

# 生成水分量を指標とした酢酸エチル合成収率の定量測定

## Quantitative Measurement of Ethyl Acetate Synthesis Yield Using Generated Water Amount as an Indicator

畑 宗平  
HATA Sohei

### I. はじめに

高等学校において有機化合物の定量測定実験を実施することは、化合物の単離に必要な器具や試薬の制約に加え、多くの高等学校では必要な分析機器が十分に整備されていない現状も相まって困難である。

一般に有機化合物の同定には、核磁気共鳴 (NMR)、質量分析 (MS)、赤外線分光 (IR)、紫外分光 (UV)、ガスクロマトグラフィー (GC)、元素分析など、複数の高度な機器分析を組み合わせる必要がある。そのため、高等学校での有機化合物の学習は、反応を色やにおいなどの五感に基づいて確認する定性的な内容にとどまり、知識伝達型の授業となっている<sup>1)</sup>。しかし、生成物を定量的に測定することが可能になれば、目的の化合物の生成を客観的な数値として確認できるため、学習者に「実感を伴った理解」をもたらすことが期待できる。

また、生成物の収率の比較を通して反応条件の最適化を検討する探究学習への発展が可能となる。高等学校での科目「化学基礎」および「化学」<sup>2)</sup>において定量測定実験を導入することは、教育的に大きな意義がある。

さらに、中学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説 理科編<sup>3)</sup> や高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示) 解説 理科編 理数編<sup>4)</sup> に示されている理科の目標では、「自然の事物・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、自然の事物・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。」と記されている。このように、「科学的に探究するため」とい

う表現が明示されており、探究活動が重視されている。

特に、高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示) 解説 理科編 理数編に書かれている科学的であるための 3 条件 (実証性、再現性、客観性) が重視されている。これらの条件を生徒が意識するような理科の授業を教師が問題解決・課題解決学習および理科の探究学習を通して実施しなければ、生徒の科学的な見方や考え方を十分に育成することは困難であると考えられる。

定量測定実験を導入することで、実験結果の再現性が確認できるようになり、高等学校の理科実験室で予測 (仮説) に対する検証が可能となる。そのことは、探究過程を導入した授業の実現を容易にし、生徒の「科学的な見方・考え方」の効果的な育成をする上で有効であると期待される。特に、高等学校での探究学習で探究力を養うためには、科学的な見方や考え方ができることは重要である。しかし、高等学校の科目「化学基礎」および「化学」において定量測定実験の導入は、酸と塩基の中和滴定実験等の一部の実験を除けば、化合物の単離に必要な器具や試薬、さらには分析機器の購入・維持に伴う経済的負担の大きさから実施が困難である<sup>5)</sup>。

このような状況は、高等学校の化学教育における実験を基盤とした学習の質的向上を阻害しており、教育現場で実施可能性の高い新たな実験手法を開発することは、教育的観点からも有用性が高いと考えられる。そこで本研究では、安価で精度が高い有機化合物の簡易定量測定器を開発し、高等学校の化学実験授業において再現性、客観性を確保しつつ実施可能な定量測定手法を提供するこ

とを目的とした。

具体的には、水の近赤外 (NIR) 吸収特性を活用し、溶媒中水分量を指標とした酢酸エチル合成収率の正確な定量測定法の確立を試みた。

本稿では、高等学校の科目「化学」の単元「有機化合物の性質と利用」において、生成水分量を指標とした酢酸エチルの合成収率を定量測定できる測定精度を備えた「簡易水分計」の開発を検討した結果について報告する。

## II. 簡易水分計を用いた酢酸エチルの合成収率の定量測定

酢酸エチルの合成反応の収率評価には高精度なガスクロマトグラフィー (GC) やカールフィッシャー法などが用いられてきた。GC は混合物の分離解析に優れる。しかし、測定時間が長く前処理が複雑である。また、カールフィッシャー法は試薬の管理と副反応への注意が必要であり、いずれの方法も前処理が煩雑でリアルタイム性に欠けるという課題がある。

一方、近赤外分光法 (NIR 法) と赤外分光法 (IR 法) は振動分光法の一つであり、前処理を必要とせず、迅速かつ非破壊的に定量が可能である<sup>6)</sup>。NIR 法はリアルタイム分析に適しており、製造ラインや現場での利用に向いている。しかし、複雑な検量線の作成が必要となる。これに対し、IR 法は官能基の吸収ピークを利用しており化学物質の同定に優れているため、研究室などの教育現場での精密な分析にも適している<sup>7)</sup>。

本研究では、NIR 法<sup>8-9)</sup> による溶媒中の水分含量の定量手法を参考にし、生成水分量を指標とした酢酸エチルの合成収率を間接的に評価する簡易水分計の開発を検討した。

酢酸とエタノールのエステル化反応は、酸触媒の存在下で加熱とともに進行し、酢酸エチルと水を生成する平衡反応である。酢酸エチルの合成反応の収率評価をするには、酢酸エチル合成反応の生成物である水の量を定量することが有効である。

例えば、NIR 法は、水分子の官能基の OH 高次倍音・結合音の帯域に吸収波長があり、溶媒背景の影響が小さいことから水分量の定量に適して

おり、酢酸エチルのエステル化反応における水の生成量をリアルタイムで追跡することの応用が可能である。

また、硫酸、酢酸、エタノール、酢酸エチル、水の IR スペクトルを比較することで、各成分の特徴的な吸収ピークを明確にし、定量の根拠とすることができる。

有機化合物の反応に関するマイクロスケール実験について多くの研究報告が存在する<sup>10-14)</sup>。しかし、定量測定を伴うマイクロスケール有機化学実験に関する報告は極めて少なく<sup>15-16)</sup>、この分野の教材開発が課題として残されている。そこで本研究では、定量測定を伴う有機化学実験教材の開発を目指し、酢酸エチル合成反応系中の水の生成量から合成反応の進行度を推定し、生成水分量を指標とした酢酸エチルの合成収率を定量測定する簡易水分計の開発を検討した。具体的には、光源 (発光素子) として近赤外線 LED を、検知器 (受光素子) としてフォトダイオードを用い、発生電流をデジタルテスターで測定することで酢酸エチルの合成収率を間接的に評価する簡易水分計の開発を行なった。

### 2.1 簡易水分計を用いた酢酸エチルの合成実験

図 1-図 5 は、分光光度計 (SHIMADZU UV mini 1240 UV-VIS SPECTROPHOTOMETER) による、酢酸エチルの合成反応時に脱水縮合反応系内に存在する各物質 (硫酸・酢酸・エタノール・水・酢酸エチル) のスペクトルである。

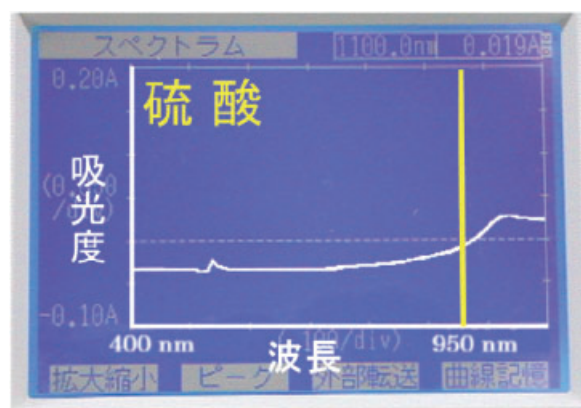


図 1 硫酸のスペクトル

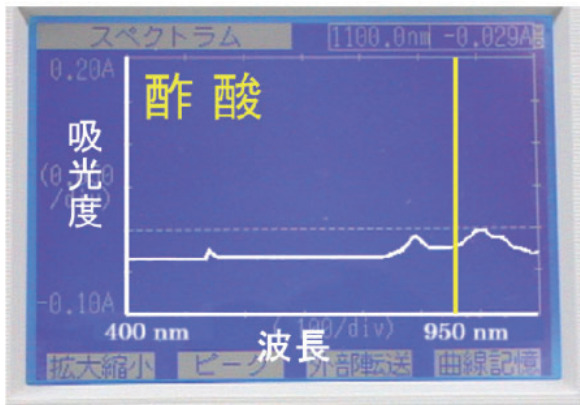


図2 酢酸のスペクトル

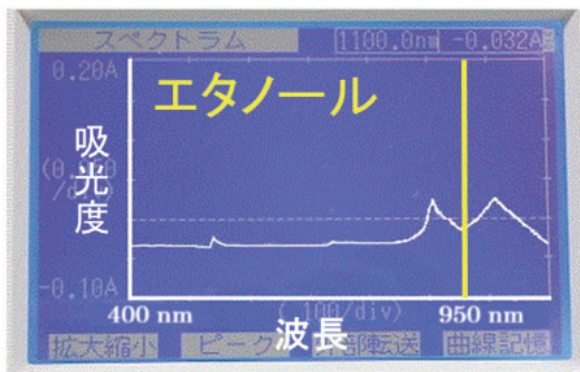


図3 エタノールのスペクトル

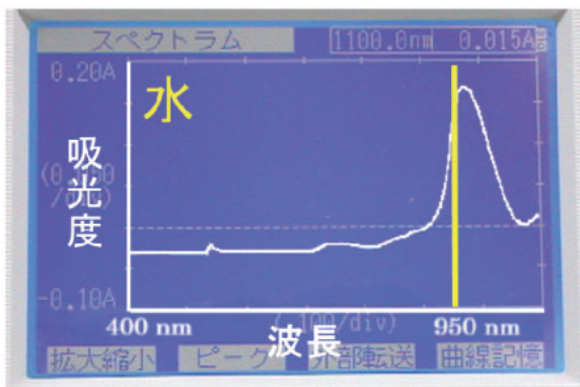


図4 水のスペクトル

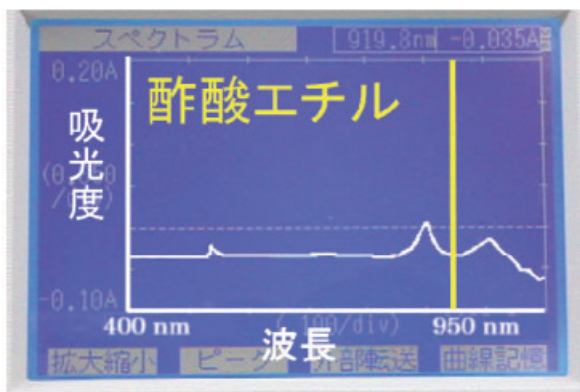
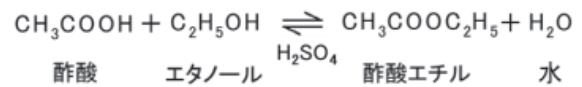


図5 酢酸エチルのスペクトル

酢酸エチルの合成反応<sup>17)</sup>では触媒（硫酸）のもとで反応が進行し、平衡が右に移行するとともに脱水縮合反応による水分子が反応系に生じる。



原料と生成物の分光光度計によるスペクトルを比較してみると、水分子は977 nm付近をピークとする近赤外線を吸収（物質の基底状態から励起状態への電子遷移に基づく近赤外線の光を吸収）する。

測定溶液の温度上昇に伴い950 nm付近の吸収ピークが高波数側にシフト変化して吸光度は減少変化を示すため、水分を含むサンプルの近赤外測定では温度を一定にして測定しないと、水分量の測定時の吸光度が一定しない（図6）<sup>18)</sup>。水のピークシフトの主たる原因として、近赤外領域では水素結合しているOH基と吸収ピーク強度が比較的大きな水素結合していないOH基の吸収ピーク位置が大きく異なることなどにより水分子同士の水素結合が温度により変化するためと言われている。

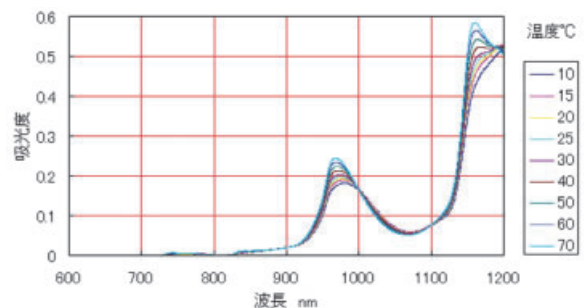


図6 水の赤外線吸収スペクトルの温度依存性<sup>18)</sup>

このような背景を受け、各物質（硫酸・酢酸・エタノール・水・酢酸エチル）のスペクトルの吸収ピーク波長のデータを活用し、ガラス製の分光セルを用いて高等学校の科目「化学」の酢酸エチルの合成反応で生成水分量を指標とした収率の定量測定を伴う実験に用いる簡易水分計の開発を検討した。その具体的な内容としては、水の赤外線吸収ピーク波長を考慮し、光源として近赤外線LED（950 nm）、検知器にフォトダイオードをそれぞれ使い、これらの光学素子により得られる電流の測定にはデジタルテスターを使用する構成の簡易水分計の開発を検討した。

## 2.2 簡易水分計の開発

本研究では、水分子が 977 nm 付近をピークとする近赤外線を吸収することに注目し、安価（単価は約 40 円程度）で入手可能な 950 nm の LED（OSRAM、TD271）光源を使用し、酢酸エチル合成反応系中の水の近赤外線吸収を測定した。

この簡易水分計による測定では、近赤外線波長の LED（950 nm）の光を試料に照射すると、水分子の濃度に応じて光が吸収されて透過光の強度が変化する。酢酸エチル合成反応系中の水の生成量が多いほど光の吸収が大きくなり、フォトダイオード（OSRAM、BP104S）に届く光の量は少なくなる、これにより反応進行度の推定が可能となる。

### (1) 簡易水分計の測定原理

酢酸エチルの合成反応では、反応の進行に伴って増加する反応系中の水分子の濃度の測定原理となる、Lambert-Beer の法則の関係が成立する。

Lambert-Beer の法則では、図 7 の模式図中の入射光の強度 ( $I_0$ ) と透過光の強度 ( $I$ ) の間に次の関係式が成立する。

$$A = -\log_{10}(I/I_0) = -\log_{10} T = \varepsilon CL$$

この式中の  $A$  は吸光度、 $T$  は透過度、 $\varepsilon$  ( $\text{cm}^2/\text{mol}$ ) は定数でありモル吸光係数と呼ばれる。

Lambert-Beer の法則により、吸光度  $A$  は波長と光路長が一定であれば試料濃度  $C$  ( $\text{mol/L}$ ) に比例する。

測定方法はガラスセル中に反応後の溶液を入れ、簡易比色計にガラスセルをセットして蓋をすることで、外部からの光を遮光する。光源の近赤外線 LED からでる特定波長（ピーク波長 950 nm）の光は、エステル化反応により生じる水分子に吸収される。

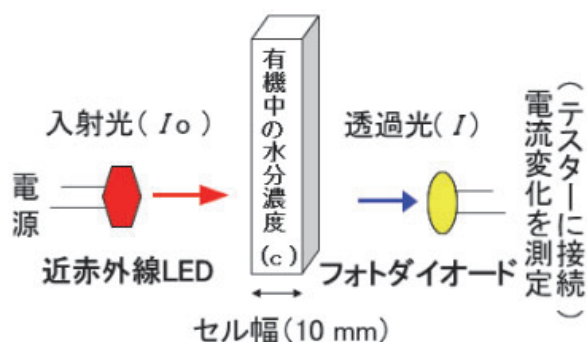


図 7 簡易水分計の基本構成の模式図

簡易水分計の作製に用いた近赤外線 LED（OSRAM、TD271）はピーク発光波長が 950 nm であり、抵抗（1/4 W カーボン抵抗の 47  $\Omega$ ）を直列に接続して使用した。

検知器のフォトダイオード（OSRAM、BP104S）には受光した光の強度に比例して微量の電流が生じる。この電流をデジタルテスターで測定し、あらかじめ作成しておいた検量線より酢酸エチルの合成収率を計算で求める。

フォトダイオードを使用する利点は、光の照度 に比例した電流が発生することである（図 8）。

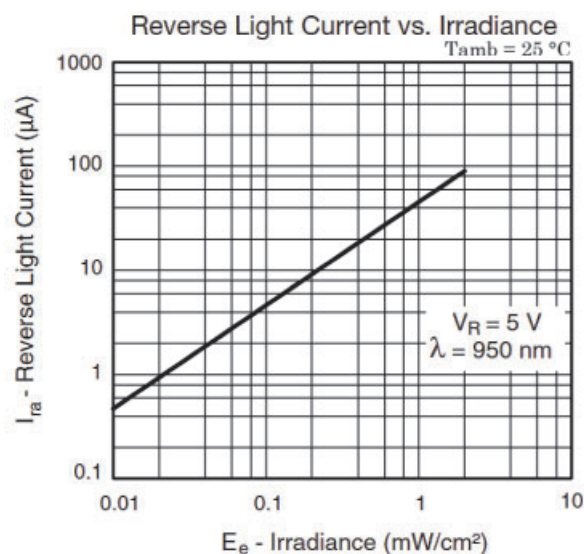


図 8 フォトダイオードの特性<sup>註1)</sup>

近赤外線 LED にかかる電圧は標準順方向電圧を考慮して 3.0 V に設定した。酢酸エチル合成反応系中に生成した水の測定時の溶液温度は 20°C である。また、図 9 に、測定時の様子を示す。なお、図 9 は測定状況が見えるように簡易水分計のプラスチックのケースの蓋を外した状態である。

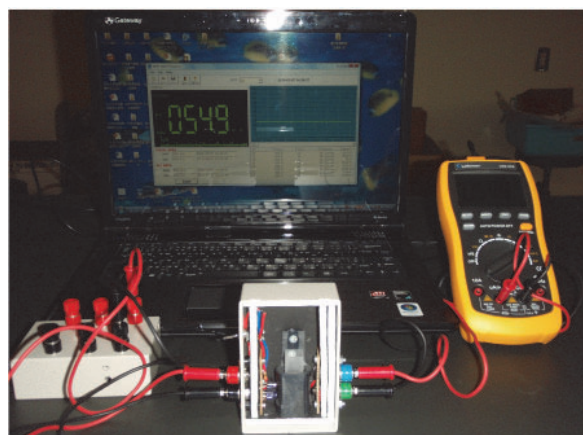


図 9 酢酸エチル合成反応系中に生成した水を測定している様子

### 2.3 簡易水分計の製作

Lambert-Beer の法則は、一定波長の光が一定光路長の条件下で成立する。本研究ではセルホルダーにより分光セルのぐらつきがあると測定毎に水溶液の一定光路長  $L$  (cm) が保証されないため、光の透過距離が変わり、正確な測定ができなくなる。よって、セルホルダーによる分光セルの固定は測定精度を左右する重要工程である。

(1) セルホルダーに用いるアルミ製角パイプ材料  
プラスチックセル容器やガラスセル容器の外径と同じ内径を持つ既成のアルミ製角パイプ（株式会社 光 AK15151、 $1.2 \times 15 \times 15 \times 995$  mm）は全国のホームセンター（DIY 用品販売店）などで購入が可能である。

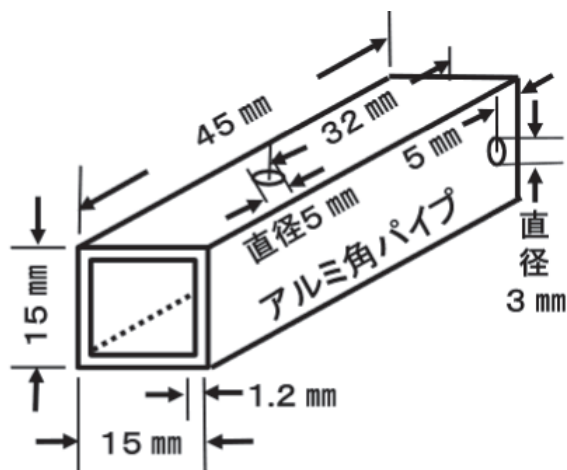


図 10 セルホルダー用のアルミ製角パイプ材料<sup>19)</sup>

(2) 簡易水分計のセルホルダーの製作工程<sup>19-20)</sup>

1) アルミ製角パイプを用いたセルホルダーの製作方法については、引用・参考文献の 19-20) を参照されたい（図 10）。

2) ホームセンターで市販されている水道パイプの継ぎ手を用いたセルホルダーの製作方法については、のこぎりやすりがあれば容易に加工できる（図 11）。

分光セル（長さ 45 mm）の透明な測定可能側面の 30 mm が中に入るように水道パイプの継ぎ手をカットする。下から 25 mm のところを中心に砲弾型 LED 用の穴を開け、180 度のところに透過光を通すスリットを作成する。水道パイプの継ぎ手の端に分光セルの 4 つの角に合わせた切込みを

入れる。LED 用の穴が分光セルの測定側面と垂直になるように切込み位置を決める必要がある。図 11 の簡易水分計の構造で、左がフォトダイオードで右が近赤外線 LED である。その間に分光セルを固定する建材用の水道パイプの継ぎ手を加工したセルホルダーが設置されている。簡易水分計は分光セルをケース内で外光の影響を受けずに測定できる。



図 11 水道パイプの継ぎ手を用いたセルホルダーの製作方法

(3) 簡易水分計の製作に用いる材料の一式

製作に必要な材料の一覧と入手価格の一例を表 1 に示す。これらの部材はホームセンターなどで入手でき、電子部品はインターネットで同等品（同じ波長の代替品）が容易に購入できる。また、製作過程では、のこぎりや電動ドリルやねじ回しを使用して材料を加工し、プラスチックケースに取り付けた。製作に要する時間はおよそ 90 分

で、1台の簡易水分計を製作するために必要な材料費は表1の価格に必要な数を掛けたものの合計となる。

表1 簡易水分計の製作に用いる材料

材料の用途	部品名	規格	価格
セルホルダー	HI-S13ソケット	25×80×40 mm	99円
プラスチックケース	モールドケース	32×80×125 mm	625円
本体の台	黒ウレタンボード	400×450×10 mm	110円
ねじ	ねじボルト	15×3 mm	110円
バナナジャックコネクタ	MK-626-0	直径4 mm	110円
炭素皮膜抵抗器	47 Ω	定格1/2W or 1/4W	2円
近赤外線LED	OSRAM TD271	950 nm	150円
フォトダイオード	OSRAM, BP104S	950 nm	116円

## 2.4 検量線の作成

### (1) 既知試料 (標準試料) の調整

表2 標準試料の調整表

	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
酢酸	11.44	10.29	9.15	8.01	6.86	5.72	4.58	3.43	2.29	1.14	0.00
エタノール	11.62	10.46	9.30	8.13	6.97	5.81	4.65	3.49	2.32	1.16	0.00
水	0.00	0.36	0.72	1.08	1.44	1.80	2.16	2.52	2.88	3.24	3.60
酢酸エチル	0.00	1.95	3.91	5.86	7.81	9.77	11.72	13.67	15.63	17.58	19.53

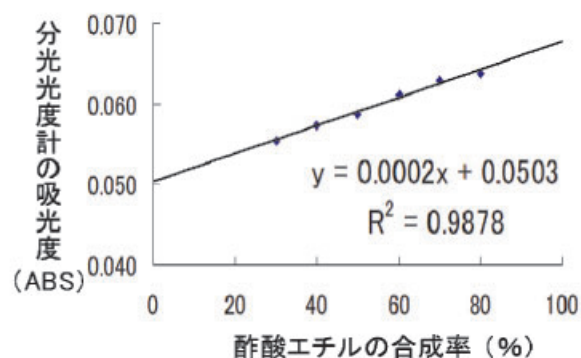
(単位はmL)

表2は、酢酸エチル合成反応において反応物を0.2 mol 等量 (同じ分量) で設定した条件下で、反応進行度0～100%に対応する反応系中の各反応物および生成物の体積を示したものである。単位はすべてmLとした。

検量線は、既知試料 (標準試料) を調整し、市販の分光光度計を使用して検量線を作成する。次に、簡易水分計についても測定結果を基に検量線を作成し、その結果を市販の分光光度計と比較検討することにより簡易水分計の定量測定の精度を評価する。

簡易比色計の性能を調べるために、既知試料 (標準試料) として、硫酸 (触媒)・酢酸・エタノール・水・酢酸エチルの混合溶液 (無色透明) を用いて、0.2 mol 等量の反応物による酢酸エチルの合成反応の進行度 (0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%) の反応溶液の標準試料を準備する (表2)。本実験では、作成した検量線の直線関係を示す範囲において、生成水

分量を吸光度から求め、その値をもとに酢酸エチルの生成量 (収率) を算出した。また、既知試料 (標準試料) では、20% 以下の試料溶液は希薄なため、90% 以上反応が進んだ場合の試料溶液は、液層が有機層と水層に分離した影響により、得られる値は正確な測定値として扱うことができなかった。



(測定波長は 950 nm、測定時の溶液の温度は 20℃)

図12 分光光度計による検量線

図12は市販の分光光度計 (SHIMADZU UV mini 1240 UV-VIS SPECTROPHOTOMETER) を使用して吸光度を測定し、作成した検量線である。

一般に分光光度計では、0.05～2.0の吸光度範囲が誤差などの影響が小さく信頼性の高い測定範囲とされている。<sup>註2)</sup>

次に、簡易水分計については、反応系中の水分子の濃度が非常に希薄であるため、標準試料の測定結果を基に近似直線を作成し、酢酸エチル合成反応の進行度により酢酸エチルの合成量を推定することとした。また、その結果を市販の分光光度計の測定結果と比較検討することにより、水分測定計の定量測定の精度を評価した。

### (2) 簡易水分計の近似直線の作成<sup>註3)</sup>

簡易水分計については測定結果を基に近似直線を作成した。また、希薄溶液では近似直線が直線関係を示す濃度範囲では定量分析に応用できる。

測定は分光光度計と同様の30%から80%の反応が進んだ場合の既知試料 (標準試料) を用いて行った。

簡易水分計の光源の近赤外線LED (ピーク波長 950 nm) からでる特定波長の光は、エステル

化反応より生じる水に吸収される。透過光により、受光素子のフォトダイオード（ピーク感度波長 950 nm）に受光した光の強さに比例して微量の電流が生じる。この電流値をデジタルテスターで測定して簡易水分計による近似直線を作成した。

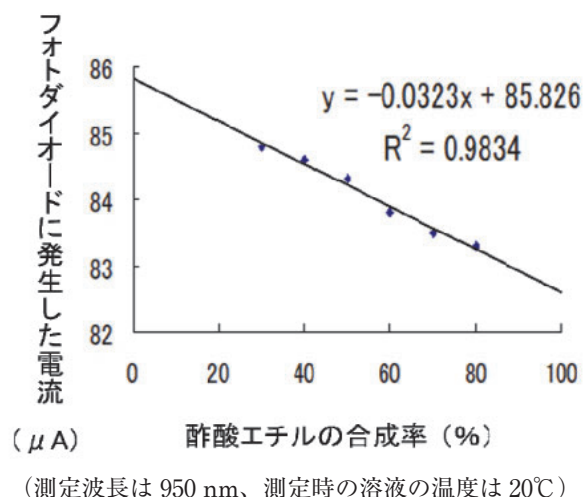


図 13 簡易水分計による近似直線

図 13 は、簡易水分計による測定電流値の結果を基に作成した近似直線である。希薄溶液であれば、測定電流値と濃度が比例関係にあるので、測定電流をそのまま検量線に使用できる。

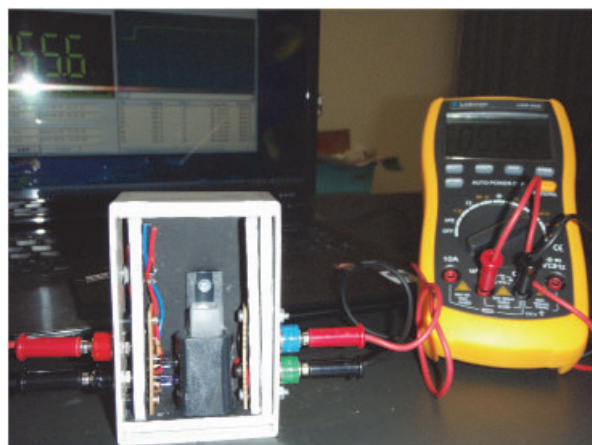


図 14 簡易水分計による測定の様子

近赤外線 LED にかける電圧は標準順方向電圧を考慮して 3.0 V に設定した。また、酢酸エチル合成反応系中の生成水分量の測定時の溶液温度は 20℃ である。

図 14 の左側の簡易水分計は、測定時の内部の状況が分かるように、プラスチックのケースの蓋を外した状態である。

### Ⅲ. 酢酸エチルの合成実験の方法と簡易水分計の測定結果の比較

実験の手順は次の通りである。0.2 mol 等量の酢酸とエタノールを乾いた試験管に入れ、濃硫酸を 0.15 mL 加えて簡易冷却管付きゴム栓を付ける（図 15 の右）。試験管を 75℃ の温水で加熱しながら約 5 分間反応させる。その後 20℃ まで冷却し（図 15 の左）、分光光度計で吸光度を測定し、その値と検量線から濃度を算出する。また、簡易水分計で受光素子のフォトダイオード（ピーク感度波長 950 nm）に発生した電流値（ $\mu\text{A}$ ）と検量線から濃度を算出する。

酢酸エチルの合成反応実験を 2 回（実験 1 と実験 2）行い、分光光度計と簡易水分計とを用いて、反応溶液中の水分量を測定し比較した。その結果、両実験において簡易水分計は分光光度計とほぼ同等の酢酸エチルの合成収率（%）を示し、簡易水分計が実用に耐える測定精度を備えていることが確認された（表 3）。



図 15 冷却用氷水（左）と湯浴用フラスコ（右）

表 3 酢酸エチル合成実験の測定値

	実験 1	実験 2
分光光度計の吸光度 (ABS)	0.0594	0.0582
分光光度計の収率 (%)	45.5	39.5
簡易水分計の電流値 ( $\mu\text{A}$ )	84.4	84.6
簡易水分計の収率 (%)	44.1	38.0

その後、試験管に水を加え、2 層に分離した上の溶液を集めて単離収率とする。粗雑な純度の合成した酢酸エチルの収率は約 55 ~ 60% であった

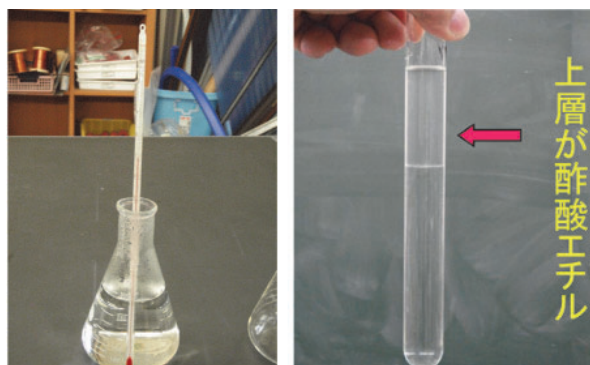


図 16 温水の温度確認(左)と合成した酢酸エチル(右)

(図 16 の右)。

さらに、反応混合物を 30 mL の冷却水に注ぎ、炭酸ナトリウムで硫酸を中和し、2 層に分かれた透明な溶液の上層をピペットで取り集めた。単離収率は一般に、酢酸エチル合成反応は可逆反応であり、精製過程で合成直後の収率よりも単離できる酢酸エチルは減少する傾向にある。

市販特級の酢酸エチルと合成実験で単離した化合物をそれぞれ分光光度計で測定してスペクトルの波形の比較を行った。その結果、この物質は蒸留で酢酸エチルの分離を行っていないため、微量の不純物を含んだ酢酸エチルであることを確認した(図 17- 図 18、表 4)。

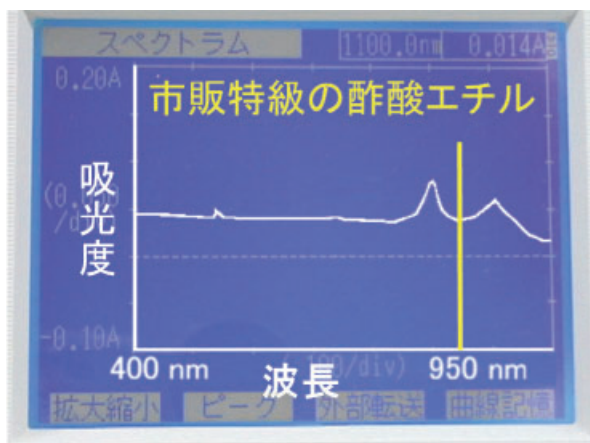


図 17 市販特級の酢酸エチルの分光光度計によるスペクトル

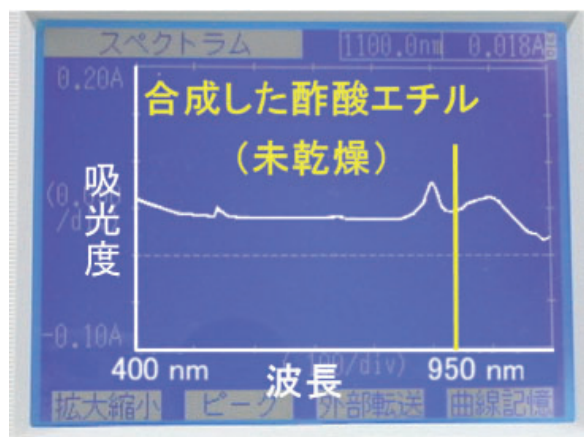


図 18 合成した酢酸エチル(未乾燥)の分光光度計によるスペクトル

表 4 特級の酢酸エチルと合成した酢酸エチルの吸収ピーク波長の比較

特級酢酸エチル		合成した酢酸エチル	
ピーク (nm)	ABS	ピーク (nm)	ABS
1008	0.058	1007	0.061
902	0.078	902	0.071
737	0.041	737	0.041
537	0.049	537	0.051

#### IV. まとめ

本研究では、エステル化反応における生成水の定量を目的として、低コストで簡易かつ定量測定に適した簡易水分計の開発を行った。開発した装置の性能評価を実施した結果、生成水分量を指標とした酢酸エチルの合成収率の定量測定に必要な測定精度を備えた簡易水分計の開発に成功した。さらに、酢酸エチル合成反応系中の水分子の濃度を簡易水分計で測定することにより、反応の進行度を予測して酢酸エチルの合成量をリアルタイムで推定できる可能性が示された。

簡易水分計を用いた酢酸エチル合成反応実験による収率測定結果と、分光光度計を用いた酢酸エチル合成反応の収率測定結果との比較により、本研究で開発した簡易水分計の有効性が実証された。

従来困難であった定量的評価を簡易かつ低コストで実現することで、教育現場における化学実験の再現性を確保し、学習者が実験結果を客観的に

分析する過程で科学的思考力（自然現象を論理的に分析し、仮説検証を通じて合理的な結論を導く能力）の育成に寄与することが期待される。

今後の課題は、高等学校化学教育において、安全性と効率性の向上を目的に、酢酸エチル合成収率の定量測定をリアルタイムで可能にする教材のマイクロスケール化を進めることである。そのため、簡易水分計と小型試験管を組み合わせたマイクロスケール化学実験教材<sup>21)</sup>の開発を継続する。

## 謝辞・附記

本論を修正する上で、大変有益なご意見を頂いた2名の匿名査読者の方々に記して深謝します。

本研究は、JSPS 科研費（基盤研究（C）、JP 23K02353、代表者 畑 宗平）の助成を受けたものである。

本稿は日本化学会第90春季年会（畑宗平：2010年8月東大阪市、近畿大学 発表論文集 p.459）で発表した内容に関して、加筆・再構成したものである。

## 註釈

- 1) 出典は OSRAM Vishay Semiconductors BP104S の Data による。  
(<https://www.vishay.com/docs/81500/bp104.pdf> (2026年1月29日参照))
- 2) 分光光度計による吸光度測定は 0.05 ~ 1.0 Abs の範囲で最も誤差が小さく、信頼性が高いとされる。Beer-Lambert の直線性は 0.1 ~ 1.0 Abs の範囲で保証されている。よって、0.05 Abs 以上であれば光量が十分に確保され、フォトメトリック精度（分光光度計の精度は ± 0.005 ~ 0.01 Abs。0.05 Abs 以上であれば誤差率が許容範囲内）の観点からも実務上許容される。また、島津製作所の技術資料「UV TALK LETTER Vol.15」(2019年06月10日)では「吸光度 1 以下はどの機種でも正確に測定できる」とされており、0.05 ~ 1.0 Abs は教育・研究の双方で安定した測定範囲として妥当である。  
([www.an.shimadzu.co.jp/sites/an.shimadzu.co.jp/files/pim/pim\\_document\\_file/an\\_jp/journal/talk\\_letters/19862/c101-0885.pdf](http://www.an.shimadzu.co.jp/sites/an.shimadzu.co.jp/files/pim/pim_document_file/an_jp/journal/talk_letters/19862/c101-0885.pdf) (2026年1月29日参照))
- 3) 一般的には、出力電流をデジタルテスターで測定し、測定結果の電流値を Lambert-Beer の法則を基に対数処理して求めた検量線を活用する。  
例えば、光源の近赤外線 LED（ピーク波長 950 nm）からでる特定波長の光は、エステル化反応より生じる水に吸収される。透過光により、受光素子のフォトダイオード（ピーク感度波長 950 nm）に受光した光の強さに比

例して微量の電流が生じる（図 14）。この電流値をデジタルテスターで測定し、電流値を対数処理して吸光度を求める。しかし今回は、非常に希薄な溶液のため、吸光度の値が 0.01 よりも小さい値になるため、簡易水分計のフォトダイオードに発生した電流値（ $\mu\text{A}$ ）の測定結果を基に作成した近似直線を用いた。

## 引用・参考文献

- 1) 畑宗平、「酢酸エチルの合成反応で収率測定を可能にする「簡易型光学式測定装置の開発」、日本化学会第90春季年会（東大阪市、近畿大学）講演予稿集 I、p.459.
- 2) 井本英夫、尾中篤、松村道雄ほか22名、「i 版 化学基礎」、新興出版社啓林館、2025；辰己敬ほか17名、「化学」、数研出版、2023 など。
- 3) 文部科学省、中学校学習指導要領（平成29年告示）解説 理科編、学校図書、2019、p.23.
- 4) 文部科学省、高等学校学習指導要領（平成30年告示）解説 理科編 理数編、実教出版、2018、p.21.
- 5) 畑宗平、「高校化学の実験で少量の液体の加熱操作を簡易化する教具」、理科教育学研究、2019、59、3、pp.457-465.
- 6) 福岡久雄、大谷悦久、「高校化学実験における赤外分光光度計（IR）の利用と実践について（II 報）」、研究報告、東京教育大学付属駒場中等学校研究係、1978、17、pp.11-46.
- 7) 山形暢、菅野麻奈美、大谷眞智子、吉村季織、高柳正夫、「近赤外分光法と赤外分光法による布地材質の分析」、ITE Technical Report、2016、40（3）、pp.33-38.
- 8) Rameswara Rao, K. B. Chandrasekhar, "Quantification of moisture content in Ethylacetate using Fourier transform Near Infrared Spectroscopy", Journal of Applied Chemistry, 2016, 4（1）、pp.1-6.
- 9) 服部祐介、鈴木泰幸、「近赤外分光によるフロー合成中の溶媒濃度および水分量の定量的モニタリング」、横河技報、2024、67（1）、pp.35-40.
- 10) 早藤幸隆、増井健人、高津戸秀、今倉康宏、「科学的に探究する能力と態度を育てる化学教材の開発（Ⅲ）－アゾ色素を用いた総合化学実験プログラムの試行－」、化学と教育、2005、53（2）、pp.94-97.
- 11) 中村文、島田秀昭、「高校化学で用いる合成洗剤のマイクロスケール実験」、日本科学教育学会研究会研究報告、2016、31（2）、pp.13-16.
- 12) 長谷川正、今瀬禎宏、白井豊和、「スモールスケールの有機合成：酢酸エチルの合成と精製」、化学と教育、1994、42（10）、pp.702-703.
- 13) 長谷川正、今瀬禎宏、宮崎仁志、「スモールスケールの有機化学実験：ニトロベンゼンの合成と減圧蒸留による精製」、化学と教育、1994、42（12）、pp.834-835.
- 14) 陣内大地、松岡雅忠、「固体酸触媒を利用したエステルのマイクロスケール合成－エステルのかおりを比較する化

- 学実験授業プログラムの開発」、理科教育学研究、2023、64 (3)、pp. 353-364.
- 15) 長谷川正、今瀬禎宏、山崎裕子、「スモールスケールの有機合成実験：酢酸ブチルの合成とプラモデル用のセメダインの作製」、化学と教育、1997、45 (1)、pp. 43-44.
- 16) 栗城鮎美、井上正之、「硫酸シリカゲルを用いるベンゼンのスルホン化－固体試薬によるマイクロスケール実験法－」、化学と教育、2019、65 (11)、pp. 588-561.
- 17) 山本祥子、島田秀昭、「酢酸エチルの合成およびけん化に関する教材研究」、九州地区国立大学教育系・文系研究論文集、2017、5 (1)、pp.18-27.
- 18) 倉田孝男、戸田勝哉、「ケモトリクス手法を用いた近赤外線小型分光器によるコンクリート診断装置開発」、IIC REVIEW、2008、39、pp. 36-42.
- 19) 畑宗平、「定量測定を伴うマイクロスケール実験教材の開発－分光セルを用いた電気分解の簡易比色計による銅イオン濃度の定量測定－」、立命館教職教育研究、立命館大学教職教育推進機構編、2025、12、pp.51-61.
- 20) 畑宗平、「簡易比色計を用いたマイクロスケール実験教材の開発－製作工程を簡易化した高精度な簡易比色計の開発とその改良－」、姫路大学教育学部紀要、姫路大学教育学部紀要編集委員会、2024、17、pp.17-23.
- 21) 畑宗平、「自作簡易加熱器具を用いた加熱操作を伴うマイクロスケール実験教材の開発」、日本理科教育学会近畿支部大会（和歌山市、和歌山大学教育学部付属中学校）発表論文集（日本理科教育学会）、2012、p.60.