

サイエンストピックス

マルチフェロイック物質の機能性ドメインの観察と制御

物理学専攻 准教授 松原 正和



世の中には磁気を帯びる「磁性」や、電気を蓄える「誘電性」などの特徴的な性質を持つ物質があり、前者はハードディスクや磁気テープ、後者は強誘電体メモリなど、現代の情報社会を支える記憶・演算デバイスの素材として活用されている。このような磁性体、強誘電体、さら

には両者の性質を併せ持つ「マルチフェロイック物質」といった電子機能性物質において、その機能性の多くは物質における対称性の破れに起因し、その機能的電子物性を理解するうえで、如何なる対称性の破れが生じているか、また、結果として生じる時間・空間的な不均一構造であるドメイン構造を明らかにすることは必要不可欠である。とりわけ、近年大きな注目を集めているマルチフェロイック物質では、磁性と誘電性の結合により特異で多彩な電子機能が発現し、例えば、「電気磁気効果」と呼ばれる通常では不可能な「磁場による誘電性の制御」や「電場による磁性の制御」などが可能になり、革新的なエレクトロニクス創成へ向け、基礎・応用両面の観点から世界中で活発に研究が行われている。しかしながら、マルチフェロイック物質では一般的に、構造的な対称性の破れが微小であり、その検出が著しく難しいという問題がある。

この微小な対称性の破れを検出する強力な手法の1つが、光第二高調波発生 (SHG) を主とした非線形光学測定である。筆者らは、独自開発した非破壊・非接触のSHG顕微鏡を用い、電場・磁場・光によるマルチフェロイックドメインの実空間ダイナミクスを可視化し、実験と理論の協力によりその電子機能制御過程を解明することに成功した。

今回研究対象としたマルチフェロイック物質は、テルビウム (Tb) とマンガン (Mn) と酸素 (O) か

らなる TbMnO_3 という化合物で、27 K 以下の温度で、電子スピンの螺旋状の秩序化に伴い強誘電分極が発現する、いわゆる「磁気誘起強誘電体」のモデルシステムとして知られている。この物質に磁場を印加すると、強誘電分極の向きが90度回転 (強誘電分極フロップ) することに起因して大きな電気磁気効果が現れることが知られていたが、この物質が示す特異な電子機能のメカニズムについては分からないことも多く、電子機能制御過程の解明が強く求められていた。

そこで、これらの本質に深く関わっているマルチフェロイックドメインの特性を明らかにするため、筆者らは「電場による強誘電分極制御」過程 (図1(a)) と「磁場による強誘電分極フロップ」過程 (図1(b)) のSHG像を撮影した。その結果、電場印加のもとではドメイン壁はピンングされることなく自由に動け、通常の強誘電体において見られるように、電場の反転による分極の反転が観測された。一方、磁場による分極フロップの前後ではドメイン構造はほとんど変化せず、この過程の前後で電気的な中性ドメイン壁と荷電ドメイン壁が発生し、磁場によりそれらを可逆的にスイッチ可能な「ドメイン壁に生じる新たな電子機能」を発見した。さらに、マルチフェロイック物質の新しい制御手法として光による制御を目指し、光照射下でのドメインダイナミクスを観察した。その結果、光照射により局所的にドメインの反転が起きること (図1(c))、また、波長の異なる光を照射することで、可逆的にドメインの反転を起こせることが明らかになった。

筆者はここで紹介した研究成果により、第14回森田記念賞を受賞しました。審査頂いた先生方や泉萩会会員の皆様、これまでご指導・ご協力を頂いた恩師や共同研究者の方々に、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

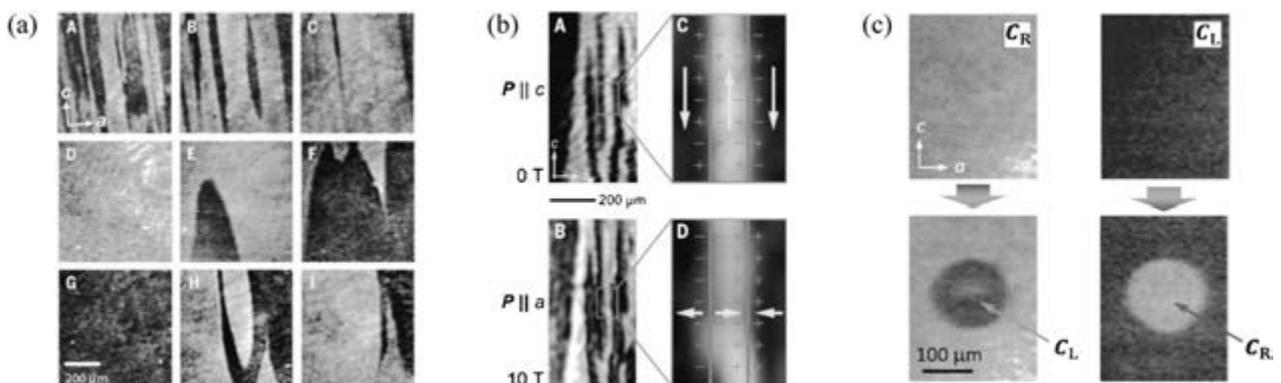


図1 SHGを用いたマルチフェロイックドメインの観察と制御 (a)電場制御 (b)磁場フロップ (c)光スイッチ

サイエンストピックス

赤外極短パルスで見る光誘起相転移の超高速ダイナミクス

平成 19 年物理学科卒 物理学専攻 助教 川上 洋平



固体中には 10^{23} 個もの電子がひしめき合っています。この多数の電子間のクーロン相互作用や交換相互作用、電子-格子相互作用などの絶妙なバランスによって、超伝導や強磁性、強誘電性などのエキゾチックな電子状態が実現するのが、固体、特に強相関電子系と呼ばれる物質の面白いところです。このような物質に光を照射すると、競合していた相互作用のバランスが崩れ、相転移（電子状態や結晶構造の変化）が引き起こされることがあります。この現象を光誘起相転移と呼びます。光パルスの瞬間的な照射によって相転移が起きた後、時間の経過と共に元の相に戻る過渡的な現象も含めて光誘起相転移と呼びます。その中でも最も典型的な例のひとつが光誘起絶縁体-金属転移です。光の照射に伴って、例えば、電子間のクーロン反発や電子-格子相互作用によって規則正しく並んで停止していた電荷の秩序（絶縁性）が融解して、金属的な性質（伝導性）を示すようになる現象です。

光照射によって電荷の秩序が融解する機構、すなわち、絶縁体から金属への相転移が引き起こされる機構については、現在でも数々の物質を対象に、実験と理論の両面から議論がなされています。代表的な例としては、化学ドーピング（元素置換）による価数制御になぞらえた、光キャリア注入による「動的価数制御」が、光誘起絶縁体-金属転移の発見初期（1990年代）から提案されています。しかし、光照射の後、刻一刻と変化する“ダイナミックな”現象の説明としては簡単すぎます。我々は、このダイナミックな機構の“中身”を明らかにすることを目的として、パルス幅 10 フェムト秒 (fs: 10^{-15} 秒) 以下（光電場の振動 1~2 周期に対応）の極めて時間幅の短い赤外極短パルス光源を構築し、時間分解分光実験を継続的に進めています。ここでは、電子間の相互作用（クーロン反発）によって絶縁体となる電荷秩序絶縁体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における光誘起絶縁体-金属転移を紹介したいと思います。

二次元有機伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ は転移温度 ($T_{CO} = 135$ K) 以下で電荷秩序絶縁体となる物質です。赤外極短パルスを用いて光励起（電荷移動励起）を行うと、瞬時に、電荷ギャップに対応する周期 20 fs の多体電子のコヒーレントな（位相のそろった）振動が駆動され、その後 200 fs の時間をかけて、BEDT-TTF 分子のコヒーレントな分子振動を励振しながら金属への相転移が進行する様子を観測しました [YK *et al.*, Phys. Rev. Lett. (2010)]。従来「動的

価数制御」の一言で説明されてきたダイナミックな機構の中身を実験的に捉えた結果です。

光誘起相転移の研究における最新の課題のひとつは、光で秩序を融解するのは反対に、“光で秩序を創る”ことです。我々は、 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の高温金属相 ($T > T_{CO}$) において、瞬時電場強度が 10 MV/cm に及ぶ高強度の極短赤外光を照射することで、伝導電子の運動を瞬間的に（50 fs の間だけ）停止させることに成功しています。この現象は、1980 年代にすでに理論的に提唱されていた、動的局在と呼ばれる機構に起因すると我々は考えています。すなわち、高周波の光電場によって非共鳴に電子の軌道を変調することで、サイト（分子）間の電子の動きやすさ（移動積分）が実効的に低下します。この移動積分の減少と電子間のクーロン反発の協奏によって、瞬間的に電荷が局在化したのだと考えています [T. Ishikawa, YK, *et al.*, Nature Commun. (2014), YK *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. (2018)]。この現象が実験的に観測されたのは我々の研究が初めてであり、パルス幅 7 fs の極めて短い光パルスを用いることで、試料の温度が上がるよりも前の、超高速な電子の運動を観測できるようになったこと、この極短パルスで瞬時電場強度 10~100 MV/cm まで高強度化できたことが、このようなブレイクスルーをもたらしたと言えます。

現在では、ペタワット (10^{18} ワット) に及ぶ高強度レーザーや、アト秒 (10^{-18} 秒) に至る極短パルスの発生が実現されており、物性実験への応用も可能になってきました。今後はさらに高強度な光パルスによって初めて引き起こされる、フェムト秒やアト秒の極短時間内に起こる非平衡現象の発見・観測に向けた実験が加速していくことが期待されます。

最後になりましたが、共同研究者の皆様、泉萩会の先生方にこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

著作権の都合により、図の web 公開は控えさせていただきます。

サイエンストピックス

多波長遠隔観測に基づく回転天体磁気圏の物質・エネルギー輸送の解明

平成 17 年地球物理学科卒 学際科学フロンティア研究所 助教 木村 智樹



現在、地球外生命の存在可能性が最も高い環境は、太陽系の氷天体内部の海「地下海」です。例えば、土星と木星の氷衛星（エンセラダス・エウロパ・ガニメデ）は、地下海の存在が確認されているか、存在可能性が非常に高いと目されています。これらの氷衛星は深宇宙に存在するため、太陽光が地球と比較して弱い一方、土星・木星磁気圏中の高エネルギープラズマが、主要な外的エネルギー源の1つとして、衛星表面に照射されています。プラズマの加速や輸送は、氷衛星の生命環境の変動・進化の解明に必須の、重要な物理過程です。磁場の拡散に伴う磁力線の繋ぎ変え現象「磁気再結合」等の、磁気圏の巨視的な電磁場変動に応じて、プラズマは日々劇的に変化します。今までの探査機その場の1点観測では、磁気圏の巨視的構造は、可視化すら困難であり、加速や輸送の過程は未解明のままでした。

そこで我々は、探査機や宇宙望遠鏡を緊密に連携させ、木星磁気圏の巨視的構造を多波長遠隔観測で可視化する事で、この問題に取り組みました。自身が開発に参加してきた宇宙望遠鏡「ひさき」と、ハッブル宇宙望遠鏡などの、国内外の飛翔体との協調観測を主導し、X線や紫外線のオーロラ発光を連続監視することで、木星磁気圏の異なるエネルギーを持ったプラズマの巨視的構造を可視化し、その変動を監視する事に世界で初めて成功しました。図1にその1例を示します。

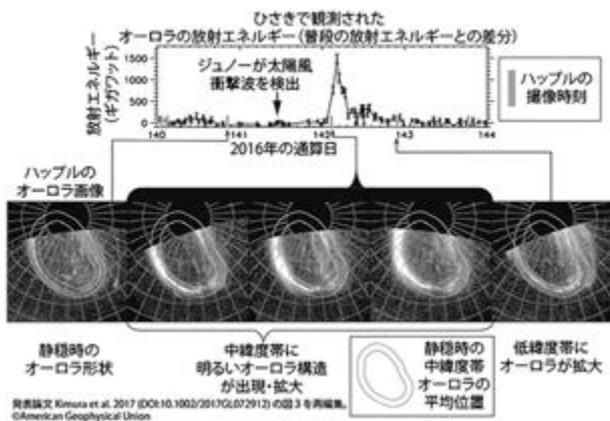


図1 「ひさき」衛星とハッブル宇宙望遠鏡の多波長遠隔観測によって明らかになった、木星オーロラの時空間変動（理化学研究所プレスリリース、©米国地球物理学会）。オーロラと、木星磁場を介して結合している、木星の磁気圏の広範な範囲のプラズマの構造や、その変動を明らかになった。

これにより、プラズマ加速のエネルギー源が、木星の高速自転、強力な固有磁場、衛星イオの火山ガス、太陽からの高速プラズマ流「太陽風」の4つの組み合わせであることを示唆しました。これは、太陽風が唯一のエネルギー源である地球磁気圏の加速とは、全く異なる過程の存在（図2）を明確に示しています。

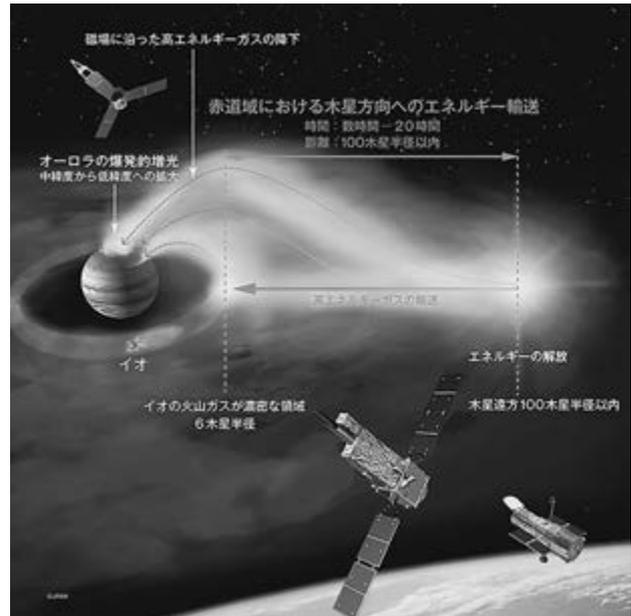


図2 我々の研究から推定される木星磁気圏におけるプラズマの加速と輸送の過程（理化学研究所プレスリリース、©JAXA）。木星周囲に蓄積された、磁場やプラズマが持つエネルギーが、磁気再結合等をきっかけにして突発的に開放され、プラズマを加速する。加速されたプラズマは、磁場が持つ張力によって、木星方向へ輸送されていると考えられる。

現在は、「ひさき」衛星と、木星を周回している米国のジュノー探査機を緊密に連携させ、我々が推定したプラズマ加速・輸送の存在実証や、実際に磁気再結合でオーロラを駆動できるプラズマ加速が実現できるのか、素過程の検証に取り組んでいます。

また、明らかにしてきた高エネルギープラズマの加速・輸送過程の知見に立脚し、氷衛星の進化の解明に取り組んでいます。原子核物理や地学分野の研究者らと協力し、衛星表層へのプラズマ照射がもたらす、氷天体表面物質の物理・化学変化を室内実験で再現し、衛星の表層・内部進化を解明しようとしています。我々が、観測機器開発や科学検討に参加している、ESAの木星氷衛星探査機JUICEは2030年代に、氷衛星を直接探査します。今後は、室内実験と探査を連携させ、氷衛星内部の地下海の進化を紐解いていきたいと考えています。