

CASE 1

「軌道弾性効果」  
新しい物性現象への展開

磁性体の薄膜を歪ませると薄膜の面内と面直方向で磁化の向きやすさ（磁気異方性）が変化することは磁気弾性効果として知られている。また、誘電体に電圧を印加すると格子ひずみを導入できる。今回、誘電体と磁性体の薄膜界面に電圧を印加した状態での新しい動作時（オペランド）磁気分光法を開発した。これにより、磁気弾性効果の量子力学的なミクロな原因として、電子のスピン角運動量よりも軌道角運動量が重要であることを見出し、「軌道弾性効果」の新現象を実証できた。

学部の量子論の講義では、スピン角運動量と軌道角運動量について学ぶ。固体中におけるこれらの量の計測と制御は、磁気記録素子やハードディスク内の磁気センサーとしての応用に直結し、スピントロニクスの研究分野が進展している。磁気記録素子の薄膜垂直方向、面内方向の磁化の揃いやすさ（磁気異方性）を操作することは、高記録容量のハードディスクなどのデバイス開発に必須なことのひとつである。また、磁性体と誘電体を組み合わせた界面では、ひずみを電氣的に可逆的に操作でき、磁気異方性を操作するマルチフェロイクス物質の研究が進んでいる。しかし、可逆的なひずみ印加に対する電子論（量子論）的なスピンと軌道の理解については、今まで明確ではなかった。

われわれは、電子の軌道運動がつくる角運動量を元素別に調べられる X 線磁気円二色性 (XMCD) に着目し、ひずみの有無の各状態での電圧印加時の（オペランド）XMCD 計測システムを立ち上げた。Ni の軌道角運動量について、電圧印加時の XMCD にて調べ、ひずみによる軌道角運動量の変化をとらえることに成功した。誘電体 BaTiO<sub>3</sub> には

電圧により 2% もの大きな格子ひずみを印加でき、このひずみの伝播により Ni の化学結合状態が変わり、磁気異方性の変化として現れていることが判った。ひずみと磁気異方性の関係を示す磁気弾性効果は現象論的なマクロな性質として定式化されているが、量子力学的には、ひずみによる軌道角運動量の変化が磁気異方性の変調を説明することが判った。われわれはこれを「軌道弾性効果」と名付けた。これは、オペランド XMCD 分光によって初めて分かることであり、薄膜に垂直方向に磁化が向いた方が安定となる垂直磁気異方性の操作に関する起源に迫るものであり、スピンオービトロニクスという新概念を創出する。

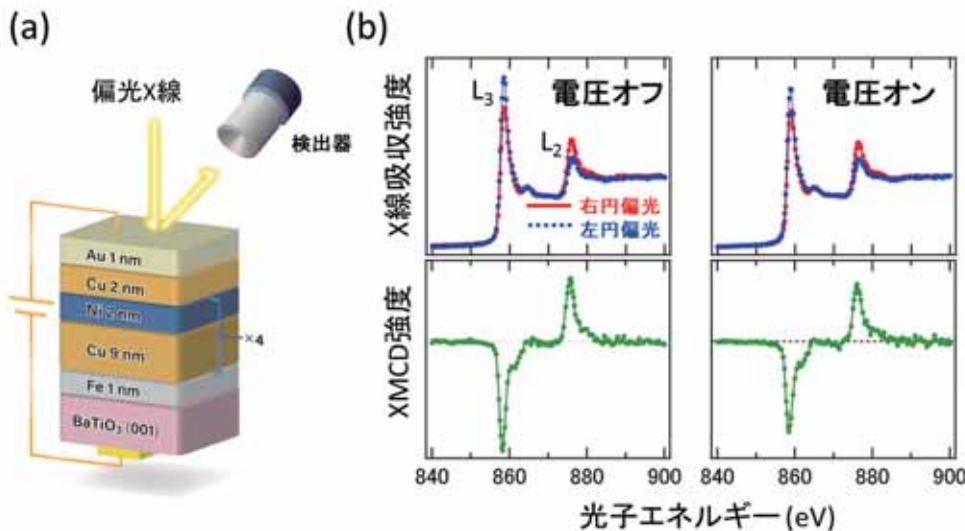
オペランド XMCD 測定については、高エネルギー加速器研究機構放射光施設 (KEK-PF) 内に理学系研究科スペクトル化学研究センターが所有するビームライン (BL-7A) にて立ち上げたシステムを用いて行った。試料に電極を設置し、電圧印加時に放射光円偏光をあてて XMCD 分光を実施した。本研究により今後、界面のスピンと軌道状態を人工的に設計することができ、今までにない

新しい磁石の性質の操作に関する研究が拓けるものと期待できる。原子レベルで制御された異種元素の界面のオペランド精密分光による物性計測は、化学と物理学の融合分野において今後益々必要となり、学生諸君のアイデアを活かせる研究分野であり、ぜひとも参入していただきたい。

本研究成果は、J.Okabayashi *et al.*, *Nature Partner Journalnpj Quantum Materials* 4, 21 (2019) に掲載された。

(2019年5月8日プレスリリース)

図：(a) 設計した構造の模式図。BaTiO<sub>3</sub> 上に Ni/Cu 多層膜を堆積し、薄膜の上下に電極を取り付けている。(b) 電圧印加オン・オフ時の Ni の L 吸収端 X 線吸収スペクトル (上段)、X 線磁気円二色性スペクトル (下段)。



## CASE 2

# ゲノムデータから読み解く日本人の集団史

「過去数千年の人口変化を推定せよ」と言われたら皆さんはどうするだろうか？

意外に思われるかもしれないが、現代人の DNA 配列から過去の人口変化を推定できるのである。

生物が子を残す際、親の DNA 配列が複製され、いわゆるコピーが子に伝わる。

時間を遡ってコピーの親を順に辿っていくと、最終的に共通の祖先 DNA 配列に到達する。

この過程は、集団サイズを変数として、確率的に表現することができる。

われわれは、現代日本人の Y 染色体 DNA 配列データと確率計算によって、

縄文時代の男性の人口変化を推定することに成功した。

日本列島には 3 万年以上前からヒトが居住しており、約 1 万 6 千年前に縄文時代が始まったと考えられている。縄文人は、狩猟採集民でありながらもひじょうに高い人口密度を達成した世界的にも注目される集団である。しかし、気候変動の影響を受けやすい狩猟採集生活において、彼らは常に安定した生活を送ることができたのであろうか。

組換えを受けないゲノム領域の DNA 配列から、過去の生物集団のサイズ変化を推定する方法が考案されている。そこで、われわれは、父親から息子に伝わる Y 染色体の配列データを用いて、縄文時代の男性人口の変化を推定することを試みた。まず、日本人男性 345 名の Y 染色体の全塩基配列決定を行い、他の東アジア人集団には観察されない（すなわち渡来系弥生人に由来しない）、縄文人由来の 122 本の Y 染色体グループを同定した。次に、それらの塩基配列の違いをもとに Y 染色体の系図

を復元し（図上）、つぎのような確率計算を行った。

$N$  人の男性からなり、1 世代で全個体が入れ替わる集団を考える。この集団から 2 人の男性の Y 染色体を無作為に抽出したとする。各男性にとって 1 世代前の任意の男性が親である確率を  $1/N$  とすると、抽出した 2 人の共通の父親が前世代に存在する確率（これを合祖確率とよぶ）は  $p_2=1/N$  である。世代を遡って考えた場合、 $k$  世代前に初めて合祖する確率  $c_k$  は、

$$c_k = p_2 \left( 1 - \sum_{i=1}^{k-1} c_i \right)$$

なる漸化式で表される。右辺の ( ) 内は  $k-1$  世代までにまだ合祖していない確率を示している。これを解くと  $c_k = p_2 (1 - p_2)^{k-1}$  であり、 $kc_k$  を  $k=1$  から  $\infty$  まで足し合わせると、2 本の Y 染色体が合祖するまでの期待世代数  $T_2=1/p_2=N$  が得られる。同様の計算から、 $m$  本の Y 染色体中の任意の 2 本が合祖して独立な  $m-1$  本となるのに要する期待世代数は  $T_m=1/p_m=2N/\{m(m-1)\}$  であり、その間の男性の数  $N_m$  は一定と仮定すると、 $N_m=\{m(m-1)T_m\}/2$  である。したがって、枝の長さが時間に比例した遺伝子の系図から  $m-1$  本の  $T_m$  を求めることで、 $m-1$  本の  $N_m$  を推定することができる。この手法に基づき計算したところ、縄文時代晩期から弥生時代初期（およそ 3,000 ~ 2,000 年前）にかけて、縄文人男性の人口が急減した後、急増したことが明らかとなった（図下）。男性の数のみが変わったとは考えにくいので、女性も同様の変化を示したと思われる。今回の結果は、発見された遺跡数やその規模などをもとに、縄文人の人口が縄文時代後期・晩期にかけて急減し、弥生時代に入って急増したことを示した先行研究の結果とよく一致していた。縄文時代晩期は世界的に寒冷化した時期であり、気温が下がったことで食料供給量が減ったことが急激な人口減少の要因だったのかもしれない。いっぽう、弥生時代に入って人口が増加したのは、渡来系弥生人がもたらした水田稲作技術によって安定した食料供給が可能になったからであろう。

本研究成果は、Y. Watanabe and J. Ohashi *et al.*, *Scientific Reports*, 9, 8556 (2019) に掲載された。

(2019 年 6 月 17 日プレスリリース)

図：122 人の日本人 Y 染色体の遺伝子系図（上）と推定した集団サイズの変化（下）。青色の曲線が推定値であり、灰色の曲線は 95% 信用区間である。

