

# 技術紹介

## 4

### 手のひらサイズ多点電気化学測定装置の開発

#### The development of the Palme-sized multi-point electrochemical sensing device

國方 亮太 Ryota Kunikata 商品開発センター 主任

須田 篤史 Atsushi Suda 商品開発センター 技術シニアマネージャー 博士(材料科学)

キーワード: バイオ LSI 計測システム、電気化学測定、手のひらサイズ、IoT、環境モニタリング

Keywords: Bio-LSI sensing system, Electrochemical measurement, Palm-sized device, IoT, Environmental monitoring

#### 要 旨

当社では、IoT と AI 技術の発展がもたらす新しい概念“Society 5.0”に貢献すべく、これまで医療・ライフサイエンス分野向けに開発してきた多点電気化学測定装置「バイオ LSI 測定装置」を、環境モニタリング分野へ展開するための活動を推進しております。河川、農場、工場等、実験室外の様々なフィールドでの環境計測に対応するために、従来機器の回路構成を見直したことで、可搬性、使いやすさを大幅に向上させた手のひらサイズの測定装置を開発することができました。本技報ではその仕様、機能実証結果について報告いたします。本装置はすでに販売を開始しており(製品名: JEC-200)、現在環境モニタリングの分野における用途開発・新市場創出のためのニーズ探索を推進しております。

#### SUMMARY

In order to contribute to the new "Society 5.0" brought about by the development of IoT and AI technology, we have been attempting to apply the "Bio-LSI sensing system", which was developed for the medical and life science fields, to the environmental monitoring field. As a result of major redesign of the circuit configuration of the original system, the palm-sized sensing device with greatly improved portability and ease of use has been developed. Here, we would like to introduce the specification and functional evaluation results of the device. This device is already on sale (Model Number: JEC-200), and now we are searching the potential needs of the device to create new application and market in the field of environmental monitoring.

## 1. はじめに

近年の IoT(Internet of Things)技術、AI(Artificial Intelligence)技術の大幅な進歩を背景に、大量のセンサによってもたらされるビッグデータを AI により解析することで、様々な社会的課題の解決、および新しい価値の創出を目指す”Society5.0”の実現に向けた取り組みが活発化しております。<sup>1)</sup>このような技術的・社会的潮流に対応すべく、我々は Society5.0 を支える技術要素の一つであるセンシングデバイスである「環境モニタリングデバイス」を開発してまいりました。環境モニタリングデバイスとは、河川、農場、オフィス等のあらゆる場所に設置され、温度、湿度、化学物質濃度といった様々な環境データを取得するセンサです。例えば、農場・植物工場の温湿度・土壌水分量検出による農作物育成管理<sup>4)</sup>、土中の水分検出による土砂災害予測<sup>5)</sup>等、様々な分野にて多種多様なセンサを用いた環境モニタリングデバイスが提案されております。さらにこれらのセンサから得られる膨大なデータを AI により高度に解析することで、農場における最適な収穫時期予測等、様々な新しい価値・サービスが創出されるものと期待しております。

これまでに我々は、社外協創プロジェクトを活用し、<sup>2,3)</sup>ウェブ広告、保険といった様々な業界の企業とともに、居住空間の温度、照度、音、振動といった情報を取得し、サーバへ保管するための「屋内環境モニタリングデバイス」(図 1)を開発しました。開発したデバイスは居住者によるエアコン等の温度調整や照明器具の使用状況、さらには居住者が発する生活音、歩行振動といった、日常生活に起因する様々な情報を取得することが可能です。また取得した情報を解析して活用することで、独居状態となっている高齢者の生活を、家族が簡便かつプライバシーに配慮しながら見守るための「遠隔見守りデバイス」としての使用が可能であることを示しました。<sup>2)</sup>なお、音や振動の周波数分布データを将来 AI により解析することで、例えば声の抑揚に現れる居住者の感情や振動に現れる居住者の転倒事故の状況、家電の使用状況等の様々な有益情報が得られると期待されます。これらの情報を統合することで、居住者のライフスタイルに合わせたターゲティング広告や、最適な保険プランの提案等、新しいビジネスへの展開が可能であると考えております。

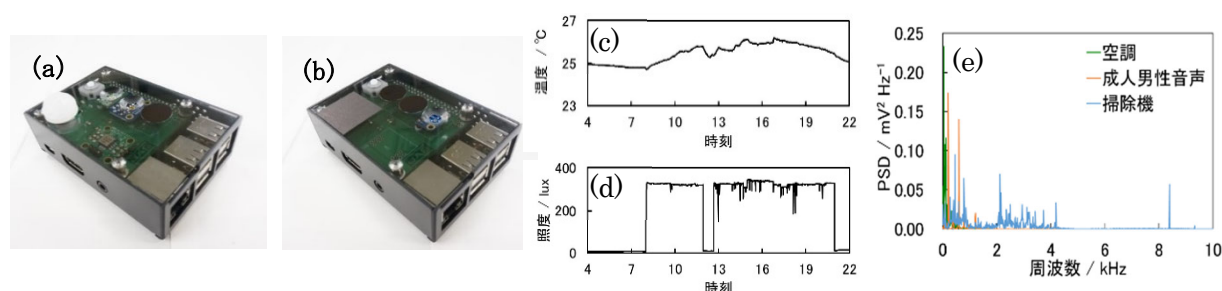


図 1. 屋内環境モニタリングデバイス

(a)92×61×28 mm の筐体内に温湿度、気圧、人感、振動センサを備えたデバイス。(b)同サイズの筐体内にマイクを備えたデバイス。両デバイスとも、これらセンサより取得したデータを無線にてウェブサーバに送付します。(c)温度データの例。(d)照度データの例。(e)典型的な生活音の周波数分布データの比較。

我々は過去に、環境モニタリングデバイスに応用可能なセンシング技術の開発を目的の一つとして、東北大学を中心とした産学連携プロジェクト(東北大学マイクロシステム融合研究開発拠点( $\mu$ SIC))へ参加し、溶液中の微量化学物質の濃度を測定するための卓上型電気化学測定装置「バイオ LSI 測定装置」(図 2)を開発いたしました。<sup>6-8)</sup>バイオ LSI 測定装置は、作用極としての正方格子状に配列された 400 点の電極、およびその直下の信号増幅回路が集積された LSI チップを用いることで、多点かつ高感度な測定を可能としております。我々はこれまでに、幹細胞の分化ステージ評価<sup>9)</sup>、神経様細胞による神経伝達物質の分泌能評価<sup>10)</sup>等、主に医療・ライフサイエンス分野における生体由来物質の評価に本装置を活用してきました。一方、本装置の測定原理は河川や土壌中の微量有害物質の検出等へも応用が可能であるため、多点、高感度といった特長を生かした新しい環境モニタリングデバイスとしての展開が期待できます。

本技報では、我々が培ってきた測定技術を発展させ、実験室外の様々なフィールドにおける高度な電気化学測定を実現すべく開発した、手のひらサイズの小型装置について報告いたします。本装置は製品名 JEC-200 としてすでに販売を開始しており、現在は環境モニタリング分野における用途開発や新市場創出のためのニーズ探索を推進しております。次章以降では、JEC-200 の仕様と機能実証結果について説明いたします。

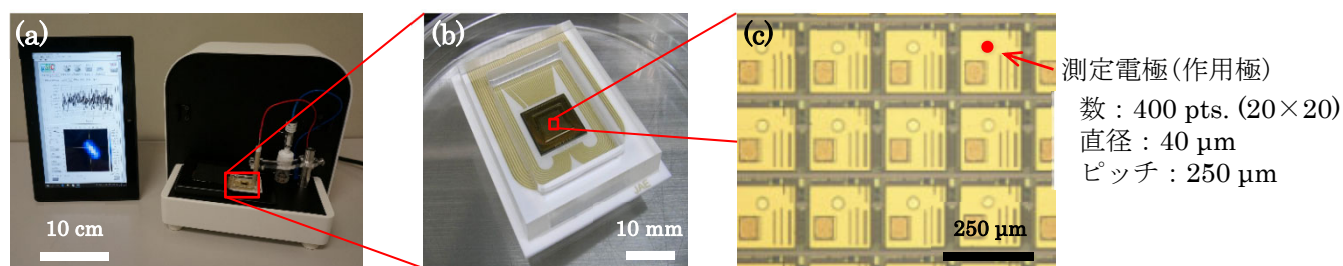


図 2. 卓上型のバイオ LSI 測定装置

(a)測定装置本体と操作用タブレット。(b)装置本体から着脱可能な測定チップ。(c)測定チップ上に実装された LSI の電気化学測定用作用極部分の拡大。

## 2. JEC-200 の仕様

### 2.1 概要

JEC-200 は、実験室外に持ち出して使用することを目的として開発した小型の電気化学測定装置です。産学連携にて開発した卓上型のバイオ LSI 測定装置と基本的な構成は同じであり、測定装置本体から着脱できる専用の LSI が実装された測定チップを用いることで、多点かつ高感度な測定が可能となっております。卓上型バイオ LSI 測定装置の回路構成を大幅に見直し、筐体サイズを幅 230.0×奥行 182.5×高さ 212.0 mm から、幅 91.0×奥行 55.0×高さ 25.5 mm へと大幅に小型化し、持ち運び容易な手のひらサイズといたしました。また、電源系統も見直すことにより、卓上型では商用 100 V 電源が必要であったのに対し、ノートパソコン(以後 PC)の USB バスパワー 5 V による作動が可能となりました。これ

らの設計変更により、実験室内のような安定した設置場所や電源が確保できる環境のみで使用されていたバイオ LSI 測定装置を、河川や農場、あるいは工場といった実験室外の様々なフィールドに持ち出すことが可能となりました。現在の仕様では PC 等の USB と有線で接続することにより電源確保とデータ通信を行っておりますが、過去の屋内環境モニタリングデバイスの試作で確認した技術を用いて、電池駆動あるいは無線給電、無線通信といった完全ワイヤレス化も可能となっております。

## 2.2 測定原理

バイオ LSI チップを用いた電気化学測定では、LSI 上に集積された測定電極である作用極(Working Electrode : WE)、および測定器本体のポテンショスタット回路より接続された参照極(Reference Electrode : RE)および対極(Counter Electrode : CE)を、同一の測定溶液に浸漬させて使用いたします。ポテンショスタット回路の機能により、参照極にユーザーが設定した電圧を印可することで、測定溶液と作用極の間の電位差を精密に制御することができます。ここで測定溶液中に酸化還元能を有する物質が存在すると、測定溶液と作用極間の電位差により、作用極に対して電子の授受が行われます。この時作用極にて授受される電子の量は、測定対象物質の濃度と相関するため、これを電流として計測することで、測定対象物質の濃度を知ることができます。

## 2.3 装置構成

JEC-200 の外観を図 3 に示します。図 3(a)はバイオ LSI チップを接続していない状態の JEC-200 本体です。JEC-200 は回路基板を収めた筐体、測定チップを設置するためのステージ、ステージ部を保護するための開閉式チップカバー等から構成されています。筐体材料には、軽量かつ内部回路基板の電磁シールドとしても機能するアルミニウムを採用しております。また、筐体には作用極を有するバイオ LSI 測定チップ接続用の FPC(Flexible Printed Circuits)ケーブル、および参照極と対極接続用のケーブルが付属しております。また、PC と接続するための micro-USB type-B 端子およびプログラム用メモリーである microSD カードスロットを備えております。図 3(b)は測定時の状態です。JEC-200 本体にバイオ LSI 測定チップと参照極、対極を接続し、測定装置制御およびデータ解析用の PC を USB ケーブルにより接続した状態です。なお、PC のディスプレイに表示されているソフトウェア画面は LabVIEW に

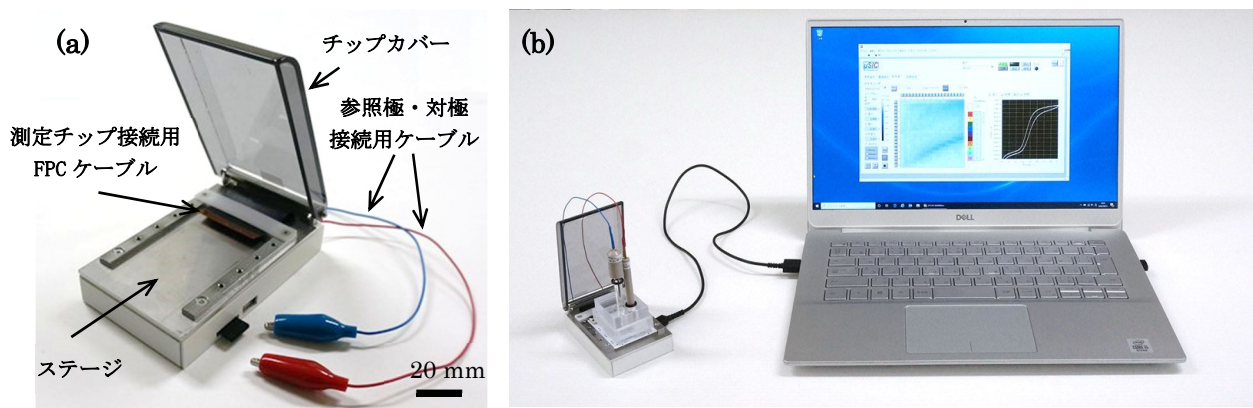


図 3. 小型電気化学測定装置 JEC-200 外観  
(a)JEC-200 本体、(b)測定時の状態



より開発したもので、本ソフトウェアはサイクリックボルタメトリーCyclic Voltammetry：CV)およびクロノアンペロメトリー(Chronoamperometry：CA)の測定モードにおいて、酸化還元電圧や測定時間によって変化する 400 点の作用極の酸化還元電流値 2 次元マップのリアルタイム表示機能だけではなく、任意の酸化還元電圧や測定時間におけるマップ表示機能を有します。また、任意の電極の CV や CA を比較のため表示することができます。

## 2.4 回路構成

JEC-200 の筐体内には、測定チップと参照極・対極への制御信号の出力、および測定チップより入力されたセンサ信号の検出を行うメイン基板と、このメイン基板の制御および PC との通信を行うマイコン基板(sparkfun 社製 Micropython Pyboard v1.1)の 2 枚の回路基板が設置されております。これら回路基板の機能を表すブロック図を図 4 に示します。ユーザーによって PC へ入力された測定条件は、マイコン内処理を経て、LSI 駆動信号および参照極・対極印可電圧信号としてそれぞれ測定チップおよびメイン基板上のデジタル - アナログ変換回路(Digital-Analog Converter：DAC)にデジタル制御信号として出力されます。このうち測定チップへ出力される LSI 駆動信号は、3.3 V から 5.0 V への信号レベル変換を経て、LSI 内にてアクティブとなる作用極のスイッチングに使用されます。また DAC に出力される参照極・対極印可電圧信号は、アナログ変換とポテンショスタット回路によるアナログ電位制御を経て参照極および対極端子に出力されます。一方、測定溶液中の化学物質濃度に応じた電圧信号である測定チップより入力されたセンサ信号は、AFE(Analog Front End)チップにてアナログ - デジタル変換、およびアナログ・デジタルフィルタによるノイズ除去を受けたのち、LabVIEW ベースのソフトウェアによる平均化処理を経て、測定結果として表示および保存されます。なお、DC5 V で最大 500 mA の USB2.0 バスパワーを電源としておりますが、本体内レギュレータにてアナログ基準電位およびアナログ IC 駆動電圧用の 4.7V、デジタル IC 駆動電圧用の 3.3V、アナログ基準電位用の 2.2 V に変換して使用しております。

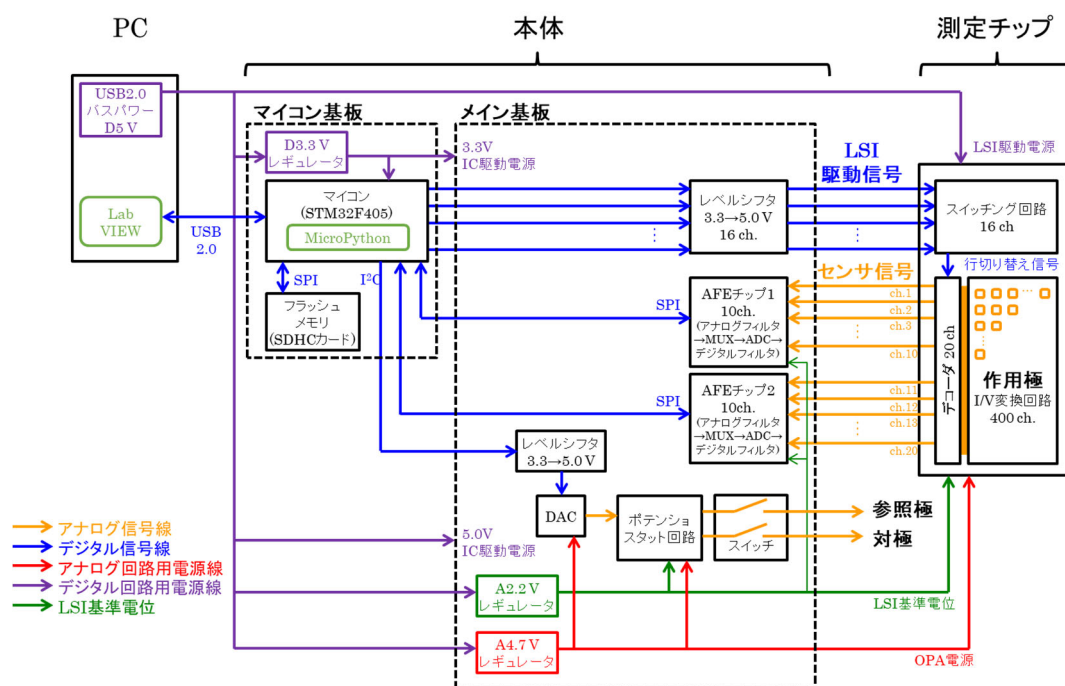


図 4. JEC-200 回路基板の機能ブロック図

### 3. JEC-200 の機能実証結果

#### 3.1 参照極電圧の制御精度評価

新たに設計した JEC-200 内のポテンシostat回路と、卓上型の従来機内のポテンシostat回路との性能比較を行うため、同回路により制御される参照極電圧の制御精度評価を行いました。実験は、ソフトウェア上での設定電圧値の入力により参照極端子の接地電圧を制御し、このときの参照極の接地電圧を電圧計(アドバンテスト製 R6243)により測定しました。結果は表 1 に示す通り、JEC-200 にて制御した設定電圧  $-2.0\text{ V}$ 、 $-1.0\text{ V}$ 、 $0.0\text{ V}$ 、 $1.0\text{ V}$ 、 $2.0\text{ V}$  において、設定電圧と測定電圧の誤差は最大  $1.5\text{ mV}$ (full scale 精度  $0.04\%\text{f.s.}$ )であったことから、JEC-200 は卓上型の従来機(誤差 $<\pm 3\text{ mV}$  typical)や一般的な電気化学測定装置(誤差数  $\text{mV}$  程度)と同等の参照極電圧制御精度を有することが確認できました。

表 1. 参照極電圧制御精度の評価結果

設定電圧 / V	$-2.0$	$-1.0$	$0.0$	$1.0$	$2.0$
設定電圧と測定電圧の誤差 / mV	$0.0$	$0.4$	$-0.5$	$1.1$	$1.5$

#### 3.2 センサ信号の検出精度評価

JEC-200 にて新たに採用した AFE チップ(信号のアナログ - デジタル変換、アナログ・デジタルフィルタリング回路を含む)と、卓上型の従来機内の AFE 回路との性能比較を行うため、同回路により検出されるセンサ信号の精度評価を行いました。実験は、直流安定化電源(アドバンテスト製 R6243)を用いてセンサ信号の入力端子(ch.1~ch.20)に直接電圧を印可し、このときの JEC-200 による測定電圧値と比較しました。結果は図 5 に示す通り、印可電圧  $-2.0\text{ V}$ 、 $-1.0\text{ V}$ 、 $0.0\text{ V}$ 、 $1.0\text{ V}$ 、 $2.0\text{ V}$  において、印可電圧と測定電圧の誤差は最大  $2.0\text{ mV}$ ( $0.05\%\text{f.s.}$ )であったことから、JEC-200 は卓上型の従来機(誤差 $<\pm 6\text{ mV}$  typical)より高いセンサ信号検出精度を有することが確認できました。

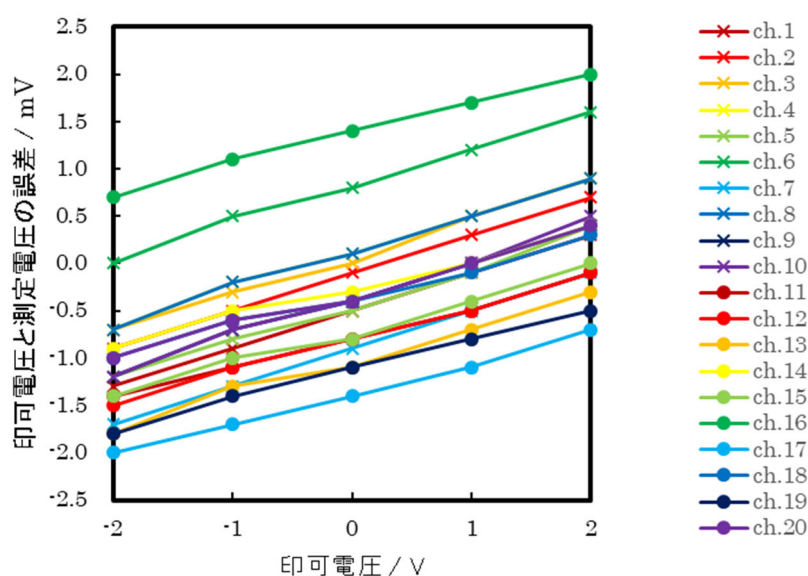
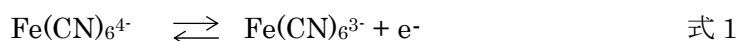


図 5. センサ信号検出精度の評価結果

### 3.3 溶液中化学物質検出能の評価

JEC-200 による溶液中化学物質検出能を評価するため、フェロシアン化カリウム水溶液を測定溶液とした電気化学測定を行いました。フェロシアン化カリウムは、電気化学測定の標準物質として一般的に用いられる酸化還元能を有する物質であり、作用極と測定溶液の間に生じた電位差により、鉄イオンの酸化還元に起因する次の電極反応を生じます。



20×20 の正方格子状に配置された 400 点の作用極のうち、1 列 20 点の作用極の測定結果を抜粋して図 6 に示します。作用極と参照極間の電圧を、-0.1 V から 0.7 V の範囲にて掃引したところ、各作用極にてフェロシアン化カリウムの酸化反応に由来する電流値が観測されました。この時の酸化電流値は、フェロシアン化カリウムの濃度、拡散係数、および作用極面積より算出される理論値である 1.18 nA にほぼ等しく、新たに設計した検出回路、ポテンショスタット回路が正常に動作している事を確認しました。また、電流値の測定レンジ±1.5 nA に対し、ノイズレベルはおおよそ 10 pA(0.33% f.s.)であり、同測定レンジにおける卓上型従来機のノイズレベル(10 pA)と同等であることがわかりました。

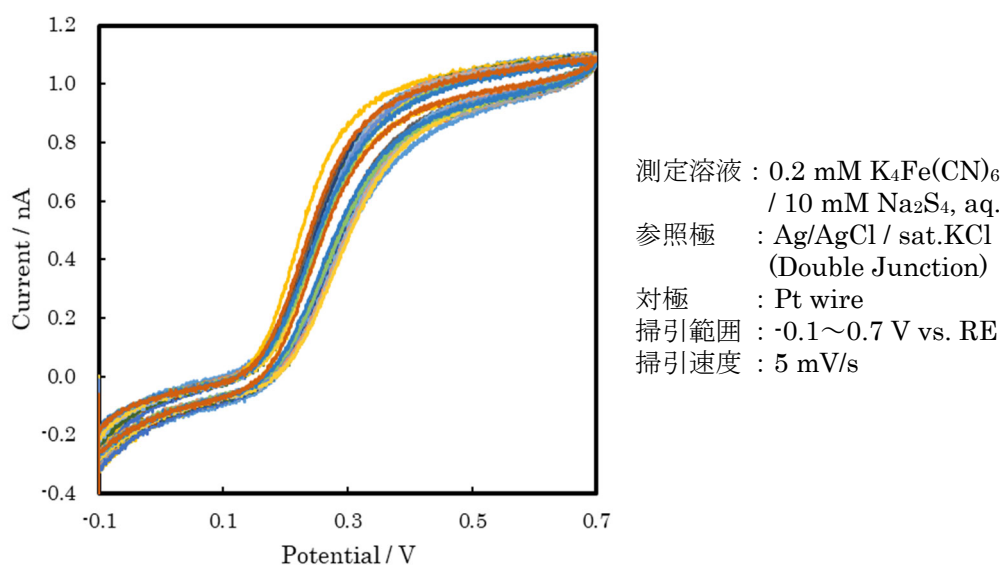


図 6. フェロシアン化カリウム水溶液の電気化学測定結果

## 4. まとめと今後の展望

過去の産学連携において医療・ライフサイエンス分野向けに開発してきた多点電気化学測定装置「バイオ LSI 測定装置」の測定技術を環境モニタリング分野へと展開すべく、実験室外への持ち出しが可能な手のひらサイズの小型電気化学測定装置 JEC-200 を開発しました。回路構成の見直しにより、筐体サイズを大幅に小型化し、かつ PC の USB バスパワーによる駆動を可能としました。将来的にはワイヤレスでの運用へも移行可能な構成となっております。また、外部の校正済み電源・電圧計を用いた参照極電圧の制御確度評価、センサ信号の検出確度評価、およびフェロシアン化カリウム水溶液を用いたノイズレベル評価を行い、それぞれ 1.5 mV (0.04 %f.s.)、2.0 mV (0.05 %f.s.)、および 10 pA 程度と、卓上設置型の従来機と同等の性能を達成していることがわかりました。

現在、使い捨てとなるチップ部分に高価な LSI を用いない新たな検出システムの開発にも取り組んでおります。LSI に含まれる増幅回路、スイッチング回路を筐体内に移し、チップ部は電極部のみの構成とすることで測定コストの大幅な低減を目指しております。この取り組みにより、環境モニタリングデバイスとしての応用範囲がさらに拡大するとともに、空港やイベント会場における感染症診断や、食品加工工場における食品の安全性確認等、より広い分野への展開も可能になるものと考えております。

### 【参考文献】

- 1) 内閣府ウェブサイト ([https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html)).
- 2) 國方亮太, 須田篤史, 航空電子技報 **42**, 5 (2020).
- 3) PARMMIT 協議会ウェブサイト (<https://rp.kddi-research.jp/parmmmit/>).
- 4) 詳細は、神成淳司 監修, スマート農業 (株式会社エヌ・ティー・エス, 東京, 2019), 第 3 章「センシング技術の活用」などを参照ください.
- 5) Y. Ueyama, M. Hatayama, H. Yamauchi, N. Yoshida, T. Kawano, IPSJ SIG Technical Report **2**, 1 (2018).
- 6) K. Y. Inoue, M. Matsudaira, R. Kubo, M. Nakano, S. Yoshida, S. Matsuzaki, A. Suda, R. Kunikata, T. Kimura, R. Tsurumi, T. Shioya, K. Ino, H. Shiku, S. Satoh, M. Esashi and T. Matsue, Lab. Chip **12**, 3481 (2012).
- 7) 國方亮太, 須田篤史, 航空電子技報 **35**, 10 (2013).
- 8) 國方亮太, 須田篤史, 航空電子技報 **38**, 1 (2016).
- 9) M. Şen, K. Ino, K. Y. Inoue, T. Arai, T. Nishijo, A. Suda, R. Kunikata, H. Shiku, T. Matsue, Biosens. Bioelectron. **48**, 12 (2013).
- 10) H. Abe, K. Ino, C. Z. Li, Y. Kanno, K. Y. Inoue, A. Suda, R. Kunikata, M. Matsudaira, Y. Takahashi, H. Shiku, and T. Matsue, Anal. Chem. **87**, 6364 (2015).