

# 原子・分子と巨視的物質

—放射線・原子力・核兵器に関係することを中心に—

## 目次

- § 0 人間は何をありえないことと思うか
- § 1 原子の発見—あらゆる物質は原子でできている
- § 2 電子の発見
- § 3 原子核の発見
- § 4 遠くて近いミクロの世界(量子の世界)
- § 5 原子・分子から巨視的物質へ
- § 6 酸素原子,酸素分子と活性酸素
- § 7 DNA—2重らせん構造—

## § 0. 人間は何をあり得ない/不思議と思うか

### 直観がおよぶ領域

われわれの眼は、(自然淘汰により)、  
長い電波を一端とし、短いX線を他端とする電磁波スペクトル  
のどこか中間にある狭い周波数領域(可視光と呼ぶ)に対応して作られている。

われわれの脳も狭い範囲の大きさや時間に対応して作られている。  
1-2メートルというわれわれの体の大きさが、想像できる大きさの  
ほぼ中間にあたるということは、たぶん意味があるだろう。

リチャード・ドーキンス「ブラインド・ウオッチメイカーー自然淘汰は偶然か?ー」  
(早川書房, 1994年), PP, 262-263

それ以外の(直観がおよばない)領域は

関心がないとするか、

不思議なこととして興味関心をもつか

という選択枝がある。

# § 1 原子の発見—あらゆる物質は原子でできている

## 古代原子論

紀元6世紀頃のギリシャ: 哲学者デモクリトス。

物質を無限にはこまかくできないと考えて、物質は形、大きさ、質量などをもっている硬い粒子からできていると主張し、これらの粒子をアトモスとなすけた。  
(ギリシャ語)アトモス=(それ以上は)分割できない。

The name atom comes from the Greek ατομος/átomos, α-τεμνω, which means uncuttable, something that cannot be divided further. The concept of an atom as an indivisible component of matter was first proposed by early Indian and Greek philosophers

アトモス: 物質構成の究極の要素

決して変化せず、消滅しない存在

→それが運動する場所として、「空虚(ケノン)」の存在も提唱

# 近代的な原子論

ドルトン: atom (原子)を初めて使用。

(化学反応における)

質量保存の法則と定比例の法則とが矛盾しないよう説明するため原子説を提唱。

1. 同じ元素の原子は、同じ大きさ、質量、性質を持つ。
2. 化合物は、異なる原子が一定の割合で結合してできる。
3. 化学反応は、原子と原子の結合の仕方が変化するだけで、新たに原子が生成したり、消滅することはない。

原子の要素性、同じ種類の原子の同一性(画一性)



ジョン・ドルトン

(John Dalton, 1766- 1844)  
イギリスの化学者、物理学者  
ならびに気象学者。

# ジャン・ペラン

(Jean Baptiste Perrin):フランスの物理学者。

樹脂の微粒子を液体に分散させその微粒子の運動(ブラウン運動)を顕微鏡で観察し、数々の実験から

**アボガドロ定数(1 mol中に含まれる粒子の個数  
( $6.02 \times 10^{23}$ 個/mol)のこと)**

を決定した。

それをLes Atomesとして1913年に出版して、物質が不連続な粒子(分子と原子の存在)からなることを実験的に証明した。

# 鉄腕アトム

手塚治虫氏の漫画「鉄腕アトム」は、原作だけではなく、近年、アニメーション作品としても世界的に知られている。2009年、米国でハリウッドで、CGにより再び作成されている。

理学博士でもある手塚氏の経歴を考えると、主人公アトムの語源は間違いなく、atom(原子)であり、アトムのエネルギー源は十萬馬力の原子力とされている。

現代的観点から考えれば、  
原子力(“atomic power”)とは原子核分裂エネルギーということである。

第二次世界大戦後の日本において、核エネルギーの受容の過程が、初期の手塚作品には反映されているという見方もある。

武田 徹「『核』論—鉄腕アトムと原発事故の間」、勁草書房、2002年。

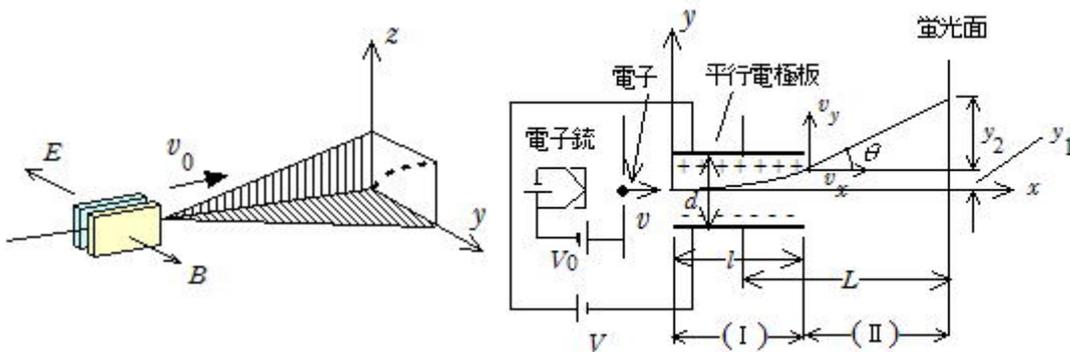
## § 2 電子の発見

J. W. Hittorf (1824 – 1914 ),ドイツ物理学者

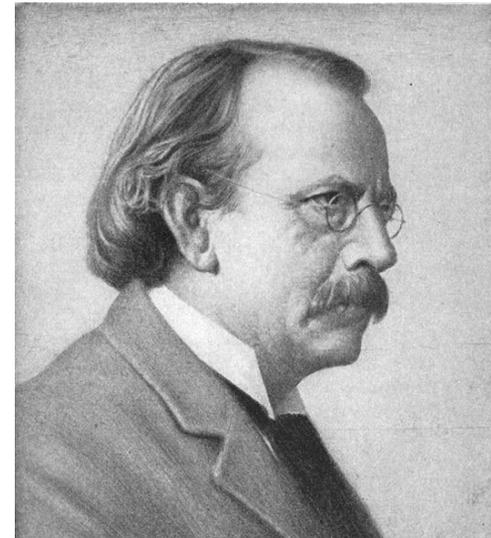
陰極線管(ガイスラー管、クルックス管)などの放電現象における陰極線の発見  
(=電子の流れ)

### トムソンの実験; 電子の電荷と質量比の決定

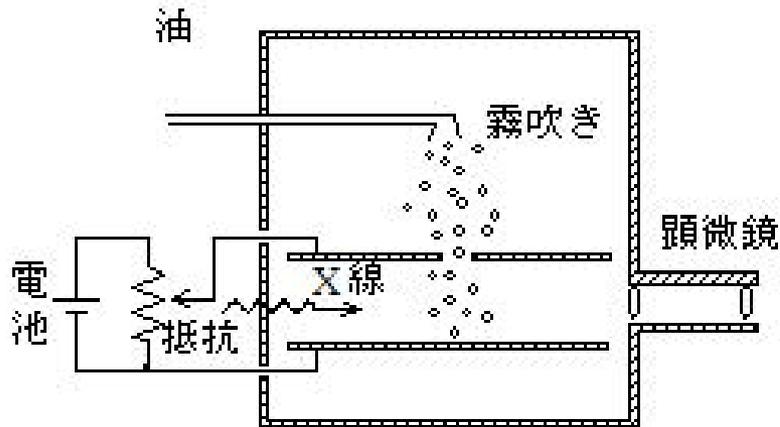
サー・ジョゼフ・ジョン・トムソン (Sir Joseph John Thomson, 1856-1940) は、イギリスの物理学者。しばしば「J.J.トムソン」と呼ばれる。1906年ノーベル物理学賞受賞。



$$\frac{e}{m_e}(\text{Thomson}) \approx 1.3 \times 10^{11} \text{ C/kg} \Leftrightarrow \frac{e}{m_e} = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$



# ミリカンの実験:電子の電荷の量子性(電荷の素量性)



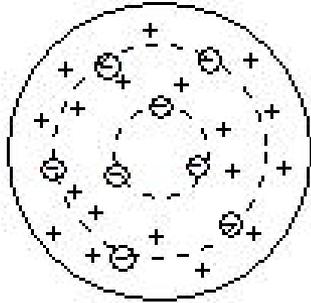
$$e(\text{Milikan}) \approx 1.59 \times 10^{-19} \text{ C} \leftrightarrow e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 0.91093897 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

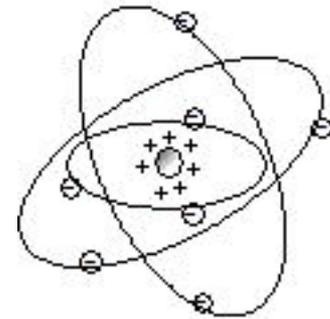
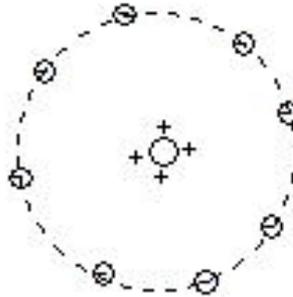
電荷の最少単位である。(基本粒子の1つである、クォークでは $e/3$ などの単位であるが。)

# § 3. 原子核の発見

トムソンの原子モデル

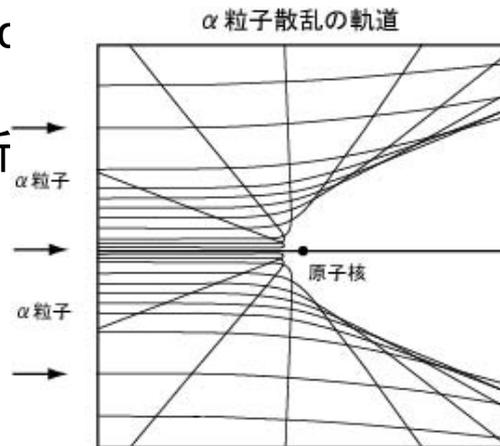


長岡半太郎の原子モデル



ガイガー・マースデンのα

ラザフォードによる分析

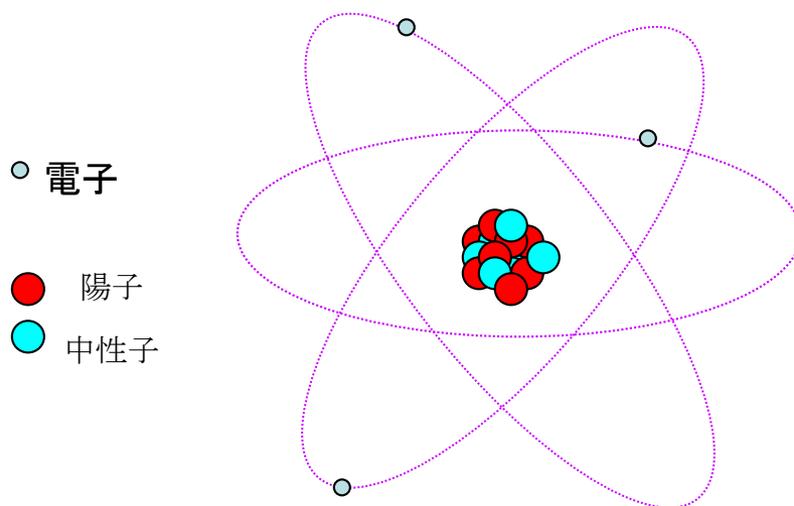


原子の「大きさ」=  $10^{-10}\text{m}$   
⇔ 原子核の「大きさ」=  $10^{-14}\text{m}$

(原子核から見ると) 原子は「大きい」、原子はかさばっている！

# 原子と原子核のイメージの虚実

過度に単純化された図



「電子が惑星のように、原子の周りをめぐっているというイメージは、意識からも、できれば無意識からも追いかけてもらいたい。完全に間違っているからだ。それはサイエンスフィクションといってもよく、すでに息の根を止められ、退けられた原子模型である。なぜ間違いかという、電子はよく知られた意味での粒子とは違って、波のような性質も持っているからである。」

P.アトキンス「ガリレオの指」(早川書房、2004年)、6章 原子、特にp. 180.

**原子核を構成している陽子、中性子は相互に接触しながら静止しているのではない！**

52 よく知られているように、ボーアはもっとずっと先まで進むことができた。実際、彼は水素原子のスペクトルを定量的に説明することができ、これは新しい考えの目ざましい成功であった。量子条件は古典物理にとってはまったく新しいものであった。加うるに、ボーアは水素原子の基底状態にある電子の運動は、電磁波の放射をしないという仮定をせねばならなかった。さもなければ、電子は古典電磁気学に従ってらせん運動をし、ごく短時間 ( $10^{-9}$ sec 程度) のうちに原子核にぶつかってしまう。

この原子の惑星理論は真面目にとってはいけない。実際それはまったく間違っている。水素原子という特別な場合にこの理論がうまくいったのは、幸運な(あるいは不運な)偶然によるものであった。幸運であるというのは、それがボ

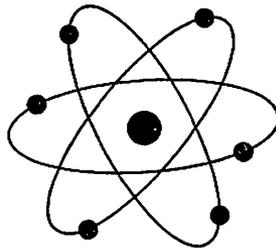


図 52A 原子時代のシンボル。これは原子構造とはまったく何の関係もない。このような形の図は、“原子”と何らかの関係のある会社、政府機関その他の組織のシンボルとして広く使われている。広告にはしばしば、非常に空想的な図が見られる。それには電子の非常な高速度が、蒸気の尾(おそらくエーテル中の蒸気の尾)のようなもので示されている。

それが単なるシンボルであると考えられるかぎりでは何の害もないが、誰かが誤解して、原子は実際にもこのように見えると信じ込む危険性が問題である。

ーアをはじめ他の人々の、原子の量子論をつくろうとする努力への励ましとなったからである。この理論のために誰かが、原子は惑星系に似ていると信じ込むとすれば、それは不運なことである。ボーア自身は愚かではなかった。彼は自分の理論を、今日存在するより完全な理論を探求するさいの中間的な段階にすぎないと見ていた。

# 原子核のイメージ

1. 原子を直径「1m」のボールとすれば、原子核は「0.1mm」の芥子粒程度の「大きさ」

原子の「大きさ」=  $10^{-10}\text{m}$  ⇔ 原子核の「大きさ」=  $10^{-14}\text{m}$

2. 原子の質量の99.9%が原子核に集中している。

電子質量 =  $0.9 \times 10^{-30}\text{kg}$  ⇔ 陽子・中性子の質量 =  $1840 \times$  電子質量

3. 原子核には正電荷が集中し、電子の負電荷を相殺している、

4. 原子核は超超高密度である。

原子核の密度は1立方センチ当たり、数十億トン

→ 核爆発: 超高密度の原子核のエネルギーの解放

→ 超高密度の原子核の崩壊(壊変)があると、放射能。

5. 原子の安定性の根拠は原子核の安定性にある。

原子核が不安定(放射性)であれば、原子は不安定

## § 4 遠くて近いミクロの世界

Q.なぜ原子は小さいか？

Q'なぜ細胞には多数の原子が含まれているか

Q.眼の驚くべき仕組み

Q.夜空の星はなぜ見えるか？

Q.&A. 物体の固さ(剛性)のミクロな原因はパウリ原理にある

Q.毎日食べる理由は何か？

A.身体構成元素の動的平衡

Q.脳細胞は3才以後は変化しない？

Q&A.水素原子がつぶれない理由は不確定性関係である。

# Q. 人間の身体は、原子に比べて、なぜ大きいのか？

## A1. 不精密度の量的目安( $\sqrt{N}$ 法則)

ある体積内の分子数 $N$

→ 誤差の大きさ $\sqrt{N}$

→ 相対誤差 (誤差率)  $= \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$

$N = 10^{12} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{100万} \Leftrightarrow$  突然変異の発生率

E.シュレーディンガー「生命とは何か」、岩波文庫、2,008年。Pp.36-37.

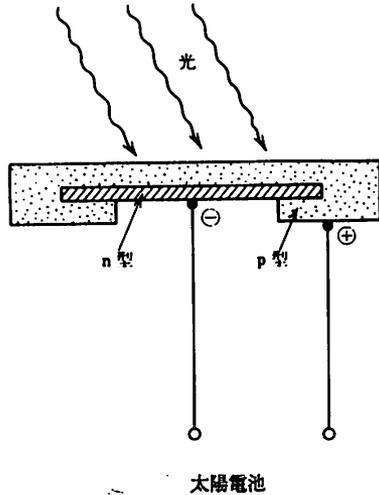
## A2. 不確定性関係の影響低減化

巨大分子→質量が大きいほど、不確定性関係の影響が無視できる

# 太陽電池

—光電効果の応用—

## 遠くて近い量子の世界



太陽電池は図に示すように二種類の半導体を張り合わせたもので、太陽の光があたると、ここから電子が飛び出すことを利用する。太陽からの光の振動数を $\nu$ とすると、その光子のエネルギーは $h\nu$ である。ここに $h$ はプランクの定数である。半導体中の電子は、この光子のエネルギーをもらって、外部に飛び出してくる。しかし飛び出すためには、 $\phi$ というエネルギー障壁を飛び超えなければならない（半導体中の電子も負のエネルギーの世界にあるわけである）。したがって、飛び出した電子のエネルギーは、エネルギー保存法則によって、

$$K = h\nu - \phi$$

となる。太陽電池に流れる電流は、この電子によるものであるから、あたる光の振動数が大きいほど電流は大きくなるわけである。

地球のまわりの空気層は、紫外線のような振動数の大きな光を吸収してしまう。したがって、太陽電池は、大気圏外で使用すると効率が良い。このため、はやくから、人工衛星の電源として使用されてきたのである。

半導体を作るのには、結晶を高温にすることが必要で、このための燃料費は高くつき、太陽電池

天国のインシュタインの言葉(?)

「太陽電池の会社の株を買っておくべきだった」

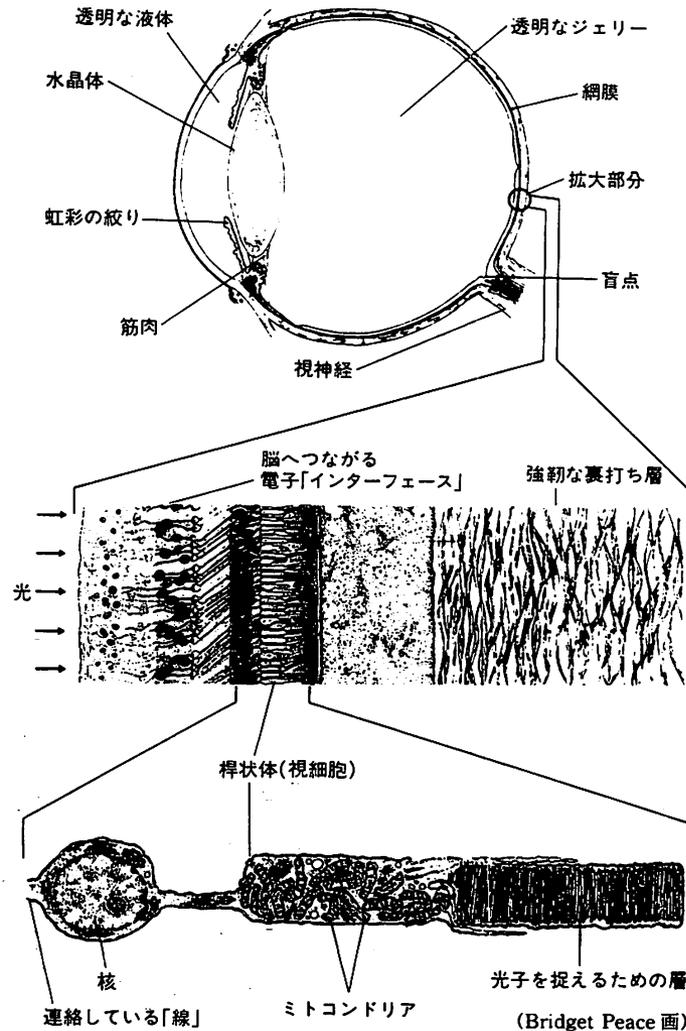
# 夜空の星はなぜ見えるか？

Ans. 「みつこ」(光子)さんのおかげです！

光が波動の性質しかもたないとすれば、遠い星から膨大な距離をあらゆる方向に伝播する際に拡散し、瞳に到達する際、視神経を物理的に刺激するのに十分なエネルギーを得るには相当な時間がかかるはず！

まとまったエネルギーを持つ量子的粒子(光子)として眼に入り、視神経を刺激するので、直ちに、夜空の星が見える！

# 眼球の中の光子を捉える層



光子を捉える  
ための層

図1

リチャード・ドーキンス  
「ブラインド・ウォッチメーカー—自然淘汰は偶然か?—(上)」  
(早川書房, 1994年, p.43)

# 同種の原子、分子の画一性と生物

**生物種の多様性:**豊富な種類の生物が存在し、同じ種類の生物でも個体ごとにどこか違う事実

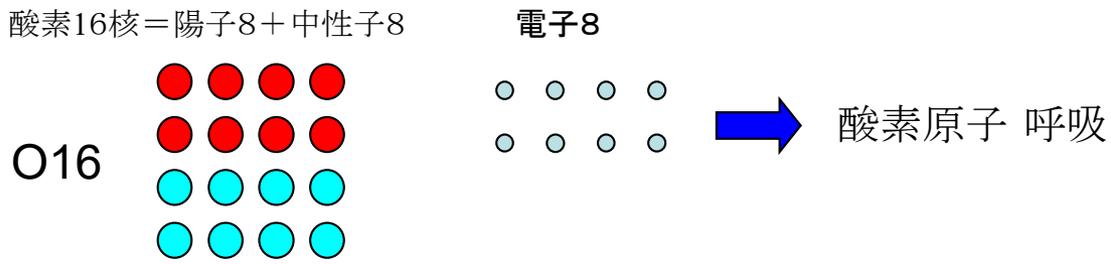
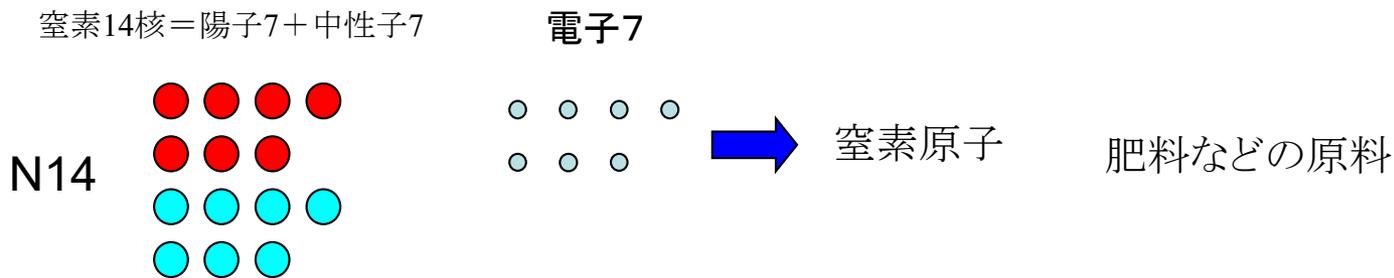
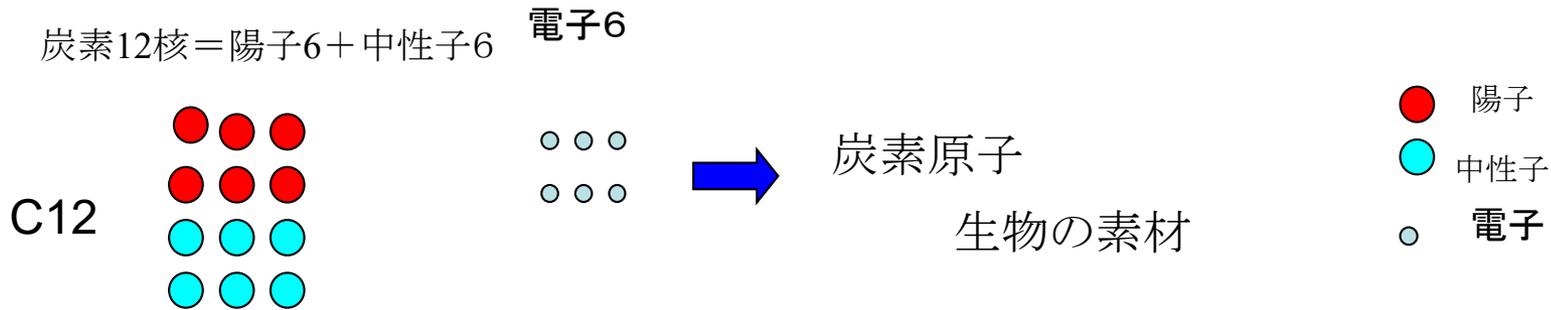
←炭素、水素、酸素、窒素などの原子から多様な巨大分子が作られることの反映。

**同種生物の類似性(遺伝の問題):** 量子の世界(原子、分子など)の同種の量子的粒子の画一性に基いている。

遺伝現象を司る材料DNAは、人間の場合、長さ2メートルほどの長さの二重らせんの巨大分子であるが、それが生物の内部で、自分自身の正確なコピーを作っていることに基づく。

原 康夫、「量子の不思議」、中公新書、1985年。

# 構成粒子の個数が少し変わると 物理的、化学的性質が大きく異なる



# 電子は人間のために働いている！

量子力学の原理は身の回りで貫徹している

材料や生物の基礎的仕組みとしての化学結合  
→パウリの排他原理は化学の法則の基礎である  
→ ゆえに生命の基礎である

電気や通信(エレクトロニクス)

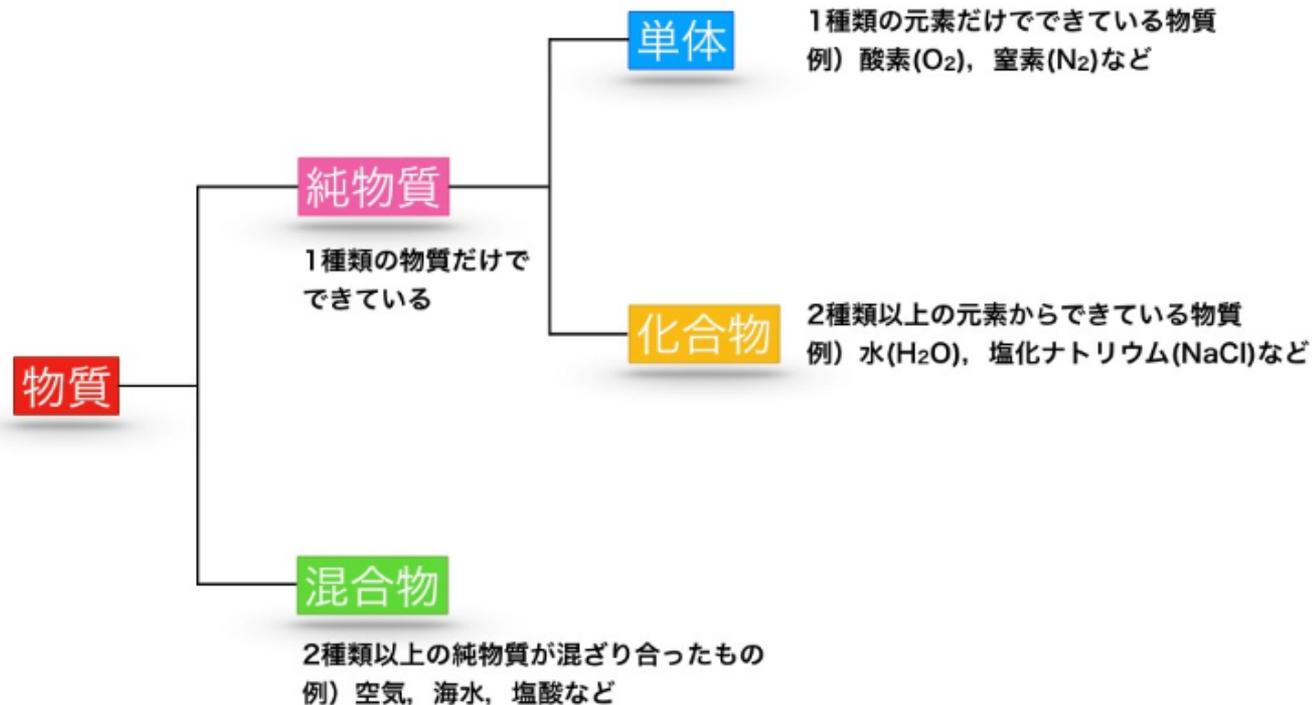
情報処理のコンピュータ

携帯電話はハイテクの塊

←電子の波動的性質、パウリの排他原理(量子力学、量子場理論)

# § 5 原子・分子から巨視的物質へ

## § 5.1 単体と化合物の違い



出典: <https://rikeilabo.com/simple-substance-and-mixture>

「純物質」は「単体」と「化合物」にわけることができるが、「分子をつくるもの」と「分子をつくらないもの」とわけることができる。

## § 5.2 単体の中で、分子をつくるものとつukらないもの

分子をつくるもの	酸素・水素・窒素・ハロゲン(17族元素)・希ガス(18族元素)などの <b>気体</b>
分子をつukらないもの	鉄・銅・銀・マグネシウムなどの <b>金属、炭素、硫黄</b>

### ＜分子をつくるもの、つukらないものの見分け方＞

分子をつくるものの例として、水(H<sub>2</sub>O):

この分子はH—O—Hのように実際に原子が結合していて、水はH<sub>2</sub>Oの分子が1つの水分子の粒として働いている。水分子と水分子の間は分子間力という分子をつくる時の原子同士の結合よりも弱い力で引きあっている。

分子をつukらないものの例としては、塩化ナトリウム(NaCl):

これはナトリウムイオンと塩化物イオンがたくさん交互に並んで結晶の粒をつくっている。

→分子をつくるもの、つukらないものの違いは「ここまでが1つの単位(分子)」という区切りがあるかないかということ。

## § 5.3 同素体とその性質

- 同素体(どうそたい、英語: allotrope、allotropism)とは、同一元素の単体のうち、原子の配列(結晶構造)や結合様式の関係が異なる物質同士の関係をいう。
- 同素体は単体、すなわち互いに同じ元素から構成されるが、化学的・物理的性質が異なる事の特徴とする。
- 多くの同素体は安定した分子として存在し、相転移(気体、液体、固体)しても化学形は変化しない(例:  $O_2$ 、 $O_3$ )。しかし、プルトニウムは例外的に温度により異なる同素体に変化する。
- 典型的な例:
  - 1) ダイヤモンドと黒鉛(グラファイト):

炭素の同素体である両者は硬度以外にも、透明度や電気伝導性が大きく異なるが、これはダイヤモンドの分子(正四面体の格子)とグラファイトの分子(平面的な六方格子の層)の構造に大きな違いがあるためで、物性における分子構造の重要性を示す例となっている。
  - 2) プルトニウム:

常圧下で、通常6種類( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ 、 $\delta'$ 、 $\epsilon$ )、高温下の限られた圧力範囲で生じると相を含めて7種類の同素体を持ち、加工処理を複雑にしている。

## § 5.4 プルトニウムガリウム合金とその核兵器における利用

・金属プルトニウムはさまざまな同素体を持つが、その中で $\delta$ 相は密度が最も低く加工性も良好である。 $\delta$ 相は常圧では310 - 452 °Cで現れ、それより低温では熱力学的に不安定であるが、他の金属元素を少量加えて合金にすると安定させることができる。その中でも優れた特性を持つのがモル濃度3.0 - 3.5% (重量パーセント濃度では0.8 - 1.0%) のガリウムを添加したPu-Ga合金である。

・Pu-Ga合金の実用上の大きな利点:

1) 熱力学的安定性が向上する

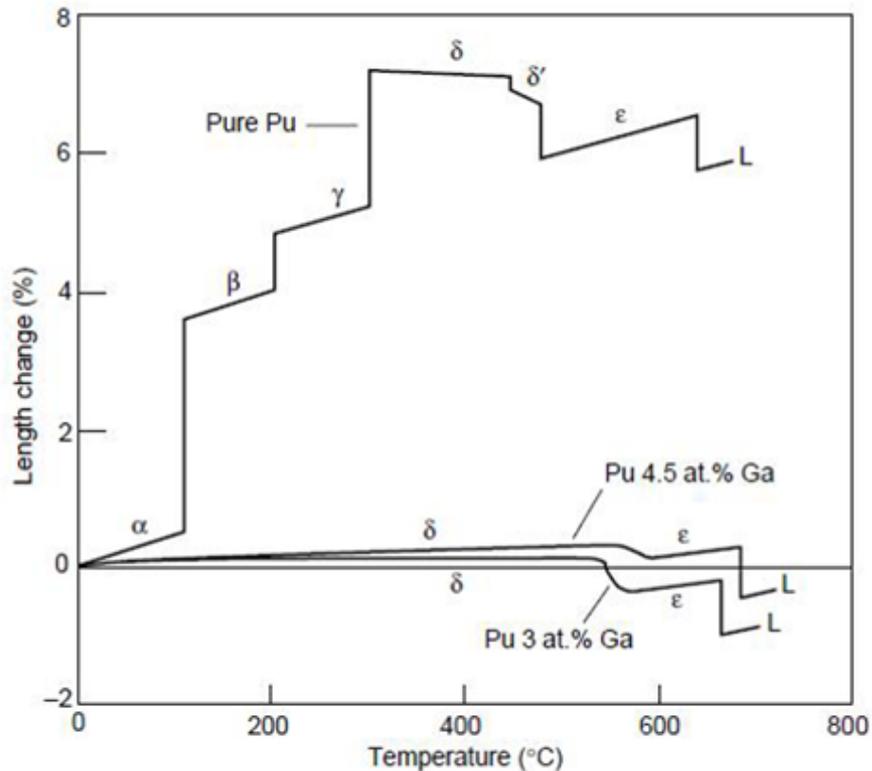
・・・  $\delta$ 相が -75 °Cから 475 °Cの範囲でほぼ安定になる

2) 熱膨張係数が小さい・・・加工時の熱変形や温度による歪みが少ない

3) 腐食に対する感受性が小さい・・・腐食速度が純プルトニウムの4%程度になる

4) 固体の方が低密度のため、鑄造性がよい・・・固化の際に膨張するため気泡や鬆(す)が入りにくい

出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』**プルトニウムガリウム合金**



プルトニウム-ガリウム合金の利点。縦軸は長さの変化率、横軸は温度を表す。

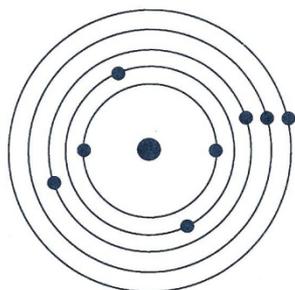
出典：Greg Jones、Reactor-Grade Plutonium and Nuclear Weapons: Exploding the Myths, February 20, 2018。Nonproliferation Policy Education Center.

<http://www.npolicy.org/thebook.php?bid=37>

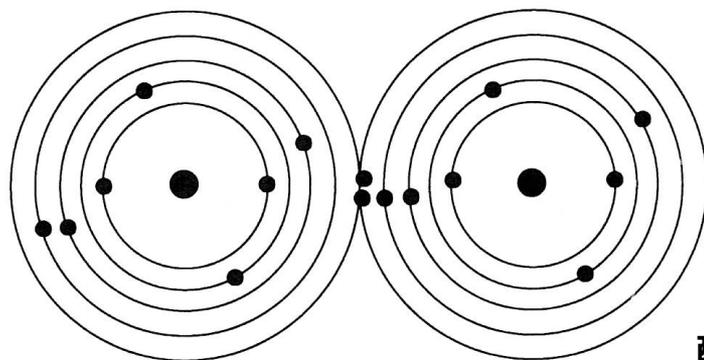
## 核兵器での利用

- ・初期の核兵器(第二次世界大戦中の米国マンハッタン計画)では、 $\delta$ 相のPu-Ga合金をいったん管状に成形し、その後、約 400 °Cで熱間圧接してピット(pit, 核分裂兵器の中心部)を製造していた。
- ・現在ではピットは鑄造されており、臨界前核実験により性能は製法によらず同等であることが示されている。Pu-Ga合金では冷却時に $\epsilon$ 相から $\delta$ 相への転移しか起こらないため、純プルトニウムを鑄造するのに比べ問題が起きにくい。
- ・それでも $\delta$ 相Pu-Ga合金は熱力学的に完全に安定なわけではなく、経時変化の懸念がある。これは各相の密度が大きく異なるため、体積変化が問題になるからである。特に、115 °C以下ではプルトニウムが $\delta$ 相から $\alpha$ 相に転移して体積が縮むため、これに伴って機械的損傷や構造が破壊されたり対称性が失われたりすることは極めて重大な問題となる。なお、ガリウムのモル濃度が4%以下の場合には圧力による相転移は不可逆的になる。
- ・一方で相転移による体積変化は核兵器を起爆させる際には便利である。  
核分裂反応が始まり、Pu-Ga合金が $\delta$ 相から $\alpha$ 相に転移すると体積が25%縮み、臨界に達しやすくなるからである。  
(体積が縮むということはPu原子同士の距離が狭まることを意味し、核分裂反応で発生した中性子が他のPu原子に当たりやすくなるからである。)

# § 6 酸素原子、酸素分子と活性酸素

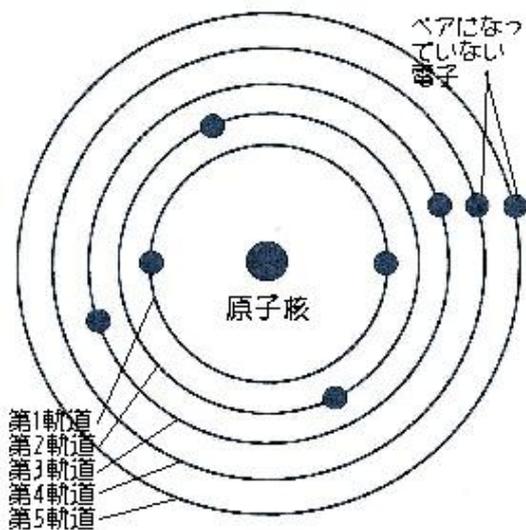


酸素原子 電子が非常に不安定な状態の原子



酸素分子

Oが二つ組み合わさってO<sub>2</sub>という分子になると、電子的に安定する



酸素の分子構造

第1軌道～第3軌道は電子が2つずつ入っている。  
第4、第5軌道はいずれも電子が1つしか入っていない。  
これは電子的に不安定な状態であることを意味する。

酸素は分子であるから、この状態の原子がすぐ隣に存在し、第5軌道を共有して電子同士がコンビを組むことで安定しようとする。

つまり第5軌道が8の字の状態になって安定する。

出典

<http://www.geocities.jp/kawa2dc/kasseisanso.htm>

# 活性酸素の種類

酸素の分子構造で説明したとおり、酸素分子は安定した電子の対ができています。ただし第4軌道の電子だけは対を作ることができず、不安定な状態になっている。そこで第4軌道の電子は安定しようと他の電子を狙っている。

そして酸素は

- ①片方の酸素原子の第4軌道にのみ外部から電子1つを取り込む
- ②両方の酸素原子の第4軌道に外部から電子を1つずつ取り込む
- ③一方の酸素原子の第4軌道に他方の酸素原子の第4軌道をまわっていた電子が入り込む
- ④酸素分子が分裂して両原子の第5軌道に1つ電子(水素)が入り込む  
の4つの行動パターンをとります

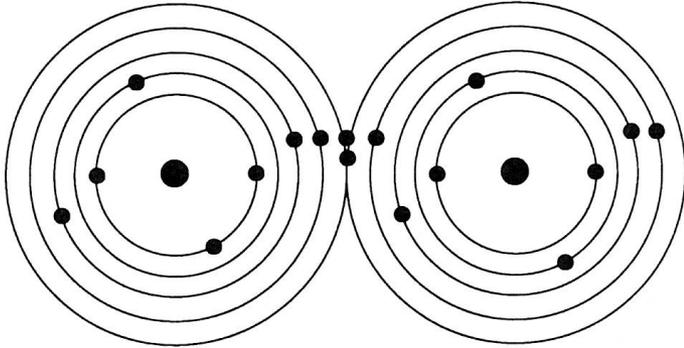
以上のパターンによって、つぎのような活性酸素が発生する:

- ①スーパーオキシドラジカル
- ②過酸化水素
- ③一重項酸素
- ④ヒドロキシラジカル

出典 <http://www.geocities.jp/kawa2dc/kasseisanso.htm>

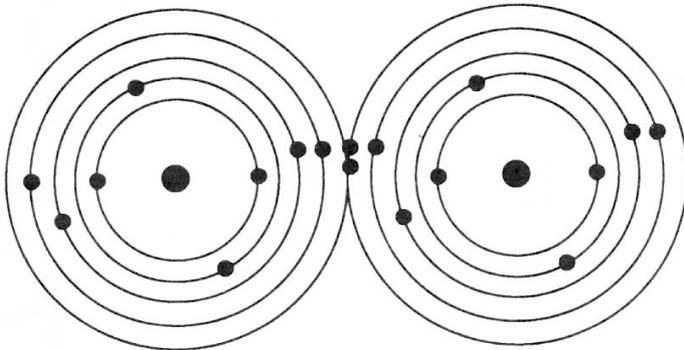
# 活性酸素の性質

## ①スーパーオキシドラジカル



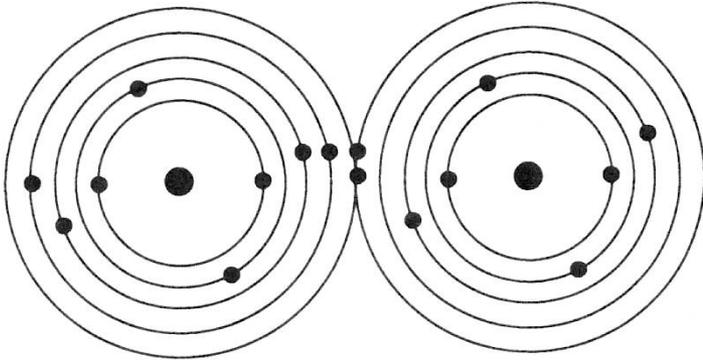
食べ物をエネルギーに変えるミトコンドリアという細胞内器官で生成される。  
ミトコンドリアがエネルギーを作るときに電子を1つ放出する。その電子を奪い取った酸素がこのスーパーオキシドラジカルになる。人の体内でもっとも多く発生する活性酸素である。

## ②過酸化水素



酸素分子を構成する2つの酸素原子の4番目の軌道にそれぞれ1つずつ電子が飛び込んだもの。したがって不対電子は持っていない。ラジカルではないが、わずかなきっかけで不対電子が登場してしまうという不安定な性質を持っているため、活性酸素の仲間に入れられている。

### ③一重項酸素

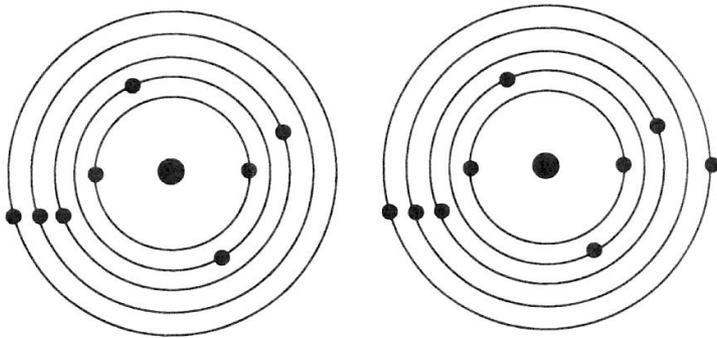


第4軌道1つが空っぽになってしまったもの。

非常に強い酸化力を持っている。

紫外線などによってお肌や体内に発生するのが特徴  
皮膚ガンはもとよりさまざまなガンの原因になる非常に悪質な活性酸素

### ④ヒドロキシラジカル



酸素分子を作っている2つの酸素原子が分離してしまい、それぞれの5番目の軌道に電子が1つ飛び込んだ活性酸素。

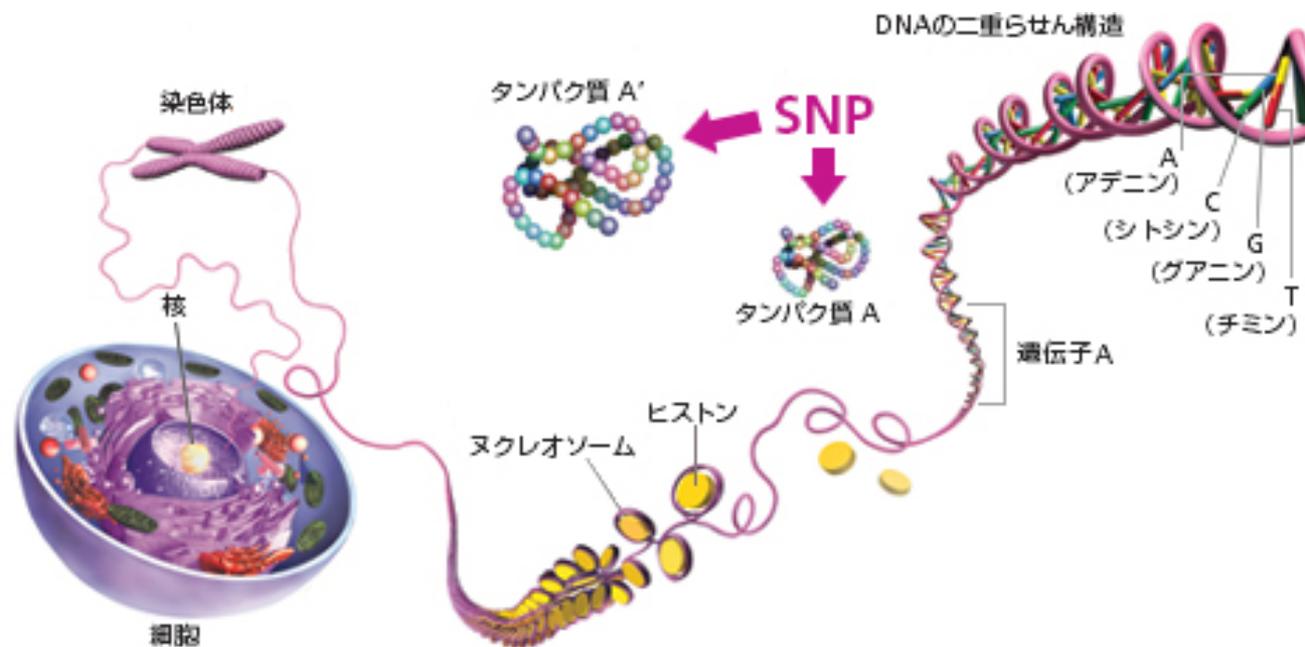
過酸化水素が金属イオンと反応した際に発生する。

このヒドロキシラジカルはもっとも酸化力が強い活性酸素である。それだけにガンや各種成人病、老化の引き金となる率がもっとも高いといわれている。ただし、存在するのは百万分の一秒といった極めて短い時間です。

出典 <http://www.geocities.jp/kawa2dc/kasseisanso.htm>

ラジカル (radical) は、不対電子をもつ原子や分子、あるいはイオンのことを指す。フリーラジカルまたは遊離基(ゆうりき)とも呼ばれる。

## § 7 DNA—2重らせん構造—



遺伝情報はDNAの塩基配列によって書かれている。遺伝情報はすべての人が同じではなく、個人ごとに違っている部分がある。個人ごとの塩基配列の違いを「遺伝子多型(いでんしたけい)」と呼ぶ。多型にはいろいろな種類があるが、1塩基の違いをSNP(スニップ: single nucleotide polymorphism、一塩基多型)という。

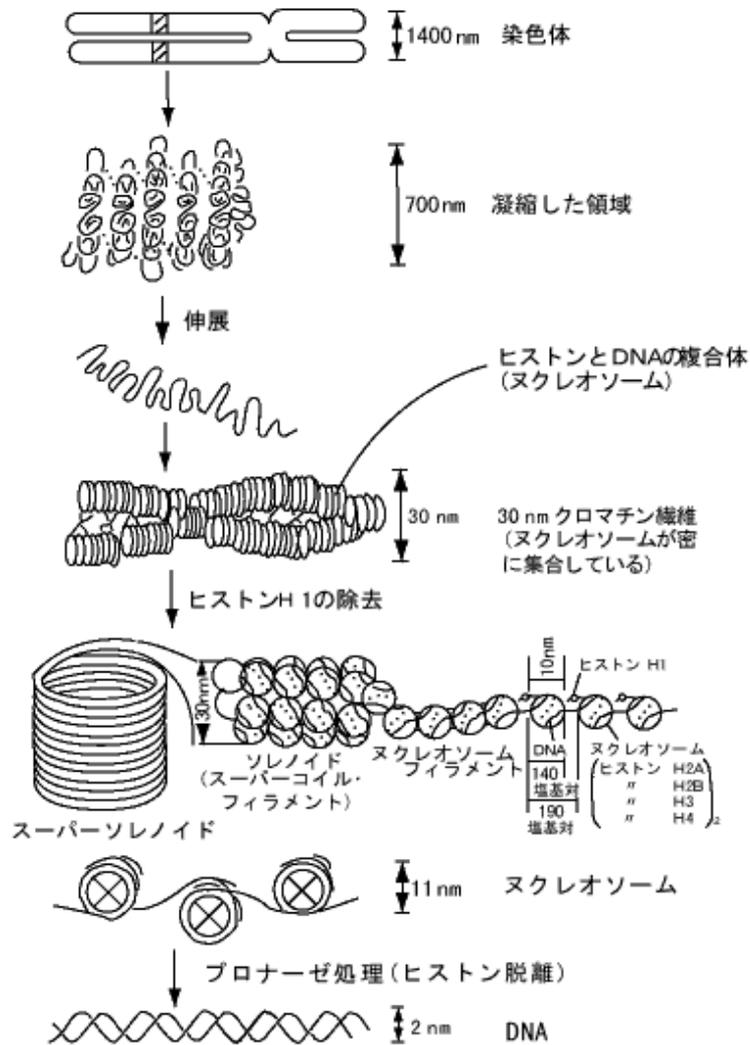
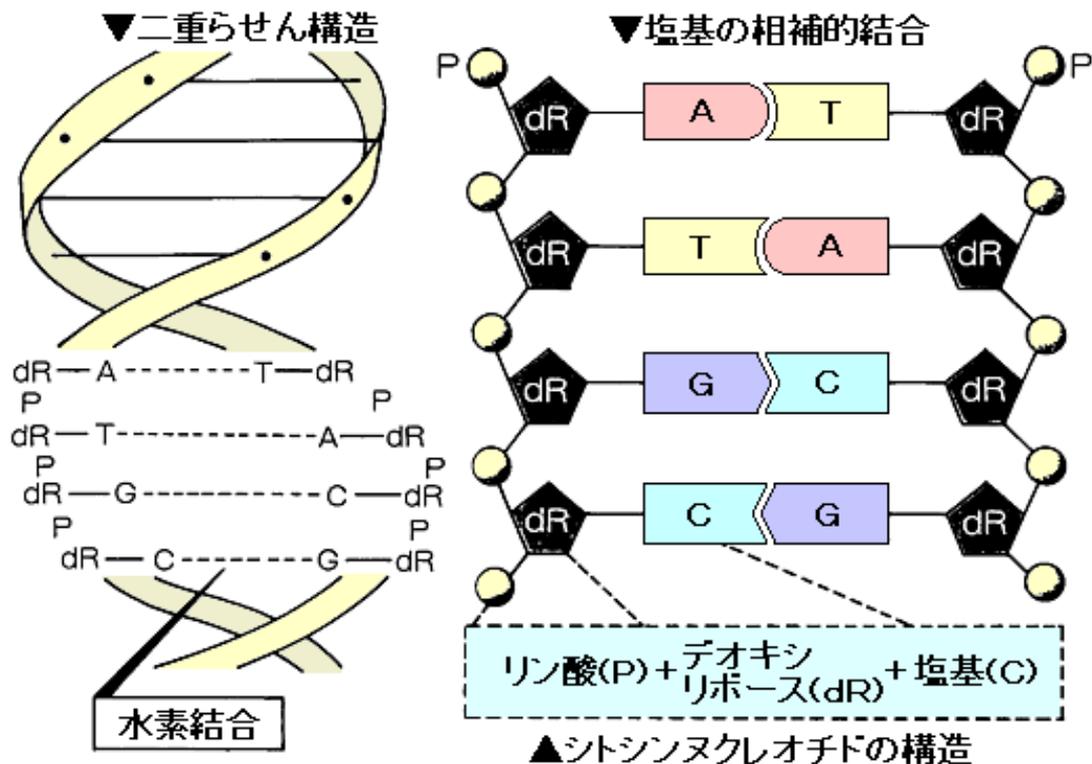


図1-8 染色体の構造とDNAの関係(堀田ら, 1989), (荒木ら, 1991)

「基礎遺伝学」(黒田行昭著;近代遺伝学の流れ)裳華房(1995)より転載  
 出典 [http://www.nig.ac.jp/museum/history/06\\_c.html](http://www.nig.ac.jp/museum/history/06_c.html)

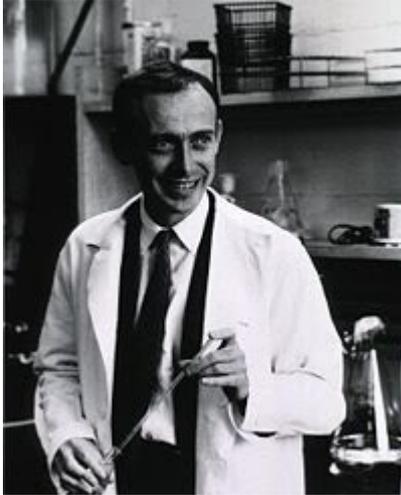


DNA塩基の相補的結合 - A(アデニン)とT(チミン)、C(シトシン)とG(グアニン)間でのみ起こり、一方の塩基配列がきまれば、相手の塩基配列がきまる。

## 図1 DNAの二重らせん構造

[出典]水野 丈夫(編):理解しやすい新生物、文英堂

# DNAの2重らせん構造の発見者



ジェームズ・デウィー・ワトソン (James Dewey Watson, 1928) DNAの分子構造における共同発見者、アメリカ出身、分子生物学者。ワトソン及び、フランシス・クリック、モーリス・ウィルキンスらは、「核酸の分子構造および生体における情報伝達に対するその意義の発見」に対して、1962年にノーベル生理学・医学賞を受賞した。

出典

<http://media.photobucket.com/image/james%20watson/bhieolet/jameswatson.jpg?o=6>



フランシス・ハリー・コンプトン・クリック (Francis Harry Compton Crick, 1916 - 2004) はイギリスの分子生物学者。DNAの二重螺旋構造の発見者。

出典

[http://images.search.yahoo.com/search/images?\\_adv\\_pro p=image&fr=yfp-t-701-s&sz=all&va=francis+crick](http://images.search.yahoo.com/search/images?_adv_pro p=image&fr=yfp-t-701-s&sz=all&va=francis+crick)