

**7月30日と、  
8月6日(火)  
の講義は、  
休講となります！**

**来週(7/23)が最後です**

# 成績の付け方

1 1点×出席点 - 20

(一昨年とは1 1点×出席点 - 40)

出席点 =

SUM (出席日数×小テスト点数)

小テスト点数は100%満点

3行ルール、遅刻等で減点あり

# 公休申請について

メールで申告すること  
締切は、7月26日（金）

体調不良などについても相談すること。  
こちらからの返事は、講義終了後一括して行うので、気長に待つこと。  
8月6日を過ぎても何も連絡がない場合は、もう一度請求して下さい。

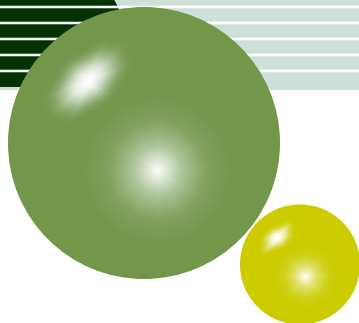
# 微粒子合成化学・講義 2019

# 触媒と反応速度

村松淳司

<http://kogi.mura.site/>

**E-mail: [mura@tohoku.ac.jp](mailto:mura@tohoku.ac.jp)**



# 触媒とは ～触媒学会webから～

- 水素と酸素から水が生成する反応  $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  を考えてみましょう. 水素と酸素の混合ガスをガラス容器に入れ 200°Cに加熱しても何の反応も起こりません. しかし, 混合ガスに少量の銅(Cu)を入れて加熱すると, 水素と酸素は速やかに反応して水を生成します. 反応後, 加えた銅には何の変化も起こっていません.
- このときCuがはたしている役割を図(省略)に示します.

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- $\text{Cu} \rightarrow \text{CuO} \rightarrow \text{Cu}$  のサイクルが1回転するたびに水が生成することになります。Cuは酸素と反応し消費され、生成したCuOは水素と反応しCuを再生します。
- サイクルを形成する2つの反応  $\text{Cu} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CuO}$  ,  $\text{CuO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Cu}$  はいずれも速く進行します。H<sub>2</sub>O生成反応速度はCuあるいはCuOの存在で増大します。このような形式で進む反応を触媒反応と呼び、サイクルを形成し、消費・再生を繰り返す物質を触媒と呼びます。

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- 自然界でも触媒反応が見られます。フロンが成層圏に到達し、紫外線により分解し塩素原子(Cl)を生ずると、これも紫外線によって酸素分子が分解して生じた酸素原子(O)とともに、次の二つの反応  $Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$  ,  $ClO + O \rightarrow O_2 + Cl$  が起こり、全体として  $O_3 + O \rightarrow 2O_2$  の反応が進行し、オゾン層が破壊されます。Clはオゾン( $O_3$ )と反応して消費され、生成したClOはO と反応し $O_2$  を生成するとともにClが再生されます。Cl(およびClO)が触媒として作用しています。

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- デンプンを分解するアミラーゼ, タンパク質を分解するペプシン, 油脂を分解するリパーゼなど, 我々の体内や他の生体内において化学反応を促進する酵素も触媒の働きをしています.



# 触媒とは ～触媒学会webから～

- 触媒は、固体、気体、液体のいずれの形態でもよく、作用中、自身は変化し続けますが、消費・再生を繰り返す。反応の前後で正味の増減はありません。触媒によって作り出される新しい経路を通して進む反応の活性化エネルギーは小さく、反応速度が大きいのです。
- ある反応系に光を照射すると反応速度が著しく増大することがあります。また、多くの反応では熱を加えると反応速度が増大します。しかし、光、熱は物質ではないので触媒とは呼びません。ただし、光を照射すると性質が変化し、触媒作用を示すようになる二酸化チタン ( $\text{TiO}_2$ )などの物質は光触媒と呼ばれます。

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- 触媒には、反応速度を増大させるほかに、特定の物質だけと反応したり、特定の物質だけを生成する働きがあります。例えば、エチレン( $C_2H_4$ )を触媒を使わないで酸素と反応させるには高温が必要で、生成物は二酸化炭素と水ですが、銀を触媒として用いると、より低温で主にエチレンオキシド( $C_2H_4O$ )が生成します。また、エタノール( $C_2H_5OH$ )を、濃硫酸とともに加熱すると、硫酸が触媒として働き、エチレンと水が生成します。

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- しかし、熱したCuにエタノールを触れさせると、エチレンは生成せずに、アセトアルデヒド( $\text{CH}_3\text{CHO}$ )と水素が生成します。また、酵素は、反応物(基質)の特定な立体構造を認識して反応を促進する触媒です。特定の物質だけと反応したり、特定の物質だけを生成する性質を選択性といい、選択性は触媒の種類によって異なります。適切な触媒を選ぶことによって、目的とする化合物を選択的に生成することができます。

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- 反応速度を増加させ、望みの化合物を選択的に生成する特質を持っている触媒は、化学工業で広く用いられています。窒素と水素からアンモニアを生成する鉄触媒の発見によって、アンモニアが工業的に生産され、窒素肥料が大量に生産され、その結果農作物の生産量が飛躍的に増大し、世界の人口の急激な増加に伴う食糧問題の解決に多大な貢献をしました。

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- ZieglerとNattaによるエチレン, プロピレンの立体規則的重合触媒の発明は, プラスチック工業を興し, 以後の材料関連工業に大変化をもたらしました. 原油から有機化学工業の原料となるナフサやガソリン, 灯油などの液体燃料を製造したり, ナフサから各種の化学品や中間原料を生成するプロセスはもちろん, 医薬, 農薬を合成するプロセスに至るまで, ほとんど全ての化学プロセスにおいて, それぞれの反応に適した触媒が用いられています.

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- 触媒は，化学品製造のためのみならず，環境負荷物質の低減のためにも広く用いられています．  
燃焼しても硫黄酸化物( $\text{SO}_x$ )を発生しない液体燃料をつくるため，石油中の硫黄成分を除去するのに硫化モリブデン( $\text{MoS}$ )触媒が用いられています．

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- 自動車の排ガスに含まれている窒素酸化物( $\text{NO}_x$ ), 一酸化炭素( $\text{CO}$ ), 未燃焼燃料を白金( $\text{Pt}$ ), ロジウム( $\text{Rh}$ ), パラジウム( $\text{Pd}$ )などの貴金属触媒を用いて窒素( $\text{N}_2$ ), 二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )や水( $\text{H}_2\text{O}$ )に転換したり, 工場や発電所の排煙中の窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )をバナジウム( $\text{V}$ ), タングステン( $\text{W}$ ), チタン( $\text{Ti}$ )からなる複合酸化物触媒を用いて除去しています.

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- また、日用品においても、空気清浄機や建物の外壁などに光触媒作用をする二酸化チタン( $\text{TiO}_2$ )が、防汚、消臭、殺菌のために用いられています。魚焼き器や石油ストーブから発生する臭いを消すためにも触媒が使われています。このように、触媒は、化学工業だけではなく、化学反応が起こる場面では常に利用される可能性があります。



# 触媒とは ～触媒学会webから～

- さて、Cuはなぜ水素と酸素から水の生成に触媒作用を示すのでしょうか、また、鉄(Fe)はなぜアンモニア合成の触媒になるのでしょうか。前者の場合にはCuは酸素分子( $O_2$ )を解離して酸素原子(O)を生成し、水素分子( $H_2$ )も解離して水素原子(H)を生成する能力があるからです。原子状の酸素、水素は分子状の酸素、水素に比べ反応性が高いのです。

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- 生成したOはCuと結合しCuOを形成し, CuOはHと反応して水を生成します. もしCuOがあまり安定すぎるならばHと反応することができず触媒のサイクルを形成できません. したがって, Cuでなくとも, 水素分子と酸素分子を解離し, 酸化物が安定すぎない金属も水生成の触媒となることができます. Cu以外でも, ほとんどの遷移金属は水生成の触媒として作用します. マグネシウム(Mg)など典型元素の金属の多くは, 水素や酸素を解離できますが, (酸化マグネシウム)MgOなどの酸化物が安定すぎるので水素原子とも反応できず, 触媒作用は示しません.

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- アンモニア合成の鉄(Fe)の触媒作用も、水素分子はもちろん、非常に強い結合を持つ窒素分子(N<sub>2</sub>)を解離して窒素原子(N)を生成することができるFeの化学的性質に因っています。Ziegler-Natta触媒は、オレフィンを活性化し重合する高い能力に加え、オレフィンの姿勢を制御できる性質があるために立体規則的な高分子の生成が可能になります。原油中の分子量の大きな炭化水素を分子量の小さい炭化水素に転換するために用いられるゼオライト触媒では、表面に存在するプロトン(H<sup>+</sup>)が炭化水素のC-C結合を切断することに作用します。

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- 酸化チタン( $\text{TiO}_2$ )の防汚, 消臭, 殺菌作用は,  $\text{TiO}_2$ が光を吸収することによって励起電子と正孔が生じ, これらがそれぞれ空気中の酸素を還元, さまざまな化学物質を酸化する働きをもつからです.

# 触媒とは ～触媒学会webから～

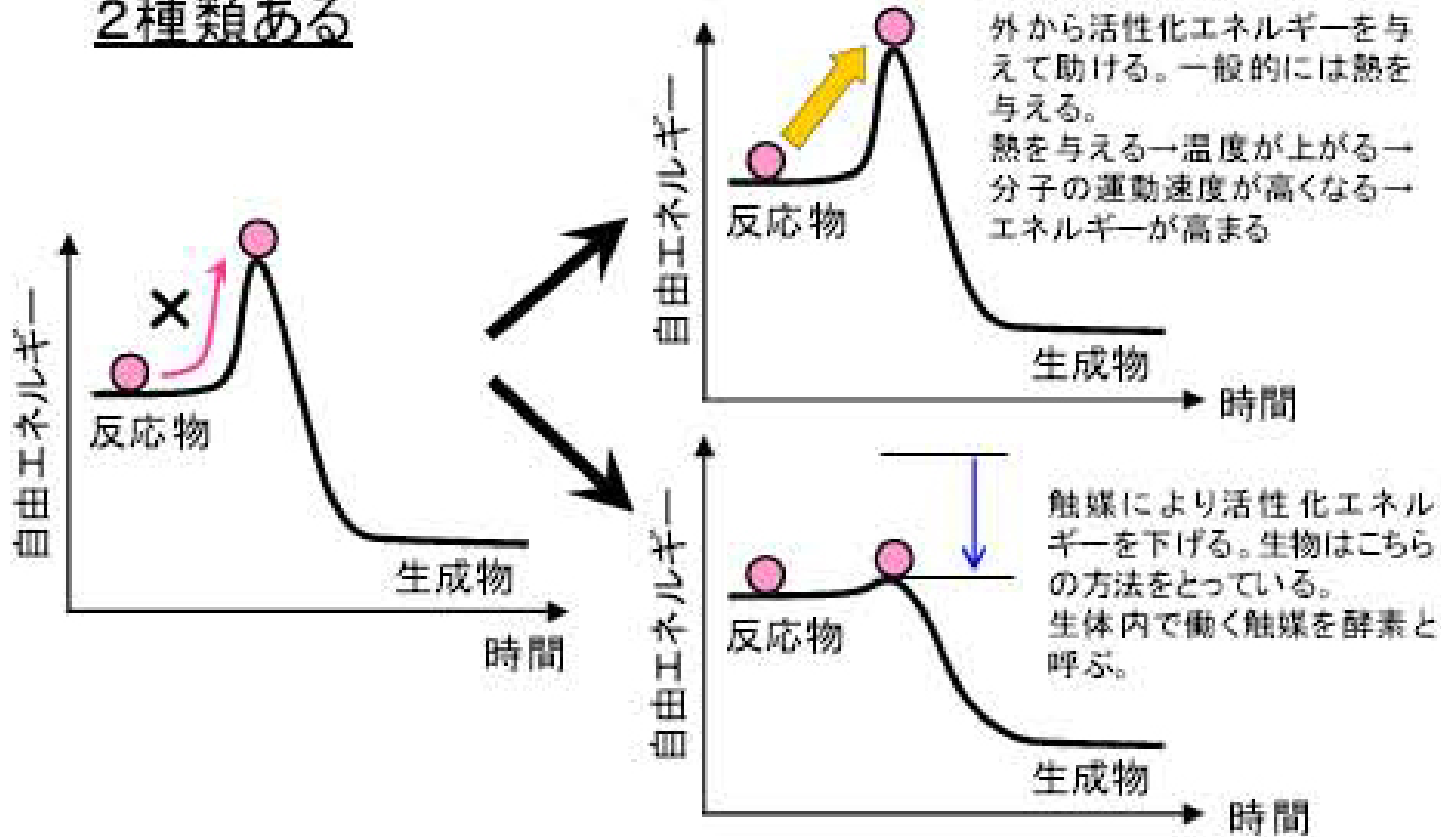
- このように、反応の種類によって、それに適した触媒の性質も異なり、触媒の作用機構も多様です。
- それでは、触媒の研究とはどのようなことをするのでしょうか。まず、触媒作用の解明、たとえば、どのように反応分子が活性化するのか、どのような経路を通過して反応が進むのか、反応の中間体は何か、触媒のどのような性質が触媒作用を起こすのかを明らかにする研究があります。

# 触媒とは ～触媒学会webから～

- また、触媒の設計と調製，すなわち，目的とする反応を促進する触媒が具備すべき物理的・化学的性質を基にして，活性や選択性の高い触媒を探索することや，新しい触媒機能を持つ物質の創製を目的とする研究もあります。
- 触媒学会は，これら研究の最新の結果を持ち寄り，討論し，新しいアイデアや情報を交換する場を提供しています。

# 触媒とは

活性化エネルギーの高い反応を進める方法は  
2種類ある



# 触媒の歴史 その1

- **イェンス・ヤコブ・ベルセリウス (Jöns Jacob Berzelius, 1779年8月20日 – 1848年8月7日)**
  - スウェーデンの化学者、医者
  - 化学を有機化学と無機化学の2つに分け、ハロゲン・同素体・異性体・有機物・触媒・非結晶 (Amorphie) などの化学上重要な用語や概念を創案
- **ウィルアム・フレンドリッヒ・オストワルド (Friedrich Wilhelm Ostwald, ラトビア語: Vilhelms Ostvalds, 1853年9月2日 – 1932年4月4日)**
  - ドイツ (バルト・ドイツ人) の化学者
  - 硝酸の製法であるオストヴァルト法を考案 (1902年)
  - 触媒は速度論に従うことを言及



# 触媒の歴史 その2

- **1801**
  - ハンフリー・デービー(イギリス)による燃料電池の原理の発明
- **1817**
  - ハンフリー・デービー(イギリス)による、加熱白金線による発火点以下の水素, 一酸化炭素, エチレン, アルコール, エーテルなどの燃焼に関する公開実験
- **1836**
  - テオドール・シュワン(ドイツ)によるペプシンの発見
- **1839**
  - ウィリアム・ロバート・グローブ(イギリス)による燃料電池の発電実験の成功

# 触媒の歴史 その3

## ■ 1894

- 高峰讓吉による、麹菌からジアスターゼを抽出した、タカジアスターゼの発明

## ■ 1897

- ポール・サバチエ(フランス)による有機不飽和化合物の水素を添加する接触還元法の発見(サバチエ=サンドラン還元)

## ■ 1902

- フリッツ・ハーバーとカール・ボッシュ(ドイツ)による、鉄を主体とした触媒上で水素と窒素からアンモニアを生産する方法の発明

## ■ 1902

- ウィルアム・フレンドリッヒ・オストワルド(ドイツ)による、白金触媒によるアンモニアからの硝酸合成

# 触媒の歴史 その4

## ■ 1913

- ウィルアム・フレンドリッヒ・オストワルド(ドイツ)は、触媒は反応速度を変化させるが、平衡を変えない、と触媒の概念を発表

## ■ 1913

- BASF社のMittasch, Schneiderら： 酸化物触媒による、水性ガスからのメタノール合成

## ■ 1925

- フランツ・フィッシャーとハンス・トロプシュ(ドイツ)による一酸化炭素と水素からFe系触媒による液体炭化水素の合成

## ■ 1949

- 白金／アルミナ触媒によるナフサの接触改質

# 触媒の歴史 その5

## ■ 1953

- カール・ツィーグラ―(ドイツ)によるエチレンの常圧重合法発明。その後、ジュリオ・ナッタ(イタリア)によるプロピレンの重合に成功。ツィーグラ―・ナッタ触媒。

## ■ 1972

- 本多・藤嶋効果。水からの水素、酸素生成。

## ■ 1979

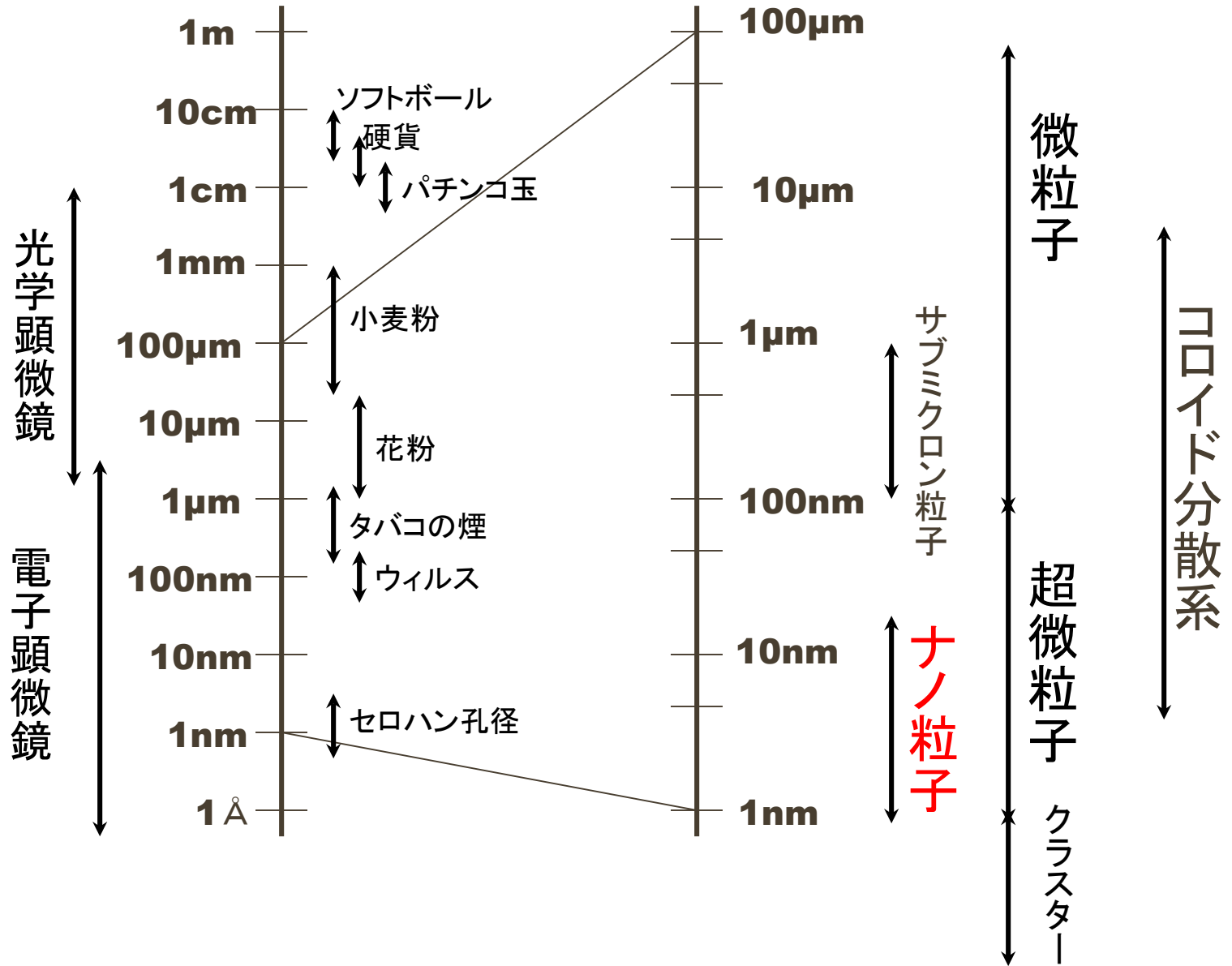
- パラジウム触媒を用いて有機ハロゲン化合物と有機ホウ素化合物を結び付ける「鈴木・宮浦カップリング」を発見

## ■ 1986

- 野依良治による、BINAP-ルテニウム触媒の発明

# ナノ粒子と触媒

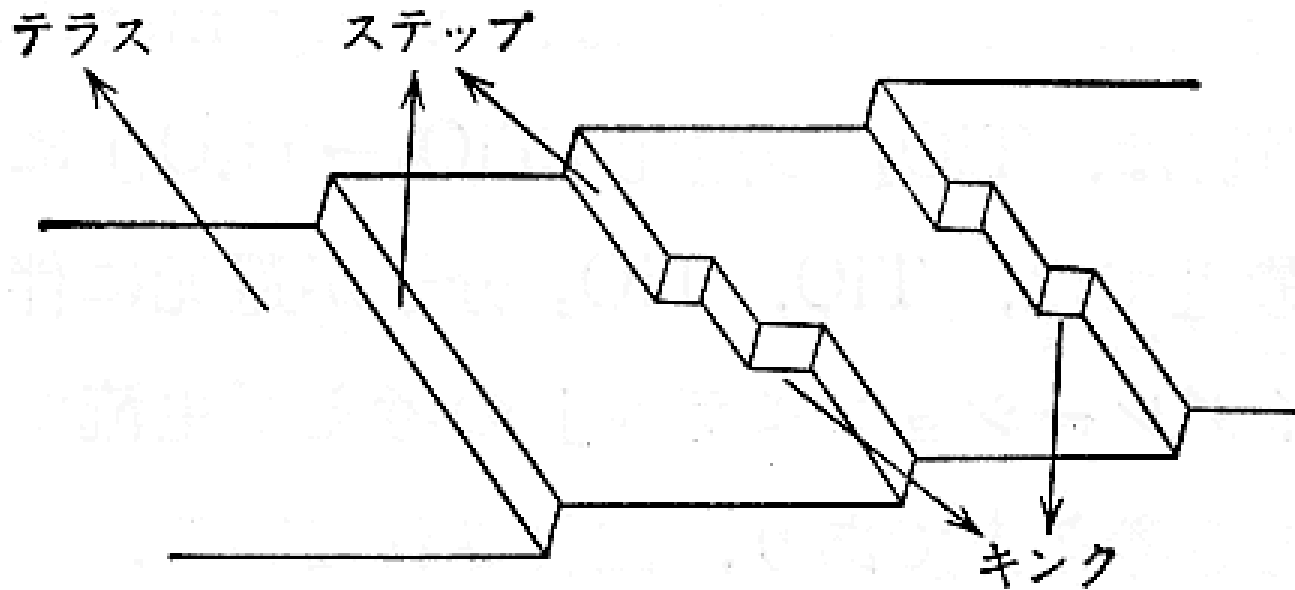
# 粒子径による粒子の分類



# ナノ粒子

- $10^{-9}$  m = 1 nm
- 10億分の1mの世界
- 原子が数～十数個集まった素材
- バルクとは異なる物性が期待される
- バルク原子数と表面原子数に差がなく、結合不飽和な原子が多く存在する

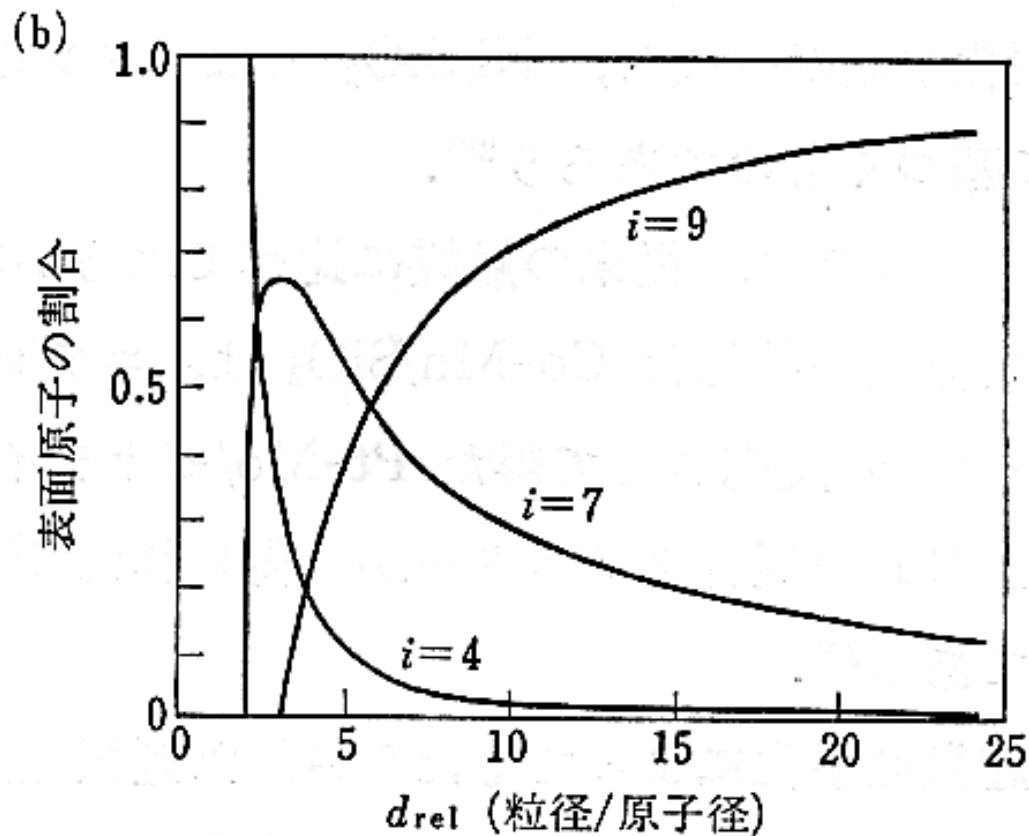
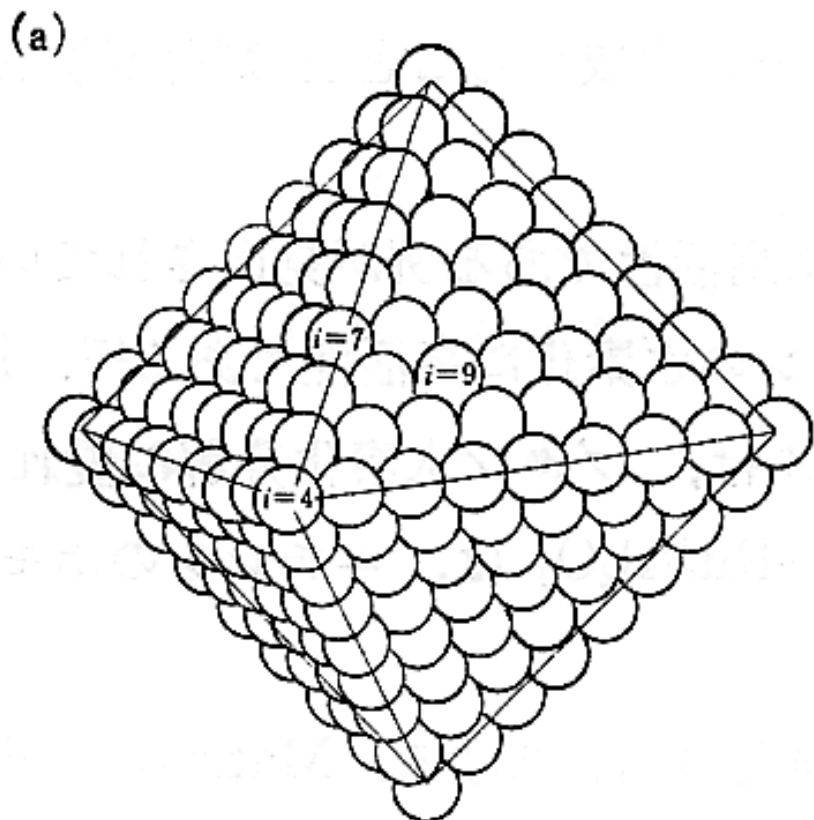
# 表面構造と触媒機能



金属単結晶表面上の原子.



# 表面構造と触媒機能



金属表面原子の構造と数.

# 比表面積の計算

$$A_S = 4\pi r^2, \quad V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$\text{比表面積} = \frac{A_S}{Vd} = \frac{3}{rd}$$

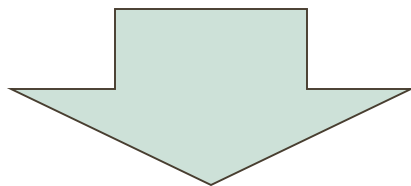
( $d$ は比重)

# 触媒

- **工業触媒**
  - 活性、選択性、寿命、作業性
- **触媒設計**
  - 表面制御
  - バルク制御
- **表面制御**
  - 金属触媒→金属種、価数、組成、粒径など
    - 担体効果、アンサンブル効果、リガンド効果

# 活性

- **活性点1つあたりのturnover frequency**
  - 1サイトあたりの表面反応速度
- **触媒材料全体としての活性**



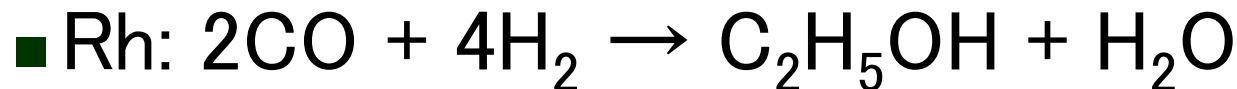
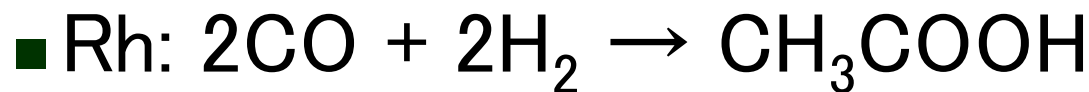
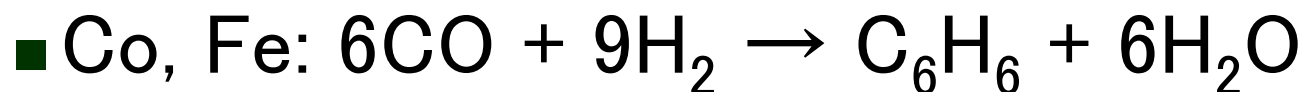
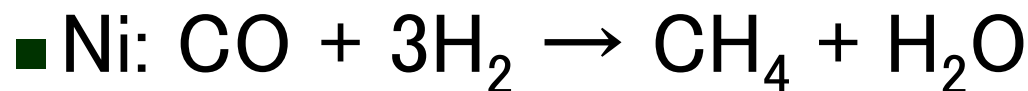
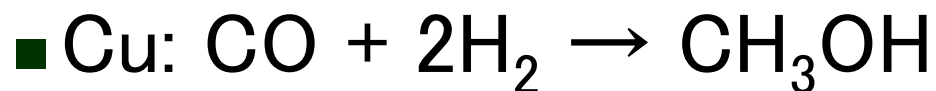
触媒全体の活性は全表面積に依存  
しかし、構造に強く依存する場合もある(後述)

## ■ 触媒寿命

- 同じ活性選択性を持続する
- 工業的には数ヶ月から1年の寿命が必要
- 失活
  - 主にシントリングや触媒物質自身の変化

## ■ 特定の反応速度だけを変化させる

– COの水素化反応



– 反応条件にも左右される

# 酸化状態の制御の例

## ■ Mo/SiO<sub>2</sub>触媒

– COの水素化反応→炭化水素、アルコール合成

■ Mo(金属状態)→低級炭化水素を生成

– Mo金属上でCOは解離し、アルコールは生成しない

■ Mo(4+)→低活性で極僅かにメタノールを生成

– Mo(4+)上ではCOは非解離吸着し、-CO部分を保持

■ Mo(金属)とMo(4+)→混合アルコールを生成

– 解離したCOから炭素鎖を伸ばす-CH<sub>2</sub>が生成

– 末端に-COが付加し、水素化されてアルコールに

# サイズ制御

- 比表面積を大きくし全体の触媒活性を増大
- TOF (Turnover Frequency)がサイズに依存
  - 量子効果



$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$S = 4\pi r^2$$

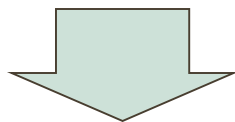
$$\therefore \text{比表面積} SSA = \frac{S}{V d} = \frac{3}{r d}$$

$d$ は密度

半径が小さくなるほど、比表面積は大きくなる！

# 触媒設計

- **表面情報の正確な把握**
- **精密な表面機能制御**



- **局所構造制御と評価が重要**

# 触媒の分類

## ■ 均一系触媒

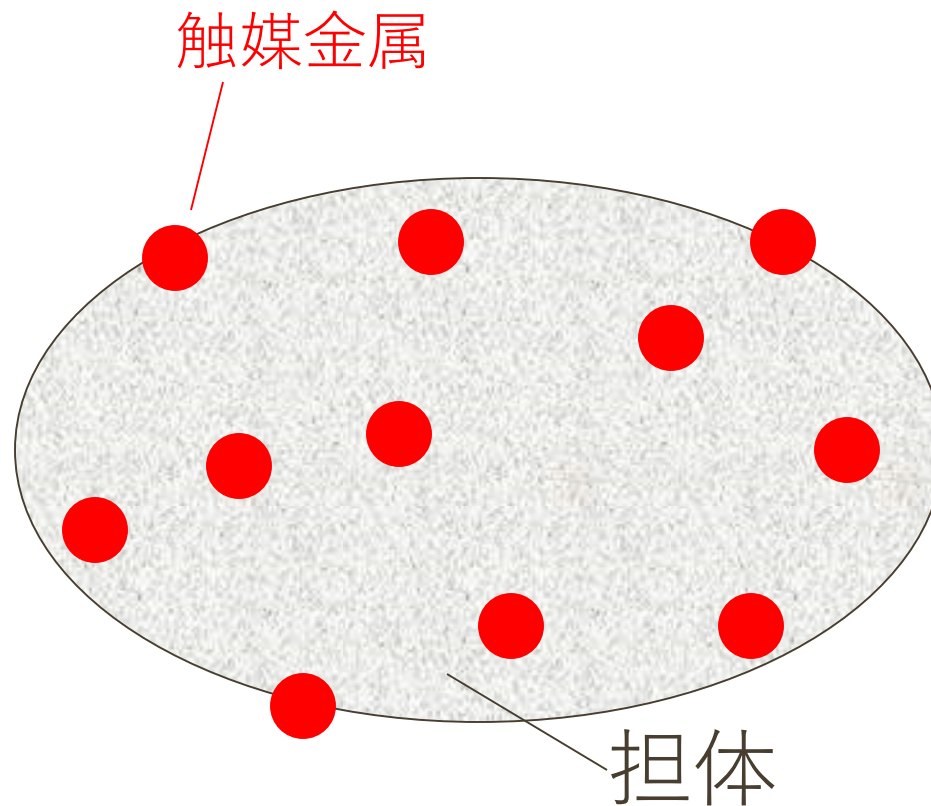
- 反応物、生成物と同じ相
- 例： 酢酸合成のロジウム触媒
  - 液相均一系 触媒も液体

## ■ 不均一系触媒

- 相が違ふもの
- 例： 固体触媒
  - 担持触媒、無担持触媒

# 担持金属触媒

- 担体物質上に、触媒金属が担持されている
- 担体は粉体か、塊状態である



# 担持金属触媒

## ■ 担体

- 金属酸化物が多い
- 細孔が発達しているものが多い
- 機械的強度に優れている

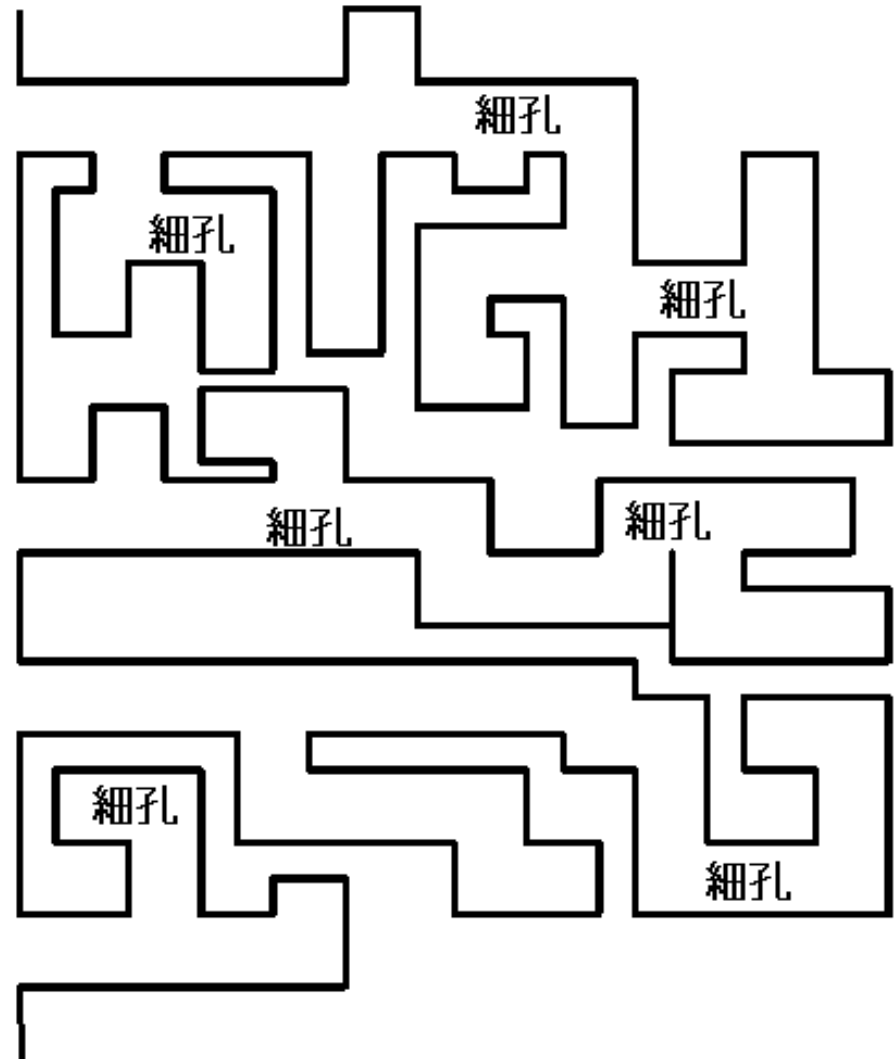
## ■ 触媒金属

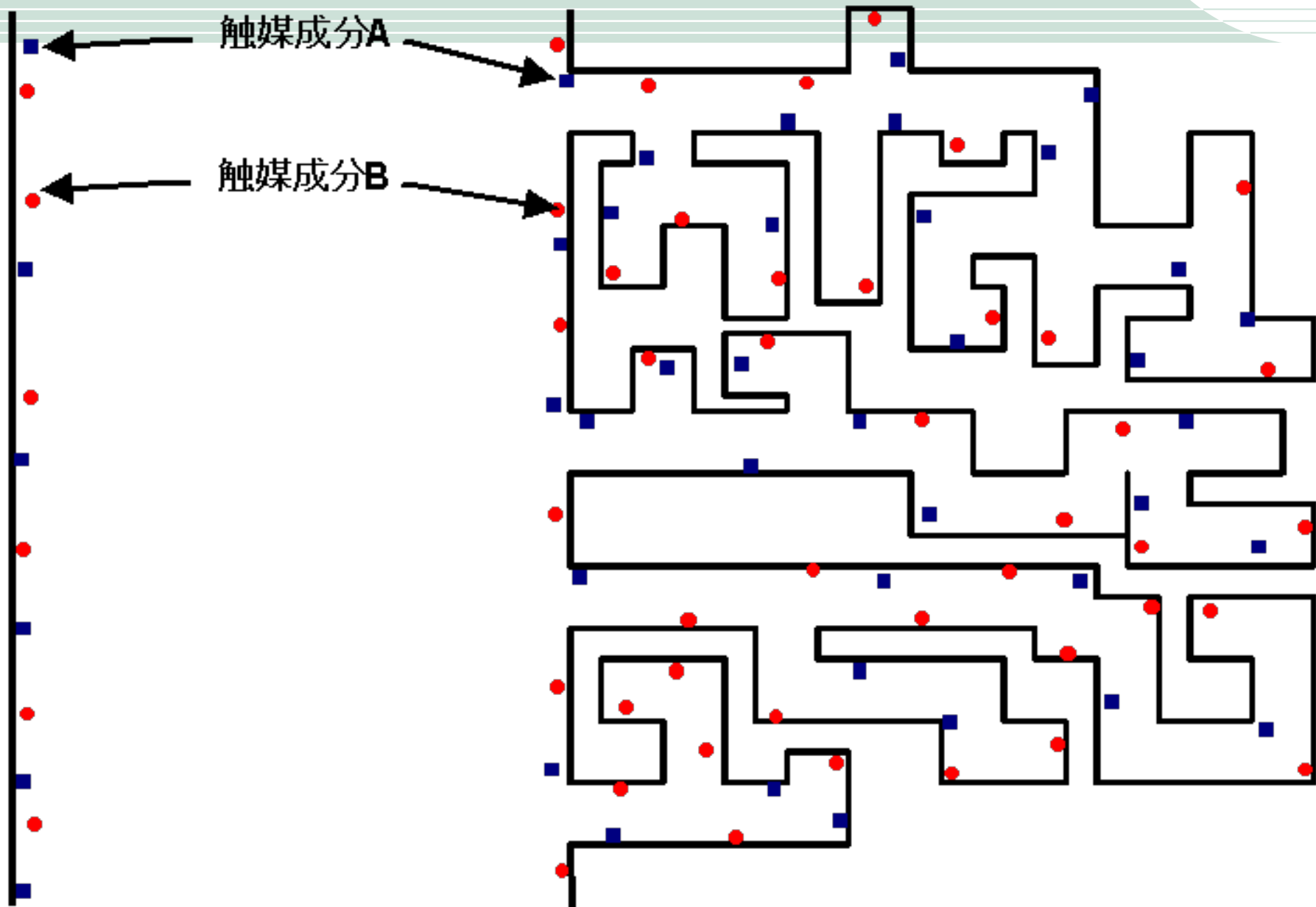
- 担体上に担持、分散
- 数nm程度の大きさが理想とされる
- 実際は5～50nm程度の場合が多い

# 担体： 比表面積が大きい

細孔のない物質

細孔の発達した物質

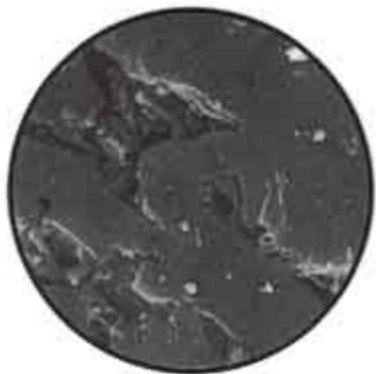




# 担体の例： 活性炭

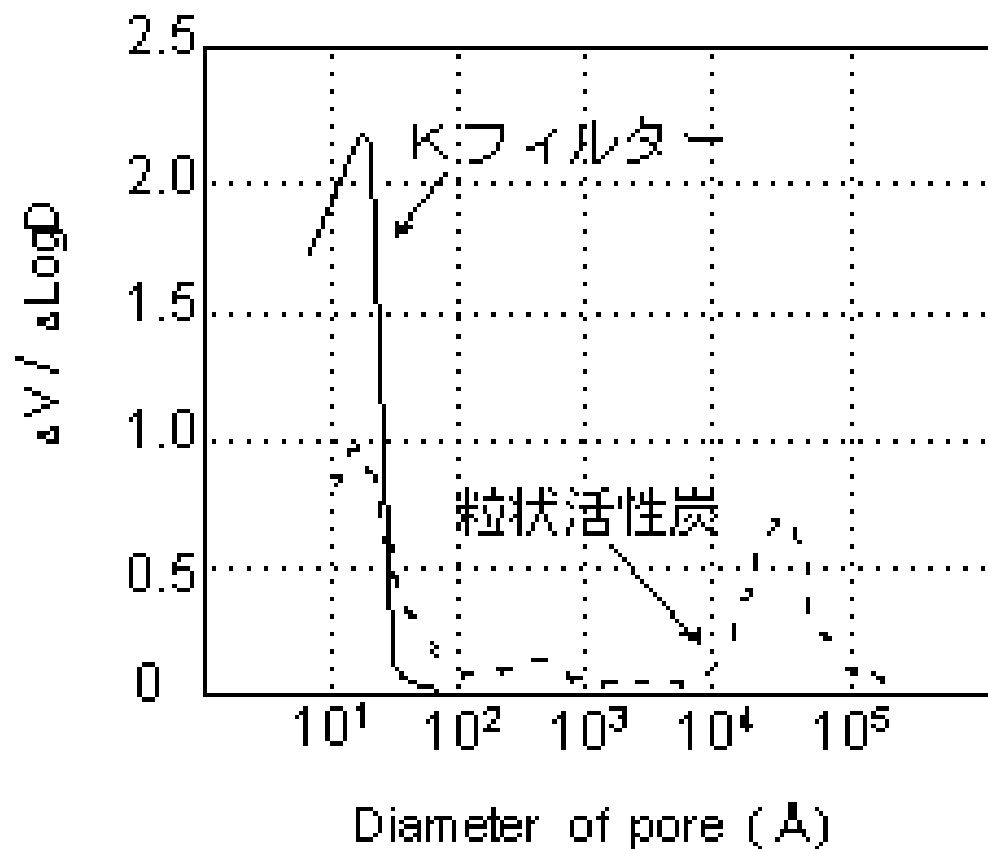
- ヤシガラ活性炭      石炭系活性炭

- 木炭系



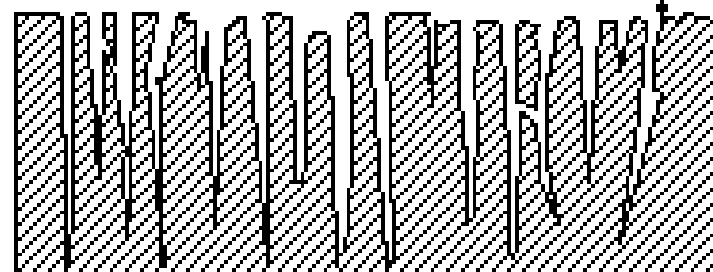


# 活性炭



Kフィルター

Micro pore

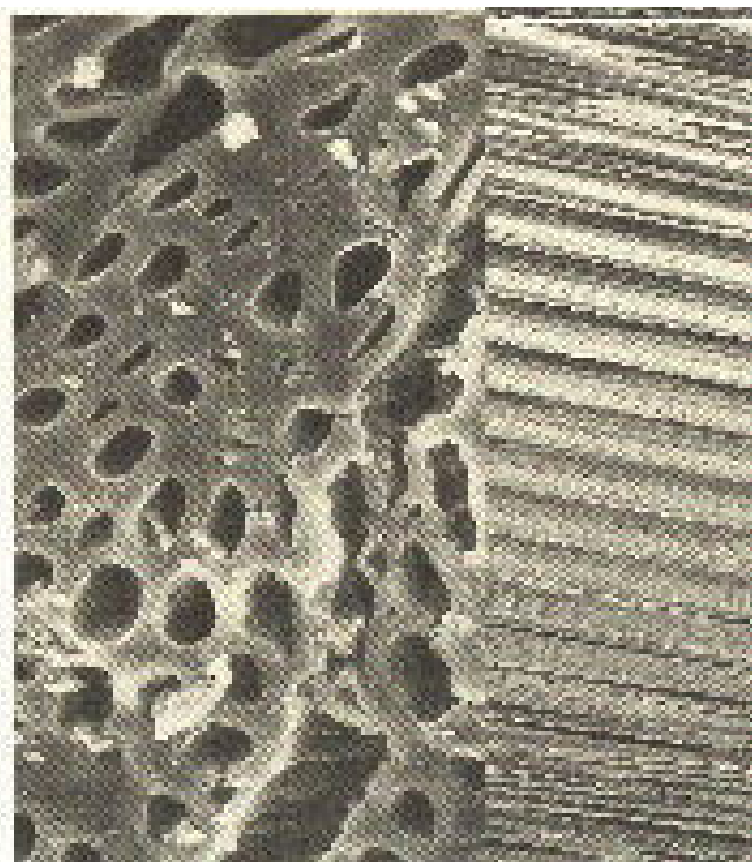
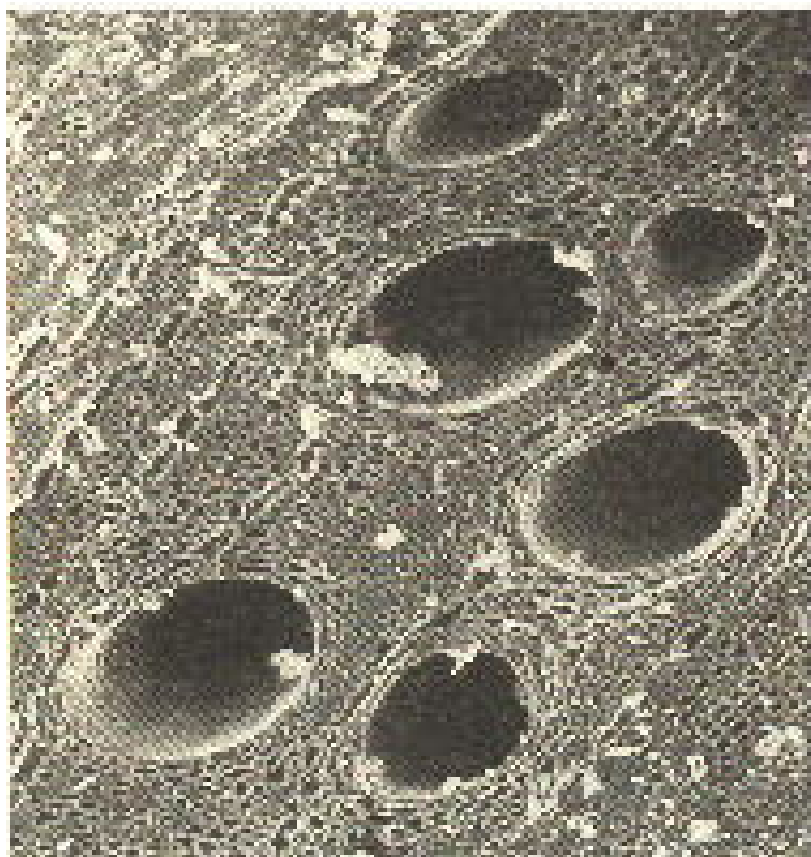


粒状活性炭

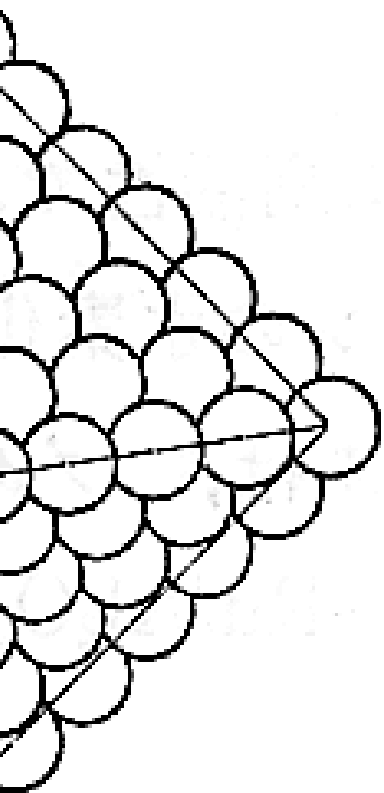
Macro pore



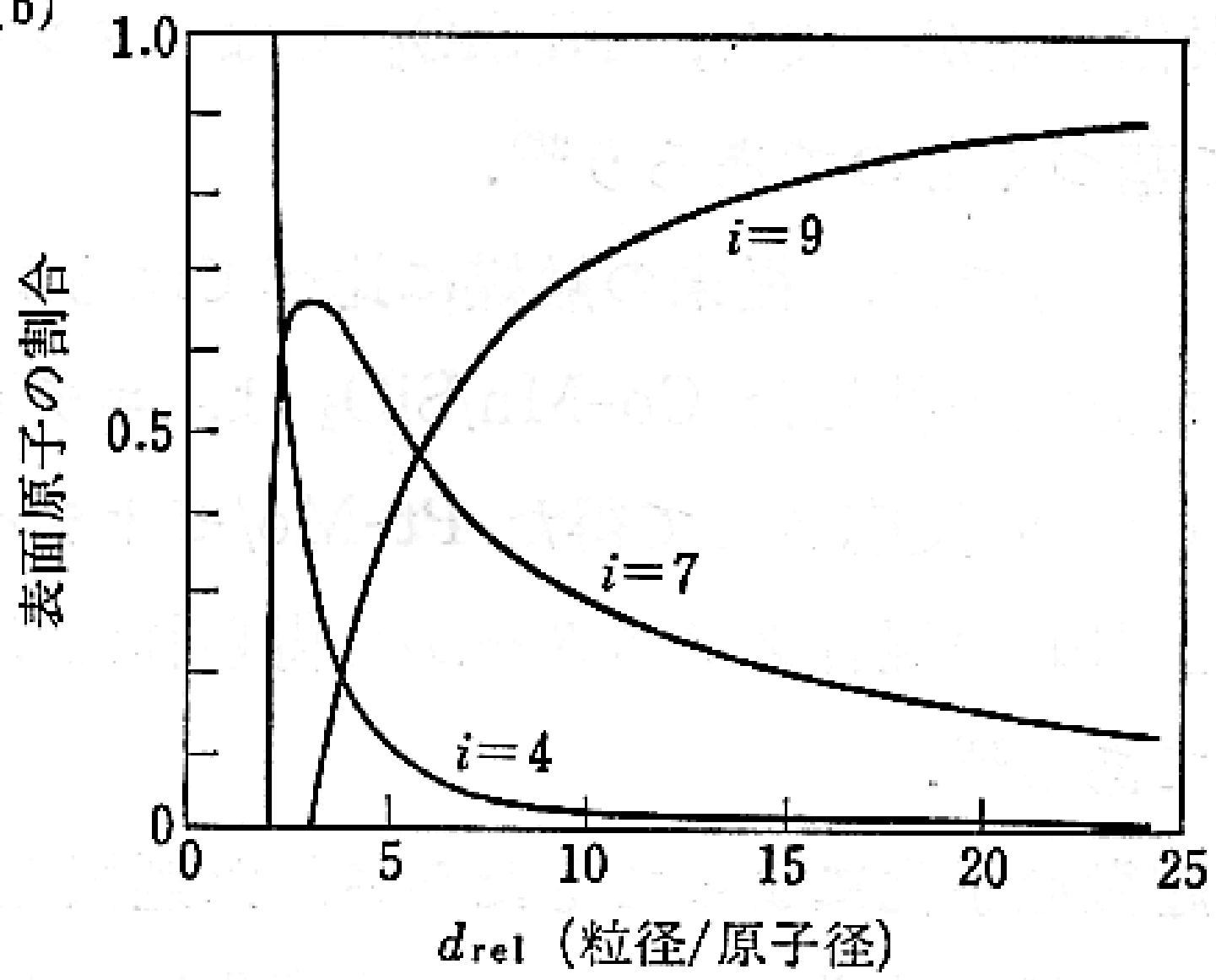
# 木炭の表面



# 触媒反応の基礎



(b)



金属表面原子の構造と数.

# 構造敏感・構造鈍感

## 構造鈍感

- 表面積が大きくなる効果のみ現れる

## 構造敏感

- 触媒活性は粒径に依存
  - 粒径が小さいほど大きい
  - 粒径が大きいほど大きい
  - ある粒径で最大となる

表 1 ターンオーバー頻度 (TOF) と粒径との関係

<b>I型</b> (TOF は粒径に依存しない)	
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Pt/SiO <sub>2</sub> <sup>a)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_8$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>b)</sup>
$\triangle, \square + \text{H}_2 \rightarrow \triangle, \square$	Pt/SiO <sub>2</sub> , Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>c)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_8 + \text{H}_2$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>d)</sup>
<b>II型</b> (TOF は粒径が小さいほど大きい)	
$\text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$	Ni/SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>e)</sup> , Pt-black <sup>f)</sup>
$\triangle + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8$	Rh/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>g)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2 \rightarrow \triangle$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>h)</sup>
$\text{C}-\text{C}-\text{C} + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}-\text{C}-\text{C} + \text{CH}_4$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>i)</sup>
$\triangle + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>j)</sup>
$\text{C}_2\text{H}_6 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4$	Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>k)</sup>
<b>III型</b> (TOF は粒径が小さいほど小さい)	
$\text{C}_2\text{H}_6 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>l)</sup>
$\text{C}_3\text{H}_8 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>m)</sup>
$\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	Pt/SiO <sub>2</sub> <sup>n)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2 \rightarrow \triangle$	Rh/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>o)</sup>
$\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$	Ni/SiO <sub>2</sub> <sup>p)</sup>
$\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6$	Ru/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>q)</sup> , Co/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>r)</sup>
$\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	Rh/SiO <sub>2</sub> <sup>s)</sup>
$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$	Fe/MgO <sup>t)</sup>
<b>IV型</b> (TOF はある粒径で最大となる)*	
$\text{H}_2 + \text{D}_2 \rightarrow 2\text{HD}$	Pd/C, Pd/SiO <sub>2</sub> (13 Å) <sup>u)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_8$	Ni/SiO <sub>2</sub> (12 Å) <sup>v)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_8$	Rh/SiO <sub>2</sub> (18 Å) <sup>w)</sup>

\* ( ) 内は最大の TOF を与える粒径。

文献) a) *Adv. Catal.*, 20, 153, b) *J. Catal.*, 5, 111 (1966), c) *J. Catal.*, 6, 92 (1966); 85, 530 (1984), d) *J. Catal.*, 5, 471 (1966), e) *J. Phys. Chem.*, 70, 2257 (1966), f) *J. Phys. Chem.*, 67, 841 (1963), g) *J. Catal.*, 56, 21 (1979), h) 5th I.C.C., 695 (1972), i) *J. Catal.*, 11, 35 (1968), j) 4th I.C.C., 286 (1971), k) *Chem. Lett.*, 1988, 265, l) *Hi*, 1975, 1646, m) *J. Catal.*, 53, 365 (1978), n) *J. Catal.*, 53, 414 (1978), o) *J. Catal.*, 68, 419 (1981); 87, 27 (1984), p) *J. Catal.*, 65, 335 (1980), q) *J. Catal.*, 51, 386 (1978); 75, 251 (1982); *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 57, 938 (1984), r) *J. Catal.*, 85, 78 (1984), s) *Chem. Lett.*, 1984, 1607, t) *J. Catal.*, 37, 513 (1975), u) *Hi*, 1984, 1011, v) 5th I.C.C., 671 (1972), w) *J. Catal.*, 69, 180 (1981).

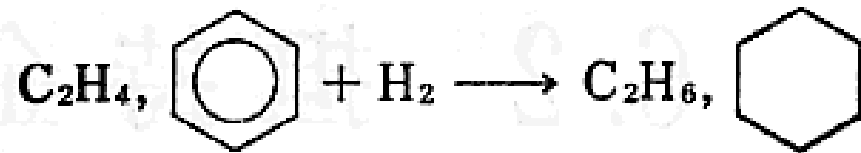
# 構造敏感・構造鈍感

ターンオーバー頻度 (TOF) と粒径との関係

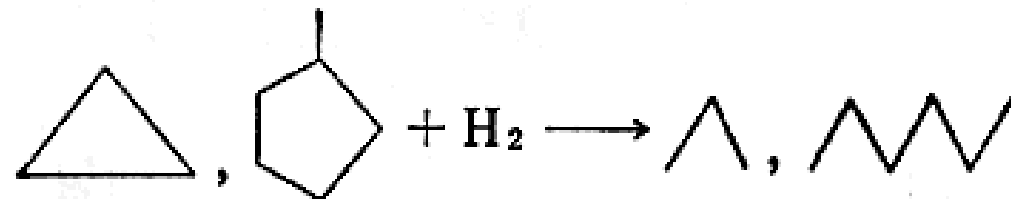
**I 型** (TOF は粒径に依存しない)



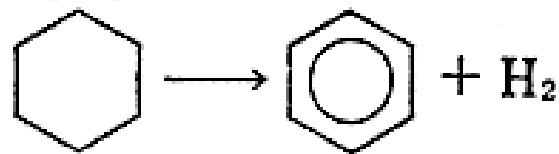
Pt/SiO<sub>2</sub><sup>a)</sup>



Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>b)</sup>



Pt/SiO<sub>2</sub>, Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>c)</sup>

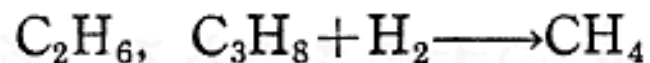


Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>d)</sup>

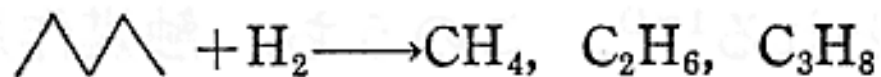
# 構造敏感・構造鈍感

ターンオーバー頻度 (TOF) と粒径との関係

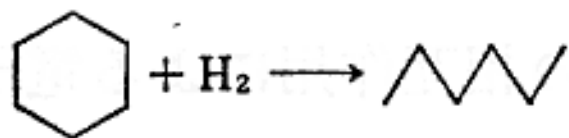
II型 (TOF は粒径が小さいほど大きい)



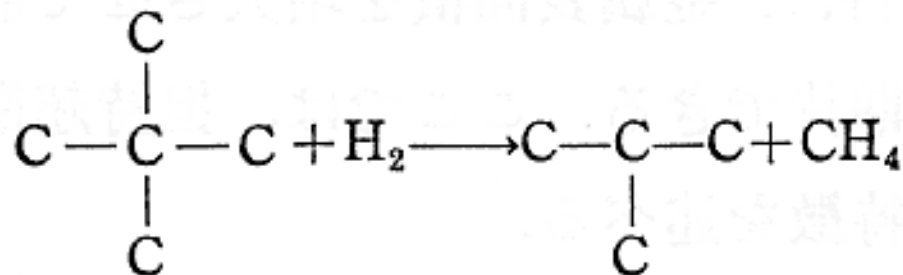
Ni/SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>e)</sup>, Pt-black<sup>f)</sup>



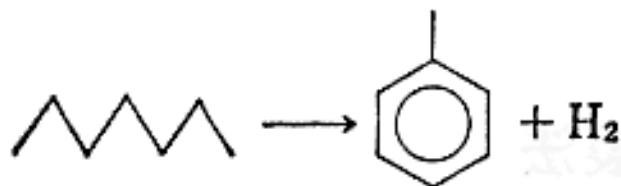
Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>g)</sup>



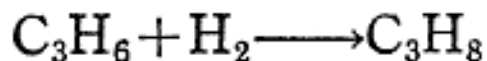
Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>h)</sup>



Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>i)</sup>



Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>j)</sup>

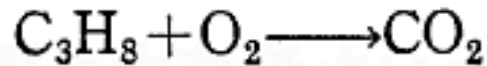


Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>k)</sup>

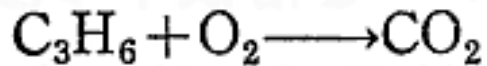
# 構造敏感・構造鈍感

ターンオーバー頻度 (TOF) と粒径との関係

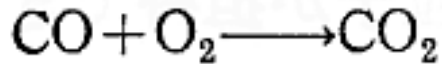
III型 (TOF は粒径が小さいほど小さい)



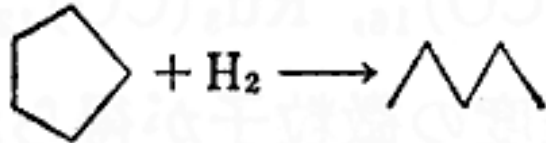
Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>l)</sup>



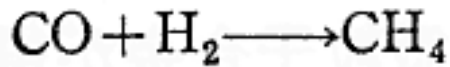
Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>m)</sup>



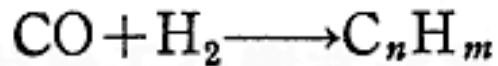
Pt/SiO<sub>2</sub><sup>n)</sup>



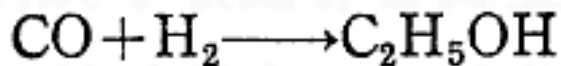
Ph/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>o)</sup>



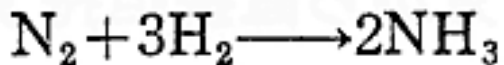
Ni/SiO<sub>2</sub><sup>p)</sup>



Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>q)</sup>, Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>r)</sup>



Rh/SiO<sub>2</sub><sup>s)</sup>



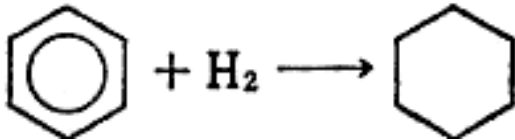
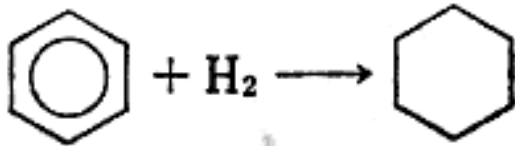
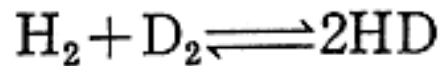
Fe/MgO<sup>t)</sup>



# 構造敏感・構造鈍感

ターンオーバー頻度 (TOF) と粒径との関係

IV型 (TOF はある粒径で最大となる)\*

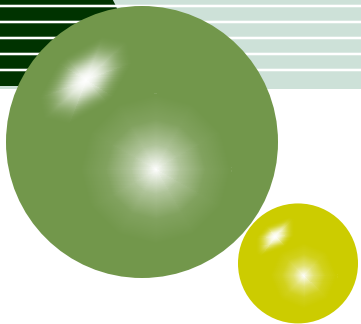
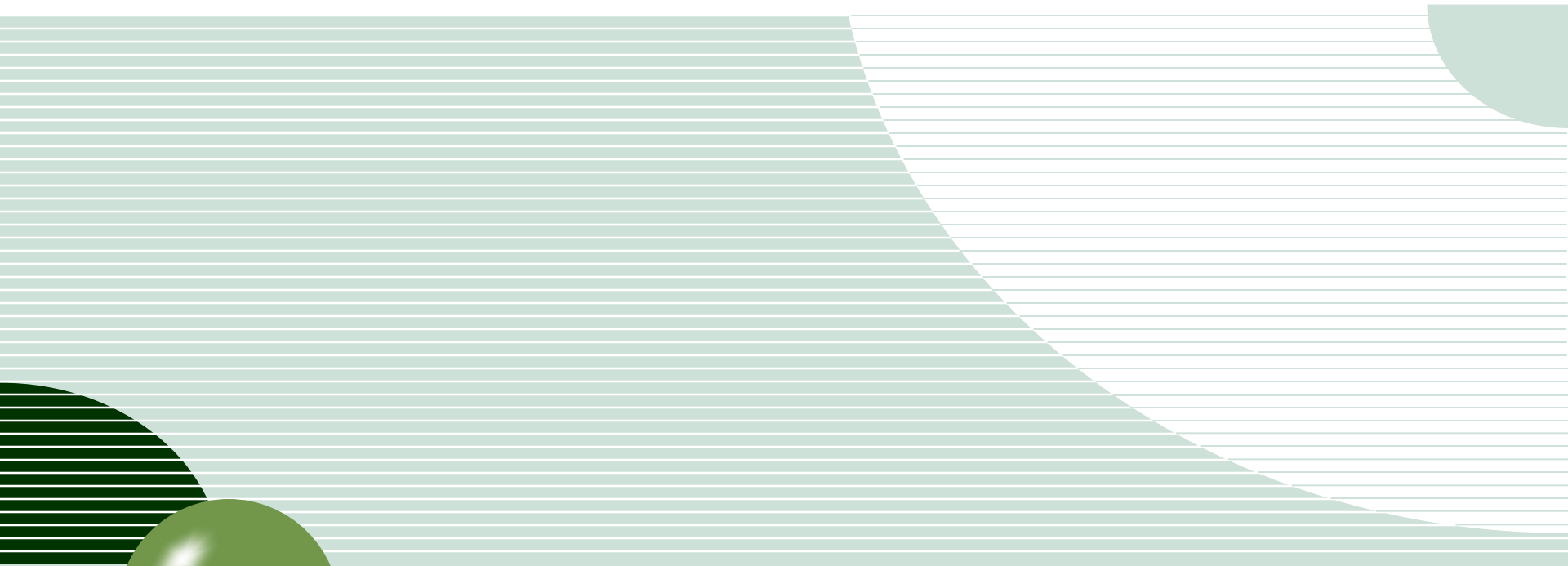


Pd/C, Pd/SiO<sub>2</sub> (13 Å)<sup>u)</sup>

Ni/SiO<sub>2</sub> (12 Å)<sup>v)</sup>

Rh/SiO<sub>2</sub> (18 Å)<sup>w)</sup>

# 吸着と触媒反応



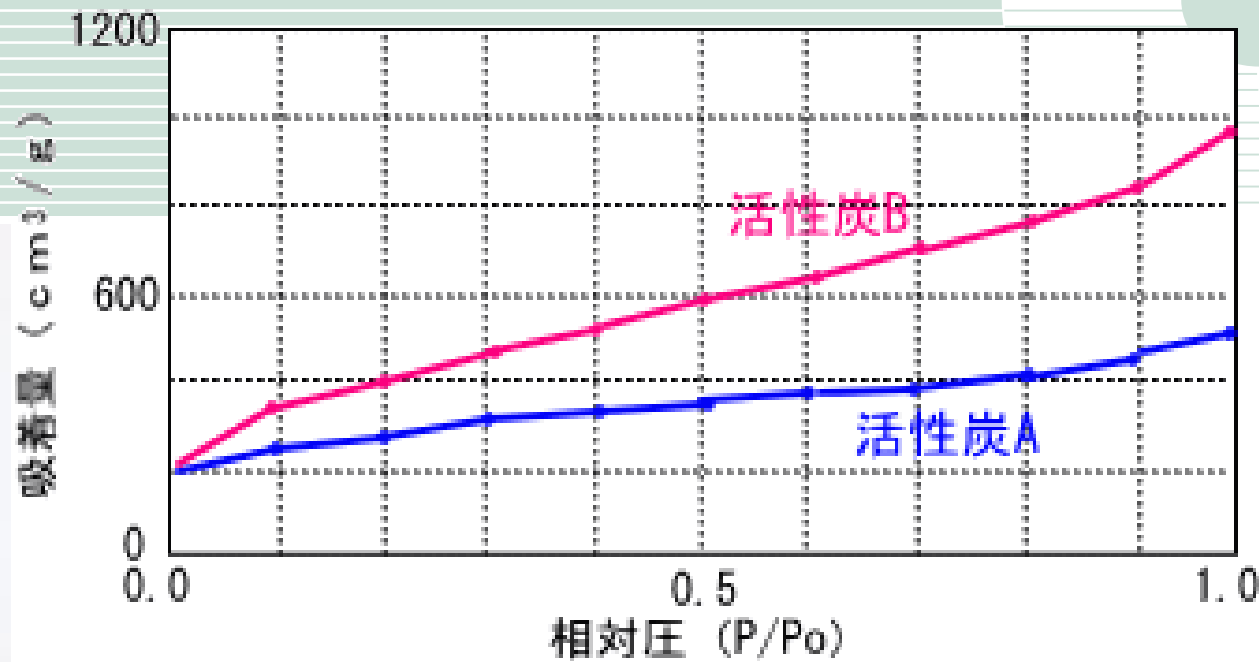
# 吸着が始まり

- **物理吸着**
  - 弱い吸着：必ず自然界にある
- **化学吸着**
  - 強い吸着：化学結合を伴う

# Table 化学吸着と物理吸着

吸着特性	化学吸着	物理吸着
吸着力	化学結合	ファン・デル・ワールス力
吸着場所	選択性あり	選択性なし
吸着層の構造	単分子層	多分子層も可能
吸着熱	10～100 kcal/mol	数kcal/mol
活性化エネルギー	大きい	小さい
吸着速度	遅い	速い
吸着・脱離	可逆または非可逆	可逆
代表的な吸着の型	ラングミュア型	BET型

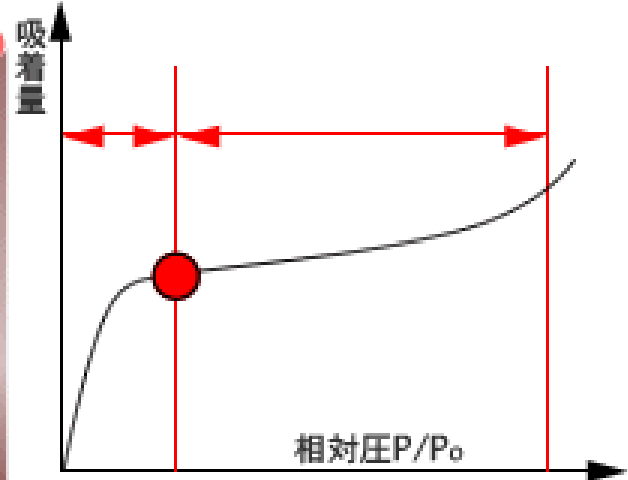
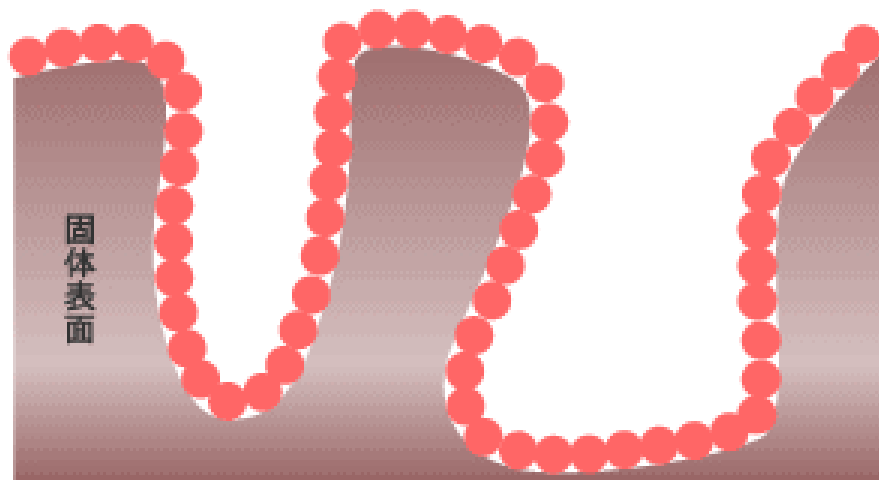
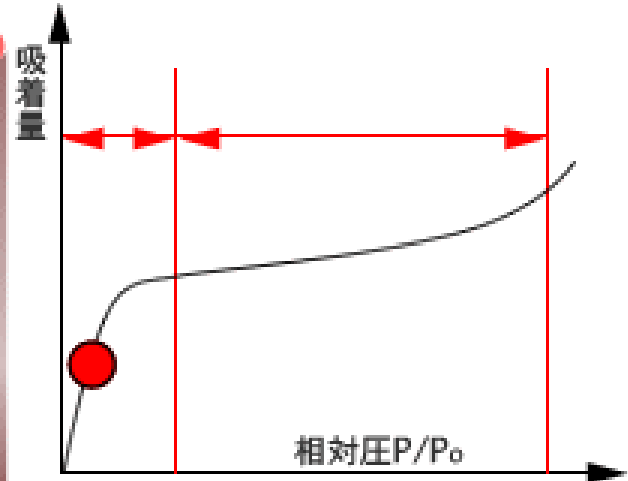
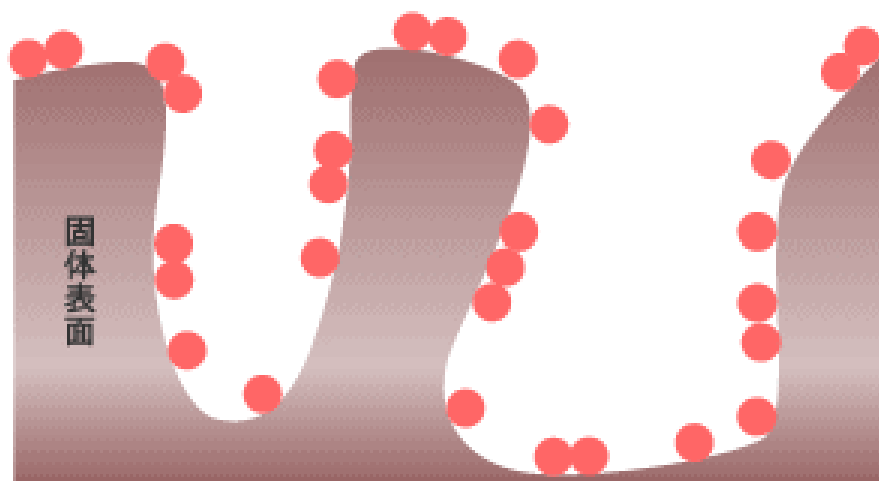
# 物理吸着



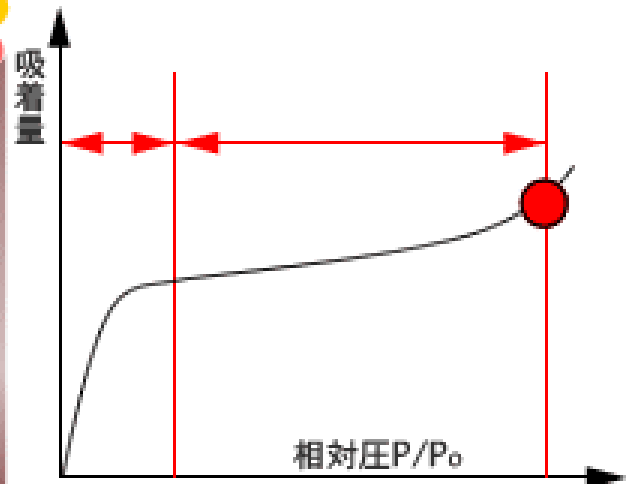
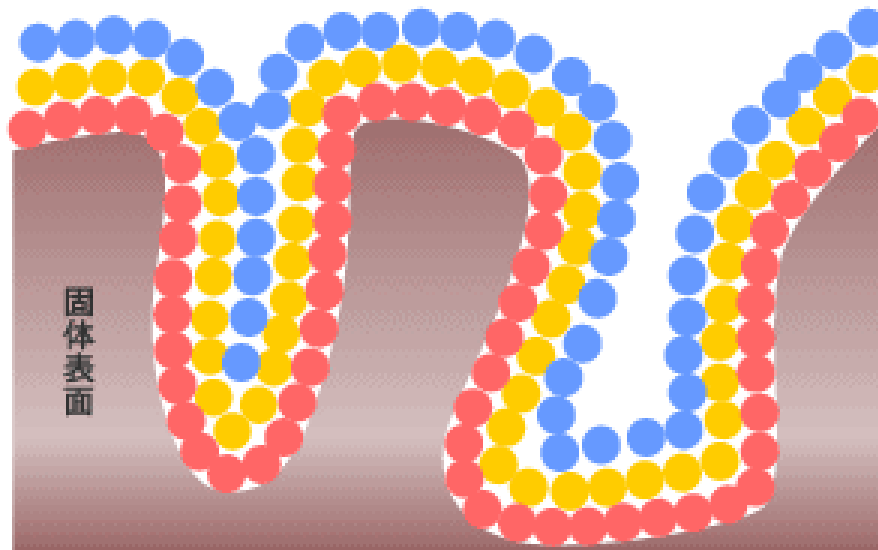
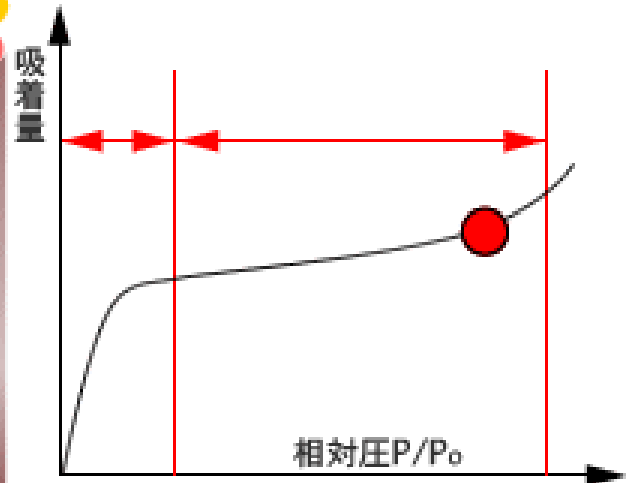
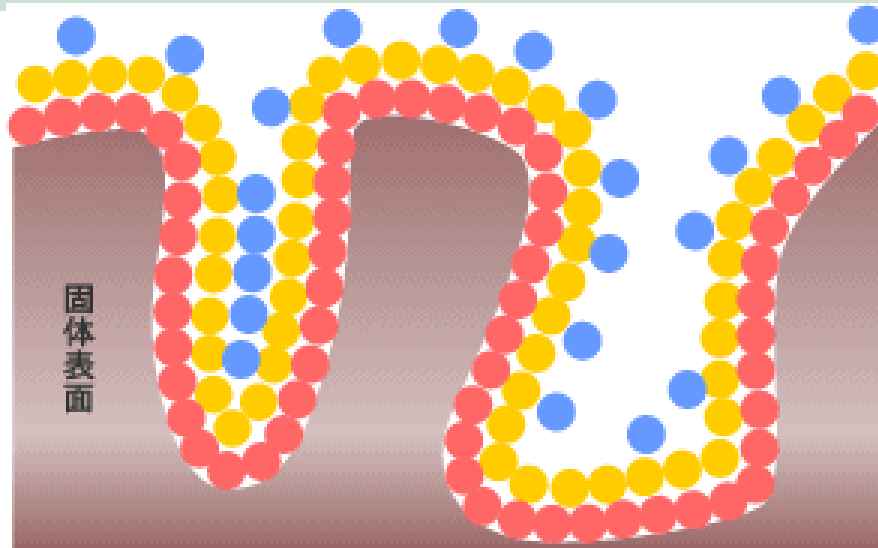
活性炭の吸着等温線

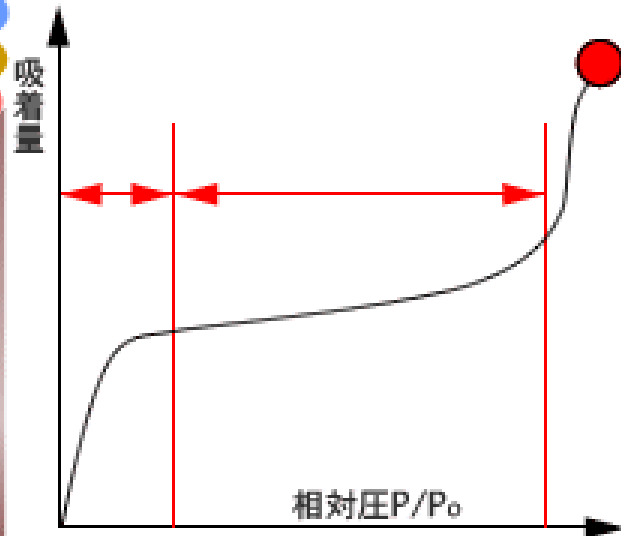
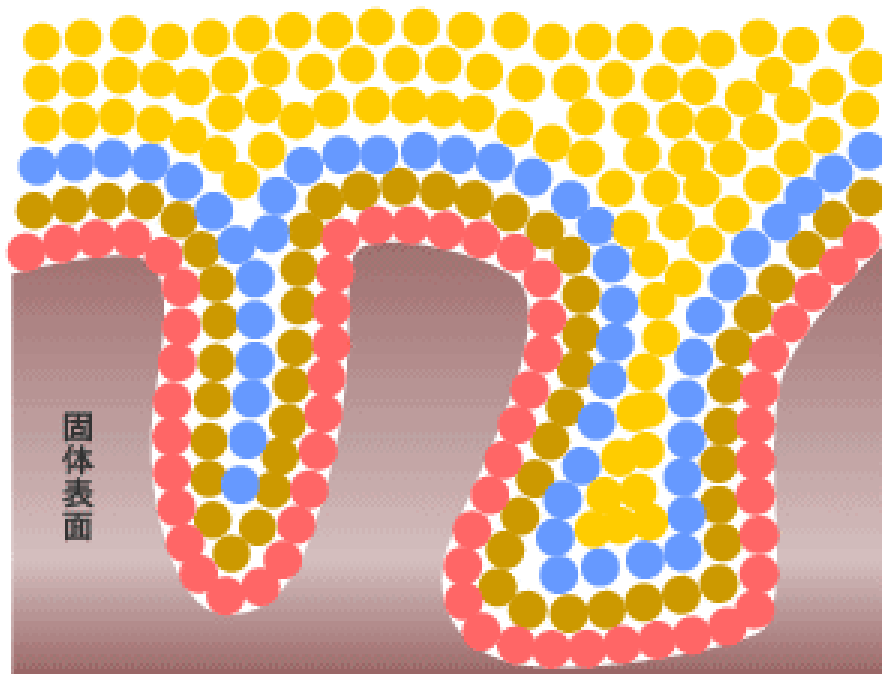
試料	比表面積 (m²/g)	細孔容積 (ml/g)		平均細孔直径	資料質量 (g)
	BET法	メソポア	ミクロポア		
		10_3000Å	<10Å		
1 活性炭A	1050	0.56	0.36	30	0.200
2 活性炭B	1600	1.48	0.27	35	0.210

# 物理吸着



# 物理吸着







# 物理吸着

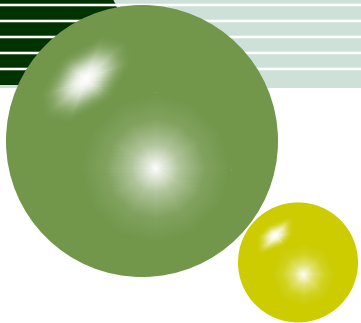
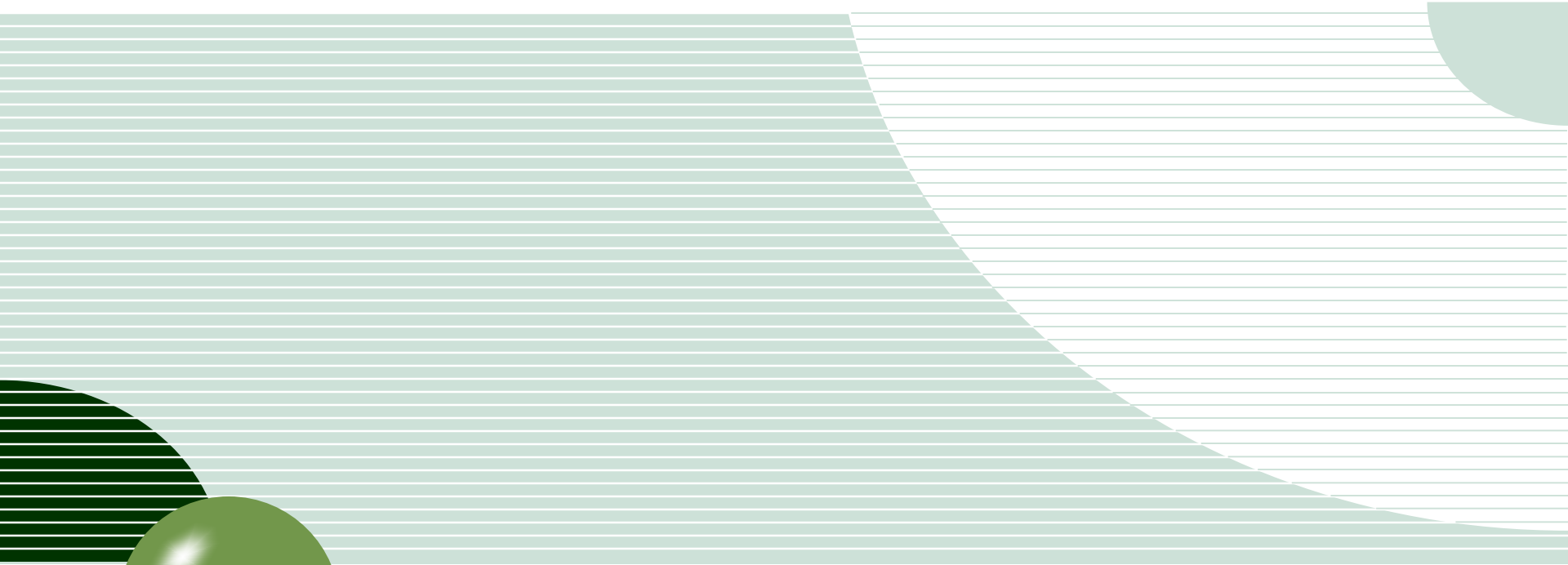
BETの式：一定温度で吸着平衡状態であるとき、  
吸着平衡圧Pと、その圧力での吸着量Vの関係

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \left( \frac{C - 1}{V_m C} \right) \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

- 但し、
- $P_0$ ： 飽和蒸気圧
  - $V_m$ ： 単分子層吸着量、気体分子が固定表面で単分子層を形成した時の吸着量
  - $C$ ： 吸着熱などに関するパラメータ  $> 0$

この関係式は  $P/P_0$ ： 0.05～0.35の範囲でよく成立する

# 化学吸着



# 化学吸着

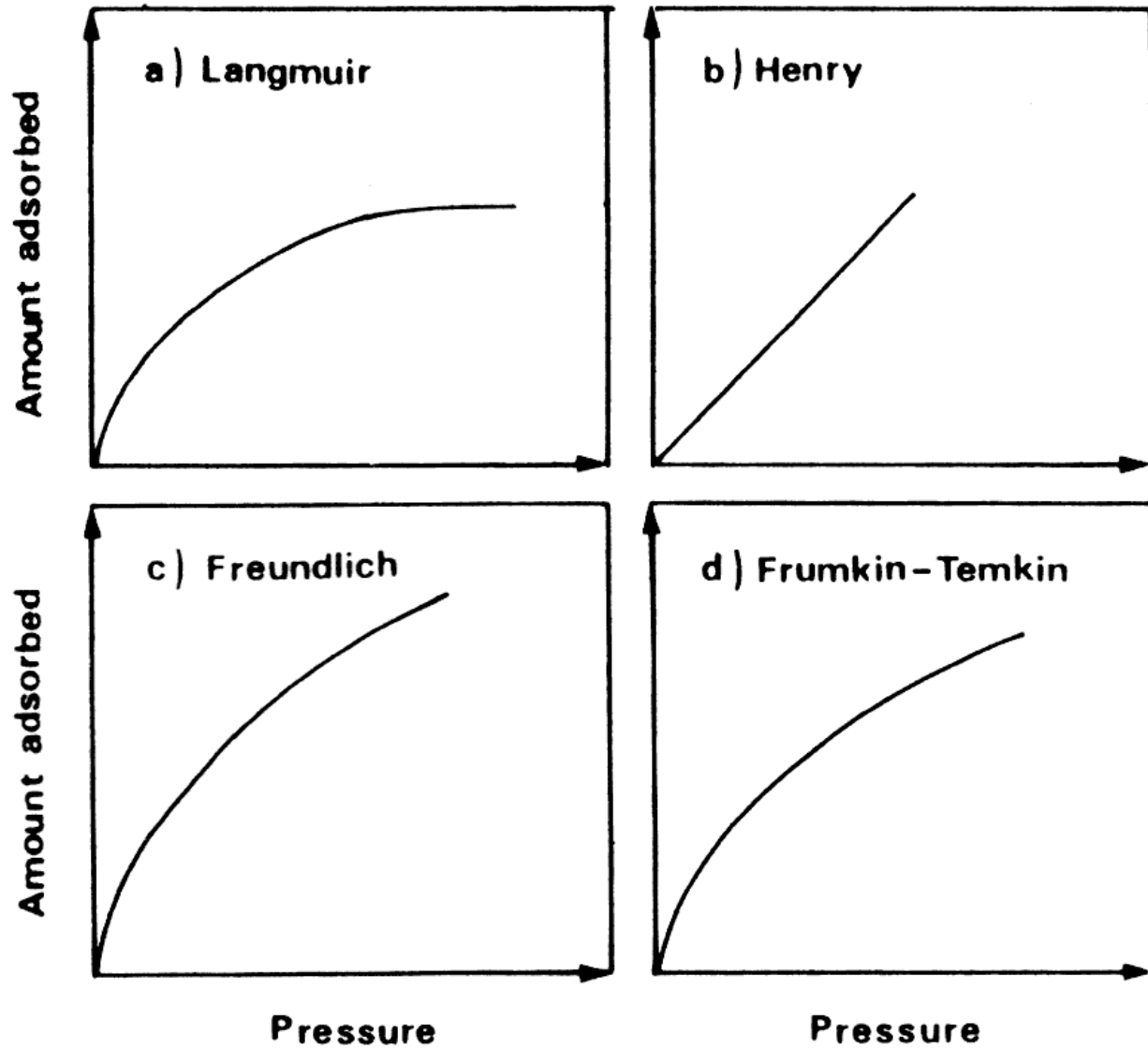
- **解離吸着**



- **非解離吸着**



# 吸着等温線



# 吸着等温式

- **Langmuir**

$$v = \frac{abp}{1 + ap}$$

$$v = \frac{ab\sqrt{p}}{1 + a\sqrt{p}}$$

$$\theta/(1 - \theta) = ap$$

$$\theta/(1 - \theta) = a\sqrt{p}$$

$p$ : 吸着平衡圧

$v$ : 吸着量

$b$ : 飽和吸着量

$\theta = v / b$

- **Henry**

$$\theta = ap$$

$\theta \ll 1$  のときに相当

- **Freundlich**

$$v = ap^{1/n} \quad (1 < n < 10)$$

- **Frumkin-Temkin**

$$v = A \ln Bp$$

# 吸着等温式

## ■ Langmuir

- ほとんどの化学吸着が該当する
- 吸着熱は吸着量に無関係であるのが理論であるが、必ずしも理論には合わない場合がある

## ■ Henry

- 直線的に吸着量が増加する式だが実際にはLangmuir型の一部とされている場合が多い

## ■ Freundlich

- 吸着熱は  $\ln v$  (吸着量) と直線関係にある
- 中間部分はLangmuir型に近いので見極めが難しい

## ■ Frumkin-Temkin

- 金属鉄上へのアンモニアや窒素吸着で提出された特殊なケース
- 吸着熱は吸着量とともに直線的に減少する

# 化学吸着

## Langmuir式 (理論式)

$$\frac{d\theta}{dt} = k_f(1-\theta)C_A - k_b\theta \quad (1)$$

$k_f$ ,  $k_b$ , 吸着および脱着反応速度定数

$$\theta = q / q_m \quad (2)$$

$q_m$ , 飽和吸着量

平衡状態において  $dq/dt = 0$  なので

$$q = q_m\theta = q_m \frac{K_A C_A}{1 + K_A C_A} \quad (3)$$

$K_A$ , 吸着定数

# 化学吸着

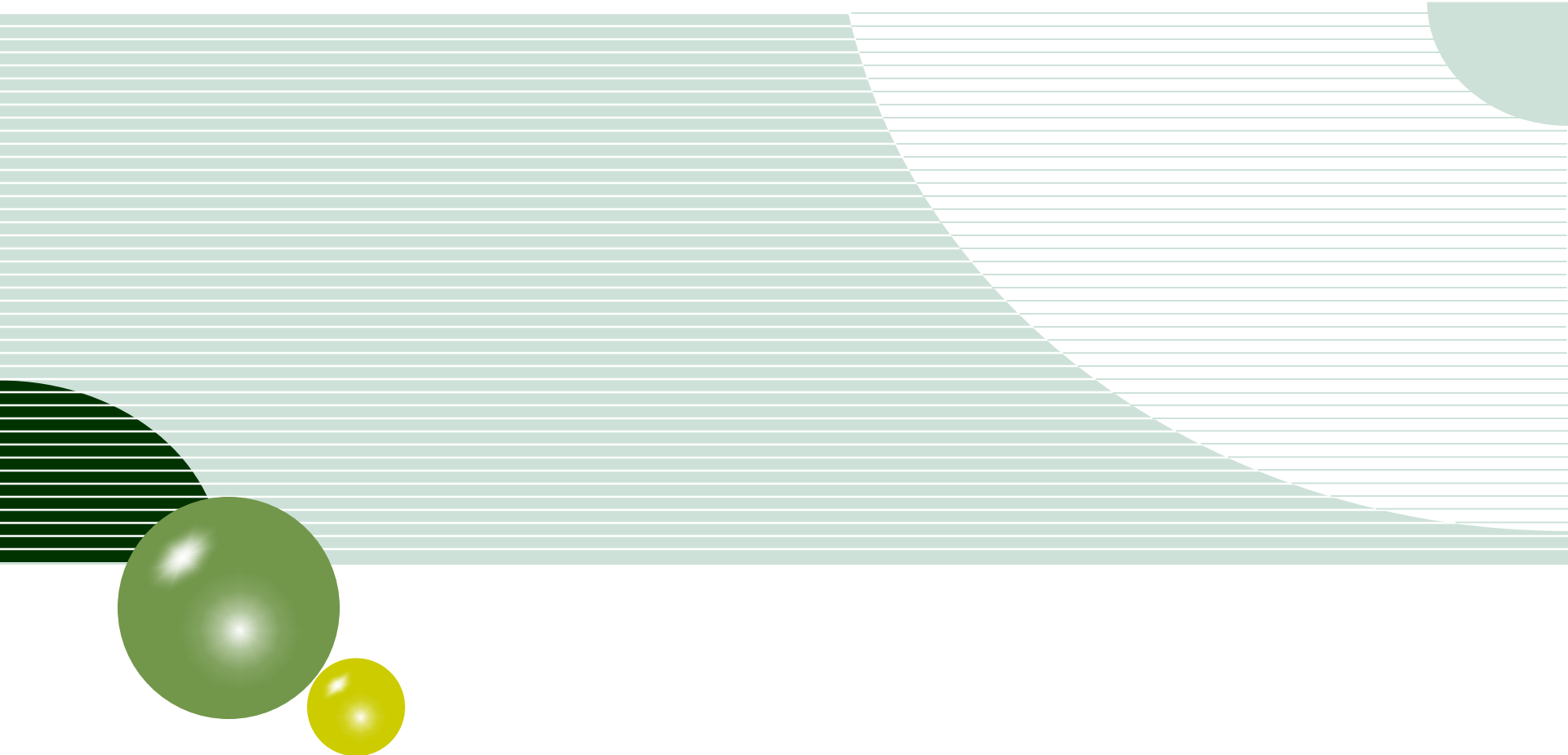
- ・Freundlich式(実験式)

$$q = kC_A^n \quad (4)$$

$k, n$ , フロインドリッヒ定数;  $C_A$ , 吸着質の平衡濃度  
(※吸着質(adsorbate): 吸着される物質のこと)



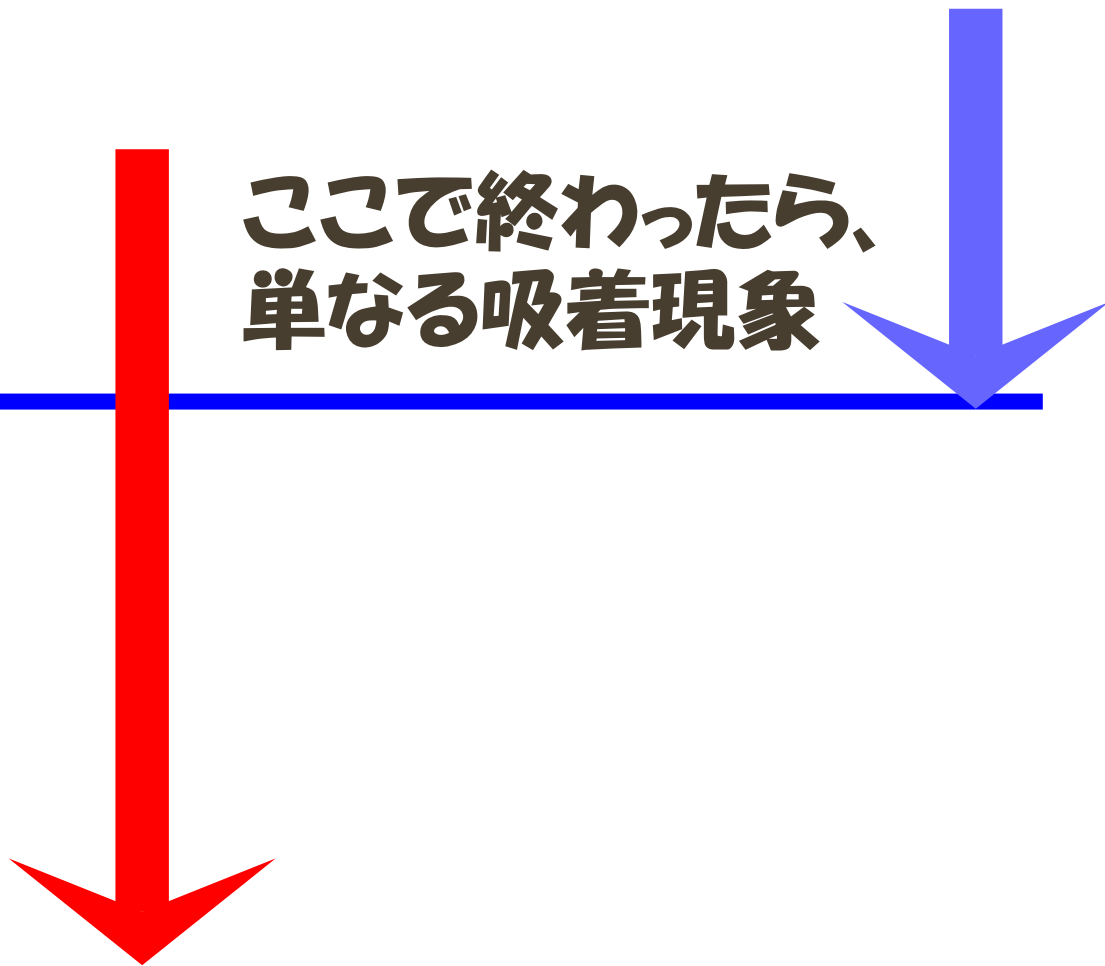
# 吸着から表面反応へ



# 触媒反応

- 物理吸着
- 化学吸着
- 表面反応
- 脱離

ここで終わったら、  
単なる吸着現象

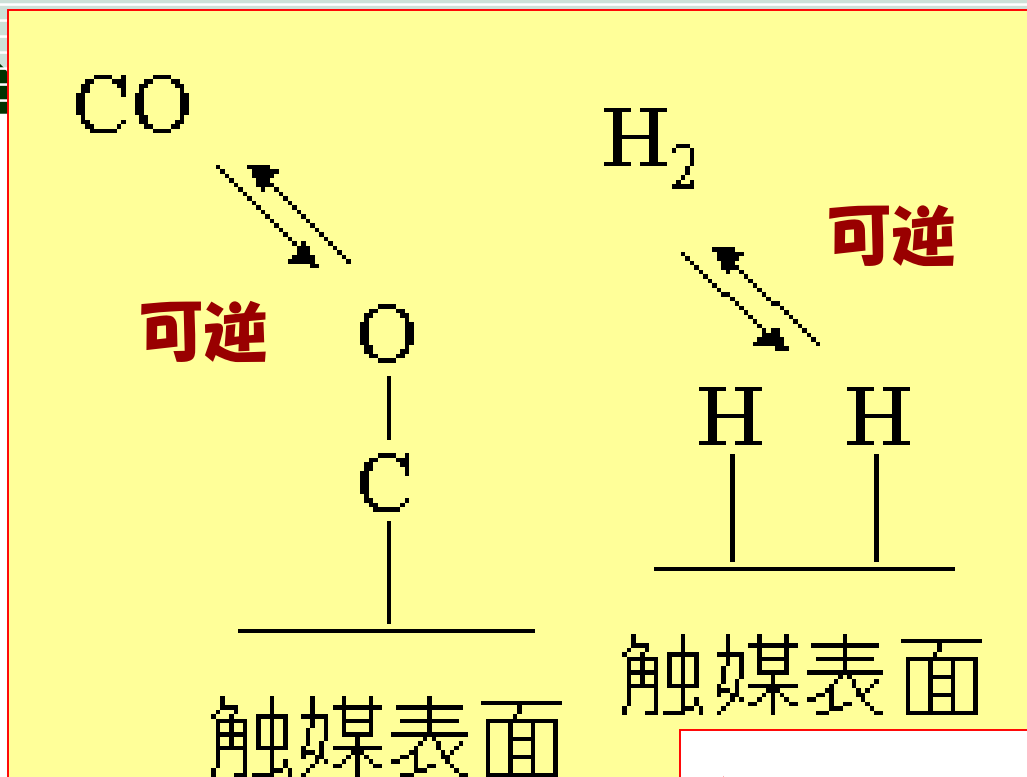


# 例：メタノール合成反応

- 合成ガスからメタノールを合成する反応



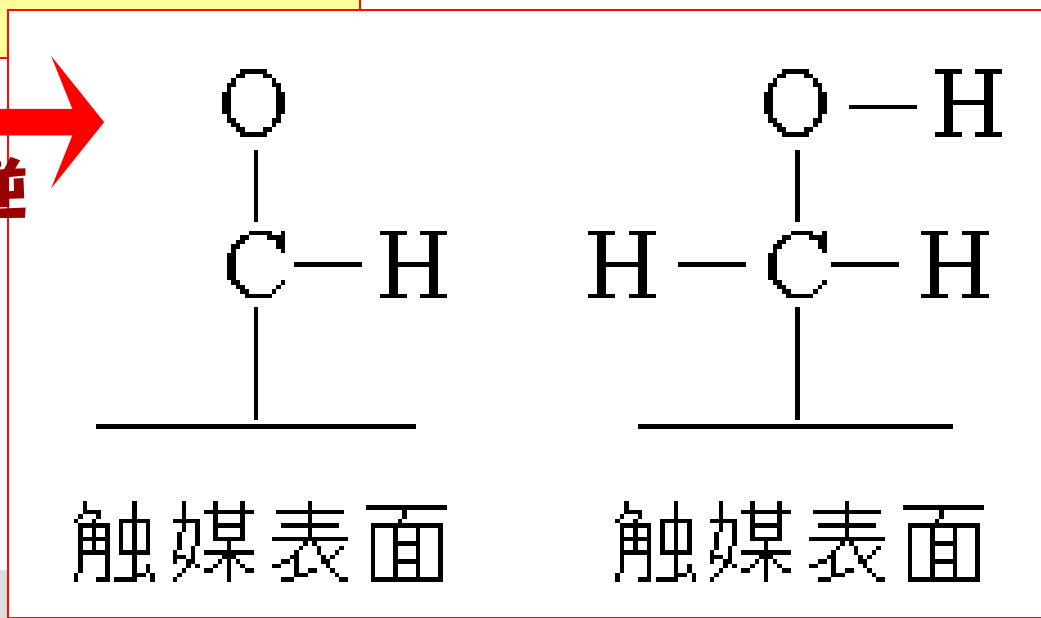
ポイントはC=O間の非解離。H-H間の解離



物理吸着  
→ 化学吸着

**CH<sub>3</sub>OH**

不可逆  
表面反应



# 表面反応

- **不可逆過程が多い**
  - 逆反応が圧倒的に不利な場合
- **表面反応が律速段階になる場合が多い**
  - 表面反応にも多くの段階がある
  - どこが律速段階か、は、アレニウスプロットで知ることができる

# 例：メタノール合成

- 合成ガスからメタノールを合成する反応



**CO**ガス→**CO**(化学吸着)

**H<sub>2</sub>**ガス→**H<sub>2</sub>**(化学吸着)→**2H**(解離吸着)

**CO**(吸着)+**H**→**CHO**(吸着) <律速段階>

**CHO**(吸着)+**H**→**CH<sub>2</sub>O**(吸着)

**CH<sub>2</sub>O**(吸着)+**H**→**CH<sub>3</sub>O**(吸着)

**CH<sub>3</sub>O**(吸着)+**H**→**CH<sub>3</sub>OH**(吸着)

**CH<sub>3</sub>OH**(吸着)→(脱離)**CH<sub>3</sub>OH**

# 活性化エネルギー

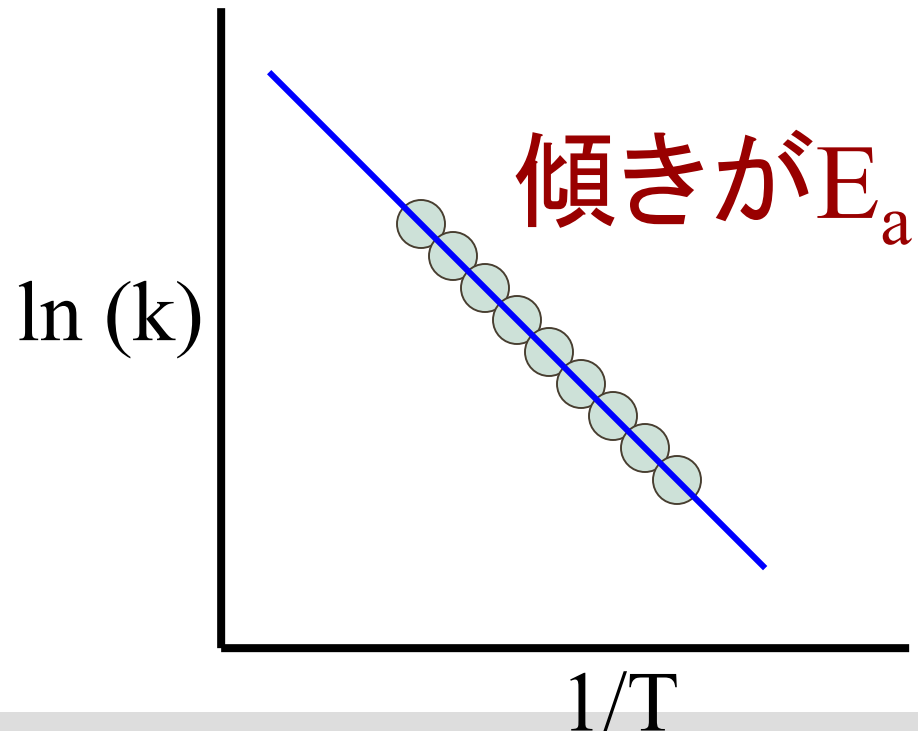
- **アレニウスの式**  
**反応速度定数  $k$**

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

- ここで、 $A$  は頻度因子、 $E$  は活性化エネルギーである。この式は異なる温度での速度定数がわかれば、活性化エネルギーを求めることを示している。
- アレニウスの式は、ボルツマン分布の式と同じ形をしていることが重要である。活性化エネルギーは、反応が起きる途中の、中間体になるためのエネルギーであるが、その中間体の存在する割合が、反応速度を支配していると言っていることを示している。
- 反応速度の解析は、様々な物質が共存するような反応において、反応のメカニズムを解明する上で、重要となる

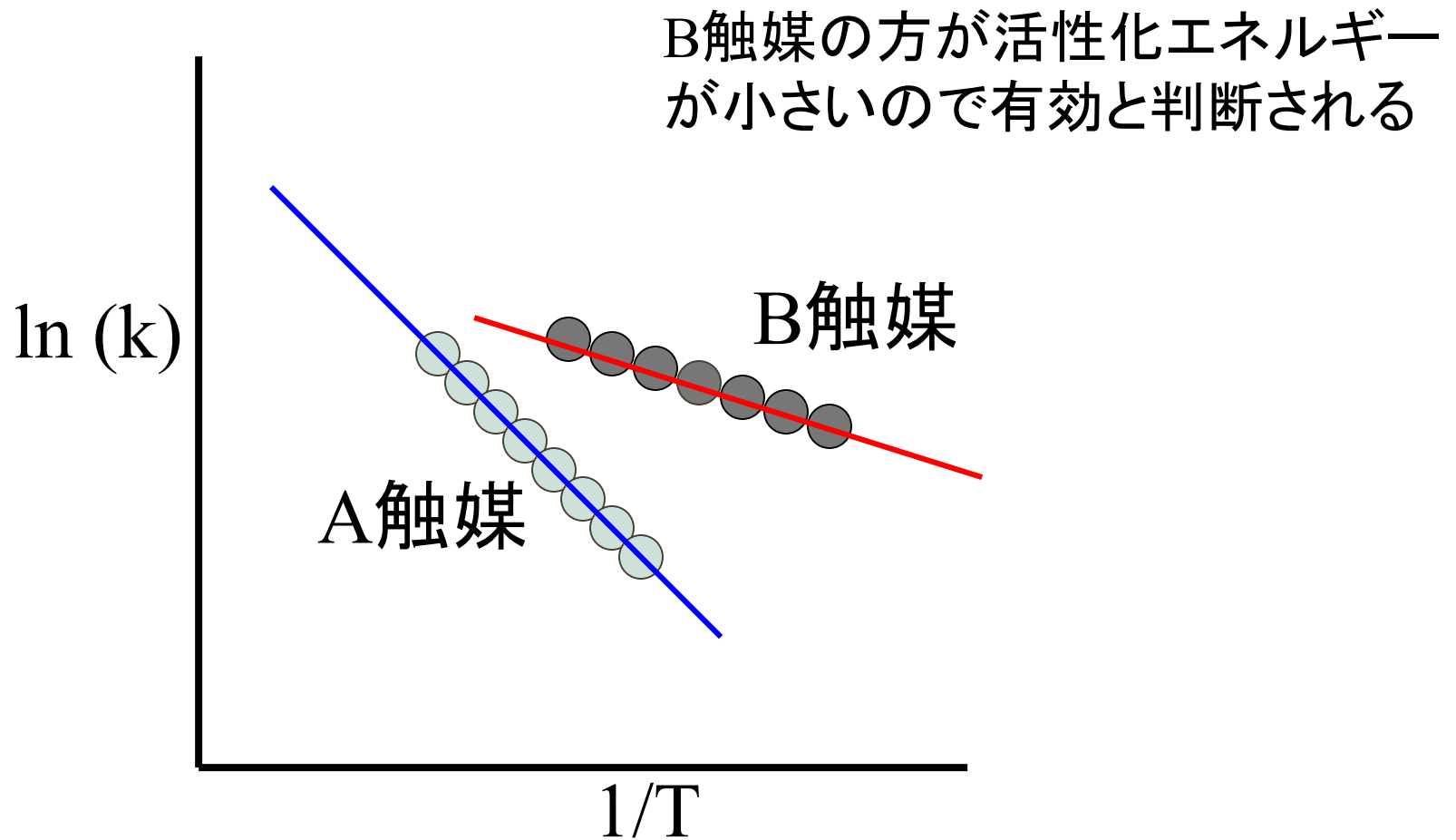
# 見かけの活性化エネルギー

- 実験データから、 $\ln(k)$ =y軸、と $1/T$ =x軸のプロットをすると、傾きが $E_a$ =活性化エネルギーとなる

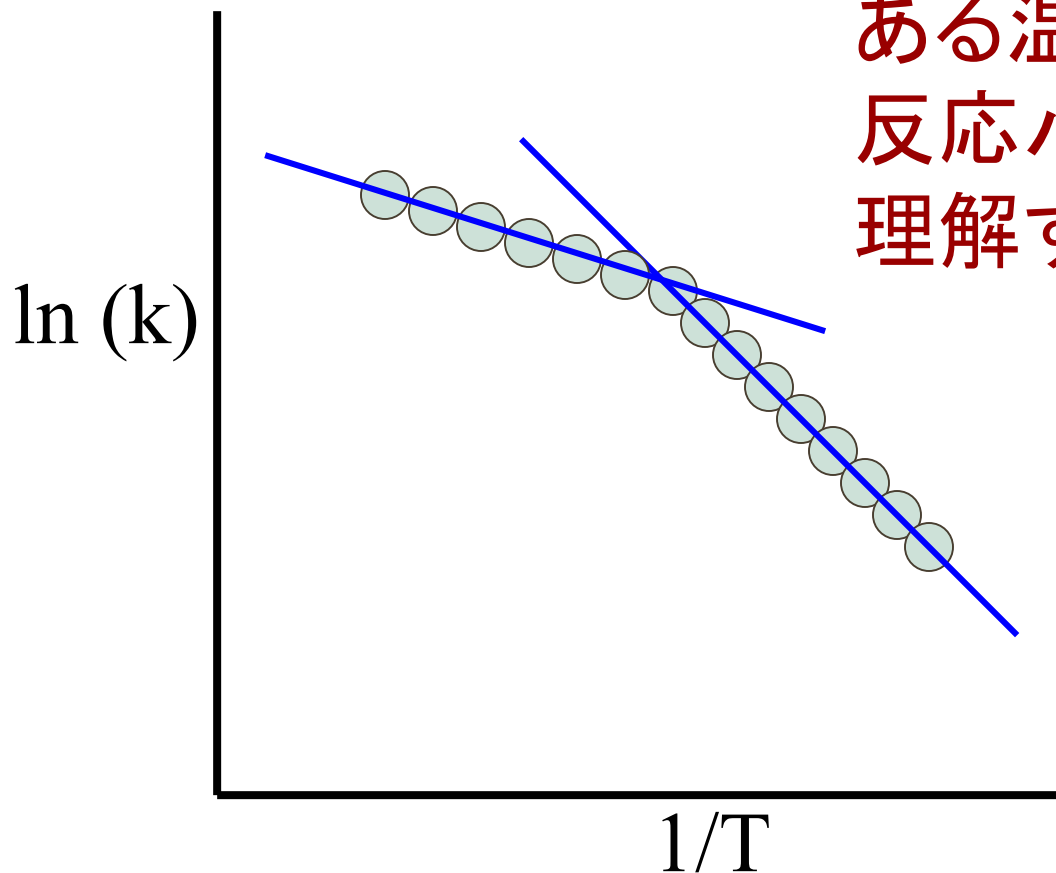




# 触媒の働き

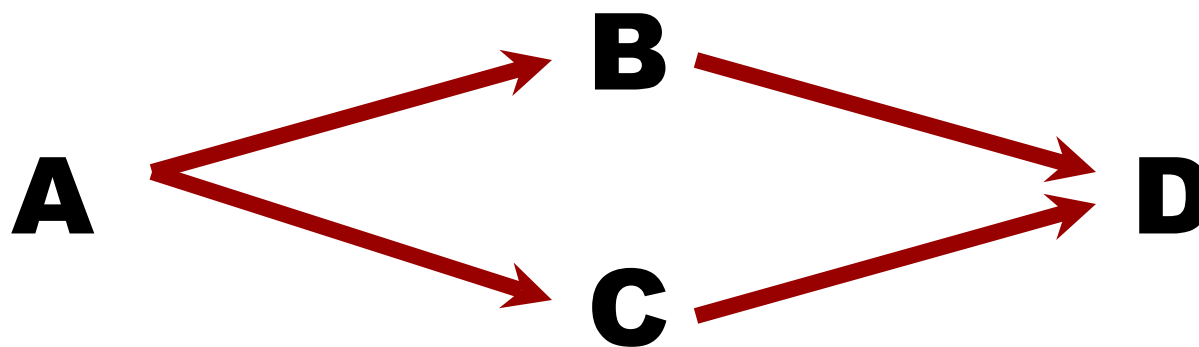


# 活性化エネルギーが変わる？



ある温度領域で  
反応パスが変わったと  
理解すべき

# 反応のパス



律速段階が変わると活性化エネルギーは変わる

# 自動車触媒

- 現在、アルミナをベースとし白金、パラジウム、ロジウムを加えた三元触媒が主。
- 酸素の吸収脱離のためのセリアを助触媒として使用
- ロジウムは窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )の還元能力が高く、白金とパラジウムは炭化水素(HC)と一酸化炭素(CO)の酸化能力が高い。
- ガソリンエンジンの排ガス組成ではHC、CO、 $\text{NO}_x$ のバランスがとれているため、HCとCOの酸化反応と $\text{NO}_x$ の還元反応を同時に行わせることができる。