

DLC電極による日本酒発酵の DX応用技術

東京電機大学 理工学部 理工学科
電子情報・生体医工学系
教授 大越 康晴

2025年11月4日

従来技術とその問題点

主な発酵モニタリング技術

- pHセンサ・溶存酸素センサ
→ 発酵進行をpH・酸素濃度変化で評価
- 電気化学的測定 (CV法)
→ ITO・白金電極で酸化還元反応を解析
- 音響センサ法
→ 発酵音を解析し進行・異常を検出
- CO₂測定法
→ 発生量からアルコール濃度を推定
- 官能評価・ガスクロ分析
→ 成分変化を精密解析

共通する課題

- 電極の劣化・汚染による測定精度の低下
- 長期間の連続モニタリングが困難
- 高価な装置・熟練技術者が必要
- リアルタイム評価が難しい

従来技術とその問題点

【社会的背景】

- ・ **日本酒・味噌・醤油・酢など**を製造する中小規模の発酵食品メーカー
- ・ 食品関連の研究機関や品質管理部門を持つ飲食・流通企業
- ・ 将来的には**海外の発酵文化圏にも展開**

<問題点課題>

【社会的課題】

- ・ 発酵プロセスを職人の経験や勘に依存
- ・ 品質の再現性・安定性が乏しい
- ・ **技能継承が困難で、次世代の担い手が不足**
- ・ 工程の異常や発酵失敗による食品ロス・コスト増大
- ・ **デジタル対応やエビデンス要求への対応が不十分**

- ・ 発酵状態の「見えにくさ」
- ・ 品質のばらつき
- ・ マニュアル化の困難
- ・ 技術継承の課題



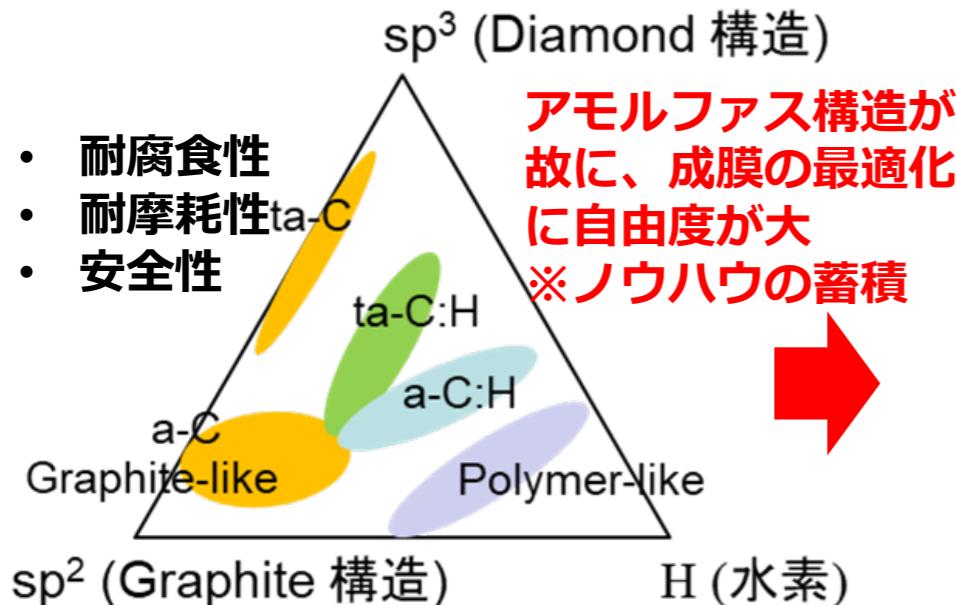
<発酵モニタリングシステム>
「見える化」⇒後継者への技術継承

新技術の特徴・従来技術との比較

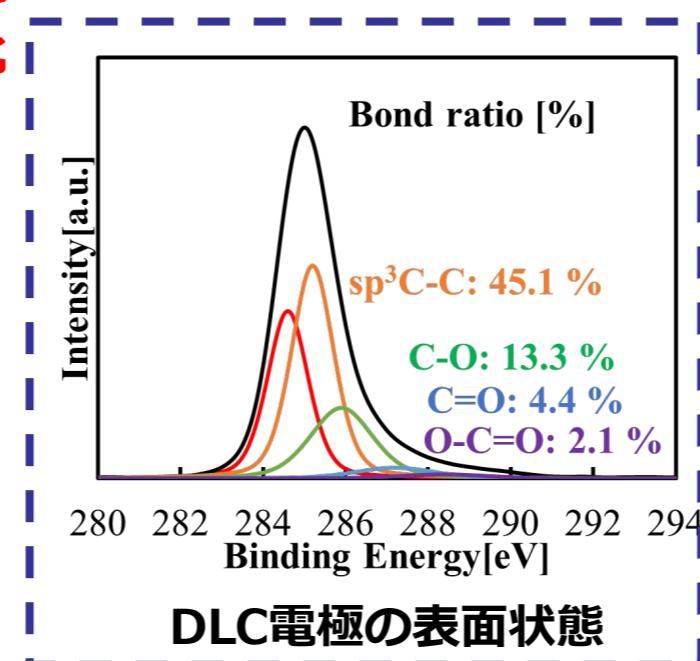
pHセンサ・溶存酸素センサ、電気化学的測定(CV法)、音響センサ法、CO₂測定法、官能評価・ガスクロ分析

低成本・柔軟な成膜加工により、小型機器や現場密着型設計が可能

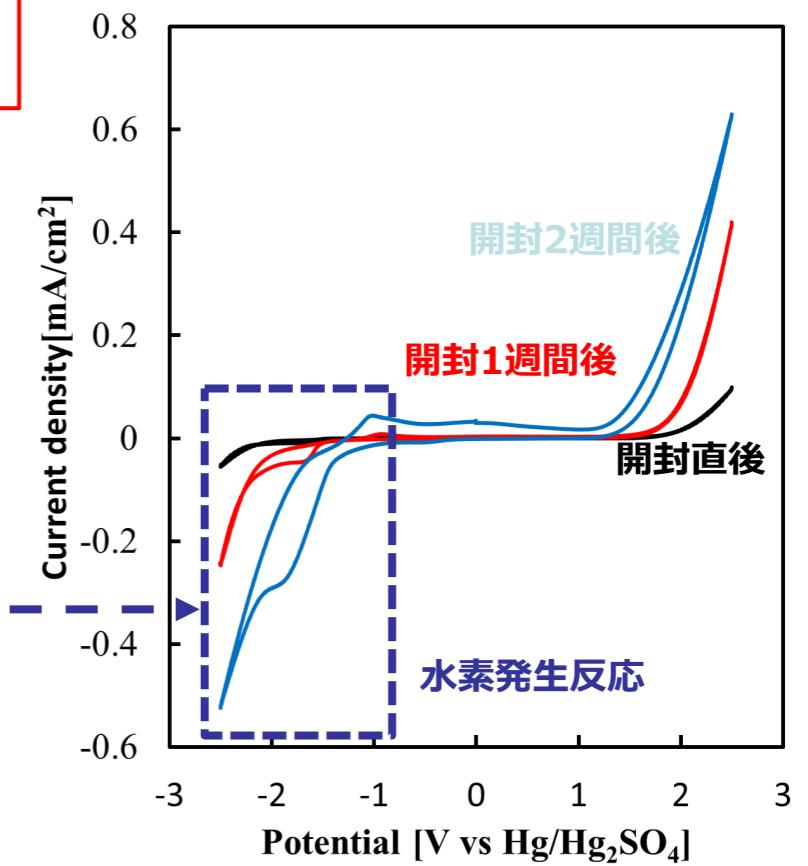
DLC電極は、発酵の本質的变化を直接検出可能である。



DLC (Diamond-like Carbon) の分類
J. Robertson, Mater. Sci. Eng. R 37,
129 - 281, 2002.



DLC電極の表面状態

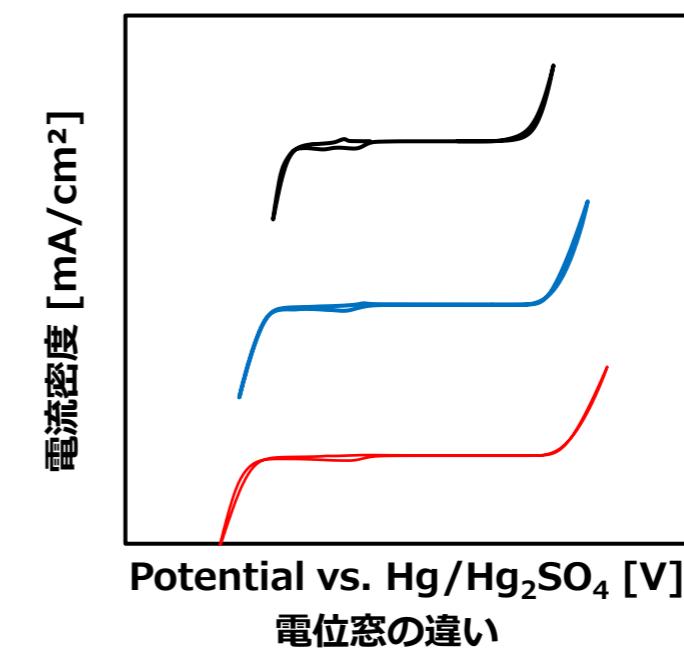
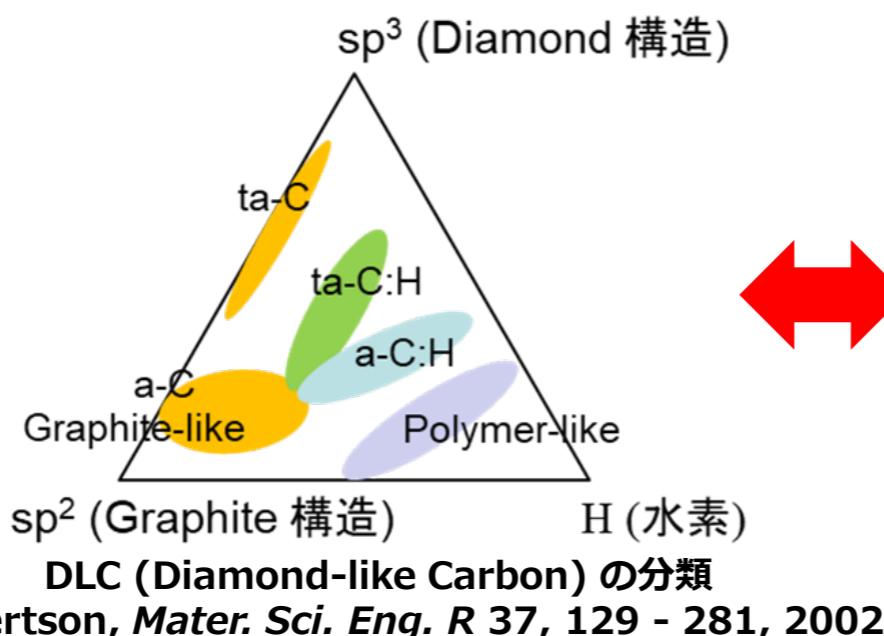


生酒（火入れなし）の発酵の経時変化

新技術の特徴・従来技術との比較

【解決アプローチ】

- DLC電極を用いたリアルタイム・非破壊の電気化学センシングで、発酵状態を定量的に「見える化」（伝統的な発酵産業 × センシング技術）
- クラウド連携によりAI解析・進行度予測・異常検知を実現
- 経験に頼らず、定量指標に基づいた判断・管理が可能
- 技術継承や品質保証、海外展開を支援するデータ駆動型の発酵支援基盤を提供



新技術の特徴・従来技術との比較

【創出される価値】

- ・ 職人依存から脱却し、誰でも再現可能な品質管理体制を構築
- ・ 製造現場の省人化・属人性解消
- ・ 若手人材へのスムーズな技能移転
- ・ 国際市場における製品品質の信頼性向上と輸出支援
- ・ 地域発酵産業のデジタル化（DX）による高付加価値化



数値化・可視化・AI解析

「味や香り」の見える化

発酵管理の自動化とデジタル化による技術継承モデルの構築

新技術の特徴・従来技術との比較

新技術の概要

- DLC (Diamond-Like Carbon) 電極を用いた電気化学的発酵モニタリング
- CV (サイクリックボルタンメトリー) 指紋と機械学習により、発酵状態や品質を多段的に評価
- 非破壊・少量サンプルで短時間測定が可能
- DLC電極は高硬度・化学的安定性に優れ、繰り返し測定が可能

項目	DLC電極を用いた新技術	従来技術 (pH・DO・ITO・Pt電極など)
測定原理	CV応答の多次元解析 (機械学習)	pH・DO変化、単一信号検出
測定方式	非破壊・少量試料・リアルタイム	接触型・汚染や劣化の影響大
電極耐久性	高 (炭素結合安定、繰返し測定可能)	低 (表面劣化・汚染・交換頻度高)
評価対象	アミノ酸・有機酸・発酵指標など多成分	限定的 (pHや酸素のみ)
運用性	自動化・データ解析が容易	定期校正や熟練操作が必要
応用範囲	日本酒・味噌・醤油など多様な発酵食品	主に酒類・单一発酵対象

想定される用途

【世界の発酵モニタリング市場（2023⇒2032年）】約25⇒48億米ドル※1

【医薬・バイオ発酵（細胞培養等）市場（2024⇒2030年）】約36⇒61億米ドル※2

【発酵食品の市場規模（2024⇒2032年）】約377⇒858億米ドル※2

【地域別の市場動向】※1

＜北米およびヨーロッパ＞

- 先進的な技術の採用と研究開発への多額の投資により、これらの地域が市場をリードしている。
- 食品・飲料および製薬業界において、品質管理への高い要求が市場成長を支えている。

＜アジア太平洋地域＞

- 人口増および急速な工業化と食品・飲料業界の拡大により、発酵モニタリング技術の需要が増加している。

※1 DataIntelo社「Fermentation Monitors Market Report」より

※2 (株)グローバルインフォメーション 市場調査レポートより

想定される用途

- **食品・飲料業界の需要増加：**

健康志向の高まりにより、コンブチャ、ヨーグルト、ザワークラウトなどの発酵食品の需要が増加し、品質と一貫性を確保するための精密な発酵モニタリングの必要性が高まっている。

- **クラフトビールの台頭：**

クラフトビール市場の拡大に伴い、風味や品質を維持するための高度な発酵モニタリング技術の導入が進んでいる。

- **製薬業界での応用**

抗生素質やワクチンなどのバイオ医薬品の製造において、発酵プロセスの品質管理と規制遵守のために、リアルタイムでの発酵条件の監視と調整が求められている。

- **バイオ燃料分野の成長**

持続可能なエネルギーへの移行に伴い、**発酵プロセスから得られるバイオマスの生産**が注目されており、収率と効率を最大化するための発酵モニタリング技術の採用が進んでいる。

想定される用途

■ 食品・発酵分野での応用

- 日本酒・焼酎・ワインなどの醸造工程管理
→ 発酵状態・熟成度をリアルタイムで定量評価
- 味噌・醤油・酢などの発酵食品モニタリング
→ pH・有機酸・アミノ酸変化を多次元的に解析
- 発酵異常や雑菌汚染の早期検出
→ 製造ラインの品質管理・トレーサビリティ強化

■ バイオ・医療分野への展開

- 細胞培養モニタリング
→ 培養液中の代謝変化（乳酸・グルコース等）を検出
- 創薬・バイオリアクタ評価
→ 酵素反応や培養プロセスを非破壊・リアルタイムで評価

想定される用途

■ 産業・環境モニタリング

- 排水・環境水の酸化還元状態の監視

→生物化学的・化学的酸素要求量の指標の迅速測定

- 工場プロセス制御・スマートファクトリー連携

→ IoT・AIと組み合わせた自動発酵制御システムへ展開

DLC電極による電気化学センシングは、

食品・バイオ・環境分野を横断する共通基盤技術

として、多様なリアルタイムモニタリングに応用可能である。

想定される用途

- 本技術の特徴を生かすためには、**日本酒や味噌・醤油などの発酵食品製造**に適用することで、**発酵状態のリアルタイム評価・品質管理の効率化**といったメリットが大きいと考えられる。
- 上記以外に、**異常発酵や汚染の早期検出、工程の自動化・省人化**といった効果が得られることも期待される。
- また、達成された**高安定・高感度な電気化学センシング技術**に着目すると、**細胞培養モニタリング、医療・バイオリアクタ管理、環境センシング**などの分野や用途への展開も可能と思われる。

本技術は、**発酵品質評価からバイオ・環境計測までを一体的にカバーできる次世代プラットフォーム技術**として期待される。

実用化に向けた課題

■ 技術的課題

- 長期安定性の検証

- 発酵環境下での電極表面の劣化・汚染対策
- 繰返し測定時の信号ドリフト補正の最適化

- 電極・回路の標準化

- 電極構造・材料条件の再現性確保
- センサモジュール化・小型化

- データ解析アルゴリズムの高度化

- CV指紋の自動識別精度向上
- 機械学習モデルの汎化性能の確保

■ 実装・運用上の課題

- 発酵現場への適用性

- 高温・高濃度環境でのセンサ耐久性評価
- 現場作業者でも扱いやすい操作性の確保

- メンテナンス性

- 電極洗浄・交換の容易化
- キャリブレーション不要化

- コスト面

- DLC電極製造コストの削減
- 汎用電子回路との統合による低価格化

実用化に向けた課題

■ 社会実装・制度的課題

- **品質評価基準との整合**
 - ・官能評価や既存規格との対応
- **データ信頼性・標準化**
 - ・クラウド連携時のデータ安全性
 - ・AI判定の説明性・透明性の確保

実用化の鍵は、

「**耐久性・再現性・標準化・操作性**」の4点を確立すること。
DLC電極の特性を活かしつつ、**現場適用型センサシステム**への最適化が今後の課題である。

実用化に向けた課題

- 現在、**DLC電極を用いた日本酒発酵モニタリング**について、**CV（サイクリックボルタンメトリー）測定**により**発酵状態を評価**できるところまで開発が進んでいる。しかし、**各種発酵状態について繰り返し測定（再利用）における電極表面の安定性**の点が未解決である。
- 今後、発酵環境下での実験データを取得し、**異なる発酵プロセス（例：日本酒・味噌・醤油）において、再現性の評価も含め**の測定条件・データ解析パラメータの最適化を行っていく。
- 発酵段階の識別精度を95%以上まで向上できるよう、**CVデータの前処理アルゴリズムの最適化、機械学習モデルの高精度化（ノイズ耐性強化）、電極表面構造の制御による信号安定性向上**、といった技術を確立する必要がある。。

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	<ul style="list-style-type: none"> DLC電極の設計と成膜条件の最適化 CV応答と発酵成分（有機酸・アミノ酸）の相関原理の解明 	<ul style="list-style-type: none"> 酒蔵や公的研究機関での基礎実験 論文・特許出願による技術基盤確立
現在	<ul style="list-style-type: none"> 日本酒発酵液を対象としたCV指紋取得が実現 機械学習による発酵段階の識別モデルを構築 	<ul style="list-style-type: none"> 企業・酒蔵との共同研究開始 JSTシーズ探索事業等への申請準備
1~2年後	<ul style="list-style-type: none"> 繰り返し測定の安定性評価 発酵進行に関する識別精度95%以上の達成 耐腐食性・洗浄再利用性の向上 	<ul style="list-style-type: none"> デモンストレーション実施（実醸造現場） JST/A-STEP, IJIE等の事業に応募し研究資金獲得 酒蔵での評価試験・基礎データ提供
3~4年後	<ul style="list-style-type: none"> センサモジュールの小型化・防汚構造化 信号再現性・耐久性の実証（複数ロット電極で評価） 	<ul style="list-style-type: none"> プロトタイプのサンプル提供開始 発酵食品全般（味噌・醤油等）への展開
5年後	<ul style="list-style-type: none"> 解析アルゴリズムの自動化・クラウド連携実現 	<ul style="list-style-type: none"> 商用モニタリングサービスの提供

企業への期待

- 未解決の繰り返し測定における安定性および、電極汚染防止については、**材料表面改質・コーティング技術や微細加工技術**により克服できると考えている。
- これらの技術を有するセンサデバイスメーカーや分析機器メーカーとの**共同研究・共同開発を希望する。**
- また、**発酵制御装置・IoT計測機器を開発中の企業**、および食品・バイオ・環境モニタリング分野への展開を考えている企業には、本技術（DLC電極を用いたリアルタイム電気化学センシング）の導入が**高耐久・高感度な品質管理ソリューション**として有効と思われる。

企業への貢献、PRポイント

- ・ 本技術は、**DLC電極による日本酒発酵のリアルタイム・非破壊モニタリング**が可能なため、**企業の品質管理・生産効率化・人材依存の軽減**に大きく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科学的な裏付けを行うことが可能。
- ・ また、**既存の発酵管理システムやIoTデバイスに組み込むことで、現場での自動制御・データ駆動型製造への発展**が期待される。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 液状物の発酵又は醸造の状態を評価する電極、センサ及び解析装置
- 出願番号 : 特願2025-137386
- 出願人 : 学校法人東京電機大学
- 発明者 : 大越 康晴、向山 義治、萌出 大道、池 優輝

お問い合わせ先

東京電機大学

研究推進社会連携センター 産官学連携担当

T E L 03-5284-5225

e-mail crc@jim.dendai.ac.jp