

### 3 3 「心臓はなぜ左にあるのか？」

前に書いた「生命世界の非対称性」では、動物の形態を見ると、その外形については高等になれば圧倒的に左右対称が多いと書いた。このことは皆よく知っている。

すばしこく動いて餌を追ったり天敵から逃げるなど、意のままに動くためには左右対称でバランスがよいことが不可欠である。

一方、動物の体内をみると対称ではない。これは人間も同じである。

心臓の位置は身体を中心線よりも左にずれている。なぜこのようなずれが起るのだろうか？

形が左右対称だったり、右にずれた形と左にずれた形が半々の確率でできるのなら、それなりに判るが、必ず一方向にずれた形ができるとしたら、そのための積極的な理由とメカニズムがあるに違いない。

肝臓は右寄り、膵臓は左寄りにある。心臓の形はねじれていて、ねじれの左右の巻き方向は決まっている。大腸の身体内での巻き方は右から左である。肺の気管の分岐の仕方も厳密に言えば左右で違って、肺葉とよばれる肺の単位は、ヒトでは右に三つ、左に二つある。

このように身体は内部構造で見るとはっきりと左右非対称である。

これは対称性よりも、必要な機能を限られた体内に効率よく収め、効率よく機能させるためにそのようになったものと考えられる。しかし、そうだとすると、何がずれの方向を決めているのだろうか？

「生命世界の非対称性」で書いたように、この地球上に存在するすべての生物は、同じキラリティー（細胞を形成する分子構造には鏡像体があり、光学的な性質が核酸はD型[右旋性]、アミノ酸はL型[左旋性]）の炭素からできていて、それは素粒子間に働く力の「対称性の破れ」に由来している。

心臓の位置の片寄りは左と決まっているが、ごく稀に10万人に1人程度の確率で、心臓の左右が逆の人がいるらしい（カルタゲネル症候群とよばれている）。

心臓の位置が逆の人は心臓以外の臓器の左右も逆になっていることが多いという。

左右非対称を決めるおおもとの原因がどこかにあって、この原因が変化すると臓器の左右が変わるらしい。

しかし、心臓の位置を決めるのはどちらでもよくて、その時の決まった向きでよいとはいかない。

左側に心臓を入れ込めば、うまくはまるようになっている。右に入れたのでは、どう動かしても回してもうまくはまらない。

身体の形づくりで、心臓の位置はなぜか中心から左側と決まっているのである。

心臓が左側ということは、ゲノムによって次世代に伝えられているはずである。しかし、ゲノムの実体はDNA分子であり、そこには4種類のヌクレオチド（核酸のもとになるもの）の配列で情報が記録されているにすぎない。このような抽象的情報でどうして左右の指示ができるのだろうか。

そもそもDNAの情報は、4種類の核酸塩基（A-アデニン/T-チミン/G-グアニン/C-シトシン）の1次元的な配列で、これが20種のアミノ酸の配列を指示している。しかし、塩基の配列という抽象的な情報だけでは、多くのアミノ酸で作られる複雑なアミノ酸分子の立体的な形は決まらない。

たとえば、核酸塩基の特定の配列があって、これからできたアミノ酸の連なりが右巻き螺旋構造を形成したとする。これでアミノ酸鎖の空間的な形は決まるのだが、これは鎖を構成しているアミノ酸がL型アミノ酸だったからこのように決まったのである。もしこれがD型アミノ酸であったら、同じ核酸塩基の配列からできたアミノ酸鎖の螺旋は巻きが逆になるはずなのである。

L型アミノ酸の鏡像がD型アミノ酸で、L型アミノ酸が連なってできた右巻きの螺旋は、これを鏡に映すとD型アミノ酸が連なってできた左巻きの螺旋になる。

したがって、ある核酸塩基配列があってそれに従ってできたL型アミノ酸の鎖が右巻きだった時、これがD型アミノ酸からできた鎖だったら左巻きになるのである。

アミノ酸の配列が決まっても、アミノ酸のタイプがL型かD型が決まらないかぎり、巻き方向についての形は決まらない。

DNAは、アミノ酸分子の巻き方の方向を指定するような情報はもっていない。そこにある現物のアミノ酸に従うのだ。すべての生物はL型アミノ酸のみで作られているから、L型が決める方向の螺旋になったのである。

動物の体の内部構造などの非対称性を子に伝えるためには、1次元的な塩基配列といった遺伝情報だけでは不十分なのである。2本の互いに鏡像対称の軸に、それぞれ X 軸, Y 軸, Z 軸の方向を書き込んだ3次元の針金細工のような見本が情報として伝わらなくてはならない。

左側にずれた心臓は、身体を構成しているアミノ酸の、キラリティーが片側(L型)だけである事実と関係するのではないだろうか。

キラリティーの一方しか示さないアミノ酸が現物として豊富にある。この一方のキラリティーが見本となって、何らかの過程を経て身体のキラリティーの一方、すなわち心臓が左にある身体だけがつくられるきっかけになっていないだろうか。

アミノ酸分子のキラリティーは、微小サイズの非対称であり、身体の非対称はメートルで表すようなマクロな物体の非対称である。こんなにスケールの異なる両者が関係しあうのだろうか。関係しあうとすればどんな筋道になっているのだろうか。

生物学者は、突然変異で左右非対称性が変異している動物を見出して、これを使ってその体内の遺伝子発現などの実験を続けた。

その結果、胚表面細胞から生えた繊毛が胚表面に、非対称な流れをつくっていたことがわかったのである。

繊毛運動に関わるタンパク質(キネシン)に異常があり、心臓の左右非対称性に異常を起したマウスがいる。これらのマウスは、すべて心臓が逆の右にあるのではなく、右と左が半々になっている。

一方、左右非対称の内臓に異常が起る(内臓逆位という)カルタゲネル症候群の人たちは、なぜか繊毛や鞭毛の異常に関連する疾患を表すことが多いことが知られていた。

たとえば、慢性気道感染症にかかったり、男性側の原因で不妊になることが多い。これらの疾患がなぜ繊毛や鞭毛と関係するのかというと、気道には繊毛の生えた細胞があり、繊毛が気管の痰を上方に運び口から外に出す。しかし、この痰の排出がうまくいかないので、肺の感染が生じやすく慢性気道感染症が起る。

また、精子の鞭毛が正常に動かないために精子がうまく泳げず、卵に到達できないために不妊症になることがある。いずれも繊毛や鞭毛(基本構造は繊毛と同じ)の動きに関する欠陥である。そこで、胚の繊毛に何か大きく関係する要因があるものと想定されるのである。

マウスの胚盤期の胚に、結節とよばれるものがある。結節とは周囲とは異なった細胞の集りのことを言うのだが、この結節の上皮細胞にはそれぞれ繊毛が生えている。

繊毛は回転軸を後ろ方向に傾けながら回転運動を行い、結節付近に右から左への流れをつくっている。

心臓の左右非対称性が変異しているマウスでは、この流れがはっきりしないことが明らかになった。

胚盤の結節に右から左への流れができることが、心臓の非対称性をつくる原因だったのである。

この流れにより細胞膜でできた小胞が左に流れる。小胞の中にはソニックヘッジホッグとよばれるタンパク質やレチノイン酸が入っている。このような因子が作用して、中心より左側にある細胞でノーダルと呼ばれる遺伝子が発現することが明らかにされた。

ノーダル遺伝子がつくるノーダルタンパク質はシグナル分子であり、細胞に作用する因子である。

左側が、右側とこの因子の有無によって区別されたのである。これが心臓形成の時に、心臓の位置や形に非対称をもたらすと考えられている。

アミノ酸のキラリティーが、繊毛の動きによる流れの向きにまで影響していたのである。

右から左への流れによって、細胞にシグナルを伝える因子の濃度に左右間で差ができるのだろう。ここで生じるのはほんのわずかの濃度差に違いない。これが細胞増殖などに大きな違いとなって表れるには、チューリングのメカニズム（注1）が働いているものと考えられる。

心臓が左に片寄るのは、左にも右にも同じようにある細胞のうち、左側の細胞が特別な遺伝子を発現するようになったからである。

左側の細胞も右側の細胞も、同じようにその特別な遺伝子を発現することはできるのだが、いったんどちらかで発現が起ればその側だけで発現し、両方同時には発現しないような仕組みができていると考えられる。

チューリングのメカニズムは、このような一方にだけスイッチが入ることを説明することができる。

繊毛の流れによって起った、因子のわずかな濃度差がきっかけとなり非対称が起ったのであろう。繊毛に異常が起って一方向の流れが起らないと、遺伝子発現が右で起るか左で起るかの確率は半々になる。

キネシンに異常が起ったマウスで、心臓が右にあるのと左にあるのが半々だったのはこの為だろう。

そこで、注目すべきは結節での右から左への流れと、アミノ酸のキラリティーの関係である。

結節表面で右から左への流れが起るのは、繊毛が回転軸を傾けて一方向に回転しているからであるが、繊毛の断面を見ると、タンパク質が螺旋状に合わさってできた中空のチューブになっている。

結節表面の細胞が一方向の回転をするのは、L型アミノ酸によって作られる中空チューブの螺旋の巻き方の向きが非対称であり、それが繊毛構造の非対称に反映されていると考えてよい。

繊毛の回転方向は、L型アミノ酸のキラリティーが反映していることになる。

繊毛は小さな分子に見られる微小なキラリティーを、繊毛という体の微小組織レベルの運動にまで拡大する装置であると見なせる。

それでは、地球上の生物を構成している分子のキラリティーは、どうして片方に揃っているのか？たとえばタンパク質は、なぜL型アミノ酸からだけできているのかという疑問が出ることだろう。

宇宙から来た隕石に有機物が見出され、その中でアミノ酸はL型がD型に対して過剰であることが認められている。地球上の生命体の材料となる分子に、すでにキラリティーの偏りがあった可能性があるのである。地球上でも宇宙でも、放電や放射線、重粒子線などによって分子が合成される場合、キラリティーの偏りはなく、アミノ酸の場合L型とD型は同じ割合で合成されるはずである。

どうして宇宙からのアミノ酸に、キラリティーの偏りがあるのだろうか。現在は以下のように考えられている。

光には円偏光（光が円を描きながら伝播する）とよばれる偏光があり、これには右円偏光と左円偏光がある。円偏光の下でキラリティーのある分子が生成される時、そこでの円偏光が右か左かによってキラリティーに偏りができることが知られている。

宇宙には中性子星とよばれる密度の極めて高い星があり、これが円偏光を放っているのだが、この星からある方向に右円偏光が出る時、その反対側からは左円偏光が出る。

中性子星の片側で物質が生成された時には、キラリティーの偏った分子ができることになり、これを含んだ宇宙に漂うチリで地球が創られていることが考えられる。

そしてこの根本は、「生命世界の非対称性」で示したように、自然界にある4つの力のうち、素粒子間に働く“弱い核力”だけが対称性がわずかに破れていることにその原因があるのである。

このように見てくると、動物の内臓については、機能を果たすために最も合理的な形と大きさであり、その位置や向きはアミノ酸のキラリティーから決められていることがわかる。

遺伝情報として伝えなくても、体内微小器官（繊毛など）の非対称性によって決まってくるアミノ酸や細胞の流れから、濃度差などが原因となって起こる遺伝子の発現（スイッチの入り方）によって必然的に決まるようになっていたのである。

自然界にごくありふれて存在する、炭素原子を中心に作られるキラリティーを持ったアミノ酸。このキラリティーはDNAには乗せきれない遺伝的情報を、非対称性と物理原理、化学原理を巧妙に組み合わせることによって、少ない情報で目的を達成できるようにしたものと考えられる。

アミノ酸どうしを結びつけるペプチド結合の立体構造。これは単純な構造を持つDNAを使って、アミノ酸の配列さえDNAで指定しておけば、複雑な構造のタンパク質まで、自動的に誤りなく作られる仕組みを少ない情報で実現するものであった。

これらのことから感じることは、非常に多くの遺伝情報を少ない情報量で、いかに合理的に伝えるかという、天の知恵が込められていると思えて仕方ないのである。

すべての生命が持っている、子孫をより多く残して繁栄していくという目的に対して、生命の進化が生み出したほとんど神業ともいえる答えのように思う。

#### （注1） チューリングのメカニズム

イギリスの数学者アラン・チューリングは、コンピュータの原型を創造したといわれる。

彼は生物の形態形成の謎を数学によって解き明かした。

チューリングは、生物の模様がモルフォゲンという化学物質の「反応」と「拡散」によってできることを示した。ニシキゴイや三毛猫が示すような、動物表面の規則性をもつ、同じではないがどこか似たパターンの斑点や縞模様ができるメカニズムを、シミュレーションによって証明した。

これらのパターンは、遺伝子が直接パターンや形を決めると考えていたのでは説明できなかった。遺伝子が、アクチベーター（活性）分子およびインヒビター（抑制）分子を合成し、特にアクチベーター分子をポジティブ・フィードバック的に合成する細胞をつくり、その細胞の集りがパターン構成要素として働くことで、はじめて理解できるようになった。（2, 0 1 1 . 1 2 . 0 1）