

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24340074

研究課題名(和文)電子とプロトンが相関した単一分子種有機伝導体の物性制御

研究課題名(英文)Solid State of electron and proton coupled single-component organic conductors

研究代表者

森 初果 (Mori, Hatsumi)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：00334342

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)：水素結合は水や氷、DNAやタンパク質中などに存在し、静電的な相互作用で分子集団内外の形成に関わり、我々の生命や生活にとって必要不可欠な役割を果たす。これらの水素結合プロトン由来の「プロトン固体物性」は、電子が主役で電気伝導性や磁性を与える「電子固体物性」とは、従来、別個独立に研究されてきた。

本課題では、この「電子固体物性」に「プロトン固体物性」が連動した「電子-プロトン相関固体物性」の発現を目指したところ、「単成分純有機物質における金属性」、「プロトンの量子性を利用した量子スピン液体」、「プロトン移動による伝導性、磁性のスイッチング」などの新たな相関機能が得られたので報告する。

研究成果の概要(英文)：Organic functional crystals with novel π -electronic states such as (super) conductivity, (anti-/ferro)magnetism, etc., have been vigorously developed. On the other hand, researches of hydrogen-related functionalities such as (anti-/ferro) electrics, proton (super) conductivity, etc. have been also extensively performed. In this project, the novel π -electron-hydrogen concerted organic materials and their functionalities are reported. This phenomenon with dynamically coupled π electron-hydrogen might be related to biochemical cascade reactions and applicable to novel organic surface and devices.

研究分野：固体科学

キーワード：分子性導体 水素結合 相関機能物性 重水素効果 相転移

1. 研究開始当初の背景

水素結合は水や氷、DNA (デオキシリボ核酸) やタンパク質中などに存在し、静電的な相互作用で分子集団内外の形成に関わり、我々の生命や生活にとって必要不可欠な役割を果たす。この水素結合中のプロトンは、機能性有機固体中でも電子に次いで軽い粒子であり、固体形成に関わる他、その動特性は、強誘電性やプロトン伝導など、固体物性の中で重要な役割を果たす。しかしながら、これらのプロトン由来の「プロトン固体物性」は、電子が主役で電気伝導性や磁性を与える「電子固体物性」とは、従来、別個独立に研究されてきた。

提案者は、これまで有機超伝導体の物質開発、およびその電子固体物性研究において大きな成果を挙げてきた。さらに、この「電子固体物性」に「プロトン固体物性」が連動した「電子-プロトン相関固体物性」の発現を目指して、研究を推進している。最近、酸化還元能と開発し、その顕著な相関物性の発現を目指した。

2. 研究の目的

表題の電子とプロトンが相関した単一分子種有機伝導体では、2次元有機伝導層間にアニオン絶縁層はなく、水素結合によって層は連結されている。そのため、水素結合プロトンあるいはデューテロンのダイナミクスにより、 π 電子相が連動して、新たな固体物性が期待できる。本課題の具体的な目標は以下である。

(1) プロトンと電子が相関する有機分子、カテコール誘導体(Cat-EDT-TTF)を用いた単一分子種有機伝導体 κ -H₃(Cat-EDT-TTF)₂ およびその重水素体の良質な有機結晶を作成して、水素を含めた結晶構造を決定し、それに基づいた電子構造の計算を行い、

(2) さらにその高品質な単結晶 [κ -X₃(Cat-EDT-TTF)₂, X = H, D] の、伝導性、磁性、誘電性の温度依存性の詳細な測定を実施し、

(3) 量子スピン液体および同位体重水素効果など、プロトンと電子が相関した新たな物性および機能性発現の可能性に挑戦する。

3. 研究の方法

上記の目的に従い、以下のような方法を用いて研究を推進した。

(1) 高品質な単一分子種有機伝導体の合成、単結晶育成

単一分子種有機伝導体の構成分子であるカテコール誘導体(H₂Cat-EDT-TTF)の収率を上げ、十分な量を合成し、それを原料として、定電流電解法で、高品質な結晶育成の条件(温度、溶媒の種類と量、結晶セルの形状、電気化学的成長のための印加電流値、電極の表面と形状、結晶成長インキュベータの選定)を絞り、

放射光での構造決定や物性測定などに最適な単結晶育成を行う。

(2) 放射光を用いた単一分子種有機伝導体のプロトンおよびデューテロンの位置を含むX線結晶構造、およびバンド構造の決定を行う。

また、この結晶構造より、プロトンが感じるポテンシャルエネルギーについてGaussianプログラムを用いて計算し、プロトンダイナミクスの温度依存性を考察する。

(3) 高品質な単一分子種有機伝導体 [κ -X₃(Cat-EDT-TTF)₂, X = H, D] の誘電性、磁性、伝導性の温度依存性の測定を行う。

まず、磁性であるが、 κ -H₃(Cat-EDT-TTF)₂ において、三角格子において格子点にあるスピンのフラストレーションが効けば、磁化率においても、スピンの磁気秩序が回避される可能性、つまり低温までスピン液体となる可能性があるため、SQUID、ESR 磁気共鳴、トルクの実験を行う。

電気抵抗率については、常圧下における温度依存性の振る舞いを検討する。単一分子種有機伝導体において、プロトン-電子間に相関がある場合、プロトンダイナミクスを反映した動的な電気分極が伝導層に影響を与える可能性を検討する。

4. 研究成果

(1) 電子-プロトン相関系の純有機物質で、単成分ながら金属状態を示すことを発見(雑誌論文⑥)

通常、単一成分の有機物質は半導体または絶縁体であり、例えばポリ塩化ビニルは、10¹⁶ ohm cm より大きく、リード線の被覆絶縁材料として利用されている。「単成分純有機物は電気を流さない」という常識を覆す材料を開発することは、昔から研究者の夢であり、基礎的および応用的な観点で大変重要な課題である。

これまで、空気中安定であり、平面性の高い中性の開殻分子、つまり不対電子を持つ中性および両性ラジカル分子が開発できれば、高い伝導性を有する有機物ができると考えられてきた。実際、分極のためラジカル電子間のクーロン相互作用が比較的弱い両性ラジカルでも、常圧室温の伝導度は 10⁻¹ Scm⁻¹ が上限であった。

その中で、本課題で開発した π 電子-水素協奏系は、図1で示すように、分子から水素イオンであるプロトンを引き抜き、電荷を補償するためにホールが注入されて Cat-EDT-TXF^{0.5+} (X = S, Se) となり、自己ドーブによる伝導キャリアの生成が実現した。そして、これらの自己ドーブ型の分子が集積して伝導パスを形成し、3/4 充填バンドを形成する単成分純有機伝導体である κ -H₃(Cat-EDT-TTF)₂ と κ -H₃(Cat-EDT-ST)₂ が得られた。常圧室温伝導度は、 κ -H₃(Cat-

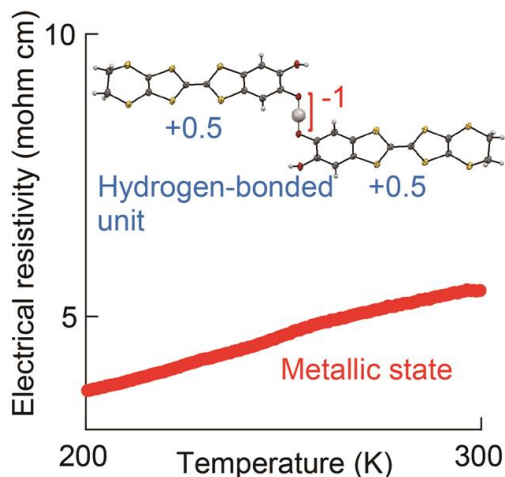


図1 純有機単成分導体の分子ユニット構造 [$\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-ST})_2$] とその電気抵抗率。世界最高の室温伝導度 (19 Scm^{-1}) をもつ純有機単成分導体は、水素結合で連結されて、電気的に中性な高対称性分子ユニットから構成される。そのユニットでは、電気を運ぶ担体となる電荷が広く非局在化し、さらに、ユニットが自己凝集して2次元伝導層を形成するため、約1万気圧というこれまでで最低の圧力下で金属状態となる。

$\text{EDT-TTF})_2$ で、 3.5 Scm^{-1} 、結晶学的に同型の $\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-ST})_2$ で、 19 Scm^{-1} と、純有機の単成分伝導体では、これまでで最高値を持つ。本系は、従来の中性ラジカルより、2次元的かつ強い分子間相互作用を有し、特に $\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$ に比べて、 $\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-ST})_2$ ではバンド幅が1.7倍であると計算されている。そればかりでなく、従来の開殻系単成分伝導体では1分子に1電子であったのに対して、今回は2分子で1電子、つまり1分子で平均0.5電子であるため、電子間のクーロン斥力が小さくなり、伝導度が向上していると考えられる。また、図1に示すように、 $\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-ST})_2$ に圧力を印可したところ、1.3 GPa とこれまでで一番小さい圧力において、室温伝導度は 130 Scm^{-1} が得られ、室温付近で金属状態を示した。

このように、 π 電子-水素協奏系の分子を用い、自己ドーピングにより、純有機単成分伝導体でも圧力下で金属状態を示す。

(2) 電子-プロトン相関係の純有機物質で、量子スピン液体状態を示すことを発見 (雑誌論文⑤)

温度を下げると、水は運動エネルギーを失い、氷(固体)に相転移する。同様に、磁性体中の電子スピンも、通常、低温では整列し、基底状態は強磁性、反強磁性、あるいは非磁性相とスピンの固体として長距離秩序を示す。しかし、図2のように、正三角格子に $S=1/2$ のスピンを反強磁性的に並べようとすると、ある場所はスピンの向きが決められず、

「三すくみ」や「三つ巴」というフラストレーション状態となる。このように、フラストレートした状態を持つために基底状態が長距離秩序を持たない状態を「スピン液体状態」と呼び、この量子スピン液体物質の探索が長年行われてきた。

このスピン液体に対する理論的アプローチとして有名なのが、1973年アンダーソン博士 (Anderson, P. W., ノーベル物理学賞受賞者) が示した「RVB (resonating valence bond)」状態である。三角格子上で、2つの $S=1/2$ スピンが強く結合してスピン-重項状態を形成し、量子的な効果に加え、三角格子の持つフラストレーションの効果のため、常にスピン-重項ペアが入れ替わっているような状態である。これは、スピン液体を表現する有力な候補である。

このように、理論からの提案により長年の物質探索が行われ、2003年以後に、量子スピン液体状態を示す $\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ や $\text{EtMe}_3\text{Sb-[Pd(dmit)}_2)_2$ という2つの有機三角格子系結晶が見出されたが、両者のスピン液体としての振る舞いは全く異なるため、スピン状態の本質を理解するには程遠く、さらなる量子スピン液体状態を示す物質の発見が渴望されていた。そして、2014年に本課題で開発した π 電子-水素協奏系 $\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$ も量子スピン液体候補であることを突き止めた。

本有機結晶の2次元伝導層はbc面で広がっており、この2次元層間は水素結合で連結されている。この2次元層における分子配列は、水素結合ユニット $\text{H}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$ が、 π 電子間の相互作用により点線で囲まれた二量体を形成し、さらにこの二量体が二次元三角格子を形成している。図2にあるとおり、三角格子点に $S=1/2$ のスピンの局在している。他のスピン液体候補の三角格子 t/t' (三角格子の歪の程度の目安) は拡張ヒュッケル法 (あるいは第一原理計算) で 1.06 ($0.80\text{-}0.83$) [$\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$] と 0.92 ($0.79\text{-}0.82$) [$\text{EtMe}_3\text{Sb-[Pd(dmit)}_2)_2$] と求められているのに対して、本結晶は 1.47 (1.25) と異方的である。

そこで、本結晶 $\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$ について静磁化率の温度依存性を調べたところ、図2の黒線のように温度低下とともに増加し、およそ20 Kで幅広い極大を持ち、 $J=-80\text{--}100$ K 三角格子ハイゼンベルグ型モデルで最適化されることが明らかとなった。さらに低温における長距離秩序の有無について、カンチレバーを用いたトルク測定を行った。一般に、常磁性状態では、トルク τ は、 $\tau(\theta, H) = AHP \cdot \sin 2(\theta + \theta_0)$ 、ただし、 θ は印加磁場の角度、 H は磁場、 A は定数、 AHP は振幅で最適化される。また、長距離秩序により内部磁場が発生すると、角度依存性は2倍周期の正弦曲線からピーク構造に変化する。0.4 Kにおける測定の結果、トルク τ は2倍の正弦曲

線に従い、振幅も 20T まで磁場の 2 乗に比例すること、また同様の振る舞いが 50 mK まで観測されることが明らかとなった。このように、三角格子のフラストレーション効果により、約 $J/1000$ の極低温まで長距離秩序を持たない常磁性状態であることから、量子スピン液体の候補となった。

さらに、約 3 K から 50 mK という極低温領域まで静磁化率とトルク測定から磁化率を見積もったところ、温度依存せず一定となっており、本結晶がギャップレスの量子スピン液体状態であることを示唆している。

これまでに発見された量子スピン液体物質である κ -(BEDT-TTF)₂Cu₂(CN)₃ や EtMe₃Sb[Pd(dmit)₂]₂ では、三角格子状に位置する二量体内のスピンの局在ばかりでなく、二量体内の電荷の自由度が量子スピン液体状態を安定化するのに重要であるという提案がなされている。前者の κ -(BEDT-TTF)₂Cu₂(CN)₃ では、観測された 60K 以下でのリラクサー的な誘電応答は、二量体内の電荷の揺らぎを起源としているとも提案されており、後者 EtMe₃Sb[Pd(dmit)₂]₂ では、 t'/t を横軸とした相図で、量子スピン液体相は、反強磁性相と電荷秩序相に挟まれていると報告されている。このように、量子スピン液体相の近傍に電荷秩序相が存在していることが理論的にも実験的にも提案されている。

上記の κ -(BEDT-TTF)₂Cu₂(CN)₃ や EtMe₃Sb[Pd(dmit)₂]₂ と比較して Cat-EDT-TTF 分子の二量体を作る三角格子は、 $t'/t = 1.47$ と正三角格子($t'/t = 1$)から大きく歪んでおり、それにもかかわらず、量子スピン液体状態を示唆していることは大変興味深い。本物質は、上記 2 物質とは異なり、二次元三角格子の各層が互いに水素で繋がれているところに特徴がある。この水素が低温で、有機分子間の中心位置から逸れて量子

的に揺らいでいる時、水素結合で繋がれた有機分子間で電荷も協奏的に揺らぐ。この電荷の揺らぎが、スピンの長距離秩序を不安定化させ、つまり量子スピン液体状態を安定化していることが、近年の理論および実験から提案され、相関物性として興味深い。

(3) 電子-プロトン相関系の純有機物質で、電気伝導性と磁性が切り替わることを発見—重水素移動が握る物性変換の鍵— (雑談論文①-④)

通常の水素結合型反強誘電体において、OHO および ODO の酸素原子間距離(R_{OO})がわずかに 0.03 Å の違うと、85 K にも及ぶ大きな同位体効果があることが報告されている。本節(3)では、 π 電子-水素協奏系において、その約 2 倍の 185 K にも及ぶ巨大な同位体効果があり、その起源が、重水素移動と協奏した π 電子の移動により伝導性と磁性の切替わりという大変珍しい現象であることが明らかになったので報告する。

κ -X₃(Cat-EDT-TTF)₂ において、X をすべて水素から重水素に置換するため、水素体 H₂(Cat-EDT-TTF)を原料として重メタノール溶媒を含む混合溶媒を用いて、弱アルカリおよび電解質の共存下、電気化学的な結晶成長を行い重水素体 κ -D₃(Cat-EDT-TTF)₂ を得た。この重水素体では、室温において伝導層間は O..D..O という強い水素結合 $R_{OO} = 2.501(2)$ Å で連結されている。空気中に晒すと、1 年ほどで水素体の一部置換されるが、重溶媒中で保管すればほぼ 100% の重水素化率を保つことができる。

前節(2)述べたように、水素体 κ -H₃(Cat-EDT-TTF)₂ は、極低温まで長距離秩序がみられない量子スピン液体状態であるため、図 3 に示すように、電気伝導率の温度依存性は室温で $\sigma = 4$ S cm⁻¹、活性化エネルギー $E_a = 0.11$ eV の半導体で、磁化率も、 $J = -80 \sim -100$ K の三角格子のハイゼンベルグ型で低温まで最適化されることを述べた。それに対して、重水素体は、室温の伝導率はほぼ変わらず $\sigma = 6$ S cm⁻¹ で、室温から 185 K までは、活性化エネルギーが水素体よりやや小さい $E_a = 0.08$ eV の半導体であるが、185 K で抵抗率のスイッチングが起こり、温度低下とともに抵抗率も急上昇する。磁化率も、185 K までは水素体とほぼ同じ振る舞いを示すが、抵抗率の切り替えと同じ温度で、突如非磁性へスイッチングを起こすことが明らかとなった。

そこで、このスイッチングの起源を結晶構造から解き明かすために、高エネルギー研究所の放射光施設で、スイッチング温度前後の詳細な構造決定を行った。水素結合ユニットの中心に位置する水素結合 O..H..O、O..D..O の部分であるが、270 K では水素も重水素も、酸素原子間中心の 2 回軸上にあり、 R_{OO} 距離は水素体で 2.486(5) Å、重水素体で 2.501(2) Å と後者の方が 0.015 Å とほんの少しだけ長

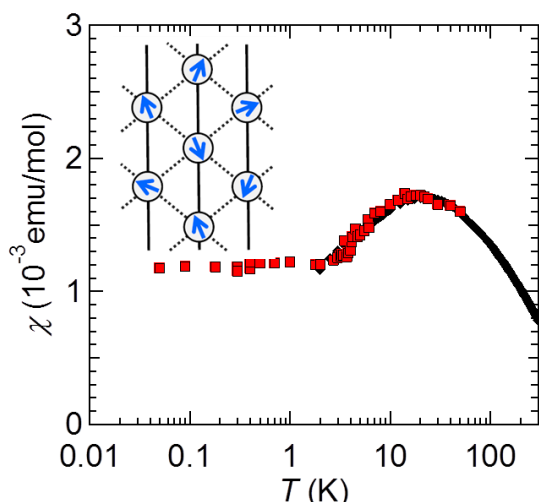


図2 水素体 κ -H₃(Cat-EDT-TTF)₂ における磁化率の温度依存性。高温で三角格子のハイゼンベルグモデルで磁化率で最適化され、2K 以下で一定となり、ギャップレス量子スピン液体が提案されている。

い。これらの結晶を冷却し、50 K で測定したところ、水素体の水素の電子密度は中心に留まり、 R_{00} 距離は 2.453(5) Å と室温より 0.032 Å 短くなった。一方、重水素体は 185 K 以下で空間群が C2/c から P-1 に構造変化し、 R_{00} 距離は転移前後で 2.501 Å と変わらないものの、伝導性および磁性のスイッチングとともに重水素の位置も中心から偏り、O-D..O と非対称化することが放射光 X 線による電子密度分布で明らかとなった。

水素ユニットの中心で、重水素が中心から ~ 0.25 Å 偏ると、水素結合が [O^{-0.5}..D..O^{-0.5}] から [O^{-0.06}..D..O^{-0.94}] へと変化する。それに伴い π 電子系も両側部分の中性を確保するため、 -0.44 価の π 電子が移動して、水素結合ユニットの π 電子の価数は、(+0.5, +0.5) から (+0.06, +0.94) と非対称化する。つまり、水素結合ユニット全体の電荷に変化はないが、重水素移動、およびそれと協奏した π 電子移動により、中心の水素結合の非対称化、およびそれと協奏した π 電子状態の変化が起きた。

水素結合ユニットの π 電子状態の変化は、集積体である有機結晶の電子状態とも連動している。重水素体の 270 K では、二量体 (+0.5, +0.5) に $S = 1/2$ のスピンの局在する「ダイマーモット絶縁体状態」である。この結晶が冷却されると 185 K で重水素移動を契機とする π 電子系の電荷不均化が起こり、二量体 (+0.5, +0.5) は、2 種類の二量体として ($\sim +1$, $\sim +1$) と (~ 0 , ~ 0) に分かれ、前者は(者はれとしてスピン-重項状態を形成する。このように、水素を重水素に置換することにより、室温では同じ電子状態であるにもかかわらず、低温では重水素と π 電子が協奏し、全く異なる基底電子状態を与えるのは大変興味深い。

最後に、水素を重水素に置換した時に、なぜ電子状態が大きく変化したかをポテンシャルエネルギーカーブの計算に基づいて考察してみる。水素体と重水素体について、室温および 50 K の結晶構造より水素結合ユニットを切り出し、水素および重水素を酸素原子 O1 と O2 間で移動させた時のポテンシャルエネルギーカーブ変化を DFT 計算で描いている。ここでは、ゼロ点振動など量子的な効果は含まれていない。室温における水素体と重水素体は、 R_{00} 距離が各々 2.486(5) Å、2.501(2) Å と 0.015 Å 長くなったため、ダブルミニマムポテンシャルエネルギーの障壁エネルギーも 0.09 から 0.14 eV に上昇している。水素体の温度を低下すると、 R_{00} 距離が 0.033 Å 短くなるため、障壁エネルギーも 0.09 から 0.07 eV に減少している。さらに、重水素体の温度変化についてであるが、驚くべきことに、 R_{00} 距離は 270 K と 50 K で 2.501 Å と変化しないにもかかわらず、室温では対称的、低温では非対称的なポテンシャルエネルギーカーブを与えている。これは、O..D..O の水素結合ばかりでなく、 π 電子系

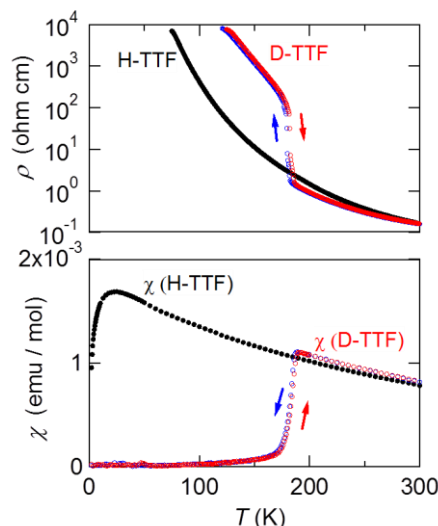


図 3 π 電子-プロトン相関係有機伝導体 κ -X₃(Cat-EDT-TTF)₂ [X = H, D] の電気抵抗率及び磁化率の温度依存性。水素体 H-TTF は量子スピン液体状態なので、少なくとも 50 mK までは相転移がないのに対して、重水素体 D-TTF は、重水素移動に伴う磁性、伝導性のスイッチングが 185 K で起こり、巨大な同位体重水素効果が発現していることが明らかとなった。

との協奏によってポテンシャルエネルギーの非対称化が誘発されたと考えられる。

このように動的な重水素に協奏した伝導性および磁性のスイッチングは大変珍しく、またその重水素効果も 185 K と我々の知る限り最高の値となっている。このスイッチングは、水素結合の距離だけでなく、 π 電子の電子状態と深く関係しているので、 π 電子の要請も含めた π 電子-水素の協奏現象が重水素効果を決めていると考えられる。

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 39 件)

- ① J. Yoshida, A. Ueda, R. Kumai, Y. Murakami, and H. Mori “Anion substitution in hydrogen-bonded organic conductors: the chemical pressure effect on hydrogen-bond-mediated phase transition”, CrystEngComm, 19, 367-375 (2017). DOI: 10.1039/c6ce01763k (査読有)
- ② A. Ueda, A. Hatakeyama, M. Enomoto, R. Kumai, Y. Murakami, and H. Mori, “Modulation of Molecular π -Electron System in a Purely Organic Conductor that shows Hydrogen-bond-dynamics-based Switching of Conductivity and Magnetism”, Chem. Eur.J., 21, 15020–15028(2015). DOI: 10.1002/chem.201502047 (査読有)
- ③ J. Yoshida, A. Ueda, A. Nakao, R. Kumai, H. Nakao, Y. Murakami, and H. Mori, “Solid-solid phase interconversion in an

organic conductor crystal:
hydrogen-bond-mediated dynamic changes
in π -stacked molecular arrangement and
physical properties”, Chem. Commun., 55,
15557-15560 (2014). DOI:

10.1039/c4cc07810a (査読有)

- ④ A. Ueda, S. Yamada, T. Isono, H. Kamo, A. Nakao, R. Kumai, H. Nakao, Y. Murakami, K. Yamamoto, Y. Nishio, and H. Mori, “Hydrogen-Bond-Dynamics-Based Switching of Conductivity and Magnetism: A Phase Transition Caused by Deuterium and Electron Transfer in a Hydrogen-Bonded Purely Organic Conductor Crystal”, J. Am. Chem. Soc., 136 (34), 12184–12192 (2014). DOI: 10.1021/ja507132m 3 (査読有)
- ⑤ T. Isono, H. Kamo, A. Ueda, K. Takahashi, M. Kimata, H. Tajima, S. Tsuchiya, T. Terashima, S. Uji, and H. Mori, “Gapless Quantum Spin Liquid in an Organic Spin-1/2 Triangular Lattice κ -H₃(Cat-EDT-TTF)₂”, Phys. Rev. Lett., 112, 177201(2014). DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.177201 (査読有)
- ⑥ T. Isono, H. Kamo, A. Ueda, K. Takahashi, A. Nakao, R. Kumai, H. Nakao, K. Kobayashi, Y. Murakami, and H. Mori, “Hydrogen bond-promoted metallic state in a purely organic single-component conductor under pressure”, Nature Commun., 4, 1344(1-6) (2013). DOI: 10.1038/ncomms2352 (査読有)

[学会発表] (計 136 件)

- ① H. Mori, “Novel Functionalities of Proton-Electron Coupled Molecular Materials”, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010 (ICSM2016), June 26-July 1, 2016, Guangzhou, China.
- ② 上田 顕、島山あかり、榎本真哉、熊井玲児、村上洋一、森 初果、“カテコール縮環 TTF 型純有機伝導体における S/Se 置換効果：一電子移動相転に対する影響”、分子科学討論会、東京工業大学（東京都目黒区）、2015 年 9 月 16-19 日。
- ③ 磯野貴之、杉井かおり、寺嶋太一、上田 顕、森初果、宇治進也、“量子スピン液体状態における磁気熱量効果： κ -H₃(Cat-EDT-TTF)₂ の場合”、日本物理学会秋季大会、中部大学（愛知県春日井市）、2014 年 9 月 7 日～9 月 10 日。
- ④ 吉田順哉、上田 顕、中尾朗子、熊井玲児、中尾裕則、村上洋一、森 初果、“新規水素結合ユニット型有機伝導体 [H₃(Cat-EDO-TTF)₂]BF₄ のドナー配列変化を伴う相転移”、日本化学会第 94 春季年会、名古屋大学（愛知県名古屋市）、2014 年 3 月 27-30 日。
- ⑤ H. Mori, “Electron-Proton Coupled

Single-Component Organic Conductors”, the International School and Symposium on Molecular Materials & Devices, September 24-28, 2012, Durham (UK).

[図書] (計 1 件)

- ① 森 初果 他、東京大学物性研究所編、朝倉書店、物性科学ハンドブック、2016、932-973

[その他]

ホームページ等

<http://hmori.issp.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

森 初果 (MORI Hatsumi)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号：00334342

(2)研究分担者

上田 顕 (UEDA Akira)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号：20589585

磯野 貴之 (ISONO Takayuki)
東京大学・物性研究所・特任研究員
研究者番号：70625631