高校化学 L01 第 144 講 アルカンの性質と反応

この講でできるようになること

- アルカンの構造と一般式を説明できる。
- アルカンの完全燃焼と不完全燃焼の違いを反応式から説明できる。
- メタンと塩素の置換反応について、条件と生成物の関係を説明できる。

アルカンの構造と性質

アルカンは、環をもたない鎖式の飽和炭化水素である。炭素原子間の結合がすべて単結合であり、一般式は C_nH_{2n+2}（$n \geq 1$）で表される。

炭素原子は 4 本、水素原子は 1 本の結合をつくる。炭素数が増えても、この原子価の関係を満たすように水素数が決まる。

名称	分子式	縮合構造式
メタン	CH_4	CH_4
エタン	C_2H_6	CH_3CH_3
プロパン	C_3H_8	$CH_3CH_2CH_3$

アルカンは分子全体として電荷の偏りが小さい非極性分子であり、水に溶けにくい性質をもつ。一方で、分子同士の間には分子間力が働くため、物質の状態や沸点に影響する。

常温常圧では、低級アルカンは気体として存在するものが多い。直鎖状の同族体では、炭素数が増えるほど一般に分子間力が大きくなり、沸点は高くなる傾向がある。ただし、物質の状態や融点などは構造や条件によって変化するため、すべてが単純な規則で決まるわけではない。

アルカンは、常温・暗所の穏やかな条件では多くの試薬と反応しにくいが、「全く反応しない物質」ではない。条件を変えると燃焼や置換反応が起こる。

アルカンの燃焼

アルカンは十分な酸素がある条件で点火すると完全燃焼し、二酸化炭素と水を生じて熱を放出する。この反応では炭素原子、水素原子、酸素原子の数が反応の前後で保存される。

一般式 C_nH_{2n+2} の完全燃焼では、C 原子数から CO_2 の係数が n、H 原子数から H_2O の係数が $n+1$ となる。右辺の O 原子数は $2n+(n+1)=3n+1$ なので、O_2 の係数は $\frac{3n+1}{2}$ となる。

$$C_nH_{2n+2}+\frac{3n+1}{2}O_2 \rightarrow nCO_2+(n+1)H_2O$$

この係数は物質量の比を表している。分数係数をなくしたい場合は、反応式全体を同じ数だけ倍して最小整数係数に直しても反応の関係は変わらない。

代表的な反応式を確認すると、メタンでは次のようになる。

$CH_4+2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O$

エタンでは次のようになる。

$2C_2H_6+7O_2 \rightarrow 4CO_2+6H_2O$

プロパンでは次のようになる。

$C_3H_8+5O_2 \rightarrow 3CO_2+4H_2O$

©ミライコーチング

燃焼では炭素が酸化される。例えばメタン中の炭素の酸化数は -4 であり、二酸化炭素中では $+4$ になる。また、酸素は 0 から生成物中で -2 になるため、酸化還元反応として見ることができる。

メタンの完全燃焼と不完全燃焼

点火後の燃焼：条件・生成物・原子数を3つの代表式で比べる

完全燃焼　酸素が十分

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

生成物：二酸化炭素（CO_2）と水（H_2O）

原子数（左辺＝右辺）　C：1＝1　　H：4＝4　　O：4＝4

不完全燃焼：COを生じる例　酸素不足など

$$2CH_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO + 4H_2O$$

生成物：一酸化炭素（CO）と水（H_2O）

原子数（左辺＝右辺）　C：2＝2　　H：8＝8　　O：6＝6

不完全燃焼：Cを生じる例　酸素不足など

$$CH_4 + O_2 \rightarrow C + 2H_2O$$

生成物：炭素・すす（C）と水（H_2O）

原子数（左辺＝右辺）　C：1＝1　　H：4＝4　　O：2＝2

不完全燃焼の2式は代表モデル。実際は CO_2・CO・C などが混在し、
酸素量だけで生成物の割合は決まらない。

図 1　酸素の供給条件で変わる燃焼生成物を比べる。

酸素が不足すると不完全燃焼が起こり、一酸化炭素や炭素（すす）が生じることがある。この講の不完全燃焼のモデルでは、水素はすべて水になると仮定する。

$$2CH_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO + 4H_2O$$

$$CH_4 + O_2 \rightarrow C + 2H_2O$$

ただし、実際の燃焼では条件によって二酸化炭素、一酸化炭素、炭素などが混在する。酸素量だけから実際の生成物の割合を決めることはできない。

一酸化炭素は有毒であるため、燃焼に関わる現象は十分な換気や安全管理が必要であり、家庭で条件を変えた実験を行うものではない。

アルカンの置換反応

置換反応とは、分子中の原子や原子団が別の原子や原子団に置き換わる反応である。アルカンでは、水素原子が他の原子へ置き換わる反応が代表的である。

メタンと塩素の混合物に光を当てるなどの条件では、次の置換反応が起こる。

$$CH_4 + Cl_2 \rightarrow CH_3Cl + HCl$$

©ミライコーチング

この反応では、メタン中の水素 1 個が塩素原子 1 個に置き換わる。炭素原子の数は変化せず、炭素の価数 4 も保たれている。また、塩素分子 Cl_2 の 2 個の塩素原子は、クロロメタンと塩化水素へそれぞれ 1 個ずつ入る。

置換がさらに進むと、水素が順番に塩素へ置き換わる。

$CH_3Cl \rightarrow CH_2Cl_2 \rightarrow CHCl_3 \rightarrow CCl_4$

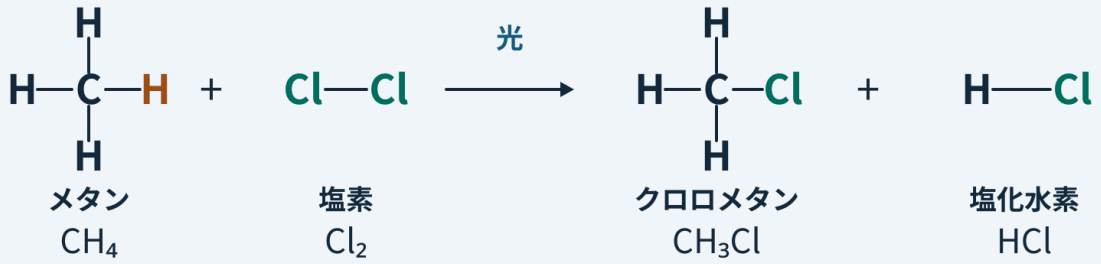
化学式	名称
CH_3Cl	クロロメタン
CH_2Cl_2	ジクロロメタン
$CHCl_3$	トリクロロメタン（クロロホルム）
CCl_4	テトラクロロメタン（四塩化炭素）

それぞれの段階では、残っている水素 1 個が塩素 1 個へ置換され、Cl_2 を 1 分子消費して HCl を 1 分子生成する。初めに示した反応式は 1 段階の代表例であり、条件によって生成物の種類や割合は変化する。

メタンの塩素置換：HがClに替わる

すべての原子と結合を示す構造式で比較する

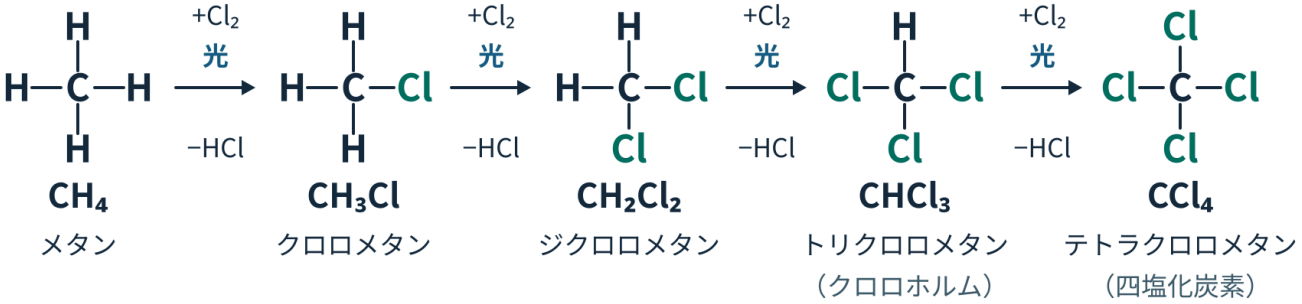
1段階目：H 1個が Cl 1個に置き換わる



右側の C—H が C—Cl に変わり、炭素からの結合は4本を保つ。

Cl_2の2個のClは、CH_3ClとHClへ1個ずつ入る。

続く置換：残っているHが1個ずつClに替わる



各段階で Cl_2 1分子を消費（$+Cl_2$）、HCl 1分子を生成（$-HCl$）。
すべての構造で、Cから出る単結合は4本。
実際には、複数の塩素置換生成物が混在しうる。

図 2　H が Cl へ置き換わる構造と、続く置換の段階。

メタンと塩素の混合物は危険を伴うため、家庭で点火や光照射などを行ってはならない。この講では実験を行わず、資料から反応の条件と生成物の関係を理解する。

燃焼ではアルカンの炭素骨格が酸素によって二酸化炭素などへ変化する。一方、置換では炭素骨格を保ちながら水素が塩素へ置き換わる。この違いを、反応物・条件・生成物の関係で整理する。

反応	必要な条件	炭素骨格	主な生成物
完全燃焼	十分な酸素、点火	変化する	CO_2、H_2O
置換	塩素、光など	保たれる	塩素置換されたアルカン、HCl

例題

例題と演習の解説では、係数を合わせる途中の式も示す。途中の式は未完成であり、最後にすべての元素の原子数が一致するように整える。

例題 1

プロパン C_3H_8 の完全燃焼について考える。

(1) プロパンの完全燃焼を表す最小整数係数の反応式を示せ。また、C・H・O の順に原子数を合わせる考え方を説明せよ。

(2) C_3H_8 0.200 mol を完全燃焼させるとき、必要な O_2 と生成する CO_2、H_2O の物質量を求めよ。ただし、酸素は十分にあり、反応は完全に進行するものとする。気体の体積は扱わない。

解答・解説

(1)

完全燃焼では、炭素原子は二酸化炭素へ、水素原子は水へ変化する。

まず炭素数を合わせる。

$C_3H_8 + O_2 \rightarrow 3CO_2 + H_2O$

次に水素数を合わせる。左辺の水素原子は 8 個なので、水分子を 4 個にする。

$C_3H_8 + O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$

最後に酸素原子数を合わせる。右辺の酸素原子は、CO_2 由来の 6 個とH_2O由来の 4 個で合計 10 個であるため、左辺の酸素分子は 5 個必要である。

したがって、

$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$となる。

この反応式では、反応前後で C 原子 3 個、H 原子 8 個、O 原子 10 個が一致しており、原子数が保存されている。

(2)

反応式の係数比から、物質量の比は次のようになる。

$C_3H_8 : O_2 : CO_2 : H_2O = 1 : 5 : 3 : 4$

プロパン 0.200 mol に対して、

$O_2 = 0.200 \times 5 = 1.00 \ \text{mol}$

$CO_2 = 0.200 \times 3 = 0.600 \ \text{mol}$

$H_2O = 0.200 \times 4 = 0.800 \ \text{mol}$である。

答えは、必要な酸素が 1.00 mol、生成する二酸化炭素が 0.600 mol、水が 0.800 mol である。

例題 2

メタンの塩素置換について、まず一段階の反応を考える。

(1) メタンと塩素の置換反応について、必要な条件と反応式を示せ。また、水素が塩素へ置き換わっても炭素の価数 4 と塩素原子数が保たれることを説明せよ。

(2) メタンと塩素を反応させたとき、CH_3Clだけを純粋に得られると一般に断定できない理由を説明せよ。CH_3ClとCl_2から次段階の反応を示し、残っている水素に注目せよ。

解答・解説

(1)

メタンと塩素の置換反応は、光を当てるなどの条件で起こる。

反応式は、

$CH_4 + Cl_2 \rightarrow CH_3Cl + HCl$である。

この反応では、メタン中の水素原子 1 個が塩素原子 1 個へ置き換わる。

反応前のメタンでは、炭素は 4 本の結合をもっている。反応後のクロロメタンでも、炭素は 3 個の水素と 1 個の塩素に結合しており、炭素の価数 4 は保たれている。

また、塩素分子Cl_2の塩素原子 2 個は、1 個がCH_3Clへ入り、もう 1 個がHClへ入るため、塩素原子数も反応前後で保存される。

(2)

CH_3Clが生成しても、分子中にはまだ 3 個の水素が残っている。そのため、さらに塩素と反応して次の置換が進む可能性がある。

$CH_3Cl + Cl_2 \rightarrow CH_2Cl_2 + HCl$

この後も、

$CH_2Cl_2 + Cl_2 \rightarrow CHCl_3 + HCl$

$CHCl_3 + Cl_2 \rightarrow CCl_4 + HCl$のように置換が続く。

したがって、最初の反応式は一段階の代表例であり、通常はCH_3Clだけが必ず単一の生成物として得られるとは限らない。残っている水素が置換可能であることが理由である。

©ミライコーチング

例題 3

メタンの燃焼について資料上のモデルを用いて考える。

(1) 炭素を含む生成物が CO のみであると仮定したモデルについて、最小整数係数の反応式を示せ。また、メタン中の炭素の酸化数が-4から CO 中で$+2$になることを説明せよ。

(2) CH_4 0.100 mol がこのモデルで完全に反応するとき、必要なO_2と生成するH_2Oの物質量を求めよ。また、実際の不完全燃焼では酸素不足だけで同じ量論関係を決められない理由を説明せよ。

解答・解説

(1)

炭素を含む生成物を CO のみとすると、まず炭素数を合わせる。

$CH_4 + O_2 \rightarrow CO + H_2O$

次に水素数を合わせる。左辺の水素原子は 4 個なので、水を 2 個にする。

$CH_4 + O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$

右辺の酸素原子は、CO 由来の 1 個と水由来の 2 個で合計 3 個である。そのため、O_2 の係数は $\frac{3}{2}$ となる。これは物質量比を表し、酸素分子が分数個あるという意味ではない。

$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$

分数係数をなくすため、全体を 2 倍する。

$2CH_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO + 4H_2O$

この反応では、メタン中の炭素の酸化数は-4である。一方、CO では酸素の酸化数が-2であるため、炭素の酸化数は$+2$となる。

C : $-4 \rightarrow +2$となり、炭素は酸化されている。

(2)

反応式より、

$CH_4 : O_2 : H_2O = 2 : 3 : 4$である。

メタン 0.100 mol に対して、

$O_2 = 0.100 \times \frac{3}{2} = 0.150 \ \ \mathrm{mol}$

$H_2O = 0.100 \times 2 = 0.200 \ \ \mathrm{mol}$となる。

実際の不完全燃焼では、生成物は CO だけではなく、CO_2や炭素（すす）などが混在する場合がある。そのため、酸素が不足しているという条件だけから、生成物の割合や 1 種類の反応式による量論関係を決めることはできない。

このモデル式は、炭素含有生成物を CO と仮定した場合の代表的な反応式であり、実際の燃焼現象では条件によって生成物の割合が変化する。

演習問題

演習 1

エタン C_2H_6 の完全燃焼について考える。

(1) エタンが完全燃焼するときの最小整数係数の反応式を示せ。

(2) エタン C_2H_6 0.300 mol を完全燃焼させるとき、必要な O_2 と生成する CO_2、H_2O の物質量を求めよ。ただし、酸素は十分にあり、反応は完全に進行するものとする。

演習 2

メタンと塩素の置換反応について考える。光を当てる条件で、一段階の置換反応のみを考える。

(1) メタンと塩素の反応で生じる 2 つの生成物と反応式を示せ。また、メタン中の何が置き換わったか説明せよ。

(2) ジクロロメタン CH_2Cl_2 がさらに Cl_2 と一段階反応するとき、生じる 2 つの生成物と反応式を示せ。

演習 3

アルカンの完全燃焼について考える。

(1) 鎖式アルカンの一般式 C_nH_{2n+2} から、完全燃焼の一般式を C・H・O の原子数保存を用いて導け。

(2) ペンタン C_5H_{12} の完全燃焼について、最小整数係数の反応式を示せ。また、ペンタン 0.0500 mol が完全燃焼するときに生成する H_2O の物質量を求めよ。

演習 4

メタンの不完全燃焼について、炭素を含む生成物が炭素 C のみであると仮定したモデルを考える。

(1) このモデルにおけるメタンの反応式を、最小整数係数で示せ。

(2) 「酸素不足と分かったので、生成物は必ず CO だけであり、生成量も一意に決まる」という考えが誤りである理由を説明せよ。

演習 5

メタンの完全燃焼と一段階塩素置換について比較する。

(1) メタンの完全燃焼と一段階塩素置換について、反応物、条件、炭素を含む生成物、水素の扱いの 4 つの観点から比較して説明せよ。

©ミライコーチング

演習問題の解答・解説

解答 1

(1)

エタンの完全燃焼では、炭素数、水素数、酸素数の順に原子数を合わせる。

まず炭素数を合わせる。

$C_2H_6 + O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O$

次に水素数を合わせる。左辺の水素原子は 6 個なので、水を 3 個にする。

$C_2H_6 + O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$

右辺の酸素原子は、二酸化炭素由来の 4 個と水由来の 3 個で合計 7 個であるため、O_2 の係数は $\frac{7}{2}$ となる。

$C_2H_6 + \frac{7}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$

分数係数をなくすため、全体を 2 倍する。

$2C_2H_6 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O$

(2)

反応式より物質量比は、

$C_2H_6 : O_2 : CO_2 : H_2O = 2 : 7 : 4 : 6$である。

エタン $0.300\ \mathrm{mol}$ に対して、

$O_2 = 0.300 \times \frac{7}{2} = 1.05\ \ \mathrm{mol}$

$CO_2 = 0.300 \times \frac{4}{2} = 0.600\ \ \mathrm{mol}$

$H_2O = 0.300 \times \frac{6}{2} = 0.900\ \ \mathrm{mol}$となる。

解答 2

(1)

メタンと塩素の一段階置換反応では、光を当てるなどの条件で反応が起こる。

$CH_4 + Cl_2 \rightarrow CH_3Cl + HCl$である。

この反応では、メタン中の水素原子 1 個が塩素原子 1 個へ置換される。炭素原子数は 1 個のままであり、炭素は反応前後で 4 本の結合を保つ。また、Cl_2の塩素原子 2 個は、CH_3ClとHClへ 1 個ずつ移るため、塩素原子数も保存される。

(2)

ジクロロメタンでは、まだ 2 個の水素が残っているため、さらに置換が進む。

$CH_2Cl_2 + Cl_2 \rightarrow CHCl_3 + HCl$となる。

生成物は、トリクロロメタン $CHCl_3$ と塩化水素 HCl である。

解答 3

(1)

アルカンの完全燃焼では、

$C_nH_{2n+2}+O_2 \rightarrow nCO_2+(n+1)H_2O$とおく。

炭素数を合わせると、二酸化炭素の係数はnとなる。

水素数を合わせると、水分子は$n+1$個必要になる。

右辺の酸素原子数は、

$2n+(n+1)=3n+1$個である。

したがって、左辺の酸素分子の係数は、

$\frac{3n+1}{2}$となる。

よって完全燃焼の一般式は、

$C_nH_{2n+2}+\frac{3n+1}{2}O_2 \rightarrow nCO_2+(n+1)H_2O$である。

(2)

ペンタン C_5H_{12} では、一般式に$n=5$を代入する。

$C_5H_{12}+8O_2 \rightarrow 5CO_2+6H_2O$となる。

反応式より、

$C_5H_{12}:H_2O=1:6$である。

ペンタン $0.0500\ \mathrm{mol}$ から生成する水は、

$H_2O=0.0500\times 6=0.300\ \ \mathrm{mol}$となる。

解答 4

(1)

炭素を含む生成物が炭素Cのみであると仮定する。

$CH_4+O_2 \rightarrow C+H_2O$

まず水素数を合わせる。

$CH_4+O_2 \rightarrow C+2H_2O$

右辺の酸素原子は 2 個なので、左辺の酸素分子は 1 個必要である。

したがって、

$CH_4+O_2 \rightarrow C+2H_2O$となる。

(2)

酸素不足の条件だけでは、生成物が一種類に決まるとは限らない。

実際の不完全燃焼では、酸素量や温度などの条件によって、CO_2、CO、炭素Cなどが混在する場合がある。

そのため、「酸素不足である」という情報だけから、必ずCOだけが生成すると判断することはできず、特定の一つの反応式による量論関係を決定することもできない。

解答 5

(1)

メタンの完全燃焼と一段階塩素置換は、反応物・条件・炭素を含む生成物・水素の扱いが異なる。

観点	完全燃焼	一段階塩素置換
反応物	CH_4とO_2	CH_4とCl_2
条件	十分な酸素のもとで点火	光などの条件で反応
炭素を含む生成物	CO_2	CH_3Cl
水素の扱い	すべて酸素と反応してH_2Oになる	4 個の H のうち 1 個が Cl へ置換されてHClを生じ、3 個は炭素に結合したまま残る

完全燃焼では、メタンの炭素骨格が酸素によって二酸化炭素へ変化する。一方、一段階塩素置換では炭素骨格は保たれ、水素 1 個が塩素へ置き換わる。

©ミライコーチング