

二酸化炭素発生量からの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

石川 卓* 河原 航** 野口 友嗣*** 飛田 啓輔***

1. はじめに

清酒は、水、麴、および蒸米を混合し、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ある。酒母（しゅぼ）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ある。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、安定した品質の清酒を製造するために必要不可欠である。

酒母では、仕込みから時間経過とともに米由来のデンプンが麴に含まれる酵素によって糖化され、多量のグルコースが生成される。同時に、酒母に添加した清酒酵母は増殖とともにグルコースを資化することで多量のエタノールと二酸化炭素を生成する。そして、1週間程度の酵母によるアルコール発酵期間を通じて、従業員が成分分析や温度の目視計測を行い、発酵状態の確認や適切な温度調節を行う。一般的に、酒母中のアルコール濃度は、国税庁所定分析法に従い¹⁾、酒母の濾液を用いて分析する。この分析は、用いる濾液の調製に加え、人の手で作業を行う必要がある。そのため、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ことから、温度調節などの処置が遅れるという課題がある。

当センターでは、酒母の発酵状態をリアルタイムで可視化するための技術開発に取り組んでいる。これまでに、アルコール発酵の過程で生成される二酸化炭素に着目し、密閉タンク内で酒母から発生する二酸化炭素累積値と液中アルコール濃度に強い相関関係があることを確認した²⁾。

2. 目的

酒蔵での酒母造りには、上部が開放した形状のタンク（以後、「開放タンク」と表記）が用いられる。本研究では、開放タンクにおける酒母から発生する二酸化炭素より、アルコール濃度を推定する技術開発を試みる。さらに、遠隔地においてもリアルタイムかつ迅速に発酵状態を把握するためのシステムを構築する。

3. 研究内容

3.1 開放タンク向け二酸化炭素測定装置の開発

開放タンク内の酒母から発生する二酸化炭素を測定するため、局所的に設置が可能な二酸化炭素測定装置（以後、「開発装置」と表記）を開発した（図1）。本開発装置は、プローブ、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る。二酸化炭素センサが格納された筒状プローブの上端部は流量計およびエアーポンプに接続され、下端部は酒母に挿入される。プローブは長さ約900 mm、下端部の直径40 mmの大きさである。測定対象の酒母は粥状であり、直径20～30 mm程度の固形物もあることから、プローブ下端部の大きさはそれを考慮している。

二酸化炭素濃度測定は、エアーポンプでプローブ内の気体を吸引すると同時に、二酸化炭素センサで行われる。プローブには、センサ格納部と下端部の間に直径13 mmの大气開放口があり、プローブ内圧を一定で測定することができる。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果たす。本開発装置を用いることで、プローブ挿入領域における二酸化炭素発生量を算出することができる。

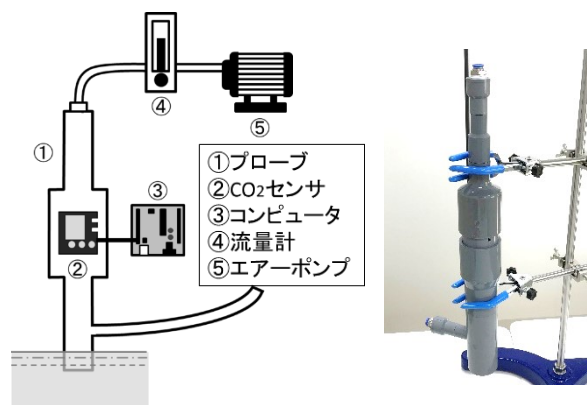


図1 二酸化炭素測定装置の構成図（左）と実際のプローブ（右）

3.2 開発装置を用いた二酸化炭素測定手順

開放タンクで酒母を仕込み、開発装置をタンク内に設置した（図2）。開発装置は下端部を50 mm程度酒母の中に挿入した位置で固定した。仕込みの手順として、タンク内に乾燥麴1 kg、乾燥アルファ米2 kg、水5 Lを入れ、58℃で8時間糖化した。その後、タンク温度を20℃に制御し、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た。

酒母が発酵する間、開発装置により30秒間隔で二酸化炭素濃度を測定し、図3の手順で二酸化炭素発生量の累積値を算出した。プローブ内気体の吸引流量は2 L/minで一定とした。液中アルコール濃度は、1日1回



図2 測定の様子

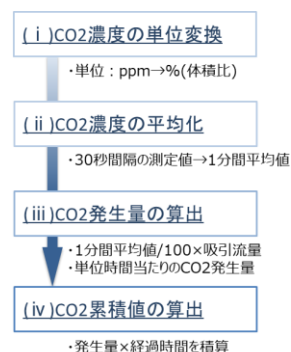


図3 二酸化炭素累積値の算出手順

の頻度で酒母をサンプリングし、遠心分離によっ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（アントンパール社製 Alcoalyzer3001 SAKE）で測定した。

3.3 アルコール濃度と二酸化炭素発生量の測定結果

開放タンクを用いて、3.2 の手順で求めた酒母液中のアルコール濃度、二酸化炭素発生量および累積値を図4に示す。液中アルコール濃度は、発酵1日目ではわずかな上昇が見られ、2～5日目では顕著に上昇した。その後は緩やかな上昇であった。二酸化炭素発生量は、発酵1日目ではほとんど見られなかったが、その後は増加傾向を示し、3～4日目で高い水準となった。5日目以降徐々に減少した。二酸化炭素発生量の累積値を算出したところ、液中アルコール濃度と高い相関関係があることを確認した（相関係数0.99）。なお、これらの結果は、既報の密閉タンクで行った研究結果と同様であった²⁾。

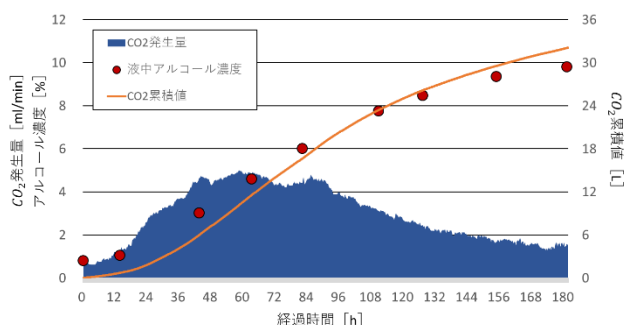


図4 酒母中のアルコール濃度と二酸化炭素累積値

上述の結果を基に、二酸化炭素累積値から液中アルコール濃度を推定するため、両者の相関図から1次近似式を求めた（図5）。この近似式より、二酸化炭素累積値から液中アルコール濃度を推定することができる。

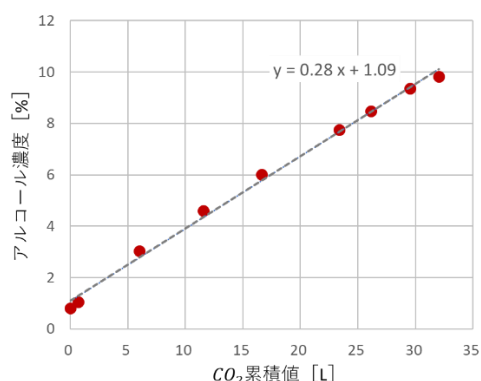


図5 酒母中のアルコール濃度と二酸化炭素累積値の相関図

3.4 アルコール発酵管理システムの構築

酒蔵の従業員は定期的に発酵室に行き、酒母の発酵状況を確認する。アルコール濃度推定値を発酵室だけでなく、遠隔地から確認を可能とすることで、作業

者が迅速に発酵状態を把握することができる。そこで、Google 社が提供する開発プラットフォームを用いて、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、発酵状況をメールで通知する機能を構築した。二酸化炭素発生量やアルコール濃度推定値のデータおよびグラフは Google スプレッドシート上で確認することができる。さらに、アルコール濃度推定値が閾値を超えた際に、メールでその状況が通知される。これらの機能を開発装置に追加し、アルコール発酵管理システムを構築した（図6）。

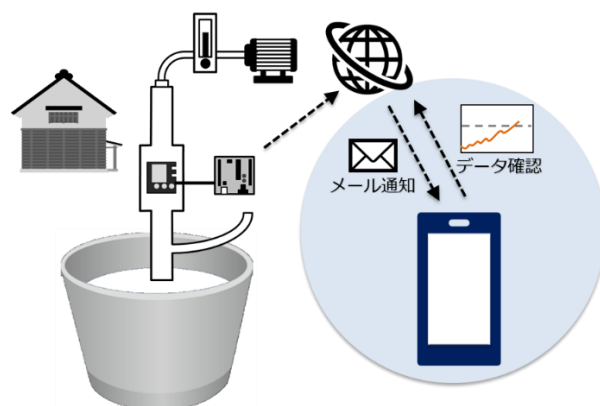


図6 アルコール発酵管理システムの概略図

4. まとめ

本研究では、実際の酒蔵で用いられる開放タンクにおいて、酒母から発生する二酸化炭素に着目し、アルコール濃度を推定する技術の開発を試みた。局所的に設置が可能な二酸化炭素測定装置を開発し、発酵する酒母について測定したところ、二酸化炭素累積値から液中アルコール濃度を推定できることが確認できた。

さらに、発酵状況をスマートフォン等へ通知する機能を開発装置に追加することで、発酵室以外の場所でもリアルタイムかつ迅速に発酵状態を把握することを可能とした。このことは、作業負荷の低減と発酵管理の即時性向上につながることを期待される。

なお、本研究の開発装置および測定方法は特許出願中である（特願：2023-189798）。

また、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「次世代型生酏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ているものである。

5. 参考文献等

- 1) 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2国税庁訓令第9号.
- 2) 石川卓、河原航、野口友嗣、飛田啓輔、非接触による酒母中アルコール濃度の推定技術の開発、茨城県産業技術イノベーションセンター研究報告、51、27-30、2023