

様々な色に着色した温度応答性ゲルの作成方法の検討および アドバンストサイエンスコースの授業における実践

丹羽 啓太* 山本 愛子** 水谷 真夢*** 長 昌史****

* 愛知県立守山高等学校 (愛知教育大学 2019 年度卒業生)

** 愛知県立豊野高等学校 (愛知教育大学 2019 年度卒業生)

*** 岡崎市立生平小学校 (愛知教育大学 2018 年度卒業生)

**** 愛知教育大学理科教育講座 (化学)

Preparation of Variously Colored Thermoresponsive Gels and Practice in a Class on Advanced Science Course

Keita NIWA*, Aiko YAMAMOTO**, Mayu MIZUTANI*** and Masashi OSA****

*Moriyama High School, Nagoya 463-8503, Japan (FY 2019 Graduate, Aichi University of Education)

**Yutakano High School, Toyota 470-1202, Japan (FY 2019 Graduate, Aichi University of Education)

***Oidaira Elementary School, Okazaki 444-3334, Japan (FY 2018 Graduate, Aichi University of Education)

****Department of Science Education, Aichi University of Education, Kariya 448-8542, Japan

Keywords : 温度応答性ゲル, ハイドロゲル, 体積相転移, ポリ-N-イソプロピルアクリルアミド, 色素

I 研究の背景と目的

高校化学における合成高分子化合物の単元では、イオン交換樹脂、吸水性高分子、感光性高分子、導電性高分子などの特殊な機能をもった機能性高分子化合物が扱われている。しかし、その教育のために利用できる実験教材は現在のところほとんど無く、適切な実験教材の開発が望まれる。温度変化に応答して体積が変化する機能をもつ温度応答性ゲル^{1) 2) 3)}は、高校で課題研究のテーマとして取り上げられることもあり⁴⁾、機能性高分子化合物の教育に利用できる実験教材の候補の一つと考えられる。筆者らは、温度応答性ゲルの実験教材としての有効性について予備的検討を行うために、筆者らが開催した中学・高校教員を対象とした教員免許状更新講習会の参加者に温度応答性ゲルを合成していただいた。その結果、参加者からは「温度上昇によってゲルがぎゅっと縮むのはとても面白かった。」「機能性高分子を実際に目にするのは初めてだったので、とても興味深かった。」「ぜひ授業で取り入れてみたい。」「実験自体は混ぜ合わせるなどの簡単な作業が多いので、授業内で取り入れることも可能だと思った。」といった温度応答性ゲルの実験教材としての可能性を窺わせる感想を複数得た。

上述の講習会で用いた温度応答性ゲルは、N-イソプロピルアクリルアミドというモノマーを架橋剤と共に水中、室温において重合することによって合成されたポリ-N-イソプロピルアクリルアミド (PNIPA) ゲルである。この重合反応においては、PNIPA分子鎖が架橋され、内部に水分子を包含した網目構造 (ゲル) が形成される (図1)。そのように合成されるPNIPAゲルは、低温では無色透明の膨潤したゲルであるが、温度を上げていくと33℃付近でPNIPA分子鎖が脱水和し凝集するので⁵⁾、収縮して白濁したゲルになる⁶⁾。収縮したゲルの温度を逆に下げていくと、ゲルは再び膨潤し膨張する。したがって、温度変化によりPNIPAゲルの収縮と膨張を可逆的に行わせることができ、高分子化合物が持つ温度応答機能を観察することができる (図2)。

そのような温度変化によるPNIPAゲルの可逆的な体積変化は、生成したゲルを水中に沈めたうえで、水温を変化させて観測するのであるが、低温時のPNIPAゲルは無色透明であるため、水中に沈めたPNIPAゲルは目視では見にくい。そのため、低温時の視認性を良くするためにはPNIPAゲルを着色できれば望ましい。また、様々な色に着色したPNIPAゲルを作成できれば、より華やかで印象的な化学教材に

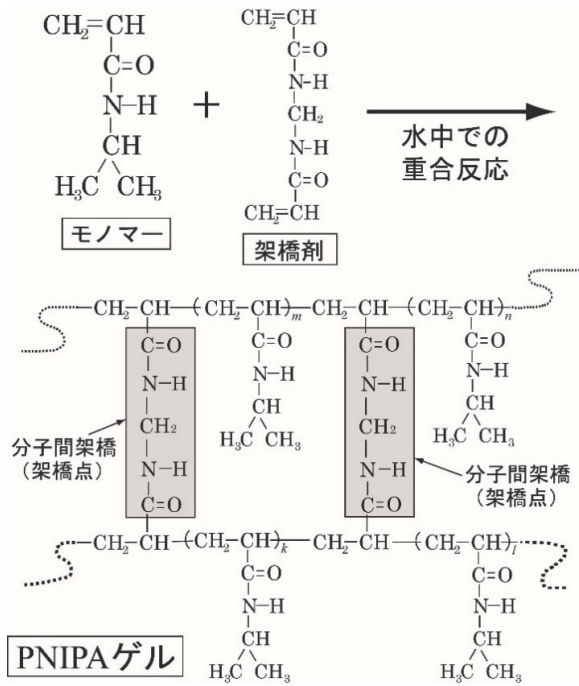


図 1. PNIPAA ゲルの合成

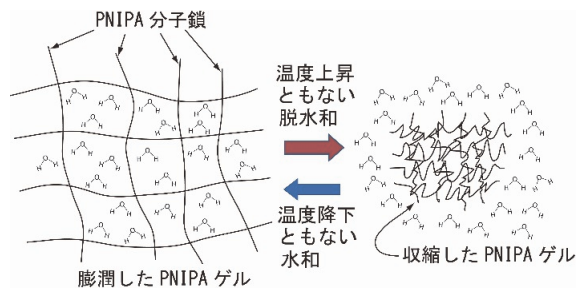
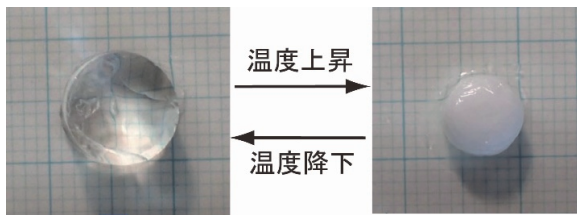


図 2. PNIPAA ゲルの温度変化による収縮と膨張
[ゲルの写真(上)と模式図(下)]

なることが期待できる。本研究では、様々な色に着色したPNIPAAゲルをできるだけ簡単に作成する方法について検討した結果を報告する。また、大学の授業でそのようなゲルの作成を実践した際に学生から得られた感想を紹介する。

II 実験

1 用いた試薬

N-イソプロピルアクリルアミド (NIPAA) モノマーは、KJケミカルズ株式会社製NIPAM[®]をベンゼン/ヘキサン (15mL / 350mL) 混合溶媒を用いて再結晶

を行い、精製したものを用いた。ゲルの架橋剤 *N,N'*-メチレンビスアクリルアミド (BIS)、重合開始剤である過硫酸アンモニウム (APS)、および促進剤

N,N,N',N'-テトラメチルエチレンジアミン (TMEDA) は市販試薬をそのまま用いた。ゲルの着色のために用いた色素は、メチレンブルー、オレンジ II、メチルオレンジ、アシッドレッド 1、アシッドレッド 26、アシッドレッド 27、アシッドグリーン 1、アシッドグリーン 3、アシッドブルー 1、エリオクロムブラック T、カルミン酸、インジゴカルミンの 12 種類 (図 3) であり、いずれも市販試薬をそのまま用いた。

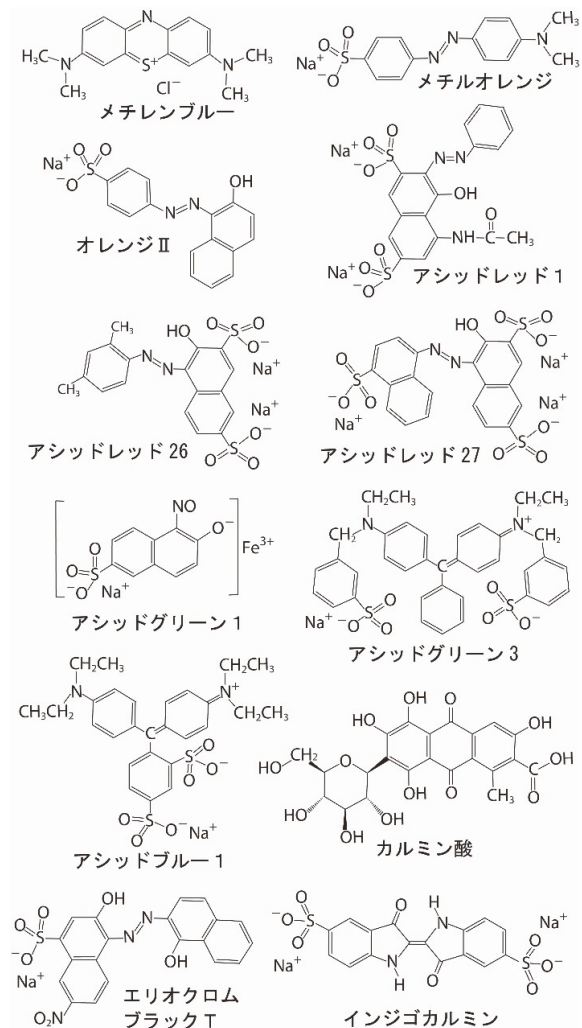


図 3. PNIPAA ゲルの着色に用いた色素の化学構造

2 着色したPNIPAAゲルの合成

PNIPAAゲルは、NIPAAモノマーの水溶液 (モル濃度 1750 mM, 体積 1 mL)、BISの水溶液 (モル濃度 16.3 mM, 体積 1 mL)、APSの水溶液 (モル濃度 30 mM, 体積 0.25 mL)、TMEDAの水溶液 (モル濃度 90 mM, 体積 0.25 mL) を混合し、重合させて合成した。混合後の反応溶液中における各試薬のモル濃度は、[NIPAA] = 700 mM, [BIS] = 6.5 mM, [APS] = 3.0 mM,

[TMEDA] = 9.0 mMである。4種類の試薬の水溶液を、まず、内径8 mmの試験管内で混合し、混合した直後に反応溶液の一部を内径2 mmのキャピラリー管に移し、両方の管を20 °Cの水浴中において1時間反応させることで、2種類の太さの円柱形ゲルを作成した。

PNIPAゲルを着色するために、次の2つの方法を用いた。1つ目は、上述のように作成した（色素を含まない）PNIPAゲルを、室温で、色素の水溶液中に1週間漬けて染色する方法である（図4）。もう1つの方法では、混合前の4種類の水溶液（モノマー、BIS、APS、TMEDAの各水溶液）中に色素を添加しておき、それらの水溶液を混合して重合させ、着色したPNIPAゲルを得る（図5）。後者の方法の色素の添加量は、0.2 mMから2.0 mMの範囲で変化させた。

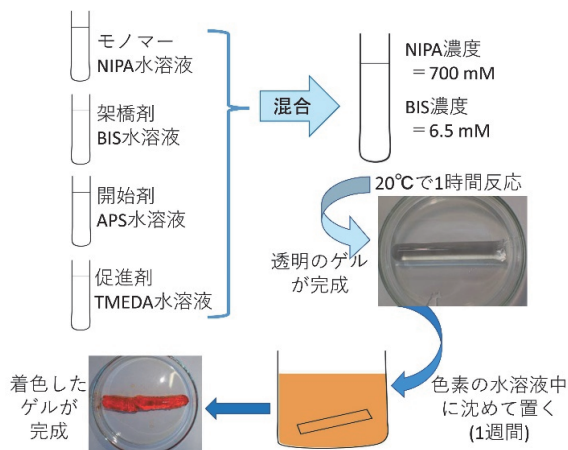


図4. PNIPAゲルの着色方法①
～ 透明のゲルを合成し、それを染色する

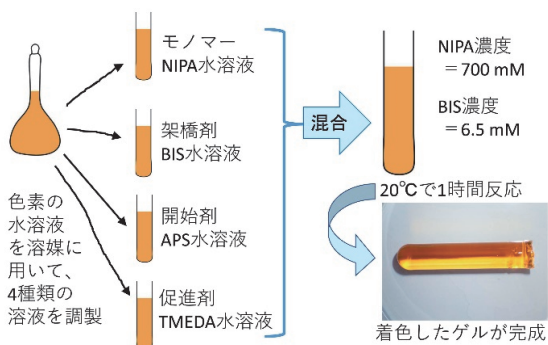


図5. PNIPAゲルの着色方法②
～ ゲル化反応前の水溶液に色素を加えておく

3 PNIPAゲルの体積の温度変化の測定

作成した円柱状のPNIPAゲルを試験管またはキャピラリー管から取り出し、5日間以上蒸留水中に沈めて洗浄した。その後、内径2 mmのキャピラリー管内で重合した円柱状ゲルから長さ2 mm程度の部分を切り取り、それを温度調節が可能な恒温水槽中に沈め、読み取り顕微鏡によってそのゲルの断面の直径 d を

測った。ゲルが沈められている恒温水槽の温度を白金抵抗温度計で測定し、それをゲルの温度に等しいものとした。図6に測定装置の概要を示す。

d の測定は、20 °C～42 °Cの温度範囲で行った。恒温水槽の温度を20 °Cから段階的に上げていき、それぞれの温度において d を測定した。測定は、水温を測定温度に設定してから30分経過後と45分経過後に行い、両方の d の値がほぼ一致していれば次の温度での測定に進んだ。

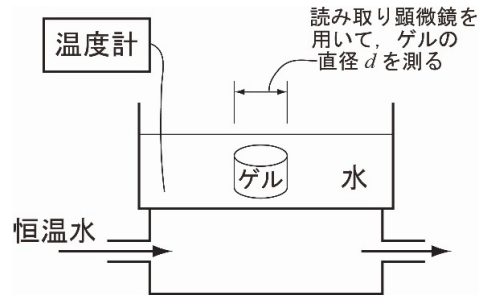


図6. PNIPAゲルの直径の測定装置の概略図

III 結果と考察

1 PNIPAゲルを着色する方法の検討

前章で述べた1つ目の着色方法（合成した透明のゲルを色素の水溶液中に漬けて染色する方法）と2つ目の着色方法（重合前の水溶液中にあらかじめ色素を添加しておく方法）では、どちらが着色したPNIPAゲルを作成するのに適しているのか検討した。1つ目の方法で、色素としてオレンジIIを用い、重合した透明のPNIPAゲルを2 mMのオレンジII水溶液中に1週間漬けた。その後、ゲルを色素水溶液から取り出したとき、ゲルはオレンジ色に染まっていたが、そのゲルを純水中に沈めておくと、次第に脱色していき、1週間後には透明のPNIPAゲルに戻ってしまった。一方、2つ目の方法では、同様に色素としてオレンジIIを用い、混合前の4種類の水溶液中に、濃度が0.4 mMとなるようにオレンジIIを添加しておき、それらを混合して重合させ、オレンジ色のゲルを得た。このように得た着色したPNIPAゲルを純水中に沈めておくと、最初はゲルから色素が流れ出し、ゲルのオレンジ色が若干薄まるが、次第に色素の流出は収まり、ゲルは透明になってしまうことはなく、その後1年以上の間、水中に沈めておいてもオレンジ色の着色を保った。1つ目の方法では、色素分子がゲルの表面付近のみのPNIPA分子鎖に吸着するのに対して、2つ目の方法では、ゲル内部のPNIPA分子鎖にも色素分子が吸着するためゲルから色素分子の流出が起こりにくくなり、後者の方法で着色したゲルの方が脱色しにくい結果になったと考えられる。これらの結果から、着色して色

が保たれるPNIPAゲルを作成するには、先に重合した透明のゲルを後から染色するのではなく、重合前の反応溶液中に色素を添加しておき、その後、重合させる必要があることがわかった。

2 様々な色に着色したPNIPAゲルの作成

前節で述べた2つ目の着色方法（重合前の水溶液中に色素を添加しておく方法）を用いて、12種類の異なる色素を使って着色したPNIPAゲルの作成を試行した。表1に、用いた色素とその添加量、重合後のゲル化および着色の状況をまとめる。アシッドレッド1, アシッドレッド26, アシッドブルー1の3種類の色素については単一の添加量においてのみゲル作成を行い、それ以外の9種類の色素については添加量を2通り以上に変えてゲル作成を行った。この表の3列目に示されているゲル化の状況が、○の場合はその条件でゲル化してしっかり固まったゲルが得られたことを表し、×の場合はゲル化せず固まらなかったことを表す。また、△の場合はゲル化したものの、ゲルが柔らかすぎてゲルを反応容器から取り出せなかったことを表

す。表の4列目には、反応容器から取り出した直後のゲルの着色状況が記されており、その右側に付されている記号（†または‡）は、作成したゲルを洗浄するために純水中に沈めておいた後に着色状況がどのように変化したかを表すためのものである。†の場合は、ゲル化の直後はゲルが着色していたが純水中に沈めておくと脱色して透明のゲルになってしまったことを表し、‡の場合は、純水中に沈めておいてもゲルの着色が保たれたことを表している。

使用した色素の中で、メチレンブルーを添加した場合は、今回の色素の添加量の下限値である0.2 mMと上限値である2.0 mMのいずれにおいてもゲル化して固まったが、得られたゲルを純水中に沈めておくと色がほぼ完全に抜けてしまった。一方、オレンジIIを添加した場合は、色素の添加量が少ない場合にはゲル化するが、添加量が多くなるとゲル化しなかった。これと同じ傾向は、表1にあるオレンジII以外の色素を添加した場合にも見られる。このことから、一定量以上の色素を添加すると重合反応が妨げられる場合があり、ゲル化させるためには色素の添加量に注意を払う

表1 PNIPA ゲルの着色に用いた色素とその添加量、重合後のゲル化と着色の状況

色素	添加量	ゲル化の状況	着色の状況
メチレンブルー	0.2 mM	○	青色に着色 †
	2.0 mM	○	青色に着色 †
オレンジII	0.4 mM	○	オレンジ色に着色 ‡
	1.0 mM	○	オレンジ色に着色 ‡
	1.5 mM	△	オレンジ色に着色
	2.0 mM	×	—
メチルオレンジ	0.4 mM	○	オレンジ色に着色 ‡
	1.0 mM	△	オレンジ色に着色
アシッドレッド1	1.0 mM	○	赤色に着色 ‡
アシッドレッド26	1.0 mM	○	赤色に着色 ‡
アシッドレッド27	0.4 mM	○	赤色に着色 ‡
	1.0 mM	×	—
アシッドグリーン1	0.1 mM	○	薄い緑色に着色 †
	0.4 mM	×	—
アシッドグリーン3	0.4 mM	○	薄い水色に着色 †
	1.0 mM	×	—
アシッドブルー1	0.4 mM	○	薄い青色に着色 †
エリオクロムブラックT	0.4 mM	○	紫色に着色 ‡
	1.0 mM	×	—
カルミン酸	0.2 mM	○	ほとんど着色しない
	1.0 mM	×	—
インジゴカルミン	0.2 mM	○	ほとんど着色しない
	1.0 mM	×	—

ゲル化の状況 ○：ゲル化して固まった。 ×：ゲル化せず固まらなかった。

△：ゲル化して固まったが、柔らかすぎて容器から取り出せなかった。

着色の状況 †：ゲル化した直後は着色していたが、その後、水中に沈めておいたら完全に脱色した。

‡：ゲル化した後、水中に沈めておいても脱色しなかった。

必要のあることがわかる。オレンジII, メチルオレンジ, アシッドレッド1, 26, 27, およびエリオクロムブラックTを色素に用いた場合は, 色素の添加量が多くなればゲル化し, 生成したゲルを純水中に沈めておいても着色が保たれることが表よりわかる。それに対して, アシッドグリーン1と3, アシッドブルー1, カルミン酸, およびインジゴカルミンを用いた場合, ゲル化はするが, 生成したゲルはほとんど着色しないか, もしくは薄く着色するもののゲルを純水中に沈めておくと完全に脱色してしまう。

脱色せずに色が保たれるPNIPAゲルが得られた場合に使用した色素(オレンジII, メチルオレンジ, アシッドレッド1, 26, 27, およびエリオクロムブラックT)は, 図3の化学構造式からわかるように, いずれも $-SO_3^-$ 基を持つアゾ染料である。それ以外の種類の色素を用いた場合は, 着色が保たれるPNIPAゲルが得られなかった。これらのことから, $-SO_3^-$ 基を持つアゾ染料はPNIPA分子鎖に強く吸着しゲルの着色が保たれるが, それ以外の色素はPNIPA分子鎖への吸着力が弱く脱色しやすいと考えられる。以上の結果より, 着色し色が保たれるPNIPAゲルを得るためには, $-SO_3^-$ 基を持つアゾ染料の使用が適していることが明らかになった。

3 着色したPNIPAゲルの温度応答挙動

前章で作成した色の着いたPNIPAゲルが, 色素を含まないPNIPAゲルの場合と同様に, 温度変化にตอบสนองして体積相転移を示すかどうか確認するために, 内径2 mmのキャピラリー管内で重合し長さ約2 mmに切り取った円柱状の着色ゲルを温度調節が可能な水浴中に沈め, その断面の直径 d を測定した。ゲルを重合するのに用いたキャピラリー管の内径を d_0 (= 2 mm)とし, d と d_0 より次式を用いて, ゲルの膨潤度 V/V_0 (V はゲルの体積, V_0 はキャピラリー管内での合成時のゲルの体積)を求めた⁶⁾。

$$V/V_0 = (d/d_0)^3$$

図7は, オレンジII(添加量1.0 mM), メチルオレンジ(添加量0.4 mM), およびエリオクロムブラックT(添加量0.4 mM)により着色したPNIPAゲルの V/V_0 と温度の関係を示すグラフである。いずれの色素で着色したゲルも, 温度上昇にともない, 膨潤度は減少し, 33~34℃付近においてゲルの体積が急激に減少する体積相転移を起こしていることがわかる。前章で作成した着色ゲルのすべてが, これらと同様の温度応答挙動を示した。色素を含まないPNIPAゲルの場合も同様に, 33~34℃付近で体積相転移が見られる。このことから, 今回の実験で, PNIPAゲル中に取り込まれた色素分子は, PNIPAゲルの温度応答挙

動にほとんど影響を与えないことがわかる。図8に, メチルオレンジ(添加量0.4 mM), アシッドレッド1(添加量1.0 mM), エリオクロムブラックT(添加量0.4 mM)によって着色したPNIPAゲルの, 低温時の膨潤状態と高温時の収縮状態の写真(読み取り顕微鏡で見たゲルの写真)を示す。これらの写真からも, 温度上昇にともない, 着色したゲルが収縮していることが明らかである。

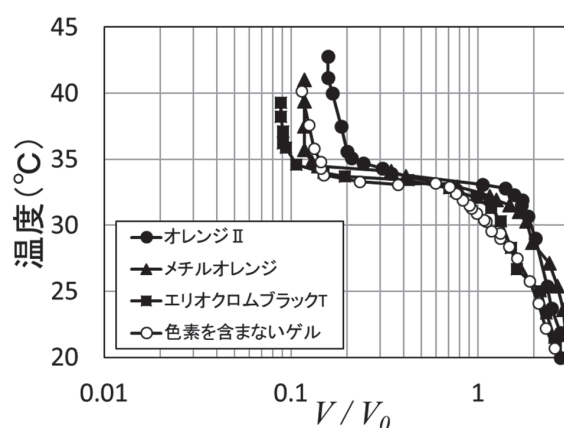


図7. オレンジII, メチルオレンジ, エリオクロムブラックTにより着色したPNIPAゲルの V/V_0 と温度の関係(比較のために, 同じ条件で作成した色素を含まないPNIPAゲルに対する結果も図中に示す)

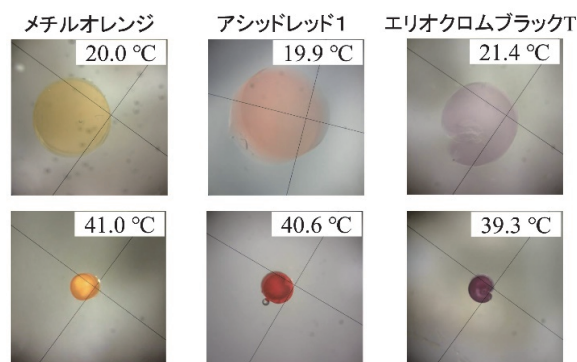


図8. メチルオレンジ, アシッドレッド1, エリオクロムブラックTにより着色したPNIPAゲルの低温時(上)と高温時(下)の写真

4 アドバンスサイエンスコースの授業における実践

本研究で作成方法を検討した様々な色に着色したPNIPAゲルについて, 愛知教育大学のアドバンスサイエンスコースの授業である「ASC化学」において実践を行った。アドバンスサイエンスコースは, 愛知教育大学において2017年度に設置された高校数学・理科教員の養成を目的とした学部と大学院を結ぶ6年一貫の教育を行うコースであり, 「ASC化学」は, アドバンスサイエンスコースに所属する2年生を対象とした, 水曜日の午後2時限続きで開講される授業である。授業実践では, まず最初に高分子化合物と

温度応答性ゲルについて説明を行ったあと、受講生10名に、以下に示す手順で、色のついたPNIPAゲルを作成してもらい、作成したゲルを温度変化させたときのゲルの変化を観察してもらった。

- ①オレンジⅡまたはアシッドレッド1が添加された4種類の水溶液（モノマー、BIS、APS、TMEDAの各水溶液）を共通試薬として準備しておき、各受講生に、ポリプロピレン製の試験管（直径13 mm × 長さ100 mm）および試験管のふたを配布する。
- ②各受講生が、マイクロピペットを使って4種類の水溶液を必要量だけばかり取り、試験管内で混合する。その試験管にふたをし、20℃に設定された水浴中に試験管をセットして、1時間反応させる。
- ③1時間後、各受講生が試験管からゲルを取り出し、水が入ったビーカー内でゲルを洗浄したのち、はさみとピンセットを使って、ゲルから5 mm角程度の大きさの立方体部分（正確に立方体でなくてもよい）を切り取る。
- ④各受講生が、冷水の入ったシャーレとお湯の入ったシャーレを準備しておき、作成したゲルから切り取った小さなゲルを、冷水の入ったシャーレとお湯の入ったシャーレの中に交互に浸してみる。この過程における、ゲルの大きさの変化を観察する。

補足の説明として、「ゲルの体積変化を観察する際、切り取ったゲルが大きすぎると、ゲル内部に存在する水が抜けず、ゲルの表面のみの水が抜けることになるので、ゲル全体の体積変化が小さくなる。大きな体積変化を観察するためには、ゲルをなるべく薄めに切り取るとよい。」と伝えた。

実験の終了後、受講生からの感想が得られたので、そのいくつかを紹介する。まず、今回作成した温度応答性ゲルの化学実験教材としての有効性について、次のような感想が得られた。

- ・高校化学において高分子化合物に興味を持ってもらう教材として有効だと思った。
- ・見た目がとてもきれいなので、高校生の興味をひけるのではないかと。
- ・高校化学では、高分子の構造は図を使って理解するが、やはり実際に実物を見て学べるのがよいと考える。
- ・高分子の単元は暗記するイメージが強いが、この実験を通して高分子に興味を持つ生徒が増える可能性があると考えられる。
- ・温度によって大きさが変わるという目に見える変化であるので、興味を持つ生徒は多いと思う。
- ・何らかの外部刺激で性質が変化する高分子が存在することを実際に見ることができ、機能性高分子を理

解させるための実験教材として有効であると考えられる。

- ・扱う薬品が少なく、作業工程が少ないので、説明しやすく、失敗も起こりにくいと感じた。
- ・温度応答性ゲルの温度による変化は視覚的にわかりやすく、またインパクトもあり、印象に残る実験であると思った。
- ・高校生だけでなく、小・中学生に対しても興味を持ってもらえると思う。
- ・今回のような温度によってゲルが変化することは生徒の興味・関心を引くことができ、実際に体験することで高校生でもゲルに興味を持つのではないかと考える。
- ・温度変化によって大きさが変わるの、高校化学でも習うたんぱく質の熱による変性とも関連付けられるため、イメージが付きやすいと思われる。
- ・ゲルを大きく切りすぎるとゲルの内部に存在する水分子が抜けにくく、温度変化による体積の変化が小さくかつ遅くなるという点は、結果と原因の関係が理解しやすく、化学の反応や現象はすべてが均一に起きるのではなく、反応する物体の構造によって様々に変化があるということを理解するのに役立つ教材にもなり得ると感じた。

以上のように、受講生の多くが、本研究で作成方法を検討した色のついた温度応答性ゲルが、高校化学において有効な実験教材になり得るという印象を持ったことがわかった。

一方、高校の授業で実際にこの実験を行うときに起こり得る問題点について、受講生から以下のような指摘があった。

- ・ゲル化反応の待ち時間が長いので、授業で用いるには何らかの工夫が必要と感じた。例えば、化学の授業が2時間連続であったときに、始めに準備を行い、待ち時間の間に座学を行うなどすれば効率良く時間を使えるのではないかと考えた。
- ・高校の授業は1コマ50分なので、高校の授業の中でゲルの作成から観察までを行うのは難しい。そのため、あらかじめ作成したものを授業中に観察して、その後に理論の解説をするといった授業の展開にする必要があるだろう。
- ・高校の化学で高分子化合物を扱うのは3年生の遅い時期になることが多く、この時期は大学受験も近いために、大学受験と直接関係のない内容を扱うのは生徒にとっても教員にとっても不安が大きいのではないだろうか。この内容を扱うためには、比較的早い段階で高分子化合物の内容の授業を終わらせるか、高分子化合物の内容の授業をほかの内容の授業と入れ替えて行う必要があるだろう。

- ・温度応答性ゲルを高校の授業で扱うのは時間的な問題から難しいのではないかと考えられるが、その性質自体はとても興味深いものであり、このゲルの観察を探究活動などに発展させることができれば、高校の授業で扱う価値は十分にあるのではないかとと思われる。
- ・高校化学の早い時点で、ゲルとはどういうものかということに軽く触れたうえで本実験を行っておき、高分子化合物の単元になったとき、以前に行った本実験のことを生徒の頭の中に呼び起こすように発問し、生きた知識として生徒に再インプットすることで、高分子化合物に興味を持つきっかけ作りになるのではないかとと思われる。

以上のように、本研究においてアドバンスサイエンスコースの授業の中で実践した色の着いた温度応答性ゲルの作成および観察実験を、そのままの形で高校の授業の中で実施することは、高校の授業時間の点からすると難しいと考えられる、という意見が複数あった。これらは妥当な意見である。受講生たちが指摘しているように、色の着いた温度応答性ゲルを高校化学において化学実験教材として利用するためには、あらかじめ作成したゲルを準備しておき授業時間内で体積変化の様子を観察する、あるいは可能な範囲で授業日程を入れ替えて実験を行う、あるいは探究活動の中で利用する、といった工夫が必要となるであろう。このような問題点が存在しているが、色の着いた温度応答性ゲルは高校化学において印象に残る実験教材となることが期待でき、高校の授業においても利用できるように、実験方法のさらなる改良および授業方法の工夫が望まれるところである。

IV おわりに

本研究では、着色した温度応答性ゲルであるPNIPAゲルをできるだけ簡単に作成する方法を探索した。分子構造に $-SO_3^-$ 基を持つアゾ染料を、重合前の反応溶液中に添加しておくことで、着色して容易には脱色しないPNIPAゲルを作成できた。

着色したPNIPAゲルについて膨潤度の温度変化を調べたところ、ゲル中の色素分子はゲルの温度応答挙動に影響を及ぼさず、色素を含まないPNIPAゲルの場合と同様に、 $33 \sim 34^\circ\text{C}$ 付近で体積相転移が見られた。

本研究で検討された色の着いたPNIPAゲルの作成実験と温度変化による体積変化の観察実験を、大学での授業の中で実践した。その授業の受講生の多くから、「色の着いた温度応答性ゲルを高校化学において実験教材として使用するには授業方法を工夫する必要があるが、実施できれば高校生にとって印象に残る実験教材になるだろう」、という感想が得られた。

本報告が教育現場において役立つ情報となれば幸いです。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 17K00966 の助成を受けて行ったものです。

「ASC化学」の授業において行った、色の着いた温度応答性ゲルの作成および観察実験に対し、感想を述べていただいた受講生諸氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 山内 愛造, 広川 能嗣, 機能性ゲル, 共立出版, 1990, p. 55.
- 2) 吉田 亮, 高分子ゲル, 共立出版, 2004, p. 33.
- 3) 宮田 隆志, 高分子ゲル, 共立出版, 2017, p. 88.
- 4) 森安 勝, 化学と教育, 2019, 67, 548.
- 5) 長 昌史, 高分子論文集, 2009, 66, 273.
- 6) T. Hirotsu, Y. Hirokawa, T. Tanaka, *J. Chem. Phys.*, 1987, 87, 1392.

(2020年8月7日受理)