

図 2 : ゼロ磁場下で様々な温度で測定した SrCo<sub>6</sub>O<sub>11</sub> の磁気ピーク。

さらに磁場中での測定を行うことで、図 3 に示すように温度と磁場の関数として完全な相図を得ることが出来た。ここで  $\langle n \rangle$  は磁気周期を示す。SrCo<sub>6</sub>O<sub>11</sub> は単位胞内に c 軸方向に 2 つの Co(3)面を持つため、(002)が最初の許される結晶構造ピークであり、(001)は単純な  $\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow$  の反強磁性を示す。従って、 $\langle 2 \rangle$  は L=1 ピーク、 $\langle 3 \rangle$  は L=4/3 ピーク、 $\langle 4 \rangle$  は L=3/2 ピーク、 $\langle 5 \rangle$  は L=4/5 ピーク、 $\langle 12 \rangle$  は L=5/6 ピークに対応する。 $\uparrow\uparrow\uparrow$  状態と  $\uparrow\uparrow\downarrow$  状態 ( $\langle 3 \rangle$ ) の間の境界は磁化測定によって決定され、他の境界は本研究の RSXS によって決定された。この相図は、低温かつ低磁場領域で多くの磁気周期が共存している様子を示している。ここで、これらの磁気構造の一つ一つのエネルギーは非常に近く、エネルギー差が温度や磁場に敏感に依存している。同様のふるまいは CeSb でも観測され、CeSb においても磁気構造が温度と磁場の関数として変化する。この現象は「悪魔の華」あるいは「悪魔の階段」[3,4]と呼ばれ、多くの磁気構造が外的パラメーター(この場合、温度と磁場)のパラメーターとして調節できる。

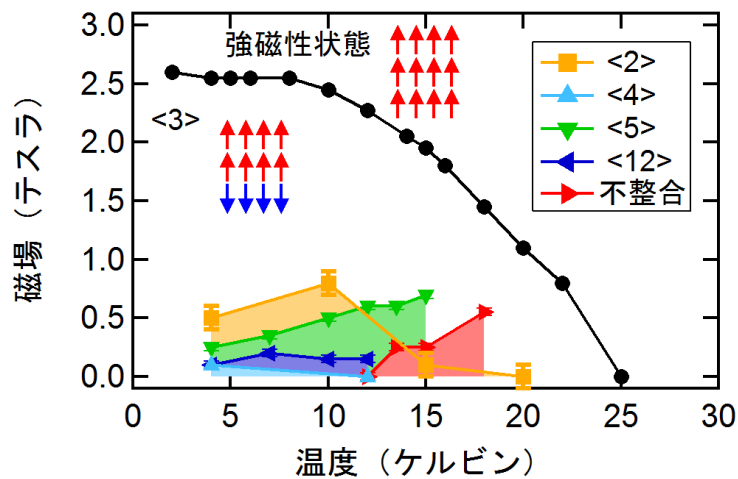


図 3 : RSXS 測定で決定された SrCo<sub>6</sub>O<sub>11</sub> の磁場中相図。

この場合の磁気秩序においては、そのメカニズムは一軸性の近接と次近接の相互作用を考えたイジングモデル (ANNNI モデル) で説明できる。このモデルでは、最近接( $J_1$ )と次近接( $J_2$ )のイジングスピン同士の相互作用が競合しており、温度と  $J_2/J_1$  の関数としての相図においてエネルギーの近い多くの磁気構造が現れる。 $\text{SrCo}_6\text{O}_{11}$  においては、その状況と得られた結果は ANNNI モデルと非常によく一致していると考えられる。従って我々は、 $\text{SrCo}_6\text{O}_{11}$  が実際に「悪魔の階段」のシナリオ、すなわちほとんど同じエネルギーを持つ多くの磁気周期の共存状態、が実現していると結論した。このような共存状態は磁場の印加によって崩され、エネルギー的に安定な相だけが選ばれる。しかし、実際に観測された図 3 の相図を完全に説明するには、イジングモデルのような近い相互作用のみを考えるのではなく、Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) 相互作用を取り入れたモデルが必要であると考えられる。 $\text{SrCo}_6\text{O}_{11}$  は遍歴電子と局在スピンの強い相互作用からなる系であり、RKKY 相互作用が重要な役割を果たすと考えられる。従って、 $\text{SrCo}_6\text{O}_{11}$  は単純な ANNNI モデルの範疇を超えており、局在スピンの伝導電子を頭に入れたより複雑なモデルでより良く記述できると考えられる。

まとめると、我々は  $\text{SrCo}_6\text{O}_{11}$  の単結晶において、RSXS によって詳細な磁気構造の決定に成功し、悪魔の階段のふるまいを観測した。これは、非常に磁気的なフラストレーションが大きいことの結果であると考えられる。基底状態は、エネルギーが非常に近い様々な磁気周期の共存状態であり、非常に磁場に敏感である。層状の結晶構造とイジング型の異方性のために、この物質は単一の物質内にスピンバルブ機能を持っている。これは、通常では複雑なヘテロ構造が必要であることに対して大きな利点であり、将来の悪魔の階段構造を積極的に活かしたスピントロニクス材料の開発につながる大きな指針となる研究結果である。

[1] S. Ishiwata *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 217201 (2007).

[2] T. Matsuda *et al.* and H. Wadati, Phys. Rev. Lett. **114**, 236403 (2015).

[3] P. Bak, Rep. Prog. Phys. **45**, 587 (1982).

[4] K. Ohwada *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 086402 (2001).