

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340071

研究課題名(和文) ナノ細孔中の水分子ネットワークにおけるラジオ波帯プロトン伝導ダイナミクス

研究課題名(英文) Radio-frequency-range proton dynamics of the water network in nanopores

研究代表者

松井 広志 (Matsui, Hiroshi)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30275292

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：LCRメーターとインピーダンス・アナライザ(本研究計画で導入)を組み合わせたプローバースystemを開発した。微小試料に対して2端子法インピーダンス測定を行い、ナノ細孔中水分子のダイナミクスを捉えた。Ni(cyclam)試料の誘電分散は、第1, 2水和圏の水分子双極子の配向変化に起因する。また、ナノ空間の強い束縛により、そうした水分子の緩和時間が、自由水に比べて約3桁減少する。エリスリトール内包試料では、エリスリトール分子の近傍で局所的にプロトン移動が発生する。孤立した生体分子の特性が、ナノ空間を利用することで研究可能になり、今後さらに活用する。

研究成果の概要(英文)：We developed novel prober system in combination with LCR meter and impedance analyzer. Employing extremely small single crystal, complex impedance is available to measure at 20 Hz～3 GHz. By considering an appropriate equivalent circuit, we have clarified the dynamics of the water network in molecular porous crystal Ni(cyclam), and the erythritol-intercalated water network. The dielectric constant in wide range of frequency (700 Hz～16.3 GHz) indicates the dielectric dispersion due to configurational change of electric dipole concerning strongly hydrated water molecules in the primary and secondary hydration shells. The relaxation time is three orders of magnitude smaller than one in free water. The erythritol-intercalated water network shows large dielectric constant and isotope effect, which reveal a local proton transfer generated near the erythritol molecule. We have successfully opened the way for the study of individual biological molecules by utilizing hydrophilic nanopores.

研究分野：固体物理

キーワード：水分子 ナノ空孔 プロトン伝導 インピーダンス プローバー 多孔体 水和 誘電緩和

1. 研究開始当初の背景

ゼオライト、カーボンナノチューブなどのナノ空間には、水分子、ガス、イオンが内包でき、多彩な応用が試みられている。ナノ空間に閉ざされた水分子、及び水分子ネットワークの構造、電気的特性は、水分子が置かれた環境に強く依存する。たとえば、ナノ空間を形成する骨格分子が親水性か、疎水性か、また、電荷をもつサイトの配置などにより、水分子間に働く水素結合力は変化する。つまり、ナノ空間の種類、形状、大きさなどを変えれば、水分子ネットワークの特性や水素結合状態を制御できるだろう。水分子ネットワークの水素結合は、プロトン伝導の伝導機構にも関与する重要な要因である。高プロトン伝導体ナフイオンなどの燃料電池電解質や、生体分子の機能性、神経伝達機構などにおいて、水分子ネットワークの特性は関係が深い。一般に、こうした物質の水分子ネットワークは非常に複雑なため、プロトン伝導機構の解明が困難である。物性物理学として研究を行うには、規則性の高い水分子ネットワークをもち、純良な単結晶試料が必要である。さらに、広帯域な誘電分散を調べることで、プロトン伝導機構が明らかにできるはずである。自由水では、広帯域での誘電特性が解明されているが、ナノ空間に閉ざされた水分子の誘電特性はほとんど分かっていない。

糖やタンパク質などの機能性生体分子を水分子ネットワーク中に内包できれば、分子単体の特性が引き出せるだろう。こうした視点で研究を進めるには、少なくとも数ミリメートル程度の単結晶が合成でき、かつ、分子を挿入可能な水和構造をもつ系が必要である。本研究では、こうした条件を満足する系

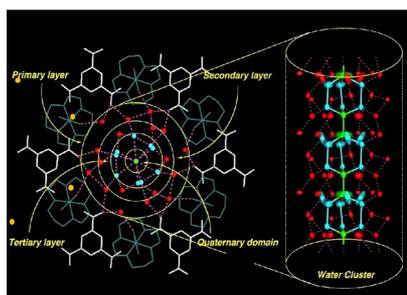


図 1

として、主に図 1 に示す分子性ナノ多孔質結晶 $\{[\text{Ni}(\text{cyclam})(\text{H}_2\text{O})_2]_3(\text{TMA})_2 \cdot 29\text{H}_2\text{O}\}_n$ (以後、Ni(cyclam)試料と表記) に注目した。また、分子性ナノ多孔質結晶 $\{[\text{M}(\text{H}_2\text{bim})_3] (\text{TMA}) \cdot 20\text{H}_2\text{O}\}_n$ ($\text{M} = \text{Co}, \text{Rh}, \text{Ru}$) と、 $\{[\text{Co}(\text{H}_2\text{bim})_3] (\text{TATC}) \cdot 7\text{H}_2\text{O}\}_n$ において、プロ

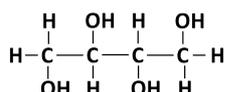


図 2

トン伝導性とプロトン水和物の解明を目指した。

低周波誘電率測定では、電極端子を試料に付ける必要があり、実験技術の開発が必要であった。低周波の誘電応答を観測できるようになれば、ナノ空間中での水分子の集団応答がどのような影響を受けるか、さらに、プロトンの移動が誘電応答にどのように関与するか解明できると考えた。

2. 研究の目的

20 Hz - 3 GHz までの交流インピーダンス測定を行うために、LCR メーター、およびインピーダンス・アナライザ (本研究計画で導

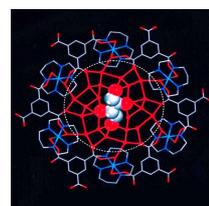


図 3

入) を用いて、幅広い周波数で伝導率・誘電率測定を可能にする。大きさが 1 mm 程度の微小試料の誘電率測定を行うためにプローブシステムを開発する。

本研究では、Ni(cyclam)試料の親水性ナノチャンネル(図 1)を試験管として利用することも考えた。研究分担者は、水分子ネットワーク中に、エリスリトール(図 2、4 炭糖エリトロースの糖アルコール)を挿入した試料を合成した。エリスリトールは天然に存在する糖アルコールであり、果物やキノコ、発酵食品などに含まれる。甘みを感じるが、通常の砂糖と異なりカロリーが無く、歯垢を分解する作用を有し、加工食品や歯磨き粉などに使用されている。エリスリトール分子は、水分子ネットワークの中心に規則正しく配列することが分かった(図 3)。そのため、エリスリトール単体の応答や水分子への影響が研究できると考えた。今後、ナノ空間中水分子にいろいろな分子を配列させ、新たな機能性と応用を切り開く突破口になる研究である。

3. 研究の方法

交流インピーダンス法は、伝導率、誘電率測定、或いは電気化学反応における反応速度の解析など、幅広く利用されている。直流測定では、振動数がゼロにおける電氣的な応答を観測するが、応答を引き起こす要因が複数あった場合、それらを同時に観測してしまう。こうした要因が、それぞれ異なる周波数応答を持てば、異なる周波数分散として観測でき、各要因を分離できる。

本研究では、広帯域のインピーダンス測定を実現するため、Agilent E4980A プレジジョン LCR メーター(LCR メーター)と、本研究計画で導入した Agilent E4991A RF イ

ンピーダンス/マテリアル・アナライザ(インピーダンス・アナライザ)の2つの測定機器を利用する。LCRメーターは20 Hz 2 MHzまでの、また、インピーダンス・アナライザは1 MHz 3 GHzまでの複素インピーダンスを測定できる。インピーダンス・アナライザの測定原理は、RF-I-V法に基づく。これらの機器を用いて微小単結晶試料を測定するために、2端子法に基づくプローバーと組み合わせたシステムを構築した。試作したシステムの全体を図4に示す。



図4

微小試料の実際の測定では、2つのCCDカメラの拡大映像を、2つの液晶モニターに映し出し、それらを見ながら白金製プローバー探針を試料の両端に正確に接触させる。プローバー探針の移動は、台座上に磁石で固定したxyz調節機構により行う。なお、試料台にもxyzステージを装備し、より微細な調整を可能にした。プローバー探針の構造図を図5に示す。試料端とプローバー探針との接触をより良くするために、導電性グリースを間に挟んだ。また、試料の脱水を避けるためにも有効であった。

導電性グリースと試料の間に生じる接触抵抗が問題になった。接触抵抗の寄与は、ランドルス回路を含めた等価回路を考慮することで除去した。この回路は、拡散と電荷移動が混合律速となる電極反応の等価回路であり、溶液中の電極付近で発生する電気二重層における反応を表す。一般に、接触抵抗は低周波数領域で支配的な寄与をするため、ランドルス回路を含む等価回路は、LCRメータ

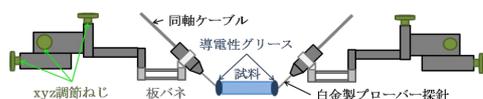


図5

の測定結果に対して適用する。プローバー探針の校正には、オープン、ロード、ショート of 3つの測定を行う。オープンでは探針の間隔を1 mm空けて測定し、ショートは探針同士を接触させて測定した。ロードについては、50 の高周波用チップ抵抗を用いた。

プローバーシステムは、室温のみの測定に限定される。低温実験用には、新たなインサートを試作した。測定精度を低下させないために、同軸ケーブルの長さを極力短くした。これに合わせ、小型クライオスタットを作製

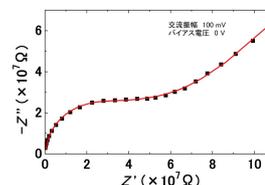


図6

した。2本のセミリジッド同軸ケーブルの長さは、30 cmに抑えられた。さらに、超小型の一軸プローバーを試作し、Ni(cyclam)試料の低温測定を可能にした。インサートが短く、熱流入が生じるため、最低温度は8 Kである。

4. 研究成果

(1) Ni(cyclam)試料

LCRメーターで交流振幅を100 mV、バイアス電圧を0 Vとして、Ni(cyclam)試料におけるインピーダンスの実部 Z' と虚部 Z'' の周波数変化を測定した。図6にナイキストプロットを示す。直線部分は低周波数側に(接触抵抗) 半円部分は高周波数側に対応する。脱水した試料では、半円の直径が約10倍になることから、水分子ネットワークの応答と結論できる。この水分子ネットワークによる応答は、RC並列回路で再現できる。Ni(cyclam)試料における、水分子ネットワークと重水分子ネットワークの誘電率は、ともに約50である。しかし、顕著な同位体効果は現れない。したがって、700 Hz 2 MHzにおけるNi(cyclam)試料の水分子ネットワークの誘電率は、プロトン伝導によるのではなく、水分子双極子の配向変化と結論できる。

インピーダンス・アナライザにより、Ni(cyclam)試料のインピーダンスを1 20 MHzの範囲で得ることができた。等価回路を1つのRC並列回路として、試料の直流抵抗と静電容量を求めた。20 MHz以上では、試料のインピーダンスが非常に小さいため、正確な値を決定できなかった。

以上の結果をまとめたグラフを図7に示す。図中には、16.3 GHzで行ったマイクロ波空洞共振器摂動法の測定結果も載せている。Ni(cyclam)試料の水分子ネットワークと、重水分子ネットワークに対する周波数変化は、水分子双極子による誘電応答に起因する。1 MHz以下の伝導率・誘電率は、周波数に対してほぼ一定である。それ以上の周波数では伝導率が増加するが、誘電率は減少する。周波数の増加により、交流電場の変化に追従できる水分子双極子の数が減少すると、自由水と同様に伝導率・誘電率は周波数変化によって分散を示す。このような誘電率・伝導率の分散はデバイ型の誘電緩和によって記述できる。今回の測定結果も、図7のようにデバイ緩和で再現できる。実曲線がフィッティングした結果である。緩和時間は、水分子系、重水分子系に対して、それぞれ 1.7×10^{-9} 、 3.0×10^{-9} secと求まった。重水分子は水分子よりもわずかに大きな電気双極子モーメン

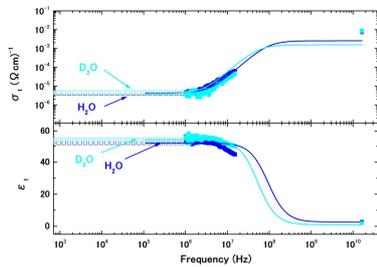


図 7

トをもち、かつ、重水分子ネットワークの方が、水分子ネットワークに比べて水素結合が強い。こうした相違が、緩和時間の違いを生じさせている。

Ni(cyclam)試料の水分子ネットワークにおいて、第 1 水和圏の水分子は負電荷をもつトリメシン酸のカルボキシラート、もしくは正電荷をもつ Ni²⁺に結合した水分子に水和する。こうした電荷の影響を受けるため、水分子ネットワークの水素結合は増強される。高プロトン伝導性が確認されている $\{[Co(H_2bim)_3](TMA) \cdot 20H_2O\}_n$ に比べて、Ni(cyclam)試料はこうした効果を強く受け、第 1,2 水和圏は非常に強固な水素結合によって束縛されている。しかし、骨格の電荷の影響はナノチャンネルの中心に向かって弱くなり、第 3,4 水和圏の水素結合は比較的弱い。特に、第 4 水和圏の水分子は 2 つの等価なサイト間をホッピングすることができ、自由度が高いことを示す。

次に、緩和周波数について考える。自由水における集団運動の誘電緩和は、18 GHz 付近に観測される。しかし、図 7 に示すように Ni(cyclam)試料の緩和周波数は 50~90 MHz であり、3 桁も小さい値である。Ni(cyclam)試料の水分子ネットワークは、電荷効果によって自由水よりも強い水素結合をもち、水分子の配向が交流電場に追従する時間が遅くなったと考えられる。そのため、強く束縛された第 1,2 水和圏の水分子の集団応答は、自由水の集団応答よりも低周波数側に現れることになる。ナノ空間中で、水分子が一斉にわずかに配向を変える集団応答であることが分かった。

Ni(cyclam)試料の誘電率と水分子の密度の関係を考察した。誘電応答の主な起源である第 1,2 水和圏の水分子の数密度は自由水の場合に比較して低い。しかし、Ni(cyclam)試

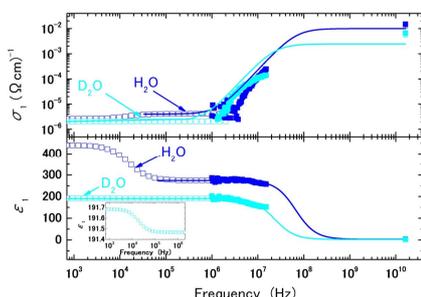


図 8

料の誘電率は、自由水(~80)とあまり変わらない。第 1,2 水和圏の水分子は、自由水よりも配向角が大きいことを示す。また、自由水よりも小さい密度で、同程度の誘電率をもつことが分かった。

(2) エリスリトールを内包した Ni(cyclam) 試料

上記と同様に、エリスリトールを内包した試料について、700 Hz、20 MHz、及び 16.3 GHz における伝導率(図 8)を得た。100 Hz、1 MHz における伝導率は、周波数に対して一定であり、それ以上の周波数では伝導率が増加する。Ni(cyclam)試料と同様に、デバイ緩和によるフィッティングを行った。10 MHz 付近に、Ni(cyclam)試料と同様な緩和が出現する。低周波の誘電率は、100 程度の値をとり、同位体効果が現れる。このため、エリスリトール挿入試料の誘電応答にはプロトンが関与することが分かった。

非常に高い誘電率は、試料内部で電気分極が発生し、局所的にプロトンが移動することを示唆する。そこで、プロトンがエリスリトールの近傍で局所的に移動するモデルを考えた(図 9)。このモデルでは、エリスリトール挿入試料の水分子ネットワークは、3 つの領域に分けられる。1 つは骨格分子に近い、水分子ネットワークの外側の層である。この領域の水分子は界面相互作用によって強く束縛されており、Ni(cyclam)試料と同様な誘電応答をもたずである。次に、水分子ネットワークの中央部分は、エリスリトール近傍の伝導領域と、その間に存在する非伝導領域の 2 つに分けられる。エリスリトールから離れた領域では電荷サイトのクーロン場の影響を受け、非常に強固な水素結合を形成し、非伝導領域が現れると考えられる。これら 2 つの領域は c 軸方向に交互に積層する。

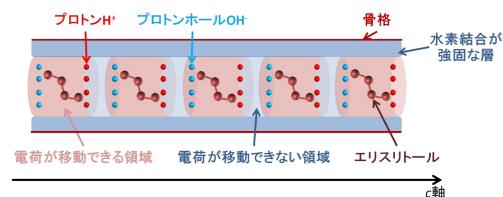


図 9

エリスリトールはプロトン・ドープメントの役割を果たし、OH 基に水和する水分子を自己解離させ、プロトンとプロトンホールを生み出すと期待される。エリスリトールは 4 つの OH 基を持つため(図 1)、最大で 4 つのプロトンを生み出せる可能性がある。プロトンとプロトンホールは外部電場によってエリスリトール近傍の伝導領域内部をそれぞれ逆方向に移動することになる。

低周波において、プロトン(プロトンホール)が伝導領域の境界面まで到達できれば、伝導領域の両端にプロトンとプロトンホール

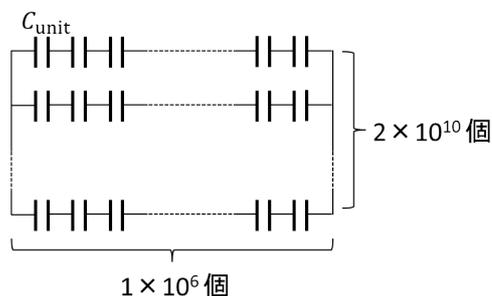


図 10

が溜る。これは非伝導領域の両端に電荷が溜ると言い換えることができる。電場の向きが反転すると、伝導領域のプロトンとプロトンホールは逆方向に移動し、非伝導領域の両端に逆符号の電荷が溜まる。つまり、伝導領域は導線の役割を果たし、非伝導領域の両端に電荷(プロトンとプロトンホール)を送り込むことになる。また、非伝導領域は両端に電荷を蓄える微小なコンデンサとみなせる。その結果、低周波数領域では試料の静電容量成分が増大し、高い誘電率を示すと考えられる。

試料とユニットセルの c 軸方向の長さの比較から、1本のナノチャンネル当たり 1×10^6 個のコンデンサが直列接続すると記述できる。また、試料とユニットセルの断面積の比から、試料中にはナノチャンネルが 2×10^{10} 個存在する。その結果、試料中の等価回路は、図 10 で表せることになる。なお、非伝導領域によるコンデンサの静電容量を C_{unit} とし、その誘電率は 47 と見積もれた。

(3) 水ナノチューブと水分子鎖

$\{[\text{Co}(\text{H}_2\text{bim})_3](\text{TMA}) \cdot 20\text{H}_2\text{O}\}_n$ 内の水ナノチューブ(図 11(a))、および $\{[\text{Co}(\text{H}_2\text{bim})_3](\text{TATC}) \cdot 7\text{H}_2\text{O}\}_n$ の水分子鎖(図 11(b))について、単結晶 1 個を用いて低周波誘電率の測定に成功した。水ナノチューブは基本的に一つの RC 並列回路で記述でき、その誘電率は約 7 となり、水分子双極子の応答を検出している。10 MHz 以上では、プロトン伝導率が増加し、低抵抗になったことで低周波誘電率測定が困難になった。しかし、誘電分散の兆候をほとんど示さないことから、水分子の集団応答は Ni(cyclam) 試料に比べて高周波側にあることが分かる。これは、水ナノチューブが柔らかいことに起因する。一方、水分子鎖の低周波誘電率は約 13 であり、水ナノチューブの約 2 倍の値をとる。X 線結晶構造解析によると、水分子鎖上の水分子の酸素原子は、室温でも配置が特定される。この酸素原子を

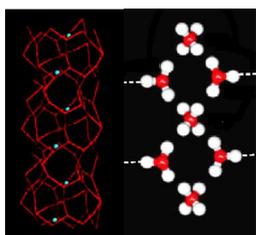


図 11(a),(b)

中心にした電気双極子の回転の自由度が、より高くなったことで、誘電率が増加することが分かった。これは、水分子の揺らぎが大きく、柔らかい水ナノチューブとは対照的に、水分子鎖全体の揺らぎが小さく、固いことに起因する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 11 件)

M. Tadokoro, Y. Ohhata, Y. Shimazaki, S. Ishimaru, T. Yamada, Y. Nagao, T. Sugaya, K. Isoda, Y. Suzuki, H. Kitagawa, and H. Matsui, Anomalous Enhancement of Proton Conductivity for Water Molecular Clusters Stabilized in Interstitial Spaces of Porous Molecular Crystals, *Chemistry A European Journal*, 20 巻, pp.13698-13709, 2014 年. (査読有)

M. Sadakiyo, T. Yamada, K. Honda, H. Matsui, and H. Kitagawa, Control of Crystalline Proton-Conducting Pathways by Water-Induced Transformations of Hydrogen-Bonding Networks in a Metal-Organic Framework, *Journal of The American Chemical Society* 136 巻, pp.7701-7707, 2014 年. (査読有)

H. Matsui, Y. Suzuki, H. Fukumochi, and M. Tadokoro, Defect Dynamics of the Dipole Ordered Water Chain in a Polar Nanochannel, *Journal of The Physical Society of Japan* 83 巻, p. 054708 (10 ページ), 2014 年. (査読有)

H. Matsui, Dynamics of protonic transport through the nanochannel water in molecular porous crystals, *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology* 4 巻, pp.4-4, 2013 年. (査読有)

S. Yamanaka, K. Umamoto, Z. Zheng, Y. Suzuki, H. Matsui, N. Toyota and K. Inumaru, Preparation and superconductivity of intercalation compounds of TiNCl with aliphatic amines, *Journal of Materials Chemistry* 22 巻, pp. 10752-10762, 2012 年. (査読有)

H. Matsui and M. Tadokoro, Proton dynamics in water nanotube of new molecular porous crystal, *Key Engineering Materials* 508 巻, pp. 257-260, 2012 年. (査読有)

H. Matsui and M. Tadokoro, Eigen-like hydrated protons travelling with a local distortion through the water nanotube in new molecular porous crystals $\{[M(\text{H}_2\text{bim})_3](\text{TMA}) \cdot 20\text{H}_2\text{O}\}_n$ ($M = \text{Co}, \text{Rh}, \text{Ru}$), *The Journal of Chemical Physics* 137 巻, p. 144503 (10 ページ), 2012 年. (査読有)

[学会発表](計 35 件)

岩本慧、望月大、長田師門、朝倉裕介、黒田一幸、松井広志、低次元シリケート CsHSi_2O_5 におけるプロトンの非調和振動、日本物理学会年次大会、2015 年 3 月 21 ~ 24 日、早稲田大学、東京都。

富田京志、福持裕之、岩本慧、田所誠、松井広志、ハロゲン置換した水素結合型レニウム錯体の赤外吸収スペクトル、日本物理学会年次大会、2015年3月21~24日、早稲田大学、東京都。

松井広志、田中涼、田所誠、アルカリ金属イオンを含むナノチャンネル水のプロトン伝導 I、日本物理学会年次大会、2015年3月21~24日、早稲田大学、東京都。

赤城達弥、本田恭平、田所誠、松井広志、糖アルコールを内包した水分子クラスターの誘電応答、日本物理学会年次大会、2015年3月21~24日、早稲田大学、東京都。

松井広志、田中涼、田所誠、アルカリ金属イオンを導入したナノチャンネル水のプロトン伝導、第40回固体イオニクス討論会、2014年11月16~18日、東京工業大学、東京都。

H. Matsui, Y. Suzuki, H. Fukumochi, M. Tadokoro, Proton dynamics of the water lattice in nanochannel, 39th International Conference of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2014年9月14~19日、The University of Arizona、ツーソン、アメリカ。

富田京志、福持裕之、岩本慧、田所誠、松井広志、水素結合型レニウム錯体におけるプロトンの赤外分光研究、日本物理学会秋季大会、2014年9月7~10日、中部大学、春日井市。

岩本慧、望月大、長田師門、朝倉裕介、黒田一幸、松井広志、低次元シリケート CsHSi₂O₅ におけるプロトンの振動状態、日本物理学会秋季大会、2014年9月7~10日、中部大学、春日井市。

赤城達弥、本田恭平、田所誠、松井広志、ナノ細孔中水分子ネットワークの誘電応答、日本物理学会秋季大会、2014年9月7~10日、中部大学、春日井市。

松井広志、鈴木雄太、福持裕之、田所誠、一次元水分子鎖におけるプロトンと配向欠陥の運動、日本物理学会秋季大会、2014年9月7~10日、中部大学、春日井市。

松井広志、鈴木雄太、福持裕之、田所誠、ナノ細孔中一次元水分子鎖を伝搬するプロトンと配向欠陥、第17回超イオン導電体物性研究会、2014年7月18~19日、日本大学、習志野市。

H. Matsui, Dynamics of protonic transport through the nanochannel water in molecular porous crystals, 3rd International Conference on Nanotek&Expo (Nanotek-2013), 2013年12月2日、Hampton Inn Tropicana、ラスベガス、アメリカ。(招待講演)

松井広志、ナノ細孔中水分子鎖の高周波伝導ダイナミクス、第39回固体イオニクス討論会、2013年11月21日、くまもと県民交流館パレア、熊本市。

岩本慧、望月大、長田師門、朝倉裕介、黒田一幸、松井広志、低次元シリケート

CsHSi₂O₅ のテラヘルツ時間領域分光、日本物理学会秋季大会、2013年9月27日、徳島大学、徳島市。

松井広志、鈴木雄太、福持裕之、田所誠、ナノ細孔に内包された水分子チェーンの伝導ダイナミクス、日本物理学会秋季大会、2013年9月27日、徳島大学、徳島市。

本田恭平、濱野雄広、田所誠、松井広志、分子性ナノ多孔質結晶におけるプロトンと水分子の低周波応答、日本物理学会秋季大会、2013年9月27日、徳島大学、徳島市。

福持裕之、松井広志、田所誠、新規レニウム錯体におけるプロトンと電子の電磁波応答、日本物理学会秋季大会、2013年9月27日、徳島大学、徳島市。

松井広志、ナノ空孔中プロトンの高周波伝導ダイナミクス、第63回固体イオニクス研究会、第16回超イオン導電体物性研究会、2013年7月11日、日立シビックセンター、日立市。(招待講演)

H. Matsui, A. Sugawara, J. Fujikake, M. Tadokoro, Proton conduction and NH₄⁺ Intercalation effect in water nanotube of molecular porous crystal, 17th International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC17), 2013年5月12-16日、仙台国際会議場、仙台市。

松井広志、藤掛洵朗、田所誠、分子性ナノ多孔質結晶 {[M(H₂bim)₃](TMA) · 20H₂O}_n (M = Co, Ru, Rh) のプロトン伝導、日本物理学会秋季大会、2012年9月18-21日、横浜国立大学、横浜市。

²¹ H. Matsui, Proton conducting mechanism in water nanotube of new molecular porous crystal, 16th Solid State Protonic Conductor Conference (SSPC16), 2012年9月10-14日、Phelma Minatec、グルノーブル、フランス。

{図書}(計 0 件)

{産業財産権}

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

{その他}

ホームページ等

<http://ldp.phys.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 広志 (Matsui Hiroshi)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：30275292

(2) 研究分担者

田所 誠 (Tadokoro Makoto)

東京理科大学・理学部・教授

研究者番号：60249951

(3) 連携研究者 なし