

連載 理学のキーワード 第6回



「水素結合」

田中 健太郎（化学専攻 助教授）

水素結合 (hydrogen bond) とは、OH や NH など電気陰性度の高い原子に共有結合した水素原子が、近傍の他の官能基の非共有電子対と非共有結合的に作る結合である。水やアルコールが同じような分子量をもつ化合物に比べて高い沸点を示すのは、分子間に水素結合を生じることが大きく寄与している。たとえば、水（分子量 18）の沸点が 100℃であるのに対し、水素結合しないメタン（分子量 16）の沸点はずっと低く、-162℃である。

水素結合の強さは 10 ~ 40 kJ/mol の間であり、ファンデルワールス力（1 kJ/mol 程度）よりは強いが、共有結合（500 kJ/mol 程度）より弱く、室温で可逆的な結合・解離が可能である。

水素結合の起源のひとつには、分極して弱く正電荷を帯びた水素原子と非共有電子対の弱い負電荷の間に生じる、静電相互作用があげられる。しかし、イオン結合とは異なり、水素結合は方向に対する強い指向性をもっている。

これらの特徴から、生体分子の中で水素結合はとくに重要な働きをしている。DNA やタンパク質などの生体高分子が、機能的な高次構造を形成するには、水素結合が欠かせない。DNA の二重らせん構造の内部では、核酸塩基どうしの間で相補的な水素結合のパターンが形成され、遺伝情報の暗号となっている。また、タンパク質に特異的に基質が結合することを「鍵」と「鍵穴」に例えるこ

とがあるが、それらの間の分子認識にも水素結合が関与している。酵素の活性中心では、基質の固定化だけでなく、電子密度の調節、プロトンの移動などを通して、反応の促進にも大きく寄与している。

生体高分子の構造や機能は、新しい分子構築の手本としてさまざまなヒントを与えてくれるが、中でも水素結合は、合成化学、超分子化学、創薬などの分野で欠かせない概念である。最近、モーター、ピストン、シャトル等々、身近な機械と同じような機能をもつ分子が合成されてきているが、「分子機械」の中にも水素結合は重要な「部品」として組み込まれている。



「地下生物圏」

浦辺 徹郎（地球惑星科学専攻 教授）

地下生物圏という言葉は一風、変わった生い立ちをもっている。最初（1992年）に提唱したのが、定常宇宙論で有名な天文学者、ゴールド（T. Gold）だったからである。ゴールドの真骨頂は学問の常識を破ることにあり、地下生物圏のアイデアも、地球創成時の炭素が今もメタンガスとして大量に地球内部に存在しているとする、彼の年来の主張から派生してきたものらしい。

ゴールドの主張には科学的根拠が薄弱的な部分もあるが、地下生物圏の生物量（バイオマスという）が炭素重量換算で 200 兆トンに達し、陸上と海中の生物の総量 1 兆トンをはるかに凌ぐという推算是驚きとともに迎えられた。ペダーセン（Pedersen）などの微生物学者がその考えを支持し、活発な議論がなされている

ところである。ただし、200 兆トンという数字を信じる人は少なく、地下数千メートルまでに地球表層と同等程度の微生物（原核生物）のバイオマスが存在するのではないかと推定されている。

地下に大きなバイオマスが存在することが最初に示されたのは海底堆積物で、そこには 1 cm³ 当たり 10 万から 1 億の微生物細胞が含まれている。これらの微生物は、おもに堆積物中の有機物やその分解生成物をエネルギー源として考えると考えられており、大局的には太陽エネルギーによる光合成に依存しているといえる。

いっぽうで、光合成由来の有機物に依存せず、地球内部の無機化学物質エネルギーのみに依存する生態系も見つかっている。たとえば、スウェーデン

の花こう岩体の割れ目中や、アメリカ西部の厚い玄武岩溶岩の地下水中には、水素ガスを代謝の起点とする微生物生態系が発見されている。地下は光や酸素の無い世界なので、そこでは嫌氣的な化学合成、たとえばメタン生成 ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) などを行う独立栄養微生物が一次生産を支えているらしい。

地下生物圏の考えは、地下に留まらない広がりを見せている。というのも、この生態系なら地球以外の惑星や衛星の内部にも普遍的に発生・存在しうるからである。われわれの研究室では、地下生物圏の窓ともいべき海底熱水噴出域に焦点をあてて、それが地球上の物質循環にどのような影響を与えているのかを研究している。



「ヒッグス粒子」

駒宮 幸男 (物理学専攻 教授)

素粒子の多くは質量をもっている。その質量の起源となるのがヒッグス粒子だ。光子などの質量ゼロの素粒子は光速で走る。宇宙初期の高温状態では、恐らくすべて素粒子の質量はゼロで、光速で飛び回っていた。宇宙が膨張して冷えてきたある時点で、ヒッグス粒子の場が空間(「真空」)に凝縮した。宇宙が、水蒸気が冷えて水になるような相転位を起こしたと考えられる。素粒子は、この凝縮したヒッグス場と相互作用するようになり、いわば抵抗を受けて光速で走れなくなった。これは質量を持ったということだ。素粒子の質量はヒッグス粒子との相互作用の強さに比例する。光子などはヒッグス粒子と相互作用しないため、いまでも質量がゼロのままであり、トップクォークなどは、ヒッグス粒子と強く相互作用するため、大きな質量をもつ

ようになった。つまり、真空中に充滿したヒッグス粒子の場合は素粒子を動きにくくして質量を与える役目をする。あえて例えれば、百メートル12秒で走れる人でもプールの中では水の抵抗を受けてゆっくりしか走れない。この水の役割をするのがヒッグス粒子だ。1960年代に英国のヒッグス(P. W. Higgs)博士が、質量のない素粒子が質量を獲得する「ヒッグス機構」を提唱した。この理論にはシカゴ大学の南部陽一郎博士も大きな貢献をした。

ヒッグス粒子はまだ発見されていない。したがって上に書いた理論は、まだ実験的に検証されていない。30年以上も前から実験家はこの素粒子を発見しようと、さまざまな加速器を用いた実験で血眼になって探索してきた。ヒッグス粒子自身の質量は、CERN(ジュネーブにある素粒子物理研究所)で2000

年まで稼働していた電子・陽電子の衝突加速器(コライダー)LEPでの実験によって、114 GeVから約200 GeVの間の狭い範囲に絞り込まれている(1 GeVは 10^9 電子ボルトでエネルギー=質量の単位、陽子の質量は約1 GeV)。

2008年から衝突エネルギー14,000 GeVで本格的に実験が始まるCERNの世界最高エネルギーの陽子・陽子コライダーLHC(Large Hadron Collider)では、ヒッグス粒子の発見が期待されている。LHCでのATLAS実験には素粒子センターと物理学専攻の研究者や大学院生も参加している。LHCでヒッグス粒子は恐らく発見されると考えられているが、次世代の電子・陽電子コライダー(国際リニアコライダーILC)のクリーンな環境での精密測定によって、その背後の物理法則を解きほぐすことになるだろう。



「DNAナノテクノロジー」

萩谷 昌己 (情報科学科 教授)

理学のキーワードという欄に「テクノロジー」というキーワードを掲げて恐縮であるが、この分野に関連したさまざまなキーワードの中で少なくとも現時点ではこれがもっとも適切であると思う。一般にナノテクノロジーとは、個々の分子や原子をナノメートルのスケールで制御して、2次元や3次元の構造を作ったり、静的な構造だけでなく可動部をもつ構造(すなわちロボット)や各種の機能分子を組み合わせたシステム(たとえば分子回路)の構築を目指す研究分野である。

ナノテクノロジーには大きく二つのアプローチがある。ひとつは、原子間力顕微鏡などのひじょうに微細な探針を用いて分子や原子を直接に操作することにより、ナノスケールの構造物を作ろうとするアプローチである。いっぽう、分子や原子同士が自ら選択的に結合する

能力を活用してナノスケールの構造物を作ろうとする「自律的」アプローチがある。このアプローチは「機械の自己組み立て」の技術としてマイクロスケールにおいて従来から研究されてきたが、明らかにこのアプローチが真価を発揮するのは、個々の部品を直接に操作することが困難なナノスケールの領域である。これに対して前者のアプローチを「他律的」と呼ぶことがあるが、少なくとも現状では、他律的アプローチによって分子や原子を操作できたとしても、恐ろしく能率が悪い。

しかし、ナノスケールにおいて自律的アプローチを現実のものとするには、選択的に結合する部品を自由に設計・実装できなくてはならない。そこで注目されるのが、ワトソン・クリックの相補性によって選択的に二本鎖を形成するDNA(またはRNA)である。DNA

分子を用いたナノスケールの構造形成の技術は長年に亘って研究されてきた。とくに、DNAから作られたタイル状の分子(DNAタイル)を部品として、それらの自己組み立てによって構造を形成する技術が活発に研究されている。最近では、ウィルスのゲノムのようなひじょうに長いDNA分子を意図した構造に折り畳む技術(DNAオリガミ)が開発され注目を集めている。このような構造形成のプロセスを制御することは「プログラミング」と呼ぶにふさわしい。選択的結合性に優れたDNA配列の設計、誤った結合を取り除く仕組み、プロセス全体の効率的なスケジューリングなどが典型的である。ちなみに、萩谷が代表を務めている「分子プログラミング」の特定領域研究は、DNAナノテクノロジーに対してこのような情報技術の観点から取り組んできた。