

気中アルコールセンサ及びCO₂センサを用いた

日本酒製造工程における発酵の可視化技術の検討

河原 航* 小田木 美保** 飛田 啓輔 ** 平間 毅***

1. はじめに

2013年12月に「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る¹⁾。茨城県酒造組合のホームページによると(2021年3月時点)、茨城県は関東地方で最も多い36の酒蔵数を有しており、県内日本酒産業の発展のためにも、高品質の県産日本酒の安定生産と輸出促進の取り組みが期待されている。

日本酒は、水、麴、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)を圧搾して得られる濾液である(図1)。酒母(しゅぼ)造りは、高い純度で清酒酵母を増殖させるための製造工程である²⁾。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ある。酒母造りでは、2~4週間程度の発酵期間を通じて、毎日従業員が滴定や機器分析、あるいは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。しかし、このような分析は張り付きで一定時間作業を行う必要があり、従業員の負荷が高いうえ、結果が得られるまでに数時間を要するために温度調節等の処置が遅れるといった課題があった。

そこで、IoTツールを活用して酒母造りの工程において発酵状態をリアルタイムで把握・可視化するシステムを開発することを試みた。なお、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「次世代型生醪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。

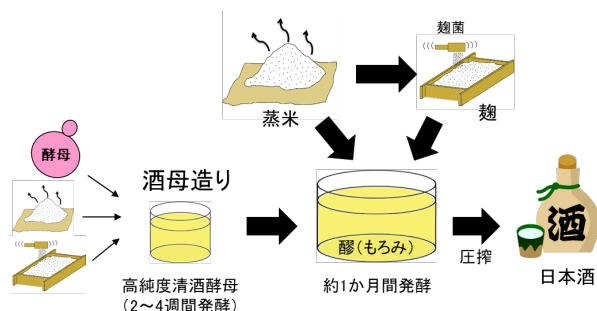


図1 日本酒製造工程と酒母造り

2. 目的

酒母では、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、清酒酵母は増殖に伴い、アルコール発酵によってグルコースからエタノールと二酸化炭素(CO₂)を生成する。酒母では、このような糖化とアルコール発酵が1つのタンクの中で同時に進行し

ている。したがって、迅速に酒母の発酵状態を理解するためには、酒母における濾液の比重を示すボーメ度に加え、エタノール濃度の推移を把握することが一般的である。通常、酒母中のエタノール濃度は、国税庁所定分析法に従い³⁾、サンプリングした試料の濾液からアルコール濃度として求めている。

本研究では酒母における発酵状態を非接触によって可視化することを目的とした。すなわち、アルコールセンサとCO₂センサによるIoTツールを活用し、気中アルコール濃度とCO₂濃度のセンシングによって、酒母中の発酵状態を可視化するというものである。今年度は気中アルコールセンサとCO₂センサによる可視化システムの構築と、そのシステムを用いた実機レベルでのセンシングを行ったので、その検討結果を以下に報告する。

3. 研究内容

3.1 可視化システムの構築

3.1.1 IoTを活用した酒母工程でのデータ可視化

IoTツールを活用して酒母工程における各データ(温度、湿度、CO₂、気中アルコール濃度)を簡易的に可視化するシステムを構築した。そのシステム構成図を図2に示す。

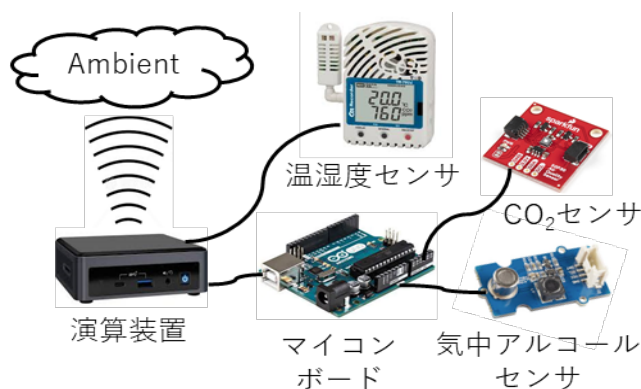


図2 可視化システムの構成図

3.1.2 可視化システムの概要

構築したシステムでは、演算装置としてintel社製のNUCを用いた。温度湿度センサには株式会社ティアンドデイ社製のおんどとりTR-76、CO₂センサには株式会社スイッチサイエンス社製Qwiic-SGP30、気中アルコールセンサにはGrove社製のアルコールセンサを用いた。温度湿度センサで取得できる各データ(温度、湿度)に関しては、シリアルケーブルを介してNUCと直接通信させてデータの処理及び送受信を行った。CO₂濃度については、CO₂センサをマイコンボード(Arduino uno)

に接続し、データ処理及びNUCとの通信を行った。気中アルコール濃度についてはアルコールセンサをCO₂センサと同様にマイコンボードと接続し、データ処理及びNUCとデータ通信を行った。NUCに取り込んだ各データは、アンビエントデータ株式会社提供しているIoTデータの可視化サービスを活用してリアルタイムに可視化した。なお、各センサの主な仕様を表1に示す。

表1 各センサの主な仕様

センサ	主な仕様
温湿度センサ	温度：0～55℃ 湿度：10～95%
CO ₂ センサ	CO ₂ ：400～60,000 ppm
気中アルコールセンサ	検出濃度：20～1,000 ppm

3.2 可視化システムによるセンシング

3.2.1 酒母の調製

酒母は普通速醸酒母⁴⁾とし、配合は汲水 120 L、乳酸 900 g、蒸米 70 kg と麴 35 kg の総米 105 kg、清酒酵母培養液 500 mL とした。仕込みは、657 L 容量の珐瑯製タンクで実施した。

3.2.2 酒母の液中成分分析

酒母の発酵期間を通じて、毎日、品温、液中のアルコール濃度、グルコース濃度及びボーメ度を測定し、時間経過による酒母の発酵状態を調べた。

サンプリングは次のとおりである。ボーメ度（比重）の測定に用いる試料には、酒母全体を撈拌後、1日1回、100 g 程度をサンプリングし濾過して得られた濾液を用いた。エタノールとグルコース濃度の測定に用いる試料は、1日1回、約10 g の試料を15 mL 遠沈管に採取した後、直ちに凍結させ、分析に用いるまで凍結保管した。分析には、解凍後、7,000 rpm、10 分間の条件で遠心分離して得られた上清を試験に供した。

ボーメ度の測定は、国税庁所定分析法に従い³⁾、振動式密度計（京都電子工業(株)社製）によって分析した。エタノールとグルコースの定量は、高速液体クロマトグラフにより以下の条件で行った。まず、送液ポンプは LC-20AD（(株)島津製作所社製）を用いた。カラムは、Shodex SH1821（8.0 I.D.×300 mm、昭和電工(株)社製）を用い、カラム温度は50℃とした。移動相は、5 mM 硫酸を毎分1.0 mL の流速で20 分間送液した。試料は、PTFE メンブレンフィルター（(株)島津ジーエルシー社製、ポアサイズ 0.22 μm、13 mm φ）で濾過した後、10 μL を装置に注入した。検出器には RID-10A（(株)島津製作所社製）を用いた。

3.2.3 実地試験

可視化システムによる測定は実機スケールで行った。測定期間は約10日間とし、1分間に1回の頻度でデータを取得した。実地試験の様子を図3に示す。



図3 実地試験の様子

3.2.4 IoTを活用した試験方法

測定方法として各センサを1組にまとめた測定系①～④をタンクの4個所にそれぞれ配置してデータを取得した。実際の各測定系の配置を図4に示す。また、各測定系の配置イメージを図5に示す。

測定系①はケース（容量3.4 L）にチューブとDC5Vで駆動するファンを設置して、タンク内の気体を吸気し、各センサでデータを取得した。その際、チューブの口の高さを液面から200 mm とした。

測定系②は測定系①と同様の構成であるがチューブの口の高さを液面から400 mm とした。

測定系③はタンクの縁にネットを取り付けその中で各データを取得する方式とした。

測定系④はタンク上部のプラスチック板の中心部分に空けた直径約20 mm の穴付近に各センサを配置しデータを取得する方式とした。

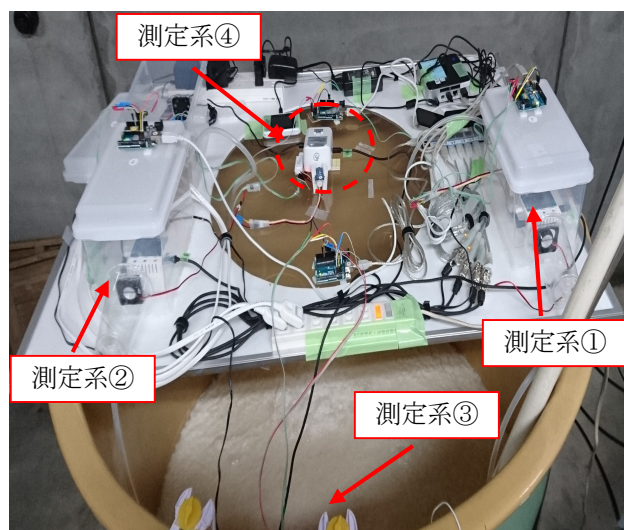


図4 実際の各測定系の配置

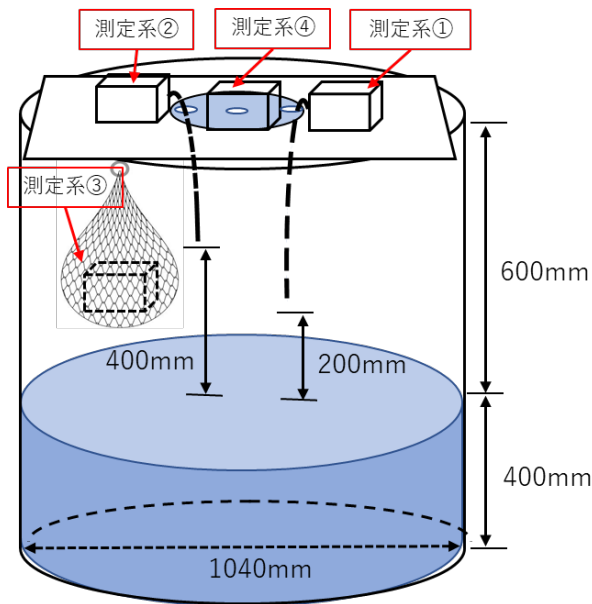


図5 各測定系の配置イメージ

4. 研究結果と考察

酒母からサンプリングした試料中のアルコール濃度、グルコース濃度、ボーメ度を図6に示す。アルコール濃度は、1日目では0%だったが、発酵日数の経過とともに上昇し、11日目では11.9%に達した。ボーメ度は、2日目では13.6だったが、8日目から下降傾向を示した。グルコース濃度は、1日目では4.1%だったが4日目では9.5%まで上昇し、その後横ばいで推移した後、7日目から下降に転じた。このように、酒母における液中アルコール濃度は、発酵日数の経過とともに上昇し続けることがわかる。なお、発酵1日目のボーメ度については、測定するための十分な濾液を得ることができなかったため結果を示していない。

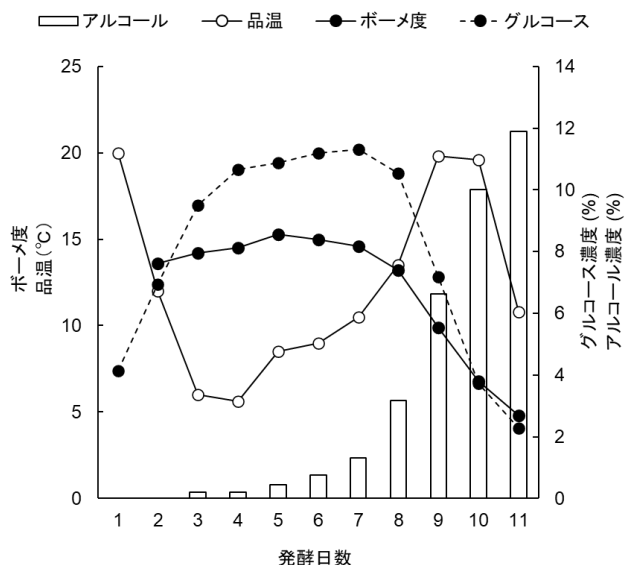


図6 酒母におけるアルコール濃度、品温、ボーメ度、およびグルコース濃度の推移

実際にサンプリングして取得した液中アルコール濃度と測定系②で取得したCO₂濃度を比較したグラフを図7に示す。また、サンプリングした液中アルコール濃度と測定系②で取得した気中アルコール濃度を比較したグラフを図8に示す。

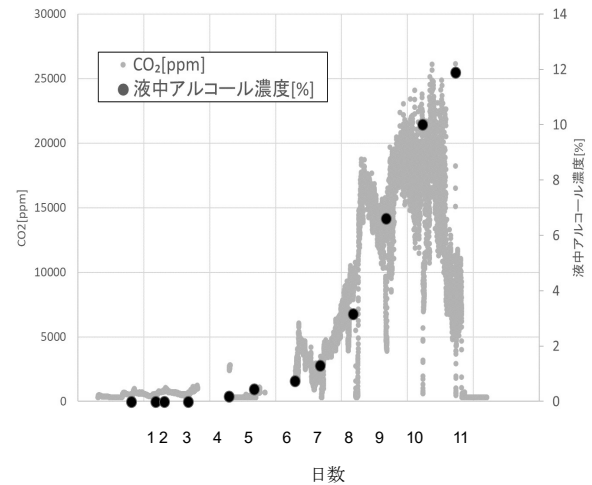


図7 サンプリング結果と気中CO₂濃度

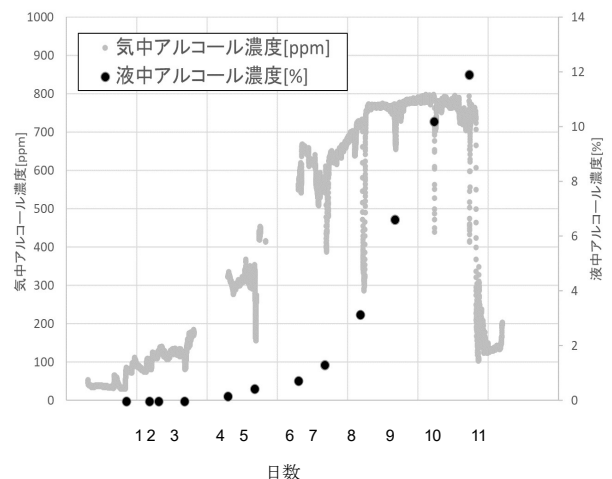


図8 サンプリング結果と気中アルコール濃度

通常、気中CO₂濃度は大気中において400ppm程度を示す。本研究では、酒母の発酵日数の経過とともに上昇する傾向を示し、発酵10日目では25,000ppm程度まで上昇した。これらの結果は、液中アルコール濃度の上昇傾向と一致していることがわかる。一方、気中アルコール濃度は酒母の発酵初期から検出され、発酵日数の経過とともに上昇する傾向を示したが、液中アルコール濃度はほとんど検出されていないことから、アルコールセンサによる結果と一致していないことがわかる。この結果から、アルコールセンサがアルコール以外の成分を認識している可能性が示唆される。なお、3日目および5日目の気中アルコール濃度の測定では、システムにおける通信障害の影響により一部のデータを得ることができなかった。

次いで、気中CO₂濃度と液中アルコール濃度では同

じ発酵日数で上昇し始めることを確認できたことから、これらの相関性を調べた。気中 CO₂ 濃度は 1 日の平均値を表している。図 9 に示したとおり、気中 CO₂ 濃度と液中アルコール濃度の間には正の相関が認められた ($r = 0.9773$)。これらの結果から、酒母での発酵に伴う液中アルコール濃度の上昇を予測するうえで、気中 CO₂ 濃度のセンシングが適していることがわかる。

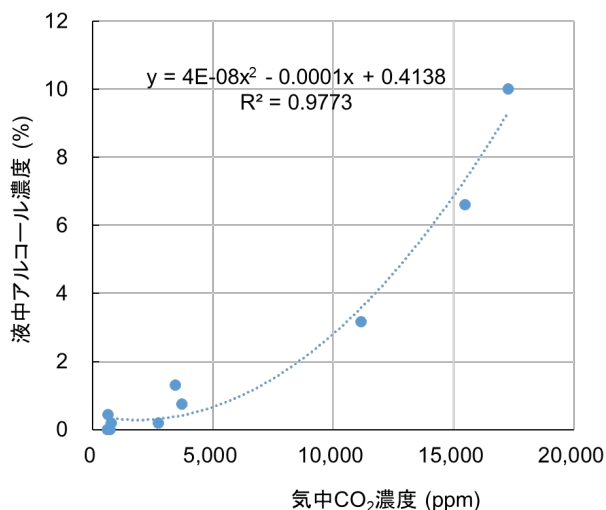


図9 液中アルコールと気中 CO₂ 濃度の相関性

なお、測定系①と測定系②では気中アルコールセンサと CO₂ センサの測定結果について同様の傾向を示していた。また、測定系③と測定系④における気中アルコールセンサと CO₂ センサの測定結果については、各センサの測定上限値を超えていた。測定系③は酒母の液面から 400 mm の位置に設置し、他の測定系と比較して最も液面と近い。また、測定系④は測定系①や測定系②と同じく液面から 600 mm の位置に設置してあるが、チューブを介してサンプリングしている測定系①や②と異なり、タンク上部に直接設置されている。したがって、各センサが測定可能となる濃度範囲に収まるように、センサの設置位置や空気のサンプリング量を調節する必要がある。

5. まとめ

- ・酒母における発酵状態を可視化するために、気中アルコール濃度と CO₂ 濃度をセンシングする可視化システムを構築した。
- ・IoT を活用したデータ可視化ではタンクの 4 箇所に各測定系を配置してデータの取得を行い、実際にサンプリングしたデータと比較し、相関関係があるか調査した。
- ・気中 CO₂ 濃度と液中アルコール濃度については同日数で上昇することを確認し、その結果から液中アルコール濃度と気中 CO₂ 濃度の間には正の相関があることが明らかになった。
- ・気中アルコール濃度と液中アルコール濃度との間には、ほとんど相関性が認められなかった。

6. 今後の課題

本研究報告には示していないが、測定系③および④から取得した CO₂ 濃度と気中アルコール濃度の値では、測定系①及び②と比較してばらつきが散見された。この現象については、各センサのデータ取得およびデータ処理において何らかの原因があると考えられる。今後は各測定系で、より高精度にデータが取得できるようにセンシング部分の改善を行う予定である。さらに、今回の計測結果からは液中アルコール濃度と気中アルコール濃度との間に相関性がほとんど認められなかったため、データの取得方法や新たなセンサの選定についても再検討を行う予定である。

7. 参考文献等

- 1) 勝田 英紀：日本酒輸出のメリット、商経学叢、64 巻、3号 (2018年)
- 2) 宮井 孝一、萱島 昭二：日本醸造協会雑誌、64巻、5 号、435-439 (1969年)
- 3) 国税庁編：国税庁所定分析法 (昭和36年1月1日 国税庁訓令第1号、最終改正令2国税庁訓令第9号)
- 4) 上田 益：男西宇和杜氏と酒造り、日本醸造協会雑誌、79巻、1号 (1984)