

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540330

研究課題名（和文）ウラン化合物における磁気メモリ効果の発現機構に関する研究

研究課題名（英文）Mechanism of the magnetic memory effect in uranium compounds

研究代表者

李 徳新 (LI DEXIN)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：40281985

研究成果の概要（和文）：我々はウラン電子系磁性体における磁気メモリ効果を基礎物性の観点で初めて見出した。本研究では、新規ウラン化合物磁気記憶材料を探索すると共に、非磁性元素無秩序化合物 U_2TSi_3 と U_2TGa_3 (T=遷移金属) および参考化合物 $R_5T_3Si_7$ (R=希土類) に対する交流磁化率や磁気緩和など基礎物性を測定し、著しい磁気メモリ効果を観測した。その磁気メモリ効果は、広い温度範囲で観測でき、スピングラス状態でフラストレートした磁気相互作用のランダム凍結により誘起された現象であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The magnetic memory effect of uranium compounds was first observed in this study. We have found a series of new magnetic memory materials containing uranium. Especially, the basic physical properties, such as AC susceptibility and magnetic relaxation were measured for nonmagnetic atom disorder compounds U_2TSi_3 , U_2TGa_3 (T=transition metal) and reference compounds $R_5T_3Si_7$ (R=rare earth), and evident magnetic memory effect was observed. The magnetic memory effect in these compounds was observed over a wide temperature range, which can be considered to originate from the random freezing of the frustrated exchange interactions in the spin glass state.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：磁性

1. 研究開始当初の背景

(1) スローダイナミクス現象に対する研究は凝縮系の物理の重要分野の一つであり、非指数型緩和、時効およびメモリ効果はその典型的な例としてよく知られている。これらの現象はポリマー、高温超伝導、粒状

材料およびスピングラスなどの物質における既に観測され、理論、実験、応用など幅広い研究は今でも続いている。そのなかで、ランダム磁性体で確認された磁気メモリ効果と若返り現象の共存が最も魅力的な話題として注目され、粉末、薄膜、バルクなど様々

な磁性記憶材料に対する研究開発は国内外で活発な多数の研究者群に支えられた。しかし、商業への応用価値、安全確保など様々な配慮があるので、これまで磁気メモリ効果に対する研究はほとんど 3d あるいは 4f 電子系磁性記憶材料に集中し、5f 電子系磁性体で観測された例は皆無であった。

(2) 我々の初期研究により、 U_2TSi_3 および U_2TGa_3 (T=遷移金属) ではスピングラスのような挙動が観測された。3d 系および 4f 系スピングラス物質で磁気メモリ効果がよく観測されることから我々も興味を喚起され、5f 電子系であるウラン化合物スピングラス物質で 3d および 4f 電子系物質の磁気メモリ効果などスローダイナミクス現象の根本的な原因は磁気原子 (あるいは原子団) のランダム配列である。一方、 U_2TSi_3 および U_2TGa_3 は六方晶構造を持ち、非磁性原子はランダムに配列するのに対して、磁性を担うウラン原子は周期的に配列しており、いわゆる NMAD (Non-Magnetic Atom Disorder) 化合物である。ウラン原子間にランダム構造が存在しないにもかかわらず、磁気メモリ効果などスローダイナミクス現象が出現することは驚くべきことである。規則的な結晶格子を形成しているウラン原子の間に、なぜフラストレートした磁氣的相互作用がランダム的に存在するのか、この相互作用が配位子原子の幾何学的配置とどのような関係があるのか、物理的な興味は磁気メモリ効果の発現機構に注がれている。

一方、f-d(p) 混成が磁気メモリ効果に重要な寄与をすることは自然に考えられる。しかし、理論的には、f-d (p) 混成が近接したスピン間にも働く短距離型相互作用であるので、全てのスピン間に同等な相互作用があるとする従来の平均場模型は 5f 電子系ランダム磁性体に対して適当ではない。5f 電子系磁性体の磁気メモリ効果の発現機構を明らかにするには、短距離型 f-d (p) 混成効果の解明をキーポイントとした展開研究が必要不可欠である。

2. 研究の目的

従来の RKKY 相互作用の距離依存性が主役となる 3d 電子系および 4f 電子系磁性合金の磁気記憶材料とは異なり、「短距離型」f-d(p) 混成は 5f 電子系化合物の磁気メモリ効果に重要な寄与をすることが考えられる。本研究では、 U_2TSi_3 と U_2TGa_3 の純良単結晶を主なターゲットに選択し、元素置換、組成変化、外部圧力の「三つの手段」を利用して f-d(p) 混成の能動的な制御

を実現する。この研究を通じて、磁気メモリ効果の変化およびその変化の規則性を観測し、3d および 4f 電子系物質と比較する上で、5f 電子系磁気メモリ効果の特徴を究明する。物性物理学の立場から、ウラン化合物における磁気メモリ効果の物理描像および発現機構を解明することが本研究の目的である。さらに磁性記憶材料などの開発にも有用な知見を提供することを望んでいる。

3. 研究の方法

U_2TSi_3 系と U_2TGa_3 系の良質結晶は本研究の主なターゲット試料である。ウランは放射性物質であるため、試料の調製や測定準備など取り扱い作業の安全性を十分配慮しながら、次のような四つの過程を通じて研究を行う：

(1) 試料作製 金研大洗センターに設置しているテトラ・アーク炉を用いて良質な多結晶あるいは単結晶試料を作製する。20 年度から遷移金属 T を取り替え (元素置換)、典型物質 U_2TSi_3 (T=Pd, Pt, Au, Rh, Ni) および U_2TGa_3 (T=Au, Cu,) の結晶を育成する。必要であれば、参考物質として対応する稀土類化合物の結晶育成を試みる。

(2) 試料評価 作成した単結晶試料に対して、まず粉末 X 線回折装置を利用して結晶品質を評価する。希望する相の単一相であることを確認した上で、結晶構造および格子定数を決定する。X 線ラウエカメラを利用して結晶軸を決定し、放電加工機により試料を整形する。

(3) 物性測定 ①各試料に対し各軸方向の磁化測定により f-d(p) 混成の異方性と磁気モーメントの配列方向の関連を調べる。磁気メモリ効果の発生温度 T_m および T_m の外部磁場 H、周波数 ω の依存性を調べるために、AC・DC 磁化率の測定を行う。さらに、時効及び若返り現象を観測するために、残留磁化 M_r の緩和規則性 (M_r-t) を測定する。メモリ効果を観測するために、磁場中冷却 (FC) とゼロ磁場中冷却 (ZFC) 直流磁化率、待ち時間を変化して交流磁化率を測定する。長距離磁気秩序が存在しないランダム磁性体では、エントロピーおよび磁気散乱が T_m で急激に変化しないので、比熱・電気抵抗の測定によりこれらを確認し、さらに磁気メモリ効果とスピン凍結現象、非フェルミ液体状態との関連を調べる。ホール効果を測定して遷移金属の置換によるキャリア濃度の変化を調べる。d 電子の性質が遷移金属の置換により変化するので、以上の測定を通じて、f-d(p) 混成と異なる d 電子の性質 (電子数、空間分布等) の関連を明らかにする。②磁性測定用圧力セルと

SQUIDを利用して、高圧力下で磁化、磁化率(特にAC磁化率)、磁気緩和を測定する。さらに、伝導特性測定用圧力セルと伝導特性測定装置を利用して、高圧力下で電気抵抗、磁気抵抗の測定を行う。磁気メモリ効果の発生温度 T_m の圧力依存性、圧力下での T_m の磁場依存性、 T_m の周波数依存性、磁気緩和挙動の変化などを観測し、圧力により f-d(p) 混成の制御効果を詳細に調べる。

(4) 物性考察 既存の理論を用いて、実験結果を定性的あるいは定量的に分析する。特に、経験方程式を利用して、AC磁化率の測定結果の動力学解析を行い、体系の静態スピン凍結温度 T_S 、動力学臨界指数 $z\nu$ 、平均励起エネルギー E_a など特徴的な物理量を求める。元素置換、組成変化、外部圧力による f-d(p) 混成の制御効果を究明する。

4. 研究成果

我々は NMAD ウラン化合物において、初めて磁気メモリ効果を見出した。従来の稀薄 3d 電子系および 4f 電子系の磁気記憶材料とは異なり、非磁性原子の乱れに起因するランダムな f-d(p) 混成は 5f 電子系化合物の磁気メモリ効果に重要な寄与をすることが考えられる。本研究では、新規ウラン化合物磁気記憶材料を探索すると共に、 U_2TSi_3 と U_2TGa_3 (T =遷移金属) を主要ターゲットに選択し、その磁気メモリ効果に関する実験研究を続けてきた。特に、 U_2PdSi_3 と U_2PtSi_3 の良質単結晶および U_2AuGa_3 の多結晶に対して、磁気メモリ効果の測定が完成した。また、参考物質として多数の希土類 NMAD 化合物および Au-Fe、Cu-Mn など伝統的な希薄磁性合金スピングラス材料を作成し、磁気メモリ効果に関連する基礎物性の測定を行った。以下で、 U_2PdSi_3 および U_2AuGa_3 の実験データを中心に、本研究で得られた主な成果について述べる。

(1) U_2PdSi_3 および U_2PtSi_3

多数の U_2TSi_3 は AlB_2 型の六方晶構造を持つ NMAD 化合物である。これまで我々の研究により、 T =Pd, Pt, Au の化合物は単純なスピングラス、 T =Rh, Ni, Co, Ir の化合物は強磁性短距離磁気秩序を伴ったスピングラスであることが判明した。また、 T =Fe, Ru の化合物では T と Si 原子のランダム構造が存在しないので、スピングラス現象が現れず、1.7 K まで常磁性的な特徴を示した。本研究により、 U_2FeSi_3 と U_2RuSi_3 を除く、上述したすべて U_2TSi_3 化合物に対する磁気メモリ現象が観測でき、その中 U_2PdSi_3 と U_2PtSi_3 の磁気メモリ効果は最も明らかである。

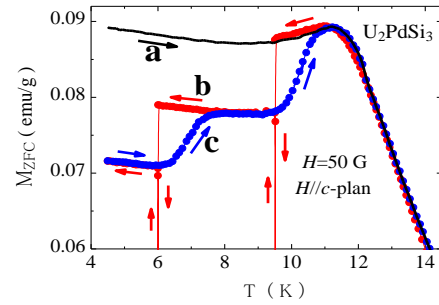


図1、 U_2PdSi_3 の磁場中 ($H=50G$) 冷却磁化強度の温度変化。測定は a (参考曲線) → b (降温測定曲線、それぞれ 6 K と 9.5 K で磁場はゼロにして、測定を停止する。2 時間後測定再開) → c (昇温曲線) の順で行った。

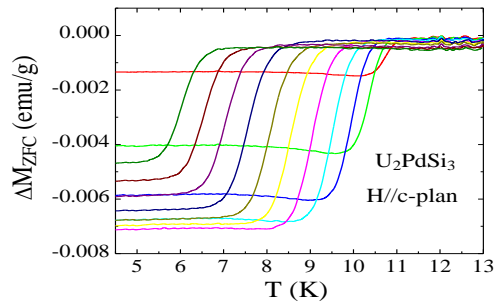


図2、 U_2PdSi_3 単結晶 c 面内における磁場中 ($H=50G$) 冷却磁化強度の各昇温曲線と参考曲線の差。磁場中冷却過程中、それぞれ $T_w=5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5$ K で磁場はゼロにして、2 時間保温した。

図1に U_2PdSi_3 単結晶 c 面内において FC ($H=50$ Oe) 磁化率の磁気メモリ効果の一部分の測定結果を示す。FC 過程中、それぞれ $T_w=5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5$ K で磁場は零まで下がり、試料を 2 時間保温した。その後、再び 50 Oe の磁場をかけ、4.5 K まで温度を下げる。4.5 K から温度上昇と共に磁化率を測定する。また、測定した曲線と参考曲線 (通常の FC 磁化率曲線) の差 (ΔM_{FC}) の絶対値は 8~9 K 付近でピークが現れた (図2)。

U_2PdSi_3 単結晶 c 面内において ZFC 磁化率のメモリ効果の一部分の測定結果を図3に示す。ZFC 過程中、試料をそれぞれ $T_w=5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5$ K で 1 時間保温した後、4.5 K まで温度を下げる。それから 50 Oe までの磁場をかけて、温度上昇と共に磁化率を測定する。図4に示したように、測定した曲線と参考曲線 (通常の ZFC 磁化率曲線) の差 (ΔM_{ZFC}) から明らかなマイナスピークが観測され、最大のピーク値は 8~9 K 付近で現れた。これは

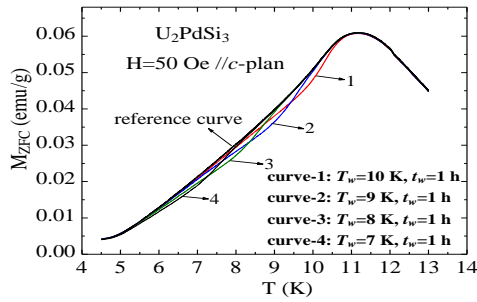


図3、 U_2PdSi_3 単結晶 c 面内における零磁場中冷却後磁化強度の温度変化。参考曲線を除く、昇温曲線1-4を測定する前の零磁場中冷却過程中、それぞれ10、9、8、7 Kで1時間保温した。

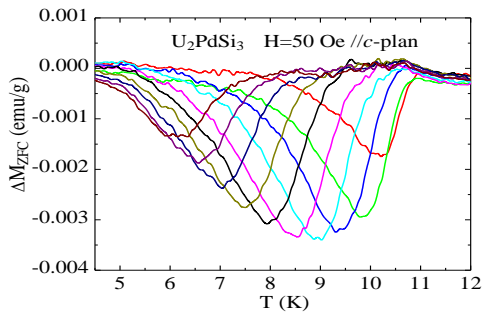


図4、 U_2PdSi_3 単結晶 c 面内における零磁場冷却後磁化強度の各昇温曲線と参考曲線の差。零磁場中冷却過程中、それぞれ $T_w=5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5$ Kで1時間保温した。

スピングラス物質特有な磁気メモリ効果である。図5は、FC磁気緩和の測定結果である。試料を2 kOeの磁場中で40 Kから8 Kまで冷却した後、磁場は零まで下がり、残留磁化の時間変化 ($M(t)$) を1時間測定する。その後温度を5 Kまで下げ、5 Kで $M(t)$ を1時間測定する。それから温度が8 Kに戻って、再び $M(t)$ を1時間測定する。最後、繰り返して同様な測定を行う。試料の残留磁化は5 Kで

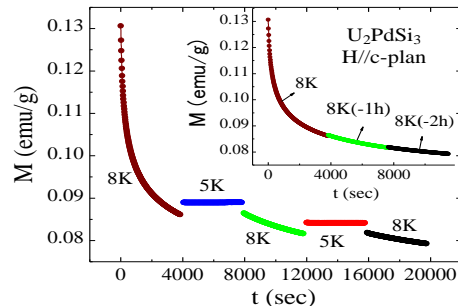


図5、 U_2PdSi_3 単結晶 c 面内における残留磁化の緩和過程。試料を磁場中 ($H=2$ kOe) 8 Kまで冷却後、磁場は零まで下がり、8 K→5 K→8 K→5 K→8 Kの順で1時間ずつ測定した。

2回の緩和を通った後、それぞれ元の状態に回復し、明瞭な磁気メモリ現象が観測された。(図5の挿入図)。以上の結果により、スピングラス転移温度以下で、 U_2PdSi_3 は磁気記憶性質を持ち、そのメモリ効果は9 K前後で最も顕著である。同様な実験測定は c 軸方向でも行い、類似な結果を得られた。

U_2PtSi_3 はもう一つ典型的な AlB_2 型のNMAD物質であり、基礎物性の測定結果により、12 K以下でスピングラス状態を形成する。その基礎磁性の測定結果、 U_2PdSi_3 と同じような明確な磁気メモリ効果の存在を確認した。

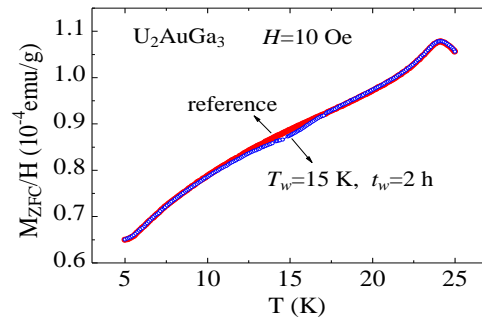


図6、 U_2AuGa_3 における零磁場中冷却後磁化強度の温度変化。参考曲線を除く、昇温曲線を測定する前の零磁場中冷却過程中、 $T_w=10$ Kで2時間保温した。

(2) U_2AuGa_3

AlB_2 型六方晶構造を持つ U_2AuGa_3 は、24 K前後でスピングラス状態に凍結されるスピングラス物質である。図6にゼロ磁場冷却あと磁化の一部の測定結果を示す。ZFC過程中に試料を $T_w=15$ Kで2時間保温した後、5 Kまで温度を下げる。それから10 Oeの磁場を印加して、温度上昇過程の磁化率を測定する。 $T_w=10$ と20 Kで同様な測定も行った。図7に示すように、測定した曲線と参考曲線の差 (ΔM_{ZFC}) から明らかなマイナスピークが現れ、典型的なスピングラス凍結に起因する磁気メモリ効果が観測された。図8はZFC磁気緩和の測定結果である。測定前、試料を零磁場中12 Kまで冷却した後、50 Oeの磁場をかけて磁化の時間変化 ($M(t)$) を2時間測定した。次に磁場を変えずに温度を5 Kまで下げ、5 Kで $M(t)$ を2時間測定した後、再度12 Kに戻して、 $M(t)$ を2時間測定した。磁化は5 Kで2度の緩和を経過した後、元の状態に回復すること (図8の挿入図) から、 U_2AuGa_3 は典型的な磁気メモリ物質であることが明らかにした。このメモリ効果は広い温度範囲で観測でき、20 K前後で最も顕著であった。

以上の測定結果により、 U_2PdSi_3 、 U_2PtSi_3

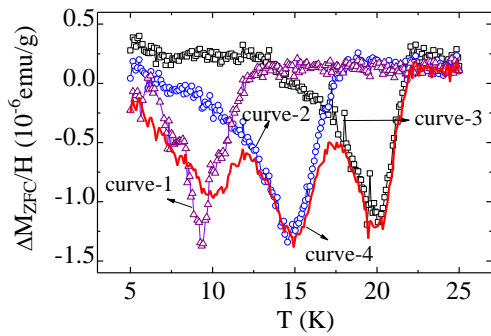


図7、 U_2AuGa_3 における零磁場冷却後磁化強度の各昇温曲線と参考曲線の差。零磁場冷却過程中、それぞれ $T_w=10$ (curve-1)、 15 (curve-2)、 20 K(curve-3)で1時間保温した。Curve-4の場合、冷却過程中で $T_w=20$ 、 15 、 10 Kで順次2時間ずつ保温した。

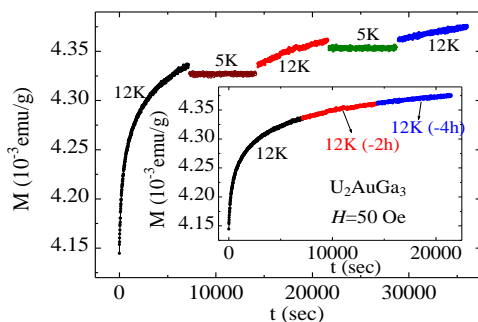


図8、 U_2AuGa_3 における磁化強度の緩和過程。試料を零磁場中12 Kまで冷却後、50 Oeの磁場をかけて、12 K→5 K→12 K→5 K→12 Kの順で2時間ずつ測定した。

および U_2AuGa_3 など5 f 電子系NMAD物質において磁気記憶性質の存在が確認した。そのメモリ効果は広い温度範囲で観測でき、約 $0.75 T_f$ (T_f はスピングラス転移温度である)で最も顕著である。磁気メモリ効果はスローダイナミクスにより誘起され、基礎および応用面から、これまで3 dあるいは4 f 電子系ランダム磁性体(希薄磁性合金、スーパーパラ磁性体、アモルファス磁性合金など)で研究されてきた。物性物理学の立場から考えれば、5 f 電子系NMAD磁性体は上述した3 dあるいは4 f 電子系物質と異なり、その磁気メモリ効果は、スピングラス状態でフラストレートした磁気相互作用のランダム凍結による誘起された現象である。3 d、4 f および5 f 電子系で観測された磁気メモリ効果を比較して、それらの本質的な区別が探し出すことは興味深い研究であり、更に展開研究が必要である。

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13件)

- ① D. X. Li, S. Nimori and Y. Shikama, Magnetic ordering and magnetocaloric effect in PrPdIn and NdPdIn, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 2012, 印刷中.
- ② D. X. Li, S. Nimori, S. Ohta, Y. Yamamura and Y. Shikama, Random spin freezing in single crystalline Ce_2CuSi_3 , Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 2012, 印刷中.
- ③ D. X. Li, T. Yamamura, K. Yubuta, S. Nimori, Y. Haga, T. Shikama, Evidence for spin-glass state in nonmagnetic atom disorder compound Pr_2AgIn_3 , Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 320, 2011, 012041 1-6.
- ④ D. X. Li, A. Kimura, Y. Haga, S. Nimori and T. Shikama, Magnetic anisotropy and spin-glass behavior in single crystalline U_2PdSi_3 , J. Phys.: Condens. Matter, 査読有, 23, 2011, 076003 1-7.
- ⑤ D. X. Li, S. Nimori, T. Shikama, Giant and anisotropic magnetocaloric effect in antiferromagnetic single crystalline DySb, Solid State Commun. 査読有, 150, 2010, 1865-1868.
- ⑥ G. Wang, Y. D. Wang, Y. Ren, D. X. Li, Y. D. Liu, P. K. Liaw, In-situ high-energy x-Ray diffuse-scattering study of the phase transition of Ni_2MnGa single crystal under high magnetic field, Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 査読有, 41A, 2010, 1269-1275.
- ⑦ A. Oyamada, M. Kondo, T. Ito, S. Maegawa, D. X. Li, Y. Haga, Spin dynamics in a triangular antiferromagnet UNi_4B , Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 145, 2009, 12044 1-4.
- ⑧ K. Yubuta, T. Yamamura, D. X. Li, Y. Shiokawa, Direct observations of ordered R_2CuSi_3 (R= Ce and Nd) cluster glass compounds in real space by HRTEM, Solid State Communications, 査読有, 149, 2009, 286-289.
- ⑨ Moshe Kuznietz, Tomoo Yamamura, Dexin Li, and Yoshinobu Shiokawa, Magnetic properties of the compounds $ThCo_2Ge_2$ and $ThCo_2Si_2$, J. Magn. Mater. 査読有, 320, 2008, 2402-2405.

- ⑩ T. Yamamura, D. X. Li, M. Kuznietz, Y. Shiokawa, Magnetic ordering in $(\text{Th}_x\text{U}_{1-x})\text{Co}_2\text{X}_2$ ($\text{X}=\text{Ge}, \text{Si}$) solid solutions, J. Appl. Phys. 査読有, 103, 2008, 07A916 1-3.
- ⑪ L. Jia, J. R. Sun, F. W. Wang, T. Y. Zhao, H. W. Zhang, B. G. Shen, D. X. Li, S. Nimori, Y. Ren, and Q. S. Zeng, Volume dependence of the magnetic coupling in $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ based compounds, Appl. Phys. Lett. 査読有, 92, 2008, 101904 1-3.
- ⑫ D. X. Li, S. Nimori, T. Yamamura, Y. Shiokawa, Ac susceptibility studies of spin freezing behavior in U_2CuSi_3 , J. Appl. Phys. 査読有, 103, 2008, 07B715 1-3.
- ⑬ D. X. Li, T. Yamamura, S. Nimori, Y. Shiokawa, Re-entrant spin-glass behavior in CeAu_2Si_2 , J. Alloys and Compounds, 査読有, 451, 2008, 461-463

[学会発表] (計 12 件)

- ① 李徳新、芳賀芳範、二森茂樹、四竈樹男、ウラン化合物 U_2PdSi_3 における磁気異方性およびスピングラス効果、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 24 日、関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス。
- ② 李徳新、二森茂樹、四竈樹男、PrPdIn 及び NdPdIn の磁気秩序と磁気熱量効果、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 21 日、富山大学五福キャンパス。
- ③ 大田卓、山村朝雄、李徳新、本間佳哉、四竈樹男、水熱合成により調製された UO_2 の磁性、日本原子力学会 2010 年秋の大会、2010 年 9 月 16 日、北海道大学。
- ④ 李徳新、二森茂樹、四竈樹男、 $\text{Tb}_5\text{Ni}_2\text{Si}_8$ における NMAD スピングラス現象、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 25 日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス。
- ⑤ 宮田香織、小山田明、西山昌秀、伊藤哲明、前川覚、李徳新、芳賀芳範、XY 型 5 f 電子系三角格子反強磁性体 UNi_4B の部分無秩序状態、日本物理学会第 56 回年次大会、2010 年 3 月 20 日、岡山大学津島キャンパス。
- ⑥ 李徳新、二森茂樹、四竈樹男、Giant and Anisotropic Magnetocaloric Effect in Antiferromagnetic Single Crystalline DySb、日本物理学会第 56 回年次大会、2010 年 3 月 22 日、岡山大学津島キャンパス。
- ⑦ 宮田香織、小山田明、西山昌秀、伊藤哲

明、前川覚、李徳新、芳賀芳範、5 f 電子系三角格子反強磁性体 UNi_4B の部分無秩序状態、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 27 日、熊本大学黒髪キャンパス。

- ⑧ 李徳新、二森茂樹、山村朝雄、四竈樹男、Ferromagnetic Ordering and Weak Spin-glass-like Effect in Pr_2CuSi_3 and Nd_2CuSi_3 、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 27 日、熊本大学黒髪キャンパス。
- ⑨ 山村朝雄、大田卓、李徳新、佐藤伊佐務、四竈樹男、2Ba-15 中性および陰イオン性ジアミド配位子とのウラン 3 価錯体の構造と物性、第 59 回錯体化学討論会、2009 年 9 月 26 日、長崎大学文教キャンパス。
- ⑩ 小山田明、西山昌秀、伊藤哲明、前川覚、李徳新、芳賀芳範、5 f 電子系三角格子反強磁性体 UNi_4B の磁気秩序状態、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 30 日、立教大学。
- ⑪ 大田卓、山村朝雄、白崎謙次、李徳新、塩川佳伸、佐藤伊佐務、ウラン (V) b-ジケトン錯体における構造と磁性の研究、第 58 回錯体化学討論会、2008 年 9 月 20 日、金沢大学。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

李 徳新 (LI DEXIN)
 東北大学・金属材料研究所・助教
 研究者番号：40281985

(2) 研究分担者

山村 朝雄 (YAMAMURA TOMOO)
 東北大学・金属材料研究所・助教
 研究者番号：20281983

(3) 連携研究者

二森 茂樹 (NIMORI SHIGEKI)
 独立行政法人物質・材料研究機構・強磁場
 共用ステーション・主幹エンジニア
 研究者番号：60354320