

Nara Women's University

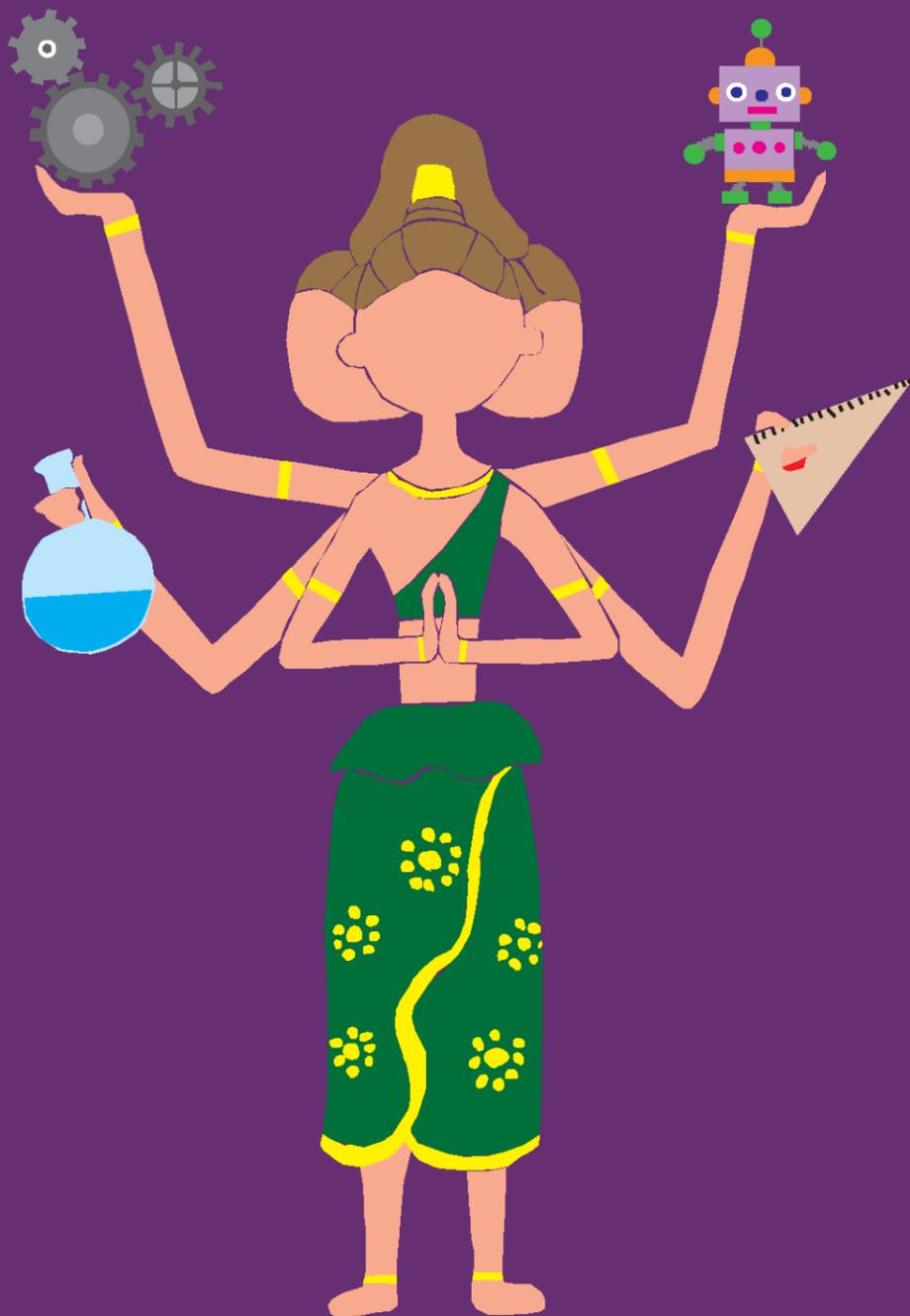
身近な物質の話

メタデータ	言語: 出版者: 公開日: 2021-08-10 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 寺内, かえで メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10935/5617

LADy SCIENCE BOOKLET

19

身近な物質の話 寺内かえで



CORE of STEM 2017

身近な物質の話

寺内 かえで

目次

第1章 物質の科学を学ぼう	1
§1-1 物質の科学の特徴	1
§1-2 人類と物質の関わり合いの歴史.....	2
§1-3 原子の大きさのイメージ	5
§1-4 地球における元素の存在度.....	7
§1-5 無限の種類 of 物質をもたらす化学結合.....	12
第1章 章末付録.....	16
第2章 水.....	23
§2-1 水のおもしろい性質.....	23
§2-2 水の分子構造.....	29
§2-3 天然の水.....	36
§2-4 飲料水.....	44
§2-5 世界の水事情.....	47
参考事項.....	49
第3章 食べ物	50
§3-1 3大栄養素	50
§3-2 代謝とは何か.....	61
§3-3 栄養摂取の方法	69
第4章 薬.....	70
§4-1 薬はどうやって効くか.....	70
§4-2 タンパク質の立体構造と医薬品.....	73
§4-3 受容体と結合する物質	74
§4-4 医薬品等についての情報の利用.....	75

第1章 物質の科学を学ぼう

§ 1-1 物質の科学の特徴

物質の科学は、高等学校までの科目名で言えば「化学」である。「化学」はおそらく高校生には暗記科目として分類され、そのために、物質の科学を理解するための基本的な概念については考えることもなく履修し終えたのではないだろうか。最近見た教養向けの教科書『教養としての化学入門 ―未来の課題を解決するために』（2016年，化学同人）¹から、化学の特徴として非常にコンパクトにまとまった記述があったので紹介したい。

- ①私たちが目で見ることができるものは、何兆もの原子を含んでいる。一方、原子は肉眼で見ることができないことができないくらい小さい。
- ②反対電荷は互いに引き合う。
- ③化学反応は電子の交換、或いは再配列にすぎない。
- ④周期表の同じ族の元素は、ふるまいがよく似ており、同じような特徴を示すことが多い。
- ⑤各炭素原子はほとんどの場合、他の四つの原子と結合するので、炭素を含む物質、つまり有機化合物の構造は予測できる。
- ⑥原子間のそれぞれの結合は、その結合を含む物質の特性と特徴を示す。
- ⑦人間が利用するために地球が供給できる原料は限られている。

上記の特徴④と⑤には、筆者が下線を加えた。その理由は、化学の特徴の一つである、各論の科学として、必ず原則（特徴）だけではなく、例外があることをよく言い表している表現だからである。「やってみないとわからない」これこそが、化学という分野の面白さであると思うが、この例外に右往左往されることなく、まずは、原則としての特徴を理解し、そういった見方でもう一度高校の教科書を見直すと化学のイメージも変わってくるかもしれない。

このテキストでは、「水」「食べ物」「薬」に主題を絞った。そして、いわゆる「化学」の分野に限定することなく、これらの主題を生活や社会という文脈の中で見ていきたい。いきなり主題に入る前に、ウォーミングアップ及び復習として、「人類と物質の関わり合いの歴史」「原子の大きさのイメージ」「地球における元素の存在度」「無限の種類物質をもたらす化学結合」といった基本的かつ共通的な内容についてこの章では扱う。

¹ この教科書は、米国で発行された“21st Century Chemistry” (2014, W. H. Freeman and Company, Kimberley Waldron, Regis University)の日本語訳である。原書は、米国コロラドで企画され、大学等で化学教育に携わる人たち、そして物理的に比較的近い距離にいる人たちが、アットホームな会合を積み重ねて作られたそうである。

§ 1-2 人類と物質の関わり合いの歴史

私たちの祖先は、数万年以上前から火を使って調理をしていた。生(なま)の食材に火を通して化学変化を起こさせ、自らにとって好ましい食べ物を作った。この調理はまだサイエンスとは言えないが、立派なテクノロジーであり、私たちの祖先が随分初期から化学に親しんでいた一つの証拠である。

紀元前 6 世紀から紀元前 2 世紀、古代ギリシアでは、経済的に余裕があり時間的な余裕もある市民階級の人たちによって、自然哲学と称される「サイエンス」の源流ともいえる学問が発展した。自然哲学を担っていた人たちは、「万物の根源とは何か？」ということに深い関心を持っていた。根源を何と考えるかにより様々な説が提唱された。このような哲学的思索の流れの中で、紀元前 5 世紀頃の自然哲学者デモクリトスはこれ以上分割し得ないものとして「アトム（ギリシア語で分割できないものの意の *atomos* に由来）」という概念を提唱した。もちろん、頭の中だけで考えた概念である。

「錬金術」というジャンルも、人類の文明の早い時期から誕生し、長い時代継続した。錬金術は、金属を金や銀などの貴金属に変化させたり、不老不死の万能薬を製出したりすることなどを目的としていたため、非科学的と捉えられる面が強調される。しかし、千年を超える長い期間に発見された豊富な物質についての知見の蓄積は、化学反応の定性的な知識や化学実験に用いる器具の発明として、その後の化学の発達に寄与した。

そして、人類は現代社会への路線を進み始めた産業革命（17 世紀後半）を機に、石炭の燃焼によって得られるエネルギーを大量に消費するようになった。この辺りの背景については、『エネルギー読本 I』（奈良女子大学理系女性教育開発共同機構 LADy SCIENCE BOOKLET 6²、寺内かえで・寺内衛）の第 1 章で取り上げた。産業革命に引き続いてヨーロッパでは市民革命が起こった。市民革命の一つであるフランス革命（1789 年～99 年）の波の中でギロチンにより処刑された人物の中にラヴォアジエ（1743-1794）がいる。ラヴォアジエは、革命前に徴税請負人という職業に就いており、このことが理由で処刑された。しかし、彼は徴税請負人を職業としながら、裕福な環境を活かして自宅に立派な実験室を備えて科学実験を楽しんだ熱烈かつ有能な「アマチュア科学者」³でもあった。彼は、燃焼の研究による「フロギストン説（ラヴォアジエ以前に広く受け入れられた燃焼についての仮説で、燃焼とはフロギストンという物質が放出されることとするもの）」の否定、質量保存の法則を明確に確立したこと、水の組成を明らかにしたことなど多数の業績をあげている。そして「近代化学の父」とも呼ばれている。また、彼はあらゆる手段を尽くして実験してもそれ以上に分解できない物質が元素であるとし、33 種の元素を提案した。しかし、個別の業績より、むしろこれらを見いだすに至った彼の研究手法こそが化学の歴史の中で大きな意味を持っていると言っても過言ではない。すなわち、物質の反応を、質量を定量することにより記述し、その関係性を明らかにしていったのである。例えば、フロギストン説の否定も、燃焼の反応前後で、精密にその重量を測定したことから導き出されたものである。

²奈良女子大学理系女性教育開発共同機構のホームページ(<http://www.nara-wu.ac.jp/core/booklet/index.html>)から無料でダウンロードできる。

³ この時代科学の研究は職業として行なわれたわけではなく、愛好家による趣味として行なわれた。「アマチュア」とはその意味で使っている。また、「科学者」という言葉自体も 19 世紀に作られたものである。

このような近代科学の手法、すなわち定量を重んずるという手法により得られた事実の積み重ねから、反応する物質の間での質量の比が求められ、原子や分子という考え方も提案された。ドルトンの原子説やアボガドロの分子仮説がそれにあたる。19世紀初頭にイギリスのドルトンが提唱した原子説は、「あらゆる物質は、小さい粒から構成されている」という仮説であるが、この「粒」のことをアトム (atom, 原子) と名付けた。アトムという言葉自体は、デモクリトスが思弁的な概念の中で導入したものと同じである。しかし、ドルトンの場合は、近代的な実験により得られた事実に基づいた考察からこの言葉を用いた。この点から、ドルトンの原子説は近代的な物質観を確立したものといえるだろう。また、定量的な実験事実と原子や分子という考え方を組み合わせて、相対的に原子の質量 (原子量) を記述できるようになった。しかし、残念ながらこの時代の技術では、まだ、原子や分子を見ることはできなかった。

電気科学や分光学といった新しい分野の科学が誕生し、それらの分野が新しい元素の発見に大きく寄与し、19世紀の半ばには既に発見された元素の数は50個を超えた。物質についての知識が増えてくると、似た性質をもつ元素のグループがあることにも気づき始めた。そして、発見された元素を、原子量など意味を持つ数の順番に並べると、なぜだか理由はわからないものの、「周期的に似た性質の元素が出現する」ことにも気づく者が現われた。この周期的に似た性質の元素が出現するという経験則を「元素の周期律」という。そして、性質の似通った元素が関連した並びとなるような表現方法が複数の人たちによって試みられた。このような試みの中で今日でも有名なものが1869年にメンデレーエフが発表した元素の周期表である。メンデレーエフの周期表が、他の人が発表したものより有名になった最も大きな理由は、表の中に空欄を設け、その空欄を未知の元素としてその性質をも予想したこと、そして後にその空欄を埋める元素が実際に発見されたことによるものと思われる。ちなみに彼の予想には間違いも多数あった。予想が当たった部分が鮮やかだったので、結果往来ということであろう。

メンデレーエフの周期表では元素は原子量順に並べられている。いくつかの例外もあったが、概ね元素の周期律をうまく表現していた。一方、現在私たちが用いている元素の周期表は原子量順ではなく、原子番号順に並んでいる。原子番号は、原子核の外にある電子の数、或いは、原子核の中の正の電荷をもつ陽子の数と等しい。原子番号という概念はメンデレーエフの時代にはまだなかった。この概念が導入されるには、さらに時代が進んで、様々な知見が蓄積され、原子の構造についての考察ができるようになることが必要だった。

19世紀の後半、真空放電に際して放出される「陰極線」というものに多くの物理学者が魅了され、その正体は何なのかという研究がなされた。結論としては、1897年にJ.J.トムソンが陰極線は負の電荷をもった粒子の流れと確認したが、そこに至る試行錯誤の実験過程で多くの実り多い発見がなされ、そこから新たな研究分野が切り開かれた。レントゲンによりX線が発見されたのも、放射線の α 線と β 線がラザフォードにより発見されたのもこの陰極線の研究の流れの中のできごとだった。 α 線を用いた実験は、原子の構造についての考察を一気に進展させた。分割不可能の意味を持つアトム (原子) は実は、それよりもっと小さな複数種類の粒子からできていることが明らかになった。1911年、ラザフォードは実験結果に基づき、「中心に正の電荷をもった小さな原子核があり、その回りを負の電荷をもった電子が回っている」という原子構造モデルを発表した。そして1913年になると、周

期表上の元素について、原子核の電荷が電子の 1 個分、2 個分、3 個分・・・となることが示唆される実験結果が発表された。また、同年にモーズリーは元素ごとに固有な特性 X 線スペクトルを詳しく調べ、原子番号 (atomic number) という用語を導入するとともに、原子番号の持つ意味の重要性、すなわち元素の周期表での基礎となるのは原子量ではなく原子番号であることを明らかにした。こうして、元素の周期表で元素を並べる基準が、原子量から原子番号へと変わったのである⁴。同時に、メンデレーエフの周期表に存在したいくつかの悩ましい例外についての説明もできるようになった。そして、原子核の中の正の電荷をもつ陽子が 1919 年に発見され、原子核中の電荷をもたない粒子、中性子が 1932 年に発見された。

中性子が発見された頃には、物理学も新しい局面を迎え、電子は粒子としての側面と、波としての側面をもつことが示された⁵。そして、ラザフォードの原子構造模型も大幅な修正を加えられた。電子の軌道は、太陽の回りを回る惑星の軌道のようにきっちりとした軌道では表わすことができず、存在確率でしか表わせないことが明らかになった。そして、存在確率が高いところを「電子軌道」ととらえ、「電子雲」で表わすことにした⁶。このような原子の姿を記述したシュレーディンガー方程式が発表されたのは 1926 年だった。20 世紀初頭という時代が、どんなにミクロの世界の研究にとって激動の時代だったかがわかると思う。

⁴ WEB 等で利用できる面白い周期表：文部科学省が国民の科学技術に触れる機会を増進する目的で発行している「一家に一枚シリーズ」の第一弾が『元素周期表』であった。2018 年 2 月現在では第 10 版が最新である。「一家に一枚シリーズ」はどれも無料で以下からダウンロードできる。<http://stw.mext.go.jp/series.html>

英国のノッティンガム大学(The University of Nottingham)の Sir Martyn Poliakoff 教授を中心としたチームが、各元素ごとに実験などを動画で紹介する”PERIODIC VIDEOS”(<http://www.periodicvideos.com/index.htm>)は世界的に有名で人気がある。WEB で便利に使える”Ptable”(<http://www.ptable.com/?lang=ja#>)は、様々な言語が選べ、タブごとに各元素の wikipedia の解説の外、属性、原子軌道、同位体、Compounds のタブがあり、それぞれの情報が詳しく得られる。(URL はいずれも 2018 年 2 月 20 日確認)

書籍では、ニュートンプレス発行の『完全図解 周期表』(2017 年、ニュートン別冊)や講談社ブルーバックスから出ている『元素 118 の新知識』(2017 年)などがお勧めである。

⁵ このことは、日立製作所の研究員であった故外村彰博士が「二重スリット実験」を行ない、非常にエレガントな結果を示した。是非ごらんいただきたい。日立製作所のホームページ(<http://www.hitachi.co.jp/rd/portal/highlight/quantum/doubleslit/index.html>)に詳しい解説と、実験の動画がある(2018 年 2 月 12 日確認)。この外村の実験は『世界でもっとも美しい 10 の科学実験』(日経 BP 社、ロバート・P・クリース著)でも紹介されている。

⁶ 電子雲、電子軌道については、章末に「電子殻から電子軌道へ」という解説を設けた。これらの用語になじみのない人は一読して欲しい。

§ 1-3 原子の大きさのイメージ

これまでの話の中で、原子の大きさについては一切触れなかった。原子が議論されてきた経緯からも、おそらく非常に小さいのだろうということは察しがつく。いったいどのくらい小さいのだろうか。元素によってその大きさは異なるが、原子の大きさはおよそ 1m の 100 億分の 1 に当たる。1m の長さを 10 分の 1 にすることを 10 回繰り返すと、この長さになる。指数表記を用いると、 $1 \times 10^{-10} \text{m}$ である。指数表記については便宜のため、章末に一覧表を示した。

もう少しイメージを明確にするため、具体例をあげながら示してみる。ここでは、およそのイメージを形成することを目的としているので、正確さは犠牲にしていることを念頭に置いてみていただきたい。

オーダー	具体例	大きさ
10^{-5}m (10 μm)	家庭で使っているアルミホイール ⁷ や食品包装用ラップ ⁸ の厚さ ヒトの細胞 赤血球 卵子 精子	約 10 μm 数～数十 μm 7～8 μm 直径は約 0.1mm(=100 μm) オタマジャクシのような形状の長い方で約 50 μm
10^{-6}m (1 μm)	細菌(bacteria)	0.5～2 μm
10^{-7}m (=0.1 μm =100nm)	ウイルス(virus)	数十～数百 nm
10^{-8}m (=10nm)	細胞膜の厚さ(脂質二重層からなる) タンパク質	8～10nm 数～十数 nm
10^{-9}m (=1nm)	フラーレン 60(fullerene 60) (炭素原子 60 個でできたサッカーボール型の分子) の直径	約 1nm
10^{-10}m (=0.1nm)	水素原子(原子番号 1)の直径 ウラン原子(原子番号 92)の直径	0.1nm 0.4nm

即ち、 10^{-10}m は原子の大きさのオーダーであることが分かる。

原子核の直径はその約 10 万分の 1 になる (約 $1 \times 10^{-15} \text{m}$)。つまり、原子核の直径が 1 ミリメートルの模型を作ると、原子の直径は 100 メートルになる。では、原子の内部には何があるのだろうか。何もない。真空である。つまり、原子の内部はほとんど空っぽなの

⁷日本アルミニウム協会のホームページ

(<https://www.aluminum.or.jp/haku/faq/index.html>, 2018 年 2 月 19 日確認)

⁸旭化成ホームページ([http://www.asahi-](http://www.asahi-kasei.co.jp/saran/products/saranwrap/comparing.html)

[kasei.co.jp/saran/products/saranwrap/comparing.html](http://www.asahi-kasei.co.jp/saran/products/saranwrap/comparing.html), 2018 年 2 月 19 日確認)

だ。原子の大きさは、元素の種類によって異なるが、いずれにしても原子の大きさは電子軌道の大きさ（電子雲の広がり）を意味している。一方、原子核は非常に小さいが、原子の質量の 99.9% がここに集中している。原子核を構成している陽子と中性子の 1 個の質量はほぼ同じであるが、電子 1 個の質量は陽子 1 個の質量のわずかに 1840 分の 1 の質量である。ここまでのところをまとめると、原子はその大きさ（広がり）は電子によって決まり、質量は原子核できまるということになる。

原子はこんなに小さなものなので、もちろん肉眼では見ることはできない。原子の構造が詳しくわかってきた 20 世紀初頭でも見ることは不可能だった。原子を粒として見るができるようになったのは、1982 年に走査型トンネル顕微鏡（STM, scanning tunneling microscope）が開発されて以降のことになる⁹。しかし、ドルトンが原子論を唱えてからわずか 1 世紀半程で原子が見えるようになったのだから、近年の科学技術の進歩がいかに速いかを感じる事ができる。

⁹ IBM は世界で初めて個別の原子を狙った場所に移動させる技術を開発した。1990 年にその技術のデモンストレーションとして 35 個のキセノン原子を配置して”IBM”と描画した。この画像が [wikipedia' IBM_\(atoms\)](https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_(atoms))([https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_\(atoms\)](https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_(atoms)))や IBM のホームページ(https://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/vintage/vintage_4506VV1003.html)で見ることができる(両者とも 2018 年 2 月 13 日確認)。また、それらからのリンクで、2013 年 4 月に作成された動画も見られるが、「原子」の操作技術がいかに進歩したかを感じさせてくれる。

§ 1-4 地球における元素の存在度

元素の周期表では、原子番号 118 個の元素まで認められるが、地球上で天然に存在している元素（非常に微量のものは除く）は、原子番号 1 の H（水素）から原子番号 92 の U（ウラン）である。93 以降の原子番号の元素は、核反応により人工的に作られたものである¹⁰。地球上に存在する元素の存在度は、元素によって大きく異なる。下記に、地球における元素の存在度を多い順に 1 番目から 10 番目まで並べたものを示した。

存在順位	地殻(*a)		海水の平均組成(*b)	
	元素記号	存在量(重量比)	元素記号	存在量(重量比)
1	O	46 %	O	8.93 ppb
2	Si	27 %	H	8.03 ppb
3	Al	8.2 %	Cl	7.30 ppb
4	Fe	6.3 %	Na	4.04 ppb
5	Ca	5.0 %	Mg	6.12 ppb
6	Na	2.30 %	S	5.97 ppb
7	K	1.50 %	K	5.62 ppb
8	Mg	2.90 %	C	4.45 ppb
9	Ti	0.66 %	Br	4.83 ppb
10	H	0.15 %	Sr	3.91 ppb

(*a) 出展：“Abundance in Earth's Crust”，

https://www.webelements.com/periodicity/abundance_crust/

※以前は、1924 年に米国の地球化学者 F.W.クラークと H.S.ワシントンによって与えられた地表 10 マイル（16km）までの構成元素の平均重量百分率が「クラーク(Clarke)数」としてよく使われ、8 番目までを「オ(O)シ(Si)ア(Al)テ(Fe)カ(Ca)ソー(Na)カ(K)」と語呂あわせで覚えたものだが、地球科学の発展に伴って科学的意義が失われ、最近では使われなくなったようである。そのいきさつについては、『化学と教育』1998 年 46 巻第 7 号、海老原充「クラーク数 — 消えゆく数値？」に詳しく記述されている。

(*b) 出展：“Abundance in Oceans”，

https://www.webelements.com/periodicity/abundance_seawater/

※なお、ここで用いた www.webelements.com/periodicity/には、Earth's crust（地殻）、Oceans(海洋)の他、meteorite, iron(鉄隕石)、meteorite(隕石)、Stream(河川水)、Sun(太陽)、Universe(宇宙)、Human(ヒト)などにおける元素の存在度も調べ

¹⁰ 1972 年、ガボン共和国にあるオクロ鉱床で天然原子炉が作動していた証拠が発見された。その後の調査により、その原子炉は、ウラン鉱石に起因しており、機能していた期間は約 60 万年間、誕生した時期はおおよそ 20 億年前と考えられている。また、天然原子炉の中で生成した ²³⁹Pu や核分裂生成物は殆ど散逸せずに、当時のままの状態が保持されていたことが明らかになった（原子力百科事典 ATOMICA「天然原子炉（オクロ原子炉）（04-02-01-10）」、http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=04-02-01-10、URL は 2018 年 2 月 21 日確認）。この発見により、Pu もごく微量だが天然に存在していると認識されるようになった

ることができる。

尚、この表には載せていないが、乾燥大気の組成については、体積比で表すと、窒素 N_2 が最も多く(78.084%)、酸素 O_2 がそれに次(20.946%)、この二成分で約 99%であり、圧倒的の大部分を占める。三番目に多いのがアルゴン Ar (0.934%)¹¹、二酸化炭素 CO_2 は四番目に多い(0.04%)。(出展：wikipedia 「Atmosphere of Earth」, https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth)

先の表に戻ると、地殻における元素存在度は、多い方から、酸素(O)、ケイ素(Si)、アルミニウム(Al)の順である。酸素が圧倒的に多く半分近くを占めている。これは、地殻の鉱物が酸化物の形態で存在しているためである。アルミニウムは私たちの日常生活の中でよく用いる金属ではあるが、もっと身近な鉄(Fe)よりも多く存在していることは意外に思うかもしれない。この感覚は、その金属を含む鉱物から金属を取り出す過程(製錬)が可能になった時代と、製造コストから来るものと思われる。金属の製錬は、大雑把な見方をすれば、金属酸化物の還元反応である。還元され難い金属は製錬するのに苦勞する(エネルギーを要する)。還元され易さ、され難さを表す尺度は、「金属のイオン化傾向」として知られている。この定性的な序列を、もう少し数値を用いて定量的に判断するには、「標準電極電位(standard electrode potential), E° 」¹²を用いる(次表参照)。還元され易いほど標準電極電位は高く、還元され難いほど標準電極電位は低くなる。鉄や銅(Cu)はアルミニウムに比べて標準電極電位が高く、燃焼反応によるエネルギーで還元することができる。しかし、アルミニウムは電気エネルギーを用いて電気分解により還元する必要があった。この電気分解による製法が開発されたのは電気化学が発達した 19 世紀の後半であった。そんなわけで、歴史的に見て、アルミニウムが酸化物としてではなくお目見えしたのは、鉄に比べてかなり遅れたのである。また、電気エネルギーを多く用いるため、電力

¹¹アルゴンは、日常生活ではあまりお目にかからない元素だが、大気中に三番目に多いということに疑問を持たないだろうか。原子番号 18 のアルゴンには、質量数が 36、38、40 の 3 つの同位体がある(いずれも安定同位体)。質量数 40 のもの(^{40}Ar)が最も多く、99.6%を占め、次いで質量数 36 のもの(^{36}Ar)が 0.34%、質量数 38 のもの(^{38}Ar)が 0.06%となっている。先に示したようにカリウムは地殻の岩石中に 7 番目に多く存在している元素である。カリウムのうち 0.01%とわずかではあるが ^{40}K が存在している。 ^{40}K (原子番号 19, 半減期 1.277×10^9 年)が放射壊変して ^{40}Ar が生じる。生じた ^{40}Ar の一部は岩石中に閉じ込められ、他は大気中に出てくる。これが大気中の ^{40}Ar となる。このような理由で、質量数 40 のアルゴン(^{40}Ar)が多くなるためである。

¹² 標準電極電位は、極が溶液と平衡状態にあり、電極反応の反応系および生成系が標準状態(活量 1)にあるときの電極電位をいう。化学電池(マンガン電池, アルカリ電池, リチウム電池, 鉛蓄電池など日常的に使われている電池のほとんどが該当)では、標準電極電位が低い方が負極となり、高い方が正極となる。起電力は正極と負極の材料の標準電極電位の差となる。標準電極電位の序列では、リチウム(Li)が最も電位が低く、化学電池の負極材として最も大きな起電力が得られる材料である。スマホ, ノートパソコン, 電気自動車など、高容量の電池を必要とする場面でリチウム(イオン)電池が使われている。これは、エネルギー密度(単位は Wh/m^3 または Wh/kg)を高くするため、電極材料としてリチウムを用いることが適しているからである。一方、リチウムという元素は、激しい反応性をもつアルカリ金属である。近年ニュースで報道されたリチウム電池による事故も、このリチウムの性質に起因するところが大きい。

の生産量が多くなる必要もあった。電力を大量に必要とするため、アルミニウムは「電気
の缶詰」とも言われる。ちなみに、1 t(トン)のアルミニウムを作るのに必要な電力量は
14,000~15,000 kWh(キロワット時)とのことである¹³。アルミニウム缶に入った飲料の空
き缶のリサイクル率は92.4%と高い¹⁴。これは、アルミニウムという資源の持続可能性の
ためというより、むしろ、鉱物からアルミニウムを得るには多くの電力を必要とするた
め、電力消費を抑えるというエネルギー経済的な目的の方が大きい。

各単体における標準電極電位 E° (V)

金属	標準電極電位 E° (V)		金属 (水素含む)	標準電極電位 E° (V)
Li	-3.045		H	0
K	-2.925		Cu	0.34
Ca	-2.84		Hg	0.796
Na	-2.714		Ag	0.799
Mg	-2.356		Pt	1.188
Al	-1.676		Au	1.52
Zn	-0.763			
Fe	-0.44			
Ni	-0.257			
Sn	-0.138			
Pb	-0.126			

一番多い酸素(O)と二番目に多いケイ素(Si)についてみてみよう。この二つの元素は、現
代の私たちのハイテク社会を支えている材料であることに気づいている人はどのくらいい
るであろうか。

まず、ケイ素は、スマホ、パソコン、様々な電化製品に必ず使われている半導体素子の
大元の材料である。

¹³ 1997年3月発行、『やさしい技術読本』, 「No1. アルミ[原料]その1」(KOBELCO 神
戸製鋼), http://www.kobelco.co.jp/alcu/technical/almi/1173955_12412.html。ちなみ
に、15,000 kWh は、2015年における日本の一世帯あたりの1ヶ月の電力消費量が約250
kWh であるので(日本原子力文化財団「一世帯あたりの電力消費量の推移」
<http://www.ene100.jp/www/wp-content/uploads/zumen/1-2-13.jpg>), 60世帯が1ヶ月に
消費する電力に相当する。(URLは2018年2月21日確認)

¹⁴ アルミ缶リサイクル協会, <http://www.alumi-can.or.jp/publics/index/65/>, 2018年2月
22日確認



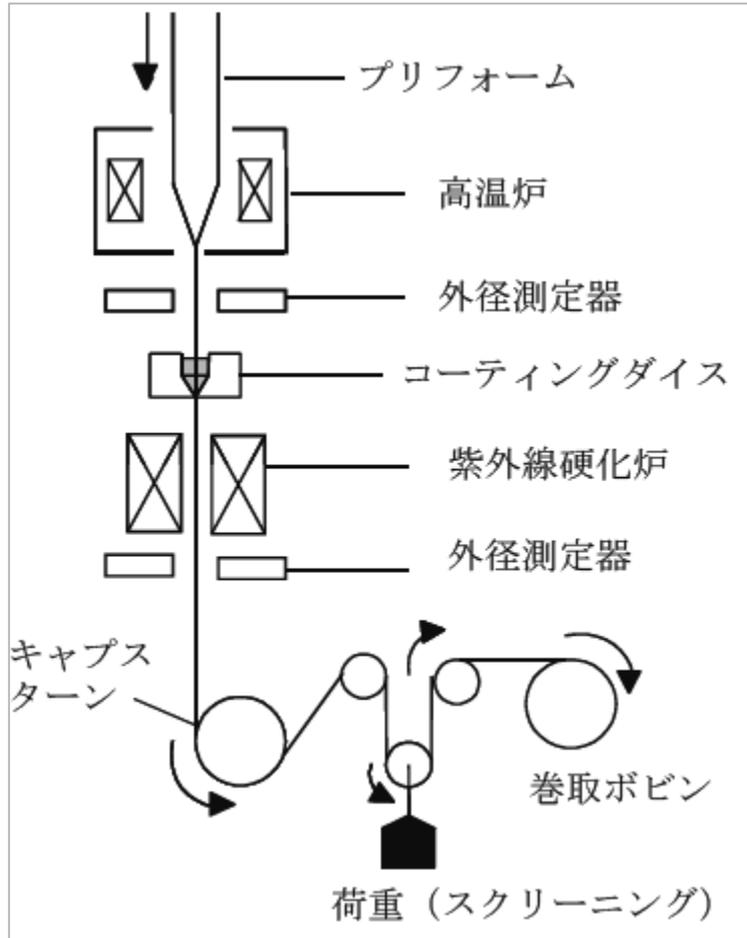
株式会社 SUMCO のホームページ <http://www.sumcosi.com/products/process/index.html>

珪石は、主にシリカ（二酸化珪素 SiO_2 ）からなる鉱物や岩石の総称である。現在の技術では、ケイ素の純度がイレブンナイン（99.99999999 % のことで、9(ナイン)が、11 個並ぶという意味、金属不純物の濃度数が ppb 以下）の単結晶シリコンインゴットを製造することができるそうである。シリコンウェーハはステッパーなどの半導体製造装置を用い、物理的・化学的な処理からなるプロセスを経て、私たちが知るメモリや CPU などが作られる。また、これほどの高純度の単結晶シリコンだけを使用するわけではないが、太陽光発電のセルもシリコンから製造されている。

次に、ケイ素と酸素から成る、二酸化ケイ素(SiO_2)についてみる。私たちの生活は、情報機器とインターネットなしでは考えられない。前者は先に述べたシリコン半導体なしでは成り立たない。後者は、現代のように大容量の情報を高速で送るためには光ファイバー (optical fiber) の存在が欠かせない。その光ファイバーは、高純度(これも不純物の濃度数が ppb 以下)な二酸化ケイ素の結晶である¹⁵。普通の板ガラスでは光を通しても 2m 程度で光が減衰してしまうが、現在光ファイバーとして用いているものは、1000km 先まで光が届く性能を持っているそうである¹⁶。光ファイバーの製造は、光ファイバーになったときに光の透過するコア部の周囲にクラッド層をもつ円柱状のガラス母材（プリフォーム, preform）を製造する。この直径は 20cm 以上の直径を持つものもある。次に、プリフォームを下図のように線引きして、光ファイバーを製造する。

¹⁵ 超高純度の合成石英（水晶）のこと。

¹⁶ 例えば、信越化学工業株式会社ホームページ (<http://www.shinetsu.co.jp/jp/products/advanced.html>)を参照



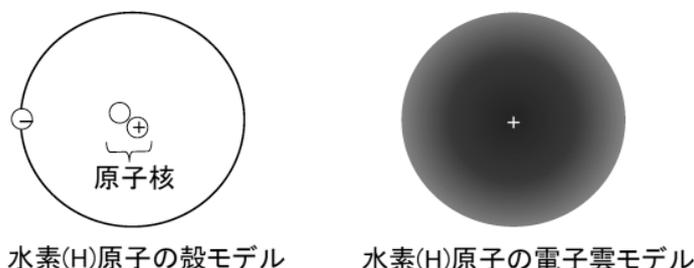
図の出展：ニューガラスフォーラム機関紙『NEW GLASS』27巻，105号(2012)，「通信用石英系光ファイバの製造方法」

地殻に存在する元素のうちで最も多い酸素と二番目に多いケイ素が，天然での存在形態そのままではないにしても，現代の私たちの情報化社会を支えるまさしく縁の下の力持ちであったという事実には感慨深いものを感じる。

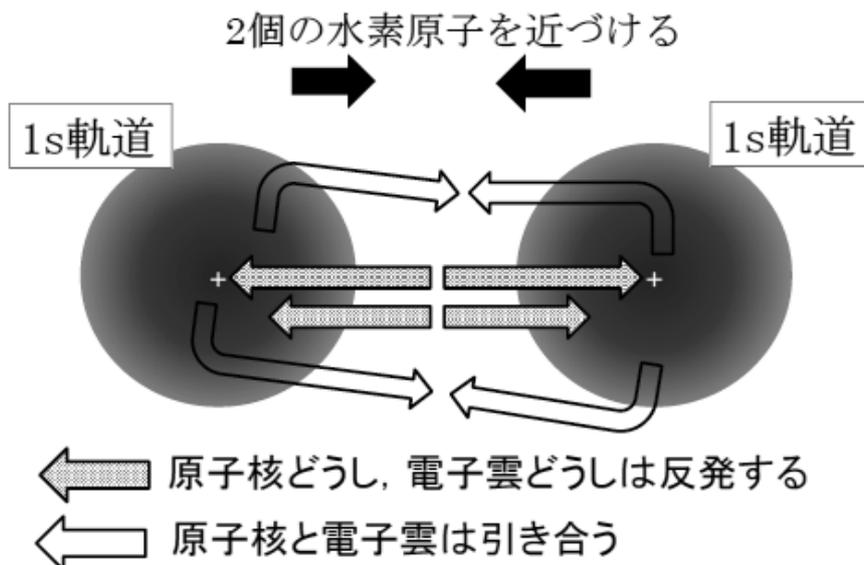
§ 1-5 無限の種類のもたらす化学結合

元素の数は周期表にも収まる程度、ちょっと頑張れば覚えることができる程度の数だが、私たちを取り囲んでいる物質の種類は実際には無数にある。原子と原子を結び付けば、無数の種類の物質を作ることができる。炭素と水素といった2種類の元素だけでも、結合にかかわっている原子の数や、またその結合の仕方により無数の炭化水素化合物を作ることができる。

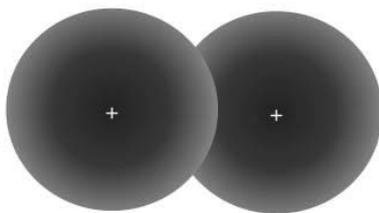
「分子」というものは、原子と原子が「共有結合」してできたものである。共有結合について簡単に復習する。水素分子 H_2 を電子式で表わしてみると、それぞれ1個ずつの価電子を供出し合って共有する。これが「共有結合」である。電子を共有し合った結果、1s軌道はどちらの水素原子から見ても、2個の収容限度まで満たされ、ヘリウム He と同じ電子配置になる（閉殻となり安定）。さらに、電子雲で共有結合をイメージしてみよう。水素原子の1s軌道は球形である（下図右側）。



2つの水素原子を近づけてやると、原子核同士は正の電荷同士なので反発しあい、電子雲同士は負の電荷同士なので反発しあう。一方、一方の原子の原子核と、他方の原子の電子雲は異なる電荷のため引きあう。

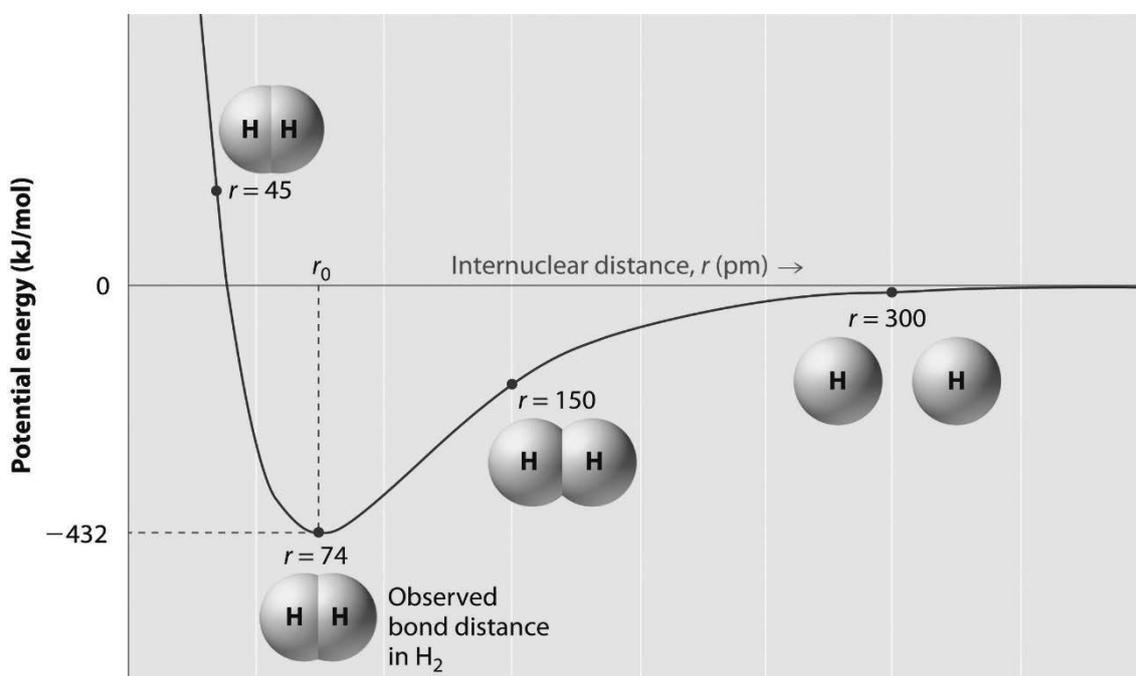


1s軌道の電子雲が互いに重なるようになる。電子雲が互いに重なり合い、どちらの原子核にとっても広がった電子雲の中の電子を所有している状態が共有結合である。



1s軌道が重なって水素分子 H_2 ができる

ここで、2個の水素原子1個ずつが離れて存在するのではなく、水素分子を形成するとどんなメリットがあるのかを、エネルギーの観点から見てみる。下記グラフに示すように、水素分子を形成した方がエネルギーが低いことがわかる。一方、2個の原子は近ければ近いほどいいわけではなく、近づきすぎると、原子核どうしの反発の寄与が大きくなり、エネルギーが高くなる。このようにエネルギー的に一番安定した状態で分子を形成する。



図の出展：Principles of General Chemistry v. 1.0

Figure 8.9 A Plot of Potential Energy versus Internuclear Distance for the Interaction between Two Gaseous Hydrogen Atoms

<http://webmis.highland.cc.il.us/~jsullivan/principles-of-general-chemistry-v1.0/s12-05-lewis-structures-and-covalent-.html>(2018年2月27日確認)

縦軸：ポテンシャルエネルギー(これが低いほど安定)

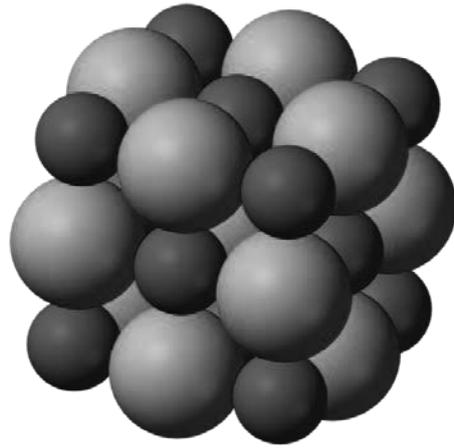
横軸：2個の水素原子の核間の距離

一般的に、電子雲は広がった方が、エネルギーが低くなる。水素原子の電子雲よりも広がった水素分子の電子雲の領域に電子が広がることにより、エネルギーが低くなる。共有結合により、2つの原子に共有されている電子対を共有電子対という。共有電子対を1本の線で表わす書き方を「構造式」という。構造式は原子と原子のつながり方を示すのに便利な方法だが、分子の形を表わしたものでない。

原子と原子の結びつきつける方法には、「イオン結合」という共有結合とは対極的な方法もある。イオン結合では、正の電荷をもつ陽イオンと、負の電荷をもつ陰イオンが¹⁷、静電気力（クーロン力）によって引き合う。第3周期1族のナトリウム Na を電子式で表わすと価電子が1個だけある。ナトリウムを水と反応させると非常に激しく反応し¹⁸、水溶液をアルカリ性にする。これは、この価電子が非常に放出されやすいという性質のためである。価電子が1個放出されると、原子核のもつ電荷と電子の総数の釣り合いが取れなくなり、正の電荷を帯びた1価の陽イオンになる。ナトリウムイオンは Na⁺ は1つ前の原子番号の18族元素ネオン Ne と同じ電子配置、すなわち安定な閉殻構造になる。ナトリウム以外の1族（例えば、リチウム Li）も同様である。18族元素と同じ電子配置をとると安定するという理由から、価電子が2個の2族の元素は、価電子2個を放出して2価の陽イオンになりやすい。一方、第3周期17族の塩素 Cl は価電子が7個、つまり3対のペアと1個の不對電子がある。この不對電子のところに、どこかから電子が1個取り込むことができれば、18族元素アルゴン Ar と同じ電子配置になり、やはり安定な電子配置となる。1個電子を取り込むと、原子核のもつ電荷と電子の総数の釣り合いが取れなくなり、こんどは負の電荷を帯びた1価の陰イオン(塩化物イオン Cl⁻)になる。同様に、塩素 Clをはじめ、他の17族元素も1価の陰イオンになりやすい性質をもつ。物質が安定に存在するためには、陽イオンと陰イオンは電荷が釣り合うように存在しなくてはならない。正の電荷と負の電荷は互いに引き合い、イオン結合を形成する。ナトリウムイオン Na⁺ と塩化物イオン Cl⁻ は食塩（塩化ナトリウム）NaCl としてよく知られている。このような、陽イオンと陰イオンが電氣的に引き合ってきた結晶を「イオン結晶」という。イオン結晶によりできている物質では、イオンが下図のように規則的に繰り返して並んでいるが、NaCl という分子のような単位があるわけではない。そこで、繰り返して並んでいる元素の原子の数を最も簡単な整数比で表わし、これを「組成式」という。

¹⁷ 陽イオン(positive ion)はカチオン(cation)ともいう。陰イオン(negative ion)はアニオン(anion)ともいう。商業的には「マイナスイオン」という言葉をよく目にするが、マイナスイオンは和製英語であることに留意。従って、マイナスイオン効果なるものにも怪しげな効果をうたったものも多いので注して賢い消費者になろう。

¹⁸ 高速増殖炉もんじゅは、度々の冷却用ナトリウム漏れ事故により、2016年12月21日に廃炉が正式決定された。ナトリウムは高速増殖炉の冷却材として要求される条件を満たす物質ではあったが、その取り扱いがナトリウムのアルカリ金属特有の反応性の高さから困難であった。日本に限らず、英国、フランス、ドイツなどでも高速増殖炉の開発を試み、同様なトラブルを起こし開発に見切りをつけている（世界の高速増殖炉の現状 <http://www.geocities.jp/tobosaku/kouza/fbr3.html>(2018年2月27日確認)）。



NaCl のイオン結晶モデル

図の出展 : wikipedia commons 'Sodium-chloride-unit-cell-3D-ionic',
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sodium-chloride-unit-cell-3D-ionic.png>, (2018
年 2 月 18 日確認)

【問】 大きな球と小さな球のどちらがナトリウムイオンだろうか。そのように考えた理由も答えよ。

第1章 章末付録

大きな数と小さな数の表わし方（指数表現）

記号	読み方	大きさ	乗数で言うと	実数
P(大文字)	ペタ	1000 兆倍	10 の 15 乗	1,000,000,000,000,000
T	テラ	1 兆倍	10 の 12 乗	1,000,000,000,000
G	ギガ	10 億倍	10 の 9 乗	1,000,000,000
M	メガ	100 万倍	10 の 6 乗	1,000,000
k(小文字)*	キロ	1000 倍	10 の 3 乗	1,000
d	デシ	10 分の 1 倍	10 の -1 乗	0.1
c	センチ	100 分の 1 倍	10 の -2 乗	0.01
m	ミリ	1000 分の 1 倍	10 の -3 乗	0.001
μ	マイクロ	100 万分の 1 倍	10 の -6 乗	0.000001
n	ナノ	10 億分の 1 倍	10 の -9 乗	0.000000001
p(小文字)	ピコ	1 兆分の 1 倍	10 の -12 乗	0.0000000000001

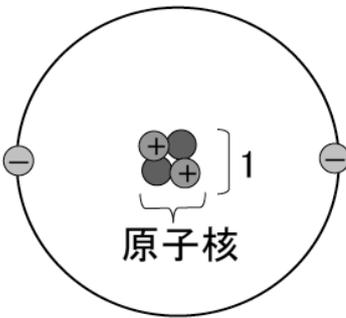
*大文字の K は、国際単位系(SI)の温度の単位で、ケルビン。

電子殻から電子軌道へ（高校までにあまり電子軌道について学ぶ機会がなかった方向け）

まず、原子の構造について復習しておく。原子の中心部には電荷をもった原子核があり、その回りに電子が存在する。電子と原子核の電気的な関係に着目すると、原子核を構成する陽子と中性子の中で電荷をもつのは陽子だけで、電子1個の電気量と陽子1個の電気量についてみると、前者がマイナス、後者がプラスと逆の符号をもつが、大きさの絶対値は同じである。また、原子は電气的に中性なので（電荷を帯びたものは「イオン」である）、正の電荷をもつ陽子の数と、負の電荷をもつ電子の数は等しくなる。すなわち、原子番号は、原子核の外にある電子の数でもある。

**高校で学んだ
原子の構造**

原子の大きさ
1 mの100億分の1
0.1 ナノメートル(nm)
 $=10^{-10}m$



ヘリウム(He)原子

⊕ 陽子
● 中性子
⊖ 電子

$100,000=10^5$
*原子核との比較で5桁違う

質量の99.9%が原子核に集中している

**陽子の数 = 元素の原子番号
= 電子の数**

高校では、電子配置は、K, L, M・・・の電子殻という概念を用いて配置していった（下表）。

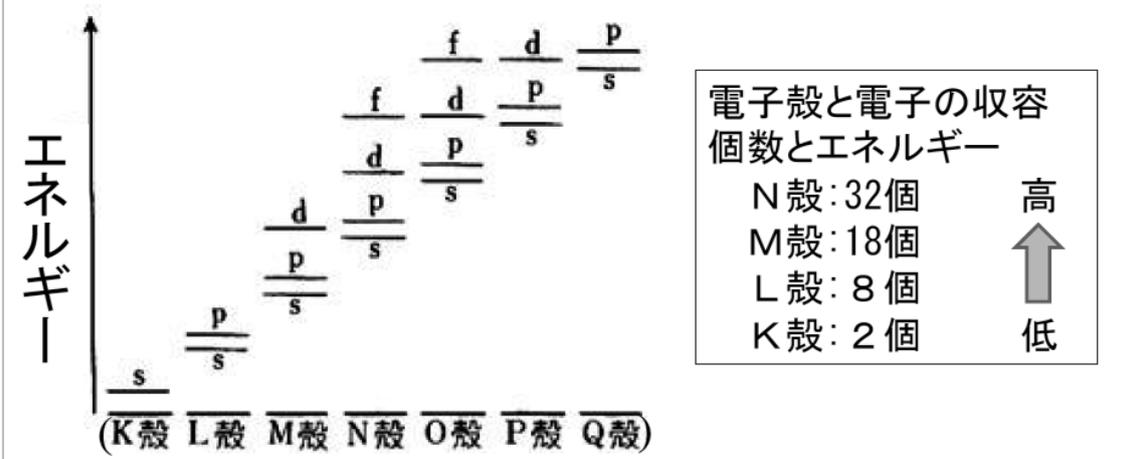
周期 ↓	族→	1族	2族	13族	14族	15族	16族	17族	18族
	電子殻	K L M	K L M	K L M	K L M	K L M	K L M	K L M	K L M
1	元素	H							He
	電子配置	1							2
2	元素	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
	電子配置	2 1	2 2	2 3	2 4	2 5	2 6	2 7	2 8
3	元素	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
	電子配置	2 8 1	2 8 2	2 8 3	2 8 4	2 8 5	2 8 6	2 8 7	2 8 8

周期表の周期と
満たされている
電子殻の関係

第1周期: K殻のみ
第2周期: K殻とL殻
第3周期: K殻, L殻とM殻

次に、原子番号1の元素から順に、原子番号の個数の電子を電子軌道に詰めていってみる。電子軌道は、20世紀の前半に原子や電子などマイクロ世界を記述する量子力学が誕生したことにより提案された考え方である。まず、電子軌道（s軌道、p軌道、d軌道、f軌道など）と、電子殻の対応を見ておこう(下図)。

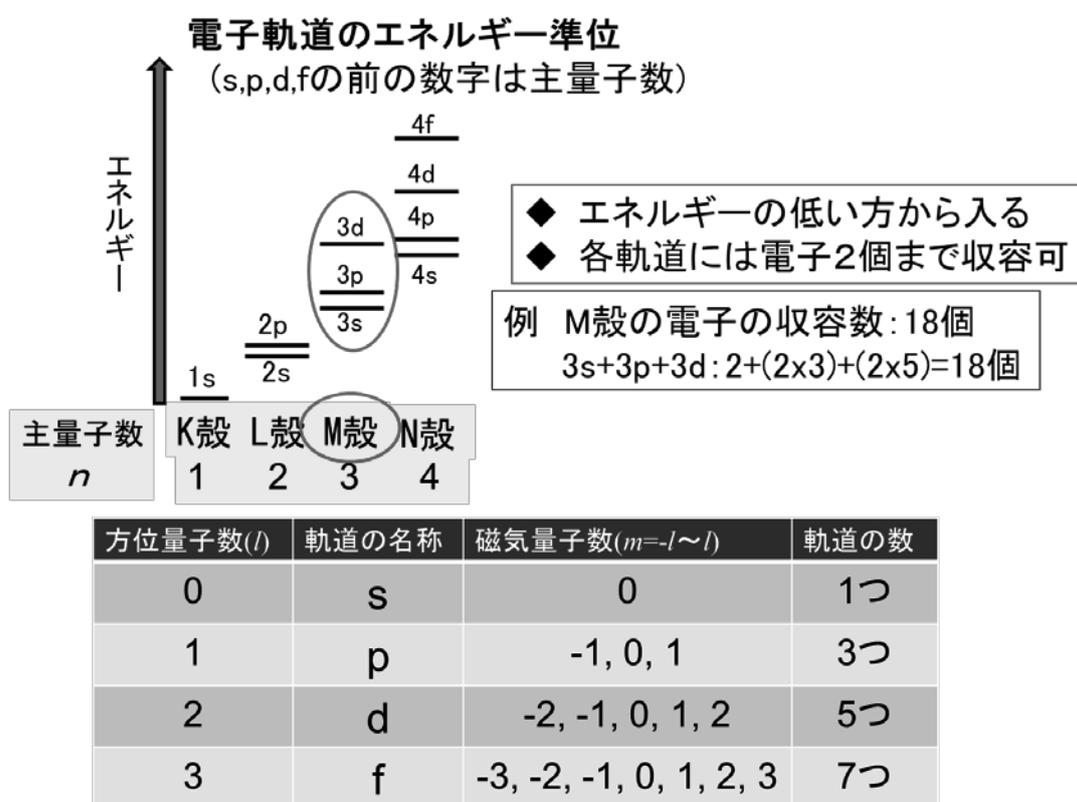
電子軌道(electronic orbital)という考え方が出てくる
s軌道, p軌道, d軌道, f軌道... ←分光学的研究から



そのためには、少し、電子軌道と電子の詰め方の規則について知っておく必要がある。

電子軌道について大雑把にまとめると、電子の収容数が決まっていること、そして、電子の状態のエネルギーの高低（エネルギー準位）と軌道の形によって、様々な電子軌道が

あるということである。電子軌道の詳細については、シュレーディンガー方程式という、原子レベルのミクロの世界を記述する方程式を解くことにより理解されている。この方程式を解くと、主量子数（記号 n ）、方位量子数（記号 l ）、磁気量子数（記号 m ）という3つの整数が入ってくる。電子の状態のエネルギーの高低（エネルギー準位）は主量子数という正の整数、すなわち1, 2, 3, 4・・・で表わされる。この値が大きくなるほどエネルギーが高い状態を示す。また、電子軌道の形を決めるのは方位量子数で、これは、主量子数より1だけ小さい整数をとることができる。具体的に示すと、0, 1, 2, 3, 4・・・で、これと電子軌道の名称、s軌道、p軌道、d軌道、f軌道、g軌道・・・が対応している。主量子数が同じでも方位量子数の値が異なると、少しエネルギーが異なり、同一主量子数でのエネルギー準位はs軌道 < p軌道 < d軌道 < f軌道 < g軌道となる。このため、例えば、主量子数4のs軌道(4s)よりも、主量子数3のd軌道(3d)の方がエネルギー準位が高くなる（主量子数1のs軌道を1s、主量子数2のs軌道を2s等のように主量子数を軌道の記号の前に書く）。このエネルギーの高低を図に表わしておく。

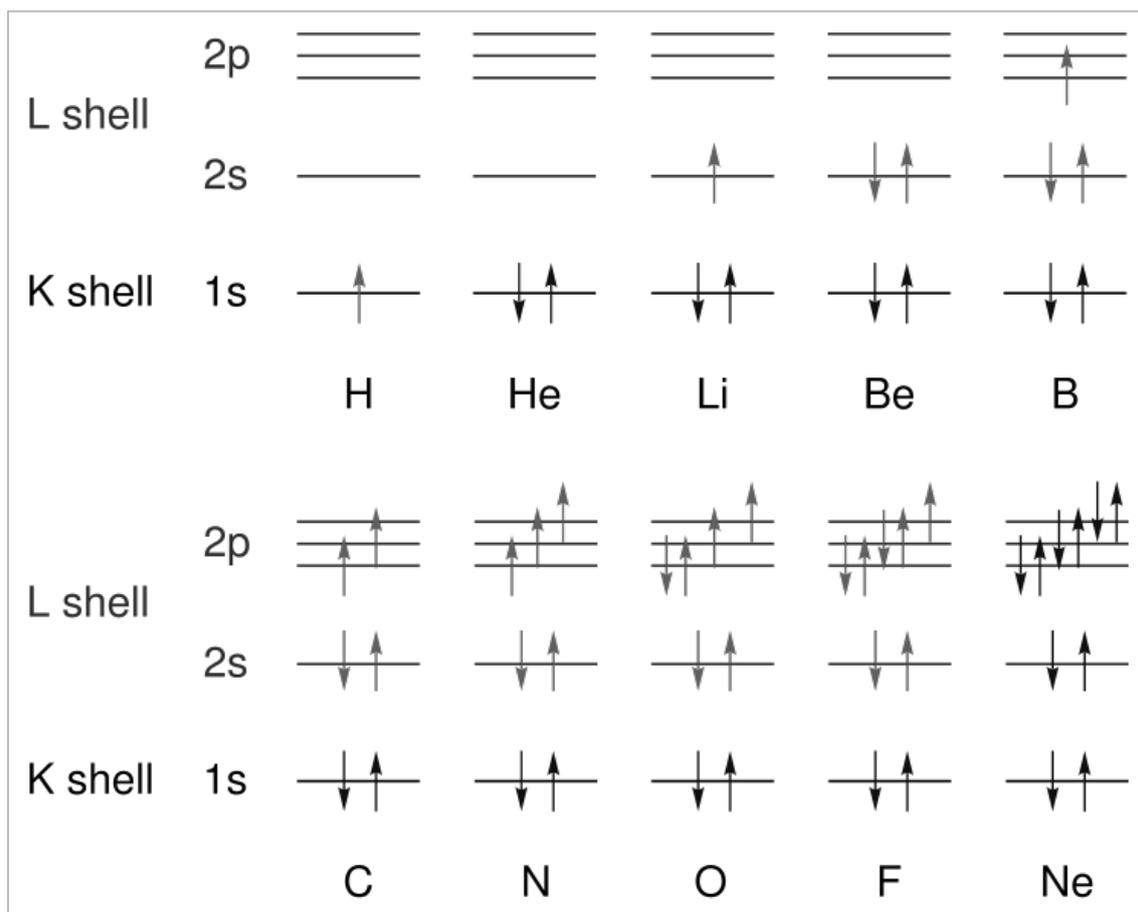


また、電子軌道の広がる向きを決めるのは、磁気量子数で、これは、マイナス l から l までの整数をとることができる(上図の表を参照)。方位量子数1の場合には、磁気量子数は(-1, 0, 1)の3つがあるので、対応するp軌道には、x軸方向に広がるもの、y軸方向に広がるもの、z軸方向に広がるものと、3つのエネルギー準位が等しい軌道がある。同様に、d軌道にはエネルギー準位が等しい軌道が5つあり、f軌道にはエネルギー準位が等しい軌道が7つある。この辺りまでが、周期表に登場する元素が関係する軌道である。

次に、電子の詰め方の規則について説明する。電子は好きな電子軌道に気まぐれで詰めていっていいわけではない。この規則を説明する前にもう一つ、電子の状態を表わす「電子のスピン」というものがあることに触れておかななくてはならない。スピンは電子がコマのように回転していると喩えられるが、ここでは、電子のスピンには上向きと下向きの2通りがあるということのみを記しておく。これで用意が整った。次の3つが電子の詰め方の規則である。

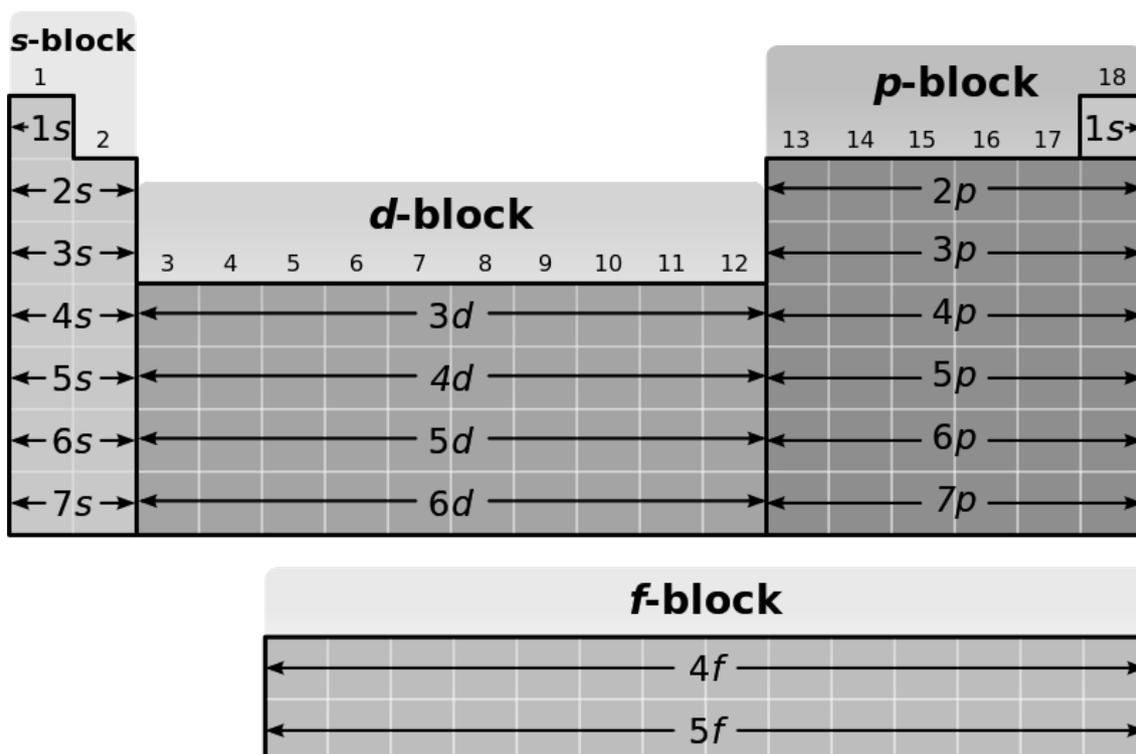
- ① エネルギーの低い方から順に詰めていく
- ② 軌道1つには電子2個まで詰めることができる。ただし、2個入れるときには、スピンの向きは逆向きにしなければならない（パウリの排他律）
- ③ 等エネルギーの軌道が複数あるとき（例えば、p軌道は3つが等エネルギー）、同じスピンの向きの電子が別々の軌道に入る（フントの規則）。つまり、等エネルギーの軌道は空きがある限りできるだけ多くの軌道に分散させるように詰めていく

規則に従って原子番号1の水素(H)から原子番号10のネオン(Ne)までの元素について、電子を詰めたものを下図に示す。ここで、矢印の上下の向きはスピンの向きに対応させている。左欄には、K殻(K shell)、L殻(L shell)も対比させている。



図の出展 : wikipedia commons 'File:Electron configuration diagrams from H to Ne'
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electron_configuration_diagrams_from_H_to_Ne.svg

元素の周期表は、元素を原子番号順に並べたとき、周期的に似た性質の元素が出現することをうまく表わすように作られているので、似た性質のものが縦の列に並ぶ(同族の元素の性質は似ている)。1族のリチウムLi, ナトリウムNa, カリウムKの電子配置を描いてみてほしい。主量子数が一番大きいところを見ると、リチウムでは2sが1個, ナトリウムでは3sが1個, カリウムでは4sが1個と、主量子数は異なってもs軌道に1個という電子の配置は同じであることに気づく。主量子数が一番大きな電子軌道は、空間的には一番外側(最外殻)にあり、このような電子を「価電子」という。同様に、2族, 13族~18族についても確かめて欲しい。やはり、縦に並んだ元素同士は、価電子の数が同じであることがわかると思う。下の図は、元素の最外殻の電子軌道を示したものである。



図の出展 : wikipedia commons 'Periodic Table 2.svg'

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Table_2.svg

一般的に、一番外側の電子は化学反応に深く関わっている。化学反応というのは、最前線にいる電子が相互に関わり合うものとイメージしてみるとよいかと思う。だから、価電子の数が同じものは、同じような反応性を示す、言い換えると、化学的な性質が似てくる。これが、元素の周期表で縦に並んだ元素が似た性質を示す理由である。そして、元素の性質の出現に周期性が生ずるのは、電子を電子軌道に詰めていく規則、すなわち、ミクロの世界の約束事によっている。

Group Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	* 72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	* * 104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	
				* 58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
				* * 90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

出展 : [wikimedia commons 「File:Simple Periodic Table Chart-en.svg」](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simple_Periodic_Table_Chart-en.svg)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simple_Periodic_Table_Chart-en.svg

第2章 水

§2-1 水のおもしろい性質

「水ほどありふれたものはない。でも、水ほど不思議なものはない。」これは、筆者が修士課程のときに教えを受けた先生¹⁹の常套句だった。水はありふれている、というのは、あまりにも身近で(特に日本では)そのありがたさを忘れていることから実感できる。しかし、例えば、水以外に、固体・液体・気体の三つの状態が日常的な温度範囲で観察できる物質があるだろうか。多分思いつかないと思う。実は物理化学的な観点から見てみるとかなり特殊な存在なのである。

まず、物質としての「水」の特殊な性質を整理してみたい。細かなことには目をつぶり、ここでは身近な現象と関係深い次の5つに着目する。

- ①固体の方が液体よりも密度が小さい
- ②沸点が異常に高い
- ③熱しにくく、冷めにくい(比熱が大きい)
- ④表面張力が大きい
- ⑤いろいろなものを溶かす

まず、①固体の方が液体よりも密度が小さい、について見てみよう。

具体的例を挙げると、「氷が水に浮く」という現象である。これは、氷(固体)の方が水(液体)よりも密度が小さいことを意味している。これは物質の一般的な性質からすれば特殊である²⁰。他にもそのような物質があるか調べてみよう²¹。

体積に着目すると、水が氷ると体積が増えると言い換えることもできる。2018年1月は記録的な寒波が日本列島を襲い、東京都心でも48年ぶりに最低気温が氷点下4℃まで下がり、水道管が凍結して破裂するなどのトラブルが多発した。東京都水道局もホームページに水道管の凍結防止法を掲載した

(<https://www.waterworks.metro.tokyo.jp/kurashi/trouble/touketsu.html>, 2018年2月28日確認)。凍結による水道管の破裂は、水道管の中の水の体積が増えたことによるものである。全面凍結した湖や沼の氷が堤状にせり上がる「御見渡り」という現象がある。長野県の諏訪湖のものが特に有名であるが、毎年見られるわけではない。2018年2月2日、諏訪湖の「御神渡り」の判定をつかさどる八剱神社(諏訪市)は、5年ぶりに「御神渡り」が出現したことを発表した。この現象は、湖面全面が結氷して体積が増えるため、凍った湖面から氷がせり上がることによるものである。

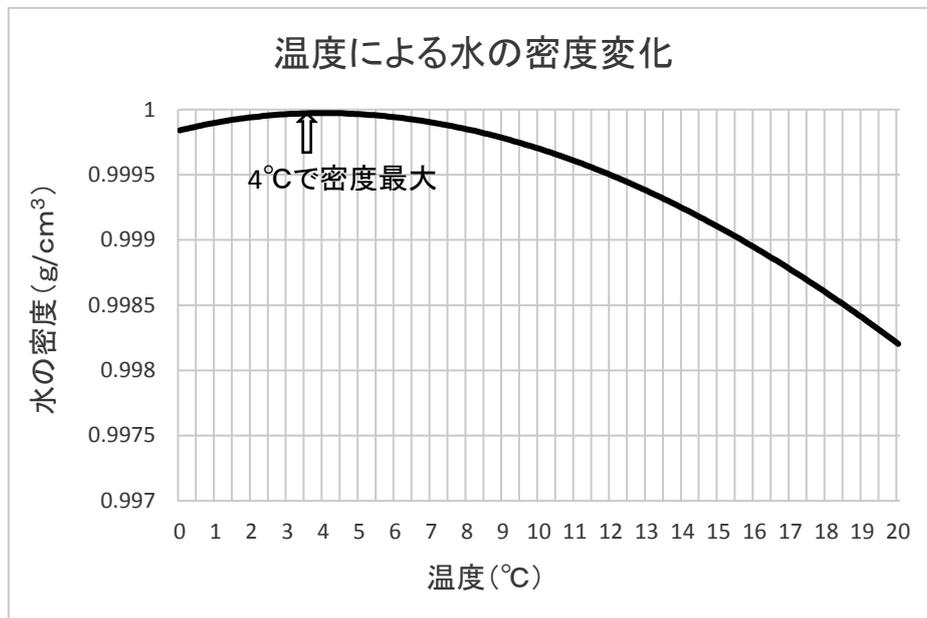
水の密度に着目して、今度は温度による水の密度変化を見てみる。一般的な物質では、温

¹⁹ 北野康先生は、「水」について、地球化学という観点から聴く人を引き込むお話をされる方だった。

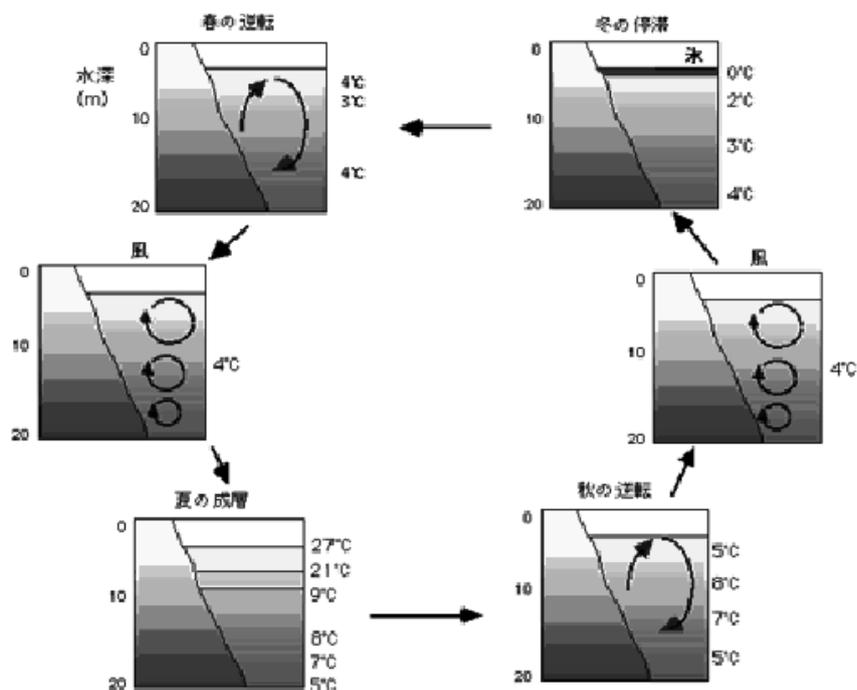
²⁰ 固体と液体の分子の運動を考えてみる。同じ数の分子を考えてみると、整然と分子が並んだ固体の方が、分子が動ける液体の方よりもコンパクトな体積の中に収まることが想像できる。つまり、一般的には固体の方が液体よりも密度が大きい。

²¹ 日常的な温度で観察できる例は少ないが、ベンゼンは室温では液体であるが、5.5℃以下では固体になり(融点 5.5℃)、80.1℃以上で気体になる(沸点 80.1℃)。また、純粋な酢酸は融点 16.6℃、沸点 117.8℃である。

度が高くなればなるほど密度は小さくなる。これは分子の運動が少しずつ激しくなっていくためである。水の場合は、下記グラフに示すように、4℃という中途の温度のときに最も密度が大きくなる(0.999973 g/cm³)。



この水の性質を、湖沼に当てはめて考えてみよう。水面が氷に覆われているときには、水面直下の水温は0℃であるが、密度の大きな4℃の水が下方に来るため、その湖の底の水は4℃となる。湖面の厚い氷に穴を開けて行なうワカザギ釣りも冬の風物詩であるが、こんな寒い中でもちゃんと魚が生きていられる環境だということだ。そして、春になり氷も溶けて水面の温度が上昇してくると湖の中で水の対流が起こる。このような対流は下図のように水温の変化に従って四季を通して起こり、この水の対流は湖の栄養成分の攪拌という役割も担っており、湖沼の生態形成に重要な役割を果たしている。



図の出展：文部科学省，科学技術・学術審議会（第8回），資料3-2 地球上の生命を育む水のすばらしさの更なる認識と新たな発見を目指して「第1章 水の性質と役割」中の図3「四季による湖水の温度変化」，

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu0/shiryo/attach/1331537.htm (2018年2月26日確認)

次に，②沸点が高い，ということについて見てみよう。

水は水素原子2個と酸素原子1個からできた分子で，化学式では H_2O である。つまり，酸素(O)の水素化合物ということもできる。酸素は，元素の周期表では16族に属している。16族元素は周期表を見ると，酸素(O)の下に順に，硫黄(S)，セレン(Se)，テルル(Te)が並んでいる。同じ族の元素は価電子の数が等しいので，同様な水素化合物， H_2S ， H_2Se ， H_2Te を作ることができる。物質の一般的な性質として「分子量が大きいほど融点や沸点も高くなる」ということが知られている。この一般則を当てはめると，水 H_2O が最も融点や沸点が低く， H_2S ， H_2Se ， H_2Te と順に高くなっていくはずである。ところが，実際の実験値を見てみると， H_2O は H_2S どころか H_2Te よりも融点や沸点が高い。(この節の節末問題1を参照)

水の沸点 100°C は，一般則からはずれて随分高い沸点であることがわかる。融点 0°C についても同様なことがいえる。このように高い沸点，高い融点を持っているからこそ，私たちの生活する温度の中で水の三態を観察することができるのである。ちなみに，日頃使っている温度の単位のセ氏温度($^\circ\text{C}$)は，スウェーデンの物理学者セルシウス(Celsius, Anders, 1701-1744)が1742年に水の氷点を 0°C ，沸点を 100°C として目盛ったことに始まっている。

次に，③熱しにくく，冷めにくい(比熱が大きい)，ということである。

熱しやすいとか冷めにくいというのは，物質の性質を表わす尺度として「比熱」で表わす。物質の温度を 1°C 上昇させるために必要な熱エネルギーの量は，物質によって異なる。比熱は，物質1gの温度を 1°C 上昇させるために必要な熱エネルギー量のことをいう²²。つまり，比熱が大きいということは，物質の温度を上昇させるためにエネルギーが多く必要だということの意味する。比熱が大きくなるほど，温まりにくく，冷めにくい性質をもっているといってもよい。では，いくつかの物質の比熱を比べてみよう(下表)。

水の比熱は他の物質と比べて大きいことが分かる。地球上には寒いところも暑いところもあるが，それでも，月面の昼の温度(150°C)と夜の温度(-100°C 以下)²³と比べれば，温度変化が非常に少ないことが分かる。このように温度変化が小さくて済んでいるのは，地表の約7割²⁴を比熱の大きい海洋が占めていることによる。

²² 比熱の単位は， $\text{J}/\text{K}\cdot\text{g}$ または $\text{J}/\text{K}\cdot\text{mol}$ で表す。 J (ジュール)はエネルギーの単位。

²³ 岩波書店『理化学辞典 第5版』「月」から引用

²⁴ 丸善『理科年表 平成19年版』「地理—世界各緯度帯の海洋の面積とその比」から引用

いろいろな物質の分子量（式量）と比熱

物質名	分子量・式量	比熱 (J/K・mol)	比熱 (J/K・g)
金 Au (25°C)	197.0	25.38	0.129
銀 Ag (25°C)	107.9	25.49	0.236
銅 Cu (25°C)	63.6	24.45	0.384
ダイヤモンド C (25°C)	12.0	6.115	0.510
エタノール C ₂ H ₅ OH (25°C)	46.1	111.4	2.42
水 H ₂ O (0°C)	18.0	75.9	4.217
水 H ₂ O (100°C)	18.0	76.0	4.22

※表の数値は、丸善『理科年表 平成19年版』から引用

水は、比熱以外にも熱に関する特殊な性質がある。状態が変化するときには必ず熱の出入りがある。水から水蒸気になるときに吸収する熱を「蒸発熱(heat of vaporization)」²⁵、その逆方向、すなわち水蒸気から水になるときに放出する熱を「凝縮熱」という。この2種類の熱は、熱の出入りの方向は逆だが、大きさは同じである。また、氷が水になるときに吸収する熱を「融解熱(heat of fusion)」、その逆方向の水が氷になるときに放出する熱を「凝固熱」という。この2種類の熱も、熱の出入りの方向は逆だが、大きさは同じである。

いろいろな物質の融点、沸点、融解熱、蒸発熱

物質名	分子量 式量	融点 (°C)	沸点 (°C)	融解熱 kJ/mol (kJ/kg)	蒸発熱 kJ/mol (kJ/kg)
水 H ₂ O	18.0	0	100	6.0 (333)	40.7* (2261*)
アンモニア NH ₃	17.0	-77	-33.5	5.66 (333)	23.35 (1374)
エタノール C ₂ H ₅ OH	46.1	-114.5	78.3	4.93 (107)	38.6 (837)
クロロホルム CHCl ₃	119.4	-63.5	61.2	-	29.4 (246)
窒素 N ₂	28.0	-209.9	-195.8	0.72 (26)	5.58 (199)
ジエチルエーテル C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	74.1	-116.3	34.6	7.19 (97)	26.5 (358)
ベンゼン C ₆ H ₆	78.1	5.5	25	9.84 (126)	31.7 (406)
四塩化炭素 CCl ₄	153.8	-22.9	76.7	-	30.0 (195)
塩化ナトリウム NaCl	58.4	800.4	1413	28.2 (483)	-

*100°Cにおける値

※表の数値は、丸善『理科年表 平成19年版』から引用

²⁵ 気化熱ともいう。

水は、融解熱、蒸発熱ともに他の物質に比べると大きいことが確認できる。このことも私たちの生活や気象現象に大きく関わっている。例えば、最近はあまり見られなくなったが、日本の夏の状景の一つとして「打ち水」という風習がある。暑い夏をしのぐため、庭や路に水をまいて涼を求める生活の知恵である。実はこれは水の蒸発熱が大きいということを利用したものなのである。打ち水をしたところからは水蒸気が上昇するが、このとき太陽に照りつけられた地面の熱は、水を水蒸気に変えるときの蒸発熱(気化熱)として使われる。その結果、地面は熱を失って涼しくなるわけである。水が大きな蒸発熱をもっているからこそ、地面から多くの熱を奪うことができるわけだ。次にもう少しスケールの大きな現象、台風について考えてみよう。気象衛星の画像をいつでも見るできるようになったこの頃では、台風が太平洋の南の海上で発生し、発達しながら北上してくる様子を見ることができる。台風の上陸時の強風の映像、被害の映像などを見れば、台風が如何に大きなエネルギーをもっているかがよく分かる。台風の大きなエネルギーの源は何だろうか。答えから先に言うと、水の凝集熱である。熱帯の海上に降り注ぐ太陽光により、水蒸気がどんどん発生する。そして、水蒸気は上昇して雲になる。雲は白く見えことからわかるように、水蒸気ではなく小さな水の粒である。つまり、水蒸気が水へと状態が変化したわけである。この状態の変化のとき、凝縮熱が放出される(凝縮熱は吸収か放出かという熱の出入りの方向は逆だが、大きさは蒸発熱と同じである)。放出された熱が周辺の空気をあたため、上昇気流はさらに強まる。これが繰り返され、積乱雲などが発達する。ちなみに気象衛星画像でお馴染みのように、台風の雲は左巻きの渦になっている。これは地球に自転によって生じる「コリオリの力」によるものである。こうして熱帯低気圧が発生し、さらに発達すると台風となる。台風のもたらす風が、湿度が高く暑いのは、海上からふんだんに供給される水蒸気と、水蒸気が水粒に変わるときに放出する莫大な熱のためである。このように、台風のエネルギーの源は水蒸気が水に変わるときに放出される熱なのである。すなわち、台風が発生するためには、水蒸気の原因となる水と、水蒸気を発生させるエネルギーの 2 つの条件が必要である。台風の仲間である、サイクロンやハリケーンも 2 つの条件を満たす熱帯の海上で発生している。熱帯地方であっても、大陸では条件の一つである水の供給がなされないため、台風のようなものが発生しない。

次に④表面張力が大きい、ということについて見てみよう。

コップ山盛りに水を入れるとき、水面がコップの上端よりも少し上に盛り上がっているのを見る。また、葉っぱの上の水の玉は何ともかわいらしいものである。このような現象は水が大きな表面張力を持っているために起こるのである。いくつかの物質の表面張力を比較してみよう。

いろいろな物質の表面張力

物質	接触する気体	温度 (°C)	表面張力 γ (10^{-3}N/m)
水 H_2O	空気	25	71.96
エタノール $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	窒素	20	22.27
ジエチルエーテル $\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$	その蒸気	20	16.96
オリーブ油 (混合物)	空気	20	32
グリセリン $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$	空気	20	63.4
石油 (混合物)	空気	18	26
水銀 Hg	窒素	25	482.1
ヘリウム He	その蒸気	-268.9	0.098

※表の数値は、丸善『理科年表 平成19年版』から引用

水は、こぼすとコロコロと球状になって転がる水銀のような特殊な物質を除けば、ドロリとしたグリセリンよりも表面張力が大きい。表面張力が大きいほど、毛管現象（毛細管現象ともいう）により上昇する高さも高くなる。このため、樹木の木部の網目構造に助けられて、背の高い樹木の先端まで水を行き渡らせることができるのである。

次は、⑤いろいろなものをよく溶かす、という性質について見てみよう。

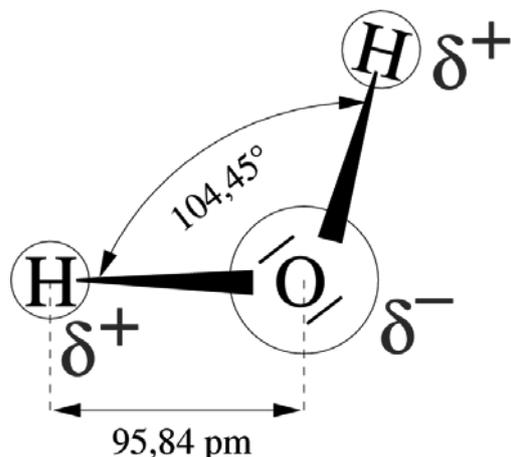
私たちの体も体重のほぼ6～7割が水である²⁶。この水の部分は体液と呼ばれ、その内訳は血漿や組織液などの細胞外液が1/3、細胞内液が2/3である。このような体液はどのような物質が含まれているのだろうか。量的な関係は生理学的に非常に重要なことであるが、ここでは体の中の水に溶けている物質という点に着目して、その物質を列挙する。陽イオンとして、ナトリウムイオン(Na^+)、カリウムイオン(K^+)、カルシウムイオン(Ca^{2+})、マグネシウムイオン(Mg^{2+})などがある。陰イオンとして、塩化物イオン(Cl^-)、炭酸水素イオン(HCO_3^-)（重炭酸イオンともいう）、リン酸水素イオン(HPO_4^{2-})、硫酸イオン(SO_4^{2-})、有機酸、タンパク質などがある。ナトリウムやカリウムのような無機質のものだけでなく、有機酸やタンパク質なども含まれている。水は実にいろいろな種類の物質を溶かすことができる。このことが、生物の存在を可能にしている。ちなみに、医療用に用いられる生理食塩水は0.9%の食塩(NaCl)をとかしたものである。また、海水には約3.5%の塩類が溶けている。大部分が NaCl と塩化マグネシウム MgCl_2 である。このように、アルカリ金属やアルカリ土類金属のイオンである Na^+ や Mg^{2+} が多いのは、地球の誕生後、海洋がどのようにできたかという海の誕生に関係している。

²⁶赤ちゃんのときの方が水分量の割合が多く、年を取るとその割合は少なくなり、性別や体型によっても異なるので体重の5～8割と幅がある。

§ 2-2 水の分子構造

前節では、水のもつ特殊な性質とそのことが私たちの生活や環境と関係しているかを現象面から見てきた。では、なぜ、水はこのように様々な特殊な性質をもっているのだろうか。本節ではその理由を解く鍵となる水の分子構造について学ぶ。

水は酸素原子 O が 1 個と水素原子 H が 2 個からできた分子で、図のような酸素原子を頂点とした折れ線上の形をしている。



水分子の構造

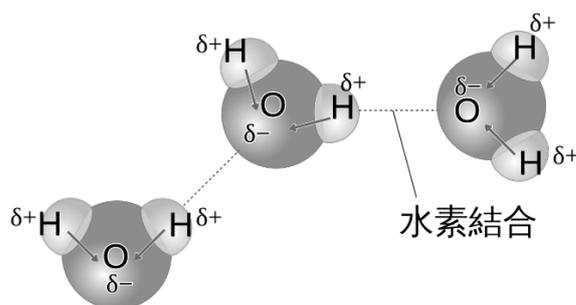
図の出展：wikimedia commons

File:Watermolecule.png

[https://commons.wikimedia.org/wiki/](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Watermolecule.png)

File:Watermolecule.png (2018 年 2 月 27 日確認)

前述したように、分子は 2 つ以上の原子が電子を共有することによりできている。先に例示した水素分子のように同じ種類の原子が結合するときには共有電子対はどちらかの原子に偏ることはない。しかし、異なる種類の原子の結合では少し事情が違う。つまり、共有電子を引きつける強さ²⁷が元素によって異なる。酸素と水素では酸素の方が電子を引きつける強さが大きく、このため、水素と酸素の結合では共有電子対は酸素原子の方に偏り、酸素原子はわずかに負の電荷を帯びる。酸素原子のところには δ^- (δ : デルタは「極わずか」という意味) とあるのは、酸素原子がわずかに負の電荷を帯びているということを示している。水分子全体では電氣的に中性だから、この負の電荷を相殺するように水素原子はわずかに正の電荷を帯びている (δ^+)。つまり、水分子は折れ曲がった部分がわずかに負の電荷を帯び、両端はわずかに正の電荷を帯び、分子の中で電荷の偏りがある極性分子である。一般的な自然の性質として、電氣的にプラスのものとマイナスのものは互いに引き合う。そこで、複数の水分子が存在しているときにもこの一般的な性質に従い、図のように、正の電荷を帯びたある水分子の水素原子が、負の電荷を帯びた他の水分子の酸素原子との間で水素結合を形成する。



図の出展：wikimedia commons

「Hydrogen-bonding-of-water illust.jp」

[https://commons.wikimedia.org/wiki/](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrogen-bonding-of-water_illust_jp.svg)
File:Hydrogen-bonding-of-water_illust_jp.svg (2018 年 2 月 27 日確認)

²⁷ この強さの目安を電気陰性度といい、数値で表わす。

液体の水のときには、水分子と水分子の間の距離が小さいので、水素結合もまだかなり残っている。水が水蒸気になるときは、つまりこの水分子が自由に飛び回ることができるようになるためには、一般の物質にはない、このような水素結合まで断ち切ってやる必要がある。このため、水の沸点は他の物質に比べて高くなる（節末問題参照）。

氷の結晶では水分子が規則正しく並ぶ。1個の水分子の周りに、水素結合を介して4個の水分子が配置される（下図参照）。塗りつぶした丸の酸素原子5個に着目すると、酸素原子は正四面体の中心と4隅に配置している（いわゆるダイヤモンド構造）。つまり、酸素原子3個を結んだ結合角は、 109.5 度となる。このとき、酸素原子と酸素原子の間の結合は、酸素原子と水素原子との共有結合長と、その水素原子と隣の水分子の酸素原子との水素結合長を合わせた長さ(0.276 nm)となっている（ダイヤモンドでは炭素原子間距離は 0.15 nm）。



図の出展：文部科学省， 科学技術・学術審議会（第8回），資料3-2 地球上の生命を育む水のすばらしさの更なる認識と新たな発見を目指して「第1章 水の性質と役割」中の図2，
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu0/shiryo/attach/1331537.htm (2018年2月26日確認)

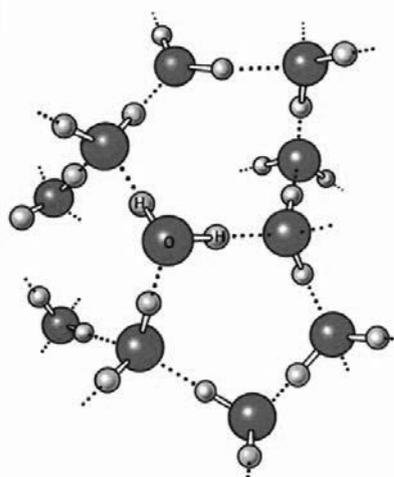
結晶の空間充填率は計算することができるが、ダイヤモンド構造は最も空間充填率が低い(34%)。水から氷の結晶となるときに、このような隙間の多い構造となるため、体積が増えて密度が低くなるのである。ちなみに、水が氷になると体積は約1割増加する。

氷が溶けて水になるとこの整然と並んだ分子が崩れ、大きな隙間に水分子が入り込むようになる（体積の減少）。一方、温度が上昇することにより、水分子の熱運動で体積が増える方向にある。この体積の減少と増加の両方が起こる。その兼ね合いで、最も密度が大きくなる温度が約 4°C というわけである。それ以上の温度になると、一般的な物質と同様、水分子の動きが少しずつ激しくなるにつれて、体積増加の効果が大きくなり、密度は温度上昇とともに小さくなっていく。また、氷から水になるときにも、やはり一般の物質にはない水素結合を少し断ち切る必要がある。このため、水の融点は他の物質に比べて高くなる。また、沸点についても、まだ残っている水素結合を完全に断ち切る必要があるため高くなる。

水の蒸発熱や融解熱が大きいという特殊な性質も、この水素結合を断ち切るのにエネルギーが多く必要なためである。比熱についても同様に考えることができる。比熱は物質の温度を 1°C 上昇させるに要する熱量であった。物質の温度が上がると、その物質を構成する原子や分子の熱運動が激しくなる。つまり、水分子の熱運動を活発にさせるためには、水素結合を切らなくてはならない。このため、水の比熱は大きいのである。

表面張力についても、水の分子間にはたらく水素結合により説明できる。まず、表面張力

とは何に起因した力だろうか。岩波書店『理化学辞典 第5版』によれば「液体はその表面積をできるだけ小さくしようとする傾向をもち、外力の作用が無視できるときは球形をとる。これは液体の分子間にはたらく引力にもとづいて、液体表面に沿って一種の張力がはたらくためである。これを表面張力という。」とある。つまり、液体の分子間にはたらく力、即ち、水においては水素結合である。水中における水分子は、図に示すようにネットワーク状の水素結合によってつながっている。このことが、水の大きな表面張力をもたらしていると考えられる。



水中における水分子の水素結合のネットワークの模式図

(点線が水素結合)

図の出展：wikipedia commons

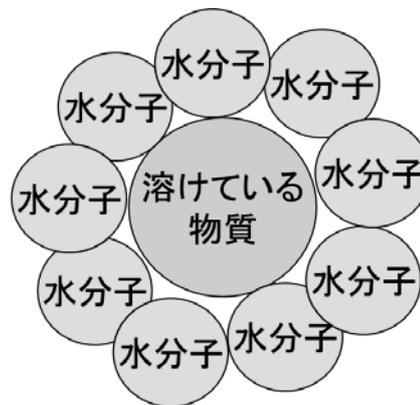
File:Wasserstoffbrückenbindungen

Wasser.png

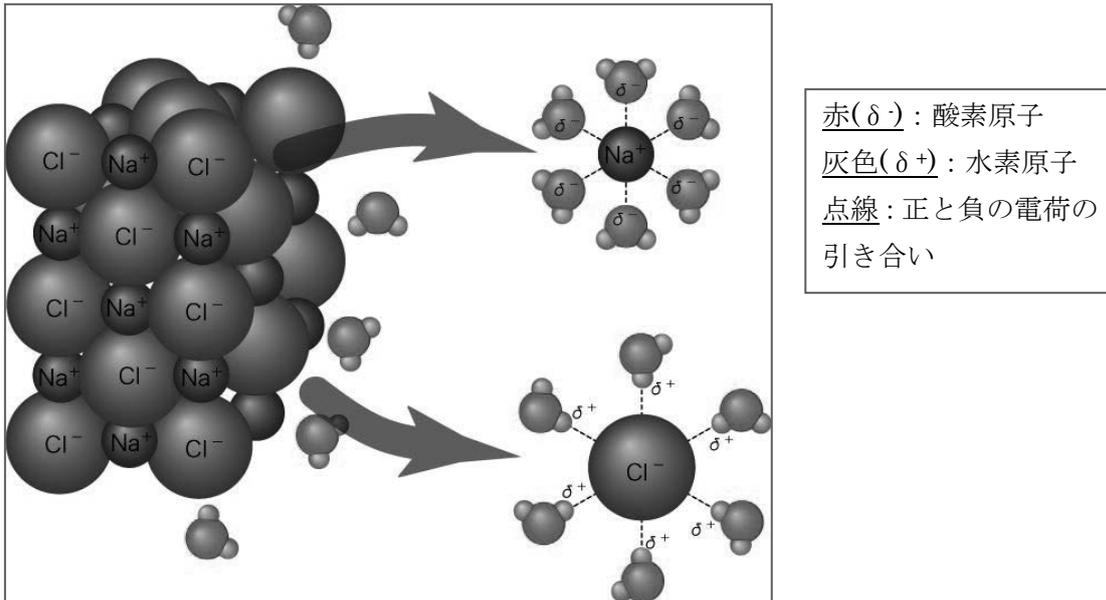
<https://commons.wikimedia.org/wiki/> (2018年3月2日確認)

次にものをよく溶かすという性質について考えてみる。

そもそも、水に溶けている状態とは同様なことだろうか。模式的に概念を図示した(右図)。このような、溶けている物質(溶質)が水分子に取り囲まれている状態である。



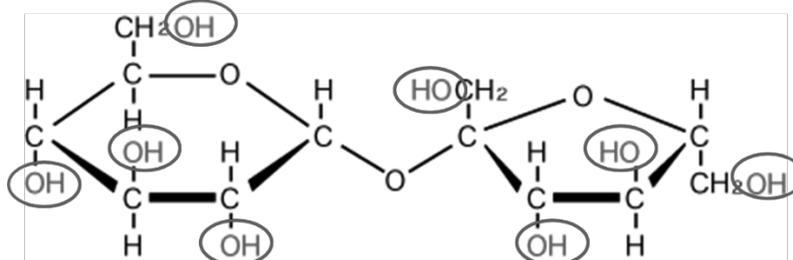
水は、食塩 (NaCl) でも砂糖 (ショ糖: $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) でもよく溶かす。前者はナトリウムイオン (Na^+) と塩化物イオン (Cl^-) がイオン結合してできた物質であり、後者は炭素原子 12 個、水素原子 22 個、酸素原子 11 個が共有結合した分子でできた物質である。溶ける前の食塩の結晶では、 Na^+ と Cl^- とが強く引き合っている。しかし、水に入れると、水分子で負の電荷を帯びた酸素原子が Na^+ をと引き合い、正の電荷を帯びた水素原子が Cl^- と引き合う。そして、液体側に Na^+ と Cl^- を別々に引っ張り出す。引っ張り出された Na^+ と Cl^- は、図のように、正の電荷を持つ Na^+ には水分子の負の電荷を帯びた酸素原子と引き合い、逆に負の電荷を持つ Cl^- には正の電荷を帯びた水の酸素原子と引き合い、水和する。



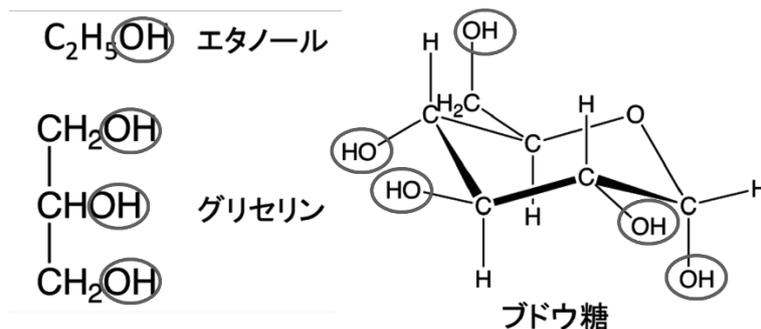
図の出展: エヌ・ティー・エス社発行『実感する化学(上巻)』「塩化ナトリウムの水への溶解」(第5章)

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

次に砂糖はどうだろうか。まず、砂糖（ショ糖）の化学構造式を示す。



スクロースは、グルコース（ブドウ糖，左側）とフルクトース（果糖，右側）が α -1,2-グリコシド結合した糖である。-OH（ヒドロキシ基，丸囲み）を多く持つことが分かる。ヒドロキシ基は水と同様、酸素原子は δ^- であり、水素原子は δ^+ である。このように分子内に極性が存在するため、水の中では、ショ糖のヒドロキシ基の酸素原子(-OH)と水分子の水素原子の間、ショ糖のヒドロキシ基の水素原子(-OH)と水分子の酸素原子の間に水素結合が生ずる。そうすると、砂糖の分子は全体的に水分子で取り囲まれ、水和する。



エタノール C_2H_5OH 等が水によく溶けるのも同じ理由である。このように、水は、極性をもつ分子を水和する、即ち、溶かすことができる。逆に、ベンゼン C_6H_6 やヘキサン C_6H_{14} など極性を持たない分子は水に溶けない。

【問 1】下記の 2 つの表の数値を用いて、横軸を分子量、縦軸を温度 ($^{\circ}C$) として実際にグラフを書いて 14 族と 16 族の水素化合物の違いを確かめ、その違いをもたらす理由を考察せよ。また、その理由から推測して、他に 16 族と同じような挙動を示すのは何族の水素化合物かを答えよ。

16 族の水素化合物の融点と沸点

化合物名	分子量	沸点 ($^{\circ}C$)	融点 ($^{\circ}C$)
H_2O (water, 水)	18.0	100.0	0.0
H_2S (hydrogen sulfide, 硫化水素)	34.1	-60	-82
H_2Se (hydrogen selenide, セレン化水素)	81.0	-41.3	-65.7
H_2Te (hydrogen telluride, テルル化水素)	129.6	-2.2	-49

14 族の水素化合物の融点と沸点

化合物名	分子量	沸点 ($^{\circ}C$)	融点 ($^{\circ}C$)
CH_4 (methane, メタン)	16.0	-161.5	-182.5
SiH_4 (silane, シラン)	32.1	-112	-185
GeH_4 (germane, ゲルマン)	76.6	-88	-165
SnH_4 (stannane, スタンナン)	122.7	-52	-146

※表の数値はいずれも、en.wikipedia.org から引用した。

【問 2】「いろいろな物質の融点、沸点、融解熱、蒸発熱」の表を見て以下の物質について比較し、気づいた点を示し、その理由について考察せよ。

- ・エタノールとジエチルエーテル (ヒント：沸点など)
- ・ジエチルエーテルとベンゼン (ヒント：融点など)

【問 3】「いろいろな物質の融点、沸点、融解熱、蒸発熱の表」を見て塩化ナトリウムの融点や沸点の他の物質と比べた特徴を挙げよ。またその理由を考察せよ。

【問 4】「いろいろな物質の表面張力の表」を見て以下の物質について比較し、その力の大小の理由について考察せよ。

- ・水とエタノールとグリセリン
- ・エタノールとジエチルエーテル

【問 5】台所洗剤は、油で汚れたお皿や鍋をきれいにしてくれる。このことについて、分子レベルで説明せよ。

【問 6】テキストで例示した以外にも、水に関わるおもしろい現象は多数ある。各自で例を探し、なぜそうなるのかを考察せよ。

【問 7】水素結合は、生物の遺伝物質 DNA においても重要な役割を果たしている。このことについて、分子レベルで説明せよ。

【参考動画】

「分子科学研究所」のアップした You Tube (いずれも *Nature* 誌に掲載された研究論文の一部) ☆BGMも併せて視聴してみることをおすすめする。研究者の遊び心が感じられる。URL はいずれも 2018 年 3 月 2 日確認。

・水が氷になるまで

http://www.youtube.com/watch?v=8eXdXHP5dk8&feature=c4-overview&list=UUVnZi_CwLOBebeWyFkJV1w

(水が凍って氷になるまでをコンピュータでシミュレーションし、視覚化した動画です。水の温度を下げるとマイナス 40 度くらいまで凍らない「過冷却状態」が出来ます。そして、はじめのうちは安定な小さな領域、「氷核」が生まれては消えていきます。水の揺らぎの中で、氷核の成長・崩壊を繰り返し、その中で十分に秩序を形成することが出来た場合に、本当の氷となっていきます。)

音楽は、バッハの無伴奏チェロ組曲第 1 番ト長調 BWV1007。心地よい 1/f 揺らぎの演奏と、水素結合が生まれては消えるという揺らぎがシンクロしているようだ。

シミュレーションの原著論 : M.Matsumoto, S.Sito, I.Ohmine, *Nature*, vol.416, pp.409-413, 28 March 2002

・氷が融解して水になるまで (1)

http://www.youtube.com/watch?v=5mPL6BgIohk&list=UUVnZi_CwLOBebeWyFkJV1w&feature=c4-overview

(氷が融解して液体の水になるまでをコンピュータでシミュレーションし、視覚化した動画です。氷中の水分子は全て四配位をしており、エネルギー的に安定で、拘束された構造にいます。初めは、熱揺らぎによって、結晶点から離れた欠陥分子が出来ても、すぐに結晶点へ戻ってしまい、なかなか融けません。しかし、あるときから、結晶構造へ戻りにくくなり、且つ、構造変化が激しくなります。そして、結晶構造の破壊を止める事ができなくなり、やがて液体の水へ至ります。)

・氷が融解して水になるまで (2)

http://www.youtube.com/watch?v=pYoZ3Cy0fmw&list=UUVnZi_CwLOBebeWyFkJV1w

((1) の各時間でエネルギー最小化を行い、構造変化を顕在化させたものです。氷が融解して液体の水になるまでをコンピュータでシミュレーションし、視覚化した動画です。氷中の水分子は全て四配位をしており、エネルギー的に安定で、拘束された構造にいます。初めは、熱揺らぎによって、結晶点から離れた欠陥分子が出来ても、すぐに結晶点へ戻ってしま

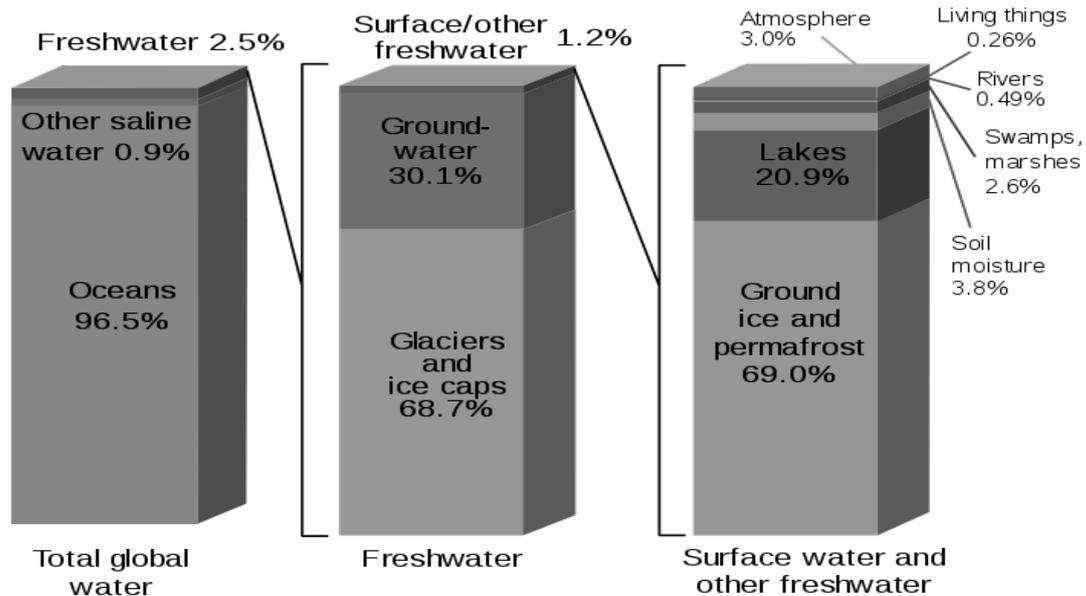
い、なかなか融けません。しかし、あるときから、結晶構造へ戻りにくくなり、且つ、構造変化が激しくなります。そして、結晶構造の破壊を止める事ができなくなり、やがて液体の水へ至ります。)

§ 2-3 天然の水

地球上の約 7 割は海洋である。陸は約 3 割である。

そして、地球表層の水における海水の割合は 96.5% である。淡水の割合はわずかに 2.5% である。淡水の中で、なんと約 7 割が氷河であり、地下水が約 3 割、河川や湖沼などの地表淡水は 1.2% にすぎない。私たちが日頃利用している、いわゆる「水」は地球全体の水から見れば驚くほど少ない。

Where is Earth's Water?



図の出展: USGS Water Science School から引用(United States Geological Survey; USGS, アメリカ地質調査所),

Source: Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources* (Oxford University Press, New York).

ted States Geological Survey;
<https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>



水の循環

図の出展： USGS Water Science School から引用(United States Geological Survey; USGS, アメリカ地質調査所), <https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>

上図は地表と大気の間での水の循環を示したものである。水の循環には出発点はないが、海から始めてみよう。水の循環を引き起こす太陽は海水の温度を上昇させる。海水のいくらかは大気中へ蒸気として蒸発する。蒸発はまた、淡水湖や河川でも起こる。陸地では、植物から蒸散した水や土壌から蒸発散により蒸気を大気中に供給する。氷や雪が融けることなく直接蒸気として蒸発する昇華によっても大気中に水蒸気が供給される。また、上昇気流が蒸気を温度が低い空気中に持ち上げることで、蒸気（気体）が雲（液体）へと凝縮する。

気流が雲を地球の周りに動かし、そして雲の粒子は衝突・成長し、降水として空から降下する。雪として落ちてくる水分は、氷冠や氷河として蓄積される。温暖な気候の場所の雪は春になると融け、雪解け水として陸上を流れる。ほとんどの降水は海へ落ちるが、陸上に落ちたものは重力によって地表水（河川・湿地・湖沼などの水）として地表を流れる。

雨水は河川へ流れ込み、河川流となって海に向かって移動する。そのうち、いくらかは湖や河川の淡水として貯えられる。しかし、全ての雨水が地表水というわけではなく、その多くは地中に吸い込まれる（浸透）。その中でも地中深くに浸透した水は帯水層（水が充満した地下の岩石で長期間にわたって多量の淡水の地下水を溜めておくことができる）へ至り、帯水層へ水を補給する。

地下水のいくらかは地表面近くに存在し、地下水流として地表水（と海）の中へしみだすことができる。また地表への開口部を見出すと流れの「源泉」として流出する。そして長い時間をかけて水は移動を続け、水循環の「終わり」であり始まりでもある海へと戻る。

私たち人類は、このダイナミックな自然の中で生活しているという気持ちを忘れてはい

けないと思う。

下表に、地球全体での水の量を体積で見積もったものを示す。なお、ここで示している数字は概数である。

水 源	水の体積 (km ³)	淡水中の割合 (%)	水全体中の割合 (%)
Oceans, Seas, & Bays (海洋, 海, 湾)	1,338,000,000	--	96.5
Ice caps, Glaciers, & Permanent Snow, (氷冠, 氷河, 万年雪)	24,064,000	68.7	1.74
Groundwater, (地下水)	23,400,000	--	1.69
Fresh (淡水)	10,530,000	30.1	0.76
Saline (塩水)	12,870,000	--	0.93
Soil Moisture, (土壌の水分)	16,500	0.05	0.001
Ground Ice & Permafrost (底氷, 永久凍土)	300,000	0.86	0.022
Lakes, (湖沼)	176,400	--	0.013
Fresh (淡水)	91,000	0.26	0.007
Saline (塩水)	85,400	--	0.006
Atmosphere, (大気中の水)	12,900	0.04	0.001
Swamp Water, (湿地水)	11,470	0.03	0.0008
Rivers, (河川)	2,120	0.006	0.0002
Biological Water, (生物中の水)	1,120	0.003	0.0001

出展 : Source: Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources* (Oxford University Press, New York).

USGS Water Science School, <https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>

水文学²⁸の分野では、平均滞留時間(存在する水がすべて入れ替わるために要する時間、滞留時間 : residence time)を用いて、その動きを定量的に見積もる。上表に示された貯水空間の水の量と、水の循環でのその貯水空間への水の出入りの量から見積もることができる。下表に、様々な貯水場所についての典型的な滞留時間を示す。

²⁸ 水文学 (すいもんがく, hydrology) とは、地球上の水循環を主な対象とする地球科学の一分野である。主として、陸地における水とその循環過程から、地域的な水のあり方・分布・移動・水収支等に主眼をおいて研究する科学である。

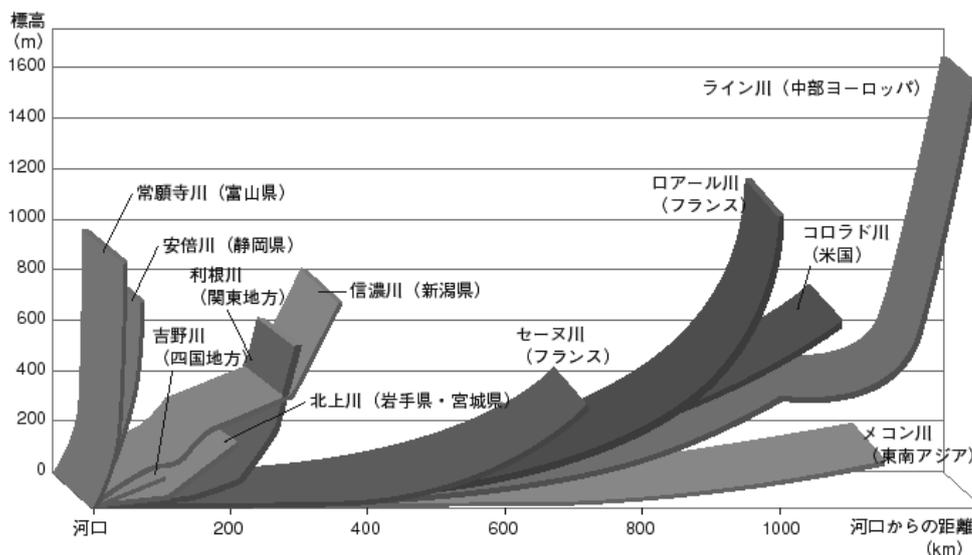
各貯水空間別の水の平均滞留時間

Reservoir(貯水空間)	Average Residence Time(平均滞留時間)
海洋水	3200 年
氷河	20～100 年
季節要因の積雪	2～6 月
土壌の水分	1～2 月
地下水：浅部	100～200 年
地下水：深部	10,000 年
湖沼	50～100 年
河川（平均値）	2～6 月（16 日）
大気中の水分	8 日

表の出典：FUNDAMENTALS OF PHYSICAL GEOGRAPHY (2nd Edition)

<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8b.html>

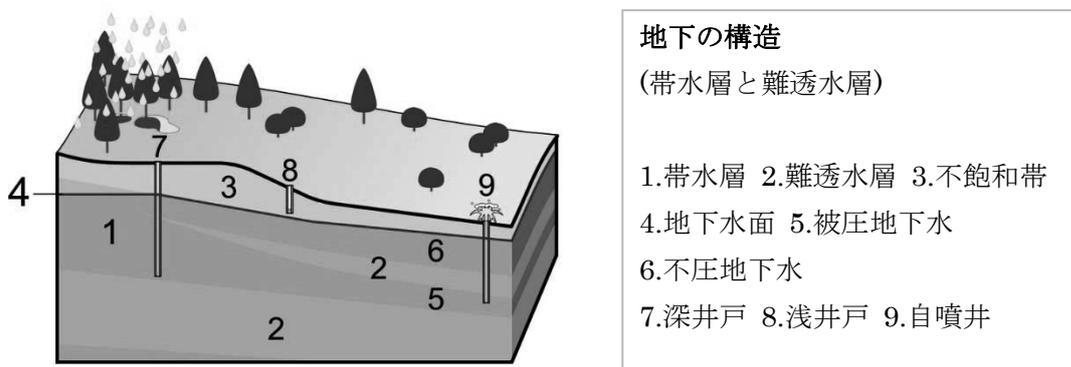
この表で、氷河、湖沼、河川の値に大きな差があるのは、氷河の位置や規模、湖沼の大きさの大小、河川の長さの長短に差が大きいためである。世界の河川には 5000km を超えるような大河もあれば、日本の河川のように最長でも 367km（信濃川）という場合もあるが、その平均の滞留時間が 16 日と見積もられている。日本の河川は下図に示すように一般的に、短くて勾配が急であるという特徴があるため、日本の河川の平均滞留時間は世界のそれよりさらに短くなる。



出展：国土交通省ホームページ「諸外国と比べて急こう配の日本の河川」

http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai_3-1-2.html

地下水の滞留時間は、水が地下水面に供給されてから帯水層中を移動に要した時間として定義されている。地下の地質構造などに大きく依存している。



図の出展：Wikimedia commons

File:Groundwater (aquifer, aquitard, 3 type wells).PNG

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Groundwater_\(aquifer,_aquitard,_3_type_wells\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Groundwater_(aquifer,_aquitard,_3_type_wells).PNG)

日本では地下水の滞留時間は数年から数百年と推定されており、海外に比べると短い。下記に、日本のものも含むデータを示す。

表 2.1 地下水の滞留時間

(出典：地下水の保全と利用、建設省河川局河川計画課)

地 域	滞 留 時 間
黒部川扇状地*扇端部の砂丘の地下水	0.14 年
黒部川扇状地の深層地下水**	2 年以上
那須岳周辺から基底流出***する地下水	2～3 年以上
南関東の深層地下水	20 年以上
市原臨海部の深層地下水	30 年以上
濟州島の火山岸中の地下水	2～9 年以上
オタワ川流域の湖沼水と地下水	約 3 年
チェコスロバキアの山地小流域からの地下水	2.5 年
テキサス州カリゾ砂岩中の地下水	最大 27,000 年
マラカイボ湖岸の深層の地下水	4,000～35,000 年
リビア砂漠のヌビア砂岩中の地下水	25,000～35,000 年
中央ヨーロッパの深層地下水	約 10,000 年

*扇状地(13)

**浅い不圧地下水よりも深い被圧帯水層の地下水のこと。

***地下水が低水期や渇水期においても定常的に河川等に流れ出ること。

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/mizu_junkan/tikasui_management/pdf/siryoku4-3.pdf
から引用

次に、化学組成の観点から、天然の水を見てみる。

天然の淡水の化学組成の例

サンプル番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	雨水, Menlo Park, California	雨水の 平均, sites in North Carolina and Virginia	ライン 川の組 成, ア ルプス から流 れ出た とき	流出火 成岩中 の流 水, Wash ington Cascade s	Joe Creek(小川)の 起点, southwe stern Oregon, 1990年 11月雨 季	Joe Creek(小川)の 起点, southwe stern Oregon, 1991年 9月乾季	グレー トソル トレイ ク Utah	海水の 平均	地下 水, Supai Formati on 石灰 岩から, Grand Canyon	地下 水, 火 山岩か ら, New Mexico	地下 水, シ エラネ バダ山 脈の 泉, 短 滞留時 間	地下 水, カ ナダの 変成岩 から, 長滞留 時間
Calcium(Ca ²⁺)	0.8	0.65	40.7	1.68	14	22	241	400	144	6.5	3.11	4540
Magnesium(Mg ²⁺)	1.2	0.14	7.2	0.24	13	17	7200	1350	55	1.1	0.7	160
Sodium(Na ⁺)	9.4	0.56	1.4	0.16	8	14	83,600	10,500	~27	~37	3.03	2740
Potassium(K ⁺)	-	0.11	1.2	0.31	-	0.5	4070	380	~2	~3	1.09	32.1
Bicarbonate(HCO ₃)	4	-	114	5.4	104	129	251	28	622	77	20	55
Sulfate(SO ₄ ²⁻)	7.6	2.2	36	1.3	4.7	1.3	16,400	185	60	15	1	1
Chloride(Cl ⁻)	17	0.57	1.1	0.06	8.5	33	140,000	19,000	53	17	0.5	12,600
Silica(SiO, SiO ₂)	0.3	-	3.7	0.7	24	30	48	3	22	103	16.4	8.5
TDS	38	4.7	207	10	120	180	254,000	35,000	670	222	36	20,338
pH	5.5	-	-	6.9	7.7	7	7.4	-	-	6.7	6.2	6.5

全ての濃度は mg/L である。/TDS は全容解固形物である。/ (-) は成分が検出できなかったか、分析されなかったことを示す。/(~) は「概数」を意味する。

出典 : Water Encyclopedia Fresh Water, Natural Composition of

<http://www.waterencyclopedia.com/En-Ge/Fresh-Water-Natural-Composition-of.html> (2018年3月1日確認)

日本の河川及び湖沼水の化学組成を下記に示す。濃度は(mg/L)で表示されている。

河川・湖沼名	長さ・面積	観測点	pH	アルカリ度 Ca CO ₃	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂
利根川	322 km	茨城・取手町	7.1	29.6	5.6	1.5	13.3	3.3	5.3	20.2	23
信濃川	367 km	新潟・長岡市	6.4	18.9	1.4	0.7	10.2	2.1	4.4	18.7	9.3
紀ノ川	136 km	和歌山・和歌山市	7.1	37.3	5.2	0.9	12.9	1.3	4.4	6.6	14.4
琵琶湖	607.3 km ²	滋賀・湖心	7.4	25.2	5.1	0.8	8.5	2.7	3.8	3.3	1.6
霞ヶ浦	167.6 km ²	茨城・新治郡大津村	7.1	43.4	16.7	3.7	16.6	5.9	20.1	36.7	13.8
山中湖	6.8 km ²	山梨	7.3	38.6	3.8	1.2	8.3	3.4	0.8	1.6	9.3

出展：丸善『理科年表 平成 19 年版』「日本の河川・湖沼水の化学成分」から引用

日本の河川や湖沼の水は、海外のそれと比べて、カルシウムイオン(Ca²⁺)やマグネシウムイオン(Mg²⁺)が少ない。これは、滞留時間が比較的短いことと関係している。カルシウムイオンやマグネシウムイオンが多いか少ないかによって、多い方を硬水(hard water)、少ないほうを軟水(soft water)と区別する。前者は、石鹼が泡立ちにくく洗濯に適さないが、後者はそれに対して洗濯に適している。

【問 8】「天然の淡水の化学組成の例」の表のサンプル番号 1 の雨水の pH が 5.5 と酸性よりになっている。これはなぜかを考察せよ。また、「酸性雨」²⁹とは pH5.6 以下の雨が、なぜ pH7.0 以下ではないのだろうか。その理由を化学反応式を用いて表し、pH5.6 という数字の根拠を考察せよ。

【問 9】「天然の淡水の化学組成の例」の表のサンプル番号 3 と 4 を比較して化学組成における特徴的な違いを答えよ。また、その違いは何に起因するかを考察せよ。

※ヒント：スイスアルプスの形成の歴史を調べてみよう

参考サイト：神奈川県立生命の星・地球博物館

<http://nh.kanagawa-museum.jp/research/tobira/archives/10-2/imanaga.html>

【問 10】「天然の淡水の化学組成の例」の表のサンプル番号 7 と 8 を比較して化学組成における特徴を答えよ。また、サンプル番号 7 (米国ユタ州のグレートソルトレイク)の成り立ちからその特徴を考察せよ。

²⁹ 気象庁ホームページ「酸性雨に関する基礎的な知識」
http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/acid/info_acid.html

【問 11】「天然の淡水の化学組成の例」の表と「日本の河川及び湖沼の化学成分」の表を比較して気づく点を列挙し、その理由を考察せよ。

【問 12】海水の平均的な水素イオン濃度(pH)を調べよ。なぜそのような pH に成るのかを考察し、海水の pH を決める要因についても考えてみよ。大気中の二酸化炭素濃度が増加しているという事実が報じられているが、このことは、海水にどのような影響を与えるかを考察せよ。

【問 13】「天然の淡水の化学組成の例」の表のサンプル番号 9 と 10 を比較して化学組成における特徴的な違いを答えよ。また、その違いは何に起因するかを考察せよ。

※ヒント：それぞれどのような岩石に接触していた地下水か

【問 14】「天然の淡水の化学組成の例」の表のサンプル番号 11 と 12 を比較して化学組成における特徴的な違いを答えよ。また、その違いは何に起因するかを考察せよ。

※ヒント：滞留時間

【問 15】日本の水は一般に軟水が多く、海外では硬水が多い、といわれる。この理由について考察せよ。

§ 2-4 飲料水

先に、河川や湖沼の水の成分比較において、硬水と軟水について触れた。水の硬さ、軟らかさは水の味にも関係している。そこで、水1000ml中に溶けているカルシウムとマグネシウムの量を表わした数値を「硬度(hardness)」といている。いくつかの国で硬度の算出の仕方に違いがあるようであるが、ここではWHO（世界保健機関）のガイドライン³⁰によるもの（米国及び日本もこれに同じ）を示す。カルシウムとマグネシウムのイオン濃度（mg/L）を、下式により炭酸カルシウム（CaCO₃）濃度に換算する。

$$\text{硬度} : \text{CaCO}_3 \text{ (mg/L)} = \text{Ca (mg/L)} \times 2.5 + \text{Mg (mg/L)} \times 4.1$$

※上の換算式の係数は、炭酸カルシウムの式量はCaCO₃=100、カルシウムとマグネシウムそれぞれの原子量は、Ca=40、Mg=24.3、であるところから出てきたもの。

（100/40=2.4、100/24.3=4.1）。

WHOの基準では、硬度が60mg/L以下を「軟水(soft)」、60～120mg/Lを「中程度の硬水(moderately hard)」、120～180mg/Lを「硬水(hard)」、180mg/L以上を「きわめて硬水(very hard)」としている。また、一般的には、硬度100mg/L以下を軟水、それ以上を硬水と表現する例が多いようである。

水道水については、全国の水道事業者・用水供給事業者の各浄水場における検査状況³¹を、原水/浄水別に集計したデータが、「水道水質データベース」(<http://www.jwwa.or.jp/mizu/index.html>)にて無料で公開されている。各都道府県の水道原水の水質については「原水の水質」(http://www.jwwa.or.jp/mizu/or_up.html)の「基準項目」(都道府県ごとにPDFファイルで見られる)で調べることができる。「カルシウム・マグネシウム等(硬度)」を比較してみると、地域によりかなり高度に差があることが分かる。ちなみに、平成27年度の奈良市木津浄水場の「原水」の硬度は、平均値が35であり、軟水であることが分かる。

【問 16】「水道水質データベース」(<http://www.jwwa.or.jp/mizu/index.html>)を用いて、自分の出身地、ゆかりの地、興味のある地域の水道水の特徴を調べよ。

ちなみに、日本各地、世界各地の水の硬度を一覧表にしている「せっけんライフ」というサイトのURLを紹介しておく。

日本の水の硬度：<http://sekken-life.com/life/nihonnokoudo.htm>

世界の水の硬度：<http://sekken-life.com/life/sekainokoudo.htm>

次に、「ミネラルウォーター」についてデータを調べてみよう。

³⁰WHO/HSE/WSH/10.01/10/Rev/1 Hardness in Drinking-water.

Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. pp.11 (WHO, 2011)

http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/hardness.pdf

³¹ 最高値・最小値・平均値・検査回数

市販のミネラルウォーターにはラベルに成分表示がなされている。この表示に記載しなくてはならないことは、農林水産省の法令「ミネラルウォーター類（容器入り飲料水）の品質表示ガイドライン（H2.3.30 農林水産省局長通達 食流第 1071 号）」³²により定められている。これによれば、ア品名、イ原材料名、ウ内容量、エ賞味期限（品質保持期限）、オ保存方法、カ採水地、キ使用上の注意、ク使用方法、ケ製造者等を記載することが義務付けられている。この文書を読むと、他にもいろいろと書いてあるが、「採水地」と「原水の種類」を表示する必要はあるが、ミネラルウォーターで一般的な品質として扱われている、「硬度(軟水、硬水)」については実は義務表示とはなっていないことには注意して欲しい。

ミネラルウォーター類(容器入り飲用水)の品質表示 ガイドライン

平成2年3月30日 2 食流第1071号 食品流通局長通達
改正 平成7年2月17日 7 食流第398号

品名	原水	処理法
ナチュラルウォーター	特定の水源から採水された地下水(注1)	沈殿、ろ過、加熱殺菌以外の物理的・化学的処理を行わないもの
ナチュラルミネラルウォーター	ナチュラルウォーターのうち鉱化された地下水(注2)	
ミネラルウォーター	ナチュラルミネラルウォーターと同じ	品質を安定させる目的等のため、ミネラルの調整、ばっ気、複数の水源から採水したナチュラルミネラルウォーターの混合等が行われているもの
飲用水又はポトルドウォーター	(飲用適の水(硬度、pHを除く))	(処理法の限定はない)

(注1) 特定の水源とは、水質、水量において安定した地下水の供給が可能な単独水源をいう。
(注2) 鉱化された地下水とは、地表から浸透し、地下を移動中又は地下に滞留中に地層中の無機塩類が溶解した地下水(天然の二酸化炭素が溶解し、発泡性を有する地下水を含む。)をいう。
○ナチュラルウォーター、ナチュラルミネラルウォーター以外のものに対する「自然」、「天然」の用語及びこれに類似する用語は表示禁止。
○ポトルドウォーターは(一括表示の中に)採水地を記載することができない。

厚生労働省ホームページ・審議資料：http://www.mhlw.go.jp/shingi/2009/07/dl/s0723-16c_0005.pdf

なお、「ミネラルウォーター&炭酸水を比較しよう」というサイトの中に、ミネラル成分・硬度の比較一覧、が掲載されているので興味のある方はごらんになると面白いと思う。

<http://mineral->

[waters.net/%E3%83%9F%E3%83%8D%E3%83%A9%E3%83%AB%E6%88%90%E5%88%86%E3%81%AE%E6%AF%94%E8%BC%83%E8%A1%A8](http://mineral-waters.net/%E3%83%9F%E3%83%8D%E3%83%A9%E3%83%AB%E6%88%90%E5%88%86%E3%81%AE%E6%AF%94%E8%BC%83%E8%A1%A8)

よく聞くミネラルウォーターのブランド、「エビアン」は非常に硬水であり、「ボルビック」は軟水であることがわかる。機会があれば、自分の好みに合ったミネラルウォーターを、科

³² <http://minekyo.net/files/lib/1/27/201506041456502355.pdf> (2018年3月5日確認)

学的・化学的な観点とともに味わってみるのもよい。

おいしい水といえば、やはり「名水」という言葉を思い出す。日本では、「名水百選」といわれる水がある。これはどのようなものであろうか。環境省が昭和 60 年に全国各地の名水といわれるものを選んで「名水百選」としたのが始まりである。その後、平成 20 年にさらに加え「平成の名水百選」とした。それに伴い、オリジナルの名水百選を「昭和の名水百選」と命名している³³。また、地下水学会では、学会紙『地下水学会誌』において、「平成の名水百選の水質特性」という詳細な水質分析を行なった結果を報告している。この技術報告はネット上で公開されており、J-Stage で下記 URL からダウンロードできる。

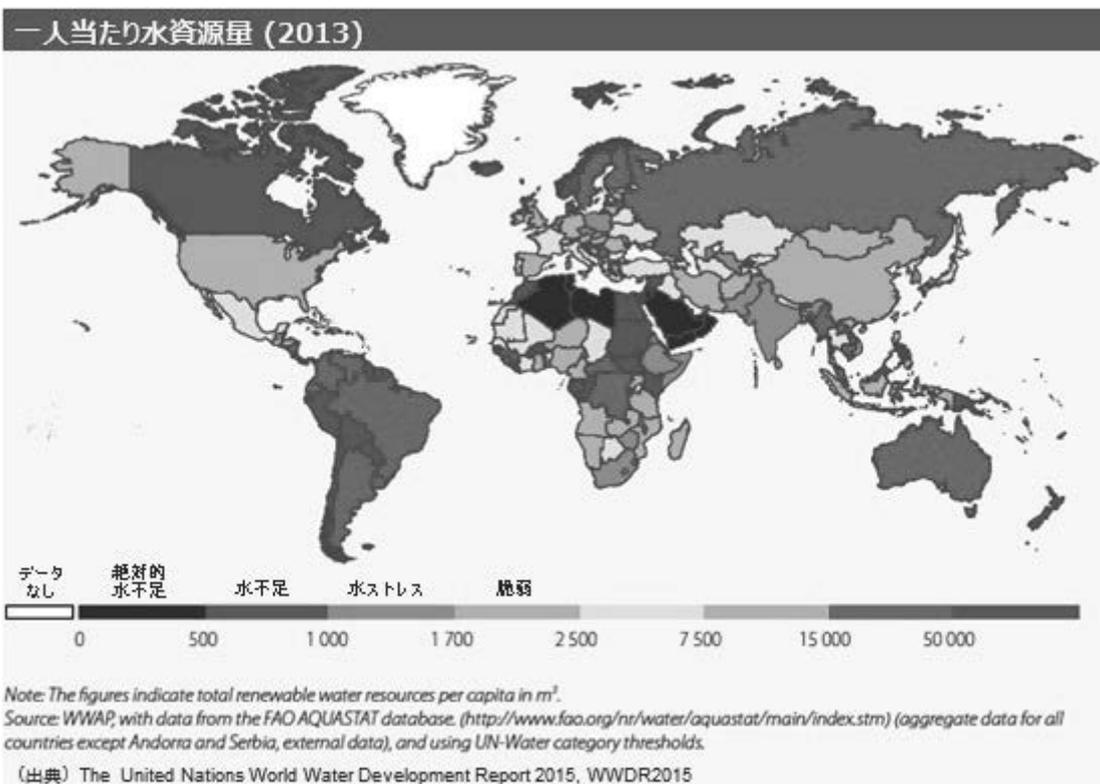
「平成の名水百選の水質特性」『地下水学会誌』 vol-51_127(2009)

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jagh/51/2/51_2_127/_pdf

³³ 環境省・名水百選ポータル, <http://www.env.go.jp/water/meisui/>

§ 2-5 世界の水事情

日本に住んでいる私たちは日常的には(災害時などを除く)水に困ることはない,しかし,全地球規模で見ると,これは非常に恵まれたことである。例えば,2013年の一人当たりの水資源量を見てみよう。



出展：国土交通省ホームページ「水資源問題の原因」から引用

http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000021.html(2018年3月6日確認)

思ったより日本の数値が高くないと思うかもしれないが,これは,年間降水量を人口で割ったものであるためである。また,ここで示されたデータは,降水量を基にしたものであるので,衛生面等を考慮して,実際に飲料その他の生活水として利用できるかどうかとは別である。

環境省のホームページに掲載されている「平成22年版 図で見る環境白書」(第4章「水の星地球」第2節「水問題解決に向けた取組」)によれば,2002年の世界の安全な飲料水へのアクセス率は下図のようであった(出展:

<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/zu/h22/html/hj10010402.html>)。

安全な飲料水へのアクセス率

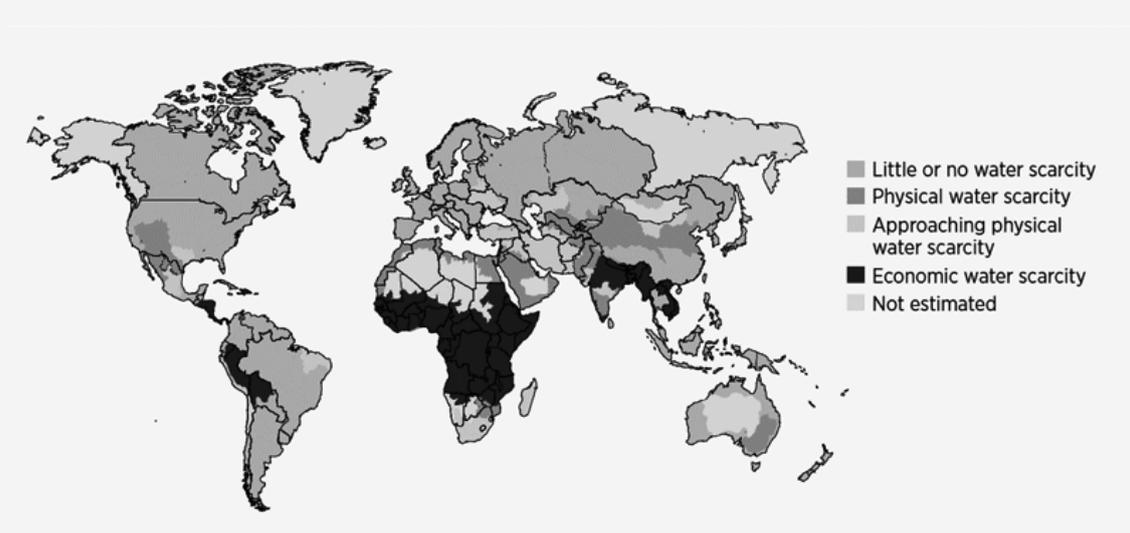
- 全世界で10.7億人(17%)が安全な飲料水へのアクセスなし(うち97%が途上国)
- アクセス率の低い地域は、大洋州(52%)、サブサハラ(55%)など



2002年の時点で、全世界で10.7億人(17%)が安全な飲料水へのアクセスができないとされている。その後も加速度的に人口が増加し続けていることを考慮すれば、様々なアプローチがなされているとしても、状況が劇的に改善されているとは考え難いだろう。

次に、世界の水不足の状況について見てみよう。

Global physical and economic water scarcity



出展：国連(the United Nation) ホームページ

<http://www.un.org/waterforlifedecade/scarcity.shtml>

このデータでは、日本は水不足の問題がほとんどない地域に入っている。大きな水不足を抱えた地域はアフリカ大陸、東南アジアなどに偏在していることがわかる。個別の国の水状況について知りたいときは、「国土交通省」のホームページの中にあるサイト「世界各国の水関連情報」が役に立つだろう。

http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000023.html

参考事項

「ウォーターフットプリント」という概念がある。これは、生産物のライフサイクルを通じて使用される水の量を定量的に把握する考え方で、原材料や生産過程などに関わる水の使用量を足し合わせ、最終的な生産物に必要な水の量を算出する。生産物単位の水使用量に注目している点に特徴がある。オランダで設立された非営利組織であるウォーターフットプリントネットワーク（WFN : Water Footprint Network）³⁴が広く知られている。同組織のホームページでは、世界の水の状況や生産物ごとのウォーターフットプリントなども表示されており、日常生活に関する質問に回答することで、自身の生活のウォーターフットプリントを計算できる機能（Water footprint calculator）も用意されている。

「Product gallery」（<http://waterfootprint.org/en/resources/interactive-tools/product-gallery/>）では、計算された例も見るができる。ここに一例を示しておく。

生産物	WFP 値		生産物	WFP 値
米	2497 L/kg		豚肉	5988 L/kg
パン(小麦)	1608 L/kg		牛肉	15415 L/kg
りんご	822 L/kg		ビール(大麦)	15415 L/kg
ピザ・マルゲリータ	1260 L/ 725g		ミルク	255 L/ 250mL

ちなみに、ライフサイクルにおける使用量を定量的に把握する取り組みとして、「カーボンフットプリント(CFP)」という概念もある³⁵。これらは、環境、産業活動などまで含めた、社会科学的な数値といえるだろう。

環境省は、国内外の算出手法や国内企業による具体的な算出事例等を取りまとめた「ウォーターフットプリント算出事例集」を2014年に公表した³⁶。

³⁴ <http://waterfootprint.org/en/>

³⁵ 「ウォーターフットプリント」「カーボンフットプリント」については、大和総研グループの岡野氏が分かり易くまとめている。

https://www.dir.co.jp/research/report/esg/keyword/143_water_footprint.html(2018年3月6日確認)

³⁶ 「環境省・ウォーターフットプリント算出事例集」は下記からダウンロードできる。
<https://www.env.go.jp/press/18475.html> (2018年3月6日確認)

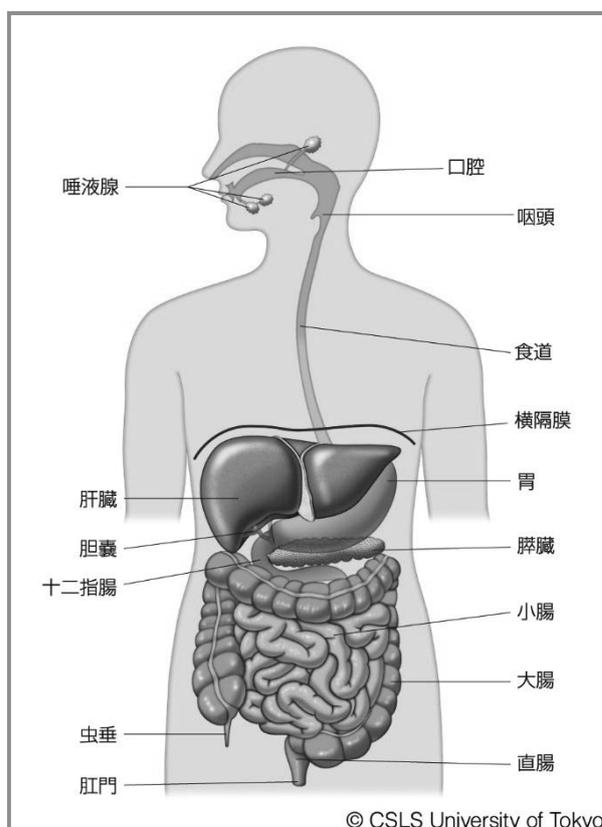
第3章 食べ物

§ 3-1 3大栄養素

私たちは毎日食事により栄養を摂取している。そして、食べたものは消化器官で消化され、私たちの体を形成したり、日々の活動のエネルギーに変換されたりしている。ここでは、5大栄養素（炭水化物、脂質、タンパク質、ミネラル、ビタミン）のうち、特に3大栄養素といわれる、炭水化物、脂質、タンパク質について、物質という視点から見ていく。

まず、消化の構造について復習しておく。

下記は、ヒトの消化器官の模式図である。それぞれの器官で消化酵素を分泌して、摂取した栄養を、基本単位にまで分解する。



出展:「東京大学生命科学教育用画像集」

http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=1155

消化器と消化酵素

口腔：アミラーゼ

胃：ペプシン

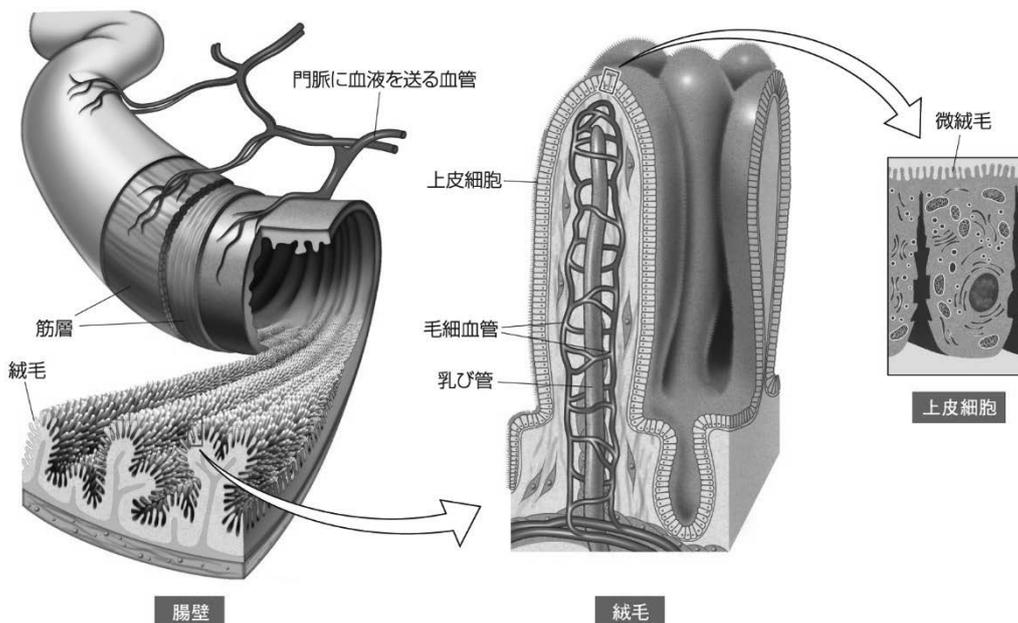
十二指腸・膵臓：膵アミラーゼ，トリプシン，キモトリプシン，膵リパーゼ

小腸：マルターゼ，スクラーゼ，ラクターゼ，アミノペプチダーゼ

3大栄養素については、炭水化物はブドウ糖に、タンパク質はアミノ酸に、脂質は脂肪酸とグリセリンに分解される。このような基本単位が、小腸（下図）において、血液を介して吸収され、各細胞に運ばれ、後述する「代謝」の出発物質となる。

ちなみに、1gあたりのエネルギー生産量は、炭水化物 4kcal、タンパク質 4kcal、脂質 9kcal である³⁷。

³⁷ 栄養の表示としては、SI単位(J)を使わず、慣用的なカロリー(kcal)を使用する。



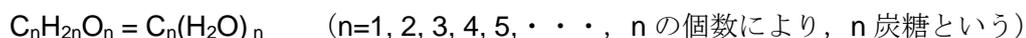
© CSLS University of Tokyo

小腸と血管

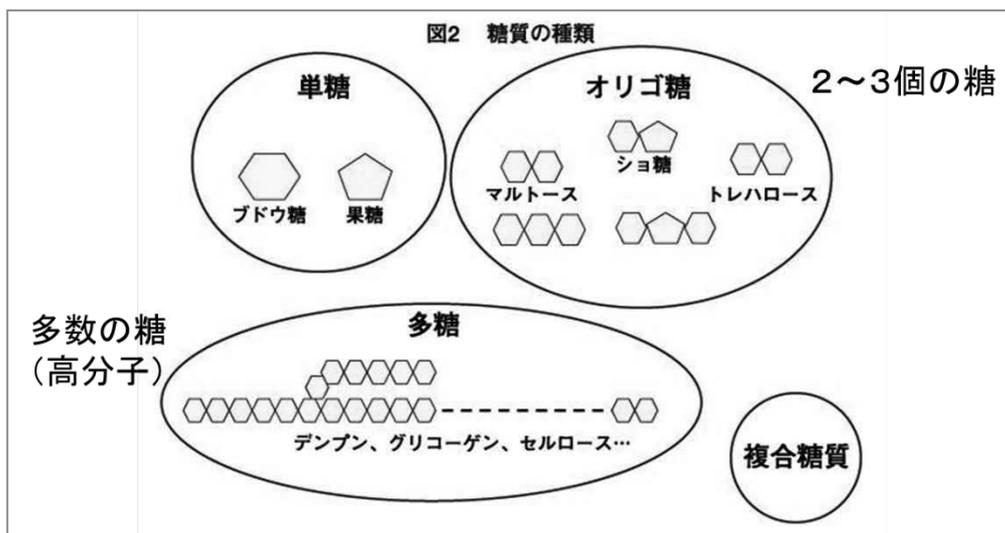
出展：「東京大学生命科学教育用画像集」

http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=1154

まず、「炭水化物」とは、いわゆる「糖類」であり、炭素 C と水 H₂O からできている。このことを化学式であらわすと、



となる。糖類には、構成単位である単糖を単位として、単糖数個が結合したオリゴ糖、多数の単糖が結合して高分子となった多糖に分類できる³⁸。



³⁸ 糖と糖が結合する反応は、水 H₂O が 1 個取れる脱水縮合反応である。

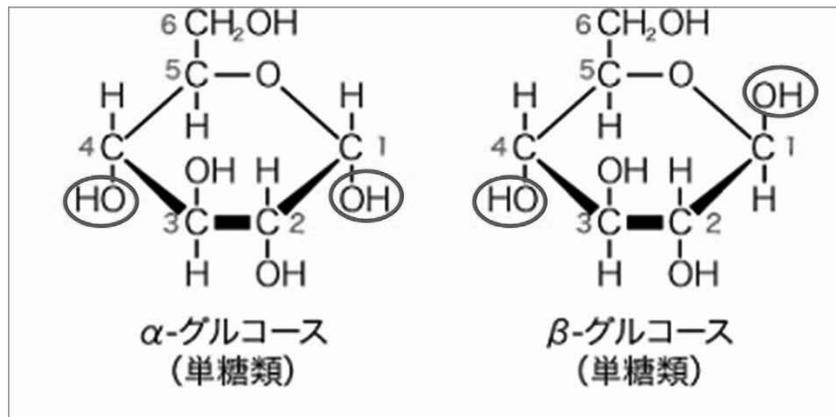
以下の表に、単糖，オリゴ糖，多糖の具体例と簡単な解説を示す。

分類	物質の例	解説
単糖*1 (monosaccharide)	グルコース (glucose)	ブドウ糖ともいう。生体のエネルギー源。
	フルクトース (fructose)	果糖ともいう。多くの果実に含まれる。糖類の中で最も甘い。
	マンノース (mannose)	グルコマンナン(こんにゃく)を構成する。
	ガラクトース (galactose)	グルコースと共に 2 糖のラクトースを構成する。
	リボース (ribose)	RNA の構成成分。DNA では酸素が一つ欠落。
オリゴ糖 (oligosaccharide)	ショ糖 (sucrose)	砂糖の主成分。グルコースとフルクトースが結合。
	麦芽糖 (maltose)	デンプンの分解で生じる。グルコース 2 分子が結合。
	乳糖 (lactose)	乳汁中に含まれる。ガラクトースとグルコースが結合した物質。
	セロビオース (cellobiose)	セルロースの分解産物。グルコース 2 分子が結合。ヒトの体内では分解できない。
多糖 (polysaccharide)	デンプン (starch)	植物の主な貯蔵多糖。グルコースが多数結合した物質。
	グリコーゲン (glycogen)	肝臓や筋肉などに貯蔵される多糖。グルコースが多数結合した物質。
	セルロース (cellulose)	食物繊維の構成成分。グルコースが多数結合した物質だが、ヒトの消化酵素では消化できない。
	ヒアルロン酸*2 (hyaluronic acid)	皮膚，軟骨，結合組織などに広く分布し，保湿物質として薬品や化粧品に利用。単糖の誘導体が鎖状に結合した物質。
	グルコマンナン (glucomannan)	こんにゃくに含まれる。マンノース及びグルコースが直鎖状に結合した物質。

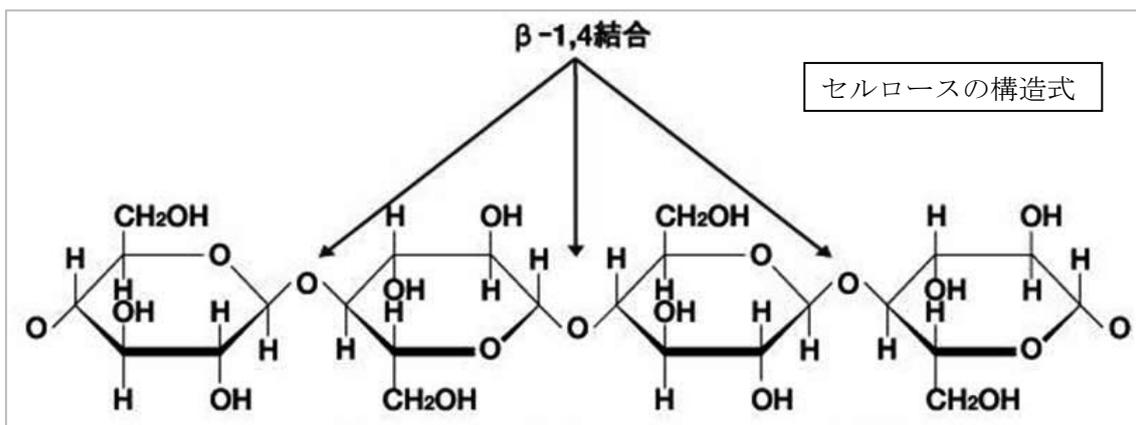
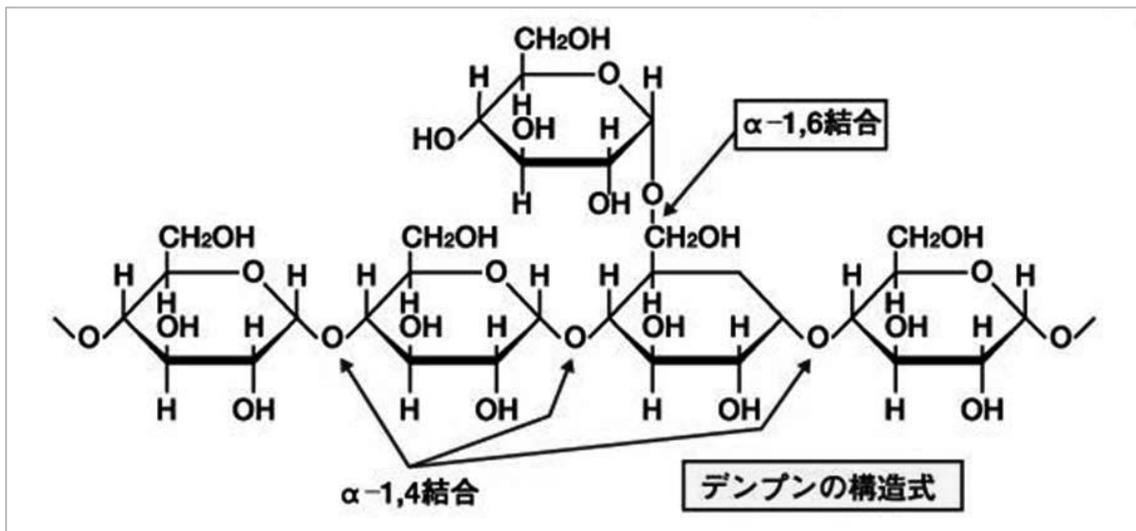
*1:リボースは炭素五個から成る 5 炭糖(pentose)であるが，その他は 6 炭糖(hexose)である。

*2:グルクロン酸と N-アセチルグルコサミンとからなる。

最も基本的な糖，ブドウ糖 (=グルコース) であり，甘い果実の中に多量に存在する。



丸をつけた水酸基(-OH)の位置関係により α 型と β 型がある。25℃の水溶液中では α 型は37%、 β 型は63%存在し、相互に変換できるので α 型と β 型の違いについて意識することはない。しかし、グルコース同士を結合した多糖では α 型が結合したのか、 β 型が結合したのかで全く異なる。下記に、 α -グルコースが結合した多糖、デンプンの構造式と、 β -グルコースが結合した多糖、セルロースの構造式を示す。



ヒトを含む動物の消化酵素は、デンプンなどを構成する α -グルコースの結合は分解することができるが、食物繊維や紙の繊維を構成する β -グルコースの結合は分解することができ

きない³⁹。

糖類といえば、やはり「甘み」が気になる。砂糖の甘さを 1.00 としたときの、相対的な甘さの比較を参考までに示しておく。

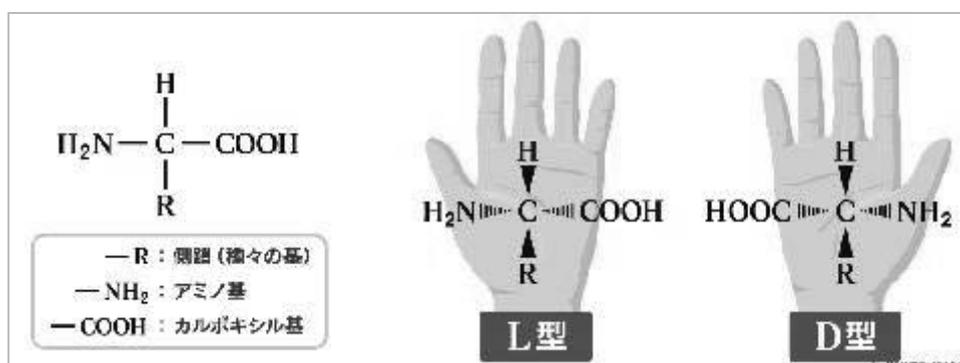
Sweetness of various compounds^{[a][13][14][15][16][17]}

Name	Type of compound	Sweetness
Lactose	Disaccharide	0.16
Maltose	Disaccharide	0.33 – 0.45
Sorbitol	Polyalcohol	0.6
Glucose	Monosaccharide	0.74 – 0.8
Sucrose	Disaccharide	1.00 (reference)
Fructose	Monosaccharide	1.17 – 1.75
Sodium cyclamate	Sulfonate	26
Steviol glycoside	Glycoside	40 – 300
Aspartame	Dipeptide methyl ester	180 – 250
Sodium saccharin	Sulfonyl compound	300 – 675
Thaumatococin	Protein	2000
Lugdunamine	Guanidine compound	300,000 (estimated)

出展 : <http://en.wikipedia.org/wiki/Sweetness>

次に、「タンパク質」とその構成要素「アミノ酸」について見てみる。

アミノ酸は、下図のように、炭素の 4 つの結合手に、水素原子、アミノ基(-NH₂)、カルボキシル基(-COOH)、及び側鎖が結合したものである。

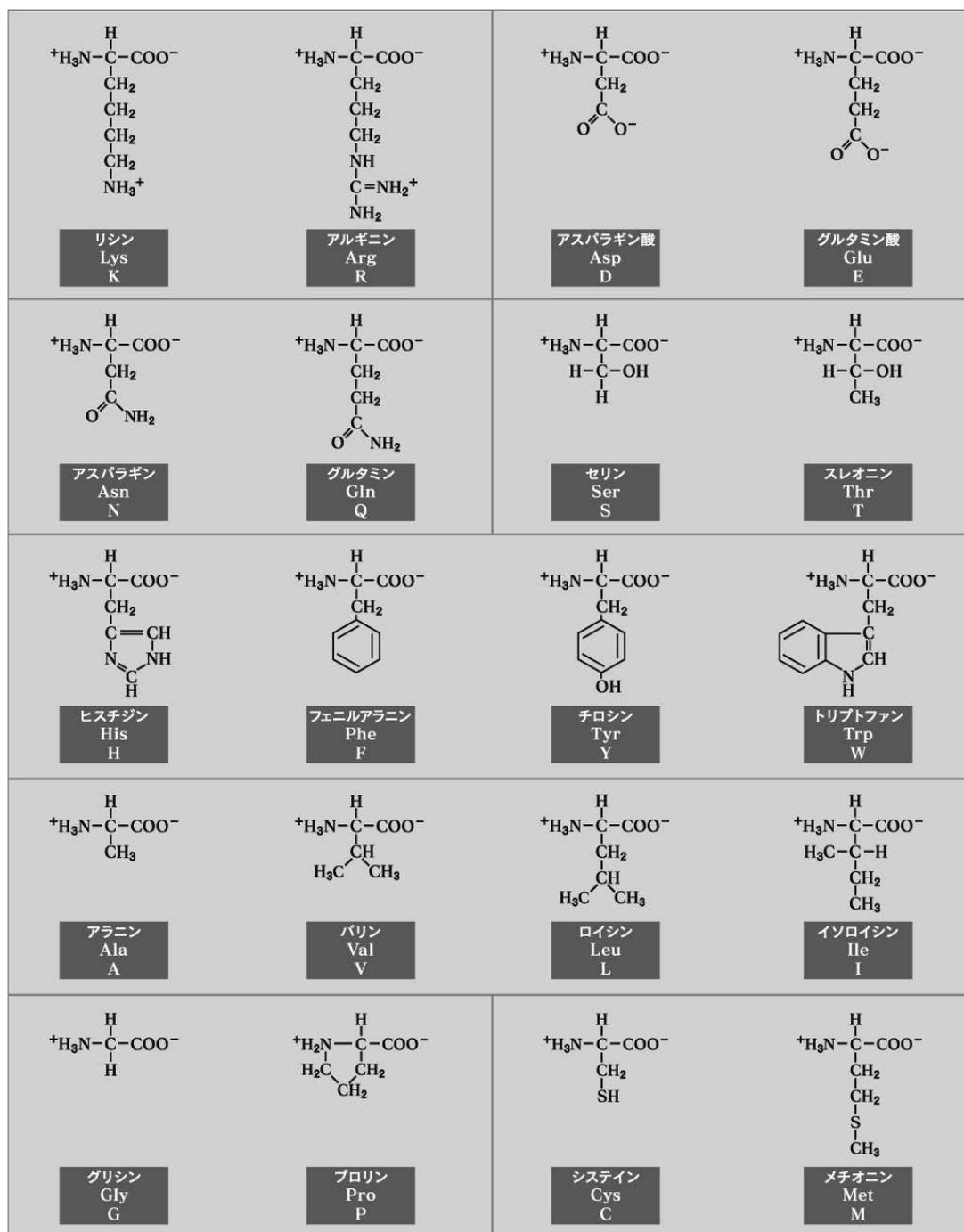


出展 : 「東京大学生命科学教育用画像集」

http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=610

³⁹ ウシやヤギなどの草食動物は、共生微生物の力を借りている。

図のように L 型と D 型の光学異性体が存在するが、生体では基本的に L 型だけが構成成分となっている⁴⁰。側鎖の部分が異なることにより、アミノ酸は全部で 20 種類ある(下図)。ヒトのタンパク質を構成するアミノ酸で一番多いのがロイシン(L)で、一番少ないのがトリプトファン(W)である。



© University of Tokyo

出展：「東京大学生命科学教育用画像集」

⁴⁰ 細菌の細胞壁等にごくわずかな例外もある。

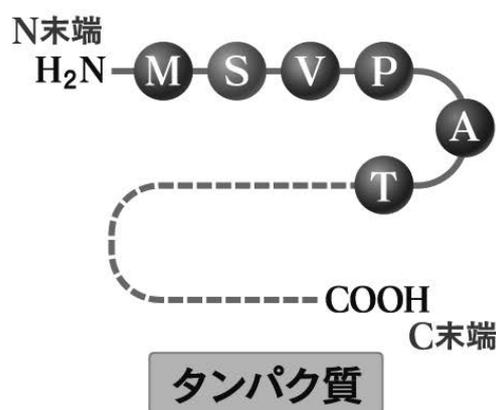
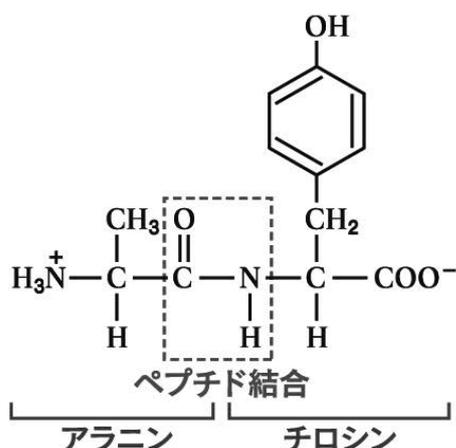
http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=611

この中で、体内では合成できないため、食品などで摂取してやることが必要なアミノ酸がある。これを「必須アミノ酸」といい、9種類ある(下表)。

イソロイシン	スレオニン	トリプトファン
バリン	ヒスチジン	フェニルアラニン
メチオニン	リジン	ロイシン

この表で、アンダーラインの3種類は、「分岐鎖アミノ酸 (BCAA : branched-chain amino acid)」という。側鎖の部分が枝分かれした構造に由来した名称である。運動時に筋肉のエネルギー源となるといわれるものである。

タンパク質は、アミノ酸分子が多数ペプチド結合することによってできる高分子⁴¹である。

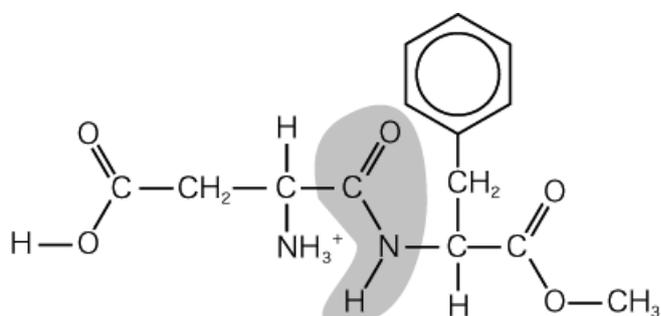


© University of Tokyo

出展：「東京大学生命科学教育用画像集」

http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=612

「アスパルテーム」はダイエット甘味料として知られているが、糖質ではない。その構造



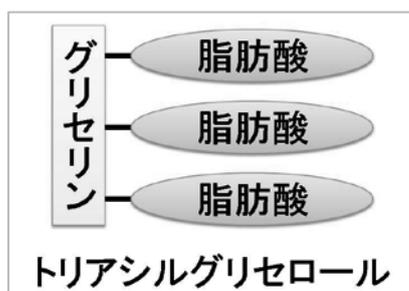
式は左記のようなもので、2種類のアミノ酸、アスパラギン酸とフェニルアラニンが結合したものである。アミノ酸が結合してできたものなので、アスパルテーム1g当たりのカロリーは4kcalである。

この物質は、砂糖の約200倍甘いので、例えば、100g中に糖質10g(40kcal)

⁴¹ アミノ酸の配列を一次構造という。二次構造 (主鎖, α ヘリックス), 三次構造 (空間的構造), 四次構造 (サブユニット間相互作用) と高次構造を言い表す。高次構造は、タンパク質の機能発現にとって非常に重要な要素である。

を含む飲料と同じ甘さにするには、アスパルテームは 0.05g でよいことになる。これは 0.2kcal (=0.05g×4kcal/g)であるのでダイエットになるというわけである。なお、厳密にはゼロカロリーではないが、消費者庁の定める栄養成分表示では、100g(100mL)あたり 5kcal 未満の場合は「ゼロ」「ノン」「無」と表示してもよい、ことになっているので、実際にそのような表示の商品が販売されている。

次に、「脂質」について見てみよう。中性脂肪(トリアシルグリセロール)、脂肪酸、グリセリン、コレステロールなどをあわせて脂質という。



中性脂肪は脂肪酸とグリセリンがエステル結合でできたものである。これは、貯蔵脂肪の主なもので、動物では特に皮下脂肪組織に多く含まれており、必要に応じてエネルギー源として利用される。

最近では、生活習慣病の大敵とされている。



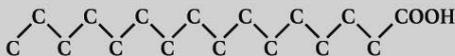
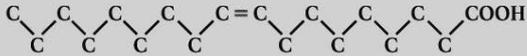
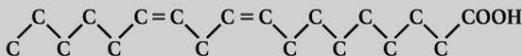
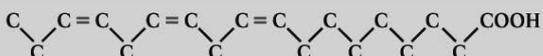
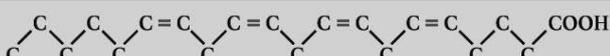
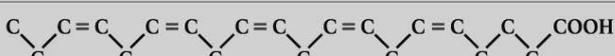
脂肪酸は炭化水素にカルボキシル基が結合したものである。「(カルボキシル基の名称) + 酸」というのが脂肪酸の IUPAC の命名法であるが、日常的な物質が多いことから「慣用名」が用いられることが多い。

例を下の表に示す。

炭素の数	慣用名	IUPAC 名	化学式	存在・用途
1	ギ酸	メタン酸	HCOOH	アリ、ハチの毒
2	酢酸	エタン酸	CH ₃ COOH	酢
3	プロピオン酸	プロパン酸	CH ₃ CH ₂ COOH	果実香料の合成
4	酪酸	ブタン酸	CH ₃ (CH ₂) ₂ COOH	油脂が腐敗した臭い
5	吉草酸	ペンタン酸	CH ₃ (CH ₂) ₃ COOH	人工果実エッセンス
6	カプロン酸	ヘキサン酸	CH ₃ (CH ₂) ₄ COOH	バター
7	エナント酸	ヘプタン酸	CH ₃ (CH ₂) ₅ COOH	
8	カプリル酸	オクタン酸	CH ₃ (CH ₂) ₆ COOH	
9	ペラルゴン酸	ノナン酸	CH ₃ (CH ₂) ₇ COOH	

10	カプリン酸	デカン酸	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	
12	ラウリン酸	ドデカン酸	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	ココナッツオイル。 界面活性剤の原料
14	ミリスチン酸	テトラデカン酸	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	パーム油
16	パルミチン酸	ヘキサデカン酸	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	ラード、ヘット
17	マルガリン酸	ヘプタデカン酸	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{COOH}$	マーガリン

炭化水素基は、炭素と水素だけからできているので、極性を持たない。一方、カルボキシル基は、水分子と同様、酸素原子の部分が負の電荷を持つ。ギ酸や酢酸のように炭素数が少ない場合は、カルボキシル基の寄与が大きく、水溶性であるが、炭素数が多くなると炭化水素基の寄与が大きくなり水には解けない。一般に、脂肪や油脂といわれているものは炭素数が多く、水には溶けない。また、一般に、炭化水素基の炭素数が長くなるほど融点は高くなる。これは、炭化水素の融点や沸点の一般則と同じである。炭素数が 10 以上では日常的な温度では固体となる。下に示すのは様々な脂肪酸の構造式である。

飽和脂肪酸の例	
	(C16:0) パルミチン酸
不飽和脂肪酸の例	
	(C18:1) オレイン酸
	(C18:2) リノール酸
	(C18:3) リノレン酸
	(C20:4) アラキドン酸
	(C20:5) EPA
	(C22:6) DHA

炭素に結合した水素は省略

© University of Tokyo

出展：「東京大学生命科学教育用画像集」

http://cslls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=11

炭化水素基に炭素の二重結合がない脂肪酸を「飽和脂肪酸」といい、炭化水素基に炭素の二重結合がある場合を「不飽和脂肪酸」という。生理的には、飽和脂肪酸は、代謝の過程で体内で合成できるため摂取することが必須ではないが、不飽和脂肪酸の中には体内では合成

できないため食品などから摂取することが必要な必須脂肪酸もある（リノール酸，リノレン酸，アラキドン酸など）。物理化学的には，下表に示すように，飽和脂肪酸は分子あたりの炭素数が多いほど融点が高くなる。不飽和脂肪酸の場合は，炭化水素基の炭素数だけでなく，二重結合の数も融点に関係し，二重結合が多いほど融点は低くなる。

上述のしたことを下表にまとめる。

表11.3 脂肪酸の融点

名称	分子あたりの炭素数	融点、℃
飽和脂肪酸		
カプリン酸	10	32
ラウリン酸	12	44
ミリスチン酸	14	54
パルミチン酸	16	63
ステアリン酸	18	70
不飽和脂肪酸		
オレイン酸(二重結合1個)	18	16
リノール酸(二重結合2個)	18	-5
リノレン酸(二重結合3個)	18	-11

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

図の出版：エヌ・ティー・エス社発行『実感する化学(下巻)』11章

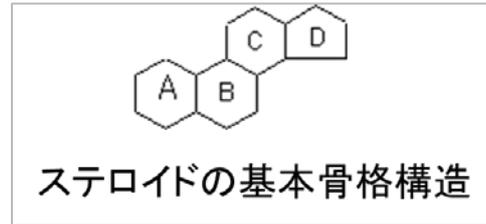
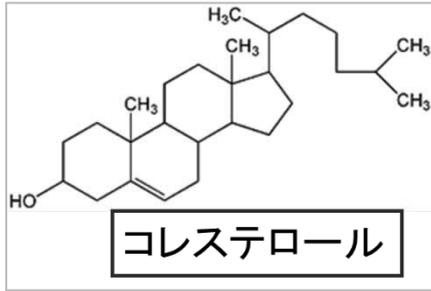
このような脂肪酸の性質を利用して脂質の硬さを調整することが出来る。飽和脂肪酸の割合が高いほど，硬い製品を作ることができる。不飽和脂肪酸は，二重結合を持つので，幾何異性体(*cis*型，*trans*型)⁴²をもつ。天然の脂肪酸はほとんどが *cis* 型である。

不飽和脂肪酸の不飽和結合には，人工的な化学反応によって水素を付加反応させることができる。この場合，部分水素化の反応がおこり，これまでなかった *trans* 型の結合が生成することがある。こうして生じたものが「トランス脂肪酸」といわれるものである。トランス脂肪酸は摂取量が多いと健康に悪影響を及ぼすことがあるとされており，米国の食品医薬品局(FDA)では，米国での使用を全面禁止している。

【問】農林水産省のホームページ(「トランス脂肪酸に関する情報」

http://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/trans_fat/)を参照して，トランス脂肪酸はどんな食品に多く含まれているかを調べよ。また，あなた自身はどのような対応を取ろうと考えるかを答えよ。

⁴² *cis* 型は二重結合をはさんで水素が同じ側にあり，*trans* 型は二重結合をはさんで水素が反対側にある。

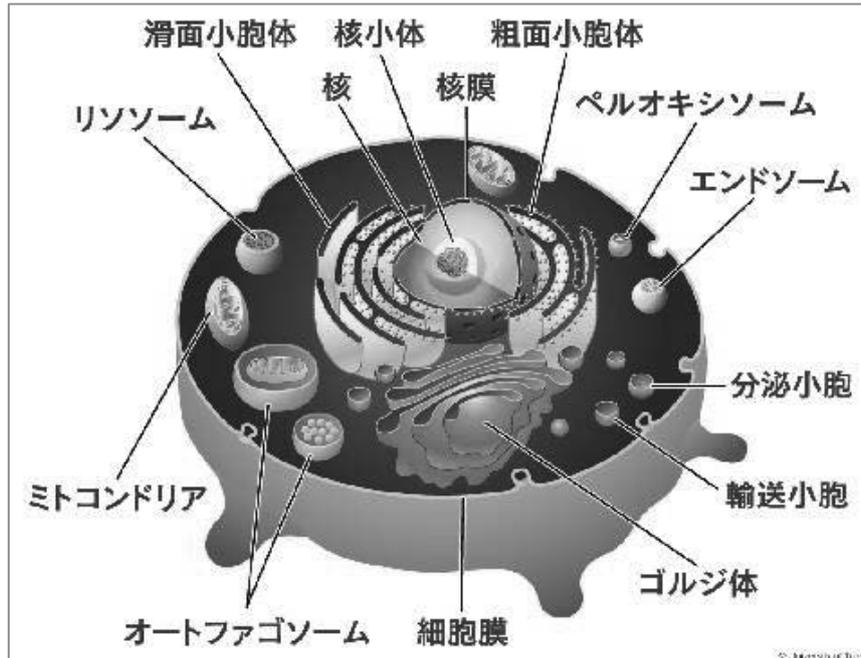


コレステロールは、最も代表的なステロール（ステロイドのアルコールの総称）の1つである。あらゆる細胞の細胞膜の構成成分として、また、胆汁酸、ステロイドホルモン、ビタミンDの合成材料として重要である。一方、動脈硬化などの生活習慣病との関連も注目されている。

§ 3-2 代謝とは何か

ここまでで、三大栄養素の概要を学んだ。次に、代謝について学んでいく。消化は、消化器官（つまり多数の細胞が組織となって機能している）によって進行するが、代謝は、個別の細胞の中で進行するという事に留意してほしい。そこで、まず、小細胞の構造について復習しておく。

下図は、真核細胞（私たちヒトは真核細胞生物）の構造を示す模式図である。



出展：「東京大学生命科学教育用画像集」

http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=693

この細胞の中には、様々な役割を持った小器官が存在する。その細胞内小器官(細胞質も含めている)の働きを、以下に示す。

区画	主な機能
細胞質	物質輸送と多数の代謝経路をもつ
核	遺伝情報であるDNAの複製場所
小胞体	脂質や膜タンパク質の合成
ゴルジ体	タンパク質と脂質の修飾と選別輸送
エンドソーム	細胞内への物質取り込みと選別
リソソーム	細胞内の物質消化
ペルオキシソーム	分子の酸化
リボソーム	タンパク質の合成
ミトコンドリア	好気呼吸によるATP合成
葉緑体	光合成によるATP合成と炭素固定

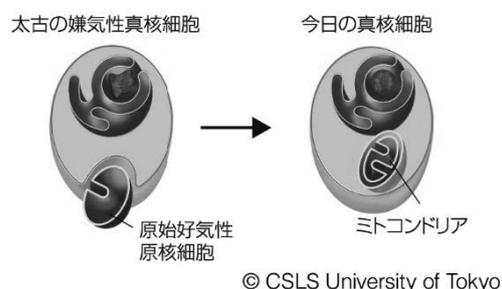
© CSLS University of Tokyo

出展：「東京大学生命科学教育用画像集」

http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=1219

好気呼吸による ATP 合成を行うミトコンドリアは、細胞中に平均 300~400 個存在し、特に、肝臓、腎臓、筋肉、脳などの代謝の活発な細胞では数千個が存在する。

脇へそれるが、ミトコンドリアの DNA(mtDNA)は核の DNA とは異なる。なぜ核とは異なるのか、ということに対して、「細胞内共生説」が考えられている。すなわち、地球には 38 億年前に嫌気性細菌シアノバクテリアが登場し、やがて酸素を利用できる好気性細菌が登場した。約 20 億年前には真核生物の祖先が誕生し、真核生物は好気性細菌の一種を取り込んでミトコンドリアにした。つまり、ミトコンドリアは、細胞が酸素を利用できるようにするために取り込んだものなのだ。

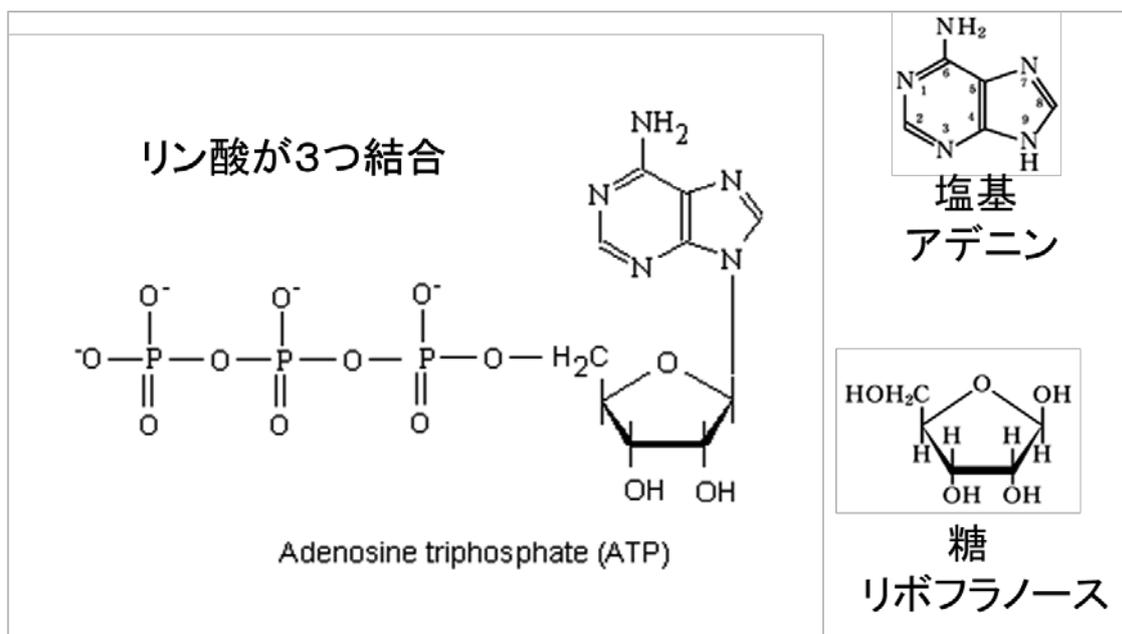


細胞内共生説の概念図

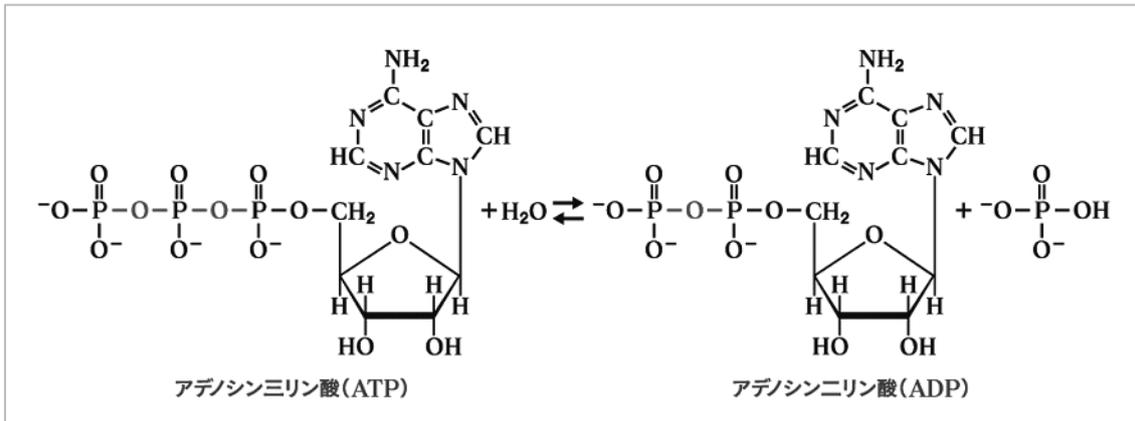
出展：「東京大学生命科学教育用画像集」

http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=1218

ここで、「ATP」についても簡単に復習しておく。ATP (adenosine triphosphate, アデノシン三リン酸) は、生命活動におけるエネルギー供給分子であり、生物のエネルギー通貨と言われることもある。



ATP のエネルギーの源は、「高エネルギーリン酸結合」である。

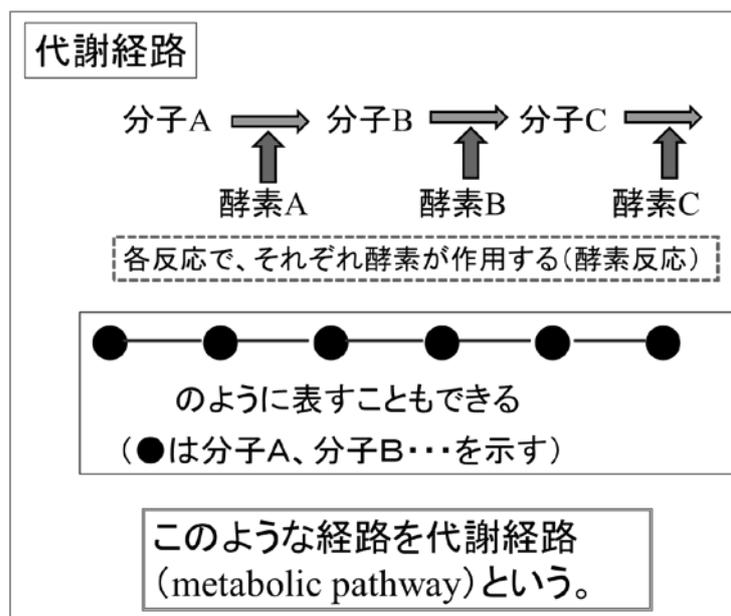


この結合が切れる（加水分解）と多量のエネルギーが放出される。



一日に必要なエネルギー，つまり基礎代謝量及び身体活動に必要なエネルギーを足し合わせたものは，約 2000kcal といわれている。上式により計算すると，一日あたり，約 1.6×10^{26} 個の ATP⁴³を消費していることになる。

代謝（metabolism）には，異化（catabolism）と同化（anabolism）の 2 通りがある。異化はからだを構成する複雑な物質を，簡単な物質に分解する過程であり，エネルギーが放出される（エネルギー放出反応）。例えば，呼吸がそれにあたる。一方，同化は外界から取り入れた簡単な物質から，からだを構成する複雑な物質を合成する過程であり，エネルギーを必要とする（エネルギー吸収反応）。例えば，炭酸同化，窒素同化などである。代謝では，下図のように，何段階も酵素反応が続いている。

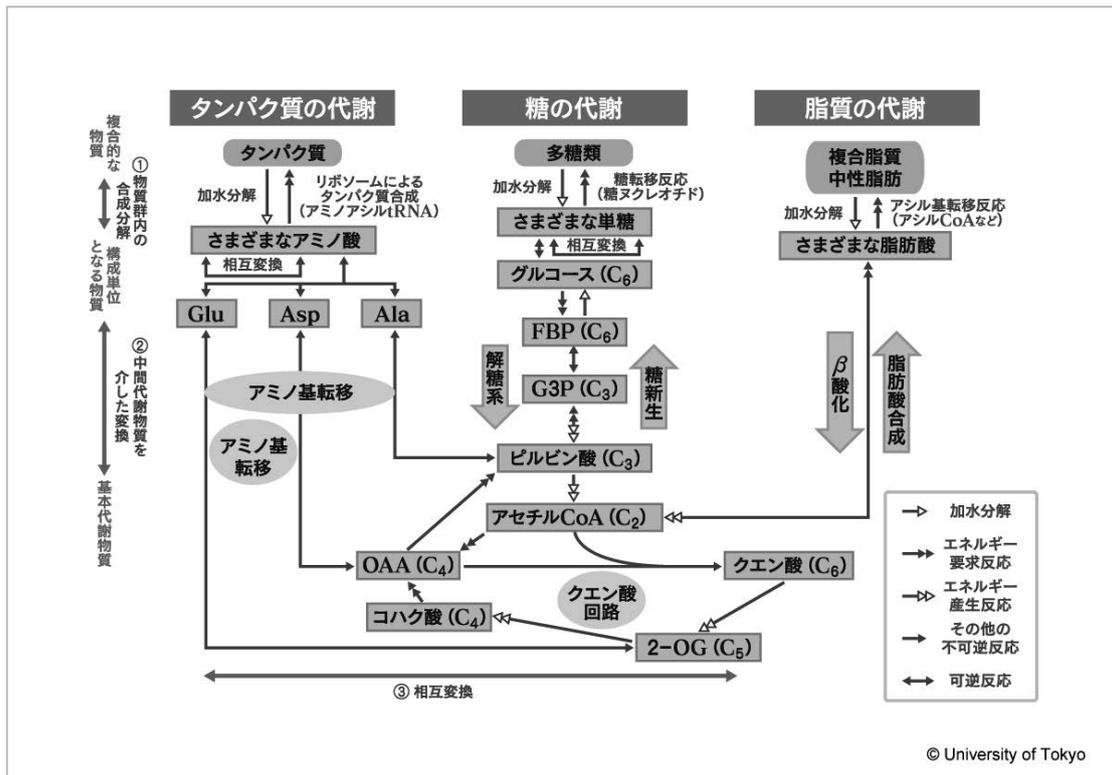


⁴³ 140kg 分の ATP に相当する。

代謝経路は非常に複雑である。しかし私たちは特にその詳細を覚える必要はない。ただ、公共の WEB にて、Metabolic pathway の全体像を見ることができ、また、そこを起点に詳細な pathway を調べられることは知っておくと便利である。そのサイトを紹介する。

京都大学が公開している「KEGG PATHWAY Database」の中の「Metabolic pathway」
URL : http://www.genome.jp/kegg-bin/show_pathway?map01100

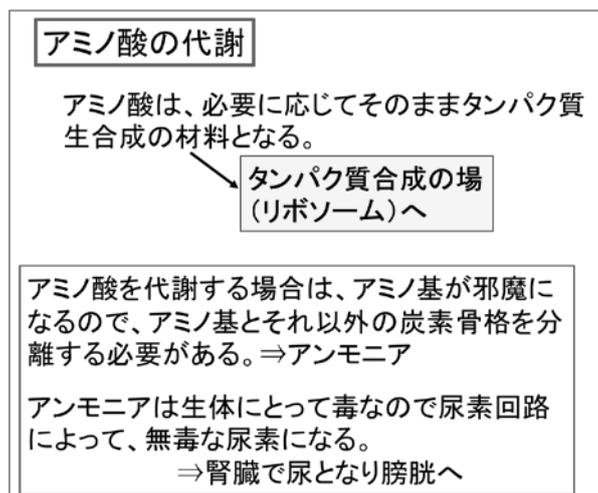
次に、3 大栄養素に関係した部分について、ごく要点だけを見ていく。下図は全体的な概要である。



出展：「東京大学生命科学教育用画像集」

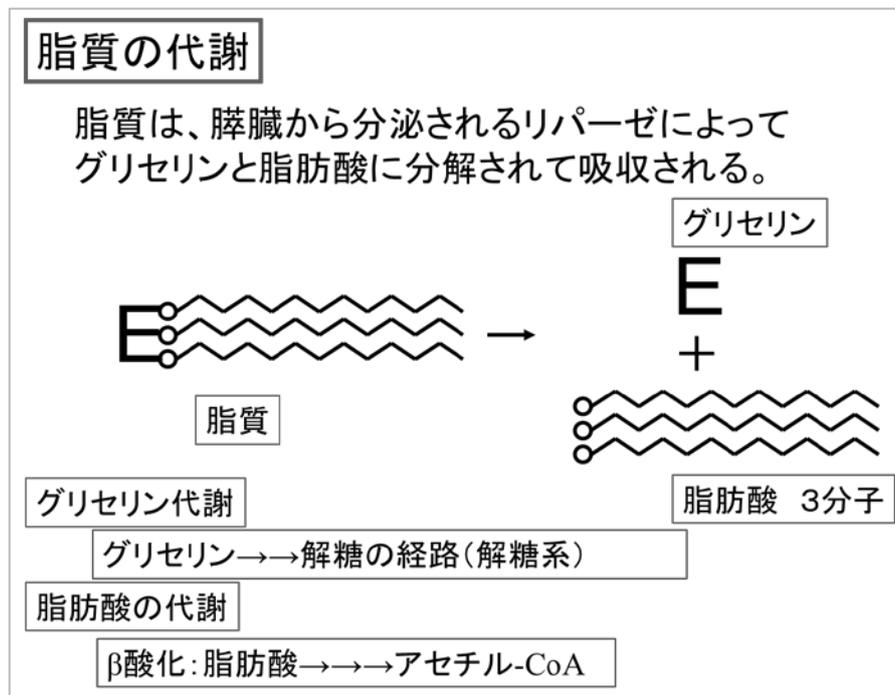
http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=131

まず、タンパク質の消化により生じたアミノ酸の代謝のポイントを示す。



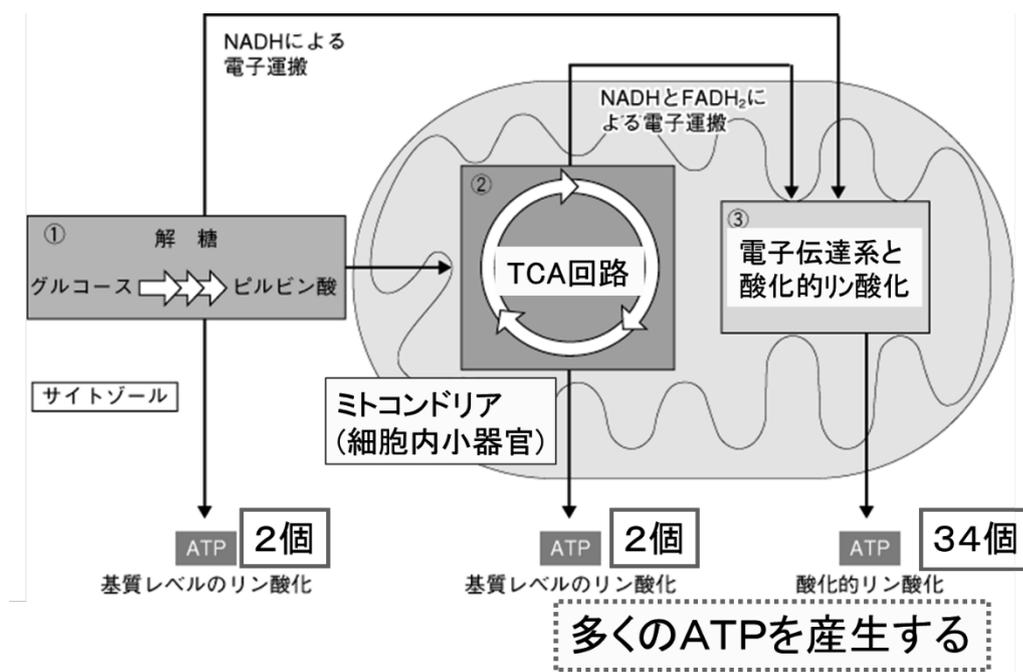
アミノ酸は、窒素を含むアミノ基を有することから、外部へ排出する経路をとる場合には、生体にとって有害なアンモニア(NH₃)を無害な尿素(CO(NH₂)₂)にしてから排出する。

次に脂質の消化により生じた脂肪酸とグリセリンの代謝について示す。



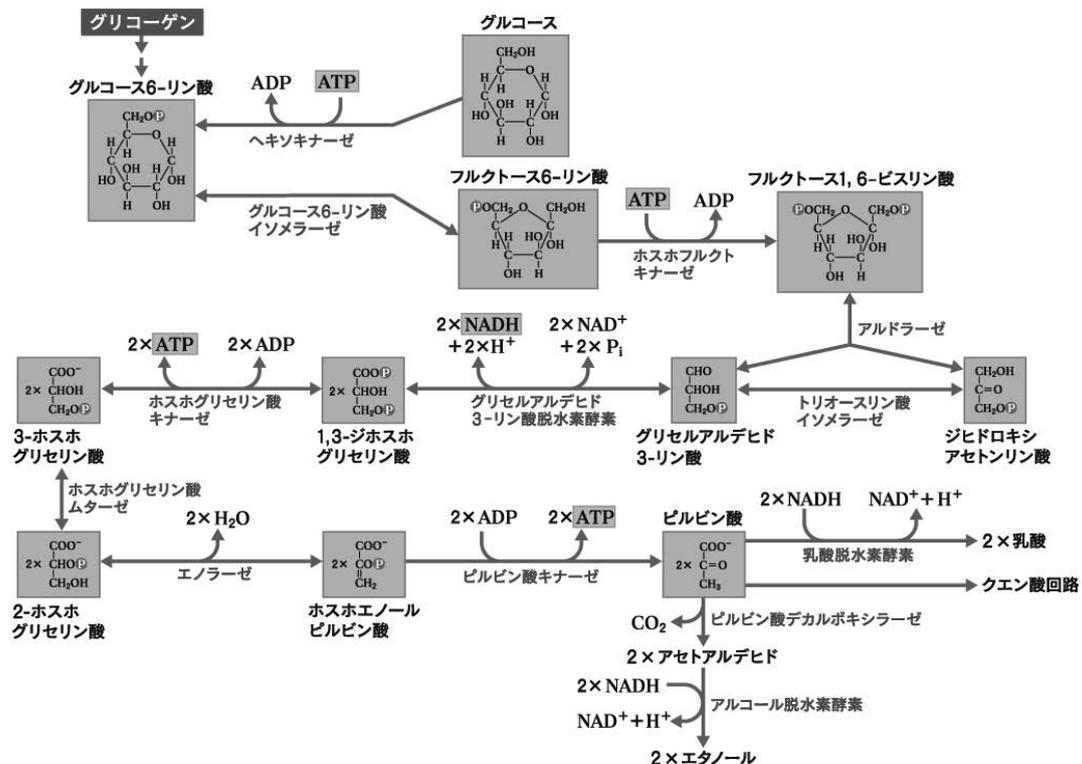
図に示したように、脂肪酸とグリセリンは別々の経路をたどる。脂肪酸はβ酸化とよばれる代謝経路をとる。

次に、炭水化物の消化により生じたブドウ糖の代謝に示す。まず、炭水化物の代謝の本流(酸素条件下)での全体的な大きな流れを見て、それから細かいところを見ていくことにする。



図を見て分かる通り、大まかに分けると、グルコースからピルビン酸までの解糖系（細胞質内で進行）、そして、ミトコンドリアで進行する、TCA 回路と電子伝達系の3つになる。

下図に解糖系の詳細を示す。ここでは、6炭糖のグルコースから始まり、3炭糖のピルビン酸2個が生ずる。そして、差し引き2個のATPが作られる。



© University of Tokyo

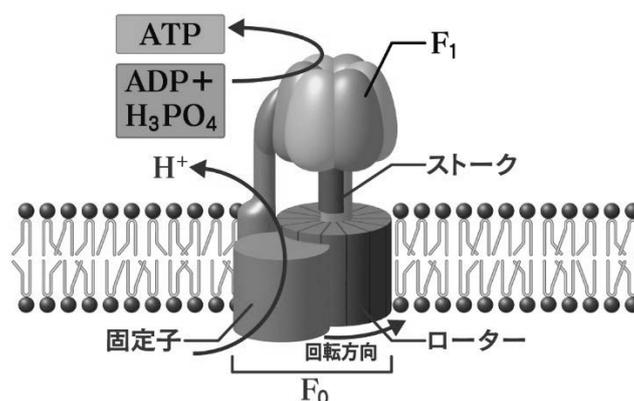
出展：「東京大学生命科学教育用画像集」

http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=791

次に、TCA 回路の詳細を示す。TCA 回路とは、tricarboxylic acid cycle（トリカルボン酸回路）のことで、1937年にドイツの化学者クレブス(Krebs)が発見したことからクレブス回路とも呼ばれる。

ミトコンドリア内膜には、図のように複数のタンパク質複合体が埋まっており、何段階もの酸化還元反応のステップを経て大量の ATP を産生する。

このステップの最後にある ATP 合成酵素が ATP を合成する。この酵素は下図のような構造をしており、回転する機構を持っている。呼吸鎖の段階で、生体膜を挟んでプロトン (H⁺) の勾配を作る。この勾配を利用して、プロトンが特殊なタンパク質 (ATPase) を通過するとき、この酵素の回転機構を回転させる。この回転のエネルギーを利用して、アデノシン二リン酸にリン酸を付加する。例えて言えば、水力発電所では高い水位にある水を落下させ、勢いを持った水でタービンを回し発電する(電力を生み出す)のと同様である。



© University of Tokyo

出展：「東京大学生命科学教育用画像集」

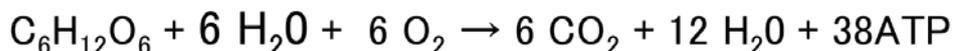
http://cslls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=147

このあたりの詳細については、科学技術振興機構・サイエンスチャンネル「(32) ナノサイズのモーターが創る「生命」」で公開している動画が面白い。

<http://sciencechannel.jst.go.jp/D047001/detail/D057001032.html>

これで、炭水化物(carbohydrate)の複雑な代謝経路を一通りたどった。この複雑な経路で行われたことを一まとめにすると、下記の実に単純な反応式となる。

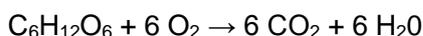
有酸素呼吸の全体式(まとめたもの)



この式の左右の辺から水分子 6 個を差し引いてやると、



となる。生きるために栄養を摂取し、ひたすら ATP を産生しているということが、よく分かる。エネルギー発生を除いた化学反応式は、



であり、これはグルコース(C₆H₁₂O₆)の燃焼反応⁴⁴と同じである。燃焼は激しい反応である

⁴⁴ グルコースの燃焼反応では、燃焼熱は 2803.3 kJ/mol であるので、エネルギーの放出量という点では異なっている。

が、生体での反応はとても穏やかである。穏やかに進行することができるのは、酵素を用いて、活性化エネルギーが小さくて済む反応を何段階も重ねていくからである。細胞内には、まさしく精巧なからくり仕掛けがあるのだ。

§ 3-3 栄養摂取の方法

私たちは、食物を食べるという行為によって生きるために必要な栄養を摂取している。これは自力での栄養摂取である。一方、自力での栄養摂取が困難な場合には、医療的行為により栄養を摂取することができる。例えば、胃ろう⁴⁵、経鼻経管栄養⁴⁶、中心静脈栄養⁴⁷などの方法がある。

⁴⁵ お腹から胃に直接穴を開けて栄養を注入する方法。

⁴⁶ 鼻の穴からチューブを通して体内に栄養を注入する方法。

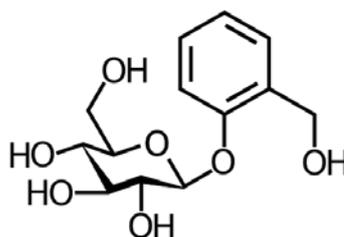
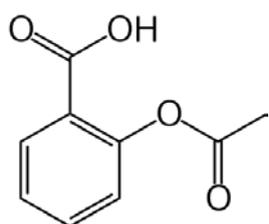
⁴⁷ 心臓の近くにある、太くて血流の早い静脈（一般的には鎖骨の下を通る静脈）にカテーテルを挿入して栄養を直接注入する方法。

第4章 薬

§4-1 薬はどうやって効くか

この章では、医薬品などについて学ぶ。もともと、医薬品は手に負えないほど数が多いので、その各論を取り扱うことは全くしない(章末に参考サイトを紹介する)。ここでは、生体に生理的作用を及ぼす物質、という観点から医薬品を捉え、薬はどうやって効くのかということをおおまかに把握してみたい。とはいえ、単に概念的に説明するのは却って分かり難いと思われるので、例を挙げて説明する。

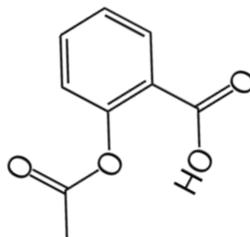
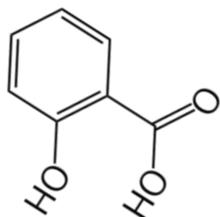
まず、解熱鎮痛剤として市販されている、アスピリン(Aspirin)⁴⁸を例として始める。アスピリンは、解熱鎮痛作用のある物質、アセチルサリチル酸(acetylsalicylic acid)を商品化したドイツのバイエル社が名付けた商標名である。



(左) アセチルサリチル酸(acetylsalicylic acid)の構造式

(右) サリシン(salicin)の構造式

この薬の起源は古代ギリシア時代にさかのぼる。ヤナギの樹皮の煎じ薬は、古代ギリシア時代から鎮痛作用があることが知られていた。ヤナギの煎じ薬の成分はサリシンという鎮痛作用をもつ物質であった⁴⁹。このサリシンは体内ではサリチル酸として作用する。



(左) サリチル酸(salicylic acid)の構造式

(右) アセチルサリチル酸(acetylsalicylic acid)の構造式

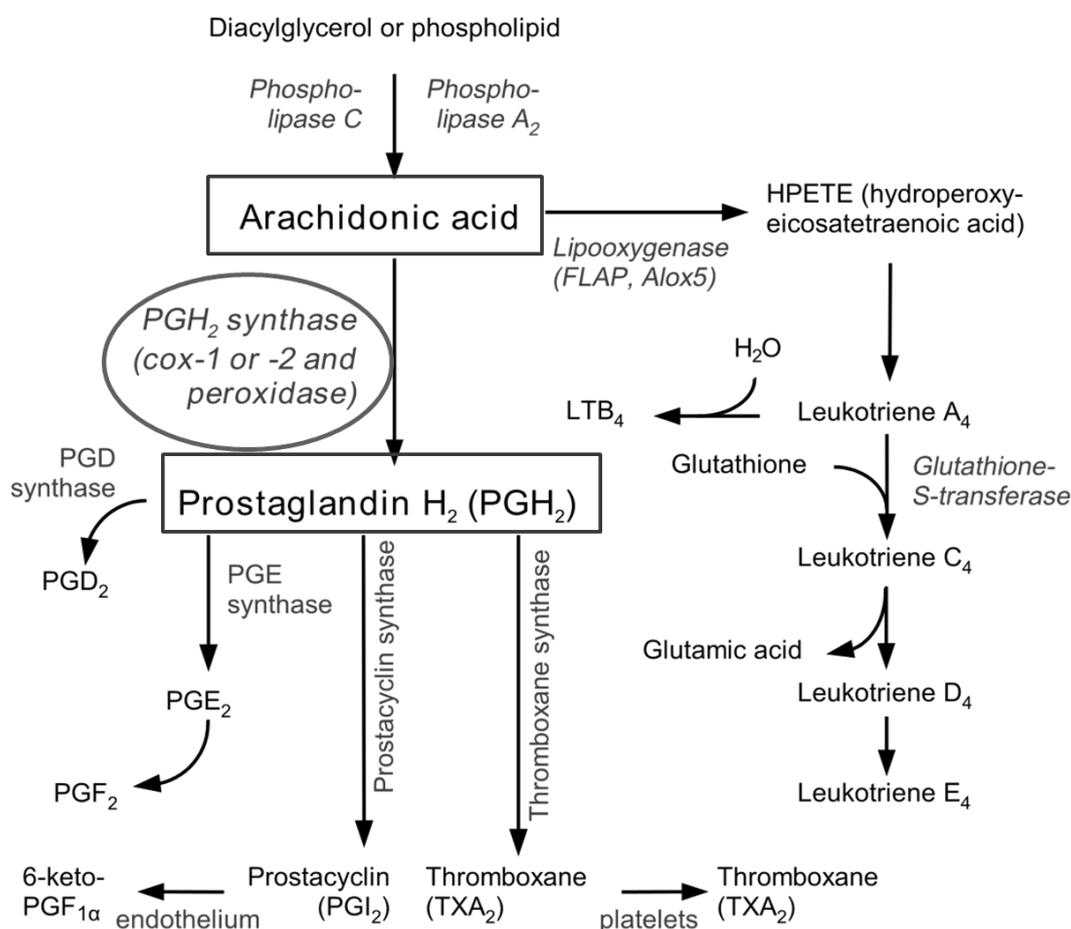
サリチル酸は、酸性が強く、胃の粘膜を痛めるという副作用があった。そこで、胃の粘膜を痛めないように、サリチル酸のベンゼン環に付いているヒドロキシ基を修飾してアセチル基とした。この物質は、修飾した部分は外れて体内ではサリチル酸として作用した。1897年にドイツの化学者、ホフマンがこの物質の合成に成功し、1899年にドイツの製薬会社バイエル社から解熱・鎮痛剤「アスピリン」として販売された⁵⁰。その後、同様な解熱鎮痛作

⁴⁸ アスピリンはバイエル社の登録商標である。

⁴⁹ もちろん古代ギリシアにその物質について知られていたわけではなく、後の時代に明らかになったことである。

⁵⁰ 1950年に世界最大の売上高の鎮痛剤としてギネスブックに載った。

用を有する薬剤が数多く開発された。例えば、市販されている一般薬ではイブプロフェン (Ibuprofen) やロキソプロフェン (Loxoprofen, 商品名「ロキソニン」) などがある。これらは、作用に若干の差異があるが、「非ステロイド性抗炎症薬 (NSAID : Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drug)」⁵¹ に分類される薬品である。これらの薬剤は、シクロオキシゲナーゼ (cyclooxygenase, COX と略す) という酵素がプロスタグランジン (Prostaglandin) を産生するのを阻害する役割をしている。下図は、細胞膜を構成するリン脂質由来のアラキドン酸 (Arachidonic acid) を原料としてプロスタグランジン (Prostaglandin, PG) 類やトロンボキサン (Thromboxane, TX) 類などを作る代謝経路 (アラキドン酸カスケード) である⁵²。COX が作用する位置をまるで囲んだ。



出展 : wikimedia commons, Eicosanoid synthesis.svg

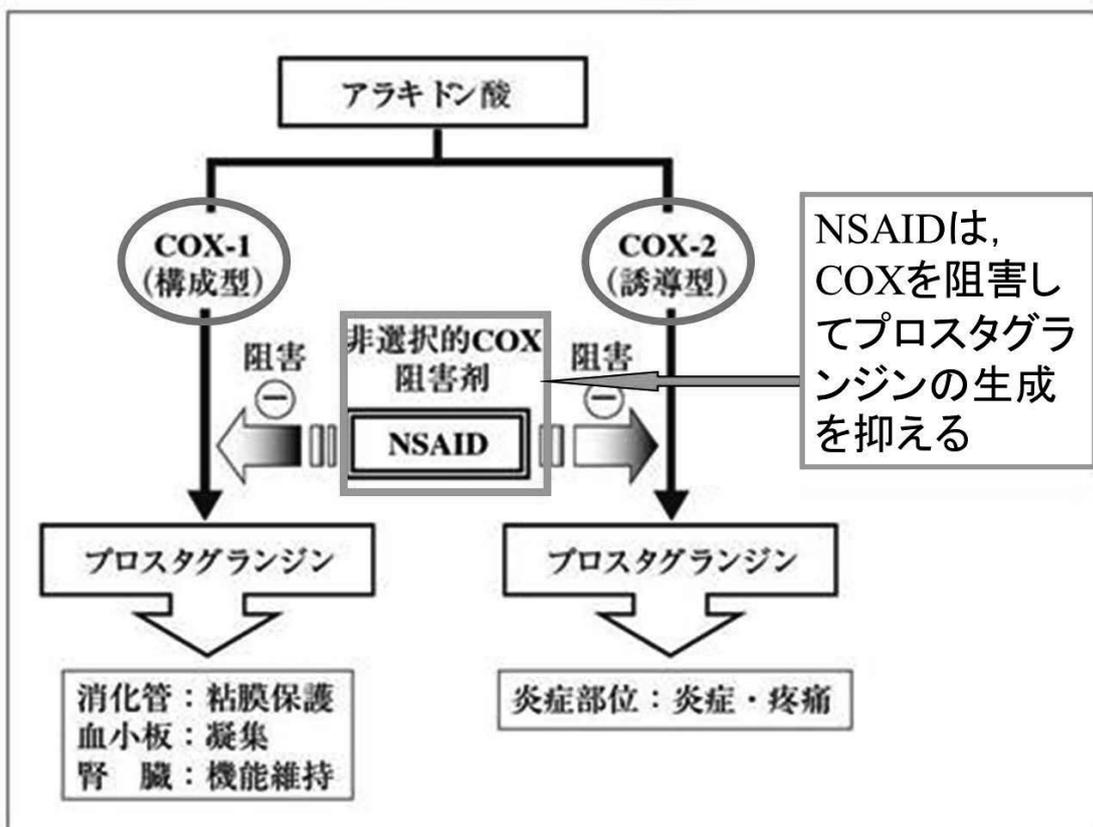
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Eicosanoid_synthesis.svg

このカスケードをもっと簡略化した図に、NSAID の作用について付記した。このような薬

⁵¹ ステロイドでない抗炎症作用を持つ薬剤。

⁵² 第3章2節で紹介した KEGG pathway では、「entry no. 00490, Arachidonic acid metabolism」にて、詳細な情報を得ることができる。

剤が、どこに、どのように作用しているかを、薬剤の作用機序（作用メカニズム）という。



ここで、COXは一つだけでなく、COX-1とCOX-2と2つ⁵³あることに気づく。COX-1のほうは消化管の粘液保護の作用を持っているので、その作用を阻害すると消化管の粘液が保護されず、胃を痛めるという副作用をもたらすことも分かる。それならCOX-2だけを阻害してやればいい、と考えるかもしれない。実際これは医薬品の開発においてもそう考えられて、COX-2選択的阻害剤⁵⁴、という薬剤も開発されている。

このように、作用機序⁵⁵が明らかになると、どんな薬剤を作ってやればいいか、ということが見えてくる。作用機序を明らかにするには、図に示したカスケードのような生体内でのpathwayが明らかにされる必要がある。これは、地道な研究によって解明され、現在もそういった研究がなされている。次の節では、作用機序が明らかになった後に、どのように考えていくかということをもとめてみよう。

⁵³ COXのアイソザイムは3つある。なお、アイソザイム(isozyme)とは、同一の生物種に本質的に同一の触媒反応を行う酵素が2種以上あって、タンパク質の一次構造が相互に異なる酵素を相互にいう。

⁵⁴ 既に、「セレコックス錠」という商品名の処方薬が整形外科などで用いられている。

⁵⁵ もう一例、1929年にフレミングにより偶然に発見された最初の抗生物質、ペニシリンの作用機序についても記しておく。アオカビ *Penicillium notatum* などの産生するペニシリンは、β-ラクタム系抗細菌抗生物質と分類されている。この薬剤は、細菌の細胞壁の主成分を合成する酵素を阻害することで細菌を壊す。細胞壁は細菌にはあるがヒトにはないので、細菌に選択的に作用するので副作用が比較的少ない。

§ 4-2 タンパク質の立体構造と医薬品

まず、ターゲットとなる分子（酵素や、受容体など）を特定しないといけない。先の例では COX という酵素がターゲットで、このターゲットの機能を阻害するという作用が求められる。酵素は、既に学んだようにタンパク質であり、基質と鍵と鍵穴の関係を持って作用する（基質特異性）。この例では基質はアラキドン酸である。なぜ、鍵と鍵穴に例えられるかというと、相手方とぴったりと合わないといけない、ということだが、ぴったりと合うというのはどういうことかということ、やはり鍵と鍵穴のように、立体的な構造がうまくマッチしているということを意味している。酵素には「活性部位」という酵素の機能発現に最も重要な空間がある。この活性部位を邪魔してやれば、酵素は機能を発現できなくなる。そうすると、何が知りたくなるだろうか？活性部位の立体構造を知りたいと思う。そして、活性部位は必ずしも表に表出しているわけではないので、酵素のタンパク質の立体構造全体も知りたい。こんなわけで、タンパク質の立体構造を解明することは、純粋科学の興味としてだけでなく、その先の応用への展開のためにも非常に必要とされている⁵⁶。立体構造解析の結果としてアスピリンが COX の活性部位を塞いでいる様子が 1995 年の論文に報告された。このあたりの詳細かつわかりやすい説明が、PDBj (Protein Data Bank Japan)内のサイト、「今月の分子」⁵⁷No.017「シクロオキシダーゼ」に記載されている。ビジュアルとしても大変美しいのでぜひ各自で

URL: <https://pdbj.org/mom/17>

を見てほしい。

タンパク質の構造解析の分野は「構造生物学」と言われているが、X線構造解析により行なわれてきたため、はじめの頃は、物理学の研究で多く行なわれてきた（生物物理）。近年、X線構造解析ではなく、クライオ電子顕微鏡法⁵⁸(Cryo-electron microscopy)による立体構造解析が数多く発表されるようになった。

⁵⁶ 兵庫県にある SPring-8 では、製薬会社が専用の貸し切りラインを利用していたりする。

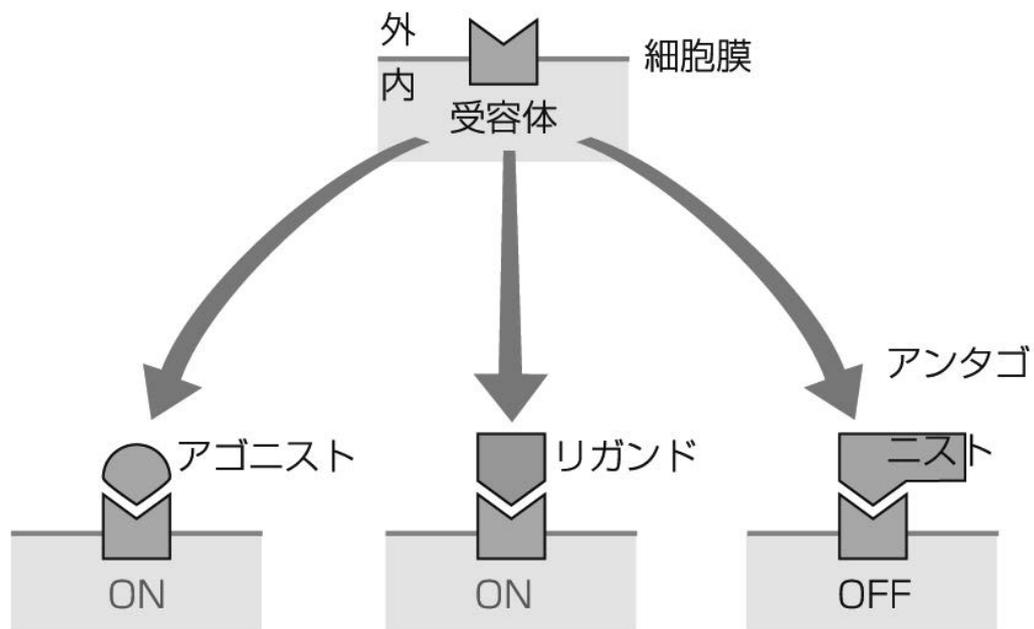
⁵⁷ David S. Goodsell 博士による「Molecule of the Month」を日本語に訳したもの。社会で話題となっている内容に関わる分子を蛋白質構造データバンク (PDB) から選び、機能と構造に関して解説している。原文は、PDB(Protein Data Bank)のサイト内の「Molecule of the Month」。2018年3月時点で101個の分子がエントリーされている。

⁵⁸ Cryo は低温の意味。2017年のノーベル化学賞はこの手法を開発した欧米の3氏に贈られた。

§ 4-3 受容体と結合する物質

鍵と鍵穴の関係にあった酵素については、基質そのものが化学反応により変化した。生体には、鍵と鍵穴の関係で作用するもう一つの重要なものがある。それは、受容体(レセプター, **receptor**)とそれに結合する物質の関係である。私たちが味やにおいを感じたりするのも、味覚受容体や嗅覚受容体に味物質や匂い物質が結合するところから始まる。また、五感によって直接感じ取ることはできないが、ホルモンや神経伝達物質も受容体と結合することにより、生理作用が起こる。このように、受容体に特定物質が結合することにより生理作用が起こる場合、「受容体の結合部位を塞いでやれば、生理作用が阻害されるのではないか」と酵素とのアナロジーで推測できると思う。

受容体に結合する物質は、リガンド(**ligand**)、アゴニスト(**agonist**)、アンタゴニスト(**antagonist**)に分類できる。



© CSLS University of Tokyo

出展：「東京大学生命科学教育用画像集」

http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=1166

上図に示すように、リガンドとは、生体内で受容体と親和性を持ち、結合した後、細胞内で生理作用を持つ物質をいう。つまり、生体内に内在する物質である。一方、アゴニストとアンタゴニストは、薬剤のように外部から体内に入る外来物質である。上の図を見ると、受容体と結合したとき(塞いだとき)、アゴニストとアンタゴニストはその作用の仕方(受容体がONになるかOFFになるか)が異なっていることが分かる。アゴニストとは、それが受容体と結合したとき、リガンドと同等の作用をもたらす物質をいう。アンタゴニストとは、それが受容体と結合することにより、リガンドの作用を抑えるように働く物質をいう。上の図でも視覚的に示されているが、受容体と、リガンド・アゴニスト・アンタゴニストとは、鍵と鍵穴の関係にあり、受容体 A には受容体 A に対して親和性の高い構造を持った物質しか結合できない。女性ホルモン、男性ホルモン、副腎皮質ホルモン、アドレナリン、アセチルコ

リン, ドーパミン, セロトニン, GABA(γ -アミノ酪酸)などはリガンドの例である。精神安定剤などの向精神薬は, 神経伝達に関わる受容体に結合できる物質で, タイプとしてはアゴニストもアンタゴニストもある。また, がんの疼痛治療に用いられるとともに麻薬としても知られるモルヒネは, オピオイド受容体に作用する外来物質である。モルヒネが結合する受容体があるなら, 生体内にリガンドがあるのではないかと探索した結果, 1980年代にオピオイドペプチドと総称されるいくつかの物質が見つかった。

各論としてみると「個別の多様な作用の物質がいろいろとある」ということになるが, 「薬はどうやって効くのか」という観点でとらえると, 非常にシンプルである。

§ 4-4 医薬品等についての情報の利用

医薬品及びトクホについての情報を調べるのに適したサイトを紹介する。

(いずれも 2018 年 3 月 8 日確認)

一般用医薬品の添付文書情報 (家庭用医薬品検索)

http://www.info.pmda.go.jp/osearch/html/menu_tenpu_base.html

医療用医薬品の添付文書情報 (処方箋医薬品検索)

http://www.info.pmda.go.jp/psearch/html/menu_tenpu_base.html

ジェネリック医薬品の情報サイト

http://www.generic.gr.jp/index_sr.php

「特定保健用食品 (トクホ)」表示許可商品一覧

https://hfnet.nih.go.jp/contents/sp_health.php

LADy SCIENCE BOOKLET 19
身近な物質の話

2018年3月31日発行

奈良女子大学 理系女性教育開発共同機構

CORE of STEM

Collaborative Organization for Research in women's Education of
Science, Technology, Engineering, and Mathematics

〒630-8506 奈良市北魚屋東町

コラボレーションセンター Z207

TEL.&FAX 0742-20-3266

ladyscience@cc.nara-wu.ac.jp
