

## 1 研究背景

### 1-1 キラリティ (カイラリティ; Chirality)

ある物体の鏡映が移動と回転だけで元の物体と一致しないとき、その性質をキラリティ (掌性; 左右性) という。例えば、図 1 に示すように、右手と左手、乳酸にはキラリティがあり、互いに鏡写しの関係にあつて移動と回転だけで右手と左手が一致することはない。キラリティは自然界を理解する上で重要な概念である。歴史的には、晶癖に左右性がある酒石酸結晶において左右旋光性の選択が観測され、ミクロな構造の左右性がマクロな物性として現れることが確認された。生命においても DNA やアミノ酸などで左右性が大切な役割を担っている。天文においても銀河の回転方向に左右性がある。

これまでキラリティはアミノ酸といった有機物を対象とした製薬分野で研究が行われてきたが、有機物は磁性の研究に適さないため、磁性のキラリティの研究は行われてこなかった。最近では磁性のキラリティが観測される無機物のキラルらせん金属磁性体の発見がされ、磁性やスピントロニクス分野で、その物性や工業応用に注目が集まっている。これまでに発見された磁性のキラリティは、図 1 に示すような、キラルソリトン格子 (カイラルソリトン格子) [1, 2] とスキルミオン格子 [3] の 2 種類である。キラルソリトン格子は、磁場誘起の 1 軸らせんで、スキルミオン格子は磁気スピンの渦であることがわかっている。これまでにキラルらせん金属磁性体は、d 電子系から MnSi [4]、Cr<sub>1/3</sub>NbS<sub>2</sub> [2, 5, 6] と、f 電子系から YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> [7-10]、EuPtSi [11] が発見されているが、物質の報告例が少なく、研究は発展途上段階にある。

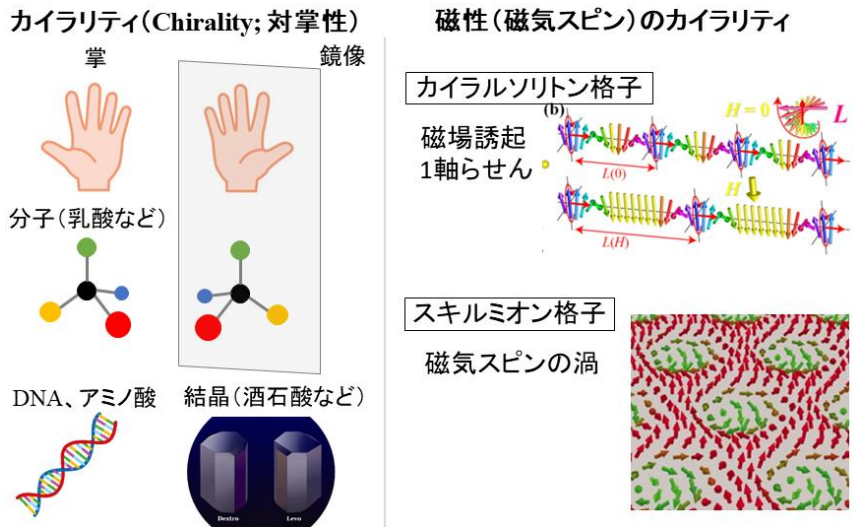


図1 身の周りのキラリティ(カイラリティ)と磁性のキラリティ

### 1-2 キラルらせん磁性体

キラリティを反映したマクロな磁気構造はこれまで d 電子系で確認されてきた。立方晶 MnSi では図 2(a) に示すように、磁気スピンの渦巻き状に配列し、その渦巻きが六方格子を組むスキルミオン格子 (Skyrmion Lattice; SkL) が、Cr<sub>1/3</sub>NbS<sub>2</sub> では一軸らせん磁気構造で“ひねり” (ソリトン) が周期的に配列したキラルソリトン格子 (Chiral Soliton Lattice; CSL) が観測された。本研究対象の YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> (空間群 R32; 三方晶) は、我々の研究室で発見された世界初の 4f 電子系キラルらせん磁性体である。この物質に銅置換することでキャリア注入した Yb(Ni<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>)<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> では、図 2(b) のような CSL や、磁気八極子らせんの発見が確認された [9]。また最近、立方晶 EuPtSi (空間群 P213) において SkL が確認された。YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> や EuPtSi のらせん磁気構造は d 電子系の MnSi や Cr<sub>1/3</sub>NbS<sub>2</sub> の数十 nm に比べて 1/10 の短周期らせんでスピンの向きが離散的であるが、その挙動は不思議なことに、d 電子系の SkL や CSL を記述する、局在スピンを連続媒体として扱うモデルで説明できる。YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> の CSL の場合は、隣り合うスピン同士の角度が 90 度以上ひねられており、新しい概念である伝導電子を媒介した RKKY 型の Dzyaloshinskii-Moriya (DM) の反対称スピン相互作用が働いていると

考えられる（古典的な DM 相互作用では 90 度以上のひねりを説明できない）。 $\text{YbNi}_3\text{Al}_9$  ではキャリア注入によりそのキララらせん磁気構造の周期を調整することが出来る。これは、反対称交換相互作用、いわゆる、ジャロシンスキー-守谷（DM）相互作用を調整できることを意味する。

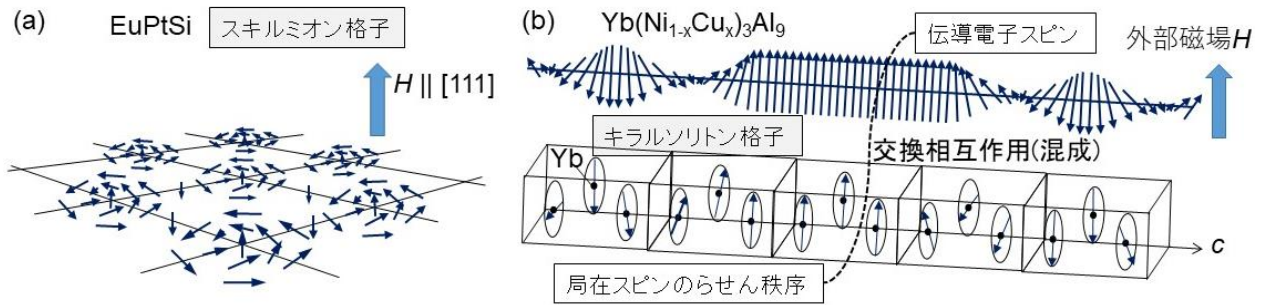


図2 (a) MnSi のスキルミオン格子 (b)  $\text{Yb}(\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x)_3\text{Al}_9$  のキララソリトン格子

### 1-3 キララらせん磁性体の結晶育成

キララ物質の結晶合成に目を向けると、ノーベル賞を受賞した野依による不斉合成（左右作り分け技術）は有機化学分野におけるキララ物質の研究と医療薬などへの応用を飛躍的に拡大させた。しかしキララ磁性の研究には、有機物は強い磁性を持ちにくいいため適さない。一方、無機物の場合は、結晶キラリティを持たせる基本技術がないため、研究に適したキララ物質の合成が進まず、キララらせん金属磁性体はこれまでに数えるほどしか報告がない。そのため、キララらせん磁性体における反対称スピン相互作用などの基本物理や Skyrmion や CSL といったキララらせん磁気構造の研究は十分には進んでいない。原子内のスピン-軌道相互作用がどのように結晶中で反対称スピン相互作用として磁気構造に反映され、キララらせん磁性が発現するのかの解明が期待される。

### 1-4 キララらせん金属磁性体の工業応用

現在、電子情報処理デバイスには、磁気メモリーや磁気センサーとして磁性体が使われている。このデバイスでは、2つの磁気スピンの向き（上向き、下向き）によって“0”と“1”の2値化（2進数）された電気信号を用いて情報処理を行っている。今後、デジタル化がより一層広まるビッグデータ社会に対応するために、これまでの2進数動作するデバイスとは異なる革新的な電子デバイスの開発が望まれている。

キララらせん金属磁性体中で発現するキララソリトン格子では、印加する磁場の強さを変えると、らせん構造のひねりの数（磁気ソリトンの数）をゼロから数億個まで段階的に変えることができる。この性質を利用して、従来の“0”と“1”の2進法を採用した磁気メモリーと比べて飛躍的に高密度な多値的な情報記憶媒体への応用が期待される（図3）。[12]

## キララ磁気ソリトン格子の多値的状態

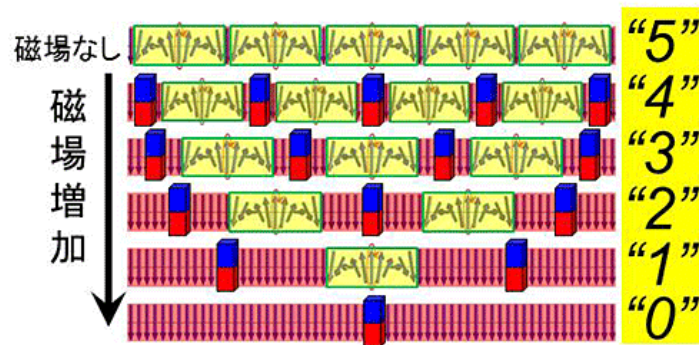


図3 キララソリトン格子の多値的状態[12]

## 2 研究目的

本研究の最終目的は、量子コンピュータと組み合わせることができる極低温で動作する高密度な磁気メモリデバイス新材料の開発である。我々が発見したキラルらせん磁性体  $\text{YbNi}_3\text{Al}_9$  (空間群  $R32$ ,  $\text{ErNi}_3\text{Al}_9$  型構造) は、元素置換と磁場により、CSL のらせん周期やソリトン (ひねり) の数をゼロから数億個まで段階的に調整できる (図 4)。本研究では、この利点を活かし、様々ならせん周期をもつキラルらせん秩序状態をつくり出し、それらと比較した研究を行う。この研究を実現するために交流磁気抵抗測定 (図 5) という、実験室系でキラルらせん磁気構造に関する知見を得る測定手法を確立する。この測定からキラルソリトン格子の形成メカニズムに関する情報を引き出し、新しい磁気メモリ開発に繋がる情報を得る。交流電流で磁気ソリトンの数を制御し (情報を書き込み)、抵抗値でその情報を読み取ることは、この新しい磁気メモリ開発の第一歩となる。

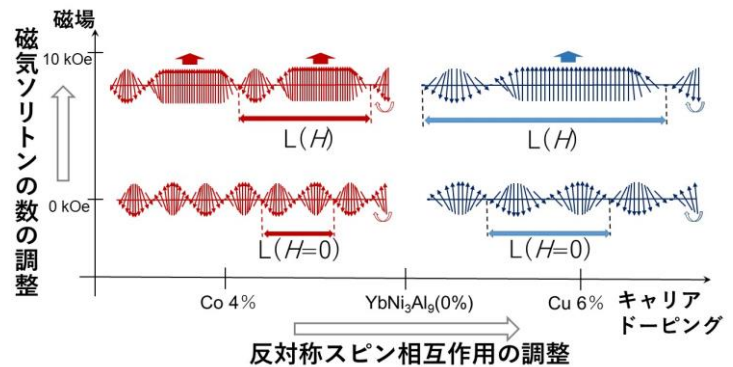


図4  $\text{YbNi}_3\text{Al}_9$  における CSL のらせん周期  $L$  の調整

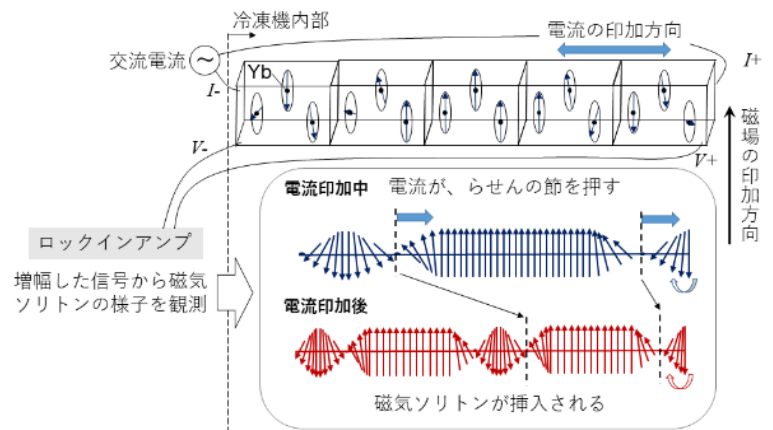


図5 交流磁気抵抗測定装置と CSL の電流応答

## 3 研究方法

### 3-1 結晶育成

フラックス法によって本研究対象のキラルらせん金属磁性体  $\text{YbNi}_3\text{Al}_9$  の結晶育成を行った。フラックス法とは原材料を高温で溶媒 (フラックス) に溶かし、その後徐冷して結晶を析出させる育成法である。この育成法で得られる結晶は、右手結晶と左手結晶の混晶になると分かっている [13]。そこで本研究では、右手あるいは左手のみの結晶 (エナンチオピュア結晶) を得るために温度勾配を利用したフラックス法を開発し、その方法で結晶を得ている。

### 3-2 試料評価、物性測定

#### (1) 単結晶 X 線構造解析

得られた結晶がエナンチオピュア結晶であることを X 線構造解析で Flack パラメータを測定して確認した。単結晶 X 線構造解析は Rigaku 製 VariMax with RAPID を用いて測定し、Jana2006 により解析を行った。結晶方位はラウエ写真で確認した。ラウエ写真は IPX Co., Ltd. 製 IPX-LC で撮影した。

#### (2) 磁化測定

$\text{YbNi}_3\text{Al}_9$  の元素置換による磁性の変化を測定するために、磁化を測定した。磁化測定は Quantum Design 社製 MPMS III (Magnetic Property Measurement System) を使用して引き抜き法で行った。

#### (3) ホール抵抗測定

元素置換によるキャリア数の変化を調べるために、ホール抵抗を測定した。ホール抵抗は Quantum Design 社製 PPMS (Physical Property Measurement System) を使用して行った。



#### (4) 交流磁気抵抗測定

キラルソリトン格子の交流電流に対する動的応答を調べるために、交流磁気抵抗測定を行った。ロックインアンプとPPMSを組み合わせ、2Kまでの低温、9Tまでの高磁場中で高感度に磁気抵抗を測定できる装置を構築した。

### 4 研究結果

#### 4-1 キラルらせん金属磁性体 $\text{YbNi}_3\text{Al}_9$ のエナンチオピュア結晶の育成

キラル磁性を調べるためには、エナンチオピュア結晶を準備することが重要である。私は無機キラルらせん金属磁性体  $\text{YbNi}_3\text{Al}_9$  の大きなエナンチオピュア結晶を温度勾配を利用したフラックス法で育成することに成功した。図6に作製した温度勾配炉と、各設定温度での炉内の温度分布を示す。原材料はアルミナるつぼに詰めて、石英管アンプルに封入されている。アンプルは模式図の中央部、炉内の高さ  $z = 110 \text{ mm}$  の位置に配置されている。原材料の溶液の高さは  $800^\circ\text{C}$  でおおよそ  $7 \text{ mm}$  になる。温度勾配は炉の上下方向に存在し、下に行くほど温度が低くなっている。溶液の上端と下端ではおおよそ  $5^\circ\text{C}$  の温度勾配がつけられている。

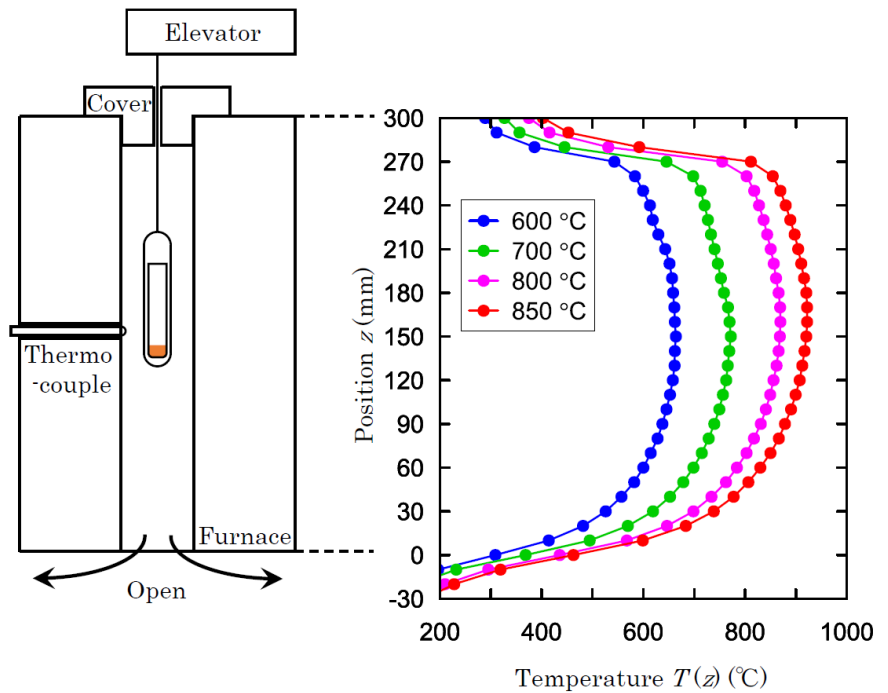


図6 温度勾配炉の模式図と各設定温度での炉内の温度分布

図7(a)に温度勾配なしで育成した結晶を、図7(b)に温度勾配ありで育成した結晶を示す。温度勾配有る場合には、温度勾配のない場合と比べると、約3倍程度の大きさ(数mm角)の結晶が再現良く得られた。また、結晶の数も2~3個程度に制御できた。X線回折から得られた結晶の絶対構造を決定し、 $3 \text{ mm}$ 角程度の範囲にわたってエナンチオピュア結晶が得られていることが分かった。大型のエナンチオピュア結晶は、中性子実験によるマグノンの観測や、超音波測定など格子欠陥に敏感な測定のために必要とされており、今後のキラル磁性体の研究推進が期待できる。

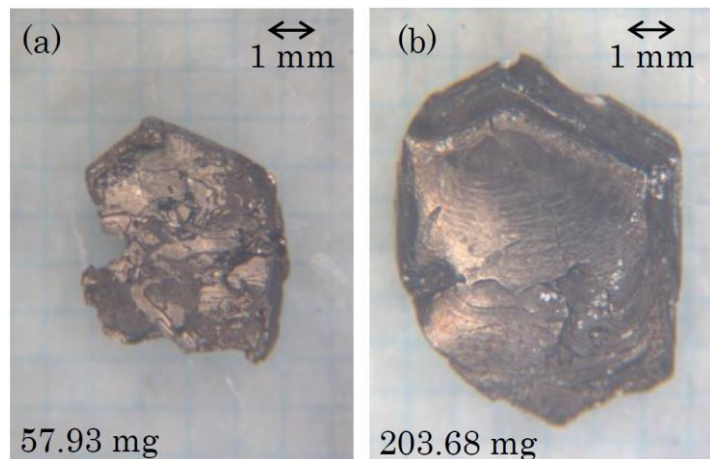


図7 (a) 温度勾配なし (b) 温度勾配ありで育成した結晶

## 4-2 YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> における元素置換効果

### (1) 電気抵抗

YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> 及び Cu 置換の  $T = 2 \sim 300$  K、 $j \parallel [01\bar{1}0]$  方向の電気抵抗率の温度依存性を図 3.1 に示す。横軸の温度は対数目盛で表示している。すべての試料において 300 K から抵抗率は減少していき、100 K から 40 K の間で上昇し、秩序温度  $T_M$  以下で急激に減少する。Cu を置換することで、高温での電気抵抗率は大きくなっている。40 K ~ 100 K までの温度範囲では図中の破線で示すように、 $\rho = -a \log T$  ( $a$ : 定数) の関係があり、高温での近藤効果による  $T_{max}$  が現れる。

次に YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> 及び Co 置換の  $T = 1.5 \sim 300$  K、 $j \parallel [01\bar{1}0]$  方向の電気抵抗率の温度依存性を図 3.2 に示す。Cu 置換と同様に高温での電気抵抗率は置換をすることで大きくなっている。Co 4% 置換試料では  $T_M$  となる抵抗が急激に減少する変化は見られず、 $T = 1.5$  K 以下に磁気秩序温度があると考えられる。

Cu 及び Co 置換量に対する磁気秩序温度  $T_M$  及び  $T_{max}$  の変化に注目すると、磁気秩序温度は Cu 置換量に比例して増大し、Co 置換では減少する。これは置換効果による RKKY 相互作用が変化していることが考えられる。一方で、 $T_{max}$  の値は YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> と比べて、Cu、Co 置換どちらも 1 K 程度しか変化していない。磁気秩序温度の変化と比較すると、YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> から Cu 6% 置換試料の変化率は 90% 程度であるのに対して  $T_{max}$  の変化率は 3% 程度であり、高温での近藤効果はあまり変化していないと考えられる。

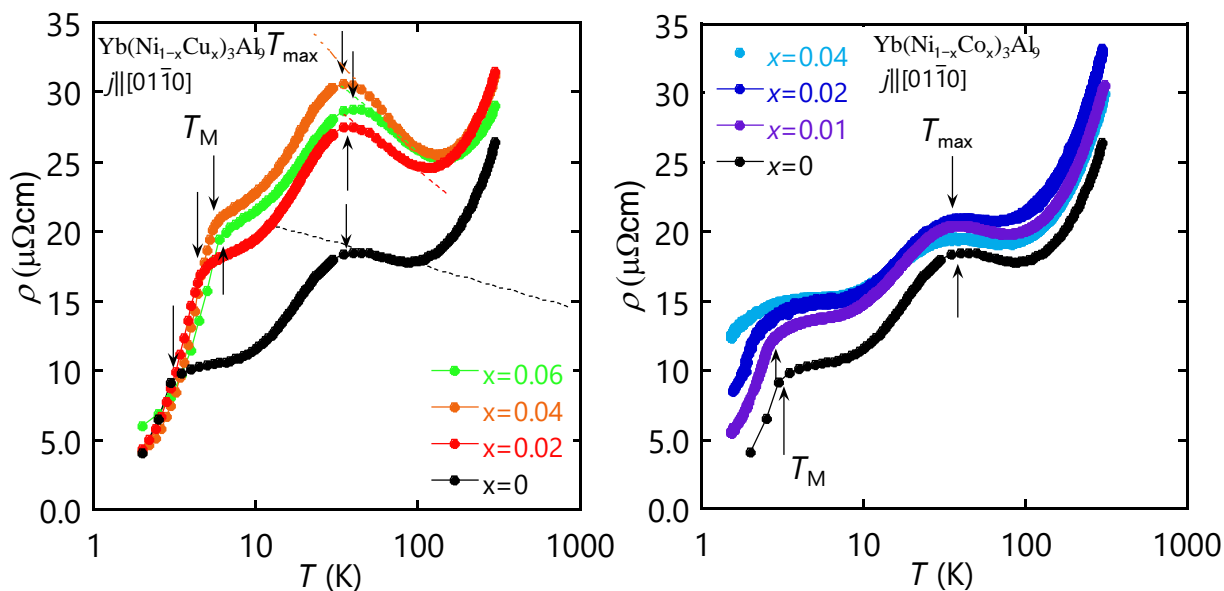


図5 (a) Yb(Ni<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>)<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> と (b) Yb(Ni<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>)<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> 電気抵抗率の温度依存性

### (2) 磁化

YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> 及び Cu、Co の各置換量での磁化の磁場依存性のグラフを図 3.9 に示す。図 3.9(a) のグラフをみると Cu を置換することで臨界磁場（キラルソリトン格子が壊れて強制強磁性状態になる磁場）の値は Cu 置換量に比例して臨界磁場は増大している。Cu 4% 置換試料で見られる磁化が急峻に立ち上がる現象は、Cu 2% 置換試料の臨界磁場と  $H = 5$  kOe での立ち上がりと一致しており、Cu が 2% と 4% 置換された試料が同じ試料内に存在している可能性が考えられる。図 3.9(b) では、Cu 置換とは対照に、Co を置換することで臨界磁場の値は減少している。

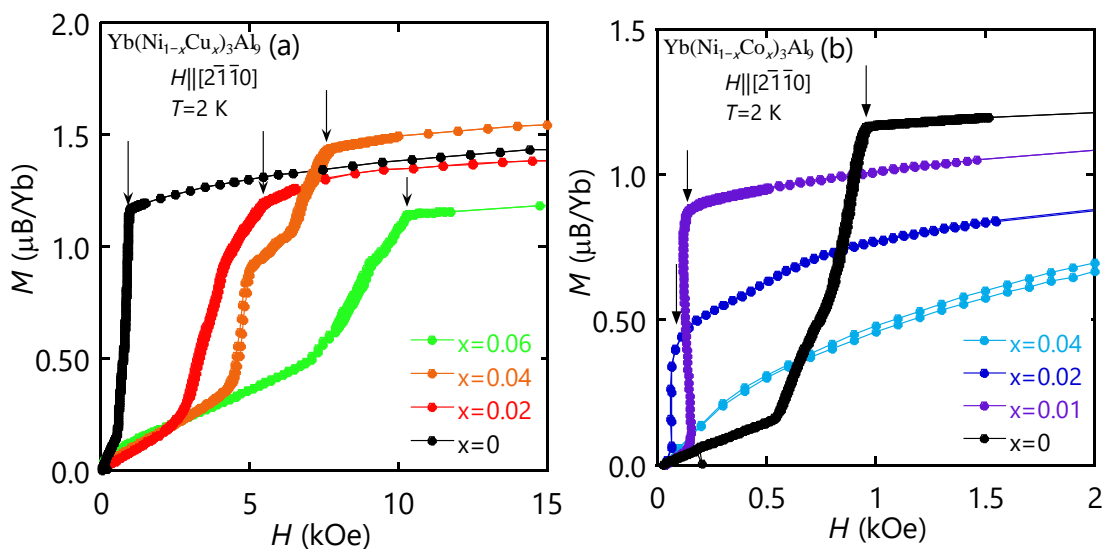


図 3.9 各置換量での磁化の磁場依存性 (a)  $\text{Yb}(\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x)_3\text{Al}_9$  (b)  $\text{Yb}(\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x)_3\text{Al}_9$

### (3) ホール抵抗

$\text{YbNi}_3\text{Al}_9$  及び、Cu、Co 置換試料の温度  $T = 2 \text{ K}$ 、磁場方向  $H \parallel [2\bar{1}\bar{1}0]$ 、電流方向  $j \parallel [01\bar{1}0]$  のホール抵抗率の磁場依存性をそれぞれ図 3.18 に示す。ホール抵抗率の傾きは Cu、Co 置換両者とも正の値をとっているため多数キャリアは  $\text{YbNi}_3\text{Al}_9$  と同様に正孔である。低磁場では磁化の振る舞いを反映した異常ホール効果が見られる。強磁場では磁場に比例してホール抵抗率は増大している。

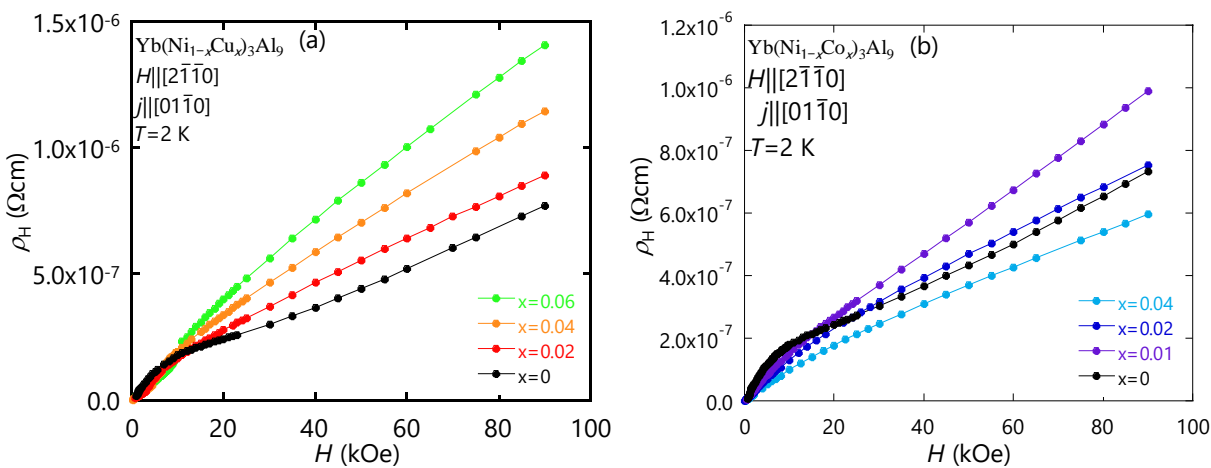


図 3.18 ホール抵抗率の磁場依存性 (a)  $\text{Yb}(\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x})_3\text{Al}_9$  (b)  $\text{Yb}(\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x})_3\text{Al}_9$

ホール抵抗率および磁化過程から、以下の式を用いて、正常ホール係数  $R_0$ 、異常ホール係数  $R_s$  を求める。

$$\rho_H = R_0 B + [(1 - N)R_0 + R_s]M$$

Cu、Co 置換量に対する正常ホール係数および異常ホール係数の変化をそれぞれ図 3.19 に示す。図 3.19(a)

の正常ホール係数はCuの置換量が増加するにつれて線形的に増大している。Coを置換することで正常ホール係数は小さくなっている。図3.19(b)の異常ホール係数も置換量に応じて、正常ホール係数と同じ振る舞いを示している。異常ホール係数の値は正常ホール係数と比べ、2桁ほど大きくなっている。

強磁場極限( $H = 90$  kOe)における2キャリアモデルを適用し、以下の式を用いて、置換量に対する正孔数 $p$ と電子数 $n$ の差の変化を求め、図3.22に示す。

$$R_H = \frac{1}{e(p-n)}$$

各置換量によってキャリア数の差にばらつきが見られるが、置換量に応じてキャリア数の増減が見られた。Cu置換割合の増加に比例してキャリア数の差は小さくなり、Co置換では大きくなっている。これはCuを置換することで電子が、Coを置換することで正孔が増加していると考えられる。Cu6%置換では母体に対してキャリア数は約2倍変化している。

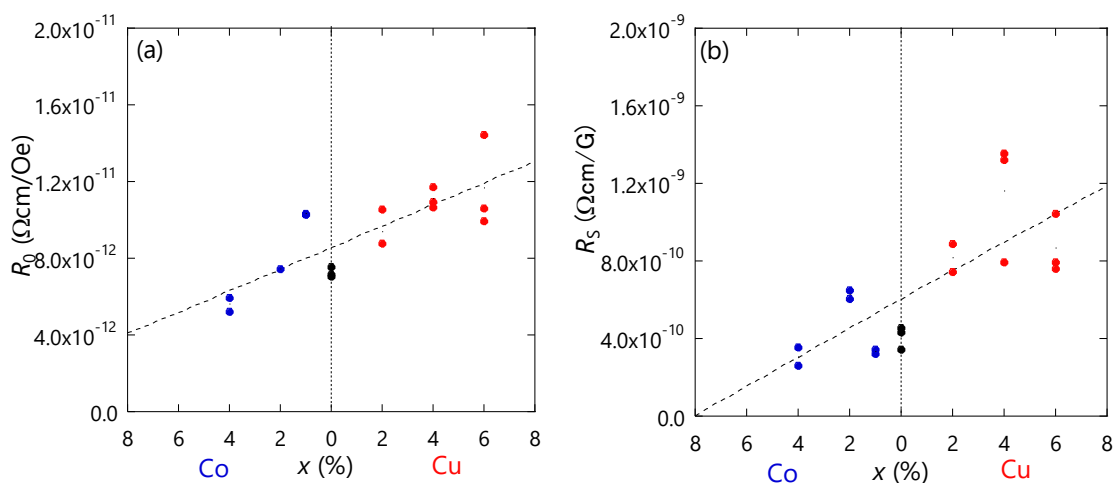


図 3.19 置換量に対する (a) 正常ホール係数  $R_0$ 、(b) 異常ホール係数  $R_s$  の変化

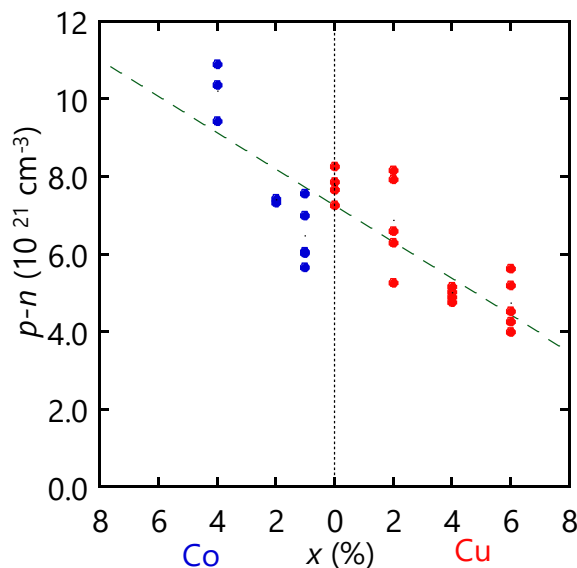


図 3.22 Cu、Co 置換量に対するキャリア数の差の変化

ここで正孔  $p$  と電子  $n$  が同数であると考えたとき、そこに電子が  $\Delta n$  個増えたとすると、増加後の正孔  $p'$  と電子  $n'$  は以下の式のように表すことができる。

$$p' = p - \frac{1}{2} \Delta n$$

$$n' = n + \frac{1}{2} \Delta n$$

よって  $\Delta n$  は以下のように電子数の増加前後のキャリア数の差から求めることができる。

$$\Delta n = (p' - n') - (p - n)$$

上記の内容を踏まえて、Cu 置換による電子数の増加について述べる。

$\text{YbNi}_3\text{Al}_9$  は単位胞に 18 個 Ni が存在している。そこに Cu6% 置換することで、Ni に対して約 1 個分置換されていることになる。置換量分だけ電子が注入されたと仮定すると、単位胞体積で割れば電子がどれだけ注入されたか見積もることができる。Cu6% 置換されたときの電子数  $\Delta n$  は  $0.864 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  となる。測定で得られた  $\text{YbNi}_3\text{Al}_9$  と Cu6% 置換試料の  $\Delta(p - n)$  は以下の式で求められる。

$$\Delta(p - n) = (p - n)_{\text{YbNi}_3\text{Al}_9} - (p - n)_{\text{Cu6\%}}$$

よって、 $\Delta(p - n)$  は  $3.04 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  となる。理論値と比較すると 5 倍程度大きな値となるが、オーダーはあっており、Cu を置換することで電子数が増加していると考えられる。

#### 4-3 $\text{YbNi}_3\text{Al}_9$ の交流磁気抵抗測定

$\text{YbNi}_3\text{Al}_9$  及び Cu を置換した試料の  $T = 2 \text{ K}$  での  $j \parallel [0001]$  方向、 $H \parallel [2\bar{1}\bar{1}0]$  の磁気抵抗  $\Delta\rho/\rho_0$  の磁場依存性のグラフを図 3.12 に示す。図 3.12 (a) では、すべての試料で磁気抵抗は極大をとった後に磁気抵抗が減少し、極小をとった後に外部磁場に比例して増大している。強磁場での負の磁気抵抗は Cu 置換することで大きくなっている。この高磁場での振る舞いは Cu 置換によるフェルミ面の変化が影響していると考えられる。図 3.12 (b) に低磁場部分の拡大図を示す。ゼロ磁場から  $H^*$  までは磁気抵抗の値はほぼ一定で、その後、急激に減少し、図 9 に示した磁化から定めた臨界磁場の位置で折れ曲がりが見測された。

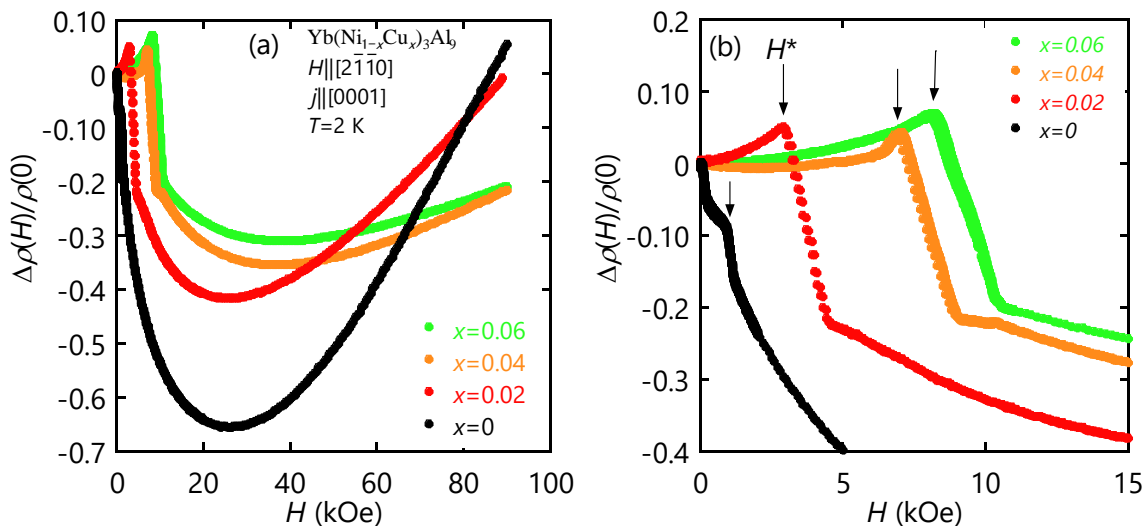


図 3.12  $\text{Yb}(\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x)_3\text{Al}_9$  の磁気抵抗の磁場依存性。(a) 全体図 (b) 低磁場の拡大図



磁化と磁気抵抗測定の結果をふまえると、磁気抵抗が極大を示した後に減少し、折れ曲がり観測されるまでの間に、磁気ソリトンの数が減少し、ゼロになることがわかる。このような磁気抵抗の磁場依存性は磁気秩序温度以下で普遍的に観測されている。ここで、磁気ソリトンは磁壁と同様の磁気抵抗を示すことを仮定して、キラルソリトン格子が磁場に対してどのような応答を示すのかを考察する。

$H$ 以下で、磁気抵抗は変化しないが、磁化の値が増大するためには、磁気ソリトンの数はほとんど変化せず、強制強磁性的な領域が増大する必要がある。“ひねり”が結晶中に均一に分布していると仮定すると、Cuに6%置換された試料では最も“ひねられた”状態でYbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub>母体と同程度のひねり度合であることが見積もられた。一方、 $H$ 以上で磁気抵抗が減少する領域では“ひねり”が解消され、磁気ソリトンの数が急激に減少していると考えられる。磁気ソリトンの駆動をしたい場合はこの領域で細かく測定を行えばよいと推測される。しかし、現状では磁気ソリトン1個の変化に相当する磁気抵抗の量子化は観測されていない。今後、試料の微細化による磁気ソリトン数の制限や磁場角度回転による精密な磁場制御を行うなどして、磁気ソリトンの制御、駆動に挑戦したい。

## 5 まとめ

本研究ではYbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub>元素置換によるキャリア注入の磁気相互作用及びキャリアの変化を明らかとした。電気抵抗測定ではCuを置換することで磁気秩序温度が変化し、RKKY相互作用が増大していることが確かめられた。高温での近藤効果による $T_{\max}$ の値は置換による大きな変化は見られなかった。ホール効果測定では強磁場極限における2キャリアモデルを用いることでキャリア数の差を求めた。元素置換を行うことでキャリア数が増えていることが確かめられた。キャリア数の差から、Cuを置換することで電子が、Coを置換することで正孔が増加していると考えられる。置換効果によるキャリア数の変化がフェルミ面を変化させ、磁気相互作用に影響を及ぼしていると考えられる。磁化測定からは、臨界磁場がわずか数%の元素置換によって10倍程度まで調整可能であることが分かった。元素置換によってこの物質が示す磁性が大きく変化していることがわかる。交流磁気抵抗測定からは、磁気ソリトンの数が臨界磁場近傍で急激に減少している可能性が高いことが分かった。今後臨界磁場近傍に着目して測定を行い、磁気ソリトンの制御や駆動に挑戦したい。

試料合成面では、温度勾配を利用したフラックス法によって、大型のエナンチオピュア結晶の育成に成功した。今後、高品質な試料によってキラル磁性の研究推進が期待される。

## 【参考文献】

- [1] J. Kishine, K. Inoue, and Y. Yoshida, Progress of Theoretical Physics Supplement 159, 82-95 (2005).
- [2] Y. Togawa, Y. Kousaka, K. Inoue, and J. Kishine, Journal of the Physical Society of Japan 85, 112001 (2016).
- [3] J.H. Han, J. Zang, Z. Yang, J-H Park, and N. Nagaosa, Phys. Rev. B 82, 094429 (2010).
- [4] A. Bauer and C. Pfleiderer, Phys. Rev. B 85, 214418 (2012).
- [5] Y. Togawa, T. Koyama, K. Takayanagi, S. Mori, Y. Kousaka, J. Akimitsu, S. Nishihara, K. Inoue, A. S. Ovchinnikov, and J. Kishine, Phys. Rev. Lett. 108, 107202 (2012).
- [6] M. Ohkuma, M. Mito, N. Nakamura, K. Tsuruta, J. Ohe, M. Shinozaki, Y. Kato, J. Kishine, Y. Kousaka, J. Akimitsu, et al., AIP Advances 9, 075212 (2019).
- [7] S. Ohara, T. Yamashita, Y. Mori, and I. Sakamoto, Journal of Physics: Conference Series 273, 012048 (2011).
- [8] S. Ohara, S. Fukuta, K. Ohta, H. Kono, T. Yamashita, Y. Matsumoto, and J. Yamaura, Proceedings of the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013) 017016 (2014).
- [9] T. Matsumura, Y. Kita, K. Kubo, Y. Yoshikawa, S. Michimura, T. Inami, Y. Kousaka, K. Inoue, and S. Ohara, Journal of the Physical Society of Japan 86, 124702 (2017).
- [10] R. Aoki, Y. Togawa, and S. Ohara, Physical Review B 97, 214414 (2018).
- [11] M. Kakihana, D. Aoki, A. Nakamura, F. Honda, M. Nakashima, Y. Amako, S. Nakamura, T. Sakakibara, M. Hedo, T. Nakama, and Y. Onuki, Journal of the Physical Society of Japan 87, 023701 (2018).
- [12] JST プレスリリース「らせん結晶構造を持つ磁石のひねりの数を制御・検出に成功～電子デバイスのメモリー密度の飛躍的な向上が期待～」(2015)
- [13] 栗本迅, 修士論文「RNi<sub>3</sub>X<sub>9</sub>(R=希土類元素 X=Al, Ga) のキラル結晶構造」, (名古屋工業大学大学院, 2016).

## 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
キラル金属磁性体 Yb(Ni <sub>1-x</sub> Cu <sub>x</sub> ) <sub>3</sub> Al <sub>9</sub> のホール効果測定	日本物理学会	2020年9月
温度勾配フラックス法によるカイラル磁性体 YbNi <sub>3</sub> Al <sub>9</sub> のエナンチオピュア結晶の合成	日本物理学会	2021年3月