

屈折糖度計を用いたアルコール発酵の定量的な観察 —化学量論係数理解のための活用—

Quantitative Observation of Alcoholic Fermentation using a Refractometer (Brix-Meter): Using for Understanding Stoichiometric Coefficients

島田 透*・藏 真奈*,**
Toru SHIMADA*・Mana KURA***

要 旨

本研究はアルコール発酵において消費されるグルコース量と生成するエタノール量を屈折糖度計により測定し、得られたデータを詳細に解析することにより、化学反応式で示される化学量論関係が反応の前後だけでなく反応中にも満たされていることが確認することができる実験を提案するものである。これまで、アルコール発酵の実験は生物系の授業において嫌気呼吸や微生物の働きを理解するために実施されることが多かった。しかし、アルコール発酵を化学反応式としてとらえることで、化学反応式に現れる係数の実感を伴った理解、化学における粒子概念の獲得、物質量の理解など化学系の実験としての活用が期待できることを示す。

キーワード：アルコール発酵、屈折糖度計、化学反応式、化学量論係数、粒子概念（物質量）

1 はじめに

アルコール発酵は、酵母の働きによりグルコースなどの糖が二酸化炭素とエタノールに分解される反応である。その反応は次に示す化学反応式で表される。



酵母の働きを利用したこの反応は、燃料の製造、パンやアルコール飲料の生産など幅広く利用されている。

日常生活とも深くかかわるアルコール発酵は、高等学校の理科学教科書（化学、生物、科学と人間生活）にもさまざまな単元で取り上げられ、広く学習されている。具体的には、化学においてはアルコール、糖、酵素をそれぞれ学習する際に、生物においては呼吸の学習をする際に、科学と人間生活においては微生物の利用を学習する際にアルコール発酵について学習する。手元にある「化学」の教科書ではアルコール発酵の実験に関する記載は見つけられなかったものの、「生物」と「科学と人間生活」の教科書にはキューネ

発酵管を用いた実験^{1,2)} や注射器筒を用いた実験^{3~7)} についての記載がある。キューネ発酵管を利用した実験は、発生した二酸化炭素の量（体積）を追跡する定量的なもの^{1,2)} であるのに対し、注射器筒を利用した実験は、発生した二酸化炭素の石灰水による検出や発生したエタノールのヨードホルム反応による検出など定性的なもの^{3~7)} である。

アルコール発酵には、糖（基質）の種類や濃度、温度、pH、酵母の量や保存環境などが影響を及ぼす。このため、これらの影響を詳細に検討し、学校におけるアルコール発酵実験に資することを旨とした研究も行われている^{8~11)}。これらの研究は、高等学校の教科書に記載される実験と同様に、反応の生成物である二酸化炭素やエタノールを主な観察対象としている。反応物である糖の減少に着目した研究も行われているものの、バイオリクターにおける酵母の再利用の可能性に関して議論するもの¹²⁾ であり、アルコール発酵そのものの教材化とは観点が異なっている。

* 弘前大学教育学部理科教育講座
Department of Science, Faculty of Education, Hirosaki University
** 北海道足寄町立足寄中学校
Ashoro Junior High School, Ashoro, Hokkaido

そこで本研究では、化学的な視点から、反応物である糖の減少に着目したアルコール発酵の定量的な観察の検討に取り組んだ。糖の減少量の測定には屈折糖度計を用いた。屈折糖度計は、サトウキビの収穫時期を見定めることを目的に開発されたため糖度計とよばれている¹³⁾ものの、実際には糖だけでなく、塩類、たんぱく質、酸など水に溶けているものの合計を表示する計測器である^{13~15)}。このため本研究では、測定で得られたデータに対し、反応物の糖の減少だけでなく、生成物のエタノールの増加についての議論も行った。その結果、化学反応式で表される化学量論関係をほぼ満たす値を得ることができた。アルコール発酵の実験は、生物系の授業において行われることが多いが、発酵現象を化学反応としてとらえることで、化学量論関係の理解、粒子概念の獲得や物質の理解をするための化学系の実験としても活用できる可能性があることが分かった。

2 実験

アルコール発酵の観察は、異なる初期濃度（2.0%、4.5%、8.3%）のグルコース水溶液に対して行った。酵母には、日清フーズ株式会社のスーパーカメリアドライイーストを用いた。このドライイーストはスーパーなどで容易に入手でき、予備発酵が不要なものである。アルコール発酵は40°Cの恒温槽にビーカーを入れて行った。グルコース水溶液と酵母懸濁液の混合は、両溶液が40°Cになったことを確認してから行った。グルコース水溶液の濃度は、酵母懸濁液と混合したときに所望の濃度となるように調整している。発酵中は時計皿で蓋をし、適宜発生した泡を潰しながら溶液の攪拌を行った。一定時間ごとにスポイトを用いて溶液を採取し、屈折糖度計による糖度測定を行った。測定後は、測定した溶液をすみやかにスポイトでビーカーに戻した。

糖度の測定には株式会社アタゴのポケット糖度計PAL-Jを用いた。この糖度計は、屈折率を測定することで糖度を決定している。計測に光を使うことから、測定は瞬時に行うことができる¹³⁾。屈折糖度計には、Brix目盛で測定した糖度が表示される。目盛で測られるBrix%は試料液に含まれる可溶性固形分の濃度を表し、スクロース（ショ糖）溶液100g中に含まれるスクロースの質量で定義されている¹⁴⁾。本研究では、Brix目盛で測定した糖度をBrix糖度とよぶことにする。

反応物のグルコースの測定には、株式会社タニタのポータブルグルコース計GF-501-SBTを用いた。このグルコース計は、グルコースオキシダーゼ固定化酵素膜と過酸化水素電極を組み合わせた酵素電極でグルコース濃度を計測する。

3 結果と考察

3-1 グルコース水溶液のBrix糖度

グルコースのみが水溶液中に存在するときの検量線を作成するため、さまざまな濃度のグルコース水溶液を調整し、屈折糖度計を用いて糖度測定を行った。調整したグルコース水溶液の濃度は0~20%であり、測定は40°Cで行った。各濃度3回ずつ測定を行い、各濃度で平均した値をプロットしたものを図1に示す。図1から、測定した濃度範囲においては、Brix糖度はグルコース濃度に比例することが確認できる。このときの直線の傾きは0.99であり、調整した濃度の99%の値としてBrix糖度が表示されることが分かる。すなわち10%のグルコース水溶液を40°Cにおいて同じ屈折糖度計を用いて測定を行うと9.9%と表示されるということである。デジタル屈折糖度計では温度補正は行われている¹⁴⁾と考えられるので、調整したグルコース水溶液の濃度と測定で得られる値との差異は、Brix目盛がスクロース（ショ糖）を基準にしていることによるものと考えられる。実際に10.0%のスクロース水溶液を調整し、同じ糖度計で糖度測定を行ったところ、10.0%と表示された。このことから、グルコース

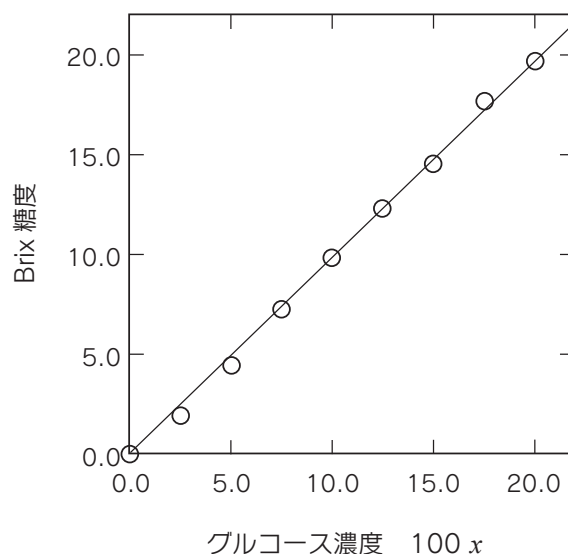


図1 さまざまな濃度のグルコース溶液に対するBrix糖度（検量線）。

水溶液でみられたずれは、グルコース水溶液とスクロース水溶液の間のわずかな屈折率の差によるものであると考えられる。

3-2 エタノール水溶液の Brix 糖度

屈折糖度計は、糖以外の濃度測定にも利用できる^{13~15)}。このため、濃度 0~20%のエタノール水溶液を調整し、屈折糖度計を用いて Brix 糖度の測定を行った。その結果を図 2 に示す。測定は 40°Cで行い、各濃度 3 回ずつ測定を行った平均をプロットしている。図 2 から、測定したエタノールの濃度範囲において、Brix 糖度は濃度に比例して直線的に増加することが確認できる。このときの直線の傾きを求めると 0.41 となり、調整したエタノール濃度の 41%の値が、屈折糖度計には Brix 糖度として表示されることが分かる。

この結果は、屈折糖度計は糖度の測定だけでなく、作成した検量線を利用することでエタノール濃度の測定にも使えることを示している。したがって、アルコール発酵の反応追跡に屈折糖度計を用いる場合には、反応物であるグルコースなどの糖の減少だけでなく、反応により生成するエタノールの増加も同時に測定していることに注意を払う必要がある。

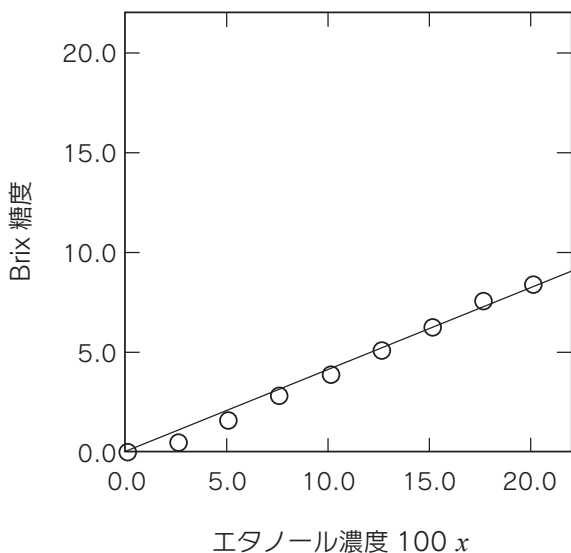


図 2 さまざまな濃度のエタノール溶液に対する Brix 糖度 (検量線)。

3-3 グルコースとエタノールの混合溶液の Brix 糖度

ここまでの実験結果から、グルコースとエタノールがそれぞれ単独で水中に存在するときの濃度は、屈折糖度計を用いて測定できることが確認できた。実際のアルコール発酵中の溶液には、グルコースとエタノールが同時に存在している。そこで、グルコースとエタ

ノールの混合溶液を調整し、Brix 糖度の測定に与える相互作用の有無について調べた。

グルコース 5 g とエタノール 5 g を精製水 50 g に溶かした水溶液を 40°C の恒温槽で温めたものに対し測定を行った。このときの濃度は、グルコース、エタノールともに 8.3% である。グルコースのみがこの濃度で存在する水溶液を測定した場合、図 1 の検量線をもとに考えると、屈折糖度計には 8.2% と表示されるはずである。また、エタノールのみがこの濃度で存在する水溶液中を測定した場合には、図 2 の検量線をもとに考えると、屈折糖度計には 3.4% と表示されるはずである。これらのことから、グルコースとエタノールに相互作用がないとすれば、混合溶液の Brix 糖度は、11.6% と屈折糖度計に表示されることが予想される。実際に調整した水溶液に対し測定を 3 回行ったところ、3 回とも 11.5% と表示された。したがって、グルコースとエタノールは水溶液中に共存したとしても、Brix 糖度の測定には影響を与えないことが考えられる。

過去に行われたブドウ酒醸造用センサー開発を目指した研究では、糖、アルコール、酸、ブドウ果汁のうち 2 つをさまざまな濃度で混合した溶液に対し Brix 糖度の測定が行われている¹⁶⁾。この研究は、各成分が共存した場合の Brix 糖度は、それぞれの成分の Brix 糖度の加算値であると報告している。したがって、本研究で測定した混合溶液は 1 種類のみであるものの、さまざまな濃度のグルコースとエタノールの組み合わせにおいても、Brix 糖度の加算性は成り立っているものと考えられる。

3-4 アルコール発酵の観察

グルコース水溶液の初期濃度を 2.0%、4.5%、8.3% としたものに対し、屈折糖度計を用いてアルコール発酵の観察を行った。Brix 糖度の測定間隔は、初期濃度が 2.0% のものは 5 分、それ以外の 2 つの濃度の溶液に対しては 20 分ごとである。

反応時間に対する Brix 糖度の変化を図 3 に示す。どの初期濃度で反応を開始しても、Brix 糖度は直線的に減少した後、完全に 0 にはならず一定値となっている。屈折糖度計を用いた小野寺らの研究¹²⁾でも、Brix 糖度が 0 にはならず、一定の値で低下しなくなることが報告されている¹²⁾。

小野寺らは Brix 糖度が一定の値となり変化しなくなるのは、酵母の働きが弱まることで、反応物の糖が残っているにもかかわらず反応が進まなくなるためだ

と推測をしている¹²⁾。しかし、小野寺らは、酵母の再利用回数を検討することを目的に、引き続き同じ酵母を使った複数回のアルコール発酵の観察を行い、反応速度は遅くなるものの同程度の Brix 糖度までは反応が進行することも報告をしている¹²⁾。もし、酵母の働きが弱まったことで反応が進まなくなったのだとすれば、酵母の複数回の利用は難しいと考えられる。小

野寺らの観察では、反応速度が遅くなっていることから、反応中に酵母数の減少が生じている可能性はあるが、酵母自体の働きが弱まったことにより反応が停止したとは考えにくいと思われる。

このようなことから、反応の後半で Brix 糖度が一定となり下がらなくなるのは、原料であるグルコースが反応により全て消費されアルコール発酵が終了するためだと考えられる。このことを確認するため、Brix 糖度が一定となった後の溶液に対し、グルコース計を用いてグルコース濃度の測定を行った。その結果、グルコース計には常に 0 の値が表示された。すなわち、最初に用意したグルコースはアルコール発酵により全てエタノールに変換され、溶液中には残っていないということである。したがって、Brix 糖度が一定となった後に屈折糖度計に表示される値は、生成したエタノールの値を主に示しているものといえる。

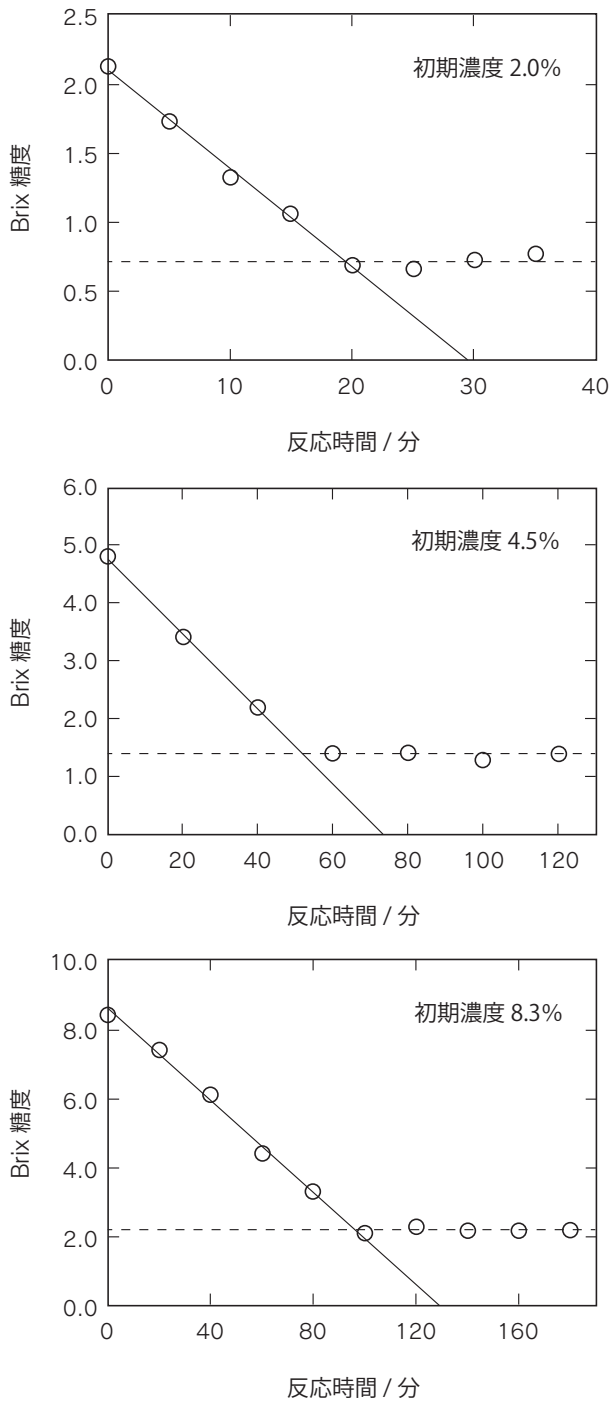


図3 初期濃度2.0%、4.5%、8.3%のグルコース溶液に対するアルコール発酵の観察結果。丸印：測定結果、実線：Brix 糖度が減少する部分の近似曲線、破線：Brix 糖度が一定となったときの平均値。

3-5 アルコール発酵の反応時間

これまでみてきたように、屈折糖度計を用いてアルコール発酵を一定時間間隔で測定したとき、ある反応時間以降において Brix 糖度が一定の値となる。これは、原料となるグルコースが全て消費されたことにより反応が終了したためである。このことから、反応時間の前半部における傾きが負の直線と、後半部における水平な直線との交点から、アルコール発酵が終了した反応時間を決定することができる。

3種類の異なるグルコース初期濃度で観察を行った結果(図3)に対し、反応中の Brix 糖度の変化を表す近似式を最小二乗法により求めた(図3実線)。すべての濃度において Brix 糖度の変化は直線でフィットでき、その時間変化(直線の傾き)はおよそ -0.07% /分で一致し、初期濃度によらないことが分かった。このことは、本実験条件におけるアルコール発酵は、基質の濃度によらない零次反応で進行していることを意味しているものと考えられる。これまでの研究でも、グルコースの初期濃度が1%と10%のときとで反応速度がほとんど変わらないことが報告されており、今回の結果は過去の研究ともよく一致している⁸⁾。また、二酸化炭素の発生量の計測においても、反応の初期を除いて発生量は直線的に変化することが報告されている⁹⁾。

反応が終了し、一定となった Brix 糖度の平均値を表1および図3に破線で示す。先に求めた右下がりの直線との交点から、グルコースが全て無くなるまでの反応時間として、グルコースの初期濃度が低いものか

ら順に19分、52分、97分を得た。

表1 一定値となった Brix 糖度

グルコース初期濃度 100 x	反応後の Brix 糖度	酵母の影響を除いた Brix 糖度
2.0	0.7	0.4
4.5	1.4	1.1
8.3	2.2	1.9

3-6 反応時間の予測

学校の授業や実験教室などで実験を行う場合、所定の時間内に実験が終わるよう事前に検討を行う必要がある。さきほど求めたアルコール発酵の終了時間とグルコースの初期濃度との関係は、本実験と同条件のアルコール発酵の実験を計画する際には、グルコースの初期濃度を何パーセントにすればよいのかの指針を与える。

アルコール発酵の終了時間とグルコースの初期濃度との関係を図4に示す。この直線の傾きを最小二乗法により求めると、0.086という値が得られる。この値をもとに考えると、例えば、60分でアルコール発酵が終了する観察を児童・生徒に行わせたい場合には、5.2% (=0.086%/分×60分) のグルコース溶液を最初に用意すればよいということが分かる。

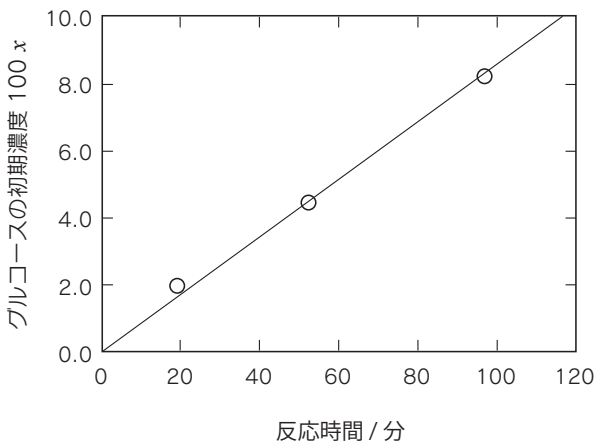


図4 反応時間とグルコースの初期濃度との関係。

3-7 ドライイーストによる糖度測定への影響

ここまで、ドライイーストによる Brix 糖度測定への影響については議論をしてこなかった。これまでの研究では、ドライイーストの製造時の加熱処理や水に溶かす際に死滅した酵母の存在が糖度測定に影響を与えることが指摘されている¹⁰⁾。したがって、定量的な議論を進めるためには、ドライイーストによる影響を

考慮する必要がある。

本研究では、アルコール発酵の反応時間を決定する際、反応前半において Brix 糖度が減少する部分の直線を最小二乗法により決定した。このとき得られた切片は、どの初期濃度においても、調整したグルコースの初期濃度から予想される Brix 糖度よりも大きい値であった。このため、予想値よりも大きい部分が酵母による影響だと考えた。3種類の異なるグルコース初期濃度において、切片と予想値とのずれの平均をとると0.3%となった。観察した反応時間内において、反応速度に変化が見られないこと、また本実験でアルコール発酵を行わせる40℃という温度が酵母の生育最適温度から外れることから、酵母の生育や死滅は起こっていないと考え、酵母からの影響は常に0.3%であるとみなし解析を進めることとした。

3-8 生成したエタノールの濃度

反応終了後に一定値となった Brix 糖度から酵母の影響を除いたものを表1に示す。先にも述べたように、グルコース計によりグルコースが存在しないことが確かめられたことから、酵母の影響を除いた Brix 糖度は生成したエタノールのみ由来するものと考えられる。ここでは、この一定となった Brix 糖度から、生成したエタノール濃度を求めていく。

本実験の屈折糖度計を用いてエタノール水溶液を測定すると、実際のエタノール濃度の0.41倍の値が Brix% として表示される。したがって、屈折糖度計に表示された値を0.41で割れば、実際のエタノール濃度を求めることができる。例えば、グルコース初期濃度8.3%からアルコール発酵を開始した場合、一定値となる Brix 糖度から酵母の影響を除いた値は1.9%とな

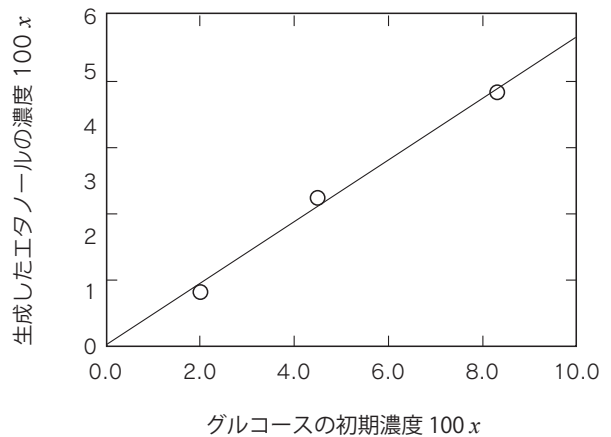


図5 グルコースの初期濃度と生成したエタノール濃度の関係。

る。この値を0.41で割ると4.6となり、生成したエタノールの濃度は4.6%と決定できる。他のグルコース初期濃度から観察を行った結果に対しても、生成したエタノール濃度の決定を同様に行った。その結果を図5に示す。当然のことながら、グルコースの初期濃度が高いほど、生成するエタノール濃度も高くなり、それらの間には直線関係がみられる。

3-9 化学反応式における係数の理解

化学反応式に現れる係数の実感を持った理解は、化学における粒子概念の獲得に重要であると考えられる。本研究では、反応前のグルコース濃度は調整した溶液の濃度であり、完全に反応が進んだ後の生成したエタノール濃度は3-8のように求めることができる。これらを使うことで、化学反応式における係数の理解を深めることができると考えられる。そこで、実験結果をもとに化学量論関係の検討を行った。

化学反応式に現れる係数と溶液の濃度そのものとは関係していないことはすぐに確認できる。例えば、グルコースの初期濃度が8.3%の場合を考えると、生成するエタノールの濃度は4.6%であり、反応物のグルコースと生成物のエタノールの濃度比は8.3:4.6で、およそ1.8:1である。化学反応式(1)を見ると、グルコースとエタノールの係数比は1:2である。したがって、化学反応式で示される係数と濃度とは関係していない。

そこで、粒子の数に着目した物理量である物質量の計算を行う。水溶液が x gあると考えると、グルコースの初期濃度が8.3%の場合には、

$$8.3\% \times x \text{ g} = 0.083 x \text{ g}$$

のグルコースが水溶液中に含まれていることになる。グルコースの分子量は180であるから、その物質量は、

$$\frac{0.083 x \text{ g}}{180 \text{ g/mol}} = 4.6 x \times 10^{-4} \text{ mol}$$

となる。このグルコースがすべてエタノールに変化したときの濃度は4.6%である。エタノールが生成する際には二酸化炭素も生成するが、水溶液の質量は反応後も x gに保たれていると仮定すると、反応後の水溶液には、

$$4.6\% \times x \text{ g} = 0.046 x \text{ g}$$

のエタノールが含まれている。エタノールの分子量は46であるから、その物質量は、

$$\frac{0.046 x \text{ g}}{46 \text{ g/mol}} = 1.0 x \times 10^{-3} \text{ mol}$$

となる。消費されたグルコースの物質量と生成したエ

タノールの物質量の比を取ると、

$$\begin{aligned} \text{グルコース} : \text{エタノール} \\ &= 4.6 x \times 10^{-4} \text{ mol} : 1.0 x \times 10^{-3} \text{ mol} \\ &= 1 : 2.2 \end{aligned}$$

となり、化学反応式で示されるグルコースとエタノールの係数比1:2に近い値が得られる。

他の初期濃度で行った測定結果に対しても、消費されたグルコースの物質量と生成したエタノールの物質量の比を同様に求めた。その結果を表2に示す。どの初期濃度から測定を開始しても、化学反応式で示されるグルコースとエタノールの係数比1:2に近い値が得られた。

実験データに対し、このような解析を行うことで、化学反応式に現れる係数が反応に関与する物質の物質量、すなわち粒子数に関わるものであることへの理解が深まることが期待される。

表2 反応したグルコースと生成したエタノールの物質量比

グルコース初期濃度 100 x	グルコースと エタノールの物質量比
2.0	1:2.0
4.5	1:2.4
8.3	1:2.2

3-10 反応中の化学量論関係

反応物のグルコースと生成物のエタノールの物質量がおおよそ1:2であることが確認できることを3-9で示した。この結果は、反応開始前と反応終了後のみを考えたものである。Brix糖度変化が直線的であることから、反応中もこの関係が満たされていることは明らかである。しかし、化学反応式の意味の理解を深めるためには、反応進行中における量的関係を実験者一人一人が手を動かして実際に確認することは重要であると考えられる。

グルコースの初期濃度が8.3%の場合を例として、この関係が満たされていることを確認していく。本実験の解析では、酵母による影響は常に0.3%であるとしているので、図3に示す該当するデータのBrix糖度から0.3を引いてプロットし直したものを図6に示す。これまでの解析から、グルコースがなくなるまでの反応時間は97分であり、生成したアルコールのみが示すBrix糖度は1.9%である。反応後の溶液にはグルコースが存在せず、本実験条件では反応は零次だとみなせるので、エタノールの生成に対応したBrix糖度

は、反応時間の経過とともに直線的に増加していくと考えられる。エタノールの生成に対応した Brix 糖度は、

$$\text{Brix 糖度} = 0.019\% / \text{分} \times (\text{反応時間})$$

と書ける (図 6 破線)。また、実験で観測される Brix 糖度は最小二乗法により、

$$\text{Brix 糖度} = -0.066\% / \text{分} \times (\text{反応時間}) + 8.3\%$$

と書くことができる (図 6 実線の前半部)。ここでは、反応開始から 30 分後を考える。上の式の (反応時間) 部分に 30 分を代入すると、Brix 糖度として屈折糖度計には 6.3% と表示されることが分かる。また、このうちの 0.57% ($= 0.019\% / \text{分} \times 30 \text{分}$) は生成したエタノールの濃度に相当するものであることも計算から分かる。これらの値から、30 分後に溶液中に存在するグルコース濃度に相当する値として 5.7% ($= 6.3\% - 0.57\%$) を得ることができる。グルコースの初期濃度は 8.3% であるので、30 分間の反応により消費されたグルコースは 2.6% ($= 8.3\% - 5.7\%$) の Brix 糖度変化に相当する量である。3-9 での解析と同様に、水溶液の質量は常に $x \text{ g}$ であると仮定して、反応で変化したそれぞれの物質質量を求める。反応開始から 30 分後までに、グルコースは $1.4x \times 10^{-4} \text{ mol}$ 消費され、エタノールは $3.0x \times 10^{-4} \text{ mol}$ 生成している。これらの比を取ると 1 : 2.1 となり、反応の途中においても反応物のグルコースの物質質量と生成物のエタノールの物質質量がおおよそ 1 : 2 であることが確認できる。

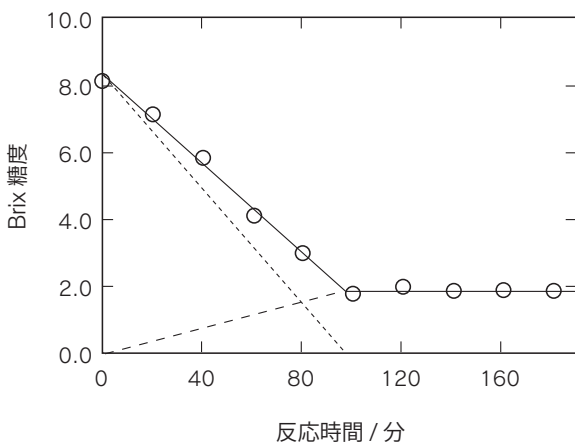


図 6 初期濃度 8.3% のグルコース溶液に対するアルコール発酵の観察結果。図 3 のプロットから酵母の影響 (0.3%) を除いている。丸印：酵母の影響を除いた測定結果、実線：Brix 糖度が減少する部分と一定となったときの近似曲線、破線：生成したエタノール量に相当する Brix 糖度の変化、点線：溶液中に存在するグルコース量に相当する Brix 糖度の変化。

4 まとめ

本研究では、高等学校の教科書でも取り上げられるアルコール発酵に関し、反応物である糖の減少に着目した定量的な実験の検討に取り組んだ。糖の減少の定量的な観察には屈折糖度計を用いた。その結果、屈折糖度計で示される Brix 糖度は、反応時間とともに直線的に減少した後、完全に 0 にならず一定値となることが分かった。Brix 糖度が一定値となった溶液に対するグルコース計による測定から、この溶液にはグルコースが存在していないことが確認できた。このため、一定値となった溶液で表示される Brix 糖度は、主に生成したアルコールに由来するものであることが分かった。屈折糖度計により、グルコース量だけでなくアルコール量も計測できることから、化学反応式で示される量論関係の検討も行った。反応前と反応後の比較だけでなく、反応中も化学量論関係が保たれていることが確認できた。アルコール発酵は生物系の実験で実施されることが多いが、化学反応としてとらえることで、化学反応式に現れる係数の実感を伴った理解、化学における粒子概念の獲得、物質量の理解など化学系の実験としても活用できると考えられる。

参考文献

- 1) 高等学校教科書「生物」、啓林館 (2012)。
- 2) 高等学校教科書「科学と人間生活」、啓林館 (2018)。
- 3) 高等学校教科書「科学と人間生活 暮らしの中のサイエンス」、数研出版 (2019)。
- 4) 高等学校教科書「新科学と人間生活」、数研出版 (2019)。
- 5) 高等学校教科書「改訂 科学と人間生活」、第一学習社 (2019)。
- 6) 高等学校教科書「科学と人間生活 新訂版」、実教出版 (2019)。
- 7) 高等学校教科書「改訂 科学と人間生活」、東京書籍 (2019)。
- 8) 鹿児島県総合教育センター、「指導資料・理科」、平成 15 年 11 月。
- 9) 大橋淳史、福山勝也、大場 茂、「アルコール発酵の最適温度の測定」、慶應義塾大学日吉紀要・自然科学、1-13、45 (2009)。
- 10) 向井知大・大場 茂、「ドライイーストの経年劣化によるアルコール発酵実験への影響」、43-56、54 (2013)。
- 11) 仁宮章夫、「アルコール発酵の定性的な扱いの工夫」、45-46、45 (1997)。
- 12) 小野寺美佳、山田 緑、矢野 慎、杉本将英、肥田野豊、長南幸安、「バイオリアクターを用いたアルコール発酵」、弘前大学教育学部紀要、69-74、105 (2011)。
- 13) 川澄英明、「糖度計 (ブリック計) について」、計量管

- 理、613-615、34 (1985).
- 14) 浅沼秀治、「屈折計(糖度計)」、冷凍、400-402、70 (1995).
- 15) 関口君則、「味をはかる糖度計」、日本機械学会誌、874-875、114 (2011).
- 16) 佐藤郁子、村井一男、「簡易計測器のブドウ酒醸造管理センサーとしての使用の試み 含有成分の糖度計示度に及ぼす影響」、岩手県醸造食品試験場報告、81-84、18 (1984).

(2021. 1. 20 受理)