

アルコール発酵状況可視化システムの試作開発

石川 卓* 飛田 啓輔** 澤島 真名美** 伊藤 貞良***

1. はじめに

「日本酒の製造技術や品質管理が、職人の勘と経験に頼ることが多い」ことが、業界の課題となっている。品質管理の重要な工程の1つに、日本酒のもとを造る「酒母造り」という発酵工程がある。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る。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時間を要する。そのため、発酵状態をリアルタイムに把握することが困難であった。これを解決するため、当センターでは平成31年度より研究を実施した。その結果、アルコール発酵の副産物である二酸化炭素の発生量からアルコール濃度を推定する手法及びシステム（アルコール発酵状況可視化システム）を研究開発した¹⁾（図1）。これにより、アルコール発酵物の発酵状態を連続的かつリアルタイムに把握する手法を提案した。このアルコール発酵状況可視化システムの実用化に向けて、試作開発を行った結果について報告する。



図1 アルコール発酵状況可視化システムの概略図

2. 目的

アルコール発酵状況可視化システムの実用化を目的として、当センターと株式会社ユードムは共同研究を実施した。実用化するには、ハードウェア及びソフトウェアについて、以下の観点から踏まえて改良する必要がある。

【ハードウェア】

- ・安全性を考慮した構造設計
- ・衛生面を考慮した材料選定

【ソフトウェア】

- ・データ取得の安定性向上
- ・出力データの視認性向上

また、試作機を用いて酒母造りを想定した発酵物の測定を行い、試作機の性能評価を行う。

3. 研究内容

3.1 ハードウェアの改良

3.1.1 安全性を考慮した構造設計

センターが研究開発したアルコール発酵状況可視化システムでは、図1に示すように、プローブの中に二酸化炭素センサ（以下、「センサ」と表記）が設置されている。しかし、センサは固定されていないため、位置や姿勢が不安定であり、測定に影響を及ぼす可能性がある。また、センサに結露による水滴が生じた場合、その水滴が発酵物に落下する可能性がある。

そこで、台座を新たに設け、センサを固定した（図2）。また、台座の下方に結露水用の受け皿を設置し、受け皿の中に水分を吸収するスポンジを入れた。そして、台座や受け皿が発酵物に落下しないように、受け皿の下に金網を設置した。これにより、センサを安定的に固定し、センサへの付着物の落下を防止する構造に改良した。

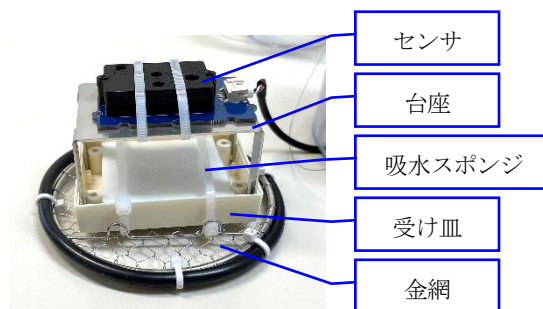


図2 センサの固定方法

3.1.2 衛生面を考慮した材料選定

アルコール発酵状況可視化システムは、食品製造に用いることを想定している。そのため、食品に接する可能性のある部分について、衛生面を考慮する必要がある。そこで、プローブ及びセンサの固定に用いる構成物について、食品衛生法を考慮して選定した。

3.2 ソフトウェアの改良

3.2.1 データ取得の安定性向上

これまでのコンピュータのデータ処理は、センサからの測定データ取得、データ保存、クラウドへの送信を、順次繰り返していた。この場合、クラウドへの送信に時間がかかってしまい、データ取得間隔が一定でなくなることがあった。

そこで、「データ取得」と「クラウドへの送信」のプロセスを分けて処理するプログラムに改良した。データ取得からスプレッドシートによるグラフ表示までの処理に関するフロー図を図3に示す。図3の赤点線部が本研究で改良した箇所である。これにより、クラウドへの送信に時間がかかった場合でもデータ取得に影響を及ぼさず、データ取得間隔を一定にすることが

できた。

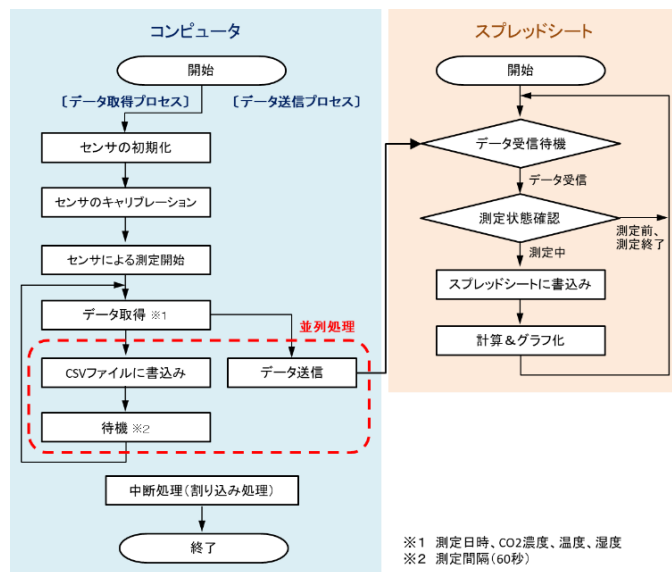


図3 コンピュータ（左）とスプレッドシート（右）の処理フロー図

3.2.2 出力データの視認性向上

これまで、センサからの測定データはクラウド上のスプレッドシートに保存され、そこでグラフの生成やアルコール濃度推定値の算出が行われていた。そのため、ユーザーはスプレッドシートでグラフ等の出力データを確認することができるが、特にグラフについては使用するデバイスによって見え方が異なり、適切な大きさで表示されない場合があった。また、スプレッドシートには計算用のシートがあり、ユーザーに提供する出力データ以外の情報も記載されていた。

そこで、Google Sitesを用い、測定状況を確認するための簡易ウェブサイトを試作した（図4）。ウェブサイトへアクセスすることで、測定状況を示す数値やグラフを閲覧することができる。簡易ウェブサイトを用いることで以下のような特徴があり、出力データの視認性の向上につながることを期待される。

- ・スプレッドシートのグラフをウェブサイトへ埋め込むことにより、最新の測定状況がウェブサイト上に表示される。
- ・ウェブサイトのグラフを閲覧する際、使用するデバイスに応じてグラフの大きさが調整されて表示される。
- ・ウェブサイトへスプレッドシートの特定のシートのリンクを付けることで、提供したいデータのみを表示させることができる。
- ・1つのページに複数の測定状況を表示させることができる。

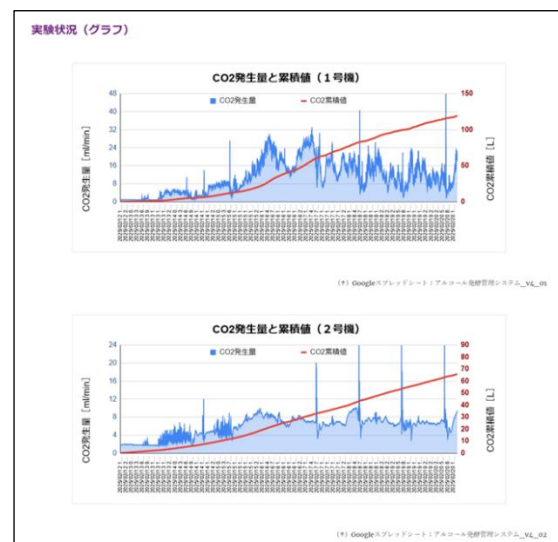


図4 試作したウェブサイト

3.3 試作機の性能評価

本研究による試作機の性能評価を行うため、酒母造りを想定した発酵物を用意し、発生する二酸化炭素測定を2回実施した。

3.3.1 実験方法

1回目の実験では、以下の方法で発酵物を調製した。

- 1) 乾燥 α 化米2 kg、乾燥麹1 kg、純水5 Lを、温度調節機能を兼ね備えたジャケット式ステンレスタンク内で混合して、56℃で6時間糖化させた。
- 2) 糖化後、すぐに20℃まで冷却し、乳酸17.5 mLと清酒酵母培養液100 mLを添加して20℃で発酵させた。
- 3) 発酵物に対して試作機を挿入した状態で固定し、二酸化炭素濃度を60秒間隔で測定した（表1）。その際、測定データの信頼性を確認するため、センターが研究開発した試作機でも同時に測定を行った（図5）。

また、1日1回発酵物をサンプリングし、遠心分離（10,000 rpm、5分間）によって得られた上清を分析サンプルとした。そして、サンプル中のアルコール濃度を国税庁所定分析法²⁾に従って分析した。二酸化炭素濃度測定及びアルコール濃度分析を約10日間実施した。その間、タンクの設定温度は20℃で一定とし、9日目以降は7℃で一定とした。

試作機の性能評価は以下の観点で実施した。

- 〔観点①〕 センサに結露が生じていないか
- 〔観点②〕 測定した二酸化炭素濃度がセンサの測定範囲内であるか
- 〔観点③〕 測定した二酸化炭素発生量の累積値と発酵物のアルコール濃度の間で強い相関があるか

2回目の実験では、材料の量を1回目の2倍にし（乾燥 α 化米4 kg、乾燥麹2 kg、純水10 L）、同様の手順で発酵させた。試作機による測定についても1回目

と同様に約 9 日間実施した。その間、タンクの設定温度は 20℃で一定とした。

表 1 試作機による測定条件

項 目	1回目	2回目
測定期間	約10日間 (233時間)	約9日間 (208時間)
測定対象	CO ₂ 濃度、温度、湿度	CO ₂ 濃度、温度、湿度
CO ₂ 校正値	450ppm	430ppm
測定間隔	60秒	60秒
吸込量	4,000ml/min	4,000ml/min
プローブ挿入深度	5cm	6cm

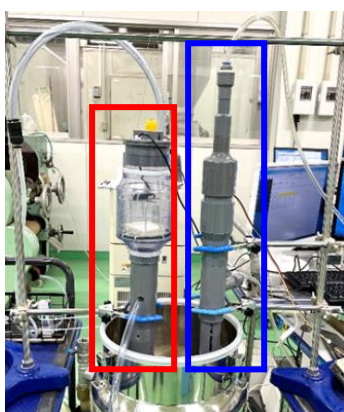


図 5 試作機設置の様子

左（赤線）が本研究による改良後の試作機、右（青線）が改良前の試作機。

3.3.2 実験結果

〔観点①（センサに結露が生じていないか）〕

試作機で測定した二酸化炭素濃度、温度、湿度の結果を表 2 に示す。測定した湿度の最大は 1 回目で 50.24%、2 回目で 51.79%であった。結露が生じているかどうかを判定するには、測定した温度と湿度から露点温度を計算し、測定温度と比較する必要がある。そして、露点温度より測定温度が低い場合に結露が発生する。August-Roche-Magnus の式^{3), 4)}（飽和水蒸気圧を温度の関数として表す経験式）を用いて露点温度を計算した結果、1 回目、2 回目とも、常に露点温度より測定温度のほうが高かった。そのため、結露は生じていなかったと考えられる。

表 2 試作機による測定結果

	CO ₂ [ppm]		温度[℃]		湿度[%]	
	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
Max	1,739.98	10,410.25	27.37	19.93	50.24	51.79
Min	442.14	419.64	10.52	9.28	16.23	16.02
Avg	832.47	1,515.50	14.19	13.97	32.85	31.62

〔観点②（測定した二酸化炭素濃度がセンサの測定範囲内であるか）〕

表 2 より、測定した二酸化炭素濃度の平均値は 1 回目で 832.47ppm、2 回目で 1,515.50ppm であった。1 回

目と 2 回目で約 2 倍の差が生じたのは、発酵物の材料の量が 2 倍になったことによるものと考えられる。

また、二酸化炭素濃度のヒストグラム（図 6）によると、1 回目では 1,000ppm 付近、2 回目では 1,700ppm 付近の頻度がもっとも高かった。二酸化炭素濃度の最大値は 1 回目で 1,739.98ppm、2 回目で 10,410.25ppm であった（表 2）。本研究で使用したセンサの二酸化炭素濃度の測定範囲は 400～10,000ppm である。そのため、10,000ppm を超えた値が 1 回あったものの、2 回の実験ともに 99.9%以上の測定値がセンサの測定範囲内に収まることを確認することができた。

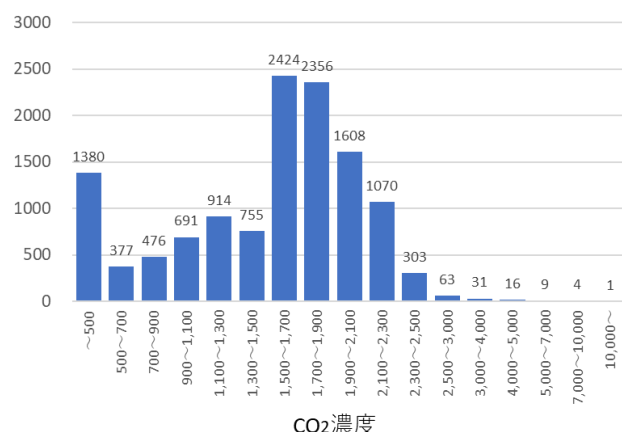
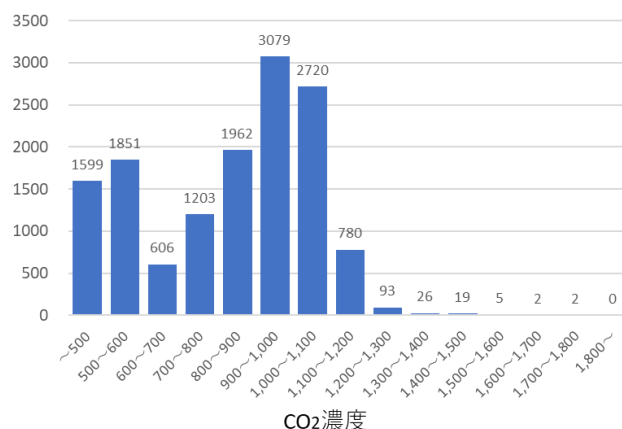


図 6 二酸化炭素濃度のヒストグラム

上が 1 回目、下が 2 回目の結果。

〔観点③（測定した二酸化炭素発生量の累積値と発酵物のアルコール濃度の間で強い相関が示されるか）〕

測定した二酸化炭素濃度から算出した二酸化炭素発生量とその累積値、分析によって得られた発酵物のアルコール濃度の結果を図 7 に示す。1 回目、2 回目とも、二酸化炭素発生量の累積値はアルコール濃度とともに上昇した。特に 1 回目では、測定開始から 208 時間後にタンクの設定温度を 20℃から 7℃に下げたが、それに伴い、二酸化炭素発生量は減少し、アルコール濃度と二酸化炭素発生量の累積値の増加がともに緩やかになった。

二酸化炭素発生量の累積値とアルコール濃度の相関関係を調べたところ、1 回目、2 回目の相関係数はそれ

ぞれ0.998、0.997であった。t検定の結果、いずれも有意水準1%で統計的に有意であった。

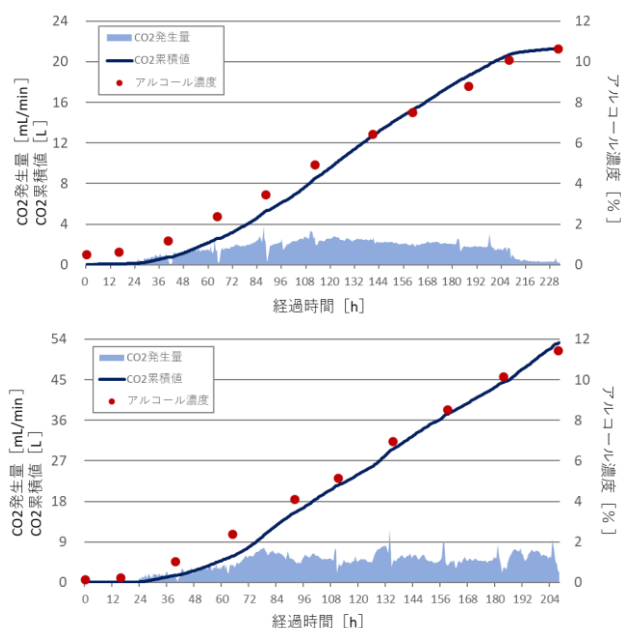


図7 二酸化炭素発生量とアルコール濃度
上が1回目、下が2回目の結果。

二酸化炭素発生量の累積値とアルコール濃度の相関図を図8に示す。両者の相関関係の強さから、1回目、2回目とも直線状にプロットされている。そのため、1次近似式を求めることで、二酸化炭素累積値からアルコール濃度を推定することができる。

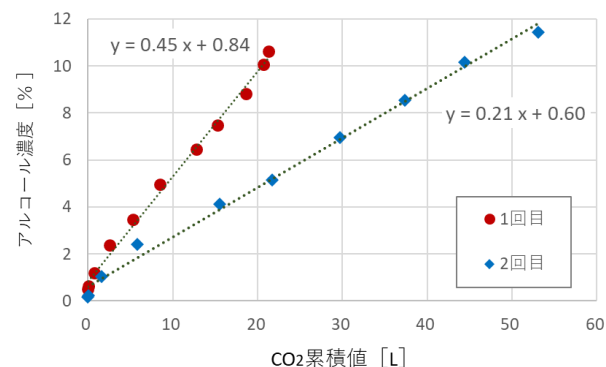


図8 二酸化炭素累積値とアルコール濃度の相関図

なお、センターが研究開発した試作機でも同時に測定を行ったが、観点①と③については概ね同等の結果であった。観点②について、センターの試作機では2回目の実験において、約13%が10,000ppmを超えていた。本研究による試作機では、99.9%以上の測定値がセンサの測定範囲内に収まっていたことから、より正確なデータが取得できていたと考えられる。

4. まとめと今後の課題

センターが研究開発したアルコール発酵状況可視化システムの実用化に向けて、「2. 目的」で挙げた観点

を踏まえて試作機を構築した。主な結果は以下のとおり。

[ハードウェア]

- ・センサを台座に固定し、台座の下方に結露水用の受け皿を設置した。これにより、センサへの付着物の落下を防止する構造となり、センサの安定性と落下物に対する安全性を向上させた。
- ・構成物について、食品衛生法を考慮した材料のものを選定した。

[ソフトウェア]

- ・プログラムの改良により、データ取得間隔を一定にし、データ取得の安定性を向上させた。
- ・簡易ウェブサイトを試作し、出力データの確認方法を提案した。ユーザーにとって不要なデータを除外して表示できるため、視認性の向上が期待される。

また、試作機を用いて酒母造りを想定した発酵物を測定し、性能評価を行った。主な結果は以下のとおり。

- ・発酵物を測定中にセンサに結露は生じなかった。
- ・二酸化炭素濃度の測定値は99.9%以上がセンサの測定範囲内であった。
- ・二酸化炭素発生量の累積値と発酵物のアルコール濃度の間で非常に強い正の相関が認められた。

今後の課題として、以下の点を検討する必要がある。

- ・多量の発酵物への対応

本研究の実験では概ねセンサの測定範囲内で二酸化炭素濃度を測定することができたが、実験よりも多くの発酵物を測定する場合はエアポンプによる吸引量を増やす、またはより高濃度まで測定できる二酸化炭素センサを用いる必要がある。

- ・プローブの設置方法

本研究の実験では、プローブをタンクの上から吊るして設置した。実際の酒蔵では、より大きなタンクが使われている場合が多いため、作業性や簡便性を考慮して設置方法を検討する必要がある。

5. 参考文献等

- 1) 石川卓、河原航、野口友嗣、飛田啓輔、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、茨城県産業技術イノベーションセンター研究報告、52、13-14、2024
- 2) 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.
- 3) O. A. Alduchov and R. E. Eskridge. Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure, Journal of Applied Meteorology, 35, 601-609, 1996.
- 4) M. G. Lawrence. The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air, Bulletin of the American Meteorological Society, 86, 225-234, 2005.