

# 過炭酸ナトリウムを利用した実験教材

具志堅園子<sup>1</sup>, 瓜生 翔太<sup>2</sup>, 古賀 飛鳥<sup>3</sup>, 岡島 俊哉<sup>4</sup>, 中島 道夫<sup>4</sup>, 石原 秀太<sup>5</sup>

## Experimental Educational Material using Sodium Percarbonate

Sonoko GUSHIKEN, Syouta URYUU, Asuka KOGA, Toshiya OKAJIMA,  
Michio NAKASHIMA, and Hideta ISHIHARA

### 要 旨

過炭酸ナトリウムから酸素を発生する場合、60℃以上の熱湯につけることによって、短時間に酸素を捕集することができる。室温でも、触媒をつかえば、過酸化水素単独の分解と同じように酸素を発生することができる。

発生した酸素の圧力変化から反応の速度定数を求める方法について検討し、得られた活性化エネルギーの値を体積変化から求める方法から得られた値と比較した。

### 1. はじめに

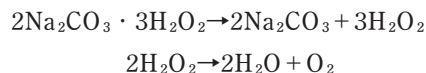
教師が理科の授業を作るにあたって、楽しさだけを追求することはもちろんできない。かといって子ども達が見向きもしないような教材では「わかる楽しい授業」には到底結びつかないだろう。学習を活性化させるために、身近な素材を子どもの目線に立って見つめなおし、教材として発掘する必要がある<sup>1)</sup>。

今回は化学実験における酸素の供給源として、二酸化マンガンに触媒とした過酸化水素の分解に代わる新しい素材として提案されている、酸素系漂白剤を使った反応速度の実験の教材化について報告する。

### 2. 過炭酸ナトリウム

酸素系漂白剤の主成分である過炭酸ナトリウム(sodium percarbonate, CAS No. 15630-89-4)は、通常炭酸ナトリウムと過酸化水素が2:3のモル比で混合してできる付加化合物を指す<sup>2)</sup>。

過炭酸ナトリウムの化学式は $2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$ と表され、水に溶けて炭酸ナトリウムと過酸化水素に遊離し、炭酸ナトリウムの加水分解により弱アルカリ性(pH = 10.6)を示す。



また、過炭酸ナトリウムから遊離した過酸化水素は弱アルカリ性水溶液中で加熱されると、活性

<sup>1</sup> 神奈川県横須賀市立望洋小学校 教諭

<sup>2</sup> 佐賀県伊万里市立伊万里中学校 教諭

<sup>3</sup> 佐賀大学 教育学研究科教科教育専攻 理科教育専修在学

<sup>4</sup> 佐賀大学 文化教育学部 環境基礎講座

<sup>5</sup> 佐賀大学 文化教育学部 理数教育講座

酸素と水に分解され、酸化力を示し、色素を分解して無色の物質に変える漂白作用を示す。

### 3. 体積変化の測定

#### 体積で酸素の発生量を測定

【準備】市販酸素系漂白剤（花王株式会社「ワイドハイター」試料①、シャボン玉石けん株式会社「シャボン玉酸素系漂白剤」試料②）、水（蒸留水・水道水・カルキ抜き水道水）、温度計、薬包紙、薬さじ、電子天秤、三角フラスコ（300 mL）、メスシリンダー（100 mL、500 mL）、恒温水槽。

過炭酸ナトリウム含有率は次のようにして決定した。漂白剤の適量を取り、水溶液とする。過マンガン酸カリウム水溶液を用いた、通常の酸化還元滴定によって水溶液の過酸化水素含有量を決定し、この値から過炭酸ナトリウム含有率を計算した。酸素系漂白剤を水溶液にすると、過酸化水素の分解が始まるので、得られた値は概略値である。

【実験方法】試料10.0 gを量りとり、一定温度の蒸留水または水道水200 mLとともに、三角フラスコに入れる。恒温水槽で温度を一定に保ちながら、発生した酸素を水上置換で捕集し、30秒毎に酸素の発生量を記録する。

最初、入手しやすい試料①を使用した。図2に示すように、酸素はあまり発生しない。試料①に

は過炭酸ナトリウム（含有量測定値38 %以上）の他に界面活性剤（アルキル硫酸エステルナトリウム）、アルカリ剤（炭酸塩）、漂白活性剤、安定化剤、酵素などが入っている。特に界面活性剤は酸素発生時に多量に泡となり、酸素がうまく発生しない原因と考えられる。また、温度が高いからといって酸素の発生が速いわけでもなかった。

一方、試料②は過炭酸ナトリウム100 %（表示100 %、測定値75 %以上）からできており、その他の添加物を一切含んでいない。図3からも明らかのように、酸素の発生量は試料①に比べてはるかに多い。また、高温ほど酸素の発生の速度は大きくなる。また、蒸留水を使用した場合と水道水を使用した場合では、高温での酸素の発生量にさほど違いは見られなかったが、50～60℃では気体の発生量に違いが見られた。

#### 反応速度と活性化エネルギー

試料②の実験結果から、反応の活性化エネルギーが求められる。 $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ の反応速度  $v$  は一定温度のもとでは残っている  $\text{H}_2\text{O}_2$  の濃度  $C$  に比例する。

$$v = -\frac{dC}{dt} = kC^n \quad k: \text{速度定数} \quad \cdots \text{①}$$

この反応は反応速度が濃度の1乗に比例する一次反応 ( $n=1$ ) と仮定すると、

①式を積分すると

$$-\ln C = kt + a \quad a: \text{積分定数}$$

ここで  $t=0$  の時の濃度を  $C_0$  とすると  $-\ln C_0 = a$  したがって

$$\ln \frac{C}{C_0} = -kt \quad \cdots \text{②}$$

ある時間  $t$  までに分解した  $\text{H}_2\text{O}_2$  の量（濃度）を  $x$  とすると  $C_0 - C = x$  となり②式に代入すると

$$\ln \frac{C_0 - x}{C_0} = -kt \quad \cdots \text{③}$$

実験では発生した酸素の体積を測定したので、 $\text{H}_2\text{O}_2$  の濃度の代わりに酸素の体積を用いて③式を表す。時間  $t$  までに発生した酸素の体積  $V$  は  $x$  に比例し、時間  $\infty$  までに発生した酸素の体積  $V_\infty$ 。

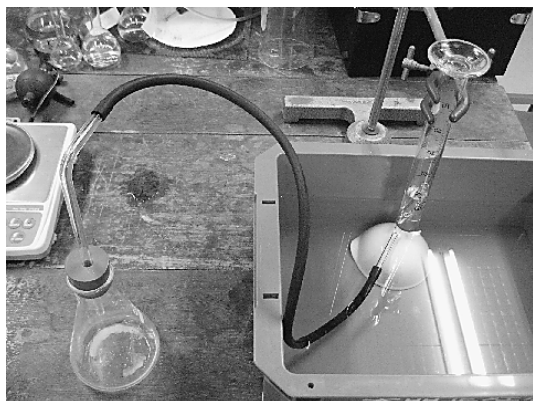


図1 実験装置図

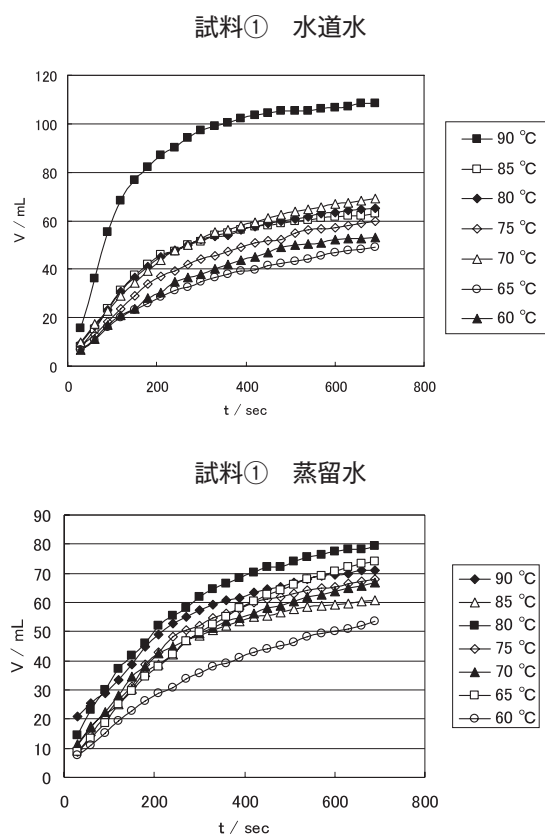


図2 試料①の酸素発生量の温度変化。  
上図：水道水使用、下図：蒸留水使用。

は  $C_0$  に比例するので、③式は次のようになる。

$$\ln \left[ \frac{V_\infty}{V_\infty - V} \right] = kt \quad \cdots ④$$

$t$  に対して  $\ln \left[ \frac{V_\infty}{V_\infty - V} \right]$  をプロットして、その勾配から  $k$  を決めることができる。今回の実験では、90℃での最大酸素発生量を  $V_\infty$  とした。

また、速度定数  $k$  と反応の絶対温度  $T$  に次のアレニウスの関係式が成り立つとすると、

$$k = A \exp \left( -\frac{E_a}{RT} \right) \quad \cdots ⑤$$

$E_a$ ：活性化エネルギー、 $R$ ：気体定数、 $A$ ：頻度因子

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad \cdots ⑥$$

したがって  $\ln k$  と  $1/T$  は直線関係にあり、その勾

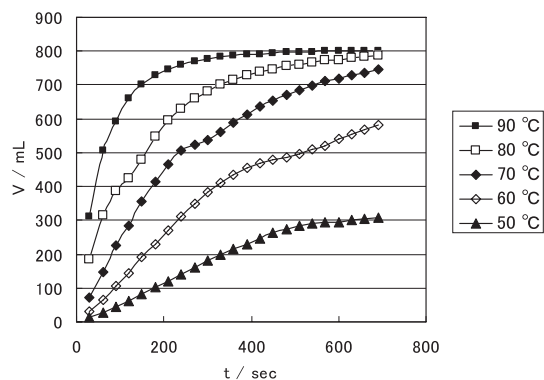
配より活性化エネルギー  $E_a$  を求めることができる。エクセル上で  $1000/T$  に対して、各温度での速度定数  $k$  の自然対数  $\ln k$  をプロットし線形近似曲線を作成し、その線形近似曲線の傾き  $a$  から

$a = -\frac{E_a}{1000R}$  となり、活性化エネルギー  $E_a$  を求めることができる。

$$E_a = -8.314 \times a \text{ (kJ/mol)} \quad \cdots ⑦$$

図4に、蒸留水を使用した試料②の実験での、 $\ln k - 1000/T$  のグラフを例として示す。それぞれの実験で得られた反応の活性化エネルギーは表1のようになった。50%過酸化水素水の熱分解に対して68 kJ/mol程度の活性化エネルギーが報告されており、ほぼ一致する<sup>4)</sup>。水道水を使用した場合、酸素発生のための活性化エネルギーは蒸留水を使用した場合よりも小さくなり、何らかの触媒作用が考えられる。触媒作用は水道水に含まれる塩素が関係しているのではないかと考え、脱塩素（カルキ抜き）水道水で実験を行った。沸騰ジャーポットを使って湯を沸かし、カルキ抜きボタンを押して水道水のカルキを抜いてから今までと同様に実験を行った。カルキ抜きの作業は念のため3回行った。酸素の発生量は図5のようになった。得られた活性化エネルギーは、蒸留水を使用した場合と水道水を使用した場合の中間の値を示した。また、水道水には金属イオンが微量に含まれており、金属イオンの触媒作用も考えられる<sup>5)</sup>。次の過酸化水素の酸化、還元に関する酸化還元電位の中間の電位を示す金属イオンは過酸化水素から酸素を発生するときの触媒となる（後述）。

試料② 水道水



試料② 蒸留水

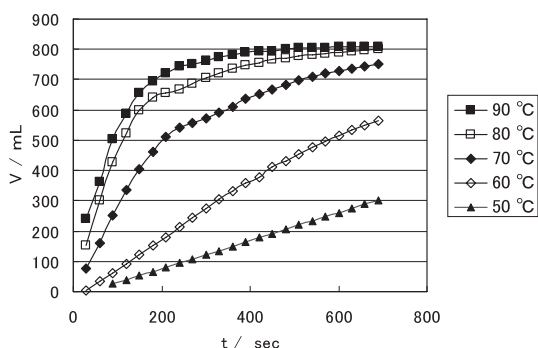


図3 試料②の酸素発生量の温度変化。  
上図：水道水使用、下図：蒸留水使用。

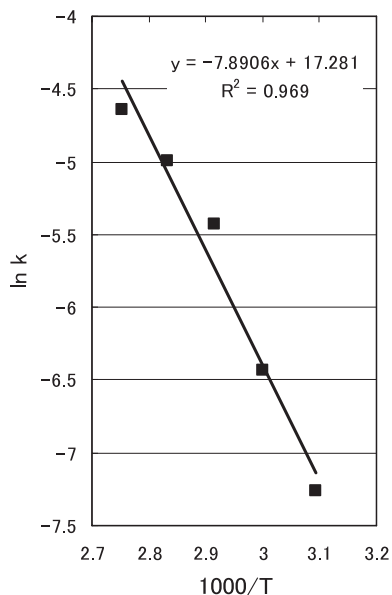


図4 蒸留水を使用した試料②の酸素発生の実験

表1 試料②の活性化エネルギー

活性化エネルギー $E_a$ kJ/mol	
蒸留水	66 ± 1
水道水 (カルキ抜き)	61 ± 1
水道水	59 ± 1

(誤差の見積もりは文献3)に従った)

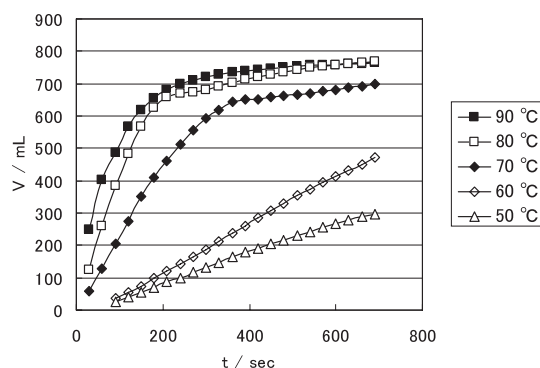
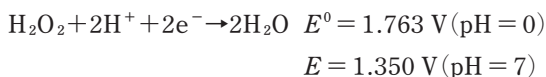
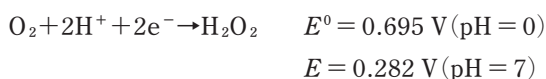


図5 脱塩水を使った試料②の酸素発生量の温度変化。

酸化：



還元：



#### 4. 圧力変化の測定

##### 圧力で酸素の発生量を測定

【準備】酸素系漂白剤（シャボン玉石けん株式会社「シャボン玉酸素系漂白剤」）、水（水道水・蒸留水）、共通摺合茄子型フラスコ、ビーカー、電子圧力計、スタンド、薬包紙、薬さじ、電子天秤、試験管、注射器、ケッククリップ・テーパージョイント、恒温槽、三方コック、分岐管、真空ポンプ、ピンチコック、ストップウォッチ。

##### 【実験方法】

- ①共通摺合茄子型フラスコと水を入れた試験管を恒温槽の中に入れ、温めておく。

- ②酸素系漂白剤を電子天秤で1 g 量り、茄子型フラスコの中に入れる。
- ③真空ポンプで茄子型フラスコ内の空気を抜き、フラスコ中の圧力が一定になると三方コックを閉め、密閉状態にする。
- ④測定温度になったらピーカーに温めていた試験管の水を入れ、注射器で20 mL とる。
- ⑤測定温度が一定になったら注射器を設置し、茄子型フラスコ内にピンチコックを開けて水を注入し、ピンチコックと三方コックを閉める。
- ⑥酸素の発生による圧力が増加するので、一定時間ごとに圧力を電子圧力計（絶対圧）で測定する。

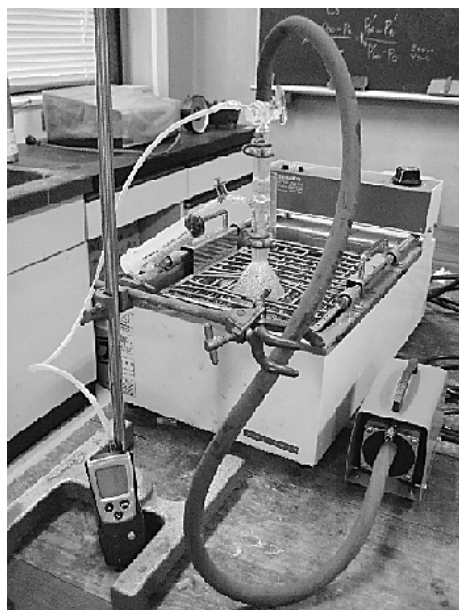


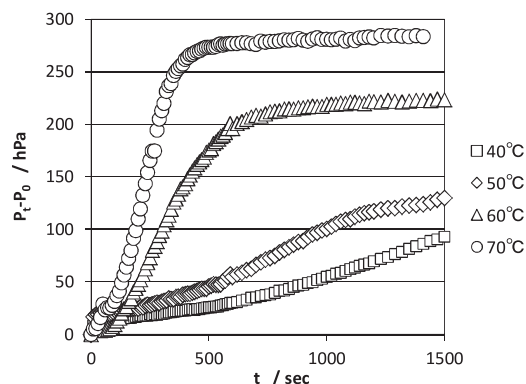
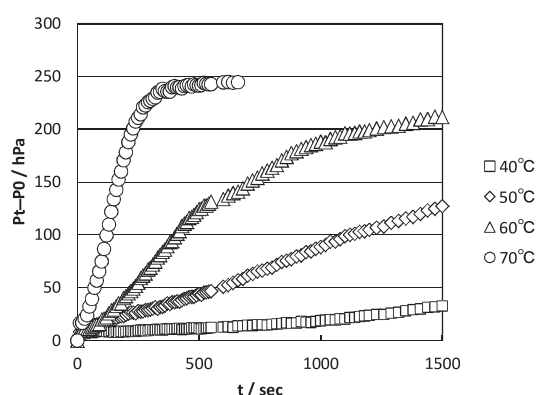
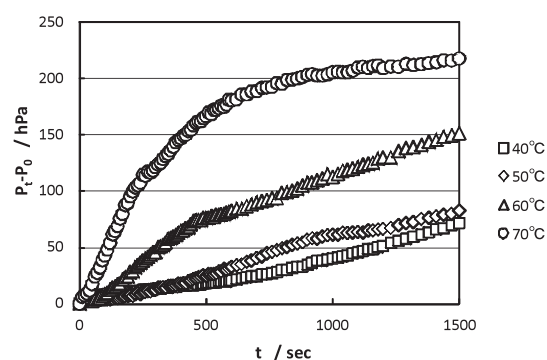
写真1 圧力測定装置

### 圧力測定からの活性化エネルギー

水道水を加えて酸素を発生する実験では、室温の水道水と温度を変えた水道水の2種類で実験を行った。室温の水道水を以下、水道水と表記し、恒温槽を使って温度を変えた水道水を以下恒温水と表記する。

水道水、恒温水、蒸留水共に恒温槽の温度が高いほど酸素の発生量も多く、発生速度も大きいことが分かる。（図6参照）

体積の測定と同様に圧力の測定からも速度定数  $k$  が求められる。反応容器を密閉すると、発生する酸素量によって反応容器内の圧力は増加していく。気体は理想気体であるとする。 $P_{\infty}$ 、 $P_t$ 、 $P_0$  を次のように定義する。

図6-1 水道水における  $P_t - P_0$  の時間変化図6-2 恒温水における  $P_t - P_0$  の時間変化図6-3 蒸留水による  $P_t - P_0$  の時間変化

$P_{\infty}$ ：無限大時間後の反応容器の圧力

$P_t$ ： $t$ 秒後の反応容器内の圧力

$P_0$ ：反応開始時の圧力



また、反応容器の内容積を $V_0$ 、大気圧を $P$ 、反応開始時の反応容器内にある気体のモル数を $n_0$ 、 $t$ 秒までに発生した酸素のモル数を $n_t$ 、無限大時間までに発生した酸素のモル数を $n_\infty$ とすると、

$$P_\infty = \frac{(n_0 + n_\infty)RT}{V_0}$$

$$P_t = \frac{(n_0 + n_t)RT}{V_0} \quad \dots(8)$$

$$P_0 = \frac{n_0 RT}{V_0}$$

同様に、 $V_\infty$ 、 $V$ も次のような式で表され、

$$V_\infty = \frac{n_\infty RT}{P} = \left( \frac{P_\infty V_0}{RT} - \frac{P_0 V_0}{RT} \right) \left( \frac{RT}{P} \right)$$

$$= \frac{(P_\infty - P_0) V_0}{P}$$

$$V = \frac{n_t RT}{P} = \left( \frac{P_t V_0}{RT} - \frac{P_0 V_0}{RT} \right) \left( \frac{RT}{P} \right)$$

$$= \frac{(P_t - P_0) V_0}{P}$$

ここで、 $P$ は大気圧。よって④式は

$$\ln \left[ \frac{V_\infty}{V_\infty - V} \right] = \ln \left[ \frac{(P_\infty - P_0)}{(P_\infty - P_t)} \right] = kt \quad \dots(9)$$

となり、 $\ln F(P) = \ln \left[ \frac{(P_\infty - P_0)}{(P_\infty - P_t)} \right]$ を時間 $t$ に対してプロットし、その傾きから速度定数 $k$ が求められる。今回の測定では、 $P_\infty$ は $P_t - 1/t$ のプロット図7から、エクセルで線形近似して求めた。 $\ln F(P) - t$ のプロットから、線形近似式の勾配として求めた速度定数 $k$ の平均値が表2のようになった。

表2 速度定数 ( $s^{-1}$ )

温度	水道水	恒温水	蒸留水
40℃	0.00010	0.00015	0.00020
50℃	0.00045	0.00055	0.00056
60℃	0.00265	0.00120	0.00137
70℃	0.00385	0.00815	0.00204

これをアレニウスプロット (⑥式) したものを図8に示す。得られた活性化エネルギーを表3に示す。水道水と恒温水を使用した場合、活性化エネルギーはほぼ同じになり、蒸留水を使用した場

合、体積変化から得られた活性化エネルギーとはほぼ同じになった。体積変化から得られた値との相違は今のところ説明できない。

触媒としての金属イオンが溶液中にない場合、水が関係する反応機構は非経験的分子軌道法を用いて研究した。過酸化水素 ( $HO-OH$ ) を水分子が活性化して $H_2O-O$  (water oxide) を生成すると考えられている。これを次の図9に示す。

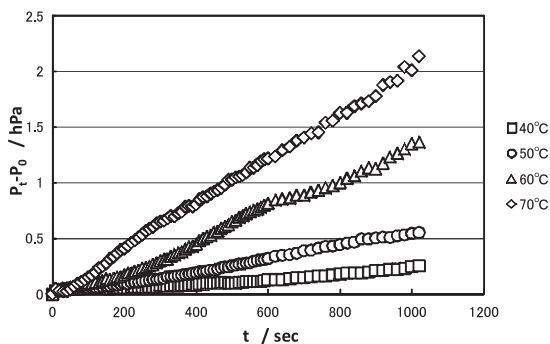


図7  $\ln F(p) - t$ プロット (蒸留水)

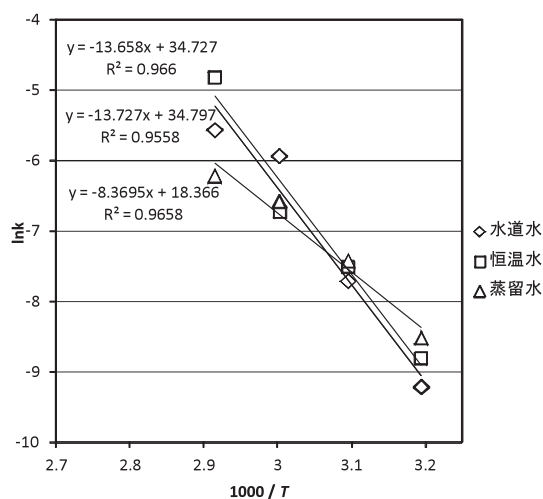


図8 アレニウスプロット  $\ln k - 1000/T$

表3 活性化エネルギー ( $kJ/mol$ )

水道水	$114 \pm 6$
恒温水	$114 \pm 5$
蒸留水	$70 \pm 3$

生成した Water oxide と呼ばれる  $\text{H}_2\text{O}-\text{O}$  の酸素原子 1 つ（水素原子が結合していない方）が酸素

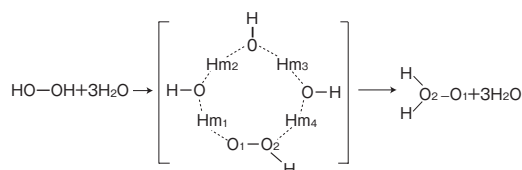
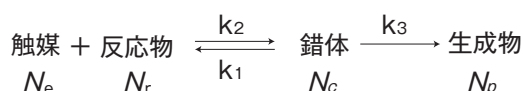


図9 過酸化水素の活性化反応の一例

発生に関係している。このような酸化反応の形態は、他の無機および有機過酸化物（過炭酸塩、有機過酸類）にも見られる。モデル計算によると真空中での反応で活性化エネルギーは112.9 kJ/mol である。報告されている触媒なしの反応の活性化エネルギー75.3 kJ/mol よりも大きい値となっている<sup>6)</sup>。

金属触媒が存在する場合、任意の時間の溶液の中に、触媒、反応物、錯体、生成物が存在し、それぞれの濃度を  $N_e$ 、 $N_r$ 、 $N_c$ 、 $N_p$  とする。反応機構は次のように表わされる。



$k_1$  と  $k_3$  は一次反応速度定数、 $k_2$  は二次反応速度定数とする。ある時間の反応物の消滅速度は、

$$\begin{aligned} -\frac{dN_r}{dt} &= k_2[\text{触媒}][\text{反応物}] - k_1[\text{錯体}] \\ &= k_2N_eN_r - k_1N_c \end{aligned}$$

生成物の生成速度は、

$$\frac{dN_p}{dt} = k_3[\text{錯体}] = k_3N_c$$

となる。ここで、錯体の濃度が定常状態、すなわち、反応物の消滅速度（＝錯体の生成速度）と生成物の生成速度（＝錯体の消滅速度）が等しいとする。

$$\frac{dN_c}{dt} = 0 \quad \text{すなわち} \quad -\frac{dN_r}{dt} = \frac{dN_p}{dt} \quad \text{から}$$

$$k_2N_eN_r - k_1N_c = k_3N_c$$

$$N_c = \frac{k_2}{k_1 + k_3} N_e N_r. \quad \text{ここで} \quad K = (k_1 + k_3)/k_2$$

とすると、生成物の生成速度も

$$\frac{dN_p}{dt} = N_e N_r k_3 / K \quad \cdots \cdots \textcircled{10}$$

と表され生成速度は見かけ上、反応物の一次反応となる。これは、酸素の発生速度が過酸化水素濃度の一次反応で示されることになる。また、反応物の消滅速度は

$$-\frac{dN_r}{dt} = N_e N_r k_3 / K$$

この式から反応速度は反応物の濃度にかかわらず、触媒濃度に正比例する。つまり、みかけの速度定数は、 $k' = N_e k_3 / K$  となり、触媒濃度に正比例する。反応途中の錯体の生成は、分子軌道法を用いた研究から、例えば、 $\text{Fe}^{3+}$  イオンが溶液に存在するときは次の図のような  $\text{Fe}^{3+}$  イオンと過酸化水素の錯体の生成が報告されている。

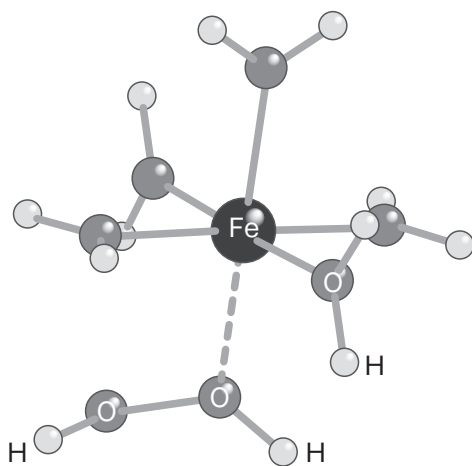


図10  $\text{Fe}^{3+}$  イオンと過酸化水素の錯体<sup>7)</sup>

## 5. 金属塩の触媒効果

### 【準備】

酸素系漂白剤（シャボン玉石けん株式会社「シャボン玉酸素系漂白剤」、水道水、三角フラスコ、ビーカー、注射筒、スタンド、薬包紙、薬さじ、電子天秤、注射器、ゴム管、ガラス管、ゴム栓、メスシリンダー、ストップウォッチ、触媒試料

(二酸化マンガン、水酸化ナトリウム水溶液 (1 mol/L)、酸化鉄 (Ⅲ)、四酸化三鉄、フェリシアニ化カリウム、過マンガン酸カリウム、クロム酸カリウム、塩化カルシウム、塩化銅 (Ⅱ)、塩化鉄 (Ⅲ)、酸化銅、硫化クロム)

### 【実験方法】

- ①酸素系漂白剤を電子天秤で3 g量り、三角フラスコの中に入れる。
- ②金属塩を電子天秤で0.5 g量る。
- ③注射器で水を20 mL量り取る。
- ④水と金属塩を三角フラスコの中に入れ、ガラス管付きのゴム栓で閉める。
- ⑤室温で注射筒を使い酸素の発生量10 mL ごとにかかった時間を記録する。

実験結果を図12に示す。特に酸素発生速度の大きい金属塩の結果を図12下に示す。イオン性の化合物で、水に溶解して金属イオンを生成する金属塩の触媒効果が大きいことがわかる。この触媒効果は、標準電極電位を用いて次のように説明できる。

標準電極電位 ( $E^0$ ) と電位 ( $E$ ) には次のような関係 (ネルンストの式) がある。

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{Red}]}{[\text{Ox}]} \quad \cdots \cdots (11)$$

[Ox]: 酸化剤のモル濃度

[Red]: 還元剤のモル濃度

$n$ : 酸化還元反応に関係する電子のモル数

$R$ : 気体定数

$T$ : 絶対温度 (標準状態で298 K)

$F$ : ファラデー定数

$E^0$ : 標準電極電位 ([Red] = [Ox]での  $E$  の値)

25℃では次のようになる。

$$E = E^0 - \frac{0.059}{n} \log \frac{[\text{Red}]}{[\text{Ox}]} \quad (\text{V}) \quad \cdots \cdots (12)$$

また、平衡状態で  $E = 0 \text{ V}$  となり、したがって、

$$E^0 = \frac{RT}{nF} \ln(K) \quad \cdots \cdots (13)$$

自由エネルギー変化で  $\Delta G = -RT \ln(K)$  の関係があるから、



図11 触媒効果の実験装置

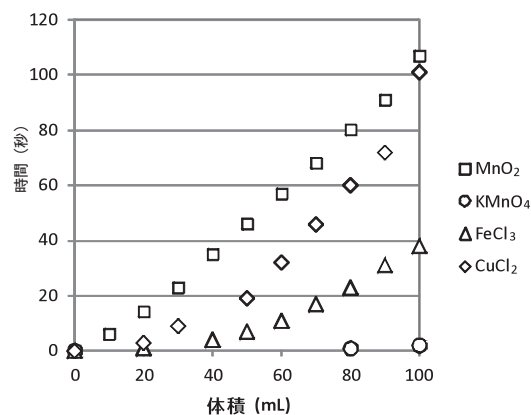
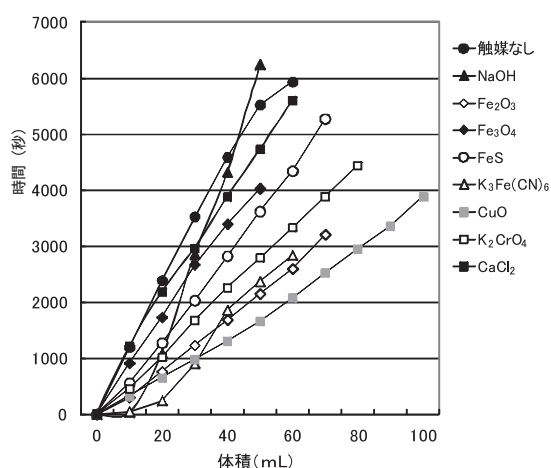


図12 金属塩の触媒効果

$$\Delta G_0 = -nFE^0 \quad \cdots \cdots (13)$$

で標準電極電位と関係付けられる。

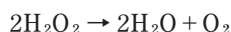
さらに、 $A+B \rightarrow C+D$  の反応の自由エネル



ギー変化は  $\Delta G = G(C) + G(D) - G(A) + G(B)$ 。

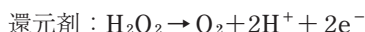
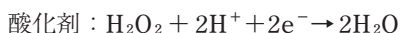
$\Delta G < 0$  ならば、反応は右向きに進行すると予測できる。これらの関係を利用し考察する。

まず、過炭酸ナトリウムから解離した過酸化水素は水と酸素に分解される。



過酸化水素は酸化剤と同時に還元剤として働く。

その際の酸化還元反応式は次のようになる。



還元剤の反応式を利用して、それぞれの標準電極電位の pH 変化を求める。

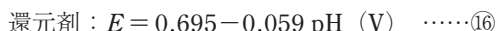
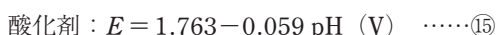
$$E = E^0 - \frac{0.059}{n} \log \frac{[\text{Red}]}{[\text{Ox}]}$$

$$= E^0 - \frac{0.059}{2} \log \frac{1}{[\text{H}^+]^2}$$

$$= E^0 - 0.059 \text{ pH}$$

$$-\log_{10}[\text{H}^+] = \text{pH} \quad \cdots \cdots (14)$$

よって過酸化水素のそれぞれの酸化還元電位は、pH によって変化する。



グラフにすると図13のようになる。

酸化還元電位が高い値を持つ化学種は酸化還元

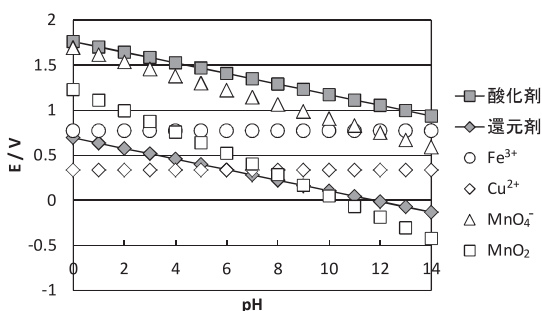
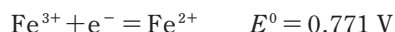


図13 過酸化水素の酸化還元電位の pH 変化

電位が低い値を持つ化学種を酸化するので、グラフの上下関係で酸化剤となるか、還元剤となるかを判断できる。この2本の直線の間に酸化還元電位を持つ金属イオンは、過酸化水素が酸化剤となり、金属イオンが還元剤として働く。さらに、金属イオンが酸化剤となり過酸化水素が還元剤とし

て働いて酸素が発生する。したがって、この間に酸化還元電位がある金属イオンは触媒として働くことができると言える。

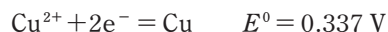
それぞれの金属イオンの酸化還元電位から考察する。最初に鉄(Ⅲ)イオンについては、



なので、液性が酸性でもアルカリ性でも

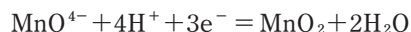
$$\Delta G = -2FE < 0$$

が成り立ち、過酸化水素の還元と酸化が同時に進行し、酸素が発生する。銅(Ⅱ)イオンの場合は



なので、pH = 6 以上で触媒効果を示す。

過マンガン(Ⅶ)酸イオンは

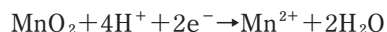


$$E^0 = 1.695 \text{ V (pH = 0)}$$

酸化還元反応では、 $\text{H}^+$ イオンが関係するので、電位は pH 依存性を示す。ネルンスト式を利用して、

$$E = E^0 - \frac{4}{3} \times 0.059 \text{ pH (V)}$$

となり、図13に示すように、過酸化水素の2本の直線の間にあり触媒作用を示す。ただし、アルカリ性では酸化マンガン(Ⅳ)として働くことになる。酸化マンガン(Ⅳ)は



なので、酸化還元電位は pH 依存性を示し、

$$E = E^0 - 2 \times 0.059 \text{ pH (V)}$$

となり、pH = 9 以下で触媒作用を示す。水酸化ナトリウムを加えた時の酸素発生速度は無添加の場合とほぼ同程度であること、および、酸化マンガン(Ⅳ)と塩化銅(Ⅱ)の酸素発生速度を比較すると、酸化マンガン(Ⅳ)のほうがわずかに遅いので、過炭酸ナトリウム水溶液の液性は弱アルカリ性であると考えられる。強アルカリ性では、水酸化銅(Ⅱ)や水酸化鉄(Ⅲ)の沈殿が生成し、触媒として働かないと考えられる。

### 金属塩濃度の影響

金属塩化物の濃度の異なる水溶液を調整して、触媒の濃度効果を考察する。塩化鉄(Ⅲ)、塩化

銅 (Ⅱ)、塩化ナトリウムの各水溶液 0.01 mol/L、0.05 mol/L、0.10 mol/L を用いて室温で圧力測定を行った。塩化鉄 (Ⅲ) の例を図14に示す。

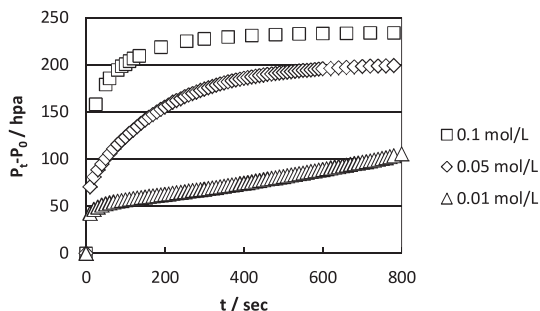


図14 FeCl<sub>3</sub> 濃度による酸素発生量の変化

各水溶液について得られた速度定数の値を図15に示す。塩化鉄 (Ⅲ) 水溶液では速度定数は濃度とともに増大しているが、塩化銅 (Ⅱ) 水溶液では反応が進行するにつれて、酸化銅 (Ⅱ) と考えられる黑色物質が生成しており、このため反応が抑制されていると考えられる。塩化ナトリウム水溶液では、濃度効果は見られない。塩化物イオンは共通であるので、速度定数の濃度変化は金属イオンによる効果であることがわかる。

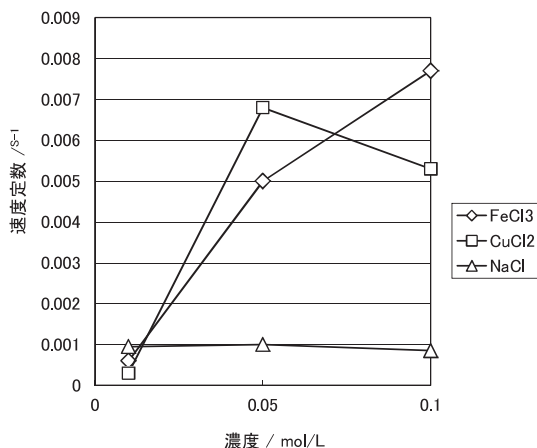


図15 速度定数の濃度変化

## 6. まとめ

過酸化水素の反応教材としての利用は多く報告されている<sup>8, 9)</sup>。酸素系漂白剤は酸素発生材料として既に知られているが、この酸素系漂白剤も反応速度や活性化エネルギー、また触媒作用を示すための教材として使用可能であると考えられる。

最後に、本研究は日産科学振興財団・理科環境教育助成を受けて行った。日産科学振興財団には深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 福岡敏行編著、コンセプトマップ活用ガイド、東洋館出版社 (初版) p. 145 「学習を活性化する4つのポイント」.
- 2) <http://www.matsuo-yakuhin.co.jp/pc.html>  
「過炭酸ソーダ」松尾産業株式会社 (2007年5月現在).
- 3) 一瀬正己、誤差論、培風館 (初版) p. 34.
- 4) Hans K. Fauske, Process Safety Progress, 23(2) pp. 108-113 (2004).
- 5) 蛍光X線分析によって、水道水の蒸発残渣中にモリブデン、ニッケル、亜鉛が微量検出された。
- 6) E. A. Moelwyn-Hughes, The kinetic of Reactions in Solution, OUP, Second edition, p. 299 (1947), J. G. Stark and H. G. Wallace, Chemistry Data Book, John Murray, p. 85 (1975).
- 7) F. Buda et al., Chem-Eur. J. 7 (13) pp. 2775-2783 (2001).
- 8) 竹村安弘、日本理科教育学会研究紀要 26(1) pp. 65-68 (1985).
- 9) 紺野昇・利安義男、化学と教育、42(6) p. 437 (1994).