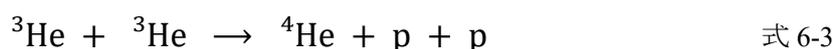


6. プリン体にまつわる何故を化学する

何故、通風を引き起こすプリン体が身体に必要？

太陽などのすべての恒星は陽子（水素の原子核）が式 6-1 と式 6-2 と式 6-3 の 3 つの式で表される核融合反応による大きなエネルギーで輝いています。元素記号の左上付きの数字は原子量を表していますから陽子は ${}^1\text{H}$ と表されますが、陽子と中性子と電子をそれぞれ p と n と e と便宜上表しますから陽電子は e^+ と表されます。この水素の原子核が核融合してヘリウムに変化する連鎖反応により膨大なエネルギーが発生していますが、同時に式 6-4 と式 6-5 と式 6-6 の核融合反応も進行していますから陽子や中性子が副生します。この膨大なエネルギーは電磁波や中性子や陽子とともに恒星の周囲に放射されます。このように恒星が放射する電磁波や中性子や陽子などの宇宙線は何億年という年月をかけて地球にまで送られ、到達した可視光線が目に入れば光輝く星と認識できます。



広い宇宙空間には中性子や陽子や電子などの素粒子の他にこれらが種々の組み合わせで結合した原子や分子が存在しています。これらの原子や分子に高いエネルギーを帯びた中性子や陽子や電子や電磁波が衝突しますと、より低いエネルギーの電磁波の放射を伴い分子や原子の分裂や分解や結合などの種々の変化が引き起こされます。

宇宙の遠い彼方に存在する分子に中性子や陽子が衝突した時に放射される電磁波が非常に微弱ながら地球に到達しますから、このような電磁波を観測するように長野県八ヶ岳山麓の野辺山宇宙電波観測所には直径 45m の大型のパラボラアンテナや 600m の直線上に同時測定できるように複数のパラボラアンテナが天に向って設置されています。このような電波望遠鏡により電磁波の周波数とその強度が測定でき、宇宙に存在する水やアンモニアやメタンや硫化水素などの他に一酸化炭素や一酸化窒素やメタノールやアセチレンなど 100 種類以上の分子の存在とその濃度が確認されています。衛星テレビや行政無線やスマホや電子レンジなどに用いられている電磁波が 12GHz 以下ですから、50GHz 以上のマイクロ波領域は比較的雑音が少なく容易に観測できます。宇宙で一番多く分布している水素分子とよい相関関係があるために、115GHz のマイクロ波を放射する一酸化炭素の分布は容易に観測でき、他の種々の分子の分布状態を示すと考えられています。野辺山宇宙電波観

測所の村岡和幸研究員らは、渦巻銀河 M83 の中心部分で 89GHz のマイクロ波を発するシアン化水素と一酸化炭素の電磁波を観測した結果を報告しています。比較的小さな望遠鏡でも M83 は渦巻きが 4 月の下旬に南寄りの空に観測できる銀河です。報告によりますとその銀河の渦巻きの沢山の明るい星が光り輝いている部分ではなく、星も何もなさそうな暗い部分にシアン化水素分子が出す電波が強く観測されています。そして、シアン化水素分子からの電波が強い場所は星が全く存在しないのではなく分子が高い密度で存在しており、まさに新しい星が誕生しつつあると報告しています。

太陽程度の恒星の周囲ではシアン化水素の存在が確認されることが多く、太陽よりも低温で光る矮星では一酸化炭素などの分子の存在が観測されているにもかかわらずシアン化水素の存在がほとんど確認されません。太陽のような温度の高い恒星の内部では、式 6-1 と式 6-2 と式 6-3 の 3 つの式で表される核融合の連鎖反応により大きなエネルギーを産出していますが、同時に式 6-4 と式 6-5 と式 6-6 の核融合反応も多く進行していますから、大量の陽子や中性子が副生しています。恒星の周囲に多く存在している一酸化炭素の酸素原子と中性子が衝突して式 6-7 の核反応が進行しますとシアン化水素が生成します。このことから太陽のような恒星のまわりでは、シアン化水素の生成が進むと考えられ、45 億年前に太陽の近くで誕生した地球の大気中や海水中にはシアン化水素がかなり存在していたと考えられます。



植物の中では図 3-6 に示すように葉緑素が太陽の光を効率よく吸収して得たエネルギーで水を酸素まで酸化し、NADP 陽イオンを高い反応性の還元状態を持つ NADPH まで還元します。この NADPH の高い還元性により二酸化炭素を還元して植物はブドウ糖を生合成しています。生物の体内では、このブドウ糖が異性化反応、分解反応、酸化反応などの複雑な反応経路でピルビン酸に変化し、このピルビン酸が二酸化炭素を失って図 3-20 で示すアセチル補酵素 A に変化し、さらにクエン酸の触媒により二酸化炭素まで酸化されます。このときブドウ糖は大気中の酸素を酸化剤として図 3-22 に示すように FADH₂ から FAD への酸化過程や NADPH から NADP 陽イオンへの酸化過程など複雑な反応経路を経て二酸化炭素まで酸化されます。ADP はリン酸と 7.29kcal/mol の吸熱的な平衡反応により ATP に変化しますが、葉緑素が吸収した太陽光のエネルギーやブドウ糖の一連の酸化反応において発生するエネルギーは ADP から ATP を生成することに費やされ、図 3-17 に示すように生成した ATP から ADP へ戻るときに放出する 7.29kcal/mol のエネルギーが生命活動の維持に要する活力に充てられています。

これら太陽の光のエネルギーでブドウ糖を生成する反応とこのブドウ糖を空気で酸化して活力とする反応の過程で、生物にとって極めて重要な酸化や還元的能力やエネルギーの遣り取りの働きをしている NADPH と NADP 陽イオン、FADH₂ と FAD、アセチル補酵素 A (HS-CoA)、ADP と ATP にはいずれもアデニンと 5 炭糖のリボースがグリコシド結合したアデノシンと呼ばれる図 6-1 に示す構造の化合物が分子の一部を占めています。この

アデニンの分子式はシアン化水素 (HCN) 5 分子に相当する $C_5H_5N_5$ ですが、5mol のシアン化水素と 1mol のアデニンの燃焼熱がそれぞれ 793.0 kcal と 663.7kcal と

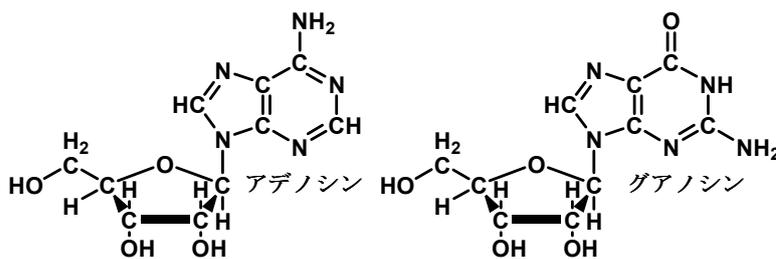


図6-1 プリン型ヌクレオシドの構造

報告されていますから、シアン化水素は何らかの触媒で発熱的に容易に縮合してアデニンを生成すると考えられます。実際フラスコに入れたアンモニア水の中にシアン化水素を溶かして長時間にわたり加熱しますとアデニンが生成したと Oró が 1961 年に報告しています。太陽のような恒星のまわりで一酸化炭素などの分子が集合してきますと、新しい星の誕生とともにシアン化水素の生成が進むと考えられますから、45 億年前に太陽の近くで誕生した原始地球の大気中には水素とヘリウムに次いで一酸化炭素、水、アンモニア、ホルムアルデヒド、シアン化水素の順に多く含まれていたと現在では類推されています。当然、地球誕生当時の海の中にも多くシアン化水素が溶けて存在したと思われ、アデニンに変化したと考えられています。

次の「何故、DNA の中には宝物がいっぱい？」の節で説明しますが、アデニンの他にグアニンとウラシルとチミンとシトシンの 5 種の化合物を核酸塩基と総称し、それらの核酸塩基が 5 炭糖のリボースあるいはデオキシリボースとグリコシド結合した化合物をヌクレオシドと総称し、それらのヌクレオシドのリン酸エステルをヌクレオチドと総称しています。図 6-1 に示すようにアデノシンと同じプリン型ヌクレオシドのグアノシンも生物体内で重要な働きを担っていますが、それらのヌクレオチドはそれぞれ AMP と GMP とよばれています。この 2 種類のヌクレオチドは図 6-2 に示すような過程でイノシン酸から体内で生合成されています。このようにイノシン酸は人間にとって最も重要なプリン塩基のヌクレオチドの前駆物質ですから、人間はイノシン酸を図 6-3 に示すようにリボースリン酸

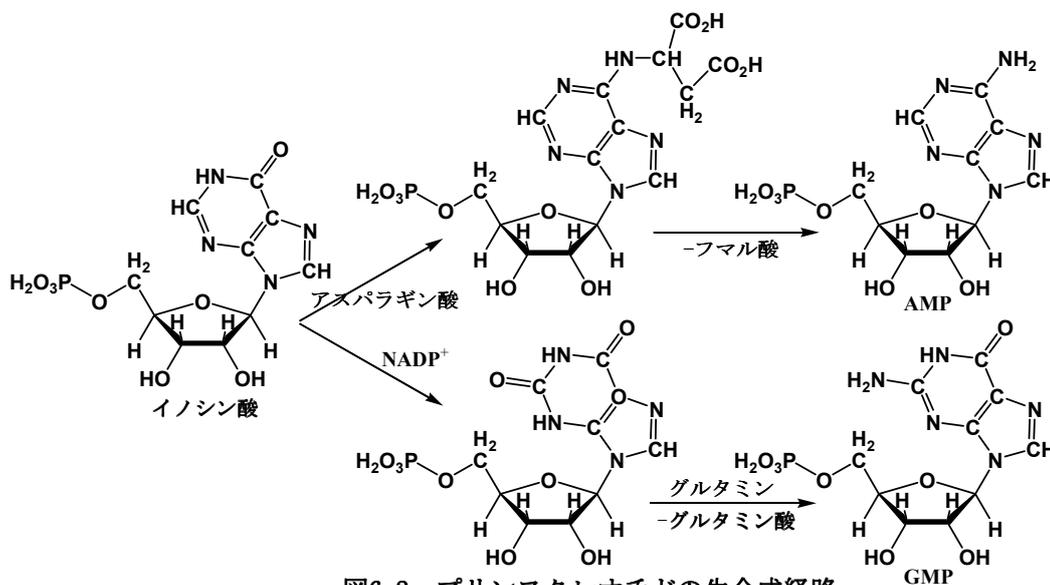
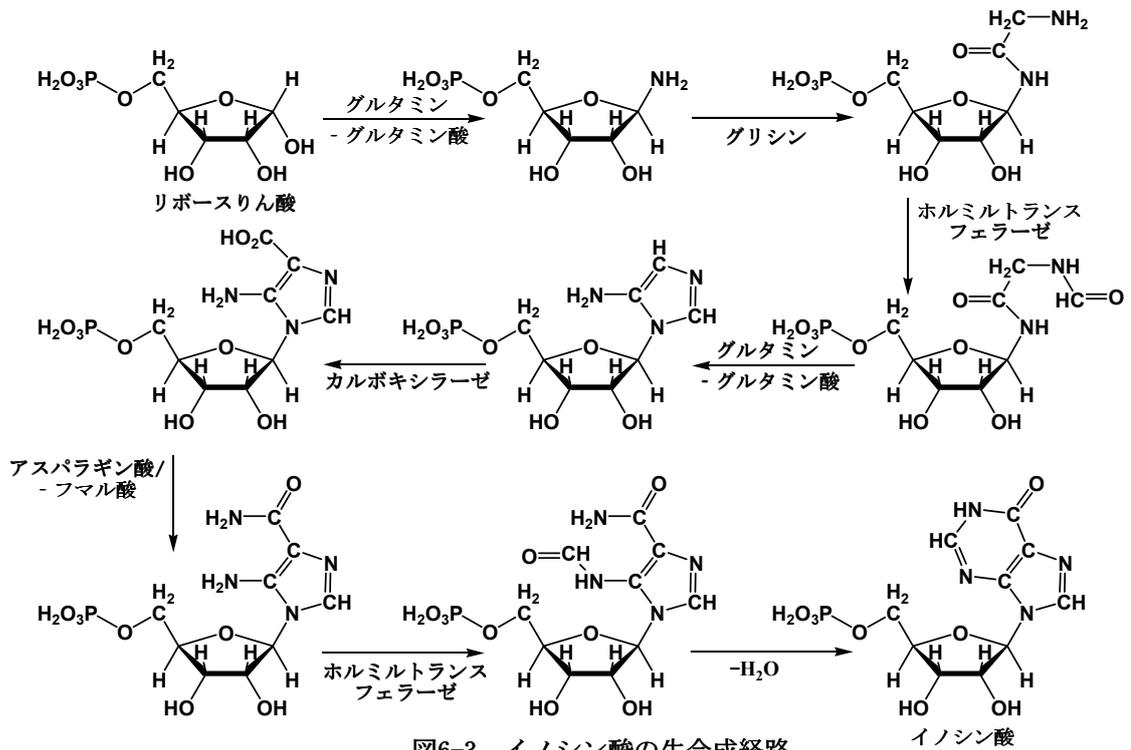
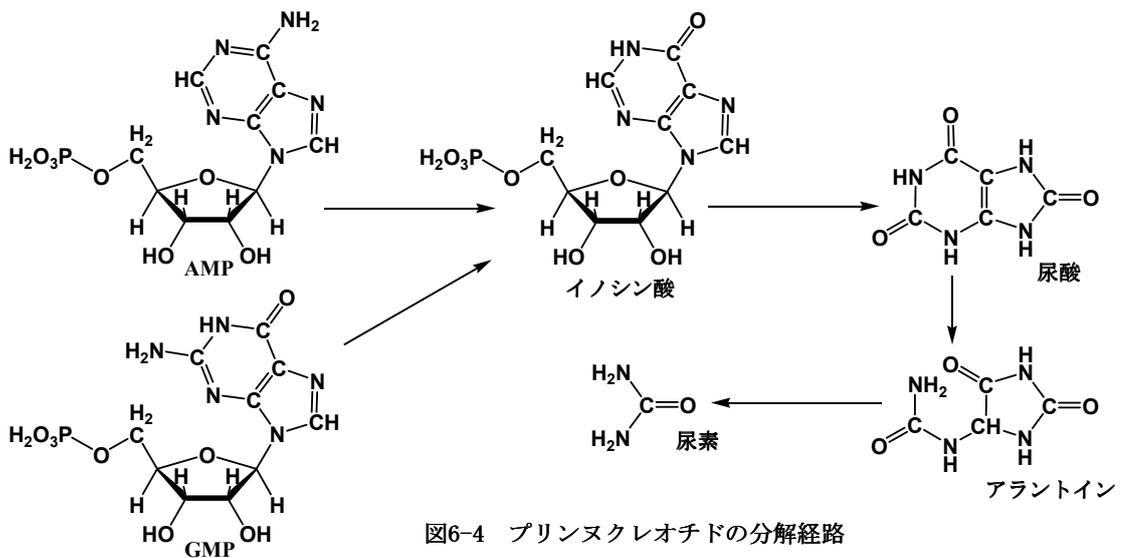


図6-2 プリンヌクレオチドの生合成経路



にグリシンやグルタミンやアスパラギン酸などのα-アミノ酸と種々の酵素が作用して人間の体内で生合成していますが、多くの食物からも摂取しています。

このようにアデニンとそのヌクレオチドは人間にとって生命活動を維持する上で欠くことのできない極めて重要な物質ですが、特に身体的に成長し激しく活動する青春には多くアデニンとそのヌクレオチドが必要と考えられます。人間はこのように生命活動を維持する上で欠くことのできない極めて重要なプリン塩基のヌクレオチド類を主に再利用していますが、一部は尿酸に酸化されてゆきます。また、青春には身体の成長に伴う旺盛

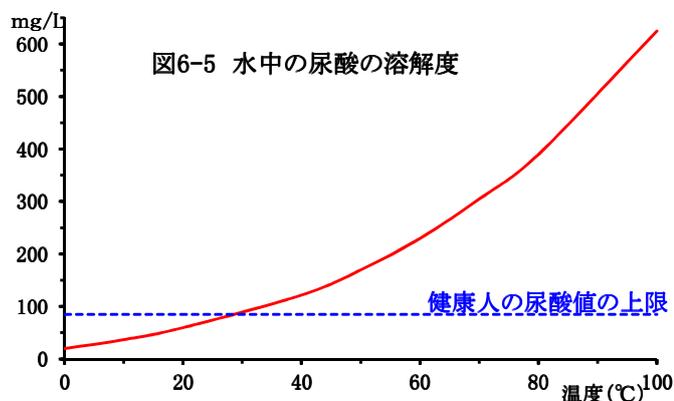


な細胞分裂と活発な活動を支える大量のエネルギー消費のために、大量のプリン塩基のヌクレオチド類を要しますが、人間は年齢を重ねる間に次第にその必要量が減少します。しかし、食べ物からの摂取量はあまり減少しませんから、プリン塩基のヌクレオチド類が必然的に体内に過剰になってきます。過剰に摂取されたプリン塩基のヌクレオチド類は図 6-4 に示すような脱アミノ化酵素による AMP からのイノシン酸への変化、イノシン酸の酸化反応と加水分解により尿酸に分解されます。

水と酸素は人間が生命活動を維持するうえで欠くことのできない基本的な物質ですが、それぞれ極めて反応性の高い物質ですから、人間にとって毒性を示す過酸化水素や一重項酸素や水酸ラジカルなどの物質が金属化合物や紫外線の作用により副生します。プリン塩基のヌクレオチド類のイノシン酸への脱アミノ化反応とイノシン酸の酸化反応と加水分解により生成する尿酸は抗酸化剤の性質を持っていますから、血液中に発生する過酸化水素や一重項酸素や水酸ラジカルなどの有毒な物質を還元して解毒する抗酸化剤として、ビタミン C と共に作用します。この尿酸が不要になりますと、人間の体内ではアラントインを経て尿素に分解して尿中に排泄されます。また、タンパク質や α -アミノ酸が分解する時に発生する窒素化合物とともに、ここで脱アミノ化酵素により排出される窒素化合物はアンモニアとして尿中に排泄されます。

尿酸はプリン塩基のヌクレオチド類の分解した老廃物でありながら、重要な抗酸化剤の働きをする物質ですから、健康な女性の血液中には 20~70mg/L、男性では 21~85mg/L の尿酸が含まれています。しかし、水に溶け易い尿素やアンモニアと異なり、尿酸は図 6-5 に示すように人間の体温の水には約 110 mg/L しか溶けず、平面状のプリン環骨格を持つ物質ですから結晶し易い性質を示しています。血液中に含まれる尿酸の濃度が健康な人間の上限値よりわずかに高くなりますと、結晶が析出を始める飽和濃度に達してしまいます。特に、33°Cでは 100 mg/L に、30°Cでは 90 mg/L まで尿酸の溶解度が減少しますから、爪先や指先などのように比較的体温の低い身体の末端部分では尿酸がかなり結晶化しやすくなります。そのような場合には血液中に尿酸の針状結晶が析出してしまいますから、激しい痛みを伴って血液の流れに

支障をきたします。この高尿酸血症はわずかの風に当たっても感じるほどの激痛を伴うことから通風と呼ばれて、なるほど、プリン塩基のヌクレオチド類が体内に過剰になり易い熟年期の人にしばしば発症する疾患です。



何故、DNA の中には宝物がいっぱい？

2重結合は σ 結合と π 結合の2種類の結合で結ばれており、それぞれ結合エネルギーに相当するエネルギー的な安定化が起こります。2重結合と単結合（ σ 結合）の結合エネルギーの差はおおよそ π 結合の結合エネルギーと考えることができます。炭素＝炭素2重結合の平均的な結合エネルギーが146 kcal/mol、炭素－炭素単結合が平均的に83 kcal/molですから、炭素＝炭素2重結合のうちで π 結合の結合エネルギーは約63 kcal/molと見積もることができ、 σ 結合の83 kcal/molよりはかなり小さな値と考えられます。 π 結合が結合軸上ではなく直交軸上に存在している π 電子の相互作用によるものですから、結合を構成している2個の原子が結合軸に沿って回転する時には、それぞれの π 電子の軸方向は変化します。図6-6に示すようにそれぞれの π 電子の軸方向が一致する回転角 θ が 0° の時にはそれぞれ

それぞれの π 電子は最も近付きますから、最も大きく相互作用します。また、軸方向が逆方向の θ が 180° の時にも π 電子は近付き相互作用は大きくなります。軸方向が直行して θ が 90° の時には全く相互作用しませんから、 π 結合による安定化は起こりません。 π 結合エネルギーを約63 kcal/molと見積もることと π 結合の強さが回転角 θ により変化することは縦軸を π 結合エネルギーとする図6-7のグラフで表すことができます。

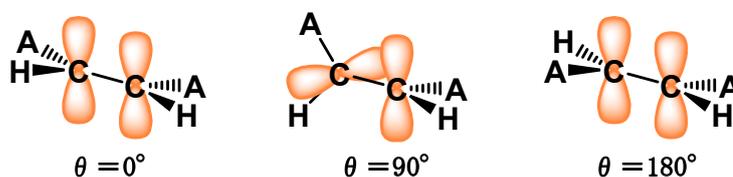


図6-6 回転角と π 電子の重なり

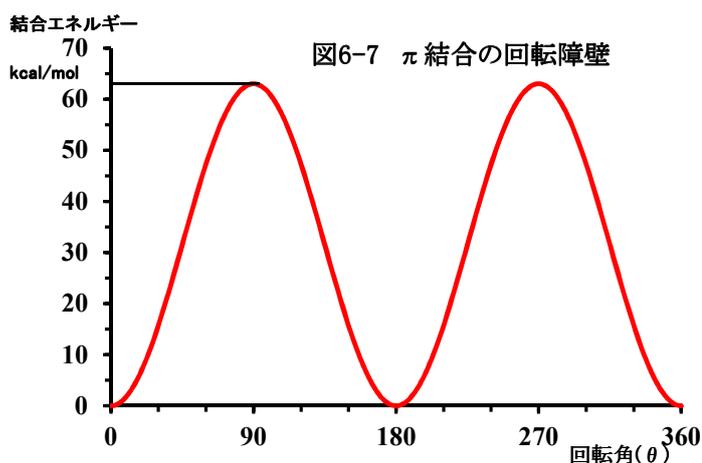


図6-7 π 結合の回転障壁

2つ以上の2重結合が単結合と交互に結合することを共役と呼んでいます。表6-1には標準的な単結合化合物のエタンや2重結合化合物のエチレンと比較して、共役した構造を持つ1,3-ブタジエンの結合距離と最も安定な分子の構造を掲げておきます。この表から明らかなように、1,3-ブタジエンの2つの2重結合はエチレンの結合距離

表6-1 共役化合物の分子構造の特徴と共鳴エネルギー

距離と最も安定な分子の構造を掲げておきます。この表から明らかなように、1,3-ブタジエンの2つの2重結合はエチレンの結合距離

	結合距離 (nm)		構造	共鳴エネルギー
	単結合	2重結合		
エタン	0.154		正4面体	0 kcal/mol
エチレン		0.134	平面 120°	0 kcal/mol
1,3-ブタジエン	0.146	0.135	平面E型	5 kcal/mol
ベンゼン	0.139	0.139	平面正六角形	36 kcal/mol

に比較して長く、2つの2重結合を結び付けている単結合はエタンよりも短くなっています。一般に2つの原子間の結合エネルギーが大きくなるほど結合距離が短くなりますから、ブタジエンの2重結合に挟まれている単結合は若干の π 結合性を持つことにより結合エネルギーが大きく、同時に2重結合の π 結合性はエチレンに比較して約8kcal/mol小さくなると見積もられます。また、2つの2重結合を単結合が結び付けていながら、1,3-ブタジエンを構成している10個の原子は2重結合のようにすべて同一平面上に位置する構造をしています。

1,3-ブタジエンは図6-8に示すように4個の炭素原子が σ 結合で結ばれ、それらの炭素原子には直交軸上にそれぞれ1個ずつの π 電子が存在しています。これらの炭素原子は σ 結合で結ばれて近接していますから、直交軸上の π 電子の側面が重なり合い3つの σ 結合の上に互いに相互作用する2つの π 結合が形作られます。ここで、4個の炭素原子の間に π 結合が拡がり相互作用することにより、1,3-ブタジエンの場合には総結合エネルギーが5kcal/molほど大きくなります。このように2つの隣り合った炭素=炭素2重結合の π 結合が相互作用することを共鳴といい、その共鳴により π 結合が拡がって均一化するとともに増加した結合エネルギーを共鳴エネルギーと呼んでいます。

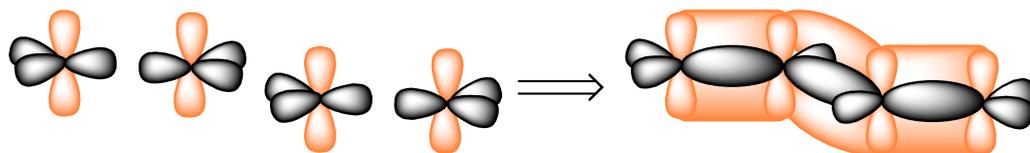


図6-8 4個の π 電子が相互作用するブタジエン

分子式が C_6H_6 のベンゼンは19世紀に性質が明らかになった極めて安定な物質ですが、炭素原子の原子価が4価であることを考えると多くの2重結合や3重結合を分子の中に入れていることとなります。Kekuléは3本の2重結合と単結合が交互に六角形に結ばれ共役した構造を考えました。3つの σ 結合の上に互いに相互作用する2つの π 結合が形作られている共役2重結合では共鳴安定化が起こります。表6-1に掲げたブタジエンの共鳴エネルギーはわずかに5kcal/molに過ぎませんが、6本の σ 結合の六角形の構造上に3本の π 結合が共役したベンゼンではその共鳴エネルギーが36kcal/molと見積もられ、ベンゼンの分子の形が図6-9のように平面正六角形をしていることも明らかになりました。このことからベンゼン環は正六角形の6本の σ 結合上に3本の π 結合は拡がり、直交軸上の π 電子は自由に移動でき、大きな共鳴エネルギーを持って安定化します。

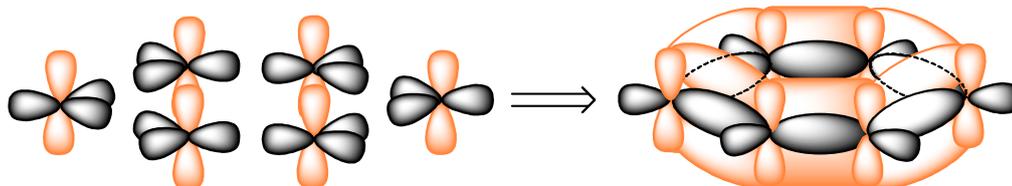


図6-9 平面正六角形のベンゼン環

汎用電子計算機や大型電子計算機では記憶素子部分が最も重用な役割を演じていますが、この記憶素子に最も求められることは正確な情報の記憶と伝達とされます。しかも、

不意の停電や雷などの大電力の通電においてもその記憶の安全な保持が求められます。生物の進化の過程や生命活動に必要なすべての膨大な情報を収納する役割を果たしていますから、計算機の記憶素子部分のように DNA は急激な環境の変化や外的な障害からの記憶情報を安全に保存するとともに、RNA を介して正確に読み出しと必要に応じた書き換えができなければなりません。生体内の生命活動はすべて物質の化学変化で進行していますが、温度や気圧の急激な変化、酸素や水や栄養物質の過不足、紫外線や放射線の被曝などの環境の変化にも、DNA は安定に記憶素子として機能しなければなりません。

ベンゼン環は平面正六角形で6本の σ 結合上に3本の π 結合が拡がり、直交軸上の π 電子は大きな共鳴エネルギーを持って安定化します。ベンゼンに代表される芳香族化合物は炭素を中心原子とする物質の中でエネルギー的に最も安定な性質を示し、熱や光の影響を受け難く極めて安定で堅牢な平面構造を持っています。そのため板や紙が隙間なく積み重なるように、平面構造の芳香族化合物の分子はお互いに平行になるように積み重なりやすい性質があり分子間力が大きくなって安定化しますが、お互いに平行でない場合には、隙間なく詰まることができなくなり、分子間力が弱くなります。しかも、代表的な芳香族化合物のベンゼンやナフタレンには酸性の部分も塩基性の部分も無く、他の分子と van der Waals 力などの通常の分子間力以外には相互作用をしません。第2章の「何故、水は液体？」の節で考えたように水素原子がある距離を持って酸素原子や窒素原子に挟まれる時には水素結合と呼ばれる相互作用が加わりますが、2つの分子が接近して働く van der Waals 力などの通常の分子間力に比較してこの水素結合は非常に強い分子間力が働くと考えられます。

炭素が窒素で置き換わった化合物は芳香族複素環化合物と総称されていますが、ベンゼンの正六角形の環を構成している1つの炭素原子が1つの窒素原子で置き換えられたピリジンは図 6-10 に示すように環の中に3本の多重結合が隣り合った構造を持っていますから、ベンゼンと同じように安定で堅牢な平面構造を持ち芳香族性を示します。しかも、図の青色で示した窒素原子の非結合性の電子対は環平面上で外側を向いて出ているから、水素結合に適した塩基の部分となることが出来ます。また、ベンゼンの隣り合った2つの炭素原子が1つの窒素原子で置き換わった5角形の構造を持つピロールは図 6-10 に示すように窒素の非結合性の電子対と2本の多重結合が環の中で相互作用をして、ベンゼンやピリジンと同じように安定で堅牢な平面構造を持つ芳香族の性質を示します。このピロールの窒素の電子対は芳香族の安定化に寄与しているためほとんど塩基性を示しませんが、炭素原子や水素原子などと結合出来る1本の結合を環の外に持って

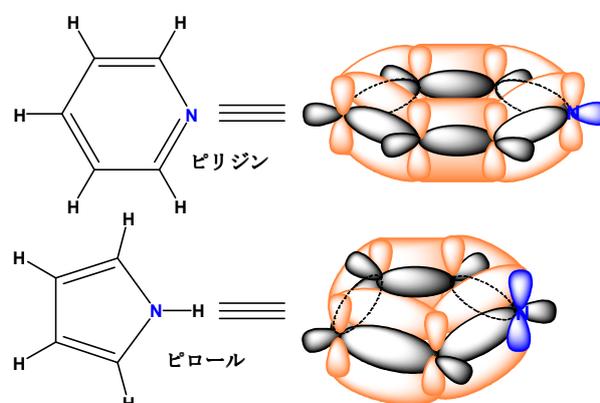


図6-10 基本となる芳香族複素素環の構造

います。

ベンゼンの2つの炭素原子が2つの窒素原子で置き換わった芳香族複素環化合物は図 6-11 に示すように3種類存在しますが、2つの窒素原子の間に1つの炭素原子が挟まった構造のピリミジンはかなり安定で水素結合に適した塩基の部分をもつています。また、ピロールの炭素原子がピリジンの

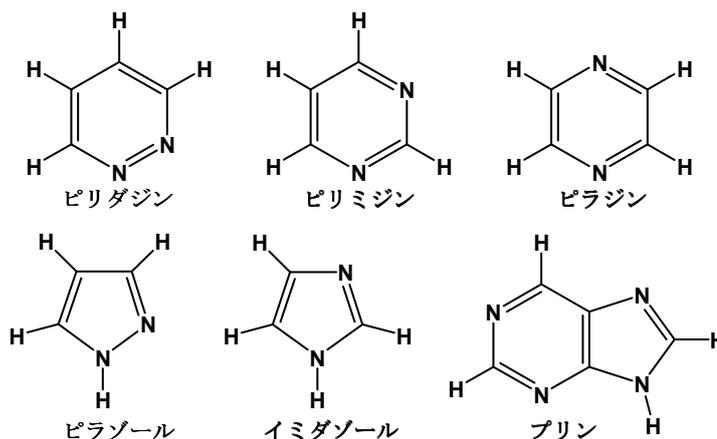


図6-11 2つの窒素原子を含む芳香族複素環

のように窒素原子で置き換わったピラゾールおよびイミダゾールも図 6-11 に示すように安定で堅牢な平面構造を持つ芳香族の性質を示します。これらの2つの窒素原子を含む化合物は水素結合に適した塩基の部分をもっており、これらの5角形の構造を持つ一連の化合物も芳香族複素環化合物と呼ばれています。ピリミジン環とイミダゾール環が接するように繋がったプリン環も図 6-11 に示すように2つのベンゼン環が繋がったナフタレン環のように芳香族性を示します。

他方、ベンゼン環に水酸基 (-OH) の結合したフェノールは芳香族の安定性を保ちながら pK_a が約 10 を示す弱い酸性の物質で、酸素-水素結合の部分が水素結合に適しています。同じように、ベンゼン環にアミノ基 (-NH₂) の付いたアニリンも水素結合のための窒素-水素結合の部分が水素結合に適しています。フェノールやアニリンと同じように、水酸基やアミノ基が結合した芳香族複素環でも、高い安定性を示す性質を保ちながら、それぞれ酸や塩基の性質を示します。これらの芳香族環は大きな共鳴安定化のために、堅牢な平面構造を保ち構成するすべての原子の相対的位置がほとんど変化しません。当然、芳香族複素環を構成する窒素原子も結合している水酸基やアミノ基も原子の相対的位置が固定されていますから、水素結合などの相互作用をする相手の分子が限られますが、適した分子に対しては強固に水素結合します。言い換えればこれらの芳香族複素環は相手となる分子を選好みしますが、選んだ分子とは確実に水素結合します。

前節の「何故、通風を引き起こすプリン体が身体に必要？」で触れましたが、イノシン酸や AMP や GMP などのアデニンやグアニンのヌクレオチド類はアセチル補酵素 A や ATP や DNA や RNA などの人間にとって生命活動

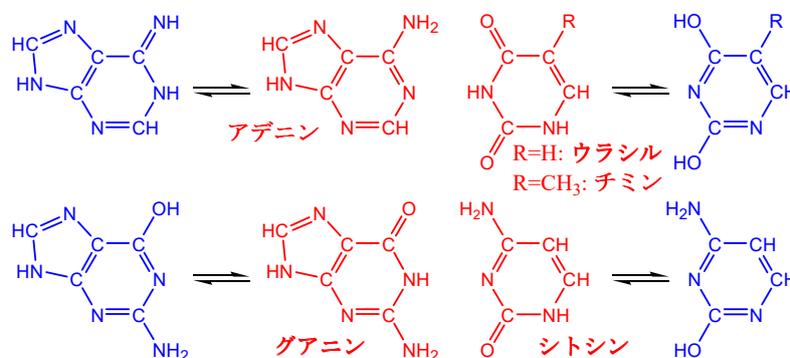


図6-12 DNAとRNAの核酸塩基

を維持する上で欠くことのできない極めて重要な物質です。図 6-12 に示すようにアデニンは熱や光などの影響を受け難い安定な芳香族性を持つプリン環にアニリン性のアミノ基の付いた構造を持っていますから、安定で水素結合に適した2つの部位が固有の相対位置を保ちつつ固定されています。また、グアニンもいずれも炭素=酸素2重結合を含む芳香族複素環の構造を持っていますが、平衡反応により図 6-12 に青色で示すようなフェノール性水酸基を持つプリン型の芳香族複素環の性質も示します。

前節で少し触れましたが、核酸塩基にはアデニンとグアニンの他にウラシルとチミンとシトシンの5種の化合物が総称され、ヌクレオシドとヌクレオチドがそれぞれ対応しています。ウラシルとチミンとシトシンはいずれも炭素=酸素2重結合を含む芳香族複素環の構造を持っていますが、平衡反応により図 6-12 に青色で示すようなフェノール性水酸基を持つ芳香族複素環の性質も示します。アデニンは炭素=窒素2重結合が環内の構造と環外の構造の間に平衡関係がありますから、アデニンは図 6-13 に赤色で示すようにチミンやウラシルと一義的に2本の水素結合で容易に結ばれ相互作用します。このようにアデニンはチミンやウラシルとは非常に適合した水素結合をすることができますが、それ以外の物質とは適合できず強い相互作用をすることができません。また、熱や光などの影響を受け難い安定な芳香族性を示すプリン環の骨格を持つグアニンも炭素=酸素2重結合を含む芳香族複素環の構造を持っていますから、平衡反応によりフェノール性水酸基を持つ芳香族複素環の性質も示し、アニリン性のアミノ基と併せて3つの部位が安定で水素結合に適した固有の相対位置を保ちつつ固定されています。そのためグアニンは3本の水素結合により厳しく選好みして相互作用しますから、グアニンは一義的にシトシンを選びます。このようにアデニンとグアニンは相手となる分子を厳しく選好みして極めて限られた分子しか選びませんが、選んだ分子とは確実に水素結合します。

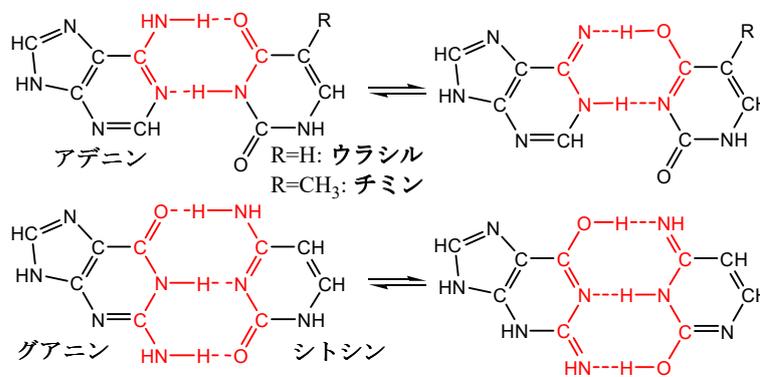


図6-13 核酸塩基の水素結合

このようにアデニンとグアニンに対して特異的に水素結合のできるような位置に酸素原子や窒素原子を持つウラシルとチミンとシトシンのヌクレオチドは図 6-14 に纏めたような経路で種々の酵素や補酵素の働きにより生合成されています。アミノ酸の一種のグルタミンと二酸化炭素と ATP が結合した後に、グルタミン酸の脱離により生成するカルバモイルリン酸にアスパラギン酸や NADP 陽イオンやリボース-5-リン酸が次々に反応して、ウラシルのヌクレオチド (UMP) を生合成します。さらに、酵素や補酵素の働きでこの UMP のウラシル部分にグルタミンとセリンがそれぞれ作用してシトシンのヌクレオチド (CMP) とチミンのヌクレオチド (TMP) が生合成されます。

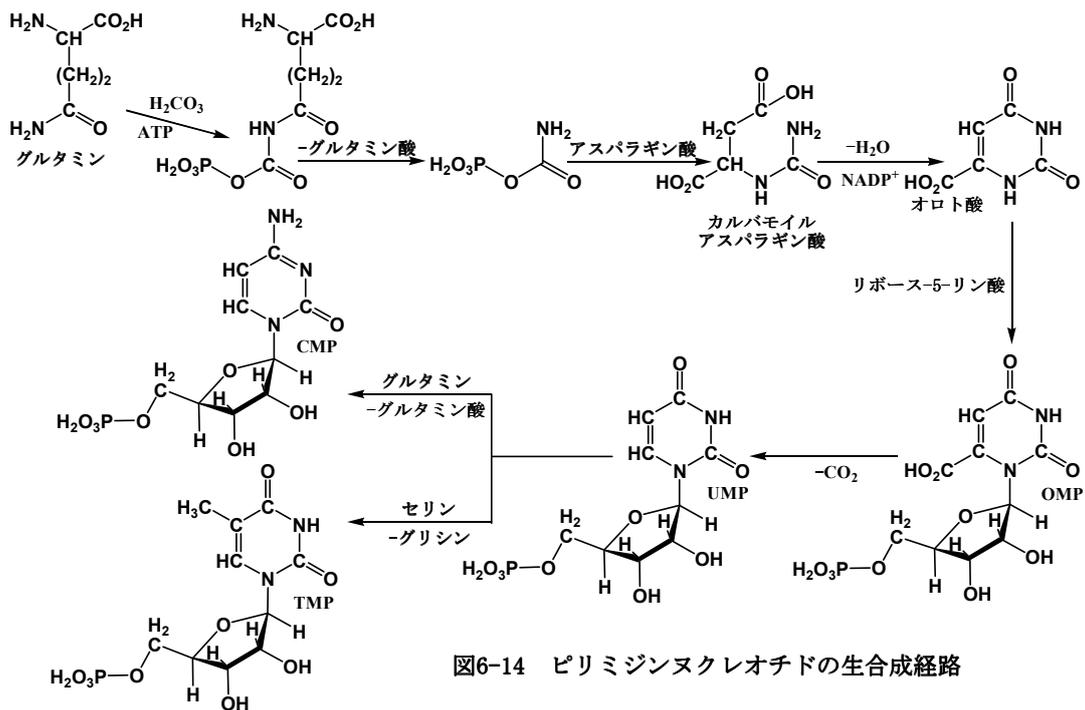


図6-14 ピリミジンヌクレオチドの生合成経路

表 1-1 には 1 つの細胞の中に含まれる化学物質の種類とその重量比を掲げましたが、それぞれの物質がその性質に応じた働きをして生命活動を維持しています。DNA はデオキシリボ核酸 (Deoxyribonucleic Acid) を省略した名前の物質で細胞中に必ず 1 個だけ含まれており、その細胞の進化の過程や生命活動に必要なすべての情報を記憶し、必要に応じた情報を発信しています。そのため、全ての細胞は DNA が正常に機能しなければ、その生命活動を停止して死滅します。

核酸塩基と呼ばれるグアニンとアデニンとチミンとシトシンの 4 種の含窒素環状化合物がそれぞれ 5 炭糖の一種のデオキシリボースと結合した図 6-15 の赤色で示したデオキシグアノシンと黄色で示したデオキシアデノシンと緑色で示したチミジンと青色で示したデオキシシチジンをデオキシリボヌクレオチドと総称しています。DNA はこれら 4 種のデオキシリボヌクレオチドの 3 位と 5 位の水酸基が図 6-15 の黒色で示すリン酸エステルを介して次々に $10^2 \sim 10^{12}$ 個ほど長く鎖状に結合した物質です。DNA は長く連なった鎖状のデオキシリボースリン酸エステルの骨格のそれぞれのデオキシリボースの 1 位に 4 種の核酸塩基の 1 種が結合した構造を持っていると言葉を変えた表現もできます。DNA はこれらの 4 種のデオキシリボヌクレオチドの並び方によ

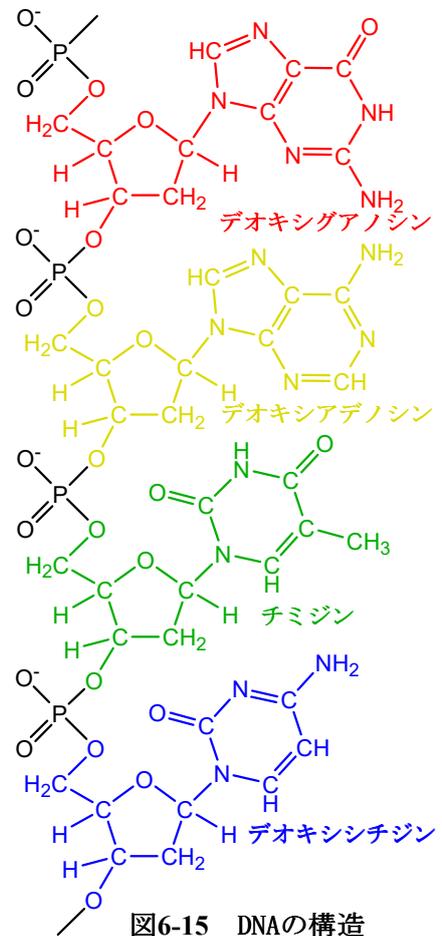


図6-15 DNAの構造

り、その細胞の進化の過程や生命活動に必要なすべての情報を記憶し、生命活動をするために必要な情報を発信しています。

アデノシンとグアノシンとウリジンとシチジンの4種のヌクレオシドは5炭糖の一種のリボースに図 6-12 に掲げたアデニンとグアニンとウラシルとシトシンの4種の核酸塩基がそれぞれ結合しており、4種のヌクレオチドは対応するこれらのヌクレオシドのリボースの5位の水酸基がリン酸と縮合したリン酸の構造を持っています。これらのヌクレオチドがDNAに接近するとき、ヌクレオチドのウラシルとシトシンとグアニンとアデニンがDNAの鎖上に配列したアデニンとグアニンとシトシンとチミンの4種の核酸塩基とそれぞれ一義的に水素結合しますから、DNAの核酸塩基の並び方に対応するように4種のヌクレオチドが並びます。このようにDNAの核酸塩基の並び方に対応して並んだヌクレオチドがリン酸エステル結合により重合して生成したRNA（リボ核酸、**Ribonucleic Acid**）はリボースの3位と5位の水酸基がリン酸と縮合して長く連なった鎖状のリボースリン酸エステルの骨格のそれぞれのリボースの1位に4種の核酸塩基の1種が並んで結合した構造を持っています。アデニンとグアニンは相手となる分子を厳しく好み、アデニンはチミンあるいはウラシルを選びますし、グアニンはシトシンを選んで確実に水素結合しますから、DNAの核酸塩基の並び方が正確にRNAに反映され、DNAの細胞の進化の過程や生命活動に必要なすべての情報を正確にRNAに伝達します。

生物の細胞が分裂して増殖するときには、RNAを介してDNAは同じ核酸塩基の並び方を持つDNAを常に転写して新しい細胞に用意しますから、1つの生物個体の中では全ての細胞が全く同じDNAを1個ずつ持つことになります。しかし、雌雄により新しい細胞が形成されるときには、両性の持つDNAから転写されたRNAを介して両性の情報を併せたような核酸塩基の並び方を持つDNAが新たに用意されますが、その混ざり方が微妙に異なりますから同じDNAを持つ細胞は形成してきません。このように両性のDNAから転写されたRNAを介してDNAが作られますから、親子や兄弟のDNAの間では核酸塩基の並び方に高い類似性が認められますが、一卵性双生児を除けば全く同じ核酸塩基の並び方のDNAを持つことはありません。人間は哺乳類から進化してきましたから、結果として多くの哺乳動物のDNAと人間のDNAの間で、核酸塩基の並び方にかなり多くの共通性がみられます。このようにDNAは4種類の核酸塩基の並ぶ順序により、生物の38億年にわたる発生以来の進化の歴史を表現し記録しています。結果として、DNAの核酸塩基の並び方に由来する皮膚や髪や瞳の色、体格、運動能力、知的能力などの身体の特徴が先天的に受け継がれてゆきます。近年DNAの核酸塩基の並び方を調べる技術が向上しましたから、人間はじめ多くの生物のDNAに収納されている細胞の進化の過程や生命活動に必要なすべての情報が解読されるようになってきました。同時に人の血縁関係や同一認定などの人間の生物学的な相互関係を明らかにできるようになりましたから、裁判の有力な証拠にまでDNAの核酸塩基の並び方が用いられるようになりました。

汎用電子計算機や大型電子計算機では記憶素子部分が最も重用な役割を演じています

が、この記憶素子に最も求められることは正確な情報の記憶と伝達のほかに、不意の停電や雷などの大電力の通電においてもその記憶の安全な保持にあると思われます。同じように生物の進化の過程や生命活動に必要なすべての膨大な情報を収納する役割を果たしている DNA は急激な環境の変化や外的な障害からの記憶情報を安全に保存するとともに、RNA を介して正確に読み出しと必要に応じた書き換えができなければなりません。生物にとって最も重要な遺伝情報を収納する役割を果たしている DNA を破壊や損傷から保護するために、酸性を示す DNA は親和性の高い塩基性アミノ酸のリジン (Lys) とアルギニン (Arg) を多く含むタンパク質のヒストンで包み込まれており、RNA に情報を転写するときのみ包みが開かれると考えられています。その上、DNA と RNA の情報の保存と読み出しと書き換えに用いられている核酸塩基は熱や光などの影響を受け難い安定な芳香族複素環の構造を持ち、互いに相手となる分子を厳しく選好みして確実に水素結合し、DNA の情報を正確に RNA に伝達します。DNA は細胞の進化の過程や生命活動に必要なすべての情報を安全に記憶していますから、急激な環境の変化や外的な障害からの記憶情報の安全な保持が求められますが、RNA は情報を伝達する役目を担っていますから、役目を終えた後には情報の混乱を避けるためにその情報の速やかな消滅が求められます。そのためにデオキシリボースとリボースは非常に類似した構造の化合物ですが、DNA は非常に安定なデオキシリボースをリン酸エステル結合で結んだ長い鎖の骨格構造を持っていますが、リボースをリン酸エステル結合で結んだ長い鎖状の RNA の骨格構造は比較的不安定で容易に分解します。

近年飛躍的に進歩してきた汎用電子計算機や大型電子計算機は記憶素子上の電氣的な ⊕ と ⊖ あるいは磁氣的な N と S の 2 種類の並び方で情報の記憶を行う 2 進法です。現在著者の手元にある汎用電子計算機は 4 つの情報単位をあらかじめ 1 塊にした 64Bit が 1Byte になるように作られており、 2^{64} が 18446744073709551616 ですから、1 つの情報単位となる 1Byte は 1.84×10^{19} 通りの中での 1 通りの情報を持つことができます。しかも、この汎用電子計算機には情報保存用に約 1.56×10^{11} Byte が用意されていますから、約 2.9×10^{30} 通りの情報が保存できます。

リン酸エステルを介したデオキシリボースの長い鎖状の骨格を持つ DNA の最先端を占めるデオキシリボヌクレオシドは 4 種の可能性があります、第 2 番目を占めるデオキシリボヌクレオシドも 4 種類の可能性を持っていますから、この 2 つのデオキシリボヌクレオシドの並ぶ組み合わせは 16 (4^2) 種になります。n 個のデオキシリボヌクレオシドがリン酸エステルで連結されればその時の並ぶ組み合わせは 4^n 種と考えられますから、DNA で行う情報の記憶方法は 4 進法と考えることができます。精巧な機構と組織を持つ人間の DNA はデオキシリボヌクレオシドの数 n が 10^9 を越す極めて大きな値を持っていますから、固有の記憶内容を持つ $4^{1000000000}$ ($10^{602060000}$) 種の中の 1 種の DNA を個人個人の人間がそれぞれ持っています。現在の世界の人口約 7×10^9 人と比較しますと、DNA の数 $10^{602060000}$ 種は比較にならない桁外れの膨大な多さですから、世界に同じ DNA を持つ人間の存在することは全くあり得ないと考えられます。このように極めて膨大な情報を持つ DNA がすべて異なる性質

を示しますから、それらの中には人類にとって極めて有用な性質や情報が未だ隠れていると思われます。化学の進歩と知識や情報の蓄積により、将来において化学の知識や技術による人類への大いなる貢献が期待されます。著者の手元にある汎用電子計算機の記憶容量 10^{30} や地球で認識できる全宇宙に存在する原子の数 1.91×10^{68} 個と比較するとき、DNA が持つ桁違いに大きな記憶容量に畏敬の念を抱くばかりです。

生物が生命の維持や種の保存などのための機能や組織や経験が DNA の中に記憶され、残され、蓄積されてきましたから、環境の変化に連れて進化したり退化しても生命の維持に関する根源的な機能や組織は受け継がれています。DNA の中には原始地球上に誕生した当時からの生物の進化の歴史がすべて記憶されており、人間もこの記憶された内容に支配されていますから、この記憶された内容に逆らうように進化すれば人間も絶滅への道を迎えることになるでしょう。このように原始地球の環境に適応するように 38 億年前に海の中に誕生した生物から進化してきた過程に関する膨大な情報が逐一記憶されていますから、**なるほど**、人間の DNA の中には人類にとって極めて有用な原始地球以来の歴史や経験や情報などの宝物が未だ隠れていると思われます。将来において化学の進歩と知識や情報の蓄積に基づき、この DNA に残されている膨大な歴史と経験の記憶を解読し、理解し、対応することにより、人類の幸福への大いなる貢献が期待されます。