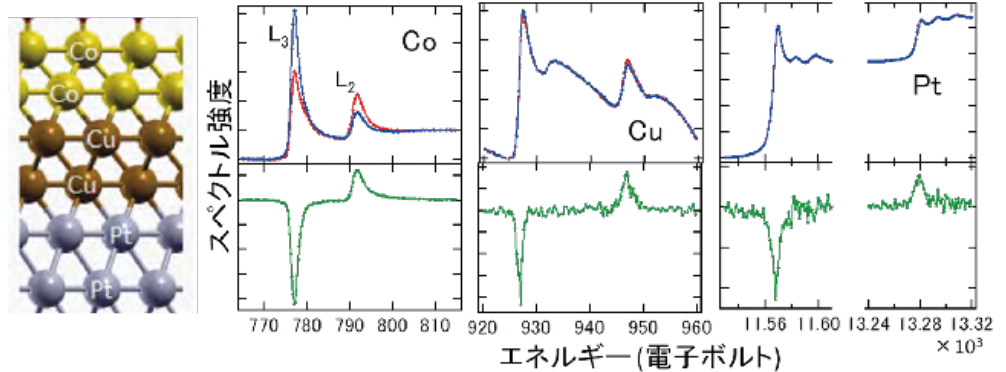


CASE 1

銅が磁石に、しかも
垂直を向く新しい磁石に！

原子レベルで制御された薄膜の界面では、非磁性体である銅にも磁石としての性質が生じる。しかも、薄膜の面に垂直方向に磁化する性質を示すことが判った。それを調べるには、元素別に磁性を計測する必要があり、放射光を用いた磁気分光法により初めて明らかにできた。



べることに着目した。Co/Pt界面は、Coの磁石(スピン)としての性質、Ptの重い元素としての性質(スピン軌道相互作用)が合わさった近接効果により、膜に垂直方向に磁化することが安定となる。この界面に非磁性体Cu層を原子レベルで人工的に挟み込むと、3原子層の厚さまではCuにも垂直方向にスピンの誘起されることが判った。図のCuの膜厚をさらに増やすと、CoとPtの間の相互作用がなくなり、近接効果が及ばずに、垂直方向にスピンの揃わなくなることもスペクトルから明らかになった。また、界面での近接効果によりCuに磁石としての性質が発現することが、解析計算によっても再現された。これらにより、原子レベルで人工的に設計した構造において、磁気特性を操作できることを実証した。

原子レベルで制御されたCo/Cu/Pt多層構造の図(左)と各元素のX線吸収スペクトル(右上段)と磁気円二色性スペクトル(右下段)。

強磁性体と非磁性体を交互に堆積した薄膜は、磁気メモリーなどの記録素子やハードディスク内の磁気センサーとして広く用いられている。とくに、薄膜の面に垂直方向に磁化の向きを揃えて磁気記録を行う技術は、高記録密度(ハードディスクの容量を増やす)を達成するために重要となっている。これらの素子を設計することは、磁化(スピン)を操作するスピントロニクスとよばれる研究分野におけるデバイス開発でもっとも重要なことのひとつである。しかし、強磁性体と非磁性体が接合した界面(図左)にてスピンの垂直方向に誘起されるメカニズムについて、今まで明確ではなかった。磁石は本来、膜に平行方向にスピンの揃うことでエネルギーが低くなり安定となるが、膜に垂直方向に揃う方が安定することがある。これまでに、非磁性体であるCuにおいて、膜面に平行な方向への磁化の誘起については研究が進んできたが、薄膜の面に垂直な方向の磁化観測とその設計に関する知見は得られていなかった。

理学系研究科附属スペクトル化学研究センターでは、高エネルギー加速器研究機構放射光施設(KEK-PF)の放射光ビームラインにて、元素別の内殻励起を用いた磁気分光(X線磁気円二色性)装置を立ち上げてきた。この装置を用いて、非磁性体に誘起される微弱な磁気シグナルをとらえることができる。今回、Co/Pt界面に膜厚の異なるCuを人工的に挟み込み、各元素の磁気特性を調

磁気記録素子やスピントロニクスの研究にて広く用いられているCuを用いた材料設計、素子設計を行う上で、Cuに誘起される磁性について知ることがきわめて重要な指針を与える。応用的には、垂直磁化を用いた高記録密度を可能にする素子設計に有用であり、基礎科学的には、近接効果もたらす界面での誘起磁性に関する物性研究の進展につながる。「界面を制するものはデバイスを制す」とも言われる。原子レベルで制御された試料の精密分光による物性評価は、ナノテクノロジーの研究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.*, *Sci. Rep.*, 7, 46132 (2017) に掲載された。

(2017年4月13日プレスリリース)

CASE 2

従来想定より頻繁に発生 巨大な関東地震は

神奈川県から千葉県東方沖までの領域のプレート境界では、大正の地震と元禄の地震など規模の異なる巨大地震がくりかえし発生してきた。(左上)。断層がずれ動くとき地面が隆起し、波打ち際の地形は階段状の海岸段丘として、隆起時期は地層に残された干上がった貝の年代として記録される(右上)。調査地点では4段の海岸段丘の存在が知られていたが、今回われわれは新たな一段を発見(左下)し、それら段丘の形成年代が従来の推定値より約1000年以上新しいことを明らかにした。

将来の巨大地震発生を予測するためには、過去の地震の履歴を正確に復元することが必要である。過去の地震の履歴は、地震に伴い大地が隆起したことで地層に残された、貝化石の年代から知ることができる。今回われわれは、房総半島南部で、高密度で広範なボーリング調査を行い大量の貝化石を採取することで、従来よりも格段に信頼性の高いデータを得ることに成功した。その結果、江戸時代に東京などをおそったような巨大な関東地震(元禄型関東地震)が、従来の推定である最短2000年間隔よりも、もっと頻繁に最短500年間隔で起こっていたことが明らかになった。

穴を掘って地層を調べる研究と聞くと、いかにも古めかしい研究に聞こえるかもしれないが、それが将来の巨大地震を予測するのに、ほぼ唯一の観測手段であると聞くとどうだろうか。力学的なモデルを使って系の将来を予測するとき、必要となるのは系の運動の過去の履歴(時空間パターン)のデータである。地震の場合、それを与えるのが地層に残された過去の地震の痕跡である。近年では、人工衛星を用いたりリモートセンシングなど、地震観測の技術は飛躍的に発展したが、これら現代的観測のデータが得られているのは、たかだか過去数10年分である。巨大地震のくりかえし間隔は、一般に100年から1000年のオーダーである。歴史記録も無いような過去の地震のデータを得ようとすると、地層の記録に頼るしかない。

地震の痕跡の中で、地層や地形に残りやすいもののひとつが、地震(断層のずれ)に伴う地表面の隆起である。海岸では、隆起により波打ち際の

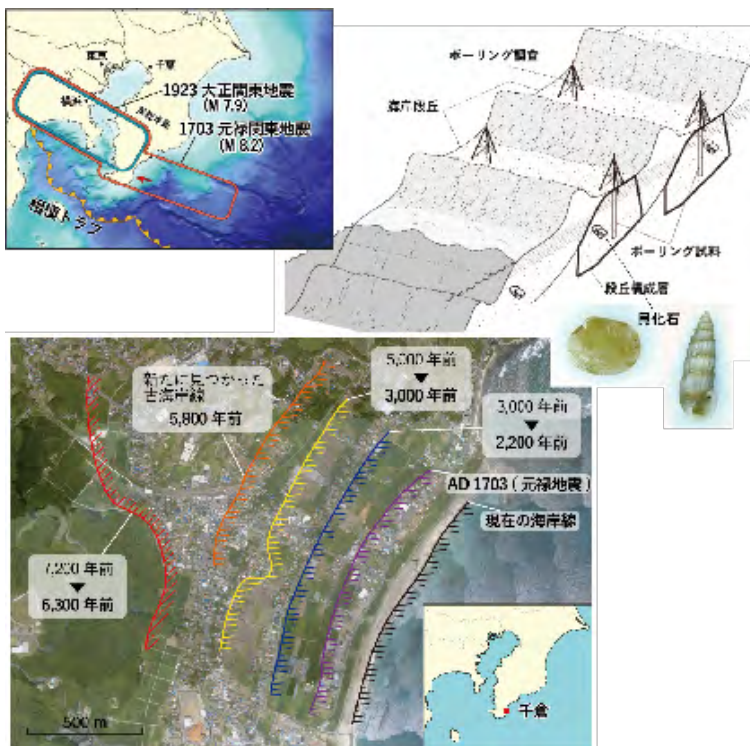
浅瀬が陸上に現れ、階段状の地形である海岸段丘が形成される。今回調査した房総半島の千倉地域には、1703年(江戸時代元禄年間)の巨大地震で形成された海岸段丘が存在している。元禄地震は、1923年(大正)の地震よりさらに大きかった。元禄地震による段丘面の上位には、過去と同規模の巨大地震(元禄型関東地震)に伴って形成された3段の段丘の存在が認定されている。これらの段丘の年代から、過去には2000年ほどの間隔で巨大地震が起こったと推定されていた。しかし、段丘の形成年代を決める試料は、十分ではなかった。

段丘の形成年代は、その場所の地層に埋まっている貝化石などの放射性炭素年代測定によって推定することができる。正確な年代を得るためには、できるだけ多数の貝化石を採集する必要がある。しかし従来の研究では、川の侵食によって地表に露出した地層で採取した少数の貝化石で年代が推定されていた。今回われわれは、ちゅう密に14本のボーリング(掘削)調査を行うことで多数の貝化石を採取して、より正確な段丘年代を推定することに成功した。さらに高解像度の航空レーザー測量・解析を行うことで、新たな段丘も発見した。得られた結果は、国の施策にも反映されていた従来の常識を覆すものであった。段丘の形成年代が、従来値より約1000年以上若返り、その年代の間隔は最短500年となり、ばらつきも大きくなる傾向となったのである。このことは、元禄型関東地震が従来想定されているよりも高頻度で発生しており、そのくりかえしパターンも従来考えられていたほど規則的ではない可能性があることを示している。

本研究の成果には、地球惑星環境学科4年生の卒業研究が重要な役割を果たした。今後、われわれは野外調査地域を広げてより広範なデータを得るとともに、現象を再現できる物理モデルの構築を目指している。

本研究は、J. Komori *et al.*, *Earth and Planetary Science Letters*, 471, 74-84 (2017) に掲載された。

(2017年5月11日プレスリリース)



CASE 3

見つかるまで
史上最も熱い惑星が

2017年6月、表面温度が4,600K(Kは絶対温度)にも達する巨大ガス惑星KELT-9b(ケルトナインビー)が発見された。この惑星はおよそ10,000Kの恒星KELT-9のまわりを、約1.5日という短周期で公転している。このような短周期の巨大ガス惑星は「ホットジュピター」とよばれているが、KELT-9bはこれまで知られている中で最も熱いホットジュピターであり、かつ最も熱い恒星のまわりのホットジュピターである。この常識はずれの惑星がいったいどのようにして見つかったのかを紹介しよう。

KELT-9bは国際研究チームKELTが発見した9個目の惑星である。KELTは、口径4.2cmというひじょうに小さな広視野望遠鏡をアメリカ合衆国と南アフリカ共和国の2ヶ所に設置し、太陽系外惑星が主星の前を通り過ぎる際に少しかだけ主星が暗くなる「トランジット」という減光現象(いわゆる食)を探している。

トランジットによって惑星を見つけるには、ひとつの大きな関門がある。それは恒星同士が互いの前を通り過ぎる「食連星」も同じように暗くなる減光現象をおこすため、見つかったのが本物の惑星なのか、あるいは偽物の食連星なのかを改めて判別する必要があるという点である。ちなみにKELTの場合、見つかったトランジットの候補の実に98%程度が偽物であることがわかっている。

KELTにはトランジット観測経験のある世界各国の研究者やアマチュア天文学者が参加しており、トランジットの候補が本物の惑星か偽物の食連星かを判別する観測に取り組んでいる。その方法は減光現象を複数の色(波長)で観測して、その減光の深さがどの色でもほぼ同じかどうかを確認するというものである。この原理は、恒星は自

分自身で光っているのに対し、惑星は光っていないため、食による減光に大きな色の依存性があれば食連星、ほとんど色の依存性がなければ惑星であると判別できるというものである。

筆者らはこのような判別を効率よく行うため、岡山天体物理観測所にある188cm望遠鏡に3色同時撮像装置MuSCATを開発し、2014年12月から観測を行ってきた。今回発見されたKELT-9bはちょうど2014年に減光現象が発見され、筆者らは2015年8月にMuSCATで減光現象の観測を行い、その減光に波長依存性がほぼないことを確認した。その後、この惑星はKELTチームのメンバーによって軌道や質量、昼側の表面温度の測定などが行われ、2017年6月に英国の科学雑誌Natureで発見が発表された。

この惑星は昼側の表面温度が4,600Kという恒星の温度にも匹敵する温度となっている常識はずれの惑星である。このような高温の惑星大気はこれまでに観測された例がなく、今後の詳細な観測ターゲットとしてひじょうに面白い。

いっぽう、惑星形成という観点からすると、KELT-9bの発見は約10,000Kというこれまでで最も高温な恒星のまわりでもホットジュピターが形成されることを示した、惑星形成理論に対する重要な観測的知見でもある。KELT-9bが実在する最も熱い惑星になるのか、それともさらに高温の惑星の記録が塗り替えられるのかは、今後のトランジット惑星探しにかかっている。

塗り替えられるのかは、今後のトランジット惑星探しにかかっている。

2018年3月には、ほぼ全天のトランジット惑星を探索するNASAの衛星TESSが打ち上げられる予定となっている。筆者らはMuSCATと、2017年にスペイン・カナリア諸島の1.52m望遠鏡用に新しく開発した4色同時撮像装置MuSCAT2を用いて、TESSの時代にさらなる面白い惑星たちを探していきたいと考えている。

本研究成果は、B. S. Gaudi *et al.*, *Nature*, 546, 514 (2017)に掲載された。

(2017年6月6日プレスリリース)

主星KELT-9(左の青白い恒星)と惑星KELT-9b(右)の想像図。主星が高速で自転している(自転軸は図の水平方向)ためやや扁平になっていることや、惑星からの大気の流出が表現されている。(© NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (IPAC))

