

簡単に分子模型や結晶模型を 製作する研究

1. 紙で折り出す安価な方法

田 村 通 和

I 緒 言

化学の真髄を知ろうとする手段の1つに分子模型や結晶模型がある。分子模型は化合物や分子がどのような原子や官能基の配列で構成されているかを知る手段であり、また絶対構造を表示する最も直接的な方法でもある。

結晶模型も結晶の形と原子の配列との関係を知る手段として最も適した表示法である。

しかるに個人的な個々の問題として考えるとき、現在のそれらの模型は難解で高価な市販品が多く、自作も容易でなく、したがって、身近かなものでないものが多かった。

当然なことに教師自身や学生生徒の製作は無理が多かった。そこに知識の遅れがあるようにも見受けられる。このような難点を解決しようと計画し、試験的に開発した結果、ほぼ満足し得るものになったので、その概要について述べる。

II 製作材料および条件

製作材料はここでは紙を用いるものについて述べる。

通常使用されている筆記用の上質紙、折紙、半紙などが本文に示した大きさの模型には適するが模型の大きさを5倍大、10倍大、それ以上にするときには適当な厚さの紙にした方が曲がりにくいと言えよう。

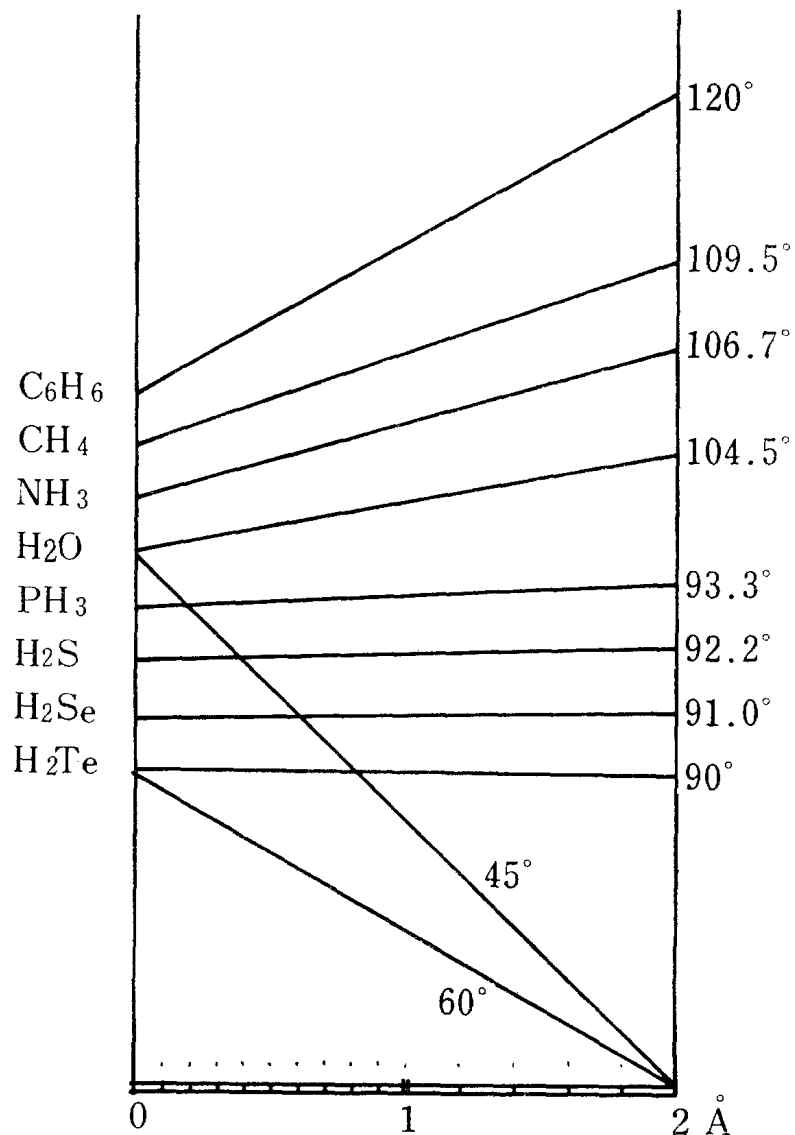
また、タバコの包装紙、買物の包装紙、千代紙、銀紙、ロウ紙、その他の紙加工紙の再利用により美術的なものにも出来るのである。その他の材料は適当な物を利用すればよいのである。

条件は図に示したように、折りダマと称する中心となった部分があり、方向と角（原子価角）を表示すると共に中心となる原子のタマを作り出すのである。通常、円を中心線で折って、数枚折り張り合わせて、1つの球を想像するものにするのであるが円板は少しでも折り曲げれば円ではないがその張り合わせによって球を連想し仮定することにする。

理論上の円まかは球にしたいときはあらかじめ相当するダ円形にしたものを張り合わせてタマをつくるべきである。

各元素によってタマの大きさは異なる。その大きさ、すなわち、直径はここでは各元素の原子半径を半径とした。

各元素のタマの色は適当であればよい。そのためにはその元素を想像するような代表的な色であればよいのであろう。明白な規則はないのである。したがって、好ましい色別について記した。



第 1 図

大きさはオングストローム単位が用いられている。 $1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-8} \text{ cm}$ である。原子や分子は目で見ることには現在ではまだ不可能で、電子顕微鏡でも巨大分子でさえ十分な映像は撮影されていない現状であるので当然、1億倍以上の解像力が必要となる。

分子模型は2億5000万倍の大きさに $1 \text{ \AA} = 2.5 \text{ cm}$ として作るのである。それでも小さいので教示用、その他にはその数倍～数10倍が使用される。著者は教師用として5倍と10倍大を使用している。

第1図は分子模型を製作および学習するために必要な原子価角および模型用A計である。いわゆる、分子模型メジャーとも言えよう。

第1表は代表的原子半径その他を記した例である。() 内に模型用の大きさを cm で表わしてある。

第2表は原子間距離の例である。

第3表は原子価角の例である。

第 1 表

原子番号	元素名	構造	原子半径 \AA	イオン半径 \AA	共有半径 \AA (四面体型)	金属半径 \AA (12配位)
1	H	H ₂ : A3	0.37(0.925)	0.00()		
2	He	単原子 A3A1A2	1.50(3.75)			
3	Li	A 2	1.52(3.8)	0.68(1.7)		1.57(3.925)
4	Be	3 A	1.13(2.825)	0.33(0.825)	1.06(2.65)	1.12(2.8)
5	B	三方, 正方	0.90(2.25)	0.21(0.525)	0.88(2.2)	
6	C	黒鉛 ダイヤモンド	0.71(1.775) 0.77(1.925)	0.15(0.375) 1.60(4.0)	0.77(1.925)	
7	N	A 1	0.53(1.325)	1.40(3.5)	0.70(1.75)	
8	O	立方, 六方	0.61(1.525)	1.40(3.5)	0.66(1.65)	
9	F		0.71(1.775)	1.36(3.4)	0.64(1.6)	
10	Ne	A 1	1.59(3.975)			
11	Na	A 2	1.86(4.65)	0.97(2.425)	1.54(3.85)	1.91(4.775)
12	Mg	A 3	1.60(4.0)	0.66(1.65)	1.40(3.5)	1.60(4.0)
13	Al	A 1	1.43(3.575)	0.51(1.275)	1.26(3.15)	1.43(3.575)
14	Si	A 4	1.17(2.925)		1.17(2.925)	
15	P	黒 [3]	1.09(2.725)		1.10(2.75)	
16	S	単斜	1.02(2.55)	1.85(4.625)	1.04(2.6)	

原子 番号	元素名	構造	原子半径 Å	イオン半径 Å	共有半径 Å (四面体型)	金属半径 Å (12配位)
17	Cl	A14	1.01(2.525)	1.81(4.525)	0.99(2.475)	
18	Ar	A1	1.91(4.775)			
19	K	A2	2.26(5.65)	1.33(3.325)		2.35(5.875)
20	Ca	A1	1.97(4.925)	0.99(2.475)		1.97(4.925)
21	Sc	A3	1.65(4.125)			1.64(4.0)
22	Ti	A3	1.47(3.675)			1.47(3.675)
23	V	A2	1.25(3.125)			1.35(3.375)
24	Cr	A2	1.25(3.125)			1.29(3.225)
25	Mn	A1	1.3(3.25)	0.80(2.0)		1.37(3.425)
26	Fe	A2	1.24(3.1)	0.64(1.6)		1.26(3.15)
27	Co	A3	1.25(3.125)	0.72(1.8)		1.25(3.125)
28	Ni	A1		0.69(1.725)		1.25(3.125)
29	Cu	A1	1.28(3.2)	0.72(1.8)	1.35(3.375)	1.28(3.2)
30	Zn	A3	1.33(3.325) 1.48(3.7)	0.74(1.85)	1.31(3.275)	1.37(3.425)
31	Ga	Ga ₂ 〔7〕	1.24(3.1) 1.38(3.45)	0.62(1.55)	1.26(3.15)	1.53(3.825)
32	Ge	A4	1.23(3.075)	0.53(1.325)	1.22(3.05)	
33	As	A7	1.25(3.125)		1.18(2.95)	
34	Se	A8	1.16(2.9)	2.00(5.0)	1.14(2.85)	
35	Br	A14	1.14(2.85)	1.96(4.9)	1.11(2.775)	
36	Kr	A1	2.01(5.025)			
37	Rd	A2	2.44(6.1)	1.52(3.8)		2.50(5.25)
38	Sr	A1	2.15(5.375)	1.16(2.9)		2.15(5.375)
39	Y	A3	1.82(4.55)	0.92(2.3)		1.82(4.55)
40	Zr	A3	1.62(4.05)	0.76(1.975)		1.60(4.0)
41	Nb	A2	1.43(3.575)	0.69(1.725)		1.47(3.675)
42	Mo	A2	1.36(3.4)	0.62(1.55)		1.40(3.5)
43	Tc	A3	1.35(3.375)			1.35(3.375)
44	Ru	A3	1.33(3.325)	0.67(1.675)		1.34(3.35)
45	Rh			0.68(1.7)		1.34(3.35)
46	Pd			0.80(2.0)		1.37(3.425)
47	Ag	A1	1.44(3.6)	0.97(2.425)	1.52(3.8)	1.44(3.6)
48	Cd	A3	1.49(3.725) 1.66(4.15)	0.97(2.425)	1.48(3.7)	1.52(3.8)

表2-1 共有結合 [\AA], (cm)
() 内は模型用 cm 換算値

分子	結合	距離 \AA (cm)
H ₂	H—H	0.741 (1.85)
O ₂	O=O	1.207 (3.02)
N ₂	N≡N	1.098 (2.75)
F ₂	F—F	1.417 (3.54)
Cl ₂	Cl—Cl	1.988 (4.97)
I ₂	I—I	2.667 (6.67)
Br ₂	Br—Br	2.284 (5.71)
H ₂ O	O—H	0.957 (2.39)
HCl	H—Cl	1.275 (3.19)
HBr	Br—H	1.414 (3.54)
HI	I—H	1.609 (4.02)
PH	P—H	1.433 (3.58)
PH ₃	P—H	1.415 (3.54)
H ₂ S	S—H	1.328 (3.32)
SH	S—H	1.341 (3.35)
CO	C=O	1.128 (2.82)
CO ₂	C=O	1.160 (2.9)
NO ₂	N—O	1.20 (3.0)
NO	N=O	1.151 (2.88)
N ₂ O	N=O	1.184 (2.96)
NH ₃	N—H	1.012 (2.53)

表2-2 イオン結合 [\AA], (cm)

分子	結合	距離 \AA (cm)
LiCl	Li—Cl	2.021 (5.05)
NaF	Na—F	1.926 (4.82)
NaCl	Na—Cl	2.361 (5.90)
NaBr	Na—Br	2.502 (6.26)
KCl	K—Cl	2.667 (6.67)
KBr	K—Br	2.821 (7.05)
MgO	Mg—O	1.749 (4.37)
CaO	Ca—O	1.822 (4.56)

表2-3 金属結合 [\AA], (cm)

金属	結合	距離 \AA (cm)
Ag	Ag—Ag	2.889 (7.22)
Al	Al—Al	2.863 (7.16)
Au	Au—Au	2.884 (7.21)
Ca	Ca—Ca	3.947 (9.87)
Cu	Cu—Cu	2.556 (6.39)
Fe	Fe—Fe	2.482 (6.21)
Hg	Hg—Hg	3.005 (7.51)
Na	Na—Na	3.716 (9.25)
Pb	Pb—Pb	3.500 (8.75)
Zn	Zn—Zn	2.665 (6.66)

表 2-4 有機化合物

分子	結合	距離 Å (cm)	
C-X	C-Br	1.94 (4.85)	
	C-Cl	1.78 (4.45)	
	C-F	1.38 (3.45)	
	C-H	1.10 (2.75)	
	C-I	2.14 (5.35)	
	C-N	1.47 (3.68)	
	C-O	1.43 (3.58)	
	C=O	1.20 (3.0)	
	C-S	1.82 (4.55)	
	C=S	1.61 (4.03)	
	C-Si	1.86 (4.65)	
	芳香環	C-C	1.347 (3.37)
		C-Cl	1.71 (4.28)
C-H		1.085 (2.71)	
C-N		1.43 (3.58)	
C-O		1.36 (3.4)	
炭素間	C-C	1.299+0.04n	
	C=C	1.226+0.028n	
	C≡C	1.207 (3.02)	

表 3-1 原子価角

分子	結合	原子価角
CH ₄	∠HCH	109.5°
SiH ₄	∠HSiH	109.5°
GeH ₄	∠HGeH	109.5°
SnH ₄	∠HSnH	109.5°
PbH ₄	∠HPbH	109.5°
NH ₃	∠HNH	106.7°
PH ₃	∠HPH	93.3°
AsH ₃	∠HAsH	91.8°
SbH ₃	∠HSbH	91.3°
H ₂ O	∠HOH	104.5°
H ₂ S	∠HSH	92.2°
H ₂ Se	∠HSeH	91.0°
H ₂ Te	∠HTeH	90.0°
O ₃	∠OOO	116.8°
O ₂ S	∠OSO	120°
HgI ₂	∠IHgI	180°
O ₂ N	∠ONO	134.3°
H ₂ O ₂	∠OOH	94.8°
S ₈	∠SSS	105°

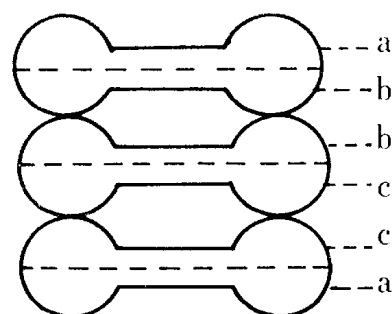
Ⅲ 分子模型製作の方法

著者の方法に従った、あらゆる分子模型について説明することは不可能であるので、ここではその基本ともいべき初歩的な模型について説明する。図はすべて切り抜いて、その模型を製作して欲しい。

① 水素 H₂

原子半径は0.37Å (模型円直径: 0.925cm),
原子間距離は0.74Å (ボンドの長さ: 1.85cm)。

先ず、ハサミで第2図を切り抜き、点線に従って、120°谷に折る、裏面にノリまたは接着剤をつけて、張り合わせる (a と a', b と b',



第 2 図

c と c' を合わせてつける), 水素のタマを水色 (淡青色) に着色し, ボンド (結合手) を白色とすれば出来る。

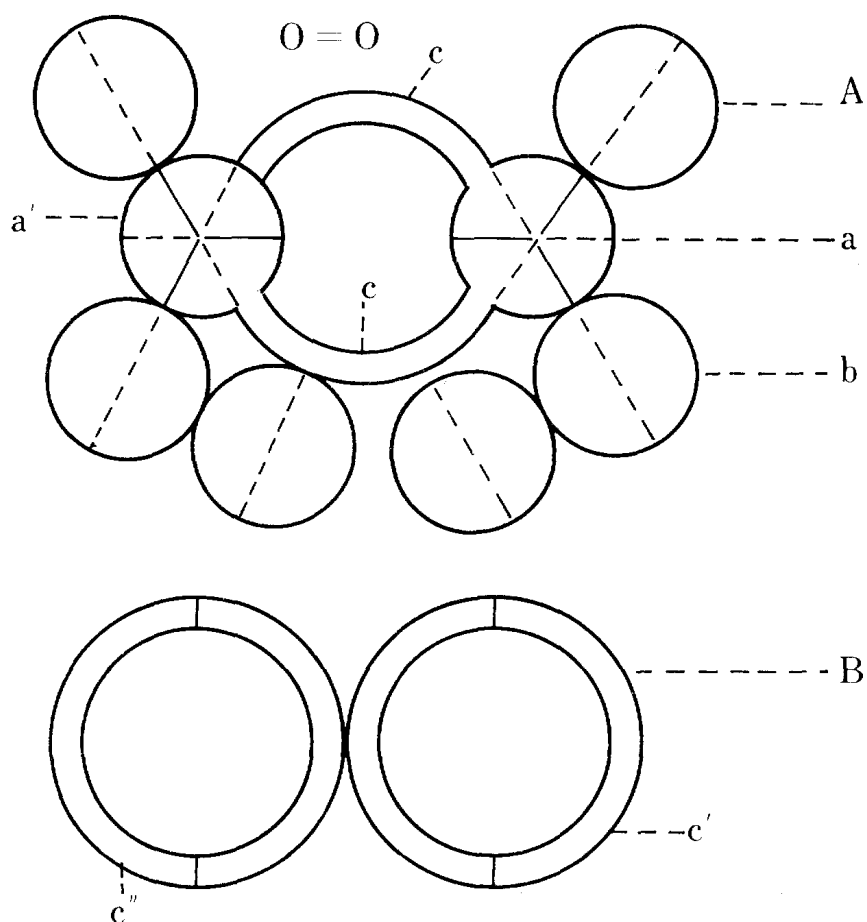
H—H は直線で結合した H_2 である

分子の模型で最も小さいことが他の模型と比較すればよく理解されよう。

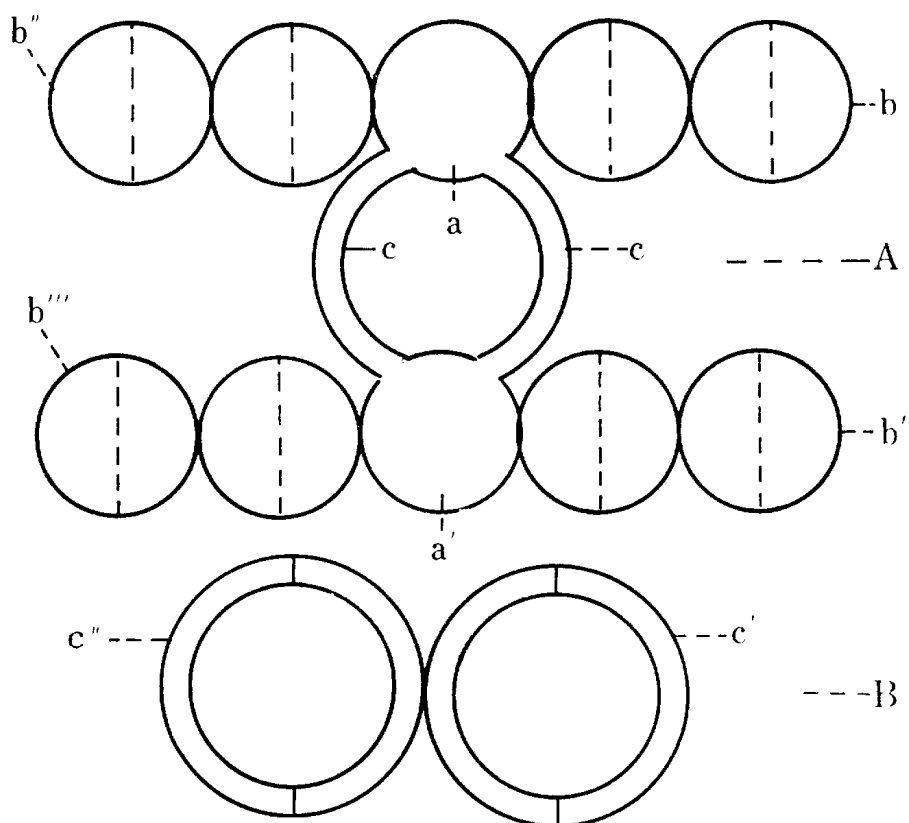
④ 酸素 O_2

原子半径は 0.61\AA (模型円直径: 1.525cm), 原子間距離は 1.21\AA (ボンドの長さ: 3.07cm)。

第3図はエチレン型結合であって, A図において a は折りダマで, 先ず A および B 図ともに切り抜き, c の二重結合の部分をも B の輪を c' と c'' で表裏ともにノリで張り合わせて, c を補強する。次ぎに a の点線を谷に折り, 実線を山に折る。さらに b の円板を点線で谷に折り 120° くらい曲げ, a の実線に合わせて山に折り重ねる, 3枚とも同様に重ねるとタマができる。裏面をノリでつけて, 円板が3枚, Y字状に張り合わさって, 1つの



第 3 図



第 4 図

タマをつくる。他も同様に張り合わせると出来上がる。

酸素のタマをうすい赤またはオレンジ色に着色する。ボンドは白色または紅色に着色する。

第4図は平面型であって、A図のaは折らないでそのままである。AおよびB図とも切り抜いて、先ず、Bの輪をcに重ねて表裏ともにノリで張り合わせる。次ぎにAのb~b''の円板を点線で90°谷に折り、十字型に組み合わせ、ノリで付ける。他のタマも同様にして出来上げる。

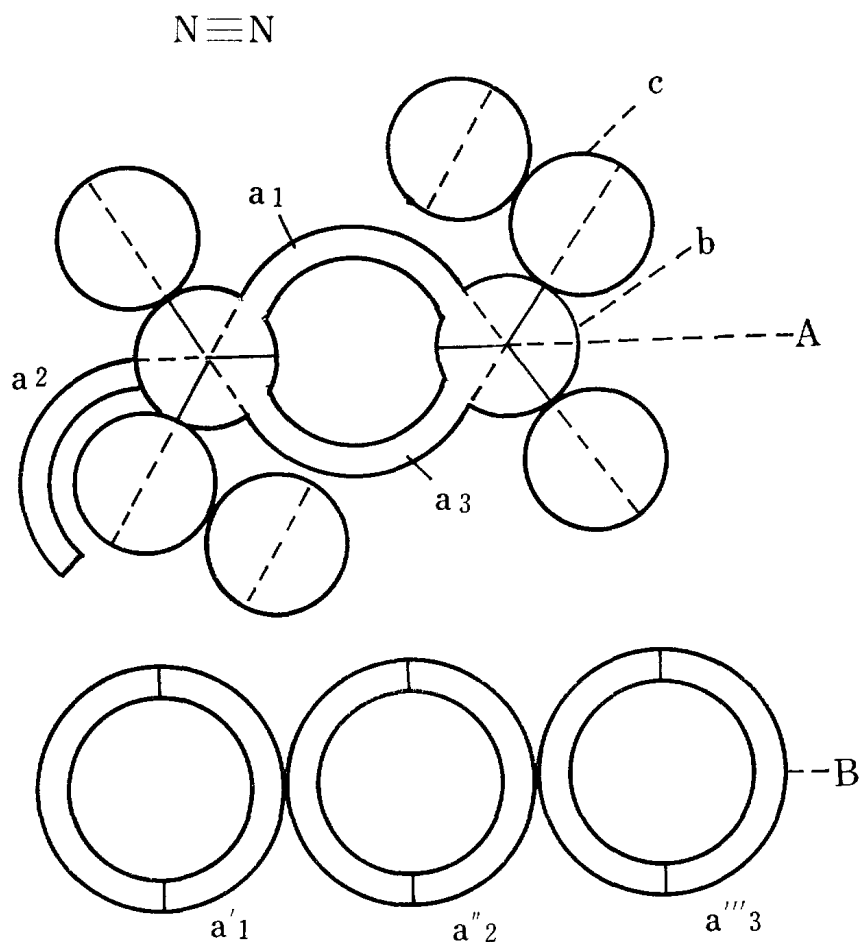
エチレン型と同様に着色する。

④ 窒素 N_2

原子半径は 0.52\AA (模型円直径: 1.325cm)、原子間距離は 1.10\AA (ボンドの長さ: 2.75cm)

第5図はその模型の展開図である。A、Bともに切り抜き、先ず、A図の折りタマを点線は谷に折り、実線は山に折る。三重結合が折り出せたので、Bの輪で補強し、固定する。手順写真を見て、組み立てる。

窒素のタマを青または青紫あるいは黄土色または茶色に着色する、ボンドは白色または紅色に着色すると出来上がる。



第 5 図

⊖ 水 H_2O

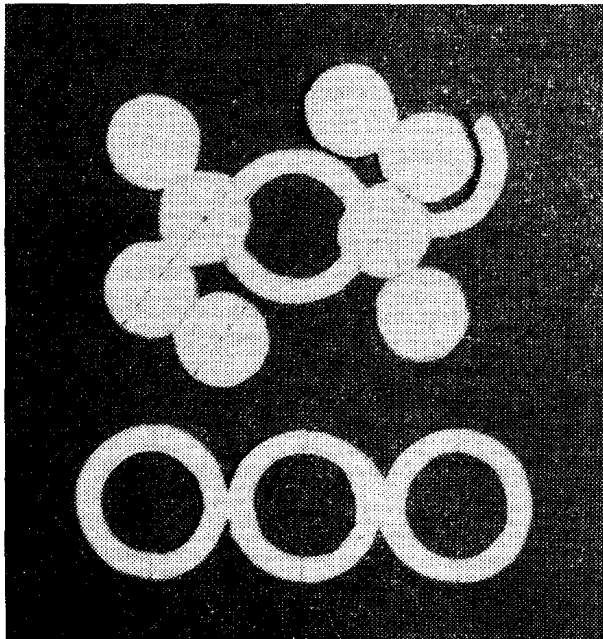
原子価角 104.5°

原子半径 OおよびHと同様,

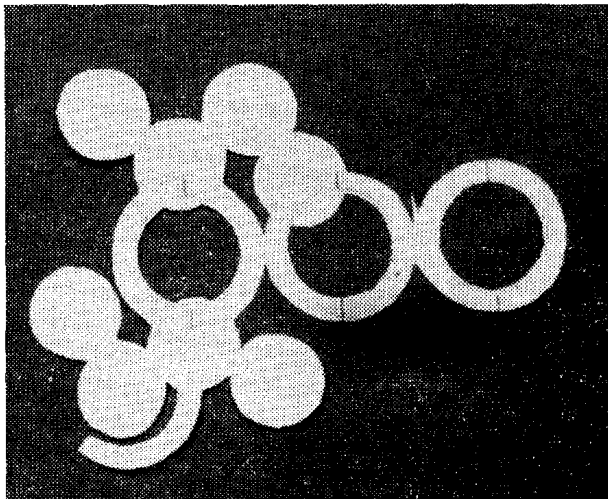
原子間距離 O-H 0.957\AA (ボンドの長さ 2.3925cm)

第7図は H-O-H が平面上に並ぶようになった図であって、折りダマは8つ折りである。AおよびB図ともに切り抜いて、先ずA図を組み立てる。点線は谷に折り、実線は山に折る。Bも同様に折る。Aをノリ付けする前にBでAのボンドおよび水素のタマをノリで張り合わせ、ついで折りダマおよび酸素のタマをノリ付けする。第1図のメジャーの 104.5° の線に合わせて H-O-H の開きを決めノリ付けする。

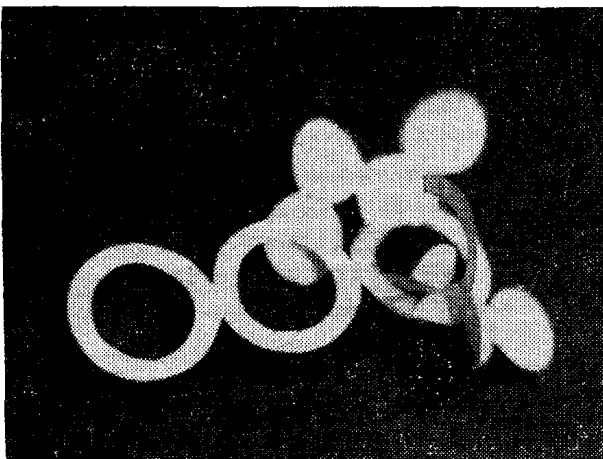
着色は酸素および水素の項を見ること。



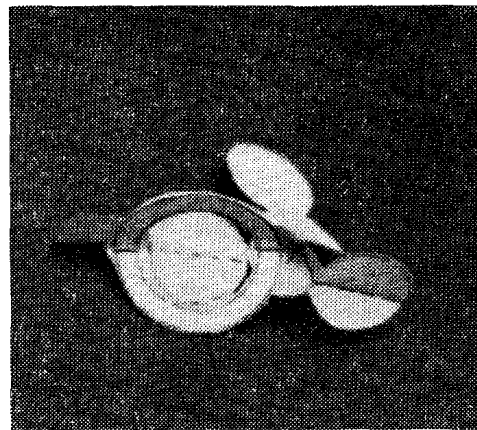
① 切り抜き



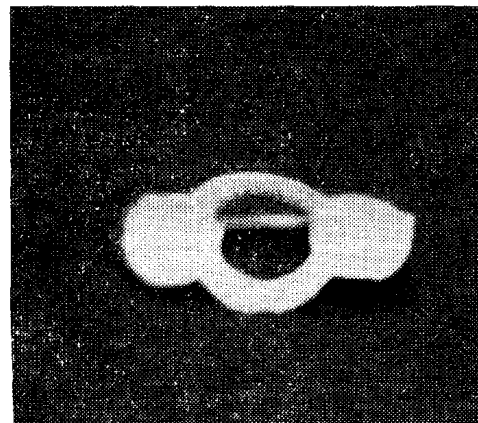
② 裏面に輪をはる



③ 表面にし三重結合のタマを折る

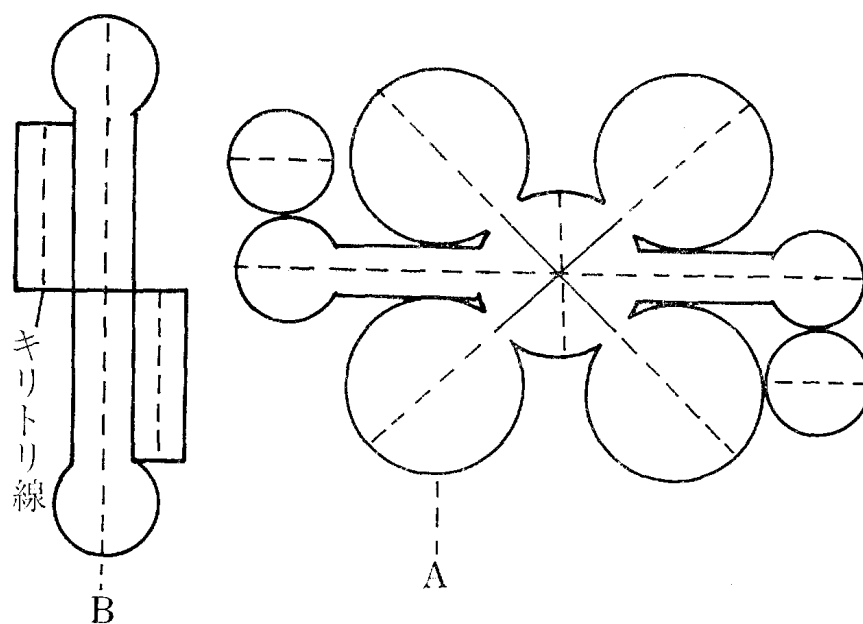


④ 三番目の輪をはるため
タマを輪の中に入れたと
ころ



⑤ 出来上がったところ

第 6 図



第 7 図

④ メタン CH_4

炭素の原子半径は 0.77\AA (模型円直径: 1.925cm),

原子間距離は 1.085\AA (ボンドの長さ: 2.7125cm),

原子価角 109.5°

第8図はその模型である。図を切り抜き、点線は谷に折り、実線は山に折る。③の水の組み立てにならって、Bを張り合わせて、各ボンドおよび水素のタマをつくる。次ぎに折りダマを折って、炭素のタマを重ね合わせて、ノリ付けすると出来上がる。

原子価角 109.5° をメジャーに合わせて、ノリ付け固定する。

炭素のタマは黒色に、水素のタマは水色に着色する。

次ぎにメタンの誘導体について、そのハロゲン原子のタマを作る。各4個以上つくと学習に便利である。

第9図にその例を示した。Aはフッ素，Bは塩素，Cは臭素，Dはヨウ素の模型である。

原子間距離は表2.4に示してある。

㊦ エタン C_2H_6

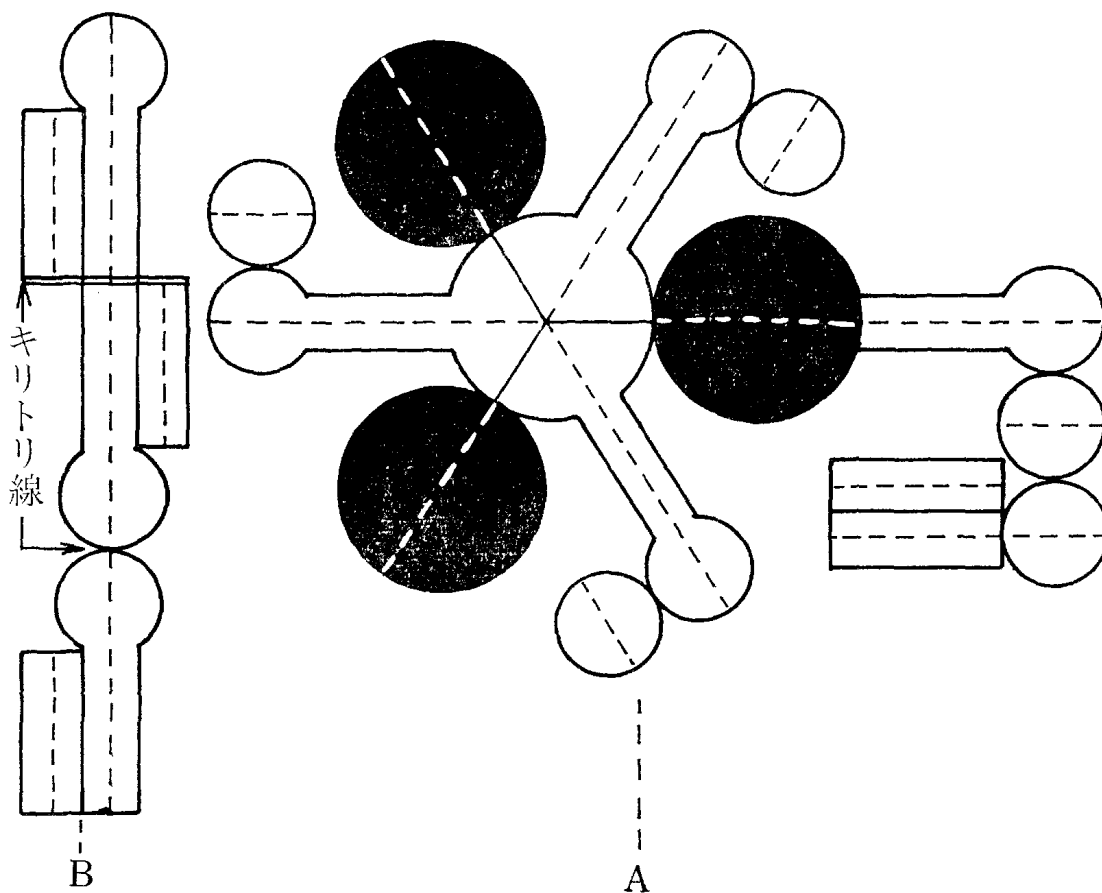
C-C 原子間距離 1.536\AA ， C-H 原子間距離 1.092\AA (ボンドの長さ C-C : 3.84cm ， C-H : 2.73cm)， 原子価角 107.9°

第10図はその模型である。

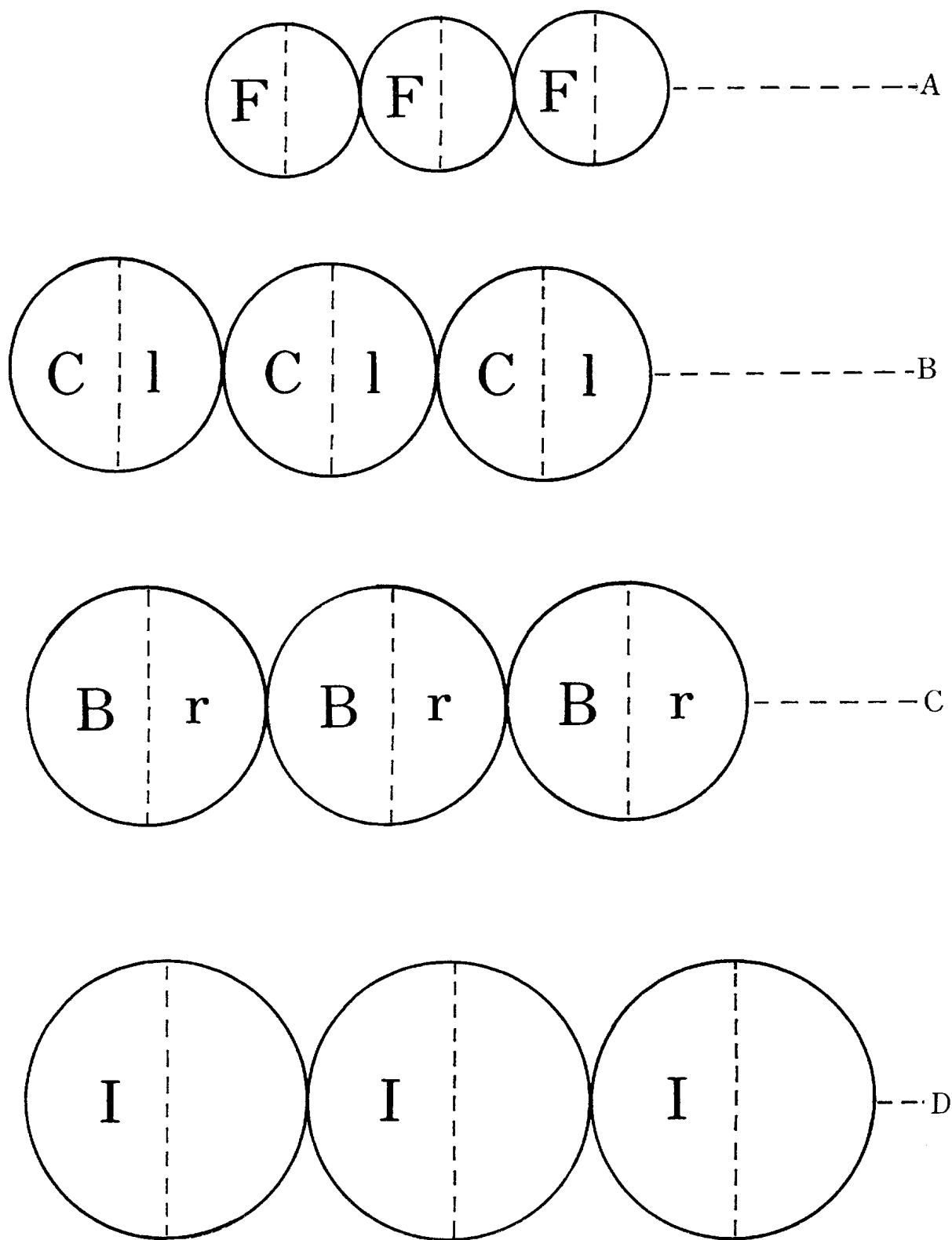
㊦と同様につくる。

㊧ エチレン C_2H_4

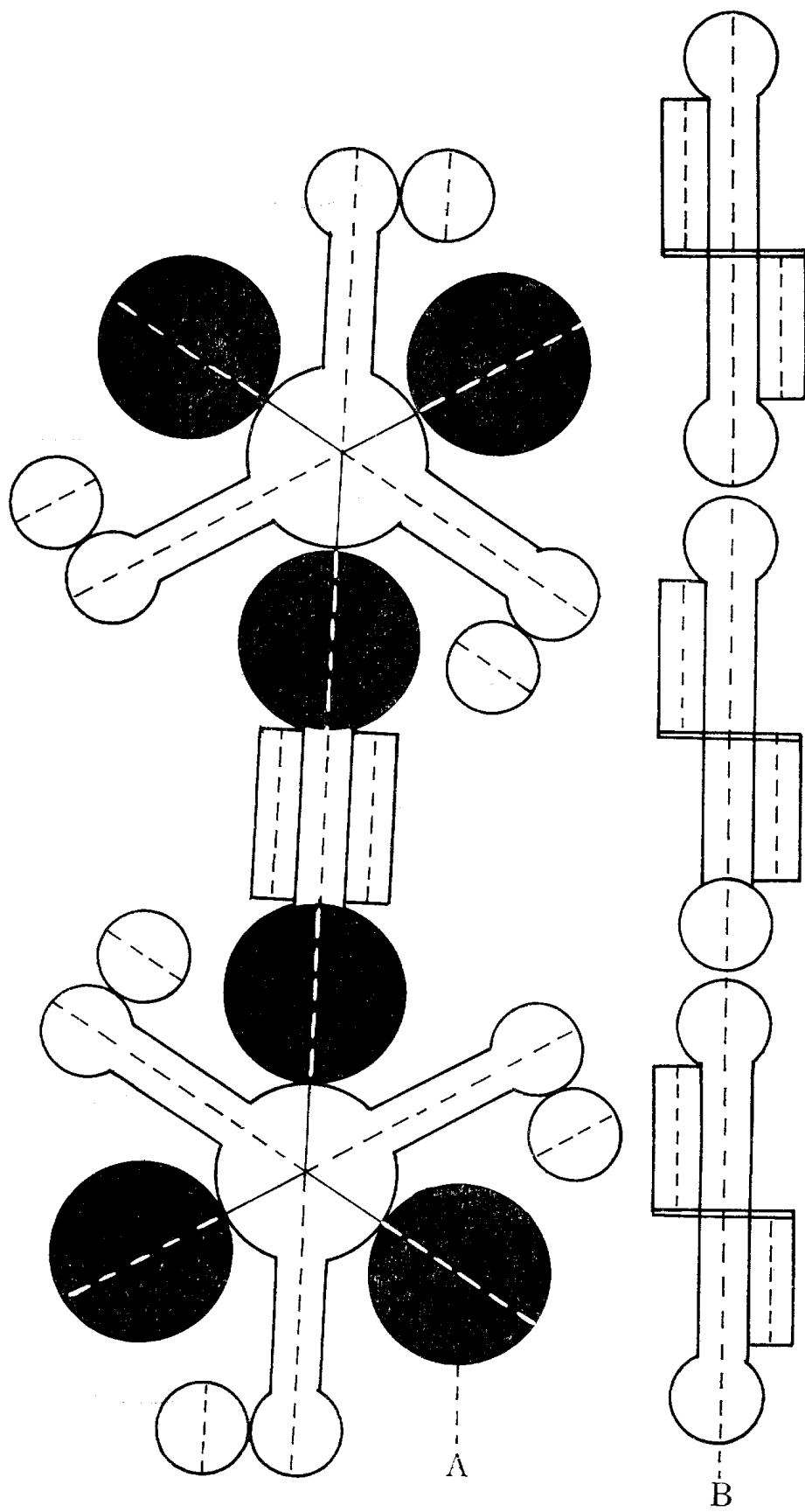
第11図はその模型の展開図であって， C-C 原子間距離 1.338\AA ， C-H 原子間距離 1.086\AA ， HCH 117.5° である。㊦と同様につくる。



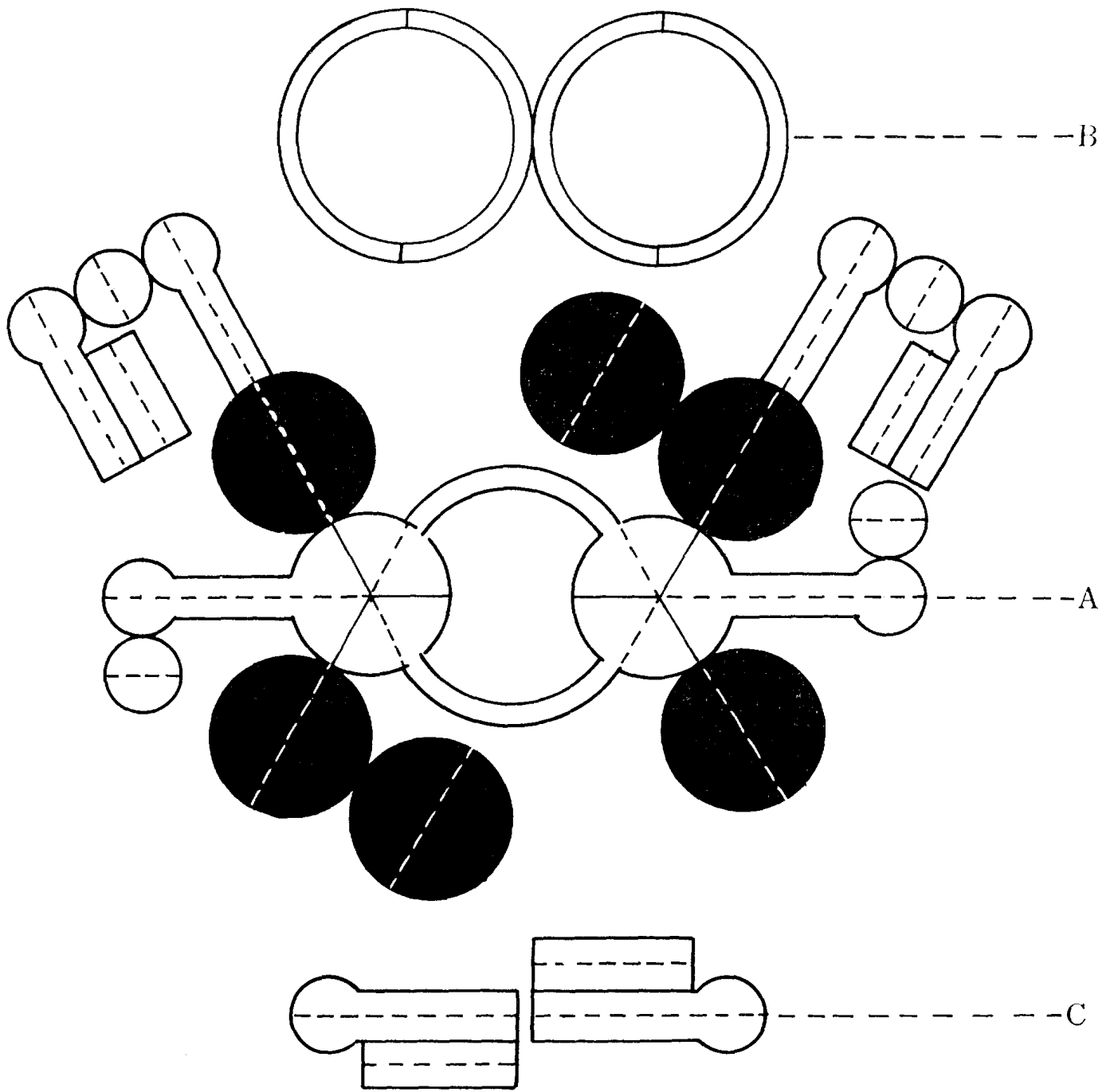
第 8 図



第 9 図



第 1 0 图



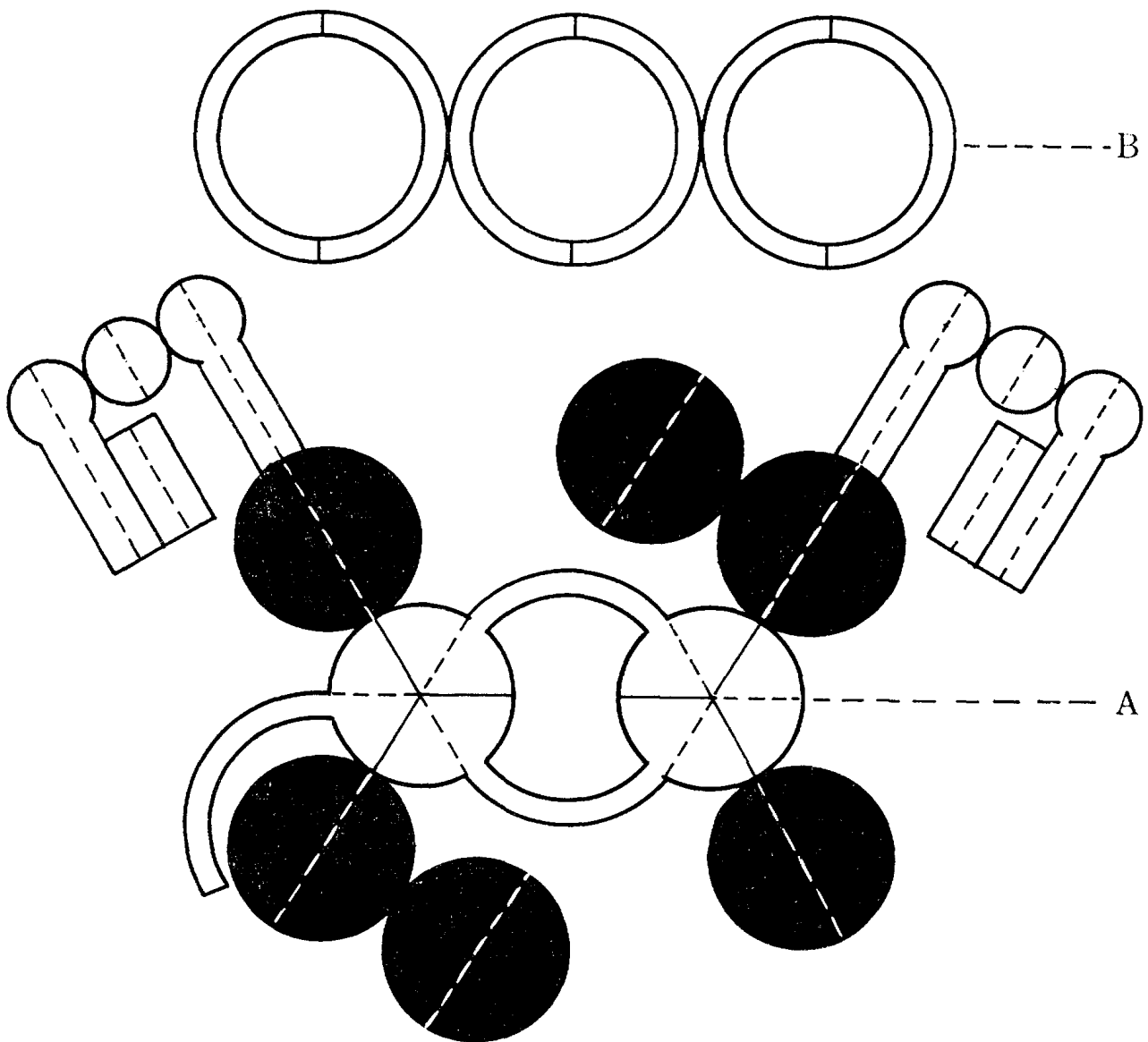
第 1 1 図

㊦ アセチレン C_2H_2

C-C 原子間距離 1.203\AA , C-H 原子間距離 1.060\AA である。第12図はその模型の展開図である。㊦と同様につくる。㊦および第6図を参照すること。

㊧ ベンゼン C_6H_6

C-H 原子間距離 1.084\AA , C-C 原子間距離 1.397\AA , 原子価角 120° である。



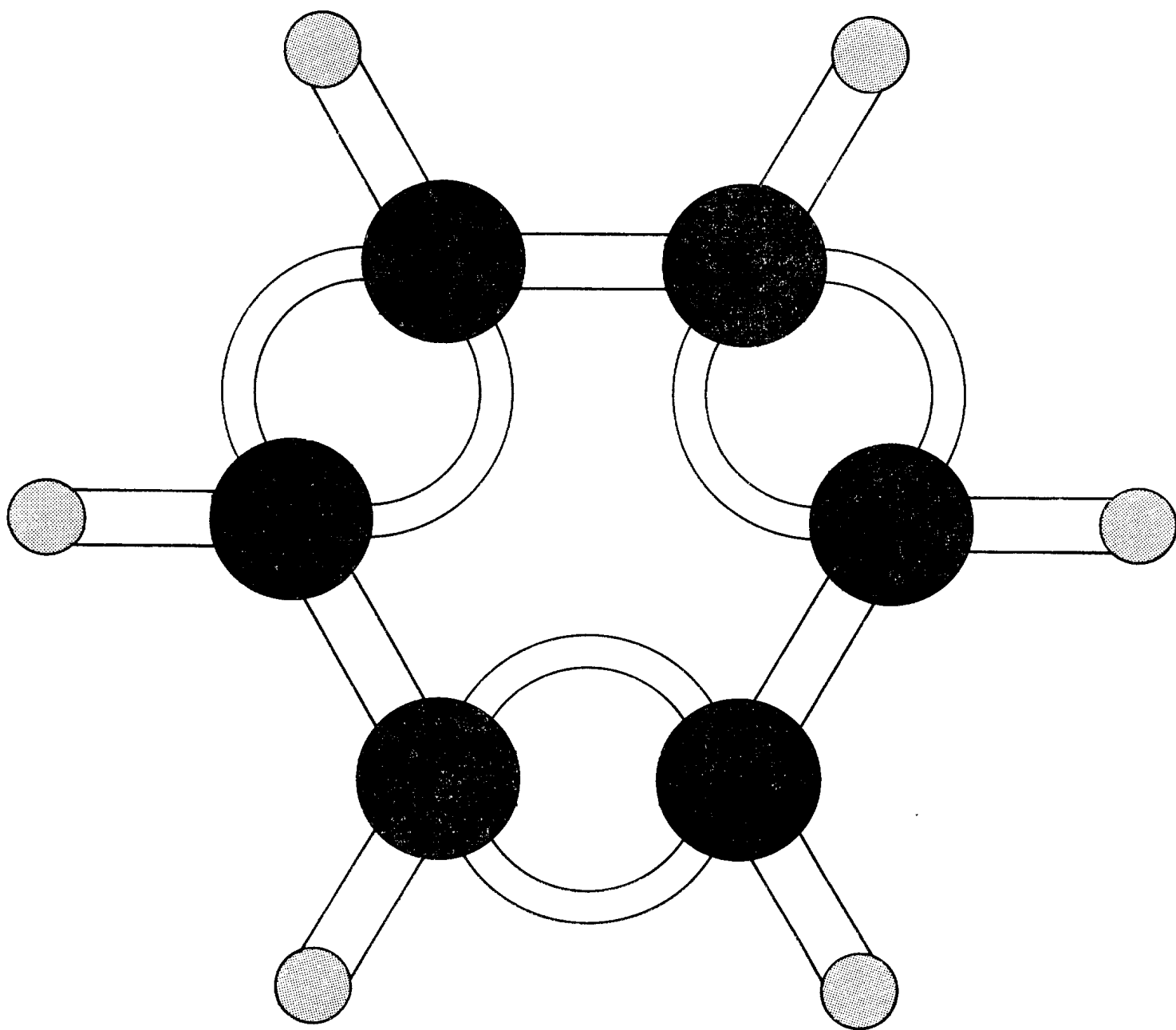
第 1 2 図

第13図はその例である。その他に各種の様式が考えられる。

⑧ ダイヤモンド型結晶構造模型

ダイヤモンド (A 4) は正四面体型 4 配位の巨大分子で一辺の長さ 3.566\AA (8.9cm) の方向性のある立体格子である。

模型では C-C 原子間距離約 3.9cm の第14図のような展開図を組み立て、立方格子に入れると出来上がる。しかし、第14図の展開図はその 1 例であって、その他種々の型が出来る。第15図を参照せよ。



第 1 3 図

IV 考 案

19世紀に化学結晶学，結晶化学が確立され，また原子論の唱えられてから分子構造もますます研究され，今日に及んでいる。

物質の構造の解明にX線回析，赤外線スペクトル，その他の研究により，それぞれの特徴を把握して構造を決めるのであるが，分子構造の絶対構造決定には分子模型による直接的方法は必要である。

したがって，本研究は分子構造決定法の一手段でもあり，また立体化学の平面的解析法とも言うべきものであって，結晶構造模型や分子構造模型の有意義性を強調し，その観察は不可避なものと言える。

しかし模型という一般的概念はオモチャを連想するので軽蔑される向きもあるが，このことばのイメージを持つのが悪いのであって，本質的にはその意味が異なっていることに気付かれたことと思う。

本来は専門家の研究用の道具であったが化学知識の普及に従って，その理解を深める上に役立つようになった。

従来より各種の方法による模型の形態があり，それぞれ特徴を有する。しかし緒言にも述べたように若干の難点のあるものが多かった。それらを全く無視することはよくない，したがって比較検討を試みるべきである。

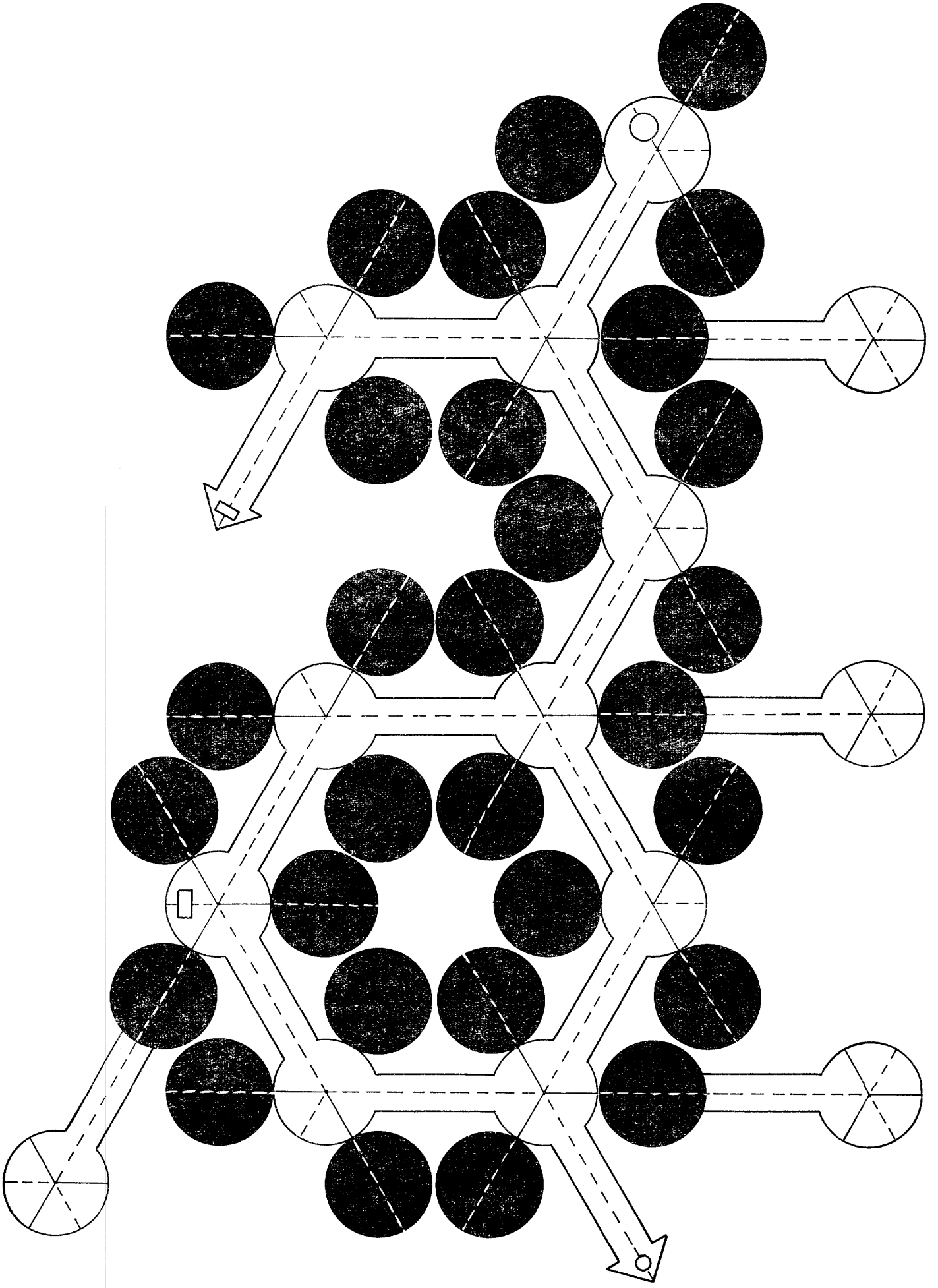
さて分子構造には achiral または non-dissymmetric なものと chiral または dissymmetric なものとに分けられている。

この achiral なものと chiral なものとを比較し，分子構造を理解し，その性質の相違点を学習すればその成果は多大である。

原子の配列や誘導体，化合物，化学反応などについて，立体化学的に説明をすることやその学習に，研究にその効果を期待できよう。

出来上がった模型は鏡にうつしてみることがその分子に鏡映対称の存否を知る手段である。

著者の方法は紙，強化織物，布，キレ，プラスチックシート，金属板，板，シート状物などを使用する折り紙式の方法で，折りダマ（これが絶対必要とはしない）を用いる方法である。この折りダマは方向と角度，原子



第 1 4 图

のタマを決めるのに都合がよいものである。

一般に従来の既製品のタマは球状または八面体などの外観からきたものが用いられている。この想定と方法を打破したのが著者の方法として出来たのである。

原子は球を想定してきた、したがって、それを連想するような形として、ある角度に曲げた円板のY字状または十字状、その他の形状で数枚重ね合わせて、タマを構成したものである。

このような作業は誰でも容易に出来るのであり、材料の購入など考慮するほどではない。しかし、各模型の作図や構成など印刷で量的に出来るので学生生徒の学習にも容易である。

化学的知識の普及のみならず、意匠、美術、工芸、装飾、造形造花飾、着物や表紙の模様や柄、その他に用いることも考えられる。

また軽いので風や熱その他の力を利用した飾り物とすることも学習の一助となる。

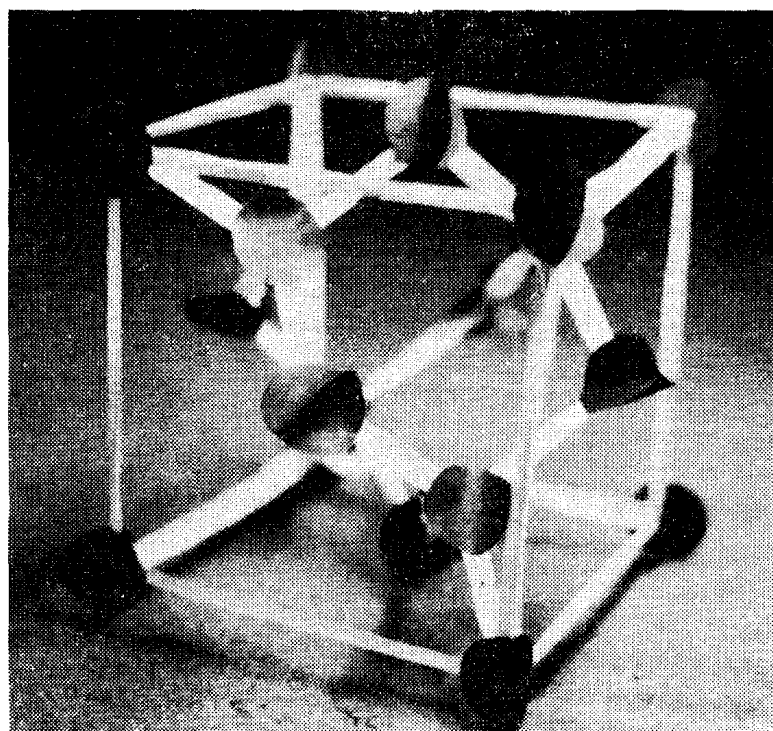
V 結 語

新しく分子模型および結晶模型を折り出す方法を研究した。

1. 平面的に展開した各模型図から簡単に立体的各模型を組み立てることが出来る。
2. 紙など安価な材料を用いるので学習の場で困難な事態は少ない。
3. 美芸的要素を付加し、創意工夫により、多くの作品が作れ、化学本位より脱した利点を加えたので一般にも利用できるようにした。
4. 絶対構造研究やその表示法、研究モデル製作に役立つように留意した。
5. 立体化学構造の平面展開法を案出した。
6. 模様として新しいものを開発した。

文 献

1. 日本化学会編；化学便覧，基礎編Ⅱ，11.14 分子内原子配置 1379，12.1 結晶構造 1411，50/6，丸善.
2. 結晶工業ハンドブック編集委員会編；結晶工業ハンドブック，46/5，共立出版.
3. 中崎昌雄；分子のかたちと対称，48/10，南江堂.
4. R. B. Heslop & P. L. Robinson; *Inorganic Chem.* 187., 43/9, ELSEVIER. P. C. 丸善.
5. L. F. Fieser & M. Fieser; *Advanced Organic Chem.*, 25, 40/ Reinhold. Pub. Corp. 丸善.
6. Walter J. Moore; *Physical Chem.*, 645, 41/5, Prentice-Hall, INC. 丸善.
7. Linus Pauling & Roger Hayward; 木村健二郎／大谷寛治訳；分子の造型，50/6，丸善.



第15図 ダイヤモンド結晶模型完成図