

# 中等化学教育におけるグリーンケミストリー教材の開発

— マイクロ波照射を用いたアセチルサリチル酸の合成を中心に —

山田 秀人

(2006年10月5日受理)

Development of Teaching Materials of Green Chemistry at Secondary Schools  
— With a Focus on the Synthesis of Acetylsalicylic Acid Using Microwave Irradiation —

Shuto Yamada

For developing the teaching materials of green chemistry at the students' laboratories in secondary schools, the possibility of green chemical improvement of the synthesis methods of acetylsalicylic acid was investigated by applying the microwave irradiation as the energy source of the synthetic reaction. Through examining the heating characteristics of the reactants by microwave, it was revealed that the application of the microwave irradiation is useful to reduce the amount of a reactant component and the experimental duration. On the basis of such fundamental research on the synthetic condition, a detailed experimental procedure was proposed for applying the improved synthetic method to students' laboratory. In addition, the proposed method was applied to the practice for the green chemistry education at a high school. By comparing the present synthetic method of acetylsalicylic acid with the conventional one, students could become aware of the green chemical effects of the present synthetic method. It is highly expected that the students' understanding on the significance of chemistry for realizing the society which makes sustainable development possible is enhanced through such educational practice on green chemistry.

Key words: Green chemistry, Chemistry education, Microwave, Acetylsalicylic acid

キーワード：グリーンケミストリー，化学教育，マイクロ波，アセチルサリチル酸

## 1. はじめに

現在、社会を取り巻く様々な環境問題に対する化学の取り組みとして、化学物質の合成プロセスにおいて有害物質や使用エネルギーの削減のための研究が進められており、グリーンケミストリーと呼ばれる研究分野として認められている<sup>1-3)</sup>。グリーンケミストリーを実現する一つの手段として、マイクロ波加熱における

エネルギー効率や加熱特性などの特徴を利用して、新しい化学反応プロセスの開発が進められている<sup>4,5)</sup>。

グリーンケミストリーの考え方を教育に応用した取り組みは、諸外国をはじめわが国においても、大学レベルでの化学教育において実践されるようになった<sup>6)</sup>。グリーンケミストリーの基本概念の学習は、持続可能な開発を目指した社会の実現がこれからの生活に必要な不可欠なものであることを気づかせるための有効な手段であると考えられる。しかし、現在の中等化学教育においては、マイクロスケール実験の開発による有害物質の削減等の研究は進められているが<sup>7)</sup>、グリーンケミストリーの内容を理解させることを目的とした教材や実験素材の開発とそれを用いた教育実践について

本論文は、課程博士候補論文を構成する論文の一部として、以下の審査委員により審査を受けた。

審査委員：古川義宏（主任指導教員）、柴 一実、

葛岡孝則、古賀吉信

の研究報告は少ない。

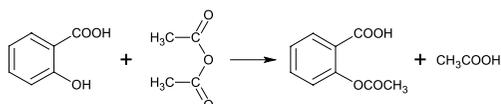
このような視点から、筆者らは、種々の無機反応にマイクロ波照射を用いた実験教材開発のための基礎的な研究を行ってきた。その結果、化学カイロの実験廃棄物中の酸化鉄の炭素還元において、従来の電気炉中での加熱に替えてマイクロ波加熱を行うことにより、反応時間の大幅な短縮が可能となった<sup>8)</sup>。また、種々の無機水和物にマイクロ波を照射した場合の加熱メカニズムと脱水反応経路について明らかにした<sup>9)</sup>。

本研究では、高等学校化学で取り上げられているアセチルサリチル酸の合成実験にマイクロ波加熱を応用し、中等化学教育におけるグリーンケミストリー教材として用いるための基礎的な研究を行った。また、従来法によるアセチルサリチル酸の合成実験<sup>10)</sup>との比較を通して、グリーンケミストリーの概念と意義を生徒に理解させるための授業実践について検討した。

## 2. マイクロ波照射を用いたアセチルサリチル酸の合成

### 2.1 アセチルサリチル酸の合成

アセチルサリチル酸は、次式に示すようにサリチル酸を無水酢酸によりアセチル化することで得られる有機化合物である。



サリチル酸のアセチル化は、エステル化などの官能基の反応性を理解させるために重要な反応である。また、アセチルサリチル酸は、頭痛薬などの鎮痛剤の主成分として古くから用いられている物質である。このことから高等学校化学における身近な物質を用いた課題研究等の実験素材としても取り扱われている<sup>11)</sup>。

これまでに、マイクロ波加熱を用いたアセチルサリチル酸の合成例は多数報告されている<sup>12,13)</sup>。しかしながら、生徒実験の教材として用いる場合の条件等についての詳細な検討はなされていない。

本研究では、マイクロ波加熱を用いたアセチルサリチル酸の合成実験を高等学校におけるグリーンケミストリー教材として取り扱うことを目的として、合成反応及び生徒実験として用いるために必要な反応条件の詳細を検討した。

### 2.2 実験方法

(a) マイクロ波照射による反応物の温度変化

表1に示すI～IVの試料に、家庭用電子レンジを用

いて、マイクロ波(2.45GHz, 500 W)を任意の時間照射した。照射後の試料温度は、放射温度計(MINOLTA 505S)を用いて測定した。

表1 温度測定のための試料

試料	
I	ガラスビーカー(パイレックス: 50 ml)
II	I + サリチル酸(ナカライテスク) 5 g (固体)
III	II + 無水酢酸(SAJ) 5 ml (液体)
IV	III + 濃硫酸(SAJ) 0.05 ml (液体)

(b) 電子レンジを用いたアセチルサリチル酸の合成

50 ml ガラスビーカーにサリチル酸5 gを秤り取り、表2に示す合成条件A～Cでマイクロ波(2.45GHz, 500Wあるいは190 W)を照射した。照射後、マグネチックスターラーを用いて攪拌しながら蒸留水50 mlを加えた。さらに攪拌した後、氷水浴中で冷却し生成物結晶を析出させた。生じた生成物結晶を吸引ろ過し、蒸留水で洗浄した後、風乾した。

風乾後の粗製生成物をジエチルエーテルに溶解し、同量の石油エーテルを加え、氷水浴中で再結晶させた。この再結晶生成物を吸引ろ過し、風乾した。

得られた粗製生成物及び再結晶生成物を同定のための試料とした。

(c) 生成物の収率

(b)で得られた粗製生成物及び再結晶生成物の質量を測定し、収率を求めた。

(d) 生成物の同定

アセトンとヘキサンを混合した展開溶媒(体積比4:3)を用いて、合成した試料、標品サリチル酸及び標品アセチルサリチル酸の薄層クロマトグラフィーを行った<sup>14)</sup>。また、フーリエ変換赤外分光光度計(SHIMADZU FT-IR8100)を用いて、合成した試料、標品サリチル酸及び標品アセチルサリチル酸の赤外吸収スペクトルを測定した<sup>15)</sup>。

高等学校におけるサリチル酸の同定法に従い、合成した試料及び標品サリチル酸のエタノール溶液に0.1M塩化鉄(III)水溶液を数滴加え、生成物中の残留サリチル酸と鉄(III)イオンの呈色を観察した。

表2 アセチルサリチル酸の合成条件

	無水酢酸	照射時間	触媒(濃硫酸)
合成 A	3-8 ml	120 s (500 W)	無
合成 B	6 ml	60-180 s (500 W)	無
合成 C	6 ml	45-120 s (190 W)	有
従来法	10 ml	湯浴	有

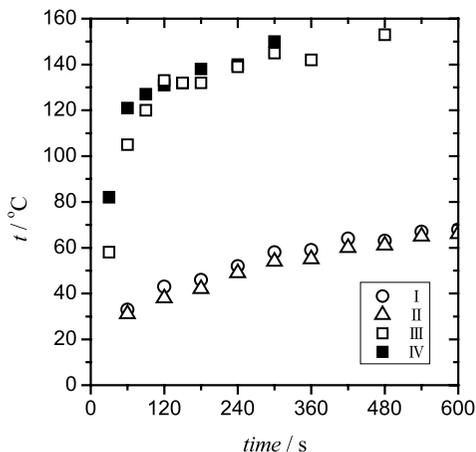


図1 マイクロ波照射後の種々の試料の温度変化

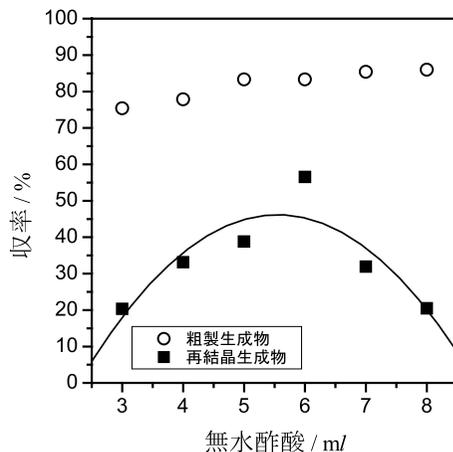


図2 合成Aにおける生成物の収率

### 2.3 結果と考察

アセチルサリチル酸の合成反応は、サリチル酸と無水酢酸の混合物を100℃程度に保つことで進行する反応である。有機化合物の合成反応にマイクロ波照射を応用する場合、極性分子とマイクロ波の相互作用により発熱し、反応が加速されることが報告されている<sup>16)</sup>。しかし、試料容器がマイクロ波と相互作用を起こし、その発熱した容器からの伝導加熱により反応物が加熱される例もある<sup>9)</sup>。そのため、試料及び試料容器の温度変化を測定し、アセチルサリチル酸の合成にマイクロ波照射を用いた場合の加熱メカニズムと反応経路の詳細を検討した。

図1に、マイクロ波 (2.45GHz, 500 W) を任意の時間照射したときの試料 (I～IV) の温度変化を示す。ビーカー中のサリチル酸 (試料II) にマイクロ波を照射した場合、試料の温度は、ガラスビーカー (試料I) とほぼ同様の変化を示した。また、試料IIではサリチル酸に融解などの顕著な変化は観察されなかった。それに対し、無水酢酸とサリチル酸の混合物 (試料III) では、試料の温度は、マイクロ波照射を開始した直後から60℃以上に加熱され、混合試料は融液となった。また、照射時間360秒以上においては、粘性の高い飴状の物質が生成した。この飴状の生成物は、アセチルサリチル酸の熱分解反応の中間生成物であると考えられる<sup>17,18)</sup>。試料IIIに触媒として濃硫酸を加えた試料IVは、照射時間60秒で約120℃まで加熱され、試料IIIに比べ急激に温度が上昇する。以上の結果から、アセチルサリチル酸の合成にマイクロ波加熱を用いた場合、無水酢酸や硫酸とマイクロ波の相互作用により、温度が急激に上昇し、融液となった約130℃の反応液中でアセチル化が進行することがわかる。

図2に、サリチル酸5gと任意量の無水酢酸の混合物にマイクロ波 (2.45GHz, 500 W) を120秒間照射した場合 (合成A) の粗製及び再結晶生成物の収率を示す。粗製生成物の収率は、反応物中の無水酢酸の体積が5ml以上で、約85%の一定値を示す。再結晶生成物の収率は、無水酢酸の体積が6mlのとき約50%と最も大きくなり、さらに無水酢酸の体積を増やすと収率は減少する。これは、無水酢酸の増加に伴いマイクロ波による加熱効率が上昇し、無水酢酸の蒸発が顕著になるためであると考えられる。

表3に、合成Aで得られた生成物結晶の薄層クロマトグラフィーの結果を示す。無水酢酸3mlを加えた場合の粗製生成物の薄相クロマトグラフィーでは、標品アセチルサリチル酸に対応するスポットとともに、未反応のサリチル酸に由来すると考えられるスポットが観察される。一方、無水酢酸の体積が5ml以上の場合、再結晶生成物の薄層クロマトグラフィーから求めた $R_f$ 値は、アセチルサリチル酸の標品とほぼ同様

表3 合成Aにおける生成物の $R_f$ 値

試料 (無水酢酸)	$R_f$ 値			
	粗製生成物	再結晶生成物	粗製生成物	再結晶生成物
3 ml	0.48	0.66	0.10	0.66
4 ml	0.18	0.67	0.09	0.64
5 ml	0.08	0.64	0.	0.66
6 ml	0.09	0.68	0.	0.64
7 ml	0.10	0.72	0.	0.64
8 ml	0.10	0.70	0.	0.63
サリチル酸	0.42			
アセチルサリチル酸	0.66			

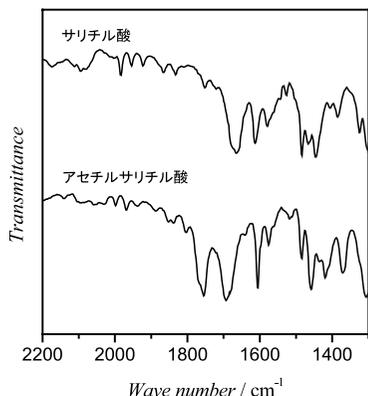


図3 標品サリチル酸と標品アセチルサリチル酸の赤外吸収スペクトル

の値を示す。粗製生成物及び無水酢酸 3～4 ml を加えた場合の再結晶生成物に観察される0.1の  $R_f$  値は、副生成物によるものと考えられる。

図3に、標品サリチル酸と標品アセチルサリチル酸の赤外吸収スペクトルを示す。アセチルサリチル酸のスペクトルにおいて、 $1750\text{ cm}^{-1}$ 付近でサリチル酸には観察されないピークが存在する。これはカルボニル基に対してオルト位に配位するアセチル基による吸収帯に帰属されている<sup>15)</sup>。合成Aで得られた再結晶生成物の赤外吸収スペクトルにおいても、この特徴的な吸収が観察された。さらに、鉄(Ⅲ)イオンの添加によるサリチル酸-鉄(Ⅲ)の呈色は観察されなかった。これらの結果から、合成実験に用いる無水酢酸の体積としては、再結晶後の収率が最も大きい6 ml が適当であると考えられる。

図4に、サリチル酸 5 g と無水酢酸 6 ml の混合物に任意の時間マイクロ波 (2.45GHz, 500 W) を照射した場合 (合成B) の粗製及び再結晶生成物の収率を

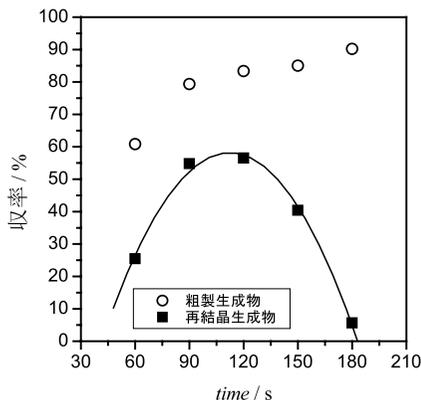


図4 合成Bにおける生成物の収率

表4 合成Bにおける生成物の  $R_f$  値

試料 (照射時間)	$R_f$ 値			
	粗製生成物		再結晶生成物	
60 s	0.17	0.62	0.09	0.68
90 s	0.09	0.68	0.	68
120 s	0.10	0.68	0.	64
150 s	0.12	0.71	0.	67
180 s	0.11	0.70	0.	62
サリチル酸	0.43			
アセチルサリチル酸	0.63			

示す。粗製生成物の収率は、照射時間90秒以上で80%以上になる。再結晶生成物の収率は、照射時間120秒で約55%と最も大きくなり、さらにマイクロ波を照射すると減少する。

表4に、合成Bで得られた生成物結晶の薄層クロマトグラフィーの結果を示す。粗製生成物の薄層クロマトグラフィーでは、合成Aと同様に標品アセチルサリチル酸に対応するスポットとともに、副生成物のスポットが観察された。一方、照射時間90秒以上の再結晶生成物では、アセチルサリチル酸に帰属される  $R_f$  値だけが観測される。

また合成Bの再結晶生成物の赤外吸収スペクトルにおいて、 $1750\text{ cm}^{-1}$ の吸収が観察された。さらに、鉄(Ⅲ)イオンの添加においても呈色がみられなかった。これらの結果から、合成反応に必要なマイクロ波の照射時間は、再結晶後の収率が最も大きい120秒が適当であると考えられる。

図5に、サリチル酸 5 g と無水酢酸 6 ml の混合物に触媒として濃硫酸0.05mlを加え、任意の時間マイクロ波 (2.45GHz, 190 W) を照射した場合 (合成C) の粗製及び再結晶生成物の収率を示す。粗製生成物の

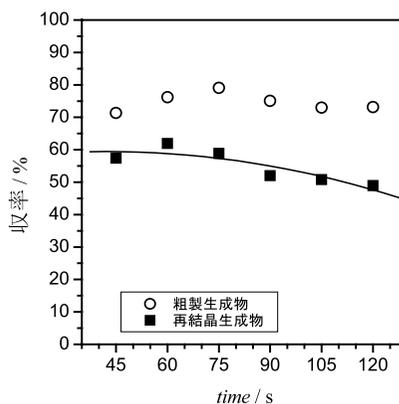


図5 合成Cにおける生成物の収率

表5 合成Cにおける生成物の  $R_f$  値

試料 (照射時間)	$R_f$ 値			
	粗製生成物		再結晶生成物	
45 s	0.30	0.72	0.08	0.67
60 s	0.10	0.70	0.	0.67
75 s		0.71	0.	0.65
90 s		0.72	0.	0.64
105 s		0.71	0.	0.65
120 s		0.70	0.	0.64
サリチル酸	0.40			
アセチルサリチル酸	0.66			

収率は、45～120秒の照射時間では70～80%の範囲ではほぼ一定の値を示す。再結晶生成物の収率は、照射時間60秒で約60%と最も大きくなり、さらにマイクロ波を照射すると徐々に減少する。

表5に、合成Cで得られた生成物結晶の薄層クロマトグラフィーの結果を示す。75秒以上のマイクロ波照射で得られた粗製生成物では、合成A及び合成Bの粗製生成物で観察されていた未反応のサリチル酸及び副生成物のスポットは観察されなかった。また、照射時間60秒以上の再結晶生成物の  $R_f$  値は、どの試料においてもアセチルサリチル酸の標品と同様の値を示した。同様に赤外吸収スペクトル測定においてもアセチルサリチル酸に一致するスペクトルが観察された。また生成物溶液と鉄(Ⅲ)イオンとの呈色反応においてもサリチル酸-鉄(Ⅲ)の呈色を示さなかった。

グリーンケミストリーの実現のための指標として示されているグリーンケミストリーの12箇条<sup>13,19)</sup>においては、「修飾反応及び補助物質についてできるだけ削減する」という項目が挙げられていると同時に、「できるだけ触媒反応を目ざす」といった項目も重要視されている。本研究で検討したマイクロ波加熱を用いたアセチルサリチル酸の合成実験では、濃硫酸触媒を用いた場合に高い収率でアセチルサリチル酸が得られた。また、粗製生成物においても未反応のサリチル酸がほとんど検出されなかったことから、再結晶に必要なエーテル等の有機溶媒の削減も可能である。このことから、グリーンケミストリー教材として取り扱う実験条件としては、マイクロ波加熱と濃硫酸触媒を使用した合成Cが最も有効であると考えられる。

### 3. 生徒実験への適用

#### 3.1 授業実践の概要

ここまでの検討で、マイクロ波照射を用いたアセチルサリチル酸の合成を行った場合、従来法に比べ反応に要する反応物の量的削減とアセチル化に要する反応時間が短縮されることが明らかとなった。

そこで、従来法によるアセチルサリチル酸の合成実験との比較を通して、グリーンケミストリー概念と意義を生徒に理解させるための授業実践を計画した。授業実践の対象には、広島県内の公立高等学校2年生、「理科基礎」履修の3クラス116名の生徒を設定した。生徒は第1学年次に「化学I」を履修しており、本実験で取り扱う化学反応については既習事項であった。また、授業実践を行う単位として、合成物質の有用性と利用時の環境への配慮等を取り扱う単位である「物質の合成への道」を選択し、単元のまとめとしてグリーンケミストリーについての授業及びアセチルサリチル酸の合成実験を行った。

図6に、授業及び生徒実験の計画のフローチャートを示す。生徒は、グリーンケミストリーについては全く知識を持っていなかったため、第1時で物質の合成が環境に及ぼす影響とエネルギーの観点からみた環境問題及びグリーンケミストリーの12箇条など、グリーンケミストリーについての授業及びアセチルサリチル酸の合成実験を行った。

図6に、授業及び生徒実験の計画のフローチャートを示す。生徒は、グリーンケミストリーについては全く知識を持っていなかったため、第1時で物質の合成が環境に及ぼす影響とエネルギーの観点からみた環境問題及びグリーンケミストリーの12箇条など、グリーンケミストリーについての授業及びアセチルサリチル酸の合成実験を行った。

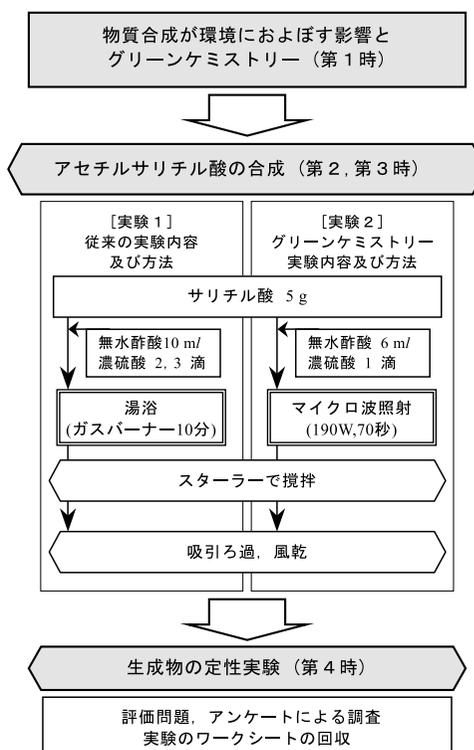


図6 授業実践及び実験の概要 (第1時2006年6月27日, 第2時6月28日, 第3時7月4日, 第4時7月5日実施)

ンケミストリーの概要についての授業を実施した。第2時、第3時においては、4人1組の班を編成し、従来法による合成実験を実験1、マイクロ波加熱を用いる合成実験を実験2として生徒実験を実施した。第2時第3時で得られた粗製生成物を第4時の定性実験の試料とした。実験1及び2では、有機溶媒の使用を回避し、実験に要する時間を短縮するために生成物の再結晶操作は実施しなかった。そのため、得られた粗製生成物をろ過した後、残留サリチル酸を除去するため、冷水で十分に洗浄するように指導した。また、従来の合成法とマイクロ波加熱を用いた合成法をグリーンケミストリーの観点から比較するため、反応物の加熱以外の実験操作は統一した。なお、アセチル化の反応中、無水酢酸の蒸気が生成するため実験室内の換気を十分に行うとともに吸入に気をつけるよう指導した。

### 3.2 アセチルサリチル酸の合成

今回の実験は、吸引ろ過などこれまで行ったことの無い実験操作を含む内容であったが、実験1及び実験2とも後片付けまで含めて授業時間以内で終了させることができた。第4時の定性実験では、実験1及び実験2において得られる最終生成物の色、収量及び鉄(Ⅲ)イオンによる定性反応の結果について観察させ、結果を比較させた。

図7に、生成物の定性実験の結果を示す。実験を行った30班中24班で実験1及び実験2で得られた生成物においてサリチル酸-鉄(Ⅲ)イオンの呈色は観察されなかった。実験1の生成物のみ、または実験2の生成物のみが呈色を示した班もみられるが、標品サリチル酸を用いた場合に比べると呈色が薄く、生徒も「生成物のほとんどがアセチルサリチル酸であり、ごく微量の残留サリチル酸を含む」と判断した。また、実験1、2の生成物の両方で呈色が観察された班もみられるが、これは吸引ろ過を行った後の粗製生成物の洗浄が不充

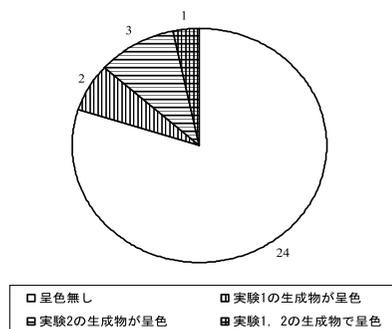


図7 サリチル酸-鉄(Ⅲ)イオンの呈色を用いた定性実験の結果 (2006年7月5日実施)

分であったためであると考えられる。粗製生成物の色及び収量については、すべての班が実験1と実験2の間で差異がないと報告した。以上の結果から、生徒は、マイクロ波加熱を用いたアセチルサリチル酸の合成実験を円滑に実施し、さらに得られるアセチルサリチル酸も従来法と同様の純度を有することがわかる。

### 3.3 グリーンケミストリー教材としての検討

図8に、授業を実施したクラス(実験群:116名)と授業を実施していないクラス(対照群:74名)を対象に行った化学の学習や実験への考え方(Q1~6)、環境問題への関心や知識(Q7~9)、及び社会における化学の役割(Q10~13)についてのアンケートの結果を示す。t検定の結果、実験群と対照群の間において化学の学習や実験に対する考え方(Q1~6)に優位な差は認められず、どちらの群においても化学に対する興味・関心は高いが、学習及び実験への積極的な取り組みは充分できていないことがわかる。環境問題に対する関心や知識に対する質問項目(Q7~9)についても、本単元での環境問題と化学との関係の学習を通じて高い興味・関心を示すようになっており、検定の結果、実験群と対照群で優位な差は認められなかった。また、社会における化学の役割についての質問(Q10~13)では、実験群において傾向がみられたが、顕著な優位性は認められなかった。

実験結果をもとに以下の3項目について実験1及び実験2のどちらに当てはまるかをそれぞれの生徒に考察させ、アンケート形式のレポートで報告させた。

- ①同じ量のアセチルサリチル酸を得るのに、実験で用いた反応物(サリチル酸、無水酢酸)や触媒(濃硫酸)の量が少なかったのは実験1、実験2のどちらか。
- ②アセチル化の反応(加熱、攪拌)に用いた熱や電気などのエネルギーが少なかったのは実験1、実験2のどちらか。
- ③今回行った実験でグリーンケミストリー反応として、より当てはまるのは実験1、実験2のどちらか。またその理由も答えよ。

図9に、レポートの結果を示す。①の反応物及び触媒の量については、ほとんどの生徒が実験2に当てはまると回答している。②については実験2に当てはまると回答した生徒が約70%みられ、実験1に当てはまると回答した生徒が①に比べ多くなる。これは、今回の実践授業において、「湯浴」によるガスの消費量と、「電子レンジ」による電気の消費量について定量的な比較を行わなかったためであると考えられる。また、実験1に当てはまると回答した生徒の中には、「実験

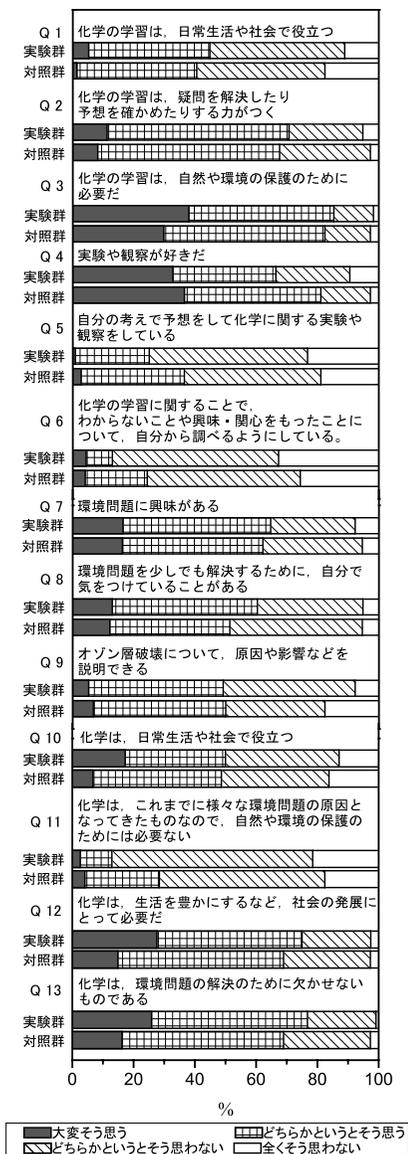


図8 化学の学習や実験への考え方 (Q1～6), 環境問題への関心や知識 (Q7～9), 及び社会における化学の役割 (Q10～13) についてのアンケート結果 (2006年7月5日実施)

1は電気を使用していないため省エネルギーでありグリーンケミストリーとしてふさわしい」という割合が多く、グリーンケミストリーの基礎概念を理解させるためには、エネルギー概念自体の指導も必要であることがわかる。③においては、約70%の生徒が、「原料をむだにしない」、「省エネルギー」などのグリーンケミストリーの12箇条をもとに実験2を選択していた。

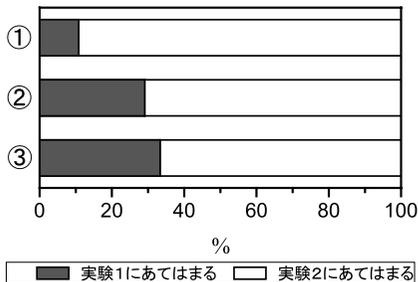


図9 生徒実験の結果 (2006年7月5日実施)

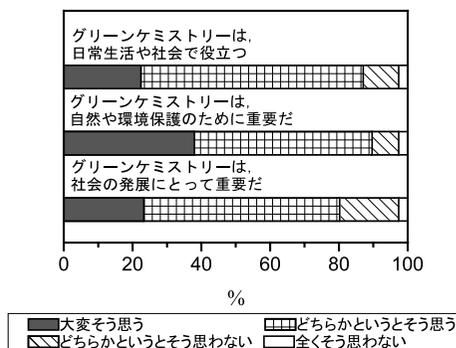


図10 グリーンケミストリーの社会における役割についてのアンケートの結果 (2006年7月5日実施)

しかしながら、「定性反応の結果、実験2の生成物中に残留サリチル酸の存在が確認されたため、実験1の方が目的の物質であるアセチルサリチル酸が多く合成できている」と回答した生徒もおり、実験操作の不備により実験2のグリーンケミストリーにおける優位性を認識できない場合もあった。

図10に、実験群を対象に行ったグリーンケミストリーの社会における役割についてのアンケート結果を示す。どの質問項目においても80%以上の生徒が、グリーンケミストリーは社会において重要な役割を果たすと答えている。このことから生徒は、グリーンケミストリーの必要性や社会における役割について肯定的な考えを授業実践から得たと考えられる。また、アンケートに設けた自由記述欄には、「持続的な開発を目指す社会とグリーンケミストリーとの関わりの重要性を理解できた」や、「グリーンケミストリーをもう少し学習したい」などの意見もあった。

図8のアンケート結果において、化学の学習や化学自体の社会や日常生活での役割や意義 (Q1, 10) については、肯定的な回答が約半数に止まっている。一方、環境問題の解決や社会の発展における化学の役割 (Q11, 13) については、約8割の生徒が肯定的な回

答をしている。さらに、実験群に対するグリーンケミストリーの生活や社会における役割(図10)については、約9割の生徒が肯定的な回答をしている。このことは、生徒の環境問題の解決に対する化学への期待の高さを反映するものであり、グリーンケミストリー自体が社会における化学の理想的な役割を目指す取り組みであることと深く関係しているものと思われる。そのため、環境化学やグリーンケミストリーに関連した教材を日常の化学の学習内容として適宜取り入れることは、化学の学習のもつ本質的な意義を認識させるうえで有効であると考えられる。

#### 4. おわりに

グリーンケミストリー概念と意義を理解させるための実験教材の開発とそれをを用いた教育実践を目的として、マイクロ波加熱を用いたアセチルサリチル酸の合成に関する基礎的研究と、それをを用いた生徒実験の方法について検討を行った。合成反応についての検討結果から、アセチルサリチル酸の合成反応にマイクロ波加熱を用いることで、反応物及び触媒の削減と反応時間の短縮が可能となり、グリーンケミストリー教育のための素材として有効であることがわかった。また、授業実践の結果から、従来法によるアセチルサリチル酸の合成実験と今回提案したグリーンケミストリー実験を比較させる授業展開は、グリーンケミストリー概念と意義を生徒に理解させるために有効であることがわかった。

グリーンケミストリーの学習を通じて化学の学習の本質的な意義を認識させるためには、日常の学習に適宜環境化学やグリーンケミストリーに関連した教材を取り上げていくことが必要であると思われる。そのため、さらに多様なグリーンケミストリー教材の開発が必要であると考えられる。

#### 【注及び参考文献】

- 1) P. T. Anastas and J. C. Warner, *Green Chemistry*, Oxford (1998).
- 2) 吉村忠与志, 西宮辰明, 本間善夫, 村林眞行, *グリーンケミストリー ゼロエミッションの化学をめざして*, 三共出版 (2001).
- 3) 柘植秀樹, 荻野和子, 竹内茂彌 編, *環境と化学 グリーンケミストリー入門*, 東京化学同人 (2002).
- 4) H. M. Kingston and S. J. Haswell (eds.), *Microwave-Enhanced Chemistry*, Am. Chem. Soc. (1997).
- 5) 柳田祥三, 二川佳央, 勝木宏昭, 加藤俊作, 滝沢博胤, 徳田昌生, 佐藤元泰, 和田雄二, 佐藤誠吾, 川島徳道, 笠井均, 篠塚英利, *マイクロ波の新しい工業利用技術*, エヌ・ティー・エス (2003).
- 6) 井上正之, *広島大学教育学研究科紀要 第二部*, **53**, 39-47 (2004).
- 7) 荻野和子, *化学と教育*, **50**, 437-440 (2002).
- 8) 山田秀人, 綿貫真衣, 古賀信吉, 田中春彦, *化学と教育*, **52**, 185-186 (2004).
- 9) 山田秀人, 九十九絵理, 真子輝, 古賀信吉, 田中春彦, *化学と教育*, **54**, 352-355 (2006).
- 10) 田中春彦 編著, *化学の実験*, 培風館 (2001).
- 11) 日本化学会編, *実験で学ぶ化学の世界 3*, 丸善 (1996).
- 12) A.G.Whittaker, *Educ. Chem.*, **39**, 134-136 (2002).
- 13) 松村竹子, *化学と教育*, **52**, 790-791 (2004).
- 14) 石川正行, 原昭二, 小谷力, 中沢泰男編, *薄層クロマトグラフィー～基礎と応用～*, 南山堂 (1963).
- 15) 荒木峻, 益子洋一訳, *有機化合物のスペクトルによる同定法 (第三版)*, 東京化学同人 (1976).
- 16) 柳田祥三, 松村竹子著, *化学を変えるマイクロ波熱触媒*, 化学同人 (2004).
- 17) Y. A. Ribeiro, A.C.F. Caires, N. Boralle and M. Ionashiro, *Thermochim. Acta*, **279**, 177-181 (1996).
- 18) E. M.de A.Silva, D. M.de A.Melo, M. de F.V. de Moura and R. F.de Farias, *Thermochim. Acta*, **414**, 101-104 (2004).
- 19) 文献1) 中, グリーンケミストリーの12箇条が以下のように定義されている。  
The twelve principles of green chemistry.  
(1) It is better to prevent waste than to treat or clean up waste after it is formed.  
(2) Synthetic methods should be designed to maximize the incorporation of all materials used in the process into the final product.  
(3) Wherever practicable, synthetic methodologies should be designed to use and generate substances that possess little or no toxicity to human health and the environment.  
(4) Chemical products should be designed to preserve efficacy of function while reducing toxicity.  
(5) The use of auxiliary substances (e.g. solvents, separation agents, etc.) should be made unnecessary wherever possible and, innocuous when used.  
(6) Energy requirements should be recognized for their environmental and economic impacts and

- should be minimized. Synthetic methods should be conducted at ambient temperature and pressure.
- (7) A raw material of feedstock should be renewable rather than depleting wherever technically and economically practicable.
  - (8) Unnecessary derivatization (blocking group, protection/deprotection, temporary modification of physical/chemical processes) should be avoided whenever possible.
  - (9) Catalytic reagents (as selective as possible) are superior to stoichiometric reagents.
  - (10) Chemical products should be designed so that at the end of their function they do not persist in the environment and break down into innocuous degradation products.
  - (11) Analytical methodologies need to be further developed to allow for real-time, in-process monitoring and control prior to the formation of hazardous substances.
  - (12) Substances and the form of a substance used in a chemical process should be chosen so as to minimize the potential for chemical accidents, including releases, explosions, and fires.

