

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20534

研究課題名（和文）ナノスケールの吸着現象に着目した神経伝達物質の超高感度電気化学的検出

研究課題名（英文）Ultra-sensitive electrochemical detection of neurotransmitters based on nanoscale adsorption phenomena

研究代表者

大野 雄高（Ohno, Yutaka）

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号：10324451

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000円

研究成果の概要（和文）：カーボンナノチューブ電気化学センサを用いた神経伝達物質の検出技術について、カーボンナノチューブ表面や金属ナノ粒子、フェニルボロン酸などの分子との相互作用を利用し、感度と選択性の向上を目指した。ドーパミンの検出において、金ナノ粒子の修飾によって感度が向上すること、フェニルボロン酸との反応性生物を検出することによりアスコルビン酸存在下においても選択的検出が可能であることを見出した。さらに、センサ内において機械学習を実現することを目的に、カーボンナノチューブ電気化学センサを用いてリザーバーコンピューティング動作を実証するとともに、表面修飾により計算性能の向上が可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
ストレスに起因する様々なリスクの管理は極めて重要な社会課題であり、簡便かつ高精度な計測に基づくストレス評価技術の確立することが求められている。特に本研究で扱ったドーパミンはストレスマーカーとして知られており、本研究の成果はこれを高感度かつ選択的に検出する技術である。将来的には、唾液からその場で瞬時にストレスを評価できる技術の実現につながるものである。また、本研究で実証した電気化学的なりザーバーコンピューティングはセンサ内において機械学習を実現するものであり、センサにおいてバイオマーカの検出のみならず、ストレスや病気などの診断を可能とする技術の実現に繋がるものである。

研究成果の概要（英文）：The detection of neurotransmitters using carbon nanotube electrochemical sensors was studied towards improvements in sensitivity and selectivity by utilizing the interaction with carbon nanotube surface, metal nanoparticles, and molecules such as phenylboronic acid. In the detection of dopamine, we found out that the sensitivity was improved by modification with gold nanoparticles and that selective detection was possible even in the presence of ascorbic acid by detecting reaction products with phenylboronic acid. Furthermore, for the purpose of realizing machine learning in the sensor, we demonstrated reservoir computing operation using carbon nanotube electrochemical sensors and found out that surface modification can improve the computational performance.

研究分野：ナノ材料デバイス

キーワード：カーボンナノチューブ 電気化学センサ 神経伝達物質 リザーバーコンピューティング 物理リザーバーフレキシブルエレクトロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

電気化学的センサはその場で迅速に病気の診断・治療（いわゆるポイント・オブ・ケア）を実現するためのツールとして期待されている。最近、電気化学センサを用いて、例えば1個のインフルエンザウィルスを検出することが可能となるなど、その進展は目覚ましく、診断・医療技術を飛躍的に発展させる技術として期待されている。診断と治療に時間を必要とする精神性の疾患の診断・治療や、うつ病の予防等において重要なストレス等の精神的状態の把握においても定量性の観点から電気化学センサによる診断が注目されている。特に、ストレスはうつ病などの心疾患のみならず、生活習慣病などのリスクファクターであり、その評価・管理は極めて重要な社会課題であり、簡便かつ高精度な計測に基づくストレス評価技術を確立することが求められている。“直接的”なストレスマーカーとして神経伝達物質であるドーパミンやアドレナリン、ノルアドレナリンといったカテコールアミン類が挙げられる。これらを直接計測できれば、原因となる感情を含めた高度なストレス評価が可能となると考えている。ストレス評価の社会普及のためには、非侵襲で簡便かつ迅速、低コストで神経伝達物質を計測できる電気化学的手法を開発することが必須である。

## 2. 研究の目的

本研究では、カーボンナノチューブ等のナノ物質と神経伝達物質との相互作用を利用し、神経伝達物質の超高感度・選択的検出手法の創出を目指し、神経伝達物質のナノスケールでの相互作用の解明を進めるとともに、定量性や選択性の向上や阻害物質の影響を明らかにすることにより、神経伝達物質の電気化学的検出技術の高度化を進めることを目的とした。さらに、センサにおける電気化学的現象を用いて機械学習を行う、いわば *in-sensor machine learning* の実現を目指し、カーボンナノチューブ電気化学センサを用いてニューラルネットワークコンピューティングの一種であるリザーバーコンピューティングを実現するという挑戦的な研究も実施した。

## 3. 研究の方法

上記目的を踏まえ、次の研究項目を実施した。

### (1) 神経伝達物質の超高感度・選択的検出

- a. 清浄な表面をもつカーボンナノチューブ薄膜センサの作製
- b. 金属ナノ粒子修飾によるドーパミンの選択的検出
- c. カーボンナノチューブへのドーパミンの吸着と高感度検出の試み
- d. フェニルボロン酸との結合を用いたドーパミンの選択的検出

### (2) カーボンナノチューブ電気化学センサにおけるリザーバーコンピューティング

- e. 電気化学リザーバー測定系の構築
- f. リザーバー性能の評価とカーボンナノチューブ表面の修飾の効果
- g. 相関関数を用いた高次元性の評価
- h. 血糖値変化の予測の実証

## 4. 研究成果

### (1) 神経伝達物質の超高感度・選択的検出

はじめに、浮遊触媒気相成長(浮遊触媒化学気相成長)法によって成膜した清浄な表面を持つ

カーボンナノチューブ薄膜 (図 1) を用いてカーボンナノチューブ電極 (図 2) の作製を行った。カーボンナノチューブの結晶性の指標として用いられるラマンスペクトルの G/D 比は 93 であり、極めて結晶性が高いカーボンナノチューブが得られていることを確認している。素子作製プロセスにおいてカーボンナノチューブ薄膜が汚染されるのを防ぐため、保護膜として  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (40 nm) を成膜し、最後にウェットエッチングして除去し、カーボンナノチューブ電極を露出させた。

金属ナノ粒子は電気化学的な触媒作用を持っており、電気化学センサを金属ナノ粒子で修飾することにより、電極表面の電子交換速度が向上することが知られている。本研究では、優れた柔軟性をもつカーボンナノチューブ薄膜電極において、金属ナノ粒子を修飾し、その効果を調べた。高品質のカーボンナノチューブ表面は不活性であり、金属ナノ粒子を修飾する上で、その核生成が課題となった。はじめに、カーボンナノチューブ電極を 2 M の硫酸中において、電気化学的な酸化を行い、官能基を導入することによって、電気化学的に活性な反応サイトを形成した。その結果、電気化学的手法によりカーボンナノチューブ薄膜表面に金ナノ粒子を修飾できること、および修飾時間の増加に伴って金ナノ粒子の粒径が大きくなることを明らかにした (図 3)。金ナノ粒子を修飾したカーボンナノチューブ電極を使用し、100  $\mu\text{M}$  のドーパミン溶液のサイクリックボルタンメトリ (CV) と微分パルスボルタンメトリ (DPV) の測定を行った。サイクリックボルタモグラムにおける酸化ピークと還元ピークの電位差 (ピークセパレーション) は電子交換速度の指標となるが、修飾時間の増加に伴いピークセパレーションは小さく、金ナノ粒子の修飾による電子交換速度の向上を確認した。これは、DPV のピーク電流が修飾時間とともに増加したことから確認した。金ナノ粒子の粒径が大きくなることで電極特性が向上しており、表面積の増加が触媒作用の大きな要因であると考えられる。また、硫酸による官能基修飾のみを行ったカーボンナノチューブ電極と金ナノ粒子を修飾した電極を使ってドーパミンの DPV を測定したところ、金ナノ粒子の修飾によって検出感度がおよそ 30% 向上した (図 4)。

体液中のドーパミンを電気化学的に検出する場合、同様の酸化還元電位をもつアスコルビン酸が干渉することが知られている。ドーパミンとボロン酸が反応し結合したボロン酸エステル

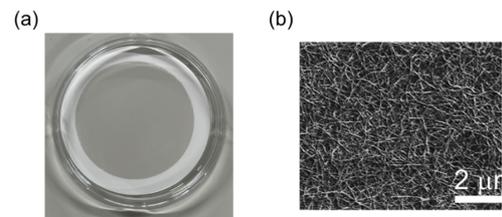


図 1. (a) メンブレンフィルタ上に成膜したカーボンナノチューブ薄膜 (b) カーボンナノチューブ薄膜の SEM 像

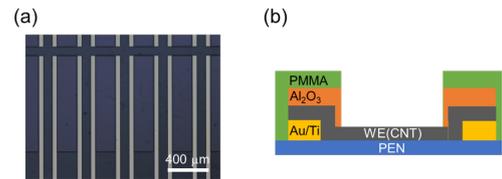


図 2. (a) 作製したカーボンナノチューブ電極アレイの光学顕微鏡像 (b) 作製したカーボンナノチューブ電極の断面模式図

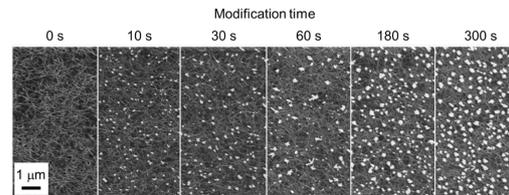


図 3. 金ナノ粒子を修飾したカーボンナノチューブ電極の SEM 像

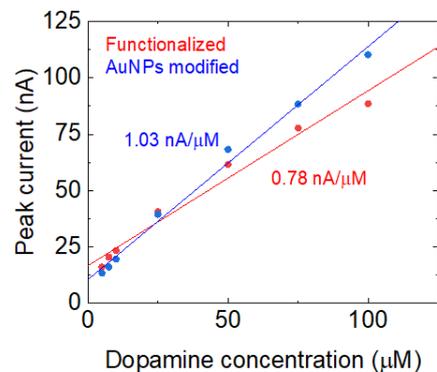


図 4. 官能基修飾電極と金ナノ粒子 (AuNPs) 修飾電極の DPV におけるピーク電流値のドーパミン濃度依存性

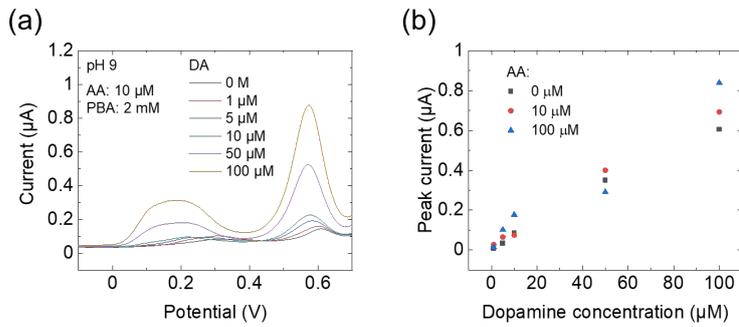


図 5. (a) ドーパミン、アスコルビン酸、フェニルボロン酸混合溶液における DPV の測定結果 (b) ピーク電流値のドーパミン濃度依存性

はドーパミンと異なる酸化還元電位をもつことが期待され、アスコルビン酸との選択性の向上が期待できる。本研究では、ドーパミン溶液にフェニルボロン酸を加え、アスコルビン酸存在下におけるドーパミンの選択的検出を試みた。図 5(a) の DPV において、0.6 V 付近のピーク電流はドーパミン濃度に依存して増加し、反応性生物の参加によって考えられる。混合するアスコルビン酸の濃度を 0~100 µM のように変化させ、0.6 V 付近のピーク電流のドーパミン濃度依存性を測定した (図 5(b))。いずれのアスコルビン酸濃度においても、ピーク電流はドーパミン濃度に従って単調に増加し、アスコルビン酸濃度が 10 倍違う場合においても、ピーク電流値の変動は 20~30% (主に測定ばらつきに起因する) であり、アスコルビン酸存在下においてドーパミンを選択的に検出していることを示している。

## (2) カーボンナノチューブ電気化学センサにおけるリザーバーコンピューティング

リザーバーコンピューティングはニューラルネットワークコンピューティングの一種であり、単純な学習プロセスにより出力層の結合重みのみを更新するため、計算量が少なく高速な機械学習手法であり、心電図や音声などの時系列データを扱うのに適している。非線形性、高次元性、短期記憶という 3 つの特性もつ物理システムはリザーバーとして有用であり、IoT センサのエッジ処理デバイスとしての活用が期待されている。物質の酸化還元反応を利用した電気化学センサは電気二重層の充放電や、電極-電解質液界面での酸化還元種の拡散層の形成により、短期記憶や非線形性を持っており、センシングのみならず物理的リザーバーとしても利用できる可能性があり、センサー自体に機械学習の機能を実装できる可能性がある。

本研究では、カーボンナ

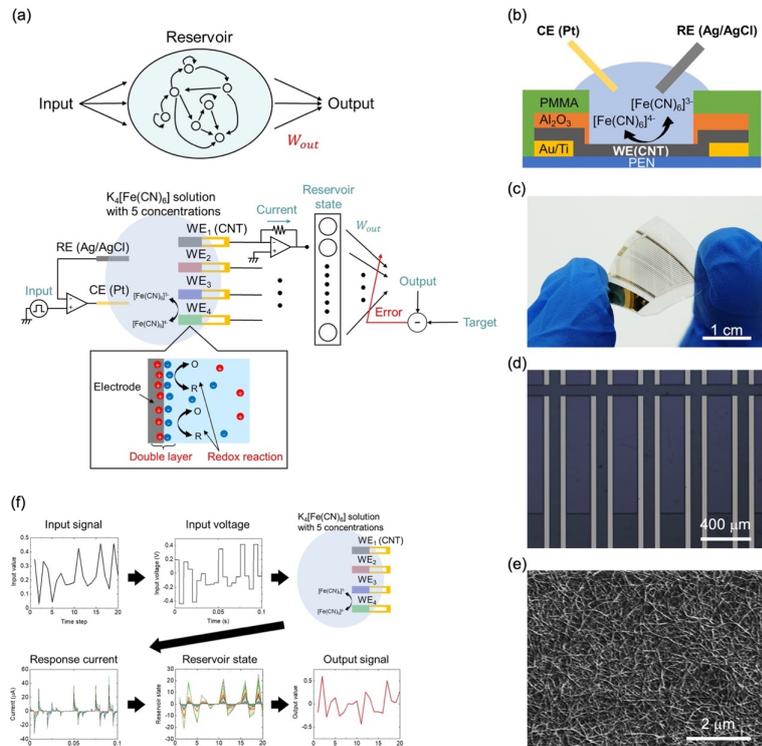


図 6. カーボンナノチューブ電気化学センサを用いて構築したリザーバーコンピューティングシステム。

ノチューブ薄膜電極を用いたセンサにおける電気化学リザーバーとしての機能の実証を目指した。カーボンナノチューブ薄膜表面を電気化学的に修飾することにより、リザーバーの高次元化と予測性能の向上を試みた。最終的には、1型糖尿病患者の血糖値データを用いた血糖値の時系列データ予測の結果を実証した。

本研究で構築した電気化学リザーバーを図6に示す。電気化学リザーバーは作用電極(WE)としてのカーボンナノチューブ薄膜、Ag/AgCl参照電極(RE)、Pt対極(CE)、電解質溶液としての $K_4[Fe(CN)_6]$ 溶液を

によって構成された。4つの異なる条件で修飾したカーボンナノチューブ電極(WE<sub>1</sub>-WE<sub>4</sub>)と5つの異なる濃度の $K_4[Fe(CN)_6]$ 溶液を用い、リザーバーの出力に多様性をもたせて高次元化を実現した。

図7はリザーバーの(a)記憶容量と(b)NARMA2モデル( $m = 2$ )における時系列予測タスクの出力波形である。記憶容量は電極の修飾条件による変化は小さい。NARMAタスクにおいては、電極の修飾電圧が同じものと異なるもののどちらの出力信号も目標出力をよく再現している。NMSEは電極の修飾電圧が同じものが0.448、異なるものが0.368であり、電極の修飾電圧が異なるもののほうが同じものに比べて、高い予測精度が得られている。相関関数を用いた高次元性の評価方法を考案し、電極表面の修飾によってリザーバーの高次元化が可能であることを明らかにした。

最後に、本研究で構成したカーボンナノチューブ電極の修飾電圧が異なるリザーバーを用いて血糖値の予測を行った(図8)。Diabetes Research in Children Network(DirecNet)より一型糖尿病患者の血糖値を5分毎に測定した時系列データを取得した。これを入力信号 $u(n)$ とし、目標出力 $d(n)$ は入力信号を $k$ ステップだけ進めた信号 $d(n) = u(n+k)$ とした。つまり、 $k$ ステップ先の血糖値を予測した。図15(a)はリザーバーを用いて3ステップ先(15分先)の血糖値を予測した出力信号と目標出力を示している。ある程度的一致が見られ、物理リザーバーコンピュータを用いた血糖値の予測を初めて実証したものである。RMSEは47.0 mg/dlであった。図15(b)は予測長に対するRMSEである。予測長が長くなるほど予測精度は悪くなる。血糖値は食事やインスリン注射によって生ずる急峻な血糖値の変化の予測はできておらず、正確な予測にはそれらの情報もリザーバーへの入力に加える必要があると考えられ、今後の課題となる。

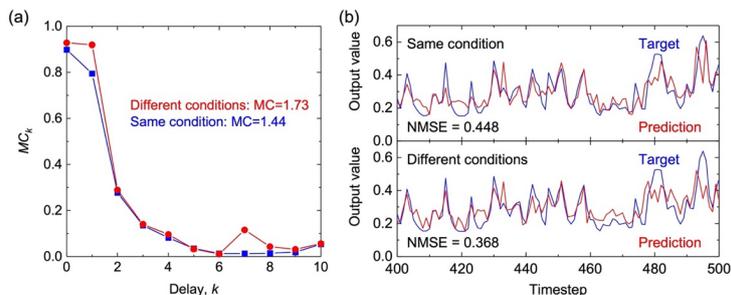


図7. カーボンナノチューブ電気化学リザーバーの性能評価. (a) 同じ条件と異なる条件で修飾した場合の決定係数の比較、(b) (上) は同じ条件、(下) は異なる条件で修飾した場合のNARMA2モデルによる時系列データ予測タスク

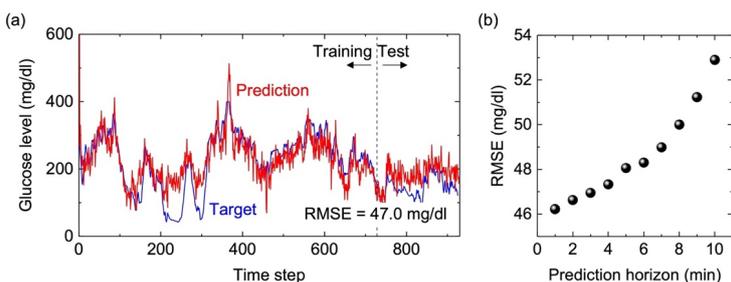


図8. 血糖値予測の結果 (a) 目標出力と予測信号 (b) 予測長に対する予測誤差

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sun Yun, Li Pengpeng, Kauppinen Esko I., Sun Dong-Ming, Ohno Yutaka	4. 巻 12
2. 論文標題 Key factors for ultra-high on/off ratio thin-film transistors using as-grown carbon nanotube networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 16291 ~ 16295
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/D2RA02088B	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tan Fu Wen, Hirotsu Jun, Kishimoto Shigeru, Ohno Yutaka	4. 巻 61
2. 論文標題 PMMA/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> bilayer passivation for suppression of hysteresis in chemically doped carbon nanotube thin-film transistors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 034002 ~ 034002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac5264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Oshima Hisayoshi, Iwase Katsunori, Ohno Yutaka	4. 巻 61
2. 論文標題 In situ monitoring of the electrical property of carbon nanotube thin film in floating catalyst chemical vapor deposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 038002 ~ 038002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac4a5e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsunaga Masahiro, Hirotsu Jun, Ohno Yutaka	4. 巻 15
2. 論文標題 In-plane dual-electrode triboelectric nanogenerator based on differential surface functionalization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 027006 ~ 027006
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac4d07	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Momaya Divyang, Ohno Yutaka	4. 巻 60
2. 論文標題 Effect of electrochemical functionalization of single-walled carbon nanotube electrodes in flexible enzymatic biofuel cells	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 068002 ~ 068002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac0261	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawaguchi Atsushi, Uchiyama Haruki, Matsunaga Masahiro, Ohno Yutaka	4. 巻 14
2. 論文標題 Simple and highly efficient intermittent operation circuit for triboelectric nanogenerator toward wearable electronic applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 057001 ~ 057001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 F. W. Tan, J. Hirotsu, Y. Nonoguchi, S. Kishimoto, H. Katsura, and Y. Ohno	4. 巻 14
2. 論文標題 Low-voltage carbon nanotube complementary electronics using chemical doping to tune the threshold voltage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Express	6. 最初と最後の頁 45002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abe8aa	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Sulciute, K. Nishimura, E. Gilshtein, F. Cesano, G. Viscardi, A. G. Nasibulin, Y. Ohno, and S. Rackauskas	4. 巻 125
2. 論文標題 ZnO Nanostructures Application in Electrochemistry: Influence of Morphology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. C	6. 最初と最後の頁 1472-1482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c08459	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Nishio, J. Hirotsu, S. Kishimoto, H. Kataura, and Y. Ohno	4. 巻 6
2. 論文標題 Low-voltage operable and strain-insensitive stretchable all carbon nanotube integrated circuits with local strain suppression layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Adv. Electron. Mater.	6. 最初と最後の頁 2000674
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aelm.202000674	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計34件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 26件)

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon nanotube-based flexible electronics: From transistors to circuits and neuromorphic computing
3. 学会等名 2.5D Materials; NANOCARBON seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno, T. Watanabe, K. Tatsumi, A. Kawaguchi, A. S. Aji, and H. Uchiyama
2. 発表標題 Carbon nanotube-based flexible memory devices for neuromorphic computing
3. 学会等名 2022 MRS Fall Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Shingu, T. Watanabe, and Y. Ohno
2. 発表標題 Physical reservoir computing using electrochemical reaction at carbon nanotube electrodes
3. 学会等名 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Ohno, A. S. Aji, T. Watanabe, A. Kawaguchi and H. Uchiyama
2 . 発表標題 Carbon nanotube-based reservoirs for neural network computing
3 . 学会等名 12th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Watanabe, H. Uchiyama and Y. Ohno
2 . 発表標題 Reservoir computing in carbon nanotube thin-film transistors
3 . 学会等名 12th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 N. Mitsuzawa, T. Kashima, H. Kataura and Y. Ohno
2 . 発表標題 Design and Fabrication of low-power flexible sensing circuits based on carbon nanotube
3 . 学会等名 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Shingu, T. Watanabe, and Y. Ohno
2 . 発表標題 Reservoir computing based on electrochemical reaction at carbon nanotube electrode
3 . 学会等名 The 63rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Watanabe, H. Uchiyama and Y. Ohno
2. 発表標題 Physical reservoir computing using multi-terminal carbon nanotube thin film transistors
3. 学会等名 The 63rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon nanotube analog-digital mixed-signal integrated circuits for epidermal electronics
3. 学会等名 The 22nd International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno, T. Kashima, and M. Matsunaga
2. 発表標題 Stretchable and transparent triboelectric nanogenerators based on carbon nanotubes for self-powered wearable devices
3. 学会等名 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon Nanotube Thin-Film Devices for Fully-Flexible Electronics
3. 学会等名 241st ESC Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Low-Voltage Operable, Flexible Analog/Digital Mixed-Signal Integrated Circuits Based on Carbon Nanotubes
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブ薄膜トランジスタへのスマネン吸着とその効果
3. 学会等名 ナノカーボン研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブが拓く半導体エレクトロニクス：いよいよ始まる実用化と将来展望
3. 学会等名 研究会「1次元、2次元物質科学の展望と課題」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 半導体カーボンナノチューブエレクトロニクスの最新動向
3. 学会等名 第49回炭素材料学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 ナノカーボンの次世代エレクトロニクスへの応用展開
3. 学会等名 2次元材料に関する第5回Koine Meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Design and fabrication of flexible analog/digital mixed-signal circuits based on carbon nanotube thin film transistors
3. 学会等名 11th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy and Environment (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kashima and Y. Ohno
2. 発表標題 Design and fabrication of flexible analog/digital mixed-signal circuits based on carbon nanotube thin film transistors
3. 学会等名 The International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon nanotube technologies for flexible electronics
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon nanotube-based flexible electronics
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kashima and Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon Nanotube-based Analog/Digital Mixed-signal Integrated Circuits for Flexible Sensors
3. 学会等名 The 11th International Conference on Flexible and Printed Electronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. S. Aji, Y. Ohno
2. 発表標題 CNT/HfO <sub>2</sub> /CNT memristor with high on-off ratio for neuromorphic computing
3. 学会等名 The 60th Anniversary Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Uchiyama, S. Kishimoto, J. Ishi-Hayase, and Y. Ohno
2. 発表標題 Self-aligned hybrid quantum structure of diamond nitrogen-vacancy center and carbon nanotube for electrical control of quantum states
3. 学会等名 The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Ishimaru, T. Kashima, H. Kataura, Y. Ohno
2 . 発表標題 Scattering parameter analysis of self-aligned flexible carbon nanotube thin-film transistors??
3 . 学会等名 The 60th Anniversary Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Funayama, H. Tanaka, J. Hirotsu, K. Shimaoka, Y. Ohno, Y. Tadokoro
2 . 発表標題 Linearization of output from nanoelectromechanical systems by optimally combined high-order harmonics
3 . 学会等名 The 34th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical systems (MEMS2021) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 A. Kawaguchi, M. Matsunaga, H. Uchiyama, J. Hirotsu, Y. Ohno
2 . 発表標題 Simple and highly efficient intermittent operation circuit for triboelectric nanogenerator
3 . 学会等名 The 59th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Y. Ohno
2 . 発表標題 MoS2 Nanogenerators: Harvesting Energy from Droplet Movement
3 . 学会等名 AAPPSS Bulletin Lecture Series 2020 ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Energy Harvesting Technologies Based on Low-Dimensional Materials for Self-Powered Sensing Devices
3. 学会等名 2020 MRS spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Endo, H. Uchiyama, Y. Ohno, J. Hirotsu
2. 発表標題 Temperature dependence of Raman G-band shift in defective single-walled carbon nanotubes
3. 学会等名 The 59th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Ishimaru, T. Kashima, H. Kataura, Y. Ohno
2. 発表標題 Operation speed enhancement in carbon nanotube thin film transistors by self-aligned process
3. 学会等名 The 59th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブ薄膜を用いたエネルギーハーベスティングデバイス
3. 学会等名 システムナノ技術に関する特別研究専門委員会 第1回研究会「科学技術イノベーションを創成する先進システムナノ技術」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブに基づく柔軟なアナログ/デジタル集積回路
3. 学会等名 第84回半導体・集積回路技術シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石丸紗椰，鹿嶋大雅，片浦弘道，大野雄高
2. 発表標題 自己整合プロセスにより作製したカーボンナノチューブ薄膜トランジスタの動作速度評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブの半導体応用
3. 学会等名 FNTGウェビナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 演算増幅回路	発明者 大野雄高，鹿嶋大雅	権利者 名古屋大学
産業財産権の種類、番号 特許、2020-091725	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	新宮 太郎  (Shingu Taro)	名古屋大学・工学研究科・大学院生  (13901)	
研究協力者	牛山 拓也  (Ushiyama Takuya)	名古屋大学・工学研究科・大学院生  (13901)	
研究協力者	内山 晴貴  (Uchiyama Haruki)	名古屋大学・工学研究科・助教  (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関