

生徒の解答用紙から学ぶ化学の授業づくり

— 実力テストの解答分析と科学的思考の育成 —

守 屋 昌 樹

岡山朝日研究紀要 第43号 (2022年3月) 抜刷

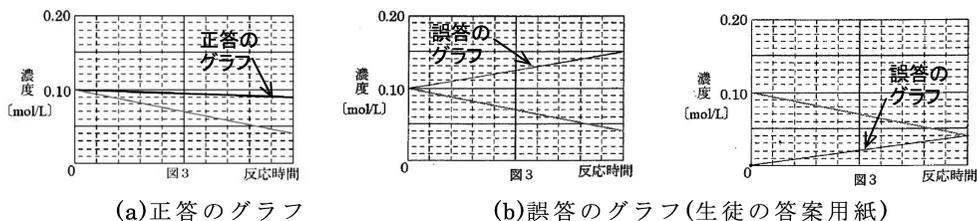
〒703-8278 岡山市中区古京町2-2-21

生徒の解答用紙から学ぶ化学の授業づくり
 - 実力テストの解答分析と科学的思考の育成 -

守屋 昌樹

1. はじめに

令和2年度第3学年・補習科第3回理系化学の実力テスト(9月4日実施)のグラフ問題において、出題者の予想を上回る誤答パターンが見られ、生徒の科学的思考について危機感を覚えたことが執筆の動機である。具体的には、図表1-1に示すように、正答は右下がりの減少のグラフ(a)であるが、増加のグラフ(b)を書いた答案が非常に多かった。問題文を読んで何が起きているか?現象を全くイメージできていない様子や、先入観のみで安直に答えようとしている姿勢が見て取れた。



図表 1-1 実力テストのグラフ問題の正答と誤答の例

第1の原因として解答時間が足りなかったことが考えられたが、生徒はどこで何につまずいているのかを検証する必要があると考えた。実力テストの約2ヶ月後に同じ問題を再度解答させ、実力テストの答案を詳細に比較分析して、生徒の解答の様子や知識・思考などの変容を追跡した。また、令和2・3年と連続して3年理系を担当したので、年度を超えて傾向が見られないか調査、分析した。

II 次の各問い(問5~問7)に答えよ。

酸化剤と還元剤を直接反応させず、別々に反応させると電気エネルギーを取り出すことができる。図2のように、容器I、IIに酸化剤または還元剤の水溶液を入れ、容器間を塩橋でつなぎ、導線でつないだ炭素電極を各水溶液に浸すと検流計に電流が流れる。塩橋とは、電解質溶液を寒天とともに管に詰めて固めたものであり、容器I、IIの水溶液を電氣的に接続するものである。

容器Iに硫酸酸性の0.10mol/L二クロム酸カリウム水溶液100mLを、容器IIに0.10mol/Lヨウ化カリウム水溶液100mLを入れたところ、電流は図2の(①)の向きに流れた。このとき容器Iの炭素電極は(②)となる。図3は反応時間と容器IIのヨウ化カリウム水溶液の濃度[mol/L]の関係を示している。

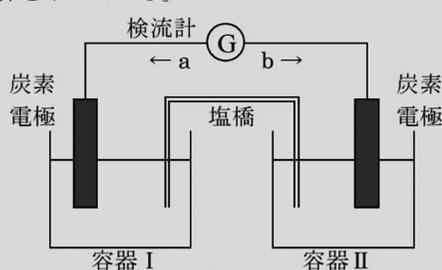


図2

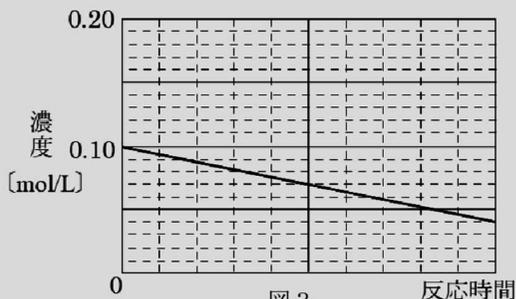


図3

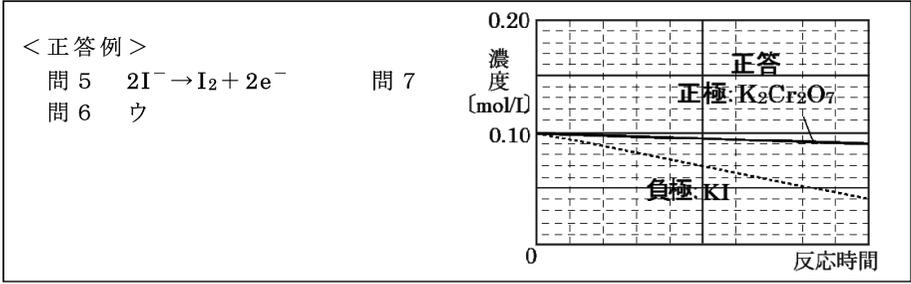
問5 容器IIの炭素電極で起こる変化を電子 e^- を含むイオン反応式で表せ。

問6 文章中の(①)、(②)に当てはまる語句の組合せとして適当なものを、次の(ア)~(エ)のうちから一つ選び記号で答えよ。

(ア)①a, ②正極 (イ)①a, ②負極 (ウ)①b, ②正極 (エ)①b, ②負極

問7 反応時間と容器Iの二クロム酸カリウム水溶液の濃度[mol/L]の関係を解答用紙のグラフ用紙に書け。ただし、反応による水溶液の体積変化は無視できるものとする。

図表 1-2 第3回実力テスト問題 第2問II



図表 1-3 第 3 回実力テスト問題 第 2 問 II の正答例

2. 問題の内容と出題の視点

(1) 問題の概要・内容について

この問題を考えるためには次の 3 つの (i)~(iii) の過程が必要である。

(i) 電子の流れを考える (電池の原理)

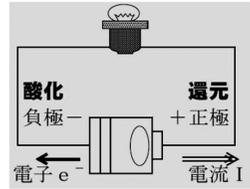
・・・<知識, 思考・判断>

問題文中に「電流は・・・流れた」とあるので、酸化還元反応=電子の授受が起こっている。図表 2-1 に示す酸化還元の定義 (上) と電池の原理 (下) を結びつけて思考し、電子の向きを判断する必要がある。

酸化還元の定義

	酸素 O	水素 H	電子 e ⁻	酸化数
酸化	+	-	-	+
還元	-	+	+	-

+ : 受け取る・増加, - : 失う・減少



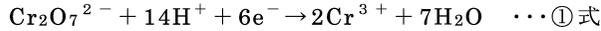
図表 2-1

酸化還元の定義 (上) と電池の原理 (下)

(ii) 各電極での反応を考える・・・<知識>

各電極で起こる変化は①式, ②式の通りである。

(正極) 還元反応→電子を受け取る反応

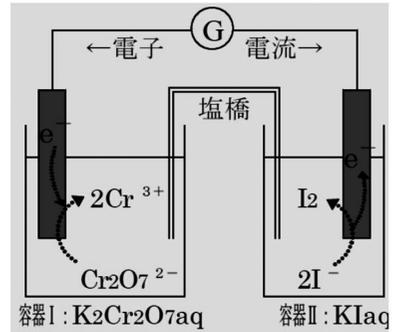


(負極) 酸化反応→電子を失う反応



①式, ②式のように酸化剤・還元剤が授受できる電子数の知識がないと問 7 のグラフは書けない。①式は難易度がやや高いが, ②式を問う問 5 は標準的でしっかり得点したい問題である。

図表 2-2 に示すように, 電子の授受を行うためには, 両極において何らかの物質 (活物質) が反応して減少しなければならない。このイメージが湧かなかった生徒が多く, 一方が「減少」しているから他方は「増加」していると安直に判断し図表 1-1 (b) のような増加のグラフを書いてしまったと考えられる。



図表 2-2 変化のイメージ

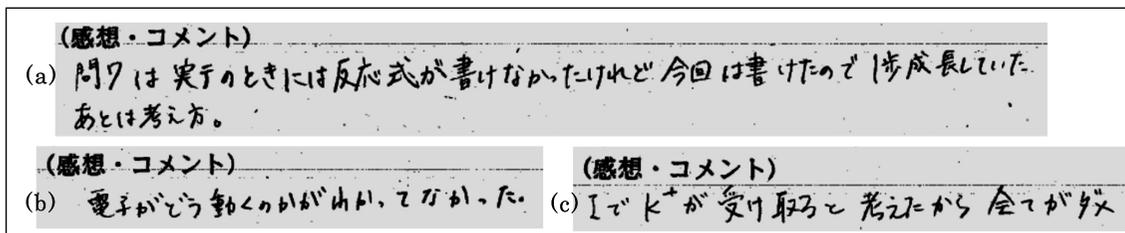
(iii) 電子の授受を釣り合わせる・・・<知識・思考>

両辺の電子の数を釣り合わせるため, 式①+式②×3 より,



となり, $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} : \text{I}^- = 1 : 6$ で反応することが分かる。よって, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ のグラフの傾きは KI に対して 1/6 となるので図表 1-3 に示す正答例のグラフが得られる。

生徒の感想・コメントには、図表3-7(a)のように手応えを感じている生徒がいる一方で、(b)、(c)のようにまだ基礎が固まっていないコメントも見られた。



図表3-7 事後確認テスト後の生徒の感想・コメント

令和2年度は、新型コロナウイルス感染予防のための臨時休校など、教師の指導面と生徒の学習面において授業時間の制限があった。また、令和2年度3年生の成績推移を振り返ると、現役生の成長が現れるタイミングが例年より1カ月遅いように思われた。夏休みが短縮され十分に基礎基本を定着させる時間が足りなかったためではないかと考えている。

(3) 令和3年度3年生の応答

令和3年度も3生理系を担当することとなったため、令和3年8月下旬の補習期間において図表3-3の事後確認テストを実施した。昨年度と同様に解答時間は6分間とし、答案用紙の正誤・パターン分析を行った。

図表3-8(i)に示すように、問7において正答のグラフを書いた3年生が17人(10.2%)、誤答である減少のグラフ(パターン6,7)を書いた生徒29人(17.5%)、全くの誤答である増加のグラフ(パターン4,5)を書いた生徒は15人(9.0%)であり、昨年度3年生よりも的確に現象を捉えている生徒が多いようであった。また、正答の生徒の割合は物理選択者の方が多く、男女比でみるとほぼ理系の男女比と同じであった(図表3-8(ii))。(令和3年度3生理系:193人:男子124人/女子69人,物理選択161人/生物選択32人)。

基礎的内容の問5,問6の正答率はそれぞれ68.1%,65.1%で昨年度より高く、問5においてカリウムイオンが還元される反応($K^+ + e^- \rightarrow K$)の誤答は無かった。問5,問6の基礎的な知識の正答率が高いほど、問7の正答率も向上することが考えられる。

(i) 事後確認テスト 令和3年度3年生の解答集計(N=166)

	問5	問6	問7								
			0(無答)	1(正答)	2(変化なし)	3(同じ)	4(増加①)	5(増加②)	6(減少①)	7(減少②)	8(その他)
正答(度数)	113	108									
(割合)	68.1%	65.1%									
誤答(度数)	49	58	98	17	6	1	13	2	29	0	0
(割合)	29.5%	34.9%	59.0%	10.2%	3.6%	0.6%	7.8%	1.2%	17.5%	0.0%	0.0%

増加のグラフ 減少のグラフ

(ii) 事後確認テスト問7の解答パターン度数

問7_パターン1(正答)度数				
全体	男子	女子	物理選択	生物選択
17	14	3	16	1

問7_パターン6,7(減少)度数				
全体	男子	女子	物理選択	生物選択
31	22	9	28	3

図表3-8 令和3年度3年生の事後確認テスト(令和3年度8月下旬)の解答状況(N=166)

生徒の感想・コメントには、酸化還元反応を苦手とし、電子の授受のイメージができなかったとするものや、定着は不十分であるとするものがあつた(図表3-9)。一方で、夏休みの復習で手応えを感じた生徒や、複数の分野を横断し活用する問題に対して面白さを感じる生徒など、肯定的にとらえているコメントもあつた。

- ・電子がどこから出るのがわからなかった。
- ・何が起きているか、よくわからなかった。解説を見たらなんとなく分かった。
- ・しっかりイメージして解くことが大切だと思った。
- ・あいまいなところがミスしてしまうことが分かった。
- ・電池の問題が苦手なのでより勉強が必要だということを改めて認識した。
- ・知識をつなげて考えることが大切だと思った。
- ・基礎を確認できるよい問題でした。
- ・酸化還元剤と電池の複合問題は初めて見たのでおもしろかった。

(感想・コメント)

香汗行電池の分野だったけど、夏休みの成果もあり、
最初の2問をミスして合点がよかった。その学習の必要性があると思えた。

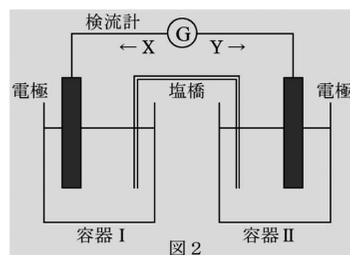
図表 3-9 令和3年度3年生の事後確認テストの感想・コメント

4. 実力テスト出題の視点と作問過程

(1) 作問の過程について

該当の問題について、最初の作問段階ではグラフ問題を想定しておらず、図表 4-1 の (③) のように数値計算の問題であった。ここで、科学的思考を問うために図表 4-1 の (③) の数値計算をグラフの読み取りとグラフによる表現の問題に変更した (①) と (②) は図表 1-2 の問 6 と同様に基本的な知識を問う問題である。

容器 I に硫酸酸性の 0.10mol/L ニクロム酸カリウム水溶液 100mL を、容器 II に 0.10mol/L ヨウ化カリウム水溶液 100mL を入れたところ、電流は図 2 の (①) の向きに流れ、容器 I の電極が (②) になる。ヨウ化カリウム水溶液の濃度が 0.090mol/L となったとき、ニクロム酸カリウム水溶液の濃度は (③) mol/L になっている。



問 6 (①) , (②) に当てはまる語句の組合せとして適当なものを、(ア)~(エ)のうちから一つ選び記号で答えよ。

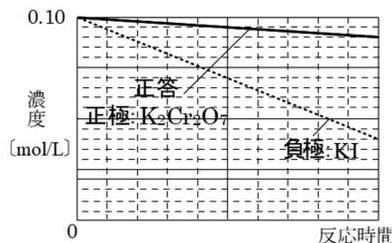
(ア) (①) X, (②) 正極 (イ) (①) X, (②) 負極 (ウ) (①) Y, (②) 正極 (エ) (①) Y, (②) 負極

問 7 実験 1 について、容器 I の電極で起こる変化を電子 e^- を含む式で表せ。

問 8 (③) に当てはまる数値を有効数字 2 桁で答えよ。ただし、溶液の体積変化は無視できるものとする。

図表 4-1 作成当初のテスト問題

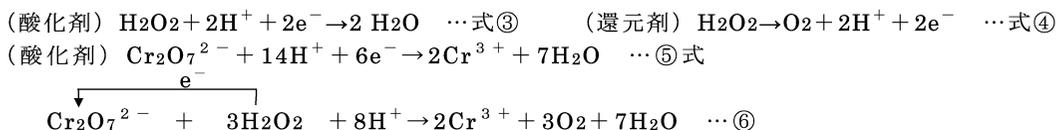
はじめは図表 4-2 のように減少のグラフだけに限定した問題であった。ここで、「もし上半分にもグラフ用紙を設定したら生徒はどんな反応をするだろうか?」と考え、増加・減少のどちらのグラフでも記入できるようにグラフ用紙を変更した。結果は出題者の予想を超えて増加のグラフを書いた生徒が多く、現象をイメージできていない様子を見ることができた。



図表 4-2 作成当初のグラフ問題

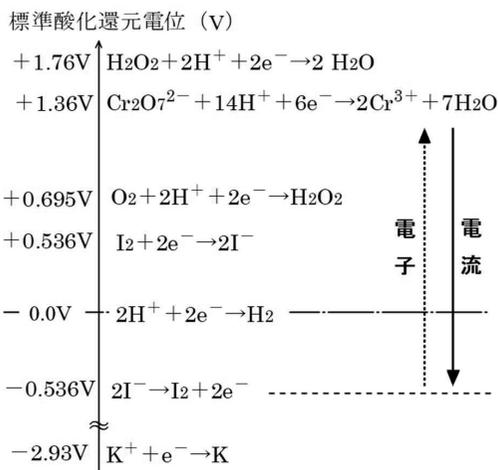
(2) 作問の題材について

作問の前々段階では、題材として二クロム酸カリウムと過酸化水素の組み合わせを考えていた。過酸化水素は式③に示すように代表的な酸化剤であるが、二クロム酸カリウムなどの強力な酸化剤に対しては式④のように還元剤として作用する。過酸化水素は式③と式④のどちらで反応するかを生徒に判断させたいと当初は考えていた。式⑤+式④×3より、式⑥のように反応し、過酸化水素から二クロム酸カリウムに電子が流れるので、過酸化水素側が負極、二クロム酸カリウム側が正極になる。



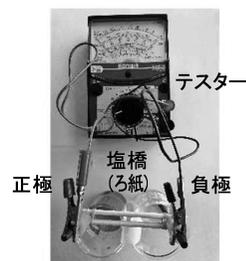
しかし、水素を基準とする標準電極電位（図表4-3）で考えると、過酸化水素の方が二クロム酸カリウムより高い電位にある。電位が高い方から低い方へ電流は流れ、電子の向きはこの逆になるので、標準酸化還元電位からすると、過酸化水素側が正極、二クロム酸カリウム側が負極になり、式⑥の反応は起こらないことになる。

半反応式	標準酸化還元電位
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.763V
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	1.36 V
$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0.695V
$\text{I}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{I}^-$	0.536V
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0.000V
$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2.925V



図表4-3 標準酸化還元電位と電流・電子の向き

そこで、図表4-4のように問題に示す装置を組み立て、電極は炭素棒、塩橋は硫酸ナトリウム水溶液をしみ込ませたろ紙を使用し、電流値を測定した（図表4-5）。また、電流値が微弱であったため電流計ではなくテスターを使用した。さらに、酸化剤側に硫酸を添加し電流値の変化の有無についても測定した。



図表4-4 実験装置

	正極	負極	電流値(mA)	その他
(i)	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{aq } 20\text{mL}$	3% $\text{H}_2\text{O}_2\text{aq } 20\text{mL}$	ごくわずかに+	負極の電極に気体が発生
	〃 +硫酸 3mL		ごくわずかに+	
(ii)	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{aq } 20\text{mL}$	KIaq 20mL	+0.085	負極付近がうすい黄褐色に変化
	〃 +硫酸 3mL		+0.155	
(iii)	3% $\text{H}_2\text{O}_2\text{aq } 20\text{mL}$	KIaq 20mL	+0.060	負極付近がうすい黄褐色に変化
	〃 +硫酸 3mL		+0.094	

電極：炭素棒 塩橋：0.10mol/L 硫酸ナトリウム水溶液/ろ紙
 水溶液：0.10mol/L 二クロム酸カリウム，約3%過酸化水素，0.10mol/L ヨウ化カリウム

図表4-5 酸化剤・還元剤による電池

図表 4-5 (i)に示すように、二クロム酸カリウム側（正極）から過酸化水素側（負極）へごく微量ながら電流が流れたこと、過酸化水素側の電極付近から酸素と考えられる気体が少量の発生したことから、装置全体として式⑥の反応がわずかながら進んでいることが考えられる。この実験結果から、図表 4-2 のような濃度変化のグラフは実際には起こりにくいと考え、実力テストの題材として不適当と判断した。

図表 4-5 (ii)(iii)の組み合わせでは、測定可能な電流値が測定され、図表 4-3 の標準酸化還元電位と矛盾しない結果が得られた。そこで、実力テストの題材として図表 4-5 (ii)の二クロム酸カリウムとヨウ化カリウムの組み合わせを選択した。

指導者が思い込みで問題作成すること、紙面上の知識だけで思考・判断することの危険性と、実際にやってみることの大切さを改めて感じた。また、実際に実験で検証してみると、新たな疑問や視点が得られ、教材研究の幅が広がるように思った。

正極側に硫酸を添加すると電流値が増加する傾向が見られたが、その理由などについては検証が必要である。

(3) 生徒の解答・振り返りから見る教師の気づき

生徒の解答や振り返りの記述を読むと、生徒がつまづきやすい部分が見え、教員が思わずハッとする疑問が出てくる。

例えば、水溶液中において二クロム酸カリウムに含まれる K^+ はなぜ $K^+ + e^- \rightarrow K$ のように反応しないのか。この疑問をどの時期に、どのように生徒に理解させればよいか、考えることが大切である。

また、図表 4-6 に示す生徒の感想に対して、⑤式 ($Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- \rightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$) の左辺には、確かに水素イオンと電子が含まれるが、なぜ水素イオンの還元 ($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$) よりも⑤式が優先するのか？生徒らしい素朴な疑問である。しかし、これを説明するためには「標準酸化還元電位」の概念が必要であり、生徒が抱く素朴な疑問には実は本質に近づくヒントが隠れていると言える。

(感想：コメント)

H^+ が e^- を受け取るより、 Cr が還元される方が優先なのだとわかった。

図表 4-6 酸化還元反応における生徒の振り返り

(4) 誤答分析を踏まえた授業の展開例

実力テストの分析結果と追跡から、基礎的知識を問う問題の正答率が高いと発展的なグラフ問題の正答率も高くなる傾向が見られた。当然であるが適確な現象のイメージと思考のためには知識の定着が必要であることが分かった。では、どうすれば授業を通して現象をイメージし、科学的思考力を生徒に身につけさせることができるだろうか。今回取り扱った実力テストの問題をベースとして、授業展開を考えてみたい。

図表 1-2 の実力テストは、①グラフから現象を読み取る→②量的関係を考える→③反対の電極で起こるグラフを書く、という展開であった。

現象をイメージするためには、実験結果をグラフにする学習活動が大切ではないかと考えた。そこで図表 4-7 のように、①与えられたデータをグラフにする→②反対の電極で起こる現象・量的関係を考える→③グラフを書く、という展開を考えた。基礎知識が定着していないと全く思考できないため、ヒントや思考の切り口を示し、モル濃度ではなく物質質量の変化を考えさせ取り組みやすくした。まず自分で考え、次にグループ内で互いに確認させると、思考や視点を広げることができ、面白い生徒の反応が期待できるのではないかと予想する。

さらに、問5のように別の物質を用いた場合を考えさせることで、現象のイメージと仕組みについて理解を深められるのではないかと考えている。

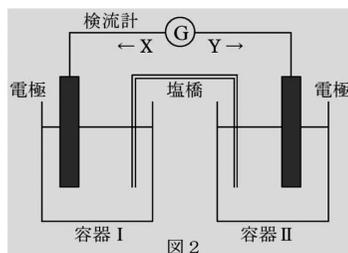
授業時間の確保が難しいが、普段の観察実験においても以上のような視点や要素を加え、ちょっとした工夫で普通の基本的な実験を発展的に展開できるのではないだろうか。

容器Ⅰに硫酸酸性の 0.10mol/L ニクロム酸カリウム水溶液 100mL を、容器Ⅱに 0.10mol/L ヨウ化カリウム水溶液 100mL を入れた。容器Ⅰ、Ⅱでは次の反応が起こるものとする。



容器Ⅱの電極のまわりがうすい黄褐色になり、電流は図2の(①)の向きに流れたため、容器Ⅰの電極が(②)になることが分かる。

容器Ⅱのヨウ化カリウムの物質量は次のように変化した。



時間 [分]	0	t	$2t$	$3t$	$4t$
容器Ⅱ:ヨウ化カリウム [mol]	1.0×10^{-2}	8.5×10^{-3}	7.0×10^{-3}	5.5×10^{-3}	4.0×10^{-3}
容器Ⅰ:ニクロム酸カリウム [mol]	1.0×10^{-2}				

問1 容器Ⅱの電極で起こる変化を電子 e^- を含む式で表せ。

問2 (①), (②) に当てはまる語句の組合せとして適当なものを, (ア)~(エ)のうちから一つ選び記号で答えよ。

(ア)(①) X, (②)正極 (イ)(①) X, (②)負極 (ウ)(①) Y, (②)正極 (エ)(①) Y, (②)負極

問3 容器Ⅰのニクロム酸カリウムの物質量について、表に当てはまる数値を求めよ。

(まずはここまで自分で考え、その後グループ内で確認せよ)

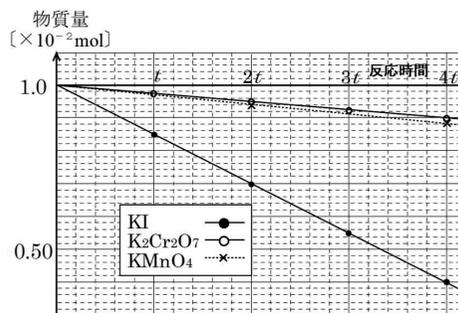
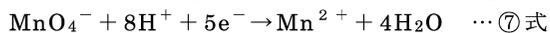
問4 ヨウ化カリウム、ニクロム酸カリウムの物質量と時間変化の関係を表すグラフをそれぞれ書け。

問5 容器Ⅰにニクロム酸カリウム水溶液の代わりに、0.10mol/L 過マンガン酸カリウム水溶液 100mLを用いると、グラフはどのようになるか？

図表 4-7 実カテストを活用した授業プリントの例

図表 4-8 に問 4, 問 5 のグラフの作成例を示す。必ずしも原点 O を示す必要はなく、目的や必要に応じて軸、目盛りや目盛り幅を設定すればよい。生徒には原点を必ず書かなければならないという先入観もあるので、生徒からは様々なグラフが出てくることが予想される。自作したグラフをグループ内で見せ合い評価すれば、グラフ作成上のコツや注意点を自らの力で見出すことができるかもしれない。

問 5 について、硫酸酸性で過マンガン酸カリウムは⑦式のように反応し、ヨウ化カリウム ($2\text{I}^- \rightarrow \text{I}_2 + 2\text{e}^-$) と反応すると、式⑧のように $\text{MnO}_4^- : \text{I}^- = 1 : 5$ で反応する。したがって KMnO_4 のグラフの傾きは KI に対して 1/5 となる。



図表 4-8 グラフの例

5. おわりに

生徒の誤答パターンを通して、生徒がいつ、どの分野で、どのようにつまずいているか想像することができ、学習指導の力点や指導計画などの改善につながる。

令和元年度から3年連続、3年団に所属し大学受験指導に携わった。令和2年度と令和3年度の3年生とはほとんど接点がなく、教師も生徒も互いに様子をみながらのスタートであったように思う。特に令和2年度は5月に臨時休校し、基礎がしっかり固められないまま授業を進め、さらに共通テスト導入への対応など、生徒にも教師にも苦しい経験であった。

本校紀要（2018年）において、一部の生徒には「理科は暗記科目」と考え中学校と同じように丸暗記で対応しようとする姿勢や、文字や数字を目だけで追う学習にとどまり現象のイメージや規則性の理解まで到達できていない様子が見られ、課題があると報告した。

また、授業づくりにおいて単なる知識の定着ではなく生徒が自分の言葉で科学用語や現象を説明しイメージを形成させること、教師が常に「なぜ？」を問うことが大切であると述べた。

令和4年度入学生から新しい教育課程が施行されるが、高等学校学習指導要領あるいは解説に示されている理科の見方・考え方と、「化学」の目標を確認し、化学の授業を通して身につけさせたい資質・能力について確認しておきたい（図表4-9）。

＜理科の見方・考え方（高等学校）＞

自然の事物・現象を、質的・量的な関係や時間的・空間的な関係などの科学的な視点で捉え、比較したり、関係付けたりするなどの科学的に探究する方法を用いて考えること

＜高等学校学習指導要領「化学」の目標＞

化学的な事物・現象に関わり、理科の見方・考え方を働かせ、見通しをもって観察、実験を行うことなどを通して、化学的な事物・現象を科学的に探究するために必要な資質・能力を次のとおり育成することを目指す。

- (1) 化学の基本的な概念や原理・法則の理解を深め、科学的に探究するために必要な観察、実験などに関する技能を身に付けるようにする。
- (2) 観察、実験などを行い、科学的に探究する力を養う。
- (3) 化学的な事物・現象に主体的に関わり、科学的に探究しようとする態度を養う。

図表4-9 理科の見方・考え方と「化学」の目標

入試問題を解くことが理科のゴールではない。また、サイエンスは丸暗記ではない。化学は目に見えない原子・分子が起こす化学的現象をイメージすること、そして自然の中から規則性や法則性を見出す学問であり、本質を見抜くことが大切であると考えている。岡山朝日29会主催講演会（平成30年10月31日）において、生物学者の福岡伸一先生は「想像すること」が大切であると述べており、私のモットーはあながち外れていないと考えている。自分で課題を見出し、目に見えない事物・現象をイメージし、実証・証明する方法を考えられる力は生徒が大学生・研究者・社会人になっても大切であろう。

理科において本物を見ること、実際に体験することは非常に大切である。基礎的な観察・実験も大切であるが、本当にわくわくする瞬間は思いもよらなかった意外な結果が出てくる時、予想しなかった現象に出会う時である。

生徒の知的好奇心を刺激できるような授業展開を目指して生徒とともに探究し続けたい。

【参考文献】

- 1) 『高等学校学習指導要領解説 理科編 理数編』文部科学省（平成30年）
- 2) 『岡山朝日研究紀要 第39号』「学びをつなぐ『化学基礎』の取り組み」（守屋昌樹，岡山県立岡山朝日高等学校（2018年3月））
- 3) 『鳥城第178号』岡山県立岡山朝日高等学校（平成30年度）
- 4) 『改訂5版 化学便覧 基礎編Ⅱ』日本化学会編（2004年 丸善）