

First Book

# 遺伝子・DNA わかる

が

マンガと豊富なイラストでわかりやすい!

夏 緑 文

真右衛門 画

技術評論社

First Book

# 遺伝子・DNA わかる

が

マンガと豊富なイラストでわかりやすい!

夏緑文

真右衛門画



技術評論社



## まえがき

かつて、元アメリカ大統領ビル・クリントンは、20世紀の最後の50年は物理学の時代だったが、21世紀の最初の50年は生物学の時代になるだろうと予言しました。

果たして現在、飽和した機械産業は衰退をはじめました。それにかわって台頭してきたのが、クローン技術を用いた再生医療や遺伝子治療などのバイオ技術です。iPS細胞の発明をはじめとする日本の再生医療は世界のトップを走り、外貨の獲得に貢献しています。

このように、21世紀の前半の50年を生きるわれわれにとって、遺伝子・DNAの知識は絶対的に必須です。

そして遺伝子の研究をする分子生物学的には、DNAの時代は1953年のDNA二重らせん構造の発見に始まり、2003年のヒトゲノムの全解読によって一区切りができました。現在はその次にくるポストゲノム時代として、再生医療やオーダーメイド医療の研究が始まっています。

そこで本書では、遺伝子についての知識を理解しやすい流れに整え、わかりやすい読み物として記述しました。最先端の知識について、簡潔にわかりやすく説明してあります。

その理解をより直感的に助けるため、今回も真右衛門先生に手伝っていただき、マンガやイラストで理解の補助を行いました。

21世紀の世界を生き残るための基礎知識として、どうぞ本書をお役立てください。



ファーストブック  
**遺伝子・DNAがわかる** Contents

はじめに ..... 3

第1章

**オトコとオナナのDNA** ..... 21

1 DNAとは何か ..... 22

● 遺伝子を記録するDNA ..... 22

● 染色体とDNA ..... 23

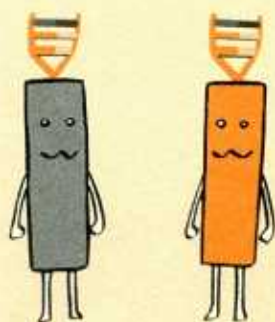
● 遺伝子の数 ..... 25

『めぐりあう遺伝子、桃姫の大冒険！』

第1話

桃ももから生まれた染色体せんしよくたい ..... 27





## 2 骨もDNAも軽い鳥

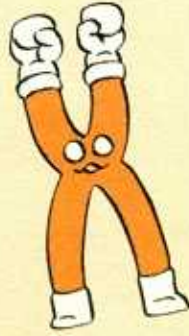
- 必要十分な遺伝子の数 ..... 28
- ムダをはぶいた鳥のゲノム ..... 29
- 魚と両生類の巨大ゲノム ..... 30
- 巨大ゲノムの利点 ..... 32

『めぐりあう遺伝子<sup>いでんし</sup>と桃姫<sup>ももひめ</sup>の大冒険<sup>だいぼうけん</sup>！』

第2話 さえた遺伝子<sup>いでんし</sup>の使い方<sup>つかいかた</sup>！ ..... 33

## 3 父ロバ母ウマ<sup>だいなり</sup>父ウマ母ロバ

- 倍数体のできかた ..... 34
- 大きな倍数体 ..... 35
- 欲張りな倍数体 ..... 36
- 種無しスイカの種はどこ ..... 37



## 4

## 男をこえたスーパーマン

● 子孫ができない異質倍数体

37

『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険!』

## 第3話

怪力桃姫は雑種強勢?

39

● 数のしびりがきつい常染色体

40

● X染色体が足りないと未成熟な女子に

41

● 男を作る遺伝子Sry

42

● Y染色体いっぱいですーパーマンに

44

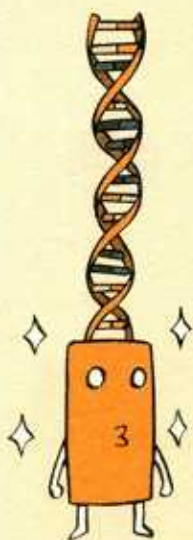
『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険!』

## 第4話

妙なるゲノムのハーモニー

45





## 5 性と交尾は絶滅を救う ..... 46

- 交尾で作る多様な遺伝子 ..... 46
- 両性具有のカタツムリ ..... 48
- この世に男と女が必要な理由 ..... 49

『めぐりあう遺伝子〜桃姫の大冒険!』

### 第5話 なぜ鬼は恋をするのか ..... 51

## 6 性転換する動物たち ..... 52

- 気分次第で性別チェンジ ..... 52
- 環境ホルモンで性別は変わるのか ..... 54
- 気温で変わる男と女 ..... 56

『めぐりあう遺伝子〜桃姫の大冒険!』

### 第6話 最強戦士は女らしく ..... 57



7

地球上から男が消える日

58

● 1000万年後、Y染色体が消滅する

58

● 男と女の三億年

58

● 性転換する哺乳類

62

『めぐりあう遺伝子<sup>いでんし</sup>と桃姫<sup>ももひめ</sup>の大冒険<sup>だいぼうけん</sup>!』

第7話

Yから生まれた桃太郎<sup>ももたろう</sup>!

63

8

性のめばえ

64

● 下等動物の性

64

● 細菌のオスとメス

64

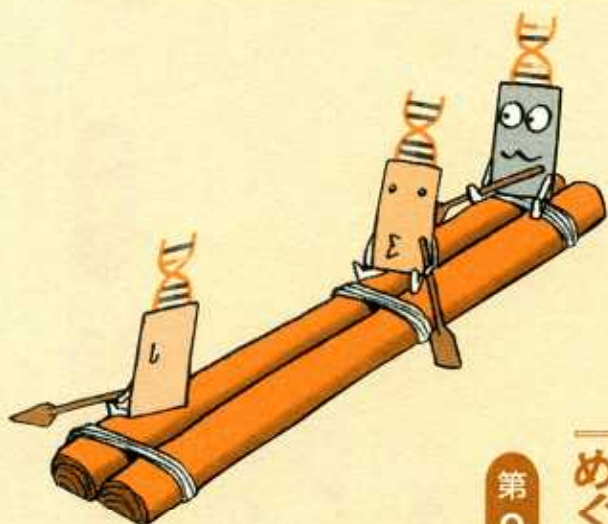
● 交雑によるゲノムの多様性とその意義

66

● 風変わりな性決定

67





『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険!』

第8話 恋する遺伝子は翼に乗って

69

## 9 セクシーなネアンデルタール・マッチョマン

70

● 母系染色体と父系染色体

70

● 原人たちの遺伝子

71

● ネアンデルタール男にひかれる人類女

74

『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険!』

第9話 鬼を愛した女たち

75



## 第2章

## 46億年の遺伝子

## 1 石から生まれたゲノム

● 宇宙創生と核酸の誕生

● 温泉が作ったRNA

● RNAワールドから生命へ

『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険!』

## 第10話

石猿の遺伝子は進化の夢を見るか

## 2 生命の中心教義・セントラルドグマ

● RNAワールドからDNAワールドへ

● CD↓カセットテープ↓音楽

● ヒ素DNAを持つ細菌







『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険!』

第11話

生命のドグマ!

89

### 3 死がみちびく進化

●なぜ人は死ぬのか

90

●進化を後押しした大絶滅の歴史

91

●カンブリア爆発の前の原核生物爆発

93

『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険!』

第12話

絶滅と進化は不死鳥のように

95

### 4 永遠の生命

●生命を守る死のスイッチ

96

●自殺遺伝子が作る指

97



## 5

## 弱肉強食の遺伝子

● 老化をつかさどるテロメア

● 60年生きた細胞

『めぐりあう遺伝子』桃姫の大冒険！

第13話 不死鳥の水かき！

● 食うDNAと食われるDNA

● 食う微生物と食われる微生物

● ゲノムを食うもの

● ウイルスと戦うRNA

『めぐりあう遺伝子』桃姫の大冒険！

第14話 鬼ヶ島・弱肉強食の掟！

98

99

101

102

102

103

104

106

107





## 6 共生者たちのゲノム

108

● 私の中の他人

108

● ミトコンドリアの特殊なゲノム

109

● 葉緑体の歴史

111

『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険！』

第15話 頭の桃の木は寄生体？

113

## 7 敵か味方か？ レトロウイルスと生命の進化

114

● ゲノムの中に潜りこむウイルス

114

● 核ゲノムに割りこむウイルスゲノム

116

● がらくたDNAが導く進化

118

『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険！』

第16話 遺伝子破壊攻撃を防御せよ！

119



## 8 遺伝子の発見者メンデル

● 遺伝子の発見 ..... 120

● 劣性遺伝子が劣っているわけではない ..... 122

● メンデルのウソ ..... 122

● 孫が祖父に似る隔世遺伝 ..... 124

『めぐりあう遺伝子<sup>いでんし</sup>と桃姫<sup>ももひめ</sup>の大冒険<sup>だいぼうけん</sup>！』

第17話

角<sup>つの</sup>は優性<sup>ゆうせい</sup> 桃<sup>もも</sup>は劣性<sup>れっせい</sup>？

125

## 9 劣性遺伝子をおさえる優性遺伝子

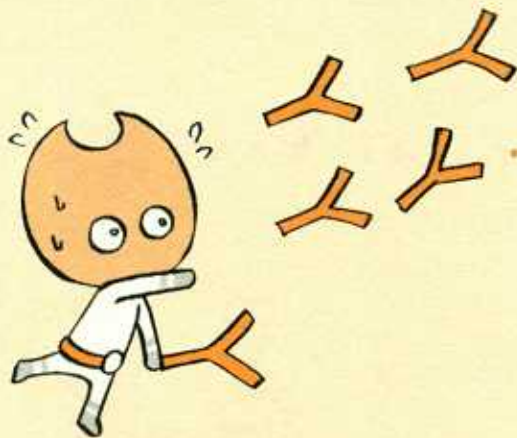
● 145年目の真実 ..... 126

● 沈黙のX染色体 ..... 126

● 抑えきれない遺伝子 ..... 128

● 風が吹いた先にあるものは ..... 129





### 第3章

## 遺伝子・DNAの最前線

『めぐりあう遺伝子<sup>いでんし</sup>と桃姫<sup>ももひめ</sup>の大冒険<sup>だいぼうけん</sup>！』

### 第18話

不完全な桃太郎<sup>ふかんぜんももたろう</sup>

131

## 1 400年前のクローン生物

● クローンとは？

134

● ウンシュウミカンは全てクローン

135

● 現在の植物クローン

136

● 植物クローンの作り方

137

『めぐりあう遺伝子<sup>いでんし</sup>と桃姫<sup>ももひめ</sup>の大冒険<sup>だいぼうけん</sup>！』

### 第19話

接ぎ木<sup>つぎき</sup>で増えるクローン鬼<sup>おに</sup>

139



### 3

## 万能細胞と再生医療

- クローンを作る万能細胞 ..... 146
- 自己と他者を断絶する免疫 ..... 146
- 再生医療の例 ..... 148



### 2

## クローン動物の作りかた

- 60兆個のクローン ..... 140
- 皮膚の傷がなかなか埋まらないのは ..... 140
- 体細胞クローンの作りかた ..... 142
- クローン動物の商業利用 ..... 142
- 絶滅動物の復活 ..... 144

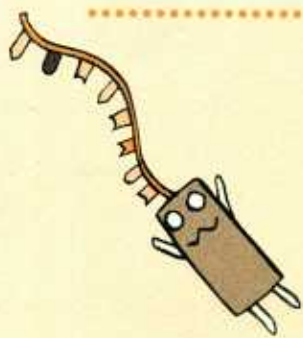
第20話

桃太郎複製計画!?

『めぐりあう遺伝子<sup>いでんし</sup>、桃姫<sup>ももひめ</sup>の大冒険!』  
もちたろうふくせいけいかく

145





## 4

### 遺伝子を見つける方法

● 再生医療のしくみ

● iPS細胞の利用法

『めぐりあう遺伝子<sup>いでんし</sup>と桃姫<sup>ももひめ</sup>の大冒険<sup>だいぼうけん</sup>！』

第21話

再生遺伝子<sup>さいせいいでんし</sup>のカスケード！

152

● 遺伝子の探しかた

● 新型インフルエンザとDNA検査

● DNA捜査の落とし穴

● ハイルブロン<sup>ハイルブロン</sup>の怪人

『めぐりあう遺伝子<sup>いでんし</sup>と桃姫<sup>ももひめ</sup>の大冒険<sup>だいぼうけん</sup>！』

第22話

もてあそばれた角遺伝子<sup>つのいでんし</sup>！

157

156

155

154

152

151

150

149



## 5 太陽からDNAを守るスイッチ

- 紫外線と皮膚ガン ..... 158
- ほくろとメラノーマ ..... 160
- 肌が黒くなるスイッチ ..... 161

『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険!』

第23話

修羅の覚醒・暴走する細胞!

163

## 6 遺伝子組み換えと遺伝子治療

- 遺伝子組み換えの方法 ..... 164
- 遺伝子組み換え作物の危険性 ..... 164
- 遺伝子組み換えを利用した遺伝子治療 ..... 166
- 遺伝子治療で永遠の命は作れるか ..... 168





## 7

### 現在進行形の進化

『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険!』  
第24話 秘策・遺伝子組換えで超酵素パワー!!

169

● 絶滅の原因と生物種の統計

170

● 現在も続く進化と新種

172

● 人間が観察した進化

173

『めぐりあう遺伝子と桃姫の大冒険!』

第25話

進化は二人を分かつのか

175

## 8

### 感染するタンパク質・プリオン

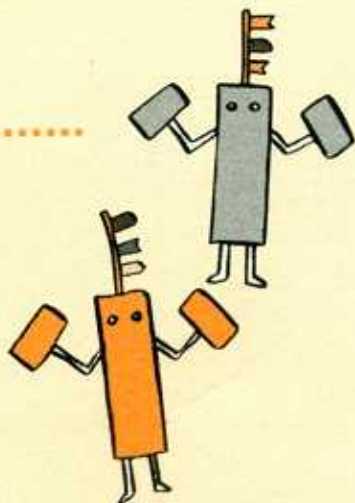
176

● 狂牛病の謎

176

● 遺伝性タンパク質、か?

176



## 索引

## 9

## 遺伝子ダイジェスト〜人類の到達点

● 遺伝子のあゆみ〜遺伝学から染色体へ

● DNAのあゆみ〜ヌクレインからDNAへ

● めぐり逢い・遺伝子とDNA

● ゲノムフロンティアとポストゲノム時代

『めぐりあう遺伝子〜桃姫の大冒険!』

第27話

探しつづけた宝物

● ゆるんだゴム

● 無敵のプリオン

『めぐりあう遺伝子〜桃姫の大冒険!』

第26話

その牙を止めて!

191

187

185

184

183

182

182

181

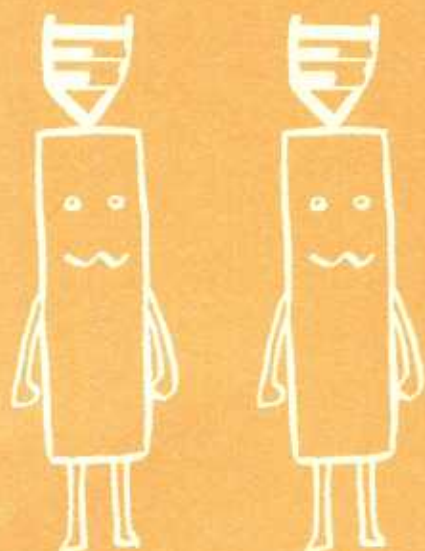
179

177



第1章

# オトコとオシナのDNA





# DNAとは何か

## 遺伝子を記録するDNA

人間の体は60兆個の細胞でできています。

皮膚も、筋肉も、髪の毛の1本1本まで、すべて細胞から作られています。

ひとつひとつの細胞は、どろどろしたタンパク質の溶液（細胞質）を油の膜（細胞膜）で包んだ、水風船のような構造をしています。

この細胞質の中に、さらに油の膜で包まれた小さな水風船が浮かんでいます。これが核（細胞核）です。

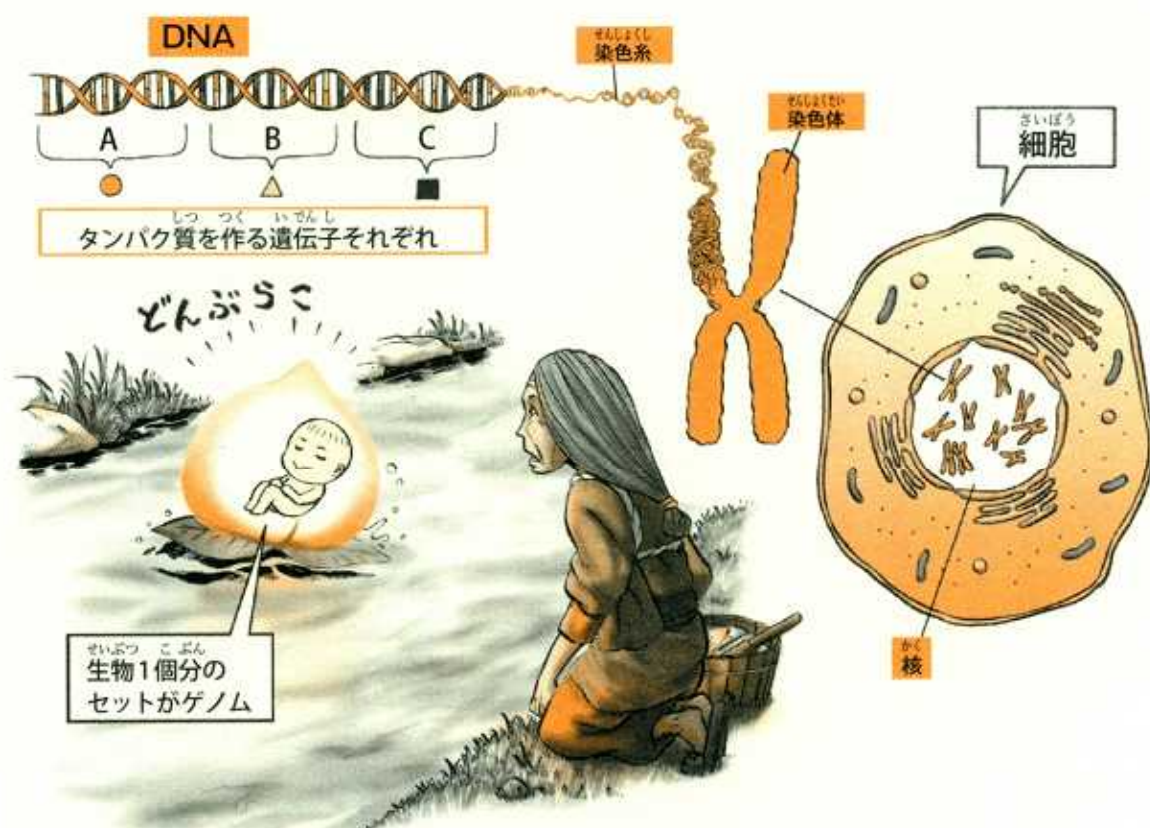
核の中には、染色体というもやもやした長い糸のようなものが入っています。この染色体の正体がDNA（デオキシリボ核酸）という物質です。DNAは、（デオキシリボ）ヌクレオチドと呼ば

れる小さな分子が、二重らせん状に長く連なったもので、遺伝情報を記録することができます。

1個の核の中にあるDNAには、1人の人間を作るために必要なタンパク質の設計図が全て記録されています。このタンパク質の設計図が遺伝子（遺伝情報）で、人間はおよそ2万2000個の遺伝子を持っています。遺伝子の数には、多少の個人差があります。1個の生物をつくるために必要な、全ての遺伝子のセットのことを「ゲノム」と呼びます。

人間はこのゲノムを、父親から1セット、母親から1セット、受けついでいます。1個の核の中にゲノムが何セットあるかを示すのが、核相です。ゲノム1セットの核相をnと表現します。人間は





ゲノムを2セット持っているので、核相は $2n$ です。1セットの人間のゲノムは、30億個のヌクレオチド（塩基対）からできています。人間の核相は $2n$ なので、1個の核には60億個の塩基対がふくまれています。

1個の核の中にある60億塩基対分のDNAをのばすと、1・8メートルにもなります。しかし、DNAの幅はわずか2ナノメートル（1ナノメートルは100万分の1ミリ）です。

なお、1個の核の直径はわずか5マイクロメートル（1マイクロメートルは1000分の1ミリ）しかありません。この小さな核の中に、長いDNAは規則正しくたたまれて入っています。

## 染色体とDNA

細胞は分裂することで増殖します。細胞分裂のとき、核も分裂しますが、そのとき核の中に「X」の形をした物体がたくさんあらわれます。

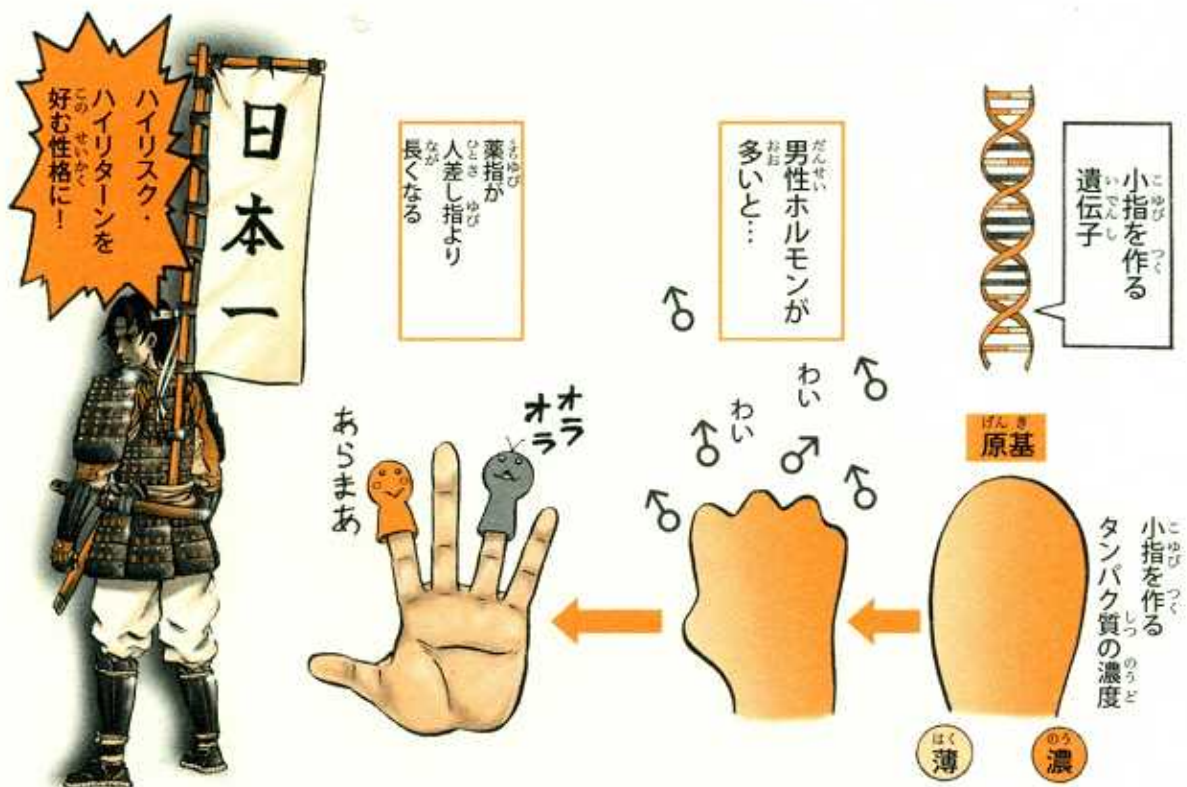
これは、DNAの長い糸を、細胞分裂しやすくするため糸巻きのように巻いたもので、染色体といっています。DNAの糸を染色糸せんしきといっています。これは、酢酸カーミンなどの染色液で染まることから名づけられました。

人間の場合、1セットのゲノムを巻くと23本の染色体になります。人間の核相は $2n$ なので、 $2n$  46本の染色体を持っています。

23本のうち、22本は男女共通の常染色体じょうしよくで、大きい順に1番から22番までの番号が振られています。残りの1本は性染色体で、X染色体とY染色体があります。

性染色体は、男女の性別を決める染色体です。2セットのゲノムに、女は両方Xを持っています。男はXとYを1本ずつ持っています。

染色体の数や形は、生物によって決まっています。





## 遺伝子の数

人間のゲノム1セットにふくまれる遺伝子の数は、およそ2万2000個です。およそ、というのは、遺伝子の数に個人差があるからです。

たとえばX染色体は1億6300万塩基対で遺伝子の数は1141個ですが、Y染色体は5100塩基対で遺伝子も255個しかありません。また、Y染色体はX染色体には無い遺伝子を持っています。つまり、XXを持つ女とXYを持つ男とでは、持っている遺伝子の数が変わってきます。

他人が持っていない遺伝子を持っていたり、同じ遺伝子を重複して持っている、遺伝子の数は増えます。逆に、ふつうは持っている遺伝子を持っていないかったり、持っているはずの遺伝子が壊れていると、遺伝子の数は減ります。

遺伝子は生命の設計図なので、基本的には、その数が多いほど複雑な設計図からなる高等な生物

が作れます。

たとえば下等な細菌であるマイコプラズマのゲノムは、60万塩基対で480遺伝子。平均的な細菌である大腸菌は、460万塩基対で4300遺伝子。これら細菌は、DNAが核につつまれた構造をしていない下等な生物で、げんかく原核生物と呼ばれます。

原核生物よりも、核の構造を持った真核生物、また真核生物の中でも、単細胞生物より多細胞生物のほうが、ゲノムのサイズは大きくなります。

シヨウジヨウバエが1・6億塩基対で1万4000遺伝子、背骨を持った脊椎動物せきついの祖先であるナメクジウオが5億塩基対で2万1600遺伝子、ハツカネズミは26億塩基対で2万929遺伝子です。哺乳類のゲノムサイズは、だいたい25億〜30億ヌクレオチドです。

魚類から哺乳類まで、脊椎動物の遺伝子の数は、だいたい2万個ぐらいで共通しています。さらに、

ナメクジウオが持っている遺伝子の6割は、人間と同じです。つまり、生命体の基本的な部分を作るために必要な遺伝子の数に対して、体づくりの複雑さにはそれほどたくさんの遺伝子は必要ないのです。

たとえば5本の指はそれぞれ違った形をしています。ですが、そのために必要な遺伝子は5個ではなく、わずか1個です。

受精卵が発生をはじめて胎児になり、手ができるとき、手のもとになる原基<sup>げんき</sup>とよばれる組織の端っこで、小指を作る遺伝子がはたらきはじめます。この遺伝子は、小指を作るタンパク質を作ります。このタンパク質は手の原基の中に分散していき、小指の部分で一番濃く、親指の部分で一番薄いという濃度のかたより（濃度勾配<sup>こうばい</sup>）ができます。

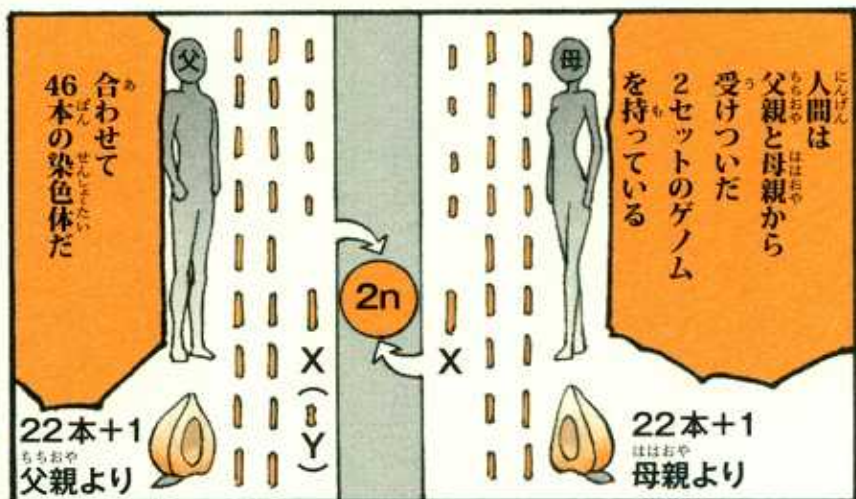
すると、このタンパク質が一番濃いところの原基が小指へ、一番薄いところの原基が親指へと分化します。

人差し指・中指・薬指は、中間ぐらいの濃度のところにできて、似たような形をしています。しかし、この3本の長さに、別のタンパク質である男性ホルモンが関係しています。

胎児期に男性ホルモンが多いと薬指が人差し指より長く、少ないと人差し指のほうが長くなります。このようにして、少ない遺伝子で複雑な体が形づくられます。

なお、男性ホルモンは脳の発生にも影響をおよぼすので、薬指が長い人（胎児期に男性ホルモンの多くさらされた人）は、ハイリスク・ハイリターンを好む男性的な性格をしています。その一例として、すぐれた投資家は、薬指が長い傾向があります。









## 骨もDNAも軽い鳥

### 必要十分な遺伝子の数

高等動物が複雑な体を持っているからといって、必ずしもたくさん遺伝子が必要ではありません。少ない遺伝子を使いまわしたり組みあわせて、複雑な体を作りあげています。

反対に、遺伝子が多くても必ずしも複雑な体を持っているとはかぎりません。線虫は線形動物の仲間で、これは昆虫のような節足動物よりも、カタツムリのような軟体動物よりも、さらにはミミズのような環形動物よりも下等な動物です。が、その遺伝子の数は1万8000個で、シヨウジョウバエの1万4000遺伝子よりも4000個も多くの遺伝子を持っています。

遺伝子は便利な道具のようなもので、いろいろ

たくさん持っているほうが、生存競争に有利です。そこで下等動物は、どんどん新しい遺伝子を増やして進化していきます。

しかし、道具もあまり多すぎると、使いこなせなくなってきました。そこでこんどは道具を整理して、不要な道具や重複している道具や他のもので代用できる道具を捨て、効率よく道具を使えるように工夫ははじめます。

たとえば甲殻類のミジンコは、ゲノムは2億塩基対と小さいのに、遺伝子は約3万9000個と、これまで知られている動物ゲノムの中では最も多いのですが、甲殻類よりも高等な昆虫では遺伝子の数がその半分の2万個しかありません。脊椎動物も、だいたい2万個ぐらいの遺伝子数に落ちつ



いています。

## ムダをはぶいた鳥のゲノム

線虫は多細胞生物の中では比較的ゲノムサイズが小さく、ショウジョウバエの1・6億塩基対に対して、1億塩基対しかありません。遺伝子の数は多いのに、ゲノムサイズは小さいのです。

じつはハツカネズミの場合、26億塩基対のゲノムのうち、遺伝子を記録している領域はわずか3%です。残りの97%は、染色体の形を安定させたり、遺伝子のはたらきを調節しています。

遺伝子以外のムダな部分の量は、進化の中で、必要に応じて調節されています。ムダな部分が多くても少なくても、それぞれにメリットがあるのですが、まずはムダの少ない鳥類のゲノムについて紹介しましょう。

鳥類は爬虫類から進化しましたが、爬虫類のゲノムが10億〜30億塩基対であるのに対し、鳥類の



ゲノムは7億〜10億塩基対しかありません。

人間のゲノムの30億塩基対のうち、半分は反復配列という、意味をもたないDNAです。このゴミは、DNA複製のミスや、レトロウイルスというウイルスの感染によって増えていきます。

逆に言えば、ゲノムサイズを削ろうと思えば、これらのゴミのぶんは削る余裕があるのです。

鳥類は、保温のためにウロコを羽毛に変えた恐竜から進化しました。その羽毛を、空を飛ぶために使うようになりました。大地を歩くための丈夫な重い骨も、中空にして軽くし、さらに空を飛びやすくなりました。

それと同時に、ゲノムサイズを削ることで、細胞そのものの軽量化も行ったのです。

## 魚と両生類の巨大ゲノム

フグの仲間には脊椎動物の中でゲノムサイズがもつとも小さく、4億塩基対しかありません。人間

ではゲノムの半分を占める意味のない反復配列が、フグでは1割にも満たないのです。同じ魚類でも、ハイギョは1400億塩基対もの巨大なゲノムを持っています。

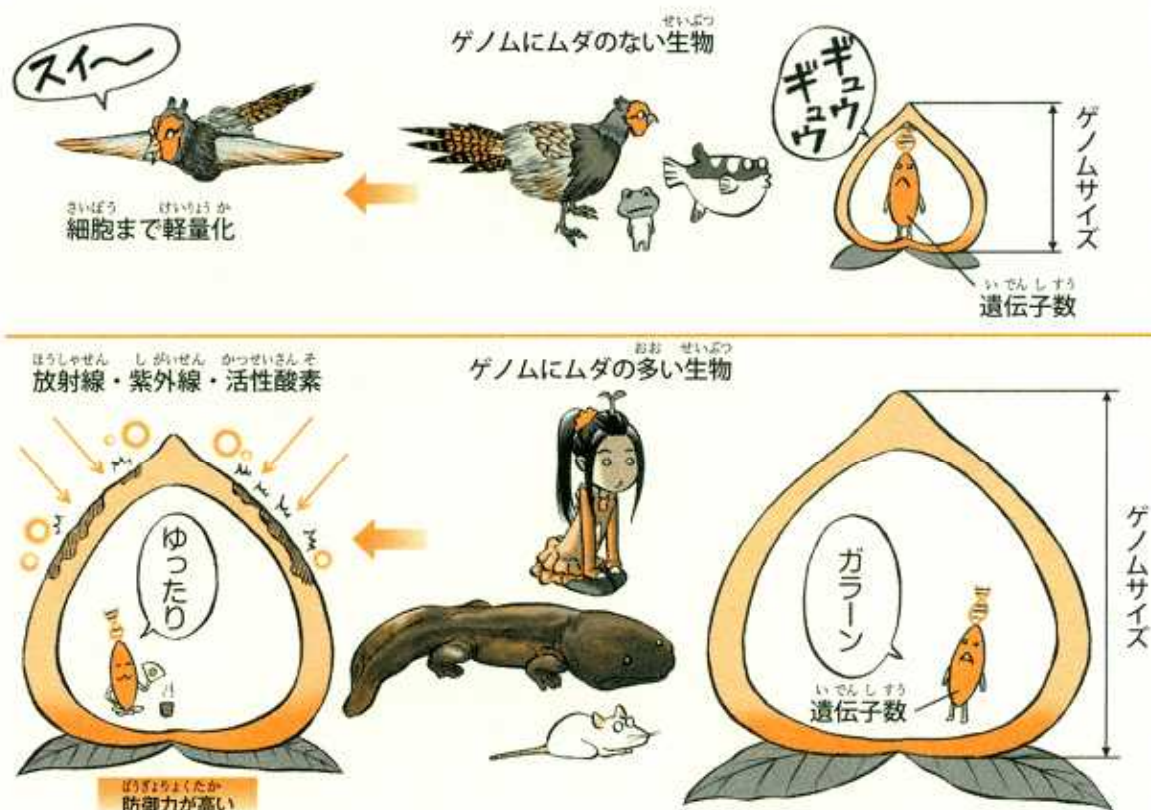
また両生類では、カエルは2万1000個の遺伝子を持っていますが、ゲノムサイズは17億塩基対と人間の半分ほどしかありません。しかし同じ両生類であるイモリやオオサンショウウオは、人間の30倍、1000億塩基対もの巨大なゲノムを持っています。

このように、魚類や両生類のゲノムサイズの大さきには、大きな振れ幅があります。

ゲノムサイズが大きくなる原因のひとつに、魚類や両生類がかんたんに倍数体を作ることがあります。倍数体とは、ふつう核にふくまれるゲノムは2セット（核相 $2n$ ）ですが、これが $3n$ や $4n$ になることです。

植物もかんたんに倍数体を作るので、ゲノムサ





イズは大きなものが多いです。

反対に高等な鳥類や哺乳類では、このような倍数体は致命的です。倍数体については、34ページでくわしく説明します。

魚や両生類や植物において倍数体を作るメリットは、まず同じ遺伝子の個数が増えることで、万が一ある遺伝子がこわれたときのスペアを確保することが出来ます。

遺伝子は、レトロウイルスやトランスポゾンといった、DNA配列の中に別のDNA配列を割りこませてくるような因子によって自分のDNA配列を乱されると、つぶれてしまいます。

また、宇宙や岩石からの放射線、紫外線、化学薬品や酸素呼吸にともなう活性酸素によって遺伝子の中のDNA配列が壊されてしまうと、やはりつぶれます。重要な遺伝子がつぶれると、胚発生できずに死んでしまいます。

そこで、ゾウリムシのような原生動物をはじめ、

多くの生物は遺伝子のスペアを確保するために $2n$ の核相を持っています。しかし、両方の遺伝子ともつぶれることもあるので、 $3n$ や $4n$ といった倍数体になると、より安全になるのです。

ただしゲノムサイズが大きいと、DNAの複製に時間がかかるため、細胞分裂にも時間がかかり、生長は遅くなり、体も重くなります。溪流にひそむサンショウウオなど、おだやかで変化の少ない環境に住む生物なら、大きなゲノムを持っていたのも大丈夫だったのでしょうか。

## 巨大ゲノムの利点

人間もフグも遺伝子の数に大差はありませんが、フグのゲノムは4億塩基対でムダなDNA配列は1割、人間のゲノムは30億塩基対でムダなDNA配列は半分もあります。

遺伝子の数に大差が無いということは、ゲノムサイズが大きいほど、遺伝子を記録したり遺伝子

のはたらきを助けたりしていない、無意味なDNA配列の割合が多いことになります。

ゴミのようなDNA配列が増えると、それだけDNAの複製に時間とエネルギーがかかるので、生存には不利になるように思えます。

しかし、このゴミ配列は、遺伝子変異の緩衝材になっています。すなわち、全てのDNA配列が生存に重要な遺伝子だと、紫外線などでDNAが傷ついたら、致命傷になって死んでしまいます。そこで、重要でないゴミ配列でかさ増ししておく、と、傷ついてもなかなか致命傷にならないのです。

また、タンパク質の合成を行うリボゾームRNAの遺伝子も同様です。この遺伝子は、細胞内に大量に存在するリボゾームRNA（全RNAの7割）を作るため、ゲノムの中に数百〜数千個の同じコピーがあります。が、半数はRNAを作らず、ゲノムの安定性を保持する役割をにいます。









## 父ロバ母ウマV父ウマ母ロバ

だいなり

### 倍数体のできかた

ふつう核にふくまれるゲノムは2セット（核相  $2n$ ）ですが、これが  $3n$  や  $4n$  になるのが倍数体です。

$2n$  の生物は、核の中にゲノムを2セット持っています。細胞分裂のときは、これをそれぞれ複製して、2セットを2コピー作り、分裂した娘細胞（じよう）にそれぞれのセットを1コピーずつ伝えます。それで、娘細胞も  $2n$  になります。

しかし、オスとメスが子供を作るとき、配偶子（精子と卵子）がそれぞれ  $2n$  のゲノムを持っていたら、それらが合体してできた受精卵は  $4n$  になってしまいます。それで、ふつうは減数分裂という特別な細胞分裂をおこなって、核相  $n$  の配偶子を

作ります。

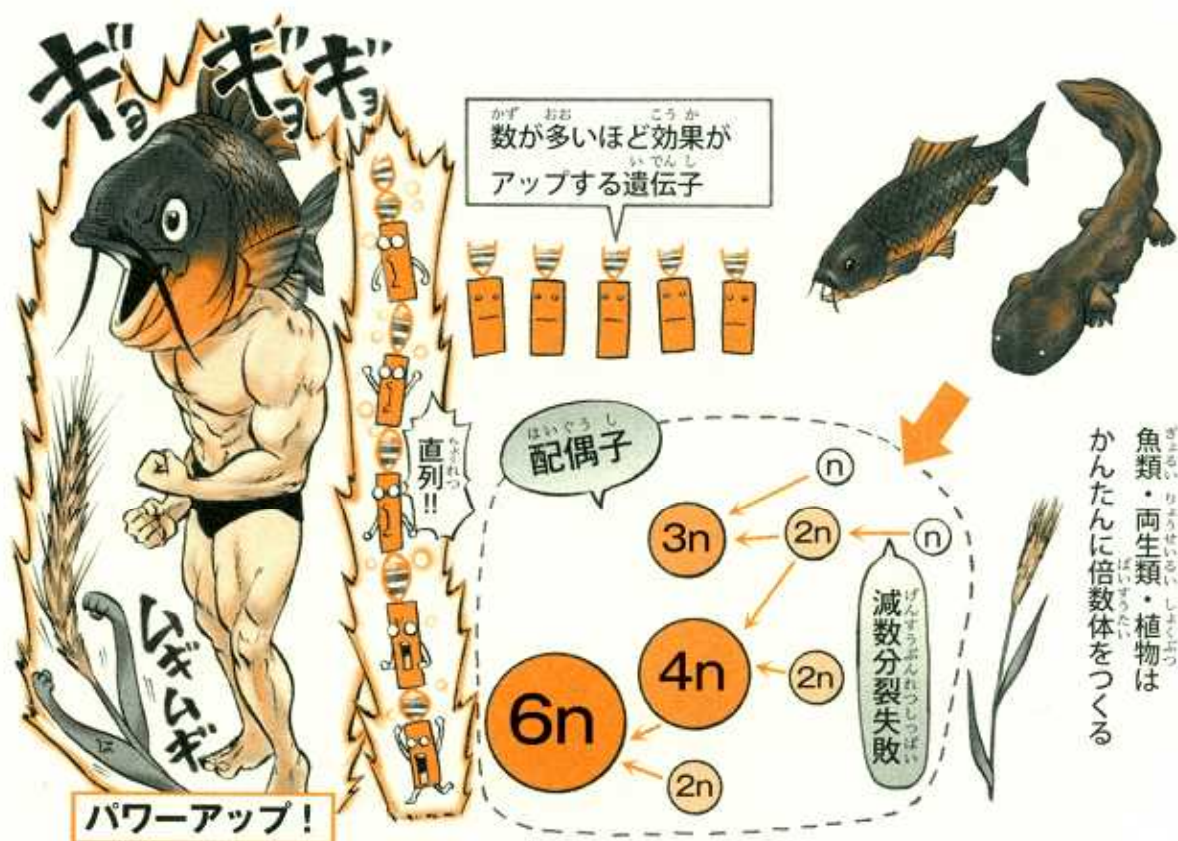
ところが、この減数分裂に失敗すると、核相  $2n$  の配偶子ができます。

核相  $2n$  の精子や卵子がふつうの核相  $n$  の精子や卵子と受精すると、核相  $3n$  の3倍体になり、 $2n$  とうしで受精すると4倍体になります。

高等動物では、遺伝子のはたらきが非常に厳密に制御されているので、このような倍数体は発生の早い段階で発生が止まってしまい、生存できません。

しかし、魚類や両生類などの下等動物や植物は、かんたんに倍数体を作ることができます。





## 大きな倍数体

哺乳類や鳥類といった複雑な体の形をもつ高等動物は、厳密に遺伝子が制御されているため、遺伝子の数が増えると、さじ加減が狂って正常に発生できなくなってしまう。

それを防ぐため、同じ遺伝子を2セット持っていたとしても、その片方しかはたらかせず、もう片方はDNAにカギをかけてはたらきを止めています(このカギのことをメチル化といいます。くわしい説明は126ページ)。

そのため、同じ遺伝子を2個持っていたとしても、ふつうはたらく遺伝子は1個だけなのですが、ときどき、数があればあるほど効果がアップする遺伝子があります。たとえば身長を高くする遺伝子は、1個より2個持っているほうが、身長が高くなります。

魚類や両生類のようにかんたんに倍数体を作る生物は、遺伝子の数が増えることで、遺伝子のは

たらしがその数に応じてアップするため、体が大型化して生存競争に有利になります。

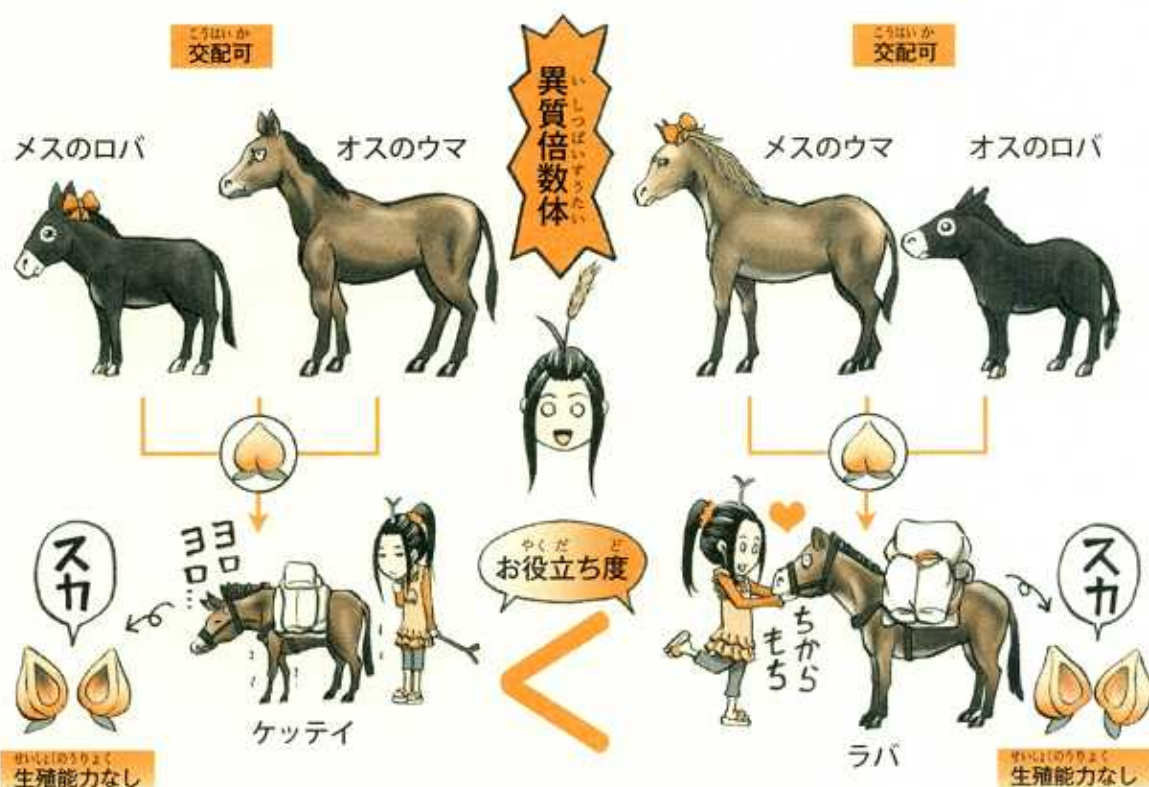
## 欲張りな倍数体

パンコムギはパンを作る小麦粉をとるための小麦で、その核相は $6n$ の6倍体です。

植物は、動物にくらべて体の形がはるかに単純です。動物は、頭や手足や神経や内臓など、非常に複雑な体の構造を持っていますが、植物は単純な茎と葉っぱの繰り返しです。そのため、植物は遺伝子の重複に柔軟で、かんたんに倍数体を作ります。

パンコムギは、3種類のコムギが交雑して6倍体となっています。つまり3種類のコムギのゲノムを全て持っています。

まず野生の一粒コムギ( $2n \parallel AA$ )と別の野生コムギ( $2n \parallel BB$ )が交雑して、両方のゲノムを持つマカロニコムギ( $4n \parallel AABB$ )が生まれま





した。このマカロニコムギ(4n)と野生のタルホコムギ(2n||DD)が交雑して、パンコムギ(6n||AABBD)が生まれました。

マカロニコムギ(4n)やパンコムギ(6n)のような、2種類以上の異なったゲノムを持つ倍数体を、異質倍数体と呼びます。このような異質倍数体では、両方の親の形質を欲張りにいいところ取りした上に、2種類以上の優秀なゲノムを合わせた雑種強勢が起ることで、より優秀な種を作ることが期待できます。

## 種無しスイカの種はどこ

3倍体など奇数体の生物は、一部の例外をのぞいて生殖能力がないため、生殖にエネルギーをとられません。

遺伝子を多く持っていることにくわえ、生殖にエネルギーを取られないため、大型化します。そのため、農業や漁業において、このような倍数体

を利用した育種が進められています。

また3倍体の植物に生殖能力がないということは、種もできません。これを利用して、種無しスイカが作られています。

種無しスイカは、ゲノムを倍化させた4nの個体のめしべ(配偶子は2n)に2nの個体の花粉(n)を受粉させて、種子(3n)を取っています。この3nの種を植えると3倍体のスイカが育ちますが、3倍体の植物は生殖のための配偶子である胚珠と花粉(動物でいうところの、卵子と精子)を作ることができません。それで、種ができないのです。

## 子孫ができない異質倍数体

分類学上の概念である種(スピーシーズ)とは、交配可能な集団のことをいいます。たとえば、チワワとダックスフントはまったく違う姿をしていますが、交配して子供を作ることができます。つまり、品種の違いといった遺伝子の差異はあつて

も、同じ種なのです。

しかし、種が違うと子供を作ることとはできません。人間とサルは種が違うので、交配しても子供はできません。

ただし遺伝的に近い種の場合、種が違ってても子供を作ることができる場合があります。たとえば、広く家畜として飼われているラバは、オスのロバとメスのウマを交雑させて生まれた異質倍数体です。

ところが、ラバは配偶子を作るために必要な染色体の対合ができないので、精子や卵子といった配偶子を作れず、ウマやロバと交雑したり、ラバどうしで交尾しても、次代の子孫を作ることができません。すなわち、ロバとウマは雑種第一代の子供は残せるけれども、その先が無いため、別の種ということになります。

このラバには、両親の良い形質が遺伝しています。ウマの良いところ（体が大きく力が強い）、

ロバの良いところ（温和で人によくなれる）、さらに雑種強勢によって両親のどちらよりも優れているところ（ロバよりも粗食に耐え、体力がある）があります。

もちろん、全てが両親より高いスペックというわけではありません。たとえば、ラバはウマほど足が速くはありません。それでも、強靱で賢く便利な荷物運搬用の家畜として、ラバは長年人間に作られ、飼われてきました。

なお、オスのウマとメスのロバのあいだに生まれた交雑種はケッテイといいます。ケッテイはラバより小さいため、あまり役に立ちません。これは遺伝子的な理由か、あるいは母親がウマより小さなロバなので、あまり大きな子供を妊娠することができないせいだと考えられています。



3倍体 2倍体

それは 3倍体と いうてね

生殖能力が ないから種が できないの

はいぐうし 配偶子

ついでに 対合できない

おばあちゃん このスイカ 種がないよ!?

ふうーん じゃあ 赤ちゃんも 入ってないかい

しゃく

しゃく

!

グイ

おじいさんが 教えたのね

.....

まさか 桃姫...

あたしが 桃から生ま れたことは 知ってるよ

だから妹が スイカの中に いたらしい なーと思っ て

あたし雑種強勢 なのかな?

なんとも 言いようが なくてなあ...

この前頭の 新芽について きかれたんだ

みんなが バカにするの



## 4 男をこえたスーパーマン

### 数のしびりがきつい常染色体

複雑な体をもつ人間は、植物や魚や両生類のようには、ゲノムをまるごと増やして倍数体になることはできません。それどころか、染色体が1本過剰なだけでも致死的になります。

染色体に過不足があることを、染色体異常とよびます。このうち、ある染色体が1本過剰で3本ある状態をトリソミーといいます。大きな染色体のトリソミーが起こると、発生途中で発生が止まって死んでしまいます。

ただし、影響の少ない小さな染色体や、染色体の一部のみが過剰になっているタイプのトリソミーでは、生存や生長が可能な場合もあります。しかしこの場合、遺伝子が過剰であることが微

妙なさじ加減を狂わせて、先天性の疾患の原因となることもあります。

たとえばダウン症は、21番染色体が1本過剰な状態（21トリソミー）ですが、それによって先天性の心臓疾患などが起こります。

従来は外科手術などによって、この疾患を対症的に治療することしかできませんでした。

けれど遺伝子の研究が進んだ現在では、2セットある遺伝子の片方がもう片方のはたらきを抑えるしくみが解明されています。そこで、これを利用して過剰な遺伝子のはたらきを人為的に抑え、遺伝子過剰による疾患を治療できるようになりました。



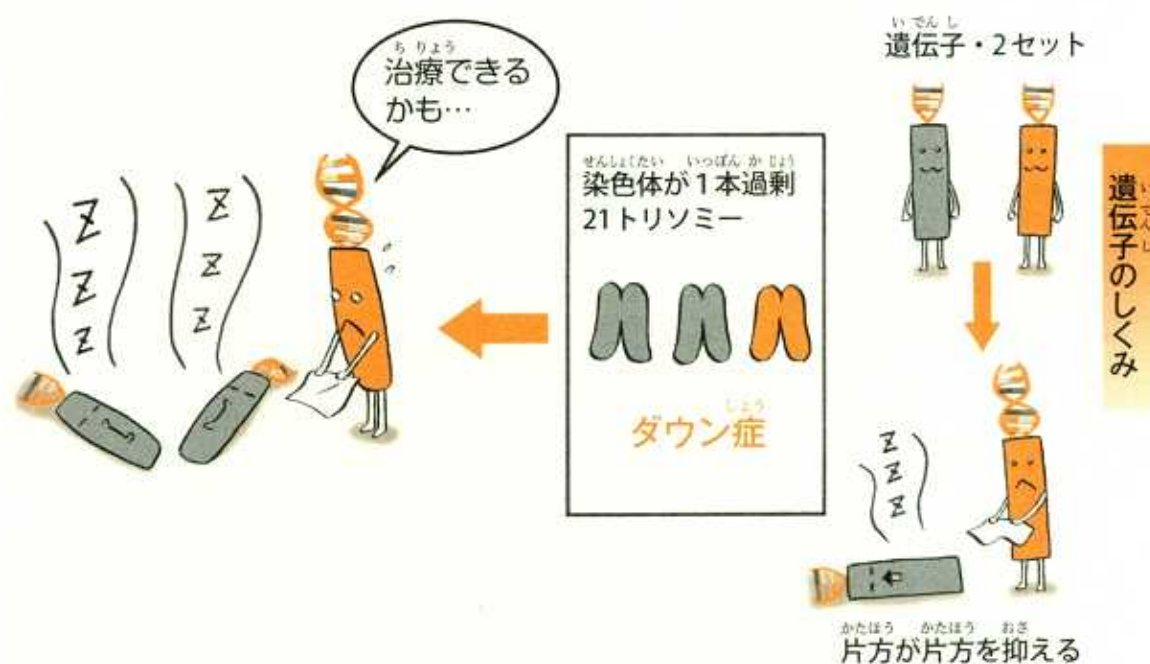
## X染色体が足りないと未成熟な女子に

人間において、トリソミーのように染色体が過剰になったり、逆にある染色体が欠失して1個しかなかったり（モノソミー）すると、とくにそれが大きな染色体や重要な遺伝子を持った染色体部位の場合は致死となって、早期に発生が停止し、流産してしまいます。

妊娠に気づかない状態でのごく早期の流産は、わずかに遅れた月経としてとらえられ、気づかないことも多々あります。それをふくめると、全妊娠の4割はこのような染色体異常によって初期流産していると考えられています。

しかし常染色体ではなく、性染色体の過不足が起こった場合、致死にならないことがあります。

通常、女は父方と母方からそれぞれX染色体を受けつぎ、2個のX染色体を持っています（XX）。しかし減数分裂のミスが起こって精子か卵子にX染色体がふくまれていなかった場合、X染色体が



1個だけ(XO)になります。または、片方のX染色体の一部が欠失していることもあります。

通常、2個のX染色体のうちの片方は、もう片方によってはたらしを止められています。そのため、実質的にX染色体は片方だけではたらいいます。XO型はその状態とあまり変わらないはずですが、それでもほとんどは正常に発生することができず、流産となります。

生存した場合、外見は女性となります。しかし、体格の成長や思春期の第二次性徴がじゅうぶん発達しなかったり、先天性の内臓疾患などが起こります。これら、X染色体の遺伝子の不足によって起こる症状を、ターナー症候群と呼びます。

ターナー症候群の女子は、成長ホルモンおよび性ホルモンの投与によって、体格の成長や第二次性徴をおぎないます。しかし染色体に過不足があると減数分裂ができないので、卵子を作ることができず、不妊となります。卵子が排出されないの

で、月経ありません。

ただ、X染色体はPAR領域(擬似常染色体領域)という染色体の両端にある、ほんの数%ほどの領域があれば対合して、減数分裂を行うことができます。そのため、一部のターナー症候群の女子は妊娠が可能です。

なお、X染色体が完全に無いパターン(OOやOY)では発生することはできません。なぜなら、Y染色体はX染色体よりもはるかに小さくて、生存に必要な遺伝子を持っていないからです。

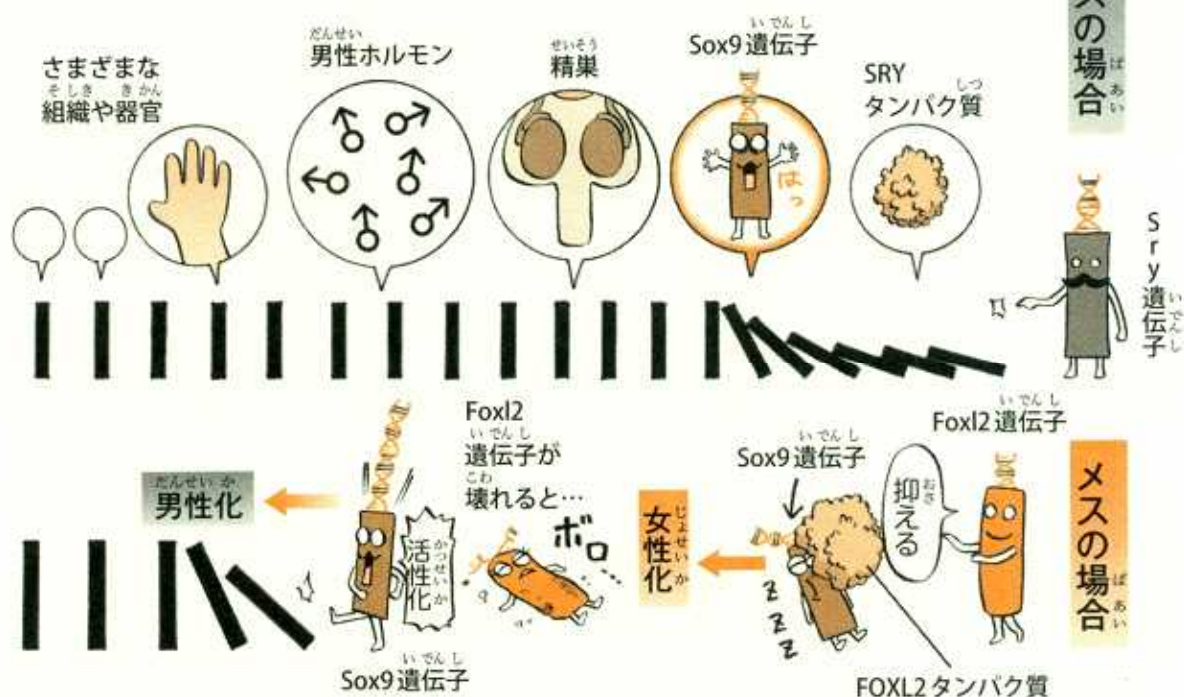
### 男を作る遺伝子Sry

Y染色体上に、Sry<sup>スライ</sup>という遺伝子があります。この遺伝子が、男性の決定に重要な役割を果たしています。

Sry遺伝子のはたらくことで、生殖器が精巣へと分化します。精巣は男性ホルモンを作るので、



## 形態形成のドミノ倒し



その影響で胎児のさまざまな組織や器官が男のものへと形づくられていきます。またさまざまな組織や器官は、別の組織や器官を分化させる形態形成の誘導体（オーガナイザー）として働きます。このように形態形成は、ドミノ倒しのように進んでいきます。

Sry遺伝子をはたらくと、SRYタンパク質が作られます。SRYタンパク質はいくつかの遺伝子に関与していますが、そのうちのひとつが、常染色体上にあるSox9遺伝子です。

SRYタンパク質がSox9遺伝子を活性化させると、生殖器が精巣へと分化します。

では、Sry遺伝子およびY染色体を持っていないメスは、放っておいてもメスになるのでしょうか。従来は、動物はデフォルトではメスになり、Sry遺伝子のはたらきによってメスからオスへと分化する、と考えられていました。

しかし近年、メスはメスで、Foxl2遺伝子

という遺伝子からできるFOX L2タンパク質を用いて、わざわざSOX9遺伝子の転写を抑えていることがわかりました。

つまり、メスのFox12遺伝子が壊れると、Sryも無いのにSOX9遺伝子が活性化します。その結果、Sryを持っていないにもかかわらず、卵巣が精巣へ変わるのです。

### Y染色体いっぱいですーパーマンに

常染色体が過剰に存在するトリソミーなどでは、大きな染色体や重要な遺伝子においてトリソミーが起こると、致死となります。

しかし性染色体の場合、過剰にあってもあまり大きな影響を与えない場合もあります。

XXY型の場合は、クラインフェルター症候群となります。Y染色体を持っているので性別は男ですが、Xが2本あるので女性ホルモンが多いため、胸がふくらんだり精子ができにくいといった

弊害があります。ホルモン治療によって、症状を軽減します。

XXY型の場合は、男性決定遺伝子のスイッチを押すY遺伝子が多いため、男性決定遺伝子がより強く活性化されます。そのため、XXY型の男はふつうの男よりもっと男性的な特徴の強い、スーパーマンになります。すなわち、身長や知能が高かったり、暴力的な性格であったりします。

XXX型は女になり、さほど影響はありません。XXYYやXXYYなど、性染色体が非常に過剰な例もありますが、生存は可能です。





きみは  
おほい  
大きなあ

この辺の  
人じゃ  
ないね？



桃姫 17歳



まるで  
倍数体  
みたい

フン

高等動物は  
ゲノムが倍に  
増えても  
発生の途中で  
死ぬだけで  
倍数体には  
ならない



あら...  
すいぶん  
男らしい  
笛の響き  
だわねえ



ただし  
性染色体は  
別だ！

Y染色体が一本  
多くても  
男性的な特徴が  
強化されるだけで  
生存は可能!!

おれのような!!

高身長・高知能  
暴力的な性格



ゲノムは生命を  
奏でる楽譜だ

なかには  
音符をそれ以上  
増やしても  
減らしても  
成立しない  
名曲もあるのだ



ごついわりに  
気どったことを  
言うね





## 性と交尾は絶滅を救う

### 交尾で作る多様な遺伝子

オスやメスという性別は、高等動物における概念です。

下等動物は細胞分裂によって増殖しますが、これだと、生まれてくる次代はすべてクローンになります。クローンとは、同じ遺伝子（同じゲノム構成）を持った細胞集団や、個体集団のことです。

クローンで子供を残すことができるなら、生殖に必要なのは1個体のみです。広い野生の世界で結婚相手を見つけるのは至難のわざなので、自分だけで子孫を残すことができれば、さぞかし生存競争に有利なのではないかと思われるでしょう。

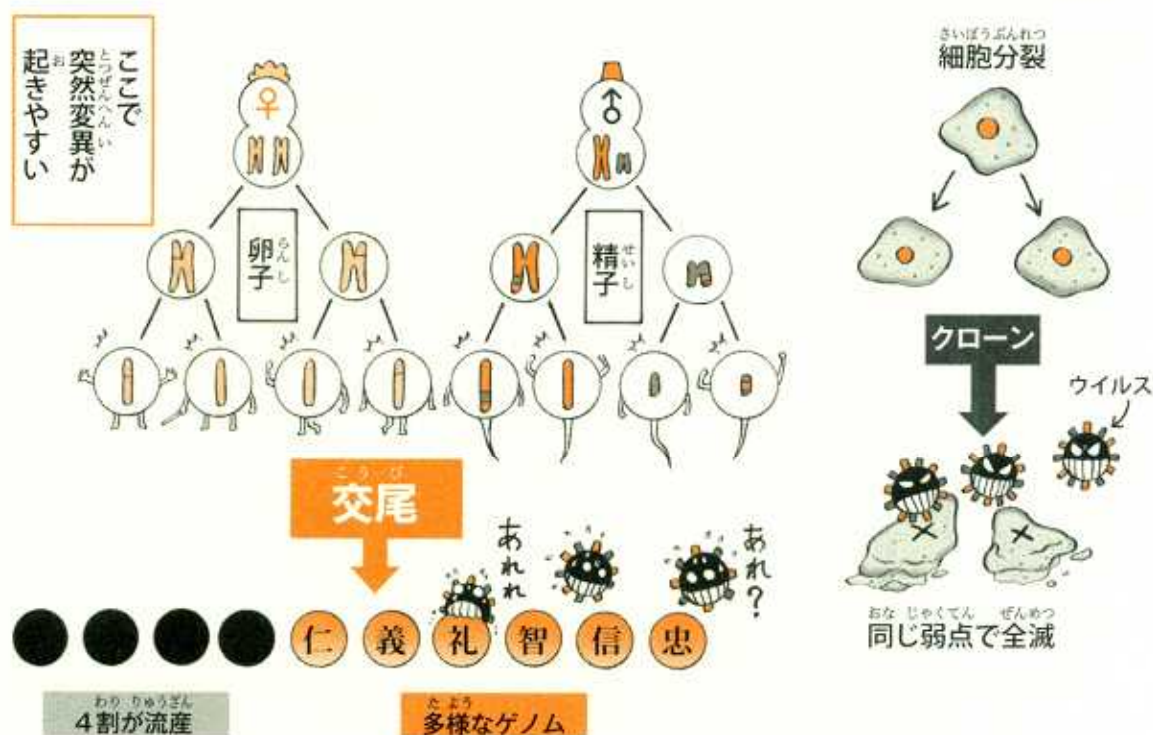
しかし、同じ遺伝子構成を持っているクローン集団は、病原体や環境変化などによる淘汰圧（とうたあつ）に対

して、まったく同じ弱点を持っていることになります。すると、環境が悪くなれば、たちまち全滅してしまいます。

ところが、もしある生物集団が多様なゲノム構成を持っていると、何かが起こっても、だれかが生き残る可能性があります。

たとえば20世紀には不治の病と恐れられたHIV感染症（エイズ）は、エイズウイルスが免疫細胞に感染して破壊してしまう病気です。ところが、まれにこのウイルスに感染しない人間がいます。彼らは、CCR5というタンパク質を作る遺伝子に突然変異を起こしています。エイズウイルスは、人間の免疫細胞の表面にあるCCR5タンパク質に結合しないと、この細胞に感染できません。そ





ここで、この遺伝子に突然変異を起こしている人の免疫細胞にはエイズウイルスが感染できないため、エイズにかかりません。

どんなに厳しい環境の中でも、遺伝子の多様性によって幸運にも生き残る個体が出てくれば、種は絶滅しません。交尾はゲノムを混ぜ合わせるだけでなく、交尾のために生殖細胞（精子や卵子）を作る必要があります、このときに突然変異が起こりやすくなります。

この突然変異には失敗も多く、そのため受精卵の生長（胚発生）が途中で止まってしまう例も少なくありません。魚を飼ったり植物の栽培をしていると、一定数の「かえらない卵」や「発生途中で死ぬ卵」、「発芽しない種」があることに気づくでしょう。

人間でも、気づかない初期流産をふくめると、全妊娠の4割が突然変異のミスによって流産になると考えられています。

それでも遺伝子の多様性を確保するため、ゲノム構成のことなる「相手」を見つけ、精子や卵子を作って、交尾する必要があるのです。

### 両性具有のカタツムリ

昆虫には性別がありますが、それよりも下等なカタツムリにはオスとメスの区別がなく、1つの個体の体内で精子と卵子の両方を作ります。しかし、自分の精子と卵子で受精することはできません。ゲノムを混ぜるために、もう1匹の「相手」が必要です。

相手を見つけると、カタツムリはお互いの体を合わせ、おたがいに生殖管（陰茎）を相手の生殖孔の中に挿入し、精子を送りこみます。

こうしておたがいに精子を交換し、相手の精子と自分の卵子とが受精して、受精卵となります。そして両方のカタツムリが産卵し、子供のカタツムリが孵化します。





## この世に男と女が必要な理由

背骨を持つ脊椎動物は、オスとメスの性別を持っています。

植物でも、ひとつの花の中におしべとめしべがあつて自分の花粉で受粉ができる（自家受粉）ものもあれば、雄花と雌花に分かれていたり、花粉だけを作る雄樹・胚珠<sup>はいしゅ</sup>だけを作る雌樹と分かれている場合もあります。

オスとメスの違いがあると、カタツムリのような両性具有よりも交尾は難しくなります。なぜなら、広い世界の中で交尾相手を探してやっと遭遇できても、それが自分と同性なら、交尾することができないからです。

これは一見、貴重な交尾のチャンスのみすみす逃してしまい、生存競争には不利であるように思えます。ところが動物は逆に、高等になるほどオスとメスの違いをよりはっきりと区別するように進化していきます。

オスとメスの違いが存在する利点のひとつは、より多様なゲノムや、より多様な形質を獲得するためです。性別の違いがあると、自分が交尾できる相手を探すのがより難しくなるため、より広い範囲で相手を探す必要があります。

また遺伝子の中には、父親由来のときしかはたらかない、または母親由来のときしかはたらかない、というふうに刷りこまれるものがあります。これによって、近親交配などで両親が似たようなゲノム構成だったとしても、男女の組み合わせを変えることで次代の遺伝子のON・OFFが変わり、多様な形質を発現することが可能になります。

何より、精子と卵子の両方を作るには、倍のエネルギーが必要です。どちらか片方だけ作れば良いのなら、エネルギーが節約できます。

さらに、オスとメスが別々だと、環境に応じて男女比を柔軟に変えられます。

環境がよくて餌が豊富にあるのなら、子孫をた

くさん残してその環境を独占してしまったものが、生存競争に勝ち残れます。そこで卵を作るメスが大量にいれば、次代の数を一気に増やすことができるようになります。

逆に環境が悪い場合は、より強い次代を鍛えあげて環境を克服する必要性がでてきます。そこでオスのほうがメスよりたくさんいる状況になると、オスはメスをめぐって争いをはじめます。こうして、選抜された強いオスだけが次代に遺伝子を残すことができるので、強い次代が生まれ、さらに選抜を重ねることで、厳しい環境にも耐えられる強い集団が生まれます。

人間の歴史を振り返ると、農耕によって生活が豊かな環境では集団で定住生活をして集団で子育てをするため、母親とその母親を中心とした社会ができます。平安時代の日本のように通い婚を行ったり、エジプト王朝のように女王をいただいたり、弥生時代の卑弥呼のような女性のシャーマ

ンがあらわれたり、子供を産み育てる女性が優位で権力を握る母系社会になります。このような社会では、大地母神的な豊穡の女神が崇められます。

いっぽう農耕ができる豊かな土地を持たない狩猟・採集文化の環境では、女性は狩りの獲物と同等で、強い男性が子孫を残すための奴隷になります。敵と戦い、負けた敵集団の女性を戦利品として手に入れてきたので、婚姻は勝利者である男性と敗北者である女性の間で行われ、男性が優位な関係性が生まれます。そして、武士や騎士のような敵に勝つ強い男性が求められる父系社会となります。このような社会では、猛々しい英雄や戦神が崇められます。



おれは：  
ガールフレンドが  
欲しいのだ



おかしいか？  
おれの育った  
土地には女が  
少ない

あぶれたものは  
他の土地で  
相手を探すしか  
ないのだ



この辺にも  
あまりいないぞ

最近鬼が  
出るというて  
村を出て行った  
家族も多い



お前が  
犯人か！

少し積極的  
になりすぎた  
ようだ



分裂で増える  
下等動物なら  
こんな苦労をする  
必要もあるまい

悪いオニが  
分裂で増えても  
悪いオニのままで

オスとメスの  
ゲノムが混ざり  
合うからこそ  
多様なゲノムの  
中から良いオニも  
生まれてくるのだ！！

だが！







## 性転換する動物たち

### 気分次第で性別チェンジ

脊椎動物の中でも下等な魚類・両生類・爬虫類は、オスとメスの区別がありますが、性染色体を持っていません。彼らの性決定は環境に適応するため、柔軟なものとなっています。

たとえばイソギンチャクの中に群をつくって住んでいる魚のカクレクマノミは、環境に応じて性転換を行います。

38ページの異種間交雑種で、ラバ（父ロバ母ウマ）よりケッテイ（父ウマ母ロバ）のほうが体格が小さく使役に向かないという話をしました。この理由はいろいろありますが、ひとつはケッテイは母が小さなロバなので、体格の大きい子供が生まれてこれられないという制約が関係していると考え

えられています。

カクレクマノミも、メスの体が大きいほうが、たくさん卵を産むことができます。その反面、イソギンチャクの中でくらす狭い住環境の中でメスばかりたくさんいると、次代の稚魚たちが過密状態になり、すみかがなくなってしまう。そこで強いオスが強い稚魚を残せば、強い稚魚が旅立って、まだだれも住んでいないイソギンチャクを見つけ、そこで増えることができます。

強い稚魚を作るためには、強いオスを選抜する必要があります。そのためには、オスを増やして競争させる必要があります。

そのいっぽうで、稚魚が少なすぎると旅立った先で全部死んでしまうので、あるていど数は必要



にんげん せいべつ かんきよう きゆう  
人間の性別は環境ホルモンに左右されない



こうとうどうぶつ せい  
高等動物の性は  
せいせんしつたい  
性染色体で決まる



なため、卵の数も増やしたいのです。しかし卵の数を増やすためメスを増やすと、全てのオスがメスを手に入れられるので競争が起こらず、強い子孫が生まれません。

この非常に複雑な生存競争の難問を、カクレクマノミは非常に合理的に解決しました。

孵化してきた若いカクレクマノミは、全てオスです。彼らは餌を奪いあい、より強いものがたくさん餌を手に入れて、一番大きくなります。

すると、群で一番大きくなった個体がメスに性転換します。つまり、体が一番大きくなってたくさん卵が産める上に、最強の遺伝子を持った最強のメスがあらわれます。

このメスと交尾できるのは、残ったオスの中で一番大きい個体です。すなわち群の中のナンバーワンが母親、ナンバーツーが父親になることで、卵がたくさん生まれ、なおかつオスが競争して選抜されるという、良いところ取りをしている

のです。

ちなみにナンバー・ワンのメスが死ぬと、ナンバー・ツーが群の中で一番大きな個体になります。そこで、それまで父親だったナンバー・ツーが性転換してメスになり、ナンバー・スリーだったオスと交尾することになります。

### 環境ホルモンで性別は変わるのか

高等動物になるほど、性別のしぼりはきつくなり、性転換しにくくなります。

受精卵が細胞分裂を起こしながらさまざまな器官が細かく分化していくことを、胚発生と呼びます。哺乳類の場合、胚発生は全て母胎の中で完了するため、胚のことを胎児と呼びます。鳥類など卵生動物の卵の中にいる生まれる前の幼体も、胚と呼ばれます。

さて、胚は発生を進めながらどんどん複雑に形づくられていきます。胚発生の途中で男性ホルモ

ンが強くはたらくと各器官が男性型に、女性ホルモンが強くはたらくと女性型に分化します。人間だと26ページで紹介したように、男性ホルモンのほたらきで脳が男性型の思考をするよう分化したり、薬指が長くなったりします。

性染色体を持っていると、この性決定を厳密に決めることができます。43ページで説明したように、Y染色体上の遺伝子を作るSR Yタンパク質が精巣を分化させ、精巣が男性ホルモンを作りまします。つまり性決定は性染色体によって行われていて、それが一番強く影響します。

ですから、男の子はたとえ母親から生まれても、母親の女性ホルモンによって女性化することなく、自分の性染色体にもとづいて男の子として生まれてきます。

ときどき環境ホルモンが問題になりますが、環境ホルモンによって性別が変わったり性別がかく乱されるのは、もともと性転換などをかんとんに



起こす、性別のしぼりのゆるい貝などの下等動物です。

仮に性染色体を持っている人間が環境ホルモンに影響されるとしたら、それよりもっと濃度の高い母親の女性ホルモンを、それも器官が分化している最中の敏感な胎児期に浴びている男の子は、全て女の子の体で生まれてくるはずです。

理論的に考えて、高等動物である人間の性別が環境ホルモンに影響を受けることはないし、万が一あったとしても、自分自身の性染色体およびそれによって分化した精巣などの性腺から出る性ホルモンに比べれば、ごく軽微な影響しか与えません。

環境ホルモン問題は、性別をかく乱された下等動物が子孫を残せず絶滅の危険があるという自然保護や、有毒物質による汚染の防止という観点からは重要な問題ですが、人間の性別のかく乱という観点からそれを見るのは迷信めいた杞憂です。

# 温度依存性決定 (TSD)



## 気温で変わる男と女

両生類以上の高等な脊椎動物の性別は、魚類に比べると厳密で、自然環境において性転換することはありません（ホルモンを投与するなどして、後から性転換させることは可能です）。

爬虫類のうち性染色体を持っているのは、ヘビとほとんどのトカゲ、一部のカメのみです。ヘビの性染色体は、鳥と同じZW型です。

ワニとほとんどのカメと一部のトカゲは、性染色体を持っていません。それではどうやって性別が決まるのかというと、温度依存性決定（TSD）が行われています。すなわち、クマノミのように環境の変化に依存して性決定をしているのですが、その環境要因が温度であり、その影響がおよぶのは胚発生時にかぎられています。

TSDには、高温でオス、低温でメス、その逆、一定の範囲内の温度でのみオス、の3パターンがあります。卵を孵化させる温度を管理することに

よって、人為的に性別を変えることもできます。

これは環境が厳しいときにはメスを増やして大量の子孫を残すことで人海戦術での生き残りをはかり、環境が穏やかなときは環境によってオスが淘汰されにくいため、オスを増やすことで競争を行わせ強い子孫を残すのに役立ちます。

ただし性染色体によって厳密な性別決定が可能なヘビにおいては、TSDは起こりません。





さ...さすが  
桃太郎

腕っぷしの  
強さでは誰も  
かなわないぜ...



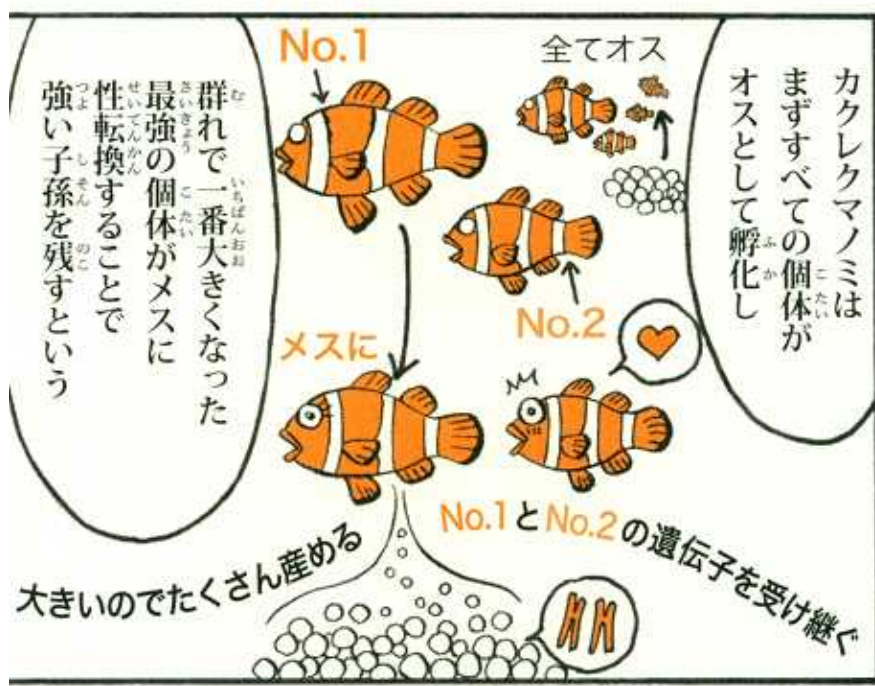
鬼を捕まえ  
たぞ——っ



私は  
桃姫だ!!



桃太郎って  
いうな!!



カクレクマノミは  
まずすべての個体が  
オスとして孵化し

群れで一番大きくなった  
最強の個体がメスに  
性転換することで  
強い子孫を残すという

No.1とNo.2の遺伝子を受け継ぐ



男勝りだった  
桃姫が急に  
お化粧とか  
気にし出して...



そんな話を  
思い出した

私を見て  
思い出したのは  
失礼じゃない?





## 地球上から男が消える日

### 1000万年後、Y染色体が消滅する

哺乳類の性別は、X染色体とY染色体によって決められているXY型です。XXが女、XYが男です。

鳥類では、XYが女、XXが男になります。そこでややこしいので、このような性決定をする性染色体はXYではなくZWと名づけて、ZWが女、ZZが男としています。

ところで、人間のY染色体は5100万塩基対で255遺伝子です。これはX染色体の1億6300万塩基対・1141遺伝子に比べて、はるかに小さく、機能（遺伝子の数）も少ないのです。

すなわち、Y染色体だけでは遺伝子が足りない

ので生存することは不可能です。そのうえ、現在もなおこのY染色体は小さくなりつづけていて、100万年あたり5個ずつ遺伝子が減っています。そして1000万〜2000万年後には、Y染色体が完全に無くなってしまおうと試算されています。そうなったら、オスはどこへ行ってしまうのでしょうか？

### 男と女の3億年

背骨を持つ脊椎動物には魚類・両生類・爬虫類・鳥類・哺乳類の5つの大きなグループがあります。

進化の道筋をたどると、まず古生代にあらわれた魚類が両生類に進化して地上に進出し、繁栄し



ました。恐竜のように巨大化するものもあらわれた両生類の多様性の中で、爬虫類に進化するものと、哺乳類に進化する爬虫類型哺乳類があらわれました。

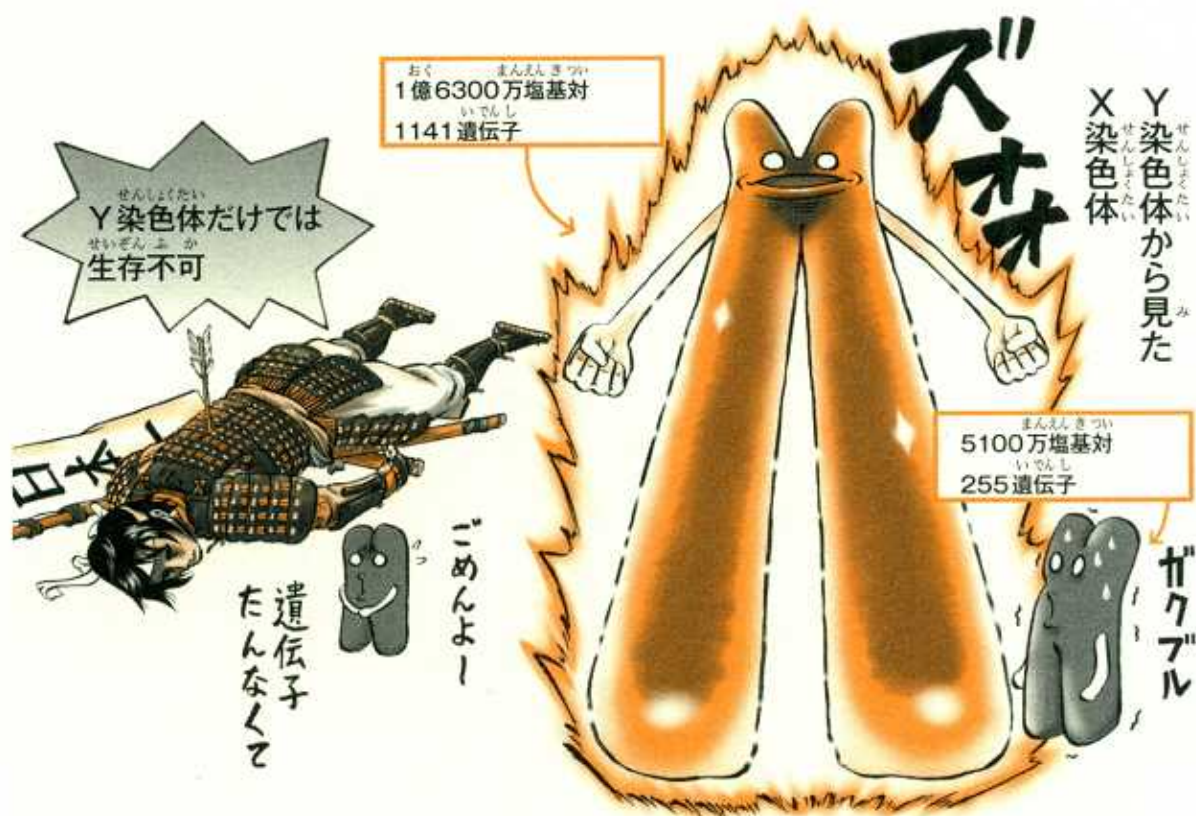
古生代の終わりに超巨大な森林火災が起きて両生類のほとんどが絶滅し、中生代がおとずれると、爬虫類が地上の覇権を得ました。最初はワニの仲間のクルロタルシ類が幅をきかせていましたが、恐竜がとってかわりました。

恐竜の中の羽毛恐竜から、中生代の終わりに鳥類が進化しました。

いっぽう哺乳類は、中生代のはじめごろに哺乳類型爬虫類から進化しました。

さて、哺乳類の祖先となった古生代の爬虫類型哺乳類が、たんきりゅう単弓類です。爬虫類はそうきりゅう双弓類で、両者は頭蓋骨の特徴が違っています。

一部の単弓類は、大きな背びれを開いたり閉じたりすることで、ラジエーターのように体温を放





散したり、逆に保温につとめたりしていたことです。このような自分の体温の変化を脳で完治し、その調整を意図的に行うことができるという特徴が、つねに一定の体温を持っているという哺乳類の特徴（恒温性）へとつながりました。

この単弓類には、性染色体がありませんでした。単弓類があらわれた3億年前には、Y染色体はまだX染色体と同じ大きさでした。つまりこれらの染色体はただの常染色体のうちの1組にすぎず、まだ性によって異なった性染色体というものは存在していなかったのです。

しかし、何らかの理由でこの染色体に異変が起こり、Y染色体へと進化しました。はじまりは、恐らく生殖細胞を作るときの減数分裂のミスにより、片方の染色体で一部の領域が欠失したことでした。

減数分裂を行うときには、一番最初に同じ大きさの1組の染色体（相同染色体）がぴったりとく



つつきあって、DNAの二重らせんをゆるめてからみあい、染色体の一部をお互いに交換します。これを相同染色体の対合といいます。相同染色体の長さがあまりに違っていると、対合できません。全ての相同染色体がきちんと対合しないと、減数分裂は起こりません。

37〜38ページで紹介した3倍体(種無しスイカ)や異種間交雑体(ラバ)で不妊になるのはこのためで、相同染色体が完全な対合ができないので生殖細胞を作るための減数分裂が行えないのです(マカロニコムギの場合は、交雑種ABの遺伝子を倍化させてAAB Bとしたことで、相同染色体問題をクリアしています)。

Y染色体の祖先となる片方の染色体の一部が欠失してしまっても、運良く単弓類の染色体は染色体の両端にあるPAR領域と呼ばれる領域を使って対合することができました。

が、もとの染色体に欠失があるので、減数分裂

のときの相同染色体の対合が不安定になり、この染色体上のほかの領域も欠失しはじめます。

やがて小さくなりつつあるY染色体の祖先の上に、もう片方の完全な染色体(後のX染色体)にはないSry遺伝子ができました。Sry遺伝子を作るSryタンパク質の作用によって、生殖器原基は精巣へと変化します。精巣は男性ホルモンを作ること、胚が男の形になるよう運命づけます。

こうしてXとYの性染色体ができたことで、温度などの環境要因に左右されることなく、性染色体による確固たる性別決定ができるようになりました。

原始的な哺乳類であるカモノハシは、単弓類が性染色体によって性決定をしはじめたところに、その他の哺乳類と分岐して、別の進化の道を歩みはじめました。そのため、カモノハシの性染色体は他の哺乳類とは違って、10本もあります。しかも

それは、同じ哺乳類よりも、鳥類の性染色体との相関性が高いのです。

そのためSry遺伝子は、単弓類から進化した哺乳類がカモノハシと分岐したあとで、哺乳類のX染色体にもぐりこんでY染色体に変えたと考えられています。

このままY染色体が縮小しつづけると、完全にY染色体が無くなるかもしれません。が、その前にSry遺伝子が別の染色体に移動して、新しい性染色体になるかもしれません。

### 性転換する哺乳類

魚類はカクレクマノミのように、後天的に性転換します。しかし両生類と爬虫類は胚発生の時点で性決定が行われるので、誕生後には野生状態での性転換は起こりません（人為的に性ホルモンを与える、性転換させることができます）。

性染色体を持っている鳥類と哺乳類は、受精卵

の時点で性決定が行われます。鳥類は人為的に性ホルモンを与えることで後天的に性転換できますが、哺乳類では不可能だと考えられていました。性ホルモンの投与によって、男の胸をふくらませたり女にひげを生やすなどはできても、生殖能力を転換させることはできなかったのです。

しかしメスのマウスにおいて、Foxl2遺伝子を壊すと、Sox9遺伝子が活性化して、3週間で卵巣が精巣に変化し、その精巣が男性ホルモンを作りはじめました。つまり、Y染色体（Sry遺伝子）を持っていないメスが、後天的にオスに性転換したのです。





この辺に  
桃太郎の  
ニセモノが  
いると聞いて  
きたのだが…

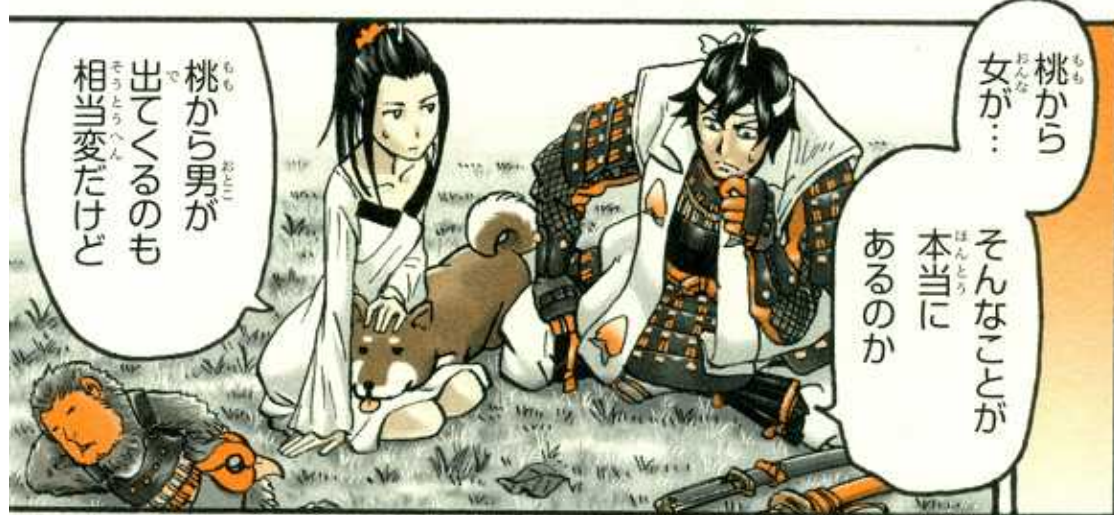


だーからー

わたし  
私は  
ももひ…



われこそが  
桃から生まれた  
桃太郎である!!



桃から  
女が…

そんなことが  
本当に  
あるのか

桃から男が  
出てくるのも  
相当変だけど



だが…

Y染色体が  
なくなっても  
鬼退治に挑む者が  
絶えることは  
ないだろう

桃姫  
きみの  
ように!!



そういえば  
Y染色体は  
世代を経るごとに  
小さくなっている  
という

やがて  
Y染色体は  
なくなつて

桃からは女の子しか  
生まれてこなく  
なるのかも  
知らないな…

1000万年  
2000万年後





## 8 性のめばえ

### 下等動物の性

これまで、高等な動物ほど厳密に性別を決定するという話をしてきました。脊椎動物では、

- ・鳥類・哺乳類・ヘビなど一部の爬虫類……性染色体によって、受精卵の時点で性別が決定する。
- ・爬虫類……温度によって、胚発生の時点で性別が決定する。

- ・両生類……温度によって、幼生時代に性別が決定する。

- ・魚類……環境などによって、成長してからも性別が変わる。

これよりも原始的な動物では、環境によって性別が決定されたり、カタツムリのように両性具あったりします。もっと原始的な生物における性

決定はどうなっているのでしょうか。

### 細菌のオスとメス

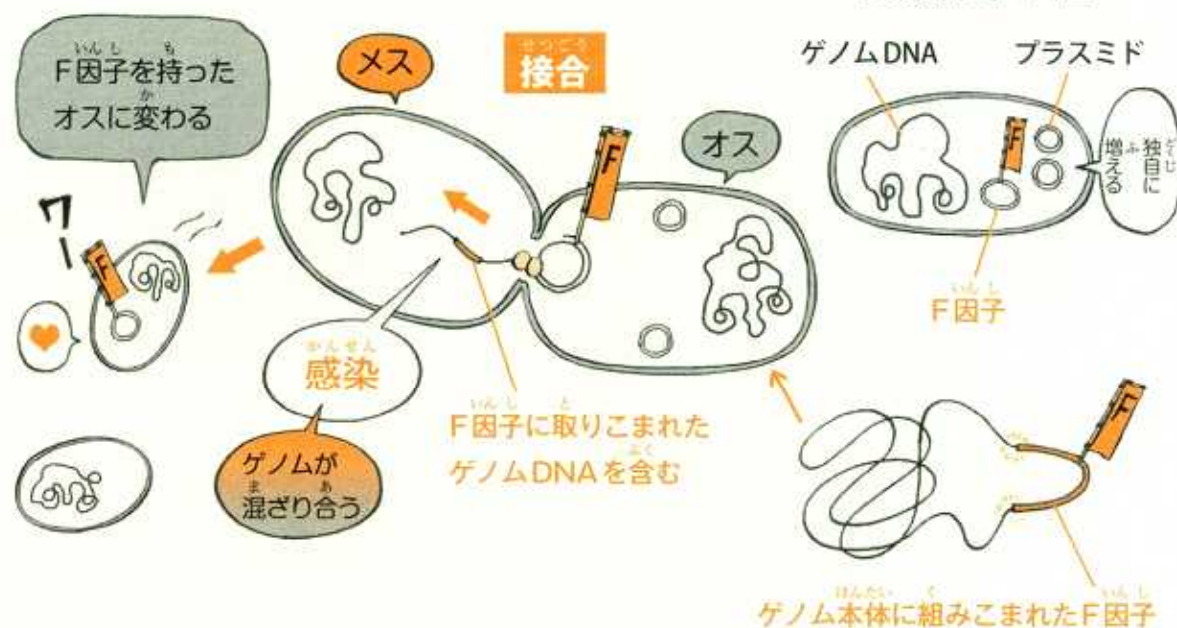
オスとメスの定義を広げると、交雑のときに、遺伝子を相手におくるほうがオス、遺伝子を受けとるほうがメスということになります。

大腸菌などの細菌はもっとも下等な生物で、DNAゲノムは核膜につつまれずに、細胞の中に輪になって浮かんでいる原核動物です。この単純な下等生物は、ふだんは細胞分裂によって増える無性生殖を行っています。

ところで大腸菌は自分のゲノムのほかに、プラスミドという小さな輪の形をしたDNAを持っています。プラスミドは大腸菌のゲノムDNAとは



## 大腸菌の性



独立して増え、細胞分裂のときは娘細胞へ伝えられていく、小さな寄生性遺伝物質断片です。

このプラスミドのうち、大腸菌どうしがくつくと相手の大腸菌と接合して感染し、そこでまた増えるものがあります。これはF因子(稔性因子)と呼ばれています。稔性とは、子孫を残す能力のことです。すなわち、F因子を持った大腸菌はオス、F因子を感染させられるほかの大腸菌はメスと定義することができます。

ただし、このオスとメスの概念は、人間の男女とは少し違います。人間の男が女に遺伝子を与えると、女から次代の男か女が生まれてきます。しかし大腸菌の場合は、メスがF因子を与えられた瞬間に、それはほかのメスにF因子を与えるオスに変わり、F因子を持ったオスからF因子を持った次代のオスが細胞分裂で増えてきます。ひとつの試験管の中でふうの大腸菌とF因子を持った大腸菌を同時に培養した場合、最終的に、試験管

の中は全てF因子を持ったオスの大腸菌になります。

F因子はときどき、大腸菌のゲノム本体に組みこまれることがあります。そして接合のときに、F因子といっしょに周辺の遺伝子を数十から百個ほど、受け手の大腸菌へ運ぶことがあります。こうして大腸菌のゲノム本体も混ざりあい、より多様なゲノムを持つ生物へと進化していきました。

### 交雑によるゲノムの多様性とその意義

大腸菌よりも進化した原生動物などの微生物でも、遺伝子のやりとりが行われます。

彼らはふだん細胞分裂で次代を作っています。これを性に頼らない生殖ということで、無性生殖といいます。細胞分裂を続けているうちに、紫外線や化学物質など、酸素呼吸をする生物なら活性酸素によるゲノムDNAの傷が増えていって、遺伝子がどんどんつぶれていきます。すると、細胞

が必要なタンパク質をじゅうぶん作っていけなくなり、老化しはじめます。

こうして、最終的には細胞分裂ができなくなつて死滅してしまいます。原生動物ゾウリムシの場合、700回の分裂によって寿命をむかえます。

そこでゲノムが老化してくると、細胞どうしを融合させてゲノムを混ぜあわせる交雑が行われるようになりました。相手の傷ついていない新しい遺伝子を取りこむことで、ゲノムを補完し、無傷な状態に戻して若返らせるのです。

ゾウリムシの場合はお互いに細胞を融合させあうため、受け手（メス）や与え手（オス）という区別はありません。そのかわりに接合型（メイトイング・タイプ）という性別のようなものが何種類も存在しています。ある接合型のゾウリムシが接合できる相手の接合型は決まっていて、同じ接合型どうしでは接合できません。これは、仮に同じゾウリムシが細胞分裂して生まれた子孫どうし



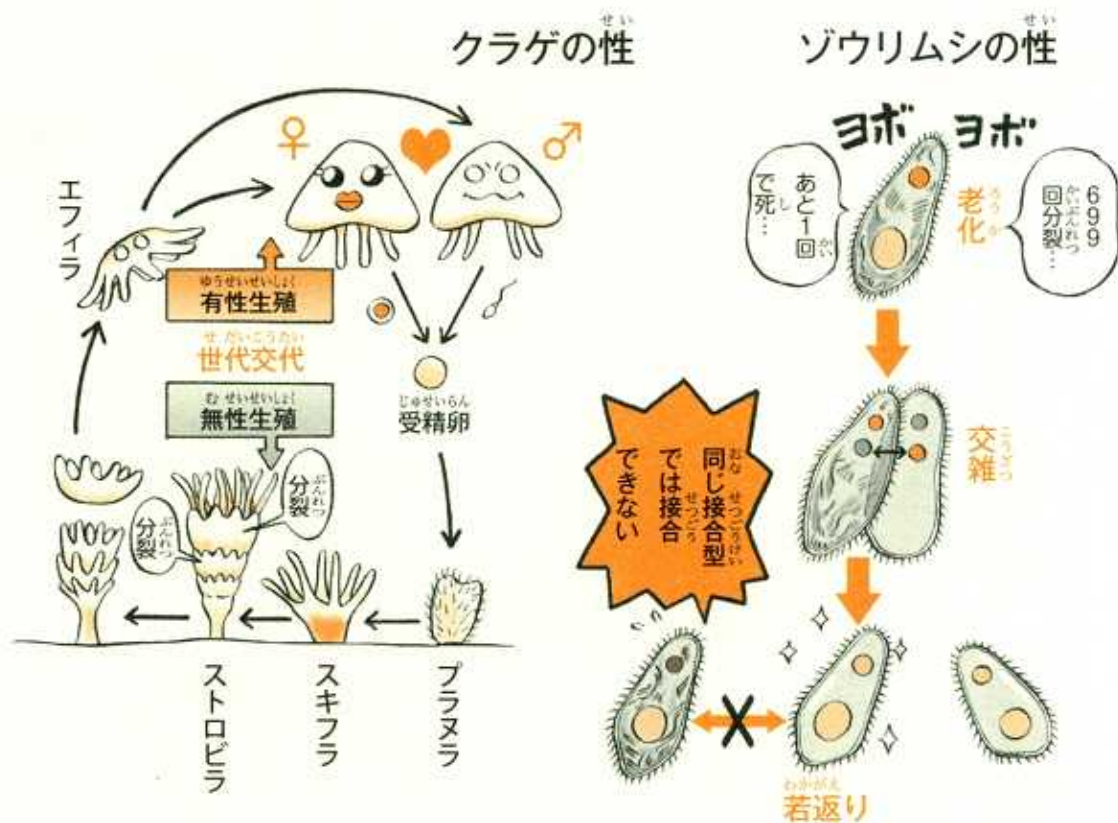
で接合すると同じ遺伝子が壊れていて若返れないので、より違いの大きなゲノムを持った個体と接合するために、このようなシステムがあるのです。

## 風変わりな性決定

クラゲは、袋のような形をした原始的な動物です。口と肛門の区別はなく、袋の口からエサを食べ、消化したかすを袋の口から外に捨てます。オス(2n)とメス(2n)の違いがあり、これが精子(n)と卵子(n)を作って受精卵を作ります。

ところが、この受精卵(2n)はクラゲではなく、イソギンチャクのように岩にくっついて増えるスキフラ(2n)という形になります。スキフラが成長すると何匹もの幼いクラゲ(2n)が積み重なったストロビラになり、これが1匹ずつばらばらになって何匹ものクラゲになります。

つまりクラゲは、オスとメスがゲノムを混ぜ合わせて受精卵を作る有性生殖世代と、細胞分裂を



するように子孫を増やす無性生殖世代を交互に過ごしているのです。

さて、この袋状の動物から、口と肛門が別のチクワのような形に進化したとき、胚発生の際に口から先にできる仲間（旧口動物）が軟体動物や昆虫などの節足動物へ、肛門から先にできる仲間（新口動物）が脊椎動物へと進化しました。

昆虫にも性別がありますが、その性決定は脊椎動物とは異なり、多様です。

たとえばアリマキ（ $2n \parallel 6$ ）は、メスしかいません。2nの卵を体内で孵化させて、メスの子供だけを生みます。ところが環境が悪くなると、アリマキは別の土地に移動するために、翅のはえたメス（ $2n \parallel 6$ ）を生みます。さらに同時に、悪い環境を克服するべく、新しい強いゲノムを作るために、翅のはえたオス（ $2n \parallel 5$ ）を生み出します。

またミツバチも、全てメス（ $2n \parallel 32$ ）です。働きバチは幼虫時代の栄養が悪いため、生殖器が未

発達で、卵を生む能力はありません。ロイヤルゼリーという栄養価の高い餌を与えられた幼虫は、生殖器が発達して産卵能力のあるメス（女王バチ）になります。

女王バチが産んだ卵（ $n \parallel 16$ ）が未受精卵のまま発生すると、オスの王バチ（ $n \parallel 16$ ）が生まれます。王バチの精子（ $n \parallel 16$ ）が女王バチの卵（ $n \parallel 16$ ）と受精した受精卵（ $2n \parallel 32$ ）から、メス（ $2n \parallel 32$ ）の働きバチや女王バチが生まれます。

なお、精子の生産に必要な遺伝子 *Wol* は、昆虫にもウニにも脊椎動物にも人間にも存在しています。この遺伝子を壊したオスのマウスでは、健康に影響はありませんが、精子が作られません。すなわち、精子を作る遺伝子は、旧口動物と新口動物が分かれる以前の6億年前に生まれ、人間が持つ精子特異的な遺伝子の中で最古の物だと考えられています。







# 9 セクシーなネアンデルタール・マツチヨマン

## 母系染色体と父系染色体

Y染色体は父から息子へと遺伝する男系の染色体です。娘にはY染色体が伝えられないので、もしある男性に娘しか生まれなければ、彼のY染色体はそこで途絶えてしまいます。

反対に、ミトコンドリア染色体は母から娘へと遺伝する女系の染色体です。ミトコンドリアは、細胞の中に浮かぶ小さな細胞内小器官（オルガネラ）で、核ゲノムDNAとは別に、細菌にタイプの似た独自のゲノムDNAを持ち、独自に増殖します。

オルガネラは、細胞の中につまっているどろどろした液体（細胞質）の中に浮かんでいます。母親の細胞から作られる卵子は、減数分裂の結果半

数体（ $n$ ）となった卵細胞核が、母親由来の細胞質に浮かんでいます。

いっぽう精子（ $n$ ）は、減数分裂の結果半数体となった精細胞核を頭部に持ち、それを運ぶための鞭毛べんもうのまわりに、鞭毛に運動エネルギーを供給するためのミトコンドリアが並べられています。

精子は卵子の中に入って受精しますが、このとき精子のミトコンドリアは壊されて、受精卵の中には残りません。残っているという説もあります。が、現在の定説では、ミトコンドリアは母親の卵からのみ伝えられる母系遺伝にかぎられています。

そこで、ミトコンドリアのゲノムDNAから女系の祖先をたどっていくと、仮説上、一番最初の



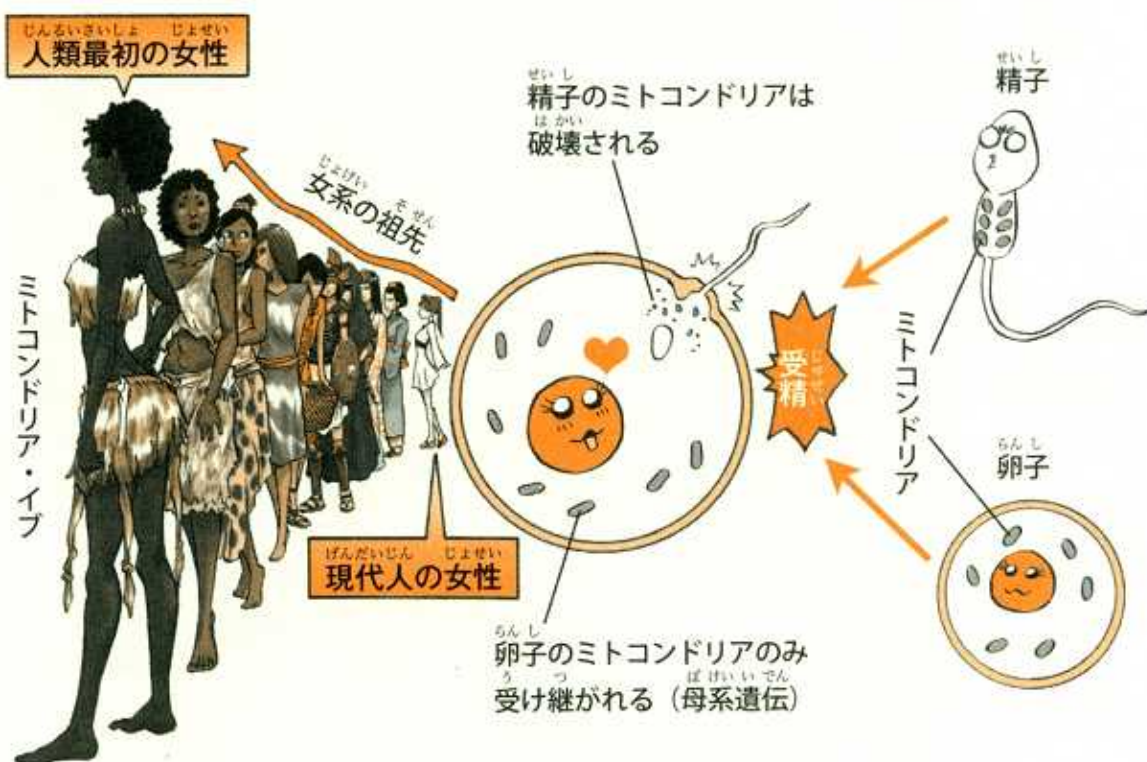
女性に到達できます。人類最初のこの女性を、ミトコンドリア・イブと呼びます。

人類の祖先である類人猿の突然変異によって最初に現れた人間（ホモ・サピエンス）である彼女は、アフリカ南部で生まれました。

## 原人たちの遺伝子

世界で最初にあらわれた人類（ヒト科の霊長類）は、200万年前にアフリカ南部にいたアウストラルピテクス・アフリカーヌスです。彼らはゴリラのような大型の類人猿ではなく、華奢な体を持った華奢型の人類でした。手で木の枝をつかみ、足で地上を移動するという手足の使い分けから、彼らは二足歩行を始めました。こうしてあいた手によって、彼らは欠けた石などを道具として使いはじめます。

50万年前には、火を発見しました。火は寄生虫のわいた肉を消毒し、硬いイモ類を柔らかくしま



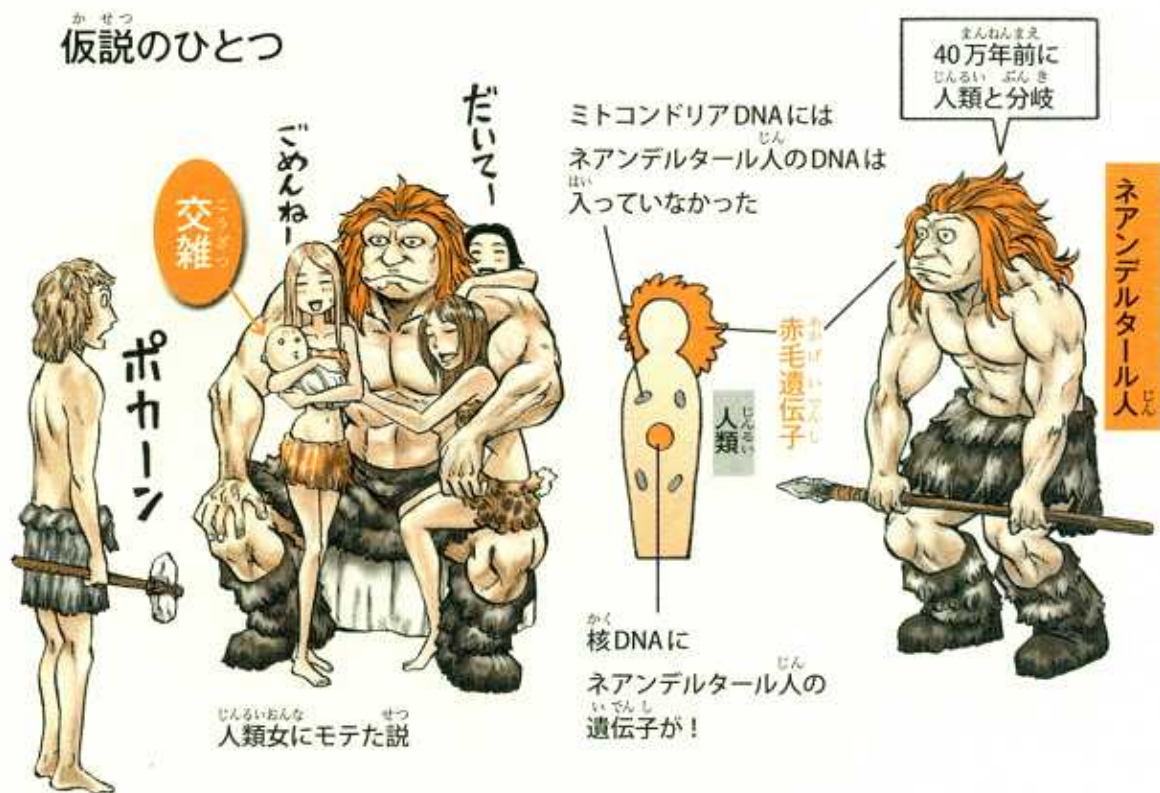
す。火で調理することで人類は今まで食べられなかった物を大量に食べられるようになり、脳を発達させるための大量のエネルギーを得ました。

やがて40万年前、これら原人（ホモ・エレクトス）の一部の集団がアフリカを出てヨーロッパに住み、ネアンデルタール人となりました。また、アジアのアルタイ山脈周辺に住んだ人々は、デニソワ人となりました。彼らは、われわれホモ・サピエンスと同じヒト科ヒト属の、別の種の人間ですが、現在は絶滅しています。

20万年前、アフリカに残った集団からホモ・サピエンスが誕生し、10万年前にアフリカを出て、世界中へ広がりました。ヨーロッパに向かった彼らは、ネアンデルタール人と遭遇しました。

ネアンデルタール人は日光の弱い高緯度のヨーロッパに適応し、赤毛で色白の、現在の白人に似た容姿を持っていました。武器や装飾品を作る文化を持っていて、新生児の脳の大きさは人類と変

### 仮説のひとつ





わりませんが、成長が速く（というか人類が体の大きさのわりには異常に成長が遅く）、脳の大きさも人類よりやや大きめで、体格も当時の華奢な人類と比べると大きめでした。しかし成長が速いせいで、同じ量の食料があっても栄養失調になりやすく、子供時代に成長が阻害されていました。

いっぽう人類は成長が遅いぶん、大人になるまでの時間も長く、生殖を始めるまえに親として生きるための学習と経験を積みました。また寿命が長かったことで、経験豊かな母親の母（祖母）も育児に参加し、子供の死亡率を低く抑えました。そのため、ネアンデルタール人は人類との生存競争に破れ、2万年前に滅びました。

人間とネアンデルタール人はほんの40万年前に分岐したので、種が違ってても交雑は可能でした。人類とネアンデルタール人が共存していた数万年の間に、交雑した子孫が生まれました。

当初、ミトコンドリアDNAを調べたときには、

人類にネアンデルタール人のミトコンドリアDNAは入っていないかったので、両者は交雑していなかったと考えられていました。人類の赤毛の遺伝子がネアンデルタール人のものと似ていることはわかっていましたが、交雑していないはずなので、それらの遺伝子は別々に進化したものだと考えられていました。

ところが、後により大規模にDNAを調べられるようになって核DNAを調べると、アフリカ先住民族をのぞく人類のゲノムの中に、ネアンデルタール人由来の遺伝子が1〜4%も含まれていることがわかりました。サハラ以南をのぞく全世界の人類のX染色体上にも、ネアンデルタール人由来のDNA配列があります。すなわち、アフリカを出た人類がネアンデルタール人と交雑し、免疫にかかわる遺伝子をふくむネアンデルタール遺伝子の一部が今も人間の中に残っていることがわかったのです。

ゲノムの研究に被験者として協力している英国のヘヴィメタル歌手オジー・オズボーンも、ネアンデルタール人由来の遺伝子を持っていました。

### ネアンデルタール男にひかれる人類女

人間が、ネアンデルタール人のミトコンドリアDNAは持っていないが、核DNAは持っていたことから、3つの仮説が考えられます。

1つ目は、ミトコンドリアDNAは小さく進化も速いので、仮にネアンデルタール由来の遺伝子があっても見落としている可能性。

2つ目は、交雑はネアンデルタール人の男と人間の女の間のみ行われたため、ネアンデルタール人の核DNAは受精卵の中に入ったけれど、ミトコンドリアDNAは入らなかった可能性。ネアンデルタール人は姿が美しく体が大きかったので、現生人類の女性には、華奢で紳士的で頭の良い同種の男性よりも、セクシーにうつったのかもしれない。

ません。ネアンデルタール人の薬指は現生人類のものより長く、好色で強引で性欲旺盛だったと考えられます。さらにネアンデルタール人は、大人の体格は大きくても新生児の脳の大きさは人間とほぼ同じなので、体が小さく華奢な人間の女でもネアンデルタール人との交雑種の子供の妊娠と出産が可能だったのでしょう。

3つ目は、当時は母系社会で、母親のいる集団内で子育てをしていました。交雑種の子供を人間の母親は祖母とともに時間と手間をかけて育て上げますが、ネアンデルタール人の母親には成長の遅い交雑種の子を育て切れなかったかもしれません。さらにデニソワ人とも交雑した人々が、メラネシアに定住しました。メラネシア人は、4〜6%のデニソワ人遺伝子を持っています。これら、ネアンデルタール人やデニソワ人から持ち込まれた免疫遺伝子によって、交雑種の生存が有利になりました。





おれは  
もともと  
害のない  
鬼なんだ

よせよ

家来に  
なる？



きびだんご



今から40万年前  
ネアンデルタール人と  
デニソワ人という  
我々とは別の  
人類がいた

後に彼らと  
遭遇した  
ホモ・サピエンス  
からすれば

大柄な彼らは  
鬼のように  
見えたこと  
だろう

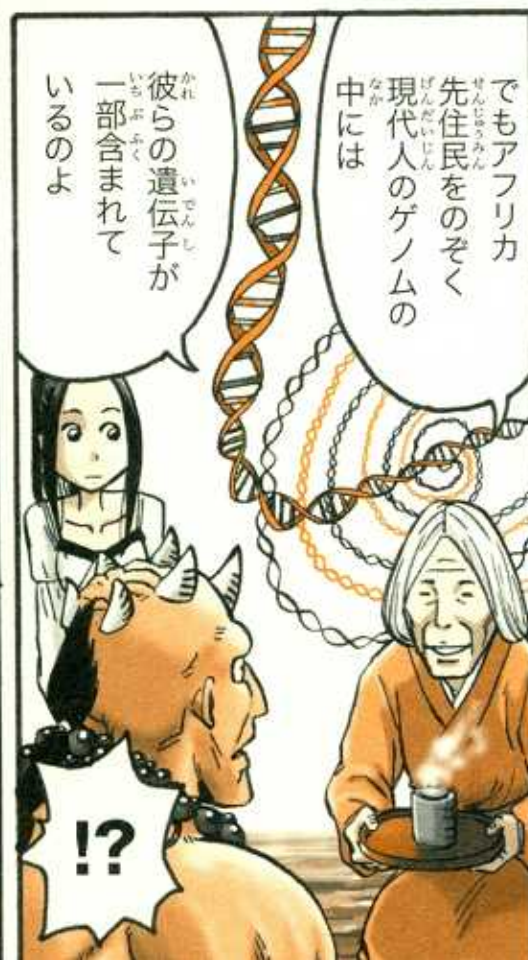


あいつのことが  
気になるもの

私  
鬼ヶ島へ  
行くわ



つまり  
愛された鬼も  
いるってことよ

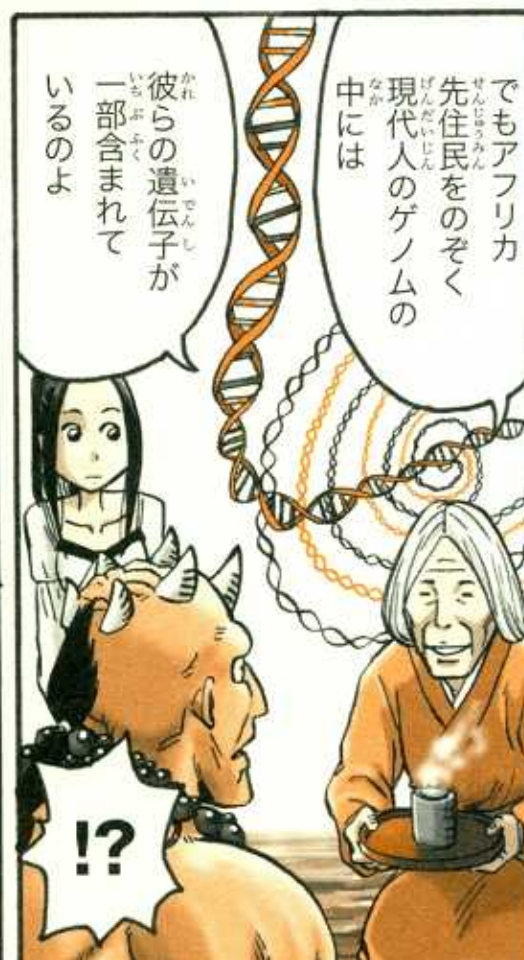


でもアフリカ  
先住民をのぞく  
現代人のゲノムの  
中には

彼らの遺伝子が  
一部含まれて  
いるのよ

!?

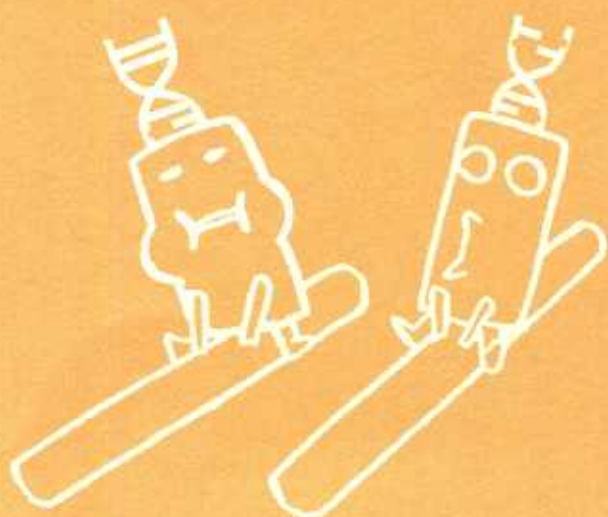






第2章

46億年の遺伝子





# 石から生まれたゲノム

## 宇宙創生と核酸の誕生

孫悟空は、石から生まれた石猿です。これは中国の突拍子もない昔話ですが、全ての生物の源もまた石であると考えられています。

そもそも宇宙は、137億年前にビッグバンによって誕生しました。

ビッグバン前の世界は、この宇宙とはまったく別の、揺らぐエネルギーのような存在でした。それが何かのひょうしでビッグバンを起こしたことにより、この宇宙の時間と空間が誕生しました。エネルギーから質量（物質）が生まれ、それによって重力などの素粒子の相互作用が生まれました。こうして素粒子から原子が生まれ、一番単純な原子である水素とヘリウムが集まって恒星になり

ました。恒星は自分の重力によって核融合を起こし、窒素や酸素や炭素などの重い元素を作りました。これらの元素は恒星が爆発したときに宇宙に撒き散らされて、この宇宙のチリが新しい星の材料となりました。

こうしてできたさまざまな元素が、高温や宇宙放射線のエネルギーなどの影響で化合して、アミノ酸や核酸などの分子が作られました。

45億年前、このような宇宙のチリが集まって太陽系ができました。原始の地球にも、このように宇宙で合成されたり、新たに雷の放電などによって合成されたアミノ酸や核酸が存在しました。これらの分子は、雨に混じって原始の海に流れこみ、地熱などの働きで、より多様な分子を生みだしま



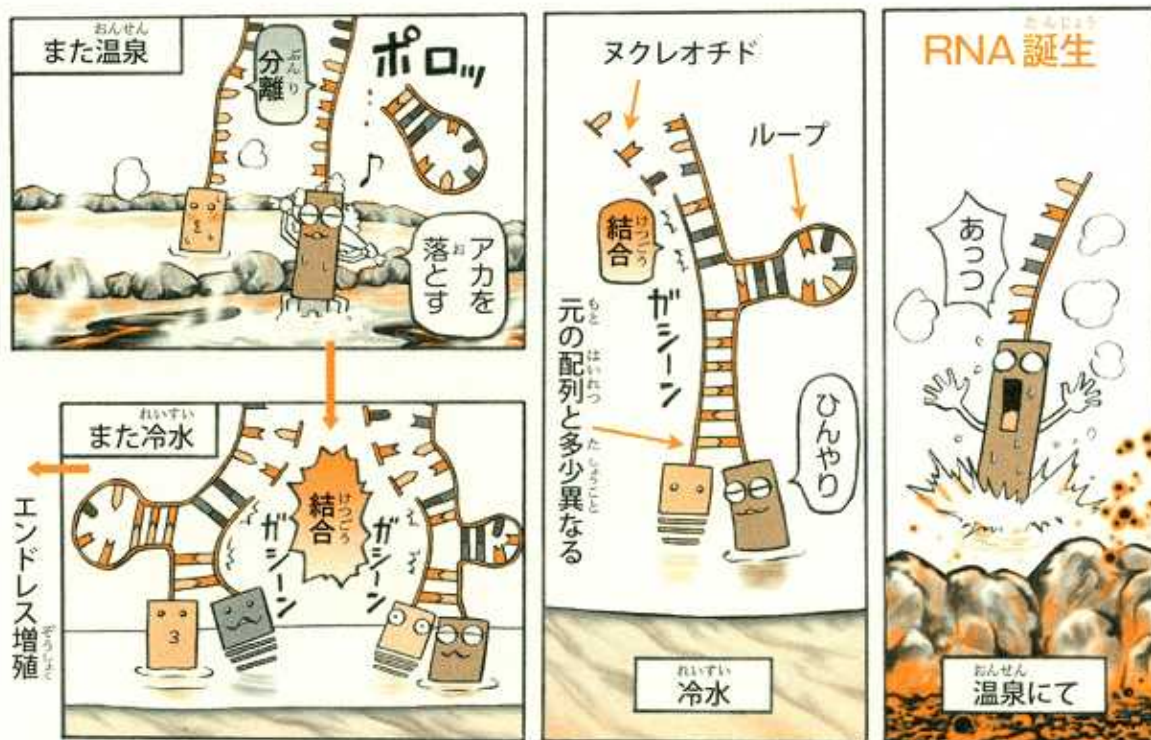
した。

こうして生まれた分子のひとつが、リボヌクレオチドです。リボヌクレオチドから酸素がひとつ無くなったのが、DNAの材料であるデオキシリボヌクレオチドです。リボヌクレオチドはつながって、RNAという長い鎖状の分子になりました。

RNAは、 $A \cdot G \cdot C$ のほか、 $T$ のかわりに  $U$  という塩基を持っていて、DNAと同じように相補的な鎖を作って自己複製を行います。

RNAは、なぜこのような鎖型の構造を取れたのでしょうか。まず海水に溶けこんでいた核酸が、海の底の石英などの結晶構造を鋳型としてビーズ玉をつなげるように並び、並んだリボヌクレオチドのリン酸どうしが結合して鎖状になったのではないかと考えられています。

こうして、二重らせん構造を持った遺伝子DNAの原型となる、1本鎖状のRNAができました。



## 温泉が作ったRNA

鉱石の結晶を鋳型にして1本鎖RNAができる  
と、次はこのRNAを鋳型にして、新たなリボヌ  
クレオチドが水素結合でくっつきます。

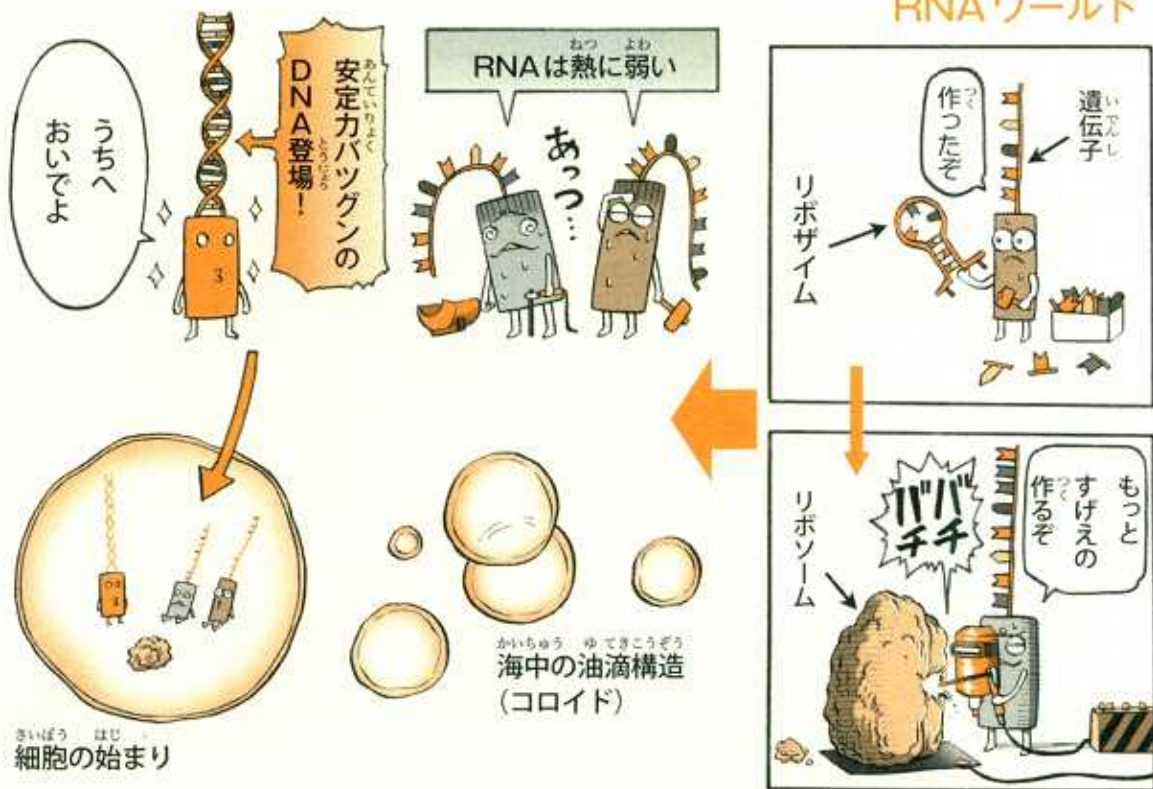
水素結合は、90℃をこえる高温にすると分子運  
動が活性化して離れます。30℃ぐらいの低温にす  
ると分子運動が落ちついて、ふたたび水素結合で  
くっつきます。

地球誕生から40億年前までは、まだ地球が宇宙  
のチリから出来たばかりのマグマのかたまりのよ  
うな状態でした。地殻変動は激しく、熱水の温泉  
が湧いていました。

海底火山から湧き出る温泉の周囲で波にもまれ  
ていた原始のRNA鎖に、冷たい海水の中で新た  
なりボヌクレオチドが結合して、相補的な2本鎖  
のRNA鎖になります。

次にこれが温泉の近くに流されると、2本鎖が  
ばらばらになって、1本鎖のRNA鎖2本に分か

## RNAワールド





れます。

そして、この2本のRNA鎖が、またそれぞれ低温の水域でリボヌクレオチドと結合して、4本のRNA鎖になります。

このようにして、RNA鎖は自分と同じ配列を自己複製していきました。自己複製する塩基配列、すなわち遺伝物質「ゲノム」の始まりです。

もちろんこのとき、RNAはまだ遺伝子でも何でもありませんでした。単なる、自分を鋳型にして自分のコピーを作る能力を持った、鎖状の物質にすぎませんでした。

ところで、RNA鎖はただの一次元的なひもではなく、温度が下があれば分子の相互作用によってたたまれ、立体構造をとります。たとえば1本のRNA鎖の中にたまたま相補的な配列があれば、その部分でΩ状のループを作ってしまう。すると、このループになった部分はコピーのときに読み飛ばされてしまうので、複製されたRNAで

は塩基配列が変わってしまいます。

またGはG同士でくっつく性質があるので、配列の中にGが並んでいるとこの部分が団子になってしまい、やはりコピーのときに読み飛ばされ、複製されたRNAでは同一性が保持できません。こうしてだんだん短くなっていくうちに、他のもっと長いRNA鎖の部品として使われてしまい、この世から消えてしまったRNA配列も無数にありました。

こうして、他のものよりも自己複製しやすい性質を持ったRNA鎖が選抜されていきました。

## RNAワールドから生命へ

ゲノムRNAの選抜は、さらに続きました。

G団子などの自己複製に向いていない配列が生まれて淘汰されていく一方、その立体構造がRNAの自己複製反応を進める触媒としてはたらく配列もありました。

このような触媒として働くRNA分子のことを、リボザイムといいます。そして、リボザイムを作るようなRNAの配列が、遺伝子になりました。ゲノムも遺伝子も触媒もRNAで作られていた前生命の世界、すなわち自己複製するRNAの世界をRNAワールドと呼びます。

RNAワールドの中で、さらに触媒として、RNAを材料にしたリボザイムではなく、タンパク質を材料にした酵素を作れるような構造物（リボソーム）を作るものも現れました。

さらに、RNAは熱などに対して不安定なので、その塩基配列を保持するために、ゲノムの材料としてRNAよりも丈夫なDNAを使うものが出てきて、これがメジャーになって行きました。

こうしてできたりボザイムや酵素を他のゲノムに横取りされないよう、ゲノムは水に溶けた油滴構造（コロイド）の中に入りこみました。これが細胞のはじまりです。

このようにして、自分が作ったりボザイムや酵素は自分だけで有効に使い、新しい材料はコロイドの膜を通して外から手に入れ、さらにそれを自分の中にためこむようになりました。そして油滴に何かの力が加わって小さく分かれたときに、増えたゲノムや材料もいっしょに分けられて、そこでまた増えて行きました。これが、細胞分裂のはじまりです。

細胞構造を持ったことによって、他力本願な化学反応ではなく、自主的にゲノムの自己複製が行えるようになりました。この状態になった物質を、われわれは生命と呼んでいます。



おい！  
あんたら  
鬼ヶ島へ  
行くんだろ？！

おれ様も  
連れてって  
くれ

おれ様は  
石から  
生まれた  
石猿の  
孫悟空だ

石から…

変か？

こうして  
じっとしてるの  
にも飽きた

石を連れて  
いっても  
役には立たん

まて  
まて

生物の  
ゲノムだって  
石から生まれ  
たんだぞ

原始海底の  
鉱物の結晶構造を  
鑄型にしてな

おれ様だって  
似たような  
もんよ

おまえは  
石のまんま  
だろ

あらじゃあ  
石から生まれた  
ゲノムはどうやって  
生物になったの  
かしら

おお

それがわかれば  
おれ様も生物に  
なれそうだ

なれたら  
きびだんご  
あげる





## 生命の中心教義・セントラルドグマ

### RNAワールドからDNAワールドへ

RNAワールドの中から、細胞構造を持ち、ゲノムとしてDNAを持った「生命」が生まれてきました。生命は、早ければ43億年前には誕生していたかもしれませんが、この時代は地殻変動が激しくて、証拠となる化石が残っていません。しかし少なくとも、今から38億年前には生命の痕跡が見つかっています。

生命誕生前のRNAワールドの世界にあったものは、複雑な化学反応を起こす核酸分子であって、能動的な生命ではありません。生命誕生前の時代を冥王代といい、生命誕生後の38億年前からの時代を始生代といいます。

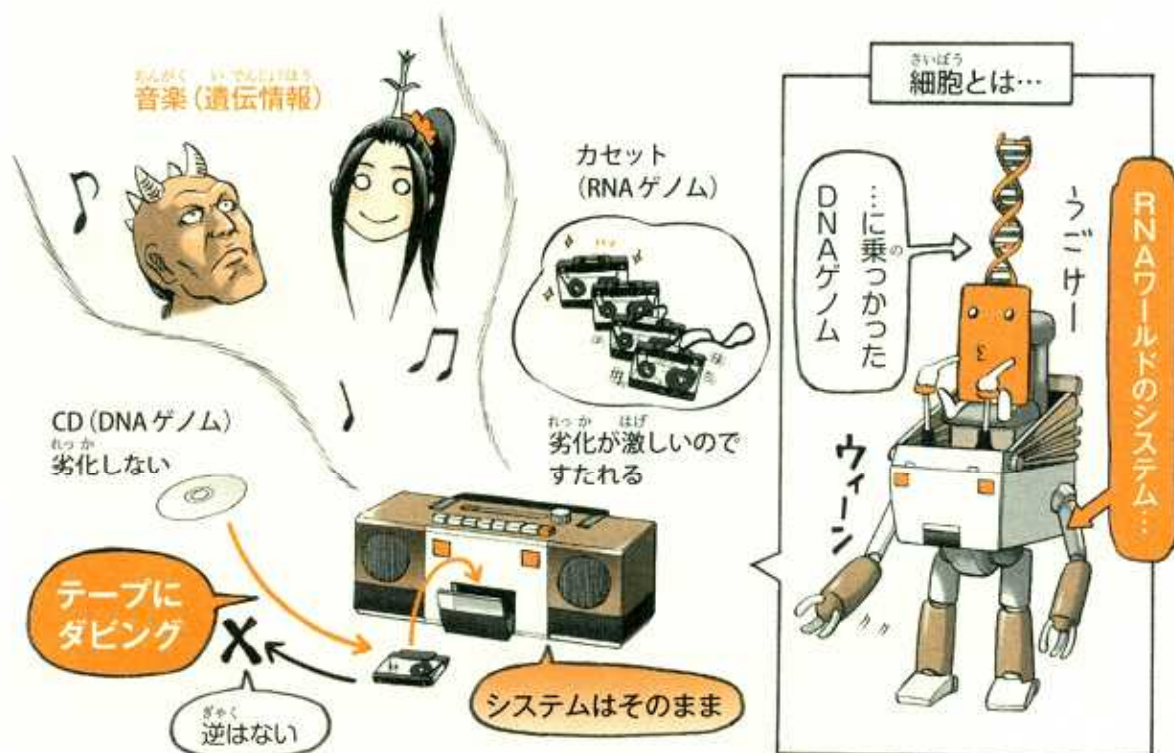
始生代、細胞はより進化して多機能化し、より

自分自身を効率的に増殖する能力を上げていきました。新しい設計図（遺伝子）から新しい道具（タンパク質）を作りあげたゲノムどうしの競争が始まりました。

増殖が早いもの、新しい道具を持ったものが有利になりました。しかし、遺伝子が増えてゲノムサイズが大きくなると、自己複製に時間がかかり、増殖が遅くなって不利にもなります。こうして、さまざまなパラメーターに左右されながら、他よりも効率的に自己増殖を行える細胞が生存競争に勝ち残って、生き残っていききました。

ゲノムとしてDNAを用いるようになった細胞が生存競争に勝ったため、現在、ゲノムとしてRNAを用いている生命体は存在しません（ただし





細胞構造を持っていない、生命体ではないウイルスには、ゲノムとして1本鎖や2本鎖のRNAを持っているものもあります。

しかし、細胞のシステムそのものはRNAワールドの中で進化したものです。そのため現在のDNA生物の細胞システムは、RNAワールドのシステムの上にDNAゲノムが乗ったツギハギです。

ゲノムDNAに記録された遺伝子がタンパク質を作るとき、まずはDNAを伝令RNAにコピーする必要があります。すなわち、DNAゲノムをRNAゲノムに変換するのです。

遺伝子情報を記録した伝令RNAは、核を出て、細胞質の中のリボソームに向かいます。リボソームはRNAからなる巨大な分子で、伝令RNAの遺伝情報にしたがい、タンパク質の材料であるアミノ酸を並べていきます。このアミノ酸を運んでくる運搬RNAも、RNAからなる分子です。つ

まり遺伝子もRNA、遺伝子をタンパク質に変える道具もRNAという、RNAワールドそのまのシステムなのです。

### CD↓カセットテープ↓音楽

細胞はDNAゲノムを持つ、RNAワールドのシステム。

この概念は、CDとカセットテープの関係になおすと理解しやすいです。DVDやブルーレイが全盛の現在、若い読者には少々わかりにくいとはいえかもしれません。

カセットテープは、RNAゲノムです。入っている音楽が、遺伝情報。これを再生することが、遺伝子を発現させてタンパク質を作ること。再生する機械が、カセットデッキです。

新曲が出たらカセットテープを買い、カセットデッキで再生して楽しめます。カセットテープは劣化が激しいので、カセットデッキで別のカセッ

トテープにダビングします（ゲノムの複製）。

やがてCDが発売されました。カセットテープと違って、劣化しない音源（DNAゲノム）です。ところが、すでに家にはカセットデッキを中心とした豪華なステレオシステムがあります。

そこでCDをカセットテープにダビングすることで、今までどおりのカセットデッキを使うことにしました。これがDNAをRNAに転写し、RNAワールドでそろえた細胞システムを使うということです。

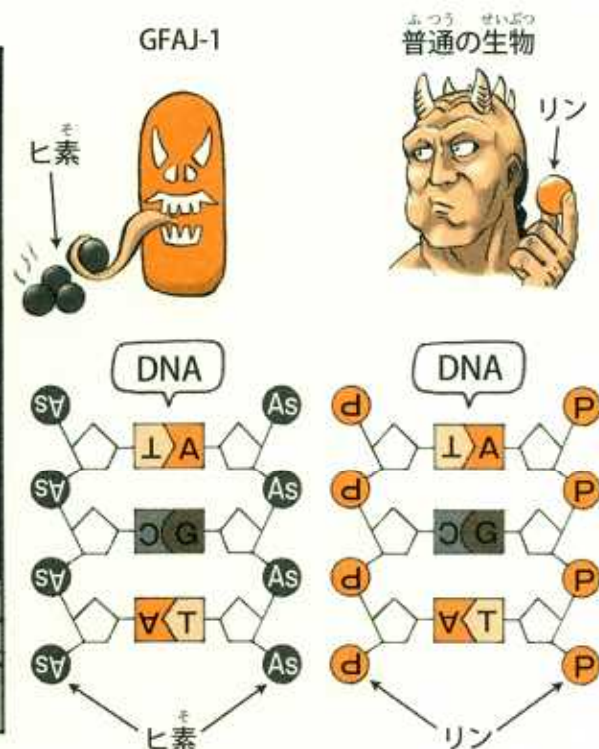
ただしDNAワールドではDNAがゲノムなので、カセット（RNA）はもはや自己複製は行わず、CD（DNA）の内容をダビングするためだけに存在しています。また機能的に、カセットからCDにダビングされることもありえません。

このような、DNAは自己複製し、DNA→RNAに転写、RNA→タンパク質に発現、という一方通行で逆はありえない遺伝子DNA発現の流





宇宙にもリンを使わない生命が？



れを、セントラル・ドグマといいます。これは、DNAの二重らせん構造を発見したクリックによって提唱されました。

### ヒ素DNAを持つ細菌

DNAワールド全盛の中で、生存競争に勝ったものは数を増やし、負けたものは滅亡していききました。RNAゲノムをはじめとして、永遠にこの世から消えてしまった試作品のようなゲノムも無数にありました。

2010年、NASAは従来の宇宙の生命探査計画を揺るがす大発表をしました。それはヒ素が多く含まれる泉に住む細菌GFAJ-1の発見です。

GFAJ-1は真正細菌（バクテリア）で、大腸菌やサルモネラ菌といった一般的な病原菌をふくむ、プロテオバクテリアの仲間です。

植物が光合成によって作り、生物がエネルギー

源として用いる糖（炭水化物）は、炭素・水素・酸素からできています。これに窒素・リン・硫黄を加えた6元素が、タンパク質や核酸などの材料で、生命体に欠かせないものです。

ところがGFAJ-1が住む環境にはリンが少なく、DNAのリン酸骨格を作るための材料が足りません。そこでGFAJ-1はリンのかわりに、同じ窒素族元素であるヒ素をDNAの材料として用いることができます。

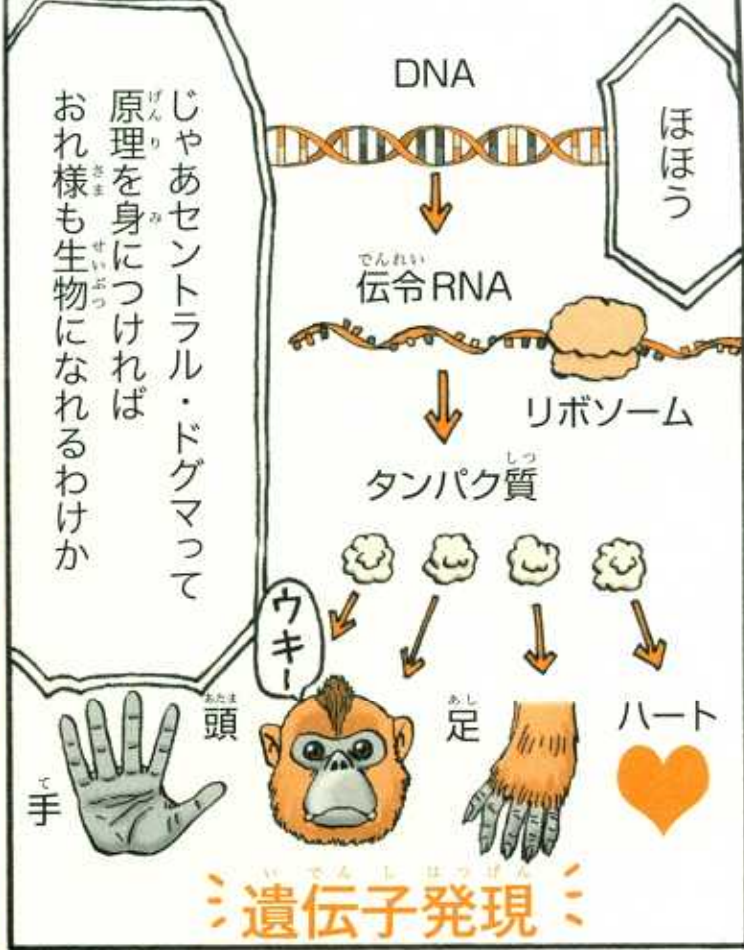
もともとヒ素は同じ窒素族元素であるリンに似ているため、タンパク質の材料としてまちがって取りこまれて、正常でない酵素ができあがってしまいます。すると細胞のシステムを触媒していた酵素が働かなくなってしまうので、中毒を起こして死んでしまいます。

しかしGFAJ-1はそのヒ素をリンの代替材料として、DNAの材料に使って生存することができます。ただしGFAJ-1は、われわれリン

酸骨格DNAを持った生物と種の起源を異にするような生物ではありません。もともとふつうのリンを使ったDNAを持つふつうの細菌だったものが、リン不足で仕方無くヒ素も使えるようになっただけです。リンがあればリンのほうを好んで使うので、GFAJ-1にヒ素を与えるよりリンを与えたほうが速く増殖します。

このGFAJ-1の発見がなぜ宇宙に関係しているのかというと、従来、宇宙生命の探索のためには、隕石などにPCR法というDNA増幅技術を用いてゲノムの有無を調べていました。しかしDNAの構成材料が違えば、PCR法では増幅されません。つまり今までの生命探索方法では、われわれのDNAと組成が異なる遺伝物質を持つ生物を見落としていた可能性が示唆されたのです。こうして、GFAJ-1の存在は、従来の宇宙における生命探索の方法論に一石を投じました。







## ③ 死がみちびく進化

### なぜ人は死ぬのか

時間が経つにつれて、ゲノムは紫外線などの影響でどんどん壊れて老化します。そこでゲノムを混ぜあわせることで、壊れた部分をおぎないあい、若がえったゲノムを作るのが、交雑の目的です。

だから人間は生殖細胞を作って若い子供を産み、若返るすべのない古い細胞のかたまりである自らは年老いて、生命を支える筋肉細胞や免疫細胞がどんどん死滅し、ついに生命活動を支えることができなくなって老衰死します。

もし、この死というシステムがなかったらどうなるでしょう？ 大人は子供より大きいので、生存競争において絶対的に勝利します。子供は生存競争に負けつづけるので、新しい組み合わせの多

様なゲノムと進化の可能性を持った次代は、永遠にあらわれません。その状況で厳しい環境変化が起こった場合、古いゲノムを持った者たちは適応できずに絶滅してしまいます。

どんなに強い者にも必ず死が訪れて、誰も世界を支配しつづけることができない。その死というシステムがあるおかげで、常に生命は新しいものへと新陳代謝されていきます。

生態系についても、同じことが言えます。針葉樹の大森林は、植物遷移きよくそうりんの最終段階です。この状態になった極相林きよくそうりんの森では、地面は木々の影になって真っ暗で、新しい種は芽吹いてもすぐに枯れてしまいます。そのままでは、針葉樹が枯れるまで生態系は何千年も変化しません。



## 死というシステム

生態系がリセット



山火事


しよくぶつせん い さいらゆうだんかい  
 (植物遷移の最終段階)  
しんようじゆ だいしんりん  
 針葉樹の大森林


しかし、落雷などによって山火事が起こると大森林が焼き払われ、生態系がリセットされます。そこで、これまでは大きな針葉樹に勝てなかった小さな種が芽吹き、新たな生存競争を始めます。その中で、突然変異によってあらわれた、これまでは無かった特性を持った植物が繁殖する可能性もあります。

こうして、旧世代の死によって生物種は多様に進化していきます。多様な種が存在していることで、大きな環境変化が起こっても、全ての生命体が絶滅することは防げます。

死というシステムによって、地球の生命体の全てが完全に絶滅することが予防されているのです。

## 進化を後押しした大絶滅の歴史

地質時代でもっとも有名なのは、恐竜が天下をとった中生代でしょう。

われわれ人間が生きている新生代は、哺乳類の

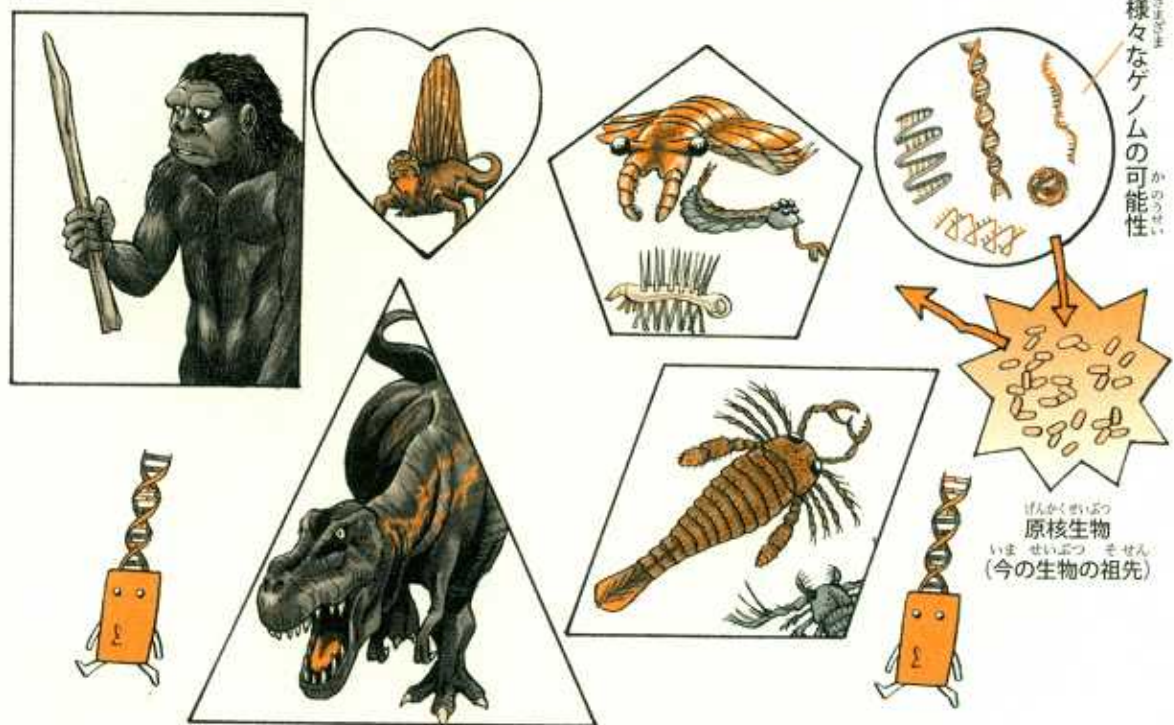


時代です。が、哺乳類は実は2億2500万年前、中生代のごく初期にすでに誕生していました。6500万年前に恐竜をはじめとする多くの爬虫類が滅びるまでは、地球の生態系という舞台の中では脇役だった哺乳類ですが、爬虫類の大絶滅のおかげで、それまで少しずつためていた変異の多様性を爆発させて、あいている生態的地位（ニッチ）を一気に独占したのです。中生代末期にあらわれた鳥類も、同様にこのニッチを奪いました。

たとえば高木の葉を食べる大型草食動物の座は、雷竜からキリンやゾウへ。ティラノサウルスのような大型肉食動物は、ライオンやトラ、鳥類では今は滅びた恐鳥類。海の魚を食べる海棲動物の座は、首長竜や魚竜から、アシカやカバやイルカ、鳥類ではペンギンやウ。空を飛ぶ翼竜や羽毛恐竜の座は、おもに鳥類が奪いました。

古生代から中生代に変わるときも、大絶滅と、それにともなうニッチの空白、その空白の座を奪

環境（図形）が変化するとに大絶滅と進化の爆発をくり返した





うための種の多様性の爆発が起こっています。

古生代が終わった原因は隕石衝突による、世界中の森林を燃やしつくすほどの大火災でした。これによって地球上の酸素濃度が激減し、30%をこえる豊かな酸素濃度によって大型化した昆虫は絶滅、恐竜のように多様化して地上を支配していた大型両生類も絶滅し、薄い酸素でも耐えられる小型の動物だけが何とか生存可能でした。そこでわずか10%という中生代の薄い酸素を効率よく使える気嚢構造を肺に持つ恐竜が、一気にニッチを広げることができたのです(現在の酸素濃度は20%)。

さらに古生代の前には先カンブリア時代があり、その末期にはクラゲのような腔腸動物やゴカイのような環形動物など、原始的な動物たちのエディアカラ生物群が栄えていました。

彼らが絶滅した原因は不明ですが、地球の寒冷化のせいかもしれません。そして彼らが滅びたあとの地球の海に、カンブリア爆発と呼ばれる進化

の爆発が起こりました。先カンブリア時代にためこまれた遺伝子変異が一気に花開き、多様な動物が一斉に出現し、それぞれの遺伝子を駆使して生存競争のレースをはじめました。

カンブリア爆発のころに、現在地球上にいる全ての動物の原型が出揃いました。背骨を持った脊椎動物、貝やタコのような軟体動物、硬い外骨格で体を包んだ節足動物。その中には、ウミサソリのように一時は大繁栄したものの、やがて衰退して消えたものもあります。

### カンブリア爆発の前の原核生物爆発

エディアカラ生物群の大絶滅およびカンブリア爆発以前にも、地球は何度も凍りつき、せつかく栄えていた生命が大絶滅してきました。その間は海底火山のまわりや地下の温泉のまわりなど、気候変動の影響を受けない場所で生命が生きのびていました。

彼ら原核生物である古細菌（アーキア）の仲間  
は、鉄を酸化させてエネルギーを得たり、強酸性  
の硫酸の温泉の中で硫黄を酸化させてエネルギー  
にしています。地下の温泉の中で変異をためこみ、  
いざ海が溶けたときに、生命が消えた海へ向かっ  
ていつせいに地下から生存圏を拡大し、支配しま  
した。そして、真核生物へと進化したのです。

さて、その原核生物たちの時代の前には、さま  
ざまな材料でゲノムづくりが試されたことでしょ  
う。まだ生命（細胞）ではなく、ゲノムの増殖装  
置としての原始的なコロイドにすぎなかったころ。  
RNAゲノムやDNAゲノム、それにGFAJ-  
1のように炭素・水素・酸素・窒素・リン・硫黄  
のほかの材料から作られたDNAやRNAやその  
他のゲノムもあったでしょう。

このようにさまざまなゲノムがひしめきあう中  
で、大絶滅が起こって全てのゲノムはばらばらの  
核酸に戻ってしまい、その中でカンブリア爆発の

ように、DNAゲノムにRNA式の細胞という自  
己増殖システムをそなえた「原核生物」が爆発的  
に増殖して、全ての生物の祖先になったのでしょ  
う。







## 4

# 永遠の生命

### 生命を守る死のスイッチ

命あるもの（すなわち、細胞構造を持ったゲノムDNA）は必ず死にます。ゲノムDNAは紫外線や、酸素呼吸にともなう活性酸素で傷つきつづけ、遺伝子がどんどん壊れていきます。

ですから、生殖細胞を作って、それを別の生殖細胞と交雑することで、壊れた遺伝子をおぎなわなくてはけません。父方のゲノムと母方のゲノムの両方ともその遺伝子が壊れていたら、最悪の場合、その受精卵は発生しません。つまり、ここで壊れた遺伝子が淘汰され、正常な遺伝子を持った次代が生まれてくるのです。

次代に生態系の座をゆずるため、生殖能力を失った親の世代は早々に死ぬ必要があります。サケ

は産卵のために海から川へ遡上しますが、そのとき川の淡水に慣れるために数日間、海と川のあいだの汽水域に滞在します。このときサケには死のスイッチが入ります。もはや、川を遡上して卵を産み精子を放出して、死ぬしかなくなるのです。

生物は皆、何らかの死のスイッチを持っています。ゾウリムシのように、ゲノムDNAが損傷して最終的に分裂できなくなって寿命を迎えるという消極的な死だけではありません。高等動物になると、もっと積極的に死のスイッチを使うようになります。

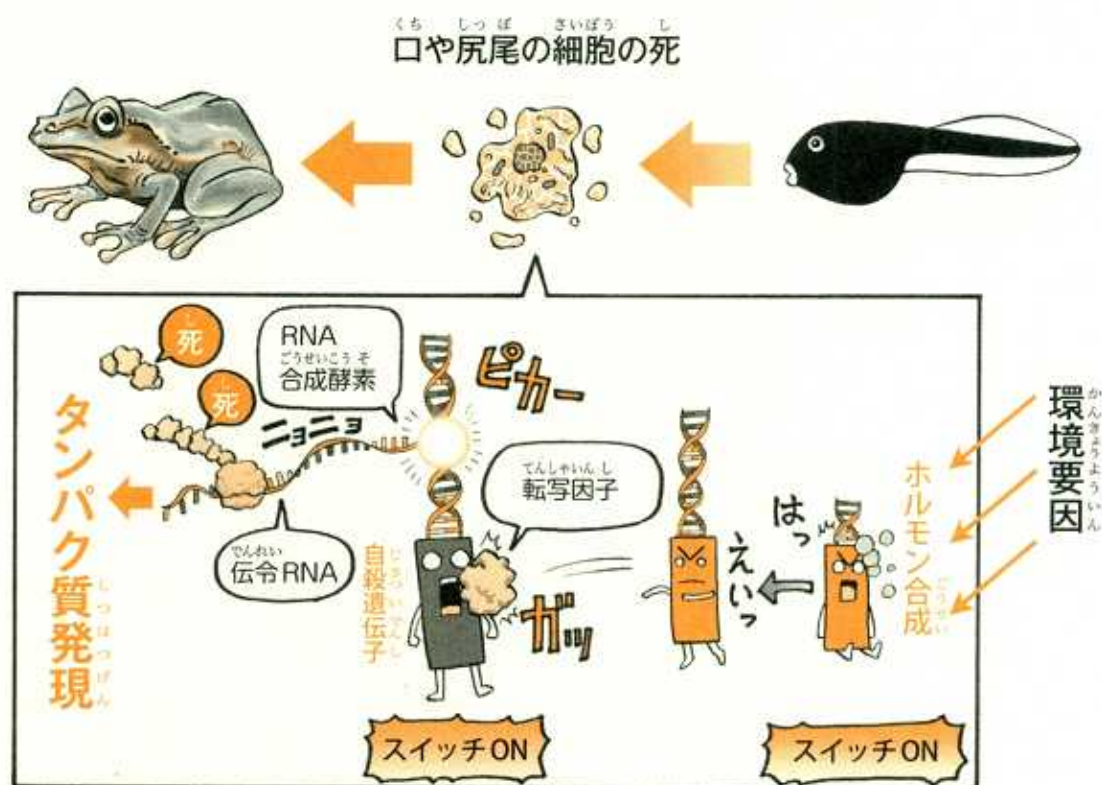
そのスイッチが入ることによって、自殺遺伝子が働き、細胞は死ぬのです。



## 自殺遺伝子が作る指

人間の指の間には水かきがあります。手は胚発生するとき、まずグローブのように五本の指がくっついた形で作られ、最後に指のあいだの組織の細胞が発生の決まった時期に死んでいって、五本ばらばらの指になります。決まった時期に細胞が死ぬよう定められていることを、予定細胞死（プログラムド・セル・デス）といいます。そして、自殺遺伝子によって特定の時期に特定の細胞が自ら死んでいくこの現象を、アポトーシスといいます。アヒルの足指には水かきがありますが、これはアポトーシスがじゅうぶん働いていないからです。ニワトリの足指はアポトーシスのおかげで水かきがありませんが、遺伝子組み換えでアポトーシスをおさえると、足指に水かきをもったニワトリになります。

オタマジャクシがカエルに変態するときにも、アポトーシスが関与しています。アポトーシスに



よって、尻尾が短くなっていきます。またオタマジャクシの口のまわりの細胞も死んでいくので、オタマジャクシのおちよぼ口から、カエルらしい大きな口へと変化していきます。

このような自殺遺伝子のスイッチは、遺伝子の上流の領域にあります。この領域に転写因子というほかの遺伝子が作ったタンパク質が結合すること、遺伝子のスイッチが入って活性化します。転写因子がDNAに結合することで、遺伝子の上流の領域にRNA合成酵素がくつつくことができるようになります、伝令RNAが合成されて、タンパク質として発現するのです。

転写因子の遺伝子もまた、他の転写因子によって活性化されています。一番最初にそれらの遺伝子のスイッチを入れているのはホルモンで、ホルモンを合成するスイッチを入れているのは、日照条件などの環境要因です。

これらの遺伝子発現のネットワークを完全に解

明することができれば、遺伝子治療などに役立ちます。このネットワークが全て解明されていない状態でむやみに遺伝子治療を行うと、風が吹けば桶屋がもうかる方式で意図しない遺伝子が発現し、ガンなどの原因にもなるからです。

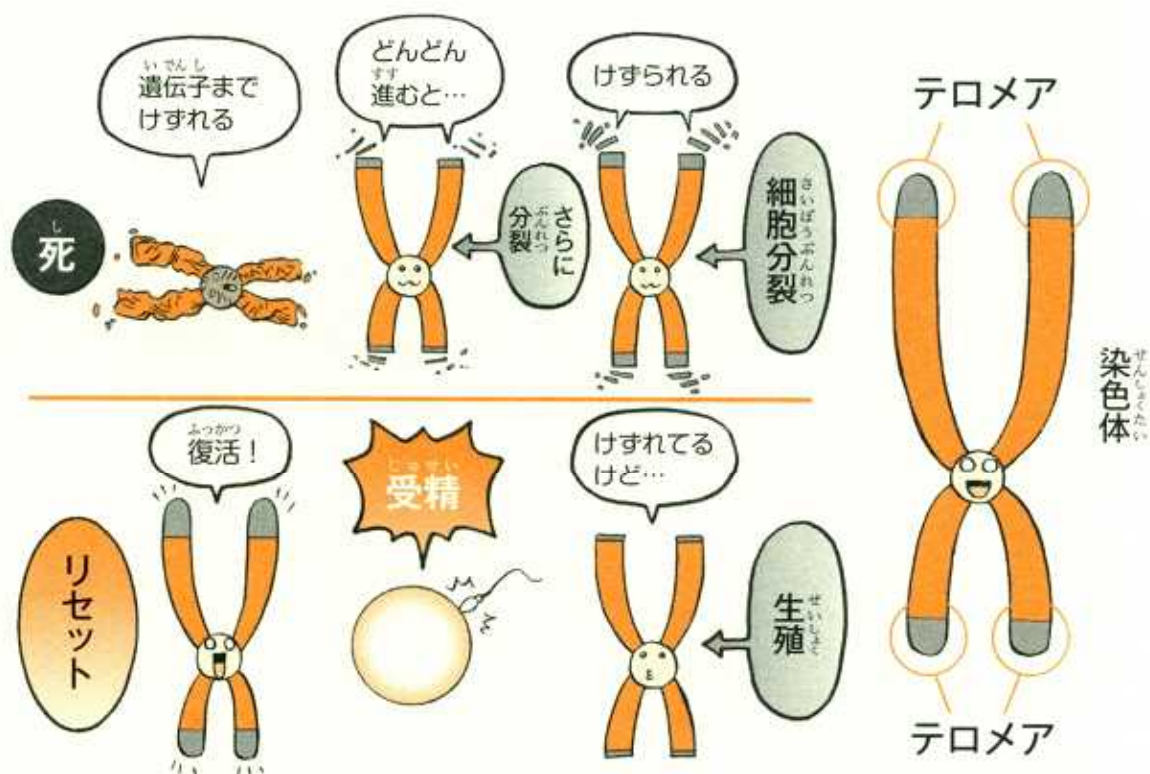
ゆえに、まだ人類に遺伝子の知見が乏しい現在、遺伝子治療はそれができる技術があってもかんだんには行えないのです。

### 老化をつかさどるテロメア

自殺遺伝子とは別に、細胞の老化にかかわっているのが染色体の端にあるテロメアという領域です。テロメアは反復配列という意味の無いDNA配列からできていて、遺伝子はコードしていません。

ここは染色体ののりしろ部分です。細胞分裂するたびに染色体は端から削られていきますが、テロメアがあるため、大事な遺伝子は削られません。





しかし細胞分裂が一定の回数に達すると、テロメアは無くなり、遺伝子が削られて細胞が死にます。こうして骨や筋肉や免疫細胞などが減っていくことが、老化です。やがて生命を維持するだけの細胞数が無くなったとき、老衰によって死亡します。

テロメアは生殖細胞が受精すると、リセットされます。大人の細胞から核を取りだして受精卵に入れ再び新生児として産ませる体細胞クローンの場合、取り出された核のテロメアの長さはリセットされず、加齢に応じて短くなったままです。そのため、クローンで生まれた動物はそのぶん寿命が短くなります。

### 60年生きた細胞

テロメアはただ減るばかりではなく、テロメラゼという酵素でそこそこ補修されてもいます。テロメラゼの活性を上げることで、細胞の老化

を防ぎ、永遠の命を得ることができる可能性があります。

ところで、実際にテロメララーゼによって永遠の命を持った細胞があります。それは、ガン細胞です。

ガン細胞は、細胞の成長と細胞分裂のスイッチが壊れてしまった異常な細胞です。ふつうの細胞より成長が速く、数ヶ月で細胞分裂します。

細胞は、決まった時期に決まった場所で定められた遺伝子のスイッチが入って発現することで、それぞれの組織へと分化します。しかしそのスイッチが壊れてしまうと、成長の制御がきかず、アポトーシスによる秩序も無く、何の役にも立たない細胞のかたまりになります。これがガンです。ガン化した細胞が増殖すると、組織や器官が正常に働けなくなり、生命を維持することができなくなります。

ガン細胞ではテロメララーゼの遺伝子も抑制がき

かないので、テロメアは永遠に修復されつづけます。そのため、ガン細胞は永遠の生命を持っています。

ガンの研究のため世界中の研究室で使われているヒラー細胞は、1951年に子宮頸ガンの細胞から分離された培養細胞です。当時30代だったその患者ヘンリエッタ・ラックスの死後60年経った今も、永遠の寿命を持つガン細胞は死ぬことなく、けいだい継代培養されつづけています。





きみの足って  
アヒルみたい

「不死」  
だからな

生物は皆  
自殺遺伝子を  
もっていて  
これが働く  
と細胞が死ぬ

指の完成

死 死 死

生命とは  
死というノミの力  
で彫り出されてくる  
彫刻なのじゃ



ニワトリの足指も  
アポトーシスの働きで  
水かきがなくなる  
わけだが

コケー



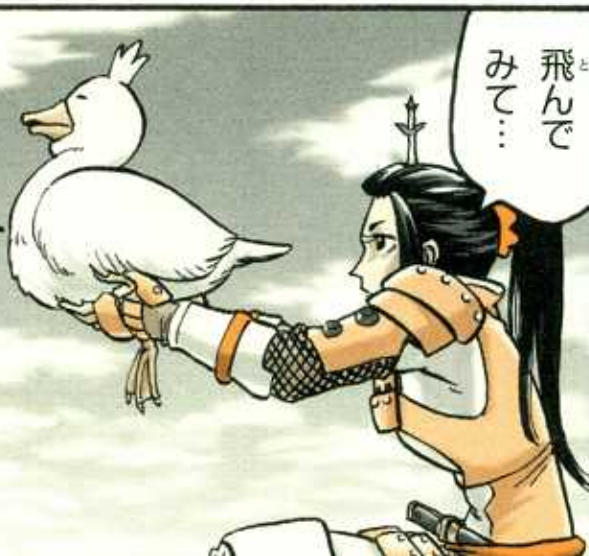
私は不死ゆえに  
アポトーシスが  
じゅうぶん働かない

ゆえに  
アヒルのような  
足指をしている  
わけよ



要は  
アヒル  
なんだろ

飛んで  
みて...



不死だから  
せかせかと  
飛んで逃げる必要は  
ないのじゃな





## 弱肉強食の遺伝子

### 食うDNAと食われるDNA

弱肉強食は、生存競争の基本的な概念です。まだ生命が誕生していない40億年前の冥王代の時代にも、弱い者は強い者の糧となっていました。

DNAやRNAを作るには、材料としてヌクレオチドが必要です。ヌクレオチドが鎖のようにつながった高分子のヌクレオチド鎖になることで、遺伝情報を記録できるゲノムが作られます。

しかし、DNA鎖やRNA鎖は高温になると分子運動が激しくなって、ふたたびばらばらのヌクレオチドに戻ってしまいます。そこで、海底火山などのまわりの熱水中では、熱に強いヌクレオチド鎖が生き残っていました。

熱に強いものは、まずヌクレオチドの鎖が長い

もの。長いほど熱に強くなります。ですから、自分より短いヌクレオチドが近くにあった場合、これが熱に負けてばらばらになったものを、長いほうが自分をより伸ばす材料として再利用します。つまり、短いヌクレオチド鎖が長いほうに「食われた」といえます。

また、同じ長さのヌクレオチド鎖でも、熱への強さが違います。<sup>グアニンシトシン</sup>GやCが多いものは熱に強くなります。

だからといって、ただ長ければ生存競争に勝てるほど話は単純ではありません。ヌクレオチド鎖が長すぎると、波に揺られるなどの物理的な力で切れてしまうので、上手に折りたたまって壊れにくい立体構造を取れるような配列を持ったものも



生き残ります。さらに、触媒をもちいて他のヌクレオチド鎖を積極的に破壊し、自分の材料にしてしまう「肉食系」のヌクレオチド鎖もあらわれました。

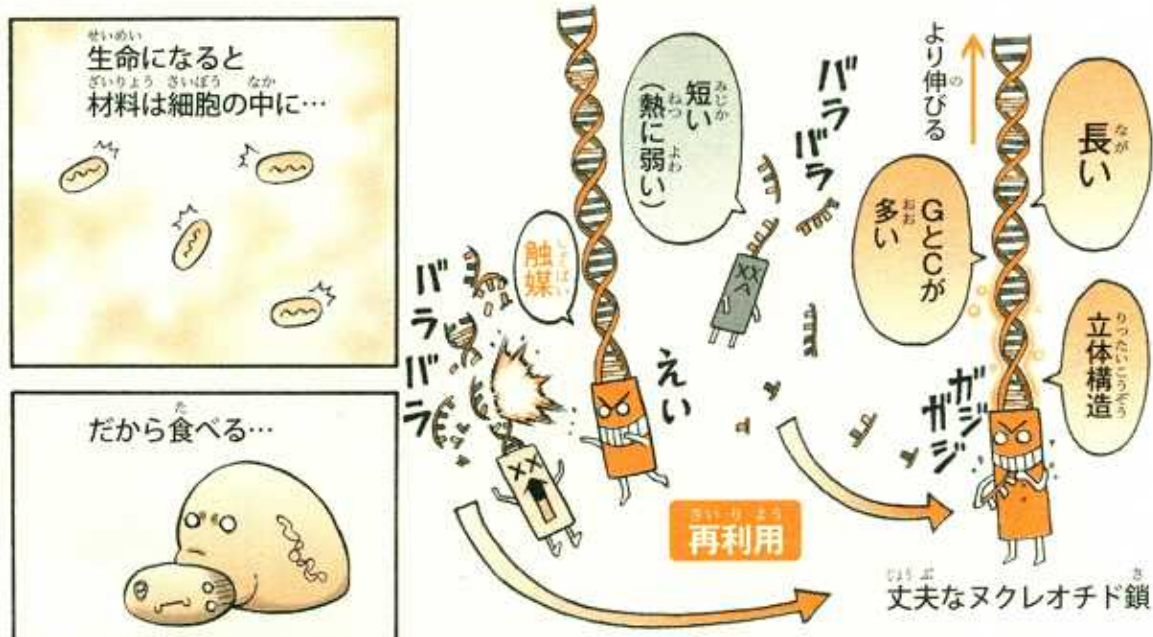
こうして、より生き残りやすい配列を持ったヌクレオチド鎖が生き残り、生き残るための道具を作るための配列が遺伝子になったのです。

### 食う微生物と食われる微生物

遺伝子を持ちはじめたゲノムは、やがてよりゲノムを有効に増幅させるための細胞構造を手に入れた、生命になりました。

この原始的な生命（原核生物）もまた、自分を複製するための材料が必要でした。生命があふれる海にはもう、材料となるヌクレオチドは余っていません。全て生命がその材料に使ってしまっているのです、そうなるとうほかの生命を殺して奪うしかありません。

### 弱肉強食の原始の海



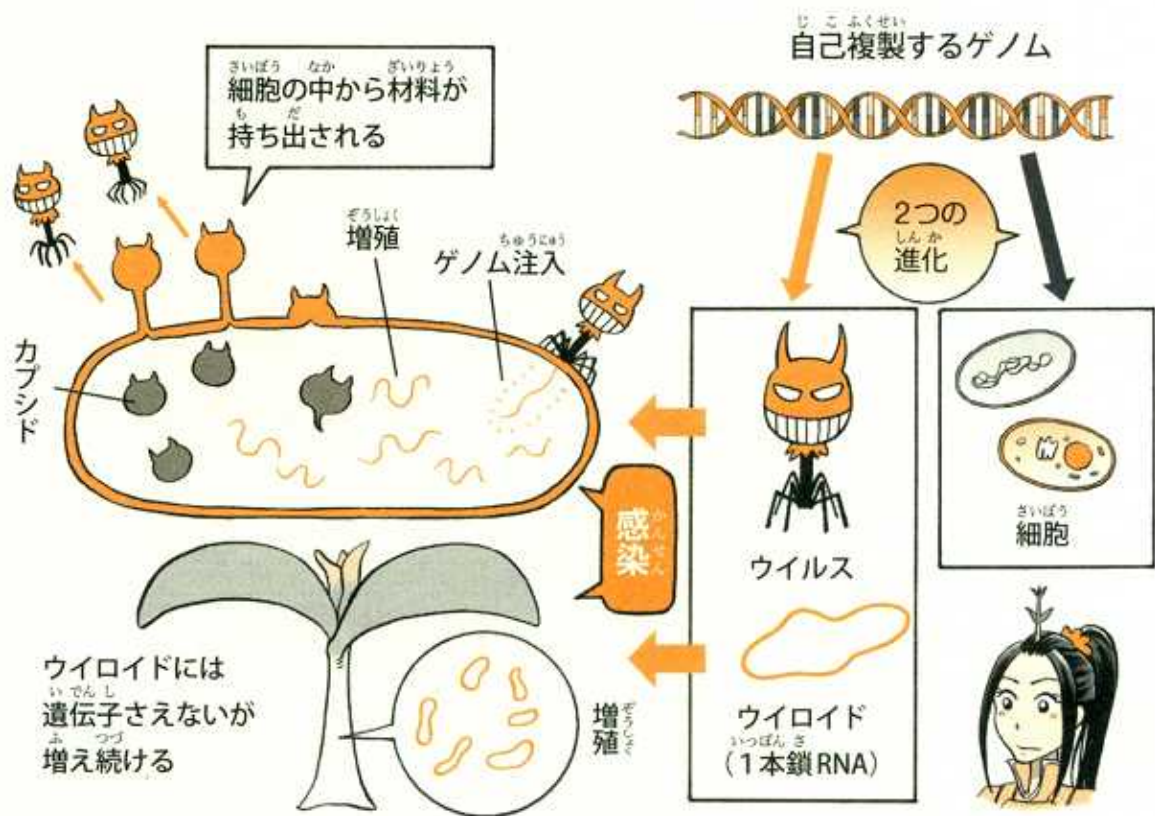
こうして、肉食の微生物が生まれました。より多くの自分の複製を作る材料を手に入れるために、より多くの材料を求めて、他の細胞を飲みこんで奪いはじめたのです。

また一部のものは、他のものを食って有機物を奪うのではなく、自分で合成する光合成細菌や化学合成細菌などの、独立栄養生物へと進化しました。独立栄養生物は自分で有機物を作るため、他の生物がいらない（つまり敵のいない）場所へと生存圏を拡大していきました。

## ゲノムを食うもの

自己複製を行う性質をもつヌクレオチド鎖のことをゲノム（遺伝物質）といい、細胞構造を持つゲノムのことを生物とよびます。

ゲノムを作るための材料（ヌクレオチド）や、それを触媒する酵素などを独占するため、ゲノムが外界との壁を作って引きこもったのが細胞のは





じまりです。

これによって、細胞構造を持たなかったゲノムは材料が不足し、消えていくしかなかったのでしょうか。

ところが、そんなことはありませんでした。ゲノムの「自己複製する」という性質によって、一部のゲノムは細胞を作るのとは別の方向へ進化していきました。

RNAワールドの中から生まれたRNAゲノムや、その後生まれたDNAゲノムの一部は、無いものは奪うという結論に達し、ウイルスとなりました。彼らは、細胞という家の中に押し入り、強盗をはたらきました。ゲノムは小さいほど速く複製できるため、生存競争には有利になります。そこでフットワークを軽くするため、細胞システムなどに必要なよい遺伝子は持たず、必要なものは他人から奪うことにしたのです。

ウイルスは自分を増殖するための遺伝子は持つ

ていますが、原核生物のように細胞構造は持っていないません。

細胞はゲノムの複製を全て自分の力でしようとしているのに比べ、ウイルスはそういう自給自足を行いません。たとえ自分もマネをして細胞を作っても、今さら生存競争に勝てないからです。そこで、自分で細胞を作るのではなく他の細胞に感染するという、別の作戦に出たのです。

ウイルスは、タンパク質でできた殻（カプシド）でゲノムを包んでいます。細胞構造を持つ生物のゲノムは2本鎖DNAのみですが、ウイルスのゲノムは、1本鎖RNA・2本鎖RNA・1本鎖DNA・2本鎖DNAと多様です。ウイルスを包むタンパク質は、ウイルスのゲノム上に遺伝子が記録されています。その他にも、ウイルスのゲノムは酵素など、自分が効率的に複製するための遺伝子を持っています。

ウイルスは、自らのゲノムを細胞の中に注入し

ます。すると細胞は、自分のゲノムではなくウイルスのゲノムを複製したり、ウイルスゲノム上の遺伝子を転写・翻訳しはじめます。

やがて細胞の中には、ウイルスのゲノムと、ウイルスのカプシド（殻）タンパク質や酵素などが作られます。それらの材料となるヌクレオチドやアミノ酸は、細胞の中から持ちだされます。

こうしてウイルスは他人の材料を使って、細胞の中で大量に増殖し、ゲノムや酵素をカプシドの中に収納すると、細胞膜を破って外に飛び出し、数百個もの子ウイルスとなります。

また、カプシドも持っていない原子的なウイルスであるウイロイドは、植物に感染する病原体で、1本鎖RNAです。ウイロイドは遺伝子を記録していません。ただ、植物細胞に感染して自分のゲノムを複製するのです。

このようにウイルスは、細胞のゲノムを「食って」増殖します。そして増殖に細胞のシステムを

必要とするため、死んだ細胞では増殖することができません。

## ウイルスと戦うRNA

免疫細胞は異物（タンパク質）を見つけて攻撃しますが、細胞内に入ったウイルスはただの核酸なので、敵の物質だという見分けが付きません。

しかしゲノム上には、タンパク質をコードしていないがRNAは転写する領域があります。この転写されたRNAは、ある遺伝子の伝令RNAを分解することで、その遺伝子がタンパク質として発現できないようにします。このしくみを、RNA干渉といいます。このRNA干渉によってウイルスが作らせた伝令RNAなども分解し、防御しているのです。



着いたね



この島は  
鬼が鬼を  
食らう  
弱肉強食の  
世界だ

充分に  
注意しろ

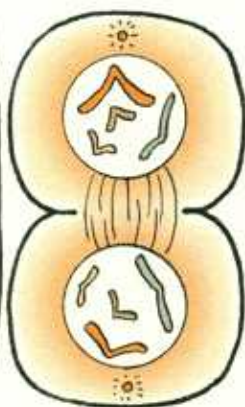
ほほほ

弱肉強食は  
なにも  
鬼ヶ島だけの  
話では  
ないぞよ

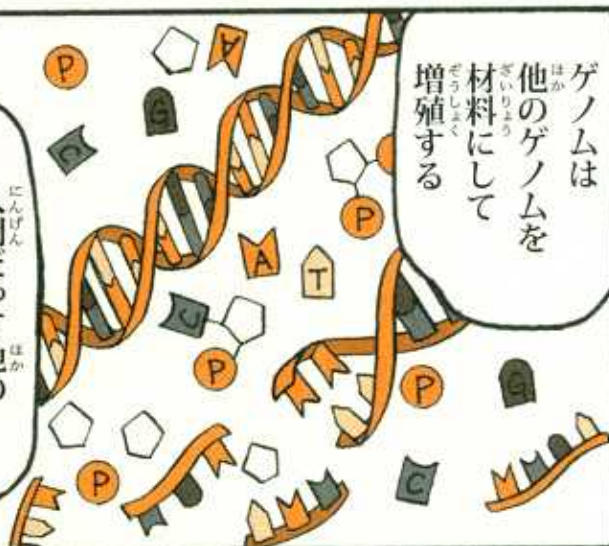


ゲノムは  
他のゲノムを  
材料にして  
増殖する

人間だって他の  
生物を食べねば  
自分のゲノムの  
材料を調達  
できないのじゃ



ヒトもオニも  
全てはゲノムの  
「自己複製する」  
という性質に  
合わせて動い  
おるだけよ

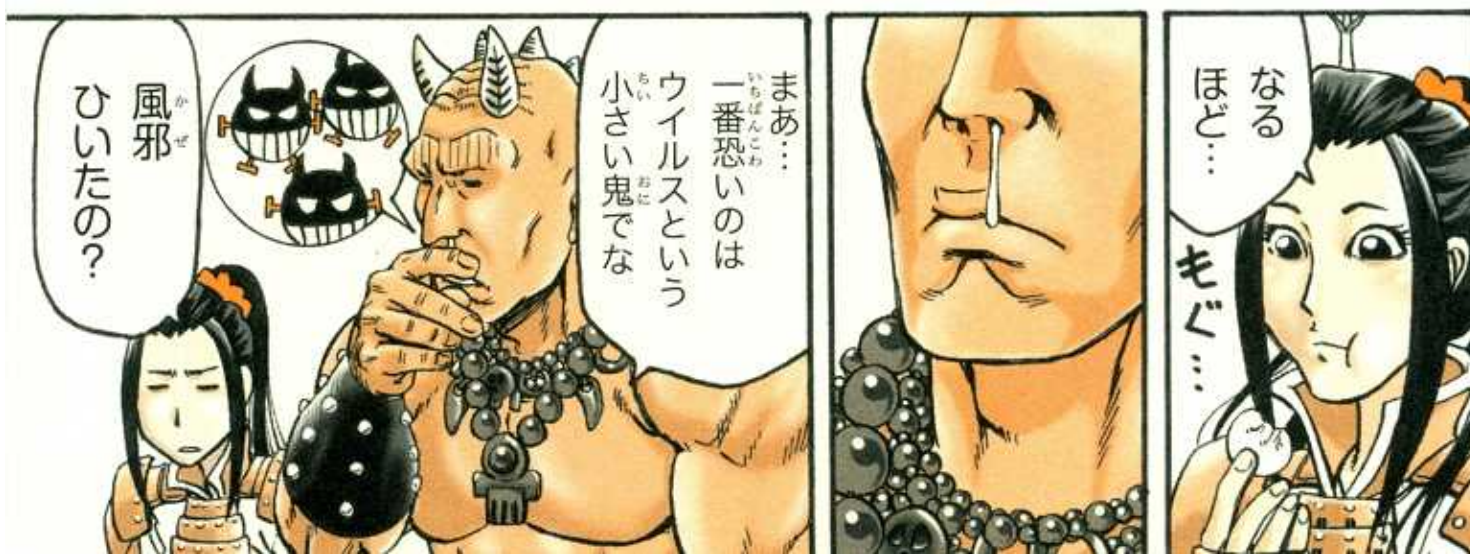


なる  
ほど…

もぐ…

まあ…  
一番恐いのは  
ウィルスという  
小さい鬼でな

風邪  
ひいたの？







# 共生者たちのゲノム

## 私の中の他人

核構造を持たない原始的な原核生物である真正細菌（バクテリア）の一種、大腸菌は、糖を分解して、その分子の結合エネルギーを取り出すことで、エネルギーを得ます。このシステムを解糖系といい、糖を有機酸へと分解します。

有機物を分解してエネルギーを取り出すことを、呼吸といいます。解糖系は酸素を必要としない呼吸なので、嫌気呼吸<sup>けんきこ</sup>といえます。

いっぽう好気性細菌は、酸素を用いた好気呼吸を行うことで、この有機酸をさらに、二酸化炭素と水にまで分解します。二酸化炭素も水も、それ以上分解してエネルギーを取り出すことのできない無機物です。これにより、同じエサから嫌気呼

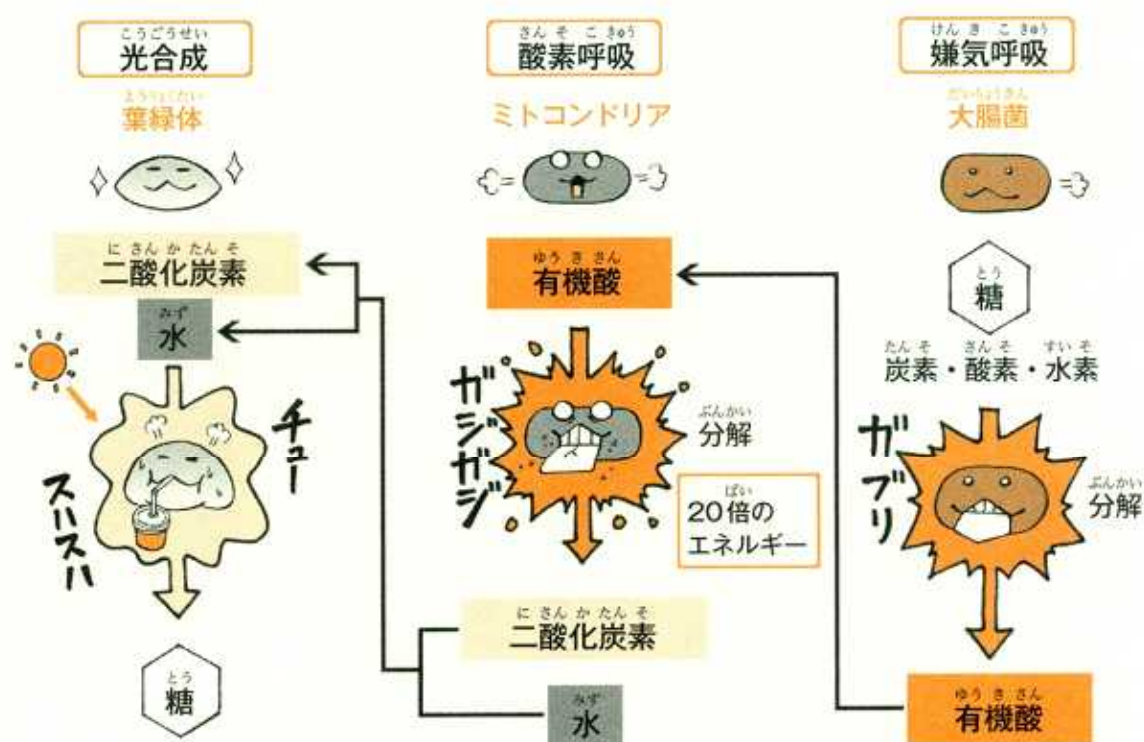
吸の20倍近くのエネルギーを引き出すことができるようになりました。

ただし、酸素は炎を燃焼させたり鉄を錆びさせる強烈な酸化力によって、DNA分子を酸化し破壊してしまう、毒性の強い物質です。そのため多くの古細菌と真正細菌は、酸素の無い環境で暮らす嫌気性細菌です。硫酸の温泉に住む細菌ですら、酸素があると死滅します。

その中で、好気性細菌は毒性の強い活性酸素を無毒化できる酵素を得て、酸素呼吸による大きなエネルギーを得られるようになりました。

さて、リケッチアは真正細菌ですが、非常に小さく、他の細菌のように自分だけで生きていくことはできません。ウイルスのように、生きている





細胞に寄生して生きています。

このようなりケツチアの仲間の<sup>アルファ</sup>αプロテオバクテリアの仲間で、酸素呼吸ができる好気性細菌が、21億年前に原始的な真核生物と出会いました。

この原始的な真核生物は、海底火山の周辺など深い海底に住んでいた古細菌が進化して生まれました。古細菌が、細胞内に広がっていたゲノムを核膜につつまむことで傷つきにくくしたものが、核のはじまりです。

そして、酸素呼吸できる好気性細菌が真核細胞の中に入りこみ、ミトコンドリアになりました。ミトコンドリアは細胞の中で、酸素呼吸を担っている細胞内小器官（オルガネラ）です。

こうして真核細胞は、酸素呼吸による大きなエネルギーを得て、生存競争に勝ち残っていききました。

### ミトコンドリアの特殊なゲノム

真核細胞を包んでいる細胞膜は、脂質の2重膜

です。核を包む膜も脂質の2重膜で、ミトコンドリアを包む膜も脂質の2重膜です。

ミトコンドリアの内膜はひだのようになっていて、ここに呼吸にかかわる酵素がびっしりとくっついていきます。

もともとミトコンドリアは細胞内に寄生した真正細菌なので、ミトコンドリアは核ゲノムとは別の、独自のゲノムDNAを持っています。ミトコンドリアのゲノム染色体はふつうの真正細菌と同じ環状の2重鎖DNAですが、1つのミトコンドリアの中に2個あります。そしてふつうの細菌のように、細胞分裂のようにして増えます。

DNAはコドンという遺伝暗号を記録していて、それはヌクレオチド分子の中の塩基という部分の違によって記録されています。塩基にはA・チミン・グアニシン・シトシン・ウラシルの4種類があり、カセットテープのテープのようなヌクレオチド鎖の上に並べられています。

これを、RNA合成酵素がコピーして伝令RNAに写しとったあと、細胞内にあるリボソームの中で、3文字ずつを1セットにしてアミノ酸と対応させていきます。この3文字のセットを、3文字なのでトリプレット、あるいは暗号(コード)の因子ということでコドンと呼びます。

このAとT、GとCが対になるという性質を用いて、運搬RNAが対応するアミノ酸を運んできます。運搬RNAはクローバーの形をした分子で、クローバーの茎の部分に20種のアミノ酸のいずれかがつき、クローバーの葉の部分には塩基が3つ並んでいます。これがアンチコドンといって、伝令RNA上のコドンと対になるアンチコドンが結合することで、そのコドンに応じたアミノ酸が並べられていきます。

そしておよそ30個以上のアミノ酸が並べられ、機能を持ったタンパク質となります。

どのコドンがどのアミノ酸に対応するかは決ま

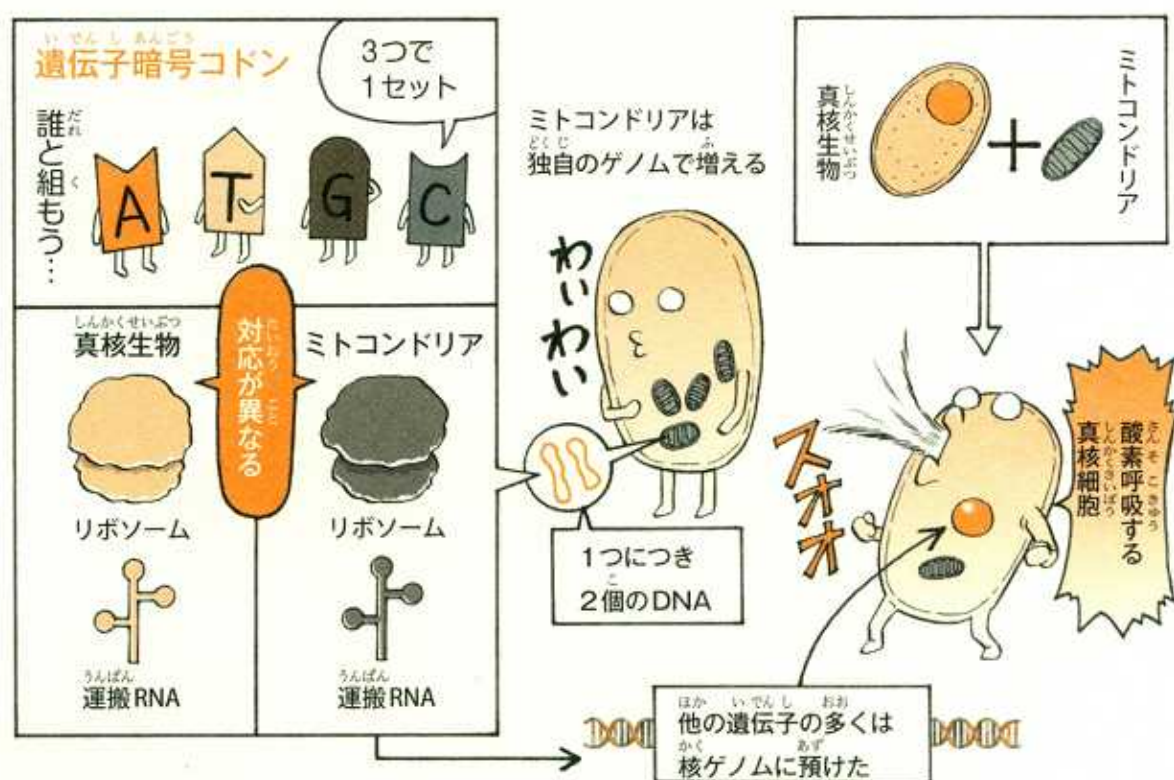


ミトコンドリアの由来は真正細菌であるため、このコドンの対応が、古細菌由来の真核生物の核ゲノムのものとは異なっています。そのため、ミトコンドリアゲノムが持つ37個の遺伝子の中には、独自の運搬RNAと独自のリボソームRNAを作る遺伝子がふくまれています。

しかし、その他の多くのミトコンドリア遺伝子は、21億年の共生関係のあいだに、核ゲノムのほうに預けてしまいました。それでミトコンドリアはもう、細胞から脱出して1個の細菌に戻って生きていくことはできません。

# 葉緑体の歴史

ミトコンドリアは糖を二酸化炭素と水に分解してエネルギーを得ますが、その逆に、光のエネルギーを利用して二酸化炭素と水から糖を作るのが



光合成です。

ミドリムシのような光合成能力のある原生動物やほとんどの植物は、葉緑体を持っています。葉緑体は、光合成を行う細胞内のオルガネラです。その由来は、ミトコンドリアより少し遅れて20億年前に、ミトコンドリアを持った真核生物に共生した光合成能力を持った真正細菌です。光合成を行うシアノバクテリアの一種、アカリオクロリスの仲間が、葉緑体になりました。

さて、海藻などの藻類は真核生物であり、原始的な植物です。これが高等になると地上に上がってコケなどに、やがてシダ、針葉樹などの裸子植物、花を咲かせる被子植物へと進化します。

藻類には、テングサのような紅藻類、コンブのような褐藻類など、緑色ではない葉緑体を持つものがあります。これは、深い海底には青色の光しか届かないため、その補色となる色素（葉緑素Ⅱクロロフィル）を用いて光エネルギーを有効に吸

収するためです。

葉緑体が真核細胞に共生した20億年前には火山活動が活発で、そのチリによって空は常に夕焼けのように真っ赤でした。その赤い光を有効に利用するために、葉緑体の祖先のアカリオクロリスの仲間は緑色の色素を使うようになりました。このため植物細胞などの葉緑体は、黄色いクロロフィルと緑のクロロフィルが合わさった黄緑色をしているのです。



知ってるかい？  
植物細胞の  
中にある葉緑体

お空が赤かったほど  
太古の昔には  
独立した細菌  
だったそうだよ

誰!?

お姉ちゃんの  
頭の桃の木も  
以前は独立した  
生物で土の上に  
生えてたのかなあ

さあね

葉緑体が  
ないと植物は  
光合成ができない  
けれど

その桃の木を  
引っっこ抜いたら  
お姉ちゃんはどう  
なっちゃうんだろう

庭園に植え  
たいなあ  
桃の木を…

桃太郎の  
こと…!!?

!!!

いひひひ

あの男のと  
合わせて  
二本!!

鬼の子供は  
ずいぶん  
挑発的なのね





## 敵か味方か？ レトロウイルスと生命の進化

### ゲノムの中に潜りこむウイルス

江戸時代には園芸が流行し、アサガオをかけあわせてさまざまな変わった花が作られました。その中で吹掛紋ふっかけもんという模様のアサガオには、紫の地模様の中に大きな白い色抜けや、小さくスプレーを吹いたような色抜けがあります。

紫色は、アントシアンという色素によるものです。本来、ゲノムDNAは全ての細胞で同じですから、全て紫色になるはずですが、

しかし吹掛紋のアサガオでは、白い部分の細胞でのみ、アントシアン遺伝子が壊れています。これは、トランスポゾンという「さまよえるDNA断片」のせいです。

トランスポゾンはDNAの断片フラグメントで、両端の部分

はそれぞれ対になるような反復配列を持っています。この配列によって、トランスポゾンはΩの形を作ります。

トランスポゾンの中には転移酵素（トランスポザゼン）の遺伝子があり、この酵素でトランスポゾンは染色体から自分自身を切り出して、染色体の別の場所に割りこみます。また、自分を切り出さずに染色体のほかの場所に自分のコピーを作ることもあります。

トランスポゾンがどこに入るか、規則性はありません。ゲノムのどこにでも、ランダムに割りこむ可能性があります。

トランスポゾンがもし遺伝子に割りこんだら、その遺伝子は壊れてしまいます。吹掛紋の場合は

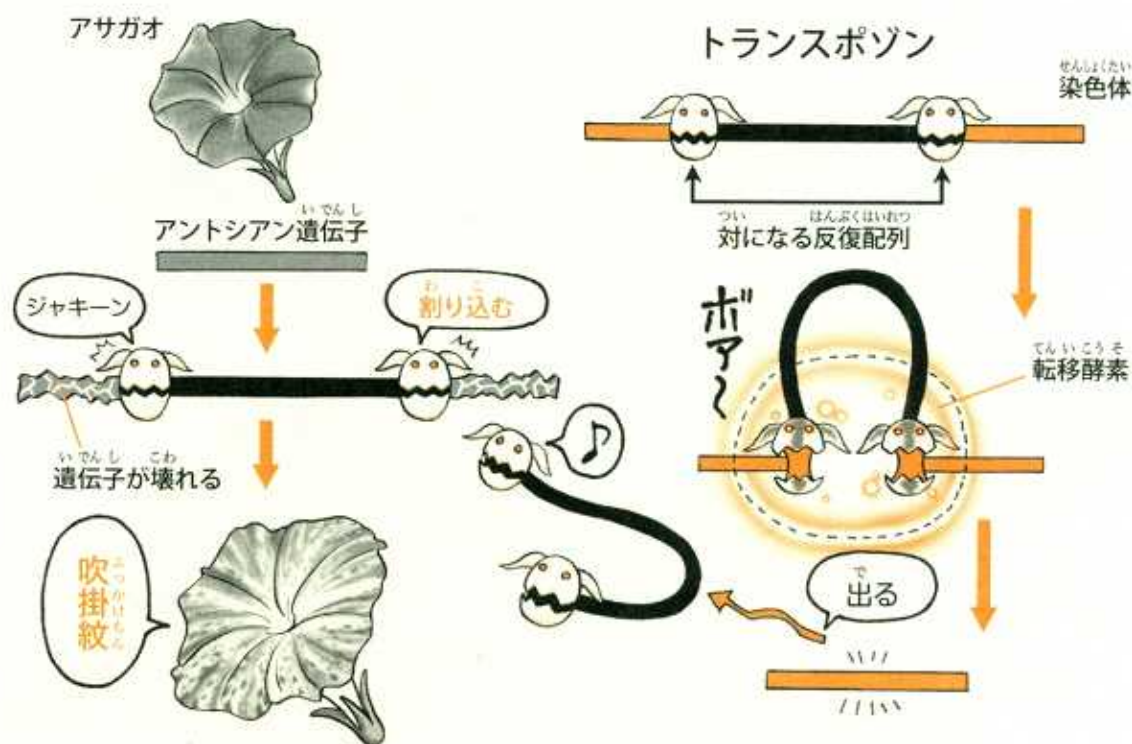


アントシアン遺伝子が壊れて、その細胞だけ色素を作れず白い色抜けになるのです。

そして、細胞分裂するときは、ゲノムDNAはトランスポゾンごと複製されるので、娘細胞の遺伝子も壊れたままになります。遺伝子が壊れたのが発生の初期だと、その後何度も細胞分裂が行われて、遺伝子が壊れた娘細胞が大量にできます。吹掛紋の場合は、大きな範囲が白い色抜けになります。

いっぽうトランスポゾンが遺伝子を壊したのが発生の後期だと、そこからの細胞分裂回数が少ないので、色抜けは小さくなります。アサガオの吹掛紋では、スプレーを吹いたような細かい白い点模様になります。

トランスポゾンは、原核生物にも真核生物にも存在します。もしトランスポゾンが遺伝子から出ていったら、その遺伝子は元にもどることもあります。もしトランスポゾンがわずかなDNA断片



を残して出ていったら、そこで遺伝暗号（コドン）が狂うため、遺伝子は壊れたままになってしまいます。

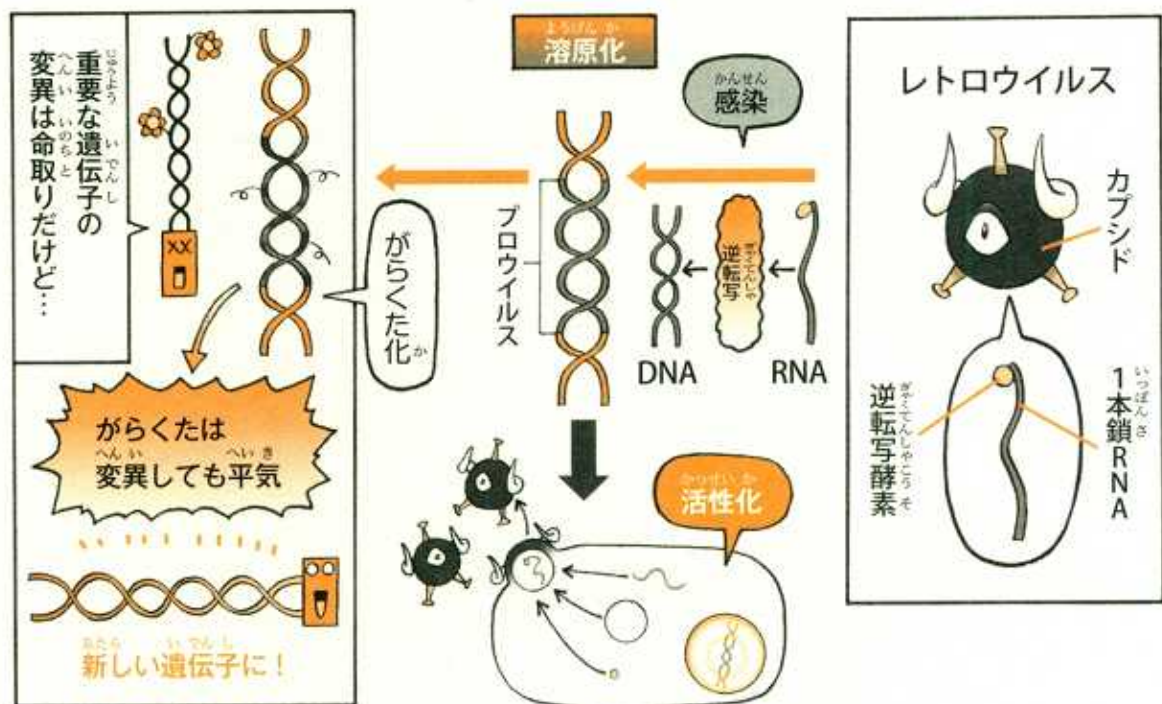
トランスポゾンとは、ただの「染色体に割りこむDNA断片」であって、病原性はありません。

しかし、もしこのトランスポゾンがさまざまな増殖力と感染力を持っていたらどうなるでしょう。それが、エイズ病原体であるHIVウイルスのようなレトロウイルスです。

### 核ゲノムに割りこむウイルスゲノム

その存在を知られはじめた当時、HIVは不治の病として恐れられていました。現在は研究によってその感染システムなどがわかってきたため、投薬治療によって発病を抑えることができます。

エイズとは後天性免疫不全症候群のことで、その病原性ウイルスであるHIVは免疫細胞の一種である免疫T細胞に感染します。すると免疫T細胞





胞がウイルスのせいで破壊されるので、免疫力が落ち、ふつうならとても感染しないようななどにもいる細菌などに感染して、死んでしまうのです。これを、日和見感染ひよりみかんせんといいます

HIVウイルスは、レトロウイルスという種類のウイルスです。レトロとは、「逆」という意味です。

レトロウイルスは、ゲノムとして1本鎖RNAを持っています。そしてタンパク質のカプシド(殻)の中に、逆転写酵素といっしょに詰まっています。レトロウイルスは、この逆転写酵素で「逆」転写を行うので、レトロの名がついているのです。

逆転写とは、絶対的な生命の中心教義だと信じられていた、クリック提唱のセントラル・ドグマをくつがえす現象です。それまでは、DNAがRNAに転写されるという流れは不可逆のものだと思われていました。

レトロウイルスが宿主細胞(感染先の細胞)に

感染すると、RNAゲノムと逆転写酵素が宿主細胞の中に入ります。すると逆転写酵素は細胞内のヌクレオチドを材料にして、RNAゲノム(+鎖)を鋳型に、相補的なDNA(-鎖)を作ります。さらに、このDNAを鋳型にして相補的なDNA(+鎖)を作ると、レトロウイルスのRNAゲノムをコピーした2本鎖DNAができます。

このウイルスをコピーした2本鎖DNAは、宿主ゲノムDNAの中にもぐりこみます。これを溶原化といい、宿主DNAの中にもぐりこんだウイルスDNAのことをプロウイルスと呼びます。

プロウイルスは、しばらくは潜伏期間として動きを起こしません。トランスポゾンと同じように、細胞分裂のときにいっしょに複製されて、娘細胞へも伝わっていきます。

やがて、潜伏期間が過ぎるとプロウイルスが活性化します。プロウイルスDNAが転写されると、それはそのままウイルスゲノムRNA(+鎖)に

なります。また、プロウイルスDNAが転写されて伝令RNAも作られ、これはリボソームに移動して、ウイルスのカプシドタンパク質や逆転写酵素など、ウイルスのためのタンパク質を作らせま

す。  
こうして新たに生産された子ウイルスが細胞膜を破って脱出し、免疫細胞が破壊されるため、免疫不全症候群が起こるのです。

### がらくたDNAが導く進化

ゲノムの中に組みこまれたプロウイルスは、潜伏期間のあいだに紫外線や活性酸素などに傷つけられてDNAが壊れると、機能を無くしてしまう場合があります。このように無害なゴミになってしまったジャンクDNAは、そのままゲノムDNAの中に残されます。

細胞には、その長い歴史の中でさまざまなレトロウイルスが感染しつづけたため、人間のゲノム

のうち30%は遺伝子をコードせず機能も担っていない完全なジャンクのDNAです。しかし、このレトロウイルスが捨てていったがらくたが、意外に役立っています。

ひとつは、まったく機能を持っていないDNA領域は傷ついても大丈夫なので、ゲノムの破損の緩衝材になること。そしてもうひとつは、進化に役立っているのです。

がらくたDNAのせいで機能を失った遺伝子は、転写されることもはたらくこともなく、偽遺伝子としてゲノムの中に残ります。偽遺伝子は機能が無いので、DNA配列が変異を起こしても大勢に影響がありません。

機能中の遺伝子は変異が起これば命取りになる可能性が高いので、あまり大きく変異しません。しかし偽遺伝子は淘汰されないぶん大胆に変異することができるので変異速度が速く、その結果、新しい遺伝子を生み出すのに役立っています。









## 8 遺伝子の発見者メンデル

### 遺伝子の発見

メンデル遺伝は、高校で習う遺伝子の話の一番最初に載っている、遺伝学の基礎の基礎です。

子供が親に似るのは、親から子供へ何らかの形質を伝える物質が伝えられているからである、という概念は古くからあり、それを遺伝と呼んでいました。そして子供は親のどちらにも似ているので、親から子へと形質が伝わる遺伝を担うものは、どろどろした液体のようなもので、子供の形質は両親の形質を混ぜあわせてできていると考えられていました。

遺伝を研究していたオーストリアの司祭メンデルは、修道院の畑でさまざまな形質を持ったエンドウマメを交配して、それぞれの形質は別々に遺

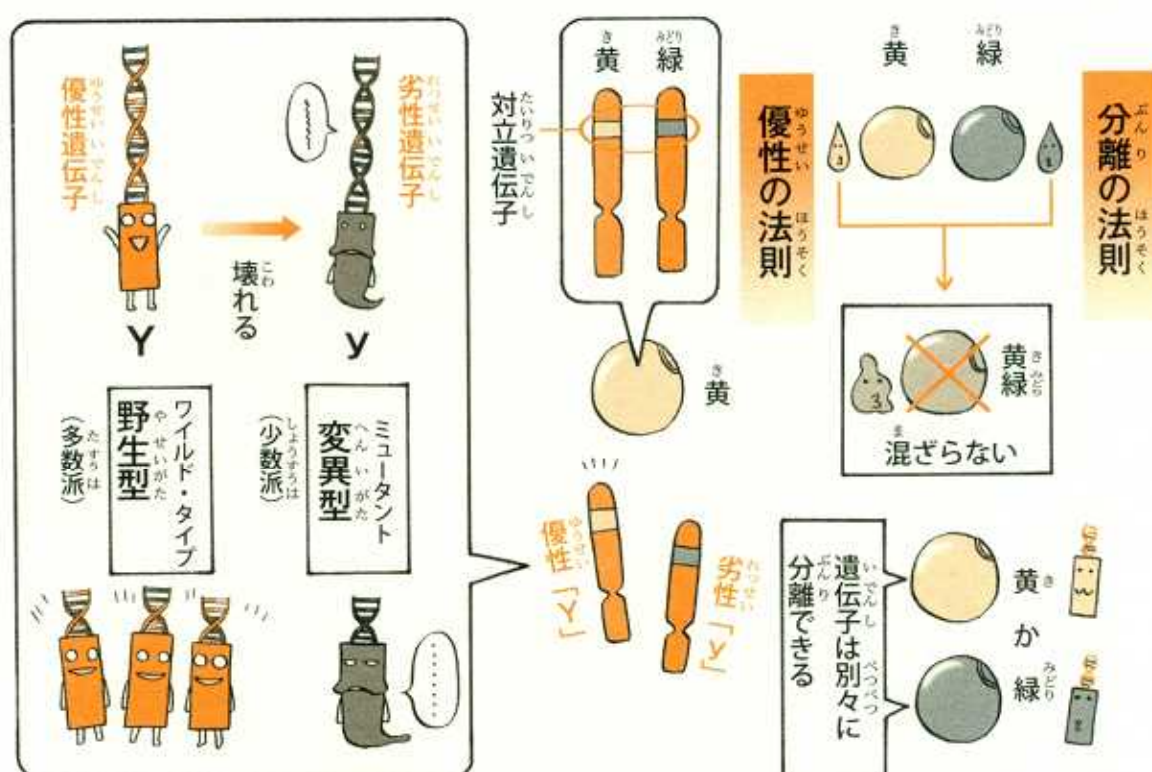
伝することをつきとめました。

彼は、遺伝をつかさどるものは液体状で混ざるようなものではなく、粒子（固形の物質）であると見抜きました。彼はこの物質を、遺伝をつかさどる因子として「遺伝子」と名づけ、1865年にメンデルの法則を発表しました。

メンデルは、黄色い豆と緑の豆をかけあわせる子とは全て黄色い豆になるが、その子を自家受粉させて孫を作ると、孫の中に親と同じ緑の豆ができることを見つけました。

もし遺伝を担う物質が液体状で混ぜ合わされるようなものなら、黄色い豆と緑の豆をかけあわせると子は黄緑色になり、それを自家受粉させても全て黄緑色の子孫になるはずですが。





そのためメンデルは、遺伝を担う物質は独立した粒子状の「遺伝子」で、しかも黄色と緑の遺伝子がいっしょにあるときは、その中間の形質になるのではなく、どちらか片方の形質になることに気づきました。

こうしてメンデルは、遺伝子の存在と、それは混ぜ合わさるのではなく別々に分離できること（分離の法則）、豆の色のようである形質をなう遺伝子は、両親から1個ずつ、合計2個もらっていること。しかし、その形質、つまり同じ遺伝子座（アليل）には黄色と緑のようなバリエーションの違いの対立遺伝子があること。そして、その対立遺伝子のバリエーションには、形質が表に出てくるもの（優性遺伝子）と、優性遺伝子があるときには形質が表に出てこないもの（劣性遺伝子）があることに気づきました（優性の法則）。

たとえば豆の色の場合は、黄色が優性で緑が劣性です。

## 劣性遺伝子が劣っているわけではない

優性と劣性は、英語ではドミナント（最も勢力のある）とリセッシブ（引っ込みがちの）といいます。漢字の優劣のイメージではなく、あくまでも、同じ遺伝子座の異なる対立遺伝子が同時に存在した場合に、一番前に出てくる形質と、引っ込んでしまう形質という意味です。

たとえばエンドウマメの豆の色では、黄色が優性で緑色が劣性です。このとき、遺伝子の名前のつけたたは、黄色（yellow）が優性なので、まずこれを大文字で「Y」遺伝子と名づけます。それに対する劣性遺伝子は、緑だからG……ではなく、Yの劣性なので「y」遺伝子と名づけます。

多くの劣性遺伝子は、優性遺伝子が突然変異を起こして遺伝子が壊れ、遺伝子のはたらきが弱まったり、異常なタンパク質を作ったり、タンパク質をまったく作らなくなったり、そもそも遺伝子そのものが欠失しています。

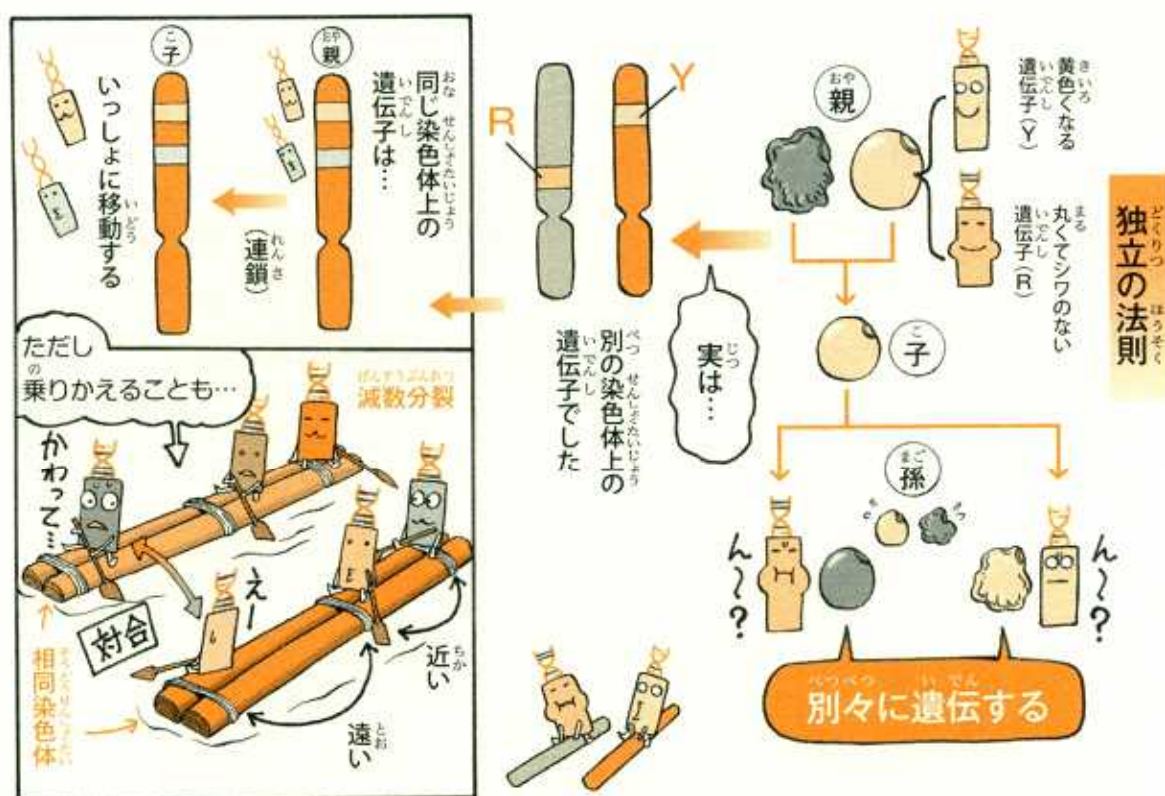
つまり、劣性の緑のエンドウマメは、緑にする遺伝子Gを持っているのではなく、黄色にする遺伝子Yを持っていない（その結果、緑になった）、すなわちyであるということです。

まとめると、豆はYYかYyで黄色、yyで緑色になります。YYやYyのように対立遺伝子と同じ種類のものをホモ接合体、Yyのように優性と劣性など違う種類のものをヘテロ接合体と呼びます。ホモは「同じ」、ヘテロは「異なる」という意味です。また対立遺伝子で、多数派の遺伝子（多くは優性）を「野生型（ワイルド・タイプ）」、少数派の遺伝子を「変異型（ミュータント）」と呼びます。

## メンデルのワソ

メンデルの法則には「優性の法則」「分離の法則」のほかにも、「独立の法則」があります。これは、たとえば豆が黄色くなる遺伝子（Y）と、豆が丸





くてシワの無い遺伝子(R)は、別々に遺伝するというものです。

しかし、同じ染色体上の遺伝子は基本的にいっしょに遺伝します。これを連鎖といいます。YとRは別の染色体上の遺伝子なので、連鎖(リンク)せず別々に遺伝しているのです。

実は、メンデルは最初に独立の法則を考え、その仮定に合った7個の遺伝子のデータだけを選んで発表しました。この7個の遺伝子は、それぞれ別の染色体に乗っています。そのため独立の法則は、同じ染色体上の遺伝子においてはあてはまりません。

同じ染色体上の遺伝子でも、減数分裂のときに相同染色体が対合するときに、相手の染色体と遺伝子をのりかえます。

こうやって、新しい遺伝子の組み合わせの染色体から多様な子孫を作ります。遺伝子どうしが近いほど連鎖は強く組み換えは起こりにくく、遺伝

子間の距離が遠いほど、組み換え価は大きくなります。

そこで1915年モーガンは、キイロショウジョウバエのさまざまな突然変異体を交雑してそれぞれの遺伝子間の距離をはかり染色体上にマッピングした、染色体地図を作りました。

現在ではゲノムDNAを全て解読できるようになったので、組み換え価の計算による染色体地図作りは行われています。全てのゲノムDNAを解読したあとで、コンピューターを用いて、遺伝子特有の構造を持っているDNA領域を探します。

### 孫が祖父に似る隔世遺伝

子供が親よりも祖父母に似ていることを、かくせい隔世遺伝といいます。これは、優性の法則と分離の法則から説明できます。

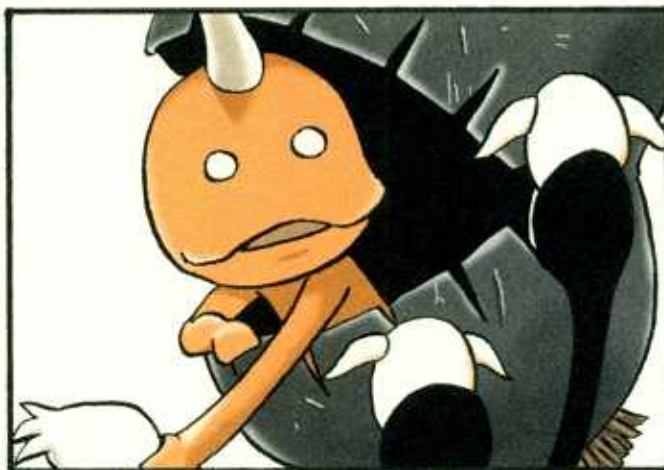
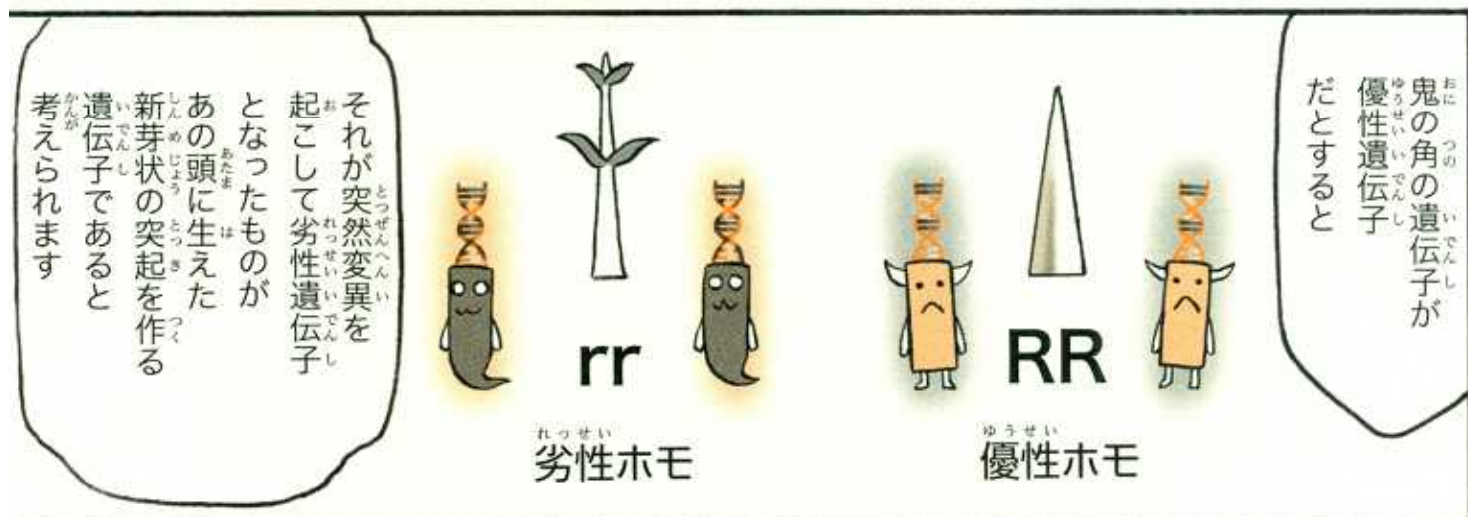
たとえば、耳垢がカサカサしているのは劣性遺伝で、皮脂でベタベタしているのは優性遺伝です。

耳垢がカサカサしているのは、 $ABC C 1 1$ という遺伝子の1つのヌクレオチドが、グアニン $G$ からアデニン $A$ に変化した突然変異です。そこで湿型を $G$ 型、乾型を $A$ 型と呼ぶのですが、わかりにくいのでここでは、優性の湿型を $G$ 、劣性の乾型を $g$ として説明しましょう。

父の耳垢がカサカサ( $gg$ )で仮に母がベタベタ( $GG$ )だと、二人のあいだに生まれた子供は全てベタベタ( $Gg$ )になります。が、 $Gg$ の子供が $Gg$ と結婚して子供を生むと、ベタベタ( $GG$ )のほかにカサカサ( $gg$ )が生まれます。

つまり、 $gg$ の孫は、 $Gg$ の親よりも $gg$ の祖父に似ていることになります。これが隔世遺伝です。









## 劣性遺伝子をおさえる優性遺伝子

### 145年目の真実

メンデルが、優性の法則をふくむメンデルの法則を発表したのは、1865年のことです。しかしそれから145年のあいだ、なぜ優性遺伝子の形質のみが表現形としてあらわれ、劣性遺伝子の形質はあらわれないのか、くわしい仕組みはわかっていませんでした。

ようやく2010年に、奈良先端科学技術大学院大学の高山らは、優性遺伝子が劣性遺伝子を抑制するシステムを解明しました。

優性遺伝子と隣接している別の遺伝子が、24ヌクレオチドほどの短いRNA鎖を作ります。このRNA鎖に誘導されて、劣性遺伝子のDNAにメチル基(CH<sub>3</sub>-)という分子が結合します。すると、

伝令RNAの転写がされなくなり、遺伝子がはたらかなくなります。こうして、優性遺伝子とともにある劣性遺伝子は、優性遺伝子の存在によって沈黙させられます。

### 沈黙のX染色体

メチル基はDNAを沈黙させます。メスはX染色体を2本持っていますが、片方の染色体のはたらかきは抑えられています。これによって、X染色体が1本しかないオスとバランスが取れています。

どちらのX染色体が沈黙するのかは、胚発生が始まった段階では決まっています。しかし、あるていど胚発生が進んだ段階で、細胞ごとにどちらかのX染色体にメチル基がくっついて、不活性

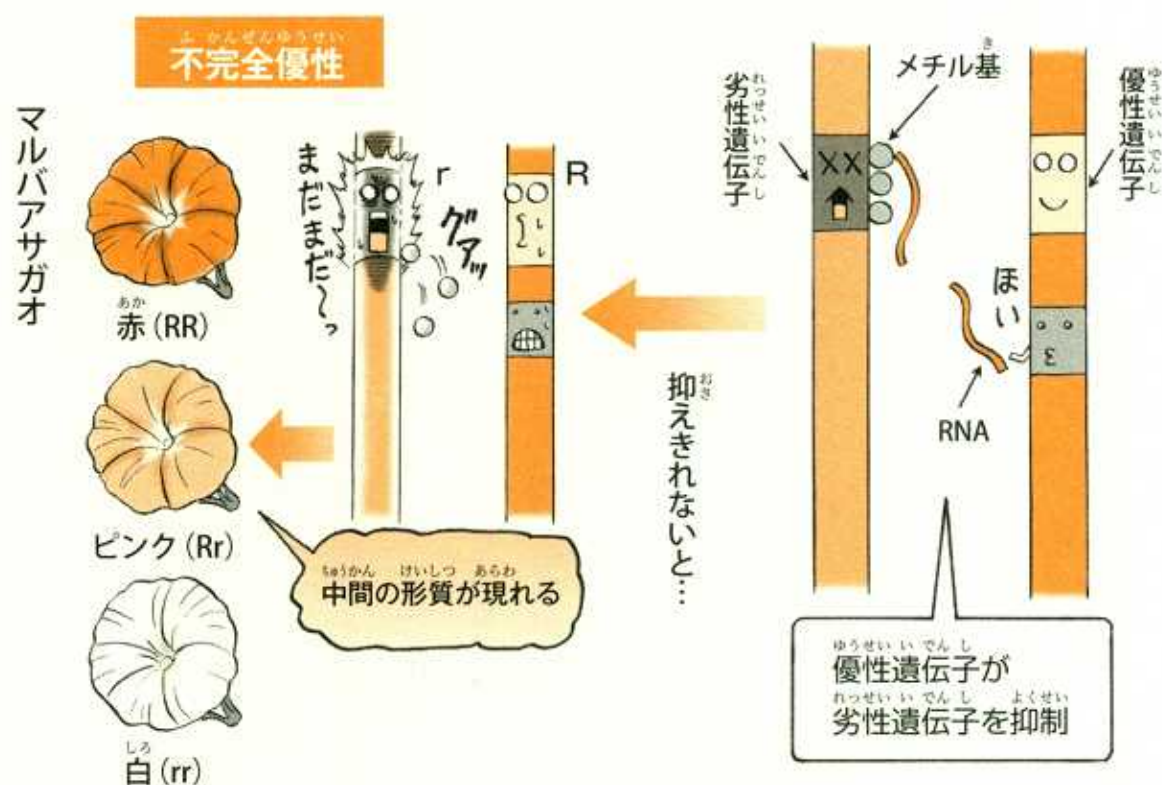


化されます。

このあと細胞分裂が起こっても、DNA複製のとき、メチル化されたX染色体のメチル基もいっしょに複製されるので、一度不活性化されたX染色体は一生目覚めることはありません。

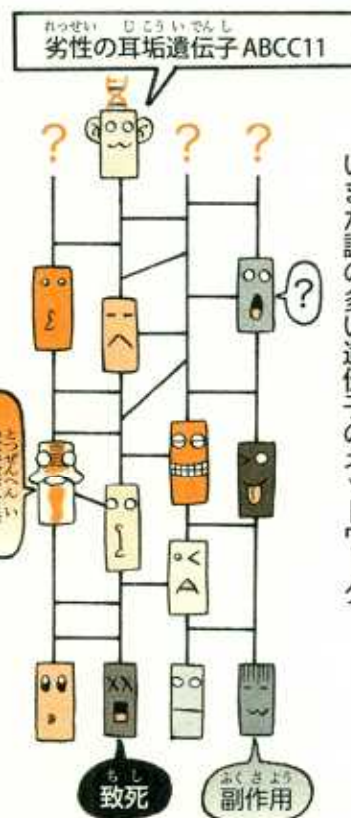
ネコの毛色の決定には何種類もの遺伝子がからんでいます。そのうち三毛猫の茶色い部分と黒い部分の毛色の遺伝子は、同じ遺伝子座にある対立遺伝子で、X染色体上に乗っています。茶毛が優性、黒毛が劣性です。

茶毛と黒毛をヘテロで持っているメスネコなら、メンデル遺伝に従えば、全身が茶毛のぶちになるはず。ところが、体のどこかでは茶毛遺伝子が乗ったX染色体、他の場所では黒毛遺伝子が乗ったX染色体が、ランダムに不活性化されます。これによって、体のあるところでは劣性の黒い毛、あるところでは優性の茶色い毛の色になります。こうして、茶と黒の2色のぶちがある三毛猫が生





ハツカネズミの毛を  
黄色にする優性遺伝子Y



いまだ謎の多い遺伝子のネットワーク

まれます。

オスの三毛猫が数万分の1と珍しいのは、オスはX染色体を1本しか持っていないので、本来、黒毛遺伝子か茶毛遺伝子かの、どちらか一方しか持てないからです。すなわちオスの三毛猫は、XYなど、X遺伝子2本とY遺伝子を持った特殊な染色体構成の個体です。

三毛猫のぶちの大きさによって、X染色体のどちらが不活性化するのが、細胞分裂の比較的早い時期に決定していることがわかります。たとえば、もし茶と黒がもっと細かく入り乱れていたら、それはかなり細胞分裂が進んだ段階で、それぞれの細胞の中でX染色体の不活性化が起こったことになります。

### 抑えきれない遺伝子

遺伝子の優性と劣性は、必ずしも0か1かではありません。



たとえばマルバアサガオの場合、花色遺伝子Rが優性ホモ(RR)で赤、劣性ホモ(rr)で白になります。ところがヘテロ(Rr)はピンク色になり、中間の形質になります。これを不完全優性といいます。

ヘテロが中間の形質になる理由は、2つあります。ひとつは優性遺伝子が、完全には劣性遺伝子を抑えきれない場合。もうひとつは、優性遺伝子が2セットあってもふつうは片方が沈黙させられるのですが、遺伝子の数が多いほど効果が上がる遺伝子の場合です。たとえば身長を高くする遺伝子は、劣性ホモ(遺伝子0個)へヘテロ(遺伝子1個)へ優性ホモ(遺伝子2個)と、遺伝子の数が増えるほど身長が高くなります。

ほかにも、不完全優性の例があります。ABO式血液型では、赤血球の表面にある糖タンパク質の構造がそれぞれ違います。同じ遺伝子座にAとBとOの対立遺伝子があり、AとBが優性でOが

劣性です。同じ遺伝子座に3個以上の対立遺伝子があるのを、複対立遺伝子といいます。

このとき、対立遺伝子AとOを持っているとOが引っ込んでA型に、AとBを持っていると両方とも表に出てきてAB型に、OとOを持っていると優性遺伝子の後ろで引っ込んでいた劣性形質が表に出てこられるのでO型になります。

このように、AとBがどちらも優性でお互いに相手を抑えられない状態も、不完全優性といいます。

### 風が吹いた先にあるものは

風が吹けば桶屋が儲かる、ということわざがあります。遺伝子も、ある突然変異を見つけてその原因遺伝子が特定されますが、その遺伝子はほかの遺伝子などとも複雑に関わりあっている場合があつて、そのネットワークはまだ全て完全には把握されていません。

たとえば、124ページで登場した耳垢遺伝子 ABC C11 は、耳垢だけにかかわっているわけではありません。優性の ABC C11 遺伝子は、薬剤の代謝分解能力にもかかわっています。それで、耳垢が乾いた劣性遺伝子を持った人は、薬を分解しにくく、薬が効きやすいかわりに副作用が出やすいという特徴があります。

副作用だけですか？ 良いのですが、ある形質の遺伝子がどこかで別の大変な遺伝子とも関連していて、その遺伝子があることで生存できないという致死遺伝子もあります。

ハツカネズミでは、毛色を黄色にする優性遺伝子 Y が致死遺伝子として知られています。劣性ホモ (yy) は灰色、ヘテロ (Yy) で黄色い毛色のハツカネズミが生まれますが、優性ホモ (YY) になると発生せずに死んでしまいます。

現在、このような遺伝子のネットワークは、まだ完全には解明されていません。そのため、ある

遺伝子の欠損によって起こる疾患を治療するための遺伝子治療は、遺伝子の発現量などのさじ加減を間違えると副作用を起こす危険があります。

まして、優れた遺伝子をいくつも組み入れて子供を好きなようにデザインしようとしても、遺伝子組み換え技術はあってもそれらの遺伝子の副作用が完全に解明されていない現在の科学では、大きなリスクがともなっているのです。

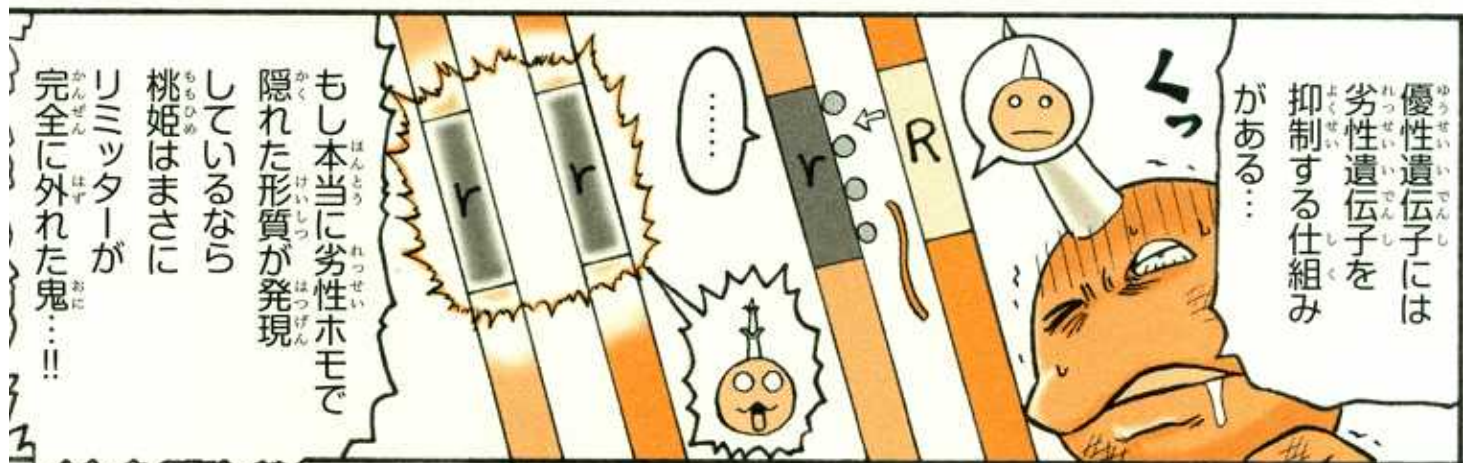




桃から  
鬼が…

生まれてくる  
はずないでしょ…

ガッ



優性遺伝子には  
劣性遺伝子を  
抑制する仕組み  
がある…

もし本当に劣性ホモで  
隠れた形質が発現  
しているなら  
桃姫はまさに  
リミッターが  
完全に外れた鬼…!!



私の研究所に  
来るがいい



ヘテロ (Rr)  
なのだ



それが  
桃太郎

不完全優性  
といって  
優性と劣性の  
中間の形質に  
なる



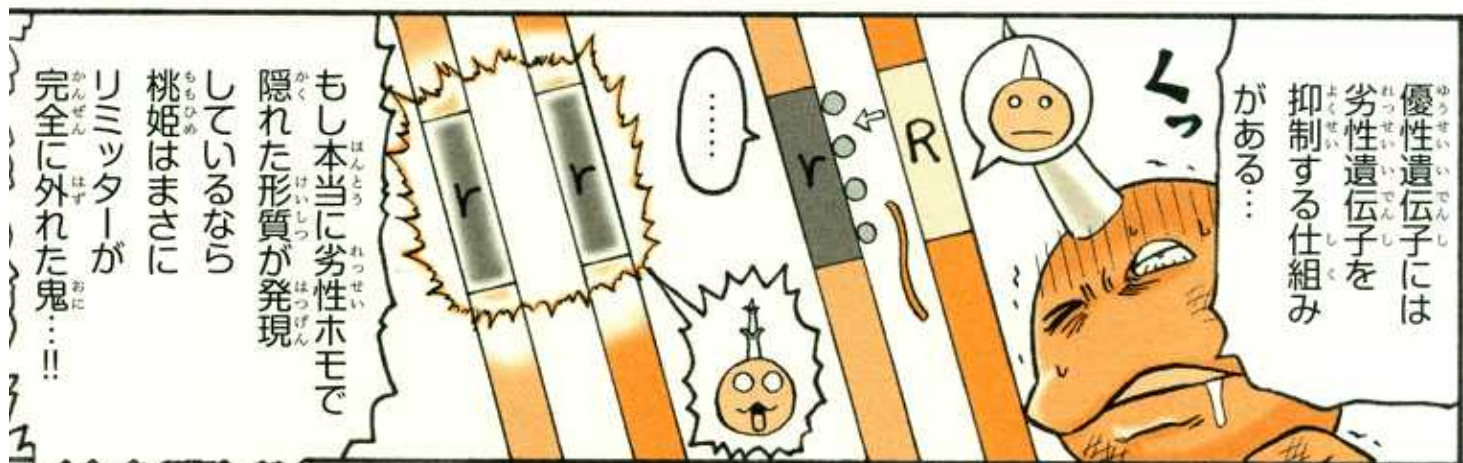
じゃあ  
桃太郎は  
どうなの!  
あいつは  
今どこに  
いる!!





桃から  
鬼が…

生まれてくる  
はずないでしょ…



優性遺伝子には  
劣性遺伝子を  
抑制する仕組み  
がある…

もし本当に劣性ホモで  
隠れた形質が発現  
しているなら  
桃姫はまさに  
リミッターが  
完全に外れた鬼…!!



私の研究所に  
来るがいい



ヘテロ (Rr)  
なのだ



それが  
桃太郎

不完全優性  
といって  
優性と劣性の  
中間の形質に  
なる



じゃあ  
桃太郎は  
どうなの!  
あいつは  
今どこに  
いる!!



第3章

遺伝子・DNAの最前線





# 400年前のクローン生物

## クローンは？

クローンは、同じゲノムを持った集団のことを言います。

たとえば、人間の細胞のひとつひとつは全て同じ1個の受精卵から細胞分裂で増えてきた、同じゲノムを持ったクローンです。

一卵性双生児は、1つの受精卵から発生した胚が、発生の途中で2つに分かれてそれぞれが別の個体として発生したものです。2人とも同じゲノム構成を持っているクローンになります。

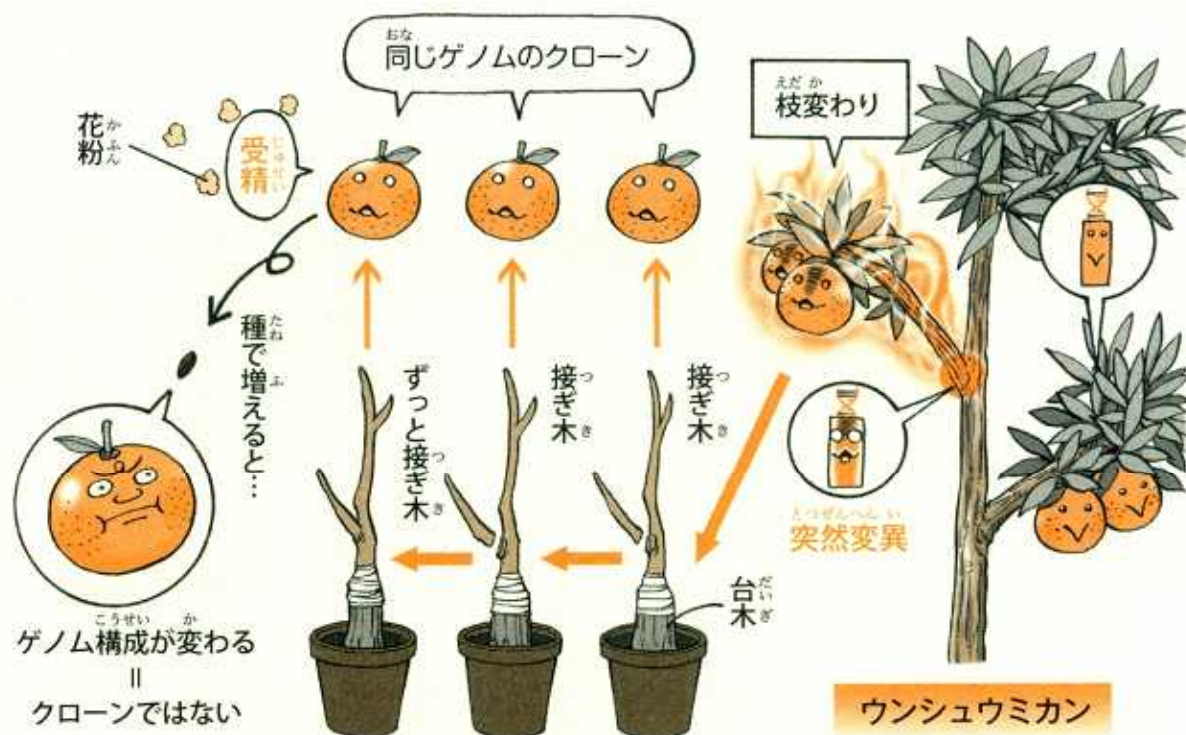
また、1匹の大腸菌を培養液の中に入れて培養すると、細胞分裂によって菌が増え、培養液が白くにごります。この培養液の中の菌の1匹1匹も、クローンです。

SFに登場するクローン人間は、だれかの髪の毛などの細胞から、その人を再生します。これは現在、すでに技術的に可能となっていますが、動物のクローンづくりは本来、非常に困難でした。

しかし植物の場合、その体づくりは単純で、自然状態でもクローンで増殖できるものもあります。たとえば庭木として植えられているナリキンソウは、地面に落ちた葉からまた根が出て育ちはじめます。こうして育ったナリキンソウは、もとのナリキンソウのクローンです。

日本人は400年前から、このような植物クローン生物を作成して栽培していました。それが、ウンシユウミカンです。





## ウンシュウミカンは全てクローン

ウンシュウミカンは、冬に食べるいわゆる一般的なミカンです。皮が薄く、手でかんたんに皮をむくことができる便利な柑橘類で、甘味も強く、種がありません。種が無いのにどうやって増えるのかというと、ウンシュウミカンは種から増やしてはいないのです。

ミカンは500年前に、中国から渡ってきました。植物には茎の頂点に生長点という活発に細胞分裂を行っている組織があり、この組織が葉などに分化していくのですが、生長点の細胞が突然変異を起こすと、そこから先に伸びた枝の遺伝子が変わり、枝変わりと呼ばれる変異体になります。

ウンシュウミカンは400年前に、このような枝変わりによって発生したミカンでした。この枝を切り取って、台木と呼ばれる他の木の根に接ぎ木することで、枝変わりした枝を増やしたものがウンシュウミカンです。

すなわち、今あるウンシュウミカンは全て、400年前の1本の枝変わりから生まれたクローンなのです。

台木として使われるのは、主に同じ柑橘類であるカラタチです。

リンゴなどの品種も同じように枝変わりによって発生し、マルバカイドウなどの台木に接ぎ木して増やします。

ところで、ウンシュウミカンにもたまに種ができることがあります。種は、減数分裂した配偶子が受精してできるので、たとえ自分の花粉とめしべによる自家受精でも、親とはゲノムの構成の違う種になります。

つまり、親のクローンではないので、その種を植えてもウンシュウミカンという品種は生えてきません。

ウンシュウミカンはいくまでも、クローンと接ぎ木によってのみ維持される品種なのです。

## 現在の植物クローン

現在も、接ぎ木によって優良な枝変わり品種が維持されています。

果物の他にも、商業的に作られているクローンがあります。もっとも多く作られているのはランで、市場に出回っているランの8割は工場で作られたクローンです。

もともとランは種子が栄養分に乏しく、種子をまいただけではまず発芽しません。ランを上手に発芽させるには、ランの種子に栄養を与える役目をする蘭菌という共生菌が必要です。

ですから、手間のかかる種子からの発生ではなく、クローンによって新しいランを作るほうがはるかに簡単で、品質も安定しています。ランの場合、発芽率の悪い種子から育てるよりも、クローンで育てたほうがずっと簡単なのです。

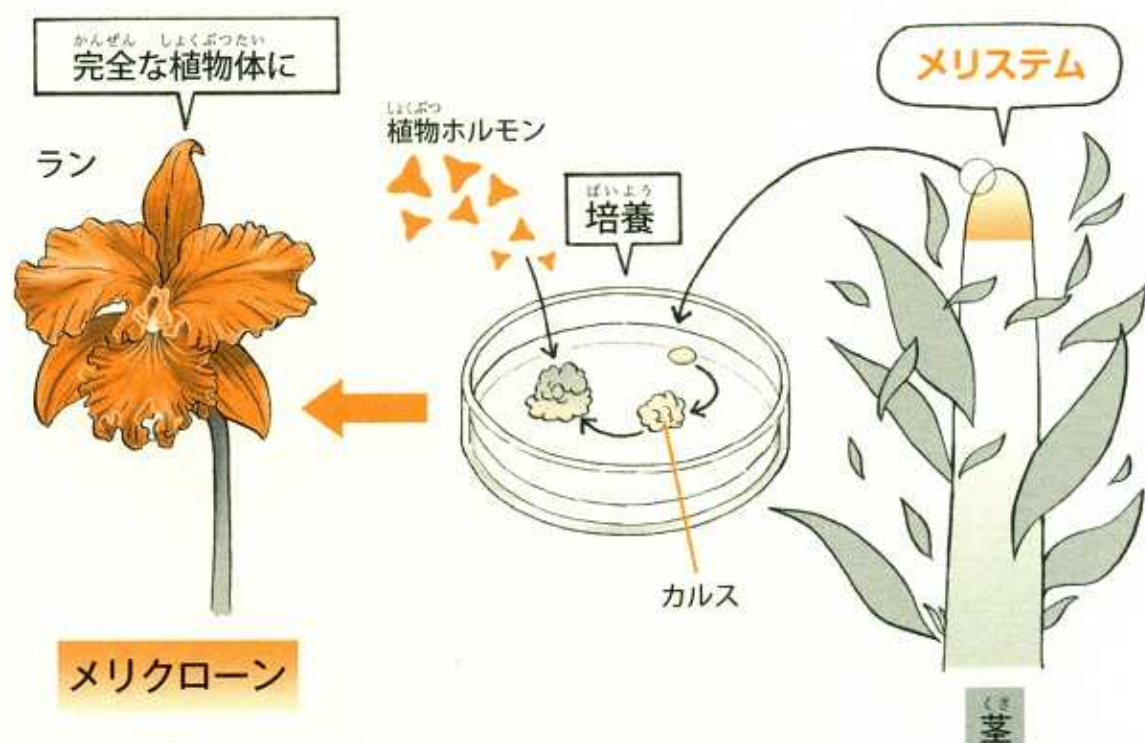


## 植物クローンの作り方

植物クローンを作るときは、まず増やしたい細胞を調達します。かといって、どこの細胞でもいいわけではありません。ウイルスなどに汚染されていない、清浄な細胞が必要になります。

そこで、材料となる細胞は生長点から採ってきます。茎の先端の小さな葉が密集しているところから、小さな葉など細かいものを削り取っていくと、最後には小さなドーム状の組織があらわれます。これが生長点です。茎の先端（けいちよう茎頂）にあるこの生長点を、メリステム（分裂組織）といいます。

メリステムは、未分化な細胞の集まりです。これを、植物の細胞培養に必要な栄養素が溶けこんだ寒天培地で培養すると、未分化な細胞のかたまり（カルス）ができます。このカルスに植物ホルモンを作用させることで、根や葉を人為的に分化させ、新しい完全なクローン植物体を作ることができます。



できます。

カルスをクローン植物体へ再分化させることに  
はじめて成功したのは、1958年のこと。ニン  
ジンのカルスに植物ホルモンを与えて、再分化さ  
せることに成功しました。

このようなクローン作成法は、けいちよう茎頂組織を培養  
することから茎頂培養と呼ばれます。そして、茎  
頂培養によって作られたクローンを、メリクロー  
ンといいます。ランなどのメリクローンは、無菌  
状態にした工場内で作られています。

メリクローンを作るコツは、なるべく生長点に  
近い細胞を取って培養することです。なぜなら、  
ウイルスは自分のゲノムを複製させて細胞を破壊  
して外にとびだし、周辺の細胞に感染して広がっ  
ていきますが、生長点に近い場所の細胞はウイル  
スの増殖速度よりも細胞分裂速度が勝るため、ウ  
イルスに汚染されていない清浄な状態の植物細胞  
が取れるからです。

このようなメリクローンは、シャーレの上で培  
養されるだけではありません。カルスを寒天培地  
で作った粒に埋めこんで、種子がなくてもクロー  
ンが育つ人工種子などが研究されています。



400歳の  
生物を食べて  
みないか

400歳!?  
なに  
何その怪物!?

ただの  
ウンシュウ  
ミカンだよ

植物は  
動物と違い  
構造が単純で  
簡単にクローンで  
増える

ウンシュウミカンは  
400年間  
同じゲノムが  
増殖を続けて  
いるのだ

博士がまた  
人を連れて  
きたよ!

ヒソソ

めずら  
しいなあ

あの子  
たちは…

台木に  
接ぎ木して  
おいたよ

また仲間が  
増えるね

ふう

彼らは  
同じ枝から  
増える  
クローンだ

ミカンから  
生まれた  
ミカン太郎

!!?

こいつ…マッド  
サイエンティストだ!





## クローン動物の作りかた

### 60兆個のクローン

わたしたちの体を作る体細胞の1個1個はすべて、起源（オリジナル）である受精卵のクローンです。1個の細胞である受精卵は、出産時には2兆個に増え、大人になると60兆個ほどになります。この60兆個の細胞は全て、同じゲノム情報を持ったクローンです。

この体細胞を1個取ってきて、それをもとに作られた新しい個体を作ったものが、クローン生物です。

細胞分裂で増える大腸菌やゾウリムシなどの単細胞生物、無性生殖で生まれたアリマキ、挿し木で増えた植物や、栄養生殖するイモや球根は、いずれもクローンです。

しかし人間は、体細胞を培養しても新しい人間にはなりません。各組織や器官ごとの細胞分化が進んでいるため、さまざまな遺伝子のスイッチにカギがかけられているからです。

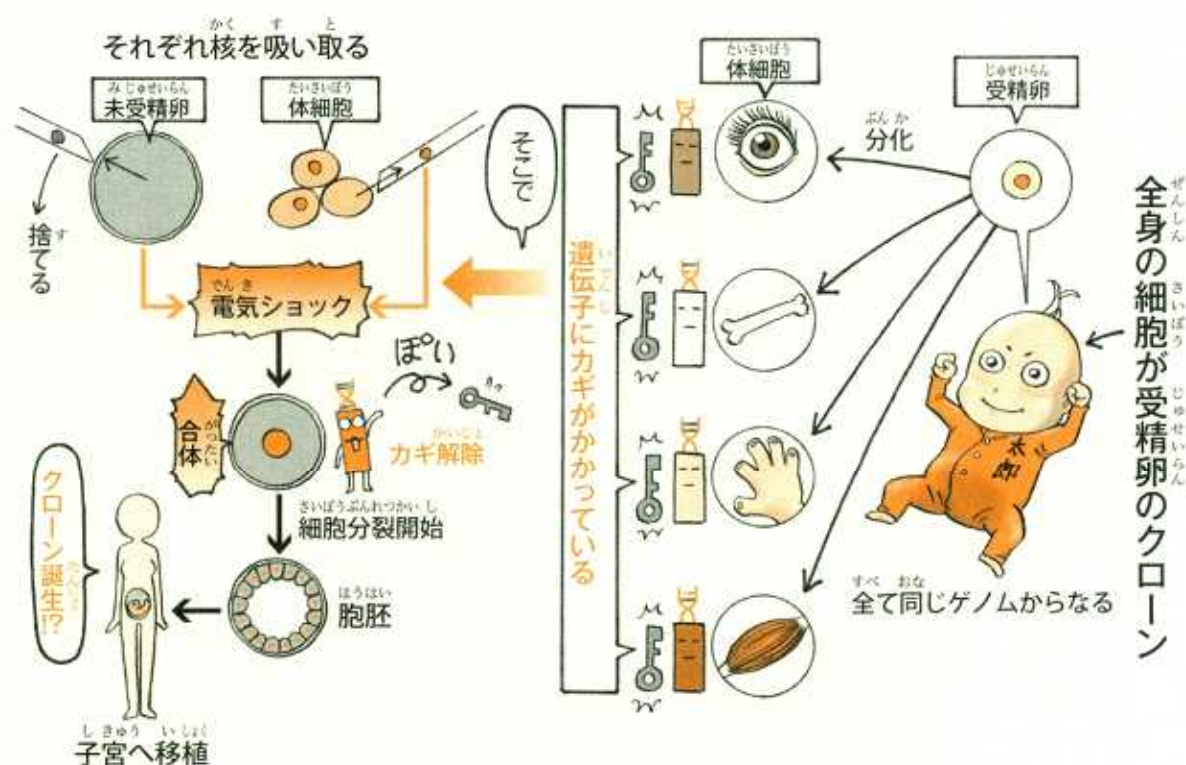
### 皮膚の傷がなかなか埋まらないのは

クローン人間などの動物のクローンは、その体づくりの複雑さから、20世紀後半にならないと作ることができませんでした。

動物は複雑な体を作るために、それぞれの器官や組織になるよう細胞を細かく分化させる必要があります。そのため、それぞれの組織によって発現する遺伝子は決められています。

たとえばひざを大きくすりむいたとき、傷は周





囲から埋まっています。決して、まん中から埋まることはありません。これは、傷を埋めるための表皮の細胞は、同じ表皮の細胞からしか作られないからです。

ひざをすりむいた傷は、表皮の細胞がはがれて、その下の真皮の層がむき出しになった状態です。真皮に分化した細胞は、表皮細胞を作ることができます。傷の周囲に残った表皮の細胞からしか表皮ができないから、大きな傷はなかなか埋められないのです。

そこで、火傷などで大きな傷ができたときは、表皮をメッシュのように切って広げて貼ることで、ひとつひとつの傷の面積を減らし、早く傷を埋めるといった治療法が取られます。

このように、動物の組織の細胞は分化が固定されてしまっています。つまり皮膚の細胞を培養しても、1人の人間には戻らず、皮膚しか作ることができないので、クローン人間は作れないのです。

そこで、どうにかしてこの分化の固定を解除して脱分化させ、体細胞からクローンを作る方法が長年研究されていました。

### 体細胞クローンの作りかた

体細胞からクローンを作るには、受精卵と同じものを人工的に作ります。

まず、クローンを作りたい個体から体細胞を取ってきて、その核だけを細いピペットで吸い取ります。

次に、別に用意した未受精卵から核を吸い出して、捨てます。そして、この核が無くなった卵子と先ほどの核を混ぜて、電気ショックを与えます。すると、細胞膜のすきまから核が卵細胞の中に入ります。

これを、しばらくシャーレの上で培養します。すると、核移植がうまくいったものは細胞分裂をはじめます。

やがて細胞分裂がすすむと、ほうはい胞胚というピンポン玉のような状態の胚になります。胞胚は未分化な細胞のかたまりですが、このあと体を形づくる遺伝子のはたらきはじめて、肛門と口（体の前後）のある姿へと変わっていきます。

この胞胚まで育った卵を、代理母の子宮に移植します。うまくいくと、胚発生が進んでクローン動物の子供が生まれてきます。

### クローン動物の商業利用

このような動物クローン作りは、有用な形質を持つ動物を大量に得るのに役立ちます。

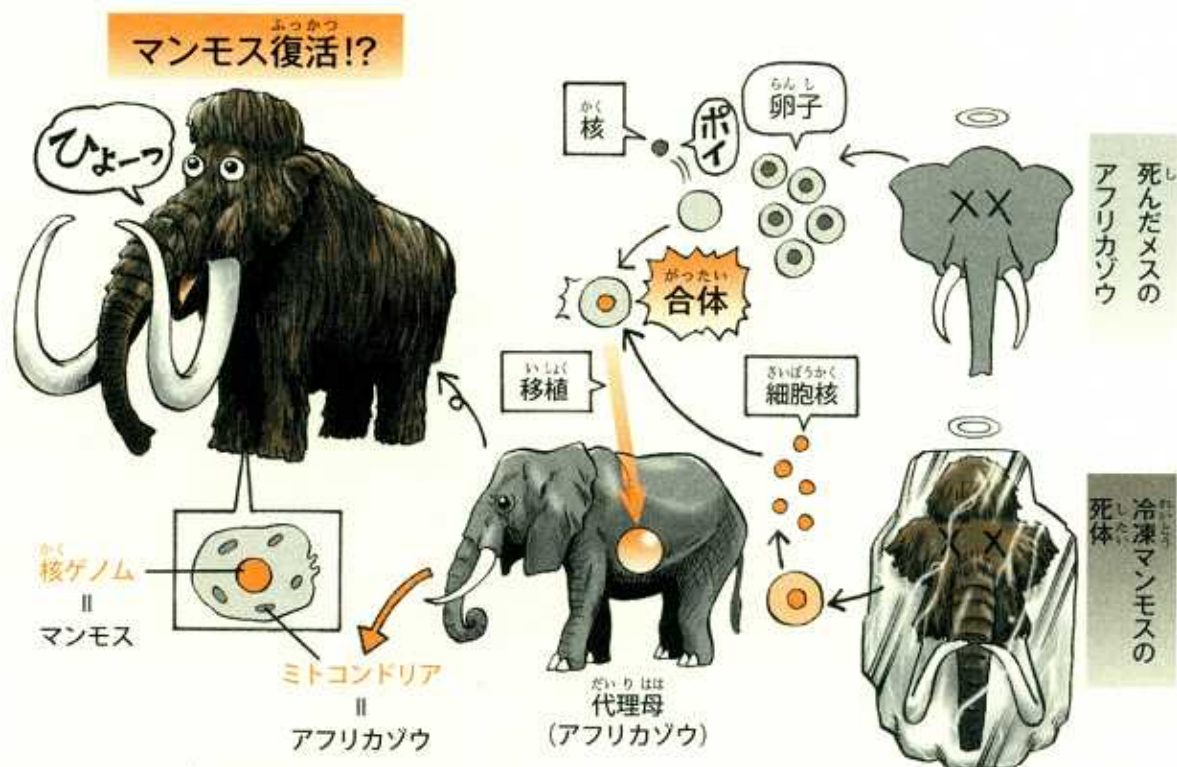
ウンシュウミカンの枝変わりのように、優秀な形質を持った家畜が生まれた場合、従来はこれから精子を取って凍結保存し、薄めて多くのメスに受精させることで、優秀な形質を持った次代を作っていました。しかし、このようにして生まれた子供はあくまでメスの遺伝子と交雑した個体であ



り、完全に親と同じ形質にはなりません。

しかし体細胞クローン技術を用いれば、優秀な形質を持った家畜をクローンで大量に増やすことができます。この方法なら、もし優秀な形質を持った個体がメスでも、何万頭にも増やすことができます。

哺乳類の体細胞クローンを作れるようになった1997年より前にも、畜産においてクローン技術は役立てられていました。優秀な肉牛の卵子と精子を取りだして人工受精させ、優秀な受精卵を得ます。この受精卵が細胞分裂をしたら、それをタングステンのナイフで半分に切ります。すると、まだ全能性が残っているこれらの細胞は、一卵性双生児のように、それぞれ独立した個体へと発生するので、肉牛より体が大きい乳牛の子宮に入れて育て、出産させます。これによって、貴重な肉牛の子供をより多く得ることができます。



## 絶滅動物の復活

人間の体細胞クローンを作るとは、世界中のどこの国でもまだ許可されていません。

しかし、動物の体細胞クローンは作ってもかまいません。そこで、老齢になったペットのクローンを作るというビジネスもありますが、価格は1匹あたり15万ドル（割引価格でも5万ドル）です。

また、絶滅した動物から細胞を採取してクローンを作るという計画も進められています。

一例として、近畿大学などが、マンモスを復活させるプロジェクトを進めています。まず動物園で死んだメスのアフリカゾウが出たら、それをもらって卵子を大量に手に入れます。次に、永久凍土の中で冷凍されたマンモスの死体から細胞核を採取し、先ほどの卵子に核移植して、アフリカゾウの代理母に移植するのです。

冷凍マンモスの核は、死後時間が経っていることと凍りついていたことでDNAがボロボロにな

っており、従来はクローンの再生が成功しませんでした。しかし現在、状態の良いマンモスの細胞が手に入ったので、順調にいけば数年後には世界初のマンモスが誕生する予定です。

ただしクローンマンモスは、核ゲノムはクローンのものですが、ミトコンドリアなどの細胞内小器官（オルガネラ）のゲノムは代理母であるアフリカゾウのものなので、100%純粋なマンモスというわけではありません。



ねえ博士  
この人の枝は  
接ぎ木しないの？

ギクッ

頭のあれは  
木じゃないんだ

なで〜

接ぎ木をしても  
桃の実は  
ならないよ

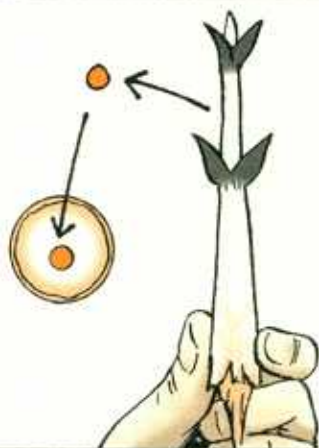
動物の体細胞は  
分化が進んでいて  
遺伝子にカギが  
かかっている



そのままでは  
角の細胞は  
角にしか  
ならない

それは…  
桃太郎の!?

動物のクローンを  
作るには細胞核を  
未受精卵に移植  
する必要がある



これを代理母に移植して  
桃太郎のクローンを  
作るなら

代理母として使うのは  
人間の子宮かな？  
桃の花の子宮かな？



お前…  
桃太郎を  
どうした!?

ググ…





## 3 万能細胞と再生医療

### クローンを作る万能細胞

クローンの利用法は、ひとつの個体をまるごとクローンにするだけではありません。発生ของシステムを解明して、ある組織の細胞に特有な遺伝子のスイッチを入れることで、特定の組織や器官のクローンを作ることができるようになります。

この技術が確立されれば、臓器移植などのドナーが無くて、人工的に組織や臓器を作ることができるようになります。

現在の臓器移植には、ドナー不足問題以上に大きな問題があります。それは、免疫による拒絶反応です。

### 自己と他者を断絶する免疫

免疫とは、自分と他人を見分け、それを引き離すしくみです。

たとえばカイメンは、単細胞の原生動物の群体が多細胞動物に進化したばかりの原始的な動物です。

ばらばらの細胞に分けると、ふたたびもとのカイメンに戻る習性があります。このとき、相手の細胞の表面にある、多細胞動物の細胞どうしをくっつけるカドヘリンというタンパク質の型を見て、自分と同じならくっつき、違うなら離れます。

オレンジ色のダイダイソカイメンと紫色のムラサキイソカイメンをそれぞれバラバラにして混ぜあわせると、同種の細胞だけがくっつきあって、

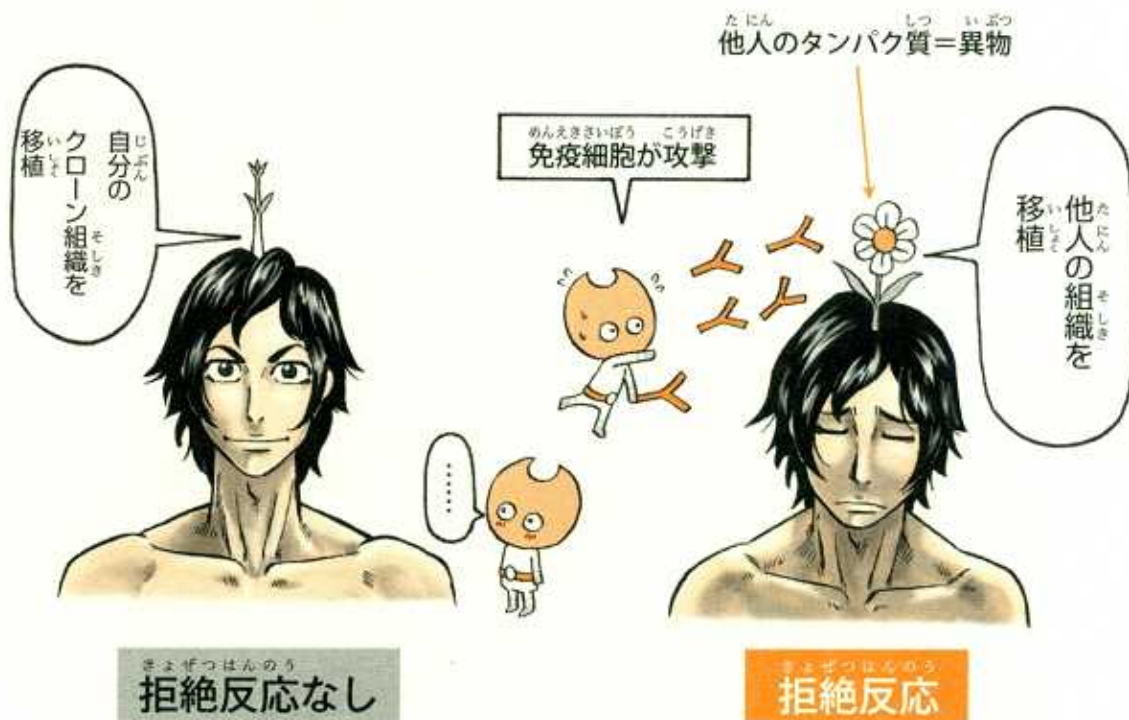


元通りのダイダイイソカイメンとムラサキイソカイメンに戻り、両方が混ざったカイメンにはなりません。

ただし、カイメンは同種か異種かを見分けているだけで、個々の個体を見分けているわけではありません。ですから、2匹のダイダイイソカイメンを混ぜると1匹になります。

しかし高等動物になってくると、この自分と他者を分けへだてる認識が厳しくなってきます。脊椎動物は免疫細胞によって、自分以外のタンパク質を異物として攻撃します。これによって細菌感染をふせいだり寄生虫を殺したりするのですが、移植された臓器もまた、自分ではない他者（ドナー）のタンパク質です。ですから移植しても、免疫細胞がその臓器を攻撃して破壊してしまいます。これが拒絶反応です。

そこで臓器移植のときには、拒絶反応をおさえるため免疫抑制剤を使う必要があります。しかし



免疫抑制剤を使うと、移植臓器だけではなく、病原菌などのタンパク質にも抵抗しなくなってしまうため、日和見感染を起こす危険があり、無菌室での入院が必要です。また退院後も、食事は無菌状態に近づけるために全て加熱するなど、生活上の制約がついてきます。

その点、自分のクローン臓器なら、拒絶反応が起こらないので免疫抑制剤も要りません。このように、クローン臓器やクローン組織を使って自分の身体の部品を作りなおすのが再生医療です。

## 再生医療の例

数年内に実用化されると言われている再生医療が、歯科における歯の再生です。

歯髄の細胞を培養すると、歯が再生されます。これによって入れ歯ではなく、自分の歯を再生することができるようになります。

また、神経細胞は今まで再生が不可能で、一度





切れたら元に戻らないと言われてきました。しかし再生医療なら、神経細胞も再生できます。背骨の骨折などによって足へ向かう神経が切れ、歩けなくなった人が歩けるようになったり、目が見えない人が網膜細胞と視神経の再生によって目が見えるようになったりします。

しかし細胞分化のスイッチとなる遺伝子とその副作用については、まだ完全には解明されていません。さらに遺伝子（タンパク質を作る）だけでなく、タンパク質がかかわらないRNA干渉のシステムも形態形成にかかわっているため、再生を完全にコントロールするにはまだまだ知見が足りません。

細胞が再生するということは、無秩序な再生Ⅱガン化に限りなく近く、再生組織を移植したつもりが人工のガン細胞を移植することにもなりかねません。再生医療はまだ、安易に受ける段階に入っていないのです。

## 再生医療のしくみ

胚発生の初期の細胞は、まだ分化のスイッチが入っていない未分化な状態です。この状態の細胞を万能細胞といい、どんなものにも分化する能力（全能性）を持っています。このような全能性を持つ細胞を幹細胞かんといいます。

幹細胞から、クローン人間を作ることが可能です。また、細胞の分化をコントロールすることで、特定の臓器や組織を作り再生医療に役立てることも可能です。そこでクローン作りや再生医療のため、動物における未分化な細胞の開発が進められていました。

胚から作った万能細胞の培養細胞のことを、胚性幹細胞（ES細胞）といいます。植物のメリステムと同じです。全能性を持ったこの細胞を使うことで、クローンを作れるようになりました。

胚性幹細胞は受精卵を材料にしているので、生命倫理の問題がありました。しかし2007年京

都大学の山中らは、人間の大人の皮膚細胞に4種類の遺伝子を導入して、胚性幹細胞のように使える万能細胞であるiPS細胞（ヒト人工多能性幹細胞）を確立しました。このiPS細胞は、皮膚細胞を使っているため、生命倫理の問題をクリアした幹細胞として、再生医療に利用できます。

とはいえ、4種類の遺伝子を導入しているわけなので、これらの遺伝子がどのような悪影響をおよぼすかがわかりませんでした。ガン化する可能性もありました。現在のiPS細胞は、より安全性の高いものへと改善されています。

### iPS細胞の利用法

筋肉からは筋肉しか作られませんが、これを利用して、太ももの筋肉の細胞を培養してシート状にしたものを、心臓の筋肉の弱ったところに貼りつけることで、心臓の収縮力を取りもどすという心筋シート治療法を、大阪大学などのグループが

2006年に成功させました。

現在、iPS細胞を使ってこの心筋シート法に改良が加えられ、より速く大量に質の良い心筋細胞を得られるよう、研究中です。

日本は戦後、機械工業で経済発展を遂げてきました。が、それらは現在、人件費と土地の安い海外に流出しています。

しかし現在、日本の高度な再生医療を受けるため、海外からツアーが組まれています。日本にとって、独自の高度な医療は新たな外貨獲得手段です。そのため、iPS細胞に関する権利関係の国際的な保護を固める必要があります。





※カスケードの説明はP.152へ





## 4

# 遺伝子を見つける方法

## 遺伝子の探し方

ある形質から、その原因になる遺伝子を同定するのは、桶屋が儲かっているのを見てどこで風が吹いたかを調べるようなものです。

ここで、桶屋からすぐに風を探し当てられることもあれば、いくつもの遺伝子のドミノ倒しをさかのぼらなくてはならないときもあります。ある遺伝子がONになったら、その遺伝子産物などの影響ではかの遺伝子のON/OFFが変わる……という連続した相互関連を研究し、そのネットワークの全容を解明するのも、遺伝子研究の重要な部分のひとつです。

このような、風が吹けばホコリが立つ、ホコリが立てば砂が目に入り……のようなドミノ倒しの

な相互関係を、次々に落ちていく滝にたとえて「滝（カスケード）」と名づけられました。

基本的に、ある遺伝子を探すための方法は、その遺伝子を壊してしまうノックアウト法です。遺伝子が壊れて何が変わったかを見れば、今までその遺伝子が何をしていたかがわかります。

ノックアウト法が開発されるまでは、交配によって劣性遺伝子（多くの場合、優性遺伝子が壊れるか失われたもの）をホモで持つ純系個体を得て、遺伝子の働きを調べるのが主流でした。

現在は、ゲノムDNAの解読技術が格段に上がったため、ある生物のゲノムを全て解読してから、それをコンピューターで解析することによって、遺伝子らしい部分や、ほかの遺伝子が作ったタン



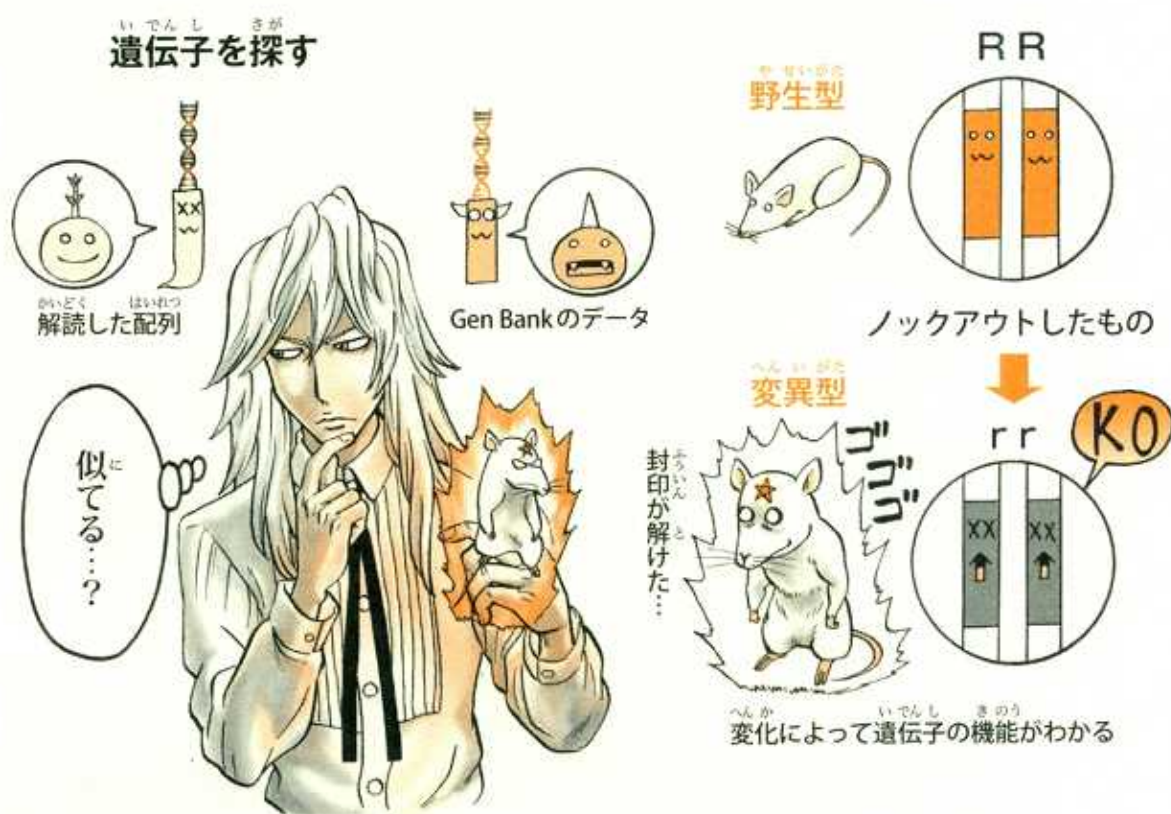
パク質にコントロールされそうな部分を見つけることもあります。

インターネット上のGenBank（遺伝子銀行）には、さまざまな生物の遺伝子が登録されています。自分が解読したDNA配列をこのGenBankのデータと対応させることで、既知のどの遺伝子に似ているかを調べることができます。

また、ゲノムDNAの配列が未知の生物に対して、別の生物が持っているある既知の遺伝子の類似遺伝子があるか無いかを速やかに調べる方法もあります。

まずGenBankのデータから、類似遺伝子を探したい遺伝子のヌクレオチド配列を探してきます。この配列の両端の部分にある20塩基対ほどのヌクレオチド配列をもとにして、プライマーと呼ばれる短いヌクレオチド鎖を化学的に合成します。

DNA増幅装置に、調べたいゲノムとプライマ



ーとDNA重合酵素（DNAポリメラーゼ）を入れて増幅させると、2個のプライマーに挟まれた部分だけが増幅されてきます。これが、探したい類似遺伝子のDNAです。

このように、プライマーを用いてゲノムの中の特定の部分だけを増幅して検出する方法を、PCR（ポリメラーゼ連鎖反応）といいます。PCR法によって、数時間で特定のDNA断片を100万倍に増幅することができます。

### 新型インフルエンザとDNA検査

インフルエンザウイルスの検出などにも、PCR法は役立っています。

まず、鼻の奥の粘膜に綿棒を突っこんで、サンプルを取ります。このサンプルには、はがれた細胞が含まれています。この細胞に対し、既知のインフルエンザウイルスのヌクレオチド配列から合成したプライマーを加えてPCR増幅機にかけま

す。

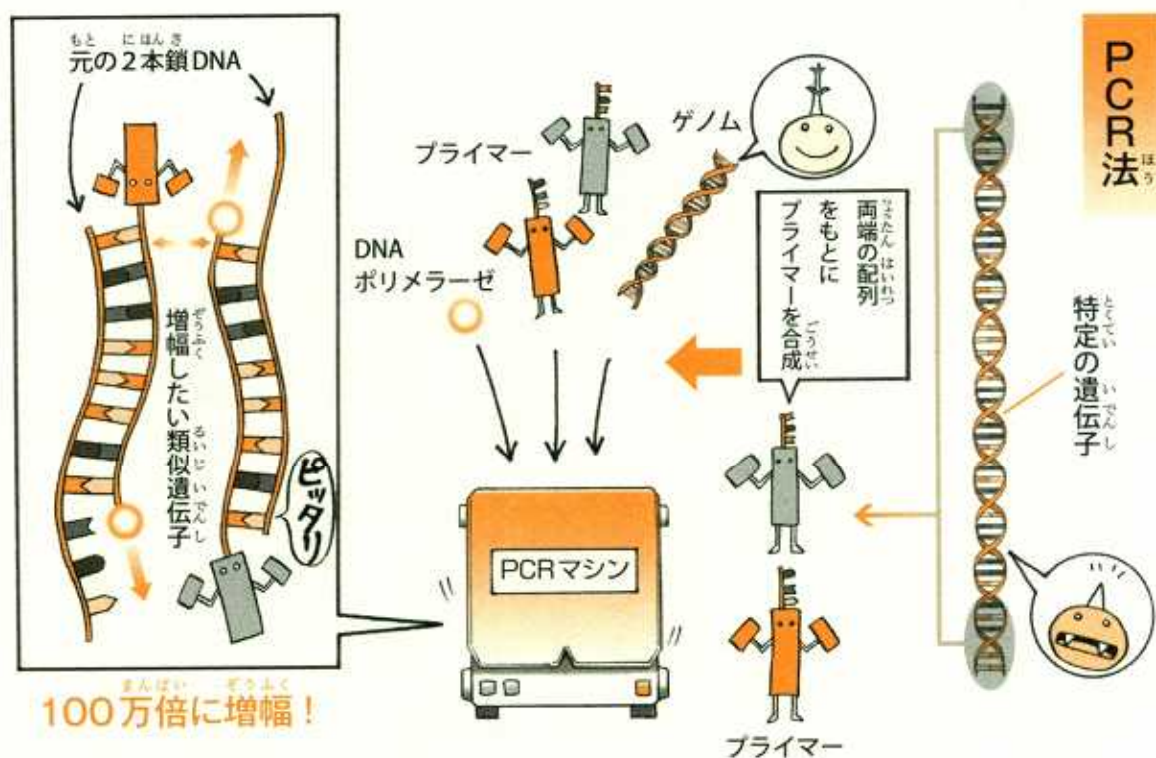
もしサンプルにインフルエンザウイルスがふくまれていると、DNAが増幅されてきます。つまりインフルエンザ陽性です。いっぽう、もしふくまれていなければ、プライマーがくつつく相手がないので、DNA重合酵素が合成するDNAもなく、何も増幅されてこないのが、インフルエンザ陰性であると言えます。

さて、この増幅されてきたDNAのヌクレオチド配列を解読することで、このインフルエンザウイルスが既存のものか、それとも突然変異を起こした新型であるのかがわかります。

もしヌクレオチド配列が違っていたら、それは新型ウイルスということになります。

また食品の偽装なども、PCR法を用いたDNA鑑定によって暴かれます。たとえばカレイの切り身をDNA鑑定するとヒラメだったとか、コーンスープなのにトウモロコシのDNAが検出され





なかった、などもわかります。

## DNA捜査の落とし穴

PCR法はDNAを100万倍に増幅する非常に感度の高い検査法なので、犯罪捜査にも使われます。血痕や遺留品などに含まれるわずかなDNAを増幅し、そのヌクレオチド配列を解読することによって、それが被害者や加害者のDNAと一致するかどうかが調べることができます。

しかし、感度が高いだけに、偽陽性の結果を出す危険性もあります。本来は相同性が低くて増幅してくるはずのないDNAが増幅してくる場合があります。

また感度が高いため、サンプルへの混入汚染によるミス（コンタミネーション）も注意しなければいけません。2007年にドイツ警察を騒がせた「ハイルプロンの怪人」事件は、コンタミネーションによるミスの最たる例です。

## ハイルブロン<sup>1</sup>の怪人

2007年にドイツのハイルブロンで、女性警察官が殺される事件がありました。警察はいつものように、綿棒で遺留品の表面をかき取って、残された犯人のDNAをPCR法でDNA鑑定しました。

過去のデータと照らし合わせたところ、犯人は女性で、同じ犯人がヨーロッパ各地で40件をこえる凶悪事件に関わっていることがわかりました。その神出鬼没さから、数ヶ国語に堪能でヨーロッパを股にかける女性連続殺人犯の姿が浮かび上がり、ハイルブロン<sup>2</sup>の怪人と呼ばれました。2009年には30万ユーロ（3300万円）もの懸賞金もかけられました。

しかし、調べていくうちに彼女のDNAは、まったく関係の無さそうなところからも出ていることがわかりました。そして懸賞金から2ヶ月後、ついに怪人の正体が判明します。

それは、警察に綿棒を納入している綿棒会社で働いている女性でした。彼女は綿棒を、素手で容器に詰めていました。それで彼女のDNAが全ての綿棒に付着し、この綿棒を用いて集めたサンプルから彼女のDNAが検出される結果になったのです。

このようなコンタミネーションを防ぐためには、使う器具をあらかじめ120℃の蒸気で加圧滅菌したり、ガンマ線（放射線の一種）を照射することで、付着しているDNAを破壊しておく必要があります。





失敗か！  
再生組織が  
暴走を…

ガン化して  
しまった！



おれの頭に  
妙なものを  
植えたのは  
お前か…



劣性ホモで  
リミッターの外れた  
私なら勝てるはず！



大丈夫か！

さがつて！  
桃太郎は  
私が  
押さえる！



きみと同じ  
リミッターの  
外れた鬼…

つまり  
今の  
桃太郎は…

いや 未知の  
遺伝子カスケードが  
作動しているぶん  
それ以上の可能性も…



ちよつと待て…  
移植した  
再生芽は  
角遺伝子を  
ノックアウト  
してあるんだ



人体実験  
したのかよ！  
このマッド!!

PCR法で桃太郎の  
角遺伝子を同定したあと  
その働きを知りたくて  
やってみたのだが…





## 太陽からDNAを守るスイッチ

### 紫外線と皮膚ガン

1998年、母子手帳から、赤ちゃんを丈夫にするために日光浴させましょうという記述が消えました。母子手帳は妊娠を申告することで自治体から発行され、6歳までの子育てについてのアドバイスが書かれているものです。

それまでは、真っ黒に日焼けした子供が健康であると言われていました。明るい日光を見ることが自律神経を整え免疫のバランスをととのえるはたらき、皮膚を外気にふれさせることで体温調節機能を鍛えるはたらき、そして紫外線を浴びることとで体内でビタミンDが合成され、骨の発達障害（くる病）を防ぐはたらきがあるからです。

このため、日光の弱い北欧では冬でも裸で日光

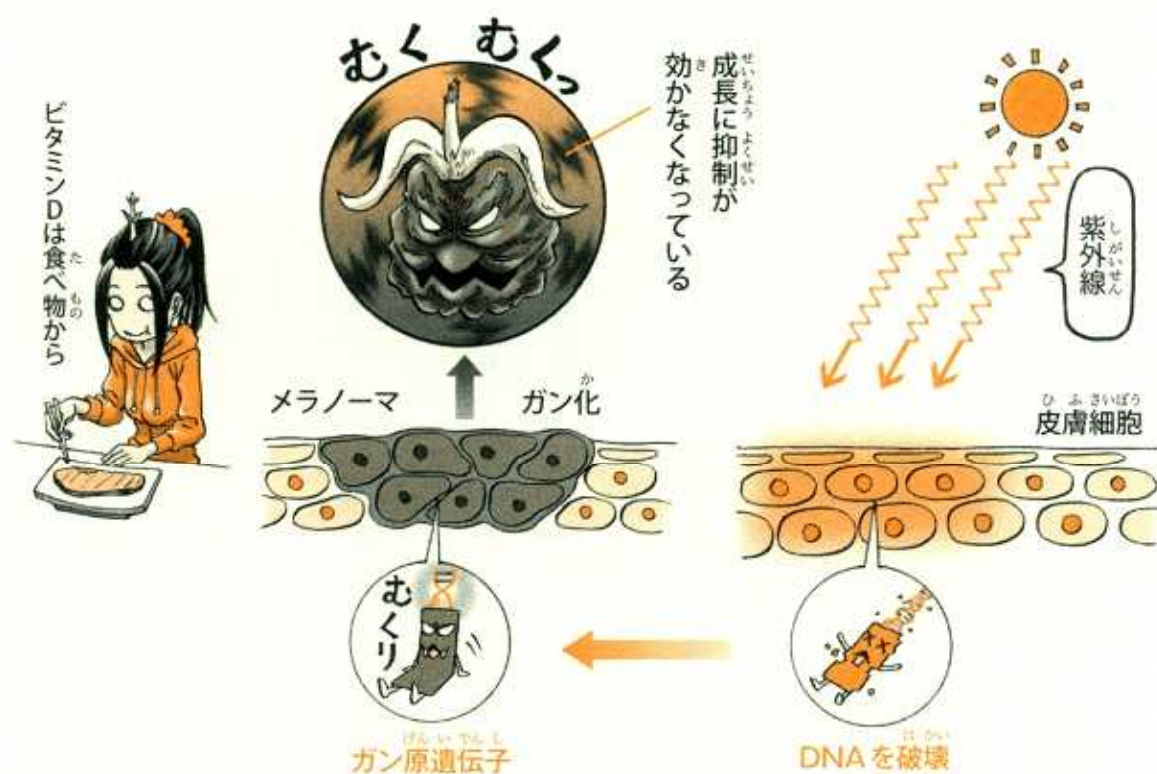
浴をする習慣があります。

しかし栄養学などの研究が進み、ビタミンDの合成にはさほど大量の紫外線は必要無いことがわかりました。黄色人種の肌の色と日本の緯度における日光の強さからすると、夏場は日陰で30分、冬場は服の上から顔や手に1時間でじゅうぶんです。

紫外線はエネルギーの高い光なので、DNAを破壊します。布団を干すのは、湿気を取ると同時に、微生物のDNAを紫外線で破壊することで殺し、殺虫・殺菌する作用があります。

もちろん人間のDNAも破壊されるので、夏の強い直射日光に当たりすぎると、DNAが破壊された細胞が炎症を起こして、火傷のようになりま





す。これが、日焼けです。さらに、死んだ皮膚細胞が後にむけてきます。

DNAの損傷で恐ろしいのは、その時の火傷よりも、数年後に発生する皮膚ガンです。紫外線によって皮膚の表面の細胞のDNAが傷つくとガン細胞になり、大きなほくろのようなメラノーマになります。メラノーマは放っておくと転移し、死にいたる危険なガンです。

そのため、とくに皮膚の薄い子供に過剰な日光浴をさせることはむしろ危険だということになり、母子手帳から日光浴の項目が削除されたのです。

また栄養の豊かな現在では、日光浴をしなくても、食べ物からもビタミンDを摂取できます。とくに魚はビタミンDが豊富なので、魚食の多い日本人の食生活では、まず心配ありません。日光の弱い高緯度地域に住んでいる黒人は、日光だけではビタミンDをじゅうぶん合成できないため、サプリメントで栄養を補っています。

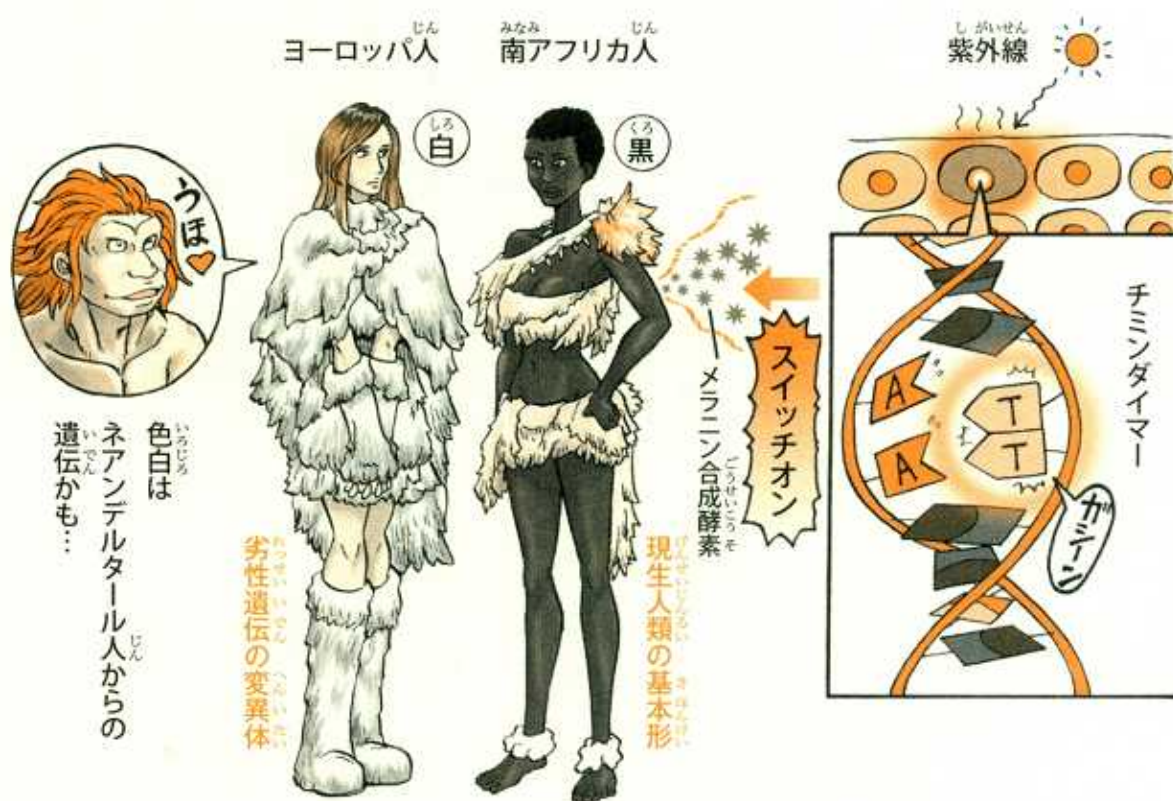
## ほくろとメラノーマ

ほくろとメラノーマの違いは、まずメラノーマはガンなので成長することです。ホクロが大きくなっていくようなら要注意で、直径7mmを超えたら病院で検診を受けます。

またメラノーマはガン細胞なので、周囲の細胞をじよじよに侵食していくため、ほくろのようなくつきりとした丸い形ではなく、いびつな形で、しかも黒い部分の境界線がにじんだようになっています。

メラノーマの原因は、紫外線により皮膚細胞のDNAが傷つくことです。ガンを起こす遺伝子をオンコジーン（ガン原遺伝子）といいます。オコジーンの正体は細胞の成長にかかわる遺伝子です。

それが傷つき、細胞の成長に抑制が効かなくなったものがガンになります。





## 肌が黒くなるスイッチ

遺伝子には、常に発現しているものと、スイッチが入ったときだけ発現するものがあります。紫外線に当たると肌が日焼けするのは、紫外線がスイッチを入れるからです。

紫外線が表皮細胞に当たってその高いエネルギーでDNAを壊すとき、ヌクレオチドの中でTが隣りあっている配列がたまたま壊されると、チミンは相手になるはずのAではなくチミン<sup>アデニン</sup>どうしで手をつないでしまいます。これを、チミンが2個つながった分子ということで、チミン二量体（ダイマー）といいます。

細胞の中にチミンダイマーができると、メラニン合成酵素のスイッチが入り、メラニン色素が作りはじめられます。メラニン色素は黒茶色の色素で、肌の色や髪の色を黒くします。

このメラニンのスイッチは、チミンダイマーができた細胞だけで入ります。そしてチミンダイマ

ーは紫外線が当たった細胞でしか作られないので、肌の上に紙を切って乗せておくと、その部分だけがきれいに焼けずに残ります。

また、必ずしも紫外線でなくても、人工のチミンダイマーを塗っても同じ日焼け効果があります。メラニン合成のスイッチさえ入れてしまえば、放っておいても色黒になっていくので、ガンにならないよう日焼けするには、10分ほど日向に出てチミンダイマーを作り、20分ほど日陰で休んでチミンダイマーにスイッチを入れさせる、を繰り返すのが効率的で比較的安全です。

肌が黒くなると、紫外線が体の中まで入って来にくくなります。日傘が白よりも黒のほうが多いのも、黒のほうが紫外線を止めるからです。こうして人間は、日光によって肌を黒くすることで紫外線から身を守っています。

しかし白人は肌が白く、どんなに日焼けしても真っ赤になるばかりで、真っ黒にはなりません。

これは、細胞ごとのメラニンの合成能力が低いわけではありません。白人にもほくろがあるように、メラニンを作る細胞はじゅうぶんメラニンを作るのですが、白人の場合、メラニンを作る細胞の数が少ないので黒くならないのです。

また、手のひらや足の裏は黒人でも白くなっています。これは、もともとこの場所は日光に当たりにくいこと、角質化した皮膚が分厚くて紫外線がメラニン合成のスイッチを入れないこと、もともとメラニン合成をする細胞が少ないことが理由です。

現生人類（ホモ・サピエンス）の基本形は南アフリカ人で、肌は黒く、強烈な紫外線から体を守っていました。

しかし10万年前にアフリカを出て、ヨーロッパへ向かいました。ヨーロッパは海流の影響で温暖なので、かなりの高緯度地方まで人間は進出できました。肌が黒いと弱い日光のせいでくる病にな

るため、変異体として現れた色白の劣性遺伝子を持った個体が多数を占めていきました。

こうして、白人が生まれたと考えられています。ただ、白人の赤毛遺伝子がネアンデルタール人のものと同じだったため、色が白いことに関する遺伝子の一部も、色白だったネアンデルタール人からの遺伝かもしれません。人類の基本形であるアフリカ南部の人々以外の人類は、すべてネアンデルタール人の遺伝子を持ち、ネアンデルタール人との交雑種の子孫だからです。パプアニューギニア人は、さらにデニソワ人の遺伝子も持っています。

今もなお、色白遺伝子は人間において劣性遺伝子です。しかし、劣性遺伝子を持つものがほとんど多数を占めて優勢になってくると、それが優性遺伝子に変わり、その裏に新たな劣性遺伝子ができてくることもあります。





かはあつ



切り落とした  
方も増殖を!?

!?



桃姫に  
何を  
する!



鬼ヶ島の  
鬼どもを全て  
倒す...!!

倒す...



細胞の成長に  
抑制が効かなくなっている

切るだけでは  
ガン細胞のように  
無限に再生を  
くり返すぞ!!  
倒すには焼き払うしか...



ぐああつ





# 遺伝子組み換えと遺伝子治療

## 遺伝子組み換えの方法

生命工学（バイオテクノロジー）の基本は、遺伝子組み換えとクローンの作成、この2点に集約されているといって良いでしょう。

遺伝子組み換えとは、ある生物のゲノムに自分の好きな遺伝子を加えること（形質転換）です。もともと一般的なのは、大腸菌のプラスミドDNAの環を切って遺伝子をねじ込み、大腸菌の中に戻す方法です。

この方法を用いて、たとえばヒトの遺伝子を大腸菌にねじ込んで培養し、これを精製することで、酵素などのタンパク質を大量に手に入れることができます。

植物に感染する土壌細菌アグロバクテリウムは、

ティプラティプラスミドという、植物の核DNAに入り込めるプラスミドを持っています。このティプラスミドに任意の遺伝子を遺伝子組み換えした上でアグロバクテリウムに入れて植物に感染させると、植物のゲノムにその遺伝子をねじこんで形質転換させます。これを利用して、遺伝子組み換え作物が作られるようになりました。

## 遺伝子組み換え作物の危険性

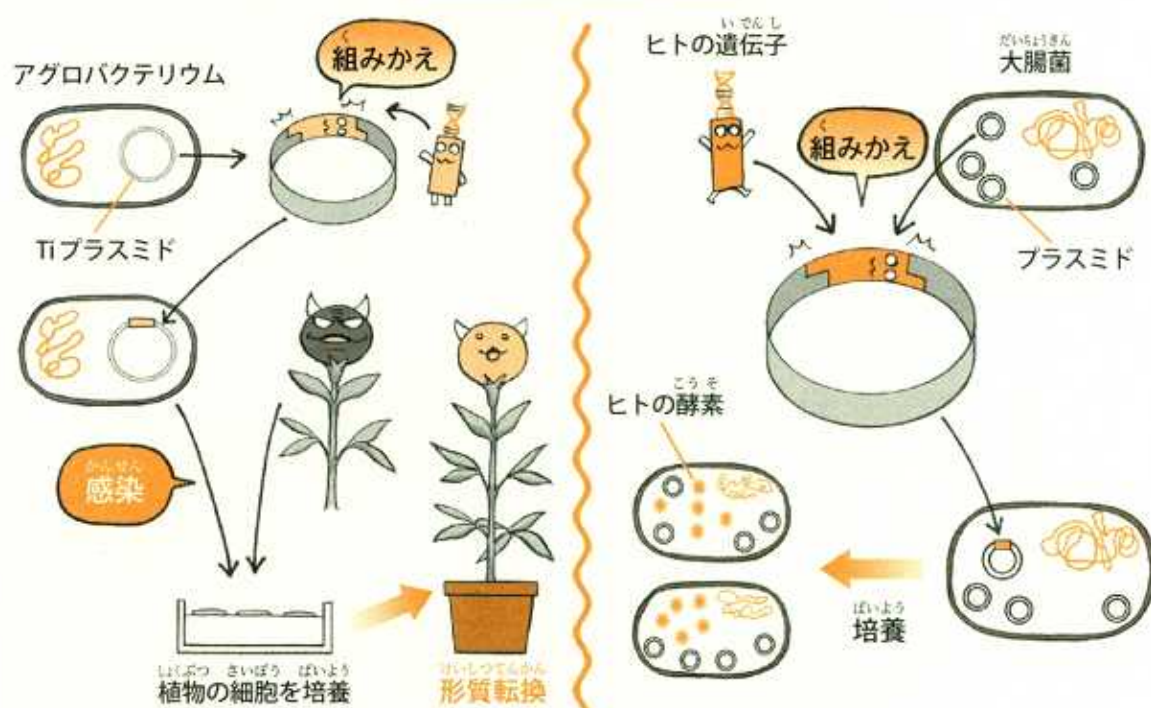
遺伝子組み換え作物は、アメリカでは一般的に作られ、販売されています。

作物は、無農薬では育ちません。植物はもともと虫や草食動物による食害からのがれるために、体内にアレルギー性の高い物質とか、苦味やえぐ



味などを帯びた物質を作成してためこみます。そのため、食べるとアレルギーを起こしたり、中毒症状を起こしたり、結石の原因になったりします。そこで、育種によってそれらの毒性物質を排除していったのが、現在の野菜です。当然、虫などに食害されやすく、自分の毒のかわりに農薬がなければ全滅してしまいます。無農薬野菜も、農薬を使っている畑の区画の真ん中で作っています。しかし、農薬を使うにはお金と手間がかかります。日本ではリモコンヘリなどで丁寧に農薬を散布していますが、広大なアメリカの農業ではそんなに手間をかけることができません。そのため、害虫に対する毒性物質の遺伝子をピンポイントで探し当て、これを作物に導入した遺伝子組み換え作物の種子を種苗会社が作り、販売しています。ただ、アメリカではすでに害虫抵抗性トウモロコシを食害できる耐性害虫が登場してしまいました。また多くの国は日本のように豊かな水が無いの

### 遺伝子組み換え





で、土に塩分がたまり、作物の生育には不適な砂漠が多くあります。ここでも育つような耐塩性の作物を作ること、農地の無い貧しい国でも豊富な食料を得られ、紛争の原因が減ります。作物を恒常的に栽培すれば砂漠の環境が変わり、緑化もできます。

また、売った作物を受粉させて勝手に種を増やされると、種苗会社が儲かりません。そこで遺伝子組み換えでF1不稔種<sup>ふねんしゅ</sup>という、次代を作れない種子を作って販売しています。

これらはピンポイントで遺伝子を加えているため、味やアレルギー物質などの影響は少ないと考えられています。しかし、ひとつの遺伝子の下流にどのような遺伝子があつてどのように働いているのか、そのカスケードの全てが判っているわけではないので、意図しない毒性物質が作られてしまう危険もあります。

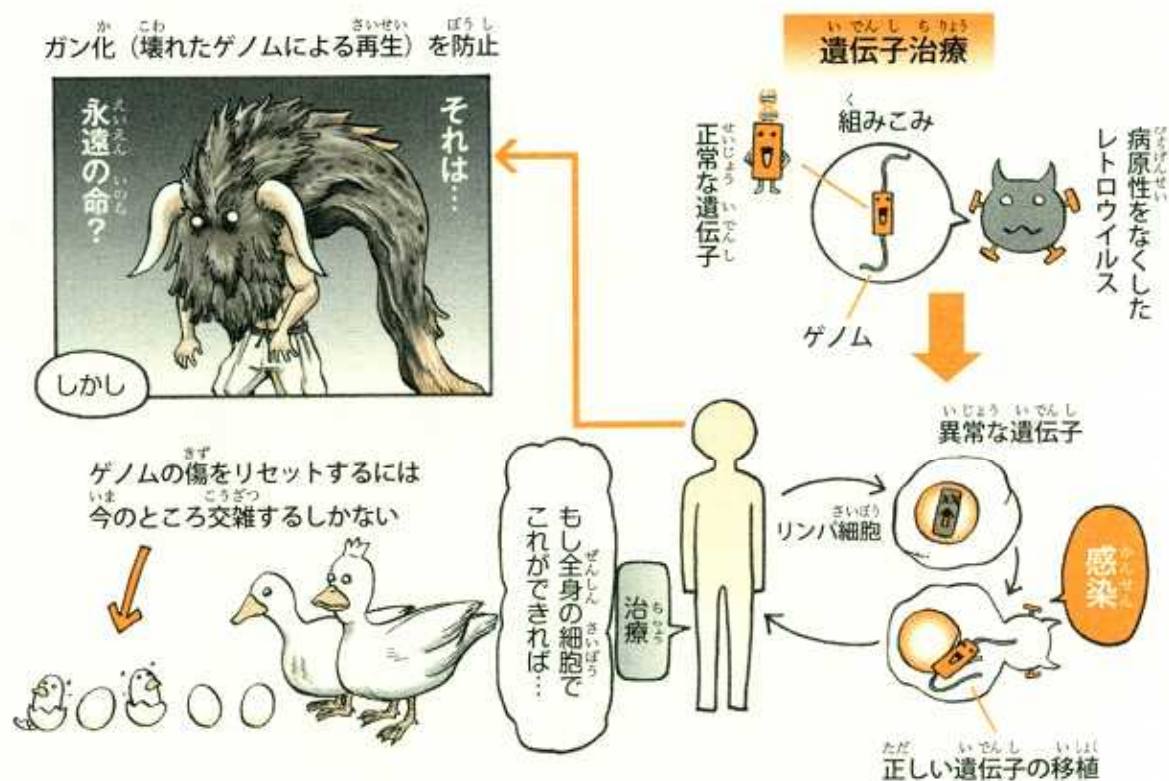
遺伝子組み換え作物は、日本ではまだまだ敬遠

されています。しかし、遺伝子組み換え技術そのものは便利だし、発展途上国の食料不足を解消するためには、少ない土地で多くの収量が期待できる遺伝子組み換え作物が重要です。現在は全世界の1億ha以上の農地で栽培され、その栽培面積は発展途上国を中心に、年々増加しています。

そこで、日本では遺伝子組み換えを利用せず、遺伝子組み換えと同等の効果を上げる育種が開発されました。有用遺伝子を遺伝仕組み換えで導入するのではなく、その遺伝子を持った個体をPCR法で探し、それを母本として育種を重ね、遺伝子を持った個体をPCR法で選抜していった、遺伝子組み換え作物と同じものを従来の育種の方法だけで作りあげたのです。

### 遺伝子組み換えを利用した遺伝子治療

植物にアグロバクテリウムを感染させたように、動物はレトロウイルスを使って遺伝子導入するこ



とができます。

遺伝子の塩基配列が1文字でもおかしくなると、その配列が記録しているアミノ酸が別のものに置き換わってしまう場合があります、それによって正しいタンパク質が作られなくなって起こる病気があります。たとえば酸素が少なくなると赤血球が三日月のようにつぶれてしまう鎌状赤血球貧血症は、赤血球の色素ヘモグロビンの遺伝子の17番目の塩基の置換によって起こります。

また、ミトコンドリアDNAの414番目の塩基置換によって、老年性アルツハイマーが起こります。これらミトコンドリアDNAの異常による病気を、ミトコンドリア病といいます。

このような患者には、正しい遺伝子を導入することで治療が可能です。まず、病原性をなくしたレトロウイルスのゲノムに必要な遺伝子を組み込みます。次に、患者からリンパ細胞などの細胞を取りだし、レトロウイルスを感染させます。する



と、患者の細胞に新しい遺伝子が導入されます。

臓器移植には拒絶反応が起こりますが、拒絶反応はタンパク質に対して起こるもので、核酸である遺伝子の移植では拒絶反応は起こりません。

### 遺伝子治療で永遠の命は作れるか

究極の病気治療の目標は、永遠の生命です。

iPS細胞は再生医療に希望を与えますが、永遠に再生し続けられるものではありません。なぜなら遺伝子は、時間が経つにつれて放射線や活性酸素などで壊れてゆき、全身のゲノムは壊れかけのものになります。壊れかけたゲノムで組織や器官を再生しても、正常な機能を持ったものは作れないからです。

人間のテロメラーゼ活性を強めても同じことで、ゲノム本体が壊れていれば、ただの無秩序なガン細胞になってしまいます。

すなわち、現在の科学では、今自分が持ってい

るゲノムのままで、永遠に存在することはできないのです。いずれ、体細胞を取りだして壊れた遺伝子やテロメアを完全に修復してから体細胞クローンを作り、これに記憶をうつせるようになるか、あるいは遺伝子治療がもつと発達して、体じゅうの細胞にピンポイントで壊れていない遺伝子を補充しつつ壊れた遺伝子を削除できるようになれば、可能かもしれません。

しかし今のところ、ゲノムのリセットのためには交雑するしかありません。すると、たとえ自分から作った卵子と精子とで受精しても、減数分裂や染色体の乗り換えが起こるため、それが受精しても自分と全く同じゲノムを持った人間は生まれられません。

永遠の命を科学で手に入れるまでには、現在のところ、まだまだ技術が足りないのです。









## 現在進行形の進化

### 絶滅の原因と生物種の統計

人類が現れてから、生物の絶滅が加速していると言われていました。人類の活動によって環境破壊が促進され、多くの生物種が絶滅したとも言われています。

もちろん、ニホンオオカミなどのように人間の乱獲によって滅んだ生物種もありますし、後述のクニマスが絶滅しかけたのも人間の農業用水の確保が原因でした。しかし絶滅危機論の多くは、絶滅危機生物の看板に隠れ、政治的利用を目的に捏造されたデータをもとにして語られています。

まず人類が現れてから絶滅する生物種の数が増えているという説についてですが、恐竜時代の生物種は化石を調べて統計するしかありませんが、

化石が残っているのは非常に稀有な例です。サンブル数と化石から得られるデータが少ないので、同じ種だと思っていた化石が実は別々の種かもしれない、種の数の正確な統計は難しいのです。

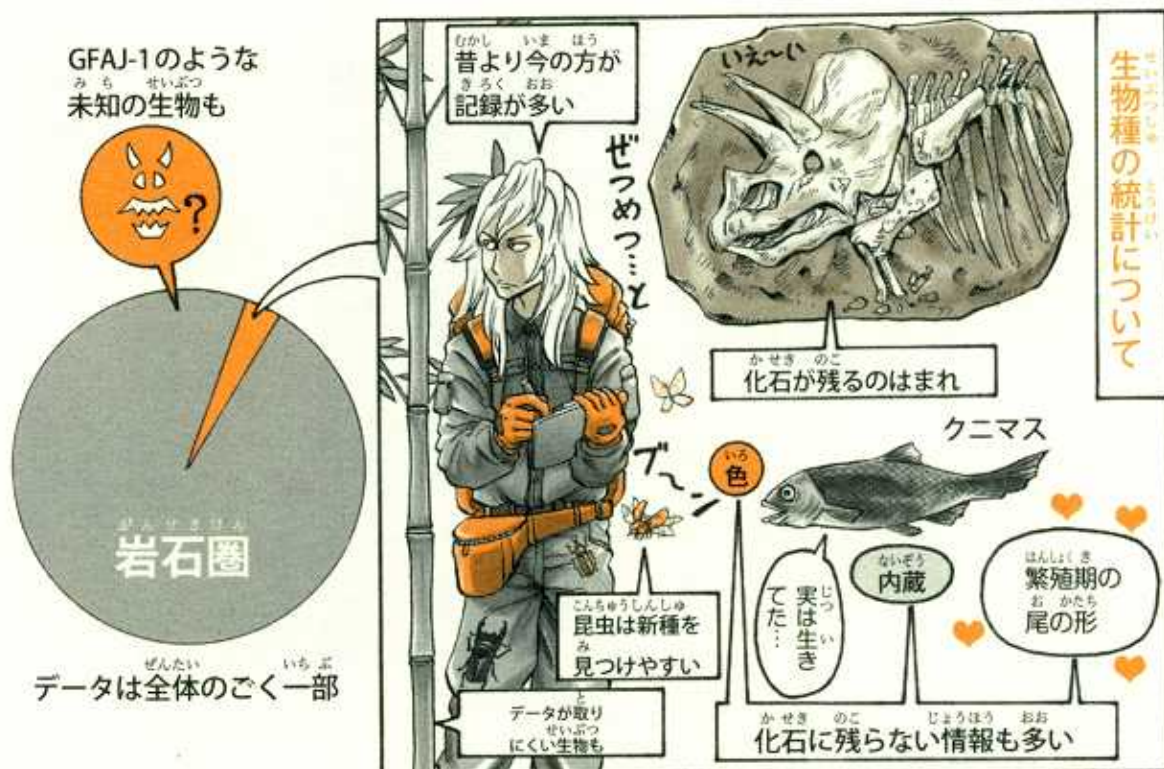
たとえば2010年、絶滅したと思われていたクニマスが、長年近縁種のヒメマスと混同されて生存していたことがわかりました。クニマスとヒメマスの違いは、色、繁殖期の違いによる尾の形の違い、内臓の形の違いです。これらのデータは、化石では残りません。

また、大昔の文字を持たない人間より今の人間のほうが多くの記録を残し、学者は世界中を調べて新種を見つけるので、記録された絶滅種が増えるのは当然のことです。



しかも、地球上には870万種の生物がいると予測されていますが、今までに発見されたのは125万種にとどまり、陸の生物の86%、海の生物の91%がまだ見つかっていません。多くの生物種は、人間の知らないところで生活し、進化し、自然淘汰の果てに絶滅しています。地球上で今まで発見された生物種の7割を昆虫が占めているのは、外見が分類しやすく、硬い外骨格のおかげで、死んでも死骸や化石が残りやすく、また陸上や空中など発見しやすい場所に住んでいることも、大きな要因です。

地球の生物量（バイオマス）の多くは、人間がほとんど知らない地下の岩石圏に大量に眠っています。硫酸の熱泉の中に住む古細菌<sup>アーキヤ</sup>など、人類がまだ分類していない生物種が大量に存在しています。2010年にNASAが発見したヒ素DNAを持つ真正細菌GFAJ-1（87ページ）のように、従来の生物探査法ではまだ人類が発見できて





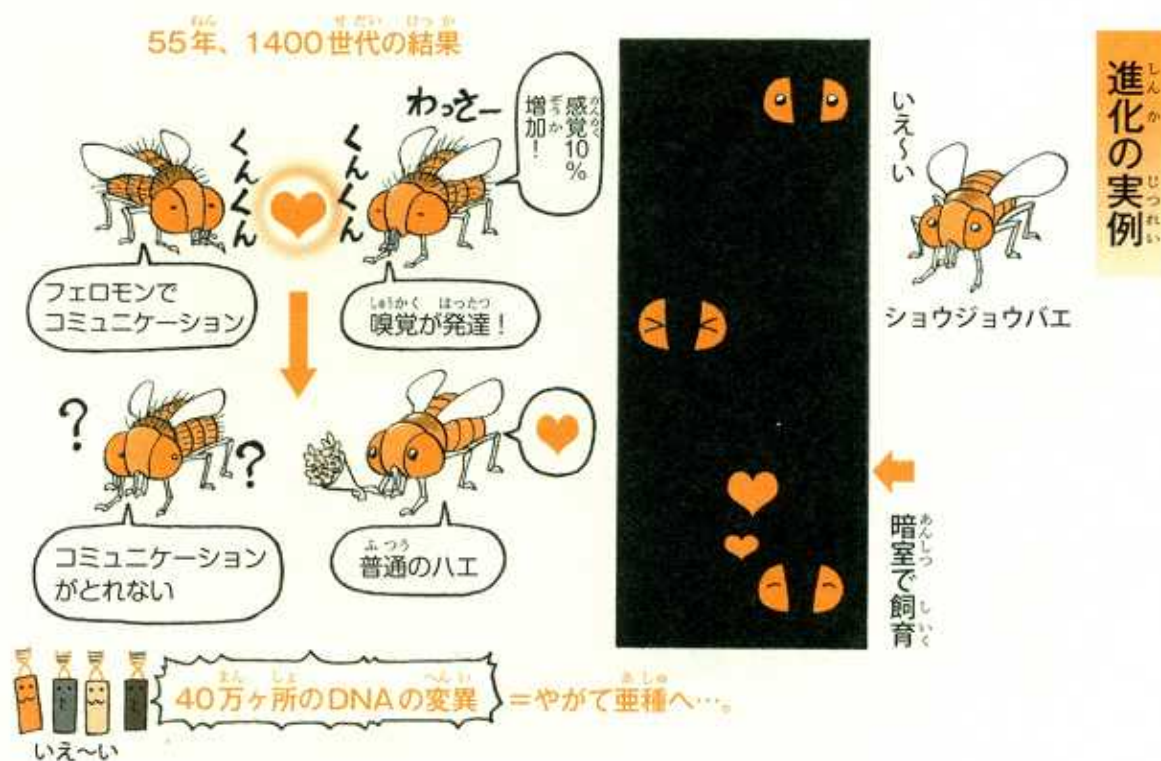
いない生物種も多数存在しています。すなわち、絶滅種の統計は生態系全体のごく一部のデータだと留意する必要があります。

また絶滅の原因については、地球上の生命は隕石や山火事、気候変動などによって何度も大絶滅を起こしています。人間がどんなに環境を破壊しても、地球の海が無酸素状態になったり、酸素濃度が20%も下がった古生代の大火事ほどの影響を地球に与えることは不可能です。

政治的意図および個人のニヒリズムを満足させるための自虐的な絶滅論は、複雑な生態系の研究を忌避し、生命と生態系の謎を解き明かす科学の芽を摘む危険性があります。

## 現在も続く進化と新種

ゲノムの中で偽遺伝子を中心にDNAの変異が進み、交雑や、環境の圧力による自然選択（自然淘汰）によって生物種の中のゲノムの趨勢が変化





しつづけている以上、常に新しい種が生まれてくる可能性があります。

たとえばダーウィン・フィンチとして有名なガラパゴス島のフィンチは、現在まさに分岐しつつある種です。全て同じフィンチという種ですが、住んでいる島によって餌になる食物が違うため、くちばしの形が分岐しています。あまりにも違いすぎるので、ダーウィンは最初、これらの鳥は全て別の種だと思っていました。

木の実を割って食べるものはペンチのように分厚い丈夫なくちばしで、虫を食べるものはピンセットのように細長いくちばしです。動物の血を吸っているものは、さらに細長く鋭いくちばしを持っています。

これらのフィンチは同じ種なので交雑は可能ですが、そもそも餌を手に入れる生活圏が違うので遭遇することがありません。また、体の大きさが違いすぎても交雑しにくく、ますます集団間の違

いが大きくなっていきます。

また、フィンチなどの鳥のさえずりや、ホタルの光の点滅パターン、カエルの鳴き声などは、住んでいる場所にに応じて方言があります。これらは交雑のための異性とのコミュニケーションに必要なので、方言が違っているとコミュニケーションが成立せず、交雑できません。

このようにして、最初はわずかだった集団間の違いが、交雑は可能だけれど自然状態ではまず交雑することはないという亜種になり、ついに遺伝子的に離れすぎてしまつて交雑不可能な独立した種になるのです。

### 人間が観察した進化

京都大学で、55年におよぶ長い長い進化の研究が行われました。ショウジョウバエを、1400世代にわたって暗室で飼育し続けたのです。

生物は環境が変わると、その環境に応じて変化



します。暗い環境の中で有利な形質を手に入れるのはもちろんですが、限られたエネルギーの中で暮らしている生物にとって余分なタンパク質は作りたくないため、無駄な形質は捨てられます。光の無い洞窟で暮らす動物は、紫外線を防ぐ必要が無いので色が白く、光が無いので目も退化します。

さて、闇条件で育てられたハエは野生に比べると淘汰圧が低く、餌もふんだんにあるし交尾相手も探さなくても周囲にいるし敵もいませんが、それでも進化が起きました。全身に生えた感覚毛が10%伸びて、嗅覚が発達したのです。嗅覚によってお互いに、交尾のためのコミュニケーション手段であるフェロモンを感知します。彼らをふつうのハエとともに置いても、コミュニケーションがとれず、ほとんど交尾を行いません。また暗室バエは、嗅覚やフェロモンに関する遺伝子において40万ヶ所もDNAの変異がありました。こうして彼らは、亜種へと進化しつつあるのです。

なお、シヨウジョウバエの1400世代を人間に換算すると3〜4万年です。人類ホモ・サピエンスがホモ・エレクトスの子孫の旧人から分岐したのは20万年前です。40万年前に分岐したネアンデルタール人は人類とは別の種として分類されていますが、交雑が可能だったので、亜種として分類することもあります。



この多様な  
姿形…

鬼ヶ島は  
鬼のガラパゴス  
か…



突然変異や  
交雑…



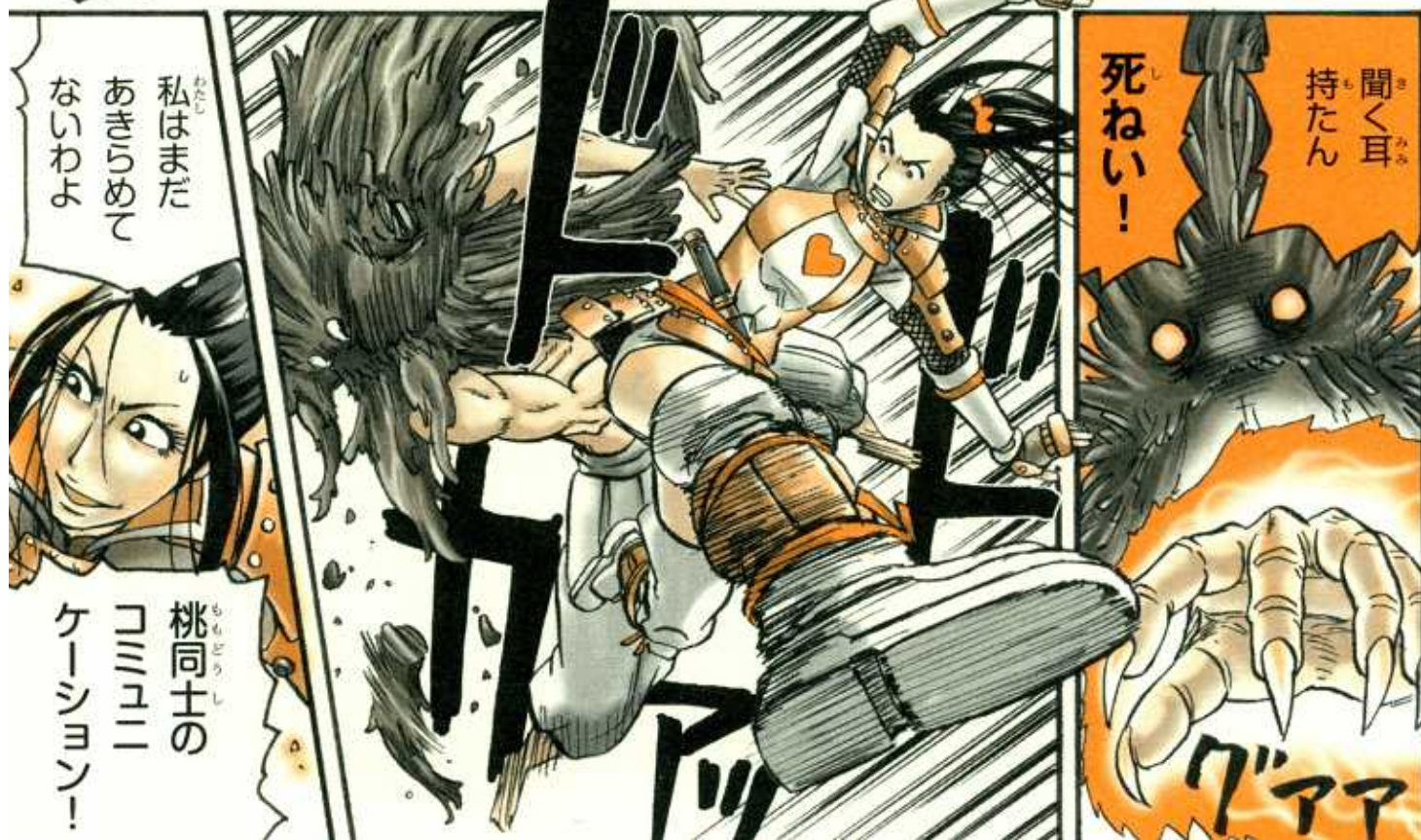
自然選択  
によって  
きつと今も  
新種の鬼が  
誕生して  
いるのだ…

そうだ桃太郎  
カエルも鳴き声が  
違えば種が違う

おまえを助けに来た  
桃姫と話が  
通じないのなら  
別種と言って  
いいだろうよ



化け物め



聞く耳  
持たん  
死ねい!

私はまだ  
あきらめて  
ないわよ

桃同士の  
コミュニケーション!





## 感染するタンパク質・プリオン

### 狂牛病の謎

狂牛病（BSE）は、ウシが震えたりふらついたりして、立てなくなってしまう病気です。似たような病気はそれまでも、ヒツジのスクレイピー病、ヒトのクロイツフェルト・ヤコブ病やクールー病がありました。

これらは、病気になった動物の脳や脊髄や骨髄を食べたり、病気になった人の脳の硬膜を移植することによって感染していました。感染性ということ、その原因はウイルスのようなものだと思われていましたが、1982年にプルシナーが、原因となるものが感染性のあるタンパク質だと発見しました。そして、タンパク質性感染因子という意味で、プリオンと名づけました。

正確には「プリオン」ではなく、「異常プリオン」がこの病気の原因です。

### 遺伝性タンパク質、か？

少量の（異常）プリオンを摂取すると、やがて脳の中で（異常）プリオンが増殖していきます。これは脳細胞に沈着し、脳細胞は破壊されていきます。すると脳が体の統制を取れなくなるので、震えたりふらついたりしはじめ、最後には死んでしまします。

この状況を見ると、まるでタンパク質なのにDNAのように自己増殖するかのように見えます。セントラル・ドグマはDNAのみが自己複製し、RNAに転写してタンパク質として発現、という



もので、逆は無いということでした。

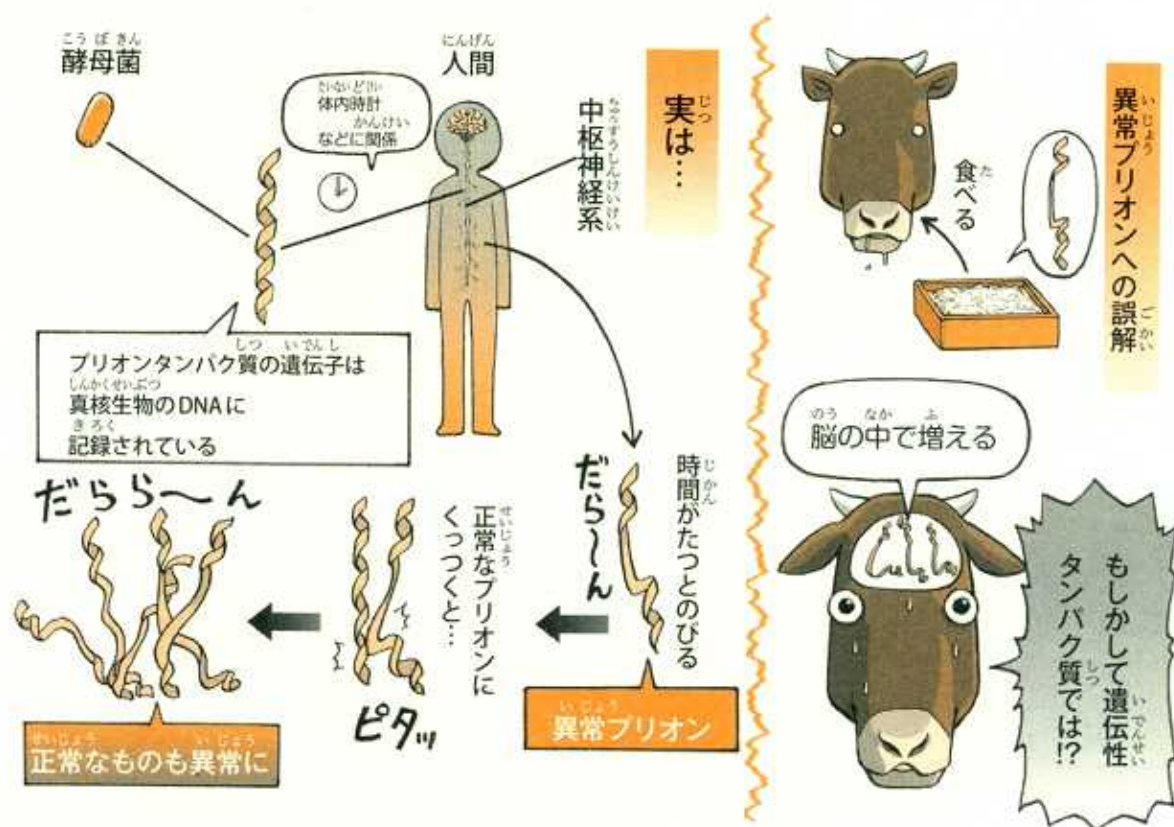
後にレトロウイルスが、RNAをDNAに逆転写して、そのDNAからRNAを作る形で複製することがわかりました。また40億年前のRNAワールドでは、RNAが自己複製していました。

しかし、自己複製するタンパク質というものは存在していませんでした。プリオンは、あたかも自己複製するゲノムのように振舞っていたので、遺伝性タンパク質かとも思われました。しかし、実はプリオンはゲノムではなく、自己複製するものでもありませんでした。

それなのになぜ、(異常)プリオンが増殖するのでしょうか。

### ゆるんだゴム

実はプリオンタンパク質そのものは、酵母菌から人間まで、真核生物に広く存在していることがわかりました。人間では神経細胞を維持したり、





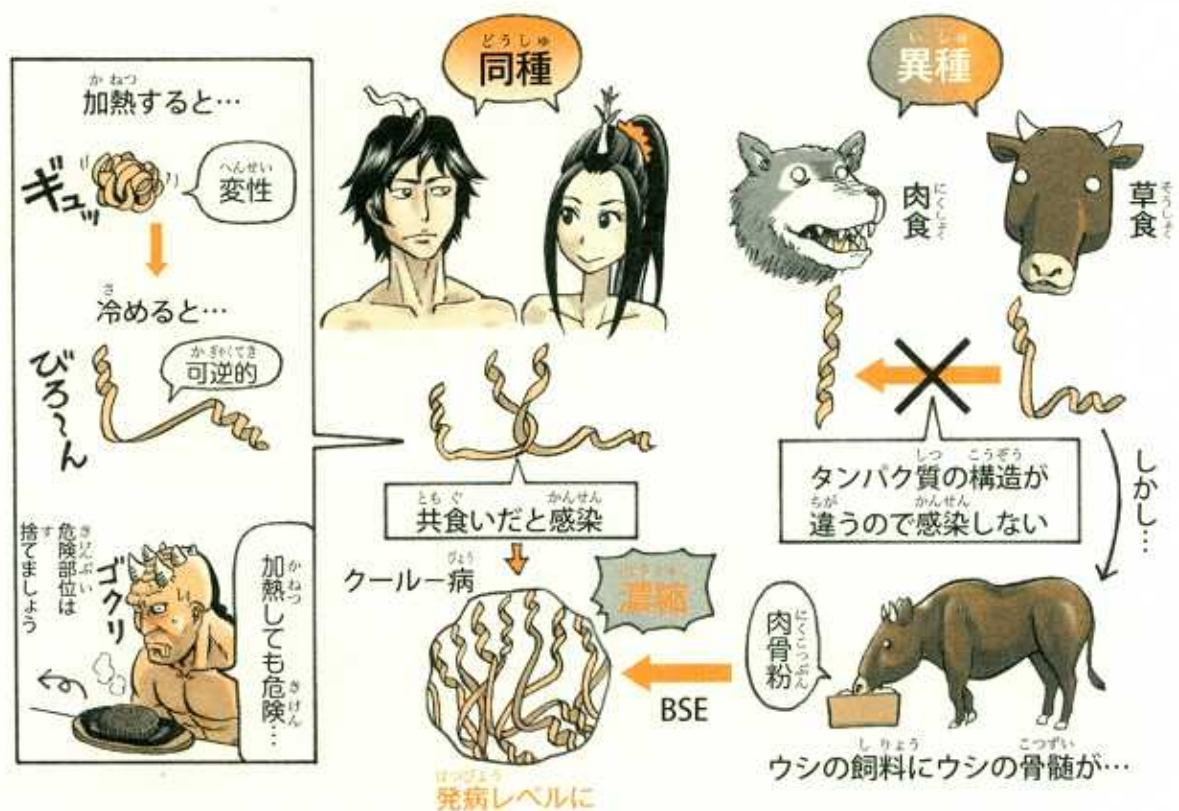
中枢神経系で体内時計の調節などに関わっている  
ので、神経の多い脳や脊髄に豊富にふくまれています。

プリオンの遺伝子は人間のDNA上にコードされています。DNAがプリオンを作るのであって、自己増殖するわけではありませんでした。

そして、作られたばかりのプリオンは正常なはたらきをしているのですが、時間がたつとプリオン分子の中にあるらせん状の部分が、のびたりボンのようになります。くたびれたゴムがゆるんてしまうようなもので、こうなるとプリオンは正常な働きができなくなります。

この異常プリオンがふつうのプリオンにくつくと、相手のプリオンもゴムのテンションがゆるんだようになり、異常になります。こうして異常プリオンが、正常なプリオンを変質させていくのです。

どんな動物でも生きていくかぎり、時間が経つ





につれて一定数の異常プリオンはできていくのですが、ふつうはそれが致死的な量になる前に寿命がきて死ぬので、プリオン病を発症するに至りません。また異常プリオンは、遺伝的に隔たった生物のプリオンとはタンパク質の構造が違いすぎるので干渉できず、感染しません。だから、プリオン病の草食動物を食べた肉食動物が感染することはありません。

しかし、同じ種の間で共食いが起こると、自然発生した異常プリオンが濃縮されて行き、発病レベルになります。BSEは、ウシの飼料としてウシの骨髄が含まれた骨粉を使ったことで濃縮が起こったのが原因です。

またクールー病は風土病で、現地では女子供の病気だと伝えられていました。クールー病の流行地域にはかつて人肉食の文化があったのですが、まずい脳は立場の弱い女子供の食べ物となっていたため、女子供が発病したからです。

そのため、プリオン病を予防するにはプリオンの多い脳や骨髄などは食用にせず、処分することが重要です。もちろん同種間や近縁種間での共食いを避けて、異常プリオンの濃縮を防ぐことは最も重要です。

### 無敵のプリオン

ふつうのタンパク質は、50℃から60℃ぐらいで分子構造が変わってしまい、そのまま戻りません。たとえば卵を熱するとタンパク質が固まってゆで卵になりますが、冷やしてもゆで卵はもとの卵に戻りません。これを、不可逆的なタンパク質の変性といいます。

細菌などが加熱すると死んでしまうのも、細胞を構成するタンパク質が不可逆的に変性するからです。それで、細菌や寄生虫に汚染されている食べ物も、加熱すれば安全に食べることができます。酵素も、体温（37℃）付近の温度でもっとも活



性が高くなるように設計されています。そのため、高熱によって酵素は破壊されてしまいます。

ただし、全てのタンパク質が熱で不活化するわけではありません。食中毒の原因になる細菌のタンパク質毒は、加熱しても壊れません。

BSEの異常プリオンも、熱で変性しますが可逆的で、冷めるとまたもとの異常プリオンに戻ります。したがって、たとえ肉をよく煮炊きしても、BSEの危険性には変わりありません。BSEの異常プリオンを不活性化するには、強酸性の薬品フェノールで処理する必要がありますが、これでは食用になりません。

そのためBSEの感染拡大を止めるには、異常プリオンの検査を行い、感染が明らかになった個体を焼却処分して異常プリオンの連鎖を断つこと。たとえ健康な動物であっても、経年によって検出されないほどの異常プリオンが発生しているため、それを摂取して濃縮しないよう、飼料用をふ

くめてプリオンタンパク質を多く含む脳や脊髄や骨髄は捨ててしまうこと。それらが肉を汚染しないように気をつけること。

日本では昔から、フグの有毒な部位を捨てて安全な部位だけ食べるという調理技術がありました。肉も同じように処理することで、安全に食べることができます。









## 9 遺伝子ダイジェスト〜人類の到達点

### 遺伝子のあゆみ〜遺伝学から染色体へ

子供が親に似ている、すなわち親から子供に形質が伝えられることは、「遺伝」と名づけられていました。

単細胞生物であるアメーバをまっふたつにしたとき、核があるほうだけが生きつづけます。また顕微鏡の発明によって、受精のときには精子と卵子の核が合体することも観察されました。こうして、生命と遺伝にかかわる物質は細胞の核の中にあると予想されました。

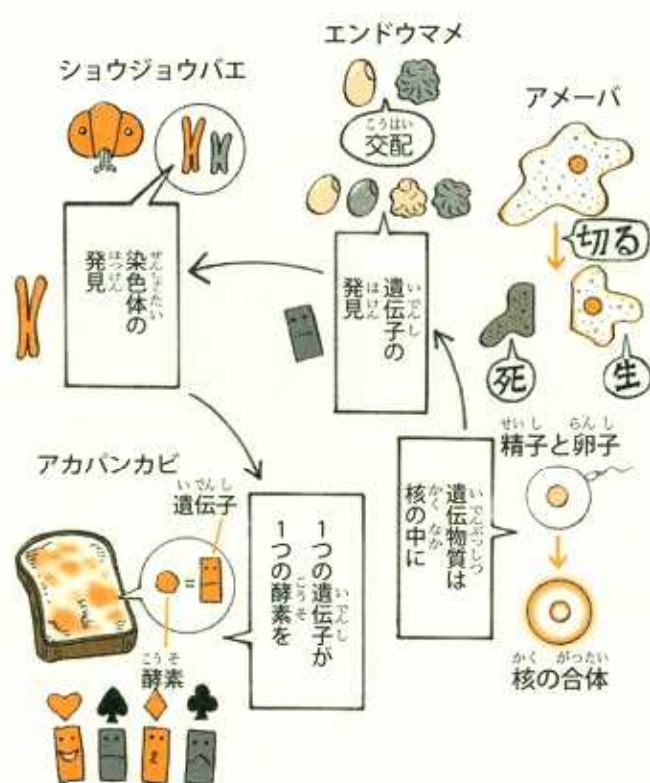
遺伝物質は交じり合う液体状のものだと考えられていましたが、1865年、メンデルがエンドウマメの交配によって遺伝子を発見します。これによって遺伝物質が独立して遺伝する粒子状の物

質であることがわかりました。

さらに核の中をよく調べ、1920年代、核の中にある染色体が遺伝子の正体だという染色体説が提唱されました。ハエの唾液腺の巨大染色体は染色体が合体してふつうの100倍の大きさになったものですが、それぞれの遺伝子は縞状の模様として見えます。そして遺伝子のはたらくとき、その部分の縞がふくらんでパフになります。モーガンは、さまざまな突然変異を持ったショウジョウバエを交雑させ、その組み換え価を計算して1933年、染色体地図を作りました。

さらに1945年にビードルとテータムはアカパンカビの栄養要求株を用いて、モーガンが突然変異の形質と遺伝子を関連づけたのに対し、アカ





発見のあゆみ

遺伝



それは親から子へ

パンカビの代謝酵素と遺伝子を関連づけました。こうして、遺伝子は酵素を記録し、1つの遺伝子は1つの酵素を記録しているという1遺伝子1酵素説が提唱されました。

### DNAのあゆみ〜ヌクレインからDNAへ

いっぽう、細胞がどのような物質から構成されているのかを調べていた人々もいました。

1869年にミーシャーは、膿にたくさんふくまれている物質を抽出し、細胞核物質（ヌクレイン）と名づけました。ヌクレインをさらに研究すると酸性の物質だったので、核に含まれている「核酸（ヌクレイック・アシッド）」という名前がつけられました。

そして核酸の化学組成がくわしく分析され、ヌクレオチドの塩基には4つの種類（A・T・G・C）があることがわかりました。

このころ、人々は遺伝物質がどのような科学物



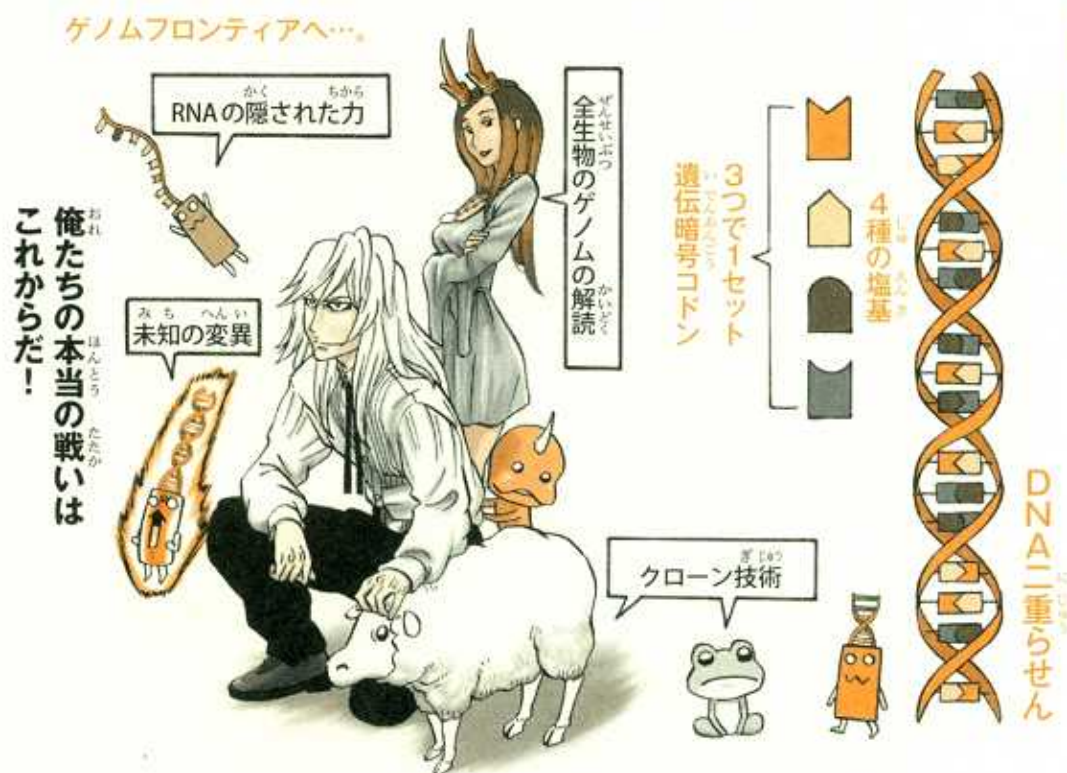
質なのか知りたいと思っていました。

しかし核酸はわずか4種類で、遺伝子を記録するには単純すぎるということで、20種類あるアミノ酸（タンパク質）が遺伝子の候補に挙げられていたのです。タンパク質は、細胞質の中のみならず核の中にも豊富に存在しています。

## めぐり違い・遺伝子とDNA

1928年のアベリー、1944年のグリフィスは、肺炎双球菌をさまざまな処理をしてからネズミに感染させ、病原性に関する物質がDNAなのかRNAなのかタンパク質なのかを調べました。これによって、肺炎双球菌に病原性を付与しているものがDNAであると証明されました。

これによって、遺伝子の正体はタンパク質ではなくDNAではないかと考えられるようになりました。それを力強く後押ししたのが、1953年のワトソンとクリックによるDNA二重らせんモ





デルです。

2人はDNAの分子構造を考え、4種の塩基の比率やX線解析写真から、AとT、GとCが対をなす二重らせん構造モデルを作りました。このモデルは、染色体の複製や娘細胞への分配、塩基配列により遺伝子の記録など、遺伝子のメカニズムを全て説明できるものでした。

DNA二重らせん構造の発見と、DNAが遺伝子であると証明されたことで、遺伝子DNAの研究は一気に加速しました。

1955年にはタンパク質のアミノ酸配列が解読され、翌56年にはDNAの人工合成に成功しました。

そして1965年に遺伝暗号（コドン）の解読が終わり、73年には遺伝子操作技術が開発されました。いっぽうクローン技術は、60年にカエルの、96年にヒツジの体細胞クローン作成に成功しました。

## ゲノムフロンティアとポストゲノム時代

広大なゲノムの荒野を歩く旅人にとって、染色体地図は非常に粗い地図です。フロンティアの旅には、もっと詳細なゲノムDNAの知識が必要です。

そこで1990年に、国際ヒトゲノム計画がスタートしました。これは日本を含めた先進国の科学者たちが協力して、30億塩基対という当時としては膨大なゲノムDNAを解読する計画でした。

しかし、計画半ばで暗雲が立ちこめます。遺伝子の塩基配列の特許を抑えて遺伝子治療などの利権を手に入れようとしたアメリカの新興バイオベンチャー企業が、正確性は二の次で大量にDNA解読装置を投入して、ヒトゲノムの解読を始めたのです。

この争いは結局2003年、国際ヒトゲノム計画がわの勝利で幕を閉じました。そしてその後、ポストゲノム時代が始まりました。



ポストゲノム時代に行われている主な研究は、様々な生物の全ゲノムの解読による遺伝子資源の記録、それらを分析することによる新たな遺伝子の発見、さらに遺伝子を記録していない部分のはたらきの解明があります。

また、二重らせんの発見からヒトゲノム計画までの50年はDNA研究の時代でしたが、ポストゲノム時代はRNA研究の時代になります。たとえば遺伝子を記録していないDNA領域から転写された、タンパク質にならないRNAが、遺伝子のはたらきに影響を与えています。遺伝学の基礎の基礎であるメンデルの優性の法則すら、このようなRNAによって遺伝子DNAが不活化されています。RNA干渉といって、RNAが標的とする伝令RNAを分解することで遺伝子の発現をおさえるシステムもあります。

逆に、リボゾームRNAの遺伝子は、大量のリボゾームを作るために数百〜数千コピーもあるの

ですが、その半数は、遺伝子としての機能を持っているのに遺伝子としては働かず、ジャンクDNAのようにゲノムを安定させる働きをしています。さらにポストゲノム時代には、各人の遺伝子変異をふまえたオーダーメイド医療の研究が進められます。今まで、薬など全ての患者に同じ量が与えられ、その薬が合わないマイノリティーは「一定確率での副作用の可能性」の一言で排除されてきました。しかし患者の遺伝子を調べることで、どんな人にも最適な副作用の無い治療法を選ぶことができます。

たとえば耳垢遺伝子ABCC11(124ページ)に変異があることが判っていれば、薬剤に感受性が強くふつうの量では副作用が出ることが予想されるので、そういう患者は投薬量を減らすなどの対処ができるのです。





俺達も  
鬼だった  
んだな...

桃姫よ...



祖先も... 遺伝子の  
材料も同じなのに...  
生物はなぜこうも  
受け継がれるものが  
違うのだろう...



鬼が持つて  
いるものを我々  
人類は無くして  
いたりするの  
だろうか...?



桃を拾いに  
きたの



...やれ

鬼退治を  
するがいい



私は鬼退治に  
来たんじゃないよ



|              |     |
|--------------|-----|
| ヒメマス         | 170 |
| 表皮細胞         | 141 |
| 日和見感染        | 117 |
| フェロモン        | 174 |
| 不活性化         | 126 |
| 不完全優性        | 129 |
| フグ           | 30  |
| 複対立遺伝子       | 129 |
| プラスミド        | 64  |
| プラスミドDNA     | 164 |
| プリオン         | 176 |
| プロウイルス       | 117 |
| プログラムド・セル・デス | 97  |
| プロテオバクテリア    | 87  |
| 分離の法則        | 122 |
| 分裂組織         | 137 |
| ヘテロ接合体       | 122 |
| 変異型          | 122 |
| ヘンリエッタ・ラックス  | 100 |
| ほくら          | 160 |
| ポストゲノム       | 185 |
| 哺乳類          | 25  |
| ホモ・エレクトス     | 71  |
| ホモ接合体        | 122 |
| ポリメラーゼ連鎖反応   | 154 |

## マ行

|            |         |
|------------|---------|
| マイコプラズマ    | 25      |
| マカロニコムギ    | 36      |
| マルバアサガオ    | 129     |
| マンモス       | 144     |
| ミーシャー      | 183     |
| ミジンコ       | 28      |
| ミツバチ       | 68      |
| ミトコンドリア    | 70,110  |
| ミトコンドリア・イブ | 71      |
| ミトコンドリア病   | 167     |
| ミュータント     | 122     |
| 無性生殖       | 64      |
| ムラサキイソカイメン | 146     |
| 冥王代        | 84      |
| メチル化       | 35      |
| メチル基       | 126     |
| メラニン合成     | 161     |
| メラノーマ      | 159,160 |
| メリステム      | 137     |
| 免疫         | 146     |
| 免疫T細胞      | 116     |

|       |     |
|-------|-----|
| 免疫抑制剤 | 147 |
| メンデル  | 120 |
| 網膜細胞  | 148 |
| モーガン  | 124 |
| モノソミー | 41  |
| 藻類    | 112 |

## ヤ行

|       |     |
|-------|-----|
| 野生型   | 122 |
| 有機酸   | 108 |
| 優性遺伝  | 124 |
| 優性遺伝子 | 121 |
| 優性の法則 | 121 |
| 優性ホモ  | 129 |
| 油滴構造  | 82  |
| 葉緑体   | 112 |
| 予定細胞死 | 97  |

## ラ行

|          |        |
|----------|--------|
| ラバ       | 38     |
| ラン       | 136    |
| リケッチア    | 108    |
| リボザイム    | 82     |
| リボソーム    | 82     |
| リボソームRNA | 32,186 |
| リボヌクレオチド | 79     |
| リン       | 88     |
| リンク      | 123    |
| 類似遺伝子    | 153    |
| 劣性遺伝     | 124    |
| 劣性遺伝子    | 121    |
| 劣性ホモ     | 129    |
| レトロウイルス  | 116    |
| 連鎖       | 123    |
| 老化       | 66,98  |

## ワ行

|          |     |
|----------|-----|
| ワイルド・タイプ | 122 |
| ワトソン     | 184 |



|           |          |
|-----------|----------|
| ストロビラ     | 67       |
| スライ遺伝子    | 42       |
| 性決定       | 54       |
| 性染色体      | 24       |
| 生態的地位     | 92       |
| 生長点       | 137      |
| 生命        | 82       |
| 生命工学      | 164      |
| 脊椎動物      | 25       |
| 接合型       | 66       |
| 節足動物      | 28       |
| 絶滅        | 91       |
| 先カンブリア時代  | 93       |
| 線形動物      | 28       |
| 染色液       | 24       |
| 染色糸       | 24       |
| 染色体       | 24       |
| 染色体異常     | 40       |
| 染色体地図     | 124      |
| 線虫        | 28       |
| セントラル・ドグマ | 87       |
| 臓器移植      | 146      |
| 双弓類       | 59       |
| 相同性       | 155      |
| 相同染色体     | 60,123   |
| ゾウリムシ     | 31,66,96 |

## タ行

|            |     |
|------------|-----|
| ダーウィン・フィンチ | 173 |
| ターナー症候群    | 42  |
| 体温調節機能     | 158 |
| 対合         | 123 |
| 体細胞クローン    | 142 |
| ダイダイイソカイメン | 146 |
| 大腸菌        | 25  |
| ダイマー       | 161 |
| 対立遺伝子      | 121 |
| ダウン症       | 40  |
| 滝          | 152 |
| 多細胞生物      | 25  |
| 種無しスイカ     | 37  |
| 単弓類        | 59  |
| 単細胞生物      | 25  |
| 男性ホルモン     | 26  |
| タンパク質性感染因子 | 176 |
| チミン        | 79  |
| チミンダイマー    | 161 |
| チミン二量体     | 161 |

|              |        |
|--------------|--------|
| 中生代          | 91     |
| 鳥類           | 29     |
| テータム         | 182    |
| デオキシリボ核酸     | 22     |
| デオキシリボヌクレオチド | 79     |
| デニソフ人        | 71     |
| テロメア         | 98     |
| テロメラーゼ       | 99     |
| テロメラーゼ活性     | 168    |
| 転移酵素         | 114    |
| 伝令RNA        | 85,186 |
| 独立の法則        | 122    |
| 突然変異体        | 124    |
| トランスポーゼ      | 114    |
| トランスポゾン      | 31,114 |
| トリソミー        | 40     |

## ナ行

|           |            |
|-----------|------------|
| ナメクジウオ    | 25         |
| ナリキンソウ    | 134        |
| 軟体動物      | 28,68      |
| ニッチ       | 92         |
| ヌクレイン     | 183        |
| ヌクレオチド    | 22,102,153 |
| ネアンデルタール人 | 71         |
| 稔性因子      | 65         |
| 濃度勾配      | 26         |
| ノックアウト法   | 152        |

## ハ行

|            |         |
|------------|---------|
| 肺炎双球菌      | 184     |
| バイオテクノロジー  | 164     |
| ハイギョ       | 30      |
| 胚珠         | 49      |
| 胚性幹細胞      | 149     |
| 爬虫類型哺乳類    | 59      |
| ハツカネズミ     | 25,130  |
| 歯の再生       | 148     |
| バル領域       | 42      |
| パンコムギ      | 36      |
| 万能細胞       | 146,149 |
| 反復配列       | 30,114  |
| ビードル       | 182     |
| ヒーラー細胞     | 100     |
| ヒ素         | 87      |
| ヒ素DNA      | 171     |
| ビタミンD      | 158     |
| ヒト人工多能性幹細胞 | 150     |
| 皮膚ガン       | 159     |



|               |           |                |        |
|---------------|-----------|----------------|--------|
| 核酸            | 78,183    | 甲殻類            | 28     |
| 隔世遺伝          | 124       | 好気性細菌          | 108    |
| 核相            | 22        | 光合成            | 112    |
| カクレクマノミ       | 52        | 光合成細菌          | 104    |
| カスケード         | 152       | 酵素             | 179    |
| カタツムリ         | 48        | 腔腸動物           | 93     |
| カドヘリン         | 146       | 後天性免疫不全症候群     | 116    |
| カブシド          | 105       | 国際ヒトゲノム計画      | 185    |
| ガラパゴス島        | 173       | 古細菌            | 94     |
| カルス           | 137       | 小麦             | 36     |
| 環境ホルモン        | 54        | コロイド           | 82     |
| 環形動物          | 28,93     | コンタミネーション      | 155    |
| ガン原遺伝子        | 160       |                |        |
| ガン細胞          | 100       | <b>サ行</b> 再生医療 | 148    |
| カンブリア爆発       | 93        | 細胞核            | 22     |
| 偽遺伝子          | 118       | 細胞核物質          | 183    |
| キロシヨウジョウバエ    | 124       | 細胞質            | 22     |
| 寄生性遺伝物質断片     | 65        | 細胞内小器官         | 70     |
| 旧口動物          | 68        | 細胞分化           | 140    |
| 狂牛病           | 176       | 細胞分裂           | 82     |
| 拒絶反応          | 146       | サケ             | 96     |
| グアニン          | 79,102    | 死              | 90     |
| クールー病         | 176       | シアノバクテリア       | 112    |
| クニマス          | 170       | ジェンバング         | 153    |
| 組み換え価         | 124       | 紫外線            | 158    |
| クラインフェルター症候群  | 44        | 色素             | 112    |
| クラゲ           | 67        | 自殺遺伝子          | 96     |
| クリック          | 184       | 歯髄             | 148    |
| グリフィス         | 184       | 始生代            | 84     |
| クルロタルシ類       | 59        | シトシン           | 79,102 |
| クロイツフェルト・ヤコブ病 | 176       | ジャンクDNA        | 186    |
| クローン          | 46,99,134 | 終止コドン          | 111    |
| クローン臓器        | 148       | 寿命             | 66     |
| クローンマンモス      | 144       | 娘細胞            | 34     |
| クロロフィル        | 112       | ショウジョウバエ       | 173    |
| 形質転換          | 164       | 常染色体           | 24     |
| 茎頂            | 137       | 植物クローン         | 136    |
| 血液型           | 129       | 自律神経           | 158    |
| ケッテイ          | 38        | 進化             | 90     |
| ゲノム           | 104       | 真核生物           | 25     |
| ゲノムサイズ        | 30        | 心筋シート          | 150    |
| 原核生物          | 25,94     | 神経細胞           | 148    |
| 原基            | 26        | 新口動物           | 68     |
| 嫌気呼吸          | 108       | 真正細菌           | 87,108 |
| 原人            | 71        | 水素結合           | 80     |
| 減数分裂          | 34        | スキフラ           | 67     |
| 恒温性           | 60        | スクレイビー病        | 176    |



## 英数字

|             |             |
|-------------|-------------|
| 1本鎖         | 105         |
| 2本鎖         | 105         |
| 6元素         | 88          |
| ABCC11      | 124,130,186 |
| ABO式        | 129         |
| AGC         | 79          |
| Boule       | 68          |
| BSE         | 176         |
| CCR5タンパク質   | 46          |
| DNA         | 22          |
| DNA重合酵素     | 154         |
| DNA捜査       | 155         |
| DNA増幅技術     | 88          |
| DNA増幅装置     | 153         |
| DNA二重らせんモデル | 184         |
| DNAポリメラーゼ   | 154         |
| ES細胞        | 149         |
| Foxl2遺伝子    | 43          |
| FOXL2タンパク質  | 44          |
| F因子         | 65          |
| GenBank     | 153         |
| GFAJ-1      | 87,171      |
| HIV         | 46          |
| iPS細胞       | 150         |
| OO型         | 42          |
| OY型         | 42          |
| PAR領域       | 42          |
| PCR法        | 88,154      |
| RNA         | 79          |
| SOX9遺伝子     | 43          |
| Sry遺伝子      | 42          |
| SRYタンパク質    | 43          |
| Tiプラスミド     | 164         |
| TSD         | 56          |
| XO型         | 42          |
| XXX型        | 44          |
| XXYYY型      | 44          |
| XXY型        | 44,128      |
| YYYY型       | 44          |
| YYY型        | 44          |
| X染色体        | 41,58       |
| YY122       |             |
| Y染色体        | 42,58       |

## ア行

|                    |     |
|--------------------|-----|
| アーキア               | 94  |
| アウストラロピテクス・アフリカーヌス | 71  |
| アカパンカビ             | 182 |

|           |        |
|-----------|--------|
| アカリオクロリス  | 112    |
| アグロバクテリウム | 164    |
| アサガオ      | 114    |
| アデニン      | 79     |
| アペリー      | 184    |
| アポトーシス    | 97     |
| アミノ酸      | 78     |
| アリマキ      | 68,140 |
| アリル       | 121    |
| アンチコドン    | 110    |
| アントシアン    | 114    |
| 異質倍数体     | 38     |
| 異常プリオン    | 176    |
| 一卵性双生児    | 134    |
| 遺伝子       | 120    |
| 遺伝子過剰     | 40     |
| 遺伝子銀行     | 153    |
| 遺伝子組み換え   | 164    |
| 遺伝子座      | 121    |
| 遺伝子治療     | 98,166 |
| 遺伝情報      | 22     |
| 遺伝物質      | 104    |
| イモリ       | 30     |
| インフルエンザ   | 154    |
| ウイルス      | 105    |
| ウイロイド     | 106    |
| ウラシル      | 79     |
| ウンシュウミカン  | 134    |
| 運搬RNA     | 85     |
| エイズウィルス   | 46     |
| エディアカラ生物群 | 93     |
| 塩基対       | 23     |
| エンドウマメ    | 120    |
| 大型草食動物    | 92     |
| 大型肉食動物    | 92     |
| オオサンショウウオ | 30     |
| オタマジャクシ   | 97     |
| オルガネラ     | 70,109 |
| オンコジーン    | 160    |
| 温度依存性決定   | 56     |

## カ行

|        |     |
|--------|-----|
| 海藻     | 112 |
| 解糖系    | 108 |
| カイメン   | 146 |
| カエル    | 30  |
| 化学合成細菌 | 104 |
| 核      | 22  |



【著者】

夏 緑 (なつ みどり)

京都大学大学院理学研究科博士課程修了。日本分子生物学会会員。宇宙作家クラブ会員。著書『遺伝子・DNAのひみつ』『遺伝子・DNAのすべて』(童心社)、『ウイルスと微生物がよ〜くわかる本』『病原体と免疫がよ〜くわかる本』(秀和システム)、漫画原作『獣医ドリトル』『こうすればがんは防げる』(小学館)、など多数。

真右衛門 (しんえもん)

マンガ家。著作は「ガチ博士のヤンキーラボラトリー」双葉社、「G組のG」講談社、「めもるは何もメモらない」「働き者がばかをみる」竹書房、など。

公式サイト <http://gachikun.web.fc2.com/index.html>

カバー・本文イラスト ● 真右衛門  
カバー・表紙 ● 小山巧 (志岐デザイン事務所)  
本文デザイン・DTP ● BUCH+

ファーストブック

いでんし でいーえぬえー

遺伝子・DNA がわかる

2011年11月5日 初版 第1刷発行

著 者 なつ みどり  
夏 緑  
しん えもん  
真右衛門

発行者 片岡 巖

発行所 株式会社技術評論社

東京都新宿区市谷左内町 21-13

電話 03-3513-6150 販売促進部

03-3267-2270 書籍編集部

印刷／製本 日経印刷株式会社

定価はカバーに表示してあります。

本書の一部または全部を著作権法の定める範囲を越え、無断で複製、複製、転載、テープ化、ファイルに落とすことを禁じます。

©2011 夏 緑、真右衛門

造本には細心の注意を払っておりますが、万一、乱丁(ページの乱れ)や落丁(ページの抜け)がございましたら、小社販売促進部までお送りください。送料小社負担にてお取り替えいたします。

ISBN978-4-7741-4834-2 C3045

Printed in Japan

本書へのご意見、ご感想は、技術評論社ホームページ(<http://gihyo.jp/>)または以下の宛先へ書面にてお受けしております。電話でのお問い合わせにはお答えいたしかねますので、あらかじめご了承ください。

〒162-0846  
東京都新宿区市谷左内町21-13  
株式会社技術評論社書籍編集部  
『遺伝子・DNAがわかる』係

H. KAMII

2012.4月

00-6435-2984