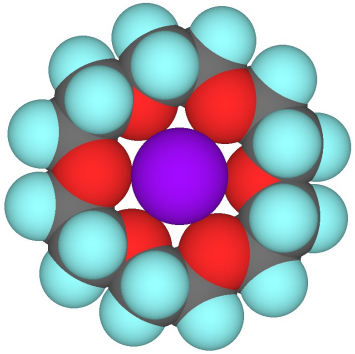
分子のかたちと集合：
分子から超分子へ

私たちの身の回りは、分子(有機化合物)で溢れています。様々な分子たちが私たちの生活に役立っています。私たち体も分子からできています。

分子は2次元・3次元的なかたち(構造)をもって、その個性を発揮します。

また、**分子は弱い力で集まったとき、新たな性質を発揮する**場合があります。

この講演では、**分子がかたちをつくる仕組み**と、**分子が集合する仕組み**と、**分子の集合体(超分子)**について紹介します。



サイエンスカフェ　2018年4月26日

静岡大学理学部化学科　小林健二

URL: https://sites.google.com/view/shizuoka-chem-kobayashi

分子のセントラルドグマ

物理 → **化学** → 生物

原子核 → 原子・**電子** → **混成軌道とパイ軌道**

→ **共有結合（シグマ結合とパイ結合）**

→ **分子** → **3次元立体構造**

→ 水素結合やファンデルワールス力などの
分子間相互作用による分子の集合・組織化

→ 生命体

元素の周期表
The Periodic Table

周期＼族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素 Hydrogen 1.00798																	2 He ヘリウム Helium 4.0026
2	3 Li リチウム Lithium 6.968	4 Be ベリリウム Beryllium 9.01218											5 B 硼(ホウ)素 Boron 10.814	6 C 炭素 Carbon 12.0628	7 N 窒素 Nitrogen 14.0069	8 O 酸素 Oxygen 15.9994	9 F 弗(フッ)素 Fluorine 18.9984	10 Ne ネオン Neon 20.1797
3	11 Na ナトリウム Sodium 22.9898	12 Mg マグネシウム Magnesium 24.306											13 Al アルミニウム Aluminum 26.9815	14 Si 珪(ケイ)素 Silicon 28.085	15 P 燐(リン) Phosphorus 30.9738	16 S 硫黄 Sulfur 32.068	17 Cl 塩素 Chlorine 35.452	18 Ar アルゴン Argon 39.948
4	19 K カリウム Potassium 39.0983	20 Ca カルシウム Calcium 40.078	21 Sc スカンジウム Scandium 44.9559	22 Ti チタン Titanium 47.867	23 V バナジウム Vanadium 50.9415	24 Cr クロム Chromium 51.9961	25 Mn マンガン Manganese 54.938	26 Fe 鉄 Iron 55.845	27 Co コバルト Cobalt 58.9332	28 Ni ニッケル Nickel 58.6934	29 Cu 銅 Copper 63.546	30 Zn 亜鉛 Zinc 65.38	31 Ga ガリウム Gallium 69.723	32 Ge ゲルマニウム Germanium 72.630	33 As 砒(ヒ)素 Arsenic 74.9216	34 Se セレン Selenium 78.971	35 Br 臭素 Bromine 79.904	36 Kr クリプトン Krypton 83.798
5	37 Rb ルビジウム Rubidium 85.4678	38 Sr ストロンチウム Strontium 87.62	39 Y イットリウム Yttrium 88.9058	40 Zr ジルコニウム Zirconium 91.224	41 Nb ニオブ Niobium 92.9064	42 Mo モリブデン Molybdenum 95.95	43 Tc テクネチウム Technetium [99]	44 Ru ルテニウム Ruthenium 101.07	45 Rh ロジウム Rhodium 102.906	46 Pd パラジウム Palladium 106.42	47 Ag 銀 Silver 107.868	48 Cd カドミウム Cadmium 112.414	49 In インジウム Indium 114.818	50 Sn 錫(スズ) Tin 118.710	51 Sb アンチモン Antimony 121.760	52 Te テルル Tellurium 127.60	53 I 沃(ヨウ)素 Iodine 126.904	54 Xe キセノン Xenon 131.293
6	55 Cs セシウム Cesium 132.905	56 Ba バリウム Barium 137.327	※1	72 Hf ハフニウム Hafnium 178.49	73 Ta タンタル Tantalum 180.948	74 W タングステン Tungsten 183.84	75 Re レニウム Rhenium 186.207	76 Os オスミウム Osmium 190.23	77 Ir イリジウム Iridium 192.217	78 Pt 白金(プラチナ) Platinum 195.084	79 Au 金 Gold 196.967	80 Hg 水銀 Mercury 200.592	81 Tl タリウム Thallium 204.384	82 Pb 鉛 Lead 207.2	83 Bi ビスマス Bismuth 208.980	84 Po ポロニウム Polonium [210]	85 At アスタチン Astatine [210]	86 Rn ラドン Radon [222]
7	87 Fr フランシウム Francium [223]	88 Ra ラジウム Radium [226]	※2	104 Rf ラザホージウム Rutherfordium [267]	105 Db ドブニウム Dubnium [268]	106 Sg シーボーギウム Seaborgium [271]	107 Bh ボーリウム Bohrium [272]	108 Hs ハッシウム Hassium [277]	109 Mt マイトネリウム Meitnerium [276]	110 Ds ダームスタチウム Darmstadtium [281]	111 Rg レントゲニウム Roentgenium [280]	112 Cn コペルニシウム Copernicium [285]	113 Nh ニホニウム Nihonium [278]	114 Fl フレロビウム Flerovium [289]	115 Mc モスコビウム Moscovium [288]	116 Lv リバモリウム Livermorium [293]	117 Ts テネシン Tennessine [294]	118 Og オガネソン Oganesson [294]

※1 ランタノイド系	57 La ランタン Lanthanum 138.905	58 Ce セリウム Cerium 140.116	59 Pr プラセオジム Praseodymium 140.908	60 Nd ネオジム Neodymium 144.242	61 Pm プロメチウム Promethium [145]	62 Sm サマリウム Samarium 150.36	63 Eu ユウロピウム Europium 151.964	64 Gd ガドリニウム Gadolinium 157.25	65 Tb テルビウム Terbium 158.925	66 Dy ジスプロシウム Dysprosium 162.500	67 Ho ホルミウム Holmium 164.930	68 Er エルビウム Erbium 167.259	69 Tm ツリウム Thulium 168.934	70 Yb イッテルビウム Ytterbium 173.045	71 Lu ルテチウム Lutetium 174.967
※2 アクチノイド系	89 Ac アクチニウム Actinium [227]	90 Th トリウム Thorium 232.038	91 Pa プロトアクチニウム Protactinium 231.036	92 U ウラン Uranium 238.029	93 Np ネプツニウム Neptunium [237]	94 Pu プルトニウム Plutonium [239]	95 Am アメリシウム Americium [243]	96 Cm キュリウム Curium [247]	97 Bk バークリウム Berkelium [247]	98 Cf カリホルニウム Californium [252]	99 Es アインスタイニウム Einsteinium [252]	100 Fm フェルミウム Fermium [257]	101 Md メンデレビウム Mendelevium [258]	102 No ノーベリウム Nobelium [259]	103 Lr ローレンシウム Lawrencium [262]

2018, 4, 26
朝日新聞天声人語に
宇田川榕庵（蘭学者）の記事：
1837-1847年に
近代化学を紹介する
舎密開宗を出版。
水素，炭素，窒素，酸素
などの元素名や
元素，酸化，還元，溶解，分析，
細胞などの
化学や生物学用語を生み出す

表の見方

セル内の表記

原子番号 **元素記号**
元素名(日本語)
元素名(英語)
原子量

セルの色

- の元素は、単体の物質が**金属**的性質（光沢がある、電気や熱をよく通す、陽イオンになりやすい、など）を持つ。
- の元素は、単体の物質が**非金属**的性質を持つ。
- の元素は、単体の物質がその中間の（**半導体**的、**半金属**的）性質を持つ、ことを示す。

［元素記号の色］
赤字のものは、単体の物質が室温（15℃くらい）で**気体**。
青字のものは、単体の物質が室温で**液体**。
黒字のものは、単体の物質が室温で**固体**である、ことを示す。

※ 原子番号 113,115,117,118 の元素は、2015年にIUPACにより正式に認められ、2016年に元素名が決定された。
※ 原子番号 113Nh の質量数[278]は、理化学研究所（日本）で発見された同位体の値である。

《2017.06 作成》

参考文献

国立天文台編「理科年表 2016年版」、丸善
・・・他

引用：http://www.chiba-kc.ac.jp/user/~iseri/siryo/atom.pdf

有機化学

2つの原子が最外殻電子を1つずつ共有し合う結合を**共有結合**といい、
共有結合から成る分子を有機化合物という。

現代社会のいたるところで有機化合物が用いられている。例えば、
医薬品や食品や衣料・プラスチック・液晶などの素材などが挙げられる。
また、**生命体は、有機化合物が集まって構成**されている。
これら**有機化合物を取り扱うのが有機化学**である。
有機化学は、化合物の構造と反応の両面から体系化されている。

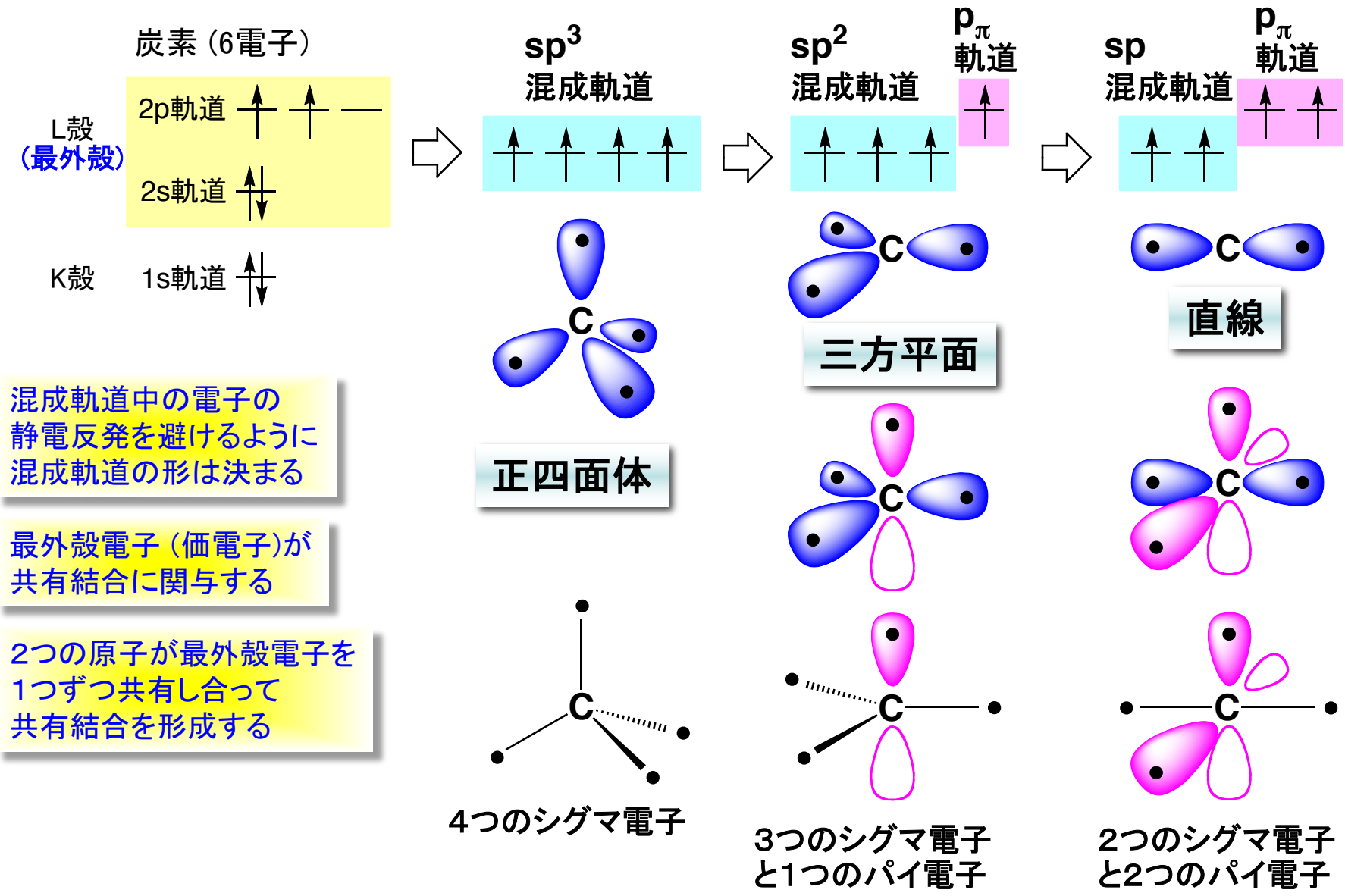
有機化合物の**立体構造**を理解すると、**分子が情報を持っている**ことがわかる。

分子はどうして，かたち(立体構造)をもつのか

⇩

共有結合をつくる元素の混成軌道によって決まる

炭素原子の混成軌道（シグマ軌道）のかたちとパイ軌道

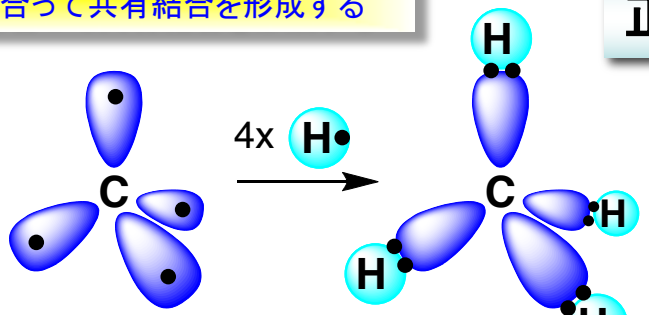


分子のかたち（立体構造）

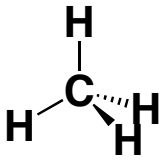
2つの原子が最外殻電子を1つずつ
共有し合って共有結合を形成する

1 Å = 0.1 nm = 10^{-10} m
（100億分の1メートル）
1 nm = 10^{-9} m
（1 mを地球の直径と仮定すると
1 nmは一円玉の直径に相当）

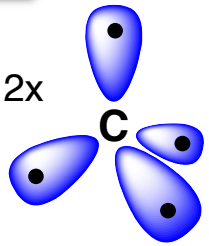
正四面体構造

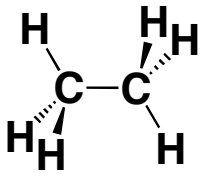


sp^3混成軌道



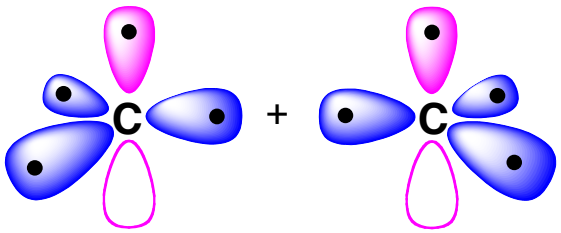
メタン
C-H単結合
シグマ結合



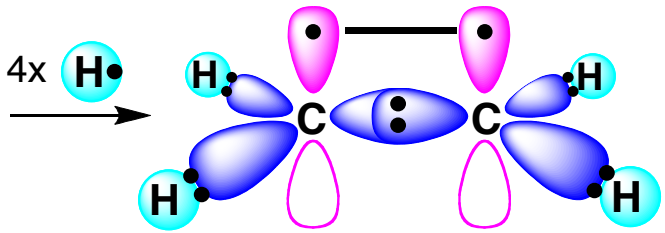


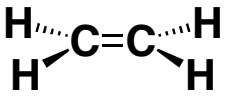
エタン
C-C単結合　1.54 Å
1本のシグマ結合

平面構造



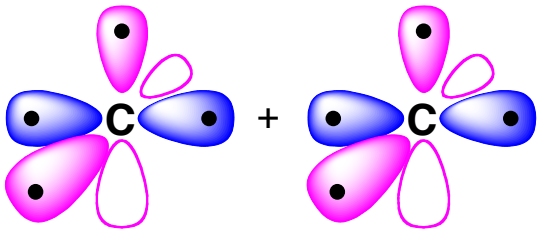
sp^2混成軌道
1つのp_π軌道



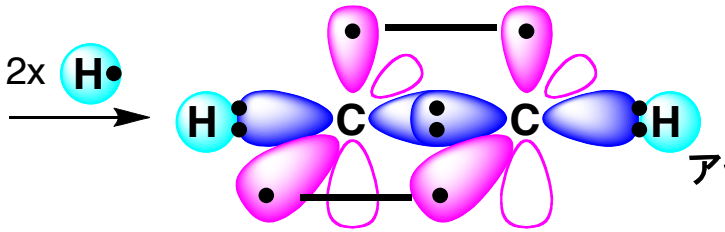


エチレン（平面構造）
C-C二重結合　1.34 Å
1本のシグマ結合と
1本のパイ結合

直線構造



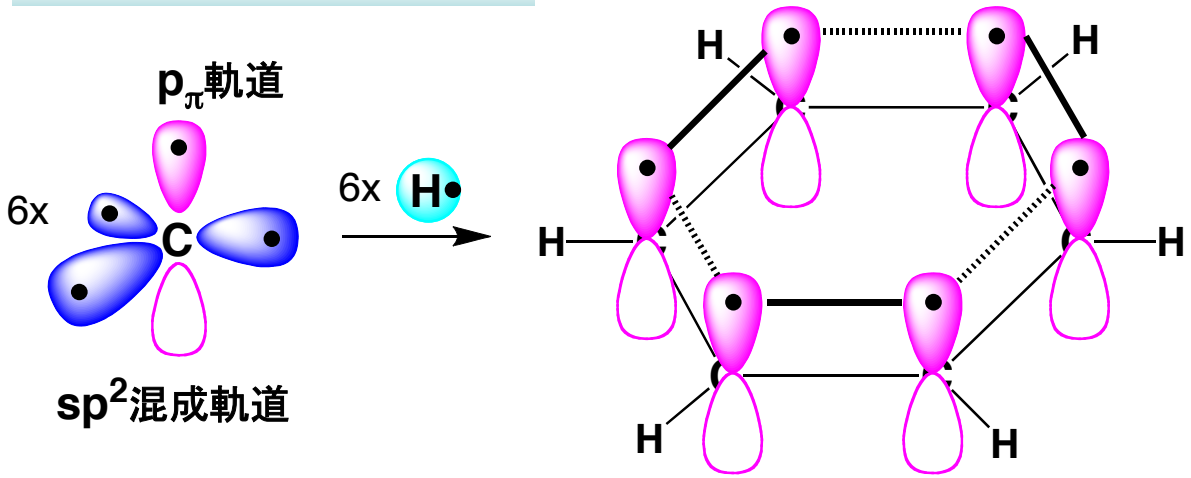
sp混成軌道
2つのp_π軌道



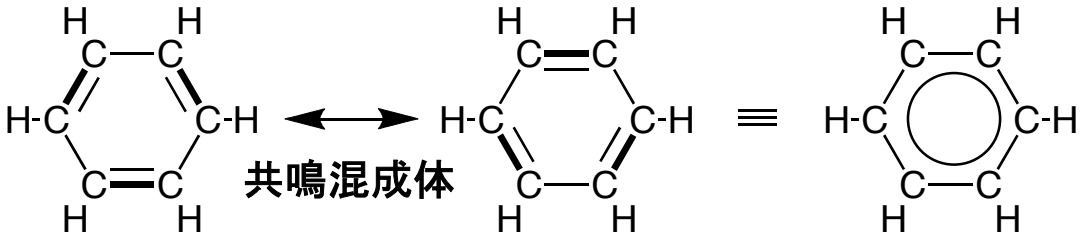
H—C≡C—H

アセチレン（直線構造）
C-C三重結合　1.20 Å
1本のシグマ結合と
2本のパイ結合

ベンゼン（平面構造）

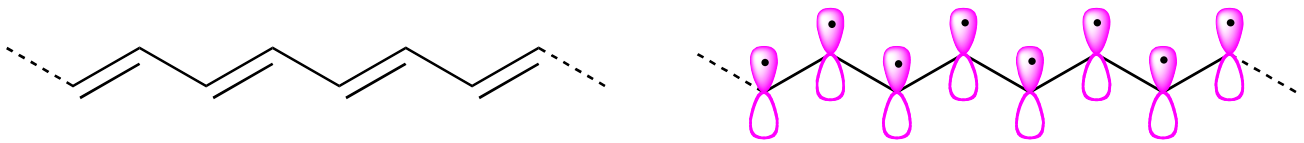


ベンゼンは6つのp_π軌道がつながっており(共役)、6つのパイ電子が閉じた系でp_π軌道を介して回っている(パイ電子の非局在化、共鳴)

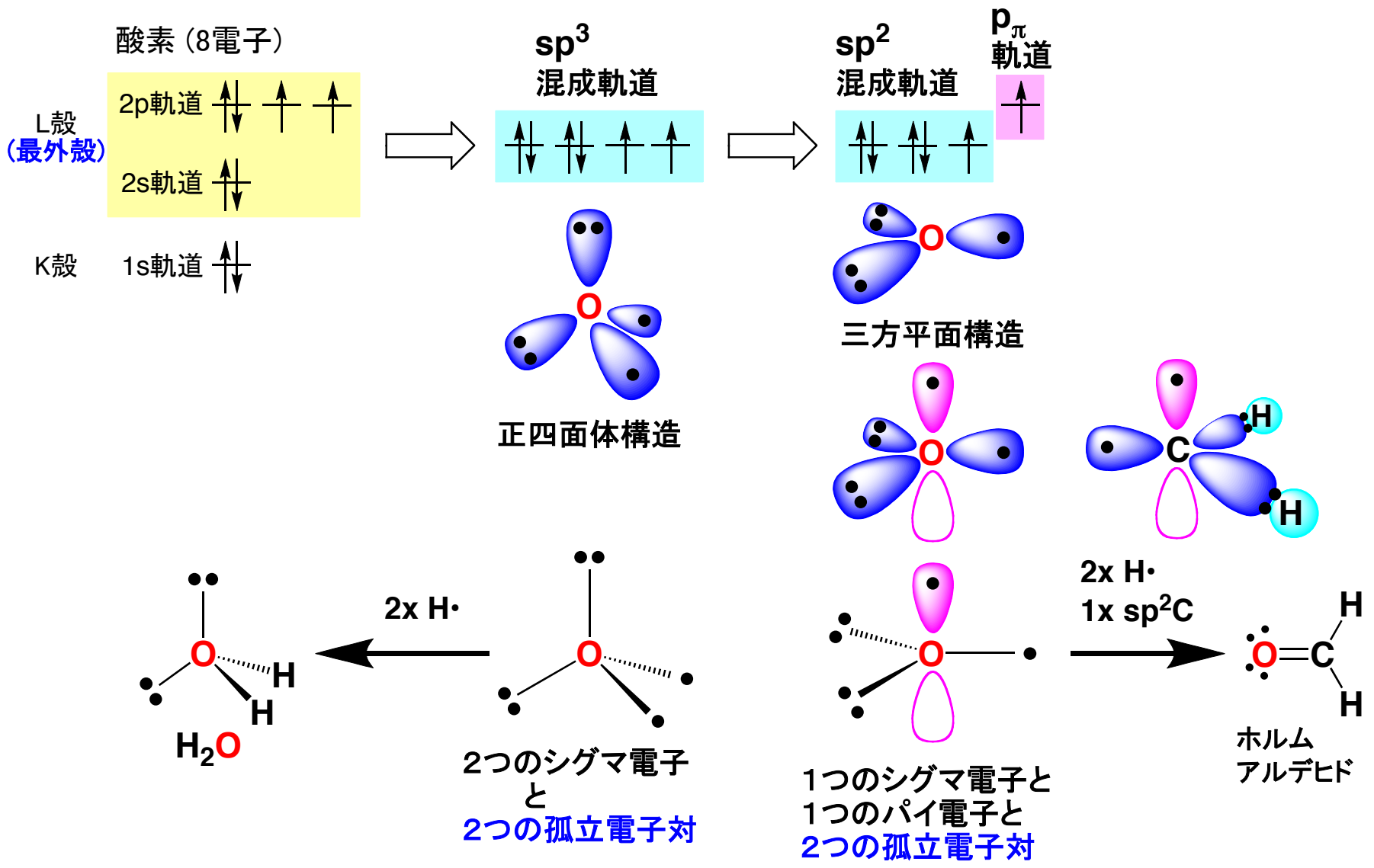


C–C単結合: 1.54 Å
C=C二重結合: 1.34 Å
ベンゼンC-C結合は
６本等価で1.39 Å

ポリアセチレン

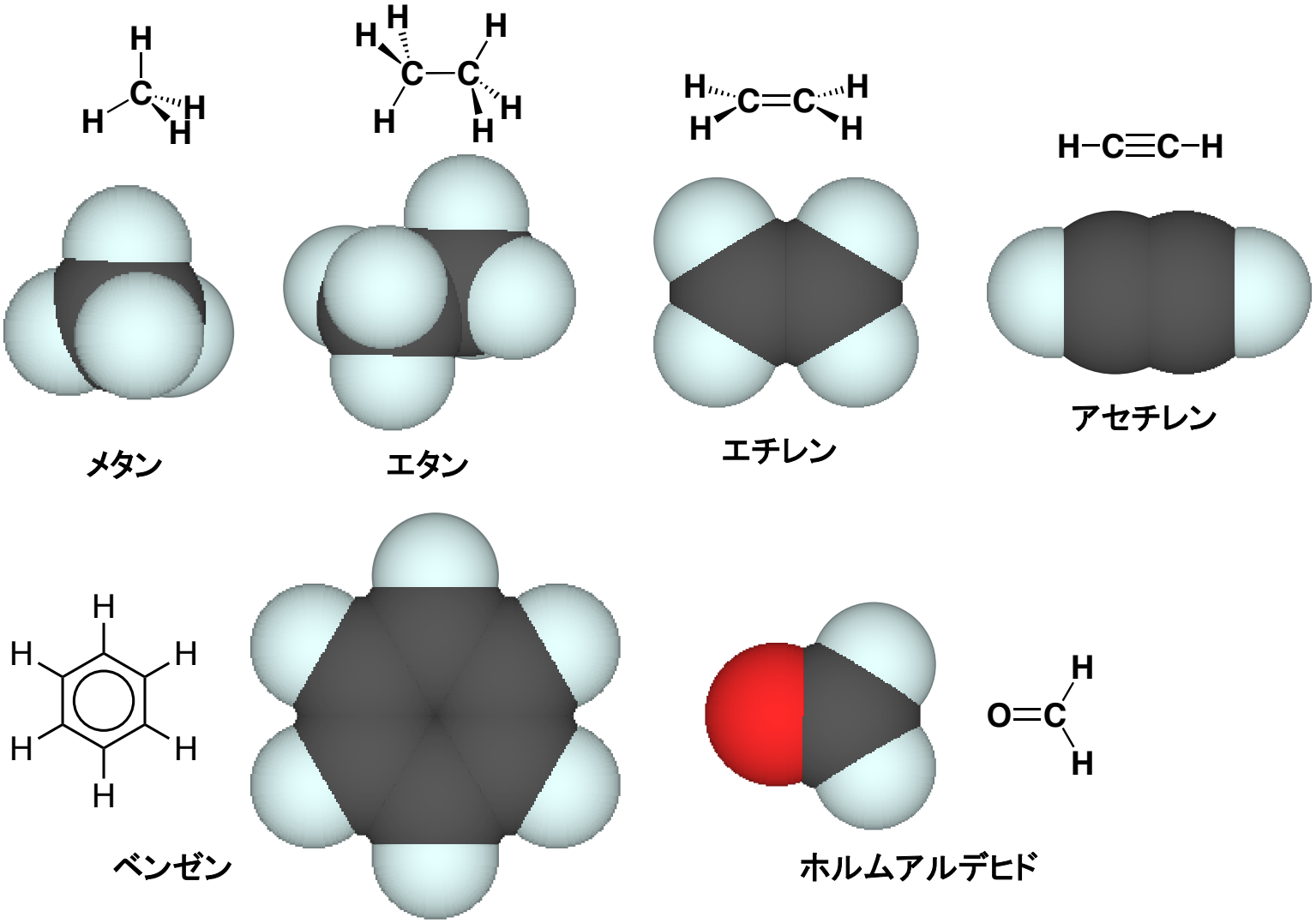


酸素原子の混成軌道(シグマ軌道)のかたちとパイ軌道



分子のかたち（立体構造）

破線–くさび形表記と空間充填モデル



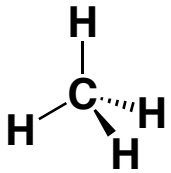
ベンゼンの直径：原子間距離 = 0.496 nm
vdW半径込み = 0.714 nm
ベンゼンの厚み：vdW半径込み = 0.340 nm

ベンゼンを約14億個つなぐと1 m

ベンゼンを約29億個積み重ねると1 m

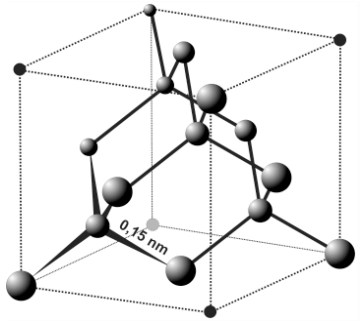
1 nm = 10^{-9} m

炭素の同素体

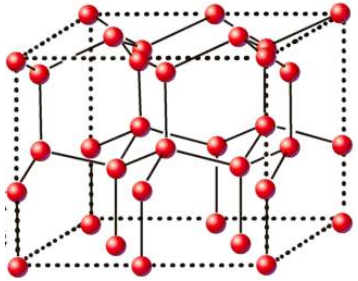


メタン
sp^3炭素

sp^3炭素同士を
無限に繋ぐと



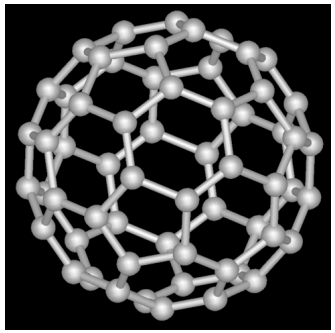
ダイヤモンド



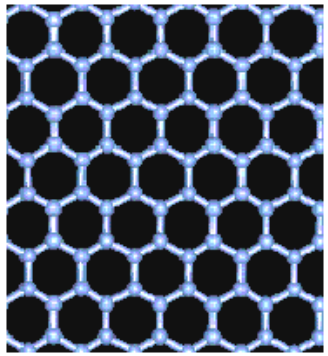


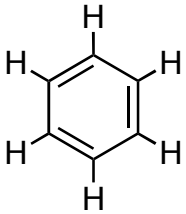
フラーレン（C60）

sp^2炭素60個を
閉じた形で繋ぐと



グラファイト（積層シート）
グラフェン（単層シート）

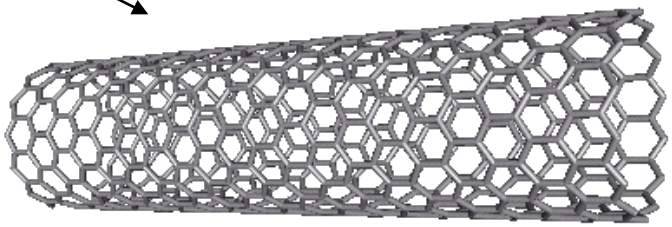




ベンゼン
sp^2炭素

sp^2炭素同士を
無限に繋ぐと

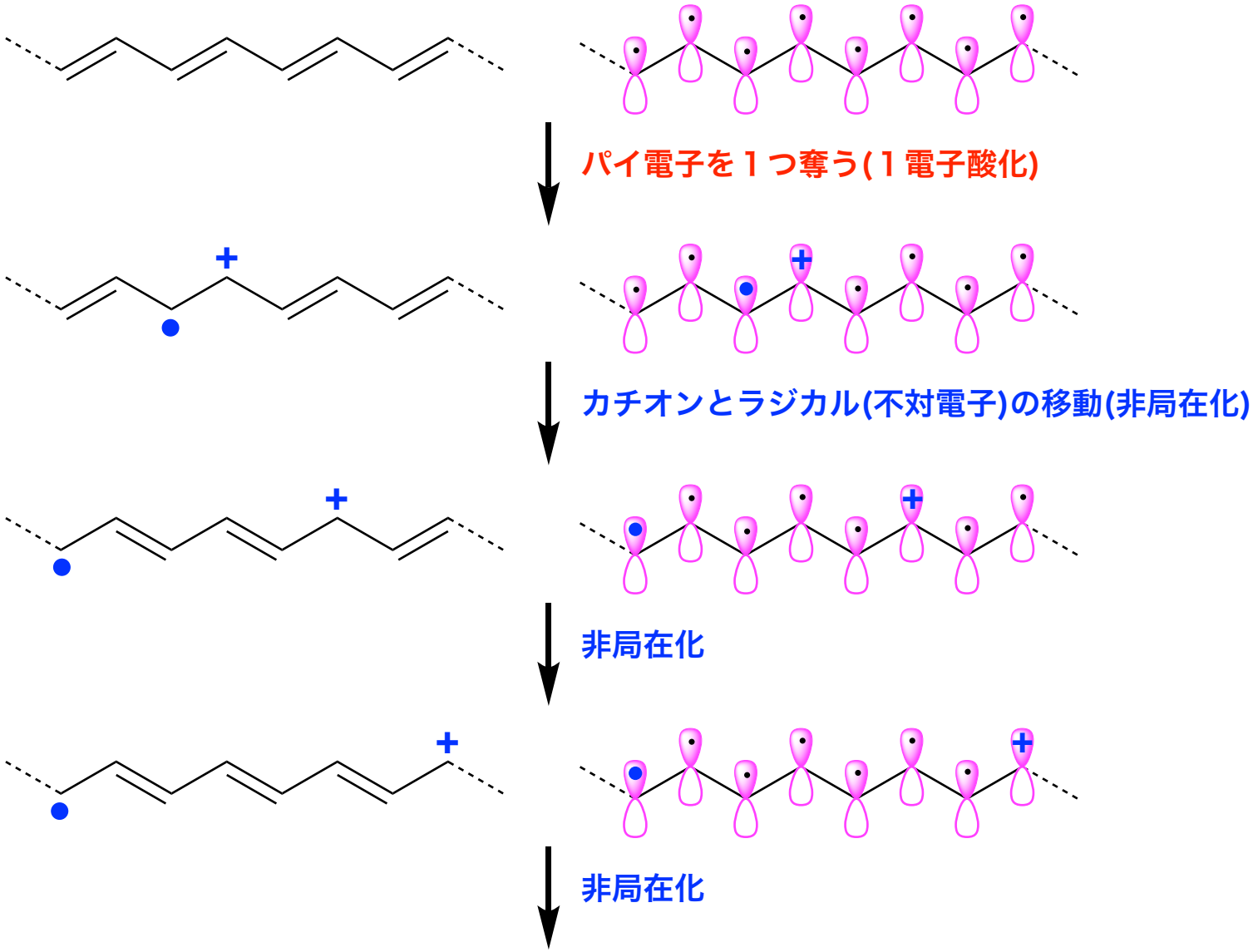
カーボンナノチューブ





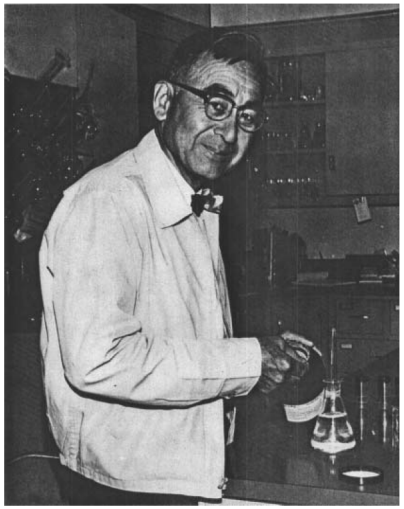


ポリアセチレンが電気を通す仕組み

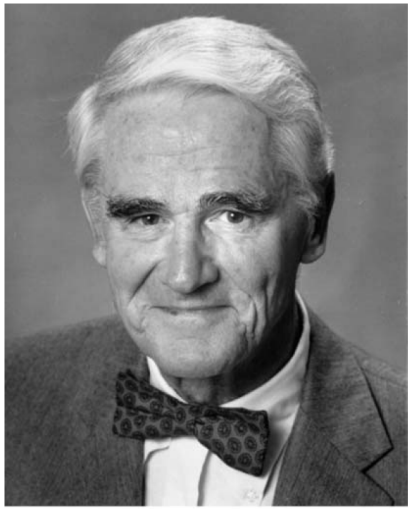


ホスト–ゲスト化学 ～ 分子認識 ～ 超分子化学の根幹

1987年ノーベル化学賞



Charles J. Pedersen
(1904 ~ 1989)

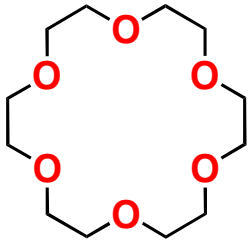


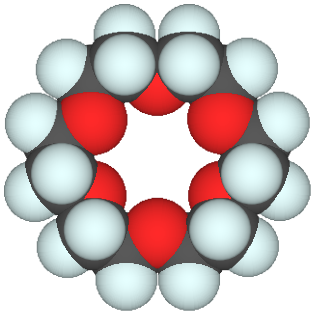
Donald J. Cram
(1919 ~ 2002)



Jean-Marie Lehn
(1939 ~)

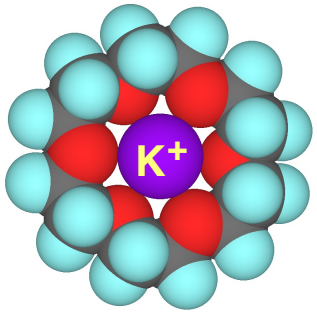
捕捉する分子をホスト分子，捕捉される分子(イオン)をゲスト分子とよぶ





クラウンエーテル

K^+ (カリウムイオン)



カリウムイオンの捕捉

超分子化学 (分子集合体化学)

- これまでの有機化学は単独の分子の性質に注目
- 分子が複数あるいは集団として振る舞ったとき、個々の分子では見られない新たな性質や機能が発現する可能性がある。**生体はまさに分子の集合体**



- **分子の集合組織化を制御することを目的とした学問を超分子化学**あるいは**分子集合体化学**という
- 超分子化学（分子集合体化学）とは、**複数あるいは集団の分子が弱い力**，即ち，**分子間相互作用で会合**し、その化学・物理特性は**分子集合系全体で独自の新しい特性を持つ**もの、と定義される。
- **超分子化学はボトムアップ型ナノテクノロジーに必須の分野**

有機合成化学 (共有結合化学) vs 超分子化学 (非共有結合化学)

共有結合の化学

- 速度論支配
- 結合エネルギーは大きい
  C-C = 83 kcal/mol
  C-N = 73 kcal/mol

- 低分子の精密合成に有効
- 生成物は安定
- いったん副生成物ができると目的物への変換不能
  （エラーの修復できない）

非共有結合(分子間相互作用)の化学

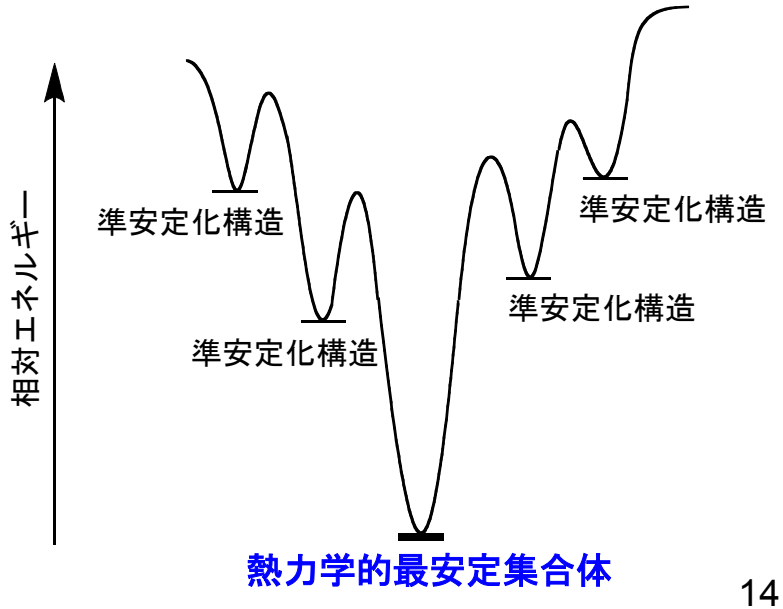
- 熱力学平衡支配
- 結合エネルギーは小さい
  水素結合 = 0.5 ~ 3 kcal/mol
  配位結合 = 3 ~ 6 kcal/mol

- 共有結合体に比べ不安定
- しかし、結合が可逆のためエラーの修復可能
  最終的には熱力学的最安定構造に落ち着く
- 分子設計を適切に施せば
  巨大分子（集合体）を一挙に構築可能

超分子化学の分子設計指針

1) 種々の分子間相互作用の利用
2) 相補性と方向性を有する水素結合and/or配位結合
3) 相互作用部位の配向（求心的 vs 発散的）
4) 事前構成化
5) 多点相互作用と協同性

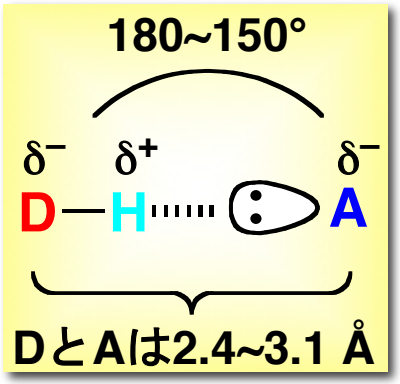
ユニット分子にこれら情報を如何にインプットするか
（分子プログラミング）



分子間相互作用の代表例：水素結合

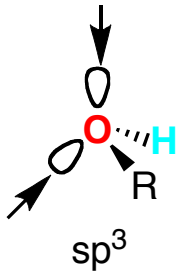
電気陰性度の高いD原子とA原子（O, N 原子 etc）の間に水素原子が介在して起きる引力を水素結合という。本質的には静電相互作用と同じであるが、**高い相補性と方向性**をもつことが水素結合の特徴。

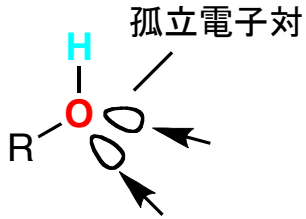
D–Hを水素結合供与体
（*分極していること*）



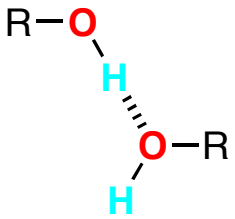
A:を水素結合受容体
（*孤立電子対をもつこと*）

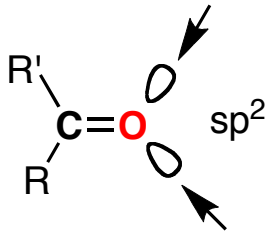
・相補性 ・方向性（角度, 距離依存性） ・弱い結合力 0.5~3 kcal/mol

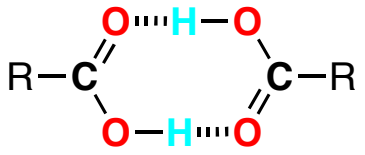




水酸基、水







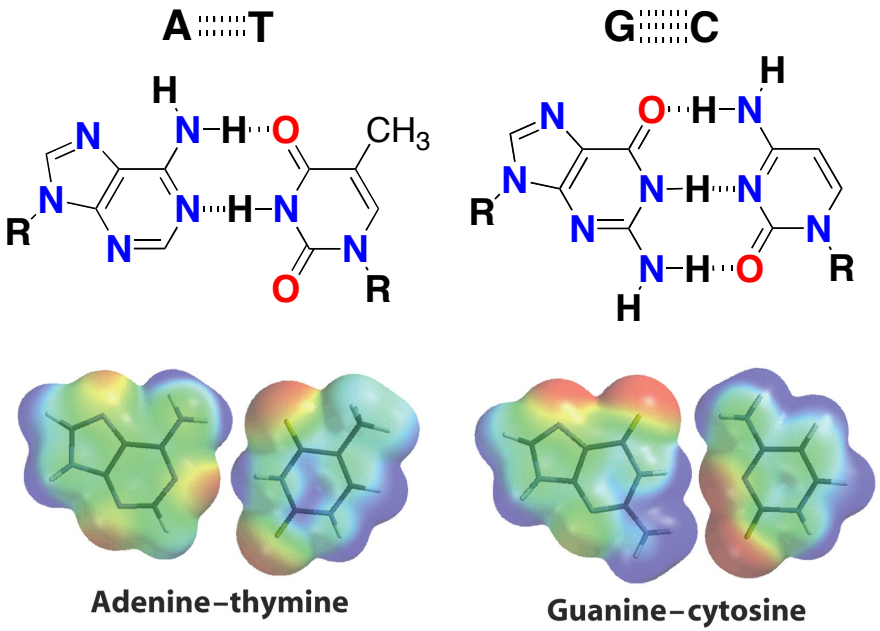
カルボニル基、カルボン酸、アミド基

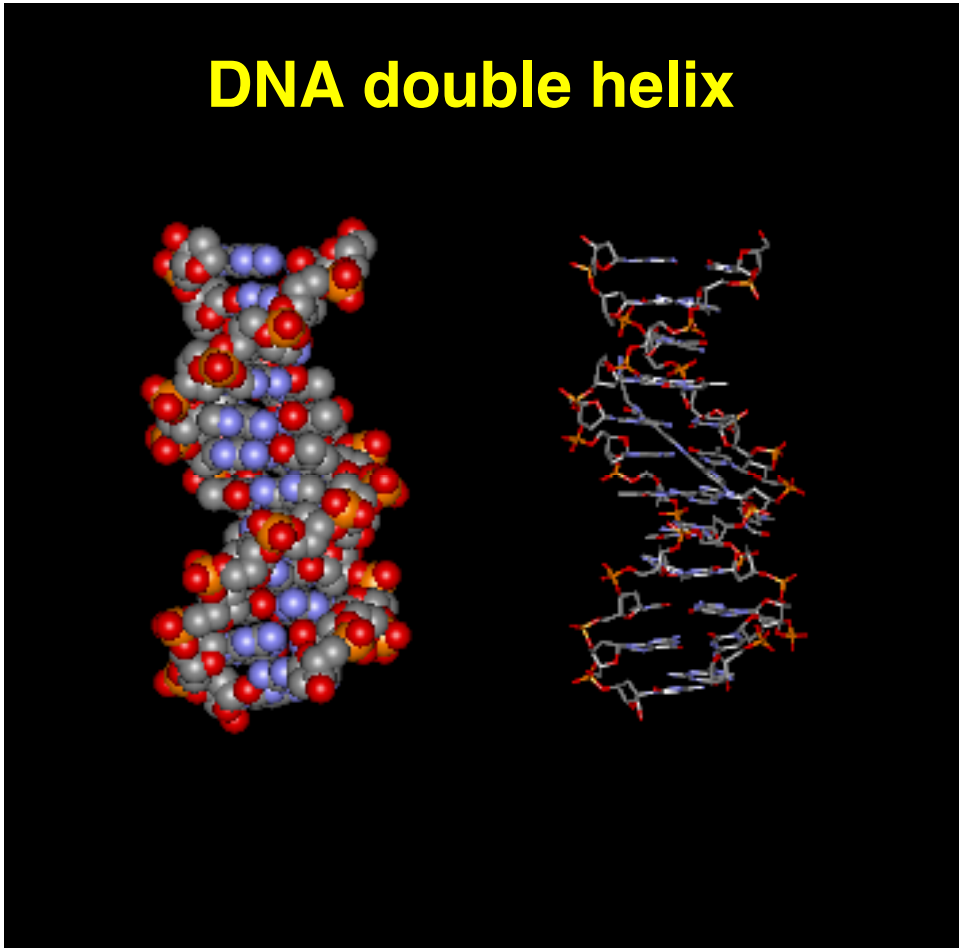
---

van der Waals相互作用、静電相互作用、π－π スタッキング
双極子相互作用、疎水性相互作用、配位結合　も重要

DNA

DNAは、A•TとG•Cの相補的水素結合によって遺伝情報を担うと同時に、構造化学的には、水素結合、疎水性相互作用、π–πスタッキングとの協同効果によって二重ラセン構造を安定化している



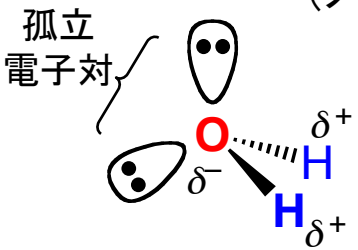


水と氷

室温で液体：沸点 Bp = 100 °C、融点 Mp = 0 °C

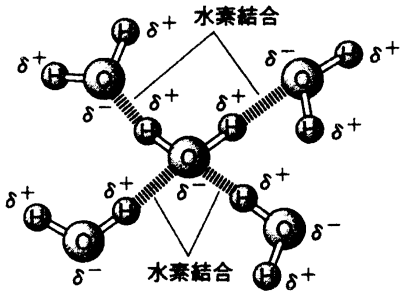
O-H結合は電気陰性度の違いから大きく分極し，(δ⁻)**O-H**(δ⁺)となっており，しかも，**酸素原子には孤立電子対**がある。よって，**水分子は，分子間で互いにHとOの間で水素結合**し，液体および固体中で**分子集合体**として振る舞う。よって，分子量**18**ながら室温で液体で，高沸点。

（メタン (分子量16): Bp = –162 °C, エタン (分子量30): Bp = –89 °C）

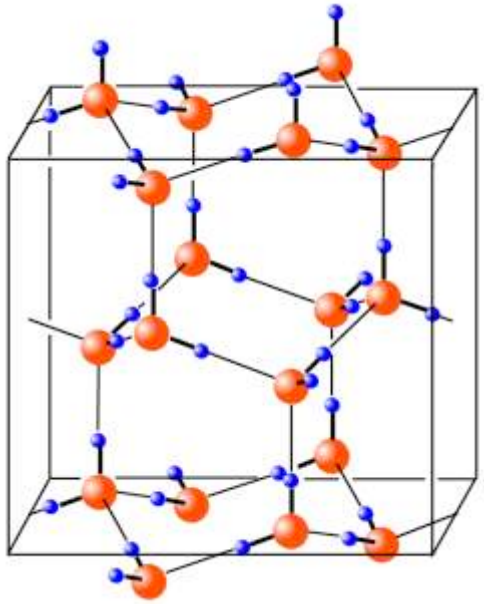


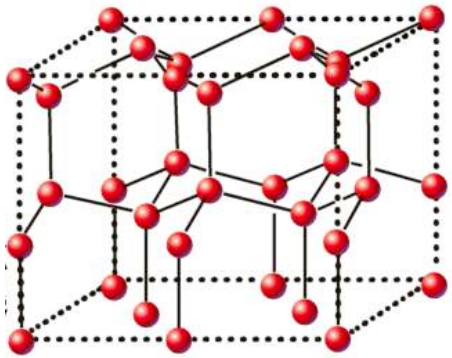
酸素原子は
sp^3混成軌道
（正四面体構造）

水分子同士は水素結合：氷の構造は，ダイヤモンドと同じ



氷



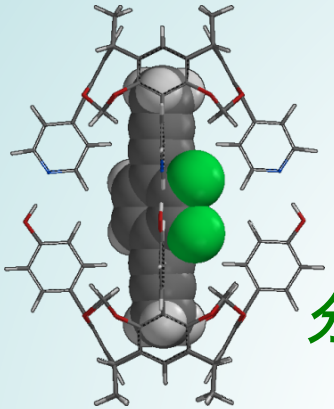


ダイヤモンド

超分子化学

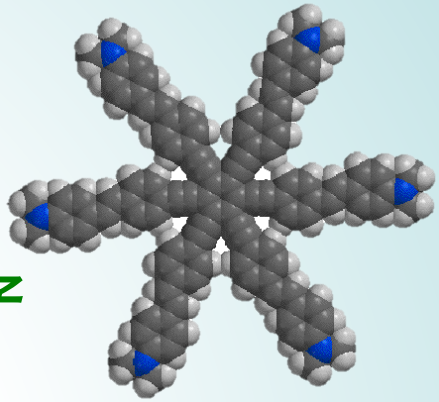
有機π電子系化学

小林研究室



分子集合性ナノ空間

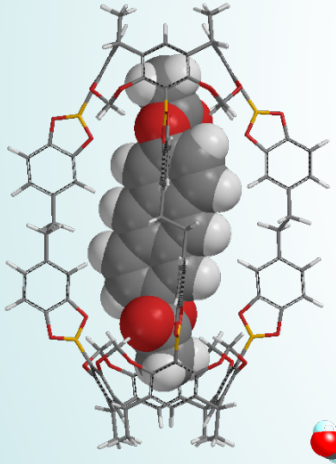
パイ共役拡張分子

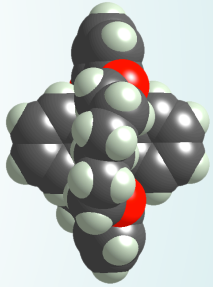


分子集合カプセル

有機発光材料

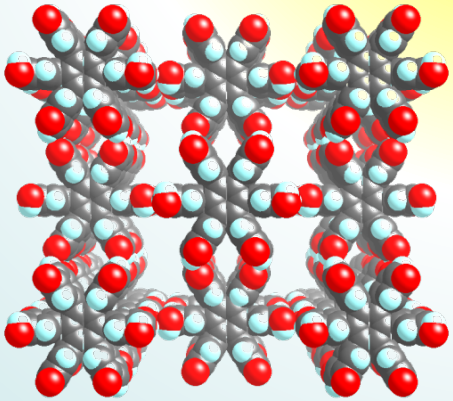
有機機能ナノ化学

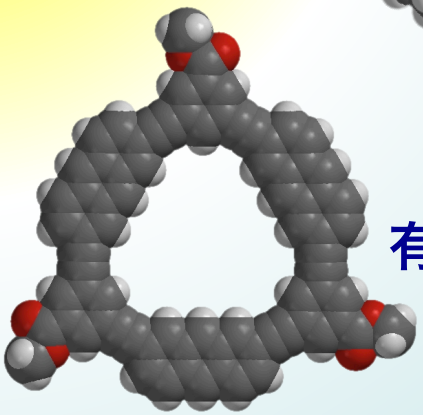


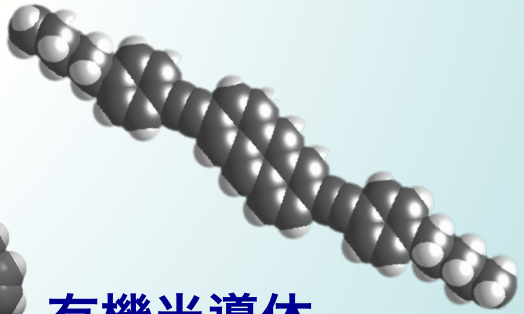


分子配列制御

分子素子



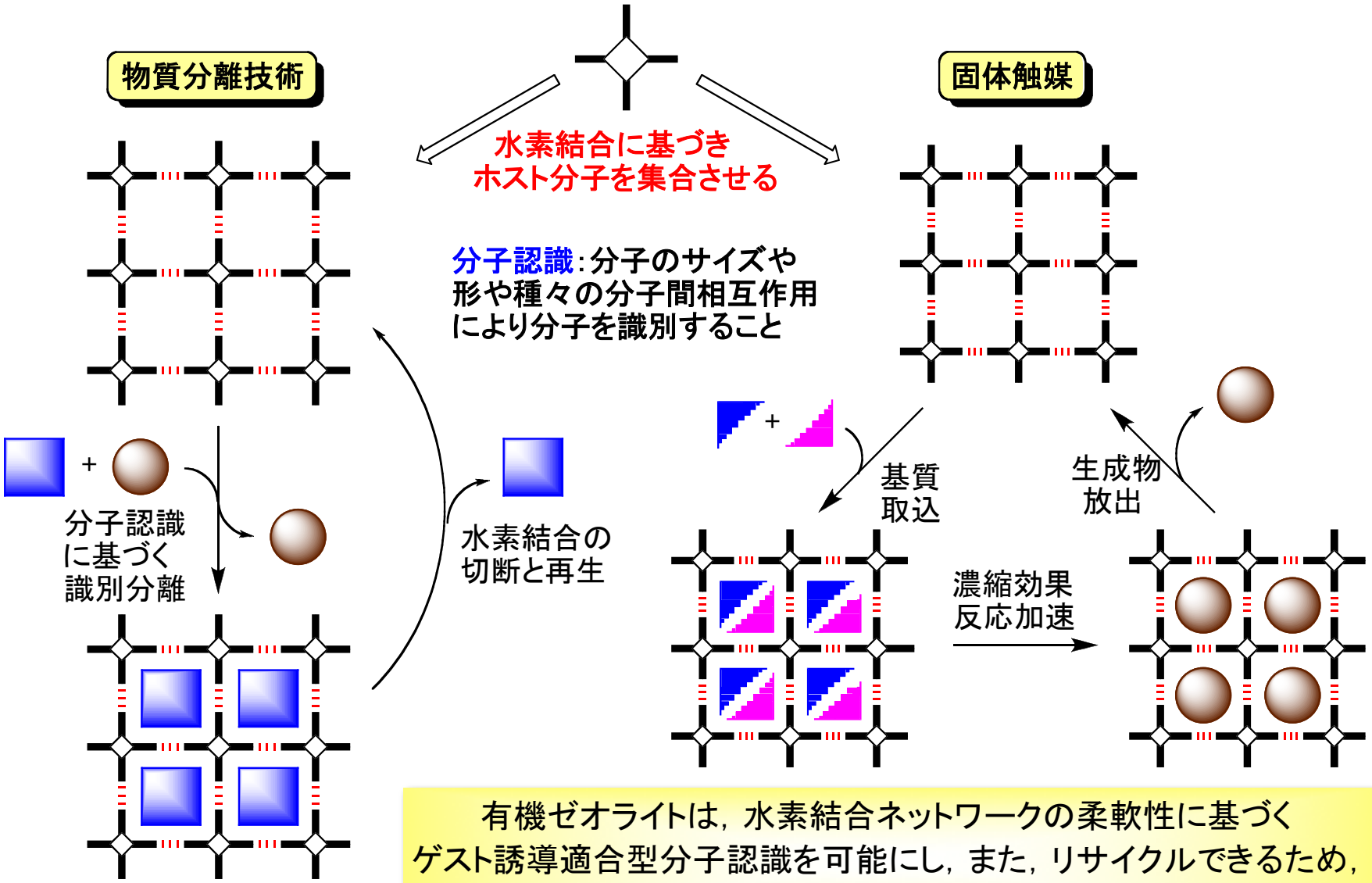




多孔質結晶性
分子集合体

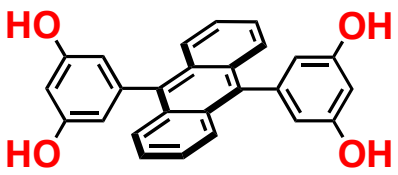
有機半導体

多孔質結晶性分子集合体：有機ゼオライトへの展開

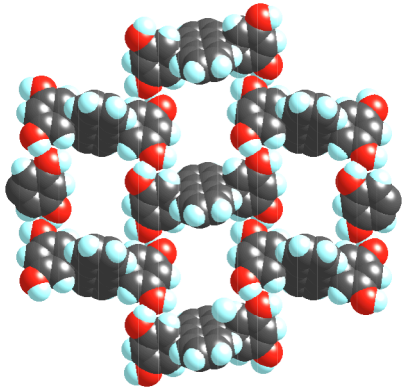


有機ゼオライトは，水素結合ネットワークの柔軟性に基づく
ゲスト誘導適合型分子認識を可能にし，また，リサイクルできるため，
環境適合性と高い機能性を併せ持つ材料になる。

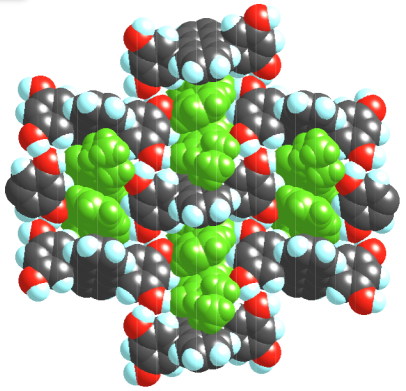
有機ゼオライト:
多孔性2次元水素結合ネットワーク結晶



再結晶

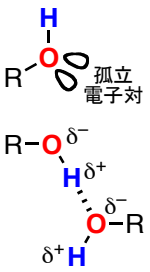


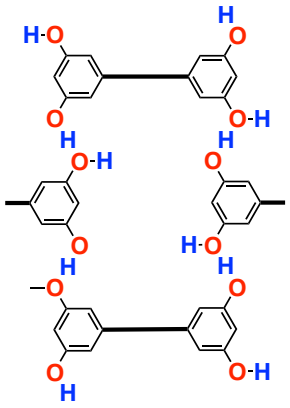
$PhCO_2Bu$-*i*

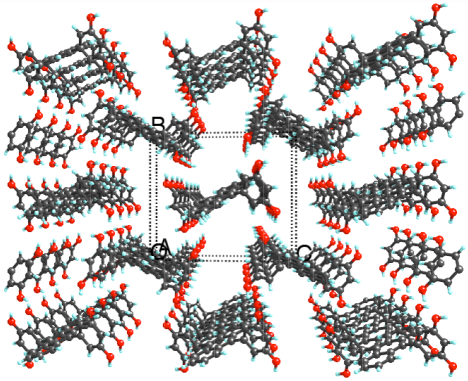


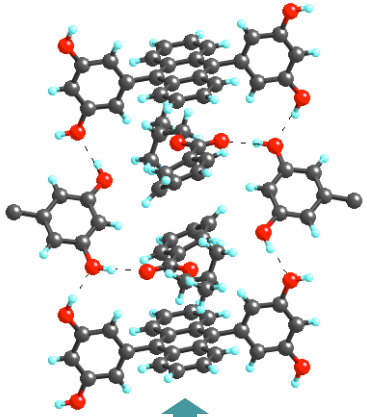
母核部位と水素結合部位の間に
直交因子を導入
↓
多孔質２次元水素結合
ネットワークの相互貫入を防ぐ

Poly-resorcinol H-B chains
Large cavity
(vdW 10.1 x 4.6 Å)
without interpenetration







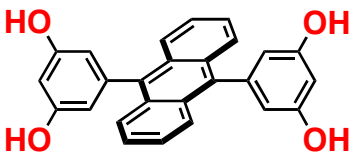


多点相互作用による分子認識

- **H-G間の水素結合**
- **H-G間のπ-πスタッキング**
- **H-G間のCH-π相互作用**
- **G-G間のπ-πスタッキング**

Y. Aoyama and K. Kobayashi et al.
Tetrahedron Lett. **1993**, *34*, 7929; *Supramolecular Chem.* **1995**, *4*, 229;
J. Am. Chem. Soc. **1995**, *117*, 8341; *Tetrahedron* **1995**, *51*, 343;
J. Am. Chem. Soc. **1996**, *118*, 5562; *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **1997**, *70*, 3075;
Chem. Eur. J. **1998**, *4*, 417.

分子認識



Host

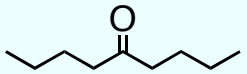
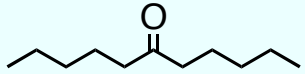
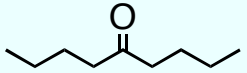
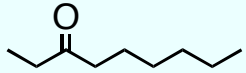
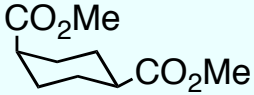
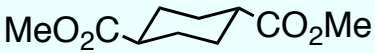
guest A : guest B
= 1 : 1

競争熱再結晶

Host•X(guest A)•Y(guest B)

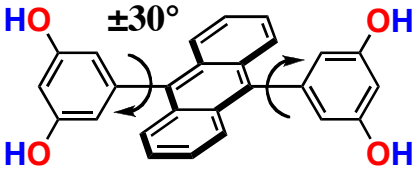
全包接量 X + Y = 2当量

ゲスト選択性

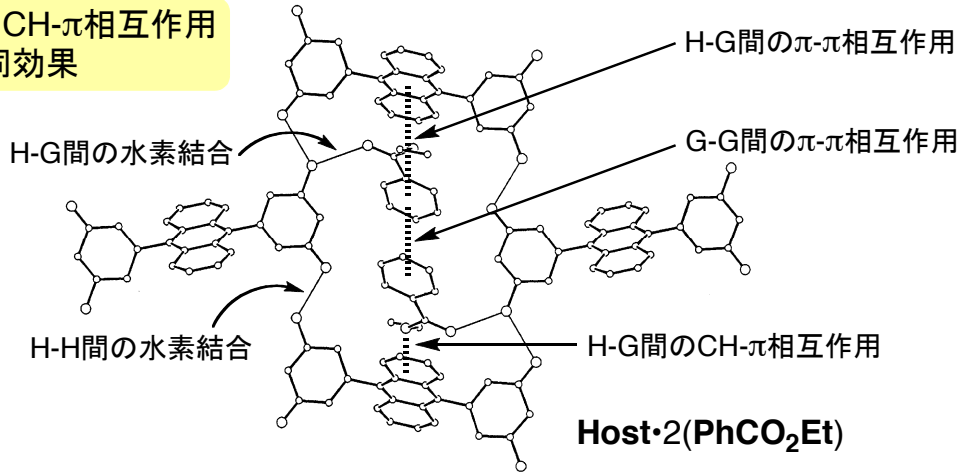
	guest A	guest B	A / Host	B / Host
水素結合部位の有無	$Ph-CO_2CH_3$	$Ph-CH_2CH_2CH_3$	2	0
サイズの違い	$Ph-CO_2CH_3$	$Ph-CO_2CH_2CH_3$	0.4	1.6
サイズの違い	$Ph-CO_2CH_3$	$Ph-CO_2CH_2CH(CH_3)_2$	0.03	1.97
分岐の違い	$Ph-CO_2CH_2CH_2CH_3$	$Ph-CO_2CH_2CH(CH_3)_2$	0.8	1.2
サイズの違い			2	0
対称性の違い			2	0
立体化学の違い			2	0

J. Am. Chem. Soc. **1995**, *117*, 8341.

水素結合, π-π, CH-π相互作用
の協同効果

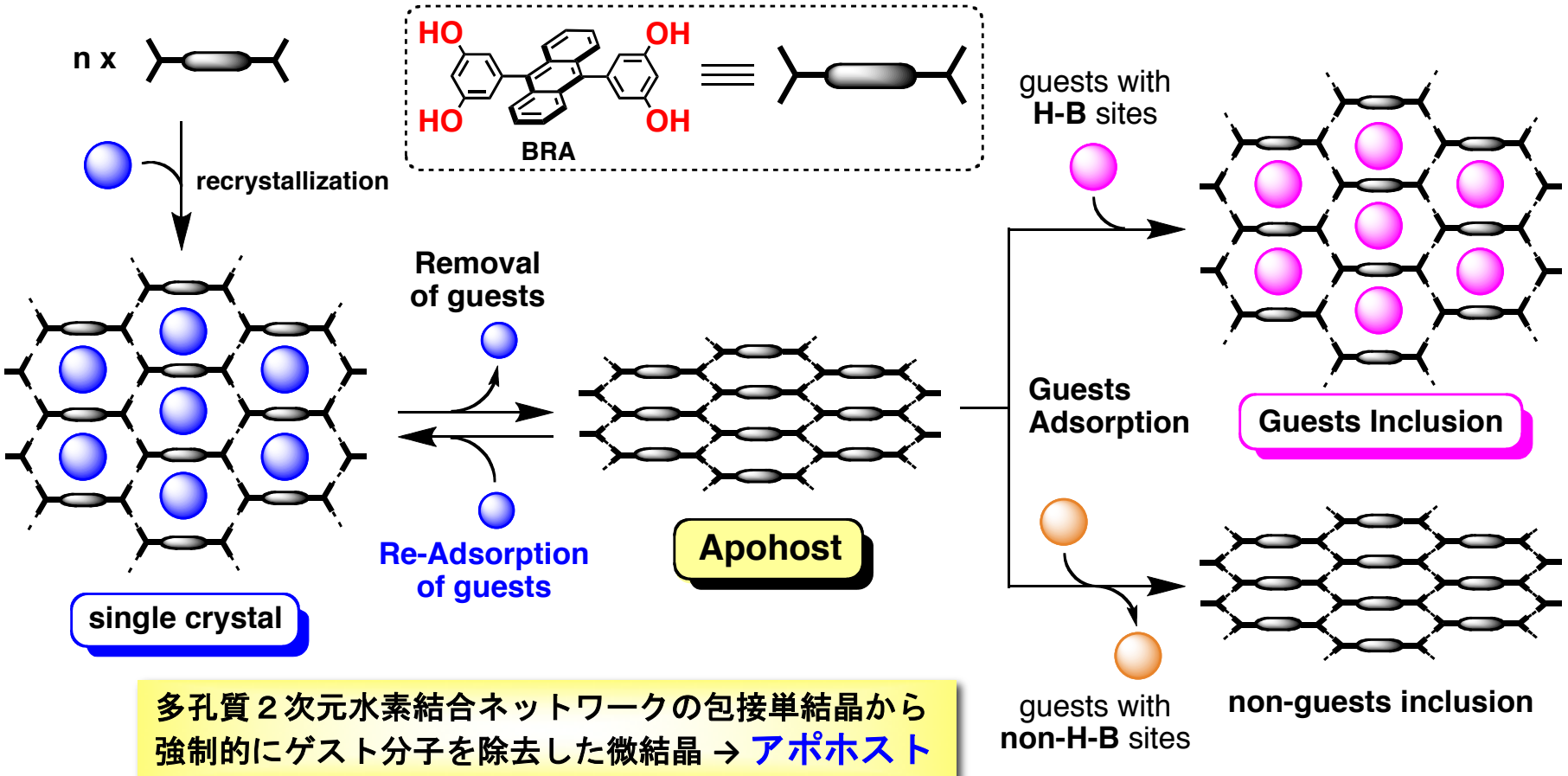


キャビティーサイズ
を微調整できる



Host•2(**$PhCO_2Et$**)

アポホスト

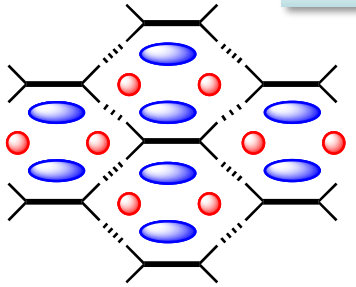


多孔質２次元水素結合ネットワークの包接単結晶から
強制的にゲスト分子を除去した微結晶 → アポホスト

- ゲストを除去すると多孔性を維持できずキャビティーは潰れてしまう、しかし、
- ある程度の水素結合ネットワークを維持していてアモルファス状態ではない
- 除去したゲストをアポホストに曝すと、多孔質２次元水素結合ネットワークを復元
  化学量論的にゲストを再包接して、単結晶性を回復
- サイズが適合し水素結合部位をもつゲストであれば、アポホストは
  多孔質２次元水素結合ネットワークを復元し、化学量論的にゲストを包接する

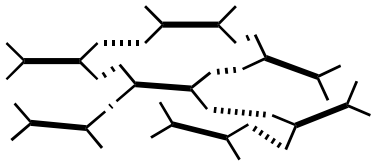
水素結合の
柔軟性
↓
水素結合性
有機結晶は
生き物

アポホストは液体，気体，固体ゲストを化学量論的に包接し 2-D HB-Network & 単結晶性を復元



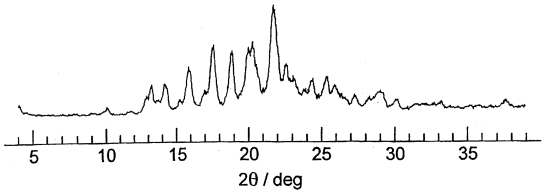
Host•2(C_6H_6)•2(EtOAc)単結晶

0.1 mmHg
190 °C, 40 h
– C_6H_6, EtOAc



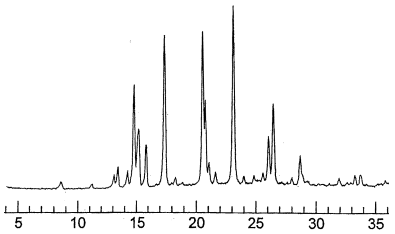
アポホスト
（微結晶）

アポホストの粉末X線回折



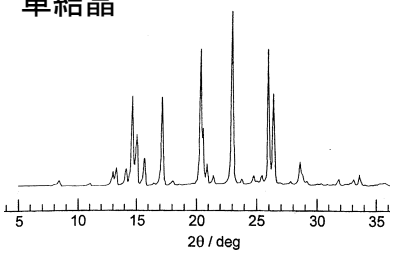
J. Am. Chem. Soc. **1995**, *117*, 8341.

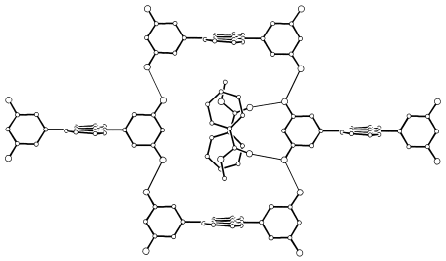
Apohost + $PhCO_2Me$ **(液体)**



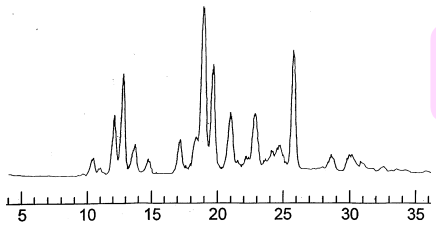
単結晶性回復

Host•2($PhCO_2Me$)
単結晶



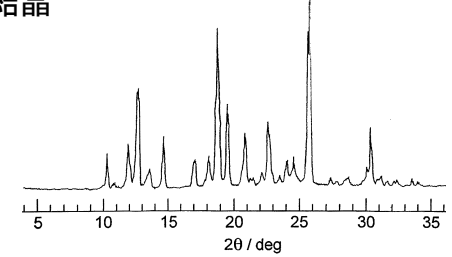


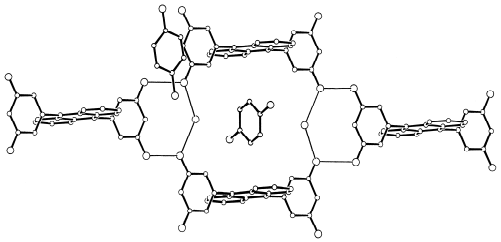
Apohost + *p*-Xylene **(蒸気)**



単結晶性回復

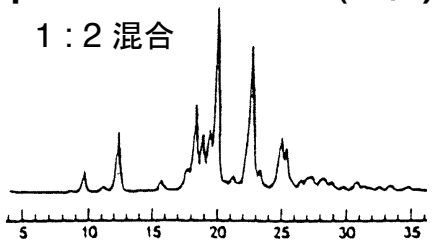
Host•2(*p*-Xylene)•2(H_2O)
単結晶



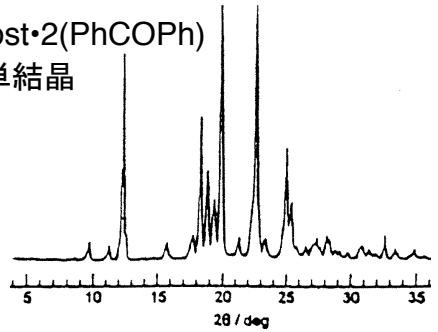


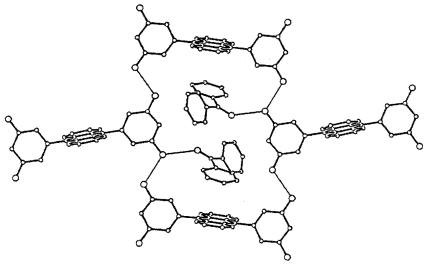
Apohost + PhCOPh **(固体)**

1 : 2 混合

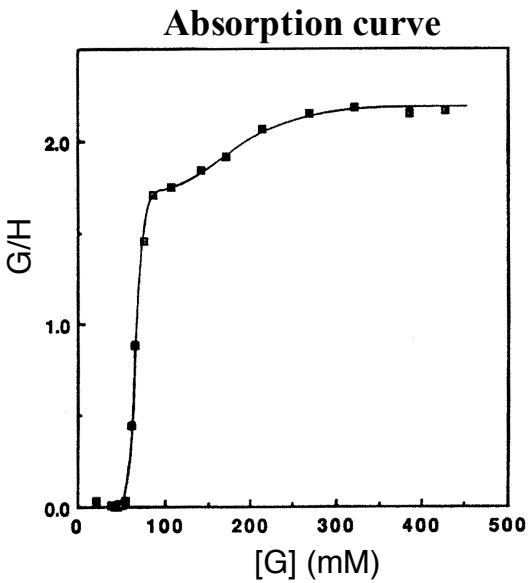


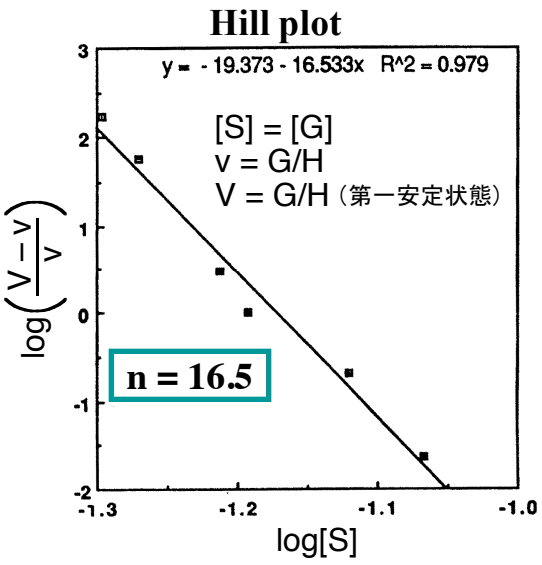
Host•2(PhCOPh)
単結晶



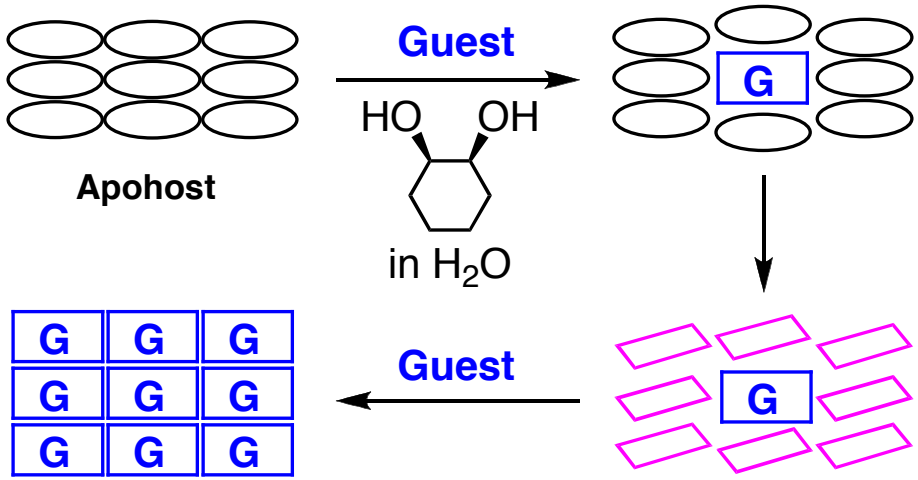


水中での水溶性ゲストの包接とアロステリック効果



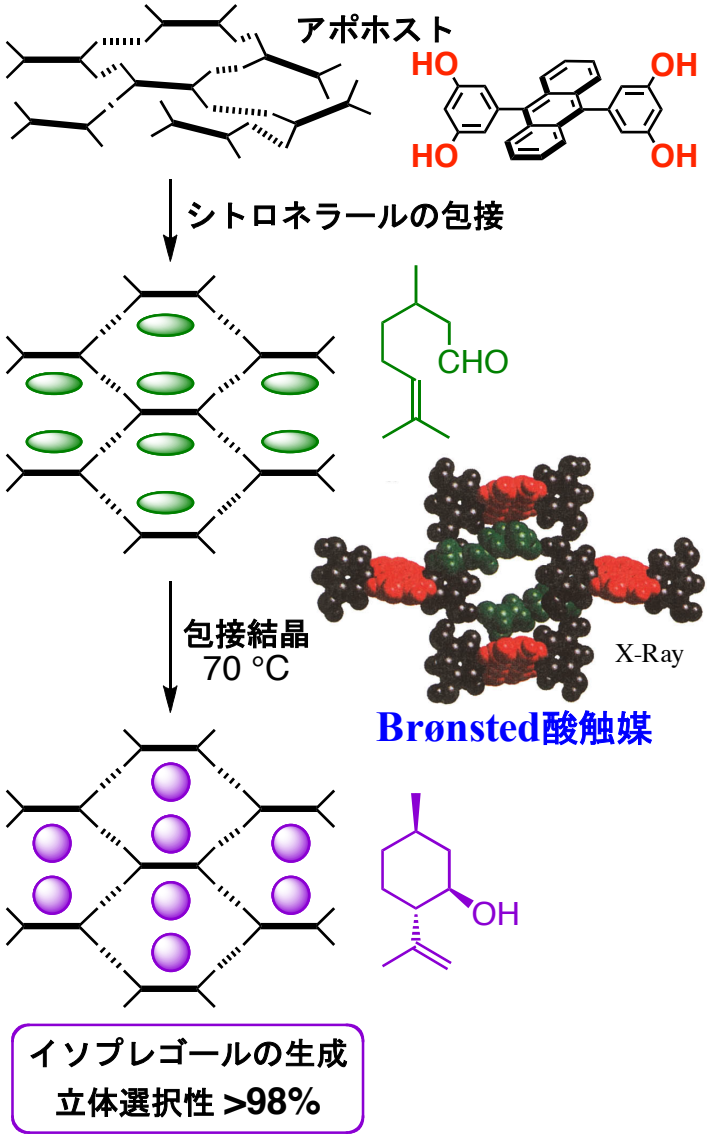


G = *cis*-1,2-Cyclohexanediol



Y. Aoyama and K. Kobayashi et al. *Tetrahedron* **1995**, *51*, 343.

立体選択的反応場



Y. Aoyama and K. Kobayashi et al. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **1997**, *70*, 3075.

分子集合カプセル

バルク溶媒から隔絶されたナノ空間



ホモカプセル

ヘテロカプセル

ゲスト包接に基づく機能

有機物理化学的興味

不安定中間体（活性種）の検出・単離
２種類のゲスト包接に基づく
　配向異性体(orientational isomer)
　配置異性体(constellational isomer)の出現



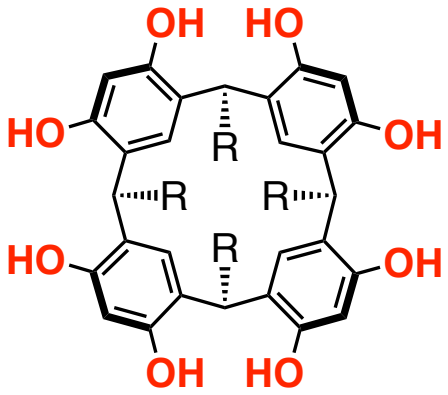
材料科学的興味

分子認識に基づく物質分離
基質濃縮効果による触媒
配向異性を利用した分子スイッチ

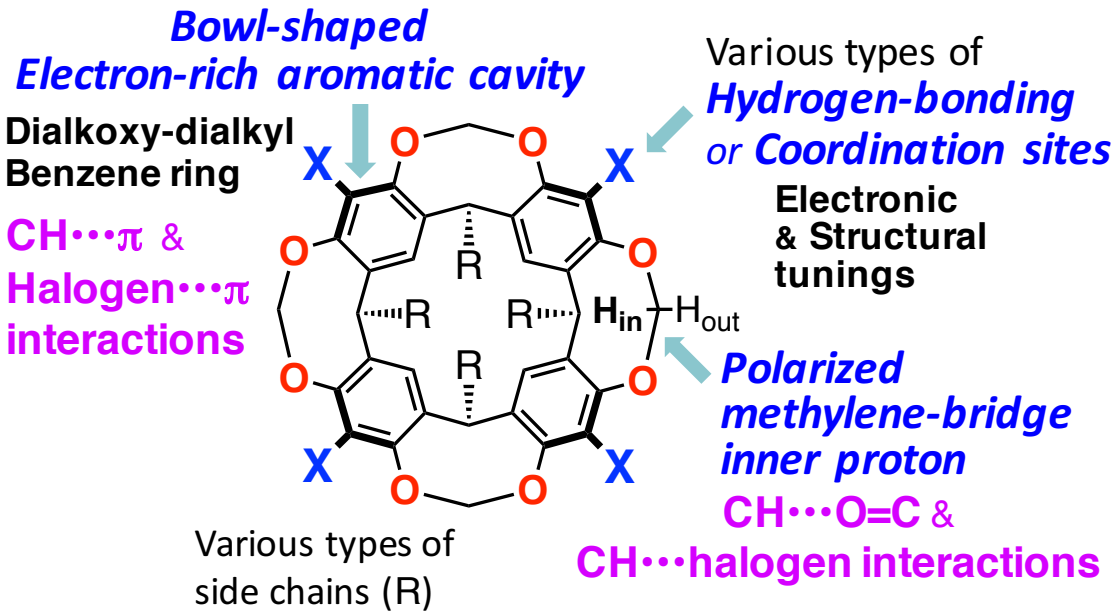
生命科学的興味

ドラッグデリバリーシステム

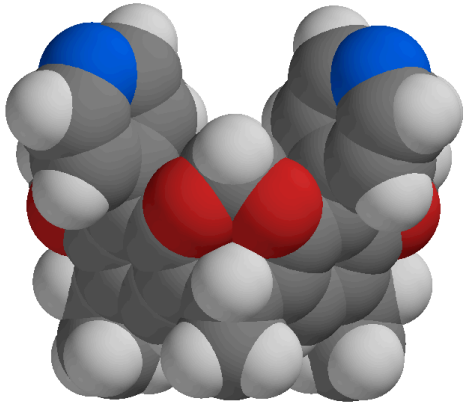
カリックス[4]レゾルシンアレーン



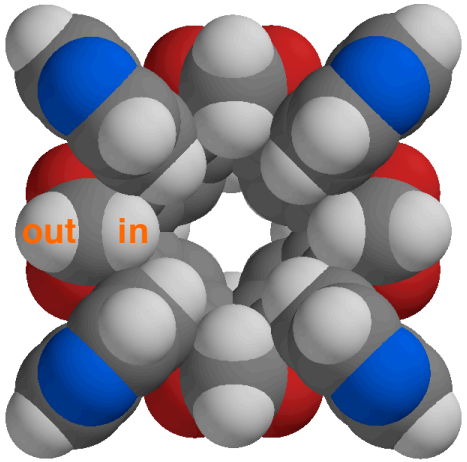
お椀型大環状分子：キャビタンド



Front view



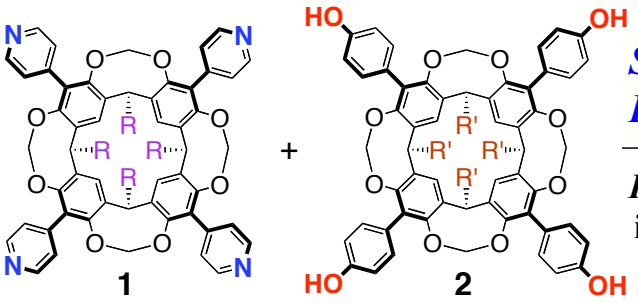
Top view



Tetra(*p*-pyridyl)-cavitand

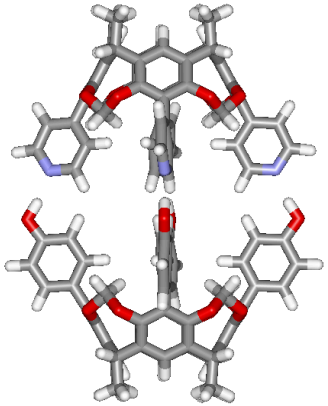
総説：*Chem. Soc. Rev.* **2015**, *44*, 449.

水素結合ヘテロカプセル



Self-Assembly by Hydrogen Bonds

$K_a = 1.26 \times 10^7\ M^{-1}$ in $CDCl_3$ at 298 K

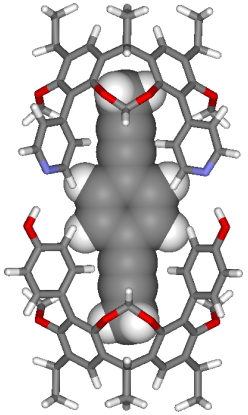


1•2

Me — Me

G1

$K_a = 1.14 \times 10^9\ M^{-1}$ in $CDCl_3$ at 298 K



G1@(1•2)

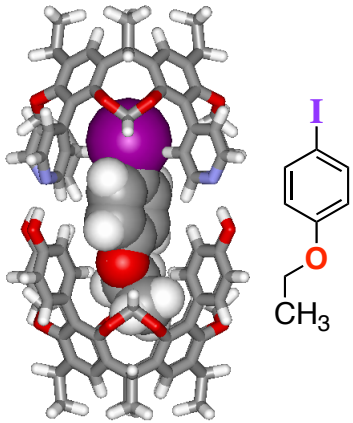
特徴１ 高選択的分子認識と包接 → 物質分離剤へ

特徴２ 非対称ゲストの包接配向制御 → 分子デバイスへ

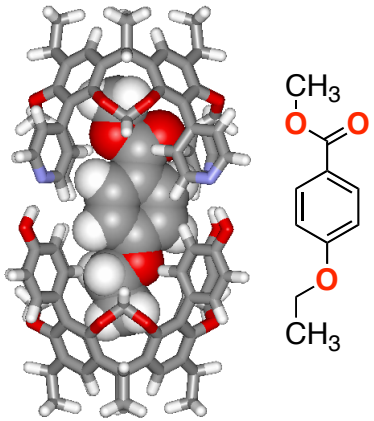
J. Org. Chem. **2007**, *72*, 3242.
Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **2009**, *106*, 10444.
Chem. Eur. J. **2013**, *19*, 3685.
Chem. Soc. Rev. **2015**, *44*, 449.

非対称カプセルへの非対称ゲスト分子の包接 ➡ **配向異性化現象の発現**

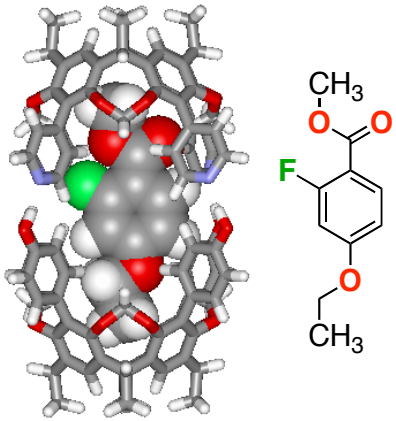
高選択的



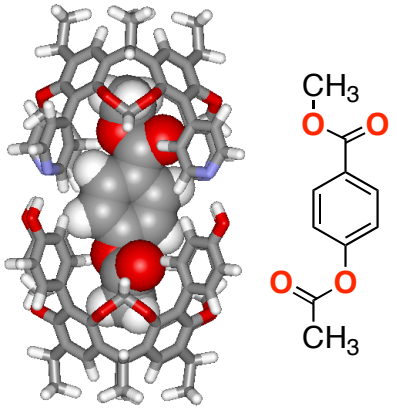
Specific



Major : minor
97 : 3



Major : minor
>99 : 1

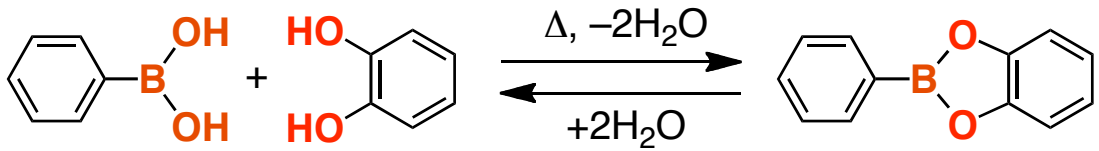


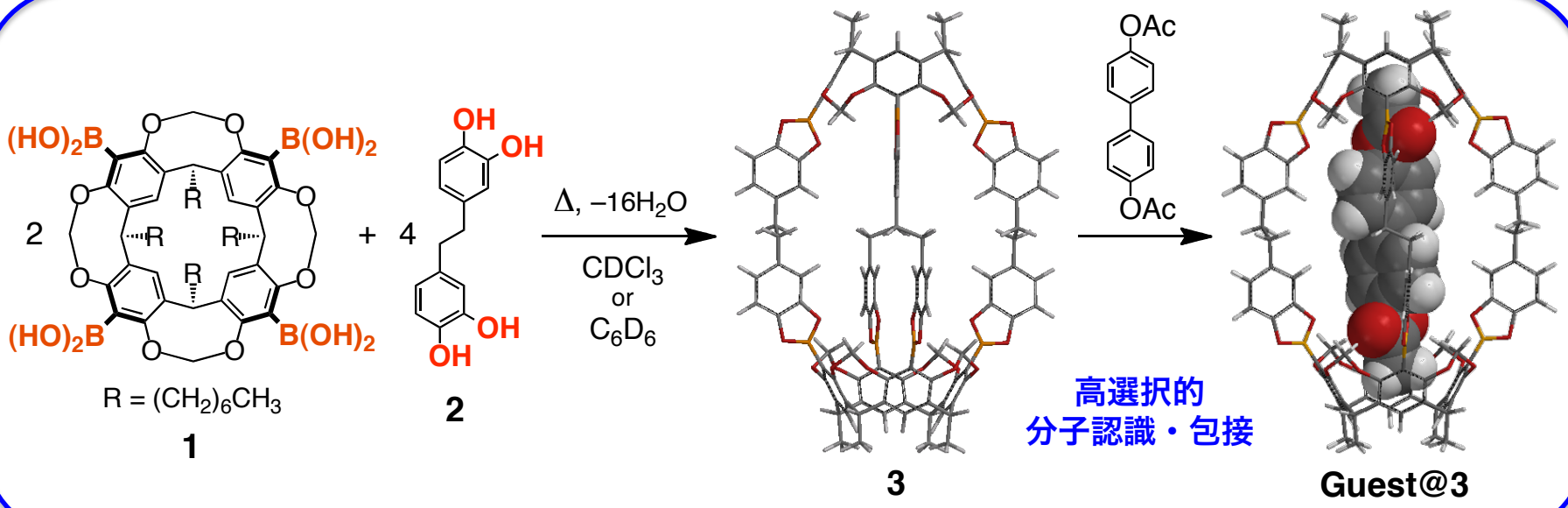
Major : minor
87 : 13

動的ホウ酸エステル結合カプセル

動的共有結合

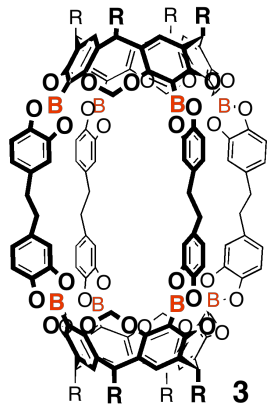
熱力学平衡下で形成する共有結合で、
共有結合の強さと結合形成・解離が可逆的という性質を併せ持つ
(共有結合と水素結合のメリットを併せ持つ)

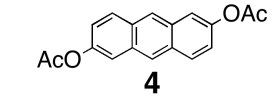




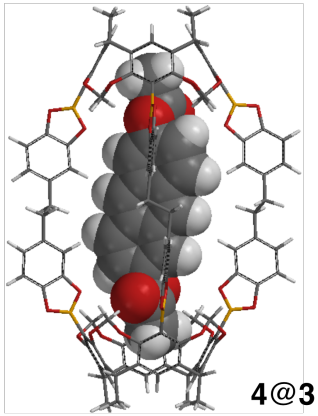
Angew. Chem. Int. Ed. **2008**, *47*, 6255. *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 777. *Chem. Eur. J.* **2015**, *21*, 13714.

ナノ保護容器：不朽発光材料への展開



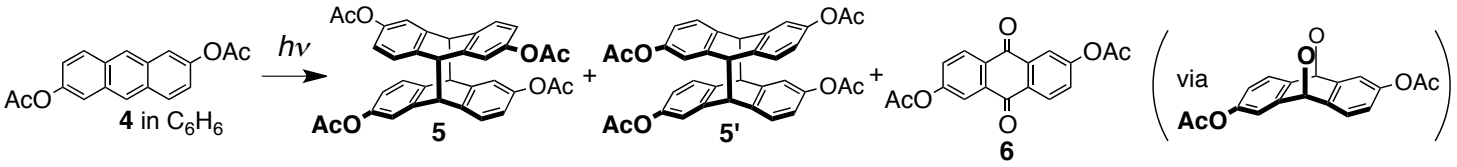


K_a = 1.83 x 10^6 M^{-1}
in C_6D_6 at 313 K

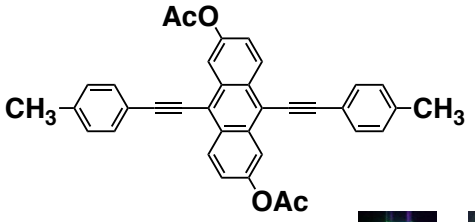


・包接により下記の光反応を防止
・ゲスト分子の発光特性を維持

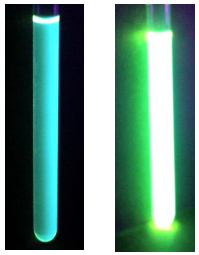
J. Org. Chem. **2010**, *75*, 6079.
(Featured Article)

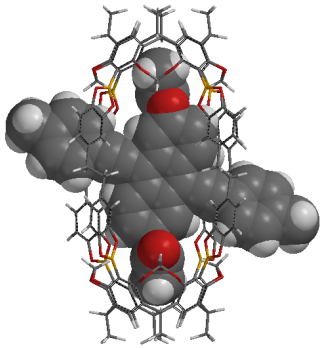


蛍光灯下200時間後の光安定性の比較

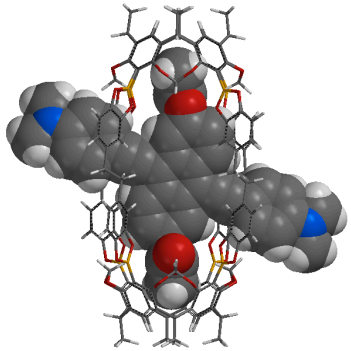


7
84%分解

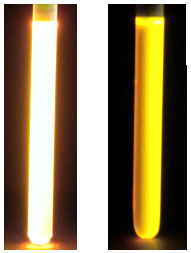


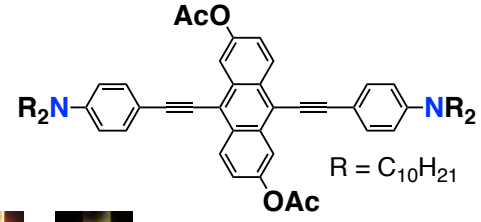


7@3
分解せず



8@3
分解せず



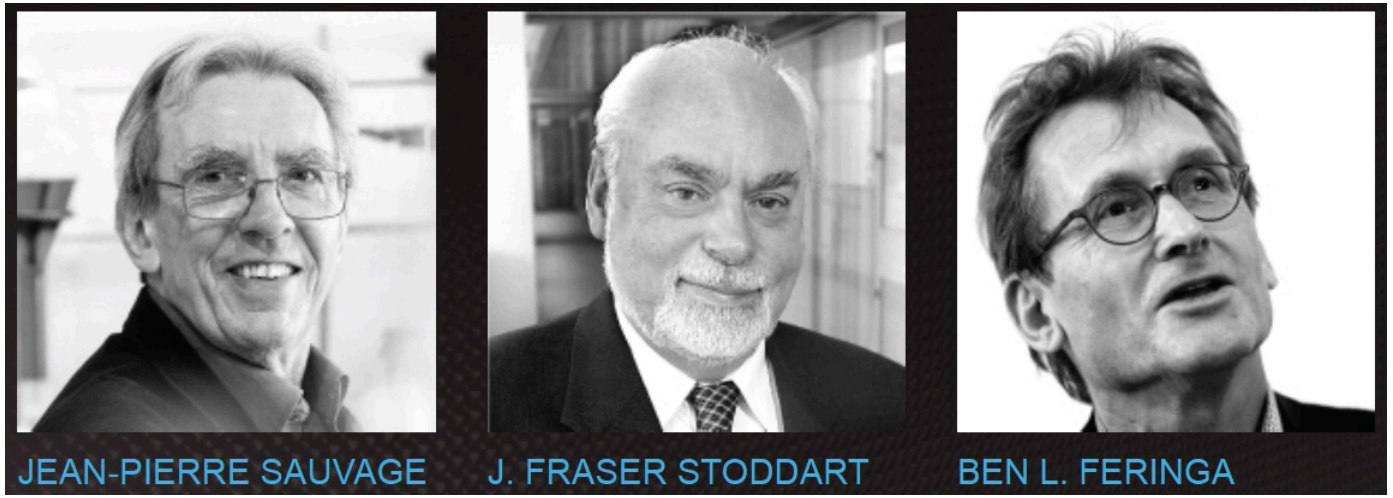


8
50%分解

Chem. Asian J. **2014**, *9*, 1282.

分子マシーンの設計と合成

2016年ノーベル化学賞



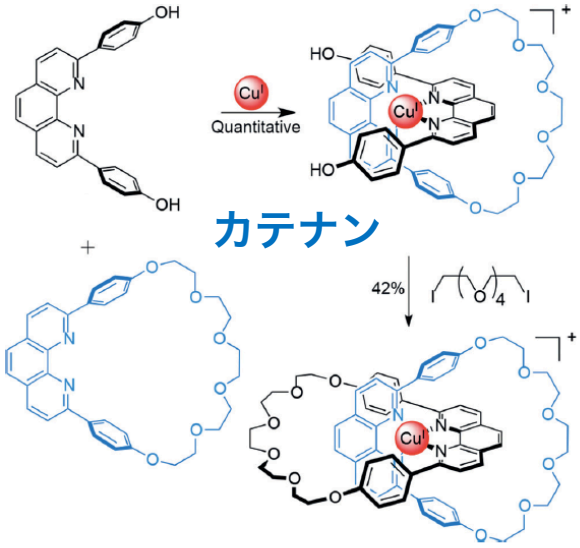


Figure 1. First template synthesis of a [2]catenane by Sauvage et al.[4]

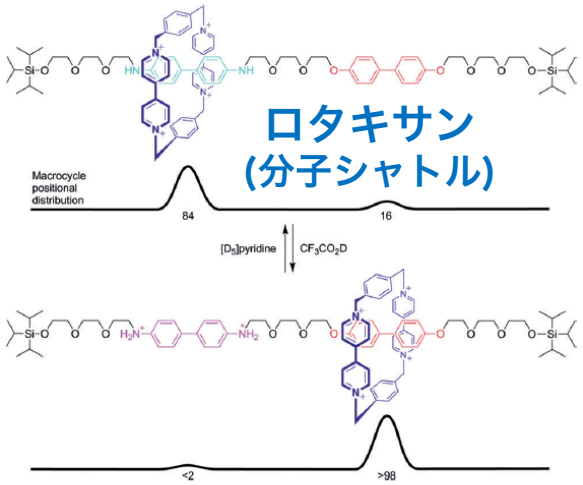


Figure 2. First switchable molecular shuttle by Stoddart et al.[8]

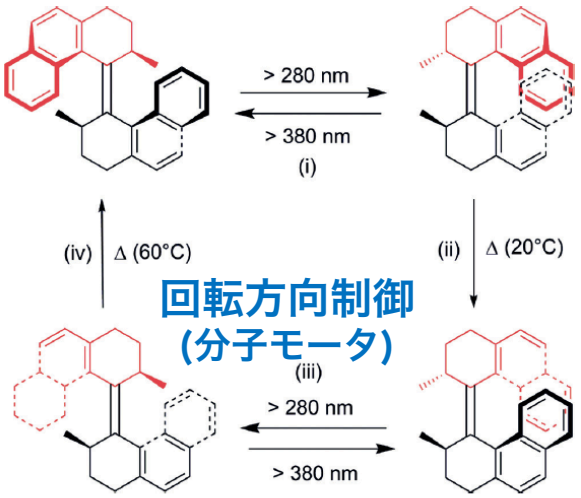


Figure 3. First light-driven rotary molecular motor by Feringa et al.[10]

引用：D. A. Leigh *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 14506.
Congratulations to the 2016 Nobel Prize Winners in Chemistry from ACS Publications.

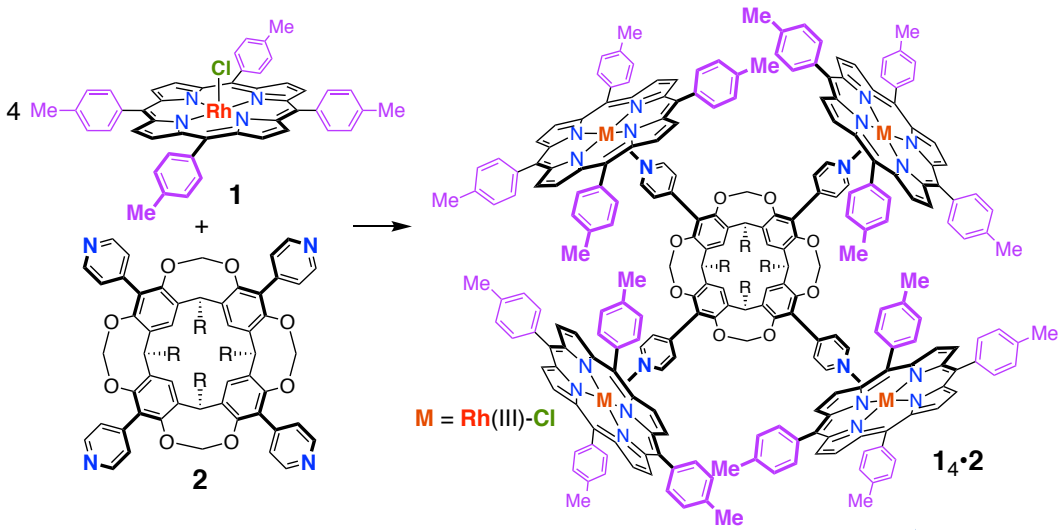


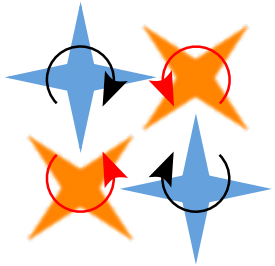
Spur Gear　Bevel Gear　Worm Gear　Spiral or Helical Gear

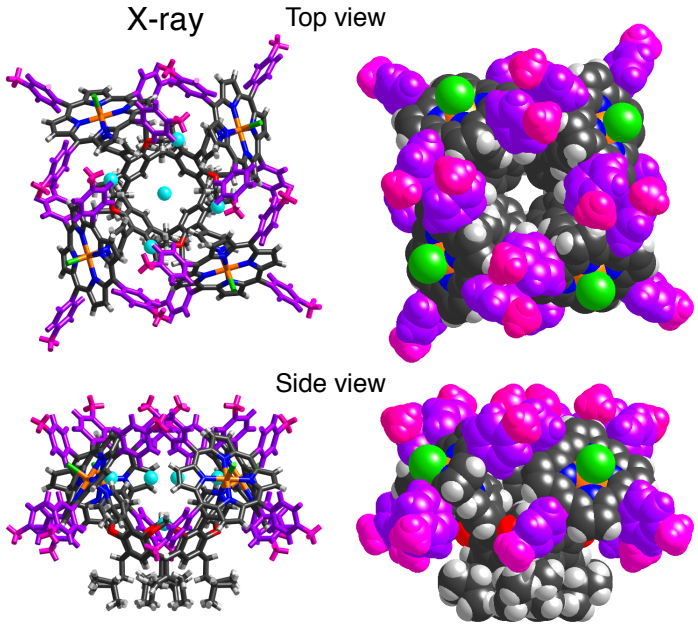
Reviews of Molecular Machines: J. Michl et al. *Chem. Rev.* **2005**, *105*, 1281; D. A. Leigh et al. *Chem. Rev.* **2015**, *115*, 10081.

分子集合カプセルから分子マシーンへの挑戦：分子ギア

Rh–NPy 配位結合軸上でポルフィリン同士は噛み合ってギア回転





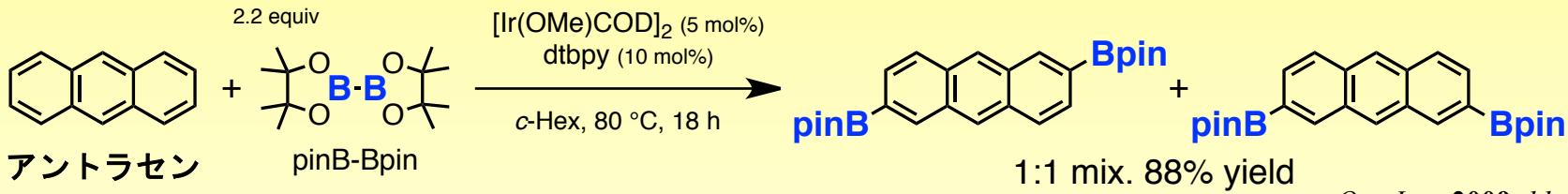


J. Am. Chem. Soc. **2016**, *138*, 12564.

有機π電子系の化学

アントラセンを基盤とするパイ共役拡張分子

2,6- & 2,7-ジボリルアントラセン：有用合成中間体



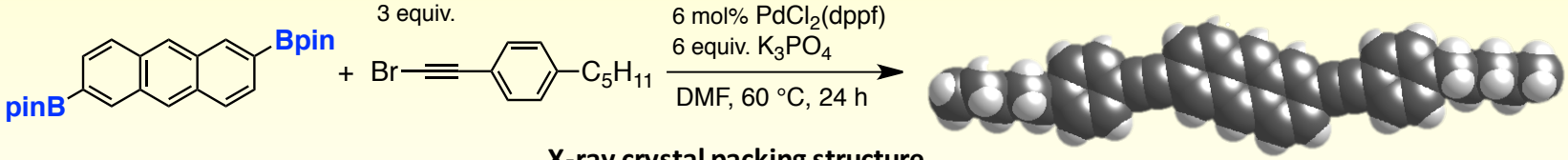
アントラセン　　pinB-Bpin

1:1 mix. 88% yield

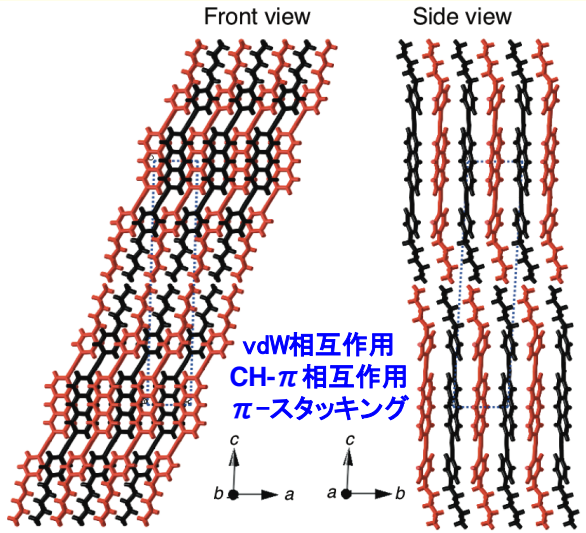
Org. Lett. **2009**, *11*, 3658.
Chem. Lett. **2011**, *40*, 941.

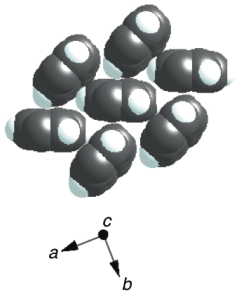
有機電界効果トランジスタ

鈴木-宮浦クロスカップリング反応



X-ray crystal packing structure





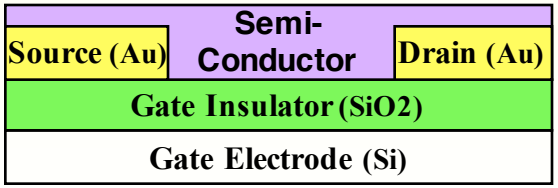
ドロップキャストだけで
μ_{FET} = 0.63 cm²/V·sを達成

Chem. Lett.
2016, *45*, 1403.

有機半導体のメリット:
軽量、大面積化、塗布、
曲げられる、
種々の誘導体合成可能

⇩

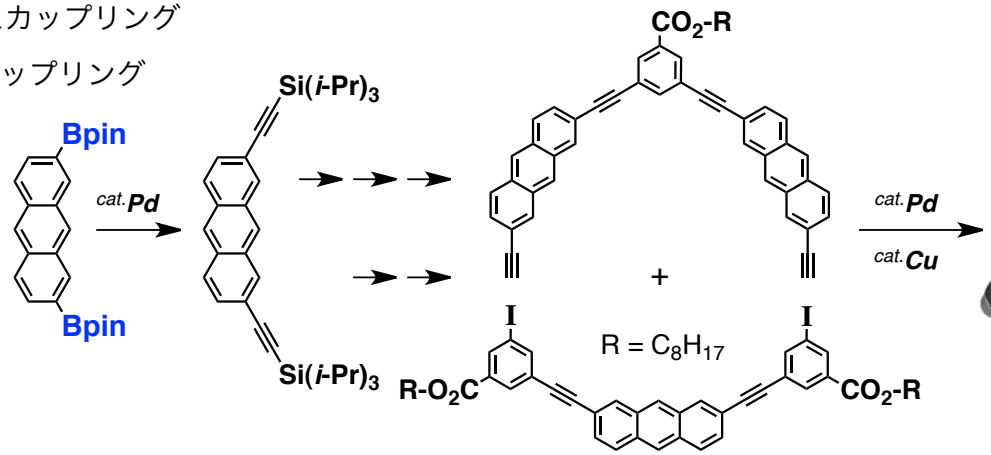
フィルムディスプレイ
電子ペーパー
ウエアラブルコンピュータ

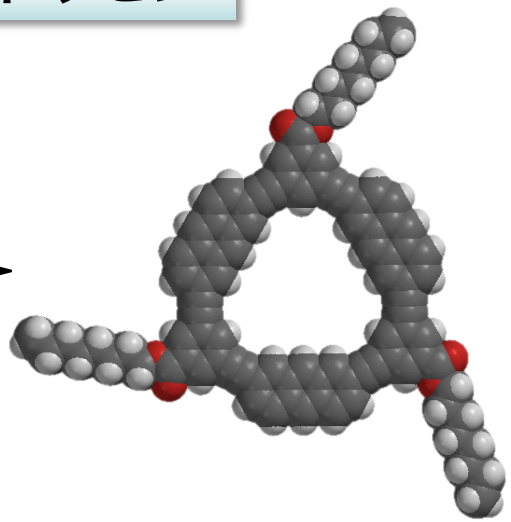


ゲートに電圧をかけたときのみ
有機半導体に電気(ホール)が流れる

平面性大環状パイ共役拡張アントラセン

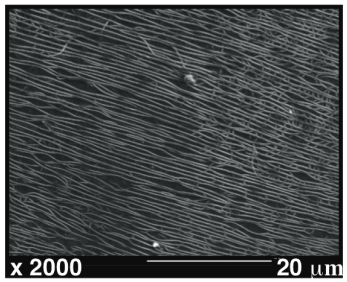
鈴木-宮浦クロスカップリング
&
薗頭クロスカップリング

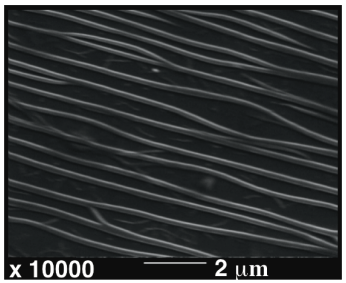


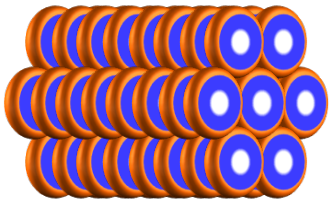


溶液をドロップキャストすると
直径約0.2 μm, 長さ約100μmの
ナノファイバーを形成

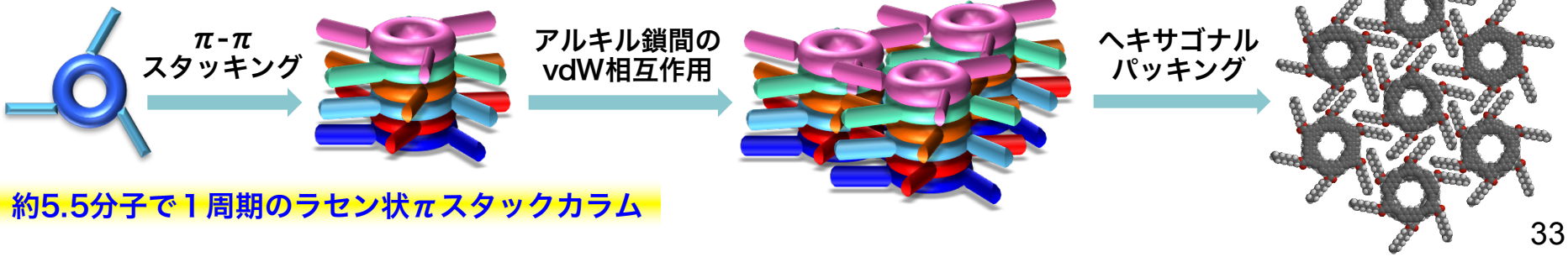
Chem. Eur. J. **2016**, *22*, 16760.







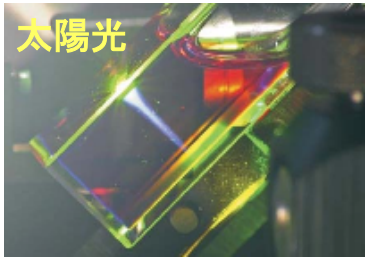
分子自己集合に基づくπ-スタックナノチューブ！ナノワイヤートランジスタ?



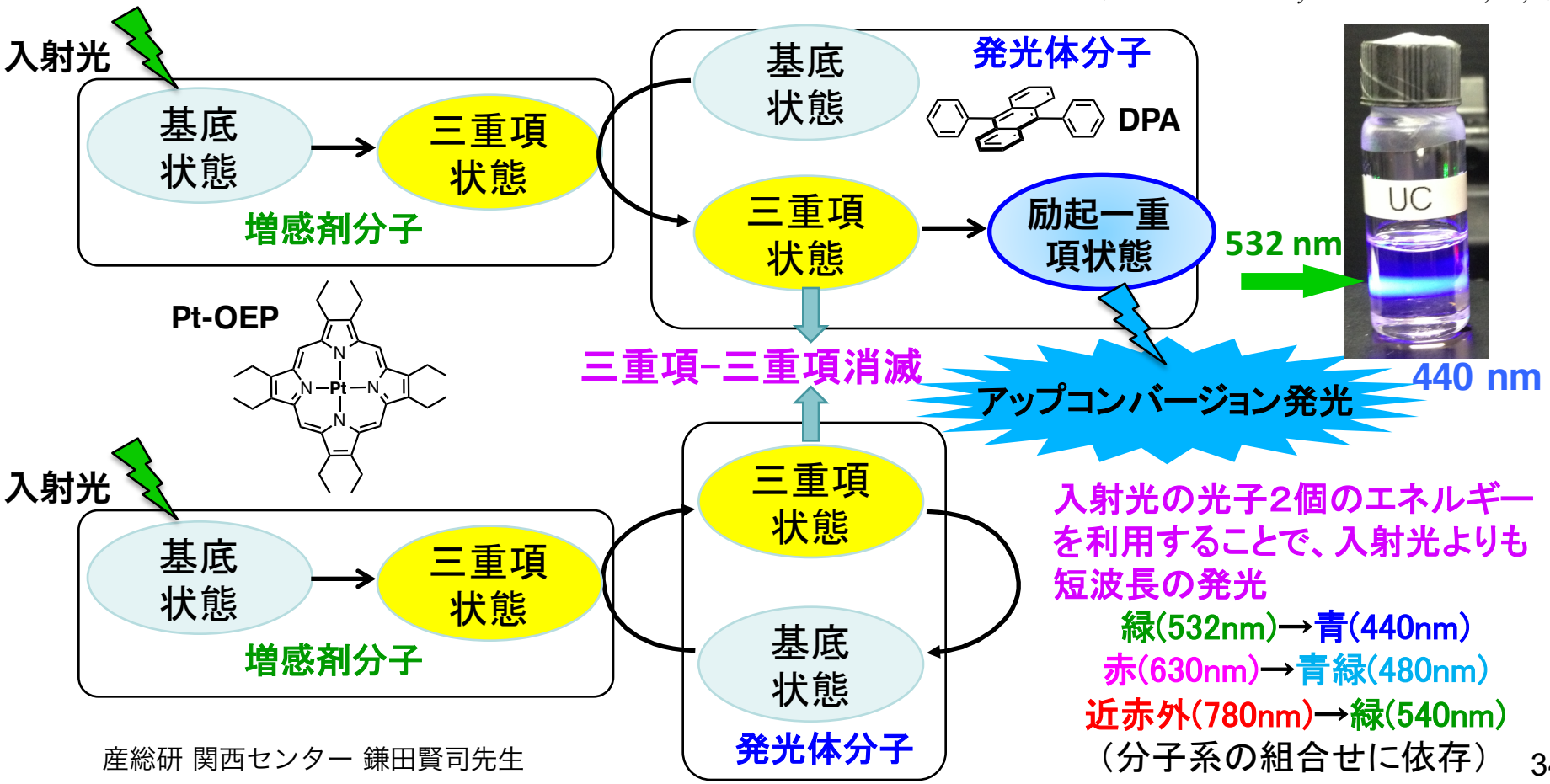
約5.5分子で１周期のラセン状πスタックカラム

三重項-三重項消滅過程を用いた光アップコンバージョン

・太陽光などの非レーザー光でも高い発光収率（～5%）
・増感剤分子が入射光を吸収、生成した三重項状態のエネルギーを発光体分子に受け渡し、それで生じた2個の発光体分子の三重項状態が三重項−三重項消滅を起こし、一方からアップコンバージョン光を発生（もう一方は基底状態に戻る）。
・*長波長の光を短波長の光に変換する現象・技術*



太陽光を用いた三重項−三重項アップコンバージョンの例
（Baluschev et al. *Phys. Rev. Lett.* **2006**, *97*, 7）

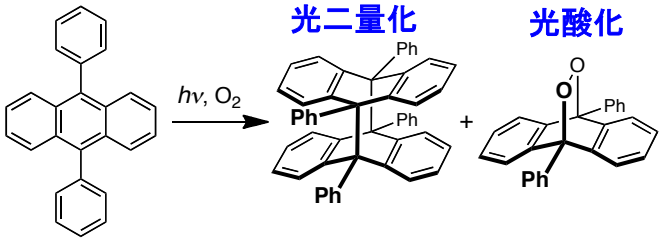


入射光の光子2個のエネルギーを利用することで、入射光よりも短波長の発光
緑(532nm)→青(440nm)
赤(630nm)→青緑(480nm)
近赤外(780nm)→緑(540nm)
（分子系の組合せに依存）

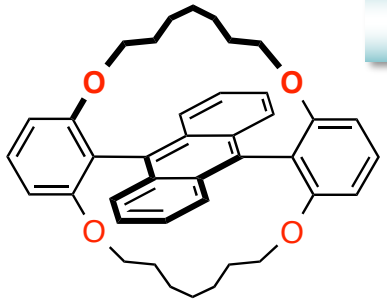
産総研 関西センター 鎌田賢司先生

9,10-ジフェニルアントラセン
（DPA）の光反応

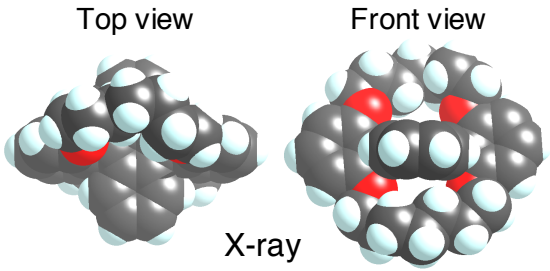
発光特性を失う



二重アルキレン(C7)ストラップ保護DPA



C7-sDPA



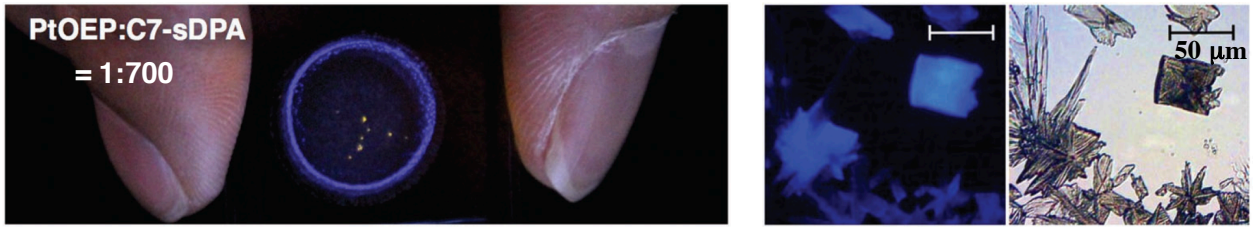
光二量化や光酸化耐性の大幅な向上
固相中でも優れた発光特性

J. Org. Chem. **2013**, *78*, 2206.
(Featured article)

C7-sDPAはTTA光アップコンバージョンの発光体としても有用

長波長の光を短波長の光に変換

迅速乾燥キャスト法
（飽和溶液を用いて）



C7-sDPA: UC-QY = 10~20% (excitation intensity = 10~50 mW cm^{-2})
DPA: UC-QY = 4~12% (excitation intensity = 500~1500 mW cm^{-2})

Excitation at 532 nm

産総研 関西センター 鎌田先生との共同研究
K. Kamada and K. Kobayashi et al. *Materials Horizons* **2017**, *4*, 83.

静岡産の有機機能ナノサイエンスを目指して



ご静聴ありがとうございました