様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成　２９　年　　６　月　１５　日現在

機関番号：１３９０１
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2014～2016
課題番号：２６８００１９５

研究課題名（和文）螺旋磁性体の磁気構造変化に関する研究

研究課題名（英文）Study of magnetic structure change in chiral magnets

研究代表者
長尾　全寛（Nagao, Masahiro）
名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授
研究者番号：８０７２６６６２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,100,000円

研究成果の概要（和文）：カイラル磁性体において、螺旋磁気構造からスキルミオンが形成される。スキルミオンは応用の面から注目を集めている。本研究では螺旋磁気構造とスキルミオンの磁気構造変化を明らかにするためローレンツ電子顕微鏡を用いた。
スキルミオン結晶は物性に大きく影響を与えると考えられている。FeGe1-xSixの磁気構造観察を行ったところ、スキルミオン結晶の多結晶状態への変化が明らかとなった。
理論においてスキルミオン結晶は、螺旋磁気構造との構造的関係性が指摘されている。そこでFeGeの螺旋磁気構造とスキルミオンの関係を調べた。その結果、スキルミオンは螺旋伝播ベクトルが異なる領域にトラップされることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：In chiral magnets, skyrmions are formed from helical magnetic structures. Skyrmions have attracted much attention in both applications and fundamental sciences. We have used Lorentz transmission electron microscopy (LTEM) to reveal a change of their magnetic structures.
The quality of skyrmion ordering, the so-called skyrmion crystal or skyrmion lattice, affects the physical properties of magnetic skyrmions. Using LTEM, we observed skyrmion polycrystallization in FeGe1-xSix as a function of x. With increasing x, the skyrmion crystal changes from single crystalline to polycrystallines.
Theories indicate that the skyrmion lattice is represented by a superposition of three spin helices at an angle of 120 degrees to each other. Using LTEM, we investigated the relationship between the skyrmion lattice and the helix in FeGe thin films. After the magnetic field is removed, the ordered skyrmions are trapped inside helimagnetic domain walls where the different helical vectors are encountered.

研究分野：磁性

キーワード：スキルミオン　ローレンツ電子顕微鏡　スピントロニクス

１．研究開始当初の背景
MnSi, FeGe などの螺旋磁性を示す B20 合金は、非フェルミ液体状態や金属-絶縁体転移といった興味深い物性を示すことから基礎科学の面から非常に注目されてきた物質群である。応用の面では、スキルミオン（渦状の磁気構造体。が発見され、その後、スキルミオン相で現れる巨大な異常ホール効果や超低密度電流でのスキルミオン駆動など従来にない興味深い物性が明らかになるにつれてスキルミオンが高性能で省電力な次世代の磁気素子として有望視され始めている。スキルミオンは螺旋磁気秩序相に弱い磁場を印加することで形成され、スキルミオンが三角格子状に規則正しく配列する。これをスキルミオン結晶と呼ぶ。スキルミオンの応用に向けたサイズ制御という点においては MnSi のスキルミオンのサイズは約 18 nm、Si を Ge に置換した MnGe では約 3 nm と報告されており、サイズが大きく変化する。また、MnGe は無磁場下でもスキルミオン類似の磁気構造の形成が示唆されている。以上のように、B20 合金において格子定数の変化による磁気構造の変化と物性の変化は相関を持っている可能性が強く示唆され、その理解は基礎科学と応用の両面から重要である。

２．研究の目的
そこで本研究では、3.研究の方法に示したローレンツ電子顕微鏡の特徴を活かして、系統的な化学的圧力変化による B20 合金の螺旋磁気構造およびスキルミオンへの影響を調べることにより磁気状態が物性へ与える影響を明らかにすることを目的として研究を行った。

３．研究の方法
ローレンツ電子顕微鏡を用いると螺旋磁気構造およびスキルミオンの磁気構造を実空間で直接観察することが可能である。つまり、局所的な磁気構造を直接観察することが可能であるという利点がある。系統的な実験により局所的に磁気構造が変化したりスキルミオンの配列に変化があった場合、ローレンツ電子顕微鏡観察は最も強力な実験手法であるため、本研究においてローレンツ電子顕微鏡を主として用いた。

４．研究成果
(1) 磁気スキルミオンは規則的な配列を示しことが知られており、この状態をスキルミオン結晶もしくはスキルミオン格子と呼ぶ。スキルミオン結晶の結晶性は物性に大きな影響を与えると考えられているが、スキルミオン結晶の結晶性に関しての理解は得られていない状況であった。そこで本研究ではスキルミオンが現れることが知られている FeGe の Ge サイトに Si を置換していき、スキルミオン結晶にどのような影響を与えるか調べた。その結果、図１に示すように Si を置換することでスキルミオン配列に乱れが生じ、スキルミオン多結晶状態になる様子が観察された。

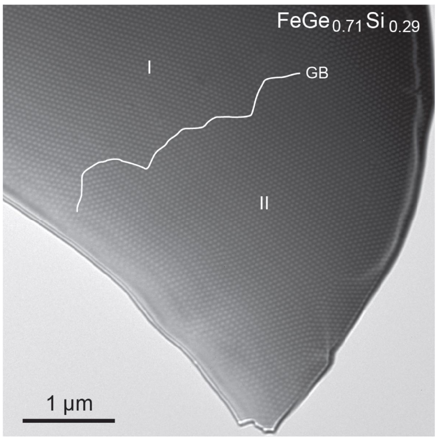

図１．スキルミオン多結晶状態

また、温度を変化させるとスキルミオンのドメイン境界が動いていく様子が観察され、実空間においてスキルミオンの移動容易性を示す結果が得られた。

(2) 磁場下におけるスキルミオン格子の形成は理論的には無磁場状態の螺旋磁気構造を面内で互いに 120 度の関係（これを Tripel-Q 状態という）で重ね合わせた状態と指摘されてきた。このモデルを用いて理論的には応用上重要な励起状態が予測・説明されてきたものの実験において Triple-Q 状態であることを示した例はなかった。そこで本研究ではスキルミオンの準安定性のトポロジーに由来する堅牢さに着目して、螺旋磁気構造とスキルミオン格子の関係性を調べた。その結果、磁場を除去していくと、図２に示すように、螺旋磁気ドメイン、つまり螺旋伝播ベクトルが異なる場所においてスキルミオンがトラップされることが明らかとなった。この結果はスキルミオン格子が Multiple-Q 状態であることを示している。

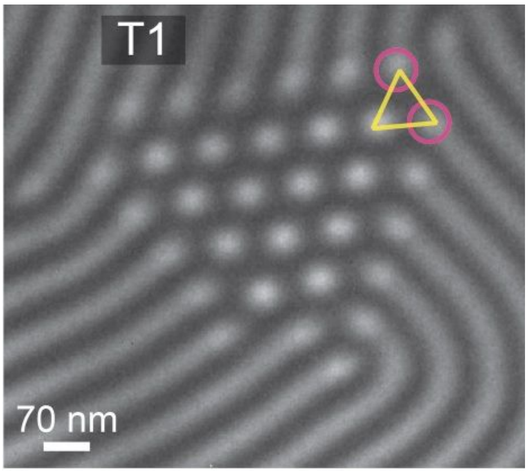

図２．Multiple-Q 状態

さらに温度変化させると、無磁場にもかかわらず螺旋磁気ドメイン境界においてスキルミオンの形成が観測された。この結果は、螺旋磁気ドメイン境界において、スキルミオンの局所的な最小エネルギー状態が存在していることを示唆している。

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　3 件）

① Masahiro Nagao, Yeong-Gi So, Hiroyuki Yoshida, Kazunari Yamaura, Takuro Nagai, Toru Hara, Atsushi Yamazaki, Koji Kimoto. Experimental observation of multiple-Q states for the magnetic skyrmion lattice and skyrmion excitations under a zero magnetic field. Physical Review B. 査読有、Vol.92, 2015, pp.140415-1-140415-5.

② Masahiro Nagao, Yeong-Gi So, Hiroyuki Yoshida, Takuro Nagai, Keiichi Edagawa, Kaichi Saito, Toru Hara, Atsushi Yamazaki, Koji Kimoto. Real space observation of skyrmion polycrystallization and its domain boundary behavior in FeGe1-xSix. Applied Physics Express. 査読有、Vol.8, 2015, pp.033001-1-033001-4. http://dx.doi.org/10.7567/APEX.8.033001

③ 長尾全寛、肖英紀、木本浩司、ローレンツ顕微鏡による強磁性酸化物中の磁気スキルミオン状磁気クラスターの観察、Journal of the Vacuum Society of Japan、査読有、Vol. 57、2014、pp.391-397. http://doi.org/10.3131/jvsj2.57.391

〔学会発表〕（計　8 件）

① M. Nagao, Y. G. So, A. Yamazaki, and K. Kimoto. Real Space Observation of Magnetic Skyrmions Using Lorentz Transmission Electron Microscopy. 25th Annual Meeting of MRS-J 2015 Challenges and progress in strongly correlated functional materials (International Symposium). 2015.12. 産業貿易センタービル（神奈川県横浜市中区）.

② M. Nagao. Characterization of Magnetic Skyrmions Using Lorentz Transmission Electron Microscopy. The 2nd East-Asia Microscopy Conference, Young scientists satellite meeting -towards next generation of microscopic sciences. 2015.11. 淡路夢舞台国際会議場（兵庫県淡路市）.

③ M. Nagao. Lorentz Transmission Electron Microscopy Study of Magnetic Skyrmions. 2nd International Symposium on Frontiers in Materials Science. 2015.11. Waseda University（東京都新宿区）.

④ 長尾全寛，肖英紀,吉田紘行，長井拓郎，原徹，山崎淳司，木本浩司．ローレンツ電子顕微鏡による磁気スキルミオンの局所的形成と消滅の観察の観察．日本顕微鏡学会 第 71 回学術講演会．2015.5．国立京都国際会館（京都府京都市左京区）

⑤ 肖英紀，長尾全寛，吉田紘行，長井拓郎，枝川圭一，齋藤嘉一，原徹，山崎淳司，木本浩司．FeGe1-xSix 系 B20 型化合物におけるスキルミオン結晶のローレンツ電子顕微鏡観察．日本物理学会第 70 回年次大会．2015.3． 早稲田大学（東京都新宿区）

⑥ 肖英紀，長尾全寛，吉田紘行，長井拓郎，枝川圭一，齋藤嘉一，原徹，山崎淳司，木本浩司．FeGe 系 B20 型化合物中のスキルミオン形成における元素置換効果．日本物理学会 2014 年秋季大会．2014.9．中部大学（愛知県春日井市）

⑦ 長尾全寛．ローレンツ電子顕微鏡によるスキルミオンの実空間観察．第 3 回 関西若手物性研究会「顕微鏡を通して見る現象」．2014.5． 大阪大学（大阪府豊中市）．

⑧ 長尾全寛，肖英紀，吉田紘行，長井拓郎，原 徹，山崎淳司，木本浩司．化学圧力効果によるスキルミオン結晶の変化の直接観察．日本顕微鏡学会　第 70 回学術講演会．2014.5．幕張メッセ 国際会議場（千葉県千葉市美浜区）．

〔図書〕（計　0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計　0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計　0 件）

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織
(1)研究代表者
長尾　全寛　（NAGAO Masahiro）
名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授
研究者番号：80726662

(2)研究分担者
(　　　)

研究者番号：

(3)連携研究者
(　　　)

研究者番号：

(4)研究協力者
(　　　)