

量子物性理論研究グループの主な成果

Highlights of Research Group for Condensed Matter Theory

森 道康

Michiyasu Mori

グループリーダー

Group Leader



概要

電荷、スピン、軌道といった電子の内部自由度と電子間の強い相互作用が織り成す物性を探求してきた。中でも、スピンゼーベック効果、スピンホール効果、フォノンホール効果、スピン起電力などは、複数の内部自由度が絡む新しい物理現象である。これらの項目に関する当研究グループの成果を報告する。

1. 研究の背景・経緯

物質を構成する原子の組み合わせを選ぶことにより、あるいは物質を微細加工することで、微視的スケールの量子効果を巨視的スケールの物性として引き出すことが出来る。そこでは、電子の持つ電荷、スピン、軌道といった内部自由度が絡みあい、電子は互いに強く相互作用している。本研究グループでは、これら電子の内部自由度と電子間の強い相互作用が織り成す物性を探求してきた。様々な数値計算手法を用いてデバイスの新原理や新機能を提案すると共に、そこで求められる新機能材料の創出や新しい物理学的概念への到達を目指してきた。とりわけスピントロニクスに関連する研究を推進してきた。

スピントロニクスは、電子の電氣的性質の流れである電流の代わりに、電子の磁氣的性質の流れである「スピン流」を利用する。次世代の省エネルギー電子デバイスとなることが期待されている[1-3]。1980年代の磁気抵抗効果に関する研究をきっかけに急速に進展し、ハードディスクに組み込まれ、不揮発メモリーへの応用が試みられている。その後、磁化をスピン流によって制御しようとする試みも精力的に行われている。

一方、スピントロニクスの研究は、その進展の速さに加え、多岐に亘る非常に豊かな色彩を放ち始めている(表1)。初期の磁気抵抗効果を中心とした研究を第一段階とすると、電流やスピン流を使う試みは第二段階と言える。ただ、この第二段階は、単なる制御方法の変化に留まらず、2008年齊藤英治氏の研究グループによって発見された、スピン流を基軸にした熱電発電の原理(スピンゼーベック効果)へと進化した[4]。本質的な第二段階の始まりである。本研究グループでは、このスピンゼーベック効果に関する研究を強力に推進してきたので、次節において報告する。

後に述べるが、スピンゼーベック効果において、スピン流の生成・注入・変換が重要である。スピン流は、磁化の時間変化と捉えることが出来る(表1)。加えて、磁化の空間変化が伴うとき、通常の電磁場とは区別され

Abstract

We have studied the physics emerging from the internal degrees of freedom of electrons: charge, spin, and orbital, and strong interaction between electrons. In particular, the spin Seebeck effect, the spin Hall effect, the phonon Hall effect, and the spinmotive force, are new phenomena in which multiple internal degrees of freedom are involved. Results of our research group in these areas are summarized.

1. Introduction

Choosing combinations of atoms and/or using micro-fabrication techniques, quantum mechanical phenomena in a microscopic scale can be revealed to us as various macroscopic properties. The internal degrees of freedom of electrons, charge, spin and orbital, are entangled and strongly interact with one other. We have studied new physics originating from such internal electron degrees of freedom and the electron correlations. We have sought new functional materials and new concepts in condensed matter physics, in addition to new features of devices by using a variety of numerical methods. We have focused especially on spintronics and its related subjects.

Spintronics uses “spin current”, that is the flow of the magnetic property of electrons, instead of the electric current, which is the flow of the electronic charge. It is expected to be the next-generation of energy-saving electronic devices [1-3]. Triggered by magnetoresistance in the 1980s, spintronics progressed rapidly and is now applied to the hard disk drives, and furthermore the application to non-volatile memories is seen to be realized. Manipulation of spins by spin current is also an active subject.

On the other hand, in addition to the speed of progress, spintronics is beginning to show a rich variety of phenomena (Table 1). If the study on

1 st stage (1985-)	Magnetization	\vec{M}	Magnetoresistance HDD, MRAM
2 nd stage (2000-)	Spin current	$\vec{J}_s \propto \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}$	Spin-Seebeck effect Thermoelectricity
3 rd stage (2009-)	Spin-electric field	$E_i \propto \vec{M} \cdot \left(\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial x_i} \right)$	Spinmotive force Power generation & converter

表1 スピントロニクス研究の多様な進展

Table 1 Diverse development of spintronics

るべき磁性体由来の電場を電子が感じ取ることが提案されていた[5,6]。そして、実際に磁壁の運動に伴う起電力が観測され[7,8]、スピン起電力と呼ばれている。ここにおいて、スピントロニクス研究は第三段階に突入したと言える。本研究グループでは、この新たな研究の流れにおいて、先導的な研究成果を挙げてきたので、この点に関しても次節で報告する。

2. 研究の内容

(1) スピンゼーベック効果

スピンゼーベック効果は、図1左図に示したような強磁性体と金属の分かり易い接合構造を用いる[4]。x方向に磁場と温度差(∇T)を与えると、上部金属の両端に電位差(V)が生じる。図1右上図に示すように、 V は位置に依存し、高温側と低温側で符号が変わる。金属の両端に V が生じるのは、金属中に注入されたスピン流が、後に述べる逆スピンホール効果によって電流に変換されたためと理解できる。そして、 V が位置に依存するのは、温度勾配に応じて注入されるスピン流の大きさが変化する(図1右中図)ためだと考えると辻褄が合う。しかし、温度差によって強磁性体中にスピン流が誘起されるという仮定では、数mmにも及ぶ長さに対して線形に電圧が変化す

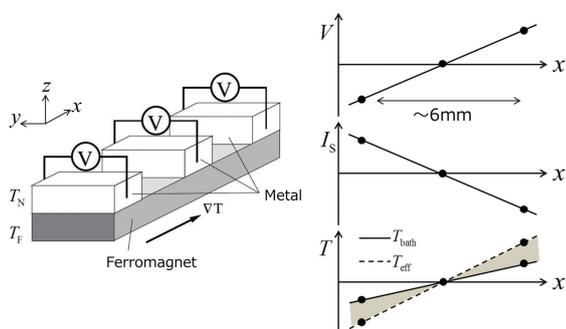


図1 左図：スピンゼーベック効果の測定配置[4] (Ref.[9]より抜粋)。右図：各位置における電圧(上図)、注入されるスピン流(中図)、温度分布(下図)

Fig.1 Left: Experimental setup for observing the spin Seebeck effect[4] (Schematic in Ref.[9]). Right: Spatial dependence of voltage (upper), injected spin current (middle), temperature (lower).

magnetoresistance in 1980s is assigned to be the first stage, the utilization of charge and/or spin currents to control the magnetization can be regarded as the second stage. It must be noted that this second stage is not a naive change of control method but is rather enhanced by the spin Seebeck effect, which is a completely new principle of power generation by spin current and was discovered by the group of Eiji Saitoh in 2008 [4]. This is the beginning of the second stage. We have studied this subject intensively. Our results are summarized in the next section.

As we shall outline later, in the spin Seebeck effect, generation, injection and conversion of spin current are important. The spin current can be considered to be a time variation of magnetization (Table 1). When a spatial variation of the magnetization is induced in addition to the spin current, it is reported that electrons are taken in an electric field inherent to a magnet which should be distinguished from the usual electromagnetic field [5,6]. In fact, a motive force induced by a domain-wall motion is observed [7,8]. It is called the spinmotive force. Here, spintronics enters the third stage. We have obtained many pioneering results on this subject as well, and those are also summarized in the next section.

2. Selected outcomes

(1) Spin Seebeck effect

A simple junction of ferromagnet and metal shown in Fig. 1 (left) is used for the spin Seebeck effect. With an applied magnetic field and a temperature gradient (∇T), a voltage drop (V) appears in the metal. As shown in Fig. 1 (right, top), V depends on the position of the metal and changes its sign from the high- to the low temperature sides. The voltage in the metal is induced by converting the spin current, which is injected from the ferromagnet, to the charge current by the inverse spin Hall effect. The spatial dependence of V means that the magnitude of the spin current depends on ∇T (Fig.1 right middle). Those explanations might be sound, but the fact that V changes linearly on such a long length scale, which amounts to several mm, cannot be explained by assuming that ∇T induces spin current inside the ferromagnet. This is because the spin current usually decays within several nm. Such a non-trivial phenomenon, the spin Seebeck effect, has been clarified in Refs. [9] and [10]. It was pointed out that the essential element is the spin current injected by thermally driven magnetic fluctuations.

ることを説明できない。スピン流は数 nm で減衰してしまうからである。自明とは言えないスピンゼーベック効果の機構は、文献 [9] および [10] において解き明かされた。ここでは、熱によって駆動された磁気揺らぎが、スピン注入の本質であることを示した。その結果、強磁性体の温度を T_F 、金属の温度を T_N とすると、金属中に注入されるスピン流 (I_S) は、 $I_S \propto \Gamma \chi_N J_{sd}^2 (T_N - T_F)$ で与えられることが分かった (図 1 右中図)。 Γ 、 χ_N はそれぞれ金属中のスピン散乱確率、常磁性帯磁率。強磁性体と金属は、磁気交換結合 J_{sd} で結ばれているとした。結果は、強磁性と金属の温度差 ($T_N - T_F$) に比例する。従って、温度勾配は x 方向でなくてもよく、応用上は z 方向に与える方が有利である。しかし、ここで一つ問題が残る。図 1 左図において、強磁性体中に温度差はあるものの、 T_N と T_F は局所的には同じになっているはずである。もし、そうだとすると、金属中にスピン流が注入されなくなってしまう。この点に関して、文献 [9] において、強磁性体中に温度差が金属にスピン流を注入する仕組みを解き明かした。局所熱平衡状態を仮定し、それらの結合を摂動的に扱うことで、系の熱浴としての温度 T_{bath} とスピンが感じ取る有効温度 T_{eff} との間に違いが生じ得ることを示した (図 1 右下図)。これらの温度差こそが、金属にスピンを注入していた原動力であり、数 mm にも及ぶ長い距離に亘って、その効果を発揮していた機構だったのである。 T_{bath} と T_{eff} の違いは、非常に重要な概念である。強磁性体中で運ばれる熱とスピンの感じる温度とが区別されるためである。この概念を敷衍することで、スピンゼーベック効果が低温で著しく増加する現象 (フォノンドラッグ) も極めて自然に理解できることとなった [11]。この概念を更に敷衍すると、スピン流を駆動するのは温度でなくても良いことになり、音波によるスピン注入の実現 [12]、反強磁性体やフェリ磁性体などにおけるスピン注入の研究 [13,14] へと発展した。こうして、スピンゼーベック効果の基礎理論が構築された。

(2) スピンホール効果、フォノンホール効果

スピンゼーベック効果は、全く新しい熱電発電の原理である。その性能指数を向上させたいと考えることは自然な流れである。応用の観点では、デバイス構造が極めて重要であるが、材料選択の観点からは、金属中のスピンホール効果が重要である。(逆) スピンホール効果は、電流 (スピン流) がそれとは垂直方向のスピン流 (電流) に変換される物理現象である。これまでスピン流・電流の変換効率はおよそ 1% 以下に留まっていたが、本研究グループはこのスピン流・電流の変換効率を大きく増強する微視的メカニズムを理論的に解明した [15-17]。具体的には、鉄イオンを微量含む金がスピンホール電極材料として優れていること、また伝導面の厚さを薄くして表面散乱の寄与を増やすとスピンホール効果が増強される事などが分かり、結果としてスピン流・電流の変換効率を 10% 程度まで引き上げられる事を示した。計算に用いた方法の概略を図 2 に示す。

物質の個性を取り込むべく第一原理計算を行い、さらに、量子モンテカルロ法を用いることで、不純物における電子

We have shown that the spin current injected into the metal (I_S) is given by, $I_S \propto \Gamma \chi_N J_{sd}^2 (T_N - T_F)$, with spin scattering rate in the metal Γ , and susceptibility of the metal χ_N . Temperatures in the ferromagnet and the metal are denoted by T_F and T_N , respectively. It is supposed that the metal is coupled to the ferromagnet by J_{sd} . In our result, I_S is proportional to the temperature difference ($T_F - T_N$). Hence, ∇T is not necessarily in the x direction, and ∇T in the z direction is rather advantageous for application. The following point must be noted here. In Fig.1 (left), although a temperature gradient exists inside the ferromagnet, T_F must coincide with T_N locally, since the metal are directly attached to the ferromagnet and then the interface of them should be thermally equilibrium. If this is true, spins cannot be injected into the metal. This crucial point is clearly explained in Ref. [9]: Supposed local thermal-equilibrium states perturbatively connected each other, it is found that the effective temperature for spins (T_{eff}) can deviate from the temperature of the system as heat bath (T_{bath}). See Fig. 1 (right, bottom). It is this temperature difference that injects spins into the metal, and furthermore this is the main force to maintain this phenomenon for a distance as long as several mm. Again this temperature difference between T_N and T_F is conceptually very important, since heat flowing in the ferromagnet is distinguished from the effective temperature for spins. This concept reasonably explains the phonon drag effect, in which the spin Seebeck signal is strongly enhanced at low temperatures [11]. Further extension of this concept leads to the realization that temperature is not always necessary to drive spin current, i.e., spin pumping by acoustic wave [12], spin Seebeck effect in compensated ferrimagnets [13], dc spin pumping enhanced by magnetic fluctuation [14]. Now we believe that our results have established the basic theory of the spin Seebeck effect.

(2) Spin Hall effect and phonon Hall effect

The spin Seebeck effect is a completely new principle of thermopower generation. It is natural to wish to enhance its figure of merit. Although device structure is crucial to applications, from a viewpoint of material science, the spin Hall effect in a metal is important. The spin Hall effect is an interesting phenomenon from which the charge current is converted to the spin current perpendicular to it (in the literature, the inverse spin Hall effect is vice versa). So far, efficiency of this conversion has been less than 1%, whereas we have found a microscopic mechanism to enhance it theoretically [15-17]. For example, Au containing a tiny amount of

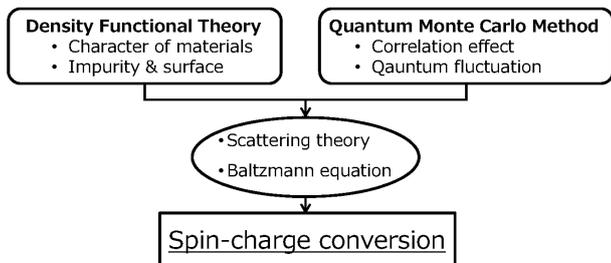


図2 第一原理計算と量子モンテカルロ法を組み合わせた輸送方程式の解法

Fig.2 Strategic map to solve transport equation combining density functional theory and quantum Monte Carlo method

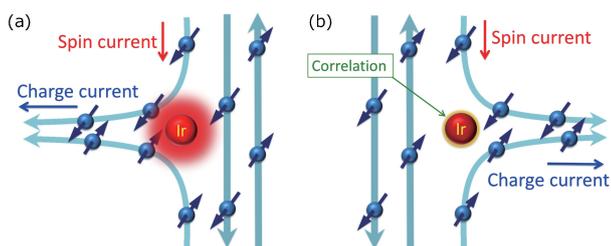


図3 スピンホール効果における電子相関の重要性

Fig.3 Effect of electron correlation on spin Hall effect

相関を取り込むことに成功した。この方法を用いて、イリジウムを僅かに含んだ銅におけるスピンホール効果[18]において、電子相関が重要であることを示した(図3)。

関連が深い現象として、弱い強磁性体として知られるニッケルとパラジウムの合金が常磁性体から強磁性体へと転移するキュリー温度付近でのみ、電圧信号に異常が現れることが報告された[19]。この異常が、キュリー温度付近で強磁性体のスピンの揺らいでいることに起因するものであることを解明した[20]。現象の本質が、磁気揺らぎの高次相関にあるため、非線形スピンホール効果と呼ばれる。この原理を用いた超高感度磁気センサーとしての応用が期待される。

スピンゼーベック効果は、スピン流の生成と制御の重要性を我々に再認識させた。それでは、熱流(フォノン流)は制御できるのであろうか。電流やスピン流は、ローレンツ力やスピン軌道相互によって、流れの方向や相互の変換が可能になるが、格子振動が量子化されたフォノンは、電荷もスピンも持たない。にもかかわらず、非磁性絶縁体Tb-Gdガーネット(TGG)に温度勾配を与え、それと垂直な方向に磁場を加えたとき、両者に垂直な方向に温度勾配が現れる現象が観測された。この現象は、フォノンホール効果と呼ばれている。本研究グループは、TGGで観測されたフォノンホール効果の起源が、過剰に含まれた磁性イオン(Tb^{3+})によるフォノンのスキュー散乱によるものであることを明らかにした[21]。Tbイオンの擬二重項からの共鳴散乱が、磁場によって分裂す

Fe is a possible candidate for a spin Hall electrode. In a thin film, scattering on surface is dominant and enhances the spin Hall effect. As a result, it is estimated that the conversion of spin- and charge currents can be raised to be about 10%. Our method to obtain the above results is summarized in Fig. 2. The character of materials is captured by the density functional theory and the correlation effects such as quantum fluctuation are taken into calculation by the quantum Monte Carlo method. Our method is applied to another case, e.g., Ir doped Cu, in which electronic correlation is crucial to find the sign of spin Hall effect [18] (See also Fig. 3).

A closely related phenomenon is reported as an anomaly in the spin Hall voltage near the Curie temperature of Ni-Pd alloy, which is known as a soft ferromagnet. We have shown that this anomaly originates from the spin fluctuation near the Curie temperature [20]. It is called non-linear spin Hall effect due to the fact that the higher order of spin-spin correlation function determines this effect. Now this phenomenon is expected to be a method for a high sensitive magnetic sensor.

The spin Seebeck effect has reminded us of the importance of spin current and its control. Here one question arises: Can we control heat (phonon current) by some means? Concerning the charge and spin currents, the direction of their flow and mutual conversion are possible due to Lorentz force and spin orbit interaction, while phonons as quantized lattice vibration have neither charge nor spin. Nevertheless, when a linear magnetic field is applied perpendicularly to a heat current in a sample of terbium gallium garnet (TGG), $Tb_3Ga_5O_{12}$, a transverse temperature gradient is induced in the third perpendicular direction. This is called the phonon Hall effect. We have shown that the puzzling phonon Hall effect observed in TGG is due to the resonant skew scattering of phonons from the crystal field levels of superstoichiometric Tb^{3+} ions [21]. A quasi-doublet state of Tb ion is split by magnetic field and then the resonant skew scattering of phonons becomes finite. This is the essential point clarified by us. Hereafter, in addition to spin current, we can expect to control heat current.

(3) Spinmotive force

According to classical electrodynamics, electromotive force arises from the time variation of a magnetic field. Interplay of this magnetism and electricity is the induced electromotive force discovered by Faraday. Faraday's law is indispensable to our life as an important principle of various electrical apparatus. On the other hand, when a spatial variation of the magnetization is induced in addition to its time variation, i.e., spin current, electrons are taken in an electric field inherent to a magnet which

ることでフォノンの共鳴スキャッターが有限になることが、この現象の本質であることを示した。スピン流に加え、熱流の制御への期待が高まる。

(3) スピン起電力

古典電磁気学によれば、起電力は磁場の時間変化によって生じる。この磁気と電気の結びつきが、ファラデーによって発見された誘導起電力である。ファラデーの法則はその発見から現在に至るまで、様々な電気機器の動作原理として私たちの生活を支えている。一方、磁化の時間・空間変化が伴うとき、通常の電磁場とは区別されるべき磁性体由来の電場を電子が感じ取ることが提案されていた[5,6]。そして、実際に磁壁の運動に伴う起電力が観測された[7,8]。電子のもう一つの性質スピンに起因する起電力であることから、スピン起電力と呼ばれている。

スピン起電力は、磁性体中の磁化による磁気エネルギーが、伝導電子を通じて電気エネルギーに直接変換されることにより生じる現象である。誘導起電力とは異なり、時間変化しない直流磁場からも電気を生み出すことができる。典型例は、磁壁を含むような磁性細線に直流磁場 (H_{DC}) を印加する方法である (図4)。

磁性体に磁場を加えると磁壁が移動し、この運動に伴って磁気エネルギーが解放される。解放された磁気エネルギーが電気エネルギーへ変換され、スピン起電力が生じる。本研究グループでは、微視的模型に基づいたスピン起電力の基礎理論を構築し[22]、観測するデバイス構造を提案し観測に成功した[23]。

図4の例では、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ことになる。すなわち、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。一方、本研究グループでは、図5に示すような周期的に横幅を変えた強磁性細線に直流磁場を印加することで、交流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)」効果が可能であることを示した[24]。

周期変調した細線の中で磁壁の運動方程式を解き、スピン起電力を計算した。図5に示す通り、周期変調細線におけるスピン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分かった。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

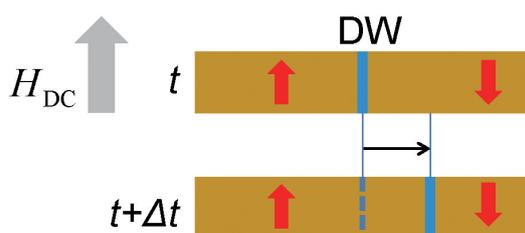


図4 直流磁場の印加により誘起された磁壁の運動

Fig.4 Domain wall (DW) motion induced by a dc magnetic field

should be distinguished from the usual electromagnetic field [5,6]. In fact, a motive force induced by a domain-wall (DW) motion is observed [7,8]. It is called the spinmotive force, since it originates from the spin degrees of freedom of electrons.

The spinmotive force is a phenomenon which arises from direct conversion of the magnetic energy of magnetization to electrical energy through conduction electrons. Unlike the induced electromotive force, electricity can be produced by applying a dc magnetic field, where the time variation of magnetic field is not necessary. One typical example is to apply a dc magnetic field on a magnetic wire containing a DW, as shown in Fig. 4. As the magnetic field is applied, the DW starts to move in the wire to seek the lowest energy state and then magnetic energy is released. The amount of energy converted from magnetic to electrical energy is the origin of spinmotive force. We have established the basic theory of spinmotive force based on a microscopic model [22], and proposed a device design where it is easy to measure the spinmotive force. In fact, this is successfully observed in experiment [23].

In Fig. 4, the spinmotive force is proportional to the amplitude of an applied magnetic field. It means that a dc magnetic field induces a dc voltage and an ac magnetic field results in an ac voltage with the frequency of the input magnetic field. We have proposed a device as shown in Fig. 5, that has a periodic change in the width of a magnetic wire. In this device, a dc magnetic field can induce an ac voltage, i.e., dc-ac converter between magnetism and electricity [24]. To show useful properties, the equation of motion of the magnetization with DW and periodic modulation in width is solved numerically, and then the spinmotive force is calculated. The time evolution of the output voltages in a uniform wire (black) and a sinusoidal wire (red) are also shown in Fig. 5. In the red curve, the ac component, in addition to the dc component, is induced due to the change in width. The amplitude and the frequency can be controlled by a magnitude of the dc magnetic field and/or changing its shape. Hence, it leads to good control of the ac characteristics from MHz to GHz by appropriately choosing materials. In addition to the shape control, the ac characteristics can be changed by combination and/or fabrication process of materials, which will change the DW energy. It is expected theoretically that an electronic device directly exploiting magnetic energy will bring about a big energy-saving effect in the future, since a power supply during standby is not necessary. Our results show the potential of this new phenomenon, the spinmotive force, and have opened a new pathway to power electronics based on spintronics, i.e., “power spintronics”. Finally, we would remark that DW

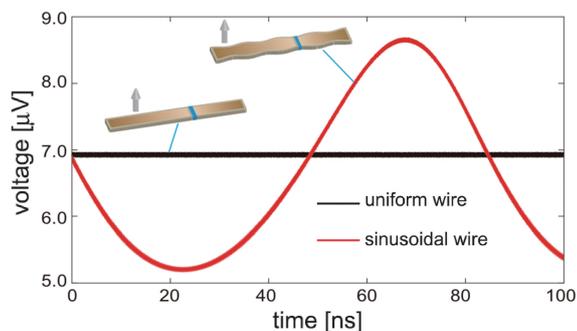


図5 磁気・電気間の交流・直流変換(コンバータ) [24]

Fig.5 dc-ac converter between magnetism and electricity [24]

可能であるため、適切な磁性材料を選べば、MHz帯からGHz帯までの良好な交流特性が得られる。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でも交流特性を生み出すことが可能となることが分かる。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。本研究成果は新現象であるスピン起電力の大きな可能性を示すと共に、スピントロニクス技術に基づくパワーエレクトロニクス、すなわちパワースピントロニクス分野を切り拓くものなのである。最後に、このような磁壁の運動に伴うゲージ場が超伝導体を用いて、高感度に測定可能であることを付け加えておく [25,26]。また、力学的角運動量によるスピン流生成に関する成果 [27-31] は、力学的物質・スピン制御研究グループにより報告される。

3. 成果の意義と今後の展望

スピントロニクスの研究は、多岐に亘る非常に豊かな色彩を放ち始めている (表1)。本研究グループは、その新展開である第二段階、第三段階を象徴する二つの物理現象、スピンゼーベック効果とスピン起電力を中心に研究を推進してきた。それらは、見紛うことなく電子の内部自由度を複数活用した新しい現象であった。これらに関する成果は、工学的なヒントを与えているだけでなく、凝縮系物理における新概念を切り開くものだったと言える。今後、これらの成果が、熱エネルギーの効率的利用、耐放射線デバイスなど、原子力科学に貢献することが期待される。

参考文献 References

- [1] "Concepts in Spin Electronics" Ed. S. Maekawa *et al.*, Oxford University Press, UK 2006.
- [2] "Spin Current" Ed. S. Maekawa *et al.*, Oxford University Press, UK 2012.
- [3] S. Maekawa *et al.* J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 102002 (2013).
- [4] K. Uchida *et al.* Nature **455**, 778 (2008).
- [5] G. E. Volovik, J. Phys. C **20**, L83 (1987).

motion can be accurately detected by superconducting electrodes, since the spinmotive force is more or less equivalent to the gauge field induced by DW motion [25,26]. Additional results on spin current generation by mechanical angular momentum [27-31] will be reported by Research group for Spin Manipulation and Material Design by Combining Spintronics and High-Speed Rotation Technique.

3. Impact and perspectives

Spintronics is beginning to show a rich variety of phenomena (Table 1). Our studies are mainly focused on the spin Seebeck effect and the spinmotive force, which symbolize the second and the third stages in the latest progresses of spintronics. These are absolutely new phenomena using the multiple internal degrees of freedom of electrons. We have proposed new concepts on these subjects. Our innovative results will provide some hints for engineering, i.e., device design. We are expecting that these results will be useful for efficient utilization of thermal energy and radiation-proof devices, and finally contribute to atomic energy science and engineering in the near future.

- [6] S. E. Barnes and S. Maekawa, Phys. Rev. Lett. **98**, 246601 (2007).
- [7] S. A. Yang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 067201 (2009).
- [8] M. Hayashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 147202 (2012).
- [9] H. Adachi *et al.* Phys. Rev. B **83**, 094410 (2011).
- [10] J. Ohe *et al.* Phys. Rev. B **83**, 115118 (2011).
- [11] H. Adachi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97**, 252506 (2010).
- [12] K. Uchida *et al.*, Nature Materials **10**, 737 (2011).
- [13] Y. Ohnuma *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 014423 (2013).
- [14] Y. Ohnuma *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 174417 (2014).
- [15] B. Gu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 086401 (2010).
- [16] B. Gu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 216401 (2010).
- [17] B. Gu *et al.*, J. Appl. Phys. (2015) in press.
- [18] Z. Xu *et al.*, arXiv.1405.7449.
- [19] D. Wei *et al.*, Nature Communications **3**, 1058 (1-5) (2012)
- [20] B. Gu *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 241303(R) (2012)
- [21] M. Mori *et al.* arXiv.1407.0802.
- [22] Y. Yamane *et al.*, J. Appl. Phys. **109**, 07C735 (2011).
- [23] Y. Yamane *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 236602 (2011).
- [24] J. Ieda *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 252413 (2012).
- [25] S. Hikino *et al.*, Appl. Phys. Lett. **100**, 152402 (2012).
- [26] M. Mori *et al.*, J. Phys: Condens. Matter **26**, 255702 (2014).
- [27] M. Matsuo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 076601 (2011).
- [28] M. Matsuo *et al.*, Appl. Phys. Lett. **98**, 242501 (2011).
- [29] M. Matsuo *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 115301 (2013).
- [30] M. Matsuo *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 180402(R) (2013).
- [31] M. Matsuo *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 104410 (2011)