

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360289

研究課題名(和文)

ハイブリッド式常温磁気冷凍実現のためのメタ磁性型材料の磁気熱量効果制御

研究課題名(英文) Control of magnetocaloric effect in metamagnetic materials to realize hybrid-type room temperature magnetic refrigeration

研究代表者

藤田 麻哉 (FUJITA ASAYA)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10323073

研究成果の概要(和文)：

優れた磁気熱量効果を示す  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  化合物を基調として合金設計し、異なる動作温度域の材料を組み合わせたハイブリッド方式を実現化するために、磁性および磁気熱量プロファイルの解明・制御に取り組んだ。Al や希土類元素を用いた部分置換を行い、それぞれの変化について電子状態および磁気体積効果の観点から解析した。この結果、熱量変化を保持した動作温度幅を拡大や、相転移履歴由来の熱損失の抑制を実現した。

研究成果の概要(英文)：

To realize hybrid system by combining the materials with different working ranges, we attempted to analyze and control magnetic and magnetocaloric properties in terms of metallurgical design on the basis of  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  high performance magnetocaloric materials. The changes in these quantities due to the partial substitution by Al or rare earth elements have been analyzed from the view points of electronic states and magnetovolume effects. The expansion of working range and the suppression of hysteresis loss were realized.

交付決定額

(金額単位：円)

|         | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|---------|------------|-----------|------------|
| 2008 年度 | 9,700,000  | 2,910,000 | 12,610,000 |
| 2009 年度 | 1,800,000  | 540,000   | 2,340,000  |
| 2010 年度 | 1,400,000  | 420,000   | 1,820,000  |
| 年度      |            |           |            |
| 年度      |            |           |            |
| 総計      | 12,900,000 | 3,870,000 | 16,770,000 |

研究分野：金属物性

科研費の分科・細目：材料工学・金属物性

キーワード：環境・エネルギー材料、磁気冷凍、金属磁性、メタ磁性転移

## 1. 研究開始当初の背景

従来の冷凍技術には、フロン系冷媒の気化・液化熱による気体冷凍技術が利用されて来た。しかし、最近、オゾン層保護、地球温暖化防止のためフロン使用削減・停止の国際枠組み条約が締結され、ノンフロン冷凍技術の開発が急務となっている。しかし、気体冷凍で培った省エネ技術はガス種が変わると状況が一変してしまう。そこで、気体冷凍に限定せず、固体を用いた冷凍まで含めて、新

しい冷凍が着目されている。中でも、磁性体の磁気変化に伴う熱変化、すなわち磁気熱量効果を応用した磁気冷凍は、フロン系ガスを一切用いないために地球環境破壊の危険性を回避できること、および、高エネルギー効率の冷凍が可能である、といった大きな利点を兼ね備える。代表者は、これまでに磁気冷凍材料の候補物質となる遍歴電子メタ磁性化合物の基礎研究を行ってきたが、その結果を活用し、磁気冷凍実現のために不可欠なハ

ハイブリッド方式に対応可能なメタ磁性材料開発の学術的基盤を確立する。

## 2. 研究の目的

磁気冷凍実用化のために注目されたのは、潜熱により磁気エントロピー変化 $\Delta S_m$ が増大する磁気1次相転移の利用であるが、これは、気体冷凍において蒸発および液化の潜熱を応用するのと、熱力学的に同一である。多くの磁性体は2次磁気転移を示すため、1次転移材料は例が限られている上に、1次相転移は変化が急峻なため、実用的な磁場により熱変化を得られる温度範囲が限定されてしまう。そこで、実用的冷凍に対応するためには、合金設計した材料により、熱量効果が得られる温度範囲を拡充する必要がある。このために注目されるのが、磁気冷凍用磁性体をカスケード配列するハイブリッド方式である。すなわち材料特性としては、単一組成の $\Delta S_m$ - $T$ 曲線のプロファイルにおいて変化量が大きくても、相互の重なり部分での熱移動が過不足なく達成されなければ、部分的に熱の蓄積を生じて冷凍は実現できない。以上より本研究では、 $\Delta S_m$ の温度プロファイル全体の制御の可能性について、金属物性・材料学の観点から学術基盤を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、 $\text{NaZn}_{13}$ 型  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  化合物を機軸とした磁気熱量プロファイルの制御のために、以下に示した項目を用いて研究を遂行する。

(1) 元素部分置換によるプロファイル変化：  
 $\Delta S_m$ は、熱力学的な関係として、磁化 $M$ の温度 $T$ による微分を磁場 $H$ により積分した量に相当する。遍歴電子メタ磁性転移に由来した急峻な磁化 $M$ の変化および転移臨界磁場 $H_C$ に深く関わることを示す。そこで、部分置換による合金設計を行い、プロファイルの変化を調べるが、さらに部分置換の方策としては以下の2つが考えられる。

### ① FeおよびSiサイト部分置換

遍歴電子メタ磁性転移の発生は3dバンドのフェルミエネルギー $E_f$ 近傍の状態密度曲線の形状に依存するため、 $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$ 化合物においても3dバンド構造のわずかな変化によって、相転移挙動は顕著に変化する。そこで、大きなバンド構造変化をもたらすと予想されるFeあるいはSiサイトの部分置換を行い、磁気熱量効果の温度依存性の変化を探り、材料設計指針を検討する。

### ② Laサイト部分置換

Laサイトを他の希土類により部分置換すると、ランタノイド収縮により、格子定数の減少が生じ、磁気体積効果を反映して相転移挙動が変化する。また、Prなどの磁性希土類により部分置換すると、磁化 $M$ に希土類モー

メントの影響が現れる。このような特徴を利用することで、磁気エントロピー変化の温度プロファイルを制御する方策を検討する。さらに、これらについては、複合置換などを視野に入れて、より柔軟な磁気熱量効果制御を実施する。また1次相転移固有の履歴現象が、サイクル運行において熱損失になることを考慮し、履歴損失の低減も検証する。

## (2) 磁気状態と電子構造の関連把握

$\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$ 化合物について、電子状態の変化と磁気熱量効果の関連性を明らかにする。本系においてFe濃度の増加に伴いキュリー温度 $T_C$ が低下し、 $T_C$ 直上における磁気エントロピー変化 $\Delta S_m$ が増加する。このような変化は3dバンドの特異構造に関連している。熱力学諸量を与える状態方程式と電子構造との関連を考察し、磁気熱量効果の電子論的な制御可能性について検討する。

## 4. 研究成果

(1) Al部分置換およびPr+Al複合部分置換した化合物系における磁気熱量効果：Siサイトを置換できる元素は限られているが、Alの場合には $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Al}_{1-x})_{13}$ がSi系と同程度のFe組成まで結晶構造が安定であるので、Alによる部分置換を試みた。 $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12-y}\text{Al}_y)_{13}$ において、 $y = 0.03$ までメタ磁性転移が観測されたが、Al濃度の増加に伴い、転移はブロードになることがわかった。重要なことは、図1に示すように、メタ磁性転移臨界磁場 $\mu_0 H_C$ は温度とともに上昇するが、Al濃度の増加に対して傾き $\mu_0 dH_C/dT$ が減少することである。熱力学的関係からは、 $\mu_0 dH_C/dT$ が大きいほど潜熱が増加するが熱変化出現温度幅は小さくなる。

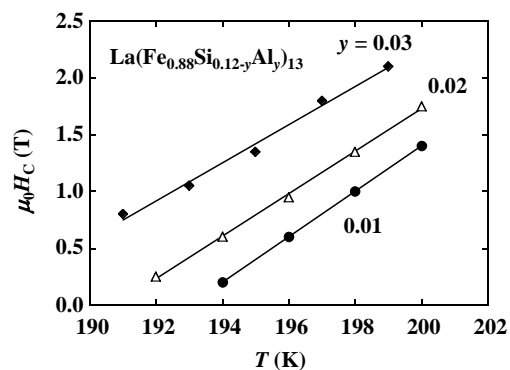


図1 Al部分置換後の相転移磁場の温度変化

冷凍に応用する際は、 $\Delta S_m$ - $T$ 曲線が囲む面積がサイクルにより移動できる熱量の目安としての相対冷凍能力(RCP)と見做せるので、放熱のための熱移動には、同一面積で温度幅の広い $\Delta S_m$ - $T$ 曲線が有利である。比較の結果、

$y = 0.01$  では RCP は置換前より増加しており、 $0.02$  で同程度となる。一方、温度幅は  $y = 0.02$  で約 130% に増加することがわかった。以上の結果は日本金属学会講演大会等で発表(5. [学会発表] ⑭⑰など)し、投稿準備中である。

一方、Al 部分置換により転移がブロード化することに着目すると、相転移履歴の制御の可能性が生じる。例えば、Fe 低濃度の試料では転移の次数が 2 次的になることを利用し、La サイトを他の希土類で置換すると、ランタノイド収縮による磁気体積効果が生じるためエントロピー変化は増加するが、転移履歴は小さいまま保持されることを我々は見出した。Al 部分置換の場合には、転移の制御を置換元素によって行うため、Fe 濃度を大きく保つことができる。そこで、Al 部分置換系において、磁気体積効果を利用するために、Al 濃度の増加に伴う圧力効果の変化を調べた。その結果、部分置換前におけるキュリー温度  $T_C$  の大きな負の圧力係数 ( $d \ln T_C / dp \sim -0.5$ ) に対して、図 2 に示すように、Al 部分置換後は一旦  $y = 0.01$  まで圧力係数  $d \ln T_C / dp$  の絶対値が減少するが、その後 Al 濃度を増加させると圧力効果が回復する様子が見られた。圧力効果を減少させる要因は、相転移が 2 次転移に近づくためであるが、それにも関わらず圧力係数が回復するのは、図 1 に示した結果を踏まえ、有限温度の磁気体積効果を支配するスピンの揺らぎの変化に由来すると説明できる。実際、図 2 に示したように、スピン揺らぎの温度変化と転移磁場の増加を直接関係付ける係数  $\beta$  が圧力効果と同様の組成依存性を示しており、Al 部分置換による転移の変化は磁気揺らぎの温度成長にも関係することがわかった。これらの結果は、5. [学会発表] ⑧⑬のほか、[雑誌論文] ①に発表された。

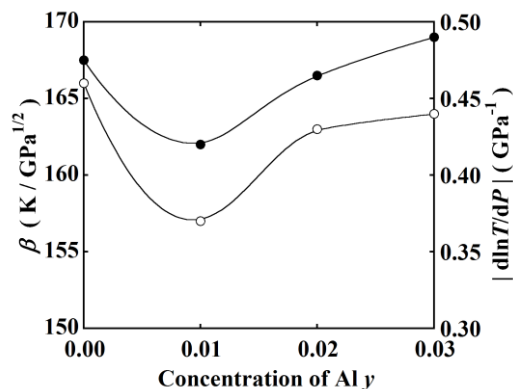


図 2 キュリー温度の圧力係数および転移磁場の磁気揺らぎ依存係数  $\beta$  の Al 濃度依存性

以上のように、磁気体積効果への Al 部分置換の影響が明らかになったので、これら

を踏まえ、Al 部分置換化合物に、さらに La サイトの Pr 部分置換を複合的に施し、格子定数低下により、静水圧印加と同様の状態を実現することを試みた。まず、希土類を選定するため、Al 部分置換前後において Ce および Pr による部分置換を行った。それぞれについて特徴的な変化が現れたが、特に Ce の場合は体積変化が大きいことに加え、電子状態変化も観測された。一方、Pr による部分置換後は、体積効果が主要因であるが、Pr イオンが磁気モーメントを有する効果も見られた。いずれも、Al 部分置換と組み合わせることにより、冷凍容量を増大もしくは保持した状態で温度幅を変化することができた。そこで、さらなる制御目標である、相転移履歴損失まで含めて特徴を評価した。図 3 に示すように、部分置換前の  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$  および Fe 濃度を減少させて Pr 部分置換した  $\text{La}_{1-z}\text{Pr}_z(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  ( $z = 0.7, x = 0.86$ ) の磁気エントロピー変化と同程度の大きさの変化が、複合置換 ( $z = 0.2, y = 0.02, x = 0.88$ ) において得られた。一方、相転移履歴の損失は、Fe 濃度を減少させた試料と Al 部分置換した試料において格段に減少しており、特に、複合置換の場合には転移履歴が出現する温度幅も狭くなっていることが確認された。これらの成果は、5. [学会発表] ④⑥⑩⑮に発表され、投稿準備中である。

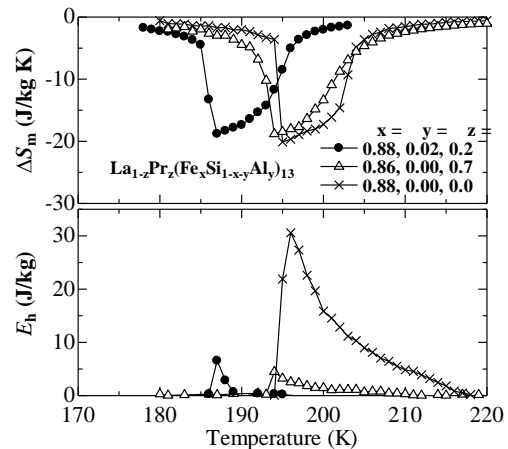


図 3 Fe 濃度調整と Pr+Al 部分置換した場合の磁気エントロピー変化と履歴損失の温度依存性

(2) 合金設計に伴う磁気状態変化と電子構造の関連性把握：これまで代表者らは、Fe 原子核周りの環境を捉えることができるメスバウアー効果を用い、水素吸収に伴う体積効果と電子状態変化について調査を行い、主に磁気体積効果が磁気状態変化の主要因であることを突きとめた。一方、Ce 部分置換を行った場合は、ランタノイド収縮に加え、遷移金属中での Ce イオン価数が 4 価になりやすい傾向のため、体積収縮が顕著に生じる。このため、静水圧効果と同等の磁気体積効果が

生じるが、さらに電子状態変化まで考慮しないと説明できない磁気変化も生じた。そこで、Ce 部分置換系についてメスバウアー効果測定を行い、体積と電子状態変化が及ぼす磁性変化について考察した。まず、常磁性領域で測定したところ、2重スペクトルが見られ、同位体シフト  $IS$  を除くと、これまでに測定した  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$  およびその水素化試料と全く同じ形状であった。常磁性スペクトルは Fe 原子核周りの電場勾配を反映することを考慮すると、La サイトの部分置換は系の対象性を変えないことがわかる。一方、10 K におけるスペクトルは、図 4 に示すように、部分置換前の試料と同様に、強磁性状態に対応して、磁気分裂による 6 重形状を示す。低温での  $IS$  は主に電子濃度を反映することを考慮すると、Ce 部分置換前後の  $IS$  は純 Fe 基準で  $-0.01 \text{ mm/s}$  から  $0.06 \text{ mm/s}$  に変化しており、これは Fe 核周りの電子濃度が減少したことを示す。本系への水素吸収を行った場合を参考にすると、水素は格子定数を増加させる一方で、電荷移動はほとんど起こらないため、波動関数の重なりが減少した効果により  $IS$  は正方向に増加する。Ce 部分置換は格子定数が減少するので、波動関数の重なりとしては増加する傾向にあるが、実際には逆の変化が観測される。このことはすなわち、Ce 原子の 5d あるいは 4f 電子が 3d 電子と混成し、電子状態変化を引き起こしていることを示す。これらの結果は 5. [学会発表] ⑦にて招待講演するとともに、[雑誌論文] ②に発表された。

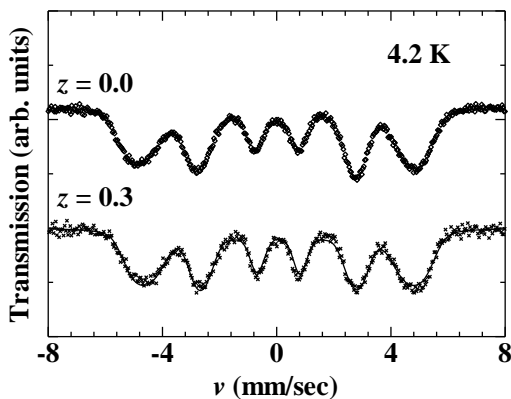


図 4 Ce 部分置換前後のメスバウアースペクトル

この結果を踏まえ、電子状態変化の熱力学的状態への反映について調査した。熱力学的諸量を与える磁気的自由エネルギーに基づく状態方程式は、ランダウ展開に基づく理論的考察により、磁化の偶べき項の関数として与えられるが、さらに有限温度での磁気揺らぎを交えて各項の係数の温度変化が与えられている。これを利用すると、磁化曲線の温度変化から各係数を求めることができ、その結果をもとに自由エネルギーやエントロピー変化が算出される。この解析を Ce 部

分置換した  $\text{La}_{0.7}\text{Ce}_{0.3}(\text{Fe}_{0.86}\text{Si}_{0.14})_{13}$  の磁化曲線に適用して得られた、自由エネルギー展開係数の 2 次および 4 次の係数の温度変化を図 5 に示す。なお、本試料は、前述(1)項に述べた Pr 部分置換の場合と同様の効果を狙っており、Fe 濃度を低下して転移をブロードにするかわりに、希土類部分置換による磁気体積効果を利用し、最終的に磁気熱量効果を保持しつつ相転移履歴を減少できるように制御したものである。体積変化に加え、メスバウアー効果測定で確認された Ce 部分置換による電子状態変化は、磁気状態方程式の 2 次および 4 次の展開係数に強く影響を及ぼし、結果的に磁気エントロピー変化を増大させることがわかった。一方、自由エネルギー曲線の強磁性と常磁性状態間におけるエネルギー障壁  $E_b$  が相転移履歴を与えることに注目し、熱力学的相転移点における  $E_b$  を算出した結果、展開係数の変化が  $E_b$  の値を小さくしていることがわかった。すなわち、Ce 部分置換による電子状態変化は結果的に磁気熱量効果の利用を有利に進める方向に作用していることが明らかになった。これらは、5. [学会発表] ⑦⑧のそれぞれにおいて招待講演として報告され、[雑誌論文] ②⑧に発表された。

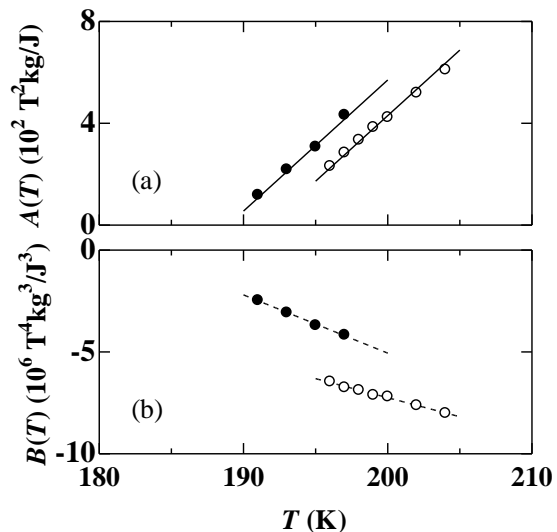


図 5  $\text{La}_{1-z}\text{Ce}_z(\text{Fe}_{0.86}\text{Si}_{0.14})_{13}$  ( $z = 0.0$  および  $0.3$ ) における(a) 2 次および(b)4次ランダウ展開係数の温度依存性:

### (3) まとめ

$\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  化合物の優れた磁気熱量特性は世界的に着目され、ここ数年において各国で盛んに研究され始めた。その中で、例えば、動作温度の異なる試料を効率よく作製するために、水素を最大濃度まで吸収処理することで水素化プロセスを簡便にし、キュリー温度制御は Mn 部分置換により実施する方法なども提案されている。しかし、この方法では、結局、キュリー温度変化に伴い磁気熱量効果が低下してしまうため、RCP としても保持で

きず、カスケード使用するための材料ハイブリッド化は不向きである。本研究で展開したような、金属工学的な利点を電子論的に活用するための学術基盤が無ければ、上記のように闇雲に合金設計を行うことになる。重要なことは、4.(1)および(2)に記した $\Delta S_m$ , RCP および  $E_h$  などの重要なパラメータはいずれも磁気体積効果と電子状態に深く関わっていることが明らかになったことであり、同時に、いくつかの量は制御の方策も見えはじめた。今後は、実用に近い、より先鋭化した条件での実証を企業等と連携して行うことで、材料化が進展することが見込まれる。一方、磁気相転移の科学としては、静的な解明は格段に進展したので、今後は動的な性質(カイネティクス)にまで踏み込んだ研究が必要である。なお、相転移カイネティクスは工学的にも冷凍サイクル運行に関連することであり、実用上も重要である。

#### 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 12 件)

- ① 矢子ひとみ、藤枝俊、藤田麻哉、深道和明、” Pressure effect on the Curie temperature of  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12-y}\text{Al}_y)_{13}$  ”、J. Phys. : Conf. Ser.、266 巻 012023:1-4、(2011)、査読有
- ② 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、” Changes in electronic states and magnetic free energy in  $\text{La}_{1-z}\text{Ce}_z(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  magnetic refrigerants ”、J. Phys. D : Appl. Phys. 44 巻、64013:1-7、(2011)、査読有
- ③ 藤田麻哉、” Fe 系遍歴電子メタ磁性転移の高効率磁気冷凍材料への応用 ”、日本磁気学会誌まぐね、6 巻、89-96、(2011) 査読有
- ④ 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、” Influence of hydrogenation on volume dependence of the Curie temperature and entropy change in  $\text{La}(\text{Fe}_{0.86}\text{Si}_{0.14})_{13}$  ”、J. Phys. : Conf. Ser.、200 巻、092006:1-4、(2010)、査読有
- ⑤ 藤田麻哉、” Fe 系室温磁気冷凍材料のスピンの揺らぎとメタ磁性転移制御 ”、日本磁気学会研究会(エネルギー関連技術としての熱と磁気)資料、No. 147、1-6、(2010) 査読無
- ⑥ 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、” 高効率 Fe 系室温磁気冷凍メタ磁性材料のスピンの揺らぎと相転移制御 ” 日本磁気学会誌まぐね、5 巻、264-269、(2010) 査読有
- ⑦ 藤田麻哉、小岩井貞義、藤枝俊、深道和明、他 3 名、” Magnetocaloric effect in spherical  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  and their hydrides for active magnetic regenerator-type refrigerator ”、J. Appl. Phys.、105 巻

07A936: 1-3、(2009)、査読有

- ⑧ 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、” ADVANTAGE OF THE ITINERANT ELECTRON METAMAGNETIC TRANSITION IN  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  FOR HIGH PERFORMANCE MAGNETIC REFRIGERATION ”、Proc. 3rd Int. Conf. on Magn. Refrig. at Room Temp.、33-40、(2009)、査読有
  - ⑨ 藤枝俊、藤田麻哉、深道和明、” Reduction of hysteresis loss and large magnetocaloric effects in substituted compounds of itinerant-electron metamagnets  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  ”、J. Magn. Magn. Mater.、321 巻、3567-3570、(2009)、査読有
  - ⑩ 藤枝俊、藤田麻哉、深道和明、” Strong Pressure Effect on the Curie Temperature of Itinerant-Electron Metamagnetic  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}\text{H}_y$  and  $\text{La}_{0.7}\text{Ce}_{0.3}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}\text{H}_y$  ”、Mater. Trans.、50 巻、483-486 (2009) 査読有
  - ⑪ 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、” Control of Magnetocaloric Effects by Partial Substitution in Itinerant-Electron Metamagnetic  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  for Application to Magnetic Refrigeration ”、IEEE Trans. Magn.、45 巻、2620-2625、(2009)、査読有
  - ⑫ 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、” Influence of hydrogenation on the electronic structure and the itinerant-electron metamagnetic transition in strong magnetocaloric compound  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$  ”、J. Magn. Magn. Mater. 321 巻、3553-3558、(2009)、査読有
- [学会発表] (計 18 件)
- ① 矢子ひとみ、藤枝俊、藤田麻哉、深道和明、” Time Dependence of Magnetization in the Isothermal Process of the Itinerant-electron Metamagnetic Transition in  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$  ”、International Conference of Asian Union of Magnetic Society、2010 年 12 月 8 日、済州島(韓国)
  - ② 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、” Difference between the Pressure Effect on the Curie Temperature of  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  and their Hydrides ”、International Conference of Asian Union of Magnetic Society、2010 年 12 月 6 日、済州島(韓国)
  - ③ 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、” Small Hysteresis Behavior in  $\text{La}(\text{Fe}_{0.86}\text{Si}_{0.14})_{13}\text{H}_{1.1}$  after Sharpening of the Itinerant Electron Metamagnetic Transition by External Pressure ”、MRS 2010 Fall Meeting、2010 年 11 月 30 日、Boston (米国)
  - ④ 矢子ひとみ、藤枝俊、藤田麻哉、深道和明、”  $\text{La}_{0.8}\text{Pr}_{0.2}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.10}\text{Al}_{0.02})_{13}$  化合物

の磁気エントロピー変化および転移履歴損失の温度依存性”、日本金属学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 27 日、北海道

⑤ 藤田麻哉、矢子ひとみ、藤枝俊、深道和明、”  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$  化合物における自発電圧発生の局所観測による相転移進行の解明”、日本金属学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 27 日、北海道

⑥ 矢子ひとみ、藤枝俊、藤田麻哉、深道和明、” Ce 部分置換による  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.10}\text{Al}_{0.02})_{13}$  化合物の冷凍容量の増大”、第 34 回日本磁気学会学術講演会、2010 年 9 月 7 日、つくば

⑦ 藤田麻哉、” Changes in electronic states and magnetic free energy in  $\text{La}_{1-z}\text{Ce}_z(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  magnetic refrigerants” (招待講演)、The 2nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications、2010 年 7 月 16 日、仙台

⑧ 矢子ひとみ、藤枝俊、藤田麻哉、深道和明、” Pressure effect on the Curie temperature of  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12-y}\text{Al}_y)_{13}$ ”、The 2nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications、2010 年 7 月 15 日、仙台

⑨ 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、”  $\text{La}_{0.7}\text{Ce}_{0.3}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$  化合物のメスバウアー分光による Ce 部分置換の影響の解明” 日本金属学会 2010 年春季大会、2010 年 3 月 30 日、つくば

⑩ 矢子ひとみ、藤枝俊、藤田麻哉、深道和明、”  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.10}\text{Al}_{0.02})_{13}$  化合物の Ce 分置換による磁気エントロピー曲線の最大値及び半値幅の増大”、日本金属学会 2010 年春季大会、2010 年 3 月 30 日、つくば

⑪ 藤田麻哉、Fe 系遍歴電子磁性体の基礎研究と相転移制御による高効率磁気冷凍材料開発、日本金属学会 2010 年春季大会、2010 年 3 月 30 日、つくば

⑫ 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、” 磁気熱量化合物  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$  の起電力と相転移進行の相関”、日本金属学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 17 日、京都

⑬ 矢子ひとみ、藤枝俊、藤田麻哉、深道和明、 $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.10}\text{Al}_{0.02})_{13}$  化合物の圧力印加による磁気エントロピー変化の増大、日本金属学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 17 日、京都

⑭ 矢子ひとみ、藤枝俊、藤田麻哉、深道和明、” Al 部分置換した  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$  化合物における磁気冷凍容量の向上”、第 33 回日本磁気学会学術講演会、2009 年 9 月 14 日、長崎

⑮ 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、”  $\text{La}_{0.7}\text{Ce}_{0.3}(\text{Fe}_{0.86}\text{Si}_{0.14})_{13}$  磁気熱量化合物における 1 次相転移履歴損失とスピンの揺らぎ”、第 33 回日本磁気学会学術講演会、2009 年 9 月 14 日、長崎

⑯ 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、” Advantage of the Itinerant Electron Metamagnetic Transition in  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  for High Performance Magnetic Refrigeration (招待講演)”、3rd International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature、2009 年 5 月 12 日、Des Moines(米国)

⑰ 矢子ひとみ、藤枝俊、藤田麻哉、深道和明、” Al 部分置換した  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  磁気冷凍化合物における磁気エントロピー曲線の温度幅の増大”、日本金属学会 2009 年春季大会、2009 年 3 月 28 日、東京

⑱ 藤田麻哉、藤枝俊、深道和明、”  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  磁気冷凍化合物の断熱温度変化過程における相転移障壁による熱損失”、日本金属学会 2009 年春季大会、2009 年 3 月 28 日、東京

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤田 麻哉 (FUJITA ASAYA)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：10323073

### (2) 研究分担者

深道 和明 (FUKAMICHI KAZUAKI)  
東北大学・多元物質科学研究所・研究教授  
研究者番号：00005969