

無機化学

2012年4月～2012年8月

水曜日1時間目114M講義室

第11回 6月27日

分子の対称性(1)対称操作と対称要素・

(2)分子の対称による分類・構造異性と立体異性

担当教員:福井大学大学院工学研究科生物応用化学専攻

教授 前田史郎

E-mail: smaeda@u-fukui.ac.jp

URL: <http://acbio2.acbio.u-fukui.ac.jp/phychem/maeda/kougi>

教科書:アトキンス物理化学(第8版)、東京化学同人

主に8・9章を解説するとともに10章・11章・12章を概要する

1

6月22日

原子価殻電子対反発則(VSEPR則)を適用して金属錯体の構造を推定できる。

①VSEPR則を簡単に説明せよ。

(1)分子(イオン)は電子対間の反発ができるだけ少なくなるような構造をとる。

(2)電子対間の反発は $lp-lp > lp-bp > bp-bp$ の順に強い。

(3)電子対間の反発はその角度が90°より十分大きいときには無視できる。

lp; lone pair 非共有電子対

bp; bonded pair 結合電子対

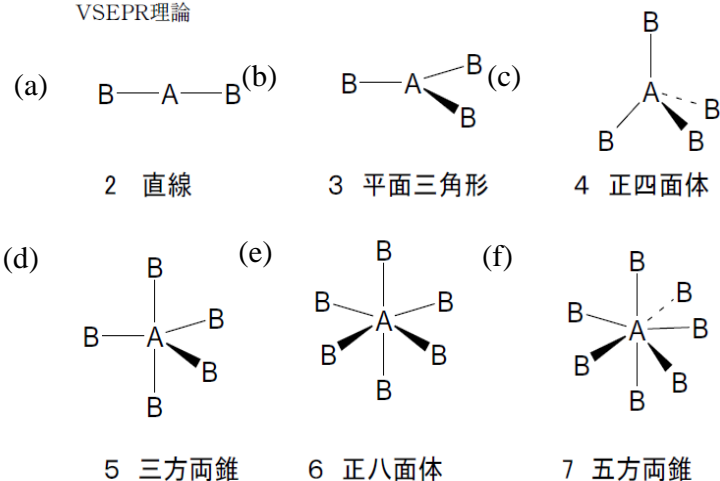
VSEPR則 (valence shell electron-pair repulsion; 原子価殻電子対反発則)

2

②VSEPR則から推測される次の構造(名称(配位数))を図示せよ。

(a)直線(2), (b)平面三角形(3), (c)正四面体(4),
(d)三方両錐(5), (e)正八面体(6), (f)五方両錐(7)

VSEPR理論




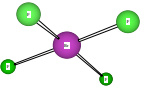
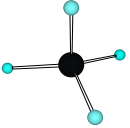
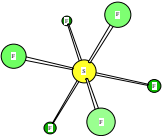
3

種々の混成軌道の組合せを含む化合物

混成軌道	軌道の方向性	化合物の例
sp	直線	C ₂ H ₂
sp ²	三角形	BCl ₃ , CO ₃ ²⁻ , NO ₃ ⁻
dsp ²	平面正方形	[Cu(NH ₃) ₄] ²⁺
sp ³	正四面体	CH ₄ , NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ , ClO ₄ ⁻
sp ³ d	三方両錐	PCl ₅ , AsCl ₅
d ² sp ³	正八面体	[Fe(CN) ₆] ⁴⁻
sp ³ d ²	正八面体	SiF ₆ ²⁻ , SF ₆ , [FeF ₆] ³⁻

4

代表的な遷移金属錯体とその形

配位数	錯体の形	例
2	直線 	$[\text{CuCl}_2]^-$, $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$, $[\text{AuCl}_2]^-$
4	正方平面 	$[\text{Ni}(\text{CN})_4]^{2-}$, $[\text{PdCl}_4]^{2-}$ $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$
4	正四面体 	$[\text{Cu}(\text{CN})_4]^{3-}$, $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ $[\text{CdCl}_4]^{2-}$, $[\text{MnCl}_4]^{2-}$
6	正八面体 	$[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$, $[\text{V}(\text{CN})_6]^{4-}$ $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2]^+$, $[\text{Co}(\text{en})_3]^{3+}$

授業内容

- 1回 元素と周期表・量子力学の起源
- 2回 波と粒子の二重性・シュレディンガー方程式・波動関数のボルンの解釈
- 3回 並進運動：箱の中の粒子・振動運動：調和振動子・回転運動：球面調和関数
- 4回 角運動量とスピン・水素原子の構造と原子スペクトル
- 5回 多電子原子の構造・典型元素と遷移元素
- 6回 種々の化学結合：共有結合・原子価結合法と分子軌道法
- 7回 種々の化学結合：イオン結合・配位結合・金属結合
- 8回 分子の対称性(1) 対称操作と対称要素
- 9回 分子の対称性(2) 分子の対称による分類・構造異性と立体異性
- 10回 結晶構造(1) 7晶系とブラベ格子・ミラー指数
- 11回 結晶構造(2) 種々の結晶格子・X線回折
- 12回 遷移金属錯体の構造・電子構造・分光特性
- 13回 非金属元素の化学
- 14回 典型元素の化学
- 15回 遷移元素の化学

6

12章 分子の対称

426

12・1 対称操作と対称要素

対称操作(symmetry operation): 物体をある規則に従って移動させた前後で、その物体が同じ配向をとっているとき、この移動を対称操作という。代表的な対称操作には、**回転**、**鏡映**、および**反転**がある。

対称要素(symmetry element): 幾何学的な意味での**線**(line)、**面**(plane)、**点**(point)であって、これらの対称要素に関して1つあるいはそれ以上の対称操作を行う。例えば回転(対称操作)はある軸(対称要素)の回りに実行する。

7

427

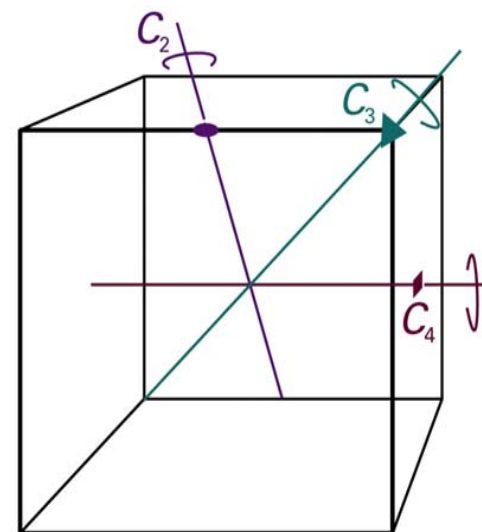


Figure 12-1
Atkins Physical Chemistry, Eighth Edition
© 2006 Peter Atkins and Julio de Paula

C_2 : 2回軸
 C_3 : 3回軸
 C_4 : 4回軸

$$C_n: n = 360^\circ/\theta$$

図12・1 立方体の対称要素の例。2回軸を6個、3回軸を4個、4回軸を3個持っている。回転軸を慣用の記号で示してある。

8

対称操作	記号*	対称要素
1) 恒等(identity)	E	恒等要素
2) 回転(rotation)	C_n	n 回回転軸
3) 鏡映(reflection)	$\sigma (S_1)$	鏡面
4) 対称心による反転(inversion)	$i (S_2)$	対称心(対称中心)
5) 回映(improper rotation)	S_n	n 回回映軸

*記号: シェーンフリースの記号

鏡映は1回回映(S_1), また対称心による反転は2回回映(S_2)に等しい。対称操作は、大きく分けると回転(C_n)と回映(S_n)に分けることができる。そして、回映対称(S_n)を持たない分子はキラルである。

Table 12.1 The notation for point groups*

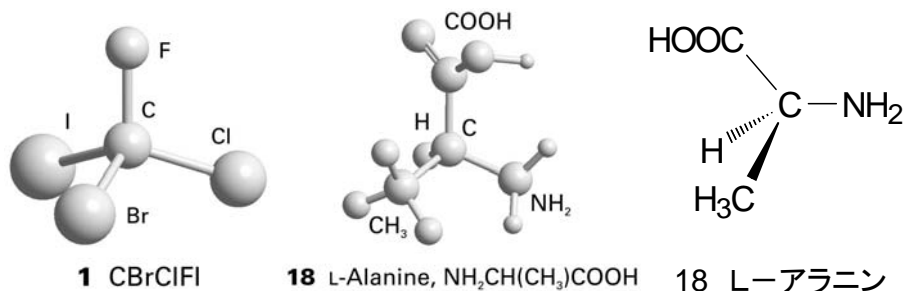
C_1	$\bar{1}$								
C_s	m								
C_1	1	C_2	2	C_3	3	C_4	4	C_6	6
		C_{2v}	$2mm$	C_{3v}	$3m$	C_{4v}	$4mm$	C_{6v}	$6mm$
		C_{2h}	$2m$	C_{3h}	$\bar{3}$	C_{4h}	$4/m$	C_{6h}	$6/m$
		D_2	222	D_3	32	D_4	422	D_6	622
		D_{2h}	mmm	D_{3h}	$\bar{6}2m$	D_{4h}	$4/mmm$	D_{6h}	$6/mmm$
		D_{2d}	$\bar{4}2m$	D_{3d}	$\bar{3}m$	S_4	$\bar{4}/m$	S_6	$\bar{3}$
T	23	T_d	$\bar{4}3m$	T_h	$m\bar{3}$				
O	432	O_h	$m\bar{3}m$						

* In the International system (or Hermann-Mauguin system) for point groups, a number n denotes the presence of an n -fold axis and m denotes a mirror plane. A slash (/) indicates that the mirror plane is perpendicular to the symmetry axis. It is important to distinguish symmetry elements of the same type but of

表12・1 点群の表記法: シェーンフリース系と国際(ヘルマン-モーガン)系

	n 回回転軸	鏡面	軸に垂直な鏡面
シェーンフリース	C_n	σ	σ_h
国際系	n	m	$/m$

恒等 identity, E



恒等操作

分子に対して何もしないという対称操作

- (1) この対称要素しか持たない分子が存在する。
- (2) 群論の表し方と関係がある。

対称軸のまわりの回転 rotation C_n

$$n = 2\pi/\theta$$

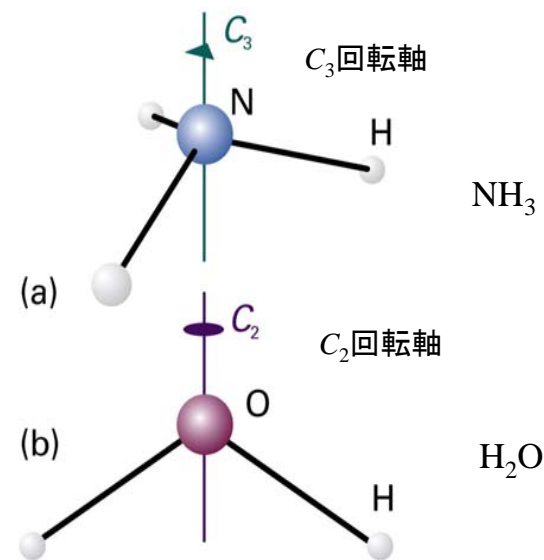
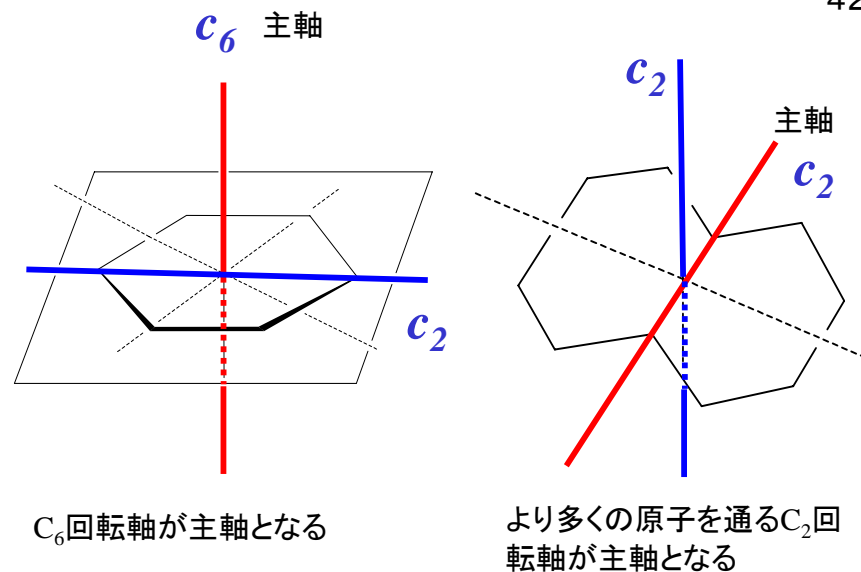


Figure 12-2
Atkins Physical Chemistry, Eighth Edition
© 2006 Peter Atkins and Julio de Paula

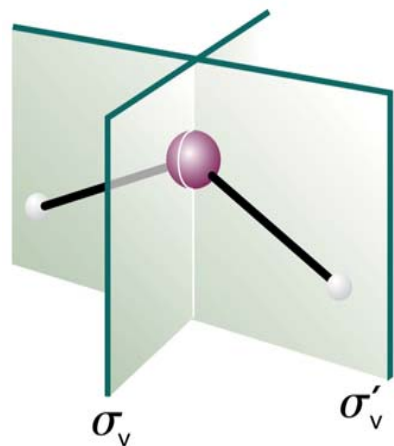
対称軸の選び方

主軸:

- (1) 1本の回転軸ではその軸を主軸とする.
- (2) n 本の回転軸があるとき, 最大の n の軸を主軸とする.
- (3) 最大の n を有する軸が複数のとき, 最も多くの原子を通過する軸を主軸とする.



対称面での鏡映 reflection σ

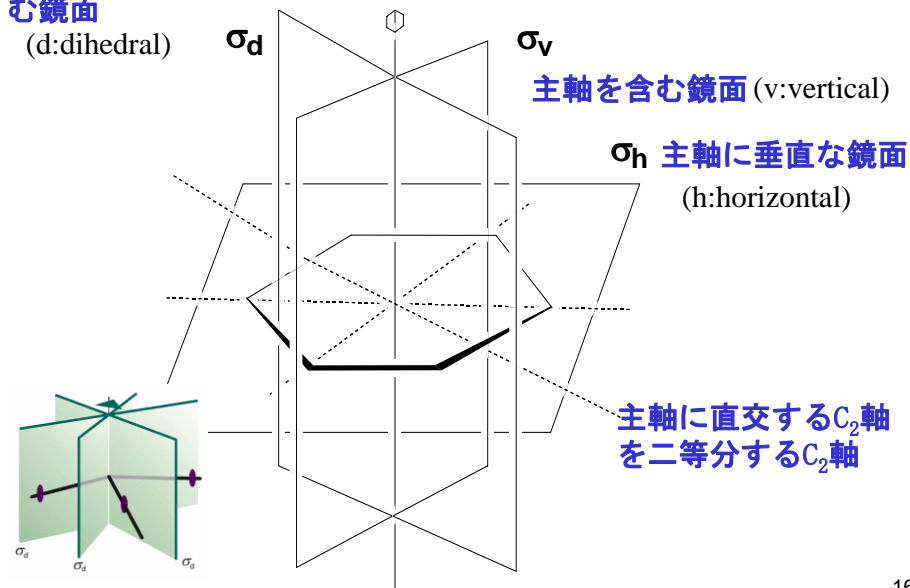


σ_v : 主軸を含む鏡面
(v:vertical)

Figure 12-3
Atkins Physical Chemistry, Eighth Edition
© 2006 Peter Atkins and Julio de Paula

図12・3 H_2O 分子は2つの鏡面を持つ. これらは両方とも垂直であり(つまり主軸を含む) σ_v と σ_v' である.

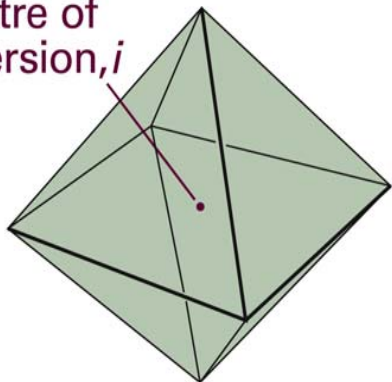
二等分鏡面 : 主軸に直交する C_2 軸を二等分する C_2 軸と主軸とを含む鏡面
(d:dihedral)



対称中心による反転 inversion i

428

Centre of inversion, i



H_2O , NH_3 , CH_4 , 正四面体は対称心を持たない。

球, 立方体, 正八面体は対称心を持つ。

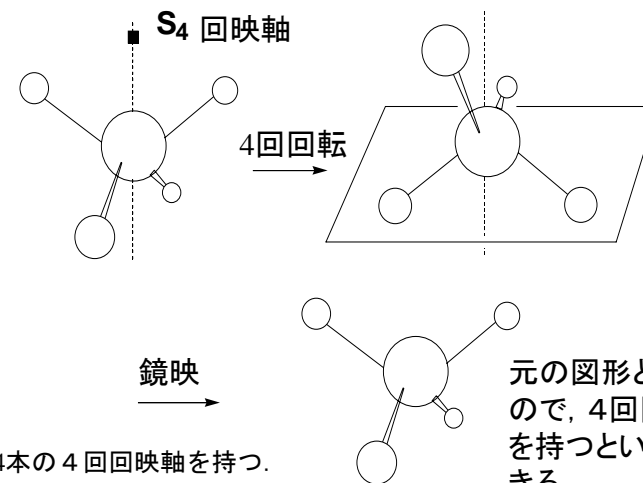
Figure 12.5
Atkins Physical Chemistry, Eighth Edition
© 2006 Peter Atkins and Julio de Paula

全ての点を分子の中心まで移動させ、さらに反対側に同じ距離移動させたとき、元の形と同じになる場合、この分子は対称心を持つ。

17

n 回回映 improper rotation S_n

428



CH_4 は4本の4回回映軸を持つ。

元の図形と一致するので、4回回映対称を持つということが出来る。

n 回回転の後、鏡映を行う対称操作を n 回回映対称操作という。

18

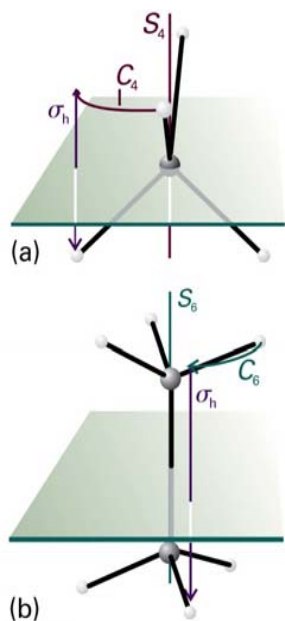


図12・6

(a) CH_4 分子は4回回映軸(S_4)を持つ。この分子を 90° 回転させ、続いて水平面で鏡映させたあとの形はもとと区別できない。

(b) エタンのねじれ形は S_6 軸を持つ。これは、 60° 回転につづいて鏡映を行う。

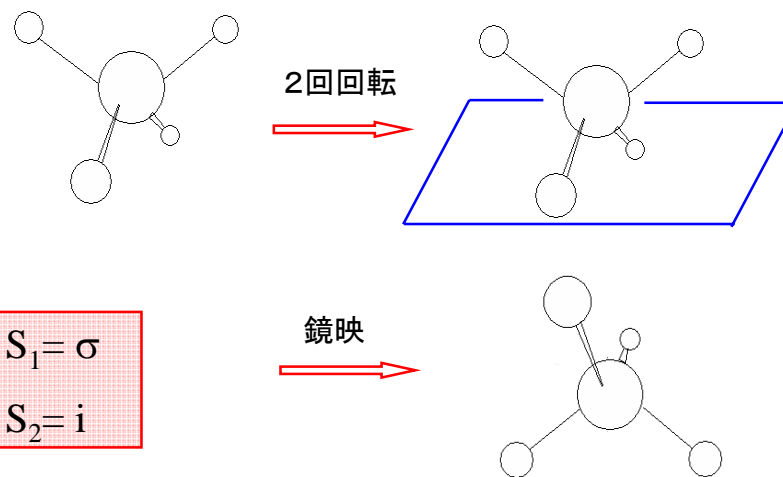
Figure 12-6
Atkins Physical Chemistry, Eighth Edition
© 2006 Peter Atkins and Julio de Paula

428

19

2回回映 S_2

428



$$S_1 = \sigma$$

$$S_2 = i$$

2回回映対称は対称中心による反転と同じ対称操作である。1回回転はももしないのと同じだから、1回回映対称は鏡映と同じ対称操作である。

20

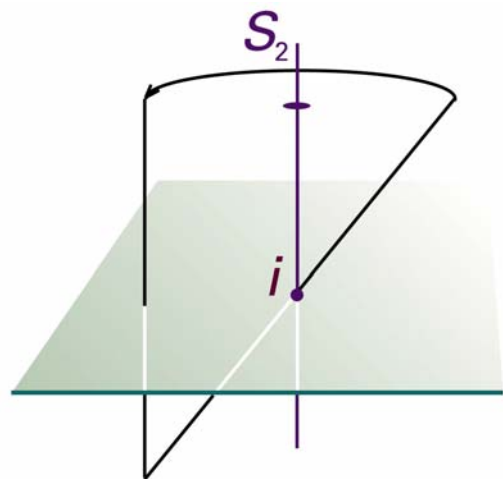
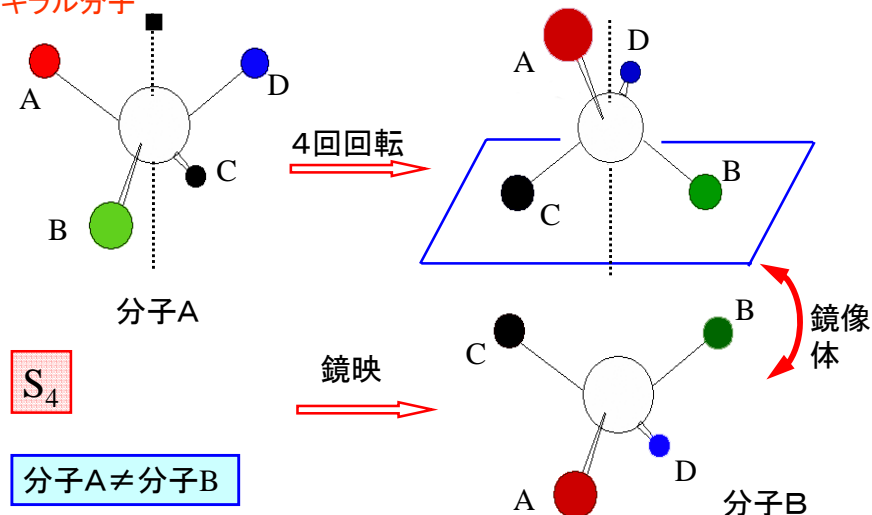


Figure 12-14
Atkins Physical Chemistry, Eighth Edition
© 2006 Peter Atkins and Julio de Paula

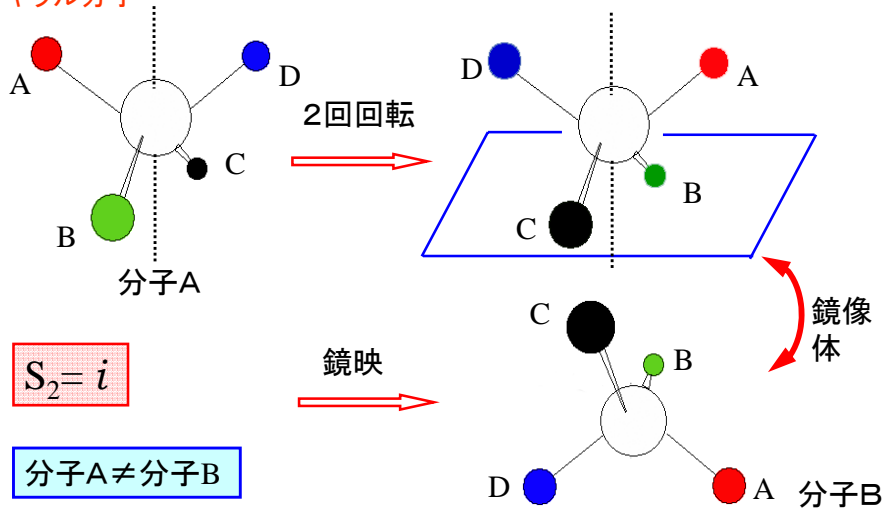
図12・14 反転中心を持つ分子はどれでも少なくとも S_2 の要素を持っている. i と S_2 は等価だからである.

4つの異なる原子(原子団)と結合している不斉炭素原子を持つキラル分子



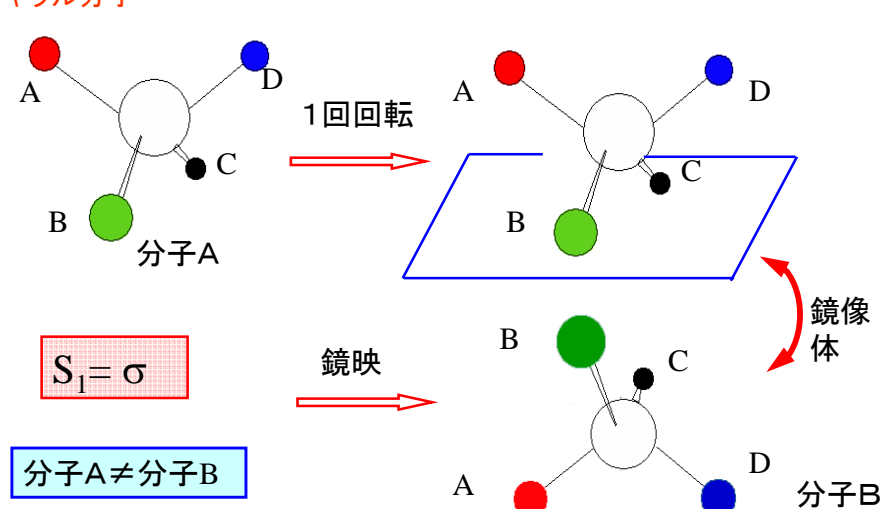
この分子Bは分子Aとは一致しない. つまり, キラル分子は4回回映対称を持たない. 一般に, 回映対称を持つ分子はキラルではない. 22

4つの異なる原子(原子団)と結合している不斉炭素原子を持つキラル分子

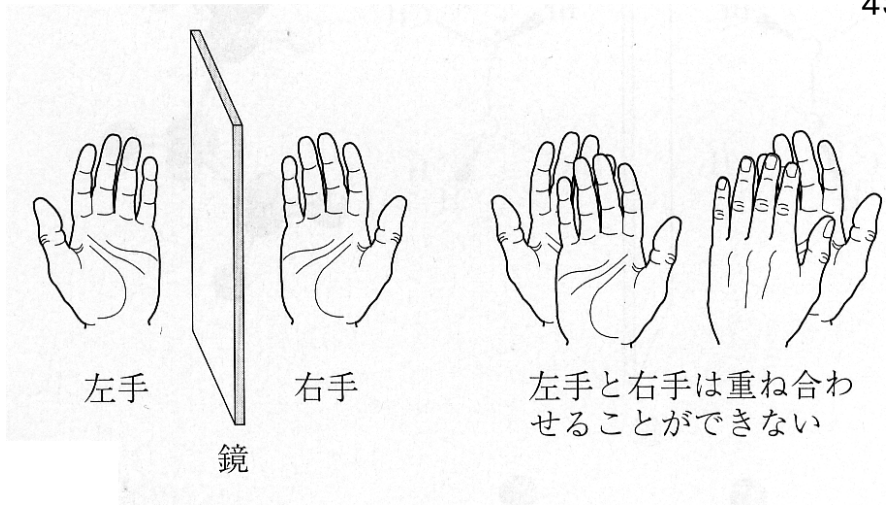


この分子Bは分子Aとは一致しない. つまり, キラル分子は2回回映対称を持たない. 一般に, 回映対称を持つ分子はキラルではない. 23

4つの異なる原子(原子団)と結合している不斉炭素原子を持つキラル分子



この分子Bは分子Aとは一致しない. つまり, キラル分子は1回回映対称を持たない. 一般に, 回映対称を持つ分子はキラルではない. 24



手は、キラルである。



「スヌーピー立体化学を学習する」

手だよ！

君の夕食の支度をした手だよ。

缶切りを回して、夕食のお皿を運んできた手だよ

手だよ！

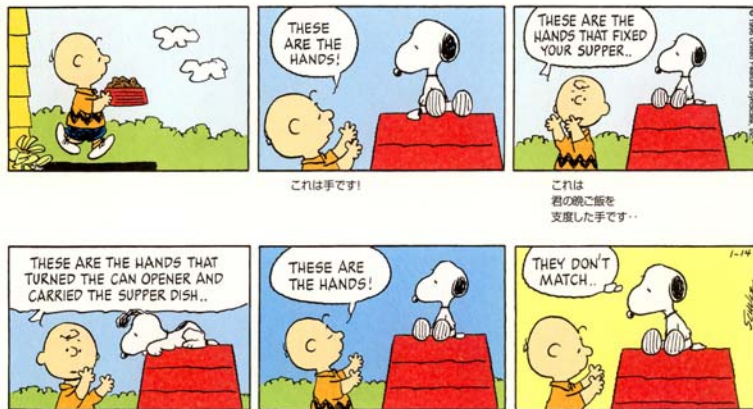
右手と左手は一致しない・・・



ドッグ フード

1996年

谷川俊太郎訳



これは手です！

これは君の晩ご飯を支度した手です..

これは缶切りを回してお皿を運んだ手です..

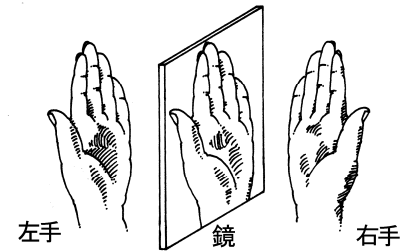
これは手です！

不揃いだね..

谷川訳では
"THEY DON'T MATCH."
「不揃いだね...」.
SNOOPYが右手と左手の関係が対掌体であることをつぶやく方が面白いと思います...

Sunday Special
Peanuts Series
SNOOPY®
いとしのあなたへ
シュルツ著
谷川俊太郎訳
角川書店（平成15年）

対掌性(キラリティー)



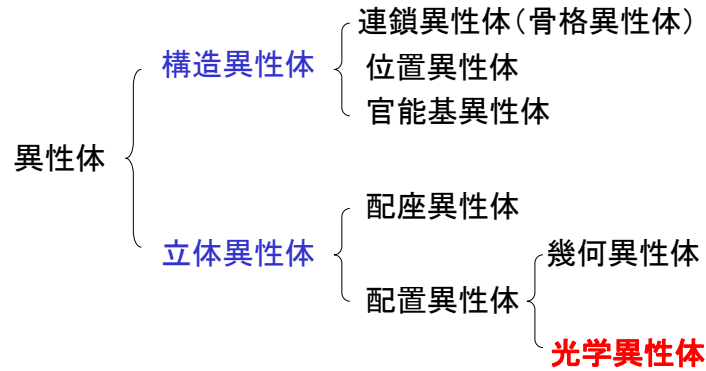
2つの分子の立体構造に互いに鏡像の関係が存在するとき、すなわち右手と左手の関係にあるとき、この両者は**対掌体(エナンチオマー)**であるという。また、**実像分子と鏡像分子とが立体的に一致しない性質をキラリティー(chirality)**と呼び、またこのような分子は**キラル(chiral)**であるという。実像分子と鏡像分子が一致するときは**アキラル(achiral)**であるという。

異性体:

434

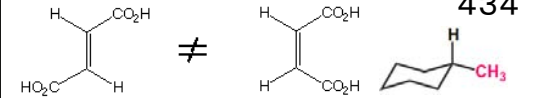
分子式が同じ、すなわち構成原子の種類と数が同じだが構造が異なる分子、またはそのような分子からなる化合物を異性体 (isomer) と呼ぶ。

異性体の種類

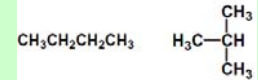


29

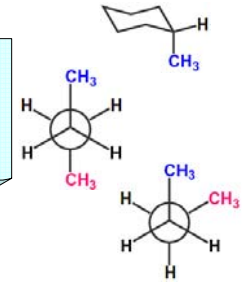
異性体
分子式が同じで
構造が異なる



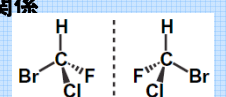
構造異性体
原子が結合する順 (つながり方) が異なる



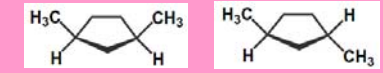
立体異性体
原子が結合する順は同じで空間的な配置が異なる



エナンチオマー
互いに重ね合わせることが出来ない像と鏡像の関係



ジアステレオマー
像と鏡像の関係ではない立体異性



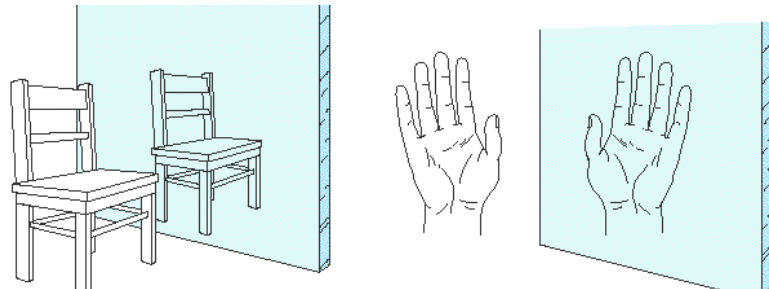
30

キラリティー (対掌性)

434

“キラリティー (対掌性)”とは、右手の手袋と左手の手袋 (あるいは右手と左手) のような関係のことをいう。右手の手袋は左手にはまらない、つまり互いに鏡に映した鏡像の関係にあるが、ぴったり重ね合わせることができない (同じではない)。

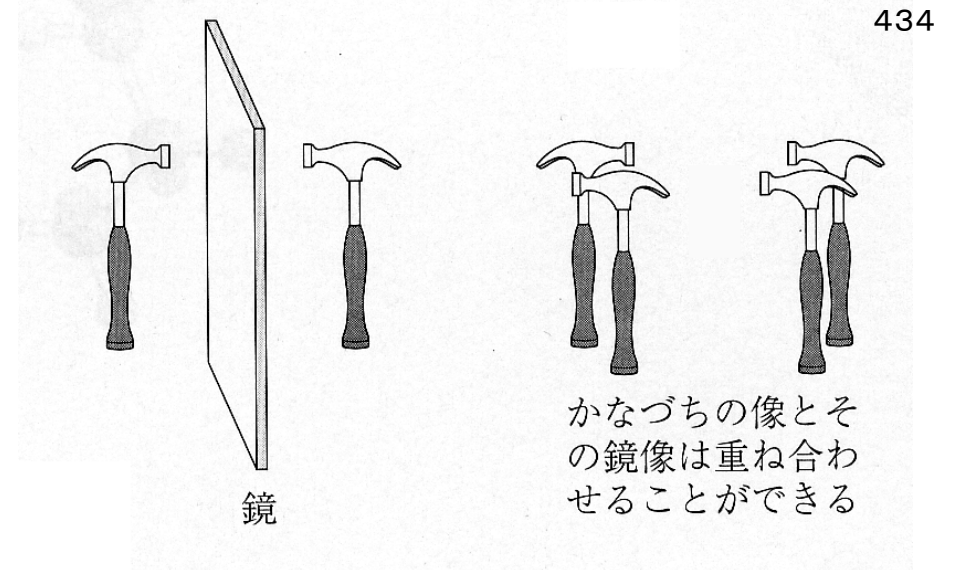
鏡に映った物体の像 (鏡像) が元の物体と重ならないとき、その物体はキラルであるという。鏡像が元の像と重なるとき、その物体はアキラルであるという。



イスはアキラルである。

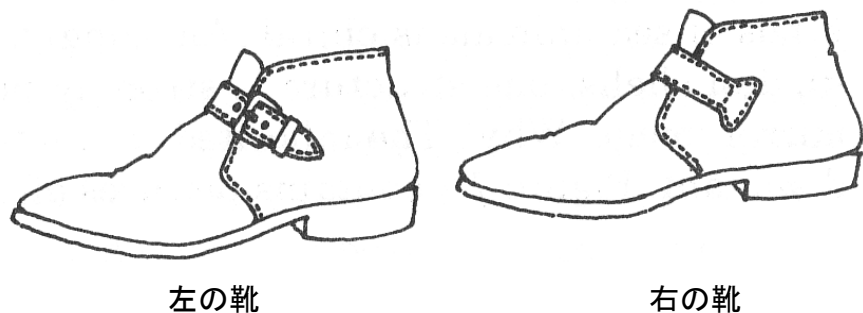
手はキラルである。

31

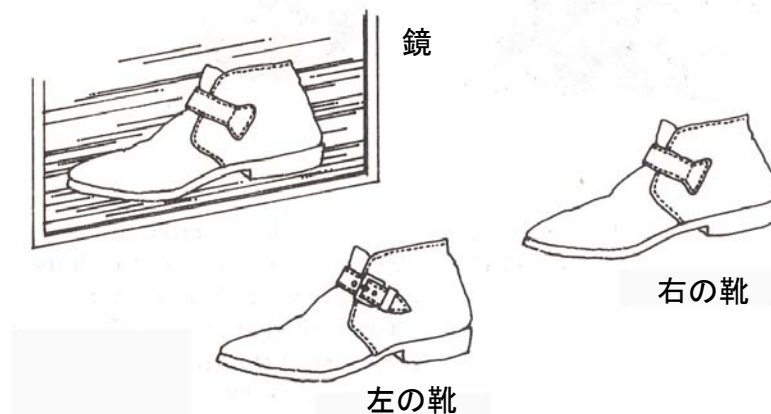


かなづちは、キラルではない。

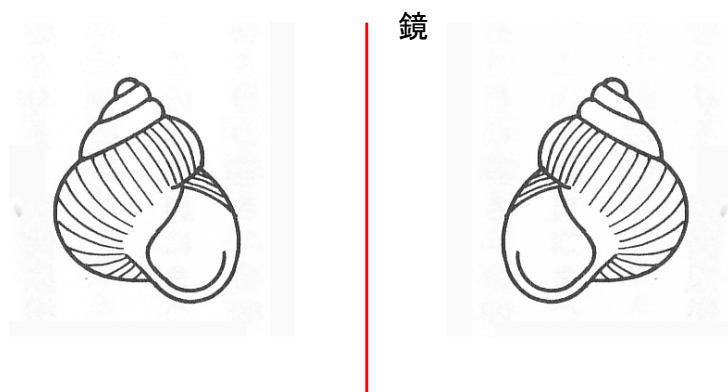
32



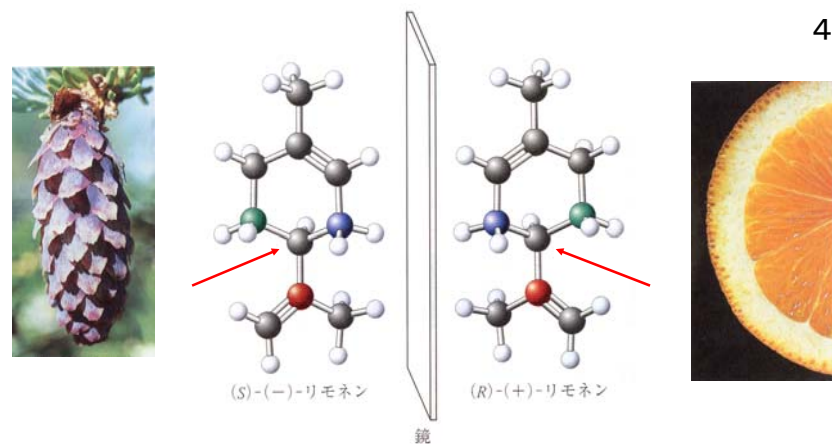
私たちの身の回りでは、左の靴と右の靴が対掌体の関係にあります。つまり、靴はキラルな物体であることができます。



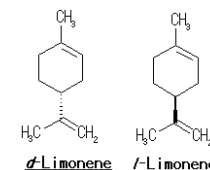
「左の靴」を鏡に写すと、鏡の中には「右の靴」が現れます。元の像(左の靴)と鏡に写った像(右の靴)は、左手と右手と同じように決して重ね合わせることができません。



自然界の例では、右巻きの巻貝と左巻きの巻貝は互いに対掌体である。すなわち、巻貝はキラルである。



リモネンの分子構造とその鏡像 これらは全く異なった香りがする、S体の分子はもみの木の松かさに含まれていてテレピン油の香りがする。その鏡像であるR体の分子はオレンジ特有の香気をもたらしている。(矢印の炭素原子が不斉炭素である)



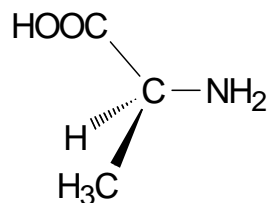
12・2 分子の対称による分類

点群 Point Group

全く同じ対称要素を持つ分子は同じ点群に属す

(a) C_1 , C_s , C_i 点群

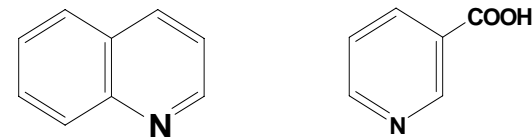
C_1 群: E以外に対称要素を持たない分子は C_1 群に属す



18 L-アラニン

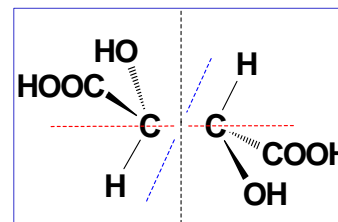
37

C_s 群: E以外に鏡面 σ のみを持つ分子は C_s 群に属す



4 キノリン

C_i 群: E以外に反転中心*i*のみの要素を持つ分子は C_i 群に属す



このような分子は必然的に S_n 対称性を持つ

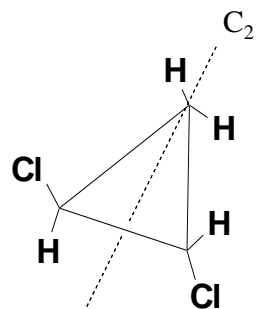
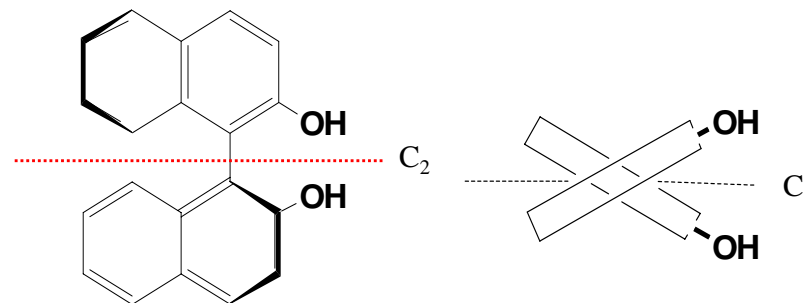
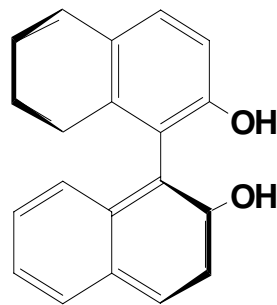
C_s 群は S_1 対称性を持つ.
 C_i 群は S_2 対称性を持つ.

3 メソ酒石酸 恒等と反転中心を持つ: C_i

38

(b-1) C_n 群

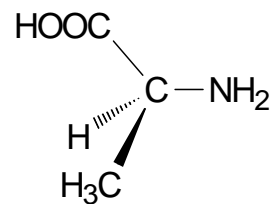
E以外に C_n 軸を1本のみ持つ分子は C_n 群に属す

 C_2 群 C_2 群

39

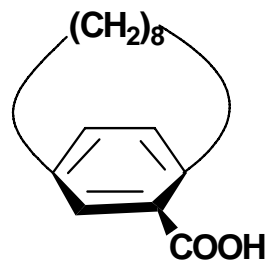
40

C_n 群に属する分子はキラルである



C_1 群：中心不斉

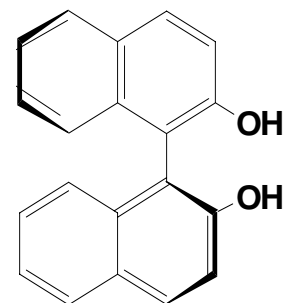
不斉炭素(4つの異なる原子(原子団)と結合している炭素)を持つ



C_1 群：面不斉

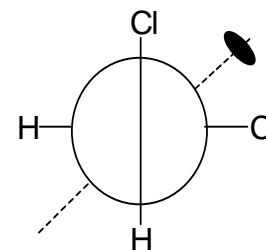
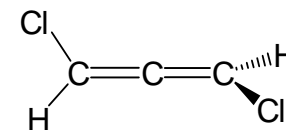
不斉炭素を持たないがキラルである

41



C_2 群：軸不斉

不斉炭素を持たないがキラルである

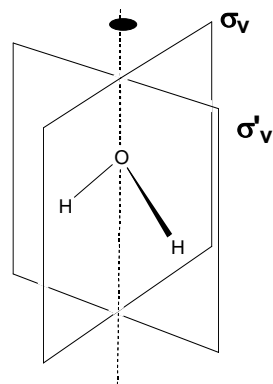


C_2 群：軸不斉

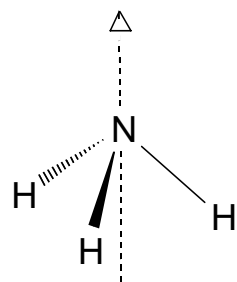
42

(b-2) C_{nv} 点群

C_n 軸1本と、 σ_v をn個持つ分子は C_{nv} 点群に属す

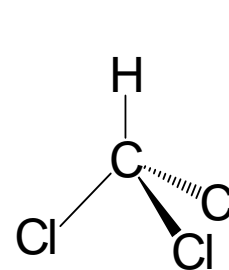


H_2O C_{2v}

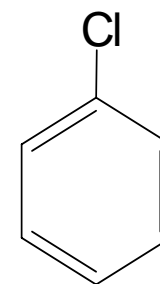


NH_3 C_{3v}

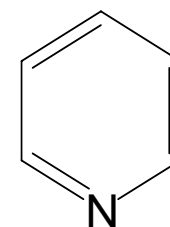
43



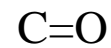
$CHCl_3$: C_{3v}



C_6H_5Cl : C_{2v}



ピリジン: C_{2v}

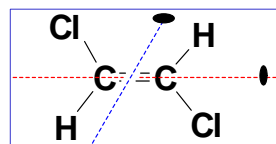
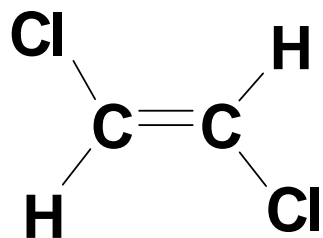


一酸化炭素: $C_{\infty v}$

44

(b-3) C_{nh} 点群

C_n 軸1本と σ_h を1つ持つ分子は C_{nh} 点群に属す



6 trans-1,2-ジクロロエチレン

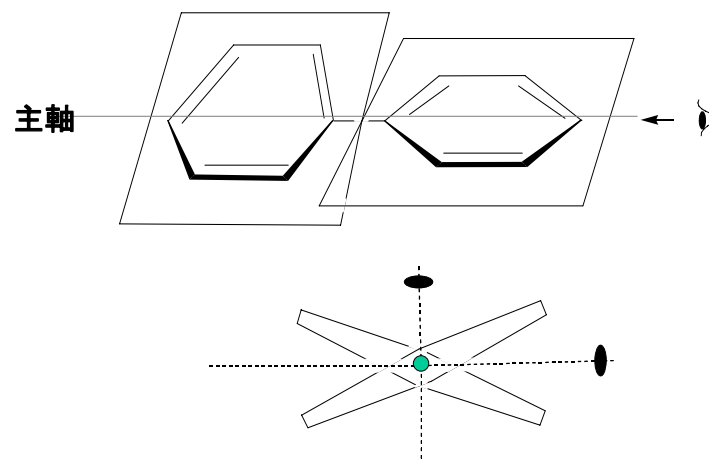
恒等, n 回回転軸と水平な鏡面を持つ: C_{2h}

C_{2h} 点群に属する分子は必然的に S_2 (したがって, i) を持つ.
2 回回転の後で鏡映させる対称操作は S_2 である.

45

(c-1) D_n 点群

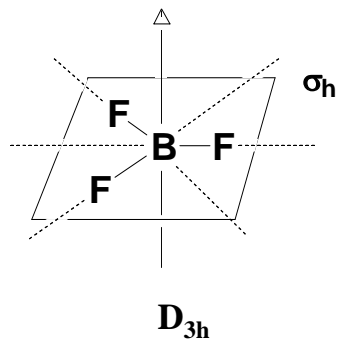
C_n 軸を1本とこの C_n 軸に垂直な C_2 軸を n 本持つ分子は D_n 点群に属す



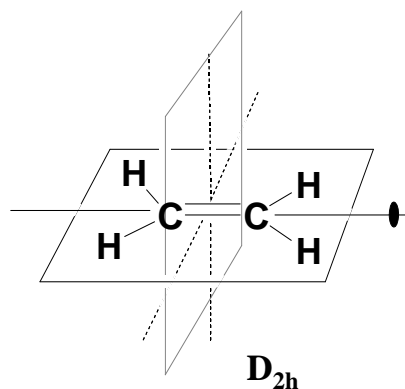
46

(c-2) D_{nh} 点群

D_n 群の要素を有し, かつ主軸 (C_n 軸) に垂直な鏡面 (σ_h) を持つ分子は D_{nh} 点群に属す

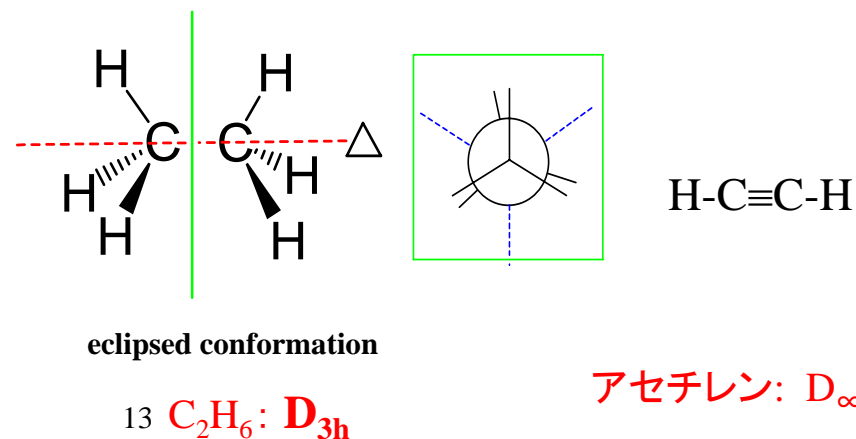


8 三フッ化ホウ素



9 エテン (エチレン)

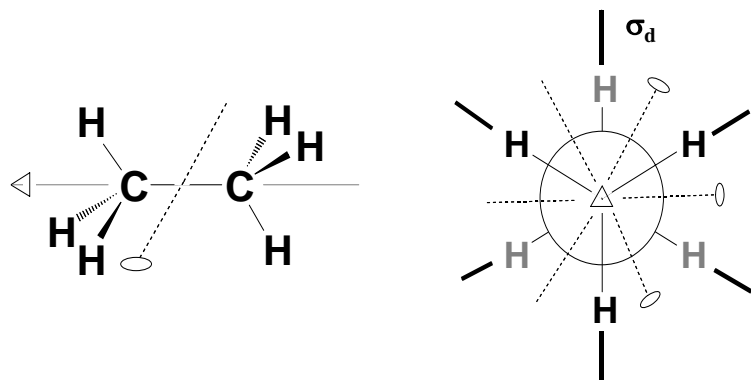
47



48

(c-3) D_{nd} 点群

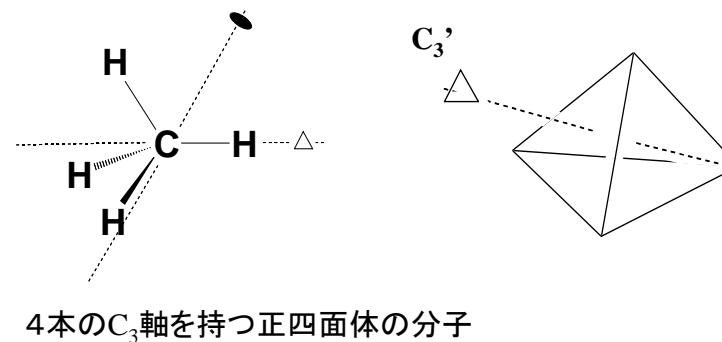
D_n 群の要素を持ち、かつ全ての隣接した C_2 軸の間の角を2等分する垂直な n 個の鏡面 (σ_d 面) を持つ分子は D_{nd} 点群に属す



49

(e-1) T_d 点群 (正四面体群)

3本のお互いに直交する C_2 軸, 4本の C_3 軸, 4本の C_3' 軸を持ち、かつ6個の σ_d 面, 6本の S_4 軸, 8本の C_3 軸を持つ分子は T_d 点群に属す

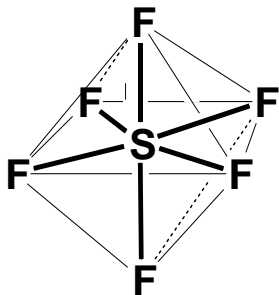


4本の C_3 軸を持つ正四面体の分子

50

(e-2) O_h 点群 (正八面体群)

C_4 軸が6本あり、かつ正八面体構造の分子は O_h 点群に属す



51

12・3 対称からすぐ導かれる結果

分子の点群が分かると、すぐにその分子の性質に関して何らかのことを言えるようになる。

(a) 極性

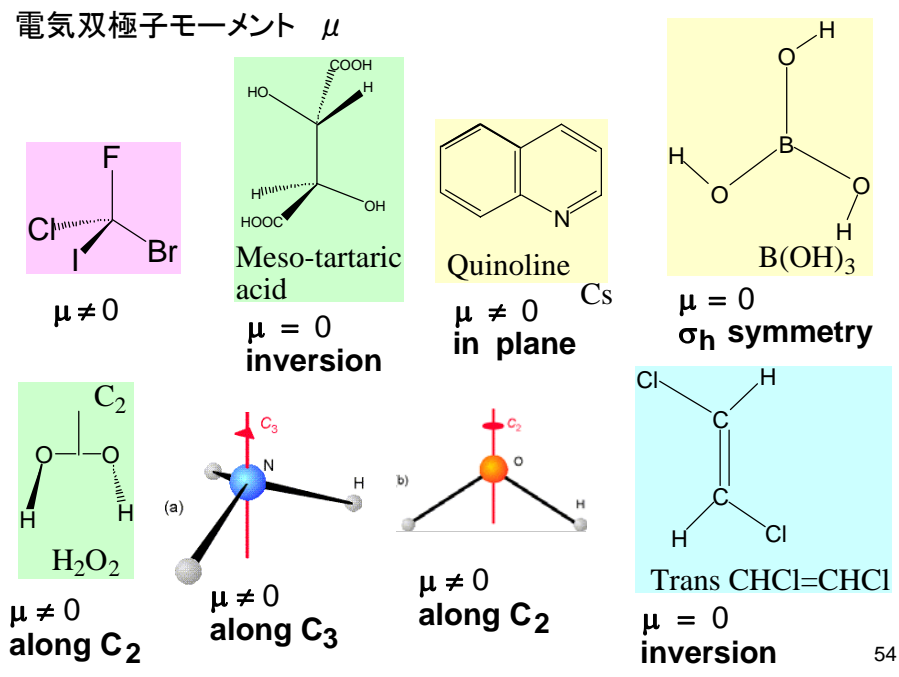
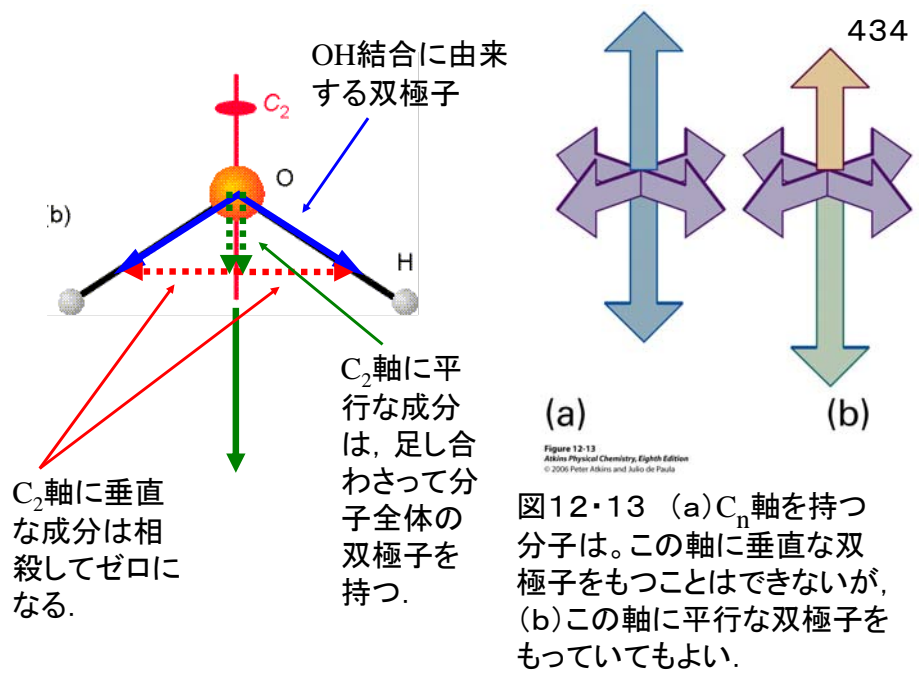
極性分子とは、永久電気双極子モーメントをもつ分子のことである。

C_n , C_{nv} および C_s 群に属する分子だけが永久電気双極子モーメントを持つことができる。

C_n と C_{nv} については、双極子は対称軸に沿う方向になければならない。

例: オゾンは折れ曲がっていて C_{2v} 点群に属するから極性がある。二酸化炭素 CO_2 は、直線で $D_{\infty h}$ に属するから極性はない。

52

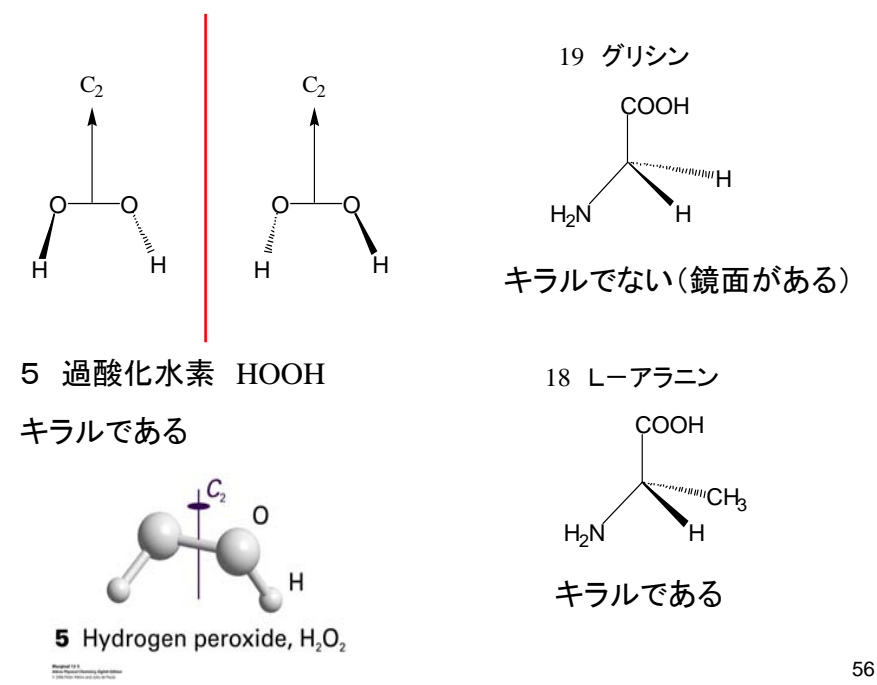
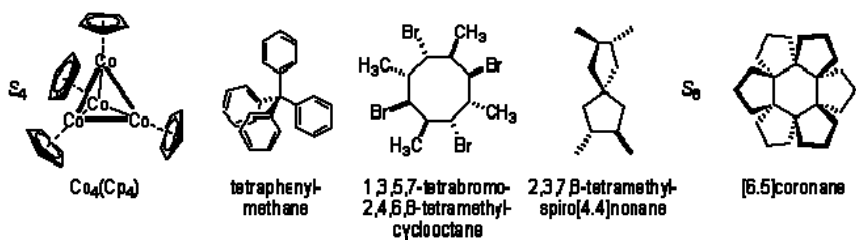


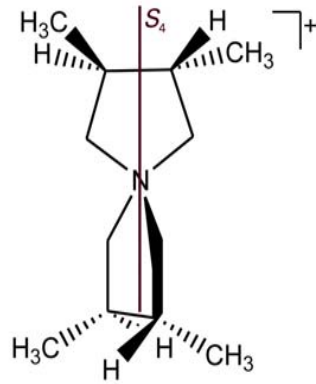
(b)キラリティ(掌性)

434

キラルな分子とは、自分自身の鏡像と重ね合わせられない分子のことである。キラルな分子とその鏡像の相手とは、異性体の鏡像体(エナンチオマー)を形成し、偏光面を同じだけ、しかし逆方向に回転させる。

ある分子が回映軸 S_n をもたない場合に限り、その分子はキラルで、光学活性になり得る。鏡面 (S_1) または反転中心 (S_2) を持つ分子はアキラルである。 S_4 分子は反転中心を持たないが S_4 軸があるためにアキラルである。





20 $N(CH_2CH(CH_3)CH(CH_3)CH_2)_2^+$

Marginal 12-20
Atkins Physical Chemistry, Eighth Edition
© 2006 Peter Atkins and Julio de Paula

反転中心*i*(S_2)は持たないが、4回回映軸(S_4 軸)を持つのでアキラルであって光学不活性である。

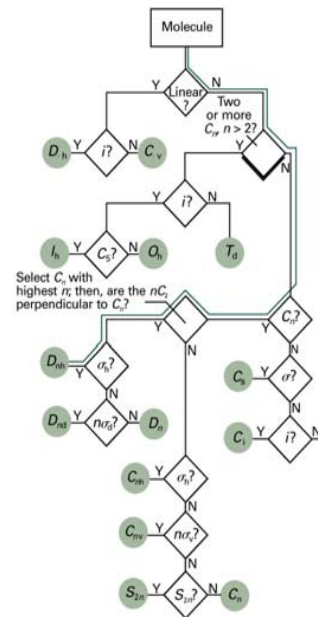
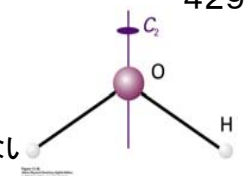


Figure 12-7
Atkins Physical Chemistry, Eighth Edition
© 2006 Peter Atkins and Julio de Paula

例えば、 H_2O 分子は、



- (1)直線ではない。
 - (2) $n > 2$ の C_n は2本以上なし
 - (3) C_2 である。
 - (4)最大の C_n である C_2 に垂直な C_n はない。
 - (5) σ_h はない。
 - (6) σ_v がある。
- したがって、点群は C_{2v} である。

図12・7 分子の点群を決定するための流れ図。上端から出発してそれぞれの菱形の枠内の質問に答えよ。

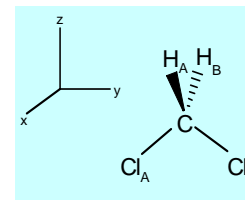
対称性と群論

いくつかの要素(element)からなる集合を考えたとき、それらの要素に対する演算が定義されており、次の4つの性質を満たすとき、その集合は群をなすという。

- (a)集合の任意の要素AとBについて、演算の結果 $A \cdot B = C$ はこの集合の要素である。
- (b)集合の任意の要素Aについて、 $A \cdot E = E \cdot A = A$ を満足する要素Eが、その集合の中に必ず1個存在する。Eは単位要素である。
- (c)集合の任意の要素について、結合の法則 $(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$ が成立する。
- (d)集合の任意の要素Aについて $X \cdot A = A \cdot X = E$ を成立させるXがその集合の要素として存在する。XはAの逆要素 $X = A^{-1}$ である。

対称操作の積

対称操作を2回連続して行った結果が、また1つの対称操作であるとき、これを対称操作の演算と考え、この演算を積という。



点群 C_{2v}

対称操作

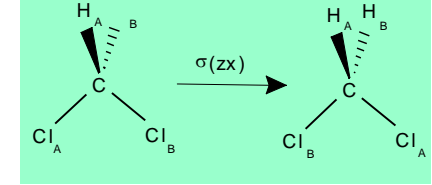
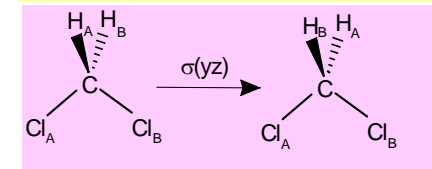
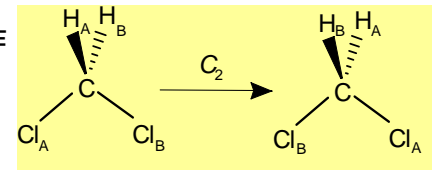
2回回転軸 C_2

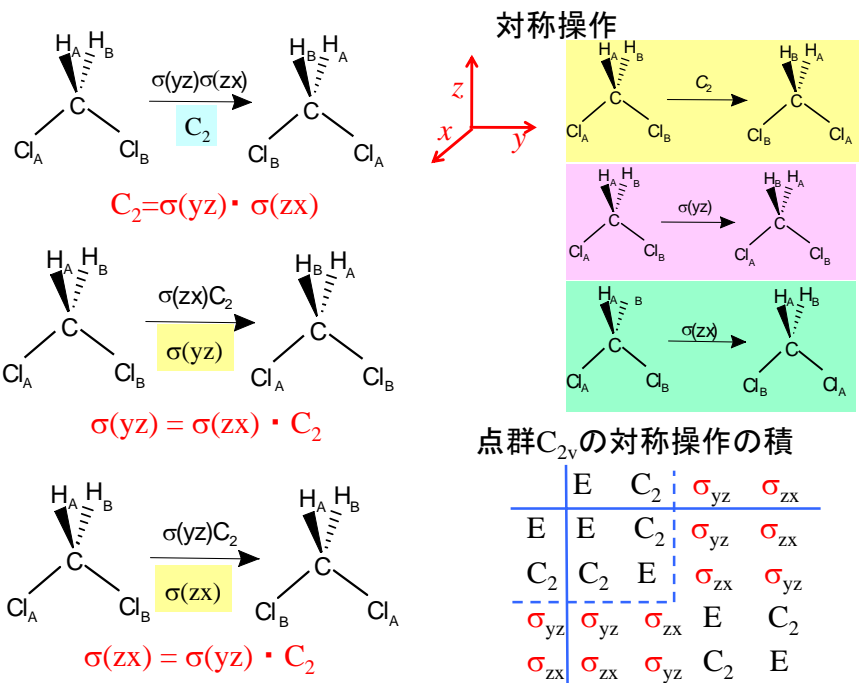
鏡面 $\sigma(yz)$

鏡面 $\sigma(zx)$

恒等 E

対称操作





点群 C_{2v} の対称操作の積

	E	C_2	σ_{yz}	σ_{zx}
E	E	C_2	σ_{yz}	σ_{zx}
C_2	C_2	E	σ_{zx}	σ_{yz}
σ_{yz}	σ_{yz}	σ_{zx}	E	C_2
σ_{zx}	σ_{zx}	σ_{yz}	C_2	E

要素の数 h を群の位数という. 分子の対称操作を要素とする群を点群という. 上の表から分かるように点群 C_{2v} は群である. 点群 C_{2v} の位数は4である. また, 上の表の点線は $\{E, C_2\}$ が別の点群 C_2 であることを示している. この場合, **点群 C_2 は点群 C_{2v} の部分群である**という.

点群 C_{3v} の対称操作と対称要素

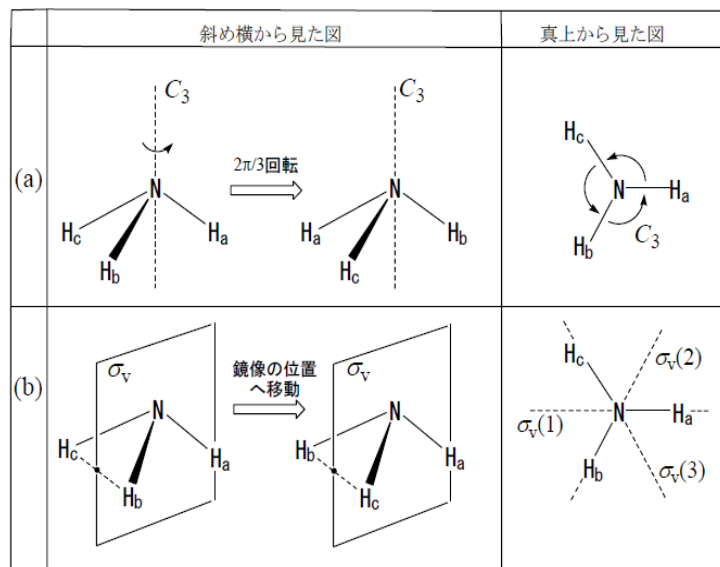
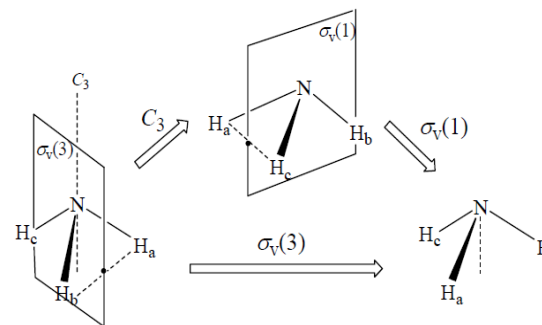


図7. 1. NH_3 の対称操作と対称要素. (a) 3回回転と3回回転軸、(b) 反射と対称面

点群 C_{3v} の対称操作の積



操作の順番が変わると結果は異なる.

$$\sigma_v(1) \cdot C_3 = \sigma_v(3)$$

$$C_3 \cdot \sigma_v(1) = \sigma_v(2)$$

C_3 回転を2回繰り返すと $120^\circ \times 2 = 240^\circ$ 回転する. これを C_3^2 とする.

$$C_3 \cdot C_3 = C_3^2$$

C_3 回転を3回繰り返すと $120^\circ \times 3 = 360^\circ$ 回転する. これを恒等操作 E とする.

$$C_3 \cdot (C_3 \cdot C_3) = C_3 \cdot C_3^2 = C_3^3 = E$$

表 3. C_{3v} の対称操作の積 ($B \cdot A$)

$B \backslash A$	E	C_3	C_3^2	$\sigma_v(1)$	$\sigma_v(2)$	$\sigma_v(3)$
E	E	C_3	C_3^2	$\sigma_v(1)$	$\sigma_v(2)$	$\sigma_v(3)$
C_3	C_3	C_3^2	E	$\sigma_v(2)$	$\sigma_v(3)$	$\sigma_v(1)$
C_3^2	C_3^2	E	C_3	$\sigma_v(3)$	$\sigma_v(1)$	$\sigma_v(2)$
$\sigma_v(1)$	$\sigma_v(1)$	$\sigma_v(3)$	$\sigma_v(2)$	E	C_3^2	C_3
$\sigma_v(2)$	$\sigma_v(2)$	$\sigma_v(1)$	$\sigma_v(3)$	C_3	E	C_3
$\sigma_v(3)$	$\sigma_v(3)$	$\sigma_v(2)$	$\sigma_v(1)$	C_3^2	C_3	E

点群 C_3 は点群 C_{3v} の部分群である。

6月27日, 学生番号, 氏名

(1) ある分子がキラルであるとはどういうことか説明せよ。

(2) ある分子がキラルであるための条件は何か説明せよ。ただし、「不斉炭素原子をもつこと」ではない。

(3) 本日の授業についての意見, 感想, 苦情, 改善提案などを書いてください。