

シンポジウム(口頭講演) | シンポジウム：ナノテクノロジーを駆使したバイオセンサーと2次元材料の最前線 - ヒト感染性ウイルスを迅速に検出可能なグラフェンFETセンサーによるパンデミックのない社会の実現 -

📍 2025年3月14日(金) 13:30 ~ 17:15 🏢 K205 (講義棟)

[14p-K205-1~10] ナノテクノロジーを駆使したバイオセンサーと2次元材料の最前線 - ヒト感染性ウイルスを迅速に検出可能なグラフェンFETセンサーによるパンデミックのない社会の実現 -

松本 和彦(阪大)、牛場 翔太(村田製作所)

13:30 ~ 13:35

[14p-K205-1]

趣旨説明

○松本 和彦¹ (1.阪大産研)

13:35 ~ 13:45

[14p-K205-2]

挨拶

○田中 健一¹ (1.科学技術振興機構)

13:45 ~ 14:15

[14p-K205-3]

感染症対策に資する非増幅遺伝子検査法の開発

○渡邊 力也¹ (1.理研CPR)

14:15 ~ 14:30

[14p-K205-4]

集積化グラフェンFETアレイの表面ポテンシャル精密制御による高感度ウイルス検出 (1)

○松本 和彦¹、山本 佳織¹、佐藤 夏岐¹、矢野 真美子¹、坂野 喜代治¹、大西 絵里子¹、田中 秀和¹、牛場 翔太²、谷 晋輔²、木村 雅彦²、渡邊 洋平³ (1.阪大産研、2.村田製作所、3.慈恵医大)

14:30 ~ 14:45

[14p-K205-5]

集積化グラフェンFETアレイの表面ポテンシャル精密制御による高感度ウイルス検出 (2)

○松本 和彦¹、山本 佳織¹、佐藤 夏岐¹、矢野 真美子¹、坂野 喜代治¹、大西 絵里子¹、田中 秀和¹、牛場 翔太²、谷 晋輔²、木村 雅彦²、渡邊 洋平³ (1.阪大産研、2.村田製作所、3.慈恵医大)

14:45 ~ 15:15

[14p-K205-6]

ペプチドを用いた2次元材料表面のバイオ-ナノ界面制御とバイオセンシング

○早水 裕平¹ (1.東京科学大)

15:45 ~ 16:15

[14p-K205-7]

二次元物質のCVD成長と転写を通じた2.5次元物質科学の推進

○吾郷 浩樹^{1,2} (1.九大院総理工、2.九大半導体セ)

16:15 ~ 16:30

[14p-K205-8]

グラフェンFETアレイのラマン顕微鏡による評価

○牛場 翔太¹、中野 友美¹、徳田 優果¹、谷 晋輔¹、木村 雅彦¹、松本 和彦² (1.株式会社村田製作所、2. 阪大産研)

16:30 ~ 16:45

[14p-K205-9]

酸化物薄膜トランジスタ型バイオセンサーの教師あり学習による核酸検出判定

○廣瀬 大亮¹、高村 禅¹ (1.北陸先端大)

16:45 ~ 17:15

[14p-K205-10]

グラフェンFETセンサの実用化に向けた取り組み

○木村 雅彦¹、松本 和彦² (1.村田製作所、2.阪大産研)

シンポジウム(口頭講演) | シンポジウム：ナノテクノロジーを駆使したバイオセンサーと2次元材料の最前線 - ヒト感染性ウイルスを迅速に検出可能なグラフェンFETセンサーによるパンデミックのない社会の実現 -

📅 2025年3月14日(金) 13:30 ~ 17:15 🏢 K205 (講義棟)

[14p-K205-1~10] ナノテクノロジーを駆使したバイオセンサーと2次元材料の最前線 - ヒト感染性ウイルスを迅速に検出可能なグラフェンFETセンサーによるパンデミックのない社会の実現 -

松本 和彦(阪大)、 牛場 翔太(村田製作所)

13:30 ~ 13:35

[14p-K205-1] 趣旨説明

○松本 和彦¹ (1.阪大産研)

キーワード：バイオセンシング、2次元材料

本シンポジウムの趣旨を述べる。様々なウイルスやバイオマーカー、生体信号を簡便に高感度に検出し、健康維持や社会の安定に寄与することは世の中の喫緊の課題である。最新のエレクトロニクスとナノテクノロジーを駆使した様々なバイオセンシング法と材料である2次元材料の最新情報を提示する。またこれらの中で、社会実装に近いものは何かを問うシンポジウムを企画する。

挨拶

Greeting

田中 健一

Ken-ichi Tanaka

E-mail: tanaka@tanakake.net

感染症対策に資する非増幅遺伝子検査法の開発

Development of amplification-free genetic testing method for infectious disease control

理研 CPR¹ ○渡邊 力也¹

RIKEN¹, °Rikiya Watanabe¹

E-mail: rikiya.watanabe@riken.jp

新型コロナウイルス感染症の世界的な流行を経験し、将来のパンデミックに備えるべく、ワクチン・治療薬の開発に加えて、汎用的な感染症検査法の確立が急務とされている。この背景を受け、私たちは、基礎研究で培った生体分子の1分子計測技術を発展させ、病原体の遺伝子を1分子レベルで迅速に定量できる、世界最速の非増幅遺伝子検査法（SATORI法）の開発に成功した（参考文献1）。また、実用化にむけて、臨床現場のニーズに応えるべく、全自動検査装置や小型検査装置などのプロトタイプを開発するとともに、消耗品等の長期保管方法の確立に加え、それらのランニングコストの大幅な削減を達成した（参考文献2, 3, 4, 5）。本演題では、SATORI法の最新の開発状況と、それらが拓く感染症対策の未来像について概説する。



参考文献

1. Shinoda, H. et al., *Commun Biol* (2021) 4, 476
2. Shinoda, H. et al., *Commun Biol* (2022) 5, 473
3. Ueda, T. et al., *Anal Chem* (2023) 95, 9680-9686
4. Iida, T. et al., *Lab Chip* (2023) 23, 684-691
5. Iida, T. et al., *iScience* (2024) 110868

集積化グラフェン FET アレイの表面ポテンシャル精密制御による 高感度ウイルス検出 (1)

High sensitive virus detection through precise control of surface potential
of integrated graphene FET arrays

阪大産研¹、村田製作所²、東京慈恵医大³、
○松本和彦¹、山本佳織¹、佐藤夏岐¹、矢野真美子¹、坂野喜代治¹、大西絵里子¹、田中秀和¹、
牛場翔太²、谷晋輔²、木村雅彦²、渡邊洋平³
SANKEN, Osaka Univ.¹, Murata Manufacturing Co., Ltd², The Jikei University School of Medicine³,
○K. Matsumoto¹, K. Yamamoto¹, N. Sato¹, M. Yano¹, K. Sakano¹, E. Ohnishi, H. Tanaka,
S. Ushiba², S. Tani², M. Kimura², and Y. Watanabe³
E-mail: k-matsumoto@sanken.osaka-u.ac.jp

我々は図1に示す集積化グラフェン FET アレイを用いて、高感度、簡便、高速なウイルス検出を目指している。FETは32個が集積され、グラフェンチャンネルは $10\mu\text{m}\times 400\mu\text{m}$ であり、様々な抗体や表面修飾を行なって特性を比較している。グラハムの式から表面電荷と感度の関係を導出したのが図3であり、最高感度はグラフェン表面の電荷が0の時に得られることがわかる。ところが実際のグラフェン表面は図2のポンチ絵で示すように、グラフェン FET 作製時に生じる電荷や修飾した抗体の電荷により負に帯電している。その為、この負電荷をキャンセルアウトするために正電荷を有するポリリジン(PLL)を添加して感度を向上させることを実施してきた。今回、PLLによるウイルスの物理吸着増大の問題を解決し、かつ、その濃度依存性を詳細に調べた。図4に示すように、PLLの濃度を $5\sim 500\mu\text{g/ml}$ と変化させた場合のウイルスの検出感度を示す。 $5\mu\text{g/ml}$ から投入量を増やしていくと感度が増大し、 $50\sim 80\mu\text{g/ml}$ で最大値を示し、さらに投入量を増やすと感度が減少することが明確になり、図3の理論予測と一致することが判明した。これによりPLLの濃度依存性を明確にし、ウイルスの最高検出感度が得られる最適なPLL濃度を導出でき、今後の高感度化への道を開いた。

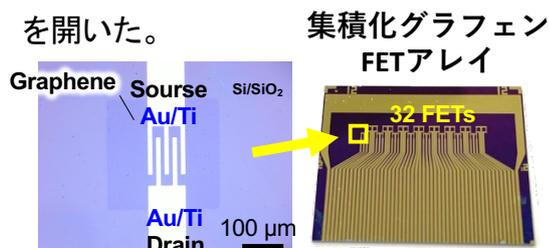


Fig. 1, Integrated graphene FET array for high sensitive detection of virus.

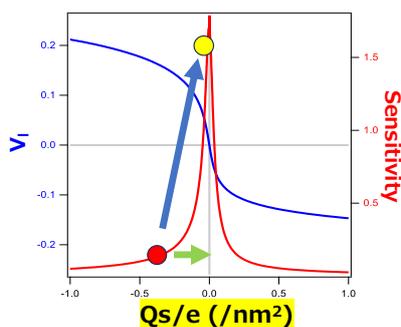


Fig. 3, Relationship between surface charge and sensitivity.

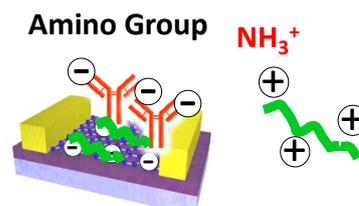


Fig. 2, Surface potential modulation of GFET by positively charged PLL for high sensitive detection of virus.

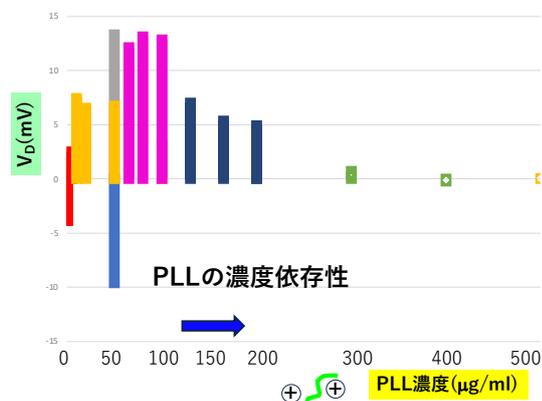


Fig. 4, Relationship between concentration of PLL and sensitivity.

集積化グラフェン FET アレイの表面ポテンシャル精密制御による 高感度ウイルス検出 (2)

High sensitive virus detection through precise control of surface potential
of integrated graphene FET arrays

阪大産研¹、村田製作所²、東京慈恵医大³、
○松本和彦¹、山本佳織¹、佐藤夏岐¹、矢野真美子¹、坂野喜代治¹、大西絵里子¹、田中秀和¹、
牛場翔太²、谷晋輔²、木村雅彦²、渡邊洋平³
SANKEN, Osaka Univ.¹, Murata Manufacturing Co., Ltd², The Jikei University School of Medicine³,
○K. Matsumoto¹, K. Yamamoto¹, N. Sato¹, M. Yano¹, K. Sakano¹, E. Ohnishi, H. Tanaka,
S. Ushiba², S. Tani², M. Kimura², and Y. Watanabe³
E-mail: k-matsumoto@sanken.osaka-u.ac.jp

我々は図1に示す集積化グラフェン FET アレイを用いて、高感度、簡便、高速なウイルス検出を目指している。FETは32個が集積され、グラフェンチャンネルは $10\mu\text{m}\times 400\mu\text{m}$ であり、様々な抗体や表面修飾を行なって特性を比較している。グラハムの式から表面電荷と感度の関係を導出したのが図3であり、最高感度はグラフェン表面の電荷が0の時に得られることがわかる。ところが実際のグラフェン表面は図2のポンチ絵で示すように、グラフェン FET 作製時に生じる電荷や修飾した抗体の電荷により負に帯電している。その為、この負電荷をキャンセルアウトするために正電荷を有するポリリジン(PLL)を添加して感度を向上させることを実施してきた。今回、PLLによるウイルスの物理吸着増大の問題を解決し、かつ、その濃度依存性を詳細に調べた。図4に示すように、PLLの濃度を $5\sim 500\mu\text{g/ml}$ と変化させた場合のウイルスの検出感度を示す。 $5\mu\text{g/ml}$ から投入量を増やしていくと感度が増大し、 $50\sim 80\mu\text{g/ml}$ で最大値を示し、さらに投入量を増やすと感度が減少することが明確になり、図3の理論予測と一致することが判明した。これによりPLLの濃度依存性を明確にし、ウイルスの最高検出感度が得られる最適なPLL濃度を導出でき、今後の高感度化への道を開いた。

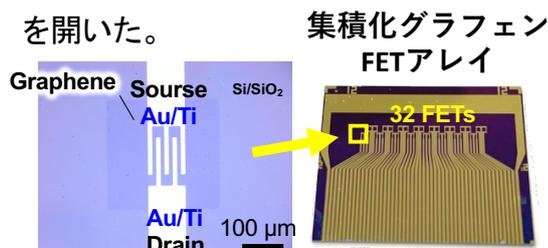


Fig. 1, Integrated graphene FET array for high sensitive detection of virus.

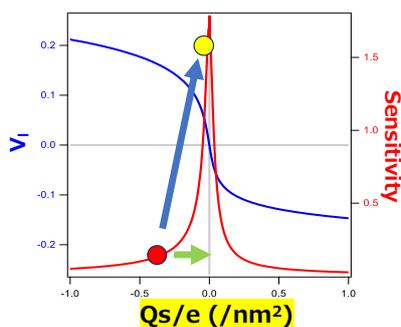


Fig. 3, Relationship between surface charge and sensitivity.

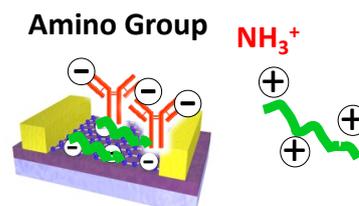


Fig. 2, Surface potential modulation of GFET by positively charged PLL for high sensitive detection of virus.

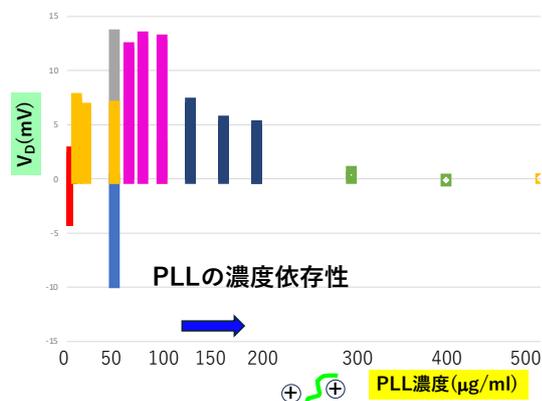


Fig. 4, Relationship between concentration of PLL and sensitivity.

ペプチドを用いた 2 次元材料表面の バイオ-ナノ界面制御とバイオセンシング

Formation of bio-nano interfaces with 2D materials and peptides for biosensing

東京科学大¹ ○早水 裕平¹

Institute of Science Tokyo¹, °Yuhei Hayamizu¹

E-mail: hayamizu@mct.isct.ac.jp

2次元(2D)ナノ材料、特にグラフェンや遷移金属カルコゲナイドの物性は広く研究されており、その応用が様々な分野で期待されている。特に、ポストコロナ時代においては、バイオテクノロジー分野やバイオセンサーに関連した応用を念頭に、バイオ分子と2Dナノ材料との界面に対する理解の重要性が増している。本講演では、ペプチドを用いた2D材料表面上のバイオ分子-ナノ材料界面の制御に関する研究の最近の進展について紹介する。これらのペプチドは、自己組織化によって2Dナノ材料表面に一様な単分子層を形成する固体吸着ペプチドとして知られている[1-4]。特に、これらのペプチドは基板である2D材料の電気化学的ポテンシャルに応じて自己集合構造を変化させ[5]、または溶液のpHの変化によって2D材料の電子状態を調整することが可能である[6]。さらに、有機溶媒を溶液に導入することで、自己組織化構造を変化させることもできる[7]。これらのペプチドは、補因子であるヘミンと階層的な自己組織化をすることで、グラファイト表面で電気化学触媒として機能する能力を示しており[8]、自己組織化ペプチドを用いたバイオ-ナノ界面応用の可能性が広がっている。最近では、生体の嗅覚受容体を模倣したペプチドを利用したグラフェンベースの匂いセンサーが、優れた感度と選択性を達成している[9,10]。この新しいシステムでは、匂い分子のエナンチオマーを高い信号コントラストで区別でき、従来の匂いセンサーでは達成されなかった能力を示した[11]。講演では、これらの研究成果を掘り下げ、ナノ材料界面制御の重要性について紹介する。

【参考文献】

1. C. R. So, et.al., ACS Nano, 6 (2) 1648-1656 (2012).
2. D. Khatayevich, et al., Small 10, 8 1505-1513 (2014).
3. P. Li, et.al., ACS Applied Materials & Interfaces 11, 20670 (2019).
4. Y. Hayamizu, et.al., Scientific Reports 6, 33778 (2016).
5. T. Seki, T. Ihara, Y. Kanemitsu, and Y. Hayamizu, 2D Mater. 7, 034001 (2020).
6. S. Tezuka, T. Seki, et.al. 2D Mater. 7, 024002 (2020)
7. R. Ccorahua, et.al. *The Journal of Physical Chemistry B* 125.39 10893-10899 (2021).
8. W. Luo, et al. *Nanoscale* 14.23 8326-8331 (2022).
9. C. Homma, et.al., Biosensors and Bioelectronics, 224, 115047 (2023).
10. T. Rungreunthanapol, et.al., Analytical Chemistry, 95(9), 4556--4563 (2023).
11. Y. Yamazaki, et.al., ACS Appl. Mater. Interfaces 16, 18564--18573 (2024).

二次元物質の CVD 成長と転写を通じた 2.5 次元物質科学の推進

Development of 2.5D materials science based on CVD growth and transfer of 2D materials

九大院総理工・九大半導体センター 吾郷 浩樹

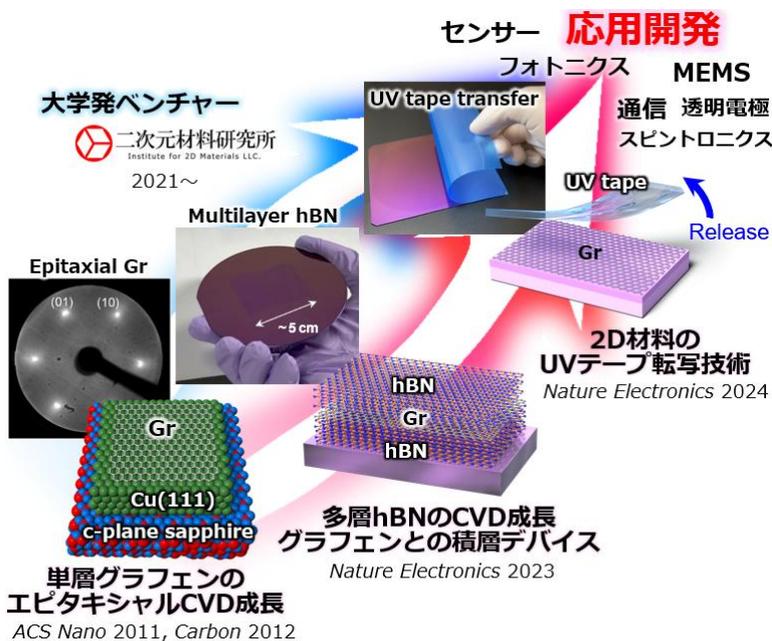
Kyushu Univ. Hiroki Ago

E-mail: ago.hiroki.974@m.kyushu-u.ac.jp

2004 年のグラフェンの報告から始まった二次元物質研究は、ファンデルワールス積層によって新たな物質を作り上げるという手法につながり、物質合成に大きなパラダイムシフトをもたらしている。また、積層した二次元物質の層間、あるいは二次元物質と基板の界面には、高さが可変な vdW ナノ空間が広がっており、エネルギー応用をはじめ、新奇な構造や物質創製の場としても期待できる。これらは、二次元物質研究の先を行く「2.5 次元物質科学」とみなすことができる [1-3]。

特に、グラフェンでは、突出したキャリア移動度やセンシティブリティから、バイオセンサーや光センサー、磁気センサーなどのセンサーを中心とした応用が活発に研究されている。このような高性能センサーをはじめとする応用には、グラフェンそのものの高品質化が必須である。我々は 2008 年の早い時期からグラフェンの CVD 成長の研究を開始し、銅箔に代わる結晶性金属触媒として、サファイア基板上に堆積した Cu(111)、Co(0001) 薄膜を用いた「エピタキシャル CVD 法」を開発してきた [4-7]。エピタキシャル CVD 法は、グラフェンの方位が制御されて結晶性が高い、Cu(111) が平滑で硬いためグラフェン転写時のダメージが少ない、銅箔で見られる多層グレインが抑制できるといった利点を持ち、最近では北京大やケンブリッジ大など世界的にも広くこの手法が利用されている。また、この成果は九大発グラフェンベンチャーの立ち上げにもつながっている [8]。

本講演では、このグラフェンのエピタキシャル CVD 法について説明するとともに、グラフェンのキャリア移動度を向上させるのに重要な役割を果たす、六方晶窒化ホウ素 (hBN) の多層膜の CVD 合成とグラフェン FET への応用についても紹介する [9]。一方、Cu(111) からのグラフェンの転写も、グラフェンセンサーの実用化において重要である。そこで、我々は「Ready to transfer」のコンセプトの下、UV 光で粘着力が 1/10 まで低下するテープについて、グラフェンに特化した粘着剤、基材、転写プロセスを開発し、残渣や破れが少なく、かつ簡便な転写法を開発した [10]。講演では、この UV テープの延伸によるグラフェンナノスクロールの合成に関する新たな結果についても紹介する予定である [11]。



【文献】

- [1] H. Ago, P. Solís-Fernández, *NPG Asia Mater.* (invite review), **16**, 31 (2024).
- [2] H. Ago et al., *Sci. Tech. Adv. Mater. (STAM)*, **23**, 275 (2022).
- [3] Y.-C. Lin et al., *Nat. Commun.*, **15**, 425 (2024).
- [4] H. Ago et al., *ACS Nano*, **4**, 7407 (2010).
- [5] B. Hu et al., *Carbon*, **52**, 57 (2012).
- [6] Y. Ogawa et al., *J. Phys. Chem. Lett.*, **3**, 219 (2012).
- [7] H. Ago et al., *Appl. Phys. Express*, **6**, 75101 (2013).
- [8] <https://www.2jigen-zairyo.co.jp/>
- [9] S. Fukamachi et al., *Nat. Electron.*, **6**, 126 (2023).
- [10] M. Nakatani et al., *Nat. Electron.*, **7**, 119 (2024).
- [11] T. Maezawa et al., in preparation.

グラフェン FET アレイのラマン顕微鏡による評価

Analysis of Graphene Field-Effect Transistor Arrays Using Raman Microscopy

株式会社村田製作所¹, 阪大産研² ◯牛場 翔太¹, 中野 友美¹, 徳田 優果¹,
谷 晋輔¹, 木村 雅彦¹, 松本 和彦²

Murata Manufacturing Co., Ltd.¹, SANKEN, Osaka Univ.², ◯Shota Ushiba¹, Tomomi Nakano¹,
Yuka Tokuda¹, Shinsuke Tani¹, Masahiko Kimura¹, Kazuhiko Matsumoto²

E-mail: shota.ushiba@murata.com

グラフェン合成技術の発展により、グラフェン電界効果トランジスタ (GFET) アレイの作製が可能となった。しかし、アレイ全体で電気特性はバラついており、商業化の大きな課題となっている。本研究では、ラマン顕微鏡を用いた GFET アレイの検査技術を提案する (Fig. 1(a)) [1]。電気測定を行う前に、アレイ内の全ての GFET のラマンイメージを撮像した。G バンドおよび 2D バンドのピーク位置から、GFET 内のホールキャリア密度 (n_H) を算出した (Fig. 1(b))。 n_H は、溶液下で測定した V_{DP} と相関した (Fig. 1(c))。さらに、GFET のラマンピークを作製プロセス毎に追跡した結果、面内バラツキが wet 転写プロセス中に発生していることが明らかとなった。

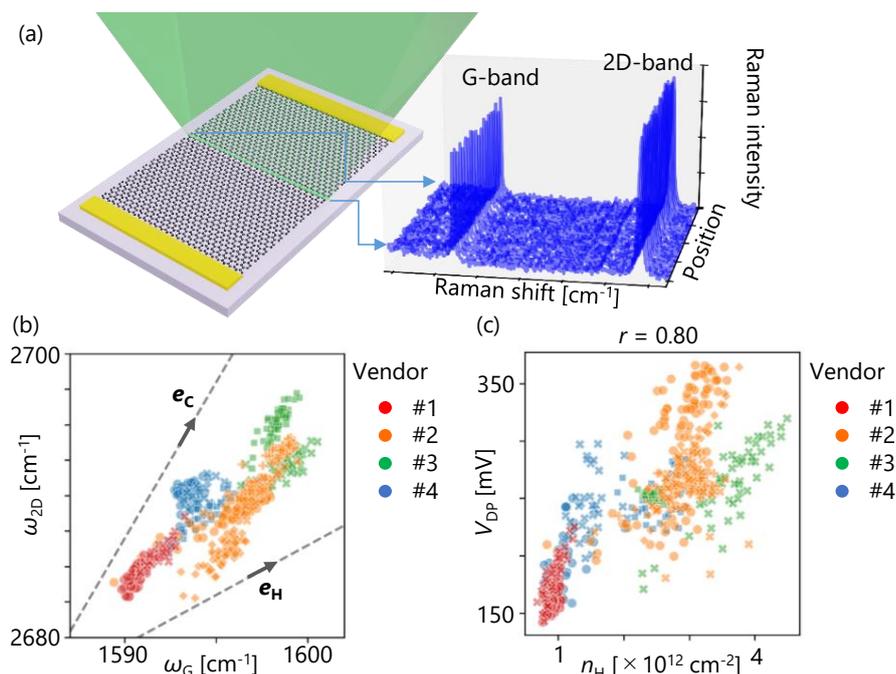


Fig. 1. (a) ラマン顕微鏡による GFET の評価。(b) G バンドおよび 2D バンドのピーク位置。色の違いはグラフェンベンダーに対応。(c) n_H と V_{DP} の相関図。

Reference: [1] S. Ushiba et al. ChemRxiv (2024). DOI: 10.26434/chemrxiv-2024-q0m2n.

酸化物薄膜トランジスタ型バイオセンサーの教師あり学習による核酸検出判定

Decision of Nucleic Acid Detection by Supervised Learning

for Oxide Thin Film Transistor Biosensor

北陸先端大¹, °廣瀬 大亮¹, 高村 禪¹

JAIST¹, °Daisuke Hirose¹, Yuzuru Takamura²

E-mail: d-hirose@jaist.ac.jp

【はじめに】核酸の分子センシングは、パンデミック対策や疾患検査の需要がある。著者らは、酸化物薄膜トランジスタ(ox-TFT)型核酸センサーの開発を進めている。このセンサーは分子が持つ電荷に起因するゲート電圧ドレイン電流(VgId)特性変化によって分子センシングを行っている。しかし、ox-TFT 型センサーの VgId 特性は、溶液のわずかな環境変化にも影響をうけ、時にバッファの入れ替えでさえ VgId 特性が変化する不安定さの課題があった。本研究では、機械学習を利用することで精度の高い核酸検出判定が可能になるのではないかと仮説を立て検証を進めた。今回、ox-TFT 型核酸センサーの教師あり学習を用いた判定結果について報告する。

【実験および解析】イーグルガラス基板に、酸化物半導体チャネル層として酸化インジウムを溶液法によって成膜した。ソースドレイン電極は酸化インジウムスズ/プラチナ電極を積層し、ox-TFT 型センサーを作製した。パターンニングはフォトリソグラフィによって行った。3-Glycidyloxypropyltrimethoxysilane とアミン基修飾 DNA を用いて、ox-TFT 上に DNA を修飾した。標的試料は合成 DNA と生体試料として大腸菌とした。本研究では、機械学習の教師あり学習を用いて検証した。正答率(Accuracy)を評価することで検出判定を行った。データの標準化、主成分分析(PCA)による次元圧縮、データセットの選定、各種教師あり学習手法を検討した。データの不足や不均衡ならびに質的なバラつきを補うため、SMOTE 法および Tomek Links 法の適用も行った。

【結果】様々な教師あり学習の手法の検討の結果、ox-TFT 型センサーにおいては、ランダムフォレスト(RF)法が適していることがわかった。合成 DNA、大腸菌の検出判定において、適切な手法を組み合わせることで、95%を超える正答率を達成した。また、SMOTE+Tomek Links 法は正答率を向上させる効果があることがわかった。本発表ではこれらの詳細について報告する。

参考文献

- (1) 廣瀬大亮, 趙 耘枢, 高村 禪, 化学とマイクロ・ナノシステム学会会誌 23, 2, p31 (2024)
- (2) W. Wu, M. Biyani, D. Hirose, Y. Takamura, Biosensors, Vol. 13, p. 765. (2023)

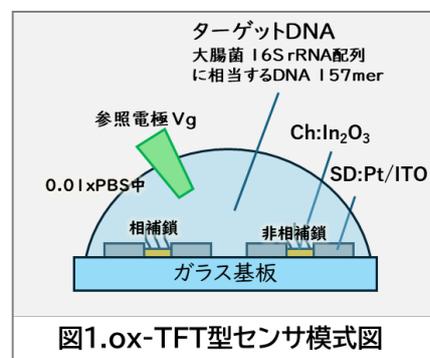


図1.ox-TFT型センサ模式図

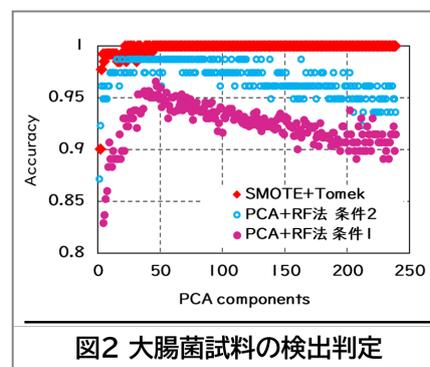


図2 大腸菌試料の検出判定

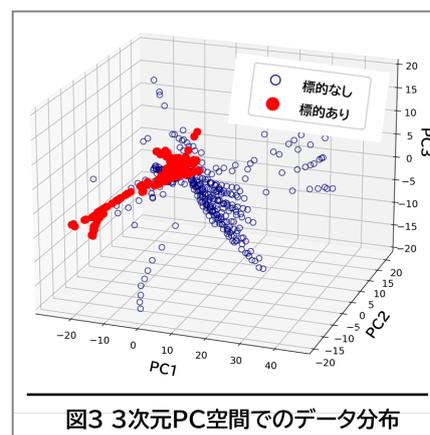


図3 3次元PC空間でのデータ分布

グラフェン FET センサの実用化に向けた取り組み Study for Practical Application of Graphene FET Sensor

村田製作所¹, 阪大産研², 木村 雅彦¹, 松本 和彦²

Murata Manufacturing Co., Ltd.¹, SANKEN, Osaka Univ.²,

Masahiko Kimura¹, Kazuhiko Matsumoto²

E-mail: mkimura@murata.com

我々のグループでは、グラフェンを用いた高感度 FET(Field Effect Transistor)バイオセンサの開発に取り組んでいる。グラフェンは厚み方向が炭素原子一層からなる 2 次元材料であり、表面に広がる π 電子層の寄与により、外部の刺激に極めて敏感な性質を持つ。このグラフェンを FET チャネルに用いることで、ウイルスの高感度センシングに対して大きな可能を感じている。また、FET の電気信号としてウイルスの存在を検知できることから、PC やスマートフォンなどの各種通信デバイスとの親和性が高く、広範な用途への展開が期待される。

このセンサは FET からなる半導体エレクトロニクスの部分と、糖鎖や抗体などの生体高分子を用いるバイオテクノロジーの要素が融合した、異分野技術の融合によるデバイスとなる。これまでの取り組みの中で、各々の基本動作やその組み合わせの良否など、解明を進めてきた。基本的なデバイスの動作としては、目指す構造や必要な技術要件などが明らかになりつつある。また、社会実装に向けたビジネス面でのアプローチについても構想を進めている。一方で、センサとして広く用いられる一般製品に仕立てるためにはデバイスの基本動作のみならず、検体に含まれる不純物や物理的、化学的な外部要因の変動に左右されず動作する信頼性、また、大量生産品としてのばらつき低減など、工業的な視点での安定性の担保が重要となる。しかしながら、こういった、半導体エレクトロニクスとバイオテクノロジーの融合はまだ先例が少なく、工業製品としての開発に関する知見やノウハウは乏しい。現在、我々はそういった製品としての安定性に関連する研究に取り組んでいるが課題は多く、改めて当該分野の基本的メカニズムの理解が十分でないと感じている次第である。

本講演では、デバイスの安定動作や信号のばらつきなどに関してのこれまで我々が調べてきたこと、デバイス構成に関して改善を施してきたことなどをレビューする。また、現在、直面している課題についても触れたい。