

# 熱力学のための 数学基礎



## 微分、偏微分、の使い分け

$$\partial U = C_V dT \approx dU = C_V dT \longleftrightarrow \Delta U = C_V \Delta T$$

：ある状態と他の状態の差を表しています。

d：微分記号。の差が極微小、極限的に0の関係を表します。

∂：偏微分記号。変数が2つ以上で成り立っている関数で、ある変数を定数とみなした時の注目している変数の微分。

一般に、は微分記号dと置き換えることができ、

目的の関数の値は定積分によって求めることができる。

偏微分を微分に変更するためには、**変数を定数としている条件下**ではという但し書きが必要。

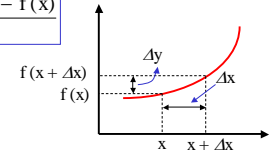
## 微分の定義

従属変数  $y = f(x)$  という関数の微分を考える。x は独立変数。

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

例  $y = f(x) = x^2$

$$\frac{dy}{dx} = 2x$$



$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{(x + \Delta x)^2 - x^2}{\Delta x} \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{x^2 + 2x\Delta x + (\Delta x)^2 - x^2}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} (2x + \Delta x) = 2x \end{aligned}$$

$$\frac{dy}{dx} = 2x \longrightarrow dy = 2x dx$$

x = g(y) という逆関数の微分を考える。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dy} &= \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{g(y + \Delta y) - g(y)}{\Delta y} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{f(x + \Delta x) - f(x)} = \frac{1}{\frac{dy}{dx}} \\ \frac{dy}{dx} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \end{aligned}$$

$$\frac{dy}{dx} \cdot \frac{dx}{dy} = 1 \longrightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{du}{dx} \cdot \frac{dy}{du} \quad u \text{ は } x \text{ と } y \text{ の関数。}$$

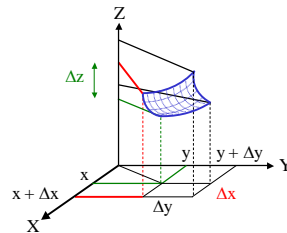
## 偏微分の定義

独立変数が2つ以上ある従属変数の場合の微分

$z = f(x, y)$  の微分は？

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta z}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x}$$

y を定数とみなして x だけについて微分する。



例  $z = f(x, y) = x^2 y^3$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 2xy^3, \quad \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y$$

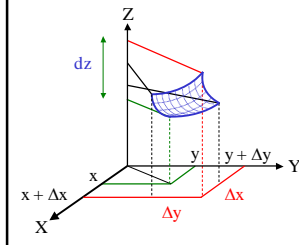
$$\frac{\partial z}{\partial y} = 3x^2 y^2, \quad \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)_x$$

## 全微分の定義

独立変数が2つ以上ある従属変数の場合の微分

$dz = \lim_{\Delta x, \Delta y \rightarrow 0} \{ f(x + \Delta x, y + \Delta y) - f(x, y) \}$  x と y が両方変化したときの変化量(微分)。

$$\begin{aligned} dz &= \lim_{\Delta x, \Delta y \rightarrow 0} \{ f(x + \Delta x, y + \Delta y) - f(x, y) \} = \lim_{\Delta x, \Delta y \rightarrow 0} \{ f(x + \Delta x, y + \Delta y) - f(x, y + \Delta y) \} \\ &\quad + \lim_{\Delta x, \Delta y \rightarrow 0} \{ f(x, y + \Delta y) - f(x, y) \} \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y + \Delta y) - f(x, y + \Delta y)}{\Delta x} \Delta x \\ &\quad + \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y} \Delta y \\ &= \frac{\partial f(x, y + \Delta y)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \Delta y \end{aligned}$$



偏微分の定義より、 $\Delta y$  が非常に小さい時には  $\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y}$

与式に上の関係を代入すれば

$$dz = \frac{\partial f(x, y + \Delta y)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \Delta y = \frac{\partial}{\partial x} \{ f(x, y) + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \Delta y \} \Delta x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \Delta y$$

$$= \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \frac{\partial \Delta y}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \Delta y$$

非常に小さい = 0

$$dz = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \Delta y = \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y dx + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)_x dy$$

Copyright A.Azuro 7

**まとめ** 独立変数が2個以上(今は2つだけ考える)の時の微分は、偏微分と全微分がある。

$z = f(x, y)$

**偏微分**

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta z}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x} \quad \frac{\partial z}{\partial x} \equiv \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y$$

**全微分**

$$dz = \lim_{\Delta x, \Delta y \rightarrow 0} \{ f(x + \Delta x, y + \Delta y) - f(x, y) \}$$

$$dz = \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y dx + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)_x dy$$

Copyright A.Azuro 8

**熱力学 (Thermodynamics)**

熱力学とは: 巨視的な系 (molのオーダー) を取り扱い、系の状態変化を理論体系化したもの。  
3 態の化学は熱力学、例えば気体の状態方程式、相平衡 etc.

- 化学反応が起こる**可能性**を判断する規準を与える。
- 化学反応の平衡時の最大生成物量を計算する方法を与える。

可能性がないと判断される反応は絶対に起こらない。

**限界点**

- 化学反応の速度、時間を予測できない。
- 化学反応の機構についての情報は与えない。

Copyright A.Azuro 9

**熱とは:** 状態あるいは相の変化には必ず、\_\_\_\_\_の出入り(収支)がある。\_\_\_\_\_変化は熱とそれ以外とに区別できる。熱以外の\_\_\_\_\_変化を仕事という。

水 1g の温度を 14.5 から 15.5 まで上昇させるのに必要な熱量を 15 calorie (1 cal) と呼ぶ(温度により水の比熱容量は異なる)。

熱の仕事当量 (mechanical equivalent of heat)

$1 \text{ cal}_{15} = 4.1855 \text{ J}$


**熱力学的な熱の仕事当量とは**

$1 \text{ cal}_{\text{th}} = 4.184 \text{ J}$  (定義)

熱化学的カロリー (thermochemical calorie)


Copyright A.Azuro 10

**巨視的な系の定義**




開いた系 (開放系) Open system

外界とエネルギー交換、物質移動が可能



閉じた系 (閉鎖系) Closed system

外界とエネルギー交換は可能、物質移動は不可能



孤立系 Isolated system

外界とエネルギー交換、物質移動が不可能

Copyright A.Azuro 11

**熱力学第0法則 (zeroth law of thermodynamics)**

A と C が熱平衡 (thermal equilibrium) にあり、B と C が熱平衡状態にあるとき、A と B もまた熱平衡状態である。

A, B, C の温度は互いに等しい

熱平衡状態  
孤立系を長時間放置し、巨視的な変化がなくなった状態

経験温度:

ある2点を定義して、それに対して相対的(等分)に目盛をつけて定めた数値を用いる。いわば相対温度。1 (セルシウス温度) は  $1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$  の時、水の氷点と沸点を100等分したもの。

< 熱力学温度 (絶対温度) : 熱力学第2法則 >

Copyright A.Azuro 12

**熱力学第1法則 (first law of thermodynamics)**

孤立系の中での何らかの変化は、  
孤立系内部のエネルギー変化を伴わない、  
( ) 仕事と熱との関係

閉じた系を考える

閉じた系の内部のエネルギー変化は q と w だけによる。  
内部エネルギー: U,  
Aの状態から熱 q をもらってBの状態になったときの内部エネルギー変化をとすると、 $\Delta U = U_B - U_A$

$\Delta U = +$

孤立系においては内部エネルギーの変化はないから、  
 $\Delta U = 0$   $0 = +$  ,  $\therefore =$

つまり、閉じた系がける熱量はすべて仕事に変化することを示している。 → 永久機関(熱を供給されなくても仕事をする機関)の存在を否定。

第一種の永久機関(perpetual engine of the first kind)

符号: + と -

**熱量 q:** 系が熱を吸収する:  $\Delta U$ の\_\_\_\_; 吸熱的な時は\_\_\_\_(\_\_\_\_)。  
系が熱を放出する:  $\Delta U$ の\_\_\_\_; 発熱的な時は\_\_\_\_(\_\_\_\_)。

**仕事 w:** 仕事は系が外部に対して行う場合を\_\_\_\_(\_\_\_\_)とする。  
なぜなら、内部エネルギーがその分\_\_\_\_から。

**内部エネルギー**  $\Delta U = +$

内部エネルギーは状態量: 状態変化の経路に無関係  
熱量 q と仕事 w は状態変化の経路に依存

1. A B C と進む変化  $\Delta U_1$   
2. A C と進む変化  $\Delta U_2$

**熱力学第1法則**  $\Delta U_1 = \Delta U_2$

しかし、  
 $q_1 \neq q_2$  であり  $w_1 \neq w_2$   
(偶然 = になることもある。)

**圧力一定下での理想気体の体積変化** (定圧過程)

圧力を一定に保って、閉じた系にある気体に熱を加える

熱(q) → P = 一定

$\Delta U = +$  仕事 w は  $P\Delta V$  →  $\Delta U = -$

q (供給された熱量) に注目すると、  
 $q = +$   $\equiv \Delta H$  エンタルピー変化 (enthalpy)  
内部に残る熱量 → 外部に使う熱量

**圧力一定の時の関係式であることに注意**

**熱容量:** \_\_\_\_\_  
(specific heat capacity)  
比熱: 1gの物体、モル熱容量: 1molの物体。

**定積熱容量  $C_V$**  定積;  $\Delta V = 0$  (定積過程)

$q = \Delta U + P\Delta V$  →  $q = \Delta U$

1 Kだけ上昇させる = 横軸に温度、縦軸に熱量のグラフの傾きを求めること

熱量を温度で微分  $C_V = \left(\frac{\partial q}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$

**定圧熱容量  $C_p$**  定圧;  $\Delta P = 0$  (定圧過程)

$\Delta H = q = \Delta U + P\Delta V$   $C_p = \left(\frac{\partial q}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P$

$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P = +$

$C_p - C_V$  を考えると  
 $C_p - C_V = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P - \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V =$

UをTとVの関数と考えてUの全微分を求めると、

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV + \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT \quad Pを一定という条件で左式をdTで割ると、$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$$

←

$$C_P - C_V =$$

Copyright A.Azuro 19

$$C_P - C_V = \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T + P \right\} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

温度一定で体積が変化した時の内部エネルギー変化

- 固体、液体の場合  
体積変化でおこる内部エネルギー変化は凝集力(内部圧)という。固体や液体では分子間力があるため無視できないほど大きい。
- 気体の場合  
分子間力が小さいため無視できる。ほぼ0(理想気体では0)。

温度変化による体積変化(圧力一定下)

- 固体、液体の場合  
温度の変化に対する体積変化は無視できるほど小さい。
- 気体の場合  
温度の変化に対する体積変化は比例するから、一定の値をもつ。

Copyright A.Azuro 20

気体の熱容量

$$C_P - C_V = \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T + P \right\} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

= 0、Jouleの法則 (補遺) 第3法則も使うのでその後

1 molの理想気体においては、PV = RTだから、

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \frac{R}{P} \quad C_P - C_V =$$

気体のエネルギー U は  $U = 3/2 RT$ 。

運動エネルギーと内部エネルギーは等しい、 $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = \frac{3}{2} R \rightarrow C_P =$

Copyright A.Azuro 21

$T_1$ から $T_2$ への温度変化による状態変化での内部エネルギー変化(定積下)とエンタルピー変化(定圧下)

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$$

$$C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P$$

上記のUを定積下での条件をつけると、  
 $dU = C_V dT$   
 $\int_{T_1}^{T_2} dU = \int_{T_1}^{T_2} C_V dT$   
 $\Delta U = \int_{T_1}^{T_2} C_V dT$

上記のHを定圧下での条件をつけると、  
 $dH = C_P dT$   
 $\int_{T_1}^{T_2} dH = \int_{T_1}^{T_2} C_P dT$   
 $\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_P dT$

Copyright A.Azuro 22

まとめ (理想気体)

$$U = q + w, \quad H = U + PV = U + nRT$$

定積  $\Delta V = 0$

$$\Delta U = \Delta q \quad \Delta H = \Delta U + nR\Delta T \quad C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$$

定圧  $\Delta P = 0$

$$\Delta U = \Delta q - P\Delta V \quad C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P$$

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V = \Delta q$$

Copyright A.Azuro 23

例題1: 1 atm下で1 molの水素を0 から100 まで加熱したときのエンタルピー変化を求めよ。水素の定圧モル熱容量は温度Tの関数として、

$$C_P = 27.28 + 3.26 \times 10^{-3} T + 0.50 \times 10^{-5} \frac{1}{T^2} \text{ [JK}^{-1}\text{mol}^{-1}\text{]}$$

のように表される。

解答

Copyright A.Azuro 24

例題2: 例題1のエンタルピー変化から、この時の水素の内部エネルギー変化を求めよ。

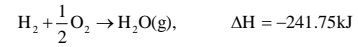
解答

Copyright A.Azuro

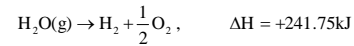
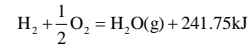
25

燃焼と生成の標準モルエンタルピー standard molar enthalpy of combustion  
standard molar enthalpy of formation

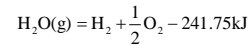
反応熱 (定圧下での反応熱はエンタルピー変化に等しい)



水素と酸素は**発熱反応 (exothermic)**



水蒸気の分解は**吸熱反応 (endothermic)**



Copyright A.Azuro

26

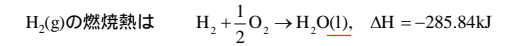
定積下での反応熱は内部エネルギー変化に等しい。

定義より、 $q = \Delta U + P\Delta V$   $\xrightarrow{\text{定積下という条件から}}$   $q = \Delta U$

• 通常の実験では定圧下がほとんど

• 燃焼熱: 物質が完全に燃焼するときの反応熱

有機物 (CHO) では \_\_\_\_\_ 下で \_\_\_\_\_ と \_\_\_\_\_ が生成する。



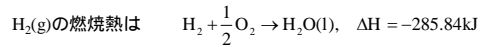
1 atm, 25 °C、1 molあたりの燃焼熱 (heat of combustion) を

**標準燃焼エンタルピー** ( $\Delta H_c^\circ$ ) という。

Copyright A.Azuro

27

標準生成エンタルピー ( $\Delta H_f^\circ$ )



この反応式は左からでは  $\text{H}_2(\text{g})$  の燃焼を表しているが、右から見れば、 $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  の生成を表しているとも言える。

ただし、生成熱は標準状態の元素単体から生じたとき

(上記の場合、 $\text{H}_2$  元素と  $\text{O}_2$  元素から生じていることに注意)

の反応熱であり、元素の生成熱を規準として0と定める。

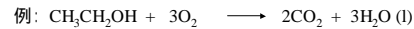
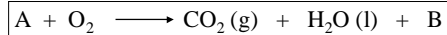
単体は 1 atm, 25 °C で最も安定なものを選択する。

例: 黒鉛は生成エンタルピーは0、ダイヤモンドは0でない。

Copyright A.Azuro

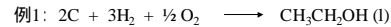
28

標準燃焼エンタルピー 実際に反応が進む

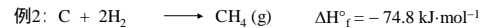


$$\Delta H_c^\circ = -1371 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

標準生成エンタルピー 実際に反応が進む必要はない



$$\Delta H_f^\circ = -1371 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$



Copyright A.Azuro

29

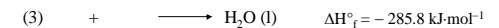
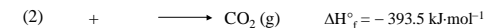
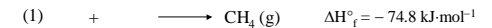
ヘスの法則 (総熱量不変の法則 law of constant heat summation)

定圧反応熱 (標準燃焼エンタルピー) または定積反応熱 (標準内部エネルギー) は途中の反応経路によらず、さらにその反応が複数段で行われても、反応熱の総和は不変。

(逆も成り立ちます。)

標準生成エンタルピーから標準燃焼エンタルピーを求められる。

例: メタンの燃焼エンタルピーを求める。



Copyright A.Azuro

30

Copyright A.Azuro 31

$$2(\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2) + (\text{C} + \text{O}_2) - (\text{C} + 2\text{H}_2)$$

$$\longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 - \text{CH}_4$$

$$\downarrow$$

$$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$$

したがって、メタンの標準燃焼エンタルピー  $\Delta H_c^\circ$  は

$$\Delta H_c^\circ = 2 \times (-285.8) - 393.5 - (-74.8) = -890.3 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$\Delta H_c^\circ = -890.3 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Copyright A.Azuro 32

$$\Delta H_c^\circ = 74.8 + (-393.5) + 2 \times (-285.8) = -890.3 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$-\text{CH}_4(\text{g})$  の標準生成エンタルピー  
 $\text{CO}_2(\text{g})$  の標準生成エンタルピー  
 $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  の標準生成エンタルピー

$$\text{CH}_4(\text{g}) + 2\text{O}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$$

$\Delta H_f^\circ = 0$

**燃焼エンタルピー** = 右辺の生成エンタルピーの和  
 - 左辺の生成エンタルピーの和

Copyright A.Azuro 33

練習問題 1

一酸化炭素の25における標準燃焼エンタルピーを求めなさい。  
 二酸化炭素の標準生成エンタルピーは  $-393.5 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、  
 一酸化炭素の標準生成エンタルピーは  $-110.5 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  とする。

解答  $\text{CO}(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) \quad \Delta H_c^\circ = ?$

Copyright A.Azuro 34

燃焼エンタルピー = 右辺の生成エンタルピーの和  
 - 左辺の生成エンタルピーの和

$$\text{CO}(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$$

ゆえに  $\Delta H_c^\circ =$       kJ

$\text{mol}^{-1}$ は標準モルエンタルピーなので省略してもよい。

Copyright A.Azuro 35

練習問題 2

次に上げるそれぞれの分子の標準燃焼エンタルピーの値を用いて、エチレン( $\text{C}_2\text{H}_4$ )の標準生成エンタルピーを求めなさい。

分子	$\Delta H_c^\circ / \text{kJ mol}^{-1}$	分子	$\Delta H_c^\circ / \text{kJ mol}^{-1}$
$\text{H}_2(\text{g})$	-285.84	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{g})$	-1410.97
$\text{C}(\text{s})$	-393.51		

ヒント

$\text{C-H-O}$ からなる分子を酸素存在下で燃焼したのが燃焼エンタルピー、生成物は水と二酸化炭素。

Copyright A.Azuro 36

**練習問題2の解答**

$$\text{C(s)} + \text{O}_2(\text{g}) = \text{CO}_2(\text{g}) \quad \Delta H_c^\circ = -393.51 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1} \quad (1)$$

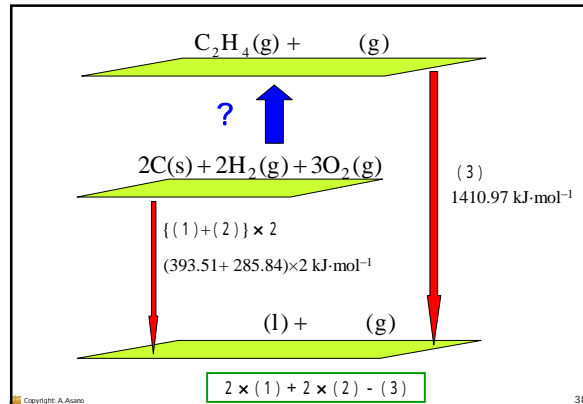
$$\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) = \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \quad \Delta H_c^\circ = -285.84 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1} \quad (2)$$

$$\text{C}_2\text{H}_4(\text{g}) + 3\text{O}_2(\text{g}) = 2\text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \quad \Delta H_c^\circ = -1410.97 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1} \quad (3)$$

C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(g)の生成熱 ΔH<sub>f</sub><sup>°</sup>は

$$2\text{C(s)} + 2\text{H}_2(\text{g}) = \text{C}_2\text{H}_4(\text{g})$$

という反応式により得られる値であるから、  
 $2 \times (1) + 2 \times (2) - (3)$ で上式を得る。



$2 \times (1) + 2 \times (2) - (3)$ から、

$$\Delta H_f^\circ = -393.51 \times 2 - 285.84 \times 2 - (-1410.97)$$

標準生成エンタルピー ΔH<sub>f</sub><sup>°</sup>は  $\Delta H_f^\circ = +52.27 \text{ kJ}$

$$+ \text{O}_2(\text{g}) = \text{C}_2\text{H}_4(\text{g}) - 52.27$$

**吸熱反応**

**別解**

$$\Delta H_f^\circ = -393.51 \times 2 - 285.84 \times 2 - (-1410.97)$$

をよく考えてみましょう。

$$\Delta H_f^\circ = -393.51 \times 2 - 285.84 \times 2 - (-1410.97)$$

C(s) × 2の標準燃焼エンタルピー

H<sub>2</sub>(g) × 2の標準燃焼エンタルピー

C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(g)の標準燃焼エンタルピー

$$2\text{C(s)} + 2\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4(\text{g})$$

**生成エンタルピー** = 左辺の燃焼エンタルピーの和  
 - 右辺の燃焼エンタルピーの和

**燃焼エンタルピー** = 右辺の生成エンタルピーの和  
 - 左辺の生成エンタルピーの和

問題にしている物質

**格子エネルギー (格子エンタルピー: lattice enthalpy)**

イオン結晶を気体状態のイオン対に分解するときのエネルギー  
 (気相のイオン対が固体のイオン結晶になる時、放出するエネルギー)

$$\text{Na(g)} \xrightarrow{+IE} \text{Na}^+(\text{g})$$

吸収

$$\text{Cl(g)} \xrightarrow{-EA} \text{Cl}^-(\text{g})$$

放出

$$\text{Na}^+(\text{g}) + \text{Cl}^-(\text{g}) \xrightarrow{\text{格子エネルギー}} \text{NaCl(s)}$$

格子エネルギー

Born-Haber cycle: ボルン・ハーバーサイクル

