

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15148

研究課題名（和文）高効率薬物スクリーニング系構築のためのアレイ型シリコンチップの開発

研究課題名（英文）Development of array silicon chips for construction of highly efficient drug screening systems

研究代表者

但木 大介（Tadaki, Daisuke）

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：30794226

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、従来の創薬スクリーニング系が抱える測定スループットの課題克服のため、人工膜再構成法に基づく高効率薬物スクリーニングアレイ系の構築に挑んだ。はじめに、1個の微小孔をもつシリコンチップが複数（16）個独立に装着された、複数（16）ウェル型マイクロアレイシステムの開発に成功した。また、反応性イオンエッチング（RIE）に基づくDryプロセスの導入により、高均一な縁部構造を有する複数（16）微小孔搭載型アレイチップの作製法を確立した。その後生じた課題により、本チップに基づくアレイシステムの開発までには至らなかったものの、高効率薬物スクリーニング系構築に向けた多くの重要な基盤技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果である複数ウェル型マイクロアレイシステムの開発、及び複数微小孔搭載型アレイチップの作製法の確立は、いずれも人工膜再構成法に基づくイオンチャンネル機能評価系における測定スループットを飛躍的に向上させるものであり、今後のイオンチャンネル開閉機構解明のための研究を促進させる重要な成果である。また、応用開発の面では、測定スループットの向上により、創薬スクリーニング系における候補薬物の選定効率が上昇することで、新薬開発の加速化につながる画期的な成果だと言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, to overcome a measurement throughput problem of conventional drug screening systems, we attempted to construct a highly efficient drug screening array system based on an artificial cell membrane reconstitution method. First, we successfully developed a multiple (16-) well microarray system consisting of multiple (16) independently mounted silicon (Si) chips with a single microaperture. By using a dry process with reactive ion etching (RIE), we also developed a method to fabricate array Si chips with multiple (16-) microapertures having a uniform edge structure. Although the development of an array system based on these chips was not completed due to new challenges, many important fundamental technologies were established for the construction of a highly efficient drug screening system.

研究分野：ナノマイクロシステム関連

キーワード：微細加工プロセス シリコンチップ マイクロアレイ 脂質二分子膜 人工膜再構成系 hERGチャンネル 無細胞タンパク質合成系 薬物スクリーニング

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

創薬を取り巻く環境は年々厳しさを増しており、1つの医薬品に掛かる開発費用は現在1000億円を上回り、開発期間は平均で10年を超える。この原因は、主に創薬スクリーニング(薬物副作用評価)系が抱える根本的課題にある。それは、測定対象試料の調製(生体細胞の培養)に多くの時間・コストを要することによって引き起こされる測定スループットの低下である。研究代表者は、創薬の主要なターゲットであるイオンチャンネルに基づく薬物副作用センサ系として、生体細胞膜を模した人工の脂質二分子膜からなる人工膜再構成系に着目した。本系は、細胞・試料調製時間の大幅な短縮(数~数10時間)を実現する無細胞タンパク質合成法と結合可能なことが近年見出され、注目を集めている。このため、研究代表者は、本人工膜系に基づく高効率薬物スクリーニング系の構築と機能性検証が、創薬分野に資する重要な基盤技術になると考えた。ここでは、系の高効率化(測定スループット向上)の鍵となるマイクロアレイシステムの開発を行うが、それに先立ち、人工細胞膜の支持体となる半導体シリコン(Si)チップの作製法の構築を実施することとした。人工細胞膜は一般に脆弱であり、安定形成のためには同チップ上における微小孔の構造最適化(縁部形状の均一性の制御)が必須となる。本研究により、主目的である創薬(新薬開発産業)分野への貢献は元より、微細加工・MEMS分野、ひいては、ナノ・バイオ融合分野の開拓・推進につながる多くの重要な知見の獲得が期待される。

### 2. 研究の目的

本研究では、従来の創薬スクリーニング(薬物副作用評価)系が抱える測定スループットの課題克服のため、人工膜再構成法に基づく高効率薬物スクリーニングアレイ系の構築を目指すものである。はじめに、人工細胞膜の支持体となる半導体Siチップの作製法の構築、具体的には、同チップ上における微小孔の構造最適化(縁部形状の均一性の制御)を行い、安定な人工膜系を確立する。その上で、1個の微小孔をもつチップが複数(16)個独立に装着された、複数(16)ウェル型マイクロアレイシステムの開発を行う。また、複数(16)微小孔搭載型アレイチップの作製法の構築を行った上で、本チップに基づくアレイシステムを開発し、薬物副作用試験により機能性を検証する。

### 3. 研究の方法

本研究では、上で示した目的の内容に沿う形で、以下4点の項目に取り組む。

#### (1) 微小孔縁部先端形状の高精度な制御技術の確立

図1に、人工細胞膜の支持体となる半導体Siチップにおける微小孔の作製プロセスを示す。特に、作製工程(10)において、SiO<sub>2</sub>エッチング条件の最適化を実施する。具体的には、エッチング液(フッ化水素酸)の濃度とエッチング浸漬時間を各々調整することにより、図中構造Cの先端形状が再現よく得られるような条件を獲得する。

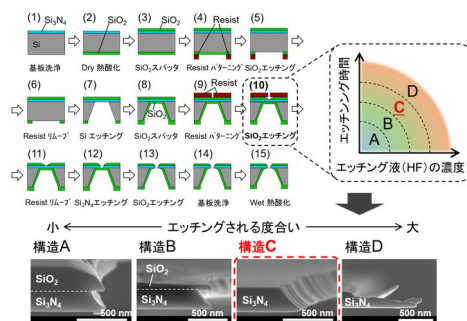


図1. 微小孔の作製プロセスと縁部先端形状の最適化

#### (2) シリコンチップを複数個用いた多チャンネル同時計測の試行(複数ウェル型マイクロアレイシステムの開発と機能性検証)

先端形状が(構造Cに)最適化された微小孔を1つ有する単体チップを複数(16)個、開発された測定用チャンバーにそれぞれ独立に装着し、複数(16)ウェル型マイクロアレイを構成させる。人工脂質二分子膜を、複数ウェルに跨り一律に形成させた状態で、まず個々の人工膜が、チャンネル電流記録に必要な水準の抵抗(>1GΩ)を有しているか調べる。その後、形成膜に対し、イオンチャンネル膜タンパク質の包埋を試みるとともに、各チャンネル電流の複数同時計測を実施する。

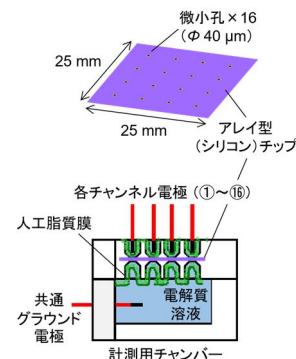


図2. アレイ型チップに基づく薬物スクリーニングシステムの開発

#### (3) 複数微小孔が搭載されたアレイ型チップの作製

(1)で得た最適化条件を用い、アレイ型チップの作製を行う。チップの想定寸法は図2中の通り、1辺25mm角のものであり、微小孔16個が等間隔(4.5mmピッチ)に配置されている。作製

されたチップにおいて、16 個の微小孔がいずれも同様の最適化構造（構造均一性）を有しているか確認を行う。

(4) アレイ型チップを用いた多チャンネル同時計測の試行  
 (アレイ型チップに基づく副作用評価システムの開発と機能性検証)

最後に、開発された測定用チャンバーにアレイ型チップを装着し（図 2）、人工脂質二分子膜の一律形成や、複数チャンネルからの電流の同時計測などの実施を通して、薬物スクリーニング（副作用評価）系としての機能性検証を行う。

4. 研究成果

(1) 微小孔縁部先端形状の高精度な制御技術の確立

本実施項目では、まず当初の予定通り、図 1 中の工程 (10)において、エッチング液であるフッ化水素酸(HF)の濃度・エッチング浸漬時間を変えることにより、得られる微小孔の縁部構造を精査した。しかし、HFの濃度によるエッチング形状の制御が困難であり、これが HF の（層同士を跨ぐ）高い浸透性によるものと考えられた。そこで、緩衝 HF を新たに導入したところ、エッチング速度が緩やかになり、構造の詳細な制御が可能となった。これにより、図 1 中の構造 C を 8 割以上の割合で再現よく得ることに成功した。さらに、緩衝 HF と HF とを複合的に用いる（浸漬時間の前半に前者を、後半に後者をそれぞれ用いる）ことによって、縁部先端の周辺、すなわちマイクロスケール領域に亘るなだらかなテーパ構造を形成させることができ、これが、形成膜の安定性に寄与することを見出した。

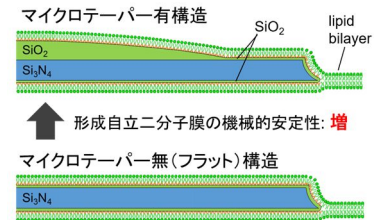


図 3. マイクロテーパ構造

(2) シリコンチップを複数個用いた多チャンネル同時計測の試行  
 (複数ウェル型マイクロアレイシステムの開発と機能性検証)

続いて、(1)により最適化された微小孔（40 μm）を 1 つ有する単体チップを 16 個用いて、図 4 に示すような 16 ウェル型マイクロアレイシステムを開発した。具体的には、個々の単体チップをテフロン樹脂製のホルダーに装着し、チャンバーシステムへと組み込んだ。その後、リン脂質分子が展開された電解質溶液の液面を同時に引き上げること（単分子膜貼り合わせ法）により、16ヶ所の微小孔上への自立型脂質二分子膜の同時形成に成功した。形成膜のうち、全体の 8 割を超える膜がチャンネル電流記録に必要な水準の高抵抗（>1 GΩ）を有していることが分かった。次に、hERG チャンネルと呼ばれる心筋に多く存在するイオンチャンネル膜タンパク質を含むプロテオリポソームを、チャンバー側面から各ウェル内へ添加したところ、複数のウェルからの、シングルチャンネル電流を含む hERG チャンネル電流の並列記録に成功した（図 5、なお図中の赤矢印はマルチチャンネル電流を示す）。さらに、これらのチャンネル電流は、hERG チャンネルの特異的阻害剤である E-4031 の添加によって、いずれも完全に抑制された（図 5）。以上の結果は、hERG チャンネルが本アレイシステムの形成膜へ包埋されたことを示唆するものであり、本研究で開発

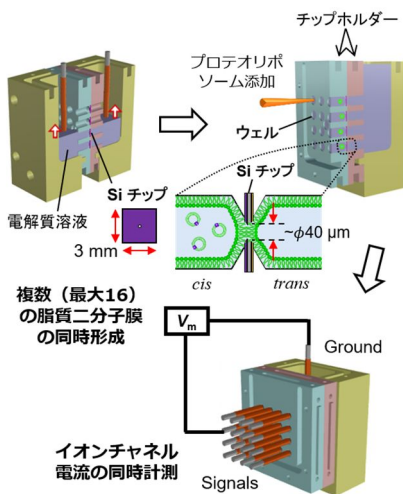


図 4. 16 ウェル型マイクロアレイシステム

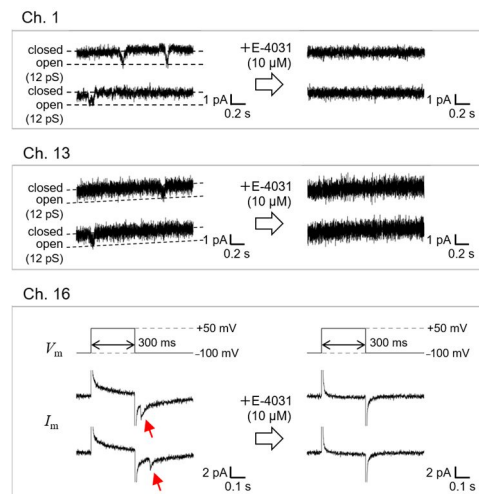


図 5. hERG チャンネルの並列記録



されたアレイ評価系が、今後の高効率薬物スクリーニング系構築のための重要な基盤技術として見出された。

### (3) 複数微小孔が搭載されたアレイ型チップの作製

次に、16 個の微小孔が搭載されたアレイ型チップの作製を行った。ここで、図 1 中の工程(10)でエッチングするための SiO<sub>2</sub> スパッタ膜の面内均一性が、基板面積に依存して低下する(中心から離れるに従い薄くなっていく)ことが判明していたため、大面積なアレイ型チップでは、微小孔の構造均一性の低下が予想された。そこで、反応性イオンエッチング(RIE)に基づく Dry プロセスを導入することにより、新規 Dry・Wet 複合プロセスを構築した(図 6)。図 6 中の工程(7)が、図 1 中の工程(10)に相当する。これにより、構造均一性(形状制御の精度)が飛躍的に向上し、最適化構造を有する微小孔の割合は 9 割近くにまで到達した。結果として、図 7 のような Si ウェハを出発材料とすることにより、1 枚のウェハから 4 枚のアレイ型チップを作製できる高効率プロセスの確立に成功した。本成果は、系の一層の高効率化を目指すための重要な指針となるものである。

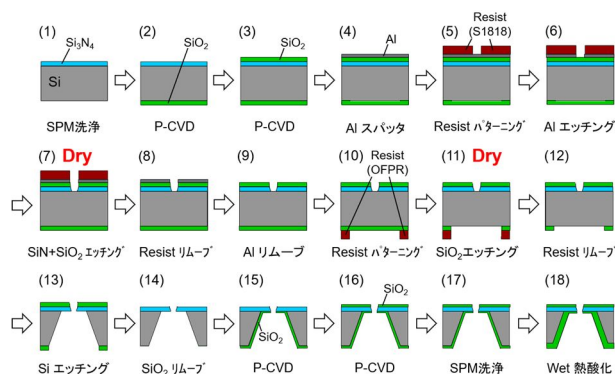


図 6. 新規 Dry・Wet 複合プロセス (工程(7, 11)が Dry プロセス)

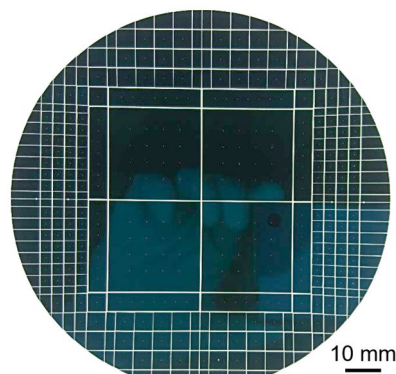


図 7. プロセス完了後の Si ウェハ (中央に 4 枚のアレイチップが存在)

### (4) アレイ型チップを用いた多チャンネル同時計測の試行 (アレイ型チップに基づく副作用評価システムの開発と機能性検証)

最後に、アレイ型チップに基づく副作用評価システムの開発を試みた。図 8 に示すように、作製されたチップをテフロン樹脂製のホルダー(図 9)に装着し、チャンバーシステムへと組み込んだ。しかし、単分子膜貼り合わせ法による複数の自立膜の一律形成を試みたものの、膜が形成された微小孔の割合が 1 割にも満たず、その後のイオンチャネルを用いた副作用評価試験(センサとしての機能性検証)までには至らなかった。この原因について考察・精査した結果、チップとチャンバーとの密着性が不十分であったため、隣り合った微小孔同士が、浸み出した電解質溶液を介して繋がってしまった可能性が考えられた。プロセス完了後のウェハから得られた単体チップを用いた場合には、問題なく膜形成に成功したことから、微小孔の構造によるものではなく、チャンバーシステムの構造に起因する問題であると結論付けた。

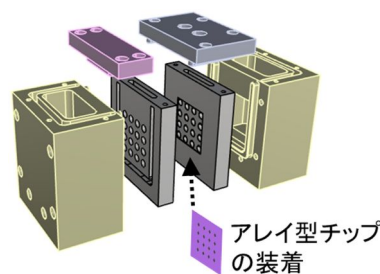


図 8. アレイ型チップに基づくチャンバーシステム

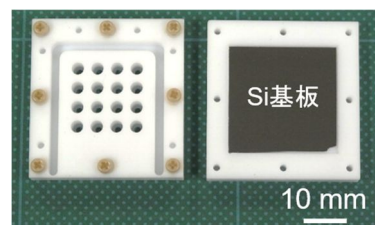


図 9. アレイ型チップ装着用ホルダー(写真は疑似チップ)

以上 4 項目の実施により、人工細胞膜の支持体となる微小孔縁部の最適化構造を再現よく得るための作製法を確立し、単体チップに基づくマイクロアレイシステムの開発・薬物スクリーニング(副作用評価)系としての機能性検証に成功した。また、アレイシステムの開発までには至らなかったものの、系の一層の高効率化につなげるためのアレイ型チップの作製法を確立した。本研究全体を通じ、高効率薬物スクリーニング系構築に向けた多くの重要な基盤技術を確立した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Xingyao Feng, Teng Ma, Daisuke Tadaki, Ayumi Hirano-Iwata	4. 巻 e60957
2. 論文標題 Self-assembly of hybrid lipid membranes doped with hydrophobic organic molecules at the water/air interface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Visualized Experiments	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3791/60957	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 Teng Ma, Madoka Sato, Daisuke Tadaki, Xingyao Feng, Ayumi Hirano-Iwata	4. 巻 45
2. 論文標題 Development of multifunctional ultrathin films based on lipid bilayer structures formed on microfabricated chips	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MEMBRANE	6. 最初と最後の頁 121~128
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5360/membrane.45.121	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 Ryusuke Miyata†, Daisuke Tadaki†, Daichi Yamaura†, Shun Araki, Madoka Sato, Maki Komiya, Teng Ma, Hideaki Yamamoto, Michio Niwano, Ayumi Hirano-Iwata (†Equal contribution)	4. 巻 12
2. 論文標題 Parallel recordings of transmembrane hERG channel currents based on solvent-free lipid bilayer microarray	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 98
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/mi12010098	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 Teng Ma, Madoka Sato, Maki Komiya, Xingyao Feng, Daisuke Tadaki, Ayumi Hirano-Iwata	4. 巻 50
2. 論文標題 Advances in artificial bilayer lipid membranes as a novel biosensing platform: from drug-screening to self-assembled devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 418~425
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1246/cl.200764	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 Teng Ma, Madoka Sato, Maki Komiya, Kensaku Kanomata, Takaya Watanabe, Xingyao Feng, Ryusuke Miyata, Daisuke Tadaki, Fumihiko Hirose, Yuzuru Tozawa, Ayumi Hirano-Iwata	4. 巻 233
2. 論文標題 Lateral voltage as a new input for artificial lipid bilayer systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Faraday Discussions	6. 最初と最後の頁 244 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1FD00045D	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18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Teng Ma, Xingyao Feng, Daisuke Tadaki, Ayumi Hirano-Iwata
2. 発表標題 Bio-hybrid membrane as a platform for new nanodevices
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Maki Komiya, Miki Kato, Daichi Yamaura, Ryo Yokota, Yusuke Tsuneta, Madoka Sato, Daisuke Tadaki, Hideaki Yamamoto, Michio Niwano, Ayumi Hirano-Iwata
2. 発表標題 Development of a screening system for identifying drugs that have side-effects on hERG channels using artificial bilayer lipid membranes
3. 学会等名 東北大学 & 理化学研究所 連携シンポジウム「計測科学が拓く生命科学の新展開」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daisuke Tadaki, Ryusuke Miyata, Daichi Yamaura, Shun Araki, Madoka Sato, Maki Komiya, Teng Ma, Hideaki Yamamoto, Michio Niwano, Ayumi Hirano-Iwata
2. 発表標題 Development of solvent-free lipid bilayer microarray for parallel recordings of transmembrane hERG channel currents
3. 学会等名 11th International Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics (IWNN-11) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 但木 大介、宮田 隆典、山浦 大地、荒木 駿、佐藤 まどか、小宮 麻希、馬 騰、山本 英明、庭野 道夫、平野 愛弓
2. 発表標題 Solvent-freeな脂質二分子膜マイクロアレイを用いたhERGチャネル電流の並列記録
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺 恭也、横田 澗央、加藤 美生、佐藤 まどか、但木 大介、小宮 麻希、山本 英明、庭野 道夫、平野 愛弓
2. 発表標題 個別化医療のためのhERGチャネルセンサの構築
3. 学会等名 2020年度電子部品・材料(CPM)若手ミーティング
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 まどか、小宮 麻希、鹿又 健作、渡辺 恭也、横田 澗央、安藤 大貴、陰山 弘典、馬 騰、但木 大介、山本 英明、廣瀬 文彦、平野 愛弓
2. 発表標題 膜内電界制御を可能とする人工脂質二分子膜に基づく新規イオンチャネル解析系の構築
3. 学会等名 2020年度電子部品・材料(CPM)若手ミーティング
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryusuke Miyata, Daisuke Tadaki, Daichi Yamaura, Shun Araki, Madoka Sato, Maki Komiya, Teng Ma, Hideaki Yamamoto, Michio Niwano, Ayumi Hirano-Iwata
2. 発表標題 Solvent-free lipid bilayer microarray for parallel recordings of transmembrane hERG channel activities
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State devices and materials (SSDM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 まどか、小宮 麻希、鹿又 健作、馬 騰、但木 大介、廣瀬 文彦、平野 愛弓
2. 発表標題 人工脂質二重膜内電界制御に基づく新規イオンチャネル機能評価システムの構築
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 小宮 麻希、佐藤 まどか、鹿又 健作、渡辺 恭也、安藤 大貴、陰山 弘典、馬 騰、横田 滯央、但木 大介、山本 英明、戸澤 謙、廣瀬 文彦、庭野 道夫、平野 愛弓
2. 発表標題 膜内電圧制御に基づく新たな人工細胞膜イオンチャネル解析系の構築
3. 学会等名 日本分析化学会第70年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺 恭也、佐藤 まどか、小宮 麻希、鹿又 健作、馬 騰、但木 大介、廣瀬 文彦、平野 愛弓
2. 発表標題 人工脂質二分子膜系の新入力としての膜平行電圧の導入
3. 学会等名 2021年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Madoka Sato, Maki Komiya, Kensaku Kanomata, Teng Ma, Daisuke Tadaki, Fumihiko Hirose, Ayumi Hirano-Iwata
2. 発表標題 Development of a novel artificial lipid bilayer system that enables applying a lateral voltage as a new input for ion channel analysis
3. 学会等名 The 4th International Workshop on Symbiosis of Biology and Nanodevices (The 4th IWSBN) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Ryusuke Miyata, Daisuke Tadaki, Daichi Yamaura, Shun Araki, Madoka Sato, Maki Komiya, Teng Ma, Hideaki Yamamoto, Michio Niwano, Ayumi Hirano-Iwata
2. 発表標題 Development of solvent-free lipid bilayer microarray for parallel recordings of transmembrane hERG channel activities
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teng Ma, Xingyao Feng, Daisuke Tadaki, Ayumi Hirano-Iwata
2. 発表標題 Photoresponse Mechanism of a free-standing lipid bilayer membrane doped with fullerene derivatives
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Madoka Sato, Maki Komiya, Kensaku Kanomata, Teng Ma, Daisuke Tadaki, Fumihiko Hirose, Ayumi Hirano-Iwata
2. 発表標題 Construction of novel ion channel analytical system using artificial lipid bilayer based on intramembrane electric fields
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Maki Komiya, Ryo Yokota, Madoka Sato, Daisuke Tadaki, Hideaki Yamamoto, Yuzuru Tozawa, Michio Niwano, Ayumi Hirano-Iwata
2. 発表標題 Development of a bio-device for the analysis of ion channel activities based on artificial bilayer lipid membranes
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡部 開登、馮 興堯、馬 騰、但木 大介、鹿又 健作、廣瀬 文彦、平野 愛弓
2. 発表標題 脂質二分子膜構造に基づく機能性バイオハイブリッド膜の光応答メカニズムの解明
3. 学会等名 2021年度電子部品・材料(CPM)若手ミーティング
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 嶋田 佳宏、平松 大樹、佐藤 陸、守屋 雅隆、但木 大介、平野 愛弓、水柿 義直
2. 発表標題 [70]PCBMを混合した自立型脂質二分子膜の電気的特性
3. 学会等名 2021年度電子部品・材料(CPM)若手ミーティング
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 陸、平田 はるか、守屋 雅隆、嶋田 宏、但木 大介、平野 愛弓、水柿 義直
2. 発表標題 炭素系ナノ材料を混合した自立型脂質二分子膜の電気的特性
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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 但木 大介、平野 愛弓	4. 発行年 2020年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 6
3. 書名 膜タンパク質工学ハンドブック	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 脂質二分子膜チャネル評価チップ及びその製造方法ならびに評価装置	発明者 廣瀬 文彦、鹿又 健作、平野 愛弓、但木 大介	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/020148	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

〔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	平野 愛弓  (Hirano-Iwata Ayumi)		
研究協力者	庭野 道夫  (Niwano Michio)		
研究協力者	山本 英明  (Yamamoto Hideaki)		
研究協力者	馬 騰  (Ma Teng)		
研究協力者	小宮 麻希  (Komiya Maki)		
研究協力者	荒木 駿  (Araki Shun)		
研究協力者	宮田 隆典  (Miyata Ryusuke)		

6. 研究組織（つづき）

	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	山浦 大地  (Yamaura Daichi)		
研究協力者	佐藤 まどか  (Sato Madoka)		

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2件

国際研究集会 11th International Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics (IWNN-11)	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 12th International Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics (IWNN-12)	開催年 2022年～2022年

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