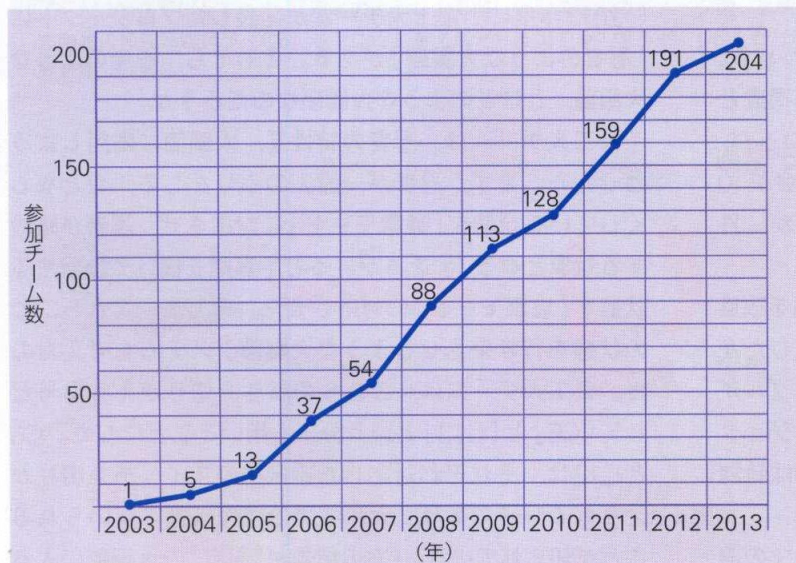
わずか2か月あまりで大腸菌の生命システムの“骨子”をつくる

iGEMは、どのような流れで行われるのだろうか。

毎年、2月から5月にかけて、その年に開催されるiGEMの登録受付が行われる。登録が完了すると、参加するチームには、生命システムの構築に必要な遺伝子の部品(以下、遺伝子部品)が配られる。

学生たちは、まず、大腸菌を用いてどういった生命システムを構築するかについてテーマを決める。たとえば、「ヒ素を検出する大腸菌をつくる」などだ。つづいて、構築する生命システムを実現するために、数理モデルを書く。また、それと並行して、テーマに沿った大腸菌を構

iGEMの歩み



iGEMが2003年に発足してから2013年にいたるまでの参加チーム数の変遷をグラフにあらわした。2005年には国際大会がはじめて開かれ、その後、参加チーム数は年々増加した。2011年から2014年の間には、アメリカ、アジア、ヨーロッパなどの地域に分割して地方予選がはじめて開かれた。

MITの授業の一環として発祥したiGEMは、現在では非営利組織として運営されている。

iGEM2010大会の授賞トロフィー



写真は、iGEM 本選で授与される、トロフィーの数々。決勝では優勝、準優勝、3位が決定される。また、各部門（8部門）ごとの賞もある。（出典：iGEM and Justin Knight）

築するための実験を行う。学生たちは、配布された遺伝子部品を改良したり、新たに遺伝子部品をつくったりして、それらを組み合わせ、「改良生命システム」をもつ大腸菌をつくる。

なお、大会までの実験期間はわずか2か月間ほどだ。その間に、テーマに沿った大腸菌を完成させることはむずかしい。そのため、実際には、構築したい大腸菌のシステムの一部を実験で実証し、得られたデータをコンピューターシミュレーションに組みこむことで、そのシステムがほんとうに“動く”かどうかを予測する。

チームは、10月からはじまる大会までの期間、大腸菌のシステムの内容やプロジェクトの進行状況を、ウェブサイト上で公開する。また、大会当日に行われる口頭発表とポスター発表に向けて準備を行う。

10月になると、いよいよ、iGEMの大会が行われる。2011年以降、iGEMは、地方大会と本大会の二部構成となっている。まず、世界各地域（2013年はヨーロッパ、アジア、ラテンアメリカ、北アメリカ）で地方大会が10月に行われ、3倍～4倍の倍率を勝ちぬいたチームが、11月にMITで行われる本選に進む。

地方大会では、目的の達成度（既存の遺伝子部品を改良したかどうかや他チームの活動にも大きな貢献をしたかどうかなど）によって、金メダル、銀メダル、銅メダルが授与される。さらに、すぐれたウェブ上でのプロジェクトの発表やポスター発表、口頭発表などに対しては特別賞も授与される。

本選では、プロジェクト全体のすばらしさ（テーマの選

定から、遺伝子部品の新規性、構築した大腸菌のシステムについての発表、そのシステムの実現性や重要性、社会とのかかわりなど）にもとづいて決勝に進出するチームが選ばれ、優勝、準優勝、3位が決定される。iGEMは八つの部門（①Food & Energy Project, ②Environment Project, ③Health & Medicine Project, ④Manufacturing Project, ⑤New Application Area, ⑥Foundational Advance, ⑦Information Processing Project, ⑧Software Tool）に分けられており、この部門ごとの賞もある。この賞は、チームの発表内容にもとづいて授与される。

2014年は、例外的に地方大会がなく、全チームが本大会に出場できる。2014年は、10月30日から11月3日の日程で、ボストンにて本大会が行われる。

情報伝達分子を使って大腸菌の状態を切りかえる

iGEMにこれまで参加している、数ある日本のチームの中で、東京工業大学（以下、東工大）のチームはアジアからの初参加となる2006年から過去8年連続出場している歴史あるチームだ（2006年は、東京大学と慶應義塾大学との連合チーム）。また、Information Processing 部門の最優秀賞を過去3回、金賞を7年連続受賞している。この最優秀賞の数がトップクラスであるだけでなく、金賞の連続受賞の成果は世界でもナンバー1だ。この、歴史と実績を合わせもつ東工大iGEMチームの2013年度の取り組みを紹介しよう。

2013年度に、東工大チームが発表したプロジェクトに「忍者のような大腸菌」がある。そもそも、忍者のような大腸菌、とはどのような大腸菌なのだろうか。

東工大チームは、忍者の特性を、大腸菌に応用しようと考えた。まず、忍者が一般人のふりをして、おとなしくしている状態を「通常モード」に対応させ、忍者が暗殺する対象となる侍をみかけると手裏剣を投げて攻撃する状態を「攻撃モード」に対応させた。そして、これら二つの状態を行き来させるような大腸菌システムを考えただ。東工大チームは、これらの状態を切りかえる信号として「C6」と「C12」という分子を用いることにした。C6とC12は、それぞれ対応した遺伝子のスイッチを切りかえられる分子であり、大腸菌間の情報伝達に用いられることが知られている。C6の信号が“忍者”の大腸菌に入る

iGEM2013での受賞のようす



iGEM2013における、東工大チームの集合写真。この大会で、チームはInformation Processing部門の最優秀賞を受賞した。

と、この大腸菌は「通常モード」になり、C12の信号が入ると、「攻撃モード」になるようなストーリーを考案したのだ(下のイラスト参照)。ここで、C6を出すのは“一般人”の大腸菌で、C12を出すのは“侍”の大腸菌である。

しかし、実際には、C6とC12は構造が似ており、本来C6が対応するDNA領域にC12が対応してしまうという問題があった。この問題は、クロストークとよばれる。つまり、“侍”がやってきても“忍者”は攻撃しないという

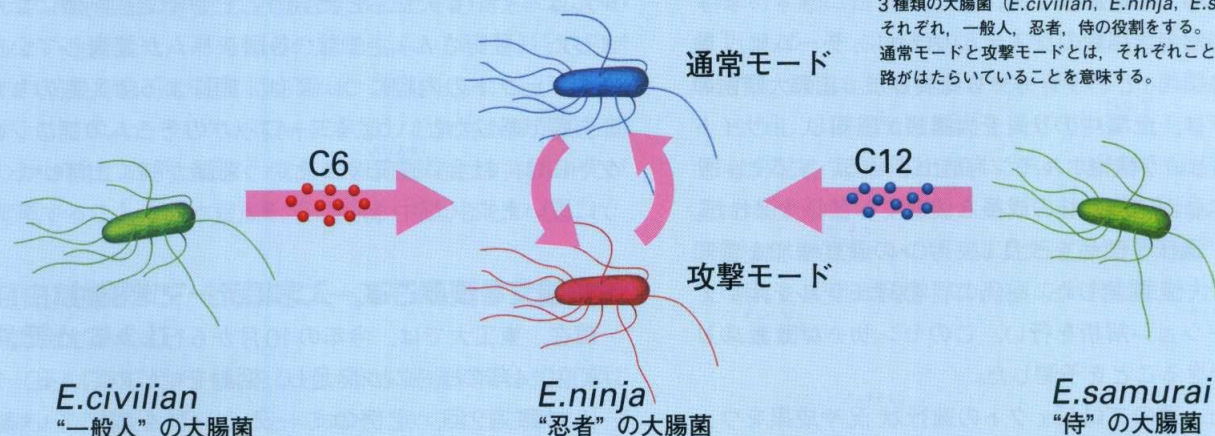
ことがおきてしまうことになる。

この問題を解決するために、東工大チームは新たな遺伝子を遺伝子回路に組み入れ、C12による信号が“忍者”大腸菌に入っても「通常モード」にならないようなシステムを考えた。そして、その回路の一部分である、クロストークにかかわる遺伝子部品を実際につくり、クロストークが実際におきないことを実験で確かめた。

なお、実験期間は2か月間ほどであり、考案した忍者

iGEM2013での発表作品例(忍者のような大腸菌, 英語名はNinja State Switching)

iGEM2013で出品された、「忍者のような大腸菌」のシステムのイメージ図。二種類の大腸菌(それぞれ一般人, 侍と名づける)が、忍者役の大腸菌に情報伝達分子「C6」と「C12」をそれぞれ放出する。すると、C6を受け取った場合と、C12を受け取った場合とで、忍者大腸菌の状態が切りかわる。



3種類の大腸菌 (*E.civilian*, *E.ninja*, *E.samurai*) はそれぞれ、一般人、忍者、侍の役割をする。通常モードと攻撃モードとは、それぞれことなる遺伝子回路がはたらいっていることを意味する。

組換え大腸菌の作製



製作段階の大腸菌。左の大腸菌には赤色の蛍光タンパク質（RFP）が、右の大腸菌には緑色の蛍光タンパク質（GFP）が組み込まれている。蛍光タンパク質が発する蛍光の強度から、組みこんだ遺伝子部品のはたらきを調べるができる。（iGEM2014 に出品を予定）

大腸菌システムの一部しか再現できない。そのため、東工大チームは数理モデルを用いて、この忍者大腸菌の遺伝子回路をモデル化した。そして、C6とC12を加えてから、大腸菌の通常モードと攻撃モードが時間経過とともにどのように変化するかをシミュレーション解析した。その結果、構築した遺伝子回路は予想通りにはたらき、C6とC12によって忍者大腸菌の通常モードと攻撃モードの状態をうまく切りかえられることが予測されたという。

つづいて東工大チームは、この忍者大腸菌がC12を受け取って攻撃モードになると、「手裏剣」を投げるといふしくみを考えた。そして、この手裏剣に相当するものとして、「M13 ファージ」という大腸菌に感染するウイルスを用いることにした。M13 ファージは、大腸菌に感染し、その大腸菌から出てきて、またほかの大腸菌に感染するという性質がある。

チームは、信号を受け取るとM13の放出が誘導されるような新しい遺伝子部品をつくり、その遺伝子部品が実際に機能することを実験で確かめた。

これらの忍者大腸菌のシステムのほかに、チームは、「農業を行う大腸菌」というテーマも発表した。この大腸菌のシステムでは、土壌中のリンを大腸菌が感知し、「サイトカイニン」という植物ホルモンを放出させる。すると、サイトカイニンが植物の枝の成長を促進するという流れだ。チームは、遺伝子部品を改良し、リンの濃度増加を感知するセンサーを開発した。さらに、数理モデルを用いてシミュレーション解析を行い、このセンサーが微量のリンを感知できることを予測した。

こうした一連のプロジェクトの進行状況や成果をウェブサイト上や当日の大会で発表し、東工大チームはめで

大腸菌の機能を調べる機器



遺伝子組換え大腸菌の機能を調べるために用いる「フローサイトメーター」という機器。フローサイトメーターを用いると、大腸菌が発する蛍光の強度を調べることができる。画像左側に、サンプル注入部が、画像中央に、測定結果を映し出すコンピューターの画面が見えている。

たく Information Processing 部門の最優秀賞を受賞したのである。

2013年度の活動を振りかえって、チームメンバーの畑中恵菜さんと荻野紗良さんは次のように語る。「夏休みは、毎日朝から晩まで大学に来て、実験やデスクワークをしていました。たいへんでしたが、実験期間が短いので、今やらなければという気持ちで行っていました」。プロジェクトは、メンバーの意見をまとめていくリーダーと、実験を行って遺伝子部品を組み合わせしていくグループ、遺伝子組換え大腸菌を用いて、その性質を実験で検証するグループ、発表の準備をするグループなど、メンバーが役割分担をしながら進めていったという。「メンバーには、生物系の学生が多かったので、遺伝子パーツの組み立て実験はとても効率的に進みました」(畑中さん、荻野さん)。

世界各国の学生たちとのぎをけずった大会については、どのように感じただろうか。「自分たちと同じ研究をがんばっている人たちと出会うことができ、刺激になりました」(荻野さん)。また、各国チームが発表しているプロジェクトの内容については、国による考え方のちがひも肌で感じたという。「ヨーロッパのチームのプロジェクトには、社会に還元するという意識が強く出ていたように思います」(畑中さん)。

学術論文を読みこみ、入念にテーマを検討

現在、東工大では、今年の10月から行われる大会に向けて2014年のチームが発足し、活動をはじめている。チームは毎週2回、定例のミーティングを開いている。Newtonはこのチームミーティングを訪れ、今年のチー

ムのようなすを取材した(取材日:2014年6月17日)。

ミーティングに集まったメンバーは、14人。生物系や情報系の学部で学んでいる大学3年生が中心だ。皆、各自パソコンに向き合い、なにやら調べ物をしているようだ。チームを指導している東京工業大学大学院総合理工学研究科の木賀大介准教授によると、4月から6月にかけては、プロジェクトの内容を決める期間だという。チームは、どんな大腸菌をつくりたいかについて思い思いのアイデアを出していく。そして、その大腸菌のシステムが実際につくれるかどうか(実現性があるか)を検討する。その際に、基盤となる研究成果があるかどうか、学術論文を読んで調べることが必要となる。また、プロジェクトを決める際には、過去の論文や大会で発表されたものと重複しない(新規性がある)ことも重要だ。

ミーティングでは、各自がプロジェクトの内容の検討結果を発表する時間が設けられる。学術論文を読むなどして1回の発表の準備にける時間は平均5、6時間におよぶという。メンバーの一人は、「はじめは英語の論文を読むことがたいへんでしたが、だんだんと楽しくなってきました」と話す。また、ミーティングで各自がアイデアを出し合うことで、議論が深まっていくのが楽しいという声も聞かれた。

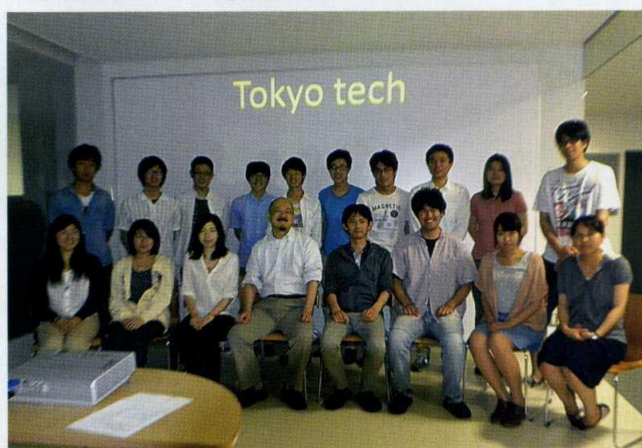
木賀准教授によると、チームは、プロジェクトの内容の検討と並行して、大腸菌システムの構築に必要な実験の練習も行っているという。その後、試験休み期間を経て、8月後半から本格的に実験を行い、9月ごろから発表の準備をして本大会にのぞむ予定だ。

メンバーの一人は、自分と同じ分野やちがう分野を学んでいる他国の学生と交流できることを心待ちにしているという。また、海外からの留学生メンバーは、「iGEMでの成果を自分の国に持ち帰り、友人たちに伝えたいです」と話す。こうしてiGEMに参加した学生たちが国と国のかけ橋となり、将来、海外の研究機関との共同研究が実現することを、木賀准教授は期待しているという。

自由な発想で、社会のニーズも満たした生命システムづくり

iGEM東工大チームをひきいる木賀准教授は、指導にあたって重視していることについて、次のように話す。「プロジェクトのテーマを検討する際には、学生にいか

iGEM2014東工大チーム



iGEM2014のチームメンバーと、iGEM2012、iGEM2013の参加者、およびチームの指導にあたる木賀大介准教授(前列左から4番目)と鮎川翔太郎特任助教(前列左から5番目)。

由に考えてもらうかを意識しています。しかし、何でもよいというわけではなく、社会とのかかわりをもったテーマであることを認識させるようにしています」。近年の活動では、他大学やサイエンスカフェで一般の人と交流し、一般の人からもらったさまざまな意見をプロジェクトに反映するようにしているのだという。

木賀准教授によると、世界に通じるテーマであることも重要だという。たとえば、iGEM2012では、メンバーの杉山拓生さんによる「大腸菌に東工大生らしい恋をさせよう」という発案が、だれもが知っているロミオとジュリエットを演じる大腸菌というテーマに仕立てられ、出品された。

さらに、木賀准教授は、こうした課外活動においても科学の手順に沿うように意識して、指導しているという。たとえば、テーマを検討する際に第三者の原著論文を参照する、綿密な対照実験をかならず行う、といったことだ。

こうしたiGEMの活動を通じて、学生たちは科学的な思考方法や実験手法を身につけ、自分たちが思いえがく新たな大腸菌のシステムをつくりだす。活動で得られた経験は、みずからの将来にとって大きな糧となり、生みだされた成果は科学界の発展の大きな原動力となっていくにちがいない。

7

地球外生命

協力 倉本 圭／井田 茂

地球上の生物は、細胞でできており、遺伝情報であるDNAをもち、外から栄養を取り入れて代謝し、自分自身を複製してふえる。しかし、もし地球とはことなる環境で進化した生物が地球外にいたとしたらどうだろうか？ それは地球型の生物とはちがう特徴をもっていて、もなんら不思議ではないだろう。いったい地球外に生命はいるのだろうか？ また、惑星が生命を宿す条件とはどのようなものだろうか？ PART7では、地球以外の惑星にも生命がいる可能性があるのかどうかを、みていこう。

条件1：水の存在 ①～②

条件2：惑星のタイプ

条件3：惑星の大きさ

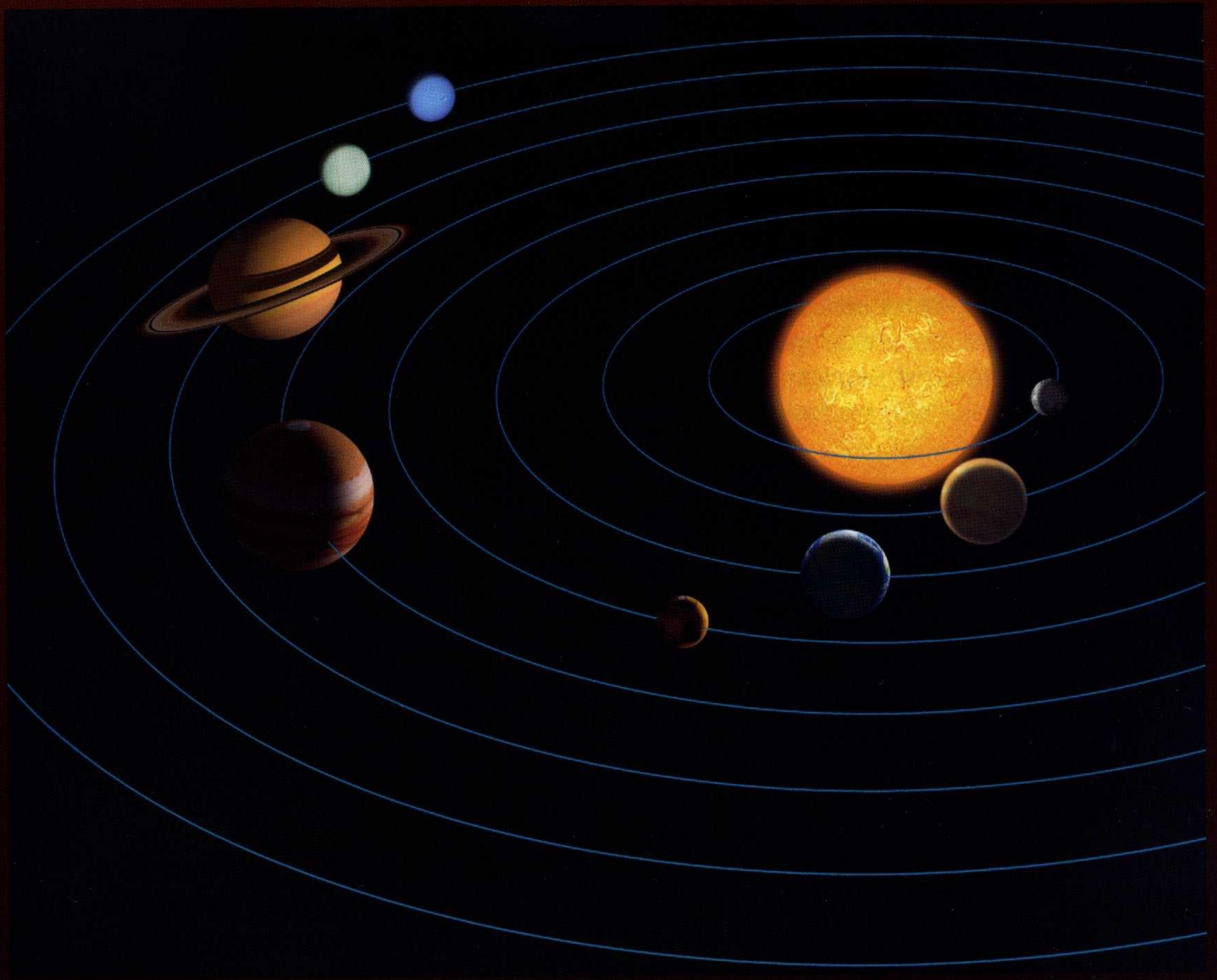
条件4：巨大ガス惑星の数

条件5：恒星の寿命

条件6：銀河中心からの距離

衛星の生命

地球外生命は存在するか？



液体の水は、生命活動の基盤

生命にとって、あるいは少なくとも地球型の生命にとって必要だと考えられている条件のうち、最も重要だとされているのは、「液体の状態の水」の存在だ。

なぜ液体の水が重要なのだろうか。理由はいくつかあるが、液体の水はさまざまな物質をとかしこむことができるというのが、大きな理由だ。たとえば生命がその命を維持するには、さまざまな化学反応が必要となる。多くの物質をとかしこむことが可能な液体の水は、このような化学反応を引き起こすための場をあたえてくれているのである。あるいはさまざまな物質を体の中で移動させる際にも、液体の水に托かして移動させれば非常に効率がよい。

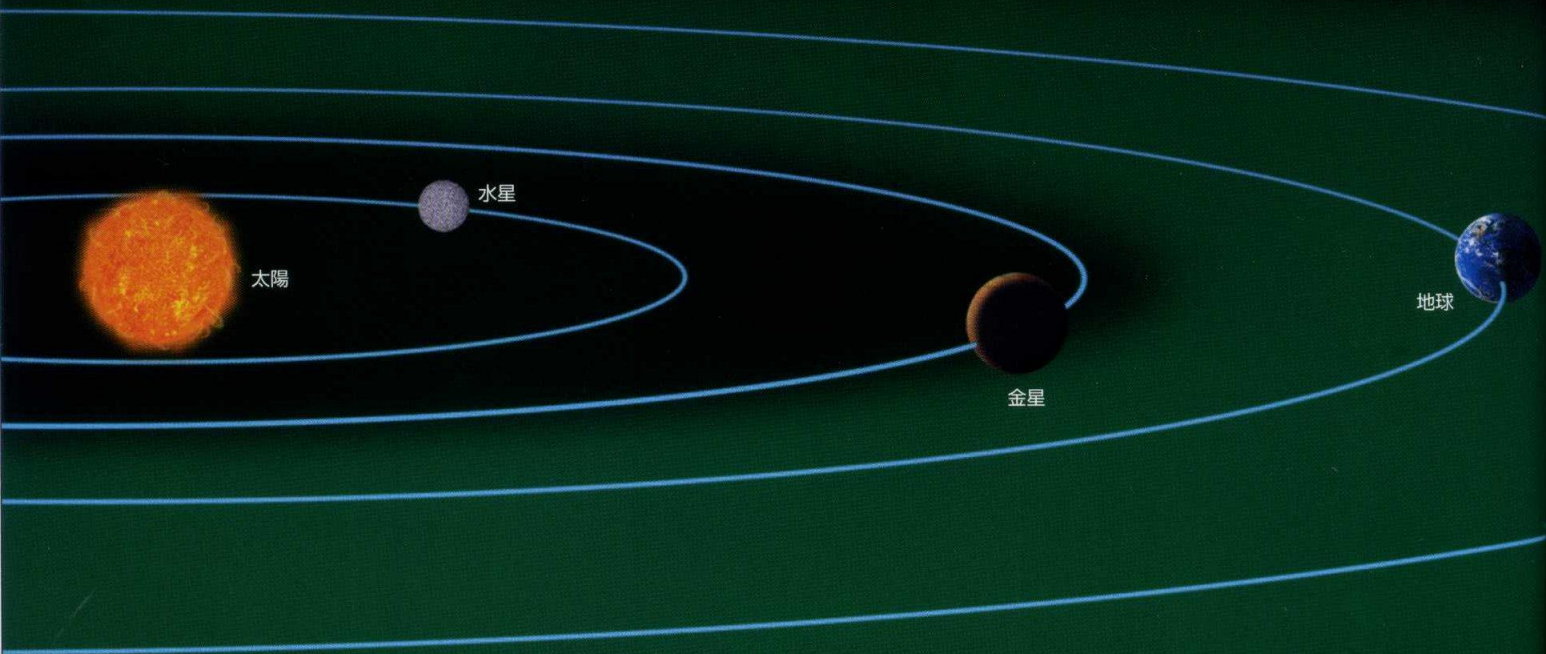
では、地球以外の生命についても同様に、液体の水が必ず必要なのだろうか。これについては、現時点ではわかっていない。地球以外の生命がみつからないからだ。ひょっとしたら宇宙には水を必要としない生命も存在するかもしれない。しかしまずは、地球の生命にならって、液体の水を必須の条件として話を進めよう。なお、ここでいう生命とは、知能をもった高等生物に限らず、細菌のような微生物も含めることにする。

液体の水が存在できる領域とは？

では、液体の水が存在できるのはどのような惑星だろうか。

太陽系のハビタブル・ゾーン

緑色の領域は、液体の水が存在可能で生命が存在しうる領域のことである「ハビタブル・ゾーン」のおおまかな範囲を示している。



太陽系を例にして考えてみよう。太陽系の中心には、いうまでもなく太陽がある。太陽はみずから光り輝く恒星だ。そのまわりには、八つの惑星が太陽をほぼ中心にして公転している。内側から順番に、水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星である。これらの惑星のうち、現在、その表面に液体の水が存在しているのは、私たちの地球だけだ。

惑星の表面に液体の水が存在できるかどうかを決める要素の一つが、「中心の恒星からの距離」である。地球よりも少し太陽に近い金星では、太陽に近すぎて、その表面に液体の水は存在できない。また地球よりも外側を公転している火星では、表面の水は凍りついてしまう。太陽系の場合、液体の水が存在できる領域は、金星の公転軌道と火星の公転軌道の間にあるようだ。

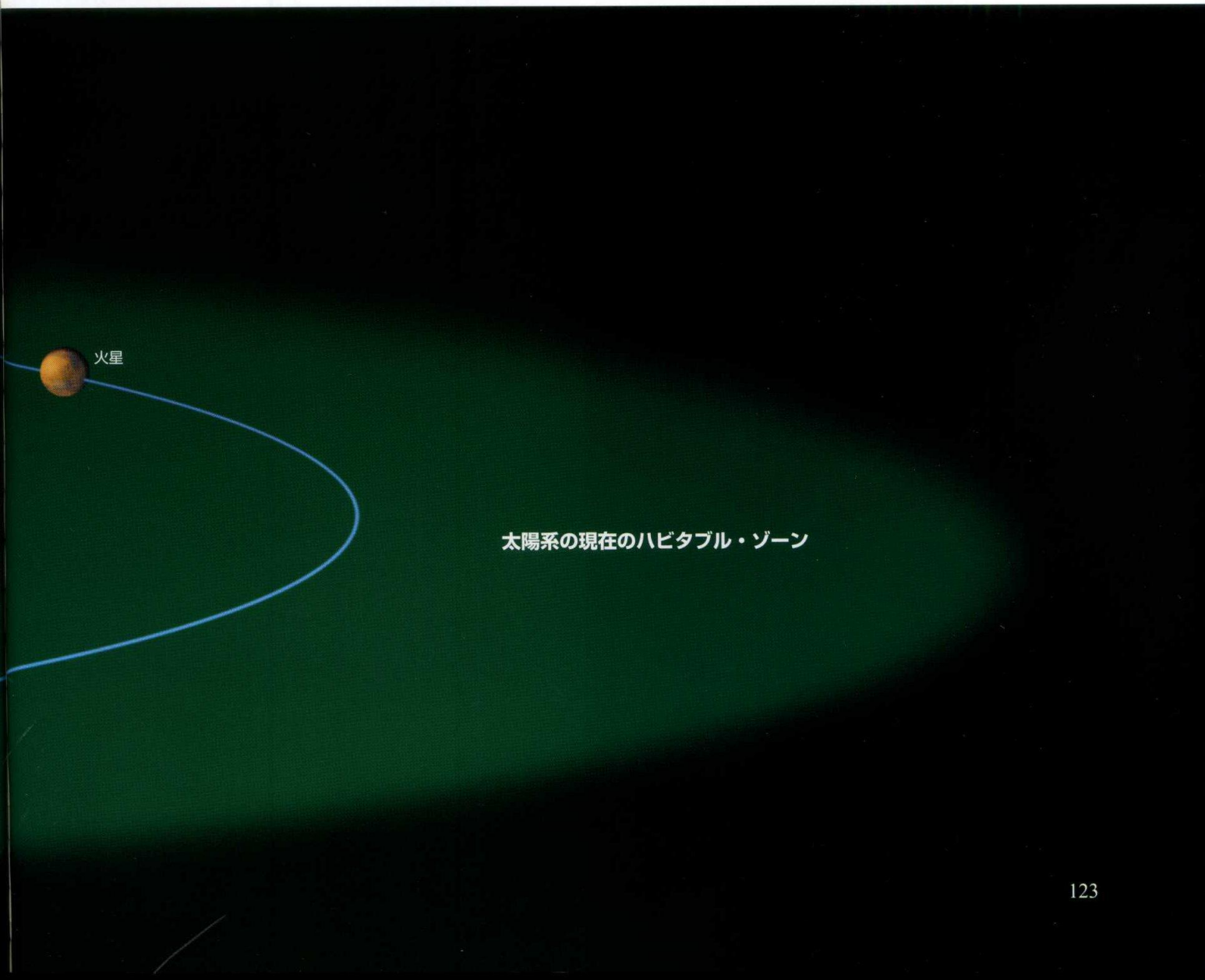
このような、その場所に惑星があったときにその表面に液体の水が存在できる領域のことを「ハビタブル・ゾーン（生命居住可能領域）」とよんでいる。地球もこの範囲に含まれている。

地球と太陽の距離（約1億5000万キロメートル）は太陽系などの距離をあらわすときの基準として使われており、これを1天文単位（1AU）という。太陽系のハビタブル・ゾーンは、非常におおざっぱに言えば、0.7AU（金星の公転軌道）と1.5AU（火星の公転軌道）の間にあるわけだ（下の図）。

かつて海が存在した惑星、火星

現在、太陽系で表面に液体の水をもっているのは地球だけである。その外側の軌道を公転する火星では、極地方に氷があることのみが確認されており、表面に水は確認されていない。

しかし過去には、火星にも海があったと考えられている。そのため火星では、過去に生命が存在していた可能性がある。また現在も、生命の痕跡や、あるいは生命そのものが地中に残っているかもしれない。そのため火星は、生命探査の有力候補にあげられている。



太陽系の現在のハビタブル・ゾーン

条件1：水の存在 ②

さまざまな条件が「液体の水」がある範囲を決める

ハビタブル・ゾーンの範囲は、さまざまな条件で決まる。たとえば、「**中心の恒星の明るさ**」。暗い恒星はエネルギーの放出量が小さく、明るい恒星はエネルギーの放出量が多い。このため、中心の恒星が暗い星ならばハビタブル・ゾーンはより内側に、そして明るい星ならばより外側に移る（下の図）。たとえば太陽の4分の1の明るさの恒星のまわりのハビタブル・ゾーンは、おおむね太陽系の場合の2分の1の距離にある。また、太陽の2倍の明るさの恒星のハビタブル・ゾーンは、太陽系の場合のおよそ1.4倍外側にある計算となる。

惑星の陸地が、「液体の水」の維持にかかわっている

また、「**惑星そのものの状態**」によっても、その範囲は大きく変化する。惑星表面のほとんどが液体の水におおわれた「海惑

星」と、ほとんどが陸の「陸惑星」を考えてみよう（右ページ下の図）。

海惑星が恒星の比較的近く（ハビタブル・ゾーンの内側の境界付近）を公転しているとしよう。この場合、液体の水が蒸発することで大量の水蒸気が生じる。水蒸気は、惑星の熱が宇宙へと逃げていくのをさまたげる「温室効果」が非常に強い物質だ。このため恒星の近くをまわる海惑星では、温室効果の暴走によって灼熱の状態になりやすい。いったん暴走状態になってしまうともう歯止めはきかず、液体の水はすべて蒸発してしまうことになる。

一方、陸惑星の場合は、蒸発した水蒸気が大気の運動によって気温の低い極地方に運ばれ、そこで水や氷となってとどまる効果がはたらくので、海惑星の場合にくらべて灼熱の状態には

ハビタブル・ゾーンは恒星の明るさによってかわる

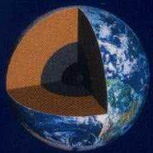
恒星が明るい場合

ハビタブル・ゾーンは外側により、範囲は広くなる

恒星が暗い場合

ハビタブル・ゾーンは内側により、範囲はせまくなる

中心の恒星の明るさは、その恒星が放出しているエネルギーの量と関係している。このため恒星の明るさ次第で惑星が受けとる熱の量が変化し、結果としてハビタブル・ゾーンも変化するようになる。



惑星は「岩石型」が のぞましい

ひと言で惑星といっても、そのタイプはさまざま。太陽系を例にとれば、そのタイプは大きく分けて三つある。水星、金星、地球、火星は「**岩石型惑星**」、木星と土星は「**巨大ガス惑星**」、天王星と海王星は「**巨大氷惑星**」である(右の図)。

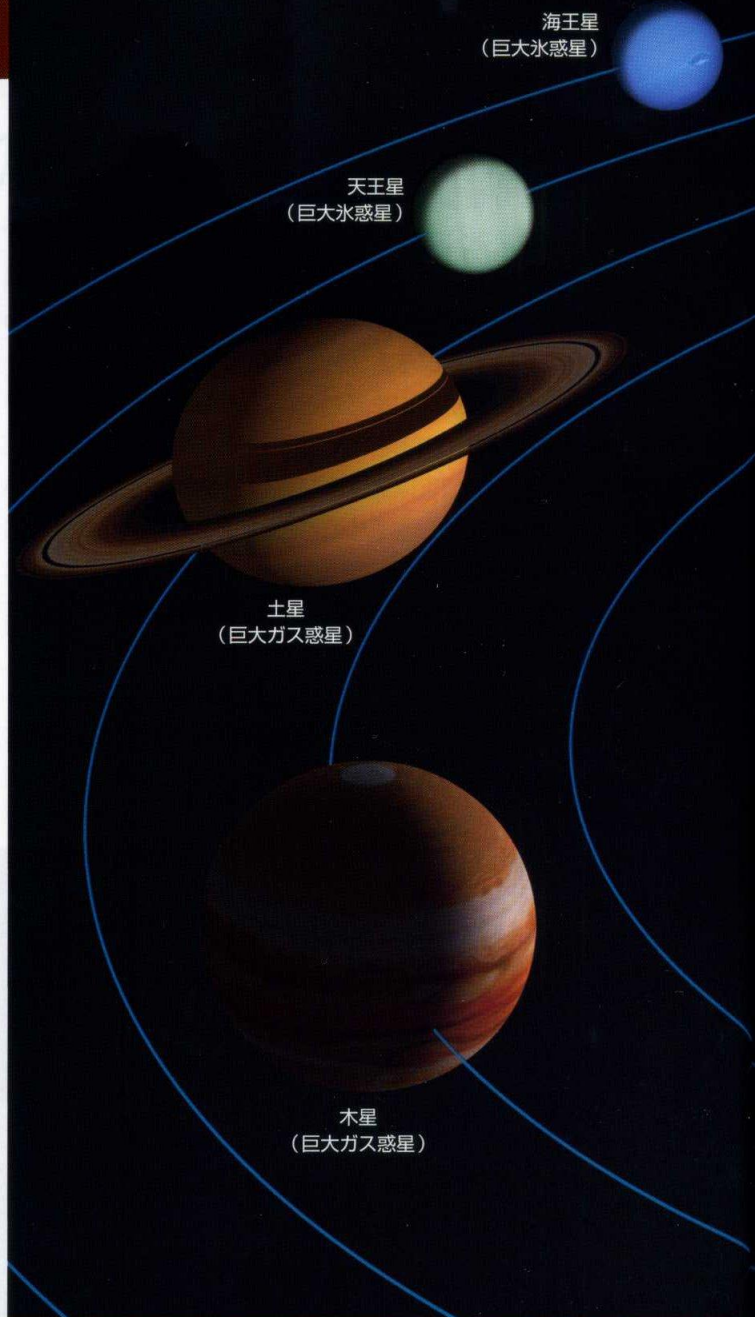
惑星が誕生するとき、その材料には、多くの場合である程度の水が含まれていると考えられている。また惑星の誕生後にも、その惑星系(恒星と惑星などの一団)の外縁部から、**彗星**などがやってきて惑星に水を供給すると考えられている(惑星の形成過程については130～131ページで紹介する)。つまり**惑星は、いずれのタイプでも、程度の差こそあれ、もともとある程度の水をもっているのである。**

岩石型惑星は、外側に岩石、内側に金属の核をもった構造をしている。岩石型惑星の場合は、岩石に含まれた水が火山活動によって惑星の内部から放出されるなどして、表面にたまることになる。このため岩石型惑星では表面に液体の水が存在できる可能性がある。ただし、どれくらいの量の水があるかや、長期間にわたって安定して液体の水を維持できるかどうかは、さまざまな条件に左右される。**岩石型惑星であれば必ず液体の水が存在するとはかぎらないが、それがハビタブル・ゾーン内にあり、また液体の水が安定して維持される場合には、生命を宿す可能性があることになる。**

巨大ガス惑星は、外側は主に水素の厚い大気、内側に金属のようにふるまう水素の層があり、中心には岩石と氷でできた核がある。このような惑星では、液体の水は存在するとしても大気層のごく一部、しかも雲の粒子や雨粒の形としてであるため、生命を宿す可能性は低いという。

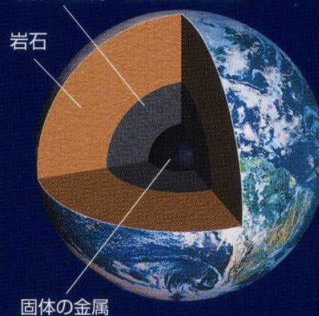
巨大氷惑星はどうか。太陽系の外縁部にある天王星と海王星は、外側を水素などの大気、その内側に大量の「氷の層」、中心に岩石の核をもった構造をしている。天王星や海王星のような惑星でも、巨大ガス惑星と同様、液体の水は大気のごく一部でしか存在できないと考えられている。

また、ここまでで紹介した3種類の惑星とはことなる、新しいタイプの惑星がありうることがわかってきた。たとえば、ハビタブル・ゾーンに、巨大な水玉のような惑星が存在している可能性があるという。深い深い海をもった、大部分が液体の水という風変わりな惑星である。このような惑星に生命が宿るかどうかについては不明だ。

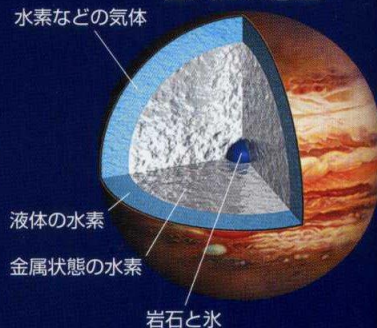


太陽系でみられる三つの惑星のタイプ

液体の金属 岩石型惑星



巨大ガス惑星

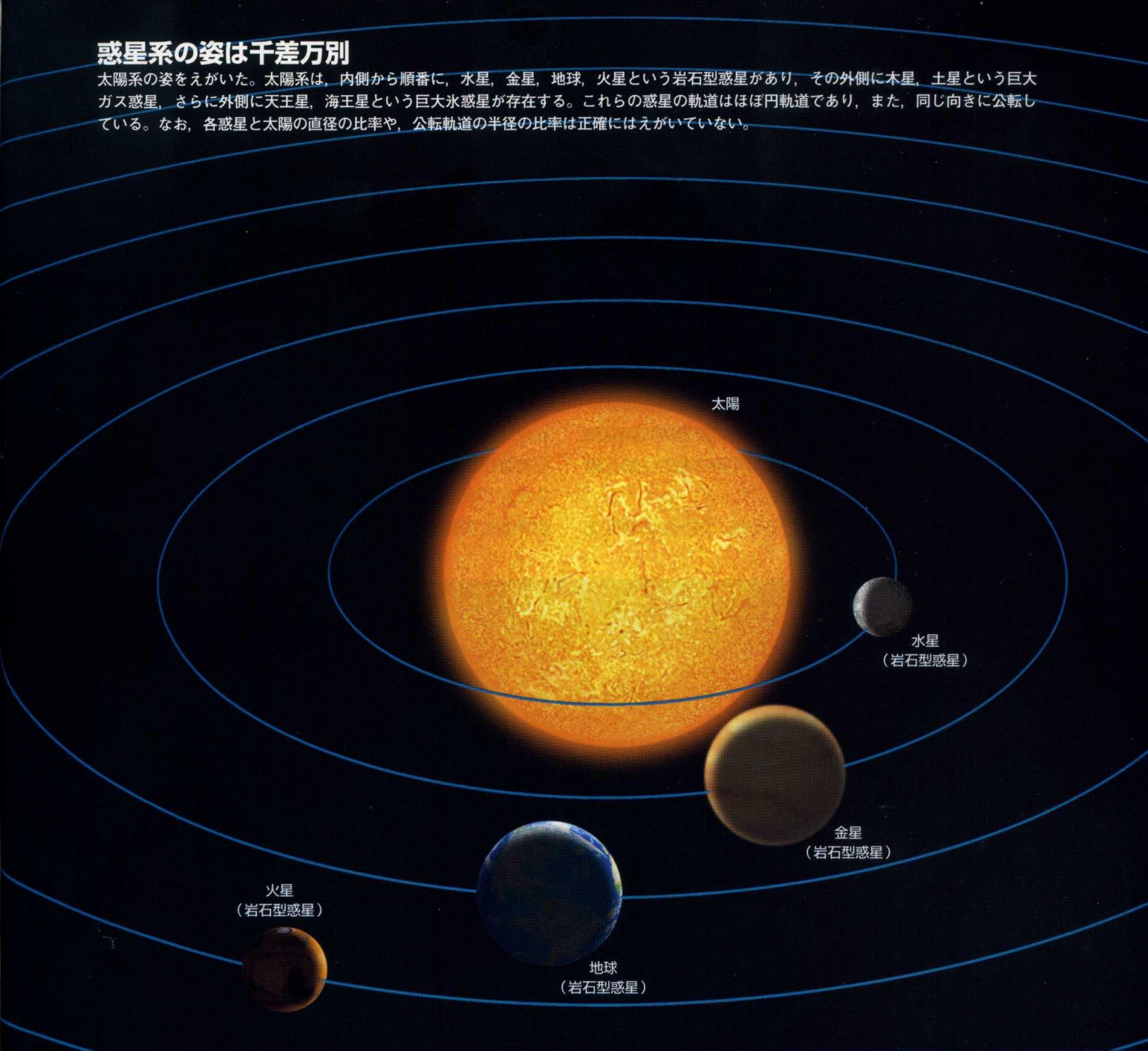


外側に岩石、内側に金属の核をもつ。太陽系では水星、金星、地球、火星がこのタイプである。条件がそろえば、表面に液体の水が安定して存在できる。

大部分が水素からなる巨大な惑星。外側には主に水素の大気、内側には高い圧力のため金属のようになった水素、中心には岩石や氷からなる核がある。核の部分だけで地球の10倍ほどの重さがあると推定されている。

惑星系の姿は千差万別

太陽系の姿をえがいた。太陽系は、内側から順番に、水星、金星、地球、火星という岩石型惑星があり、その外側に木星、土星という巨大ガス惑星、さらに外側に天王星、海王星という巨大氷惑星が存在する。これらの惑星の軌道はほぼ円軌道であり、また、同じ向きに公転している。なお、各惑星と太陽の直径の比率や、公転軌道の半径の比率は正確にはえがいていない。



巨大氷惑星

水素などの気体

岩石

“氷の層”

材料段階では水やメタンの氷だったものが、
高温高圧の「超臨界流体」となったもの

大部分が氷からなる巨大な惑星。外側に主に水素からなる大気、内側には主に氷からなる層があり、中心には岩石と氷からなる核がある。太陽系の外側の天体ほど、氷の割合が高い傾向にある。



「巨大な水玉」惑星は、氷惑星からできる？

近年になって太陽系以外の惑星（系外惑星）がたくさん発見されるようになり、惑星や惑星系の姿は実に多様であることがわかりつつある。「巨大な水玉」惑星もその一つだ。

天王星や海王星は太陽系では外側をまわっているが、惑星系によっては、氷惑星が内側へと軌道をしてハビタブル・ゾーンに存在している可能性もありうるという。その氷惑星が天王星や海王星のようにガスをまとった巨大なものでない場合も考えられ、この場合、深い海をもった、大部分が液体の水からなる惑星となる。近年発見された地球の数倍の質量の惑星は、岩石型惑星だとする見方とは別に、このような氷惑星がとけた状態のものだとする説もある。



惑星は小さすぎず大きすぎず

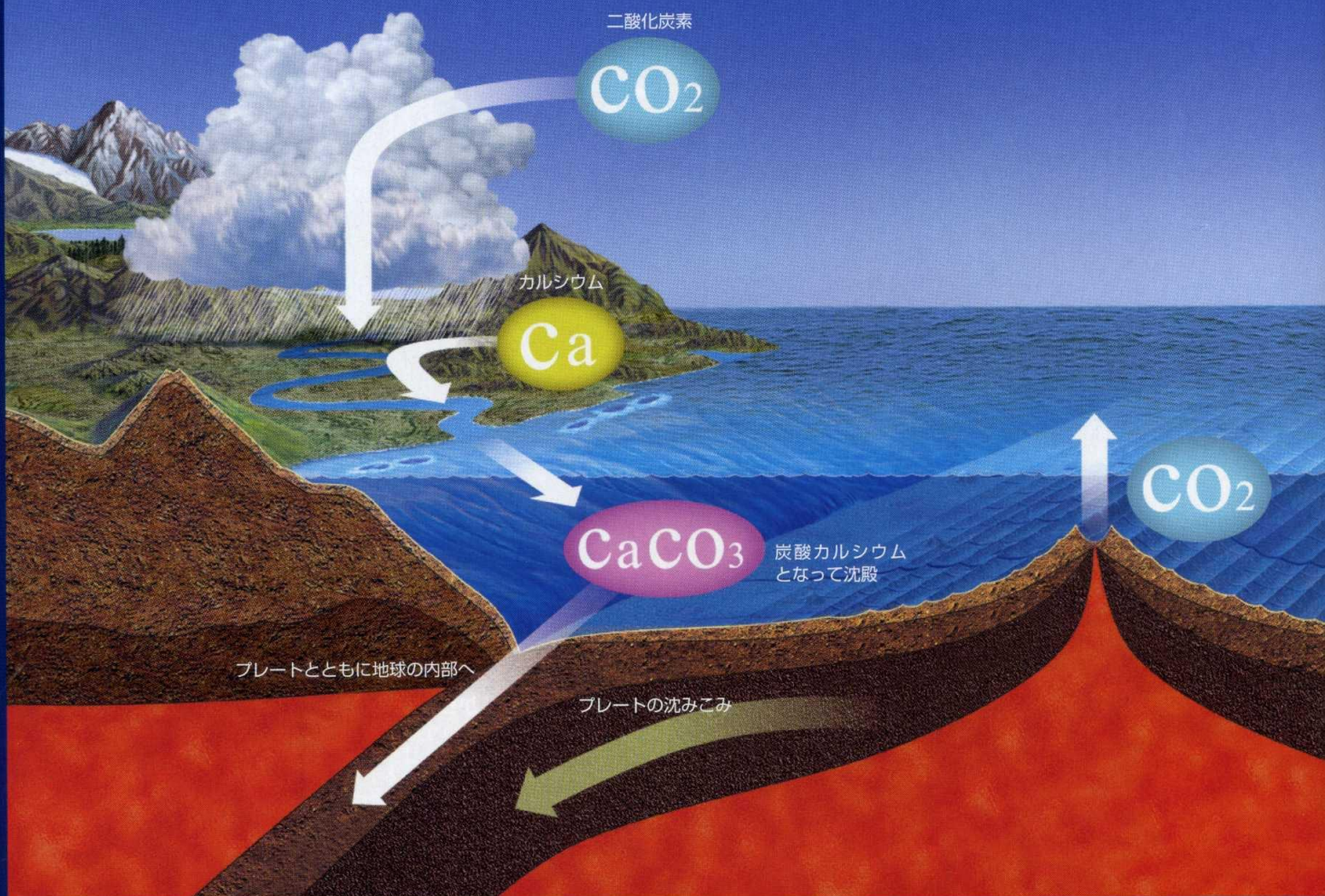
惑星の大きさも、生命が存在できるかを考えるうえで重要だという。まずは惑星が小さい場合を考えてみよう。小さな惑星は、十分な量の大气を保持しにくい。大气のない惑星は、生物を形づくる分子を破壊する宇宙線や紫外線が直接降り注ぎ、生命の生存には不向きであるとされている。また、惑星が小さいと、惑星の内部が冷えやすい。内部が冷えた惑星では火山活動がおきないので、惑星の大气の温度を保つ効果のある二酸化炭素などの供給がストップすることになる。

一方、大きな惑星についてはどうだろうか。現在の惑星形成

理論(130～131ページで紹介)では、初期の惑星がある程度の大きさになると、周囲からガスをどんどん取りこむようになり、木星のような巨大ガス惑星になると考えられている。そのため、液体の水は存在するとしてもごく一部だ。

また、巨大ガス惑星にはならなかったとしても、大きな惑星は全球が水におおわれやすいという。まず、多くの材料物質から惑星がつくられるので、水の量も多い。また、重力が強くなることで惑星の起伏が少なくなるため、地球の陸地部分のような周囲より高度の高い部分ができにくい。起伏の差が小さい惑

陸があることで、二酸化炭素の濃度が調節される



星表面は、大量の水におおわれてしまうのだ。そして、全球を水におおわれた惑星の気温は不安定になりやすいのだという。その原因は二酸化炭素だ。

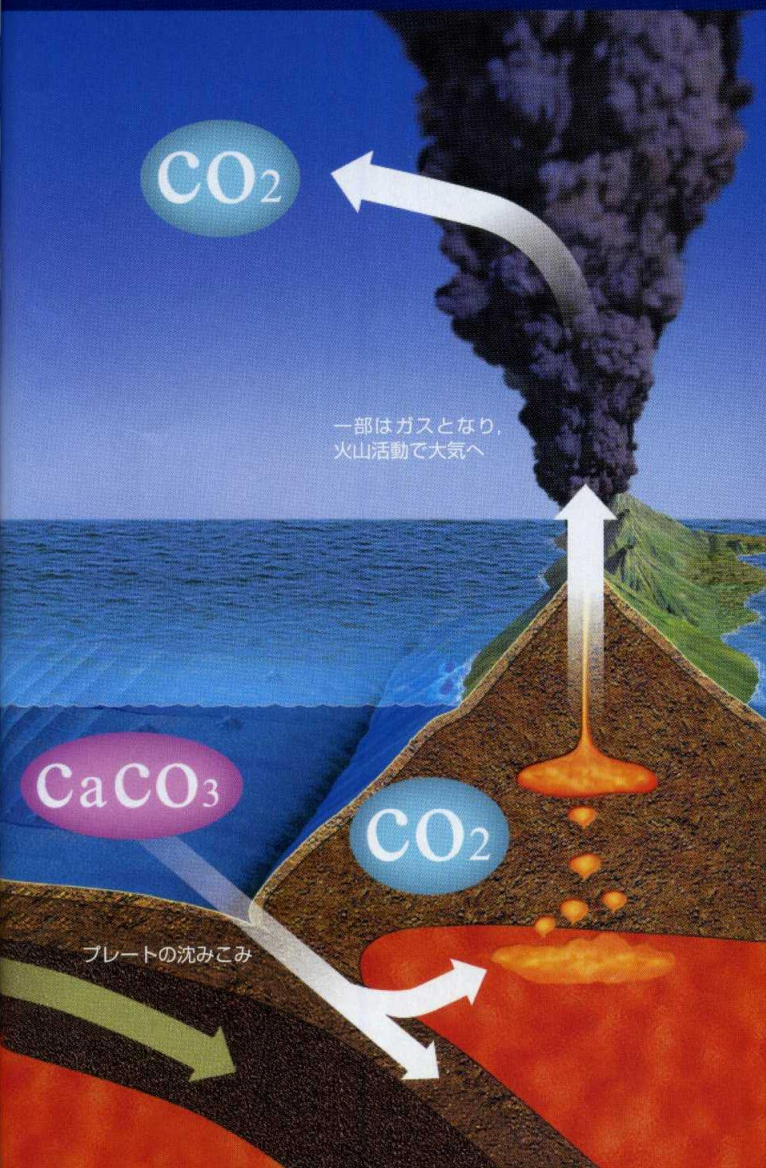
惑星では火山活動により、つねにその内部から二酸化炭素が供給されている。全球が水におおわれた惑星でも、海底火山があるので同じことだ。二酸化炭素は温室効果によって惑星を保温する効果がある。では、もし二酸化炭素が惑星内部から出てくれば取り除かれなくてどうなるだろうか。二酸化炭素の濃度はどんどん上がり、温室効果によって灼熱の惑星になってしまうだろう。全球が水におおわれた大きな惑星では、まさにこのようなことがおきると考えられている。

陸地は惑星の気温の自動調節装置

二酸化炭素は、雨水や海水にとけこんで一部は大気から取り

除かれるが、その量には限界がある。しかし、もし陸があれば、浸食作用によってカルシウムなどが陸からとけだし、これらと二酸化炭素が結合して海底に沈殿する。すると、海水に二酸化炭素がとけこむ余地がうまれる。陸がある惑星ではこうして継続的に二酸化炭素が大気から取り除かれるため、二酸化炭素の濃度がおさえられる。しかも、大気から二酸化炭素を取り除く機能は、惑星の気温が高いときは強くなり、気温が低いときは弱くなるので、惑星の気温が安定する。**陸地は、惑星の気温の自動調節装置の役割を果たしているのだ(下の図)。**

全球が水におおわれた惑星ではこのしくみがはたらかず、液体の水が存在できる期間が長続きしない可能性がある。惑星には、生命の生存に向けた、適度な大きさがあるのだ。



陸地が二酸化炭素の量を調節

二酸化炭素は、火山活動によってつねに惑星の内部から放出されている。陸地がある星では、この二酸化炭素の量を調節するしくみがはたっている。

まず、雨などによって陸地が浸食され、その際、カルシウムなどの物質がとけだす。カルシウムは海で二酸化炭素と結合し、炭酸カルシウムとなる。炭酸カルシウムは海底に沈殿し、「プレート運動」によって地球の内部に引きずりこまれる。このようにして、大気から二酸化炭素が取り除かれるのだ。

このメカニズムは気温が高いと化学反応の速度が上がったり降水量が増加したりすることによって強くはたらくように変化し、逆に気温が低いとはたらきが弱まると考えられている。つまり気温が高いときには二酸化炭素を取り除き、気温が低いときにはそのはたらきを弱め、火山活動によって二酸化炭素濃度が増加するのを待つ。こうして、二酸化炭素の量が調節されるのだ。

巨大ガス惑星の数は二つまで

ここまで、惑星が生命を宿すための「惑星の条件」を紹介してきた。ここでは、惑星をとりかこむ「惑星系の条件」を見ていこう。

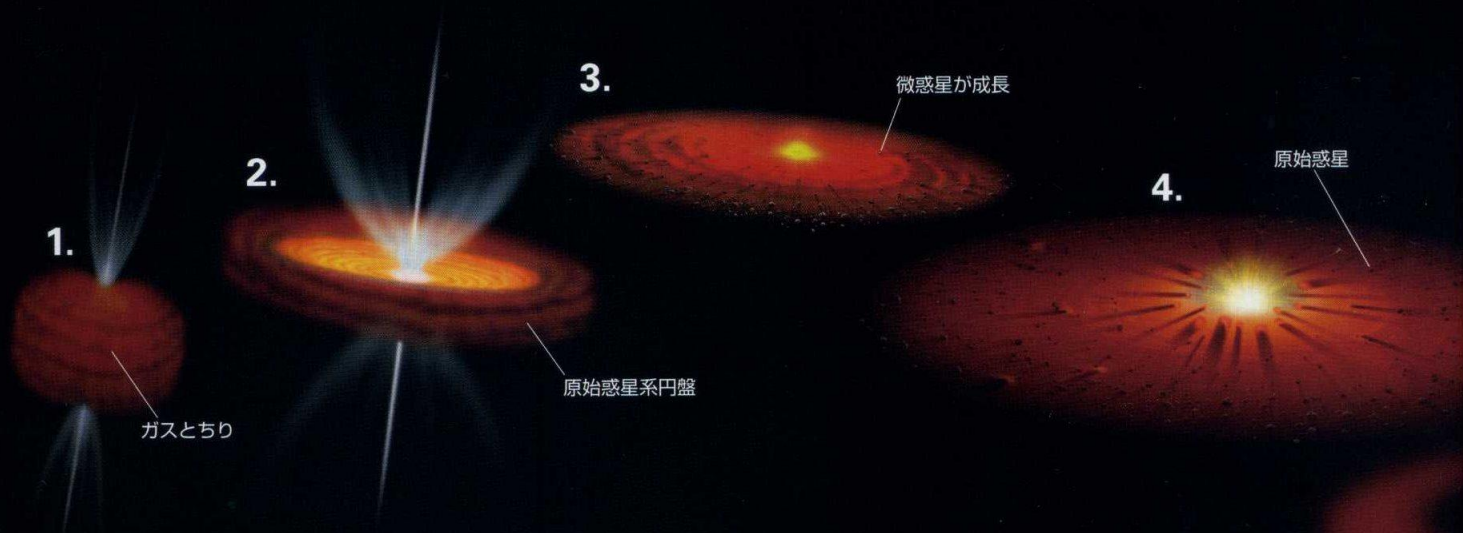
惑星系の条件は、「惑星系の中に巨大ガス惑星が多くないこと」である。巨大ガス惑星の数が一つかあるいは二つの場合はよい。ところが三つ以上の場合、比較的短期間のうちに、巨大ガス惑星どうしがたがいにおよぼす重力の影響による軌道の乱れが大きくなり、巨大ガス惑星の公転軌道が極端な楕円に変化するのだ。こうなると、巨大ガス惑星にくらべて小さな惑星たちはひとたまりもない。巨大ガス惑星につられるようにして軌

道を大きく乱し、場合によっては宇宙の彼方に向けて飛びだしていったり、あるいは中心の恒星や巨大ガス惑星に衝突して消滅してしまったりするのだ。

最初の物質が多いと、巨大ガス惑星がしやすい

まずは、惑星系のでき方を簡単に見ていこう(下の図)。惑星系は、水素などのガスや、ちり(固体成分)が集まってできる。まず、ガスやちりは、まわりながら円盤状(原始惑星系円盤)になる。そのうち、円盤の中でちりがたがいにくっつき、いくつかの惑星ができる。太陽系の場合は、内側に岩石型、外側に

太陽系ができるまでの過程とは？



恒星と惑星系の材料は、宇宙空間をただようガスとちりである。あるとき、近くでおきた超新星爆発(132ページで紹介)による衝撃波により、ガスとちりの濃い部分ができる。その部分は周囲よりも重力が強いため、周囲からガスとちりが集まってくる(1)。また、ガスとちりは回転運動をするようになる。ガスとちりは重力でちぢもうとするが、遠心力がはたらくために、薄い円盤状(原始惑星系円盤)となる。原始惑星系円盤の中心では、生まれたての恒星が輝きはじめる(2)。一方、原始惑星系円盤では、ちりどうしがくっつきあって成長していく。ちりの成長は原始惑星系円盤の内側のほうが早く進む。やがてちりは微惑星へ(3)、原始惑星へと成長する(4)。さらに衝突を重ねて、原始惑星系円盤の内側に地球のような岩石型惑星ができあがるのである。一方、円盤のガスは内側から消えていく(5)。

外側でも、惑星の卵の成長は進んでいく。内側とことなるのは、その成長が遅いことと、材料となるちりが多いことだ。岩石型惑星の質量が地球のおよそ10倍程度になると、惑星自身の強力な重力により、原始惑星系円盤のガスが惑星にどんどん流れこむようになる。こうして惑星は大量のガスをまとい、木星や土星のような巨大ガス惑星が誕生する。

さらにその外側では、氷を主成分とする惑星の卵が、さらに遅れて成長している。ところがこの惑星の卵が巨大ガス惑星へと成長する準備がととのうころには、原始惑星系円盤はほとんど消えかかっている。この消えかけの円盤のガスを取りこんで成長したのが巨大氷惑星である天王星と海王星であり、両者は木星や土星ほどには大きくなれなかった(6)。以上が太陽系の歴史のあらましである。

二つの巨大ガス惑星、その外側に氷惑星ができた。

この巨大ガス惑星の数はどのようにして決まるのだろうか。「それは**最初の『原始惑星系円盤』に集まった物質の量**によって決まるようです」(倉本博士)。

円盤の内側では、外側にくらべて物質の総量が少なく、惑星の卵が周囲からガスを取りこむようになるほど成長しない。しかし、原始惑星系円盤の物質が多い場合は、円盤の内側でも、巨大ガス惑星へと成長できる。一方、円盤の外側でも、物質が多いために惑星の卵の成長速度が上がり、円盤が消える前にガスを取りこんで、巨大ガス惑星へと成長できる。

原始惑星系円盤の物質の量が多いほど巨大ガス惑星の数がふえ、少ない場合は巨大ガス惑星が存在しない惑星系となる場合もあるらしい(右ページの図)。太陽系は両者の中間的な性質と

いうことになる。太陽系の原始惑星系円盤の物質がもう少し多かったら、たとえば天王星が巨大ガス惑星となったかもしれない。すると木星、土星、天王星の合計三つが巨大ガス惑星となり、巨大ガス惑星どうしの軌道の乱しあいによって太陽系の姿は現在のものとはまったくことなるものになったはずだ。

なお、巨大ガス惑星が一つも存在しない場合は、別の危機が惑星を襲う可能性があるという。惑星系の外縁部には彗星のもととなる天体がたくさん存在し、ときには惑星系の内部まで侵入することもある。これが惑星に衝突すると、そこにくらす生命にとっては危機となる可能性がある。巨大ガス惑星の大きな重力は、そのような天体の侵入を極力防いでくれている可能性があるという。ただしこれについては不明なことも多い。

原始惑星系円盤の物質が大量であるほど巨大ガス惑星ができやすい

円盤の物質が大量

円盤の物質が太陽系の場合と同程度

円盤の物質が少ない

巨大ガス惑星

岩石型惑星

巨大ガス惑星

巨大氷惑星

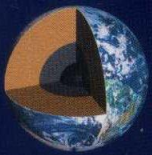
岩石型惑星

5.

円盤のガスが消失

原始惑星系円盤の物質の量のちがいで、その後につくられる惑星のタイプがどのように変化するかを示した。円盤の物質が大量である場合は、その円盤からできる惑星は巨大ガス惑星となりやすいと考えられている。一方、円盤の物質が少ない場合には、巨大ガス惑星はできず、岩石型惑星となる。また、外側ではガスをもたない氷惑星ができる。円盤の物質が両者の中間(太陽系と同程度)の場合は、内側に岩石型惑星、外側に巨大ガス惑星、さらに外側に巨大氷惑星ができると考えられる。

6.



恒星の寿命は10億年以上は必要!?

次に、惑星系の中心に存在する「恒星の条件」を見ていこう。
地球の年齢は、太陽とほぼ同じ46億年だと考えられている。
一方、地球に生命が誕生したのは、およそ38億年前、つまり
地球誕生から10億年未満のことである。地球の例を考えれば、
惑星の誕生から生命の誕生までの期間は、10億年もあれば十分
ということになる。

では、どんな惑星でも10億年以上の寿命が約束されている
かといえば、そんなことはない。それは中心の恒星の寿命に左
右される。

恒星の寿命を決めるのは、その質量である。大きな(重い)
恒星ほど寿命が短く、小さな(軽い)恒星ほど寿命は長い(下の
図)。これは、重い恒星ほど重力が大きいために中心部が圧縮

軽い恒星は寿命が長く、重い恒星は寿命が短い



されて高温になり、恒星を輝かせる「核融合」がはげしく進むためである。太陽の場合、寿命はおよそ100億年である。

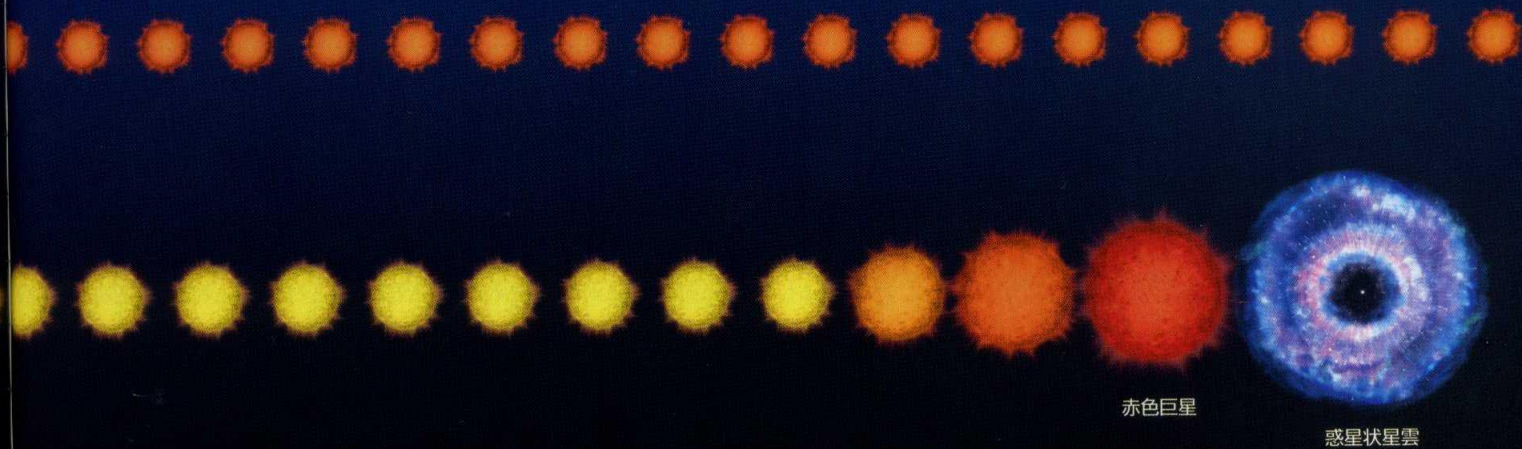
では、太陽より重い恒星の場合を考えよう。たとえば太陽の30倍の質量の恒星があったとする。このような恒星の寿命は1000万年程度しかない。この恒星にたとえ生命が存在するためのそのほかの条件を満たした惑星があったとしても、生命が誕生するには時間が短すぎるということになる。

太陽の2倍以下の質量の恒星なら寿命は大丈夫

太陽の2倍の質量の恒星があるとする。このくらいの恒星であれば、寿命は少なくとも10億年ほどはある。この恒星を公

転する惑星がこれまでに紹介した条件を満たしているならば、生命が誕生する可能性があることになる。これよりも軽い恒星なら寿命はさらにのびるので、生命誕生の可能性はさらに高まるだろう。

なお、恒星は一生の間に明るさが変化する。恒星の一生の9割を占める「主系列」とよばれる安定した状態の間に、明るさはおおよそ3倍にもなるのだ。その間、ハビタブル・ゾーンは徐々に外側に移っていくので、せっかく恒星の寿命が10億年あったとしても、惑星がハビタブル・ゾーンに入っている期間はこれよりも短くなる場合もある。



恒星は軽いほど寿命が長い。たとえば太陽の0.08倍の質量（恒星とよべる最小の質量）の恒星は、10兆年をこえる寿命をもつと考えられている。太陽と同程度の質量の恒星の寿命はおよそ100億年である。太陽の質量の2倍をこえると、恒星の寿命が10億年を下まわり、生命が誕生するのはむずかしくなる。

なお、質量が太陽の8倍をこえる恒星は、その一生の最後に超新星爆発をおこす。太陽の質量の30倍をこえると、恒星の死後にはブラックホールが残され则认为られている。太陽の約8倍以下の質量の恒星は、主系列の時代が終わると「赤色巨星」とよばれる状態にふくれあがり、その後は「白色矮星」となって冷えていく。また、質量が太陽の0.08倍以下の場合には核融合がおきないため、恒星とは区別して「褐色矮星」とよばれている。

中心も外側も、生命の誕生には適さない

惑星が銀河のどのあたりに位置するのかということも、惑星に生命が生息できるかどうかにかかわっているという。「銀河の条件」を見ていこう。

私たちの太陽系がある銀河系（天の川銀河）は、数千億個という膨大な数の恒星の集団である。銀河系全体の形は、直径約10万光年（1光年は光が1年間に進む距離）の巨大な薄い円盤のようであり、円盤の中央付近にはとくにたくさん恒星が集まってふくらんだ「バルジ」という構造をもっている。

銀河の中心付近は、そこにたくさんの恒星があることからわかるように、恒星の材料が豊富である。恒星の中には質量の大きなものも多く、これらは早い段階で寿命をむかえて超新星爆発をおこす。

超新星爆発がおきると、恒星の内部につくられた「重い原子」が宇宙空間にまき散らされる。つまり銀河の中心付近は、水素やヘリウム以外の重い原子が多く存在するのである。これは、次の惑星形成の際に固体成分（ちり）が多いということの意味する。

物質が豊富なら、固体成分の割合も高いため、この領域では惑星の卵の成長が早い。そのため、巨大ガス惑星が三つ以上の惑星系になりやすいことになる（130～131ページ）。そのような惑星系は軌道が乱れやすいので、生命を宿す条件がととのった惑星は誕生しにくいといえる。

また、周囲に恒星の数が多すぎることも、生命にとってよい条件ではない。恒星が多いと、近くで超新星爆発がおきること多くなり、爆発のたびに、放出された生物に有害な宇宙線にさらされることになるためだ。

では逆に、銀河の外側についてはどうだろうか。銀河の外側では、中心付近とは逆の状況である。つまり恒星や惑星の材料物質が少ないため、そもそも惑星が誕生しにくいのだ。

結局、**銀河の中で生命を宿す惑星が誕生しやすい「銀河のハビタブル・ゾーン」は、銀河の中心から近すぎず、逆に遠すぎもせず、適切な距離の帯状の領域ということになる。**私たちの太陽系も、まさにそのような領域に位置しているのだ（右の図）。

銀河のハビタブル・ゾーンとは？

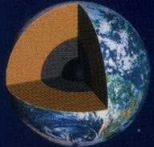
銀河の中で、生命の誕生に適した惑星がしやすい「銀河のハビタブル・ゾーン」は、銀河の中心から近すぎず、遠すぎない領域だと考えられている。私たちの太陽系は、銀河のハビタブル・ゾーンの中に位置する。

なお、この条件はあくまでも全体の傾向をあらわしたものであり、局地的には、銀河の中心付近や外側にも生命誕生の条件がととのった惑星が誕生する可能性はある。

銀河のハビタブル・ゾーンについては、まだあまり研究が進んでいないこともあり、わからない点も多いのが実情である。たとえば、銀河の種類は円盤形の渦巻き銀河だけでなく、球形あるいはラグビーボールのような形をした楕円銀河もある。楕円銀河で生命を宿す惑星が誕生しやすいかどうかについては、よくわかっていない。

銀河のハビタブル・ゾーン（オレンジ色の帯状の領域）

太陽系の位置



地球外生命は、衛星に誕生している!?

ここまでは惑星について議論を進めてきたが、実は宇宙で生命が誕生しうるのは、惑星だけではないかもしれない。「衛星」も生命を宿す可能性があるのだ。たとえば**ハビタブル・ゾーンの領域に巨大ガス惑星があったとして、その巨大ガス惑星のまわりを公転している衛星であれば、液体の水が存在できる可能性は高い。**

また、衛星の母天体（巨大ガス惑星など）がハビタブル・ゾーンになかったとしても、生命誕生の可能性は残されている。巨大ガス惑星のまわりを公転する衛星は、巨大ガス惑星の強力な重力により、つねに引きのばされるような変形を受けている。この「ちようせき潮汐力」によって衛星の内部には摩擦熱が生まれる。この熱のおかげで、本来凍りついているはずの衛星の内部がとけ、液体の水が安定して存在する可能性があるのである。

実際、私たちの太陽系にはこのような衛星がいくつかあることがわかっている。たとえば木星の衛星であるエウロパは、表面は厚さ数キロメートル以上の氷でおおわれているが、その内部では深さ数十キロメートル以上にわたって氷がとけており、液体の水が存在すると考えられている（右の図上側）。実際、この氷のひび割れから水が噴きだしたことを示す成果が2013年12月に発表された。エウロパには、地球の深海にあるような「ふんしゅつこう熱水噴出孔」のようなものも存在する可能性があり、そのような場所では生命が存在するかもしれないと考えられている。

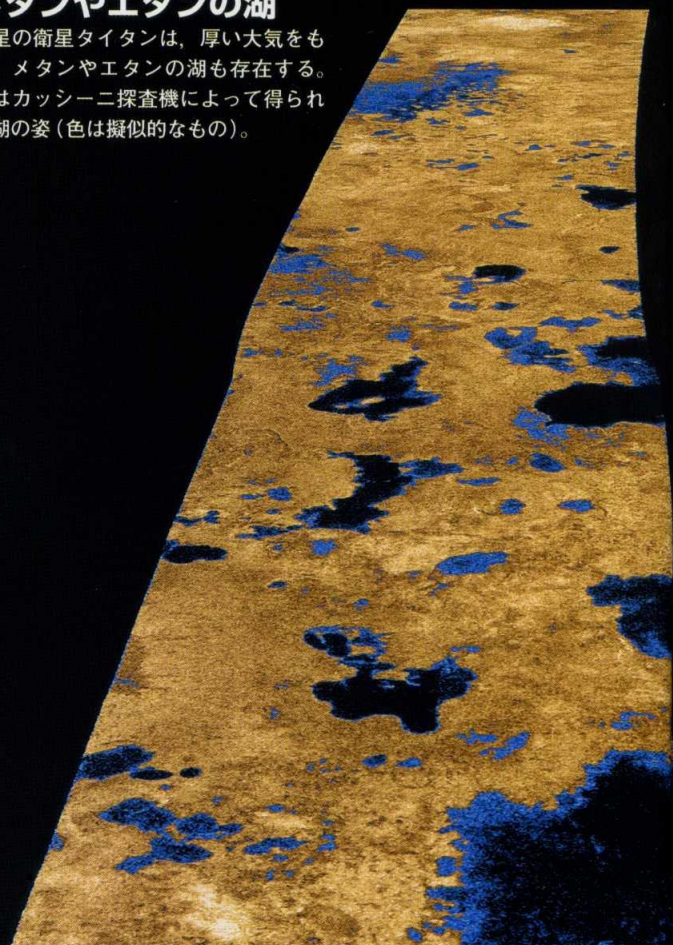
あるいは土星の衛星であるタイタンは、主に^{ちつそ}窒素からなる厚い大気をもっており、表面には液体のメタンやエタンの川や湖が存在するらしいことがわかっている（右の図下側）。ここでは地球とはことなるタイプの（液体の水以外を利用する）生命が存在する可能性も、否定はできないという。

私たちの太陽系の中にも、生命が存在する可能性がある天体があるというのは、実にわくわくする話だ。今後の探査に期待したい。



タイタンの表面にあるメタンやエタンの湖

土星の衛星タイタンは、厚い大気を持ち、メタンやエタンの湖も存在する。右はカッシーニ探査機によって得られた湖の姿（色は擬似的なもの）。



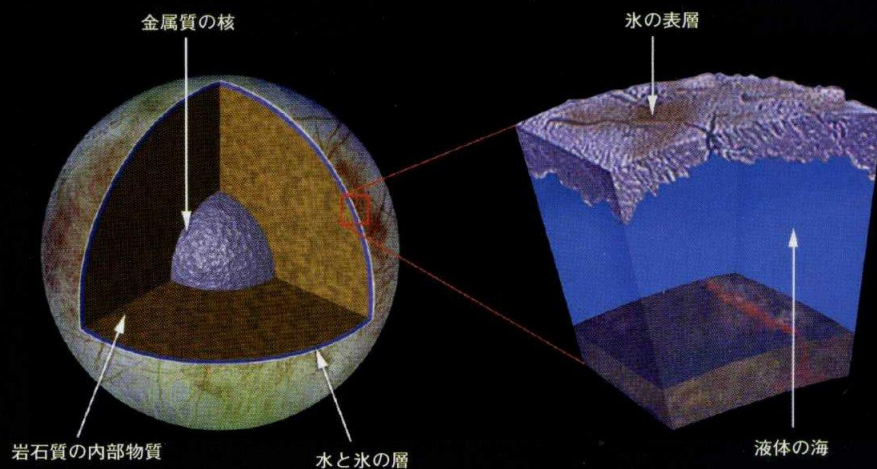
エウロパに海の証拠を発見か

左は、NASAの宇宙探査機「ボイジャー」と「ガリレオ」のデータによるエウロパの全球画像に、ハッブル宇宙望遠鏡の観測装置によるデータを重ね合わせてつくられた画像だ。

分析の結果、エウロパの南極付近に水素原子と酸素原子があり（画像の青い部分）、これらの分布が時間的に変動していることがわかった。これらの原子は、エウロパの表面にある氷のひび割れから水が噴きだし、それが分解してできたものだと考えられるという。

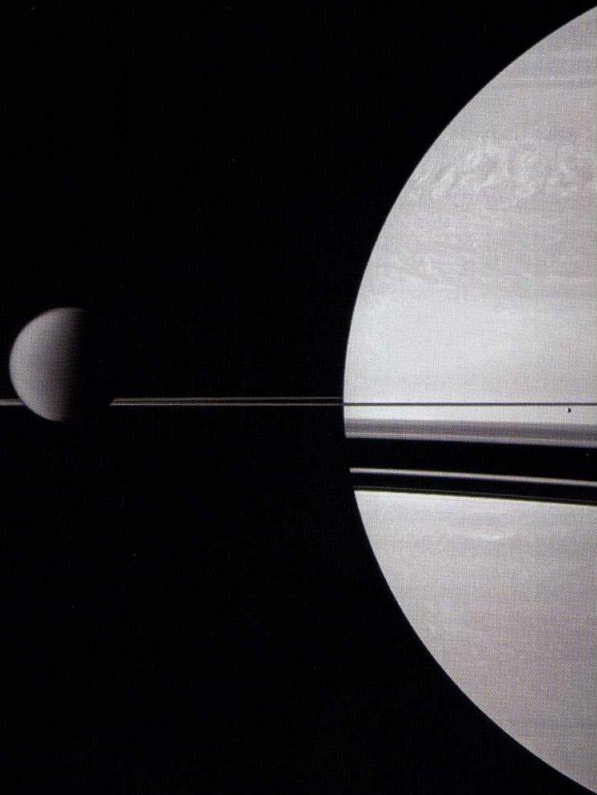
氷の下に海をもつ

現在予想されているエウロパの内部構造モデルの一つ。表面の氷の下に、100キロメートル以上の深さの海が存在している可能性が指摘されている。もしそうであれば、地球上の水の総量の約2倍の大量の水が存在することになる。



土星の衛星タイタン

土星の輪の手前にタイタンが見えるようすを、NASAの惑星探査機カッシーニがとらえた。



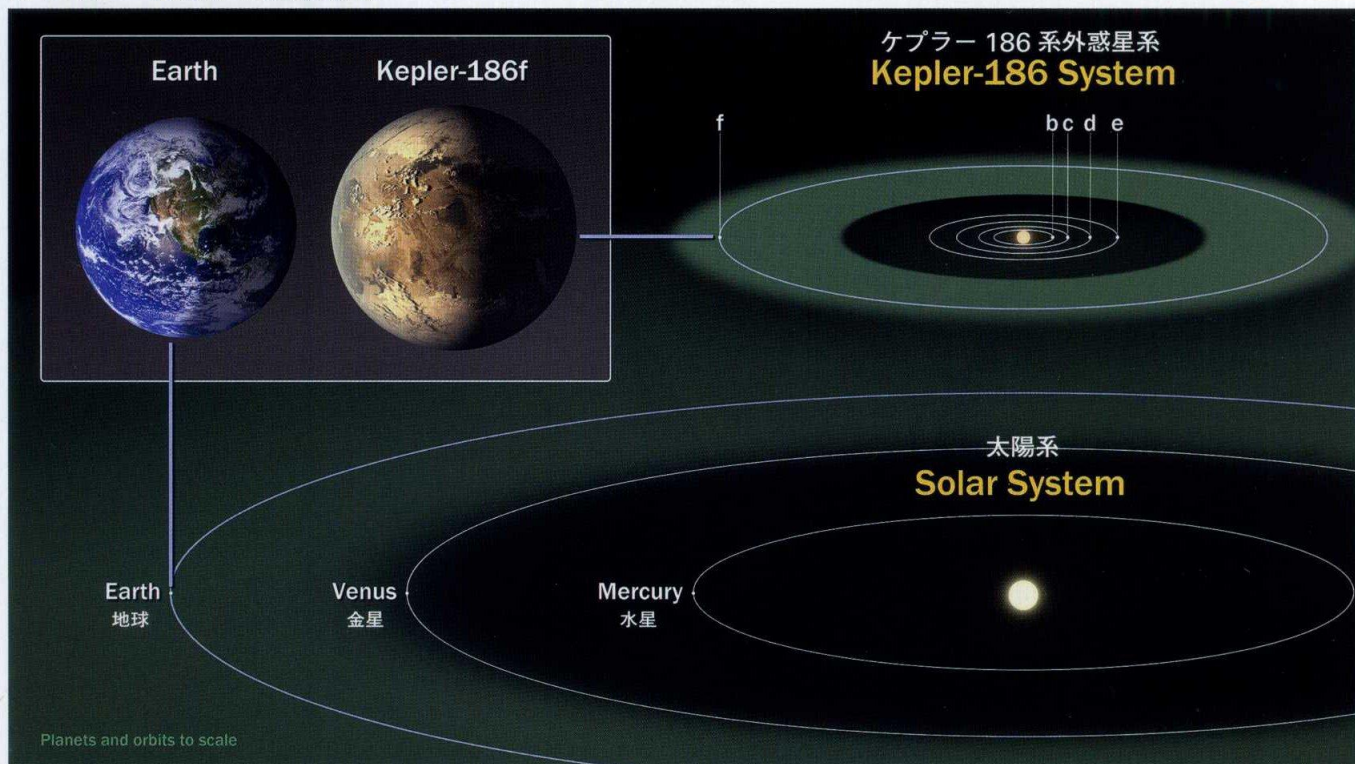
地球外生命は存在するか？

太陽系や太陽系外の惑星に生命が存在する可能性を追う

近年、太陽以外の恒星をまわる惑星「系外惑星」の観測が急速に進んでいます。発見された惑星の中には、岩石でできていたり、水の海があったりする可能性がある惑星があり、生命が存在するかどうか注目されています。また、太陽系の、地球以外の天体でも、生命の兆候が見られるかどうか観測がつづけられています。いったい、地球外に生命はいるのでしょうか？地球外で生命をはぐくむ環境は、どのようなものなのでしょうか？

執筆：井田 茂 東京工業大学地球生命研究所 教授

ケプラー186fの想像図



ケプラー186は、中心星をまわる五つの惑星（b, c, d, e, f）からなる系外惑星系だ。このうち、ケプラー186fは、系外惑星系のハビタブル・ゾーン（緑の部分）に存在する地球と同じようなサイズの惑星である。

最近、「地球に似た惑星を発見」というニュースをよく耳にしたいと思います。太陽以外の恒星をまわる惑星「系外惑星」の観測は急激に進展しています。その結果、私たちの銀河系の恒星の大半に、惑星が存在するようだということがわかってきました。発見された系外惑星の大多数は、地球質量程度からその10倍くらいの範囲の比較的小型の惑星で、それらは木星や土星のような巨大なガス惑星ではなく、地球のような岩石惑星か氷惑星だろうと推定されています。さらに、表面に海(液体の水)をもつ可能性がある惑星も次々と発見されてきているのです。

そのため、「そのような系外惑星に生命はすんでいるのだろうか」という疑問が当然出てきます。実は、今さかんに「地球外生命」についての科学的な議論がはじまっています。ただし、地球外生命といっても、人の姿に似た「宇宙人」の話ではありません。

地球の生命は共通祖先から分かれて進化した

まずは、地球の生命の話からはじめましょう。地球生命はおおまかに、動物、植物、微生物に分けることができます。地球生命は多種多様ですが、微生物も動物も植物も同じ20種類のアミノ酸を使い、同じ4種類の塩基を遺伝情報に用いるという共通の特徴をもつ生物です。遺伝子解析の結果、地球のすべての生物は共通祖先(ルカやコモノートとよばれています)から分かれて進化したことがわかっています。

地球の生物はどのようにして進化してきたのでしょうか。原核生物とよばれる、1マイクロメートル(マイクロは100万分の1)程度の原始的な微生物から、真核生物とよばれる100マイクロメートル程度の微生物への進化(約20億年前)や、海の中にいた微生物から動植物への進化(6億年前～4億年前)を見てみましょう。これらの進化は、連続的というよりは、「断続的」におきています。さらに、その断続的な進化は、地球全体が凍りついて、生物が大絶滅した「全球凍結」イベントと同じタイミングでおきたことがわかっています。動物になってからも、いったんは恐竜へと進化したのが、それが絶滅したことで、ほ乳類が繁栄しました。

つまり、一般に、生物はさまざまな方向に広がって進化していくのですが、環境変動などの偶然の重なりで、選別されたり進化が促進されたりしてきたようです。系

外惑星が地球とよく似た環境をもっている、人の姿をした知的生命どころか、動物や植物といった形態の高等生物がいるのかどうかもよくわかりません。まずは、微生物レベルで地球外生命を考えてみることにしましょう。

生命は液体の水から生まれた?

地球生命は、有機物(炭素化合物)を材料にして、液体の水(H₂O)の中で化学反応が進んで生まれたという考えが一般的です。これを「化学進化モデル」とよびます。原始的な生命は、海底火山のそばや火山のそばの湖などで生まれ、光合成ではなく、地熱エネルギーを使って生きていたと考えられています。

この化学進化モデルは、銀河系の中では一般的なように見えます。銀河系の平均的な組成では、水素(H)が全原子の数の9割程度、ヘリウム(He)が1割程度を占めます。残りは微量なのですが、次に酸素(O)、炭素(C)、ネオン(Ne)、窒素(N)とつづきます。使える材料の中で量の多い水(H₂O)の中で、結合力が強い炭素を主に使い、窒素なども使いながら有機物を合成していくというのは、理にかなっています。

このように水の中で有機化合物の合成が進んで微生物が生まれる、ということは地球固有のことではなく、銀河系全般になりたつ性質なのかもしれません。

海が存在するためには大気圧と温度が重要

惑星に液体の水が存在する条件として、よく使われるのが、「ハビタブル・ゾーン」という概念です。ハビタブル・ゾーンとは、中心星から近すぎたり遠すぎたりすることがない距離に存在し、惑星表面の水が蒸発も凍結もしないで、液体の状態で存在可能な軌道範囲のことです(左ページのイラスト)。太陽の明るさのもとでは、0.9～1.5天文単位の領域(1天文単位は太陽と地球の平均距離)などといわれます。ただし、外側境界の1.5天文単位という値は明確に定まってはいません。

地球はハビタブル・ゾーンにしっかり入っていて、液体の水(海)を表面にもっています。しかし、ハビタブル・ゾーンに入っていれば必ず海が存在するわけではありません。たとえば、火星の大気圧は地球の100分の1以下なので、火星表面で水が液体の状態ではいられない温度範囲はほとんどありません。月は、もちろん地球とともにハ

ビタブル・ゾーンに入っています。しかし、大気がほとんどないので、液体の水は存在できません。海が存在するためには、「温度がある一定の範囲の値である」ことに加えて、「大気圧がある程度以上高い」ことが必要なのです。火星は地球質量の10分の1、月は80分の1なので、重力が弱いことが原因でだんだん大気が逃げてしまったと考えられています。つまり、惑星の質量が地球の10分の1以上はあることが必要だと考えられます。

微量の水のおかげで、地球で生命が生まれた

さらに、ハビタブル・ゾーンにある惑星の材料になる固体物質には、一般に、水が含まれていないという問題があります。1気圧のもとでは、水は0℃以下で氷になりますが、惑星系を生むガス円盤のガスの圧力はきわめて低いので、水はマイナス100℃以下でやっと氷になります。つまり、1天文単位の範囲では氷が凝縮して液体の水にならないのです。

実際、地球の海の総質量は、地球全体の0.02%にすぎません。地球内部に含まれる水を加えても、0.1%に届くかどうかです。地球は、ほとんど乾燥していて、表面がちょっとだけ湿っているというだけの天体なのです。

でも、その微量の水のおかげで、地球では生命が生まれたのです。この水は、どこから来たのでしょうか。それは偶然おきたのでしょうか、それとも必然的におきたのでしょうか。一つの可能性は、温度が低いところで氷を取りこんで生まれた小惑星や彗星が地球に衝突することで、地球に水が持ちこまれたというものです。ほかにも、惑星間をただよう氷のちりが降り積もった、という説や、原始地球表面のマグマの海と原始大気の水素が反応してできたという考えもありますが、どれが正しいのか、解明されていません。海が存在するための条件はまだわからないところがあります。

植物が、系外惑星に生命を見つける目印？

系外惑星の観測精度は、驚異的なペースで上がりつづけています。1995年にはじめて系外惑星が発見された当時は、中心星に近い軌道の巨大ガス惑星しか発見できませんでした。しかし、今では地球よりも小さい惑星も発見されています。また、ハビタブル・ゾーンの惑星も、ぞくぞくと発見されています。

依然として、生命の起源は大きな謎ですが、天文学者や惑星科学者たちは、はるか彼方の系外惑星の生命を検出する方法を議論しはじめています。そのアイデアの一つは、化学的に安定な状態（平衡状態）からずれた大気組成を見つけることです。生命は「平衡に向かうという物理・化学法則にさからうもの」という考えがあるからです。

たとえば、地球の大気には大量の酸素が含まれていますが、平衡状態では、酸素はすぐに陸地を酸化して、使われてしまうはずですが、それでも酸素が存在しているのは、平衡にさからって光合成を行う生物がせっせと酸素を吐きだしているからです。2020年代には超大型望遠鏡「TMT」や「E-ELT」が登場する予定ですが、この望遠鏡は、はるかにはなれた系外惑星の大気組成を観測して、酸素があればそれを検出することができます。

ただし、よく知らない惑星の、平衡状態にある大気の組成をどこまで推定できるのか、また、そもそも「生命とは、平衡に向かうという物理・化学法則にさからうもの」という仮定がどこまで正しいのかという問題があります。

でも、とりあえず観測してみようというというのが、天文学者や惑星科学者たちの考えです。たとえば、ハビタブル・ゾーンの系外惑星の何%に大気中の酸素があり、その確率は惑星の軌道や質量にどう依存するのかがわかれば、その情報を利用して、逆に、生命とは何かという最大の問題にせまれるかもしれません。

一方、より直接的な方法も提案されています。植物は太陽が発する可視光を吸収して光合成をしますが、可視光からほんの少し波長がずれた赤外線強く反射しています。赤外線で見ると、植物は光り輝いているのです。陸地は植物でおおいつくされるので、陸地が光り輝くこととなります。惑星の地形は直接見えませんが、惑星は自転をしているはずなので、周期的に大陸部分が見えます。それに対応して赤外線の強度が強くなります。これをとらえれば、植物が存在することがわかるでしょう。なお、たとえば、太陽より軽い恒星「赤色矮星」の光は、赤外線が強くなるので、反射する光の波長は変わると思われます。

赤い恒星の系外惑星には、深い海がある!?

系外惑星は、生命のすむ惑星のイメージもかえようとしています。赤色矮星は銀河系の恒星の7～8割を占める

恒星です。赤色矮星は光が弱いので、ハビタブル・ゾーンは中心星にとっても近くなります。そのため、ハビタブル・ゾーンにある惑星の、恒星に照らされている側（昼側）には、強い紫外線やX線が降りそそぎます（赤色矮星は、可視光は弱いのですが、高エネルギー紫外線やX線は強いことが知られています）。昼側と、恒星に照らされていない側（夜側）の境目の領域は、生命の居住に適しているかもしれません。

さらに、赤色矮星のまわりでは温度が低いので氷が凝縮しやすく、惑星がハビタブル・ゾーンに存在していれば、大量の水を含んだ惑星になるかもしれません。地球のような数キロメートルの深さの海ではなく、数百キロ、数千キロの深さの海をもつオーシャン・プラネットかもしれないのです。

赤色矮星が生命を宿す惑星をもつとしたら、地球とはまるでちがう環境になるようです。

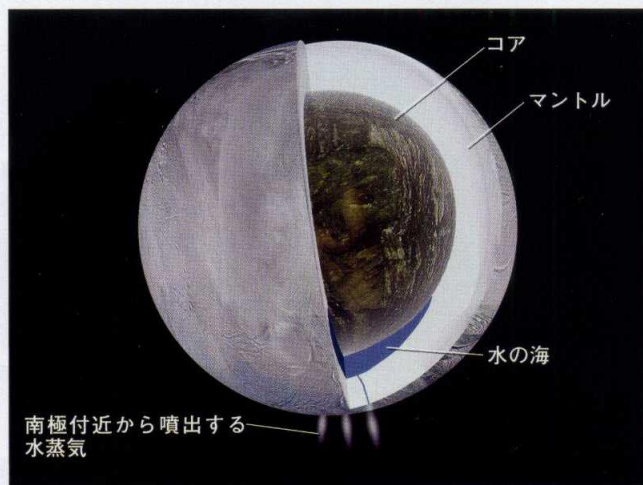
太陽系内の衛星に水蒸気を発見

天文学者や惑星科学者たちは望遠鏡観測で、なんとか生命の兆候をとらえようと議論しています。しかし、最大の問題は、私たちがたった一系統の地球生命しか知らないことです。多様な生命についての情報がある程度なければ、系外惑星に生命がいても、そのデータを解釈できないかもしれません。なんとかして、地球とは別系統の生命を直接分析したいものです。地球生命とはことなる系統の生命の入手が可能かもしれないのは、「火星」と、木星の衛星の「エウロパ」、土星の衛星の「エンケラドス」と「タイタン」です。

火星には、数十億年前に水が流れた跡が残っています。水が関わらないとつくられないような岩石や鉱物も発見されました。当時、今よりもっと大気圧が高かったならば、海または湖があったとしてもおかしくありません。そうだとすると、生命の痕跡が残っていたり、水分が含まれる地下に微生物が生き残っていたりするかもしれません。ですが、これまでのところ、1976年にNASAの「バイキング」、2012年にNASAの「キュリオシティ」が火星に降り立って、生命をさがしましたが、残念ながら、いまだに有機物すら発見できてはいません。

一方、木星や土星はハビタブル・ゾーンのはるか外の酷寒の環境にあります。そこに存在する木星や土星の水

水蒸気を噴きだす、土星の衛星



エンケラドスの南極の地下には、海が存在する可能性がある。

衛星は、惑星の重力の影響（潮汐力）でゆがめられ続けることで内部が加熱され、凍った表面の下に液体の海が存在する可能性があります。実際、エウロパやエンケラドス（上の図）の表面の割れ目から水蒸気が噴きだすのが観測されました。土星探査機「カッシーニ」は2005年にエンケラドスから蒸気が噴出しているのをみつけ、その蒸気に突っこみました。分析の結果、それが水蒸気で、有機物も含まれているようだということがわかりました。

2005年にカッシーニの子機の高イヘンスがタイタンの表面で見た風景は、湖や入江、そこに流れこむ河川であり、地球の風景とたいへんよく似ていました。しかし、タイタンの表面は酷寒の世界なので、それは水ではなく、液体メタンか液体エタンだと考えられています。メタンの海で生命が誕生するのはわかりませんが、その可能性は否定できません。ぜひとも、新しい探査機で木星や土星の衛星の生命の再探索をしてもらいたいものです。

地球外生命の発見はまもなく？

地球外の知的生命体の存在はたいへん気になりますが、知性や文明とは何か、その起源は何かという問いは、生命の起源と並ぶ難問です。天文学者たちは、星空に電波望遠鏡を向けて何か人工的なシグナルが含まれていないか、半世紀以上も調べてきましたが、何もみつけれませんでした。

地球外に知的生命体が発見される見通しはまだありません。しかし、地球外生命についての科学的な議論は急速に進んでおり、「微生物レベルの地球外生命発見」という大ニュースが届く日は遠くないかもしれません。 ●

エピローグ

研究者が語る “生命とは何か”

協力 長沼 毅／リチャード・ドーキンス／ポール・デイヴィス／
松井孝典／上田泰己／吉川研一／出口 茂

エピローグでは、微生物生態学、進化生物学、宇宙物理学、生命物理学などの分野で活躍する国内外の研究者が語る、“生命とは何か”について紹介しよう。生命の特徴の中で、最も重要なものは何か？ 将来、人工的に生命をつくることは可能か？ ロボットは生命になりうるのか？ 生命のしくみを明らかにするために、解き明かすべき課題は何なのか？ 最先端の研究者たちの答えをみていこう。

生命と物質に根本的なちがいはない／リチャード・ドーキンス博士

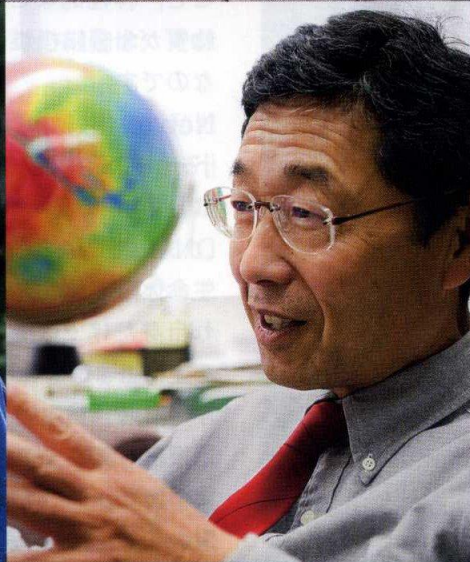
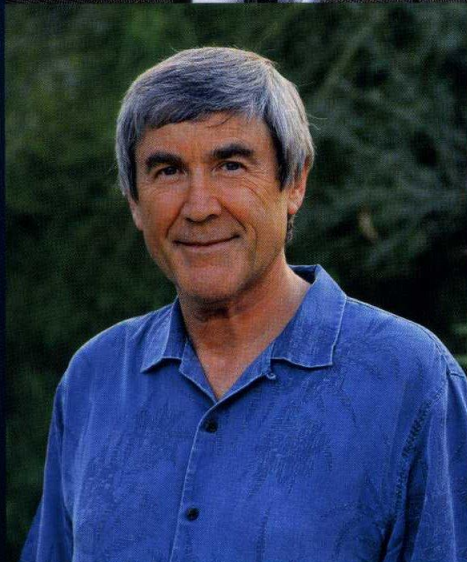
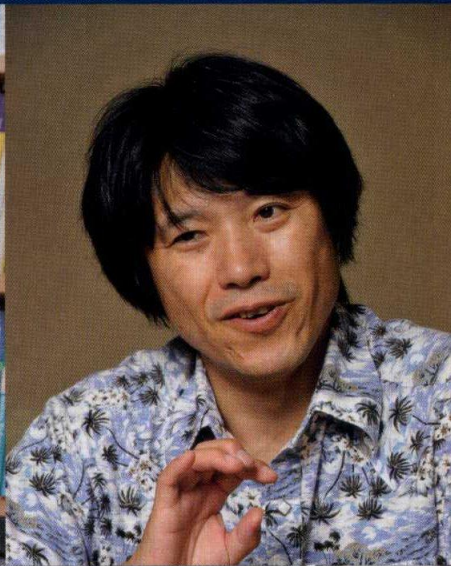
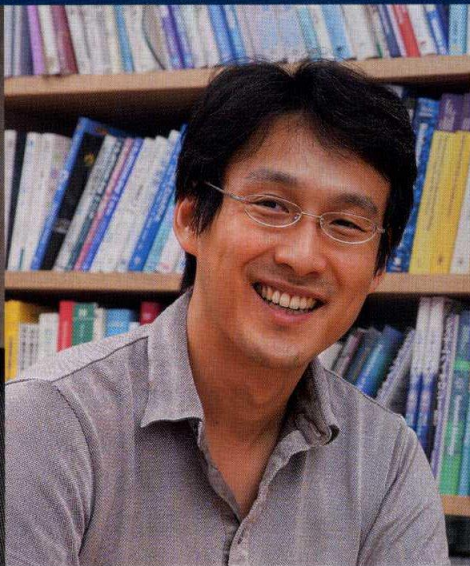
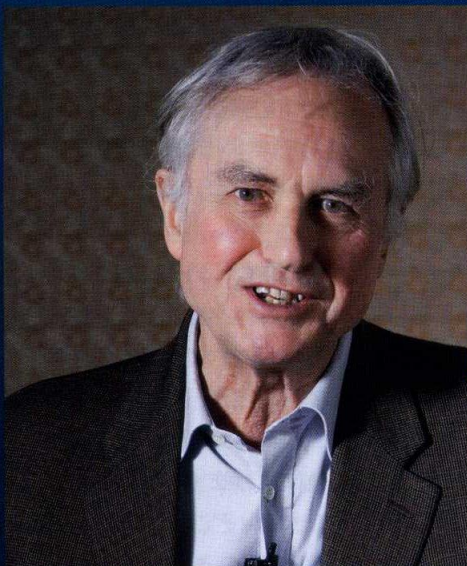
“生命のソフトウェア”は書きかえられる／ポール・デイヴィス博士

「生命とは何か」の答えは宇宙にある／松井孝典博士

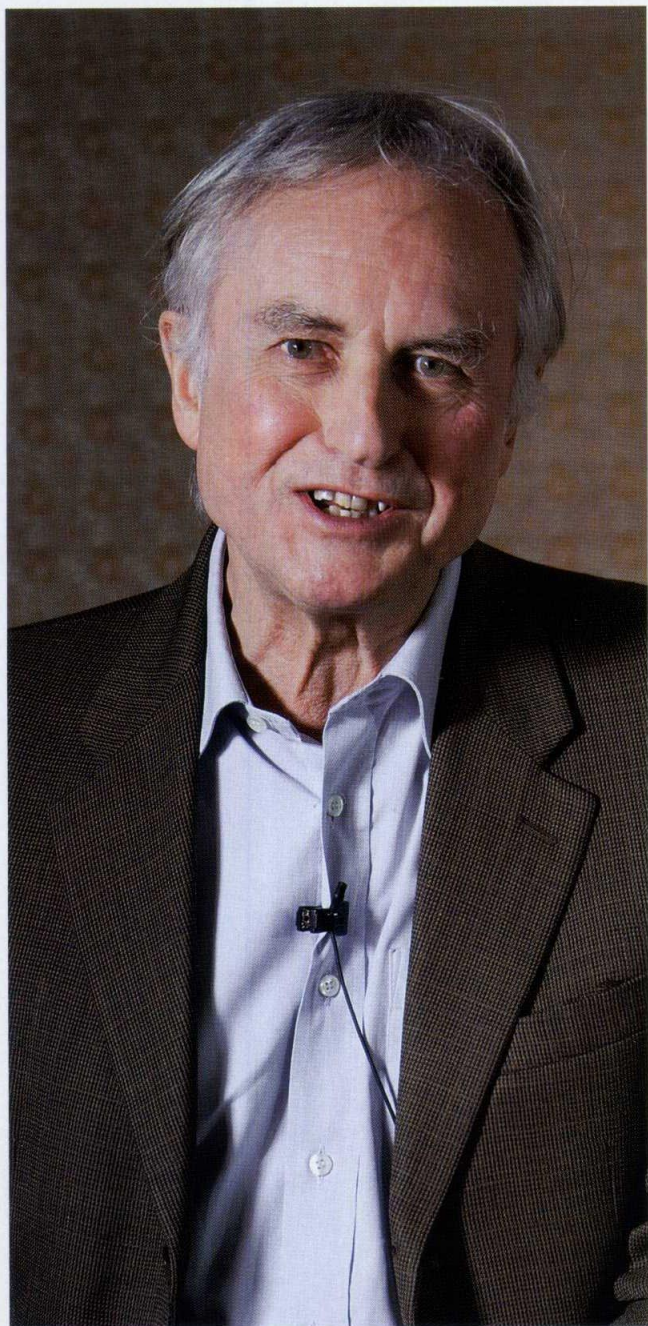
ヒトゲノムの全合成が生命解明の道を開く／上田泰己博士

生物学は「発見の時代」から「生命の本質にせまる時代」へ／吉川研一博士

極限環境の生物は地球外の生命を探る手がかりとなりうる／長沼毅博士



生命と物質に根本的なちがいはない



リチャード・ドーキンス

Richard Dawkins

イギリス、オックスフォード大学オリオルカレッジ名誉フェロー
イギリスの進化生物学者。主な著作に、『利己的な遺伝子』（紀伊國屋書店）、『盲目の時計職人』（早川書房）、『神は妄想である』（早川書房）などがある。

Newton — 「生命」と「物質」のちがいは、何でしょうか？

ドーキンス博士 — 生命とは、極度に複雑な機構をもつようになった物質です。ここでいう「極度に複雑な機構」とは、たとえば、まるで目的をもっているかのように行動するものです。

人工の機械の場合を考えてみましょう。誘導ミサイルは、動機と力（たんさく）をもち、熱などを感知する器官（そうじく）を使って、ゴールを探索（たんさく）して、目標に向かって自分を操縦（そうじゆう）しますね。また、生物も、この誘導ミサイルの特徴（とくちょう）の多くをもっています。ただし、ただの物質である砂粒（すなつぶ）や、岩の塊（かたまり）などは、これらの特徴をもっていません。

生命と物質に、根本的なちがいはありません。「生命の実体」とよびうるものは存在しません。そこに、不思議なこと、神秘的なことは何もないのです。つまり生命は、物質が十分に複雑な組織（そくし）をもったとき、あらわれる何かなのです。

Newton — ウイルスは生命の基準を満たすでしょうか？

ドーキンス博士 — ウイルスは、ほぼ純粋（じゆんすい）なDNAまたはRNA※1だと考えることができるでしょう。ウイルスはDNA／RNAと、少しの部品（ぶひん）からなる存在です。ほかの生命体（有機体）に寄生（いそん）し、完全に依存（いそん）しているので、それ自身だけでは生きることができません。しかし、彼らを生命とよばない理由は、私には思いあたりません。

ウイルスはとても興味深い存在です。「DNA自身の自己複製（じこふそく）の能力」という、生命の根本的な特徴の一つを示すよい例だからです。

Newton — 将来、人工合成した分子から、生命をつくるようになるのでしょうか？

ドーキンス博士 — 私は、人類がいつか生命をつくることをほとんど疑っていません。事実上、現在可能です。というのも、クレイグ・ヴェンター博士※2は、ある意味では、細菌（さいきん）をつくりましたからね。ですから、私は人工の生命（せいめい）がもっとひんぱんにつくられるようになると思います。

Newton — 生命のしくみを完全に解明するにあたって、未解明なことは何でしょうか？

ドーキンス博士 — 発生学（はっせいがく）の分野に、大きな未解明の領域（りやうが）があります。遺伝子（いでんし）の情報（じゆうほう）をもとに、体ができていく

※1 細胞内でDNAに記録された遺伝情報をコピーしたり、運んだりする分子。ウイルスの一部は、RNAに遺伝情報を記録している。

※2 アメリカの分子生物学者。2010年、世界ではじめて、人工合成したDNAを細菌に挿入することで、人工DNAをもとに生きる細菌をつくることに成功した（101ページに写真）。

過程についてです。

各世代の遺伝子は、次世代に移行するにあたって、ただ自分自身を複製しているわけではありません。遺伝子は、発生の過程をへて自分たちのための体を組み立てます。その過程は、非常に複雑なのです。

この過程は、原理的には説明されています。細胞内では、タンパク質が制御され、タンパク質は個々の細胞の生化学を制御します。細胞のレベルでは、個々の細胞たちは、全身の構想をもたないまま、組織をつくるために相互作用します。そして組織は相互作用してより大きな器官をつくり……というわけです。

このように、原理的には説明されていますが、その細胞で何がおきているかについては、発生学者による説明が待たれているのです。

Newton—— 私たち多細胞生物の個々の細胞は、それぞれが一匹の生物なののでしょうか？

ドーキンス博士—— 生命の序列のあらゆる段階で、私たちは「より低い単位が集まってより高次の単位ができる」と考えています。たとえば、アリたちは、集まって「アリの巣」というより複雑な有機体をつくっています。また、私たちの細胞は、集まって多細胞からなる体を構成しています。

個々の細胞と独立した生命体は次のようなちがいがあります。体の中のほとんどの細胞は不定期に自己複製したりしません。彼らは短期間に、彼ら自身のような細胞をふやすためにクローンをつくるだけです。一方、体は、いわゆる「生殖細胞系」による複製という非常に特殊な過程をへて、遺伝子を次世代に渡していきます。

社会性昆虫と細胞たちの間には類似する点があります。でも、こうした比較を行う際には慎重になったほうがいいでしょうね。

Newton—— ロボットは生命になりうるのでしょうか？

ドーキンス博士—— 私は、原理的にはロボットも生命のようになりうるという見方をとるべきだと思います。ロボットたちが自己複製し、彼ら自身に似た娘ロボットをつくることができるかもしれないし、生きた有機体が進化すると同じように進化できるかもしれないからです。もっとも、彼らは、このようなことを気にする必要がな

いかかもしれません。彼らはすでに、ほかの方法で彼らの遺伝情報を複製することができますから。

フォン・ノイマン^{※3}以来、人々は自己複製するロボットの可能性を探ってきました。そして、それが可能であるという主張に対する、核心をつく理性的な反論はないと思います。

私は、ロボットは生命になりうると思います。そもそも生きている有機体自身が物質でできた存在だと考えるからです。ただし、原理的には可能でも、非常にむずかしいことかもしれません。実際上の困難はあることでしょう。

Newton—— 生命は、いつ、どのようにして誕生したのでしょうか？

ドーキンス博士—— 地球が誕生した46億年前から、最初の細菌の化石があらわれる35億年前までの間のいつかでしょう。その期間内のいつだったかについてはだれも知りません。また、どこで、どんなふうにしてはじまったのかもわかりません。

私たちがわかるのは、次のような、最初に自己複製した分子の起源であるだろうものについてです。それはおそらくDNAではなく、DNAのようにはたらく何かでした。それは自己複製しており、そしてあるとき、自然選択^{※4}が可能になったのです。自然選択により、DNAの先がけがあらわれました。そのDNAではない何かは、徐々に複雑になっていき、細胞ができはじめ、さらに複数の細胞が集まって、多細胞の有機体になり、さらに……というわけです。

Newton—— 生命は地球で誕生したのでしょうか？

それとも、宇宙からやってきたのでしょうか？

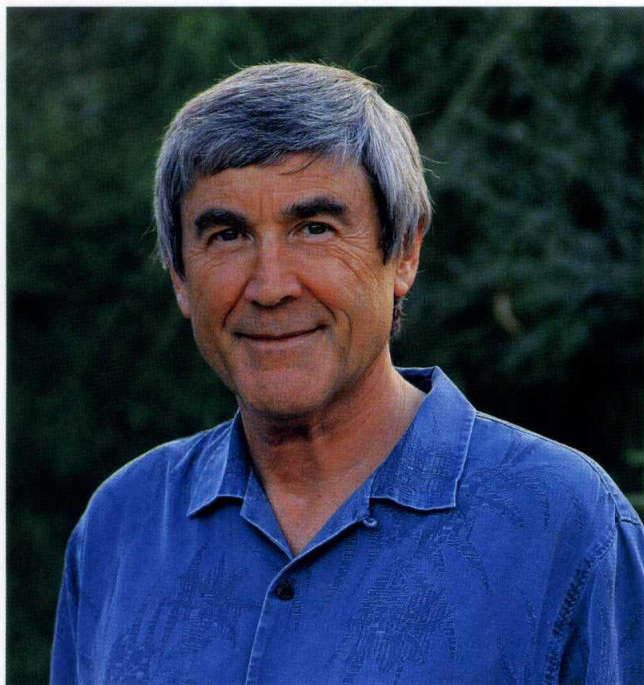
ドーキンス博士—— 地球で出現した可能性が高いと思います。可能性を完全に排除することはできないのですが、生命体が宇宙からやってきたとは思いません。ただし、生命の化学的な“建築素材”の多くは宇宙からやってきたのでしょうか。

現在、生命をつくるたくさんの“建築ブロック”や、たくさんの必須のアミノ酸が隕石に含まれているとわかっています。生命の起源をつくる化学的な素材として、利用できたのではないのでしょうか。

※3 ハンガリーの数学者。多岐にわたる研究の一つとして、自己複製のしくみの理論的な説明がある。

※4 突然変異をおこした遺伝子を受けついだ子孫のうち、たまたまそのときの環境に適した変異をおこした子孫は生き残りやすく、ほかは生き残りにくい。こうして、自然環境に選ばれるようにして、一部の子孫が生き残ることを「自然選択」という。

“生命のソフトウェア”は書きかえられる



ポール・デイヴィス

Paul Davies

アメリカ、アリゾナ州立大学教授

イギリスの宇宙物理学者。主な著書に『宇宙最後の3分間』（草思社）、『宇宙に隣人はいるのか』（草思社）などがある。

Newton — 生命とは何でしょうか？

デイヴィス博士 — この質問はこれまで何度も問われてきました。しかし、まだあまりうまく定義されていませんね。

Newton — では、博士が考える生命の定義は何でしょうか？

デイヴィス博士 — 「情報の意味を処理するシステム」です。

Newton — 生命の最も重要な特徴は何でしょうか？

デイヴィス博士 — 「情報の流れを処理する方法を持っていること」です。また、この点が、生命のしくみを解明するにあたって残されている謎でもあります。体内で、情報が論理だった方法で処理される方法がわかっていないのです。

Newton — 将来、人工合成した分子から、生命をつくることができるようになるのでしょうか？

デイヴィス博士 — 近い将来にはむずかしいでしょう。

クレイグ・ヴェンター博士が行ったように、生きている細菌に人工のゲノムを挿入^{そうにゅう}することで、生命を「再プログラミングする」ことは簡単です。これは、生命の「ソフトウェア」を再プログラミングするようなものです。

しかし、「ハードウェア」の部分、つまり細胞をゼロからつくるのは、人間の能力をはるかにこえています。細胞は、はるかに複雑な構造をもっていて、専門化した多数の分子からなるからです。個々の分子やゲノム、ウイルスをつくることはできます。しかし、細胞をつくる段階にはほど遠いのです。

Newton — iPS細胞によって、いつか組織や器官を再生し、生きた動物をつくることができるようになるのでしょうか？

デイヴィス博士 — はい、じきに可能になるでしょう。

Newton — 生命科学の発展は、人類の寿命や老化などにどう影響するのでしょうか？

デイヴィス博士 — 寿命を少しのばせるでしょう。ただし、すでに根本的な限界に到達しつつあると思います。

Newton — 多細胞生物を構成する個々の細胞を理解すれば、多細胞生物を理解できるのでしょうか？

デイヴィス博士 — 生命は、さまざまな規模・時間のスケールで、組織だったふるまいを見せます。それらのふるまいは、遺伝子からの情報の流れと、ミクロな環境からの情報の流れによりつながっています。多細胞生物については、このような全体のシステムとして考えなければなりません。

ちなみに単細胞の集まりが多細胞生物になるということは、これまでに別個に何度もおきていることです。この変化は、生命の論理的な構造が根本的にかわることを意味していますが、どのようにしておきるのかはわかっていません。

Newton — ロボットは生命になりうるのでしょうか？

デイヴィス博士 — DNAを人工的に設計し直した生物と、無機物からなるナノマシンの区別はすぐに消えてしまうと思います。ですから、ナノスケールの領域では、有機的な世界と、無機的な世界の特徴をあわせもつ、ハイブリッドな機械がじきにつくられるでしょう。しかし、金属でできた大きなロボットが、生命の特徴の多くをそなえることはないでしょうね。

「生命とは何か」の答えは宇宙にある

Newton — 生命の最も重要な特徴は何でしょうか？

松井博士 — 設計図であるDNAやRNA、そして、そこに核酸塩基で書かれている言語ですね。

地球の生命の概念は、DNA、RNAに表現されています。その内容が、細胞という構造として、物質的にはタンパク質となってあらわれています。表現をになう設計図が解明されれば、まずは地球の生命について理解が深まるでしょう。

Newton — 生命のしくみを完全に解明するにあたって、未解明なことは何でしょうか？

松井博士 — DNA、あるいはRNAとその言語が、なぜこんなふうに行っているのかわかっていません。これがわかれば、地球生命だけではなく、宇宙における生命、つまり普遍的な意味で生命についてわかるようになります。

そのためには、地球外の、宇宙における生命をみつけなければなりません。もし、地球の生命とはちがう生命をいくつかみつけ、その設計図を比較することができたら、生命の普遍性や生命の定義について解明できるでしょう。

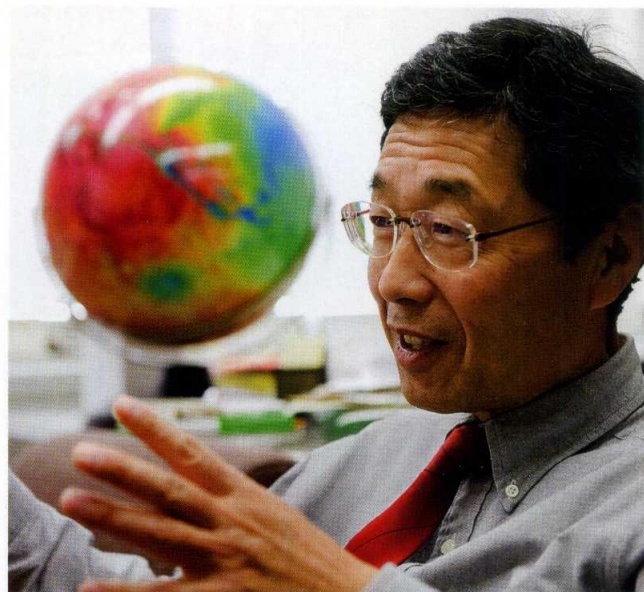
Newton — 地球外の生命をみつけられない限り、生命の定義はわからないのでしょうか？

松井博士 — 現在、私はウイルスに注目しています。ウイルスは、DNAやRNAの設計図をもっており、その内容は生物と同様に、タンパク質やDNAなどの物質として表現されています。この意味で、地球生命に限りなく近い物質です。ウイルスを地球生命の起源と進化という観点から比較すれば、生命とは何かを理解できるかもしれません。

Newton — iPS細胞によって、いつか組織や器官を再生し、生きた動物をつくることができるようになるのでしょうか？

松井博士 — 単細胞からなる生物や、あるいは部品をつくることはできても、多細胞の統合されたシステムをつくることはむずかしいでしょう。部分ができて、部分がさらに自立的に統合化されたシステムになるメカニズムを理解することは、なかなかむずかしいと思います。発生・分化の部分には謎が多いのです。遺伝情報がどのようにして発現してくるのかもなかなかわからないのですから。

Newton — 将来、人類は、人工物から生命をつくる



松井孝典

まつい・たかふみ

東京大学名誉教授、千葉工業大学惑星探査研究センター所長
惑星科学者。海の誕生を解明した「水惑星の理論」などで知られる。

ことができるようになると思いますか？

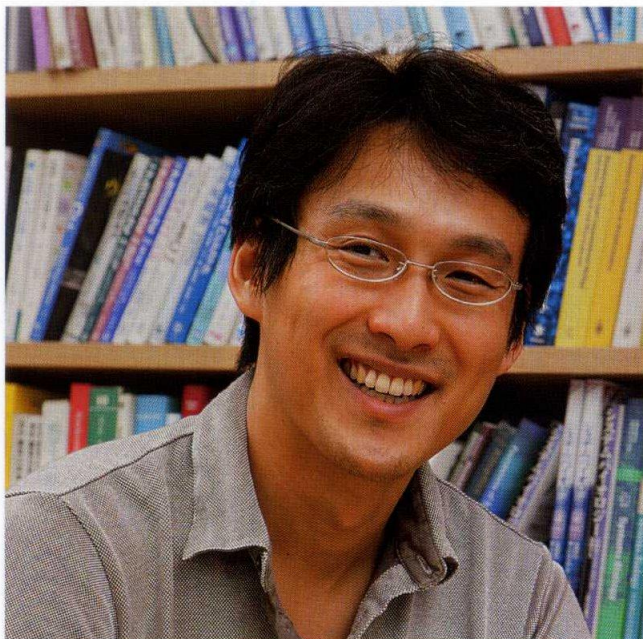
松井博士 — 生命の定義によりますね。私たちは、普遍的な生物学をもっていないので、生命の定義を知らないのです。たとえば、設計図に既存の生物のDNAを流用して、化学的な過程をすべて再現できたら、それを「地球生命」とよんでも不思議ではありません。でも、おそらく再現できないでしょう。

また、少なくとも、生命の設計図そのものが自律的に生まれてくるしくみを理解し、設計図そのものをつくるのでなければ、本質的な意味で「生命をつくった」とははいえないと思います。

Newton — 生物学はどの方向に進歩するのでしょうか？

松井博士 — 物理学や化学は、20世紀に普遍性を獲得し、宇宙でおきることを語ることができるようになりました。しかし、生命はその段階に進んでいません。まだ「地球限定の生物学」なのです。やりがいのある問題がたくさんあるので、ぜひ若い人たちに挑戦してほしいですね。

ヒトゲノムの全合成が生命解明の道を開く



上田泰己

うえだ・ひろき

理化学研究所生命システム研究センターグループディレクター
概日時計などをテーマに生命システムの「時間」の解明にとりくむ。

Newton — 生命の最も重要な特徴は何でしょうか？

上田博士 — 「物事を抽象化する能力」です。「抽象化」とは、多様な物事を、有限な資源を用いて表現することです。私たち生命システムは、有限な分子・細胞だけで、無限とも思える多様な環境に対処しなければなりません。そこで生物は、「進化」によって時間をかけて遺伝子を変化させたり、「学習」によって細胞の状態を変化させたりして、さまざまな出来事に対応しています。これらは「抽象化」の能力の一端ですが、その原理はまだ人が設計できるほどには解明されていません。

Newton — 何が明らかになれば、生命のしくみが解明されたことになるのでしょうか？

上田博士 — 最初の質問の答えにあげた「抽象化の原理」を解明することですが、簡単ではないと思います。

生命システムがつくりあげたものの中で、最も情報が圧縮されている物質がDNAだと思います。今の勢いでDNAの合成能力が進歩して、もしもヒトゲノム※1をつ

くれるようになったとしたら、「抽象化」のしくみを調べられるようになるでしょう。「本能」や「行動」などの現象を理解することができるようになるかもしれません。

Newton — 将来、人工合成した分子から、生命をつくることができるようになるのでしょうか？

上田博士 — はい。「生命」と「物質」の大きな断絶は取り除かれることになると思います。

Newton — iPS細胞によって、いつか組織や器官を再生し、生きた動物をつくることができるようになるのでしょうか？

上田博士 — 個体全体をつくるのはまだまだ先だと思います。また、ヒトを生み出す能力をもつような構造体を直接再構成する研究は、倫理的にもひかえることが必要だと思います。ヒト以外の哺乳類を対象として、細胞から個体の元となるような構造体をつくる技術は徐々にできてくると思います。

今や、クローン技術によっていわば「受精卵」が再構成され、iPS細胞によって初期胚の内部の細胞ができています。今後、もし（ヒト以外の）哺乳類で初期胚そのものを再構成できたら、重要な技術になるでしょう。また、（ヒト以外の）哺乳類で子宮のようなものを工学的に実現できると、医学研究を行うためのさまざまなモデル動物を作製でき、非常に有用な技術になるはずです。でも、まだめどがたっていません。

Newton — 多細胞生物の個々の細胞を、独立した生命体と見なすときが来たと思いますか？

上田博士 — あわせると個体をつくる能力をもつ卵子と精子を、少なくとも受精させる前は、独立した生物として取りあつかっていないのですから、その必要はないでしょう。

Newton — 生命科学の発展は、人類の寿命や老化などにどう影響するのでしょうか？

上田博士 — 再生医療が進歩しても、「寿命」や「老化」といった課題は依然として残ると思います。「寿命」や「老化」で最も不思議なのは、「非常に長い過程を数えることができるプロセスがどのようなところにあるか」だと思います。同じゲノムを用いてちがう細胞に分化する能力を獲得するしくみ、いわば「細胞の学習則」を解明することで「寿命」・「老化」の制御や、その限界を知ることにつながると想像しています。

※1 ヒトのDNAに書きこまれている遺伝情報。

生物学は「発見の時代」から「生命の本質にせまる時代」へ

Newton — 生命の最も重要な特徴は何でしょうか？

吉川博士 — 「現宇宙で自発的に発生し、地球環境と相互作用している超階層的な自律システムであること」です。たとえば、原始地球上では酸素がほとんどなく、有害な紫外線が降りそそいでいました。海中で生物が光合成をはじめ、酸素分子を大気に排出すると、地表への紫外線量が減り、酸素呼吸を行う生物が生まれました。これは相互作用の一例です。

Newton — 何が明らかになれば、生命のしくみが解明されたことになるのでしょうか？

吉川博士 — 私のこれまでの生命現象に関する研究を通して実感していることは、「生命に関してなにか本質的なことをみつけたその翌日には、それに倍する疑問に気づく」ということです。数十億年の進化の歴史をくぐってきた生命の謎は、とても深淵であると思っています。生命は、細胞—個体—生物集団などの階層性を持ちます。この“生命のしくみ”に、何か決定的な因子が「一つだけ」あるわけではないと考えています。

Newton — 将来、人工合成した分子から、生命をつくることができるようになるのでしょうか？

吉川博士 — 生命体の構造や機能のある特定の側面をモデル化した人工物をつくることはできるでしょう。化学エネルギーを使って等温条件下でみずから動きまわるもの、限定された条件下で進化的な特質を示すもの……たとえば、栄養条件が変わると形態や代謝条件がそれに応じて変化するものなどです。

Newton — iPS細胞によって、いつか組織や器官を再生し、生きた動物をつくることができるようになるのでしょうか？

吉川博士 — 1997年のクローン羊ドリーの例もあるとおり、単一の体細胞のゲノムから個体全体を再生できることは、哺乳動物でも実証されています。iPS細胞からでも、個体が再生することは可能であると思います。そのような個体は、やはり一つの独立した生命体でしょう。ただ、このような実験をヒトを対象に行うことについては、十分に議論をつくす必要があるでしょう。少なくとも当面は禁止されるべきだと思います。

Newton — 生命科学の発展は、人類の寿命や老化などにどう影響するのでしょうか？



吉川研一

よしかわ・けんいち

同志社大学生命医科学部教授

生命物理学者。散逸構造を含む物理学である「非線形科学」に詳しい。生物活動を物理現象としてとらえ、解明することをめざす。

吉川博士 — 基礎科学の発展に支えられて、医療や健康科学の技術が進歩し、人々の健康や幸福に貢献することが可能になるでしょう。ただ重要なことは、それを保証するような社会のシステムをどのようにつくっていくかということです。生命科学の発展は、社会・経済・政治のありかたと密接に関連しているからです。

Newton — 今後、生物学はどの方向に進歩するのでしょうか？

吉川博士 — 天文学の分野では、400年前のガリレオの望遠鏡による宇宙の観察以来、肉眼では見ることができなかった数多くの星や星雲が次々と発見されました。このような「発見の時代」を経て、近年では、ビッグバンや膨張宇宙、ヒッグス粒子など、「宇宙の本質」を論じる時代となっています。

生物学の分野での20世紀後半以降は、生命を構成する分子の知識が爆発的に増大する「発見の時代」でした。現代は、「生命システムの謎」にせまる時代になりつつあるといえるでしょう。

極限環境の生物は地球外の生命を探る手がかりとなりうる

地球には、深海や南極、砂漠など、一般的な生物が生育する環境と大きくことなる「極限環境」がある。極限環境には、私たちがまだ見ぬ、新たな生物が生息している可能性があり、地球外生命を探るうえでのヒントとなりうる。極限環境を探索し、生命について数々の著書をもつ長沼毅博士に、地球外生命の存在の可能性を聞いた。

長沼 毅

広島大学大学院生物圏科学研究科准教授
理学博士。専門は微生物生態学。深海や地底、
南極など極限環境にすむ微生物を研究してい
る。著書に『生命とはなんだろう?』や『宇宙で
いちばん面白い 脳がしびれる科学の時間』、『地
球外生命 われわれは孤独か』など多数がある。

Newton — 生物の大事な性質とは何でしょうか?

長沼博士— 生命という現象を具現化しているのが生物体ですね。生物体は物質ですが、まず大事な性質が「ふえる物質」であるということです。

生物体は、ふえるにあたって、自分と同じようなものをつくりまします。バクテリアのような単純なものの場合、そのまま自分と同じものがポロンとできるのですが、われわれ人間の場合は、受精卵というたった1個の細胞がどんどんふえていって、最終的には親と同じ形になります。この後者を考えたときに、大事な性質は「情報」ですよ。たった1個の細胞が、ふえていきながら全体として形をつくるときに、情報がなければ、親と同じものになりえないからです。

Newton — 生物は、ふえる物質であって、情報をもっている。ほかにも、重要な特徴はありますか?

長沼博士— 生物は、「実装（英語ではimplementationとよぶ）」^{じっそう}というはたらきをもっています。たとえば、無人の工場でベルトコンベアの上をいろいろな製品が並んで流れていく場面を考えてみましょう。ばらばらの向き

に並んでいる製品をロボットアームでつかんで、その向きを直し、不備があればそれを取り除くということを行っています。この一連の作業を実装といいます。機械の場合、実装はコンピュータプログラミングで行いますが、生物はそれを自分でやっているのだからすごいのです。

Newton — 実装とは、正しく機能する製品をつくりあげていく作業を指すのですね。生物の場合、実装とは具体的にどのようなことを指すのでしょうか?

長沼博士— 生物は、体をつくる材料をどこから自力で入手しながら、自分の体をつくりあげていきます。こうしたことが実装にあたります。また、生物が自分の体をつくる際には、エネルギーを入手します。そしてそのエネルギーを、使い勝手がよいように^{へんかん}変換します。これを代謝とよびます。この代謝も、実装ですね。

ウイルスは自己完結していない生命体

Newton — 私たち生物とウイルスのちがいはどのようなもののでしょうか?

長沼博士— 生物のしくみはコンピューターのハード



ウェアとソフトウェアのようなものです。ソフトウェアには、そこにあるハードウェア一式を動かすためのマニュアルが書いてある。このマニュアルにあたるのがDNAで、それをタンパク質などの“道具”が読み取って自分でその通りに動くと、自分と同じものができるといふしくみになっています。

一方、ウイルスは、自分がふえるためのふえ方のマニュアルをもっています。しかし、ふえるための道具が、“他人”の道具なんです。でも何かの道具を使ってふえることはそこに書いてある。そういう意味では、生命体はかなり近いんです。ふえるための道具とか代謝するための道具を自分で一式もっていると、自己完結型の生命といえますが、ウイルスは、自己完結していない生命といっています。そういう意味では、私は生命体と考えてよいと思いますよ。ただ、今いる生命の祖先に近いかというところではなくて、より退化するほうに進化したのでしょうか。実装をもちに、楽をしているのです。

生命の誕生のかぎはDNAの「情報」

Newton — 生命の起源については、どのようにお考えでしょうか？

長沼博士 — 情報を残す分子であるDNAがなにかの偶然でできちゃったということはあるでしょう。ただ、そこに書きこまれる内容である「情報」が、生命の誕生に一番重要だと思います。

DNAを複製するためには、タンパク質（DNA合成酵素）が必要です（右の図）。そして、このDNA合成酵素は、DNAのもつ情報をもとにしてつくられる。DNAとタンパク質のどちらが先に誕生したのかという問いに答えることはむずかしいですが、DNAが出現し、そこに情報が書きこまれることで、はじめて生物らしくふるまえるようになったのだといえるでしょう。

Newton — 地球外生命体が存在する可能性はあるでしょうか？

長沼博士 — かなりあると思いますよ。生命体を「動く物質」とか、「ふえる物質」というふうに考えれば、物質というのは宇宙中にあるのだから、そういった自分でふえる物質ができてくることはありえるでしょう。人間のような知的生命体がいるのか、あるいは、われわれ人間がもっているような文明を築いているのかという話は別として、バクテリアやアメーバぐらいのものだったら、いっぱいいるでしょうね。

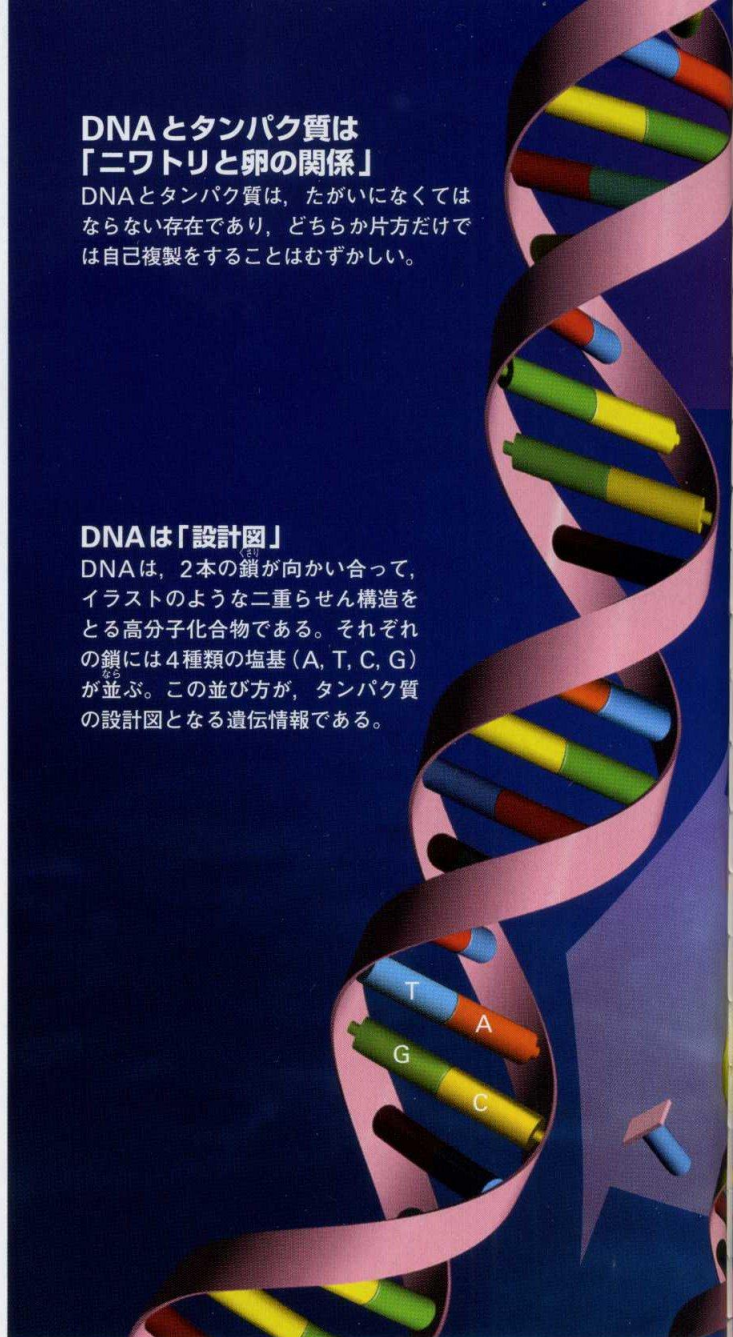
Newton — アメーバのような生命体が地球外に存在

DNAとタンパク質は「ニフトリと卵の関係」

DNAとタンパク質は、たがいになくなくてはならない存在であり、どちらか片方だけでは自己複製をすることはむずかしい。

DNAは「設計図」

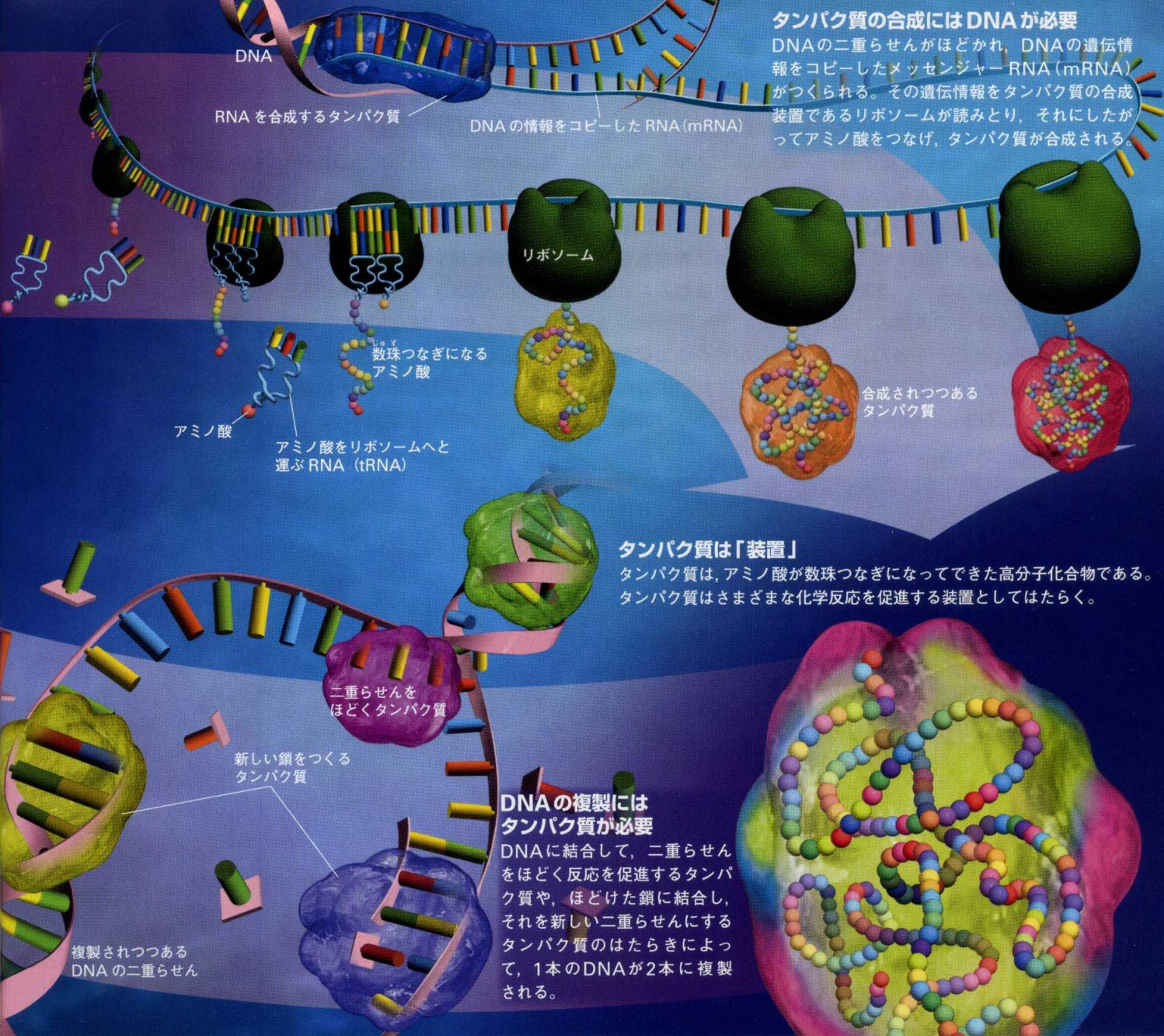
DNAは、2本の鎖が向かい合って、イラストのような二重らせん構造をとる高分子化合物である。それぞれの鎖には4種類の塩基（A、T、C、G）が並ぶ。この並び方が、タンパク質の設計図となる遺伝情報である。



するとすれば、そういった生命体は情報記録物質としてDNAを使っているのでしょうか？

長沼博士 — DNAは安定性にすぐれているので、情報を記録する媒体として、とてもすばらしいです。そのため、よその天体でも、同じものを使っているんじゃないかなという気はします。ただ、DNAに含まれているリンは、地球ではそこそこ使える量が生物圏にあるけども、ほかの星ではそんなにたくさんは存在しないかもしれないとも考えられています。

リンの供給源は、岩石なんですね。地球の表面の3割は陸地で、そこに雨が降って、岩石を物理的にも化学的にも風化します。その風化によって岩石中に閉じこめら



タンパク質の合成にはDNAが必要
DNAの二重らせんがほどかれ、DNAの遺伝情報をコピーしたメッセンジャーRNA (mRNA) がつくられる。その遺伝情報をタンパク質の合成装置であるリボソームが読みとり、それにしたがってアミノ酸をつなげ、タンパク質が合成される。

タンパク質は「装置」

タンパク質は、アミノ酸が数珠つなぎになってできた高分子化合物である。タンパク質はさまざまな化学反応を促進する装置としてはたらく。

DNAの複製にはタンパク質が必要

DNAに結合して、二重らせんをほどく反応を促進するタンパク質や、ほどけた鎖に結合し、それを新しい二重らせんにするタンパク質のはたらきによって、1本のDNAが2本に複製される。

れたリンが水の中にとけだす。それを生物が利用することで、DNAがつくれるようになりました。一方、陸地のない、海ばかりの惑星だったらリンが少ないでしょうね。そういう、リンが少ない海では、DNAをもった生命体ができにくく、DNA以外の何らかの情報記録分子があるかもしれない。DNAは、たぶんこの宇宙を見渡しても、最強クラスの情報分子だと思いますが、最強じゃないからといってだめというわけでもないの、DNA以外の情報記録分子を使っている可能性はあると思いますよ。

多種類の反応の場となる水は、生命誕生に有利

Newton — 今、地球外生命の探索において、水があ

るかどうかが焦点となっていますが、なぜ水の有無が重要なのでしょうか？

長沼博士 — 水は、かなりたくさんの種類の物質をとかすことができるんです。原料物質の種類が多いと、それらの組み合わせの数も多くなるので、反応の種類も多いですね。一方、油はどうかというと、とかせる物質の種類が少ないため、そこでおきる反応の種類も少なくなります。そのため、油の中は水の中よりも、生命体が発生しにくのではないかと感じはします。

Newton — 地球外の天体に水があることがわかったとして、そこからさらに踏みこんで、生命の存在を明らかにするためには何が必要でしょうか？

長沼博士——表面に水と、ほとほと陸地がある、地球のような星を見たときに、何を調べれば「ここに生命がいる」と自信をもって結論できるのかということが、実はまだわかっていません。たとえば、植物の葉緑素を例にとると、葉緑素は特定の波長の光を吸収したり、放出したりする性質がありますので、光を当てればその存在を調べることができます。そういった、生物が吸収したり放出したりする光の波長の特徴を網羅的に調べあげ、それらを組み合わせることによって、総合的に、ここに生態系があると判断できるかもしれません。それは個々の生物というよりも、生態系レベルでね。

人工的にDNAの変化を加速させることで、人工生命が誕生？

Newton——将来、人工合成した分子から生命体をつくることはできるのでしょうか？

長沼博士——現状では、DNAを人工的に合成し、先にDNAを抜いた細胞にそれを入れたら、人工合成したDNAに書かれている内容にもとづいて細胞が動いたというところまでは達成しています。また、細胞膜の人工合成技術もかなり進んでいます。将来、こうしてできた人工細胞に、人工合成した“道具”をいれ、もしも細胞が“動いた”ら、それは生命体といえるでしょうね。たとえばア

「熱水噴出孔」が生命を誕生させた？

地下のマグマによって熱せられた海水が噴きでる場所を「熱水噴出孔」とよぶ。アメリカの潜水艇「アルビン号」が1977年にガラパゴス諸島沖の海底で発見して以来、熱水噴出孔は世界各地の海底でみつかっている。噴きだす熱水には、硫化鉄などのさまざまな鉱物がまじって、黒い煙のようにみえることもある。そのような熱水噴出孔は「ブラックスモーカー」ともよばれる。熱エネルギーや、有機物のもととなるメタンやアンモニアなどの分子が豊富に存在するため、熱水噴出孔は最初の生命が誕生した場所として有力視されている。イラストにえがいたような、熱水（超臨界水）の作用でアミノ酸が重合していく反応がそこでおきたかもしれないと考える研究者もいる。

鉱物を含んだ熱水

アミノ酸の重合体

アミノ酸の重合体

アミノ酸の重合体が熱水から抜けだす

熱水のはたらきでアミノ酸の重合がおきる

アミノ酸を含む海水が熱水とまざる

さまざまなアミノ酸

熱水噴出孔

冷たい水が流入する

熱せられた水が上昇する

マグマ

メーバのように、もそもそ動きはじめるとか、あるいは、自分で栄養分をとったり、原料物質を集めたりするとか、そして究極的にふえとかすれば、もう生命体といえるのだと思います。そうしたことは、将来、たぶん実現する可能性があると思います。

生命体の面白いところは、DNAに書かれているマニュアルの中身がよく変化すること（突然変異^{とつぜん}）です。こうした突然変異がおきて、マニュアルのありとあらゆる変化の組み合わせを生みだすのに、自然界だったら仮に100万年かかるのでしょうか。しかし、人間は人工的にDNAをつくりだし、あらゆる変化の組み合わせを加速的に生みだすことができます。こうしたことをたとえば1年ぐらいうるうことができれば、近い将来、生命は誕生すると思います。

極限環境は地球外生命を知るかぎとなる？

Newton——先生ご自身の研究で、極限環境をテーマにされているのはなぜでしょうか？

長沼博士——地球外生命にとっても興味があったんですよ。地球はなまぬるくて、温室のような環境だけれども、地球外は、過酷^{かこく}だったり、極限的だったりするのではないかと想像していました。そこで、地球の中で一番きびしいところに行って、そこで生きている生物を調べれば、地球外の世界にいる生命体たちの生態や体のつくりなどがわかるかもしれないと思ったのです。

私が高校生のころ、深海の海底火山に「熱水噴出孔^{ふんしゅつこう}」というものがみつかりました（左ページの図）。熱水噴出孔では、熱い水が噴いていて、その熱い水には、火山ガスがとけこんでいたんです。火山ガスに含まれている硫化水素は、われわれ人間には毒ですが、ある種の生物には、毒どころか、エネルギー源になります。深海は暗黒なので、光エネルギーを使う植物なんかいません。そのため食べ物にとぼしいのですが、それにもかかわらず、海底火山の熱水噴出孔の周りには、生き物の大群衆があり、それを支えているのは火山ガスなどだということがわかったんですよ。そして、こうした海底火山が存在する可能性のある天体が、地球外にもあることが当時想定されたんです。それが、木星のガリレオ衛星です。

身近なところにも極限環境がある

Newton——こうした極限環境の生物を調べることで、何か面白い発見はありましたか？

長沼博士——私たちが今行っている面白い研究に、この

地球上において、われわれとはちがったタイプのアミノ酸で体ができているものをさがす、というものがあります。アミノ酸には、左手型のアミノ酸と右手型のアミノ酸が存在することが知られています。今、地球上にいる生物は、ほぼみんな左手型のアミノ酸で構成されていると考えられています。もし、そうでない生き物がいれば、これは地球外生命の発見にも匹敵^{ひってき}するわけです。そういった意味で通常とは逆側の、すべてが右手型のアミノ酸からできている生命体をさがしたいと思い、もう20年ぐらい研究を行っています。まだ発見していませんけども。これはなかなかハイリスク・ハイリターンです。

でも意外なことに、かわったもののほど、身近なところにいるのです。広島大学の周りには自然が多いですが、そこからとった生き物には、えっとおどろくものがいっぱいいます。

私たちは今、地球上で最小の生き物をさがそうと思っています。実際、目の細かいフィルターでこしとられたあとの、生き物がいないと思われていたサンプルをもらって調べてみると、かわった微生物がいっぱいいることがわかりました。見方をちょっとかえるだけで、極限環境に行かなくても極限微生物が得られると思うようになりました。

Newton——そうした身近な極限環境には、実際に、どんなかわった生き物がいましたか？

長沼博士——体の大部分が右手型のアミノ酸でできている生き物がいました。あと、数年で1回分裂^{ぶんれつ}するような、ゆっくりふえる微生物もいました。今後、体のすべてが右手型のアミノ酸でできているものもみつかったりするのではないかと、と思っています。

Newton——今後、どのような研究を行っていきたいですか？

長沼博士——地球上にいる、通常とは別系統の生き物を見つけること、たとえば、アミノ酸では、体のすべてが右手型のアミノ酸からなる生き物をさがすのが1点ですね。もう1点は、自分で生命をつくることです。ある物理学者の言葉に、「自分でつくらなければ、それはわかったことにならない」、というものがあります。将来、人工生命ができる可能性はかなり高いといえます。そういうところに、自分も食いこみたいと思っています。一人の人間が、一人の発想で、人工生命をつくれるとはかぎりませんが、何人かの人が手を組んだらできるかもしれない。私も、そこに入りこみたいと思っていますね。

Newton——どうもありがとうございました。 ●

有田隆也／ありた・たかや

名古屋大学大学院情報科学研究科複雑系科学専攻教授。工学博士。1960年、東京都生まれ。東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻博士課程修了。専門は人工生命・複雑系科学。現在の研究テーマは、ヒトの心や言語の進化。近著に『生物から生命へ』がある。

池原健二／いけはら・けんじ

放送大学奈良学習センター所長、財団法人国際高等研究所フェロー、奈良女子大学名誉教授。工学博士。1944年、大阪府生まれ。京都大学工学部工業化学科卒業。専門は生命科学。研究テーマは、生命の基本システムの成立過程、遺伝子や遺伝暗号、タンパク質および生命の起源。

石井哲也／いしい・てつや

北海道大学安全衛生本部特任准教授。博士（農学）。科学技術振興機構、京都大学iPS細胞研究所を経て、現在に至る。1970年、群馬県生まれ。名古屋大学大学院農学研究科修了。専門は生命倫理学、細胞生物学。現在は、iPS細胞などの生物医学研究における生命倫理の研究を行っている。

井田 茂／いだ・しげる

東京工業大学地球生命研究所教授。理学博士。1960年、東京都生まれ。京都大学理学部物理系卒業。専門は惑星物理学。

上田泰己／うえだ・ひろき

東京大学医学系研究科教授、理化学研究所生命システム研究センターグループディレクター。医学博士。1975年、

福岡県生まれ。東京大学医学部卒業。専門はシステム生物学・合成生物学。概日時計などをテーマに、生命システムの「時間」の解明に取り組む。

木賀大介／きが・だいすけ

東京工業大学大学院総合理工学研究科・地球生命研究所准教授。博士（理学）。1971年、東京都生まれ。東京大学理学部生物化学科卒業。専門は合成生物学。タンパク質やDNAを組み合わせて、自律的に動作するシステムを作製している。

倉本 圭／くらもと・きよし

北海道大学大学院理学院教授。理学博士。1966年、北海道生まれ。東京大学理学部地球物理学科卒業。専門は惑星科学。

五條 堀 孝／ごじょうぼり・たかし

アブドラ国王科学技術大学ディスティングイッシュト・プロフェッサー（サウジアラビア）、情報・システム研究機構国立遺伝学研究所特任教授。理学博士。1951年、福岡県生まれ。九州大学理学部生物学科卒業。専門は分子進化学、比較ゲノム学、生命情報学。ウイルスや細菌の進化学研究とともに、ゲノムや遺伝子発現の大規模解析から脳・神経系の進化について精力的に研究している。著書に『人間は生命を創れるか』など。

小林憲正／こばやし・けんせい

横浜国立大学大学院工学研究院教授。自然科学研究機構客員教授。理学博士。1954年、愛知県生まれ。東京大学理学

部化学科卒業。研究テーマは、星間および惑星上での生体分子の無生物的生成過程と極限環境生命検出法。

西條政幸／さいじょう・まさゆき

国立感染症研究所ウイルス第一部長。医学博士。1963年、北海道生まれ。旭川医科大学医学部医学科卒業。専門は小児科、感染症。現在の研究テーマは、ウイルス感染症。

斎藤成也／さいとう・なるや

国立遺伝学研究所集団遺伝研究部門教授、総合研究大学院大学遺伝学専攻教授、東京大学大学院生物科学専攻教授。Ph.D.。1957年、福井県生まれ。東京大学理学部生物学科卒業。専門は人類進化学。研究テーマは、遺伝子の進化。とくにヒトの進化を遺伝子レベルで探っている。

菅 裕明／すが・ひろあき

東京大学大学院理学系研究科教授。Ph.D.。1963年、岡山県生まれ。岡山大学工学部工業化学科卒業。マサチューセッツ工科大学Ph.D.。専門は生物有機化学、ケミカルバイオロジー。

高畑尚之／たかはた・なおゆき

総合研究大学院大学名誉教授。理学博士。1946年、愛知県生まれ。京都大学理学部化学科卒業。専門は理論集団遺伝学。ゲノムに刻まれた環境との相互作用、生物種の個別性の遺伝的基盤について研究している。

瀧ノ上正浩／たきのうえ・まさひろ

東京工業大学大学院総合理工学研究科

知能システム科学専攻講師。博士(理学)。1978年、埼玉県生まれ。東京大学理学部物理学科卒業。専門は生物物理学、非線形非平衡科学、マイクロ流体工学。研究テーマは、生命と物質の境界の探求、マイクロ流体工学による非平衡人工細胞モデルの構築、生体分子ロボットの構築など。

田沼靖一／たぬま・せいいち

東京理科大学薬学部生化学教室教授・ゲノム創薬研究センターセンター長。薬学博士。1952年、山梨県生まれ。東京大学大学院薬学系研究科博士課程修了。専門は生化学、分子生物学。細胞の生と死の決定機構や、ゲノム創薬などに関する研究を行う。

田端和仁／たばた・かずひと

東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻助教。博士(理学)。1973年、愛知県生まれ。金沢大学大学院自然科学研究科博士課程修了。専門は生物物理学。どうやったら細胞は創れるのか、「死んだ」状態から「生きた」状態は創れるのかをテーマに、バクテリア再構成法の研究を進めている。

出口 茂／でぐち・しげる

海洋研究開発機構・海洋生命理工学研究開発センター長。博士(工学)。1966年、京都府生まれ。京都大学工学部高分子化学科卒業。専門はバイオミメティクス、極限環境でのソフトマテリアル生成、ナノバイオテクノロジーなど。

長沼 毅／ながぬま・たけし

広島大学大学院生物圏科学研究科准教

授。理学博士。1961年、三重県生まれ。筑波大学第二学群生物学類卒業。専門は微生物生態学。現在、深海・地底・南極・北極・砂漠など極限環境の生物学、生物海洋学に取り組む。著書に『生命とは何だろう?』、『宇宙でいちばん面白い 脳がしびれる科学の時間』など多数。

藤井紀子／ふじい・のりこ

京都大学原子炉実験所教授。医学博士。1951年、東京都生まれ。東京医科歯科大学大学院医学研究科単位取得退学。主に、タンパク質中に生じるD-アミノ酸(右手型アミノ酸)の生成メカニズムと老化、病態についての研究、並びに従来とは異なるタンパク質中のD-アミノ酸の微量、簡便な分析方法の開発研究を行っている。

ポール・デイヴィス／Paul Davies

アメリカ、アリゾナ州立大学教授。イギリス出身。専門は宇宙物理学。主な研究は、曲がった時空における量子場の理論の構築など。宇宙のはじまりや生命の起源、時間の性質など、存在についての「大きな問」に興味をもっている。主な著書に『宇宙最後の3分間』、『宇宙に隣人はいるのか』などがある。

松井孝典／まつい・たかふみ

東京大学名誉教授、千葉工業大学惑星探査研究センター所長。理学博士。1946年、静岡県生まれ。東京大学理学部地球物理学科卒業。専門は惑星科学。近年は、秒速数十キロを超える超高速衝突による衝突蒸気雲の物理と化学、宇宙からの生命飛来の可能性、インド、

スリランカの赤い雨の細胞状物質の研究、インドのローナークレーターの調査などに興味をもっている。主な著書に『地球システムの崩壊』、『宇宙人としての生き方』などがある。

松岡雅雄／まつおか・まさお

京都大学ウイルス研究所教授。医学博士。1957年、大分県生まれ。熊本大学医学部卒業。専門はウイルス学、血液学。ヒトレトロウイルスによっておきる疾患(ATLやエイズ)の病態の解明や、治療法の開発などの研究を行っている。

山内一也／やまのうち・かずや

東京大学名誉教授。農学博士。1931年、神奈川県生まれ。東京大学農学部獣医学科卒業。専門はウイルス学。著書に『ウイルスと地球生命』、『ワクチン学』などがある。

吉川研一／よしかわ・けんいち

同志社大学生命医科学部医情報学科教授。工学博士。1948年、兵庫県生まれ。京都大学工学部石油化学科卒業。専門は生命物理学、非線形科学。生命の本質を探る研究に取り組んでいる。

リチャード・ドーキンス／

Richard Dawkins

イギリス、オックスフォード大学オリオルカレッジ名誉フェロー。ケニア共和国出身。専門は進化生物学。進化論を一般読者に向けて解説した著書『利己的な遺伝子』で有名である。ほかに、『盲目の時計職人』、『神は妄想である』など多数の著書がある。

Staff

Editor in Chief	水谷 仁
Editorial Management	高嶋秀行 中村真哉 福田伊佐央
Art Direction	吉澤公紀
Editorial Staff	小西真紀子

Photograph

3	Katja Heinemann/NovusSelect, 安友康博 / Newton Press, 森本勝義 /Newton Press, Arizona State University, 松井孝典, 同志社 大学 吉川研一	92-93	東京大学大気海洋研究所 三澤信彦 94 NASA image courtesy Jeff Schmaltz 95 MODIS Rapid Response team 101 THOMAS DEERINCK/SPL/PPS 102-103 東京工業大学 瀬ノ上正浩 104-105 情報通信研究機構 大岩和弘 105 愛知教育大学 住野豊・東京大学 永井健 107 東京大学 田端和仁 109 名古屋大学 伊藤孝・鈴木麗麗・有田隆也 114 the iGEM Foundation and Justin Knight 115 the iGEM Foundation 116 iGEM and Justin Knight 117~119 提供: 東京工業大学 iGEM チーム 136 NASA, ESA, and L. Roth (Southwest Research Institute and University of	Cologne, Germany), NASA/JPL/Space Science Institute 137 NASA, NASA/JPL/Space Science Institute 138 NASA Ames/SETI Institute/JPL-Caltech 141 NASA/JPL-Caltech 143 Katja Heinemann/NovusSelect, 安友康博 / Newton Press, 森本勝義 /Newton Press, Arizona State University, 松井孝典, 同志社大学 吉川研一 144 Katja Heinemann/NovusSelect 146 Arizona State University 147 松井孝典 148 安友康博 /Newton Press 149 同志社大学 吉川研一 151 森本勝義 /Newton Press
---	--	-------	---	--

Illustration

Cover Design	デザイン室 宮本理恵子 (イラスト: 黒田清桐, Newton Press)	22 23 25 ~ 35	Newton Press, 藤井康文 Rey. Hori Newton Press	72 ~ 73	Newton Press (資料提供: 国立遺伝学研究所 Newton Press	115 117 121 ~ 135	デザイン室 デザイン室 田久保純子 Newton Press
表 2	Newton Press	41 ~ 54	Newton Press	74	Newton Press (資料提供: 国立遺伝学研究所	152 ~ 154	Newton Press
2	Newton Press	56 ~ 57	デザイン室	75	Newton Press	表 4	Newton Press
3	Newton Press	61 ~ 67	Newton Press	80 ~ 88	Newton Press		
5 ~ 9	Newton Press	68 ~ 69	月本事務所 (AD: 月本佳代美, 3D: 今村香代)	90-91	Newton Press		
12 ~ 13	黒田清桐			96-97	Newton Press		
14 ~ 21	Newton Press	70-71	Newton Press	110 ~ 113	Newton Press		

初出

「最初の生命」はどう誕生した? Newton 2007年3月号
新・進化論 Newton 2007年12月号
生命を宿す惑星の条件 Newton 2010年3月号
ウイルスとは何か? Newton 2011年2月号
体を脅かすウイルスたち Newton 2012年3月号

ダニが運ぶ新種のウイルスとは? Newton 2013年5月号
生命とは何か Newton 2013年7月号
新種の巨大ウイルスは未知の生物群のなごり? Newton 2013年10月号
多能性幹細胞 Newton別冊『人体新書 ILLUSTRATED 改訂版』を改変

ニュートン別冊

やさしくわかる

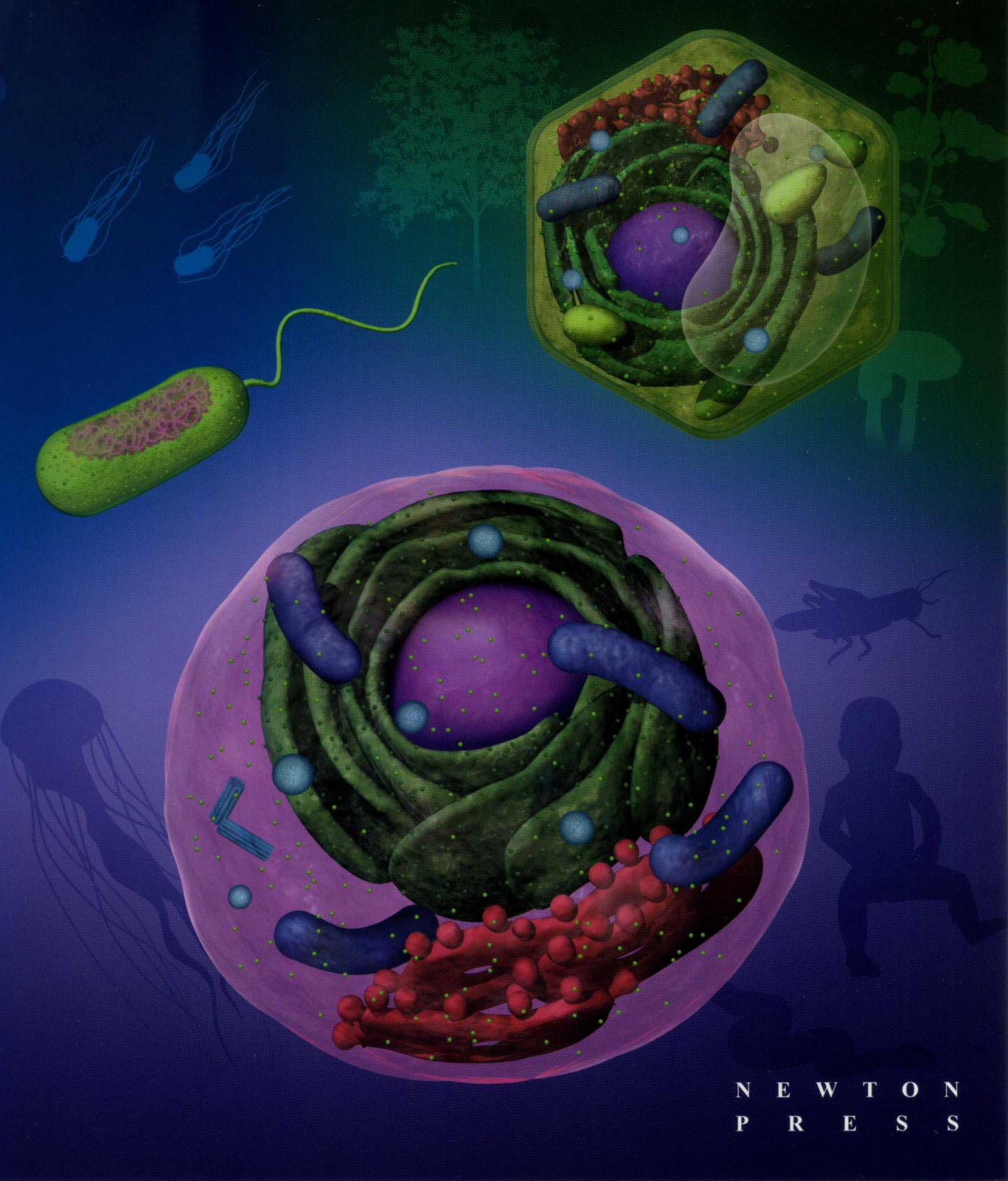
生命の科学

2014年8月15日発行

発行人 高森圭介

発行所 株式会社 ニュートンプレス
〒151-0053 東京都渋谷区代々木2-1-1 新宿マインズタワー
TEL 03-5352-6054 FAX 03-5352-6058

© Newton Press 2014



N E W T O N
P R E S S



9784315519976



1929445025937

ISBN978-4-315-51997-6

C9445 ¥2593E

雑誌66885-34

Printed in Japan