

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02204

研究課題名（和文）化学的に機能化された架橋グラフェンによるマルチモーダル分子認識センサ

研究課題名（英文）Multimodal molecular recognition sensor based on chemically functionalized suspended graphene

研究代表者

高橋 一浩（Takahashi, Kazuhiro）

豊橋技術科学大学・次世代半導体・センサ科学研究所・教授

研究者番号：90549346

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では化学的に機能化されたグラフェンを含む自立ナノシートを製し、特異吸着させた分子によって印加される応力（ひずみ）と分子質量を同時に計測するマルチモーダル分子認識センサの開発を行った。表面応力測定によりCOVID-19の重症化を予測するバイオマーカーのマルチ検出に、共振測定によりインフルエンザウイルスとCOVID-19の検出に成功した。また、CMOS検出回路とセンサの一体化を行い、簡易診断センサシステムの実現可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本提案では、分子を特異吸着する自立膜にナノ膜厚のシートを使用することによりセンサ感度を向上し、ICチップ上で高感度分子検出可能な、可搬性・携帯性に優れた計測器を提供する。産業応用としては、家庭での簡易病気診断や、呼気ガスからの病気診断、ppbオーダーの感度が必要とされる地雷や空港での麻薬の検出といった用途が期待できる。また、提案技術は、環境中のウイルスを計測することが可能であることから、今後パンデミックを引き起こすウイルスが発生したときに経済活動を停滞させないためのキーデバイスになると期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed a multimodal molecular recognition sensor using chemically functionalized freestanding nanosheets including graphene, that simultaneously measures the stress (strain) and molecular mass induced by specific bound molecules. We performed multi-detection of biomarkers that predict the severity of COVID-19 by surface stress measurement, and influenza virus and COVID-19 by resonance measurement. In addition, we integrated the CMOS detection circuit and the multimodal sensor, and demonstrated the feasibility of a simple diagnostic sensor system.

研究分野：マイクロマシン工学

キーワード：架橋グラフェン NEMS/MEMS マルチモーダルセンサ 共振器 化学センサ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

グラフェンは非常に高い電子移動度を示し、比表面積が大きく、低質量であるためセンサ材料として有望視されている。たとえばグラフェンの広い表面に接触したたんぱく質やウイルスなどの電荷に鋭敏に反応して導電性を変化することから、電気的に標的を検出する FET 型バイオセンサが盛んに研究されている[JACS 132, 18012 (2010)]。しかし、電気的なバイオセンシングでは測定範囲を制限するデバイ遮蔽の問題があり、生理的な塩濃度下では 10 nm を超える生体分子の検出が困難であった。一方で基板から自立させた架橋グラフェンは基板の光学フォノンによる電子散乱を受けないため、基板に固定されたグラフェンよりも高いキャリア移動度 200000 cm²/Vs を示すことや、薄く軽量の架橋グラフェンを用いることで超高感度な質量センサが期待されており、実際に二酸化炭素 1 分子を架橋グラフェン上で検出した報告がある[Sci Adv 2, e1501518 (2016)]。しかしながら、従来の報告では分子が架橋グラフェン上に物理吸着した際の物性値の変化を測定しており、測定対象の分子を選択的に検出する能力がない。

このような課題を解決するため、本研究室では、基板から自立したグラフェン表面にタンパク質抗体などの分子レセプターで機能化することによって分子認識能を与え、選択性をもった超高感度バイオセンサを初めて実現した。また、架橋グラフェンを共振振動させて、質量変化に伴う固有振動数の変化を定量するセンサシステムの開発に取り組んでいる。また、生体分子同士が反発する力学量をセンサ可動膜に加わる応力として計測するパイオトランスデューサを開発し、バイオマーカー分子 100 ag/mL の検出下限が得られた。

ここで、2 次元材料に分子が吸着したときの振る舞いはバルク材料と異なり、分子の吸着によって振動膜に印加される応力が質量変化とは別に固有振動数の変化を発生してしまう。応力印加に依存して変化するグラフェン共振器の周波数特性は以下の式で表される[Nat. Nanotech. 4, 861 (2009)] :

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T_0 + T}{\rho w}} \quad \left(\begin{array}{ll} L: \text{共振器の長さ} & T_0: \text{ビルトイン応力} \\ w: \text{共振器の幅} & T: \text{印加応力} \\ \rho: \text{グラフェンの密度} & \end{array} \right)$$

ただし、既報論文では真空蒸着による堆積物がグラフェンよりも数倍厚く積層された状態での特性評価であったため、本質的にグラフェン共振センサの質量感度を明らかにした報告はない。2 次元材料における応力印加と質量増加に依存して変化する共振特性の物理モデルを明らかにできれば、各パラメータの定量が可能になり、超高感度で正確な分子検出が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、化学的に機能化されたグラフェンをはじめとするナノシートの架橋構造を作製し、特異吸着させた分子によって印加される応力（ひずみ）と分子質量を同時に計測するマルチモーダル分子認識センサの開発を行う(図 1)。架橋構造上に吸着させた分子間の相互作用により印加される応力と分子質量は、それぞ

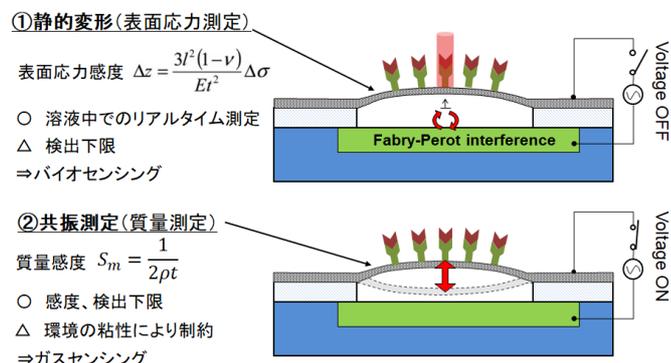


図 1 レセプター修飾架橋ナノシートを用いたマルチモーダル分子認識センサ

れ光干渉型表面応力測定と固有振動数測定により解析を行う。さらに、自立ナノシートを CMOS

回路上に集積化することにより、チップ上で吸着分子による力学応答を検出するセンサシステムを開発する。以上の課題遂行による成果物として、ウイルス、タンパク質マーカーの液中リアルタイム計測や、におい分子等のマルチパーパス分子測定を実現する。

3. 研究の方法

センサの要素技術として、自立膜上のバイオインターフェースの検討、ひずみ印加構造による共振特性の向上、CMOS 検出回路との一体化デバイスによるオンチップ分子計測に取り組み、各種要素を追加したときのセンサ応答を評価した。

応力（分子間相互作用） 質量マルチモーダルセンシング

グラフェンやナノシートでキャピティを封止したドラム構造を作製し、自立ナノシート上に特異吸着した生体分子間の相互作用力と分子質量を同時に検出するセンサの試作を行った。すなわち、同一のセンシングエリア内において分子の特異吸着時の静的なたわみを光透過率で計測し、外力を印加して自立膜を加振した時の周波数解析から質量を測定するマルチモーダルセンサを作製した。架橋グラフェン表面への化学的修飾は、グラフェンの結晶構造と似た構造を持つピレンの化合物（1-pyrenebutanoic acid succinimidyl ester）を架橋剤として用いた。ピレンのもつ六員環構造は結合によりグラフェンに接着し、末端の官能基を化学的に活性化させることによりレセプターと共有結合で固定化することができる。センサの分子検出能力評価には、タンパク質バイオマーカーの検出には抗体を使用し、ウイルスの検出には糖鎖や DNA アプタマーを使用した。自立膜の共振特性の評価には架橋グラフェンとシリコン基板間の干渉特性の変化を利用したレーザー励起加振法を用いて評価を行った。

ひずみ印加構造の作製

2次元膜の架橋構造は、吸着分子の力学量変化に対して超高感度に応答することができる一方で、質量が小さく慣性力が低いという特徴から環境の粘性に影響を受けやすい。結果として、振動の質を表すクオリティファクターが極端に劣化する。この問題を解決するため、本研究ではグラフェン転写時にひずみを印加するプロセス技術開発を行った。グラフェン転写時の支持膜としてエラストマー素材であるポリスチレン-ポリブタジエン-ポリスチレン(SBS)ナノシートを用いることとした。SBS ナノシートは弾性変形量が従来支持膜として使用していたポリメタクリル酸メチル(PMMA)よりも2桁大きな100%以上のひずみが印加できる。架橋グラフェンへのひずみをラマン分光測定で評価し、built-in strain 値の増大による fQ 積の値をレーザー励起による共振測定により評価した。

検出回路との一体化

外部測定機器を用いずにICチップ上で分子計測を行うことを目指し、CMOS集積回路と架橋グラフェンセンサの集積化を行った。プロトタイプとして試作した0.18 μm CMOS集積回路は、架橋グラフェンの変形による透過率変化を検出するフォトディテクタとソースフォロワ回路から成るAPS回路で構成した。ICP-RIEを用いてパッド開口とフォトダイオード上部の酸化膜をエッチングし、本研究室独自の減圧ドライ転写法を用いてグラフェンを転写し、一体化チップを作製した。

4. 研究成果

(1) 表面応力測定によるCOVID-19重症化予測マーカーのマルチ検出

MEMSマルチモーダルセンサを用いて表面応力測定によりCOVID-19の重症化を予測するバイオマーカー（CCL-17, CXCL-10）のマルチ計測を実施した。センサチップ上にCCL-17抗体とCXCL-10抗体をそれぞれ修飾し、分光光度計でセンサの反射スペクトルを測定し、キャピテ

直径300 μm のセンサ素子の光干渉特性を評価した。CCL-17抗原と CXCL-10抗原溶液の終濃度を1 ng/mL となるように滴下し、干渉ピークのシフト、すなわち可動膜の変形量を観察した。その結果 CCL-17 抗原滴下に対してはCCL-17抗体固定化センサのみのレッドシフトが確認された(図2)。一方、CXCL-10抗体を固定化したセンサでは、CXCL-10抗原に対してのみの応答が確認できたことから分子選択性と重症化予測マーカーのマルチ計測の可能性が示された(図3)。続いて検出下限評価のため、CCL-17 抗原を終濃度1 pg/mL -1 $\mu\text{g/mL}$ の条件で応答を取得し、検出下限は1 pg/mL 以下であることが示唆された。以上の結果より、COVID-19感染初期の段階で重症患者を予測する応用に期待することができる。

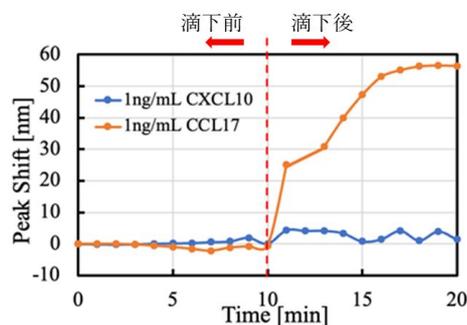


図2 CCL17抗体を修飾したセンサの応答

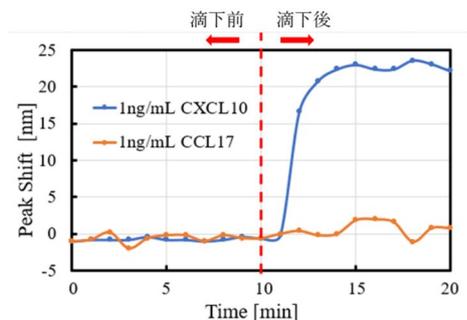


図3 CXCL10抗体を修飾したセンサの応答

(2) 共振質量測定によるウイルス検出

提案するセンサは自立膜表面をレセプターで機能化することにより、様々な分子に対して特異性を持った分子検出を行うことができる。インフルエンザウイルスが細胞に侵入する際のレセプターとして知られる糖鎖をグラフェン表面に修飾して、ウイルスの検出実験を行った。直径4.6 μm のグラフェン共振センサを用いて、糖鎖プローブはポジティブコントロール(陽性)として6'-sialyllactose、ネガティブコントロール(陰性)として3'-sialyllactose を使用してそれぞれ60分間修飾した。生理食塩水中にインフルエンザウイルスの終濃度0.8 HAU(ヘマグルチニンユニット)の試薬にセンサチップを1時間反応させた。インフルエンザウイルスの処理前後に検出された共振周波数の平均値より、インフルエンザウイルスの溶液に処理されたポジティブコントロールの共振周波数は9.20 MHz を示し、ウイルス吸着前の共振周波数である9.91 MHz より710 kHz 程度低周波側にシフトした(図4)。この結果は、6'-sialyllactose に修飾したグラフェン表面上にインフルエンザウイルスが結合し、可動膜の質量の増加による応答が得られていると考えられる。糖鎖修飾されたセンサの選択性の検証として使用したネガティブコントロールの共振周波数も低周波数側に480 kHz シフトしている。この結果は、ポジティブコントロールの結果と230 kHz 程度の有意な差が得られ、インフルエンザウイルスに対して選択的に結合していることが示唆される。ネガティブコントロールの結果が低周波数側にシフトする原因として、インフルエンザウイルスの試薬に含まれている様々なタンパク質が架橋剤に非特異的に吸着した原因が考えられる。糖鎖プローブの修飾後、可動膜表面にブロッキング処理を行うことで非特異吸着を抑制し、特定ターゲットの分子に対する選択性の感度を向上させることが可能であると考え

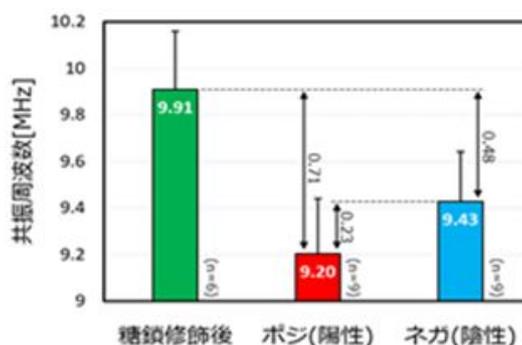


図4 糖鎖機能化グラフェンによるウイルス処理前後の共振周波数変化

られる。

また、COVID-19のスパイクタンパク質を特異的に吸着する特性を持つ DNA アプタマー [Anal.Chem. 92, 9895 (2020)]を用いて、ウイルス検出を実施した。架橋剤とアプタマーの修飾前後においてグラフェン共振センサの共振周波数を測定した結果、未処理の状態では10.9 MHz 付近に見られた周波数は、8.5 MHz 付近に低下する様子が確認された。これは架橋剤とアプタマーが吸着したことによる質量増加が起因しているものと考えられ、表面が機能化できたと判断される。この表面を持つセンサに対して 10^4 copies のウイルスを溶液処理し、乾燥後の共振周波数を測定した結果、7.9 MHz への周波数低下が確認された。これより、COVID-19がアプタマーに吸着したことによるセンサ応答の取得に成功したと考えられる。

(3) グラフェン共振センサの共振特性向上

大気中での共振動作を目的に、グラフェン共振センサの共振特性向上のため、グラフェンに引張歪みを印加した状態で転写を行い、転写時にピルトインひずみを加えるプロセス技術を検討した。架橋された膜の品質評価のため、ラマン分光法による評価を行った。ひずみ印加デバイスの G ピーク2D ピークは、

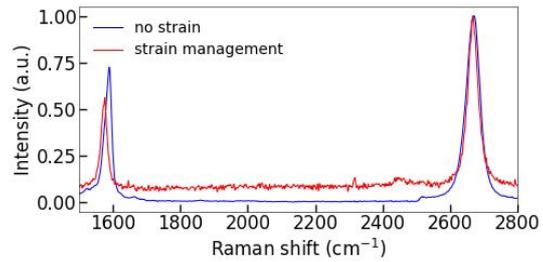


図5 ひずみ印加グラフェンのラマン分光特性

それぞれ -13.7 cm^{-1} 、 -2.2 cm^{-1} の低波数側へのシフトが得られた(図5)。ラマンシフトとひずみの関係が調査された文献値より[ACS Nano 2, 2301 (2008)]、0.56%程度のひずみが印加されたことが示唆された。また、グラフェン共振器の共振測定を行い、ひずみ印加による効果を評価した結果、共振周波数、Q 値ともに62%の向上を確認した。以上の結果より、エラストマー素材によるグラフェンの転写プロセスは共振特性向上に有効であることが示せた。

(4) グラフェン型表面応力センサのオンチップ計測

CMOS 検出回路上にグラフェン型表面応力センサを一体化した試作チップについて、SEM 観察により架橋構造を確認した。また、グラフェン架橋部の反射スペクトルからエアギャップ由来の干渉特性を確認し、検出回路とグラフェン型表面応力センサの一体化に成功した(図6)。また検出回路の動作確認として波長638 nm のレーザーを照射した際の出力を確認したところ、光強度に応じた出力が得られたため、ポストプロセスによる回路への影響はないと判断した。一体化センサを用いて、COVID-19の重症化予測マーカーである CCL-17を検出対象とし、電気的分子検出を行った。測定方法は、従来の反射光を用いた光学的測定と波長638 nm のレーザー光を照射した際の電気的測定を同時に行い、反射率の変化と出力電圧の変化を評価した。638 nm の反射光強度の変化と出力電圧の変化を確認したところ、反射強度1%の減少に対し出力としては120 mV の増加が確認

できた。これは、反射光強度が減少したことで透過光強度が増加し、検出回路に照射される光が増加したためだと考えられる。以上の結果から、バイオマーカー検出に用いられる簡易診断センサシステムの実現可能性を示した。

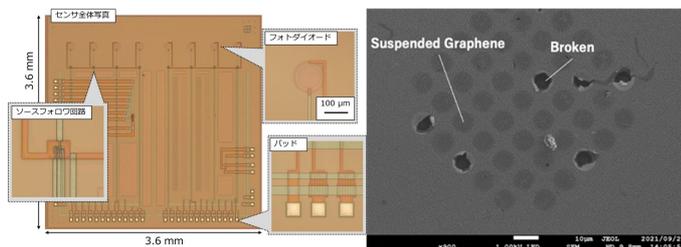


図6 CMOS 検出回路一体型 MEMS グラフェンセンサ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tomoya Maeda, Ryoto Kanamori, Yong-Joon Choi, Miki Taki, Toshihiko Noda, Kazuaki Sawada and Kazuhiro Takahashi	4. 巻 22
2. 論文標題 Bio-Interface on Freestanding Nanosheet of Microelectromechanical System Optical Interferometric Immunosensor for Label-Free Attomolar Prostate Cancer Marker Detection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1356
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22041356	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Toshiaki Takahashi, Yong-Joon Choi, Kazuaki Sawada, Kazuhiro Takahashi	4. 巻 20
2. 論文標題 A ppm Ethanol Sensor Based on Fabry-Perot Interferometric Surface Stress Transducer at Room Temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6868
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20236868	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yong-Joon Choi, Toshiaki Takahashi, Miki Taki, Kazuaki Sawada, Kazuhiro Takahashi	4. 巻 172
2. 論文標題 Label-free attomolar protein detection using a MEMS optical interferometric surface-stress immunosensor with a freestanding PMMA/parylene-C nanosheet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biosensors and Bioelectronics	6. 最初と最後の頁 112778
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.bios.2020.112778	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 3件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 坪内麟太郎, 上坂淳平, 郷 幸佑, 野田俊彦, 澤田和明, 高橋一浩
2. 発表標題 歪み印加手法を用いたキャビティ封止型グラフェン共振器の fQ 積向上にむけた検討
3. 学会等名 令和3年度電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪上 天斗, 高橋 利昌, 崔 容俊, 澤田 和明, 高橋 一浩
2. 発表標題 光干渉型MEMS表面応力センサによる室温エタノールガス検出
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新野 謙, クサイニ アミルン, 上坂 淳平, 古澤 絵里子, 崔 容俊, 合田 達郎, 宮原 裕司, 野田 俊彦, 澤田 和明, 高橋 一浩
2. 発表標題 グラフェン共振センサによる飛沫中のインフルエンザウイルスの検出
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken Arano, Amirun Ammar Bin Kusaini, Eriko Furusawa, Junpei Uesaka, Yong-Joon Choi, Toshihiko Noda, Tatsuro Goda, Yuji Miyahara, Kazuaki Sawada, and Kazuhiro Takahashi
2. 発表標題 A suspended graphene-based resonant mass sensor for label-free virus detection
3. 学会等名 2021 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前田 智也, 金森 亮人, 崔 容俊, 瀧 美樹, 野田 俊彦, 澤田 和明, 高橋 一浩
2. 発表標題 オンチップアトモル免疫センシングに向けた光干渉型表面応力センサの製作
3. 学会等名 第 38 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新野 謙, 上坂 淳平, 坪内 麟太郎, 金森 亮人, 喜種 慎, 古澤 絵里子, 飛沢 健, 赤井 大輔, 野田 佳子, 崔 容俊, 澤田 和明, 高橋一浩
2. 発表標題 抗原抗体反応のオンチップ検出に向けたグラフェン型表面応力センサの作製と評価
3. 学会等名 第 38 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪上 天斗, 太田 宏之, 藤枝 俊宜, 崔 容俊, 野田 俊彦, 澤田 和明, 高橋 一浩
2. 発表標題 分子インプリント法を用いた光干渉型MEMS 表面応力センサの作製とレセプター膜のパターニング
3. 学会等名 第 38 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 PHAM VIET KHOA, 坪内 麟太郎, 秋田 一平, 野田 俊彦, 澤田 和明, 高橋 一浩
2. 発表標題 Development of electro-thermal excitation technique for graphene based resonant mass sensor
3. 学会等名 第 38 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪上 天斗, 太田宏之, 藤枝俊宣, 崔 容俊, 野田俊彦, 澤田和明, 高橋 一浩
2. 発表標題 神経伝達物質の多項目検出に向けた 光干渉型 MEMS 表面応力センサの作製と評価
3. 学会等名 第 12 回集積化 MEMS 技術研究ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新野 謙, 上坂淳平, 坪内麟太郎, 金森亮人, 古澤絵里子, 飛沢 健, 赤井大輔, 野田佳子, 崔 容俊, 野田俊彦, 澤田和明, 高橋一浩
2. 発表標題 架橋グラフェンを用いた CMOS-MEMS 表面応力センサの作製と評価
3. 学会等名 第 12 回集積化 MEMS 技術研究ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋一浩
2. 発表標題 MEMS 技術を用いたマルチモーダルバイオセンサ
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新野 謙, 古澤 絵里子, 崔 容俊, 野田 俊彦, 澤田 和明, 合田 達郎, 高橋 一浩
2. 発表標題 グラフェン型共振質量センサによるCOVID-19 の検出
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 喜種慎、澤田和明、高橋一浩
2. 発表標題 レセプター修飾グラフェン共振センサによる高感度質量計測
3. 学会等名 令和二年度電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 利昌、太田 宏之、藤枝 俊宣、澤田 和明、高橋 一浩
2. 発表標題 非標識神経伝達物質検出に向けた分子インプリント法による MEMS 光干渉型表面応力センサの作製
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 金森 亮人、崔 容俊、高橋 利昌、瀧 美樹、澤田 和明、高橋 一浩
2. 発表標題 グルタルアルデヒドによる架橋を用いた光干渉型表面応力バイオセンサの製作
3. 学会等名 第37回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上坂 淳平、喜種 慎、澤田 和明、高橋 一浩
2. 発表標題 歪み印加によるキャビティ封止型グラフェン共振器の共振特性向上
3. 学会等名 第12回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 喜種 慎、澤田和明、高橋一浩
2. 発表標題 架橋グラフェンを用いた超高感度光干渉型マルチモーダルバイオセンサ
3. 学会等名 第12回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 利昌、太田 宏之、藤枝 俊宣、澤田 和明、高橋 一浩
2. 発表標題 神経伝達物質の非標識検出に向けた分子インプリント法によるMEMS光干渉型表面応力センサの作製と評価
3. 学会等名 第12回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上坂淳平、古澤絵里子、崔容俊、野田俊彦、澤田和明、高橋一浩
2. 発表標題 歪み印可による封止型グラフェン質量センサの共振特性向上とウイルスの非標識検出
3. 学会等名 第11回集積化MEMS技術研究ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金森亮人、崔容俊、瀧美樹、野田俊彦、澤田和明、高橋一浩
2. 発表標題 オンチップ非標識バイオセンシングに向けたCMOS MEMS光干渉表面応力センサの製作
3. 学会等名 第11回集積化MEMS技術研究ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新野 謙、上坂淳平、坪内麟太郎、金森亮人、喜種 慎、古澤絵里子、飛沢 健、赤井大輔、野田佳子、チェ ヨンジュン、野田俊彦、澤田和明、高橋一浩
2. 発表標題 オンチップ検出に向けたグラフェン型表面応力センサの作製と評価
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋一浩、合田達郎、古澤絵里子、喜種慎、上坂淳平、宮原裕二、澤田和明
2. 発表標題 グラフェン共振質量センサを用いたウイルスの非標識検出
3. 学会等名 電気学会マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuhiro Takahashi
2. 発表標題 MEMS Optical Interferometric Multimodal Biosensor for Label-Free Molecular Detection
3. 学会等名 The 10th Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2022 (APCOT2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Viet Khoa Pham, Rintaro Tsubouchi, Ippei Akita, Toshihiko Noda, Kazuaki Sawada, and Kazuhiro Takahashi
2. 発表標題 Evaluation of Resonance Characteristics of Drum Graphene Resonator Using Electro-Thermal Excitation Technique
3. 学会等名 The 10th Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2022 (APCOT2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wen En Tan, Tomoya Maeda, Takato Sakagami, Hiromi Suzuki, Yong-Joon Choi, Toshihiko Noda, Kazuaki. Sawada, and Kazuhiro Takahashi
2. 発表標題 Detection of Predictive Biomarker of COVID-19 Severity using A MEMS Optical Interferometric Surface-Stress Immunosensor
3. 学会等名 The 10th Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2022 (APCOT2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 PHAM VIET KHOA, 坪内麟太郎, 秋田一平, 野田俊彦, 澤田和明, 高橋一浩
2. 発表標題 グラフェン共振器のジュール熱加振技術の開発とその共振特性の評価
3. 学会等名 令和4年度電気学会E部門総合研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新野 謙, 古澤 絵里子, 前田 智也, 容俊 崔, 野田 俊彦, 澤田 和明, 高橋 一浩
2. 発表標題 バイオマーカーの オンチップ計測に向けたグラフェン型表面応力センサによる電気的分子検出の検討
3. 学会等名 電気学会マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阪上 天斗, 太田 宏之, 藤枝 俊宣, 崔 容俊, 野田 俊彦, 澤田 和明, 高橋 一浩
2. 発表標題 光干渉型 MEMS 表面応力センサ上への分子インプリント(MIP)膜の成長条件検討
3. 学会等名 電気学会マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takato Sakagami, Toshiaki Takahashi, Hiroyuki Ohta, Toshinori Fujie, Yong-Joon Choi, Toshihiko Noda, Kazuaki Sawada, Kazuhiro Takahashi
2. 発表標題 Investigation of growth conditions of molecularly imprinted films on optical interferometric surface stress sensor for label-free neurotransmitter detection
3. 学会等名 Optical MEMS and Nanophotonics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 一浩
2. 発表標題 集積化MEMS技術によるマルチモーダル分子認識センサ
3. 学会等名 Future Technologies (FT) from Tokushima (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新野 謙, 古澤 絵里子, 前田 智也, 野田 佳子, 赤井 大輔, 飛沢 健, 容俊 崔, 野田 俊彦, 澤田 和明, 高橋 一浩
2. 発表標題 オンチップ検出に向けたグラフェン表面応力センサの検出回路一体化と 腫瘍マーカー検出
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wen En Tan, 古澤 絵里子, 前田 智也, 野田 佳子, 赤井 大輔, 飛沢 健, 容俊 崔, 野田 俊彦, 澤田 和明, 高橋 一浩
2. 発表標題 MEMS光干渉 センサ によるCOVID - 19重症化予測マーカーのマルチ検出
3. 学会等名 第39回「センサ・ マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阪上 天斗, 太田 宏之, 藤枝 俊宣, 崔 容俊, 野田 俊彦, 澤田 和明, 高橋 一浩
2. 発表標題 素子ごとに分子インプリント膜を局所成長した光干渉型 神経伝達物質センサの作製
3. 学会等名 第39回「センサ・ マイクロマシンと応 用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Motoki Kato, Ken Arano, Masato Saito, Toshinori Fujie, Tatsuro Goda, Yong-Joon Choi, Toshihiko Noda, Kazuaki Sawada, and Kazuhiro Takahashi
2. 発表標題 Fabrication of strain-induced graphene resonant mass sensor using elastomer nanosheet for molecular detection
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中本高道監修、高橋一浩他35名共著	4. 発行年 2020年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 289
3. 書名 匂いのセンシング技術	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ウイルスの質量検出センサおよび測定装置	発明者 高橋一浩、合田達郎	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-008329	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>集積化バイオセンサ・MEMSグループホームページ http://int.ee.tut.ac.jp/bio/ TUT Research https://www.tut.ac.jp/english/newsletter/contents/2022/31/features/features.html</p>

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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------