

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740247

研究課題名(和文)磁化運動および力学運動を用いたスピン流制御の理論

研究課題名(英文)Theory of spin current control by use of magnetic and mechanical motions

研究代表者

家田 淳一 (IEDA, Jun'ichi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号：20463797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：ナノスケールの極小磁石を対象として、磁石の方向である磁化の運動と物体そのものの運動から磁気の流れである「スピン流」を生み出す新しい手法の理論提案を行った。ナノ磁石の境界である「磁壁」の運動に伴い発生する微小電力の出力安定化に有利な性質(高磁気異方性)を特定することで、従来材料の100倍の出力増大が可能であることを明らかにし、その磁気デバイス応用の提言を行った。また、金属の表面や界面に発生する特殊な磁場を用いることで、極めて強力なナノ磁石を作ることができることを理論的に明らかにした。更に、液体金属を使うことで物体運動からのスピン流生成が可能であることを理論的に予言し実験グループと共に実証した。

研究成果の概要(英文)：Generation methods of spin current - a flow of magnetism - originating from magnetic and mechanical motion in ferromagnetic nanostructures have been investigated. Theoretical study shows that high magnetic anisotropy materials can significantly stabilize a voltage signal arising from magnetic domain wall motion in nano-magnets making its magnitude 100 times larger than those observed previously. Some device applications based on this effect are also proposed. In addition, fluid motion of a liquid metal is shown to generate a spin current, which has been confirmed experimentally in collaboration work with an experimental group.

研究分野：物性理論

キーワード：スピン起電力 スピン流 磁壁 スピン軌道相互作用 垂直磁気異方性 スピン回転相互作用 バーン  
ット効果 液体金属

## 1. 研究開始当初の背景

現在の高度情報化社会を支えるエレクトロニクスは、電子の電荷の流れである電流を活用することにより大きく発展してきた。本研究の背景となるスピントロニクスは、電子スピンの流れであるスピン流を電流とともに積極的に利用することで、従来技術を凌駕する高い性能と新しい機能の開発を目的としている。電流は電位差を与えさえすれば流れ続けるため、その利用は容易である。これに対し、スピン流はミクロンスケール以下の有限の距離しか伝達されないため、その実用にはさまざまな困難が伴う。このため多様なスピン流の生成・制御手法の確立はスピントロニクスの最重要課題となる。

スピン流制御には、スピンの持つ角運動量を他の形態の角運動量と相互に変換することが必要である。局在磁化と伝導電子スピン流の間の角運動量変換が、スピン移行トルク、スピンポンピング、スピン起電力等の観点から研究され近年著しい発展を遂げた。

この一方、磁化と力学回転の間の角運動量変換は、古く量子力学建設以前となる 1915 年のアインシュタイン、ドハースおよびパーネットらの研究にまで遡り、今日それらのナノデバイスにおける検証が進められている。

こうした流れの中で、スピン流と力学回転の直接的相互作用の研究は存在せず、力学回転とスピン流の角運動量変換は、長年の間完全なミッシングリンクとなっていた。

研究代表者らは、近年のスピン流生成の基盤原理が電子のスピン軌道相互作用にあることに着目し、力学回転の効果を反映した一般共変ディラック方程式の低エネルギー極限を調べることで、2011 年回転系におけるスピン軌道相互作用の基礎方程式を導いた。ここに磁化および力学回転とスピン流を角運動量相互変換という視座の下、統一的に議論する理論的枠組みの建設が始まり、スピントロニクスに力学的スピン流制御法の導入という新しい可能性が切り開かれた。

## 2. 研究の目的

以上を踏まえ、角運動量の相互変換という視座のもと、これまでに行ってきた磁化運動によるスピン流生成の研究をより発展させると共に、力学回転とスピン流の間に横たわるミッシングリンクを埋め、スピントロニクスに力学的スピン流制御という新概念を本格的に導入する。前者については、ナノ構造磁性体の性質を反映した「スピン起電力」の特徴的な振る舞いの研究に焦点を絞り、実験グループとの連携のもとスピン流の増幅法の開発などの応用的展開を目指す。後者は、ごく黎明期の研究内容を含むため、基礎的な理論構築の完成を目標とする。

## 3. 研究の方法

ナノ構造磁性体における磁化運動、力学運動とスピン流の相互作用に関し下記の研究課題を掲げ、理論的・数値シミュレーション的手法を用いて研究を行った：

- ・ナノ構造磁性体の形状及び性質を反映したスピン起電力の解析と応用
- ・スピン - 回転結合を用いた非一様回転からのスピン流生成の理論構築
- ・スピン流を用いたナノスケール力学系の制御に必要な基礎理論の探索

以上の研究を行う上で、i) 国内外の実験グループと情報交換を緊密に行い研究推進に随時反映させる、ii) 成果の国際的なプライオリティー確立のために関連研究会等において情報発信を精力的に行う、などの研究マネジメントにも配慮した。

更に、研究後期にはさらなる理論展開を実施するため、ドイツのマインツ大学に客員教授として滞在し、国際共同研究を推進した。

## 4. 研究成果

### (1) スピン起電力出力安定化の指針

[Applied Physical Letters **100**, 162401 (2012).]

スピン起電力を生成するための典型的な方法として、微細加工された磁性細線中の磁壁の運動が利用される。磁性体に磁場を加えると磁壁は一方向へ移動するが、これに伴って磁気エネルギーから電気エネルギーへの変換が起こり、スピン起電力が生じる。これは、スピン起電力の生成方法として初めに提案されたものであり、その後米国と日本の研究グループによって独立に実証されている。これらの実験では、磁性細線としてパーマロイ（鉄・ニッケル合金）が用いられた。スピン起電力の大きさは加える磁場の大きさに比例するが、パーマロイは磁気異方性が非常に小さい軟磁性材料であり、磁壁の構造そのものが磁場によって容易に変形する。すなわち、加える磁場が大きくなってくると安定した磁壁の運動を制御することが困難になり、それに伴ってスピン起電力の出力も乱雑な信号となることが問題となっていた。既存の実験では、パーマロイに加えらるる磁場の大きさは数十 mT に制限され、出力される起電力は数  $\mu\text{V}$  程度にとどまる。よって、応用上の観点からより大きなスピン起電力の生成を可能にする物質の探索、及び理論的な指針を得ることが重要な研究課題とされていた。

本研究では、この問題を克服するために、磁気異方性の大きな物質に着目した。こうした物質では、磁壁の構造は磁気異方性によって強く支配されており、外から加えた磁場による磁壁構造の乱れはパーマロイの場合に比べて極めて小さく、大きな磁場の下でも安定した磁壁運動が可能となる。

大きな磁気異方で知られるコバルト・ニ

ツケル多層膜と鉄・白金規則合金薄膜を対象とし、数値的手法によってこれらの物質における磁壁運動とそれに伴って発生するスピンの起電力を求めた。その結果、コバルト・ニッケル細線では数百 mT、さらに磁気異方性がコバルト・ニッケル細線より十倍ほど大きい鉄・白金細線では数 T までの範囲で、安定した磁壁移動が確認された(図1)。こうした磁場の範囲内で、コバルト・ニッケルでは最大数十  $\mu\text{V}$ 、鉄・白金細線においては既存出力の約百倍に上る数百  $\mu\text{V}$  ものスピンの起電力が得られることがわかった(図2)。また、磁壁運動の解析により、磁気異方性の大きな物質ではスピンの起電力を発生させるために必要な磁壁の可動範囲が、これまでより小さくて良いことも判明した。これは、スピンの起電力を用いたデバイスのさらなるダウンサイジングを可能とする。以上の研究成果により、より磁気異方性の大きな物質がスピンの起電力の生成には有利であることが判明した。

本成果は、スピンの起電力を応用する際の材料設計に指針を与えるものであり、スピンの起電力デバイスの開発が大きく促進されることが期待される。

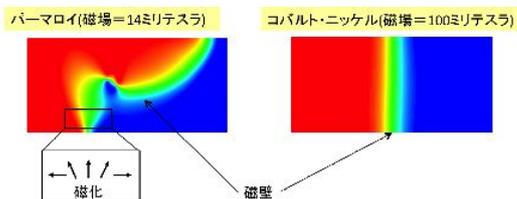


図1 パーマロイ(左)と、コバルト・ニッケル多層膜(右)磁性細線内部における磁壁構造。赤で示した磁区と青で示した磁区の境界領域が磁壁に対応。

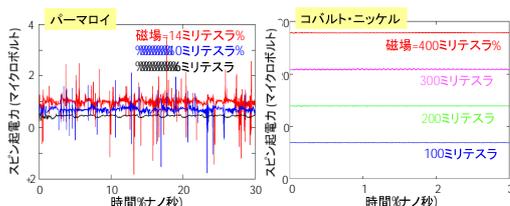


図2 スピンの起電力の時間と磁場依存性。

## (2) 直流磁場から交流電圧の変換原理

[Applied Physical Letters 101, 252413 (2012).]

スピンの起電力の大きさは加える磁場の大きさに正比例するため、直流の磁場に対しては直流の電圧が生じ、交流磁場からは入力した磁場と同じ周波数を持った交流電圧が生じる。これに加え、スピンの起電力を用いたユニークな応用例が提案・実証された。それは、形状加工した強磁性薄膜に交流磁場を入力し、直流の電圧を生み出す仕組み、すなわち「磁気・電気間の交流・直流変換(コンバー

タ)」効果である。

これを受け、次なる研究テーマとしてその逆変換機構(インバータ)の可能性を探索した。インバータを実現するには、直流の入力エネルギーを時間的に変化させる仕組みを見出す必要がある。本研究では、この課題を解決するため、図3に示すような周期的に横幅を変えた強磁性細線を提案した。変調を伴う細線中の磁壁は、ちょうどゴム膜のように伸縮に伴い界面エネルギーが変化する。このエネルギーは細線の横幅に比例するため、磁壁がある場所ごとに図3右グラフが示すような異なる磁気エネルギーを持つ。

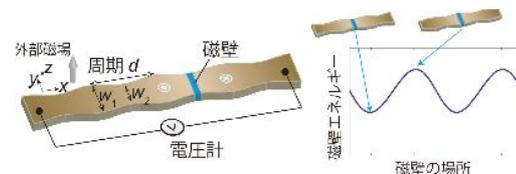


図3 磁気パワーインバータの模式図(左)と磁壁エネルギーの位置依存性(右)。

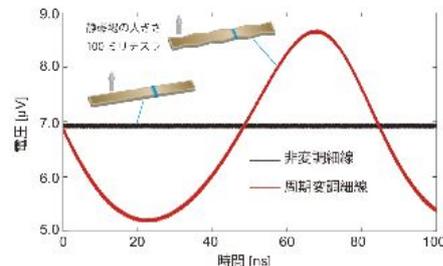


図4 磁気パワーインバータの出力電圧(赤線)。形状を加工していない通常の磁性細線における出力電圧(黒線)とともに示す。

ここに外部から磁場を入力し磁壁を移動することで、通常の入力磁場によるスピンの起電力に加え、磁壁に蓄えられた固有の磁気エネルギーによるスピンの起電力を同時に利用することを考案した。これにより、磁壁移動に伴って発生する出力電圧にはこの磁壁エネルギーの変動を反映した交流成分が重ね合わされる。このことを確かめるため、周期変調した細線の中で磁壁の運動方程式を解き、スピンの起電力を計算した。その結果、周期変調細線におけるスピンの起電力の出力電圧信号(赤線)では、直線状の非変調細線の場合に生じる直流電圧(黒線)に加えて交流成分が発生することがわかった(図4)。この交流成分の振幅や周波数などの特性は、外部から入力する直流磁場の強さや細線の形状を調整することで制御することが可能であり、適切な磁性材料を用いた場合 MHz 帯から GHz 帯までの良好な交流特性が得られることが明らかになった。また、細線の幅の変調に限らず、磁性材料の組み合わせや加工プロセスなどにより磁壁エネルギーを適切に制御することができれば、原理的に様々な手法で交流特性を生み出すことが可能となる。ここで示されたような、直流磁場から交流電圧を直接

生み出す機構は、これまでのいかなる物理法則でも実現されておらず、ここに、磁気パーインバータの原理が確立した。

本成果は、入出力が共に電気的である通常の能動素子に対し、電気と磁気の両者を直接結びつけるいわばハイブリッド版能動素子の誕生といえる。磁気エネルギーを直接利用した電子素子は、原理的に待機電源が不要なため、将来的に大きな省エネ効果をもたらすものと期待される。

### (3) 新しい垂直磁気異方性の発現原理

[Scientific Reports 4, 4105 (2014).]

パソコンやスマートフォンなどの情報をいつでも利用できる状態に保持する記憶デバイスの記憶密度は、磁性薄膜に小さな棒磁石(N極S極の組)を何個並べられるかで決まる。2005年、この小さな棒磁石を横に並べる水平記録方式から、縦に並べる垂直記録方式に置き換わり、記憶密度が一気に5~10倍に増大した。この技術革新を実現したのが、「垂直磁化膜」と呼ばれる特殊な磁石である。最近では、極限まで薄くした垂直磁化膜に外部から電場をかけることで磁石の向きを制御する「電場効果」が盛んに研究され、この現象を用いた磁気情報操作の低消費電力化も追求されるなど、大きな注目を集めていた。

このように、垂直磁化膜は磁気記憶媒体として優れた性質を持ちすでに広く利用されているが、実用的な研究が先行する一方、なぜ極薄の磁性膜で磁石の向きを垂直に揃えることができるのか、その起源にはまだ不明な点が多く残されている。特に、原子数層レベルの極薄磁性膜に異種材料を貼り付けた場合の電場効果に関しては、既存の解釈では説明できない現象が報告されるなど、メカニズムの理論的解明が待ち望まれていた。

本研究では、「ラシュバ効果」と呼ばれる金属の表面ごく近傍にのみ生じる電場が原因で発現する特殊な磁場の存在に着目した。ラシュバ効果による磁場は、常に「膜に水平方向」に働くため、磁石を膜に垂直に揃える直接の原因として取り上げられることがなく、十分に検討がされていなかった。

そこで、まず極薄磁石とラシュバ効果の大きな異種材料を貼り付けた状況を想定し(図5) 対応する理論モデルの解を用いてラシュバ効果の寄与を足し上げ、磁石の向きが薄膜面に垂直の場合と、薄膜面に水平の場合のエネルギーを比較した。その結果、磁石の向きが膜に垂直の場合の方が全体として磁気により強化され、安定化されることを見出した。

ラシュバ効果の大きさは、金や銀などの貴金属の表面で、普通の磁石の作る磁場の数十倍から数百倍もの磁場に相当することが最近の研究でわかっている。今回のラシュバ効果による垂直磁化膜のメカニズムによれば、適切な材料の組み合わせを選ぶことで、史上最強レベルのネオジム磁石をも凌駕する極

めて強力な極薄磁石を、ナノメートルスケールで実現することができることになる。

本成果は、電場効果を含めた垂直磁化膜の今後の材料開発に基礎的な設計指針を与えるものであり、ナノスケールの極薄磁石による不揮発性磁気メモリの超高密度化に寄与するとともに、それによる待機電源が不要な電子機器の実現に大きく貢献するものと期待される。

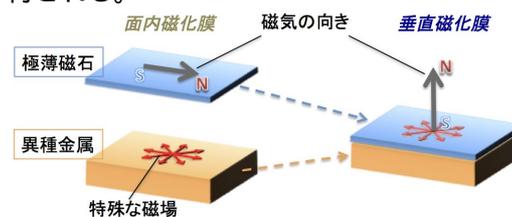


図5 極薄磁石とラシュバ効果を持つ異種材料を貼り付けると、磁石の安定な向きが面内(水平)から垂直となる。

### (4) 表面音波からのスピン流生成

[Physical Review B 87, 180402 (2013).]

スピントロニクスにおいて中心的な役割を果たすのが磁気の流れ「スピン流」である。従来、このスピン流を作り出すには、i)磁石を使う、ii)プラチナなどの貴金属を使う、という2つの手法が知られていた。

本研究では、局所的な回転運動をする金属中の電子の振る舞いを精密に予測する基礎方程式を導き、銅やアルミニウムのような身近な金属に音波を注入することによってスピン流を生み出す機構を見出した。

音波を金属に注入すると、金属表面付近に回転運動が誘起される。この回転運動は、表面付近で最大の回転速度を持ち、表面から離れるに従い、回転速度は減衰する(図6)。本研究で導かれた理論によって、電子のスピン方向は金属表面付近の回転軸に揃い、より回転速度の大きい場所へと移動し表面方向へスピン流が発生することが明らかになった。

本成果により、プラチナなど高価な貴金属を使うことなくスピン流を生み出す手法が開拓され、レアメタルフリーな省電力磁気デバイス開発につながると期待される。

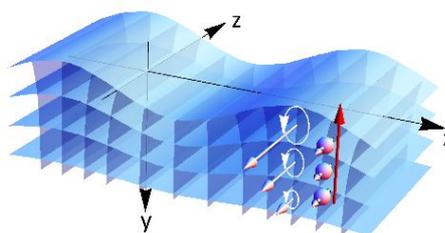


図6 音波によるスピン流生成。音波を注入すると、金属表面付近に回転運動が誘起される(白矢印)。この回転軸に平行に電子の自転方向が揃い、回転速度の大きい表面に向かってスピン流(赤矢印)が生成される。

### (5) スピン流体発電

[Nature Physics 12, 52-56 (2016).]

スピンの生成には、電磁場、熱、音波などの相互作用が用いられ、これまでにさまざまな形態のエネルギーをスピン流に変換する技術が確立されてきた。しかし、スピン流の利用は固体物質中に限られており、液体金属のような流体でスピン流を生成できるかどうかは不明であった。

本研究では、周囲の物体の振動や回転運動に影響されて、物体中を流れるスピンの現象を記述する理論体系を構築し、液体金属の流れがスピン流を生み出すことを見出した。

水銀やガリウム合金のような液体金属を細管に流すと、管の内壁と液体金属の間の摩擦によって、液体金属中に渦運動が発生する。この渦の強さは、管の内壁で最大であり、内壁から管の中心に向かって弱まる(図7)。このような渦運動の分布によって、液体金属中の電子スピンの影響を受け、渦運動の強いところから弱いところに向かって、スピン流が流れることを理論計算により明らかにした。また、管の内壁から中心に向かって生成されたスピン流は、さらに液体金属中で散乱され、管に沿った方向に逆スピンホール効果による電圧を発生する。

実験グループとの共同研究により実証実験を行い、直径数百マイクロンの細管に液体金属を流す際に生じる液体金属の渦運動を用いて、その液体金属中にスピン流を生み出し、その結果生じる 100nV の電気信号を取り出すことに世界で初めて成功した。

本研究によって、電子のスピンの液体金属の渦運動と量子力学的に相互作用することが世界で初めて証明され、スピン流研究に液体金属が利用できることを明らかにした。

従来の流体発電では、水流でタービンを回転させる水力発電や、磁石を使った磁気流体発電のように、タービンや磁石といった外部装置が不可欠であった。これに対し、今回発見した手法では、電子スピンと流体渦運動との相互作用を利用するので外部装置が不要となり、原理的には超小型化が可能となる。将来的に、微弱な電力で駆動するナノロボットの電源装置への応用が期待される。また、得られる電気信号の強度が流体の速度分布に応じて変化することを利用して、微小領域における流体の速度を電気で観測する流体速度計の実現も期待される。

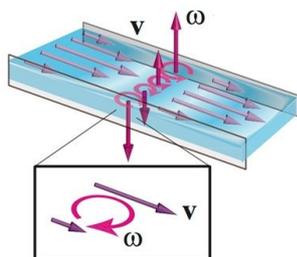


図7 細管中を流れる液体金属(速度場  $v$ )に発生する渦運動の分布(渦度場  $\omega$ )

### 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25件)

- (1) Yuta Yamane, Jun'ichi Ieda, and Jairo Sinova, "Electric voltage generation by antiferromagnetic dynamics," Physical Review B **93**, 180408(R) (2016) 査読あり.  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.180408>
- (2) R. Takahashi, M. Matsuo, M. Ono, K. Harii, H. Chudo, S. Okayasu, J. Ieda, S. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Spin hydrodynamic generation," Nature Physics **12**, 52-56 (2016) 査読あり.  
<http://dx.doi.org/10.1038/NPHYS3526>
- (3) S. E. Barnes, J. Ieda, and S. Maekawa, "Rashba Spin-Orbit Anisotropy and the Electric Field Control of Magnetism," Scientific Reports **4**, 4105(1-5) (2014) 査読あり.  
<http://www.nature.com/srep/2014/140217/srep04105/full/srep04105.html>
- (4) J. Ieda, M. Matsuo, and S. Maekawa, "Theory of mechanical spin current generation via spin-rotation coupling," Solid State Communications **192**, 52-56 (2014) 査読あり.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ssc.2014.02.003>
- (5) Y. Yamane, J. Ieda, and S. Maekawa, "Spinmotive force with static and uniform magnetization induced by a time-varying electric field," Physical Review B **88**, 014430(1-4) (2013) 査読あり.  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.88.014430>
- (6) J. Ieda, Y. Yamane, and S. Maekawa, "Spinmotive Force in Ferromagnetic Nanostructures," SPIN **3**, 1330004(1-15) (2013) 査読あり.  
<http://dx.doi.org/10.1142/S2010324713300041>
- (7) J. Ieda, S. Maekawa, and Y. Yamane, "Real time analysis of spinmotive force due to domain wall motion," Journal of Korean Physical Society

62, 1802-1806 (2013) 査読あり.  
<http://link.springer.com/article/10.3938/jkps.62.1802>

- (8) M. Matsuo, J. Ieda, K. Harii, E. Saitoh, and S. Maekawa, "Mechanical generation of spin current by spin-rotation coupling," *Physical Review B* **87**, 180402(R)(1-4) (2013) 査読あり.  
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.87.180402>
- (9) M. Matsuo, J. Ieda, and S. Maekawa, "Renormalization of spin-rotation coupling," *Physical Review B* **87**, 115301(1-7) (2012) 査読あり.  
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.87.115301>
- (10) Jun'ichi Ieda and Sadamichi Maekawa, "Magnetic power inverter: AC voltage generation from DC magnetic fields," *Applied Physical Letters* **101**, 252413(1-4) (2012) 査読あり.  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4773214>
- (11) Y. Yamane, J. Ieda, and S. Maekawa, "Stability of Spinmotive Force in Perpendicularly Magnetized Nanowires under High Magnetic Fields," *Applied Physical Letters* **100**, 162401(1-3) (2012) 査読あり.  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4703933>

[学会発表](計2件)

- (1) J. Ieda, "Perpendicular magnetic anisotropy induced by Rashba spin-orbit interaction," The 9th of the annual ISSP International symposium on New Perspective in Spintronics and Mesoscopic Physics, 2015.6.1-19, 東京大学物性研究所 (千葉県・柏市) [招待講演]
- (2) 家田淳一、「ラッシュバ効果による界面磁気異方性の理論」, 日本物理学会 2014年秋季大会, 2014.9.9, 中部大学 (愛知県・春日井市) [招待講演]
- (3) J. Ieda, "Mechanical Generation of Spin Current in Nonmagnetic Thin Films," *Spin Caloritronics IV*, 2012.6.2-5, 東北大学金属材料研究所 (宮城県・仙台市) [招待講演]

[産業財産権]  
取得状況(計2件)

名称: スピン流制御装置  
発明者: 市村雅彦、家田淳一、前川禎通  
権利者: 株式会社日立製作所、日本原子力研究開発機構  
種類: 特許  
番号: 第5649198号  
出願年月日: 平成25年11月14日  
取得年月日: 平成26年11月21日  
国内外の別: 国内

名称: 磁気メモリ  
発明者: 市村雅彦、菅野量子、家田淳一、前川禎通  
権利者: 株式会社日立製作所、日本原子力研究開発機構  
種類: 特許  
番号: 第5626741号  
出願年月日: 平成25年11月14日  
取得年月日: 平成26年10月10日  
国内外の別: 国内

[その他]

外部表彰  
平成28年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞受賞『ナノ磁性体による磁気エネルギー利用法の理論研究』, 平成28年4月20日  
<http://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2016/042501/>

プレス発表等  
<http://www.jaea.go.jp/02/press2012/p12041701/index.html>  
<http://www.jaea.go.jp/02/press2012/p13010901/index.html>  
<http://www.jaea.go.jp/02/press2013/p13051701/index.html>  
<http://www.jaea.go.jp/02/press2013/p14021701/index.html>  
<http://www.jaea.go.jp/05/genki/genki33.pdf#page=8>

HP  
<http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/spineergy/ieda/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
家田 淳一 (IEDA, Jun'ichi)  
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究副主幹  
研究者番号: 20463797