



が発達し始めていることがわかる。また、 $T_p$  とほぼ同じ温度から比熱に磁気比熱の寄与が観測された。特に、低温では大きな磁気比熱の寄与が観測され、ゼロ温度外挿で有限の  $C/T$  が存在することからギャップレススピン励起があるスピン液体相であることがわかる。

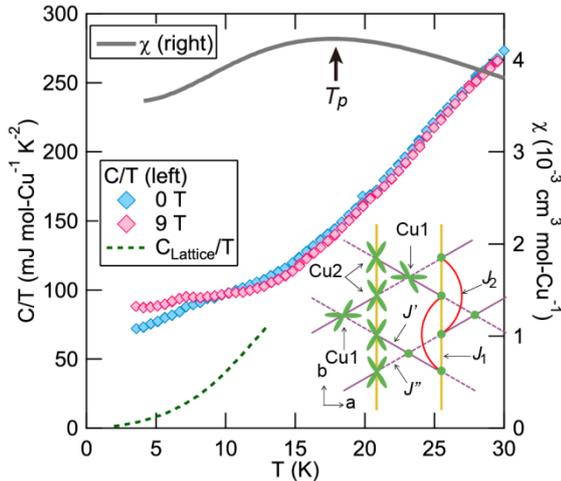


図 1 ボルボサイトの比熱を温度で割った量  $C/T$  (左軸) と磁化率  $\chi$  (右軸) の温度依存性。点線は類似物質から見積もった格子比熱の温度依存性。右下の内挿図は  $a$ - $b$  面における銅イオン (Cu1, Cu2) の配置とその間のスピン相互作用 ( $J_1, J_2, J', J''$ ) の関係を表している。

ボルボサイトの縦熱伝導率  $\kappa_{xx}$  の温度依存性を示したのが図 2 である。熱伝導率においても  $T < T_p$  の温度領域で磁場によって減少する磁場依存性を示すことがわかった。詳細な磁場依存性の解析からこの減少分はスピンによる熱伝導率の寄与を表していることがわかった[4]。

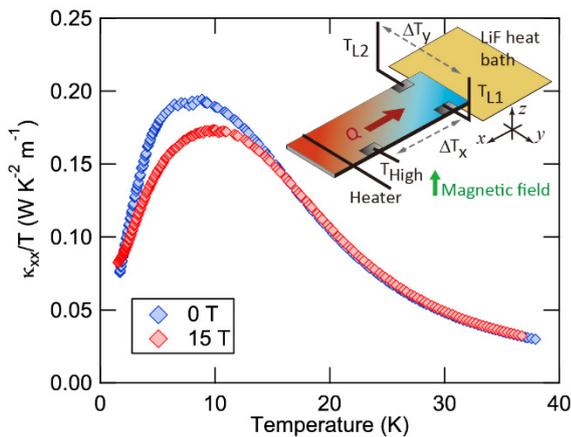


図 2 ゼロ磁場と 15 T 磁場下 ( $H//c$ ) における縦熱伝導率  $\kappa_{xx}/T$  の温度依存性。内挿図は測定の設定アップを示している。

熱ホール伝導率  $\kappa_{xy}$  の温度依存性を示したのが図 3 である。熱ホール伝導率が  $T \sim J_{eff}/k_B$  の温度から上昇し、磁化率が極大を示す  $T_p$  より少し下の温度から急に減少して  $T_N$  より少し上の温度で符号が反転していることがわかる。磁化率の温度変化と相関して  $\kappa_{xy}$  も温度変化していることから、この熱ホール効果の起源はスピン励起であると考えられる。この  $\kappa_{xy}$  の温度依存性から  $T > J_{eff}/k_B$  の常磁性相では熱ホール伝導率はなく、スピン相関が発達して液体相に入るにしたがって熱ホール伝導率が現れていることがわかった。これは熱ホール伝導率がスピン液体相の形成を特徴づける量であることを示唆している。磁化率の極大を示す  $T_p$  より下の温度で観測された急激な温度変化の起源は分かっていないが、熱ホール効果の起源となるスピノゲージ場が磁気秩序相に近づくことによって不安定化する可能性や、スピン相関の発達によって別のスピン励起が現れた可能性などが考えられる。

磁場による  $\kappa_{xx}$  の減少分からスピンによる  $\kappa_{xx}$  を見積もり、スピン励起がフェルミ統計に従うと仮定すると、観測された  $\kappa_{xy}$  の大きさと Wiedemann-Franz 則からスピン励起を感じる有効的な磁場と電荷の大きさ  $(eB)_{spin}$  を見積もることができる。非常に大雑把な近似であるが、この見積もりから、通常の電子のもつ  $(eB)_e$  に対して、 $|(eB)_{spin}/(eB)_e| \sim 0.01$  と評価できる。すなわち、スピン励起は有効的に印加した磁場の  $\sim 1/100$  を有効的に感じて曲げられていると評価できる。

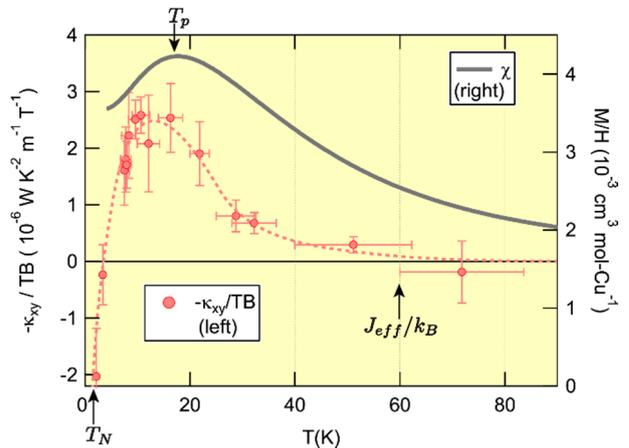


図 3 15 T の磁場下で観測された熱ホール伝導率  $\kappa_{xy}$  を温度と磁場で割った量の温度依存性 (左軸) と磁化率の温度依存性 (右軸)。

