

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05415

研究課題名(和文) 固液界面を利用した水溶液中のタンパク質振動スペクトルの測定と分子間相互作用の検出

研究課題名(英文) Method to measure vibrational spectra of proteins in aqueous solution for detection of intermolecular interactions using solid/liquid interface

研究代表者

近藤 正人 (Masato, Kondoh)

筑波大学・数理工学系・助教

研究者番号：20611221

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：固体基板と水溶液の固液界面にタンパク質を保持し、界面敏感な振動分光法を適用することで、タンパク質の振動スペクトルを十分に水と接した状態で高感度に得る。その実現に向け、フッ化カルシウムにシリカ薄膜をコートした基板の作製と高品質化に取り組んだ。シリカコート面に、タンパク質をシランカップリングさせて保持する計画であったが、途中、作製される基板のコート面の平面性に問題が生じるようになり、計画を進めることが困難な状況となった。そこで、計画を見直し、この問題に影響されずに行える実験として、固液界面の脂質二分子膜と相互作用したペプチドの振動スペクトル測定に挑んだ。結果、そのラマンバンドの検出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

界面敏感なラマン分光法で、界面にある脂質膜と相互作用した膜結合ペプチドの振動スペクトルを検出できたことが本研究の主な成果である。概要の項目で述べたように、途中で計画を見直したが、当初着目した「界面を利用する」という独自の視点で取り組んだ研究である。膜結合ペプチドは、抗生物質としての重要な働きを持つ。その抗菌作用は、ペプチドが細胞膜と結合し、膜に侵入して孔をあけることで発現する。抗菌作用の機構を理解するには、膜とペプチドの相互作用を調べるのが不可欠である。本研究の学術的意義は、こうした相互作用を、界面を利用した新しい視点から研究する方法を与えたことにある。

研究成果の概要(英文)：In this study, I have applied interface-sensitive spectroscopy to proteins immobilized at a solid/aqueous solution interface to develop a new method to obtain vibrational spectra of biomolecules in aqueous environment with high-sensitivity. For this purpose, I have developed and improved a CaF₂ substrate coated by a thin layer of silica. I was initially going to fix protein samples chemically on the silica-coated surface of this substrate using silane coupling agents. However, in the middle of the research, some problems arose concerning the flatness of the coated surface of the substrate, and they made it difficult to move the project. Thus, I reconsidered the project and performed experiments to measure vibrational spectra of alamethicin, one of membrane-binding peptides, interacting with lipid bilayer membranes prepared at a solid/aqueous solution interface. As a result, I have successfully detected Raman bands of alamethicin interacting with phospholipid bilayers.

研究分野：分子分光学

キーワード：生体分子 振動スペクトル 固液界面 振動和周波発生分光 全内部反射ラマン分光 脂質膜

1. 研究開始当初の背景

(1) 学術的な背景

タンパク質間、酵素と基質間など、生体内では分子間での相互作用が絶えず起きている。ほぼ全ての生体反応において、生体分子が刺激を受けてから実際に機能するまでの間には、別の分子と相互作用する。そのため、刺激から機能に至る過程を理解するには、生体分子間の相互作用を高感度検出することが不可欠である。

相互作用が、分子のどの部位で、どんな変化を通して起きるのかを調べる一つ的手段として、振動スペクトル測定は有効である。分子の局所的な構造変化に敏感だからである。だが、振動スペクトルを生体条件に近い環境、すなわち水溶液中で感度よく得ることは、水の赤外吸収による妨害があるために容易ではない。赤外反射吸収分光やラマン分光を利用した研究も行われているが、十分な感度や選択性が達成されているとは言い難い。

これら従来法でタンパク質と標的分子間の相互作用を調べる際、標的分子の添加前後で得たスペクトルの差を取る方法が一般に用いられる。だが、従来法では、バルク水溶液中の分子全体が同じ感度で検出されるため、標的分子と相互作用しているタンパク質も、していないタンパク質も、同じ強度でスペクトルに寄与する。興味ある相互作用を反映した信号だけを得るには、相互作用を反映していない背景信号を正確に除く必要があるが、それは難しい。事実、従来法で相互作用変化が研究される例は、これを光誘起できる系にほぼ限られている。こうした系では、光誘起差スペクトルを時間分解検出することで、微小な相互作用変化の検出が実現される。だが、実在の多くの系は、光で変化を誘起できない。そのため、標的分子の添加前後での定常スペクトルの差を高感度で得る方法論の開発は重要な課題となる。

本研究では、“界面を利用する”という新しい着眼点から、その開発に挑んだ。着想の鍵は、固体と水溶液の界面にタンパク質を固定し、界面敏感な振動分光法を適用することである。

(2) 本研究の着想に関する背景

タンパク質固定法として、シランカップリング法に注目した。この方法では、シランカップリング剤をシリカ基板に、Si-O 共有結合で化学的に保持する。この技術を用いれば、シランカップリング剤を介して、タンパク質を固液界面に配向を制御した上で固定できる。ここに界面敏感な分光法を適用することで、これらの構造や動きを調べることができる。界面敏感な振動分光法には、ヘテロダイン検出振動和周波発生 (HD-VSFG) 分光法を採用した。

課題開始数年前の 2017 年に、研究代表者の所属するグループで、固体と水溶液界面での界面活性剤会合膜を対象とした HD-VSFG 分光が実現されている。¹ また、同グループでは、HD-VSFG 分光を中赤外領域で行うことの実現に向け、CaF₂ 基板上に極薄い SiO₂ 層を形成し、中赤外領域の透過率を確保したままシランカップリング可能な基板の試作が行われている。² 一方、試作された基板で固液界面の HD-VSFG 分光が実現されるかを確かめる試験や、この基板にタンパク質を固定する方法の確立には至っていない。以上が、課題開始時の状況であった。

2. 研究の目的

固体と水溶液の界面を利用して、タンパク質の振動スペクトルを十分に水と接した状態で高感度で得る。また、その標的分子を加えた際のスペクトル変化を高い精度で検出し、標的分子との相互作用に伴うタンパク質の構造変化を捉える。これらを実現する新しい実験方法を確立し、その有効性を実証することが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) アイデアの概要

固体と水溶液界面に、タンパク質をシランカップリング剤を介して固定する。ここに HD-VSFG 分光を適用する。HD-VSFG 分光が界面選択的であることを利用して、圧倒的多数のバルク水分子からの信号を原理的に抑える。また、タンパク質を特定の配向に制御した状態で界面に局在させた試料に適用することで、タンパク質からの信号を増強させて得る。このアイデアの重要な点は、固液界面にタンパク質を局在化させ、界面の振動スペクトルだけを検出する点である。この水溶液層に、標的分子を加えて測定すると、タンパク質と相互作用した標的分子だけがスペクトルに現れる。相互作用していない標的分子からの背景スペクトルを抑えることができるため、高感度に相互作用を検出できる。実験方法が確立された際の実証実験には、固液界面にタンパク質を固定した系の水層に変性剤を加え、変性前後の振動スペクトル変化を捉える研究を計画した。

(2) シリカコート CaF₂ 基板

固液界面の HD-VSFG 分光に利用でき、かつ、タンパク質を固定できる基板として、シリカ薄膜をコートした CaF₂ 基板に着目した。このシリカコート CaF₂ 基板では、シリカ面に試料分子をシランカップリング反応で化学的に固定できる。固液界面の VSFG 測定は、水の強い赤外吸収を避けるため、赤外プローブ光を基板側から入射する内部反射配置で行う必要がある。シリカは 2000 cm⁻¹ 以下の赤外領域で不透明であるが、薄膜としたうえで赤外領域で透明な CaF₂ にコートすることで、この配置での測定も可能となる。一方、ヘテロダイン検出 (HD) を行うには、この基板の試料と同じ面 (シリカコート面) に、信号強度や位相の基準となる参照試料を準備する必要もある。HD-VSFG 分光を固液界面に適用した過去の例¹ にならぬ、参照試料には、銀薄膜を用いた。

本研究では、ゾルゲル法と呼ばれる手法とスパッタ法の二つの作製方法を試した。ゾルゲル法では、溶液の作製と整形、500 程度での加熱のみでシリカ薄膜を作製できる。基板作製の簡易化を期待してこの手法での作製も試した。だが、シリカ薄膜を作製後、参照試料の銀薄膜を蒸着する際に、スパッタ法を用いる必要があったため、最終的には、シリカ薄膜の作製もスパッタ法で行う手順を採用した。

(3) シリカコート CaF₂基板を用いた HD-VSFG 測定

シリカコート CaF₂ 基板のシリカ面と空気、もしくは、水溶液の界面に試料を準備し、CaF₂ 側から、可視プローブ光、赤外プローブ光、および、局所発振 (LO) 光を入射させ (内部反射配置)、試料から生じた SFG 光を検出した。試料の測定の後、試料と同じ面に準備した参照試料 (蒸着した銀薄膜) からの SFG 信号を測定した。これらの信号から、試料の銀に対する相対的な二次非線形感受率 $\chi_{\text{Sample}} / \chi_{\text{Ag}}$ を得た。試料の絶対配向の情報を含んだ量である絶対的な非線形感受率を得るには、その基準となる銀の絶対的な感受率が必要である。本研究では、次節で後述する方法で感受率の値を決定した。

4. 研究成果

当初の目的に沿って、HD-VSFG 分光のための基板の作製と改善を中心に行ってきたが、途中、後述の問題が起き、計画を変更した。この章では、(1)で、基板の作製と改善の取り組みと、そこで明らかになった数々の問題について報告する。その後、(2)で、当初の計画を変更したものの、当初の計画と同様に、「界面を利用する」という視点から取り組んだ研究の成果を報告する。

(1) HD-VSFG 分光のためのシリカコート CaF₂ 基板の作製と高品質化の取り組み

シリカコート CaF₂ 基板の試作

まず、ゾルゲル法によって CaF₂ 基板 (20 × t5) 上にシリカ薄膜 (厚み ~100 nm) をコートした。次に、コート面に、スパッタ法で、銀薄膜 (厚み ~200 nm) を参照試料として、その上に金薄膜 (厚み ~200 nm) を保護膜として、この順に蒸着した。

シリカコート CaF₂ 基板に蒸着した銀薄膜の絶対的な二次非線形感受率の決定

本研究の到達目標の一つは、この基板のシリカコート面と水溶液の界面に準備した試料について、HD-VSFG 測定ができることを示すことである。このような測定の際には、前節で述べた通り、可視と赤外プローブ光、LO 光を基板側から基板底面 (シリカコート面) に入射させる内部反射配置をとる必要がある。このとき、実測されるのは、試料および参照試料の各々から生じた SFG 信号である。これらの信号から直に得られるのは、試料の銀に対する相対的な二次非線形感受率 $\chi_{\text{Sample}} / \chi_{\text{Ag}}$ である。つまり、試料の絶対的な非線形感受率 χ_{Sample} を決定するには、銀の感受率 χ_{Ag} の値が必要である。

そこで、この目標の到達に向けた最初のステップとして、銀の感受率を決定した。この際、ジパルミトイルフォスファチジルコリン (DPPC: 図 1a) というリン脂質のラングミュア プロジェット (LB) 膜を用い、次の方法で行った。

DPPC のアルキル鎖が上を向けた LB 膜の絶対的な感受率 χ_{up} と、下を向けた膜のもの χ_{down} では、その符号が反転する ($\chi_{\text{up}} = -\chi_{\text{down}}$: 図 1b)。それぞれの膜を、外部および内部反射配置で HD-VSFG 測定し、各々の参照試料に対する相対的な有効感受率 $\chi_{\text{up,eff}} / \chi_{\text{quartz,eff}}$ と $\chi_{\text{down,eff}} / \chi_{\text{Ag,eff}}$

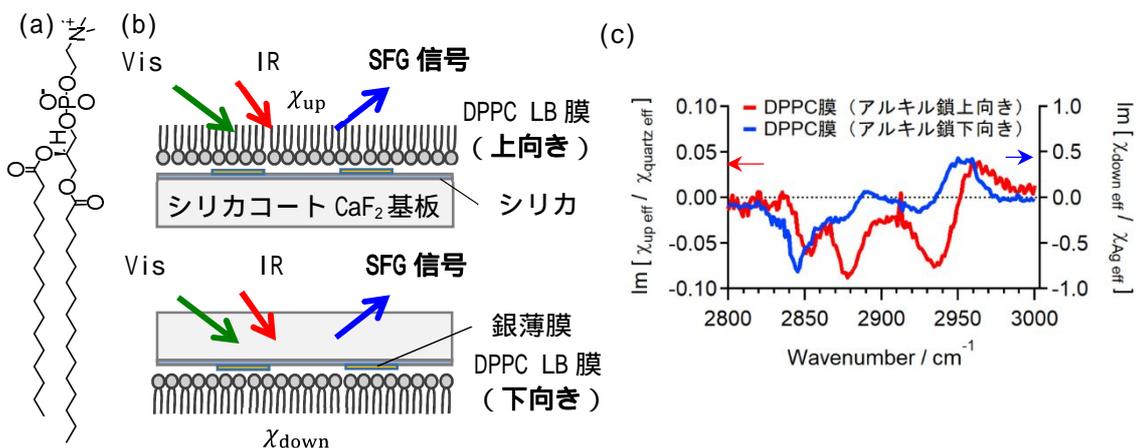


図 1 (a) リン脂質 DPPC の分子構造、(b) シリカコート面に蒸着した銀の感受率を決定するための実験の概要。(c) 外部および内部反射配置で得た $\chi_{\text{up,eff}} / \chi_{\text{quartz,eff}}$ (赤) および $\chi_{\text{down,eff}} / \chi_{\text{Ag,eff}}$ (青) の虚部スペクトル (縦軸値は、それぞれ、左側と右側に示している)

$\chi_{\text{Ag,eff}}$ の虚部スペクトルを得た (図 1c)。これらは、それぞれの配置での参照試料、z-cut 水晶と銀の感受率のほか、実験条件に依存するフレネル因子を含んだ量である。ここで、 χ_{up} は、既

知量 χ_{quartz} とフレネル因子を用い、実測スペクトルから得られる。また、 χ_{down} は、未知量 χ_{Ag} を使って表せる。そのため、 $\chi_{\text{up}} = -\chi_{\text{down}}$ の関係を用いれば、銀の感受率 χ_{Ag} を決定できる。この方法で、シリカコート CaF_2 基板に蒸着した銀薄膜の感受率、 χ_{Ag} を $5.3 \times 10^{-11} \times \exp(i246^\circ)$ m/V と決定した。

この決定した値を用いることで、この基板のシリカコート面と水溶液の固液界面に準備した試料について、絶対的な感受率を得ることができるようになった。だが一方で、ここまでの研究で、一つ深刻な問題があることも分かった。それは、シリカコート CaF_2 基板からの SFG 信号の強度が、シリカコートしていない CaF_2 基板のものに比べて、1/10 以下となることである。この問題が深刻なのは、実験の際に、シリカコート基板からの信号をガイドに、SFG 装置の光軸調整を行うことができなくなるからである。まずコートなしの基板からの信号をガイドに光軸調整を行い、その後試料をシリカコート基板に交換するという方法をとる必要があり、シリカコート基板からの信号を得るまでに時間と手間がかかってしまう。このことが大きな問題であった。

シリカコート CaF_2 基板の作製手順の変更とこの基板での HD-VSFG 試験

シリカコート CaF_2 基板に蒸着した銀の信号が非常に小さい問題を解決するために、 CaF_2 基板に直接、銀薄膜を蒸着し、その上にシリカコートする方法を試した。その結果、この基板の銀からの SFG 信号の強度は、シリカコートしていない CaF_2 基板の場合とほぼ同様であることが分かった。このため、光軸調整の際に、基板を交換する必要がなくなり、測定までにかかる時間を大幅に短縮できた。なお、この取り組みの段階で、ゾルゲル法を用いず、基板作製の全てのプロセスをスパッタ法で行うよう変更した。

この基板のシリカ上にシランカップリング膜を準備し、その振動 SFG スペクトルを、基板と空気、および、基板と水の固液界面で得る試験を行った。この試験では、ポリエチレングリコール (PEG) 鎖を含む親水性のシランカップリング剤 (図 2a) を用いた。

図 2b に、空気と基板の界面、および、基板と空気の界面で、それぞれ、外部および内部反射配置で得た親水性シランカップリング膜の感受率 χ_{PEG} の虚部スペクトルを示す。前者は PEG 鎖を上側に向けており、後者は下側に向けている。どちらのスペクトルにも、幅の広い CH 伸縮振動バンドが観測された。幅の広がりや、PEG 鎖長に分布があることを示唆したものであると考えている。重要なのは、これらのスペクトルにおける CH バンドの符号が互いに反転していたことである。以前に測定された別のシランカップリング膜の CH バンドの符号を参照すると、どちらの配置で得たスペクトルの符号も、想定される PEG 鎖の向きと矛盾していないことが分かった。

次に、この PEG 鎖を水に接触させた状態、すなわち、固液界面で PEG 膜の測定を行った結果を図 2c に示す。基板と空気の界面で測定した際と同じ符号で CH バンドが現れたことから、やはり、想定しているように PEG 鎖を下側に向けていることと矛盾しておらず、妥当なスペクトルが得られたものと判断した。だが、基板と空気の界面で測定したものに比べ、信号強度が低下していた。これは、PEG 中の酸素原子と水の水素結合による影響だと考えている。

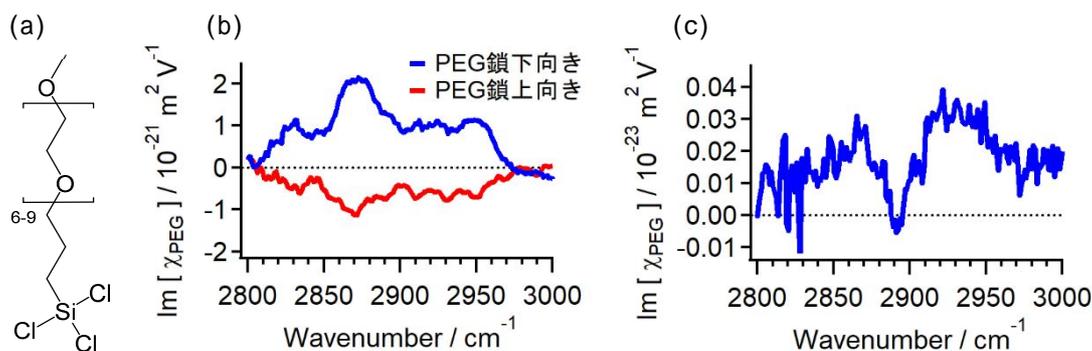


図 2 (a) 親水性シランカップリング剤の構造 (b) 空気と基板 (赤) および基板と空気 (青) の界面各々で、外部および内部反射配置で得た親水性シランカップリング膜の χ_{PEG} の虚部スペクトル (c) 基板と水界面の親水性シランカップリング膜の χ_{PEG} の虚部スペクトル。

基板のシリカコート面の経時劣化およびその他の問題と解決の取り組み

ここまでの取り組みの中で、基板のシリカコート面に準備した試料のスペクトルが、数日の時間スケールで変化してしまう様子が度々見られていた。詳しく調べるため、リン脂質の LB 膜を、シリカコートした面としていない面それぞれに準備し、各々のスペクトルの経時変化を追う実験を行った。その結果、明らかに、コートした面の劣化が大きいことを見出した。

シリカコートの際のスパッタ条件を再検討し、基板の質を改善する試みを行った。だが、その途中、シリカコート面に準備した LB 膜から、SFG 信号が全く見られなくなるという、より深刻な問題が生じた。原子間力顕微鏡で調べ、その要因は平面性の劣化であると分かりつつあるが、現時点でも解決できていない。この問題のため、当初の計画を進めることが困難な状況となった。

そこで、計画を見直し、この問題に影響されずに、かつ、当初の計画と同様に、「界面を利用する」という視点から取り組める研究として、下記の研究を計画し、進めた。

(2) 全内部反射ラマン分光による固液界面の基板支持二分子膜と相互作用しているペプチドの振動スペクトル測定

アラメチシン (ALM) という膜結合ペプチドを対象に、膜とペプチドの相互作用を調べた。ALM は、20 残基のアミノ酸で構成される、分子量約 2000 のペプチドである。その構造は、 α -helix と 3_{10} -helix で構成されている。微生物の細胞膜と結合し、膜に侵入して穴をあけることで、抗菌活性を示す。抗菌作用の機構を知るには、ALM と膜の相互作用を捉えることは重要である。

シリカプリズムと水の界面に、リン脂質 DPPC の基板支持脂質二分子膜 (SLB) を準備した。SLB の準備は、LB 法とラングミュア シェーファー (LS) 法を組み合わせで行った。その全内部反射 (TIR) ラマンスペクトルを図 3a (黒: DPPC スペクトル) に示す。2849 と 2883 cm^{-1} の振動バンドは、それぞれ CH_2 の対称と逆対称伸縮振動に、2930 cm^{-1} 付近の肩は脂質鎖の CH_3 対称伸縮と CH_2 変角振動の倍音とのフェルミ共鳴に帰属した。

この系の水層に、ALM のジメチルスルホキシド (DMSO) 溶液を、ALM の最終濃度が 0.6, 6.1, 12.2 μM となるように加えた後のスペクトルを図 3a (青, 緑, 赤) に示す。ALM 濃度の増加に伴い、2849, 2883, 2928 cm^{-1} のバンド強度が増大し、3016 cm^{-1} に新たなバンドが現れた。これらのうち、2928, 3014 cm^{-1} のバンド強度の増大は、DPPC 膜に DMSO だけを加えた参照実験でも観測されていたことから、DMSO の影響であることが分かった。

図 3a のスペクトルには ALM の影響に加え DPPC や DMSO の影響が含まれている (ALM+DPPC+DMSO スペクトル)。ここから ALM の影響だけを取り出したスペクトルを図 3b に示す。このスペクトルは、ALM+DPPC+DMSO スペクトル (図 3a 青, 緑, 赤) から DPPC スペクトル (図 3a (黒)) を引いて、ALM と DMSO の影響だけを反映したスペクトルを得た後、ここから DMSO のスペクトルを引き算して得たものである。DMSO スペクトルは、DMSO だけを加えた参照実験の結果から得たものを用いた。この二重差スペクトル (図 3b) は、DMSO 由来の 2928, 3014 cm^{-1} のバンドが除かれており、ALM の影響だけを反映していると考えられる。

ALM の影響には、ALM の振動バンドの寄与のほか、ALM に誘起された膜の構造変化に由来するものが考えられる。各々の寄与の大きさを調べるため、アルキル鎖を重水素化した DPPC (d_{62} -DPPC) の SLB への ALM 添加実験を行った。この実験では、ALM の振動バンドは CH 領域に、脂質アルキル鎖の構造変化の影響は CD 領域に現れる。 d_{62} -DPPC 膜に ALM 添加前後のスペクトル変化は、CH 領域では、DPPC 膜での実験で観られたものと同様であった。一方、CD 領域では大きなスペクトル変化は観られなかった。これらのことは ALM を加えた際のスペクトル変化 (図 3b) のうちの大部分が ALM の振動バンドが現れたことに由来しており、ALM に誘起された膜の構造変化によるものではないことを示している。

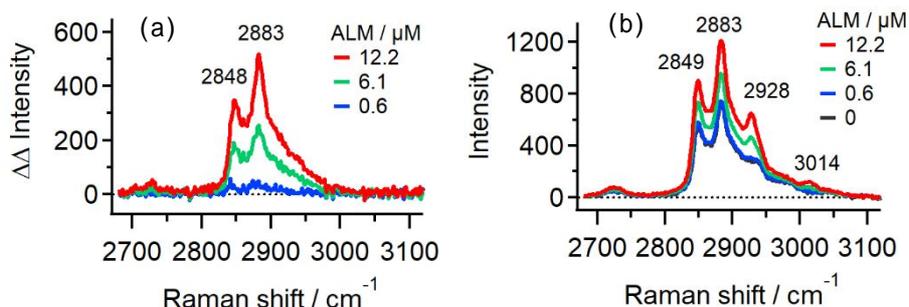


図 3 (a) シリカ/水界面の DPPC の SLB の水層に、ALM の DMSO 溶液を加えた際の全内部反射ラマンスペクトルの変化。(b) ALM の影響だけを含む二重差スペクトル。(ALM+DPPC+DMSO スペクトル - DPPC スペクトル - DMSO スペクトル)。

謝辞

シリカコート CaF_2 基板の作製や改善の検討の際には、筑波大学助教の野嶋優妃博士、学類生の沓澤祐樹さん、大坂実旺さん、成田英史さんに協力頂いた。また、全内部反射ラマン分光の実験では、同大学大学院生の佐野有里紗さんに協力頂いた。

参考文献

- 1 N. Takeshita, M. Okuno, T. Ishibashi, *J. Phys. Chem. C.* **2017**, *121*, 25206.
- 2 A. Padermshoke, S. Konishi, M. Ara, H. Tada, T. A. Ishibashi, *Appl. Spectrosc.* **2012**, *66*, 711.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 Masato Kondoh, Hayato Honda, Kei Togasaki, Yoshinobu Nishimura, Tatsuo Arai, Taka-Aki Ishibashi	4. 巻 126
2. 論文標題 Time-Resolved Infrared Spectroscopy with Multivariate Analysis on Photoinduced Proton Transfer in Aromatic Urea-Acetate Anion Complexes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 912-921
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpccb.1c09526	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 Masato Kondoh, Arisa Sano, Izuru Kawamura, Taka-aki Ishibashi	4. 巻 126
2. 論文標題 Total Internal Reflection Raman Spectra of Alamethicin Interacting with Supported Lipid Bilayers at a Silica/Water Interface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 10712-10720
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpccb.2c06371	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11件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Masato Kondoh, Taka-aki Ishibashi
2. 発表標題 Time-resolved IR spectroscopy of photo-induced ring opening and closure reactions between 2-hydroxychalcone and flav-3-en-2-ol
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野有里紗, 近藤正人, 川村出, 石橋孝章
2. 発表標題 全内部反射ラマン分光による固液界面リン脂質二重膜とアラメチシンの相互作用観測の試み
3. 学会等名 2021年日本分光学会年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤正人, 中島晃希, 新井達郎, 石橋孝章
2. 発表標題 VSFG分光で観るSHG活性色素Ap3の平面支持脂質二重膜への吸脱着過程
3. 学会等名 第15回分子科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永山弘季, 近藤正人, 田島優衣, 石橋孝章
2. 発表標題 非光反応性タンパク質の紫外光励起過渡回折格子信号とその起源の検討
3. 学会等名 第15回分子科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野有里紗, 近藤正人, 川村出, 石橋孝章
2. 発表標題 固液界面におけるリン脂質二重膜と膜透過ペプチドの全内部反射ラマンスペクトル測定
3. 学会等名 第15回分子科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島晃希, 近藤正人, 新井達郎, 石橋孝章
2. 発表標題 HD-VSFG分光法で観るSHGプローブ色素AP3と水上脂質単分子膜の相互作用
3. 学会等名 2020年度日本分光学会年次講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野有里紗, 近藤正人, 石橋孝章
2. 発表標題 リン脂質/コレステロール混合二重膜の全内部反射ラマン分光
3. 学会等名 2020年度日本分光学会年次講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 筑波標, 近藤正人, 石橋孝章
2. 発表標題 HD-VSFG分光で観る脂質二分子膜の構造に対するコレステロールの影響
3. 学会等名 2020年度日本分光学会年次講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤正人, 佐野有里紗, 鈴木沙弥, 石橋孝章
2. 発表標題 全内部反射ラマン分光による膜結合ペプチドと基板支持脂質二分子膜の相互作用の観測
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木沙弥, 近藤正人, 石橋孝章
2. 発表標題 リン脂質二分子膜中のグラミシジンAの全内部反射ラマンスペクトル測定
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 篠田亮介, 近藤正人, 百武篤也, 石橋孝章
2. 発表標題 4'-ジヘキシルアミノ-4-スルホアゾベンゼン水溶液上の脂質単分子膜のHD-VSFG分光
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022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	石橋 孝章 (Ishibashi Taka-aki) (70232337)	筑波大学・数理物質系・教授 (12102)	

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