

人手いらずで発酵を見守る：
不透明懸濁系対応ラマンプローブ
による現場実装型センシング技術

三重大学大学院 生物資源学研究科 共生環境学専攻
助教 内藤 啓貴

2025年10月7日

新技術の概要

清酒もろみなどの
複雑で変動しやすい
懸濁液の製造管理

サンプリングと前処理が
必須で、官能評価(経験や勘)
に依存する

“透明なら測れる”
とされてきた光計測

常識を覆す逆転現象の発見

懸濁液の方が
高精度

に測定できるという新事実

なぜ、懸濁液でこそ成分を高精度に測れるのか？
— ラマン光散乱の逆転現象を解明し、新しい光計測学を拓く —



1. 複雑系に対応する新しい計測学を創出
2. 発酵科学や環境科学へ展開し、日本発の文化的・国際的価値を創出
3. 杜氏の経験を科学で再現し、製造現場の精度と効率を革新

従来技術とその問題点

発酵過程におけるエタノール・エキス分（糖など）のモニタリングについて、既に実用化されているものには、振動式密度計と蒸留法との組み合わせや近赤外分光法等があるが、

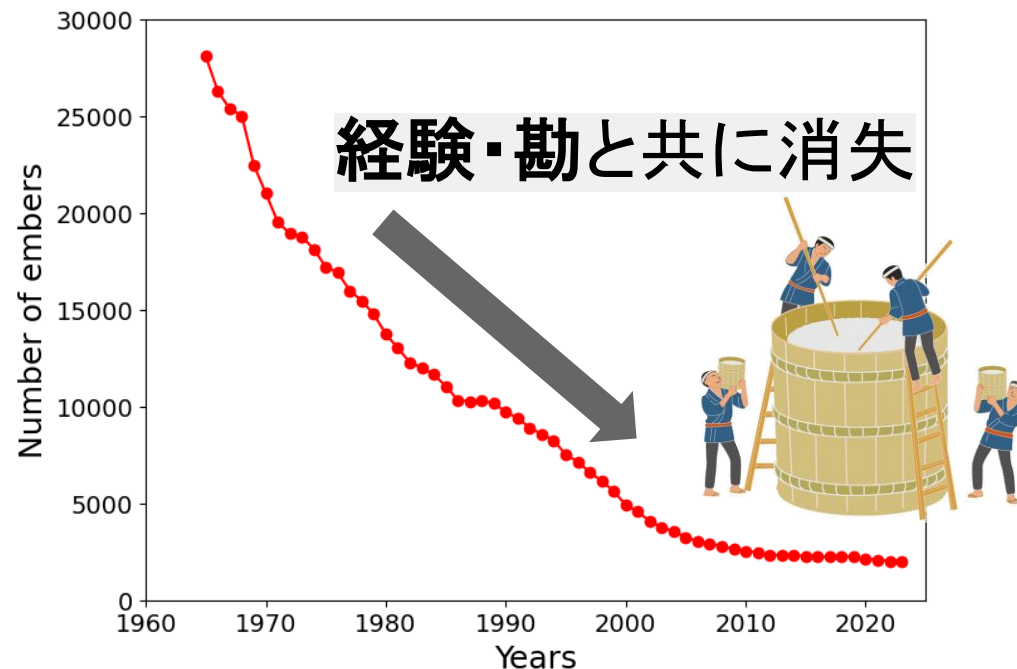
サンプリング・濾過に起因する人的コストが発生
抜き取り作業により発酵状態への影響が増加

等の問題があり、広く利用されるまでには至っていない。
⇒特に課題を抱えている清酒製造過程について紹介する。

清酒業界のかかえる課題

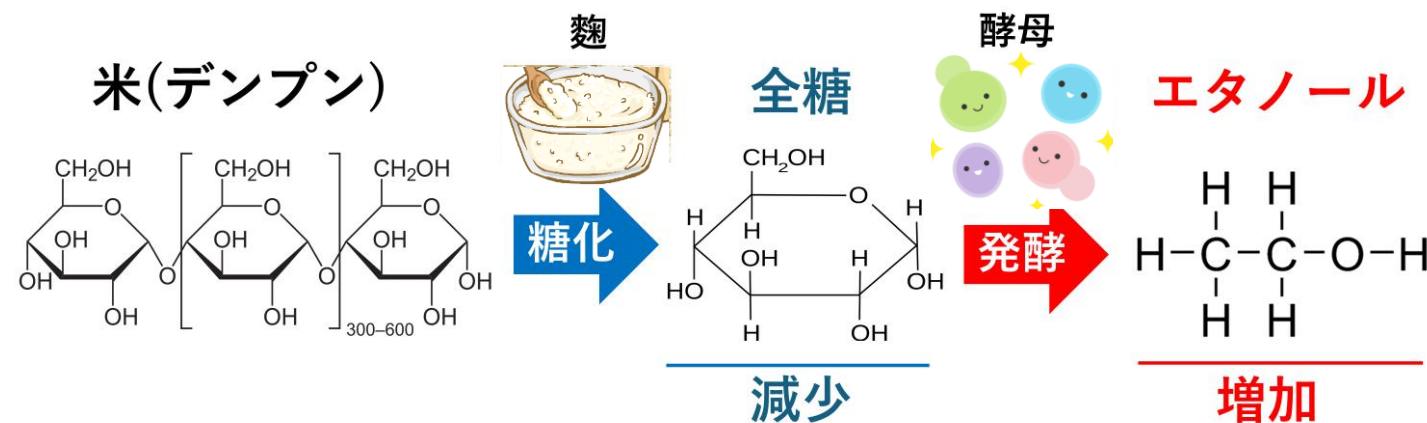
・深刻な造り手不足

・もろみ管理による造り手への負担



杜氏組合人数の推移¹⁾

経験や勘をデータ化により補完



全糖とエタノールの並行的変動

破壊
長時間
技術 を要する計測²⁾

非破壊・迅速・簡便な計測手法の開発・実装が求められている

計測が比較的簡便である分光計測に着目

¹⁾日本酒造杜氏組合連合会, 組合会員数の推移, <https://nittoren.com/about/>, 2023 (2024/4/20閲覧)

²⁾近藤恭一, 清酒醪のアルコール分と日本酒度のオンライン計測, 日本醸造協会誌, 83 (6), 364-369, 1988

従来技術とその問題点

もろみを一部
サンプリング
(300g程度)



ろ過

or



遠心分離

有人作業。

タイムラグが生じる為
タンク内の値とずれる要因に。

上清

ボーム、アルコール、
酸度、アミノ酸度等进行分析
(清澄後の分析機器は充実)

残さ 廃棄。分析ごとにロスが出る。



Ex) 近赤外分光法によるエタノール分析
(※写真は清酒計測用装置とは異なる)

ボームとアルコールを測定
(500-600万円)

それぞれの分析を個別に実施。

分析結果次第で
權入れ・加水

もろみタンク



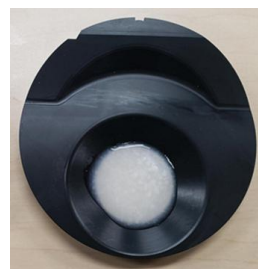
毎朝9時から午前中一杯かけて
サンプリング～分析～もろみ管理
この作業が無人工化できれば・・・

従来技術とその問題点

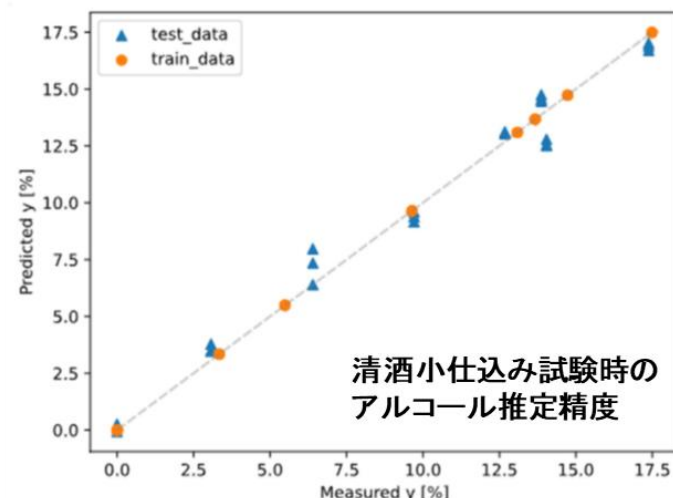
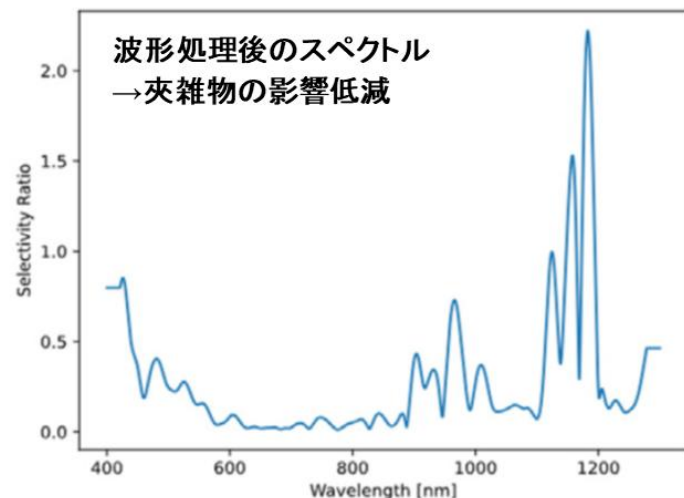
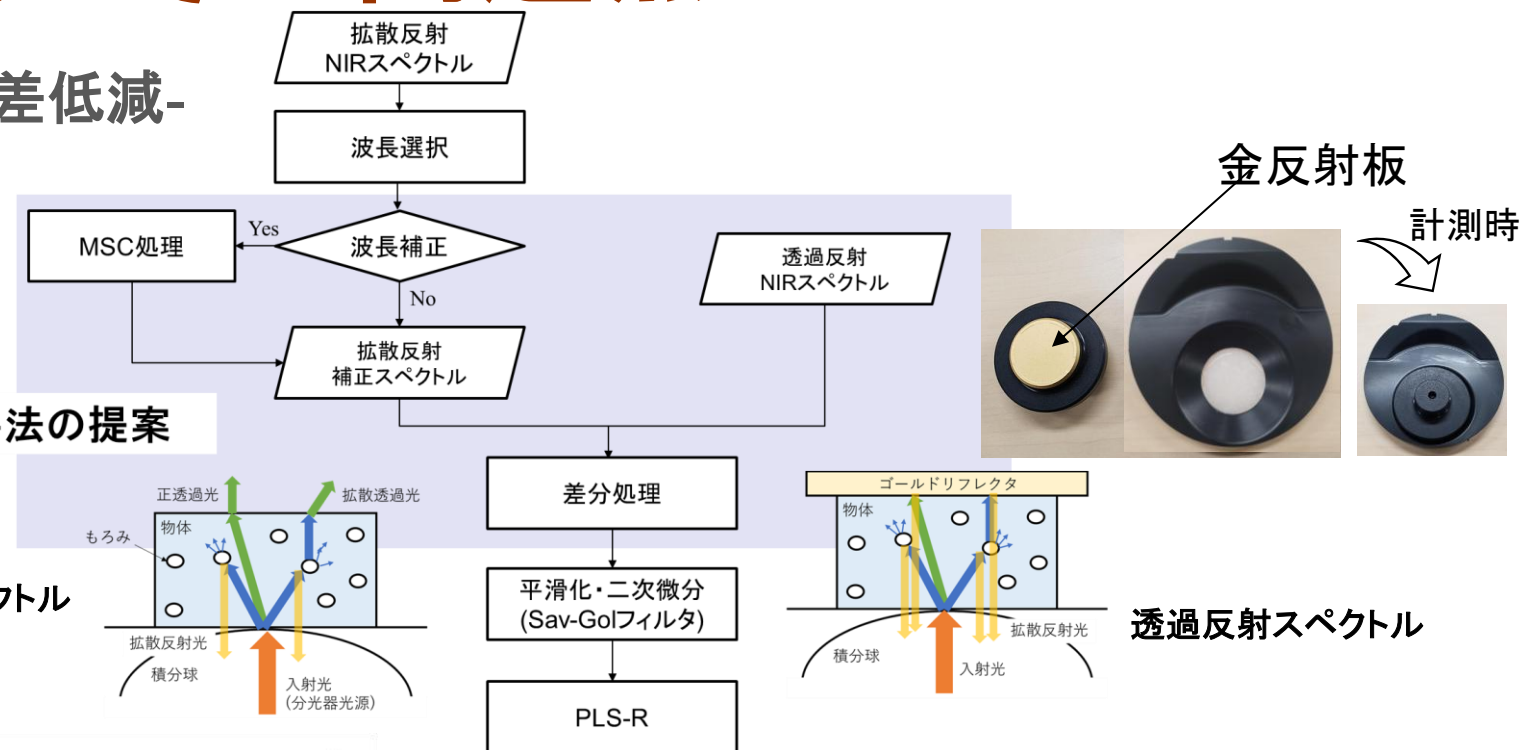
-近赤外領域の差分反射法によるもろみによる誤差低減-



FOSS, NIRS DS2500



新測定手法の提案



差分スペクトルの取得、反射スペクトルにのみ乗法散乱補正(MSC)の波形処理を行った結果、もろみ夾雑物の影響を低減し、正確性の高いアルコール濃度推定モデルを確立

しかし、サンプリング不要・連続モニタリング可能とはいえない

実用化に向けた課題

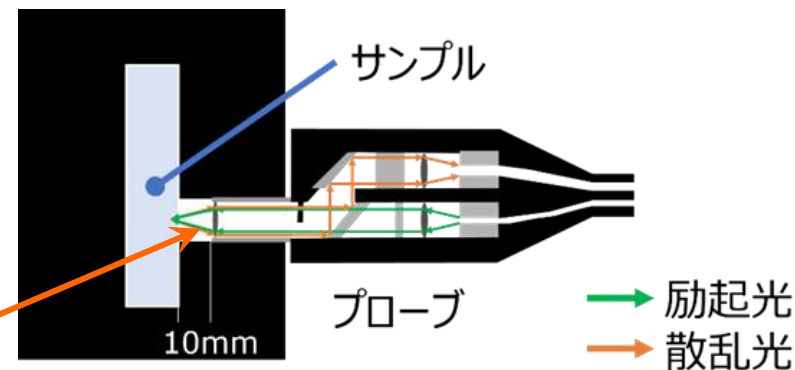
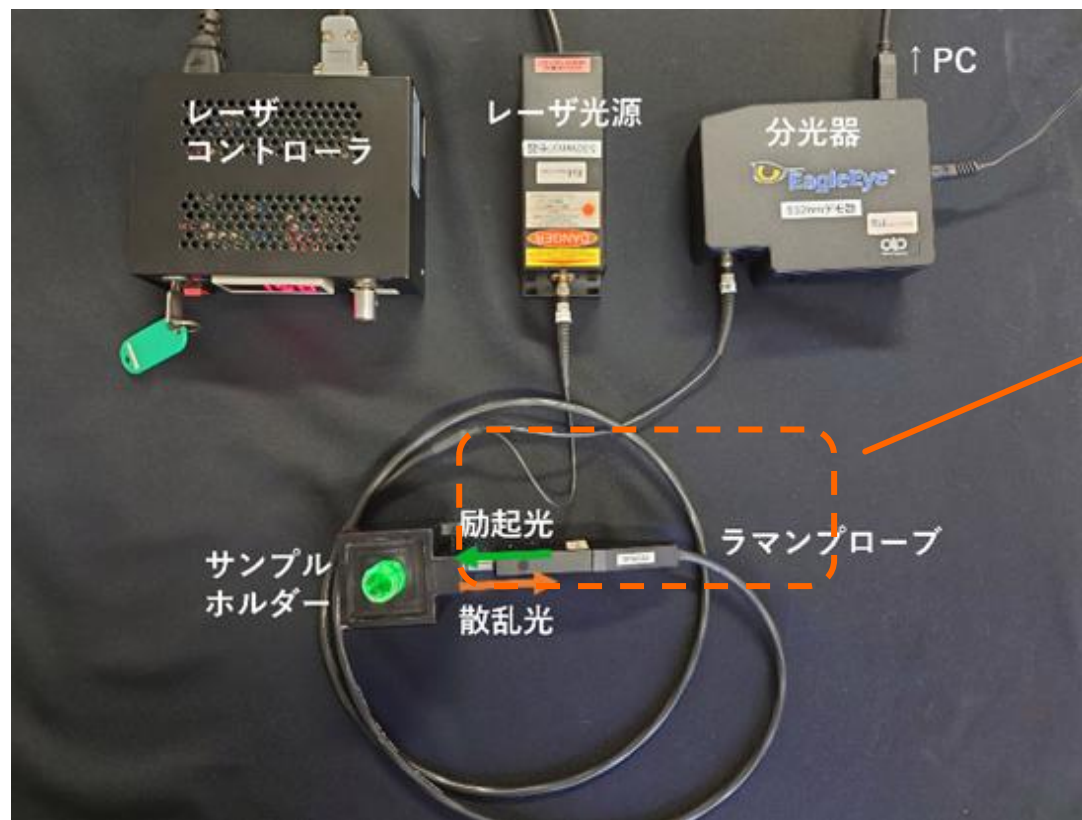
- 近赤外分光についてもろみの散乱による精度低下を抑えるところまで開発済み。しかし、「**サンプリング不要・連続モニタリング可能**」という目標には未達。
- 今後、**新たなアプローチの光学技術＝ラマン分光法**について実験データを取得し、実製造スケールの不透明懸濁系の計測に適用していく場合の条件設定を行っていく。
- 実用化に向けて、エタノール・糖の定量誤差を従来の濾過サンプルを計測する手法に肉薄する技術を確立する必要もあり。

新技術の特徴

- 従来技術の念願であった「**サンプリング不要・連続モニタリング可能**」を達成する「ラマン界面プローブ法」を開発した。
- 従来のラマン分光法は固体試薬や透明液体への使用に限られていたが、不透明懸濁系の界面のみをプローブすることで現場実装に見合う定量精度にまで向上できた。

新技術の特徴

問：不透明懸濁系のためのラマン計測はどうあるべきか？



ラマン分光のメリット

- ・水分や二酸化炭素の影響が弱い
- ・装置が比較的安価で小型

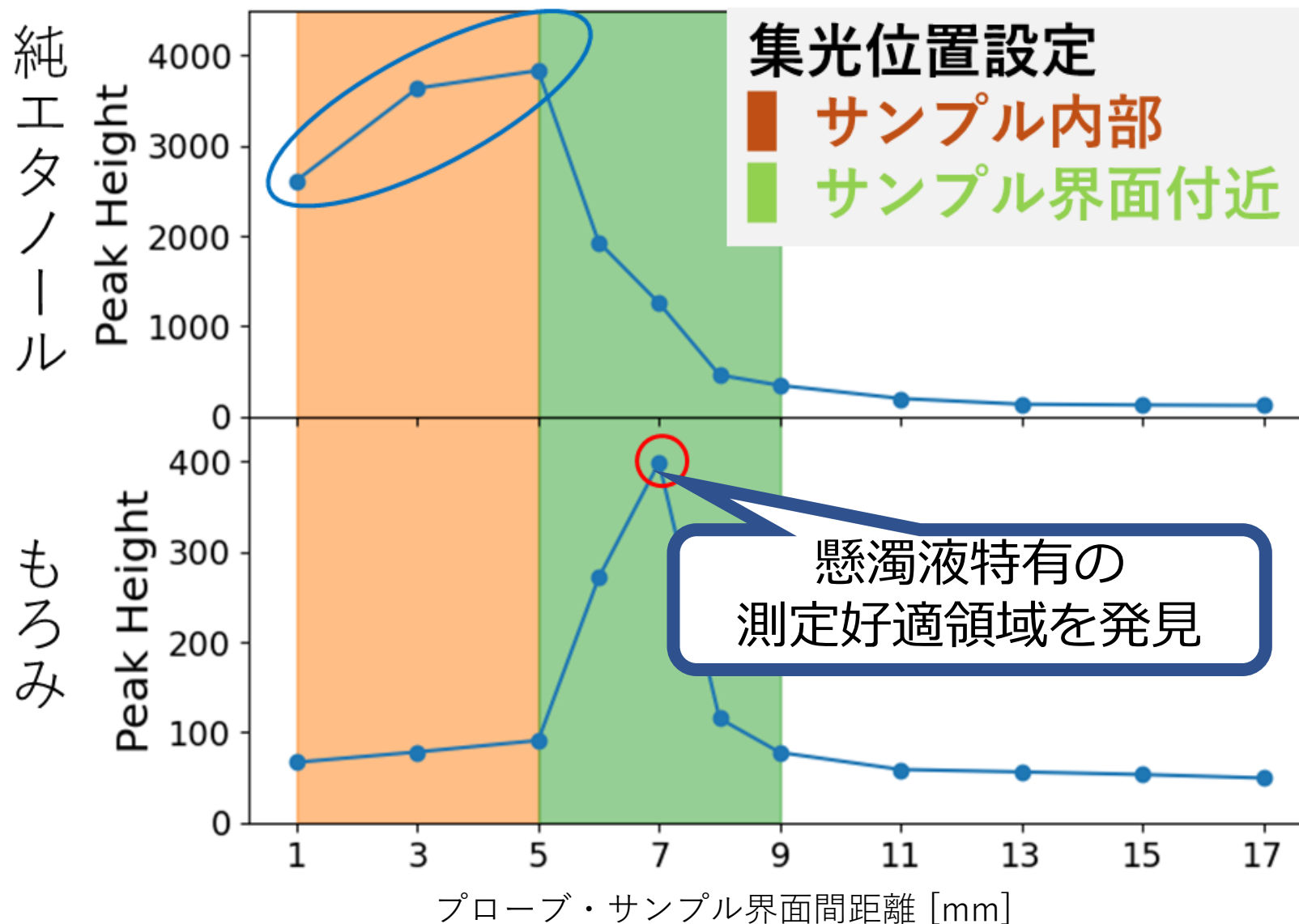
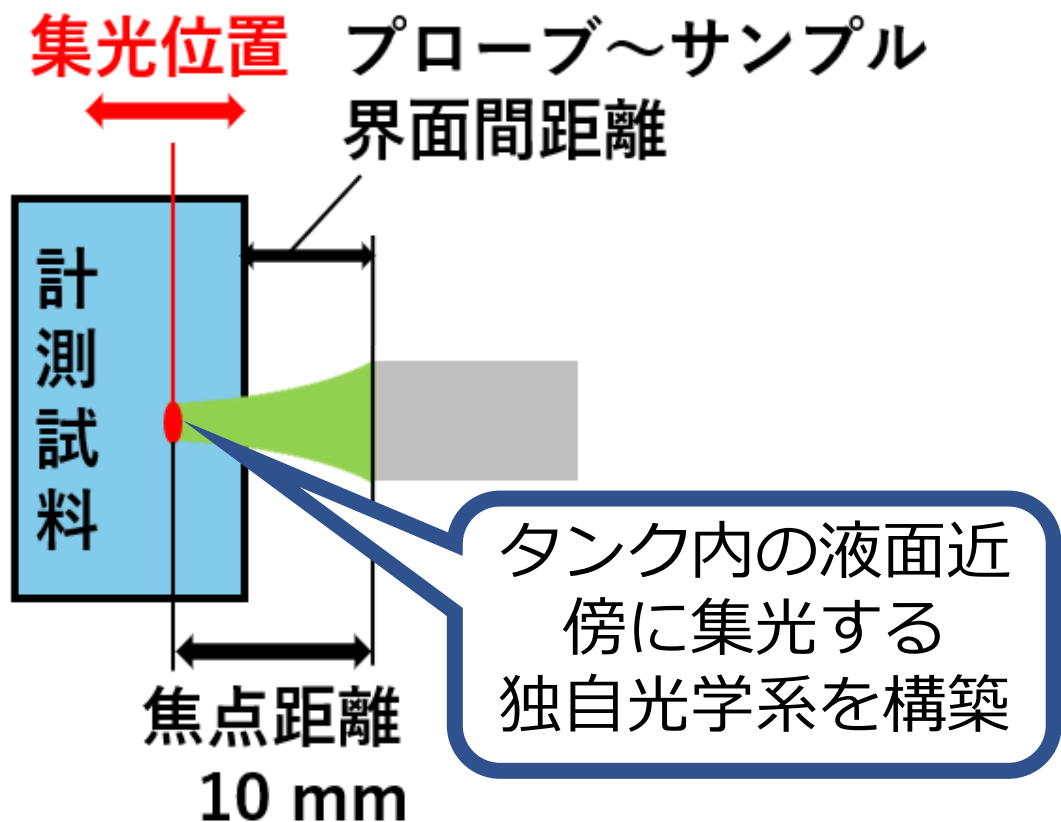
デメリット

- ・感度が弱く、高出力レーザーが必要
- ・局所的に熱を持ち、蛍光に影響

➡ ラマン界面プローブ法を考案

新技術の特徴

高濃度懸濁液のための界面プローブ集光系



新技術の特徴

清酒小仕込み試験によるもろみ中のエタノール予測実証試験



α 化米で麴歩合20%、吸水歩合135%の3段仕込
(酵母2種で2系統実施)

計測期間:0日目~16日目(2日毎, 2日目除く)
MK3タンク(訓練用):10回×8日=80点
BMK3タンク(テスト用):10回×8日=80点

-オンサイト清酒もろみ成分無人モニタリングシステム-

・ボーマ
・アルコール
・酸度
・アミノ酸度
・グルコース

発酵中もろみ

発酵状態推定・意思決定

ラマン計測

ラマンスペクトル

データ分析

もろみ中物質の定量

①タンク内をモニタリング可能
▶ 有人作業がなく、分析による廃棄も出ない。
連続値が取得でき、高品質なモノづくりへ

②複数成分の定量
▶ ラマンスペクトルによる
複数成分の定量

③タンクごとの増産
▶ 光を分光し

④清酒醸造のAI
▶ 発酵状態に
添加判断か

▶ 有人作業がなく、分析による廃棄も出ない。
連続値が取得でき、高品質なモノづくりへ

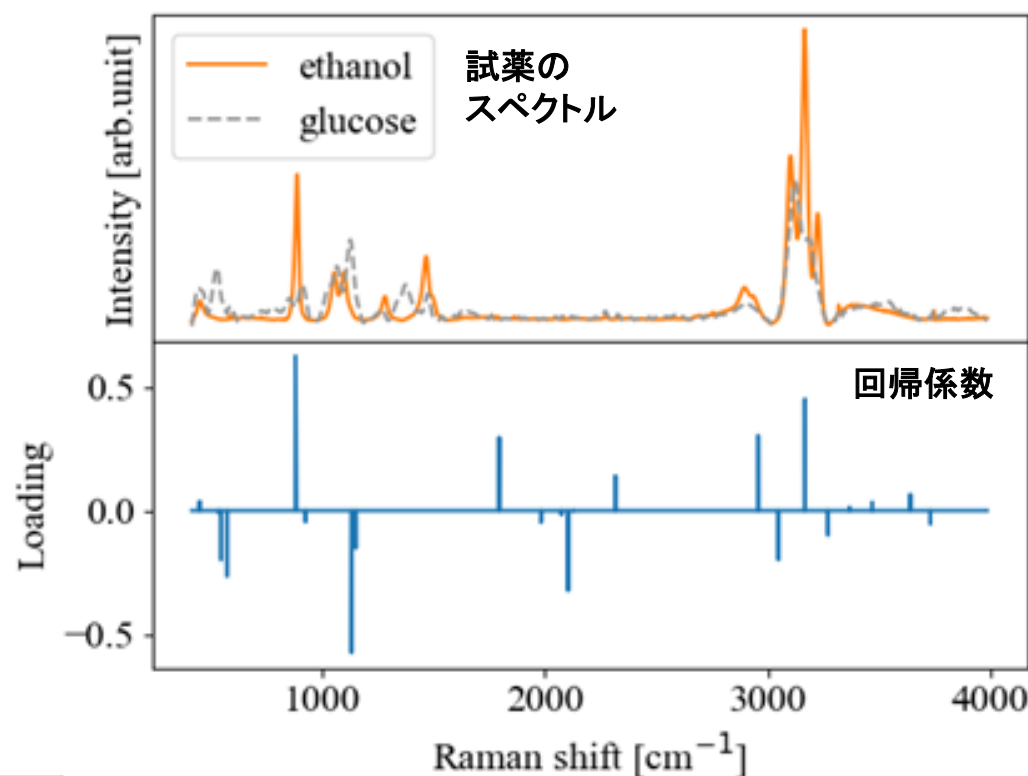
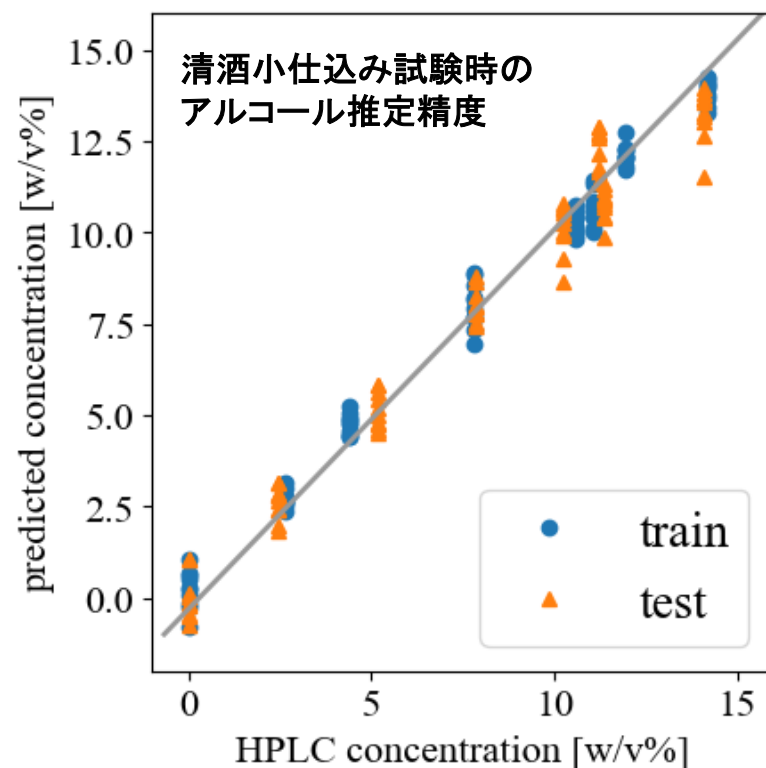
▶ ラマンスペクトルで相関があるピークがあれば
複数成分のモニタリングが可能

▶ 光を分光し、プローブの増設のみで対応可能

▶ 発酵状態に応じて、設定温度の変更や追水の
添加判断が可能となり、自動化への可能性

新技術の特徴

ベースライン補正、平滑化、スペクトルの利用範囲の制限により
スペクトルの前処理を行い、LASSO回帰を組み合わせることで、
もろみ夾雑物の影響を低減し、正確性の高いアルコール濃度推定モデルを確立



波長域	標準化	回帰	R2C	R2P	RMSEC	RMSEP
400-4000	○	LASSO	0.989	0.973	0.481	0.746
400-4000	-	LASSO	0.976	0.952	0.723	1.003

→発酵過程において、糖由来ピークは負に相関し、
エタノール由来ピークは正に相関

清酒小仕込みもろみサンプルにおいて、
 $R^2=0.97$ 、 $RMSEP=0.75$ (% , w/v)の精度でエタノール濃度推定が可能

従来技術との比較

- サンプルング濾過が不要なため品質管理者の省人化が期待
 - 連続モニタリングにより詳細な発酵過程の現象解明
 - 複数成分の一括計測により分析の迅速化も可能
- ⇒本技術の適用により、導入コストは従来手法の最大1/10に

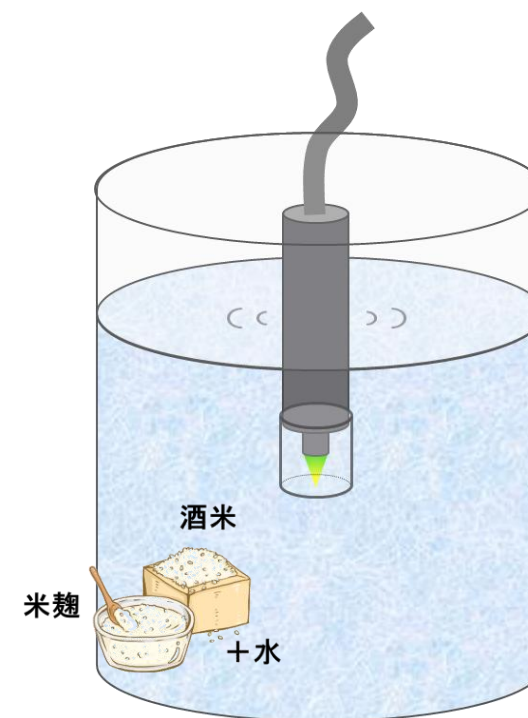
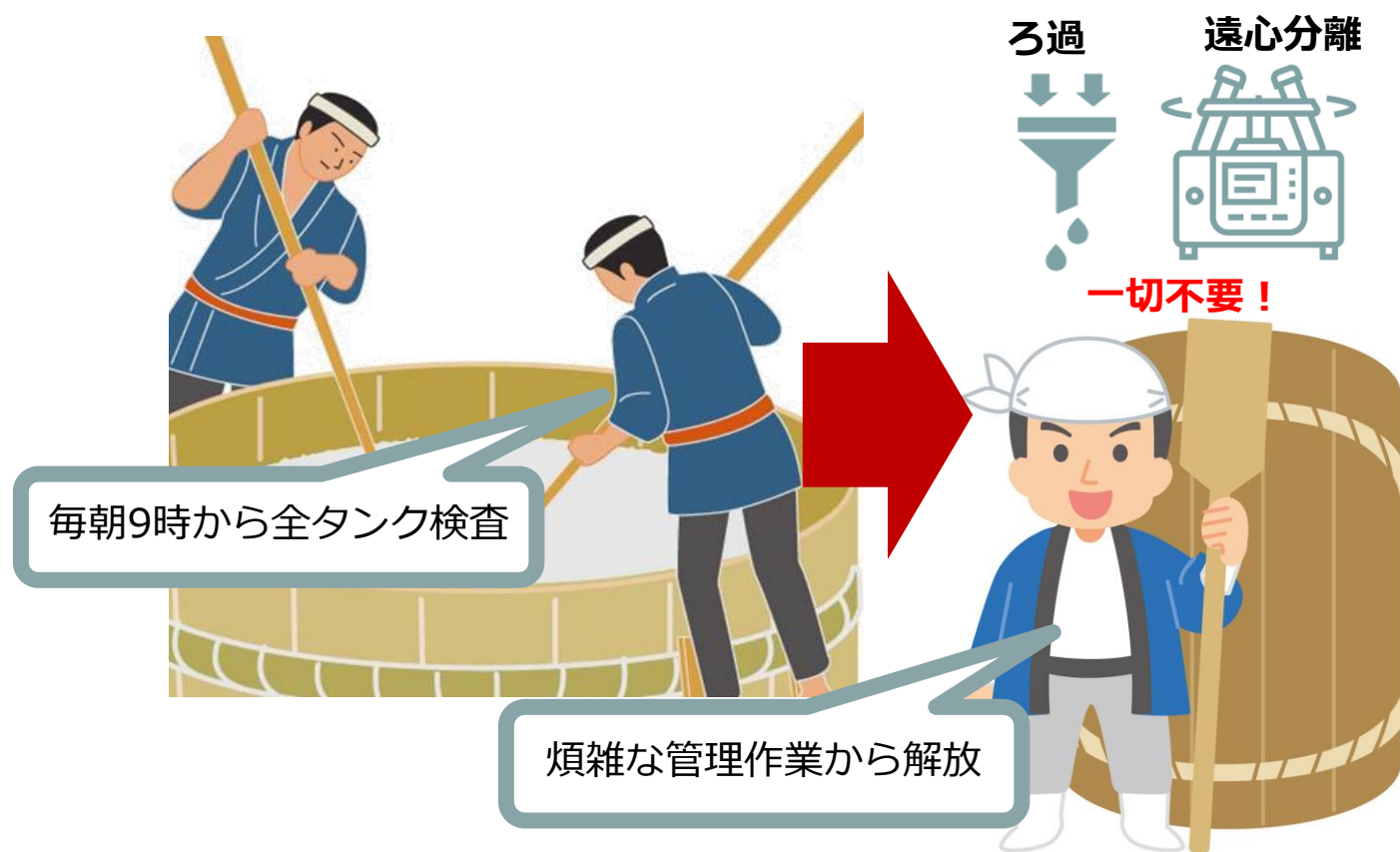
評価項目	本技術 (プローブ法)	従来技術 (SDK=密度計+蒸留)	競合技術 (密度計+近赤外分光)
無濾過ダイレクト測定	○	×	×
連続モニタリング	○	×	×
エタノール・糖同時測定	○	×	×
導入コスト	50-400万円/台 (簡易-高精度)	700万円/台	100-500万円/台 (簡易-高精度)

想定される用途

- 本技術の特徴を生かすためには、清酒もろみ製造に適用することで無人でエタノール・糖濃度の連続モニタリングのメリットが大きいと考えられる。
- 上記以外に、経時モニタリングの過程で新製品開発のヒントやエビデンスが得られることも期待される。
- また、達成された技術は不透明懸濁系への適用可能性に着目すると、幅広い食品、化学、医療、エネルギーといった分野や用途に展開することも可能と思われる。

想定される用途

ラマン界面プローブが杜氏・日本の清酒文化を持続する！



ラマン界面プローブ法で
発酵もろみを遠隔見守り！

- 応用分野；食品分析への応用、環境科学分野では汚水中の物質濃度測定や海洋研究への応用、エネルギー分野ではバイオマスエネルギー生産の管理

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組みについて記載
基礎研究	・ラマンプローブ光学系の設計が完了（予備検証の成功）	醸造学会・展示会「発酵ワールド」で紹介
現在	・ラマン界面プローブ法が実現（タンク内の直接計測が実現）	特許申請・イノベーションジャパン（大学見本市）
2年後	・液浸プローブ・光学系・レーザー安定度の進展 ・産業実装に最適化されたラマン界面プローブ法が実現 （例：誤差0.2wt%で無濾過エタノール濃度の定量が実現）	例：実装モデルの具現化・デモの完了 ：JSTのA-step事業へ応募し研究資金獲得
3年後	・実スケールにおける評価（例：性能、安定性試験の実施） ・市場品のモニタリングを実現（例：実証試験・お客様調査）	例：評価基礎データの提供 もろみトレサビリティ清酒のブランド化
4年後	・システムの市販開始（例：装置一体化・耐用年数長期化の実施）	例：システムのテスト販売開始

社会実装への道筋

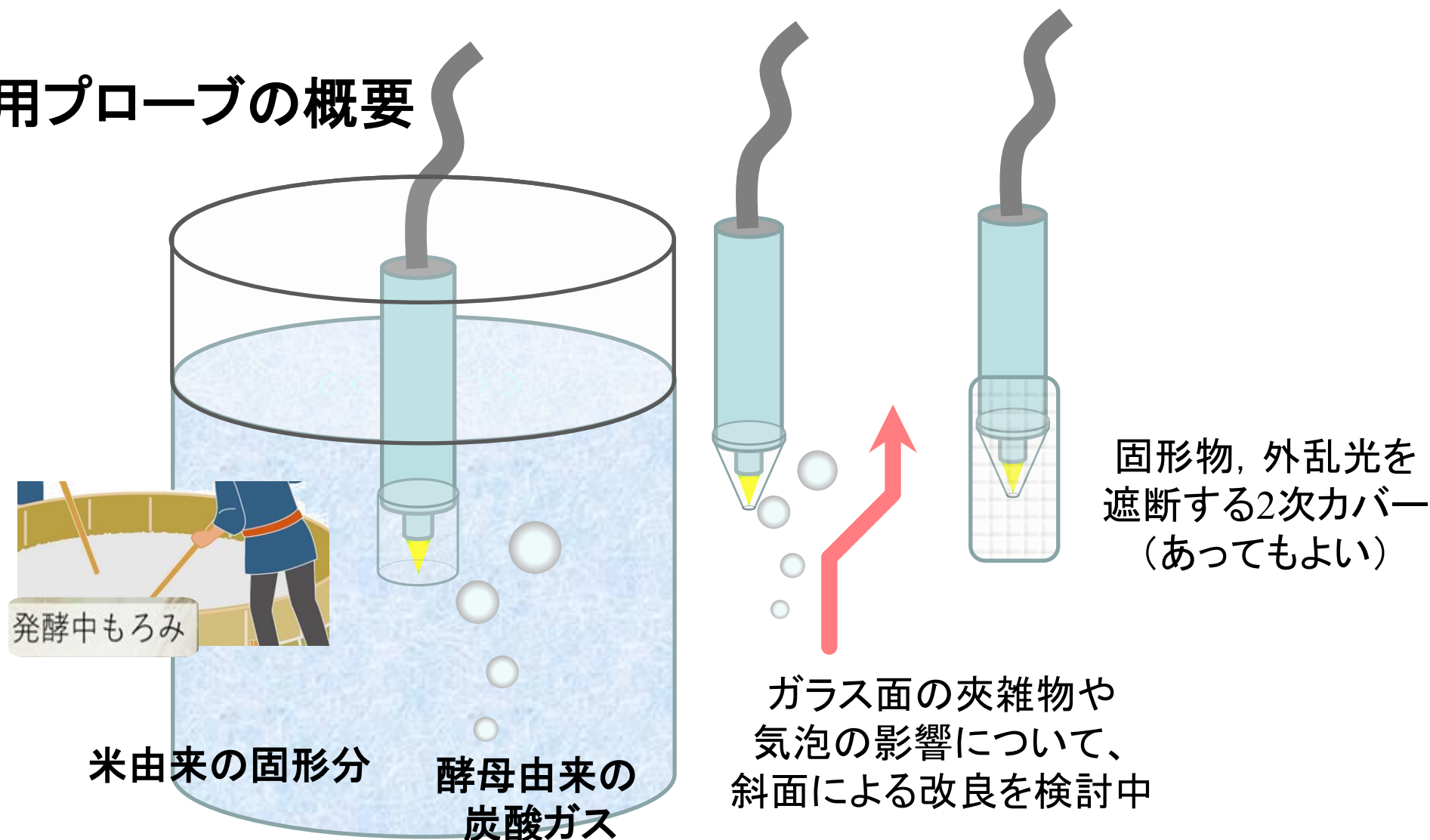
タンク内モニタリング用プローブの概要

Point①

液面に集光するように

Point②

石英もしくはガラス面で
液面との境界を設ける



光路長を確保し、液面に集光するという方法
その方法を実現するプローブの設計(装置)

実装モデルを具現化可能な
パートナー企業を探索中

企業への期待

- 未解決の「実産業で使用可能な液浸プローブの具現化」「装置の一体化」「UIの向上」については、光学機器メーカー、計測機器メーカーの技術により克服できると考えている。
- 光学設計、計測機器のUI設計の技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、発酵に限らず不透明懸濁系のダイレクトモニタリング技術を開発中の企業、当該分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術は不透明懸濁液の経時的な自動モニタリングが可能なため、省人化・高品質化の双方で企業に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験を行うことで計測対象物の処理加工効果に対して科学的な裏付けを行うことが可能。
- 本格導入にあたっての技術指導等も可能

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 測定方法、測定装置及び制御システム
- 出願番号 : 特願2025-020182
- 出願人 : 三重大学、三重県
- 発明者 : 内藤啓貴、野崎秀真、丸山裕慎

本技術に関する知的財産権

-従来-

- ・もろみは固液混合物である

- ▶ 固液分離操作が必須。この工程は有人で行われている。

- ・濾過による固液分離では、分析までのタイムラグが問題

- ▶ 濾過中にも酵素反応は進行するため、分析値が発酵タンクの値を示しているか不明。

- ・濾液を複数の分析に供して、発酵制御に必要な分析値を入手

- ▶ ボーメ(比重)、アルコール、酸度、アミノ酸度等を経時分析するが、これら分析値は濾液を個別の測定に供して取得している。



-新手法-

- ・発酵タンク中のもろみから直接分析

- ▶ 固液分離操作が不要。さらに、分析までのタイムラグがない。

- ・ラマンスペクトルから複数成分を同時定量

- ▶ 従来法では別分析であった分析値を、ラマン分光法でモニタリング可能に。

- ・リアルタイム分析から、自動発酵制御システムを構築

- ▶ 発酵管理指標となる分析値がモニタリング可能となったことから、発酵状態に応じて温度管理や追水の添加など、発酵管理の自動化が可能に。

産学連携の経歴

＜嗜好品企業の研究者として＞

- 2017年-2020年 大学・研究機関と3件の共同研究実施（筆頭発明者として5件の特許出願）

＜大学研究者として＞

- 2022年- 国内インフラ企業からの受託事業
- 2024年 国内最大手清酒メーカーとの共同研究

お問い合わせ先

株式会社三重ティーエルオー

T E L 059-231-9822

e-mail mie-tlo@mie-tlo.co.jp