

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 7日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360001

研究課題名（和文） 巨大スピン熱伝導物質の開発とメカニズムの解明

研究課題名（英文） Development of Highly Thermal-Conducting Spin-Materials and Elucidation of the Mechanism of the Thermal Conduction

研究代表者

小池 洋二（KOIKE YOJI）

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70134038

研究成果の概要（和文）：

スピンによる熱輸送を利用した新しい電氣的絶縁性高熱伝導材料の開発を目指して、低次元量子スピン系の高品質単結晶を作製し、その熱伝導を測定し、大きなスピンによる熱伝導のメカニズムを研究した。その結果、スピンによる熱伝導が大きくなる要素として、以下のことを新しく見出した。（1）最隣接交換相互作用が均一であること。（2）ハイゼンベルグスピンであること。（3）スピン量子数 S が大きいこと。（4）磁気励起子がボース・アインシュタイン凝縮状態であること。（5）フラストレーションによるスピン揺らぎが大きいこと。

研究成果の概要（英文）：

We have grown high-quality single crystals of low-dimensional quantum-spin systems, measured the thermal conductivity and investigated the mechanism of large thermal conductivity due to spins, in order to develop new electrically insulating and highly thermal-conducting materials using thermal conduction due to spins. As a result, we have found new several factors of large thermal conductivity due to spins as follows. (1)Uniform nearest-neighboring exchange-interaction. (2)Heisenberg spin system. (3)Large quantum-spin-number. (4)Bose-Einstein condensed state of magnetic excitations. (5)Large spin-fluctuations due to spin frustrations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2012年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 応用物性・結晶工学

キーワード：熱伝導，単結晶，低次元量子スピン系，銅酸化物，遷移金属化合物，マグノン，スピノン，スピンによる熱伝導

1. 研究開始当初の背景

スピン量子数 $S=1/2$ の低次元量子スピン系物質においては、スピンの励起子であるスピノンやマグノンが巨大な熱を運び、スピンによる熱伝導が非常に大きいものがある。その

ため、このスピンによる熱伝導を利用した新しい電氣的絶縁性高熱伝導材料の開発が期待されている。特に、 $S=1/2$ の1次元反強磁性ハイゼンベルグスピン系（ Sr_2CuO_3 や SrCuO_2 等）においては、スピンによる熱伝導

が非常に大きいことが知られていた。我々は、これがバリエーションなスピノンによる熱輸送のためであることを実証し、スピン鎖を分断する非磁性不純物や格子欠陥がスピノンの熱輸送を阻害していることを明らかにした。つまり、試料中のスピネットワークの欠陥を除去することによって、スピンによる熱伝導を向上させることができることが分かった。

また、大きなスピンによる熱伝導を持つ物質を開発するためには、そのメカニズムを解明する必要がある。当時までの研究から、スピンによる熱伝導は、次のような物質で大きくなることが分かっていた。

- ・スピネットワークの次元性が低い。
- ・隣接スピン間の交換相互作用 J が大きい。
- ・スピン間の相互作用が反強磁性である。

しかしながら、 $S \geq 1$ 以上のスピン系、イジングスピン系、フラストレーションを持つスピン系では、スピンによる熱伝導の大きさについてほとんど研究されていなかった。

(1) 2本足スピン梯子格子型のスピネットワークを持つ $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ は、150K 周辺で、大きなスピンによる熱伝導の寄与があることが知られていた。そして、この物質の Sr サイトを Ca と La で置換すると、スピネットワークを分断しているホールが除去されて、スピンによる熱伝導の寄与が劇的に大きくなることが知られていた。したがって、高純度の原料を用いて単結晶を育成し、適切なアニールを施すことによって、さらなるスピンによる熱伝導の向上が期待できた。

(2) 当時まで、スピンによる熱伝導の観測報告は、ハイゼンベルグスピン系のみであった。イジングスピン系では、理論的に、スピンによる熱伝導は非常に小さいと考えられていた。なぜなら、スピンのフリップフロップが隣のスピんに伝搬するためには、スピンの x 方向成分 S_x と y 方向成分 S_y が存在することが必要であるからだ。したがって、 z 方向成分 S_z しか持たないイジングスピン系では、スピンによる熱伝導は観測されないはずであるが、これを実際に確かめた例はなかった。

(3) 1次元反強磁性スピン系においては、マグノンの速度が JS に比例するため、スピンによる熱伝導の大きさは JS に比例する。しかし、この系におけるスピンによる熱伝導の研究は、 $S=1/2$ の場合がほとんどであり、 $S \geq 1$ の系の研究は $S=1$ の物質の2例しかなかった。それらのうちの一つの Y_2BaNiO_5 では、それなりの大きさのスピンによる熱伝導が観測されていたが、もう一つの AgVP_2S_6 では、その大きさはかなり小さかった。 $S=1/2$ の系と $S=1$ の系におけるスピンによる熱伝導の違いは、半整数スピンと整数スピンにおける基底状態の違いに起因している可能性もあり、 $S=1$ の1次元反強磁性スピン系におけるスピ

ンによる熱伝導の大きさと JS の関係を明らかにする必要がある。

(4) $S=1/2$ の3次元スピндаイマー系 TlCuCl_3 では、スピンギャップを磁場で消失させると磁場誘起磁気秩序相が出現し、それをマグノンのボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) 状態と見なすことができる。我々は、マグノンの BEC 状態で熱伝導率が劇的に上昇することを発見した。しかしながら、この上昇する熱伝導がスピンによるものであるかフォノンによるものであるか、明らかになっていなかった。スピンによる熱伝導は、スピネットワークの異方性によって大きな異方性を示すため、 $S=1/2$ の1次元スピндаイマー系の $\text{Pb}_2\text{V}_3\text{O}_9$ における BEC 状態の熱伝導の異方性に興味を持たれていた。

(5) スピンによる熱伝導が大きくなる条件を見直すと、古典的な系よりも量子的な系の方が適していると捉えることができる。つまり、スピンの揺らぎが強い系でスピンによる熱伝導が大きくなると考えられるかもしれない。フラストレーションを持つスピン系では、その効果によりスピンの揺らぎが大きくなるため、スピンによる熱伝導が大きくなる可能性がある。しかしながら、フラストレーションスピン系において大きなスピンによる熱伝導が観測された例はなかった。

2. 研究の目的

(1) 新しい電氣的絶縁性高熱伝導材料を開発するために、室温付近でスピンによる熱伝導の寄与を持つ $S=1/2$ の2本足スピン梯子格子系 $(\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{La})_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ に注目し、この物質におけるスピネットワークの欠陥を除去することで、スピンによる熱伝導の向上を目指す。

(2) ACoX_3 ($A=\text{Rb}, \text{Cs}; X=\text{Cl}, \text{Br}$) は、Co が持つ $S=1/2$ のスピンの反強磁性相関を持ち c 軸方向に配列した1次元スピン系である。このスピン鎖は、20%程度のハイゼンベルグ性を備えた擬イジングスピン鎖であると知られている。この物質におけるスピンによる熱伝導の大きさを調べることにより、イジングスピン系におけるスピンによる熱伝導を明らかにする。

(3) ANiX_3 ($A=\text{Rb}, \text{Cs}; X=\text{Cl}, \text{Br}$) は、Ni が持つ $S=1$ のスピンの反強磁性相関を持ち c 軸方向に配列した1次元ハイゼンベルグスピン系である。この物質におけるスピンによる熱伝導の大きさを調べ、これまで得られている $S=1/2$ の系におけるスピンによる熱伝導と比較することにより、1次元ハイゼンベルグスピン系におけるスピンによる熱伝導の S による違いを明らかにする。

(4) $S=1/2$ の1次元結合交替スピン鎖を持つ1次元スピндаイマー系 $\text{Pb}_2\text{V}_3\text{O}_9$ は、スピンギャップを磁場で消失させると、低温でマ

グノンの BEC 状態が実現する。このとき、スピン鎖に平行方向の熱伝導とスピン鎖に垂直方向の熱伝導を比較することにより、BEC 状態で上昇する熱伝導がスピンによるものであるかフォノンによるものであるかを明らかにする。

(5) $\text{Cu}_3\text{Mo}_2\text{O}_9$ は、Cu が持つ $S=1/2$ のスピンによるスピン鎖を持つが、その周りに別の 2 つのサイトの Cu が持つ $S=1/2$ のスピндаイマーが配置されているため、フラストレーションのあるスピン鎖系として考えることができる。この系におけるスピンによる熱伝導の大きさを調べることで、フラストレーションがスピンによる熱伝導に及ぼす効果を調べる。

3. 研究の方法

熱伝導率の測定は、定常熱流 4 端子法で行い、磁場の印加には、東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターの超伝導マグネットを用いた。

(1) 99.9%(3N), 99.99%(4N), 99.999%(5N) の純度を持つ原料を用いて、

$(\text{Ca,Sr,Ba,La})_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ 単結晶を溶媒移動浮遊帯域 (TSFZ) 法で作製した。そして、as-grown 試料、酸素アニールや高酸素圧アニールを施した試料に対して、スピン梯子格子の足方向の熱伝導率を測定した。

(2) ブリッジマン法により育成した ACoX_3 ($A=\text{Rb,Cs}; X=\text{Cl,Br}$) 単結晶について、スピン鎖に平行な c 軸方向と垂直な c 面方向の熱伝導率を測定した。

(3) ブリッジマン法により育成した ANiX_3 ($A=\text{Rb,Cs}; X=\text{Cl,Br}$) 単結晶について、スピン鎖に平行な c 軸方向と垂直な c 面方向の熱伝導率を測定した。

(4) 浮遊帯域 (FZ) 法により育成した $\text{Pb}_2\text{V}_3\text{O}_9$ 単結晶について、スピン鎖に平行な $[101]$ 方向とそれに垂直な $[10\bar{1}]$ 方向と b^* 軸方向の磁場中熱伝導率を測定した。

(5) FZ 法により育成した $\text{Cu}_3\text{Mo}_2\text{O}_9$ 単結晶について、スピン鎖に平行な b 軸方向とそれに垂直な a 軸方向と c 軸方向の熱伝導率を測定した。

4. 研究成果

(1) 純度の異なる原料を用いて $\text{Ca}_9\text{La}_5\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ の単結晶を育成し、熱伝導率を測定したが、その値に純度による大きな違いを見出すことができなかった。さらに、酸素アニールや高酸素圧アニールを施しても、熱伝導率の値に有意な変化を見出すことはできなかった。同様に、4N の原料を用いて育成した $\text{Sr}_9\text{La}_5\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ と $(\text{Sr,Ba,La})_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ においても、アニール効果は見出されなかった。それに対して、ホールドーピングのために室温付近におけるスピンによる熱伝導が小さ

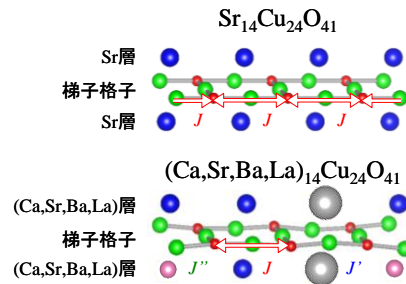


図 1. $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ と $(\text{Ca,Sr,Ba,La})_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ における梯子格子の歪みの様子。

くなっている $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ では、酸素アニールによって、熱伝導が向上した。これは、図 1 のように、Sr サイトに何も置換されていないときは、スピン梯子格子に歪みが存在せず、アニールによってスピン欠陥が補われたためと結論した。一方、Sr サイトに異なる元素を置換すると、Sr 層とスピン梯子格子層間の格子のミスマッチやイオン半径の不均一性により、図 1 のように、スピン梯子格子に歪みが発生し、 J は不均一になり、マグノンの散乱確率が増え、スピンによる熱伝導の向上が抑えられていると結論付けた。したがって、スピンによる熱伝導の向上のためには、スピンネットワーク内の J が均一であることが必要であると分かった。

(2) 図 2 に、 ACoX_3 ($A=\text{Rb,Cs}; X=\text{Cl,Br}$) 単結晶におけるスピン鎖に平行な c 軸方向の熱伝導率 $\kappa_{\parallel c}$ と垂直な c 面方向の熱伝導率 $\kappa_{\perp c}$ の温度依存性を示す。これを見ると、 RbCoCl_3 における $\kappa_{\perp c}$ は、10K 周辺にピークを持つ典型的なフォノンによる熱伝導の温度依存性を示していることが分かる。それに対して、 RbCoBr_3 , RbCoCl_3 , CsCoCl_3 の $\kappa_{\parallel c}$ は、10K のピークに加えて、60K 周辺にスピンによる熱伝導の寄与である肩を持っている。この大きさを見積もり、その値を JS に対してプロットすると、ハイゼンベルグスピン系のものよりも小さくなる傾向があることが分かった。そこで、 ACoX_3 では、 J の 20% 程度にハイゼン

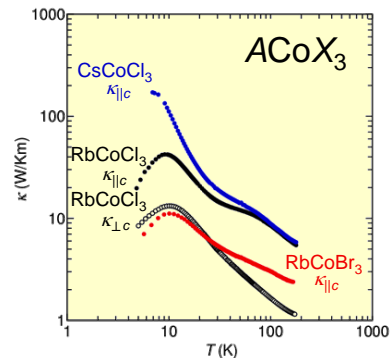


図 2. ACoX_3 ($A=\text{Rb,Cs}; X=\text{Cl,Br}$) 単結晶におけるスピン鎖に平行な c 軸方向の熱伝導率 $\kappa_{\parallel c}$ と垂直な c 面方向の熱伝導率 $\kappa_{\perp c}$ の温度依存性。

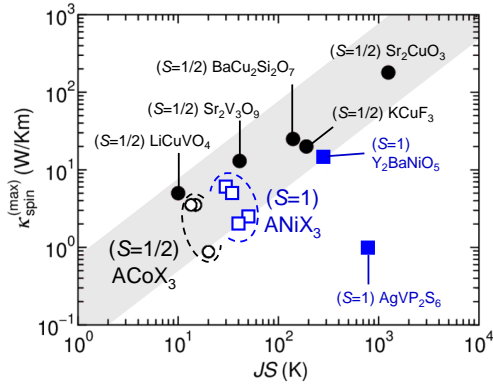


図3. スピンによる熱伝導の最大値と JS の関係. 丸は $S=1/2$ の物質, 四角は $S=1$ の物質. 塗り潰しは過去の報告例であり, 白抜きは今回の結果である.

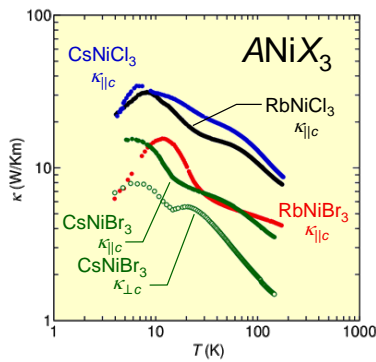


図4. $ANiX_3$ ($A=Rb, Cs$; $X=Cl, Br$) 単結晶におけるスピン鎖に平行な c 軸方向の熱伝導率 $\kappa_{\parallel c}$ と垂直な c 面方向の熱伝導率 $\kappa_{\perp c}$ の温度依存性.

ベルグ性があることを考えて, J の値を 20% にしてプロットすると図3のようになる. これを見ると, スピンによる熱伝導の大きさはおよそ JS に比例していることが分かる. したがって, スピンによる熱伝導は, 理論通りハイゼンベルグ性から現れることが明らかになった. つまり, 高熱伝導材料のためには, ハイゼンベルグスピン系の物質を選択する必要がある.

(3) 図4に, $ANiX_3$ ($A=Rb, Cs$; $X=Cl, Br$) 単結晶におけるスピン鎖に平行な c 軸方向の熱伝導率 $\kappa_{\parallel c}$ と垂直な c 面方向の熱伝導率 $\kappa_{\perp c}$ の温度依存性を示す. これを見ると, $CsNiBr_3$ における $\kappa_{\perp c}$ は, 反強磁性転移温度 $T_N=15K$ で折れ曲がりを見せすが, 30K 以上の温度では, 典型的なフォノンによる熱伝導の温度依存性を示していることが分かる. それに対して, $ANiX_3$ の $\kappa_{\parallel c}$ では, $ACoX_3$ と同様に, 60K 周辺にスピンによる熱伝導の寄与である肩を持っている. このスピンによる熱伝導の大きさを見積もり, その値を JS に対してプロットすると図3のようになり, おおよそ JS に比例していることが分かる. したがって, スピンによ

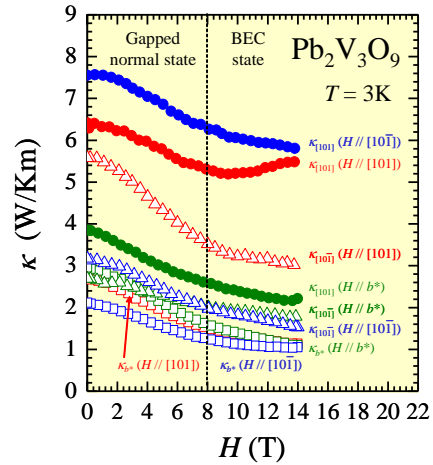


図5. $Pb_2V_3O_9$ 単結晶における $[101]$ 方向, $[10\bar{1}]$ 方向, b^* 軸方向の熱伝導率 ($\kappa_{[101]}$, $\kappa_{[10\bar{1}]}$, κ_{b^*}) の磁場依存性. 磁場も, $[101]$ 方向, $[10\bar{1}]$ 方向, b^* 軸方向に印加している.

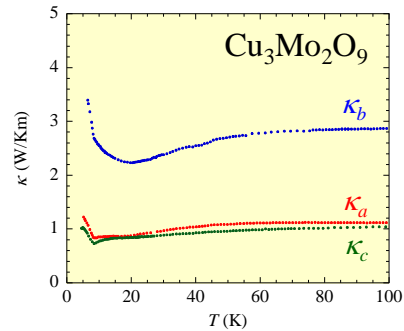


図6. $Cu_3Mo_2O_9$ 単結晶における a 軸, b 軸, c 軸方向の熱伝導率 (κ_a , κ_b , κ_c) の温度依存性.

る熱伝導は JS に比例する傾向があり, S が大きい物質の方が高熱伝導材料に向いていると考えられる.

(4) FZ 法により, $Pb_2V_3O_9$ の大型単結晶の育成に初めて成功した. 図5に, その単結晶におけるスピン鎖に平行な $[101]$ 方向の熱伝導率 $\kappa_{[101]}$ とそれに垂直な $[10\bar{1}]$ 方向と b^* 軸方向の熱伝導率 $\kappa_{[10\bar{1}]}$ と κ_{b^*} の 3K での磁場依存性を示す. これを見ると, 磁場 H をスピン鎖に平行な $[101]$ 方向に印加したときの $\kappa_{[101]}$ のみ, 8T 以上の磁場下での BEC 状態で大きく上昇しているが, それ以外の熱流方向と磁場方向では, BEC 状態で折れ曲がりが見られるだけで, 熱伝導率の上昇は見られていない. この結果は, まず, $Pb_2V_3O_9$ では磁場をスピン鎖方向に印加した場合だけしか, 磁場誘起磁気秩序をマグノンの BEC 状態と捉えることができないことを示唆している. というのは, BEC 状態になるためには, 磁気的な相互作用が磁場に対して等方的であることが必要であるからである. さらに, $H//[101]$ において, スピン鎖方向に平行な $\kappa_{[101]}$ だけが BEC 状態で上昇することは, BEC 状態における熱伝導

の上昇がスピンの寄与によるものであることを示唆している. このように, $\text{Pb}_2\text{V}_3\text{O}_9$ では, $H//[101]$ のときのみ磁場誘起磁気秩序をマグノンの BEC 状態と見なすことができ, BEC 状態での熱伝導率の上昇は, スピンによる熱伝導の寄与であることを明らかにした.

(5) 図 6 に, $\text{Cu}_3\text{Mo}_2\text{O}_9$ 単結晶におけるスピン鎖に平行な b 軸方向の熱伝導率 κ_b とそれに垂直な a 軸方向と c 軸方向の熱伝導率 κ_a と κ_c を示す. スピン鎖に平行な κ_b は, それに垂直な κ_a と κ_c よりも絶対値が 2 倍ほど大きく, さらに, 20K 以下の温度で κ_b のみが上昇していることが分かる. この結果より, κ_b にはスピンによる熱伝導の寄与があり, スピン鎖とスピンドイマーの間で生じるフラストレーションが, κ_b におけるスピンによる熱伝導を増大させている可能性がある」と結論した.

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 4 件)

- ① K. Naruse, T. Kawamata, M. Ohno, Y. Matsuoka, K. Kumagai, Y. Koike, Thermal conductivity due to magnons in high-quality single crystals of the two-leg spin-ladder system $(\text{Ca}, \text{Sr}, \text{La})_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$, *Solid State Communications*, 査読有, 154 (2013) 60-63, DOI: 10.1016/j.ssc.2012.10.013
- ② M. Sato, T. Kawamata, K. Naruse, K. Kudo, N. Kobayashi, Y. Koike, Anisotropic Behavior of Thermal Conductivity in the Bose-Einstein Condensed State of the Bond-Alternating Spin-Chain System $\text{Pb}_2\text{V}_3\text{O}_9$, *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, 400 (2012) 032079-1-4, DOI: 10.1088/1742-6596/400/3/032079
- ③ 小池洋二, 川股隆行, スピンによる熱伝導, 伝熱, 査読無, 50 (2011) 12-20
- ④ 小池洋二, 高温超伝導物質と高熱伝導スピン計物質を求めて, 翠巒, 査読無, 25 (2011) 14-18

[学会発表] (計 20 件)

- ① 成瀬晃樹, 川股隆行, 大野真澄, 松岡禎知, 長谷正司, 黒江晴彦, 関根智幸, 佐々木孝彦, 小池洋二, 擬 1 次元反強磁性体 $\text{Cu}_3\text{Mo}_2\text{O}_9$ 単結晶における熱伝導と磁気秩序, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学 (広島), 2012 年 3 月 26 日
- ② 松岡禎知, 川股隆行, 成瀬晃樹, 大野真澄, 西脇洋一, 加藤徹也, 佐々木孝彦, 小池洋二, $S = 1$ の一次元量子スピン系 ANiX_3 ($A=\text{Rb}, \text{Cs}$; $X=\text{Br}, \text{Cl}$) におけるスピンによる熱伝導, 日本物理学会第 68 回年

次大会, 広島大学 (広島), 2012 年 3 月 26 日

- ③ K. Naruse, T. Kawamata, M. Ohno, Y. Matsuoka, K. Kumagai, Y. Koike, Thermal Conductivity due to Magnons in High-Quality Single Crystals of the Two-Leg Spin-Ladder System $(\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{La})_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$, Excellent Graduate Schools 2012 Annual Meeting & Japan-Russia Workshop on Advanced Materials Synthesis Process and Nanostructure, 華乃湯 (仙台), 2013 年 03 月 07 日
- ④ 松岡禎知, 川股隆行, 成瀬晃樹, 大野真澄, 西脇洋一, 加藤徹也, 佐々木孝彦, 小池洋二, $S=1$ の 1 次元量子スピン系 ANiX_3 ($A=\text{Rb}, \text{Cs}$; $X=\text{Cl}, \text{Br}$) におけるスピンによる熱伝導, 日本応用物理学会 東北支部第 67 回学術講演会, 東北大学金属材料研究所 (仙台), 2012 年 12 月 7 日
- ⑤ 川股隆行, 松岡禎知, 成瀬晃樹, 大野真澄, 西脇洋一, 加藤徹也, 佐々木孝彦, 小池洋二, 擬 1 次元スピン系 ABX_3 ($A=\text{Rb}, \text{Cs}$; $B=\text{Co}, \text{Ni}$; $X=\text{Cl}, \text{Br}$) におけるスピンによる熱伝導, 第 6 回物性科学領域横断研究会, 東大 (本郷), 2012 年 11 月 27 日
- ⑥ 成瀬晃樹, 川股隆行, 大野真澄, 松岡禎知, 熊谷健一, 小池洋二, 2 本足スピン梯子格子系 $(\text{Sr}, \text{Ba})_9\text{La}_5\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ 単結晶の高品質化とマグノンによる熱伝導, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大 (横浜), 2012 年 9 月 18 日
- ⑦ 松岡禎知, 川股隆行, 成瀬晃樹, 大野真澄, 西脇洋一, 加藤徹也, 佐々木孝彦, 小池洋二, $S = 1$ の一次元量子スピン系 RbNiBr_3 におけるスピンによる熱伝導, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大 (横浜), 2012 年 9 月 18 日
- ⑧ K. Naruse, T. Kawamata, M. Sato, M. Ohno, K. Kudo, N. Kobayashi, Y. Koike, Thermal conductivity due to magnons in high-quality single crystals of the two-leg spin ladder system $(\text{Ca}, \text{Sr}, \text{La})_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$, The 19th International Conference on Magnetism (ICM2012), Busan (Korea), 2012.8.10
- ⑨ T. Kawamata, T. Noji, Y. Koike, Thermal conductivity and magnetic susceptibility of the 4-leg spin-ladder system $(\text{La}_{1-x}\text{Y}_x)_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ and the 5-leg spin-ladder system $(\text{La}_{1-x}\text{Eu}_x)_8\text{Cu}_7\text{O}_{19}$, The 19th International Conference on Magnetism (ICM2012), Busan (Korea), 2012.8.10
- ⑩ T. Kawamata, M. Uesaka, M. Sato, Y. Koike, Magnetic susceptibility of the quasi one-dimensional spin system $\text{Sr}_2\text{V}_3\text{O}_9$, The 19th International Conference on Magnetism (ICM2012), Busan (Korea), 2012.8.10

- ⑪ 川股隆行, 成瀬晃樹, 西脇洋一, 加藤徹也, 松岡禎知, 大野真澄, 小林典男, 小池洋二, 擬 1 次元インゲスピン系 $RbCoX_3(X=Cl, Br)$ におけるスピンによる熱伝導, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学 (西宮), 2012 年 3 月 24 日
- ⑫ 成瀬晃樹, 川股隆行, 佐藤光秀, 大野真澄, 工藤一貴, 小林典男, 小池洋二, 2 本足スピン梯子格子系 $(Ca, Sr, La)_{14}Cu_{24}O_{41}$ 単結晶の高品質化とマグノンによる熱伝導, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学 (西宮), 2012 年 3 月 24 日
- ⑬ 成瀬晃樹, 川股隆行, 佐藤光秀, 大野真澄, 工藤一貴, 小林典男, 小池洋二, 2 本足スピン梯子格子系 $(Ca, Sr, La)_{14}Cu_{24}O_{41}$ 単結晶の高品質化とマグノンによる熱伝導率, 日本応用物理学会 東北支部第 66 回学術講演会, いわて県民情報交流センター (盛岡), 2011 年 12 月 1 日
- ⑭ 川股隆行, 佐藤光秀, 成瀬晃樹, 工藤一貴, 小林典男, 小池洋二, 熱伝導率から見た $Pb_2V_3O_9$ におけるトリブロン・ボース・アインシュタイン凝縮相転移, 第 5 回物性科学領域横断研究会, 東北大 (仙台), 2011 年 11 月 19 日
- ⑮ 成瀬晃樹, 川股隆行, 佐藤光秀, 大野真澄, 工藤一貴, 小林典男, 小池洋二, 2 本足スピン梯子格子系 $Ca_9La_5Cu_{24}O_{41}$ 単結晶の高品質化とマグノンによる熱伝導, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学 (富山), 2011 年 9 月 21 日
- ⑯ T. Kawamata, M. Sato, K. Naruse, K. Kudo, N. Kobayashi, Y. Koike, Anisotropic Behavior of Thermal Conductivity in the Bose-Einstein Condensed State of the Bond-Alternating Spin-Chain System $Pb_2V_3O_9$, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing(China), 2011.8.11
- ⑰ 佐藤光秀, 川股隆行, 成瀬晃樹, 工藤一貴, 小林典男, 小池洋二, 1 次元ボンド交替系 $Pb_2V_3O_9$ における熱伝導とボーズ・アインシュタイン凝縮転移, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学 (新潟), 2011 年 3 月 26 日
- ⑱ 成瀬晃樹, 川股隆行, 佐藤光秀, 上坂正憲, 工藤一貴, 小林典男, 小池洋二, 2 本足スピン梯子格子系 $Ca_9La_5Cu_{24}O_{41}$ のマグノンによる熱伝導の向上化, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学 (新潟), 2011 年 3 月 25 日
- ⑲ 佐藤光秀, 川股隆行, 上坂正憲, 成瀬晃樹, 工藤一貴, 小林典男, 小池洋二, 1 次元ボンド交替スピン系 $Pb_2V_3O_9$ 単結晶における強磁場下のボーズ・アインシュタイン凝縮転移と熱伝導の異方性, 第 65 回日本応用物理学会東北支部学術講演会,

東北大学 (仙台), 2010 年 11 月 25 日

- ⑳ Y. Koike, Thermal conductivity due to spinons and triplons in one-dimensional quantum spin systems, Workshop on Transport Phenomena in Low Dimensional Quantum Magnets, Kolymbari(Greek), 2010.9.24

[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

小池 洋二 (KOIKE YOJI)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 70134038

(2)研究分担者

川股 隆行 (KAWAMATA TAKAYUKI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 00431601

(3)連携研究者

()

研究者番号: