

## 高校の科学部活動で活用される分析化学

山口 悟

### 1 緒 言

高校生の科学部活動において分析化学は最も扱いやすい研究手法の一つである。これまで高校化学で行われてきた分析化学として、金属イオンを検出する定性分析や、酸塩基滴定及び酸化還元滴定を代表とする滴下法のような簡単なものが多かった。近年では、SSH（スーパーサイエンスハイスクール）事業や色々な化学支援事業のおかげで、高校でも高度な分析機器を導入できる機会が多くなってきた。さらに、高大連携が進んだことにより高校にはない高度な分析機器を大学にお願いすることにより使用できるようになってきた。また、県の施設であれば、高校生が操作することはできなくとも、好意的にデータを取って頂いたりもする。そしてなにより、高校以外の社会的、学術的関係ができたおかげで、高校生が研究を通じて大学の先生や研究者と交流することができるため、高校卒業後の進路が明確になるという副次的な効果もある。そこで一例として、私が勤務した高校の科学部活動で行った分析化学を活用した研究について紹介する。

### 2 分光光度計を用いた河川中窒素の実験

茨城県立鉾田第二高等学校生物部では、落葉を利用した鉾田川の脱窒に関する研究<sup>1)</sup>を行った。

茨城県鉾田市を流れる鉾田川は窒素濃度が環境基準値 10 mg/L (10 ppm) を超過し、大きな環境問題となっていた。そこで、鉾田川の窒素濃度を減少させることを目的とし、研究を行った。研究が始まった当初は鉾田川の現状を知るために、簡易分析ができる市販のバックテスト<sup>®</sup>を用いて水質調査を行っていた。鉾田川全域の水質調査を実施した結果、下流付近では窒素濃度は高かったが、窒素濃度の低い支流付近には草木が茂り、川底にたくさんの落葉が堆積していることが分かった。そこで落葉は自然の浄化作用において重要な役割を果たしていると考え、落葉を利用した窒素濃度減少の検討を行った。

実験が進むにつれ、部員たちは色見本を参照して目測で定性的に評価するバックテストでは、より正確な評価ができないと感じるようになっていた。そこで、還元とナフチルエチレンジアミン比色法を参考にし、高校でもできる範囲で、紫外・可視分光光度計を利用した

バックテストの定量化を試みた。まず、測定条件の最適化を行った。硝酸イオン  $\text{NO}_3^-$  濃度が 1~10 ppm の水溶液を作製し鉾田川のモデル水とした。石英セルにモデル水とバックテストの試薬を加え、3分間よく振り混ぜた。分光光度計にセットし、539 nm の吸光度を測定した。その結果、バックテストで用いられる試薬の反応速度は室温と時間に大きく依存することがわかった。本検討より、 $\text{NO}_3^-$  濃度を定量評価する際には、バックテスト試薬を試料水に加え、10分後に 539 nm の吸光度を測定するという条件で詳細な定量分析ができることがわかった。図 1 では、バックテストを用いた色見本を目測した結果であり縦軸の値は階段状であったが、図 2 に示した分光光度計を用いた結果では、縦軸が定量化されたため、より正確な窒素減少の実験値が得られてい

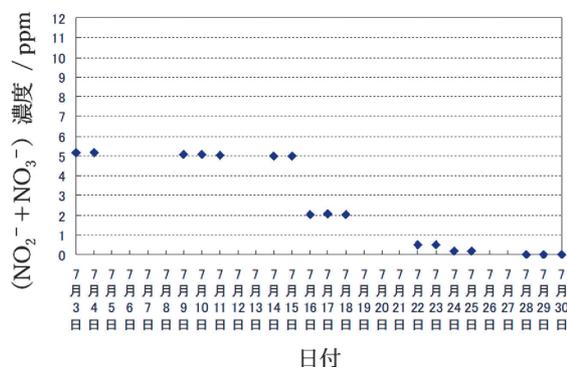


図 1 河川水と落葉（樺）をいれた水槽における亜硝酸イオン ( $\text{NO}_2^-$ ) と硝酸イオン ( $\text{NO}_3^-$ ) の濃度変化<sup>1)</sup>

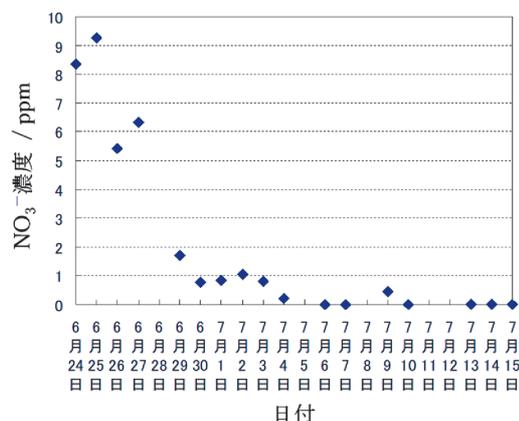


図 2 分光光度計とバックテストを用いたモデル水と落葉（樺）をいれた水槽における硝酸イオン ( $\text{NO}_3^-$ ) の濃度変化<sup>1)</sup>

る。部員たちは客観的評価の妥当性を理解するとともに、市販品を工夫することで本格的な研究にもできる経験が積めた。このような経験からか、得られた成果を発表したいという意識が生まれ、主体的に取り込む姿勢に変化していった。分光光度計という高度な機器を使ったことで、自分たちの研究に自信を持った結果であった。

### 3 分光光度計を用いたメイラード反応におけるアミノ酸置換基の影響の研究

茨城県立水戸第一高等学校化学部では、メイラード反応におけるアミノ酸置換基の影響<sup>2)</sup>、酸化亜鉛の光触媒作用による有機化合物の光分解反応<sup>3)</sup>、ドーブ型 ZnS : Mn<sup>2+</sup> ナノ蛍光体の蛍光メカニズムの解明の研究<sup>4)</sup>において分光光度計を利用した。ここでは、メイラード反応におけるアミノ酸置換基の影響を紹介する。

メイラード反応とは食品中のアミノ酸、ペプチドやタンパク質と還元糖が反応してメラノイジンと呼ばれる褐色物質と風味成分が生成する反応である。その反応の例として、焼肉の焦げ目やホットケーキの焼き色、味噌や醤油の褐色成分の生成などが挙げられ、料理の色や風味に大きく影響する。したがって最適な調理方法を確立し、一般的においしいといわれるような料理を簡単に作るためにもメイラード反応の反応速度定数を求めることは重要である。さらに、非常に複雑なメイラード反応を理解するために、アミノ酸の持つ置換基がメイラード反応に及ぼす影響を明らかにすることも重要である。

メイラード反応は求核付加反応であるシッフ塩基形成からはじまる複雑な複合反応である。文献調査から、シッフ塩基形成過程からアマドリ転移を起こすまでの反応が律速段階であることが示唆された。したがって、アミノ酸より糖の量を過剰にすることで、メイラード反応は擬一次反応として扱うことができる。本研究では、メイラード反応を擬一次反応と近似し、高校の実験室レベルでの、定量的な反応速度定数の算出方法を検討した。

実験は、グルコース濃度をアミノ酸濃度の10倍になるように調整した混合水溶液を用いた。そのグルコース/アミノ酸混合水溶液をスクリーキャップ付き石英セルに入れオイルバスで加熱した。分光光度計を用い、メラノイジンの吸収極大波長である470 nmにおける吸光度を測定した。グルコース+アミノ酸→メラノイジンをA→Bの擬一次反応と仮定し、式(1)からメイラード反応速度定数を算出した。

$$\ln \frac{[B_x]}{[B_0]} = k(t_x - t_0) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、[B] はメラノイジンの濃度(吸光度)、*t* は加熱時間 [min]、*k* は反応速度定数 [min<sup>-1</sup>] である。図3に470 nmにおけるメラノイジンの吸光度の加熱時間変化の測定結果を示す。これらの結果を擬一次反応と仮定したときのln([B<sub>x</sub>]/[B<sub>0</sub>]) と(*t<sub>x</sub>*-*t<sub>0</sub>*) の関係を

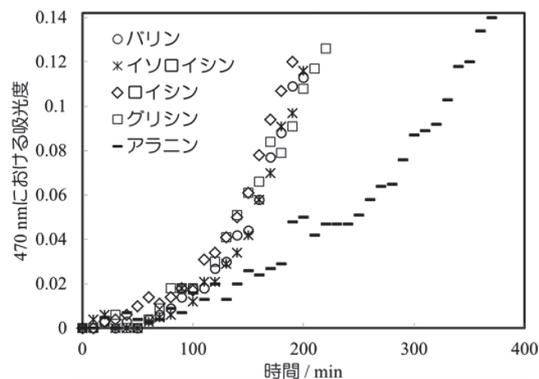


図3 470 nmにおけるメラノイジン吸光度の反応時間変化<sup>2)</sup>

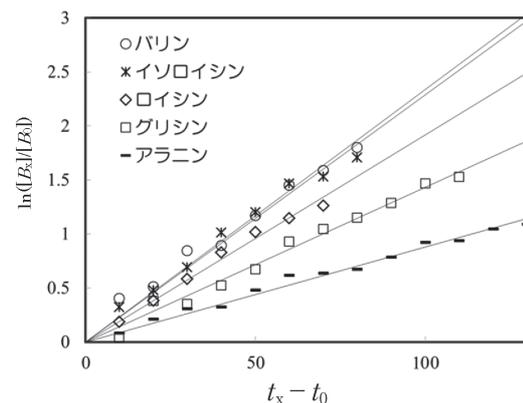


図4 グルコース/バリン、イソロイシン、ロイシン、グリシンおよびアラニン系における擬一次反応を仮定したときのln([B<sub>x</sub>]/[B<sub>0</sub>]) と(*t<sub>x</sub>*-*t<sub>0</sub>*) の関係<sup>2)</sup>

表1 バリン、イソロイシン、ロイシン、グリシン、アラニンの反応速度定数 [min<sup>-1</sup>] と決定係数 R<sup>2</sup> 値<sup>2)</sup>

アミノ酸	反応速度定数/min <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup> 値
バリン	0.0233	0.9642
イソロイシン	0.0229	0.9719
ロイシン	0.0192	0.9854
グリシン	0.0136	0.9074
アラニン	0.0088	0.9842

図4に示す。それぞれのグラフの傾きから得られた反応速度定数*k*と決定係数R<sup>2</sup>値一覧を表1に示す。高校生でも反応速度論を学習し、分光光度計を用いることで定量的な反応速度定数を求める実験ができた。さらに、部員たちは得られた反応速度定数の比較からアミノ酸置換基がメイラード反応に及ぼす影響を分子構造に絡めて考察するなど、高度な分析機器を応用した結果として、高校生が伸びる可能性を感じ取ることができた。

### 4 組成、状態分析機器を利用したカラミ煉瓦作製方法の考案

茨城県立日立第一高等学校化学部で行った日立製カラミ煉瓦の作製方法の考案を紹介する<sup>5)</sup>。

茨城県日立市は、日本を代表する世界的企業である日

立製作所（多くの日立市民は通称として日製“につせい”と呼んでいる）の創業の地として知られている。日製の前身は久原鋳業株が運営していた、日本を代表する銅鉱山の日立鉱山である。日立鉱山では、銅を製錬する際に副産物として図5に示すカラミが大量に排出されていた。カラミは鉄を多く含むガラス質の物質であるため密度が大きく、例えばセメントの材料としても輸送コストがかかり、再利用もまた困難である。そのため現在でも市内にはカラミが大量に放置されている。カラミの数少ない活用例に“カラミ煉瓦”がある。カラミ煉瓦には独特のガラス質の風合いがあり、見た目に荘厳さを有するため、犬島精錬所美術館をはじめとし、全国各所の歴史的な建造物に用いられている。日立市では久原鋳業株日立鉱山が鉱夫の遊興を目的とし建築した旧共楽館（日立武道館）や日鉱斯道館の門柱（図6）など、日立市を代表する歴史的建造物に使われていることが確認されている。現在ではカラミ煉瓦は生産されなくなったことから、その製法の詳細が失われてしまった。カラミ煉瓦は歴史的建造物にも使用されているため、歴史的建造物が老朽化した際には必ず必要になり、今後需要が高まる可能性を有する。そこで本研究では、新たな産業の創出および持続可能な産業を意識した研究開発を行っていくという観点から、日立製カラミ煉瓦の作製方法を考案することを目的とした。

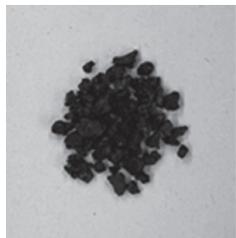


図5 銅の製錬時に炉内で分離されたカラミ<sup>5)</sup>



図6 日鉱斯道館の門柱に使用されているカラミ煉瓦<sup>5)</sup>

文献調査から、カラミ煉瓦の製造方法について、自溶炉から排出される液体スラグを鋳型に流し込む鋳造法で製造されていた可能性が高いことがわかった。構成成分と構造は走査型電子顕微鏡“SEM”，X線結晶構造解析“XRD”，蛍光X線分析“XRF”で解析した。表2にカラミ煉瓦とカラミの主成分分析結果を示す。また、日立市のカラミ煉瓦では、図7に示すように微量成分として硫黄（S）やヒ素（As）が含まれることが分かった。カラミからカラミ煉瓦製造を再現する実験を行った結果、粉末冶金法で製造することが可能であることが判明した。再現したカラミ煉瓦のXRF測定から、加熱することで微量成分のSとAsが蒸発することがわかった。各装置の分析結果から、カラミ煉瓦は鉄（Fe）を多く含むガラス質の物質、“鉄ガラス”のような性質であることが分かった。上記の条件をもとに、リスクのある元

表2 XRFによる日立市のカラミ煉瓦（黒色）、カラミ煉瓦（赤色）、カラミ、および足尾銅山のカラミの定量分析結果（元素比）<sup>5)</sup>

	Fe	Si	Ca	Al
カラミ煉瓦（黒色）	47.05	33.14	7.06	5.09
カラミ煉瓦（赤色）	62.01	16.77	5.67	3.84
カラミ	46.03	21.98	5.79	4.79
足尾銅山のカラミ	48.14	28.98	9.91	5.59

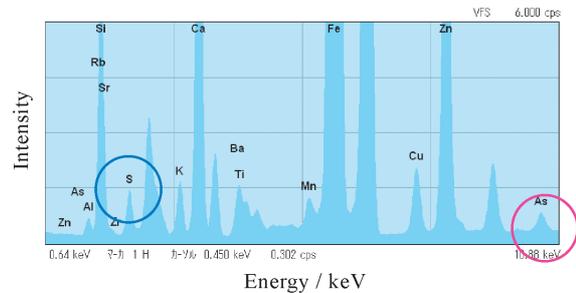


図7 日立市のカラミ煉瓦のXRFスペクトル<sup>5)</sup>

素を含まず、SDGsを意識したカラミ煉瓦を作製するため、リサイクル原料や日立市特有の原料を使用したカラミ煉瓦の試作実験を行った。その結果、リスクのある元素を含まない、安全で既存のものと同じ見た目も同じカラミ煉瓦を作製することができた。

カラミ煉瓦とカラミの解析において、XRF、XRD、そしてSEMなどと高校では扱うことのできない高価な分析機器が利用できた。茨城県の施設や、国の研究所、大学、民間の研究所や企業など、県立高校での研究であっても、前向きに高校生に貴重な機会を与えてくれた。部員たちはデータを理解するために、装置の測定原理から同定解析方法まで丹念に勉強を行った。本研究は、理学・工学的な内容だけでなく、産業の創出のような経済学・経営学的な側面も持った内容でもあり、部員の進路選択に大きく寄与した研究でもあった。改めて、高価な分析機器に高校生がふれる機会を与えてくれた方々に、心から感謝したい。

## 5 コンピュータシミュレーションを活用した滴定分析法用語の考察

茨城県立水戸第一高等学校化学部で実施した、多価酸⇌1価塩基滴定曲線と酸塩基滴定における学術用語についての考察<sup>6)</sup>を紹介する。

水酸化ナトリウムやアンモニア水といった1価塩基を塩酸や酢酸といった1価酸に滴下して得られる酸塩基滴定（中和滴定）曲線は、ほとんどの化学基礎の教科書や化学の資料に掲載されている。1価塩基をシュウ酸やリン酸といった多価酸に滴下した酸塩基滴定曲線も一部の資料には掲載がある。しかしながら、その逆である、多価酸を1価塩基に滴下した酸塩基滴定曲線はど

の教科書・資料にも掲載が無いことに注目した。そこで、多価酸を1価塩基に滴下した酸塩基滴定曲線を作成し、その形状を明らかにすることを目的とした。また、実験で作成した酸塩基滴定曲線の形を踏まえ、高校化学の酸塩基滴定の単元で使われる「第1中和点」、「第2中和点」といった用語についても議論した。ここで、酸塩基滴定の表現方法として、滴定溶液の酸を被滴定溶液の塩基に滴下する場合は“酸→塩基”とし、滴定溶液の塩基を被滴定溶液の酸に滴下する場合は“酸←塩基”とした。

実験方法はどの高校でも行われている酸塩基滴定実験を用いた。部員はこの実験を、水に溶けている二酸化炭素を脱気するところから丁寧にいった。多価酸として0.10 mol/Lのリン酸水溶液( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )、1価塩基として0.10 mol/Lの水酸化ナトリウム水溶液( $\text{NaOH}$ )を調製した。図8に多価酸←1価塩基、および図9に多価酸→1価塩基の酸塩基滴定の実験結果を示す。また、それらの図にはこの反応における文献値の酸解離定数 $K_{a_n}$ ( $n=1, 2, 3$ でそれぞれ一段階目、二段階目、三段階目の解離を示す)を変数として、コンピュータシミュレーションで求めた酸塩基滴定曲線の理論計算結果も示してある。実験値(○)と理論値である実線がほとんど一致する精度で実験を行うことができた。本実験から、多価酸→1価塩基滴定曲線は多価酸←1価塩基滴定曲線を縦軸で反転させたような形状をもっていることがわかった。また、多価酸←1価塩基滴定曲線においては、滴定溶液と被滴定溶液の濃度が等しいとき、滴定溶液の体積を $V_1$ 、被滴定溶液の体積を $V_2$ とするとpHの低いほうから $x$ 番目の当量点には式(2)の比例の関係式が成り立ち、多価酸→1価塩基滴定曲線においては、式(3)の反比例の関係が成り立つことがわかった。

$$V_1 = xV_2 \dots\dots\dots (2)$$

$$V_1 = V_2/x \dots\dots\dots (3)$$

図8(b)と図9(b)に、コンピュータシミュレーションから得られたイオンの分率の結果を示す。図8(b)では $\text{H}_3\text{PO}_4 \leftarrow \text{NaOH}$ 滴定曲線における $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、 $\text{H}_3\text{PO}_4$ の分率の変化を示している。「第1中和点」は滴下量が20 mLのときに現れる。そのときの反応式は、 $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ で $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ )が生成する。さらに滴下量を40 mLにすると、「第2中和点」が現れ、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{HPO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ で $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ( $\text{HPO}_4^{2-}$ )が生成する。また、酸塩基滴定曲線上では確認できないが60 mLには理論上は「第3中和点」が存在する。このようにイオンの分率から、それぞれの当量点(高校化学では中和点と言う)で生じるイオンを同定できた。さらに本研究から、現在の高校化学の教科書や資料で用いら

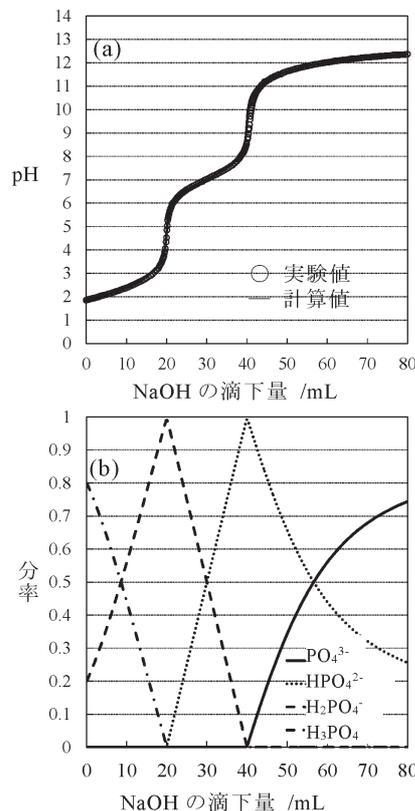


図8 多価酸←1価塩基の滴定結果<sup>6)</sup>

- (a)  $\text{H}_3\text{PO}_4 \leftarrow \text{NaOH}$  滴定曲線
- (b)  $\text{H}_3\text{PO}_4 \leftarrow \text{NaOH}$  滴定曲線における  $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、 $\text{H}_3\text{PO}_4$  の分率

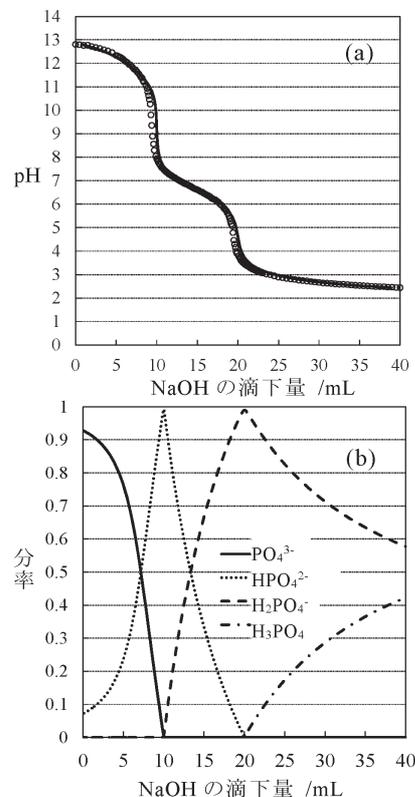


図9 多価酸→1価塩基の滴定結果<sup>6)</sup>

- (a)  $\text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{NaOH}$  滴定曲線
- (b)  $\text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{NaOH}$  滴定曲線における  $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、 $\text{H}_3\text{PO}_4$  の分率

れている「第1中和点」,「第2中和点」という用語は,それら当量点で起こる反応を明確にできないこともわかった。その理由は,図8の多価酸←1価塩基の滴定曲線においてそれぞれの当量点の名称を現れた順番から「第1中和点」,「第2中和点」,「第3中和点」とした場合,その用語を図9に示す多価酸→1価塩基滴定曲線に用いると,図9(b)のシミュレーションの結果から「第2中和点」の $\text{HPO}_4^{2-}$ が先に現れて,「第1中和点」の $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ が後に現れるという矛盾が生じてしまう。そもそも, $\text{H}_3\text{PO}_4 \leftarrow \text{NaOH}$  滴定曲線における第1,第2,第3中和点で起こっている反応すべてが中和反応なのかも疑問である。そこでより適当な用語として,“中和の当量点”や“塩の当量点”という用語を提案した<sup>6)</sup>。

本研究は,単純な滴定法による酸塩基滴定実験であるが,改めて高校の教員として多くを学べた。高校で学習する化学基礎の教科書にある第1中和点や第2中和点という名称は単なる思い込みであると認識できた。高校生自身が教科書や資料に疑問を持ち,その裏付けを証明できるような実験をしたことは高い評価を与えられる。

## 6 界面活性剤構造が洗浄力に与える影響

茨城県立水戸第一高等学校化学部で行った界面活性剤の炭化水素基の構造が洗浄力に与える影響<sup>7)</sup>と茨城県立日立第一高等学校化学部で行った動植物性油脂から合成された界面活性剤の洗浄力に関する研究<sup>8)</sup>を紹介する。

これら二つのテーマに共通しているのが界面活性剤である。まず,界面活性剤の分子が集まって球状になる最低濃度の臨界ミセル濃度“CMC”を求める際に,高校の実験室でも簡単に行える滴下法を利用した。ホールピペットを用い,各界面活性剤水溶液を量り取り,溶液がすべて滴下し終わるまでの水滴の数である滴下数“ $n$ ”を測定する。溶液の表面張力 $\gamma$ は式(4)で表される。

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{n_0 \rho}{n \rho_0} \dots\dots\dots (4)$$

ここで,添え字の0は蒸留水を示している。

本実験では,低濃度の界面活性剤溶液において $n$ を測定したため, $\rho/\rho_0=1$ と近似して, $\gamma$ を算出した。溶液の $\gamma$ と濃度“ $c$ ”の関係式は式(5)のGibbsの吸着等温式で表現される。

$$\frac{\Delta \gamma}{\Delta \ln c} = -2RT\Gamma \dots\dots\dots (5)$$

ここで, $R$ , $T$ ,および $\Gamma$ はそれぞれ,気体定数,溶液の絶対温度,および表面過剰量を示している。実験において, $T$ は一定であり,CMCに近づくにつれ $\Gamma$ も一定となる。CMC以上の濃度においては,界面活性剤分子は溶液の水面を全て覆うため, $\gamma$ は一定値となり, $\Delta \gamma/\Delta \ln c$ は0となる。したがって, $\gamma$ を $\ln c$ に対してプ

ロットし, $\gamma$ が飽和し一定となる $c$ をCMCと定義できる。図10にオレイン酸Na(炭素数18,二重結合1),リノール酸Na(炭素数18,二重結合2)及びリノレン酸Na(炭素数18,二重結合3)の結果を示す。破線の丸で囲んだ折点がそれぞれのCMCである。この水戸一高で行われた研究は,CMCと密接に関係のある洗浄力に与える分子構造の影響についての考察であり,ミセル形成とともに洗浄力が変化し,CMC以上では洗浄力は一定であることがわかった。

日立一高では,現在SDGsを意識した商品開発が重

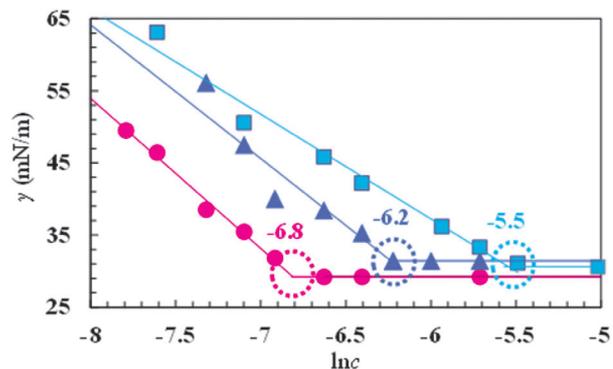


図10 オレイン酸Na(●),リノール酸Na(▲),およびリノレン酸Na(■)の表面張力測定の結果<sup>7)</sup>

要視されているという背景の下,化石燃料を使わない自然由来の洗剤を開発する研究を行った。洗浄力の高い自然由来の洗剤を提案するために,身近にある様々な種類の動植物性油脂から界面活性剤を合成し,洗浄力の指標となるCMCを評価した。図11に8種の動植物性油脂のCMCの実験値と界面活性剤を構成する脂肪酸Naの組成の比較を示す。これらのデータから,界面活性剤を合成するには油脂の平均分子量が大きく,油脂を構成する脂肪酸の種類が少ないことが重要であることがわかった。また,この研究では部員が率先して非常に入手し難い鯨油を求め,取扱業者を調査し,探し当てた。研究を説明したところ,ご好意で鯨油を無償で提供していただける貴重な経験が積めた。

CMCが小さいということは,低濃度でも洗浄性を示すと考えられるため,例えば1回の洗濯に使われる界

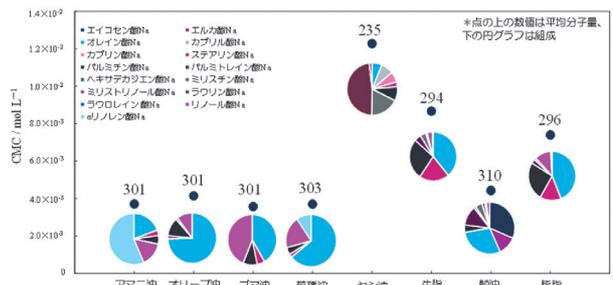


図11 CMCの実験値と界面活性剤を構成する脂肪酸Naの組成の比較<sup>8)</sup>

面活性剤の量が少なくて良いとも考えられる。水戸一高化学部で行った界面活性剤の炭化水素基の構造が洗浄力に与える影響<sup>7)</sup>では、洗浄力を CMC から予想するだけでなく実際に洗浄力を測定し、その違いを評価した。専門の先生を探し、その先生に洗浄力測定を依頼するのではなく、実際に自分の手でやりたいと伝えた結果、長期休業日を使って大学の先生の指導の下、洗浄力測定を部員自身でできることになった。実験方法は以下の通りである。汚染されていない布“原布”と湿式人工汚染布“汚染布”とその洗浄後の布の 600 nm における表面反射率“ $R$ ”を分光色差計で測定し、評価する。実際の洗濯機で洗う状態に近づけるために入れる白い布“白布”および汚染布を投入し、攪拌式洗浄力試験機を用い洗浄した。洗浄後の汚染布“洗浄布”を十分に乾燥した後、 $R$ を測定した。原布、汚染布、および洗浄布の  $R$  から、式 (6) に示した Kubelka-Munk 関数を用い  $K/S$  値を求め、式 (7) より洗浄率“ $D_{KS}$ ”を算出した。

$$K/S = \frac{(1-R)^2}{2R} \dots\dots\dots (6)$$

$$D_{KS} = \frac{(K/S)_s - (K/S)_w}{(K/S)_s - (K/S)_0} \times 100 \dots\dots\dots (7)$$

ここで、添え字の 0, s, および w はそれぞれ、原布、汚染布、および洗浄布を表している。表面張力測定から、CMC の値が最も小さいのはオレイン酸 Na であることがわかった。各界面活性剤の CMC を目安とし、洗浄力測定を行った結果を図 12 に示した。図から、いずれの界面活性剤も洗浄率  $D_{KS}$  は約 65% で最大となることがわかった。また、 $D_{KS}$  が最大となる界面活性剤の濃度  $c$  の値において、最も小さいのはオレイン酸 Na であった。したがって、二重結合の数が最も小さいオレイ

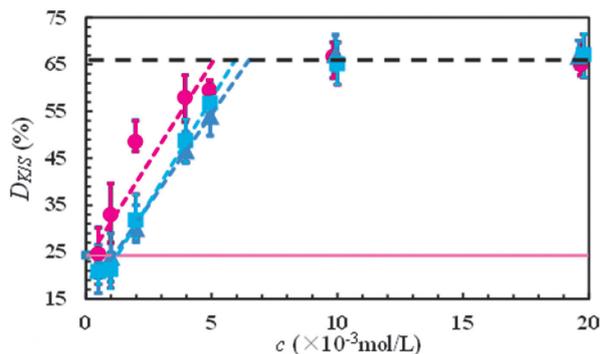


図 12 各界面活性剤における布の洗浄率<sup>7)</sup>  
 オレイン酸 Na の  $D_{KS}$  (●), リノール酸 Na の  $D_{KS}$  (▲), リノレン酸 Na の  $D_{KS}$  (■), および水の  $D_{KS}$  (実線)

ン酸 Na が低濃度において高い洗浄力を示すことがわかった。部員は高度な半経験的分子軌道法を用い、分子構造の最適化をシミュレーションし、本研究をまとめた。その結果、市販の洗剤に用いられている界面活性剤の多くが、直線形の飽和炭化水素基から構成されている理由も考察できた。高校でも難しい量子化学を利用し、身近なところの考察まで発展できたことは、部員が主体的に自立した研究ができた結果であると考えられる。

## 7 結 言

本報は、私が高校の科学部活動で行った分析化学を用いた研究の一部である。高校での研究において、分析化学は最も身近にあり、分析化学は研究の面白さを体験できる有用なツールである。この研究活動を通じて生徒たちは、高校の勉強でのイメージがインプットからアウトプットに変化したようであった。国や県の研究機関、民間企業、そして大学が、高校の理数教育の充実のために前向きに支援をしていただけたことに心から感謝したい。現在の高等学校において、教科指導だけでなく、課題研究が重要な位置を占めてきていると感じている。したがって、私たち教員も教科指導だけでなく、研究指導ができるようになるための研鑽が必要であると考え、そして私たち教員がアップデートしながら生徒たちと議論し、共に成長していければ幸いである。

## 文 献

- 1) 塚本和貴, 山口 悟: *student chemistry*, **1**, 14 (2019).
- 2) 富田季里呼, 松田樹生也, 山口 悟: *student chemistry*, **1**, 39 (2019).
- 3) 東ヶ崎 駿, 山口 悟: *student chemistry*, **1**, 50 (2019).
- 4) 鈴木佳太, 北村 峻, 郡 涼太, 山口 悟: *student chemistry*, **2**, 5 (2020).
- 5) 今野馨琳, 木村菜々美, 山口 悟: *student chemistry*, **2**, 22 (2022).
- 6) 西野光太郎, 山口 悟: *student chemistry*, **1**, 1 (2019).
- 7) 小泉勇樹, 山口 悟: *student chemistry*, **1**, 27 (2019).
- 8) 齊藤美樹, 立山愛莉, 川本琴美, 山口 悟: *student chemistry*, **2**, 12 (2021).



山口 悟 (Satoru YAMAGUCHI)  
 茨城県日立第一高等学校 (〒317-0063 茨城県日立市若葉町 3-15-1). 博士 (学術).  
 E-mail: yamaguti-satoru@mail.ibk.ed.jp