

2020 年度 化学・バイオ工学実験 A

実験課題

テーマ G

1.6 液体の相互溶解度

1.7 凝固点降下(ベンゼンを溶媒とするナフタレンの分子量)

1.8 反応速度解析

視聴日 2020 年 6 月 23 日・24 日・25 日

提出日 2020 年 7 月 1 日

B8TB3040 齊藤依緒

## 1 緒言

今回の実験ではフェノール・水二成分系の相互溶解を取り扱う。相互溶解とは、二成分系においてある温度では成分が相互に溶解せずに二相を形成する・二相に分かれる温度が組成に依存する、という現象である。温度依存に関しては、高温ほど相互溶解しやすく、ある一定温度以上ではどんな組成でも一相となる系・低温ほど溶解しやすく、ある一定温度以下では必ず一相となる系が存在し、水-フェノール系は前者にあたる。また、二相と一相の境界となる温度を前者の系では上部臨界可溶温度 (UCST)、後者の系では下部臨界可溶温度 (LCST) という。相互溶解においては組成・温度・系の状態 (二相か一相か) を同時に記述するため、線図がよく用いられる。今回の実験では溶解温度の測定から線図を作成し、相互溶解について理解する。

## 2 実験方法

### 2.1 実験器具

- スタンド
- クランプ
- 遠沈管 (50mL)
- 温度計
- シリコーンゴム栓
- スターラー
- スターラーチップ
- 駒込ピペット (2, 5 m L)
- ピペットスタンド
- ホットプレート
- ステンバット
- 洗ビン

### 2.2 試薬

- 蒸留水
- フェノール

### 2.3 実験方法

実験方法を以下のフローチャートに示す。今回は同じ実験を 10 通りの組成で行った。

1. フェノールを遠沈管に約 4.5g 秤量した。今回は 4.5888g のフェノールを用いた。また、この時遠沈管にスターラーチップを入れた。
2. 1 の遠沈管に、初回の組成となる 2 m L の蒸留水を駒込ピペットで加え、温度計つきのゴム栓で蓋をした。

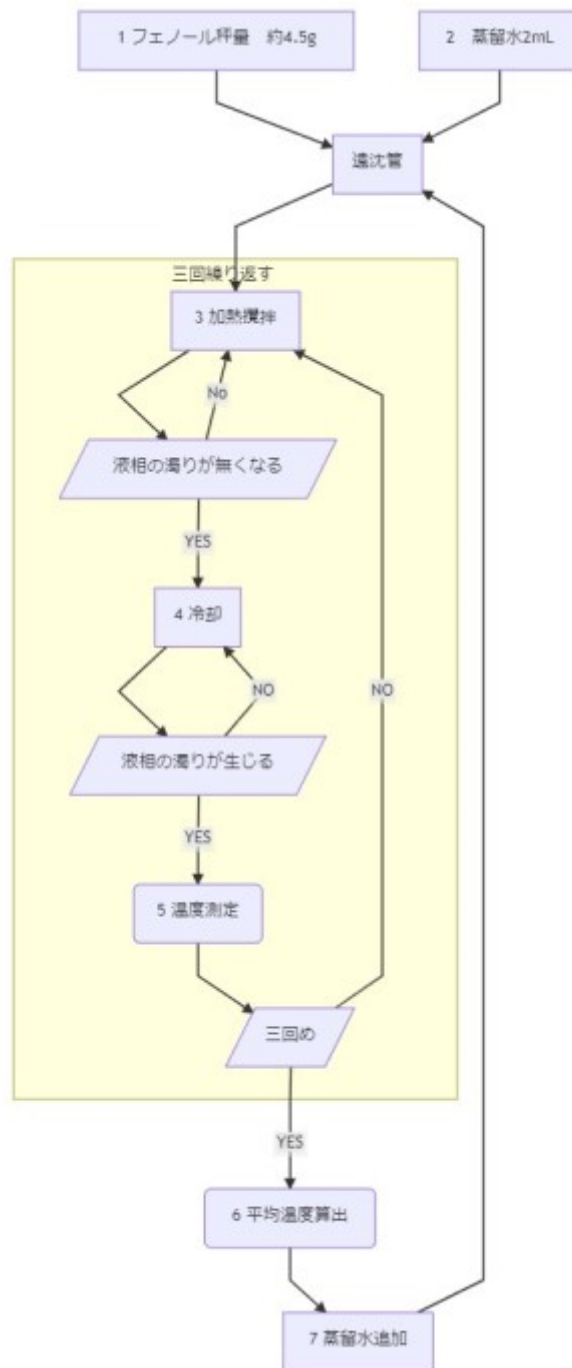


図1 フェノール溶解フローチャート

3. 2 の遠沈管を濁りが無くなるまで加熱攪拌した。
4. 濁りが無くなった時点から冷却を開始した。
5. 放冷中に再び濁りが生じた温度を測定した。
6. 3~5 を 3 回繰り返し、得られた三通りの温度の平均値をこの組成での溶解温度とした。
7. 三回目の測定が終わったのち、次の総容量となるように蒸留水を追加し、再び 3~5 の操作を行った。
8. 7 を合計 10 通りの組成で繰り返した。

総容量・追加量・質量分率の関係は以下の通りである。フェノールの使用量は先述したとおり 4.5888[g]、水の密度は常温 (25 °C) での 0.997[g/mL] を用いた。

総容量 [mL]	追加量 [mL]	質量分率 [-]
2	1	0.697
3	1	0.605
4	1	0.535
5	2	0.479
7	3	0.396
10	5	0.315
15	5	0.235
20	5	0.187
25	10	0.155
35	-	0.116

### 3. 結果

各組成について溶解温度の平均をとり、表に記載したものを以下の表に、実験データに基づき作成した相互溶解線図を以下の図 2 に示す。

線図から、上部臨界可溶温度は約 66.0 °C と読み取ることができる。

溶解温度	組成
39.75	0.6969
55.67	0.6052
61.90	0.5348
63.87	0.4791
66.00	0.3964
65.43	0.3150
63.77	0.2346

溶解温度	組成
60.67	0.1869
57.20	0.1553
45.33	0.1161

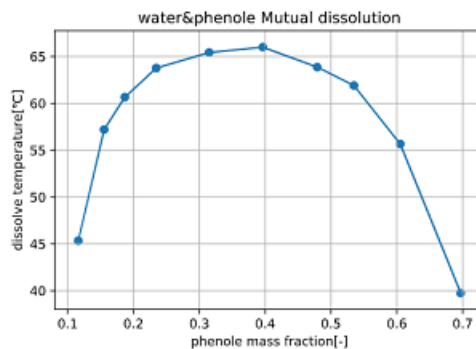


図2 相互溶解線図

## 4. 考察

各融解温度における組成を数値的に算出するため、この線図をラグランジュ補間を用いて 11 次関数で近似し、11 次方程式の解として各温度の組成を求め、平均することで予想される UCST 組成を求めた。また、各温度の低フェノール組成・高フェノール組成・中点を上記のグラフにプロットしたものを以下の図に示した。ラグランジュ補間において、端点付近は実測値は通るものの大きく外れた関数となるため、UCST 組成を求めるために選定した温度は 55 °C～65 °C の範囲とした。

各温度から求めた平均値から、UCST 組成は約 0.36～0.378 の範囲にあることが予想される。この仮説は、文献値と比較しても差が小さいことから妥当であると言える。

温度 [°C]	低フェノール組成 [-]	高フェノール組成 [-]	予想される UCST 組成 [-]
55	0.143	0.608	0.3755
58	0.161	0.592	0.3765
60	0.179	0.574	0.3765
62	0.204	0.532	0.3680
65	0.276	0.449	0.3625
文献値	-	-	0.366

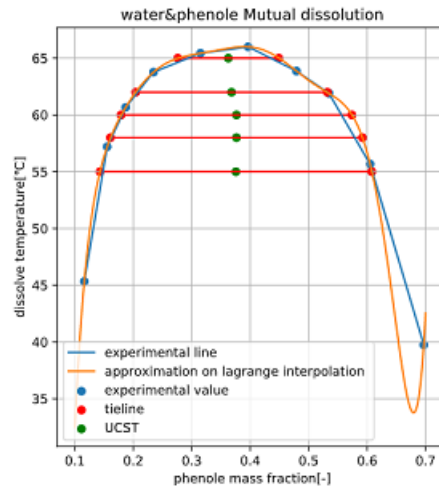


図3 UCST 組成算出プロット

## 5. 課題

1. 3 節参照
2. 3 節参照
3. 4 節参照
4. 線図よりフェノールに富む相の組成  $x_r$ , 水に富む相の組成  $x_p$  をそれぞれ読み取ると、

$$x_r = 0.60x_p = 0.13$$

となる。100[g] のうちフェノールは 25[wt%] であるため、各相の質量を  $M_r, M_p$  [g] とおくと

$$M_r \cdot x_r + M_p \cdot x_p = 25[g]$$

$$M_p = (100 - M_r)$$

より、 $M_r = 25.5[g]$  と求めることができる。

5. ポリ N-イソプロピルアクリルアミドの構造式は以下の通りである。

側鎖は N や O などの電気陰性度の高い原子を持ち、水素結合や静電的相互作用などを受けやすい。低温ではそれらが支配的となり、水和しやすく一相となる。高温では水分子との相互作用に比べ、側鎖のイソプロピル基同士の疎水性相互作用が強く働き、ポリ N イソプロピルアクリルアミドどうして集合するようになり、二相を形成するようになる。これが微小凝集相である。

## 6. 参考文献

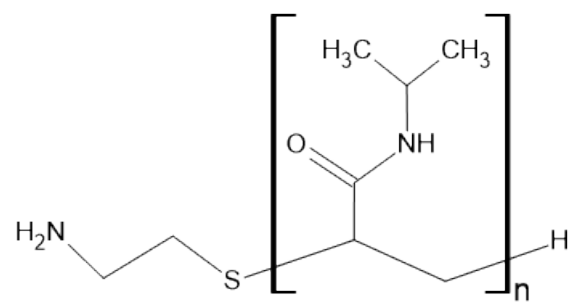


図4 ポリ N-イソプロピルアクリルアミド

## 1. 緒言

希薄溶液において、 $W[\text{kg}]$  の溶媒に溶質を  $n[\text{mol}]$  溶かすと質量モル濃度に比例して凝固点が  $\Delta T[\text{K}]$  下がる。この現象を凝固点降下といい、以下の式で表される。このとき、 $K_f$  は溶質に固有の比例定数であり、単位は  $[\text{K} \cdot \text{kg}/\text{mol}]$  である。

$$\Delta T = K_f \frac{n}{W} \quad (1)$$

溶質のモル質量を  $M[\text{g}/\text{mol}]$ , 質量を  $w[\text{g}]$ , 質量濃度を  $c[\text{g}/\text{kg}]$  とすると以下の式で凝固点降下からモル質量を求めることができる。今回はこの関係を用いてナフタレンのモル質量を決定する。

$$M = \frac{K_f w}{W \Delta T} = \frac{K_f}{\Delta T} \cdot c \quad (2)$$

## 2. 原理

### 2.1 凝固点降下の発生原理

凝固点降下は、熱力学的に以下のように説明できる。まず、溶媒 A, 溶質 B について化学ポテンシャルを考える。

$$\mu_A = \mu_A^* + RT \ln x_A \quad (3)$$

$$\mu_B = \mu_B^\circ + RT \ln x_B \quad (4)$$

このとき、理想希薄溶液を仮定しているため活量を組成で近似している。また、 $\mu_A^*, \mu_B^\circ$  はそれぞれの純成分の化学ポテンシャルである。圧力一定において、純成分 A の融点を  $T$  とすると、(3) より (5) が導ける。

$$\ln x_A = \frac{\mu_A - \mu_A^*}{RT} \quad (5)$$

両辺を  $T$  で微分すると、

$$\frac{d \ln x_A}{dT} = -\frac{\mu_A - \mu_A^*}{RT^2} \quad (6)$$

(6) にギブス-ヘルムホルツの式を当てはめ、(7) を得る。

$$\frac{\partial \ln x_A}{\partial T} = -\frac{H_A^{(l)} - H_A^{(s)}}{RT^2} = -\frac{\Delta H_{\text{dissolve}}}{RT^2} \quad (7)$$



ここで  $H_A^{(l)}, H_A^{(s)}$  は液体・固体それぞれの状態の成分 A のエンタルピーである。式 (7) を変形し、 $x_A \sim 1, T_m \sim T$  で積分する。この時、 $T_m$  は純 A 成分の融点である。

$$\int_1^{x_A} d\ln x_a = \int_{T_m}^T -\frac{\Delta H}{RT^2} dT \quad (8)$$

$$\ln x_a = -\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) = -\frac{\Delta H(T - T_m)}{RT \cdot T_m} \quad (9)$$

凝固点降下  $\Delta T = T_m - T$ , 分母において  $T_m \simeq T$  と近似する。また、 $x_A + x_B = 1, x_A \gg x_B$  より、

$$\ln x_A = \ln(1 - x_B) \simeq -x_B \quad (10)$$

したがって

$$x_B = \frac{\Delta H \Delta T}{RT_m^2} \quad (11)$$

$x_B$  は B 成分のモル分率であるため、

$$x_B = \frac{w}{W \cdot M} \quad (12)$$

よって、

$$\Delta T = \frac{RT_m^2}{\Delta H} \cdot \frac{w}{W \cdot M} = K_f \frac{n}{M} \quad (13)$$

が導出できる。

### 3 実験方法

#### 3.1 試薬

- ナフタレン 0.1 ~ 0.2g 三包
- ベンゼン 40mL

#### 3.2 実験器具

- 上皿天秤
- メスシリンダー
- 温度計

- バックマン温度計
- 100mL 試験管
- 試験管 (大)
- 共栓つき三角フラスコ (50 m L)
- 攪拌棒

### 3.3 実験方法

1. ベンゼンをメスシリンダーで 40mL はかり、三角フラスコに入れた。このとき、ベンゼンを入れる前後でフラスコの質量を測定し、差をベンゼンの質量とした。
2. ナフタレンを 0.1~0.2g 秤量し、薬包紙に包んだものを三包作った。各重量を以下に示す。

A	B	C
0.19[g]	0.13[g]	0.15[g]

3. バックマン温度計を調整した。
4. 純ベンゼンについて、攪拌しながら氷で冷却した。また、30 秒毎にバックマン温度計の目盛りを読み、3 回連続で同じ値が計測されたときの温度を凝固点とした。さらに、時間短縮のため、最初は試験管を直接氷に入れて冷却したがある程度まで温度が下がってからは試験管を二重にして空気層を作り、冷却の速度を遅くした。
5. B のナフタレンを試験管に加え、4 と同様の計測を行った。その後、A → C の順にナフタレンを加え、同様の計測を行った。

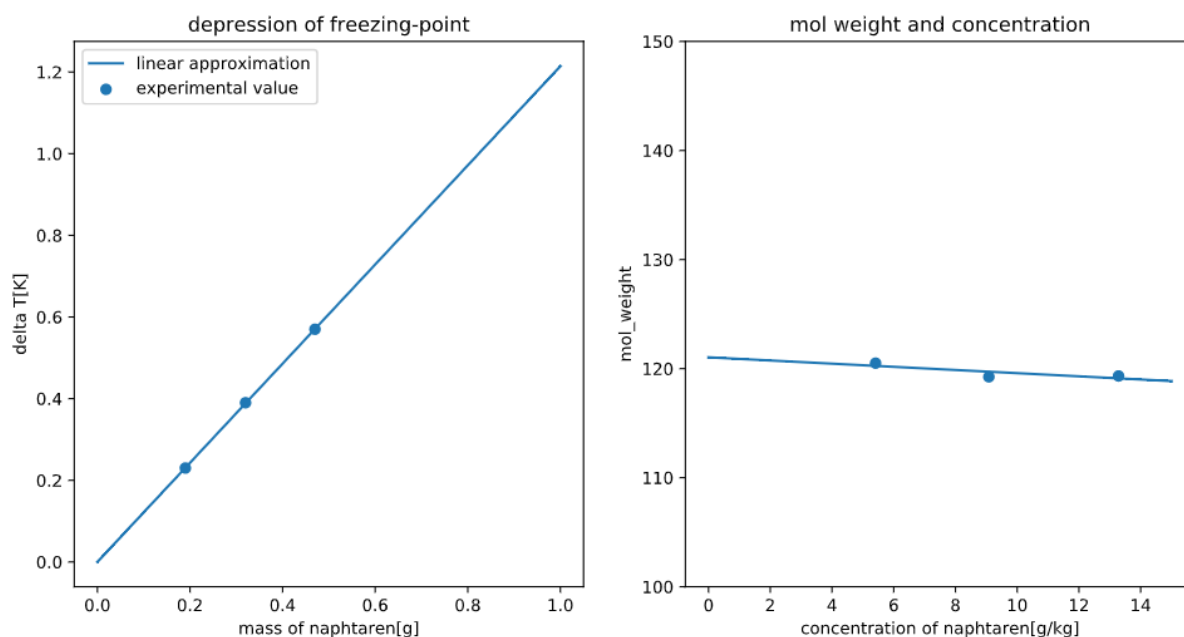
## 4. 結果

四種類のナフタレン量について、それぞれ凝固点降下を測定した。結果を以下の表に示す。

また、各凝固点降下について (2) 式で分子量を求めたものも以下の表に示す

ナフタレン質量 $w$ [g]	ナフタレン質量濃度 $c$ [g/kg]	凝固点降下 $\Delta T$ [K]	モル質量 $M$ [g/mol]
0.13	3.710	0.23	120.50
0.32	9.083	0.39	119.25
0.47	13.28	0.57	119.33

(ベンゼン使用量  $W=34.91$ [g],  $K_f = 5.12$ [K · kg/mol]) また、上記の結果から二つのグラフを作成した。



左はナフタレン質量に対し凝固点降下をプロットし、原点を通る直線で線形近似したものである。近似直線の傾きは 1.242 であり、これは (2) 式を変形した以下の (14) 式の左辺にあたる。

$$\frac{\Delta T}{w} = \frac{K_f}{MW} \quad (14)$$

右辺の  $W$  は既知であることから (14) からナフタレンのモル質量を算出すると、 $M = 118.06$  となる。

右のグラフは各凝固点降下と質量濃度からそれぞれモル質量を算出し、濃度に対してプロットしたものであり、この直線の  $y$  切片がモル質量に当たる。(2) 式より、この値は濃度によらず一定値になると推測でき、実際の傾きは -0.15 となった。

以上から、それぞれの方法で算出したナフタレン分子量を以下の表に示す。

$w - \Delta T$ プロット	$c - M$ プロット	文献値
118.06	121.04	128.17

## 5. 考察

今回の実験では 4 で示した表の通り、すべての方法で文献値よりも小さい分子量が得られた。また、 $c-M$  プロットにおいて、濃度が大きくなるほど小さい分子量となり、近似曲線の傾きは負となった。これは、凝固点降下が質量モル濃度に比例するのは理想希薄溶液に限った現象であり、濃度が大きくなるにつれて非理想性が大きくなっていることが原因であると考えられる。

## 6. 課題

### 1. 4 参照

2. (1),(2) 式が成立する、つまり溶液が理想希薄溶液であり、凝固点降下度とモル濃度は比例するという前提のもとに分子量を算出している。 $w - \Delta T$  プロットは (1) 式に基づいており、質量濃度と凝固点降下の比例定数に溶質の分子量が含まれることを利用している。 $c - M$  プロットにおいてはそれぞれの濃度において分子量を求めているため、仮にすべての濃度で正確な分子量が算出できればグラフの傾きは 0 となる。しかし、5 で述べたように濃度が大きくなれば非理想性も大きくなることから、y 切片を分子量として採用している。

### 3. 2.1 参照

4. ベンゼン 16.22g に安息香酸 0.237g を溶解した溶液の質量濃度 [g/kg]

$$\frac{0.237[g]}{16.22[g]} = 14.6[g/kg]$$

$K_f = 5.12[K \cdot kg/mol]$ , より、 $\Delta T$  と合わせて (2) 式に代入すると分子量は

$$M = 235.07[g/mol]$$

となる。これは安息香酸 ( $C_7H_6O_2$ ) の分子量 122.12[g/mol] のほぼ二倍であることから、安息香酸の大部分はベンゼン中で二量体を形成していると考えられる。

### 5. デュマ法においては、気体の状態方程式

$$PV = nRT$$

を用いて、昇華しやすい物質の分子量を測定する。

小さい穴をあけた蓋をして大気開放したフラスコ (体積  $V[m^3]$ , 乾燥質量  $w_1[g]$ ) に適当量の試料  $W[g]$  を入れ、沸点以上の一定温度  $T[K]$  に保ち、試料を完全に昇華させる。大気開放しているためフラスコ内圧は大気圧  $P_0[Pa]$  に等しく、過剰な試料はフラスコの孔から大気に噴出する。噴出が終わった時点でフラスコ内では気液平衡となっており、体積  $V[m^3]$ , 圧力  $P_0[Pa]$ , 温度  $T[K]$  の気体で満たされている。その後、試料が凝縮するまで放冷すると、内圧の低下によりフラスコ内に空気が戻り、質量  $w_2[g]$  となる。以上の値を用い、

$$P_0 V = \frac{(w_2 - w_1)RT}{M}$$

として分子量  $M[g/mol]$  を算出することができる。

6. • 熱電対法異なる金属を接合し、両端に温度差を与えると接合点付近に温度差に応じた電圧が発生する。これをゼーベック効果といい、熱電対法においてはこの電圧を測定することで温度を測定す

る。熱電対の測定温度は素材によって異なる。一般に白金など貴金属においては広範囲の温度測定が可能であるが、高価なため必要とされる温度範囲に適した素材を選定する必要がある。

- 測温抵抗体電気抵抗の温度依存性を利用した温度の測定法である。白金やニッケル・銅などの金属や半導体は高温ほど電気抵抗が大きい。電気抵抗は定電流下での電圧の変化として測定できるため、測温抵抗体はこの性質を利用して温度を測定する。抵抗体に電流を流す導線抵抗を知っておく必要がある。

## 1. 緒言

今回の実験では、エステルの加水分解反応を例に反応速度解析を行う。反応速度は濃度の時間で、各成分の濃度・反応速度定数から式 (1) のように表される。

$$A + B \longrightarrow P \text{ において } -\frac{d[A]}{dt} = k[A]^p[B]^q \quad (1)$$

このとき、各濃度の指数  $p, q$ , また全体の反応次数  $p + q$  は化学量論数に関係なく反応によって異なるが、今回は  $p = q = 1$  の一次反応を仮定する。

酢酸エチルのアルカリ加水分解は以下の化学反応式で表される。

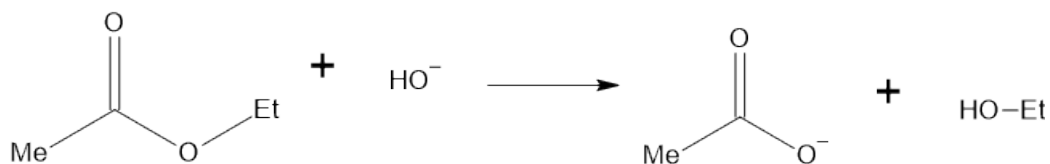


図1 加水分解

この式から反応速度式を  $p = q = 1$  の仮定の下立式すると、

$$-\frac{d[AcOEt]}{dt} = k[AcOEt][OH^-] \quad (2)$$

という二次反応となる。各成分における物質収支は初濃度を下付き文字 0 で表すと

$$[AcOEt] = [AcOEt]_0 - [AcO^-] \quad (3)$$

$$[OH^-] = [OH^-]_0 - [AcO^-] \quad (4)$$

と書くことができる。これを (2) 式に代入して、

$$\frac{d[AcO^-]}{dt} = k([OH^-]_0 - [AcOEt]_0)t + \ln \frac{[OH^-]_0}{[AcOEt]_0} \quad (5)$$

という式を得る。この式の左辺を時間に対してプロットし、反応速度係数  $k$  を求める。

## 2. 方法

### 2.1 実験器具

《NaOH 調整》

- ビーカー (50mL)
- メスフラスコ (500mL)

#### 《加水分解反応》

- 共栓付き三角フラスコ (500mL)
- 駒込ピペット
- ホールピペット (20mL)
- メスフラスコ (250mL)
- ストップウォッチ
- スターラー
- 磁気攪拌子
- 恒温槽
- メスシリンダー (250mL)
- 加熱還流装置
  - マントルヒーター
  - リービッヒ冷却器
  - 平底フラスコ (500mL)

#### 《滴定》

- ホールピペット (10mL, 25mL, 50mL)
- コニカルビーカー (100mL, 8 個)
- ビュレット (50mL)

#### 《その他》

- ピペットスタンド
- 安全ピペッター
- 漏斗
- クランプ
- スタンド
- 水浴

### 2.2 試薬

- 水酸化ナトリウム (2.0685g)
- 塩酸 (0.1M, 300mL 程)
- 酢酸エチル (0.4mL)
- フェノールフタレインのエタノール溶液 (0.1%)

## 2.3 実験方法

実験方法について以下のフローチャートに示す。また、今回の実験は NaOH 調整・標定、加水分解反応・反応液の滴定の 2 つに分かれているため、それぞれについて示す。

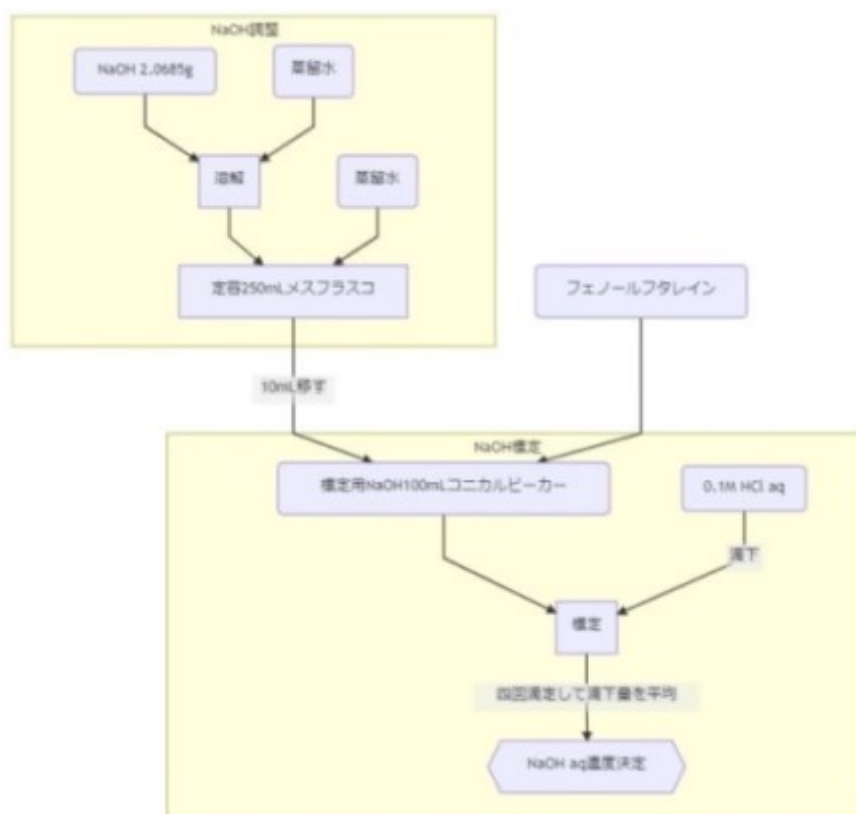


図2 NaOH 調整フローチャート

### ■2.3.1 NaOH 調整・標定

1. 50mL ビーカーに NaOH を約 2g 秤量した。今回は 2.0685g 使用した。これを少量の蒸留水で溶解させた。
2. 溶液を 250mL メスフラスコに移し、蒸留水で定容・攪拌した。
3. 定容した NaOH 水溶液のうち 60mL を 250mL メスフラスコにうつし、定容した。これを反应用とした。残りの溶液は標定用にビュレットに移した。
4. 反应用の NaOH 水溶液はメスフラスコのまま 30 分間 25 °Cの恒温槽に浸した。
5. 0.1M の HCl 水溶液を 10mL,100mL のコニカルビーカーに移してフェノールフタレイン溶液を 2, 3 滴加えた。これを被滴定液とした。



6. 5 の HCl 溶液に 3 の NaOH 溶液を、溶液に薄赤色の呈色がみられるまで滴下した。滴定は四回行い、平均値を滴定に要した NaOH 溶液の体積とした。

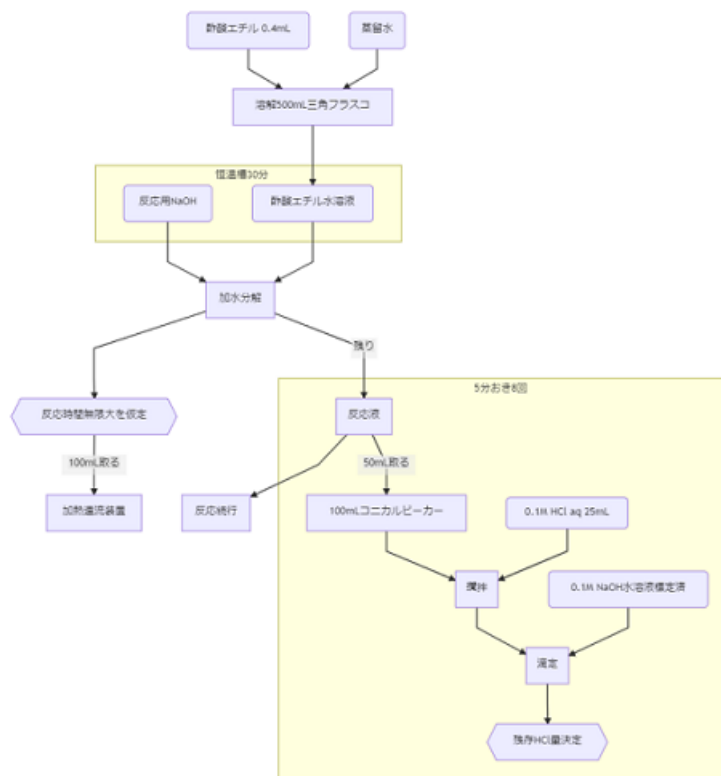


図3 加水分解フローチャート

### ■2.3.3 加水分解反応

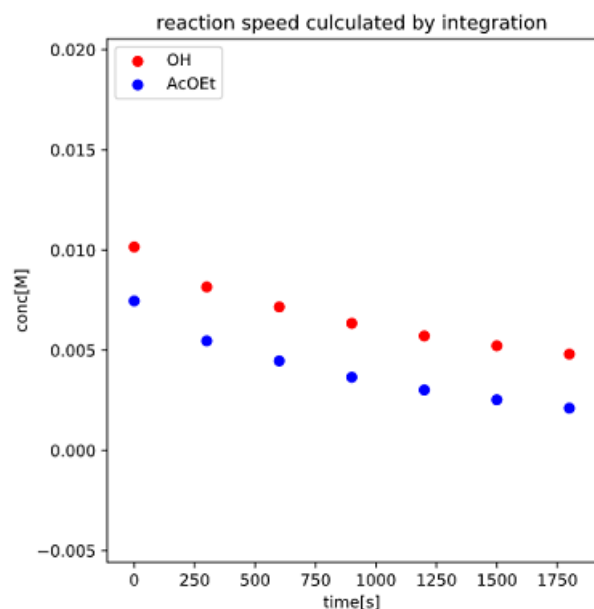
1. 酢酸エチル 0.4mL を 500mL 共栓付き三角フラスコに移し、250mL の蒸留水を加えて攪拌・溶解した。溶解したのちの溶液を 25 °C の恒温槽に 30 分間浸した。
2. 逆滴定に用いるため、0.1M の HCl 溶液を 25mL ずつ 8 個のコニカルビーカーに移した。
3. 酢酸エチルの入ったフラスコに 2.3.3-4 の NaOH 溶液を一度に加え、この時点を反応開始とした。反応開始後すぐに反応液 50mL を 2 のコニカルビーカーに注入し、フェノールフタレイン溶液を加えたのち 0.1M の HCl 溶液で滴定した。  
また、反応液を 100mL 平底フラスコに移した。
4. 以後、300 秒おきに反応液を別のコニカルビーカーに移し、同様に滴定を行った。
5. 平底フラスコに移した反応液はリービッヒ冷却器・マントルヒーターを用いた加熱還流装置で 45 分間加熱還流を行い、放冷したのちに 3 同様の滴定を行った。この時の反応液を  $t = \infty$  とした。

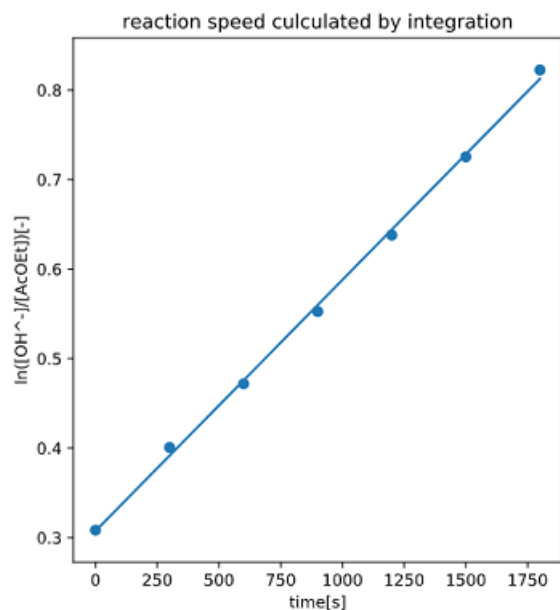
### 3. 結果

各反応時間において、滴定に要した NaOH 体積 [mL]・余剰 HCl 物質質量 ( $\times 10^{-3}$ [mol]), 反応溶液の各化学種の濃度 ( $\times 10^{-3}$ [M]),  $\ln \frac{[OH^-]}{[AcOEt]}$  について以下の表に示す。

反応時間	NaOH 体積	余剰 HCl	$[OH^-]$	$[AcO^-]$	$[AcOEt]$	$\ln \frac{[OH^-]}{[AcOEt]}$
0	21.90	1.99	10.2	0.725	7.46	0.308
300	23.00	2.09	8.16	2.72	5.46	0.401
600	23.55	2.14	7.16	3.72	4.47	0.472
900	24.00	2.18	6.35	4.53	3.65	0.553
1200	24.35	2.21	5.71	5.17	3.02	0.638
1500	24.62	2.24	5.22	5.66	2.53	0.725
1800	24.85	2.26	4.80	6.07	2.11	0.822
$\infty$	25.73	2.34	3.21	7.67	0.515	—

また、時間に対し  $[OH^-]$ ,  $[AcOEt]$  濃度をプロットしたグラフを図 2、 $\ln \frac{[OH^-]}{[AcOEt]}$  をプロットしたグラフを図 3 に示す。





二つ目のグラフは最小二乗法により線形近似した回帰線を記入した。回帰線は以下の式で表される直線である。

$$y = 2.807 \times 10^{-4}x + 0.3072 \quad (6)$$

(5) 式と照らしあわせると、

$$k([OH^-]_0 - [AcOEt]_0) = 2.807 \times 10^{-4} \quad (7)$$

であると言える。 $OH^-$ ,  $AcOEt$  初濃度の差は

$$[OH^-]_0 - [AcOEt]_0 = 0.0027[M] \quad (8)$$

より、反応速度定数  $k$  は

$$k = 0.104 \quad (9)$$

と求めることができた。

#### 4. 考察

図 4 の  $[OH^-]$ ,  $[AcOEt]$  の時間に対するプロットが二つの化学種において初濃度を除きほぼ同じ経過をたどること、図 5 のグラフが直線で近似できることより (5) が成立していると言えることからこの反応は  $p=q=1$

の二次反応であると言える。また、塩基性触媒条件のエステル加水分解では求核剤となる塩基 ( $OH^-$ ) は直接カルボニル炭素を攻撃し、 $EtO^-$  は脱離しやすいため塩基の求核攻撃が律速となる。ゆえに求核剤である  $[OH^-]$ 、求電子剤である  $[AcOEt]$  についてそれぞれ一次、全体では二次反応となるという推定は妥当である。

## 5. 課題

1. 3 節参照
2. 同上
3. 4 節参照
4. 反応速度定数は以下のアレニウスの式と呼ばれる温度の関数で表される。

$$k = A \exp \left( -\frac{E_a}{RT} \right) \quad (10)$$

ここで  $A, R, E_a$  は定数であることから、高温では反応速度定数が大きくなり、短時間の反応で  $T = \infty$  に相当する反応率が得られる。

5. (2),(3),(4) の式に基づき、 $[OH^-]_0 \gg [AcOEt]_0$  の条件下で反応速度式を解く。上記の仮定より、 $[OH^-] = \text{const}$ 、つまり疑一次過程と近似することができるため、

$$-\frac{d[AcOEt]}{dt} = k'[AcOEt] \quad (11)$$

ここで  $k'$  は反応速度定数を  $[OH^-]_0$  で補正したものであり、

$$k' = k \cdot [OH^-]_0 \quad (12)$$

といえる。移項して定数項を考えずに積分すると、

$$\int -\frac{1}{[AcOEt]} d[AcOEt] = \int k' dt \quad (13)$$

$$\ln \frac{[AcOEt]}{[AcOEt]_0} = -k't \quad (14)$$

$$\frac{[AcOEt]}{[AcOEt]_0} = e^{-k't} \quad (15)$$

$$[AcOEt] = [AcOEt]_0 \cdot e^{-k't} \quad (16)$$

のように算出できる。

6.  $[OH^-]_0 \gg [AcOEt]_0$  より、5 で用いた仮定に合致するため式 (15) を使用する。  
(13) より

$$k' = 0.10[M] \cdot 0.20[M^{-1}s^{-1}] = 0.02[s^{-1}]$$

よって、(15) に代入すると

$$\frac{1}{2} = e^{-0.02 \cdot t}$$

両辺の対数を取ると

$$-0.693 = -0.02 \cdot t$$

$$t = 34.65[s]$$

となる。

## 参考文献 (1.6, 1.7, 1.8 共通)

- <http://edu.chemistry.or.jp/teibanjikken/shigh/fp/fp.htm> 定番！ 化学実験 凝固点降下の測定
- 分析化学データの統計処理法 分析化学/21 巻 (1972) 1 号 小島 次雄
- (2013)13 山口大学工学部研究報告 2 成分系混合物の液液平衡に関する熱力学小淵茂寿 (理工学研究科 環境共生系専攻) ほか
- 凝固点降下の実験 化学と教育 57 巻 12 号 (2009 年) 酒井秀樹
- 高分子論文集 66 巻 8 号 (2009) ポリ N-イソプロピルアクリルアミドの分子構造と水溶液挙動 長昌史
- 化繊講演集第 66 集ポリ (N-イソプロピルアクリルアミド) の分子構造と相挙動 吉崎 武尚・長昌史
- アトキンス物理化学 (上) 第 10 版 2017/3/10 (訳) 中野元祐 東京化学同人発行