

非接触による酒母中アルコール濃度の推定技術の開発

石川 卓* 富田 洋文** 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、酵母の増殖と発酵に伴い、エタノールが生成される。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。しかし、このような分析は、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る。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、温度調節などの処置が遅れるという課題があった。

この課題を解決するため、本研究では、リアルタイムで酒母中のアルコール濃度を把握し、発酵状態を迅速に把握できる技術開発を目的に、非接触によって酒母中アルコール濃度の推定を試みる。

2. 目的

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。一般的に、酒母造りではアルコール濃度が10%に達した段階で清酒酵母の死滅を防ぐために速やかに品温を下げ、清酒酵母によるアルコール発酵を抑制する。したがって、酒母造りにおいてアルコール濃度を迅速に把握することは極めて重要である。そこで、本研究ではハイパースペクトルカメラや気体測定用センサを用いて、酒母造りにおける液中アルコール濃度を非接触で把握・可視化する技術を開発することを試みた。

3. 研究内容

3.1 ハイパースペクトルカメラを用いた反射率測定によるアルコール濃度推定の検討²⁾

3.1.1 近赤外光を利用した酒の品質評価

本手法は、液体表面に反射する近赤外光の測定によるアルコール濃度推定の検討を実施した。近年、近赤外光の測定による酒の品質評価が行われている³⁾。この評価手法に関して、評価する液体を専用の容器に取り出す必要がある。

そこで本手法では、より簡便な評価の実施を目的とし、ハイパースペクトルカメラを用いた液体表面の反

射光の測定を行い、測定データから液体の品質を評価する手法を検討した。この手法の展望として、酒造工程において液体を取り出すことなく、上方向からの測定のみでリアルタイムな評価が可能となる。

3.1.2 ハイパースペクトルカメラの撮影による反射率の測定

本手法では、水とエタノールの混合液を評価対象とし、ハイパースペクトルカメラはエバ・ジャパン社製のSIS-NIを用いた。図1にハイパースペクトルカメラと実験時の様子を示す。このカメラは波長900nmから1700nmまで10nm間隔の近赤外光の測定が可能であり、各波長において分解能4000のデータを出力する。また一度に640×400ピクセル分の撮影が可能である。

評価実験では撮影する被測定物として12種類（エタノール濃度4.9%、9.0%、14.8%、20%、30.6%、40.6%、51.6%、62.3%、72.3%、82.3%、91.6%、99.9%）の混合液と純水を加えた計13種類の液体を20mlずつ用意した。

ビーカーに液体を入れてカメラの真下に設置した後、500Wのハロゲンランプを三方向から照射し、カメラパラメータの調整を行い、撮影を実施した（図1）。撮影後、撮影した液体表面のデータを50×50ピクセル分をトリミングし、各ピクセルの反射率データをcsvファイルとして出力した。

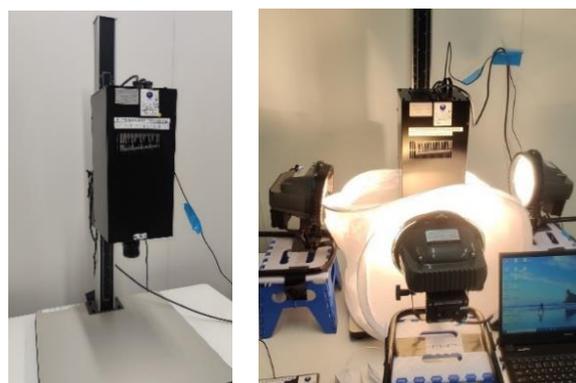


図1 ハイパースペクトルカメラ(左)と実験時の様子(右)

3.1.3 反射率測定結果と考察

撮影データで得られた50×50ピクセル分の平均反射率を図2に示す。このグラフは横軸が波長、縦軸が反射率を示す。この反射率が低いほど、液体がその波長の光を多く吸収したことを示す。

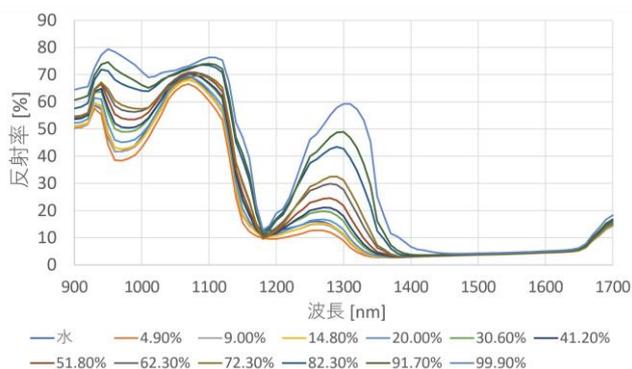


図 2 各液体における反射率測定の結果

図 2 より、どの液体も波長 1200nm 付近と 1400nm 以降で反射率が低くなる傾向があった。また、960nm 付近と 1300nm 付近では、各液体で反射率が異なることが確認され、特に 1300nm においては平均反射率の最大差が約 50 ポイントあった。

一般的に、1300nm 付近の波長域に観測されるスペクトルの吸収は、水とアルコールの O-H 伸縮振動に起因することが知られている。すなわち、この波長付近の吸光度は水分子の伸縮振動の結合音に起因することが報告されており⁴⁾、水を多く含む低濃度エタノールは光の吸収度が高くなることから、反射率が低くなると考えられている。したがって、1300nm 付近の大きな反射率の差から、エタノール濃度を推察できる可能性がある。

今回の実験で、エタノール濃度に起因した反射率の変化を確認したが、濃度に依存した反射率の差異を明らかにすることは難しかった。すなわち、反射率によるエタノールの濃度推定へのモデル化は、不明瞭である。そこで本研究では、機械学習によるハイパースペクトルカメラの撮影結果からエタノール濃度を推定する手法を検討した。

3.1.4 機械学習を用いた液体の分類精度の検証

各液体で測定した反射率のデータを機械学習ツールのランダムフォレストを利用し、学習および推定を実施し各液体の分類精度を検証した。このランダムフォレストを使用する際のパラメータは、木の深さを 30、木の本数を 30、ランダムステートを 42 とした。

各液体で取得したデータからランダムに 80 ピクセル分のデータを抽出し、全液体の取得データを学習用データと検証用データで 7 対 3 の割合に分けた。そして構築したランダムフォレストに学習用データを入力し、学習済みモデルを作成する。このモデルに検証用データを入力することで、どの液体であるかの推定値が返ってくる。

用意した検証用データに対して学習済みモデルが推定し分類した結果を図 3 に示す。各枠内の数字は分類した結果の割合を表している。今回の測定における機械学習による分類の平均正答率は 97.4%であった。このことから、機械学習を用いた液体の濃度分類において高精度なエタノール濃度推定の可能性があることが

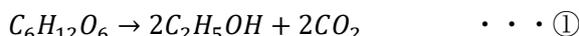
分かった。

		推定したエタノール濃度												
		純水	4.9%	9.0%	14.8%	20.0%	30.6%	40.6%	51.6%	62.3%	72.3%	82.3%	91.6%	99.9%
撮影した実際のエタノール濃度	純水	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4.9%	0	95.5	4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9.0%	0	5.3	94.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14.8%	0	0	6.1	87.9	6.1	0	0	0	0	0	0	0	0
	20.0%	0	0	0	0	96.2	3.8	0	0	0	0	0	0	0
	30.6%	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
	40.6%	0	0	0	0	0	3.8	96.2	0	0	0	0	0	0
	51.6%	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
	62.3%	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
	72.3%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0
	82.3%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
	91.6%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
	99.9%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

図 3 機械学習による分類結果

3.2 二酸化炭素発生量によるアルコール濃度推定

酒母の発酵過程において、式①のとおり酵母の働きでブドウ糖がエタノールと炭酸ガスに分解される。



このアルコール発酵に着目し、汎用センサでの測定が困難なアルコール濃度を二酸化炭素発生量から推定することを試みた。

また、その結果を基に、実際の酒蔵でのアルコール濃度推定に向けて、二酸化炭素評価装置の作製等を行った。

3.2.1 アルコール濃度と二酸化炭素発生量の測定方法

酒母の発酵過程におけるアルコール濃度と二酸化炭素発生量を測定するため、酒母センシングシステムを用いた (図 4)。本システムは、温度調節機能とセンシングユニットが付加した高機能タンクである。タンクは高さが 400mm、容量が約 30L の円筒型である。本システムにより、密閉したタンク内で発酵を進めることができ、同時に、気層部のアルコール濃度 (以下、「気中アルコール濃度」と表記) と、タンク上部から抽出した気体に対する二酸化炭素濃度を測定することができる。なお、二酸化炭素は 500ml/min の流量で気体を引き込みながら測定し、タンク内が負圧にならないように、引き込み管の一端を大気開放とした。

酒母の仕込みは、タンク内に乾燥麹 1kg、乾燥アルファ米 2kg、水 5L を入れ、58℃で 8 時間の条件で糖化した。その後、タンク温度を 20℃に制御し、乳酸 24ml と清酒酵母の培養液 100ml を加え、7 日間酒母を発酵させた。発酵期間において、気中アルコール濃度と二

酸化炭素濃度は30秒間に1回の測定間隔でデータ収集した。一方、液中アルコール濃度の測定は、1日1回の頻度で酒母をサンプリングし、遠心分離によって濾液を得た。さらに、その濾液は国税庁所定分析法に従い、Alcolyzer3001 SAKE（アントンパール社製）を用いてアルコール濃度を測定した。

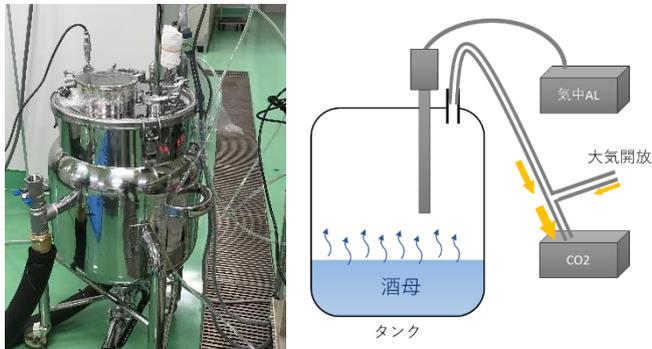


図4 酒母センシングシステムの外観(左)と概略図(右)

3.2.2 アルコール濃度と二酸化炭素発生量の測定結果

酒母センシングシステムを用いて、酒母のアルコール濃度と二酸化炭素発生量を測定した。

まず、二酸化炭素発生量の結果を図5に示す。なお、二酸化炭素発生量は、30秒間隔で取得した二酸化炭素濃度を10分間平均値にし、流量を掛けて算出した。二酸化炭素発生量は、発酵1日目ではほとんど検出されなかったが、2~3日目で増加した。4~5日目で、発生量は高い水準となり、6日目で減少した。

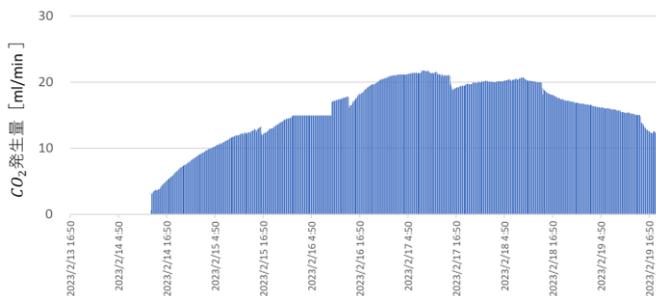


図5 酒母発酵中の二酸化炭素発生量

次に、気中アルコール濃度と液中アルコール濃度、二酸化炭素発生量の累積値の結果を図6に示す。なお、気中アルコール濃度は、30秒間隔で取得した値を10分間平均したものである。また、二酸化炭素発生量の累積値は、前述の二酸化炭素発生量に時間(10分間)を掛け合わせ、積算したものである。

気中アルコール濃度に関して、わずかではあるが、発酵とともにアルコール濃度が増加した。また、液中アルコール濃度と二酸化炭素累積値はいずれも正比例的に増加しており、両者に強い相関関係があることを確認した(相関係数0.99)。

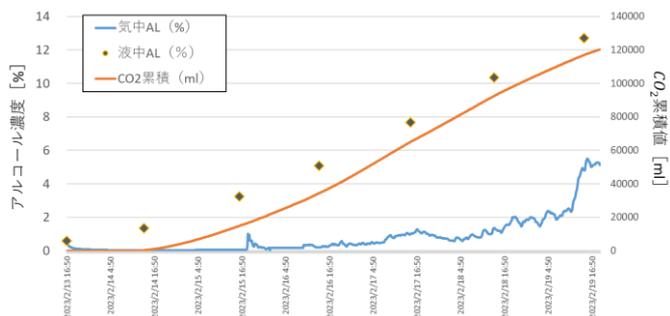


図6 酒母発酵中のアルコール濃度と二酸化炭素累積値

そこで、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、その相関図から1次近似式を求めた(図7)。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。

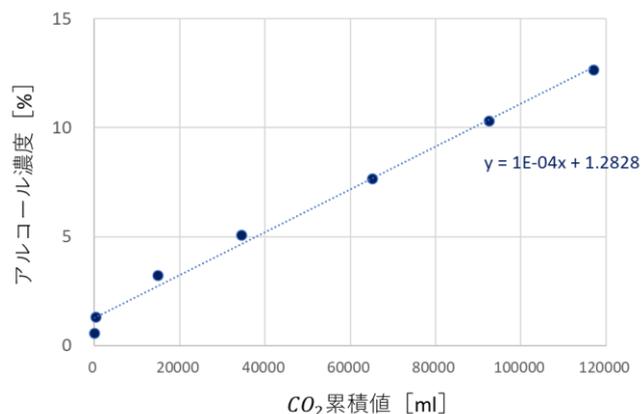


図7 酒母発酵中の液中アルコール濃度と二酸化炭素累積値の相関図

3.2.3 実環境でのアルコール濃度推定に向けた検討

酒母センシングシステムによる測定では密閉したタンクを用いたが、実際の酒蔵で酒母造りに用いられる容器は上部が開放した形状である。このような実環境で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、一部密閉系を作り、その中で二酸化炭素濃度を測定することができる二酸化炭素評価装置のプロトタイプを試作した。その概略図を図8に示す。

このプロトタイプでは、二酸化炭素濃度を測定するため汎用センサを用いているが、酒母センシングシステムと同等な応答性で二酸化炭素濃度測定ができることを確認した。

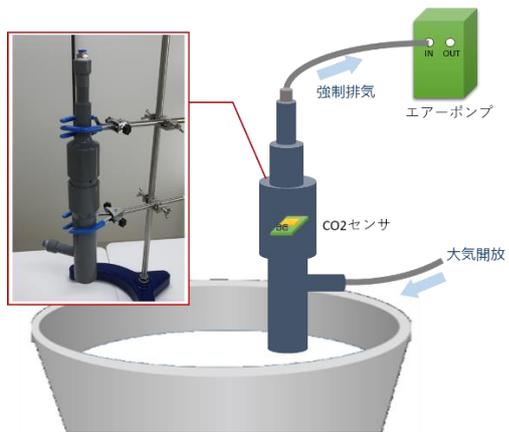


図 8 二酸化炭素評価装置プロトタイプの概略図

4. 研究結果と考察

4.1 ハイパースペクトルカメラを用いたアルコール濃度推定

酒造におけるアルコールの簡便な評価手法を検討するため、液体表面の撮影による濃度推定の可能性を検証した。その結果、用意したエタノール混合液の濃度間で反射率に差異が表れることを確認した。また、機械学習を用いたエタノール混合液の分類精度を検証した結果、97.4%の正答率で分類することができた。

今後は本手法を用いて、エタノール以外のグルコースや乳酸菌などの成分が含まれた条件における液体の分類および成分分析の可能性を検証する。

4.2 二酸化炭素発生量によるアルコール濃度推定

酒母の発酵過程におけるアルコール濃度を二酸化炭素発生量から推定することを試みた。密閉したタンク内で酒母を発酵させたところ、液中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ることを分かった。そして、二酸化炭素累積値から液中アルコール濃度を推定する近似式を導出した。

今後は実際の酒蔵でのアルコール濃度推定に向けて、作製した二酸化炭素評価装置プロトタイプを用いて二酸化炭素濃度測定とアルコール濃度推定を試みる予定である。

5. まとめ

清酒製造の現場では「一麴、二酛（酒母）、三造り」と呼ばれるように、酒母造りは清酒製造において極めて重要な工程の一つとされている。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ことを目的とし、アルコール濃度が 10%に達した段階で清酒酵母の死滅を防ぐために速やかに品温を下げ、清酒酵母によるアルコール発酵を抑制する必要がある。従来、アルコール濃度の分析は、酒母のサンプリング、濾液の調製、蒸留の作業を経て、アルコール濃度の測定を行ってきた。本研究では、ハイパースペクトルカメラや二酸化炭素のセンシングを用いることで、酒母の工程において液中のアルコール濃度を非接触によって把

握・可視化する技術を開発することができた。

6. 今後の展開

本研究では、非接触による酒母のアルコール濃度の推定技術の開発を試みた。今後は、IoTツールを活用することで、遠隔で酒母のデータ閲覧を可能とするシステム構築を目指して行く予定である。また、開発した技術は、清酒の酒母の発酵に限らず、醪の発酵、あるいは果実酒などの醸造酒における果醪のアルコール発酵においても展開できる可能性がある。

なお、本研究は令和元年から令和5年まで、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ているものである。

7. 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) 富田 洋文、河原 航、平間 毅、飛田 啓輔. ハイパースペクトルカメラを用いた近赤外分光反射率測定によるアルコール濃度推定の検討. 情報処理学会第 84 回全国大会講演論文集、2022 (1)、59-60、2022.
- 3) 末原 憲一郎、亀岡 孝治、橋本 篤, “赤外分光情報に基づいた嗜好飲料のスペクトル特性把握”, 日本醸造協会誌, Vol. 113, No. 3, pp. 133-141, 2018.
- 4) 池羽田 晶文, “アルコール水溶液中の水の水素結合-モル吸光係数の拡張概念によるスペクトル解析”, 分析化学, Vol. 59, No. 1, pp. 13-21, 2010.