

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02564

研究課題名（和文）ペプチドが実現する細胞・ナノ材料界面における信号伝達の機構解明

研究課題名（英文）Understanding of signal transduction via peptides at the interface of cells and nanomaterials

研究代表者

早水 裕平（Hayamizu, Yuhei）

東京工業大学・物質理工学院・准教授

研究者番号：80443216

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、二硫化モリブデン（MoS<sub>2</sub>）の特性を活かし、細胞活動をリアルタイムで観測する新規計測系を開発した。具体的には、自己組織化ペプチド感応膜を使用して安定な細胞接着を実現し、MoS<sub>2</sub>ナノシートの光・電子物性を利用して細胞の活動を局所的に観測した。以下の4つを実施した：（1）細胞結合性のある自己組織化ペプチドの開発、（2）ペプチドによるナノシートへの細胞接着の評価、（3）イオン応答性のペプチド感応膜の設計と開発、（4）発光イメージングおよび電気測定系の構築。実験結果から、MoS<sub>2</sub>ナノシートからの発光パターンが細胞の接着面に応じて変化することが観察され、細胞活動のリアルタイム観測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、二硫化モリブデン（MoS<sub>2</sub>）を用いた新しい細胞活動のリアルタイム観測システムの開発に成功したことである。このシステムは、細胞結合性のある自己組織化ペプチドを用いて安定な細胞接着を実現し、MoS<sub>2</sub>ナノシートの光・電子物性を活用して局所的な細胞活動を観測することが可能である。この成果は、生体内での細胞活動の解析やバイオセンシング技術の発展に貢献するとともに、疾患の診断や治療法の開発においても有益な情報を提供することが期待される。また、ナノテクノロジーを応用した新たな細胞観察手法の開発は、医療や生命科学の分野においてさまざまな応用可能性を持ち、社会的なインパクトも大きいと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a novel measurement system to observe cellular activities in real time by harnessing the properties of molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>). Specifically, we achieved stable cell adhesion using self-assembled peptide-responsive membranes and utilized the optical and electronic properties of MoS<sub>2</sub> nanosheets to locally monitor cellular activities. We conducted the following four steps: (1) development of self-assembled peptides with cell-binding properties, (2) evaluation of cell adhesion to the nanosheets using peptides, (3) design and development of ion-responsive peptide-sensitive membranes, and (4) construction of luminescence imaging and electrical measurement systems. Experimental results revealed that the luminescence patterns from the MoS<sub>2</sub> nanosheets changed in response to cell adhesion, enabling successful real-time monitoring of cellular activities.

研究分野：バイオセンサ、ナノバイオ界面、ペプチド工学

キーワード：生体材料 ペプチド 自己組織化 グラフェン ナノシート

## 1. 研究開始当初の背景

グラフェンなどの2次元ナノ材料は、その比表面積の大きさから高感度のバイオセンシングが可能とされ、その電界効果型トランジスタによるバイオセンサ開発が広く行われている。

グラフェン・トランジスタを用いたバイオセンサは松本らの研究 (Matsumoto et.al. J. Am. Chem. Soc., 2010)を初めとして、抗体やウイルスなど様々なターゲットに対して感度があるバイオセンサが開発されてきた。最近では、単層グラフェンに神経細胞などを直接接着させ、電気刺激を与え、その活動電位を測定する研究も行われている (N. P. Pampaloni, et.al., Nature nanotechnology, 2018)。一方で、より近年では半導体2次元ナノ材料であるMoS<sub>2</sub>のバイオセンサが、グラフェン・バイオセンサの7.4倍の感度を有する報告がなされている (D. Sarkar et.al., ACS Nano, 2014)。これまでの動作実証では、その感度評価が主になされ、ガン・マーカーなどのより実用に近い生体分子検出も徐々に報告されている (L. Wang et.al., Small, 2014)。こちらのバイオセンサでは細胞活動計測の報告はまだない。

一般に、トランジスタ型のバイオセンサの表面には、標的分子に対して結合能を有する生体プローブを固定させる必要がある。固定法は、(1)ナノシートに化学的に共有結合性のリンカーを介して直接プローブを固定する直接固定型、(2)ナノシートを数10nm厚の酸化膜で被覆し、そこに共有結合性のリンカーでプローブを固定する酸化膜固定型がある (RN. Dalila et.al., Biosensors, 2019)。これらの手法では、プローブ分子がセンサ表面に不均一に固定されているために、プローブ活性が低下することが問題である。よって、プローブ分子を2次元ナノ材料表面の最近傍に固定することによって感度を高く保ち、かつ、均一に固定することにより、全てのプローブ分子の活性を高く保つ機構の開発が必須であった。

申請者は、2次元ナノ材料表面で自己組織化するペプチドを用いた新しいプローブ分子の固定法の研究を行ってきた (Y. Hayamizu et.al., Scientific Reports, 2018)。近年では、半導体2次元ナノ材料であるMoS<sub>2</sub>表面に吸着し、安定かつ均一な単分子膜を形成するペプチドを開発した (発光 i, Y. Hayamizu et.al., ACS Applied Materials and Interfaces, 2019)。このペプチドは絹糸のタンパク質に多く含まれるアミノ酸配列を模倣し設計され、MoS<sub>2</sub>表面に厚さ~1nmのペプチド単分子膜を形成する (図1)。この単分子膜は電位印加下や有機溶媒中でもその秩序構造が安定であることが実証され、バイオセンサのプローブ固定用の分子足場として有望である。さらに、ビオチン-アビジンを用いたセンシングの実証実験では、足場ペプチドとプローブ・ペプチドをグラフェン上で共自己組織化し、プローブを固定することに成功した。溶液中でナノシート・トランジスタを用いた電導測定から、濃度 fM (フェムトモラー) レベルの感度を実現した。さらに、自己組織化ペプチドは、その秩序構造から、グラフェンやMoS<sub>2</sub>の電子移動度に悪影響を与えないことが明らかとなった。

これまで、MoS<sub>2</sub>のトランジスタを利用したバイオセンサでは抗原抗体反応などの検出が実現されてきたが、培養条件下の細胞活動をナノシートによってリアルタイムでセンシングした報告例はない。2次元材料を用いた細胞センシングでは、バイオ・ナノ界面における信号伝達の機構解明と細胞活動の選択的信号変換は重要課題である。これまで、グラフェン・トランジスタを用いた細胞活動電位測定では、グラフェン界面に形成される電気化学二重層のイオン濃度の変化を静電容量の変化として検出していた。これは、現象的には神経細胞の膜電位が変化する際に起こる細胞膜近傍のイオン濃度の変化を観察していることになる。これに対して、細胞接着や細胞膜の状態変化など「イオン濃度変化以外」の細胞活動をセンシングする試みは行われていない。ここでは、細胞から放出されるイオンが、細胞膜と2次元ナノ材料表面の空間に閉じ込められることによって、細胞膜近傍のイオン濃度が変化し、電気信号に影響を与えられ、すなわち、放出されるイオンだけでなく、細胞とナノ材料の接着の状態や、その空間に充填される細胞外マトリックスなどの物質によっても電気信号は影響を受ける。ナノ材料を用いた細胞センシングを進展させるためには、以上を考慮に入れ、細胞のどのような活動が、どのような電子信号となって検出されるのか仕組みを明らかにし、それを利用したセンサ界面を形成する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、MoS<sub>2</sub>ナノシートを用いた細胞結合能と高感度を併せ持ったこれまでにない光および電気計測による電気化学的な細胞活動計測の実現である。これにより、細胞-ナノシート間の信号伝達機構を明らかにする。次のように研究を進める。

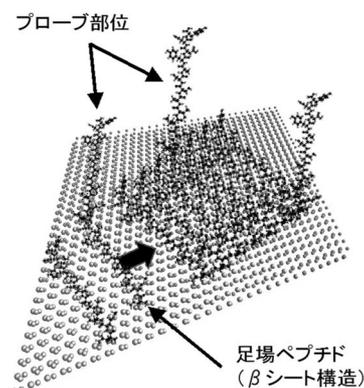


図1: ナノシート上の絹糸タンパク質を模倣した自己組織化ペプチドとプローブが集合したペプチドの共自己組織化の模式図

- (1) 細胞結合性のある自己組織化ペプチドを開発し、その構造安定性を評価する。これにより、ナノシート表面に安定的に接着した状態で細胞培養が行える条件を確立する。
- (2) 開発したペプチドを使用しナノシートへの細胞接着を評価する。位相差顕微鏡での細胞観察や蛍光標識による蛍光顕微鏡測定を行い、接着状態を定量的かつ統計的に評価し、その知見をもとペプチドのアミノ酸配列の改良に繋げる。
- (3) イオンとの相互作用機能を有する天然タンパク質のアミノ酸配列を参考にし、イオン応答性のペプチド感応膜の設計と開発を行うことにより、イオン応答性の界面を実現する。
- (4) ナノシートの電子状態が細胞接着および活動によってどのような変調を受けるか、光励起下での発光・分光イメージングおよび電気測定を行う。そのための実験系の構築を行い、細胞活動観測のためのプラットフォームを完成させる。
- (5) 上記の技術を総合して、動物細胞活動のリアルタイム測定を行う。細胞の活動をナノシートの電導特性からリアルタイムで観測しつつ、発光・分光イメージング測定によって、局所的な情報を取得する。

### 3. 研究の方法

**細胞結合性のある自己組織化ペプチドの開発：**  
 ナノシートへの安定な細胞接着を実現するため、足場ペプチドに細胞結合部位を加えた双機能ペプチド開発を目的とする。細胞と親和性の高いと考えられるペプチドを自己組織化ペプチドに結合させたものをナノシート表面に共自己組織化させ、原子間力顕微鏡(AFM)で評価する。AFM画像から、新規ペプチドがナノシート表面に均一な単分子膜へと自己組織化するかを明らかとし、最適なアミノ酸配列を設計する。

**ペプチドを使用した、細胞接着の評価：**良好な細胞接着によって初めて細胞活動の信号が効率的にナノシート側に伝わる。ここでは、作製したペプチド膜を修飾した MoS<sub>2</sub> に、マウス線維芽細胞 (3T3) を播種・培養し、その接着性の評価を行う。播種時の細胞密度や培養条件について検討を行い、接着のペプチド依存性について位相顕微鏡や蛍光顕微鏡を用いて定量的な解析を行う。

**イオンや pH 応答性のペプチド自己組織化膜の開発：**細胞から放出される特定のイオンに結合するペプチド感応膜の設計・開発をする。ヒスチジンや電荷を有するアミノ酸はイオンとの強い相互作用が知られている。

**発光イメージングおよび電気測定のプラットフォーム構築：**MoS<sub>2</sub> 発光測定において、細胞からの影響(細胞接着および、イオンなどの細胞からの放出物)をよりコントラスト良く可視化するため、MoS<sub>2</sub> 合成条件の最適化および培養液の自家蛍光を低減した測定系を構築する。培養条件下で細胞接着による発光への影響を評価する。これより、細胞接着を MoS<sub>2</sub> 発光測定によって可視化する(図2)。

**細胞活動のリアルタイム測定：**外部刺激に対して応答する生細胞の活動をナノシートの電気・発光特性から観測する。半導体ナノ材料の微細で高感度な特徴を活かし、細胞個体ひとつひとつの活動をリアルタイムで観測する。また、外的刺激によって、細胞の状態に動的な変化がみられることが期待されるが、これをナノシートの発光によって観察する。時空間的な観察には、MoS<sub>2</sub> の発光イメージングを利用する。

### 4. 研究成果

#### 細胞結合性のある自己組織化ペプチドの開発

本研究では、グラファイト/グラフェン表面におけるペプチドの自己組織化の設計と特性評価を行った。ペプチドは、グラファイト/グラフェン表面での自己組織化において、トリプトファンを3つ含む配列を結合部位として利用し、その電気特性を調査した。さらに、トリプトファンは GGG リンカー(トリグリシン)と GRGDS(グリシン-アルギニン-グリシン-アスパラギン酸-セリン)と結合させることで、グラファイト/グラフェン表面での細胞接着を促進する双機能ペプチドを設計した。これらのペプチドはグラファイト表面で六方対称性の規則構造に自己組織化し、単分子膜厚の薄膜構造を形成した。

#### ペプチドを使用した、細胞接着の評価

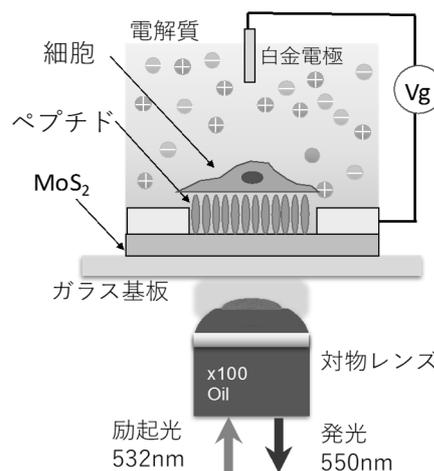


図2: MoS<sub>2</sub>電気化学トランジスタの概略図。油浸レンズを用いて蛍光イメージ観察を行う。

GRGDSGGGWWWW ペプチドという非共有結合性ペプチドがグラファイト/グラフェン表面に自己組織化することで、細胞の接着を誘導することに成功した(図3)。このペプチドは比較的小さいため、非共有結合を利用することで共有結合よりも電気特性がより良く保たれることが期待される。このペプチドを用いたグラファイト/グラフェン界面は、細胞から放出される電気活性分子のリアルタイム測定に有用であると考えられる。

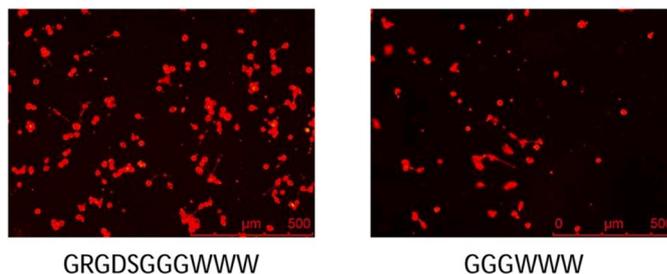


図3: GRGDSGGGWWWW および GGGWWWW ペプチドによって表面修飾されたグラファイト上の培養 4 時間後の接着細胞の蛍光画像。細胞は CellMask™ オレンジで染色された。

#### イオンや pH 応答性のペプチド自己組織化膜の開発

イオンや pH に応答するペプチドとして両親媒性ペプチドを設計した。疎水性アミノ酸としてフェニルアラニン、親水性アミノ酸として正電荷を持つリジンと負電荷を持つグルタミン酸を採用した。さらに、両端にプロリンを配置した PKFKFEFEP (PKE) ペプチドを設計した。プロリンはアミノ酸の中でも特殊な構造を持ち、アミノ酸配列の内部に存在するとターンを形成しやすいなどの特性がある。プロリンが両端に存在すると、分子末端の振動運動が低下し、エントロピー的に安定になるため、秩序ある構造形成を促進する。また、比較のために、プロリンを両端に持つ正電荷のみの PK (PKFKFKFKP) ペプチドと負電荷のみの PE (PEFEFEFEP) ペプチドを設計した。これらを使用し、MoS<sub>2</sub> との相互作用を高め、FET 応答に大きな差を生じることを期待した。

まず、未修飾の MoS<sub>2</sub> FET において、pH への応答を調査した結果を報告する。pH に対する応答は 2 つのタイプに分けられることがわかった。一つは、ほとんど閾値電圧に応答しない FET であり、もう一つは pH が増加するにつれて閾値電圧が低電圧側にシフトする FET である。先行研究では、4 層の CVD MoS<sub>2</sub> を用いた FET ではほとんど欠陥がなく、pH への応答が見られないことが報告されている。したがって、デバイス間の応答の差は MoS<sub>2</sub> の欠陥量に依存すると考えられる。これは閾値電圧の絶対値からも欠陥量の違いが判断される。本研究では、pH をイオン強度が等しくなるように調整し、閾値電圧のシフトはほとんど観察されなかった。

次に、ペプチド自己組織化前後の pH 変化に対する閾値電圧の変化を評価した。PKE ペプチドでは、pH の上昇とともに閾値電圧が高電圧側にシフトしていることがわかった。一方、PK ペプチドは pH 2.45 から pH 7.45 の範囲では閾値電圧の変化はほとんどないが、高い pH では閾値電圧が高電圧側にシフトした。PE ペプチドは pH 2.45 から pH 7.45 の範囲では PKE や PK とは異なり、低電圧側にシフトし、pH 7.45 から pH 11.45 に変化すると高電圧側にシフトした。各 pH の値の時のペプチドのネットチャージに対する閾値電圧の変化では、PKE はネットチャージに対して単調に変化しているが、PK や PE は単調な変化ではない。

実際の局所的な pH は分からないため、実際のペプチドのネットチャージは分からない。イオン強度は一定である溶液で未修飾の場合は応答が見られなかったが、ペプチドでは応答が変化しているため、プロトン濃度がペプチドに影響したと言える。リン酸緩衝液 (PB) の電解質濃度によってペプチド自己組織化後の閾値電圧の変化がなかったのに対して、異なる pH の溶液で応答していることから、同様なことが言える。最後に、AFM による観察で MoS<sub>2</sub> FET の表面にペプチドが残っていることが確認された。

#### 発光イメージングおよび電気測定のプラットフォーム構築

本研究では、まずペプチド修飾を行っていない MoS<sub>2</sub> の pH 応答を調査した。その結果、酸性条件では MoS<sub>2</sub> の発光強度が上昇し、塩基性条件では減少することが確認された。また、酸性条件では短波長シフトとピーク幅の減少、塩基性条件では長波長シフトとピーク幅の増加が観察された。これらの結果は、先行研究と一致している。

次に、ペプチド修飾前後での MoS<sub>2</sub> の発光特性の比較(図4)と、ペプチド修飾 MoS<sub>2</sub> の pH 応答を調査した。使用したペプチドはグリシンとアラニンの繰り返しアミノ酸配列を有する GA ペプチドを使用した。使用した GA ペプチドはそれぞれ末端に電荷の異なるアミノ酸を配置した RY5 と EY5、そして電荷を有さない QY5 を選択した。その結果、RY5 修飾では発光強度が著しく低下し、QY5 修飾ではやや低下し、EY5 修飾ではほとんど変化しなかった。

また、RY5 修飾では塩基性条件でのレッドシフトが観察され、ペプチド分子から MoS<sub>2</sub> への電子ドーピングが起きた可能性が示唆された。一方、EY5 修飾では発光特性の変化が非常に小さく、電子のやり取りがほとんど起こらなかったと考えられる。

さらに、ペプチド修飾 MoS<sub>2</sub> の溶液 pH に対する発光応答を調査した結果、RY5 と QY5 修飾では pH の変化に応じて発光強度が変化し、EY5 修飾ではほとんど変化しなかった。また、pH の変化に伴う発光ピーク波長の変化も観察された。特に EY5 修飾では塩基性条件でも発光特性の変化が穏やかであることが示された。

これらの結果から、EY5 修飾ペプチドは MoS<sub>2</sub> の表面修飾に適しており、塩基性環境下でも発光特性の変化が制御されることが示唆された。また、個別のペプチド修飾による MoS<sub>2</sub> の発光特性への影響も明らかになった。この研究は、MoS<sub>2</sub> を用いた pH センシングにおけるペプチド修飾の重要性を示唆している。

#### 細胞活動のリアルタイム測定

接着力の強い NIH3T3 細胞を使用した。NIH3T3 はマウス胎児線維芽細胞であり、接着評価によく使用される株化細胞である。MoS<sub>2</sub> と水溶液の間に印加する電圧によって、MoS<sub>2</sub> 内の電荷キャリアに対応する対イオンが結合し、MoS<sub>2</sub> 界面で電気二重層を形成すると考えられる。このとき、電気二重層の形成速度は細胞と MoS<sub>2</sub> 間のイオンや水の拡散速度に影響を受ける可能性がある。

実験では、MoS<sub>2</sub> と電極の間に印加する電圧を矩形波状に変調し、MoS<sub>2</sub> の発光変化とイオンや水の拡散の関係を検討した。結果として、発光強度の印加電圧に対する応答は、先行研究と同様の傾向を示した。未修飾の MoS<sub>2</sub> と poly-L-lysine 修飾 MoS<sub>2</sub> を比較すると、立ち上がりの位置に差が見られた。poly-L-lysine をコーティングすると高電圧側にシフトし、MoS<sub>2</sub> 内の電子密度が低下したと考えられる。この現象の原因として、poly-L-lysine の表面吸着による化学ドーピングや界面近傍の水溶液の酸化還元電位の変化が考えられる。

さらに、発光強度は矩形波型の電圧に対して遅い緩和を持つ変化を示した。この変化のメカニズムについて、以下の仮説を検討する。まず、大きなゲート電圧が印加された状態では、MoS<sub>2</sub> の界面に陽イオンが吸着し、電気二重層が形成される。一方で電圧を小さくすると、MoS<sub>2</sub> と陽イオンの静電相互作用が小さくなる。したがって、陽イオンや水の脱離が起こり、MoS<sub>2</sub> の電子密度が低下し、発光強度が増加する。その後、電気二重層の再構成によって電子密度が再び増加し、発光強度が減少すると考えられる。この際の印加電圧の大きさによって様相が変わる。特に印加電圧が大きい場合、脱離した陽イオンの周囲に分極した水が入り込む。これにより、一度低下した電子密度が再び上昇し、発光強度の減少量が大きくなると考えられる。一方、印加電圧が小さい場合、陽イオンの脱離に伴って入り込んだ水は配向せず、電子密度がある程度保たれる。そのため、発光強度の減少量は小さくなる。

また、細胞存在下と細胞非存在下での発光変化の様子が異なることを発見した。細胞存在下では、細胞膜に付着した負に帯電した糖鎖や細胞からの分泌物により、MoS<sub>2</sub> 近傍の環境が複雑になり、電気二重層が安定構造を取るまでに時間がかかったと考えられる。これにより、発光強度の減少率が細胞存在下では緩やかであることが示唆される。さらに、細胞膜が負に帯電していることから、細胞存在下では陽イオンが細胞側に引き寄せられ、発光強度が最大値をとる時間に差が生じることが観察された。

以上の結果から、MoS<sub>2</sub> 界面での電気二重層形成やイオンの拡散により、MoS<sub>2</sub> の発光特性が変化することが示唆された。また、細胞の存在はこの過程に影響を与え、細胞の位置をマッピングすることが可能であることがわかった。今後は、細胞がいる際のイオンの拡散モデルを考案することで、より詳細な情報が得られることが期待される。

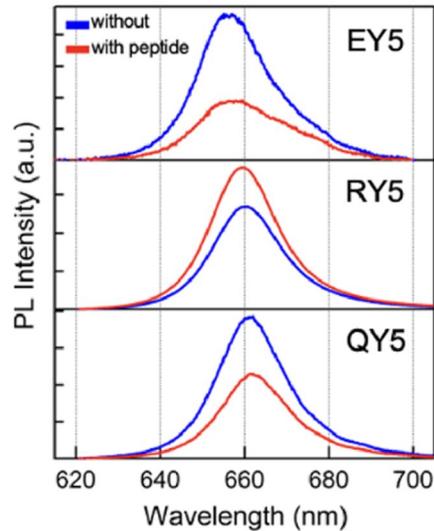


図4: ペプチドの自己組織化前後の単層 MoS<sub>2</sub> の典型的な発光スペクトル

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tatematsu Soichiro, Ohnishi Tomoko, Saito Shogo, Tanaka Masayoshi, Hayamizu Yuhei, Okochi Mina	4. 巻 170
2. 論文標題 Assemblies of bi-functional peptides on pyrolytic graphite for cell adhesion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biochemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 107988 ~ 107988
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bej.2021.107988	査読の有無 無
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 Sun Linhao, Li Peiying, Seki Takakazu, Tsuchiya Shohei, Yatsu Kazuki, Narimatsu Takuma, Sarikaya Mehmet, Hayamizu Yuhei	4. 巻 37
2. 論文標題 Chiral Recognition of Self-Assembled Peptides on MoS <sub>2</sub> via Lattice Matching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 8696 ~ 8704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.1c00792	査読の有無 無
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 Ccorahua Robert, Noguchi Hironaga, Hayamizu Yuhei	4. 巻 125
2. 論文標題 Cosolvents Restrain Self-Assembly of a Fibroin-Like Peptide on Graphite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 10893 ~ 10899
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c02594	査読の有無 無
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 Takakazu Seki, Toshiyuki Ihara, Yoshihiko Kanemitsu, Yuhei Hayamizu	4. 巻 7
2. 論文標題 Photoluminescence of CVD-grown MoS <sub>2</sub> modified by pH under aqueous solutions toward potential biological sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2D Materials	6. 最初と最後の頁 34001
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 Sayaka Tezuka, Takakazu Seki, Tomoko Ohnishi, Hironaga Noguchi, Masayoshi Tanaka, Mina Okochi, Yuhei Hayamizu	4. 巻 7
2. 論文標題 In situ bioimaging of Lactobacillus by photoluminescence of MoS2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2D Materials	6. 最初と最後の頁 24002
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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Chishu Homma, Yuhei Hayamizu
2. 発表標題 Co-self-assembly of probe and scaffold peptides on graphite surface toward functionalization of graphene biosensors
3. 学会等名 The Fullerenes, Nanotubes and Graphene research society, All-Virtual Conference
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chishu Homma, Yoshiaki Sugizaki, Atsunobu Isobayashi, Yuhei Hayamizu
2. 発表標題 Detection of Limonene Using Graphene Field Effect Transistor Modified by Self-assembling Peptide
3. 学会等名 TMS2021 Annual Meeting & Exhibition, All-Virtual Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chishu Homma, Yuhei Hayamizu
2. 発表標題 pH dependence of electrical response in graphene biosensors functionalized by self-assembled peptides
3. 学会等名 The Fullerenes, Nanotubes and Graphene research society, All-Virtual Conference
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 茂田井和紀, 大津 博義, 河野 正規, 早水裕平
2. 発表標題 ブレード法による結晶性ペプチド配向膜の作製と構造評価
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 茂田井和紀, 大津博義, 河野正規, 森健彦, 秋澤和輝, 奥脇弘次, 望月祐志, 早水裕平
2. 発表標題 ペプチド結晶における分岐した水素結合の原子間距離と伸縮振動周波数の関係
3. 学会等名 第82 回応用物理 学会秋季学術講演会, オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 茂田井和紀, 早水裕平
2. 発表標題 ソリューションシェアリング法によるペプチド配向膜の作製とラマン分光による構造評価 “
3. 学会等名 第32 回光物性研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 茂田井和紀, 早水裕平
2. 発表標題 ソリューションシェアリング法による結晶性ペプチド配向膜の 作製と構造評価
3. 学会等名 日本化学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazunori Motai, Yuhei Hayamizu
2. 発表標題 Oriented crystal growth of phenylalanine and dipeptide by solution shearing
3. 学会等名 Materials Research Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuhei Hayamizu
2. 発表標題 Bio-imaging with Photoluminescence of Single-layer MoS2
3. 学会等名 TMS 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究分担者	金蔵 孝介 (Kanekura Kosuke)  (10508568)	東京医科大学・医学部・准教授  (32645)	

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