

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02687

研究課題名(和文) 電極電位に応じたイオン液体電気二重層中の物質移動の多角的Operando解析

研究課題名(英文) Multiple Operando Analysis on Potential Dependent Material Transport in Electric Double Layer Formed at Ionic Liquid / Electrode Interface

研究代表者

福井 賢一 (Fukui, Ken-ichi)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：60262143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：可能な限り損失がない蓄電池と省エネルギー電気デバイスの構築に関わる技術の基盤となる、デバイス動作下(Operando)の電気二重層界面を明らかにするための多角的解析手法の確立を目指した。特に不揮発性でかつ安定な電解液として注目されるイオン液体中で、エネルギーキャリアとなる金属イオンが電気二重層界面において電極電位に応じてどのように振る舞うかを、表面科学的分析に適したイオン液体溶液薄膜が【開いた系】として自由な物質交換と電位制御が保証された液滴バルク(“物質・電位浴”)と接続した3極制御電気化学系を構築することで、当該研究グループが開発してきた手法により解析できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

クリーンな自然エネルギーから電気エネルギーを創り出すのと同時に重要なのは、可能な限り損失なく電気エネルギーを蓄積する蓄電池と省エネルギー電気デバイスの構築に関わる技術の確立であり、その基礎過程の重要性が再認識されようとしている。ところが、それらの機能の根幹をなす電気二重層を、デバイス動作下(Operando)で複数の解析手法で観測し、計算科学的手法も加えて総合的に解釈できるような方法論が欠如していた。本研究では、すぐれた特性に加えて不揮発性であるイオン液体電解液に着目し、その方法論を提供することができた点において意義あるものである。

研究成果の概要(英文)：A key methodology for the "Operando" analyses of the interfacial electric double layer (EDL) for the basis of development of high efficient battery and energy saving electric devices has been developed. Particularly, we focused on the analyses of the metal ions as an energy carrier of the devices in the EDL of ionic liquid (IL) electrolytes. Using a small droplet of IL solutions, whose potential is controlled with three electrodes, thin IL layer surrounding the droplet, which also responded with the potential control and works as an open system for the material transport by connecting with the droplet bulk, was successfully analyzed by EC-XPS, EC-FM-AFM, and also by MD calculations.

研究分野：表面物理化学

キーワード：Operando観測 電気二重層 イオン液体 電気化学 光電子分光

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

クリーンな自然エネルギーから電気エネルギーを創り出すのと同時に重要なのは、可能な限り損失なく電気エネルギーを蓄積する蓄電池と省エネルギー電気デバイスの構築に関わる技術の確立であり、その基礎過程の重要性が再認識されようとしている。電極界面に生じる電気二重層には大きな電場が集中し、電極での電気化学反応の driving force となっているが、液中での電子移動反応の速度を定式化した Marcus 理論の枠組みでも分かるように、電子移動反応には電極電位で決まる平均的な電気二重層構造以上に局所的なイオンの分布が重要である。ところが、デバイス動作下(Operando)にある電気二重層の解析手法は明らかに立ち後れている。

本研究でターゲットとするイオン液体(IL)は、不揮発・難燃性でかつ広い電位窓をもつ化学的に安定な電解液であり、延焼の危険性がない二次電池や電気化学デバイスへの応用が期待される。その一方で、同じ IL であっても電極材料の種類によって界面近傍での構造化の度合いが大きく異なることが申請者らの研究によって示され、電気二重層の詳細な描像や例えば Li イオン電池のエネルギーキャリアとなる  $\text{Li}^+$  の二重層内での拡散が構造化によりどう制限されるのか、など未だ明らかになっていないことも多い。

申請者らはこれまで、電気化学系の電極近傍の電解質溶液の局所解析を Operando で行う手法の開発に注力してきた。その一つが、イオン液体など不揮発性の電界液には制限されるが、電極電位制御をしながら元素種、価数、化学環境の空間分布計測を行う分光法(EC-XPS)である。しかし、原理的に(真空中に設置された分光器側からみて)真空から深さ 2 nm 程度までの信号しか得られない。一方、電極界面の光電子による解析のため、分析深さ 2 nm 以内にイオン液体を薄膜化すると、薄膜内でのイオンの垂直拡散は解析できるが、分子数および組成が限られた『閉じた系』であることによる問題が顕在化してきた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、イオン液体が形成する電気二重層の中で、エネルギーキャリアとなる金属イオンなどの移動が電極電位に応じてどのように起こるのかを、デバイス動作下(Operando)で多角的に解析する実験および計算科学的手法の決定版を確立することである。表面科学的分析に適したイオン液体溶液薄膜が【開いた系】として自由な物質交換と電位制御が保証されたバルク(“物質・電位浴”)と接続した系を利用するところに最大の特徴がある。液滴を縁取る厚さ数 nm の薄膜は数 100  $\mu\text{m}$  にもおよび、バルク部分との自由な物質交換が可能な開いた系であり、3 電極系で電位も制御されている。さらに、測定に必要な X 線照射によるダメージも回避する方策が準備されている。電極電位に応じた金属イオンの空間分布、溶媒和状態の解析から、2 次電池性能にとって重要な負極皮膜の解析までを見据えた、総合的提案である。

### 3. 研究の方法

本研究では、表面科学的分析に適したイオン液体薄膜と薄膜内の物質量を調整するパuffers や 3 極制御で溶液電位を規定できるバルクイオン液体が接続されたイオン液体溶液の液滴を EC-XPS に用いることで、イオン液体/電極界面の多角的 Operando 解析を実現する。イオン液体溶液液滴を縁取る薄膜は数 100  $\mu\text{m}$  にもおよび、バルク部分との自由な物質交換が可能な【開いた系】であり、電位も制御できるため、目的に合う界面解析が可能となるはずである。また、厚みに応じた界面でのイオン液体の構造化を、我々が開発した電気二重層領域の顕微解析手法(EC-FM-AFM)により解析する。さらに、電解液の界面近傍での電子状態解析法として開発してきた電気化学紫外全反射吸収分光(EC-ATR-FUV)による解析も進め、多角的 Operando 解析を実現する。

### 4. 研究成果

以下に本研究により得られた主要な結果について述べる。

電気化学光電子分光(EC-XPS)による電極電位に応じた金属イオン空間分布測定

Au(111)電極上に数  $\mu\text{L}$  のイオン液体(IL)液滴を垂らして電極を配置して EC-XPS 測定をする概念図、液滴を縁取る薄膜領域の厚み分布の計測例、および電極電位を変えたときのスペクトルの変化を図 1 に示す。IL の厚みが数  $\mu\text{m}$  で、Au(111)電極からの Au 4f 信号が検出できる薄膜範囲においても、電極電位(ここではバルクのイオン液体の電位に連動した基準電極の電位を変えて

いる)の変化に応じたカチオンおよびアニオンの  $N 1s$  スペクトルが想定通りに電位シフトしていることが確認できる。

このように系の構築に問題がないことを確認した上で、二次電池のエネルギーキャリアとなり得る  $Mg^{2+}$  イオンを溶質とする IL 電解液の液滴を Au(111)電極上に乗せて 3 極系を同様に形成し、電極に pzc(potential of zero charge)から電位を印加して電荷をもたせたときに、液滴の周辺薄膜領域での組成変化を EC-XPS で測定した。予想通り、光電子信号の検出深さの制限により薄膜領域でのみ電極電位応答がみられ、例えば、電極が負電荷をもつ負の電位では、 $Mg^{2+}$  イオンが電極と接する深い界面に引き寄せられると同時にバルク領域からの拡散によって薄膜領域にも運ばれることが明らかとなった。同時に、IL を構成するカチオン/アニオン比も変化する。また、電極が反対符号をもつ電位では、 $Mg^{2+}$  イオンが薄膜領域からバルク領域へと拡散することも確認された(論文投稿準備中)。さらにこれらの変化にはヒステリシスも観測された。

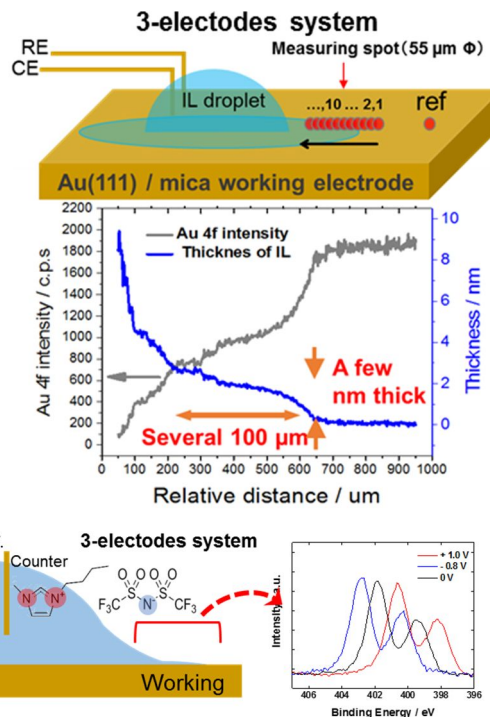


図 1 イオン液体液滴を縁取る薄膜領域の厚み分布の実験結果(中段)と 3 極電位制御中の EC-XPS 測定と概念図(上段)および実際の電位依存 XPS スペクトル(下段)。

分子動力学(MD)計算による電極電位に応じた金属イオン空間分布解析と EC-XPS との整合性評価

MD 計算により、(i)真空/IL 界面が IL/電極界面での挙動に影響を与えるか(膜厚依存)、(ii)バルク量の液体に埋もれた界面と薄膜界面とでは電位応答は同じなのかについて検証を行った。その結果、典型的 IL の場合、IL 層の厚みが 2 nm 以下になると、グラファイト電極上でのイオン液体の配向や拡散挙動に顕著な変化が見られることが分かった。つまり、2 nm 以下についての の 実験の解析に、この点を考慮する必要があることが分かった。

#### 金属イオンの界面垂直方向の動きと溶媒和状態の解析

電極界面近傍での化学種の電子遷移スペクトルの測定が可能な EC-ATR-FUV を用いて、 $Li^+$  イオンに対するイオン液体アニオンの配位数を数学的な解析手法を適用することで決定できることを実証した。分子動力学(MD)計算で  $Li^+$  イオンに直接配位することが見込まれるアニオン数よりも、さらに 1 つ多くのアニオンの電子状態まで影響を与えていることが同測定・解析から分かり、その時間依存状態密度汎関数(TFD-DFT)の計算により、遷移状態の波動関数の混成が起こることが確認された(図 2)。これを元に溶媒和状態の電位依存性に関する解析を進めた。さらに、MD 計算により、電極表面電荷に応じた  $Li^+$  イオンの電極表面への接近挙動や、脱溶媒和状態への遷移も確認された。 $Mg^{2+}$  をエネルギーキャリアとして含むイオン液体溶液液滴での EC-XPS 測定では、負電荷が生じる電極に対して、 $Mg^{2+}$  の液滴バルク部から薄膜電気二重層領域への垂

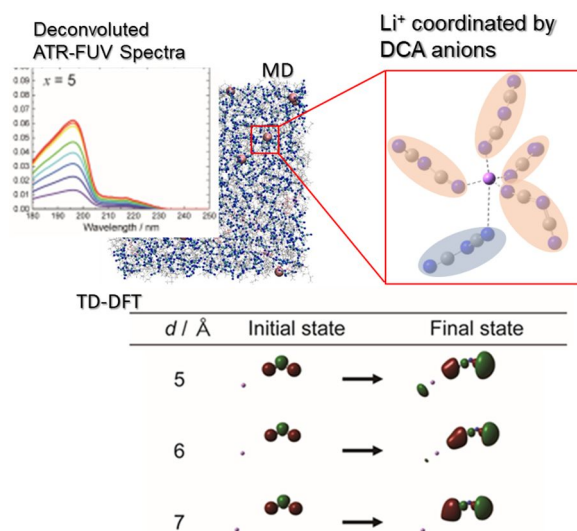


図 2 イオン液体(BMP-DCA)中で  $Li^+$  イオンが何個の DCA アニオンに配位されているかの解析。MD 計算では 4 個のアニオンしか配位圏内には入らないが、EC-ATR-FUV のスペクトルの数学的解析と TD-DFT 計算より 5 個目の関与が実証された。

直拡散も確認された。

### EC-FM-AFM による IL 液滴/電極界面の電位に応じた局所構造解析

IL 液体液滴の薄膜領域において Au 電極界面との界面に生じるイオン液体の構造化を EC-FM-AFM によるフォーススペクトルで測定することに成功した。さらに、IL 液滴の外気との界面位置をフォーススペクトルで捉えられること、すなわち IL 薄膜の厚みや、その厚み情報をつなげることで液滴薄膜の形状を評価できることを見出した。これまで EC-XPS 測定でしか薄膜厚みの評価ができなかったが、EC-FM-AFM によるフォーススペクトルでの評価が可能になったことで、解析可能なレベルが格段に上がったことは本研究の最大の成果の一つである(図 3)。

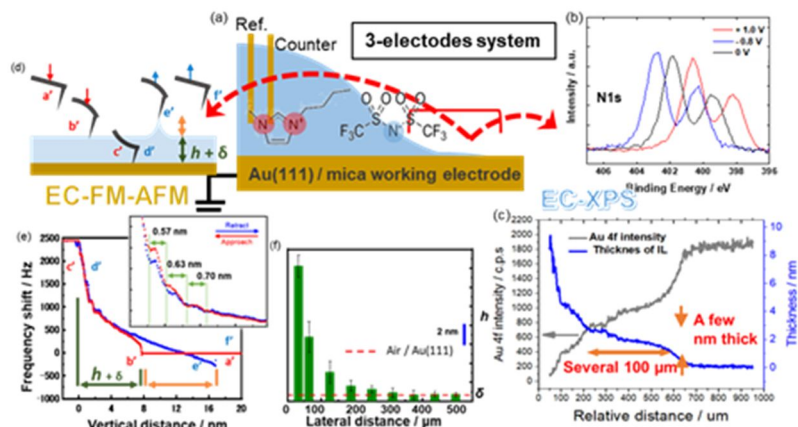


図 3 イオン液体液滴を縁取る薄膜領域の EC-XPS および EC-FM-AFM による「厚み・組成・構造化」の電位依存局所解析。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11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 Masaya Imai, Ichiro Tanabe, Akifumi Ikehata, Yukihiro Ozaki, Ken-ichi Fukui	4. 巻 22
2. 論文標題 Attenuated Total Reflectance Far-Ultraviolet and Deep-Ultraviolet Spectroscopy Analysis of the Electronic Structure of a Dicyanamide-Based Ionic Liquid with Li+	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 21768-21775
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CP03865B	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 Ichiro Tanabe, Musashi Shimizu, Rikuto Kawabata, Chiaki Katayama, Ken-ichi Fukui	4. 巻 301
2. 論文標題 Far- and deep-ultraviolet surface plasmon resonance using Al film for efficient sensing of organic thin overlayer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A	6. 最初と最後の頁 111661 (6 page)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2019.111661	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 Masaya Imai, Yasuyuki Yokota, Ichiro Tanabe, Kouji Inagaki, Yoshitada Morikawa, Ken-ichi Fukui	4. 巻 22
2. 論文標題 Correlation between Mobility and Hydrogen Bonding Network of Water at Electrified-Graphite Electrode Using Molecular Dynamics Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 1767-1773
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CP06013H	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 Daijiro Okaue, Ichiro Tanabe, Sakurako Ono, Kota Sakamoto, Taiki Sato, Akihito Imanishi, Yoshitada Morikawa, Jun Takeya, Ken-ichi Fukui	4. 巻 124
2. 論文標題 Ionic-Liquid-Originated Carrier Trapping Dynamics at the Interface in Electric Double-Layer Organic FET Revealed by Operando Interfacial Analyses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 2543 ~ 2552
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b10636	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 Yusuke Morino, Yasuyuki Yokota, Hisaya Hara, Ken-ichi Bando, Sakurako Ono, Akihito Imanishi, Yugo Okada, Hiroyuki Matsui, Takafumi Uemura, Jun Takeya, Ken-ichi Fukui	4. 巻 22
2. 論文標題 Rapid improvements in charge carrier mobility at ionic liquid/pentacene single crystal interfaces by self-cleaning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 6131-6135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CP00149J	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 Morino Yusuke, Yokota Yasuyuki, Bando Ken-ichi, Hara Hisaya, Imanishi Akihito, Takeya Jun, Fukui Ken-ichi	4. 巻 118
2. 論文標題 Operando atomic force microscopy study of electric double-layer transistors based on ionic liquid/rubrene single crystal interfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 243301-243301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0053848	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 Tanabe Ichiro, Imoto Iroha, Okaue Daijiro, Imai Masaya, Kumagai Shohei, Makita Tatsuyuki, Mitani Masato, Okamoto Toshihiro, Takeya Jun, Fukui Ken-ichi	4. 巻 4
2. 論文標題 Electronic excitation spectra of organic semiconductor/ionic liquid interface by electrochemical attenuated total reflectance spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Chemistry	6. 最初と最後の頁 88 (8 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42004-021-00525-y	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 Imai Masaya, Tanabe Ichiro, Sato Taiki, Fukui Ken-ichi	4. 巻 273
2. 論文標題 Local structures and dynamics of interfacial imidazolium-based ionic liquid depending on the electrode potential using electrochemical attenuated total reflectance ultraviolet spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 121040-121040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.saa.2022.121040	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 Morino Yusuke, Fukui Ken-Ichi	4. 巻 38
2. 論文標題 Interface Behavior of Electrolyte/Quinone Organic Active Material in Battery Operation by <i>Operando</i> Surface-Enhanced Raman Spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 3951-3958
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.2c00344	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 福井賢一	4. 巻 65
2. 論文標題 電気化学周波数変調AFMによる電気二重層界面のOperando局所解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 表面と真空	6. 最初と最後の頁 47-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.65.47	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 福井 賢一	4. 巻 91
2. 論文標題 界面の機能を生みだす電気2重層の分子スケールでの描像を解明する	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 15-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.91.1_15	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43件（うち招待講演 4件／うち国際学会 16件）

1. 発表者名 福井賢一
2. 発表標題 グラファイト電極上に形成される電気二重層における水分子およびイオンの動的挙動の解析
3. 学会等名 第3回ハイドロジェノミクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福井賢一
2. 発表標題 走査プローブ顕微鏡による機能材料表面における化学プロセスの微視的解明
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣田佑輝，田邊一郎，福井賢一
2. 発表標題 イオン液体先行薄膜に対するFM-AFMを用いた局所構造解析
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 佐藤大輝，上田滉輝，高橋亮広，田邊一郎，今西哲士，福井賢一
2. 発表標題 電気化学X線光電子分光法によるグラファイト電極の電位に応じた界面イオン液体の局所構造変化の解析
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 北野祥平，田邊一郎，福井賢一
2. 発表標題 非水電解液 / グラファイト電極界面におけるトリオキソトリアンギュレンの 配向と酸化還元活性との相関
3. 学会等名 電気化学会第88回大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 田邊一郎, 福井賢一
2. 発表標題 遠紫外分光法の電気化学系への展開
3. 学会等名 分光イノベーション研究会「分光学夢シンポジウム」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken-ichi Fukui, Akihiro Takahashi, Hiroki Ueda, Akihito Imanishi
2. 発表標題 Potential dependent diffusion behavior of Mg <sup>2+</sup> ions at interfacial ionic liquid on Au electrode analyzed by electrochemical XPS
3. 学会等名 21st International Vacuum Congress (IVC-21) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福井賢一
2. 発表標題 イオン液体を用いた電気化学デバイスの電極界面に生じる電気二重層の局所解析
3. 学会等名 界面機能化学セミナー(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ichiro Tanabe, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Far- and deep-ultraviolet surface plasmon resonance sensors
3. 学会等名 ACS Fall 2019 National Meeting & Exposition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田邊一郎, 今井雅也, 井本彩葉, 寿山安紀, 福井賢一
2. 発表標題 遠紫外光を用いた新規界面分光による界面電解液の電子状態解析
3. 学会等名 第124回触媒討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡上大二朗, 大野桜子, 阪本康太, 名藤広晃, 佐藤大輝, 田邊一郎, 今西哲士, 竹谷純一, 福井賢一
2. 発表標題 電気二重層有機 FETの動作過程における界面イオン液体の分子スケールダイナミクス
3. 学会等名 第13回分子科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小山翔大, 福井賢一, 今西哲士
2. 発表標題 イオン液体中電極近傍におけるホッピング拡散に誘起された金属イオン欠乏層形成と金属電析への影響
3. 学会等名 第13回分子科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田邊一郎, 寿山安紀, 佐藤大輝, 今井雅也, 福井賢一
2. 発表標題 電極界面におけるイオン液体の電子励起スペクトル測定
3. 学会等名 第13回分子化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米川昌輝, 田邊一郎, 稲垣耕司, 森川良忠, 福井賢一
2. 発表標題 段差を持つグラファイト電極のステップ高さに応じた界面イオン液体の配向・運動性の分子動力学計算による解析
3. 学会等名 第13回分子科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井雅也, 田邊一郎, 福井賢一
2. 発表標題 減衰全反射遠紫外分光法によるイオン液体電解がもつ子状態の金属イオンへの配位による変化への配位による変化
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 難波 亮太郎, 米川昌輝, 田邊一郎, 笹原亮, 大西洋, 福井賢一
2. 発表標題 周波数変調 AFM によるグラファイト電極上に調製した異なる深さの穴近傍における界面イオン液体の構造化の解析
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡上大二郎, 大野桜子, 阪本康太, 名藤広晃, 佐藤大輝, 田邊一郎, 今西哲士, 竹谷純一, 福井賢一
2. 発表標題 電気二重層有機トランジスタの不安定動作を引き起こす界面イオン液体の分子ダイナミクス
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井本彩葉, 岡上大二朗, 熊谷翔平, 牧田龍幸, 三谷真人, 田邊一郎, 岡本敏宏, 竹谷純一, 福井賢一
2. 発表標題 減衰全反射遠紫外分光法による p 型有機半導体薄膜電気二重層トランジスタの動作中の電子状態変化の解析
3. 学会等名 2019日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡上大二朗, 大野桜子, 阪本康太, 名藤広晃, 佐藤大輝, 田邊一郎, 今西哲士, 竹谷純一, 福井賢一
2. 発表標題 イオン液体ゲート電気二重層有機トランジスタの界面層構造とデバイス動作安定性との相関
3. 学会等名 2019日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 難波亮太郎, 米川昌輝, 田邊一郎, 笹原亮, 大西洋, 福井賢一
2. 発表標題 周波数変調AFMによるグラファイト電極上の異なる深さの段差近傍における界面イオン液体の構造化の解析
3. 学会等名 2019日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田邊一郎, 寿山安紀, 佐藤大輝, 今井雅也, 福井賢一
2. 発表標題 電気化学・減衰全反射型遠紫外分光法の開発と電極界面イオン液体の電子励起スペクトル測定
3. 学会等名 2019日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daijiro Okaue, Ichiro Tanabe, Sakurako Ono, Kota Sakamoto, Taiki Sato, Akihito Imanishi, Yoshitada Morikawa, Jun Takeya, Ken-ichi Fukui,
2. 発表標題 The Reversible Structuring of Ionic-Liquid Monolayer in Electric Double Layer OFET Revealed by Operand Investigations
3. 学会等名 International Symposium for Nano Science (ISNS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Ueda, Akihiro Takahashi, Ichiro Tanabe, Akihito Imanishi, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Structure of ionic liquid / Au(111) electrode interface dependent on Mg <sup>2+</sup> concentration and an electrode voltage analyzed by XPS
3. 学会等名 International Symposium for Nano Science (ISNS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Hirota, Ichiro Tanabe, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Local Analysis of Interfacial Structure at Mg <sup>2+</sup> -containing Ionic Liquid / Au(111) using Frequency Modulation Atomic Force Microscopy
3. 学会等名 International Symposium for Nano Science (ISNS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Koyake, Kota Sakamoto, Akihito Imanishi, Ichiro Tanabe, Jun Takeya, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Local Operational Mechanism of Electric Double Layer OFET at the Ionic liquid/Organic Semiconductor Interface revealed by Electrochemical Frequency Modulation AFM Analyses
3. 学会等名 International Symposium for Nano Science (ISNS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshinobu Fujihira, Ken-ichi Fukui, Akihito Imanishi
2. 発表標題 Behavior of Solute Metal Ions at Ionic Liquid/Electrode Interface Studied by Electrochemical Impedance Spectroscopy
3. 学会等名 International Symposium for Nano Science (ISNS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaya Imai, Ichiro Tanabe, Tomonori Kakinoki, Aki Suyama, Taiki Sato, Kenji Miyatake, Kenichi Oyaizu, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Novel Spectroscopy Using Far UV Light Applied for Electronic States Analyses of Interfacial Electrolyte and Hydrogen Storing Materials
3. 学会等名 1st International Symposium "Hydrogenomics" (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井 雅也, 田邊 一郎, 池羽田 晶文, 尾崎 幸洋, 福井 賢一
2. 発表標題 減衰全反射遠紫外分光法を用いたイオン液体電解液中での金属イオン溶媒和による電子構造解析
3. 学会等名 電気化学会第87回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田邊一郎, 今井雅也, 井本彩葉, 福井賢一
2. 発表標題 30. 電気化学遠紫外分光法の開発～電極界面イオン液体の電子励起スペクトル測定～
3. 学会等名 日本化学会第100回春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daijiro Okaue, Ichiro Tanabe, Sakurako Ono, Kota Sakamoto, Taiki Sato, Akihito Imanishi, Yoshitada Morikawa, Jun Takeya, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Carrier Trapping / Detrapping Dynamics in Electric Double Layer OFET Caused by the Anion-Dependent Structuring of the Ionic-Liquid Monolayer
3. 学会等名 The 100th CSJ Annual Meeting
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 米川 昌輝, 田邊 一郎, 難波 亮太郎, 笹原 亮, 大西 洋, 森川 良忠, 福井 賢一
2. 発表標題 界面イオン液体の構造にグラファイト電極の複数原子層ステップはどのように影響を与えるのか
3. 学会等名 日本化学会第100回春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daijiro Okaue, Ichiro Tanabe, Sakurako Ono, Kota Sakamoto, Taiki Sato, Akihito Imanishi, Yoshitada Morikawa, Jun Takeya, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Ionic-Liquid-Originated Carrier Trapping Dynamics for the Electric Double-Layer Organic FET Revealed by Operando Interfacial Analyses
3. 学会等名 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taiki Sato, Hiroki Ueda, Akihiro Takahashi, Yuki Hirota, Ichiro Tanabe, Akihito Imanishi, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Analyses of the interfacial ionic liquid on Au(111) electrode using electrochemical XPS through the precursor film region
3. 学会等名 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ichiro Tanabe, Iroha Imoto, Daijiro Okaue, Masaya Imai, Shohei Kumagai, Tatsuyuki Makita, Masato Mitani, Toshihiro Okamoto, Jun Takeya, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Electrochemical ATR ultraviolet-visible spectroscopy applied for organic semiconductor/ionic liquid interface
3. 学会等名 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomonori Kakinoki, Ichiro Tanabe, Masaya Imai, Kenji Miyatake, Kenichi Oyaizu, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Interfacial Spectroscopic Study using Far UV/Deep UV Light for Electronic States Analyses of Interfacial Electrolyte and Hydrogen-Storing Materials
3. 学会等名 Material Research Meeting 2021 (MRM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Intefacial Spectroscopic Study using Far UV/ Deep UV Light for Electronic States Analyses
3. 学会等名 11th Iwasawa conference (International Conference on State-of-the Art Catalysis and Surface/Interface Science for Sustainable Society) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ichiro Tanabe, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Electrochemical attenuated total reflectance spectroscopy in far- and deep-ultraviolet regions
3. 学会等名 SPIE Annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Masaya Imai, Ichiro Tanabe, Akifumi Ikehata, Yukihiro Ozaki and Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Spectroscopic analyses of solvation structure for metal ions formed by ionic liquid using attenuated total reflectance far ultraviolet (ATR-FUV) spectroscopy
3. 学会等名 The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ichiro Tanabe, Ken-ichi Fukui
2. 発表標題 Development of electrochemical far- and deep-ultraviolet spectroscopy
3. 学会等名 The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田邊一郎, 井本彩葉, 岡上大二朗, 今井雅也, 熊谷翔平, 牧田龍幸, 三谷真人, 岡本敏宏, 竹谷純一, 福井賢一
2. 発表標題 電気化学ATR紫外可視分光法による有機半導体/イオン液体界面の電子状態解析
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 森野裕介, 福井賢一
2. 発表標題 ベンゾキノン末端単分子膜修飾電極におけるLi脱挿入過程のOperando EC-SERSによる解析
3. 学会等名 2021年電気化学秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田邊一郎, 井本彩葉, 岡上大二郎, 今井雅也, 熊谷翔平, 牧田龍幸, 三谷真人, 岡本敏宏, 竹谷純一, 福井賢一
2. 発表標題 トランジスタ動作中におけるイオン液体/有機半導体界面のATR紫外分光研究
3. 学会等名 2021年度日本分光学会年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田邊一郎, 井本彩葉, 岡上大二郎, 今井雅也, 熊谷翔平, 牧田龍幸, 三谷真人, 岡本敏宏, 竹谷純一, 福井賢一
2. 発表標題 電気化学ATR紫外可視分光法の開発とイオン液体/有機半導体界面への応用
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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本表面真空学会編	4. 発行年 2021年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 576
3. 書名 図説 表面分析ハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>大阪大学基礎工 福井研究室  <a href="http://www.chem.es.osaka-u.ac.jp/surf/">http://www.chem.es.osaka-u.ac.jp/surf/</a>  Recent Achievements of Fukui Lab.  <a href="https://www.facebook.com/Recent-Achievements-of-Fukui-Lab-SurfInterface-Chem-Group-in-Osaka-Univ-792442370830639/">https://www.facebook.com/Recent-Achievements-of-Fukui-Lab-SurfInterface-Chem-Group-in-Osaka-Univ-792442370830639/</a></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
研究協力者	森川 良忠  (Morikawa Yoshitada)	大阪大学・大学院工学研究科・教授  (14401)	
研究協力者	今西 哲士  (Imanishi Akihito)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授  (14401)	
研究協力者	田邊 一朗  (Tanabe Ichiro)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  (14401)	

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