

令和 2 年 8 月 24 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04953

研究課題名(和文) 異常クーロン力空間を利用したカーボンナノチューブ イオン液体強磁性複合材の創成

研究課題名(英文) Fabrication of ferromagnetic CNT (carbon nanotube)-IL (ionic liquid) composites using anomalous Coulombic fields of carbon nanopores

研究代表者

二村 竜祐 (Futamura, Ryusuke)

信州大学・学術研究院理学系・助教

研究者番号：90647223

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、カーボンナノチューブが有する特異的なクーロン相互作用空間と、閉じ込めた分子集団を一方向に並ばせる性能を最大限に有効活用し、磁性イオン液体との複合化により1次元強磁性材料の合成を目指した。目的の達成のため、1) 磁性イオン液体を含むイオン液体構造の基礎科学的解明、2) イオン液体がカーボンナノチューブの1次元細孔中で示す秩序構造形成機構の解明、3) 磁性イオン液体とカーボンナノチューブとの複合材料の合成を行った。特に3)では、通常は液体である磁性イオン液体をナノチューブと混合させるだけで、結晶様の1次元秩序構造を得ることに成功した。本研究により新たな超高容量記憶デバイスの開発が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、カーボンナノチューブを含むナノカーボン細孔中でのイオン液体構造の特異性を明らかにした。具体的には、導電性を有するナノカーボン細孔中でイオン液体は、同種イオンが近接した超イオン状態を形成することを解明した。これはナノ空間を利用することで、お互いにクーロン斥力が働く磁性イオンを密に配列させ、結果として強磁性を示すナノカーボン複合材料を合成可能であることを強く支持する。さらに本研究では磁性イオン液体とカーボンナノチューブの複合材料が秩序構造を形成することを明らかにし、既存の磁気記憶デバイスを凌ぐ新規超高容量記憶デバイスの開発に向け大きく前進した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aim to create hybrid materials of magnetic ionic liquids in carbon nanotubes, which show high magnetic response due to the unique 1 dimensional ordering of magnetic ions. For this purpose, we attempted following three studies; 1) The elucidation for the anomalous ionic liquid structure confined in carbon nanopores. 2) The 1D order structure formation of ionic liquids in carbon nanotubes and understanding of the ordered structure. 3) Synthesis for the hybrid materials of magnetic ionic liquid in carbon nanotubes. In particular for 3), we succeeded to obtain the hybrid materials with crystal-like ordered structures, implying the possibility for the developments of the brand-new memory devices with ultra-high capacity.

研究分野：ナノ空間科学

キーワード：複合材料 磁性材料 イオン液体 X線散乱測定 磁化率測定 カーボンナノチューブ 1次元構造 分子シミュレーション

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、研究者個人に帰属されます。

## 1. 研究開始当初の背景

H26-28 の科研費研究(若手研究 B 代表者:二村竜祐)で、我々は活性炭細孔中に常磁性イオン液体(1-エチル-3-メチルイミダゾリウム テトラクロロフェレート,EMI-FeCl<sub>4</sub>)を導入することで、磁石に引き付けられるカーボン複合材の合成法の確立に成功した(図1)。さらに、磁性イオン液体がナノカーボン細孔中でバルクとは異なった分子間構造及び磁気相転移挙動を示すことを突きとめ、複合材の様々な応用への可能性を示した。



図1 合成した磁性イオン液体-活性炭複合材料

一方で、金属的な導電性を待つナノ多孔体の内部空間に捕らわれたイオンや分子は、ナノスケールの静電遮蔽効果を受けてイオン間のクーロン相互作用が消失することが理論計算により知られている(S. Kondrat, *J. Phys.: Condens. Mater.* 2011)。

では、金属的な導電性を持つカーボンナノチューブ細孔中に磁性イオン液体を導入することで、お互いに斥力が働く磁性イオン(FeCl<sub>4</sub><sup>-</sup>)を、ナノ空間を活用することで密に配列させ、結果として強磁性を示すナノカーボン複合材料を合成できないだろうか？

常磁性イオン液体との複合体が強磁性を発現するためには、1次元ナノ空間で磁性イオンの磁気スピンの並んだ長距離秩序配列を形成する必要がある。そこで本研究ではまず、カーボンナノチューブ(CNT)の電導性由来する高い静電遮蔽効果を利用して、磁性イオン間の斥力相互作用を弱める。さらにCNT内部で分子集団がバルクでは起こり得ない秩序構造や相挙動を示すことを利用する。これらのCNTがもたらす、磁性イオンが近距離に並ぶ静電遮蔽効果とその内部にイオンを一方向に並ばせる幾何構造とのシナジー効果により、CNTと磁性イオン液体の複合化によって強磁性材料を合成する。

このように、CNTの有する優れた性能及び特異な1次元ナノ空間を最大限に有効に活用することで、CNT1本1本が独立した磁石として働く超高容量磁気記憶デバイスの創成が可能になると期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究では反磁性のCNTと常磁性イオン液体の複合化により、強磁性を示す1次元ナノカーボン磁石を合成し、そして強磁性発現機構をイオンの集団構造から明らかにすることを最終目的とした。そのために1) イオン液体が2次元のスリット型ナノ空間で形成する超イオン状態の解明、2) イオン液体が1次元のシリンダー型ナノ空間で形成する特異な秩序構造形成の解明、3) 磁性イオン液体構造解析法の確立、4) 磁性イオン液体-CNT複合材料の調製法の確立と複合材の構造解析を行ったので報告する。

## 3. 研究の方法

### A. イオン液体の構造解析

近年の技術的な発展により均一性の高い様々なCNT(シングルウォール、ダブルウォール、マルチウォールなど)が市販されるようになったが、価格は高価であり、試料合成のスクリーニング段階では1mg程度の微量でも質の高いX線散乱測定が行える必要がある。そこで、本研究では2次元ディテクターを備えた微量に対し迅速かつ高精度の測定が可能な、イメージングプレート(IP)X線回折装置(Rapid II, 株式会社リガク)を導入した(図2)。これにより複合材試料の合成とカーボンナノチューブ細孔中の磁性イオン液体の構造の解析(X線散乱測定)を並行する効率的な実験を行うことが可能となった。本研究では、磁性イオン液体であるEMI-FeCl<sub>4</sub>やBMI-FeCl<sub>4</sub>(1-ブチル-3-メチル

イミダゾリウム テトラクロロフェラート)に加え、一般的なイオン液体である EMI-TFSI (1-エチル-3-メチルイミダゾリウムビス (トリテトラフルオロメチルスルフォニウム) イミド) を用いた検討を行った。

X 線散乱測定解析には、分子シミュレーションを組み合わせた手法であるハイブリッドリバースモンテカルロ (HRMC) 法を用いた。バルクセル、スリット型細孔セル、シリンダー型細孔セルにイオンを導入し構造及びポテンシャルの最適化後のイオン液体について詳細な構造解析を行った。

### B. 磁性イオン液体の分子内パラメータの決定

イオン液体の EMI や BMI などのカチオンや TFSI アニオンについては HRMC 法で必要な分子内パラメータが報告されている。一方で FeCl<sub>4</sub> についての分子内パラメータの報告例はない。そこで本研究では Gaussian09 による密度汎関数計算を行い、FeCl<sub>4</sub> イオンの分子内構造及び点電荷を計算し (図 3)、HRMC シミュレーションに用いた。

### C. 磁性イオン液体-CNT 複合材料の調製

目的の細孔充填率 (ここでは 0.9) となるような濃度でイオン液体を溶解したアセトニトリル溶液を調製し、カーボン材料によく含浸させ、ゆっくりと加熱乾燥しアセトニトリルを徐々に蒸発させた。その後真空加熱乾燥 (150 °C, < 0.1 Pa) を 2 日間おこなうことで細孔中のみイオン液体を残留させたサンプルを得た。磁性イオン液体-CNT 複合材料に対しても同様の手法により調製を行った。また CNT 系では、高温での空気酸化により開口処理を行ったサンプルを用いた。調製を行ったサンプルについては X 線散乱測定により構造を評価した。

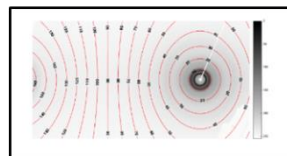
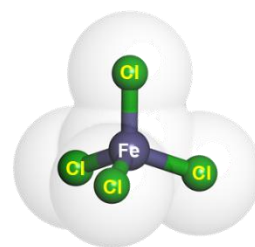


図 2 IP-XRD 装置外観と 2D データ



| atom | $\sigma$ (nm) | $\epsilon$ (kJ mol <sup>-1</sup> ) | q (e)    |
|------|---------------|------------------------------------|----------|
| Fe   | 0.113         | 0.125                              | 2.38824  |
| Cl   | 0.377         | 0.620                              | -0.84706 |

図 3 FeCl<sub>4</sub> の分子構造とパラメータ

## 4. 研究成果

### 1) イオン液体が 2 次元のスリット型ナノ空間で形成する超イオン状態の解明

一般的なイオン液体である EMI-TFSI をスリット型のナノ空間を有する活性炭細孔中に導入し、X 線散乱測定及び HRMC シミュレーションにより構造解析を行った。図 4 に種々の細孔中 (細孔径,  $w = 0.7-1.5$  nm) における EMI-TFSI 構造の HRMC シミュレーション結果を示した。図 4 の上は細孔径方向のイオンの分布、そして下は陰イオンの周りの第一配位圏における各イオンの割合を示している。イオンの大きさで 2 層よりも小さな空間である 0.7 及び 0.8 nm 細孔中でのみ陰イオンの周りの同種イオン (陰イオン) の割合が 20%を超えていることがわかる。このことは 2 分子サイズよりも小さな細孔中ではイオン液体が形成するクーロン力による秩序構造が一部乱れた構造を形成することを示しており、本研究の根拠となる異常クーロン力空間の証拠となる重要な研究成果である (R. Futamura et al,

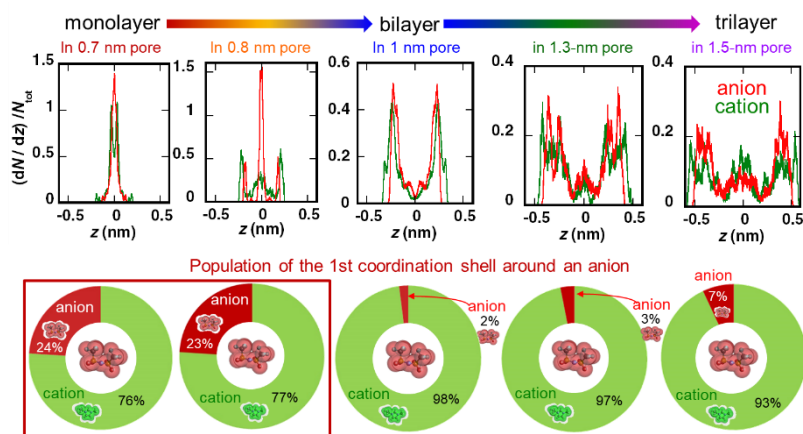


図 4 (上) 細孔中でのイオンの分布 (下) 陰イオンの配位構造

## 2) イオン液体が 1 次元のシリンダー型ナノ空間で形成する特異な秩序構造形成の解明

CNT は 1 次元のシリンダー型ナノ空間を有しており、活性炭が有する 2 次元のスリット型細孔とは次元性が異なる。そのため細孔中で形成されるイオン液体構造は 1 次元的な配列構造となると予測される。CNT 細孔中 ( $w = 1.5$  及び  $2.0$  nm) にイオン液体である EMI-TFSI を導入し、X 線散乱測定を行った。図 5 に CNT 細孔中に導入した EMI-TFSI の X 線散乱プロファイルを示した。CNT 細孔中では、イオン液体の同種イオン間及び異種イオン間の規則配列に関する  $9\text{ nm}^{-1}$  及び  $14\text{ nm}^{-1}$  のピーク強度の大小がバルクと比べ逆転した。さらに  $1.5\text{ nm-CNT}$  ではバルクや活性炭細孔中及び  $2\text{ nm-CNT}$  細孔中では見られなかったショルダーが  $7.7\text{ nm}^{-1}$  及び  $12\text{ nm}^{-1}$  に見られた。MC シミュレーションにより、 $1.5\text{ nm}$  の CNT 細孔はチューブ径方向の同一平面上に EMI カチオンと TFSI アニオンが対になって入ることができるギリギリの大きさであり、イオンの配向が制限されることがわかる(図 6)。結果として、 $1.5\text{ nm}$  細孔中ではチューブ軸方向に一次元構造由来の秩序構造が形成され、これは X 線散乱測定の結果と良い一致を示した。

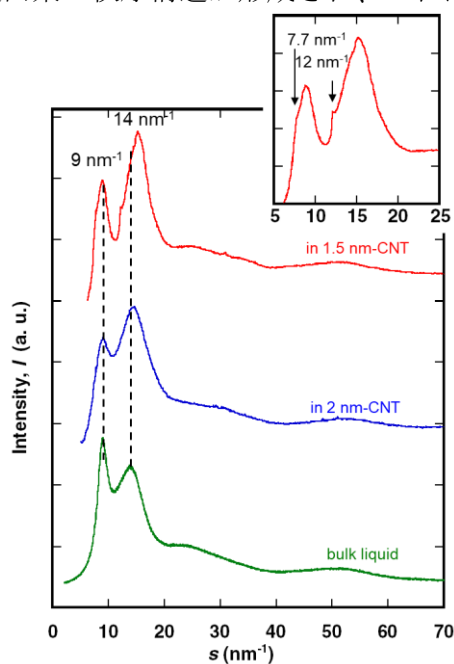


図 5 CNT 細孔中での EMI-TFSI の X 線散乱プロファイル

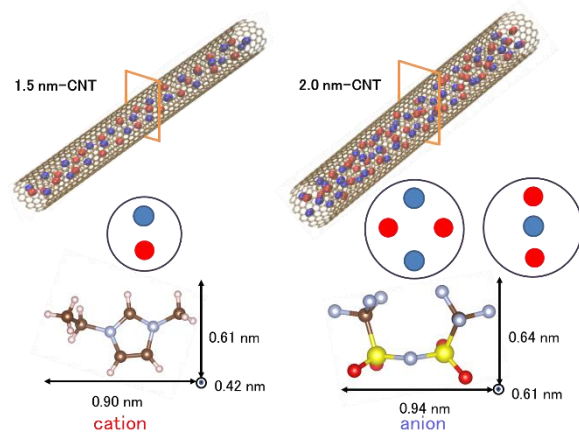


図 6 (上) CNT 細孔中でのイオン液体構造と (下) イオンと細孔径の大きさの関係

## 3) 磁性イオン液体構造解析法の確立

CNT 細孔中における磁性液体構造の解明のために、まずバルクの磁性イオン液体の構造解析を行った。図 7 に EMI-FeCl<sub>4</sub> の X 線散乱測定から求めた動径分布関数と HRMC から求めた動径分布関数の比較を示した。両者はよく一致しており、HRMC から得られた構造情報は信頼性が高い。HRMC シミュレーションを行うことで各成分の寄与を分離して得ることができる。これによると  $0.5\text{ nm}$  にアニオンとカチオンの第一隣接距離があるが、これは図 7 (上) の動径分布関数には見られない。これらのことは、従来法である動径分布関数による解析だけでは磁性イオン液体構造の詳細な構造解析が困難であることを示しており、磁性イオン液体構造に対する HRMC 法の有効性がわかる。

BMI-FeCl<sub>4</sub> は  $90\text{ K}$  でも結晶化せずガラス様な X 線散乱プロファイルとなる。HRMC シミュレーション結果の空間分布関数解析により、温度が低くなるほど陽イオンの周りの陰イオンの配位構造が広範囲にわたり、サイトがぼやけていることがわかる (図 8 上)。このことは、BMI-FeCl<sub>4</sub> が低温でも結晶化しない特徴をよく表している。また  $90\text{ K}$  でのアモルファス状態であっても、FeCl<sub>4</sub> 同士が数個並んだ会合構造を形成しており (図 8 下)、これ

が磁化率測定で示される反強磁性相互作用の起源であることを明らかにした。本研究は、これまで詳細な検討が行われてこなかった磁性イオン液体構造をミクロな観点から明らかにした重要な研究成果である (R. Futamura et al., *J. Mol. Liq.* 2020)。

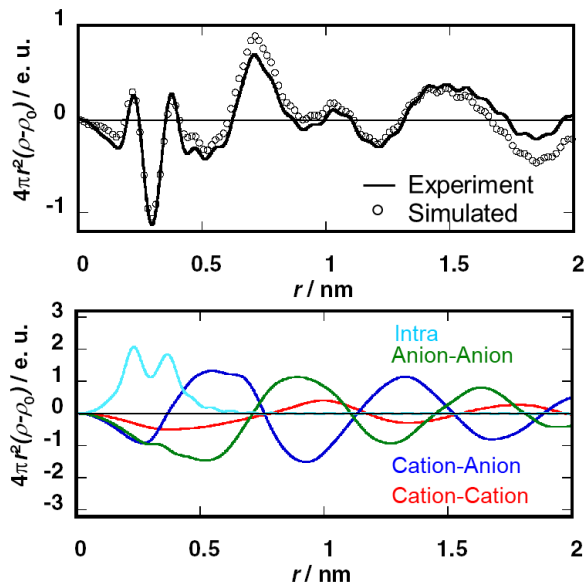


図7 (上) EMI-FeCl<sub>4</sub>の動径分布関数  
(下) HRMC法から算出した成分別動径分布関数

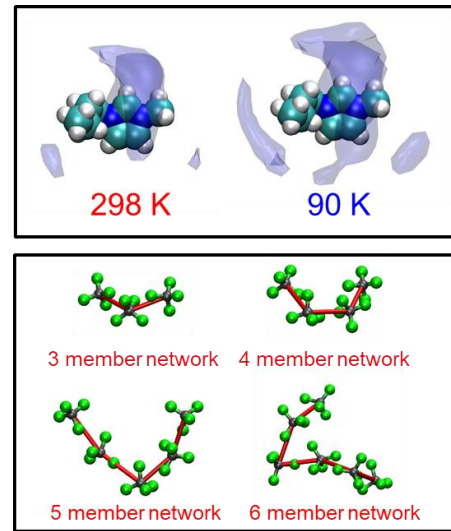


図8 (上) BMIイオン周りのFeCl<sub>4</sub>イオンの分布の温度依存性  
(下) FeCl<sub>4</sub>イオンの会合構造

#### 4) 磁性イオン液体-カーボンナノチューブ複合材料の調製法の確立と複合材の構造解析

磁性イオン液体である EMI-FeCl<sub>4</sub> を CNT 細孔中に導入した複合材を調製し、XRD 測定を行った (図9)。磁性イオン液体の導入により結晶構造由来のピークが複数見られた。これらはそれぞれ面間隔  $d = 0.28, 0.2, 0.16, 0.14, 0.13$  及び  $0.12$  nm に対応し、1辺が  $0.28$  nm の単純立方格子が持つ面間隔と対応する。詳細な構造解析については現在検討中であるが、結晶性のピークが得られたことは最終目的である、CNT 細孔中での磁性イオンの密で結晶様の配列構造形成を示唆している。細孔径の異なる CNT 及び異なる磁性イオン液体 (BMI-FeCl<sub>4</sub>) を用いた複合材の調製も行ったが、どの場合も同様の結晶性のピークが得られた。これらのことから、磁性イオン液体-CNT 複合材の調製法を確立できたと結論付けられる。また今後は、複合材料の磁化率測定により磁気特性を明らかにし、そして複合材料による超高容量磁気記憶デバイスの創成することで応用面への展開が期待できる。

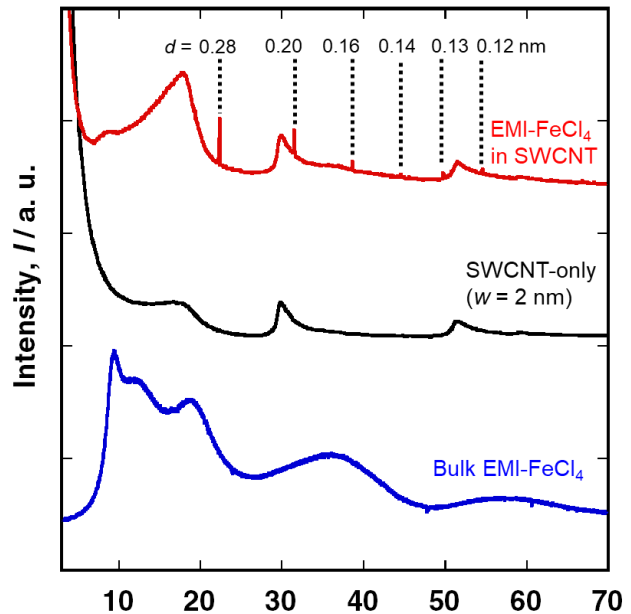


図9 調製した EMI-FeCl<sub>4</sub>-CNT 複合材の XRD プロファイル

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Futamura Ryusuke, Takasaki Yuma, Otsuka Hayato, Ozeki Sumio, Kaneko Katsumi, Iiyama Taku   | 4. 巻<br>311                   |
| 2. 論文標題<br>Configurational evidence for antiferromagnetic interaction in disordered magnetic ionic liquids by X-ray scattering-aided hybrid reverse Monte Carlo simulation | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Molecular Liquids   | 6. 最初と最後の頁<br>113321 ~ 113321 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113321   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Kamijyou Yuito, Stevic Dragana, Kukobat Radovan, Urita Koki, Chotimah Nurul, Hattori Yoshiyuki, Futamura Ryusuke, Vallejos-Burgos Fernando, Moriguchi Isamu, Utsumi Shigenori, Sakai Toshio, Kaneko Katsumi | 4. 巻<br>293                   |
| 2. 論文標題<br>Mesoscopic cage-like structured single-wall carbon nanotube cryogels   | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Microporous and Mesoporous Materials  | 6. 最初と最後の頁<br>109814 ~ 109814 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.micromeso.2019.109814   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Ahuja Preety, Akiyama Shingo, Ujjain Sanjeev Kumar, Kukobat Radovan, Vallejos-Burgos Fernando, Futamura Ryusuke, Hayashi Takuya, Kimura Mutsumi, Tomanek David, Kaneko Katsumi | 4. 巻<br>7                   |
| 2. 論文標題<br>A water-resilient carbon nanotube based strain sensor for monitoring structural integrity   | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Materials Chemistry A   | 6. 最初と最後の頁<br>19996 ~ 20005 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1039/c9ta06810d   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Pina-Salazar Elda-Zoraida, Sagisaka Kento, Hattori Yoshiyuki, Sakai Toshio, Futamura Ryusuke, Osawa Eiji, Kaneko Katsumi | 4. 巻<br>2                     |
| 2. 論文標題<br>Electrical conductivity changes of water-adsorbed nanodiamonds with thermal treatment                                   | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Chemical Physics Letters: X  | 6. 最初と最後の頁<br>100018 ~ 100018 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.cpltx.2019.100018  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Khoerunnisa Fitri, Futamura Ryusuke, Mukai Shin, Konishi Takehisa, Fujikawa Takashi, Kaneko Katsumi | 4. 巻<br>145             |
| 2. 論文標題<br>X-ray absorption anomaly of well-characterized multiwall carbon nanotubes                          | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Carbon  | 6. 最初と最後の頁<br>209 ~ 217 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.carbon.2019.01.021  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Pina-Salazar Elda-Zoraida, Sakai Toshio, Osawa Eiji, Futamura Ryusuke, Kaneko Katsumi      | 4. 巻<br>549             |
| 2. 論文標題<br>Unusual hygroscopic nature of nanodiamonds in comparison with well-known porous materials | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Colloid and Interface Science   | 6. 最初と最後の頁<br>133 ~ 139 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.jcis.2019.04.053   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Putri Austina D., Chotimah Nurul, Ujjain Sanjeev Kumar, Wang Shuwen, Futamura Ryusuke, Vallejos-Burgos Fernando, Khoerunnisa Fitri, Morimoto Masafumi, Wang Zhipeng, Hattori Yoshiyuki, Sakai Toshio, Kaneko Katsumi | 4. 巻<br>139             |
| 2. 論文標題<br>Charge-transfer mediated nanopore-controlled pyrene derivatives/graphene colloids   | 5. 発行年<br>2018年         |
| 3. 雑誌名<br>Carbon   | 6. 最初と最後の頁<br>512 ~ 521 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.carbon.2018.07.001   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Pina-Salazar Elda-Zoraida, Kukobat Radovan, Futamura Ryusuke, Hayashi Takuya, Toshio Sakai, Osawa Eiji, Kaneko Katsumi | 4. 巻<br>139             |
| 2. 論文標題<br>Water-selective adsorption sites on detonation nanodiamonds   | 5. 発行年<br>2018年         |
| 3. 雑誌名<br>Carbon   | 6. 最初と最後の頁<br>853 ~ 860 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.carbon.2018.07.036   | 査読の有無<br>無              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Futamura Ryusuke, Iiyama Taku, Takasaki Yuma, Gogotsi Yury, Biggs Mark J., Salanne Mathieu, Segalini Julie, Simon Patrice, Kaneko Katsumi | 4. 巻<br>16                |
| 2. 論文標題<br>Partial breaking of the Coulombic ordering of ionic liquids confined in carbon nanopores   | 5. 発行年<br>2017年           |
| 3. 雑誌名<br>Nature Materials  | 6. 最初と最後の頁<br>1225 ~ 1232 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/nmat4974  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

〔学会発表〕 計25件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 14件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>R. Futamura, T. Iiyama, R. Okumura, Y. Gogotsi, M. J. Biggs, M. Salanne, P. Simon and K. Kaneko |
| 2. 発表標題<br>Superionic States Formation of Ionic Liquids in 1 Dimensional Nanopores of Carbon Nanotubes     |
| 3. 学会等名<br>ICAC2019 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>R. Futamura, T. Iiyama, T. Ueda, K. Kaneko   |
| 2. 発表標題<br>Concerted Nanoporosity of H <sub>2</sub> O-adsorbed GOs, Evidenced by in-situ X-ray Diffractions |
| 3. 学会等名<br>MRM2019 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hayato Otsuka, Yuma Takasaki, Ryusuke Futamura, and Taku Iiyama                              |
| 2. 発表標題<br>Adsorption and Magnetic properties of ACF and SBA-15 Functionalized by Magnetic Ionic Liquid |
| 3. 学会等名<br>Japan Adsorption 2019 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |



|         |   |
|---------|---|
| 1. 発表者名 | Ryusuke Futamura, Taku Iiyama, Yury Gogotsi, Mark J. Biggs, Mathieu Salanne, Patrice Simon, Katsumi Kaneko                                  |
| 2. 発表標題 | Pore Size Dependent Superionic State of Ionic liquids in Carbon nanopores with Hybrid Reverse Monte Carlo Simulation-aided X-ray Scattering |
| 3. 学会等名 | Japan Adsorption 2019 (国際学会)  |
| 4. 発表年  | 2019年   |

|         |   |
|---------|---|
| 1. 発表者名 | Ryusuke Futamura, Taku Iiyama, Takahiro Ueda, Katsumi Kaneko      |
| 2. 発表標題 | In-situ X-ray Diffraction Evidenced GO/H2O Concerted Nanoporosity |
| 3. 学会等名 | Fundamentals of Adsorption (FOA) 13 (国際学会)                        |
| 4. 発表年  | 2019年   |

|         |  |
|---------|--|
| 1. 発表者名 | Hayato Otsuka, Yuma Takasaki, Ryusuke Futamura, Taku Iiyama                          |
| 2. 発表標題 | Adsorption and magnetic properties of SBA-15 functionalized by magnetic ionic liquid |
| 3. 学会等名 | Fundamentals of Adsorption (FOA) 13 (国際学会)   |
| 4. 発表年  | 2019年  |

|         |                                      |
|---------|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 | 石井 誠一郎、二村竜佑、飯山 拓                     |
| 2. 発表標題 | SBA-15へのイオン液体添加による親水性/疎水性のスイッチング機能発現 |
| 3. 学会等名 | 第50回中部化学関係学協会支部連合秋季大会                |
| 4. 発表年  | 2019年                                |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>糸島 和真、二村竜佑、飯山 拓         |
| 2. 発表標題<br>温度を変数とした吸着現象の解明/新規現象の開拓 |
| 3. 学会等名<br>第50回中部化学関係学協会支部連合秋季大会   |
| 4. 発表年<br>2019年                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>二村 竜祐   |
| 2. 発表標題<br>ナノ空間で同種イオンが形成する超イオン状態の解明と電場印加in-situ X線散乱測定法の開発 |
| 3. 学会等名<br>第33回日本吸着学会研究発表会（招待講演）                           |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>大塚 隼人、高崎 優真、二村 竜祐、飯山 拓                              |
| 2. 発表標題<br>SBA-15 の細孔内における磁性イオン液体 emim FeCl <sub>4</sub> の磁気特性 |
| 3. 学会等名<br>第33回日本吸着学会研究発表会                                     |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>岩下 浩章、吉元 政嗣、二村 竜祐、飯山 拓                 |
| 2. 発表標題<br>吸着分子径・分子間相互作用の SWCNT 細孔中における分子集団構造への影響 |
| 3. 学会等名<br>第33回日本吸着学会研究発表会                        |
| 4. 発表年<br>2019年                                   |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Ryusuke Futamura, Yuma Takasaki and Taku Iiyama |
| 2 . 発表標題<br>Magnetic Ionic Liquids in Carbon Nanospaces     |
| 3 . 学会等名<br>Okinawa Colloids 2019 ( 国際学会 )                  |
| 4 . 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Yuuki Ishihara, Minoru Deguchi, Ryusuke Futamura, Taku Iiyama   |
| 2 . 発表標題<br>Control of structure and molecular selectivity of carbon nanospace by introducing hydrophobic molecules |
| 3 . 学会等名<br>Okinawa Colloids 2019 ( 国際学会 )  |
| 4 . 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>Shoichi Tonegawa, Ryusuke Futamura, Taku Iiyama            |
| 2 . 発表標題<br>Elucidation of the polar molecules structure in nanospaces |
| 3 . 学会等名<br>Okinawa Colloids 2019 ( 国際学会 )                             |
| 4 . 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>R. Futamura, T. Iiyama, Y. Gogotsi, M. J. Biggs, M. Salanne, P. Simon, K. Kaneko  |
| 2 . 発表標題<br>Co-ion Association Structure of Ionic Liquids in Monolayer Sized Carbon Nanopores |
| 3 . 学会等名<br>8th Pacific Basin Conference on Adsorption Science and Technology ( 国際学会 )        |
| 4 . 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>R. Futamura, T. Iiyama, Y. Gogotsi, M. J. Biggs, M. Salanne, P. Simon, K. Kaneko |
| 2. 発表標題<br>Pore Size Sensitive Co-ion Association of Ionic Liquids in Carbon Nanopores      |
| 3. 学会等名<br>Carbon 2018 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>R. Futamura, T. Iiyama, Y. Gogotsi, M. J. Biggs, M. Salanne, P. Simon, K. Kaneko                               |
| 2. 発表標題<br>Pore Size Effects on the Partial Breaking of Coulombic Ordering Structure of Ionic Liquids in Carbon Nanopores |
| 3. 学会等名<br>The 8th international workshop characterization of porous materials: from angstroms to millimeters (国際学会)      |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>二村竜祐、飯山拓、P. Simon、M. Salanne、M. J. Biggs、Y. Gogotsi、金子克美 |
| 2. 発表標題<br>ナノカーボンの導電性が誘起する同種イオンの稠密構造に対する細孔サイズ依存性                    |
| 3. 学会等名<br>第45回炭素材料学会年会   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>二村竜祐、飯山拓、P. Simon、M. Salanne、M. J. Biggs、Y. Gogotsi、金子克美 |
| 2. 発表標題<br>細孔ジオメトリがイオン液体の超イオン状態に与える影響                               |
| 3. 学会等名<br>第32回日本吸着学会研究発表会  |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>FUTAMURA, Ryusuke; Iiyama, Taku; UEDA, Takahiro; KANEKO, Katsumi              |
| 2. 発表標題<br>Water adsorption induced nanogaps between inter layer space of graphene oxide |
| 3. 学会等名<br>日本化学会第99春季年会  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>R. Futamura, T. Iiyama, Y. Gogotsi, M. Salanne, P. Simon, K. Kaneko            |
| 2. 発表標題<br>Polarization Effects on Superionic-State of Ionic Liquids in Carbon Nanopores. |
| 3. 学会等名<br>Carbon2017 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>R. Futamura, T. Iiyama, Y. Gogotsi, M. J. Biggs, M. Salanne, P. Simon, K. Kaneko.            |
| 2. 発表標題<br>Microscopic Evidence for the Superionic-State Formation of Ionic Liquids in Carbon Nanopores |
| 3. 学会等名<br>The 6th symposium on Future Challenges for Carbon-Based Nanoporous Materials (国際学会)          |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>R. Futamura, T. Iiyama, M. Salanne, M. J. Biggs, Y. Gogotsi, P. Simon, K. Kaneko |
| 2. 発表標題<br>スーパーキャパシタの高容量化につながる同種イオンの濃縮状態-カーボン細孔中でイオン液体が形成する超イオン状態の解明                        |
| 3. 学会等名<br>日本化学会第98春季年会   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>R. Futamura, T. Iiyama, M. Salann, M. J. Biggs, Y. Gogotsi, P. Simon, K. Kaneko |
| 2. 発表標題<br>Pore Size Effects on Superionic States of Ionic Liquids in Carbon Nanopores     |
| 3. 学会等名<br>日本化学会第98春季年会  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>二村竜祐, 飯山拓, Patrice Simon, Mathieu Salanne, Mark J. Biggs, Yury Gogotsi, 金子克美 |
| 2. 発表標題<br>カーボンナノ細孔中でイオン液体が形成する“非クーロンの”構造の制約依存性   |
| 3. 学会等名<br>第31回日本吸着学会研究発表会  |
| 4. 発表年<br>2017年   |

〔図書〕 計1件

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>二村竜祐, 飯山拓   | 4. 発行年<br>2019年 |
| 2. 出版社<br>株式会社NTS   | 5. 総ページ数<br>9   |
| 3. 書名<br>『PCP/MOFおよび各種多孔性材料の作り方、使い方、評価解析』 「ナノ空間内の分子やイオンの特異構造解析」 |                 |

〔産業財産権〕

〔その他〕

|  |
|--|
| <p>微小空間を最大限に利用しよう！<br/> <a href="https://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/science/quest/research/post-76.php">https://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/science/quest/research/post-76.php</a></p> <p>飯山・二村研ホームページ<br/> <a href="http://science.shinshu-u.ac.jp/~tiiyama/">http://science.shinshu-u.ac.jp/~tiiyama/</a></p> <p>プレスリリース記事（磁性イオン液体構造の研究論文 J. Mol. Liq. 2020）<br/> <a href="https://eurekaalert.org/pub_releases/2020-06/su-mls060520.php">https://eurekaalert.org/pub_releases/2020-06/su-mls060520.php</a></p> |
|--|

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|