アルコール濃度推定による日本酒発酵工程のスマート化

日本酒造りにおいて、国内の酒蔵数や従事者数は減少し続けており、職人の勘と経験に頼ることが多い製造技術の継承や品質管理が業界としての課題となっています。
品質管理が求められる工程の1つに、日本酒のもとを造る「酒母（しゅぼ）造り」という発酵工程があります。酒母造りでは、酒母に含まれるアルコール濃度が発酵状態の指標とされます。しかし、アルコール濃度を直接測定するには、分析のために一定の作業と時間を要するため、発酵状態をリアルタイムに把握することが困難でした。そこで我々は、アルコール発酵の副産物である二酸化炭素に着目し、その発生量からアルコール濃度の推定を試みました。今回はその研究結果をご紹介いたします。

茨城県産業技術
イノベーションセンター
主任
石川　卓
（いしかわ　たく）

1．はじめに

日本酒造りにおいて、国内の酒蔵数や従事者数は減少し続けています[1)2)]。また、中小規模の酒蔵においては、様々な製造工程で職人の勘と経験に頼ることが多く、製造技術の継承や品質管理が業界としての課題となっています。人材確保のためにも職人の技術を円滑に継承できる仕組みが必要です。製造現場でのデジタル技術の活用、さらには自動化が図られることで、労働力不足の解消につながるかもしれません。

国税庁「酒類製造業及び酒類卸売業の概況」[3)]によると、清酒の製造者数において茨城県は関東地方で最も多い41の事業者がありますが、その多くが中小規模の酒蔵であり、前述の課題は茨城県の酒造りにおいても重大な課題であると言えます。

一方、2013年に「和食」がユネスコ無形文化遺産に登録されたことを背景に、日本酒は海外からの関心が高くなっています[4)]。日本酒造組合中央会によると、この10年間、日本酒の輸出数量および金額はともに増加傾向にあります（図1）。特に2022年は10年前に比べ、輸出数量が約2.5倍、輸出金額が約5倍に増加しています。2023年における輸出先は、中国、アメリカ、香港、韓国、台湾の５カ国で、輸出数量全体の約75％、輸出金額全体の約80％を占めている状況です（表1）。東南アジアや中南米では日本食レストランが増加しており、今後も日本酒市場の拡大が期待されます。

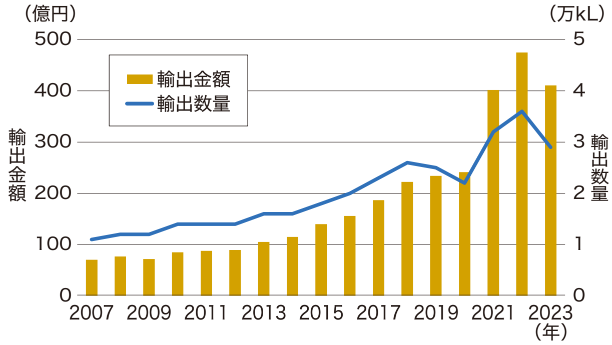

図1 日本酒の輸出動向（日本酒造組合中央会のデータを基に作成）

表1 2023年における日本酒の国別輸出数量（左）と国別輸出金額（右）

順位	国　名	数量（L）
1	アメリカ	6,502,237
2	中　国	5,793,847
3	韓　国	4,191,862
4	台　湾	3,103,784
5	香　港	2,327,945

合計（全体）　29,195,769
合計（上位５カ国）21,919,675
上位５カ国の割合　75.1％

順位	国　名	金額（千円）
1	中　国	12,465,430
2	アメリカ	9,090,646
3	香　港	6,023,799
4	韓　国	2,904,746
5	台　湾	2,677,216

合計（全体）　41,081,845
合計（上位５カ国）33,161,837
上位５カ国の割合　80.7％

（日本酒造組合中央会のデータを基に作成）

Information

国内の日本酒酒蔵数や従事者数は減少し続けており、職人の勘と経験に頼ることが多い日本酒製造技術の継承や品質管理が業界としての課題となっています。茨城県の清酒製造事業者数は関東地方最多の41であり、その多くが中小規模の酒蔵であるため、この課題の重要性は特に高いといえます。

日本酒のもとを造る「酒母（しゅぼ）造り」という発酵工程では、酒母に含まれるアルコール濃度が発酵状態の指標とされます。しかし、これを直接測定するには、分析のために一定の作業と時間を要するため、発酵状態をリアルタイムに把握することが困難で、その解決の要望が寄せられていました。

研究初期段階で、アルコール濃度測定を安価な市販センサを使った小型装置で実現することは困難と判断されました。そこで、本来測定すべきアルコール濃度を、それと比例して発生しているはずの二酸化炭素濃度の測定で代替することによって解決法を示したのが本研究のポイントです。

この方式が成り立つための最初の重要な条件は、従来確立されている手法で測定されたアルコール濃度と、本方式で測定された二酸化炭素濃度との関係が明確であることですが、ほぼきれいな比例関係が実験により示されました。

これに基づき、測定の自動化と安価な装置開発に成功しています。さらに、自動化に際して測定値は電子データとしてコンピュータ内で処理されるので、クラウドサービスを使ってデータ蓄積とグラフ化等の加工や、スマートフォン等によりメールで受け取れる機能も構築しています。担当者が装置の近くに待機する必要もありませんので、省力化の効果は大きいと考えられます。

開発された測定装置および測定方法について、2023年11月に、以下の名称で特許出願されています（名称：「二酸化炭素測定装置、エタノール濃度測定装置、二酸化炭素濃度の測定方法、及び、エタノール濃度の測定方法」）。実用化に向けた実証実験について県内の複数企業から関心を示されており、今後の進展が大いに期待されます。

ナビゲーター　つくばサイエンス・アカデミー
コーディネータ　渡辺 正信

2. 日本酒の製造工程における課題

日本酒は、水、麹、および蒸した米を混合し、清酒酵母によって1カ月間ほど発酵させた醪（もろみ）を濾して得られる濾液です（図2）。酒母造りは、醪に添加する清酒酵母を高い純度で増殖させるための製造工程です[5]。純度の高い清酒酵母を得ることは、醪を良好な発酵へと導き、安定した品質の日本酒を製造するために必要不可欠です。

酒母造りでは、酵母の増殖と発酵に伴い、エタノール（アルコールの一種のため、以下、「アルコール」と表記）が生成されます。そのため、発酵の進行とともに酒母のアルコール濃度が上昇します。日常的な酒母造りの製造管理において、このアルコール濃度が発酵状態の指標の1つとされています。一般的に、酒母のアルコール濃度は国税庁所定分析法に従って分析されます[6]。具体的には、サンプリングした酒母から濾液を調製し、その濾液を蒸留して得られる留液から比重法などによってアルコール濃度を確認します。しかし、これらの分析は、分析に用いる濾液の調製に加え、人の手で分析作業を行う必要があります。さらに、従業員を一定時間拘束するとともに、結果が得られるまでに時間を要するため、発酵状態をリアルタイムに把握することが困難です。酒蔵ではアルコール分析に加え、匂いや見た目の変化など職人の経験により発酵状態が推測されていますが、職人が酒母を常時観察することは困難です。このような状況から、温度調節などの処置が遅れるという課題がありました。

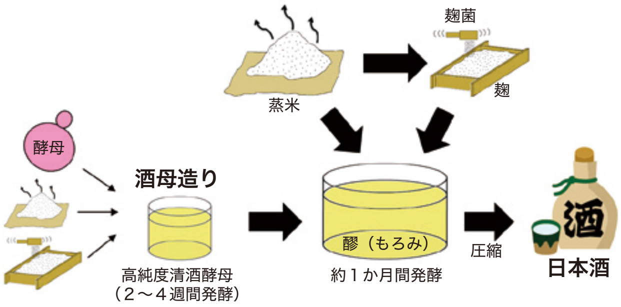

図2 日本酒製造工程と酒母造り

加えて、アルコールセンサに関して、一般的なセンサでは酒母の発酵管理に必要なアルコール濃度の測定ができず、高濃度の測定には特殊なセンサが必要になるため、導入には多大なコストがかかります。

そこで我々は、アルコールセンサを使用せずに酒母の発酵状態をリアルタイムに把握する手法を開発するため、研究を始めました。

3. 発酵工程で発生する二酸化炭素の測定

酒母の発酵状態の把握に向けて、我々は、酒母造りのアルコール発酵で副産物として生成される二酸化炭素に着目しました。酒母造りのアルコール発酵では、次の化学式のとおり、清酒酵母によってグルコース（糖分）からアルコールとともに二酸化炭素が生成されます。

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

グルコース（ブドウ糖）　エタノール　二酸化炭素

そのため、理論的には、アルコールと正比例の関係で二酸化炭素が生成されるため、二酸化炭素の発生量からアルコールの生成量、つまりはアルコール濃度が推定できると考えました。

そこで、酒母の発酵工程におけるアルコール濃度と二酸化炭素発生量の関係を検証するため、まず、図3のような密閉したタンクで測定を行いました。この密閉タンクは、直径約350 mm、高さ約400 mm、容量約30 Lの円筒型の形状で、温度調節が可能です。

酒母の仕込みには、高温糖化酒母造りを採用しました。まず、タンク内に乾燥麹1 kg、乾燥アルファ米2 kg、水5 Lを入れ、58℃で８時間保持することで糖化を促しました。この間に、米由来のデンプンが麹に含まれる酵素によってグルコース（糖分）に変換されるというものです。その後、品温を20℃に保ち、乳酸24 mLと清酒酵母の培養液100 mLを加え、7日間酒母を発酵させました。この発酵期間において、酒母のアルコール濃度と酒母から発生する二酸化炭素濃度を測定しました。酒母のアルコール濃度は、1日1回の頻度で酒母をサンプリングし、濾して得られた濾液に対して、国税庁所定分析法に従い、アルコール分析装置（Alcolyzer3001 SAKE；アントンパール社製）を用いて測定しました。また、二酸化炭素測定器を用いてタンク内部から吸引した気体の二酸化炭素濃度を30秒間隔で測定し、その発生量を算出しました。

上記の方法で測定した酒母のアルコール濃度と二酸化炭素発生量の累積値の結果を図4に示します。二酸化炭素の単時間あたりの発生量は、発酵の進行に伴い増減の変化がありましたが、その発生量の累積値を算出したところ、アルコール濃度と強い相関関係があることを確認しました（相関係数0.99）。

4. 二酸化炭素測定装置の開発

実際の酒蔵で酒母造りに用いられるタンクは上部が開放された形状で、容量は数十Lから数百Lに及びます。そのタンクに多量の原料が投入されるため、発酵に伴い、多くの二酸化炭素が発生します。また、酒母は原料や温度が均一になるように、あるいは溶存した二酸化炭素の排出のために定期的に櫂棒（かいぼう）という道具によりかき混ぜられます。そのため、前節のように、タンクを塞ぐという方法を酒蔵に適用するには、安全性、作業性の観点で支障があります。

そこで、酒蔵の環境と作業を考慮し、開放タンクに対して有効な方法を探りました。その中で、酒母の一部から発生する二酸化炭素量と酒母全体から発生する二酸化炭素量は比例関係にあることが推測されるため、前節の結果を踏まえ、酒母の一部から発生する二酸化炭素量もアルコール濃度と相関関係にあると考えました。それを立証するため、実際に測定することを試み

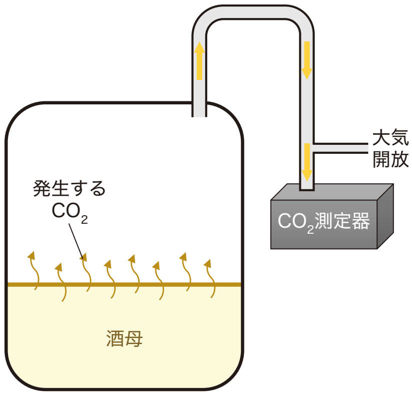

図3 密閉タンクによる測定（概略図）

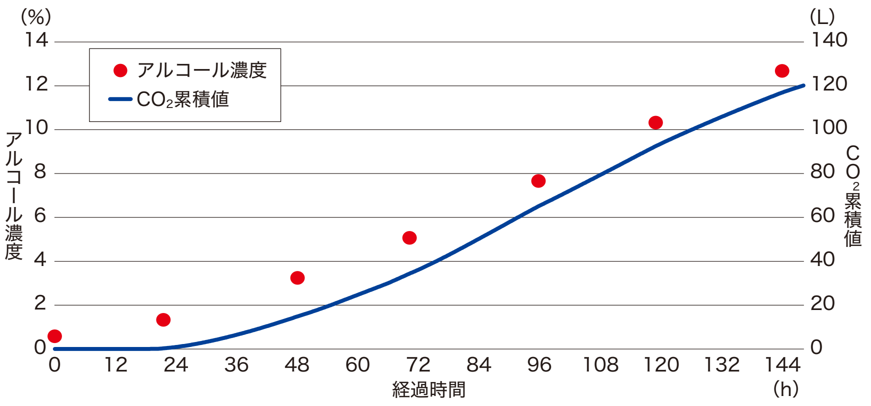

図4 酒母のアルコール濃度と二酸化炭素累積値

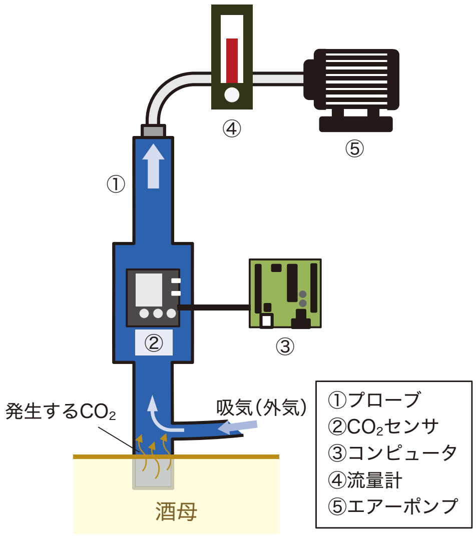

図5 二酸化炭素測定装置の構成図

ました。しかし、酒母の一部から発生する二酸化炭素量を測定する適当な装置がありませんでした。そのため、図5のような二酸化炭素測定装置を開発しました（以下、「開発装置」と表記）。本開発装置は、円筒状プローブ（長さ約900 mm）、二酸化炭素センサ、コンピュータ、流量計およびエアーポンプから構成されます。プローブの下端部は酒母に挿入され、開放タンク内の酒母に対して一部密閉系が形成されます。測定対象の酒母は粥（かゆ）状であり、一定サイズの固形物が含まれていることを考慮して、プローブ内が詰らないように下端部の直径を40 mmに設定しました。プローブ内部には二酸化炭素センサが格納され、上端部は流量計およびエアーポンプに接続されています。エアーポンプによってプローブ内の気体が常時吸引され、同時に二酸化炭素センサで二酸化炭素濃度が測定されます。プローブには、センサ格納部と下端部の間に直径13 mmの大気開放口があります。これは、測定時にプローブ内の圧力を一定に保持するために設けています。二酸化炭素センサと接続されたコンピュータは、センサからの測定データの取得および保存等の役割を担います。本開発装置により、プローブ内の酒母表面から発生する二酸化炭素を測定することができます。

5. 開発装置による二酸化炭素測定とアルコール濃度推定

酒母のアルコール濃度と、酒母の一部から発生する二酸化炭素量の関係を調べるため、両者の測定を行いました。酒母のアルコール濃度は、3節に記載した方法で、1日1回の頻度で測定しました。また、開発装置を開放タンクの酒母の中に設置し（図6）、酒母から発生する気体の二酸化炭素濃度を測定しました。そして、3節の手順と同様に、二酸化炭素発生量の累積値を算出しました。なお、酒母の仕込みは3節の検証実験と同じ原料および条件としました。

酒母のアルコール濃度と二酸化炭素累積値を測定した結果を図7に示します。3節の結果と同様に、酒母のアルコール濃度と二酸化炭素累積値には強い相関関係がありました（相関係数0.99）。次に、酒母のアルコール濃度と二酸化炭素累積値の相関図を図8に示します。この相関図から1次近似式を算出することができます。ここでは、二酸化炭素累積値（L）をX、アルコール濃度（%）をYとすると、近似式は以下のように算出されます。

$$Y = 0.28X + 1.09$$

例えば、二酸化炭素累積値が32 Lのときにアルコー

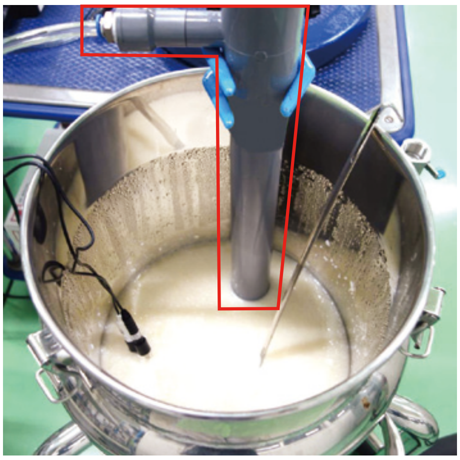

図6 開発装置（赤線）を開放タンクに設置した様子

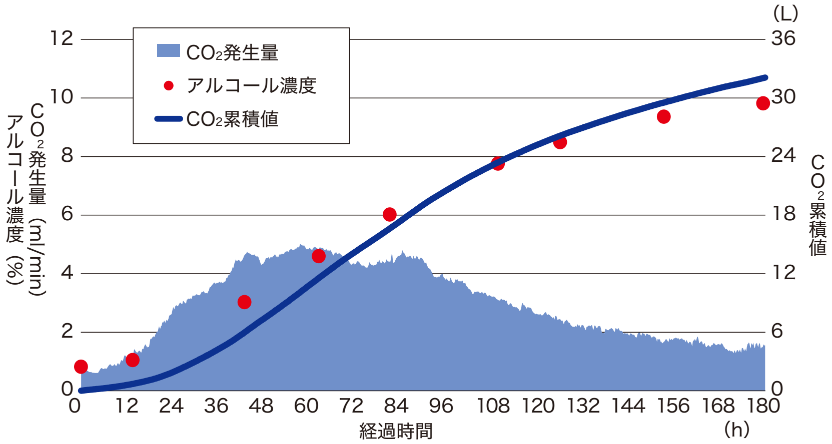

図7 酒母のアルコール濃度と二酸化炭素累積値

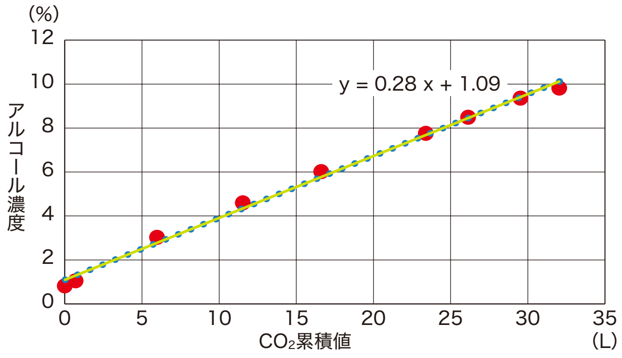

図8 酒母のアルコール濃度と二酸化炭素累積値の相関図

ル濃度（推定値）が10%となります。このように、この近似式により、酒母の一部から発生する二酸化炭素累積値から酒母のアルコール濃度を推定することができます。

6. 発酵状態の可視化

現状、酒蔵では従事者が定期的に発酵室に行き、酒母の発酵状態を確認しています。従事者が発酵状態をリアルタイムに把握するためには、アルコール濃度推定値を発酵室だけではなく、遠隔地から容易に確認できる仕組みが必要です。

そこで我々は、Google社が提供するクラウドサービスを用いて、アルコール濃度推定値をスマートフォン等で確認する機能と発酵状態をメールで通知する機能を構築しました。Googleスプレッドシート上に二酸化炭素濃度の測定値が記録され、同時に、二酸化炭素累積値およびアルコール濃度推定値が算出され記録されます。また、グラフも表示され、いずれもリアルタイムで更新されます。さらに、把握したいアルコール濃度およびメールアドレスを事前にGoogleスプレッドシート上に入力しておくことで、アルコール濃度推定値が設定した濃度に達した際に、メールでその状況が通知されます。これらの機能を二酸化炭素測定装置に加えました（図9）。

7. まとめ

本研究では、リアルタイムでの発酵状態の把握が困難であった酒母造りに対して、アルコールセンサを使用せずに、副産物として生成される二酸化炭素を測定することでアルコール濃度をリアルタイムに推定する手法お

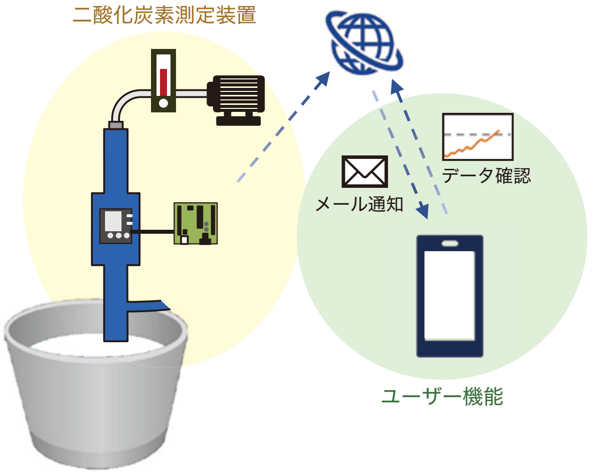

図9 二酸化炭素測定装置に追加したユーザー機能

よび装置を開発しました。開発装置には、酒母の発酵状態の推定に加え、発酵室以外の場所でも従事者がリアルタイムかつ迅速にその情報を把握する機能があります。そのため、作業負荷の低減と安定的な発酵管理につながることが期待されます。また、実用化への障壁の1つであるコストを考慮して、いずれも安価に入手できる市販品から開発装置を構成し、ソフトウェアについても無料で利用できるサービスを使用しました。ただし、開発装置を実用化するためには、装置製作を行う企業、また、実証実験に協力していただく酒蔵との連携が必要不可欠です。今後は、企業や酒蔵と連携し、開発装置の製品化、さらには県内酒蔵への導入を目指します。なお、本開発装置は製造管理を目的として日常的に酒母のアルコール濃度の推移を観察するものであり、国税庁所定分析法に代わるものではないことに留意が必要です。

本研究は令和元年度から令和5年度まで文部科学省特別電源所在県科学技術振興事業「次世代型生酛系酒母を利用した日本酒とその他の食品への応用に関する研究開発」の一環として実施したものです。

［参考文献］

1） 国税庁：清酒製造業の概況
2） 日本酒造杜氏組合連合会：組合会員数の推移
3） 国税庁：酒類製造業及び酒類卸売業の概況（令和5年アンケート）
4） 勝田 英紀（2018）：日本酒輸出のメリット、近畿大学経営学部商経学叢、64巻、3号、pp.667-685 .
5） 宮井 孝一、萱島 昭二（1969）：Ⅲ酒母、日本醸造協會雜誌、64巻、5号、pp.435-439 .
6） 国税庁編：国税庁所定分析法（昭和36年1月11日国税庁訓令第1号、最終改正令4国税庁訓令第8号）

<ご照会先> isikawat@itic.pref.ibaraki.jp