

高等学校 化学基礎「酸と塩基の反応」への化学平衡概念導入の試み —協動的な学びとなる探究活動を取り入れた授業実践を通して—

大方 祐輔

高等学校化学基礎「酸と塩基の反応」の単元において、化学平衡の概念を導入した授業をデザインすることを試みた。具体的には、酢酸水溶液を水酸化ナトリウム水溶液で中和滴定したとき、中和点の酢酸ナトリウム水溶液がなぜ塩基性を示すのか、生徒実験の結果を考慮しながら、生徒が既習の知識を活用して科学的に説明する探究活動とその評価方法を開発し、実践した。その結果、探究活動における生徒の思考過程の流れを追跡する方法を考案し、生徒が水溶液中に共存する様々な化学平衡をどのように捉え、理解し、表現するのか、より臨場感のある詳細な分析が必要であることが示唆された。

1. 研究の経緯と目的

(1) 研究の経緯

高等学校化学基礎「酸と塩基の反応」の単元では、酸や塩基の強弱と電離度との関係を扱う中で、水素イオン指数 pH について学習する。pH は、水のイオン積および酸や塩基の電離平衡と深い関連があるが、電離平衡を含む化学平衡の考え方は抽象性が高く、本質的な理解を伴って概念を構築することは難しい。したがって、現行の学習指導要領では、選択必修科目である化学基礎において、酸と塩基の反応に関して化学平衡の考え方をを用いた説明は基本的に取り扱わないこととしている。例えば、水のイオン積について、化学基礎の教科書では発展的な内容として「一定温度では、水溶液中に存在する水素イオン濃度と水酸化物イオン濃度の積は一定の値となる。¹⁾」程度の記述がされているだけである。また、弱酸や弱塩基の分子は水溶液中で一部のみ電離する、と学習し、弱酸や弱塩基の電離を示すイオン反応式は、いわゆる可逆反応を表す「 \rightleftharpoons 」を用いて示すが、この可逆反応についても詳細には触れない。このような学習実態の中で、生徒は弱酸や弱塩基の水溶液の pH を求める計算などを機械的に行うが、化学平衡の概念を理解せずして、弱酸や弱塩基の性質の本質を理解しているとはいえない。そこで、本研究では、弱酸の塩(酢酸ナトリウム)の水溶液の加水分解について、生徒実験の結果に基づいてその原理を科学的に考察する協動的な学びとなる探究活動を取り入れ、生徒が化学平衡の考え方に触れるきっかけとなるような授業をデザインしたいと考えるに至った。

(2) 研究の目的

平成 26 年 11 月の中央教育審議会諮問「初等中等教育における教育課程の基準等の在り方について」によると、「基礎的な知識・技能を習得するとともに、実社会や実生活の中でそれらを活用しながら、自ら課題を発見し、その解決に向けて主体的・協動的に探究し、学びの成果等を

表現し、更に実践に生かしていけるようにすることが重要である²⁾」とある。また、そのためには「『何を教えるか』という知識の質や量の改善はもちろんのこと、『どのように学ぶか』という、学びの質や深まりを重視することが必要であり、課題の発見と解決に向けて主体的・協動的に学ぶ学習(いわゆる『アクティブ・ラーニング』)や、そのための指導の方法等を充実させていく必要³⁾」がある、と指摘されている。さらに、「学びの成果として『どのような力が身に付いたか』に関する学習評価の在り方についても、改善を図る必要がある⁴⁾」と明示されている。これらのことを踏まえ、化学平衡の考え方に触れるきっかけとなる授業を提案するにあたって、①生徒が既習の知識を活用して、主体的・協動的に課題解決を行う探究活動を取り入れ、その評価方法を開発すること、②探究活動として、協動的な学び(アクティブラーニング)を設定し、発展的な内容の理解の深化を図ること、この 2 点を本研究の目的とした。

2. アクティブラーニングについて

アクティブラーニング(active learning)は、「能動的学習」あるいは「積極的学習」「主体的学習」などと訳されることが多く、初等・中等教育を主とし、高等教育まで幅広く使用されている用語である。そのため、各国の研究者によってさまざまにアクティブラーニングの定義がなされている。たとえば、平成 24 年 8 月の中央教育審議会答申「新たな未来を築くための大学教育の質的転換に向けて一生涯学び続け、主体的に考える力を育成する大学へ」では、その用語集において、アクティブラーニングを以下のように定義している。「教員による一方向的な講義形式の教育とは異なり、学修者の能動的な学修への参加を取り入れた教授・学習法の総称。学修者が能動的に学修することによって、認知的、倫理的、社会的な能力、教養、知識、経験を含めた汎用的能力の育成を図る。発見学習、問題解決学習、体験学習、調査学習等

が含まれるが、教室でのグループ・ディスカッション、ディベート、グループ・ワーク等によっても取り入れられる。⁵⁾」また、溝上(2014)は、「一方向的な知識伝達型講義を聴くという(受動的)学習を乗り越える意味での、あらゆる能動的な学習のこと。能動的な学習には、書く・話す・発表するなどの活動への関与と、そこで生じる認知プロセスの外化を伴う。⁶⁾」と定義している。これらアクティブラーニングの定義にはいずれも、教員から学習者への一方向的な講義形式のような受動的学習ではなく、学習者自身が自ら参加する能動的活動を取り入れた学習である、といった意味の記述がある。このことを踏まえ、本研究では、知識伝達型授業の「聴く」という行為を乗り越え、授業の中に既習の知識を理解し使いこなすために「書く・話す・発表する」といった活動を取り入れ、生徒がそれに関与することによって様々な認知機能を働かせ、そのプロセスを表現できるような探究活動を試みた。具体的には、①酢酸水溶液を水酸化ナトリウム水溶液で中和滴定したときの滴定曲線を正確に作成し、中和点の水溶液の pH を求める生徒実験を通して、中和点における酢酸ナトリウム水溶液が塩基性を示すことを見出し、②酢酸ナトリウム水溶液はなぜ塩基性を示すのか、生徒実験の結果を考慮しながら、酢酸ナトリウム水溶液中に存在する分子やイオンの粒子モデルを用い、生徒が既習の知識を活用して説明する活動を行った。ここで、①は、中和点の水溶液が塩基性を示す、という知識を、生徒実験を通して理解し獲得する部分、そして②は、生徒が獲得した知識を活用する場面で行うパフォーマンス、つまり「書く・話す・発表する」などの活動の部分、と捉えている。次章より、①、②の部分を取り入れた具体的な授業展開について報告する。

3. 探究活動の実際

(1) 単元計画 (全 12 時間)

1. 酸と塩基 (1 時間)
2. 水素イオン濃度 (2 時間)
3. 中和と塩 (1 時間)
4. 中和滴定 (8 時間)
 - 中和における量的関係 (うち 1 時間)
 - 中和滴定 (うち 3 時間)
 - 中和滴定曲線 (うち 4 時間)

※本実践報告は、中和滴定曲線の 3、4 時間目を実施したものである。

(2) 指導過程

高等学校第 1 学年の化学基礎履修 1 クラス 41 名を対象に、中和滴定曲線 (4 時間) のうち 3 時間目において、

表 1 に示すような指導過程で実施した。また、使用教科書、試薬、実験装置は以下の通りである。

使用教科書

教科書「改訂 高等学校 化学基礎」第一学習社
副教材「五訂版 スクエア最新図説化学」第一学習社
試薬

0.1mol/L NaOH aq, CH₃COOH aq は、1mol/L NaOH aq, 1 mol/L CH₃COOH aq (いずれも米山薬品工業) をそれぞれ水で 10 倍に希釈して使用した。

実験装置

pH テスター : Checker Plus (HANNA instruments)
測定範囲 : pH 0~14 精度 (25°C) : pH ±0.2
検出単位 : pH 0.01 校正 : 1 点または 2 点校正
価格 : 約 10,000 円

なお、生徒は前時までに、塩酸を水酸化ナトリウム水溶液で中和滴定したときの滴定曲線を作成し、中和点の塩化ナトリウム水溶液の pH が 7 であることを学習している。また、中和滴定の始点の塩酸中に存在するイオンの粒子モデルを提示し、中和点における塩化ナトリウム水溶液中に存在する分子やイオンの量的関係を考慮しながら、科学的に説明する探究活動を行っている。

(3) 探究活動に取り組む生徒の様子

本実践は、前時までの水酸化ナトリウム水溶液を塩酸で中和滴定したときの流れと同じ展開である。授業時間 50 分の中で生徒実験、考察、探究活動を行うため、実験装置と試薬はあらかじめ準備をしておき、授業開始後すぐに生徒実験が行えるようにした。生徒は 1 班 4 または 5 人のグループで活動し、生徒実験では班ごとに各自役割を決めて積極的に取り組むことができていた。滴定曲線を作成し、中和点の水溶液の pH を決める際には、滴定曲線に対して 45° となる接線を 2 本引き、この 2 本の直線に対する垂線の二等分線と滴定曲線の交点を中和点とする方法⁷⁾を用いた(図 1)。この方法により、各班の中和点の水溶液の pH の値は、8.5~8.9 の範囲に収束し、理論値 (pH=8.8) の値とほぼ一致した。そして、実験結果から、中和点は酢酸ナトリウム水溶液であり、その液性は pH の値が 7 より大きい塩基性であることを確認した。なお、この授業で使用したワークシートは、参考資料として本稿の末尾に添付している。

生徒実験からわかったこと(まとめ)

酢酸水溶液を水酸化ナトリウム水溶液で中和したとき、

- ・中和点付近で pH の急激な変化が見られる。
- ・中和点の水溶液の pH は約 8.5~8.9 である。
- ・指示薬として、フェノールフタレインが有効である。

表1 指導過程

時間(分)	学習活動・指導過程	指導上の留意点	評価の実際
5	<p>○課題の提示</p> <p>酢酸水溶液を水酸化ナトリウム水溶液で中和滴定したときの滴定曲線を作成し、中和点の水溶液の pH を求めよう。</p> <p>○生徒実験(グループ)</p> <p>①0.10mol/L 酢酸水溶液 10mL を 0.10mol/L 水酸化ナトリウム水溶液で中和滴定を行う。</p> <p>② 滴下した水酸化ナトリウム水溶液の体積と混合水溶液の pH との関係をグラフに示す。</p>	<p>・前時までに、水酸化ナトリウム水溶液を塩酸で中和滴定したときの滴定曲線を作成し、中和点の水溶液の pH が7であることを学習している。</p> <p>・白衣、保護めがねの着用を徹底する。</p> <p>・試薬、ガラス器具の取り扱いに注意する。</p>	<p>・正しい操作で安全に実験を行っている。(技能)</p> <p>・実験結果にもとづいて、滴定曲線を正確に作成することができる。(思考・判断・表現)</p>
25	<p>○結果</p> <p>中和点の水溶液の pH は7より大きく、塩基性である。</p> <p>○考察</p> <p>中和点は酢酸ナトリウム水溶液であるから、塩基性を示す。</p>	<p>・水酸化ナトリウム水溶液の滴下量について、中和点付近(9.5～10.5mL)は約 0.1mL ずつ、他は約 2mL ずつ滴下する。</p> <p>・グラフプロットに表計算ソフトを使用し、測定結果をクラス全体で共有する。</p>	<p>・滴定曲線の形状から中和点を決め、中和点の水溶液の pH を求めることができる。(思考・判断・表現)</p>
30	<p>○探究活動(グループ)</p> <p>酢酸ナトリウム水溶液はなぜ塩基性を示すのか、粒子モデルを用いて説明しよう。</p> <p>○まとめ(クラス全体)</p> <p>酢酸ナトリウム水溶液は、電離で生じた酢酸イオンの一部が水と反応して水酸化物イオンを生じる加水分解がおこっている。</p>	<p>・中和滴定の始点である酢酸水溶液中に存在する分子やイオンの粒子モデルを提示し、中和点における酢酸ナトリウム水溶液中に存在する分子やイオンの量的関係を考慮しながら、説明する。</p>	<p>・酢酸イオンの加水分解について、粒子モデルを用いて説明することができる。(思考・判断・表現)</p>

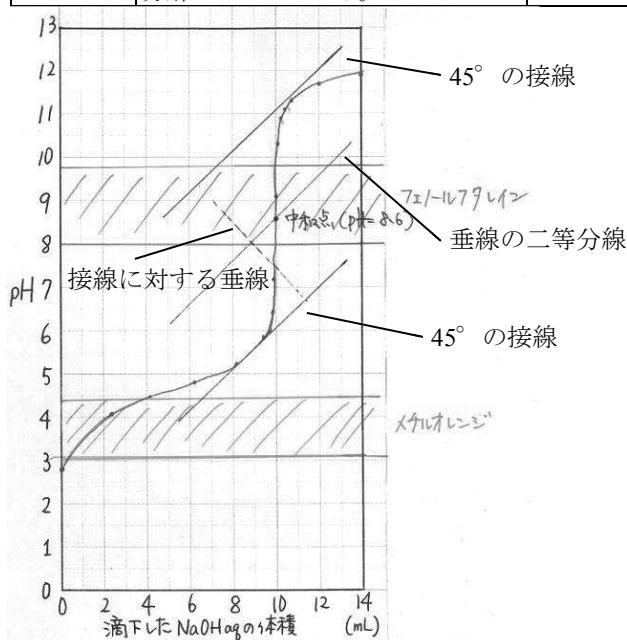


図1 0.1mol/L CH₃COOH aq 10mL を 0.1mol/L NaOH aq で中和滴定したときの中和滴定曲線(生徒作成)

続いて、授業後半には、

中和滴定の始点である 0.10mol/L 酢酸 CH₃COOH 水溶液(電離度 $\alpha \ll 1$) 10.0mL 中に存在するイオンの粒子モデルを図2のように表すと、中和点の水溶液中に存在するイオンおよび中和によって生じた水分子の粒子モデルはどのように表されるだろうか。

という課題を提示し、粒子モデルを用いて協動的な学びとなる探究活動に取り組んだ。また、表2のようなルーブリックを作成して、課題とともに生徒に提示した。ルーブリックを生徒に提示することにより、生徒にとって、課題で求められている解答をどのように書けばいいのかが明確になる。また、口頭説明においては、相手にどのように説明すれば高く評価されるのか、どのような態度で臨むことを期待されているのかが明確になる、という利点がある。このため、ルーブリックの提示は、生徒の学習活動や自己評価の指針としての役割を果たすものとして有効であると考えた。

表2 ルーブリック

評価項目	評価基準 A	評価基準 B	評価基準 C
粒子モデルの提示	水溶液の pH に基づき、水溶液中に存在する分子やイオンについて、 ①電離のようす ②量的関係(分子やイオンの個数)いずれも正しく示すことができている。	水溶液の pH に基づき、水溶液中に存在する分子やイオンについて、 ①電離のようす ②量的関係(分子やイオンの個数)いずれか1つを正しく示すことができている。	水溶液の pH に基づき、水溶液中に存在する分子やイオンについて、 ①電離のようす ②量的関係(分子やイオンの個数)いずれも正しく示すことができていない。
科学の用語とイオン反応式による記述	提示した粒子モデルの根拠となる事柄について、 ①電離のようす ②水溶液の pH との関連づけ ③量的関係(分子やイオンの個数)いずれも正しく示すことができている。	提示した粒子モデルの根拠となる事柄について、 ①電離のようす ②水溶液の pH との関連づけ ③量的関係(分子やイオンの個数)いずれか1つ～2つを正しく示すことができている。	提示した粒子モデルの根拠となる事柄について、 ①電離のようす ②水溶液の pH との関連づけ ③量的関係(分子やイオンの個数)いずれも正しく示すことができていない。
口頭説明	自分の班の考え方を発表するとき、 ①論理的な説明 ②適切な声量、スピード いずれも達成できている。	自分の班の考え方を発表するとき、 ①論理的な説明 ②適切な声量、スピード いずれか1つを達成できている。	自分の班の考え方を発表するとき、 ①論理的な説明 ②適切な声量、スピード いずれも達成できていない。



図2 0.10mol/L 酢酸 CH_3COOH 水溶液(電離度 $\alpha \ll 1$) 10.0mL 中に存在するイオンの粒子モデル(酢酸分子 20 個のうち 1 個が電離している。)参考文献 1)p.129 図 5 を参考に作成

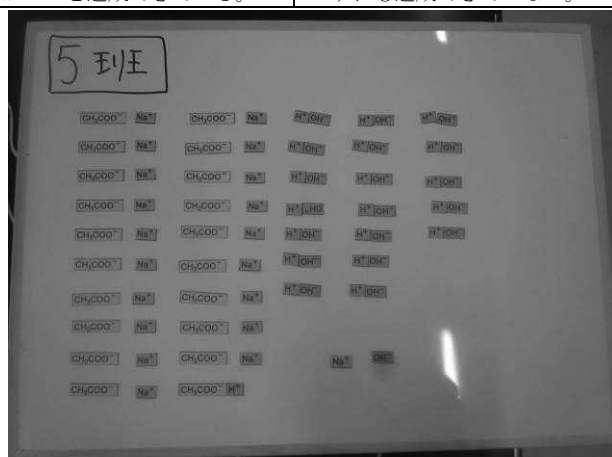


図3 生徒が提示した粒子モデル(例 1)

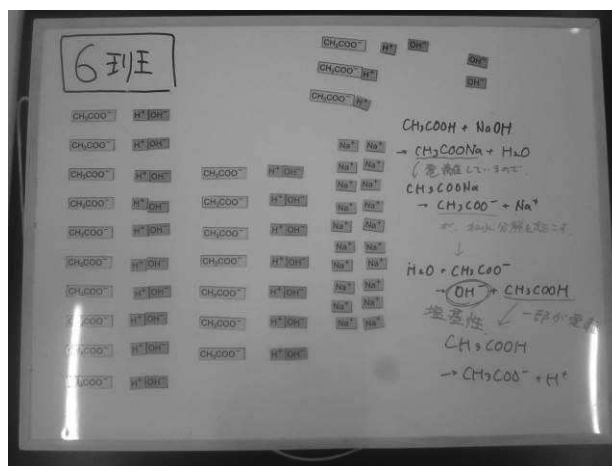


図4 生徒が提示した粒子モデル(例 2)

(4) 生徒が提示した粒子モデルの例

前掲した課題を解決するにあたり、まず、生徒に対して以下の①～③を既に学習していることを確認した。

①酢酸水溶液と水酸化ナトリウム水溶液が中和するときの化学反応式は、以下の通りである。



②酢酸ナトリウムは水中で完全に電離している。



③酢酸ナトリウム水溶液は塩基性であるから、中和点の水溶液中には水酸化物イオン OH^- が存在する。

これらの知識を活用して、粒子モデルを用いて水溶液中のイオンや分子の状態がどのようになっているかを表現し、モデルを提示した根拠を科学的な用語で説明させた。以下に生徒が提示したモデルを示す(図3～図5)。

図3の粒子モデルは、酢酸ナトリウムが電離して生じた酢酸イオン 20 個のうち 1 個が、水分子 1 個と反応して 1 個の酢酸分子に戻っている様子を示していると考えられる。しかし、科学の用語(イオン反応式や文章)によ

る記述ができなかったため、どのような思考過程でこのモデルを提示するに至ったかが不明である。図4の粒子モデルは、図3と同様、酢酸イオンが加水分解によって酢酸分子に戻っている様子を提示している。そのことは、併記しているイオン反応式からわかる。しかし、すべての酢酸イオンが加水分解して酢酸分子に戻り、酢酸は弱酸なのでその一部が電離してモデルのようになる、と読み取ることができる。この例では、科学の用語を用いた記述により、生徒の思考過程が見えるが、記述されている反応が同時に起こって平衡状態となっている、といったイメージで捉えられてはいないと推定される。

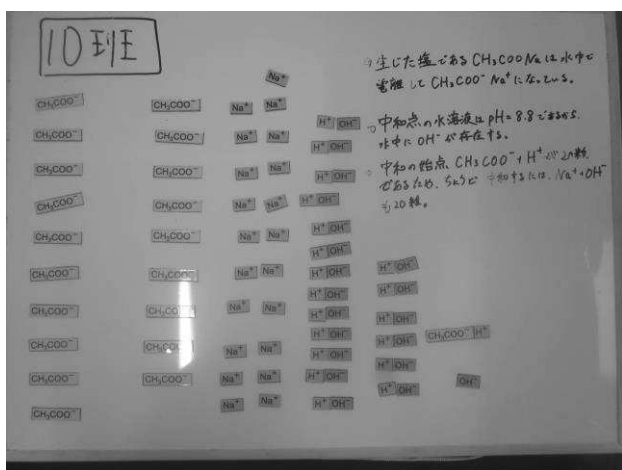


図5 生徒が提示した粒子モデル(例3)

図5のモデルでは、既習の事項および中和点の水溶液中に存在する粒子の量的関係を文章で記述し、さらに、酢酸分子の一部が加水分解して酢酸分子に戻る様子を正しく提示できている。しかし、加水分解の様子をイオン反応式で記述するには至っていない。

ここで紹介した3例に限らず、10班全てが前掲の例とほぼ同様のモデルを提示することができた。イオン反応式や文章による記述ができたのは、10班中5班のみであった。この3つの例について、表2に示したルーブリックによる生徒自己評価、あるいは指導者による評価では、「粒子モデル」については図3～図5いずれの例もA、「科学の用語による説明」については、図3の例はC、図4および図5の例はBとなった。「口頭発表」については、時間をじゅうぶんにとることができず、行うことができなかった。

4. 研究の成果と今後の展望

机間指導から、粒子モデルを提示する話し合いの中で、中和の量的関係や水溶液のpHなど、得られた実験結果に基づいて、現象を科学的に説明するために、生徒は水溶液中で起こっている反応を様々な手順で考えてい

たことがうかがえた。例えば、授業前半で取り組んだ中和滴定の進行に伴うpH変化の様子を考慮しながら、酢酸イオンから生じた水素イオンが中和によってどのように消費されていくか検討している班があった。また、中和の量的関係から、中和点では過剰な水酸化物イオンは存在しないはずであるが、水溶液は塩基性となる事実から、水溶液中に水酸化物イオンがどのようにして生じるのか考えようとしている班があった。これはまさに、水溶液中で見られる弱酸の電離平衡や加水分解平衡を自分たちなりの方法で考え、表現していることを示している。

このように、生徒は、水溶液中に存在している様々な化学平衡について考えたことを他の班と積極的に交流しながら、課題を解決しようとする姿勢が見られた。したがって、この探究活動は、生徒が既習の知識を活用して、主体的・協動的に課題を解決するための教材として、また、粒子モデルを使った思考過程の中で、生徒が自分たちなりに化学平衡の概念を取り入れながら考えることができる教材として、有用であった。一方で、今回生徒が提示した粒子モデルや文章および反応式による説明について、いずれもルーブリックによる評価でAに該当するものは得られなかった。話し合いにもう少し時間をとることができ、また、ルーブリックを活用する場面を定常的に授業の中に継続してとり入れることができるようになれば、より高い評価が得られる解答へ到達できることが期待される。今後は、生徒たちがどのような思考過程でそのモデルを提示するに至ったのか、思考過程を追跡できるような方略、例えばICレコーダーで話し合いの様子を記録する、など行うことによって、生徒の思考のパターンを分析し分類したりすること、あるいはルーブリックの評価A～Cに対応する生徒のアンカー作品を抽出すること、などといった課題が残された。

参考・引用文献

- 1) 第一学習社、「高等学校 改訂 化学基礎」, p.134.
- 2)～4) 中央教育審議会(諮問)、「初等中等教育における教育課程の基準等の在り方について」, 平成26年11月。
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/1353440.htm (閲覧日: 2017年1月5日)
- 5) 中央教育審議会(答申)、「新たな未来を築くための大学教育の質的転換に向けて—生涯学び続け、主体的に考える力を育成する大学へ—」, 平成24年8月, p.37.
- 6) 溝上慎一, 「アクティブラーニングと教授学習パラダイムの転換」, 東信堂, 2014年, p.7.
- 7) 厚生労働省告示64号, 「第十七改正日本薬局方」, 平成28年3月, p.61.

参考資料(授業で使ったワークシート)

2017年度 4年化学基礎 中和滴定曲線 No.3 月 日 ()
4年 () 組 () 番 () 班 名前 ()

○中和滴定曲線(教科書 p.144~)

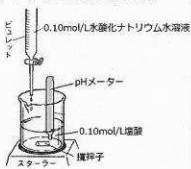
【実験】中和滴定曲線(2)

目的 酢酸水溶液(弱酸)に水酸化ナトリウム水溶液(強塩基)を加えたときの体積と pH との関係グラフ化してその特徴を捉え、中和点を求める。

準備 ビュレット、ビュレット台、ホールビペット、安全ビペット、pHメーター、トルビーカー(50mL)、ろうと、攪拌子、攪拌装置、0.10mol/L 酢酸 CH₃COOH 水溶液、0.10mol/L 水酸化ナトリウム NaOH 水溶液、蒸留水、フェノールフタレイン溶液

方法

- 0.10mol/L 酢酸水溶液をホールビペットで正確に 10.0mL はかりとり、50mL トルビーカーに入れたのち、フェノールフタレイン溶液を 1 滴加える。
- ビュレットに 0.10mol/L 水酸化ナトリウム水溶液を入れ、右図のような装置を用いて滴定を行う。
- 攪拌させながら水酸化ナトリウム水溶液を滴下し、pH を記録する。なお、滴下量は 14.0mL までとする。



注意

- 安全めがね、白衣の着用
- pHメーターの取り扱い
- 廃液回収

※酸と塩基の混合水溶液の pH は中和点の前後で急激に変化し、中和点付近で滴定曲線はほぼ垂直になる。この垂直部分に変色域が含まれる指示薬を加えて滴定を行うと、水溶液の色の変化から中和点を知ることができる。

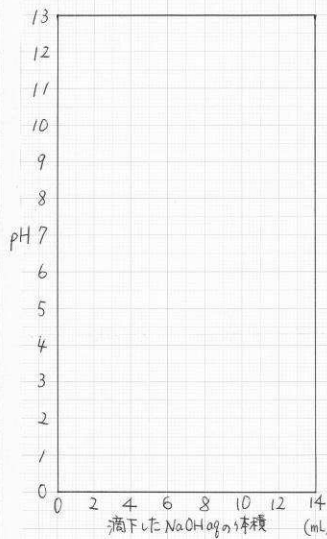
※滴下量 9.5~10.5mL の間は、0.1mL 刻みで滴下し、pH をできるだけ詳しく調べること。その他の範囲は 2~3mL 刻みでよい。

※水溶液の色が変化したときの pH の値を ○ で囲むこと。

結果

滴下量 (mL)	0.00								
pH									
滴下量 (mL)									
pH									
滴下量 (mL)									
pH									

結果をもとに、滴下した水酸化ナトリウム水溶液の体積と混合水溶液の pH との関係を表そう。



【課題5】酢酸 CH₃COOH 水溶液と水酸化ナトリウム NaOH 水溶液の中和について、化学反応式を示せ。

【課題6】滴定曲線中にフェノールフタレインおよびメチルオレンジの変色域を示せ。




【課題7】滴定曲線の形状から中和点を決め、中和点の水溶液の pH を求めよ。

結論

2017年度 4年化学基礎 中和滴定曲線 No.4 月 日 ()
4年 () 組 () 番 () 班 名前 ()

【課題8】

中和滴定の始点である 0.10mol/L 酢酸 CH₃COOH 水溶液(電離度 α << 1) 10.0mL 中に存在するイオンの粒子モデルを 図4 のように表したとき、中和点の水溶液中に存在するイオンおよび中和によって生じた水分子の粒子モデル(図5)はどのように表されるだろうか。

※Na⁺は , OH⁻は , 中和によって生じた水 H₂O 分子は  で示せ。

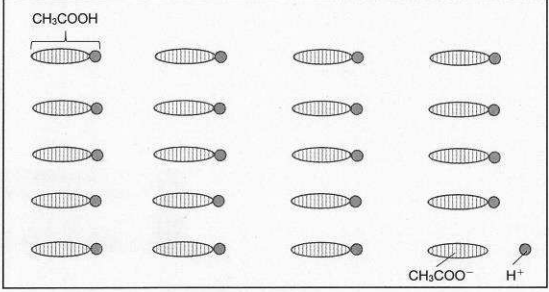


図4(教科書 p.129 図5による)

※中和の始点は 0.10mol/L 酢酸 CH₃COOH 水溶液である。酢酸は弱酸、電離度 α << 1 だから $CH_3COOH \rightleftharpoons H^+ + CH_3COO^-$ のように、酢酸分子の一部(20個中1個)が電離していると考えよう。pH は約3を示す。

※酢酸水溶液と水酸化ナトリウム水溶液が中和するときの化学反応式は、【課題5】より $CH_3COOH + NaOH \rightarrow CH_3COONa + H_2O$ で表される。酢酸ナトリウムは、水中で完全に電離していると考えよう。

また、化学反応式から、中和点は酢酸ナトリウム水溶液であり、その pH は実験結果から約 8~9 で塩基性であることがわかった。なお、塩基性を示すのは、既に学習したように、水溶液中に OH⁻ が存在することによる。

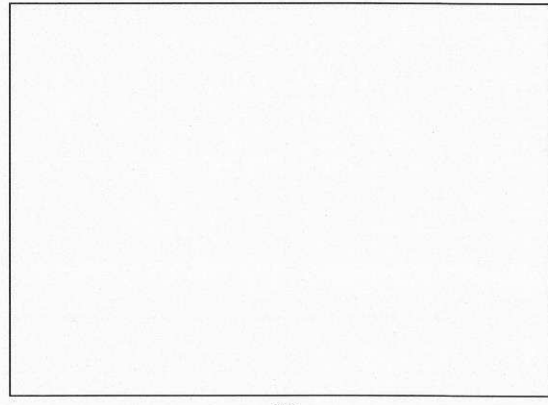


図5

図5のようなモデルを提示するに至るまでの思考の過程について、科学の用語やイオン反応式などを用いて詳しく記述せよ。