



アセトンヨウ素化反応の速度論的研究：  
CCDカメラとコンピュータを利用した反応速度測定  
教材開発の為の予備的検討

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-05-21 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田口, 哲, 笠野, 恵子 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.32150/00005103">https://doi.org/10.32150/00005103</a>

# アセトンヨウ素化反応の速度論的研究 —CCDカメラとコンピュータを利用した反応速度測定教材開発の為の予備的検討—

田口 哲・笠野 恵子

北海道教育大学札幌校化学教室 札幌 002-8502

## Kinetic Study of the Iodination of Acetone; Preliminary Investigations of the Development of Reaction Rate Measurement System with CCD Camera and Personal Computer for Chemical Education

Satoshi Taguchi and Keiko Kasano

Chemical Laboratory, Sapporo Campus, Hokkaido University of Education, Sapporo 002-8502

### Abstract

The iodination kinetics of acetone was studied by visible spectrophotometry in order to compare with the results obtained by the reaction rate measurement system with CCD camera and computer for chemical education. The iodination of acetone proceeds by the addition of hydrochloric acid and  $I_3^-$  ion to acetone. The reaction rates at temperatures of 15°C to 40°C were measured by the change of  $I_3^-$  ion concentration with time, where the concentration of  $I_3^-$  ion was determined from the absorbance at 353nm. The rate-determining step of this reaction was enolization of acetone, followed by iodination of the enol. The iodination of acetone is first-order with respect to acetone and hydronium ion, and zeroth-order to  $I_3^-$  ion. The rate constant of the enolization was  $k_{enol} = 2.3 \times 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$  at 25°C. The activation energy of this reaction was estimated to be  $E_a = 68.2 \text{ kJ mol}^{-1}$  from the plot of  $\log(k_{enol} / \text{M}^{-1} \text{ s}^{-1})$  vs.  $1/T$ . The kinetic parameters of the reaction were also calculated from the rate constant at 25°C and the activation energy:  $\Delta G^\ddagger = 99.7 \text{ kJ mol}^{-1}$ ,  $\Delta H^\ddagger = 65.7 \text{ kJ mol}^{-1}$  and  $\Delta S^\ddagger = -114 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ .

### 1. 緒言

次に示すアセトンのヨウ素化反応は酸 (又は塩基) により触媒される反応であり, 化学反応速度を学ぶ際の実験教材として使われている<sup>1,2)</sup>.



この反応の速度は, 一般に, 溶液中に残存する三ヨウ素化物イオン ( $I_3^-$ ; 黄褐色) が吸収する光

(波長353nm) の吸光度を吸光光度計を用いて追跡する事で調べられている<sup>2)</sup>.

しかしながら, この測定方法の場合, 装置内に反応溶液を設置しなければならないので, 反応の様子を観察しながら測定できないという欠点がある. また, 吸光光度計は比較的高価なものであり, 高等学校等で導入するのは困難であろう. そこで著者らは, この反応の速度を測定する方法として, 溶液の吸光の結果として私たちの目に見える補色の濃淡変化をCCDカメラ (いわゆるデジタルカ

メラ) とパーソナルコンピュータを用いて数値化して追跡する方法を開発した<sup>3)</sup>。この方法では、定量的測定を行いつつ反応の様子を直接観察できる。また、近年教育現場にはパーソナルコンピュータが普及しつつあり、用いたCCDカメラは比較的安価(1~2万円)なものであるため、実験経費を低く抑えて定量的測定ができる利点がある。さらに、画像解析に用いたソフトウェア<sup>4)</sup>はフリーウェアである。

この「CCDカメラとコンピュータを利用した反応速度測定教材」を評価するにあたっては、先に述べた吸光光度計を用いた場合の実験結果との比較検討が必要になる。そこで本研究では、吸光光度計を用いてアセトンヨウ素化反応中の $I_3^-$ 濃度を追跡することで、幾つかの温度について(1)式の反応速度を測定し、その測定結果を用いて反応機構の決定を行った。さらに、各温度における速度定数を求め、活性化エネルギー・活性化ギブス自由エネルギー・活性化エンタルピー・活性化エントロピーの値を求めた。

## 2. 理論

アセトンのヨウ素化反応速度の一般式は、

$$v = -\frac{d[I_3^-]}{dt} = k[CH_3COCH_3]^a[I_3^-]^b[H^+]^c \quad (2)$$

と表される。ここで、 $[CH_3COCH_3]$ はアセトン濃度、 $[I_3^-]$ は三ヨウ化物イオン濃度、 $[H^+]$ は水素イオン濃度、 $a, b, c$ は各化学種に関する反応次数、 $k$ は速度定数を表す。(1)式が表しているのは全反応であり、実際は、図1のように、[1]アセトンのエノール化と[2]エノール化したアセトンのヨウ素化の二段階を経て進行することが知られている<sup>1)</sup>。[1]は酸により触媒される反応である。

(1)式の反応に関して、エノール濃度の時間による微分(エノール濃度の変化速度)は、

### 1 ケト型アセトンがエノール型アセトンに変化

する反応速度(速度定数 $k_{enol}$ )

2 この反応の逆反応(エノール→ケト)の速度(速度定数 $k_{keto}$ )

3 エノールと三ヨウ素化物イオンとの反応によるエノール消費速度(速度定数 $k_t$ )

を考慮して表される。ここで、反応開始直後および反応終了時を除き、エノールの生成について定常状態が成立しているものと仮定する。定常状態ではエノール濃度は一定であるため、エノール濃度の変化速度は、

$$\frac{d[enol]}{dt} = k_{enol}[CH_3COCH_3][H^+] - k_{keto}[enol][H^+] - k_t[enol][I_3^-] = 0 \quad (3)$$

と表される。ここで、 $[enol]$ はエノール型アセトン濃度を表す。(3)式よりエノール濃度は、

$$[enol] = \frac{k_{enol}[CH_3COCH_3][H^+]}{k_{keto}[H^+] + k_t[I_3^-]} \quad (4)$$

と表される。

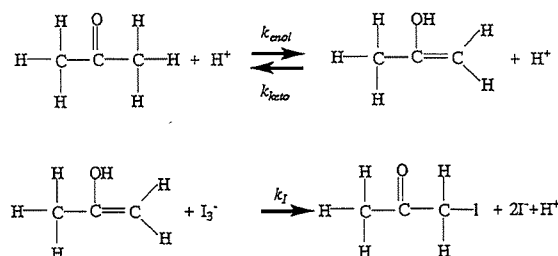


図1 アセトンのエノール化(上)とエノール化したアセトンのヨウ素化(下)

いま、(1)式の反応速度を $I_3^-$ 濃度の経時変化により測定することを考えると、 $I_3^-$ の消費速度は、

$$\frac{d[I_3^-]}{dt} = -k_t[enol][I_3^-] \quad (5)$$

で与えられる。(4)式を(5)式に代入すると、

$$\frac{d[I_3^-]}{dt} = -k_f \frac{k_{enol} [CH_3COCH_3] [H^+]}{k_{keto} [H^+] + k_f [I_3^-]} [I_3^-] \quad (6)$$

を得る。

ところで、ケト型アセトンから生成したエノールは、逆反応によりケトに戻ってしまうか、あるいはヨウ素化されてヨウ化アセトンになるかのいずれかである。前者の反応速度は  $v_{keto} = k_{keto} [enol] [H^+]$  で表され、後者の反応速度は  $v_f = k_f [enol] [I_3^-]$  で表される。

ここで、 $v_f \gg v_{keto}$  (エノール型からケト型への反応は無視できる) であったとすると、 $k_f [I_3^-] \gg k_{keto} [H^+]$  となるので、(6) 式の分母の  $k_{keto} [H^+]$  は無視できて、

$$\frac{d[I_3^-]}{dt} = -k_{enol} [CH_3COCH_3] [H^+] \quad (7)$$

と簡単になる。この式から、この条件下では、 $I_3^-$  の消費速度はケト型アセトンのエノール化速度であらわされることが分かる。これは、 $k_f$  が  $k_{keto}$  に比べて非常に大きく、ケト型アセトンからエノールが生成すると直ちにヨウ素化が起きる、即ち律速段階が“ケト型アセトンのエノール化”であることを意味している。

次に、議論を簡単にするために、 $[CH_3COCH_3] \gg [I_3^-]$  および  $[H^+] \gg [I_3^-]$  という条件で実験を行うことを考える。この場合、反応開始時から反応終了時まで  $[CH_3COCH_3]$  および  $[H^+]$  は一定値をとると近似できるので、(7) 式は、

$$\frac{d[I_3^-]}{dt} = -k'_{enol} \quad (8)$$

となる。ここで  $k'_{enol} = k_{enol} [CH_3COCH_3] [H^+]$  である。この場合、反応速度は  $[I_3^-]$  に依存せず  $I_3^-$  について 0 次の反応となる。(8) 式の両辺に  $dt$  をかけた後、 $t=0s$  から  $t=t$  および  $[I_3^-]_0$  ( $t=0s$  における  $I_3^-$  濃度) から  $[I_3^-]$  まで積分すると、

$$\int_{[I_3^-]_0}^{[I_3^-]} d[I_3^-] = -k'_{enol} \int_0^t dt \quad (9)$$

$$[I_3^-] = -k'_{enol} t + [I_3^-]_0$$

となり、 $I_3^-$  濃度は時間に対して直線的に減少することがわかる。

一方、 $v_{keto} \gg v_f$  であったとすると、 $k_{keto} [H^+] \gg k_f [I_3^-]$  となるので、(6) 式は右辺分母の  $k_f [I_3^-]$  が無視できて、

$$\frac{d[I_3^-]}{dt} = -k_f \frac{k_{enol}}{k_{keto}} [CH_3COCH_3] [I_3^-] \quad (10)$$

となる。ところでこの条件下では、(4) 式の右辺分母の  $k_f [I_3^-]$  も同様に無視できて、

$$k_{enol} [CH_3COCH_3] [H^+] = k_{keto} [enol] [H^+] \quad (11)$$

という関係が得られる。これは、ケト型マロン酸のエノール化速度とこの逆反応の速度が等しい、すなわち図 1 上段の反応が平衡にあることを示している。この反応の平衡定数  $K$  は、

$$K = \frac{[enol] [H^+]}{[CH_3COCH_3] [H^+]} = \frac{k_{enol}}{k_{keto}} \quad (12)$$

と表される。ここで、(11) 式から得られる  $k_{enol} [CH_3COCH_3] = k_{keto} [enol]$  を (10) 式に代入したのち、(12) 式の関係を使ってこれを整理すると、

$$\frac{d[I_3^-]}{dt} = -k_f K [CH_3COCH_3] [I_3^-] \quad (13)$$

となる。ここで、 $[CH_3COCH_3] \gg [I_3^-]$  という条件で実験を行うものとする、 $[CH_3COCH_3]$  の値は反応中ほぼ一定であるので、(13) 式中の  $k_f K [CH_3COCH_3]$  は定数 ( $k'_f$  とする) と見なすことができ、 $I_3^-$  濃度の時間による微分は、

$$\frac{d[I_3^-]}{dt} = -k'_f [I_3^-] \quad (14)$$

と表される。(14)式の両辺に $dt$ をかけた後、 $t=0$ sから $t=t$ および $[I_3]_0$  ( $t=0$ sにおける $I_3$ 濃度)から $[I_3]$ まで積分すると、

$$\int_{[I_3]_0}^{[I_3]} \frac{1}{[I_3]} d[I_3] = - \int_0^t k' dt \quad (15)$$

$$\ln [I_3] = -k' t + \ln [I_3]_0$$

となり、 $I_3$ 濃度の対数値は時間に対して直線的に減少することがわかる。この場合、 $v_{keto} = v_{enol} \gg v_i$ であるので、マロン酸臭素化の律速段階は“エノール化したマロン酸の臭素化”である。

以上で用いた条件では、(8)式および(14)式から明らかなように、アセトンおよび水素イオンに関しては見かけ上0次 ( $a=c=0$ )の反応となるが、真の反応次数はこのままでは不明である。一方、ケト型アセトンのエノール化が律速段階である場合は、ヨウ素イオンに関しては0次 ( $b=0$ )である。この場合、(2)式の対数は

$$\log v = \log k + a \log [CH_3COCH_3] + c \log [H^+] \quad (16)$$

と書くことができ、 $[CH_3COCH_3]$ 又は $[H^+]$ を一定にしたまま、次数を求めたい化学種の濃度を変えた際の $v$ を求め、横軸に $\log [CH_3COCH_3]$ または $\log [H^+]$ を、縦軸に $\log v$ をプロットすることで、その傾きから反応次数 $a$ および $c$ を求めることができる。

活性化エネルギー $E_a$ は、Arrhenius式

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (17)$$

の両辺を不定積分した結果、

$$\log k = -\frac{E_a}{2.303RT} + C \quad (18)$$

から、何点かの温度で反応速度を測定し、 $1/T$ に対して $\log k$ をプロットしたときの傾きから算出できる。さらに、この活性化エネルギーの値と速度定数の値から、遷移状態理論<sup>5)</sup>より活性化エン

タルピー $\Delta H^\ddagger$ ・活性化エントロピー $\Delta S^\ddagger$ ・活性化ギブス自由エネルギー $\Delta G^\ddagger$ を求めることができる。

### 3. 実験

#### 3-1 溶液の調製

溶液の調製には、ヨウ化カリウム KI (和光純薬製 特級試薬)、ヨウ素  $I_2$  (和光純薬製 特級試薬)、塩酸 HCl (和光純薬製 特級試薬36%)、アセトン  $CH_3COCH_3$  (和光純薬製 特級試薬) および脱イオン水 (Yamato Autostill WG25) を使用した。三ヨウ素化物イオン  $I_3^-$  を含む溶液は、脱イオン水に  $3.67 \times 10^{-1}$  M の KI と  $8.00 \times 10^{-3}$  M の  $I_2$  を溶解し、 $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$  の反応を利用して調製した<sup>6)</sup>。

#### 3-2 実験装置

吸光度の測定には、島津製作所ダブルビーム分光光度計 UV-140-02 を使用した。温度一定条件下で反応速度を測定するため、この光度計の試料室には恒温水循環セルホルダーを装着して、外部に設置した恒温槽 (大洋科学工業 Thermo minder Lt-100) からポンプを使用してこれに恒温水を循環させた。また、恒温槽には冷却器 (東洋科学産業 Lab Cool LC-100FC) を設置し、室温以下の温度も設定できるようにした。セルホルダーの底部には、セル用スターラー (VARIOMAG H+P Labortechnik GmbH) を設置し、反応中に試料溶液を攪拌できるようにした (図2)。使用した反応試料用セルは、蓋付き石英ガラス製角形セル (光路長1cm) であり、この中にセル用スターラー回転子を入れて使用した。反応中の吸光度の時間変化は、光度計に接続したレコーダー (RIKADENKI RW-101, WE-1001) で読みとった。

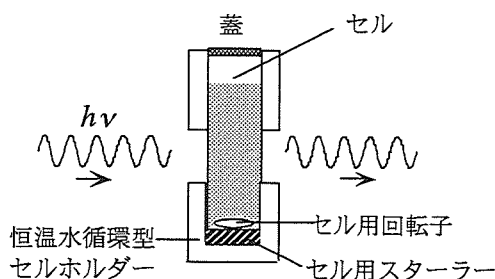


図2 セルホルダーの断面 (模式図)

表1 検量線作成に用いた溶液中の各化学種濃度

	溶液1	溶液2	溶液3	溶液4	溶液5
$[I_3^-]/M$	$1.60 \times 10^{-4}$	$1.49 \times 10^{-4}$	$1.38 \times 10^{-4}$	$1.26 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-4}$
$[HCl]/M$	$5.14 \times 10^{-3}$	$4.78 \times 10^{-3}$	$4.42 \times 10^{-3}$	$4.06 \times 10^{-3}$	$3.70 \times 10^{-3}$
%濃度*	100	93	86	79	72

	溶液6	溶液7	溶液8	溶液9	溶液10
$[I_3^-]/M$	$1.04 \times 10^{-4}$	$9.28 \times 10^{-5}$	$8.16 \times 10^{-5}$	$7.04 \times 10^{-5}$	$5.92 \times 10^{-5}$
$[HCl]/M$	$3.34 \times 10^{-3}$	$3.70 \times 10^{-3}$	$2.98 \times 10^{-3}$	$2.26 \times 10^{-3}$	$1.90 \times 10^{-3}$
%濃度*	65	58	51	44	37

\*溶液1の各化学種濃度を100とした場合の相対値

### 3-3 検量線の作成

アセトンのヨウ素化に伴う  $[I_3^-]$  の変化は、 $I_3^-$  が吸収する光波長353nmの吸光度変化で追跡する。そこで、 $[I_3^-]$  と吸光度の関係を示す検量線を作成した (図3)。溶液は、3-1で述べた三ヨウ素化物イオン溶液と塩酸を脱イオン水で希釈して  $[I_3^-] = 1.60 \times 10^{-4} M$  および  $[HCl] = 5.14 \times 10^{-3} M$  の濃度に調製したものと、これを更に脱イオン水で表1の通りに希釈したものとを使用した。

### 3-4 アセトンヨウ素化反応の反応速度の測定

3-2で述べたセルに、塩酸とアセトンを加え、その後三ヨウ素化物イオンを加えて反応を開始するとともに、353nmの吸光度の時間変化を追跡した。塩酸とアセトンの初濃度は、 $[CH_3COCH_3] \gg [I_3^-]$  および  $[H^+] \gg [I_3^-]$  という条件が満たされるよう、三ヨウ素化物イオンの初濃度に対して50倍以上になるように設定した。セル中の溶液の全量は3mlとし、この中の各化学種の初濃度は、表2に示した10種類の組み合わせを用いた。

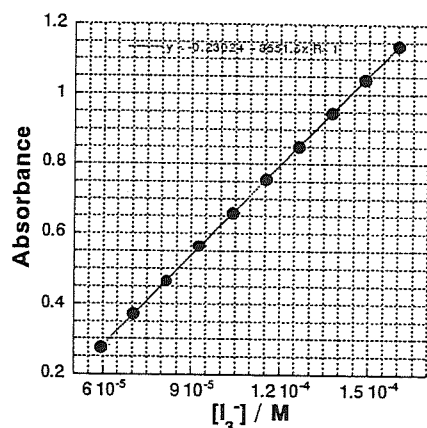


図3  $I_3^-$ 濃度と吸光度との関係 (検量線)

表2 アセトンヨウ素化反応における各化学種の初濃度・反応速度  $v$ ・速度定数  $k_{cnot}$  (25°C)

No.	$[I_3^-]_0 \times 10^4 / M$	$[HCl]_0 \times 10^2 / M$	$[C_3H_6O]_0 \times 10^2 / M$	$v \times 10^3 / M s^{-1}$	$k_{cnot} \times 10^5 / M^{-1} s^{-1}$
1	1.07	1.07	1.08	2.64	2.29
2	1.07	1.07	1.44	4.08	2.66
3	1.07	1.07	2.88	6.83	2.22
4	1.07	1.07	5.76	13.5	2.19
5	1.28	0.533	2.88	4.42	2.27
6	1.07	0.533	2.88	3.48	2.27
7	1.28	1.07	2.88	7.02	2.29
8	0.96	1.07	2.88	6.10	1.99
9	1.07	2.13	2.88	12.2	1.98
10	1.60	1.07	2.88	8.19	2.67
平均					2.28

## 4. 結果と考察

### 4-1 反応機構および反応次数の決定

図4は、25°Cにおけるアセトンヨウ素化の際の  $I_3^-$  濃度 ( $[I_3^-]$ ) 変化を表2のNo.2,3,4,7,8,9の条件で測定した結果である。これらプロットは時間に対してほぼ直線的に減少している。表2の他の濃度条件についても同様のプロットを行ったところ直線関係を示した。したがって、アセトンヨウ素化反応の律速段階は“アセトンのエノール化”であり、この反応は三ヨウ素化物イオンに対して0次であることがわかった。また、表2には各濃度条件で測定したこのプロットの直線の傾きから算出した反応速度定数の値を示したが、各々近い値を示し、平均は  $k_{cnot} = 2.3 \times 10^5 M^{-1} s^{-1}$  であった。

次に、(16)式より、アセトンおよび塩酸に関

する反応次数を調べるために、表2の結果を用いて、 $\log [\text{CH}_3\text{COCH}_3]$  vs.  $\log v$ プロットおよび $\log [\text{HCl}]$  vs.  $\log v$ プロットを行った (図5)。このプロットの直線の傾きは各々0.93および0.91となり、アセトンおよび塩酸に関する反応次数はほぼ1次であることがわかった。

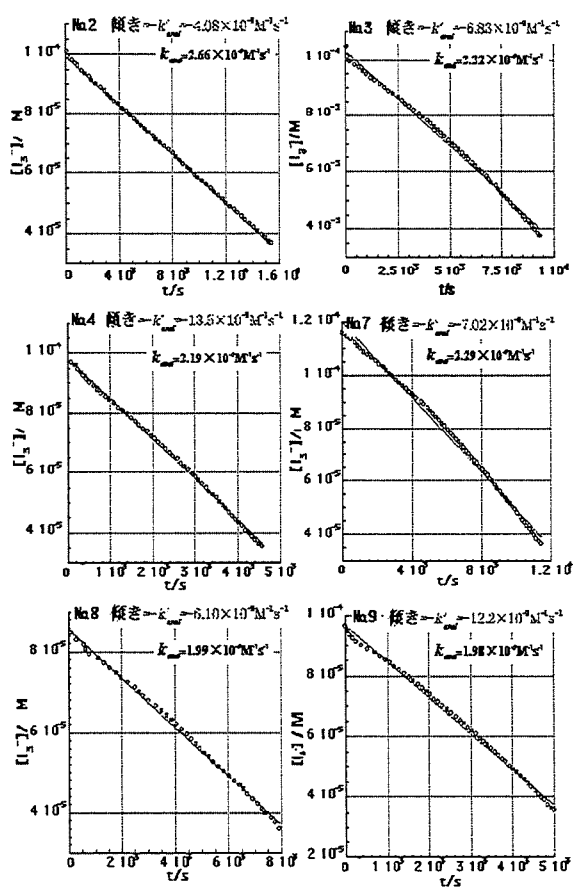


図4  $[I_3^-]$  vs.  $t$ プロット (表2 No.2,3,4,7,8,9・25°C)

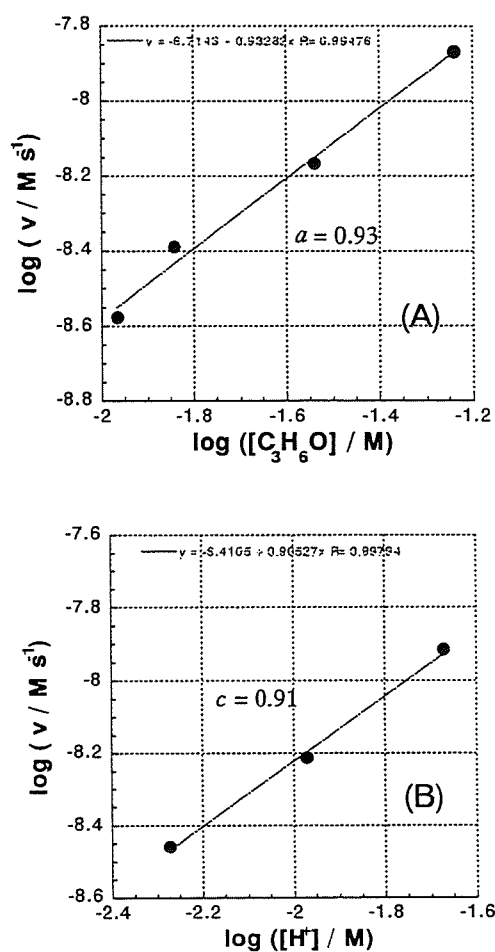


図5  $\log [\text{CH}_3\text{COCH}_3]$  vs.  $\log v$ プロット (A) および  $\log [\text{HCl}]$  vs.  $\log v$ プロット (B)

#### 4-2 速度定数の温度依存性

この反応の活性化エネルギーを求めるために、表2のNo4の初濃度条件で、15~40°Cまで5°C毎に反応速度の測定を行い、各温度での速度定数  $k_{\text{cat}}$  を求めた。その結果を表3に示す。速度定数は、反応温度上昇に伴い増大しているのは明らかである。この結果より、 $1/T$ に対して速度定数  $k_{\text{cat}}$  をプロットし (Arrheniusプロット)、その直線の傾きから活性化エネルギー  $E_a$  を求めた (図6)。その結果、 $E_a = 68.2 \text{ kJ mol}^{-1}$ を得た。また、活性化エネルギーと速度定数より、遷移状態理論<sup>5)</sup>にしたがって25°Cにおけるアセトンのエノール化の活性化ギブス自由エネルギー  $\Delta G^\ddagger$ 、活性化エンタルピー  $\Delta H^\ddagger$ 、活性化エントロピー  $\Delta S^\ddagger$  を求めた。表4がその結果である。

表3 アセトンエノール化速度定数の温度依存性

$T/^\circ\text{C}$	15	20	25	30	35	40
$k_{\text{enol}} \times 10^5 / \text{M}^{-1} \text{s}^{-1}$	0.844	1.41	2.18	3.58	5.27	8.30

\*溶液中の各化学種の初濃度は表2No.4の条件に設定

## 5. 結論

以上、本報告についてまとめると次の通りになる。

- 1 アセトンヨウ素化反応の律速段階は、15°C～40°Cの温度範囲においてアセトンのエノール化であった。また、各化学種の初濃度条件を変えて測定した際の速度定数の平均値は25°Cにおいて  $k_{\text{enol}} = 2.3 \times 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$  であった。
- 2 アセトンヨウ素化反応の反応次数は、三ヨウ素化物イオンに対して0次、アセトンおよび塩酸に関しては各々ほぼ1次であることがわかった。
- 3 各反応温度に対するエノール化速度定数を用いてArrhenius plotをとることで、アセトンヨウ素化反応の活性化エネルギーを算出した。その結果、 $E_a = 68.2 \text{ kJ mol}^{-1}$ を得た。
- 4 本実験で得た速度定数および活性化エネルギーの値を遷移状態理論に適用することにより、アセトンのエノール化の活性化ギブス自由エネルギー・活性化エンタルピー・活性化エントロピーを求めた。その結果、 $\Delta G^\ddagger = 99.7 \text{ kJ mol}^{-1}$ 、 $\Delta H^\ddagger = 65.7 \text{ kJ mol}^{-1}$ 、 $\Delta S^\ddagger = -114 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ であることがわかった。

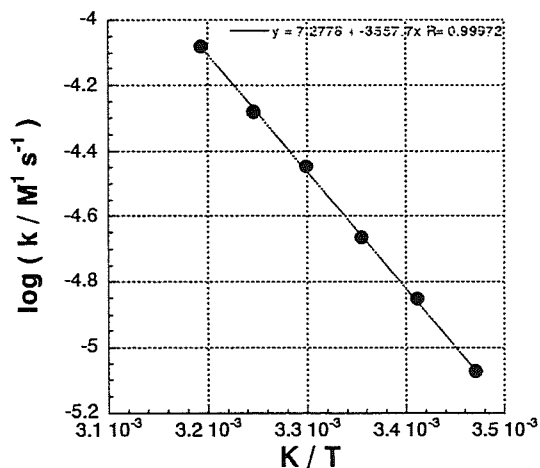


図6 Arrheniusプロット

表4 アセトンエノール化における活性化ギブス自由エネルギー  $\Delta G^\ddagger$ 、活性化エンタルピー  $\Delta H^\ddagger$ 、活性化エントロピー  $\Delta S^\ddagger$

$\Delta G^\ddagger / \text{kJ mol}^{-1}$	$\Delta H^\ddagger / \text{kJ mol}^{-1}$	$\Delta S^\ddagger / \text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
99.7	65.7	-114

$\Delta G^\ddagger$ は反応ポテンシャル障壁であり  $\Delta G^\ddagger > 0$  となっている。 $\Delta H^\ddagger > 0$ より、反応の原系から遷移状態（活性錯合体）に至る際に吸熱する。すなわち、原系よりも遷移状態の方が高いエネルギー状態にあることが分かった。また、 $\Delta S^\ddagger < 0$ となっている。すなわち、原系に比べ遷移状態の方がSが小さい事を意味する。統計力学的には、Sは系のもつ“乱雑さ”の指標であり、Sが小さいということは系がより乱れていない状態にあるといえる。これは、ケト型からエノール型に変換（図1参照）される際に、アセトン1分子と水素イオン1個とが結合して一つの活性錯合体ができたとすれば説明できる。二つの化学種が一つの化学種になる過程では乱雑さは減少するので、 $\Delta S^\ddagger < 0$ となったものと考えられる。

以上より、我々が開発した「CCDカメラとパーソナルコンピュータを活用した反応速度測定教材」<sup>3)</sup>の評価が、これらの結果と比較することで可能となった。これについては文献<sup>3)</sup>で報告する予定である。

## 引用文献と注

- 1) James P. Birk and David L. Walters, *J.Chem.Edu*, **69**, 585 (1992)
- 2) 津田孝雄 他編, 楽しい化学実験 —基礎から創造へ—, 丸善, (1997) p.116
- 3) 田口 哲・笠野恵子, 化学と教育, 印刷中
- 4) 小島清嗣・岡本洋一編, 丸ごと実践! 画像解析テキ



ストNIH Image新講座, 羊土社 (1997)

- 5) 田口 哲・仲野恵美子, 化学教育ジャーナル 3,5 (1999)  
URL <http://chem.sci.utsunomiya.ac.jp/v3n1/>
- 6) 調製した $I_3$ 溶液の濃度は  $8.00 \times 10^{-2} M$  である. 反応を完結させるために比べてKIは過剰に加えた.