

炭素の動きからみる清酒醸造の並行複発酵 品質・評価研究部門 赤松 史一

1. はじめに

清酒醸造は、麴菌の加水分解酵素による米のデンプンの糖化と、酵母による発酵が同一の醪の中で同時に進む、世界に誇る高度な並行複発酵の技術に支えられています。醪の中では、味わいの基点物質となる糖の生成と消費が絶えず繰り返されています。しかし、見かけ上の成分の濃度変化が小さいため、その詳細な動きを正確に捉えることは困難となっています。そこで、濃度ではなく安定同位体比に着目し、並行複発酵における炭素安定同位体比の特徴を明らかにすることを試みました。

安定同位体とは、陽子数が同一で中性子数が異なり、放射壊変を起こさず永続的に存在する原子を指します。炭素（C）においては、質量数 12 の ^{12}C と質量数 13 の ^{13}C の 2 種類の安定同位体が存在し、地球上の存在割合は、 ^{12}C が約 98.93%、 ^{13}C が約 1.07%です¹⁾。植物に含まれる ^{12}C と ^{13}C の比率は、植物の代謝経路や生育環境によりわずかに変動することが知られています。この微細な変動を標準物質との千分偏差(‰:パーミル)で表したものが炭素安定同位体比です²⁾。分子の炭素安定同位体比を解析することで、並行複発酵における炭素の動きを分子レベルで追跡することが可能となります。

炭素安定同位体比分析は、醸造過程の学術的解明だけでなく、近年重要性が増している食品表示の正当性を証明する技術としても有効です。食品表示は単なる法令遵守のための義務ではありません。製造者と消費者を信頼で結ぶ情報基盤であり、蔵元にとっては、酒造りへの情熱を刻む自らの矜持の証明そのものです。原料米の産地や精米歩合、麴歩合といった情報の適正な開示は、酒造りへの真摯な姿勢の証明であり、その銘に対する揺るぎない信頼へと直結します。また、表示による類似製品との差別化や地理的表示制度の活用は³⁾、製品の付加価値に見合った正当な対価を得る根拠となります。さらに、万が一の事態においても、原材料の追跡可能性が確保されていれば、被害の拡大を最小限に食い止め、迅速な原因究明が可能となり、社会的信用を守る防波堤となります。一方で、消費者にとっては、原材料やアルコール分をはじめとする表示情報が、自身の健康を守る安全の指針となります。これらの情報が正確に明示されることで、飲み手は各自の好みに合った「納得の一献」を安心して選ぶことができ、不当な不利益からも守られます。

本発表では、炭素安定同位体比分析を清酒醸造に適用し、並行複発酵における炭素安定同位体比の特徴と原材料判別の基盤となる知見を得ましたので、その成果についてご紹介いたします。

2. 並行複発酵における炭素同位体分別

まず、米麴の糖化において原料米、米麴、グルコースの炭素安定同位体比の推移を検討しました。製麴前後の炭素安定同位体比を比較したところ、原料米から米麴への炭素安定同位

体比の変化はわずかであり、製麴が炭素安定同位体比に与える影響は限定的であることが確認されました。また、糖化試験においては、米麴の分解が進み、グルコース濃度が上昇しても、グルコースの炭素安定同位体比は分解率に関わらずほぼ一定でした。これらの結果から、製麴と糖化の過程では炭素安定同位体比の変化が小さい、すなわち炭素同位体分別が起こりにくく、糖化によって生成されたグルコースは原料米の炭素安定同位体比を保持していることが明らかとなりました⁴⁾。

次に、清酒醸造の特徴である糖化と発酵が同時に起こる並行複発酵において、原料米、米麴、酒粕、および清酒中のグルコースとエタノールの炭素安定同位体比の関係を調べました。並行複発酵後の残存グルコースの炭素安定同位体比は、原料米よりも約1‰高い値を示しました。単独の糖化過程では炭素同位体分別が小さかったことから、これは発酵による影響と考えられます⁵⁾。一方、生成物であるエタノールの炭素安定同位体比は、原料米よりも約1‰低い値を示しました。通常、ワイン等の単発酵の完全発酵では、炭素安定同位体比は、基質の糖類に対して生成物のエタノールの炭素安定同位体比は2‰程度低くなることが知られています⁶⁾。しかし、清酒の並行複発酵におけるエタノールの炭素同位体分別は、単発酵の半分程度に抑制されていました。これは、糖化によってグルコースが連続的に供給、消費される清酒醸造特有の環境が、エタノールの炭素安定同位体比の変化量を抑制したためと考えられます⁶⁾。これらの結果は、並行複発酵において、残存グルコースの炭素安定同位体比がエタノールの炭素安定同位体比よりも高くなることを意味しています。また、酒粕は原料米の炭素安定同位体比を保持していることが分かりました。この知見は、酒粕の分析を通じて、清酒製造に使用された原料米の炭素安定同位体比を高い精度で推定できる可能性を示しています。

3. おわりに

今回の一連の研究で、清酒醸造の特徴である並行複発酵において、原料米から清酒のグルコースとエタノールへ至るまでの炭素安定同位体比の変化の枠組みを知ることができました。今後の研究の進展により、清酒の原材料判別技術が確立され、品質管理への応用も期待されます。

4. 参考文献

- 1) Berglund & Wieser, *Pure and Applied Chemistry*, 83 (2), 397-410 (2011)
- 2) Skrzypek *et al.*, *Pure and Applied Chemistry*, 94 (11-12), 1249-1255 (2022)
- 3) 国税庁, 酒のしおり, <https://www.nta.go.jp/taxes/sake/shiori-gaikyo/shiori/2025/index.htm> (2025)
- 4) Akamatsu *et al.*, *Heliyon*, 10 (13), e33664 (2024)
- 5) Akamatsu *et al.*, *Food Chemistry*, 424, 136372 (2023)
- 6) Akamatsu *et al.*, *Food Chemistry*, 369, 130854 (2022)