

特集：D-アミノ酸制御システムのニューバイオロジー：  
Frontier Science in Amino Acid and Protein Research

## 地球におけるホモキラリティー生成機構

市 育 代, 小 城 勝 相

パスツールの不斉現象発見以来、地球におけるアミノ酸や糖などのホモキラリティー生成機構は生命の起源における最大の謎である。多くの不斉合成の試みにもかかわらず、不斉条件を用いなくて不斉合成を行う絶対不斉合成の例は未だ存在しない。そのため、地球上のL-アミノ酸は宇宙で発生して隕石とともに地上にやってきたという宇宙起源説さえ唱えられている。一方、我々は1種類のアミノ酸の不斉合成は困難でも、ラセミ体のD、L-アミノ酸混合物は再結晶において自然に光学分割を起こす性質を持つことを実験的に証明した。しかもアミノ酸の種類が多くてもL-アミノ酸はL-アミノ酸同士、D-アミノ酸はD-アミノ酸同士がセットになることも見いだした。以上より我々はL-アミノ酸セット同時誕生仮説を提唱している。

### 1. はじめに

地球生命を構成する分子の顕著な化学的特徴が光学活性・不斉（キラリティー＝chirality：用語解説および p.356 の「ことば」参照）である。生物はL-アミノ酸のみを用いてタンパク質合成を行う。タンパク質がL-アミノ酸のみで形成されること（homochirality：ホモキラリティー）がタンパク質の高次構造の形成、酵素反応の特異性や高反応性、認識能力などにとって必須条件であると考えられている。そのため地球上におけるアミノ酸のホモキラリティー生成<sup>1,2)</sup>は生命誕生の鍵を握ると考えられてきた。

不斉現象がパスツールによって発見されて以来、生体分子を扱う有機化学最大の問題がホモキラリティー生成機構であり、不斉合成は現在も有機化学の中心テーマである。アミノ酸についてはホモキラリティー以外にも、20種類のL-アミノ酸の側鎖はどのような基準で選ばれたのかという謎もある。

L-アミノ酸という命名は、フィッシャーが糖の命名法に準じて、彼の投影法でアルデヒドの類縁体であるカルボキシル基を一番上においたとき、最後の不斉炭素についたヒドロキシル基の類縁とされたアミノ基が左に結合するものをLと命名したにすぎず（図1ではフィッシャー投影法ではなく立体的に示した）、その点以外は何ら化学的類似点といえるものはない。そのため、L-Ala（本稿ではアミノ酸はすべて3文字表記で示す）が何らかの機構で生成したとしても、同じ機構によって側鎖の構造が異なるPheもLになるとは限らない。アミノ酸がセットでLを与える機構がそもそも存在するののかも謎であった。20種類のアミノ酸すべてが同時にLになったのか、個々のL-アミノ



図1 L-アラニンとD-アラニン

横方向のくさび形の結合は紙面より上に飛び出し、上下の波線の結合は紙面の下方に伸びていることを表す。分子をこのように置く。これをそのまま紙の上に投影して、くさび形と波線を実線に変えたものがフィッシャーの投影法である。

奈良女子大学生活環境学部食物栄養学科（〒630-8506 奈良市北魚屋西町）

Formation mechanism of terrestrial homochirality

Ikuyo Ichi and Shosuke Kojo (Department of Food Science and Nutrition, Nara Women's University, Nara 630-8506, Japan)

酸生成に関連や順序があるのか、たとえば最も原始的な細胞は何種類のアミノ酸を使っていたか<sup>3)</sup>なども謎である。

なお、アミノ酸以外にもう一つ重要な分子である糖ではグリセルアルデヒド以外、不斉炭素が複数個存在する。生物界にはD-糖が多いが、上で見たようにアルデヒドから最も離れた不斉炭素に付いたOH基がフィッシャー投影法で右に出たものが多いためである。しかし他の不斉炭素の立体化学については色々な糖が存在するので、アミノ酸ほど化学的な研究ができていないのが現状である。

最近ではRNAを生命の起源と考える見方もあるが、IleとThr以外は不斉炭素が一つしかないL-アミノ酸の場合より糖のホモキラリティー生成ははるかに困難である。三つの不斉炭素が2*R*, 3*R*, 4*R*の立体配置(*R*, *S*命名法は用語解説参照)を持つリボースがL-アミノ酸より簡単に選択されるとは考えにくい。

## 2. ホモキラリティー研究の背景

生命発生前の地球では、水、メタン、アンモニア、水素など原始地球を構成する単純な分子から熱、電気放電などによってアミノ酸などの複雑な分子が合成されてきたことは1953年のMillerの実験<sup>4)</sup>で示されている。このように簡単な分子から複雑な分子が生成することを「化学進化」という。

その後、原始地球の大気成分について色々な議論があったが、類似の実験で化学進化によりアミノ酸を初めとする生体分子が非生物学的に合成されることはすでに明らかになっている。不斉合成を行う酵素が存在しないため化学進化で生成するアミノ酸は当然にもDとLが等量存在するラセミ体である。

L-アミノ酸とD-アミノ酸の量を比較する数字が、下に示す対掌体過剰率(enantiomeric excess: ee)である。対掌体(エナンチオマー)とはL-やD-アミノ酸のような鏡像異性体の一方のことである。式から明らかなようにラセミ体(あるいはラセミ混合物)(L=D)ではeeは0、純粋のL-アミノ酸では100%である。とにかく小さくてもアミノ酸のような光学活性物質において不斉の条件を使わずに片方の対掌体の量が多くなる現象、即ち、地球上で起こりうる小さくてもeeが生ずる現象を発見することが最大の難問であり続けた。

$$ee(\%) = 100 \times (L - D) / (L + D)$$

小さくてもeeが生成すれば、あとはその小さな不斉環境を用いて不斉増殖が起こるというイメージは化学者には根強い。現にBreslowら<sup>5)</sup>は、2006年にPheの再結晶において、最初にD, Lどちらかをeeで1%過剰にした原料から出発すると、2度目の再結晶で得られるeeは90%に達するという論文を発表している。この論文は、不斉増殖を明確に示すとともに、その最初のわずか1%のeeでさえ

も引き起こす機構が未だに存在しないことも重要なポイントである。

長年の不斉合成の研究から絶対不斉合成(不斉の条件を使わずに不斉分子を合成すること)は不可能であるという考えが化学者の信念にまでなっている。即ち、不斉分子そのものや対掌体過剰のような何らかの不斉条件が存在しなければ不斉反応は起こらない。すると、原始地球におけるL-アミノ酸の選択には不斉の条件が関与せざるを得ないが、生命誕生前にどのような不斉条件が存在しうるのかという二ワトリと卵に似た難問に遭遇する。このため後述するようにL-アミノ酸地球外起源=宇宙飛來說が出てくる<sup>6,7)</sup>。

不斉という発見者であるパスツールの実験が有名である。彼は(+), (-)-酒石酸アンモニウム、ナトリウム塩{(+) (-)は用語解説参照, (+), (-)-酒石酸とは(+)(-)が等量混合したラセミ体の意味}の再結晶において(+)(-)が別々に結晶化し、その結晶の形も鏡に映った対称形をしていることを発見し、ピンセットを使って初めて光学分割(用語解説参照)に成功した<sup>8)</sup>。

この実験は有機化学の教科書には必ず記載されるが、光学分割の特殊例を示したものである。実際このあと多くの類似実験が行われたが、彼の方法は上記の化合物以外では成功していない。また彼の実験において得られた結晶総体のeeが測定されていない。即ち最も重要な測定がなされていないので、地球上におけるホモキラリティーの起源とは直接の関係はない。

この実験以来、不斉誘導に結晶化<sup>9-11)</sup>が用いられ、ラセミ体のアミノ酸溶液に一方の対掌体の結晶を入れて選択的にその対掌体を結晶化させる方法<sup>12)</sup>が工業的にも用いられてきた。これらの方法も小さいとはいえ純粋の対掌体(キララル分子)を用いるのでホモキラリティー発生の議論とは無関係である。

## 3. 結晶化におけるD,L-アスパラギンの意外な性質

アミノ酸の中でもD,L-Asnは結晶化させると、DかL一方の対掌体だけを含む純粋な結晶が得られるという古い文献<sup>13)</sup>がある。Asnの場合パスツールの時のように結晶の形で見分けることはできないが、OstromisslenskyはX線構造を確認した。この研究は重要な意味を持つ。もしD,L-Asnの結晶化において、L-AsnとD-Asnが独立に一つずつ結晶化する場合を想像すると、別々の結晶の成長速度が全く同じということは普通起こらない。ということは結晶化速度の差からeeが現れる可能性がある。

実際に、D,L-Asnを再結晶すると、eeが発生することがわかった<sup>14)</sup>。以後はL体のee =  $[100 \times (L - D) / (L + D)]\%$ を使用する。ラセミ体はeeが0、純粋のL体は100%、マイナスのeeはD体過剰を意味する。通常マイナスのee

という言い方はせず D 体の ee で示すが、本稿ではグラフにプロットする必要性からマイナスの ee も使う。

D, L-Asn の再結晶で得られるすべての結晶を集めて水に溶解し、その ee を測定すると L 体の ee は -60% から 89% であった。このように再結晶だけで簡単に Asn は光学分割できた<sup>14)</sup>。11 回の再結晶で L 体が出たのは 10 回、D 体過剰が 1 回であった。これは L が有利ということではなく、実験回数を増やせば同じになると考えられる。

D, L-Asn の再結晶で生成する個々の結晶をピンセットで取り出してその ee を調べると、+ であれ - であれ、その絶対値がほぼ 90% 以上であることから、D は D 同士、L は L 同士で結晶し、その相対的な量比が全体の ee を決定することがわかった<sup>14)</sup>。即ち、Asn においては L と L (或いは、鏡像関係にありエネルギー的に等価な D と D) の相互作用 (結晶形成における熱力学的安定性) はそれらのジアステレオマー (用語解説参照) の関係にある L と D の相互作用より強いことが判明した。

ラセミ体の結晶の方が一方の対掌体のみの結晶よりも安定であるという Wallach 則<sup>15)</sup>が長く信じられてきたが、Asn に関する限りこの法則は誤りである。

#### 4. D, L-Asn は共存する D, L-アミノ酸の光学分割を起こす

Asn の D と L が独立に結晶化するなら、それぞれの対掌体の結晶上で他のアミノ酸の光学分割ができる可能性がある。純粹の L-Asn の結晶上で光学分割を行った論文もある<sup>16)</sup>。これは Asn が他の不斉分子と相互作用するとき、一方の対掌体との相互作用が熱力学的に有利になる性質があることを意味する。

そこで過剰の D, L-Asn 存在下に少量の D, L-Phe を混合して再結晶し、生成する結晶総体の ee を測定し、x 軸に Asn、y 軸に Phe の ee をプロットすると良好な直線関係を示すことがわかった (図 2)<sup>14)</sup>。L-Asn が多いときは Phe も

L 過剰で、Asn が D 過剰のときは Phe も D 過剰であった。ところが、D, L-Asn 以外に同様の実験が溶解度の上で可能な他の D, L-アミノ酸、例えば Gln, Glu, His, Ser, Asp, Met, Val には D, L-Phe を光学分割する作用はなかったので、微妙な疎水性やイオン間相互作用が Asn の能力に関係していると考えられる。

ちなみに、D, L-Asn と D, L-Phe の再結晶で生成する個々の結晶の ee を測定すると、Asn は L か D がほぼ 90% 以上、Phe は Asn に対応する対掌体が 60-90% 含まれていた。この結果は、Asn と Phe の関係においても、L-L (或いは D-D) の相互作用は L-D の相互作用より大きいことを意味する<sup>14)</sup>。

同様に過剰の D, L-Asn 存在下で 1 種類の D, L-アミノ酸の再結晶を行ったところ、D, L-Arg, Asp, Gln, His, Leu, Met, Ser, Trp, Tyr, Val に対しても同様の直線関係が得られた<sup>14,17)</sup>。即ち、D, L-Asn は共存する D, L-アミノ酸の光学分割を引き起こすことがわかった<sup>17)</sup>。ただ同様の実験で、D, L-Glu と D, L-Ala は ee を与えず、Asn もこれらのアミノ酸もすべてラセミ体であった<sup>17)</sup>。

#### 5. D, L-アミノ酸混合物は自然に高い ee を発生する性質を持つ

次に、D, L-Asn (2g) と 50mg の D, L-Ala, Asp, Arg, Glu, Gln, His, Leu, Met, Ser, Val と溶解度の低い D, L-Phe, Tyr は 25mg をとってこれら全てのラセミ体混合物を 10ml の水から再結晶し、生成する結晶総体に含まれる全アミノ酸の ee を Nimura らの方法<sup>18)</sup>を用いて測定した。独立の実験は 6 回行った。

その結果、表 1 に示すように、1 回目の再結晶では Asn を初めすべてのアミノ酸の ee は小さく、2-5 回目では、ほぼすべてが L に傾き、6 回目はすべて D に傾いた。即ち、明確に ee を与える場合は、すべてのアミノ酸に関して

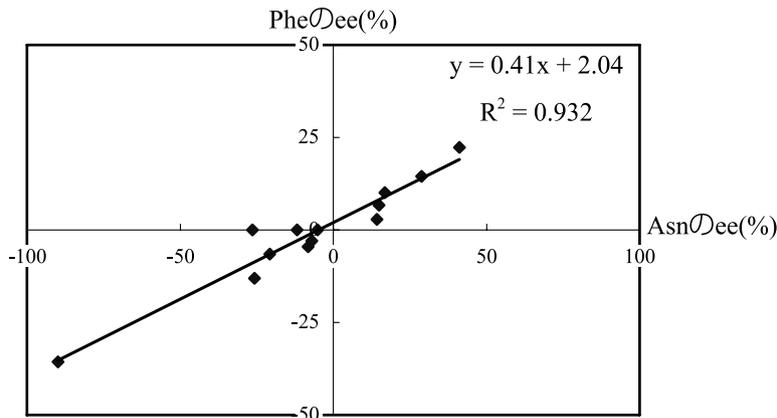


図 2 過剰の D, L-Asn と D, L-Phe を再結晶し、生成するすべての結晶を集めて ee を測定し、x 軸に Asn、y 軸に共存させた Phe の ee をプロット<sup>14)</sup>

Asnと同じ立体配置を持つ対掌体が過剰の混合物を与えた<sup>17)</sup>。つまり再結晶は、上記13種類すべてのアミノ酸が同じ立体配置を与える機構であり、最初に可能性として述べたAlaはL、PheはDになるということはない。しかもeeの最高は100%に達した(表1)<sup>17)</sup>。なお、HPLC分析の誤差は2-3%と考えられるので、この数値以下の場合にはラセミ体と考える。

さらに注目すべきことは、D、L-Asnのみと再結晶したときにラセミ体になったAlaとGluも大きなeeを与えたことである。再結晶においては最初に偶然晶出するキラルなアミノ酸の結晶表面には、同じキラリティーを持つアミノ酸が結合してくる。D、L-アミノ酸はラセミ体といっても、最初に一方が結晶化すればその結晶表面は強い不斉場を与えるはずで、いわば不斉自己増殖現象、あるいは速度論的光学分割が可能になる。

以上の結果、1種類のアミノ酸の不斉合成は困難でも、D、L-アミノ酸混合物は本来高いeeが生成する性質を持つと結論できる。この結果は、150年を超えるホモキラリティー研究の歴史の中で、ラセミ体のアミノ酸だけからeeが発生した最初の実験結果である。

しかし、今の実験だけでは、D、Lどちらが結晶化するのかは、全くの偶然と考えざるを得ず、神がサイコロを振ったと考える他はない。化学進化によって原始の海にD、L-アミノ酸を含む濃厚なスープができていたと考えられる。地球が冷却するにつれ、偶然D-アミノ酸が析出し、そこに熱力学的に有利な相互作用をするD-アミノ酸が次々に結合、堆積して海全体に広がったと考えられる。結晶化は海中のアミノ酸の溶解限度まで進行して停止するので、海の中にはL-World (L-rich World) が誕生する。そこから生命が生まれたというのが我々のL-アミノ酸セット同時誕生仮説である。

結晶化においてはイオン間相互作用が主に働くため、 $\alpha$ -炭素の立体化学が重要になり、側鎖の影響が小さくなると考えられる。この点でも結晶化による光学分割はアミノ酸がセットとして一方の対掌体を与えることになり、原始地

球におけるホモキラリティー生成機構として現実性がある。

## 6. L-アミノ酸宇宙発生説など

我々の仮説ではL-アミノ酸は地球起源だが、宇宙発生説も存在する。その証拠としては隕石中に発見された極微量の非天然型を含むアミノ酸が最大9.4%でL体のeeを持つことである<sup>6,19)</sup>。磁場を考えるものがあり、7.5Tの磁場における光反応で1000分の1のeeを生ずるという研究<sup>20)</sup>がある。

これらの研究は、どんなに小さくともeeを生成させようとする努力の結果である。地球で無理なら宇宙、とにかくeeが出る機構を見いだすことが目的になるほどの難問だからである。しかし少量のeeが宇宙から来たとしても、大気圏で高温になればラセミ化も起こるし、大量の海水の中で全アミノ酸のホモキラリティーにつながるかどうかは難しい問題である。

星が誕生するときに偏光が発生する<sup>21)</sup>。その偏光紫外線によるアミノ酸の選択的分解によるeeは最大でも数%以下である<sup>22-24)</sup>。そのため偏光分解で得られた生成物に不斉自己触媒反応を行ってeeを増幅して純粋のエナンチオマーを得るという方法が報告されている<sup>25)</sup>。少しのeeがでた後、自己触媒でeeが増幅するという説は前出のBreslowら<sup>5)</sup>と同様である。L-アミノ酸生成の場合どのような触媒反応が原始地球で可能なか興味を持たれる。一方我々の説では、たまたま先に結晶化したアミノ酸(Asn特異的かどうかは今後の課題)自身が不斉増殖の役割を果たして大きなeeを生成するため特別な触媒はいらない。もちろんAsnはAlaとホルムアミドのような簡単な分子の接触グロー放電電解(CGDE)で生成することはわかっている<sup>26)</sup>。

以上のように、化学進化で生成するラセミ体のアミノ酸からどのようにeeが生じるのかという点で多くの研究が行われている。一方、原始地球には、それ自体に不斉条件がある。地球は自転しながら太陽の周りを公転するが、地

表1 過剰のD、L-Asnと12種類のアミノ酸を混合して再結晶したときのアミノ酸のee<sup>17)</sup>

Trial	Asn	Ala	Arg	Asp	Gln	Glu	His	Leu	Met	Phe	Ser	Tyr	Val
1	0.23	-6.6	-2.4	1.2	2.3	-3.9	0.2	0.4	-9.8	-2.5	8.0	-5.5	-8.2
2	37.9	30.8	20.4	40.1	37.5	26.5	18.9	3.6	26.0	14.6	48.4	6.7	-0.4
3	33.1	43.0	35.2	48.5	52.2	41.8	18.8	8.0	40.0	22.5	56.6	14.5	5.0
4	79.4	91.0	82.6	100	94.9	92.0	70.0	42.4	40.6	71.2	100	ND	41.8
5	62.9	52.8	39.2	59.7	50.6	61.3	26.1	11.2	54.9	41.4	67.4	36.1	22.8
6	-94.6	-87.1	-43.0	-100	-72.4	-77.4	-66.9	-13.3	-62.0	-39.9	-90.1	-30.1	-6.3

ND: 検出されず

軸が23度傾いているのでその運動は不斉になる。

そのため、ホモキラリティーは地球の運動が生体分子に反映した可能性がありうる。溶液が運動すると、溶質分子は配列を起こす可能性、例えば流れの方向に小さな置換基が配向するとか、遠心力 ( $g$ :地球では $1 \times g$ ) で大きな置換基が外側を向くとかである。不斉合成には最低2方向の固定が必要であるが、地球と同じ運動をすれば、原理上2方向の固定ができるはずである。

20年ほど前に地球と似た運動をする地球モデル遠心機を作った。回転軸を傾けた容量20mlほどのテフロン製の円筒状の容器が中心から33cmにあり、自転しつつ公転する。1回の公転の間に3回自転する。非対称に回転するので公転の最大速度は150rpmほどである。

これを使って、D,L-Asnなどの再結晶を行ったが静置したときと差はなかった。さらに不斉エポキシ化、スルフィドのスルホキシドへの不斉酸化などを試みたが、未だに不斉誘導は起こっていない。この遠心機は遠心力の上では地球の $1 \times g$ をはるかに超えるので、遠心力や溶媒の流れ(地球と同じように運動している大気中で反応が起こったとして赤道地表の速度は約0.46km/sec)による分子の配列は起こらないのかもしれない。

ホモキラリティー生成は地球の歴史で1回だけ起こったと考えられ、今ではその痕跡を探すのも不可能であろう。ホモキラリティー生成は生命誕生における最大の謎であり、いつの時代もその時の化学のレベルに応じた機構が現れるように思われる。L-アミノ酸とD-系列の糖、これらの関係を含めて研究の発展に期待したい。

## 文 献

- Avalos, M., Babiano, R., Cintas, P., Jimenez, J.L., & Palacios, J.C. (2000) *Tetrahedron Asymm.*, **11**, 2845-2874.
- Mason, S. (1988) *Chem. Soc. Rev.*, **17**, 347-359.
- Ikehara, K. (2005) *Chem. Rec.*, **5**, 107-118.
- Miller, S.L. (1953) *Science*, **117**, 528-529.
- Breslow, R. & Levine, M.S. (2006) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 12979-12980.
- Pizzarello, S., Zolensky, M., & Turk, K.A. (2003) *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 1589-1595.
- Bailey, J., Chrysostomou, A., Hough, J.H., Gledhill, T.M., McCall, A., Clark, S., Menard, F., & Tamura, M. (1998) *Science*, **281**, 672-674.
- Pasteur, L. (1848) *C.R. Acad. Sci. Paris*, **26**, 535-538.
- Collet, A., Brienne, M.-J., & Jacques, J. (1980) *Chem. Rev.*, **80**, 215-230.
- Kondepudi, D.K., Kaufman, R.J., & Singh, N. (1990) *Science*, **250**, 975-976.
- Pincock, R.E., Perkins, R.R., Ma, A.S., & Wilson, K.R. (1971) *Science*, **174**, 1018-1020.
- Addadi, L., Berkovitch-Yellin, Z., Weissbuch, I., van Mil, J., Shimon, L.J.W., Lahav, M., & Leiserowitz, L. (1985) *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **24**, 466-485.
- Ostromisslensky, I. (1908) *Ber.*, **41**, 3035-3046.
- Kojo, S. & Tanaka, K. (2001) *Chem. Comm.*, 1980-1981.
- Wallach, O. (1895) *Liebigs Ann. Chem.*, **286**, 90-143.
- Weissbuch, I., Addadi, L., Lahav, M., & Leiserowitz, L. (1991) *Science*, **253**, 637-645.
- Kojo, S., Uchino, H., Yoshimura, M., & Tanaka, K. (2004) *Chem. Comm.*, 2146-2147.
- Nimura, N. & Kinoshita, T. (1986) *J. Chromatogr.*, **352**, 169-177.
- Cronin, J.R. & Pizzarello, S. (1997) *Science*, **275**, 951-955.
- Rikken, G.L.J.A. & Raupach, E. (2000) *Nature*, **405**, 932-935.
- Bailey, J., Chrysostomou, A., Hough, J.H., Gledhill, T.M., McCall, A., Clark, S., Menard, F., & Tamura, M. (1998) *Science*, **281**, 672-674.
- Inoue, Y. (1992) *Chem. Rev.*, **92**, 741-770.
- Avalos, M., Babiano, R., Cintas, P., Jimenez, J.L., & Palacios, J.C. (1998) *Chem. Rev.*, **98**, 2391-2404.
- Nishino, H., Kosaka, A., Hembury, G.A., Aoki, F., Miyauchi, K., Shitomi, H., Onuki, H., & Inoue, Y. (2002) *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 11618-11627.
- Kawasaki, T., Sato, M., Ishiguro, S., Saito, T., Morishita, Y., Sato, I., Nishino, H., Inoue, Y., & Soai, K. (2005) *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, 3274-3275.
- Munegumi, T., Shimoyama, A., & Harada, K. (1997) *Chem. Lett.*, **26**, 393-394.

## 用語解説

不斉現象(キラリティー): 炭素に結合する四つの置換基がすべて異なるとき、その炭素を不斉炭素(キラル炭素)という。炭素は4面体構造を持つので、このような分子は鏡に映った鏡像と重ね合わせることができず、鏡像とは立体異性体(光学異性体)の関係になる。これが不斉現象である。鏡像関係にあるそれぞれの分子を対掌体(エナンチオマー)といい、光学活性(偏光面を左右どちらかに回転させる性質)を持つ。

光学活性物質の表記法: 本稿に示したようにD, Lはフィッシャーの命名法である。旋光計を用いて旋光度を測定し偏光面を右側に回転させる右旋性の分子は(+), または小文字のd, 左旋性の分子は(-)または小文字のlと標記する。例えば、室温, pH7.0の水溶液中ナトリウムD線(589.3nm)で測定すると, L-Ala, L-Arg, L-Ile, L-Glu, L-Lys, L-Valなどは右旋性, L-Leu, L-Phe, L-His, L-Pro, L-Thr, L-Trpなどは左旋性である。

R, S命名法: Cahn, Ingold, Prelogによって提唱され、紙の上に構造が書ける定義である。キラル炭素に結合した四つの基を原子番号が大きいものから順に1, 2, 3, 4と番号を付ける。最初の原子が同じなら次の原子の原子量で比較する。例えば,  $-CO_2H$ と $-CH_3$ では前者が優先である。キラル炭素を紙面に置き、最も原子番号が小さい置換基4を紙面後方になるように分子を置く。この形で置換基1から2に向かって矢印を付けたとき、それが時計回りであればR, 逆であればSとする。タンパク質に含まれるL-アミノ酸はL-Cys, L-Seleno-Cys以外はS配置(con-

figuration) である。

配置と配座： L-アミノ酸を配置が違う D-アミノ酸に変換するには共有結合を切断する必要があり，特別な条件がなければ通常起こらない。一方，室温で化学結合の自由回転によって変換可能な立体異性体は配座 (conformation) の違いであり，低分子化合物では室温で容易にお互いへの変換が可能である。タンパク質の変性，例えば有機溶媒によって変性すると通常元には戻らないが共有結合が切れていないので配座の変化と考えられる。

ラセミ体 (ラセミ混合物)： 対掌体が同量ずつ存在する混合物。どちらの対掌体も生成できる化学反応では，不斉条件がなければ必ずラセミ体が生成する。

光学分割： ラセミ体から一方の対掌体を分離すること。

ジアステレオマー： 光学異性体であっても鏡像関係にないもの，例えばジペプチドを例にとると，L-Ala-L-Ala にとって，D-Ala-D-Ala は鏡像異性体だが，L-Ala-D-Ala や D-Ala-L-Ala はジアステレオマーの関係にある。